

2004 춘계학술발표회 논문집  
한국원자력학회

유리고화체 저장 및 운반을 위한  
용기 제안에 관한 연구  
Study on the Proposal of the Container  
for Storage & Transport of Vitrified Form

김용민, 송재혁, 강창순  
서울대학교  
서울특별시 관악구 신림동 산 56-1

지평국, 박종길, 신상운  
원자력환경기술원  
대전광역시 유성구 덕진동 150번지

**요 약**

원자력 이용에 수반되는 방사성폐기물의 처분과 관리는 국민 건강 및 환경 보존, 그리고 지속적인 원자력 발전을 위해 필수적인 국가적 핵심 사안이다. 따라서, 방사성폐기물 처분장의 시급성을 완화시키면서 운반 및 처분을 안전하게 할 수 있는 기술인 방사성폐기물 유리화 기술에 대한 수요가 증대되고 이에 대한 연구가 활발히 진행 중에 있다. 본 논문에서는 유리고화체 방사성폐기물 처분 전 단계로써 방사성폐기물 유리고화체를 안전하게 저장하고 운반할 수 있는 용기 관련 기술에 대한 연구를 수행하였다. 우선 중저준위 방사성폐기물 운반에 관한 국내외 요건을 검토 분석하였고, 현재 사용되고 있는 중저준위 방사성폐기물 용기를 조사하여 그 중 대표적인 용기에 대해 방사학적 평가를 수행하였다. 이를 바탕으로 중저준위 방사성폐기물 유리고화체 용기의 형태 및 규격을 결정하고, 방사학적 안전성평가를 통해 적용 가능한 용기사항을 제시하여 최종적으로 중저준위 방사성폐기물 유리고화체 용기의 기본설계에 반영할 수 있는 사항을 도출하였다.

**Abstract**

The radioactive waste problem is a critical issue of national concern to be

preferentially settled for national health, environmental conservation, and sustainable development of nuclear energy. It has necessitated new technologies for radioactive waste treatment which can mitigate imminence of decision of disposal site and maximize safety of transportation or disposal, and the demand for vitrification technology for radioactive waste is consequently increasing.

The contents and scope of this study is analysis of the basic data for container which can store, handle, and transport the vitrified form of ILLW. By studying the related technology and requirement for the vitrified form container, the basis for establishment of safety system for radioactive waste disposal should be provided. The results of this study are basic data which can be applied to the establishment of design and requirement for the vitrified form container.

## 1. 서론

유리화 기술은 방사성 물질을 물리, 화학적으로 매우 안정한 유리 구조내에 가둠으로써 누출을 막아 폐기물의 안전성을 크게 높이고 부피도 대폭 줄일 수 있는 환경친화적인 기술이다. 이 기술은 프랑스 등에서 사용후 핵연료 재처리 때 발생하는 고준위 방사성폐기물 처리에 활용해 왔으나 국내에서는 한국수력원자력 환경기술원을 중심으로 특히 중저준위 방사성폐기물을 대상으로 연구가 이루어졌다. 1994년 유리화 기술의 타당성 연구를 시작으로, 1999년에는 프랑스의 SGN사 및 현대 모비스와 공동으로 대덕연구단지 내에 유리화 실증 설비를 건설하였으며, 울진원자력 발전소 내에 유리화 상용시설 건설예정에 있다.

이에 따라 유리고화체 방사성폐기물을 안전하게 저장하고 수송할 수 있는 용기에 관한 연구도 필요하다. 따라서 본 논문에서는 유리고화체 방사성폐기물 처분 전 단계로써 방사성폐기물 유리고화체를 안전하게 저장하고 운반할 수 있는 용기 관련 기술에 대한 연구를 수행하였다.

## 2. 관련 법규 & 용기 검토

방사성폐기물을 처리, 포장, 저장, 수송, 처분하는데 있어서 무엇보다도 먼저 고려해야 할 것은 관련 법규 및 요건이다. 따라서, 방사성폐기물 유리고화체의 안전 취급과 관련한 국내외 요건 및 법규를 검토하였고, 주요 내용과 본 연구에 필요한 내용은 표 1과 같다.

