

유한요소 해석을 통한 중·저준위 방사성폐기물 포장용기의 밀폐성 평가

이정인^{1,2} · 박상욱^{1,2} · 김동욱³ · 최창영¹ · 조용재¹ · 고대철² · 장진석^{1*}

¹한국생산기술연구원 스마트제조기술연구그룹

²부산대학교 나노메카트로닉스공학과

³경북자동차임베디드연구원 전장시스템연구실

Evaluating the Airtightness of Medium- and Low-Intermediate-Level Radioactive Waste Packaging Container through Finite Element Analysis

Jeong In Lee^{1,2}, Sang Wook Park^{1,2}, Dong-Yul Kim³, Chang Young Choi¹, Yong Jae Cho¹, Dae Cheol Ko², and Jin Seok Jang^{1*}

¹Smart Manufacturing Technology R&D Group, Korea Institute of Industrial Technology

²Nanomechatronics Engineering, Pusan National University

³Gyeongbuk Research Institute of Vehicle Embedded Technology

Abstract The increasing saturation challenges in storage facilities for Low- and Intermediate-Level Radioactive Waste call for a more efficient storage approach. Consequently, we have developed a square-structured container that features a storage capacity approximately 20% greater than that of conventional drum-type containers. Considering the need to contain various radioactive wastes from nuclear power usage securely until they no longer pose a threat to human health or the environment, this study focuses on evaluating the sealing efficacy of the newly designed rectangular container using finite element analysis. Since radioactive waste containers typically do not experience external forces except under special circumstances, our analysis simulated the impact of an external force, assuming a fall scenario. After fastening the bolts, we examined the vertical stress distribution on the container by applying the calculated external force. The analysis confirms the container's stable seal.

Keywords: Leak, Gasket, Finite Element Method, Low-and intermediate-level radioactive waste container

서 론

방사성폐기물은 배출되는 방사능 농도에 따라 고준위 및 중·저준위 폐기물로 분류되며, 각 분류별 기준에 따라 다른 처분 방식을 사용 한다¹⁾. 이 중 중·저준위 폐기물로 분류되는 방사성 폐기물은 1단계 동굴형, 2단계 표층형, 3단계 매립형 처분방식을 사용하여 처분한다²⁾.

최근 원자력발전소에서 발생하는 중·저준위 방사성폐기물의 저장시설의 포화문제가 대두되고 있다. 경주 중·저준위 방사성폐기물 처분장은 국내에서 발생하는 방사성폐기물을

처분하기 위한 복합 처분시설을 갖춘 방사성 폐기물 처분장이다³⁾. 2015년 건설 당시 자료를 토대로 방사성폐기물 발생량 예측을 통해 도출된 값은 200 L 기준 약 80만 드럼이다. 원자력 최종 종료 시점인 2100년 중·저준위 방사성폐기물 발생량을 10년 단위로 예측했을 때, 200 L 기준 711,079드럼이 발생될 것으로 예측했으나, 10년 단위가 아닌 년 단위로 재산정한 결과 200 L 기준 839,694드럼이 발생할 것으로 예측하였다⁴⁾. 따라서 보다 효율적인 방사성폐기물 저장방식 도입을 통해 공간효율성을 개선시킬 필요성이 있다.

2단계 표층처분장에서 현재 사용되고 있는 드럼형 폐기물 포장용기 적재 시, 1개의 층에 포장용기를 적재 후 포장용기 위로 그라우트 타설(10 cm)을 통해 상부 적재를 위한 바닥면을 따로 생성해야 한다. 이 과정은 적재작업이 복잡하고 비효율적이며 적층 시 층당 10 cm의 추가적인 높이가

*Corresponding Author: Jin Seok Jang
Smart Manufacturing Technology R&D Group, Korea Institute of Industrial Technology, Yuga-eup, Dalseong-gun, Daegu, 42994, Korea
Tel: +82-53-580-0152, Fax: +82-54-580-0120
E-mail: jsjang@kitech.re.kr

Table 1. Volume by packaging container shape

Type	Volume
Circle	0.263 m ³
Square	0.334 m ³

요구된다. 이는 약 9개 적재 당 1개의 포장용기를 추가 적재할 수 있는 높이이다.

