

2003 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

중·저준위 방사성폐기물 유리고화체 용기의
방사학적 평가에 관한 연구

Study on the Radiological Assessment
of the Vitrified Form Container of ILLW

김용민, 송재혁, 강창순

서울대학교

서울특별시 관악구 신림동 산 56-1

지평국, 박종길, 하종현

원자력환경기술원

대전광역시 유성구 덕진동 150번지

요 약

방사성폐기물 처리에 있어서 경제성과 높은 감용율로 인해 유리화 기술 개발에 대한 많은 연구와 투자가 국내외에서 이루어지고 있다. 국내에서는 1990년대부터 특히 중저준위 방사성폐기물을 대상으로 한 유리화 기술의 타당성 연구를 시작으로, 2007년 세계 최초의 중저준위 방사성폐기물 유리화 시설의 상용화를 목표로 지속적인 연구가 수행되고 있다. 이에 따라 본 연구에서는 유리고화체 용기에 관한 방사선량을 평가를 수행하였다. 우선 방사성폐기물의 포장 및 운반에 관한 국내외 요건 및 법규를 검토하여 용기가 만족시켜야 하는 선량 제한치를 분석하였다. 그리고, 기존에 사용되고 있는 용기인 DOT-17H를 기준으로 유리고화체 저장시 방사선량을 MCNP를 통해 계산하였다. 계산 결과 기존의 DOT-17H 용기는 선량 제한치 요건을 초과하였다. 따라서 요건 충족을 위한 DOT-17H 용기 설계 변경 사항을 도출하고자, 본 연구에서는 용기의 두께, 직경, 높이 변화를 통한 방사학적 안전성을 평가하였다.

Abstract

Many studies and investment on vitrification technology development for the treatment of radioactive wastes have been accomplished both abroad and domestically

due to its economical advantage and remarkable volume reduction effect. In Korea, the feasibility study on vitrification technology for ILLW has been started since 1994, and the related research is ongoing with the purpose of operating the world first commercial facility in 2007. In this study, the radiological assessment of the vitrified forms container was carried out. First, the foreign and domestic regulations on the packaging and transport of radioactive wastes were reviewed and the dose limits were also analyzed. Second, the dose rates were calculated by MCNP code in cases when the vitrified forms are packed in the existing container DOT-17H. The results showed that DOT-17H was not satisfied as an acceptable container because of exceeding of the dose limits. Therefore, to derive the design modifications of DOT-17H necessary to satisfy the regulatory requirements, the radiological safety was evaluated with the changes of thickness, diameter, and height of DOT-17H.

1. 서론

유리화 기술은 방사성폐기물 내에 존재하는 방사성핵종을 유리구조 내에 안정한 형태로 가두는 기술이다. 이 기술은 방사성폐기물 처리시 부피를 혁신적으로 감소시키고, 처분시 방사능의 환경 유출을 근본적으로 방지할 수 있기 때문에 주요 원자력 선진국에서 큰 관심의 대상이 되어 많은 연구와 투자가 이루어지고 있다. 국내에서는 한국수력원자력(주) 원자력환경기술원을 중심으로 특히 중·저준위 방사성폐기물을 대상으로 한 유리화 기술의 타당성 연구를 시작으로, 1999년에는 프랑스의 SGN사 및 현대 모비스와 공동으로 대덕연구단지 내에 유리화 실증 설비를 건설한 바 있다. 그리고 현재 2007년 세계 최초의 중·저준위 방사성폐기물 유리화 시설의 상용화를 목표로 지속적인 연구가 수행되고 있다.

이에 따라 유리고화체 방사성폐기물을 안전하게 저장하고 수송할 수 있는 용기에 관한 연구도 필요하게 되었다. 따라서 본 연구에서는 방사학적 안전성 측면에서 기존 용기의 적용 가능성을 평가하고, 이를 토대로 용기의 설계 변경 사항을 도출하고자 한다. 이를 위해 본 연구에서는 우선 국내에서 현재 사용중인 용기들을 검토하였고(표 1 참조), 그 결과 가장 널리 사용되고 있는 DOT-17H 용기를 기준 용기로 선정하였다(표 2 및 그림 1 참조). 둘째, 방사성폐기물의 포장 및 운반에 관한 국내외 요건 및 법규를 검토하여 용기가 만족시켜야 하는 방사학적 제한치를 분석하였다. 셋째, DOT-17H를 기준으로 유리고화체 저장시 방사선량을 MCNP 코드를 통해 계산하였다. 마지막으로, DOT-17H 설계 변경 사항을 도출하고자, 용기의 두께, 직경, 높이 변화를 통한 방사학적 평가를 수행하였다.

표 1. 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 2. 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

