

구조 안전성을 고려한 사용후핵연료 처분용기 단면의 최적설계

서지혜¹ · 신창민^{1,*} · 윤형주¹ · 이상환¹

¹한국원자력환경공단 고준위처분연구팀

Optimization of the Spent Nuclear Fuel Disposal Cask Considering Structural Safety

Jihye Seo¹, Changmin Shin^{1,*}, Hyungjoo Yoon¹ and Sanghwan Lee¹

¹R&D Institute of Radioactive Wastes, Korean Radioactive Waste Agency,
174, Gajeong-ro, Yuseong, Daejeon 34129, Republic of Korea

Abstract - Spent nuclear fuel from nuclear reactors needs to be disposed of in isolation from humans and the environment as much as possible due to high heat and high radioactivity. Among the disposal methods of spent nuclear fuel, deep geological disposal, which is disposed of in the ground more than 500 m underground, is being considered as the most promising method. In the case of deep geological disposal, an engineered barrier is required to prevent radioactive material from leaking from the disposal container and spreading to the natural environment, and structural safety and criticality safety are required. In this study, to secure the structural safety of the disposal container and at the same time increase the handling efficiency, a study was conducted on a method of reducing the weight through structural change. During deep geological disposal, the critical safety evaluation of engineered barriers including the spent fuel copper disposal container was performed to calculate the interval among baskets for the spent fuel required for the design of the disposal cask. And by applying the analytical stress calculation method based on the beam theory, the efficient optimization of the cross-section of the disposal cask was performed. It was confirmed that a design that can have handling efficiency while securing structural and critical safety through the developed optimal design process can be secured.

Key words : Disposal cask, Design optimization, Spent nuclear fuel, Structural safety, Criticality safety

서 론

원자로에서 수명이 다한 사용후핵연료는 고열/방사성으로 인해 인간과 환경으로부터 격리되어 처분되어야 한다. 사용후핵연료의 처분은 다양한 방안이 고려된 바 있으나, 현재 여러 국가에서 가장 유력하게 고려되고 있는 방안은 지하 약 500~1,000 m 아래 깊이에 구축한 시설에 처분 후 폐쇄하는

심지층 처분(deep geological disposal) 방안이다(최 등 2009). 심지층 처분시스템은 초장기간에 걸쳐 사용후핵연료를 보관하는 동안 자연환경으로 방사성물질이 유출되는 것을 방지해야 하며, 이를 위해 안전성이 입증된 공학적 방벽(engineering barrier)을 갖추어야 한다. 처분시스템 공학적 방벽은 처분장에 지하수가 유입되어 사용후핵연료가 임계상태에 도달하지 않도록 하고 지진이나 단층 등 외부 하중으로부터 사용후핵연료를 안전하게 보호할 수 있어야 한다(이 등 2013). 공학적 방벽은 사용후핵연료가 밀봉되어 포장되는 처분용기(disposal

* Corresponding author: Changmin Shin, Tel. +82-42-601-5344,
Fax. +82-42-601-5389, E-mail. auver97@korad.or.kr

