

## Structural Evaluation on HIC Transport Packaging under Accident Conditions

### HIC 운반용기의 사고조건에 대한 구조평가

Sung-Hwan Chung, Duck-Hoi Kim, Jin-Se Jung, Ke-Hyung Yang and Heung-Young Lee

Korea Hydro and Nuclear Power Co., Ltd., 150 Duckjin-dong, Yuseong-gu, Daejeon

[shchung@khnp.co.kr](mailto:shchung@khnp.co.kr)

정성환, 김덕희, 정진세, 양계형, 이흥영

한국수력원자력(주) 원자력환경기술원, 대전광역시 유성구 덕진동 150번지

(Received April 7, 2005 / Approved June 1, 2005)

#### Abstract

HIC transport packaging to transport a high integrity container(HIC) containing dry spent resin generated from nuclear power plants is to comply with the regulatory requirements of Korea and IAEA for Type B packaging due to the high radioactivity of the content, and to maintain the structural integrity under normal and accident conditions. It must withstand 9 m free drop impact onto an unyielding surface and 1 m drop impact onto a mild steel bar in a position causing maximum damage. For the conceptual design of a cylindrical HIC transport package, three dimensional dynamic structural analysis to ensure that the integrity of the package is maintained under all credible loads for 9 m free drop and 1 m puncture conditions were carried out using ABAQUS code.

---

**Key words:** Type B packaging, Dry spent resin, Accidental conditions, Structural integrity, Free drop, Puncture

#### 요약

원전에서 발생하는 건조폐수지를 함유한 고건전성용기(HIC, high integrity container)를 운반하기 위한 HIC 운반용기는 내용물의 높은 방사능으로 인하여 원자력법 및 IAEA의 안전수송규정의 B형 운반용기의 요건을 따라야 하고 정상운반 및 운반사고조건에 대하여 구조적 건전성을 유

지하여야 한다. 운반용기는 최대손상을 야기하는 위치에서 단단한 바닥면 위로 9 m 높이에서의 자유낙하충격 및 연강봉 위로의 1 m 높이에서의 낙하충격을 견디어야 한다. HIC 운반용기의 개념설계를 위하여 9 m 자유낙하 및 1 m 파열조건에 대하여 ABAQUS 전산코드를 이용한 3차원 동적 구조해석을 수행하고 건전성을 평가하였다.

**중심단어** : B형 운반용기, 건조폐수지, 운반사고조건, 구조적 건전성, 자유낙하, 파열

## I. 서 론

원전의 폐수지건조처리설비에서 발생하는 건조폐수지를 함유하는 고건전성용기(HIC)는 내부에 높은 방사능이 함유된 것으로서 국내외의 관련규정에 따라 B형 운반용기를 이용하여 안전하게 운반하여야 한다. 운반용기는 원자력법[1], 과기부 고시 제2001-23호[2] 및 IAEA Safety Standards Series No.TS-R-1[3] 등 관련 규정에 따라 정상운반은 물론, 9 m 자유낙하 및 1 m 파열조건 등 운반사고조건에 대한 기술기준을 만족하고 구조적 건전성을 유지하여야 한다.

원통형 HIC 운반용기의 개념설계를 위하여 9 m의 높이에서 단단하고 편평한 바닥면으로 낙하하는 자유낙하조건 및 1 m의 높이에서 연강봉 위로 낙하하는 파열조건에 대하여 외연적 유한요소 전산해석 프로그램인 ABAQUS/Explicit 코드[4]를 이용하여 3 차원 동적 해석을 수행하고 구조적 건전성을 평가하였다. 9 m 자유낙하조건은 관련규정의 운반용기에 최대손상을 야기하는 방향을 정의하기가 어렵기 때문에 수직, 수평, 코너, 경사방향에 대한 자유낙하 등으로 구분하여 각각 해석을 수행하였으며, 1 m 파열조건은 운반용기의 본체가 직접 연강봉 위로 낙하하는 경우와 운반용기의 충격완충체가 연강봉 위로 낙하하는 경우에 대하여 각각 해석을 수행하였다. 운반용기는 9 m 자유낙하조건 및 1 m 파열조건에 대하여 발생한 최대응력강도가 관련규정[5]의 기술기준에 따른 허용치를 초과하지 않는 것으로 나타나 구조적 건전성을 유지하였다.

