KINS/HR-443

운반용기의 후판낙하충격, 열해석 및 열응력 해석기술

Analysis Technology on the Thick Plate Free Drop Impact, Heat and Thermal Stress of the Cask for Radioactive Material Transport

2002. 3

한국원자력안전기술원

요 약 문

I. 제 목

운반용기의 후판낙하충격, 열해석 및 열응력 해석기술

II. 연구개발의 목적 및 필요성

1. 연구의 필요성

오늘날 원자력발전소 및 산업, 의료, 유전공학 등과 같은 다양한 분야에서 방사성물질(Radioactive material)이 광범위하게 사용되므로 이에 따른 국내 및 국제적 운반량이 급격히 증가하는 추세에 있다. 방사성물질의 운반에서 가장 중요시 고려되어야 할 요소는 방사선과 높은 열이 방출되는 방사성물질의 위험으로부터 인간과 환경을 보호하기 위하여 운반용기의 안전성이 철저하게 보장되어야 한다는 것이다. 따라서 국내뿐만 아니라 세계 각국의 운반규정 및 IAEA 운반규정에는 운반용기가 갖추어야 할 요건을 정하고 있으며 한번에 많은 방사성물질을 운반하는데 사용되는 B형 운반용기에 대하여는 정부의 설계승인을 얻도록 규정하고 있다.

가상사고조건(Hypothetical accident condition)에 대한 운반용기의 구조적인 건전성 입증에 대한 평가방법은 시험에 의한 방법과 해석에 의한 방법 등이 있다. 시험에 의한 방법은 보다 정확한 건전성 평가에 비하여 시간과 비용이 매우 많이 소요되며 근래에 컴퓨터와 전산코드에 의한 발달에 따라 해석에 의한 방법이 널리 활용되고 있으나 국내에는 이러한 시험조건에 대한 해석방법이 정립되어 있지 않은 실정이다. 따라서, 가상 사고조건들에 대한 해석방법이 적합하고 신뢰성이 있는지 여부를 평가하기 위한 안전해석 검증기술을 개발할 필요성이 있다. 본 보고서에선 이러한 가상사고조건들 중 후판낙하충격(Thick plate free drop impact), 열해석(Heat analysis) 및 열응력해석(Thermal stress)에 대한 검증기술을 연구하였다.

현재 국내에는 약 1500개의 운반용기가 사용되고 있으나 거의 대부분이 외국으로부터 수입하여 사용하고 있는 실정으로 아직까지 국산화가 미진한 이유는 운반용기의 설계 및 제작기술이 미진하기 때문이다. 안전해석 검증기

술을 개발하고 신뢰성이 있는 해석방법을 제시하는 것은 운반용기의 국산화에 중요한 요인으로 작용될 것이며 경제적 가치가 매우 크다고 할 수 있다.

또한, 방사성물질 운반용기의 안전해석 검증기술 개발은 운반용기의 건정성 평가에 사용됨으로써 안전성을 향상시키고 일반국민의 운반사고에 대한 막연한 불안감을 해소시키며 원자력산업에 대한 신뢰성을 향상시키는 계기가 될 것이다.

2. 연구 목적

후판낙하충격(Thick plate free drop impact), 열해석(Heat analysis) 및 열응력해석(Thermal stress)에서 운반용기의 건전성을 평가할 수 있는 안전해석 검증기술 개발

III. 연구개발의 내용 및 범위

- 운반용기 후판낙하충격, 열해석 및 열응력 안전해석 기법 분석
- 운반용기 후판낙하충격, 열해석 및 열응력 평가기준 분석
- 운반용기 후판낙하충격, 열해석 및 열응력 안전해석코드 조사 및 신뢰성 분석
- 운반용기 후판낙하충격 안전해석 검증기술 개발
- 운반용기 열해석 및 열응력 안전해석 검증기술 개발

IV. 연구개발결과 및 활용에 대한 건의

1. 연구개발결과

본 연구에서 운반용기의 후판낙하충격, 열해석 및 열응력 안전해석 검증기술을 개발하기 위해 먼저 규제요건과 해석요건을 분석하였다. 운반용기의 해석방법으로는 여러 가지 방법이 있으나 본 연구에선 비교적 정확한 결과를 내는 상용 유한요소 프로그램을 사용하였다. 여러 유한요소 프로그램의 분석결과 운반용기의 후판낙하충격, 열해석 및 열응력 해석에 적합한 유한요소프로그램으로는 ANSYS, LS-DYNA3D와 ABAQUS가 적합한 것으로 분석되었다. 운반용기의 해석모델로는 KSC-4에 대해 조사 및 연구하였고 특

히, 해석프로그램들의 신뢰성과 운반용기의 열해석 특성을 비교검증하기 위해 800℃ 화재조건 시험결과와 비교하여 연구를 수행한 결과 위의 세 가지 유한요소프로그램의 결과는 서로 잘 일치하였다. 운반용기의 건전성을 또한 충분히 입증되었다.

2. 활용에 대한 건의

본 연구에서 수행한 운반용기의 후판낙하충격, 열해석 및 열응력해석 검증기술 개발로 운반용기의 안전성을 확보하고, 설계 및 제작기술의 자립화로 운반용기의 국산화 및 원자력산업의 활성화를 이끌어 내며, 일반국민의 원자력에 대한 불안감 해소 및 원자력산업에 대한 신뢰성을 향상시킨다. 또한, 운반용기의 안전성 심사에 사용함으로써 안전성을 확보하고, 사업자에게 신뢰성 있는 해석기법을 제공하며, 표준화된 안전해석 검증기술을 심사에 사용함으로써 효율적이고 신뢰성 있는 규제업무를 수행한다.

SUMMARY

Ⅰ. Project Title

Analysis technology on the thick plate free drop impact, heat and thermal stress of the cask for radioactive material transport

Ⅱ. Objective and Importance of the Project

1. Importance of the Project

The radioactive material is used in various fields such as a industry, medical, genetic engineering, and nuclear power plant. And then the number of the radioactive material transport has been gradually increased in domestic and abroad. A very important factor in the radioactive material transport is protecting the human and the nature from the radiation and high heat emitted in the radioactive material. The cask is required to withstand hypothetical accident conditions such as thick plate free drop and 800℃ heat condition in accordance with the requirements of the IAEA and domestic regulations.

The methods of the safety evaluation of the shipping cask for the hypothetical accident conditions are both analysis of the experiment and the numerical code. The method of the numerical code is developing because experimental method could spend much time and costs. However these method of the numerical code have hardly ever been established in the domestic. It is very significant to develop the safety assessment technology for efficient and reliable safety evaluation for the shipping cask on the hypothetical accident conditions.

2. Objective of the Project

Development of analysis technology on the thick plate free drop impact, heat and thermal stress of the cask for radioactive material transport.

III. Scope and Contents of the Project

- Study the method of safety analysis for thick plate free drop impact, heat and thermal stress of the shipping cask
- Study the evaluation criterion for thick plate free drop impact, heat and thermal stress of the shipping cask
- Investigation the safety analysis code and study its reliance for thick plate free drop impact, heat and thermal stress of the shipping cask
- Development of the safety assessment technology for thick plate free drop impact of the shipping cask
- Development of the safety assessment technology for heat and thermal stress of the shipping cask

IV. Results and Recommendations for Application

1. Results

In this study, The regulatory condition and analysis condition is analyzed for thick plate free drop impact, heat and thermal stress analysis to develop the safety assessment technology. Analysis is performed with finite element method which is one of the many analysis methods of the shipping cask. ANSYS, LS-DYNA3D and ABAQUS is suitable for thick plate free drop impact, heat and thermal stress analysis of the shipping cask. For the analysis model, the KSC-4 that is the shipping cask to transport spent nuclear fuel is investigated. The results of both LS-DYNA3D and ABAQUS for thick plate free drop and the results of ANSYS, LS-DYNA3D and ABAQUS for heat and thermal stress analysis is completely corresponded. And the integrity of the shipping cask is verified.

2. Recommendations for Application

By means of development of the safety assessment technology for thick plate free drop impact, heat and thermal stress of the shipping cask on the this study, safety of the shipping cask will be ensured, the domestic design

and manufacture technology of the shipping cask will become independent, and people's anxiety about radio dangers will subside. Also, through the safety examination of the shipping cask with the standard safety assessment technology, the reliable analysis method will be supplied and efficient and reliable regulation task will be performed.

목 차

제 1 장 서 론 1

제 2 장 요건 분석 4
제 1 절 후판낙하충격, 열해석 및 열응력 규제요건 4
1. IAEA Safety Standards Series No. ST-1 4
2. 10 CFR Part 71 5
3. Regulatory Guide 7.8 7
제 2 절 후판낙하충격, 열해석 및 열응력 해석요건 9
1. 용어의 정의 9
2. Regulatory Guide 7.6 10

제 3 장 해석방법 및 유한요소해석 프로그램 17
제 1 절 해석 방법 17
1. 충돌이론 및 열해석이론 17
2. 유한요소해석 방법 25
제 2 절 유한요소해석 프로그램 조사 및 분석 28
1. 후판낙하충격해석 프로그램 28
2. 열해석 및 열응력해석 프로그램 33

제 4 장 후판낙하충격, 열해석 및 열응력특성 비교검증 37
제 1 절 해석대상 운반용기의 개요 37
1. 구조 및 기능 37
2. 운전특성 42
3. 운반내용물의 개요 43
4. 운반용기 재료의 기계적 성질 43
제 2 절 운반용기 유한요소 모델링 56
1. 후판낙하충격해석 모델링 56
2. 열해석 및 열응력해석 모델링 61
제 3 절 후판낙하충격 해석결과 65
1. 후판의 수직낙하 67
2. 후판의 수평낙하 72
3. 후판의 경사낙하 72

제 4 절 열해석 및 열응력 해석결과 78
1. 열해석 82
2. 열응력해석 93

제 5 장 유한요소해석 코드의 사용절차 95
제 1 절 후판낙하 충격해석 코드의 사용절차 95
제 2 절 열 및 열응력 해석 코드의 사용절차 99

제 6 장 결론 108

참 고 문 헌 110

부 록
1-1 후판낙하충격해석 LS-DYNA3D 전산입력자료 112
1-2 후판낙하충격해석 ABAQUS/Explicit 전산입력자료 116
1-3 열해석 LS-DYNA3D 전산입력자료 118
1-4 열해석 ABAQUS/Standard 전산입력자료 123
1-5 열응력해석 LS-DYNA3D 전산입력자료 127
1-6 열응력해석 ABAQUS/Standard 전산입력자료 132

그 림 목 차

그림 3.1-1 두 물체의 충돌 I 18
그림 3.1-2 두 물체의 충돌 II 22
그림 4.1-1 KSC-4 운반용기 개략도 40
그림 4.1-2 탄성 · 소성 개념도 45
그림 4.1-3 탄성 · 완전소성 개념도 45
그림 4.2-1 저차 선형 솔리드요소 57
그림 4.2-2 운반용기 유한요소모델(후판의 수직낙하) 58
그림 4.2-3 운반용기 유한요소모델(후판의 수평낙하) 58
그림 4.2-4 운반용기 유한요소모델(후판의 경사낙하) 59
그림 4.2-5 열해석 및 열응력해석에 사용될 수 있는 모델 62
그림 4.2-6 KSC-4 운반용기의 단면형상 63
그림 4.2-7 운반용기의 열해석 모델 64
그림 4.2-8 열해석 유한요소 모델 64
그림 4.3-1 후판 수직낙하 LS-DYNA3D 해석결과 68
그림 4.3-2 후판 수직낙하 ABAQUS/Explicit 해석결과 69
그림 4.3-3 후판 수직낙하 해석결과 에너지 선도 70
그림 4.3-4 후판 수직낙하 해석결과 충격력 선도 71
그림 4.3-5 후판 수평낙하 LS-DYNA3D 해석결과 (stress contour) 73
그림 4.3-6 후판 수평낙하 ABAQUS/Explicit 해석결과 (stress contour) 74
그림 4.3-7 후판 수평낙하 해석결과 충격력 선도 75
그림 4.3-8 후판의 45° 경사낙하 LS-DYNA3D 해석결과 76
그림 4.3-9 후판의 45° 경사낙하 ABAQUS/Explicit 해석결과 77
그림 4.4-1 운반용기의 열해석 순서도 80
그림 4.4-2 KSC-4 운반용기의 800℃ 화재시험 결과 81
그림 4.4-3 LS-DYNA3D 열해석 결과 I 85
그림 4.4-4 LS-DYNA3D 열해석 결과 II 86
그림 4.4-5 ABAQUS/Standard 열해석 결과 I 87
그림 4.4-6 ABAQUS/Standard 열해석 결과 II 88
그림 4.4-7 LS-DYNA3D와 ABAQUS/Standard의 열해석 결과비교 89
그림 4.4-8 초기조건에 의한 해석 후 운반용기의 반경방향 온도분포 90
그림 4.4-9 800℃ 30분 가열 후 운반용기의 반경방향 온도분포 91
그림 4.4-10 6시간 자연냉각 후 운반용기의 반경방향 온도분포 92
그림 4.4-11 800℃ 30분 화재조건 후 온도차이에 의한 열응력 해석결과 94

그림 5.1-1 후판낙하 충격해석 procedure 98
그림 5.2-2 열해석 procedure 105
그림 5.2-3 열응력 해석 procedure 106
그림 5.2-4 운반용기 열해석에 사용될 수 있는 모델 107
그림 6-1 열해석 결과비교 109

표 목 차

표 2.1-1 일광조건 6
표 2.1-2 IAEA ST1과 10 CFR Part 71에 기술된 온도조건 6
표 2.1-3 정상운반조건과 가상사고조건에 대한 하중조합 8
표 2.2-1 Regulatory Position에 의한 응력 제한 12
표 2.2-2 정상운반조건과 가상사고조건에 대한 응력 제한 14
표 2.2-3 정상운반조건하에서 304 stainless steel의 온도에 따른 응력한계 15
표 2.2-4 가상사고조건하에서 304 stainless steel의 온도에 따른 응력한계 16
표 4.1-1 운반용기의 치수 및 중량 41
표 4.1-2 핵연료의 일반적인 제원, 재질 44
표 4.1-3 핵연료를 장전한 KSC-4 운반용기의 중량과 무게중심 50
표 4.1-4 SA 240 Type 304 stainless steel의 온도에 따른 기계적 물성값 51
표 4.1-5 Lead의 온도에 따른 기계적 물성값 52
표 4.1-6 Resin(NS-4-FR)의 온도에 따른 기계적 물성값 53
표 4.1-7 Balsa wood의 기계적 물성값 54
표 4.1-8 Red wood의 기계적 물성값 54
표 4.1-9 각 재질의 온도에 따른 열적 물성값 55
표 4.2-1 후판낙하 충격해석조건 60
표 4.3-1 내부쉘과 외부쉘의 최대응력 66
표 4.4-1 열해석 결과 84
표 4.4-2 열응력해석 결과 93
표 5.1-1 후판낙하 충격해석 LS-DYNA3D 입력화일 예 96
표 5.1-2 후판낙하 충격해석 ABAQUS/Explicit 입력화일 예 97
표 5.1-3 열해석을 위한 하중조건의 입력화일 예 101
표 5.1-4 온도에 따른 열적 물성값의 입력화일 예 102
표 5.1-5 열응력해석을 위한 입력화일 예 103
표 5.1-6 온도에 따른 기계적 물성값의 입력화일 예 104
표 6-1 후판낙하 충격해석 결과 최대응력의 비교 109

제 1 장 서 론

공학, 농학, 의학 등 기초과학뿐만 아니라 산업, 의료, 유전공학 및 원자력발전소 등으로 그 이용범위가 다양한 방사성 물질은 도로차량, 철도차량, 선박 및 항공기를 이용하여 운반되고 있으며 이에 따른 운반위험이 계속적으로 증가하고 있는 추세에 있어서 세계적으로 심각하게 취급되는 문제이다. 최근 들어 방사선물질의 사용량이 급증하고 있으며 이에 따른 방사성물질의 국내 및 국제적 운반이 급격히 증가하는 추세에 있으며 이러한 방사성물질의 광범위한 사용은 필수적으로 이들 물질의 운반을 필요로 한다.

운반 중에 사고로 인하여 방사성물질 운반용기가 파손되어 방사성물질이 누설 또는 누출될 경우에는 운반에 직접적으로 종사하는 작업자는 물론, 인근 일반인 및 주변환경에 심각한 영향을 초래하고 사회적 물의를 야기할 수 있기 때문에 운반용기의 설계 및 제작, 방사성물질의 포장작업 및 운반작업 등 운반을 위한 일련의 과정마다 철저한 안전성 확인을 거쳐서 예상되는 사고에서도 안전성이 확보되도록 하여야 한다.

방사성물질 운반에서 제일 중요한 안전성 확보수단은 운반용기의 건전성에 있다. 따라서 국내뿐만이 아니라 세계각국의 운반규정 및 IAEA운반규정에는 운반용기가 갖추어야 할 요건을 정하고 있으며 한번에 많은 방사성물질을 운반하는데 사용되는 B형 운반용기 및 핵분열성물질 운반용기에 대하여는 정부의 설계승인을 얻도록 규정하고 있다. 이들 요건중에는 정상운반조건과 가상사고조건의 시험에서 그 건전성을 유지하여야 하는데 이들 시험조건 중에서 운반용기를 9m 높이에서 견고한 바닥면 위에 떨어뜨리는 낙하충격시험(Free drop impact test)과 운반용기를 1m 높이에서 강철봉 위에 떨어뜨리는 타격충격시험(Puncture) 그리고 무게 500kg, 크기 1m×1m의 연강판이 9m 높이에서 운반용기 위로 낙하하는 시험과 800℃의 화재조건에서 30분을 유지시키는 시험이 있다.

이들 운반용기의 시험조건에 대한 입증은 시험에 의한 방법과 해석에 의한 방법 등이 있으나, 시험에 의한 방법은 비용이 매우 많이 소요되기 때문에 사업자는 해석적 방법을 선호하게 되는데 국내에는 이들 시험조건에 대한 해석방법이 정립되어 있지 않다. 운반되는 방사성물질의 종류가 방사성동위원소에서부터 사용후핵연료에 이르기까지 다양하고 이들을 운반하는 운반용기의 형태도 원통형, 장방형 등 다양하기 때문에 이들 시험의 실제적 조건을 해석에 적용하여야 하며 신뢰성 있는 결과를 얻을 수 있어야 하고 검증

되어야 한다.

지금까지의 연구개발 실적을 살펴보면 국내의 경우 운반용기의 낙하충격, 열해석 및 열응력해석에 대하여 유한요소법에 기초한 상용프로그램을 이용하여 해석하는 단계이나 가상사고시험조건에 대한 해석이론이 정립되어 있지 않고 또한 상용프로그램에 대한 신뢰성이 검증되어 있지 않는 등 아직까지 신뢰성 있는 해석기법이 개발되어있지 못한 실정이다. 국외의 경우에는 이들 시험조건에 대한 유한요소해석 및 관련 해석코드를 개발하는 등의 연구가 진행중이나 실제적 시험조건을 묘사한 해석기법이 개발되어 있지 못한 실정이다.

따라서, 사업자가 이용한 충격시험, 화재시험에 대한 해석방법이 적합하고 신뢰성이 있는지 여부를 평가하기 위한 안전해석 검증기술을 개발할 필요성이 있다. 운방용기의 낙하충격 및 화재조건에 대한 안전해석 검증기술 개발로 운반용기의 안전성을 확보할 수 있고, 설계 및 제작기술의 자립화로 운반용기의 국산화 및 원자력산업의 활성화를 꾀할 수 있으며, 일반국민의 원자력에 대한 불안감 해소 및 원자력산업에 대한 신뢰성을 향상시킬 수 있다. 또한, 운반용기 안전성 심사에 사용함으로써 운반용기 안전성을 확보하고, 사업자에게 신뢰성 있는 해석기법을 제공할 수 있으며, 표준화된 안전해석 검증기술을 심사에 사용함으로써 효율적 및 신뢰성 있는 규제업무를 수행할 수 있다.

본 연구에선 운반용기의 가상사고조건중에서 후판낙하충격, 열해석 및 열응력해석에 대해 연구하였다. 먼저 IAEA[1]와 Regulatory Guide 7.8[2]에 규정되어 있는 후판낙하충격, 열해석 및 열응력 규제요건을 분석하였고, Regulatory Guide 7.6[3]에 규정되어 있는 후판낙하충격, 열해석 및 열응력 해석요건을 분석하였다. 운반용기의 후판낙하충격, 열해석 및 열응력 해석방법으로 유한요소법을 이용하였다. 본 연구에 사용될 유한요소해석 프로그램을 결정하기 위해 해석코드인 ANSYS, NASTRAN, DYTRAN, ABAQUS, LS-DYNA3D를 조사 및 분석하여, 운반용기의 후판낙하충격, 열 및 열응력 해석에 적합한 해석코드를 선택하였다. 본 연구에 채택된 해석코드로는 후판낙하충격에 대해선 LS-DYNA3D와 ABAQUS/Explicit가 사용되었고, 열해석 및 열응력해석에는 ANSYS, LS-DYNA3D, ABAQUS/Standard가 사용되었다. 열 및 열응력에 대한 유한요소해석후 코드의 신뢰성과 운반용기의 열적인 특성을 비교검증하기 위해 운반용기 축소모델 화재시험값[12]과 비교하였다.

본문은 크게 4개 부분으로 나누어 기술하였다. 제2장에서는 후판낙하충격

, 열해석 및 열응력에 관련된 요건을 분석하였고, 제3장에서는 해석방법과 후판낙하충격, 열 및 열응력 해석을 위한 유한요소프로그램들을 조사 · 분석하였다. 제4장에서는 후판낙하충격, 열 및 열응력 해석에 대한 상세사항을 기술하였고, 운반용기 모델링 및 LS-DYNA3D와 ABAQUS의 결과들을 비교 및 분석하였다. 제5장에서는 유한요소해석 코드의 사용절차에 대해 기술하였다. 부록에는 LS-DYNA3D와 ABAQUS의 전산입력자료를 첨부하였다.

제 2 장 요 건 분 석

제 1 절 후판낙하충격, 열해석 및 열응력 규제요건

운반용기의 낙하충격 및 타격충격에 대한 규제요건인 IAEA Safety Standards Series No. ST-1[1]과 Regulatory Guide 7.8[2]을 분석하여 기술하였다. IAEA Safety Standards Series No. ST-1에는 운반용기의 초기주변온도 규정, 초기내부압력 규정, 자유낙하 규정, 관통조건 규정을 명시하고 있으며, 초기 주변온도는 정상운반조건과 가상사고 운반조건 모두 -40℃에서 38℃로 규정하고 있다. 초기 내부압력은 최대 정상 운반압력 700kPa로 규정하고 있으며 자유낙하시의 높이는 9m로 규정하고 있다. 또한 Regulatory Guide 7.8에도 정상 운반조건에 대한 규정과 가상사고 조건에 대한 규정이 명시되어 있다. 후판낙하충격 및 800℃ 화재조건에 대한 각 규정의 세부적인 내용을 살펴보면 다음과 같다.

1. IAEA Safety Standards Series No. ST-1

가. 후판낙하충격시험

낙하 III에 해당하는 후판낙하충격시험은 시편 위 9 m에서 500 kg의 물체를 낙하시켜 최대손상이 발생하도록 바닥면 위에 시편을 위치하게 하여 동적분쇄(dynamic crush) 시험을 하여야 한다. 물체는 1m×1m의 연강판이고 수평으로 떨어지게 하여야 한다. 낙하높이는 판의 아랫면에서 시편의 최고점까지로 측정되어야 한다. 시편이 위치하는 바닥면은 시편의 충격으로 인한 변위 또는 변형에 대한 저항의 증가로 시편에 대한 손상이 심각하게 커지지 않도록 편평한 수평면이어야 한다.

나. 열시험

시편은 Table 1에서 명시한 일광을 받고, 방사성 내용물로 인한 포장물내의 내부발생열의 최대설계속도일 때 38℃의 주위온도조건에서 열적 평형상태에 있어야 한다. 연속적인 포장물 응답의 평가가 고려되기 때문이라면 이 매개변수는 시험 전 및 시험 동안 다른 값을 가지도록 선택적으로 허용된다. 열시험은 다음과 같이 구성되어야 한다.

(a) 표면흡수계수 0.8 또는 특정화염에 노출된다면 포장물이 가지는 것으로 증명될 수 있는 값을 가지고 최소 평균 화염방사계수가 0.9, 평균온도 800℃를 주기 위한 충분히 정적인 주위조건에서 탄화수소연료/공기 화염으로 적어도 대등한 열유출을 제공하는 열적 환경에서 30분간 시편이 완전히 휩싸이는 노출

(b) 시편의 온도가 어디서든 감소되고 또는 초기 정상상태조건에 근접하는 것을 보장하기 위해 표 2.1-1에서 명시한 일광조건 및 방사성 내용물로 인한 포장물내의 내부발생열의 최대설계속도일 때 38℃의 주위온도 조건에서 충분한 기간 동안 시편의 노출. 연속적인 포장물 응답의 평가가 고려되기 때문이라면 이 매개변수는 시험 전 및 시험동안 다른 값을 가지도록 선택적으로 허용된다.

2. 10 CFR Part 71

10 CFR Part 71에도 위와 같은 규정들이 명시되어 있다. 또한 가상사고 조건에 대해 자유낙하시험과 관통시험이 화재시험전에 선행되어야 한다고 기술되어 있다. 그런 까닭에 열해석을 할 경우의 운반용기는 자유낙하와 관통시험에 의해 손상을 입은 운반용기로 시험을 해야한다.

그러나, 본 연구에서는 손상을 입지 않은 운반용기가 열해석에 사용하였다. 그 이유는 9m 자유낙하는 운반용기 본체에 영구변형을 일으키지 않기 때문이다. 충격후에 운반용기는 초기 형상으로 되돌아 간다. 바스켓은 어떤 부분에선 영구변형을 일으키지만 이것은 매우 작은 부분에 국한된 국부변형이고 그 크기는 작다. 충격완충체는 충격후의 변형이 충격완충체가 절연체의 기능을 방해하지 않는 것으로 생각되기 때문이다. 관통시험에 의해 운반용기 본체는 국부적으로 함몰되나 그 범위가 국부적이고 제한적이기 때문에 관통시험에 의한 효과가 크지 않다. 이러한 것들은 열전달에 큰 영향을 미치지 않으므로 손상을 입지 않은 모델이 사용되어도 큰 지장이 없다.

또한, IAEA Safety Series No. ST-1과 10 CFR Part 71에서는 정상운반중 최외각 사람이 접촉되는 표면에서 온도가 80℃를 넘지 않도록 규정하고 있다. 단, 운반용기 표면의 온도가 80℃를 의미하는 것은 아니다. 운반용기는 충분한 포장이 되어서 운반되기 때문에 최외곽 포장물의 표면온도를 의미한다.

표 2.1-1 일광조건

표면의 형태 및 위치	1일당 12시간의 일광량(W/m^2)
수평으로 운반되는 편평한 면 - 기저부 - 기타 표면	 없음 800
수평으로 운반되지 않는 편평한 면 - 각 표면	200 (a)
곡면	400 (a)

(주) a. 흡수계수를 채택하고 인근 물체로부터 반사가능성의 영향이 무시된다면, 선택적으로 sine 함수를 이용할 수 있다.

표 2.1-2 IAEA ST1과 10 CFR Part 71에 기술된 온도조건

구 분		주변온도	Insolation	붕괴열
정상 운반	고온조건	38℃ (311K)	V	최대
	저온조건	-40℃ (233K)		최대
	최저온도	-40℃ (233K)		없음
가상 사고	초기온도	38℃ (311K)	굴곡진 표면 400 W/m^2 수직 표면 200 W/m^2	최대
	30분 가열조건	800℃ (1073K)		최대
	냉각조건	38℃ (311K)	굴곡진 표면 400 W/m^2 수직 표면 200 W/m^2	최대

3. Regulatory Guide 7.8

정상운반조건과 가상사고시의 일반적인 초기 조건들에 대한 규정이 명시되어 있다. 각각에 대한 초기상태의 하중을 중첩하여 운반용기에 적용해야 한다. 정상운반조건과 가상사고에 대한 자세한 사항을 표 2.1-3에 정리하였다.

(1) 초기 운반용기 온도는 정상상태로 본다. 정상운반 상태일 경우와 가상사고 상태일 경우의 초기 온도는 -20 F(-29℃)~100 F(38℃)로 규정한다.
(2) 핵연료 붕괴열은 초기조건의 하나로 규정된다. 정상사고 조건과 가상사고 조건은 -20 F (-29℃)의 온도에서 붕괴열이 없다고 고려해야 한다.
(3) 정상사고 조건과 가상사고 조건을 평가하는데 사용되는 내부 압력은 고려되는 다른 초기 조건들과 모순이 없어야 한다.
(4) 핵연료 집합체안의 모든 압력측정 게이지들은 운반용기의 최대 압력을 결정하는데 고려되어야 한다.

가. 후판낙하충격

9m 높이에서 무게 500kg, 크기 1m×1m의 연강판을 운반용기위로 낙하시켜야 한다.

나. 800℃ 화재사고조건

(1) 방사율 0.9로 30분 동안 800℃의 복사조건에 노출된 운반용기의 구조해석이 수행되어야 한다.
(2) 초기상태는 38℃의 주위온도, 최대 일사량 조건, 최대 붕괴열, 최대 내압과 초기응력을 포함하는 상태이다.
(3) 9m 자유낙하와 1m puncture가 가해진 운반용기에 위 조건들이 적용되어야 한다. 그러나, 9m 자유낙하에 의한 충격완충체의 변형은 절연체역할을 하는 충격완충체의 열전도도를 거의 변화시키지 않고, 1m puncture는 열해석에 큰 영향을 미치지 않기 때문에 무시한다.

표 2.1-3 정상운반조건과 가상사고조건에 대한 하중조합

구 분		초 기 조 건							
		주변온도(°F)		일사량		붕괴열		최대 내압	최대 무게
		100	-20	최대	0	최대	0		
정상 운반 조건	고온조건(주변온도 38℃)			○		○		○	
	저온조건(주변온도-40℃)				○	○		○	
					○		○	○	
	최소 외부압력(0.5 atm)	○		○		○		○	
			○		○	○		○	
	진동 & 충격 (일반적으로 운송중 발생하기 쉬운 하중)	○		○		○		○	
			○		○	○		○	
			○		○		○	○	
	0.3m 자유낙하	○		○		○		○	○
			○		○	○		○	○
			○		○		○	○	○
가상 사고 조건	9m 자유낙하	○		○		○		○	○
			○		○	○		○	○
			○		○		○	○	○
	1m Puncture	○		○		○		○	○
			○		○	○		○	○
			○		○		○	○	○
	800℃ 화재조건	○		○		○		○	

제 2 절 후판낙하충격, 열해석 및 열응력 해석요건

본 절에서는 Regulatory Guide 7.6[3]에 기술되어 있는 낙하충격 및 타격충격에 대한 해석요건을 분석하였다. Regulatory Guide 7.6에 기술되어 있는 해석요건에는 정상 및 가상사고조건에 대한 응력한계값들이 기술되어 있어 사고후의 건전성을 평가하는 기준을 제시하고 있다. Regulatory Guide 7.6에 기술되어 있는 세부적인 내용은 다음과 같고 표 2.2-1에 정리하였다. 또한 표 2.2-3와 2.2-4에는 정상운반조건과 가상사고조건하에서의 SA 304 스테인리스강의 온도에 따른 응력한계값을 정리하였다.

1. 용어의 정의

가. 응력강도(Stress intensity), S_n,

최대전단응력의 두배로 정의되고 세 개의 주응력들중 임의의 2개의 주응력의 가장 큰 대수 차와 같다.

나. 1차응력(Primary stress)

하중, 압력, 자중으로 인한 Force와 Moment의 등가법칙을 만족하는 응력이다. 1차응력들은 자신에 의한 것이 아니다. 왜냐하면 국부적인 항복과 비틀림은 단면에서 평균응력을 감소시키지 않기 때문이다.

다. 2차응력(Secondary stress)

자신에 의한 응력이고, 열응력은 2차응력으로 분류된다. 왜냐하면 하중에 의해 제어받기보다는 스트레인에 의해 제어받기 때문이고, 이러한 응력들은 항복이 일어날 때 서서히 감소하기 때문이다.

라. 굽힘응력(Bending stress)

자기 자신에 의한 것이고 2차응력으로 분류된다. 접합부에서의 응력은 1차응력으로 분류된다. 사각 쉘과 평판의 접합부에서의 굽힘응력은 1차응력으로 분류된다.

마. 1차 막응력(Primary membrane stress), P_m,

요소단면의 두께에 걸친 평균 1차응력이다. 1차굽힘응력(Primary bending

stress)은 요소단면의 두께에 걸쳐서 일반적으로 선형적인 1차응력들의 성분이다.

바. 교번응력(Alternating stress intensity), S_{alt},

모든 가능한 응력상태중에서 절대값의 최대값을 1/2로 나눈 값이다.

2. Regulatory guide 7.6

운반용기의 구조적 건전성을 비교하기 위한 응력제한치는 Regulatory Guide 7.6[3]의 각 Regulatory Position 별로 표 2.2-1와 같다. 각 Regulatory Position 1, 2, 3, 4, 5, 6, 그리고 7에서 제시된 규정은 다음과 같다.

가. Regulatory Position 1

허용응력을 설정하는데 선택해야 하는 재료 특성값들을 선정하는 기준을 제시하였다. 이 기준에 따른 재료특성값들을 4장에 기술하였고 이 값들을 구조해석의 허용응력들을 정의하는데 사용하였다.

나. Regulatory Position 2

"정상운송조건에서 일차막응력에서 구한 응력 강도의 값은 설계응력강도 S_m보다 작아야 하고 일차막응력과 일차굽힘응력의 합으로 구한 응력강도는 $1.5S_m$보다 작아야 한다."는 요구사항이 제시되어 있다.

다. Rcgulatory Position 3

정상운송조건에서 발생한 응력에 대한 피로해석을 수행하여야 한다고 규정되어 있다.

(1) 교번응력 (Alternation stress intensity), S_{alt}를 구한다. 정상운송 Cycle 동안 각 부위에서의 전응력상태(Total stress state)를 고려하여 최대범위의 1/2 값을 구한다.

(2) Cycle수가 10^6 이하인 반복하중에 대해서는 ASME Code의 Sec. III Appendix I[16]의 설계피로곡선을 사용해야 한다. 하중이 10^6 Cycle을 초과할때에는 피로강도 그 이상의 감소를 고려해야 한다.

라. Regulatory Position 4

정상운송조건에 대한 요구사항이 기술되어 있다. "정상운송조건하에서 일차응력과 이차응력을 합한 범위에서 구한 응력강도 S_m은 3 S_m보다 작아야 한다. 이 응력강도의 계산요령은 2 S_{alt}의 계산절차와 유사하나 피로해석에서 고려한 국부응력집중의 효과는 이 응력범위에 포함시키지 않는다."고 제시되어 있다.

마. Regulatory Position 5

"격납용기의 좌굴은 정상운송이나 가상사고조건하에서 발생하지 않아야 한다는 규정이 제시되어 있다. 설계형태와 하중에서의 편심도를 고려하는 적절한 인자들을 사용해야 하고, 탄소성 좌굴해석(Buckling analysis)으로 구조적 불안정이 일어나지 않음을 보여야 한다. 그러나 그 용기는 이 Guide에 주어진 선형 탄소성해석에 대한 조항을 또한 만족시켜야 한다." 각 부분품의 특별한 형태나, 재질에 대하여 해당되는 구속조건에 따라 계산된 임계좌굴하중치(Critical buckling load)보다 작용하중이 작아야 위에 제시된 좌굴기준을 만족한다고 제시되어 있다.

바. Regulatory Position 6

"가장사고 조건하에서 일차막응력으로부터 구한 응력강도의 값이 2.4 S_m과 0.7 S_u의 두 값중 작은 값보다 작아야 한다"는 규정이 제시되어 있다.

사. Regulatory Position 7

"초기상태, 제작상태, 정상 운송상태, 그리고 가상사고조건사이의 극한 전응력강도범위(Extreme total stress intensity range)는 사용재료의 허용피로곡선에서 구한 10 Cycle에서의 S_a값의 수정값(고온에서 탄성계수의 감소를 고려하여 수정)을 2배한 값보다 작아야 한다고 제시되어 있다. 구조적 불연속점에 대한 적절한 응력집중계수를 사용해야 하고, 이 계수의 값을 모르는 구역에서는 그 값을 4로 사용해야 한다."고 기술되어 있다.