표 1. 국내외 방사성폐기물의 포장 및 운반에 대한 법규 비교

	IAEA SSS No.TS-R-1	과학기술부 고시 제2001-23호	NRC 10 CFR 71
주요 사항	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 일반사항: 목적, 범위, 정의</li> <li>- 일반원칙: 방사선방어, QA</li> <li>- 방사능 제한치</li> <li>- 수송 준비, 요건, 통제 등</li> <li>- 포장 및 포장물 요건</li> <li>- 시험절차</li> <li>- 승인</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 일반사항: 목적, 정의</li> <li>- 포장기준</li> <li>- 운반기준</li> <li>- 제작승인</li> <li>- 제작검사/사용검사</li> <li>- 보고</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 일반사항: 목적, 범위, 정의</li> <li>- 면제사항</li> <li>- 일반인허가요건</li> <li>- 인허가신청</li> <li>- 시험기준, 절차</li> <li>- 운영, 관련 절차 등</li> <li>- 품질보증사항</li> </ul>
포장물 일반 조건	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 크기는 10cm 이상</li> <li>- 취급, 운반이 안전, 용이</li> <li>- 안전한 격납</li> <li>- 인양용 부착물의 안전설계</li> <li>- 표면제염이 용이</li> <li>- 물 흡수 않는 외부층 설계</li> <li>- 밀폐장치의 안전성 고려</li> <li>- 재질, 부품의 적합성 고려</li> <li>- 밸브조작금지</li> <li>- 위험물 운반시 안전장치</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 크기는 10cm 이상</li> <li>- 취급이 안전하고 용이</li> <li>- 안전한 운반 및 격납</li> <li>- 표면제염이 용이</li> <li>- 물 흡수 않는 외부층 설계</li> <li>- 밀폐장치의 안전성 고려</li> <li>- 재질, 부품의 적합성 고려</li> <li>- 위험물 운반시 안전장치</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 크기는 10cm 이상</li> <li>- 외부손상방지</li> <li>- 안전한 격납</li> <li>- 재질, 부품의 적합성</li> <li>- 밸브조작금지</li> </ul>
허용 방사선량율	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 비전용적재                             <ul style="list-style-type: none"> <li>· 표면 1m: 0.1mSv/hr이하</li> <li>· 표면 : 2mSv/hr 이하</li> <li>· 운반지수 10이하</li> </ul> </li> <li>- 전용적재                             <ul style="list-style-type: none"> <li>· 표면 : 10mSv/hr이하</li> </ul> </li> <li>- 차량                             <ul style="list-style-type: none"> <li>· 표면 : 2mSv/hr이하</li> <li>· 표면 2m : 0.1mSv/hr이하</li> <li>· 운전석 : 0.02mSv/hr이하</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- L형 운반물                             <ul style="list-style-type: none"> <li>· 표면 : 0.5<math>\mu</math>Sv/hr이하</li> </ul> </li> <li>- A형, B형 운반물                             <ul style="list-style-type: none"> <li>· 표면 : 2mSv/hr이하</li> <li>· 표면 1m : 0.1mSv/hr이하</li> </ul> </li> <li>- 차량                             <ul style="list-style-type: none"> <li>· 표면 : 2mSv/hr이하</li> <li>· 표면 1m : 0.1mSv/hr이하</li> <li>· 운전석 : 0.02mSv/hr이하</li> </ul> </li> <li>- 전용적재시                             <ul style="list-style-type: none"> <li>· 표면 : 10mSv/hr이하</li> </ul> </li> <li>- 전용차량                             <ul style="list-style-type: none"> <li>· 표면 : 2mSv/hr이하</li> <li>· 표면 2m : 0.1mSv/hr이하</li> <li>· 운전석 : 0.02mSv/hr이하</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 비전용적재시                             <ul style="list-style-type: none"> <li>· 표면 : 2mSv/hr이하</li> </ul> </li> <li>- 전용적재시                             <ul style="list-style-type: none"> <li>· 표면 : 10mSv/hr이하</li> </ul> </li> <li>- 차량                             <ul style="list-style-type: none"> <li>· 표면 : 2mSv/hr이하</li> <li>· 표면 2m : 0.1mSv/hr이하</li> <li>· 운전석 : 0.02mSv/hr이하</li> </ul> </li> </ul>
허용 표면오염도	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <math>\alpha</math>선방출 : 0.4Bq/cm<sup>2</sup>이하</li> <li>- <math>\beta</math>선비방출 : 4Bq/cm<sup>2</sup>이하</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <math>\alpha</math>선방출 : 0374Bq/cm<sup>2</sup>이하</li> <li>- <math>\alpha</math>선비방출 : 3.7Bq/cm<sup>2</sup>이하</li> </ul>	-

그리고, 방사학적 요건과 관련하여 유리고화체 용기의 방사학적 안전성 평가를 위해서 기본적인 평가 용기의 모델을 결정하였다. 먼저 국내외에서 사용되고 있는 다양한 폐기물 관련 용기들을 살펴보았다. 국내의 경우, 발전소설비를 공급한 각 나라 또는 각 공급자의 설계 기준에 의거 용기가 제작되어서 여러 종류의 용기가 사용되고 있다. 국내 방사성폐기물 용기의 검토 결과는 표 2와 같다. 그 중 가장 널리 사용되고 있는 DOT-17H를 기본 모델로 잡았으며 그 사양은 표 3과 그림1 에 나타나 있다.

표 2. 호기별 폐기물 용기의 종류

호기 용기 종류	고리1호기	고리2호기	월성1호기	고리3,4호기 영광1,2호기	울진1,2호기
잡기재용기	DOT-17H 1종	DOT-5B 1종	DOT-17H 1종	DOT-17H 1종	DOT-17H 1종
농축폐액용기	DOT-17H (덮개설계특이) 1종	"	-	"	콘크리트용기 (2종)
폐수지용기	DOT-17H (차폐2중용기) 1종	"	Vault에 저장중	"	콘크리트 용기 (3종)
폐필터용기	DOT-17H (차폐) 2종	DOT-5B (바스켓내장) 1종	탄소강-콘크리 트 4종	DOT-17H (차폐) 1종	콘크리트용기 (1종)
잡고채용기	DOT-17H (차폐) 1종	DOT-17H (차폐) 1종	DOT-17H (차폐) 1종	DOT-17H (차폐) 1종	DOT-17H (차폐) 1종

표 3. DOT-17H의 규격

타입	재질	총용량 (Gal)	내부용량 (Gal)	외부높이 (cm)	외부직경 (cm)	철판두께 (mm)
DOT   17H	탄소강 + 콘크리트	55	30.5	88.4	59.7	1.2

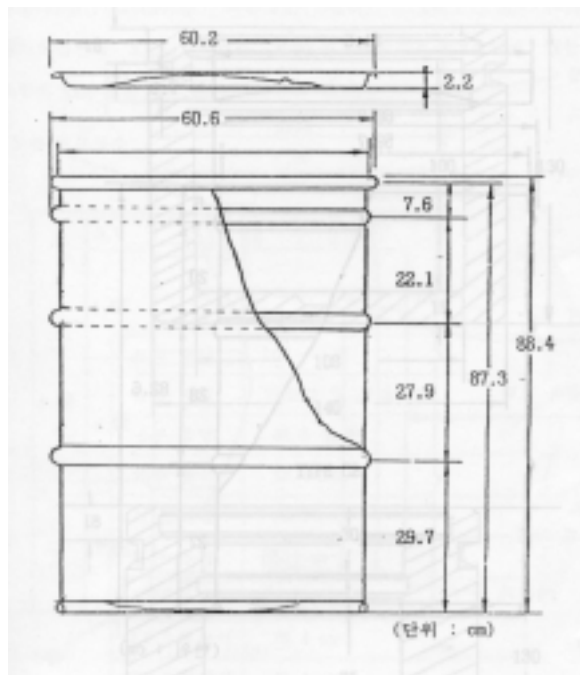


그림 1. DOT-17H의 사양

### 3. 방사학적 안전성 평가

방사성폐기물 수송용기의 설계를 위해서는 용기의 안전성 분석이 필요하다. 방사선 차폐 측면에서 방사선량률은 표면과 표면에서 1 m 떨어진 위치에서 각각 0.2 rem/hr, 0.01 rem/hr 이하를 만족해야 한다. 이를 평가하기 위하여 기존 용기의 사양과 실증 설비로부터의 중저준위 유리고화체 폐기물 자료를 이용하여 MCNP 코드를 통해 방사학적 안전성 평가를 수행하였다. 이를 통해 기존 용기의 적용 가능성을 평가하고, 유리고화체의 저장 및 운반에 적합한 용기의 사양을 제시하였다.

