



KR0000101

KAERI/RR-1913/98

최종보고서

## 방사선환경방호기술개발

**Development of Environmental  
Radiation Protection Technology**

방사선 비상대응 및 생체방어 기술개발

Development of Radiological Emergency  
Preparedness and Biological Dosimetry Technology

연 구 기 관  
한 국 원 자 력 연 구 소

과 학 기 술 부

KAERI/RR-1913/98

최종보고서

## 방사선환경방호기술개발

**Development of Environmental  
Radiation Protection Technology**

방사선 비상대응 및 생체방어 기술개발

Development of Radiological Emergency  
Preparedness and Biological Dosimetry Technology

연 구 기 관  
한 국 원 자 력 연 구 소

과 학 기 술 부

## 제 출 문

과학기술부장관 귀하

본 보고서를 “방사선 환경 방호기술개발” 과제 (세부과제 “방사선 비상대응 및 생체방어 기술개발”)의 최종보고서로 제출합니다.

1999년 4월 30일

주관연구기관명 : 한국원자력연구소

주관연구책임자 : 한 문 희

연 구 원 : 김 인 규

김 국 찬

김 은 한

서 경 석

황 원 태

최 영 길

심 혜 원

이 정 호

이 강 석

# 요약문

## I. 제 목

방사선 비상대응 및 생체방어 기술개발  
(방사선 비상대응 기술개발)

## II. 연구개발의 목적 및 필요성

원자력시설의 방사선 환경안전성확보를 위해 만일의 사고를 대비한 방사선 비상대응기술의 개발이 요구된다. 방사선 비상시 대기중으로 누출된 방사성물질은 주변의 지형과 기상조건 등의 환경조건에 따라 이동하며 여러 복잡한 경로를 거쳐 인체와 환경에 피해를 준다. 따라서 방사선 비상시 주민의 피해를 효과적으로 줄이기 위해서는 주변 환경특성을 고려한 방사선 비상대응 기술을 개발할 필요가 있다. 방사선 비상시 효과적인 대응책 수립에 가장 기본적인 정보는 방사성물질의 이동특성과 예상되는 방사선 피폭선량 정보이다. 이들 정보를 얻기 위하여 실시간 방사선 피폭해석시스템이 필요한데, 국내에서는 국가 방사능 방재체제에 중장기 연구를 통해 개발된 FADAS가 이용되고 있다.

본 연구의 목적은 울진과 월성 원전부지에 야외확산 실증실험을 수행을 통해 FADAS의 부지 적용타당성 검증과 개선 그리고 정량적인 방사선 비상대응책의 효과분석기술을 개발하는 것이다.

## III. 연구개발의 내용 및 범위

방사선 비상대응기술은 원자력시설 주변의 환경특성에 좌우되므로 주변 환경 특성의 조사·분석과 함께 개발되는 기술에 반영하는 것이 중요하

다. 본 연구에서는 기 개발된 실시간 방사선 피폭해석시스템 FADAS를 원전부지의 환경특성을 고려하여 실제적으로 활용하는데 주안점을 두었다. 이를 위해 울진과 월성 원전부지에서 추적자 방출실험을 통하여 FADAS의 부지 적용 타당성을 검증하였다. 확산실험시 가장 큰 영향을 미치는 변수가 기상자료이므로 부지 기상 관측자료를 수집하여 분석하였고, 추적자 방출실험 당시의 기상자료는 직접 관측하여 FADAS 모사시 충분히 반영될 수 있도록 하였다. 추적자 포집을 위하여 반경 10 km 범위의 영역에 포집기 90대를 분포시켰다. 이를 위해 주변도로를 따라 포집점의 좌표를 측량하였다. 추적자 방출실험당시의 기상조건과 주변 지형조건을 반영하여 FADAS를 이용한 모사결과와 실험결과를 비교 분석하였다. 또한 주변 인구, 농축산물 생산량 분포 등 실시간 피폭평가 시 요구되는 자료를 수집하여 부지특성을 반영한 실시간 피폭평가 시 활용될 수 있도록 하였다. 비상시 건축물에 의한 차폐효과 분석을 위해 주거형태 구성비, 주거형태의 건축재료에 따른 분포를 분석하였다.

방사선 비상시 피해를 최소화하기 위해 적용되는 비상대응책의 효과는 주변의 기상, 지형 등의 지리환경 뿐 아니라 인구분포, 섭식형태, 물가 등의 사회환경에도 영향을 받는다. 따라서 국내환경을 고려하여 비상시 적용되는 대응책의 효과를 분석하고자 국내 사회환경자료를 수집·분석하였다. 이를 자료를 토대로 실제 사고시 발생 가능한 조건에 대하여 장단기 비상대응책의 효과를 정량적으로 평가하였다. 원자력 사고시 방사선피해를 효과적으로 줄일 수 있는 대응책의 종류와 특성을 고찰하였다. 고찰 대상으로 접근통제, 대피, 소개, 이주, 영구정착, 안정 옥소제 복용, 음식물 섭취금지, 피폭자 제염, 구조물과 토양표면 제염 등을 고려하였다. 각 대상에 대하여 피폭 저감효과, 비상대응행위의 용이성, 사회·경제적 피해 등을 분석하였다. 적용연구를 위해 국제방사선방호위원회 (ICRP)와 국제원자력기구 (IAEA)에서

권고하는 비상대응 행위를 위한 일반적 원칙에 따라 현재까지 비상대응책 결정지원에 가장 많이 이용되는 기법인 비용 편익분석법을 초기 비상대응책(대피, 소개)에 적용하였다.

#### IV. 연구개발결과

울진과 월성 원전부지의 자리 및 사회환경특성을 반영하여 추적자 방출 실험을 실시하였다. 추적자 방출실험 실시 2주일 전부터 관측한 기상자료를 분석하여 포집점을 선정하였다. 울진부지의 경우에는 방출점인 부지내 기상탑을 중심으로 반경 3~5 km와 8~9 km 선상에 각각 43개와 49개의 포집점을 선정하였다. 월성부지의 경우에는 주변의 도로여건에 따라 3개의 선상을 따라 포집점을 선정하였다. 추적자로는 SF<sub>6</sub> 가스를 사용하였으며 방출율은 미리 관측한 기상조건을 고려하여 결정하였으며 부지의 기상탑 최상단 (58 m)에서 90분 동안 방출하였다. 추적자 포집은 방출 30분 후부터 60분 동안 이루어졌고, 포집된 추적자는 가스크로마토그라피로 분석하였다.

FADAS 모사를 위하여 추적자 방출실험시 기상관측을 수행하였으며, 이를 자료를 종합하여 난류장 모수화 및 FADAS 모델 입력자료로 활용하였다. 실험결과와 모사결과는 전반적으로 약 3에서 5배 이내의 범위에서 잘 일치하였다. 울진과 월성부지 모두에서 확산의 중심선과 확산폭이 대체로 일치하였다. 월성의 경우 가장 근접한 포집선상에서의 모사결과가 측정값의 약 1/5 정도를 나타냈는데 이는 약 200 m 깊이의 골짜기가 존재하여 추적자 중 많은 양이 계곡에 정체된 것으로 추정된다.

현재 FADAS는 국가 방사능방재시스템 CARE에 채택되어 방사성물질의 확산과 피폭평가 기능을 제공하고 있다. 또한 각 부지주변 지형 및 사회환경 D/B를 구축하여 CARE내에서 부지의 환경을 반영한 FADAS 운용이 가능하도록 하였다.

일반인에 대한 방사선 방호원칙 (행위의 정당화, 방호의 최적화)에 입각하여 음식물오염에 대해 효과적인 중·장기적 방사선 방호계획 수립에 효과적인 기법을 비용-편익분석법에 근거하여 모델링하였다. 침적시점 (사고시점)에 따른 음식물내 방사성물질의 농도변화는 개발된 동적설식경로 모델 DYNACON으로부터 예측하였다. 적용결과 특정 오염에 대한 대응책의 정당화와 최적화를 정량적으로 분석할 수 있었다.

## V. 연구개발결과의 활용계획

방사선 비상시 대응행위의 결정권한은 행정책임자에게 있다. 방사선 방호전문가는 실시간 피폭해석시스템 등의 모델을 활용하여 피해상황을 예측하게 된다. 본 연구를 통해 부지특성을 반영하여 개발된 실시간 방사선 피폭해석시스템과 비상대응책의 효과분석 기술은 결정권자가 신속히 효율적인 대응책을 수립하는데 필수적인 정보를 제공해 준다.

FADAS와 연계된 국외 원전에서의 방사선 사고를 대비한 광역 방사선피폭 해석시스템의 개발이 필요하다. 종합적인 방사선 방재체제를 구축하기 위해서는 대기중으로 누출된 방사성물질이 미리 선정된 범위를 벗어나면 자동적으로 국지 평가결과를 광역평가에 제공하는 기능이 포함되어야 한다. 국내 원전사고에 대비한 실시간 방사선피폭해석시스템의 개발경험과 결과물을 활용하여 국외 원전사고를 대비한 광역 방사선 피폭해석체제 개발에 크게 활용될 수 있을 것이다. 또한 추적자 방출실험 기술 및 개발장비는 일반 산업 시설의 오염물질 확산평가에 이용될 수 있을 것이다.

## **Summary**

### **I . Project Title**

Development of Radiological Emergency Preparedness Technology

### **II. Objectives and Necessities**

A real-time radiological dose assessment system is essential part for radiological emergency preparedness. The atmospheric dispersion of radioactive effluents is strongly dependent on the environmental characteristics such as meteorology and topography. Therefore it is necessary to develope a site-specific radiological dose assessment system with which the environmental characteristics can be considered. A site-specific real-time radiological dose assessment system provides the information on the atmospheric dispersion and radiological situation of the released effluents in emergency. In Korea, a real-time radiological dose assessment system named FADAS (Following Accident Dose Assessment System) has been developed by the staffs of Korea Atomic Energy Research Institute.

The objectives of this study are to validate the suitability of the application of FADAS to Ulchin and Wolsung nuclear sites through field tracer experiments and to analyze the effects of countermeasures using cost and benefit analysis.

### **III. Scope and Contents**

Large-scale field tracer experiments have been conducted on Ulchin

and Wolsung nuclear sites for the purpose of validating FADAS and of analyzing the environmental characteristics around the nuclear sites. The most influential factor in atmospheric dispersion is the meteorological condition. During the experiments, meteorological data were measured at the release point and the selected positions among sampling points. The measured meteorological data were used for the simulation of FADAS. For the sampling of the released tracer gas, about 90 samplers were disposed on arc lines along the roads in the radius of about 10 km around the sites. The tracer gas was released at the top of the meteorological tower, and the sampled gas was analyzed by Gas chromatography.

Once radioactive materials are released to the atmosphere, members of public may be exposed through the environmental media such as air, soil and foods. Therefore, to protect the public, adequate countermeasures should be taken at due time for those exposure pathways. Both processes of justification and optimization are applied to a countermeasure simultaneously for decision-making. In simple terms, the difference between the disadvantages and the benefits should be positive for each adopted countermeasure and be maximized by setting the details of that countermeasure. To express the net benefit of a countermeasure, the dose that can be saved in the period for which the countermeasure lasts is the relevant quantity. FADAS provides the basic information on the dose.

#### **IV. Results**

The concentration distribution obtained through field tracer

experiments on nuclear sites was compared with that estimated by FADAS simulation. For the generation of 3-dimensional wind field, the domain has been considered to be consisted of the cell with the size of  $\Delta x = \Delta y = 1$  km, and  $\Delta z = 30$  m. The wind field has been generated over the domain of  $15 \times 20 \text{ km}^2$  in X-Y plane, and 990 m in vertical direction. The comparative study shows good agreement between the measured and the simulated concentration distributions. The angles in which the maximum concentration represents are quite well agreed between the measured and the simulated distributions. The concentration distribution agrees well within a factor of 3 and 5 in Ulchin and Wolsung experiments, respectively. In the case of Wolsung, the biggest difference between the measured and the simulated was represented on the nearest arc line. It is considered due to the valley of 200 m depth along the arc line. A lots of the released gas was gathered along the valley, and it made the concentration of the gas be higher than the forecasted values.

FADAS has been adopted a basic part of Korean national radiological emergency preparedness system CARE. The site-specific characteristics obtained through the field tracer experiments have been reflected on the system.

The method for analyzing the effects of countermeasures against a nuclear emergency has been developed using cost-benefit analysis. A compartmental food-chain model DYNACON has been developed and used for the calculation of the concentration of radioactive materials in the foodstuffs.

## **V. Plan for Application of the Results**

A real-time radiological dose assessment system provides essential information in nuclear emergency. A real-time dose assessment system FADAS has been made by the staffs of KAERI. At present, this system is being operated as an important module of national radiological emergency preparedness system CARE. There are several recommendations for useful and effective emergency planning. In the early stage of accident, the estimation of radiological situation may be unrealistic due to the uncertainties from the lack of knowledge of the source term. It is expected that the uncertainties will be reduced by a further deployment of in-plant, on-site and off-site monitoring, linked on-line with emergency preparedness system. It is necessary to expand the computational area of FADAS to evaluate long range transport of airborne radioactivity against a large scale accident in foreign country. Both local and long range dispersion and dose assessment system should be controlled in a decision-making support system simultaneously. Therefore, the interface between local and long range system is important for providing fast and useful information in large scale radiological emergency.

# **Contents**

Chapter 1 Introduction .....	1
1.1 Necessity and Objectives .....	1
1.2 Scope .....	2
Chapter 2 Current Status .....	5
2.1 Real-time radiological dose assessment system .....	5
2.2 Field tracer experiment .....	7
2.3 Optimization of emergency preparedness .....	11
Chapter 3 Results .....	15
3.1 Field Tracer Experiment .....	15
3.1.1 Experiment over Ulchin site .....	15
3.1.2 Experiment over Wolsung site .....	22
3.2 Environmental conditions .....	38
3.2.1 Environmental condition over Ulchin site .....	38
3.2.2 Environmental condition over Wolsung site .....	49
3.2.3 Characteristics of buildings around nuclear sites .....	59
3.3 Emergency Preparedness .....	67
3.3.1 Optimization of countermeasures .....	67
3.3.2 Review of Countermeasure .....	70
3.3.3 Methods for quantitative optimization analysis .....	79
3.3.4 Results of the Application Study .....	80
3.3.5 Application of GIS to emergency .....	99
Chapter 4 Achievement and Contributions .....	109
4.1 Achievement of the Project .....	109
4.2 Contributions .....	111

Chapter 5	Proposal for Application .....	113
5.1	Emergency preparedness against a nuclear emergency .....	113
5.2	Non-nuclear Environmental Analysis .....	114
Chapter 6	References .....	117

# 목 차

제 1 장 서 론 .....	1
제 1 절 필요성 및 목적 .....	1
제 2 절 연구개발 내용 .....	2
제 2 장 국내외 기술개발 현황 .....	5
제 1 절 실시간 피폭해석시스템 개발 .....	5
제 2 절 야외확산실험 .....	7
제 3 절 비상대응 최적화 .....	11
제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과 .....	15
제 1 절 부지 야외확산 실증실험 .....	15
1. 울진부지 확산실험 .....	15
2. 월성부지 확산실험 .....	22
제 2 절 부지환경특성 .....	38
1. 울진부지 환경특성 .....	38
2. 월성부지 환경특성 .....	49
3. 원전부지 건축물특성 분포 .....	59
제 3 절 비상대응행위 결정기술 .....	67
1. 대응행위의 최적화 .....	67
2. 대응행위의 종류 .....	70
3. 대응행위의 정량적 최적화 보조기법 .....	79
4. 비상대응의 적용결과 .....	80
5. 지리정보시스템의 활용 .....	99
제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도 .....	109
제 1 절 연구개발목표 달성도 .....	109
제 2 절 대외기여도 .....	111

제 5 장 연구개발결과의 활용계획 .....	113
제 1 절 국내외 원자력 사고대응 기술개발 .....	113
제 2 절 원자력 및 일반 산업시설의 환경영향평가 .....	114
참고문현 .....	117

## 그 림 목 차

그림 3.1 울진 원전주변의 지형도와 방출점 및 포집점의 위치	17
그림 3.2 포집된 농도분포와 모사결과 (울진: A 포집선)	23
그림 3.3 포집된 농도분포와 모사결과 (울진: B 포집선)	24
그림 3.4 월성원자력발전소 야외확산실험지역 및 포집점의 위치	31
그림 3.5 월성 확산실험 기상관측지점	32
그림 3.6 포집된 농도분포와 모사결과 (월성: A 포집선)	35
그림 3.7 포집된 농도분포와 모사결과 (월성: B 포집선)	36
그림 3.8 포집된 농도분포와 모사결과 (월성: C 포집선)	37
그림 3.9 울진부지에서의 연간 및 계절평균 바람장미	41
그림 3.10 월성부지에서의 연간 및 계절평균 바람장미	52
그림 3.11 영광, 월성, 울진지역에서 거주민의 거처 형태에 따른 구성비	63
그림 3.12 영광지역에서 단독주택의 지붕과 외벽재료에 따른 건물의 구성비	64
그림 3.13 월성지역에서 단독주택의 지붕과 외벽재료에 따른 건물의 구성비	65
그림 3.14 울진지역에서 단독주택의 지붕과 외벽재료에 따른 건물의 구성비	66
그림 3.15 비상대응 결정을 위한 흐름도	78
그림 3.16 대응행위의 그래프 도식도	83
그림 3.17 단위 침적후 비오염사료로 대체하였을 경우와 대체하지 않았을 경우 우유내 $^{137}\text{Cs}$ 의 농도변화	90
그림 3.18 단위 침적후 비오염 사료대체의 시작시점과 수행기간의 함수로써 우유에서 핵종농도에 따른 잔여선량의 분율	91
그림 3.19 단위 침적후 섭취금지의 시작시점과 수행기간의 함수로써	

우유에서 핵종농도에 따른 잔여선량의 분율	92
그림 3.20 단위 침적후 육류내 방사성물질의 농도변화	97

## 표 목 차

표 3.1 포집점의 좌표 (울진) .....	20
표 3.2 포집점의 좌표 (월성) .....	27
표 3.3 울진부지에서의 계절별 해류풍 분포 .....	40
표 3.4 울진부지에서의 대기안정도별 발생빈도 .....	43
표 3.5 울진 부지의 월 및 계절평균 최대, 최소 혼합고 .....	45
표 3.6 울진 부지 반경 16km 이내의 자연지형물 .....	46
표 3.7 울진 부지로부터 반경 80km 이내의 행정단위별 인구 .....	48
표 3.8 울진 부지로부터 반경 80km 이내의 구역별 인구분포 .....	50
표 3.9 월성 부지에서의 계절별 해류풍 분포 .....	51
표 3.10 월성 원전부지에서의 대기안정도별 발생빈도 .....	54
표 3.11 월성 원전부지에서의 대기안정도의 계절별 발생빈도 .....	55
표 3.12 월성 원전부지의 월 및 계절평균 최대, 최소 혼합고 .....	57
표 3.13 월성 원전부지 주변의 자연지형물 현황 .....	58
표 3.14 월성 원전부지 반경 80km 이내의 행정구역별 인구수 .....	60
표 3.15 월성 원전부지로부터 반경 80km 이내의 구역별 인구분포 .....	61
표 3.16 스칸디나비아 국가 연구결과 및 국제기관으로부터 권고하고 있는 일반개입준위 .....	69
표 3.17 피폭경로에 대한 효과적 대응행위 .....	71
표 3.18 대피처의 공기교환율에 따른 내·외부 방사성물질의 상대적 농도 .....	72
표 3.19 지표위 방사성물질의 지표농도 50 kBq m <sup>-2</sup> 에 대해 침적후 대응행위 .....	94
표 3.20 침적후 10일의 대응 자연시간을 가졌을 때 방사성물질의 지표농도 .....	95
표 3.21 50 kBq m <sup>-2</sup> 침적후 대응행위의 시작시점과 대응기간의 함수로써 육류에 대한 순이득 .....	98

표 3.22 침적후 10일의 대응이 지연되었을 때 방사성물질의 지표농도와 대응기간의 함수로써 육류에 대한 순이득	100
표 3.23 GIS의 처리 및 분석기능	102

# 제 1 장 서 론

## 제 1 절 필요성 및 목적

방사성물질을 사용하는 원자력시설의 환경안전성 확보를 위해 방사선 방호 대책이 요구된다. 미국과 구소련의 원자력발전소에서 일어난 사고는 원자력 시설의 안전한 관리와 방사선 방호대책의 필요성을 크게 인식시켰다. TMI 원전사고는 원전 내부의 사고감시 및 관리체계의 발전을 가속화시켰고, 구소련의 체르노빌 사고는 대규모 비상방재체제의 도입을 촉진시켰다[1.1].

방사선 비상시 신속한 대응책 수립을 통하여 방사선 피해를 최소화하기 위해 필요한 비상방재체제에는 다양한 기능들이 포함한다. 이들 기능 중 실시간 방사선피폭해석시스템은 환경으로 누출된 방사성물질의 이동, 확산, 및 침적에 따른 방사선 피폭선량을 신속히 예측하여 비상대응책 수립에 가장 중요한 정보를 제공한다. 국내 민방위 기본계획에는 방사선 비상시 한국원자력안전기술원에 방호기술지원본부를 두고 기술적인 사항을 분석하여 행정권 한을 갖는 대응책 결정권자를 지원하도록 되어 있다. 체르노빌 원전사고 이후 국내 원자력시설에서의 방사능 사고 발생을 대비한 비상방재대책을 수립하기 위한 작업이 진행되어 왔다. 지난 1993년부터 1998년까지 원자력안전기술원 주관으로 국가 방사능방재대책 기술지원전산망 (CARE : Computerized Technical Advisory system for Radiological Emergency)이 개발되었다 [1.2]. 현재 CARE시스템에는 한국원자력연구소에서 개발한 실시간 방사선피폭해석시스템인 FADAS (Following Accident Dose Assessment System)가 채택되어 방사성물질의 대기확산 및 피폭선량평가 기능을 제공하고 있다 [1.3].

대기중으로 누출된 방사성물질은 주변의 지형과 기상조건 등의 환경조건에

따라 대기중을 이동하며 대기, 토양 및 농축산물 등의 다양한 경로를 통해 인체와 환경에 피해를 준다. 따라서 효과적인 비상대책을 수립하기 위해서는 부지 환경특성을 반영할 수 있는 실시간 피폭해석시스템과 대응책의 효과를 분석할 수 있는 비상대응기술의 개발이 필수적이다.

본 연구의 목적은 원자력 중장기연구를 통해 개발되었고 현재 국가 방사능 방재기술지원 전산체계에 채택되어 활용중인 실시간 피폭해석시스템 FADAS의 부지 적용타당성 검증과 개선에 있다. 이를 위해 원전부지에서 야외확산 실증실험을 수행하였고, 정량적인 방사선 비상대응책의 효과분석기술을 개발하고자 하였다.

## 제 2 절 연구개발 내용

중장기 연구를 통해 개발한 실시간 방사선 피폭해석시스템 FADAS를 국내 원전부지의 환경특성을 고려하여 적용타당성을 검증하고 실제적인 방재 대책의 효과를 분석하는 기술을 개발하는 것이 본 연구의 목적이다. 이를 위해 울진과 월성 원전부지에서 반경 약 10 km의 영역에서 추적자 방출을 통한 야외확산 실증실험을 수행하였다. 추적자 방출실험을 수행할 때 기상 조건이 가장 큰 영향을 미친다. 추적자 실험 상세 실시계획을 수립하기 위해서는 기존의 부지관측 기상자료의 수집·분석이 필요하며, 실험결과 분석 및 FADAS 모사시 주변의 기상조건을 실질적으로 반영하기 위해서는 추적자 방출시간 동안에 충분한 기상자료의 관측이 필요하다. 부지 기상자료 분석을 위해 부지 기상탑에서 최근 2년 동안 관측된 자료를 사용하였으며, 추적자 방출시간 동안에는 부지 기상탑과 추적자 포집점 중에서 미리 선정한 8지점에서 이동형 풍향풍속계를 이용하여 관측을 실시하였다. 포집점은 부지 주변도로를 따라 직접 측량을 수행하여 약 90개의 지점이 선정되었다. 포집된 추적자 가스는 가스 크로마토그라피를 이용하여 분석하였으며 실험

결과인 농도분포는 FADAS 모사결과와 비교·분석되었다.

방사선 비상시 피해를 최소화하기 위해 적용되는 비상대응책의 효과는 주변의 기상, 지형 등의 지리환경 뿐 아니라 인구분포, 섭식형태, 물가 등의 사회환경에도 영향을 받는다. 원자력사고시 방사선피해를 효과적으로 줄일 수 있는 대응책의 종류와 특성을 분석하였다. 대피, 소개, 이주, 안정 옥소제 복용 및 음식물 섭취금지 등의 대응책에 대하여 피폭 저감효과, 비상대응 행위의 용이성, 사회·경제적 피해 등을 분석하였다. 이들 대응책의 효과를 정량적으로 분석하기 위한 기법으로 비용효능분석 (cost-effectiveness analysis), 비용편익분석 (cost-benefit analysis), 다속성 효용분석 (multi-attribute utility analysis) 및 다범주 우위분석 (multi-criteria outranking analysis) 기법이 고려되었다. 이들 기법 중에서 적용이 용이하고 가장 널리 사용되는 비용-편익 분석법을 이용하였다.

방사선 비상시 대응책의 효과분석을 위해서는 부지주변의 인구, 농축산물 생산량 분포 등 실시간 피폭평가 시 요구되는 자료를 수집하여 부지특성을 반영한 실시간 피폭평가시 활용될 수 있도록 하였다. 또한 비상시 건축물에 의한 차폐효과 분석을 위해 주거형태 구성비, 주거형태의 건축재료에 따른 분포 등을 조사하였다.

## 제 2 장 국내외 기술개발 현황

### 제 1 절 실시간 피폭해석시스템 개발

원자력 비상시 방사선 방호를 목적으로 각국에서는 환경 특성과 사회 여건을 고려하여 그 나라에 적합한 방사선 비상대응체계를 개발해 오고 있다. 방사선 비상대응체계에는 원자력시설의 안전정보, 방사선환경감시, 기상자료, 방사성물질의 확산·피폭평가 및 대응조직 등의 다양한 기능이 포함된다. 이들 가운데 실시간 방사선피폭해석 기능은 비상시 신속하고 효율적인 대응책 수립을 위한 기본적인 자료를 제공한다. 미국의 ARAC[2.1], 일본의 SPEEDI[2.2], 유럽의 RODOS[2.3] 그리고 국내의 FADAS[1.3] 등이 방사선 비상시 실시간 확산·피폭평가를 수행하기 위하여 개발된 시스템들이다. 이들 시스템들은 기상상태의 빠른 변화를 평가에 신속히 반영하고, 비상시 당황하게 되는 작업자의 오류를 최소화하기 위하여 입출력 자료의 관리와 모듈간 연계를 온라인 전산체계로 운영하는 실시간 (real-time) 시스템으로 개발되었다. 또한 이들 시스템들은 방사선 피해 최소화를 위한 대응책 결정을 지원하는 것이 주된 목적이므로 각국의 환경특성과 기타 사회여건을 고려하여 효율적인 활용을 위주로 개발 및 개선이 추진되고 있다.

대기중으로 누출된 방사성물질의 영향을 실시간으로 평가하기 위해서는 여러 단계의 복잡한 계산이 필요하다. 실시간 피폭해석 시스템은 바람장발생, 농도분포결정, 피폭선량해석 등의 기본적인 계산 모듈과 계산된 결과의 신속한 해석을 돋기 위한 그래픽 모듈을 포함한다. 정확한 피폭해석을 위해서는 누출된 방사성물질의 대기중 농도분포를 정확히 평가해야 한다. 평탄한 지형인 경우에는 누출된 방사성물질의 농도분포를 Gaussian 형태로 가정한 단순한 모델이 널리 이용된다. Gaussian 모델은 계산이 빠르고 사용이 간편

발생할 수 있다. 그러므로 복잡한 지형에서 정확한 피폭해석을 하기 위해서는 지형효과를 고려하여 방사성물질의 농도분포를 계산할 수 있는 3차원 확산모델을 적용하여야 한다. 한국원자력연구소에서는 3차원 확산모델을 적용한 실시간 방사선피폭해석 시스템인 FADAS를 개발하였다. 바람장발생은 관측된 기상자료를 근거로 지형효과를 고려한 모델을 사용하여 3차원 해석이 가능하도록 하였고, 농도분포를 결정하기 위해 PICK 방법보다 계산과정이 간단하며 계산시간이 적게 소요되는 random walk 방법을 개발하였다. 외부 피폭해석을 위해 3차원 공간상의 육면체의 격자를 균질의 농도분포를 갖는 구로 가정하여, 3중 적분을 단일적분으로 단순화시킨 모델을 개발하였다.

개발된 실시간 방사선피폭해석시스템 FADAS의 원전 부지에서의 적용 타당성 검증과 부지의 확산특성 파악을 목적으로 야외확산 실증실험을 수행하였다. 국내 환경과 여건에 적합한 실험절차의 수립, 추적자가스의 선정, 추적자 포집기 개발, 추적자 분석기술 수립 그리고 실험결과와 FADAS 모사결과의 비교·분석 등 일련의 실험관련 기술을 정립하였다. 초기 평지에서의 적용실험 단계를 거친 후 영광, 울진, 월성 등의 국내 원전 부지에서 추적자 방출실험을 실시하였다. 실험을 통해 얻은 측정치와 FADAS 모사결과를 비교한 결과 개발된 실시간 방사선피폭해석시스템 FADAS의 부지 적용타당성을 검증하였다.

비상시 실시간 방사선피폭해석시스템의 예측결과는 단기적으로 주변주민의 대피, 소개 등의 방호대책 결정에 활용되고, 장기적으로는 경작지 작물의 오염정도를 평가하여 섭취제한, 사료 대체의 결정 및 기간설정 등의 비상대응 관련 결정을 지원한다. 현재 FADAS의 부지 적용타당성 검증 및 개선 연구와 병행하여 FADAS를 활용한 효과적인 비상대응책 결정지원을 위한 연구를 진행하고 있다.

## 제 2 절 야외확산실험

추적자를 이용한 야외 확산실험의 목적은 개발된 확산 수치모형의 검증과 특정 부지 및 특정 대기 조건하에서의 오염물질의 이동 특성을 고찰하는데 있다. 야외 확산실험을 통한 수치모형의 검증은 관측된 추적자 농도와 동일 조건에서 상호 비교하고 포집된 추적자 농도분포를 분석하여 모형에 입력되는 확산계수 등을 수식화하여 모형의 정확성을 향상시키는데 있다. 대기중에서 방사성물질의 확산은 주변의 지형특성, 기상상태 등의 환경조건에 의해 영향을 받는다. 따라서 신뢰성있는 대기확산 모형을 개발하기 위해서는 지역의 환경 특성을 고찰하고 그 특성을 확산모형에 반영하기 위한 야외 확산 실증실험이 필수적으로 수행되어야 한다. 또한 확산실험을 수행하면서 대상 지역에서 지상풍, 상층풍, 대기안정도, 상층기온 등의 기상자료를 관측·분석하여 동시에 이들 기상특성에 따른 추적자의 확산특성을 평가할 수 있다. 야외 확산실험을 통하여 관측된 기상자료와 확산사이의 관계를 설명하고 특정 부지에서 기상관측으로부터 부지 특성별 확산 매개변수를 구하는 것은 중요한 일이다. 외국의 경우 대기 확산 수치모형의 검증과 특정 부지 및 특정 대기 조건하에서의 오염물질의 이동 특성을 고찰하기 위하여 활발한 야외 확산실험이 수행되었다.

### 1. 외국의 실험예

#### 가. 미국

미국에서는 발전소 및 화학공장등에서 대기중으로 배출되는 오염물의 확산특성을 평가하기 위해 지난 수십년동안 수치모델링과 현장관측을 병행하여 수행하여 왔다. 이중 1987년에 DOE[2.4]의 지원하에 Across North America Tracer Experiment (ANATEX)라 명칭된 대규모의 야외확산실험이

수행되었는데, 실험의 주요목적은 대기중으로 방출된 오염물의 장거리 확산 특성을 평가하기 위한 것이다. 실험은 1987년 1월에서 4월까지 연속적으로 이루어졌는데 약 1000 km의 거리차가 있는 두 지점에서 추적자를 매 2.5일 동안 3시간 간격으로 방출하였다. 지상에서 약 77개 주요지점에 포집기를 설치하여 실험기간동안 24시간 연속적으로 포집하였다. 사용된 추적자는 무독성 및 비침적성의 PFC (Perfluorocarbon compounds : perfluorocycloalkane)로 대기중 장시간 체류하는 물질이다.

미국에서 수행된 또다른 대표적인 야외확산실험의 예로는 1978년 DOE의 주관하에 수행된 복잡한 지형상에서의 확산실험인 ASCOT[2.5] 프로그램이 있다. 복잡한 지형상의 확산현상에 대해 미국 DOE가 처음으로 관심을 갖게 된 주요 이유는 미국 서부가 거대한 화석 연료 에너지의 개발이 가능한 지역으로 등장함에 따라, 이 지역 주변의 복잡한 지형상에 대한 대기 이동 및 확산에 대한 어떠한 정보도 갖고 있지 못하였기 때문이었다. 국립 및 대학 연구소의 과학자들이 두개의 주요한 야외 관측실험에 참여하였고 다양한 이론적 해석을 수행하였는데, 이 프로그램의 주요 관심사항은 야간의 배기류 (drainage flow)이었다. 이 야외 관측실험의 첫 시도는 1979년부터 1981년 동안에 북부 캘리포니아 Geysers 지역에서 야간의 대기 순환 특성을 이해하기 위해 수행되었고, 1982, 1984 및 1988년의 ASCOT의 야외 실험은 서부 콜로라도의 유혈암 (oil shale) 지역에서 깊고 좁은 계곡에서의 대기 동력학과 배기류 사이의 상호작용을 고찰하기 위해 수행되었다.

#### 나. 독일

발전소의 인허가 과정이나 방사성물질의 방출을 수반하는 사고발생시 오염물질의 환경에 대한 영향을 평가하는 것이 필요하다. 이들 오염물질은

일반적으로 고도방출을 하며 오염물질의 대기중 확산은 약 10 km까지가 주요 관심 영역이다. 이와 같은 정상적인 환경영향 평가에 쓰이는 확산 모델은 잘 알려진 Gaussian 모델이며 여기에 필요한 확산 파라메터를 얻기 위한 실험을 구 KfK (현 FZK) 연구소와 쥬리히 연구소가 공동으로 실시하여 독일에서의 고유 파라메터 값을 결정하였다[2.6].

독일연방 환경, 자연보호 및 원자로 안전부에서 1986~1990년에 걸쳐, “복잡한 지형상 단기방출후 오염물질의 대기확산에 대한 연구”에 연구자금을 지원하였다. 1970년 이래 계속되어 온 실험 대상지역이 1980년 초까지는 평탄하였으나, 최근 Sophienhöhe란 인공의 산이 석탄채취 활동에 의해 야적되어 만들어졌다. 이 작은 산은 FZK로부터 2 km 떨어져 있고 FZK 기상탑에 대해 주풍향에 놓여있다. 이 지역은 아주 잘 기술된 지형일 뿐 아니라 확산 실험에 아주 적절하도록 근접이 가능한 도로망을 포함한 지형구조를 갖춘 장점을 가지고 있다. 더욱이 이 지역의 확산실험의 장점은 이십여년전부터 여러차례 평지실험을 거쳤기 때문에, 평지와 복잡한 지형상의 확산특성에 대해 여러가지를 비교할 수 있는데 있다.

실험은 30 m 및 50 m에서 2 g/sec의 방출률로 SF<sub>6</sub> 가스를 배출했으며, 1970년대 실험의 경우 약 30여 지역에서 농도를 분석했는데 반해, 이 실험에서는 약 50여 곳에서 150여 개의 공기 시료들이 포집되어 분석되었다.

필요한 기상자료는 연속측정에 의해 관측되었으며, 야외 확산 실험중에는 불연속적으로 측정되었다. FZK 연구소의 기상탑 및 5곳의 임시 마스트와 Doppler SODAR가 연속측정을 위해 투입되었다.

#### 다. 이탈리아

이태리에서는 실험용 원자로가 건설될 지역에서 대기확산영향을 평가하기 위하여 북부이태리의 Lago Brasimore 지역의 복잡한 지형상에서 1984년

가을부터 1985년 여름까지 야외 확산실험이 수행되었다[2.7]. 추적자 가스는 SF<sub>6</sub>를 이용하였고 지표 10m에서 1시간동안 추적자를 방출하고, 추적자 가스의 궤적을 추적하기 위하여 radar- tracked tetroons를 이용하였다. 방출점을 중심으로 풍하방향으로 반경 1 ~ 7 km사이에 약 40개의 포집기를 설치하였고, 포집된 추적자 가스는 가스크로마토그라피에 의해 분석되었다. 확산실험 중에 기상관측을 위하여 2개 지역에서 tethersonde를 이용하였고, 1개 지역에서는 수직 기상관측을 위하여 pilot balloon을 띄웠다.

#### 라. 덴마크

덴마크의 Riso연구소의 주관하에 1984년 5월에서 6월사이에 덴마크와 스웨덴의 접경지역인 Oresund지역에서 난류와 대기 확산특성을 고찰하기 위한 야외 확산실험이 수행되었다. 추적자로 스웨덴의 Barsebäk 발전소의 100 m 높이의 기상탑에서 SF<sub>6</sub> 가스를 방출하였고, 지표 1.5 m에서 추적자를 채집하여 가스 크로마토그라피에 의해 분석되었다[2.8].

#### 마. 스페인

스페인 전력회사의 지원하에 1990년 가을에 복잡한 지형상에 위치한 Guardo발전소 주변에서 야외 확산실험이 수행되었다[2.9]. 실험의 목적은 복잡한 지형상에서 하루주기의 흐름현상을 이해하고 확산에 영향을 주는 부지 특성인자를 찾아내는데 있었다. 발전소내 185 m 탑에서 SO<sub>2</sub>와 SF<sub>6</sub> 가스를 방출하였고, 주변의 복잡한 계곡의 지상에서 가스를 포집하였다. 2~4시간 간격으로 총 14번의 실험이 수행되었고 관측은 덴마크의 Riso연구소에 수행하였다. LIDAR를 이용하여 추적자 가스 농도의 fluctuation을 관측하고 25 m 기상관측 master로 풍향, 풍속, 온도, 난류성분등을 관측하였다. 25 m의 관측 master는 크게 2 m, 10 m, 24 m 높이에서 관측 arm을 구성하여 기상

자료를 관측하고 25 m의 최고 높이에 sonic anemometer를 설치하여 대기의 난류성분을 관측하였다.

#### 바. 일본

일본 원자력연구소는 원전사고시 방사성물질의 대기확산에 대한 모델의 검증실험을 1980년부터 시행하였다[2.10]. 이들 실험은 SPEEDI 프로젝트의 일환으로 일본원자력연구소가 주관하였으며, 일본기상협회와 일본기상연구소가 참여하였다. 모델에 대한 검증실험으로 8번의 야외 확산실험이 수행되었는데, 1980부터 1983년까지는 해안지역에서, 1984부터 1985년까지는 산악지형에서의 실험이 일본 원자력연구소의 주관하에 이루어졌다. 해안지역 실험의 주요 관심사항은 해풍에 의한 fumigation으로 추적자는 SF<sub>6</sub>를 사용하였고, 120 m의 높이에서 90분 동안 방출하였다. 포집은 방출점으로부터 반경 15 km내의 30개 지점에서 수행되었다. 산악지형에서 실험의 주요 관심사항은 지형영향에 의한 대기류의 거동으로, 바람이 계곡의 아래방향과 윗방향으로 불때의 확산특성을 조사하기 위한 것이었다. 대상지역은 쪽꾸바산으로 방출은 200 m의 높이에서 90분 동안 방출하였고, 포집은 쪽꾸바산 정상 중심에서 반경 10 km 내의 40개 지점에서 수행되었다.

### 제 3 절 비상대응최적화

#### 1. 국외 기술개발 현황

독일 FZK 연구소를 중심으로 개발된 실시간 온라인 비상대응 결정지원시스템 RODOS를 주민에 대한 폐폭선량평가 기능뿐 아니라 실제적 비상방재 대책 결정지원에 효과적으로 이용하기 위한 연구가 진행중에 있다. 최근 향상된 기능으로는 현재 뿐 아니라 미래의 방사능 누출에 대한 정보를 예측함으로써 방사성물질의 방출후 수년까지 여러 대응행위의 이득과 손해를 예측

할 수 있게 구성되어 있다. 또한 여러 비상대응행위에 대한 경제성 평가를 위해 부지특성정보에 대한 데이터베이스 구축작업도 함께 진행중이다.

1986년 체르노빌 사고 경험을 바탕으로 덴마크 Riso 연구소를 중심으로 대형 원전사고시 스칸디나비아 국가에 대한 비상대응조치의 조화를 위해 고유의 사회환경 특성 (수송비용, 대체 음식물 비용, 스칸디나비아 가옥에 대한 방사능 차폐계수 등)을 고려한 개입준위 및 유도개입준위 재정비를 위하여 BER-3라 명명된 대형 프로젝터를 1990년대 초부터 계속 추진하고 있다. 또한 비상대응방법론 연구와 함께 사고 시나리오를 가정하여 스칸디나비아 국가에 대한 방재훈련에 활용하고 있다. Riso 연구소에서는 전형적 스칸디나비아 국가의 가옥 구조 조사를 통해 이에 대한 대규모 프로젝터 (REK-1 : Large reactor accidents-Consequences and mitigating actions, 1982)를 수행한 바 있다.

중국 원자력연구소 (CIAE)에서도 퍼프 (puff) 확산모델을 사용한 실시간 피폭해석시스템이 개발되었으며 현재 비상대응 결정지원을 위한 연구가 진행중에 있다.

일본의 경우도 TMI-2 사고후 1979년에 원자력안전위원회 (NSC) 산하에 비상대응 자문기구 (ETAB)가 발족되었다. ETAB의 역할을 보다 강화하고 효과적으로 지원하기 위하여 1985년부터 일본 방사능 비상 기술자문기구를 위한 전산지원시스템 COSTA가 개발 진행중에 있으며 1996년에 비상대응 최적화 결정지원을 위한 개념설계를 시작으로 2001년에 완성될 예정이다.

그외 프랑스와 같은 여러 선진국가에서도 비상대응결정지원을 시스템 개발이 한창 진행중이다.

## 2. 국내 기술개발 현황

국내의 경우 개발된 실시간 피폭해석시스템 FADAS에서 피폭선량 기능

뿐 아니라 비상대응 결정지원을 위한 연구가 중장기 연구 2단계부터 진행중에 있으며 현재 대응행위 결정지원을 위한 방법론에 대한 개념설계가 완료된 상태이다. 보다 신뢰성 있는 결정지원을 위해 원전부지특성에 대한 자료가 수집중에 있으며, 특히 가옥구조 및 특성은 외국의 경우와 상이하여 방사능에 의한 차폐계수 등의 평가작업이 진행중에 있다.

**NEXT PAGE(S)**  
**left BLANK**

## 제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

### 제 1 절 부지 야외확산실증실험

#### 1. 울진부지 확산실험

울진 원자력발전소는 동해안에 위치하고 있으며 주변의 크고 작은 산으로 둘러싸여 있다. 부지내 기상탑은 정문 옆의 얕은 구릉에 위치하며 58 m 높이로 10 m와 58 m의 두 고도에서 기상측정을 하고 있다. 울진 원전주변의 지형정보와 기상탑을 중심으로한 지형도 및 포집점의 위치를 그림 3.1에 나타내었다.

일반적으로 바람의 방향은 지표면에서 낮동안에는 바다에서 육지로 불고, 일몰 이후에는 육지에서 바다로 불어나가는 해류풍 현상이 발생한다. 또한, 실험 전에 관찰한 풍향은 북풍과 북동풍 계열이 우세하였으므로 부지내 기상탑을 방출점으로 하고 이를 중심으로 반경 3 ~ 5 km (A line)와 8 ~ 9 km (B line) 선상에 각각 43 개와 49 개의 포집지점을 선정하였다.

포집점의 위치는 방출점중심 남서방향으로, A line에서는 140 도, B line에서는 160의 각도내에 위치하였다. 포집기는 주로 도로를 따라 설치하도록 하였으며 A line의 포집점들은 방출점으로부터 평균 4,384 m의 거리이고 A5 와 A6의 사이를 제외하고는 평균 3도의 간격으로 위치하였으며 포집점간의 평균거리는 304 m였다. B line에는 방출점 서쪽 7 km에 해발 516 m의 장재산으로부터 시작해서 북서방향까지 도로가 개설되지 않았고 추적자가 북서쪽으로 훌러갈 확률은 없었으나, 배경농도를 측정하고 또 있을지도 모르는 풍향의 변화를 고려하여 8개의 포집기를 북서방향에 배치하였는데 이 포집점들의 방출점으로부터 평균거리는 8,566 m이고 포집점간의 평균거리는 888 m, 평균간격은 5.9도였다. 나머지 B line의 포집점들은 평균거리 8,232 m이

고, 포집점간의 평균거리는 335 m, 평균간격은 2도였다. 표 3.1에 방출점을 기준으로 한 포집점의 좌표, 거리, 각도를 나타내었는데  $\theta$ 는 북쪽을 중심으로 시계방향이 (+)인 각도를 나타낸다.

야외에서의 실험일정은 영광부지 확산실험시의 절차와 동일하게 진행되었으며, 다만 실험 1주일 전부터 한국원자력연구소가 보유한 기상장비를 이용한 기상관측을 시작하였는데 SODAR 대신에 초음파 풍향풍속계를 기상탑 3개의 고도에 설치하였고 포집점 8개에 각각 간이 풍향풍속계를 설치하여 바람의 공간적인 변화를 측정하였다. 간이 풍향풍속계가 설치된 지점은 A6, A25, A37와 B8, B9, B23, B39, B48이었다.

첫 번째 실험은 1997년 5월 27일 수행되었는데, 이때의 기상예보는 흐리고 때때로 소나기였으며 강우확률은 40%로 흐릴 것으로 예보되었으며 실험기간 중 비는 내리지 않았다. 11시 30분부터 추적자 방출을 시작하였는데 이때 풍향은 58 m에서 북 내지 북북동풍으로 5 ~ 6 m/sec, 10 m에서 북북동풍으로 4 ~ 5 m/sec였다. SF<sub>6</sub> 가스는 90분 동안 지속적으로 일정한 양으로 방출하였으며 방출율은 181.4 kg/hr로 총 272.2 kg이 방출되었다.

1시간 30분동안 방출한 후 오후 1시에 추적자 방출을 완료하고 포집기를 철수하여 샘플 백을 수거한 후 분석을 의뢰하였다.

