

연구로 해체 저준위 방사성고체폐기물 저장용기 설계/제작 요건에 관한 연구

Study on the Design and Manufacturing Requirements of Container for  
Low Level Radioactive Solid Waste from KRR Decommissioning

이동규, 김희령, 박승국, 정경환, 정운수, 정기정  
한국원자력연구소

요 약

연구로 1, 2호기의 해체활동에서 발생하는 저준위 방사성고체폐기물을 저장하고 이송하기 위한 용기를 제작하는데 필요한 설계요건 및 제작기준을 도출하고, 설계자료를 바탕으로 구조해석을 수행하였으며, 완성된 용기에 대한 시험결과를 통하여 용기의 안전성을 실증·평가하였다. 저장용기는 내부 저장용량이 4m<sup>3</sup>인 Container type으로 선정하였다. 저장용기는 ISO 1496/1의 기본요건을 만족시키고, 국내 원자력법에서 규정하는 포장기준을 따랐으며, 국제원자력기구(IAEA)의 제작요건 및 시험기준을 적용하였다. 유한요소 해석 프로그램인 ANSYS Code를 이용하여 주어진 요건하에서의 응력분포와 변형을 해석하여 구조적 결함 없이 허용응력 범위내에 들었음을 검증하였고, 제시된 시험요건에 따라 상부인양 및 하부 들어올림 시험을 수행하여 이상이 없음을 실증·평가하였다.

Abstract

The design requirement and manufacturing criteria have been proposed on the container for the storage and transportation of low level radioactive solid waste from decommissioning of KRR 1&2. The structure analysis was carried out based on the design criteria, and the safety of the container was assessed. The ISO container with its capacity of 4m<sup>3</sup> was selected for the radioactive solid waste storage. The proposed container was satisfied the criteria of ISO 1496/1 and the packaging standard of Atomic Energy Act. Manufacturing and test standards of IAEA were also applied to the container. Stress distribution and deformation were analyzed under given condition using ANSYS code, and the maximum stress was verified to be within yield stress without any structural deformation. From the results of lifting tests, it was verified that the container was safe.

## 1. 서 론

국내 최초의 연구용 원자로인 연구로 1, 2호기(TRIGA Mark-II & III)는 각각 1962년과 1972년에 가동을 시작하여 국내 원자력 기술자립에 많은 도움을 주었다. 그러나 하나로 정상가동으로 효용가치가 상실되고, 시설의 노후화로 인해 1995년 두기 모두 가동을 중지시키고 폐로하기로 결정하였다[1].

연구로 1, 2호기를 해체할 경우 많은 방사성폐기물들이 발생하게 되는데, 대부분이 저준위 방사성고체폐기물로 평가되었다[2]. 현재 국내에는 방사성폐기물 처분시설이 없기 때문에 이러한 방사성폐기물들은 적절한 용기에 포장하여 처분시설이 건설·운영될 때까지 안전하게 저장·관리되어야 한다. 그러므로 방사성폐기물의 안전한 관리를 위해 폐기물 저장용기의 개발이 필요하다.

연구로 1, 2호기 해체공사시 발생하는 저준위 방사성고체폐기물은 대부분 콘크리트 및 스틸류로서, 기존의 200리터 드럼만을 사용할 경우 철재류 등의 세단으로 인한 작업량 증가, 이에 따른 작업자 피폭위험, 작업자의 산업재해 가능성 증가, 용적률 감소에 따른 드럼량 증가, 철재류 등의 무리한 드럼내 주입으로 인한 드럼 파손 및 이에 따른 드럼 부식 가속화 등의 여러 가지 문제점들이 지적되었다. 따라서 적재효율 증가, 취급 용이성, 제작비용 절감, 장기저장 및 처분장으로의 운송 등을 종합적으로 고려하여 드럼 대신 철재저장용기를 사용하는 것으로 결정하였다.

본 연구에서는 저준위 방사성고체폐기물을 저장하고 이송하기 위한 용기를 제작하는데 필요한 설계요건 및 제작기준을 도출하고, 설계자료를 바탕으로 구조적 해석을 수행하였으며, 완성된 용기에 대하여 시험기준에 따라 수행한 시험 결과를 통하여 용기의 안전성을 실증·평가하였다.

## 2. 방사성폐기물 수집 및 포장 기준

표 1 및 표 2는 각각 국내 법규[3] 및 IAEA 규정[4]에 의한 포장 및 운반에 따른 방사성물질의 분류에 대해 보여주고 있다.

모든 방사성폐기물의 수집 및 포장은 국내법규와 IAEA기준을 따를 예정으로 있다. 특히 시설해체 등의 행위로 발생된 특수형태의 폐기물은 폐기물형태, 크기, 포장용기 등에 대하여 폐기물관리사업자(원자력환경기술원)와 협의하도록 되어 있는바, 이에 대한 필요 조치는 이미 완료되었다.

## 3. 저장용기 형태

드럼 대신 적재효율 증가, 시설내 취급 용이성, 제작비용 절감, 장기저장 및 처분장으로의 운송 등을 종합적으로 고려하여 4m<sup>3</sup> 용량을 갖는 철재저장용기를 사용하는 것으로 결정하였다. 이의 결정 과정에서 제시된 각 용기들의 적재부피와 적재하중을 검토하였고, 현재 보유하고 있는 취급 가능한 장비를 기준으로 분석함으로써 수반되는 경제성도 검토하였는데 그 결과를 표 3 및 표 4에 요약하였다.

