

Structural Safety Test and Analysis of Type IP-2 Transport Packages with Bolted Lid Type and Thick Steel Plate for Radioactive Waste Drums in a NPP

**원자력발전소의 방사성폐기물 드럼 운반을 위한 볼트체결방식의
두꺼운 철판을 이용한 IP-2형 운반용기의 구조 안전성 해석 및 시험**

Sang-Jin Lee*, **Dong-Hak Kim**, Kyung-Ho Lee*, Jeong-Mook Kim* and Ki-Seog Seo

Korea Atomic Energy Research Institute, 1045 Daedeokdaero, Yuseong-gu, Daejeon

*Nuclear Engineering & Technology Institute, 25-1, Jang-dong, Yuseong-gu, Daejeon

profrog72@yahoo.co.kr

이상진*, **김동학**, 이경호*, 김정묵*, 서기석

한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 1045

*한국수력원자력(주) 원자력발전기술원, 대전광역시 유성구 장동 25-1

(Received May 7, 2007/Approved September 10, 2007)

Abstract

If a type IP-2 transport package were to be subjected to a free drop test and a penetration test under the normal conditions of transport, it should prevent a loss or dispersal of the radioactive contents and a more than 20% increase in the maximum radiation level at any external surface of the package. In this paper, we suggested the analytic method to evaluate the structural safety of a type IP-2 transport package using a thick steel plate for a structure part and a bolt for tying a bolt. Using an analysis a loss or dispersal of the radioactive contents and a loss of shielding integrity were confirmed for two kinds of type IP-2 transport packages to transport radioactive waste drums from a waste facility to a temporary storage site in a nuclear power plant. Under the free drop condition the maximum average stress at the bolts and the maximum opening displacement of a lid were compared with the tensile stress of a bolt and the steps in a lid, which were made to avoid a streaming radiation in the shielding path, to evaluate a loss or dispersal of radioactive waste contents. Also a loss of shielding integrity was evaluated using the maximum decrease in a shielding thickness. To verify the impact dynamic analysis for free drop test condition and evaluate experimentally the safety of two kinds of type IP-2 transport packages, free drop tests were conducted with various drop directions. For the tests we examined the failure of bolts and the deformation of flange to evaluate a loss or dispersal of radioactive material and measured the

shielding thickness using a ultrasonic thickness gauge to assess a loss of shielding integrity. The strains and accelerations acquired from tests were compared with those by analyses to verify the impact dynamic analysis. The analytic results were larger than the those of test so that the analysis showed the conservative results. Finally, we evaluated the safety of the type IP-2 transport package under the stacking test condition using a finite element analysis. Under the stacking test condition, the maximum Tresca stress of the shielding material was 1/3 of the yielding stress. Two kinds of a type IP-2 transport package were safe for the free drop test condition and the stacking test condition.

Keywords : Type IP-2 transport package, Safety evaluation, Free drop test, Radioactive waste drum

요 약

IP-2형 운반용기는 정상운반조건에서의 자유낙하시험 및 적층시험을 수행한 후에 운반내용물의 분산 및 유실이 없어야 하며 외부표면에서의 방사선량률이 20%이상 증가할 수 있는 차폐능력의 상실이 없어야 한다. 본 연구에서는 두꺼운 철판을 구조재로 사용하며 볼트체결방식의 뚜껑을 가진 IP-2형 운반용기에 대한 구조 안전성을 평가하기 위한 해석적인 방안을 제안하였다. 해석적인 방법을 통하여 원자력발전소에서 발생된 방사성폐기물 드럼을 폐기물 처리시설에서 임시저장고까지 운반하기 위한 두 종류의 IP-2형 방사성폐기물 운반용기에 대하여 자유낙하조건에서 운반내용물의 분산 및 유실과 차폐손실이 없음을 확인하였다. 자유낙하조건에서 운반내용물의 분산 및 유실을 평가하기 위하여 최대 볼트단면 평균응력값과 최대 뚜껑열림량을 볼트의 인장강도와 뚜껑부에 존재하는 단차와 비교 평가하였다. 또한 최대 차폐두께 감소량을 이용하여 차폐손실을 평가하였다. 자유낙하조건에 대한 동적충돌해석을 검증하고 구조 안전성을 시험적으로 평가하기 위하여 자유낙하시험을 다양한 방향으로 실시하였다. 자유낙하시험에서는 운반내용물의 분산 및 유실은 볼트체결방식의 뚜껑에서 볼트의 파손 및 플랜지의 변형 등을 검사하여 평가하였으며, 차폐손실은 초음파 두께 측정기를 이용한 차폐두께를 측정하여 평가하였다. 해석에 대한 검증을 위하여 시험에서 취득한 변형률과 가속도를 동일한 위치에서 얻어진 해석결과와 비교하였다. 해석결과는 시험결과에 비하여 보수적인 결과를 보여주므로 해석에서 입증한 IP-2형 방사성폐기물 운반용기의 안전성은 보수적인 결과이다. 마지막으로 유한요소해석을 통하여 적층조건에 대한 IP-2형 방사성폐기물 운반용기는 안전함을 입증하였다. 적층해석에서 차폐체의 응력은 항복응력에 비하여 1/3정도의 작은 값을 보였다. 두 종류의 IP-2형 방사성폐기물 운반용기는 정상운반조건에서의 자유낙하시험 및 적층시험에 대하여 안전함을 입증하였다.

중심단어 : IP-2형 운반용기, 안전성 평가, 자유낙하시험, 방사성폐기물 드럼

I. 서 론

원자력발전소에서 발생하는 중·저준위 방사성폐기물은 폐기물 드럼에 적재되어 발전소내의 임시저장

고로 운반되어 임시로 저장된다. 이러한 폐기물 드럼은 재포장되거나 용기에 담겨서 향후 경주에 건설될 방사성폐기물 처분시설로 운반되어 영구처분될 예정이다. 원자력발전소 내에서 발생된 중·저준위 방사성

폐기물을 적재한 방사성폐기물 드럼을 폐기물 처리 시설에서 임시저장고까지 운반하기 위한 IP-2형 운반 용기에 대한 연구가 진행되었다. 이러한 IP-2형 운반 용기는 운반내용물의 선량율에 따라서 35 mm 및 80 mm의 탄소강을 사용한 두 가지로 설계되고 있다. 사용된 두꺼운 탄소강은 방사성물질의 차폐를 위하여 사용되며 구조재로의 역할도 수행하고 있다. 구조재로의 역할을 수행하는 두꺼운 탄소강의 본체와 뚜껑을 체결하기 위하여 볼트를 사용한다.

방사성폐기물은 운반도중에 작업자나 환경을 보호하기 위하여 국가의 규정에 따른 기술기준[1~3]에 따라서 운반되어야 한다. 많은 방사성폐기물 드럼은 저준위비방사능물질(LSA : Low specific activity material) 및 표면오염물체(SCO : Surface contaminated object)로 분류된다. 이러한 저준위비방사능물질 및 표면오염물체는 과학기술부 고시 제 2001-23호의 규정[1]에 따라서 IP형 운반용기에 운반되어야 한다. IP형 운반용기는 LSA 및 SCO에 대한 세부기준 및 전용운반여부를 토대로 IP-1형, IP-2형 및 IP-3형 운반용기로 구분된다. IP-2형 운반용기는 IP-1형 운반용기의 기술기준을 포함하고 있으며 모든 LSA 및 SCO를 전용으로 운반할 수 있다. IP-2형 운반용기는 국내·외 방사성물질 운반용기 관련 법규[1~3]에서 규정하고 있는 기준에 의거하여 설계되어야 한다. 운반용기의 일반기준을 만족하여야 하며, 정상운반 조건에 대한 낙하시험 및 적층시험을 거친 후에 방사성내용물의 유실 또는 분산이 없으며 외부표면에서의 방사선량률이 20% 이상 증가할 수 있는 차폐능력의 상실이 없어야 한다.

폐기물 드럼을 운반하기 위한 IP-2형 운반용기는 얇은 판으로 되어있는 ISO 화물컨테이너가 많이 이용되고 있다.[4,5] 또한 별도의 크기로 개발되는 IP-2형 운반용기도 벽체가 얇은 강판이나 충격을 흡수할 수 있는 재질로 구성되어 있다. 두꺼운 철판을 이용하여 운반용기의 구조재와 차폐체의 역할을 수행하고 볼트로 뚜껑이 체결된 IP-2형 운반용기에 대한 정상운반 조건에 대한 낙하시험 및 적층시험조건에서의 구조 안전성 평가를 수행하여야 한다.