포집된 전 시간에 걸쳐 A, B line 모두 포집선의 중앙에 농도의 최대값이 나왔으므로 실험 당시의 풍향은 포집기 배치상태에 아주 적합하였다. 각 포집선마다 10개 이상의 포집점에서 추적자가 포집된 것으로 나타나 확산실험 자체는 성공적이었다.

실험결과의 해석 및 모사를 위하여 실험 당일 관측한 기상자료들을 토대로 3차원 바람장을 계산하였다. 바람장은 수평 17 km × 17 km와 연직 990 m를 수평 17 × 17개, 수직 33개의 격자로 나누어 계산하였으며 이때 방출점은 모델영역의 오른쪽 위 (북동쪽)로부터 각각 5 km되는 지점이었다.

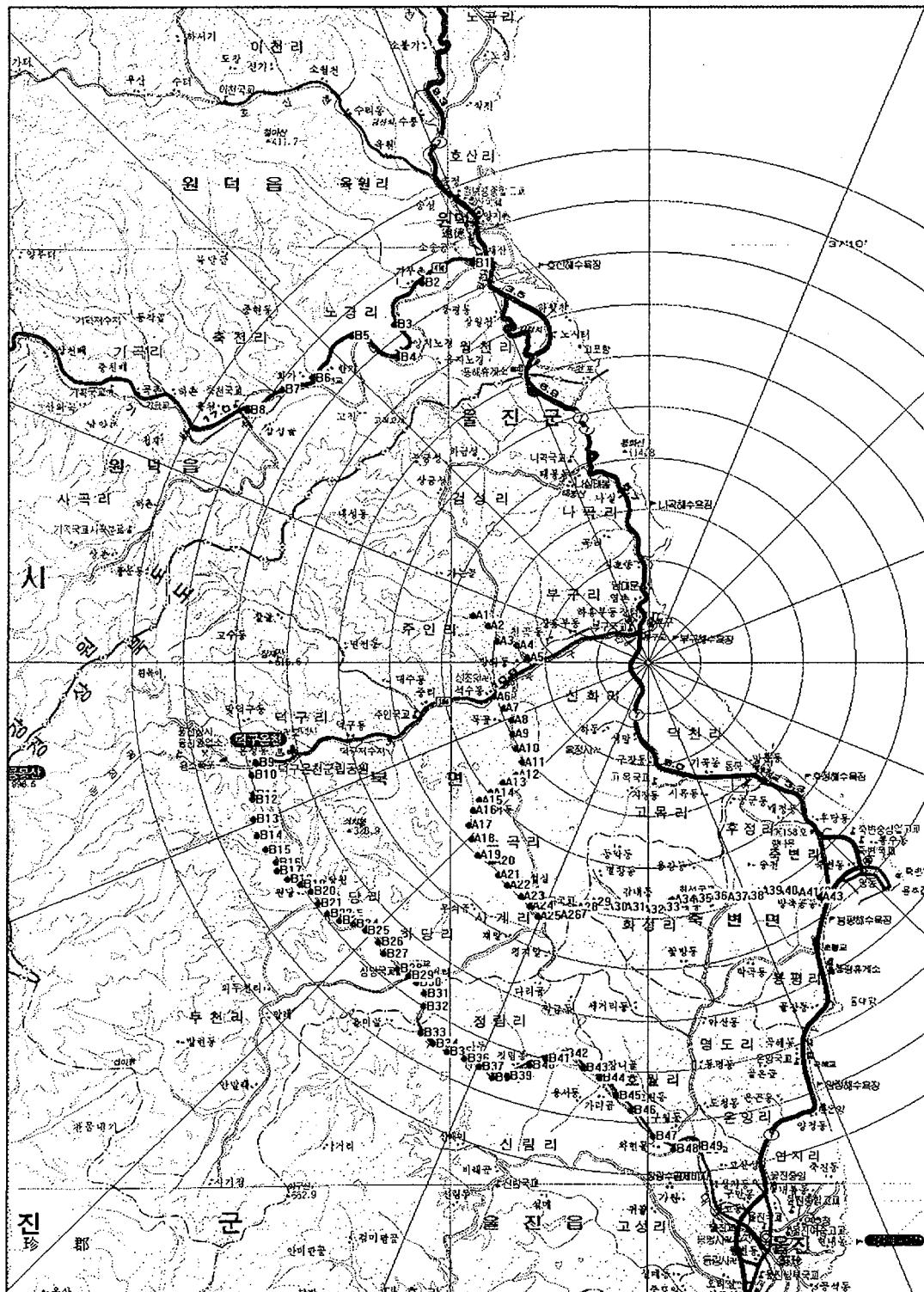


그림 3.1 울진 원전주변의 지형도와 방출점 및 포집점의 위치

(Map of the area around Ulchin nuclear power plant, release point and sampling points)

표 3.1 포집점의 좌표 (Coordinate of sampling points)

포집점	x- 좌표	y- 좌표	거리(r)	각도(θ)
A01	-3,384	925	3,509	285.3
A02	-3,100	716	3,182	283.0
A03	-2,919	406	2,948	277.9
A04	-2,538	334	2,560	277.5
A05	-2,331	94	2,333	272.3
A06	-2,969	-684	3,047	257.0
A07	-2,793	-911	2,938	251.9
A08	-2,632	-1,152	2,873	246.4
A09	-2,620	-1,423	2,981	241.5
A10	-2,547	-1,710	3,068	236.1
A11	-2,433	-1,973	3,133	231.0
A12	-2,552	-2,227	3,387	228.9
A13	-2,803	-2,370	3,671	229.8
A14	-3,044	-2,570	3,984	229.8
A15	-3,262	-2,723	4,249	230.1
A16	-3,378	-2,916	4,462	229.2
A17	-3,452	-3,199	4,707	227.2
A18	-3,412	-3,481	4,875	224.4
A19	-3,290	-3,800	5,026	220.9
A20	-3,016	-3,919	4,945	217.6
A21	-2,894	-4,188	5,091	214.6
A22	-2,715	-4,397	5,167	211.7
A23	-2,450	-4,618	5,228	207.9

표 3.1 계속 (Continued)

포집점	x- 좌표	y- 좌표	거리(r)	각도(θ)
A24	-2,282	-4,799	5,314	205.4
A25	-2,120	-5,006	5,437	203.0
A26	-1,745	-4,984	5,281	199.3
A27	-1,627	-4,965	5,225	198.1
A28	-1,416	-4,834	5,037	196.3
A29	-1,166	-4,729	4,871	193.8
A30	-839	-4,810	4,883	189.9
A31	-485	-4,810	4,834	185.8
A32	-142	-4,863	4,865	181.7
A33	170	-4,817	4,820	178.0
A34	465	-4,671	4,694	174.3
A35	780	-4,655	4,720	170.5
A36	1,088	-4,600	4,727	166.7
A37	1,492	-4,611	4,846	162.1
A38	1,801	-4,590	4,930	158.6
A39	2,145	-4,503	4,988	154.5
A40	2,460	-4,499	5,128	151.3
A41	2,871	-4,533	5,366	147.7
A42	3,088	-4,521	5,475	145.7
A43	3,325	-4,615	5,688	144.2
B01	-3,407	7,840	8,548	336.5
B02	-4,393	7,464	8,661	329.5
B03	-4,920	6,640	8,264	323.5

표 3.1 계속 (Continued)

포집점	x- 좌표	y- 좌표	거리(r)	각도( $\theta$ )
B04	-4,859	6,000	7,721	321.0
B05	-5,751	6,427	8,624	318.2
B06	-6,500	5,600	8,580	310.7
B07	-7,098	5,369	8,900	307.1
B08	-7,778	4,962	9,226	302.5
B09	-7,588	-1,978	7,842	255.4
B10	-7,665	-2,226	7,982	253.8
B11	-7,632	-2,604	8,064	251.2
B12	-7,659	-2,705	8,122	250.5
B13	-7,637	-3,081	8,235	248.0
B14	-7,576	-3,405	8,306	245.8
B15	-7,397	-3,689	8,266	243.5
B16	-7,192	-3,944	8,202	241.3
B17	-7,189	-4,101	8,277	240.3
B18	-6,977	-4,276	8,183	238.5
B19	-6,727	-4,384	8,029	236.9
B20	-6,529	-4,508	7,934	235.4
B21	-6,387	-4,746	7,957	233.4
B22	-6,209	-4,957	7,945	231.4
B23	-5,975	-5,091	7,850	229.6
B24	-5,701	-5,161	7,690	227.8
B25	-5,472	-5,286	7,608	226.0
B26	-5,211	-5,509	7,583	223.4

표 3.1 계속 (Continued)

포집점	x- 좌표	y- 좌표	거리(r)	각도(θ)
B27	-5,106	-5,746	7,687	221.6
B28	-4,848	-6,037	7,742	218.8
B29	-4,620	-6,173	7,710	216.8
B30	-4,463	-6,309	7,728	215.3
B31	-4,317	-6,525	7,824	213.5
B32	-4,326	-6,782	8,044	212.5
B33	-4,385	-7,296	8,512	211.0
B34	-4,156	-7,513	8,585	208.9
B35	-3,887	-7,674	8,602	206.9
B36	-3,548	-7,815	8,582	204.4
B37	-3,250	-7,983	8,619	202.2
B38	-3,005	-8,197	8,730	200.1
B39	-2,721	-8,169	8,610	198.4
B40	-2,272	-7,947	8,265	196.0
B41	-1,976	-7,806	8,052	194.2
B42	-1,637	-7,697	7,869	192.0
B43	-1,248	-7,999	8,096	188.9
B44	-933	-8,197	8,250	186.5
B45	-618	-8,534	8,557	184.1
B46	-320	-8,835	8,840	182.1
B47	94	-9,334	9,335	179.4
B48	499	-9,585	9,598	177.0
B49	977	-9,533	9,583	174.1

바람장 모델 영역은 수평 100 m 간격, 연직 30 m으로 나누어 확산을 모사하였다. 모사된 농도분포를 그림 3.2와 그림 3.3에 제시하였다. A 포집선에서 처음 (12:00 ~ 12:10)과 마지막 시간 (12:50 ~ 13:00)에 농도의 중심이 18도 차이가 나고 B 포집선에서 후반부 (12:30 ~ 13:00)에 약 10도 정도 차이가 난 것을 제외하고는 대체로 일치하였다. 모사된 농도도 2배 이내에서 모두 일치하여 바람장 및 추적자의 모사가 상당히 정확하였다는 것을 보여주고 있다.

농도분포의 중심이 어긋나는 것은 관측된 기상자료로부터 풍향 풍속을 내외삽할 때 격자간격이 1 km였는데 가까운 A 포집선에서 포집점간의 평균거리는 304 m로 풍향의 변화가 반영되기 어려웠기 때문인 것으로 추측된다.

## 2. 월성부지 확산실험

월성원자력발전소 부지에서의 야외확산실험은 1998년 5월 14일과 15일 양 일간에 걸쳐 수행되었다. 포집점은 방출원을 중심으로 남서방향 3개의 동심 원상 도로를 따라 설정되었다. 포집기는 가장 가까운 A 포집선 (방출점과의 평균 거리: 1,674 m)에 19개, B 포집선 (방출점과의 평균 거리: 4,635 m)에 40 개, 그리고 가장 먼 C 포집선 (방출점과의 평균 거리: 9,099 m)에 30개로 총 89개를 설치하였다. 포집점의 좌표를 표 3.2에, 실험 대상지역의 지형 및 기상관측 지점을 그림 3.4와 그림 3.5에 제시하였다. 포집점간의 위치 및 거리 등은 다음과 같다.

### - A 포집선

- . 방출점과 가장 가까운 포집점: A01 (1,290 m)
- . 방출점에서 가장 먼 포집점: A19 (2,254 m)
- . 포집점 간 평균 거리 (각도): 261 m (4.4도)
- . 방출점 중심 포집점의 각도: 217.6 ~ 295.8도

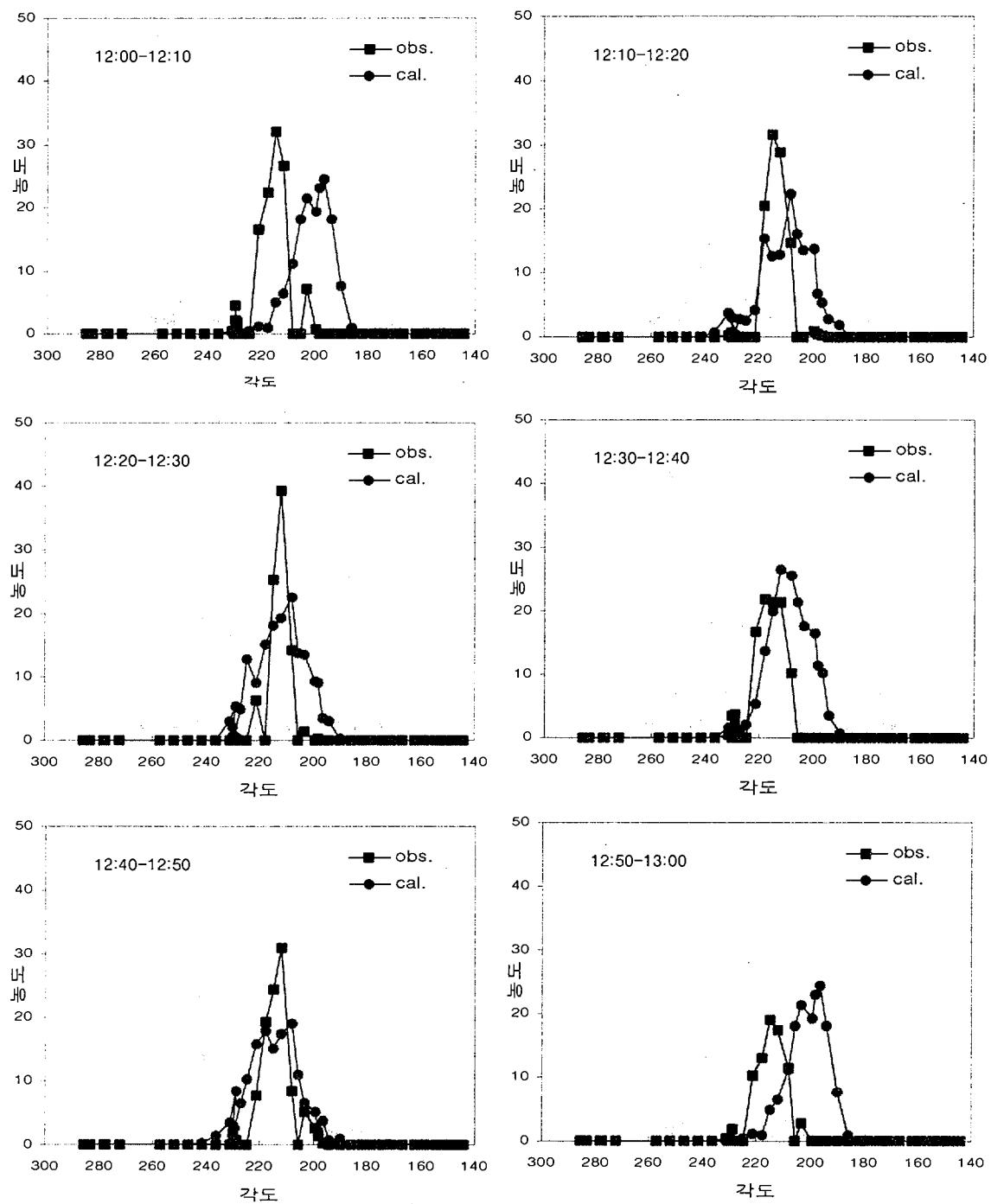


그림 3.2 포집된 농도분포와 모사결과 (Comparisons of simulated and observed concentrations in A line)

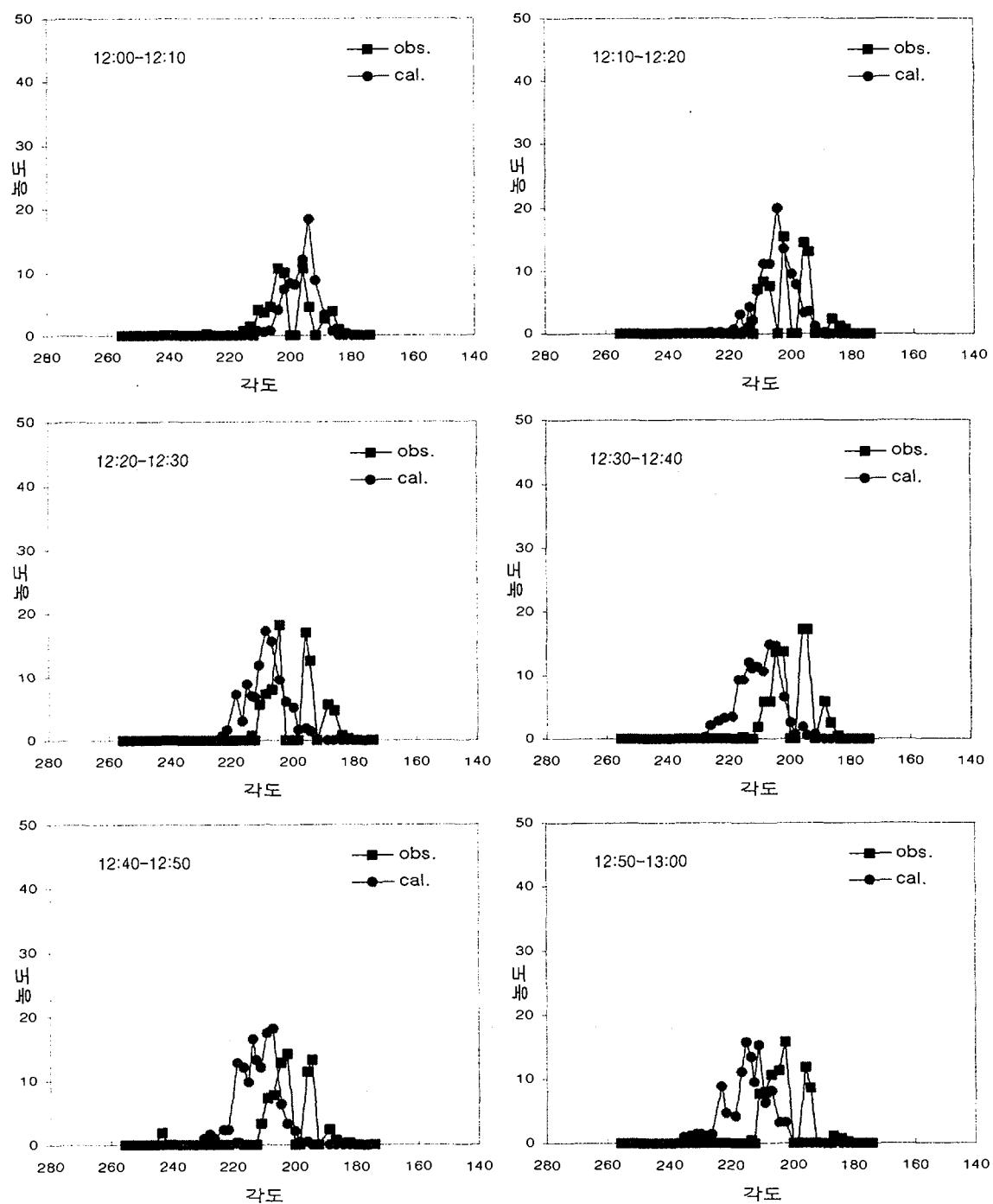


그림 3.3 포집된 농도분포와 모사결과 (Comparisons of simulated and observed concentrations in B line)

- B 포집선

- . 방출점과 가장 가까운 포집점: B11 (3,473 m)
- . 방출점에서 가장 먼 포집점: B32 (5,626 m)
- . 포집점 간 평균 거리 (각도): 238 m (2.0도)
- . 방출점 중심 포집점의 각도: 197.0 ~ 273.3도

- C 포집선

- . 방출점과 가장 가까운 포집점: C01 (6,380 m)
- . 방출점에서 가장 먼 포집점: C19 (10,524 m)
- . 포집점 간 평균 거리 (각도): 239 m (2.0도)
- . 방출점 중심 포집점의 각도: 205.8 ~ 263.0도

1998년 5월 14일 첫 번째 실험의 일정은 다음과 같다.

- 9:45 휴대용 기상관측장비 (NOVA) 설치 시작
- 9:50 샘플러 준비 완료
- 10:39 추적자 방출 준비 완료
- 11:30 방출 시작 (방출율 30 kg/hr)
- 13:30 포집 시작
- 14:30 포집 종료

이때 추적자는 월성 원자력발전소 기상탑 58 m 높이에서 방출하였으며 풍 속을 고려하여 방출율을 시간당 30 kg으로 설정하였다. 실험 후 남은 추적자 의 무게를 재어 환산한 결과는 총 69.35 kg이 방출되었으며 3시간 동안 일정 하게 방출하였으므로 시간당 23.12 kg이 방출된 것으로 확인되었다.

기상관측은 기상탑 10 m, 30 m, 58 m의 3개 높이에 초음파 풍향 풍속계 설치하였으며 실험 당일은 실험지역내 포집선을 따라 6군데에서 풍향, 풍속 을 측정하였다.

두 번째 실험은 5월 15일 10시 30분부터 12시 30분까지 수행하였는데 분석 결과 추적자가 포집선의 가장자리에 걸려 모사는 수행하지 않았다.

야외확산실험 모사는 방출점의 위치를 동부원점 기준 TM 243027, 246321, 높이 58 m로 하고 모사 영역은 방출점을 기준으로 동쪽 1 km, 서쪽 11 km, 남쪽 8 km, 북쪽 4 km에 해당하는 범위로 12 km × 12 km × 900 m (연직)의 범위를 잡았으며 격자수는 120 × 120 × 90개로 격자 간격은 수평 100 m × 100 m, 연직 10 m였다.

바람장은 관측된 자료로부터 대기안정도를 계산하고 대기안정상태에 따른 Monin-Obukhov length (L)를 Randerson[3.1]에 따라 다음과 같이 추정하였다.

$$\frac{1}{L} = (a_1 S + a_2 S^3) z_0^{-(b_1 - b_2 S) + b_3 S^2} \quad (3.1)$$

여기서,  $a_1 = 0.00435$ ,  $a_2 = 0.00372$ ,  $b_1 = 0.503$ ,  $b_2 = 0.231$ ,  $b_3 = 0.0325^\circ$ 이고  $S$ 는 Pasquill-Gifford 대기안정도 등급을 숫자로 표현한 것으로 A는 -3, B는 -2, C는 -1, D는 0, E는 1, F는 2의 값을 갖는다.

마찰속도 ( $U_*$ )는 log-linear profile[3.2]을 사용하여 구하였다.

$$U_* = \frac{k u}{\ln(z/z_0) - \psi_m(z/L)} \quad (3.2)$$

여기서,  $k$ 는 von Karman constant로 0.35에서부터 0.43까지의 값을 가지나 일반적으로 0.4의 값을 많이 사용한다.

표 3.2 포집점의 좌표 (Coordinate of sampling points)

포집점	x- 좌표	y- 좌표	거리(r)	각도(θ)
A01	-786	-1,022	1,290	217.6
A02	-907	-988	1,341	222.6
A03	-1,058	-949	1,421	228.1
A04	-1,180	-922	1,497	232.0
A05	-1,302	-842	1,551	237.1
A06	-1,409	-731	1,587	242.6
A07	-1,485	-620	1,610	247.3
A08	-1,518	-488	1,594	252.2
A09	-1,503	-339	1,540	257.3
A10	-1,520	-179	1,531	263.3
A11	-1,597	-34	1,597	268.8
A12	-1,607	75	1,609	272.7
A13	-1,664	196	1,676	276.7
A14	-1,730	324	1,760	280.6
A15	-1,788	450	1,844	284.1
A16	-1,856	570	1,941	287.1
A17	-1,903	712	2,032	290.5
A18	-1,963	844	2,137	293.3
A19	-2,030	980	2,254	295.8
B01	-1,284	-4,194	4,387	197.0
B02	-1,427	-4,065	4,308	199.3
B03	-1,564	-3,927	4,227	201.7

표 3.2 계속 (Continued)

포집점	x- 좌표	y- 좌표	거리(r)	각도( $\theta$ )
B04	-1,710	-3,781	4,150	204.3
B05	-1,817	-3,640	4,069	206.5
B06	-1,912	-3,501	3,989	208.6
B07	-1,960	-3,288	3,828	210.8
B08	-2,028	-3,119	3,720	213.0
B09	-2,106	-2,928	3,607	215.7
B10	-2,171	-2,775	3,524	218.0
B11	-2,313	-2,591	3,473	221.7
B12	-2,460	-2,488	3,499	224.7
B13	-2,616	-2,437	3,575	227.0
B14	-2,827	-2,376	3,693	230.0
B15	-2,986	-2,326	3,785	232.1
B16	-3,152	-2,274	3,887	234.2
B17	-3,349	-2,210	4,013	236.6
B18	-3,532	-2,158	4,139	238.6
B19	-3,701	-2,210	4,310	239.2
B20	-3,902	-2,269	4,514	239.8
B21	-4,114	-2,284	4,706	241.0
B22	-4,279	-2,392	4,902	240.8
B23	-4,420	-2,312	4,988	242.4
B24	-4,540	-2,190	5,041	244.3
B25	-4,652	-2,054	5,085	246.2

표 3.2 계속 (Continued)

포집점	x- 좌표	y- 좌표	거리(r)	각도(θ)
B26	-4,760	-1,896	5,124	248.3
B27	-4,965	-1,890	5,313	249.2
B28	-5,095	-1,853	5,422	250.0
B29	-5,227	-1,761	5,516	251.4
B30	-5,364	-1,563	5,587	253.7
B31	-5,426	-1,424	5,610	255.3
B32	-5,494	-1,211	5,626	257.6
B33	-5,445	-1,005	5,537	259.5
B34	-5,421	-871	5,491	260.9
B35	-5,407	-696	5,452	262.7
B36	-5,374	-491	5,396	264.8
B37	-5,391	-284	5,399	267.0
B38	-5,423	-100	5,424	268.9
B39	-5,498	95	5,499	271.0
B40	-5,566	324	5,575	273.3
C01	-2,780	-5,742	6,380	205.8
C02	-3,165	-5,655	6,481	209.2
C03	-3,724	-5,598	6,723	213.6
C04	-3,924	-5,490	6,748	215.6
C05	-4,074	-5,408	6,771	217.0
C06	-4,404	-5,216	6,826	220.2
C07	-4,779	-5,078	6,974	223.3

표 3.2 계속 (Continued)

포집점	x- 좌표	y- 좌표	거리(r)	각도(θ)
C08	-6,037	-5,835	8,396	226.0
C09	-6,577	-5,899	8,835	228.1
C10	-6,745	-5,548	8,734	230.6
C11	-7,231	-5,334	8,985	233.6
C12	-8,111	-5,062	9,561	238.0
C13	-8,392	-5,054	9,797	238.9
C14	-8,786	-5,097	10,157	239.9
C15	-9,260	-5,177	10,609	240.8
C16	-9,280	-4,962	10,523	241.9
C17	-9,270	-4,619	10,357	243.5
C18	-9,374	-4,408	10,359	244.8
C19	-9,633	-4,237	10,524	246.3
C20	-9,637	-3,739	10,337	248.8
C21	-9,541	-3,291	10,092	251.0
C22	-9,619	-3,111	10,109	252.1
C23	-9,502	-2,965	9,954	252.7
C24	-9,741	-2,566	10,073	255.2
C25	-9,638	-2,365	9,924	256.2
C26	-9,479	-2,192	9,729	257.0
C27	-9,340	-1,962	9,544	258.1
C28	-9,547	-1,816	9,718	259.2
C29	-9,655	-1,566	9,781	260.8
C30	-9,884	-1,209	9,958	263.0

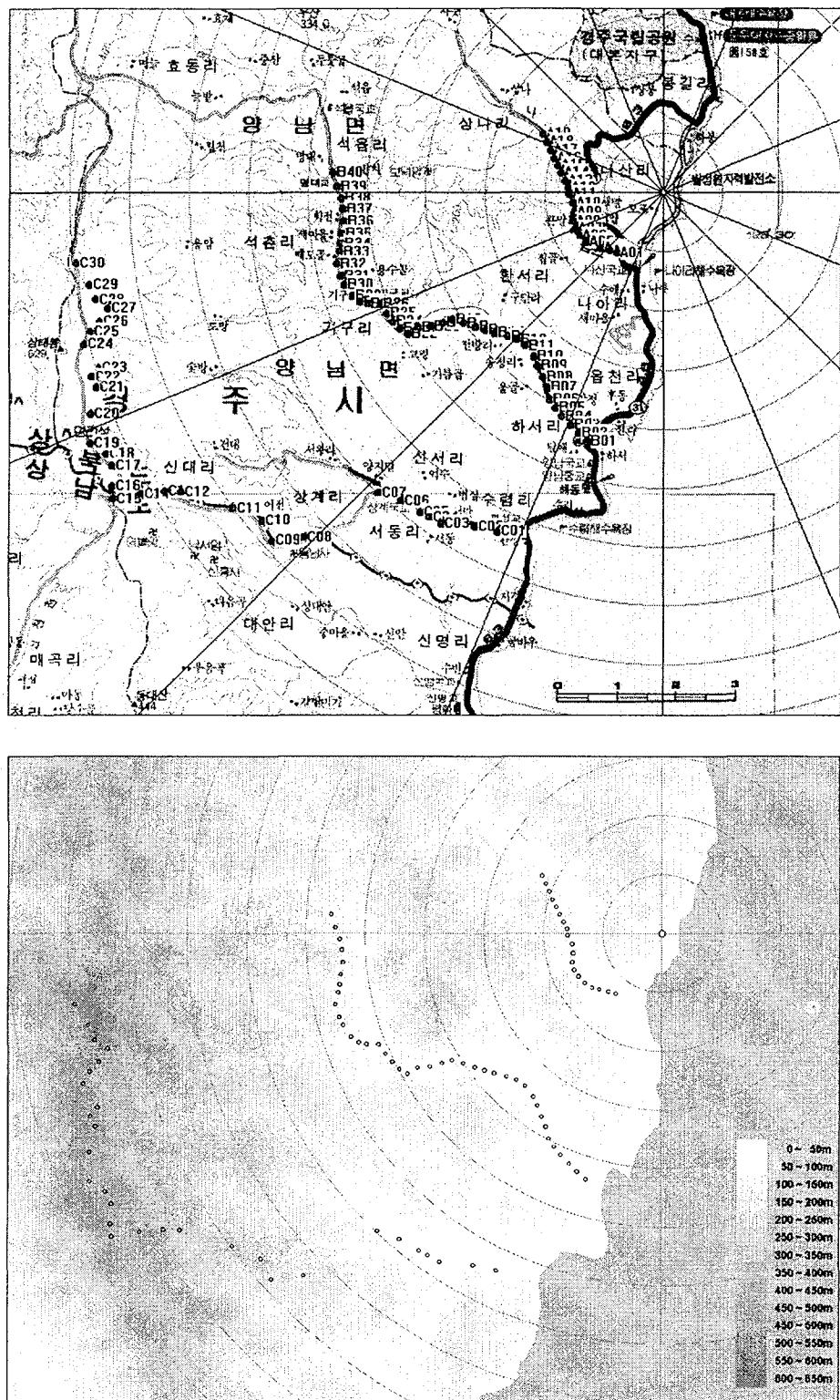


그림 3.4 월성원자력발전소 야외확산실험지역 및 포집점의 위치  
(Wolsung NPP field experiment target area and sampling points)

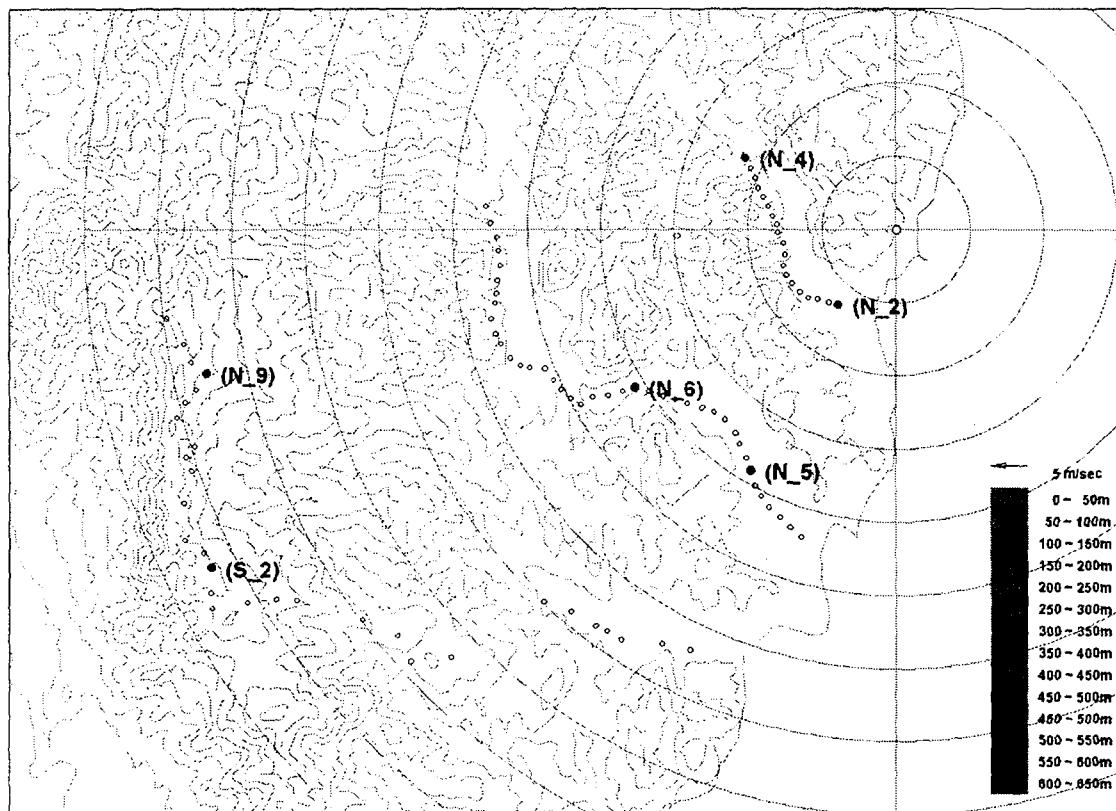


그림 3.5 월성 확산실험 기상관측지점  
(Meteorological measurement points)

$z_0$ 는 지표조도 (surface roughness)이고,  $\psi_m(z/L)$ 은 무차원 wind shear로

$$\psi_m(z/L) = \frac{k z}{u_*} \frac{\partial u}{\partial z} \quad (3.3)$$

와 같이 정의되며 대기가 불안정할 경우에는

$$\psi_m(z/L) = 2\ln \frac{1+x}{2} + \ln \frac{1+x^2}{2} - 2\arctan(x) + \frac{\pi}{2} \quad (3.4)$$

$$\text{여기서, } x = (1 - 15z/L)^{1/4}$$

중립상태일 경우에는

$$\psi_m(z/L) = 0 \quad (3.5)$$

안정한 경우에는

$$\psi_m(z/L) = -4.7 \frac{z}{L} \quad (3.6)$$

의 값을 갖는다.

지균풍은 임의의 높이  $z$ 에서 지균풍 ( $\bar{G}$ )의 풍향과 같은 방향의 바람성분을  $\bar{U}$ , 직각인 성분을  $\bar{V}$ 라 할 때 다음과 같은 관계를 갖는다[3.3].

$$\bar{U} = \bar{G} [1 - e^{-\gamma_E z} \cos(\gamma_E z)] \quad (3.7)$$

$$\bar{V} = \bar{G} [e^{-\gamma_E z} \sin(\gamma_E z)] \quad (3.8)$$

$$\text{여기서, } \gamma_E z = (\frac{f}{2K_m})^{1/2}$$

$f$  : Coriolis parameter

$K_m$ : eddy viscosity

기상탑 세 높이에서 측정한 풍향 풍속으로부터 지균풍의 풍향과 이루는 각을 계산한 뒤 각 수평관측 지점에서 관측된 풍속으로부터 마찰 속도를 계산하여 이를 수직, 수평 격자점에서 내,외삽하여 격자점 바람장의 초기값을 부

여하였다. 매 10분마다 각 격자점에 부여된 초기값으로부터 지형의 변화에 따라 연속방정식을 만족시키는 바람장을 계산하였다[1.3]. 추적자의 확산은 수평  $12 \text{ km} \times 12 \text{ km}$ , 수직  $990 \text{ m}$ 의 범위로 방출점은 계산 영역 서남단에서 동으로  $11 \text{ km}$ , 북으로  $8 \text{ km}$ 에 위치하였다. 수평 계산 격자는  $31 \times 31$  개로, 수직 계산격자는 33개로 설정하였다.

모사 결과를 추적자 분석결과와 비교한 그림을 그림 3.6부터 3.8에 수록하였다. 모사 결과는 확산의 중심선 및 확산폭이 대체로 일치함을 보였으나 A 포집선에서는 모사결과가 측정값의 약  $1/5$ , B 포집선에서는 모사결과가 측정값의 약 3배, C 포집선에서는 모사결과가 측정값의 약 5배 이내로 나타났다. 이같은 결과는 실제 추적자의 농도분포가 모사결과에 비해서 가까운 거리에서 높게 나온 것으로 이는 월성부지의 지형특성에 따른 것으로 고려된다. 즉, 방출점 풍하방향에 약  $200 \text{ m}$  깊이의 골짜기가 존재하는데 방출된 추적자중 많은 양이 이 계곡에 정체되었고 계곡을 벗어난 양은 적었을 것으로 추정된다. 이 골짜기를 따라 A 포집점이 설치되었으므로 높은 농도가 측정되었고 상대적으로 B, C 포집선으로 불어나간 양은 적었기 때문에 낮은 농도가 측정되었다고 판단된다.

이러한 모사결과는 현재 사용하고 있는 바람장 모델이 사고시 신속한 계산을 수행하기 위하여 장애물 내에서의 정체 및 내부순환을 무시하고 단지 지형의 변화에 따른 질량보존법칙만을 고려하였기 때문에 발생된 것으로 앞으로 수정되어야 할 부분이다.

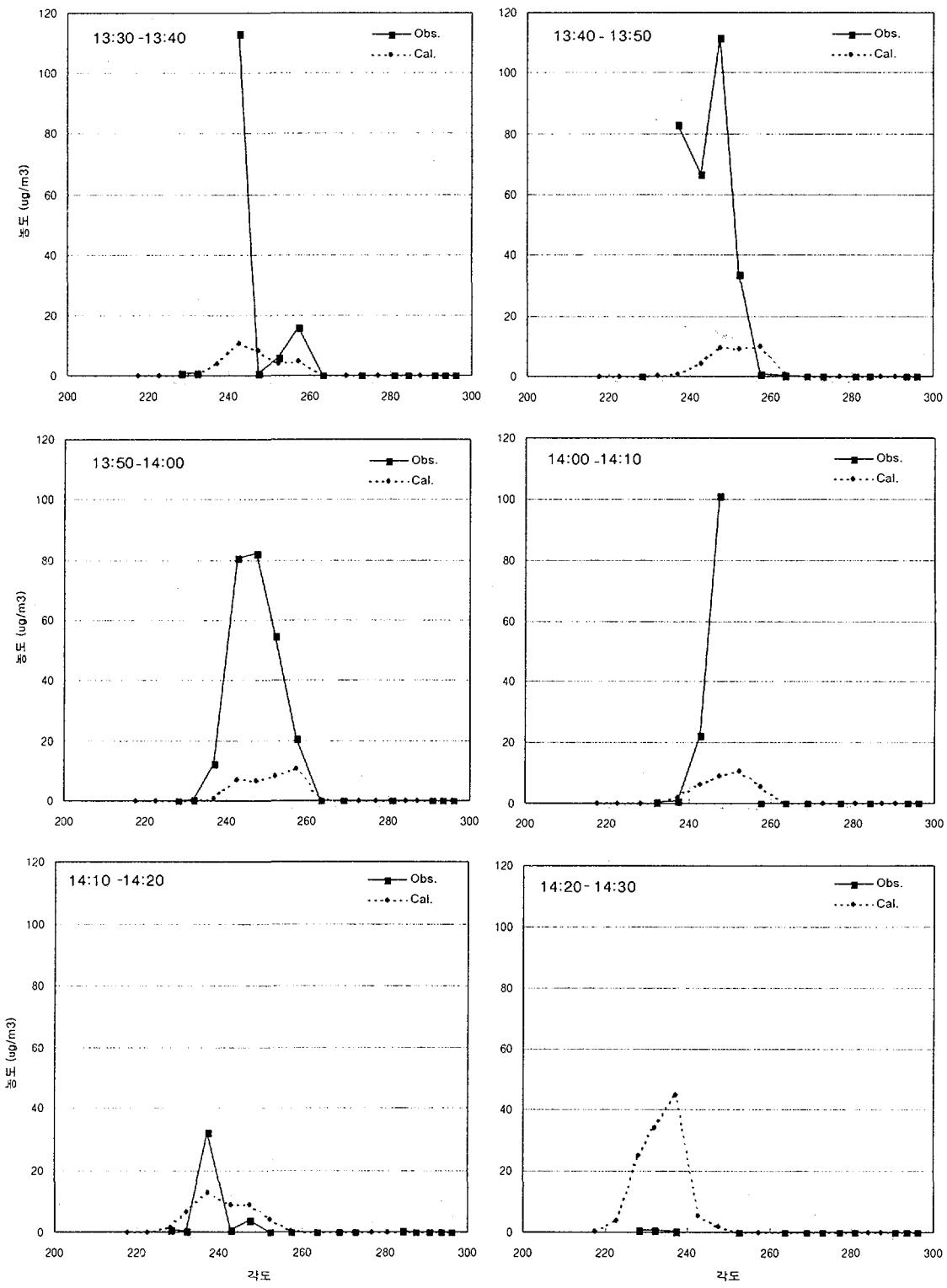


그림 3.6 포집된 농도분포와 모사결과 (Comparisons of simulated and observed concentrations in A line)

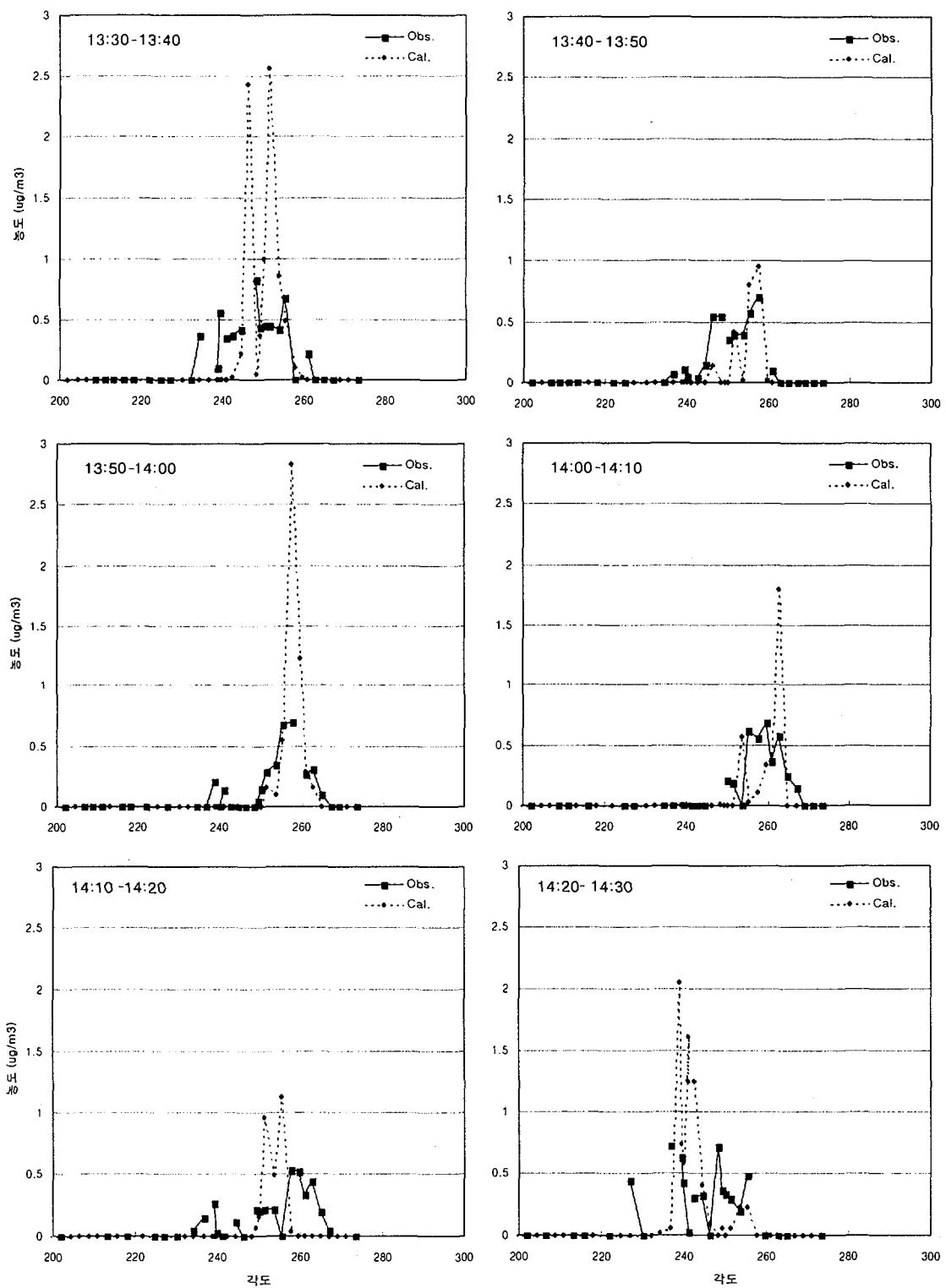


그림 3.7 포집된 농도분포와 모사결과 (Comparisons of simulated and observed concentrations in B line)

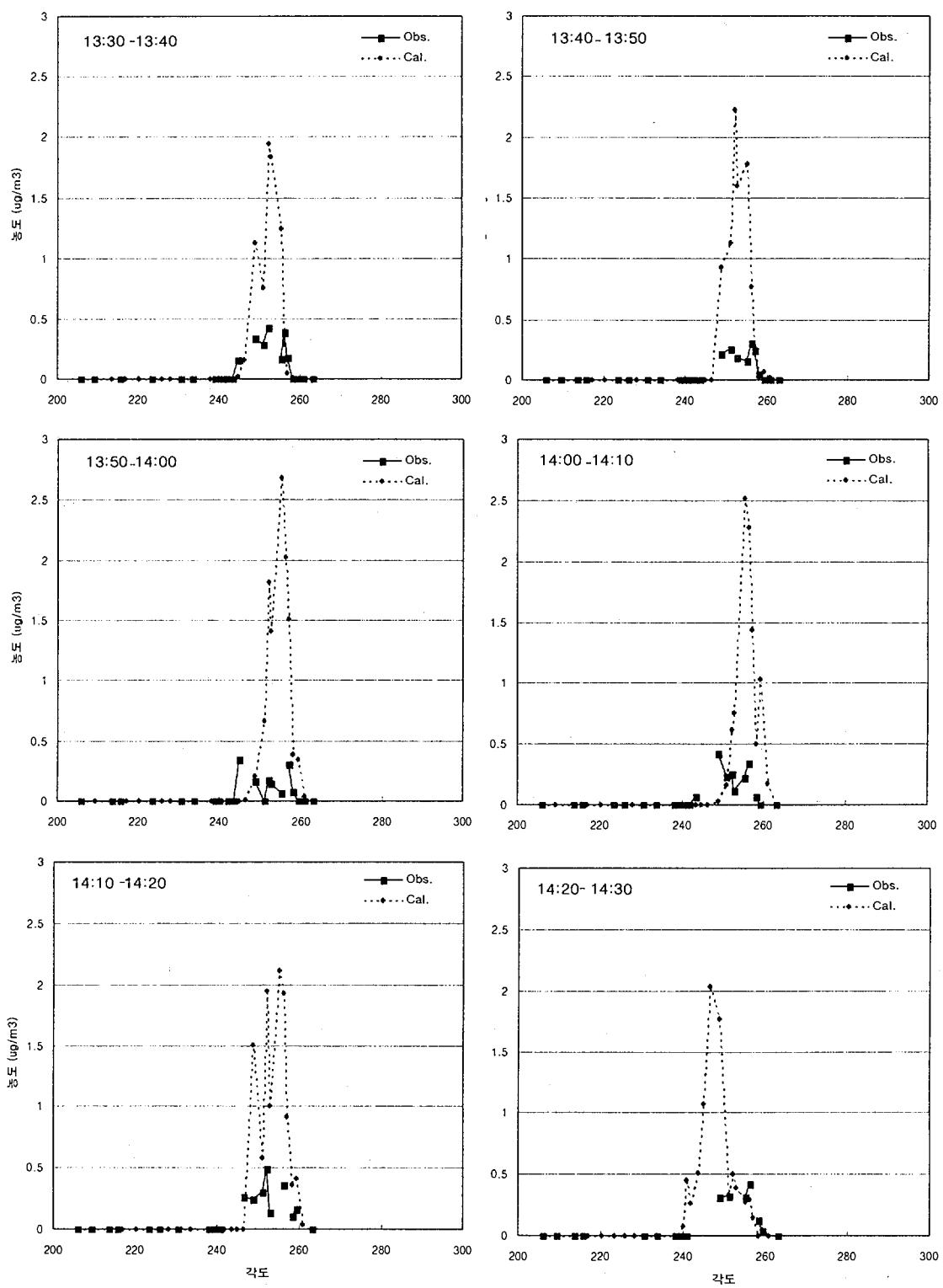


그림 3.8 포집된 농도분포와 모사결과 (Comparisons of simulated and observed concentrations in C line)

## 제 2 절 부지환경특성

울진과 월성원전 부지에 대한 기상 및 사회환경특성은 원전 최종안전성 분석보고서를 통해 조사하였다[3.4,3.5].

