



재료 조사시험용 캡슐 및 관련 설비의
안전성 분석보고서

(Safety Analysis Report(SAR)
for the HANARO Capsule and Related Systems)

한국원자력연구소

Korea Atomic Energy Research Institute

2

30 - 40

제 출 문

한국원자력연구소장 귀하

본 보고서를 “재료 조사 시험용 캡슐 및 관련시설의 안전성 분석 보고서”로 제출합니다.

1998년 2월 일

주저자 : 강 영 환

공저자 :

재료 시험용 캡슐 분야 : 주 기 남

캡슐 온도 제어장치 분야 : 정 승 호

캡슐 고정 장치 및 절단기: 박 종 만

건전성 해석 분야 : 류 정 수

(위탁과제 책임자: 충남대학교 이영신)

하나로내 진동특성 분야 : 김 태 룡

열수력 양립성시험 분야 : 양 선 규

반응도 해석 분야 : 이 병 철

감 수 위 원 : 유 봉

초 목

하나로를 이용하여 재료의 조사 시험을 수행할 수 있는 캡슐 조사설비에 대하여 수행한 안전성 분석 보고서에 대한 내역을 기술하고 있다. 캡슐 조사 시험 설비란 원자력 발전소 사용 재료를 넣어 상용로의 가동 조건에 준하여 조사 시험할 수 있는 설비이다.

제 1 장에는 캡슐조사 설비, 즉 캡슐(capsule), 고정 장치(supporting system), 온도 제어장치, 취급용 tools, 수송용 cask, 조사후 캡슐 절단기 등에 대한 장치 구성, 적용 규격 및 표준, 설계 기본 방침 및 기준에 대한 내역을 기술하고 있다.

제 2 장에는 캡슐 조사설비에 대한 하나로와의 간섭 사항이나 사용중 구조 건전성 및 안전성을 유지하는지에 대한 해석 업무 내역과 이를 실험적으로 확인한 하나로와의 열수력 양립성 시험과 하나로 가동 조건하에서 수행한 진동 시험에 대한 내역을 포함하고 있다. 마지막으로 하나로 CT조사공에 캡슐을 장전시 반응도 검토를 위하여 몬테카를로 전산 코드인 MCNP을 이용하여 수행한 내역을 포함하고 있다.

Abstract

The Safety Analysis Report(SAR) for the capsule and related systems to be used for the Material Irradiation Testing in the HANARO is organized into two chapters.

Chapter 1 includes the descriptions for test apparatus, applicable codes and standards, design requirements of the instrumented capsule and related systems.

Chapter 2 describes the results of structural integrity analysis including seismic analysis based on the data produced by hydraulic and vibrational tests. The reactivity changes caused by the capsule insertion to the HANARO core estimated using MCNP code are also included.

목 차

제출문	
초록	i
Abstract	ii
목차	iii
표목차	iv
그림목차	v
1. 캡슐 조사 시험 설비	1
1.1. 캡슐 및 관련 구조물 설계 요구 사항	1
1.2. 캡슐 및 관련 구조물의 설계 기준 등급 분류	2
1.3. 재료 시험용 캡슐	2
1.4. 캡슐 고정 장치	6
1.5. 캡슐 온도 제어장치	9
1.6. 수중용 캡슐 절단기	12
1.7. 캡슐 취급용 Tool	14
1.8. 캡슐 수송용 Cask	14
2. 캡슐 및 관련 구조물의 건전성 및 안전성 해석	14
2.1. 내진 해석	14
2.2. 응력 해석	20
2.3. 좌굴안정성	25
2.4. 충격 안정성	26
2.5. 하나로와의 열수력 양립성	31
2.6. 하나로내 진동 특성	32
2.7. 하나로 CT조사공에 캡슐장전시 반응도검토	40
3. 참고문헌	42

표 목 차

표 1.2-1. 캡슐 및 관련 시스템의 분류	45
표 1.3-1. 연구로 시험공 중성자속 특성	45
표 2.1-1. 사용 재료의 기계적 물성	46
표 2.1-2. 하중 조합 및 허용 한계	46
표 2.1-3. 하중 조합에 대한 최대 변위	47
표 2.1-4. 정하중과 지진 하중에 의한 캡슐 본체 하부 힌지점에서의 절점반력	47
표 2.1-5. 사용 조건에 따른 캡슐과 고정장치의 응력값과 허용 응력 ...	48
표 2.1-6. Service Level에 대한 최대 축응력과 굽힘 응력의 조합 하중에 따른 응력비	49
표 2.1-7. 조절 장치(Control Unit System) 구조물 응력 해석	50
표 2.2-1. 캡슐영역별 사용재료	50
표 2.2-2. 캡슐사용재 SS304와 Al의 발열량	51
표 2.2-3. 캡슐본체 온도분포 계산값	52
표 2.2-4. 캡슐의 열하중하에서 총 응력	53
표 2.3-1. 캡슐의 좌굴해석 경계 조건	53
표 2.3-2. 캡슐 구조물의 좌굴해석 결과	54
표 2.4-1. 충격 순간 캡슐의 속도	54
표 2.4-2. 단위 하중 작용시 캡슐에 작용하는 최대 응력과 탄성 변형률	55
표 2.5-1. 압력 강하 측정값(60mm Diameter-Capsule)	55
표 2.5-1. 압력 강하 측정값(60mm Diameter-Capsule with 65mm Restrictor)	56
표 2.6-1. Strain Gauge 측정 신호로부터 구한 고유 진동수	57
표 2.6-2. 캡슐모캡과 캡슐의 기하학적 특성	57
표 2.6-3. 캡슐의 공기중 진동 시험 및 해석 결과	58
표 2.6-4. ANSYS를 이용한 200 Hz까지의 모드별 고유 진동수	58

그림 목 차

그림 1.3-1.	캡슐 구조 구성도	59
그림 1.4-1.	캡슐 고정장치 구성도	61
그림 1.5-1.	캡슐 온도 제어장치 구성도	62
그림 1.6-1.	수중용 캡슐 절단기 구성도	63
그림 2.1-1.	캡슐 및 관련 구조물	64
그림 2.1-2.	조사공 하부에서의 수직 방향 가속도 충응답 스펙터럼(SSE)	65
그림 2.1-3.	수조 벽에서의 수평 방향 가속도 충응답 스펙트럼(SSE))	65
그림 2.1-4.	캡슐 유한 해석 모델	66
그림 2.1-5.	캡슐고정장치 Unit 해석모델	66
그림 2.2-1.	캡슐본체의 온도계산 모델	67
그림 2.2-2.	캡슐본체의 영역별 온도 변화	68
그림 2.2-3.	캡슐 End Plug의 열 응력 해석 모델	69
그림 2.2-4.	캡슐 End Plug의 온도 분포	70
그림 2.2-5.	열하중에 의한 변형된 캡슐 외통 End Plug 변위 형상	71
그림 2.2-6.	캡슐 End Plug의 열응력 해석 결과	72
그림 2.3-1.	캡슐 구조물의 좌굴해석 모델	73
그림 2.3-2.	양단 단순 지지 조건에서의 좌굴모드 형상	74
그림 2.4-1.	수중에서의 캡슐이 자유낙하시 하중의 자유 물체도	75
그림 2.4-2.	시간에 따른 충격 하중 이력	76
그림 2.4-3.	수직 방향 충격 하중 작용점에서의 시간에 따른 변위 이력 선도	77
그림 2.4-4.	캡슐의 시간에 따른 변위 이력	77
그림 2.5-1.	캡슐모캡 설계 형상	79
그림 2.5-2.	열 수력 시험 장치도	80
그림 2.5-3.	Data Acquisition System 개략도	83
그림 2.5-4.	D/P Transmitter 기기 보정커브	84
그림 2.5-5.	압력 강하 측정 결과도	85

그림 2.6-1. 캡슐의 공기중 고유진동수 계산을 위한 해석모델	86
그림 2.6-2. 캡슐모컵에 대한 자유진동 측정점	86
그림 2.6-3. 각 측정점에 대한 시간 영역 가속도 신호	87
그림 2.6-4. 주파수 분석결과	88
그림 2.6-5. 스프링 지지 단순보 모델	88
그림 2.6-6. 진동시험 장치 구성도	89
그림 2.6-7. 캡슐의 공기중 진동시험 결과	90
그림 2.7-1. 조사공 CT 에 캡슐이 장전된 MCNP모델	91

1. 캡슐 조사 시험 설비

캡슐 조사 시험 설비란 연구로인 하나로 혹은 원자로를 이용하여 원자력발전소 사용재료(핵연료를 포함한 원자력재료)를 넣어 상용 원자로의 가동 조건에 준하여 조사 시험할 수 있는 설비이다. 캡슐 조사 시험 설비란 캡슐(capsule), 고정 장치(supporting system), 온도 제어장치, 수중용 캡슐 절단기, 취급용 Tools, 수송용 Cask 등으로 구성되어 있다.

1.1. 캡슐 및 관련 구조물의 설계 요구 사항

1.1.1. 개요

캡슐 설계 요구 사항은 대한민국 대전 유성구 덕진동에 가동되고 있는 하나로에서 조사 시험을 위하여 사용되는 캡슐의 설계시 요구 사항을 의미하며, 연구로 가동중 및 핵연료 교체 중에 주변 설비와의 간섭이 일어나지 않게 추가되는 요구 사항을 서술한다.

1.1.2. 기능상 요구 사항

- 1) 캡슐이 시험공 내에 설치될 때 핵연료 집합체 상하 막에 걸리는 압력차와 냉각수 유량 허용치와 유사하거나 적어야 한다.
- 2) 시험 공에서의 캡슐은 일차 냉각수의 수력학적 드락(drag)으로 인한 축방향 하중에 견디어야 한다.
- 3) 캡슐은 캡슐 장·탈착중 야기되는 축방향 압축력에 견딜 수 있도록 설계되어야 한다.

1.1.3. 성능상 요구 사항

캡슐은 캡슐 자체 혹은 유동관(Flow Tube)에 손상을 줄 수 있는 진동을 최소화하도록 되어야 한다.

- 1) 일차 냉각계와의 설계 요구 사항
 - 냉각수에 캡슐 파손 등으로 인하여 생길 수 있는 Debris가 최소화되어야 한다.
 - 캡슐은 일차 냉각계에 의한 손상을 받지 않도록 하여야 하며 또한 Flow

Tube에도 손상을 주지 않도록 진동이 최소화되는 분위기를 제공하여야 한다.

2) 시험공과의 설계 요구 사항

- 캡슐, Flow Tube 및 관련 부품은 조사중 야기되는 어떠한 규격 변화도 수용할 수 있도록 규격상 양립하여야 한다.
- Flow Tube는 캡슐 하단 부분을 고정 및 제거할 수 있어야 하며 적절한 지지를 할 수 있어야 한다.

1.2. 캡슐 및 관련 구조물의 설계 기준 등급 분류[1]

재료 시험용 캡슐 및 관련 구조물의 안전 등급, 내진 범주 및 품질 등급은 표1.2-1과 같다.

1.3. 재료 시험용 캡슐[2]

1.3.1 기능 및 구조

일반적으로 캡슐이란 하나로를 이용하여 조사 시험을 수행하는 조사 설비 중의 하나로 캡슐(capsule), 고정 장치(supporting system), 온도 제어장치, 수중용 캡슐 절단기, 취급용 Tools, 수송용 Cask 등으로 구성되어 있다. 조사에 의해 발생하는 열량은 원자로 1차 냉각수에 의해 제열된다. 시료의 온도, 조사량 등을 측정 또는 제어 여부에 따라서 계장 캡슐, 무계장 캡슐로 나누며, 시료가 핵연료 물질인 경우는 연료 캡슐이라 하고 그 이외의 캡슐을 재료 캡슐이라 한다.

캡슐의 구조는 그림 1.3-1에서와 같이 크기는 본체가 약 1 m이고, 계장 캡슐의 경우 제어용 배선, 배관 등이 들어 있는 보호관(Protection Tube)을 포함 약 6m정도의 원통형 구조이다. 캡슐 본체 내부의 구조는 조사시편의 조사 조건에 따라서 온도, 중성자 조사량 등을 제어하기 위한 계장을 장착할 수 있으며 연구로 수조 밖에 온도 제어 및 측정을 위해 설치하는 제어 계통과 연결된다.

1.3.2. 설계 기본 방침 및 기준

계장 캡슐의 구조와 형상, 연구로 시험공, 사용 재료, 열 설계, 강도 설계, 핵적 설계, 계측 및 제어, 제작 및 검사 등에 대한 설계 기본 방침 및 기준은 다음과 같다.

1.3.2.1. 구조와 형상

하나로를 이용한 조사 시험에 사용할 캡슐은 원자로 노심에 장전되기 때문에 핵적, 열적, 규격적인 제한을 받는다.

캡슐 설계시 유의해야 할 기본 사항은 다음과 같다.

- (1) 조사재료중 핵연료 물질은 반드시 피복을 하여, 원자로 1 차 냉각수 및 대기에 대하여 2중 격벽이 있는 구조로 되지 않으면 안된다.
- (2) 물 또는 공기와 격렬히 반응하는 물질 (Na, NaK 등) 및 조사실험중에 대량의 Gas를 발생하거나, 다른 물질과 반응을 일으킬 수 있는 물질은 물 또는 공기에 대하여 2중격벽을 가지는 구조로 되지 않으면 안된다.
- (3) 캡슐 각부의 비중은 1.0 이상으로 되어야 하며 원자로 조사공과 구조 건전성에 문제가 없도록 하여야 한다.

캡슐 주요 규격 및 형상은 다음에 해당하는 각호의 정해진 바에 따른다.

- (1) CT 및 IR1, IR2 조사공 (최단직경 74.4 mm)에 장입하여 조사할 계장 캡슐은 일정한 주요 외형 규격 및 형상으로 한다.
- (2) 보호관 및 안내관은 일정한 주요 외형 규격으로 한다.

1.3.2.2. 연구로 시험공

재료 캡슐 조사 시험에 사용되는 조사공은, 원자로 노심 내의 CT 및 IR1, IR2 조사 공으로 핵연료 장전용의 다른 Hole 들과 동일한 Hexagonal 형태이다. 조사공에서의 최근접 내경은 (최단직경) 74.4mm 이며 이들 조사공들에서의 고속중성자 및 열중성자속은 표 1.3-1와 같다. 단, 연구로 조사시험공은 이용자 요구 사항에 따라 변경될 수 있다.

1.3.2.3. 사용 재료

캡슐의 구성 재료는 (조사 시료는 제외), 방사선 손상, 고온에 의한 변질, 열화 등이 발생해, 원자로의 운전, 캡슐의 구조 및 조사 실험에 지장을 미치는 일이 있어서는 안된다.

원자로 1 차 냉각수와 직접 접하는 캡슐 구성 부재는, 부식, 혹은 용해 등에 의해 원자로의 운전이 지장을 미치는 일이 있어서는 안된다. 특히 은, 동, 카드뮴, 탄소강 등을 사용해서는 안된다.

1.3.2.4. 열 설계

캡슐 냉각을 위한 1 차 냉각수 유량은 하나로에 캡슐장전으로 인하여 하나로 핵연료의 이용에 지장을 주지않아야하며, 캡슐상하단 로심차압은 200 ± 5 KPa, 냉각 수량은 19.6 Kg/sec 이하로 한다. 캡슐의 발열 한도량은 캡슐 주요부에 대하여 열적검토를 행하여, 각부의 온도가 다음에 명시하는 각호에 대하여 충분히 만족되지 않으면 안된다.

- (1) 캡슐의 발열에 의해, 원자로 1 차 냉각수가 비등을 일으키지 않을 것.
- (2) 시료의 중심 온도는, 원칙적으로 용융온도 이하로 할 것. 단, 중심 용융을 일으킬 우려가 있는 경우, 용융되는 것에 의해서 안전성 및 실험 목적 지장을 줄 가능성이 없음을 확인하여야 한다.
- (3) 캡슐 구성 부재와 상호 접촉 또는 접촉할 우려가 있는 부재간에는, 유해한 변질.열화 등이 일어나지 않는 온도에 있어야 한다.
- (4) 캡슐 구성 부재간에는, 열팽창에 의해 유해한 응력변형 등이 설계 허용치 이하로 되어야 한다.
- (5) 캡슐내부에 사용하는 열매체(Thermal Media)는 용융점 이하의 온도로 국한한다.

1.3.2.5. 강도 설계

캡슐의 주요부에 대한 강도설계시 내압, 기계적 및 열 하중에 대하여 충분한 강도를 가지고 있지 않으면 안된다. 강도 설계상 충분한 강도를 가지는 것은 아래에 명시된 각호를 만족하는 것을 말한다.

- (1) 기계적 응력은 허용 응력 이하에 있을 것.
- (2) 열 응력과 기계적응력의 총합은, 허용 응력의 3배를 초과하지 않을 것.
- (3) 사용중 열 응력으로 인해, 피로 파괴, Thermal Ratchet 을 일으키지 않을 것.
- (4) Creep 현상에 의해 파괴되거나, 커다란 응력 분포 변화를 일으키지 않을 것.

사용 재료의 허용 응력은 아래에 명시된 각호의 최소치로 한다.

- (1) 인장 강도의 최소 규정치 (규격치) 의 1/3의 값.
- (2) 사용 온도에서 인장 강도의 1/3의 값.
- (3) 항복치의 최소 규정치의 2/3의 값.
- (4) 사용 온도에서 항복점의 9/10의 값.

단, 항복점 최소 규정치 2/3의 값을 초과하면 안된다.

1.3.2.6. 핵적 설계

실험물에 대한 반응도 제한은 하나로 및 조사재 시험 설비 운영 기술 지침서[3]에 따라 적용된다.

1.3.2.7. 계측 및 제어

시료의 온도 제어는 다음 각호에 따르는 것으로 한다.

- (1) 히터에 의한 온도 제어는 시료 주변에 설치될 수 있는 열매체 중에, 금속으로 피복한 전열선을 집어넣거나, 또는 고정시켜 시료의 온도 제어를 행한다.
- (2) 혼합 가스에 의한 온도 제어는 캡슐 본체 내부에 He 등의 가스를 사용하여 열전도율을 변경시켜 시료의 온도 제어를 한다.
- (3) 진공에 의한 온도 제어는 혼합 가스 대신에 He (또는 질소 등) 의 진공도를 조절하여 열전도율을 변경, 시료의 온도 제어를 한다.
- (4) 병용에 의한 온도 제어는 혼합 가스, 진공 온도 제어의 어느 하나와 히터 온도 제어를 병용하여 시료의 온도 제어를 한다.

1.3.2.8. 제작 및 검사

캡슐 제작시 유의해야 할 중요한 사항은 다음과 같다.

- 캡슐 제작을 할 때에는 청정도에 충분히 유의하여 원자로의 운전 및 조사 실험에 지장을 주지 않도록 하여야 한다.
- 캡슐 구성 부에서 특히 내압, 기밀 또는 수밀을 요하는 부분의 용접 가공에 있어서는, 용접부에 대한 건전성 평가시험을 실시하는 등 특별한 배려를 하여야 한다.
- 계측 및 제어용 배선. 배관의 캡슐 내외통 관통부의 접합에는, 용접 또는 Ni 및 Ag계 납을 사용한 납접을 하여야 한다.
- 캡슐의 제작에는 원칙적으로 Ni 계 납접을 사용하는 것을 원칙으로 한다. 할 수 없이 은납접을 행하는 경우에는 사용 부위의 최고 온도를 검토하는 등 충분한 안전성을 검토하여 사용하여야 한다.
- 캡슐 구성 부품은, 원자로 1 차 냉각수의 수류력, 진동 등에 의해 이완 및 탈락을 방지하여 주변장치 등에 영향을 주지 않도록 하여야 한다.

1.3.3. 적용 규격 및 표준

모든 작업은 1989 년 12월 31일까지 적용 가능한 Code 및 Standard에 따라 수행되어야 한다. 1997년 10월 15이후에 적용되는 새로운 Code 및 기준 사항들은 공급자가 보다 양질의 제품을 공급할 수 있다는 판단이 구매자와 일치하였을 때 적용될 수 있다.

아래 항목 중에 본 캡슐은 Quality Class T의 Non-safety Item이지만 캡슐 관련 해석은 ASME Code SEC. III 의 적용에 따르며, 설계 및 제작은 Manufacturing Standard를 따르고 그 외 수행되는 모든 작업은 관련된 적용 Code 기준 및 규제 사항과 특히 아래의 항목에 따르거나, 이에 준하는 규격을 따라야 한다.

ASME	SEC. III	Components
ASME	SEC. IX	Welding and Brazing Qualification
ASME	SEC. V	NDE
ANSI	Y14.5	American National Standard for Dimensions and Tolerance of Engineering Drawings
ANSI	N45.2.1	Cleaning of Fluid Systems and Associated Components of Nuclear Power Plants
ANSI	N45.2.2	Packing, Shipping, Receiving, Storage and Handling of Items for Nuclear Power Plants
ASTM/JIS/KS		Materials

1.4. 캡슐 고정 장치[2]

1.4.1. 장치의 구성

캡슐 고정 장치는 하나로 조사공(CT, IR1 및 IR2)에 장입되는 캡슐을 안내하고 고정하기 위하여 사용된다. 따라서 캡슐 고정 장치는 그림 1.4-1에서와 같이 Reactor Chimney 상부에 캡슐을 고정하게 되며 캡슐 고정 장치의 구성은 아래와 같다.

(1) Base Plates

- one for clamp parts
- one for control unit

- (2) 계장 캡슐 상부 고정용 clamp parts : 3 sets for CT, IR1 and IR2 holes
- (3) Control Unit(1 set)
- (4) Connection Rods between Clamp Parts and Control Unit(3 ea)
- (5) Handling Tool for Operation(1 set)

1.4.2. 사용 환경 및 설계 기본 방침

1.4.2.1. 사용 환경

- (1) 캡슐 고정 장치는 하나로 가동 조건하에서 사용시에 부식 및 피로에 기 인한 문제가 없도록 설계되어야 한다.
- (2) 캡슐 고정 장치는 원자로 내에 설치되면 Pool 내의 Activated Corrosion Product와 Fission Product가 포함된 Demineralized Water 분위기에 놓이게 된다.
- (3) 사용 조건 :
캡슐 고정 장치는 Pool 내에 설치되면 원자로 정상 가동 조건하에 있다.

1.4.2.2. 설계 기본 방침

- (1) 캡슐 고정 장치는 적용 Code 및 기준에 따라 설계, 제작, 시험 및 문서화가 이루어져야 한다.
- (2) 캡슐 고정 장치는 진동, 피로, 지진에서 오는 충격 또는 선적이나 설치 중에 발생하는 충격으로부터 올 수 있는 Gross Deformation을 방지할 수 있도록 충분히 안전해야 한다.
- (3) 캡슐 고정 장치는 방사선 손상, 고온 변질 등의 현상으로 인하여 원자로 운전, 고정 장치의 구조 건전성 및 타 조사 설비에 지장이나 변형을 주어서는 안된다
- (4) 캡슐 고정 장치는 조사시험중 캡슐의 지지 역할을 할 수 있도록 설계되어야 한다.
- (5) 캡슐 고정 장치는 노내에 설치로 인하여 다른 노내 구조물 등의 원자로 운전 및 활용에 있어서 방해가 되거나 심각한 영향을 주지 않도록 설계되어야 한다.
- (6) 캡슐 고정 장치의 Clamp 및 Control Unit는 필요시에는 Assembly의 교체 및 보수가 가능하도록 설계되어야 한다.

1.4.3. 적용 규격 및 표준

수행되는 모든 작업항목을 따라야 한다.

ASME	SEC. III NF	Component Supports
ASME	SEC. IX	Welding and Brazing Qualification
ASME	SEC. V	NDE
ANSI	Y14.5	American National Standard for Dimensions and Tolerance of Engineering Drawings
ANSI	N45.2.1	Cleaning of Fluid Systems and Associated Components of Nuclear Power Plants
ANSI	N45.2.2	Packing, Shipping, Receiving, Storage and Handling of Items for Nuclear Power Plants
ASTM/JIS/KS		Materials or Equivalent

상기한 항목 중에 본 캡슐 고정 장치는 품질등급 T의 Non-safety Item이기 때문에 ASME Code SEC. III NF의 적용에 있어서 일부 항목의 요구 사항을 제외하거나 변경하여 따른다. 캡슐 고정에 사용되는 모든 재료는 ASTM 규격이나 JIS 또는 KS 규격을 따른다. 단, 설계시에 필요한 RPE Sign은 국내 기술사의 Sign으로 대체하고, 제작 및 설치할 때의 AI 검사, Code Data Report, 그리고 Code Stamp는 제외한다.

1.4.4. 시험 및 검사

캡슐 고정 장치의 주요 성능 검사 시험 항목은 아래와 같으며, 고정 장치는 주기적으로 성능을 점검하도록 하여야 한다. 특히 설치 시의 작동 성능과 비교하여 특별한 기능상의 차이점을 기록하고 문제가 발생되면 이에 대한 조치를 하여야 한다.

- Loading/Unloading 시의 최대 회전수, 회전각도 및 Torque 값
- 회전의 용이성

- Clamp Arm의 수평 이동시 회전수
- Clamp Arm의 좌우 이동 여부
- Clamp 장치의 허용오차내 대상 Hole 접근 여부
- Control Unit의 작동 성능
- 각 Joint 부위의 안정성 여부
- handling Tool의 작업 용이성
- 사용중 장치간의 상호 간섭 여부

1.5. 캡슐 온도 제어장치[2]

1.5.1. 장치 구성

캡슐 온도 제어 시스템은 크게 진공 제어부, 히터 제어부 그리고 컴퓨터 부
로 구성되며, 시스템의 개략적 구성도는 그림 1.5-1과 같다.

