

가압경수로 고준위폐기물 처분용기에 대한 크립해석

Creep Analysis for the Pressurized Water Reactor Spent Nuclear Fuel Disposal Canister

권영주[†] 하준용^{*} 최종원^{**}

Kwon, Young-Joo Ha, Joon-Yong Choi, Jong-Won

(논문접수일 : 2004년 7월 10일 ; 심사종료일 : 2004년 10월 28일)

요지

본 논문에서는 깊은 지하 500m에 처분된 가압경수로(PWR) 고준위폐기물을 처분용기에 지하수압과 벤토나이트 팽윤압이 가해지는 동안 처분용기에 발생하는 크립변형을 예측하기 위하여 처분용기에 대한 구조해석을 수행하였다. 보통 이러한 크립변형은 처분용기에 추가적인 외력이 작용하지 않더라도 처분용기에 작용하는 압력과 내부의 높은 열에 의하여 발생될 수 있다. 처분용기내부의 열분포의 복잡성 및 시간의존성으로 인하여 일단 외부 지하수압 및 팽윤압만 고려하여 크립해석을 수행하였다. 이를 위하여 적당한 크립함수를 사용하였으며, 해석은 1억(10^8)초 동안 수행하였다. 해석결과 1억초 동안 발생하는 크립변형률은 매우 작으며 주로 처분용기의 위아래 덮개에 발생함을 알 수 있었다. 그러나 처분용기의 구조강도에 중요한 내부 주철삽입물에는 훨씬 더 작은 미소한 변형률만 발생하여 처분용기에 발생하는 크립변형은 처분용기의 구조적인 안전성에는 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있었다. 해석 초기에 처분용기 내에 급격히 응력이 증가하여 최고치에 도달한 후 잠깐동안 이 응력 값을 유지하다가 그 이 후에는 급격히 응력 값이 감소하는 응력이완현상을 보이고 있기 때문에 발생 응력 측면에서도 전혀 처분용기의 구조적인 안전성에 문제가 없음이 확인되었다.

핵심용어 : 고준위폐기물 처분용기, 지하수압 및 팽윤압, 크립변형, 크립함수, 응력이완현상

Abstract

In this paper, a structural analysis for the pressurized water reactor(PWR) spent nuclear fuel disposal canister which is deposited under the 500m deep underground is carried out to predict the creep deformation of the canister while the underground water and swelling bentonite pressure are applied on the canister. Usually the creep deformation may be caused due to the pressure and the high heat applied to the canister even though additional external loads are not applied to the canister. These creep deformations depend on the time. In this paper, only the underground water and bentonite swelling pressure are considered for the creep deformation analysis of the canister, because the heat distribution inside canister due the spent fuel is not simple and depends on time. A proper creep function is adopted for the creep analysis. The creep analysis is carried out during 10^8 seconds. The creep analysis results show that the creep strains are very small and these strains occur usually in the lid and bottom of the canister not in the cast iron insert. A much smaller strain is found in the cast iron insert. Hence, the creep deformation doesn't affect the structural safety of the canister, and also the creep stress which shows the stress relaxation phenomenon doesn't affect the structural safety of the canister.

keywords : spent nuclear fuel disposal canister, underground water and swelling pressure, creep deformation, creep function, stress relaxation phenomenon

[†] 책임저자, 정희원 · 홍익대학교 기계정보공학과 부교수
전화 : 041-860-2484 : Fax : 041-866-6598

E-mail: yjkwon@wow.hongik.ac.kr

^{*} 홍익대학교 대학원

^{**} 한국원자력연구소 책임연구원

• 이 논문에 대한 토론을 2005년 3월 31일까지 본 학회에 보내주시면 2005년 6월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

