

## Structural Analysis of the Canister for PWR Spent Fuels under the Korean Reference Disposal Conditions

### 한국형 기준 처분 환경에서의 PWR 사용후핵연료 처분용기의 구조적 안전성 해석

Heui-Joo Choi, Yang Lee, Jongwon Choi and Young Joo Kwon\*

Korea Atomic Energy Research Institute, 150 Dukjin-Dong, Yuseong, Daejeon, Korea

\*Hongik University, 300 Shinanri, Chochiwon, Yeonki, Choongnam, Korea

[hjchoi@kaeri.re.kr](mailto:hjchoi@kaeri.re.kr)

최희주, 이 양, 최종원, 권영주\*

한국원자력연구소, 대전광역시 유성구 덕진동 150

\*홍익대학교, 충남 연기군 조치원 신안리 300

(Received April 13, 2006 / Approved June 30, 2006)

#### Abstract

KDC-1 canister for PWR spent fuels which will be used for the Korean Reference Disposal System was developed. The structural analysis of the canister was carried out as a part of the safety analysis. Two conditions, disposal condition and handling condition, were considered for the structural analysis. Three kinds of load cases, normal, abnormal and rock movement, were considered for the disposal condition. The results of the calculation showed that the safety factors from the structural analysis were greater than the design requirements. Two accident scenarios, gripper failure accident and canister drop accident, were analyzed for the handling condition. According to the gripper failure scenario analysis, the handling machine with grippers could be used even in the cases that one or two grippers failed. The maximum von Mises stress from the canister drop accident scenario was 0.762 MPa, which was negligible compared with the yield stress of nodular cast iron. The proposed KDC-1 canister for PWR spent fuels proves to be safe under the repository condition that is based upon the Korean reference disposal system according to the structural analysis for disposal condition and handling condition.

---

**Key words:** structural analysis, canister, spent fuel, disposal, safety

요 약

한국형처분시스템에 이용될 가압경수로형 사용후핵연료를 위한 KDC-1 처분용기를 개발하였다. 처분용기 안전성 평가의 일환으로서 처분용기에 대한 구조적 안전성을 평가하였다. 처분용기의 구조적 안전성은 처분조건과 취급조건 2가지로 구분하여 평가하였다. 처분조건에서는 3가지 하중 조건, 정상하중 조건, 비정상 하중 조건, 압반의 움직임은 고려하였다. 처분조건에서 평가 결과 3가지 조건에 대해 모두 안전계수가 설계기준보다 컸다. 취급조건에서는 처분용기 취급 중 구조해석과 처분용기 낙하 사고 시 구조해석을 수행하였다. 취급장비 고장 시나리오 평가 결과 1개 혹은 2개의 취급 장치가 고장을 일으켰을 때도 취급장비를 계속 운전하는 것이 가능하였다. 처분용기 낙하 시나리오에서는 계산결과 최대 응력은 0.762 MPa 이었으며, 이 값은 주철의 항복응력과 비교하면 거의 무시할 수 있는 값이었다. 본 논문에서 제안한 KDC-1 처분용기에 대한 처분조건 및 취급조건에서의 구조해석 결과, 한국형처분시스템에서 고려하고 있는 조건에서 그 구조적 안전성을 확인하였다.

**중심단어:** 구조해석, 처분용기, 사용후핵연료, 처분, 안전성

I. 서 론

고준위폐기물 처분시스템은 공학적방벽과 자연방벽으로 구성된다. 한국원자력연구소에서는 국내 지질 환경에 적합한 고준위폐기물 한국형처분시스템을 개발하고 있다. 공학적방벽은 사용후핵연료 자체, 처분용기, 완충재 블록, 뒷채움재와 밀봉재 등으로 구성된다. 사용후핵연료로부터 방사성 핵종의 누출을 억제하는 첫 번째 방벽은 처분용기이며, 따라서 처분시스템 설계의 시작점도 처분용기이다. 처분용기는 사용후핵연료 형상에 따라 그 형태가 결정된다. 국내 원자력발전소에서 발생되고 있는 사용후핵연료는 크게 가압경수로형과 가압중수로(CANDU)형 2가지로 구분된다. 현재 전력수급계획 반영되어 있는 28기의 원자로로부터 수명기간 동안 발생될 것으로 예상되는 사용후핵연료의 양은 약 36,000 tU로 추정되며, 이들을 처분하기 위해서는 약 14,000 여개의 사용후핵연료 처분용기가 필요할 것으로 추정되고 있다[1]. 한국형처분시스템에서는 가압경수로형 사용후핵연료의 경우 각 발전소별로 그 형상의 차이가 조금 있으나 동일한 처분용기를 이용하여 처분할 예정이다. 월성 발전소의 CANDU형 사용후핵연료는

구조가 크게 달라 별개의 용기를 개발하고 있다.