1.5.2. 온도 제어 방법

계장 캡슐의 온도 제어 방법은 진공 제어 방법, 히터 제어 방법, 그리고 진공
제어 방법과 히터 제어 방법을 함께 사용하는 혼합 제어 방법으로 구분된다.

(1) 진공 제어 방법

진공 제어 방법은 캡슐 벽과 캡슐 내부의 위치한 시편 사이의 진공 단열
층에 주입된 헬륨 가스의 진공도를 변화시켜 캡슐 벽과 시편 사이의 열
전도율을 제어함으로써 시편의 온도를 제어하는 방법이다.

(2) 히터 제어 방법

히터 제어 방법은 PID제어기로부터의 제어 출력 신호를 SCR에 전송시켜
히터의 전류를 제어함으로써 이루어진다.

(3) 혼합 제어 방법 혼합 제어 방법이란 진공 제어 방법과 히터 제어 방법을 병행하여 캡슐의 온도를 제어하는 방법으로 먼저 온도 상승 단계에서 진 공 제어 방법으로 원하는 온도보다 약간 낮은 온도까지 온도를 상승시킨 다. 이 후 히터 제어 방법으로 캡슐의 온도가 원하는 온도로 일정하게 유지되도록 제어를 함으로써 혼합 제어를 하게 된다.

(4) 컴퓨터에 의한 제어

캡슐내 시편 온도의 상승 또는 하강율이 고정된 값으로 주어진 경우나

또는 일정한 온도 패턴을 따라 캡슐의 온도를 제어할 필요가 있을 경우에는 컴퓨터에 의한 제어가 필수적이다. 즉 원하는 온도 패턴을 미리 컴퓨터에 기억시킨 후 이 패턴을 따라가도록 컴퓨터가 각 PID 조절기 등에 필요한 명령을 전달하는 방법으로 조작자의 간섭없이 완전 자동으로 캡슐의 온도를 제어할 수 있다.

1.5.3. 경보 발생 체계

캡슐 온도 제어장치는 시험용 원자로에 설치되는 장치이므로 신뢰도 측면에서 많은 고려가 있어야만 한다. 즉 장시간의 사용이나 좋지 않은 주위환경에도 어떠한 고장없이 정상적으로 동작하여야만 한다. 따라서 자기 진단 기능과 가상적인 사고가 일어났을 경우에 경보를 발생시킬 수 있을 뿐만 아니라, 조작자의 조치 없이도 스스로 적절한 조치를 취할 수 있는 기능을 보유하고 있어야 한다.

1.5.4. 설계 기본 방침 및 기준

(1) 진공 장치의 설계 및 제작 요건

- 진공 장치의 배선 및 배관은 수납 박스 내에 조립한다.
- 본 장치의 헬륨 가스 공급 및 배기부, 그리고 캡슐과의 연결은 수납 박스 외부 상에 설치된 가스 배관 조인트를 통해 이루어지도록 하며 조인트의 장/탈착이 용이하도록 하여야 한다.
- 수납 박스내의 배선 및 배관은 보수 점검이 용이하도록 설계/제작되어야 한다.
- 배관의 접속은 밸브 및 필터들의 교환이 용이하도록 설계/제작되어야 한다.
- 본 장치는 계속 동작시킬 경우에 각 부품 및 부품들 간의 연결 부위는 물론 장치 전체 누설율(leak rate)은 10^{-11} mbar/sec 이하로 엄격하게 검증되어야 한다.
- 각 부품 및 부품들 간의 연결 부위는 24시간 동안 5 Kg/cm^2 의 내압시험후 상기 누설율 조건을 만족하여야 하며, 장치 기능상의 하자가 없어야 한다.
- 본 장치에 사용되는 전기/전자 부품들은 전기적 방전이나 전파 방해를 유발하여서는 안된다.

- 본 장치는 원자로에 부설되는 조사 설비로서 사용되기 때문에 배관 내 부나 구성 부품은 충분히 탈지, 세정되어야 한다.
- 전체 장치가 가능한 경량/소형화가 되도록 설계/제작되어야 한다.

(2) 히터 제어부 및 컴퓨터부의 설계 제작 사양

- 외함은 가급적 외부로부터의 전자기파를 차단하는 재질과 구조이어야 한다.
- 본 장치에 사용된 부품들의 전원 공급 및 접지는 각 부품 제조사에서 권장하는 최선의 방법에 준한다.
- SCR 부품의 주의 온도 상승시 경보를 발생시켜야 한다.
- SCR부품에서 발생하는 전자기파 장애는 다른 기기에 영향을 주지 않도록 차단되어야 한다.
- 사용되는 전선은 AWG(American Wire Gauge)에서 정한 규격에 따라야 한다.
- 전체 시스템의 무게 중심을 가급적 아래에 위치시켜 구조적 안정성을 확보하여야 한다.
- 시스템의 이동이 용이하도록 외함에 소형 바퀴가 있어야 하며 고정시에 움직이지 않도록 고정 받침대가 있어야 한다.
- 부품의 배치는 차후 유지/보수가 및 부품의 교체가 용이하도록 배치하여야 한다.

1.5.5. 적용 규격 및 표준

수행되는 모든 작업은 관련된 적용 Code, 기준 및 규제 사항과 특히 아래의 항목에 따르거나, 이에 준하는 규격을 따라야 한다.

MSS	ICS	INDUSTRIAL CONTROLS & SYSTEM
ANSI	Y14.5	AMERICAN NATIONAL STANDARD FOR DIMENSIONS AND TOLERANCE OF ENGINEERING DRAWINGS
ANSI	B16.5	STEEL PIPE FLANGES AND FLANGED FITTINGS
ANSI	B16.34	STEEL VALVES
ANSI	B31.1	POWER PIPING
KS		MATERIALS OR EQUIVALENT
AWG		ELECTRICAL WIRE

1.6. 수중용 캡슐(보호관) 절단기[2]

1.6.1. 장치 개요 및 구성

1) 장치 개요 및 사용 환경

계장 캡슐(보호관) 절단기는 재료 조사 시험후 계장 캡슐의 본체부와 나머지 계장부를 Service Pool에서 절단 및 분리하는데 사용한다. 또한 원자로 내의 Demi-Water 수중에서 절단 작업을 하므로 절단작업중 누유에 의한 하나로 냉각수의 오염을 방지하고자 하였다. 이와 함께 캡슐 보호관 절단기는 평시에는 원자로 수조밖에 보관하며 절단 작업이 필요할 경우에만 수조 내에 장입한 후 작업을 하도록 설계 개념을 도입하였다.

2) 절단기의 구성(그림 1.6-1 참조)

- 1) Cutting Unit : 1 Set
- 2) Hydraulic Power Assembly : 1 Set
- 3) Control Box : 1 Set
- 4) 절단기 설치대 : 1 Set
- 5) Handling Tool : 1 Set

1.6.2. 적용 규격 및 표준

수중용 계장 캡슐 절단기의 설계/제작에 수행되는 모든 작업은 아래에 나열한 적용 Code, 기준 및 규제 사항을 따른다.

ANSI	Y14.5	American National Standard for Dimensions and Tolerance of Engineering Drawings
ANSI HI	B31.1	Code for Pressure Piping Hydraulic Institute Standards for Pumps
ANSI	N45.2.1	Cleaning of Fluid Systems and Associated Components of Nuclear Power Plants

ANSI	N45.2.2	Packing, Shipping, Receiving, Storage and Handling of Items for Nuclear Power Plants
ASTM/JIS/KS		Materials

1.6.3. 설계 기본 방침 및 기준

1) Cutting Unit

- (가) Cutting Unit 장치는 전체 Dimension이 약 650×250×250 mm이고 최대 약250Kg 내외의 무게를 갖도록 설계한다.
- (나) Cutting Unit 장치는 직경이 50 mm 내외의 절단물을 절단할 수 있도록 하고, 사용압력이 200 Kg/cm² 정도가 될 수 있는 구조이어야 한다.
- (다) Cutting Unit장치는 사용중 Blade의 양날이 어긋나거나 피스톤의 비틀림이 없도록 설계되어야 하며, 절단작업시 Chip의 발생을 최소화할 수 있는 구조이어야 한다.
- (라) Cutting Unit장치의 Cylinder에 장입되는 Seal은 우레탄 재질의 U자형 Packing과 네오프렌 재질의 O-ring을 사용하거나 이와 동등하거나 그 이상의 ANSI 규격품을 사용해야 한다.
- (마) 모든 Tube Fitting, Valve류는 고압에도 견딜 수 있는 ANSI 규격품을 사용해야 한다.
- (바) Control Box는 절단작업중 사용 압력을 임의의 압력으로 설정하여 사용할 수 있도록 설계/제작한다.
- (사) 수중용 계장 캡슐 절단기에 사용되어지는 모든 재료는 ASTM 규격을 만족하거나 이와 동등한 품질의 재료이어야 한다.
- (아) 기본적으로 모든 Cutting Unit는 사용중 물 속에 잠기게 되므로 ASTM 규격의 Type 304 Austenitic Stainless Steel을 사용한다.
- (자) 이와 함께 Cutting Unit는 재료 내에 Pore 등의 결함이 최소화된 SS 304 재료로 제작해야 한다.
- (차) Blade 재료는 SKD11 공구강을 사용해서 제작해야 한다.
- (카) 본 “장치”를 운반하는 공구도 가능한 한 Stainless Steel로 제작해야 한다.

2) Hydraulic Power Assembly

- (가) Hydraulic Power Assembly 장치는 절단작업중 사용압력을 임의의 압력으로 설정하여 사용할 수 있도록 설계되어야 한다.

- (나) Hydraulic Pump는 10~35, 30~210 Kgf/cm²의 2 압 2 유량 제어형으로서 고압은 실린더의 전진 기능 그리고 저압은 후진 기능을 할 수 있도록 설계/제작되어야 한다.
- (다) Hydraulic Tank의 크기는 약 30 liter 정도로 충분한 크기이어야 한다.
- (라) Water Power Pack Assembly는 사용 조건을 충분히 수용할 수 있도록 설계되어야하며 원자로 수조 내에서 작업이 가능할 수 있도록 Cutting Unit장치와의 사이에 Quick Coupling Connector가 부착된 약 10 m의 Flexible Pipe Line으로 연결되어야 한다.
- (마) 이와 함께 Power Assembly의 모든 구성품은 Roller를 이용하여 위치 이동이 쉽도록 하는 운반 공구가 포함되도록 하여야 한다.

1.7. 캡슐 취급용 Tool

조사 시험용 캡슐을 하나로에 장탈착하고자 할 때도 하나로에 사용하고 있는 핵연료 이송용 tool을 활용한다.

1.8. 캡슐 수송용기(cask)

조사시험후 조사된 시편을 분리하기 위하여 사용되는 수송용기는 하나로 사용 Driver fuel 이동용 수송용기를 활용한다.

2. 캡슐 및 관련 구조물의 건전성 및 안전성 해석

2.1. 내진 해석

하나로(HANARO) In-core에 설치될 계장 캡슐 및 고정 장치에 대한 구조적 건전성을 평가 일환으로 내진 해석을 수행하였다[2, 4~6]. 내진 해석 관련한 캡슐 및 관련 구조물은 그림 2.1-1과 같다.

2.1.1. 구조물 개요

- (1) 캡슐 고정 장치 구조물

원자로 수조 내 최하단 플랫폼 구조물 위치(EL. 78.78m)에는 계장 캡슐을 고정하기 위한 장치가 기 설치된 H-비임(Beam)과 채널브라켓(Channel Bracket)을 이용한 기지판(Base Plates) 위에 설치되었으며, 전체 구조물은 수조(Reactor Pool)에 잠기게 된다. 고정 장치가 설치될 기지판은 85 mm의 높이 차이를 가지고 3개의 고정 장치가 설치될 수 있도록 설계되었다.

계장 캡슐 상부 고정용 고정 장치는 외팔보(Cantilever) 형태로 한쪽 단은 기지판위에 고정되고, 다른 한쪽 단은 캡슐 보호관(Protection Tube)의 상부를 잡아 주게 된다. 고정 장치는 조절 장치(Control Unit)와 연결되어 수동 방식으로 작동되며, 고정 장치와 조사공 사이의 거리는 약 900mm (IR1), 780mm(CT), 650mm (IR2)이다.

(2) 내부조사공

재료 캡슐 조사 설비로 사용되는 조사공(Test Hole)은 Zircaloy-4 의 재질로 이루어졌으며, 원자로 중심 근처의 CT, IR1 및 IR2 조사공으로 육각형(Hexagonal)의 핵연료 장전용 유동관(Flow Tube)들과 동일한 형태이다. 조사공에서의 최단 직경은 74.4 mm이며, 최장 직경은 80.4 mm 그리고 길이는 910 mm이다.

(3) 캡슐 고정 장치의 조절 장치 구조물

원자로 수조 내 중단부 플랫폼(EL. 82.13m)에 계장 캡슐 상부 고정용 고정장치를 조절하기 위한 조절 장치 3개가 하나의 상자형으로 구성되어 c-채널 사이에 20 mm두께의 판을 설치하고 그 위에 장착되었다.

2.1.2. 규격 분류 및 허용 응력 기준

계장 캡슐 및 고정 장치에 대한 구조적 건전성은 현재 설계등급상 안전 등급은 NNS, 내진 등급은 II급이므로 인접한 안전 등급 설비의 구조적 건전성에 주는 영향을 검토하기 위하여 계장 캡슐(Instrumented Capsule), 고정 장치(Clamp Arm), 기지판(Base Plate), 플랫폼(Platform), 수조벽(Reactor Pool Wall), 조사공(Test Hole)등을 해석 모델로 선정하고, ASME B&PV Code, Section III, Div. 1, Part NF[7]에서 규정하는 조건 즉, 정하중(Dead Loads), 운전 기준 지진(Operating Basis Earthquake : OBE)과 안전 정지 지진(Safe Shutdown Earthquake : SSE)으로 인한 지진하중등의 모든 하중 조건에 대하여 구조 건전성을 분석하였다.

2.1.3. 재료 및 물성

기 설치된 구조물과 계장 캡슐 및 고정 장치 제작에 사용된 주재료는 SA-240 Type 304 스테인레스강이다. 설치될 기지판, 고정 장치 그리고 캡슐 등은 오스테나이트(Austenite)계열 304이고, 볼베어링과 스크류축등의 고강도를 요하는 부품들은 마르텐사이트(Martensite)계열 440C와 오스테나이트계 329 재료를 사용하였다. 이들의 물성 값은 ASME Code, Appendix[8]에서 규정하고 있는 값을 사용하였다. 또한 CT와 IR 의 조사 공은 Zircaloy-4 재질로 이루어 졌으며, 이들의 기계적 물성 값은 표 2.1-1과 같으며 기준 설계 온도는 120°C 이다.

2.1.4. 하중 조건 및 해석 모델

1) 하중 조건

다음과 같은 하중이 계장 캡슐 및 고정 장치 설계와 강도 평가를 하는데 고려되었다.

D = Dead loads

E = Operating Basis Earthquake(OBE)

E1 = Safe Shutdown Earthquake(SSE)

Q = Thermal Stress

(1) 지진 하중

지진 하중은 최하단 플랫폼에 설치된 H-비임 고정부 수조벽, 캡슐 본체 하부 그리고 조사공의 하단부를 통하여 전달되는 다지지점의 지진 입력을 요하는 문제이다. 보다 보수적인 결과를 얻을 수 있도록 OBE와 SSE 하중의 경우에 플랫폼 중단부(EL. 81.35m)의 수평, 수직 층응답스펙트럼(Floor Response Spectrum)과 조사공 하부에서의 층응답 스펙트럼중 각 방향에 대하여 더 큰 층응답 스펙트럼을 입력 하중으로 사용하여 수행하였다. 또한 조절 장치가 설치될 중단부 플랫폼 구조물에 대해서는 수조 상부(EL. 85.55m)에서의 층응답스펙트럼을 사용하였다. 그림 2.1-2에는 조사공 하부에서의 수직 방향 가속도 층응답스펙트럼(SSE)을 나타내었고, 중단부 플랫폼 수조 벽에서의 수평 방향 가속도 층응답스펙트럼(SSE)을 그림 2.1-3에 나타내었다. 해석에 사용된 가속도는 OBE 하중에 대해서 수직, 수평 방향 2% 감쇠와 SSE 하중에 대해서는 4% 감쇠 층응답스펙트럼을 가진하중으로하여 해석을 수행하였다.

(2) 하중 조합

ASME Code에 기초한 하중 조합과 허용한계를 표 2.1-2에 나타내었다. Service Level A는 정하중만을 고려한 경우이고, Service Level B는 정하중, OBE 하중 그리고 캡슐 본체 End Plug에서의 열응력[2]의 조합이며, Service Level D는 정하중과 SSE 하중의 조합이다.

2) 유한 요소 해석 모델

계장 캡슐 및 고정 장치의 해석을 위한 유한 요소 해석 모델로서 H-비임에 연결된 C-채널과 기지판 그리고 캡슐 모델을 그림 2.1-4에 나타내었다. 전체 해석 모델은 기 설치된 구조물(H-비임, 채널 브라켓, 육각형 조사 공), 새로이 제작 설치될 구조물(기지판, 고정 장치 3개, 스프링) 그리고 계장 캡슐(본체, 보호관)등으로 구성되어 있다. 그림 2.1-5에는 중단부 플랫폼에 설치되어 있는 조절 장치 구조물의 해석 모델을 나타내었다.

유한 요소 모델에서 H-비임, 채널 브라켓, 기지판 그리고 조사공은 405개의 쉘요소를 사용하여 모델링하였고, 이들의 질량은 182 Kg 이다. 기지판에 장착되어 계장 캡슐의 보호관 상부를 잡아 줄 고정 장치는 27개의 보요소로서 모델링하였고, 캡슐의 본체와 보호관 부분은 파이프 요소를 사용하였다. 캡슐에 대해서는 63개의 요소가 생성되었고, 캡슐 내부 시편의 질량(총 30 Kg)을 고려하여 캡슐의 총 질량은 57 Kg이다. 이때 본체 내부의 시험 시편에 대한 질량을 고려하기 위해서 본체 부분의 파이프 요소에 해당하는 절점에 집중 질량으로 부가하였다. 캡슐을 조사 공에 장·탈착할때 안내 역할을 하면서 최종 설치 상태에서는 스프링 역할을 하는 캡슐 본체 상부에 설치된 상부 안내 스프링(Top Guide Spring)에 대해서는 Spring-Damper 요소를 사용하였다. 총 18개의 Spring-Damper요소를 사용하였으며, 이때 스프링의 상수 값은 15 N/mm을 사용하였다. 또한 캡슐 고정 장치와 조절장치등은 모두 수조에 잠겨 있으므로 동적거동시 유발되는 동적유체질량(Hydrodynamic Masses)을 산정한 후 질량 요소를 사용하여 각 절점에 분포하였다.[9] 해석 모델에서 질량 요소는 285개로 구조물의 각 부위 절점에 고루 분산시켜 추가 질량(Added Masses)으로 부가하였고, 총 추가 질량은 34.2 Kg이다.

조절 장치 구조물에 대해서는 쉘요소와 보요소를 사용하여 총 164개의 절점과 271개의 요소로서 모델링하였고, 추가 질량을 포함하여 172 Kg의 총 질량을 갖는다.

해석 모델에 대한 경계 조건으로는 수조 벽에 설치된 H-비임과 조사 공 하

단부의 절점에 대해서 모든 자유도를 구속하는 완전 고정으로 보았다. 또한 캡슐 본체 하부의 고정부는 세방향의 변위는 고정하고, 세방향의 회전은 허용하는 힌지의 구속 조건을 갖는다.

2.1.5. 내진 해석 결과

캡슐 및 지지 구조물의 구조적 건전성을 평가하기 위해서 상용 유한 요소 전산 프로그램인 ANSYS[10]를 이용하여 내진 해석을 수행하였다.

1) 응답 스펙트럼 해석

계장 캡슐 및 고정 장치 구조물에 대한 총응답스펙트럼 해석에서는 X, Y, Z 각 방향에 대하여 유효 질량(Effective Masses)의 약 90%에 해당하는 중요한 모드들을 모두 고려하였다. 사용되는 총응답스펙트럼은 OBE와 SSE 지진 하중에 대하여 2%와 4%의 감쇠값을 사용하였다.[11] 응답 조합에서는 각 입력 지진 방향에 대하여 각 모드별 응답을 근접 모드의 상관관계를 고려한 10% 그룹법을 사용하여 구한 후, 다시 세 방향에 대하여 SRSS법으로 조합하여 응답을 구하였다.[12]

표 2.1-3에는 각각의 하중 조합에 대하여 계산된 최대 변위와 중요 부위의 변위 값을 나타내었다. 지진 하중에 의한 최대 변위는 OBE와 SSE하중 모두 IR1 조사 공용 캡슐 보호관의 중간에서 발생하였는데, Service Level D에 대하여 수직 방향 0.033 mm와 수평 방향 8.44 mm의 최대 변위를 보였다. 그러나 캡슐 보호관의 중간 부분은 원자로 침니(Chimney)내에 있게 되어 다른 구조물과의 간섭은 일어나지 않는다. 본 모델에서 다른 구조물과의 간섭이 우려되는 부분은 조사 공과 다른 유동관(Flow Tube) 사이의 간격, 즉 IR1 조사 공(1.3 mm), CT 조사 공(1.2 mm) 그리고 IR2 조사 공(1.0 mm)이다. 따라서 지진 하중에 의한 양방향의 변위를 고려하여 IR2 조사 공의 0.5 mm를 허용 변위로 선정하였다. 또한 스프링이 설치된 캡슐 본체 상부와 조사 공 사이의 간격(7.2 mm)에서 변위의 규제를 받는다. 해석 결과 조사공 상부에서의 변위는 Service Level D에 대해 수평 방향 0.49 mm를 보였고, 캡슐 본체 상부에서의 변위는 2.66 mm를 보였다. 따라서 이들 구조물은 보는바 와 같이 허용 값보다 작으므로 서로 구조물간의 충돌은 일어나지 않는다.

표 2.1-4에는 정하중과 SSE 지진 하중에 의한 캡슐 본체 하부 힌지점에서의 절점반력을 나타내고 있다. 하중 조합 Service Level D에 대하여 작용 하중은 수직 방향 17.3 Kg이고, 수평 방향 3.0 Kg이다. 캡슐 본체 하부 Spider의 허

용 하중은 약 86 Kg이므로 본 구조물의 지진 하중에 의한 작용 하중은 Spider의 허용 하중을 만족하였다.

표 2.1-5에는 사용 조건에 따른 구조물 중요 부위의 계산된 응력 값과 ASME Code에서 규정하고 있는 허용응력값을 나타내었다. 최대 응력은 지지판과 고정 장치가 연결되는 부위에서 발생하였고, 캡슐 보호관에서도 약 30 MPa 정도의 응력이 작용하였으나 재료의 허용응력치 이하의 값을 보이고 있으므로 고정 장치나 캡슐 등은 구조적으로 안정하다. 정상 운전 조건인 Service Level B의 '하중 조합, 즉 정하중, OBE 지진 하중과 2차 열 응력의 조합에 대한 결과는 캡슐 본체 End Plug에서 162.3 MPa로서 허용 응력 184.5 MPa를 만족하였다. 또한 Zircaloy-4의 육각형 조사 공의 하부 고정 부위에서도 Service Level D에 대해서 5.2 MPa의 응력 값이 계산되었으나, 허용응력값(288 MPa)보다 상당히 낮다.

표 2.1-6에는 각 Service Level에 대한 최대 축응력과 굽힘 응력의 조합 하중에 따른 응력 비를 나타내었다. 계산 결과 축응력비가 0.15보다 작았으며, 조합 응력비는 1보다 작은 값으로 ASME Code의 조합 하중 조건을 만족하였다.

2) 피로 해석

지진 하중에 대한 피로 해석은 HANARO 설계 수명 동안에 1번의 SSE하중과 5번의 OBE하중을 고려하여 수행하는데, 반복 횟수는 2400 OBE 응력 주기와 400 SSE 응력 주기로 수행한다. 그러나 응력 주기의 전체 수가 20,000 Cycle보다 작은 응력 주기에 대해서는 ASME Code의 NF-3300이 사용될 수 없기 때문에, NE-3221.5 방법에 기초한 피로 이용 계수(Fatigue Usage Factor)를 이용하여 ASME Code, Sec. III, Appendix의 Fig. I-9.2에서 정의한 주기(Cycle)의 허용수에 따라 캡슐 및 고정 장치 구조물에 대하여 계산하였다.

피로 이용 계수의 계산

계장 캡슐 및 고정 장치에 대한 피로 이용 계수가 다음과 같은 가정하에 계산되었다.

① 응력 집중 계수(Stress Concentration Factor : SCF)는 최대 응력이 발생된 위치의 기하학적 형상 등을 고려하여 계산하였으나, 보다 보수적인 산정을 위해서 4.0값을 사용한다.

② 피로 이용 계수를 계산하기 위한 응력 크기는 구조물의 모든 응력 성분

대하여 계산된 최대응력값을 사용한다.

Service Level B와 D에 대한 해석 결과로부터 가장 큰 응력이 발생된 지지판과 고정 장치 연결부의 응력 크기와 지정된 주기는 다음과 같다.

$$S_{OBE} = 35.9 \text{ MPa}, \quad S_{SSE} = 40.6 \text{ MPa}$$

$$n_{OBE} = 2400 \text{ Cycles}, \quad n_{SSE} = 400 \text{ Cycles}$$

SCF = 4.0 에 대한 최대 응력 크기는

$$S_{\max, OBE} = 35.9 \times 4.0 = 143.6 \text{ MPa (20.82 ksi)}$$

$$S_{\max, SSE} = 40.6 \times 4.0 = 162.4 \text{ MPa (23.55 ksi)}$$

이다. 계산된 최대 응력 크기에 대한 주기의 허용 수는 ASME Code, Appendix Fig. I -9.2.2로부터 무한하다. 따라서 누적되는 피로 이용 계수는 매우 적으므로 피로로 인한 구조적 손상은 거의 없는 것으로 판단된다.