원자로에서 사용한 후 폐기되어지는 고준위폐기물은 위험한 방사능과 높은 온도를 가지고 있기 때문에 이를 관리하는 것은 상당한 주의가 필요하다. 고준위폐기물 처분용기는 어떤 조건 하에서도 고준위폐기물의 방사성독성이 사라지는 10,000년 동안 폐기물을 완전히 안전하게 격리시킬 수 있게 처분용기의 수명이 확실하게 보장되어야만 한다. 이러한 이유로 저장된 기간 중에 구조적 결함이 없도록 처분용기의 구조적 안정성측면에서 여러 가지 조건을 고려해야 한다. 이러한 처분용기는 보통 지하 500m 아래의 안전한 장소에 보관하는 것이 좋다. 이런 여러 가지 안전성 측면에서 고려되어야 할 외부조건에 대하여 충분한 안전계수를 만족해야 하는데 첫 번째로 처분용기가 화강암 층의 지하 500m에 놓여서 처분용기가 정상적으로 받을 외압인 지하수압 5MPa과 벤토나이트 완충재의 팽윤압 10MPa 등 총 15MPa에 견딜 수 있는 안전계수를 만족해야 한다. 또한 처분용기 설계 시 고려되는 안전계수는 외압조건의 불확실성과 재료 특성 및 제조상의 불확실성도 함께 포함되어져야 하는데 이런 경우에 사용되는 처분용기 재질의 구조와 특성에 따라 보통 1.5~2.5의 안전계수 값이 사용되어진다.^{1),2)} 여기서 안전계수는 처분용기를 구성하는 고체물질의 항복응력과 처분용기 구조물내부에 발생하는 최대 내부응력 비로 정의된다. 그러므로 여러 가지 조건 하에서 먼저 기본적인 선형구조해석^{3)~6)}을 수행하여 얻은 구조적으로 적합한 설계를 바탕으로 고온을 가지고 있는 내부의 고준위폐기물 다발에서 방출되는 열에 의한 열응력을 해석하여야 한다. 이를 근거로 이와 같은 열응력에 의한 구조적 안전성을 확인하여야 한다.^{7)~10)} 그리고 처분용기의 외부온도는 벤토나이트 등의 화학적인 반응을 고려하여 100°C를 넘지 않아야 한다.¹¹⁾

지하에 암반구조를 가지고 있는 고준위폐기물 처분시스템 연구의 선진국인 핀란드, 스웨덴 등에서 고준위폐기물 처분용기에 대한 구조해석 연구가 상당히 진행되고 있는 실정이다. Anttila^{12),13)}는 고준위폐기물 처분용기의 구조안전성 확보를 위한 처분용기 구조에 대한 임계 구조강도를 계산하였고, Auerkari 등¹⁴⁾은 처분용기 구조의 용접부위에 대한 강도해석을 수행하였다. 또한 Raiko 등^{11),2),15),16)}과 Werme 등¹⁷⁾은 여러 유형의 처분용기 구조 설계 시 요구되는 처분용기 구조해석 문제를 다루었다. 특히, Börgesson 등¹⁸⁾은 그들의 처분용기모델에 대하여 종합적인 구조해석을 수행하는 중에 완충재의 석화작용(consolidation)을 고려한 크립해석을 수행하였다. 본 연구에서는 이와 같이 핀란드, 스웨덴 등에서 연구된 처분

용기 모델을 토대로 가압경수로(PWR)에서 발생하는 고준위폐기물 처분용기로 각각 적당하다고 판단되는^{19),20)} 4개의 사각형 바스켓 안에 고준위폐기물 다발이 채워진 처분용기 모델에 대하여 크립해석을 수행하였다.

처분용기 내부에 존재하는 고준위폐기물 다발의 고열 및 처분용기에 작용하는 지하수압 및 팽윤압에 의하여 처분용기에 구조적인 변형이 발생한 후 추가적인 외력이 작용하지 않더라도 오랜 시간 지하에 저장하는 동안 시간의 경과에 따라 처분용기내의 응력과 고준위폐기물 다발에서 발생하는 열에 의한 고온 등에 의해 처분용기 구조에 크립(creep)현상이 발생할 수 있다.²¹⁾ 이런 크립(creep)현상은 구조물이나 공업용 재료의 수명과 깊은 관계가 있기 때문에 구조적 설계에 중요한 요소이다. 그러므로 처분용기에 일정 하중이나 일정 응력 하에서 시간의존성 변형인 크립(creep)현상이 시간의 증가에 따라 초기 변형의 크기가 증가하여 소성변형이 발생할 가능성이 있다. 따라서 처분용기의 내구성 확보 차원에서 처분용기에 대한 크립(creep)해석이 요구된다. 이런 이유로 본 연구에서는 처분용기에 대하여 크립(creep)해석을 수행하여 시간 경과 후의 처분용기 내부변형의 변화를 구하였다.