### 1. 울진부지 환경특성

#### 가. 기상특성

울진 원전부지에서 1991년부터 1994년까지 관측된 자료를 통해 분석된 계절별 바람장미를 그림 3.9에 나타냈다. 연중 서풍계열 ( $202.5^{\circ} \sim 337.5^{\circ}$ )의 바람이 63.0%로 우세하게 나타났다. 동풍 계열의 바람은 일반적으로 지역적인 영향을 많이 받아 발생빈도 및 그 속도가 감소하는 반면, 서풍계열의 바람은 기압배치에 의한 계절풍의 영향을 많이 받아 발생빈도 및 그 속도가 증가한다. 계절풍의 발생빈도에 따르면 각 계절마다 풍향변화의 특징을 보여주고 있는데 봄, 여름 및 가을철에는 서풍이 각각 14.2%, 10.1% 및 20.2%로 우세하며, 겨울철에는 북서풍이 22.6%로 우세하게 나타난다. 풍향의 분포는 기체상 방사성물질에 의한 주변주민의 피폭해석에 있어 매우 중요한 기상요소로 육풍이 불 경우 사람이 살지 않는 바다로 방사성물질이 확산되며, 해풍이 불 경우에는 사람이 거주하는 내륙지방으로 방사성물질이 확산된다. 울진지역의 해풍은 북서 방향으로부터 시계방향으로 남동 방향사이에서 불어오는 바람을 의미한다. 표 3.3은 해풍과 육풍의 발생빈도를 나타냈으며 연간 해풍의 발생빈도는 53.1%, 육풍은 44.3%이다. 일반적으로 해류풍은 육지와 바다의 비열차이에 의해서 발생된다. 즉 바다가 육지보다 비열이 크기 때문에 육지의 온도가 낮에는 바다보다 높고, 반대로 밤에는 육지의 온도가 더 낮아진다. 따라서 낮에는 바다에서 육지로 밤에는 육지에서 바다로 바람이 불게 되며 이를 해류풍이라 한다.

부지내의 지상풍의 계절별 및 연간 평균풍속은 봄철 3.1 m/sec, 여름철 2.2

m/sec, 가을철 2.9 m/sec, 겨울철 3.6 m/sec로 연평균 3.0 m/sec이다. 정온 상태는 봄철에 2.6%, 여름철 6.2%, 가을철 0.7%, 겨울철 0.9%로 연평균 발생빈도는 2.7% 정도이다.

부지에서의 연평균 기온은 12.7 °C이며 부지와 인접한 강릉과 울진의 연평균 기온은 각각 12.2 °C, 12.7 °C이다. 관측기간동안 부지의 연평균 일교차는 10 °C 이하이며 대륙성 한대기단의 영향으로 최저기온은 -13.3 °C, 북태평양 고기압의 영향으로 최고기온은 38.3 °C이다.

부지에서의 상대습도는 연중 안개 및 충운의 발생빈도가 높은 여름철에 높고 겨울철에 낮다. 평균 및 최저습도는 각각 69 %, 4 % 정도이며 안개 또는 강수조건하에서는 최고 100 % 정도이다.

부지에서의 연평균 강수량은 1,103.0 mm이고 여름철 강수집중율은 42.3 %이다. 관측기간중 월 최다 강우량은 599. 5mm이며 24시간 최대 강우량은 200.4 mm이다.

부지주변 강릉과 울진지역의 기상청 자료에 의하면 안개는 강릉이 13일, 울진이 19일로 나타났으며 특히 여름철에 발생빈도가 높다. 부지에서 관측된 12년간 (1981년~1992년)의 기록으로 볼때 발전소 주변에서는 약 15일이 발생된다. 이 지역에서의 스모그는 해풍과 육풍의 교차시 바람이 약할때 안개와 더불어 발생한다. 이러한 날은 평소보다 따뜻하고 대부분 구름이 없다. 이러한 현상은 역전층이 매우 낮거나 거의 지면까지 도달할 때 보통 일어난다. 그러나 발전소는 화석연료나 천연가스를 사용하지 않기 때문에 스모그는 거의 발생되지 않는다.

대기안정도는 대기의 희석능력을 평가함에 있어서 매우 중요한 요소이며 표준편차에 의한 난류정도에 따라 분류된다. 대기의 실제 희석능력은 난류의 강도에 의해 좌우되며 이는 고도별 온도차, 풍속, wind shear, 지표면의 조도 등에 의해 결정된다. 따라서 난류의 직접측정은 이러한 영향들이 고려

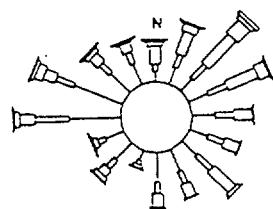
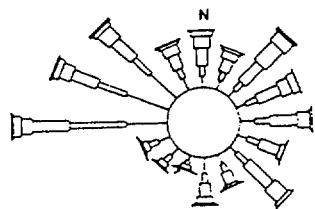
표 3.3 울진부지에서의 계절별 해륙풍 분포 (%)

(Occurrence probability of sea-breeze at Ulchin nuclear site).

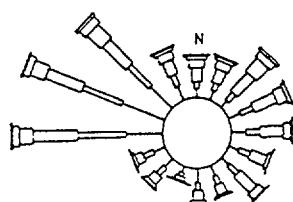
계절	해 풍 (SSE~WNW)	육 풍 (NW~SE)	정온
봄	57.5	40.1	2.6
여름	55.0	38.9	6.2
가을	46.3	53.1	0.7
겨울	54.0	45.2	0.9
평균	53.1	44.3	2.7

SPRING

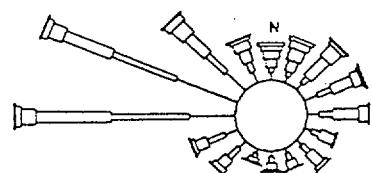
SUMMER



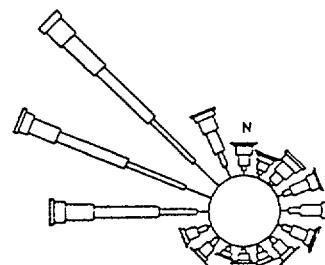
ANNUAL



AUTUMN



WINTER



0 2 4 6 8 10\*

SCALE

그림 3.9 울진부지에서의 연간 및 계절평균 바람장미.

(Yearly and seasonal wind roses at Ulchin nuclear site).

될 뿐만 아니라 희석능력을 보다 정확하게 예측할 수 있다. 대기가 안정하면 희석능력이 약한 반면 대기가 불안정하면 희석능력은 증가한다. 1991년부터 1994년까지 부지기상관측 자료를 분석한 대기안정도별 발생빈도를 표 3.4에 나타냈다.

혼합층의 높이 (혼합고)는 지면으로부터 대기의 수직혼합이 왕성하게 일어나는 층을 말한다. 이 층에서의 연직기온 감률은 대략 건조기온감률 ( $9.8^{\circ}\text{C}/\text{km}$ )를 따른다. 대기와 지표면 사이의 모든 운동량 교환과 열교환은 혼합층내에서 일어나기 때문에 혼합고는 대기 운동학적으로나 열역학적으로 상당히 중요하다. 혼합층은 지표면의 온도분포 및 그 층내의 수증기 분포와 밀접한 관계를 가지고 있다. 일반적으로 최대 및 최소 혼합고는 그날 아침의 연직기온분포, 최고기온, 최저기온으로부터 결정되며 일중 가열로 인한 대류에 의해 시간에 따라 변화하는 혼합고를 예측하기는 매우 어렵다. 따라서 기존의 기상관측자료를 이용한 혼합고 계산방법을 기술하면 다음과 같다.

$$h = \frac{C_n u^*}{f} , \text{ 중립의 경우} \quad (3.9)$$

$$h = C_s \sqrt{\frac{u^* L}{f}} , \text{ 안정한 경우} \quad (3.10)$$

$$h^2(t) = h^2(0) + \frac{2(1+2A)}{\gamma} \int_0^t \frac{H(0, \tau)}{\rho C_p} d\tau , \text{ 불안정한 경우} \quad (3.11)$$

여기서,

$h$  : 혼합고

$f$  : 코리오리 매개변수

$u^*$  : 마찰속도

$L$  : Monin-Obukhov 거리규모

$C_n$  : 경험상수 ( $=0.2$ )

표 3.4 울진부지에서의 대기안정도별 발생빈도

(Occurrence probability of atmospheric stability classes at Ulchin nuclear site)

안정도	발생빈도 (%)					평균풍속 (m/sec)
	봄	여름	가을	겨울	연간	
A : 매우 불안정	20.2	23.4	16.7	13.9	18.7	2.4
B : 불안정	15.5	14.5	12.7	16.3	14.8	3.0
C : 약간 불안정	20.7	19.9	22.8	27.5	22.7	3.5
D : 중립	22.2	24.2	27.4	32.2	26.4	3.3
E : 약간 안정	12.2	12.7	17.0	9.7	12.8	2.3
F : 안정	2.4	1.4	1.5	0.1	1.4	2.3
G : 매우 안정	5.1	1.2	1.7	0.0	2.1	1.6

$C_s$  : 경험상수 ( $=0.4$ )

$A$  : 유입률

$\gamma$  : 혼합층위 안정층에서 온위의 연직구배

$H(0, \tau)$  : 시간  $\tau$ 에서 지면에서의 열속

$\rho$  : 공기밀도

$C_p$  : 정압비열

$t$  : 시간

3년간의 울진 기상관측자료를 이용하여 월최대, 최소 혼합고와 계절평균 최대, 최소 혼합고를 표 3.5에 나타냈다. 표에 나타낸 바와 같이 최대혼합고의 최대값은 4월에 2,137 m이며 최저값은 8월의 717 m로 나타났다. 최소 혼합고의 최저치는 8월에 129 m이며 최대치는 5월에 348 m이다. 계절별로 최대평균 혼합고는 봄철에 1,975 m이며 여름철에 1,100 m로 나타났다.

#### 나. 사회환경특성

울진 원자력부지는 경상북도 동북단의 강원도계 인접지역 해변에 위치하며 행정구역 명칭은 경상북도 울진군 북면 부구리이다. 발전소부지의 경위도 중심좌표는 북위  $37^{\circ} 05' 24''$  N, 동경  $129^{\circ} 23' 04''$  E이다. 부지로부터 반경 16 km 내에는 태백산맥의 지맥이 중첩되어 있고 도처에 구릉이 복기하여 있으므로 동쪽 해안선을 제외하고는 지형이 복잡하다. 부지로부터 반경 16 km 이내에는 특기할 만한 인공구조물이나 천연지형물이 존재하지 않으며 부지주변의 주요지형물 현황을 표 3.6에 나타내었다.

발전소부지는 부구리 해안가에 위치하며 해안선을 따라 군데군데 만형의 해안에 자갈과 바위가 섞인 소형사구가 형성되어 있다. 남쪽의 구릉과 동쪽의 해안 및 북쪽의 하천 (부구천)에 의해 둘러싸여 있는 부지지역은 200 m

표 3.5 울진 부지의 월 및 계절평균 최대, 최소 혼합고  
(Mixing heights measured at Ulchin nuclear site)

구분 \ 월	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2
최대혼합고 (m)	1,98 6	2,13 7	1,80 1	1,24 0	1,34 4	717	1,16 0	1,56 9	1,30 4	1,80 1	1,34 4	1,42 1
최소혼합고 (m)	218	296	348	270	298	129	181	139	134	189	174	218
계 절	봄			여름			가을			겨울		
최대혼합고 (m)		1,975			1,100			1,344			1,522	
최소혼합고 (m)		287			232			151			193	

표 3.6 울진 부지 반경 16km 이내의 자연지형물.

(Natural topography within radius 16 km from Ulchin nuclear site)

자연지형물	길이 (km) 표고 (m) 면적 (ha)	위 치	
		거리 (km)	방향
나곡천	8.0km	3.8	NNW
기곡천	25.5km	8.0	NNW
호산천	15.5km	9.5	NNW
임원천	10.0km	15.5	NNW
부구천	15.5km	1.4	NNW
울진남대천	23.0km	12.9	SSE
왕피천	27.0km	13.8	SSE
철마천	411.7m	13.3	NNE
장재산	515.6m	8.0	W
웅봉산	998.5m	13.5	W
쇠치봉	328.9m	7.3	WSW
아구산	652.9m	12.8	SW
금산	387.9m	12.8	SSW
덕구저수지	10.0ha	5.2	W
기곡저수지	4.7ha	12.0	NW
대수호	34.0ha	4.7	W

이하의 구릉성 산악지대로 동쪽으로 경사를 보이고 있다. 부지로부터 반경 16 km 이내의 최대 해발고도지점은 부지로부터 서쪽방향으로 13.5 km 지점에 위치한 응봉산으로 높이는 998.5 m이다. 부지주변의 주요 산은 서쪽 8.0 km 지점에 위치한 장재산 (표고 515.6 m), 북북서쪽 13.3 km 지점에 위치한 철마산 (표고 411.7 m), 서남서쪽 7.3 km 지점에 위치한 금산 (표고 387.9 m) 등이다. 그리고 이들 산지를 수원으로하는 하천들이 서쪽으로부터 동해로 유입하고 있으며 일반적으로 평야가 적고 동부지대에 약간의 평지가 형성되어 있을 뿐 대부분 산지로 형성되어 있다. 부지주변에는 큰 하천은 없고 몇몇 소하천이 북서계곡으로부터 시작하여 남동방향으로 거의 평행선을 이루며 동해로 흘러 들어간다. 이들 하천은 부지와 인접하여 흐르는 부구천 (길이 15.5 m), 부지로부터 북북서쪽으로 3.8 km 거리에 위치한 나곡천 (길이 8.0 km), 부지로부터 북북서쪽으로 8.0 km 거리에 위치한 기곡천 (길이 25.5 km), 부지로부터 북북서쪽으로 9.5 km 거리에 위치한 호산천 (길이 15.5 km), 부지로부터 남남동쪽으로 12.9 km 거리에 위치한 울진 남대천 (길이 23.0 km), 부지로부터 남남동쪽으로 13.8 km 거리에 위치한 왕피천 (길이 27.0 km), 그리고 부지로부터 북북서쪽 15.5 km 거리에 위치한 임원천 (길이 10.0 km) 등이 있다. 부지에서 가장 가까이 인접하는 하천은 부구천이고 그 다음은 나곡천이다.

부지로부터 반경 80 km 이내의 1993년도 행정단위별 인구를 표 3.7에 나타냈다. 또한 부지로부터 80 km 이내의 전지역을 16개의 방사상 지역과 9개의 동심원으로 구분된 160개의 단위지역에 대한 인구분포를 표 3.8에 나타냈다.

표 3.7 울진 부지로부터 반경 80km 이내의 행정단위별 인구 (명)

(Population for administrative districts within radius 80 km from Ulchin nuclear site)

행정구역	가구수	인구수	위 치	
			거리 (km)	방향
경상북도				
안동시	22,649	117,871	75	SW
안동군	22,649	78,044	50	SW
청송군	12,246	40,127	62	SSW
봉화군	15,245	54,927	19	W
울진군	21,084	70,198	-	-
영주시	23,100	84,700	69	WSW
영덕군	19,018	61,725	50	S
영풍군	15,896	67,252	60	WSW
영양군	8,195	28,390	27	SW
충청북도				
단양군	13,407	47,628	66	W
강원도				
정선군	20,325	72,900	40	NW
명주군	19,436	68,824	56	NW
평창군	14,297	51,724	70	NW
삼척시	11,159	41,743	38	NNW
삼척군	15,009	55,008	6	NW
태백시	19,609	71,905	25	WNW
동해시	27,814	97,799	46	NNW
영월군	13,407	56,478	45	WNW

부지로부터 반경 8 km 이내에는 6개의 유치원, 8개의 초등학교 (분교포함), 2개의 중학교 및 1개의 고등학교가 있다. 부지에서 가장 인접해 있는 학교는 북면 부구리의 부구 초등학교로 부지에서 북서쪽 0.8 km 지점에 위치한다. 부지로부터 반경 8 km 이내에는 3개의 일반의원, 2개의 치과의원, 1개의 한의원 및 보건지소 1개소, 보건진료소 2개소가 있다. 부지로부터 반경 8 km 반경내에는 국도 1개와 군도 2개가 있다. 부산에서 시작되는 7번 국도는 경상남북도 동해안의 주요도시를 거쳐 강원도 은성까지 남북방향으로 달리는 매우 중요한 간선도로로서 울진 원자력발전소 부지를 우회통과한다. 394번 군도는 북면 부구리와 덕구리를 연결하며 발전소 부지앞의 부구교에서 7번 국도와 연결된다. 그리고 393번 군도는 죽변리에서 하당리를 거쳐 고성리까지 개설되어 7번 국도와 연결된다. 이외에 충남 대천에서 울진까지 연결되는 36번 국도가 부지에서 남쪽 15 km 떨어진 근남면 수산리에서 7번 국도와 만나고 강원도 도계읍에서 원덕읍까지 연결되는 416번 지방도가 9 km 북쪽의 삼척시 원덕읍 호산리에서 역시 7번 국도와 연결된다.

## 2. 월성부지 환경특성

### 가. 기상특성

부지에서의 연중 풍향은 북서계열이 우세하며 계절별 바람장미를 그림 3.10에 나타냈다. 월성지역의 해풍은 북북동 방향으로부터 시계방향으로 남남쪽 방향사이에서 부는 바람이다. 표 3.9에 나타낸 바와 같이 연간 해풍의 발생빈도는 29.6 %, 유풍은 69.7 %이다.

계절풍의 풍향 발생빈도에 따르면 각 계절마다 풍향변화의 특징을 보여주고 있는데 봄과 가을철에는 북서풍이 각각 12.8 %와 16.4 %로 우세하며 여름철에는 북북동풍이 12.9 %, 겨울철에는 서북서풍이 25.4 %로 우세하게 나타났다. 부지내 관측자료에 의하면 지상풍의 계절별 및 연간 평균풍속은 봄

표 3.8 울진 부지로부터 반경 80km 이내의 구역별 인구분포 (명)

(Population for segments within radius 80 km from Ulchin nuclear site)

방향	부지로부터의 거리 (km)									
	0.0- 1.6	1.6- 3.2	3.2- 4.8	4.8- 6.4	6.4- 8.0	8.0- 16.0	16.0- 32.0	32.0- 48.0	48.0- 64.0	64.0- 80.0
N	7	-	-	-	-	-	3	-	-	-
NNE	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-
NE	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ENE	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-
E	6	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ESE	9	27	-	-	-	-	-	-	-	-
SE	19	621	1,041	251	-	-	-	-	-	-
SSE	28	446	1,168	1,421	621	591	3	173	-	-
S	28	170	1,160	1,380	769	4,453	6,677	12,972	17,339	5,881
SSW	28	194	922	706	647	5,330	3,452	6,983	15,672	10,876
SW	28	84	141	197	295	2,548	1,063	5,230	10,003	12,316
WSW	28	94	140	197	253	1,597	2,066	7,230	20,516	31,467
W	28	84	140	197	253	1,618	11,393	43,614	12,076	19,943
WN W	28	84	140	197	253	1,686	13,683	40,197	25,193	26,542
NW	28	84	140	197	248	1,931	5,693	8,497	18,096	13,560
NNW	23	42	114	161	163	1,272	5,948	46,370	84,146	9,179

표 3.9 월성 부지에서의 계절별 해륙풍 분포 (%)

(Occurrence probability of sea-breeze at Wolsung nuclear site)

계절	해 풍 (NNE~SSW)	육 풍 (SW~N)	정온
봄	38.5	61.2	0.4
여름	46.3	52.0	2.0
가을	26.5	79.0	0.5
겨울	16.2	83.4	0.3
연간	29.6	69.7	0.8

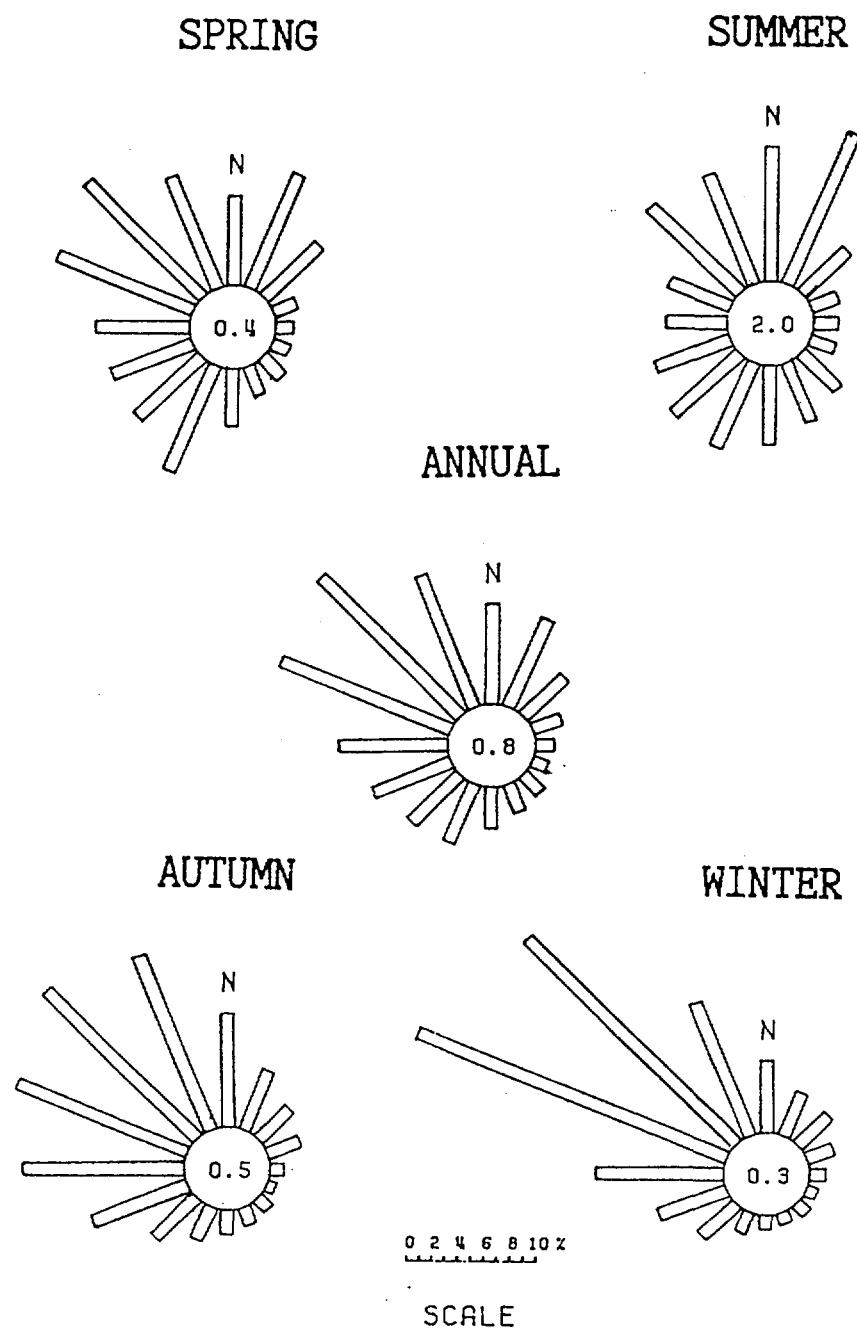


그림 3.10 월성부지에서의 연간 및 계절평균 바람장미  
(Yearly and seasonal wind roses at Wolsung nuclear site)

철 3.1 m/sec, 여름철 2.7 m/sec, 가을철 2.7 m/sec, 겨울철 2.9 m/sec으로 연평균 2.8 m/sec이다. 정온상태는 봄철에 0.4%, 여름철 2.0%, 가을철 0.5%, 겨울철 0.3%로 연평균 발생빈도는 0.8% 정도이다.

월성지역의 연평균 기온은 13.7°C이며 인접지역인 울산과 포항의 연평균 기온은 두 지역 모두 13.3°C 정도이다. 관측기간동안 연평균 일교차는 10°C 이하이며 부지의 최저기온은 대륙성 한대기단의 영향으로 -12.8°C, 최고기온은 북태평양 고기압의 영향으로 37.0°C이다.

상대습도는 연중 안개 및 충운의 발생빈도가 높은 여름철에 높았으며 겨울철에 낮았다. 평균 및 최저습도는 각각 71%, 7% 정도이며, 안개 또는 강수 조건하에서는 최고 100%를 나타낸다.

부지에서의 연평균 강수량은 1,242.0 mm이고 여름철 강수 집중률은 47.3%이다. 관측기간중 부지에서의 월 최다 강우량은 448.5 mm이며 24시간 최대 강우량은 313.0 mm이다.

월성지역의 안개에 대한 가장 유용한 자료는 울산, 포항지역의 기상청자료이다. 이 자료에 따르면 울산이 연평균 15일, 포항은 연평균 10일로 나타났으며, 여름철에 발생빈도가 높다. 부지에서 관측된 13년간의 기록으로 볼 때 발전소 주변에서는 연평균 약 12일 정도 발생된다.

1988년 3월부터 1991년 2월까지 부지관측자료를 분석한 월성지역의 대기안정도별 발생빈도를 표 3.10에 나타냈다. 또한 계절별 대기안정도를 표 3.11에 나타냈으며 안정상태가 가장 많이 발생한 계절은 여름으로 44.1 %였으며, 불안정상태는 봄과 겨울에 많이 발생한다.

표 3.12는 월성 원전부지에서 월 최대, 최소 혼합고와 계절평균 최대, 최소 혼합고를 나타냈다. 최대 혼합고의 최대값은 5월에 1,943 m이며 최저값은 11월의 1,353 m로 나타났다. 최소 혼합고의 최저치는 11월과 12월에 54 m이며 7월에 172 m이다. 계절별로 최대 평균 혼합고는 봄철에 1,910 m이며 겨울철에 2,000 m이다.

표 3.10 월성 원전부지에서의 대기안정도별 발생빈도

(Occurrence probability of atmospheric stability classes at Wolsung nuclear site)

대기안정도	발생빈도 (%)	평균풍속 (m/sec)
A : 매우 불안정	10.7	2.3
B : 불안정	11.1	2.7
C : 약간 불안정	27.9	3.0
D : 중립	17.6	2.8
E : 약간 안정	17.2	3.1
F : 안정	6.3	2.7
G : 매우 안정	9.4	2.3

표 3.11 월성 원전부지에서의 대기안정도의 계절별 발생빈도 (%)  
 (Seasonal occurrence probability of atmospheric stability classes at  
 Wolsung nuclear site)

계절	불안정 (A - C)	중립 (D)	안정 (E - G)
봄	52.0	14.6	33.5
여름	32.1	23.8	44.1
가을	50.4	19.0	30.5
겨울	61.8	13.6	24.6
연간평균	49.7	17.6	32.9

울철에 1,464 m로 나타났다.

표 3.12는 월성 원전부지에서 월 최대, 최소 혼합고와 계절평균 최대, 최소 혼합고를 나타냈다. 최대 혼합고의 최대값은 5월에 1,943 m이며 최저값은 11월의 1,353 m로 나타났다. 최소 혼합고의 최저치는 11월과 12월에 54 m이며 7월에 172 m이다. 계절별로 최대 평균 혼합고는 봄철에 1,910 m이며 겨울철에 1,464 m로 나타났다.

#### 나. 사회환경특성

월성 원자력발전소 부지는 한반도의 남동부인 경상북도 경주군 양남면 나아리에 위치하고 있으며 동해와 접하고 있다. 발전소의 경위도 중심좌표는 북위  $35^{\circ} 42' 34''$ , 동경  $129^{\circ} 28' 34''$ 이다. 동쪽으로는 동해, 서쪽으로는 양남면 나산리, 남쪽으로 양남면 읍천리, 북쪽으로 양북면 봉길리 마을로 둘러싸인 나아리 마을 북쪽에 위치한다. 부지 정지면의 평균 지반고는 12 m이며 최대지반고는 20 m 가량된다. 부지주변에는 주거지 및 관광휴양지 (해수욕장, 국립공원)가 분포하며 부지반경 8 km 이내에는 특이할 만한 산업시설 또는 상업시설이 위치하지 않는다. 부지주변 자연지형물은 표 3.13과 같다.

부지 서쪽으로 토향산 (745 m), 형제산 (429 m), 삼태봉 (629 m)으로 이어지는 준령들이 남북방향으로 발달하여 서고동저의 지형특성을 보이며 태백산맥 남단의 준산악지에 위치한다. 부지주변의 주요 하천은 대종천, 나아천, 하서천이며 이들은 북서계곡으로부터 발원하여 남동방향으로 거의 평행선을 이루며 동해로 유입된다.

부지로부터 반경 80 km 이내 1990년도 행정구역별 인구수를 표 3.14에 나타냈다. 또한 16개 방위각과 10개의 동심원으로 분할하여 160개의 단위구역에 대한 인구분포를 표 3.15에 나타냈다. 경주군내에는 126개의 교육기관이 있으며 유치원 46개소, 초등학교 60개교, 중학교 10개교, 고등학교 10개교가

표 3.12 월성 원전부지의 월 및 계절평균 최대, 최소 혼합고  
 (Mixing heights measured at Wolsung nuclear site)

구분 월	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2
최대 혼합고 (m)	1,8 93	1,8 95	1,9 43	1,9 09	1,6 89	1,7 72	1,7 58	1,5 68	1,3 53	1,3 93	1,4 42	1,5 58
최소 혼합고 (m)	78	65	64	85	17 2	10 5	93	91	54	54	63	56
계 절												
최대 혼합고 (m)	봄			여름			가을			겨울		
최대 혼합고 (m)	1,910			1,790			1,560			1,464		
최소 혼합고 (m)	69			121			79			58		

표 3.13 월성 원전부지 주변의 자연지형물 현황  
 (Natural topography within radius 16 km from Wolsung nuclear site)

자연지형물	규모	부지로부터의 위치	
		거리 (km)	방향
대종천	15.57km	3.7	N
나아천	7.14km	0.6	SW
하서천	13.18km	3.7	SW
삼태봉	650m	10.0	W
토함산	745m	15.0	WNW
무룡산	452m	15.0	SSW
상나저수지	32.9ha	4.2	WNW

3.11급 학제적 예문 (YK), 3.12급 (WS), 3.13급 (UJ)에 제시된 표제는 표제 [37].

본 연구는 제작자와 관리자, 그리고 사용자를 대상으로 한 평가 도구로, 각각의 평가 항목은 다음과 같다. 1) 제작자 평가 항목: 제작자는 제작 과정에서 제작자에게 주어진 제작 지침을 충실히 따랐는지를 평가하는 항목이다. 2) 관리자 평가 항목: 관리자는 제작자에게 제작 지침을 충실히 따랐는지를 평가하는 항목이다. 3) 사용자 평가 항목: 사용자는 제작된 제품의 품질과 사용 편의성을 평가하는 항목이다. 4) 제작자 평가 항목: 제작자는 제작 과정에서 제작 지침을 충실히 따랐는지를 평가하는 항목이다. 5) 관리자 평가 항목: 관리자는 제작자에게 제작 지침을 충실히 따랐는지를 평가하는 항목이다. 6) 사용자 평가 항목: 사용자는 제작된 제품의 품질과 사용 편의성을 평가하는 항목이다.

3. 결제결과 환불처리

표 3.14 월성 원전부지 반경 80km 이내의 행정구역별 인구수  
 (Population for administrative districts within radius 80 km from Wolsung nuclear site)

도시명	인구수 (명)	부지로부터의 위치		비고
		거리 (km)	방향	
울산시	682,973	23.0	SW	
오천읍	30,988	24.1	NNW	
경주시	141,895	26.5	WNW	
포항시	318,595	37.5	NNW	
안강읍	33,169	39.1	NW	
홍해읍	25,293	40.8	NNW	
양산읍	33,637	55.2	SW	
영천시	48,890	56.0	WNW	
밀양시	52,995	67.3	WSW	
경산시	60,524	67.5	W	
김해시	106,166	76.0	SW	부분포함
부산시	3,797,566	80.0	SSW	"
대구시	2,228,834	80.0	WNW	"

표 3.15 월성 원전부지로부터 반경 80km 이내의 구역별 인구분포 (명)

(Population for segments within radius 80 km from Wolsung nuclear site)

방향	부지로부터의 거리 (km)									
	0.0- 1.6	1.6- 3.2	3.2- 4.8	4.8- 6.4	6.4- 8.0	8.0- 16.0	16.0- 32.0	32.0- 48.0	48.0- 64.0	64.0- 80.0
N	-	63	63	-	46	1,746	32,843	21,292	7,457	24,332
NNE	63	568	276	505	459	6,660	11,632	9,951	-	-
NE	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ENE	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
E	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ESE	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SE	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SSE	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
S	592	395	66	-	-	1,524	54,638	-	-	-
SSW	197	1,184	1,052	658	-	3,047	290,29 6	29,454	232,77 9	1,519,0 26
SW	-	132	132	329	66	20,319	357,30 9	49,846	360,83 5	1,187,1 65
WSW	-	197	-	66	197	3,384	13,040	25,002	74,949	69,037
W	197	-	-	197	197	6,462	11,518	6,818	39,060	417,914
WN W	132	-	-	132	329	923	131,33 3	32,628	114,52 0	721,004
NW	-	-	789	-	505	1,010	25,016	33,696	22,046	17,213
NNW	-	-	568	253	253	2,967	68,797	314,73 4	23,387	13,923

부터 그림 3.14까지는 영광, 월성, 울진지역 단독주택의 지붕과 외벽의 재료에 따른 건물의 구성비를 나타냈다. 영광과 월성 지역의 경우 지붕이 슬래이트이고 외벽이 나무인 단독주택이 가장 많이 차지하고 있다는 것을 보여준다. 울진지역의 경우 지붕은 기와이고 외벽은 나무인 단독주택이 가장 많이 차지하였다.

향후 가옥의 크기, 창문의 넓이, 벽과 지붕의 두께 등을 고려하여 부지 특성 차폐인자를 도출할 예정이다.

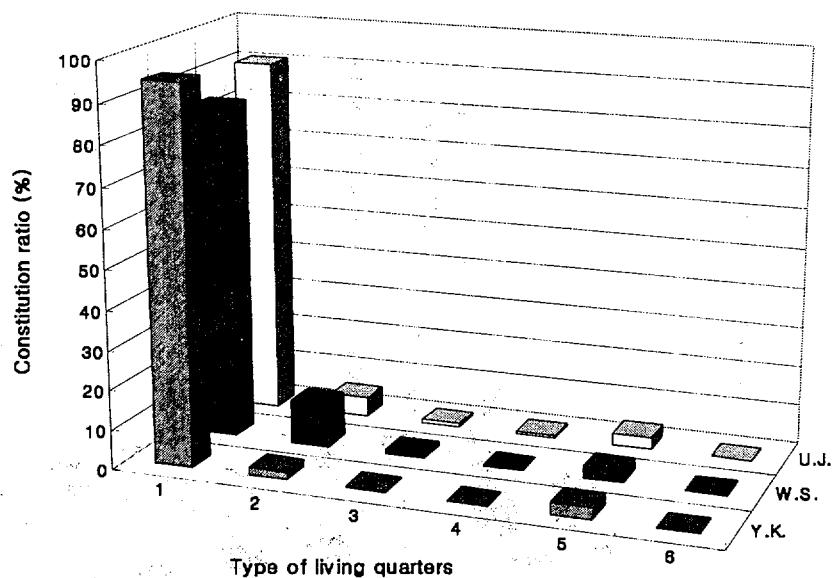


그림 3.11 영광, 월성, 울진지역에서 거주민의 거처 형태에 따른 구성비  
 (1 : 단독주택, 2 : 아파트, 3 : 연립주택, 4: 다세대주택, 6 : 비거주  
 용 건물내의 주택, 7 : 기타)  
 (Constitution ratio according to the type of living quarters at  
 Young-Kwang, Wol-sung, Ulchin nuclear sites)

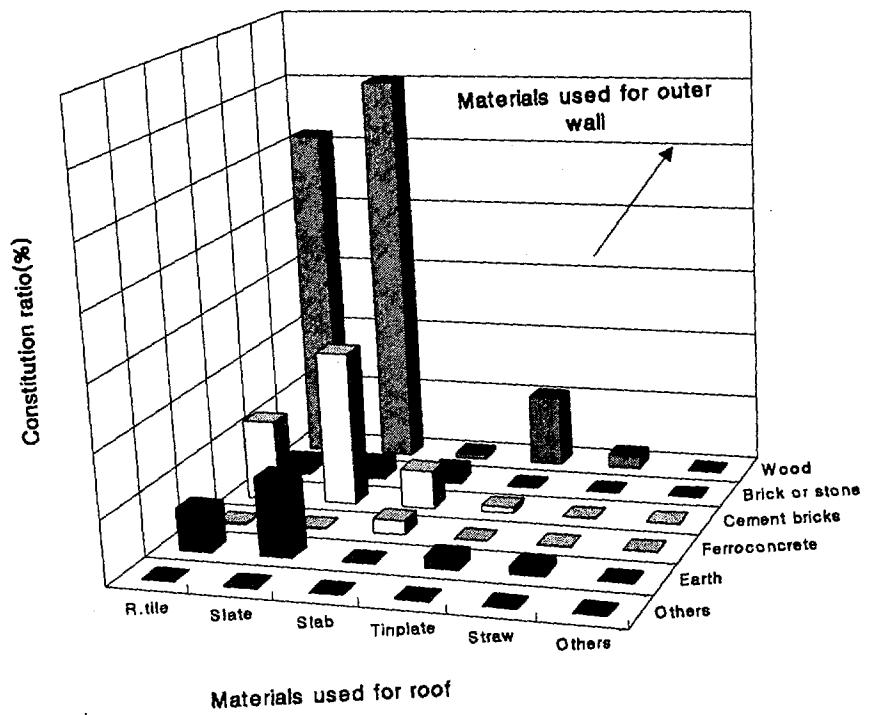


그림 3.12 영광지역에서 단독주택의 지붕과 외벽재료에 따른 건물의 구성비  
 (Constitution ratio according to materials used for outer wall and  
 roof of detached dwelling at Youngkwang nuclear site)

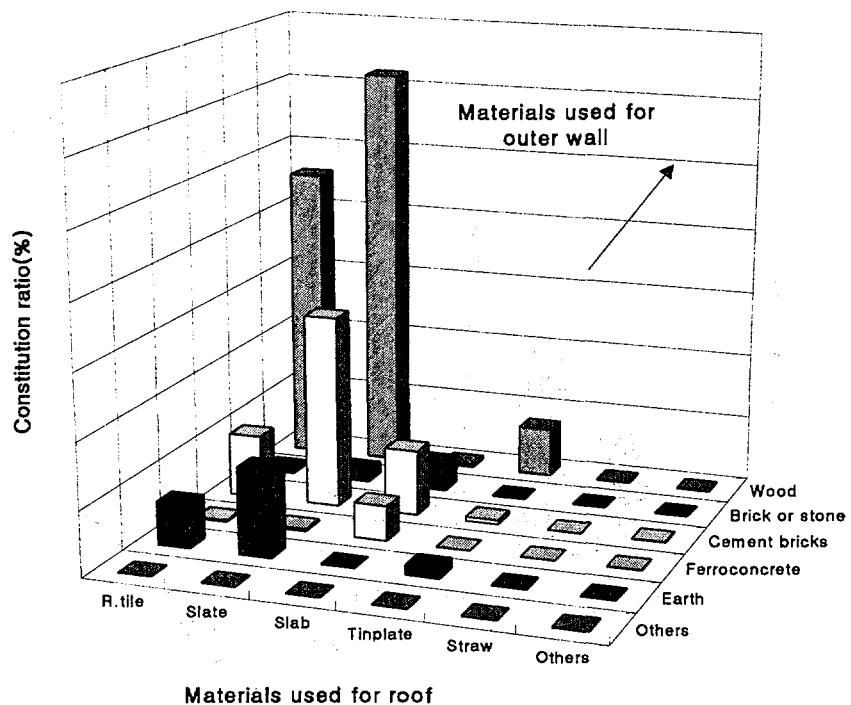


그림 3.13 월성지역에서 단독주택의 지붕과 외벽재료에 따른 건물의 구성비  
 (Constitution ratio according to materials used for outer wall and  
 roof of detached dwelling at Wolsung nuclear site)

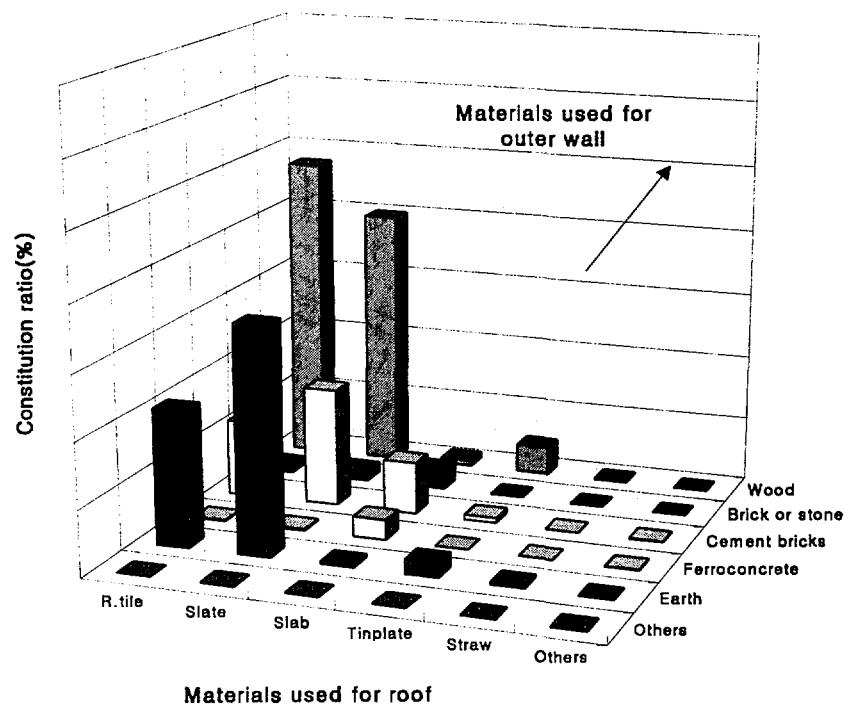


그림 3.14 울진지역에서 단독주택의 지붕과 외벽재료에 따른 건물의 구성비  
 (Constitution ratio according to materials used for outer wall and  
 roof of detached dwelling at Ulchin nuclear site)

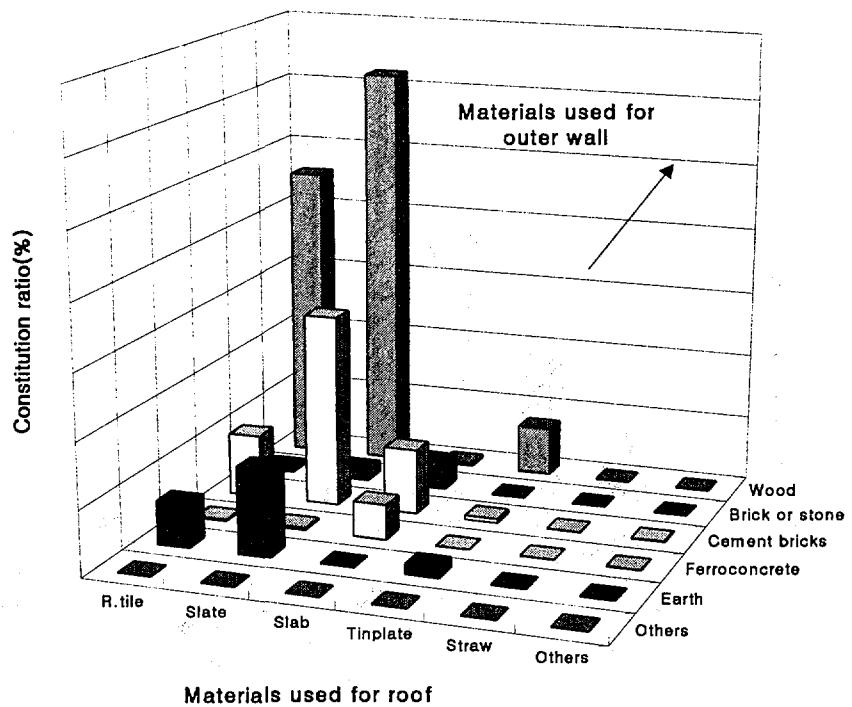


그림 3.13 월성지역에서 단독주택의 지붕과 외벽재료에 따른 건물의 구성비  
 (Constitution ratio according to materials used for outer wall and  
 roof of detached dwelling at Wolsung nuclear site)

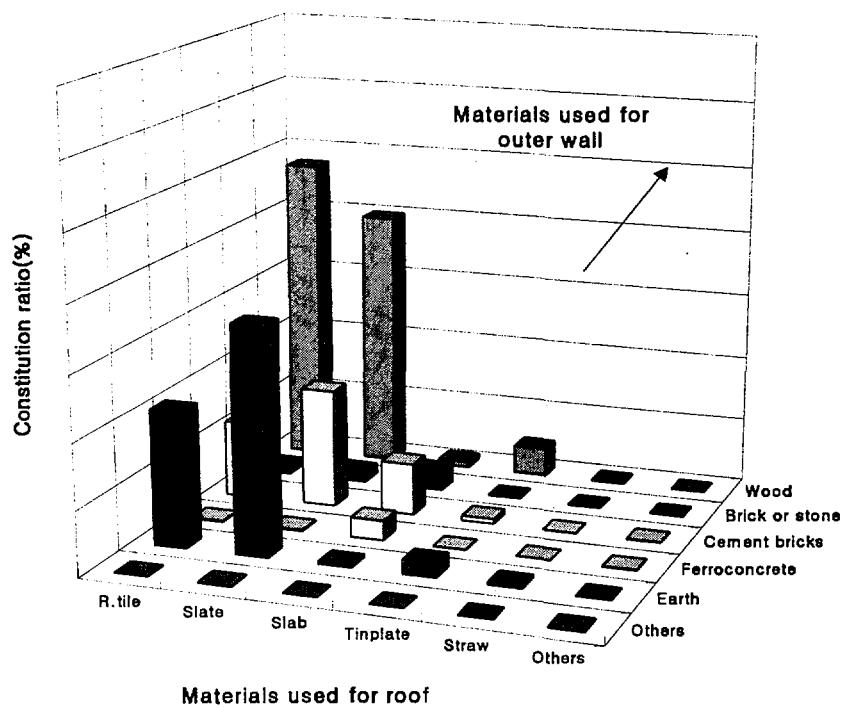


그림 3.14 울진지역에서 단독주택의 지붕과 외벽재료에 따른 건물의 구성비  
 (Constitution ratio according to materials used for outer wall and roof of detached dwelling at Ulchin nuclear site)

### 제 3 절 비상대응행위 결정기술

#### 1. 대응행위의 최적화

원자력 사고시 환경으로 방출된 방사성물질 자체는 통제할 수 없기 때문에 주민은 단지 일상생활과 다른 행위를 취하므로써 방사선으로부터 보호될 수 있다. 이러한 행위를 개입 (intervention)이라 하며, 특정 행위를 취하기 위한 선량의 준위를 개입준위 (intervention level)라 한다. 개입준위는 국가 또는 부지의 정치, 경제, 사회, 문화적 특성 등에 의존하므로 방사선 피해를 최소화하기 위해 비상대응 결정권자는 이러한 여러 인자를 종합적으로 고려하여 최종적으로 판단하여야 한다. 국제원자력기구 (IAEA), 국제방사선 방호위원회 (ICRP), 세계보건기구 (WHO) 등과 같은 여러 국제기관에서는 개입준위 설정을 위한 일반 지침과 아울러 개입준위의 일반적 범위를 제공하므로써 국가 상호간 조화를 도모하고 있다. 비상대응행위를 위한 국제방사선방호위원회 (ICRP Publication 60)에서 권고하고 있는 기본 원칙은 다음과 같다[3.8].