이와 같은 철재저장용기는 미국, 영국, 프랑스, 일본 등 원자력 선진국에서도 이미 원자력시설 제염·해체 폐기물 포장용기로 널리 사용되고 있는 것이다.

표 3 및 표 4를 토대로 검토한 결과, 경제성 및 용기의 장기 저장을 고려하여 Steel Box와 소형 ISO Container가 유리한 것으로 판단하였다. Steel Box는 폐기물 운송용기로 사용할 경우 IAEA의 방사성폐기물 운송 요구 조건을 만족하는지를 입증하기 곤란하나, 소형 ISO Container의 경우는 IAEA의 요구 조건인 ISO-1496/1[5]을 만족하므로 향후 처분장으로서의 운송시에도 추가 운송용기가 필요 없을 것으로 판단된다. 즉 해체 작업시 10톤 지게차로 취급이 가능하고 임시 저장시 연구로 2호기 원자로실의 천정크레인(7.5톤 용량)을 이용하여 2단 적재 등의 취급이 가능할 뿐만 아니라, 소외 운반시에도 별도의 운송용기나 이중 포장이 필요치 않다[6].

표 1. 포장 및 운반에 따른 방사성물질 분류(국내법규)

운반물 종류	저준위 방사성물질	L형 운반물	A형 운반물	B형 운반물
구 분	<ul style="list-style-type: none"> <li>균일하게분포되어있고방사능 농도가 A<sub>2</sub> 값이1Ci보다 큰 핵종의 경우 11MBq(0.3mCi)/g 을초과하지 않는 방사성물질.</li> <li>오염도가 37kBq(0.001mCi)/m<sup>2</sup>을 초과하지 않는 방사성 물질</li> </ul>	위험성이 극히 적은 방사성물질 (1×10 <sup>-3</sup> A <sub>1</sub> ,A <sub>2</sub> 이하)	A <sub>1</sub> 또는 A <sub>2</sub> 를 초과 하지않는 방사성 물질	A <sub>1</sub> 또는 A <sub>2</sub> 를 초과 하는방사성물질
컨테이너의 방사선량율	표면 : 10 mSv(1rem)/h 이하 차량표면 : 2 mSv(0.2rem)/h	표면 : 5 μ Sv(0.5mrem)/h이하	표면 : 2 mSv(200mrem)/h 이하 1 m:0.1 mSv(10mrem)/h 이하	
시험조건	없음	없음	고시 96-38호의 별지 2의시험조건	고시 96-38호의 별지 3, 4의시험조건
운반용기제작 승인/검사	운반용기 규정이 없음	필요 없음	필요 없음	과기부장관의 승인 필요
운반신고	필요 없음	필요 없음	필요 없음	과기부장관에게 신고

표 2. IAEA 기준에 따른 포장 및 운반기준(IAEA Safety Standard Series No. ST-1)

구 분	저준위 방사성물질	Type of Package		
		IP Type 1,2,3	Type A Package	Type B Package
기 준	· LSA-II : Specific activity가 10 <sup>-4</sup> A <sub>2</sub> /g을 초과하지 않는 물질	Containing LSA material	Containing activity up to A <sub>1</sub> or A <sub>2</sub>	Containing activity in excess of A <sub>1</sub> or A <sub>2</sub>
방사선량율	· LSA-III : Specific activity가 2x10 <sup>-3</sup> A <sub>2</sub> /g을 초과하지 않는 물질	표면 : 2 mSv(200mrem)/h 이하		
시험 조건		ISO 1496/1 Freight Containers (IP-2,IP-3)	Water spray, free drop, stacking and penetration test	Mechanical, thermal and water immersion test
승인		필요 없음	필요 없음	승인 필요

표 3. 방사성 고체폐기물 용기별 특성 비교

비교방식 폐기물용기(m)	적재 부피 (m³)	적재 중 (톤)	콘크리트 적재 부피 (m³)	소요 용기 수량	취급 가능 기기				수송 용기 사용 여부	KRR-2 Core Shroud 수용 여부	비 고
					KRR-1 Crane (5톤)	KRR-2 Crane (7.5톤)	지게차 (10톤)	Air Lifter			
10m³ ISO Skip (BNFL 제시) 3.4(L)x2.9(W)x1.72(H)	9.2	13.2	7.54	91	×	×	×	○	○	○	영구처분요건에 따른 설계/제작.
10m³ ISO Container 3.4(L)x2.9(W)x1.72(H)	9.2	13.2	7.54	91	×	×	×	○	○	○	BNFL ISO Skip 을 국내제작경우
20' Open-top ISO Container 5.9(L)x2.35(W)x2.33(H)	32.3	21.6	12.34	56	×	×	×	×	○	○	일반화물수송용 Container
Steel Box 2.1(L)x1.9(W)x1.2(H)	4.5	5.75	3.28	207	×	○	○	○	×	○ (상하 분리)	20'Container에 3개 적재기준
소형 ISO Container 2.1(L)x1.9(W)x1.2(H)	3.9	6.2	3.54	193	×	○	○	○	○	○ (상하 분리)	Steel box 크기 를 ISOContainer 형태로 제작
200 l Drum	0.2	0.5	0.2	3,099	○	○	○	○	×	×	

