JOURNAL OF RADIATION INDUSTRY

Technical article

17(2) : 191-197 (2023)
https://doi.org/10.23042/radin.2023.17.2.191

방사화 표적물질 운반용기 설계 연구

박혜민[1,*], 김태영[1], 김해영[1], 송양수[1], 이운장[1], 조원제[2], 정명환[2]

[1](주)오리온이엔씨, [2]한국원자력연구원 입자빔이용연구부

A Study on Design of Transport Container for Radio-activated Targets

Hey Min Park[1,*], Tae Young Kim[1], Hae Young Kim[1], Yang Soo Song[1], Un Jang Lee[1], Won-Je Cho[2] and Myeong Hwan Jeong[2]

[1]ORION ENC, 37, Seongsui-ro 22-gil, Seongdong-gu, Seoul 04798, Republic of Korea
[2]KAERI, Particle Beam Research Division, 181, Mirae-ro, Geoncheon-eup, Gyeongju 38180, Republic of Korea

Abstract Abstract KOMAC (Korea Multi-Purpose Accelerator Complex, KAERI) has been operating a 100 MeV proton accelerator and is going to produce ^{68}Ga isotope which is useful for diagnosis of cancer. So, it is necessary to develop a transport container for radio-activated targets. In this study, we carry out shielding analysis and structural analysis for the radio-activated target transport container using simulation programs. According to the Type A standard, the transport container includes an inner container and an overpack container. The main material of inner container is lead, and the shape is cylindrical with diameter of 152 mm, height of 142 mm and weight about 29 kg. It is planned to verify the possibility of field application through production of the transport container prototype in the future.

Key words: Radioactive isotope, Target, Container, A Type, Gamma

1. 서 론

방사선 및 방사성동위원소 이용기술은 의료, 산업, 식품, 농업분야 등 다양한 분야에 걸쳐서 기초/응용연구 및 필수 기술로 활용되고 있으며, 각 분야의 발전과 더불어 지속적으로 기술 이용이 증가할 것으로 예상되고 있다. 선진국에서는 이미 방사선 이용기술이 성숙기에 접어들면서 방사성동위원소의 이용 및 개발 연구를 활발히 추진하고 있으며, 현재 국내에서도 양성자가속기(경주), 중이온가속기(대전), 방사광가속기 - 3세대 원형, 4세대 선형(포항), 중입자가속기(부산), 방사광가속기 - 4세대 원형(오창) 등 총 6기의 대형 가속기를 운영 및 구축 중에 있다. 특히 한국원자력연구원(양성자과학연구단)에서는 국내 독자기술로 세계에서 3번째로 개발한 100 MeV, 20 mA 양성자가속기를 운영하고 있으며, 가속기에서 나오는 양성자 빔을 활용해 원자력, 나노, 생명, 정보/통신, 에너지/환경, 우주, 의료 및 기초과학 등 다양한 연구 분야에 적용하고 있다.

이 중 의료분야에서는 다양한 의료용 방사선동위원소의 국산화를 위해 연구 중에 있으며, 최근 암 진단 및 치료에 활용되는 의료용 방사성동위원소 중 주로 수입에 의존하는 금속성 방사성동위원소(^{68}Ge/^{68}Ga, ^{67}Cu) 등을 국산화하기 위한 연구가 진행되고 있다. 이에 따라 의료용 방사성동위원소의 국산화 및 생산 확대와 더불어 생산단계에서 소비단계까지의 안전한 이송체계 확립과 구축이 필요하다. 하지만 의료용 방사성동위원소의 운반을 위해 관련된 법규 및 기준에 따라 설계·제작되어 안전성이 입증된 운반용기

http://www.ksri.kr/
Copyright © 2023 by
Korean Society of Radiation Industry
*Corresponding author. Hey Min Park
Tel. +82-2-3414-2038 Fax. +82-2-3414-2031 E-mail. hmpark@orionenc.com
Received 10 May 2023 Revised 30 May 2023 Accepted 1 June 2023

를 사용하는 주요 선진국과 달리 국내는 아직 체계적인 의료용 방사성동위원소의 이송체계의 구축이 미진하다.