① 제안된 대응행위는 손실 (harm)보다 이득 (good)이 많아야 된다.

즉, 대응행위로 피할 수 있는 선량의 감소 (방사능 위험의 감소)는 사회적 비용을 포함한 제반 비용을 정당화하기 충분하여야 한다  
(행위의 정당화 ; 순이득  $\Delta B > 0$  ).

② 대응행위의 형태, 크기, 기간 등은 순이득이 최대가 되도록 최적화되어야 한다 (방호의 최적화 ;  $\frac{d\Delta B(\theta)}{d\theta} = 0$  ,  $\theta$  : 변수).

방사선에 의한 결정론적 효과 (deterministic effects)를 방지하기 위한 선량한도 (dose limit)에 대한 원칙은 피폭선원이 통제될 수 있는 경우에는 중요한 원칙중 하나이나 피폭선원이 통제될 수 없는 경우에는 적용되지 않는다.

원자력 사고에 대한 주민의 피해를 최소화하기 위해서는 사고의 영향을 평가하는데 필요한 자료를 먼저 수집·조사·분석되어야 하며, 주요 인자는 다음과 같다.

- ① 환경으로 방출되는 방사성물질의 양과 특성, 방출률, 방출기간 등  
(방사선원)
- ② 방출시각 (계절, 주중의 날, 하루중 시각 등)
- ③ 환경매체내 방사성물질의 농도
- ④ 원자력시설 부지 및 환경특성
- ⑤ 부지주변 인구밀도, 인구수, 연령군별 분포, 가옥의 대피 및 차폐효과, 음식물 및 음용수 공급원, 대응준비 등
- ⑥ 비상대응의 효율

일단 사고가 일어났다면 ①~④번 인자는 주민의 행위로는 사고의 결과를 줄일 수 없으며, ⑥번 인자는 사전 대응훈련의 효율 등으로부터 얻은 결과를 통해 부분적으로 미리 결정된다. ⑤번 인자는 주민의 대피, 소개, 음식물의 통제 등을 통해 결과를 완화시킬 수 있다.

국가상호간 개입준위의 조화를 도모하기 위해 대응행위로부터 피할 수 있는 선량 (avertable dose)에 근거하여 여러 국제기관에서 권고하고 있는 일반 개입준위 (general intervention level)와 최근 스칸다나비아 국가의 연구결과 (BER-3 project) 표 3.16에 나타냈다[3.9]. 대응행위에 대한 하한치 이하는 해당 대응 행위를 취할 필요가 없으며, 상한치 이상의 경우 대응행위를 취한다. 이와 같이 대응행위에 대한 개입준위는 해당 국가 또는 부지의 특성을 고려하여 결정되어야 한다. 이러한 특성을 고려하여 설정된 개입준위를 부지특성 개입준위 (site-specific intervention level)라 한다.

표 3.16 스칸디나비아 국가 연구결과 및 국제기관으로부터 권고하고 있는 일반개입준위

(Generic intervention levels obtained from the results of Nordic Nuclear Safety Project BER-3 and recommended by international organization)

비상대응책	BER-3	IAEA	ICRP
대피	2mSv/6h (~0.3mSv/h)	10mSv/<2d (~0.2mSv/h)	5-50mSv/<1d (~0.2-2mSv/h)
소개			
결정론적효과 :	50mSv/1d		500mSv/<1d <sup>1)</sup>
확률론적효과 :			50-500mSv/<1week
일반인	10mSv/1week	50mSv/<1week	
산업근로자	50mSv/1week		
안정요오드복용	100mSv <sup>2)</sup>	100mGy <sup>2)</sup>	>50mSv <sup>4)</sup>
이주		30mSv/1st month	5-15mSv/month
일반인	50mSv/1st month	10mSv/month thereafter	
산업근로자	200mSv/1st month	1Sv long time	1Sv total
음식물섭취금지			10mSv/yr
$\beta + \gamma$		Bq/kg <sup>3)</sup> : 1,000 (1,000)	Bq/kg : 1,000 - 10,000
$\beta$		100 (100)	
$\alpha$		10 (1)	10 - 100

1) Projected dose

2) Equivalent dose to thyroid

3) The latter figure for infants' food and milk

## 2. 대응행위의 종류

환경으로 방출된 방사성물질은 여러 환경매체를 통해 인체에로의 방사선 위해를 주게 되며, 주요 피폭경로는 다음과 같다.

- ① 방사능운으로부터의 외부피폭
- ② 지표에 침적된 방사성물질로부터의 외부피폭
- ③ 호흡에 의한 내부피폭
- ④ 재부유된 방사성물질의 흡입에 의한 내부피폭
- ⑤ 오염된 음식물에 의한 내부피폭
- ⑥ 피부 흡수를 통한 내부피폭

각 경로에 대한 방사선 피폭을 효과적으로 차단하기 위해서는 제시간에 적절한 대응행위를 취해야 한다. 다양한 대응행위가 선택될 수 있으며, 주요 피폭경로에 대한 효과적 대응행위를 표 3.17에 나타냈다. 다음은 주요 대응 행위에 대한 특성을 기술한다.

### 가. 대피

대피 (sheltering)는 방사능운과 지표에 침적된 단반감기 핵종으로부터의 외부피폭, 호흡에 의한 내부피폭 등의 영향을 줄이기 위한 대응행위로 환기 계통을 차단하고 문과 창문의 기밀성을 유지하면서 건물의 내부에 머무는 행위를 말한다. 대피는 하루에서 최대 이를 이하의 단기간동안은 효과적이나 그 이상은 효과적이지 못하다. 시간  $t=0$ 에서 건물외부에서의 방사성 물질의 농도  $A_0$ 를 가지며 시간에 따른 외부농도가 일정하다고 가정하면, 건물내부에서의 방사성물질 농도  $A$ 는 시간에 따라 다음과 같이 변화한다 [3.10].

$$A = A_0 (1 - e^{-\lambda_{air} t}) \quad (3.12)$$

표 3.17 피폭경로에 대한 효과적 대응행위

(Effective countermeasures for exposure pathways)

피폭경 로 대응행위	방사능운	지표침적	호흡	재부유 입자 흡입	접취금지	피부흡수
대 피	○	○	○	○		
소 개	○	○	○	○		
일시이주	○	○	○	○		
영구이주		○		○		
접근금지		○		○		
요오드복용			○			
흡입 보호기 착용			○	○		
음식물통제					○	
피부, 옷 등 제염		○				○
토양, 건물 등 제염		○		○		

여기서  $\lambda_{air}$ 는 건물의 공기 순환율 ( $h^{-1}$ )을 나타내며, 대략적으로 유럽과 미국 가옥의 경우  $0.33 h^{-1}$ , 일본 가옥의 경우  $0.79 h^{-1}$ 로 보고되고 있다[3.11]. 표 3.18은 공기 순환율에 따른 상대적 방사성물질의 농도  $A/A_0$ 를 보여준다. 표에 나타낸 바와 같이 공기 순환율이 높은 건물의 대피효과는 상대적으로 짧은 시간동안 유효하며, 심지어 기밀성이 매우 우수한 건물이라 하더라도 2일 이상의 대피는 효과적이지 못하다는 것을 확인해 보여준다.

표 3.18 대피처의 공기교환율에 따른 내·외부 방사성물질의 상대적 농도  
(Relative concentration of airborne radioactivity inside and outside  
a shelter as a function of air exchange rate)

시 간 교환율		0	2	4	6	8	10	12	18	24	30	36	42	48
		0.1	0.3	0.4	0.5		0.6	0.6	0.8					
$0.1 h^{-1}$		81	30	51	51		32	99	35		0.9	0.9	0.9	0.9
$0.33 h^{-1}$		0	0.4	0.7	0.8	0.9		0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
$0.79 h^{-1}$		0	83	33	62	29		1	1	1	1	1	1	1
		0.7	0.9	0.9	0.9		63	81	97		1	1	1	1
		94	58	91	98		1	1	1					

#### 나. 소개

소개는 방사선에 의한 결정론적 효과와 확률론적 위해가 클 때 이를 피하기 위해 주변의 학교, 공동 대피시설 등으로 일정기간동안 (일주일 이내) 사람이 급박하게 이동하는 행위를 말한다. 대피는 방사능운의 흡입, 방사능운이 통과하는 동안 외부피폭, 지표에 침적된 단반감기 핵종으로부터의 피폭을 줄이는데 있어 효과적이다. 만일 원자력 시설로부터 방사성물질이 환경으로 방출되기 전에 주민이 소개된다면 피폭선량을 줄이는데 있어서 매우 효과적 대응행위가 될 수 있다. 그러나 방사성물질이 방출되는 동안 소개된다면 방사능운으로부터 많은 피폭의 영향을 받을 수 있을 뿐 아니라 대피에 비해 사회적, 심리적 혼란 등의 영향을 많이 줄 수 있다. 소개와 대피의 상대적 효과는 건물의 차폐정도, 사고의 진행과정, 기상조건 등에 따라 다르다.

#### 다. 안정 요오드 복용

안정요오드 복용은 방사성 요오드의 갑상선내 흡취를 줄이기 위한 대응 행위이다. 갑상선 피폭을 최대한 줄이기 위해서는 방사성 요오드가 흡취되기 전에 안정 요오드를 복용하여야 하며, 특히 안정 요오드를 방사성 요오드 흡취되기 6시간 전에 복용한다면 갑상선에 대한 피폭영향은 거의 없다. 만일 안정 요오드의 섭취가 방사성 요오드 흡입시점과 거의 동시에 이루어 진다면 약 90 %의 효과를 얻을 수 있다. 이와 같이 안정 요오드 복용의 효과는 복용의 지연시간에 따라 감소하며, 비록 방사성 요오드를 흡입하였다 하더라도 수시간 내 복용한다면 약 50 % 정도의 효과는 얻을 수 있다.

#### 라. 일시이주

일시이주 (temporary relocation)는 불필요한 높은 피폭을 피하기 위해 수달 또는 그 이상의 기간동안 일시적으로 주민이 이동하는 행위를 말한다.

이 대응행위는 지표에 침적된 방사성물질로부터의 피폭, 재부유 방사성물질의 흡입에 의한 피폭을 방지하는데 효과적이다. 시간이 지남에 따라 지표면 오염은 방사능 붕괴, 강우와 기상효과 등으로 희석되며, 일시이주 기간동안 영구이주 (permanent resettlement)가 필요한지를 결정한다. 토양의 제염과 같은 대책은 일시이주의 기간을 단축시킬 수 있다.

#### 마. 영구이주

영구이주 (permanent resettlement)는 향후 보금자리로 돌아올 것으로 예상치 아니하며 그들의 집 또는 일시 이주한 숙소로부터 새로운 보금자리를 찾아 영구히 이동하는 행위를 말한다. 비록 일시이주가 불필요하다고 판단되더라도 장반감기 핵종으로 지표면의 오염이 높은 경우 영구이주가 필요할 정도로 잔여 선량이 높을 수 있다.

#### 바. 음식물 섭취제한

방사성물질이 농작물에 침적되어 사람이 소비할 음식물이 심각하게 오염되는 경우 소비하지 않고 폐기시키는 행위를 말한다. 오염 음식물의 섭취 금지는 수행하기 용이하고 피폭선량을 줄이는데 매우 효과적이지만 경제적, 사회적 비용이 많이 드는 극단적인 대응행위이다. 농작물의 오염 뿐 아니라 경제적, 사회적 피해를 줄이기 위해 다른 여러 행위가 고려될 수 있는데 주요 행위로는 다음과 같다.

- ① 농작물의 조기 또는 지연후 수확
- ② 음식물의 저장 또는 장기간 저장 가능한 식품으로 가공
- ③ 토양의 제염
- ④ 토양을 뿌리 흡수력이 낮은 농작물 생산에 이용
- ⑤ 가축의 오염 사료를 비오염 사료로 대체

- ⑥ 오염 음식물을 가축의 사료로 이용
- ⑦ 가축의 도살시기 변경
- ⑧ 가축의 배설율을 높이는 화학물질 투여 등

이러한 행위는 모든 여건을 고려한 최적화 분석을 통해 선택될 수 있다.

### 3. 대응행위의 정량적 최적화 보조기법

비상대응의 최적화를 위해 의사결정을 지원하기 위한 정량적 기법으로는 다음과 같다[3.12].

- ① 비용-효능 분석법 (cost-effectiveness analysis)
- ② 비용-편익 분석법 (cost-benefit analysis)
- ③ 다속성 효용 분석법 (multi-attribute utility analysis)
- ④ 다범주 우위 분석법 (multi-criteria outranking analysis)

비용-효능 분석법은 비용과 선량을 각각 x, y 축으로 하여 x-y 평면에 각 방안의 해당 위치를 자리 잡도록 하고 가장 안쪽에 위치하는 점들을 연결하는 비용-효능 곡선을 그린다. 따라서 이 곡선상에 있는 방안이 선정대상이 되며 선택은 비용부담과 피폭부담의 우선 방침에 따라 선정된다. 비용-편익 분석법은 비용부담과 피폭부담의 합이 최소화되는 수준에서 결정하는 기법으로 개인의 피폭부담이 선량에 단순 비례하느냐 아니면 선량준위에 따라 위험의 차이, 심리적 거부감 등까지 고려하여 복잡한 관계를 설정하느냐에 따라 단순 비용-편익분석법 (simple cost-benefit analysis)과 연장 비용-편익 분석법 (extended cost-benefit analysis)으로 나눈다. 다속성 효용 분석법은 각 방안의 인자들에 대해 서열에 해당하는 부분효용 (partial utility)을 설정하고 각 인자에 대해 가중치를 부여하여 가중된 부분 효용의 총합으로 나타내는 총효용 (total utility)이 최대인 것을 선정하는 방법이다. 마지막으로 다범주 우위 분석법은 다속성 효용분석을 적용하기에 불확실성이 큰 보다

모호한 경우에 적용하는 기법으로 인자와 방안들을 둘씩 상호 우위를 비교하여 방안을 선택하는 기법이다.

#### 4. 비상대응의 적용결과

대응행위는 피폭의 영향을 줄이는 이득을 줄 수 있는 반면 개인 생활 자유의 제재, 금전적 손실, 사회적 혼란등과 같은 여러 손실을 초래할 수 있다. 원자력 사고시 비상대응 결정지원을 위해 이미 설명한 바와 같이 여러 정량적 기법이 이용될 수 있는데 경제적 이론에 입각하여 잘 확립되어 있고 가장 오랫동안 널리 이용되고 있는 기법은 비용-편익 분석법으로 대응행위를 수행함에 따른 순이득  $\Delta B$  은 피폭부담 ( $G$ )과 금전비용 ( $S$ )으로 표현된다.

$$\Delta B = G - S = \alpha \Delta H - X \quad (3.13)$$

여기서,

$\alpha$  : 단위 선량당 금전가 ( $\$/(\text{man} \cdot \text{Sv})^{-1}$ )

$\Delta H$  : 대응행위를 취함으로써 피할 수 있는 선량 ( $\text{man} \cdot \text{Sv}$ )

$X$  : 대응행위에 따른 금전비용 ( $\$$ )

인적자본 접근법 (human capital approach)에 근거한 단위 선량당 금전가  $\alpha$  값은 단위 집단선량에 대한 수명손실로부터 산출된다[3.13].

- ① 방사선에 의한 치사암으로부터 수명의 평균손실은 약 13년
- ② 방사선에 의한 치사암에 대한 발생빈도는 약  $5.0 \times 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$
- ③ 비치사암에 대한 위해계수는  $1.0 \times 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$
- ④ 전세대에 걸쳐 심각한 유전적 손상을 줄 위해계수는  $1.3 \times 10^{-2} \text{ per}$

man · Sv

$$\therefore \alpha = (5 + 1 + 1.3) \times 10^{-2} \times 13 \text{ years} \times \text{GNP/population}$$

$\approx 1.0 \text{ GNP/population } (\$/(\text{man} \cdot \text{Sv})^{-1})$

그림 3.15는 비상대응 결정을 위한 흐름도를 보여주며, 비상대응 결정권자는 방사선 방호 이외 심리적 문제와 같은 다른 여러 요소 등을 복합적으로 고려하여 최종적으로 결정하여야 한다. 실제 사고, 실험 및 교훈 등으로부터 얻은 정보는 비상계획 및 수행과정 수정에 큰 도움이 될 수 있다.

다음은 비용-편익 분석법에 근거한 가상사고 시나리오 대한 비상대응 적용 결과를 보여준다. 대응행위에 따른 순이득은 피폭부담과 금전비용만을 고려하여 평가하였으며, 최종 대응행위 결정에서 중요하게 고려해야 하는 정치·사회적 요소와 같이 정성적 속성을 갖는 인자는 현재까지 적절한 모델링 방법이 없기 때문에 고려하지 않았다.

#### 가. 초기 비상대응 적용결과

방사능운이 하루동안 통과하는 동안 피폭자가 옥외에 있을 때 피폭경로별 유효선량은 다음과 같다고 가정하였다.

(주) SF와 RF는 각각 옥내의 차폐계수와 감소계수를 나타냄

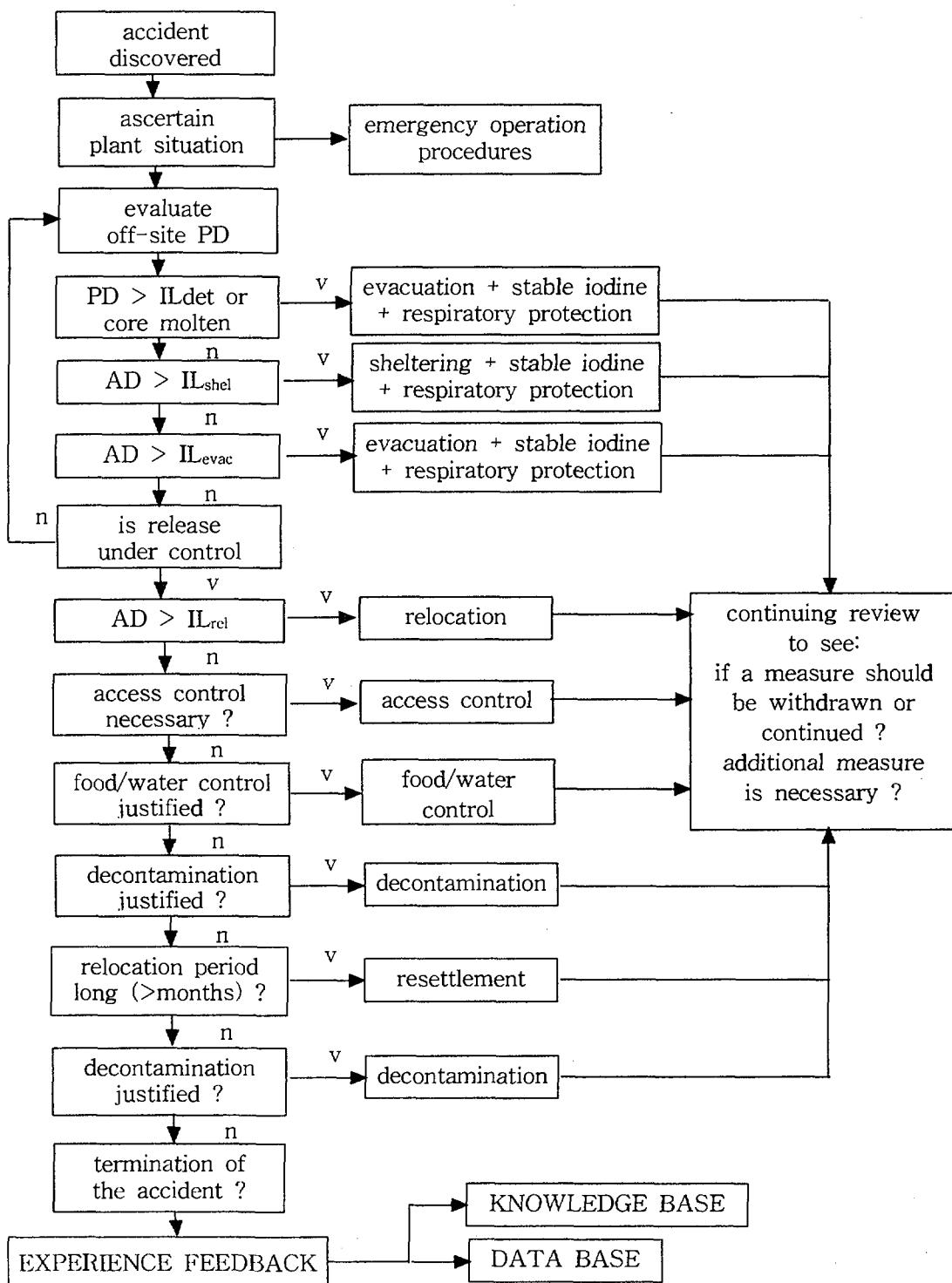


그림 3.15 비상대응 결정을 위한 흐름도  
(Flow chart for the decision-making of countermeasures)

건물의 차폐계수 및 감소계수는 피폭자가 건물 외부에 있을 때 받게 되는 선량에 대한 건물 내부에 있을 때 받게 되는 선량의 비로써 정의된다. 지표에 침적된 방사성 핵종 농도는 침적후 시간에 따라  $t^{0.8}$ 로 감소한다고 가정하였다.

먼저 아무런 대응행위를 취하지 않았을 때 예상선량 (projected dose : PD)은 결정론적 방사선 위해의 발단치 선량 ( $IL_{det}$  : intervention level for deterministic health effects)와 비교되어야 한다. 방사선의 결정론적 인체효과가 가장 민감하게 일어날 수 있는 경우는 임산부에 대한 태아의 기형출산으로 발단치는 약 0.1 Sv (2일 이내)이다. 따라서 이 시나리오에서 PD가  $IL_{det}$  이하이기 때문에 결정론적 방사선 위해는 예상되지 않는다.

두번째 단계로 대피는 소개보다 사회적 영향 등이 적은 대응행위로 먼저 대피에 대한 이득과 손실이 결정되어야 한다. 대피는 하루 또는 이틀 이상은 효과적이지 못하며, 대피와 관련된 비용 ( $X_{shlt}$ )은 단지 국민 생산성의 손실이다. 우리나라의 1인당 GNP를  $10,000 \$ yr^{-1}$ 로 가정할 때, 개입준위는 하루당 평균 개인 소득의 손실 (GNPD)로 나타낼 수 있다.

$$X_{shlt} = GNPD \quad (3.14)$$

$$IL_{shlt} = \frac{X_{shlt}}{\alpha} = \frac{27.5}{10,000} = 2.75 \text{ (mSv d}^{-1}\text{)} \quad (3.15)$$

풀름이 통과하는 동안 대피함으로써 피할 수 있는 선량 (avertable dose : AD)은 다음과 같이 평가될 수 있다.

$$\begin{aligned} AD &= (0.2 \times 10) + (0.75 \times 20) + (0.7 \times 30) \\ &= 38.0 \text{ (mSv d}^{-1}\text{)} \end{aligned} \quad (3.16)$$

따라서 AD가  $IL_{shlt}$ 보다 더 크므로, 즉 이득이 더 많으므로 대피는 비용측 면에서 효과적인 대응행위이다.

세번째 단계로 소개에 대한 이득과 손실이 결정되어야 한다. 소개와 관련된 비용 ( $X_{evac}$ )은 수송비용 ( $X_{tr} \approx 10 \$$ ), 숙박비용 ( $X_{ac} \approx 30 \$ d^{-1}$ ), 하루 또는 이틀간 소득의 손실, 수송중 발생될 수 있는 위험비용 ( $X_{risk,tr}$ )의 합으로 나타낼 수 있다.

$$X_{evac} = X_{tr} + X_{risk,tr} + X_{ac} + GNPD \quad (3.17)$$

수송중 발생될 수 있는 위험비용 ( $X_{risk,tr}$ )은 이동중 발생될 수 있는 위험 ( $R_{tr}$ )의 금전가로 이러한 위험은 방사선에 의해 야기된 것으로 가정하여 다음과 같이 평가될 수 있다.

$$X_{risk,tr} = \frac{R_{tr} \cdot \alpha}{0.073} (\$ (man \cdot d)^{-1}) \quad (3.18)$$

이동중 발생될 수 있는 위험 ( $R_{tr}$ )은  $1.06 \times 10^{-6}$  (person  $\cdot d$ ) $^{-1}$ 으로 가정하였을 때 사고후 10일째까지 소개 (9일간 소개)에 대한 개입준위는 다음과 같이 평가될 수 있다.

$$\begin{aligned} IL_{evac} &= \frac{X_{evac}}{\alpha} = \frac{10 + 0.15 + [9(30 + 27.5)]}{10,000} \\ &= 52.8 \text{ mSv} \end{aligned} \quad (3.19)$$

사고후 10일째까지 소개에 의해 피할 수 있는 선량은 다음과 같이 평가될 수 있다.

$$AD = \sum_t AD(t) = 20 \sum_{t=2}^{10} t^{-0.8} = 51.3 \text{ mSv} \quad (3.20)$$

따라서, 소개는 사고후 9일째 날 (8일동안 소개)까지 비용측면에서 정당화 될 수 있지만, 소개를 종료해야하는 최적시간을 의미하는 것은 아니다.

네번째 단계로 소개를 종료해야 하는 최적시점이 결정되어야 한다. 하루 당 소개된 지역에서 머물기 위해 하루에 요구되는 비용 ( $X_{evac,ret}$ )은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$X_{evac,ret} = X_{ac} + GNPD \quad (3.21)$$

따라서, 소개된 지역으로부터 복귀를 위한 개입준위 ( $IL_{evac,ret}$ )는 다음과 같이 평가될 수 있다.

$$IL_{evac,ret} = \frac{X_{evac,ret}}{\alpha} = \frac{30 + 27.5}{10,000} = 5.75 \text{ (mSv d}^{-1}\text{)} \quad (3.22)$$

소개를 통해 피할 수 있는 선량이 복귀를 위한 개입준위보다 더 작아지는 시간은 사고후 5일째 (4일동안 소개)이며, 소개의 최적시간을 나타낸다. 그림 3.16은 이 사고 시나리오에 대한 대응행위의 그래픽 도식도를 보여준다.

#### 나. 중기 비상대응 적용결과

중기 비상대응책으로는 잠정 이주, 영구 이주, 음식물 섭취제한 등이 있으며, 잠정 이주 및 영구 이주에 대한 대응책의 결정은 초기 대응책 결정과

정과 유사하므로 본 연구에서는 오염 음식물 관련 대응행위의 최적화 적용 결과를 논의하였다.

방사성물질에 의한 음식물의 오염준위는 방호계획을 수립할 때 요구되는 필수정보로 직접 시료를 분석하거나 환경내 핵종이동 모델을 통해 알 수 있다. 우유와 같이 연속적으로 생산되는 음식물의 경우 모델예측에 의한 방법은 신속한 대응행위의 결정 뿐 아니라 장기 대책수립에 있어 보다 효과적이다. 사고시와 같이 단기간에 다량의 방사성물질이 농경지에 침적되는 경우 침적시점에 따른 농업 및 환경조건의 영향으로 환경내 방사성물질의 농도는 침적후 시간에 따라 매우 다양한 변화를 나타낸다. 따라서 환경내 방사성물질의 농도가 항상 일정하다고 가정하는 평형모델 (equilibrium model)로는 사고시 적절하게 대처할 수 없기 때문에 침적시점과 침적후 시간에 따른 방사성물질의 농도의 변화를 해석할 수 있는 동적모델 (dynamic model)이 요구된다. 우리나라의 농업 및 환경특성을 고려한 동적모델 DYNACON[3.14]이 한국원자력연구소에서 개발한 실시간 방사선피폭해석시스템 (FADAS : Following Accident Dose Assessment System)에서 고려되는 여러 피폭경로 중 음식물섭취에 의한 내부피폭을 평가하기 위한 모듈로서 개발된 바 있다. 본 적용 연구에서는 DYNACON과 연계하여 비용-편의 분석법에 근거하여 방사성물질의 목초 침적시 오염된 육류성 식품에 대한 비상대응 방법론을 고안하였으며, 가상사고 시나리오에 대한 적용결과를 논의하였다. 대응행위로는 침적후 첫해에 피폭을 효과적으로 줄일 수 있으면서 수행하기 용이한 섭취금지와 비오염 사료대체를 고려하였다. 오염 음식물에 의한 영향은 피폭집단을 쉽게 입증할 수 없기 때문에 섭취제한으로부터 피할 수 있는 선량은 섭취 제한되는 음식물의 단위 질량당 집단선량으로 평가하였다.

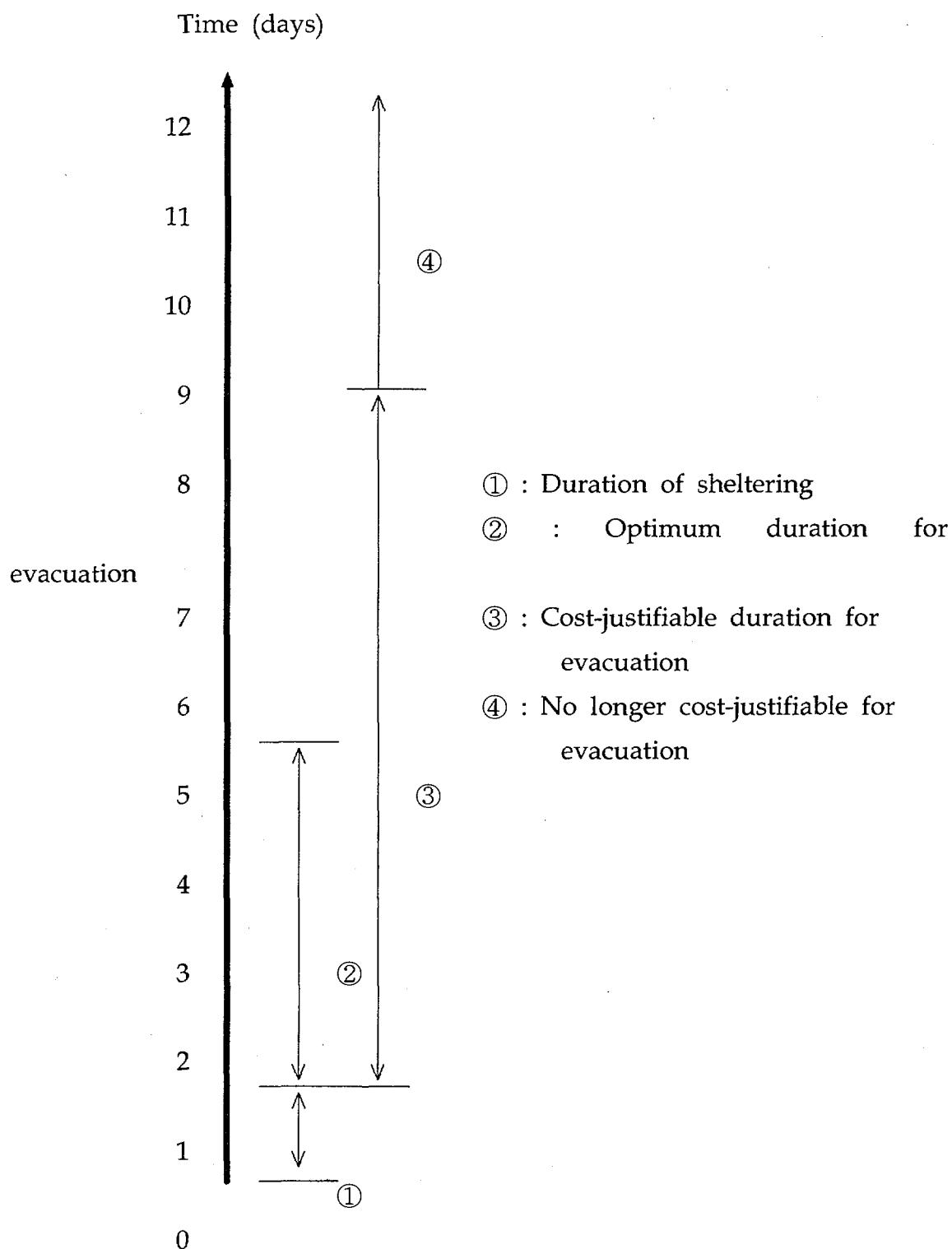


그림 3.16 대응행위의 그래픽 도식도  
 (Graphic presentation of countermeasures)

(1) 육류성 식품내 방사성물질의 농도

DYNACON은 환경구성요소를 구간 (compartment)으로 나누고 구간 간의 핵종이동을 해석하는 구간모델로 구간  $i$ 에서의 방사성물질의 농도  $Q_i$  ( $\text{Bq kg}^{-1}$  또는  $\text{Bq m}^{-2}$ )는 구간  $i$ 로 방사성물질의 유입율과 유출율의 차이로써 표현된다.

$$\frac{dQ_i}{dt} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N \lambda_{ji} Q_j - Q_i \sum_{j=1}^N \lambda_{ij}, \quad i=1, \dots, N \quad (3.23)$$

여기서,

$\lambda_{ij}$  = 구간  $i$ 에서 구간  $j$ 로의 핵종이동율 ( $\text{d}^{-1}$ ),

$N$  = 구간수.

입력자료는 침적시점과 지표위 방사성물질의 농도 ( $\text{Bq m}^{-2}$ )이며, 구간에 대한 방사성물질의 농도변화는 각 구간에 대한 미분방정식의 수치해로부터 얻을 수 있다. 육류성 식품은 오염된 목초와 토양을 섭취함으로써 오염된다. 목초와 토양내 방사성물질의 농도는 방사성물질의 재부유, 기후에 의한 제거, 토양 심층으로의 이동 등 여러 환경적 요인에 의해 시간에 따라 변화한다. 구간에 대해 얻어진 수치해로부터 우유내 방사성물질의 농도  $C(t)$  ( $\text{Bq L}^{-1}$ )는 다음과 같이 해석적으로 얻을 수 있다.

$$C(t) = C(t - \Delta t) e^{-(\lambda_b + \lambda_d) \Delta t} + \sum_k \varepsilon_k Q_k(t) \quad (3.24)$$

여기서,

$\Delta t$  : 계산시간간격 ( $\text{d}$ )

$\lambda_b$  : 생물학적 배설율 ( $= \ln 2 / T_{1/2, b}$ ,  $d^{-1}$ )

$T_{1/2, b}$  : 생물학적 반감기 (d)

$\lambda_d$  : 방사능 붕괴상수 ( $d^{-1}$ )

$\varepsilon_k$  : 가축의 오염 목초와 토양섭취율과 관계하는 인자

식 (3.24)의 오른쪽 첫번째 항은 침적시점부터  $t - \Delta t$  까지 오염된 목초와 토양의 섭취로 인한 동물성식품의 오염 기여분을, 두 번째 항은 시간  $t$ 에서 각각 오염된 목초와 토양의 섭취로 인한 동물성식품의 오염기여분을 나타낸다. 만일 젖소의 방목을 금지하고 오염된 목초대신 비오염사료로 대체하는 경우 육류성식품내 방사성물질의 농도변화는 두번째 항이 제거된 형태로 나타낼 수 있다.

## (2) 최적화 방법론

육류성식품의 오염과 그에 따른 방사능 피폭을 줄이기 위해 다양한 대응행위를 고려할 수 있다. 이를 대응행위 중에는 모든 나라와 모든 상황에서 쉽게 적용할 수 있는 것이 있는 반면 일부는 검증과 적용시 기술적 어려움이 따르는 것도 있다. 주어진 기간동안의 섭취금지는 수행하기에 가장 용이하지만 비용측면에선 비효과적인 대응행위이다. 많은 경우에 비오염 사료대체는 섭취금지보다 비용측면에서 보다 효과적이며 또한 섭취금지 만큼이나 수행하기 용이한 대응행위이다.

대응행위에 의해 피할 수 있는 유효선량 ( $\Delta H$ )은 아무런 행위를 취하지 않았을 때 유효선량 ( $H_0$ )과 대응행위를 수행한 후 잔여선량 ( $H_c$ )의 차로써 나타낼 수 있다. 대응행위의 효율 ( $\eta$ )은 다음 식으로 표현될 수 있으며, 이는 대응행위의 시작시점과 대응기간과 같은 여러 인자에 따라 다양하다.

$$\eta = \frac{\Delta H}{H} = 1 - f \quad (3.25)$$

여기서,

$$f : \text{잔여선량의 분율 } (= \frac{H_c}{H_0})$$

본 연구에서는 오염된 식품은 생활의 변화, 공급과 수요의 불균형없이 같은 가격의 오염되지 않은 식품으로 쉽게 대체될 수 있다고 가정하였다. 침적후 1년동안 한마리의 젖소로부터 생산되는 우유에 근거하여 비오염 사료의 대체에 따른 순이득 ( $\Delta B_s$ )과 우유의 소비 금지로부터 순이득 ( $\Delta B_b$ )은 다음과 같이 모델링될 수 있다.

$$\Delta B_s(\tau) = \alpha \cdot \eta(\tau) \cdot H_0^* - V_f \cdot b_f \cdot \tau \quad (3.26)$$

$$\Delta B_b(\tau) = \alpha \cdot \eta(\tau) \cdot H_0^* - P \cdot b \cdot \tau \quad (3.27)$$

여기서,

$H_0^*$  : 아무런 대응행위를 취하지 않을 경우 소비에 따른 누적

$$\text{선량 } \left( = P \cdot e(50) \cdot \int_0^{1\text{yr}} C(t) dt, \text{ Sv animal}^{-1} \right)$$

$\tau$  : 대응행위 수행기간 (d)

$V_f$  : 비오염 사료로 대체 가능한 사료섭취율 (kg (animal · d)<sup>-1</sup>)

$b_f$  : 비오염 사료의 단가 (\$ kg<sup>-1</sup>)

$b$  : 식품의 단가 (\$ L<sup>-1</sup>)

$P$  : 우유의 생산율 (L (animal · d)<sup>-1</sup>)

$e(50)$  : 예탁실효 선량환산인자 (Sv Bq<sup>-1</sup>)

위 식에서 오른쪽 첫째와 두번째 항은 같은 금전의 단위로 각각 이득(피할 수 있는 선량)과 손실(금전비용)을 나타낸다. 오염된 음식물섭취에 의한 피폭선량은 식품내 농도와 직접적으로 비례하기 때문에 침적후  $t_e$ 부터  $t_h$  동안 비오염 사료대체후 잔여선량( $f_s$ )과 섭취금지후 잔여선량( $f_b$ )은 다음 식으로 평가될 수 있다.

$$f_s(\tau) = \frac{\int_0^{t_e} C(t)dt + \int_{t_e}^{1\text{yr}} C_s(t)dt}{\int_0^{1\text{yr}} C(t)dt} \quad (3.28)$$

$$f_b(\tau) = \frac{\int_0^{1\text{yr}} C(t)dt - \int_{t_e}^{t_h} C(t)dt}{\int_0^{1\text{yr}} C(t)dt} \quad (3.29)$$

여기서,

$C_s(t)$  :비오염사료 대체후 식품내 방사성물질의 농도 ( $\text{Bq L}^{-1}$ )

육류에 대해 비오염 사료은 도살시점까지 대체된다고 가정한다. 또한 비오염 사료대체 시작시점부터 도살시점까지 연장된 기간으로 한마리 가축의 체중의 증가에 따른 이득은 같은 기간동안 대체할 수 없는 사료비용 및 노동비용과 상쇄된다고 가정하였다. 대응행위의 시작시점에서 한마리의 가축 으로부터 생산되는 육류의 소비로 인한 피폭선량에 근거하여, 순이득은 다음 식으로 평가될 수 있다.

$$\Delta B_s(\tau) = \alpha \cdot \eta(\tau) \cdot H(t_e) - V_f \cdot b_f \cdot \tau \quad (3.30)$$

$$\Delta B_b(\tau) = \alpha \cdot H(t_e) - M \cdot b \quad (3.31)$$

여기서,

$H(t_e)$  : 대응행위 시작시점에서 한마리의 가축으로부터 생산

되는 육류의 소비로 인한 폐폭선량

$$(= M \cdot e(50) \cdot C(t_e), \text{Sv animal}^{-1})$$

$M$  : 한마리 가축당 육류의 질량 ( $\text{kg animal}^{-1}$ )

육류생산을 위한 비오염 사료대체후 잔여선량의 분율은 대응행위의 시작시점과 도살시점에서의 육류내 방사성물질의 농도 비로써 표현된다.

$$f_s(\tau) = \frac{C_s(t_h)}{C(t_e)} \quad (3.32)$$

대응행위의 정당화 기간 및 최적기간은 수학적으로 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\text{정당화} : \Delta B(\tau) > 0 \quad (3.33)$$

$$\text{최적화} : \frac{d\Delta B(\tau)}{d\tau} = 0 \quad (3.34)$$

### (3) 결과해석

본 연구에서 고안된 동물성 식품에 대한 비상대응 방법론을 목초의 왕성한 성장시기 (성장기간 : 5월 1일 ~ 9월 30일)인 8월 15일 침적에 대해 적용하였다. 원자력발전소 사고시 중요 핵종인 장반감기 핵종인  $^{137}\text{Cs}$  ( $T_{1/2}=30\text{년}$ ),  $^{90}\text{Sr}$  ( $T_{1/2}=29\text{년}$ )이 고려되었다. 1996년 소비자 물가자료에 근거하여 우유는  $1.0 \$ \ell^{-1}$ , 사료는  $0.2 \$ \text{kg}^{-1}$ 으로 가정하였다. 한마리의 젖소에 대해 비오염 사료로 대체가능한 사료의 양은  $10 \text{ kg d}^{-1}$ , 우유 생산량은 10

$\ell$  d<sup>-1</sup>로 가정하였다. 성인에 대한 선량환산인자는  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{131}\text{I}$ 에 대해 각각  $1.3 \times 10^{-8}$ ,  $2.8 \times 10^{-8}$ ,  $2.2 \times 10^{-8}$  Sv Bq<sup>-1</sup>을 적용하였다[3.15].

그림 3.17은  $^{137}\text{Cs}$ 의 단위 침적후 아무런 대응행위를 취하지 않았을 경우와 10일간의 대응행위 지체된 후 비오염 사료로 20일동안 대체하였을 경우 우유내  $^{137}\text{Cs}$ 의 농도변화를 보여준다. 아무런 대응행위를 취하지 않았을 경우 우유내 방사성물질의 농도는 수일내 최대치에 도달한 후 짧은 생물학적 반감기 ( $T_{1/2,b} = 2$ 일)로 인하여 비교적 빠르게 감소하는 것을 보여준다. 비오염사료가 대체되었을 경우는 오염된 목초와 토양에 의한 우유오염에 대한 기여가 없으므로 우유내 방사성물질은 급격히 감소하며, 이후 젖소의 재방폭으로 우유내 방사성물질의 농도는 약간 증가하는 것을 보여준다.