IP-2형 운반용기의 구조 안전성 평가를 위하여 통

상 구조 안전성 시험을 수행하고 있다. 구조 안전성 시험을 수행하기 위해서는 시험모델이 제작되어야 하므로 평가에 대한 비용이 크다. IP-2형 운반용기의 개발단계에서 구조 안전성 평가를 해석적인 방법으로 수행하면 개발단계에서 많은 조건에 대한 최적화 설계가 가능하며 개발비용도 절약할 수 있다. 볼트를 이용하여 뚜껑이 체결된 IP-2형 운반용기에 대하여 낙하시험 및 적층시험 조건에 대한 안전성 평가를 위하여 해석적으로 운반내용물의 유실 및 분산 및 방사선차폐손실을 평가하는 방법을 개발하여야 한다.

본 연구에서는 두꺼운 철판을 구조재로 사용하며 볼트체결방식의 뚜껑을 가진 IP-2형 운반용기에 대한 구조 안전성을 평가하기 위한 해석적인 방안을 제안하였다. 해석적인 방법을 통하여 원자력발전소에서 발생된 방사성폐기물 드럼을 폐기물 처리시설에서 임시저장고까지 운반하기 위한 두 종류의 IP-2형 방사성폐기물 운반용기에 대하여 자유낙하조건에서 운반내용물의 분산 및 유실과 차폐손실이 없음을 평가하였다. 자유낙하조건에서 운반내용물의 분산 및 유실을 평가하기 위하여 최대 볼트단면 평균응력값과 최대 뚜껑열림량을 볼트의 인장강도와 뚜껑부에 존재하는 단차와 비교 평가하였다. 또한 최대 차폐두께 감소량을 이용하여 차폐손실을 평가하였다. 자유낙하조건에 대한 동적충돌해석을 검증하고 구조 안전성을 시험적으로 평가하기 위하여 자유낙하시험을 다양한 방향으로 실시하였다. 자유낙하시험에서는 운반내용물의 분산 및 유실은 볼트체결방식의 뚜껑에서 볼트의 파손 및 플랜지의 변형 등을 검사하여 평가하였으며, 차폐손실은 초음파 두께 측정기를 이용한 차폐두께를 측정하여 평가하였다. 해석에 대한 검증을 위하여 시험에서 취득한 변형률과 가속도를 동일한 위치에서 얻어진 해석결과와 비교하였다. 마지막으로 유한요소해석을 통하여 적층조건에 대한 IP-2형 방사성폐기물 운반용기는 안전함을 입증하였다.

II. IP-2형 방사성폐기물 운반용기

IP-2형 방사성폐기물 운반용기는 운반내용물의 선량율에 따라서 차폐두께가 다른 두 가지의 운반용기

로 설계되었다. 먼저 IP-2-a형 운반용기는 LSA-II 또는 LSA-III, SCO-II로 분류된 선량율이 20~200 mrem/hr의 방사성폐기물을 적재한 드럼(620mm(D)×890mm(H)) 8개를 전용으로 운반하는 용기이다. 또한 IP-2-b형 운반용기는 LSA-II 또는 LSA-III, SCO-II로 분류된 선량율이 200~2,000 mrem/hr의 방사성폐기물을 적재한 드럼 4개를 전용으로 운반하는 용기이다. IP-2형 운반용기는 IP-1형 운반용기의 기술기준을 만족하므로 선량율이 20~2,000 mrem/hr인 모든 LSA 또는 SCO로 분류되는 방사성폐기물을 적재한 드럼도 이러한 용기를 이용하여 운반할 수 있다. 운반하는 방사성폐기물 드럼의 중량은 400 kg으로 가정하였다.

그림 1은 IP-2형 방사성폐기물 운반용기의 개념도를 나타낸다. IP-2-a형 운반용기의 경우에는 8개의 방사성폐기물 드럼이 2×4의 배열로, IP-2-b형 운반용기

의 경우에는 4개의 방사성폐기물 드럼이 2×2의 배열로 적재된다. 운반용기의 각 드럼과 차폐체 사이는 각각 100 mm의 간격을 유지하여 드럼 취급장치의 사용이 가능하고 용기 내에서 드럼의 충돌을 방지하기 위한 내부지지장치를 사용하였다. 내부지지장치는 운반용기 내부에 탈·부착이 가능하고 약간의 움직임이 가능하도록 하였다. 내부지지장치의 높이는 드럼높이의 절반정도인 450 mm이다. 운반용기의 뚜껑은 낙하충격에 방사성내용물의 손실이나 분산이 일어나는 것을 방지하기 위하여 32개, 24개의 M24 볼트를 각각 이용하여 본체에 체결하였다. 뚜껑에 체결된 볼트를 풀고 뚜껑에 있는 아이볼트홀에 아이볼트를 부착하여 크레인을 이용하여 개방한다.

35 mm와 80 mm 두께의 철판을 사용하여 각각 차폐하며 이러한 차폐체는 차폐의 기능뿐만 아니라 운반용기의 구조재로의 역할도 수행한다. IP-2-a형 운반용기의 차폐체 내부크기는 2,980 mm(W)×1,540mm(L)×910mm(H)이며, 외부크기는 3,050mm(W)×1,610mm(L)×980mm(H)이다. 또한 IP-2-b형 운반용기의 차폐체 내부크기는 1,540mm(W)×1,540mm(L)×910mm(H)이며, 외부크기는 1,700mm(W)×1,700mm(L)×1,070mm(H)이다.

구조물의 적층 시에 구조물을 지탱하고 낙하충격에서 대비한 완충을 위하여 운반용기의 각 모서리부분 등에 각관을 부착하였다. IP-2형 방사성폐기물 운반용기는 결속을 위하여 바닥의 4개 모서리에 하부 모서리쇠를 설치하였다. 이러한 모서리쇠는 ISO 화물컨테이너에 대한 기준[6]에 의하여 제작되었다. 운반용기의 인양은 크레인과 지게차를 사용할 수 있도록 하였다. 크레인을 사용하는 경우에는 상부의 4개 모서리에 설치된 상부 모서리쇠를 이용하며, 지게차를 사용하는 경우에는 바닥에 위치한 ISO 화물컨테이너에 대한 기준에 따르는 지게발기를 이용한다.

이러한 차폐체와 각관, 모서리쇠등의 크기를 포함하면 IP-2-a형 및 IP-2-b형 운반용기의 외부크기는 각각 3,300mm(W)×1,940mm(L)×1,217mm(H), 1,980mm(W)×1,949mm(L)×1,269mm(H)이다. 표 1은 IP-2형 방사성폐기물 운반용기의 제원을 나타낸다. IP-2-a형 운반용기의 전체 중량은 6.49 t이며, 적재중

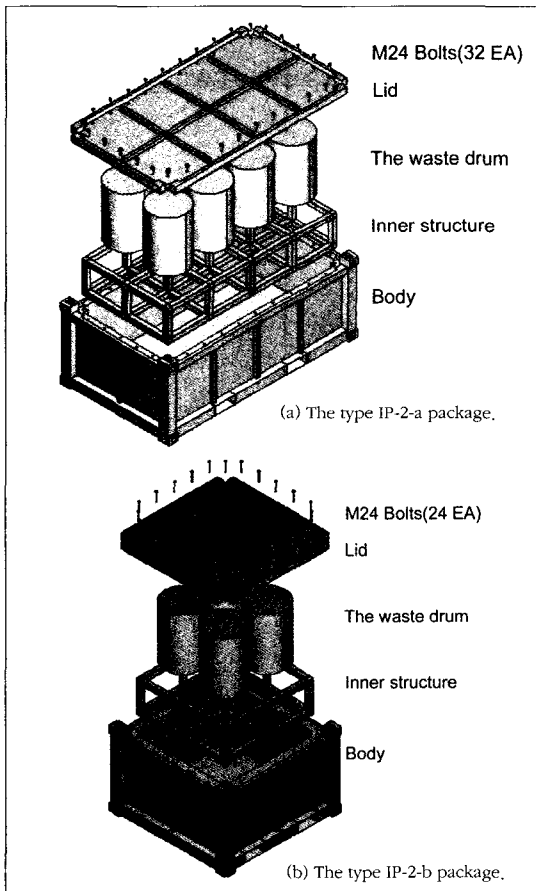


Fig. 1. The type IP-2-a transport packages for radioactive waste drums.

