

## Safety Evaluation of a Radioisotope Transport Package

J. C. Lee, J. H. Ku, K. S. Seo and D. K. Min  
Korea Atomic Energy Research Institute

### 방사성 동위원소 운반용기의 안전성 평가

이주찬 · 구정희 · 서기석 · 민덕기  
한국원자력연구소

**Abstract** - A package to transport the high level radioactive materials is required to withstand the hypothetical accident conditions as well as normal transport conditions according to IAEA standards and domestic regulations. The regulations require that the package should maintain the shielding, thermal and structural integrities to release no radioactive material. In general, safety evaluation of packages is performed by experimental methods using scale model and/or analytical methods using computer codes. This paper presents the safety evaluation of package to transport the radioisotopes produced in the HANARO to the radioisotope production facility. Radiation shielding, thermal and structural analyses were performed using the computer codes. It has been verified that the package is safe under hypothetical accident conditions as well as normal transport conditions.

*Key Words* : Radioisotope, Transport package, Radiation shielding, Safety evaluation

**요약** - 방사성 동위원소 등의 고준위 방사성물질을 운반하기 위한 운반용기는 국내외의 관련법규에 따라 정상수송은 물론 가상사고조건에서도 방사성물질의 누설이 발생되지 않도록 방사선차폐, 열 및 구조적 건전성이 유지되어야 한다. 운반용기의 건전성 평가는 시험모델을 이용한 시험적 방법과 전산해석 코드를 이용한 해석적 방법에 의하여 이루어지고 있다. 본 논문에서는 원자력연구소의 하나로에서 생산되는 동위원소를 동위원소 생산시설까지 이송하기 위한 HTS (Hydraulic Transfer System) 방사성 동위원소 운반용기의 안전성을 평가하였다. 방사선차폐해석, 열해석 및 구조해석을 수행한 결과 동위원소 운반용기는 정상수송조건 뿐만 아니라 가상사고조건에서도 건전성이 유지되는 것으로 나타났다.

**중심어** : 방사성 동위원소, 운반용기, 방사선 차폐, 안전성 평가

## 서론

방사성 동위원소는 의료분야, 산업분야, 기타 농학분야 등 각 분야에서 널리 사용되고 있으며, 산업발달에 따라 그 수요량도 크게 증가되는 추세이다. 방사성 동위원소의 수요량 증가와 더불어 동위원소를 안전하고 효율적으로 운반하기 위한 운반용기의 필요성이 대두되고 있다. 원자력연구소에서는 하나로 원자로심에서 생산되는 Mo-99, I-131, Ho-166 등의 동위원소를 인접한 동위원소 생산시설까지 안전하게 운반하기 위하여 HTS (Hydraulic Transfer System) 방사성 동위원소 운반용기를 개발하였다. 이 운반용기는 방사선원의 세기가 비교적 높은 동위원소를 운반할 수 있도록 설계되었다. 방사선원의 방사능준위로 분류되는 운반용기의 기준은 국내 원자력법 과기처고시 제 85-8호[1] 및 IAEA Safety Series No.6[2]의 규정에 의거하여 본 운반용기는 B형 포장물로 분류하였으며, B(M)형 운반용기의 기술기준을 적용하여 방사선 차폐해석, 열해석, 구조해석 등을 수행하여 운반용기의 안전성을 분석하였다.

## 방사성 동위원소 운반용기의 개요

HTS 운반용기는 그림 1과 같이 크게 용기본체(cask body)와 외부의 충격완충체(impact limiter)로 구분된다. 용기본체는 방사성 동위원소 캡슐과 캡슐을 둘러싼 내부 셸(inner shell), 납 차폐체(lead shield) 그리고 외부 셸(outer shell)로 구성되는 원통형 구조이다. 내부셸과 외부셸 사이에는 감마선 차폐재로 납을 주조하였다. 운반용기의 운반대상 내용물인 방사성 동위원소는 직경 28 mm, 높이 150 mm의 알루미늄 캡슐의 내부에 고체형 내용물로 구성되며, 이 캡슐이 운반용기의 내부공간에 장전된다. 용기의 외부를 둘러싼 충격완충체는 상하부에 balsa wood와 red wood로 채워지고, 중간부위는 5 개의 전열편으로 구성된다. 내부공간의 격납경계(containment boundary)를 유지하기 위하여 뚜껑의 하단에 dovetail 홈을 내어 바이톤 O-링을 쓰고 여러개의 볼트를 체결하여 밀봉을 하였다. 내부공간의 물을 배수하고 건조시키기 위하여 뚜껑 및 본체의 하단에 배수 카플링을 설치하였다.