그림 3.18은 침적후 비오염 사료대체 지연시간과 수행기간의 함수로써 잔류 피폭선량의 분율을 나타낸다.  $^{137}\text{Cs}$  침적의 경우, 40%의 피폭선량을 줄이기 위한 비오염사료 대체기간은 침적후 지연없이 수행하였을 경우는 약 20일이 요구되나 10일의 지연을 가지고 수행되었을 경우에는 약 90일이 요구되었다. 전자는 비용에 대한 피폭저감 측면에서 후자에 비해 약 4.5배 높다는 것을 나타낸다. 그림 3.19는 침적후 섭취금지의 지연시간과 수행기간의 함수로써 잔류 피폭선량의 분율을 나타낸다. 피폭선량을 40% 감소시키기 위한 금지기간은 침적후 지체없이 수행되었을 때는 약 25일이 요구되나 10일의 지연을 가지고 수행되었을 경우에는 약 70일이 요구되었다. 전자는 비용에 대한 피폭저감 측면에서 후자에 비해 약 2.8배가 높았다.  $^{90}\text{Sr}$  침적에 대해서도 비슷한 현상이 발견된다. 결과적으로 모든 핵종에 대해 침적후 신속한 대응은 소요되는 금전비용에 대한 피폭저감 측면에서 매우 중요하다는

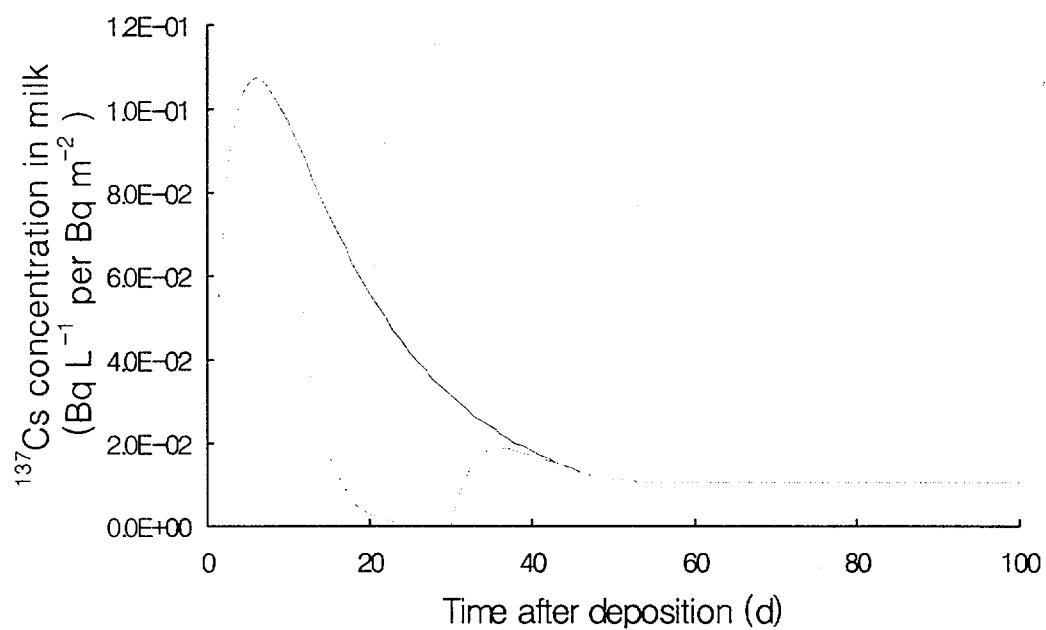
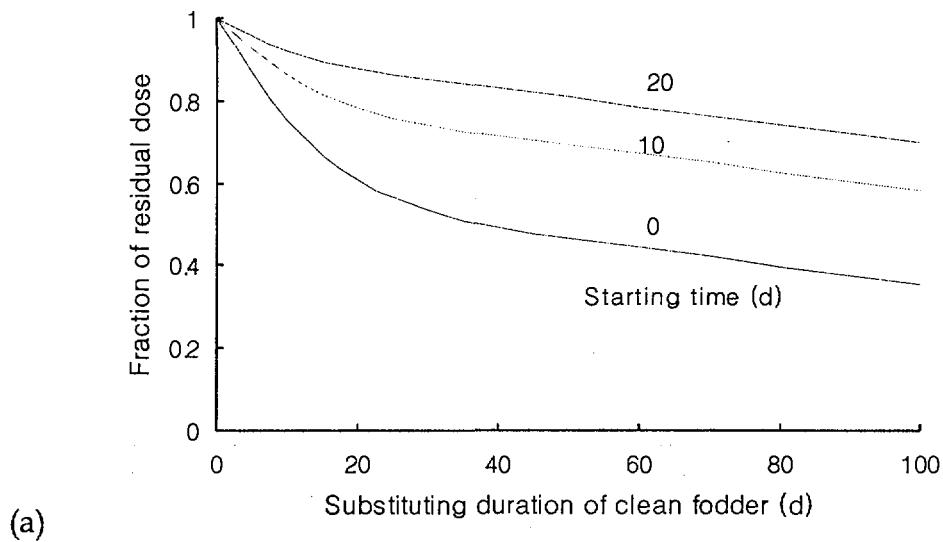
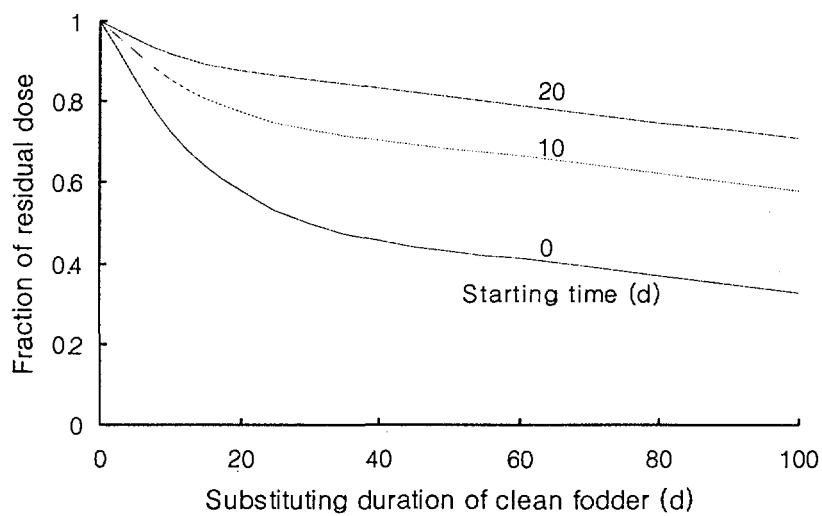


그림 3.17 단위 침적후 비오염사료로 대체하였을 경우와 대체하지 않았을 경우 우유내  $^{137}\text{Cs}$ 의 농도변화 : 실선은 대체하지 않았을 경우, 점선은 대체하였을 경우의 농도를 나타냄

(The variation of  $^{137}\text{Cs}$  concentration in milk with and without the substitution of clean fodder after unit deposition)



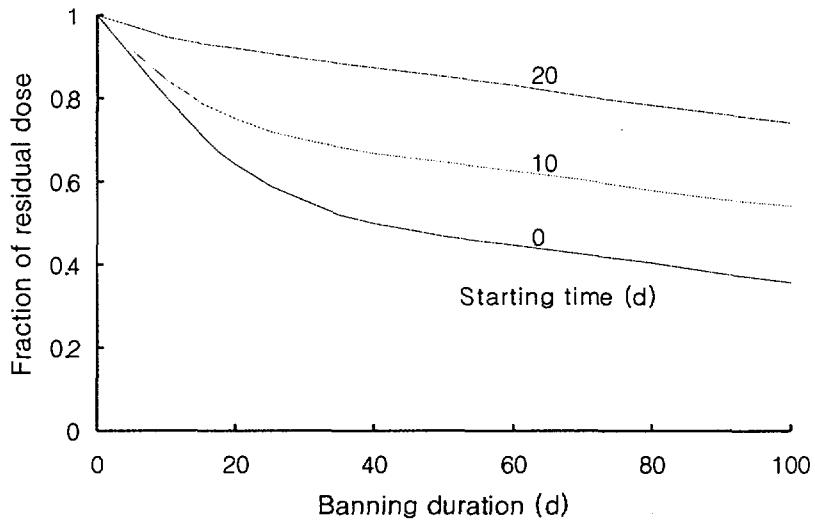
$^{137}\text{Cs}$  침적에 따른 잔여선량의 분율



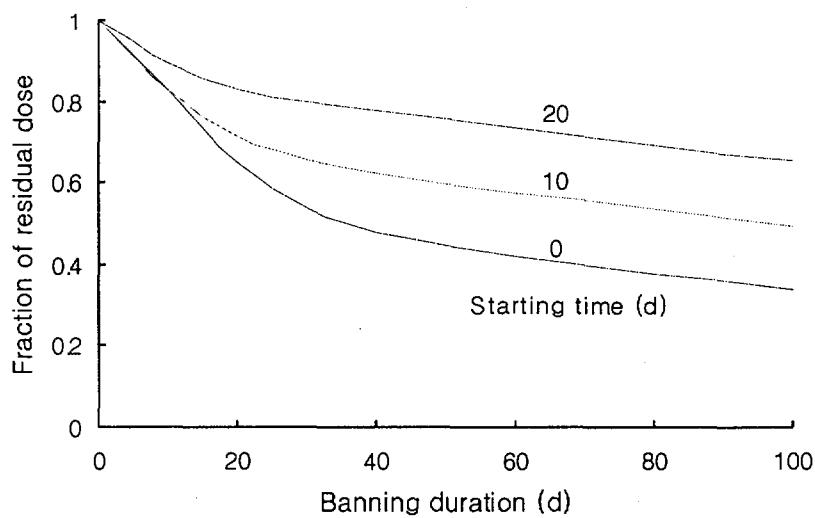
(b)  $^{90}\text{Sr}$  침적에 따른 잔여선량의 분율

그림 3.18 단위 침적후 비오염 사료대체의 시작시점과 수행기간의 함수로써 우유에서 핵종농도에 따른 잔여선량의 분율

(The fraction of residual dose due to radionuclides in milk as a function of the substituting duration and its starting time after the unit deposition)



(a)  $^{137}\text{Cs}$  침적에 따른 잔여선량의 분율



(b)  $^{90}\text{Sr}$  침적에 따른 잔여선량의 분율

그림 3.19 단위 침적후 섭취금지의 시작시점과 수행기간의 합수로써 우유에서 핵종농도에 따른 잔여선량의 분율

(The fraction of residual dose due to radionuclides in milk as a function of the banning duration and its starting time after the unit deposition)

사실을 알 수 있다. 핵종별 피폭저감 효율의 차이는 핵종의 물리적 반감기 및 생물학적 반감기 등의 차이에 기인한다.

표 3.19는 핵종별로  $50 \text{ kBq m}^{-2}$  침적후 우유에 대한 대응행위 지연시간 및 수행기간의 함수로써 순이득을 보여준다. 침적후 1년간의 누적농도 ( $^{137}\text{Cs}$  :  $2.32 \times 10^5 \text{ Bq d L}^{-1}$ ,  $^{90}\text{Sr}$  :  $2.31 \times 10^5 \text{ Bq d L}^{-1}$ )와 대응행위 후 잔류선량의 분율은 두 핵종간에 차이가 없지만  $^{90}\text{Sr}$ 의 경우 상대적으로 높은 선량환산인자로 인해 침적에 대한 순이득은  $^{137}\text{Cs}$  침적에 비해  $^{90}\text{Sr}$  침적의 경우에 보다 높았다. 이러한 사실은  $^{90}\text{Sr}$  침적의 경우에 우유에 대한 대응행위는  $^{137}\text{Cs}$  침적의 경우에 비해 보다 쉽게 정당화될 수 있다는 것을 나타낸다. 신속한 대응행위는 높은 선량감소 효과로 순이득에 있어서 보다 명백하게 높았다.  $^{137}\text{Cs}$  침적후 5일과 10일의 지연후 대응행위를 수행하였을 경우, 최대 순이득을 낳는 대체기간은 약 20일 정도였다. 이 기간은 비오염 사료대체를 위한 최적기간이다. 이 기간 이상의 대체는 대체되는 비오염 사료 비용의 증가로 순이득은 점점 감소하였다. 대체가 정당화될 수 있는 기간은 대응행위의 시작시점이 침적후 5일과 10일인 경우 각각 60일, 40일 정도였다. 결과적으로 대응행위의 정당화 및 최적기간은 대응행위를 빨리 취할수록 증가하였으며, 이는 대응행위에 대한 시간적 여유가 증가한다는 것을 의미한다. 섭취금지는 높은 우유단가로  $^{137}\text{Cs}$  침적에 대해서는 정당화되지 못하였다.  $^{90}\text{Sr}$  침적의 경우 대체를 위한 최적기간은  $^{90}\text{Sr}$ 의 선량감소에 따른 높은 순이득으로  $^{137}\text{Cs}$  침적에 비해 길었다.

표 3.20은 우유에 대해 침적후 10일의 지연시간을 가졌을 때 지표위 방사성물질의 농도와 대응행위 기간의 함수로써 순이득을 보여준다. 두 핵종 모두  $10 \text{ kBq m}^{-2}$ 의 침적에 대해 어떠한 대응행위도 정당화되지 못하지만  $100 \text{ kBq m}^{-2}$  침적에 대해서는 비오염 사료대체는 효과적인 대응행위였다. 방사성물질의 지표농도가 증가함에 따라 최적 대체기간은 점점 길었다.

표 3.19 지표위 방사성물질의 지표농도  $50 \text{ kBq m}^{-2}$ 에 대해 침적후 대응행위의 시작시점과 수행기간의 함수로써 우유에 대한 순이득 (\$)  
 (Net benefit for milk as a function of the duration of the countermeasures and their starting times for radionuclide concentrations on the ground of  $50 \text{ kBq m}^{-2}$ )

핵종	대체 또는 금지기간 (d)	대응행위 시작시점 (d)			
		5		10	
		대체 ( $\Delta B_s$ )	금지 ( $\Delta B_b$ )	대체 ( $\Delta B_s$ )	금지 ( $\Delta B_b$ )
$^{137}\text{Cs}$	10	35.4	-39.4	21.6	-52.4
	20	47.1	-103.3	25.1	-125.3
	30	44.5	-183.1	18.0	-209.0
	40	34.8	-271.4	5.6	-300.9
	50	21.4	-363.8	-7.2	-394.0
	60	8.0	-457.2	-20.6	-487.0
	70	-5.6	-550.6	-34.3	-580.7
	80	-18.4	-643.3	-47.0	-673.5
	90	-32.1	-737.3	-60.4	-767.4
	100	-43.6	-831.3	-74.1	-861.4
$^{90}\text{Sr}$	10	109.0	32.2	75.3	15.4
	20	159.0	24.3	107.1	-14.6
	30	177.9	-23.2	115.0	-75.7
	40	179.3	-94.7	110.6	-153.7
	50	171.6	-177.2	104.2	-238.8
	60	165.9	-263.6	97.1	-325.2
	70	158.2	-350.0	90.8	-412.2
	80	152.4	-437.0	83.7	-498.6
	90	144.7	-524.0	77.3	-585.6
	100	139.0	-611.1	70.3	-672.0

표 3.20 침적후 10일의 대응 자연시간을 가졌을 때 지표위 방사성물질의 농도와 대응행위의 수행기간 함수로써 우유에 대한 순이득 (\$)  
 (Net benefit for milk as a function of the duration and  
 radionuclide concentration on the ground with a 10 d delay after  
 the deposition)

핵종	대체 또는 금지기간 (d)	방사성물질의 지표농도 ( $\text{Bq m}^{-2}$ )			
		10		100	
		대체 ( $\Delta B_s$ )	금지 ( $\Delta B_b$ )	대체 ( $\Delta B_s$ )	금지 ( $\Delta B_b$ )
$^{137}\text{Cs}$	10	-11.7	-90.5	63.2	-4.8
	20	-27.0	-185.1	90.2	-50.6
	30	-44.4	-282.0	96.1	-119.8
	40	-62.9	-380.2	91.1	-201.8
	50	-81.4	-478.8	85.6	-287.9
	60	-100.1	-577.4	78.8	-374.0
	70	-118.9	-676.1	71.5	-416.4
	80	-137.4	-774.7	66.0	-546.9
	90	-156.1	-873.5	59.2	-634.9
	100	-174.8	-972.3	51.9	-722.8
$^{90}\text{Sr}$	10	-0.9	-76.9	170.6	130.8
	20	-10.6	-162.9	254.3	170.8
	30	-25.0	-255.1	290.0	148.6
	40	-41.9	-350.7	301.1	92.6
	50	-59.2	-447.8	308.4	22.4
	60	-76.6	-545.0	314.3	-50.3
	70	-93.8	-642.4	321.5	-124.4
	80	-111.3	-739.7	327.4	-197.2
	90	-128.5	-873.1	334.7	-271.2
	100	-145.9	-934.4	340.6	-344.0

그림 3.20은 단위 침적후 육류 (쇠고기)에서 방사성물질의 농도변화를 보여준다. 우유와 비교하여 육류내 방사성물질의 농도는 상대적으로 긴 생물학적 반감기로 ( $^{137}\text{Cs} : T_{1/2,b} = 50 \text{ d}$ ,  $^{90}\text{Sr} : T_{1/2,b} = 70\text{d}$ ) 어떤 한 시간에서 최대농도를 나타낸 후 매우 느리게 방사성물질의 농도가 감소하였다. 육류에서  $^{137}\text{Cs}$ 의 농도는  $^{90}\text{Sr}$ 의 농도보다 약 100배 높은데 이는 섭취사료로부터 육류로의 핵종전이계수 ( $^{137}\text{Cs} : 4 \times 10^{-2} \text{ d kg}^{-1}$ ,  $^{90}\text{Sr} : 3 \times 10^{-4} \text{ d kg}^{-1}$ )가 훨씬 높기 때문이다. 침적후 5일과 10일에서 육류내  $^{137}\text{Cs}$ 의 농도는 각각 1.32와 2.21  $\text{Bq kg}^{-1}$  per  $\text{Bq m}^{-2}$ 이다. 따라서 1  $\text{Bq kg}^{-1}$  per  $\text{Bq m}^{-2}$ 로 줄이기 위한 대체기간은 침적후 5일과 10일 대체를 시작하였을 때 각각 약 20일과 60일이 요구된다. 전자는 후자에 비해 비용측면에서 약 3배의 효과가 있다는 것을 의미한다. 따라서 우유의 경우와 마찬가지로 육류에 대해서도 신속한 대응행위는 비용측면에서 중요하다는 사실을 알 수 있다.

표 3.21은 50 kBq  $\text{m}^{-2}$  침적후 대응행위의 시작시점과 수행기간의 함수로써 육류에 대한 순이득을 나타냈다. 육류에서  $^{137}\text{Cs}$ 의 상대적으로 높은 농도로  $^{137}\text{Cs}$  침적에 대한 대응행위의 순이득은  $^{90}\text{Sr}$  침적의 경우 훨씬 높았다. 따라서  $^{137}\text{Cs}$  침적의 경우에 있어서 육류에 대한 대응행위는  $^{90}\text{Sr}$  침적의 경우보다 바람직하다. 따라서  $^{137}\text{Cs}$  침적의 경우, 대체는 대부분 효과적인 대응행위인 반면  $^{90}\text{Sr}$  침적의 경우는 일반적으로 정당화될 수 없다.  $^{137}\text{Cs}$  침적의 경우, 섭취금지는 침적후 10일의 자연시간 후 10일동안 비오염 사료대체시보다는 효과적이었다. 그러나 가능하다면 장기간 동안의 대체는 금지보다 높은 순이득을 가져다 준다. 만일 대체시작이 자연된다면 금지보다 큰 이득을 얻기 위해서는 보다 장기간동안의 대체가 요구된다.

표 3.22는 침적후 10일의 대응행위 자연후 방사성물질의 지표농도와 대응기간의 함수로써 육류에 대한 순이득을 보여준다.  $^{137}\text{Cs}$ 의 지표농도가 증가함에 따라 섭취금지보다 높은 순이득을 낼기 위해서는 보다 장기간의 대체

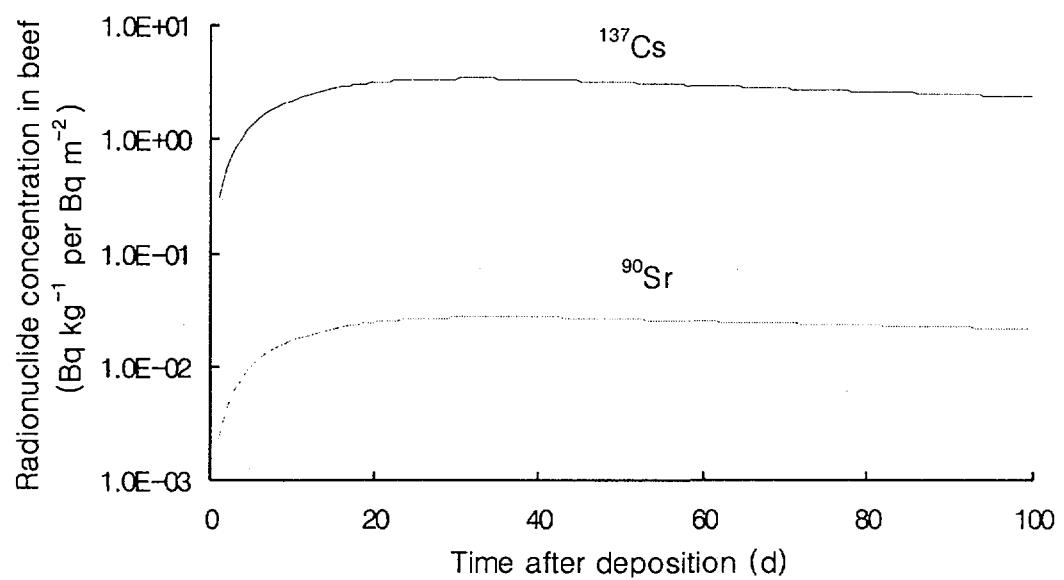


그림 3.20 단위 침적후 육류내 방사성물질의 농도변화  
(The variation of radioactivity in beef after unit deposition)

표 3.21  $50 \text{ kBq m}^{-2}$  침적후 대응행위의 시작시점과 대응기간의 합수로써 육류에 대한 순이득 (\$)

(Net benefit for beef as a function of the duration of the countermeasures and their starting times for the radionuclide concentrations on the ground of  $50 \text{ kBq m}^{-2}$ )

핵종	대체기간 (d)	침적후 대응행위 시작시점 (d)			
		5		10	
		대체 ( $\Delta B_s$ )	금지 ( $\Delta B_b$ )	대체 ( $\Delta B_s$ )	금지 ( $\Delta B_b$ )
$^{137}\text{Cs}$	10	326.8		554.1	
	20	607.3		1,030.7	
	30	854.3		1,451.3	
	40	1,042.1		1,772.7	
	50	1,217.0	-1,030	2,072.6	
	60	1,371.3		2,338.0	710
	70	1,510.2		2,577.5	
	80	1,628.5		2,782.6	
	90	1,733.9		2,966.1	
	100	1,805.9		3,093.6	
$^{90}\text{Sr}$	10	-6.4		-3.7	
	20	-13.3		-8.2	
	30	-20.5		-13.1	
	40	-28.1		-19.0	
	50	-35.8	-3,560	-24.7	
	60	-43.8		-31.1	-3,530
	70	-52.1		-38.0	
	80	-60.4		-44.8	
	90	-69.1		-52.5	
	100	-77.7		-59.8	

74. ՀԱՅՈՒԹԻՒՆԻ ՀԱՅԱՍՏԱՆ

5. 키워드별 문서 목록

古漢子屬本

표 3.22 침적후 10일의 대응이 지연되었을 때 방사성물질의 지표농도와 대응기간의 함수로써 육류에 대한 순이득 (\$)

(Net benefit for beef as a function of the duration of the countermeasures and radionuclide concentration on the ground with a 10 d delay after the deposition)

핵종	대체기간 (d)	방사성물질의 지표농도 ( $\text{Bq m}^{-2}$ )			
		10		100	
		대체 ( $\Delta B_s$ )	금지 ( $\Delta B_b$ )	대체 ( $\Delta B_s$ )	금지 ( $\Delta B_b$ )
<sup>137</sup> Cs	10	102.5		1,118.7	
	20	189.5		2,082.2	
	30	265.3		2,933.7	
	40	321.3		3,587.0	
	50	372.9	-2,783	4,197.2	
	60	417.7		4,738.4	5,020
	70	457.3		5,227.9	
	80	490.0		5,648.4	
	90	518.3		6,025.9	
	100	535.5		6,291.3	
<sup>90</sup> Sr	10	-9.1		3.0	
	20	-18.3		4.5	
	30	-27.6		4.9	
	40	-37.1		3.7	
	50	-46.5	-3,590	2.6	
	60	-56.1		0.1	-3,460
	70	-65.8		-3.2	
	80	-75.5		-6.4	
	90	-85.4		-11.3	
	100	-95.2		-15.5	

## 나. 지리정보시스템의 구성요소

지리정보시스템의 구성 요소는 다음과 같이 네가지로 분류된다.

### (1) 자료 입력

지리정보시스템에 쓰이는 일반적인 자료 입력 시스템에는 다음의 세종류가 있다. 첫째, 키보드 입력은 컴퓨터 앞에서 자료를 키보드를 통해 입력하는 것이며 속성자료는 대개 키보드로 입력된다. 둘째, 디지털이징은 지도를 디지타이저 테이블 위에 올려놓고 커서를 이용하여 지도 위에 표현된 선들을 추적하며, 그 커서의 위치는 수치형태의 좌표 자료로 변환된다. 세째, 스캐닝은 좀 더 자동화된 방법으로 지도를 스캐너가 자동으로 읽어 수치화시킨다.

### (2) 자료 관리

자료관리는 자료의 저장, 수정, 변환등의 작업과정으로서 데이터베이스 관리를 위한 필수사항이며, 지리정보 데이터베이스 시스템은 모든 지리정보를 효과적인 방식으로 저장하여 사용자에게 적시에 적절한 정보를 제공한다. 데이터베이스 시스템이 되기 위하여는 우선 지표상의 각종 지리현상의 특성이 지리정보시스템 구조속에 내포되도록 구체화되어야 한다. 그리고 그러한 특성들을 컴퓨터의 자료 구조속에 적당히 안배할 수 있어야 한다.

### (3) 자료 조작 및 분석

자료의 조작 및 분석기능에는 공간처리 기능, 공간분석 기능, 수치지형분석 기능, 망분석 기능 등으로 크게 분류할 수 있으며, 이 기능들 중 주요한 사항은 표 3.23과 같다.

표 3.23 GIS의 처리 및 분석기능  
 (Manipulation and analysis functions of GIS)

Function	Analysis
Spatial manipulation	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vector/raster conversion</li> <li>• Projection and transformation</li> <li>• Coordination</li> <li>• Proximal or neighborhood analysis</li> <li>• Area, perimeter calculation</li> </ul>
Spatial analysis	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Polygon overlay</li> <li>• Polygon dissolve</li> <li>• Point in polygon</li> <li>• Buffering and corridor</li> <li>• Windowing</li> <li>• Grid cell overlay</li> </ul>
Digital terrain analysis	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Contouring</li> <li>• Slope, aspect calculation</li> <li>• Watershed analysis</li> <li>• Volume calculation</li> <li>• Cross section</li> <li>• 3-D viewing</li> </ul>
Network analysis	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Optimal path selection: route</li> <li>• Flow simulation: allocate</li> <li>• Time, distance districting: district</li> </ul>

#### (4) 자료 출력

분석, 처리된 지리정보를 사용자에게 잘 전달하기 위해서는 표현하고자 하는 주제와 대상 정보의 양을 적당하게 조절하고, 사용자가 필요한 정보를 편리하고 정확하게 판독할 수 있도록 하여야 한다. 일반적으로 출력에 사용되는 도구로는 모니터, 프린터, 플로터 (plotter), EPP (Electrostatic Plotter & Printer) 등이 있다.

#### 다. 지리정보시스템의 자료형태

지리정보시스템에서 사용되는 자료는 공간자료 (spatial data)와 속성자료 (attribute data)로 나누어진다. 공간자료는 지형, 지질, 수계, 도로 등과 같은 각종 특성을 나타내고, 속성자료는 이들 공간자료와 관련된 위치의 명칭, 크기 및 인문적, 사회적 특성을 나타내는 것이다. 이런 공간자료를 표현하는 기술적인 방법에는 래스터 (raster) 방식과 벡터 (vector) 방식, TIN (Triangular Irregular Network) 방식이 있다.

래스터 방식은 지형적 특성이 좌표에 의해 위치가 결정된 셀(cell)들의 집합으로 표현되고, 각 셀은 하나의 특성을 가지고 독립적으로 저장된다.

벡터 방식은 지형특성이 세개의 주 지형 요소인 점, 선, 면으로서 표현된다. 예로서 지도위에 표시된 집은 하나의 X-Y 좌표로 구성된 점 자료이며, 강과 같은 선형자료는 시점의 X-Y 좌표와 종점의 X-Y 좌표로 구성된다. 또한 숲과 같은 면자료는 다수의 X-Y 좌표로 정의되며 그들 각각에 대하여 속성자료 (집, 강, 숲 등)도 표현된다. 본 연구에서는 주로 벡터 방식을 사용하였다.

TIN 방식은 지형 자료를 벡터형태로 나타내는 자료 모델이며, 지형 표면을 서로 연결된 삼각형의 면의 집합으로 나타낸다. 세 꼭지점의 각각

에 대해 X-Y 좌표 (지리적 위치값)과 Z 좌표 (높이) 값이 기록되고, 각각의 삼각형에 대해 속성자료 표가 연결되어 있다.

#### 라. 데이터베이스 기본설계 및 구축제안

지리정보시스템 내에서 복잡하고 방대한 자료들을 관리하기 위한 데이터베이스 (database) 설계 및 구축은 아주 중요하다.

##### (1) 데이터베이스 및 관리시스템

데이터베이스는 전산화된 기록 보존 시스템으로 여러 파일내에 수록되어 있는 자료들로 구성되어 있다. 그 목적은 자료들을 유지하며 동시에 그들을 사용자 요구에 맞게 조작, 이용하게 하는 시스템이다. 즉, 공통의 목적을 지원하도록 서로간에 관련이 있는 자료 파일의 통합된 모음이다. 이에 비해 데이터베이스 관리시스템 (database management system)은 데이터베이스에서 자료를 저장하고 검색하고, 관리하는 소프트웨어를 일컫는다.

##### (2) 자료 모델

데이터베이스 관리시스템에서 하나 또는 그 이상의 파일들로부터 쉽게 자료에 접근 및 호출할 수 있게 하기 위해서는, 데이터베이스를 구성하고 있는 자료들이 반드시 어떤 종류의 구조 (structure), 조직 (organization)으로 이루어져 있어야 한다. 그러한 자료 모델로는 계층 (hierarchical) 자료 모델, 망 (network) 자료 모델, 관계 (relational) 자료 모델 등이 있다

###### (가) 계층 자료 모델

이 모델은 계층적으로 되어있는 파일들간의 관계를 정의한 것이다. 계층적이라는 것은 파일들이 부모와 자식의 관계처럼 수직적인 형태로

서, 포함관계 또는 일 대 다수 관계로 연결되어 있다는 뜻이다.

이 모델은 쉽게 이해되고 쉽게 변경된다는 장점을 가지고 있지만, 같은 수준 (level)의 속성이나 기록 사이에 서로 연관시킬 수 없고, 또한 큰 색인 파일이 필요하며 어떤 특정값이 여러번 반복하여 수록되어야 하기 때문에 자료가 저장될 수 있는 여분이 필요하여 저장과 호출비용이 증가하게 된다는 단점이 있다.

#### (나) 망 자료 모델

이 모델은 한 파일이 다수의 상위 파일을 가질 수 있도록 망적으로 구성되어 있다. 망 자료 모델은 자료의 중복을 막아주고 가능한 정보를 효율적으로 이용할 수 있게 하므로 상관성이나 연결성을 미리 정의해야 할 때 유용하다. 단점은 지시자 (pointer)를 유지하기 위한 부피공간 때문에 데 이타베이스가 커진다는 점이다.

#### (다) 관계 자료 모델

이 모델은 다른 모델에서처럼 파일들이 서로 부모와 자식의 관계가 없다. 이 모델은 구조가 매우 유연하고 논리 (Boolean logic)나 수학적 연산을 이용하면 모든 질문에 답할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 또한 다른 종류의 자료를 연구, 결합하고 비교할 수 있으며, 자료의 첨가와 제거가 매우 쉽다. 그러나, 관계 데이터베이스의 단점은 특별한 관계를 만족시켜주는 자료를 찾기 위해 파일들을 순차적으로 검색해야 하기 때문에 검색되는 데이터베이스가 클 경우 많은 시간이 소요된다.

### (3) 데이터베이스 설계

본 연구에서는 자료의 공간적 성분을 관리하기 위한 위상적 자료 구

조 (topological data structure) 즉 지상요소 (terrain element)의 위치와 그들 사이의 위상적 관계를 가지며, 자료모델의 비공간적 성분을 관리하기 위한 관계적 자료 구조 즉 지상요소의 속성을 가질 것을 제안한다. 여기서 위상학 (topology)이란 공간 관계를 정의하는데 쓰이는 수학적 방법으로서 지도에 대해서는 특정 사이의 연결을 정의하고, 근접한 면들을 확인하여, 면적 같은 하나의 특징을 다른 특징 (예: 선 등)들의 집합으로 정의한다.

자료형태에 있어 벡터 방식을 사용하는 것이 확대 및 축소등의 자료변형시 유리하므로 채택한다. 또한, 자료는 도형부분과 속성부분으로 나누어지며, 공간적 자료는 위치 (location), 크기 (dimension), 형태 (shape)의 기본 위상적 특징을 갖는 점, 선, 면으로 위치와 위상을 나타내고, 비공간적 자료는 점, 선, 면들의 필요한 속성정보들을 나타내며, 일반 데이터베이스에서와 같이 입력, 저장, 조작, 검색, 출력 등이 가능하도록 한다. 이러한 자료들은 서로 데이터베이스내에서 연결되어진다.

그리고 기본 저장단위를 사용하여 계층 디렉토리 구조에서 자료파일을 관리한다. 기본 층 (layer)은 도로, 토지구획, 토양 같은 하나의 자료 층 즉 분리된 지도에 해당되고, 주어진 지역에서 지형에 대한 위치 자료와 주제 속성 (thermatic attributes)을 모두 포함한다. 따라서 주제도를 다음과 같이 분류할 것을 제안한다.

#### (가) source map

방사선원에 대한 위치 및 종류, 그리고 환경에 방출된 양을 표시할 수 있어야 한다.

#### (나) dispersion map

방사성물질의 확산과정을 외삽법을 사용하여 등치선을 사용하여 실

시간으로 표시할 수 있고 dynamic cartography (animation)으로 저장되어서 재현할 수 있어야 한다.

#### (다) exposure map

환경에 방출되어진 방사성물질의 누출에 대한 계산결과를 표시할 수 있어야 한다. 또한 누적 방사선량에 대해서 연속적으로 개선이 가능하여야 한다.

#### (라) risk map

누출된 방사성물질에 의한 사람의 부상 및 사고를 표시할 수 있어야 한다. 또한 risk map은 개별 방사선원에 대해서 합산을 통하여 총체적으로 평가할 수 있어야 한다.

DB 내에서 지형은 단순한 점, 선, 면으로 저장된다. 이런 지형에 대한 위치 자료는 연속적인 X-Y 좌표에 의해 명시적으로, 혹은 다른 특성들의 조합에 의해 위상적으로 나타낼 수 있다. 이름, 심볼, 분류, 그외 다른 속성들은 지형 속성 표 (Feature Attribute Table : FAT)에 따로 기록된다. 이 자료파일은 지형에 대해 모든 주제 자료 혹은 자료파일과 관계된 참조 주제 (reference thematic) 자료를 갖는다. 면에 대한 주제 자료는 면 속성표 (Polygon Attribute Table : PAT)에 저장된다. 그리고 선에 대한 주제 자료는 선 속성표 (Arc Attribute Table : AAT)에, 그리고 점에 대한 주제 자료는 점 속성표 (Point Attribute Table : PAT)에 각각 저장된다.

### (4) 데이터베이스 구축 과정

본 연구를 위하여 작성된 지형에 대한 초기 자료충들은 그들 각각에 대하여 국립지리원에서 발간된 수치지도를 이용하여 지형의 벡터라이징

(vectorizing)을 실시한다.

다음에 이 벡터방식의 파일을 DBMS에서의 DB 구조로 변환한 후, 위상관계를 형성시킨다. 그리고 선 혹은 면이 제대로 이어졌는가에 대한 검사를 하며 수정을 한다. 다음에 모든 자료들을 기본도 위의 자리 좌표계에 일치시키고 TM (Transverse Mercator Projection) 도법에 등록시키는 투영(projection)과 변환 (transformation) 작업을 수행한다. 마지막으로 각 자료층에 대한 지형, 인구밀도, 차폐물구조, 가옥 등의 속성값들이 입력되어 데이터베이스를 구축시킨다. 등고, 수계, 도로 등을 포함하는 기본도의 입력은 1/50,000 수치 지형도를 이용하며, 아울러 좁은 지역을 대상으로 할 시에는 1/5,000 수치 지형도를 사용하면 충분하다. 사회환경자료는 통계청의 자료를 사용하여 입력하도록 한다. 이렇게 처리된 수치지형자료와 사회환경자료는 지리정보시스템의 자료구조에 맞게 변환된 후, 데이터베이스 내에서 GIS를 위한 자료층군으로 형성되어야 한다.

## 제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

### 제 1 절 연구개발목표 달성도

본 연구의 목표달성도 평가의 기준인 평가착안점으로 아래의 항목들이 제시되었다.

- 추적자 방출실험 수행
- 실험결과와 FADAS 모사결과의 비교
- 부지 환경자료 조사 및 관측
- 부지 확산특성 분석
- 국가 방재체제 CARE 기능지원
- 비상대응 효과분석 관련 고유자료 수집 · 분석

중장기 연구를 통해 개발된 실시간 방사선 피폭해석시스템 FADAS의 부지 적용타당성 검증과 부지 환경특성의 반영을 위하여 울진과 월성 원전부지에서 야외확산 실증실험을 수행하였다. 이들 원전부지는 모두 해안가에 위치하고 있으며 주변에 크고 작은 산들로 둘러쌓여 있으므로 오염물질의 이동 분석시 부지환경의 영향을 주의 깊게 분석할 필요가 있다. 확산실험시 추적자 가스로 SF<sub>6</sub>를 사용하였으며 방출점을 중심으로 반경 10 km까지의 농도분포를 측정·해석하였다.

추적자 포집을 위해 100개의 자동 연속식포집기를 자체 설계·제작하여 야외실험에 요구되는 인력을 크게 줄일 수 있었다. FADAS를 이용한 모사결과의 정확도 향상을 위해서는 추적자 방출 및 포집 시간 동안의 기상자료 관측이 중요하다. 울진과 월성부지에서의 실험에서는 SODAR, Airsonde, 이동식 기상관측장비 등을 이용하여 부지 주변의 자료를 관측하였다. 이들 자료를 종합하여 난류장 모수화 및 FADAS 모델 입력자료로 활용하였다. 실험 결

과와 모사결과는 전반적으로 약 3에서 5배 이내의 범위에서 잘 일치하였다. 울진과 월성부지 모두에서 확산의 중심선과 확산폭이 대체로 일치하고 있다. 월성의 경우 가장 근접한 포집선상에서의 모사결과가 측정값의 약 1/5 정도를 나타냈는데 이는 약 200 m 깊이의 골짜기가 존재하여 추적자중 많은 양이 계곡에 정체되었기 때문으로 추정된다. 이같은 결과는 수치모델을 이용한 모사계산 만으로는 알 수 없는 사항으로 지형이 복잡한 경우에는 부지확산실험을 통한 특성분석이 더욱 필요함을 말해준다. FADAS는 현재 국가 방사능방재시스템 CARE에 채택되어 방사성물질의 확산과 피폭평가 기능을 제공하고 있다. 본 연구를 통해 울진과 월성에서의 확산실험을 통해 FADAS의 부지적용 타당성을 검증하였다. 각 부지주변 지형 및 사회환경 D/B를 구축하여 CARE내에서 부지의 환경을 반영한 FADAS 운용이 가능하도록 하였다.

일반인에 대한 방사선 방호원칙 (행위의 정당화, 방호의 최적화)에 입각하여 음식물오염에 대해 효과적인 중·장기적 방사선 방호계획 수립에 효과적인 기법을 비용 편익분석법에 근거하여 모델화하였다. 침적시점 (사고시점)에 따른 음식물내 방사성물질의 농도변화는 개발된 동적섭식경로 모델 DYNACON으로부터 예측하였다. 적용결과 특정 오염에 대한 대응책의 정당화와 최적화를 정량적으로 분석할 수 있었다.

방사선 비상시 피해를 최소화하기 위해 적용되는 비상대응책의 효과는 주변의 기상, 지형 등의 지리환경 뿐 아니라 인구분포, 섭식형태, 물가 등의 사회환경에도 영향을 받는다. 원자력사고시 방사선피해를 효과적으로 줄일 수 있는 대응책의 종류와 특성을 분석하였다. 대피, 소개, 이주, 안정옥소제복용 및 음식물 섭취금지 등의 대응책에 대하여 피폭 저감효과, 비상대응 행위의 용이성, 사회·경제적 피해 등을 분석하였다. 이들 대응책의 효과를 정량적으로 분석하기 위한 기법으로 비용효능분석 (cost-effectiveness analysis), 비용편익분석 (cost-benefit analysis), 다속성효용분석 (multi-attribute

utility analysis) 및 다범주우위분석 (multi-criteria outranking analysis) 기법이 고려되었다. 이들 기법 중에서 적용이 용이하고 가장 널리 사용되는 비용 편의분석법을 이용하였다. 방사선 비상시 대응책의 효과분석을 위해서는 부지주변의 인구, 농축산물 생산량 분포 등 실시간 피폭평가 시 요구되는 자료를 수집하여 부지특성을 반영한 실시간 피폭평가시 활용될 수 있도록 하였다. 또한 비상시 건축물에 의한 차폐효과 분석을 위해 주거형태 구성비, 주거형태의 건축재료에 따른 분포 그리고 외국의 건축물 차폐특성 연구 사례를 분석하였다.

## 제 2 절 대외기여도

주변국가 및 국내에서의 원자력시설 이용이 증가하고 있는 현실을 감안할 때, 방사성물질의 누출사고를 대비한 국가 차원의 비상대응시스템의 구축은 원자력 환경안전성 확보차원에서 매우 중요하다. 원자력시설의 재해발생시 실시간 방사선 피폭해석시스템은 방사성물질에 의한 주민의 피폭과 재산피해를 신속하게 예측함으로써 효과적인 비상대응책 결정을 지원한다. 따라서 실시간 피폭해석 시스템의 개발은 원자력시설의 재해발생시, 국가의 비상 대응능력 확보와 원전의 비상대응시설 구축에 필수적이라 할 수 있다. 본 연구를 통해 개발한 실시간 방사선 피폭해석시스템 FADAS는 현재 CRAE시스템의 주요 기능인 방사성물질의 이동 및 피폭선량 평가를 수행하기 위해 활용되고 있다. 따라서 본 연구를 통해 개발되고 축적된 실시간 방사선 피폭해석 기술은 국내 방사선 비상대응능력 확보 및 선진화에 크게 기여하고 있다고 사료된다.

부지 야외확산실험 결과는 한국전력을 비롯한 국내 산업체의 환경관련 연구개발에 기여하였다. 지난 98년에 수행하였던 한국전력의 월성부지 방사선 영향평가 모델개발의 결과검증을 위해 추적자 방출실험 결과를 한국전력에

서 활용하였다. 또한 산업안전 공단에서 추진중인 화학 위험물질 사고 피해 예측시스템 개발의 계획 단계에서 본 연구를 통해 축적된 피해예측 모델 개발 및 실험을 통한 검증관련 기술을 제공하여 효율적인 계획수립에 활용하기도 하였다.

산업이 발달하고 고도화되면서 산업발달에 따른 이익과 함께 자연과 환경에 위협이 나타나기도 한다. 가스의 확대이용이 국민의 생활을 깨끗하고 편리하게 해주고 있으나 가스폭발 사고시 주변 환경과 주민에게 큰 위협이 될 수도 있다. 1980년대 이전까지는 아무런 문제없이 좋은 에너지원으로 사용되던 화석연료가 세계 기후변화를 주도하는 이산화탄소 발생의 주범이라는 사실은 잘 알려져있다. 화학공업단지에서 발생하는 해로운 폐기물이 주변 자연을 황폐화시키고 주민의 건강에 위협이 되기도 한다.

환경보전과 주민안전에 대한 의식이 강화되어 자연의 훼손과 자신들의 안전을 담보로 한 무조건적인 산업발전은 원하지 않게 되었다. 새로운 산업을 추진할 때는 법으로 정한 절차를 따라 환경영향평가를 실시한 후 주변의 자연과 인체에 악 영향을 미치지 않는 경우에 한하여 건설과 운영을 허가하고 있다. 환경영향평가를 수행하기 위해서는 기체, 액체 및 고체 형태의 모든 유형의 오염 방출물에 의한 영향을 분석하여야 한다. 이를 오염물 형태중 기체 방출물의 경우가 그 피해범위가 가장 넓고 피해 분석방법 또한 매우 어렵다고 알려져있다. 대기중으로 누출된 오염원은 지형과 기상상태에 따라서 대기중 이동이 결정되고 주변 자연과 주민에게 피해를 미치게 된다.

본 연구를 통해 개발한 실시간 피폭해석 기술은 방사성물질을 대상으로 대상으로 환경 특성을 고려하여 대기중 이동 및 피해예측을 위한 기술이다. 오염원의 성질이 서로 다르다 할지라도 대기중으로 누출된 오염물질의 이동 및 피해 예측 기술은 기본적으로 같다. 개발된 실시간 방사선피폭해석 시스템과 야외확산 실증실험기술은 방사성물질 이외의 다른 오염원의 환경영향 평가기술 향상에 크게 기여하고 있다고 생각한다.