표 4. 방사성 고체폐기물 용기 비교 평가

비교방식 폐기물용기	경제성비교	취급장비분석	비 고
10m³ ISO Skip (BNFL 제시) 3.4(L)x2.9(W)x1.72(H)	적재가능 콘크리트의 단위 부피당 소요금액이 가장비쌈.	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 기존 크레인 사용 불가</li> <li>● Air Lifter 또는 15톤이상의 지게차필요</li> <li>● Hard Standing 또는 출입문 통과를 위한 출입구 개조 작업 필요</li> </ul>	BNFL 제시안 저장/운송 및 처분 가능
10m³ ISO Container 3.4(L)x2.9(W)x1.72(H)	Hard Standing을 위한 추가비용 발생	<ul style="list-style-type: none"> <li>● KRR-2 크레인 사용 불가</li> <li>● Air Lifter 또는 15톤이상의 지게차필요</li> <li>● Hard Standing 또는 출입문 통과를 위한 출입구 개조 작업 필요</li> </ul>	영국의 ISO Skip 를 국내제작 한 경우
20' Open-top ISO Container 5.9(L)x2.35(W)x2.33(H)	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 설계 및 재질변경이 요구 되어 추가개조 비용 필요</li> <li>● 적재효율이 낮아 폐기물 영구처분시 비용증가</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 24톤이상의 대용량 지게차가 필요함</li> <li>● 출입문통과를 위한 출입구 개조 필요</li> </ul>	바닥재가 목재, 상부덮개 없음
Steel Box 2.1(L)x1.9(W)x1.2(H)	비용은 중간정도	KRR-2 크레인(7.5톤) 및 10톤 지게차 사 용으로 실외운반 및 2단 적재 가능	20'Container 3개 적재기준
소형 ISO Container 2.1(L)x1.9(W)x1.2(H)	비용은 중간정도	KRR-2 크레인(7.5톤) 및 10톤 지게차 사 용으로 실외운반 및 2단 적재 가능	Steel box 크기로 ISO Container 구조로 제작한경우 저장 및 운송 가능

## 4. 설계 요건 및 제작 기준

### 4.1 설계 일반 조건

#### 가. 일반사항

저준위 방사성고체폐기물 저장용기는 안전하고 편리하게 취급할 수 있어야 하며, 운반도중 운반기구 내에서 안전이 유지될 수 있어야 한다. 자연적인 온도 및 압력의 변화와 저장용기의 운송도중 예상되는 내압의 변화, 가속, 진동 등에 의한 기능 저하, 균열, 파손 등의 포장기능이 감소되지 아니하도록 하여야 한다. 특히, 볼트, 너트 및 기타 안전장치들은 반복적으로 사용한 후에도 느슨해지거나 풀어지지 않아야 한다. 저장용기와 적재된 방사성물질 상호간에 화학적, 전기적, 방사선 조사에 의한 기능저하 등 유해한 반응이 일어나지 아니하도록 하여야 한다. 방사성물질의 누설이 없도록 하여야 하며, 용이하게 개봉되지 아니하도록 밀봉장치를 하여야 한다.

#### 나. 저장용기의 용도

저준위 방사성 고체 폐기물 저장용기는 연구로 1, 2호기의 폐로공사기간 동안 발생하는 방사화콘크리트, 각종 오염된 배관류 등과 같은 저준위의 콘크리트와 철제류를 저장하는데 사용되는 직육면체 구조의 Container type의 철제용기이다.

#### 다. 저장용기의 취급

저장용기는 다음과 같은 조건으로 취급할 때 영구적인 변형이 없는 구조이어야 한다.

- 1) 상부모서리쇠에 훅(Hook), 새클(Shackle) 또는 트위스트록(Twistlock)등을 끼워 맞춤쇠를 이용한 스프레드 방식으로 빈용기 또는 적재된 저장용기를 상부 인양할 때
- 2) 하부모서리쇠에 슬링방식으로 최소 45° 의 각도로 빈용기 또는 적재된 저장용기를 하부 달아 올림 할 때
- 3) 포크포켓을 이용하여 지게차로 빈용기 또는 적재된 저장용기를 하부 들어올림 할 때

#### 라. 기후조건

저장용기는 다음과 같은 옥내 및 옥외조건 하에서 보관되므로 방사성폐기물을 임시저장하는 동안 부식 등에 의한 방사성폐기물의 누출을 방지할 수 있어야 한다.

- 설계 기준 온도 : -40 ~ 80℃
- 기 압 : 대기압
- 연간 강수량 : 평년 1,365 mm
- 상대 습도 : 년 평균 상대 습도 ; 69%  
최저 월평균 상대습도 ; 0%  
최대 월평균 상대습도 ; 100%

## 4.2 설계 요건

### 가. 일반사항

저준위 방사성고체폐기물 저장용기는 적용 규격과 제작 표준 설계도면 및 사양에 따라 최신 설계기술과 제작기술로 설계 및 제작되어야 하며, 검사 및 청소와 방사성폐기물의 포장 후 제염이 용이한 구조이어야 한다. 저장용기는 방사성물질의 누설이 없도록 하여야 하며, 저장용기의 취급시 용이하게 개봉되지 않도록 밀봉장치를 하여야 한다. 콘크리트, 철재류 등 방사성 고체폐기물은 저장용기의 상부를 통해서 적재된다. 저장용기는 향후 방사성폐기물 처분장으로의 운송을 고려하여 필요시 20피트 상용 컨테이너에 적재/운송할 수 있는 구조이어야 한다. 이 저장용기는 탄소강으로 된 철재용기로서 철재용기의 본체는 모두 용접처리하고 상부는 개방형으로 제작된 후 상부덮개를 체결하는 구조로 제작된다. 또한 저장용기는 지게차와 천장크레인으로 취급할 수 있는 구조이어야 하고, 바깥면은 제염이 용이한 구조로 마감 처리되어야 한다.