3) 조절 장치 구조물에 대한 응력 해석 결과

조절 장치 구조물에 대한 응력 해석 결과 표 2.1-7에서와 같은 응력 값을 보였다. Service Level D의 조건에 대하여 최대 응력은 23.46 MPa로 π -채널 상부의 조절 장치가 설치되는 부분에서 발생하였으나, ASME Code의 허용응력 값을 충분히 만족하였다.

2.2. 응력 해석

2.2.1. 개요

캡슐 본체의 외경이 60 mm로 변경된 표준형 계장 캡슐의 내외 압에 의한 기계적 응력, 캡슐의 내벽과 외벽의 온도차에 의한 열 응력 그리고 End Plug의 반경 방향 온도 변화에 의한 열 응력을 계산함으로써 구조적 건전성을 평가하였다.[5, 13, 14]

2.2.2. 내압에 의한 응력 계산

캡슐 본체 내부와 외부의 압력 차이는 약 0.3 MPa이며[18], 이들 압력의 차이에 의해서 캡슐 외통에 작용하는 응력은 ASME Code Sec.III Appendix

A[15] 의 Article A·2000 "Analysis of cylindrical"에서 규정하고 있는 식을 적용하여 계산한다. 또한 내압에 의한 응력과 열 응력은 중첩 법에 의해 전체 응력으로 표현될 수 있다. ASME Code 에서 규정하는 응력식은 다음과 같다.

$$\sigma_1 = \sigma_h = P \frac{1+Z^2}{Y^2-1} \quad (1a)$$

$$\sigma_2 = \sigma_z = P \frac{1}{Y^2-1} \quad (1b)$$

$$\sigma_3 = \sigma_r = P \frac{1-Z^2}{Y^2-1} \quad (1c)$$

여기서 1, 2, 3은 각각 원주 방향, 축방향 그리고 반경 방향의 주응력을 나타내고, Y, Z는 캡슐 내·외경의 관계식으로서 다음과 같다.

$$Y = \frac{D_o}{D_i} = \frac{60}{56} = 1.071 \quad (2)$$

$$Z = \frac{D_o}{(D_i+D_o)/2} = \frac{60}{(56+60)/2} = 1.034$$

이들 값을 (1)식에 대입하여 주응력을 구하면,

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= 0.3 \frac{1+1.034^2}{1.071^2-1} = 4.22 \\ \sigma_2 &= 0.3 \frac{1}{1.071^2-1} = 2.04 \\ \sigma_3 &= 0.3 \frac{1-1.034^2}{1.071^2-1} = -0.14 \end{aligned} \quad (3)$$

이다. 일반적으로 원자력 관련 구조물의 기계적 안정성은 ASME Code에 규정된 허용 응력 기준치에 따르는데, 구조물에 발생하는 설계 응력 강도(Design Stress Intensity : S_m)가 재료의 허용 응력을 넘지 않을 때 구조물의 안정성은

확보된다. 압력에 의해서 작용하는 캡슐의 최대 응력 강도(S)는 주응력의 최대 차로 나타낼 수 있으며, 다음과 같다.

$$S = | \sigma_1 - \sigma_3 | = | 4.22 + 0.14 | = 4.36 \text{ MPa} \quad (4)$$

즉, 캡슐 외통 내·외부의 압력에 의해서 작용하는 기계적 응력 치는 4.36 MPa 이고 비교적 낮게 작용한다.

2.2.3. 좌굴응력

조사공 내부 캡슐 외통의 표면에 흐르는 냉각 유체로 인한 냉각 수압(P)은 약 0.4 MPa이다. 이 냉각 수압에 의해 발생하는 캡슐 외통의 좌굴응력은 다음 식으로 구할 수 있다.[15]

$$P_{cr} = \frac{Et^3}{4(1-\nu^2)R_o^3} \quad (5)$$

여기서 P_{cr} 은 임계좌굴응력이며, R_o 는 캡슐 외반경이다. 식(5)에 캡슐의 물성, 두께 그리고 외반경을 대입하여 계산하면 임계좌굴응력은 15.52 MPa이다. 냉각 수압에 의한 작용 좌굴응력은 3P로 계산할 때 1.2 MPa이고, 이 값은 임계좌굴응력보다 낮은 값으로서 캡슐 본체의 좌굴안정성이 확보됨을 보인다.

2.2.4. 온도 계산

캡슐 본체의 열응력해석을 수행하기에 앞서 온도 계산이 이루어졌다. 온도 계산시 캡슐 내부 시편에 대한 온도 계산을 위해 유한차분법(Finite Differential Method : FDM)을 이용한 열전달 전산 프로그램인 HEATING 7.2f [17]을 사용하였다. 이 프로그램은 1,2,3 차원에 대한 정상 상태 및 과도 상태에 대한 열 해석이 가능하고, 열전달 및 대류, 복사열 전달 해석이 가능하다. 특히 원통형 구조를 갖는 사용후 핵연료 수송 용기의 열 해석에 널리 사용되고 있으므로 본 캡슐의 열 계산에 적합하다.

(1) 해석 모델

그림 2.2-1에는 온도 계산 위한 캡슐 본체의 해석 모델을 나타내었고, 표 2.2-1에는 각 영역별 재료 및 사양을 나타내었다. 표 2.2-2에는 열계산시 열원이 되는 SS 304 시편과 알루미늄에 대한 발열량들을 나타내었다.

온도 계산에 사용된 경계 조건은 다음과 같은 가정을 근거로 하였다.

(가) He Gap에서 대류(Convection), 복사(Radiation)는 무시할 정도로 작으므로

전도(Conduction)만을 고려하였다.

(나) 경계 조건 1 은 자연 대류(Natural Convection)가 일어난다고 가정하고, 이때의 자연 대류 계수는 보수적으로 다음과 같은 관계식이 성립한다고 가정하였다.

$$\text{Convection Coefficient : } H_{nc} = 1.0(\Delta T)^{0.333}$$

$$\text{Radiation : } \epsilon = 0.1$$

(다) 경계 조건 2 (일차 냉각수와 접하는 캡슐 외통)

$$\text{냉각수 온도 : } T = 40 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\text{캡슐 외통 표면에서의 열전달 계수 : } h = 3.03 \text{ W/cm}^2 \text{ }^\circ\text{C}$$

(2) 온도 계산 결과

표 2.2-3에는 주어진 입력 자료를 근거로 하여 계산한 캡슐 본체에서의 온도 분포를 나타내었고, 그림 2.2-2에는 시편이 들어갈 다섯 영역 중앙에서의 반경 방향으로의 온도 변화를 나타낸 것이다. 이들 온도 분포는 직경 70 mm의 캡슐에 비해 최대 온도에서 비교적 낮게 계산되었고, 캡슐 외통 냉각수와 접하는 부분에서는 열전달 계수가 70 mm의 캡슐에 비해 적기 때문에 온도가 높게 계산되었다. 캡슐에서의 온도 분포로부터 캡슐 외통에서 최대 온도는 최하단 시편부(REGION I) 내벽에서 102.54 $^\circ\text{C}$ 로 가장 크게 나타났고, 캡슐 반경 방향으로의 온도 분포도 REGION I 과 바로 아래층인 반사체(reflector)와의 경계에서 크게 나타났다. 또한 반경 방향 He 가스 부분에서 온도 차이를 뚜렷하게 알 수 있으며, 시편 영역 캡슐 중앙에서의 최대 온도는 약 294.35 $^\circ\text{C}$ 로 계산되었다.

2.2.5. 열 응력

캡슐에서 발생하는 열 응력은 캡슐 외통의 두께에서 온도 차이에 의해 발생하는 열 응력과 캡슐의 End Plug에 반경 방향 온도차에 의한 열 응력 등으로 생각할 수 있다.

(1) 캡슐 외통 두께의 온도차에 의한 열 응력

캡슐 외통에서의 반경 방향 온도차로 인한 열 응력은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\sigma_{c, \max} = \frac{1}{2} \Delta T \alpha \frac{E}{(1-\nu)} \quad (6)$$

여기서 $\sigma_{c, \max}$ 는 캡슐 원주 방향의 최대 응력이며, ΔT 는 $|T_i - T_o|$ 로 캡슐

외통의 내벽 온도와 외벽 온도의 차이를 나타내고, 캡슐 길이 방향 각 위치에 따라 온도가 다르게 분포된다. 캡슐 외통에 발생하는 최대 응력의 계산은 캡슐 외통 내·외벽 면에서 온도차가 가장 큰 부분에서의 온도차로 이루어졌다. 캡슐 각 영역 외통의 내·외 벽면 온도차는 캡슐 중간에서 $\Delta T = (102.54 - 53.72) = 48.82$ 로 온도 차이가 가장 크다. 그러므로 이때의 ΔT 와 각 물성을 식(6)에 대입하여 열 응력을 계산한다.

$$\begin{aligned} \sigma_{c, \max} &= \frac{1}{2} (48.82) (17.07 \times 10^{-6}) (191.0 \times 10^9) / (1 - 0.3) \\ &= 113.7 \text{ MPa} \end{aligned} \quad (7)$$

(2) 캡슐 End Plug 반경 방향 온도차에 의한 열 응력

캡슐 하부 End Plug에서의 반경 방향 온도차에 의해서 발생하는 열 응력의 계산을 위해서 전산 프로그램인 ANSYS[9]을 사용하였다. 캡슐의 형상이 대칭이므로 축대칭 구조물의 2차원 모델링에 주로 사용되는 축대칭 요소(PLANE25)를 사용하였으며, 106개의 절점과 75개의 요소를 생성하였다. 그림 2.2-3은 캡슐 End Plug의 열 응력 해석 모델을 나타내고 있다. 해석 모델에서 캡슐 내부의 구조물이 어떠한 온도 조건에서도 캡슐의 외통과 기계적인 접촉이 없는 것으로 가정하였다. 즉, 캡슐 End Plug와 캡슐 외통 일부에서의 온도가 열응력해석을 위한 하중의 항으로 작용하였다. 또한 경계 조건으로는 캡슐 하부 고정부에 대하여 길이 방향으로의 변위를 고정하였다.

그림 2.2-4에는 캡슐 End Plug에서의 온도 분포를 나타내고 있으며, 그림 2.2-5에는 열 하중에 의해 변형된 캡슐 외통 End Plug의 변위 형상을 보여주고 있다. 이때 최대 변위는 해석 모델의 캡슐 외통 상부(Node #94)에서 0.039 mm를 보였고, End Plug에서의 변위는 외통과 End Plug의 연결부(Node #64)에서 반경 방향(UX) 0.034 mm와 축방향(UY) -0.0019 mm를 보였다.

그림 2.2-6은 이들 온도 분포에 의해서 발생하는 열 응력의 계산 결과를 보여주고 있다. 최대열응력은 End Plug와 캡슐 외통이 접하는 부분(Node #64)에서 발생하였고, 162 MPa의 응력 값을 보였다.

2.2.6. 강도 평가

캡슐 설계 기본 방침 및 기준에 따라서 설계 응력 강도와 평가 기준치를 정하였다.

스테인레스강에 대한 물성치들은 사용 온도에 따라서 그 값들이 달라지는데, 본 캡슐의 경우 외통에서의 최대 온도가 102.54 °C 이므로 열 응력 계산시 110 °C를 기준치로 하여 계산하였다. 캡슐에 발생하는 응력의 종류는 압력에 의해 발생하는 일차막응력(P_m)과 이차 응력으로 분류되는 열 응력(P_e)이 있다. ASME Code의 Sec.Ⅲ 응력의 평가 기준치는 다음과 같다.

$$P_m < S_m \quad (8)$$

$$P_m + P_e < 3S_m \quad (9)$$

여기서 S_m 은 재료의 설계 응력 강도이다.

2.2.7. 응력 해석 결과

캡슐에서의 응력 계산은 압력 차이에 의한 막응력, 냉각 수압에 의한 좌굴응력, 캡슐 외통 내·외벽 온도차에 의한 열 응력과 캡슐 End Plug에서의 반경 방향 온도차에 의한 열응력등이 계산되었다. 표 2.2-4에는 이들 계산된 응력 결과와 코드 요구 조건을 나타내었다.

직경 70mm의 캡슐에 대한 응력 계산 결과[18]과 비교하여 직경 60mm의 캡슐에 대한 열 응력 결과들은 비교적 낮은 응력치를 보였으며, 캡슐 외통에 작용하는 일차막응력(P_m)은 4.36 MPa로 허용 응력 강도인 137.2 MPa을 만족하였다. 또한 일차막응력과 열 응력과의 조합된 응력 결과는 118.1 MPa로 ASME Code 규정 허용 응력인 411.9 MPa을 만족하고 있다. End Plug에서의 열 응력 해석 결과 조합 응력은 166.0 MPa로 허용응력치를 만족하였다.

2.3. 좌굴안정성

2.3.1. 해석 모델

재료 조사 시험용 계장 캡슐은 외경에 비해 길이가 길기 때문에 좌굴안정성을 고찰할 필요가 있다.[19] 캡슐이 조사공(Test Hole)에 장착되면 고정 장치가 캡슐의 상부를 잡아 주게 된다. 따라서 좌굴안정성은 몇몇 경계 조건에 대한 임계좌굴하중(Critical Buckling Load)을 구하여 캡슐 구조물의 좌굴안정성을 평가하였다.

그림 2.3-1은 좌굴해석을 위한 캡슐 구조물의 해석 모델을 보여주고 있다. 캡슐 본체 하부의 스프링과 캡슐 보호판과 본체 연결 부위에 설치된 스프링에

대해서는 좀더 보수적인 해석을 위해 고려하지 않았고, 해석은 28개의 2차원 보요소(BEAM3)를 사용하여 수행하였다.

좌굴해석은 표 2.3-1에서와 같은 경계 조건에 대해서 수행하였다. POINT1은 캡슐 본체 하부 Receptacle에서의 경계 조건을 나타내는데 단순 지지와 고정 경계 조건에 대해서, 그리고 POINT2는 보호관 상부 고정 장치가 잡아 주는 부분의 경계 조건을 나타내는데 단순 지지와 고정에 대해서 살펴보았다. 또한 하중 조건으로는 캡슐 보호관의 제일 위 부분인 절점번호 29에 1.0 Kgf의 단위 하중이 작용하는 것으로 하여 해석을 수행하였고, 후처리 과정에서 임계 좌굴하중과 좌굴모드를 구한다.

2.3.2. 좌굴해석 결과

단순 지지와 고정의 경계 조건을 조합한 네 가지 경우의 경계 조건에 따른 계장 캡슐 구조물의 좌굴해석 결과를 표 2.3-2에 나타내었다. 단위 하중에 의한 캡슐 구조물의 좌굴해석 결과 캡슐 본체 하부와 캡슐 상부 고정부가 단순 지지된 CASE1에서 190.7 Kgf의 하중으로 가장 낮은 임계좌굴하중을 보였다.

또한 캡슐 하부를 고정으로 보았을 경우(CASE3)에는 CASE1의 힌지(hinge) 경계 조건보다 좌굴하중이 약간 증가하였다. CASE2와 CASE4는 캡슐 상부를 고정으로 보았을 경우의 결과인데 단순 지지 경계 조건에 비해 좌굴하중이 상당히 커짐을 알았다.

실제 고정 장치에 대한 노외 성능 검사 결과 최대 고정력이 202 Kg 이상임을 고려할 때 캡슐 상부에 대한 경계 조건으로는 단순 지지와 고정 지지의 중간 정도의 조건으로 보아 평가할 수 있다. 즉, 본 캡슐 구조물에 대한 임계좌굴하중은 190.7 Kgf 이상이고, 569.6 Kgf이하의 범위에 있다.

그림 2.3-2는 양단 단순 지지 경계 조건을 갖는 CASE1에 대한 3차까지의 좌굴(Buckling) 모드 형상을 보여주고 있다. 임계좌굴은 캡슐 보호관의 중간부(Node #15)에서 최대 변위를 보이며 발생하였다.

2.4. 충격 안정성

2.4.1. 개요

구조물의 고유 성질인 고유 진동수보다 짧은 시간 동안 외력이 구조물에 가

해지는 충격 문제는 정하중이 작용하는 경우와는 달리 구조물의 역학적 거동에 큰 영향을 미치기 때문에 반드시 고려하여야 한다. 계장 캡슐을 연구로의 노심에 장·탈착하는 과정에서 발생할 수 있는 가상의 사고, 또는 설치된 상태에서 타 구조물에 의해서 충격을 받았을 때 발생하는 동적 거동에 대하여 해석하였다.[20]. 특히 캡슐이 하나로 노내의 수중에서 Handling Tool로부터 분리되어 자유낙하 하는 경우의 낙하 충격 문제를 다루었고, 또한 수직·수평 방향으로 외부 충격 하중이 작용하는 경우의 해석에서는 계장 캡슐 구조물이 하나로 내부에 설치된 상태에서 외부 충격 하중을 받는 것으로 생각하였으며, 램프(Ramp)하중이 캡슐 고유 주기 보다 짧은 시간에 작용하는 경우의 천이 해석(Transient Analysis)을 수행하였다. 이때 천이 해석은 상용 유한 요소 프로그램인 ANSYS [10]를 사용하였다.

2.4.2. 수중 자유낙하 충격 해석

계장 캡슐의 자유낙하 충격에서는 수직 방향 낙하 충격을 다루었으며, 따라서 캡슐은 회전 없이 수직으로 낙하하고, 수중에서 떨어지는 캡슐의 마지막 속도로서 응력을 계산하여 구조 건전성을 평가하였다. 캡슐을 노내에 장착하기 위한 Handling Tool로부터 분리된 캡슐이 수중에서 수직으로 자유 낙하하여 연구로의 바닥이나 타 구조물과 충돌할 때의 충격 응력을 계산하기 위해서는 우선 자유 낙하한 캡슐의 충격 순간의 속도를 알아야 한다. 어떤 물체의 수중 자유낙하시 그 물체에 작용할 수 있는 하중에는 다음의 세 가지가 있다.

- 1) 자 중 (F_w)
- 2) 저항력 (F_D)
- 3) 부 력 (F_B)

캡슐이 수중에서 자유 낙하하여 충격하는 순간에 캡슐에 작용하는 하중의 자유 물체도(Free Body Diagram)를 그림 2.4-1에 나타내었다.

충격 순간의 속도를 구하기 위해서 자유 물체도(Free Body Diagram)로부터 수직 방향 하중의 평형 방정식을 세우면 다음과 같다.

$$\sum F_y = m\vec{a} = F_D + F_B - F_w = 0 \quad (10)$$

여기서 F_B 는 부력, F_D 는 저항력이고 F_w 는 캡슐의 자중이다. 수중 캡슐의 저항력으로부터 식 (10)은 다음과 같이 속도와 마찰계수의 관계식으로 표현되며 결과는 다음과 같다.[20]

$$\begin{aligned}
\Sigma F_y &= F_D + F_B - F_w \\
&= 149.1fV^2 + 67.9 - 188.6 \\
\Rightarrow fV^2 &= (188.6 - 67.9)/149.1 = 0.81 \\
\Rightarrow V &= \sqrt{\frac{0.81}{f}} \tag{11}
\end{aligned}$$

계장 캡슐에 대한 Reynolds수(Re)를 계산하면[21]

$$\begin{aligned}
Re &= \frac{\rho VD}{\mu} \tag{12} \\
&= \frac{980 \times V \times (0.034 + 0.06)}{2 \times 43.33 \times 10^{-5}} = 1.063 \times 10^5 V
\end{aligned}$$

이다.

시행오차법(trial & error method)을 통해 충격 순간 캡슐의 속도를 구하기 위해서 Moody diagram을 이용하였다. Smooth Pipe 요소에 대하여 마찰계수를 가정하고, 위의 속도계산식 (11)에 마찰계수를 대입하여 속도를 계산한 다음, 식(12)에 식(11)을 대입하여 Reynolds수를 계산한다. 계산한 Reynolds수와 Moody Diagram으로부터 구한 Reynolds수를 비교하여 그 오차가 가장 작을 때의 속도가 구하고자 하는 캡슐의 최종 속도이다. 이들을 계산한 결과를 표 2.4-1에 나타내었다. 계산 결과 마찰계수 f 가 0.0117일 때 계산된 Reynolds수의 차이가 가장 작았으며 이때의 속도는 8.32 m/sec이었다. 따라서 계장 캡슐에 대한 수중 낙하시의 충격 순간 속도(V)는 8.32 m/sec 라고 할 수 있다. 충격 순간 캡슐의 속도를 알고 있으면, 이 충격속도에 의한 충격응력은 다음 식을 이용하여 구할 수 있다[21].

$$\begin{aligned}
\sigma_I &= V_I \sqrt{E\rho} \tag{13} \\
&= 8.32 \sqrt{(193 \times 10^9 \times 7913)/9.81} \\
&= 103.85 \text{ MPa}
\end{aligned}$$

캡슐의 재료인 SS304에 대한 항복 응력은(σ_Y) 205 MPa 이고, 허용 응력 항복 응력의 0.6 σ_Y 로 하면 123.0 MPa이므로 계산된 충격 응력과 허용 응력 비교하면

$$\therefore \sigma_I < \sigma_a \quad (103.85 < 123.0)$$

이다. 따라서 계장 캡슐이 수중에서 자유 낙하하여 충격을 받는 경우 재료의 허용 응력 이하의 응력이 작용하므로 캡슐 구조물은 충격 안정성이 확보된다.

2.4.3. 수직 충격 응력 해석

(1) 해석의 가정 및 유한 요소 모델

- 계장 캡슐은 하나로 내부에 설치되어 물 속에 잠겨 있게 되는데, 이때 물의 영향은 고려하지 않았고, 수직 충격 하중이 캡슐의 상단에 작용한다.
- 캡슐 본체 상부에 설치된 상부 안내 스프링은 수평 방향만 스프링의 역할을 하며, 조사 공에 접촉하는 부분은 고정되어 있다.
- 캡슐 구조물의 자유 진동 해석 결과 기본 고유 진동수는 8.1 Hz 이었고, 캡슐의 고유 주기(t)는 고유 진동수와 반비례하기 때문에 약 0.12 sec이다. 충격해석시 작용 하중의 시간은 캡슐 고유 주기 보다 짧은 시간을 선택해야 응답을 충분히 살필 수 있으며, 충격 시간은 캡슐 고유 주기의 1/20, 즉 6 msec 동안 충격 하중이 작용하는 것으로 하였다.

충격 해석을 위한 캡슐의 해석 모델은 좌굴해석시 사용한 모델과 동일하다. 해석 모델은 캡슐 본체, 보호관, Rod Tip 그리고 스프링 등을 고려하여 생성되었고, 보호관과 본체의 연결부(절점 #7)에는 스프링이 설치되었다. 해석 모델에서 캡슐의 보호관과 본체는 28개의 2차원 보요소(BEAM3)를 사용하였고, 캡슐 본체의 상부에 설치된 와이어(wire) 스프링에 대해서는 스프링-댐퍼 요소(COMBIN14)로서 모델링하였다.

그림 2.4-2는 시간에 따른 충격 하중 이력을 나타내었고, 단위 하중과 캡슐의 임계좌굴 하중(1870N)이 캡슐 보호관의 상부에 6 msec 동안 작용하는 램프(Ramp)하중으로 고려하였다. 충격 해석을 통하여 최대 응력을 계산하고, 재료의 허용 응력과 비교하여 가해 줄 수 있는 최대 충격 하중을 결정하였다.

고려된 경계 조건으로는 캡슐 하부 Rod Tip이 Receptacle에 고정되는 부위와 캡슐 고정 장치가 잡아 주는 보호관의 상부는 단순 지지 경계 조건으로 고려하였고, 본체 상부에 설치된 와이어 스프링이 조사 공에 접촉하는 부위는 고정된 경계 조건을 적용하였다. 모델에서 절점 #26과 1은 단순 지지되었고, 스프링과 접촉되는 조사 공 부분(절점 #30)은 고정되었다. 또한 수직·수평 방향 충격 하중은 각각 절점 #30과 16에 가해진다.

(2) 단위 하중의 영향

단위 하중, 즉 1.0 N의 충격 하중이 캡슐 상부에 작용할 때, 캡슐에서의 응력을 해석하였다. 해석 결과 단위 충격 하중으로 인하여 캡슐에 작용하는 최대 응력 강도(Stress Intensity)는 19.9 KPa로 캡슐 하부의 Rod Tip부위에서 발생

하였다. SS 304재료의 허용 응력 123 MPa을 기준으로 캡슐에 수직 방향으로 가해 줄 수 있는 최대 충격 하중을 환산하면, $123/0.0199=6180$ N이다.

그림 2.4-3은 수직 방향 충격 하중 작용점인 보호관 상수(절점 #29)에서의 시간에 따른 변위 이력 선도를 나타낸 것이다. 단위 하중으로 인한 최대 변위는 충격하기 시작하여 2.4 msec에서 $0.033 \mu m$ 을 보였으며, 충격 하중이 작용한 최종 시간 범위 내에서 최대 변위가 발생함을 확인하였다. 표 2.4-2는 단위 하중 작용시 캡슐에 작용하는 최대 응력과 탄성 변형률을 나타내었다. 이때 최대 응력은 19.9 KPa이고, 최대 변형률은 $0.103 \mu \epsilon$ 수준이다.