cask)와 외부충격을 흡수하고 지하수 유입을 차단하는 완충재(buffer), 처분공 및 처분터널 폐쇄 후 설치되는 뒷채움재(backfill) 등으로 구성된다. 처분용기는 방사성 물질의 유출을 막고 외부 하중으로부터 보호하는 1차 방벽의 역할을 하며 스웨덴과 같은 처분 선도국은 장기간 부식방지를 위해 구리 재질의 외부 용기를 개발하였다(Raiko and Salo 1996; Raiko et al. 2010; Raiko 2013). 국내에서는 티타늄이나 텅스텐 재질의 처분용기에 대한 검토도 수행된 바 있다(박 등 2013). 이러한 처분용기가 받는 외부 하중은 내부 용기에서 발생하는 열을 비롯하여 지진이나 단층으로 인한 직접적 하중, 그리고 지하수 유입으로 인해 공학적 방벽 구성요소인 완충재가 팽창하여 용기에 가하는 팽윤압 등이 있다(Kwon and Choi 2007). 사용후 핵연료 처분분야에서 가장 기술력이 앞서가고 있는 스웨덴의 방폐물 전담기관인 SKB와 핀란드의 전담기관 POSIVA 등은 심지층 처분 시 처분용기가 받는 외부 하중에 대해 실험뿐만 아니라 해석적으로도 평가하는 연구를 수행한 바 있다(Raiko and Salo 1996; Borgesson et al. 2009; Raiko et al. 2010). 국내에서는 한국원자력환경공단과 한국원자력연구원 등에서 국산 처분용기에 대한 연구와 평가를 수행하였다(이 등 2013). 국내에서 주로 연구된 4다발 처분용기는 중량이 약 20톤을 초과하여 취급이 까다로울 것으로 예상되며, 처분을 위한 사용후 핵연료 포장이 처분시설에서 이루어지지 않는 경우 운반에 대한 부담도 예상할 수 있다. 처분용기는 임계나 구조 관점에서 지나치게 보수적으로 설계되어 단면적이 증가할 경우 중량이 지나치게 커져 취급 효율성이 떨어지게 되고, 한편으로는 용기 단면적이 증가할 경우 구리 오버팩의 부피가 늘어나 원자재 가격 부담이 늘어나 경제성이 떨어지게 된다. 이에 한국원자력환경공단은 심지층 처분용기의 구조적 안전성을 확보하면서 동시에 취급 효율성 증가 및 부피 감소를 위해 구조 변경을 통한 중량 절감방안에 대한 연구도 수행하여 왔다(Shin et al. 2018; Shin et al. 2019). 본 연구에서는 이전의 연구에서 도출된 한국원자력환경공단의 처분용기 형상에 대해 가혹한 외부 구조하중 및 임계조건에 대해 안전성을 유지하면서 중량을 절감할 수 있도록 최적의 치수를 찾아내는 구조 최적화 연구를 수행하였다. 최적설계를 위해 임계 안전성을 위해 최소로 요구되는 바스켓 간격을 찾아내기 위해 MCNP 해석을 수행하고, 외부 구조하중에 대한 최소 안전계수와 최소 바스켓 간격을 설계 제한 조건으로 두어 처분용기의 무게를 최소화하도록 목적함수를 두었다. 빠른 최적 설계 적용을 위해 외부 구조하중에 대한 응력 계산을 고체역학 법 이론에 근거한 이론해로 계산하였고, 이를 상용 유한요소 해석툴 ABAQUS를 활용한 전산해석으로 검증하였다.

처분용기의 구조평가 방법

사용후핵연료 처분용기에 대한 연구는 SKB와 POSIVA 등

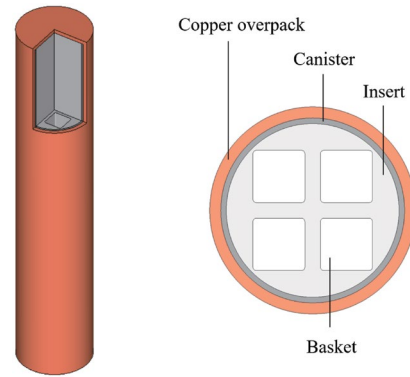


Fig. 1. Shape of the disposal cask.

에서 많이 수행된 바 있다. SKB와 POSIVA 등의 처분용기 기본 설계 형상은 Fig. 1과 같으며, 캐니스터 내부에 주철로 된 인서트(insert)로 채워지고 인서트 내부 바스켓(basket)에 사용후핵연료가 담겨 밀봉된다. 이러한 캐니스터가 장기간 부식으로부터 보호될 수 있도록 겉에는 5 cm 이상 두께의 구리 오버팩(overpack)이 감싸는 구조이다. 한국원자력환경공단과 한국원자력연구원이 수행한 국내형 처분용기 개발 연구는 이러한 기본 처분용기 형상을 바탕으로 치수 등의 기본적인 형상 정보만 변경되었다(이 등 2013).