## 제 5 장 연구개발결과의 활용계획

### 제 1 절 국내외 원자력 사고대응 기술개발

국내 원전사고를 대비하여 개발된 실시간 방사선피폭해석시스템 FADAS의 개발경험과 결과물을 활용하여 국외 원전사고를 대비한 광역 방사선 피폭해석체계를 개발하였다. 개발된 시스템은 현재 국가 방사능방재 전산기술지원 천산망인 CARE에 채택되어 국내 원자력시설의 만일의 사고를 대비한 대응책 결정지원 시스템의 중요 기능을 제공한다. 개발된 시스템의 부지 적용타당성을 검증하기 위하여 울진과 월성에서 추적자방출을 통한 야외확산 실험을 수행하였다. 실험결과와 FADAS 모사결과의 비교분석을 통해 개발된 FADAS의 적용타당성을 검증할 수 있었다. 또한 부지환경 특성이 오염물질의 이동과 확산에 크게 영향을 주고 있음을 알 수 있었다. 본 연구를 통해서는 확산실험시 소요되는 예산의 제약으로 계절적 변화와 기후조건의 변화에 따른 영향을 충분히 반영할 수 있을 정도의 다양한 조건에서의 실험이 이루어지지 못하였다. 따라서 각 원전 부지별로 다양한 계절과 기후조건에 따른 지속적인 추적자 방출실험이 요구된다.

본 연구를 통해 개발된 실시간 방사선피폭해석 시스템 FADAS는 현재는 국내 원전에서의 사고를 대비한 원전주변 수십 km 범위의 영역에서의 오염 물질의 확산 및 피폭을 평가할 수 있다. 그러나 체르노빌 원전사고의 예에서 보았듯이 만일의 경우 방사성물질이 환경으로 누출되면 기류를 타고 주변국 가 뿐 아니라 수천 km까지 멀리 떨어진 지역에까지 방사성물질이 이동될 수 있다. 그러므로 현재는 국내 원전을 대상으로 구축된 국가 방재시스템도 국외 원전사고를 대비한 광역평가를 위한 보완작업이 필요하다. 광역평가를 수행할 때 가장 중요한 기능은 국지평가에서와 같이 방사성물질의 확산이다.

비상대응체제는 비상시 활용되어야 하는 시스템이므로 활용의 단순성이 요구된다. 따라서 CARE 체제내에서 국지평가와 광 역평가를 동시에 할 수 있어야 한다. 즉 오염물질의 이동 및 확산 범위가 국지평가 범위를 벗어나게 되면 자동적으로 관련 정보를 광역평가모델로 이관하여 광역평가를 할 수 있도록 개발되어야 한다. 개발된 국내 원전 사고를 대비한 실시간 피폭해석 기술의 개발경험을 활용하여 장거리 확산 및 피폭해석 시스템을 개발할 계획이다. 현재 이 과제는 국가 원자력 중장기계획 수립시 그 필요성이 인정되어 중장기 연구계획에 그 내용이 반영되어 있다. 이 과제의 추진시 본 연구를 통해 습득한 관련 기술과 경험은 국내 방사선 사고대응기술의 자립 뿐 아니라 원전 개도국의 기술개발 지원에도 크게 기여할 것으로 판단된다.

## 제 2 절 원자력 및 일반 산업시설의 환경영향평가

산업시설의 가동으로 배출되는 오염물질의 주변 환경에 미치는 영향을 평가하는 일은 매우 중요하다. 신뢰할 수 있는 환경영향평가 결과를 얻기 위해서 가장 중요한 것은 대기중으로 누출된 오염물질의 이동과 확산을 시설주변의 환경조건을 고려하여 실질적으로 평가하는 일이다. 수치기법을 이용하여 개발된 모델들은 다양한 환경조건을 고려할 수 있도록 개발되지만 환경조건이 다양하기 때문에 부지특성 환경조건을 실질적으로 반영하는 일은 매우 중요하다.

본 연구를 통해 수행한 추적자 방출 야외확산 실증실험은 부지환경 특성을 분석하고 적용되는 수치 예측모델의 적용타당성 검증을 위해 매우 유용하다. 현재까지는 원자력 부지별로 한 계절에 두 차례 정도의 추적자 방출실험을 수행해 오고 있다. 본 연구기간 동안에는 울진과 월성원전 부지에서 추적자 방출 야외확산 실증실험을 반경 10 km 범위의 영역에서 실시하였다. 이들 실험결과는 국내 원전부지에 적용되는 환경영향평가 모델이나 비상시 피폭

해석모델의 검증연구에 유용하게 활용될 수 있다. 실제로 1998년도에는 한전에서 수행한 “월성원전 지역에 적합한 환경방사선 영향평가모델 개발” 연구의 결과검증을 위하여 본 실험의 분석결과가 이용된 바 있다[5.1].

본 연구에서는 추적자 방출실험에 소요되는 경비의 제약으로 한 부지에서 한 두차례의 추적자 방출실험만을 수행해 왔다. 그런데 환경조건으로 중요한 인자는 지형조건과 함께 기상조건이 매우 큰 영향을 미치므로 다양한 기상 조건에서의 실험을 통해 기상조건과 지형조건의 종합적인 영향 분석이 필요하다. 계절과 기후조건에 따른 확산특성 분석을 위해서는 한 부지에서 최소 2년 이상의 장기간 지속적인 추적자 방출실험이 요구된다.

개발된 추적자 방출실험 및 확산피해예측 기술은 일반 산업시설에서 배출되는 오염물질의 확산과 피해예측 그리고 군사 작전시 화학 및 방사능전 발발시 유해물질의 이동경로 예측 및 작전지원 등에도 활용될 수 있다. 특히 국방분야의 경우 화학 및 방사능전 발발시 군배치 및 민간인 보호조치 등의 대응책 결정 등은 본 연구를 통해 개발중인 비상대응 효과분석 기법을 효율적으로 활용할 수 있을 것이다.

## 참 고 문 헌

- 1.1 Govaerts, P., "Local Scale Decision Support Systems - Actual Situation and Trends for the Future", *Radiation Prot. Dosi.*, 50, 141-144(1993).
- 1.2 Park, W. J., K. W. Nam, S. Y. Jang, and S. H. Park, "Development of Korean Decision Making Support System for a Nuclear Emergency", *Radiation Prot. Dosi.* 73, 103-106(1997).
- 1.3 한문희, 김은한 외, "실시간 방사선 폐폭해석시스템구성연구", KAERI/RR-1737/96(1997).
- 2.1 M. H. Dickerson, P. H. Gudiksen, and T. J. Sullivan, "The Atmospheric Release Advisory Capability", Lawrence Livermore Laboratory Report, UCRL-52802-83(1983).
- 2.2 Chino, M., H. Ishikawa and H. Yamazawa, "SPEEDI and WSPEEDI : Japanese Emergency Response Systems to Predict Radiological Impacts in Local and Worldwide Areas due to a Nuclear Accident", *Radiation Prot. Dosi.*, 50, 145-152(1993).
- 2.3 Ehrhardt, J., "The RODOS system: Decision Support System for Off-Site Emergency Management in Europe", *Radiation Prot. Dosi.*, 73, 35-40(1997).
- 2.4 Lagomarsino, R. J., et al., The Across North America Tracer Experiment (ANATEX), ELM-523, US DOE, 1991.
- 2.5 Allwine, K. J., Atmospheric Dispersion in Mountain Valleys and Basins, PNL-7922, Pacific Northwest Lab., 1992.
- 2.6 Thomas P., et al., Mesoscale Atmospheric Dispersion Experiments Using Tracer and Tetroons Simultaneously at Kernforschungszentrum Karlsruhe, KfK-4147, 1990.

- 2.7 Desiato, F., A Dispersion Model Evaluation Study for Real-Time Application in Complex Terrain, Jour. of Applied Meteo., Vol.30, 1991.
- 2.8 Vanderborght, B., The oresund Experiments, Nuclear Energy Research Center, Report no. 86/11, 1986.
- 2.9 Nielson, M. and Mikkelsen, T., Micro-Meteorological Data Report from the Guardo Dispersion Experiments in Complex Terrain, Riso national Lab., Riso-R-634(EN), 1992
- 2.10 Chino, M., et al., Experimental Verification Study for System for Prediction of Environmental Emergency Dose Information, J. of Nuclear Science and Tech. 1989.
- 3.1 Randerson D. Atmospheric Science and Power Production, USDOE, p 162,(1984).
- 3.2 Panofsky, H. A. and J. A. Dutton Atmospheric Turbulence, John Wiley & Sons, p133-137,(1984).
- 3.3 Stull, R. B. An Introduction to Boundary Layer Meteorology, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, p 211,(1989).
- 3.4 울진 3, 4호기 최종안전성분석보고서, 한국전력공사, 1994.
- 3.5 월성 3, 4호기 예비안전성분석보고서, 한국전력공사, 1993.
- 3.6 Jensen, P. H., Calculated shield factors for selected European houses, Riso National Lab., Riso-M-2474, Denmark (1984).
- 3.7 통계청, 통계연보 (1990).
- 3.8 Annals of the ICRP, 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection on Radiological Protection, ICRP Publication 60 (1991).

- 3.9 Ole Walmod-Larsen, Intervention Principles and Levels in the Event of a Nuclear Accident : Final Report of the Nordic Nuclear Safety Research Project BER-3, Riso National Lab., Denmark (1994).
- 3.10 Yoshiyuki Nakashima, et al., "Some Considerations on Intervention Levels and Decision-Making on Countermeasures for Nuclear Emergency", Journal of Health Physics 31 (2), p169-176 (1996).
- 3.11 Murata M, H. Noguchi, et al., The effectiveness of shielding against internal exposure in nuclear accidents (I) : Survey on the natural air exchange rates and structural distribution of houses, JAERI-M 89-045 (1989).
- 3.12 Annals of the ICRP, Optimization and Decision-Making in Radiological Protection, ICRP Publication 55 (1989).
- 3.13 IAEA, Intervention Criteria in a Nuclear or Radiation Emergency, Safety Series No. 109 (1994).
- 3.14 Hwang W. T., G. S. Cho and M. H. Han, "Development of a Dynamic Food Chain Model DYNACON and Its Application to Korean Agricultural Conditions", Journal of Nuclear Science and Technology, 35 (6), p454-461 (1998).
- 3.15 IAEA, International Basic Safety Standards for Protection Against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources, IAEA Safety Series No. 115 (1994).
- 5.1 이명찬 외, “월성원전 지역에 적합한 환경방사선 영향평가모델 개발”, TR.95ZJ15.J1998.71,(1998).

# 요약문

## I. 제목

방사선 생체방어 기술개발

## II. 연구개발의 목적 및 필요성

자연계에는 방사선 이외에도 사람의 건강에 영향을 미칠 수 있는 수많은 화학물질들이 존재하는데, 이들의 혼합피폭은 기본적으로 당연한 결과이다. 그러므로, 이온방사선과 독성화학물질에 지속적으로 노출되었을 때 이온방사선과 독성물질들간의 상호작용들을 들 수 있다. 이들 상호작용들 중 어떤 것은 단순히 각각의 단일 효과를 더한 것 이상의 상승효과를 나타내거나, 길항작용을 할 것으로 예상된다. 본 연구에서, 우리는 방사선과 화학물질에 의한 각각의 돌연변이 빈도변화와, 방사선과 화학물질이 혼합되어 피폭될 때 상승작용이 일어나는지 또는 길항작용이 일어나는지를 조사하였다.

본 연구의 최종목적은 DNA의 미량분석에 의한 이온방사선과 독성 화학물질의 인체에 미치는 영향의 차이를 구분, 판별하는 것이다.

## III. 연구개발의 내용 및 범위

방사선 방호를 위한 생물학적 연구는 방사선과 독성화학물질이 생체에 미치는 영향을 평가하기 위한 생물학적 미량분석방법의 조사, T-cell clonal assay, 단일노출 또는 혼합 노출에 의한 hypoxanthine(guanine) phosphoribosyl transferase 유전자좌에서의 돌연변이 발생 빈도의 정량화 및 돌연변이 유형을 포함한다. 특히, reverse transcriptase를 이용한 polymerase chain reaction 방법은 감마선 조사와 화학물질(pentachlorophenol) 노출에 의하여

생성된 유전자 돌연변이 분석과 T-lymphocytes의 *hprt* 유전자좌에서 점 돌연변이를 조사하기 위해 전개되었다.

#### IV. 연구개발결과

규칙적인 DNA 절단현상(세포사 절단현상)이나, 단일 항체를 이용한 세포막 수용체의 유동세포분석기에 의한 측정 및 체세포 돌연변이 분석은 화학적, 물리학적인 환경 오염물질들의 건강에 미치는 영향을 평가하기 위한 효과적인 방법들이다. 그러나, 본 연구에서는 다음 연구의 mutation spectrum작성을 준비하기 위해 특정유전자의 돌연변이 분석방법들을 사용하였다. 실험실내에서 감마선 조사와 대표적인 화학오염물질인 pentachlorophenol(PCP)이 사람 T-lymphocytes내의 hypoxanthine (guanine) phosphoribosyl transferase(*hprt*) 유전자좌에 미치는 체세포 돌연변이효과를 T-cell clonal assay 방법으로 분석했다. 돌연변이 세포는 purine analogue인 6-thioguanine의 존재 하에서 clone을 형성하는 능력으로 선별되었다. 감마선 1.0Gy, 2.0Gy, 3.0Gy 선량에 의한 돌연변이율은 대조군과 비교하여 각각 40%, 450%, 750% 높았다. 0.2Gy, 0.5Gy로 조사된 그룹에서는 유의할 만한 변화는 없었다. PCP가 15ppm, 25ppm, 50ppm이었을 때, 돌연변이율은 각각 15%, 90%, 520%이었다. 10ppm으로 처리된 그룹에서는 변화가 없었다. 두 개의 다른 돌연변이원에서 비슷한 dose-response 관계를 보였다. PCP와 함께 감마선이 조사되었을 때, 혼합 노출된 세포에서는 감마선 조사된 세포에서 *hprt* 유전자의 돌연변이율과 차이가 없었다. 이 결과는 두 가지 가능성 을 제시한다. 첫째, *in vitro* 조건에서 처리된 PCP는 T-lymphocytes에서 PCP 대사물질로 전환되지 않기 때문일 것이다. 둘째, PCP의 phenol compound가 감마선에 의해 형성된 활성산소를 제거하기 때문일 것이다.

Reverse transcriptase/polymerase chain reaction(RT/PCR)기술은 방사선

과 화학물질의 혼합 노출을 판별하기 위한 mutation spectrum작성을 위해 필요하다. 돌연변이 세포를 선별하고 배양한 후, 전체 RNA가 *hprt* gene의 RT/PCR을 위해 분리되었다. 돌연변이세포 일부분에서는 감마선 조사에 의한 돌연변이세포에서 RT/PCR product가 형성되지 않았다(5/12). 반면, PCP 노출에 의한 돌연변이세포내에서 RT/PCR product는 거의 형성되었다. 이러한 결과는 *hprt* gene locus에서 점 돌연변이가 PCP 노출인 경우 우세하게 일어남을 의미한다. *Hprt* gene locus에서 유전자결실은 두 조건(감마선조사와 PCP처리)에서 모두 일어났다.

## V. 연구개발결과의 활용계획

방사선 방호 개념에서 health effect 또는 방사선 선량반응관계는 단지 방사선만을 반영한다. 그러나, 이온 방사선이 인간에 미치는 영향이 도처에 환경오염물질을 포함하는 현대환경에서 살고 있는 개체군내에서 발견됨을 기억해야 할 것이다. 그렇기 때문에, health effect에 관한 연구는 단일 또는 독성물질만을 분리하여 수행될 수만은 없는 것이다. 그러므로, 이들 결과들은 다른 유해한 물리·화학물질의 복합적인 영향을 예상하기 위해 적합한 모델로의 활용이 가능하다.

NEXT PAGE(S)  
left BLANK

## **Summary**

### **I . Project Title**

Biological Research for the Radiation Protection

### **II. Objective and Necessity**

In the living environment, besides radiation, a multiple of man-made chemical agents have also the potential to affect the health of human beings and combined exposures are a basic consequence. Therefore, when ionizing radiation and toxic chemical agents are exposed simultaneously, there can be many examples of interaction between ionizing radiation and toxic chemical agents. Some of these interactions lead to effect which are greater or lesser(synergism or antagonism) than what simple addition of the effects from exposure to single agents would predict. In the present study, we investigated the changes of mutation frequencies by radiation and toxic chemical reagents and the prediction of antagonism or synergism when combined exposure occurs.

The objective of this study is to discriminate between the effect of ionizing radiation and the effect of chemical toxic agents on man through the microanalysis of DNA composition.

### **III. Scope and Contents**

The work scope of 'Biological Research for the Radiation Protection' had contained the search of biological microanalytic methods for the assessment of health effect by radiation and toxic agents, the

standardization of human T-lymphocyte cell culture and polymerase chain reaction, T-cell clonal assay, and the quantification of mutation frequency in hypoxanthine (guanine) phosphoribosyl transferase (*hprt*) gene locus by single exposure or combined exposure. Especially, the polymerase chain reaction methods by usage of reverse transcriptase had been developed to analyze of gene product by  $\gamma$ -radiation and chemical (pentachlorophenol) agent exposure, and to investigate the point mutation in *hprt* gene locus of T-lymphocytes

#### IV. Results

DNA fragmentation analysis (apoptotic fragmentation), flow cytometric cell analysis using monoclonal antibody against receptor protein of cell membrane, and somatic mutational analysis are effective methods to assess the health effects by chemical and physical environmental pollutants. However, in the present study, mutational analytic methods were used to prepare mutational spectrum of hypoxanthine (guanine) phosphoribosyl transferase (*hprt*) gene in the future study. *In vitro* somatic mutational effects of  $\gamma$ -radiation and pentachlorophenol(PCP), which is representative of chemical pollutants, on the *hprt* gene locus in human T-lymphocytes were analyzed by a T-cell cloning assay. Mutant cells were selected by their ability to form a clone in the presence of purine analogue 6-thioguanine. The mutant frequencies by  $\gamma$ -irradiation to a dose of 1.0 Gy, 2.0 Gy and 3.0 Gy were 40%, 450% and 750% higher than those in controls. Significant changes were not observed in mutant frequencies in the 0.2 Gy and 0.5 Gy irradiated groups. When the doses

of PCP were 15 ppm, 25 ppm and 50 ppm, the mutant frequencies increased by 15%, 90% and 520%, respectively. No changes were observed in the 10 ppm treated group. Similar types of dose-response relationship were shown in the two different mutagens. When  $\gamma$ -radiation was exposed with PCP simultaneously, mutant frequencies of *hprt* gene in  $\gamma$ -irradiated cells were not different from those in combined exposed cells. This result suggests two possibilities. The one reason may be that *in vitro* condition, treated PCP does not convert into PCP metabolites, which can effectively affect the mutagenesis of *hprt* gene, in T- lymphocytes. The other reason may be that phenol group of PCP scavenges reactive oxygen species formed by  $\gamma$ -irradiation. Therefore, investigations about mutational effect by PCP metabolites are needed.

Reverse transcriptase/polymerase chain reaction (RT/PCR) technique will be needed for the mutation spectrum of *hprt* gene essential to discriminate that by radiation exposure from health effect by chemical exposure on man. After mutant cells were collected and clonally cultured, total RNA was isolated for the RT/PCR of *hprt* gene. In one part(5/12), RT/PCR products in the mutant cells by  $\gamma$ -radiation exposure were not formed. On the other hand, in the mutant cells by PCP treatment, RT/PCR product was almost formed. This means that point mutation on the *hprt* gene locus predominantly occur in the case of PCP exposure. Deletion on the *hprt* gene locus occurs both conditions( $\gamma$ -irradiation and PCP treatment).

## **V. Plan for Application of the Results**

In the radiation protection concept, the health effect or radiation dose-effect relationship reflects on only radiation. However, it should be remembered that the effects of ionizing radiation on man are observed in populations who live in today's environmental, including its ubiquitous environmental pollutants. In consequence, studies about health effect can not be carried out for single and isolated toxic agents. Therefore, these results can be applied for the appropriate model to predict combined effects of different noxious physical and chemical agents.

# Contents

Chapter 1 Introduction .....	1
1.1 Necessity and Objectives .....	1
1.2 Scope .....	5
Chapter 2 Current Status .....	7
2.1 Mutation and mutagenes .....	7
2.2 Mutation and DNA sequence .....	10
2.3 Mutation and radiation .....	10
2.4 Necessity of mutation research .....	11
Chapter 3 Contents and results of the project .....	13
3.1 Material and methods .....	13
3.1.1 Isolation of blood lymphocytes and cell line .....	13
3.1.2 Irradiation and PCP treatment .....	14
3.1.3 Prime culture .....	14
3.1.4 Subculture(second and third culture) .....	15
3.1.5 Mutant plating .....	16
3.1.6 Clonal efficiency .....	17
3.1.7 Clone forming unit and calculation of mutation fraction .....	18
3.1.8 Subculture of mutant clone .....	19
3.1.9 Reverse transcriptase PCR .....	19
3.1.9.1 Reverse transcriptase reaction .....	20
3.1.9.2 Amplification of mutant <i>hprt</i> gene(primary PCR) .....	21
3.1.9.3 Amplification of mutant <i>hprt</i> gene(secondary PCR) .....	22
3.1.9.4 Electrophoresis and recovery of mutant DNA fragment .....	24
3.1.10 DNA sequencing of mutant <i>hprt</i> gene(preparation) .....	24
3.2 Result and discussion .....	25
3.2.1 Mutant assay methods .....	25
3.2.1.1 Flow cytometry .....	25
3.2.1.2 DNA fragmentation .....	28

3.2.1.3 T-cell clonal assay .....	28
3.2.2 Cell survival of human cell and HL-60 cell line .....	28
3.2.3 <i>Hprt</i> somatic cell mutation by $\gamma$ -radiation and PCP .....	35
3.2.4 Combined effect of $\gamma$ -radiation and PCP .....	39
3.2.5 <i>Hprt</i> gene mutation and its characteristics .....	41
3.2.6 Conclusion .....	44
Chapter 4 Achievement and Contributions .....	47
4.1 Achievement of the Project .....	47
4.2 Contributions .....	47
Chapter 5 Proposal for Application .....	49
Chapter 6 References .....	51

## 목 차

제 1 장 서 론 .....	1
제 1 절 필요성 및 목적 .....	1
제 2 절 연구개발 범위 .....	5
제 2 장 국내외 기술개발 현황 .....	7
제 1 절 돌연변이 및 돌연변이원 .....	7
제 2 절 돌연변이 및 DNA 염기서열 해석 .....	10
제 3 절 돌연변이와 방사선 .....	10
제 4 절 돌연변이연구의 필요성 .....	11
제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과 .....	13
제 1 절 실험재료 및 방법 .....	13
1. 말포혈액 림프구의 분리세포 및 세포주, 세포배양배지 .....	13
2. 세포배양시 방사선조사 및 PCP 처리 .....	14
3. 1차 배양 .....	14
4. 2차 및 3차 증식배양 .....	15
5. 4차 배양 .....	16
6. CE(clonal Efficinecy)-plating판정 .....	17
7. CFU 판정 및 Mutation fraction의 계산 .....	18
8. 돌연변이 clone의 subculture .....	19
9. Reverse Transcriptase PCR .....	19
가. Reverse transcriptase reaction .....	20
나. 돌연변이 <i>hprt</i> gene의 증폭을 위한 1차 PCR .....	21
다. 돌연변이 <i>hprt</i> gene의 증폭을 위한 2차 PCR .....	22
라. 전기영동 확인 및 돌연변이 DNA fragment의 회수 .....	24
10. 돌연변이 <i>hprt</i> gene DNA-sequencing .....	24
제 2 절 연구결과 및 고찰 .....	25
1. 변이측정기술의 확립 .....	25
가. 유동세포분석기 .....	25

나. DNA 절단현상 .....	28
다. T-cell clonal assay .....	28
2. 방사선 조사에 의한 사람 cell and HL-60 cell line의 생존율 .....	28
3. 방사선 및 PCP 조사에 의한 <i>in vitro hprt</i> 유전자 돌연변이 .....	35
4. 방사선과 PCP 혼합피폭에 의한 돌연변이 빈도변화 .....	39
5. RT-PCR에 의한 돌연변이 유형분석 .....	41
6. 결론 .....	44
제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도 .....	47
제 1 절 연구개발목표 달성도 .....	47
제 2 절 대외기여도 .....	47
제 5 장 연구개발결과의 활용계획서 .....	49
제 6 장 참고문헌 .....	51

## 그 림 목 차

그림 1. 방사선 조사(100 rad, 32 hours, 단일클론형체: CD4/CD3)후 흰쥐 혈액세포의 유동세포분석 .....	26
그림 2A. 방사선(100rad)과 PCP(15ppm) 조사에 의한 세포의 DNA fragmentation .....	27
그림 2B. DNA fragmentation의 agarose gel 전기영동 .....	27
그림 3. 사람 T-lymphocyte를 $\gamma$ 선(R)과 pentachlorophenol (15ppm과 25ppm)을 동시에 피폭시킨 후 사람 <i>hprt</i> 유전자의 mutation frequency ...	40
그림 4. $\gamma$ 선 조사 후 <i>hprt</i> 유전자를 RT-PCR로 증폭시켜 agarose gel 전기 영동 분석 .....	42
그림 5. PCP 조사 후 <i>hprt</i> 유전자를 RT-PCR로 증폭시켜 agarose gel 전기 영동 분석 .....	43

## 표 목 차

표 1. $\gamma$ 선과 pentachlorophenol이 처리된 사람 T-cell의 생존율과 clonal efficiency .....	30
표 2. $\gamma$ 선 조사에 의한 HL-60 humen cell line의 생존율 .....	31
표 3. $\gamma$ 선 조사후 시간에 따른 HL-60 humen cell line의 생존율 .....	33
표 4. 36x4 humen cell line에서 <i>hprt</i> -negative clones을 가진 유전자을 얻기 위한 6-thioguanin의 최적농도 .....	34
표 5. $\gamma$ 선 조사에 의한 사람 T-lymphocytes의 mutant frequency 측정 ....	36
표 6. PCP 조사에 의한 사람 T-lymphocytes의 mutant frequency 측정 ....	38

## Figure

Fig. 1. Flow-cytometric analysis of irradiated rat blood cells .....	26
Fig. 2A. Percentage of DNA fragmentation in normal, irradiated and PCP treated cells .....	27
Fig. 2B. Agarose gel electrophoresis of DNA fragmentation .....	27
Fig. 3. Mutation frequency of human <i>hprt</i> gene following $\gamma$ -irradiation with PCP in T-lymphocyte .....	40
Fig. 4. Agarose gel electrophoresis of RT-PCR product of <i>hprt</i> gene after $\gamma$ -irradiation .....	42
Fig. 5. Agarose gel electrophoresis of RT-PCR product of <i>hprt</i> gene after PCP treatment .....	43

## Table

Table 1. Survival countings and Clonal Efficiency(CE) of human T-cell exposed to $\gamma$ -radiation and pentachlorophenol .....	30
Table 2. Survival countings of HL-60 human cell line exposed to $\gamma$ -radiation .....	31
Table 3. Results from survival plating of HL-60 human cell line exposed to $\gamma$ -radiation .....	33
Table 4. Optimal concentration of 6-thioguanine for the selection of <i>hprt</i> -negative clones in 36x4 human cell line .....	34
Table 5. Measurement of mutant frequency determined in experiments of human T-lymphocytes exposed to $\gamma$ -radiation .....	36
Table 6. Measurement of mutant frequency determined in experiments of human T-lymphocytes exposed to PCP .....	38

# 제 1 장 서 론

## 제 1 절 필요성 및 목적

방사선방호를 위한 생물학적연구로서 구체적으로 연구하여야 할 과제로서는 생물학적선량평가(Gallway *et al.*, 1987; Sasiadek *et al.*, 1991; Kim *et al.*, 1997), 유전자 변이, 면역기능의 변화 및 방사선물질의 제거등으로 일반적으로 생리학, 생화학, 면역학, 미생물학등 일반적으로 생명과학에서 다루고 있는 대상이나 목적과 부합하고 있다. 특히 혼합돌연변이원에 의한 생체영향차별화연구는 방사선방호의 기준이나 방사선 위해도의 저감화에 필수적인 연구라 할 수 있다. 일반적으로 방사선 방호의 기준은 방사선 단일영향으로 고려되고 있다. 그러나 환경 내에서의 사람은 지역, 의약품 및 산업적 특성에 따라 다양한 환경돌연변이원에 노출될 수 있다. 따라서 이러한 혼합영향의 규명은 방사선사고의 분쟁발생이 발생할 경우 개관적 자료로 고려할 수 있다. 그러므로 이러한 목적에 부합될 수 있는 실험재료 및 방법론의 선택이 이루어져야 한다. 본 실험은 사람의 hypoxanthine(guanine) phosphoribosyl transferase 유전자를 대상으로 방사선과 화학적독성을 가지고 이러한 목적 달성에 접근하고자 하였다.

일반적으로 핵산(nucleic acid)을 합성하는 경로에는 *de novo pathway*를 제외하면 체내 pyrimidine 계열과 purine 계열을 재 생성하는 salvage pathway가 있는데 여기에 관여하는 효소가 thymidine kinase와 hypoxanthine(guanine) phosphoribosyl transferase 등이다. Hypoxanthine (guanine) phosphoribosyl transferase gene (*hprt*)은 Albertini 등 (1982) 이 T-cell clonal assay를 처음 고안한 이래로 고등동물의 mutagenesis의 연구에서 가장 많이 다루어진 유전자 중의 하나이다. 세포배양시 이 *hprt*의 불활성 세포(*hprt*<sup>-</sup>)는 정상세포(*hprt*<sup>+</sup>)와 성장을 있어 큰 차이를 보이지 않으며, 오

히려 purine analogues이며 특히 생체내 강한 돌연변이효과를 갖는 6-thioguanine의 존재 하에서 무반응이 되므로 정상세포 (*hprt*<sup>+</sup>)중에서의 positive selection을 가능하게 한다. 이 *hprt* 유전자가 mutation의 연구에 많이 이용되는 주된 이유로는 연구의 간편성으로, 1) 이 유전자는 X-chromosome에 위치하고 있으므로, male의 경우, 세포내에 단하나의 functional copy로 존재한다는 것, 즉 다른 autosomal alleles에 비교하여 볼 때, 이 유전자의 단 하나의 돌연변이는 곧 돌연변이 세포로써 선택되어질 수 있다는 점이며, 2) 상기한 바 있는 세포배양시 non-essential gene이며, 선택적으로 *hprt*<sup>+</sup>로부터 *hprt*<sup>-</sup> cell을 쉽게 분리할 수 있다는 점, 3) 체세포 돌연변이의 분석을 위한 돌연변이 세포의 클론화가 혈액에서 채취된 T-cell로 부터 직접 얻는 방법(Albertini *et al.*, 1985; Turner *et al.*, 1985)이 잘 확립되었다는 점 등이다. 따라서 여러 독성물질의 노출에 대한 *hprt* gene locus 돌연변이율 (mutation frequency, MF)을 측정하여 *in vivo* biomonitoring에 이용하려는 수 많은 연구들이 수행되었으며 계속된 방법적 개선이 이루어지고 있다. 즉 연령의 변화에 따른 *hprt* 돌연변이에 관한 연구 (McGinniss *et al.*, 1989), 방사선 조사 및 화학요법에 따른 변화 (Seifert *et al.*, 1987; Nicklas *et al.*, 1990), 흡연에 따른 변화 (Cole *et al.*, 1988; Tates *et al.*, 1991) 직업적으로 독성물질에 노출됨에 따른 변화 (Messing *et al.*, 1989), 그리고 암에 잘 걸리는 경향이 있는 사람에게서 생기는 변화 (Fukuchi *et al.*, 1990; Cole *et al.*, 1992)등의 연구가 그것이며, 이러한 유형의 실험들은 모두 조사 대상자의 혈액을 채취하여 그 단핵세포를 배양하는 방법에 기초를 두고 실행되었다. 상기의 *in vivo* 실험들은 대조군에 대한 비교로써 *hprt* 유전자의 높은 돌연변이율은 발암성에 깊은 연관을 가진다는 것이 증명되었으나, 결국 *in vitro* 실험 즉, cell culture의 과정에서 같은 독성물질을 투여하여 *hprt* 유전자 돌연변이 빈도를 측정하는 방법으로 보완되어 왔다. 본 연구는 방사선 조사에 대한 T-cell *hprt* clonal assay 및 mutational spectrum을 이용한 생물학적 지표 개발 목적과 방사선과 다른 돌연변이원의 혼합효과

등의 연구를 위한 기초자료로서 우선 방사선과 원목의 보존재 등에 다목적으로 사용되며, 현재 대표적인 환경물질로 대두되고, 비교적 약한 유전독성을 나타내는 것으로 알려진 화학적 환경독성을 지닌 PCP(Cirelli, 1978; Cline *et al.*, 1989; Crosby *et al.*, 1981; Hattenman-Frey and Travis, 1989; Hoben *et al.*, 1976; Jorens *et al.*, 1991)에 의한 실험실 내에서의 각각의 돌연변이를 측정하여 비교하였으며 방사선과 PCP에 의한 혼합피폭시 돌연변이 빈도변화에 대한 synergism 혹은 antagonism을 조사하였다.

그러나 이러한 많은 사람의 *hprt* 유전자의 돌연변이율에 대한 정보는 이 정보의 정확한 분석을 위하여 역으로 실험동물에서의 독성물질에 의한 정확한 mutation effect에 대한 정보를 또한 요구하게 되었다. 왜냐하면 *in vivo* 실험이 불가능한 사람의 경우에 추정적용(extrapolation) 할 유일한 근거는 바로 실험동물에서 획득된 특정 독성물질에 의한 *in vitro* 와 *in vivo* 의 *hprt* 유전자의 돌연변이율의 비교가 필요하며, 따라서 이를 조사하기 위한 실험동물 모델의 정립이 절실한 과제로 대두되게 되었다. 실제로 사람과 실험동물 mouse, rat의 *hprt* 유전자는 그 크기와 구조에서 매우 유사하며, 모두 전체 9개의 exon에서 조합된 비교적 작은 657 base pair의 coding region을 가지고 있다. 각 exon의 염기수도 모두 일치하며 매우 보존된 염기서열을 가지고 있다. 사람 *hprt* gene의 전체크기는 44kb, 마우스의 경우는 34 kb로 차이가 있으며, 사람 *hprt* gene의 cDNA 염기서열 (Jolly *et al.*, 1983; Burkhardt-Schults *et al.*, 1990; Scopek *et al.*, 1992), intron을 포함하는 전체 염기서열 (Edwards *et al.*, 1990), mouse cDNA 및 exon인접부위의 염기서열 (Melton *et al.*, 1984)등이 밝혀져 있다. *Hprt* mutation을 위한 실험동물 모델의 정립에서 가장 큰 문제는 체세포배양에서 정형화된 방법의 확립으로, 세균이나, 효모를 이용하는 경우와는 달리 각 실험실에서 측정되는 이 돌연변이 빈도변화는 배양방법에 따라(실험실에 따라) 매우 큰 차이를 나타내고 있다. 따라서 이는 실험군내의 비교는 가능하나, 절대값으로 독자적 실험에서 상호비교를 어렵게 하고 있다 생각된다. 이를 극복하기 위하여 정형

화된 체세포배양의 방법, 세포분열자극의 방법 등은 실험동물 모델의 정립에서 중요시되어야 한다.

현재 *hprt*유전자를 이용한 환경독성물질의 정량적 위해도 평가방법은 다음과 같이 대별될 수 있다.

1) 노출이 의심되는 사람의 혈액을 채취하여 *in vivo*, *hprt* 돌연변이율을 측정하고, 이를 대조군과 비교하여 돌연변이원에의 노출정도를 평가한다 (*in vivo* human experiment). 2) 정상으로 간주되는 사람의 혈액을 채취하여, 돌연변이원을 가한 후, *in vitro* 돌연변이율을 측정하고, 이를 대조군과 비교하며, 동시에 이를 사람의 *in vivo* 돌연변이율과 비교한다 (*in vitro* human experiment). 3) 실험동물에게 돌연변이원을 직접 노출시킨 후, 혈액을 채취하여 *in vivo*, *hprt* 돌연변이율을 측정하고, 이를 대조군과 비교하며, 동시에 사람의 *in vivo hprt* 돌연변이율을 보정한다 (*in vivo* animal experiment). 4) 실험동물에서 혈액을 채취하여 돌연변이원에 노출 시킨 후, *in vitro*, *hprt* 돌연변이율을 측정하고, 이를 대조군과 비교하며, 동시에 사람의 *in vitro*, *in vivo hprt* 돌연변이율을 보정한다 (*in vitro* animal experiment). 이런 일련의 실험들은 *in vivo* human 실험은 작위적인 실험이 불가능하다는 이유로, 또한 환경독성물질의 정확한 위해도 평가를 위하여 매우 중요하며 실험결과의 올바른 해석을 가능하게 한다. 또한 근래의 PCR (Polymerase chain reaction)기법의 발달과 automatic sequencing방법의 개발은 이 T-cell clonal assay에 적용되어, 이를 다목적 biomarker로써 독성물질의 정성분석(qualitative analysis)이 가능한 단계로 발전시키게 되었다. 즉, 기존의 방법으로 *hprt* negative mutant clone을 선별하고, multiplex PCR, 또는 RT(reverse transcriptase) -PCR 방법으로 각 돌연변이된 *hprt*유전자 부위를 증폭한 후, automatic sequencing방법을 이용한 염기서열결정으로 그 돌연변이 양상을 분석하게 된 것이다. 이로써 작성된 환경독성물질에 대한 Mutational spectrum의 연구는(Messing *et al.*, 1989; Nicklas *et al.*, 1990;

O'Neill *et al.*, 1990; Tates *et al.*, 1991; Cole *et al.*, 1992; Cochrane *et al.*, 1993) 다양한 환경독성물질들에 대한 정성적(qualitative) bio-monitering에 새로운 가능성을 보여주었으며, 이 평가방법을 보다 정교하게 하였다.

본 연구는 앞에 설명한 *hprt*유전자를 이용하여, 1) 방사선 조사에 의한 적절하고 예민한 위해도 측정방법으로 *hprt*-biomarker에 의한 유전적 독성평가방법을 개발하려는 것이며, 또한 2) 근래에 새로이 논란이 되고 있는 “방사선 조사와 함께 돌연변이 상승작용을 나타낼 수 있는 잠재적 환경독성물질을 선별할 수 있는 방법”을 또한 개발하려는 것이다. 상기의 목적 2)는 T-cell clonal assay를 보완 발전시킨 기존의 유전적 독성평가방법이 다수의 환경돌연변이원을 screening하는 데 기술적으로 적합치 않은 것을 개선하려는 것으로, 즉, 다수의 환경독성물질을 screening하기 위하여 실험의 간편성을 중시하고, 많은 실험결과를 정확히 비교 판정하기 위하여 동일한 실험재료(세포)를 선택할 수 있게 하고자 한다. 본 연구에서 독성물질의 screening을 위하여 제안하고자 하는 방법은 인위적인 T-cell의 증식을 비롯하여 human lymphocyte cell line을 사용한 *in vitro* assay와 *hprt* mutant spectrum으로 요약할 수 있다. 실험에 사용된 세포주는 HL-60 (*hprt*<sup>+</sup>)과 36x4 (*hprt*<sup>-</sup>) cell line이며, 이들은 먼저 clonal efficiency가 100%라는 cell line의 특성으로 *hprt*실험에서 작용 돌연변이 효과를 손쉽게 측정할 수 있게 하였다.

## 제 2 절 연구개발 범위

본 연구의 최종목표인 방사선과 비방사선에 의한 생체영향차별화 전략과 혼합효과등 (combined effect)을 위하여 우선 방사선 및 환경돌연변이원에 의한 변이측정방법을 조사하였다.

1. 유동세포분석기
2. DNA fragmentation

### 3. T-cell clonal assay

이러한 변이측정기술중에서 돌연변이선택이 용이하고 변이측정기술이 확립된 *hprt*유전자를 대상으로 하여 다음과 같은 연구내용을 수행하였다.

1. 방사선 피폭과 pentachlorophenol 처리에 의한 T-lymphocyte cell의 *hprt* gene locus에서의 돌연변이빈도변화를 조사하였다.
2. 이와 더불어 방사선방호연구에서 가장 중요한 연구중의 하나인 방사선과 비방사선과(pentachlorophenol)의 혼합피폭에 따른 돌연변이 빈도변화를 조사하였다. 이러한 방법은 T-cell clonal assay방법으로 시행하였으며 실험재료로는 건강한 사람의 혈액으로부터 lymphocytes를 실험실에서 분리, 몇 차례의 세포배양을 통하여 시행하였다.
3. 방사선과 비방사선의 영향차별화를 위하여 방사선과 화학적 독성물질에 의하여 생성된 돌연변이세포를 선택 배양하여 total messenger RNA를 분리하였다. RT/PCR기법을 도입하고 적절한 primer를 사용하여 이러한 돌연변이세포에서 분리된 RNA를 대상으로 하여 돌연변이 *hprt*유전자를 증폭하였다. 최종 증폭된 산물을 대상으로 전기영동을 실시하고 돌연변이 유형을 확인하였다.
4. 이러한 증폭된 유전자의 돌연변이 유형과 순도 및 정확성을 agarose 전기영동방법으로 조사하였으며 이 유전자를 mutation spectrum작성에 필요한 DNA 염기서열분석을 위하여 회수, 보관하였다.

## 제 2 장 국내외 기술개발 현황

### 제 1 절 돌연변이 및 돌연변이원

일반적으로 방사선 피폭에 의한 돌연변이는 macro한 수준(somatic mutation:체세포 돌연변이)과 micro 혹은 nano한 수준(DNA염기 이상 검출)으로 대별될 수 있다. 대부분의 방사선이나 다른 carcinogen에 의한 피폭은 생체내에서 형성된 free radical(자유전자)이 화학적 변화를 일으켜 염기서열을 random하게 변화시킨다. 이러한 점돌연변이는 서로 다른 유전자에서 일어나며 이중나선에서의 염기짝의 불이치로 인하여 유전적 정보를 상실하게 된다. 따라서 특별한 유전자의 기능이 알려져 있고 분석이 가능하다면 macro한 수준에서 somatic mutation은 방사선 피폭의 척도로 사용될 수 있다. 일반적으로 정상에서 안정적이고 낮은 background(백만개의 세포당 5-30개)를 가지고 있는 유전자 많이 연구되어진 것들은 다음과 같다.

- HPRT (hypoxanthine,guanine-phosphorybosyl transferase) -  
X chromosome
- HLA(Human lymphocyte antigen)-chromosome 6
- Glycophorin A gene-chromosome 4
- T-cell antigen receptor gene(TCR)

환경독성물질에 의하여 발생되는 돌연변이는 매우 복잡한 사건이며 독성물질의 흡수, 분포, 대사활성화 해독작용, DNA에의 작용, 손상된 DNA의 복구 그리고 세포분열 같은 여러 단계를 포함한다. 생체내 돌연변이 검사中最 많이 광범위하게 사용되는 다발성 유전자는 *hprt*이다. 핵산(nucleic acid)을 합성하는 경로에는 *de novo pathway*를 제외하면 체내 pyrimidine 계열과 purine 계열을 재생성하는 salvage pathway가 있는데 여기에 관여하는 효소가 thymidine kinase와 hypoxanthine phosphoribosyl transferase 등이다. *Hprt* 유전자는 X-염색체에 위치하며 핵산의 합성을 위해 hypoxanthine

(guanine)을 purine monophosphate 형태로 전환시키는 효소를 생산하며 이 유전자를 불활성 시키면 purine 유사체 특히 6-thioguanine의 존재 하에서도 세포가 성장할 수 있는 단가 유전접합체이다. 사람에 있어서 심한 *hprt*의 결핍은 Lesch-Nyhan Syndrome을 초래하며 부분적 결핍은 통풍이나 요산과다 생성을 초래한다. 이러한 *hprt* 유전자의 돌연변이 요인은 다음과 같아 다양하다.

- 연령변화에 따른 돌연변이(McGinniss *et al.*, 1989; Cariello *et al.*, 1992)
- 방사선 조사와 화학요법에 따른 변이 (Nicklas *et al.*, 1990; Casto, 1981)
- 직업적으로 인한 독성물질에 관한 변이(Messing *et al.*, 1989)
- 담배흡연으로 인한 변이(Tates *et al.*, 1991)
- 암에 잘거리는 경향이 있는 사람에게 생기는 변이(Cole *et al.*, 1992)

따라서 Albertini 등에 의하여 이러한 *hprt* 유전자를 대상으로 암발생요인등을 분석하기 위한 방법으로 개발된 T-cell *hprt* clonal assay는 돌연변이 세포의 분리가 쉽고 그 동안 계속적인 배양조건의 개발 및 개선으로 인하여 방사선 피폭뿐만 아니라 일반적으로 여러 가지 환경독성물질의 노출에 대한 독성효과의 지표로 적용을 모색하고 있으며 실제로 말초혈액림프구세포를 사용하여 일본에서는 원폭생존자들을 대상으로 방사선량을 감시하는데 널리 사용되고 있다. Polymerase chain reaction의 도입으로 cDNA의 염기서열분석이 더욱 용이하고 효율성 있게 되었으며 따라서 *hprt* 유전자 돌연변이에 대한 DNA염기서열정보도 손쉽게 취득할 수 있게 되었다. 그러므로 RT/PCR에 의한 또는 genomic DNA의 증폭에 의한 mutational spectrum의 작성으로 체세포 돌연변이로는 불가능한 방사선을 비롯한 환경독성물질의 영향을 구분하는 정성적 분석이 가능하게 되었다.

Glycoprotein A(GPA)는 사람 적혈구 표면에서 합성되는 주된 glycoprotein이며, MN blood type의 우성분자이다. GPA에 대해서 충분히 기술되었지만, 그 생물학적 기능은 알려지지 않았다. Flow cytometry(유동세포분석기) assay는 다른 형광염료가 결합된 단일항체를 이용하여 드물게 보이는 돌연변이 적혈구(GPA는 제외)를 검출하기 위해 개발되었다.(Nagamura *et al.*, 1991) 중요한 선량 관련 돌연변이 발생빈도의 증가가 지난 원폭생존자들의 연구에서 보고되었다.(Langlois *et al.*, 1990). 이는 사람의 normal diploid cells와 marker로서 6-thioguanine 저항성을 이용한 *in vitro* 돌연변이 연구(Nagamura *et al.*, 1991)에서의 보고한 값과 매우 유사하다. *In vivo* GPA 돌연변이의 calibration이 유용한 적당한 *in vitro* system은 없을지라도, 이 결과는 적혈구 전구세포에서의 GPA 돌연변이는 애매하며, 평생동안 지속된다 는 가설을 지지하는 것으로 해석될 수 있다. GPA assay는 피폭후 40년 이상 경과된 피폭 생존자들 사이에서 명백한 선량 의존 돌연변이 발생빈도 증가를 밝혔다. 그러므로 이는 life time dosimeter로 사용될 가능성을 갖는다. 또 다른 GPA assay의 장점은 소량의 적혈구(1ml)만 있어도 된다는 장점이 있으나 집단의 50%는 homozygote이기 때문에 분석이 불가능하다.