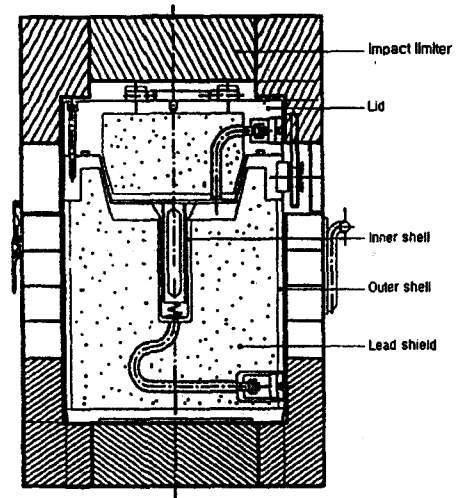


Fig. 1. Overview of HTS Cask.

HTS 운반용기의 설계기준인 운반대상 내용물은 다음과 같으며, 모든 방사능량이 특수형 방사성물질이 아닌 경우의  $A_2$  값을 초과하여 B형 운반물로 분류된다.

- ① Radioisotope I : Mo-99 100 Ci  
( $A_2$  value = 100 Ci)\*
- ② Radioisotope II : I-131 50 Ci  
( $A_2$  value = 10 Ci)\*
- ③ Radioisotope III : Ho-166 100 Ci  
( $A_2$  value = 30 Ci)\*
- ④ Radioisotope IV : 기타  
( $A_2$  값 이상인 경우 Ho-166 100 Ci 보다 방사능 세기가 낮은 것)

\*과기처 고시 제 85-8호 방사능 기준치

## 방사선 차폐해석 평가

### 해석조건 및 모델링

HTS 운반용기에 장전될 수 있는 방사성 동위원소는 Mo-99, I-131 그리고 Ho-166으로 최대 방사능 설계기준은 각각 100, 50 그리고 100 Ci이다. 이 운반용기에는 이중 한가지 핵종만 장전되는 것으로 설정하였으며, 각 동위원소별 감마선의 에너지, 발생분율, 그리고 감마선의 세기 등을 표 1에 나타내었다.  $\gamma$ 선 분율은 Mo-99가 24.5 %, I-131이 96.3 %로 Ho-166의  $\gamma$ 선 분율 1.31 %보

Table 1. Gamma-ray Source of Mo-99, I-131 and Ho-166

Isotope	Radioactivity (Ci)	Energy (MeV)	Fraction (%)	Gamma-ray source (photons/sec)
Mo-99	100	0.180	6.8	2.516E11
		0.372	1.3	4.810E10
		0.780	16.4	6.068E11
I-131	50	0.284	6.1	1.129E11
		0.364	81.1	1.500E12
		0.637	7.3	1.351E11
		0.723	1.8	3.330E10
Ho-166	100	1.180	0.08	2.934E09
		1.383	0.93	3.441E10
		1.586	0.18	6.770E09
		1.664	0.12	4.477E09

다 훨씬 높으나  $\gamma$ 선의 에너지는 Mo-99와 I-131이 0.18 MeV에서 0.78 MeV 사이에 분포하고 있으나 Ho-166의 경우에는 1.18 MeV에서 1.66 MeV 사이에 분포하고 있어 Ho-166의  $\gamma$ 선이 다른 두 핵종에서 발생하는  $\gamma$ 선보다 방사선적 영향을 클 것으로 예측된다.

방사선 차폐해석은 해석 대상물과 동일한 모델로 수행하는 것이 가장 이상적이지만 실제로 해석코드 내에서 복잡한 형태의 해석 대상물을 수치적으로 모델링하거나 기하적으로 구성하는 것이 불가능한 경우가 많다. 따라서 단순화된 모델을 써서 해석을 수행하여 그 해석결과에 대해 보수성을 더함으로써 효율적인 결과를 얻을 수 있다. 방사선 차폐해석은 MSFIELD[3]와 QAD-CG[4] 코드를 사용하여 각 동위원소를 대상으로 수행하였다.

MSFIELD 코드는 point-kernel 방식을 이용한 1차원 차폐해석 코드로서 해석 대상물에 대한 기하학적 형태가 코드내에 설정되어 있다.

MSFIELD는 1차원 해석코드이므로 상부와 측면부의 각 지점에서의 방사선량을 계산하기 위해서는 각 지점에 따라 개별적으로 해석을 수행하여야 하며, 그림 2는 MSFIELD 해석모델을 나타내고 있다. 상단부 차폐해석에서는 원통형 구조

물의 중간 연장선에서 용기 표면과 표면에서 각각 1 m, 2 m 거리에 대한 선량을 계산하였다.