이에 본 연구에서는 한국원자력연구원(입자빔이용연구부)에서 생산 계획 예정인 방사화 표적물질(금속성 방사성동위원소) ^{68}Ge/^{68}Ga의 운반을 위해 방사화 표적물질 운반용기를 설계하고, 방사선 차폐해석과 구조해석을 통해 안전성을 평가하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1. 운반용기 설계

2.1.1. 운반용기 분류기준

국내 방사성동위원소의 운반용기는 "방사선 안전관리 등의 기술기준에 관한 규칙" 제92조에 따라 운반하고자 하는 방사성내용물이 포함된 중량 및 방사성내용물의 특성을 고려하여 "방사성물질 등의 포장 및 운반에 관한 규정" 제22조부터 제36조까지의 운반용기 기술기준 규정을 적용하게 되어 있다[1].

"방사선 안전관리 등의 기술기준에 관한 규칙" 제90조에 따르면 운반용기는 L형, IP형, A형, B형, C형, 핵분열성물질 운반물로 구분할 수 있으며, 운반물별 방사성물질의 한도량은 제91조를 참고할 수 있다.

본 연구를 통해 운반하고자 하는 ^{68}Ge/^{68}Ga은 핵종 및 방사능을 명확히 알고 있는 혼합 방사성 핵종이고, 특수형 방사성물질 이외의 방사성물질에 해당하여 A형 운반물로 구분할 수 있다.

Table 1은 ^{68}Ge/^{68}Ga 핵종의 A_1, A_2 값을 나타내고 있으며, A_1 값은 특수형방사성물질에 적용하는 값을 의미하고, A_2 값은 특수형방사성물질 이외의 방사성물질에 적용하는 값을 의미한다. A형 운반물 기준으로 한도량은 A_1과 A_2 값을 초과하지 않아야 한다[2].

Table 1. A_1, A_2 values of radionuclide

Radionuclide (atomic number)	A_1 (TBq)	A_2 (TBq)
Germanium (32) ^{68}Ge	5×10^{-1}	5×10^{-1}
Gallium (31) ^{68}Ga	5×10^{-1}	5×10^{-1}

2.1.2. 방사화 표적물질 특성

방사화 표적물질인 ^{68}Ge/^{68}Ga 중 ^{68}Ge의 반감기는 270.8일이며, 전자포획으로 붕괴하여 ^{68}Ga이 된다. 딸핵종인 ^{68}Ga은 반감기가 68분이며, β+ 붕괴를 통해 ^{68}Zn로 안정화된다. 붕괴 시 3.22% 분율로 1,077 keV 감마선을 방출하고, 177.82% 분율로 511 keV의 소멸감마선을 방출한다[3]. Table 2는 ^{68}Ga: 1 Ci (37 GBq) 생산 시 방사화된 표적에서 발생되는 핵종 정보를 보여준다. 표적물질의 방사능 수량은 총 7.18 Ci (235.6 GBq)이며, 핫셀(Hot Cell) 내부에서 원격조정 로봇에 의해 취급된다.

Fig. 1은 방사화 표적물질인 ^{68}Ge/^{68}Ga 타겟의 설계 모델을 보여준다. ^{68}Ge/^{68}Ga 타겟의 크기는 직경 5 cm, 두께 2 cm이다.

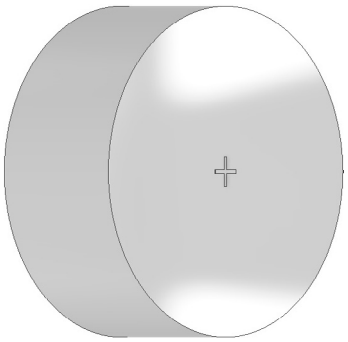

Fig. 1. Radio-activated target model.

Table 2. Radionuclide characteristic of radio-activated target

Radionuclide	GBq	Ci
^{88}Zr	1.3	0.035
^{89}Zr	1.1	0.029
^{92m}Nb	0.6	0.016
^{88}Y	2.8	0.075
^{91}Nb	0.0	–
^{93m}Nb	0.0	–
^{91m}Nb	0.0	–
^{93}Mo	0.0	–
^{67}Ga	90.5	2.445
^{71}Ge	72.0	1.945
^{68}Ga	37.0	1
^{68}Ge	37.0	1
^{69}Ge	18.1	0.489
^{65}Zn	5.1	0.137
Total	265.6	7.18

^{68}Ga은 양전자 방출 핵종으로 다양하게 응용이 가능하여, 핵의학 분야에서 PET 검출기 교정 및 진단용 방사성의약품으로 사용하고 있다. 특히 ^{68}Ge/^{68}Ga generator를 사용하면 반감기가 270.8일인 모핵종 ^{68}Ge을 통해 사이클로트론을 보유하지 않은 기관에서도 ^{68}Ga을 지속적으로 사용할 수 있다.