고준위폐기물 처분시설을 계획하고 있는 국가들은 자국의 특성에 맞추어 처분용기를 개발하고 있다. 처분시설을 건설 중인 핀란드는 스웨덴과 함께 처분용기를 공동으로 개발하고 있다. 이들 국가는 처분용기 수명 동안 처분용기 내의 사용후핵연료로부터 방사성 핵종들의 누출을 억제할 수 있도록 하기 위하여 구리로 된 외부용기와 주철로 된 내부구조물 형태의 2중구조의 처분용기를 제안하였다. 스웨덴에서는 2004년까지 내부구조물 20개와 구리 외부용기 34개를 제작한 경험을 갖고 있다[2]. 핀란드에서는 2003년 실규모의 BWR 사용후핵연료 처분용기를 제작한 경험이 있다[3]. 핀란드에서 2005년도에 추정된 처분용기 1개의 제조비용은 143,425유로이다[4]. 사용후핵연료를 재처리하고 있는 일본의 경우 재처리 과정에서 발생한 유리고화체를 위한 처분용기를 개발하고 있다. 일본은 처분용기의 수명을 1,000년을 고려하고 있으며 부식 허용 재질인 탄소강을 이용하여 용기를 제작하고 있다. 일본에서도 실규모의 처분용기를 제작한 경험을 풍부히 갖고 있다[5]. CANDU 사용후핵연료를 처분 예정인 캐나다도 구리와 주철로 된 이중용기를 고려하고 있다[6]. 다른 국

가와는 달리 산화 환경인 불포화 지질 조건에 사용후 핵연료를 처분할 계획을 하고 있는 미국의 경우 니켈 합금의 외부용기와 스테인레스강 내부용기로 구성된 처분용기를 Yucca 처분장에 이용할 계획이다[7].

저자들은 한국형처분시스템에 이용될 PWR 사용후 핵연료 처분용기를 개발하고 있다. 과거 연구를 통하여 개발된 122 cm 직경의 처분용기를 최근 구조적 안전성 평가 측면에서 최적화하여 102 cm 직경의 처분용기를 설계하여 그 중량을 크게 줄이는 데에 성공하였다. 국내에서 처분용기 설계 혹은 성능과 관련된 규정은 전혀 없어 설계기준을 외국의 사례를 바탕으로 설정하고 국내에서 발생하는 사용후핵연료 특성과 지질 조건을 고려하여 설계를 수행하였다. 처분용기의 수명은 일본의 경우 1,000년, 스웨덴과 핀란드의 경우 십 만년을 고려하고 있다. 국내에서는 아직 결정된 바가 없어 두 가지를 모두 고려한 개념의 처분용기를 개발하고 있다. 대부분의 국가에서 처분용기의 수명은 외부용기의 부식속도를 이용하여 결정하고 있다. 본 논문에서는 처분용기 수명 십 만년을 고려해 개발한 구리 외부용기 개념을 대상으로 구조해석을 수행하였다.

본 논문의 목적은 한국형처분시스템의 처분환경에서 KDC-1 처분용기의 구조적 안전성을 평가하는 것이다. 처분용기에 대한 구조해석은 처분조건에서의 구조해석과 처분용기 취급측면에서의 구조해석을 정상조건과 사고조건에 대해 각각 수행하였다. 처분용기를 개발하고 있는 각국은 자국의 처분환경으로부터 처분용기에의 하중조건을 도출하고 처분용기가 구조적 안전성 측면에서 이를 만족할 수 있도록 개발하고 있다. 스웨덴[8]과 핀란드[9]의 경우 다양한 하중조건과 함께 미래에 빙하가 찾아 올 가능성까지 고려한 하중조건을 고려하기도 하였다. 일본[5]의 경우 처분용기 구조해석에 완충재 블록으로부터 발생하는 비대칭 하중조건을 고려한 해석을 수행하였다. 처분조건 및 취급조건에 대해서 구조해석은 NISA 프로그램으로 계산하였으며, 취급 중 처분용기 낙하 사고 해석의 충격력 계산에는 RecurDyn 프로그램을 이용하였다. 구조해석 결과는 안전계수(safety factor)를 통해 나타내었다.