## II. 운반용기 개요

운반용기는 단조강의 단일 셀로 이루어진 원통형

구조물이며, 상하부의 충격완충체가 부착되어 자유낙하 등으로 인한 충격하중을 흡수하도록 하였다. 운반용기는 Fig. 1에 나타낸 것처럼 방사성내용물, 용기뚜껑 및 양 단의 충격완충체 등으로 구성되며, 용기본체는 외경 1,580 mm, 벽두께 170 mm, 길이 1,710 mm의 원통형 셸이며, 용기뚜껑은 두께 200 mm의 원판형으로 용기본체와 볼트로 체결되어 방사성물질의 누설에 대한 격납경계를 유지하도록 하였다. 용기본체의 벽두께는 관련규정의 방사선 준위에 대한 제한치를 만족시키기 위해 충분한 차폐 역할을 제공한다. 충격완충체는 얇은 셸의 원통구조물 내부에 충격흡수능력이 뛰어난 발사나무를 삽입하여 운반용기가 자유낙하 등으로 충격을 받게 될 때 분쇄되면서 충격에너지를 흡수하여 용기본체 및 내용물에 미치는 충격을 완화시키도록 하였다. 또한, 운반용기 내부의 내용물은 외경 1,183 mm, 길이 1,295 mm, 중량 약 1.9 톤인 건조폐수지를 밀봉 함유한 HIC를 기준하였다.

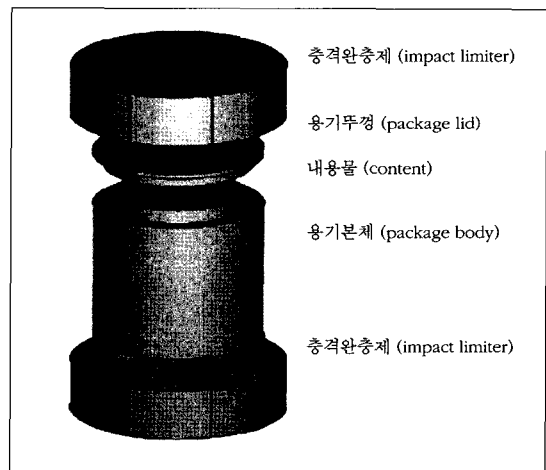


Fig. 1. Configuration of the transport packaging.

### III. 구조해석

관련규정에 따라 운반사고조건인 9 m 자유낙하 및 1 m 파열조건에 대하여 상용 유한요소 전산해석 프로그램인 미국 ABAQUS Inc. 사의 ABAQUS/Explicit Version 6.4 코드를 이용하여 3차원 동적 구조해석을 수행하였다.

자유낙하조건 및 파열조건 해석에 대한 해석모델은 운반용기가 중심축을 기준으로 대칭인 원통형이고 상하부가 동일한 구조이므로, Fig. 2에 나타낸 것과 같이 1/2 원통형을 기준으로 3차원 육면체요소(C3D8R)를 이용하여 모델링을 하였으며, 사용된 절점은 총 67,345개, 요소는 총 55,712개이다. 용기본체와 뚜껑의 볼트결합은 완전결합으로 고려하였으며, 충격완충체 외부의 얇은 셀은 배제하였다. 내부의 내용물은 강체요소로 고려하여 질량만을 나타낼 수 있도록 하였다. 원통형 해석모델이 자유낙하로 인한 초기속도를 가지고 단단한 바닥면에 충돌하는 문제로 구성하였으며, 기하학적 특징을 고려하여 중심축을 따라 형성된 단면들은 낙하방향 이외의 방향으로서는 고정시키는 대칭조건을 주었으며, 용기본체와 충격완충체 사이는 접촉면조건을 부여하였다. 9 m 자유낙하조건에 대하여 소성이 일어나지 않는 편평한 바닥면은 강체면으로 가정하고 최대손상이 예측되는 수직(용기의 중심축과 충돌면이 수직인 방향), 수평(용기의 중심축과 수평면이 평행인 방향), 코너(용기의 무게중심과 충격완충체의 최외각 모서리가 일직선인 방향) 및 경사(용기의 중심축과 바닥