표 2.2-1 Regulatory Position에 의한 응력제한

Regulatory position	적 용 조 건	응 력 제 한
1	Normal & Accent	Sm:ASME sec.3 Class 1 Components Sa:ASME sec.3 Class 1 Appendix 1 Su:ASME sec.3 Class 1 Appendix 1 Sy:ASME sec.3 Class 1 Appendix 1
2	Normal	$P_m < S_m$ $P_m + P_b < 1.5\ S_m$
3	Normal	Total stress range in normal operating cycle S_{alt} $S_{alt} = S_a \times E_a / E_d$ Stress concentration factors shell be used
4	Normal	① $S_n = 2\ S_{alt} < 3\ S_m$ ② If 3 S_m limit is exceded, following condition are met. $S_{n'}=S_n-(S_c+S_{ub}) < 3\ S_m$ for stainless steel $K_e=1.0$ for $S_{n'} = 3S_m$ $K_e=1.0+10/3\times(S_{n'} / 3S_m-1)$ for $3\ S_m < S_{n'} < 5.1\ S_m$ $K_e=10/3$ for $S_{n'} < 5.1\ S_m$ $S_{n'}= K_e\times S_a$ only for $S_y/S_u<0.8$

표 2.2-1 Regulatory position에 의한 응력제한(계속)

Regulatory position	적용 조건	응 력 제 한
5	Normal & Accident	Buckling of containment vessel should not occur.
6	Accident	$P_m < 2.4\ S_m$ or $0.7\ S_u$ $P_m + P_b < 3.6\ S_m$ or S_u
7	Normal & Accident	Total stress intensity range 2 S_a at 10 cycle.

S_y : Yield strength
S_u : Ultimate tensile strength
S_m : Design stress intensity
P_m : Primary membrane stress
P_b : Primary bending stress
S_a : Stress value by fatigue curve
S_c : Stress due to stress concentration
S_{alt} : Alternating stress intensity
E_a : The modulus of elasticity in the analysis
E_d : The modulus of elasticity in the fatigue curve
S_n : Primary and secondary stress
S_{tb} : Stress due to thermal bending
$S_{n'}$: Calculated stress intensity

표 2.2-2 정상운반조건과 가상사고조건에 대한 응력 제한

Design Requirement	Normal Transport Condition	Hypothetical Accident Condition
Lifting Device	Minimum safety factor of the three against yielding	Failure must not impair shielding
Tie - down Device	Withstanding a static force on a direction of -Vertical component 2g -Transverse component 5g -Traveling component 10g	Failure must not impair shielding
Initial Ambient Temperature	Between -40 ℃ and 38 ℃	Between -40 ℃ and 38 ℃
Initial Internal Pressure	Max. Normal operating Pressure	Max. Normal operating Pressure
Free Drop	0.3 m Drop	9 m Drop
Penetration, Puncture	3.2 cm dia. 6 kg Steel bar dropped from 1m height	1m Drop onto 15 cm dia. 20 cm long steel bar
Stress Intensity	$P_m < S_m$ $P_m + P_b < 1.5\ S_m$ $P_m + P_b + Q < 3\ S_m$	$P_m < 2.4\ S_m$ or $0.7\ S_u$ $P_m + P_b < 3.6\ S_m$ or S_u

Ref.) Regulatory Guide 7.6

표 2.2-3 정상운반조건하에서 304 stainless steel의 온도에 따른 응력한계[12), 22)]

Calculated Stress Type	Upper Limit	Numerical Limit (MPa) for Metal Temp.,℃, Not Exceeding								
		40 ℃	100 ℃	150 ℃	200 ℃	250 ℃	300 ℃	325 ℃	350 ℃	375 ℃	400 ℃
Primary Membrane Stress Intensity	S_m	138.03	138.03	138.03	129.98	122.04	114.97	112.03	112.03	109.97	107.03
Primary Membrane +Primary Bending Stress Intensity	1.5 S_m	207.09	207.09	207.09	195.02	183.05	172.46	168.05	168.05	165.00	160.59
Primary+Secondary Stress Intensity Range	3.0 S_m 3.0 S_m	414.08	414.08	414.08	389.95	366.11	344.92	336.09	336.09	329.91	321.08
Maximum Total Stress Intensity Range	S_a of 10^6 Cycles	170.69	167.26	163.73	161.08	157.55	154.02	152.84	151.66	150.49	148.33

Ref.) ① S_m : Design stress intensity
② S_a : Alternating strength

표 2.2-4 가상사고조건하에서 304 stainless steel의 온도에 따른 응력한계[12)]

Calculated Stress Type	Upper Limit	Numerical Limit (MPa) for Metal Temp.,℃, Not Exceeding								
		40℃	100℃	150℃	200℃	250℃	300℃	325℃	350℃	375℃	400℃	425℃
Primary Membrane Stress Intensity	2.4 S_m	331.28	331.28	331.28	311.96	292.93	275.96	268.89	268.89	263.89	256.83	251.92
Primary Membrane +Primary Bending Stress Intensity	3.6 S_m	496.88	496.88	496.88	467.94	439.29	413.88	403.29	403.29	395.93	385.34	377.88
Primary+Secondary Stress Intensity	S_u	516.99	485.01	454.99	444.98	438.02	438.02	438.02	438.02	438.02	434.98	433.01

Ref.) ① S_m : Design stress intensity

② S_u : Ultimate strength

제 3 장 해석방법 및 유한요소해석 프로그램

제 1 절 해 석 방 법

사용후핵연료 운반용기의 정상운반조건이나 가상사고조건하에서의 거동 예측은 설계 시 필수적이다. 후판낙하 충격해석방법에는 충돌이론에 의한 해석방법과 유한요소해석 방법이 있고, 특히 유한요소해석 방법은 비선형거동의 세부적인 사항을 얻을 수 있기 때문에 안전성분석을 위한 후판낙하 충격해석에 적합하다. 충돌이론에는 Newton의 충돌이론[6], Hertz의 충돌이론[6] 등이 있다. 운반용기의 열해석 방법에는 전도, 대류, 복사 열전달식에 의한 정상상태 열해석이 가능하지만 800℃ 화재조건과 같은 해석에는 많은 제약조건을 수반하기 때문에 운반용기 각 부분의 세밀한 온도분포를 구하기 위해선 유한요소해석을 통한 방법이 바람직하다.

1. 충돌이론 및 열해석 이론

가. Newton의 충돌 이론[6]

뉴튼의 제 2 법칙에서 운동방정식은 $F=m\frac{dV}{dt}$으로서 나타낸다. 이것은 「힘이 가해질 때 물체 m에는 가속도 $\frac{dV}{dt}$가 생긴다」를 타나내고 있다. 이 운동 방정식의 양변을 $t=t_2$ 까지 적분하면,

$$\int_{t_1}^{t_2} m\frac{dV}{d-t}\,dt = mV(t_1) = \int_{t_1}^{t_2} F dt = I \qquad (3.1\text{-}1)$$

가 된다. I는 시간 t_1에서 t_2까지 사이의 임펄스(Impulse)로 정의되어 있다. 이것도 「임펄스가 가해진 결과, 운동량이 변화한다」는 것을 나타내고 있다. 또한, 임펄스는 힘의 작용시간을 $\Delta t=t_1-t_2$, 그 사이의 평균된 힘을 $\overline{F}$로서, 식 (3.1-10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$I = \int_{t1}^{t2} F dt = \overline{F}\cdot\Delta t = mV(t_2) - mV(t_1) \qquad (3.1\text{-}2)$$

임펄스의 식을 사용하여 물체가 충돌할 때의 충격력을 계산할 수 있다.

나. Hertz의 충돌 이론[6]

서로 충돌하는 물체에 작용하는 힘, 충돌의 계속 시간 등을 구하는 경우에 Hertz의 이론[6]을 사용할 수 있다. 1881년에 H.Hertz에 의해서 처음으로 구해진 2개의 물체 접촉중에 생기는 응력분포는 그 후 많은 실험에서 증명되었다.

그림 3.1-2와 같이 서로 마주 보고 운동하고 있었던 2개의 물체가 충돌하여 접촉된 순간에 압축력이 상호의 공에 작용했다고 한다. 물체 m_1, m_2의 운동 방정식은,

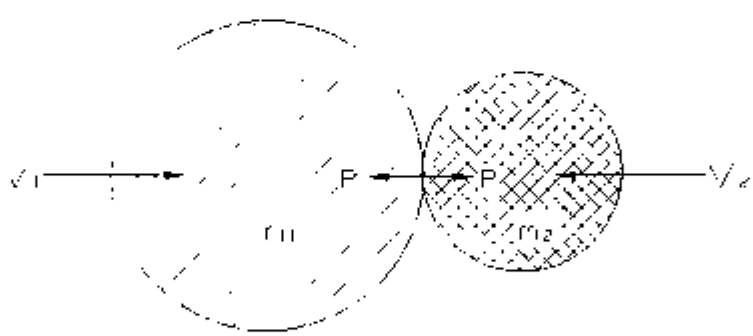


그림 3.1-1 두 물체의 충돌 I

$$m_1 \frac{dV_1}{dt} = -P \ , \quad m_2 \frac{dV_2}{dt} = -P \qquad (3.1\text{-}3)$$

으로 표현된다. α를 접촉점에 생긴 국부 변형에 의해 두 공이 접근하는 거리로 하면, 근접속도 $\dot{\alpha}$ 및 가속도 $\ddot{\alpha}$는

$$\dot{a} = \dot{V}_1 - \dot{V}_2 = \ddot{a} = \dot{V}_1 - \dot{V}_2 \qquad (3.1\text{-}4)$$

으로 주어진다. 식 (3.1-12)에서

$$\ddot{a} = \dot{V}_1 - \dot{V}_2 = -\frac{P}{m_1} + \left(-\frac{P}{m_2}\right) = -n_1 P \qquad (3.1\text{-}5)$$

$$n_1 = \frac{m_1 + m_2}{m_1 m_2} \qquad (3.1\text{-}6)$$

충격의 작용 시간(접촉 시간)이 공의 최저차 주기 보다 충분히 길면(진동의 영향을 고려하여야 한는 겨우는 공의 최저차 주기가 공의 접촉 시간보다 긴 경우이다) 진동 영향을 무시할 수 있다. 지금, a와 P 사이에 정적으로 접촉하는 2구체의 압력문제로서 풀었다.

$$P = n a^{\frac{3}{2}} \qquad (3.1\text{-}7)$$

의 관계가 성립한다고 가정한다. 다만 n은 다음식으로 정의된다. R_1, R_2는 공 1, 2의 반경, 또 E_1, E_2 및 v_1, v_2를 공 1, 2의 탄성계수, 포아송비로 하면,

$$\begin{aligned} k_1 &= (1 - \nu_1^2)/\pi E_1 \\ k_2 &= (1 - \nu_2^2)/\pi E_2 \\ k_3 &= (1 - \nu_3^2)/\pi E_3 \end{aligned} \qquad (3.1\text{-}8)$$

$$n = \sqrt{\frac{16}{9\pi^2}} \times \frac{R_1 R_2}{(k_1 + k_2)^2 (R_1 + R_2)} \qquad (3.1\text{-}9)$$

식 (3.1-14)는 다시 쓰면,

$$\ddot{a} = -n n_1 a^{\frac{3}{2}} \qquad (3.1\text{-}10)$$

가 된다. 식 (3.1-19)의 양변에 $\dot{a}$를 곱해 적분하면

$$\frac{d(\dot{a})^2}{2} = nn_1 a^{\frac{3}{2}} da \qquad (3.1\text{-}11)$$

또 적분을 계속하면 다음식을 얻는다.

$$\frac{\dot{a}^2 - V^2}{2} = -\frac{2}{5} nn_1 a^{\frac{5}{2}} \qquad (3.1\text{-}12)$$

V는 충돌 전의 두 공의 접근속도이다. 식 (3.1-12)에서 $\dot{a}=0$이라면 압축력이 최대가 될 때의 근접거리가 얻어진다. 즉

$$a_1 = \left(\frac{5}{4} \frac{V^2}{nn_1} \right)^{\frac{2}{5}} \qquad (3.1\text{-}13)$$

다음에 충격의 작용 시간을 구한다. 식 (3.1-21)에서

$$\dot{a}^2 = V^2 - \frac{4}{5} nn_1 a^{\frac{5}{2}} \qquad (3.1\text{-}14)$$

$$\dot{a} = \frac{da}{dt} = \sqrt{V^2 - \frac{4}{5} nn_1 a^{\frac{5}{2}}} \qquad (3.1\text{-}15)$$

$$\therefore \; dt = \frac{da}{\sqrt{V^2 - \frac{4}{5} nn_1 a^{\frac{5}{2}}}} \qquad (3.1\text{-}16)$$

여기에서, $\frac{a}{a_1} = x$ 일 때 식 (3.1-22)을 사용하면 윗식은

$$dt = \frac{a_1}{V} = \frac{dx}{\sqrt{1 - x^{\frac{5}{2}}}} \qquad (3.1\text{-}17)$$

라고도 나타낸다. 최대 변형은 전체 접촉 시간의 1/2이 되는 곳에서 일어나기 때문에 충격작용 시간은,

$$t = 2\int_0^{t/2} dt = \frac{2a_1}{V} \int_0^1 \frac{dx}{\sqrt{1 - x^{5/2}}} = 2.94 \left(\frac{5}{4nn_1} \right)^{2/5} V^{-\frac{1}{5}} \qquad (3.1\text{-}18)$$

또, 최대 압축력은 식 (3.1-22)을 식 (3.1-16)에 대입하면,

$$P_{\max} = na_1^{3/2} = n\left(\frac{5V^2}{4nn}\right)^2 \times \frac{10}{3} = n^{\frac{2}{5}}\left(\frac{5}{4}V^2\frac{m_1 m_2}{m_1+m_2}\right)^{2/5} \quad (3.1\text{-}19)$$

과 같이 유도할 수 있다.

다. 질점계모델 이론[6)]

물체를 마루에 떨어뜨릴 때의 파괴나 자동차등의 충돌 사고 등 충격 문제를 이미지로 해서 모델화하는 경우 간단한 예에서는 그림 3.1-3에 나타내는 스프링-질점계[6)]로 바꿔생각하면 알기 쉽다.

그림 3.1-3(a)의 경우는 질량 m의 물체가 높이 h에서 떨어져 바닥에 충돌하는 예이다. 물체의 스프링 하단이 바닥에 접촉한 순간을 t=0으로 하고, 이 때의 질점 위치를 기준으로 좌표 x를 하향으로 하면 질점 m의 진동방정식은 다음식으로 표현된다.

$$m\ddot{x} + kx = mg \quad (3.1\text{-}29)$$

일반해는 다음과 같다.

$$x(t) = A\cos\omega t + B\sin\omega t + \frac{mg}{k} \quad (3.1\text{-}30)$$

$$\omega^2 = \frac{k}{m} \quad (3.1\text{-}31)$$

로 주어지며, 초기조건 $x(0)=0$, $\dot{x}(0)=\sqrt{2gh}$에서 상수 A, B가 정해져 다음 식을 얻는다.

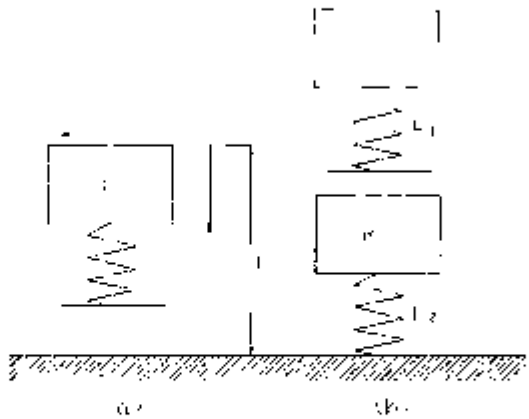


그림 3.1-2 두 물체의 충돌 II

$$x(t) = \frac{2gh}{\omega}\sin\omega t - \frac{g}{\omega^2}\cos\omega t = \frac{g}{\omega^2} = \sqrt{\frac{2gh}{\omega^2} + \left(\frac{g}{\omega^2}\right)^2}\sin(\omega t - \phi) + \frac{g}{\omega^2} \tag{3.1-32}$$

여기서,

$$\tan\phi = \sqrt{\frac{g}{2h\omega^2}}, \quad \frac{g}{\omega^2} = \frac{mg}{k} = \delta_{st} \tag{3.1-33}$$

속도 및 가속도는

$$\dot{x}(t) = \sqrt{\frac{2gh}{\omega^2} + \left(\frac{g}{\omega^2}\right)^2}\{\omega\cos(\omega t + \phi)\} \tag{3.1-34}$$

$$\ddot{x}(t) = -\omega^2\sqrt{\frac{2gh}{\omega^2} + \left(\frac{g}{\omega^2}\right)^2}\sin(\omega t + \phi) = -g\sqrt{\frac{2h}{\delta_{st}} + 1}\sin(\omega t - \phi) \tag{3.1-35}$$

처럼 된다. 실용상의 설계에서는 충돌할 때 발생하는 최대 충격력 혹은 최대 가속도(단위 질량당의 느낌의 최대 충격력으로 생각한다)가 유용하다. 단위 질량당의 충격력의 최대값 F_{max}는,

$$F_{max} = \left[\left| \frac{\ddot{x}(t)}{g} \right| \right]_{max} = \sqrt{\frac{2h}{\delta_{st}} + 1} \qquad (3.1\text{-}36)$$

처럼 된다. 즉, 물체의 낙하 높이 h와 정적 변형 δ_{st} 비의 관계로 주어진다.

라. 열해석 이론

(1) 전도 열전달

전도(conduction)는 입자간의 상호작용에 의해서 보다 에너지가 많은 입자에서 에너지가 적은 입자로 전달되는 것이다. 전도는 고체, 액체, 기체에서 모두 일어난다. 기체와 액체에서 일어나는 전도는 분자들이 멋대로 움직이는 과정에서 이들의 충돌과 확산에 의한 것이다. 고체의 경우에 전도는 격자 내부 분자의 진동과 자유전자의 에너지 전달에 의한 것이다. 예를 들어, 따뜻한 방에 있는 깡통 속의 차가운 음료는 전도에 의해 방안의 열이 알루미늄 깡통으로 전달되어 결국 실내 온도로 데워지게 된다.

전도에 의한 열전달률은 물체의 기하학적 형상, 두께, 재질 그리고 물체를 통한 온도차에 따라 다르다. 단열재가 두꺼울수록 열손실은 적어지며 용기가 있는 방의 온도가 낮을수록 뜨거운 용기는 열을 보다 많이 손실한다. 용기가 크면, 표면적이 증가하고, 따라서 열손실률도 증가한다.

두께 Δx, 표면적 A, 온도차 ΔT인 벽을 고려하면 벽에서의 온도차 ΔT 또는 열전달 방향에 수직한 면적 A가 두 배가 되면 열전달률 $\dot{Q}$는 두배가 되지만, 벽 두께가 두배가 되면 열전달률은 반이 된다. 따라서 평면층을 통과하는 열전달률은 층의 온도차와 열전달 면적에 비례하지만 층의 두께에는 반비례한다. 여기서 비례상수 k는 물질의 열전도도이며 재질이 열을 전도할 수 있는 능력을 나타낸다.

$$\dot{Q}_{cond} = k A \frac{\Delta T}{\Delta x} \qquad (3.1\text{-}37)$$

(2) 대류 열전달

대류(convection)는 고체면과 유동하는 인접한 액체 또는 기체 사이에서 발생하는 열전달이며 전도와 유체운동이 복합적으로 영향을 주게 된다. 유체운동이 빠르면 대류열전달도 많아지게 된다. 유체운동이 없는 상태에서는 고

체면과 유체 사이에는 순수한 전도만 있게 된다. 고체면과 유체 사이에 존재하는 유체운동은 열전달을 강화시키지만, 열전달률을 산출하는데 많은 어려움을 제공한다.

뜨거운 물체의 표면에 찬 공기를 불어서 냉각하는 과정에서, 처음에 에너지는 물체에 인접한 공기층에 전도에 의해 전달된다. 이 에너지는 대류에 의해 표면으로부터 옮겨지는데, 이것은 공기분자의 임의운동에 의한 전도와 표면 근처의 뜨거운 공기를 이동시켜 찬 공기로 이를 대신하는 덩어리 또는 대규모의 공기운동의 복합적인 영향에 의한 것이다.

팬(fan), 펌프, 바람과 같은 외부의 영향에 의해 표면 위로 유체가 강제로 유동되는 경우의 대류를 강제대류라 한다. 반면 유체 내부의 온도차로 인해 밀도의 변화가 생기고 이로 인한 부력에 의해 유체유동이 발생할 때, 이를 자연대류라 한다. 대류열전달률은 단순히 온도차에 비례하며, 다음과 같이 Newton의 냉각법칙으로 표시된다.

$$\dot{Q}_{convection} = hA(T_s - T_\infty) \qquad (3.1\text{-}38)$$

(3) 복사 열전달

복사(radiation)는 물질이 원자나 분자의 구조가 변하면서 전자파 또는 광자의 형태로 방출되는 에너지이다. 전도나 대류와는 달리 복사 열전달에서는 중간 매개체가 필요 없다. 복사에 의한 에너지 전달은 가장 빠르며(광속), 진공을 통과하여도 약해지지 않는다.

열전달에서는 온도에 의해서 물체가 복사열을 방출하는 열복사를 다룬다. 이것은 x-선, 감마선, 극초단파, 라디오파, TV파와 같이 온도와 관계없는 전자파와는 다른 것이다. 절대영도보다 높은 온도의 모든 물체는 복사열을 방출한다.

복사는 체적현상이며, 모든 고체, 액체, 기체는 정도의 차이는 있으나 복사열을 방사, 흡수, 그리고 통과시킨다. 방사율 ε, 표면적 A 그리고 절도온도 T_s인 물체가, 이보다 큰 주위온도 T_{surr}에 놓였을 경우, 두 표면에서 순 복사열전달은 다음과 같다. 여기서 $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} W/m^2 \cdot K^4$으로 Stefan-Boltzmann 상수를 나타낸다.

$$\dot{Q}_{emit} = \varepsilon \sigma A (T_s^4 - T_{surr}^4) \qquad (3.1\text{-}39)$$

2. 유한요소해석 방법

본 연구에서 사용된 유한요소법을 이용한 해석방법은 다음과 같다. 유한요소법은 3가지 방법으로 분류된다. 변위가 독립변수인 경우 이 방법을 변위법이라고 하고, 힘 또는 응력이 독립변수인 경우 응력법이라고 부른다. 또 다른 하나는 변위와 응력을 독립변수로 취급하는 방법인데 이 방법을 하이브리드(Hybrid)법 이라고 말한다. 기존의 유한요소 프로그램은 거의가 변위법을 사용하고 있다. 변위법에서 요소내의 변위변화는 절점변위의 항으로 가정한다. 따라서, 요소내에서의 변형률과 응력을 절점변위의 항으로 표현할 수 있다. 그러면 이들 운동방정식은 시간영역에서의 2차 상미분방정식이 된다. 이 방정식들은 직접적분기법 또는 중첩기법을 이용하여 풀 수 있다. 모드중첩기법에서 고유벡터는 변환좌표계에서 최초절점변위를 분리하기 위해서 사용된다. 운동방정식의 정확한 해를 얻기 위해서 요구되는 모드수를 알고 있다면 모드중첩기법은 아주 효과적일 수 있다. 왜냐하면 고차모드는 무시될 수 있기 때문이다.

직접적분기법에서 운동방정식은 최초의 좌표계에서 직접 구할 수 있다. 직접적분기법은 Implicit법과 Explicit법으로 분류할 수 있다.

Implicit법은 $t+\Delta t$ 에서의 운동방정식을 구함으로써 $t+\Delta t$ 가 유도된다. Explicit법에서는 시간 t 에서의 운동방정식을 구함으로써 $t+\Delta t$ 에서의 변위를 구할 수 있다. Implicit의 가장 큰 장점은 Implicit 해의 알고리즘이 무조건적으로 안정하다는 것이다. 그러나, 시간 간격이 너무 크면 누적오차(Truncation error)가 축적되고 전달될 것이다. 이에 반하여 Explicit 해의 알고리즘은 단지 조건적으로 안정하며 Explicit 프로그램은 안정성을 보증할 수 있도록 충분히 작은 시간간격을 선택하게 된다. 이러한 단점은 집중질량법이 사용되고 감쇠가 무시되는 경우에 Explicit 알고리즘이 매트릭스 역변환을 필요로 하지 않는 특징에 의해서 상쇄가 된다.

Explicit 동적해석 방법은 매우 많은 작은 시간증분을 효과적으로 수행하는 개념에 기본을 두고 있다. 이것은 Explicit 중앙차분적분법칙을 사용함으로써 달성된다.

불연속모델에 대한 동적평형 방정식은 작용된 외력과 요소내 내력 그리고 절점가속도로 정의되며 (3.1-37)식과 같이 표현될 수 있다.

$$M\ddot{u} = F - I \tag{3.1-40}$$

여기서, M은 집중질량 대각행렬, F는 작용된 외력벡터, I는 내력벡터, 그리고 $\ddot{u}$는 절점가속도이다. Explicit 법의 효율성은 집중질량 대각행렬의 사용에 있다. 집중질량 대각행렬를 이용하면 증분의 시작점에서의 가속도는 (3.1-38)식과 같이 표현할 수 있다.

$$\ddot{u}^{(i)} = M^{-1}\ (F^{(i)} - I^{(i)}\ ) \tag{3.1-41}$$

여기서, 첨자 i는 시간증분을 나타낸다.

물체의 운동방정식은 중앙차분법을 이용하여 적분된다. 즉,

$$\dot{u}^{(i+1/2)} = \dot{u}^{(i+1/2)} + \frac{\Delta t^{(i+1)} + \Delta t^{(i)}}{2}\ddot{u}^{(i)} \tag{3.1-42}$$

$$u^{(i+1)} = u^{(i)} + \Delta t^{(i+1)}\ \dot{u}^{(i+1/2)} \tag{3.1-43}$$

물체의 운동상태는 $\dot{u}^{(i+1/2)}$ 와 $\ddot{u}^{(i)}$의 값을 구함으로써 운동상태가 진전하게 된다.

Explicit법은 많은 작은 시간증분을 이용하여 시간전체를 통하여 적분된다. 이것은 중앙차분 연산자가 단지 조건적으로 안정하기 때문이다. 그리고, 안전성의 제한치는 감쇠(Damping)가 없는 경우에 계내에서의 가장 높은 고유치(Eigenvalue)의 항으로 (3.1-41)식과 같이 주어진다.

$$\Delta t \le \frac{2}{\omega_{max}} \tag{3.1-44}$$

여기서, ω_{max}는 최고차 고유진동수 이다.

Explicit 동적해석에서 대부분의 계산시간은 절점 내력들을 조합하여 각 요소내의 내력을 계산하는데 사용된다. 이들 내력들은 각 요소내의 응력으로부터 결정된다. 요소내의 응력의 결정을 요소계산(Element calculation)이라 말한다. 요소계산은 각 재료에서의 변형률 증가의 계산을 필요로 한다. 이들 변형률 증가로부터 새로운 응력들을 계산하게 된다.

Explicit 동적해석은 극도로 불연속적인 내용을 해석하는데 효과적이다. 특히, 변형되는 물체사이의 접촉조건들은 Explicit 알로리즘에서 아주 쉽게 공식화 된다. Explicit법은 반복계산과 강성행렬을 필요로 하지 않는다. 반복이 없기 때문에 절차와 관련한 공차도 없다.

본 보고서에선 수송용기의 동적거동을 규명하기 위해 사용된 유한요소해석 프로그램은 ABAQUS/Explicit[10] 와 LS-DYNA3D[11] 상용코드이다. 이 두 코드는 견고한 표면상에 낙하하여 충격을 받는 수송용기의 동적거동을 계산하는데 요구되는 특징들을 가지고 있다. 알고리즘은 앞에서 설명한 바와 같이 단지 조건적으로 안정하기 때문에 안정한 해를 보증하기 위해서 시간증분(Time increment)은 프로그램내에서 자동으로 계산되어 설정된다. 재료 라이브러리(Material library)는 탄소성재료, 고무류 재료 그리고 짖뭉개지는 형태(Crushable form)의 재료를 포함하고 있으며, 또한 사용자가 사용재료 모델을 입력할 수 있는 서브루틴의 추가가 가능하다. 이 두 코드가 수송용기의 해석에 적합한 가장 큰 특징은 충격접촉면을 효과적으로 취급할 수 있다는데 있다. 이 두 코드는 물체의 접촉면을 따라서 미끄러짐이 가능하도록 접촉-충격알고리즘을 가지고 있다. 또한, 견고한 표면을 해석적으로 취급할 수 있는 강체표면 경계조건을 가지고 있는데 강체표면은 모델에서 지정된 절점들이 침투할 수 없는 평면이다.

유한요소 동적해석은 매우 많은 양의 계산결과 들을 산출해 낸다. 그리고, 일반적으로 이러한 계산결과 들을 유용하게 이용하는 측면에서 그래픽 능력과 관계될 수 있다. ABAQUS/Explicit과 LS-DYNA3D는 미리 정해준 계산 시간간격에서 파일을 생성하도록 규정된다. 이들 파일은 시간이력에 따른 에너지분포, 절점에서의 변위, 속도, 가속도 시간이력 그리고 요소내에서의 응력, 변형률시간이력을 그림으로 그리는데 필요한 정보를 포함한다. 또한, 파일은 변형된 모양 및 윤곽선을 그리는데 필요한 정보도 포함하게 된다.

제 2 절 유한요소해석 프로그램 조사 및 분석

1. 후판낙하충격해석 프로그램

가. DYTRAN

MSC.DYTRAN[9]는 91년 6월에 공식 상용화 된 패키지로써 구조물과 유체 및 상호간의 혼합 구조 그리고 각종 부품의 동적, 비선형 거동을 해석하는 3차원 해석 프로그램으로서, Explicit Time Integration을 사용하며 재질과 형상의 비선형성에 대한 시뮬레이션을 가능케 해준다. 성형 회사 및 일반 기계산업 분야뿐만 아니라 우주 항공 그리고 자동차 산업 분야에 대한 적용이 가능하다. Dytran은 대변형, 복잡한 비선형 문제 그리고 유체와 구조물의 혼합구조 등에서 Short, Transient 동적 문제의 해석에 특히 안정적이며, 대표적인 응용 분야는 아래와 같다.

- Air Bag Analysis
- Sheet Metal Forming Analysis
- Weapons Design Calculations
- Bird Striking on Aerospace Structure
- Response of Structures to Explosive and Blast loading
- High-Velocity Penetration
- Ship Collision
- Ship Grounding
- Sloshing

MSC.DYTRAN은 동적인 구조 해석을 해결하기 위해 고전적인 Explicit 유한 요소 기술을 사용한다. 아울러, 이것은 폭 넓고 다양한 현실의 엔지니어링 문제 즉, 3차원 접촉 및 슬라이딩 효과 를 풀기위해 필요한 모든 요소 타입과 재료 모델을 포함한다. 이들 문제의 범주 속의 전형적인 적용은 구조적 충돌 해석, 낙하실험 시뮬레이션, Tri-Hub Burst Containment Analysis 및 Sheet Metal Stamping이다.

9m 충격해석을 위해 필요한 접촉조건은 DYTRAN 에서 다음과 같이 정의 할 수 있지만, LS-DYNA3D에서 좀 더 다양한 접촉조건을 구현할 수 있다.

- Master-Slave Contact
- Surface To Surface
- Grid Points To Surface
- Single Surface Contact
- Adaptive (Eroding) Contact
- Coulomb Friction

나. ABAQUS/Explicit

상용유한요소 프로그램인 ABAQUS[10]는 1978년 미국의 HKS(Hibbit, Karlsson & Sorensen Inc.)에서 다양한 공학문제를 해석하기 위하여 개발하기 시작하였는데 이것이 오늘날의 ABAQUS가 된 것이다. ABAQUS의 적용분야는 실로 광범위하여서 일일이 그 예를 나열할 수는 없지만, 국내외적으로 많이 적용되는 분야는 자동차, 타이어, 중장비, 우주 항공, 조선, 해양구조물, 원자력 발전소의 구조 해석, 토목, 건축, 전기, 가구 등의 분야에서 국내외적으로 많이 쓰이고 있다. 20년간 기계해석분야에서 그 정확성과 신뢰성을 바탕으로 하여 독보적인 위치를 차지하고 있는 이러한 ABAQUS의 가장 큰 장점은 까다로운 비선형 문제를 해결하는데 있어서 강력하면서도 쉽게 해를 얻을 수 있다는 것이다. ABAQUS는 크게 해석모듈의 차이점으로 ABAQUS/Standard와 ABAQUS/Explicit로 나눌 수 있는데 ABAQUS/Standard는 내연적 시간적분법(Implicit time integration)을 이용한 해석모듈로 선형 정적 응력/변위해석, 고유치 좌굴해석, 동적 응력/변위 문제의 해를 구할 수 있는 반면에, ABAQUS/Explicit는 외연적 시간적분법(Explicit time integration)을 이용한 모듈로 Explicit 시간적분법을 이용한 고체 및 구조물의 비선형 과도 응답의 동적 해석을 수행한다. 이 모듈은 최신 Supercomputer system 을 잘 활용하기 위해 완전히 Vector화 되어있다. 강력한 연결 능력, 신뢰도, 큰 모델에서의 계산 효율 등으로 인해 불연속적으로 비선형 응답을 나타내는 준 정적 응용분야에서도 매우 효과적으로 사용할 수 있다.

(1) ABAQUS의 특징

ABAQUS는 범용(General Purpose) 유한요소 개념의 소프트웨어 Package이며 완전히 Module화 되어 있다. ABAQUS의 유한요소 Library는 어떠한 형상도 기술할 수 있을 정도로 충분히 광범위하며 이미 증명된 최신의 요소기술을 사용한다. ABAQUS는 Material Model에 대해서도 광범위하게 사용할 수 있다.

등방성 재질의 선형 탄성 응답만을 구하는 제한적인 것이 아니라, ABAQUS을 이용하면 작거나 혹은 큰 변형율에 대하여 저온 및 고온에서, 그리고 낮거나 높은 변형도(Strain Rate)에서 등방성 및 이방성 재질의 응력 및 변형을 모델로 만들 수 있다. 그리고 금속뿐 아니라 고무, Polymer(탄성 및 점탄성을 갖는), 철근 콘크리트, 잘 부스러지거나 탄력이 있는 Form, 토

양과 바위같은 지질학적 재질도 해석이 가능하다.

ABAQUS는 설계가 모듈화 되어 있기 때문에 요소, 재질, 해석과정, 하중 작용순서 등의 물리적으로 의미 있는 조합이 가능하고 이것이 바로 ABAQUS가 다른 코드들과 비교하여 독특하고 강력할 수 있는 점이다. 어떠한 재질도 임의의 요소와 결합할 수 있고(특히 복합재료의 경우) 따라서 임의의 하중 조건하에서 모델의 한 부분을 형성할 수 있다. ABAQUS에서는 모델 크기에 대한 인위적 제약이 없다. 이와 같은 특징에 의해서 많은 비선형을 요구하는 운반용기의 자유낙하충격 해석에서 좋은 결과값은 얻을 수 있다.

(2) 구성

(가) ABAQUS/Standard : 범용 유한요소 해석 Module로서 ABAQUS/Explicit 시간 적분을을 이용한 비선형 동적응답 해석과 ABAQUS Aqua 및 ABAQUS/Usa에서 다루는 문제를 제외한 모든 능력을 보유한다.

(나) ABAQUS/Post : 이것은 ABAQUS와 상호 연관된 후처리부이다. 여기서는 변형된 형상 윤곽, 시간변화 및 변수와 변수간의 그림을 나타내 준다. Animation 과정이 쉽게 만들어진다. ABAQUS/Post는 예를 들어, 윤곽 그림을 인식하고 재질이나 다른 불연속을 밝히며 접촉 압력과 같은 변수를 윤곽 그림으로 나타낼 수 있도록 ABAQUS의 모든 기능을 지원한다.

(다) ABAQUS/Post : 항상 ABAQUS 해석 Module과 함께 제공된다. 다른 Workstation이나 다른 그래픽 장치에서 이용하기 위해 별도로 구입할 수도 있다. 이러한 경우 서로 다른 시스템간의 해석 결과 File을 옮겨주기 위한 변환 프로그램이 함께 제공되어야 한다.

(라) ABAQUS/Pre : 이것은 ABAQUS를 위한 대화형 전처리기로서 5.3 Version 부터 제공되는 것이다. 이 제품은 완전한 형상 정보생성과 자동으로 mesh를 생성해 준다. 이것은 PDA Engineering Inc의 P3 PATRAN에서 제공받은 기술을 바탕으로 한다. ABAQUS/Pre는 다른 모든 Module과 독립적으로 설치된다.

다. LS-DYNA3D

시간에 따른 하중의 변화를 가지고 있는 문제에 대한 해석을 할 수 있는 (Dynamic transient analysis를 Real time 영역에서 가능) LS-DYNA3D[11]는 1976년 Lawrence Livermore National Laboratory에서 개발된후 계속적인 발전을 이루어 현재는 버전 960까지 출시되었다. LS-DYNA3D는 고무, 토양, 복합재 등 과 같이 비선형성이 강한 재료와 변형이 심한 구조물의 비선형 해석이 가능하다.