사각 구조의 포장용기는 현재 사용 되고 있는 원통 드럼 형태의 포장용기와는 달리 코너 부분의 Dead Space를 활용할 수 있어 Table 1과 같이 약 20% 높은 부피를 가진다. 따라서 동일 면적대비 저장용량을 증가시킬 수 있으며, 이는 Fig. 1에 나타냈다.

중·저준위 방사성 폐기물 포장용기는 지진 등의 재난재해가 발생하였을 경우를 가정하여 포장용기의 구조건전성, 밀폐 등의 기능을 평가해야 한다. Kim⁵⁾은 유한요소 프로그램을 통해 응답스펙트럼 해석을 실시하여 사각구조 방사성폐기물 포장용기의 내진 건전성 평가 연구를 수행했다.

본 연구에서는 포장용기의 밀폐를 평가하기 위해 포장용기가 이탈하여 낙하할 수 있는 상황을 가정하여 해석을 진행했다.

드럼형 포장용기의 경우 내용물 유출이 발생하더라도 그라우트 타설을 적용하여 2차 밀봉이 가능하므로 내용물 누출의 위험이 적다. 제안된 사각구조 포장용기의 그라우트 타설을 적용하지 않기 때문에 특수한 경우가 발생하더라도 기밀성을 유지 할 수 있는 밀폐능력이 요구된다.

각종 방사성폐기물은 인체나 환경에 영향을 주지 않는 상태가 될 때까지 밀폐상태를 유지하는 기능을 가져야한다. 밀폐구조의 기밀상태 유지를 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. Bae⁶⁾는 밀폐구조의 기밀상태 유지를 위해 플랜지 볼트 체결거리에 따른 두 볼트 중심으로부터 이격거리에 대한 면압 크기 및 분포영역의 특성에 대한 연구를 유한요소 해석을 통해 진행했다. Karohika⁷⁾는 접촉폭과 접촉응력을 매개 변수로 누출 방지를 위한 금속 개스킷의 최적설계를 Taguchi 방법을 사용하여 진행했다. 본 연구에서는 유한요소 해석을 활용하여 금속 소재의 개스킷을 적용한 방사성폐기물 포장용기 체결부 면압 분석을 통해 포장용기의 밀폐성을 평가했다.

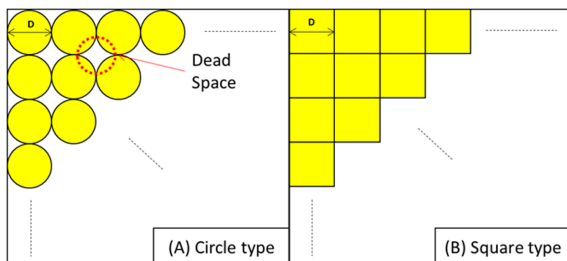


Fig. 1. Loading method by packaging container shape.

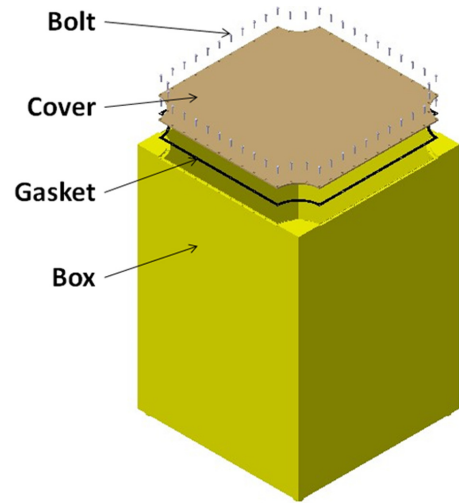


Fig. 2 Structure of square packaging container.

포장용기의 구조 및 소재

1. 포장용기 구조

새롭게 제안된 포장용기는 (615×615×884)mm 두께 10T, 무게 약 1 ton 규격의 직육면체 형상이다. 포장용기의 구조는 Fig. 2와 같이 포장용기 본체, 덮개, 개스킷으로 이루어져 있고, 본체와 덮개 사이에 개스킷을 삽입하여 내부 물체의 누출을 방지한다.