QAD-CG 코드는 point-kernel 방식을 이용한 3차원 해석코드로서 방사선원 영역을 적절히 세분하여 각 미세체적 선원으로부터 외부 detector 위치까지 kernel 방법으로 line-of sight를 계산하게 된다. 따라서 QAD-CG 코드는 각 측정지점이나 방향에 관계없이 한번에 해석을 수행하여 여러 부위에 대한 해석결과를 얻을 수 있고 단일 해석모델을 사용함으로써 1차원 해석코드에서는 고려되지 않은 복합구조의 영향이 포함된 계산결과를 얻을 수 있다. 동위원소 운반용기에 대한 QAD-CG 코드를 이용한 방사선차폐해석을 위한 해석모델은 그림 3과 같이 2차원 모델로 구성하였다. 운반용기의 차폐체의 주재료는 납이며, 구조재는 스테인레스강으로 하였다. 캡슐형태인 방사선원은 원주형으로서 2.4 cm의 반지름과 12 cm의 높이를 갖는데 본 차폐해석에서는 알루미늄으로 된 캡슐을 공기로 가정함으로써 보수성을 더하였다. 해석모델은 내부셀을 포함한 방사선원 부분을 1영역(RCC 1), 그리고 차폐체와 외부셀을 2, 3 영역으로 구성하였다. 이는 실제 차폐능을 갖는 내부셀의 차폐능을 무시함으로써 제작상에 있을 수 있는 공차의 영향을 최소화하기 위한 것이다.

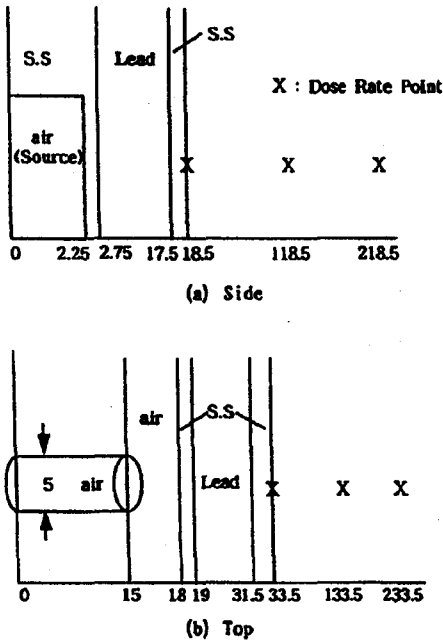


Fig. 2. Shielding Analysis Model for MSFIELD.

해석결과 및 평가

동위원소 운반용기에 대한 1차원 MSFIELD 차폐해석 결과를 표 2에 나타내었다. 계산결과 Ho-166을 방사선원으로 한 경우의 방사선량율이 Mo-99와 I-131을 방사선원으로 한 경우에 비해 최소한 20배 이상 높은 것으로 나타났다. 최대 방사선량율은 Ho-166의 경우 표면 및 1 m, 2 m에 대하여 상부는 33.7, 1.4 그리고 0.44 mrem/h, 측면부는 각각 22.8, 0.8, 그리고 0.21 mrem/h로 나타났다.

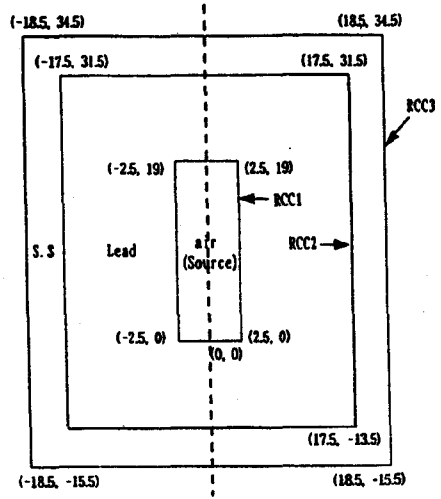


Fig. 3. Shielding Analysis Model for QAD-CG.

2차원 QAD-CG 차폐해석 결과는 Ho-166에 대한 결과만을 제시하였으며, 표 3은 해석결과를 나타내고 있다. 용기 상부 각지점에 대한 선량율은 표면, 1 m, 2 m에 대해 각각 24.6, 1.0, 0.35 mrem/h로 나타났다. 또한, 하부는 각각 17.0, 0.63, 그리고 0.16 mrem/h로 나왔고, 측면에 대하여는 각각 14.5, 0.45 그리고 0.13 mrem/h로 나타났다. 이는 허용치인 표면에서 200 mrem/h, 1 m, 2 m 거리에서의 10 mrem/h보다 훨씬 낮은 값으로 운반용기는 방사선 차폐측면에서 안전하다는 것을 의미한다.

Table 2. Result of Shielding Calculation Using MSFIELD Code

Source (Strength)	Top, mrem/hr			Side, mrem/hr		
	Surface	1 m	2 m	Surface	1 m	2 m
Mo-99 (100Ci)	2.8	0.12	0.03	0.73	0.03	0.01
I-131 (50Ci)	0.13	0.005	0.001	0.3	0.001	0.0003
Ho-166 (100Ci)	33.7	1.4	0.44	22.8	0.8	0.21

Table 3. Result of Shielding Calculation  
Using QAD-CG (Ho-166, 100Ci)

Location	Dose Rates, mrem/hr		
	Surface	1 m	2 m
Top	24.6	1.0	0.35
Bottom	17.0	0.63	0.16
Side	14.5	0.46	0.13
(Allowable Value)	(200.0)	(10.0)	(10.0)

**열해석 평가**

**해석조건 및 모델링**

방사성 동위원소로부터 방출되는 붕괴열(decay heat)은 사용후핵연료에 비하면 아주 미미하다. 따라서, 동위원소 운반용기는 화재사고시 외부화염으로부터 유입되는 열을 적절히 차단하여 차폐체의 건전성을 유지하도록 설계하였다. 동위원소 운반용기의 주차폐체는 납이고 상, 하부는 충격완충체로, 그리고 측면은 내부가 비어 있는 스테인레스강 케이스로써 용기를 보호함으로써 화재사고조건시 납차폐체의 건전성이 유지되도록 설계하였다. 본 해석에서는 법규에서 규정하고 있는 정상수송조건 및 가상 화재사고조건에 대한 열적 건전성을 평가하였다.