일본에서의 방사선 생체영향 연구는 미국, 유럽보다 상당히 조직적으로 방대하게 수행되는 것으로 사료된다. 특히 일본은 우리의 경우처럼 원자력기 반기술 연구를 1988년부터 시작 수행하고 있으며 방사선 영향평가와 저감화가 4대 기술영역에 포함되어 폭넓게 수행되고 있다. 특히 1994년부터 시작되어 2000년까지 진행되는 연구과제에는 새로운 DNA해석방법을 이용한 방사선 돌연변이 검출기술의 개발등이 있다. 이 연구의 목적은 근래 급속히 진보하고 있는 DNA해석기술 등을 사용하여 효율적이며 또 정밀한 돌연변이의 해석기술을 개발하는 동시에 컴퓨터 기술 등을 이용하여 해석기술의 연구를 실시하고, 또한 각종 돌연변이원과 방사선의 선질 및 선량률에서 방사선의 효과를 DNA의 구조변화 등에 관해 연구하고, 방사선에 의한 돌연변이 유발,

기능변화 등의 메카니즘을 밝히기 위한 신기술을 개발하여 인체의 방사선 영향평가 및 저감화에 이바지하는 시견 및 자료를 제공하는 것이다. 내용은 아래와 같다.

## 제 2 절 돌연변이 및 DNA 염기배열의 해석

본 연구에서는 방사선에 의해 유발된 돌연변이를 분자 수준에서 해석하는 방법의 하나로서 reporter 유전자를 포유류 세포나 transgenic 마우스에 도입하고, 방사선 조사후에 이 유전자를 회수하여 그 염기배열상의 변화를 조사하는 방법을 채용하고 있다. 회수한 reporter 유전자는 대장균에 감염된 변이체를 검출한다. 돌연변이검출의 reporter 유전자로서 범용되고 있는 대장균 gpt유전자를 직접 감마선 조사하여, 발생한 돌연변이의 특징을 자동 sequencer를 사용하여 해석했다. 조사한 gpt유전자를 포함한 플라스미드는 대장균 AB1157株에 도입하여 변이체를 검출했다. 그 결과, 감마선 조사에 의한 gpt유전자의 주로 G:C 염기대에 변이가 일어나, G:C→T:A변이, G:C→A:T 변이 및 G:C→C:G변이가 유발된다는 것이 밝혀지고 있다. 또한, G:C→T:A 변이는 guanine이 전사되지 않은 DNA고리(nontranscribed strand)인 경우에 많이 일어나며, 변이를 일으켰다고 추정되는 guanine의 3'측에는 adenine이 존재하는(5'-GA-3')경우가 많음이 밝혀졌다. 현재, G:C→T:A변이를 일으키는 것으로 알려지고 있는 8-oxoguanine에 대한 수복효소(mutM)의 결손된 세포에 플라스미드를 도입하여 변이빈도를 측정하고 있다.

## 제 3 절 돌연변이와 방사선

여기서는 주로 nano 수준에서의 이상, 즉, DNA 염기배열 수준의 이상을 방사선 risk평가의 유효한 지표로 삼기 위해 DNA구조변화검출법과 염기배열결정법을 일체화하여, 효율적 돌연변이 검출 시스템의 확립을 꾀한다. 본 연구의 주된 세가지는 1)돌연변이의 원인이 되는 DNA손상의 특성의 동정, 2)DNA해석방법의 기술개발과 그에 의한 변이의 해석, 3)방사선 고감수

성유전자의 연구이다. 1)의 연구는 방사선으로 유발되어 생존세포에 안정하게 존재하는 염색체 교환형 이상의 생성의 메카니즘을 밝힐 목적으로, 방사선에 의한 DNA손상이 어떤 메카니즘으로 chromatin손상에 결부되어, 최종적으로 돌연변이의 유발에 결부되는가를 조사하고 있다. 2)의 연구에서는 방사선에 의해 사람 세포에 유발된 *hprt*변이를 해석했는데, mRNA splicing 이상으로 생각되는 변이클론이 발견되어 광대한 exon영역의 해석방법의 해석을 추진하는 동시에 동정된 돌연변이의 특이성을 검토하고 있다. 3)의 연구에서는 T세포, B세포의 기능결손 뿐만 아니라, 방사선에 의한 이중고리절단의 수복유전자로 알려진 *scid* 유전자가 새로운 background로 도입되면 높은 비율로 T세포백혈병이 발생한다는 것을 알아냈다. 역으로 *nu(str)*유전자와 *scid*마우스로의 도입에 의해서도 100% 백혈병으로 사망함을 발견했다.

#### 제 4 절 돌연변이연구의 필요성

일반적으로 확실한 방사선 방호 목적에 기인하여 특정 주제와 목적을 가지고 생물학적 연구가 조직적이고 일본의 경우처럼 방사선 종합연구소나 이화학연구소를 중심으로 방대하게 수행되고 있지는 않는다. 그러나 관련기관 및 대학 등에서 방사선 피폭에 의한 돌연변이(경기대학교) 등에 관한 여러 연구가 꾸준히 수행되고 있으며 DNA strand breakage의 comet 분석 및 염색체이상현상(서울대학교 보건대학원)등 우리 실정에 맞는 방법론을 계속적으로 도입하고 있는 실정이다. 미세한 수준의 유전자 검출 수준이나 PCR 등의 방법을 많은 보편화되어 있으며 이러한 기술로 세포 및 분자수준에서의 생명현상의 해석을 위한 연구가 활발히 진행되고 있다.

일반적으로 돌연변이 연구 중 다양한 유전자를 대상으로 독성물질, 흡연 등 다양한 환경요인에 의한 체세포 돌연변이 특정자료는 상당히 많이 축적되어 있으며 상기에 열거한 *hprt*, HLA, Glycophorin A 등의 유전자 역시 예외는 아니다. 특히 이러한 유전자는 원폭 피해자나 암 환자의 경우 방사선 치료시 정상인 보다 상당한 민감성을 보인다는 보고도 많다. 특히 X선 조사

의 경우는 돌연변이의 특이서, 이른바 특정유전자상의 부위 및 변이 type에 관한 보고가 많이 직접되어 있으며 *hpert* 유전자도 마찬가지이다. 그러나 체르노빌 사건 이후 수 많은 정화종사자의(clean up) 경우 6-10년 이 경과한 후에 혈액내 *hpert* 돌연변이원이 증가하는데 이러한 현상이 방사선 피폭에 의한 것이냐 아니냐 하는 방사선 방호 측면에서의 접근이나 case study는 많이 이루어지지 않고 있다. 따라서 방사선/능을 비롯한 다양한 환경 돌연변이 원에 의한 돌연변이 특이성에 관한 data을 확보 비교 검토하는 것이 매우 유익하겠다. 또한 방사선과 다른 환경 돌연변이원의 궁극적 차별성은 원전 주변의 주민들의 질병발생이라는 주장을 과학적 근거로 대응하게 하는 진보적 접근이라고 할 수 있다. 한편 이러한 접근은 일부 특정 유전자만을 대상으로 하는 것은 단편, 지협적인 면이 있다. 그러므로 방사선 고감수성 유전자의 계속적인 발굴과 돌연변이 원인 및 DNA 해석기술개발을 통하여 방사선 위해도 평가 및 저감화에 접근하여야 한다.

### 제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

#### 제 1 절 실험재료 및 방법

##### 1. 말초혈액 림프구의 분리세포 및 세포주, 세포배양배지

실험에 사용될 사람의 림프구 세포의 분리를 위하여 heparin (beef lung heparin, 10 units/ml whole blood)으로 처리한 주사기를 사용하였다. 채혈된 25 ml의 혈액을 Histopaque(Sigma Co.) 25 ml가 담긴 50 ml용 원심분리관의 상층에 넣고, 상온에서 400 g로 원심 분리하여 중층의 혈액내 림프구세포를 수거하였다. 이 세포들을 DPBS 용액으로 두 번 세척한 후 (250g, 12분; 180 g, 12분), 5 ml RPMI-1640 배지에 부유시키고, 0.1 ml를 0.4% trypan blue로 염색하여 haematocytometer로 생 세포의 농도를 측정하였다. 보관은 배양할 때까지 37°C, 5% CO<sub>2</sub> incubator에서 보관하였다. T-lymphocytes 배양을 위하여 기본배지로서 RPMI-1640 (Sigma R-5382; with L-Gln, USA)을 선택하였고, 그 외의 기본 시약으로 Dulbecco's phosphate buffered saline (DPBS: Sigma Co.), HEPES (Sigma Co.), sodium bicarbonate (Sigma Co.)등이 사용되었다. RPMI 기본배지의 조성은 25 mM HEPES, 1x Non-Essential amino acid (Sigma Co.), 1 mM pyruvate, 0.05 mM 2-mercaptoethanol이며, 이에 2g/l의 sodium bicarbonate를 첨가하여 pH 7.2로 조정한 후, 여과льт균하였다. 2, 3차 계대배양을 위하여 RPMI 배지에 HL-1 medium (Ventrex, USA), calf bovine serum (CBS: Gibco, USA), T-cell growth factor (TCGF: Collabo -rative Research, USA)를 첨가하였다. 세포배양에 사용된 기구는 모두 일회용 플라스틱제품(Nunc, Denmark; Falcon, USA)을 사용하였다. 또한 실험에 사용된 cell line은 *hprt-negative*인 WI-L2 lymphoblastoid cells (TK6; W. G. Thilly, MIT, Cambridge, MA, USA)의 변형세포주인 36x4 cell line

(*hprt* 전체 유전자의 결실; Skopek, T. R., 1978)과 세계적으로 널리 사용되고 있는 HL60 cell line을 사용하였다. 이는 human lymphocytes에서 유래된 세포주로 *hprt*<sup>+</sup>의 유전형질을 가지며, 6-thioguanine (6-TG)배지에서 DNA의 돌연변이 과다로 사멸된다. 본 연구에 사용된 사람의 세포는 39세 한국 남자 (Sample A)와 22세의 한국 남자에서 (Sample B)의 blood lymphocyte로써 각각 heparin (beef lung heparin, 10 units/ml whole blood)을 사용하여 채혈하고 lymphocyte를 분리하였다. *hprt*유전자가 X-chromosome에 위치하기에 혼돈을 막기 위하여 모두 남자의 혈액만을 사용하였다. 48시간의 배양이 끝나 pH 6.5에 이른 배양액은 상온에서 250 g, 20분간 원심분리하고 상동액만을 모아서, 56°C에서 30분간 가열한 후, 냉동보관하여 사용하였다. HL-60 세포주의 배양은 T-cell activation이 필요 없기 때문에 기본 RPMI배지에 10% FBS를 첨가하여 배양액으로 사용하였다.

## 2. 세포배양시 방사선 조사 및 PCP 처리

세포 수집후 방사선 조사는 <sup>60</sup>Co원을 사용하여 0, 0.2, 0.5, 1.0, 1.5 2.0 및 3.0 Gy의 양으로 감마선에 노출시켰으며, 이는 세포계수가 완료된 직후, CBS가 포함되지 않은 RPMI 기본배지에서 수행하였다. 처리된 세포는 바로 1차 배양에 들어갔다. PCP는 이를 50 mg/ml의 농도로 DMSO에 녹여 각 실험군당 최종농도가 0, 5, 10, 15, 25, 50 및 100 ppm(w/v)이 되게 하여, 1차 배양 시작 12시간 경과 후부터 시작하여 24시간 동안 처리하였다. 조사량은 실험 목적에 따라 3000 rad까지 조사하였다. 배양은 37°C, 5% CO<sub>2</sub> incubator (습도는 100%)에서 최고 30일간 배양하며 관찰되었다.

## 3. 1차 배양 (prime culture)

1차 배양액은 HL-60 human cell line의 경우, RPMI 1640 기본배지에 1x

Nonessential amino acid (Sigma), 20 mM HEPES, 1 mM pyruvate, 1x Antifungal-Antibiotic solution(Sigma), 0.05 mM 2-mercaptoethanol 를 각 최종농도가 되게 넣어 RPMI 1640 완성배지를 만들고, 여기에 다시 8% fetal bovine serum, 8% ConA-sup., 4  $\mu$ g/ml concanavalin A, 10 unit/ml interleukin 2를 첨가하여 1차 배양액 (Prime culture용)으로 하였다. 세포의 농도는 분리된 blood lymphocyte 및 splenic cell를 1차 배양액에 각  $2 \times 10^6$  cells/ml되게 넣고, 각 실험군당 250 ml 용 culture flask를 사용하여 50 ml 씩 배양하였다. 배양조건은 37°C, 5% CO<sub>2</sub> incubater (습도는 100%)에서 24-36시간으로 prime culture를 수행하였다. 한편 인간 세포의 배양실험에서는 우선 분리된 blood lymphocyte를 1차 배양액에 각 실험군당  $40 \times 10^6$  ( $1 \times 10^6$  cells/ml)되게 나누고, 각기 4 개 50 ml 용 culture flask에 10 ml 씩 나누었다. 또한 이 세포의 1차 배양액은 RPMI 기본배지에 2 mM L-glutamine, 1 x antifungal-antibiotic solution(100 units/ml penicillin, 100  $\mu$ g/ml strepto- mycin sulfate, Sigma; 이상 모두 최종농도)을 넣어 RPMI 1640 완전배지를 만들고, 여기에 다시 20% HL-1 medium, 5% fetal bovine serum, 1  $\mu$ g/ml PHA를 첨가하여 1차 배양액 (prime culture용)으로 하였다. 배양은 37°C, 5% CO<sub>2</sub> incubator (습도는 100%)에서 36-40시간으로 하였다.

#### 4. 2차 및 3차 중식배양 (subculture)

36-40 시간정도의 1차 배양이 완료된 직후, cell을 원심분리로 수거하고, 그 일부를 염색하고, 검경하여 생존율을 측정 (survival counting)하였다. 인간백혈구의 배양에서는 돌연변이세포의 선택배양에 들어가기에 앞서 실험동물 세포배양에서와는 달리 충분한 세포를 확보할 필요성이 있기 때문에 2회의 subculture를 수행하였다. 이때 배양액은 RPMI 완전배지에 20% HL-1

medium, 5% FBS, 10% TCGF를 포함시키고,  $0.125 \mu\text{g}/\text{ml}$  phytohemagglutinin을 첨가시켰다. 배양을 시작할 때 세포의 농도는  $0.1 \times 10^6 \text{ cells}/\text{ml}$  이고, 보통 20 ml 단위로 배양하였다. 배양기간은 각각 3일이었다. 상기의 실험 과정은 별도로 배양방법에 따른 생존율 및 돌연변이 빈도의 변화를 보기 위하여 2차 및 3차 배양 전에 각각 세포들을 수거하고 별도의 mutant plating을 수행하였다. 편의상 1차 배양 후 mutant plating 한것을 survival plate, 2차 배양 후 plating한 것을 direct plate라 하였다 (4차 배양의 것은 mutant plate임). 이 배양방법은 다음의 4차배양(mutant plating)의 방법과 동일하게 실시하였다. 일반적으로 HL-60 human cell line의 배양에서는 충분한 세포를 확보할 수 있어 이 과정을 생략하였다.

### 5. 4차 배양 (mutant plating)

3차 배양이 완료된 후, (HL-60 human cell line의 경우 1차 prime culture 가 완료된 후) 이 세포들 중 *hprt*유전자의 돌연변이 세포를 선별하기 위하여 6-thioguanine을 사용한 선택배양을 수행하였다. 세포의 농도는  $5 \times 10^4 \text{ cells}/\text{ml}$ 로 96well plates를 사용하여 1 well에  $1 \times 10^4 \text{ cells}/0.2 \text{ ml}$  가 되게 하였다. 이 배양액은 RPMI 완전배지에 20% HL-1 medium, 5% FBS, 10% TCGF를 포함시키고,  $0.125 \mu\text{g}/\text{ml}$  phytohemagglutinin을 첨가시켰다. 또한 돌연변이 세포의 선택을 위하여 6-thioguanine을  $1 \mu\text{g}/\text{ml}$ 로 첨가하였다. Feeder cell은 36x4 cell line (*hprt*-negative)을 이용하였으며, 별도로 9 krads ( $^{60}\text{Co}$ 원, 1100 rads/min.)의 감마선에 노출시킨 후 사용하였다. 이 처리는 cell counting이 완료된 후, FBS가 포함되지 않은 RPMI 기본배지에서 수행하였고 처리된 세포는 바로 배양에 사용하였다. Feeder cell의 농도는  $1 \times 10^4 \text{ cells}/\text{well}$ 이 되게 하였다. 배양은  $37^\circ\text{C}$ , 5%  $\text{CO}_2$  incubator (습도는 100%)의 조건에서 10일간 (경우에 따라서는 15일) 수행하였으며, *hprt*- negative인

CFU (clone forming unit)의 발생을 관찰하였다. HL-60 human cell line에 있어서는 세포의 농도를  $2 \times 10^5$  cells/ml를 기준으로 하여 96well plate의 1 well에  $4 \times 10^4$  cells/0.2 ml 가 되게 하였다. 이 세포의 농도는 실험이 진행됨에 따라  $2 \times 10^4$  cells/0.2 ml 또는  $1 \times 10^4$  cells/0.2 ml로 감소시켜 돌연변이의 선별배양에서 그 효과를 조사하였다. 이 배양액은 1차 배양액의 첨가물 중 interleukin-2 를 제외한 모든 첨가물을 같은 농도로 첨가하고, 6-thioguanine을  $1 \mu\text{g}/\text{ml}$ 로 첨가하였다. 배양은  $37^\circ\text{C}$ , 5% CO<sub>2</sub> incubator (습도는 100%)의 조건에서 10일-15일간 수행하였으며, *hprt*- negative인 CFU (clone forming unit)의 발생을 유도하였다.

## 6. CE (Clonal Efficiency)-plating 판정

Mutant plating과 같은 시점에 생존한 세포의 클론형성을 측정하기 위하여 CE-plating배양을 수행하였다. 이는 feeder cell을  $1 \times 10^4$  cells/well (human cell) 또는  $2 \times 10^4$  cells/well로 조정하고, 각 well당 1,2,5 cell (human cell) 또는 1,5,20 cell 되게 첨가하여 배양시킨 것이다. 본 실험에서 이 실험용 세포는 mutant plating과 같은 시점의 세포이며 이 clonal efficiency로써 mutant fraction을 보정하였다. 세포배양액은 상기의 mutant plating때와 동일하나, 돌연변이 세포의 선택을 위하여 6-thioguanine의 첨가는 하지 않았다. Feeder cell은 사람세포의 배양에서는 감마선에 노출시킨 36x4 cell line (*hprt*-negative)을 이용하였으며, 동물세포의 경우 36 x 4 cell line, 생쥐와 흰쥐의 lymphocyte, splenic cell을 각각 실험하였다. 보다 간편한 불활성방법으로 UV-irradiation방법을 도입하여 상기의 feeder cell제조에서 최적의 조건을 조사하였다. 배양은 mutant plating과 같이  $37^\circ\text{C}$ , 5% CO<sub>2</sub> incubator (습도는 100%)의 조건에서 10일간 (경우에 따라서는 15일) 수행하였으며, *hprt*-positive 인 CFU (clone forming unit)의 발생을 관찰하였

다.

## 7. CFU 판정 및 Mutation fraction의 계산

CFU (clone forming unit)는 보통 plating 6일 이후 분열하는 세포의 형태로써 관찰되었다. 이는 보통 10일에 clone의 형태를 확인하여 1차 판정을 하고, 다시 14일에 최종 판정을 하였다. Mutant plate에서는 *hprt*-negative인 clone이, CE plate (clonal efficiency, nonselective plate)에서는 *hprt*-positive인 clone이 형성되어 96well중 CFU가 있는 well을 positive로 하여 이 수를 기록하였다. Clonal efficiency (CE), Mutant fraction (Mf) 및 mutation frequency (MF)의 계산은 Poisson statistics를 적용하여 다음과 같이 계산하였다 (Albertini *et al.*, 1985).

$$P(0) = P_0 = \text{Number of negative wells} / \text{total number of wells}$$

$$\text{Clonal Efficiency(CE)} = - \frac{\ln P_0 \text{ in nonselective plate}}{\text{Number of living cells/well}}$$

\* CE-plate에 실험용세포를 well당 2개씩 넣었으면 Number of living cells/well은 2 임.

$$\text{Mutant fraction (Mf)} = - \frac{-\ln P_0 \text{ in TG-plate}}{\text{Number of living cells/well}}$$

\* Well 당 세포의 수  $1 \times 10^4$  cells일 경우 Number of living cells/well은  $1 \times 10^4$  feeder cell의 수는 제외함.

$$\text{Mutant Frequency (MF)} = \text{Mf/CE}$$

## 8. Mutant clone의 subculture

Thioguanine-plate(Mutant-plate)에서 형성된 CFU (clone forming unit)는 *hprt*-negative인 clone이며, 이는 그 돌연변이 작용의 분석을 위하여 subculture를 수행하였다. 사용배지는 Mutant plate에서와 같이 thioguanine 함유배지를 사용하였으며 배양용기는 24well plate (2ml total culture volume/well)를 사용하였다. Feeder cell은 역시 Mutant plate에서와 같은 종류의 feeder cell을 사용하였으며 그 농도는  $2.5 \times 10^5/\text{ml}$ 로 하였다. 배양은 mutant plating과 같이  $37^\circ\text{C}$ , 5%  $\text{CO}_2$  incubater (습도는 100%)의 조건에서 수행하였으며 배양시작 5-7 일 사이에 상등의 배지를 제거하고, 새 배지 및 feeder cell을 보충하여 주면 성장속도를 빠르게 할 수 있었다. Clone에 따라 성장속도의 차이가 많으나, 보통의 경우 15일 이후 실험에 적당한 수 ( $5.0 \times 10^4/\text{total cells of each clone 이상}$ )의 세포를 얻을 수 있었다. 잘 성장된 clone들은 ( $1.0 \times 10^5/\text{total cells 이상}$ ) Cryovial과 Eppendorf tube에 반씩 나누고, Cryovial의 것은 보관용액과 혼합하여 액체질소 하에서 보관하며, Eppendorf의 것은 핵산분석에 사용하였다. 즉, 원심분리로 세포를 침전시킨 후, 1ml DPBS에 부유시켜 이를 5개의 새 tube에 각 0.2ml ( $1.0 \times 10^4/\text{each tube 이상}$ ) 씩 분주하였다. 각 tube는 다시 원심분리로 세포를 침전시킨 후 상등액을 완전히 제거하였다. 침전된 세포만이 있는 tube에 액체질소를 부어 세포를 동결, 파괴시키고 그대로  $-70^\circ\text{C}$ 에 보관하여 다음의 PCR반응에 하나 씩 사용하였다(하나의 clone당 5번의 PCR반응이 가능).

## 9. RT (Reverse Transcriptase)-PCR

본 실험의 과제 중 *hprt*유전자의 돌연변이를 이용한 방사선과 비방사선과의 생체영향 차별화를 목적으로 하는 실험에서 mutant clone *hprt* gene의

mRNA는 RT(Reverse Transcriptase) PCR실험을 통하여 DNA로 만들어지며, 이는 바로 direct sequencing에 사용된다. 이 RT-PCR실험은 효소 reverse transcriptase를 사용하는 mRNA의 DNA로의 변환, 변환된 DNA들을 1차 PCR증폭 그리고 증폭된 DNA를 direct sequencing에 사용할 만한 양으로 더 육 증폭시키기 위한 2차 PCR (re-PCR)의 3단계를 거친다.

#### 가. RT(reverse transcriptase)-reaction.

잘 성장된 mutant cell( $1 \times 10^5$  cells이상)은 원심분리 (250g 원심분리, 15 cm 반경, 1200 rpm)로 수거하고, DPBS에 부유시켜 세포의 농도를 측정 한 후, 각 tube에  $1 \times 10^4$  cell이상이 되게 분주한다. 다시 원심분리로 상등액을 제거하고, 액체질소를 tube에 부어 세포를 동결 파괴한 후 -70°C에 보관 한다(액체질소를 이용한 세포의 파괴). 보관된 cell lysate tube를 원심분리 1 분으로 cell debris를 침전시키며 녹이고 그 1 L를 취하여 다음 RT-PCR reaction을 실행한다.

#### \* RT(reverse transcriptase)-reaction

1x104 cell이상	1.0 $\mu$ l
5x RT buffer	2.0 $\mu$ l
0.1M dithiothreitol(DTT)	1.0 $\mu$ l
1 mg/ml Bovine Serum Albumin(BSA)	1.0 $\mu$ l
dNTP (2.5mM,each)	2.0 $\mu$ l
oligo dT (50ng/ml)	0.5 $\mu$ l
RNase inhibitor(40U/ l)	0.1 $\mu$ l
Nonidet P-40	0.25 $\mu$ l
MMLV-RT (200U/) 1	0.2 $\mu$ l
D.W.	1.95 $\mu$ l

\* 반응은 37°C, 1시간 진행함. 반응이 끝난 용액은 별도 inactivation 과정 없이 바로 PCR에 사용되거나, -20°C에 보관한다.

\* 보관된 cell lysate는 tube당 약 3 L의 양으로 3번의 reverse transcriptase reaction이 가능하나, 일단 녹인 cell lysate는 다시 열려 보관/사용할 수 없다. 녹을 때 공기 중의 습기를 빨아들여 cell lysate의 양을 늘리는 일이 없도록 한다.

#### 나. Mutant *hprt* gene의 증폭을 위한 1차 PCR.

RT-reaction에 의하여 만들어진 모든 polyA-tail을 가진 mRNA의 cDNA는 1차 PCR을 통하여 *hprt* gene의 cDNA만 증폭되어야 한다. 이 1차 PCR반응의 사용 primer와 조성 그리고 반응 조건은 다음과 같다.

#### \* Mutant *hprt* gene의 증폭을 위한 1차 PCR.

조성성분/ 반응액 총량:	100 $\mu$ l	최종농도
Mutant RT-reaction (cDNA)	10 $\mu$ l	-
Primer 1.(RT3, 20 $\mu$ M)	1 $\mu$ l	0.2 $\mu$ M
Primer 2.(RT4, 20 $\mu$ M)	1 $\mu$ l	0.2 $\mu$ M
dNTP ( 2.5 mM each)	12 $\mu$ l	0.3 mM (each)
10x PCR buffer(w/o Mg)	10 $\mu$ l	1x
MgCl <sub>2</sub> , 25mM.	6 $\mu$ l	1.5 mM
Taq polymerase (5 U/ $\mu$ l)	0.5 $\mu$ l	2.5 $\mu$ g/100 $\mu$ l
2차 증류수	41.5 $\mu$ l	-

\* 반응 온도와 시간은 predenaturation, 100°C, 10분 후; 94°C, 60초;  
50°C, 60초; 72°C, 120초, 30회전 반복. post-polymerization, 72°C, 10분  
\* Primer RT35'-CTGCTCCGCCACCGGCTTCC-3' (forward, 20mer)

Primer RT4 5'-GATAATTTACTGGCGATGT-3' (reverse, 20mer)

\* Primer의 농도는 제작자에 따라 3가지로 주어진다.  $\mu\text{M}$ , pmole/  $\mu\text{l}$ , ng/  $\mu\text{l}$  가 그것이다. 보통  $100 \mu\text{M}$  ( $100 \text{ pmole}/\mu\text{l}$ )로 만들어 공급되는 primer는 약  $600 \text{ ng}/\mu\text{l}$  (20mer, 1염기당 분자량 300으로 계산)로, 반응액에 들어 간 primer의 최종 농도는  $0.2 \mu\text{M}$ - $1.0 \mu\text{M}$  ( $0.2$ - $1.0 \text{ pmole}/\mu\text{l}$ ;  $1.2$ - $6 \text{ ng}/\mu\text{l}$ )이다. 본 실험에서 primer보관용액의 농도는  $20 \mu\text{M}$  ( $20 \text{ pmole}/\mu\text{l}$ ;  $120 \text{ ng}/\mu\text{l}$ )로 조정되어 있다.

#### 다. Mutant *hprt* gene의 증폭을 위한 2차 PCR (nested PCR)

1차 PCR을 통하여 선택적으로 증폭된 *hprt* gene의 DNA는 direct sequencing을 위하여 충분한 양이 아니며 재증폭(rePCR)되어야 한다. 재PCR을 같은 1차 PCR과 같은 primer를 사용하여 PCR시키면 잘 반응이 되지 않는 경우가 많이 발견되기도 한다. 이유는 분명히 설명되지 않으며, 또한 다른 많은 연구자들은 그런 어려움을 겪지 않고 있기도 하다.

Nested PCR은 1차 PCR에서 사용된 primer들의 바로 안쪽 염기서열로 만든 두 개의 primer를 이용하는 PCR로 상기의 문제점 없이 좋은 PCR결과를 보인다.

본 실험에서 사용되는 2개 primer RT-A, RT-B는 바로 1차 PCR에서 사용되었던 primer RT4, RT3의 nested primer로써 본 실험에 이용될 수 있다. 그러나 실제로 이 재PCR에서는 primer RT3, RT4를 그대로 이용하여도 별 문제가 없으며, 본 실험에서는 가급적 2차 PCR (재PCR)에서도 primer RT3, RT4를 사용하고, 그 다음 과정인 direct sequencing에서 nested primer RT-A, RT-B를 이용하기로 한다.

1차 PCR과 같은 primer를 사용한 2차 PCR이 어려운 이유는 다음과 같은 2가지 설명이 있다. 먼저, *Taq* polymerase가 단일 가닥 template와 annealing 된 primer에 binding할 때, 긴 가닥의 중간 위치로는 binding하기 쉬우나, DNA 말단에 binding하기는 효소 구조적으로 쉽지 않다는 것이다. 이는 제

한효소의 작용, 일반 DNA polymerase의 작용에서 발견되는 현상을 설명할 수 있다. 또한, template의 중간에 annealing된 primer는 자신의 5'-말단 쪽 template 단일 가닥의 구조적 도움으로 annealing 후 polymerization 온도까지 상승하는 동안 더 오래 annealing 상태를 유지할 수 있으며 온도 상승으로 활성을 되찾는 *Taq* polymerase에 의해 binding 당할 확률이 높다는 것이다. 상대적으로 template DNA 말단에 위치한 primer는 자신의 5'-말단 쪽에는 template 단일 가닥이 없기에 그 구조적 도움을 받을 수 없다는 것이다. 이 2차 PCR 반응의 사용 primer와 조성 그리고 반응 조건은 다음과 같다.

\* Mutant *hprt* gene의 증폭을 위한 2차 PCR(Nested PCR).

조성성분/ 반응액 총량:	100 $\mu$ l	최종농도
1차 PCR product	0.1 $\mu$ l	-
Primer 1.(RT-A, 20 $\mu$ M)	1 $\mu$ l	0.2 $\mu$ M
Primer 2.(RT-B, 20 $\mu$ M)	1 $\mu$ l	0.2 $\mu$ M
dNTP ( 2.5 mM each)	12 $\mu$ l	0.3mM (each)
10x PCR buffer(w/o Mg)	10 $\mu$ l	1x
MgCl <sub>2</sub> , 25mM.	6 $\mu$ l	1.5 mM
<i>Taq</i> polymerase (5 U/ $\mu$ l)	0.5 $\mu$ l	2.5 $\mu$ g/100 $\mu$ l
2차 증류수	69.4 $\mu$ l	-

\* 반응 온도와 시간은 94°C, 60초; 50°C, 60초; 72°C, 120초, 25회전 반복.  
post-polymerization, 72°C, 10분

- \* Primer RT-A 5'-CAATAGGACTCCAGATGTT-3' (reverse, 20mer)
- Primer RT-B 5'-CCTGAGCAGTCAGCCCCGCGC-3' (forward, 20mer)
- 또는
- \* Primer RT3 5'-CTGCTCCGCCACCGGCTTCC-3' (forward, 20mer)
- Primer RT4 5'-GATAATTACTGGCGATGT-3' (reverse, 20mer)

2차 PCR생성물은 1 x TAE 1% agarose gel전기 영동으로 반응 성패 여부를 확인한 후, direct sequencing으로 mutation의 위치와 종류를 확인한다.

또한 상기실험에 사용된 Primer는 다음과 같다.

Primer 3 (+): 5'- CTG CTC CGC CAC CGG CTT CC -3' 20-MER

Primer 4 (-) 5'- G ATA ATT TTA CTG GCG ATG T 20-MER

Primer B (+) 5'- CCT GAG CAG TCA GCC CGC GC 20-MER

Primer A (-) 5'- CA ATA GGA CTC CAG ATG TTT 20-MER

라. 전기영동에 의한 확인 및 Mutant DNA-fragment의 회수.

RT-PCR의 생성물 (2차 PCR 생성물)은 1xTAE, 1% agarose gel에 전기영동하여 PCR 생성물의 형성 및 deletion-mutant여부를 확인하였다. 이는 또 다음의 Sequencing반응을 위한 잔류 PCR-Primer의 제거를 위하여 수행되었다. 생성된 PCR생성물(약 650 base)과 deletion-mutant의 DNA band들은 Gene Clean Kit II (Bio 101 사)를 사용하여 회수하였다. 이 방법은 변형 없이 제작자의 지시에 따라 수행하여 다음 PCR-sequencing의 template로 사용하였다.

#### 10. Mutant hprt gene의 DNA-sequencing

회수된 각 PCR product는 DNA-sequencing으로 정상 염기서열과 다른 돌연변이의 위치를 확인하였다. Sequencing반응은 Perkin elmer사의 ABI PRISM Dye terminator를 사용한 cycle sequencing으로 수행하였으며, 96°C, 10초 denaturation, 50°C, 5초 renaturation, 60°C, 4분 polymerization, 25회 전으로 하였다. 전체 반응의 순서는 Taq-polymerase를 첨가한 상태에서 96°C, 30초의 pre- denaturation을 수행하고, 25회전의 본 반응을 수행하고 종료하였다. 사용된 Thermocycler는 Perkin Elmer 9600과 Ericomb사의 것을 사용

하였고, 반응의 조성은 다음과 같이 하였다.

Reaction premix	8.0 $\mu$ l
PCR product(10-30 ng/ $\mu$ l)	3-6 $\mu$ l
Primer A 또는 B	3.2 pmole (21.1 ng)
D.W.	-
Total volume of reaction	20 $\mu$ l

사용된 sequencing primer의 염기서열은 다음과 같다.

Primer B (+) 5'- CCT GAG CAG TCA GCC CGC GC      20-MER  
Primer A (-) 5'- CA ATA GGA CTC CAG ATG TTT      20-MER

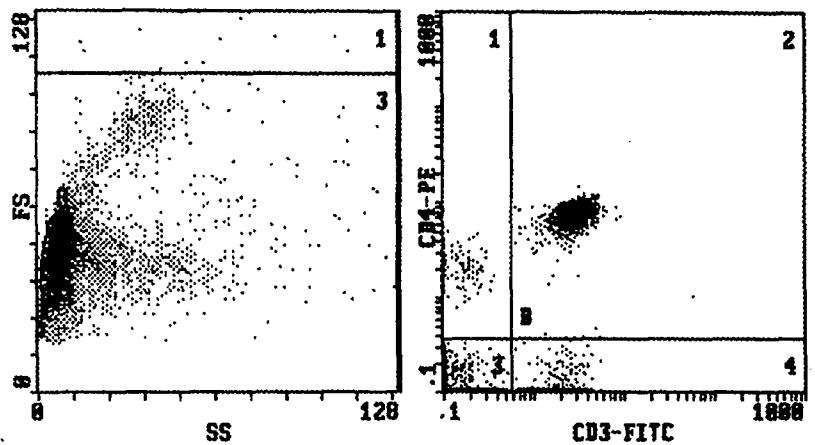
생성된 Sequencing product는 promega사의 cat# C-1281 Spin Column C를 사용하여 과량의 dNTP, ddNTP를 제거하였으며 speed Vac으로 건조시켜 loading전까지 보관하였다. Automatic Sequencer는 ABI사의 Cycle Sequencer Model ABI 373을 사용하여 염기서열을 결정하였다.

## 제 2 절 연구결과 및 고찰

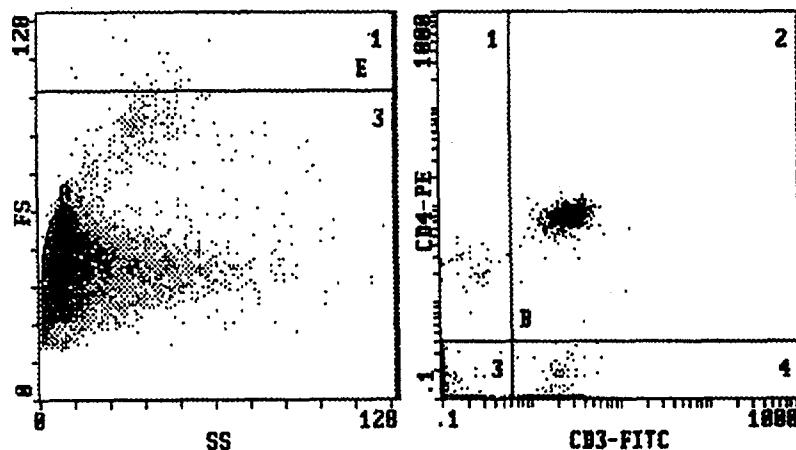
### 1. 변이측정기술의 확립:

#### 가. 유동세포분석기 (flow cytometry)

일반적으로 방사선을 비롯한 다양한 환경돌연변이원에 의한 변이의 측정은 세포막의 receptor와 관련이 있다. 따라서 CD종류의 단일항체를 이용할 경우 thymocyte나 lymphocytes의 변형의 정도를 잘 확인할 수 있다. 그러나 cell sorter가 없으면 mutant cell의 선택이 불가능하므로 현재까지 hprt 유전자의 6-thioguanine 처리에 의한 mutant cell의 선택 및 확보가 용이한



(normal) 14.6/76.6

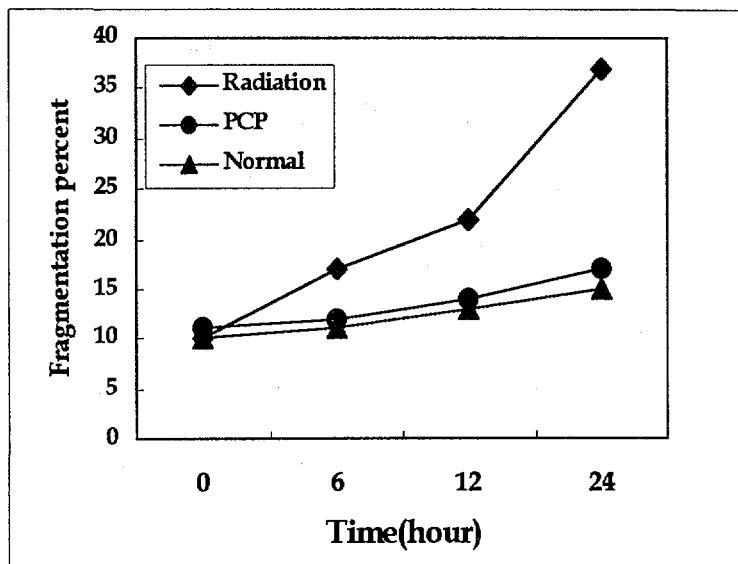


(100 rad) 8.2/86.6

그림 1. 방사선 조사(100 rad, 32 hours, 단일클론항체: CD4/CD3)후 환쥐 혈액 세포의 유동세포분석.

Fig. 1. Flow-cytometric analysis of irradiated(rat, 100 rad, 32 hours, monoclonal antibody: CD4/CD3) rat blood cells.

A



B

N PCP R

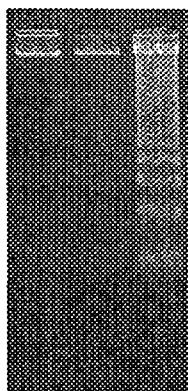


그림 2A. 방사선(100rad)과 PCP(15ppm) 조사에 의한 세포의 DNA 절단현상.

그림 2B. DNA 절단현상의 agarose gel전기영동. N, 정상세포; PCP, PCP를 처리한 세포; R, 방사선 조사된 세포.

Fig. 2A. Percentage of DNA fragmentation in normal, irradiated (100 rad) and PCP(15 ppm)-treated cells.

Fig. 2B. Agarose gel electrophoresis of DNA fragmentation. N, normal cells; PCP, PCP-treated cells; R, radiation-exposed cells.

경우는 혼하지 않다 (Figure 1).

#### 나. DNA 절단현상(DNA fragmentation)

방사선 피폭의 경우 T-임파구세포에서는 세포사 (programmed cell death) 현상이 일어나게 되는데 이러한 현상의 대표적인 것으로는 endonuclease의 규칙적인 절단현상이다. 이러한 절단현상은 화학적 방법으로 정량이 가능하나 실험적 오차가 상당히 크며 환경독성물질 중에는 이러한 세포사 현상을 유발하는 것과 그렇지 않은 것이 있어서 방사선과 일반독성 물질의 영향과의 차이를 볼 수 있는 구체적 세부특성을 알 수 없다. 방사선과는 달리 일반적으로 PCP에 의한 DNA fragmentation현상은 일어나지 않고 있다(Figure 2).

#### 다. T-cell clonal assay

방사선 피폭 및 환경 독성물질에 대한 정량적 지표뿐만 아니라 정성적 지표가 가능한 *hprt*유전자의 T-cell clonal assay를 유전적 독성 평가방법으로 사용을 위하여 확립하였다. 암발생 요인 등을 분석하기 위한 방법으로 개발된 T-cell clonal assay는 방사선 및 환경독성물질에 대한 biomarker로 이용하려는 실험에 도입되어 이미 여러 독성물질에 대하여 그 가능성을 검증 받은 바 있으며, 또한 근래의 polymerase chain reaction 기법의 발달은 이 T-cell clonal assay를 한 단계 발전시키어 환경 돌연변이원에 대한 정성적 분석방법인 mutational spectrum을 작성함으로서 연구가 발전되고 있다. 1차 배양은 단순히 세포독성효과를 나타내므로 실험결과의 정확성과 유전적 독성효과를 위하여 2-3회의 subculture를 시행하여야 한다.

## 2. 방사선 조사에 의한 Human cell 및 HL60 cell line의 생존율

Prime culture에서의  $\gamma$ -irradiation은  $\text{Co}^{60}\gamma$ -선원을 사용하여 (1.53 rads/sec), 그 최종조사량이 0, 20, 50, 100, 200, 300 rad가 되게 하였다. Human cell을 사용한 실험은 36세의 한국남자에게서 혈액 세포를 분리하여 사용하였으며, clonal efficiency는 35.6 %, Mutant fraction은  $2.77 \times 10^{-6}$ 으로 측정되었다. Human *in vitro* 실험에서 survival counting의 결과를 보면  $\gamma$ -irradiation은 200 rad 이상에서 강력한 세포독성 및 유전독성을 나타냄을 볼 수 있었다. 즉,  $\gamma$ -radiation 처리를 한 prime culture 후의 생존 세포수 검사는 0 rad에서 약 49%의 생존율을, 20 rad 이상 100 rad까지는 control과 비슷한 41-51%의 생존율을 나타냈으나, 200 rad에서는 23%정도, 또한 300 rad에서는 11% 이하의 생존율을 보였다 (표 1). PCP처리에 의해서도 고선량에서는 세포생존률이 급격히 저하되는 것을 볼 수 있었고 따라서 100 ppm에서는 CE와 MF를 관찰할 수 없었다.

이러한 생존율의 감소는 1차 배양 (prime culture)에서 세포분열이 거의 일어나지 않는다는 사실에 비추어 볼 때(O'Neill *et al.*, 1987) 단지  $\gamma$ -irradiation에 의한 독성효과를 반영하는 것으로 생각되며, 이는 세포들의 증식력을 반영하는 Clonal Efficiency(CE)실험에서 보다 극명하게 나타났다. 즉, Survival counting에서 나타난 완만한 용량-반응 관계는 각 처리농도에 따른 clonal efficiency(CE)에서 더욱 확실한 용량-반응관계를 보이고 있으며, Control에서 0.350 - 0.360으로 나타난 CE는 200 rad 이상의 고농도에서는 0.140이하로 계속 감소하였다 (표 1).

한편 Human cell line을 이용한 간편한 Clonal assay방법의 개발을 위한 기초 실험으로, 감마선 조사에 의한 cell line의 생존율을 조사하였다 (표 2). 여기서 생존율은 감마선 조사 후 세포파괴의 정도를 세포농도로 측정하였다. 사용된 선량은 1,000 rad 까지이며, 선량이 증가함에 따라 전체적으로 미세한 세포농도의 감소를 보였다. 그러나 이는 실험오차의 범위에 든 것으로

표 1.  $\gamma$  선과 pentachlorophenol이 처리된 사람 T-cell의 생존율과 clonal efficiency(CE)

Table 1. Survival countings and Clonal Efficiency(CE) of human T-cell exposed to  $\gamma$ -radiation and pentachlorophenol

Quantity of irradiation	% Survival	CE
0 rad(0 ppm)	49(52) %	0.355(0.379)
20 rad(10ppm)	51(47) %	0.388(0.358)
50 rad(15ppm)	48(48) %	0.339(0.310)
100 rad(25ppm)	41(47) %	0.274(0.161)
200 rad(50ppm)	23(39) %	0.142(0.062)
300 rad(100ppm)	11(9) %	0.089(N.D)

\* Radiation-source in experiment was Co<sup>60</sup>.

\* % was calculated by total number of cells before cultibation  $\times 100$  / total number of cells after cultibation.

\* Cell concentration of culture: prime culture ( $1 \times 10^6$  cells/ml).  
Each volume of prime cultures was (5.18ml, each).

\* CE (Clonal Efficiency) =  $-\ln P_0 / N$  ;  $P_0 = P(0)$ = Number of negative wells/total number of wells ;  $N$  = number of cells per well.

\* Each CE was calculated from data determined by 1,2,5 cells/well  
(No irradiation), 2,10,50 cells/ml (irradiation) with  $1 \times 10^4$  gamma irradiated 36x4 cells per well under nonselection conditions.

표 2.  $\gamma$  선 조사에 의한 HL-60 human cell line의 생존율

Table 2. Survival countings of HL-60 human cell line exposed to  
 $\gamma$ -radiation

Quantity of irradiation	un-irradiated cell concentration	
	$2.8 \times 10^6 / \text{ml}$	$2.48 \times 10^6 / \text{ml}$
0 rad	$2.8 \times 10^6 / \text{ml}$	$2.48 \times 10^6 / \text{ml}$
100 rad	$2.8 \times 10^6 / \text{ml}$	$2.46 \times 10^6 / \text{ml}$
200 rad	$2.4 \times 10^6 / \text{ml}$	n.d.
250 rad	n.d.	$2.28 \times 10^6 / \text{ml}$
300 rad	$2.0 \times 10^6 / \text{ml}$	n.d.
400 rad	$2.0 \times 10^6 / \text{ml}$	n.d.
500 rad	n.d.	$2.00 \times 10^6 / \text{ml}$
1000rad	n.d.	$2.30 \times 10^6 / \text{ml}$

\* n.d.; not determined

\* Radiation-source in experiment was  $\text{Co}^{60}$ .