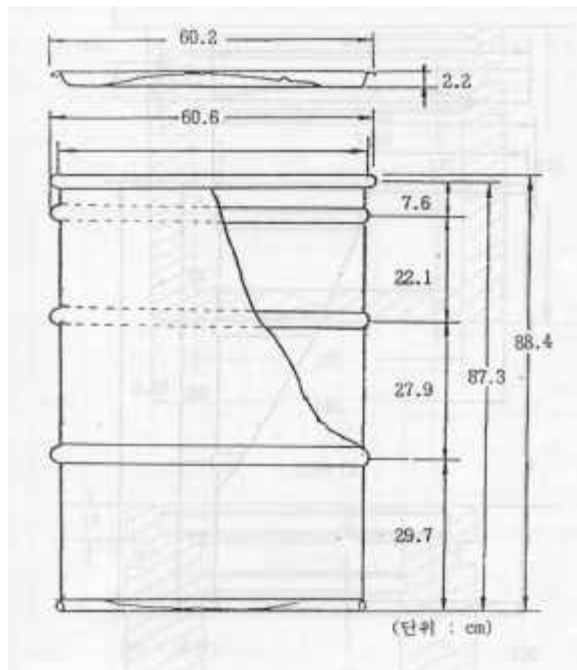


그림 1. DOT-17H의 사양

2. 관련 법규

방사성폐기물을 처리, 포장, 저장, 수송, 처분하는데 있어서 무엇보다도 먼저 고려해야 할 것은 관련 법규 및 요건이다. 따라서 중저준위 방사성폐기물 유리고화체의 안전 취급과 관련한 국내의 요건 및 법규를 검토하였다. 이들 법규 중 특히 방사성폐기물의 포장 및 운반을 위한 용기에 대해 직접적으로 규정하고 있는 법규는 국내의 과학기술부 고시 제2001-23호, IAEA의 IAEA SSS No. TS-R-1, 미국의 10 CFR 71 규정으로 각 항목에서 주요한 내용을 비교하면 다음과 같다.

표 3. 국내의 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"> - 일반사항: 목적, 범위, 정의 - 일반원칙: 방사선방어, QA - 방사능 제한치 - 수송 준비, 요건, 통제 등 - 포장 및 포장물 요건 - 시험절차 - 승인 	<ul style="list-style-type: none"> - 일반사항: 목적, 정의 - 포장기준 - 운반기준 - 제작승인 - 제작검사/사용검사 - 보고 	<ul style="list-style-type: none"> - 일반사항: 목적, 범위, 정의 - 면제사항 - 일반인허가요건 - 인허가신청 - 시험기준, 절차 - 운영, 관련 절차 등 - 품질보증사항
포장물 일반 조건	<ul style="list-style-type: none"> - 크기는 10cm 이상 - 취급, 운반이 안전, 용이 - 안전한 격납 - 인양용 부착물의 안전설계 - 표면제염이 용이 - 물 흡수 않는 외부층 설계 - 밀폐장치의 안전성 고려 - 재질, 부품의 적합성 고려 - 밸브조작금지 - 위험물 운반시 안전장치 	<ul style="list-style-type: none"> - 크기는 10cm 이상 - 취급이 안전하고 용이 - 안전한 운반 및 격납 - 표면제염이 용이 - 물 흡수 않는 외부층 설계 - 밀폐장치의 안전성 고려 - 재질, 부품의 적합성 고려 - 위험물 운반시 안전장치 	<ul style="list-style-type: none"> - 크기는 10cm 이상 - 외부손상방지 - 안전한 격납 - 재질, 부품의 적합성 - 밸브조작금지
허용 방사선량율	<ul style="list-style-type: none"> - 비전용적재 <ul style="list-style-type: none"> · 표면 1m: 0.1mSv/hr이하 · 표면 : 2mSv/hr 이하 · 운반지수 10이하 - 전용적재 <ul style="list-style-type: none"> · 표면 : 10mSv/hr이하 - 차량 <ul style="list-style-type: none"> · 표면 : 2mSv/hr이하 · 표면 2m : 0.1mSv/hr이하 · 운전석 : 0.02mSv/hr이하 	<ul style="list-style-type: none"> - L형 운반물 <ul style="list-style-type: none"> · 표면 : 0.5μSv/hr이하 - A형, B형 운반물 <ul style="list-style-type: none"> · 표면 : 2mSv/hr이하 · 표면 1m : 0.1mSv/hr이하 - 차량 <ul style="list-style-type: none"> · 표면 : 2mSv/hr이하 · 표면 1m : 0.1mSv/hr이하 · 운전석 : 0.02mSv/hr이하 - 전용적재시 <ul style="list-style-type: none"> · 표면 : 10mSv/hr이하 - 전용차량 <ul style="list-style-type: none"> · 표면 : 2mSv/hr이하 · 표면 2m : 0.1mSv/hr이하 · 운전석 : 0.02mSv/hr이하 	<ul style="list-style-type: none"> - 비전용적재시 <ul style="list-style-type: none"> · 표면 : 2mSv/hr이하 - 전용적재시 <ul style="list-style-type: none"> · 표면 : 10mSv/hr이하 - 차량 <ul style="list-style-type: none"> · 표면 : 2mSv/hr이하 · 표면 2m : 0.1mSv/hr이하 · 운전석 : 0.02mSv/hr이하
허용 표면오염도	<ul style="list-style-type: none"> - α선방출 : 0.4Bq/cm²이하 - α선비방출 : 4Bq/cm²이하 	<ul style="list-style-type: none"> - α선방출 : 0374Bq/cm²이하 - α선비방출 : 3.7Bq/cm²이하 	-

3. MCNP를 이용한 선량 계산

1) 방사선원항

유리고화체의 방사선원항은 올진 5,6호기 FSAR 등에 제시된 유리화 대상폐기물의 방사선원항, 발생량, 밀도 및 유리화시 감용비 등을 고려하여 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)	1.16×10^{-2}	2.82×10^{-6}	6.05×10^{-2}	8.14×10^{-2}	2.07×10^{-4}	5.11×10^{-5}	1.80×10^{-5}
선원항	Zr-95	Nb-95	Ru-103	Ru-106	Ag-110m	Te-129m	Ce-141
방사능 (GBq/kg)	5.76×10^{-4}	5.63×10^{-4}	1.09×10^{-2}	1.36×10^{-1}	1.96×10^{-3}	2.75×10^{-4}	2.15×10^{-4}
선원항	Ce-144	Cr-51	Mn-54	Fe-55	Fe-59	Co-57	Co-58
방사능 (GBq/kg)	6.03×10^{-3}	4.47×10^{-3}	4.40×10^{-3}	1.83×10^{-3}	4.38×10^{-4}	9.93×10^{-4}	1.36×10^{-2}
선원항	Co-60	Zn-65	Total				
방사능 (GBq/kg)	2.35×10^{-2}	1.03×10^{-3}	3.50×10^{-1}				