#### (1) 평가 기준용기

국내에서 가장 널리 사용되고 있는 DOT-17H를 기준 용기로 선정하고 용기의 모습을 단순화하여 그림 2와 같은 규격으로 코드의 Geometry에 적용하였다. 용기의 재질은 탄소강을 사용하였다. 그리고 유리고화체는  $Al_2O_3$ ,  $As_2O_3$ ,  $B_2O_3$ ,  $CaO$ ,  $CeO_2$ ,  $CoO$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $K_2O$ ,  $Li_2O$ ,  $MgO$ ,  $MnO_2$ ,  $Na_2O$ ,  $P_2O_5$ ,  $SiO_2$ ,  $TiO_2$ ,  $VO_2$ ,  $ZrO_2$ 로 구성하였고 밀도는  $2.67 \text{ g/cm}^3$ 로 계산하였다.

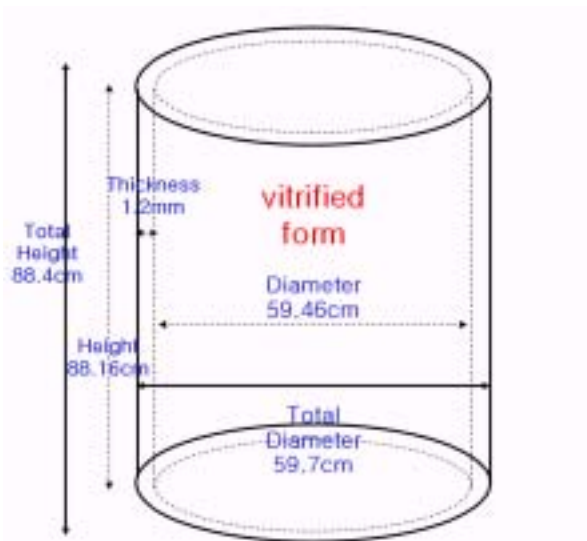


그림 2. MCNP에서 사용한 용기 구조

#### (2) 방사선원향

방사선원향으로는  $0.35 \text{ GBq/kg}$ 의 방사능을 가진 유리고화체를 설정하였다. 드럼 내부에 유리고화체가 가득 들어간다고 가정하였고, 유리고화체의 방사선원향중 드럼을 통해 나올 수 있는 photon만을 고려하였다. 유리고화체의 방사선원향은 울진 5,6호기 FSAR 등에 제시된 유리화 대상폐기물의 방사선원향, 발생량, 밀도 및 유리화시 감용비 등을 고

려하여 표 4에 나타내었다.

표 4. 유리고화체의 방사선원항

선원항	Ni-63	Tc-99	Cs-134	Cs-137	Sr-89	Sr-90	Y-91
방사능 (GBq/kg)	$1.16 \times 10^{-2}$	$2.82 \times 10^{-6}$	$6.05 \times 10^{-2}$	$8.14 \times 10^{-2}$	$2.07 \times 10^{-4}$	$5.11 \times 10^{-5}$	$1.80 \times 10^{-5}$
선원항	Zr-95	Nb-95	Ru-103	Ru-106	Ag-110m	Te-129m	Ce-141
방사능 (GBq/kg)	$5.76 \times 10^{-4}$	$5.63 \times 10^{-4}$	$1.09 \times 10^{-2}$	$1.36 \times 10^{-1}$	$1.96 \times 10^{-3}$	$2.75 \times 10^{-4}$	$2.15 \times 10^{-4}$
선원항	Ce-144	Cr-51	Mn-54	Fe-55	Fe-59	Co-57	Co-58
방사능 (GBq/kg)	$6.03 \times 10^{-3}$	$4.47 \times 10^{-3}$	$4.40 \times 10^{-3}$	$1.83 \times 10^{-3}$	$4.38 \times 10^{-4}$	$9.93 \times 10^{-4}$	$1.36 \times 10^{-2}$
선원항	Co-60	Zn-65	Total				
방사능 (GBq/kg)	$2.35 \times 10^{-2}$	$1.03 \times 10^{-3}$	$3.50 \times 10^{-1}$				

이중 photon만을 고려하여 Sr-90, Ru-106, Fe-55, Co-57, Tc-99를 제외한 선원항들을 식 (1)과 같이 ORIGEN2의 18 그룹에 대한(경계 - 0.01, 0.025, 0.0375, 0.0575, 0.085, 0.125, 0.125, 0.225, 0.375, 0.575, 0.85, 1.25, 1.75, 2.25, 2.75, 3.5, 5, 7, 9.5MeV)의 에너지 분포를 구하였다.

$$P(E_i) = \frac{\sum_{total} p_s(E_i) \times A_s}{\sum_i \sum_s p_s(E_i) \times A_s} \quad (1)$$

여기서,  $P(E_i)$ - i번째 에너지 그룹의 비율

$p_s(E_i)$ - s 핵종의 i번째 에너지 그룹의 비율

$A_s$  - s 핵종의 방사능

i - Energy Group(18 Group)

s - Each Nuclide (16 Nuclide)