2.1.3. 방사화 표적물질 운반용기

Fig. 2는 방사화 표적물질 운반용기의 설계모델을 보여준다. 운반용기는 내부용기와 덧포장용기로 구분된다. 내부용기는 원기둥 형태이며, 차폐체는 납(Pb, 99%), 하우징은 스테인리스강(Stainless Steel 304)으로 구성되며, 덧포장용기는 Box 형태로 충격흡수용 고경도 스펀지(High hardness sponge)와 섬유 강화플라스틱(Fiber-reinforced plastic) 케이스로 구성된다. 덧포장용기의 크기는 480 (L) × 370 (W) × 320 (H) mm이며, 무게는 5 kg, 내부용기의 크기는 152 (Ø) × 142 (H) mm이며, 무게는 29 kg으로 총 중량은 34 kg이다.

Fig. 2. Transport container design model.

3. 방사선 차폐해석

3.1. 차폐해석 조건

차폐해석을 위한 계산 코드로는 Los Alamos Laboratory (LANL)에서 개발한 Monte Carlo N-particle Transport Code (MCNP)인 MCNP 6.1.0 version을 사용하였다[4].

운반용기에 대한 차폐기준은 운반이 가능한 최대수량이 들어 있을 때, 운반용기 외부표면(10 cm)에서의 방사선 선량률은 시간당 2 mSv h^{-1}, 외부표면에서 2미터 떨어진 위치에서 시간당 0.1 mSv h^{-1}을 초과하지 않아야 한다.

방사화 표적물질 운반용기의 차폐성능 분석을 위해 ^{68}Ge/^{68}Ga의 핵종특성과 방사선 세기를 고려하여, 차폐체 두께에 따른 운반용기 표면에서의 방사선 선량률을 계산하였다.

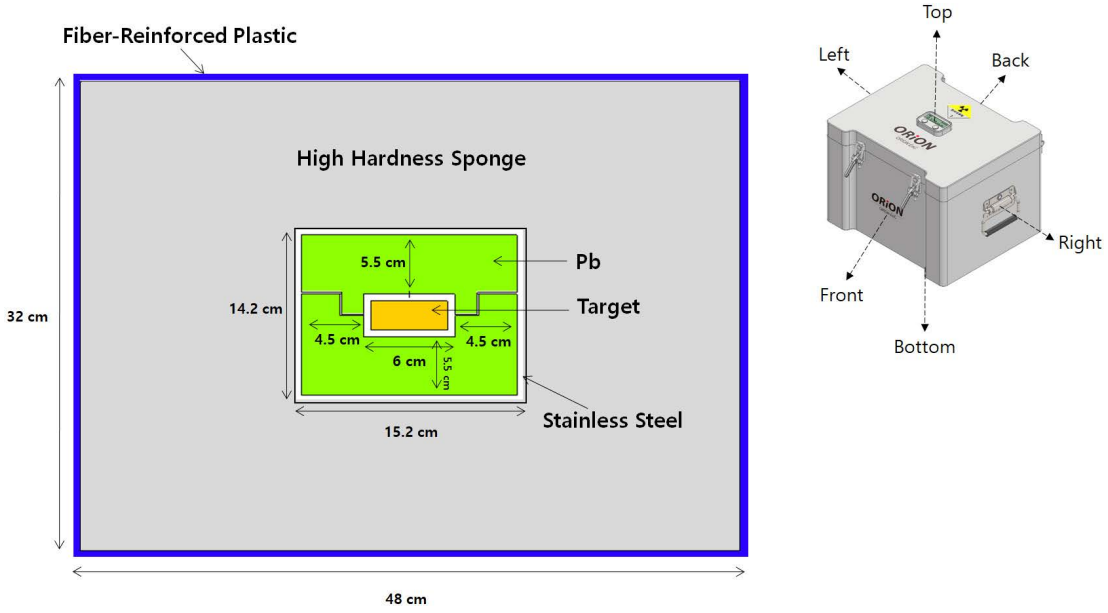

Fig. 3. Transport container full model for shielding analysis.