이중 photon만을 고려하여 Sr-90, Ru-106, Fe-55, Co-57, Tc-99를 제외한 선원항들을 식 (1)과 같이 ORIGEN2 코드의 18 에너지 구간으로 나타내었다.

$$P(E) = \frac{\sum_{total} p_s(E) \times A}{\sum_E \sum_{total} p_s(E) \times A} \quad (1)$$

여기서, P(E)-전체 선원항의 에너지 분포

p_s - 각각의 선원항의 에너지 분포

A - 방사능

선량을 도출을 위해 그림 2에 나타난 Yuri1.0 계산 프로그램을 작성하여 사용하였다. 즉, 시간에 따른 방사능의 양과 유리고화체의 총 에너지 분포를 계산하고 MCNP로 구한 플럭스를 입력시킨 후, 플럭스-선량 변환상수를 적용하여 선량을 계산하였다.

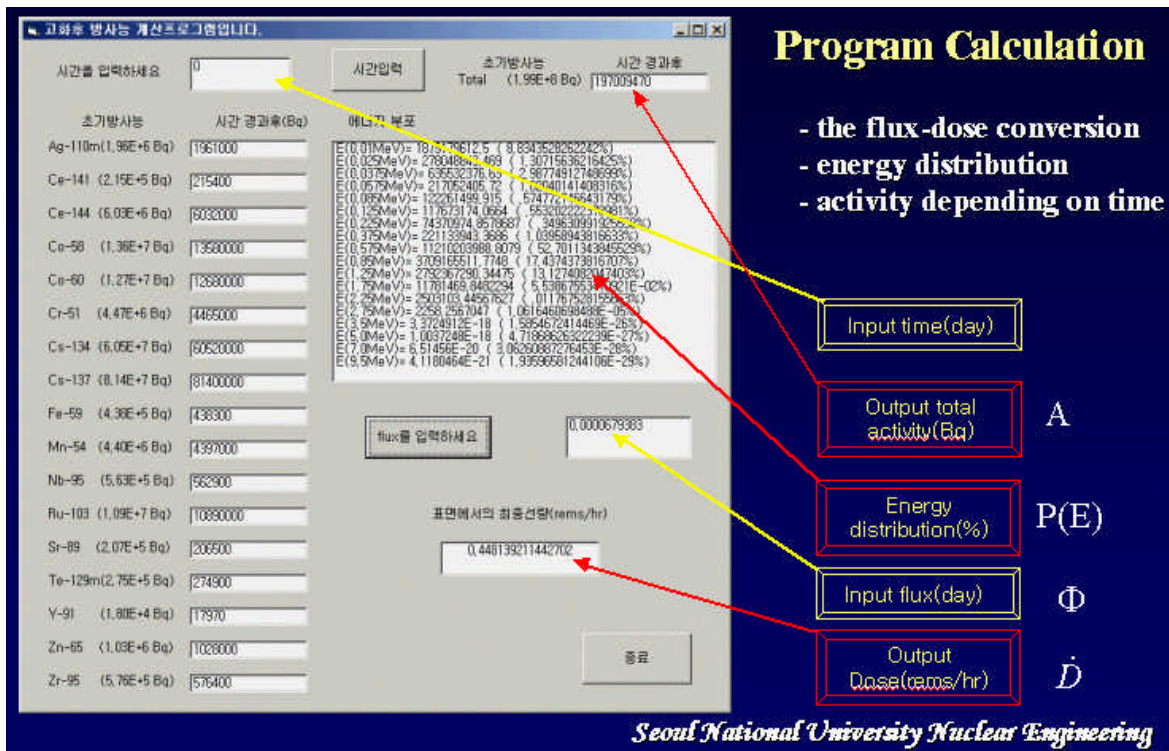


그림 2. Yuri 프로그램

2) MCNP를 이용한 플럭스의 계산

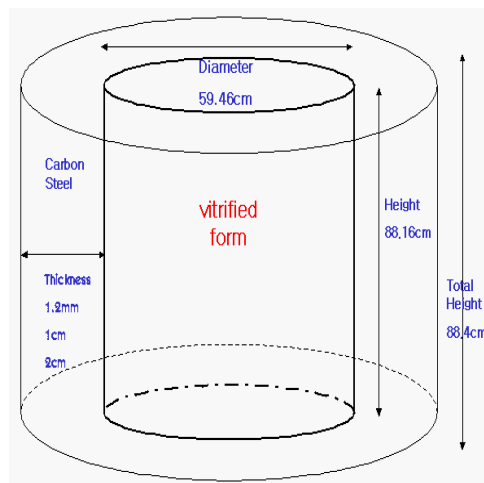


그림 3. MCNP에서 사용한 용기 구조

에너지 분포와 유리고화체 조성, 그리고 DOT-17H의 사양을 이용하여 MCNP에서 플럭스를 구하였다. 용기의 구조는 그림 3과 같고, 용기의 두께와 직경 등을 변화시키면서 용기 표면에서의 플럭스를 구하였다. DOT-17H의 재질은 탄소강으로 구성되어 있고, 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 구성되어 있다.