3차원 구조물의 물리적인 동역학적 거동을 Simulation 하기 위한 기능 및 응용분야는 여러 가지가 있으나 그중 주로 쓰이는 분야를 간단히 살펴보면 아래와 같다.

(1) 자동차 및 부품관련

자동차 제조업체 및 부품업체에서 차량충돌 및 안정성 평가 그리고 각종 Simulation을 위해 사용하고있다.

- Accelerometors
- Airbags
- Hybrid III Dummy models
- Inflator model
- Pretentioners
- Retractors
- Seatbelts
- Sensors

(2) Metal forming

재료의 변형, 응력집중, 찢김현상, 주름현상 등을 정확히 예상 할 수 있다. 950 Version은 Implicit code가 있어 Spring back을 Dyna를 이용하여 해결 할 수 있다.

- Deep drawing
- Forging
- Hydroforming
- Metal Stamping
- Multi-Stage processes
- Tailored blank

(3) 국방/무기/조선 관련

폭발 , 군사용 무기 및 항공기 설계분야에 사용할 수 있다.

- Explosives
- Penetration
- Underwater simulations
- Waste containment

· Weapon design

(4) 항공/중공업 관련

우주산업 및 항공 분야의 발달과 더불어 이 분야의 전통적인 해석 프로그램과 더불어 새로운 분야의 해석에 이용할 수 있다.

· Blade containment · Bird strike
· Extraterrestrial landing delivery systems
· Failure analysis

(5) 전자/공구/일반기계 관련

스포츠 용품, 공구, 일반기계, 전자제품, 휴대폰등 Drop/Impact/Contact test를 필요로 하는 분야에 해석 tool로 이용되고 있다.

· Baseball bats · Can and shipping container design
· Cell phones · Electronic component design
· Golf clubs · Hand tools

(6) 건설/토목 관련, 기타

포장도로 해석 및 설계, 건축물 지진해석, 도로 Guardrail 의 내충돌성 평가 그리고 해양구조물의 여러 종류 해석에 응용된다

· Glass forming · Plastics, Mold, and blow forming
· Earthquake engineering · Cvil Engineering

위와 같이 Explicit에 바탕을 둔 LS-DYNA3D는 운반용기의 충격거동과 같은 비선형 해석하기에 다른 해석코드(ANSYS, NASTRAN)보다 적당하다. 특히, LS-DYNA3D는 Constraint & Penalty Methods가 Main Algorithm으로 사용하고 있으며 40여종류의 Contact options 을 가지고 있다. Element & Material은 물론 Contact 또한 빠르고 정확한 계산을 지향하는 프로그램의 취지에 부합하도록 개발해오고 있다.

2. 열해석 및 열응력해석 프로그램

가. ANSYS

ANSYS[7]는 1970년 공학분야의 제반 문제를 컴퓨터를 이용하여 해석하기 위해 John Swanson박사가 개발한 범용 유한요소해석 프로그램으로 지금은 ANSYS, Inc.에서 개발과 유지보수를 계속하고 있다. 최초에는 주로 전력산업과 기계산업에 이용하기 위해 개발된 제품이었으나, 현재에는 자동차, 전자, 조선, 항공우주, 화학, 의학에 이르는 거의 모든 분야에서 요구되는 유한요소해석에 사용되고 있다. ANSYS는 구조, 열전달, 유체, 전자기장, 압전, 음향, 연성해석 등의 해석기능뿐만 아니라 솔리드 모델링 등을 포함한 전처리기, 후처리기, 최적설계 등의 기능을 보유하고 있고 또한, 풍부한 기능으로 초보자에서부터 전문가에 이르는 광범위한 사용자층의 요구를 만족시키는 프로그램이다.

지금까지 10,000개 이상의 기업체 및 연구기관에서 이용하고 있으며, 12,000개 이상의 대학에서 교육용으로 활용되고 있는 등 전 세계적으로 수만명의 엔지니어가 ANSYS를 사용하고 있다. 특히, 국내 대다수의 대학, 대학원에서 교육용 소프트웨어로 ANSYSTM가 채택되어 사용되고 있으며, 초보자도 쉽게 따라할 수 있는 한글판 ANSYSTM 활용안내서 시리즈가 출간됨으로써 국내 사용자층이 급격하게 늘어나고 있다.

(1) ANSYS의 특징

(가) 전 · 후처리기(Pre/Post-processor)

ANSYS는 타 프로그램과는 달리 사용하기 편한 그래픽 사용자 인터페이스(GUI)로 구성되어 있는 전처리기(Pre-processor)와 후처리기(Post-processor)가 기본적으로 내장되어 있어 모델링 과정, 해석 과정, 결과처리 과정을 위하여 두 가지 이상의 프로그램을 오가며 작업할 필요없이 효율적으로 유한요소해석 전 과정을 수행할 수 있다.

(나) 장비 독립적인 소스 코드

ANSYS는 SGI, HP, IBM, Digital, SUN 과 같은 엔지니어링 워크스테이션과 Intel, Digital 호환 퍼스널 컴퓨터에 이르기까지 시스템의 종류에 상관없이 구동되며, 특히 이름은 같지만 워크스테이션용 소스 코드(Source Code)와 퍼스널 컴퓨터용 소스 코드가 원천적으로 다른 일부 타 프로그램과는 달리 ANSYS는 기종별로 동일한 소스 코드로 작성되어 있기 때문에 기종에 상관없는 동일한 사용자 인터페이스를 가지고 있으며, 또한 이 기종간의 데이터 호환에도 전혀 문제가 발생하지 않는다. 즉, 퍼스널 컴퓨터에서 작성한 데이터를 아무런 수정없이 슈퍼컴퓨터에서도 작동시킬 수 있다.

(다) 광범위한 연성해석(Coupled-Field Analysis) 가능

ANSYS는 열-구조, 자기장-구조, 전-자기-유동-구조, 유동-구조 등과 같은 광범위한 여러 가지 물리적 현상이 복합된 연성 문제들을 해석할 수 있다. APDL을 이용한 유연한 모델링 및 해석 기능 ANSYS는 APDL(ANSYS Parametric Design Language)을 해석 전과정에서 지원함으로써 보다 유연한 작업이 가능하도록 해 주며, 이러한 기능을 이용하여 특정 과정의 매크로 수행이 가능하다.

나. NASTRAN

MSC.NASTRAN[8]은 미 항공우주국(NASA)에서 우주선의 구조 해석을 위해 개발한 구조 해석 프로그램에서 출발하여 지난 30 여년간의 연구 개발을 통하여 대다수 산업 분야의 표준 해석 시스템으로 자리매김한 범용 유한요소 해석 프로그램이다.

NASTRAN은 Static, Dynamic, Nonlinearm Thermal, Optimization등을 해석 영역으로 갖는 범용 유한요소 해석 Program으로 100만 Line이상으로 구성되어 있는 FORTRAN Program이다.

NASTRAN은 Module 이라고 하는 수많은 Building Block으로 구성되어 있으며, 한 개의 Module은 형상, Matrix 조합, 경계조건 부과, 행렬 연산, Output 계산, Print 등등의 기능을 담당하는 Subroutine 들로 구성되어 있고, 이 Module은 Direct Matrix Abstraction 이라고 하는 DMAP Program에 의하여 Control 된다. 각 해석 Type 은 수 백 개 내지는 수천 개의 DMAP 명령어의 집합체로 이루어져 있다. 일단 해석 Type이 결정되면 거기에 맞는 DMAP 명령어가 그 해석 기능을 수행하기에 필요한 Module에 지시를 하게 된다. NASTRAN은 Sparse Matrix Algorithms을 이용하여 대형 문제를 빠르고도 Disk Space를 적게 사용하면서 풀 수 있다.

해석 영역으로는 선형정적해석(Linear Statics), Inertia Relief해석(Linear Statics with Inertia Relief), 고유진동해석 (Normal Modes), 좌굴해석(Buckling)등을 할 수 있다. 또한, 열전도 해석, 자연대류 해석, 강제대류 해석, 열하중이나 열경계조건이 있는 해석을 할 수 있고, 비선형 해석으로는 재료비선형 거동해석(Hyperelasticity for large strain, Nonlinear elasticity, Thermo-elasticity, Viscoelasticity, Creep, Viscoelasticity combined with elasticity)과 기하학적 비선형 거동해석(Large deformations, Large strain for hyperelastic material, Nonlinear buckling, Snap-through analysis (post-buckling), Follower forces, Nonlinear normal modes) 그리고 경계비선형해석(Gaps opening and closing with/without Friction, Enforced deformation)을 할 수 있다.

다. ABAQUS/Standard & LS-DYNA3D

본 연구의 열해석 및 열응력해석방법 연구에 사용된 ABAQUS와 LS-DYNA3D는 충격해석뿐만 아니라 열해석 및 열응력해석이 가능하다. ABAQUS와 LS-DYNA3D는 단지 응력해석만 하는 것이 아니라, 전도 및 대류, 열전달, 물질의 확산, 소음, 압전현상 해석등도 각각 독립적으로, 혹은 응력해석과 순차적으로 연성되거나 완전히 연성(Fully Coupled)된 상태에서 해석이 가능하다. 특히 LS-DYNA3D는 열역학적인 Contact문제도 처리할 수 있기 때문에 운반용기의 열해석 유한요소프로그램으로 적합하다. 두 코드의 열해석에 대한 세부적인 사항은 4장과 5장에서 자세히 기술하였다.

제 4 장 후판낙하충격, 열해석 및 열응력특성 비교검증

제 1 절 해석대상 운반용기의 개요

본 절에서는 앞서 제시한 해석코드의 신뢰성을 분석하였는데 해석모델로써 KSC-4 운반용기에 대해서 해석을 수행하였고, 가상사고조건중 후판의 9m 자유낙하충격해석과 열해석 및 열응력해석을 수행하였다. 후판낙하충격해석은 수직낙하, 수평낙하, 45° 경사낙하로 구분하여 해석하였으며, 열해석 및 열응력 해석은 단면모델에 대해서 해석하였다. 해석결과는 LS-DYNA3D와 ABAQUS/Explicit을 비교 및 분석하였으며, 1/3축소모델시험[12]의 결과값과 비교하였다.

1. 구조 및 기능

KSC-4 운반용기는 4개의 PWR 사용후핵연료 집합체를 운반할 수 있는 운반용량을 갖는 용기로써, 이 운반용기는 뚜껑을 포함한 본체(Cask body)와 충격완충체(Impact Limiter) 및 결속장치(Tie-down Device)로 구성된다. 방사선 차폐체로는 레진(Resin)과 납(Lead)이 사용되며 충격완충체로는 발사우드(Balsa wood)와 레드우드(Red wood)가 사용된다. 빈 운반용기의 KSC-4의 중량은 약 34톤이고 핵연료집합체 4개가 장전된 운반용기의 중량은 37톤이다. 또한 전체 길이는 5.6m, 운반용기의 길이는 4.8m, 폭은 1.2m이다. 용기에 대한 치수, 중량 및 재료를 표 2.3-1에 정리하였다. 또한 운반용기의 전체적인 개략도를 그림 4.1-1에 나타내었다.

가. 운반용기 본체(Cask body)

운반용기의 본체는 핵연료를 담고 지지하는 4개의 핵연료장전통(Fuel-basket)과 이들을 고정시켜주는 장전통 고정판(Basket fixing disc)과 스테인리스강으로 된 원통형 쉘, 감마선차폐체, 중성자차폐체 그리고 차폐와 밀봉을 함께 담당하는 뚜껑(Lid)등으로 구성된다. 스테인리스강으로 된 원통

형 쉘은 내부공간을 형성하는 두께 25.4 mm의 내부 쉘(Inner shell), 중성자 차폐체(Resin)를 보호하고 주변의 임의 하중으로부터 운반용기를 일차적으로 보호하고 오염을 방지하기 위한 10mm의 외부 쉘(Outer shell)로 구분된다. 이 쉘들은 각각 감마선차폐체와 중성자차폐체를 감싸는 역할도 수행하며, 운반용기 상부의 본체프랜지(Body flange)와 바닥판재(Bottom plate)에 용접으로 고정된다.

운반용기의 상하부에는 원통형 트러니온(Trunnion)이 각각 1쌍씩 있어 운반용기를 인양하거나 운반시 차량에 고정시킬 때 사용한다. 또한, 운반용기의 외부 쉘과 내부 쉘(Inner shell)사이에는 전열핀을 부착하여 내부로부터 발생되는 열이 방출되도록 되어있다.

(1) 핵연료 장전통(Fuel-basket)

핵연료 장전통은 모두 4개의 정사각형 적육면체로 되어있으며, 14×14, 16×16, 17×17등의 PWR 핵연료집합체 4개를 장전할 수 있다.

(2) 감마선 및 중성자 차폐체

내부 쉘의 안쪽에 납을 주조하여 채워진 감마선차폐체는 주로 조사된 핵연료에서 방출되는 감마선을 차폐하기 위한 것이다. 납은 99.9% 이상의 순도를 가지며, 납이 주조될 운반용기 내외부의 온도를 조절할 수 있는 히터를 갖춘 주조설비를 이용하여 용융온도, 주입시간, 냉각시간 및 방식 등을 적절히 제어하여 납의 순도를 유지시키고, 응고수축을 최소화하여 차폐성능을 보장해야 한다. 온도에 따른 납의 기계적 성질들을 표 4.1-5에 정리하였다.

내부 쉘과 외부 쉘 사이의 공간에 Resin(NS-4-FR)을 주조하여 채워진 중성자차폐체는 주로 조사된 핵연료에서 방출되는 중성자를 차폐하기 위한 것이다. Resin은 주 구조재인 스테인리스강에 비해 강도가 훨씬 작으므로 온도에 따른 특성변화를 무시한다. Resin의 상온에서의 기계적 특성을 표 4.1-6에 정리하였다.

(3) 뚜껑(Lid)

운반용기의 뚜껑은 방사선 차폐, 핵연료 장전 및 인출시 개폐 그리고 내부 공간과의 격납(Containment), 기밀유지, 냉각수공급 및 배기등의 중요 기능을 가지고 있다. 핵연료 상부에서 나오는 방사선을 차폐하기 위하여 155mm 두께의 납차폐체와 33mm의 레진으로 되어있다. 뚜껑에 모두 2개의 원주형구조의 스테인레스강 Housing이 있으며, 첫째는 급속연결장치 밸브기

능으로 Coupling이 부착되어 있다. 둘째는 내부공간에 물을 채울 때 혹은 예비용의 Shield plug로 Housing 기능을 한다. 뚜껑에는 밀봉과 격납을 적절하게 유지시키도록 모두 16개 볼트가 일정한 간격으로 위치하여 있다. 그리고 볼트자리 바로 인접한 내부에 기밀유지를 위하여 두 개의 O-ring gasket가 부착되도록 하였다.

(4) 커플링(Coupling)

금속연결장치인 커플링(Coupling)은 운반용기의 하부와 상부인 뚜껑에 각각 설치되었있다. 하부에 설치된 것은 배수커플링(Drain coupling)이고 뚜껑에 설치된 것은 배기커플링(Vent coupling)이다. 하부에 설치된 배수커플링(Drain coupling)으로 운반용기의 누설시험에 사용한 물이나, 핵연료 장전 또는 인출 후 운반용기 내부에 담긴 풀물(Pool water)을 배출하는데 사용된다. 뚜껑에 설치된 배기커플링(Vent coupling)은 배수(Drain)를 할 때의 배기(Vent)나, 운반용기의 누설시험에 압력계를 설치하고 가압을 하거나, 건식운반(Dry transport)시에 내부공간에 건조를 위한 진공펌프의 연결구로도 사용한다.

나. 충격완충체(Impact limiter)

충격완충체는 운반용기가 자유낙하충격등의 사고로 충돌할 경우 충격을 흡수하도록 스테인리스강판 케이스 내부에 충격흡수능력이 우수한 Balsa wood와 Red wood를 삽입한다. KSC-4 운반용기의 충격완충체로 사용된 Balsa wood와 Red wood는 충격을 받게 될 때 Crush 되면서 운반용기가 갖는 운동에너지를 흡수하여, 용기 본체 및 내용물에 미치는 충격을 완화시켜 준다.

이들 두 재료는 충격흡수성능이 우수하며, 특히 Balsa wood는 비중이 아주 가볍고 다른 나무에 비해 강도가 아주 약하기 때문에 충격흡수를 위한 완충재로 많이 사용되고 있다.

운반용기의 수평낙하에 대비한 충격완충체의 측면을 구성하는 Red wood는 Balsa wood에 비해 강도가 약 3배 정도이다. 완충체 측면에 Balsa wood를 사용할 경우 완충체의 크기가 너무 커지기 때문에 Crush 특성이 우수하며 강도가 Balsa wood 보다 강한 성질이 있다.

Balsa wood 와 Red wood의 Crush 변형의 탄성부분은 아주 작고 최대

Crush강도에 도달한 직후부터는 거의 그 값으로 일정하게 소성적으로 거동한다. Red wood는 변형이 처음 길이의 65~70%에 도달했을 때부터는 비압축성 고체처럼 거동하여 Lock-up 현상이 생긴다. [13] 이들 목재들의 Crush 강도는 결의 방향에 크게 관계되며, Balsa wood의 경우 결과 평행한 방향과 직각방향에 대한 강도비는 약 13%정도이고 Red wood는 약 17% 정도이다. 이들 목재는 온도, 밀도와 관계가 있으며 이에 대한 측정은 Sandia Laboratory에서 이루어졌다. [14,15]

다. 결속장치(Tie-down device)

결속장치는 운반용기를 운반차량에 고정하여 운반할 때 운반용기를 안전하게 결속하는 구조물이다. 이 장치는 운반차량에 견고히 고정되며, 운반용기의 트러니온을 안착시키고 고정하도록 하여, 운반용기의 운반시 차량의 진동이나, 감가속, 충돌 등에 충분히 견디고 운반용기의 상하차에 편리하도록 되어있다.

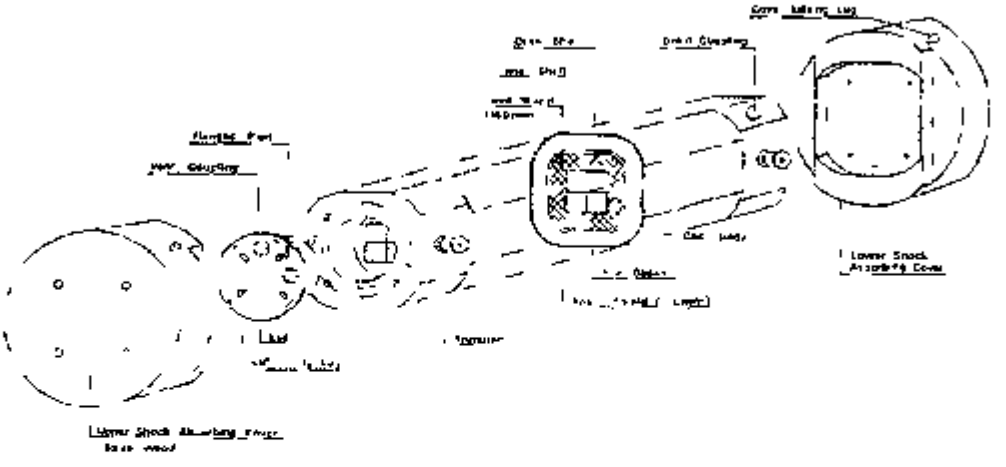


그림 4.1-1 KSC-4 운반용기 개략도

표 4.1-1 운반용기의 치수 및 중량[12)]

Components	Materials	Dimension (mm)	Weight (Ton)
1. Cask body		Length : 4845 Width : 1194 Corner : 1347	
· Fuel Basket	SA 240 Type 304	230 ×230, 6 t	0.76
· Poison Plate	B4C + Al (Boral)	5 t	0.15
· Inner Shell	SA 240 Type 304	25.4 t 4,740 H	2.82
· Lead Shield	ASTM B29 Ch. Gr. 99.9 % Pb, Casting	Side : 160 t Bottom : 175 t	20.4
· Resin	NS-4-FR (Density : 1.68 g/㎤)	Side 150 t	4.0
· Outer Shell	SA 240 Type 304	10 t , 4750 H	1.51
· Top/Bottom, Trunnion Support Plate	SA 240 Type 304	30 t Plate 30 t Plate	1.26
· Copper Plate	Pure Copper Plate	4 t , 2 t	0.86
2. Lid	Lead/S. S-304/Resin		1.0
3. Shock Absorber Cover	Balsa/Red Wood, Steel Lining		1.3
Total Cask Weight			
Loaded Cask Weight	4 PWR Fuels (17×17) Cavity Water	0.65 × 4 = 2.6 0.5	37.2

2. 운전특성(Operational features)

KSC-4 운반용기는 핵연료 장전통의 내부공간에 물을 채울수 있도록 되어있는 습식공간(Wet cavity)과 공기로 하는 건식공간(Dry cavity)으로 사용할 수 있다. 수냉식의 습식공간에서는 내부공간에 물이 있으므로써 사용후핵연료 장전후에 붕괴열이 계속 발생하므로 냉각수의 온도상승으로 인하여 물의 팽창이 일어난다. 따라서 핵연료 장전후 내부공간의 수위를 조절하여 팽창으로 기인되는 충분한 빈공간을 조성해야 한다. 하부차폐체의 측면에는 4개 장전통에서 나온 배수관이 배수 Coupling housing에 연결되어 있으며, 이 Coupling은 Two-way 장치로써 플러그(Plug)와 소켓(Socket)부분이 서로 떨어져 있을 때는 닫힌(Close) 기능이며, 이것을 서로 연결하면 동시에 Plug와 Socket 부분이 열리도록(Open) 만들어졌다. 또한 뚜껑 내부에는 배기 Coupling이 있다. 이들 Coupling은 모두 공기와 물을 사용할 수 있고 또한 고온 및 고압에 견디도록 만들어졌다.

운반용기 내부공간에 핵연료가 장전된 후 내부공간과 외부 사이에 격납을 충분히 유지할 수 있도록 격납경계(Containment boundary)를 구성한다. 운반용기 운전특성에서 중요하게 고려되는 것은 이 격납을 적절히 유지시키는데 있으며, 이러한 격납건전성을 확인시키는 주 목적은 바로 내부에 있는 내용물 즉, 방사성물질이 외부로 누출되지 않도록 보장하는데 있다. 내용물의 누설을 방지하기 위한 장치로는 뚜껑의 O-ring 재질 및 구조, Coupling 부위에 있는 기밀장치 O-ring과 Gasket등의 재질을 압력과 온도조건에 맞도록 선정하였다. 핵연료 장전후 뚜껑의 볼트를 완전히 조인 후에 뚜껑이 있는 Coupling에 누설검사장치를 부착하고 내부에 정상최대 압력조건으로 가압시킨후 누설검사를 실시하도록 하였다. 이 누설검사는 운반용기의 내부 Cavity의 격납경계 및 구조적 건전성을 확인하는데 중요한 검사항목이다.

KSC-4 운반용기를 단거리 운반용으로 사용할 경우는 주로 Cavity에 물을 채우고 장거리 운반용으로 사용할 경우 물이 없는 공기 혹은 불활성기체 헬륨(Hellium)을 채운다.

3. 운반내용물의 개요

KSC-4 운반용기는 PWR 핵연료집합체 4개를 동시에 장전하여 운반할 수 있다. 국내에서 사용되는 PWR 핵연료형은 3종류, 즉 14×14, 16×16, 17×17 집합체로 분류되고 있다. 이들 핵연료의 일반적인 제원, 재질 그리고 개요는 표 2.3-2에 표시하였다. 표에 나타난 3종류의 핵연료 집합체가 원자로에서 연소된 후 나오는 사용후핵연료는 모두 강한 방사선과 열을 방출한다. 운반용기 설계기준 핵연료로써 폭과 높이가 제일 큰 17×17 PWR 집합체를 선택하며, 냉각기간이 3년이상인 핵연료를 선정한다. 운반용기에 장전될 사용후핵연료 냉각기간을 3년이상으로 선정한 배경은 핵연료 저장풀에 저장된 핵연료의 2/3 정도가 3년 이상된 핵연료이며 또한 운반용기의 설계조건을 보다 현실적으로 고려함으로써 운반용기의 중량 및 크기등을 최적화하기 위한 것이다.

4. 운반용기 재료의 기계적 성질

KSC-4 운반용기에 사용된 주 재료는 기본 구조재로써 Stainless steel (SA240 Type 304)이 사용되며, 감마선 차폐체로는 납을, 중성자 차폐체로 NS-4-FR Resin을 사용하고, 볼트는 Low alloy steel SA193 Type B7을 사용한다. 그리고 운반용기 상·하부에 부착되는 충격완충체는 Balsa wood와 Red wood로 되어있다. 중성자 차폐체인 Resin에는 내부 쉘(Inner shell)과 외부 쉘(Outer shell) 사이의 열전달을 돕기 위해 Copper plate로 된 핀(Fin)이 사용되었다.

구조재인 Stainless steel(SA240 Type 304)과 차폐체인 Resin, Lead는 탄·소성으로 가정하였고, 충격완충체인 Balsa wood와 Red wood는 탄성·완성소성으로 가정하였다. 탄성·완성소성이란 탄성구간을 넘는 구간부터는 하중의 증가없이 변형만되는 것을 의미한다. 그림 4.1-2와 4.1-3에는 탄·소성 개념도와 탄성·완전소성 개념도를 보여주고 있다.

표 4.1-2 핵연료의 일반적인 제원, 재질[12]

Contents	Fuel assembly and fuel rod data			
	Kori 1	Kori 2	Kori 3,4	Uljin 1,2
1. Fuel assembly				
Total length with control rod (cm)	418.26	423.15	424.74	424.74
Total length without control rod (cm)	405.66	405.8	405.8	405.8
Active fuel length	365.76	365.76	365.76	365.76
Cross section (cm)	19.7×19.7	19.7×19.7	21.4×21.4	21.5×21.5
Fuel rods/assembly	179	235	264	264
Rods array/ assembly	14×14	16×16	17×17	17×17
Average burnup (MWD/MTU)	33,000	33,000	33,000	37,000
Max. Enrichment (w/o U-235)	3.2	3.1	3.1	3.1
Total weight (kg)	577.9	593.6	656.5	654
Kg U/Ass. (New fuel)	402.7	410.6	461.5	461
Kg U02/Ass.(New fuel), kg	458.1	465.9	523.5	523
Zircalloy/Ass.(New fuel), kg	98.9	106.4	110.5	108
Inconel/Ass.(New fuel), kg	4.1	4.8	5.5	6
S.S. /Ass.(New fuel), kg	16.8	17.0	17.5	17
2. Fuel rods				
Rod O.D. (cm)	1.072	0.95	0.95	0.95
Rod pitch (cm)	1.414	1.232	1.26	1.26
Clad thickness	0.062	0.057	0.057	0.057

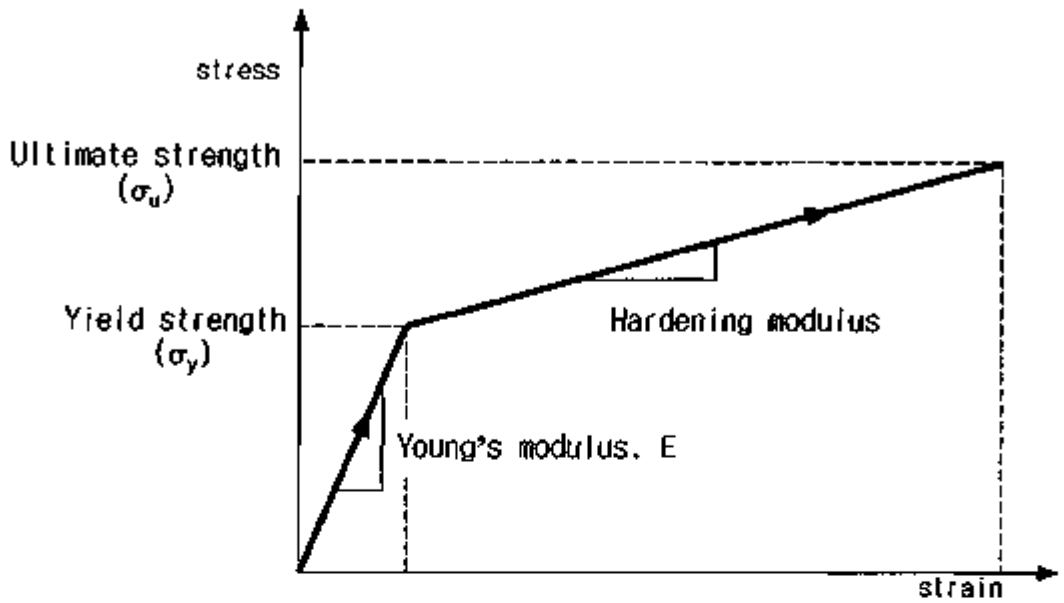


그림 4.1-2 탄·소성 개념도

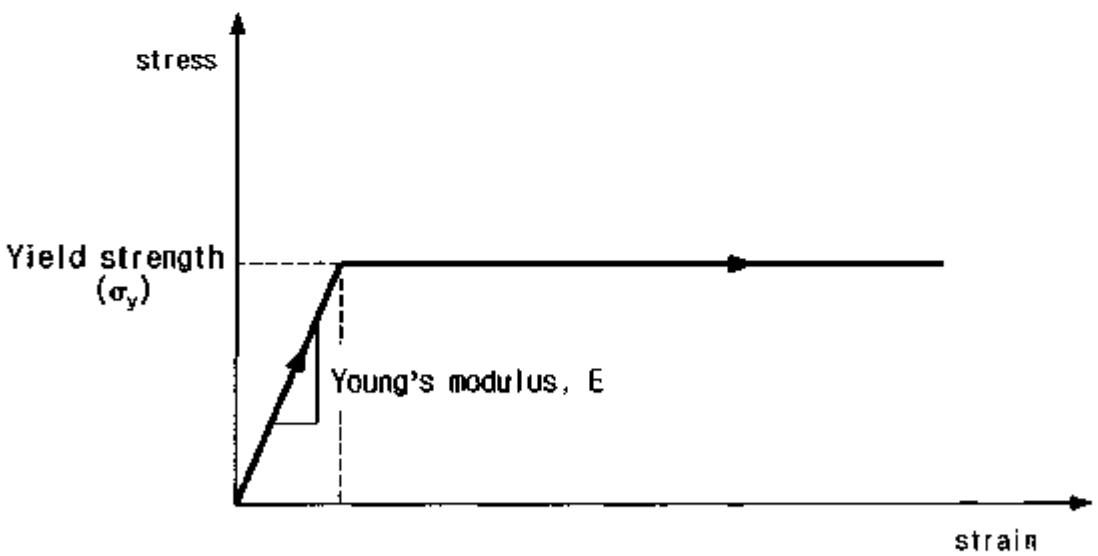


그림 4.1-3 탄성·완전소성 개념도

가. Stainless steel SA240 type304

KSC-4 운반용기의 주 구조재인 SA240 type 304의 상온에서의 기계적 특성은 ASME Sec. III App. I[6]에 다음과 같이 주어져 있다.

· Elastic modulus :	195.1 GPa
· Yield strength :	206.4 MPa
· Poisson's ratio :	0.3
· Ultimate strength :	517.1 MPa
· Density :	7,913 kg/㎥
· Strain hardening modulus :	8.981 GPa
· Coeff. of thermal expansion :	1.427×10^{-5}/℃

온도에 따른 SA240 type 304 스테인리스강의 항복응력, 탄성계수 등은 표 4.1-4과 같다.

나. 납(Lead)

감마선차폐체로 사용된 납은 불순물인 Cu의 함유율이 0.05% 이하인 Chemical lead이다. 이 납의 상온에서의 기계적 물성치는 다음과 같다.

· Elastic modulus :	15.72 GPa
· Yield strength :	4.41 MPa
· Poisson's ratio :	0.42
· Ultimate strength :	16.97 MPa
· Density :	11,300 kg/㎥
· Strain hardening modulus :	383 GPa
· Coeff. of thermal expansion :	2.898×10^{-5}/℃

온도에 따른 Chemical lead의 항복응력, 탄성계수 등은 표 4.1-5과 같다.

다. 레진(Resin)

KSC-4 운반용기의 중성자 차폐체로 사용된 Resin(NS-4-FR)은 미국의 Bisco products Inc. 의 제품으로써 상온에서의 기계적 성질만 제시하였다. 주 구조재인 스테인리스강에 비해 강도가 훨씬 작으므로 상온에 따른 특성 변화를 무시하고 상온에서의 기계적 특성을 그대로 사용하였다. 레진에 대한 기계적 특성들은 표 4.1-6와 같다.

라. Balsa wood

Balsa wood는 매우 가볍고 압축특성이 우수해 충격흡수재로 많이 사용되고 있다. KSC-4 운반용기에서는 상하부 충격완충체의 중앙부에 삽입되어 상부수직낙하나, 하부수직낙하시의 충격에너지를 흡수하도록 하였다. Balsa wood는 처음 항복강도에 이른 후 거의 일정한 강도로 압축된 후 변형이 처음 길이의 75~79%에 이르렀을 때부터 비압축성 고체처럼 거동하여 Lock-up 현상이 생긴다. Balsa wood를 비롯한 나무는 특성상 결방향에 따라 강도가 크게 달라지며, 수분 함유량에 영향을 받는다. 이에 대한 물성치는 미국 Sandia 연구소에서 실험을 수행하였다. 상온에서의 기계적 물성치를 표 4.1-7에 나타내었다.

마. Red wood

Red wood는 압축특성이 우수해 balsa wood와 함께 운반용기의 충격완충체에 많이 사용되고 있다. Red wood는 balsa wood에 비해 압축강도가 커서 충격완충체의 측면에 주로 사용되며 KSC-4 운반용기의 중심축을 기준으로 방사상방향으로 삽입되어 수평낙하나 측면으로의 충돌시에 충격을 흡수하게 된다. Red wood는 처음 항복강도에 이른후 거의 일정한 강도로 압축된 후 변형이 처음 길이의 65~70%에 이르렀을 때부터 비압축성 고체처럼 거동하여 lock-up 현상이 생긴다. Red wood도 결방향에 따라 강도가 크게 달라지며, 수분함유량에 영향을 받는다. 이에 대한 물성치는 미국 Sandia 연구소에서 실험을 수행하였다. 상온에서의 기계적 물성치를 표 4.1-8에 나타내었다.

바. 동판(Copper plate)

KSC-4 운반용기는 중성자차폐체인 Resin의 열전도율이 낮기 때문에 동판으로 된 전열핀(Heat-transfer fin)을 설치하였다. ASME sec. III App. I[16] 에 제시된 동판에 대한 기계적 물성치는 다음과 같다.

· Elastic modulus :	114.5 GPa	Ref. Table I-40
· Yield strength :	69.0 MPa	Ref. Table I-8.4
· Poisson's ratio :	0.3	Ref. Table I-8.4
· Density :	8,954 kg/㎥	

사. 볼트(Bolt) 재료

뚜껑의 볼트재료는 정상운반시에 발게되는 내부 Cavity의 압력하중과, 가상사고조건의 자유낙하충격시 발게 될 충격하중 및 화재사고시 발게될 온도와 압력의 영향을 고려하여 고장력 저합금강인 SA193 type B7을 사용한다. ASME sec. III, Div.1[17]에 제시된 이 강의 기계적 물성치들을 정리하면 다음과 같다.

· Elastic modulus :	203.4 GPa
· Yield strength :	675.9 MPa
· Poisson's ratio :	0.3
· Density :	862.1 kg/㎥

아. Stainless steel과 Lead의 동적재료특성(Dynamic properties)

KSC-4 운반용기의 9m충격해석에서는 구조재인 Stainless steel type 304와 납의 동적재료특성을 이용하였다. [18] 자유낙하충격로 인한 충격과 같은 동적인 하중을 받을 때 Stainless steel과 납은 변형률이 증가함에 따라 강도가 증가하기 때문에 방사성 물질 운반용기의 구성재료인 Stainless steel과 납의 동적재료특성(Dynamic material properties)에 대한 자료를 이용한다.

이러한 동적특성은 자유낙하충격, 타격충격 등의 충격해석에서 사용된다.

(1) Stainless steel type 304

Poisson's ratio	ν =0.3	
Young's modulus	E=186.88	GPa
Yield strength	σ_y=1034.95	MPa
Ultimate strength	σ_u=1034.96	MPa
Density	ρ = 7913	kg/m³
Strain hardening modulus	E_T=1.896	GPa

(2) 납 (Lead)

Poisson's ratio	ν =0.4	
Young's modulus	E=98.6	GPa
Yield strength	σ_y=6.89	MPa
Ultimate strength	σ_u=34.48	MPa
Density	ρ = 7913	kg/m³
Strain hardening modulus	E_T=183.45	MPa

자. 중량과 중심

KSC-4 운반용기의 주요부품들의 중량과 각각의 중심들을 표 4.1-3에 나타내었다. 여기서 무게중심의 축좌표는 운반용기의 바닥으로부터 측정한 것이며, 본 운반용기는 단면의 가로축과 세로축에 대해 대칭인 사각형에 가까우므로 각각의 중심은 운반용기의 중앙 축상에 놓여있다.