## II. 처분 조건에서 구조 해석

Fig. 1에 나타난 바와 같이 KDC-1 처분용기에는 4개의 사용후핵연료 다발을 처분하도록 되어있다. 처분용기의 직경은 102 cm, 길이는 483 cm이며, 내부 구조물의 직경은 92 cm, 사용후핵연료 바스켓의 한 변의 길이는 22.4 cm이다. 외부용기의 재질은 구리이며, 내부구조물의 재질은 구상흑연주철(nodular cast iron)이다. 스웨덴에서의 연구결과[10]에 의하면 길이 483 cm 정도의 내부구조물을 일체형으로 제작할 수 있는 재료로서 구상흑연주철이 유일하다. 처분용기의 재료의 물성 값을 Table 1에 나타내었다.

국내에서 발생하는 사용후핵연료를 직접 지층 처분하기 위하여 개발 중인 한국형 기준처분시스템의 개념도를 Fig. 2에 나타내었다. 지하 터널은 용도에 따라 중앙터널, 파넬터널, 처분터널로 구분되며, 처분용기는 처분터널 내에 굴착된 처분공에 완충재 블록과 함께 Fig. 3에 나타난 바와 같이 처분된다.

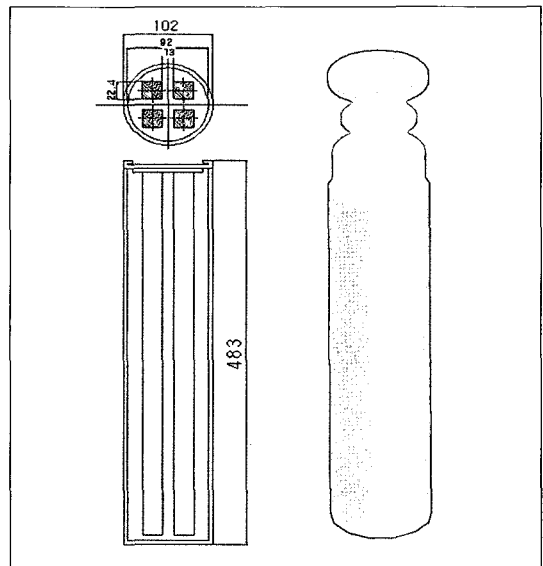


Fig. 1. Schematic of KDC-1 canister.

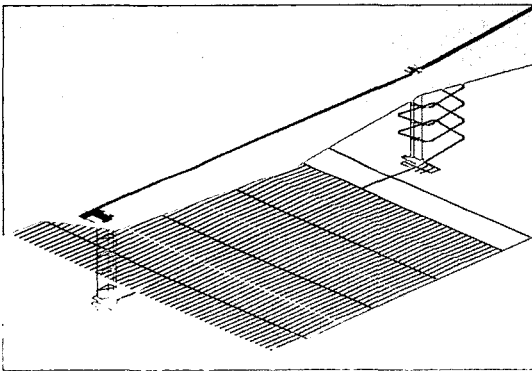
Table 1. Mechanical properties of KDC-1 canister material

Material	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Young's Modulus (GPa)	Poisson's Ratio	Yield Stress (MPa)
Nodular cast iron	7,200	162	0.3	235 (100°C)
Copper	8,900	117	0.3	60

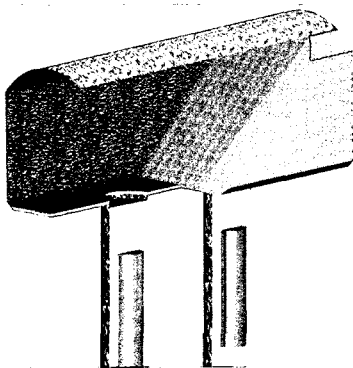
한국형처분시스템에는 현재 운전 중이거나 건설 예정인 총 28기의 PWR 및 CANDU 원자로에서 발생될 것으로 추정되는 36,000 tU의 사용후핵연료를 처분할 계획이다. 처분터널의 깊이는 지하 500 m로 예정하고 있으며, 화강암질 암반 내에 처분된 처분용기의 구조적 안전성을 평가하기 위하여 3가지의 조건을 고려하였다. 첫 번째 조건은 처분용기에 정상조건에서 지하수압과 완충재 블록의 팽윤압이 걸리는 것이고, 두 번째 조건은 지하수에 의한 재포화 중 처분용기 주변의 완충재 블록에 팽윤압이 비대칭하게 생기는 경우이다. 세 번째 조건은 처분장 내의 암반에서 10 cm 정도의 지각 이동이 발생하는 경우이다.