3) 선량을 계산

용기 표면 및 1m 선량은 식 (2)와 같이 MCNP로 구한 플럭스에 에너지 분포비율을 곱한 후 표 5에 나타난 ANSI/ANS-6.1.1-1977에 제시된 플럭스-선량 변환상수를 적용하여 계산하였다.

$$D = \sum_E \Phi \times P(E) \times C_E \quad (2)$$

여기서 D - 선량율 (rem/hr)

Φ - 표면에서의 flux ($photons/cm^2 \cdot s$)

$P(E)$ - 각 에너지의 비율

C_E - 변환상수 (rem/hr) / ($photons/cm^2 \cdot s$)

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 (rem/hr) / ($photons/cm^2 \cdot s$)	3.96×10^{-6}	1.43×10^{-6}	4.73×10^{-7}	2.78×10^{-7}	2.71×10^{-7}	3.31×10^{-7}
Energy(MeV)	0.225	0.375	0.575	0.85	1.25	1.75
Flux to Dose Rate (rem/hr) / ($photons/cm^2 \cdot s$)	5.66×10^{-7}	9.32×10^{-7}	1.32×10^{-6}	1.76×10^{-6}	2.31×10^{-6}	2.93×10^{-6}
Energy(MeV)	2.25	2.75	3.5	5	7	9.5
Flux to Dose Rate (rem/hr) / ($photons/cm^2 \cdot s$)	3.47×10^{-6}	3.96×10^{-6}	4.62×10^{-6}	5.80×10^{-6}	7.29×10^{-6}	9.15×10^{-6}

4. 결 과

기존 DOT-17H의 축(높이) 방향과 직경 방향에서의 선량율을 계산한 결과, 직경 방향에서의 선량율이 더 높게 도출되었으므로 본 연구에서는 직경 방향만을 고려하여 선량율을 평가하였다.

선량율은 드럼 내에서 선원향이 고르게 퍼져 있는 경우와 반지름에 따라서 분포가 드럼 바깥쪽에 더 몰려있을 경우의 두 가지로 나누어 계산하였다. 기존의 DOT-17H 용기에 유리고화체를 저장시킬 때, 분포가 균일한 경우에는 표면 선량율이 2.291rem/hr, 1m 거리에서의 선량율이 0.1508rem/hr로 도출되었고, 균일하지 않을 경우에는 표면에서 3.769rem/hr, 1m 거리에서 0.4001rem/hr로 도출되었다. 두 경우 모두 국내 법규에 제시되어 있는 선량제한치-표면 선량율 0.2rem/hr, 1m 거리 선량율 0.01rem/hr를 크게 초과하는 값이다. 따라서 기존의 DOT-17H의 용량 감소나 두께 증가를 통해 선량제한치를 만족시

키기 위한 설계 변경 사항을 도출하였다.

두께의 변화에 따른 선량율은 그림 4에 나타난 것처럼 표면에서의 법적 허용치를 만족시키기 위해서는 균일한 상태에서는 4.5cm이상, 균일하지 않은 상태에서는 5.5cm이상으로 계산되었으며, 그림 5에 나타난 것처럼 1m 거리에서는 최소 5.5cm(균일) 6.5cm(비균일)로 계산되었다. 그림 6 및 그림 7에 나타난 직경에 따른 표면 선량율은 분포가 균일한 경우 직경에 따른 변화가 거의 없음을 알 수 있으며, 분포가 균일하지 않은 경우에도 표면 선량율이 다소 줄어들긴 하였지만 크게 감소하지 않음을 알 수 있었다. 그러나 1m 거리에서의 선량율은 직경이 감소함에 따라 선량율 감소를 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 그림 8 및 그림 9에 나타난 높이에 따른 계산 결과에서도 같은 경향을 나타내고 있다. 또한 기존 용기의 직경-높이 사이의 비율을 유지하며 직경-높이를 변경한 경우에서도 그림 10 및 그림 11에 나타난 것처럼 균일한 분포에서는 표면 선량율이 거의 일정하게 나타났으며, 1m 거리에서의 선량율 만이 크기가 작아짐에 따라 감소함을 확인할 수 있었다. 즉, 용기를 작게 만들어 유리고화체를 적게 저장하는 방법은 표면 선량율을 감소시키지는 못하지만 1m 거리에서의 선량율은 감소시킴을 알 수 있었다. 따라서 선량율을 조절하는 데 있어서 가장 효과적인 방법은 드럼의 두께를 늘리는 것으로 판단된다. 또한 동시에 용기의 크기를 조절함으로써 효과적으로 1m 거리에서의 선량율을 조절하는 것도 적절한 방법으로 판단된다. 마지막으로 그림 12에 나타난 두께에 따른 크기별 선량율을 살펴보면 분포가 균일한 경우 법적 기준치를 만족시키기 위해서는 두께 5cm이상에 높이-60cm, 직경-40cm 이하이거나, 6cm 이상에 높이-80cm, 직경-60cm 이하여야 한다. 분포가 균일하지 않을 경우에는 두께 5cm이상에 높이-30cm, 직경-20cm 이하여야 하고, 6cm 이상에 높이-60cm, 직경-40cm이하여야 함을 확인할 수 있었다.