KSC-4 운반용기에 4개의 17×17 핵연료집합체와 Cavity water를 채운상태에서 전체의 중량과 무게중심도 표 4.1-3에 나타내었다.

표 4.1-3 핵연료를 장전한 KSC-4 운반용기의 중량과 무게중심[12)]

Component	Weight (Ton)	Axial location of center of gravity (cm)
Shells	5.31	237.5
Lead shield	20.40	233.3
Resin shield	4.00	238.4
Fuel basket	0.76	233.5
Copper plate	0.86	240.3
Boral plate	0.15	240.4
Fuel assembly	2.60	231.9
Upper trunnions	0.14	452.5
Lower trunnions	0.14	28.0
Lid	1.01	470.5
Cavity water	0.50	233.0
Lower shock absorbing cover	0.65	-17.6
Upper shock absorbing cover	0.63	498.1
Total	37.2	241.44

Note : KSC-4 cask total length without impact limiters is 4,845 ㎜

표 4.1-4 SA 240 Type 304 stainless steel의 온도에 따른 기계적 물성값

Property \ Temperature℃	-40	-29	21	93
Yield strength (MPa)	206.4	206.4	206.4	172.4
Young's modulus (GPa)	198.9	197.9	195.1	190.3
Design stress intensity(MPa)	137.9	137.9	137.9	137.9
Ultimate strength (MPa)	517.1	517.1	517.1	489.5
Hardening modulus (GPa)	8.97		8.97	8.35
Poisson's ratio	0.3			
Density (kg/m³)	7,913 kg/m³			

Property \ Temperature℃	149	204	260	399
Yield strength (MPa)	155.1	142.7	133.8	119.3
Young's modulus (GPa)	186.2	182.7	177.9	168.2
Design stress intensity(MPa)	137.9	128.9	120.7	107.6
Ultimate strength (MPa)	455.1	444.0	437.8	435.1
Hardening modulus (GPa)				
Poisson's ratio	0.3			
Density (kg/m³)	7,913 kg/m³			

Ref.) ASME section III, Division 1, Appendix I,
Table I-1.2, I-2.2, 3-1.2, I-5.0, I-6.0

표 4.1-5 Lead의 온도에 따른 기계적 물성값

Property \ Temperature℃	21.11	65.56	148.89	204.44	260
Yield strength (MPa)	4.41	3.79	2.56	1.63	0.75
Young's modulus (GPa)	15.71	14.89	13.30	12.05	10.88
Strain at yield	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
Ultimate strength (MPa)	16.95	13.09	9.30	7.23	4.82
Hardening modulus (MPa)	303.31	242.35	140.63	77.81	28.42
Poisson's ratio	0.45				
Density (kg/㎥)	11,070 kg/㎥				

* Reference

1. E.T. Tietz, "Determination of the mechanical properties of a high purity lead and a 0.05% copper-lead alloy," Stanford research institute, Menlo Park, Califonia, April 1985, WADC techanical report 57-695 ASTIA document No. 151165.
2. H.J. Rack, G.A. Knorovsky, "An assessment of stress-strain data suitable for finite element elastic-plastic analysis of shipping containers," NUEG/CR-0481, SAND77-1872, Sandia laboratories, September 1978.

표 4.1-6 Resin(NS-4-FR)의 기계적 물성값

Specific gravity	1.68 g/㎤
Maximum continuous operating	148.89 ℃
Ultimation tensile strength	29.31 MPa
Tensile elongation	0.65 %
Ultimate compression strength	72.42 MPa
Compression yield strength	60.56 MPa
Young's modulus	3.87 MPa
Impact strength	15.49 GPa
Thermal Conductivity	0.645 W/m℃

표 4.1-7 Balsa wood의 기계적 물성값

Density		160 kg/㎤
Static bending rupture		457 kg/㎠
Modulus of elasticity		6,913 kg/㎠
Compression crush strength	Parallel to grain	139 kg/㎠
	Perpendicular to grain	18.7 kg/㎠

표 4.1-8 Red wood의 기계적 물성값

Density		278-350 kg/㎤
Static bending rupture		1,417 kg/㎠
Modulus of elasticity		15,940 kg/㎠
Compression crush strength	Parallel to grain	459 kg/㎠
	Perpendicular to grain	59.5 kg/㎠

표 4.1-9 각 재질의 온도에 따른 열적 물성값

(a) SA 240 Type 304 stainless steel

온도(℃)	21.3	121.3	232.4	343.5	454.6	565.7	676.8	787.9
전도 (W/mk)	14.9	16.6	18.4	20.1	21.6	23.2	24.8	26.1
비열용량(J/kgK)	477.5	509.4	532.1	549.4	563.4	573.1	584.8	591.5

(b) Chemical lead

구 분 / 온 도	열전도도 (W/m℃)	비열 (W-hr/kg℃)(J/kg℃)	밀도 (kg/㎥)
0.0	34.6	0.036 (129.6)	11,350
200	31.7	0.038 (136.8)	11,000
327.5	18.0	0.039 (140.4)	10,900
400	16.8	0.040 (144.0)	10,900

(c) Resin

열전도도	: 0.65 W/m℃
비열	: 0.17 W-hr/kg℃
밀도	: 1680 kg/㎥

(d) Copper plate

열전도도	: 52 W/m℃
비열	: 0.1167 W-hr/kg℃
밀도	: 8800 kg/㎥

제 2 절 운반용기 유한요소 모델링

본 절에선 KSC-4 운반용기의 후판낙하충격과 열해석 및 열응력해석을 위한 유한요소 모델링을 기술하였다. 해석코드는 LS-DYNA3D[11]와 ABAQUS[10]를 사용하였으며 각각의 해석을 위한 모델링에는 eta/FEMB[19]와 IDEAS[20]가 사용되었다. eta/FEMB는 LS-DYNA3D를 위한 전처리기(Pre-processor)이고 ABAQUS를 위해선 IDEAS가 사용되었다.

본 보고서에서는 먼저 해석을 위한 모델링에 대해서 전반적인 사항을 기술하였고, 이후 각각의 해석에 대해 LS-DYNA3D와 ABAQUS/Explicit의 해석결과를 비교해 두 코드간의 차이점을 살펴보았다. 또한, 열해석은 실험값과의 비교, 분석을 수행하였다.

1. 후판낙하충격해석 모델링

후판낙하충격해석의 경우 경계조건의 변화에 따른 비선형 해석이기 때문에 해석비용을 줄이기 위해 타당한 가정하에 단순화를 하였다. 운반용기 본체와 충격완충체사이의 볼트결합은 완전결합이라고 가정하고 볼트를 모델링에서 제외한 대신에 완전결합으로 처리하였다. 운반용기의 초기조건인 내부압력으로 인한 운반용기의 각 부분에서 발생되는 정적응력의 분포와 3톤정도의 핵연료 무게는 큰 영향을 미치지 않으므로 배제하였다. 충격완충체의 외부를 감싸고 있는 Steel 쉘 또한 후판낙하충격에 큰 영향을 미치지 않으므로 모델링에서 배제하였고 red wood와 balsa wood는 등방성으로 가정하였다. Resin과 Outer 쉘 사이의 열전달을 위한 핀들 또한 후판낙하충격해석에 큰 영향을 미치지 않으므로 모델링에서 배제하였다. 운반용기 내에 핵연료는 장전되어 있지 않으며 운반용기의 상하부가 동일한 구조를 가지도록 가정하였다. 운반용기 내부에 있는 차폐체(Resin, Lead)는 내·외부 쉘과 완전히 결합되어 있다고 가정하였고 구조재인 중간 쉘과 외부 쉘은 탄·소성으로 가정하였다.

후판을 운반용기위로 9m 높이에서 자유낙하시켰을 때 운반용기가 받는 충격의 영향을 평가하였다. 이때 후판이 떨어지는 형태는 그림 4.2-2~4과 같이 수직낙하, 수평낙하 그리고 45° 경사각하로 구분하여 해석을 수행하였다. 해석모델은 실제 크기와 동일하게 대칭경계조건(Symmetric)을 적용하여서 중심축을 기준으로 하여 1/2만을 3차원 요소를 적용하였다. 하중조건으로

는 후판이 9m 높이에서 자유낙하로 인한 초기속도 $v=\sqrt{2gh}$ ≈ 13.3 m/sec를 적용하였다.

운반용기의 모든 부분을 Solid 요소로 모델링하였다. 그림 4.2-2~4과 같이 운반용기의 표면과 후판이 부딪히는 부분의 요소밀도는 해의 정확도를 높이기 위해 다른 부분보다 조밀하게 요소를 생성하였다. 해석에 적용한 유한요소는 비선형 접촉문제에 대한 해의 정확도를 높이기 위하여 저차의 선형요소를 사용하였다. 비선형 문제에서 사용되는 저차요소란 그림 4.2-1과 같이 노드가 각 모서리에만 있는 요소를 말한다. 운반용기에 사용되어진 총 절점수는 50960개이며 총요소의 개수는 40400개이다.

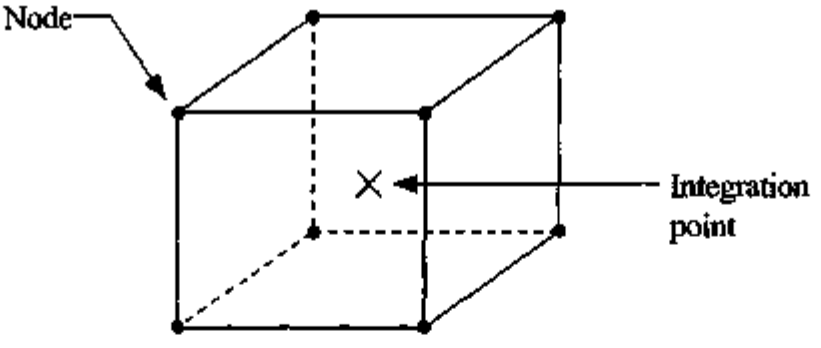


그림 4.2-1 저차 선형 솔리드요소

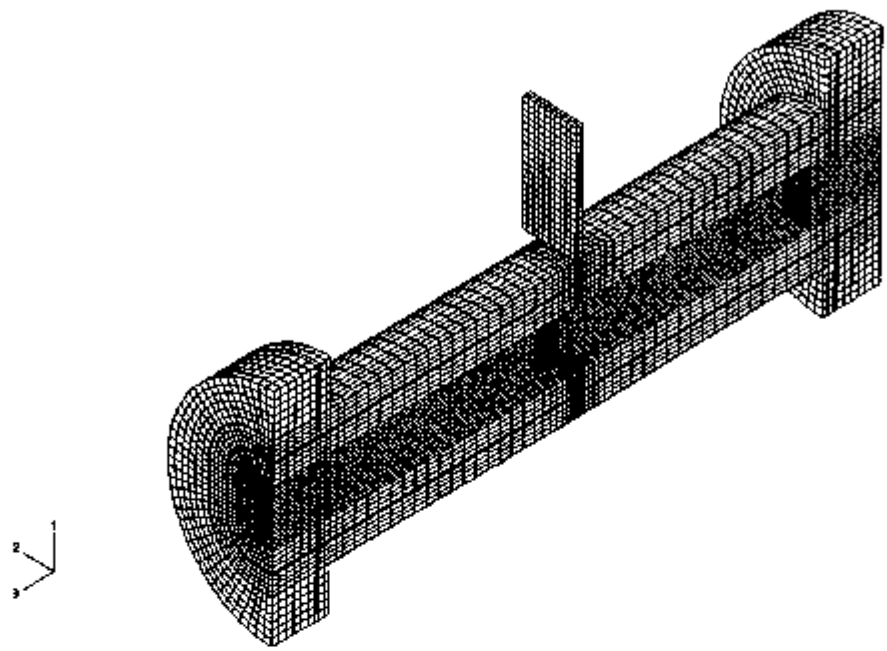


그림 4.2-2 운반용기 유한요소모델(후판의 수직낙하)

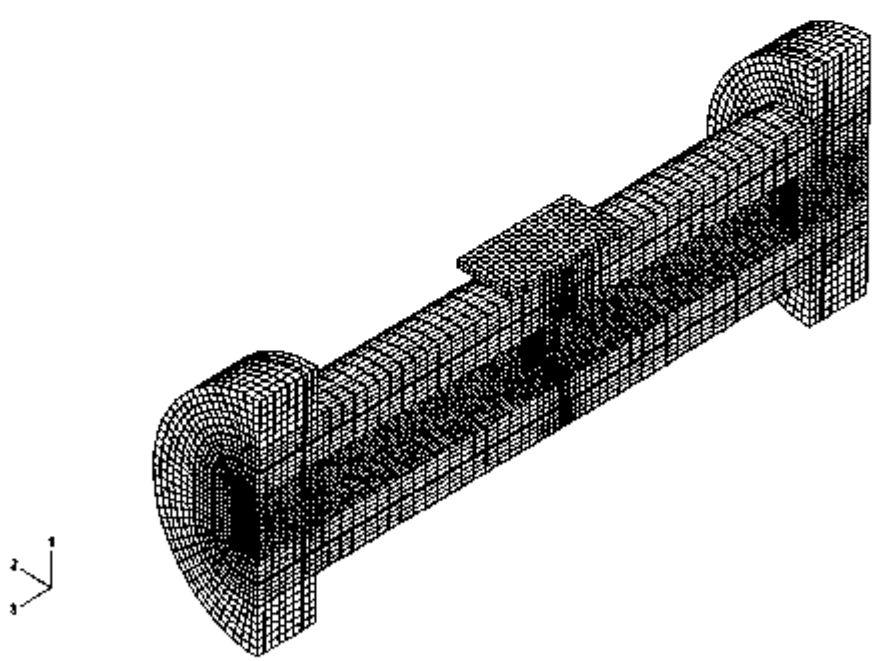


그림 4.2-3 운반용기 유한요소모델(후판의 수평낙하)

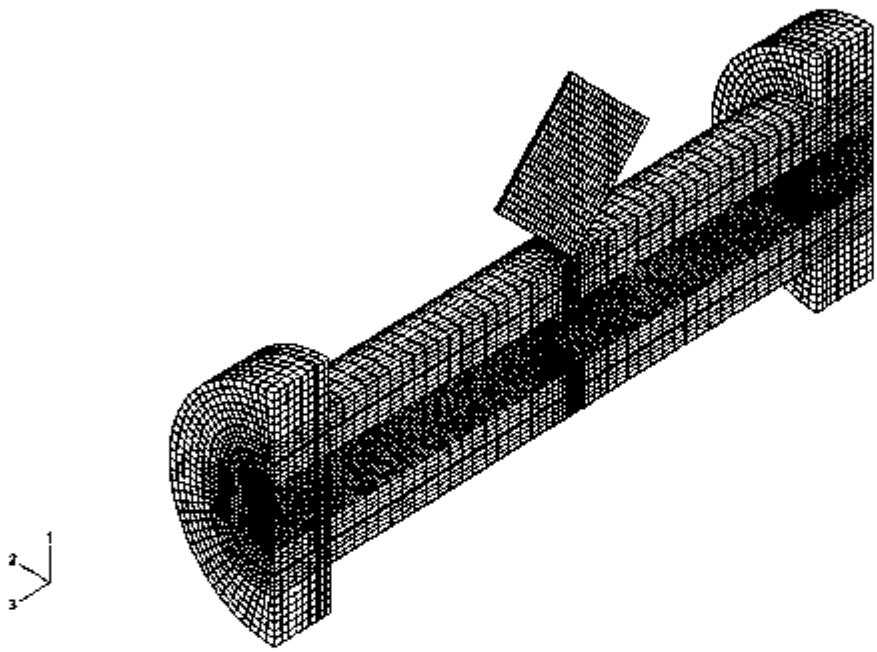


그림 4.2-4 운반용기 유한요소모델(후판의 경사낙하)

표 4.2-1 후판낙하 충격해석조건

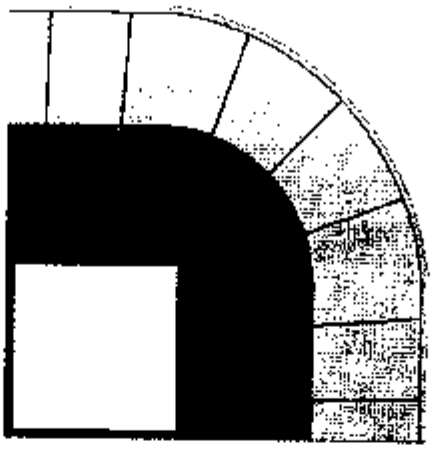
	모델링 및 경계조건
Impact limiter	Wood 방향성 무시
Cask body	차폐체와 쉘의 접촉조건은 완전 고정으로 가정
요소종류	3D solid element (Reduced integration element)
경계조건	대칭경계조건, 양단고정
후판의 초기속도 (9m 낙하조건)	v=13.3 m/s

2. 열해석 및 열응력해석 모델링

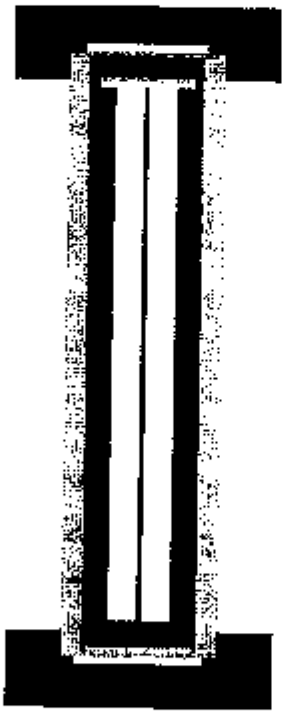
운반용기의 열해석에 사용할 수 있는 모델은 그림 4.2-5와 같은 모델들이 사용될 수 있다. 정확한 해석을 위해선 단면의 모든 재질을 고려한 3차원 모델을 해석하는 것이 좋지만 계산비용과 시간의 문제가 따르기 때문에 단면의 모든 재질을 고려한 2차원모델을 사용해도 열해석을 하는데 무방하다. KSC-4 운반용기의 실제단면형상은 그림 4.2-6과 같지만 본 연구에서는 그림 4.2-7과 같이 동판의 배열을 해석에 적합하도록 변형시킨 2차원 단면모델을 사용해 열해석을 수행하였다. 열해석에서는 동판의 영향이 중요하므로 낙하충격해석에선 제외하였던 동판을 고려하였다. 열해석시 모델의 각 부분에 적용된 경계조건 및 하중조건은 그림 4.2-8과 같다. 운반용기의 외부에는 대류와 복사조건을 고려하였고 내부에서는 전도에 의한 열전달을 고려하였으며 핵연료에서 방출되는 붕괴열은 fuel-basket의 표면에 heat flux로 주었다.

열해석시 ABAQUS/Standard에서 사용된 요소는 2차원 요소를 사용하였고 사용된 요소종류는 구체적으로 4절점 2차원 열해석 요소 DC2D4(2D diffusible heat transform element)을 사용하였다. LS-DYNA3D에선 3차원 솔리드 요소를 사용하였다. LS-DYNA3D를 사용해 대류와 복사경계조건을 적용하기 위해선 3차원 솔리드 요소의 표면에만 적용이 가능하기 때문에 두께를 10cm정도로 아주 작게 만든 3차원 솔리드 요소를 사용하였다.

열응력 해석에 사용된 모델 또한 열해석에 사용된 모델과 동일하다. 그러나 열응력 해석에서 사용된 요소의 종류는 ABAQUS/Standard에서 다르게 사용된다. 이때의 요소는 열해석과는 달리 구조해석에서 사용되는 요소를 사용되는데 본 해석에 요소종류는 감차적분의 4절점 평면 변형률 요소 CPE4R(2D plane strain element reduced integration)이다. LS-DYNA3D를 이용한 열응력해석에선 요소의 종류는 3차원 솔리드 요소로 열해석시 사용된 요소와 같다. 이와 같이 동일한 요소를 사용하는 LS-DYNA3D에선 각 해석시 입력하는 물성값으로써 구분할 수 있다. 즉 열해석을 할 경우에는 비열, 전도도 그리고 밀도값만이 필요할 뿐이고 열응력 해석을 할 경우에는 충격해석에서 사용된 구조적인 물성값만이 필요하다.



(a) 2차원 단면 모델



(b) 2차원 축대칭 모델

(c) 3차원 모델

그림 4.2-5 열해석 및 열응력해석에 사용될 수 있는 모델

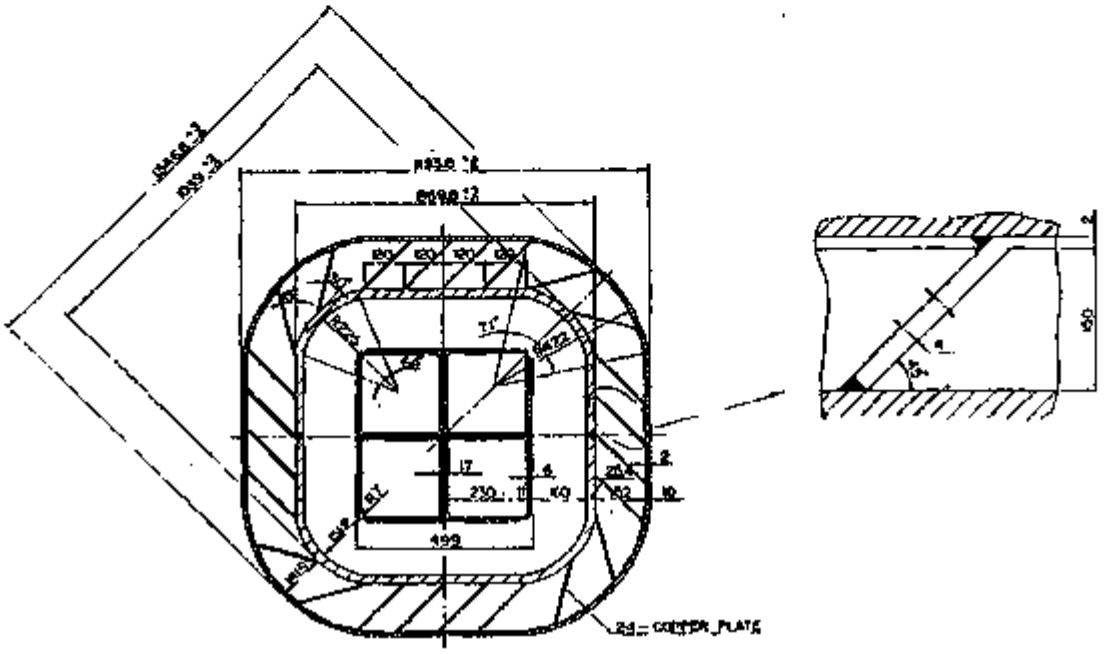


그림 4.2-6 KSC-4 운반용기의 단면형상

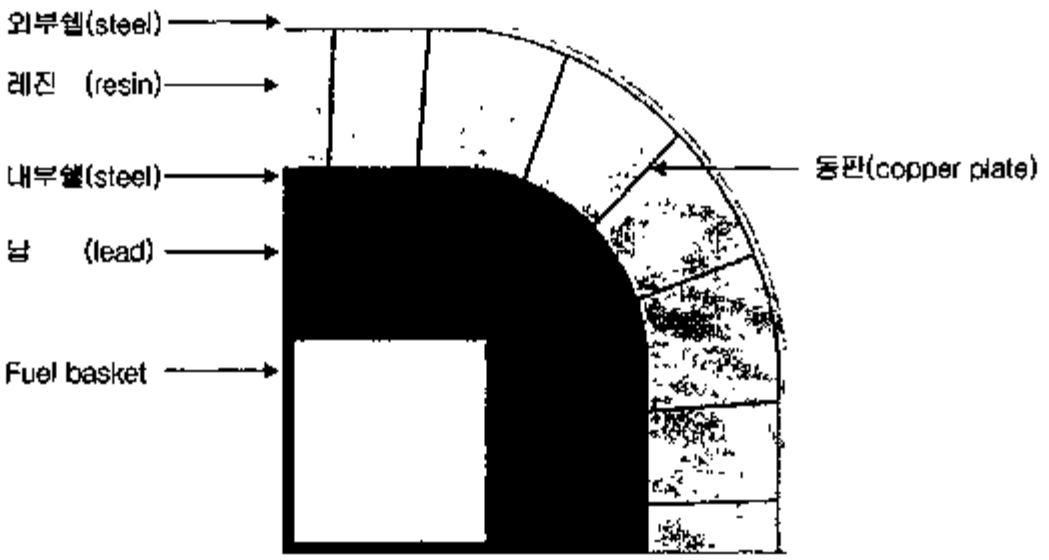


그림 4.2-7 운반용기의 열해석 모델

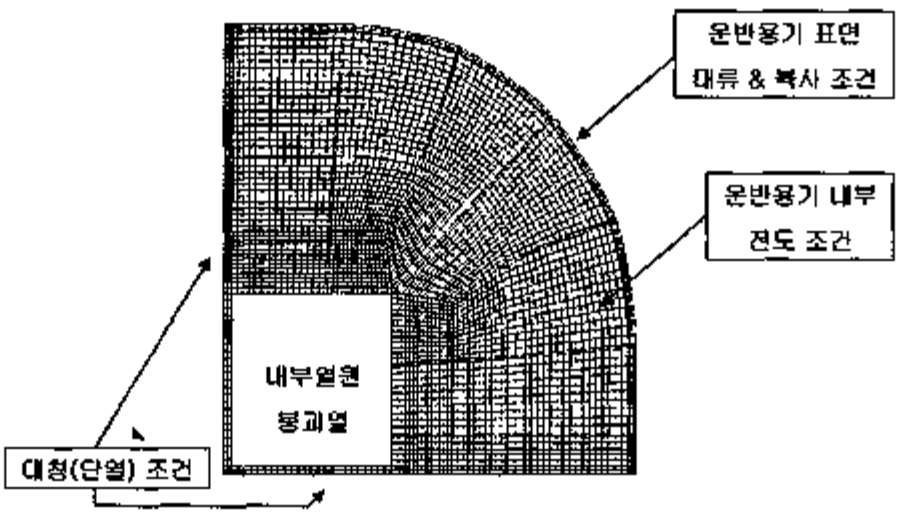


그림 4.2-8 열해석 유한요소모델

제 3 절 후판낙하충격 해석결과

본 절에서는 LS-DYNA3D와 ABAQUS/Explicit의 후판낙하충격 해석결과를 수직낙하, 수평낙하, 45° 경사낙하에 대해서 기술하였다. 규정에선 후판의 수평낙하만을 규정하고 있지만 본 연구에서는 후판의 수직낙하와 45° 경사낙하에 대해서도 연구하였다. 구조재인 Stainless steel과 차폐체인 Resin, Lead는 탄·소성으로 해석을 하였고, 충격 완충재인 Balsa wood와 Red wood는 후판낙하 충격해석에 거의 영향을 미치지 않으므로 등방성으로 가정하여 해석하였다.

결과에 대한 비교는 먼저 내부에너지(Interanl energy)와 운동에너지(Kinetic energy)에 대해서 비교하였고, 충격시의 충격력을 비교하였으며, 가장 손상을 많이 받는 부분의 Effective stress(Von-Mises stress)를 비교하였다. LS-DYNA3D와 ABAQUS/Explicit의 해석결과에 대한 신뢰성 분석은 격납경계에서 응력한계값 324MPa(=0.7Su or 2.4Sm)을 만족하는지에 대한 고찰을 하였다. 내부쉘과 외부쉘의 최대응력들을 표 4.3-1에 정리하였다.

운반용기의 자유낙하 해석모델은 대칭조건을 이용해 1/2 대칭모델을 사용하였고, 하중조건으로는 후판이 9m 높이에서 자유낙하로 인한 초기속도 13.3 m/sec를 적용하였다. 충격해석시 주위온도가 -29℃의 저온과 38℃의 고온에 대하여 각각 독립적으로 영향을 해석 및 평가하여 영향이 큰 온도조건을 선택하여야 하나, 스테인리스강의 강도는 온도가 높아지면 감소하므로 고온에서 더욱 약하기 때문에 여기서는 38℃의 고온주위 조건에 대하여 해석을 수행하였다.

LS-DYNA3D와 ABAQUS/Explicit의 결과를 비교해 보면 거의 일치하는 것을 볼 수 있지만 그림 4.3-3과 같이 LS-DYNA3D에서 약간의 에너지 손실이 발생되는 것을 관찰할 수 있다. 일반적인 경우 이러한 에너지 손실이 10% 범위에 들어올 경우를 기준으로 하여 해석의 신뢰성을 평가한다. ABAQUS/Explicit은 비선형 해석시 감차적분을 수행하더라도 굽힘의 영향을 고려하기 때문에 에너지 손실이 거의 없는 것으로 기록한다. 두 해석코드를 위한 모델링은 앞절에서 기술한 바와 같이 모두 동일하게 해 주었다. 각각에 대한 세부적인 내용은 다음과 같다.

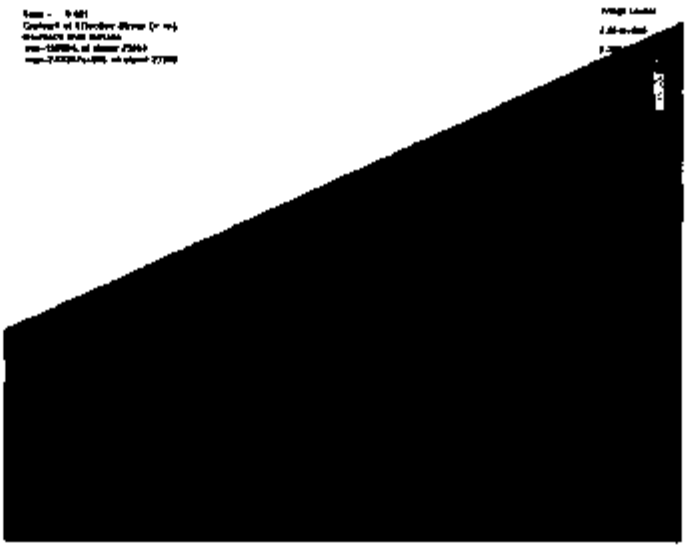
표 4.3-1 내부쉘과 외부쉘의 최대응력

	Max. effective stress (MPa)			
	Inner shell		Outer shell	
	ABAQUS	LS-DYNA3D	ABAQUS	LS-DYNA3D
수직낙하	183.1	206.9	291.4	265.4
수평낙하	155.8	158.6	267.3	269.6
경사낙하	259.8	258.1	848.3	677.1

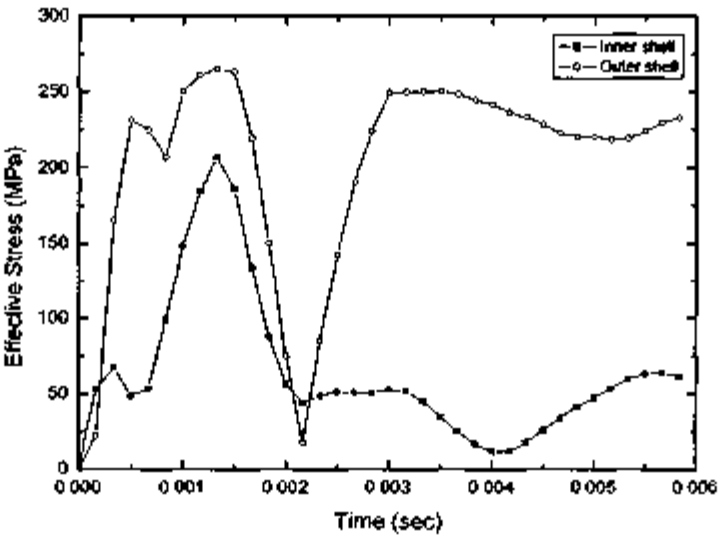
1. 후판의 수직낙하 해석결과

LS-DYNA3D 해석결과 외부쉘의 최대 Von-Mises 응력은 265.4 MPa이었고, 내부쉘의 최대 Von-Mises 응력은 206.9 MPa로 응력한계값 324 MPa보다 작은 응력을 보였고, 격납경계의 건전성은 충분히 유지되었다. 그림 4.3-4에 나타난 충격력 선도를 살펴보면 0.7 msec에서 최대를 기록한 후 2 msec에서 충돌이 거의 끝나감을 알 수 있다.

ABAQUS/Explicit 해석결과 LS-DYNA3D와 거의 동일한 결과를 얻을 수 있었다. 응력을 살펴보면 내부쉘의 최대 Von-Mises 응력은 183.1 MPa이었고, 외부쉘의 응력은 최대 291.4 MPa을 기록하였다. 이는 모두 응력한계값보다 작은 값이었고 충격력 선도는 LS-DYNA3D와 거의 동일하게 나왔다. 그러나 그림 4.3-2에서 알 수 있듯이 ABAQUS/Explicit의 해석결과에서는 후판의 모서리 부분과 마주하는 운반용기의 표면에서 약간 과도한 응력이 발생하는 것을 볼 수 있다. 그 이유는 감차적분을 수행하더라도 ABAQUS/Explicit에선 굽힘의 영향을 한 요소내에서 고려할 수 있기 때문이다. 충격력 선도를 살펴보면 0.8 msec에서 최대를 기록한 후 LS-DYNA3D와 마찬가지로 2 msec 이후부터 충돌이 거의 끝나감을 알 수 있다. 또한 ABAQUS/Explicit의 결과가 LS-DYNA3D보다 보수적으로 평가되는 것을 알 수 있다.