사용후핵연료 처분용기가 받는 구조하중은 심지층처분 깊이에 따라 받게 되는 정수압(hydraulic pressure, p_h)과 지진 및 단층으로 인한 하중, 완충재 침수에 따라 발생하는 팽윤압(swelling pressure, p_s) 등이 있다. 완충재의 대표적인 재료인 벤토나이트(bentonite)는 수분이 스며드는 경우 부피가 팽창하는 특성이 있으며, 이로 인해 처분용기 표면에 직접적인 압축 하중을 가할 수 있다. SKB의 연구 등에서는 이러한 팽윤압이 비대칭으로 가해지는 경우 매우 가혹한 구조하중 조건을 야기할 수 있다고 언급하고 있다. SKB와 POSIVA의 연구(Raiko and Salo 1996; Borgesson et al. 2009)에는 Fig. 2(a)와 같이 매우 보수적인 가정을 둔 가혹한 조건의 비대칭 팽윤압 구조하중 케이스가 제시되어 있다. 처분용기가 심지층에 처분되는 경우 처분심도압 즉 정수압을 받게 되며, 이러한 정수압은 처분용기의 뚜껑부 굽힘을 유발하여 이 위치에 가장 높은 응력을 발생시킨다. 이러한 뚜껑부 굽힘으로 발생하는 응력은 대부분 처분용기 캐니스터 뚜껑 두께를 늘리면 자연스럽게 완화시킬 수 있다. 하지만 비대칭 팽윤압의 경우에는 처분용기가 충분한 굽힘강성을 가지지 않으면 캐니스터 표면에 높은 인장응력을 유발할 수 있으며, 따라서 처분용기 설계 시 중요하게 고려해야 할 필요가 있다. 본 연구에서는 처분용기 구조평가 시 이러한 비대칭 팽윤압 하중을 적용하였으며, 팽윤압 값은 처분시스템에 적용되는 벤토나이트 완충재의 물성실험을 통해 구해야 하나 현재는 관련 정보가 없으므로 참고문헌을 바탕으로 7 MPa를 적용하였다(이 등 2013). 처분

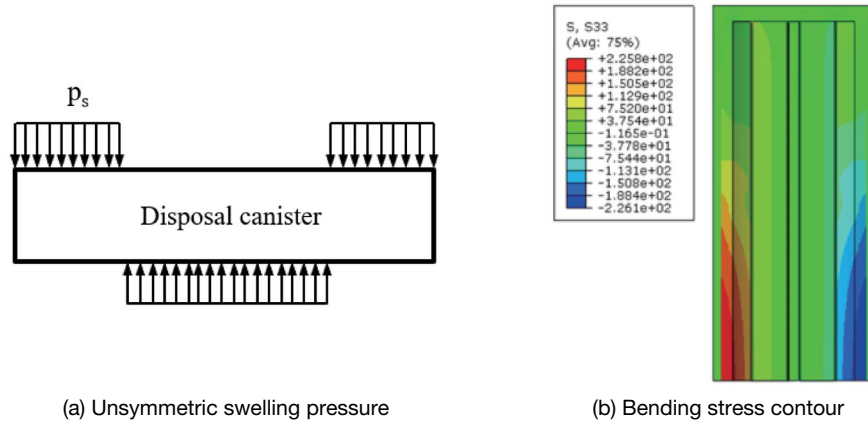


Fig. 2. External loads and bending stress contour on the disposal cask.

용기에 작용하는 하중은 정수압과 팽윤압이 동시에 작용하는 경우를 고려할 수 있으나, 이전 연구 등에서 팽윤압으로 인해 발생하는 굽힘응력이 정수압에 의해 유발되는 응력보다 상대적으로 더 크므로 조합 하중 대신 팽윤압 단일 하중이 주로 고려되고 있어, 본 연구에도 동일하게 팽윤압만 고려하였다 (Raiko *et al.* 2010). 처분용기의 구조평가는 상용유한요소 해석틀인 ABAQUS를 사용하였으며, 해석 결과의 정확성을 위해 육면체 요소로 모델링하였다. Fig. 2는 비대칭 팽윤압이 하중으로 걸리는 경우 처분용기에 나타나는 대표적인 굽힘응력의 양상을 보여준다. 처분용기의 구조 안전성 평가 시에는 처분용기에 걸리는 최대 인장응력과 최대 응력이 나타나는 캐니스터 재료의 파단응력 간의 비율로 안전계수(S_f)를 구하며, 안전계수가 2.0을 넘는지 여부로 안전성을 판단한다.