### 나. 기기사양

1) 저장용기는 자체중량을 포함한 최대 총무게가 7,250 kg이고, 바깥치수가 2150mm(L)×1900mm(W)×1,200mm(H)인 사각 Container type 용기로서 상부 개방형이고 방사성고체폐기물의 포장 후 폐기물 및 분진 등의 누출을 방지하기 위해 가스켓이 장치된 상부덮개로 볼트 및 너트를 이용하여 밀봉할 수 있어야 한다.

2) 저장용기의 주요 재질은 다음과 같다.

- 저장용기 본체 : Atmospheric corrosion resistant steel, KS D3542[7]의 SPA-H 또는 이와 동등한 재질, 항복점 : 35 kg/mm<sup>2</sup>, 인장강도가 49 kg/mm<sup>2</sup>

- 모 서 리 쇠 : Weldable steel casting, KS D4106[7]의 SCW480 또는 이와 동등한 재질, 항복점 : 28 kg/mm<sup>2</sup>, 인장강도가 49 kg/mm<sup>2</sup>

- 가 스 켓 : Hard EPDM

3) 저장용기는 최소한 ISO 1496/1에서 요구하는 강도를 만족하는 구조이어야 하며, 해체공사 중 발생하는 콘크리트 및 철재류를 포장하기 위한 것이므로 저장용기의 바닥 및 옆면도 이들 하중물을 지탱할 수 있는 구조이어야 한다.

4) 상부덮개는 저장용기에 견고하게 장착할 수 있어야 하고, 쉽고 효과적으로 봉인할 수 있는 장치를 갖추고 있어야 한다.

5) 저장용기에 설치되는 가스켓은 신품의 가스켓이 사용되어야 하며, 가스켓이 적절히 밀봉될 수 있도록 저장용기의 상부에 알맞게 설치되어야 한다.

6) 저장용기는 천장크레인을 이용하여 취급할 수 있도록 상부 및 하부에 ISO 1161의 요건을 만족하는 모서리쇠를 부착하고, 지게차를 이용한 취급도 가능하도록 저장용기의 하부에 포크 포켓을 설치하여야 한다. 이들 인양장치는 최소한 다음의 기준을 만족해야 한다.

- 인양장치는 포장재료의 항복강도를 초과하지 아니하고 포장물 하중의 3배를 지탱할 수 있어야 한다.

- 인양장치가 포장물의 하중초과로 인하여 파손되더라도 이로 인해 포장물의 차폐 또는 격납 특성이 저하되지 아니하여야 한다.

- 7) 상하부 모서리쇠에 의한 저장용기의 외관은 다음과 같아야 한다.
- 저장용기가 비어 있는 상태일 때 골재 및 바닥골재의 가장 밑면이 하부 모서리쇠의 밑면에서 윗방향으로 최소 17mm가 되도록 하여야 한다.
  - 상부 모서리쇠의 윗면은 상부의 가장 윗면에서 적어도 6mm 빠져나와야 한다.
  - 각 모서리쇠는 저장용기의 지주기둥의 바깥면보다 4mm 빠져나와야 한다.
- 8) 저장용기는 다단적재(4단적재)가 가능한 구조이어야 한다.
- 9) 저장용기는 방사성폐기물 적재시 표면방사선량이 표면에서 2 mSv/hr 이하이고, 표면으로부터 1미터 떨어진 위치에서 100  $\mu$ Sv/hr 이하가 되어야 한다[2].
- 저준위 방사성고체폐기물중 방사능 준위가 가장 높게 평가된 연구로 2호기 스틸 차폐체의 총방사능은  $5.15 \times 10^{10}$ Bq이며, Co-60의 방사능은  $2.82 \times 10^9$ Bq이고, 차폐되지 않은 스틸 차폐체의 방사선량율은 1m 떨어진 거리에서 85.5  $\mu$ Sv/hr로 산출되었다[1]. 차폐하지 않았을 경우에도 위 조건을 만족시키므로 저장용기의 강판 두께는 ISO 규정에 따라 2mm로 한다.

### 4.3 제작 기준

#### 가. 일반사항

각 저장용기는 방사성고체폐기물의 누출을 방지하기 위하여 저장용기의 각 부재의 모든 접합부위는 용접을 이용하여 접합하여야 한다. 저장용기 제작에 사용되는 철자재는 성형가공 전에 모든 철재 표면을 스웨덴 표준 SA 2.5 또는 이와 동등한 기준을 적용하여 표면조도 25~35 마이크론이 되도록 연마제 세정작업을 실시한 후 10마이크론 두께로 징크 리치 프라이머를 칠한 후 보관·사용한다. 브라스팅 처리된 표면은 고압공기 분사 또는 진공펌프를 이용하여 블라스트로 인한 먼지나 기타 잔여물 등을 제거한다. 징크 리치 프라이머 작업은 브라스팅 작업 후 한시간 이내에 수행되어야 한다.