포장용기(Box)의 상단 코너부는 Fig. 2와 같이 운반 용이성 및 낙하 시 충격에 견딜 수 있도록 라운드 형상으로 설계하였으며, 개스킷(Gasket) 및 포장용기 덮개(Cover)의 형상은 체결의 용이성을 위해 그림과 같이 설계했다.

2. 포장용기 및 볼트 소재

포장용기 및 포장용기 덮개의 소재로는 구상흑연주철을 사용했다. 구상흑연주철 소재는 중량 대비 단가가 저렴하며, 높은 주조성, 절삭성, 내식성을 가진 것이 특징이다⁸⁾.

금속 개스킷은 삽입되는 포장용기의 소재보다 연한 소재를 사용해야 하므로 구상흑연주철보다 강도가 낮은 소재인 일반 구조강을 적용했다⁹⁾.

포장용기 체결에 사용되는 볼트는 KS규격에 따른 SUS304 소재, M5규격볼트로 선정했다.

유한요소 해석

1. 외력 조건

중·저준위 방사성 폐기물 포장용기는 지진 등의 재난재해가 발생하였을 경우, 포장용기가 이탈하여 낙하할 수 있는 상황을 가정하여 폐기물 포장용기의 구조건전성을 평가한다.

포장용기는 특수한 경우를 제외하고는 일반적으로 정적인

상태를 유지하므로 내용물 누출의 위험이 적다. 하지만 포장용기가 낙하할 경우, 밀폐가 유지되지 않을 수 있으므로 구조건전성 평가 과정에서 적용한 낙하상황을 가정했다. 포장용기 외력으로는 충돌 시, 덮개에 걸리는 응력(내력)을 바탕으로 포장용기의 밀폐성을 평가했다.

1.1. 포장용기의 낙하해석

포장용기 낙하해석은 ASTM-D5276 기준에 따라 수직(바닥면과 지면이 수평이 되는 자세), 무게중심(무게중심과 모서리의 꼭짓점을 이은 선과 지면이 수직이 되는 자세), 무게중심측면낙하(무게중심과 모서리의 중심을 이은 선과 지면이 수직이 되는 자세) 총 3가지 기준으로 해석을 진행했다. 해석결과, 포장용기에 가장 높은 하중이 가해진 각도인 무게중심낙하 자세로 내부에 유체를 90% 채운 포장용기를 Table 2와 같이 회전시킨 뒤, 원자력 안전법 방사성물질 등의 포장 및 운반에 관한 규정 제 45조에 따라 1.2 m의 높이에서 낙하시켰다¹⁰⁾. 해석에 적용한 포장용기의 형상은 Fig. 3과 같다. 포장용기와 내부 유체와의 구조 연성 해석 기법을 사용하였으며, 유체구조 연성해석의 경우 Lagrange Method를 사용하여 해석을 진행했다. Lagrange Method는 구조를, Eulerian Method는 유체의 유동을 계산할 때 사용하는 것이 일반적이다. Eulerian Method와 Lagrange Method를 병행하여 사용할 경우, 수렴성의 문제 및 장시간의 해석 시간을 필요로 한다¹¹⁾. 본 구조의 경우 유체의 유동에 초점을 맞추는 것이 아닌, 구조에 작용하는 유체의 영향에 초점

Table 2. Drop test orientation of the packing container

X	34°
Y	0°
Z	37°

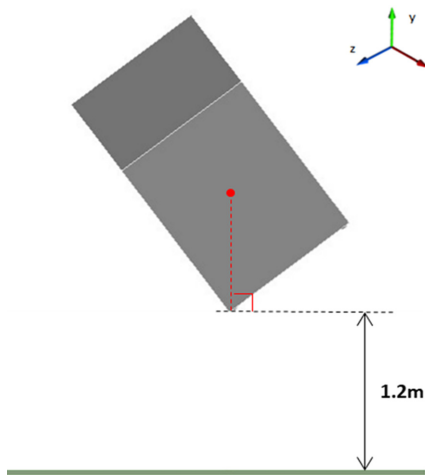


Fig. 3. Drop test height and orientation image of packaging container.