처분용기의 핵임계평가

1. 핵임계평가 절차

처분용기의 핵임계평가는 사용후핵연료의 미연소된 핵분열성 물질로 인해 정상 및 사고조건에서 핵임계 사고가 발생하지 않음을 입증하기 위해 수행하는 것이다. 핵임계평가 절차는 기존 연구 (Anttila 1996; 이 등 2013)를 참조하여 수행되었으며, 평가 기준 사용후핵연료의 제원은 Table 1과 같다. 해석 대상은 처분용기와 처분용기를 둘러싸고 있는 벤토나이트 완충재, 그리고 천연방벽에 해당되는 암반이다. 처분용기의 경우 임계평가에 큰 영향을 주지 않는 관계로 캐니스터와 인서트의 재질을 동일하게 두어 모델링하였다.

처분용기의 핵임계평가 시에는 두 가지 가정이 사용된다. 첫 번째로는 사용후핵연료 집합체는 제어봉이나 가연성 독봉을 포함하지 않는다는 것이며, 두 번째는 정상조건에서의 핵임계평가는 처분시스템이 건전성이 유지하는 상태를 해석하고, 침수조건에서의 핵임계평가는 처분시스템이 제 형태

Table 1. Specifications of spent nuclear fuel for evaluation

Nuclear fuel type	Plus7
Initial enrichment	4.5 wt.% U-235
Decay heat	55 GWd·MtU ⁻¹
Cooling time	40 yrs
Specific power	37.5 MW·MtU ⁻¹
Reloading period	60 d

를 유지하되 지하수에 의해 최적 감속조건을 이룰 때의 핵임계도를 평가한다는 것이다. 핵임계평가를 위해 Fig. 3과 같이 MCNP 코드를 활용하여 모델링하였다. 본 연구에서 핵임계평가의 목적은 설계 결과의 핵임계 안전성을 확인하는 목적이라기보다는 핵임계 안전성을 담보할 수 있는 핵임계평가 결과에 가장 큰 영향을 주는 핵연료(또는 바스켓) 간 최소 간격을 확인하고자 함이며, 이로부터 최적설계에 필요한 제한조건을 도출하는 데 있다.

2. 핵임계평가 결과

처분용기의 핵임계평가에는 본 연구에서 고려하고 있는 최적설계 대상이 되는 두 개의 모델을 사용하였다. Fig. 4(a)는 기존 연구에서 검토된 처분용기의 형상이며, Fig. 4(b)는 처분용기 내부 인서트를 제거하고 대신 캐니스터 외벽에 보강용 오버팩을 덧씌우고 내부에 지지대를 설치하여 강성을 보강한 모델이다. 내부지지대 모델은 기존 용기의 중량을 절감시키기 위해 기존 모델에서 내부 인서트를 제거하고, 이로 인해 처분용기 뚜껑부의 처짐방지 및 비대칭 팽윤압 하중에 대한 굽힘강성 증가를 위해 내부에 지지대를 추가한 것이다. 이전 연구에서 내부지지대만으로 굽힘강성 보완이 부족함이 발견되어 최종적으로는 캐니스터 주변에 철제 오버팩 보강이 동반된 모델이다 (Shin *et al.* 2018). Fig. 4(c)는 최근 연구에서 새롭게 검토하고 있는 환형 단면 처분용기의 형상이다. 중앙지지

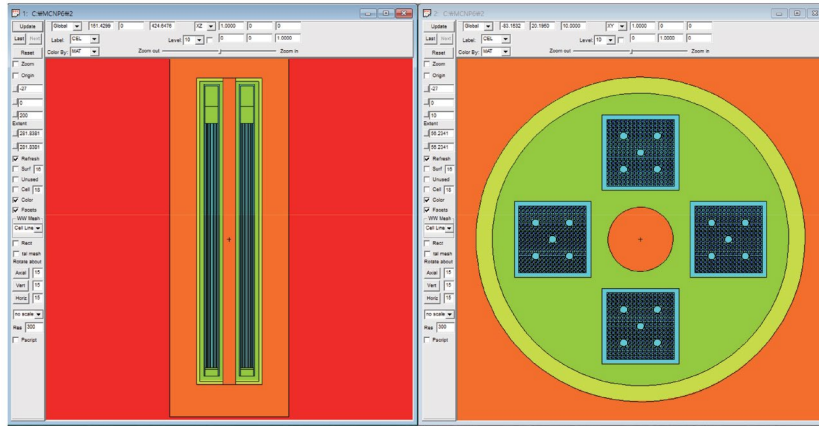


Fig. 3. Criticality analysis modeling of the disposal canister by using MCNP code.