#### 나. 용접

저장용기에 사용되는 철판에 대한 용접은 MIG(Metal Inert Gas), SAW, SMAW용접으로 수행해야 한다. 모든 용접은 AWS D1.1[8]에 따라 수행되어야 하며, 수정용접은 승인된 절차서에 따라 수행되어야 한다. 용가재의 선정 및 용접설계는 제작 전에 승인을 받아야 한다. 모든 용접부위는 용접전에 용접될 표면을 깨끗이 세척하여야 하며, 염소 함유 세정제를 사용해서는 안된다. 용접 후에는 슬래그(Slags), 스펀터(Spatters)와 같은 이물질은 제거하여야 한다.

#### 다. 도장

공급자가 공급하는 기기에 대한 초벌도장과 마감도장은 공급자의 공장에서 수행하여야 한다. 저장용기 내·외부는 방사성폐기물의 저장기간동안의 부식을 방지하기 위하여 에폭시 징크 리치 프라이머를 도막두께 25~30 마이크론으로 초벌도장 후, 에폭시 페인트를 40 마이크론 도막두께로 2차 도장을 해야한다.

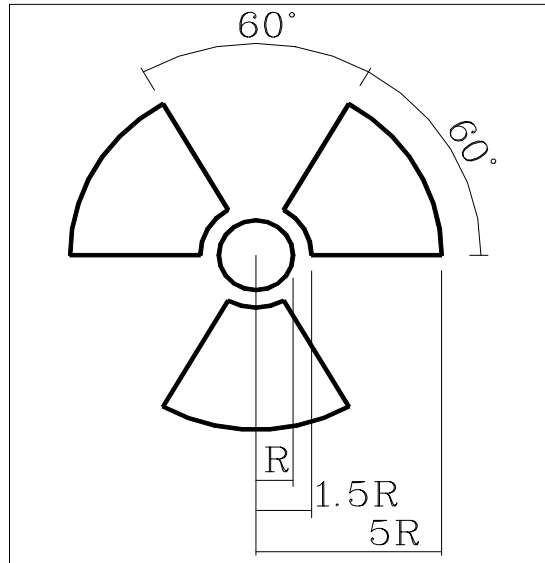
라. 표시(Mark)

마감도장을 마친 저장용기는 효율적인 방사성폐기물 관리를 위한 정보를 위해 다음과 같은 표시를 하며, 방사선 표시는 탈, 부착식 또는 은폐 방식으로 하여 빈용기 취급시 방사선 표시가 나타나지 않도록 한다.

1) 방사선 표시

방사선 표시는 최소한 저장용기의 마주보는 두 면에 표시한다.

$R = 40 \text{ mm}$



2) 저장용기 종류 및 방사선량 표시

저장용기의 일련번호와 방사선량을 나타내기 위한 표시는 저장용기의 한쪽 옆면에 흑색 테두리선과 흑색 고딕체 글씨로 다음과 같이 표시한다.

일련 번호 :				400 mm
폐기물발생일 :	년		월	
주요 내용물 :				
방사선량을				
- 측정일 :	년		월 일	
- 표 면 :				$\mu\text{Sv/hr}$
- 1 m :				$\mu\text{Sv/hr}$
방사능량 :				Bq

450 mm



## 5. 저장용기 구조 해석

이미 잘 알려진 상용 유한요소 해석 프로그램인 ANSYS Code를 이용하여 저준위 방사성고체폐기물 저장용기의 설계자료를 근거로 응력분포와 변형을 해석하였다.

구조 해석은 다음의 두 가지 경우에 대하여 수행하였으며, 이 때 사용된 저장용기의 물성은 표 5와 같다.

- 상부 모서리쇠를 이용한 인양시 컨테이너의 변형 및 응력
- 4단 적재시 컨테이너 및 내용물의 하중에 의한 컨테이너의 변형 및 응력

표 5. 컨테이너 제작에 사용된 재료의 물성표

Item	Corner Casting	Frame, Panel	Unit
Material	Iron, gray cast	Steel, carbon	-
Young's Modulus	90	200	GPa
Poisson's Ratio	0.2	0.27	-
Mass Density	70	77	KN/m <sup>3</sup>
Yield Stress	170	210 - 530	MPa

### 5.1 해석 방법

저장 용기의 Modeling은 컨테이너의 전체 크기에 비해서 재료의 두께가 1/10 이하이므로 3D 요소인 Solid 45 대신 2D 요소인 Shell 63을 사용하였고, 재료의 두께는 2mm로 Shell 요소의 Real Constant로 처리하였다.

컨테이너의 변형(deformation) 및 응력(equivalent stress) 해석시 하중은 ISO 기준에 따랐으며, 각각의 시험하중은 다음과 같다.

- 크레인 인양시 : 13,710 Kg
- 4단 적재시 : 26,104 Kg

### 5.2 경계조건

#### 1) 크레인 인양시

전체 하중인 13,710 Kg이 컨테이너의 바닥에 작용하므로 하중을 컨테이너의 바닥에 Pressure로 변환하여 적용하였으며, 인양시 사용되어지는 네 곳의 모서리쇠(corner casting)를 지지점으로 하여 해석하였다.