Table 1. Dimensions, a weight and a center of gravity of the IP-2 transport packages for radioactive waste drums.

Dimension			Type IP-2-a package	Type IP-2-b package
Dimension (mm)	Shielding material	Inner	2,980 X 1,540 X 910	1,540 X 1,540 X 910
		Outer	3,050 X 1,610 X 980	1,700 X 1,700 X 1,070
	Package	Outer	3,300 X 1,940 X 1,217	1,980 X 1,949 X 1,269
Weight (ton)	Body		4.63	6.01
	Lid		1.53	1.99
	Inner supporter		0.33	0.18
	Load		3.20	1.60
	Gross weight		9.69	9.78
Center of gravity (mm)			636	687

량 3.2 t에 총중량은 9.69 t이다. IP-2-b형 운반용기의 전체 중량은 8.18 t에, 적재중량은 1.6 t이며 총중량은 9.78 t이다. 중량은 각 부분에 대한 체적을 결정하고 여기에 밀도(7.89 t/m³)를 곱하여서 결정하였다. 무게 중심은 유한요소해석을 위하여 수행된 모델로부터 계산하였다. 무게중심은 바닥 단면의 중앙에서 하부 모서리최외의 제일 바닥으로부터의 높이를 의미한다.

III. 자유낙하시험조건에 대한 안전성 해석

IP-2형 방사성폐기물 운반용기의 중량은 약 9.7 t 및 9.8 t으로 표 2와 같이 법규에서 규정하고 있는 중량에 따른 낙하 높이 기준에 따라 운반용기를 0.9 m 높이에서 자유낙하 한다. 이러한 조건에서 운반내용물의 유실 및 분산이 없어야 하며 방사성 차폐 손실이 20% 이내 이어야 한다. 자유낙하시험 조건에 대한 운반용기의 실제 모델에 대한 낙하시험 및 해석을 실시하였다.

IP-2형 방사성폐기물 운반용기에 대하여 바닥수직방향, 뚜껑수직방향, 수평낙하방향, 바닥무게중심 방향에 대하여 낙하해석을 수행하였다. 그림 2는 이러한 낙하방향에 대한 개념도를 나타낸다. 수직낙하 방향은 용기가 놓여 있는 방향을 의미하고 수평낙하 방향은 세워져 있는 상태를 의미한다. 그리고 무게 중심낙하방향은 무게중심과 모서리의 꼭지점이 중력방향과 일치하는 방향이다.

가. IP-2-a형 운반용기

그림 3과 같이 IP-2-a형 운반용기의 자유낙하해석

Table 2. Free drop height for testing packages to normal conditions of transport.

Package mass (kg)	Free drop height (m)
package mass < 5,000	1.2
5,000 ≤ package mass < 10,000	0.9
10,000 ≤ package mass < 15,000	0.6
15,000 ≤ package mass	0.3

을 수행하기 위하여 대칭성을 고려하여 1/4 모델 또는 1/2 모델을 만들었다. 그림 3-(c)와 같이 볼트를 모델링하여 본체에는 고정구속조건(Tied constraint)을 적용하여 연결하고 뚜껑은 마찰이 없는 접촉조건(Contact constraint)으로 가정하였다. 볼트를 이용하여 운반용기의 뚜껑을 조립하는 경우에 조임토크에 의하여 볼트에 인장력이 발생한다. 본 연구에서

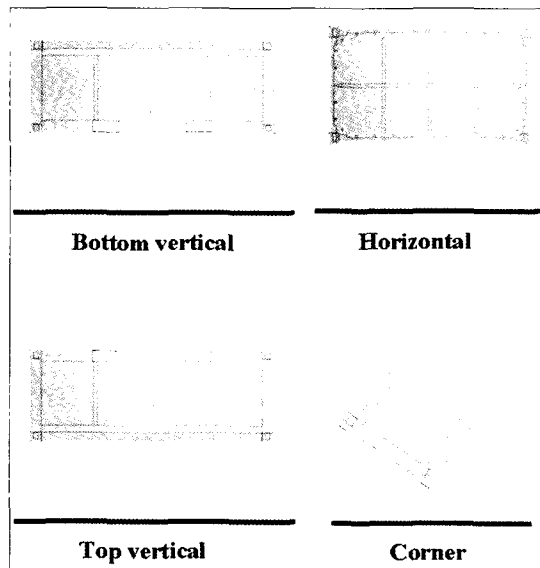


Fig. 2. Schematic diagrams of drop directions.

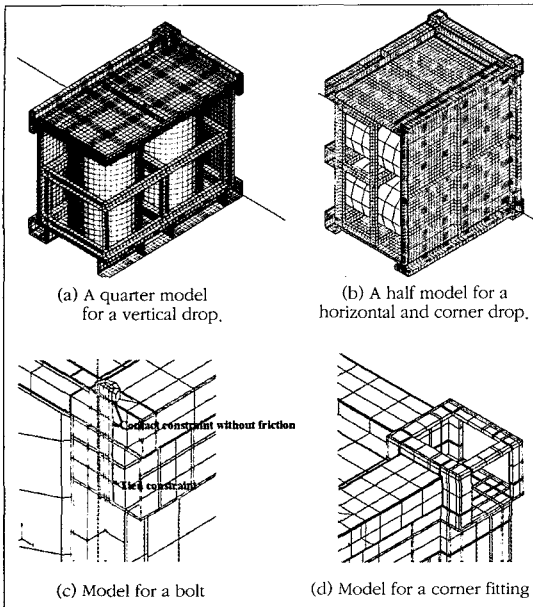


Fig. 3. Finite element models of the type IP-2-a package for radioactive waste drums.

는 볼트의 모델링에서 볼트의 조임에 의하여 발생된 긴장력에 대한 영향을 고려하지 않았다. 모서리쇠는 그림 3-(d)와 같이 실제 형상을 단순화하면서 부피는 유사하도록 모델링하여 모델의 강성을 유사하게 하였다. 각 옆면의 각관은 완충에 대한 영향이 작으며 모델링의 복잡성 때문에 제외하고 다른 모든 각관의 형상은 모델링하였으며 내부지지물을 단순화하여 모델링하였다. 사용된 요소는 3차원 Solid 8절점 요소인 C3D8R이다. 해석은 ABAQUS/Explicit[8]를 사용하여 수행하였다.

표 3은 유한요소해석에서 사용된 재료물성치를 나타낸다. 용기본체와 각관, 내부지지물 및 모서리쇠의 재료는 A36 탄소강을 사용하였고, 볼트는 ASME 193-B7를 사용하였다. 드럼의 경우 중량이 400 kg이 되도록 밀도를 조정하고 탄소강에 비하여 약 5배에

Table 3. Mechanical properties used in the FEA.

Mechanical properties	Carbon steel	The bolt	The waste drum
Density (t/mm ³)	7.89E-9	7.89E-9	1.1513E-9
Elastic modulus (MPa)	194,493	195,172	2E+7
Poisson's ratio	0.3	0.3	0.01
Yield stress (MPa)	257.109	206.9	-
Tensile stress (MPa)	399.9	860	-
Elongation (%)	23	16	-

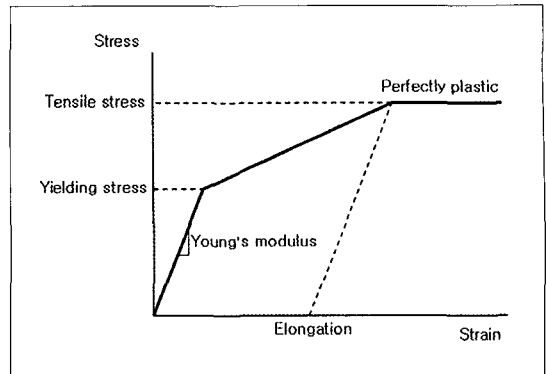


Fig. 4. The elastic-plastic stress-strain relationship of a carbon steel.