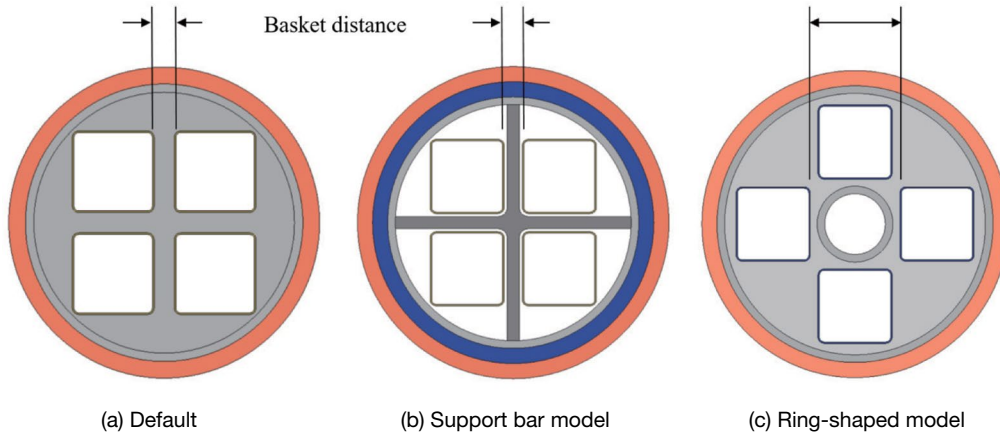


Fig. 4. Various disposal cask shapes used for criticality assessment.

Table 2. Criticality assessment results

Model	Minimum required basket distances	Effective multiplication factor	
		Normal condition	Accident condition
Support bar	7 cm	—	0.92590
Ring-shaped	23.5 cm	0.16532	0.72745

대가 사용된 모델의 경우 바스켓 간 마주보는 간격을 최소 3 cm부터 1 cm 단위로 늘려가며 임계평가를 수행하고, 환형 모델의 경우 중앙의 내부 동공(hole)의 지름을 줄여 최소로 바스켓 모서리가 맞닿는 지점인 최소 간격 23.5 cm부터 평가를 수행하였다.

평가 결과는 Table 2와 같으며, 임계사고의 기준치인 유효 증배계수 0.95를 넘지 않는 최소 연료간격 값을 각각 구하였다. 기본모델의 경우 정상조건에서 7 cm 간격보다 더 좁은 구

간에서도 이미 유효증배계수가 0.95를 넘지 않아 따로 계산하지 않았으며, 최소 연료간격 7 cm를 만족하는 경우 침수조건에서 임계 기준치가 만족되었다. 환형모델의 경우 바스켓 모서리가 서로 붙어서 밀집된 최소 간격에서도 유효증배계수가 0.95에 미치지 못하여 설계에 여유가 있음을 확인하였다.

처분용기의 최적설계

1. 최적설계 절차

본 연구에서는 Fig. 4(b)와 Fig. 4(c)에 제시된 처분용기 모델에 대해 단면 최적설계를 통해 처분용기의 중량(W_c)을 최소화함으로써 취급 효율성을 높이는 데 목적을 두고 있다. Table 3은 처분용기의 단면 최적설계 시 중량 변화에 영향을 주는 독립변수와 종속변수의 제한조건을 나열한 것이며, Fig. 5의 각 단면형상에서 변수들을 표시하였다. 독립변수는 제한 조건 안에서 값이 자유롭게 설정될 수 있는 변수로 타변수에