**가. 정상 조건**

처분용기가 처분공 내에 처분된 후 처분용기 주변



**Fig. 2. Schematic of Korean reference high-level waste disposal system.**



**Fig. 3. Canisters surrounded by buffer blocks in the deposition holes.**

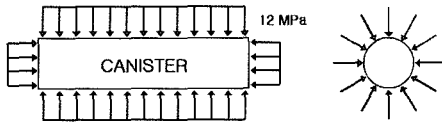
은 지하수로 포화되며, 처분용기는 이 지하수에 의한 수압과 완충재 블록으로부터의 팽윤압을 받는다. 지하 500 미터의 깊이에 처분될 경우 지하수에 의한 압력은 5 MPa이다. 또한 완충재 블록이 지하수로 포화됨에 따라 완충재로 이용된 벤토나이트는 팽윤을 하며, 벤토나이트 팽윤에 의한 하중은 7 MPa을 설정하였다[8]. 지하수압과 팽윤압을 중첩한 12 MPa을 정상조건 하중조건으로서 Fig. 4에 나타내었다. 또한, 처분용기에 포함되어 있는 사용후핵연료로부터는 방사성 핵종들의 붕괴에 의한 열이 발생하며, 이 열은 처분용기에 열응력으로 작용한다. 본 연구에서 고려한 기준 사용후핵연료는 PWR 17 × 17 핵연료 봉이며, 방출연소도는 45,000 MWD/MTU이다. 기준 PWR 사용후핵연료 붕괴열은 냉각시간 50년을 고려하여 다음 값을 이용하였다.

$$q(50) = 1476.29 \text{ W/m}^3 \dots\dots\dots (1)$$

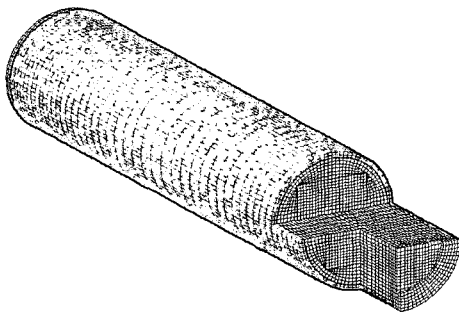
처분용기에 대한 열 및 구조해석은 유한요소법으로 해를 구하는 NISA 프로그램[11]을 이용하였다. NISA는 Kant S. Kothawala 박사가 설립한 미국의 EMRC(Engineering Mechanics Research Corporation) 사에 의해 개발된 범용 구조해석 프로그램이다. 처분용기의 1/4 형상에 대하여 이 프로그램을 이용하여 용기 내부의 온도분포를 계산한 후, 열응력, 지하수압과 팽윤압을 중첩한 3차원 구조해석을 수행하였다. Fig. 5에는 해석에 이용된 처분용기의 모델을 나타내었다. Fig. 5에 주어진 유한요소 모델은 31,460개의 절점과 18,337개의 요소로 이루어졌다. NISA 프로그램을 이용하여 계산한 결과를 Table 2와 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6에 나타난 바와 같이 최대 von Mises 응력은 약 74.9 MPa이었으며, 응력분포는 용기 전체에 걸쳐 고르게 분포하였다. Table 1에 주어진 바와 같이 구상후연주철의 최대 항복 응력은 235 MPa이므로 안전계수는 약 3.13이 된다. 정상 하중조건에서 고려하는 안전계수[8]가 2.0이므로 본 연구에서 제안한 KDC-1 처분용기는 정상하중 조건하에서 충분히 안전하였다.

**나. 비정상 하중조건**

정상조건뿐만 아니라 지하 암반내의 처분용기가 받게 될 비정상 하중조건에 대해 구조적 안전성을 해석하였다. 비정상 하중조건으로 선정한 것은 지하수에 의한 완충재의 재포화가 비대칭으로 발생되고 따라서 완충재 블록 팽윤압이 비대칭하게 발생하며 처분용기의 양끝은 고정되어 팽윤압이 Fig. 7에 주어진 바와 같이 비대칭하게 작용한 경우이다. 이 경우는 스웨덴에서 처분용기 개발을 위하여 고려한 하중조건[9]이다. 완충재가 지하수로 포화됨에 따라 완충재로 이용된 벤토나이트는 팽윤을 하며, 벤토나이트 팽윤압 7 MPa을 이용하였다. 처분용기 1/2 형상에 대하여 NISA 프로그램을 이용하여 3차원 구조해석을 수행하였다. 구조해석에 이용된 유한요소 모델은 51,870개의 절점과 36,674개의 요소로 이루어졌다. NISA 프로그램을 이용하여 계산한 결과를 Table 2와 Fig. 8에 나타내었다. 최대 von Mises 응력은 처분용기 양끝 고정단과 하중조건이 만나는 부근에 발생하고 이때 값은 약 111.9 MPa이었으며, 안전계수는 약 2.10이다. 그러나 비정상 조건에서는 정상 하중조건과는 달리 허용하는 안전계수[8]가 1.0이므로 충분히 안전하였다.