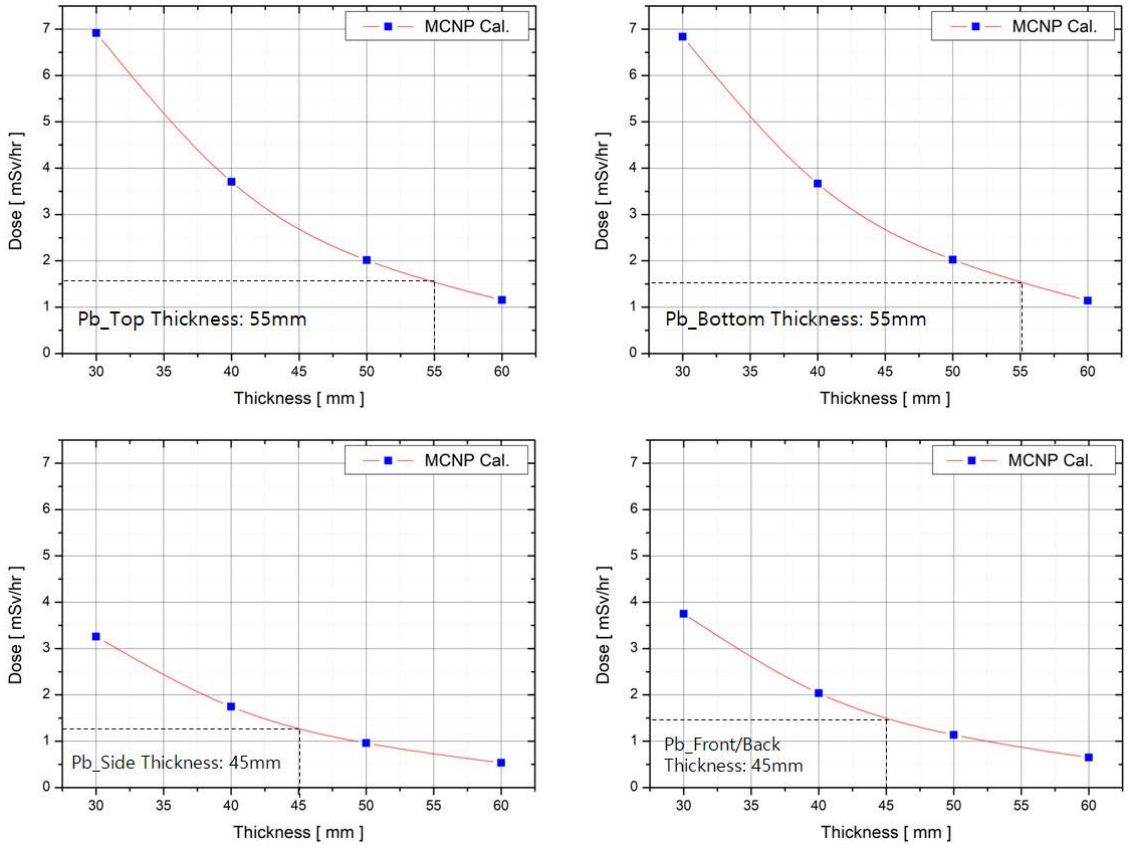

Fig. 4. Calculation results of dose rate at 10 cm according to thickness of lead shield.

3.2. 모델링 및 차폐해석

Fig. 3은 차폐해석을 위한 방사화 표적물질 운반용기의 Full Model을 보여준다.

표적물질인 $^{68}Ge/^{68}Ga$ 타겟은 내부용기의 가운데에 위치하게 되고, 원기둥 형태의 방사형 고체 선원으로 모델링하였다. 내부용기는 rcc 타입인 원기둥 형태, 덧포장용기는 rpp 타입인 육면체 형태로 모델링하였다.

외부표면 선량률 평가를 위한 계측 지점으로는 덧포장용기 표면 10 cm 지점, 6면을 관심지점으로 설정하여 방사선 선량률을 계산하였다.

Fig. 4는 방사화 표적물질 $^{68}Ge/^{68}Ga$ 고체타겟 7.18 Ci (235.6 GBq)를 기준으로, 내부용기 납(Pb) 차폐체 두께에 따른 덧포장용기 표면에서의 방사선 선량률 계산 결과를 보여준다.