### (3) 선량을 계산

Origen2에서 도출된 에너지 그룹별 비율과 유리고화체 조성, 그리고 DOT-17H의 사양을 이용하여 MCNP를 통해 flux를 구하였다. 도출된 flux 및 에너지 그룹 비율, 그리고 에너지에 따른 flux-dose Conversion factor를 이용하여 아래의 식 (2)와 같이 통해 선량

를 구하였다. 여기서 사용된 Conversion factor의 값은 표 5와 같이 ANSI/ANS-6.1.1-1977에 제시되어 있는 값을 사용하였다.

$$\dot{D} = \sum_E \Phi \times P(E_i) \times C_{E_i} \quad (2)$$

여기서  $\dot{D}$  - 선량을 (*rems/hr*)

$\Phi$  - 표면에서의 flux (*photons/cm<sup>2</sup> · s*)

$P(E_i)$  - i번째 에너지의 비율

$C_{E_i}$  - 에너지에 따른 변환상수 (*rem/hr*) / (*photons/cm<sup>2</sup> · s*)

표 5. 에너지 변환 상수(ANSI/ANS-6.1.1-1977)

Energy(MeV)	0.01	0.025	0.0375	0.0575	0.085	0.125
Flux to Dose Rate ( <i>rem/hr</i> ) / ( <i>photons/cm<sup>2</sup> · s</i> )	$3.96 \times 10^{-6}$	$1.43 \times 10^{-6}$	$4.73 \times 10^{-7}$	$2.78 \times 10^{-7}$	$2.71 \times 10^{-7}$	$3.31 \times 10^{-7}$
Energy(MeV)	0.225	0.375	0.575	0.85	1.25	1.75
Flux to Dose Rate ( <i>rem/hr</i> ) / ( <i>photons/cm<sup>2</sup> · s</i> )	$5.66 \times 10^{-7}$	$9.32 \times 10^{-7}$	$1.32 \times 10^{-6}$	$1.76 \times 10^{-6}$	$2.31 \times 10^{-6}$	$2.93 \times 10^{-6}$
Energy(MeV)	2.25	2.75	3.5	5	7	9.5
Flux to Dose Rate ( <i>rem/hr</i> ) / ( <i>photons/cm<sup>2</sup> · s</i> )	$3.47 \times 10^{-6}$	$3.96 \times 10^{-6}$	$4.62 \times 10^{-6}$	$5.80 \times 10^{-6}$	$7.29 \times 10^{-6}$	$9.15 \times 10^{-6}$

#### (4) 선량 계산프로그램의 작성 및 순서도

식 (2)의 선량을 계산 방법은 유리고화체의 핵종의 양이 변화할 때마다 다시 수계산을 해야하는 불편함을 지니고 있다. 따라서 본 연구에서 변환 상수의 계산이나 핵종의 변화에 따른 반복적인 계산을 간단하게 하기 위하여 비주얼 베이직을 이용하여 계산 프로그램 Yuri1.0을 작성해서 계산 결과 도출에 활용하였다. 그림 4에 해당 프로그램을 제시하였는데, 본 화면에서 먼저 시간을 입력시키면 시간에 따른 방사능의 크기와 유리고화체의 총 에너지 분포를 계산하고, 두번째로 MCNP에서 구해진 flux와 유리고화체의 양을 다시 입력시키면 flux-dose conversion을 통해 선량을 계산할 수 있다.