(3) 임계좌굴하중의 영향

수직 방향으로 최대 가해 줄 수 있는 충격 하중은 6180 N이지만, 직경에 비해 길이가 긴 캡슐 구조물의 임계좌굴하중은 1870 N이다. 따라서 임계좌굴하중이 충격 하중으로 작용했을 때의 응답을 고찰하였다. 동적 응답으로는 캡슐의 몇몇 점에서 시간에 따른 변위 이력, 최대 응력 강도 그리고 탄성 변형률에 대한 결과를 살펴보았다.

캡슐의 하단부(절점 #2), 중간부(절점 #16) 그리고 상단부(절점 #29)에서의 시간에 따른 변위 이력을 그림 2.4-4에 나타내었다. 최대 변위가 발생하는 부위는 단위 하중이 작용할 때와 마찬가지로 충격 하중의 작용점이 되며, 이때 변위 값은 0.61 mm이다. 최대 변위가 발생하는 시간에는 차이가 있음을 알 수 있는데, 캡슐의 하단 부에서는 1.6 msec, 중단 부에서는 2.0 msec 그리고 상단 부에서는 2.4 msec로 캡슐의 하부에서 상부로 최대 변위가 일어나는 데에는 약 0.8 msec가 걸림을 알 수 있다. 최대 응력은 캡슐의 하단부 Rod Tip부위에서 분포하며 37.2 MPa의 응력이 작용하였고, 이때 탄성 변형률은 $193 \mu \epsilon$ 로서 비교적 작은 수준이다.

2.4.4. 수평 충격 응력 해석

수평 방향으로 충격력이 작용하는 경우에는 보수성을 생각하여 변위가 가장 크게 발생하였던 보호관의 중간 부위에 충격 하중이 작용하는 것으로 하여 해석하였다. 모델과 경계 조건은 수직 충격 해석의 경우와 동일하다.

수직 방향으로 충격 하중이 작용하는 경우와 마찬가지로 캡슐 구조물의 측면에서 단위 하중이 작용하고, 작용점은 내진해석시 최대 변위가 얻어졌던 캡슐 보호관의 중앙(절점 #16)에 작용한다. 단위 충격 하중 작용시의 응력을 기준으

로 측면에서 가해 줄 수 있는 최대 충격 하중을 결정하였다.

단위 하중 1.0 N이 보호관의 중앙에 수평 방향으로 충격할 때 캡슐 중앙과 하단 부에서의 변위, 응력과 변형률 등을 고찰하였다. 마지막 충격 순간에 하중 작용점에서의 최대 변위는 수평 방향 0.012 mm 발생하였고, 수평 방향 충격 하중에 의해서 얻어진 최대 응력 0.65 MPa로 보호관의 상부 고정 장치가 잡아 주는 부분에서 발생하였다. 따라서 재료의 허용응력값과의 관계를 이용해 환산한 수평 충격 하중으로 허용되는 최대 하중은 210 N임을 알 수 있다. 또한 단위 충격 하중이 보호관의 중앙에 측면으로 작용했을 때의 최대 탄성 변형률은 $2.9 \mu \epsilon$ 로서 아주 미소한 변형률을 보였다.

2.5. 하나로와의 열수력 양립성[22]

2.5.1. 캡슐 모킹 설계, 제작 및 실험 장치

계장 캡슐에 대한 보다 정확한 설계 변수를 검토하기 위하여 모의 계장 캡슐을 설계·제작하여 유체 유동 시험을 수행하였다.

(가) 캡슐 모킹(Mock-up) 설계 및 제작

하나로를 이용한 원자력 재료의 조사 시험용 계장 캡슐은 설계·제작되기 앞서 실제 원자로 환경에서의 건전성과 연구로와의 양립성에 관한 확인 작업을 위하여 캡슐모킹의 설계, 제작이 이루어졌다. 설계 요건을 만족하는 캡슐 원통 직경 크기의 범위는 일차 실험으로 밝혔듯이 $50 \text{ mm} < D < 70 \text{ mm}$ 이었고, 실험적으로 밝혀진 범위하에서 사용 파이프의 제작구매성 등을 고려하여 직경이 60 mm인 캡슐 원통을 고려하였고, 계장 캡슐의 형상은 그림 2.5-1과 같으며, 또한 압력 강하 유발 Restrictor를 제작 부착하여 유동 실험을 수행하였다.

(나) Test Section 및 Test Loop

모의 캡슐은 그림 2.5-2와 같은 시험부에 장전되며, 시험부에는 캡슐의 열수력 양립성을 규명하기 위한 압력 강하 측정용 Tap이 Flow Tube Inlet, Outlet 부분에 설치되어있다. 설계 요건을 어느 것이 가장 잘 만족하는지 관찰하기 위해 캡슐 및 Restrictor 종류를 교환하여 설치한 후 실험을 수행하였다. 사용한 Loop 형태는 Closed Loop로서 그림 2.5-2와 같이 저장 탱크에 저장된 물

은 Pump에 의해 순환된다. 유량의 측정은 Orifice Flow Flow Meter로 하였으며, 유량은 Controller에 의해 Pump Dpeed 제어에 의해 조절된다.[23]

(다) Data Acquisition

Data Acquisition은 Orifice Plate 전후 Flow Pipe에 설치되어 있는 차압 압력 강하 Cell로 부터의 Analog Signal을 A/D Converter에 의해 전산기로 받아 유량 측정을 수행한다. 또한 시험부의 유량에 따른 압력 강하 Analog Signal도 A/D Converter에 의해 Computer로 처리한다. Data Acquisition System의 개략도는 그림 2.5-3과 같다.

(라) 실험 수행

본 실험을 수행하기 전에 먼저 압력 강하 측정에 사용하고자 하는 D/P Transmitter 기기를 보정하였는데, 보정커브는 그림 2.5-4와 같다. 유체의 온도는 40℃를 유지하였다. 측정된 결과는 그림 2.5-5와 같다.

2.5.2. 결과 해석

캡슐 직경이 60 mm 일 경우와 65 mm 직경의 Restrictor를 부착했을 때의 압력 강하 실험 결과로 외통의 경우 압력 강하가 198 kPa 일 때 유량이 20.6 Kg/s 정도이고, 저항체가 부착되었을 경우는 198 kPa 일 때 19.3 Kg/s 정도이다. 설계 요건 유량인 19.6 Kg/s의 $\pm 5\%$ 여유도를 고려한다면 실험을 수행한 두 경우가 모두 수력적으로 설계 요건을 잘 만족한다고 볼 수 있다.

2.6. 하나로내 진동 특성[2]

2.6.1. 개요

일반적으로 구조물의 진동 특성은 고유 진동수, 댐핑 및 고유 진동 모드로 정의되며 이러한 특성들은 구조물에 대한 경계 조건에 따라 변화한다. 계장 캡슐의 진동 특성 고찰은 캡슐 내부의 시편의 질량을 고려하지 않은 단순화된 모캡 모델에 대한 진동 특성을 먼저 구하고, 그 결과를 이용하여 실제 계장 캡슐에 대한 공기중 및 수중에서의 진동 특성을 추정하였다. 아울러 실제 운전 조

건에서의 유체 유발 진동(Flow Induced Vibration)현상에 의한 계장 캡슐의 최대 변위 및 동적거동시 건전성 여부를 평가하였다.

2.6.2. 캡슐 모컵의 진동 특성

상용 구조 해석 코드인 ANSYS를 이용하여 캡슐 모컵에 대한 자유 진동 해석을 수행하여 공기 중에서의 고유 진동 및 고유 진동 모드를 예측하였으며, 자유 진동 시험을 수행하여 그 결과를 확인하였다. 그리고 공기중의 해석 결과 및 수중에서의 진동 시험 결과를 이용하여 수중에서의 주요 진동 모드에 대한 고유 진동 및 부가 질량 효과를 고찰하였다. 이로부터 실제 운전 조건에서의 동적 최대 변위를 구하여 캡슐 상부 가이드 스프링부에서의 조사 공(test hole)과의 접촉 여부를 판단하였다.

(가) 공기중 고유 진동 계산

공기중에서 캡슐의 유한 요소 해석 모델은 그림 2.6-1과 같고, 유한해석 결과 주요 고유 진동은 제 1차 모드의 경우 약 4.20 Hz 이며, 제 2차 모드의 경우에는 약 10.80 Hz로 나타났다.

(나) 공기중 고유 진동 측정

공기중에서의 고유 진동 측정을 위하여 초기 변위를 이용한 자유 진동 측정 방법을 이용하였다. 그림 2.6-2에서 보는 바와 같이 캡슐의 양 끝단을 단순 지지시키고 중앙부에 초기 변위를 주어 캡슐을 자유 진동시켜 각 측정 점의 시간 영역 가속도 신호를 측정하였다. 이때 가속도 신호의 샘플링 주파수는 512 Hz 이며 신호기록 시간은 4 초로 하였다. 측정된 시간 영역 가속도 신호는 FFT(Fast Fourier Transform)기법을 이용한 주파수 분석을 통하여 고유 진동 계산에 사용된다. 각 측정 점에 대한 시간 영역 가속도 신호를 그림 2.6-3에 나타내었고, 1×점에서의 주파수 분석 결과를 그림 2.6-4에 나타내었다. 이때 제 1차 모드에 해당하는 고유 진동 약 4.25 Hz, 제 2차 모드는 약 8.52 Hz로 나타났으며 제 2차 모드가 제 1차 모드에 비해 훨씬 더 지배적인 모드로 나타났다. 그리고 앞에서의 ANSYS 해석 결과와 비교한 결과 제 1차 고유 진동 해석 결과와 잘 일치하였으나, 제 2차 고유 진동의 경우에는 해석 결과보다 약 20% 정도 낮게 나타났다.

(다) 수중 고유 진동수

수중에서의 구조물의 고유 진동수는 물의 부가 질량(added mass) 효과로 인

하여 변화한다. 일반적으로 고유 진동수는

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (14)$$

로 표현되며,

수중과 공기중의 진동수 비는 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{f_w}{f_a} = \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{m_a}{m_s}}} \quad (15)$$

여기서 f_w : 수중 고유 진동수, f_a : 공기중 고유 진동수

m_a : 부가 질량(added mass), m_s : 구조물의 질량

캡슐 모캡 보호관의 경우에 외경(D_o)은 34 mm이고, 외경(D_i)은 28.4 mm이므로, f , m_a 와 m_s 가 계산되고 식 (15)으로부터 $f_w/f_a \cong 0.84$ 이다.

앞의 공기중 실험 결과로부터 수중 고유 진동수는

$$f_1 = 4.25 \text{ Hz} \quad \rightarrow \quad (f_1)_{\text{in water}} = 3.57 \text{ Hz}$$

$$f_2 = 8.52 \text{ Hz} \quad \rightarrow \quad (f_2)_{\text{in water}} = 7.16 \text{ Hz}$$

으로 계산된다.

한편 실제로 Strain Gauge의 측정 신호로부터 구한 고유 진동수를 표 2.6-1에 나타내었고, 제 2 차 모드의 진동수가 약 7 Hz로 추정되므로 공기 중에서도 수중에서 캡슐의 진동은 제 2차 모드가 지배적임을 알 수 있다. 캡슐 모캡에 대한 진동 시험 방법과 결과에 대한 자세한 사항은 참고문헌 [24]에 있다.

(라) 유체 유발 진동에 의한 동적 변위 고찰

실험 결과로부터 수중에서 지배적인 고유 진동 7 Hz 성분이 조사 공의 내·외부를 흐르는 유체에 의하여 가진되는 경우, 캡슐과 조사 공과의 접촉 가능성을 판단하기 위하여 Paidoussis의 경험식을 이용하여 유체 유발 진동에 따른 캡슐의 진폭을 고찰하였다.

Paidoussis의 실험식[24]는 다음과 같다:

$$\frac{y_{\max}}{D} = \frac{\gamma \alpha}{8\pi S^2 \left(\frac{m \delta}{\rho D^2} \right)} \quad (16)$$

여기서, $D = 34 \text{ mm}$; 캡슐 외경

$S = 0.2$; Strouhal No.

$\gamma = 1.27$; 경계 조건에 따른 계수 (양단 지지)

$$\alpha = 2\zeta \left| H(f) \right| \left(\frac{f_s}{f_n} \right)^2 \text{ (공진 관련 계수)}$$

$\zeta = 0.028$; 캡슐의 감쇠비(측정치)

$$f_s = S \frac{U}{D} = 0.2 \times \frac{0.3}{0.034} = 1.76 \text{ Hz} \text{ ; Vortex Shedding Frequency}$$

$f_n = 7 \text{ Hz}$; 캡슐의 주 진동 주파수 (운전 조건)

$U = 0.3 \text{ m/sec}$; 캡슐의 Cross Flow 유속 (하나로 센터의 추천값)

$$\left| H(f) \right| = \frac{1}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{f_s}{f_n} \right)^2 \right]^2 + \left[2\zeta \left(\frac{f_s}{f_n} \right) \right]^2}} = 1.067$$

$$\alpha = 2 \times 0.028 \times 1.067 \times \left(\frac{1.76}{7} \right)^2 = 3.78 \times 10^{-3}$$

$m = \text{tube}$ 자체무게 + 부가질량

$$= 2.14 + 1000 \times \frac{\pi}{4} (0.034)^2 = 3.0 \text{ (kg/m)}$$

$\delta = 2\pi\zeta = 2\pi \times 0.028$ (logarithmic decrement) 이다.

위의 계수들을 식 (16)에 대입하여 최대 변위를 구하면,

$$\frac{y_{\max}}{D} = \frac{1.27 \times 3.78 \times 10^{-3}}{8 \times \pi \times (0.2)^2 \times \left(\frac{3.0 \times 2\pi \times 0.028}{1000 \times 0.034^2} \right)} = 0.01046 \text{ 이므로}$$

$$y_{\max} = 0.01046 \times 34 \text{ mm} = 0.36 \text{ mm} \text{ 가 된다}$$

2.6.3. 하나로내 캡슐 진동 특성 시험

2.6.3.1. 개요

캡슐의 동특성 해석을 수행하여 유체 유발 진동과의 공진 여부는 밝혀졌으나 실제로 캡슐이 원자로 내에 설치되었을 때 어느 정도 진동할 것인지에 대해 고찰하기 위하여 진동 시험을 수행하였다.

하나로 원자로 내에 설치되는 캡슐은 기본적으로 물 속에서 진동 시험이 수행되므로 이를 고려하여 진동 센서의 선정과 설치 위치 및 방법 등을 검토해야 한다. 일반적으로 많이 사용되는 진동 센서는 가속도계이지만 직경 34mm의 튜브에 수중용 가속도계를 설치하는 것이 현실적으로 불가능하여 이를 대신하여 스트레인 게이지를 부착하였다.

스트레인 게이지의 와이어는 캡슐 튜브 내부를 통하여 하나로 원자로 수조 밖으로 빼낸 다음 Bridge를 형성하고 증폭기 및 적절한 신호 처리 장치를 통하여 기록 및 분석을 수행한다. (그림 2.6-6 참조)

2.6.3.2. 측정 센서 설치 위치

동적 시험에 사용할 수 있는 스트레인 게이지 4개를 그림 2.6-6과 같이 3곳으로 배치하여 설치하였다. 설치 위치는 먼저 하나로 냉각재의 출구 배관의 중심선과 일치하는 곳(가장 직교류가 많을 것으로 판단되는 지점, N2 Level 1012), 그리고 양단 지지인 캡슐의 중간 부분(진동시 진폭이 매우 클 것으로 판단되는 지점, N3 Level 1542) 및 캡슐의 시편 장입 부분 근처(원자로의 Flow Tube 상단으로 난류가 예상되는 지점, N1 Level 2112)로 선정하였다.

스트레인 게이지 부착 지점 1과 3에서는 1개의 스트레인 게이지를 사용하였으며 부착 지점 2에서는 2개의 스트레인 게이지로 Half Bridge를 형성하여 진동 신호 측정의 감도를 2 배 증가시켰다.

2.6.3.3. 시험 조건

진동 시험 조건은 하나로의 운전 조건과 동일하게 하여야 하므로 TPTH (Two Pump-Two Heat Exchanger) 조건 및 OPOH (One Pump-One Heat Exchanger) 조건으로 한다. 또 캡슐의 노심 내의 설치 위치는 CT, IRI, 및 IR2 중 두 곳을 선정하여 CT 와 IRI으로 선정하여 진동 신호를 채취한다.

2.6.3.4. 시험 결과

- 1) 측정 최대 스트레인값은 측정된 최대 Peak값으로부터 노심내 조사공 CT Hole에서는 TPTH 가동 조건하에서 N3 지점에서 $107.3 \mu \epsilon$ 이었고, IR Hole에서는 TPTH 가동 조건하에서 N3 지점에서 $103.2 \mu \epsilon$ 이었다. 일반적으로 스테인레스강의 임계치는 $2000 \mu \epsilon$ 로 볼 때 그리 크지 않는 값이다.
- 2) 환산된 최대 응력은 노심내 조사공 CT Hole에서는 TPTH 가동 조건하에서 N3 지점에서 20.2 MPa로 계산되며, IR Hole에서는 TPTH 가동 조건하에서 N3 지점에서 19.4 MPa로 계산되었고, 스테인레스강의 허용 응력치 142.7 MPa(100 F) 혹은 0.6 Y.S 인 123 MPa에 비하여 작은 값으로 계산되었다.
- 3) 피로에 대한 건전성은 캡슐을 조사 공에 1 개월 동안 조사한다고 가정하여 평가를 하였다. 캡슐 응력은 (국부 응력+Bending응력+이차 응력)값이 187.5 MPa이상으로 가정시 ASME Appendix Fig I-9.2.2 근거하여 재료의 탄성 해석 Curve C 즉 $[(P_L + P_b + Q) \text{range} > 27.2 \text{ Ksi}]$ 를 활용하며 10^{11} Cycle에 대한 피로 허용응력값은 93.7 MPa이었다. 주요 주파수는 7 & 12 Hz 이나 보수성을 감안 최대 주파수를 147 Hz 가정하면 $147 \text{ Cycles/sec} \times 3600 \times 24 \times 30 = 3.8 \times 10^8 \text{ Cycles}$, 응력은 20.2MPa이었다.
- 4) 이상의 실험적 자료에 근거한 결론은 다음과 같다.
최대 Strain은 조사 공 CT Hole에서 $107.3 \mu \epsilon$, IR Hole에서 $103.2 \mu \epsilon$ 으로 허용 스트레인값($2000 \mu \epsilon$)보다 작았고, 최대 응력은 CT Hole에서 20.2 MPa, IR Hole에서 19.4 MPa로 허용응력값인 123 MPa보다 작은 값이었다. 또한 응력 및 진동 주파수 또한 피로 허용 응력 및 사이클 (93.7 MPa, 10^{11} Cycle)보다 작은 값이어 실험에 근거한 평가 결과 구조적 건전성은 문제가 없는 것으로 판단되었다.

2.6.4. 계장 캡슐의 진동 특성

앞에서의 캡슐 모캡에 대한 진동 특성 결과를 토대로 하여, 실제 시편과 계장 라인들을 고려한 계장 캡슐의 진동 특성을 고찰하였다. 실제 캡슐과 모캡의 차이는 다음 표 2.6-2와 같다.

2.6.4.1. 계장 캡슐의 공기중 진동 시험 및 해석

하나로에 설치될 계장 캡슐과 거의 유사한 조건의 캡슐에 대하여 노외 공기

중 진동 시험을 수행하였다. 실제 하나로의 설치 상태와 다른 점은 스프링의 강성(약 15 N/mm)과 고정 장치가 잡아 주는 부분의 위치(하부 고정 점에서 약 4,200mm)이고, 다른 조건은 모두 동일하다. 그림 2.6-7은 캡슐의 공기중 진동 시험 결과를 나타낸 것이고, 표 2.6-3에는 시험과 해석의 결과를 나타내었다.

2.6.4.2. 계장 캡슐의 공기중 고유 진동수

계장 캡슐의 경우에는 캡슐 모컵에 비해 총 길이가 약간 길어지고, 캡슐 내부에 시편들과 계장 라인들에 의해서 총 질량이 증가한다. 따라서 ANSYS 코드를 이용하여 공기중 고유 진동수를 계산하고, 캡슐 모컵의 경우에서 얻어진 해석치 및 실험치 사이의 비를 고려하여 공기중 고유 진동수를 추정하였다. 세개의 조사공에 설치될 계장캡슐중지지점 사이의 간격이 제일 큰 IR1 모델에 대한 ANSYS 해석 결과인 200 Hz까지의 모드별 고유 진동수는 표 2.6-4에 제시하였다.

캡슐 모컵의 공기중 고유 진동 제 1차 모드의 경우 해석치와 실험치가 잘 일치하였으나 제 2차 모드의 경우에는 실험치가 약 20% 정도 낮게 나타났다. 따라서 계장 캡슐의 경우에도 동일한 경향을 보여줄 것으로 가정하여 제 2차 고유 진동수를 약 20% 낮추어 공기중 고유 진동수를 아래와 같이 추정하였다:

$$f_1 = 4.10 \text{ Hz}$$

$$f_2 \cong 8.65 \text{ Hz}$$

2.6.4.3. 계장 캡슐의 수중 고유 진동수

수중 고유 진동수 역시 캡슐 모컵의 경우와 마찬가지로 부가 질량 효과에 의하여 다소 낮아지며(공기중 경우의 약 84%), 주요 모드 역시 제 2차 진동 모드가 될 것으로 판단된다. 따라서 수중에서의 제 2차 모드의 고유 진동수는 약 7.27 Hz가 될 것으로 추정되며, 캡슐 모컵의 경우(7.0 Hz)와 비교해 볼 때 거의 동일한 값이다.

2.6.4.4. 유체 유발 진동에 의한 변위 및 캡슐의 구조적 건전성 고찰

캡슐 모컵의 경우와 비교해 볼 때 주 진동 모드에 해당하는 주파수(7.27 Hz)가 거의 비슷하게 나타났으므로, 캡슐 모컵의 경우와 거의 비슷한 결과를 보일

것으로 판단된다. 앞에서 밝힌 바와 같이 계장 캡슐의 변위 진폭은 Chimney 내부에서의 Cross Flow 유속에 따라 많이 달라지기 때문에 여기서는 하나로 센터에서 제시한 0.3 m/sec와 캡슐 모컵의 진동 Level로부터 추정된 0.838 m/sec 2가지의 경우에 대하여 계장 캡슐의 최대 변위를 계산하였다. 이때 계산에 사용된 캡슐의 감쇠값(0.028)은 캡슐 모컵의 경우와 큰 차이가 없을 것으로 생각되어 실험치를 사용하였다.

① 유속이 0.3 m/sec 인 경우

식(16)의 Paidoussis의 실험식에서

$$\frac{y_{\max}}{D} = \frac{\gamma\alpha}{8\pi S^2 \left(\frac{m\delta}{\rho D^2}\right)}$$

$$D = 34 \text{ mm}, \gamma = 1.27, S = 0.2, \zeta = 0.028$$

$$f_s = S \cdot U/D = 0.2 \times 0.3 / 0.034 = 1.76 \text{ Hz}$$

$$f_n = 7.27 \text{ Hz}$$

$$m = \text{tube 자체무게} + \text{부가질량}$$

$$= 4.5 + 1000 \times \frac{\pi}{4} (0.034)^2 = 5.4 \text{ (kg/m)}$$

$$|H(f)| = \frac{1}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{f_s}{f_n}\right)^2\right]^2 + \left[2\zeta\left(\frac{f_s}{f_n}\right)\right]^2}} = 1.062$$

$$\alpha = 2 \times 0.028 \times 1.062 \times (1.76/7.27)^2 = 3.49 \times 10^{-3}$$

$$\frac{y_{\max}}{D} = \frac{1.27 \times 3.49 \times 10^{-3}}{8 \times \pi \times (0.2)^2 \times \left(\frac{5.4 \times 2\pi \times 0.028}{1000 \times 0.034^2}\right)} = 0.00536 \text{ 이므로 최대}$$

변위는

$$y_{\max} = 34 \times 0.00536 = 0.182 \text{ mm 이다.}$$

따라서 유속이 0.3 m/sec이면 계장 캡슐의 최대 변위는 매우 작으므로 모컵의 경우와 같이 진동과 관련된 문제가 없을 것으로 판단된다.

② 유속이 0.838 m/sec인 경우

①과 마찬가지로 방법으로

$$f_s = S \cdot U / D = 0.2 \times 0.838 / 0.034 = 4.93 \text{ Hz}$$

$$f_n = 7.27 \text{ Hz}$$

$$|H(f)| = \frac{1}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{4.93}{7.27}\right)^2\right]^2 + \left[2 \times 0.028 \times \left(\frac{4.93}{7.27}\right)\right]^2}} = 1.847$$

$$\alpha = 2 \times 0.028 \times 1.847 \times (4.93/7.27)^2 = 0.0476$$

$$\frac{y_{\max}}{D} = \frac{1.27 \times 0.0476}{8 \times \pi \times (0.2)^2 \times \left(\frac{5.4 \times 2\pi \times 0.028}{1000 \times 0.034^2}\right)} = 0.0732$$

$$y_{\max} = 34 \times 0.0732 = 2.49 \text{ mm}$$

①과 ②의 결과로부터 계장 캡슐의 최대 변위는 약 2.49 mm가 되는 것으로 나타났으므로, 상부 가이드 스프링이 지지되는 지점에서의 변위는 이보다 작은 값을 보일 것이며, 조사 공과의 간섭은 발생하지 않는다. 그리고 계장 캡슐의 경우 모컵에 비해 길이가 더 길고 지지점 사이의 거리가 더 크다 (즉, 곡률 반경이 약간 증가함). 이때 변형률은 최대 진폭과 곡률 반경의 비($\epsilon=y/\rho$)로 표현되어 지므로 계장 캡슐의 변형률은 캡슐 모컵의 경우와 거의 동일할 것으로 판단된다. 따라서 계장 캡슐의 응력 수준 역시 캡슐 모컵의 경우와 비슷할 것으로 추정되므로 진동과 관련된 구조적 건전성이 확보될 것으로 판단된다.