방사선 선량률 계산 시, 타겟의 방사화 면적이 넓은 방향인 운반용기 상·하단에서 좌·우측과 전·후측면에 비해 표면 선량률이 높게 계산되었으며, 덧포장용기의 표면으로부터 방사선 선량률 2 mSv h^{-1} 이하를 만족하는 차폐체 납의 두께는 보수적인 차폐 선량값 고려 시, 상·하단 55 mm, 좌·우측 45 mm, 전·후측 45 mm로 계산되었다.

4. 구조해석

4.1. 구조해석 조건

구조해석을 위한 계산 코드로는 유한요소 해석 프로그램인 ABAQUS/Explicit를 사용하였다.

ABAQUS/Explicit는 외연시간 적분법(Explicit time integration)을 이용한 코드로, 고체 및 구조물의 비선형 과도응답의 동적해석을 수행할 수 있다[5]. A형 운반용기에 대한 시험요건은 "방사성물질 등의 포장 및 운반에 관한 기술기준"에 따라 낙하, 적층, 관통 및 살수 시험을 통해 용기의 구조적 안전성이 입증되도록 설계 및 제작되어야 한다. 방사화 표적물질 운반용기의 안전성 평가를 위해 정상운반조건 중 운반용기에 손상을 미칠 수 있는 가상 사고조건 중 낙하, 적층 및 관통 해석을 통해, 운반용기의 구조적 안전성을 평가하였다.

Fig. 5. Transport container full model for structure analysis.

4.2. 모델링 및 구조해석

Fig. 5는 구조해석을 위한 방사화 표적물질 운반용기의 Full Model을 보여준다. 운반용기 구조는 차폐해석 모델과 동일하게 모델링하였으며, 운반용기 재료의 기계적 물성치는 ABAQUS 코드 내 물성 데이터를 적용하였다.

운반용기의 구조적 안전성을 평가를 위해 낙하, 적층 및 관통 해석 시 충돌 접점에서의 응력 분포를 계산하였다.

4.2.1. 낙하해석

낙하시험의 기준은 5톤 이하 운반용기의 경우에 1.2 m 높이에서 용기의 안전특성에 관하여 최대손상이 발생하도록 운반용기를 바닥면에 자유 낙하시켜야 한다.

운반용기는 1.2 m 높이를 가정하여 바닥 수직방향, 상부덮개 수직방향, 수평방향, 경사방향에 대하여 낙하해석을 수행하였다. Fig. 6은 이러한 낙하해석에 대한 개념도를 나타낸다. 바닥 수직낙하 방향은 운반용기가 정상적으로 놓여 있는 방향을 의미하고, 상부덮개 수직낙하 방향은 용기가 180° 회전된 방향, 수평낙하 방향은 용기가 90° 회전된 방향, 경사방향은 용기가 지면에서 45° 각도로 모서리각의 방향이 중력방향과 일치하는 방향이다.

Fig. 7은 운반용기의 경사방향에 대한 낙하충돌 시 응력분포도이며, 다양한 사고조건으로 낙하해석 시 경사방향 조건에서 상대적으로 높은 응력이 발생하였다.

해석 결과 운반용기의 45° 경사방향에 대한 낙하조건에서 지면과 충돌 시 최대응력 지점은 덧포장용기 모서리 축에서 나타났다.

최대응력에 대한 계산값은 섬유 강화플라스틱 케이스의 보수적인 항복강도를 20 MPa로 가정했을 때, 덧포장용기 모서리 축에서 소성변형이 나타났지만, 소성변형의 범위가 덧포장용기로 제한되고 내부용기는 탄성한도 이내의 응력이 발생하는 것으로 평가되었다. 다른 낙하방향 조건에 대한 해석 결과에서도 지면과 충돌 및 용기 하중으로 인한 응력이 각 용기에 영향을 미치지만 미세한 소성변형 이외에는 내부용기는 탄성한도 이내의 응력이 발생하는 것으로 평가되었다.