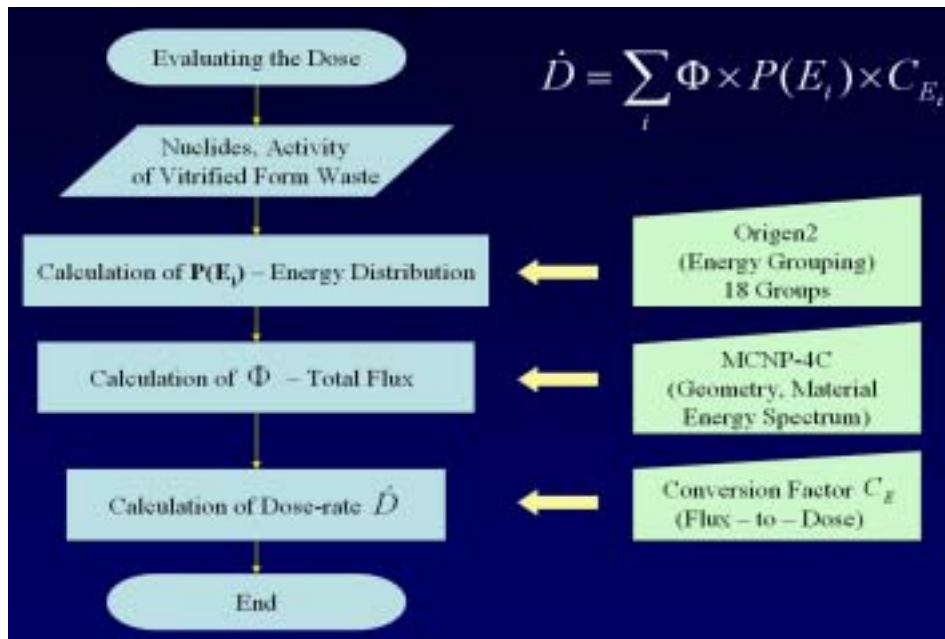


그림 3 선량계산의 수행 과정

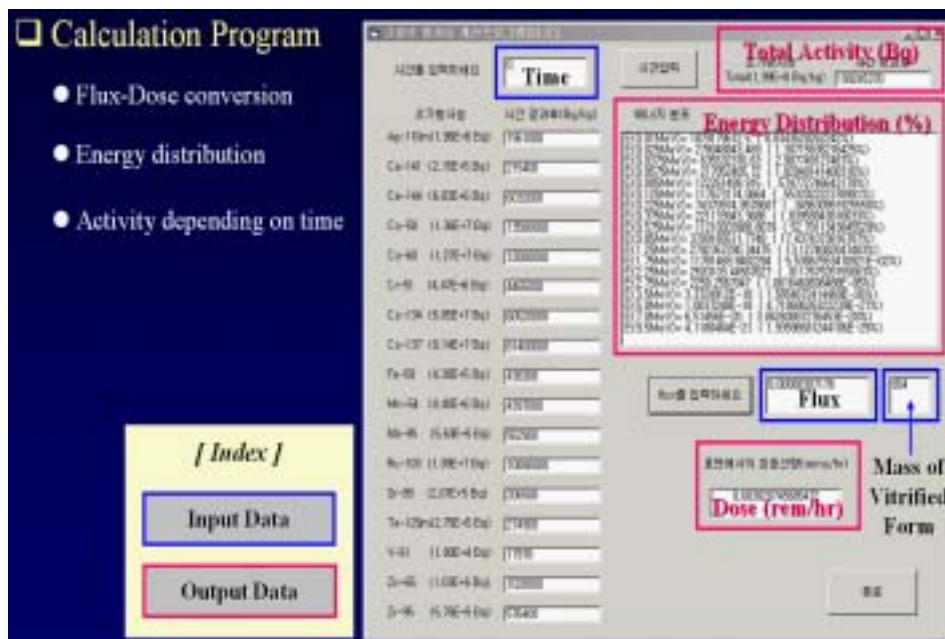


그림 4 선량 계산 프로그램 Yuri 1.0

#### 4. 결과 분석과 변경 인자 도출

##### (1) 기존 용기 분석

위와 같은 방법을 통해 기존 DOT-17H 용기에 대한 방사선량률을 계산한 결과는 표 6과 같다.



표 6 DOT-17H에 대한 방사선량률 결과

위치	옆면	상부 및 하부	제한 선량
표면	3.026 (rem/hr)	12.162 (rem/hr)	0.2 (rem/hr)
1 m 거리에서	0.204 (rem/hr)	0.242 (rem/hr)	0.01 (rem/hr)

여기서 나타난 결과는 모두 국내외 법규에서 규정하고 있는 선량제한치를 크게는 20 배 이상 초과하는 값이다. 따라서 기존의 DOT-17H 용기를 그대로 유리고화체 용기로 사용하는 것은 부적합함을 알 수 있었다. 그러므로 기존 용기가 선량 요건을 만족시키기 위해서는 크기(두께, 높이, 직경) 또는 용량의 적절한 설계변경이 필요하다고 판단된다.

## (2) 설계 변경 인자에 따른 선량률의 변화

DOT-17H 용기의 선량률을 변화시키는 주요 인자를 도출하기 위해 두께 변화, 직경 변화, 높이 변화의 경우로 나누어 해당 선량률을 평가하였다. 첫째, 두께 변화에 따른 선량률은 그림 5에 제시되어 있는데, 선량요건을 만족시키기 위해서 표면의 옆면과 상하부에서는 각각 두께가 5.0 cm 이상, 7.5 cm 이상이어야 하고, 1 m 거리에서는 6.2 cm 이상 (옆), 7.0 cm 이상(상하부)이어야 하는 것으로 계산되었다.

둘째, 직경을 변화시킨 결과는 그림 6에 제시하였다. 분석결과 직경을 줄일 경우, 옆면의 경우는 표면선량률이 거의 줄어들지 않음을 확인할 수 있었고 상하부의 경우도 줄어들기는 하지만 직경을 변화시키는 것만으로는 선량률을 만족시키는 것이 불가능한 것으로 나타났다. 1 m 거리에서는 옆면과 상하부 모두 선량률이 줄어드는 모습을 확인할 수 있었지만 상대적으로 옆면은 크게 줄어들지 않는 것으로 나타났다. 이는 표면 선량률이 근거리에서 있는 선원항들의 영향을 더 크게 받기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 단순히 부피를 줄이는 것만으로는 표면선량률을 만족시킬 수 없다.

셋째, 높이 변화에 따른 선량률을 살펴보면 그림 7에 나타난 것처럼 직경변화와 다소 비슷한 양상이 나타난다. 높이를 변화시키는 것은 표면선량률에 거의 영향을 주지 못하였다. 1 m 거리의 선량률의 경우에 있어서도 상하부가 아닌 옆면에서의 선량률만이 줄어드는 모습을 확인할 수 있었다. 이는 표면선량률의 경우 부피를 줄인다 하더라도 근접한 선원항에서 받는 선량이 줄지 않기 때문인 것으로 판단된다.

이상의 분석을 통해 용기를 작게 만들어 유리고화체를 적게 저장하는 방법은 표면 선량률 감소에는 크게 기여하지 못하지만 1 m 거리에서의 선량률 감소에는 분명하게 기여함을 알 수 있었다. 따라서 선량률을 조절하는 데 있어서 가장 효과적인 방법은 용기의 두께를 변화시키는 방법이다. 또한 동시에 용기의 크기를 조절함으로써 선량률을 좀 더 효과적으로 감소시키는 것도 적절한 방법인 것으로 판단되었다.