2.7. 하나로 CT 조사공에 캡슐 장전시 반응도 검토[26]

그림 1.3-1의 계장 캡슐을 CT 조사공에서 조사시킬 때 캡슐의 반응도 효과를 몬테카를로 전산 코드인 MCNP[27]을 이용하여 구하였다.

2.7.1. 계산 노심 조건

노심에 핵연료를 장전할 수 있는 모든 자리에 새 핵연료를 장전하였다. 이 경우 36봉 다발은 20개, 18봉 다발은 12개가 장전된다. 또한 IR1 및 IR2에는

핵연료봉 대신 AI봉으로 구성된 모의 다발을 장전하였고 CT에 캡슐을 장전하였다. 정지봉 4개는 모두 인출 상태를 가정하였고 제어봉 4개는 모두 1/2 삽입(350mm 삽입)된 상태로 가정하였다.

2.7.2. 계산 모델

CT 조사공에 장전된 캡슐의 MCNP 모델은 그림 1.2.7-1과 같다. 캡슐의 맨 위쪽 및 바닥 부분은 반응도 계산 결과에 큰 영향을 주지 못할 것으로 예상하여 본 계산 모델에는 포함하지 않았다. MCNP 계산에서는 하나로의 임계도 계산에 사용되어 온 것과 같은 총 200만개(10,000 particles/cycle, 200 cycles)의 선원을 사용하여 임계도 계산Mode로(KCOPE mode)로 계산하였다.

2.7.3. 반응도 해석 결과

CT조사공에 조사 물질이 장전되지 않을 때는 AI 모의 다발이 장전되므로 캡슐의 장전으로 인한 반응도 효과는 CT에 AI 모의 다발이 장전되었을 때와 캡슐이 장전되었을 때의 임계도 차에 의해 구하였다.

CT에 AI 모의 다발이 장전되었을 때의 임계도는 $K_{AI}=1.16413$ (상대 오차=0.056%) 이었고, 캡슐이 장전되었을 때의 임계도는 $K_{capsule}=1.15566$ (상대 오차=0.054%) 였다. 따라서 캡슐 장전에 의한 반응도 변화는 $\Delta k = \frac{1}{K_{capsule}} -$

$\frac{1}{K_{AI}} = 0.0062958$ 로 약 6.3mk였다. 이 값은 실험물의 반응도 제한치인 12.5mk[1]의 50%에 해당하는 값으로 제한치를 만족한다. 그러나 본 MCNP 계산 결과는 노심의 핵연료를 모두 새핵연료로 가정하여 구한 것으로 실제 캡슐 장전시에는 노심에 여러 가지 연소 상태에 있는 핵연료들이 장전되어 있다. 따라서 연소된 핵연료의 영향에 의한 캡슐의 반응도 효과는 본 계산 결과와 조금 차이가 있을 수 있지만 캡슐이 있을 때와 없을 때의 임계도 차이이므로 새 핵연료와 연소와 핵연료에 의한 캡슐의 반응도 효과 차이는 크지 않을 것으로 예상된다.

3. 참고문헌

1. 하나로 안전성 분석 보고서, KAERI/TR-710/96 (1996)
2. 강영환 외, “계장 캡슐 활용 기술개발”, KAERI/RR-1760/96
3. “하나로 및 조사재 시험 설비 운영 기술 지침서” KAERI- TR-708-96
4. 강영환 외, “하나로에 설치될 계장 캡슐 및 고정 장치의 구조 건전성 평가 보고서”, KAERI/TR-601/96
5. 이영신 외, “충격 안정성을 고려한 계장 Capsule구조물의 구조해석 및 설계 최적화 (I)”, KAERI/CM-141/94
6. Y.H. Kang, et al, 1996, “A Study on the Seismic Analysis for HANARO Capsules and Capsule Supporting Systems”, 11-th World Conference on Earthquake Engineering(WCEE), Paper No. 875, Mexico
7. ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section III, Div. 1, Subsection NF, 1989
8. ASME Bolier and Pressure Vessel Code, Section III, Division 1, Appendix I, Table I-10.2, 1989
9. R.D. Blevins, 1979, Formulas for Natural Frequency and Mode Shape”, Van Nostrand Reinhold Co.
10. G.J. Desalvo and R.W. Gorman, 1991, “ANSYS Engineering Analysis System User’s Manual”, Swanson Analysis System, Inc., Houston, Pennsylvania
11. USAEC Regulatory Guide 1.61, Revision 1, “Damping Values for Seismic Design of Nuclear Power Plants”, October, 1973
12. USNRC Regulatory Guide 1.92, Revision 1, “Combining Model Responses and Spatial Components in Seismic Response Analysis”, February, 1976
13. 강영환 외, “노내 시험 설비 설계 건조: 계장 캡슐”, KAERI/RR-1510/94
14. Y.H. Kang, et al, 1996 “ Thermal and Mechanical characteristics of Instrumented Capsule for Material Irradiation Test”, 5th Asian Symposium on Research Reactors, Vol.1, pp. 328~332
15. ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section III, Div. 1, Appendix A, 1989

16. ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section III, Div. 1, Subsection NB, 1989
17. K.W. Childs, 1993, HEATING 7.2f User's Manual, ORNL
18. 강영환 외, "KMRR을 이용한 노내 검증 실험 평가 기술개발", KAERI /RR-1398/93
19. Chajes, A. 1974. "Principles of Structural Stability Theory", Prentice-Hill, Inc., U.S.A.
20. 이영신 외, "충격 안정성을 고려한 계장 Capsule구조물의 구조 해석 및 설계 최적화 (II)", KAERI/CM-048/95
21. S.H. Crandall, N.C. Dahl and T.J. Lardner, 1978", An Introduction to the Mechanics of Solids", 2nd Ed., Mcgraw-Hill, Inc.
22. Y.H. Kang, et al, 1996 " Compatibility Test of the Instrumented Capsule to HANARO", 5th Asian Symposium on Research Reactors, Vol.1, pp. 323~327
23. 정문기 외, "KMRR 계장 캡슐 유동 실험", KAERI/TR-460/94
24. 기계 구조 시험실 보고서(KAERI-KM-IC-RT-3), 하나로 Capsule Vibration Test Report, 1995
25. P.Y. Chen, Flow-Induced Vibration Design Guidelines, ASME, PVP-Vol.52, 1981
26. R.J. Roark and W.C. Young, Formulas for Stress and Strain, McGraw-Hill, 5th Ed., 1975
27. 이병철, "Capsule을 CT에서 조사시 반응도 효과, 중성자속, 감마선속 및 발열량", internal memo, 한국원자력연구소 1997.
28. J. Briesmeister(Editor), "MCNP-A General Monte Carlo Code N-Particle Transport Code Version 4A, "LA-12625-M(1993)

표 1.2-1 재료 시험용 캡슐 및 관련 시스템의 분류

계통 분류	System/ Component	안전 등급	내진 등급	품질 등급	적용규격/기준	등급분 류코드
413	1. Capsule.	NNS	II	T	Manufacturing STD	T2T
	2. Supporting System	NNS	II	T	ASME Sec.III NF	T2T
	3. Temperature Control System	NA	NON	S	Manufacturing STD	S3T
	4. Cutter	NNS	NON	S	Manufacturing STD	S3T
405	5. He Gas Storage & Supply System	NNS	NON	S	Manufacturing STD	S3T

표 1.3-1 연구로 시험공 중성자속 특성

Position	Fast Neutron Flux E>0.821 MeV	Thermal Neutron Flux E<0.625 eV
IR1	1.8 E(14) n/cm2.s	3.8 E(14) n/cm2.s
IR2	1.9 "	3.9 "
CT	2.0 "	4.4 "

Table 2.1-1 사용재료의 기계적 물성

Material	Stainless Steel			Zircaloy-4
	Type 304	Type 440	Type 329	
Material Specification	Type 304	Type 440	Type 329	Zircaloy-4
Modulus of Elasticity (GPa)	193	200	200	94.3
Mass Density (Kg/m^3)	7913	7800	7800	6500
Poisson's Ratio	0.27	0.27	0.27	0.35
Ultimate Strength (MPa)	515	760	724	415.
Yield Strength (MPa)	205	450	550	240.
Allowable Stresses (MPa)*	123	270	330	144.

* Allowable Stress (ASME Code Sec.III, NF-3322.1) : $F_t = 0.60S_y$

Table 2.1-2 하중조합 및 허용한계

Load Combinations	Acceptance Limits
1. DEAD	Service Level A
2. DEAD + OBE + Q	Service Level B
3. DEAD + SSE	Service Level D

Table 2.1.-3 하중조합에 대한 최대변위

(unit: mm)

Service Level	Element No. (Node No.)	Displacement		Horizontal Allowable
		Horizontal	Vertical	
Service Level A (Dead Load)	301(306) ¹	0.002	-0.064	N/A
	361(376) ²	0.076	-0.012	N/A
Service Level B (Dead + OBE)	400(416) ³	7.44	0.029	N/A
	405(409) ⁴	2.35	0.002	7.2
	424(700) ⁵	0.43	0.022	0.5
Service Level D (Dead + SSE)	400(416)	8.44	0.033	N/A
	405(409)	2.66	0.003	7.2
	424(700)	0.49	0.025	0.5

- 1) right edge of the base plate
- 2) top position of the capsule protection tube in IR2 test hole
- 3) middle position of the capsule protection tube in IR1 test hole
- 4) connecting part of the capsule mainbody and the protection tube in IR1 test hole
- 5) top position of IR2 test hole

Table 2.1-4 정하중과 지진하중에 의한 캡슐본체하부
힌지점에서의 절점반력

(unit : N)

Position	Reaction Force		Allowable
	Horizontal	Vertical	
IR1 Test Hole	29.5	169.8	843.7
CT Test Hole	27.3	174.8	843.7
IR2 Test Hole	22.6	177.6	843.7

Table 2.1-5 사용조건에 따른 캡슐과 고정장치의 응력값 및 허용응력
(unit : MPa)

Service Level Element (Node)	Service Level A (Dead Load)	Service Level B (Dead + OBE + Q)	Service Level D (Dead + SSE + Q)
271(296) ¹	0.81	35.91	40.59
394(363) ²	0.62	26.35	29.80
423(432) ³	0.37	21.47	24.37
405(409) ⁴	0.76	13.91	15.66
490(925) ⁵	0.048	4.59	5.20
420(432) ⁶	0.01	162.31	162.35
Allowable Stress	123.0	184.5	246.0

- 1) connecting part of the base plate and the clamp arm in CT test hole
- 2) grasping part of the top protection tube
- 3) bottom end of the capsule mainbody
- 4) connecting part of the capsule mainbody and the protection tube
in IRI test hole
- 5) bottom end of IRI test hole
- 6) end plug of the capsule mainbody

Table 2.1-6 Service level에 대한 최대 축응력과 굽힘 응력의 조합 하중에 따른 응력비

Loading Condition	Element (Node) Number	Axial Stress	Major Bending Stress	Minor Bending Stress	Stress Ratio*
Service Level A(D)	18(34)	0.28	3.21	0.37	0.03
Allowable	-	123.0	123.0	123.0	1.0
Service Level B(D + E)	271(296)	0.85	35.78	11.88	0.26
Allowable	-	184.5	184.5	184.5	1.0
Service Level D(D + E1)	271(296)	0.98	40.51	12.90	0.22
Allowable	-	246.0	246.0	246.0	1.0

* Combined Stress : $\frac{f_a}{F_a} + \frac{f_{bx}}{F_{bx}} + \frac{f_{by}}{F_{by}} < 1.0$

Table 2.1-7 조절 장치(control unit system) 구조물 응력 해석
(Unit : MPa)

Loading Condition	Element (Node)	Stress	Allowable
Service Level A (D)	62(96)* 160(202)	1.464 0.264	123.0
Service level B (D + E)	160(202)**	13.694	184.5
Service level D (D + E1)	160(202)	23.464	246.0

* : H-비임의 원자로 수조 벽에 고정된 부위

** : C-채널의 중앙 상부 조절 장치가 설치된 옆부분

Table 2.2-1 캡슐영역별 사용재료

Zone Number	Description	Materials
1	End Plug	SS304
2,31	Specimen Holder	Aluminum
3,9,14,19,24,30	Insulator	Al ₂ O ₃
4,29	Reflector	SS304
5,10,15,20,25	Test Specimen	SS304
6,8,11,13,16,18, 21,23,26,28	Gap	He
7,12,17,22,27	Thermal Media	Aluminum
33	Plate	SS304
34	Top Plate	SS304
35	External Tube	SS304
36	Rod Tip	SS304

Table 2.2-2 캡슐사용재 SS304와 Al의 발열량

Z Coordinate (cm)	Stainless Steel 304	Aluminum
-8.12	7.605	2.7072
0.0	22.875	8.1081
0.75	23.5755	8.3784
-	-	-
3.25	30.42	10.8108
5.25	32.7025	11.6216
17.25	57.798	20.5405
18.75	61.6005	21.9819
30.75	74.529	26.4865
32.25	75.2895	26.7567
44.25	75.2895	26.7567
45.75	74.529	26.4865
57.75	60.0795	21.3513
59.25	57.798	20.5405
71.25	35.7435	12.7027
72.75	31.941	11.3513
75.25	25.0965	8.9189

* Heat source at peak total gamma flux zone

SS 304 : 73.94 W/cm³

Aluminum : 27.03 W/cm³

Table 2.2-3 캡슐본체 온도분포 계산값

29	87.75								40.91	40.79	40.79	40.79	40.24
28	86.75	41.67	41.69	41.71	41.71	41.84	41.85	41.89	44.71	44.38	44.36	44.34	40.98
27	85.25	54.44	54.31	54.23	54.22	53.90	53.89	53.84	51.89	43.28	43.22	43.16	40.77
26	80.25	43.08	43.05	43.03	43.03	42.95	42.95	42.93	42.50	41.61	41.61	41.61	40.53
25	75.25	52.42	52.28	52.20	52.19	51.86	51.85	51.80	49.90	45.36	45.35	45.35	41.36
24	73.75	52.58	52.46	52.39	52.38	52.10	52.09	52.04	50.49	47.49	47.49	47.49	41.81
23	73.25	86.75	86.02	85.60	85.56	83.84	83.78	83.50	73.94	46.22	46.16	46.08	41.59
22	72.75	125.51	124.07	123.27	123.19	119.96	119.84	119.34	103.58	57.34	57.22	57.08	43.73
21	71.25	94.20	89.95	87.49	87.22	76.93	74.95	74.79	70.87	63.72	63.14	62.45	44.86
20	65.25	158.32	152.88	149.73	149.39	136.23	87.29	87.13	83.83	79.11	70.34	59.63	44.50
19	59.25	126.23	118.95	114.75	114.29	96.67	84.14	83.91	79.15	71.71	69.14	66.05	45.99
18	57.75	108.42	100.22	95.49	86.37	85.20	85.16	85.01	80.85	72.77	72.75	69.25	46.71
17	51.75	178.62	168.75	163.04	106.34	104.99	104.95	104.78	100.55	92.85	92.83	74.63	48.02
16	45.75	134.94	122.95	116.00	102.49	100.80	100.75	100.53	94.93	84.29	84.28	79.68	49.27
15	44.25	143.61	131.21	124.03	110.02	108.23	108.17	107.94	101.67	89.51	89.49	84.24	50.24
14	38.25	230.14	216.66	208.85	133.01	131.13	131.07	130.83	124.89	114.03	114.01	88.95	51.39
13	32.25	165.25	149.76	140.78	123.09	120.88	120.81	120.52	113.09	98.88	98.86	92.72	52.35
12	30.75	167.42	152.01	143.07	125.46	123.23	123.16	122.87	115.24	100.52	100.50	94.12	52.63
11	24.75	246.93	232.30	223.81	142.03	139.96	139.89	139.63	133.12	121.19	121.17	93.82	52.54
10	18.75	164.04	148.96	140.20	122.99	120.81	120.74	120.45	113.01	98.71	98.69	92.51	52.25
9	17.25	216.91	202.71	194.47	193.56	158.79	133.20	132.74	122.84	107.02	101.55	94.96	52.73
8	11.25	294.35	282.97	276.38	275.65	247.92	149.83	149.46	141.86	130.67	111.05	86.62	50.74
7	5.25	186.64	175.81	169.52	168.83	142.32	138.18	137.74	126.43	105.35	104.08	102.54	53.72
6	3.25	316.75	312.46	310.02	309.75	299.67	299.27	297.66	242.04	85.44	85.10	84.68	49.97
5	1.75	85.68	85.24	84.99	84.96	83.94	83.90	83.73	78.13	65.64	65.62	65.60	46.02
4	0.75	86.30	85.77	85.49	85.46	84.30	84.26	84.09	78.89	67.95	67.93	67.91	46.38
3	0.00	76.80	71.00	67.59	67.20	51.68	50.94	47.88	46.30	45.09	45.07	45.05	41.59
		2	-0.50	50.92	42.42	43.81	43.88	42.18	42.00	41.21			
			1	-8.12	40.94	40.21							
		0.00	0.40	0.50	0.51	0.80	0.81	0.85	1.70	2.80	2.80	2.80	3.00
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

Table 2.2-4 캡슐의 열하중하에서 총 응력

(Unit : MPa)

Position	Stress Item	Calculated Stress	Design Stress Intensity	Allowable Stress Intensity	Safety Factor*	Code Requirement
External Tube	P_m	4.36	137.2	137.2	31.47	$P_m < S_m^{**}$
	P_{cr}	15.52	-	1.2	12.93	$P_{cr} > 3P^{***}$
	$P_m + P_e$	118.1	137.2	411.9	3.49	$P_m + P_e < 3S_m$
End Plug	$P_m + P_e$	166.0	137.2	411.9	2.48	$P_m + P_e < 3S_m$

* : Safety Factor = Allowable Stress Intensity / Stress Value

** : Design Stress Intensity (S_m)

*** : Coolant Pressure (P)

Table 2.3-1 캡슐의 좌굴해석 경계 조건

Case Position	CASE1	CASE2	CASE3	CASE4
POINT1*	Simply Support	Simply Support	Fixed	Fixed
POINT2**	Simply Support	Fixed	Simply Support	Fixed

* : Receptacle under capsule main body

** : Clamp position upper capsule protection tube

Table 2.3-2 캡슐 구조물의 좌굴해석 결과

Case \ Results	Critical Buckling Load (kgf)	Max. Displacement Position
CASE1	190.7	Node #15
CASE2	530.1	Node #12
CASE3	206.6	Node #15
CASE4	569.6	Node #13

Table 2.4-1 충격 순간 캡슐의 속도

f (Guess)	Re (Moody Diagram)	V ($\sqrt{0.81/f}$)	Re ($1.063 \times 10^5 V$)	Difference (%)
0.0130	4.80×10^5	7.894	8.391×10^5	42.8
0.0120	7.90×10^5	8.216	8.734×10^5	9.5
0.0119	8.10×10^5	8.250	8.770×10^5	7.6
0.0118	8.40×10^5	8.285	8.807×10^5	4.6
0.0117	8.90×10^5	<u>8.321</u>	8.845×10^5	0.6
0.0116	9.40×10^5	8.356	8.882×10^5	5.5
0.0114	10.2×10^5	8.429	8.960×10^5	12.1
0.0112	10.4×10^5	8.504	9.040×10^5	12.8
0.0110	10.6×10^5	8.581	9.122×10^5	13.9

Table 2.4-2 단위 하중 작용시 캡슐에 작용하는 최대 응력과 탄성 변형률

Item	Value
Max. Stress Intensity	19.9 kPa
Max. Strain	0.103 $\mu \epsilon$

Table 2.5-1 압력 강하 측정값(60 mm Diameter-Capsule)

Increase		Decrease	
Flow Rate (kg/s)	Pressure Drop (kPa)	Flow Rate (kg/s)	Pressure Drop (kPa)
5.028	13.958	22.086	235.223
8.034	31.848	21.105	205.152
10.049	51.23	20.086	186.679
11.096	59.974	19.622	182.162
12.173	71.692	19.606	184.152
14.178	94.281	19.626	181.413
16.002	120.861	18.191	149.002
18.155	151.578	16.207	126.541
20.061	187.216	14.005	94.371
21.059	204.965	12.026	72.502
22.044	227.81	11.025	61.493
23.075	250.933	10.16	50.662
		8.021	33.638
		5.12	14.54

Table 2.5-1 압력 강하 측정값(60 mm Diameter-Capsule with 65 mm Restrictor)

Increase		Decrease	
Flow Rate (kg/s)	Pressure Drop (kPa)	Flow Rate (kg/s)	Pressure Drop (kPa)
10.15	54.971	21.119	229.591
12.151	82.478	20.111	216.523
14.117	106.941	19.625	200.925
16.041	137.516	19.622	204.648
18.086	172.098	19.159	186.444
19.021	189.925	18.139	167.155
19.608	205.822	16.254	136.477
19.658	204.744	14.077	103.774
20.191	211.846	12.03	75.953
21.008	242.629	10.047	58.389
22.137	257.989		

Table 2.6-1 Strain gauge 측정 신호로부터 구한 고유 진동수

(단위 : $\mu \epsilon$)

N1		N2		N3	
Frequency (Hz)	r. m. s. ($\mu \epsilon$)	Frequency (Hz)	r. m. s. ($\mu \epsilon$)	Frequency (Hz)	r. m. s. ($\mu \epsilon$)
-	-	7.0	0.95	7.0	0.71
12.2	1.00	12.2	0.72	12.2	0.99
22.0	0.19	22.2	0.25	-	-
34.6	0.10	34.6	0.07	34.6	0.10
39.9	0.04	-	-	39.9	0.04
46.5	0.20	46.2	0.37	46.2	0.17
72.3	0.13	72.8	0.56	72.4	0.29
94.2	0.25	94.2	0.32	-	-
110.2	0.08	110.2	0.15	110.2	0.04

Table 2.6-2 캡슐모형과 캡슐의 기하학적 특성

Item	Model	Mock-up	Capsule
Length (mm)		5718	6400
Total Mass (kg)		11	27
Clamping position (mm)		4341	5400
Thickness of Protection Tube(mm)		2.8	1.65
No. of Spring		3	6
Spring Constant (N/mm)		100	15

Table 2.6-3 캡슐의 공기중 진동 시험 및 해석 결과

Mode No.	Natural Frequency (Hz)	
	Experiment	FEM
1	-	4.85
2	12.0	12.16
3	22.5	27.98
4	39.5	39.92
5	43.5	47.95

Table 2.6-4 ANSYS를 이용한 200 Hz까지의 모드별 고유 진동수

Mode No.	IR1 Capsule Frequency (Hz)
1	4.09
2	10.80
3	18.19
4	27.94
5	45.16
6	67.29
7	89.25
8	115.04
9	143.19
10	164.19