해당하는 높은 강성을 가졌다고 가정하였다. 탄소강과 볼트에 대한 탄성계수, 항복응력 및 인장강도는 ASME 코드[9]에 따라서 정의하였다. 차폐체에 해당되는 탄소강에 대하여서는 탄성으로 가정하였으며 그 이외의 모서리쇠 등은 탄소성으로 가정하였다. 탄소강과 볼트의 탄소성 응력-변형을 관계는 그림 4와 같이 항복응력까지 선형탄성변형을 하고, 항복응력 이후에는 인장강도에서 소성변형률이 연신률에 해당하도록 선형경화변형을 하고, 그 이후에는 강체소성변형을 한다고 가정하였다. 9.8 m/sec²에 해당하는 중력가속도를 적용하였으며 0.9 m의 낙하높이에 해당하는 초기속도 4.2 m/sec를 모델의 초기조건으로 입력하였다. 대칭면은 대칭경계조건을 부여하였으며 낙하 타겟면인 강체는 고정시켰다.

그림 5는 IP-2-a형 운반용기의 바닥수직낙하조건에 대하여 차폐체의 응력분포와 최대 응력이 발생하는 위치에서의 응력선도를 나타낸다. 뚜껑의 볼트 체결부위와 각관기둥에 의하여 집중하중을 받는 부분에서 국부적으로 큰 응력이 발생한다. 다른 낙하 방향의 해석에서도 볼트의 체결부위나 각관기둥에 의하여 집중하중을 받는 부분에서 국부적으로 큰 응력이 발생하였으며 대부분의 영역에서는 낮은 응력을 보인다.

그림 7은 IP-2-a형 운반용기의 뚜껑수직낙하해석에서 그림 6에서 보여주는 위치에 사용된 각 볼트에서의 단면평균응력선도를 나타낸다. 전반적인 모든 위치에서의 볼트가 거의 유사한 값을 보인다. 볼트가 소성변형이 일어나더라도 뚜껑을 결속하고 있고

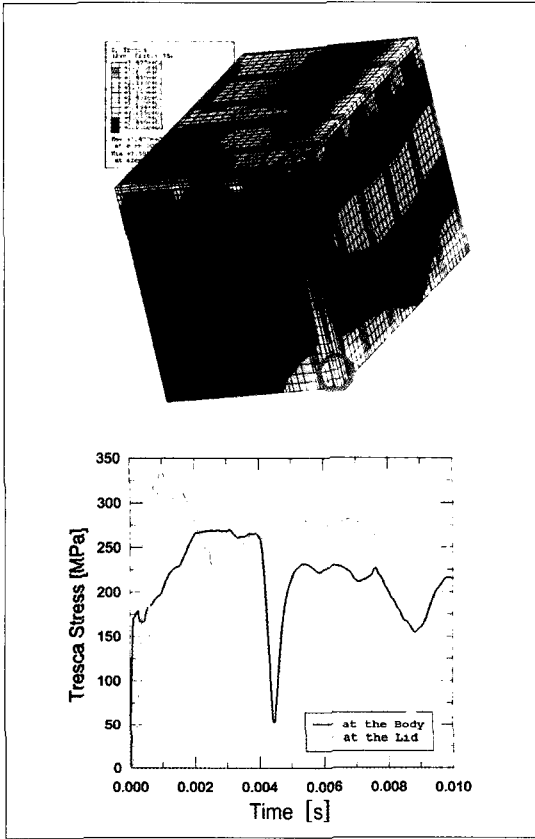


Fig. 5. A stress contour and the maximum Tresca stress of a shielding material for a bottom vertical drop analysis of the type IP-2-a package for radioactive waste drums.

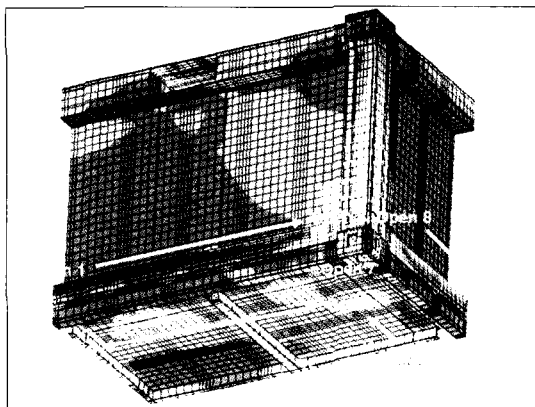


Fig. 6. Locations for measurement of lid opening displacement and bolts of the type IP-2-a package.

볼트가 부서져서 뚜껑이 열리면 운반내용물이 유실 되기 때문에 운반내용물의 분산 및 유실에 대한 평가를 위하여 볼트에서의 최대 단면평균응력값을 볼트의 인장강도와 비교하였다. 최대 볼트단면평균응

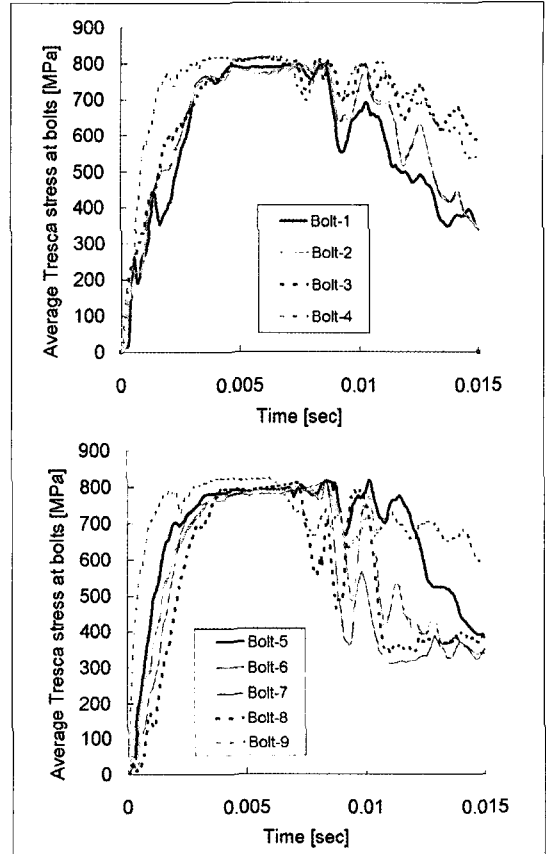


Fig. 7. Average Tresca stresses at bolts for a top vertical drop analysis of the type IP-2-a package.

력값은 797 MPa에서 818 MPa의 범위로 항복응력이 상으로 증가하지만 인장강도인 860 MPa보다는 작으므로 볼트의 파손은 발생하지 않는다.

그림 8은 IP-2-a형 운반용기 뚜껑수직낙하해석에서 그림 6에서 나타난 위치의 뚜껑열림량을 나타낸다. 모서리 중앙 부근에서의 뚜껑열림량은 2 mm 이하의 값이지만 모서리쇠와 인접한 위치에서의 최대 뚜껑열림량은 8.7 mm로 큰 값을 보인다. 긴방향 모서리에서의 뚜껑열림량이 약간 더 작은 값을 보이고 짧은 길이 방향의 모서리에서의 뚜껑열림량이 약간 더 큰 값을 보인다. 하지만 모서리쇠와 인접한 위치에서의 최대 뚜껑열림량은 거의 같다. 8.7 mm는 매우 큰 값이다. 하지만 모서리쇠 근처의 내부에는 볼트를 추가로 하나 더 체결하고 있다. Open 6과 Open 8의 위치에서의 뚜껑열림량은 이러한 추가적