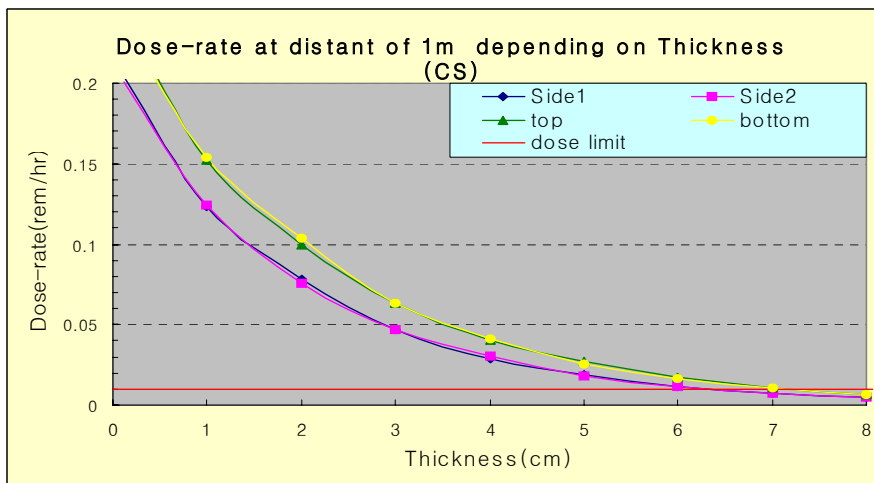
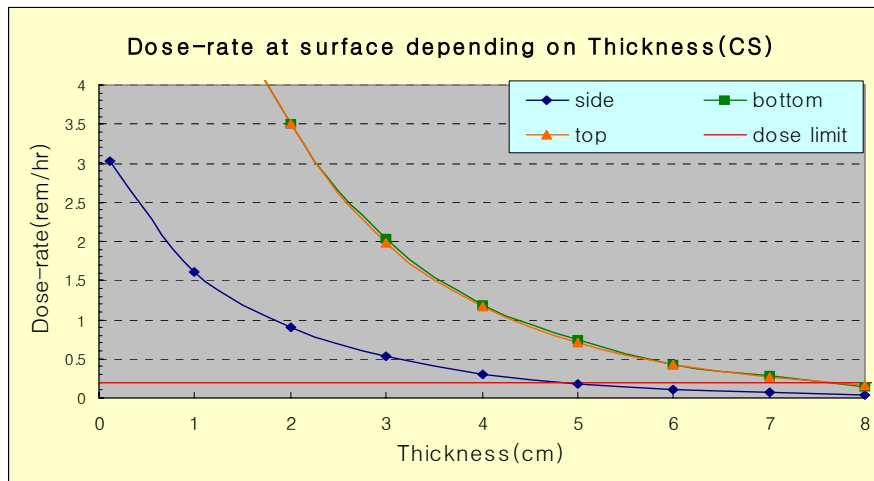
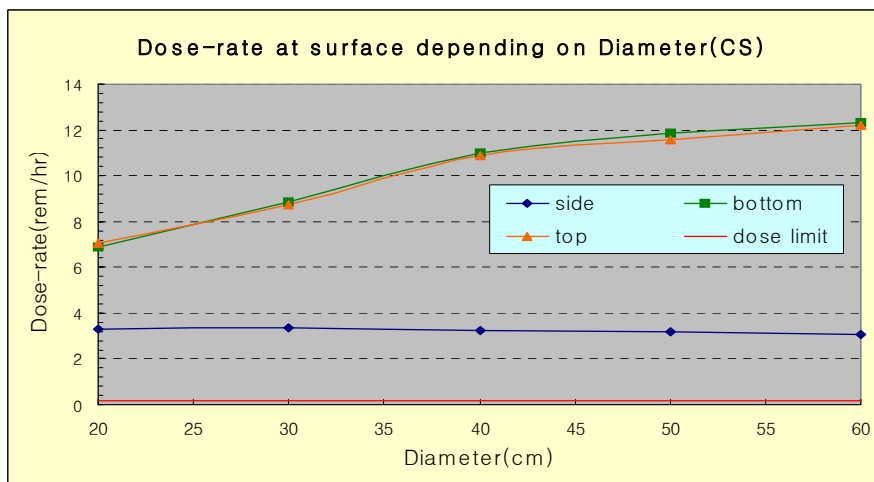