Thickness (cm)	Constant (rem/hr)	Proportion (rem/hr)	Thickness (cm)	Constant (rem/hr)	Proportion (rem/hr)
0.12	2.291	3.769	4	2.519×10^{-1}	4.001×10^{-1}
1	1.227	2.000	5	1.495×10^{-1}	2.375×10^{-1}
2	7.057×10^{-1}	1.111	6	9.304×10^{-2}	1.516×10^{-1}
3	4.228×10^{-1}	6.873×10^{-1}	7	6.008×10^{-2}	9.586×10^{-2}

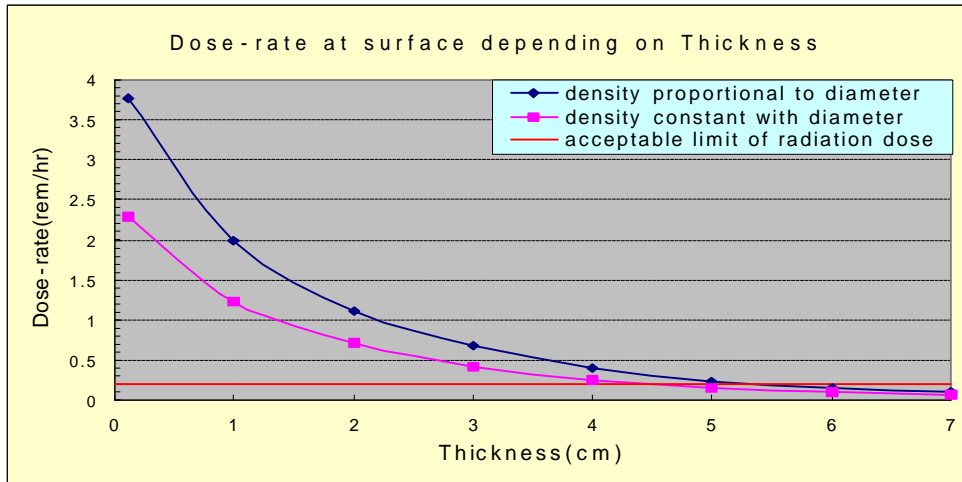


그림 4. 두께에 따른 표면 선량을

Thickness (cm)	Constant (rem/hr)	Proportion (rem/hr)	Thickness (cm)	Constant (rem/hr)	Proportion (rem/hr)
0.12	1.508×10^{-1}	2.344×10^{-1}	4	2.228×10^{-2}	3.631×10^{-2}
1	9.356×10^{-2}	1.451×10^{-1}	5	1.451×10^{-2}	2.327×10^{-2}
2	5.647×10^{-2}	9.061×10^{-2}	6	9.601×10^{-3}	1.479×10^{-2}
3	3.590×10^{-2}	5.735×10^{-2}	7	6.042×10^{-3}	9.330×10^{-3}

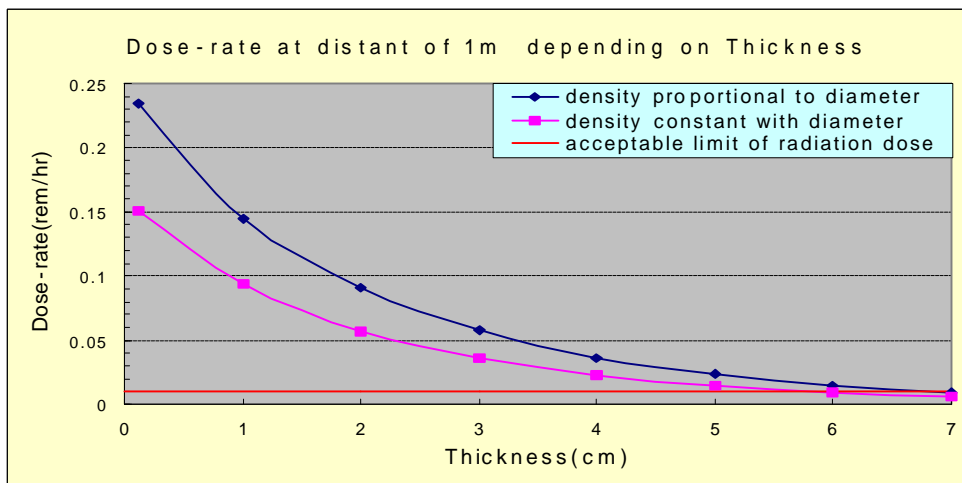


그림 5. 두께에 따른 1m 거리에서의 선량을

Diameter (cm)	Constant (rem/hr)	Proportion (rem/hr)	Diameter (cm)	Constant (rem/hr)	Proportion (rem/hr)
60	2.291	3.769	30	2.596	3.427
50	2.371	3.652	20	2.566	3.071
40	2.520	3.573			

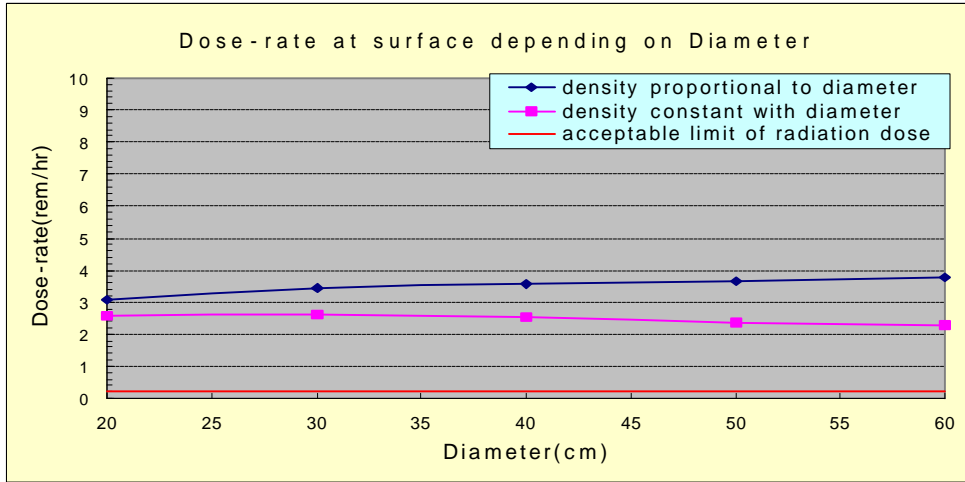


그림 6. 직경에 따른 표면 선량을

Diameter (cm)	Constant (rem/hr)	Proportion (rem/hr)	Diameter (cm)	Constant (rem/hr)	Proportion (rem/hr)
60	1.508×10^{-1}	2.344×10^{-1}	30	1.016×10^{-1}	1.237×10^{-1}
50	1.370×10^{-1}	1.987×10^{-1}	20	7.184×10^{-2}	7.875×10^{-2}
40	1.232×10^{-1}	1.641×10^{-1}			