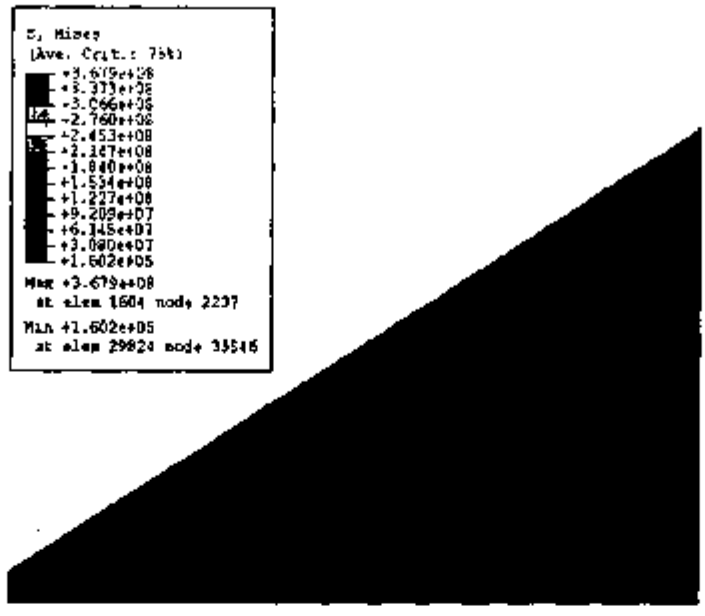


(a) 후판 수직낙하의 effective stress contour

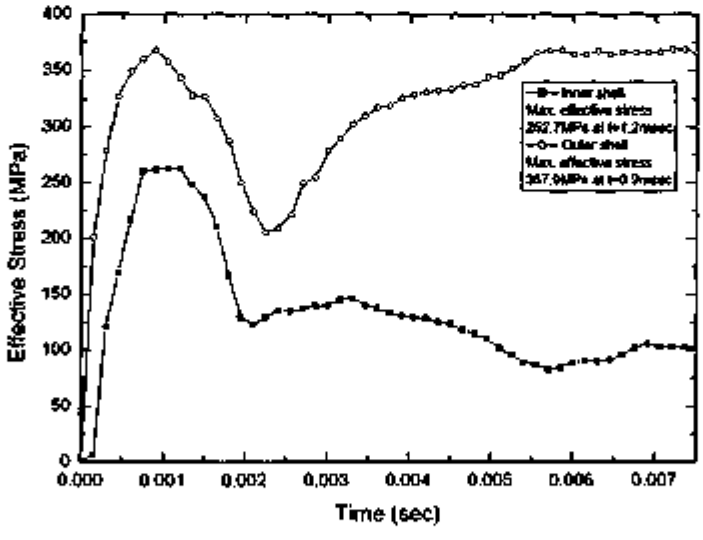


(b) 후판 수직낙하의 effective stress 선도

그림 4.3-1 후판 수직낙하의 LS-DYNA3D 해석결과

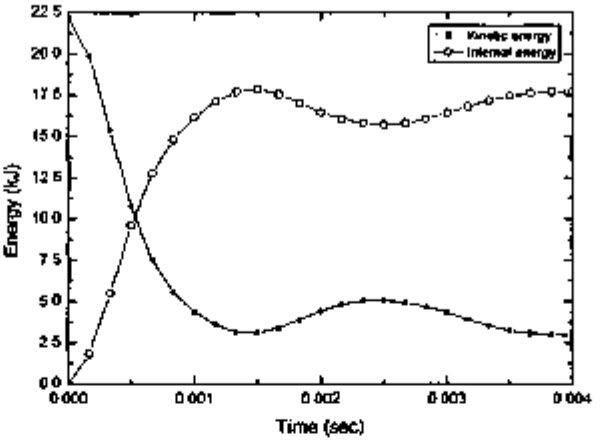


(a) 후판 수직낙하의 effective stress contour

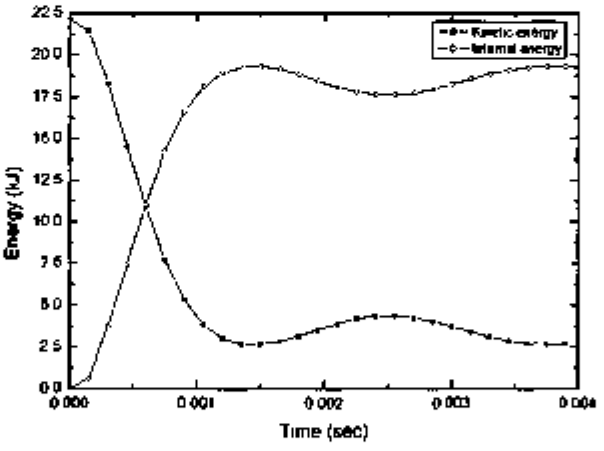


(b) 후판 수직낙하의 effective stress 선도

그림 4.3-2 후판 수직낙하의 ABAQUS/Explicit 해석결과

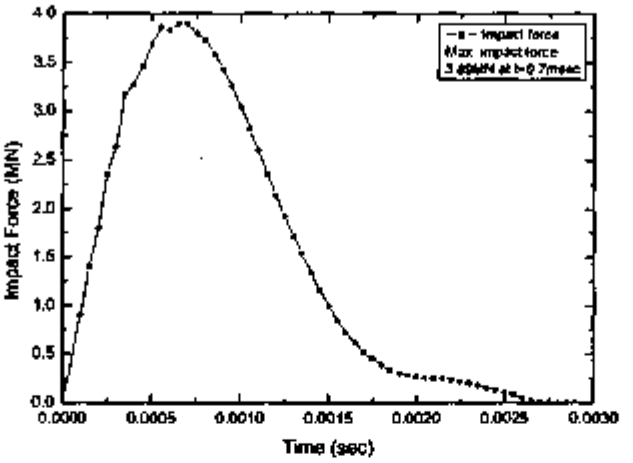


(a) LS-DYNA3D

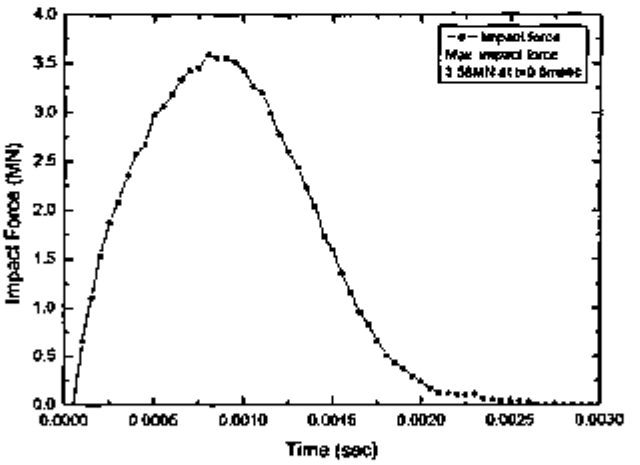


(b) ABAQUS/Explicit

그림 4.3-3 후판 수직낙하 해석결과 에너지 선도



(a) LS-DYNA3D



(b) ABAQUS/Explicit

그림 4.3-4 후판 수직낙하 해석결과 충격력 선도

2. 후판의 수평낙하 해석결과

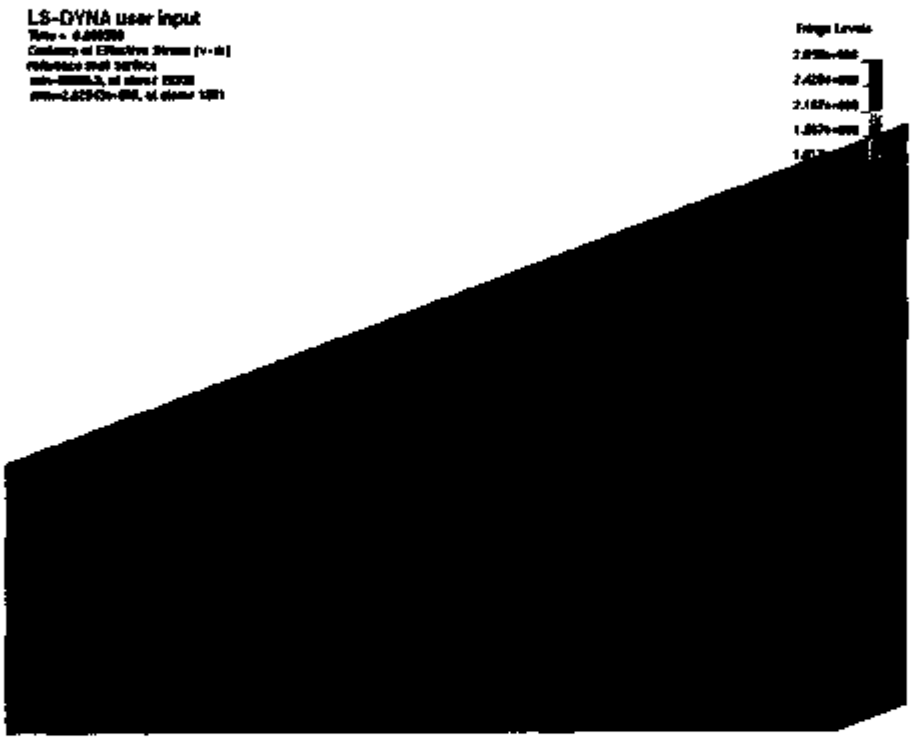
LS-DYNA3D 해석결과 최대 Von-Mises 응력은 외부 쉘에서 269.6 MPa 이었고, 내부 쉘에선 158.6 MPa로 응력한계값 324 MPa보다 적었으므로 건전성이 유지되었다. 내부 쉘의 응력이 수직낙하에서 발생되는 응력보다 적게 나온 이유는 충격시 단면적의 증가로 인해 외부 쉘과 레진에서 충격력을 많이 흡수하고 있기 때문이다. 그림 4.3-7에 있는 후판의 수평낙하시 운반용기의 충돌면에 작용하는 충격력의 변화를 살펴보면 0.23 msec에서 17.8 MN에서 최대에 이른 후 점차 감소하여 0.6 msec이후부터는 충돌이 끝났음을 알 수 있다. 수평낙하에서는 수직낙하와는 달리 충돌초기의 충돌력의 증가가 급격하지 않는 이유 또한 수직낙하보다 충격면적이 증가되었기 때문인 것으로 판단된다.

ABAQUS/Explicit 해석결과 수평낙하 또한 LS-DYNA3D와 거의 동일한 결과를 얻을 수 있었다. 응력을 살펴보면 그림 4.3-6과 같이 외부 쉘에서 최대 Von-Mises 응력이 267.3 MPa이었고, 내부 쉘에서 최대 155.8 MPa로써 건전성이 충분히 유지되었다. 수직낙하와는 달리 국부적으로 발생되는 높게 발생되는 응력은 없는 것으로 나타났다. ABAQUS/Explicit의 충격력선도를 살펴보면 0.2 msec에서 최대 15.24 MN에 이른 후 0.6 msec에서 충돌이 끝남을 알 수 있다.

3. 후판의 45° 경사낙하 해석결과

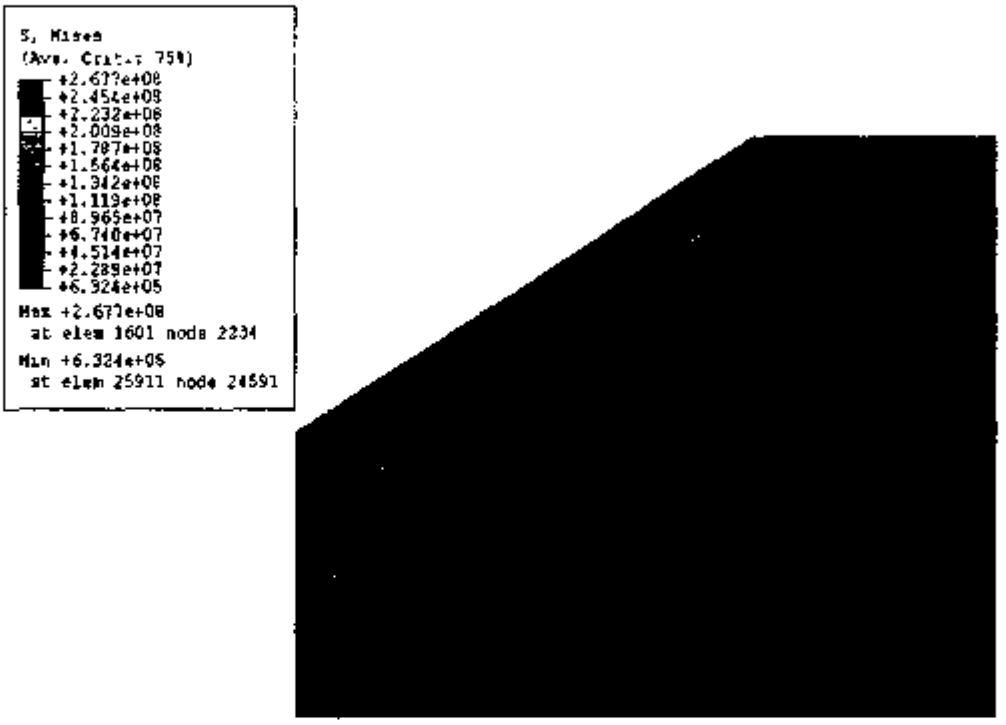
LS-DYNA3D 해석결과 외부 쉘의 최대 Von-Mises 응력은 677.1 MPa 이었고, 내부 쉘의 최대 Von-Mises 응력은 258.1 MPa 이었다. 후판의 날카로운 모서리부분이 9m에서 낙하한뒤 충돌하기 때문에 외부 쉘에서 국부적으로 파손이 발생한다는 것을 예측할 수 있다. 그러나 격납경계의 건전성은 324 MPa 안쪽에 있으므로 유지된다고 판단된다.

ABAQUS/Explicit 해석결과 외부 쉘의 최대 Von-Mises 응력은 848.3 MPa 이었고, 내부 쉘의 최대 Von-Mises 응력은 259.8 MPa 이었다. LS-DYNA3D와 마찬가지로 외부 쉘에선 국부적으로 파손을 예측할 수 있으며 내부 쉘의 응력은 324 MPa을 만족하는 범위에 있으므로 경사낙하에서도 건전성이 유지되는 것으로 평가되었다.



외부 쉘의 최대응력 : 269.6 MPa
내부 쉘의 최대응력 : 158.6 MPa
응력한계 : 324 MPa(=0.7Su or 2.4Sm)

그림 4.3-5 후판 수평낙하 LS-DYNA3D 해석결과 (stress contour)

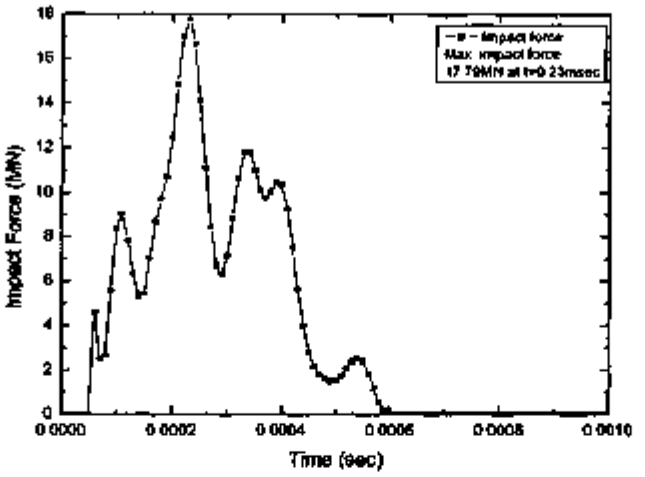


외부 쉘의 최대응력 : 267.3 MPa

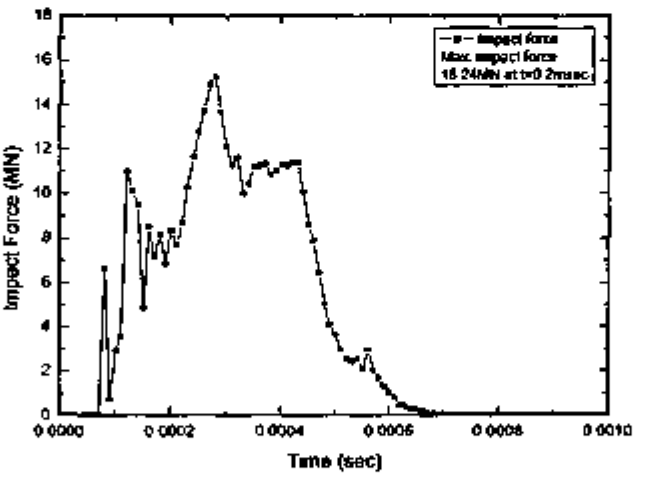
내부 쉘의 최대응력 : 155.8 MPa

응력한계 : 324 MPa(=0.7Su or 2.4Sm)

그림 4.3-6 후판 수평낙하 ABAQUS/Explicit 해석결과 (stress contour)

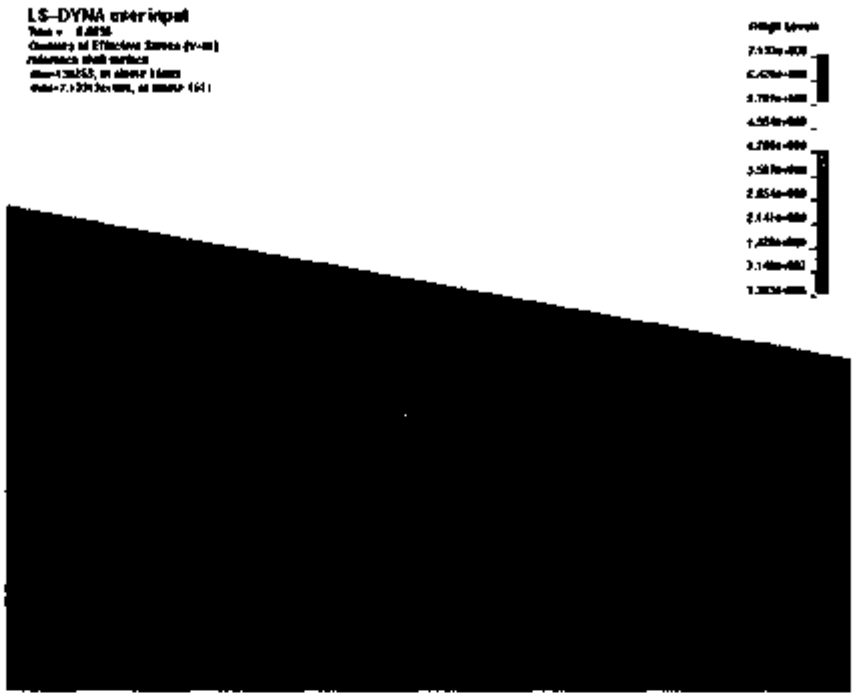


(a) LS-DYNA3D

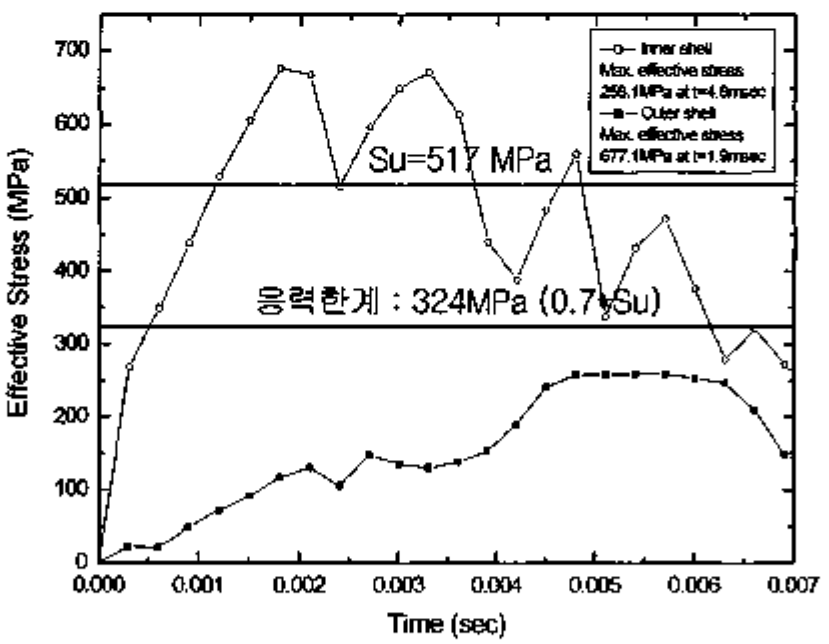


(b) ABAQUS/Explicit

그림 4.3-7 후판 수평낙하 해석결과 충격력 선도

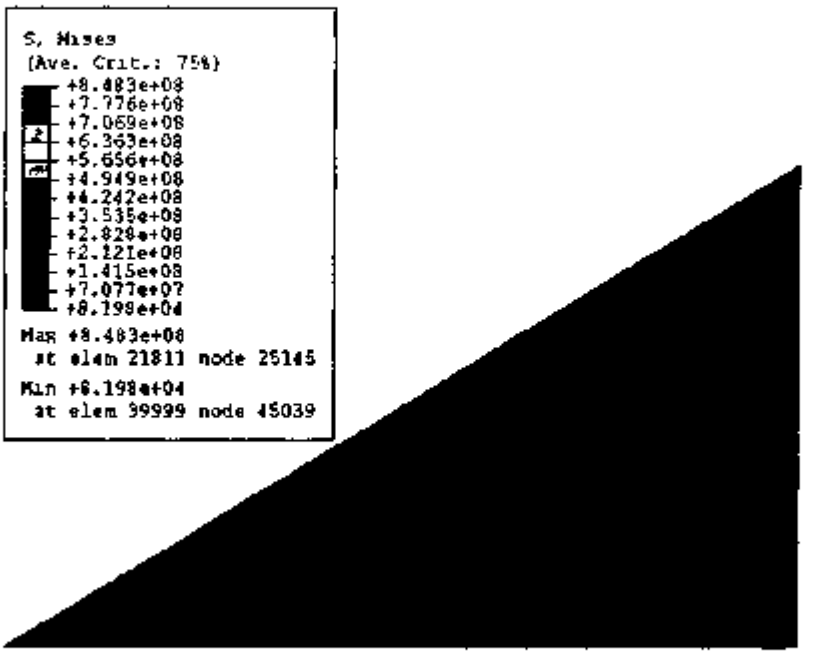


(a) 후판의 45° 경사낙하의 effective stress contour

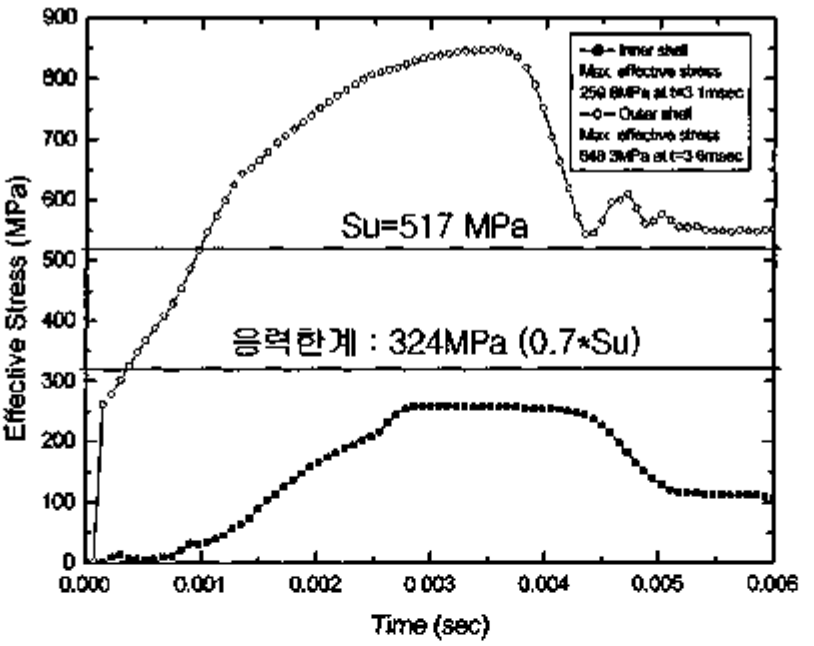


(a) 후판의 45° 경사낙하의 effective stress 선도

그림 4.3-8 후판의 45° 경사낙하 LS-DYNA3D 해석결과



(a) 후판의 45° 경사낙하의 effective stress contour



(a) 후판의 45° 경사낙하의 effective stress 선도

그림 4.3-9 후판의 45° 경사낙하 ABAQUS/Explicit 해석결과

제 4 절 열해석 및 열응력 해석결과

본 절에서는 LS-DYNA3D와 ABAQUS/Standard의 열해석 및 열응력 해석결과에 대해서 기술하였다. 10 CFR Part 71.73은 가상사고조건에 대해 자유낙하시험과 관통시험이 화재시험전에 선행되어야 한다고 기술되어 있다. 그런 까닭에 열해석을 할 경우의 운반용기는 자유낙하와 관통시험에 의해 손상을 입은 운반용기로 시험을 해야한다. 그러나, 손상을 입지 않은 운반용기가 열해석에 사용되었다. 왜냐하면 9m 자유낙하는 운반용기 본체에 영구변형을 일으키지 않기 때문이다. 충격후에 운반용기는 초기 형상으로 되돌아간다. 바스켓은 어떤 부분에선 영구변형을 일으키지만 이것은 매우 작은 부분에 국한된 국부변형이고 그 크기는 작다. 충격완충체는 충격후의 변형이 충격완충체가 절연체의 기능을 방해하지 않는 것으로 생각되기 때문이다. 관통시험에 의해 운반용기 본체는 국부적으로 함몰되나 그 범위가 국부적이고 제한적이기 때문에 관통시험에 의한 효과가 크지 않다. 이러한 것들은 열전달에 큰 영향을 미치지 않으므로 손상을 입지 않은 모델이 사용되어도 큰 지장이 없다.

열해석은 3장 1절에서 설명된 전도, 대류, 복사열전달 이론에 기초한 온도해석으로써 해석후 각 부분의 온도분포를 알아내기 위해 해석을 한다. 열응력 해석은 열해석에서 구해진 온도분포에 의한 해석으로 2차 응력으로 분류되며 규정에서는 3Sm보다 작아야 한다고 규정하고 있다. 따라서 열해석이 이루어진 후에 열응력해석이 뒤따라야 한다. 열응력을 2차 응력으로 분류하는 이유는 모델의 기하학적인 형상과 구속조건에 크게 영향을 받아 발생되기 때문이다. 열해석시 주의할 점은 열전도도와 비열값을 물성값으로 입력해야 한다. 특히 온도에 따른 물성값(열전도도, 비열)을 알고 있으면 정확한 해석을 할 수 있다. ABAQUS/Standard에서 열해석을 하려면 열해석 요소를 사용해야 하고, LS-DYNA3D에서도 열해석을 할 수 있는 요소를 사용해야 한다. 두 프로그램 모두 열해석과 열응력 해석을 위해 implicit 방법을 사용해서 해석을 수행한다.

운반용기의 열해석은 크게 세가지 단계로 분류된다(10 CFR Part 71, IAEA ST1). 첫째 단계는 내부 핵연료의 붕괴열과 외부대기온도에 의한 정상상태해석이고, 둘째 단계는 800℃의 화재사고조건에서 30분간 노출되어 있

는 해석이다(그림 4.4-1). 마지막으로 세 번째 단계는 외부대기온도에서 자연냉각되는 해석이다. 이 세가지 해석은 첫째 단계부터 순차적, 연속적으로 수행되어야 한다. 그리고 규정에서는 각 단계마다 필요한 운반용기 외부표면의 표면 방사율을 정상운반조건일 경우 0.93으로 규정하고 있고, 800℃ 화재사고조건일 경우에는 0.8로 규정하고 있다. 또한 대류열전달 계수는 정상 및 800℃ 화재사고조건에 대해 다음 식과 같이 규정하고 있다.

열해석은 해석의 신뢰성을 평가하기 위해 1988년에 실행된 실험결과(그림 4.4-2)와 비교하였다.

정상운반조건 대류 열전달 계수 : $h = 1.44\ \Delta T^{0.33}$ (4.4-1a)

가상사고조건 대류 열전달 계수 : $h = 0.0845\ \Delta T^{0.33}$ (4.4-1b)

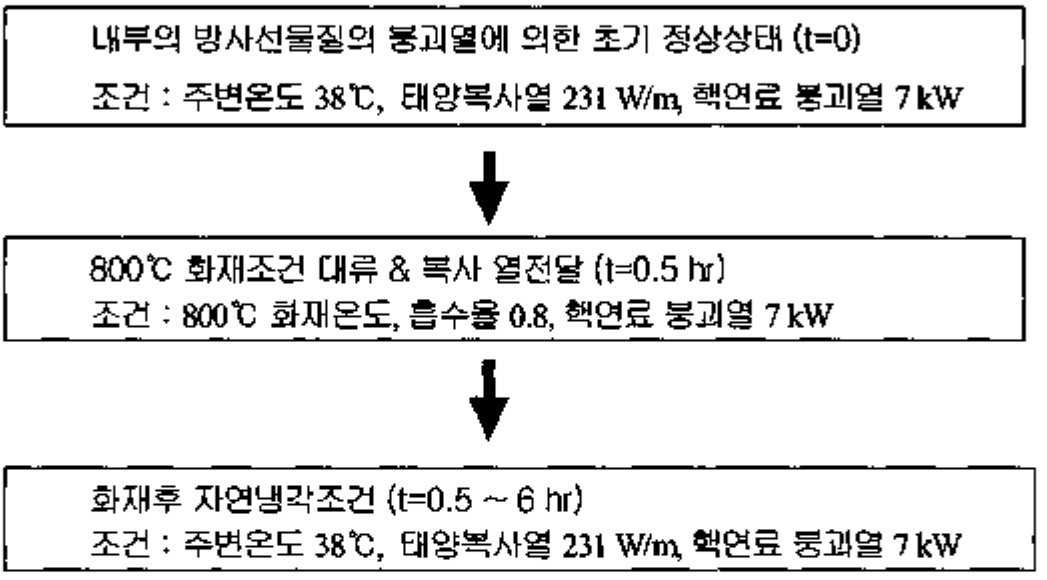


그림 4.4-1 운반용기의 열해석 순서도

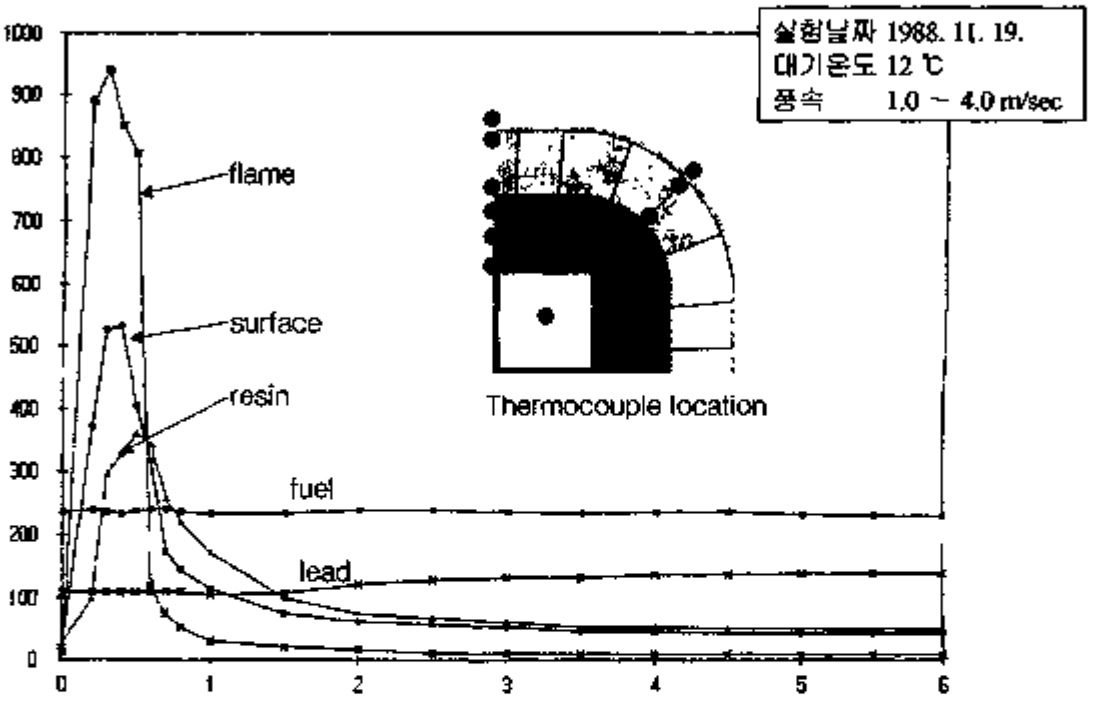


그림 4.4-2 KSC-4 운반용기의 800℃ 화재시험 결과

1. 열해석

그림 4.4-3은 LS-DYNA3D의 열해석 결과를 시간에 대해서 나타낸 것이다. 초기 정상상태 해석 후 나타난 표면온도(145.9℃)가 800℃ 화재조건동안 급격히 상승하여 30분 후에 535.9℃까지 올라간다. 30분 이후 냉각과정동안 외부표면온도는 2시간 까지는 급격히 냉각되지만 2시간 이후부터는 냉각곡선이 완만해 진 것을 볼 수 있다. 운반용기의 내부온도는 resin부분을 제외하곤 큰 변화를 보이지 않는 것을 알 수 있다. 차폐체로 사용되는 납은 6시간동안 최대온도 260℃을 갖지만 녹는점(327℃)에 훨씬 미치지 못하므로 안전하다고 할 수 있다. 열해석 동안 외부표면의 온도가 전도에 의해서 내부로 전달되는 것을 확인할 수 있지만 resin의 열전도율이 낮아서 많은 양이 내부로 전달되지 못한다는 것을 알 수 있다. 그러나 초기 정상상태해석에서는 내부의 붕괴열이 동판을 통해서 외부로 잘 전달되는 것을 알 수 있다. 그림 4.4-4는 LS-DYNA3D의 해석결과 각 단계에서의 최종온도분포를 나타내고 있는데 그림 (b)에서 외부의 열이 내부로 전달되는 모습을 보여주고 있고 그림 (c)에선 6시간의 냉각과정동안 내부의 온도분포가 안정화된 것을 볼 수 있다.

그림 4.4-5는 ABAQUS/Standard의 해석결과를 시간에 대해서 나타낸 것이다. LS-DYNA3D와 마찬가지로 800℃ 화재조건동안 온도가 급격히 상승하는 것을 볼 수 있고 이후 2시간 동안은 급격히 냉각되지만 이 이후부터는 냉각곡선이 완만해진 것을 볼 수 있다. 6시간의 열해석동안 차폐체인 납은 최대온도 250℃로 녹는점 327℃보다 적게 기록되었다. 그림 4.4-6은 ABAQUS/Standard의 해석결과 각 단계에서의 최종온도분포를 나타내고 있다. LS-DYNA3D와 마찬가지로 화재조건동안 외부의 온도가 내부로 전달되는 것을 볼 수 있고 6시간 이후엔 내부의 온도분포가 안정화된 것을 볼 수 있다. 그림 4.4-7을 보면 외부표면에서 ABAQUS/Standard의 결과가 LS-DYNA3D보다 800℃ 화재시험동안에는 높게 나타났고 이후 냉각과정에서는 LS-DYNA3D보다 낮은 온도분포를 보이고 있다. 따라서 복사조건에 대한 해석동안에는 ABAQUS /Standard가 LS-DYNA3D보다 보수적으로 평가하고 있는 것을 알 수 있다.

그림 4.4-8~10은 초기조건에 의한 해석, 800℃ 30분 열해석, 6시간 자연냉각의 각 단계에서 ABAQUS/Standard와 LS-DYNA3D의 결과를 비교한

것이다. 이 세 그림들은 모두 운반용기의 반경반향 온도분포를 나타내고 있다. 먼저, 그림 4.4-8을 살펴보면 초기조건에 의한 해석에서 LS-DYNA3D가 약 20℃정도 높게 분포되는 것을 볼 수 있다. fuel basket으로 전달된 핵연료의 붕괴열이 납과 레진을 통해서 외부로 빠져나가는 것을 보이고 있다. 그림 4.4-9는 800℃ 30분 화재조건 직후의 운반용기의 반경방향 온도분포를 나타내고 있다. 초기조건해석과 마찬가지로 LS-DYNA3D의 온도가 20℃정도 높게 분포하지만 외부표면근처에서는 ABAQUS/Standard에서 복사조건이 보수적으로 평가되는 것을 알 수 있다. 외부의 열이 내부로 전달되는 것을 resin에 의해 상당량이 차단되는 것을 알 수 있다. 마지막으로 그림 4.4-10은 6시간 자연냉각 후 운반용기의 반경방향 온도분포를 나타내고 있다. 역시 마찬가지로 LS-DYNA3D에서 ABAQUS/Standard보다 약간 높은 온도를 보이고 있다. 하지만 그 경향은 두 프로그램에서 같은 결과를 내고 있는 것을 알 수 있다.