Table 3. Material Properties of FCD400

Poisson's ratio	0.4
Young's modulus	227 GPa
Yield strength	382 MPa
Ultimate tensile strength	476 MPa
Tangent modulus	940 MPa

Table 4. Area and Normal stress values for extracting external force values

Area (A)	0.335 m ²
Normal stress (σ)	860 kPa
Force (P)	288.1 kN
Maximum Equivalent stress	70.8 MPa

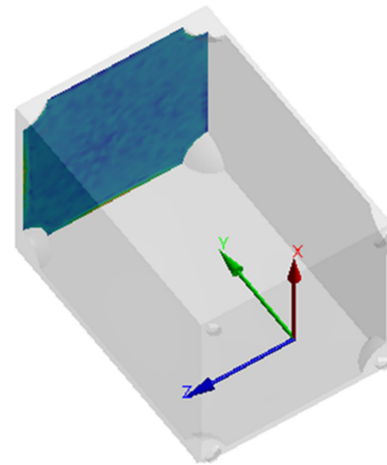


Fig. 4. Vertical stress on the cover of the packaging container.

을 두기 때문에 Lagrange Method를 사용하여 해석을 진행했다. 프로그램으로는 ANSYS Workbench를 사용했다.

내부 유체는 밀도 998 kg/m³ 물을 사용했고, 포장용기의 소재는 Table 3의 구상흑연주철(FCD400) 물성정보를 사용했다¹²⁾. 유한요소 모델은 절점 수 201,352개, 요소 수 397,571개로 구성했다.

Fig. 4와 같이 포장용기가 지면과 충돌한 시점 포장용기

Equivalent stress
Unit : MPa

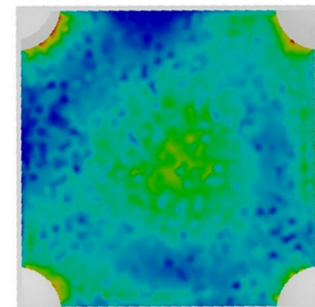
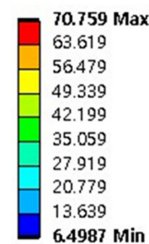


Fig. 5. Equivalent stress distribution of cover.

Table 5. Material Properties of Structural Steel

Poisson's ratio	0.3
Young's modulus	210 GPa
Yield strength	250 MPa
Ultimate tensile strength	480 MPa

덮개의 평균 수직응력을 식(1)과 같이 하중으로 변환하여 외력조건으로 적용했다. 이는 Table 4에 표기했다. 또한 Fig. 5와 같이 낙하해석 결과 포장용기 덮개면의 응력은 70.8 MPa로, 포장용기 상부에는 낙하에 의한 소성변형이 발생하지 않는 것을 확인 할 수 있다.

$$P = \sigma \times A \quad (1)$$

2. 포장용기 밀폐해석 조건

2.1. 소재

포장용기에 적용되는 구상흑연주철 소재는 Table 3의 물성정보를 사용했다. 개스킷의 소재는 Table 5와 같이 포장용기에 사용되는 구상흑연주철보다 강도가 낮은 일반 구조강(Structural Steel)소재의 물성정보를 적용했다.

2.2. 경계조건

해석조건으로는 포장용기가 지면에 고정되는 부분에 6자유도 구속조건을 적용했다. 포장용기 낙하해석을 통해 추출한 포장용기 덮개에 걸린 하중을 Fig. 4의 Y축 방향으로 수직응력을 적용했으며 유한요소 모델은 절점 수 1402,522개, 요소 수 678,299개로 구성했다.

포장용기와 개스킷의 경우 두 물체 간 서로 작용하는 미끄럼이 작고 변형이 크게 일어나지 않는다. 따라서 물체간의 분리는 발생하지만, 미끄럼은 발생하지 않는 접촉조건을 부여했다.