운반용기의 열전달은 용기 내부 cavity의 냉각 유체에 의한 대류 및 복사열전달, 용기 본체를 통한 열전도, 그리고 용기 외부표면에서의 대류, 복사열전달 등 3가지 열전달 모드로 구성된다. 대류 열전달은 운반용기 내부공간에서의 자연대류와 용기 외부표면에서 대기에 의한 자연대류 열전달로 구분된다. 이들 대류열전달계수는 실험적으로 혹은 이미 연구된 결과를 인용하여 얻게 되며, 다음과 같은 열전달계수를 얻었다[5].

- 운반용기 내부공간 :

$$h_{nc} = 1.50(\Delta T)^{0.250} [W/m^2 \cdot ^\circ C]$$

- 운반용기 외부표면 :

$$h_{nc} = 1.70(\Delta T)^{0.250} [W/m^2 \cdot ^\circ C]$$

복사열전달은 주로 고온에서 크게 일어나며, 같

은 온도에서는 재료의 방사율(emissivity)에 영향을 받는다. 운반용기의 외부셀 및 충격완충체의 표면은 스테인레스강으로 구성되며, 정상조건에서는 방사율을 0.5로 적용하였다. 또한, 화재사고조건에서는 표면방사율( $\epsilon$ )을 0.9로 외부화염으로부터의 흡수율( $\alpha$ )을 0.8로 적용하였다. 태양복사열은 법규에서 규정하고 있는 용기표면이 곡면일 경우의 태양열유속  $400 W/m^2$ 을 고려하였다.

HTS 운반용기는 내부공간(cavity)에 공기를 채우는 건식조건으로 설계하였으며, 동위원소인 캡슐에서의 최대붕괴열은 Ho-166 100 Ci에 상당하는 21.3 W를 고려하였다. HEATING 7.2f[6] 코드를 사용하여 해석을 수행하였으며, 그림 4는 2차원 해석모델을 나타내고 있다.

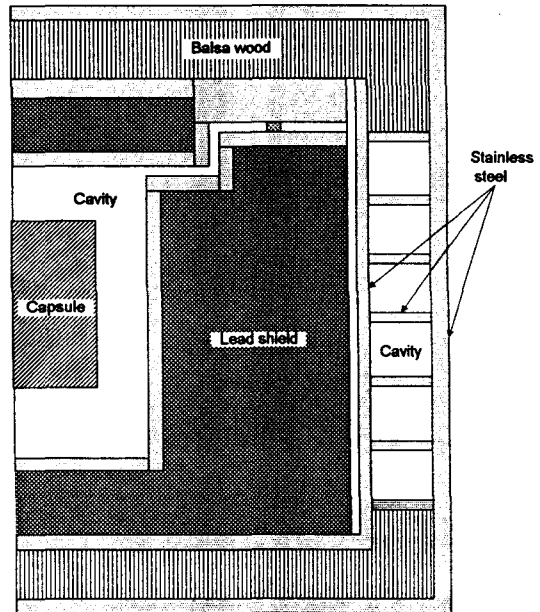


Fig. 4. Thermal Analysis Model.

운반용기 표면은 화재사고시 외부로부터 유입되는 열을 적절히 차단하여 납 차폐체의 건전성을 유지시키기 위하여 스테인레스강 케이스로써 용기를 보호하도록 하였다. 케이스의 내부는 비어 있는 것으로 하였으며, 정상조건에서 내부 캡슐로부터 발생되는 붕괴열을 적절히 열전달시키기 위해 빈 공간에 2 mm 두께의 전열핀 5 개를 부착하였다. 해석모델에서 용기본체와 케이스 사이에 3 mm의 공극을 고려하였으며, 이 공극에서

는 정상조건에서는 열전도만 일어나는 것으로 가정하였고 화재사고조건에서는 열전도 및 복사열 전달이 일어나는 것으로 모델링 하였다. 해석모델에서 동위원소로부터 발생된 붕괴열은 내부공간의 공기에 의한 대류 및 복사 그리고 용기본체를 통한 열전도 및 외부표면에서의 대류 및 복사를 통하여 외부로 열전달이 일어난다. 실제 수송시에 용기를 수직상태로 운반하기 때문에 해석모델에서 용기 하단으로는 단열 되는 조건으로 가정하였다.