**Fig. 4. Load conditions used for the structural analysis of the normal case.**



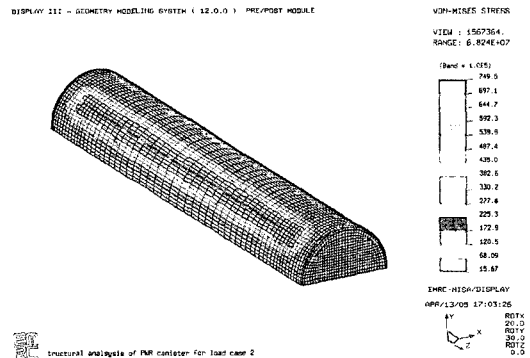
**Fig. 5. FEM model used for 3-dimensional structural analysis of the normal case.**

**다. 암반 움직임**

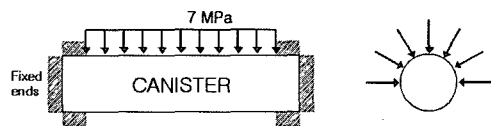
지하 암반의 움직임에 대해 처분용기의 구조해석을 수행하였다. 두께 50 cm의 완충재로 둘러싸인 처분용기 구조의 반쪽 상부 외곽에 10 cm 수평 암반 움직임이 순간적으로 발생할 경우 처분용기에 발생하는 구조변형과 응력을 해석하였다. 구조물의 상하 중앙면을 기준으로 모델을 상부와 하부로 나누었을 때, 암반의 움직임은 구조물의 상부 외곽에 정확히 수평으로 작용하고 있고, 모델의 하부 외곽면은 구조물이 이동하지 못하도록 외부 강제인 암반에 의하여 고정 지지되었다고 가정하였다. 10 cm의 암반 움직임은 변위 경계조건을 통해 적용되었으며, 적용한 변형 및 구속 경계조건은 Fig. 9와 Fig. 10에 나타내었다. Fig. 10에 주어진 바와 같이 모델 하부에 적용된 구속 경계조건에 따라 Case 1과 Case 2로 나누어 평가하였다. 구조물 좌우 대칭이기 때문에 Fig. 9와

**Table 2. Results of the structural analysis for the disposal conditions**

Material	Maximum von Mises Stress (MPa)	Safety Factor	Design Requirement	Maximum Deformation (mm)
Normal case	7,200	3.13	2.0	2.54
Abnormal case	8,900	2.10	1.0	2.64



**Fig. 6. Distribution of von Mises stresses for the normal case**



**Fig. 7. Load conditions used for the structural analysis of the abnormal case.**

Fig. 10과 같이 반단면 형상인 반원통을 모델링하고 그 대칭면에서는 대칭 구속조건을 가해주었다.

벤토나이트 완충재에 대해서는 Drucker-Prager 항복조건을 적용하였고, 구리로 된 외부용기와 구상흑연주철로 된 내부구조물에 대해서는 von Mises 항복조건을 적용하여 재료의 항복 조건을 정의하였다. Drucker-Prager 항복조건은 3개의 주응력 모두가 재료의 항복에 영향을 주며, 암석과 같은 취성재료의 3차원 거동을 잘 표현할 수 있는 것으로 알려져 있다. 또한 초기 항복 이후의 연속항복에 대한 경화법칙은 어떤 경화 매개변수함수에 의해 항복면의 크기가 커지는 동안 응력장에서 그 형상에 변화가 없다는 등방경화법칙을 적용하였다. 암반 움직임에 대한 처분용기와 벤토나이트 완충재에 발생한 응력 및 변위를 Table 3에 나타내었다. 벤토나이트 완충재에 발생하는 최대 동가 응력은 벤토나이트 항복응력인 0.17 MPa보다 커서 소성변형이 발생하였다. Case-1의 경우 구리로 된

외부용기에서 부분적인 소성변형이 발생하였으나 주철로 된 내부구조물의 경우 구조적으로 안전하였다. Case-2 조건에서는 50 cm의 완충재가 처분용기의 구조적 안전을 위해 충분히 완충작용을 하였다. 벤토나이트 완충재에서의 최대 변위는 두 가지 경우 모두 15 cm 정도이었으며, 처분용기의 최대 변위는 Case-1과 Case-2에서 각각 8.5 cm, 11.8 cm으로 나타났다.