볼트 체결을 구현하기 위해 포장용기 및 포장용기 덮개에 직경 5 mm의 Beam 요소 생성 뒤 볼트 축력을 부여하여 체결을 구현했다. 볼트의 체결력은 밀폐성에 영향을 미치는 가장 중요한 요소이다. 볼트의 체결력이 부족할 경우, 밀폐력이 떨어질 수 있고, 반면 체결력이 과다한 경우 크랙 발생 등으로 인해 포장용기에 손상을 입히거나 볼트가 파손될 수 있다¹³⁻¹⁴. 따라서 볼트가 파손되지 않으며 포장용기와 최대한 결합할 수 있는 축력인 KS규격에 명시되어 있는 최소 인장 하중의 80%를 적용했다¹⁵. 최소인장하중의 값은 Table 6과 같다.

Table 6. Load value of M5 bolt

Minimum tensile load	5960 N
80% of Minimum tensile load	4768 N

포장용기의 밀폐성 평가

1. 밀폐성 평가 기준

포장용기의 기밀성을 판단 기준은 포장용기와 덮개의 결합부에 부여된 압축응력분포로 확인했다. 포장용기가 Y축 기준으로 압축응력을 받을 때, 밀폐조건을 충족한다.

응력은 면압 형성의 근원이므로 기밀을 위해서는 필수적인 요소이다. 하지만, 항복응력을 초과한 면압은 포장용기 및 개스킷에 소성변형을 일으켜 밀폐 성능에 영향을 미칠 수 있다¹⁶⁻¹⁷. 따라서 본 연구에서는 포장용기 밀폐성 평가의 기준으로 포장용기에 압축력이 작용되되, 항복응력을 초과하지 않아 소성변형이 발생하지 않을 때 포장용기가 밀폐된 상태로 판단했다.

2. 밀폐성 평가

2.1. 유한요소 해석 결과 분석

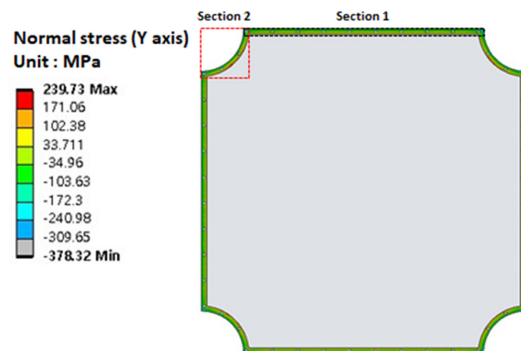
유한요소 해석을 통해 포장용기 덮개의 접촉면에 부여되는 응력분포를 분석했다. 포장용기 접촉면 분석결과, 내부의 일부 영역에는 인장응력이 발생하지만, 외부 영역에는 균일한 수준의 압축응력 분포가 나타났다. 보다 면밀한 분석을 위해 Fig. 6와 같이 포장용기의 구간을 길이 455 mm의 직선구간 Section 1과 반지름 80 mm, 길이 125.66 mm의 곡선구간 Section 2로 분류하여 분석을 진행했다.

포장용기 형상은 대칭 구조이므로 4개의 변 중 한 개의 변을 선정하여 직선 및 곡선구간으로 구역을 나누었다. 또한 각 구간의 안쪽 및 바깥쪽 모서리에 경로를 설정하여 각 경로에 부여된 응력분포를 각각 분석한 뒤 결과를 토대로 사각구조 포장용기의 밀폐성을 평가했다.

2.1.1. Section 1 해석결과

Section 1의 외부 및 내부의 응력분포는 Fig. 7과 같이 나타났다. 내·외부 길이별 분포된 수직응력 값은 Fig. 8과 같이 나타났다.