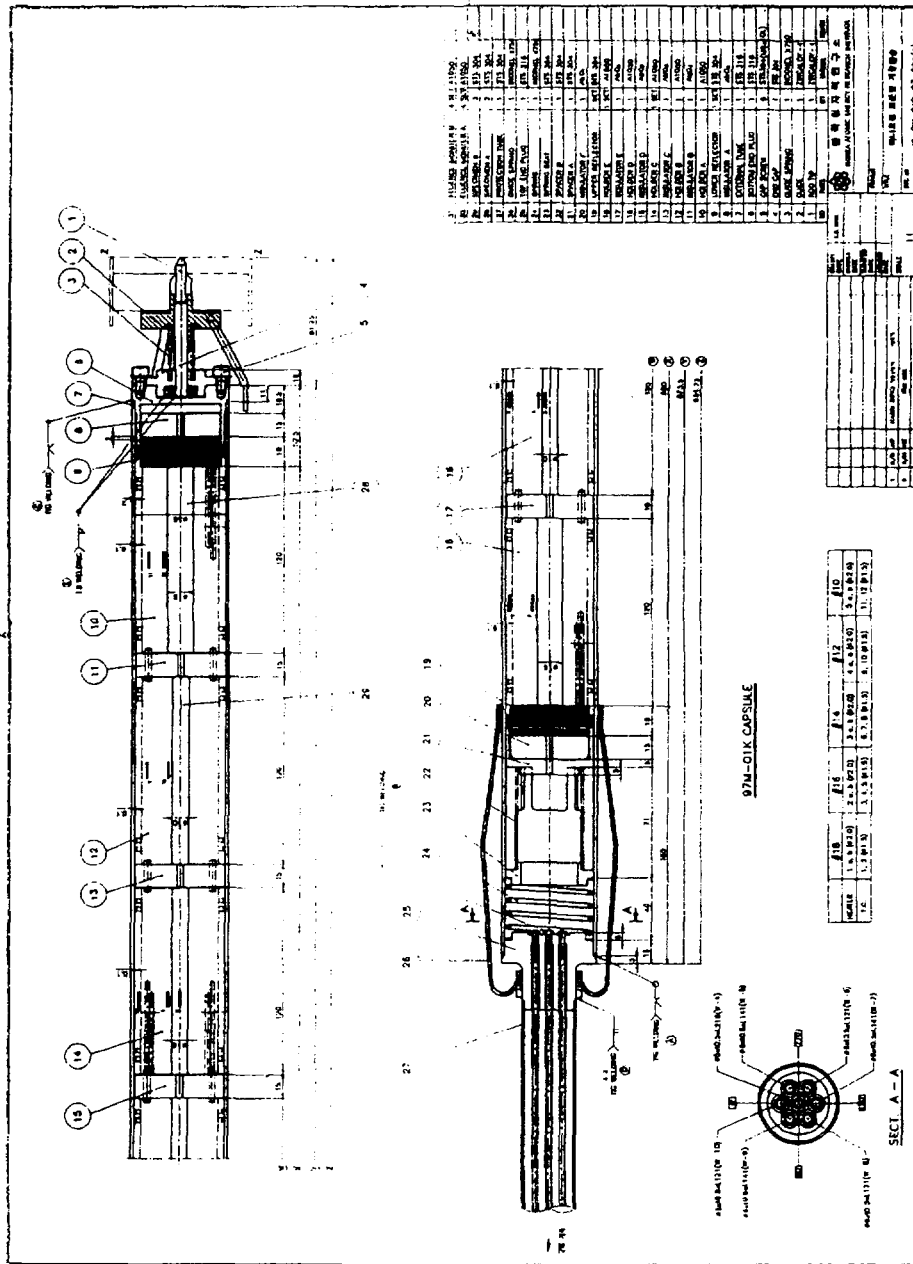


그림 13-1. 캡슐구조 구성도

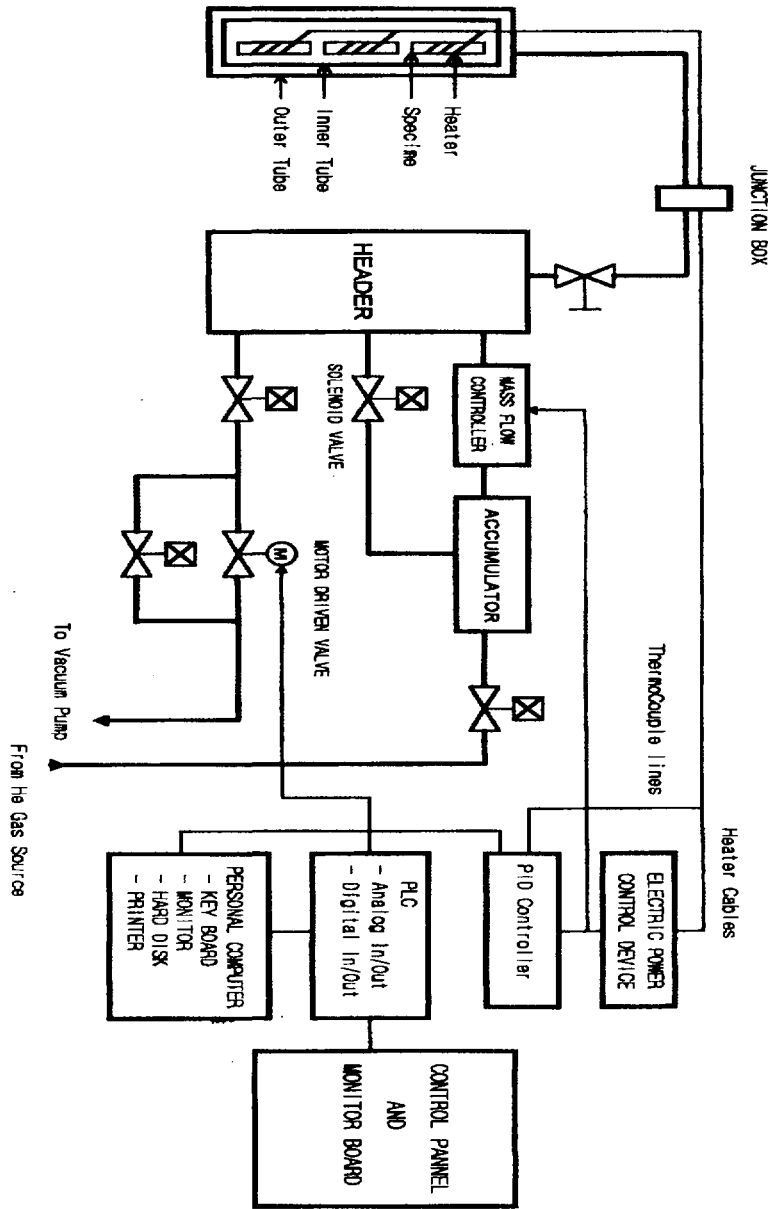


그림 1.5-1. 캡슐온도제어장치 구성도

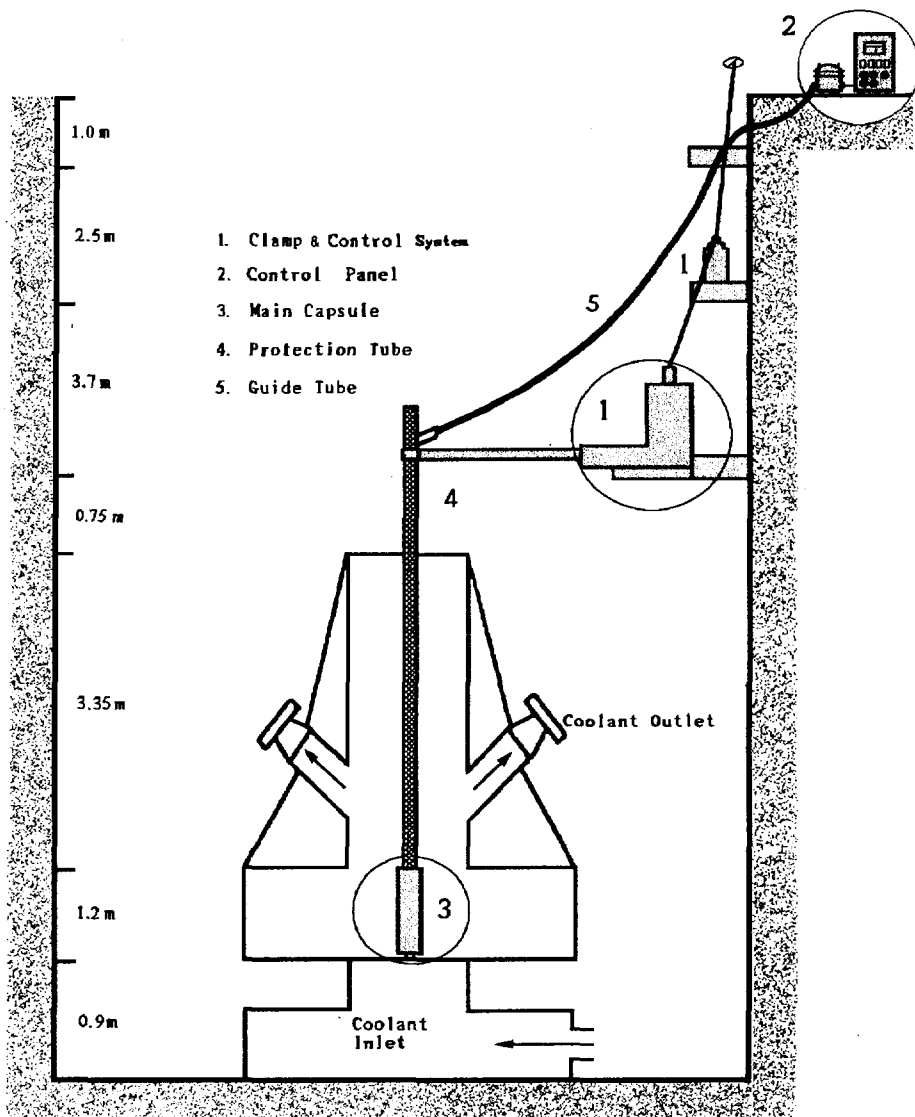


그림 2.1-1. 캡슐 및 관련 구조물

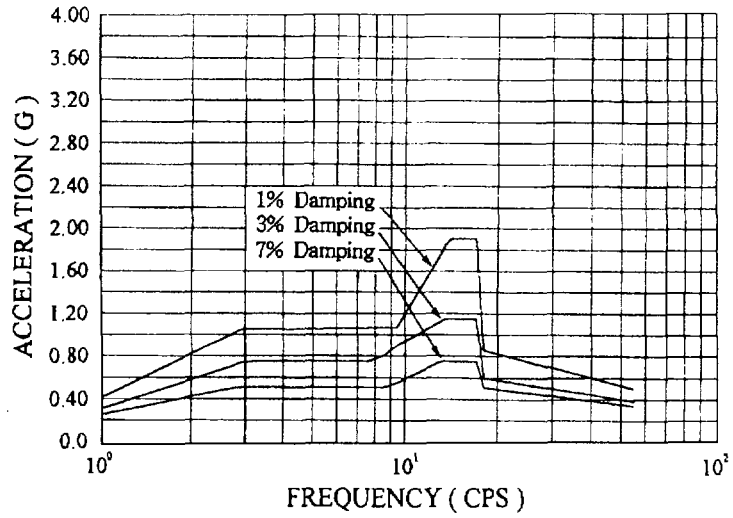


그림 2.1-2. 조사공 하부에서의 수직방향 가속도 응답 스펙터럼(SSE)

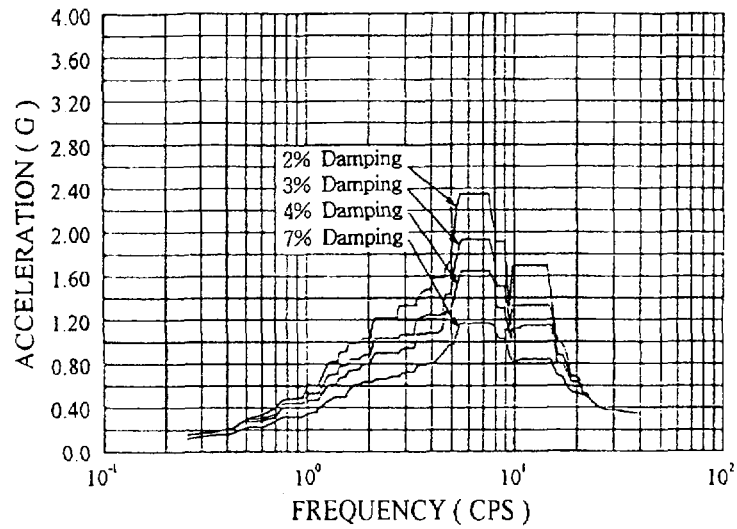


그림 2.1-3. 수조벽에서의 수평방향 가속도 응답 스펙터럼(SSE)

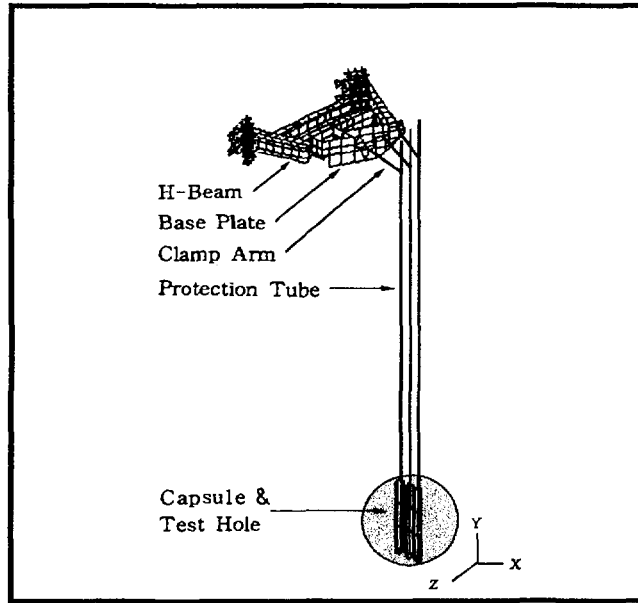


그림 2.1-4. 캡슐유한해석모델

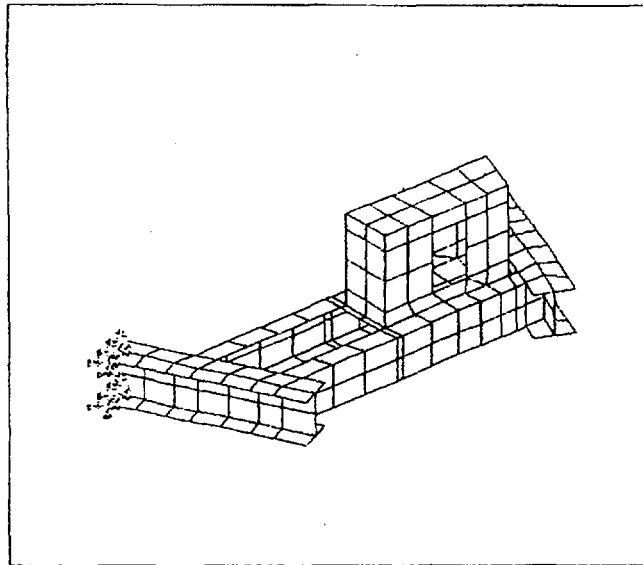


그림 2.1-5. 캡슐고정장치 Unit 해석모델

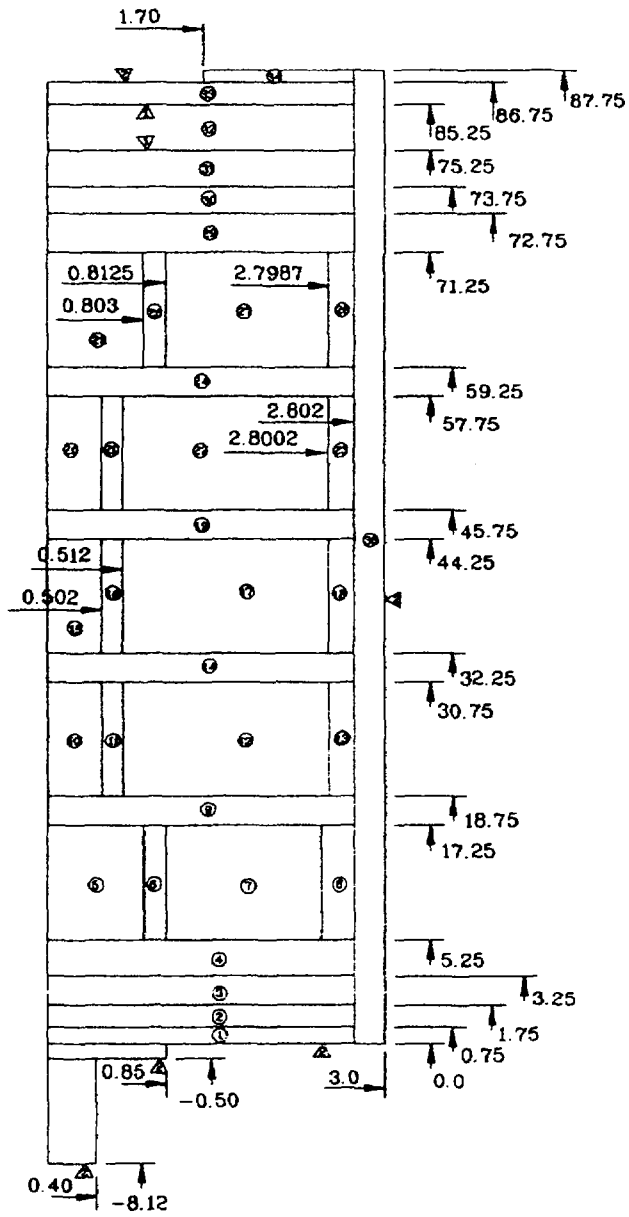


그림 2.2-1. 캡슐본체의 온도계산 모델

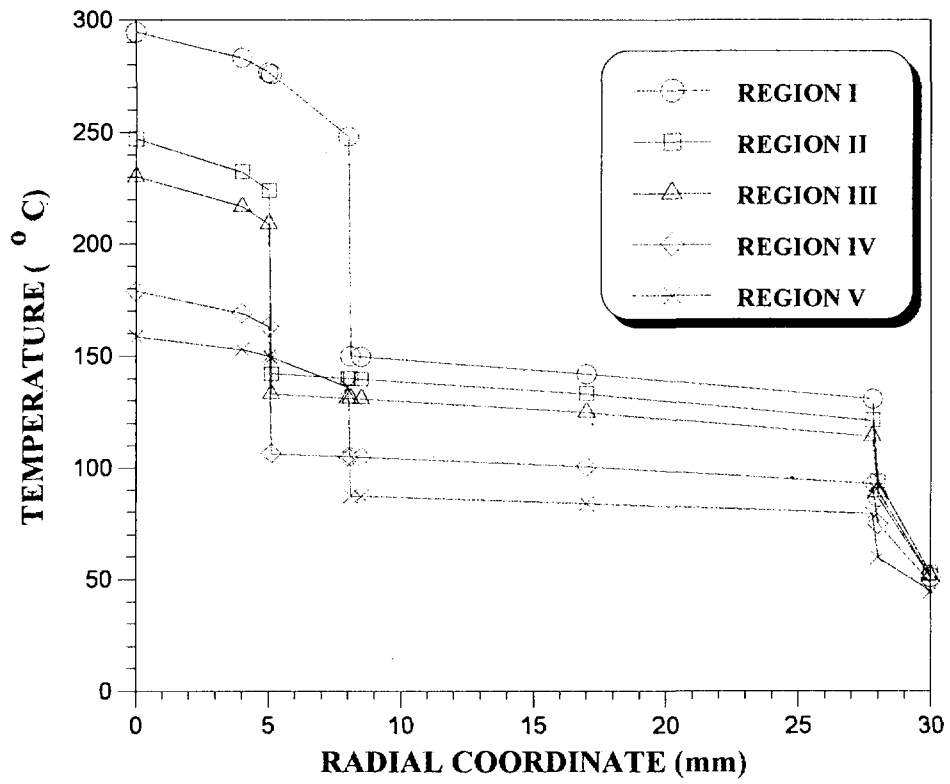


그림 2.2-2. 캡슐본체의 영역별 온도 변화

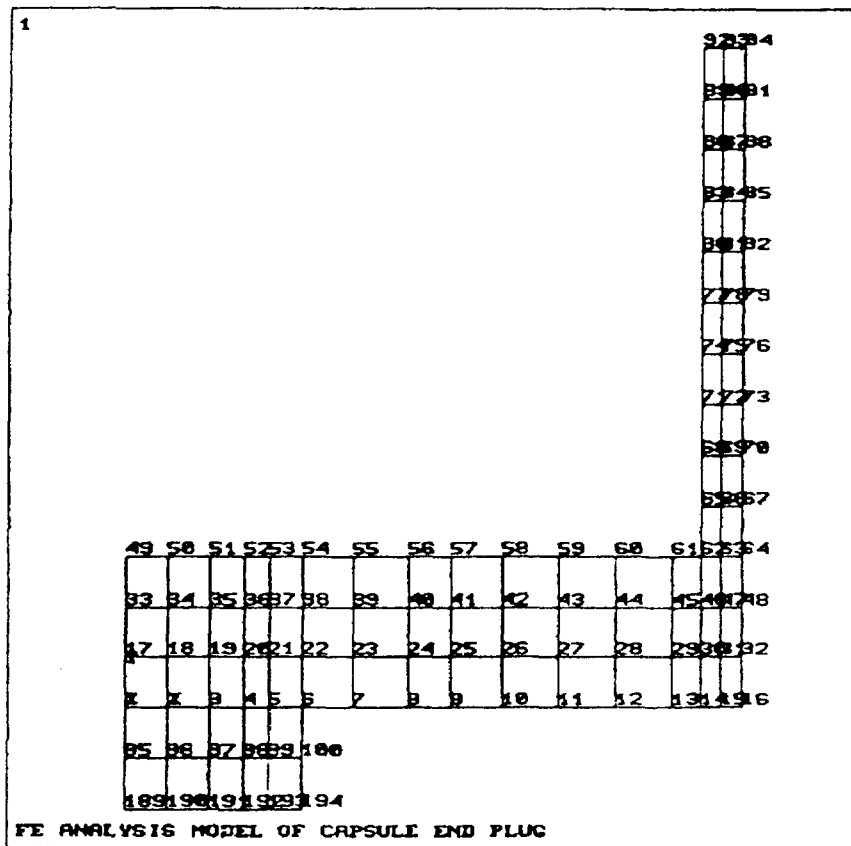
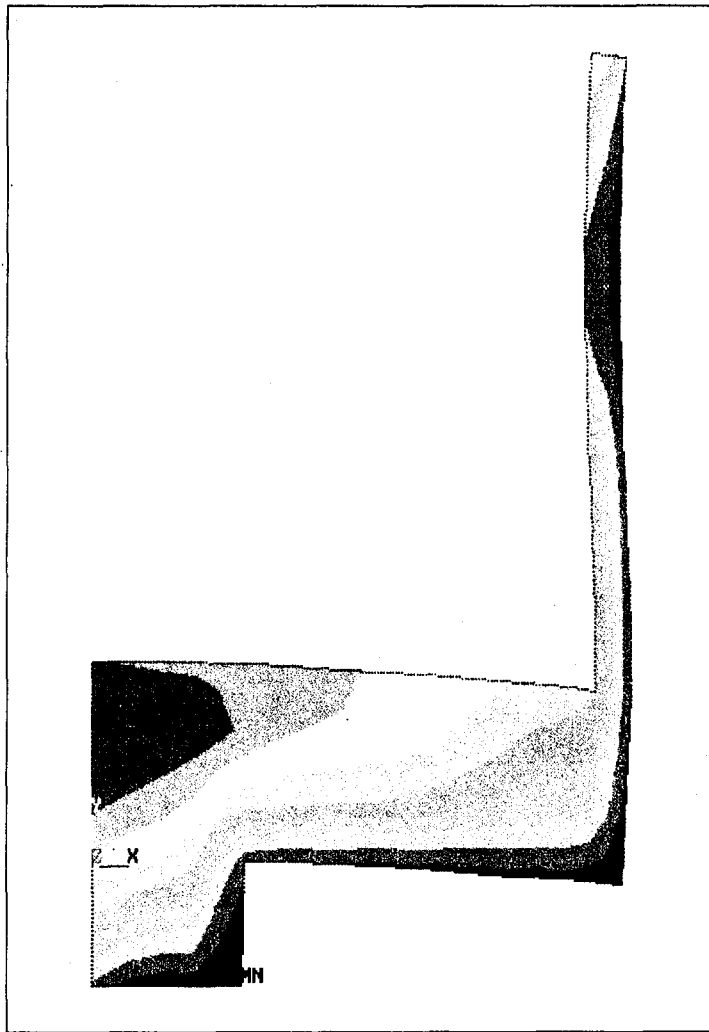
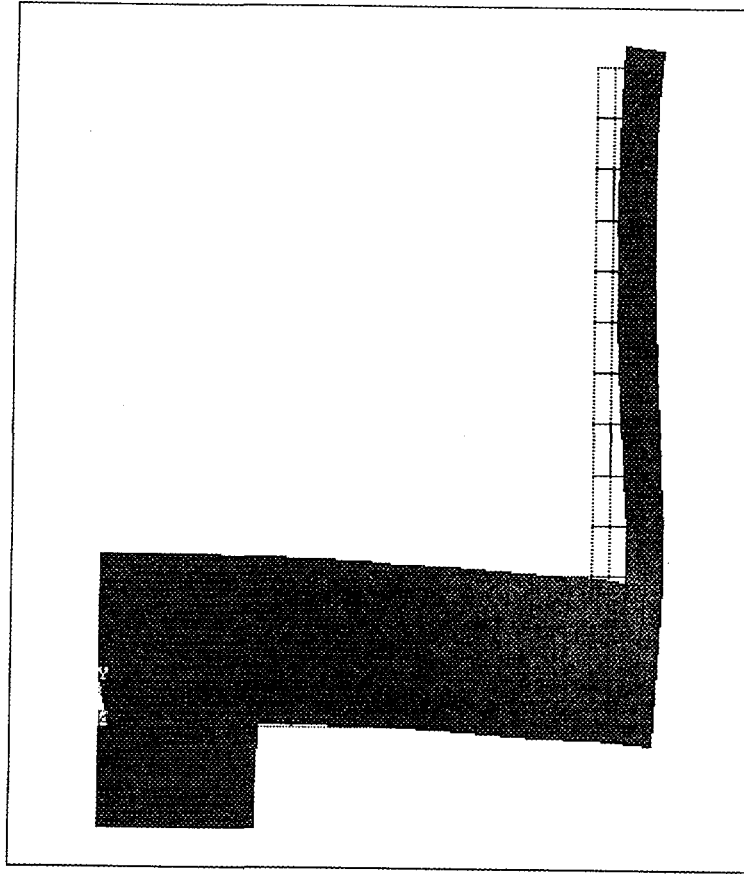


그림 2.2-3. 캡슐 End Plug의 열응력 해석모델



ANSYS 5.0
 JUL 19 1997
 10:25:03
 PLOT NO. 2
 NODAL SOLUTION
 STEP=1
 SUB =1
 TIME=1
 BFTEMP (AVG)
 DMX =0.398E-04
 SMN =41.02
 SMX =96.41
 41.02
 47.174
 53.329
 59.483
 65.638
 71.792
 77.947
 84.101
 90.256
 96.41