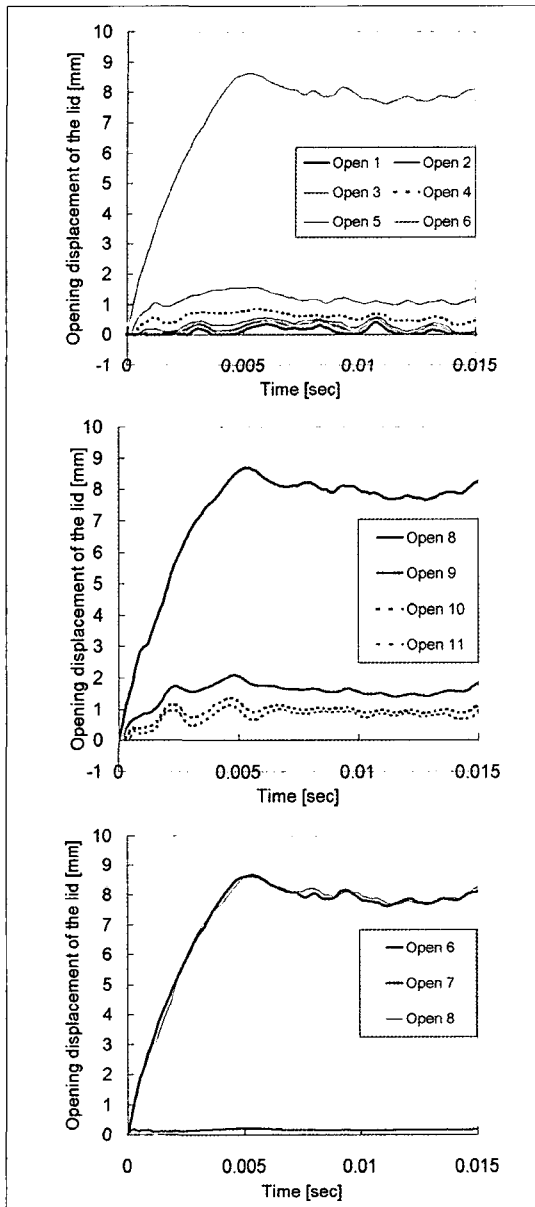


Fig. 8. Opening displacements of the lid for a top-vertical drop analysis of the type IP-2-a package.

인 볼트의 체결로 운반내용물의 유실 및 분산에 영향을 주지 않는다. 이러한 볼트에 의하여 모서리외 부근의 Open 7의 위치에서는 0.2 mm의 최대 뚜껑 열림량을 보인다. 최대 뚜껑열림량은 2 mm 이하이고 이러한 값은 볼트 체결에 의한 실제 방사성폐기물이 유출되는 경로보다도 더 큰 값이며 IP-2-a형 운반용기의 뚜껑플랜지를 위한 단차 5 mm에 비하여 작은 값이다. 그러므로 자유낙하 충격에 의하여 볼트의 파손이 없으며 뚜껑의 열림이 없으므로 운반내용물의 유실 및 분산이 없다.

그림 9는 IP-2-a형 운반용기의 짧은 방향에 대한 수평낙하해석에서 차폐두께를 측정하는 위치와 이러한 위치에서 계산된 차폐두께의 감소를 나타낸다. 지게발이 있는 위치에서의 차폐두께의 감소는 1.8 mm로 가장 큰 값을 보인다. 그 다음으로 본체 충격면의 가운데 볼트 체결부에서 큰 값인 1.2 mm가 나타난다. 그 이외의 위치에서는 1 mm이하의 값을 보인다. 최대 차폐두께의 감소량은 1.8 mm는 차폐체의 두께 30 mm에 비하여 매우 작다. 그러므로 차폐손실 20%이상의 손실이 없이 안전하다.

표 4는 IP-2-a형 운반용기에 대하여 해석 조건에 따른 최대 볼트단면평균응력값, 최대 뚜껑열림량 및 최대 차폐두께 감소량을 나타낸다. 최대 볼트단면평균 응력값은 수평낙하조건에서 가장 크며 이러한 값(839.2 MPa)은 볼트의 파손이 발생하는 볼트의 인장강도(860 MPa)에 비하여 낮은 값으로 볼트의 파손은 없다. 수직방향에 대한 자유낙하조건에서는 대부분에서의 볼트에 대하여 비슷한 값을 보인다. 하지만 수평 방향이나 무게중심방향의 자유낙하조건에서는 일부 볼트에서만 큰 값을 보인다. 특히 수평방향의 자유낙하조건에서 최대 볼트단면평균응력값은 충돌면의 볼트에서의 값으로 그 이외의 볼트는 800 MPa이하의 값

Table 4. The maximum average stresses at the bolts, the maximum opening displacements of lid and the maximum decreases in a shielding thickness for various drop directions of the IP-2-a package.

Drop direction	Bottom vertical	Top vertical	Horizontal	Corner	Limits
The maximum average stress at the bolts (MPa)	806.3	797	839.2	821.9	860 (Tensile stress of a bolt)
The maximum opening displacement (mm)	0.38	2	1.6	0.84	5 (Step at a lid)
The maximum decrease in a shielding thickness (mm)	0.082	0.04	1.8	0.35	7 (20% shielding thickness)

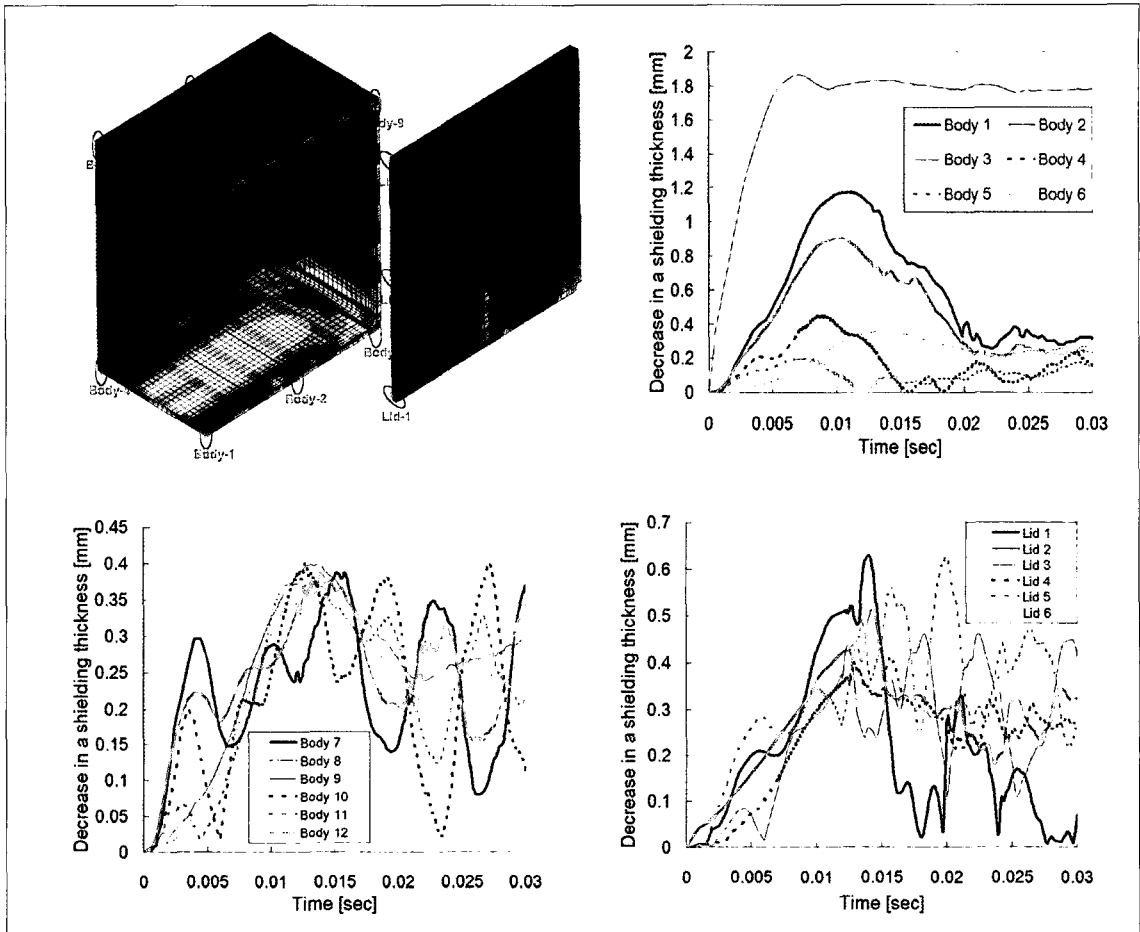


Fig. 9. Decreases in a shielding thickness and measured locations for a horizontal drop analysis of the type IP-2-a package.

이다. 몇 개의 볼트가 파손이 되더라도 플랜지의 변형이 없으면 볼트가 운반용기의 뚜껑을 결속하고 있으므로 운반내용물의 분산 및 유실은 없을 것이다. 최대 뚜껑열림량은 뚜껑수직방향 자유낙하조건에서 가장 큰 2 mm 값을 보인다. 이러한 제한치는 뚜껑 플랜지의 단차 5 mm에 비하여 낮은 값을 보인다. 최대 차폐두께감소량은 수평낙하조건에서 가장 크게 발생한다. 이는 차폐두께의 20%에 비하여 매우 작은 1.8 mm로 차폐손실은 거의 없음을 의미한다. 그러므로 자유낙하조건에서 IP-2-a형 운반용기는 방사성내용물의 유실 및 분산이 없으며 차폐두께감소량은 매우 적다.