표 4.4-1 열해석 결과

	각 부분의 최대온도 (℃)					
	정상상태		800℃ 화염조건 30분 후		38℃ 냉각조건 6시간 후	
	DYNA3D	ABAQUS	DYNA3D	ABAQUS	DYNA3D	ABAQUS
Fuel basket	259.0	181.5	254.4	181.5	280.1	228.1
Lead shield	182.0	115.8	185.3	121.8	222.8	167.7
Inner shell	175.4	109.5	188.8	139.8	214.8	161.0
Resin shield	174.9	109.2	531.6	738.8	214.3	160.6
Outer shell	145.9	77.2	535.9	742.5	165.8	106.3

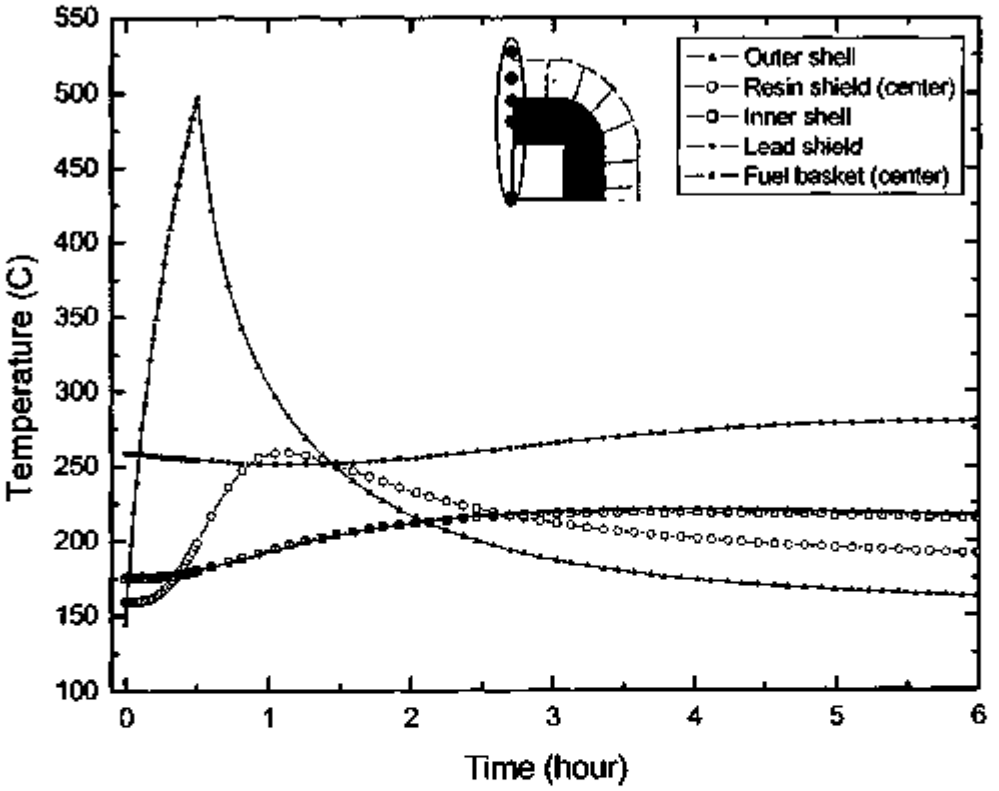
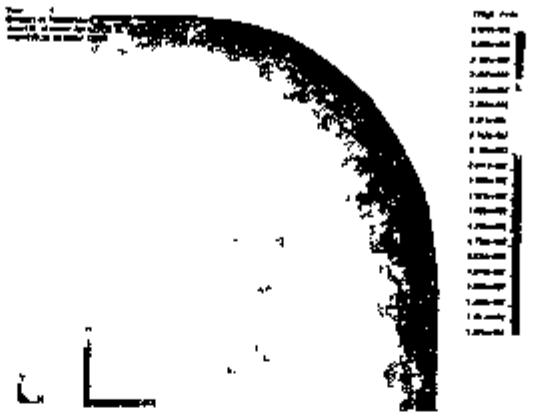
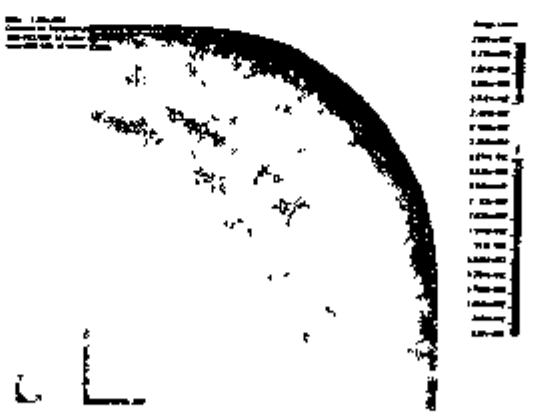


그림 4.4-3 LS-DYNA3D 열해석 결과 I



(a) 초기조건 해석 후 온도분포

(b) 800℃ 화재조건 30분 후 온도분포



(c) 6시간 냉각 후 온도분포

그림 4.4-4 LS-DYNA3D 열해석 결과 II

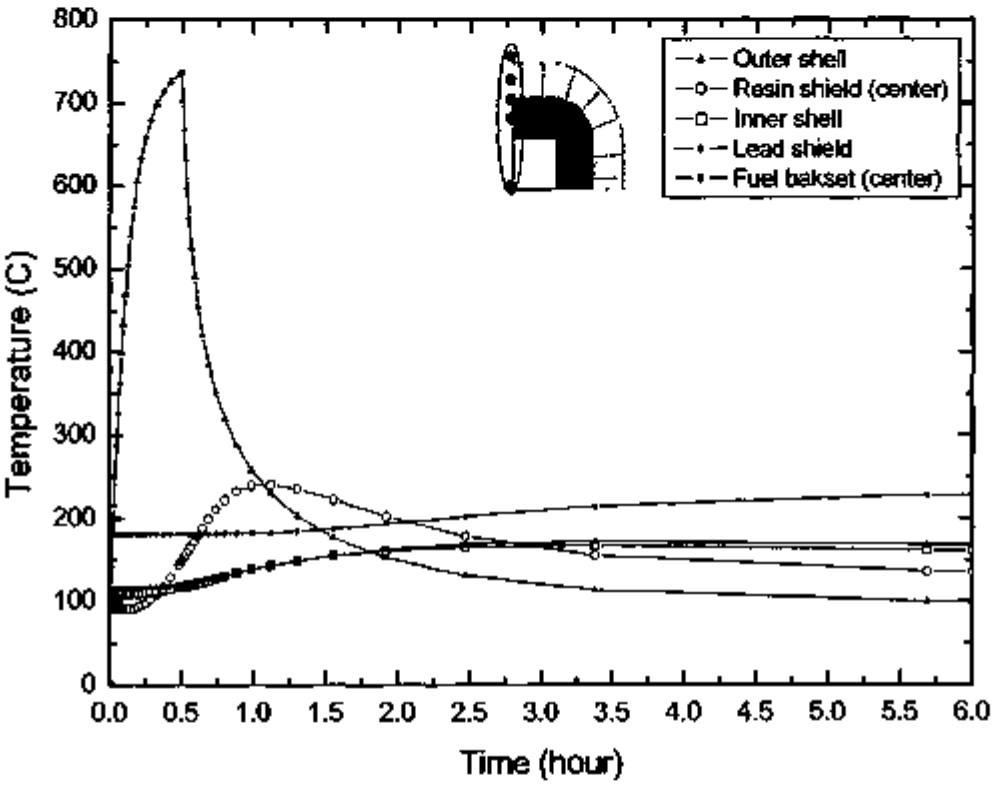
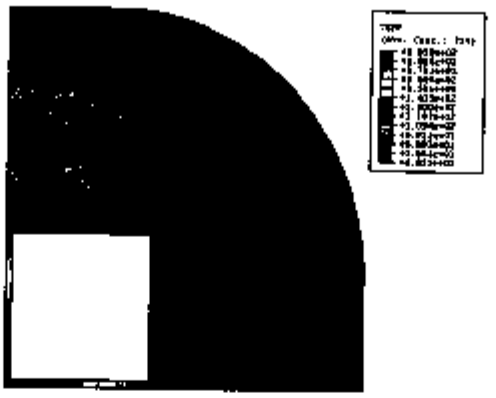
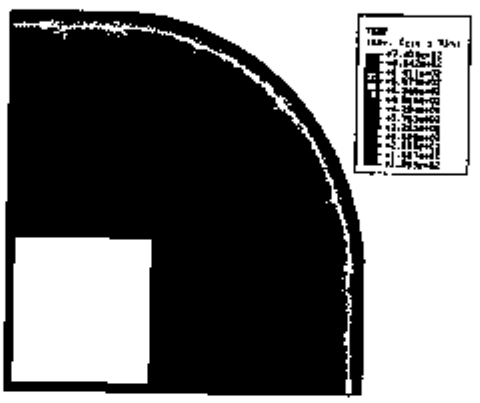


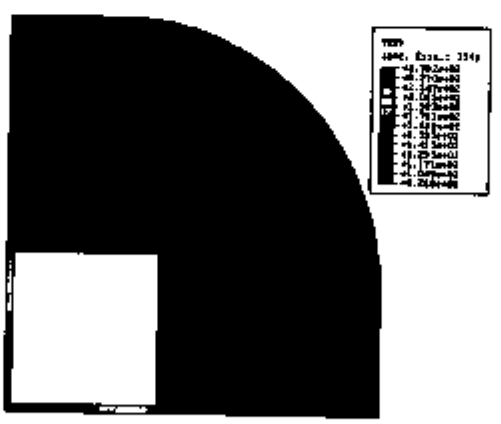
그림 4.4-5 ABAQUS/Standard 열해석 결과



(a) 초기조건 해석 후 온도분포



(b) 800℃ 화재조건 30분 후 온도분포



(c) 6시간 냉각 후 온도분포

그림 4.4-6 ABAQUS/Standard 열해석 결과

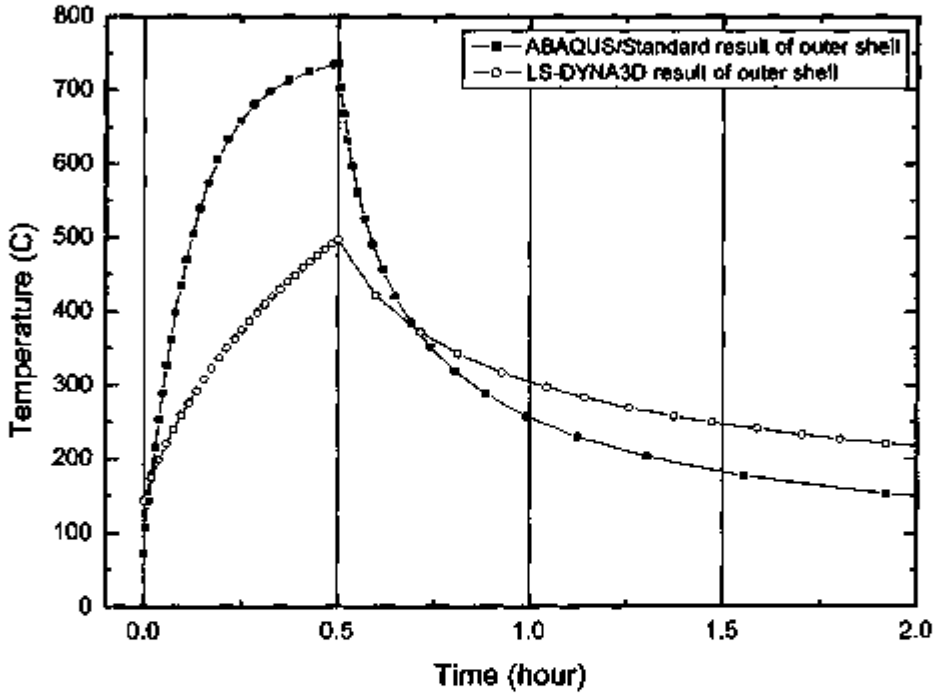


그림 4.4-7 LS-DYNA3D와 ABAQUS/Standard의 열해석 결과비교

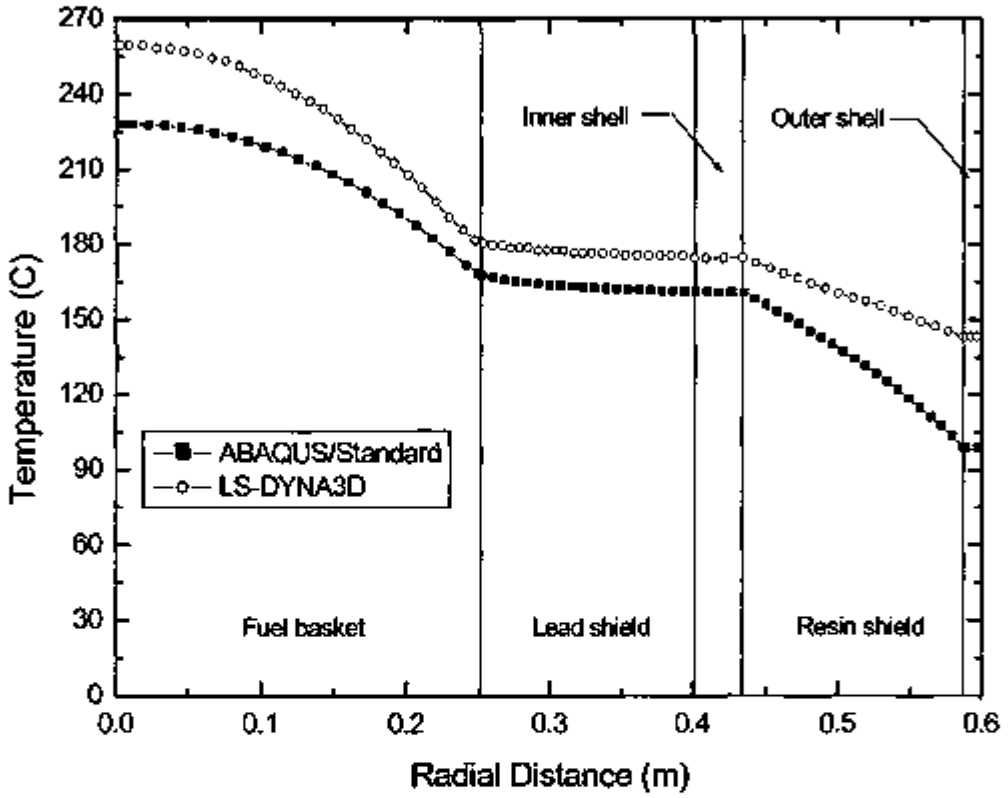


그림 4.4-8 초기조건에 의한 해석 후 운반용기의 반경방향 온도분포

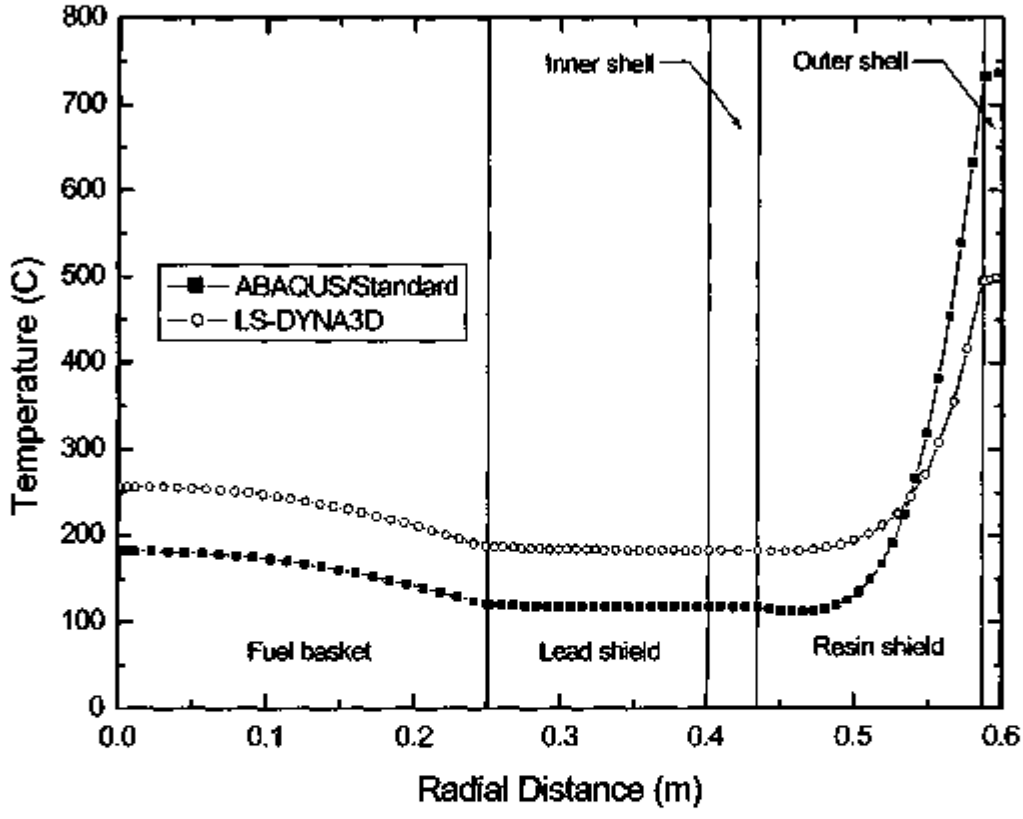


그림 4.4-9 800℃ 30분 가열 후 운반용기의 반경방향 온도분포

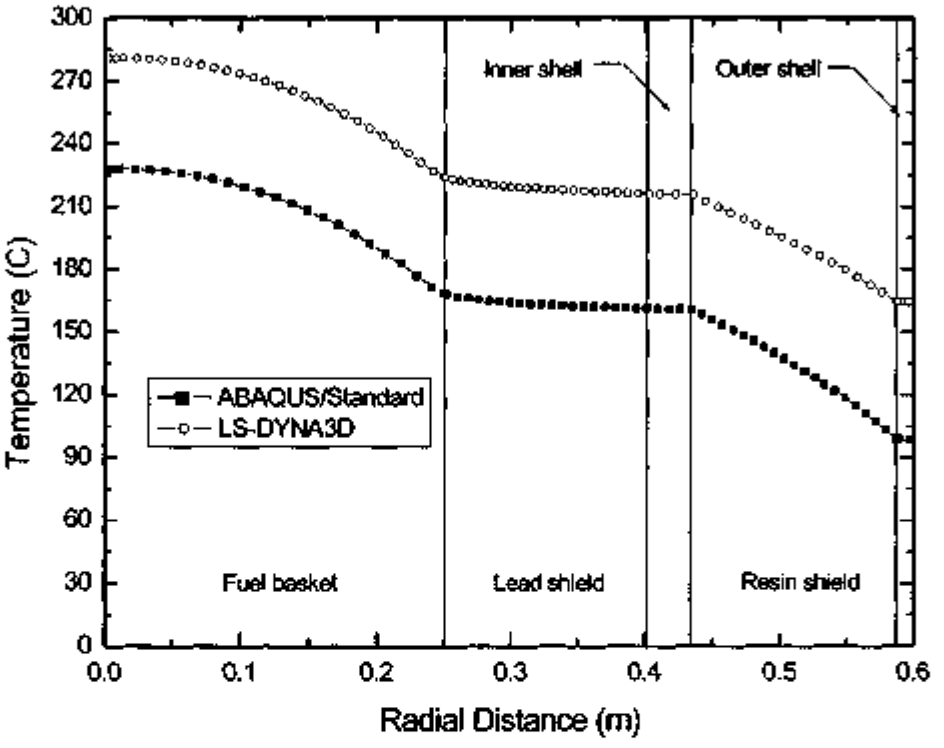


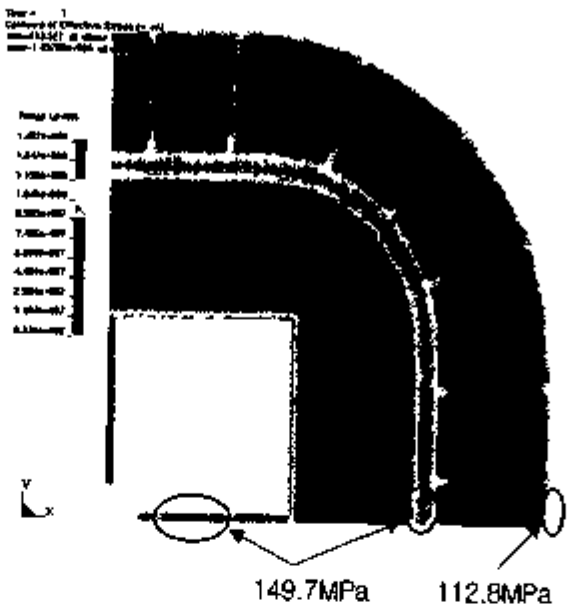
그림 4.4-10 6시간 자연냉각 후 운반용기의 반경방향 온도분포

2. 열응력해석

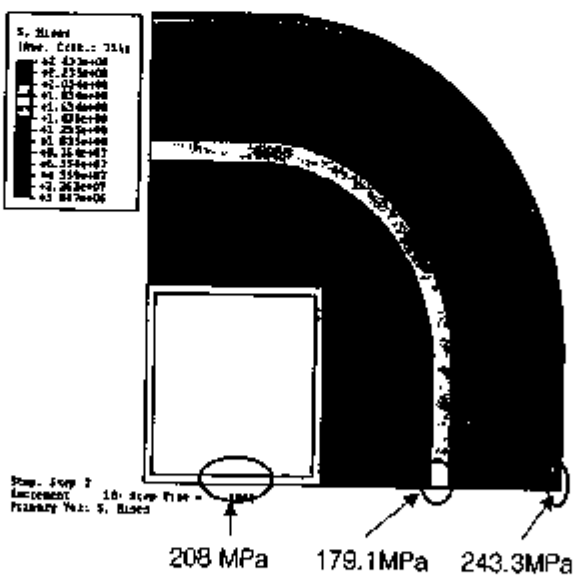
열응력 해석은 열해석으로부터 얻어진 온도분포에 의해 해석이 수행되었다. 즉, 열해석의 결과값이 열응력해석의 입력값으로 사용되었다. 또한, 열해석과 열응력해석의 모델이 같은 것을 사용해 해석을 수행하였다. 표 4.4-2는 LS-DYNA3D와 ABAQUS/Standard의 열응력해석 결과를 비교한 것이다. LS-DYNA3D는 각 단계에서 모두 허용응력 414MPa(=3Sm)에 훨씬 미치지 못하는 결과를 보이고 있다. 또한 ABAQUS/Standard역시 외부쉘을 제외하곤 운반용기의 대부분에서 허용응력보다 작은 값을 기록하고 있다. 따라서 800℃ 화재조건이 운반용기에 미치는 영향은 적다고 판단이 된다. 그림 4.4-11은 800℃ 30분 화재조건 후 온도분포에 의한 열응력 해석결과를 effective stress로 나타낸 그림이다. 그림에서도 알 수 있듯이 열에 의해 구조재(fuel basket, inner shell, outer shell)가 받는 영향이 작다는 것을 알 수 있다.

표 4.4-2 열응력해석 결과

	각 부분의 최대응력 (MPa)					
	정상상태		800℃ 화염조건 30분 후		38℃ 냉각조건 6시간 후	
	DYNA3D	ABAQUS	DYNA3D	ABAQUS	DYNA3D	ABAQUS
Fuel basket	150.6	192.0	149.7	208.0	141.1	244.3
Inner shell	151.9	177.3	149.7	179.1	142.1	143.8
Outer shell	160.8	208.2	112.8	243.3	156.4	472.1



(a) LS-DYNA3D 해석결과



(b) ABAQUS/Standard 해석결과

그림 4.4-11 800℃ 30분 화재조건 후 온도차이에 의한 열응력 해석결과

제 5 장 유한요소해석 코드의 사용절차

제 1 절 후판낙하 충격해석 코드의 사용절차

4장 3절을 통해 LS-DYNA3D와 ABAQUS/Explicit는 운반용기의 후판낙하 충격해석에 적합하다는 것을 알았다. 본 절에서는 운반용기의 후판낙하 충격해석 코드사용에 대한 절차에 대해 정리하였다.

그림 5.1-1은 충격해석의 흐름을 도시한 것이다. 먼저 충격해석 코드를 선택하고 이후 [모델링], [입력화일]의 수정, [해석], [결과]의 고찰 순서로 해석이 이루어진다. [모델링]에선 모든 부분을 고려하는 것이 좋지만 그렇게 되면 해석에 소요되는 시간과 비용이 기하급수적으로 불어나기 때문에 해석에 큰 영향을 미치지 않는 부분은 단순화 시켜 모델을 생성하는 것이 바람직하다. 후판낙하 충격해석의 경우에는 운반용기에 비해 후판이 낙하해서 부딪히는 면적이 크지 않기 때문에 운반용기의 위,아래 부분은 동일하게 취급해도 무관하다. 그리고 충격완충체의 나무에 대한 방향성을 등방성으로 가정하거나 또는 충격완충체를 무시하여 모델링에서 배제하여도 해석결과에는 큰 영향이 미치지 않는다(단, 운반용기의 9m 낙하해석에서는 충격완충체의 방향성을 고려하여 정확한 해석이 되도록 하여야 함). 내부의 동판은 두께가 작고 후판낙하의 충격에 큰 영향을 미치지 않으므로 모델에서 배제하여도 무방하다. 내부의 접촉조건 또한 완전결합으로 가정하여 모델을 생성시키고, 운반용기의 대칭조건을 충분히 이용해 1/2모델을 생성한다. 이렇게 생성된 모델로부터 해석에 필요한 입력화일을 작성한다. 입력화일에서는 경계조건, 하중조건, 재료의 물성이 정확히 작성되었는가를 확인해야 한다. 표 5.1-1과 표 5.1-2는 후판낙하 충격해석에 대한 LS-DYNA3D와 ABAQUS/Explicit의 전산입력자료 예이다. 입력화일의 작성이 끝난 뒤 해석을 하고 결과값을 확인해야 한다. 충격해석 결과는 에너지 선도를 확인해 운동에너지와 내부에너지가 보존되고 있는 가를 확인한다. 이때 에너지 손실이 있을 경우 그 범위가 10%이내에 있어야 해석에 신뢰성이 있다고 판단할 수 있다. 구조재와 격납경계의 응력은 일차막응력만을 고려하였을 경우 2.4Sm을 넘지 말아야 하고 일차막응력과 굽힘응력을 함께 고려하면 3.6Sm을 넘지 말아야 한다. 또한 실험결과(변형률, 가속도)값이 있을 경우 실험값과의 비교 또한 중요하다.

표 5.1-1 후판낙하 충격해석 LS-DYNA3D 입력화일 예

	LS-DYNA3D 입력화일의 일부분
경계 조건	*BOUNDARY_SPC_SET $ NSID CID DOFX DOFY DOFZ DOFRX DOFRY DOFRZ 1 0 1 0 1 0 1 *BOUNDARY_SPC_SET $ NSID CID DOFX DOFY DOFZ DOFRX DOFRY DOFRZ 2 1 1 1 1 1 1
하중 조건	*INITIAL_VELOCITY_GENERATION $ ID STYP OMEGA VX VY VZ 3 3 0.0 -13.3 0.0 0.0 $ XC YC ZC NX NY NZ PHASE 0.0 0 0.0 1.0 1.0 1.0 0
물성값	*MAT_PLASTIC_KINEMATIC $ MID RO E PR SIGY ETAN BETA 23 7910 1.870E+11 0.32 2.58E+8 1.89E+9 0 $ SRC SRP FS VP 0.0 0.0 0.0 0.0

표 5.1-2 후판낙하 충격해석 ABAQUS/Explicit 입력화일 예

	ABAQUS/Explicit 입력화일의 일부분
경계 조건	*BOUNDARY YSYMM, YSYMM FIX, ENCASTRE REF_NODE, 2,3 REF_NODE, 4,6
하중 조건	*INITIAL CONDITIONS, TYPE=VELOCITY REF_NODE, 1, -13.3
물성값	*SOLID SECTION, ELSET=STEEL, MATERIAL=STEEL_PLASTIC *MATERIAL, NAME=STEEL_PLASTIC *ELASTIC 187E9, 0.3 *DENSITY 7913, *PLASTIC 258.4E6, 0.0 1033.9E6, 0.403

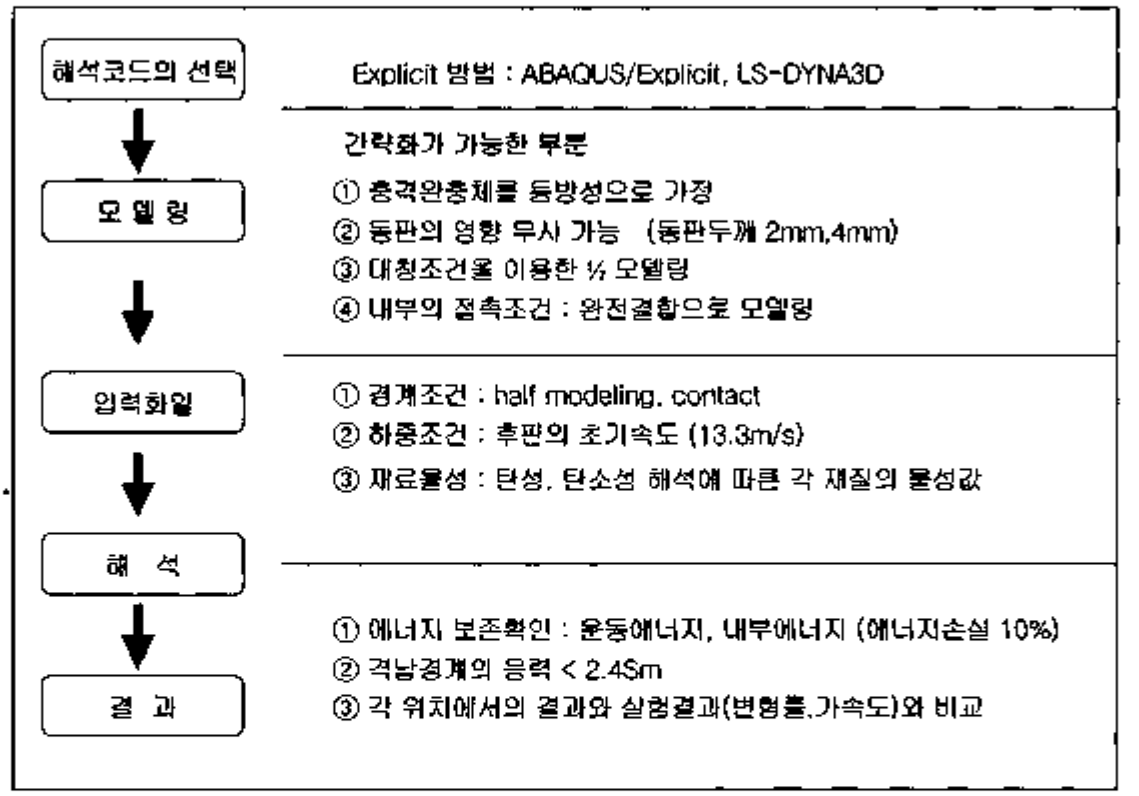


그림 5.1-1 후판낙하 충격해석 procedure

제 2 절 열 및 열응력 해석 코드의 사용절차

4장 4절을 통해 LS-DYNA3D와 ABAQUS/Standard는 운반용기의 열해석 및 열응력 해석에 적합하다는 것을 알았다. 본 절에서는 운반용기의 열해석 및 열응력 해석 코드사용에 대한 절차에 대해 정리하였다.

그림 5.2-1과 5.2-2는 열해석 및 열응력 해석의 흐름을 도시한 것이다. 충격해석과 마찬가지로 코드를 선택하고 이후 [모델링], [입력화일]의 수정, [해석], [결과]의 고찰 순서로 해석이 이루어진다. 그러나 모델링 방법, 경계조건, 하중조건 그리고 재료의 물성값이 열해석 및 열응력 해석에 적합하도록 입력되어야 한다.

열해석 코드의 선택에선 ABAQUS의 경우 Standard모듈을 선택해야 하고 LS-DYNA3D는 입력화일의 최초에 열해석을 한다고 선언해야 한다. 열해석 모델링에선 운반용기내부의 각 부분을 통한 열전달이 중요하기 때문에 실제 단면과 동일한 모델이 필요하다. 선택될 수 있는 모델에는 그림 5.2-3과 같이 2차원 단면 대칭모델, 2차원 축 대칭모델, 3차원 대칭모델이 사용될 수 있다. 또한 열해석 요소는 충격해석과 다른 열해석 전용 요소를 사용해야 한다. 열해석 입력화일에는 하중조건에서 운반용기 내부의 붕괴열과 외부의 대류 및 복사조건이 올바르게 적용되었고, 재료물성값에는 온도에 따른 비열 및 열전도도가 온도에 따라 적용되었는가를 확인해야 한다. 표 5.1-3은 열해석에서 가장 중요한 하중조건에 대한 예를 LS-DYNA3D와 ABAQUS/Standard에 대해 각각 정리하였다. 표 5.1-4는 열해석을 위한 물성값의 정의를 어떻게 내리는지 정리한 것이다. 입력화일을 작성한 후 운반용기의 열해석은 3단계로 나누어 해석을 수행한다. 이때 ABAQUS/Standard에서는 [step]이라는 명령어를 사용해 1개의 입력화일에서 각 단계의 해석을 순차적으로 할 수 있지만 LS-DYNA3D에선 각 단계마다 입력화일을 고쳐서 새로운 해석을 수행해야 한다. 해석결과는 각 단계별 온도결과와 실험값과의 비교를 통해 결과를 고찰 할 수 있다. 그러나 실험결과값이 없을 경우에는 초기조건에 의한 정상상태해석의 결과가 대류, 복사, 전도 열전달식에 의한 계산결과와 맞는지를 검토해야 한다.

열응력 코드의 선택 또한 열해석과 마찬가지로 ABAQUS는 Standard 모듈을 선택해야 하고 LS-DYNA3D는 implicit방법으로 응력해석을 수행한다. 열해석의 온도 결과값을 열응력의 하중조건으로 사용하기 때문에 해석모델은 열해석 모델과 동일해야 한다. 열응력해석은 구조해석이기 때문에 요소선정은 일반구조해석 요소와 동일한 것을 사용해야 한다. 표 5.1-5는 열응력해

석을 위한 전산입력 자료(implicit 방법, 하중조건, 경계조건)에 대한 예를 보이고 있다. 열응력해석은 열해석과 마찬가지로 온도에 따라 변하는 물성값을 필요로 한다. 온도에 독립적인 값을 사용할 수도 있지만 종속적인 물성값을 사용하는 해석이 좀 더 정확한 해석이기 때문에 표 5.1-6처럼 온도에 종속적인 탄성계수, 포아송비, 열팽창계수, hardening계수를 사용해야 한다. 열응력의 해석결과는 충격해석과 마찬가지로 격납경계의 안전성을 확인해야 한다. ASME 규정에 있는 열응력의 한계는 3Sm이다.