면이 경사각을 유지하는 방향) 등의 낙하방향에 대하여 9 m 높이에서의 자유낙하로 인한 초기속도  $13.28 \text{ ms}^{-1}$ 를 적용하였다. 1 m 파열조건은 직경 150 mm, 길이 200 mm인 연강봉을 보수적인 강체로 가정하고, 용기본체가 연강봉 위로 충돌하는 경우와 뚜껑측 충격완충체의 중앙이 연강봉 위로 충돌하는 경우에 대하여 1 m 높이에서의 자유낙하로 인한 초기속도  $4.43 \text{ ms}^{-1}$ 를 적용하였다. 경사낙하에 대하여 운반물 내부의 내용물을 강체로 모델링하는 경우 강체의 운동에 의하여 2 차 충격에 영향을 미칠 수 있으므로, 내용물의 중량을 운반용기 내부에 균일하게 분포시켜 모델링하였다. 운반용기의 본체 및 뚜껑은 스테인리스강(SA240 Type 304)으로 탄성거동을 가정하였으며, 충격완충체인 발사나무는 역학적 특성이 우수한 나무결방향으로 고려하였고, 탄소성 거동을 가정하여 변형률속도가 탄성과 소성으로 분리되는 소성변형에 대한 증분모드를 적용하였다. Table 1에 운반용기의 주요 재료인 스테인리스강 및 발사나무에 대한 역학적 물성치를 나타내었다. 9 m 자유

Table 1. Mechanical properties[6].

Properties	SA240 Type 304	Balsa wood
Elastic modulus (GPa)	186.8	0.67
Yield strength (MPa)	258.6	13.6
Ultimate strength (MPa)	1,034.5	-
Poisson's ratio	0.3	0.49
Density ( $\text{kgm}^{-3}$ )	7,913	163

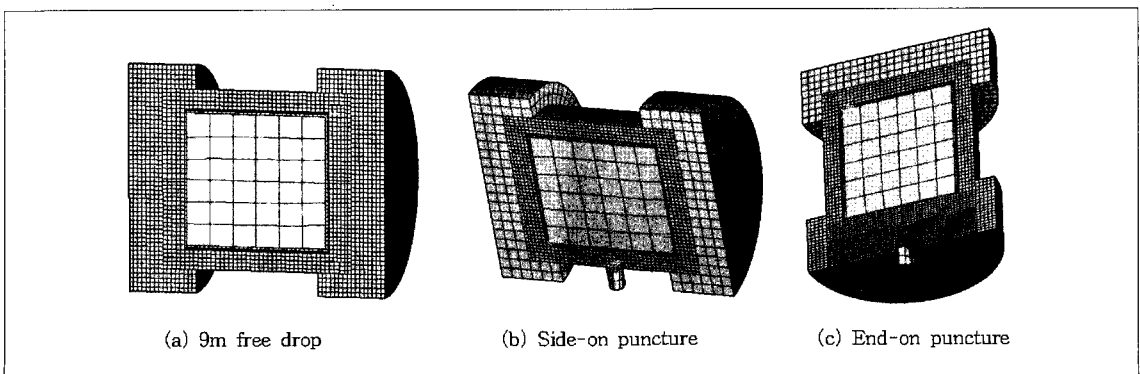


Fig. 2. Finite element models.

낙하 및 파열조건에 대한 응력강도 허용치는 관련기술기준에 따라 용기본체에 발생한 최대응력이 2.4 Sm (Sm은 항복강도의 2/3)을 초과하지 않으면 구조적으로 건전한 것으로 평가하였다.

#### IV. 결과 및 토의

##### 가. 9m 자유낙하

운반용기가 자유낙하하여 바닥면에 충돌하면 낙하로 인한 운동에너지는 충격완충체의 분쇄에 의한 변형에너지로 전환되어 충격이 흡수되는데, 각 낙하 방향에 대한 에너지시간이력에서 충돌 순간 운동에너지는 변형률에너지로 전환되어 충격이 흡수된다.