나. IP-2-b형 운반용기

그림 10과 같이 IP-2-b형 운반용기의 자유낙하해

석을 수행하기 위하여 대칭성을 고려하여 1/4 모델 또는 1/2 모델을 만들었다. 볼트와 모서리쇠, 각관 등 모델은 IP-2-a형 운반용기의 자유낙하해석에서 사용한 방법과 같은 방식으로 모델링 하였으며 재료 물성치 등 다른 조건 등도 동일하게 사용하여 수행하였다. IP-2-b형 운반용기에서도 IP-2-a형 운반용기에서의 유사하게 뚜껑에서는 볼트의 체결부위와 본체에서 각관기둥에 집중하중을 받는 위치에서 국부적으로 큰 응력이 발생하며 대부분의 영역에서는 낮은 응력을 보인다.

표 5는 IP-2-b형 운반용기의 해석 조건에 따른 최대 볼트 단면평균 응력값, 최대 뚜껑열림량 및 최대 차폐두께 감소량을 나타낸다. 최대 볼트단면평균 응력값은 뚜껑수직낙하조건에서 가장 크며 이러한 값

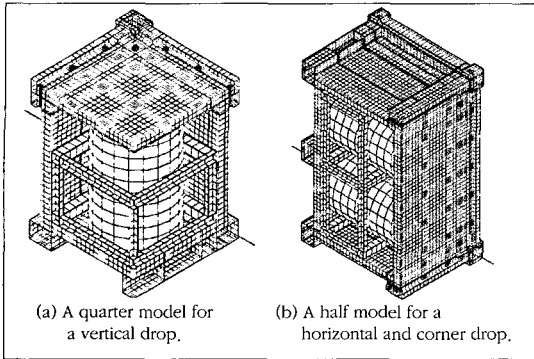


Fig. 10. Finite element models of the type IP-2-b package for radioactive waste drums.

(763 MPa)은 볼트가 파손이 발생하는 볼트의 인장 강도(860 MPa)에 비하여 낮은 값으로 볼트의 파손은 없다. 최대 뚜껑열림량은 뚜껑수직방향 자유낙하 조건에서 가장 큰 2.9 mm 값을 보인다. 이러한 제한치는 뚜껑 플랜지의 단차 10 mm에 비하여 낮은 값을 보인다. 최대 차폐두께감소량은 무게중심낙하 조건에서 가장 크게 발생한다. 이는 차폐두께의 20%에 비하여 매우 작은 0.16 mm로 차폐손실은 거의 없음을 의미한다. 그러므로 자유낙하조건에서 IP-2-b형 운반용기는 방사성내용물의 유실 및 분산이 없으며 차폐두께감소량은 매우 적어서 안전함을 의미한다.

IV. 자유낙하시험조건에 대한 안전성 시험

구조적 건전성을 시험적으로 입증하고 안전성 해석에 대한 검증을 수행하기 위하여 두 종류의 IP-2형 방사성폐기물 운반용기의 실제크기의 모델에 대하여 자유낙하시험을 실시하였다. IP-2-a형 운반용기 시험모델에 대하여 바닥수직낙하, 뚜껑수직낙하 및 수평낙하를 실시하였으며 IP-2-b형 운반용기 시험모

델에 대하여 수평낙하 및 측면경사낙하를 실시하였다. 낙하시험을 실시한 후에 시험 전후의 운반용기의 제원 및 차폐체의 두께를 측정하여 차폐손실에 대한 평가를 하였다. 또한 체결된 볼트를 풀기위한 토크를 측정하고 뚜껑과 본체사이의 간극을 시험 전후에 측정하여 내용물의 분산 및 유실이 없을 것인가를 평가하였다.

안전성 해석에 대한 검증을 위하여 낙하시험에서의 변형률과 가속도를 취득하여 해석결과와 비교하였다. 이를 위하여 스트레인게이지를 본체와 뚜껑부위에 14개 부착하였다. 또한 각 낙하방향에 대하여 각각 12개의 가속도계를 부착하였으며 네 모서리의 가운데 볼트에 4개의 힘센서를 부착하였다. 시험 중의 데이터를 취득하기 위한 케이블의 손상을 막기 위하여 시험모델의 일부에 케이블통로를 만들었다. 이러한 통로에 의하여 완충효과나 시험의 결과에 영향이 없도록 차폐체에 인접하도록 만들었다. 그림 11은 IP-2형 방사성폐기물 운반용기 시험모델의 사용한 센서의 위치를 나타낸다. ‘A’는 가속도계, ‘S’는 스트레인게이지, ‘F’는 힘센서를 부착한 위치이며 점선은 보이는 위치와 반대편에 부착한 경우를 의미한다.

가. IP-2-a형 운반용기

모든 방향의 낙하시험에 대하여 낙하충격에 의하여 주로 충격부의 모서리쪽에 인접한 부분의 각관이 그림 12와 같이 변형이 발생하고 그 이외의 곳에서는 변형이 매우 작았다. 표 6은 IP-2-a형 운반용기의 각 시험 이후에 측정된 볼트의 풀림토크를 나타낸다. 볼트가 파손된 것은 없었으며 충분한 볼트의 결속력을 가지고 있어서 운반내용물의 유출 등은 없다.

Table 5. The maximum average stresses at the bolts, the maximum opening displacements of lid and the maximum decreases in a shielding thickness for various drop directions of the IP-2-b package.

Drop direction	Bottom vertical	Top vertical	Horizontal	Corner	Limits
The maximum average stress at the bolts (MPa)	655.9	763	485	132.9	860 (Tensile stress of a bolt)
The maximum opening displacement (mm)	0.68	2.9	1.55	0.285	10 (Step at a lid)
The maximum decrease in a shielding thickness (mm)	0.0273	0.017	0.024	0.16	16 (20% shielding thickness)

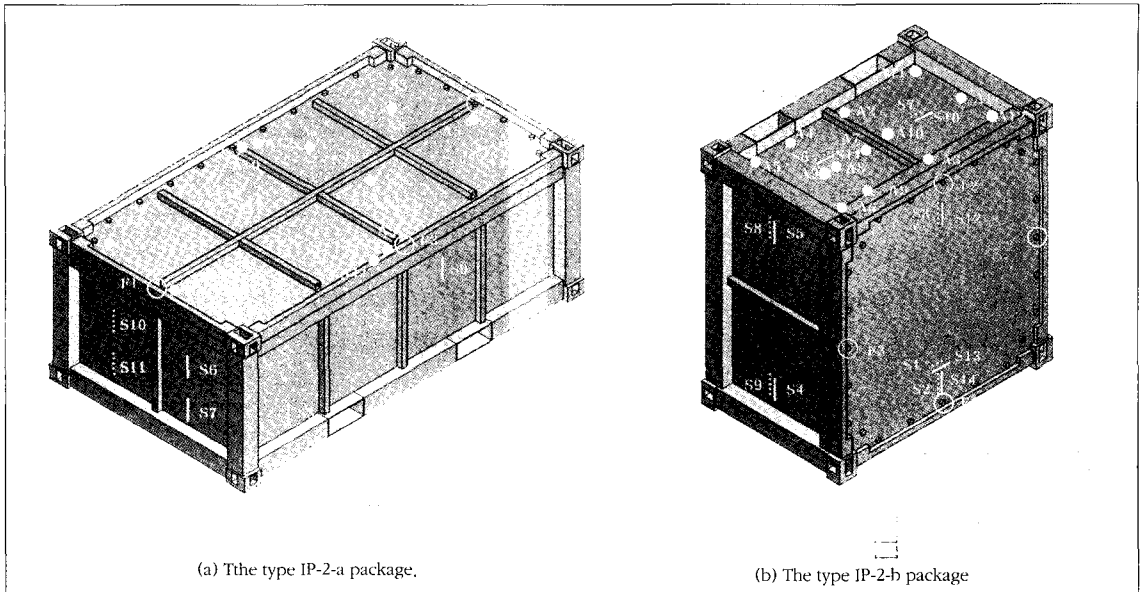


Fig. 11. Locations of strain gauges, accelerators and force sensors for 0.9 m free drop tests of the type IP-2 transport packages for radioactive waste drums. 'A', 'S' and 'F' mean the locations of accelerators, strain gauges and force sensors.