그림 6 두께 변화에 따른 선량률



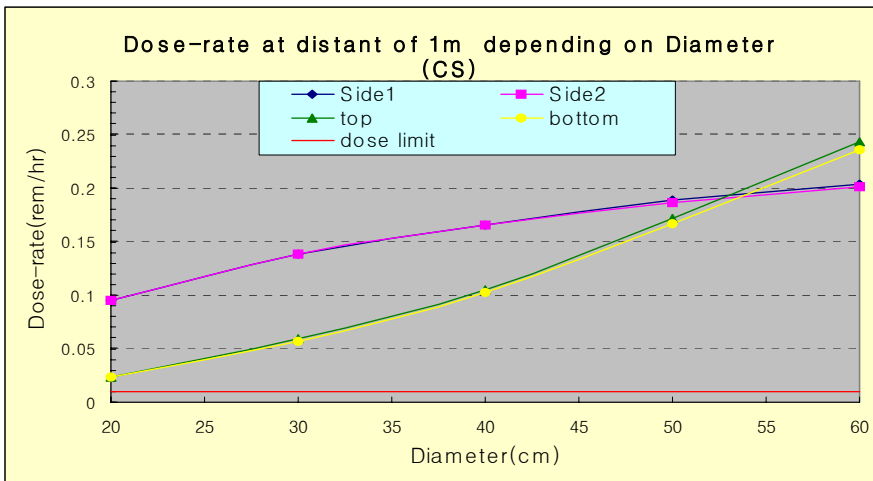


그림 6 직경 변화에 따른 선량률

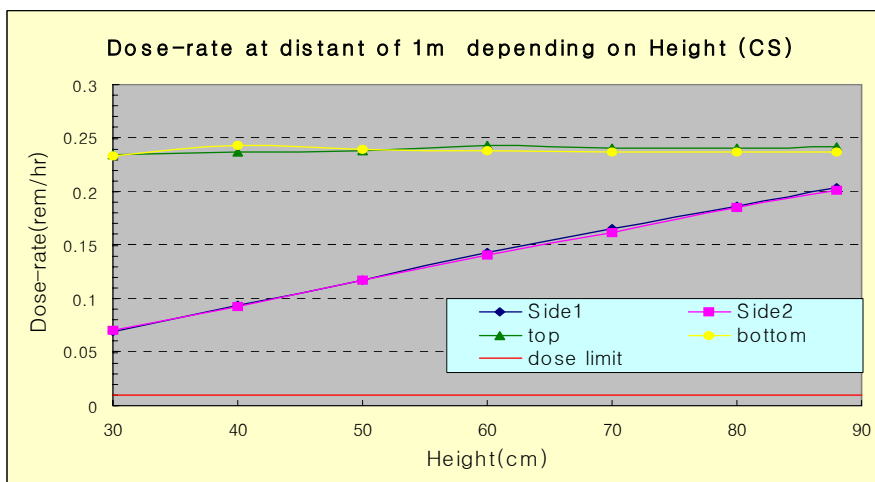
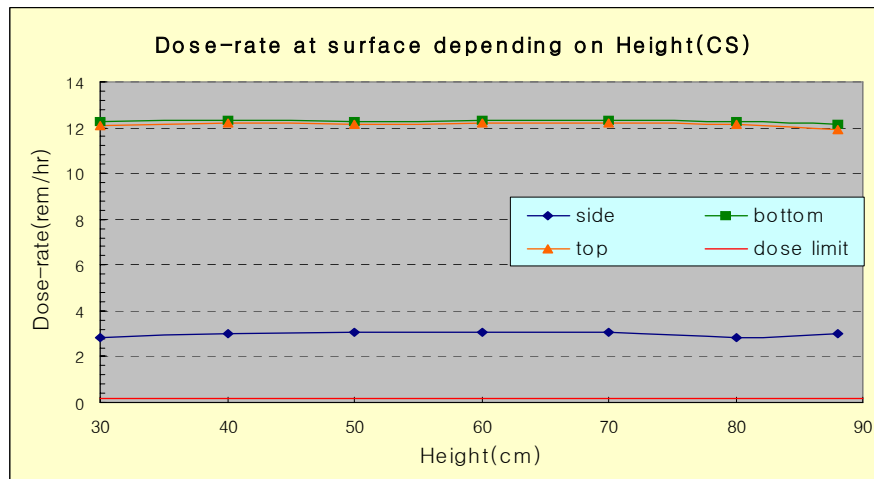


그림 7 높이 변화에 따른 선량률

## 5. 가상 용기 사양의 결정

적절한 용기의 사양을 구하기 위해서 단일용기의 경우 10 가지 사례를 기본적으로 설정하였다. 첫 번째 경우는 기존 용기인 DOT-17H와 외부 규격을 같게 하면서 내부로 용기의 두께를 늘리는 방법이다(Case 1, 6). 현재 원전에서 사용되고 있는 많은 기계들이 DOT-17H에 맞춰져 있고, 용기의 규격화라는 측면에서 권장되어 질 수 있다는 점에서 우선 고려되었다. 그리고 다음 방법으로는 두께를 줄이기 위하여 기존 용기의 직경-높이 비율을 유지하면서 용기의 크기를 줄였을 경우를 고려해 보았다(77-53.5, 66-44.5, 55-37.5)(Case 2,3,4,7,8,9). 그리고 마지막으로 기존 DOT-17H 용기와 같은 내부용량을 유지하면서 바깥으로 두께를 늘리는 방법으로 계산을 하였다 (Case 5, 10). 각 경우에 대해 용기재질을 탄소강과 스테인리스 스틸인 경우로 구분함으로써 총 10가지 사례를 분석하였다. 추가로 단일용기가 아닌 이중 용기의 사례를 설정하여 기존 DOT-17H를 유리고화체 저장 용기로 사용하고 운반시 추가용기를 사용하는 경우를 분석하였다.

저장 및 운반을 별도의 용기로 분리하는 이중용기의 경우, 저장용기는 기존의 DOT-17H 용기를 사용하는 것으로 가정하였다. 저장용기를 수송할 때 필요한 운반용기의 구조는 내벽/차폐체/외벽으로 설정하였다. 이 때, 내벽 및 외벽의 재질은 스테인리스강으로 나누고, 차폐체는 납, 탄소강의 경우로 나누어 각 사례별로 분석하였다. (Case 11, 12)

이와 같은 사례 분석을 통해 본 논문에서는 총 12가지의 적용 가능한 용기사양을 도출하여 표 7에 제시하였다.



그림 8 이중용기의 구조

선정한 12가지 사례에 대한 선량평가를 확인하기 위하여 3가지 방법으로 선량을 계산하였다. 먼저 가장 보수적인 방법이고 Monte-Carlo Method의 대표적인 코드인 MCNP-4C를 이용하여 계산하였다. 그 결과를 검증하기 위하여 SCALE의 SAS3와 QADS 코드를 사용하였다.

MCNP는 임의의 3차원 재질과 surface를 통한 구조를 cross-section data를 이용하여 수치의 확률적 분포를 반복 가능한 실험의 통계로부터 구하는 방법인 Monte-Carlo Method 코드이고, SAS3는 MCNP와 비슷한 방법으로 선량을 평가한다. QADS는 다차원

의 point-kernel analysis module을 통해서 선량을 계산하는 코드이다. 따라서 MCNP와 SAS3코드는 재질의 성분보다는 밀도에 영향을 크게 받는다. 하지만 QADS는 밀도 자체보다는 성분의 Buildup factor에 큰 영향을 받는다. 따라서 QADS가 유리고화체내의 성분으로 인해 가장 낮은 선량을 나타내고 있다. SAS3 코드는 선원향의 위치를 직육면체로 밖에 놓아야 하기 때문에 원통형의 위치를 표현하지 못해 표면에서의 선량률이 상대적으로 낮게 나타났다.