#### 2) 4단 적재시

전체 하중인 26,104 Kg이 맨 아래 컨테이너의 네 곳 윗 모서리쇠에 작용하므로 하중을 컨테이너의 모서리쇠에 Pressure로 변환하여 적용하였으며, 네 곳의 바닥 모서리쇠를 지지점으로 하여 해석하였다

### 5.3 해석 결과

#### 1) 크레인 인양시

하중에 의한 변형 및 응력 해석에서 응력의 최대값이 152 MPa으로 모서리쇠의 Yield

Stress 값인 170 MPa, 탄소강의 Yield Stress 값인 210~250 MPa 이하로 나오므로 탄성 영역에서의 변형(최대 3.1mm)만 있을 뿐 소성변형은 일어나지 않는다. 따라서 상기시험 하중에서의 구조상 변형은 발생하지 않는다. 그림 1 및 2에 크레인 인양시 변형 및 응력 해석 결과를 나타내었다.

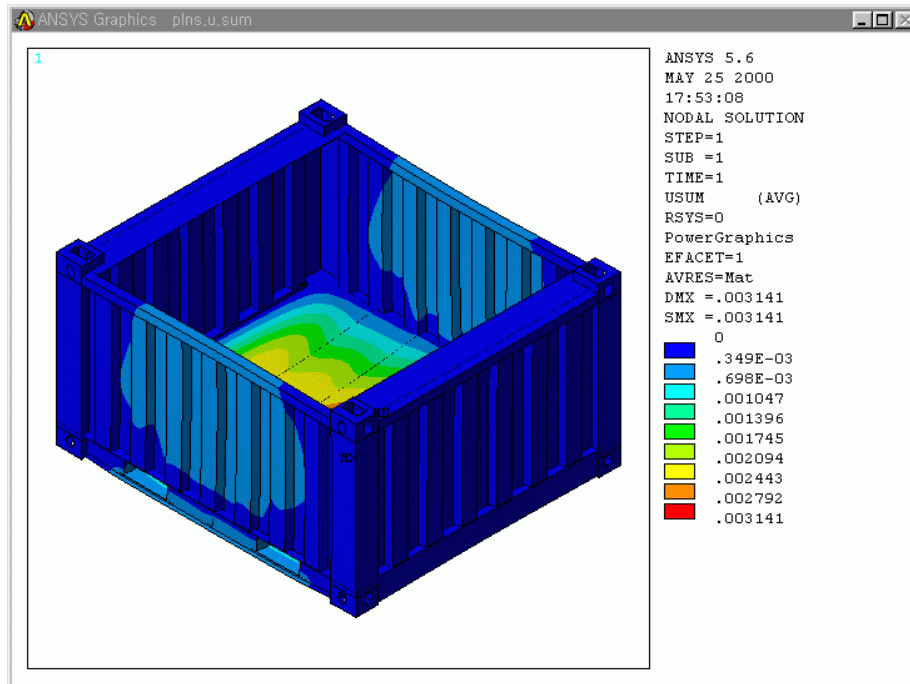


그림 1. 크레인 인양시 변형 결과(단위 : Meter)

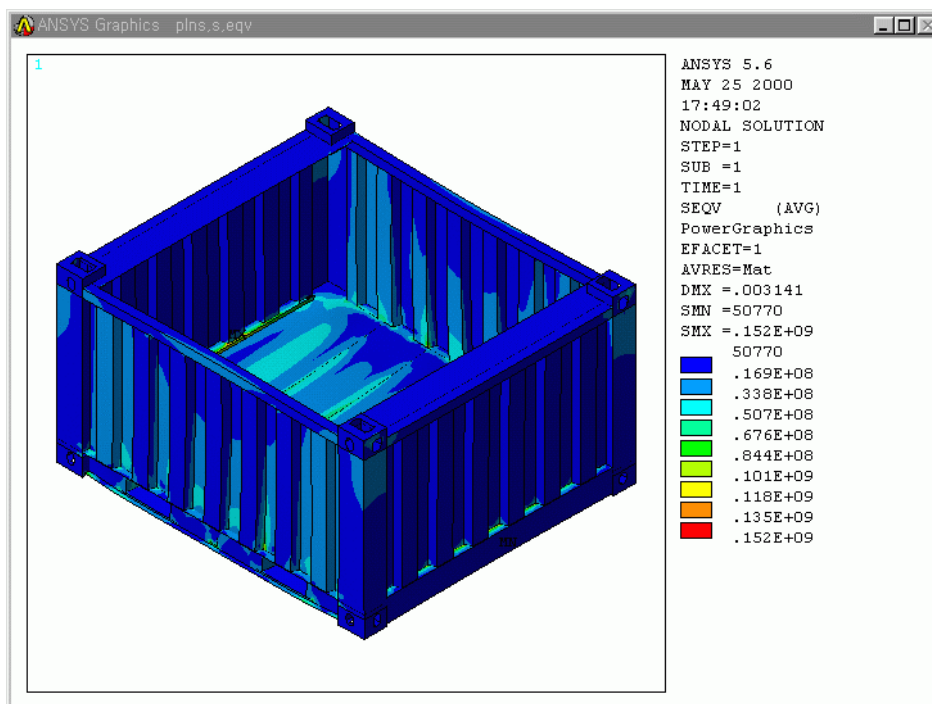


그림 2. 크레인 인양시 응력해석 결과 (단위 : Pascal)