해석결과 및 평가

그림 4의 해석모델을 이용하여 주변온도가 38℃이고 용기 표면에 태양열이 유입되는 고온조건인 정상상태(steady state)하에서의 온도를 구한 후에 화재사고조건인 시간의 변화에 따른 과도상태(transient state)에 대한 열해석을 수행하였다.

표 4는 정상조건 및 화재사고조건에서 운반용기 각 부위의 온도를 나타내고 있다. 정상조건에서 용기 외부케이스의 표면온도는 61℃이며, 용기본체의 온도는 69 ~ 70℃로 나타났다. 용기본체와 케이스 외부표면의 온도차가 약 8℃ 정도 차이를 보이는 것은 케이스 내부에 존재하는 공기의 낮은 열전달 특성 때문이다. 용기본체의 온도는 거의 일정하게 나타났으며, 이같은 현상은 동위원소로부터 발생되는 붕괴열이 아주 미세하므로 용기본체 온도에 영향을 미치는 주요인인 외부 태양복사열임을 알 수 있다. 내부공간에서 온도차가 심한 것은 공기의 낮은 대류열전달특성으로 인한 결과이다. 표 4로부터 운반용기 주요

부위의 온도가 허용온도보다 낮으므로 고온조건에서 열적 건전성이 유지됨을 알 수 있다.

화재사고조건에서 캡슐의 온도는 화재가 진행된 1.25 시간 이후에 최대 251℃로 나타났으며, 이 온도는 알루미늄의 용융온도인 660℃ 훨씬 낮으므로 가상화재사고조건에서도 운반대상 동위원소가 열적으로 충분히 안전함을 알 수 있다. 케이스의 표면은 30분간의 화재시에 최대 745℃까지 급격히 상승하였으나 이것은 보호용 카바이드로 운반용기의 구조적 건전성에는 영향을 주지 않는다. 납차폐체의 온도는 화재사고조건에서 최대 173℃까지 상승하지만 납의 용융온도 327℃보다 훨씬 낮은 온도로서 화재사고시에도 운반용기의 주요 차폐체인 납차폐체의 건전성이 유지됨을 알 수 있다. 격납경계의 주요 부품인 O-링의 온도는 화재사고시 최고 165℃로 나타났으며, 이 온도에서 O-링 재질인 바이톤은 100시간 이상 견딜 수 있으므로[7] 열적 건전성이 충분히 유지되리라 판단된다. 이상의 결과로부터 HTS 운반용기는 정상조건 뿐만 아니라 가상화재사고 조건에서도 열적으로 건전함을 알 수 있다.

구조해석 평가

해석조건 및 모델링

운반용기에 대한 구조해석은 국내 과기처고시 제 85-8호 및 IAEA Safety Series No.6를 적용하여 구조적 건전성을 평가하였다. 기타 미국 NRC 10 CFR part 71[8]의 운반용기에 대한 정상수송조건(normal transport conditions) 및 가상사

Table 4. Cask Temperatures under Normal and Fire Accident Conditions

Location	Calculated temperatures (°C)							Allowable	
	Normal	Fire (0<t<0.5 h)			Post fire (t > 0.5 h)				
		0.0	0.25	0.5	0.75	1.0	1.5		2.0
Capsule	186	186	202	230	246	251	249	660	
Inner cavity	124	120	163	193	202	202	199		
Lead shield	70	100	161	173	167	161	156	327	
Outer shell	69	107	169	173	1	160	154		
Casing surface	61	729	745	268	67	116	102		
Ambient temp.	38	800	800	38	38	38	38		

고조건(hypothetical accident conditions) 등의 기준을 참조하였다. 해석절차는 가능한 미국의 Reg. Guide 7.6[9]과 ASME 코드[10]를 따랐으며, LS-DYNA3D[11] 전산코드를 이용하여 3차원 해석을 수행하였다.

법규에서 규정하고 있는 정상수송조건에는 내부압력, 자유낙하, 누적조건 등이 있으며 이들 조건에 대한 내용을 요약하면 다음과 같다. 내부압력조건에서는 운반용기의 정상운반중 내부의 온도상승으로 인하여 발생하는 압력조건에서 용기의 건전성이 유지되어야 한다. 자유낙하에서는 용기 중량이 500 kg 이하일 경우 용기가 최대손상이 예측되는 부분으로 1.2 m의 높이에서 낙하충돌할 때 용기가 받는 구조적 영향을 평가하여야 한다. 누적조건에서는 운반용기의 모양이 누적을 효과적으로 견디지 못하는 한 용기 무게의 5 배에 해당하는 등가의 하중에서 용기의 건전성이 유지되어야 한다.