표 5.1-3 열해석을 위한 하중조건의 입력화일 예

하중조건		전 산 입 력 화 일
내부 열원	LS-DYNA3D	*boundary_flux_set 10 $ lcid MLC1 MLC2 MLC3 MLC4 1 -428.4 -428.4 -428.4 -428.4
	ABAQUS	*DSFLUX HF, S, 428.4
대류	LS-DYNA3D	*boundary_convection_set 1 $ hlcid HMULT TLCID TMULT -3 0.0845 1 1073
	ABAQUS	*BOUNDARY AMBI_NODE_ALL, 11, ,38.0 *SFILM SKSC4, FNU
복사	LS-DYNA3D	*boundary_radiation_set 1 $ RFLCID RFMULT TILCID TIMULT 2 4.536e-8 2 1073
	ABAQUS	*BOUNDARY AMBI_NODE_ALL, 11, ,38.0 *RADIATION VIEWFACTOR, CAVITY=CAV2D, SYMMETRY=NSYMM *RADIATION SYMMETRY, NAME=NSYMM *REFLECTION, TYPE=LINE 0.0, 0.0, 0.81, 0.0 *REFLECTION, TYPE=LINE 0.0, 0.0, 0.0, 0.81

표 5.1-4 온도에 따른 열적 물성값의 입력화일 예

구 분	온도에 따른 물성값 예
LS-DYNA3D	*MAT_thermal_isotropic_td_lc 1 7910 10 11 *define_curve 10 -25 463.0 0 470.0 21.3 477.5 121.3 509.4 232.4 532.1 343.5 549.4 454.6 563.4 565.7 573.1 676.8 584.8 787.9 591.5 800.0 592.0 *define_curve 11 -25 13.5 0 14.0 21.3 14.9 121.3 16.6 232.4 18.4 343.5 20.1 454.6 21.6 565.7 23.2 676.8 24.8 787.9 26.1 800.0 26.3
ABAQUS	*MATERIAL, NAME=STEEL *DENSITY 7913.0, ** define thermal conductivity that depends on temperature *CONDUCTIVITY 13.4, 0.0 17.71, 200 20.46, 400 23.90, 600 25.96, 800 ** define specific heat that depends on temperature *SPECIFIC HEAT 504, 0.0 522, 200 540, 400 558, 600 576, 800

표 5.1-5 열응력해석을 위한 입력화일

구 분		전 산 입 력 화 일
Implicit 정의	LS-DYNA3D	*control_implicit_general 1,,1, *control_implicit_linear *control_implicit_auto 0,
	ABAQUS	*STATIC 1.0,
하중 조건	LS-DYNA3D	*include temp_load.k
	ABAQUS	*TEMPERATURE, FILE=HEAT-1, BSTEP=1, BINC=1, ESTEP=1, EINC=1 *TEMPERATURE, FILE=HEAT-1, BSTEP=2, BINC=1, ESTEP=2, EINC=111 *TEMPERATURE, FILE=HEAT-1, BSTEP=3, BINC=1, ESTEP=3, EINC=106
경계 조건	LS-DYNA3D	*BOUNDARY_SPC_set 1 0 1 1 1 1 1
	ABAQUS	*BOUNDARY XSYMM, XSYMM YSYMM, YSYMM

표 5.1-6 온도에 따른 기계적 물성값의 입력화일 예

구 분	전 산 입 력 화일

LS-DYNA3D	*MAT_ELASTIC_plastic_thermal
	$MATERIAL NAME outer shell
	1 7910
	-25 21 11 93 33 204 44 315 56 426 6 537 7 648 8
	$ young's modulus
	195 2e+9, 191 1e+9, 183 4e+9, 175 2e+9, 166 1e+9, 156 9e+9, 147 7e+9, 138 6e+9
	0 3 0 3 0 3 0 3 0 3 0 3 0 3 0 3
	$ thermal expansion
	1 4e-5, 1 427e-5, 1 507e-5, 1 615e-5, 1 696e-5, 1 748e-5, 1 8e-5, 1 836e-5
	$ yield stress
	210 e+6 206 89e+6 172 46e+6 142 4e+6 125 57e+6 115 86e+6 107 62e+6 65 24e+6
	$ plastic hardening modulus
	9 e+9 8 981e+9 8 358e+9 7 627e+9 7 410e+9 7 209e+9 6 667e+9 4 815e+9

ABAQUS	*MATERIAL, NAME=STEEL ** define elastic modulus that depends temperature *ELASTIC 195 02E9, 0 3, 21 11 193 75E9, 0 3, 37 78 190 90E9, 0 3, 93 33 186 69E9, 0 3, 148 89 183 26E9, 0 3, 204 44 175 03E9, 0 3, 315 56 166 01E9, 0 3, 426 6 156 80E9, 0 3, 537 7 ** define plastic that depends temperature *PLASTIC 206 68E6, 0 0, 21 11 516 75E6, 0 034, 21 11 206 68E6, 0 0, 37 78 516 75E6, 0 035, 37 78 172 28E6, 0 0, 93 33 489 22E6, 0 037, 93 33 155 04E6, 0 0, 148 89 454 72E6, 0 038, 148 89 142 59E6, 0 0, 204 44 443 74E6, 0 039, 204 44 125 44E6, 0 0, 315 56 437 57E6, 0 042, 315 56 115 74E6, 0 0, 426 6 431 98E6, 0 044, 426 6 107 51E6, 0 0, 537 7 397 59E6, 0 043, 537 7 *DENSITY 7913, ** define thermal expansion that depends temperature *EXPANSION 1 24E 6, 21 11 1 45E-6, 37 78 1 07E 6, 93 33 1 66E-6, 148 89 1 6 15E 6, 204 44 1 696E 6, 315 56 1 7 48E-6, 426 6 1 800E 6, 537 7

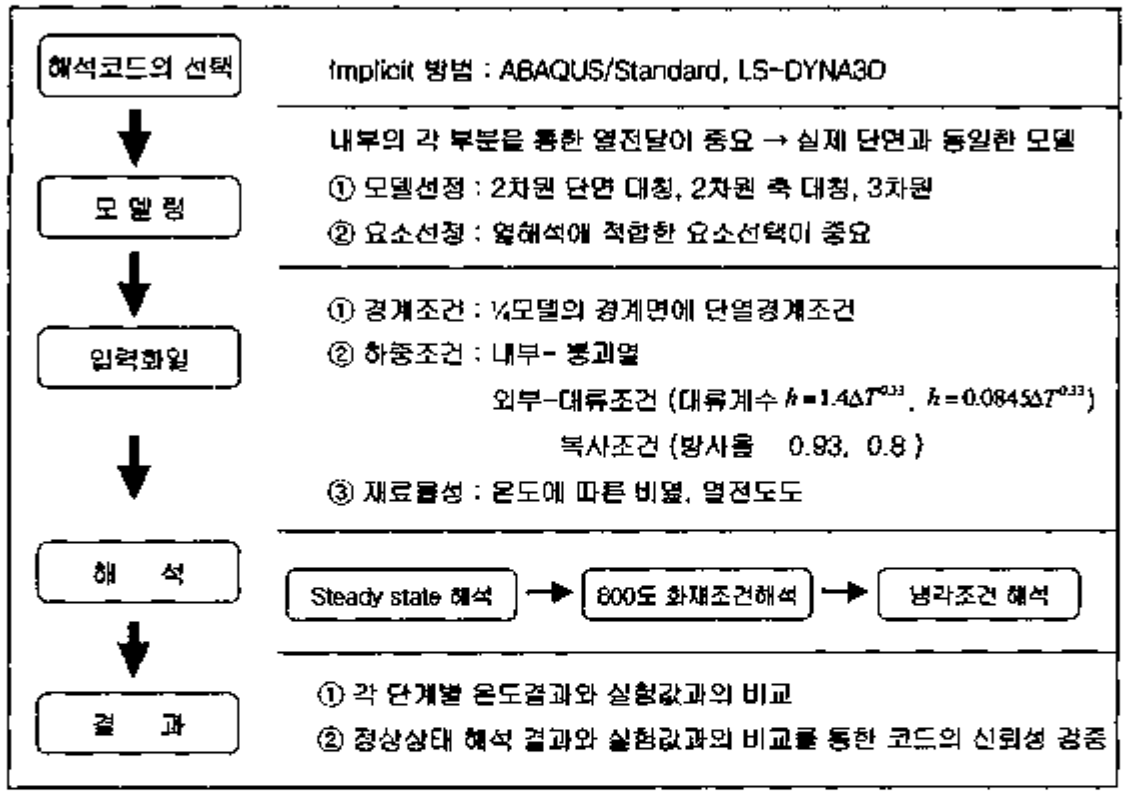


그림 5.2-2 열해석 procedure

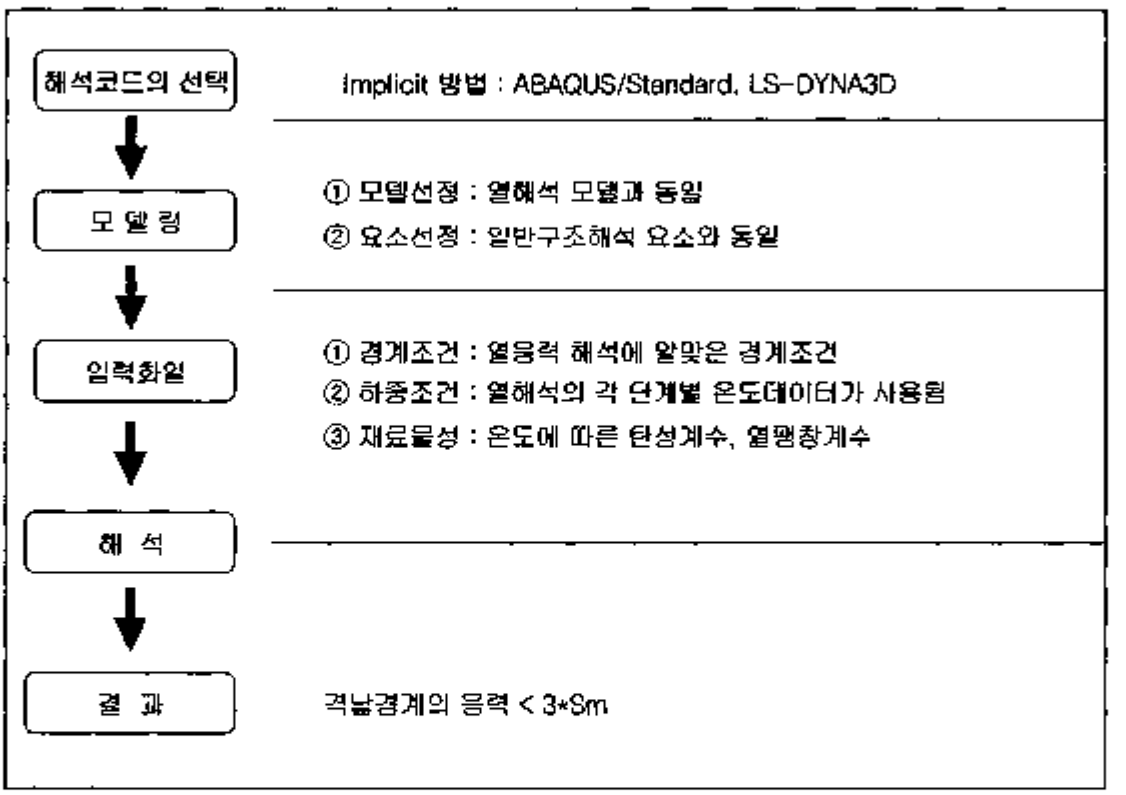
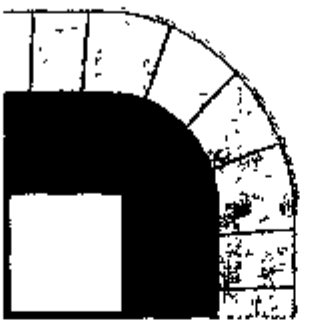


그림 5.2-3 열응력 해석 procedure



(a) 2차원 단면 모델 (1/4형상)

(b) 2차원 모델

(c) 3차원 모델

그림 5.2-4 운반용기 열해석에 사용될 수 있는 모델

제 6 장 결 론

1. 결 론

본 연구에서는 사용후 핵연료집합체 운반용기의 후판낙하 충격해석과 열해석 및 열응력해석에 대한 안전성을 평가하기 위한 규제요건과 해석요건을 분석하였으며, 운반용기의 후판낙하 충격해석과 열해석 및 열응력해석에 적합한 상용프로그램을 조사 및 분석하였고, 선택된 해석코드의 신뢰성을 분석하기 위해 KSC-4 운반용기에 대해 해석을 수행하고 그 건전성을 평가하여 ABAQUS와 LS-DYNA3D가 충격해석, 열해석 및 열응력해석에 적합한가를 검증하였다. 후판낙하충격, 열해석 및 열응력해석에 대한 규제요건에는 IAEA Safety Standards Series No. ST-1과 Regulatory Guide 7.8에 기술된 사항을 분석하였고, 해석요건에는 Regulatory guide 7.6에 기술된 사항을 분석하였다. 후판낙하충격 유한요소해석을 위해 ABAQUS/Explicit, LS-DYNA3D, DYTRAN을 분석하였고, 열해석 및 열응력 유한요소해석을 위해 ABAQUS/Standard, LS-DYNA3D, ANSYS, NASTRAN을 분석하였다. 이후 본 연구에서는 후판낙하충격, 열해석 및 열응력 해석기술을 개발하기 위해 KSC-4 운반용기모델에 대해 ABAQUS와 LS-DYNA3D를 사용해 해석방법을 연구하였다.

KSC-4 운반용기에 대한 후판낙하 충격, 열 및 열응력 해석결과 LS-DYNA3D와 ABAQUS는 이러한 해석에 적합한 프로그램이라는 것을 검증하였다. 이후 5장에선 4장에서 해석된 결과를 바탕으로 유한요소 해석코드의 입력화일의 예와 사용절차를 제시하였다.

후판낙하 충격해석에서 ABAQUS/Explicit는 감차적분을 이용하더라도 굽힘응력의 영향을 얻을 수 있고 LS-DYNA3D의 결과보다 보수적으로 나왔으며(표 6-1) LS-DYNA3D는 hourglass energy를 통해 해석의 신뢰성을 확인할 수 있었다. 800℃ 화재상태에 있는 운반용기의 열해석에서 ABAQUS/Standard는 LS-DYNA3D에 비해 대류 및 복사경계조건을 과도하게 평가하였고, 정상상태에 있는 운반용기의 열해석에서 LS-DYNA3D가 ABAQUS/Standard보다 보수적으로 평가하고 있었다(그림 6-1).

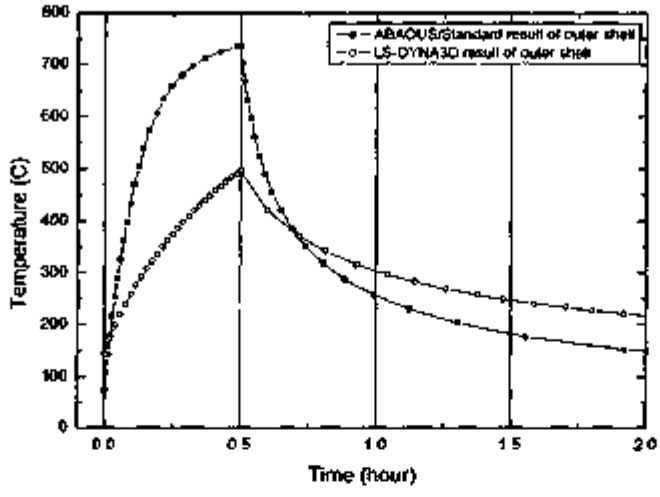


그림 6-1 열해석 결과비교

표 6-1 후판낙하 충격해석결과 최대응력의 비교

	Max. effective stress (MPa)					
	Inner shell			Outer shell		
	ABAQUS	DYNA3D	Diff.(%)	ABAQUS	DYNA3D	Diff.(%)
수직낙하	183.1	206.9	-12.9	291.4	265.4	8.9
수평낙하	155.8	158.6	-1.8	267.3	269.6	-0.8
경사낙하	259.8	258.1	0.6	848.3	677.1	20.2

$$* \text{ Diff.} = 100 - \frac{\textit{Effective stress using LS-DYNA3D}}{\textit{Effective stress using ABAQUS/Explicit}} \times 100$$

참 고 문 헌

1. IAEA Safety Standards Series No. ST-1, Regulation for the Safe Transfort of Radioactive Material, 1996 Edition

2. NRC Regulatory Guide 7.8, Load Combination for the Structural Analysis of Shipping Casks, USNRC, 1977

3. NRC Regulatory Guide 7.6, Design Criteria for the Structural Analysis of Shipping Cask Containment Vessels, USNRC, 1978

4. T. A. Nelson, R. C. Chun, "Methods for Impact Analysis of Shipping Containers, Lawrence Livermore National Laboratory", 1987

5. G. R. Cowper, " The Shear Coefficient in Timoshenko's Beam Theory", J. App. Mech., ASME, June, 1966, pp 335-340

6. 小林 治後, 佐藤 弘史, " 낙석의 내충격 설계", 도서출판 과학기술, 2000

7. Swanson Analysis System Inc., "ANSYS User's Manual", 1999

8. MSC, "NASTRAN User's Guide Manual", Version 68

9. MSC, "DYTRAN Release Notes", Version 4.7

10. H.K.S. Inc., "ABAQUS/Explicit User's Manual Ver. 5.8", 1998

11. LSTC, "LS-DYNA3D User's Manual Ver. 950", 1999

12. 한국에너지 연구소, "KSC-4 운송용기 안전성분석보고서", 1989

13. Nuclear Assurance Co., "NAC-1 Spent Fuel Shipping Cask Elastic/ Dynamic Analysis"

14. Walter A. Von Riesemann, Jommy R. Gues, "The Effects of Temperature on the Energy-Absorbing Characteristics of Redwood", Sandia Lab., NUREG/CR-0322 SAND77-1589, RT

15. Sandia Lab., "Energy Absorbing Characteristics of Materials", SLA-74-0159

16. ASME Boiler and Presure Vessel Code, Sec III, Nuclear Power Plant Components, Division 1, Appendix I, 1986

17. ASME Boiler and Presure Vessel Code, Sec III, Nuclear Power Plant Components, Division 1, 1986

18. H. J. Rack, G. A. Knorovsky, "An Assessment of stress Strain Data Suitable for Finite Element Elastic-Plastic Analysis of Shipping Containers", NUREG/CR-0481, Sand77-1872, Sandia Lab., 1978

19. LSTC, "FEMB User's Manual"

20. SDRC, "I-DEAS Master Series Student MAnual", 2000

21. ETA, "eta/PostGL User's Manual", 1999

22. 한국원자력연구소, "KSC-7 운반용기 구조설계 보고서", 1996

부　　록

부록 1-1 후판낙하의 충격해석 LS-DYNA3D 전산입력자료

```
*KEYWORD
*CONTROL_TIMESTEP
$   DTINIT    TSSFAC      ISDO    TSLIMT     DT2MS      LCTM     ERODE     MSIST
      0.0      0.90         0       0.0       0.0                 0         0
*CONTROL_HOURGLASS
$      IHQ        QH
         1      0.10
*CONTROL_BULK_VISCOSITY
$       Q2        Q1      TYPE
      1.5      0.060         1
*CONTROL_SHELL
$   WRPANG    ITRIST      IRNXX    ISTUPD    THEORY       BWC     MITER      PROJ
      20.0         2        -1         0         2         2         1         0
*CONTROL_CONTACT
$   SLSFAC    RWPNAL    ISLCHK    SHLTHK    PENOPT    THKCHG     ORIEN
      0.10      0.0         2         0         1         1         1
$   USRSTR    USRFRC     NSBCS    INTERM     XPENE     SSTHK      ECDT   TIEDPRJ
         0         0        10         0       4.0         0         0         0
$    SFRIC     DFRIC       EDC       VFC        TH     TH_SF    PEN_SF
      0.0       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0
*CONTROL_ENERGY
$     HGEN      RWEN    SLNTEN     RYLEN
         1         2         1         1
*CONTROL_OUTPUT
$    NPOPT    NECHO    NREFUP    IACCOP     OPIFS    IPNINT    IKEDIT    IFLUSH
         0         0         0         0       0.0         0       100      5000
$    IPRTF
         0
*CONTROL_TERMINATION
$   ENDTIM    ENDCYC     DTMIN    ENDENG    ENDMAS
   0.0075         0       0.0       0.0       0.0
$  -+----1----+----+----2  --+-- -3--- +----4----+----5 ---+----6 ---+--- 7----+----8
$                          DATABASE CONTROL FOR ASCII                          $
$ ---+  -1---------2  --+-- -3----+----4 ---+  --5--- +----6----+ ---7-- -+--- 8
*DATABASE_GLSTAT
$       DT
   0.0003
*DATABASE_MATSUM
$       DT
   0.0003
*DATABASE_RCFORC
$       DT
   0.0003
*DATABASE_ELOUT
$       DT
   0.0003
$  -+----1-  --+-- -2 ---+--  3-   +    4----+----5 -- +----6    +--- 7  --+  --8
$                          DATABASE CONTROL FOR BINARY
$---+--- 1----+--- 2-- -+  --3    - ---4- --+ ---5  - +  --6-   +  --7   -+-   8
```

```
*DATABASE_BINARY_D3PLOT
$  DT/CYCL      LCDT      BEAM     NPLTC
   0.0003                  0         0
*DATABASE_BINARY_D3THDT
$  DT/CYCL      LCDT
   0.0003
$---+----1----+----2----+----3----+----4----+----5----+----6----+----7----+----8
$                          DATABASE EXTENT CARDS
$---+----1----+----2----+----3----+----4----+----5----+----6----+----7----+----8
*DATABASE_EXTENT_BINARY
$    NEIPH     NEIPS    MAXINT    STRFLG    SIGFLG    EPSFLG    RLTFLG    ENGFLG
        0         0         3         1         1         1         1         1
$   CMPFLG    IEVERP    BEAMIP     DCOMP      SHGE     STSSZ    N3THDT
        0         1         0         0         0         0         2
$---+----1----+----2----+----3----+----4----+----5----+----6----+----7----+----8
$                          DATABASE HISTORY CARDS
$---+----1----+----2----+----3----+----4----+----5----+----6----+----7----+----8
*DATABASE_HISTORY_solid
1601,1602,1611,1612,3208,3209
$---+----1----+----2----+----3----+----4----+----5----+----6----+----7----+----8
$                                PART CARDS
$---+----1----+----2----+----3----+----4----+----5----+----6----+----7----+----8
*PART
$      PID     SECID       MID     EOSID      HGID      GRAV    ADPOPT      TMID
         1         1        21                           0         0
*PART
$      PID     SECID       MID     EOSID      HGID      GRAV    ADPOPT      TMID
         2         1        22                           0         0
*PART
$      PID     SECID       MID     EOSID      HGID      GRAV    ADPOPT      TMID
         3         1        23                           0         0
*PART
$      PID     SECID       MID     EOSID      HGID      GRAV    ADPOPT      TMID
         4         1        24                           0         0
*PART
$      PID     SECID       MID     EOSID      HGID      GRAV    ADPOPT      TMID
         5         1        25                           0         0
*PART
$      PID     SECID       MID     EOSID      HGID      GRAV    ADPOPT      TMID
         6         1        26                           0         0
*PART
$      PID     SECID       MID     EOSID      HGID      GRAV    ADPOPT      TMID
         7         2         1                           0         0
$---+----1----+----2----+----3----+----4----+----5----+----6----+----7----+----8
$                              SECTION CARDS
$---+----1----+----2----+----3----+----4----+----5----+----6----+----7----+----8
*SECTION_SOLID
$    SECID    ELFORM       AET
         1         1         0
*SECTION_SHELL
$    SECID    ELFORM     SHRF       NIP     PROPT   QR/IRID     ICOMP     SETYP
         2         2   0.8333         5       0.0       0.0         0         1
$       T1        T2        T3        T4      NLOC
   0.0030    0.0030    0.0030    0.0030         0
$---+----1----+----2----+----3----+----4----+----5----+----6----+----7----+----8
                              MATERIAL CARDS
$---+----1----+----2----+----3----+----4----+----5----+----6----+----7----+----8
*MAT_RIGID
```

```
$      MID        RO         E        PR         N    COUPLE         M      ALIAS
         1    7910.0 1.870E+11      0.32       0.0       0.0       0.0       0.0
$      CMO      CON1      CON2
       1.0       5.0       7.0
$LCO_OR_A1        A2        A3        V1        V2        V3
       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0
*MAT_PLASTIC_KINEMATIC
$MATERIAL NAME balsa wood
$      MID        RO         E        PR      SIGY      ETAN      BETA
        21 1.602E+02 6.782E+08      0.49  1.364E+7         0
$      SRC       SRP        FS        VP
                                      0.
*MAT_PLASTIC_KINEMATIC
$MATERIAL NAME Red wood
$      MID        RO         E        PR      SIGY      ETAN      BETA
        22 3.764E+02 1.563E+09      0.49   4.50E+7         0
$      SRC       SRP        FS        VP
                                      0.
*MAT_PLASTIC_KINEMATIC
$      MID        RO         E        PR      SIGY      ETAN      BETA
        23    7910.0 1.870E+11      0.32 2.580E+08 1.890E+09       0.0
$      SRC       SRP        FS        VP
       0.0       0.0       0.0       0.0
*MAT_PLASTIC_KINEMATIC
$      MID        RO         E        PR      SIGY      ETAN      BETA
        24    1710.0 3.800E+09      0.35 6.050E+07 4.500E+08       0.0
$      SRC       SRP        FS        VP
       0.0       0.0       0.0       0.0
*MAT_PLASTIC_KINEMATIC
$      MID        RO         E        PR      SIGY      ETAN      BETA
        25    7910.0 1.870E+11      0.32 2.580E+08 1.890E+09       0.0
$      SRC       SRP        FS        VP
       0.0       0.0       0.0       0.0
*MAT_PLASTIC_KINEMATIC
$      MID        RO         E        PR      SIGY      ETAN      BETA
        26   11100.0 9.900E+10      0.40 68900000.0 1.830E+08       0.0
$      SRC       SRP        FS        VP
       0.0       0.0       0.0       0.0
$---+----1----+----2----+----3----+----4----+----5----+----6----+----7----+----8
$                              NODE SET CARDS
$ ---+---1---+---2---+---3---+---4---+---5---+---6---+---7---+---8
*SET_NODE_LIST
$
$      SID       DA1       DA2       DA3       DA4
         1       0.0       0.0       0.0       0.0
$     NID1      NID2      NID3      NID4      NID5      NID6      NID7      NID8
        11        22        33        44        55        66        88        99
$        반복생략
*SET_NODE_LIST
$      SID       DA1       DA2       DA3       DA4
         2       0.0       0.0       0.0       0.0
$     NID1      NID2      NID3      NID4      NID5      NID6      NID7      NID8
        67        68        69        70        71        72        73        74
        75        76        77       144       145       146       147       148
$        반복생략
$---+---1---+---2---+---3---+---4---+---5---+---6---+---7---+---8
$                              BOUNDARY SPC CARDS
$---+---1---+---2---+---3---+---4---+---5---+---6---+---7---+---8
```

```
*BOUNDARY_SPC_SET
$     NSID       CID      DOFX      DOFY      DOFZ     DOFRX     DOFRY     DOFRZ
        1                  0         1         0         1         0         1
*BOUNDARY_SPC_SET
$     NSID       CID      DOFX      DOFY      DOFZ     DOFRX     DOFRY     DOFRZ
        2                  1         1         1         1         1         1
$---+----1----+----2----+----3----+----4----+----5----+----6----+----7----+----8
$                          INITIAL VELOCITY CARDS                            $
$---+----1----+----2----+----3----+----4----+----5----+----6----+----7----+----8
*INITIAL_VELOCITY_GENERATION
$       ID      STYP     OMEGA        VX        VY        VZ
        3         3       0.0     -13.3       0.0       0.0
$       XC        YC        ZC        NX        NY        NZ     PHASE
      0.0       0.0       0.0       1.0       1.0       1.0         0
$---+----1----+----2----+----3----+----4----+----5----+----6----+----7----+----8
$                              CONTACT CARDS
$---+----1----+----2----+----3----+----4----+----5----+----6----+----7----+----8
*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE
$     SSID      MSID     SSTYP     MSTYP    SBOXID    MBOXID       SPR       MPR
        3         7         3         3                              1         1
$       FS        FD        DC        VC       VDC    PENCHK        BT        DT
      0.0       0.0       0.0       0.0       0.0         0       0.0      0.10
$      SFS       SFM       SST       MST      SFST      SFMT       FSF       VSF
      1.0       1.0       0.0       0.0       1.0       1.0       1.0       1.0
$     SOFT    SOFSCL    LCIDAB    MAXPAR    PENTOL     DEPTH     BSORT    FRCFRQ
        0      0.10                1.025       0.0       2.0         0         1
$   PENMAX    THKOPT    SHLTHK     SNLOG      ISYM     I2D3D
      0.0         0         0         0         0         0
$---+----1----+----2----+----3----+----4----+----5----+----6----+----7----+----8
$                              NODE INFORMATION
$---+----1----+----2----+----3----+----4----+----5----+----6----+----7----+----8
*NODE
$    NID               X               Y               Z      TC      RC
       1       0.3437006       0.3436975           2.405     0.0     0.0
       2         0.36663         0.31685           2.405     0.0     0.0
$         반복생략
$---+----1----+----2----+----3----+----4----+----5----+----6----+----7----+----8
$                              MASS ELEMENTS
$---+----1----+----2----+----3----+----4----+----5----+----6----+----7----+----8
*ELEMENT_MASS
$    EID     NID            MASS
   60000   50252           250.0
$---+----1----+----2----+----3----+----4----+----5----+----6----+----7----+----8
$                              SHELL ELEMENTS
$---+----1----+----2----+----3----+----4----+----5----+----6----+----7----+----8
*ELEMENT_SHELL
$    EID     PID    NID1    NID2    NID3    NID4
   50001       7   50001   50002   50023   50022
$         반복생략
$---+----1----+----2----+----3----+----4----+----5----+----6----+----7----+----8
$                              SOLID ELEMENTS
$---+----1----+----2----+----3----+----4----+----5----+----6----+----7----+----8
*ELEMENT_SOLID
$    EID     PID    NID1    NID2    NID3    NID4    NID5    NID6    NID7    NID8
       1       1       1       2      13      12      78      79      90      89
       2       1       2       3      14      13      79      80      91      90
$         반복생략
*END
```

부록 1-2 후판낙하 충격해석 ABAQUS/Explicit 전산입력자료

```
*HEADING
2001 12 28 friday
ABAQUS 6 2-2
Impact analysis of the plate drop analysis for the KSC-4
1/2 symmetric model
horizantal drop of the plate
SI unit(meter, kg, N, sec)
*INCLUDE, INPUT=hor_model INP
**=============================================================**
**                    Analysis model data                    **
**=============================================================**
** define rigid body
*RIGID BODY, ELSET=RIGID_PLATE, REF NODE=60000
** define mass of rigid plate -> 250 kg
*MASS, ELSET=MASS
250,
** define material properties of the KSC4
** STEEL -> SA 240 TYPE 304
*SOLID SECTION, ELSET=STEEL, MATERIAL=STEEL_PLASTIC
*MATERIAL, NAME=STEEL_PLASTIC
*ELASTIC
187E9, 0 3
*DENSITY
7913,
*PLASTIC
258 4E6, 0 0
1033 9E6, 0 403
**
*SOLID SECTION, ELSET=LEAD, MATERIAL=LEAD
*MATERIAL, NAME=LEAD
*ELASTIC
98 98E9, 0 4
*DENSITY
11070 0
*PLASTIC
6 89E6, 0 0
34 45E6, 0 15
**
*SOLID SECTION, ELSET=RESIN, MATERIAL=RESIN
*MATERIAL, NAME=RESIN
*ELASTIC
3.86E9, 0 35
*DENSITY
1710
*PLASTIC
60 50E6, 0 0
72 34E6, 0 0075
**=============================================================**
**
*SOLID SECTION, ELSET=BALSA_WOOD, MATERIAL=BALSA_WOOD
*MATERIAL, NAME=BALSA_WOOD
*ELASTIC
0 67E9, 0 49
*DENSITY
163
*PLASTIC
1 36E7, 0 0
1 36E7, 0 68
**
*SOLID SECTION, ELSET=RED_WOOD, MATERIAL=RED_WOOD
```

```
*MATERIAL, NAME=RED_WOOD
*ELASTIC
1.56E9, 0.3
*DENSITY
350
*PLASTIC
4.50E7, 0.0
4.50E7, 0.67
**=============================================================**
** define initial velocity of the plate -> 9m drop : 13.3 m/sec
*INITIAL CONDITIONS, TYPE=VELOCITY
REF_NODE, 1, -13.3
**=============================================================**
** define boundary condition -> symmetric, clamped
*BOUNDARY
YSYMM, YSYMM
FIX, ENCASTRE
REF_NODE, 2,3
REF_NODE, 4,6
**=============================================================**
** define contact surface
*SURFACE, TYPE=ELEMENT, NAME=OUTER_SHELL
ECONT, S1
*SURFACE, TYPE=ELEMENT, NAME=RIGID_PLATE
RIGID_PLATE, SNEG
**=============================================================**
**                    Analysis history data                    **
**=============================================================**
*STEP
*DYNAMIC, EXPLICIT
, 3.0E-3
**=============================================================**
** define of the contact conditions
** slave surface -> outer shell
** master surface -> steel plate
*CONTACT PAIR, INTERACTION=INTER-1, CPSET=CPSET-1, SMALL SLIDING
OUTER_SHELL, RIGID_PLATE
*SURFACE INTERACTION, NAME=INTER-1
** friction between steel plate and outer shell is ignored
*FRICTION
0.0,
**=============================================================**
** define output request
*RESTART, WRITE, NUM=60
*OUTPUT, FIELD, VARIABLE=PRESELECT, NUMBER INTERVAL=60
*OUTPUT, HISTORY, TIME INTERVAL=0.5E-4
*NODE OUTPUT, NSET=REF_NODE
RF1,
*CONTACT OUTPUT, CPSET=CPSET-1
CFN,
*ENERGY OUTPUT
ALLIE, ALLKE, ETOTAL, ALLPD, ALLIE, ALLVD, ALLAE, ALLSE
*END STEP
```

부록 1-3 열해석 LS-DYNA3D 전산입력자료

```
*KEYWORD
*include
temp_conv.k
$---+----1----+----2----+----3----+----4----+----5----+----6----+----7----+----8
$  800도 복사조건과 대류조건에 의한 해석
$---+----1----+----2----+----3----+----4----+----5----+----6----+----7----+----8
*control_solution
1
*control_thermal_solver
1,0,3,1.2e-7
*control_thermal_timestep
0,1,70
*CONTROL_TERMINATION
1800
$---+----1----+----2----+----3----+----4----+----5----+----6----+----7----+----8
$                    (4) DATABASE CONTROL CARDS
$---+----1----+----2----+----3----+----4----+----5----+----6----+----7----+----8
*DATABASE_GLSTAT
        36
*database_tprint
        36
*DATABASE_BINARY_D3PLOT
        36
*database_extent_binary
        0        0        3        0        1        1        1        1
        0        0        0        0        0        0
$---+----1----+----2----+----3----+----4----+----5----+----6----+----7----+----8
$                    (6) DEFINE PARTS CARDS
$---+----1----+----2----+----3----+----4----+----5----+----6----+----7----+----8
*PART
        1        1                                                        1
*PART
        2        2                                                        2
*PART
        3        3                                                        3
*PART
        4        4                                                        4
*PART
        5        5                                                        5
*PART
        6        6                                                        6
$---+----1----+----2----+----3----+----4----+----5----+----6----+----7----+----8
$                    (7) MATERIAL CARDS
$---+----1----+----2----+----3----+----4----+----5----+----6----+----7----+----8
*MAT_thermal_isotropic_td_lc
$MATERIAL NAME:outer shell
$     TMID        RO     TGRLC    TGMULT
        1      7910
       10        11
*define curve
10
$                  x                  y
                 -25              463.0
                   0              470.0
                21.3              477.5
               121.3              509.4
               232.4              532.1
               343.5              549.4
```

```
                454.6                563.4
                566.7                573.1
                676.8                584.8
                787.9                591.5
                800.0                592.0
*define_curve
11
$                  x                    y
                 -25                  13.5
                   0                  14.0
                21.3                  14.9
               121.3                  16.6
               232.4                  18.4
               343.5                  20.1
               454.6                  21.6
               566.7                  23.2
               676.8                  24.8
               787.9                  26.1
               800.0                  26.3
$---+ ---1----+-- -2----+--- 3----+----4 ---+ ---5  --+ -- 6-  -+  --7- --+----8
*MAT_thermal_isotropic
$MATERIAL NAME copper plate
$     TMID        RO     TGRLC    TGMULT
        2      8830
$ capacity   conduct
    420.12      .52
$
*MAT_thermal_isotropic
$MATERIAL NAME resin
$     TMID        RO     TGRLC    TGMULT
        3      1680
$ capacity   conduct
      .612      0.65
$
*MAT_thermal_isotropic_td_lc
$MATERIAL NAME inner shell
$     TMID        RO     TGRLC    TGMULT
        4      7910
       10        11
$---+----1----+-- -2----+----3----+----4--- +--- 5-- -+-- -6-  -+ ---7 ---+----8
*MAT_thermal_isotropic_td
$MATERIAL NAME lead
$     TMID        RO     TGRLC    TGMULT
        5     11070
$temperature
       -3         0       200     327.5       400       600
$heat capacity
    129.6     129.6     136.8     140.4       144       148
$conductivity
     34.6      34.6      31.7      18.0      16.8      15.0
$-- +-- -|- --+-  -2-  -+  --3  -+- ---4----+--  5--  +-  -6   -+ -  7--  +-  -8
*MAT_thermal_isotropic_td_lc
$MATERIAL NAME fuel basket
$     TMID        RO     TGRLC    TGMULT
        6      7910
       10        11
$-  +--  1   -+   -2  --+   -3-   +   -4-  -+- --5  - + -  6 -  +   -7 -- +--- 8
$                    (7.1) SECTION CARDS
$ --+----| ---+-- -2-   +--  3  - + -- 4 -- +--  5-  -+ ---6 -  +   -7  --+ ---8
*SECTION_SOLID
```

```
$PROPERTY NAME outer shell
$      SID    ELFORM       AET
         1         1
*SECTION SOLID
$PROPERTY NAME copper plate
$      SID    ELFORM       AET
         2         1
*SECTION_SOLID
$PROPERTY NAME resin
$      SID    ELFORM       AET
         3         1
*SECTION_SOLID
$PROPERTY NAME inner shell
$      SID    ELFORM       AET
         4         1
*SECTION_SOLID
$PROPERTY NAME lead
$      SID    ELFORM       AET
         5         1
*SECTION SOLID
$PROPERTY NAME fuel basket
$      SID    ELFORM       AET
         6         1
$-  +--  1  - + ---2  -++-  -3- --+-   4--  +--  5 -- + ---6  ---+    7--  +---- 8
$                    (8) NODAL POINT CARDS
$-- +   -1   -+   -2   --- --3  --+--  4--  +  --5   -+    6--  +  - 7  --+    8
*NODE
$   NODE              X               Y               Z       TC      RC
       1  000000000E+00  596900000E+00  000000000E+00
       2  110000000E 01  596900000E+00  000000000E+00
$          반복생략
$---+  --1   -+  --2-  -+- --3  --+   -4-   +--  5 ---+   -6--  +--- 7 -- +   -8
$                    (9) SOLID ELEMENT CARDS
$---+ ---1 --------2 ---+ ---3 ---+ ---4   -+   -5--  +----6  ---+  --7-   +---- 8
*ELEMENT_SOLID
$    EID     PID      N1      N2      N3      N4      N5      N6      N7      N8
   3892       1       1       8       9       3    4075    4076    4080    4078
   3893       1    4075    4076    4080    4078    4063    4070    4071    4065
$          반복생략
$-- + ---1  --+  --2 ---+  --3  --+   -4--  +--- 5 ---+  --6-  -+--  7 -- + ---8
$                                                                        $
$                              SEGMENT SET CARDS                              $
$                                                                        $
$-  +  --1  --+  --2   -+   -3  --+   -4-   +-   5 -- + ---6 ----+    7--  +--  8
*SET_SEGMENT
$*SEGMENT SET
$      SID       DA1       DA2       DA3       DA4
         1      0.0       0.0       0.0       0.0
$       N1        N2        N3        N4        A1        A2        A3        A4
         3         1      4075      4078       0.0       0.0       0.0       0.0
      4078      4075      4063      4065       0.0       0.0       0.0       0.0
$반복생략
$   + -  1    + -  2--  +--  3--  +--  4  - +    5   -+-   6--  + -  7  - +    8
$                              SEGMENT SET CARDS                              $
$-  +  - 1    + -  2 -- + -- 3--  +--  4 -  -    5 -  + -  6   -+    7--  + -  8
*SET SEGMENT
$*SEGMENT SET
$      SID       DA1       DA2       DA3       DA4
        10      0.0       0.0       0.0       0.0
```

```
$       N1        N2        N3        N4        A1        A2        A3        A4
     3852      3856     12991     12974       0.0       0.0       0.0       0.0
$          반복생략
*SET_SEGMENT
$*SEGMENT_SET
$      SID       DA1       DA2       DA3       DA4
        11       0.0       0.0       0.0       0.0
$       N1        N2        N3        N4        A1        A2        A3        A4
     3940      3994     13479     13304       0.0       0.0       0.0       0.0
$          반복생략
*SET_SEGMENT
$*SEGMENT_SET
$      SID       DA1       DA2       DA3       DA4
        12       0.0       0.0       0.0       0.0
$       N1        N2        N3        N4        A1        A2        A3        A4
     3941      3940     13304     13328       0.0       0.0       0.0       0.0
$          반복생략
*SET_SEGMENT
$*SEGMENT_SET
$      SID       DA1       DA2       DA3       DA4
        13       0.0       0.0       0.0       0.0
$       N1        N2        N3        N4        A1        A2        A3        A4
     3885      3884     13129     13131       0.0       0.0       0.0       0.0
$          반복생략
$---+----1----+----2----+----3----+----4----+----5----+----6----+----7----+----8
$                    내부열원
$---+----1----+----2----+----3----+----4----+----5----+----6----+----7----+----8
*boundary_flux_set
$     ssid
        10
$     lcid      MLC1      MLC2      MLC3      MLC4
         1    -428.4    -428.4    -428.4    -428.4
*boundary_flux_set
$     ssid
        11
$     lcid      MLC1      MLC2      MLC3      MLC4
         1    -428.4    -428.4    -428.4    -428.4
*boundary_flux_set
$     ssid
        12
$     lcid      MLC1      MLC2      MLC3      MLC4
         1    -428.4    -428.4    -428.4    -428.4
*boundary_flux_set
$     ssid
        13
$     lcid      MLC1      MLC2      MLC3      MLC4
         1    -428.4    -428.4    -428.4    -428.4
$---+----1----+----2----+----3----+----4----+----5----+----6----+----7----+----8
$                    시간에 대한 함수
$---+----1----+----2----+----3----+----4----+----5----+----6----+----7----+----8
*define_curve
1
                 0                 1
            100000                 1
$---+----1----+----2----+----3----+----4----+----5----+----6----+----7----+----8
$                    복사조건
$---+----1----+----2----+----3----+----4----+----5----+----6----+----7----+----8
*boundary_radiation_set
$     ssid
         1
```

```
$    RFLCID     RFMULT     TILCID     TIMULT
         2   4536e 8          2        800
$-- + -- 1 ---+   --2-    *-- -3--- + ---4-    +---  5    -+-----6    -+--- 7----+----8
*define_curve
2
                    0                    0
                    1                    1
                100000                   1
$---+----1   --+----2----+----3----+----4----+----5----+----6----+----7----+----8
$                    대류조건
$---+- --1--   +----2----+----3-   -+---- 4-----+- --5-----+----6- --+--- 7--- +----8
*boundary_convection_set
$       ssid
          1
$     hlcid      HMULT      TLCID      TMULT
         -3     0 0845          1        800
$---+----1----+----2----+----3----+----4----+----5----+----6----+----7- --+----8
$                    온도에 대한 함수    (= Temp^0 33)
$- -+--- 1----+--- 2----+----3- ---+-- --4-    +---5----+----6 ---+--- 7--- +----8
*define_curve
3
                    0                    0
                   10            2 137962090
                   20            2 687446941
$           반복생략
*END
```