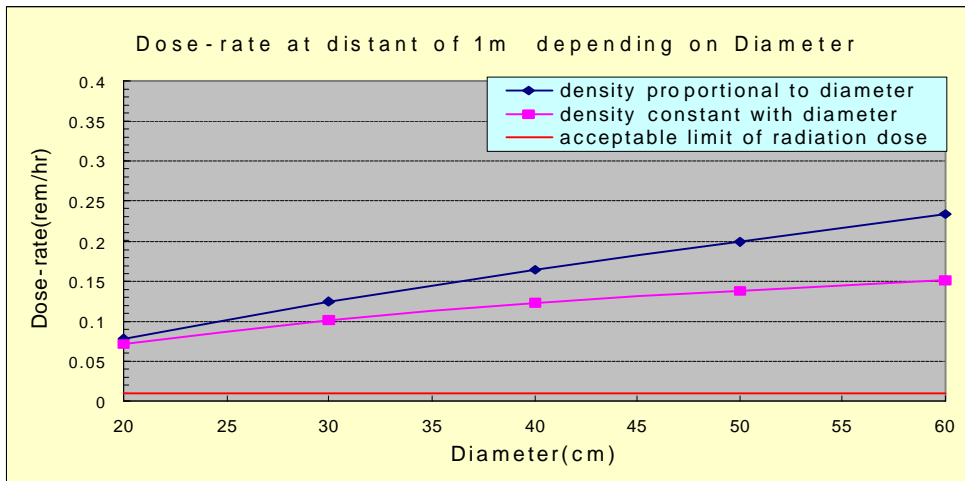


그림 7. 직경에 따른 1m 거리에서의 선량을

Height (cm)	Constant (rem/hr)	Proportion (rem/hr)	Height (cm)	Constant (rem/hr)	Proportion (rem/hr)
88	2.291	3.769	50	2.200	3.631
80	2.287	3.772	40	2.147	3.549
70	2.267	3.732	30	2.047	3.401
60	2.240	3.690			

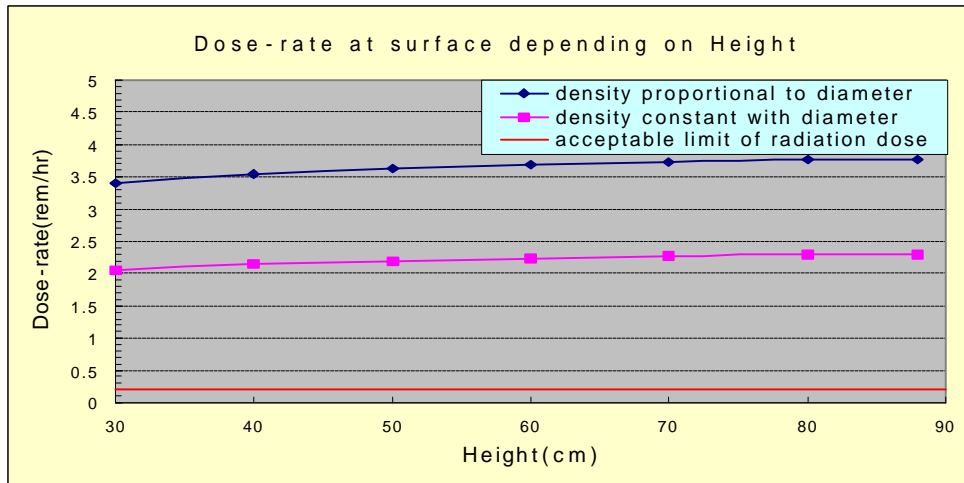


그림 8. 높이에 따른 표면 선량을

Height (cm)	Constant (rem/hr)	Proportion (rem/hr)	Thickness (cm)	Constant (rem/hr)	Proportion (rem/hr)
88	1.508×10^{-1}	2.344×10^{-1}	50	9.142×10^{-2}	1.405×10^{-1}
80	1.387×10^{-1}	2.158×10^{-1}	40	7.433×10^{-2}	1.128×10^{-1}
70	1.236×10^{-1}	1.925×10^{-1}	30	5.535×10^{-2}	8.350×10^{-2}
60	1.082×10^{-1}	1.678×10^{-1}			