각 낙하방향에 대하여 최대응력이 발생한 시점에서 운반용기의 응력분포, 변형양상 및 최대발생 응력시간이력 등을 Fig. 3에 나타내었는데, 충격완충체가 분쇄되고 응력이 전파되는 충격거동을 잘 알 수 있다. 각 방향의 낙하충격으로 인하여 운반용기의 본체에 발생한 최대응력강도를 살펴보면, 수직낙하는 충돌 직후 충격완충체가 분쇄되는 면적이 일정하기 때문에 충돌거동에 따라 평균적인 응력이 발생하고, 수평, 코너 및 경사낙하의 경우 충돌 시 분쇄변형이 진행되면서 충격면적이 점점 증가하기 때문에 충격하중이 점점 증가하는 경향을 알 수 있다. 코너낙하는 용기의 무게중심과 충격완충체의 최외각 모서리가 일직선이 되는 방향(약 40°), 경사낙하는 용기의 중심축과 바닥면이 이루는 각도인 경사각을 10° ~ 30°로 변화시켜가며 수행하였다. 경사낙하의 경우, 2차 충격 시 1차 충격점과 용기의 무게중심의 차이로 발생하는 회전력에 의한 가속도의 증가로 인하여 최대응력이 1차 충격에 비하여 2차 충격 시 더 높게 나타났으며, 1차 충격 시 최대응력은 30° 경사낙하, 2차 충격 시 최대응력은 10° 와 20° 경사낙하의 경우에서 나타났다. Table 2에 경사각의 변화에 따른 경사낙하에서 1차 및 2차 충돌에 의하여 발생한 최대응력을 나타내었다. Table 3은 각 낙하방향에 따라 운반용기에 발생한 최대응력강도를 관련규정의 기술기준과 비교하여 나타내었는데, 모든 방향의 9 m 자유낙하충격에

대하여 운반용기에 발생한 최대응력강도는 허용치 미만으로 운반용기는 구조적 건전성을 유지하였다.

##### 나. 1m 파열조건

파열조건에 대한 각 충돌방향에 대하여 운반용기의 응력분포 및 용기본체에 발생한 최대응력시간이력을 Fig. 4에 나타내었다. 용기본체가 연강봉을 직접 타격하면 충격면에 상당한 응력이 발생하였으며, 충격완충체가 연강봉을 타격하면 연강봉이 충격완충체를 관통함에 따라 충격하중을 감소시키므로 운반용기에 큰 응력을 발생시키지는 않았다. 그러나, 용기본체와 봉이 충격하는 경우에도 ASME Sec.III Div.3(7)에 따라 연강봉 직경의 1.5 배에 해당하는 충돌면적은 구조 건전성의 판단기준에서 제외하는 기준을 적용하면 운반용기는 큰 응력이 발생하지 않았다. Table 4는 운반용기에 발생한 최대응력강도를 관련규정의 기술기준과 비교하였는데, 1 m 파열조건에 대하여 용기본체에 발생한 최대응력강도는 모두 허용치 미만으로 운반용기는 구조적 건전성을 유지하였다.

Table 2. Maximum stress on packaging for 9m oblique drop.

Oblique angle	10°	15°	20°	25°	30°
Max. stress at 1st impact (MPa)	66	66	63	61	70
Max. stress at 2nd impact (MPa)	78	74	78	76	72

Table 3. Maximum stress on packaging for 9m free drop conditions.

Drop direction	Vertical	Side	Corner	Oblique		Allowable
				10°	20°	
Max. stress (MPa)	303	192	305	78	78	414

Table 4. Maximum stress on packaging for 1m puncture

Direction	Side-on	End-on	Allowable
Max. stress (MPa)	301	31	414
Puncture depth(m)	0.0079	0.2517	-