### III. 취급시 구조해석

처분용기는 지하 암반 내에 처분된 상태에서 수압, 팽윤압과 같은 외압을 견뎌야 할 뿐만 아니라, 처분 시설 운영 중 처분용기 취급 공정 중에도 그 구조적 강도를 유지하여야 한다. 처분용기는 특별하게 제작된 장비에 의해 취급되며, 이를 위하여 Fig. 1에 나타난 바와 같이 용기 뚜껑부분에 홀더 부분을 설치하였다. 처분용기의 취급 시 구조해석을 위하여 정상조건에서의 구조해석과 2가지의 취급 중 사고 시나리오를 고려하였다. 첫 번째 시나리오는 4개의 파지부 중 1개 혹은 2개의 파지부가 고장을 일으켰을 경우에 대한 것이며, 두 번째 사고 시나리오는 처분용기를 처분공에 장입하던 중 처분용기 낙하에 대한 것이다.

#### 가. 취급장비 고장 해석

처분용기 개념설계에 의하면 처분용기를 취급하

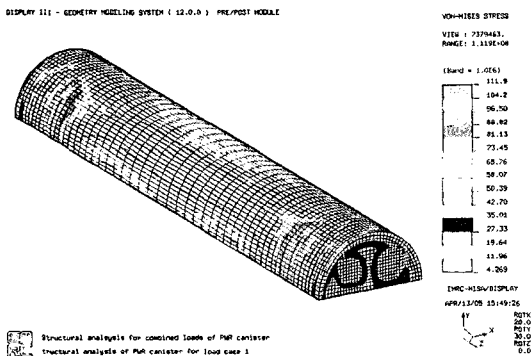


Fig. 8. Distribution of von Mises stresses for the abnormal case.

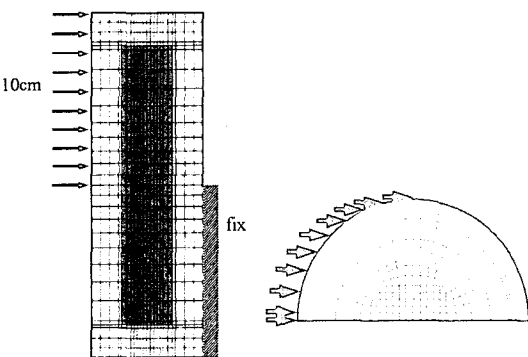


Fig. 9. Load condition used for the structural analysis for the rock movement.

Table 3. Results of structural analysis for the rock movement condition

		CASE-1	CASE-2	Yield stress
Max, displacement (cm)	buffer	15,1	14,9	-
	canister	8,5	11,8	-
von Mises stress (MPa)	buffer	23,1	10,8	0,17
	copper shell	52,5	20,4	60
	cast iron	53,6	23,1	235

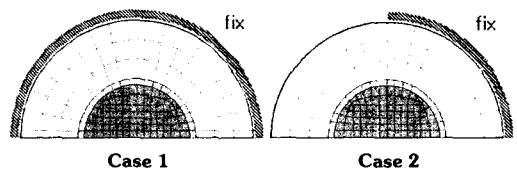


Fig. 10. Load condition used for the structural analysis for the rock movement (bottom part)..

기 위하여 용기 뚜껑 부분에 4개의 파지부가 있다. 파지부 1개 폭은 10.5 cm이며, 파지부의 구조 해석을 위하여 사용후핵연료 포함 25톤인 처분용기 자중에 의한 하중조건을 고려하였다. 취급 중 구조해석을 위하여 4개의 파지부가 정상조건인 경우와 파지부의 일부가 운전 중 고장이 발생할 경우, 운전 지속 가능성 판단을 위하여 구조해석을 수행하였다. Fig. 11에는 취급 중 장비 고장에 대한 해석을 위해 설정한 모델을 나타내었으며, 용기 상부에 사각형으로 표시된 부분이 파지부이다. 구조 해석은 처분 시 구조해석과 같이 처분용기에 형상에 대하여 NISA 프로그램을 이용하여 3차원 구조해석을 수행하였다.

NISA 프로그램을 이용하여 계산한 3가지 조건에서의 구조해석 결과를 Table 4에 나타내었다. Table 4에 나타난 바와 같이 정상조건에서 해석결과 최대 von Mises 응력은 4개의 파지부에 집중되었으며 그 값은 12.6 MPa이었으며 이 때 안전계수는 4.76으로 설계기준 값인 2.0보다 훨씬 큰 값이었다. 취급장비 1개와 2개가 작동하지 않을 경우에도 Table 4에 나타난 바와 같이 안전계수가 1.97과 2.38로 두 가지 경우 모두 설계기준 값인 1.0 이상이었다. 즉, 본 연구에서 제안한 처분용기는 취급 중 장비가 고장을 일으킬 경우에도 계속 운전을 하여도 용기의 하중에 의한 구

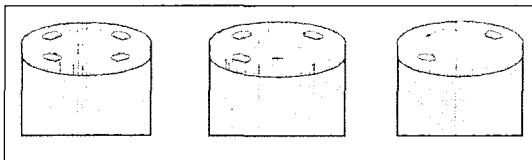


Fig. 11. Structural analysis models for gripper failure accident.