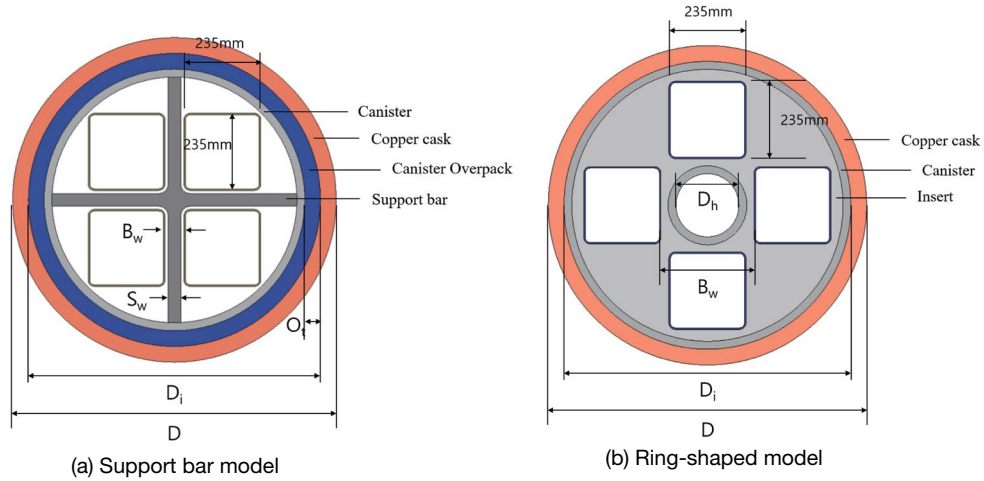


Fig. 5. Design parameters for design optimization.

Table 3. Design parameters and criteria for cask section optimization

Property	Design parameter	Design criteria	
		Support bar model	Ring-shaped model
Independent	B_w : Basket distance	$B_w \geq 70\text{mm}$	$B_w \geq 245\text{mm}$
	D_i : Canister inner dia.	$D_i \geq 780\text{mm}$	$D_i \geq 780\text{mm}$
	O_t : Overpack thickness	$0\text{mm} \leq O_t \leq 55\text{mm}$	$160\text{mm} \leq D_h \leq 200\text{mm}$
	D_h : Canister inner hole dia.		
Dependent	D : Cask outer dia.	$D \leq 1049\text{mm}$	$D \leq 1049\text{mm}$
	S_f : Safety factor	$S_f \geq 2.0$	$S_f \geq 2.0$
	S_w : Support bar thickness	$0\text{mm} \leq S_w \leq B_w$	—

영향을 주지 않으나, 종속변수는 독립변수 값들의 변화에 따라 값이 결정되거나 설계범위가 제한되는 특징을 가진다. 제한조건에서 바스켓 간 거리(B_w)는 핵임계평가 결과로부터 제한치를 산출하였으며, 환형 단면 모델의 경우 제한치는 23.5 cm지만 실제 바스켓 모서리가 완전히 맞닿을 수는 없으므로 24.5 cm로 조건을 높였다.

최적설계를 통해 해를 구하는 과정에서는 안전계수 값을 계산하기 위해 설계변수 값이 변경될 때마다 새롭게 유한요소 모델링을 하여 응력을 계산해내야 한다. 이는 매우 번거롭고 시간이 걸리는 작업이기 때문에 본 연구에서는 구조해석 결과를 유한요소법이 아닌 빔 이론에 근거한 해석적인 이론 해를 활용하는 방법을 적용하였다(Borgesson *et al.* 2009). 이는 용기의 단면 강성을 계산한 후 고체역학의 빔 이론식에 근거하여 굽힘응력을 계산해내는 방법이며, 식 (1)과 같이 계산된다. 여기서 p 는 팽윤압, D 는 처분용기 지름, L 은 처분용기 길이, $W (= I_z/y)$ 는 단면강성이다.

$$\sigma_y = M \cdot y / I_z = (p \cdot D \cdot L^2 / 16) \cdot W \quad (1)$$

최종적인 최적설계 문제는 식 (2)와 같이 정의될 수 있

다. 최적설계 문제의 비선형성에 대한 정보가 없는 상황이므로 완만한 비선형 문제에 적합한 알고리즘인 GRG 기법 (Generalized Reduced Gradient method)과 비선형성이 강한 문제에서 전역 최적값을 찾기 위해 다수의 모집단을 활용하는 진화기법 (Evolutionary method)을 모두 적용해 보았다. 스테인레스 재질의 캐니스터의 두께는 25 mm, 구리 캐스크의 두께는 50 mm로 고정하였다. 제한조건에서 안전계수 (S_f)는 해석적으로 계산된 캐니스터의 최대 굽힘응력값 대비 재료의 파단강도 (σ_t) 비율로 계산하였다.