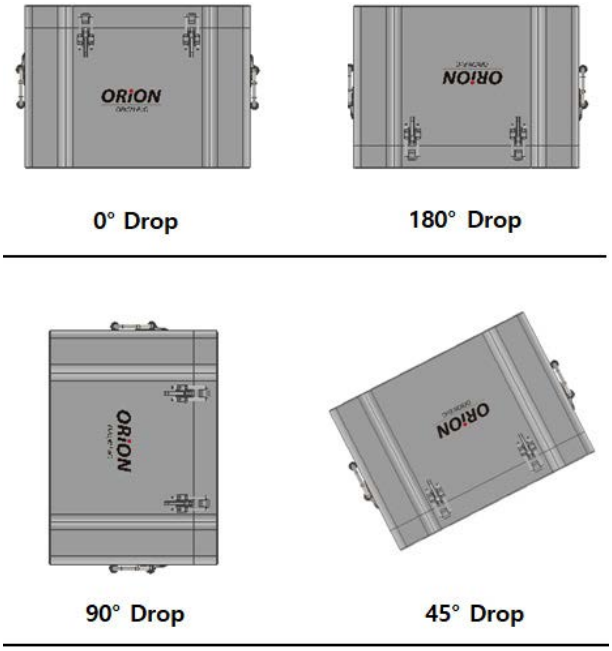

Fig. 6. Conceptual diagram of drop test.

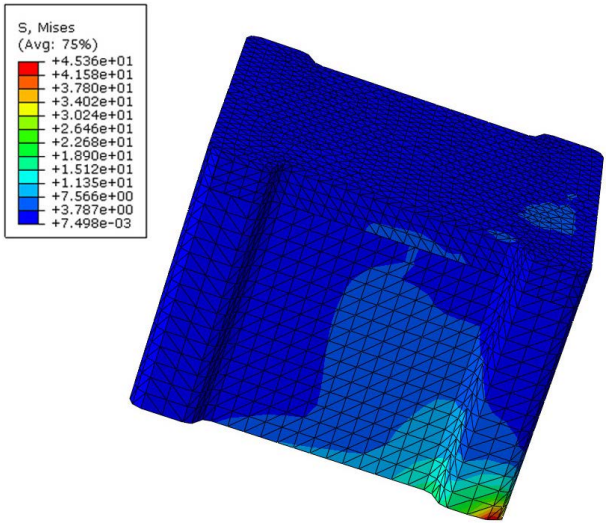

Fig. 7. Stress distribution of drop analysis.

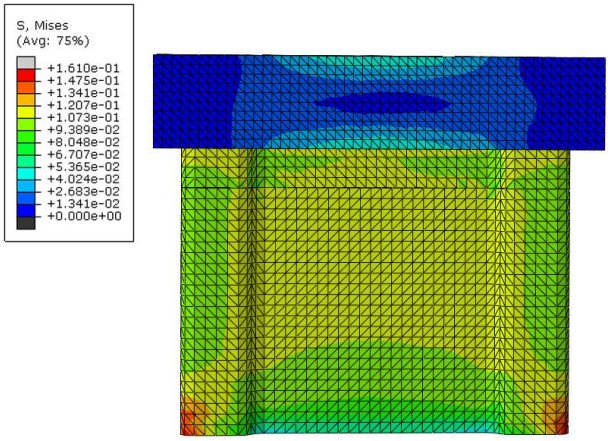

Fig. 8. Stress distribution of stacking analysis.

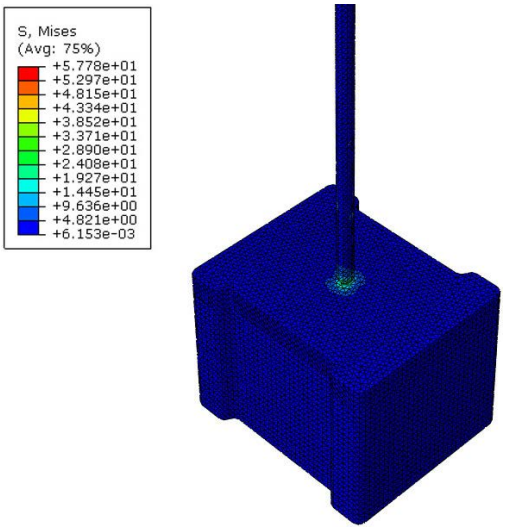

Fig. 9. Stress distribution of penetration analysis.

4.2.2. 적층해석

적층시험의 기준은 운반용기가 위로 적층이 가능한 형상인 경우에는 24시간 동안 실제 운반물 중량의 5배에 해당하는 하중이나 운반물의 수직투영 면적에 13 kPa을 곱한 값에 해당하는 하중을 받도록 해야 한다.

운반용기의 적층조건 고려 시, 최대 중량이 34 kg이므로 운반용기의 5배 중량인 170 kg의 하중 적층을 위해 고중량 플레이트를 적용하여, 24시간 동안 하중이 덧포장용기의 상부면에 균일하게 분포되도록 모델링하였다.