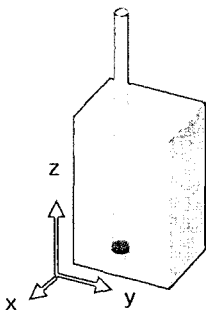


Fig. 12. Schematic of the canister drop accident.

조적 안전성은 확보되었다. Table 4에 나타난 계산 결과를 살펴보면, 파지부 1개가 고장을 일으켰을 경우가 2개가 고장을 일으켰을 경우보다 더 작은 안전 계수를 나타내었다.

#### 나. 처분용기 낙하 해석

지하 암반 내에 건설되는 처분공은 그 깊이가 7.83 m이다. 처분용기를 처분공 내에 장입하는 도중 취급 장치의 고장 등으로 인하여 낙하되었을 경우에 대하여 충격력을 구하고 그 충격력에 의한 구조해석을 수행하였다 (Fig. 12). 처분용기가 처분터널 바닥면으로부터 1 m 높이(처분공 바닥면 기준 8.83m)에서 완충재 블록이 없는 처분공으로 추락하였다고 가정하고 이때 충격력을 RecurDyn 프로그램[12]을 이용하여 구하였다. 처분용기와 처분공과의 접촉은 면내 원통 접촉을 가정하였다. 총 모사 시간은 20초 동안이었다. Table 5에 처분용기 낙하 시 발생하는 충격력을 나타내었다. Table 5에 나타난 바와 같이 처분공으로 추락 낙하 시 처분용기가 받는 최대 충격력은 첫 번째 충돌시의 5.728 MN이었다.

첫 번째 충돌시 처분용기에 가해지는 충격력에 대하여 처분용기의 구조적 안전성을 평가하기 위하여 이때의 충격력을 외력으로 사용하고, 이 충격력이 처분용기 밀면에 수직으로 균일하게 작용하고 있다고 가정하였다. 따라서 처분용기의 밀면에 작용하는 외력은 처분용기가 밀면과 충돌 시 받는 충격력 5.728 MN을 처분용기 밀면적으로 나눈 값( $P=7.01$  MPa)을 외력조건으로 이용하였다. 구조해석은 NISA 프로그램을 이용하였으며, 처분용기 낙하에 의한 최대 응력과 변위는 각각 0.762 MPa와  $18.38 \times 10^{-3}$  mm 이었다. 최대응력은 주철 내부구조물에 발생하였으며, 발생한 최대 응력 값은 주철의 항복응력 235 MPa와

Table 4. Results of the structural analysis for the gripper failure accident

Material	Maximum von Mises Stress (MPa)	Safety Factor	Design Requirement	Maximum Deformation (mm)
4 grippers (Normal case)	12.6	4.76	2.0	0.015
3 grippers (One failure)	30.4	1.97	1.0	0.251
2 grippers (Two failure)	25.2	2.38	1.0	0.026

**Table 5. Impact forces from the canister drop accident**

Collision sequence	Collision time (sec)	Impact force (MN)	Direction component (MN)		
			Fx	Fy	Fz
1	1.428	5.728	0	0	5.728
2	4.082	5.452	0	0	5.452
3	6.689	5.097	0	0	5.097
4	9.089	4.699	0	0	4.699

비교하면 거의 무시할 수 있는 값이었다.

**IV. 결 론**

국내 원자력발전소에서 발생하는 사용후핵연료를 영구처분하기 위한 한국형처분시스템에 이용될 KDC-1 처분용기를 개발하였다. 구조적 건전성 측면에서 최적화 설계를 통하여 개발된 처분용기에 대한 안전성 평가를 핵심계, 방사선 차폐, 구조 해석, 열 해석 등을 통하여 수행 중이다. 본 논문에서는 처분용기 안전성 평가의 일환으로서 처분용기에 대한 구조적 안전성을 평가하였다. 처분용기의 구조적 안전성은 처분조건과 취급조건 2가지로 구분하여 평가하였다. 처분조건에서는 한국형처분시스템에서 예상되는 3가지 하중 조건, 정상하중 조건, 비정상 하중 조건, 암반의 움직임에 고려하였으며, 취급조건에서는 처분용기 취급 중 구조해석과 처분용기 낙하 사고 시 구조해석을 수행하였다.