Minimize W_c (ton)

subject to

(Support bar model)	(Support bar model)	
$0\text{mm} \leq S_w \leq B_w$	$D_i \geq 780\text{mm}$	(2)
$D_i \geq 780\text{mm}$	$160\text{mm} \leq D_h \leq 200\text{mm}$	
$0\text{mm} \leq O_t \leq 55\text{mm}$	$B_w \geq 245\text{mm}$	
$B_w \geq 70\text{mm}$	$D \leq 1049\text{mm}$	
$D \leq 1049\text{mm}$	$S_f \geq 2.0$	
$S_f \geq 2.0$		

Table 4. Material properties

	E (GPa)	Poisson ratio	Density ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	σ_y (MPa)	σ_t (MPa)
Iron	162	0.3	7200	240	370
Copper	16	0.21	8900	50	-
SA-350	187	0.3	8300	235	483

Table 5. Results of bending stress calculation

Model	Maximum bending stress (MPa)		Difference (%)
	Analytical	Numerical	
Support bar	206.4	208.0	0.84
Ring-shaped	187.2	186.1	0.61

2. 유한요소 모델링

최적설계 결과를 검증하기 위한 유한요소 모델링은 상용 유한요소 해석 프로그램인 ABAQUS 6.18을 사용하였다. 모델은 처분용기를 1/4 모델로 구성하였고 환형단면 모델의 경우 8절점 육면체 C3D8R 요소 249,440개가, 내부지지대 모델은 요소 수 241,172개가 사용되었다. 요소 세장비는 3:1 수준으로 구성되었으며, 캐니스터는 두께방향으로 3개 층으로 모델링하였는데, 급힘 변형이 대체로 완만하게 발생하기 때문에 해석 결과 표현에는 무리가 없을 것으로 판단되었다.

Fig. 2(a)와 같은 구조하중을 적용할 경우 하중이 서로 마주보지 않는 중심면을 기준으로 대칭 구속조건을 부여할 수 없으므로 상용 유한요소해석 툴에서 지원하는 Inertia Relief 기능을 활용하였다. Inertia Relief는 외부 하중을 강체운동 가속도로 변환하여 각 절점에 적용된 힘의 합력이 평형을 이루도록 수렴하여 해석 결과를 도출하는 방법으로서, 주로 구속조건을 부여하고자 하는 면을 기준으로 힘의 합력이 평형을 이루는 모델에 잘 적용된다. Inertia Relief를 적용하지 않은 나머지 두 방향(용기 길이 방향 및 하중 대칭면 방향)에는 대칭조건을 부여하였다.

용기 단면강성 계산 및 유한요소 해석에 필요한 재료물성은 Table 4와 같으며, 내부 인서트의 재질은 주철(iron)이며, 중앙지지대(support bar)와 캐니스터 오버팩, 캐니스터의 물성은 스테인리스강(SA-350)을 적용하였다.

이론식에 근거하여 계산한 결과를 유한요소 해석 모델로 검증한 결과는 Table 5와 같으며, 이론해가 유한요소 해와 1% 미만의 차이로 매우 유사한 결과를 보이는 것을 확인할 수 있었다.

Table 6. Optimization results

Case	Default (SKB)	Optimization	
		Support bar	Ring-shaped
D (mm)	1049.0	1049.0	995.0
D_i (mm)	899.0	789.0	845.0
S_w (mm)	-	48.27	-
O_t (mm)	-	55.0	55.0
D_h (mm)	-	-	200.0
B_w (mm)	135	70.0	245.0
W_{ic} (ton)	17.0	5.56	13.5
W_c (ton)	24.3	17.9	20.2
S_f	3.22	2.00	2.00

3. 최적설계 결과

Table 6은 최적설계 결과를 보여주며, GRG 기법을 사용한 경우와 진화기법을 사용한 경우 모두 동일한 최적해로 수렴함을 확인할 수 있었다. 최적설계를 거치지 않은 SKB의 원형모델의 경우 처분용기의 중량은 24.3톤에 달하며, 여기서 캐니스터의 중량(W_{ic})은 약 17톤에 달한다. 중량 최적설계를 수행한 결과 지지대 모델은 처분용기의 중량이 17.9톤, 캐니스터의 중량은 5.56톤으로 나왔다. 지지대 모델에서 캐니스터 중량이 감소한 것은 내부에 주철 소재의 인서트가 제거되었기 때문이며, 캐니스터에 비해 상대적으로 처분용기 중량이 증가한 것은 캐니스터 외부에 추가된 철제 오버팩의 무게 때문이다. 환형 단면 모델은 처분용기 중량이 20.2톤이며, 캐니스터의 무게는 13.5톤이다. 환형 단면 모델은 캐니스터 내부에 인서트가 있어 캐니스터 중량이 지지대 모델보다는 올라가지만 전체적인 용기 단면 너비가 감소하여 전체 중량은 SKB 모델보다 적게 나왔다. 구조 안전성만을 고려한 결과로는 지지대 모델이 중량 감소에 가장 적합하게 나왔으나, 원자재 가격이 높은 구리 소재 외부용기의 부피 감소를 고려한다면 환형 단면 모델이 좀 더 유리할 것으로 보인다.