내부 응력분포 분석결과, 볼트의 체결력을 가장 많이 받

**Fig. 6.** Section profile of cover.

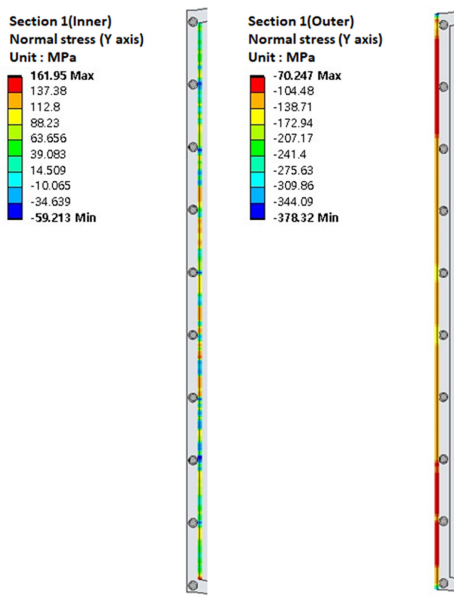


Fig. 7. Stress distribution of section 1.

는 위치인 볼트 중심의 경우 최대 59.21 MPa의 압축응력이 나타났다. 그러나 볼트 중심을 제외한 볼트와 볼트 사이 영역의 경우 체결력에 비해 포장용기 덮개에 수직으로 부여된 하중의 영향을 더 많이 받아 최대 239.73 MPa의 인장응력이 발생하는 것으로 나타났다.

외부 응력분포 분석결과, 포장용기 외부 전체 구간에 70 MPa 이상의 압축응력이 발생했고, 최대 378.32 MPa의 압축응력이 발생했다. 볼트 중심 위치에 나타난 압축응력의 경우 볼트와 볼트 사이 영역에 나타난 압축응력에 비해 약 30 MPa 이상 높은 값이 나타났다.

Section 1의 내부 볼트와 볼트 사이 영역에는 최대 약 162 MPa의 인장응력이 나타났고, 볼트 중심부의 경우 최대 59 MPa의 압축응력이 발생했다. 볼트와 볼트 사이 영역에

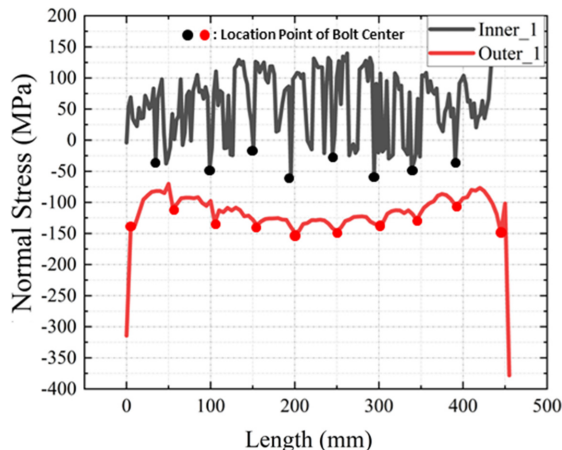


Fig. 8. Normal Stress-Length correlation of section 1.

서 인장응력이 발생해, 완벽한 밀폐를 유지한다고 보기 어렵다. 하지만, 외부 응력분포 결과 전 구간 최소 50 MPa, 최대 378 MPa의 압축응력이 발생한 것을 확인할 수 있다. 따라서 Section 1 구간에서 포장용기가 볼트 체결에 의해 밀폐된 상태로 판단할 수 있다.

2.1.2. Section 2 해석결과

Section 2의 내부 응력분포는 Fig. 9과 같이 나타나며, 외부 응력분포는 Fig. 10와 같이 나타났다. 내·외부 길이별 분포된 수직응력 값은 Fig. 11과 같이 나타났다.

분석결과, 내부 전체 구간에 최대 239.73 MPa, 최소 64.12 MPa의 인장응력이 발생했다. 최대 인장응력이 발생하는 지점은 볼트와 볼트의 중간 지점으로 나타났으며, 볼트 중앙부의 경우 비교적 낮은 인장응력이 발생한 것을 확인할 수 있다.

외부 응력분포 분석결과, 포장용기 외부 전체 구간에 90 MPa 이상의 압축응력이 부여되었고, 최대 325.36 MPa의 압축응력이 발생했다. 볼트 중심 위치의 압축응력은 볼트와 볼트 사이 영역에 나타난 압축응력에 비해 약 50 MPa 이상 높게 나타났다.