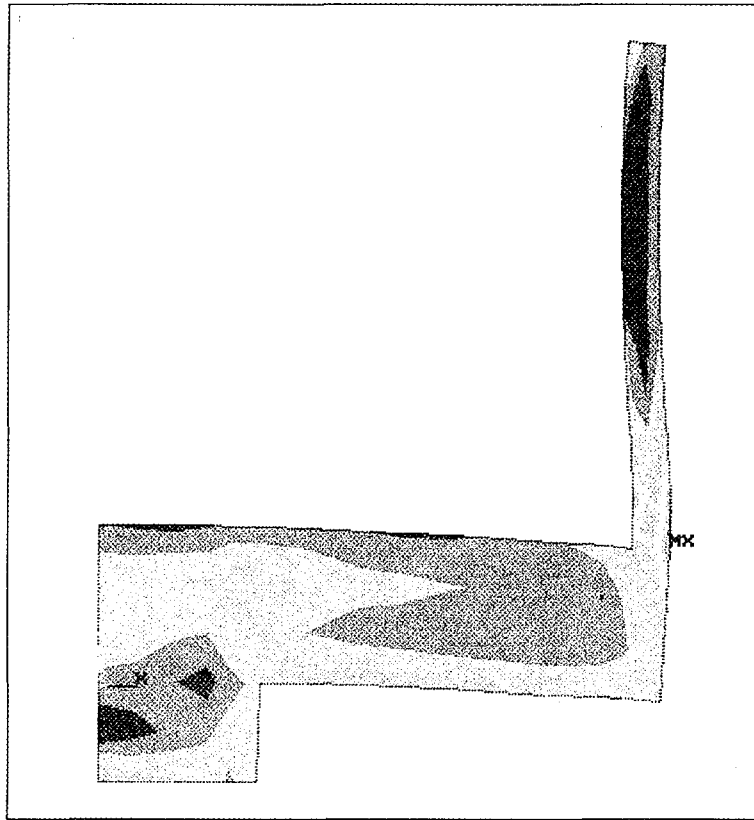
그림 2.2-4. 캡슐 End Plug의 온도분포



ANSYS 5.0
JUL 19 1997
10:24:50
PLOT NO. 1
DISPLACEMENT
STEP=1
SUB =1
TIME=1
RSYS=0
DMX =0.398E-04
SEPC=28.615

DSCA=53.156
ZU =1
DIST=0.02116
XF =0.016015
YF =0.014237
CENTROID HIDDEN

그림 2.2-5. 열하중에 의한 변형된 캡슐외통 End Plug 변위형상



ANSYS 5.0
 JUL 19 1997
 10:25:10
 PLOT NO. 3
 NODAL SOLUTION
 STEP=1
 SUB =1
 TIME=1
 SINT (AVG)
 DMX =0.398E-04
 SMN =0.352E+07
 SMX =0.162E+09
 SMXB=0.220E+09
 0.352E+07
 0.212E+08
 0.388E+08
 0.565E+08
 0.741E+08
 0.917E+08
 0.109E+09
 0.127E+09
 0.145E+09
 0.162E+09

그림 2.2-6. 캡슐 End Plug의 열응력 해석결과

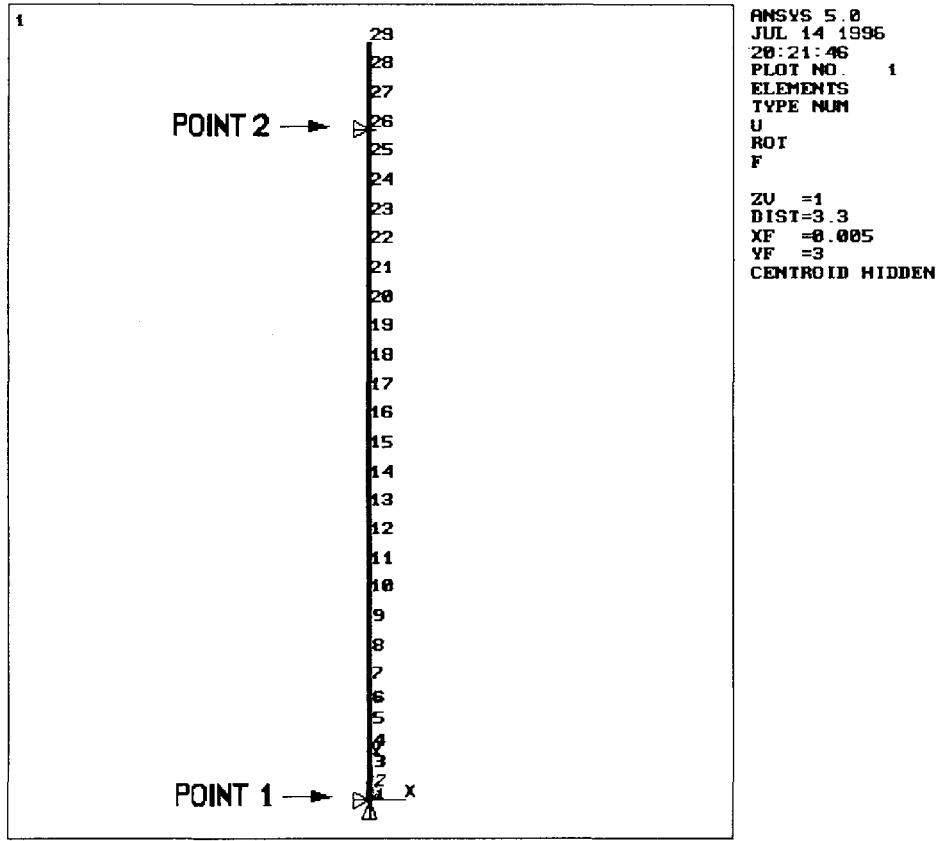


그림 2.3-1. 캡슐구조물의 좌굴해석모델

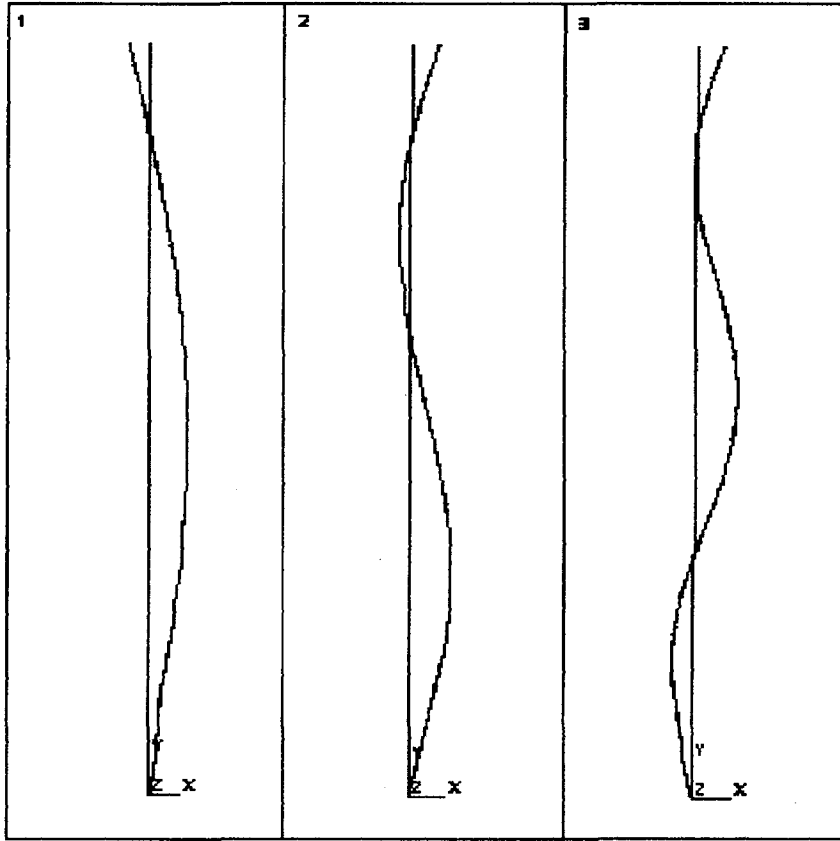


그림 2.3-2. 양단 단순지지 조건에서의 좌굴모드형상

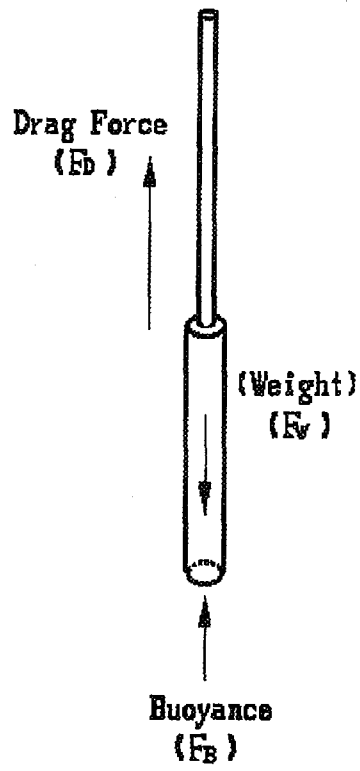


그림 2.4-1. 수중에서의 캡슐이 자유낙하시 하중의 자유물체도

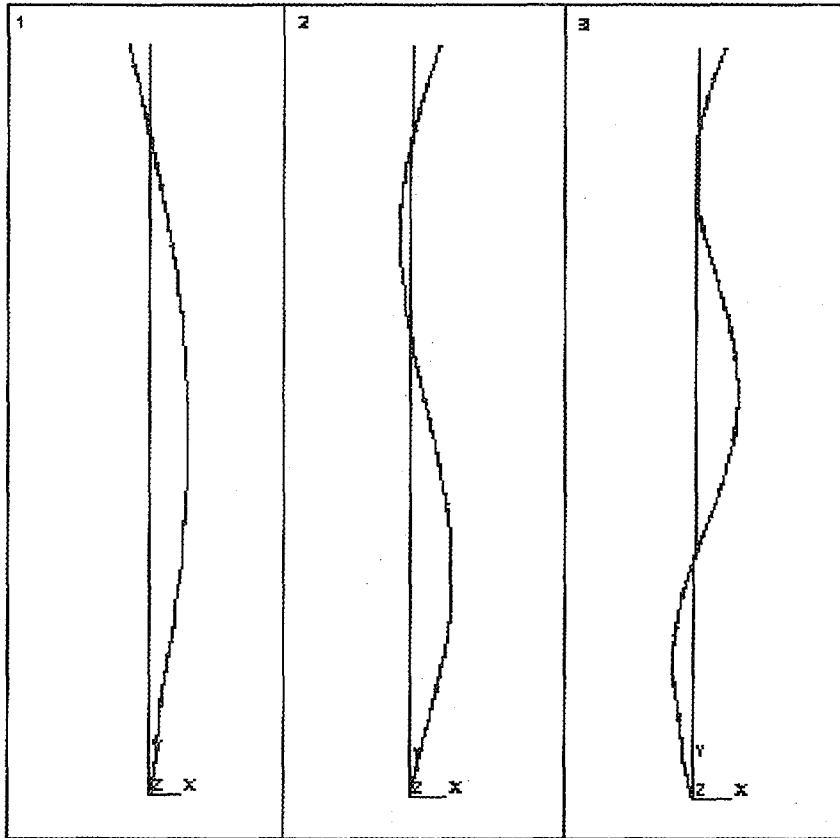
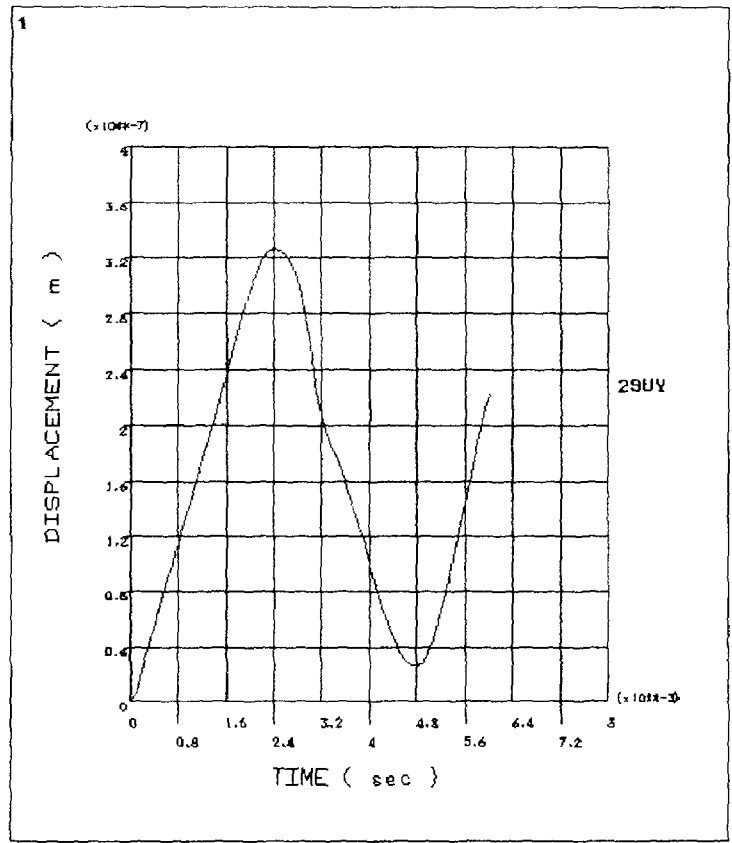
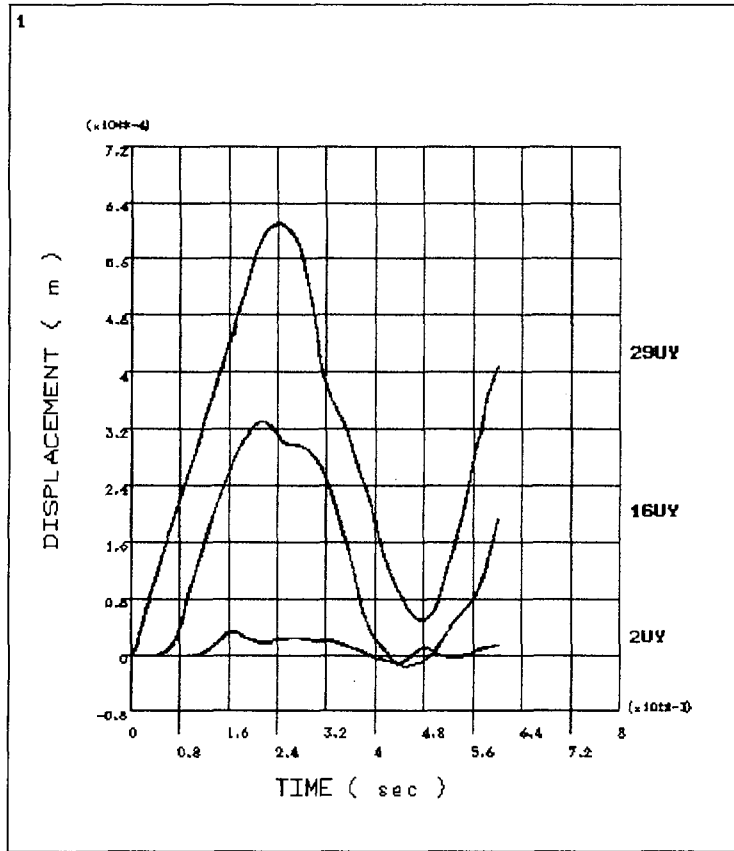


그림 2.3-2. 양단 단순지지 조건에서의 좌굴모드형상



ANSYS 5.0
 JUL 12 1995
 10:16:02
 PLOT NO. 1
 POST26
 ZU =1
 DIST=0.75
 XF =0.5
 YF =0.5
 ZF =0.5
 CENTROID HIDDEN

그림 2.4-3. 수직방향 충격하중 작용점에서의 시간에 따른 변위이력선도



ANSYS 5.0
 JUL 12 1995
 10:38:02
 PLOT NO. 1
 POST26
 ZU =1
 DIST=0.75
 XF =0.5
 YF =0.5
 ZF =0.5
 CENTROID HIDDEN

그림 2.4-4. 캡슐의 시간에 따른 변위이력

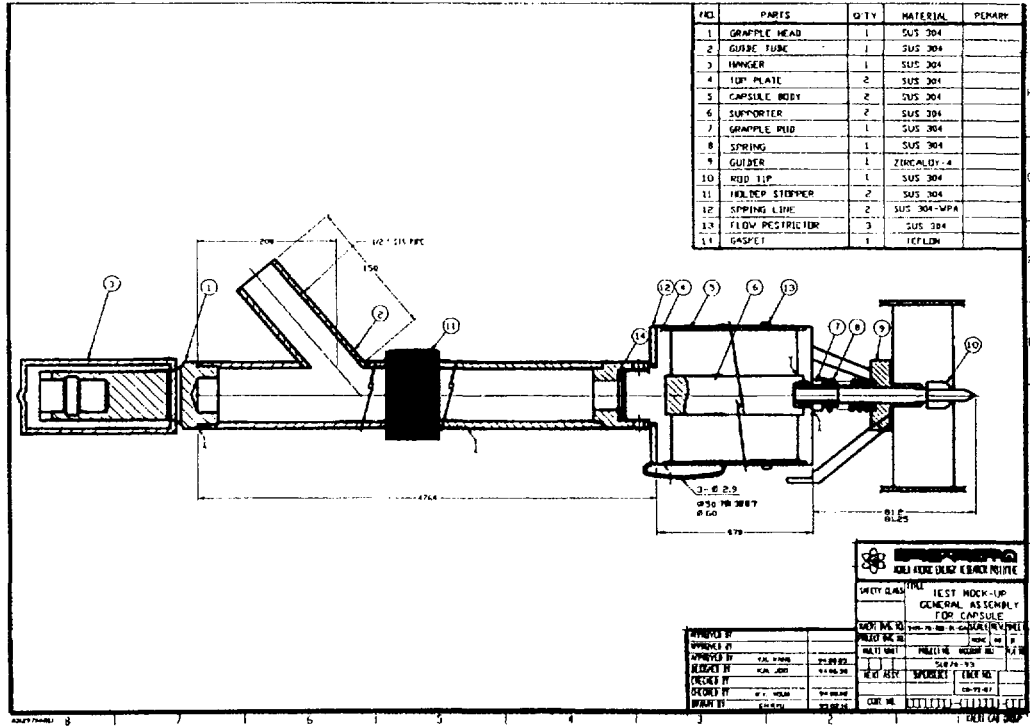


그림 2.5-1. 캡슐모킹 설계형상

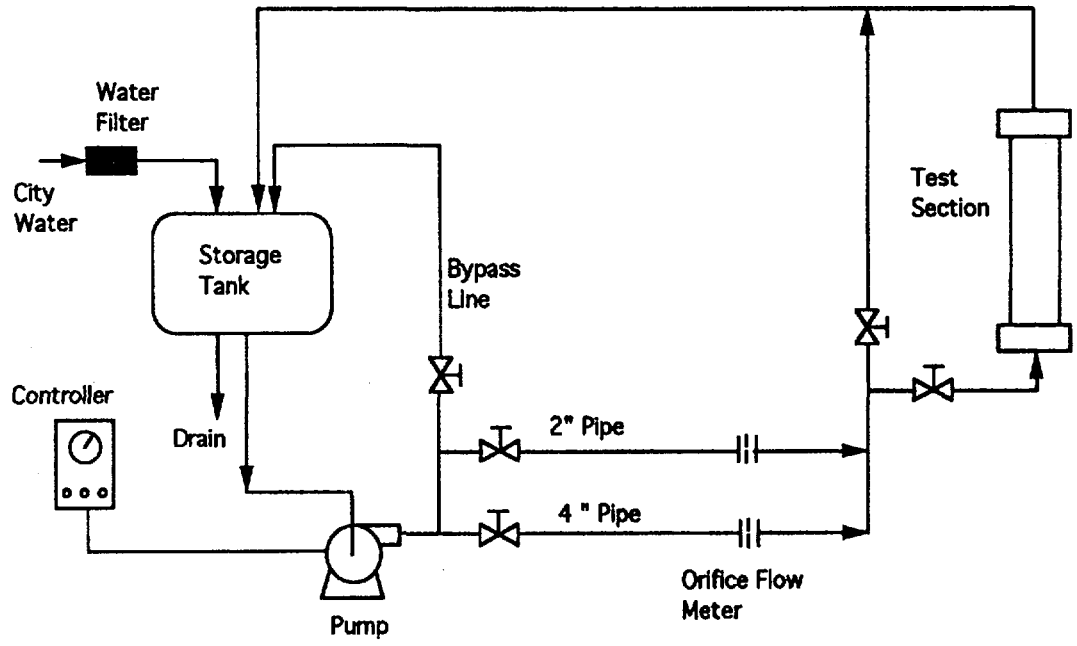


그림 2.5-2. 열수력 시험장치도

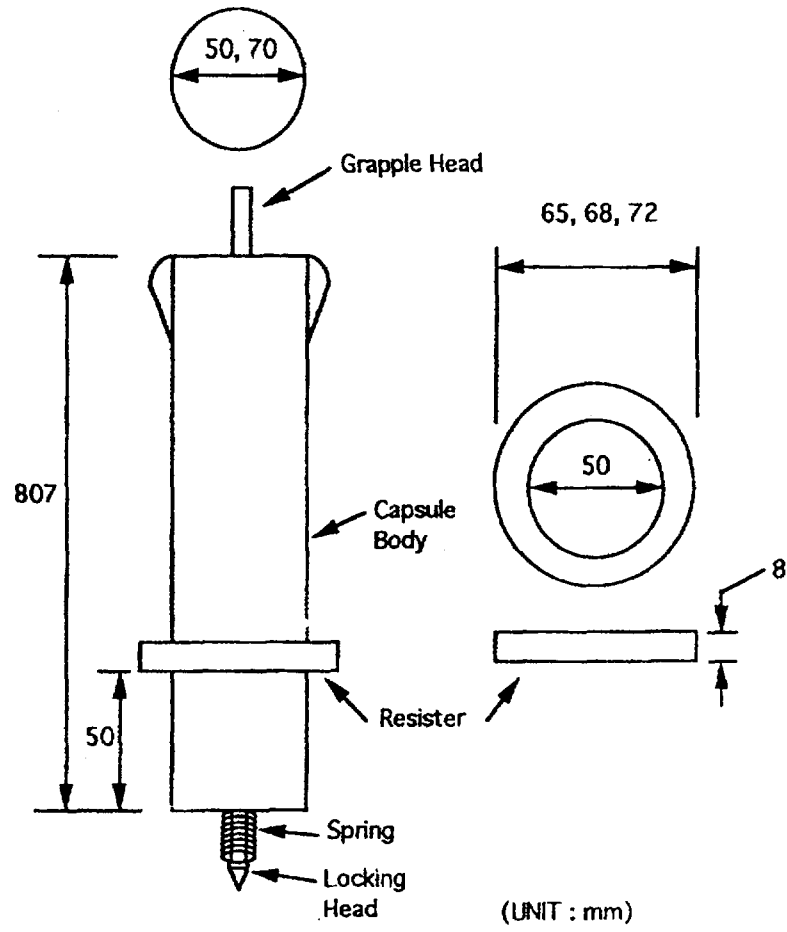


그림 2.5-2. 열수력 시험장치도 (계속)

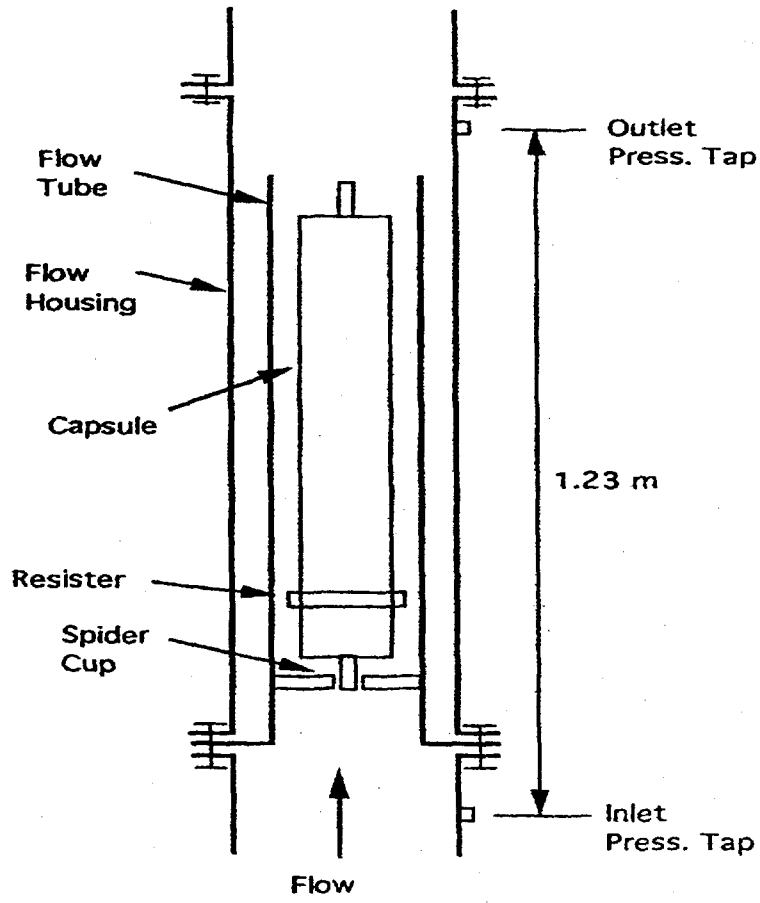


그림 2.5-2. 열수력 시험장치도 (계속)