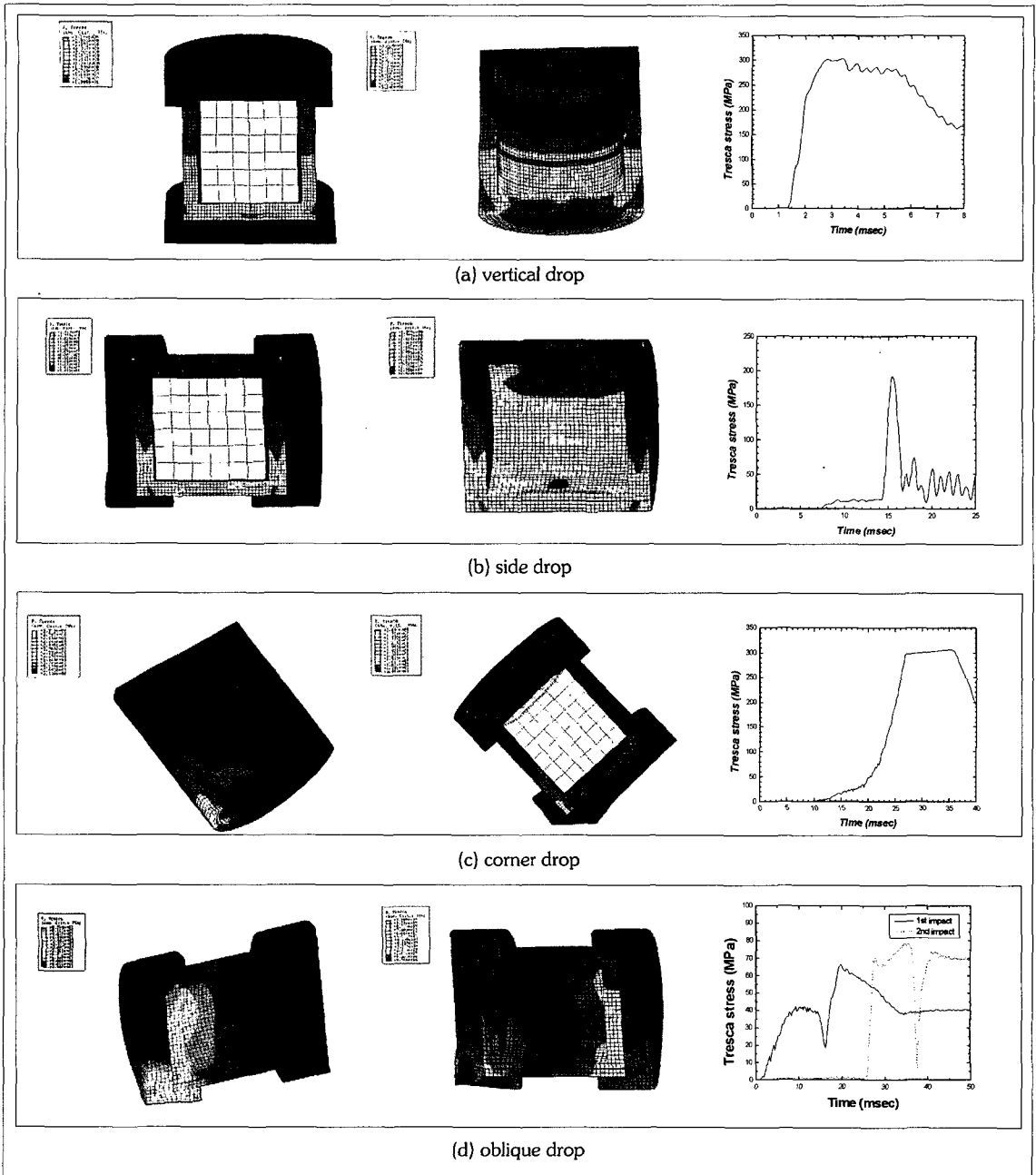


Fig. 3. Maximum stress contours under 9m free drop conditions.

V. 결론

HIC 운반용기의 개념설계를 위하여 관련규정의 B형 운반용기 요건에 따라 운반사고조건인 9 m 자유낙하 및 1 m 파열조건에 대하여 ABAQUS 전산코드

를 이용한 3 차원 동적 구조해석을 수행하고 운반용기의 구조적 건전성을 평가하였다. 운반용기가 수직, 수평, 코너 및 경사방향으로 구분하여 바닥면에 충돌하는 9 m 자유낙하조건과 용기본체 및 충격원충체 방향으로 연강봉 위로 충돌하는 1 m 파열조건에 대