2) 4단 적재시

하중에 의한 변형 및 응력 해석에서 응력의 최대값이 8.63 MPa으로 모서리쇠의 Yield Stress 값인 170 MPa, 탄소강의 Yield Stress 값인 210~250 MPa 이하로 나오므로 탄성 영역에서의 변형(최대 0.19mm)만 있을 뿐 소성변형은 일어나지 않는다. 따라서 상기시험 하중에서의 구조상 변형은 발생하지 않는다. 그림 3 및 4에 크레인 인양시 변형 및 응력 해석 결과를 나타내었다.

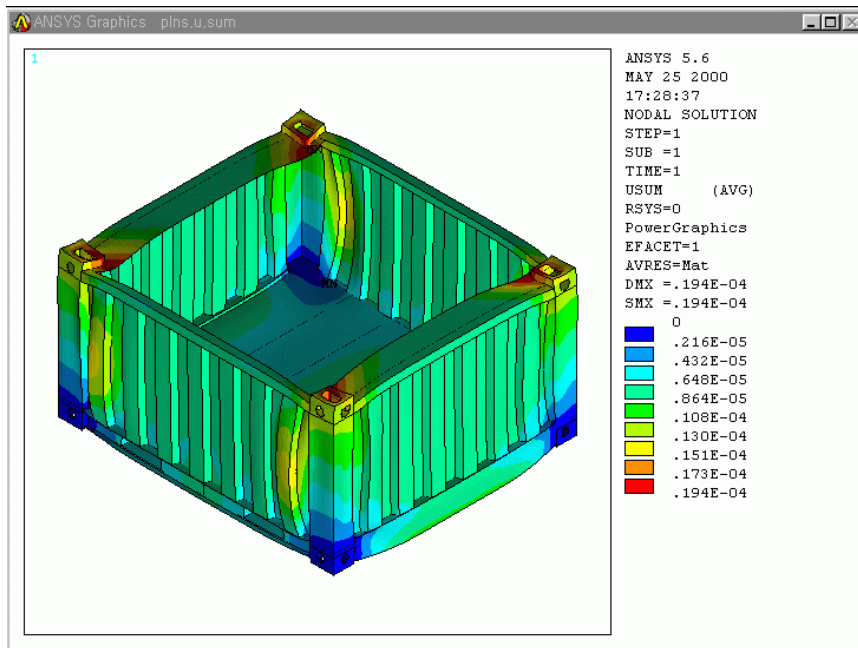


그림 3. 4단 적재시 변형 결과(단위 : Meter)

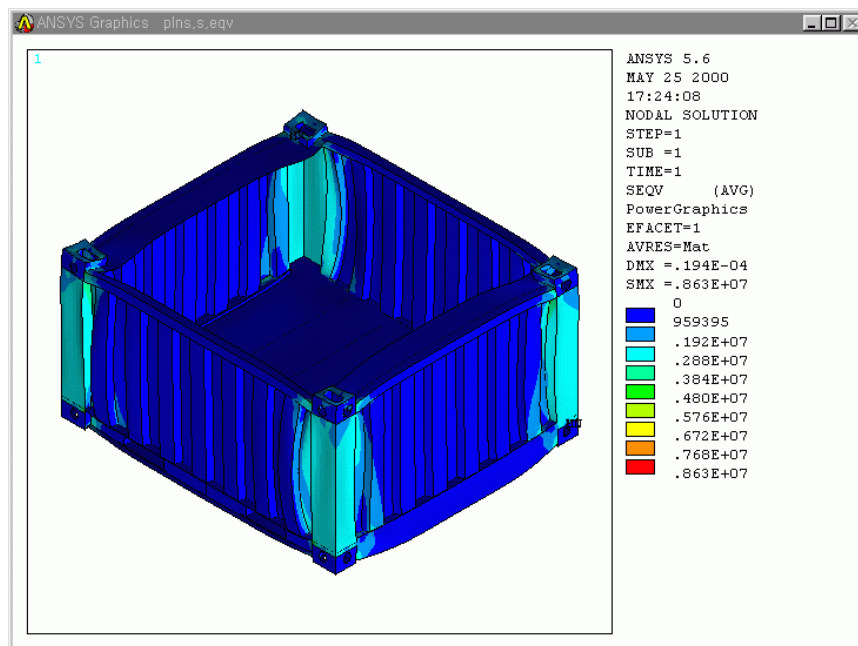


그림 4. 4단 적재시 응력해석 결과 (단위 : Pascal)

## 6. 시험 및 검사

### 6.1 일반 요건

1) 저장용기의 제작에 사용되는 모든 자재는 공급자의 품질보증절차에 따라 시험 및 검사 완료된 자재만을 사용한다.

2) ISO 1496/1의 시험방법을 포함한 시방서의 적용규격 및 표준에서 요구하는 모든 시험 및 검사를 수행하여야 하며, 품질검사 요원의 검사 및 확인을 받아야 한다.