처분조건에서 고려한 정상 하중 조건은 5 MPa의 지하수압과 7 MPa의 완충재 팽윤압이었으며, 비정상 하중 조건은 지하수 재포화 과정 중 완충재 블록에서 7 MPa의 비대칭 팽윤압이 발생하는 것을 고려하였다. 암반의 움직임은 처분용기가 장입된 지하 500 m 깊이의 암반이 10 cm 정도 지각이동이 발생한 경우에 대해 그 구조적 안전성을 평가하였다. 평가 결과 3가지 조건에 대해 모두 안전계수가 설계기준보다 컸으며, 따라서 본 연구에서 개발된 KDC-1 처분용기는 설계 조건에 대해 그 안전성이 유지되었다.

취급장비 고장 시나리오에서는 처분용기 개념 설계에서 고려한 4개의 취급 장치 중 1개 혹은 2개의 장치가 작동하지 않을 경우 운전을 지속할 것인가를 판단하기 위하여 구조해석을 수행하였다. 하중 조건

은 사용후핵연료를 포함한 처분용기 중량 25톤을 가 정하였으며, 평가결과 4개의 취급 장치가 정상 작동 할 때뿐만 아니라 1개 혹은 2개의 취급 장치가 고장 을 일으켰을 때도 안전계수가 설계기준보다 충분이 컸다.

처분용기 낙하 시나리오에서는 깊이 7.83 m의 처 분공에 완충재가 설치되어 있지 않는 조건에서 처분 공 표면 1 m의 높이에서 처분용기가 추락하였다. 낙 하에 의한 충격력은 Recurdyn 프로그램을 이용하여 구 하였으며, 구해진 충격력은 5.728 MN이었다. 이 충격력을 처분용기 밑바닥 부분에 작용하였을 경우 에 대해 외력을 구하고, 이 외력에 의한 처분용기의 최대 응력과 변형을 NISA 프로그램을 이용하여 구하 였다. 계산결과 최대 응력은 0.762 MPa 이었으며, 이 값은 주철의 항복응력 235 MPa와 비교하면 거의 무시할 수 있었다.

본 논문에서 제안한 PWR 사용후핵연료 KDC-1 처 분용기에 대한 처분조건 및 취급조건에서의 구조해 석 결과, 한국형처분시스템에서 고려하고 있는 조건 에서 그 구조적 안전성을 확인하였다.

**감사의 글**

본 연구는 과학기술부가 시행한 원자력 중장기 연 구사업의 일환으로 수행되었습니다.

**참고 문헌**

- [1] Heui-Joo Choi, Jongwon Choi, and Jong Youl Lee, "Korean Reference Disposal System for High-level Radioactive Wastes," Proceedings of the 6th Korea-China Joint Workshop on Nuclear Waste Management, pp. 225~235, Nov. 16-17, Kyeongju, Korea, (2005).
- [2] Claes-Goran Andersson, Peter Eriksson, Marika Westman, Status report, canister fabrication, SKB Technical Report TR-04-23 (2004).
- [3] Heikki Raiko, Test Manufacture of a Canister Insert, POSIVA Working Report 2003-59



(2003).

- [4] Tapani Kukkola and Timo Saanio, Cost Estimate of Olkiluoto Disposal Facility for Spent Nuclear Fuel, POSIVA Working Report 2005-10 (2005).
- [5] JNC, H12 Project to Establish Technical Basis for HLW Disposal in Japan, JNC TN (1999).
- [6] CTECH, Conceptual Design for a Deep Geologic Repository for Used Nuclear Fuel, CTECH 1106/MD18085/REP/01 (2002).
- [7] US DOE, Analysis of the Total System Life Cycle Cost of the Civilian Radioactive Waste Management Program, DOE/RW-0533, (2001).
- [8] Lars Werme, Design premises for canister for spent nuclear fuel, SKB, Technical Report, TR-98-08 (1998).
- [9] Heikki Raiko and Jukka-Pekka Salo, Design report of the canister for nuclear fuel disposal, POSIVA-96-13 (1996).
- [10] Claes-Goran Andersson, Test manufacturing of copper canisters with cast inserts, SKB Technical Report TR-98-09, (1998).
- [11] EMRC, NISA User's Manual, Engineering Mechanics Research Corporation (1998).
- [12] Function Bay, RecurDyn Solver Theoretical Manual, Function Bay (2004).