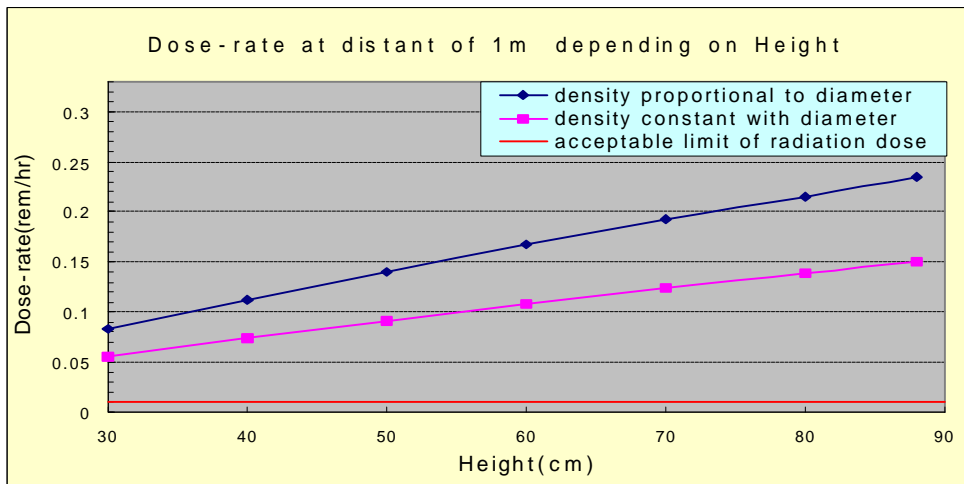


그림 9. 높이에 따른 1m 거리에서의 선량을

Height-Diameter (cm)	Constant (rem/hr)	Proportion (rem/hr)	Height-Diameter (cm)	Constant (rem/hr)	Proportion (rem/hr)
88-60	2.291	3.769	45-30	2.434	3.245
75-50	2.341	3.616	30-20	2.302	2.813
60-40	2.454	3.501			

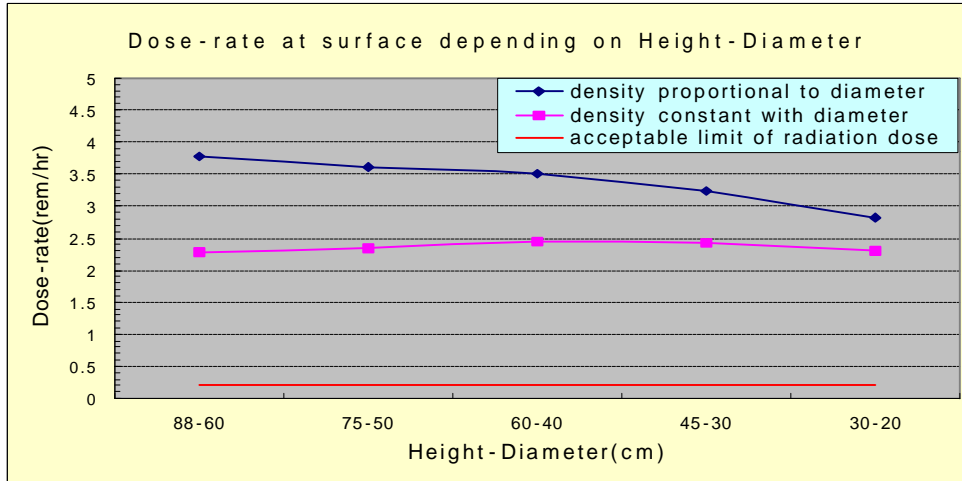


그림 10. 크기에 따른 표면 선량율

Height-Diameter (cm)	Constant (rem/hr)	Proportion (rem/hr)	Height-Diameter (cm)	Constant (rem/hr)	Proportion (rem/hr)
88-60	1.508×10^{-1}	2.344×10^{-1}	45-30	5.488×10^{-2}	1.114×10^{-1}
75-50	1.192×10^{-1}	1.733×10^{-1}	30-20	2.590×10^{-2}	7.115×10^{-2}
60-40	8.798×10^{-2}	1.470×10^{-1}			