Fig. 12. Deformation of corner fittings and square pipes for a horizontal drop test of the type IP-2-a package.

또한 시험전후에 뚜껑과 본체의 플랜지에 부착된 각관의 간극을 측정하여 표 6에 각 시험에 따른 최대 값을 나타내었다. 플랜지와 플랜지 사이에 고무가스켓이 존재하여 측정된 간극은 플랜지와 플랜지 사이의 간극이 아니라 플랜지보호를 위한 각관의 간극이다. 운반내용물의 유실 및 분산이 발생하려면 플랜

지 사이의 간극을 측정하여야 하지만 이는 볼트가 체결되어있고 플랜지의 변형이 거의 없어서 플랜지 사이의 간극은 없었다. 플랜지와 플랜지의 간극이 아닌 각관의 간극조차도 시험모델 뚜껑의 단차인 6.17 mm에 비하여 더 작은 값으로 운반내용물의 분산이나 손실이 발생하지 않음을 알 수 있다.

모든 시험에서 초음파 두께 측정공구를 사용하여 시험 전·후의 차폐체 두께를 측정하여 차폐체 두께 감소를 측정하였다. 측정된 결과 측정오차 수준(평균 0.02 mm이내)으로 거의 변화가 없다. 즉, 낙하시험에 따른 차폐손실은 없었다.

내부지지구조물은 드럼이 충격을 가하게 되는 수평낙하에서만 변형이 발생하였으며 수직낙하에서는 거의 없었다. 하지만 내부에 있는 드럼은 충격방향에 따라서 바닥면이나 뚜껑 또는 측면에 약간의 찌

Table 6. Test results for 0.9 m free drop tests of the type IP-2-a package for radioactive waste drums.

Drop direction		Bottom vertical	Top vertical	Horizontal	Limits
The maximum increase in a gap between body and lid (mm)		0.76	0.46	3.7	5 (Step at a lid)
Torque to loosen a bolt (N · m)	Maximum	153	260.5	427.5	-
	Average	57	162.6	244.4	-
Failure and looseness of bolt		No	No	No	No
Decrease in a shielding thickness (mm)		0.01	0.02	0.01	7 (20% shielding thickness)

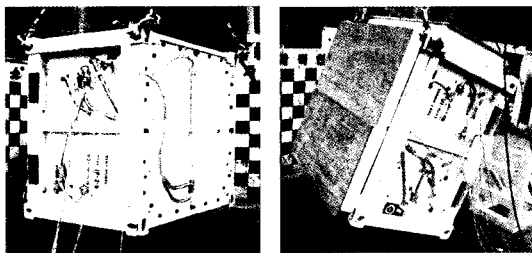
그러짐이 발생하였다.

나. IP-2-b형 운반용기

그림 13과 같이 IP-2-b형 운반용기의 수평방향 및 측면경사방향으로의 낙하시험을 실시하였다. IP-2-a형 운반용기의 자유낙하시험에서와 동일하게 시험 이후에 육안검사를 통한 변형량, 볼트의 풀림토크, 플랜지의 간극 및 차폐체 두께 등을 측정하여 표 7에 나타내었다. IP-2-a형 운반용기와 유사하게 충격면의 모서리쇠 부근에서 주로 변형이 발생하였으며 차폐체의 두께(80 mm)가 더 두꺼워서 모서리쇠 부근의 국부적인 부위의 변형이 크다. 초음파 두께 측정기를 이용하여 측정된 차폐체 두께는 최대 0.16 mm 정도의 증가가 있었지만 평균 0.02 mm의 측정 오차 정도의 변형만이 존재하였다.

볼트의 풀림토크를 측정하였다. 수평방향 및 측면경사방향으로의 낙하는 볼트의 인장력에 영향을 주지 않기 때문에 볼트의 풀림토크의 감소가 없었다. 대부분의 볼트에서 많은 체결력을 가지고 있었다. 즉, 충분한 볼트의 결속력을 가지고 있어서 운반 내용물의 유출 등은 없다.

시험전후에 본체 및 뚜껑의 플랜지에 부착된 각관



(a) A horizontal drop test. (b) A bottom oblique drop test.

Fig. 13. 0.9 m free drop tests of the type IP-2-b package.

의 간극을 측정하였다. 수평방향 낙하에서 모서리쇠의 변형에 의하여 간극이 발생하거나 각관 위아래의 변형이 심하여서 간극이 최대 9 mm 까지 발생하였지만, 이러한 간극은 플랜지를 보호하는 각관의 변형으로 뚜껑 플랜지와 본체 플랜지 사이는 볼트의 체결에 의하여 간극이 없었다. 그러므로 운반내용물의 분산이나 손실이 발생하지 않음을 알 수 있다.

다. 낙하해석에 대한 검증

낙하시험에서 취득한 데이터를 이용하여 낙하해

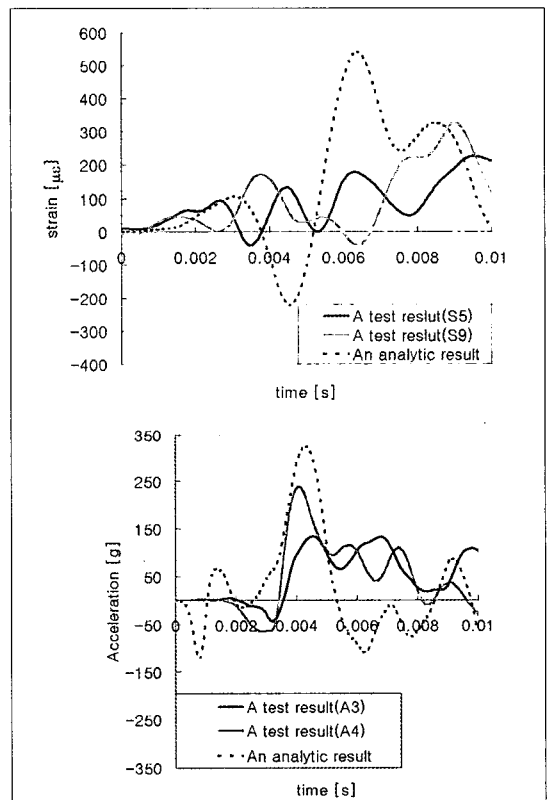


Fig. 14. Comparisons between test and analytic results for a bottom vertical drop test condition of the type IP-2-a package.

Table 7. Test results for 0.9 m free drop tests of the type IP-2-a package for radioactive waste drums.

Drop direction		Horizontal	Bottom oblique	Limits
The maximum increase in a gap between body and lid (mm)		9	0.23	10 (Step at a lid)
Torque to loosen a bolt (N · m)	Maximum	414.5	435	-
	Average	269.5	337.8	-
Failure and looseness of bolt		No	No	No
Decrease in a shielding thickness (mm)		0.02	0.01	16 (20% shielding thickness)

석에 대한 검증을 수행하였다. 그림 14는 IP-2-a형 운반용기의 바닥수직낙하시험에서 변형률(S5, S9 위치)과 가속도(A3, A4 위치)에 대하여 시험결과와 해석결과를 비교한 결과이다. 해석결과에서 최대 변형률은 540 이며 시험결과에서 최대 변형률은 340 이다. 해석결과에서 최대 가속도는 340 g이며 시험결과에서 최대 변형률은 250 g이다.

이러한 해석결과와 시험결과 차이는 낙하시험에서 약간의 기울어짐과 탄소성재료물성치에 대한 정확도의 차이에 의한 것으로 생각된다. Quercetti 등[10]은 원통형의 강봉을 0.5 m에서 떨어지는 시험 및 시험을 통하여 0.1°의 기울어짐에 의하여 운반용기에 발생한 변형률은 큰 차이가 발생함을 보였다. 해석에서 사용된 탄소성재료물성치는 ASME 코드[9]의 값으로 재료가 가져야 할 최소값으로 실제 재질에서의 값과 차이를 보인다. 또한 실제 응력-변형률 선도는 가정한 선형가공경화이후에 완전소성으로 가정한 결과와 차이를 보인다. 해석 결과가 시험 결과에 비하여 더 큰 값을 가지므로 해석 결과는 시험 결과에 비하여 보수성을 가짐을 의미한다. 낙하조건에서의 다양한 각도에서의 안전성을 입증하였던 해석결과는 보수성을 가지는 결과로 IP-2형 방사성폐기물 운반용기는 낙하조건에서 구조적 안전성을 유지하고 있음을 의미한다.