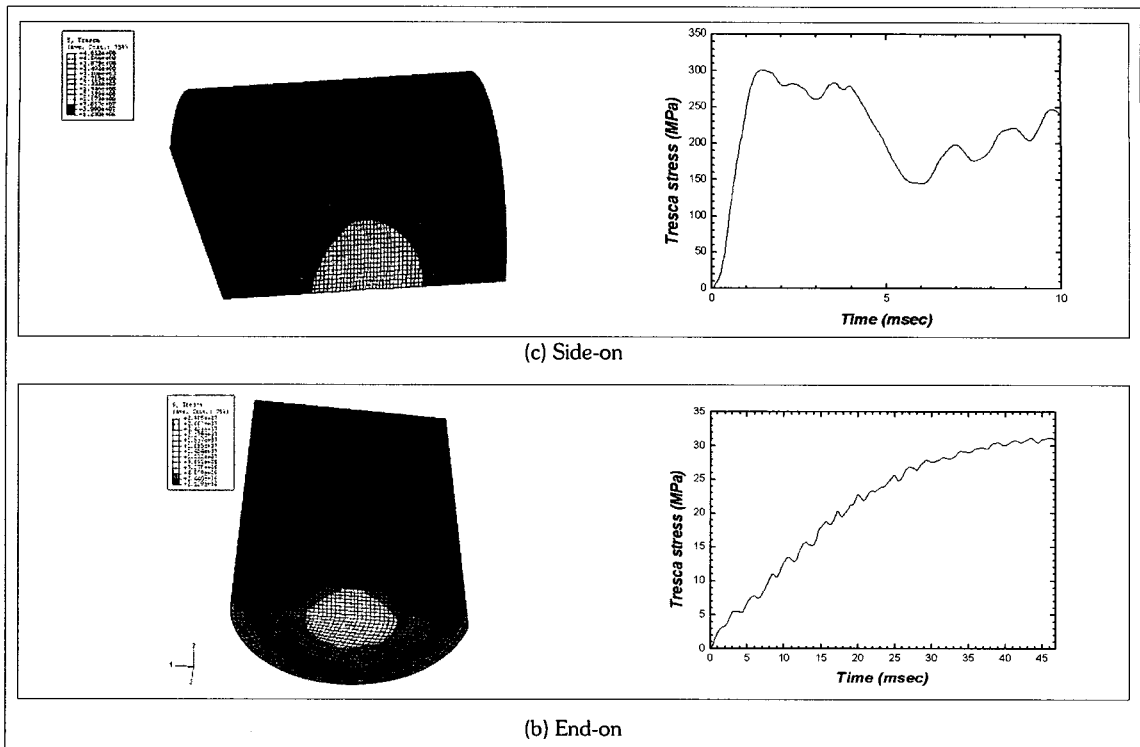


Fig. 4. Maximum stress contours under 1m puncture conditions.

하여 운반용기에 발생한 최대응력강도는 모두 관련 규정의 기술기준에 따른 허용치 미만으로 운반용기는 구조적 건전성을 유지하였다.

이러한 구조해석의 결과는 추후 기본설계단계에서 보다 상세한 해석과 평가에 대한 기초자료로 활용될 것이다.

참고문헌

1. 과학기술부 고시 제2001-23호, 방사성물질등의 포장 및 운반에 관한 규정 (2001).
2. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material, Safety Standards Series No.TS-R-1 (2005).
3. US NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, Standard Review Plan for Transportation Packagings for Radioactive Materials, NUREG-

- 1609 (2000).
4. ABAQUS Inc., ABAQUS/Explicit User's Manual, Version 6.4 (2004).
5. US NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, Design Criteria for the Structural Analysis of Shipping Cask Containment Vessel, Regulatory Guide 7.6 (1978).
6. 강희영, 이홍영, 서기석, 구정희, 이주찬, 이재한, 홍성인, 윤정현, 최병일, 신희성, 박종목, 노성기, 백창렬, 주용선, KSC-4 수송용기 안전성분석보고서, 한국원자력연구소, KAERI/TR-137/89 (1989).
7. AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS, Containment Systems and Transport Packagings for Spent Nuclear Fuel and High Level Radioactive Waste, ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section .III, Division 3 (1998).