내부압력 해석에서는 운반용기의 설계압력인 3 kg/cm<sup>2</sup>을, 자유낙하해석에서는 1.2 m 높이에서 자유낙하로 인한 초기속도 4.852 m/s를 하중조건으로 적용하였다. 해석모델은 그림 5와 같이 3차원 모델을 사용하였다. 누적조건 해석에서는 운반용기 자중 622.7 kg의 5배인 3.1톤의 하중이 운반용기의 상부에 돌출한 뚜껑에 모두 작용한다고 가정하여 368 kPa의 압력이 뚜껑의 상부면에 작용하는 조건으로 해석하였다.

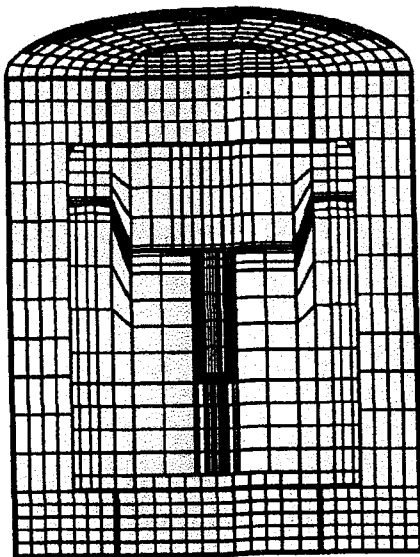


Fig. 5. Free Drop Analysis Model.

운반용기의 설계조건중 하중조건이 가장 큰 것이 가상 사고조건으로, IAEA Safety Series No.6 및 과기처 고시 제 85-8호의 특별시험조건에는 9 m 자유낙하, 1 m 파열, 침수 및 800℃ 화재사고 조건 등이 있다. 운반용기의 격납경계를 이루고 있는 내부셀은 가상 사고조건에서도 항복을 일으키지 않아야 하므로 내부셀은 탄성해석으로 외부셀 및 납차폐체는 탄소성 해석을 수행하였다.

자유낙하조건에서는 운반용기가 9 m 높이에서 단단한 수평 바닥면 위에 최대손상이 예측되는 곳으로 자유낙하시켰을 때 운반용기가 받는 충격의 영향을 평가하였다. 운반용기가 상하부에 충격 완충체가 부착된 상태에서 바닥부가 충돌하는 하부수직낙하, 원통형의 측면으로 충돌하는 수평낙하 및 운반용기의 모서리가 운반용기의 무게중심과 일직선으로 충돌하는 55° 경사낙하조건 등에 대해서 해석을 수행하였다. 운반용기의 자유낙하 해석모델은 정상수송조건인 1.2 m 자유낙하 해석 모델에 9 m 높이에서 자유낙하로 인한 초기속도 13.3 m/s를 하중조건으로 적용하였다.

파열조건은 운반용기가 단단한 수평면에 수직 상태로 세워진 직경이 15 cm, 길이가 20 cm인 연강봉위에 1 m의 높이에서 최대손상이 예측되는 곳으로 충돌되는 사고로서 충격완충체 내부에 나무가 없고 전열핀만 있는 원통형의 측면으로 충돌하는 경우로 가정하였다. 침수조건은 운반용기가 수심 15 m 깊이에 8 시간 이상 빠졌을 경우에 용기가 최소 150 kPa 수압을 받게 되는 것으로 하였다. 화재사고조건은 운반용기가 800 °C의 화염에 30 분간 노출된 후 자연냉각되는 조건이며, 온도변화에 따른 구조적 건전성을 분석하였다. 하중조건은 열해석에서 얻은 표 4의 결과를 이용하였다.

#### 해석결과 및 평가

표 5는 정상수송조건시 각각의 조건에 대한 해석결과이며, 운반용기 주요부위의 최대응력강도를 나타내고 있다. 내부압력조건에서 최대응력은 내부셀에서는 일차막응력(Pm)이 2.7 MPa, 일차막응력과 일차굽힘응력(Pb)의 합이 2.9 MPa로 허용응력강도의 약 2%에도 미치지 못하여, 운반용기의 모든 부분이 내부압력의 영향을 거의 받지 않는 것을 알 수 있다. 자유낙하 해석결과 운반용기의 각 부분에서 발생하는 최대응력은 허용치에

Table 5. Calculated Maximum Stress Intensities under Normal Transport Conditions

Loading condition	Component	Maximum stress intensity, MPa		Allowable values, MPa		Remark
		Pm	Pm+Pb	Sm	1.5 Sm	
Internal pressure	Inner shell	1.84	1.92	138	207	
	Inter flange	1.70	2.00	138	207	
	Lid inside	2.70	2.90	138	207	
1.2 m free drop	Inner shell	43.2	59.3	138	207	
	Inter flange	45.6	74.8	138	207	
	Lid inside	38.1	68.3	138	207	
Compression	Inner shell	4.1	4.7	138	207	
	Inter flange	2.9	3.5	138	207	
	Lid inside	4.7	5.2	138	207	