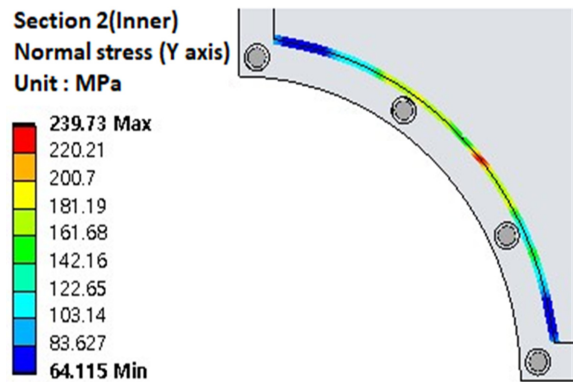


Fig. 9. Stress distribution of section 2 (Inner).

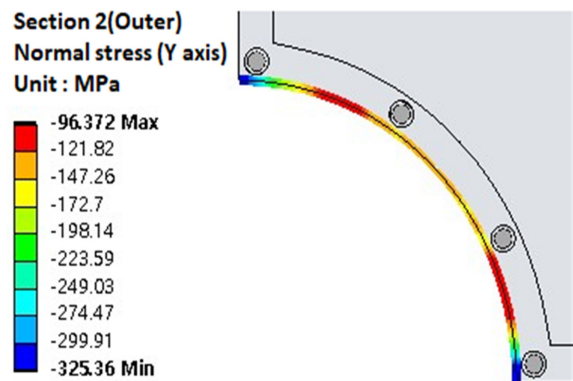


Fig. 10. Stress distribution of section 2 (Outer).

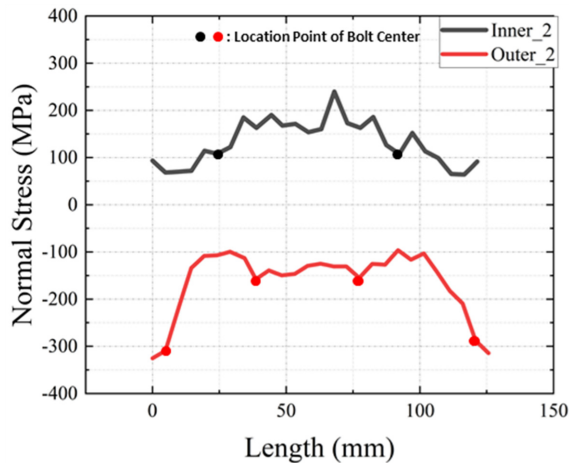


Fig. 11. Normal stress-Length correlation of section 2.

Section 2의 내부 전 영역에는 60 MPa 이상의 인장응력이 나타났고, 볼트와 볼트 사이 일부 영역에 최대 239.73 MPa의 인장응력이 발생했다.

내부 영역 전체에 인장응력 분포가 나타났지만, 외부응력 분포 결과를 보았을 때 전 구간 최소 90 MPa, 최대 325.36 MPa의 압축응력이 발생한 것을 확인할 수 있다. 따라서 Section 2 구간에서 포장용기가 볼트 체결에 의해 밀폐된 상태로 판단할 수 있다.

결과 및 고찰

본 연구에서는 새롭게 제안된 사각구조 중-저준위 방사성 폐기물 포장용기의 밀폐를 유한요소해석 프로그램인 ANSYS Workbench를 사용하여 검증했다.

(1) 새롭게 제안된 포장용기의 밀폐를 검증하기 위해 낙하충돌해석을 진행하였으며, 유체 구조 연성해석을 진행하여 포장용기 덮개의 하중 값을 도출 했다.

(2) 포장용기에 볼트 체결 모델을 구현하였으며, 유체 구조 연성해석에서 도출한 하중 값을 외력 값으로 적용하여 포장용기 밀폐해석을 진행했다.

(3) 밀폐를 검증하기 위해 포장용기 접촉면에 발생한 응력을 구역을 나누어 각 경로에 부여된 응력분포를 분석했다.

(4) 분석 결과, 외부구간 70 MPa 이상, 최대 378 MPa의 압축응력이 발생하여 포장용기가 밀폐된 상태로 판단했다.