인정되며, T-cell clonal assay의 prime culture와는 달리 단기배양(48시간 이내)에서도 세포분열이 가능하기에 선량의 정도를 역산하기에는 적절치 않은 것으로 판단되었다.

HL-60 human cell line을 이용한 clonal assay의 개발에서 정확한 판정을 위한 적정 배양시간을 실험하였다(표 3). 감마선이 조사된 HL-60 cell을 배양하고 각각 7일, 14일, 21일, 28일에 현미경관찰을 통하여 positive/negative well을 판정하였다. 먼저 판정된 기록은 후에 판정된 기록과 비교하였으며, 개개 well의 성장상태는 각 실험군내에서 동일하게 진행되었다. 감마선이 조사된 세포들은 대조군에 비하여 선량이 높아짐에 따라 성장이 느려짐이 확실히 관찰되었으며, 이는 중식가능한 세포수의 감소에 의한 것으로 사료된다. 500 rad까지의 선량으로 조사된 HL-60 세포들은 3주(21일)에 이르러 대조군 세포와 동일한 cell mass를 기록하였으며, 1000 rad의 조사를 받은 세포들은 4주(28일)이 되어도 positive well로 판정받은 것이 전혀 없어 100% 세포사멸로 추정되었다. 전 배양기간에 걸쳐 배지의 교환을 수행치 아니하였으며, 이로써 세포의 성장은 약  $10^5$  cells/well (++)에서 정지되었다. 이 실험으로 HL-60 cell을 이용한 clonal assay는 3주(21일)의 배양기간을 거쳐야 함이 확정되었다.

*hprt* negative clone을 선별하기 위한 적정 6-thioguanine(6-TG)의 농도를 검사하였다 (표 4). 대조군에 비하여 세포의 성장은 5  $\mu$ M의 6-thioguanine의 첨가에서도 확실히 저해되었으며, 이는 원래 *hprt* negative의 유전형을 가진 36x4 cell line에서도 나타나, 6-thioguanine의 세포 성장저해가 유전독성에 기인하는 것이 아님이 관찰되었다. 6-thioguanine에 의한 성장저해는 고농도 (20  $\mu$ M 이상) 실험군에서 보다 강력하였으며, 4주(28일)의 관찰에서도 대조군에 비하여 비교적 적은 세포총량을 보였다. 그러나, 10  $\mu$ M 이하의 6-thioguanine 첨가군들의 3주(21일)후 관찰 결과는 well당 세포의 총량이 대

표 3.  $\gamma$  선 조사후 시간에 따른 HL-60 human cell line의 생존율Table 3. Results from survival plating of HL-60 human cell line exposed to  $\gamma$ -radiation

Quantity of irradiation	Nr. of well	Days of estimation			
		7	14	21	28
0 rad	288	-	++	++	++
100 rad	288	-	++	++	++
200 rad	96	-	+	++	++
250 rad	192	-	+	++	++
300 rad	96	-	+	++	++
400 rad	96	-	+/-	++	++
500 rad	192	-	+/-	++	++
1000rad	192	-	-	-	-

\* Radiation-source in experiment was Co<sup>60</sup>.\* Survival plating was cultured with  $1 \times 10^4$  cells/well in standard medium without 6-TG.\* Rate of cell growth in each well were different by means of quantity of gamma irradiation. Symbol, ++, +, +/-, - and -- were indicated as results of cell condition and mass by microscopic observation on 7, 14, 21 and 28 days after  $\gamma$ -irradiation.

표 4. 36 x 4 human cell line에서 *hprt*-negative clones을 가진 유전자를 얻기 위한 6-thioguanine의 최적농도

Table 4. Optimal concentration of 6-thioguanine for the selection of *hprt*-negative clones in 36x4 human cell line

Concentration of 6-thioguanine	Nr. of well	Days of estimation			
		7	14	21	28
0 $\mu$ M	96	-	+	++	++
5 $\mu$ M	96	-	-	++	++
10 $\mu$ M	96	-	-	++	++
20 $\mu$ M	96	-	-	+	+
30 $\mu$ M	96	-	-	+	+
40 $\mu$ M	96	-	-	+	+

\* Cells was cultured in standard condition with  $1 \times 10^4$  cells/well with 6-TG.

\* Rate of cell growth in each well were different by means of concentration of 6-thioguanine(6-TG). Symbol, ++, +, +/-, - and -- were indicated as results of cell condition and mass by microscopic observation on 7, 14, 21 and 28 days after plating.

조준과 차이가 없는 것으로 나타났기에, 본 실험에서 기획하고 있는 cell line을 이용한 clonal assay의 *hprt* negative clone의 선별에 별 문제가 없을 것으로 예측하고 있다. HL-60 cell line (*hprt* positive)에 대한 동일한 실험에서 5  $\mu$ M이상의 6-thioguanine의 첨가는 총 480 well 모두에서 처리 후 1주일 후 확실한 세포사멸의 효과가 관찰되었다.

Cell line에 의한 clonal assay의 개발은 cell line의 높은 clonal efficiency에 의한 민감한 유전독성평가방법을 기대하는 것이다. HL-60 cell (*hprt* positive)의 배양 중 6-thioguanine 첨가는 매우 적은 돌연변이 *hprt* negative cell을 그중에서 선별하고자 하는 것으로, HL-60 cell과 36x4 cell (*hprt* negative) 을 6-thioguanine을 첨가, 공배양하여 36x4 cell의 clonal efficiency(CE)를 측정하였다 (표 5). 공배양은 HL-60  $1 \times 10^4$  cells/well 과 36x4 cell 각각 1/well, 2/well, 5/well, 10/well을 합하여 진행하였으며, 이는 8  $\mu$ M의 6-thioguanine을 첨가한 선택배양 후 positive/negative판정을 하였다. 결과는 예상대로 100%에 가까운 CE를 나타내었으며, 아울러 양 세포주는 상호 feeder cell로 사용이 가능함이 증명되었다.

### 3. 사람의 *hprt*유전자에서 방사선 및 pentachlorophenol 조사에 의한 *in vitro* *hprt* gene mutation (human *in vitro*)

Mutation fraction(Mf)는  $-\ln P_0$  를 well당 주어진 세포수로 나누어 준 것이며, 이를 CE로 보정한 것을 Mutant Frequency(MF)로 정하였다(O'Neill *et al.*, 1990). 이는 6-thioguanine을 사용하여 *hprt*-negative인 세포를 positive selection한 것으로 concanavalin A 등의 자극에 따라 세포분열을 계속하게 하여 clone을 형성하게 하였다(Albertini *et al.*, 1985). 일반적으로 6일 이후부터 *hprt*-positive인 세포들이 급속히 쇠퇴하게 됨을 볼 수 있었고, 이로써 *hprt*-negative인 세포들의 분열하는 세포형태를 보다 쉽게 관찰할 수 있었다.

표 5.  $\gamma$  선 조사에 의한 사람 T-lymphocytes의 mutant frequency 측정

Table 5. Measurement of mutant frequency determined in experiments  
of human T-lymphocytes exposed to  $\gamma$ -radiation

Quantity of irradiation	Mutant fraction	Clonal Efficiency	Mutant Frequency
0 rad	$2.61 \times 10^{-6}$	0.355	$7.35 \times 10^{-6}$
25 rad	$2.87 \times 10^{-6}$	0.388	$7.38 \times 10^{-6}$
50 rad	$2.67 \times 10^{-6}$	0.339	$7.87 \times 10^{-6}$
100 rad	$2.68 \times 10^{-6}$	0.271	$9.89 \times 10^{-6}$
200 rad	$5.01 \times 10^{-6}$	0.142	$35.3 \times 10^{-6}$
300 rad	$4.87 \times 10^{-6}$	0.089	$54.7 \times 10^{-6}$

보통 6일에 관찰된 분열하는 세포의 형태는 배양 10일 이후에는 clone의 형태로 관찰되었고 positive well로 판정하였다. 다량의 plate를 관찰하는 데 있어 round bottom 96 well-plate가 flat bottom 형 보다 매우 간편하였으며 positive/negative 판정이 보다 객관화되는 장점이 있었다. 감마선 및 pentachlorophenol 조사에 의한 human *in vitro* *hprt* mutant frequency(MF)는 1차 prime culture, 2, 3차 subculture, 4차 돌연변이 선택배양(Thioguanine-plate)의 판정을 통한 mutant fraction(Mf)의 계산 및 CE값에 의한 보정으로 구해졌다.

이 결과는 앞의 중식력 측정을 위한 CE측정이 완만한 용량-반응관계를 보인데 반해 확실한 정량적 차이와 민감도의 차이를 나타내었으며, 감마선 조사량의 증가에 대하여, 비교적 정확히 증가되는 mutant frequency가 측정되어, 전체적으로 확실한 용량-반응관계를 보였다 (표 5). 즉, 100 rad 이하의 저 조사량 처리에 있어서는 매우 완만한 Mutant Frequency의 증가를 나타내다가 200 rad 이상의 고 조사량 처리에서는 무처리군에 비해 5배 이상되는 급격한 MF 증가를 보이고 있다. 방사선의 경우 0.25 Gy까지, PCP의 경우 20 ppm까지 생존율, clonal efficiency 비방사선 및 PCP의 경우와 커다란 차이를 보이고 있지 않았다. 0.5 Gy 이상에서는 방사선의 경우 돌연변이율이 증가하기 시작하였으며, PCP의 경우는 15 ppm부터 돌연변이율이 증가하기 시작하였다. PCP의 경우 25 ppm이상의 처리에서는 생존율 및 clonal efficiency가 급격히 떨어지고 있는데 이는 PCP의 세포독성을 나타내고 있는 것으로 사료되며, 100 ppm에서는 돌연변이율에 대하여 만족할 만한 결과가 나오지 않고 있다. 측정된 최고선량 (감마선) 또는 농도 (PCP)에서 양자의 돌연변이율의 변화는 각각 그 background수준과 비교할 때 750% 와 500%의 증가율을 보였다(표 5, 6).

본 실험의 최종결과로써 human blood lymphocyte의 배양에서 감마선조

표 6. Pentachlorophenol(PCP) 조사에 의한 사람 T-lymphocytes의 mutant frequency 측정

Table 6. Measurement of mutant frequency determined in experiments of human T-lymphocytes exposed to pentachlorophenol

Quantity of PCP	Mutant fraction	Clonal Efficiency	Mutant Frequency
0 ppm	$3.06 \times 10^{-6}$	0.379	$8.04 \times 10^{-6}$
10 ppm	$2.91 \times 10^{-6}$	0.358	$8.13 \times 10^{-6}$
15 ppm	$2.78 \times 10^{-6}$	0.310	$9.24 \times 10^{-6}$
25 ppm	$2.38 \times 10^{-6}$	0.161	$14.78 \times 10^{-6}$
50 ppm	$2.59 \times 10^{-6}$	0.062	$41.77 \times 10^{-6}$
100 ppm	N.D.	N.D.	N.D.

\* Radiation-source in experiment was Co<sup>60</sup>.

\* % was calculated by total number of cells before cultivation  $\times 100$  / total number of cells after cultivation.

\* Cell concentration of culture: prime culture ( $1 \times 10^6$  cells/ml).  
Each volume of prime cultures was (5.18ml, each).

\* CE (Clonal Efficiency) =  $-\ln P_0 / N$  ;  $P_0 = P(0)$ = Number of negative wells / total number of wells ; N = number of cells per well.

\* Each CE was calculated from data determined by 1,2,5 cells/well (No irradiation),

2,10,50 cells/ml (irradiation) with  $1 \times 10^4$   $\gamma$ -irradiated 36x4 cells per well under nonselection conditions.

\* Mutant Frequency (MF) = Mf/CE = Mutant fraction / Clonal efficiency ;  
Mutant fraction (Mf)=  $(-\ln P_0$  in thioguanine-plates) / ( $1 \times 10^4$  cells/well)

\*  $1 \times 10^4$  mononuclear cells/well used for 6-TG selective conditions( $1 \mu\text{g}/\text{ml}$  of medium) with  $1 \times 10^4$   $\gamma$ -irradiated 36x4 cells per well.

사에 대한 mutant fraction, Mutant Frequency의 linear regression equation은 다음과 같이 계산되었다. Mutant fraction = [ 0.0072 × (rad of irradiation) + 2.5923 ] × 10<sup>-6</sup>, Mutant Frequency = [ 0.1688 × (rad of irradiation) + 1.4167 ] × 10<sup>-6</sup>. 또한, 상기의 linear regression equation에 대한 correlation coefficient (r)은 mutant fraction에 대하여는 0.7259로, Mutant Frequency에 대하여는 0.9542로 계산되어 Mutant Frequency가 보다 직선상의 상관관계에 가까운 것으로 나타났다. 이는 Clonal Efficiency (CE)로써 Mutant fraction을 보정하여 Mutant Frequency로 분석하는 것이 보다 정확함을 다시 보여준 것이라 하겠다.

#### 4. 방사선과 PCP혼합피폭에 의한 돌연변이 빈도변화

방사선 방호에서 방사선영향의 기준은 방사선 단일영향으로 고려되고 있다. 그러나 환경 내에서 사람은 지역, 의약품복용 및 산업특성등에 따라 일부 특정물질의 환경 돌연변이원에 의하여 노출될 수 있다. 따라서 방사선 피폭의 경우는 상황에 따라서 이러한 요인을 고려하여야만 한다. 이러한 혼합영향의 규명은 방사선 상해의 분쟁이 발생할 경우 객관적 자료로 고려할 수도 있는 것이다. 대체적으로 하나 이상의 환경돌연변이원이 피폭되었을 경우에는 각각의 돌연변이빈도변화의 additive효과가 나타난다. 그러므로 본 연구에서는 방사선과 환경 내에서 많이 접촉할 수 있는 PCP를 대상으로 *hprt* 유전자돌연변이의 혼합영향을 살펴보았다. 다양한 방사선량에 고정된 농도의 PCP (15, 25ppm)를 처리함으로써 돌연변이율에서 방사선단일효과와 어떠한 차이를 보이고 있는지 살펴보았다. 그러나 예상하였던 것과는 다르게 synergistic (additive) 효과를 보이고 있지는 않았다. 즉 단일방사선의 경우와 *hprt* 유전자 돌연변이율에서 유의성 있는 차이는 보이지 않고 있다(그림 3). 이러한 원인은 아직은 정확하게 설명할 수는 없으나 ① PCP의 생체내 유입

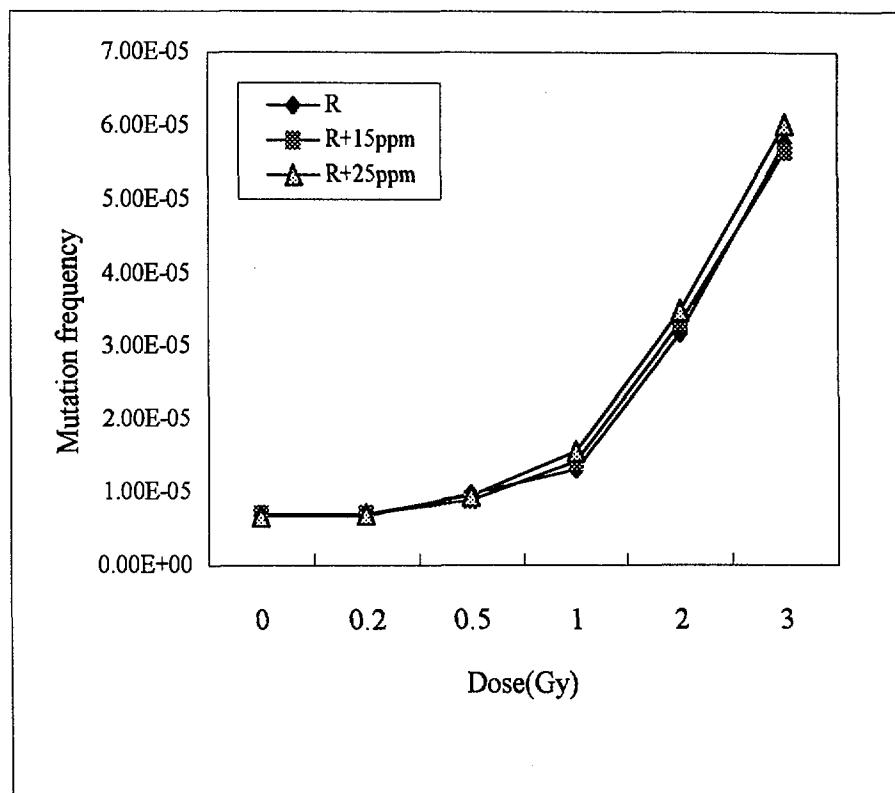


그림 3. 사람 T-lymphocyte를  $\gamma$  선(R)과 pentachlorophenol(15ppm과 25ppm)을 동시에 피폭시킨 후 사람 *hprt* 유전자의 mutation frequencies.

Fig. 3. Mutation frequencies of human *hprt* gene following  $\gamma$ -irradiation(R) with pentachlorophenol(15 ppm and 25ppm) in human T-lymphocyte.

시 metabolism과 그 대사산물에 의한 영향은 고려되지 않은 것으로 사료된다. 따라서 차기 연도의 연구는 이러한 대사산물을 대상으로 혼합효과등을 고찰하여야 할 것으로 사료된다. ② PCP의 구조 중 phenol기가 방사선조사에서 생성된 radicals를 일부 흡수하는 효과를 배제할 수는 없으나 좀 더 구체적 연구가 필요하다.

## 5. RT-PCR에 의한 돌연변이유형분석

방사선 (300 rad)과 PCP(25ppm) 피폭에 의해 유도된 *hprt* 돌연변이 유전자 유형의 분석을 위하여 사람의 T-лим파구세포에 감마선을 조사하고 6-thioguanine에 의한 *hprt* cell을 선택하여 여러 clone을 증식배양 하였다. 그후 각각의 cell을 파괴하여 RT-PCR을 수행 전기영동한 결과 다음과 같은 유형의 돌연변이가 나오는 것으로 사료된다(그림 4, 5).

정상적인 *hprt* 유전자의 RT-PCR product는 660bp정도이다. 그러나 방사선피폭의 경우에는 RT-PCR 산물이 만들어지지 않는 경우가 많게 되는데 이러한 현상은 주로 발현단계에 관여된 부분으로 발현단계에서 messenger RNA가 만들어지지 않을 경우를 추측할 수 있고 또는 5' 말단 혹은 3' 말단 부분이 돌연변이 되었을 것으로 추정된다(3, 6, 8, 10 lane).

RT-PCR 산물이 control과 비교하여 정상적 product를 생성하는 경우가 발생하는데 이러한 경우는 돌연변이 현상에서 흔히 볼 수 있는 *hprt* 유전자의 일부가 점(point)돌연변이가 되어 정상적 아미노산을 변형시키는 경우이다. 따라서 최종산물은 불활성 *hprt*효소를 생산하게 된다(2, 4, 7, 9, 11 lane).

RT-PCR 산물 중에는 조금 작아진 product가 생성되는데 이러한 경우는 주로 *hprt* 유전자의 일부가 결실되었거나 splicing 과정 중에서 과다결실이 일어나는 것으로 추정하고 있다(5, 12 lane)

현재의 실험에서는 PCP에 의하여 피폭되었을 경우는 방사선의 경우처럼

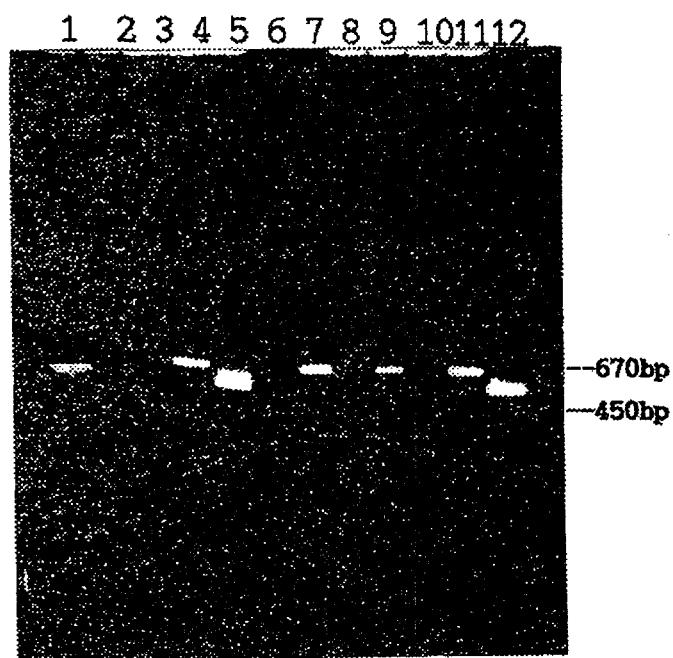


그림 4.  $\gamma$  선 조사 후 *hprt* 유전자를 RT-PCR로 증폭시켜 agarose gel 전기영동 분석.

Fig. 4. Agarose gel electrophoresis of RT-PCR product of *hprt* gene after  $\gamma$ -irradiation.

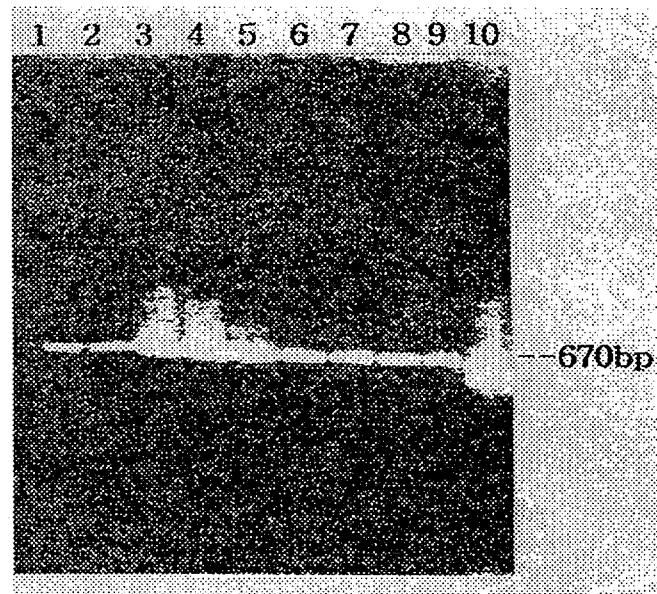


그림 5. PCP 조사 후 *hprt* 유전자를 RT-PCR로 증폭시켜 agarose gel 전기영동 분석.

Fig. 5. Agarose gel electrophoresis of RT-PCR product of *hprt* gene after PCP treatment.

RT-PCR 산물이 생성되지 않는 경우는 발생하지 않았다. 반면에 대부분 점들 연변이가 발생하여 정상적인 아미노산을 변형시키는 것으로 추정된다. (2 - 9 lane, lane 1: 정상)

PCP피폭에 의해서도 결실현상이 발생하는 것으로 추측되는데 10 lane에서 는 정상적인 것보다 약 30base정도의 deletion이 일어난다.

## 6. 결 론

가. 실험의 간편성: 본 연구에서 HL-60 human cell line을 사용하여 실험을 하는 것은 비교적 복잡하며 난이도가 높은 실험인 T-cell clonal assay를 간편하게 하고자 하는 것이다. 이 간편성은 다양한 환경돌연변이원을 1차 screening하는데 보다 유리할 뿐 아니라, 방사선 조사와 더불어 돌연변이 상승효과를 나타내는 환경돌연변이원을 빠르게 검색할 수 있을 것이다.

나. 실험의 객관성: T-cell clonal assay는 높은 실험 난이도, 실험재료인 세포의 비 동일성 등의 이유로 각 연구실간 결과의 수평비교가 어려운 문제점이 있었다. 이는 본 연구에서 추구하는 cell line에 의한 clonal assay의 개발에 의하여 극복될 수 있을 것이며, 보다 상호비교가 쉬운 실험결과를 보일 수 있을 것으로 기대한다. 따라서 T-cell clonal assay에서 동일 세포의 충분한 공급이 어려운 이유로 주저되던 다양한 복합실험이 가능하다.

다. 혼합효과의 다양성: 본 연구에서 사용되고 있는 비방사선물질은 현재 대조군으로 PCP만을 사용하고 있으나 다양한 혼합효과 등의 영향을 관찰하기 위하여 특정지역의 산업형태, 방출오염물질 등의 사전 조사 등이 이루어 져야 할 것으로 생각된다.

라. 대사산물에 의한 돌연변이변화: 방사선과 PCP의 혼합피폭에 의한 변이빈도는 synergistic 효과를 나타내고 있지 않았다. 이러한 이유로는 PCP의 대사과정중 독성이 강하다고 생각되는 Tetrahydrochloroquinone과 tetra-

chlorocatechol(IPCA, 1987; Schwetz *et al.*, 1978)등의 생성이 본 시스템에서 는 일어나지 않을 경우를 추측할 수 있다. 따라서 직접 대사산물이라고 생각 되는 이러한 물질을 대상으로 방사선과의 혼합효과를 측정하는 것이 바람직 하다.

마. 염기서열 분석에 의한 DNA 변이검출 필요성: 현재 RT-PCR에 의한 방사선과 PCP의 돌연변이 유형을 보면 방사선피폭은 deletion형태나 처음부터 전혀 RNA합성을 못하는 경우가 주류를 이루는 것으로 추측된다. 반면 PCP처리에 의한 돌연변이는 점돌연변이로서 발현은 되나 불활성물질을 유도 하는 것으로 생각된다. 따라서 본 실험에서는 exon중 가장 큰 base를 가지고 있는 exon III(184bp)를 분석하고 이러한 결과가 차별화전략에 부합하지 않 을 경우 전체(667bp) 분석이 필요하다.

NEXT PAGE(S)  
left BLANK

## 제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

### 제 1 절 연구개발목표 달성도

본 연구개발의 최종목표는 첫째 방사선피폭과 다른 화학적 환경돌연변이 원과의 혼합피폭의 경우 돌연변이빈도변화에 있어서 방사선에 의한 단일피폭의 경우와 어떤 차이를 가지고 있는가 하는 것이며 둘째 방사선과 다른 화학적 돌연변이원에 의한 생체영향을 정성적으로 차별화 하는 것이다. 그러므로 이러한 목표를 달성하기 위하여 생체영향을 분석할 수 있는 다발성 돌연변이 유전자인 *hprt* 유전자에 대한 특성조사 및 연구가 이루어졌으며 돌연변이를 세포 및 DNA 수준에서 분석할 수 있는 변이측정 및 분석기법을 확립하였다. 특히 T-cell clonal assay는 암발생요인 등을 분석하기 위한 방법으로 개발되었으며 방사선 및 환경독성물질에 대한 biomarker로 이용하려는 실험에 도입되어 이미 여러 독성물질에 대하여 그 가능성을 검증 받은 바 있다. 이러한 분석기법으로 방사선 및 PCP 각각의 돌연변이빈도변화 및 혼합피폭에 의한 돌연변이 빈도변화의 양상에 관한 목표에 달성하였다. 또한 최종적 목표인 다발성변이부위조사와 mutation spectrum작성의 목표를 달성하기 위하여 방사선 및 PCP에 의하여 발생된 돌연변이세포를 selection하여 cloning하는 작업을 달성하였다. 또한 이러한 유전자 지도작성에 필요한 reverse transcriptase/polymerase chain reaction을 도입하여 돌연변이된 유전자 분석을 위한 실험방법의 표준화를 달성하였다.

### 제 2 절 대외기여도

상기에서 설명한 바와 같이 원자력시설물이나 동위원소의 사용이 급증함에 따라 방사선의 생체영향에 대한 국민들의 관심은 증가될 수밖에 없다. 따

라서 위와 같은 구체적이며 과학적인 근거자료를 확보하는 것이 막연한 방사선피폭의 생체영향에 관한 부정적인 인식을 불식시키는데 기여할 것으로 기대된다. 이러한 막연한 불안이 원자력 및 방사선사고시 분쟁이 발생할 수 있는데 이러한 경우에도 참고자료로 기여할 수 있을 것으로 생각하며 방사선방호의 기준 등을 좀더 구체적으로 설정하고자 할 때 기여할 것으로 사료된다.

## 제 5 장 연구개발결과의 활용계획

일반적으로 방사선 방호의 기준은 방사선 하나의 영향을 반영하고 있으 며 방사선에 의한 손상과 부가적 화합물에 의하여 발생된 손상의 잠재적인 상호관계나 차이는 설명하고 있지 않다. 특히 방사선 사고후의 피폭자들의 만발효과 및 작업종사자들의 질병들은 그러한 원인이 방사선영향인지 아니면 다른 환경오염들에 의한 것인지에 대하여 객관적이고 구체적인 근거를 제시하지 못하고 있다. 따라서 이러한 문제는 방사선사고의 상해분쟁 및 보상문제 등 법적으로도 상당한 어려움을 겪게 된다. 본 연구결과는 이러한 문제에 대하여 과학적으로 대응할 수 있는 객관적 판단 및 평가자료로서 활용이 가능하며 방사선 방호기준과 방사선방호계획 수립을 위한 기초적 자료로서의 활용도 가능하다. 또한 방사선의 생체영향을 정량화하고 방사선장해를 최소화하기 위한 신속하고 정밀도 높은 검출 및 평가를 위한 기술로 활용이 가능하리라 생각된다. 이러한 기술은 방사선장해를 최소화하기 위한 생체방어기술연구나 방사선에 의하여 필연적으로 발생하는 활성산소에 의하여 유발된 각종 질병을 방지하기 위하여 필요한 항산화 기능물질 등의 분석 등에 필수적으로 활용될 것이다. 근래에 분자생물학의 발전은 유전자 염기서열분석 등 과거에 장시간이 소요되는 것을 많이 단축하였으며 미량의 시료로 다량의 sample을 분석하는 것을 용이하게 하였다. 따라서 이러한 각각의 돌연변이 발생원에 대한 특정유전자의 미세한 수준에서 돌연변이자료가 계속 축적되고 data base작업이 이루어진다면 방사선영향과 피폭위험에 따른 종합적인 참고자료로서 활용할 수 있고 발암이 방사선 피폭에 의한 것이라는 주관적 주장이나 사회적 문제 과학적으로 대응할 수 있으리라 기대된다.

## 제 6 장 참고문헌

1. Albertini, R. J., O'Neill, J. P., Nicklas, J. A., Heintz, N. H. and Kelleher, P. C. (1985): Alterations of the *hprt* gene in human *in vivo*-derived 6-thioguanine resistant T lymphocytes, *Nature*, 316, 369-371.
2. Albertini, R. J., Castel K. L. and Borcherding, W. R. (1982): T-cell cloning to detect the mutant 6-thioguanine-resistant lymphocytes present in human peripheral blood. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 79, 6617-6621.
3. Burkhart-Schultz, K., Strout, C. L. and Jones, I. M. (1990): Mouse model for somatic mutation at the *hprt* gene: molecular and cellular analyses. *Mutation and the Environment, Part C*, pages 5-14. Wiley-Liss, Inc.
4. Cariello, N. F., Swenberg, J. A. and Skopek, T. R. (1992): *In vitro* mutational specificity of cisplatin in the human hypoxanthine guanine phosphoribosyltransferase gene., *Cancer Research*, 52, 2866-2873
5. Casto, B. C. (1981): Effect of chemical carcinogens and mutagens on the transformation of mammalian cells by DNA virus, Gauri, K. K., Ed."Antiviral chemotherapy: Design of inhibitors of viral functions" New York, NY. Academic Press. 261-278.
6. CELDS (1992): Computer-environmental Legislative Data Systems, University of Illinois, Urbana, IL, March.
7. Cirelli, D. P. (1978): Patterns of pentachlorophenol usage in America. - an overview, in Rao, K. R., Ed. "Pentachlorophenol, chemistry, pharmacology and environmental toxicology" New York,

- NY, Plenum Press, 13-18.
8. Cline, R. E., Hill, R. H. J. and Phillips, D. L.(1989): Pentachlorophenol measurements in body fluids of people in long homes and workplace. *Arch. Environ. Contam. Toxicol.*, 18, 475-481.
  9. Cochrane, J. E. and Skopek, T. R.(1993): Mutagenicity of butadiene and its epoxide metabolites: I. Mutagenic potential of 1,2-epoxybutene,1,2,3,4,-diepoxybutane, and 3,4-epoxy-1,2-butanediol in cultured human lymphoblasts., *Carcinogenesis*, submitted.
  10. Cole, J., Arlett, C. F., Norris, P. G., Stephans, G., Waugh, A. P. W., Beare, D. M. and Green, M. H. L.(1992): Elevated *hprt* mutant frequency in circulating T-lymphocytes of Xeroderma pigmentosum patients., *Mutation Research*, 273, 171-178, 1992
  11. Cole, J., Green, M. H. L., James, S. E., Henderson, L. and Cole, H.(1988): A further assessment of factors influencing measurements of thioguanine resistant mutant frequency in circulating T- lymphocytes., *Mutation Research*, 204, 493-507.
  12. Crosby, D. G., Beynon, K. I., Greve, P. A., Korte, F., Stilli, G.G. and Vouk, J. W.(1981): Environmental chemistry of pentachlorophenol. *Pure. Appl. Chem.* 53, 1051-1080.
  13. Edwards, A., Voss, H., Rice, P., Civitello, A., Stegemann, J., Schwager, C., Zimmermann, J., Erfle, H., Caskey, C. T. and Ansorge, W.(1990): Automated DNA sequencing of the human *HPRT* locus., *Genomics*, 6, 593-608.
  14. Fukuchi, K. I., Tanaka, K., Kumahara, Y., Pride, M. B., Martin, G. M. and Monnat, R. J. Jr.(1990): Increased frequency of 6-thioguanine resistant peripheral blood lymphocytes in Werner syndrome patients. *Human Genet.*, 84, 249-252.

15. Galloway, S. M., Armstrong, M. J., Reuben, C., Coleman, S., Brown, B., Cannon, J., Bloom, A. D., Nakamura, F., Ahmed, M., Duk, S., Rimpo, J., Margolin, B. H., Resnick, M. A., Anderson, B. and Zeiger, E.(1987): Chromosome aberrations and sister chromatid exchanges in Chinese hamster ovary cells; Evaluations of 108 chemicals. Environ. Molecul. Mutagen. 10 (Suppl.10), 1-175.
16. Hattenman-Frey, H. A. and Travis, C. C.(1989): Pentachlorophenol: Environmental partitioning and human exposure. Arch.of Environ. Contam. Toxicol., 18, 482-489.
17. Hill, R. H., Teresa, T., Holler, J. S. Douglas, M. F. Smith, S. J., Needham, J. J. and Binder, S. (1989): Residues of chlorinated phenols and phenoxy acid herbicides in the urine of Akansas children. Arch. Environ. Contam. Toxicol., 18, 469-474.
18. Hoben, H. J., Ching, S. A. and Casarett, L. J.(1976): A study of inhalation of pentachlorophenol by rats. III.Inhalation toxicity study. Bull. Environ. Contam. Toxicol., 15, 463-465.
19. IPCA.(1987): International Programm on Chemical Safety; Penta chlorophenol, environmental health criteria. 71. Geneva, World health organization. 1-236.
20. Jolly, D., Okayama, H. Berg, P., Esty, A. C., Filpula, D., Bohlen, P., Johnson, G. G., Shively, J. E., Hunkapillar, T. and Friedmann, T.(1983): Isolation and characterization of a full-length expressible cDNA for human hypoxanthine phosphoribosyl transferase. Proc. Natl. Acad. Sci. USA., 80, 477-481.
21. Jorens, P. G., Janssens, J. J. and Van Tichelen. W. A.(1991): Penta chlorophenol concentrations in human cerebrospinal fluid. Neurotoxicol. 12, 1-7, 1991.

22. McGinniss, M. J., Nicklas, J. A. and Albertini, R. J.(1989): Molecular analysis of *in vivo* hprt mutations in human T-lymphocytes; IV. Studies in newborns. Environ. Mol. Mutagen. 14, 229-237.
23. Melton, D. W., Konecki, D. S., Brennand, J. and Caskey, C. T.(1984): Structure, expression, and mutation of the hypoxanthine phosphoribosyl transferase., Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 81, 2147-2151.
24. Messing, K., Ferraris, J., Bradley, W. E. C., Swarty, J. and Seifert, A. M.(1989): Mutant frequency of radiotherapy technicians appears to be associated with recent dose of ionizing radiation., Health Phy. 57, 537-544.
25. Nicklas, J. A., Falta, M. T., Hunter, T. C., O'Neill, J. P., Jacobson-Kram, D., Williams, J. R. and Albertini, R. J.(1990): Molecular analysis of *in vivo* hprt mutations in human T-lymphocytes. V. Effects of total body irradiation secondary to radioimmunoglobulin therapy (RIT). Mutagenesis. 5, 461-468.
26. Nishimura, N., Nishimura, H. and Oshim, H. (1982).: Survey on mutagenicity of pesticides by the *Salmonella-Microsome* Test. Aichi Ika Daigaku Igakukai Zasshi. 10, 305-312.
27. O'Neill, J. P., Sullivan, L. M. and Albertini, R. J. (1990): In vitro induction, expression and selection of thioguanine-resistant mutants with human T-lymphocytes. Mutation Research. 240, 135-142.
28. O'Neill, J. P., McGinniss, M. J., Bermann, J. K., Sullivan, L. M., Nicklas, J. A., and Albertini, R. J. (1987): Refinement of a T-lymphocyte cloning assay to quantify the *in vivo* thioguanine-resistant mutant frequency in human. Mutagenesis. 2, 87-94.
29. Seifert, A. M., Bradley, W. C. and Messing, K. (1987): Exposure of nuclear medicine patients to ionizing stimulation is associated

- with rises in *HPRT* mutant frequency in peripheral T-lymphocytes., Mutation Research, 191, 57-63.
30. Sasiadek, M., Norppa, H. and Sorsa, M.(1991): 1,3-Butadiene and its epoxides induce sister-chromatid exchanges in human lymphocytes in vitro., Mutation Research. 261, 117-121.
30. Schwetz, B. A., Quast, I. F., Keeler, P. A., Humiston, C. G. and Kociba, R. J.(1978); Results of two-year toxicity and reproduction studies on pentachlorophenol in rats, Rao,K.R., Ed., "Pentachlorophenol, chemistry, pharmacology and environmental toxicology" New York, NY, Plenum Press. 13-18.
31. Scopek, T. R., Walker, V. E., Cochrane, J. E., Craft, T. R. and Cariello, N. F.(1992): Mutational spectrum at the *Hprt* locus in splenic T cells of B6C3F1 mice exposed to N-ethyl-N-nitrosourea. Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 89, 7866-7870.
32. Seemiller, J. E., Rosenbloom, F. M. and Kelley, W. N.(1967): Enzyme defect associated with a sex-linked human neurological disorder and excessive purine synthesis., Science, 155, 1682-1684.
33. Seiler, J. P.(1991): Pentachlorophenol. Mutation. Research. 257, 27-47.
34. Tates, A. D., Dam, F. J. V., Mossel, H. V., Schoemaker, H., Thijssen, J. C. P., Woldring, V. M., Zwindermann, A. H. and Natarajan, A. T.(1991): Use of the clonal assay for the measurement of frequencies of *HPRT* mutants in T-lymphocytes from five control populations., Mutation Research. 253, 199-213.
35. Turner, D. R., Morely, A. A., Haliandros, M., Kutlaca, R. and Sanderson, B. J.(1985): *In vivo* somatic mutations in human lymphocytes frequently result from major gene alterations. Nature, 315,

343-345.

36. US DHHS.(1991): U.S. Department of Health and Human Services; Toxicological profile of pentachlorophenol.
37. US EPA.(1991): U.S. Environmental Protection Agency, Land disposal restrictions, Code of Federal Regulations, 40 CFR 268.
38. US EPA.(1979): U.S. Environmental Protection Agency, Reviews of the environmental effects of pollutants; XI.Chlorophenols, HERL,ORD, Cincinnati,OH.
39. Kim I. G., Yoon, B. S., Cho, M. H., Park S. Y and Lee, Y. S. (1997a): Mutation frequency at the *hprt* locus in human T-cell exposed to pentachlorophenol. Kor. J. Toxicol. 13, 71-78.
40. Yoon, B. S., Cho, M. H., Lee, S. M. and Lee, Y. S.(1997b): Analysis of in vivo Mutation at *hprt* gene from the rat exposed to penta chlorophenol. Kor. J. Lab. Aniamal Sci. 13, 87-92.
41. Yoon, B. S., Cho, M. H. and Lee, Y. S.(1997c): Analysis of Mutant frequency at *hprt* gene from the mice exposed to pentachlorophenol. Kor. J. Lab. Aniamal Sci. 13, 81-86.
42. Kim, I. G., Park, S. Y., Yoon, B. S., Cho, M. H. and Lee, Y. S. (1997): Comparison of mutant frequencies induced by  $\gamma$ -radiation and pentachlorophenol at *hprt* locus in human T-lymphocytes(I). Journal of Korean Association for Radiation Protection, 22(1), 15-21.

서 지 정 보 양 식									
수행기관보고서번호	위탁기관보고서번호	표준보고서번호	INIS 주제코드						
KAERI/RR-1913/98									
제목 / 부제	방사선 비상대응 및 생체방어 기술개발								
연구책임자 및 부서명	한 문 희 (원자력환경연구팀)								
연 구 자 및 부 서 명	김 인 규(원자력환경연구팀), 김 국 찬( " ), 김 은 한( " ), 서 경 석 ( " ), 황 원 태 ( " ), 최 영 길 ( " ), 심 혜 원( " ), 이 정 호 ( " ), 이 강 석 ( " )								
출판지	대 전	발행기관	한국원자력연구소	발행년	1999				
폐이지	205 p.	도 표	있음( V ), 없음( )	크기	21×29.7 Cm.				
참고사항	원자력중장기 결과보고서								
비밀여부	공개( ), 대외비( ), — 급비밀	보고서종류							
연구위탁기관		계약 번호							
초록 (15-20줄내외)	<p>방사선 비상대응기술은 원자력시설 주변의 환경특성에 좌우되므로 주변 환경 특성의 조사·분석과 함께 개발되는 기술에 반영하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 기 개발된 실시간 방사선 피폭해석시스템 FADAS를 원전부지의 환경특성을 고려하여 실제적으로 활용하는데 주안점을 두었다. 이를 위해 울진과 월성 원전부지에서 추적자 방출실험을 통하여 FADAS의 부지 적용 타당성을 검증하였다. 방사선 비상시 피해를 최소화하기 위해 적용되는 비상대응책의 효과는 주변의 기상, 지형 등의 지리환경 뿐 아니라 인구분포, 섭식형태, 물가 등의 사회환경에도 영향을 받는다. 따라서 국내환경을 고려하여 비상시 적용되는 대응책의 효과를 분석하고자 국내 사회환경자료를 수집·분석하였다.</p>								
	<p>방사선 방호를 위한 생물학적 연구는 방사선과 독성화학물질이 건강에 미치는 영향을 평가하기 위한 생물학적 미량분석, T-cell clonal assay, 단일노출 또는 혼합 노출에 의한 hypoxanthine(guanine) phosphoryl transferase 유전자좌에서의 돌연변이 발생 빈도의 정량화를 포함한다. 특히, reverse transcriptase를 이용한 polymerase chain reaction 방법은 감마선 조사와 화학물질(pentachlorophenol) 노출에 의하여 생성된 유전자 돌연변이 분석과 T-lymphocytes의 hprt 유전자좌에서 점 돌연변이를 조사하기 위해 전개되었다.</p>								
주제명키워드 (10단어내외)	방사선 비상대응, 야외확산 실증실험, 생물학적 미량분석, 유전자 돌연변이, 점 돌연변이								

BIBLIOGRAPHIC INFORMATION SHEET					
Performing Org. Report No.		Sponsoring Org. Report No.	Stamard Report No.	INIS Subject Code	
KAERI/RR-1913/98					
Title / Subtitle		Development of Radiological Emergency Preparedness and Biological Dosimetry Technology			
Project Manager and Department		Moon Hee, Han (Environment and Radiation Department)			
Researcher and Department		In Gyoo, Kim (Environment and Radiation Department) Kook Chan, Kim( " ), Eun Han, Kim( " ), Kyung Suk, Suh( " ), Won Tae, Hwang( " ), Young Gil, Choi( " ), Hae Won, Shim( " ), Jeong Ho, Lee( " ), Kang Suk, Lee( " )			
Publication Place	Taejon	Publisher	KAERI	Publication Date	1999. 4
Page	205 p.	Ill. & Tab.	Yes( <input checked="" type="checkbox"/> ), No ( <input type="checkbox"/> )	Size	21×29.7 Cm.
Note	Nuclear Long Term Project Report				
Classified	Open( <input checked="" type="checkbox"/> ), Restricted( <input type="checkbox"/> ), <u>      </u> Class Document		Report Type	Research Report	
Sponsoring Org.		MOST	Contract No.		
Abstract (15-20 Lines)		<p>Large-scale field tracer experiments have been conducted on Ulchin and Wolsung nuclear sites for the purpose of validating FADAS and of analyzing the environmental characteristics around the nuclear site. The most influential factor in atmospheric dispersion is the meteorological condition. During the experiment, meteorological data were measured on the release point and the selected positions among sampling points. Once radioactive materials are released to the atmosphere, members of public may be exposed through the environmental media such as air, soil and foods. Therefore, to protect the public, adequate countermeasures should be taken at due time for those exposure pathways. Both processes of justification and optimization are applied to a countermeasure simultaneously for decision-making.</p>			
<p>The work scope of 'Biological Research for the Radiation Protection' had contained the search of biological microanalytic methods for the assessment of health effect by radiation and toxic agents, the standardization of human T-lymphocyte cell culture and polymerase chain reaction, T-cell clonal assay, and the quantification of mutation frequency in hypoxanthine (guanine) phosphoribosyl transferase (<i>hprt</i>) gene locus by single exposure or combined exposure. Especially, the polymerase chain reaction methods by usage of reverse transcriptase had been developed to analyze of gene product by <math>\gamma</math>-radiation and chemical (pentachlorophenol) agent exposure, and to investigate the point mutation in <i>hprt</i> gene locus of T-lymphocytes.</p>					
Subject Keywords (About 10 words)		radiological emergency system, field tracer experiment, biological microanalytic methods, point mutation			

## 주         의

1. 이 보고서는 과학기술부에서 시행한 원자력연구개발사업의 연구 보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 과학기술부에서 시행한 원자력연구개발사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가 과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개 하여서는 아니됩니다.