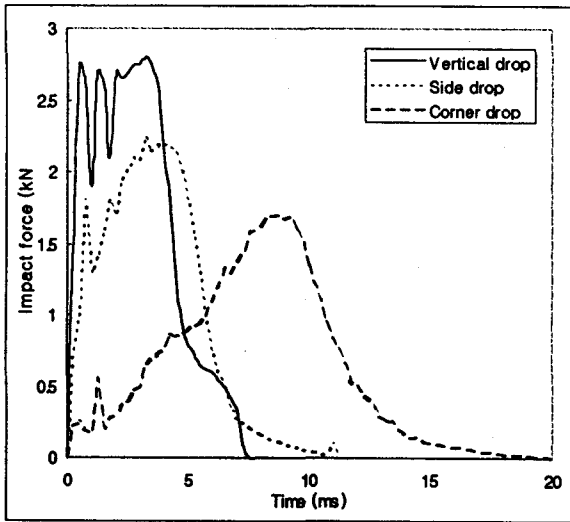


Fig. 6. Impact Force Time History for 9 m Drops.

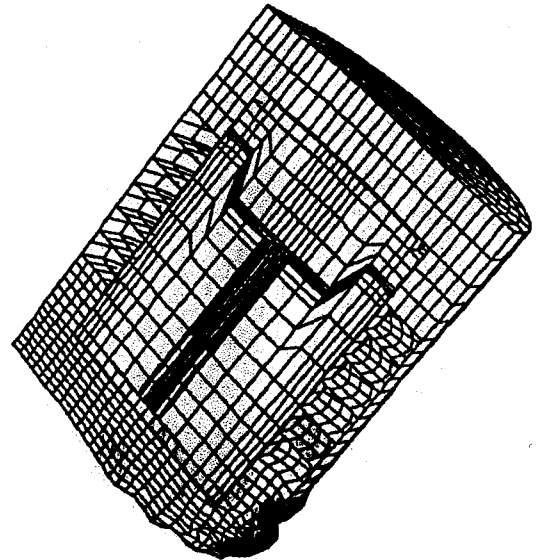


Fig. 7. Stress Contour under 9 m Corner Drop.

비하여 1/3 정도의 낮은 값을 보이므로 용기의 전선성이 유지되리라 판단된다. 압축조건에서 최대 응력이 뚜껑 내부에서의 일차막응력과 굽힘응력의 합이 5.2 MPa로 거의 응력이 발생하지 않음을 알 수 있다.

그림 6은 가상 사고조건표의 9m 수직, 수평

및 경사낙하시 충돌면에 작용하는 충격력의 변화를 나타내며, 충돌거동이 각각 7.5 ms, 12 ms 및 20 ms에서 끝남을 알 수 있다. ASME 코드에서는 사고조건에서 일차막응력(Pm)은 설계응력강도(Sm)의 2.4배, 그리고 일차막응력(Pm)과 일차굽힘응력(Pb)의 합은 설계응력강도의 3.6배보다 낮



Table 6. Calculated Maximum Stress Intensities under Accident Conditions

Analysis condition		Component	Maximum stress intensity, MPa		Allowable values, MPa		Remark
			Pm	Pm+Pb	2.4 Sm	3.6 Sm	
9 m free drop	Vertical drop	Inner shell	21.9	29.3	331.3	549.9	
		Inner flange	15.8	16.7	331.3	549.9	
		Lid inside	81.3	110.4	331.3	549.9	
	Side drop	Inner shell	48.1	121.3	331.3	549.9	
		Inner flange	74.6	200.3	331.3	549.9	
		Lid inside	80.7	187.0	331.3	549.9	
	Corner drop	Inner shell	33.6	73.9	331.3	549.9	
		Inner flange	57.5	198.4	331.3	549.9	
		Lid inside	49.4	137.5	331.3	549.9	
1 m puncture		Inner shell	9.2	29.2	331.3	549.9	
		Inner flange	17.6	61.8	331.3	549.9	
		Lid inside	50.4	58.1	331.3	549.9	
15 m water immersion		Inner shell	2.3	2.6	331.3	549.9	
		Inner flange	2.3	2.8	331.3	549.9	
		Lid inside	3.3	3.9	331.3	549.9	

아야 한다고 규정하고 있다. 표 6에는 가상사고시 각각의 해석조건에 대한 최대응력강도를 허용치와 비교하여 나타내었다. 수직, 수평 및 경사낙하 해석조건에서 최대응력강도가 허용응력강도보다 작은 값으로 운반용기의 건전성이 유지하는 것으로 나타났다. 그림 7은 경사낙하시 운반용기의 변형된 모습과 내부의 응력분포를 나타내고 있다. 충격완충체는 모서리 부분이 충돌 시작후 9.5 ms에서 8.7 cm 변형되는 것으로 나타났다.

그림 8은 파열조건시 운반용기 외부 충격완충체 케이스의 응력분포 및 변형된 모습을 보여주고 있다. 이때 충격완충체의 외부는 충돌후 9 ms에서 2.1 cm 변형되었고, 전체 충돌거동은 약 15 ms정도 소요되는 것으로 나타났다. 최대응력은 표 6과 같이 격납경계인 뚜껑의 내부에서 일차막 응력이 50.4 MPa, 일차막응력과 굽힘응력의 합이 58.1 MPa로 허용응력강도보다 훨씬 작은 값으로 건전성을 유지하였다.