부록 1-4 열해석 ABAQUS/Standard 전산입력자료

```
*HEADING
*NODE, NSET=NODE_ALL, SYSTEM=R
      1,      0.5889,  0.08843838,          0.
반복생략
   4761,        0.81,        0.04,          0.
*ELEMENT, TYPE=DC2D4, ELSET=OUTER_SHELL
      1,      1,      14,      12,      2
반복생략
**=================================================================================
**
*NSET, NSET=KSC4_NODE_ALL, GENERATE
   1,  4677,      1
*NSET, NSET=AMBI_NODE_ALL, GENERATE
 4678,  4761,      1
*ELSET, ELSET=KSC4
OUTER_SHELL, COPPER_SHELL, COPPER_PLATE, RESIN, INNER_SHELL, LEAD, FUEL_BASKET
*ELSET, ELSET=HF_S1
 4235, 4236, 4237, 4238, 4239, 4240, 4241, 4242, 4243, 4244, 4245, 4246, 4247, 4248, 4249, 4250
 4251, 4252, 4253, 4254, 4277, 4278, 4279, 4280, 4281, 4282, 4283, 4284, 4285, 4286, 4321, 4323
 4324, 4325, 4326, 4327, 4328, 4329, 4330, 4331, 4332, 4343, 4345, 4346, 4347, 4348, 4349, 4350
 4351, 4352, 4353, 4354, 4369, 4370, 4371, 4372, 4373, 4374, 4375, 4376, 4377, 4378, 4379, 4380
 4381, 4382, 4383, 4384, 4385, 4386, 4387, 4388
*ELSET, ELSET=HF_S2
 4299, 4301, 4302, 4303, 4304, 4305, 4306, 4307, 4308, 4309, 4310, 4445, 4446, 4447, 4448, 4449
 4450, 4451, 4452, 4453, 4454
*ELSET, ELSET=HF_S3
 4423, 4424, 4425, 4426, 4427, 4428, 4429, 4430, 4431, 4432, 4434, 4456, 4467, 4468, 4469, 4470
 4471, 4472, 4473, 4474, 4475, 4476, 4478, 4489, 4490, 4491, 4492, 4493, 4494, 4495, 4496, 4497
 4498,
*Elset, elset=__M15_S2
 48,
*Elset, elset=__M15_S3
  1,  2,  3,  4,  5,  6,  7,  8,  9, 10, 24, 25, 26, 27, 28, 29
 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45
 46, 47, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60
*Elset, elset=__M15_S4
 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 61, 62, 63
 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79
 80, 81, 82, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94
*Elset, elset=__M16_S2, generate
 4499,  4518,      1
*Elset, elset=__M16_S4, generate
 4520,  4539,      1
*SURFACE, TYPE=ELEMENT, NAME=HF
HF_S1, S1
HF_S2, S2
HF_S3, S3
*SURFACE, TYPE=ELEMENT, NAME=SKSC4, PROPERTY=RKSC4
__M15_S2, S2
__M15_S3, S3
__M15_S4, S4
*SURFACE, TYPE=ELEMENT, NAME=SAMBI, PROPERTY=RAMBI
__M16_S2, S2
__M16_S4, S4
**=================================================================================**
*SURFACE PROPERTY, NAME=RKSC4
** define surface emissivity of the KSC4 : 0.8
*EMISSIVITY
0.8,
** define surface emissivity of the ambient : 1.0
```

```
*SURFACE PROPERTY, NAME=RAMBI
*EMISSIVITY
1.0,
*CAVITY DEFINITION, NAME=CAV2D
SKSC4, SAMBI
**-----------------------------------------**
** Material properties of the KSC4  **
**-----------------------------------------**
*SOLID SECTION, ELSET=OUTER_SHELL, MATERIAL=STEEL
*SOLID SECTION, ELSET=INNER_SHELL, MATERIAL=STEEL
*SOLID SECTION, ELSET=FUEL_BASKET, MATERIAL=STEEL
*MATERIAL, NAME=STEEL
*DENSITY
7913.0,
** define thermal conductivity that depends on temperature
*CONDUCTIVITY
13.4, 0.0
17.71, 200
20.46, 400
23.90, 600
25.96, 800
** define specific heat that depends on temperature
*SPECIFIC HEAT
504, 0.0
522, 200
540, 400
558, 600
576, 800
**-----------------------------------------**
*SOLID SECTION, ELSET=LEAD, MATERIAL=LEAD
** lead shield
*MATERIAL, NAME=LEAD
*DENSITY
11350,
** define thermal conductivity that depends on temperature
*CONDUCTIVITY
34.6, 0.0
31.7, 200
18.0, 327
16.8, 400
** define specific heat that depends on temperature
*SPECIFIC HEAT
129.6, 0.0
136.8, 200
140.4, 327
144.0, 400
**-----------------------------------------**
*SOLID SECTION, ELSET=COPPER_SHELL, MATERIAL=COPPER
*SOLID SECTION, ELSET=COPPER_PLATE, MATERIAL=COPPER
** copper shell, copper plate
*MATERIAL, NAME=COPPER
*DENSITY
8800.0,
*CONDUCTIVITY
52.0,
*SPECIFIC HEAT
420.12,
**-----------------------------------------**
*SOLID SECTION, ELSET=RESIN, MATERIAL=RESIN
** resin shield
*MATERIAL, NAME=RESIN
*DENSITY
1680,
```

```
*CONDUCTIVITY
0.65,
*SPECIFIC HEAT
612,
**=====================================**
*SOLID SECTION, ELSET=AMBI, MATERIAL=AMBI
** outside ambient
*MATERIAL, NAME=AMBI
*DENSITY
7913.0,
*CONDUCTIVITY
13.4,
*SPECIFIC HEAT
504,
**=================================================**
** define Stefan-Boltzmann radiation contants : 5.9967*10^-8
** define temperature of absolute zero : -273
*PHYSICAL CONSTANTS, STEFAN BOLTZMANN=5.6697E-8, ABSOLUTE ZERO=-273.0
** define initial temperature ksc4 and outside ambient
*INITIAL CONDITIONS, TYPE=TEMPERATURE
KSC4_NODE_ALL, 0.0
AMBI_NODE_ALL, 0.0
**=================================================**
**                Analysis history data              **
**=================================================**
**
**************************************************
**                      STEP 1                      **
**************************************************
**
** definition first step : natual convection and decay hear in the fuel basket
*STEP, INC=500
** 1st step -> stedy state condition
*HEAT TRANSFER, STEADY STATE
1.0,
** define temperature of the outside ambient -> 38.0
*BOUNDARY
AMBI_NODE_ALL, 11, ,38.0
** define load condition : decay heat in the fuel basket
*DSFLUX
HF, S, 428.4
** define film coefficient of surface of KSC4
*SFILM
SKSC4, FNU
** control cavity radiation and viewfactor calculations
*RADIATION VIEWFACTOR, CAVITY=CAV2D, SYMMETRY=NSYMM
*RADIATION SYMMETRY, NAME=NSYMM
*REFLECTION, TYPE=LINE
0.0, 0.0, 0.81, 0.0
*REFLECTION, TYPE=LINE
0.0, 0.0, 0.0, 0.81
*RESTART, WRITE, FREQUENCY=5
*OUTPUT, FIELD, VARIABLE=PRESELECT, FREQUENCY=5
*ELEMENT OUT
TEMP,
*OUTPUT, HISTORY, VARIABLE=PRESELECT, FREQUENCY=5
*NODE FILE, NSET=KSC4_NODE_ALL
NT,
*END STEP
**
**************************************************
**                      STEP 2                      **
**************************************************
```

```
**
** define second step   temperature of outside ambient -> 800 C
*STEP, INC=500
*HEAT TRANSFER, DELTMX=10, END=PERIOD
10, 1800, 1.0E-15, 1800
*BOUNDARY
AMBI_NODE_ALL, 11, ,800
*RESTART, WRITE, FREQUENCY=5
*OUTPUT, FIELD, VARIABLE=PRESELECT, FREQUENCY=5
*ELEMENT OUTPUT
TEMP,
*OUTPUT, HISTORY, VARIABLE=PRESELECT, FREQUENCY=5
*NODE FILE, NSET=KSC4_NODE_ALL
NT,
*END STEP
**
*************************************************
**                    STEP 3                    **
*************************************************
**
** define third step - temperature of outside ambient -> 38 C
*STEP, INC=500
*HEAT TRANSFER, DELTMX=10, END=PERIOD
10, 19800, 1.0E-15, 19800
*BOUNDARY
AMBI_NODE_ALL, 11, ,38
*RESTART, WRITE, FREQUENCY=5
*OUTPUT, FIELD, VARIABLE=PRESELECT, FREQUENCY=5
*ELEMENT OUTPUT
TEMP,
*OUTPUT, HISTORY, VARIABLE=PRESELECT, FREQUENCY=5
*NODE FILE, NSET=KSC4_NODE_ALL
NT,
*END STEP
```

부록 1-5 열응력해석 LS-DYNA3D 전산입력자료

```
*KEYWORD
*control_solution
0
*CONTROL_TERMINATION
1
*control_implicit_general
1,1,
*control_implicit_linear

*control_implicit_auto
0,
*CONTROL_TIMESTEP
$   DTINIT     SCFT     ISDO    TSLIMT     DTMS     LCTM    ERODE    MSIST
     .000     .900        0
*CONTROL_HOURGLASS
$     IHQ       QH
        1     .100
*CONTROL_BULK_VISCOSITY
$      Q2       Q1
    1.500     .060
*CONTROL_ENERGY
$    HGEN     RWEN   SLNTEN    RYLEN
        1        2        1        1
*CONTROL_OUTPUT
$   NPOPT   NECHO   NREFUP   IACCOP    OPIFS   IPNINT   IKEDIT
        0       0        0        0     .000        0      100
$---+----1----+----2----+----3----+----4----+----5----+----6----+----7----+----8
$                    (4) DATABASE CONTROL CARDS
$---+----1----+----2----+----3----+----4----+----5----+----6----+----7----+----8
*DATABASE_GLSTAT
        1
*database_tprint
        1
*DATABASE_BINARY_d3dump
        1
*DATABASE_BINARY_D3PLOT
        1
*database_extent_binary
        0        0        3        0        1        1        1        1
        0        0        0        0        0        0
$---+----1----+----2----+----3----+----4----+----5----+----6----+----7----+----8
$                    (6) DEFINE PARTS CARDS
$---+----1----+----2----+----3----+----4----+----5----+----6----+----7----+----8
*PART
$HEADING
 PART PID =        1 PART NAME :outer shell
$    PID     SID     MID   EOSID    HGID    GRAV  ADPOPT    TMID
        1       1       1                                     1
*PART
$HEADING
 PART PID =        2 PART NAME :copper plate
$    PID     SID     MID   EOSID    HGID    GRAV  ADPOPT    TMID
        2       2       2                                     2
*PART
$HEADING
 PART PID =        3 PART NAME :resin
$    PID     SID     MID   EOSID    HGID    GRAV  ADPOPT    TMID
        3       3       3                                     3
*PART
$HEADING
```

```
 PART PID =        4 PART NAME  inner shell
$      PID       SID       MID     EOSID      HGID      GRAV    ADPOPT      TMID
         4         4         4                                        4
*PART
$HEADING
 PART PID =        5 PART NAME  lead
$      PID       SID       MID     EOSID      HGID      GRAV    ADPOPT      TMID
         5         5         5                                        5
*PART
$HEADING
 PART PID =        6 PART NAME  fuel-basket
$      PID       SID       MID     EOSID      HGID      GRAV    ADPOPT      TMID
         6         6         6                                        6
$---+----1----+----2----+----3----+----4----+----5----+----6----+----7----+----8
$                    structure MATERIAL CARDS
$---+----1----+----2----+----3----+----4----+----5----+----6----+----7----+----8
*MAT_ELASTIC_plastic_thermal
$MATERIAL NAME outer shell
$      MID        RO
         1      7910
$       t1        t2        t3        t4        t5        t6        t7        t8
      -25     21.11     93.33    204.44    315.56     426.6     537.7     648.8
$ young's modulus
 19.522e+9 19.110e+9 18.345e+9 17.521e+9 16.618e+9 15.696e+9 14.774e+9 13.862e+9
$ poisson's ratio
      0.3       0.3       0.3       0.3       0.3       0.3       0.3       0.3
$ thermal expansion
  1.400e-5  1.427e-5  1.507e-5  1.615e-5  1.696e-5  1.748e-5  1.800e-5  1.836e-5
$ yield stress
 21.000e+6 20.689e+6 17.246e+6 14.274e+6 12.557e+6 11.586e+6 10.762e+6  6.524e+6
$ plastic hardening modulus
  9.000e+9  8.981e+9  8.358e+9  7.627e+9  7.410e+9  7.209e+9  6.667e+9  4.815e+9
$---+----1----+----2----+----3----+----4----+----5----+----6----+----7----+----8
*MAT_plastic_kinematic
$MATERIAL NAME copper plate
$      MID        RO         E        PR      SIGY      ETAN
         2      8830  11.448E+9      0.3  68.974E+6         0

*MAT_plastic_kinematic
$MATERIAL NAME RESIN
$      MID        RO         E        PR      SIGY      ETAN
         3      1680  3.8694E+9     0.35   60.50E+6   45.08E+6

$---+----1----+----2----+----3----+----4----+----5----+----6----+----7----+----8
*MAT_ELASTIC_plastic_thermal
$MATERIAL NAME inner shell
$      MID        RO
         4      7910
$       t1        t2        t3        t4        t5        t6        t7        t8
      25     21.11     93.33    204.44    315.56     426.6     537.7     648.8
$ young's modulus
 19.522e+9 19.110e+9 18.345e+9 17.521e+9 16.618e+9 15.696e+9 14.774e+9 13.862e+9
$ poisson's ratio
      0.3       0.3       0.3       0.3       0.3       0.3       0.3       0.3
$ thermal expansion
  1.400e-5  1.427e-5  1.507e-5  1.615e-5  1.696e-5  1.748e-5  1.800e-5  1.836e-5
$ yield stress
 21.000e+6 20.689e+6 17.246e+6 14.274e+6 12.557e+6 11.586e+6 10.762e+6  6.524e+6
$ plastic hardening modulus
  9.000e+9  8.981e+9  8.358e+9  7.627e+9  7.410e+9  7.209e+9  6.667e+9  4.815e+9
$---+----1----+----2----+----3----+----4----+----5----+----6----+----7----+----8
*MAT_ELASTIC_plastic_thermal
$MATERIAL NAME lead
```

```
$       MID        RO
          5     11070
$        t1        t2        t3        t4        t5        t6        t7        t8
          3     21 11     37 78     65 56     93 33    148 89    204 44     260 0
$ young's modulus
  16 00e+9  15 71e+9  15 23e+9  14 89e+9  14 33e+9  13 30e+9  12 05e+9  10 88e+9
$ poisson's ratio
      0 45      0 45      0 45      0 45      0 45      0 45      0 45      0 45
$ thermal expansion
  2 850e-5  2 898e-5  2 934e-5  2 952e-5  3 006e-5  3 114e-5  3 276e-5  3 438e-5
$ yield stress
   4 50e+6   4 41e+6   4 02e+6   3 79e+6   3 35e+6   2 56e+6   1 63e+6   0 75e+6
$ plastic hardening modulus
 310 00e+6 303 31e+6 278 32e+6 242 35e+6 196 63e+6 140 63e+6  77 81e+6  28 42e+6
$--- +----1----+---+-- -2----+----3----+----4----+----5----+----6----+----7----+----8
*MAT_ELASTIC_plastic_thermal
$MATERIAL NAME fuel basket
$       MID        RO
          6      7910
$        t1        t2        t3        t4        t5        t6        t7        t8
        -25     21 11     93 33    204 44    315 56     426 6     537 7     648 8
$ young's modulus
 195 22e+9 191 10e+9 183 45e+9 175 21e+9 166 18e+9 156 96e+9 147 74e+9 138 62e+9
$ poisson's ratio
      0 3       0 3       0 3       0 3       0 3       0 3       0 3       0 3
$ thermal expansion
  1 400e-5  1 427e-5  1 507e 5  1 615e-5  1 696e-5  1 748e-5  1 800e 5  1 836e 5
$ yield stress
 210 00e+6 206 89e+6 172 46e+6 142 74e+6 125 57e+6 115 86e+6 107 62e+6  65 24e+6
$ plastic hardening modulus
  9 000e+9  8 981e+9  8 358e+9  7 627e+9  7 410e+9  7 209e+9  6 667e+9  4 815e+9
$
$   +----1--  +-- -2----+- --3----+-  -4----+--- 5----+- --6----+----7--- + ---8
$                    thermal MATERIAL CARDS
$---+----1 ---+-- -2----+ ---3----+----4----+----5--  +----6----+--- 7----+----8
$
*MAT_thermal_isotropic_td_lc
$MATERIAL NAME outer shell
$      TMID        RO     TGRLC    TGMULT
          1      7910
         10        11
*define_curve
10
$                  x                  y
                 -25               463 0
                   0               470 0
                21 3               477 5
               121 3               509 4
               232 4               532 1
               343 5               549 4
               454 6               563 4
               565 7               573 1
               676 8               584 8
               787 9               591 5
               800 0               592 0
*define_curve
11
$                  x                  y
                 -25               13 5
                   0               14 0
                21 3               14 9
               121 3               16 6
               232 4               18 4
```

```
                343.5                  20.1
                454.6                  21.6
                565.7                  23.2
                676.8                  24.8
                787.9                  26.1
                800.0                  26.3
$---+---1---+---2---+---3---+---4---+---5---+---6---+---7---+---8
*MAT_thermal_isotropic
$MATERIAL NAME copper plate
$     TMID        RO     TGRLC    TGMULT
        2      8830
$ capacity   conduct
    420.12       52
$
*MAT_thermal_isotropic
$MATERIAL NAME resin
$     TMID        RO     TGRLC    TGMULT
        3      1680
$ capacity   conduct
      612      0.65
$
*MAT_thermal_isotropic_td_lc
$MATERIAL NAME inner shell
$     TMID        RO     TGRLC    TGMULT
        4      7910
       10        11
$
$---+---1---+---2---+---3---+---4---+---5---+---6---+---7---+---8
*MAT_thermal_isotropic_td
$MATERIAL NAME lead
$     TMID        RO     TGRLC    TGMULT
        5     11070
$temperature
       -3         0       200     327.5       400       600
$heat capacity
    129.6     129.6     136.8     140.4       144       148
$conductivity
     34.6      34.6      31.7      18.0      16.8      15.0
$---+---1---+---2---+---3---+---4---+---5---+---6---+---7---+---8
*MAT_thermal_isotropic_td_lc
$MATERIAL NAME fuel basket
$     TMID        RO     TGRLC    TGMULT
        6      7910
       10        11
$
$---+---1---+---2---+---3---+---4---+---5---+---6---+---7---+---8
$                    (7.1) SECTION CARDS
$---+---1---+---2---+---3---+---4---+---5---+---6---+---7---+---8
*SECTION_SOLID
$PROPERTY NAME outer shell
$      SID    ELFORM       AET
        1         1
*SECTION_SOLID
$PROPERTY NAME copper plate
$      SID    ELFORM       AET
        2         1
*SECTION_SOLID
$PROPERTY NAME resin
$      SID    ELFORM       AET
        3         1
*SECTION_SOLID
$PROPERTY NAME inner shell
$      SID    ELFORM       AET
```

```
        4         1
*SECTION_SOLID
$PROPERTY NAME:lead
$      SID    ELFORM        AET
        5         1
*SECTION_SOLID
$PROPERTY NAME:fuel-basket
$      SID    ELFORM        AET
        6         1
$---+----1----+----2----+----3----+----4----+----5----+----6----+----7----+----8
$                    (8) NODAL POINT CARDS
$---+----1----+----2----+----3----+----4----+----5----+----6----+----7----+----8
*NODE
$   NODE              X               Y               Z       TC       RC
       1  .000000000E+00  .596900000E+00  .000000000E+00
       2  .110000000E-01  .596900000E+00  .000000000E+00
반복생략
$---+----1----+----2----+----3----+----4----+----5----+----6----+----7----+----8
$                    (9) SOLID ELEMENT CARDS
$---+----1----+----2----+----3----+----4----+----5----+----6----+----7----+----8
*ELEMENT_SOLID
$    EID     PID      N1      N2      N3      N4      N5      N6      N7      N8
    3892       1       1       8       9       3    4075    4076    4080    4078
반복생략
$---+----1----+----2----+----3----+----4----+----5----+----6----+----7----+----8
*BOUNDARY_SPC_set
$      sid      CID     DOFX     DOFY     DOFZ    DOFRX    DOFRY    DOFRZ
        1                0        1        1        1        1        1
$
*BOUNDARY_SPC_set
$      sid      CID     DOFX     DOFY     DOFZ    DOFRX    DOFRY    DOFRZ
        2                1        0        1        1        1        1
$
*BOUNDARY_SPC_set
$      sid      CID     DOFX     DOFY     DOFZ    DOFRX    DOFRY    DOFRZ
        3                1        1        0        1        1        1
$
$---+----1----+----2----+----3----+----4----+----5----+----6----+----7----+----8
$                         SEGMENT SET CARDS                              $
$---+----1----+----2----+----3----+----4----+----5----+----6----+----7----+----8
*SET_SEGMENT
$*SEGMENT_SET
$      SID      DA1      DA2      DA3      DA4
        1      0.0      0.0      0.0      0.0
$       N1       N2       N3       N4       A1       A2       A3       A4
        3        1     4075     4078      0.0      0.0      0.0      0.0
반복생략
$---+----1----+----2----+----3----+----4----+----5----+----6----+----7----+----8
$                         SEGMENT SET CARDS                              $
$---+----1----+----2----+----3----+----4----+----5----+----6----+----7----+----8
*SET_SEGMENT
$*SEGMENT_SET
$      SID      DA1      DA2      DA3      DA4
       10      0.0      0.0      0.0      0.0
$       N1       N2       N3       N4       A1       A2       A3       A4
     3852     3855    12991    12974      0.0      0.0      0.0      0.0
반복생략
$---+----1----+----2----+----3----+----4----+----5----+----6----+----7----+----8
*include
temp_load-1.k
*END
```

부록 1-6 열응력해석 ABAQUS/Standard 전산입력자료

```
*HEADING
*NODE, NSET=KSC4_NODE_ALL, SYSTEM=R
      1,      0.5889,   0.08843838,          0
반복생략
*ELEMENT, TYPE=CPE4R, ELSET=COPPER_PLATE
   189,    204,    287,    325,    194
반복생략
**=================================================================================
*NSET, NSET=XSYMM
  169,  171,  241, 1606, 1608, 1609, 1610, 1611, 1612, 1613, 1614, 1615, 1616, 1617, 1618, 1619
 1620, 1621, 1622, 1623, 1624, 1625, 1626, 2339, 2341, 2342, 3471, 3472, 3473, 3474, 3475, 3476
 3477, 3478, 3479, 3480, 3481, 3482, 3483, 3484, 3485, 3486, 3487, 3488, 3489, 3490, 4372, 4374
 4375, 4531, 4532, 4533, 4534, 4535, 4536, 4537, 4538, 4539, 4540, 4541, 4542, 4543, 4544, 4545
 4546, 4547, 4548, 4549, 4550, 4591
*NSET, NSET=YSYMM
   23,   25,  191,  546,  547,  548,  549,  550,  551,  552,  553,  554,  555,  556,  557,  558
  559,  560,  561,  562,  563,  564,  565, 2189, 2191, 2192, 2472, 2474, 2475, 2476, 2477, 2478
 2479, 2480, 2481, 2482, 2483, 2484, 2485, 2486, 2487, 2488, 2489, 2490, 2491, 2492, 4374, 4376
 4377, 4400, 4401, 4402, 4403, 4404, 4405, 4406, 4407, 4408, 4409, 4410, 4411, 4412, 4413, 4414
 4415, 4416, 4417, 4418, 4419, 4441
**=================================================================================
**=====================================**
**  Material properties of the KSC4  **
**=====================================**
** Material behavior -> elastic-linear plastic
*SOLID SECTION, ELSET=OUTER_SHELL, MATERIAL=STEEL
*SOLID SECTION, ELSET=INNER_SHELL, MATERIAL=STEEL
*SOLID SECTION, ELSET=FUEL_BASKET, MATERIAL=STEEL
*MATERIAL, NAME=STEEL
** define elastic modulus that depends temperature
*ELASTIC
195.02E9, 0.3, 21.11
193.75E9, 0.3, 37.78
190.90E9, 0.3, 93.33
186.69E9, 0.3, 148.89
183.26E9, 0.3, 204.44
175.03E9, 0.3, 315.56
166.01E9, 0.3, 426.6
156.80E9, 0.3, 537.7
** define plastic that depends temperature
*PLASTIC
206.68E6, 0.0, 21.11
516.75E6, 0.034, 21.11
206.68E6, 0.0, 37.78
516.75E6, 0.035, 37.78
172.28E6, 0.0, 93.33
489.22E6, 0.037, 93.33
155.04E6, 0.0, 148.89
454.72E6, 0.038, 148.89
142.59E6, 0.0, 204.44
443.74E6, 0.039, 204.44
125.44E6, 0.0, 315.56
437.57E6, 0.042, 315.56
115.74E6, 0.0, 426.6
431.98E6, 0.044, 426.6
107.51E6, 0.0, 537.7
397.59E6, 0.043, 537.7
*DENSITY
7913.
** define thermal expansion that depends temperature
```

```
*EXPANSION
14.24E-6, 21.11
14.45E-6, 37.78
15.07E-6, 93.33
15.66E-6, 148.89
16.15E-6, 204.44
16.96E-6, 315.56
17.48E-6, 426.6
18.00E-6, 537.7
**=================================**
*SOLID SECTION, ELSET=LEAD, MATERIAL=LEAD
** lead shield
*MATERIAL, NAME=LEAD
** define elastic modulus that depends temperature
*ELASTIC
15.71E9, 0.4, 21.11
15.23E9, 0.4, 37.78
14.89E9, 0.4, 65.56
14.33E9, 0.4, 93.33
13.30E9, 0.4, 148.89
12.05E9, 0.4, 204.44
10.88E9, 0.4, 260.0
*DENSITY
11070.0,
*PLASTIC
4.41E6, 0.0, 21.11
16.95E6, 0.041, 21.11
4.02E6, 0.0, 37.78
15.50E6, 0.041, 37.78
3.79E6, 0.0, 65.56
13.09E6, 0.038, 65.56
3.35E6, 0.0, 93.33
10.33E6, 0.035, 93.33
2.56E6, 0.0, 148.89
9.30E6, 0.047, 148.89
1.63E6, 0.0, 204.44
7.23E6, 0.071, 204.44
0.75E6, 0.0, 260.0
4.82E6, 0.143, 260.0
** define thermal expansion that depends temperature
*EXPANSION
28.98E-6, 21.11
29.34E-6, 37.78
29.52E-6, 65.56
30.06E-6, 93.33
31.14E-6, 148.89
32.76E-6, 204.44
34.38E-6, 260.0
**=================================**
*SOLID SECTION, ELSET=COPPER_SHELL, MATERIAL=COPPER
*SOLID SECTION, ELSET=COPPER_PLATE, MATERIAL=COPPER
** copper shell, copper plate
*MATERIAL, NAME=COPPER
*ELASTIC
114.36E9, 0.3
*DENSITY
8800.0,
*PLASTIC
68.90E6, 0.0
*EXPANSION
0.06E-6
**=================================**
*SOLID SECTION, ELSET=RESIN, MATERIAL=RESIN
```

```
** resin shield
*MATERIAL, NAME=RESIN
*ELASTIC
3.86E9, 0.35
*DENSITY
1710,
*PLASTIC
60.50E6, 0.0
72.34E6, 0.0075
*EXPANSION
58.15E-6,
**************************************************
**                Analysis history data            **
**************************************************
**
**************************************************
**                      STEP 1                     **
**************************************************
**
** definition first step - natual convection and decay hear in the fuel basket
*STEP, INC=500
** 1st step
*STATIC
1.0,
*TEMPERATURE, FILE=HEAT-1, BSTEP=1, BINC=1, ESTEP=1, EINC=1
** define boundary condition of ksc4 section
*BOUNDARY
XSYMM, XSYMM
YSYMM, YSYMM
*RESTART, WRITE, FREQUENCY=5
*OUTPUT, FIELD, VARIABLE=PRESELECT, FREQUENCY=5
*ELEMENT OUTPUT
TEMP,
*NODE OUT, NSET=KSC4_NODE_ALL
NT,
*OUTPUT, HISTORY, VARIABLE=PRESELECT, FREQUENCY=5
*END STEP
**
**************************************************
**                      STEP 2                     **
**************************************************
**
** define second step
*STEP, INC=500
*STATIC
10, 1800, 1.0E-15, 1800
*TEMPERATURE, FILE=HEAT-1, BSTEP=2, BINC=1, ESTEP=2, EINC=111
*BOUNDARY
XSYMM, XSYMM
YSYMM, YSYMM
*RESTART, WRITE, FREQUENCY=5
*OUTPUT, FIELD, VARIABLE=PRESELECT, FREQUENCY=5
*ELEMENT OUTPUT
TEMP,
*NODE OUT, NSET=KSC4_NODE_ALL
NT,
*OUTPUT, HISTORY, VARIABLE=PRESELECT, FREQUENCY=5
*END STEP
**
**************************************************
**                      STEP 3                     **
**************************************************
**
```

```
** define third step
*STEP, INC=500
*STATIC
10, 19800, 1.0E-15, 19800
*TEMPERATURE, FILE=HEAT-1, BSTEP=3, BINC=1, ESTEP=3, EINC=106
*BOUNDARY
XSYMM, XSYMM
YSYMM, YSYMM
*RESTART, WRITE, FREQUENCY=5
*OUTPUT, FIELD, VARIABLE=PRESELECT, FREQUENCY=5
*ELEMENT OUTPUT
TEMP,
*NODE OUT, NSET=KSC4_NODE_ALL
NT,
*OUTPUT, HISTORY, VARIABLE=PRESELECT, FREQUENCY=5
*END STEP
```

서 지 정 보 양 식

수행기관보고서번호	위탁기관보고서번호		
	KINS/HR-443		

제목/부제	
	운반용기의 후판낙하충격, 열해석 및 열응력 해석기술 개발
연구위탁기관 과제명 및 과제책임자	방사선방호 규제기술개발 이 두 희
연구자 및 부서명	이영신, 류충현, 김현수, 최경주, 최영진, 이재형, 나재연, 김성종 (충남대학교)

발 행 지	대전	발행기관	충남대학교	발행일	2002. 3
페 이 지	145p.	도 표	유 (○), 무 ( )	크 기	21×29 cm.
참고사항					
비밀여부	공개(○), 비공개( )		보고서 종류	위탁연구보고서	
연구위탁기관	한국원자력안전기술원		계 약 번 호		

초록 (200단어 내외)

운반용기의 후판낙하충격, 열해석 및 열응력 해석기술 개발을 위해 본 연구에선 규제요건과 해석요건을 분석하였다. 운반용기의 충격해석방법과 열해석 및 열응력해석 방법으로 유한요소법을 채택하였고, 사용한 프로그램은 ANSYS, LS-DYNA3D 와 ABAQUS이다. 해석코드의 신뢰성 분석을 위해 KSC-4모델에 대해 해석을 하였고, 해석프로그램간의 결과는 잘 일치하였으며 운반용기의 건전성을 입증하였다. 본 연구를 통해 사업자에게 신뢰성 있는 해석기법을 제공하며, 표준화된 안전해석 검증기술을 심사에 사용함으로써 효율적 및 신뢰성 있는 규제업무를 수행한다.

주제명키워드 (10단어 내외)	방사성물질 운반용기, 후판낙하충격, 열해석, 열응력해석 규제요건, 해석요건, 안전해석

BIBLIOGRAPHIC INFORMATION SHEET

Performing Org. Report No.	Sponsoring Org. Report No.		
	KINS/HR-443		

Title/Subtitle	Analysis Technology on the Thick Plate Free Drop Impact, Heat and Thermal Stress of the Cask for Radioactive Material Transport
Sponsoring Org. Project and Project Manager	Development of Regulation Technology for Radiation Protection Dew-Hey Lee
Researcher and Dep't.	Young-Shin Lee, Chung-Hyun Ryu, Hyun-Su Kim, Kyung-Joo Choi, Young-Jin Choi, Jae-Hyung Lee, Jae-Yun Na, Seong-Jong Kim (Chung-Nam National University)

Pub. Place		Pub. Org.	Chung-Nam National University	Pub. Date	2002. 3.
Page	145p.	Il. and Tab.	Yes (○), No ( )	Size	21× 29 cm.
Note					

Classified	Unclassified(○), Classified( )	Report Type	Sponsoring Research Report
Sponsoring Org.	Korean Institute of Nuclear Safety	Contract No.	

Abstract (About 200 Words)

In this study, The regulatory condition and analysis condition is analyzed for thick plate free drop, heat and thermal stress analysis to develop the safety assessment technology. Analysis is performed with finite element method which is one of the many analysis methods of the shipping cask. ANSYS, LS-DYNA3D and ABAQUS is suitable for thick plate free drop, heat and thermal stress analysis of the shipping cask. For the analysis model, the KSC-4 that is the shipping cask to transport spent nuclear fuel is investigated. The results of both LS-DYNA3D and ABAQUS for thick plate free drop and the results of ANSYS, LS-DYNA3D and ABAQUS for heat and thermal stress analysis is completely corresponded. And the integrity of the shipping cask is verified. Using this study, the reliable safety assessment technology is supplied to the staff. The efficient and reliable regulatory tasks is performed using the standard safety assessment technology

Subject Keywords (About 10 Words)

Cask for radioactive material transport,
Thick plate drop impact. Heat analysis. Thermal analysis
Regulatory condition, Safety assessment technology