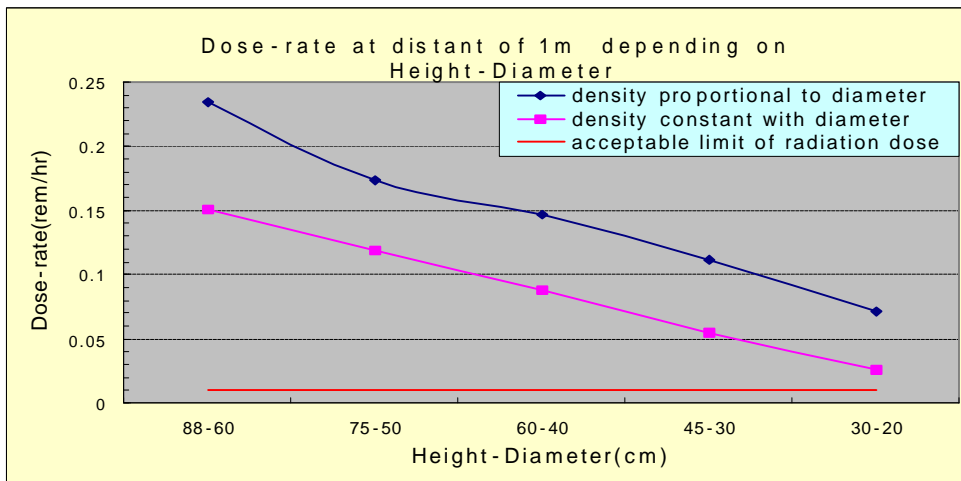


그림 11. 크기에 따른 1m 거리에서의 선량율

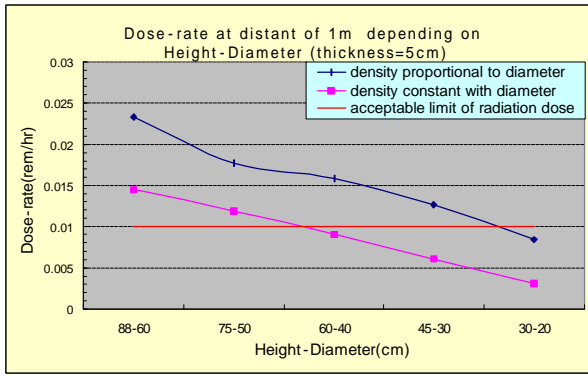
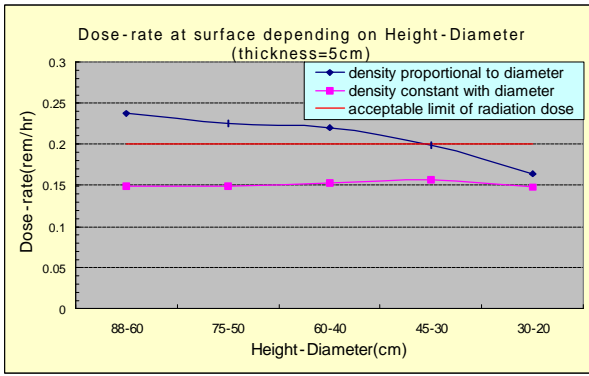
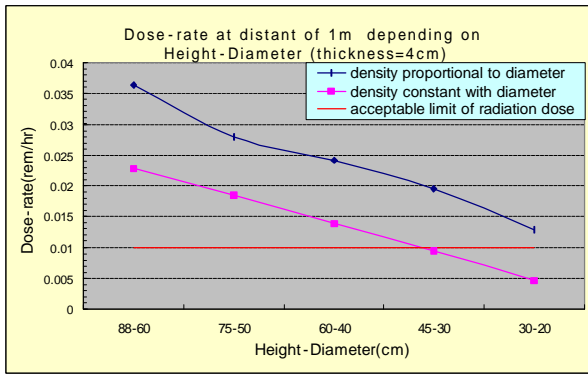
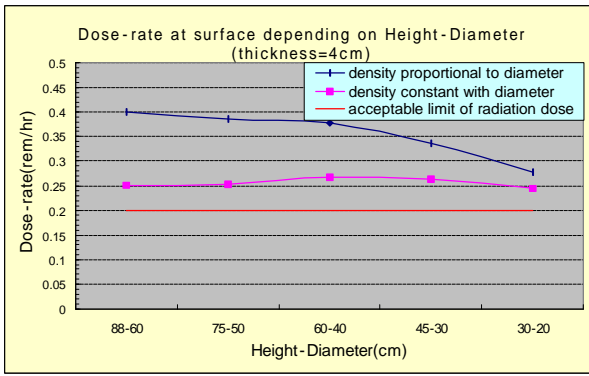
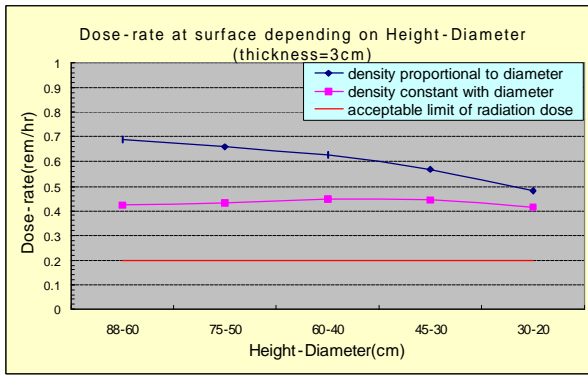
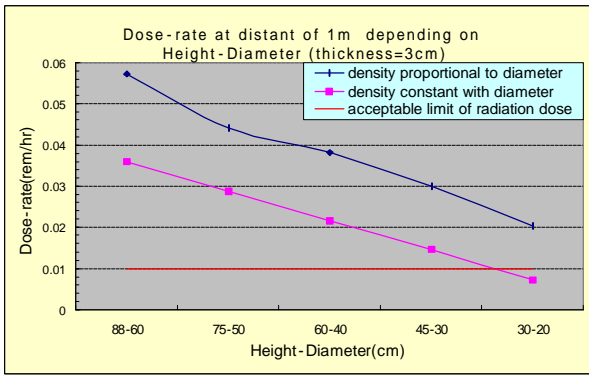


그림 12. 두께에 따른 크기별 선량을 비교

5. 결 론

유리고화체 용기의 선량율을 조절하는 데 있어서 가장 효율적인 방법은 차폐, 즉 용기의 두께를 변화시키는 것임을 알 수 있다. 결과에 나타난 것처럼 두께를 늘일 경우 선량율이 다른 높이나 직경의 감소에 비해 빨리 감소함을 알 수 있었다. 직경이나 높이를 줄이려면 상당히 작게 드럼을 만들어야 하고 이는 드럼의 용량이라는 측면에서 매우 비효율적이다. 본 연구의 계산 결과에서는 2cm 이상의 탄소강의 두께를 가지면 기준치를 만족시킬 수 있음을 알 수 있었다. 그러나, 안전 여유도를 고려한다면 이 두께는 훨씬 더 늘어나야 할 것으로 판단된다. 그러나 두께를 무조건 늘리는 것은 드럼의 무게나 제작비용 등에서 비효율적이 될 수 있다. 따라서 다른 재질에 의한 차폐 설계를 고려할 필요도 있다. 추후 차폐체의 도입이나, 저장과 수송용기의 분리 방안, 용기의 재질 등을 고려한 추가적인 설계 변경 사항 연구를 계속 수행함으로써 최종적으로 최적화된 용기의 설계 변경 사항을 도출할 수 있을 것으로 판단된다.

Acknowledgement

본 연구는 한국원자력환경기술원에서 주관하는 “중·저준위 방사성폐기물 유리고화체 안전 취급 연구” 과제의 일환으로 수행되었습니다.

참고 문헌

- [1] , “ . (),” 2002.
- [2] , “ ,” 1987.
- [3] , “ 5, 6 ,” 1987.
- [4] Radiation shielding Information Center, “RSIC COMPUTER CODE COLLECTION, MCNP 4A Monte Carlo N-Particle Transport Code System”, 1993.