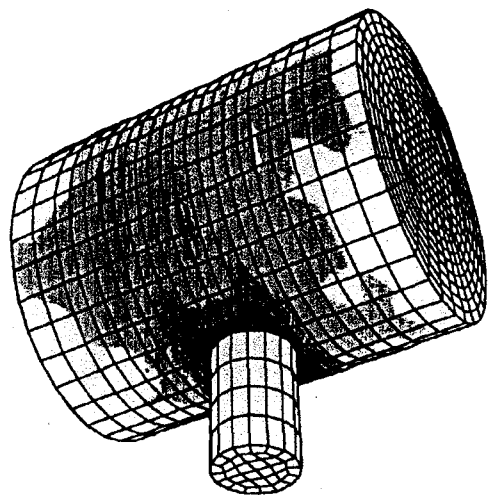


Fig. 8. Stress Contour under Puncture.

Table 7. Summary of Maximum Stress Intensities under Fire Accident  
Condition at Each Time Step (MPa)

Part Time(h)	Inner shell		Outer shell		Lid	
	Calcu- lated	Allow- able	Calcu- lated	Allow- able	Calcu- lated	Allow- able
0.0	2	501	1	502	1	502
0.25	29	492	42	487	13	501
0.5	97	457	106	452	95	497
0.75	118	451	96	450	45	489
1.0	96	452	73	452	69	482
Max.	118	451	106	452	95	497

침수조건에서도 표 6에 나타난 바와 같이 거의 응력이 발생하지 않음을 알 수 있다. 표 7은 화재 사고조건에서 과도시간에 따른 용기 구조재에 대한 응력강도를 나타내고 있으며, 최대응력강도가 허용응력강도에 비하여 훨씬 낮으므로 화재사고 조건에서도 운반용기가 구조적으로 건전함을 알 수 있다. 이상의 결과로 보아 동위원소 운반용기는 정상수송조건 및 가상사고조건에서 구조적 건전성이 충분히 유지됨을 알 수 있다.

## 결 론

본 연구에서는 원자력연구소의 하나로 원자로 심에서 생산되는 동위원소를 인접한 동위원소 생산시설까지 운반하기 위한 HTS 방사성 동위원소 운반용기의 안전성을 평가하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다. 방사선 차폐해석을 수행한 결과 운반용기의 표면 방사선량율이 최대 24.6 mrem/h로 허용치인 200 mrem/h보다 낮게 나타났다. 또한 용기 표면에서 1 m, 2 m 떨어진 지점에서의 선량율도 허용치보다 낮으므로 방사선차폐 측면에서 용기의 안전성이 입증되었다. 열해석 결과 정상수송조건 및 가상 화재사고조건에서 용기의 감마선 차폐체인 납의 최대온도가 납의 용융온도보다 훨씬 낮아 감마선차폐체의 건전성이 유지되는 것으로 나타났다. 또한 용기 내부의 캡슐의 온도도 허용치에 비하여 훨씬 낮아 열전달 측면에서도 용기의 건전성이 입증되었다. 정상수

송 및 가상사고조건에 대한 구조해석을 수행하였으며, 용기의 구조적 건전성도 충분히 입증되는 것으로 나타났다. 따라서 본 HTS 방사성 동위원소 운반용기를 이용하여 하나로에서 생산되는 방사성동위원소를 안전하게 수송할 수 있을 것으로 판단된다.

## 참 고 문 헌

1. 과기처고시 제 85-8호, "방사성물질 등의 포장 및 운반에 관한 규정," 1985.
2. IAEA, "IAEA Regulations for the Safe Transport of Radioactive Materials," IAEA Safety Series No. 6, 1985.
3. "MICROSHIELD User's Manual Ver. 3," Grove Engineering. Inc., 1988.
4. V. R. Cain, "A Users Manual for QAD-CG : The Combinational Geometry Version of QAD -P5A Point Kernel Scattering Code," CCC-307, 1977.
5. J. P. Holman, "Heat Transfer," International Student Edition 5th Ed., 1985.
6. K. W. Childs, "Heating 7.2f : Multidimensional, Finite-Difference Heat Conduction Analysis," ORNL/CAD, 1993.
7. "Gask-O-Seal Handbook," OSD-6411, Parker Seal Group Silver City, CA, 1983.
8. US NRC, 10 CFR Part 71, "Packaging and

- Transportation of Radioactive Material," 1989.
9. US NRC Reg. Guide 7.6, "Design Criteria for the Structural Analysis of Shipping Cask Container Vessels," 1978.
  10. ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Sec. III, "Nuclear Power Plant Components, Div. 1, Appendix I," 1986.
  11. J. O. Hallquist, "LS-DYNA3D Users Manual Version 930," LSTC, 1993.