본 연구에서는 해석을 통해 포장용기의 밀폐성을 분석하였지만, 체결력 및 면압과 밀폐의 상관관계에 대한 보다 면밀한 분석을 위해서는 추가적으로 실험을 통한 검증이 필요하다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국생산기술연구원(EH-23-0006)과 산업통상

자원부 및 산업기술평가관리원(KEIT-20015706) 연구비 지원으로 수행되었음

참고문헌

1. Yun, S. T. 2008. Site selection for low and intermediate level radioactive waste disposal facility in Korea. Progress in Nuclear Energy, 50(2-6), 680-682.
2. Baik, J. K, Jung, S. W and Son, J. W, 2022. A Study on Applying Methods of Waste Package for Decommissioning Wastes of Nuclear Power Plant. Journal of Energy Engineering, Vol. 31, No. 4, pp.24-33.
3. Seo, K. W., Kim, Y. J., Jung, S. H. and Choi, K. Y. 2015. Reinforced Concrete Silo Construction Project for Low Level Radioactive Waste Disposal. Magazine of the Korea Concrete Institute, 27(4), pp. 45-49.
4. Namgoong, J. 2020. A Study on the prediction of low and intermediate level radioactive waste generation for efficient management of disposal sites in Korea, Chosun University, Korea.
5. Kim, D. Y., Kim, J. W., & Jang, J. S. 2022. Seismic Integrity Analysis of Radioactive Waste Containers Using the Response Spectrum Method. Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers - A, 46(4), 421-428.
6. Myung-whan Bae, & Su-min Kim. 2019. A Study on Characteristics of Magnitude and Distribution Area for Contact Pressure Relative to Separated Distance from Middle of Two Bolts by Tightening Distance Between Flange Bolts. Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers - A, 43(2), 101-110, 10.3795/KSME-A.2019.43.2.101.
7. Karohika, Im & Haruyama, Shigeyuki & Choiron, Moch & Nurhadiyanto, Didik & Antara, I & Budiarsa, Nyoman & Widhiada, Wayan. 2020. An Approach to Optimize the Corrugated Metal Gasket Design Using Taguchi Method. International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology. 10. pp.2435-2440.
8. Kim, S. D. 2022. A Study of Microstructure control for improvement of the Mechanical Properties of Ductile Cast Iron, Pukyong National University, Korea
9. Yun, S. T. 2008. Site selection for low and intermediate level radioactive waste disposal facility in Korea, Progress in Nuclear Energy, Volume 50, Issues 2-6, pp. 680-682.
10. 과학기술부 고시 제 2001-23호, “방사성물질 등의 포장 및 운반에 관한 규정”.
11. Liu, G R., Liu, M. B. 2003. Smoothed Particle Hydrodynamics- a meshfree particle method, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., ISBN 981-238-456-1, P5-12.
12. Hayato Mouri, Wilfried Wunderlich, Morihito Hayashi, 2009. New aspects about reduced LCF-life time of spherical ductile cast iron due to dynamic strain aging at intermediate temperatures, Journal of Nuclear Materials, Volume 389, Issue 1, Pages 137-141, ISSN 0022-3115.
13. Gore, P., Sujata, M. and Bhaumik, S.K. Stress Corrosion Cracking of Ring Type Joint of Reactor Pipeline of a Hydrocracker Unit.

J Fail. Anal. and Preven.

14. Lee, M. Y. Jeong, D. H. and Kim, B. T. 2018. A Study on the Behavior of Class 900 Flange Joints with Metal Ring Gaskets. *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, 17(1), pp. 34-41.
15. Lee, M. Y. 2016. A Study on the Contact Characteristics of Bolt Flange Connections with metallic gasket, Pukyong National University, Korea.
16. IN, S. R. and Yoon, B. J. 2006. Structure analysis of metal gaskets in tightened flanges. *Applied Science and Convergence Technology*, 15(5), pp. 475-484.
17. Nurhadiyanto, Didik & Mujiyono, Mujiyono & Sutopo, & Ristadi, Febrianto. 2018. Simulation Analysis of 25A-Size Corrugated Metal Gasket Coated Copper to Increase Its Performance. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 307.