결 론

본 연구에서는 사용후핵연료의 심지층 처분을 위해 개발된 구리 처분용기의 최적설계를 수행하였다. 최적설계의 목적은 기존 국외 처분용기나 국내에서 연구되었던 처분용기의 보수적인 설계로 인해 취급 효율성이 떨어지는 것을 개선하기 위함이다. 사용후핵연료 처분용기에 사용되는 캐니스터는 표준화된 캐니스터를 사용할 경우 중간저장 이후 처분장 운반까지 폭넓게 활용될 수 있으며, 따라서 취급 효율성도 중요하다. 사용후핵연료 처분용기의 취급 효율성 향상을 위해 제안된

두 가지 형태의 처분용기 모델에 대해 최적설계를 위한 프로세스를 개발하고, 적합한 설계 제한조건 개발을 위한 구조 및 핵심계평가를 수행하였다. 최적설계 프로세스를 통해 처분용기의 단면 치수 최적화를 수행하고, 이로부터 처분용기의 중량 및 크기 등을 조절할 수 있음을 확인하였다. 향후 추가적인 열해석을 통해 온도제한 조건 등을 추가한다면 공학적방벽 처분용기의 초기 설계를 위한 치수 산정에 활용할 수 있을 것으로 기대된다. 한편으로는 최적설계 결과로 인해 상대적으로 약해진 굽힘강성이 지진 하중과 같은 다른 성격의 하중 조건에서도 유효한지에 대한 검증도 필요할 것으로 사료되며 후속 연구를 통해 수행할 계획이다.

사 사

본 연구는 산업통상자원부 에너지기술평가원 기술개발과제(No. 2021171020001A)의 연구비를 지원받아 수행되었습니다.

참 고 문 헌

박종원, 박신화, 이경황, 주성민, 박광수, 신흥철, 김진홍, 김홍주. 2013. 지하연구시설 설계를 위한 처분시스템 개념 수립. KORAD/TR/2013-01.

이민수, 최희주, 이재완, 이종열, 김인영, 김경수. 2013. 사용후핵연료 처분을 위한 공학적방벽시스템 개발. KORAD/EBS-TR/2014-06.

최희주, 이종열, 정종태, 이민수, 조동건, 국동학. 2009. 2009 해외 고준위폐기물 처분시스템 개발 현황 분석보고서. 한국원자력연구원. KAERI/AR-845/2009.

Anttila M. 1996. Criticality safety calculations for the nuclear waste disposal canisters. POSIVA-96-11.

Borgeson L, Johannesson LE and Raiko H. 2009. Uneven swelling pressure on the canister simplified load cases derived from uneven wetting, rock contours and buffer density distribution. SKB-Doc. 1206894.

Kwon YJ and Choi JW. 2007. Structural Design requirements and safety evaluation criteria of the spent nuclear fuel disposal canister for deep geological deposition. *JNFCWT* 5(3): 229-238.

Raiko H. 2013. Canister Design 2012. POSIVA 2012-13.

Raiko H and Salo JP. 1996. Design report of the canister for nuclear fuel disposal. POSIVA-96-13.

Raiko H, Sandstrom R and Ryden H. 2010. Design analysis report for the canister. SKB TR-10-28.

Shin CM, Lee SH, Kim TM and Lee SJ. 2018. Mechanical Evaluation of Copper Disposal Canister under Swelling Pressures in the Engineered Barrier System. Proc. of the KSME 2018 Annual Meeting.

Shin CM, Lee SH and Lee SJ. 2019. Structural Evaluation of a Spent Nuclear Fuel Disposal Canister with Annular Cross Section. Proc. of the KSME 2019 Annual Meeting.

Received: 22 November 2021
 Revised: 29 December 2021
 Revision accepted: 29 December 2021