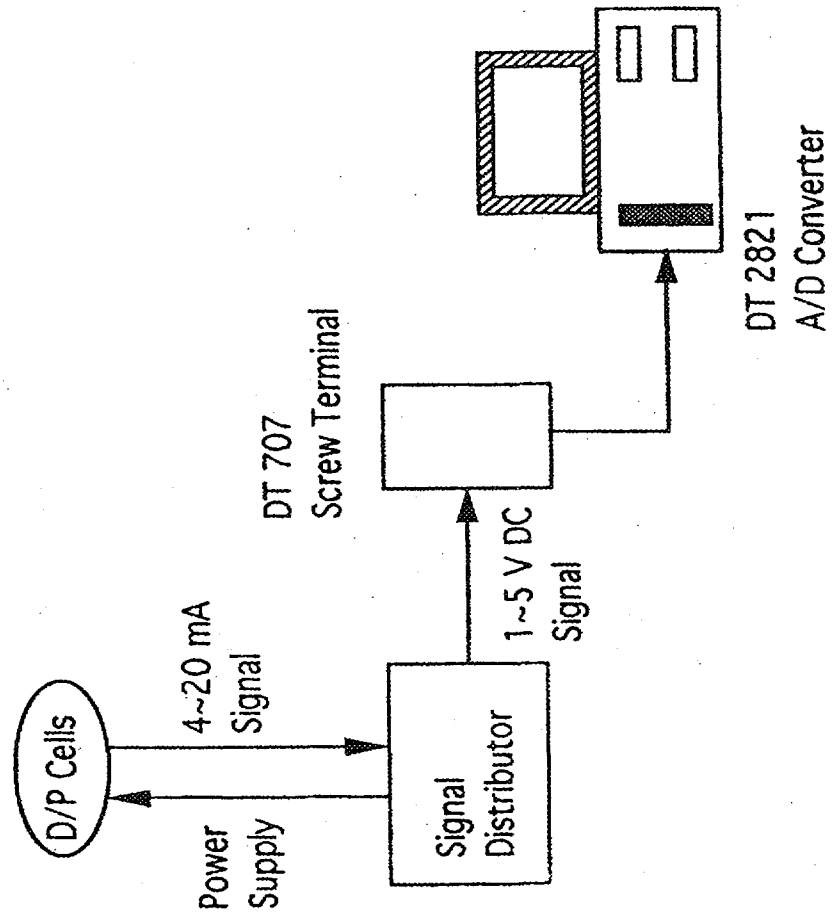


그림 2.5-3. Data acquisition system 개략도

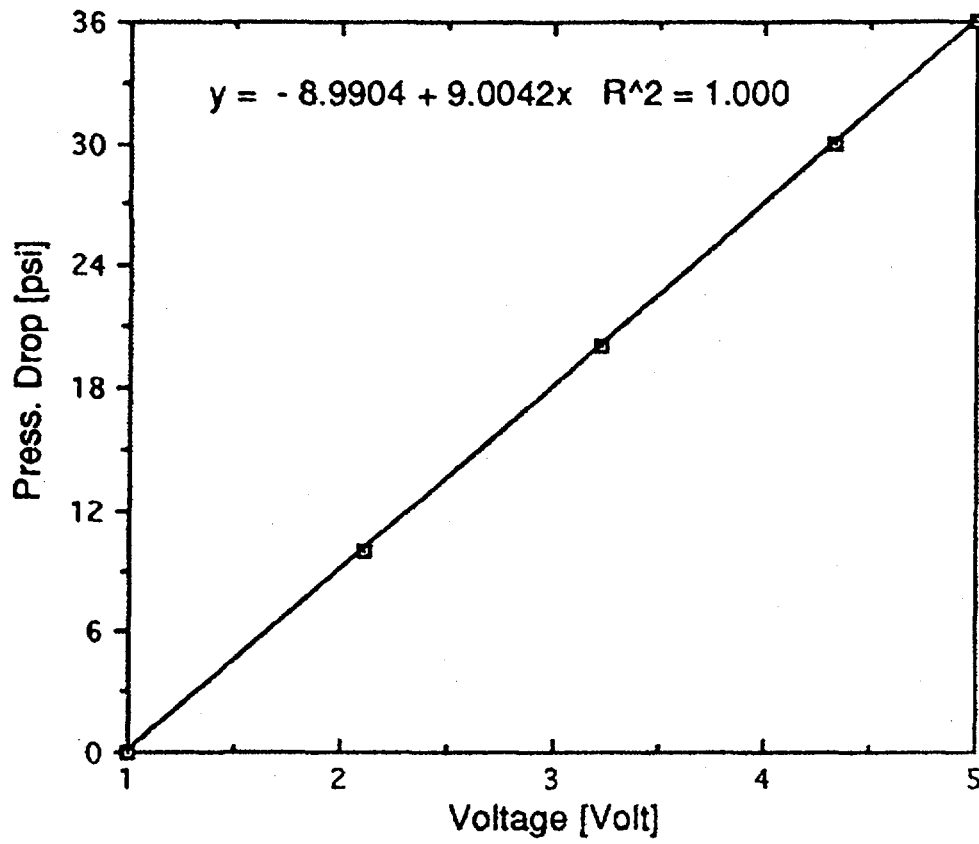


그림 2.5-4. D/P transmitter 기기 보정커브

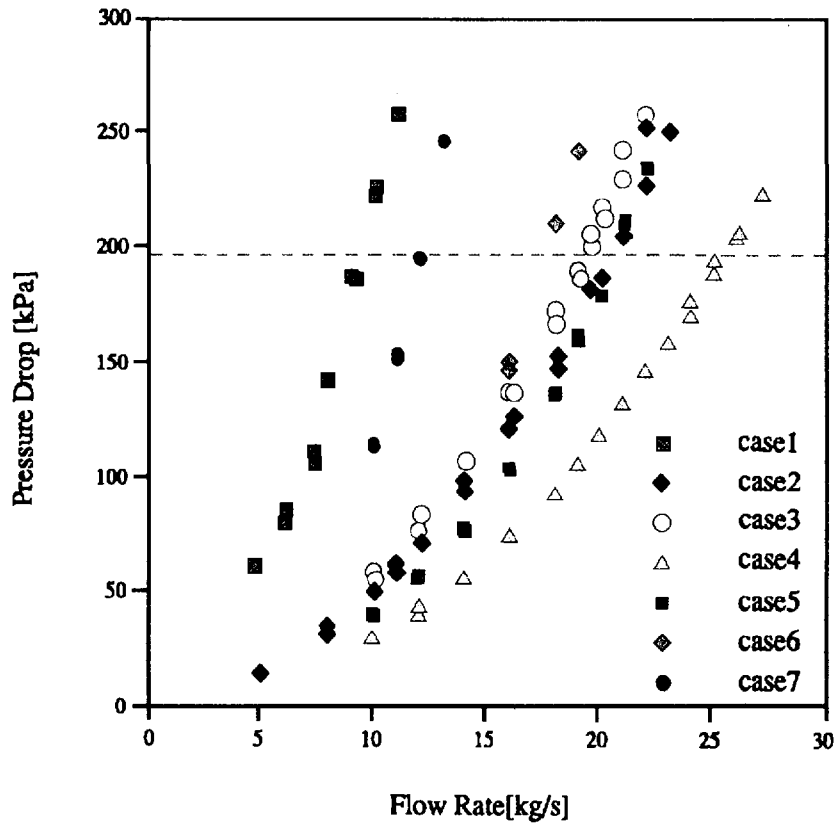


그림 2.5-5. 압력강하 측정 결과도

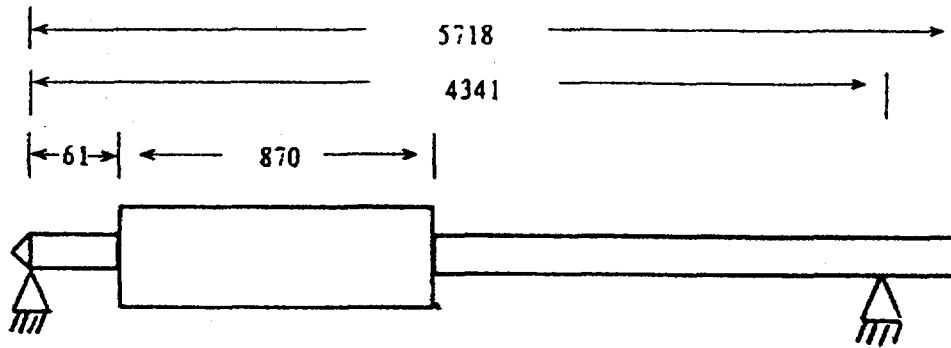


그림 2.6-1. 캡슐의 공기중 고유진동수 계산을 위한 해석모델

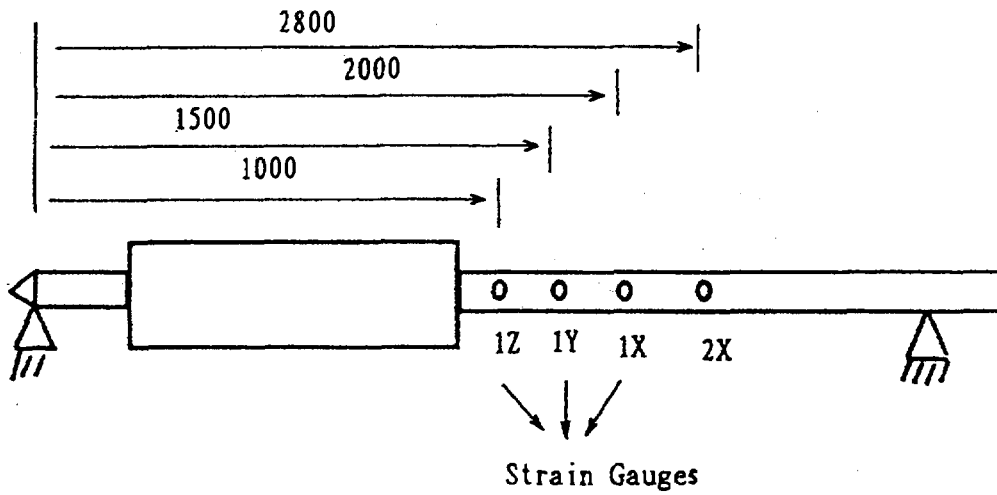


그림 2.6-2. 캡슐모퉁에 대한 자유진동 측정점

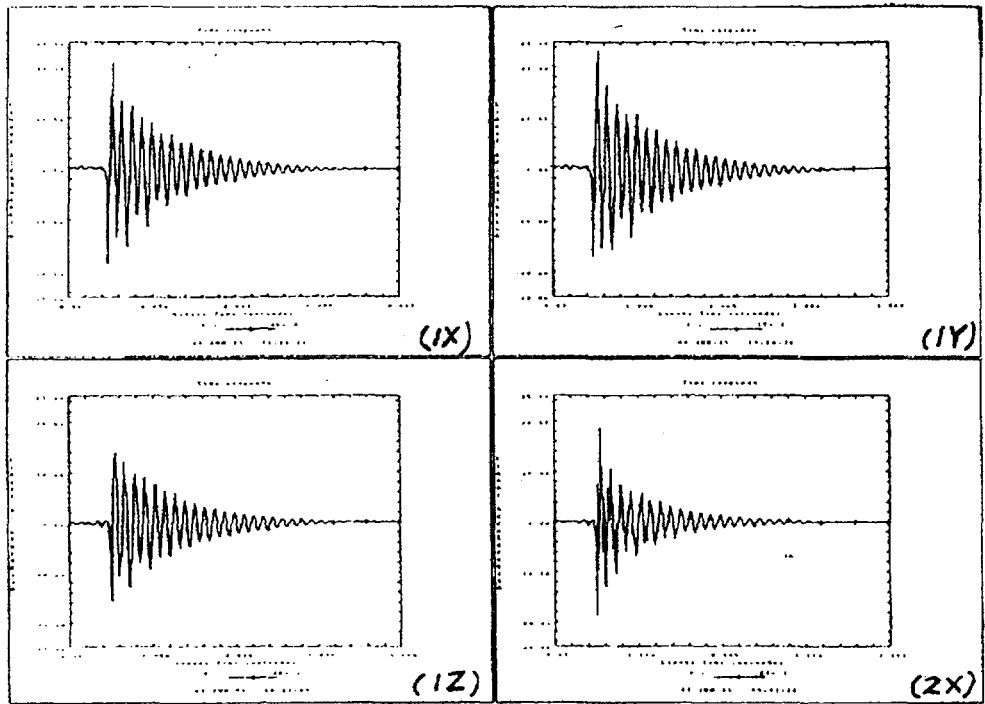


그림 2.6-3. 각 측정점에 대한 시간 영역 가속도 신호

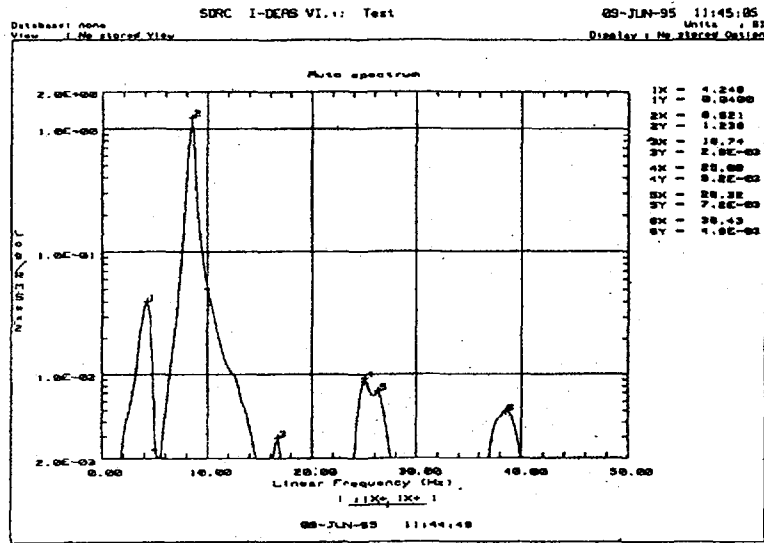


그림 2.6-4. 주파수 분석결과 (point 1X)

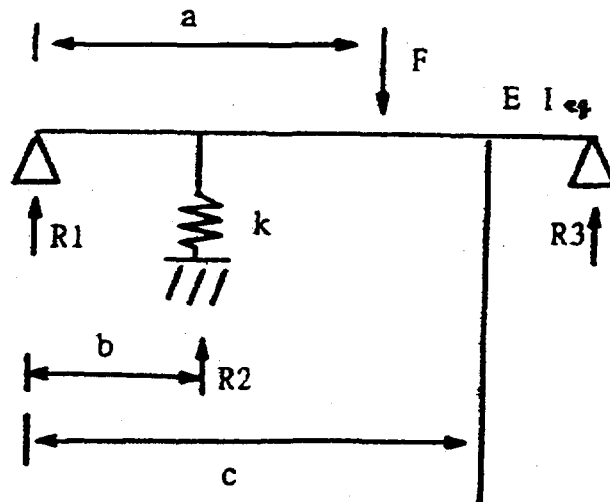
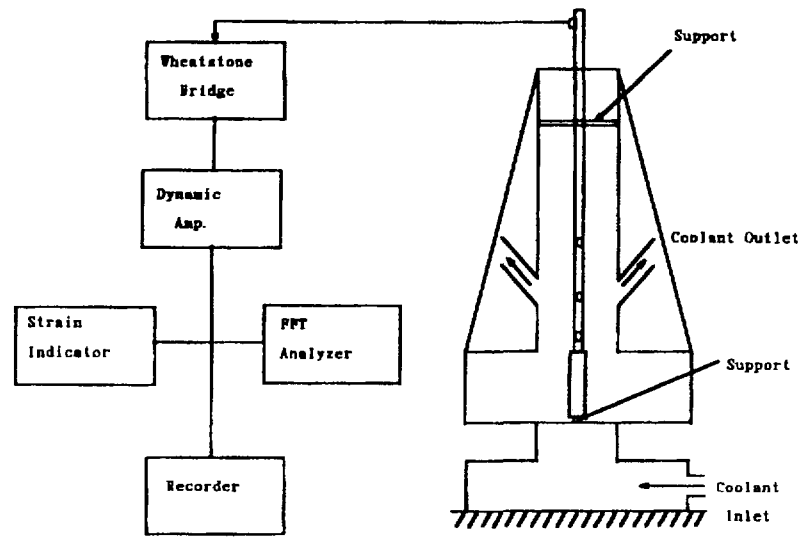
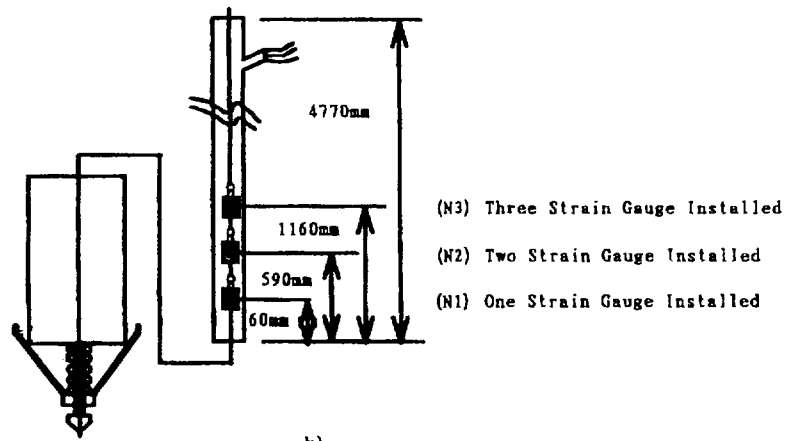


그림 2.6-5. 스프링 지지 단순보 모델



a)



b)

그림 2.6-6. 진동시험 장치 구성도

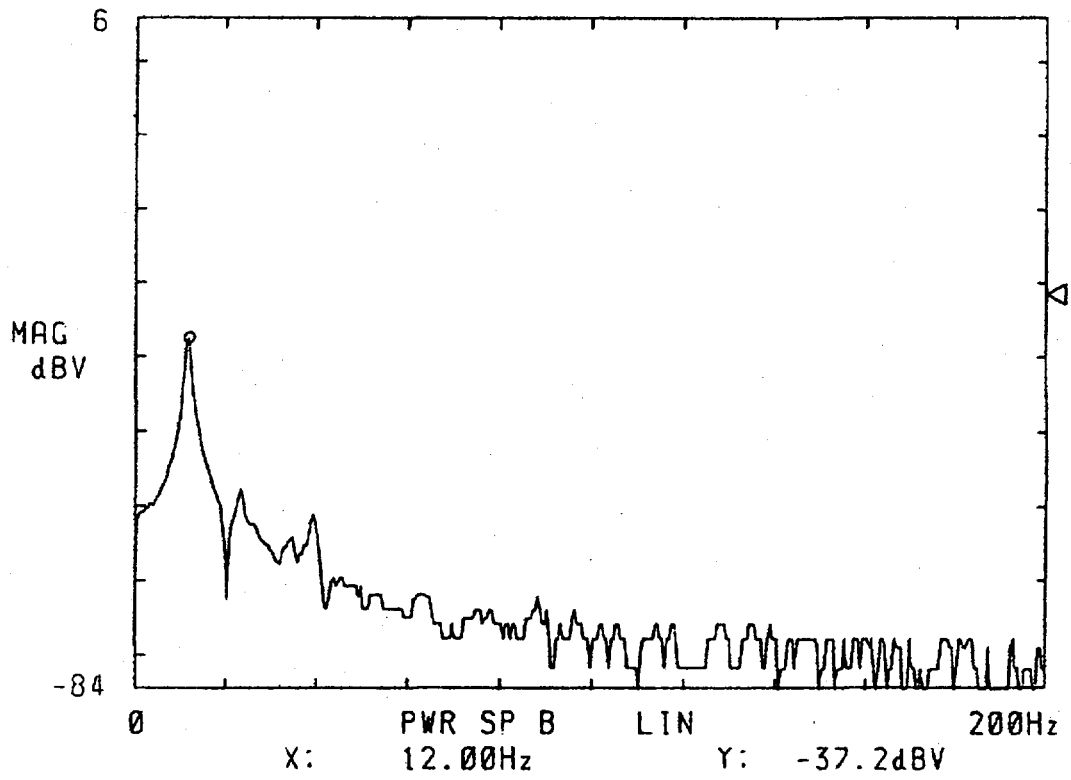
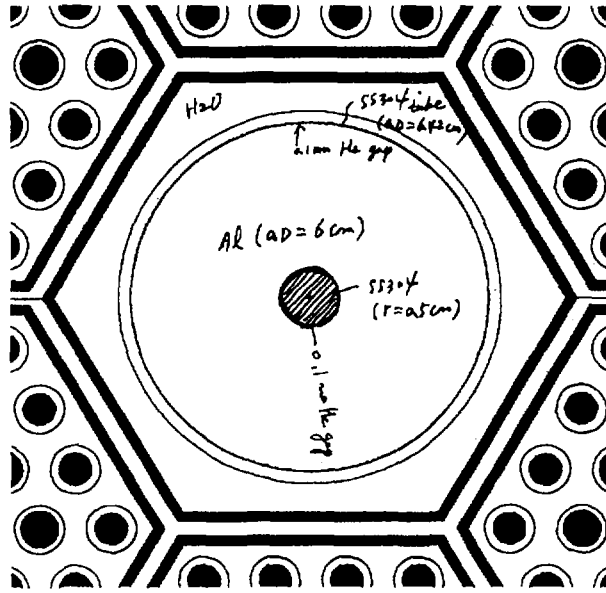
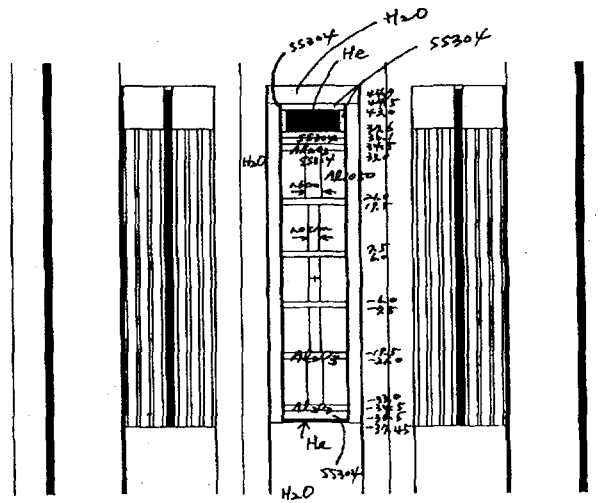


그림 2.6-7. 캡슐의 공기중 진동시험 결과



a) 평면도



b) 단면도

그림 2.7-1. 조사공 CT에 캡슐이 장전된 MCNP모델

BIBLIOGRAPHIC INFORMATION SHEET					
Performing Org. Report No.	Sponsoring Org. Report No.		Standard Report No.	INIS Subject No.	
KAERI/TR-985/98					
Title/Subtitle	Safety Analysis Report for Material Irradiation Test Capsule and Related System				
Project Manager/ Dept. (Main Author)	Young-Hwan Kang (HANARO Capsule Development and Utilization Lab)				
Researcher and Dept.	<p>Kee-Nam Choo, Sunh-Ho Cheung, Jong-Man Park, Tae-Ryong Kim(HANARO Capsule Development and Utilization Lab), Jeong-Soo, Ryu, Byung-Chul, Lee(HANARO Operation Team), Sun-Kyu, Yang(Thermal Hydraulic Safety Research Team), Young-Shin, Lee(Mechanical Design Engineering Department, Chung-Nam University)</p>				
Pub. Place	Taejeon	Pub. Org.	KAERI	Pub. Date	Mar,1998
Page	p. 81	Fig. and Tab.	Yes(○),No()	Size	19x26cm
Note					
Classified	Open(○). Outside(). ___Class		Report Type	Technical Report	
Sponsoring Org.			Contract No.		
Abstract (About 300 Words)	<p>The Safety Analysis Report(SAR) for the capsule and related systems to be used for the Material Irradiation Testing in the HANARO is organized into two chapters.</p> <p>Chapter 1 includes the descriptions for test apparatus, applicable codes and standards, design requirements of the instrumented capsule and related systems.</p> <p>Chapter 2 describes the results of structural integrity analysis including seismic analysis based on the data produced by hydraulic and vibrational tests. The reactivity changes caused by the capsule insertion to the HANARO core estimated using MCNP code are also included.</p>				
Subject Key Words (About 10 Words)	<p>Capsule, HANARO, Structural Integrity, Seismic Analysis, Compatibility, Vibrational Test, Excess Reactivity</p>				

서 지 정 보 양 식

수행기관 보고서번호		위탁기관 보고서번호		표준보고서번호		INIS 주제코드	
KAERI/TR-985/98							
제목 / 부제							
재료조사시험용 캡슐 및 관련설비의 안전성분석보고서							
연구책임자 및 부서명 (AR, TR인 경우 주저자)		강영환 (조사시험용 캡슐개발 및 활용)					
연구자 및 부서명							
<p style="text-align: center;">주기남, 정승호, 박종만, 김태룡(연구로이용기술개발팀), 류정수, 이병철(하나로운영팀), 양선규(열수력안전연구팀), 이영신(기계 설계공학과, 충남대학교.)</p>							
발 행 지	대 전	발행기관	한국원자력연구소	발 행 일	1998.3.		
페 이 지	p. 81	도 표	유(○), 무()	크 기	19x26cm		
참고사항							
비밀여부	공개(○), 대외비(), ___급비밀			보고서 종류	기술 보고서		
연구위탁기관				계약번호			
초록 (300단어 내외)							
<p>하나로를 이용하여 재료의 조사 시험을 수행할 수 있는 캡슐 조사설비에 대하여 수행한 안전성 분석 보고서에 대한 내역을 기술하고 있다. 캡슐 조사 시험 설비란 원자력 발전소 사용 재료를 넣어 상용로의 가동 조건에 준하여 조사 시험할 수 있는 설비이다. 제 1 장에는 캡슐조사 설비, 즉 캡슐 (capsule), 고정 장치(supporting system), 온도 제어장치, 취급용 tools, 수송용 cask, 조사후 캡슐 절단기 등에 대한 장치구성, 적용 규격 및 표준, 설계 기본 방침 및 기준에 대한 내역을 기술하고 있다. 제 2 장에는 캡슐 조사 설비에 대한 하나로와의 간섭 사항이나 사용중 구조 건전성 및 안전성을 유지하는지에 대한 해석 업무 내역과 이를 실험적으로 확인한 하나로와의 열수력 양립성 시험과 하나로 가동 조건하에서 수행한 진동 시험에 대한 내역을 포함하고 있다. 마지막으로 하나로 CT조사공에 캡슐을 장전시 반응도 검토를 위하여 몬테카를로 전산 코드인 MCNP을 이용하여 수행한 내역을 포함하고 있다.</p>							
주제명 (10단어 내외)							
캡슐조사설비, 하나로, 건전성해석, 열수력양립성, 진동시험, 잉여반응도							