Fig. 8은 5배의 하중 적층조건에 대한 운반용기의 응력 분포도를 보여주고 있다.

적층해석 결과 운반용기 중량의 5배 하중에 대한 적층조건에서 최대응력은 1.5 MPa로 계산되었으며, 최대응력 지점은 덧포장용기의 모서리 축에서 나타났다.

최대응력에 대한 계산값은 섬유 강화플라스틱 케이스의 보수적인 항복강도를 20 MPa로 가정했을 때, 약 8%의 수치로, 운반용기의 5배 중량을 적층하여도 소성변형이 발생하지 않고 탄성한도 이내의 응력이 발생하는 것으로 평가되었다.

4.2.3. 관통해석

관통시험의 기준은 관통봉을 격납계통에 타격하도록 용기로부터 1 m 높이에서 운반용기의 가장 약한 부분의 중심 부위에 수직으로 낙하시켜야 한다. 관통봉은 직경이 3.2 cm이고, 중량이 6 kg이며 타격하는 부분이 반구형이고 타격으로 인하여 변형되지 않아야 한다.

관통해석을 위해 시험기준에 따라 관통봉을 설계하고, 덧포장용기의 상부면 중심으로 수직낙하하도록 모델링하여, 관통해석을 수행하였다. Fig. 9는 관통조건에 따른 관통봉의 타격 시 운반용기의 응력분포도를 보여주고 있다.

관통해석 결과 관통봉의 운반용기 타격 시, 최대응력은 14.4 MPa로 계산되었으며, 최대응력 지점은 덧포장용기의 상부면 중심 타격지점에서 나타났다. 최대응력에 대한 계산값은 섬유강화플라스틱 케이스의 보수적인 항복강도를 20 MPa로 가정했을 때, 관통시험 후에도 소성변형이 발생하지 않고, 탄성한도 이내의 응력이 발생하는 것으로 평가되었다.

5. 결 론

본 연구에서는 방사화 표적물질 ^{68}Ge/^{68}Ga의 운반을 위해 운반용기를 설계하고, 방사선 차폐해석과 구조해석을 통해 안전성을 평가하였다. 운반용기는 차폐계통인 내부용기와 격납계통인 덧포장용기로 구분된다.

방사선 차폐해석을 통해 목표한 방사능 수량(7.18 Ci)의 ^{68}Ge/^{68}Ga 고체타겟 운반이 가능한 운반용기를 설계하였으며, 설계된 운반용기의 안전성 평가를 위해 A형 운반용기에 대한 시험요건 중 낙하, 적층 및 관통시험에 대한 구조해석을 수행하여, 설계된 운반용기의 구조적 안전성을 확인하였다.

본 연구를 기반으로 방사화 표적물질 운반용기를 제작하여, 추후 생산 예정인 ^{68}Ge/^{68}Ga 고체타겟을 이용해 실제 운반을 통한 실증 연구를 수행할 계획이다.

사 사

본 연구는 2023년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 방사성동위원소 산업 육성 및 고도화 기술지원 사업(과제번호: 2021M2E7A1079155) 및 한국원자력연구원 운영사업의 지원을 통해 수행되었으며, 그 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. Nuclear Safety And Security Commission. 2021. Rules on technical standards of radiation safety control, etc. NSSC Regulation Article 29.
2. Nuclear Safety And Security Commission. 2021. Regulation on Packaging or Transport of Radioactive Material, etc. NSSC Notification 2021-2.
3. Delacroix D. 2002. Radionuclide and radiation protection data handbook. 2th ed. Nuclear Technology Publishing, Kent, pp. 64-65.
4. Lee SB, Kim CY, Jeong GS, Lee HJ, Lee YJ and Lee JW. 2018. Evaluation of Shielding Capability of 89Zr Transport Container Using MCNP Code. *J. Radiat. Ind.* **12**(3):163-168. https://doi.org/10.23042/radin.2018.12.3.163.
5. Shin SH, Choi WN, Yoon SB, Lee UJ, Park HM and Kim HR. 2022. An Approach to the Localization of Technology for a Transport and Storage Container for Very Low-Level Radioactive Liquid Waste. *J. Nucl. Fuel Cycle Waste Technol.* **20**(1):127-131. https://doi.org/10.7733/jnfcwt.2022.010.