표 7. 제안된 용기 사양과 특징

Case	특징	사용 재질	외부 직경 (cm)	외부 높이 (cm)	내부 직경 (cm)	내부 높이 (cm)	용량 (ℓ)	총무게 (Kg)	고화체양 (Kg)
1	외부크기 유지	CS	59.7	88.4	47.3	74	130.03	1270.12	347.18
		옆면두께 6.2cm, 위아래두께 7.2cm							
2		CS	53.5	77	42	63	87.2829	907.54	233.045
		옆면두께 5.75cm, 위아래두께 7cm							
3	용량축소	CS	44.5	66	34	52	47.2118	561.79	126.056
		옆면두께 5.25cm, 위아래두께 7cm							
4		CS	37.5	55	27	42.5	24.3336	351.169	64.9707
		옆면두께 5.25cm, 위아래두께 6.25cm							
5	내부용량 유지	CS	72.46	103.56	59.46	88.16	244.8	2086.1	653.616
		옆면두께 6.5cm, 위아래두께 7.7cm							
6	외부크기 유지	SS	59.7	88.4	47.7	74.4	132.953	1274.41	354.986
		옆면두께 6cm, 위아래두께 7cm							
7		SS	53.5	77	42.5	63.5	90.0827	907.121	240.521
		옆면두께 5.5cm, 위아래두께 6.75cm							
8	용량축소	SS	44.5	66	34.3	53	48.9727	561.776	130.757
		옆면두께 5.1cm, 위아래두께 6.5cm							
9		SS	37.5	55	27.3	43	25.17	352.876	67.204
		옆면두께 5.1cm, 위아래두께 6cm							
10	외부크기 유지	SS	71.96	103.16	59.46	88.16	244.8	2056.86	653.616
		옆면두께 6.25cm, 위아래두께 7.5cm							
11	이중용기 납차폐	CS,SS, Pb,SS	66.7	95.9	59.46	88.16	244.8	1496.06	653.616
		옆면두께(고화체-29.73, CS-0.12, Air-0.5, SS-0.5 Pb-2.0, SS-0.5) 위아래두께(고화체-44.08 CS-0.12, Air(위)-0.5, SS-0.5, Pb-2.5, SS-0.5)							
12	이중용기 탄소강 차폐	CS,SS, CS,SS	73.2	104.3	59.46	88.16	244.8	2107.09	653.616
		옆면두께(고화체-29.73, CS-0.12, Air-0.5, SS-0.5 CS-5.25, SS-0.5) 위아래두께(고화체-44.08 CS-0.12, Air(위)-0.5, SS-0.5, CS-6.7, SS-0.5)							

## 6. 결 론

중저준위 방사성폐기물 유리고화체를 안전하게 취급하기 위한 용기 관련 연구를 수행하였다. 이를 위해 유리고화체 용기 관련 지침 및 요건을 검토하였다. 유리고화체 운반 용기에 있어서 현재의 제한 선량률은 표면에서 0.2 rem/hr, 1m거리에서 0.01 rem/hr이다. 이를 기준으로 용기에 대한 방사학적 안전성을 평가해 보았다. 분석 기준 용기는 용기 단일화의 관점에서 현재 가장 많이 사용되고 있는 DOT-17H 용기를 선택하였다.

그 결과 제한선량을 크게 초과하는 값이 나왔고, 기존의 DOT-17H로는 유리고화체 운반 용기에 바로 적용할 수 없음을 알 수 있었다. 따라서 실린더형의 모습을 유지하면서 해당 용기를 크기(높이 및 직경 변화), 재질(탄소강, 스테인리스강), 단일용기/이중용기 여부 등으로 분류하여 방사선 차폐해석을 각 사례별로 수행하였다.

이러한 분석을 바탕으로 적용가능한 12가지 용기를 제안해 보았다. 탄소강과 스테인리스강을 재질로한 단일 용기의 경우에는 먼저 용기 단일화의 관점에서 기존 용기의 외부 크기를 고정시키고 내부 두께를 늘려감으로서 적절한 용기의 두께를 계산하였고, 두께를 줄이기 위해 내부 부피를 줄이는 방법으로 3가지를 제시하였다. 그 경우 내부용량이 매우 적어지는 문제를 확인할 수 있었다. 따라서 내부용량을 유지한 채 외부로 두께를 늘리는 경우도 제시해 보았다. 이 경우는 용량유지만큼이나 용기가 커지고 무거워지는 단점이 생길 수 있다. 또한 수송과 처분을 별도로 하는 방법 2가지도 제시해 보았다. 기존의 용기를 사용하면서 이중용기로 차폐를 함으로써 방사학적 선량 요건을 만족시키는 방법도 제안하였다.

연구에서 도출된 결과는 유리고화체 용기의 기본설계 및 요건 정립에 활용할 수 있는 기초자료로서, 용기 제작 및 운영을 위한 단계별 절차 마련에 적용할 수 있을 것으로 보인다. 실제적인 용기 설계 및 제작을 위해서는 본 연구에서 제시된 용기 제원을 토대로 보다 정확한 가정 사항 및 설계 자료, 방사선원형, 경제성, 안전 여유도, 용기 단일화 관점 등을 충분히 고려하는 추가적인 연구가 계속되어야 할 것으로 보인다. 또한, 이러한 상세 설계 변경사항에 대한 고려와 더불어 실증 실험 및 시험을 병행하여 연계함으로써 최종적으로 최적화된 용기 설계 사항을 도출할 수 있을 것으로 판단된다.

## 참고 문헌

- [1] 원자력환경기술원, “중·저준위 방사성폐기물 유리화 기술개발(Ⅱ),” 2002.
- [2] 한국수력원자력·원자력환경기술원, “중저준위 방사성폐기물 유리화시설의 경제성분석 및 안전성평가 시나리오 수립”, 2002.
- [3] 한국에너지연구소, “사용후핵연료저장용기개발,” 1987.
- [4] 한국전력공사, “울진 원자력발전소 5, 6호기 최종 안전성분석보고서,” 1987.
- [5] International Atomic Energy Agency Vienna, “Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material”, IAEA Safety Standards Series No.TS-R-1 (ST,-1, Revised), 1996
- [6] U.S. Nuclear Regulatory Commission, “PACKAGING AND TRANSPORTATION OF RADIOACTIVE MATERIAL”, NRC-Regulations(10 CFR) Part71, 1996.
- [7] 과학기술부, “방사성물질 등의 포장 및 운반에 관한 규정”, 고시 제2001-23호, 2001
- [8] Radiation shielding Information Center, “RSIC COMPUTER CODE COLLECTION, MCNP 4A Monte Carlo N-Particle Transport Code System”, 1993.
- [9] OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY, “SAS3: an automated monte carlo shielding analysis module”, ORNL/NUREG/CSD-2/V1/R6, 1998.
- [10] OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY, “QADS: a multidimensional point-kernel analysis module”, ORNL/NUREG/CSD-2/V1/R6, 1998.