3) 시험 및 검사계획서는 검토를 위하여 제출하여야 하며, 시험 및 검사가 끝난 직후 시험 및 검사에 대한 결과보고서 및 입증자료가 남도록 한다.

#### 4) 배치(Batch)검사

- 배치검사의 주기는 매 10세트의 저장용기 제작시 마다 시행한다.
- 배치검사의 항목은 상부 인양 및 하부 들어올림 시험으로 한다.

#### 5) 상부 인양 및 하부 들어올림 시험

6) 모든 저장용기는 찢수 및 결함사항 체크 및 누수시험을 실시하여야 한다.

#### 7) 누수시험

시험할 저장용기의 모든 이음부 및 상부덮개 부분에 대하여 다음의 조건으로 누수시험을 한다.

- 물구멍의 지름은 12.5 mm로 한다.
- 물구멍의 압력은 물줄기 끝이 10m 상당(100kPa) 이상으로 한다.
- 물 뿌리는 이동속도는 100mm/sec 이하로 한다.
- 뿜는 물은 시험면에 거의 수직이 되도록 하고, 물구멍과 시험면의 거리는 1.5 m 이내로 한다.

8) 저장용기는 상기의 시험 및 검사 후에도 사용상 차질을 주는 변형 또는 손상이 없어야 하며, 방사성 내용물의 외부확산 또는 손실이 없어야 한다. 또한, 누수시험을 한 후, 내부에 누수를 발견할 수 없어야 한다.

### 6.2 시험 결과

#### 가. 상부 인양 시험

ISO 1496/1의 기준에 따라 13,710 Kg의 내용물을 저장용기에 채우고 5분 동안 상부 인양한 후 저장용기의 구조적 변형을 측정된 결과 상부 인양시 최대 1.5 mm의 변형이 있었으나, 시험 후 영구변형 등 기타 부적절할 치수의 변화는 없었다.



#### 나. 하부 들어올림 시험

ISO 1496/1의 기준에 따라 10,810 Kg의 내용물을 저장용기에 채우고 5분 동안 하부 들어올림한 후 저장용기의 구조적 변형을 측정된 결과 하부 들어올림시 최대 1.0 mm의 변형이 있었으나, 시험 후 영구변형 등 기타 부적절한 치수의 변화는 없었다.



## 7. 결 론

연구용 원자로 1, 2호기(TRIGA Mark-II & III)의 해체활동에서 발생하는 저준위 방사성고체폐기물을 저장하고 이송하기 위한 용기를 제작하는데 필요한 설계요건 및 제작기준을 도출하고, 설계자료를 바탕으로 구조해석을 수행하였으며, 완성된 용기에 대한 시험결과를 통하여 이를 실증·평가하였다. 방사성고체폐기물 저장용기는 기본형상을 해외에서도 저준위 고체폐기물의 저장 및 이송용기로 많이 사용되고 있는 Container type으로 선정하였다. 저장용기는 내부 저장용량이  $4\text{m}^3$ 이고 외관치수가  $2150\text{mm(L)} \times 1900\text{mm(W)} \times 1200\text{mm(H)}$ 로서 International Organization for Standardization document ISO 1496 / 1, "Series 1 Freight Containers - Specifications and Testing - Part 1 : General Cargo Containers의 기본요건을 만족시키고, 국내 원자력법 시행령 제 3 절 "방사성물질등의 운반 및 포장"에서 규정하는 포장기준을 따랐으며, 국제원자력기구(IAEA)의 "Regulations for The Safe Transport of Radioactive Material / Safety Standards Series No. ST-1 / Requirement, 1996 Edition"의 Industrial Package Type 2 (IP-2)의 제작요건 및 시험기준을 적용하였다. 제작기준은 American Welding Society(AWS) D1.1의 규격을 따랐으며, 그 외 도장요건 및 부착물 부착요건 등 규정하지 않은 사항에 대해서는 해당되는 국내 기준 및 규격을 적용하였다. 설계된 자료 및 도면을 근거로 상용 유한요소 해석 프로그램인 ANSYS Code를 이용하여 주어진 요건하에서의 응력분포와 변형을 해석하여 구조적 결함 없이 허용응력 범위내에 들었음을 보여주었고, 제시된 시험기준에 따라 인양 및 들어올림 시험을 수행하여 이상이 없음을 실증·평가하였다.

## 후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행한 것입니다.

## 참고문헌

- [1] 이동규 외, “연구로 1, 2호기 해체에 따른 방사성고체폐기물 관리방안 연구”, 2000 춘계학술발표회 논문집, 한국원자력학회, 2000
- [2] 해체계획서, 한국원자력연구소, 2000
- [3] 과기부고시 96-38호 “방사성물질등의 포장 및 운반에 관한 규정, 1996
- [4] Safety Standard Series ST-1(Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material), IAEA, 1996
- [5] ISO 1496-1, Series 1 Freight Containers - Specification and Testing - Part 1: General Cargo Containers for General Purpose, 1998
- [6] K.J.Jung, "Radioactive waste management plan during the TRIGA Mark-II and Mark-III decommissioning" International Symposium on Technologies for the Management of Radioactive Waste from Nuclear Power Plants and Back End Nuclear Fuel Cycle Activities, Taejon (1999)
- [7] KS, 한국표준협회, 1997
- [8] Structural Welding Code, AWS D1.1-98, American Welding Society, 1998