V. 적층시험 조건에 대한 안전성 해석

운반용기 중량의 5배의 하중이나 13 kPa의 하중이 운반용기 상부에 작용하는 조건인 적층조건에 대한 안전성을 입증하여야 한다. 안전성은 해석을 통해 입증하였다. 운반용기의 적층은 상부와 하부 모서리쇠를 이용한다. 그러므로 상부 모서리쇠에 운반용기 중량의 5배 하중이 작용한다는 조건에 대

하여 수행하였다. 상부 모서리쇠는 본체에 직접 연결되었으므로 본체만을 이용하여 해석을 수행하였다. 표 8은 운반용기 본체의 차폐체에 발생하는 최대응력과 상부 모서리쇠의 최대 변형을 함께 나타내었다.

상부 모서리쇠의 최대 변형은 IP-2-a형 운반용기의 경우에는 0.067 mm이며 IP-2-b형 운반용기의 경우에는 0.019 mm이다. 이러한 값은 상부 모서리쇠와 뚜껑 높이에 비하여 매우 작다. 그러므로 적층에 의한 IP-2형 방사성폐기물 운반용기의 변형에 의하여 적층된 운반용기의 상하부가 접촉하지 않으므로 적층에 의한 하중이 상부 모서리쇠에만 적용된다는 가정과 본체만을 이용한 적층해석은 타당하다.

그림 15는 적층하중에서의 IP-2형 방사성폐기물 운반용기의 본체 차폐체의 응력분포를 보인다. IP-2-a형 운반용기의 경우에는 72.9 MPa의 최대 Tresca 응력이 차폐체 하단부의 각관을 지지하고 있는 부분에서 발생하며, IP-2-b형 운반용기의 경우에

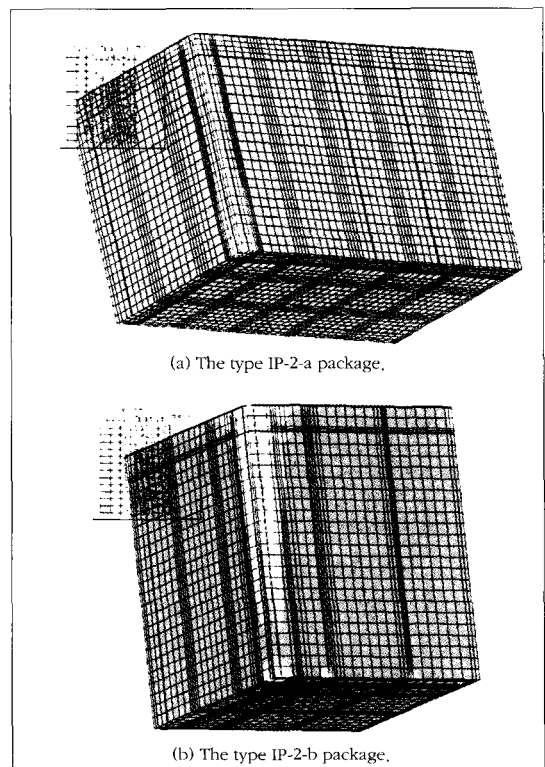


Fig. 15. Stress contours for the stacking analysis of the type IP-2 transport packages for radioactive waste drums.

Table 8. Results of analyses for the stacking test condition of the type IP-2 transport package.

Package	Type IP-2-a package	Type IP-2-b package
The maximum displacement (mm)	0.097	0.047
The maximum stress (MPa)	72.9	39.2

는 39.2 MPa의 최대 Tresca 응력이 상부 모서리쇠를 지지하고 있는 영역에서 발생하였다. 그러므로 적층 조건에서 IP-2형 방사성폐기물 운반용기는 구조적 건전성을 유지하고 있으며 안전함을 의미한다.

VI. 결 론

두꺼운 철판을 구조재로 사용하며 볼트체결방식의 뚜껑을 가진 IP-2형 운반용기에 대한 구조 안전성을 평가하기 위한 해석적인 방안을 제안하였다. 해석적인 방법을 통하여 원자력발전소에서 발생된 방사성폐기물 드럼을 폐기물 처리시설에서 임시저장고까지 운반하기 위한 두 종류의 IP-2형 방사성폐기물 운반용기에 대하여 자유낙하조건에서 운반내용물의 분산 및 유실과 차폐손실이 없음을 확인하였다. 자유낙하조건에서 운반내용물의 분산 및 유실을 평가하기 위하여 최대 볼트단면 평균응력값과 최대 뚜껑열림량을 볼트의 인장강도와 뚜껑부에 존재하는 단차와 비교 평가하였다. 또한 최대 차폐두께 감소량을 이용하여 차폐손실을 평가하였다. 자유낙하조건에 대한 동적충돌해석을 검증하고 구조 안전성을 시험적으로 평가하기 위하여 자유낙하시험을 다양한 방향으로 실시하였다. 자유낙하시험에서는 운반내용물의 분산 및 유실은 볼트체결방식의 뚜껑에서 볼트의 파손 및 플랜지의 변형 등을 검사하여 평가하였으며, 차폐손실은 초음파 두께 측정기를 이용한 차폐두께를 측정하여 평가하였다. 해석에 대한 검증을 위하여 시험에서 취득한 변형률과 가속도를 동일한 위치에서 얻어진 해석결과와 비교하였다. 해석결과는 시험결과에 비하여 보수적인 결과를 보여주므로 해석에서 입증한 IP-2형 방사성폐기물 운반용기의 안전성은 보수적인 결과이다. 마지막으로 유한요소해석을 통하여 적층조건에 대한 IP-2형 방사성폐기물 운반용기는 안전함을 입증하였다. 적층해석에서 차폐체의 응력은 항복응력에 비하여 1/3정도의 작은 값을 보였다. 안전성을 입증하기 위한 해석이 시험결과와는 정확히 일치하지는 않지만 시험결과에 비하여 보수적인 결과를 보여주므로 해석적인 방법으로 입증된 두 종류의 IP-2형 방사성폐기물 운

반용기의 자유낙하시험 및 적층시험에 대하여 안전성은 유효하다.

참고문헌

- [1] 과학기술부고시 제 2001-23호, “방사성물질등의 포장 및 운반에 관한 규정”, 2001.
- [2] IAEA, "IAEA Safety Standards Series No. ST-1 : Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material," 1996.
- [3] U.S. Code of Federal Regulations, "Packaging and Transportation of Radioactive Material", Title 10, Part 71, 1997.
- [4] M.C. Janieki and R.P. Hows, "FREIGHT CONTAINERS AS IP-2 PACKAGINGS," RAMTRANS, Vol. 5, No. 2~4, pp.229~234, 1994.
- [5] K.C.Urch, "THE DESIGN, MANUFACTURE AND TESTING OF A NEW GENERATION OF ISO FREIGHT CONTAINER FOR CERTIFICATION AS AN IP-2 PACKAGE IN COMPLIANCE WITH THE IAEA REGULATIONS FOR THE SAFE TRANSPORT OF RADIOACTIVE MATERIALS, 1985 EDITION(AS AMENDED 1990)," RAMTRANS, Vol.8, No. 2, pp.109~115, 1997
- [6] ISO 1496-1 "Series 1 Freight Containers-Corner Fittings-Specification", 1984.
- [7] ISO 1496-1 "Series 1 Freight Containers-Coating, Identification and Marking", 1995.
- [8] "ABAQUS User's Manual for Revision 5.8", Hibbit, Karlson & Sorenson Inc., 1999.
- [9] ASME Boiler & Pressure Vessel Code Sec. II Part D, "Properties", (2001).
- [10] T. Quercetti, G. Wieser, H. Völzke and P. Zeisler, "Analytical, numerical and experimental investigations on the impact behaviour of selected structures," Nuclear Engineering and Design, Vol. 150, pp.287~293, 1994.