본 연구에서는 MCAE구조해석 프로그램인 상용해석코드 NISA를 이용하여 처분용기에 대한 크립(creep)해석을 수행하였다.

2. 크립해석 문제의 구성

2.1 구조 형상

직경이 122cm이고 내부 바스켓이 비워져 있는 경우에 대하여 크립해석을 수행하는데 처분용기가 지하의 저장소에 보관된 후에 고열이나 지하수압 및 팽윤압에 의하여 구조적 변형이 발생한 후에 추가적인 외력이 없더라도 오랜 기간동안 지하에 저장되므로 시간의 흐름에 따라 존재할 수 있는 크립에 의한 변형이 구조물에 어떤 영향이 있는가를 알아보아야 한다. 본 논문에서는 처분용기내의 열분포 복잡성 및 시간의존성 때문에 벤토나이트의 팽윤압과 지하수압의 영향만을 고려하여 처분용기의 내부주철 삽입물 및 이를 둘러싸고 있는 구리(copper)재질의 외곽 쉘과 위아래 덤개에서 발생하는 크립변형에 대하여 해석을 수행하였다.

해석대상 처분용기 구조물의 구조형상 및 주요재원은 다음 그림 1에 표시되어 있다.

2.2 구조물질 상수 및 크립법칙

가압경수로(PWR)형 처분용기는 내부 주철삽입물(cast

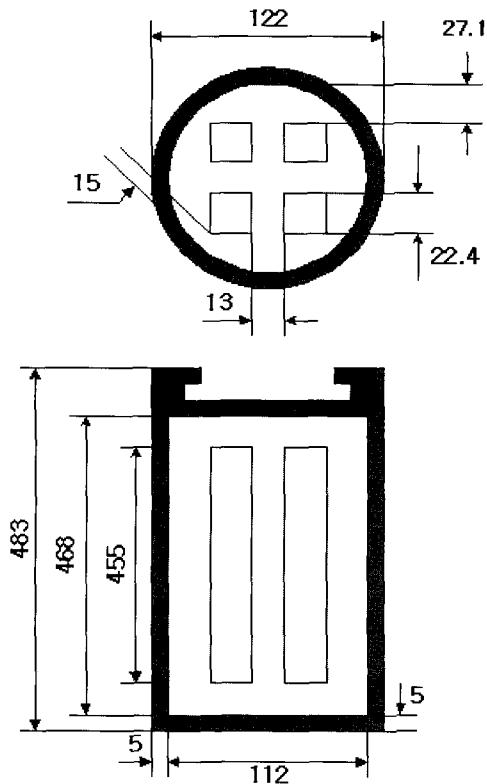


그림 1 Geometry of the PWR canister(unit: cm)

iron insert)과 외곽 쉘(outer shell) 및 위아래 덮개(lid & bottom)로 구성되어 있다. 외곽 쉘 및 위아래 덮개는 구리(copper)로 이루어져 있고, 처분용기의 내부 삽입물은 주철(cast iron)로 채워져 있다. 내부삽입물의 바스켓은 비워져 있다고 가정하였다. 이들 재질에 대한 물질 특성들이 다음 표 1에 나타나 있다.

표 1 Material properties²²⁾

	Cast iron	Copper
Young's modulus E (GPa)	126.5	117
Poisson's ratio ν	0.25	0.3
Mass density ρ (kg/m ³)	7,400	8,900

외곽 쉘 및 위아래 덮개는 구리(copper)재질로 이루어져 있고, 처분용기의 내부 삽입물은 주철(cast iron)로 채워져 있는데 이들에 대한 크립해석을 수행하기 위해서는 적당한 크립함수(creep function)가 정의되어야 한다. 다음은 본 연구에서 사용한 구리(copper) 및 주철(cast

iron)에 대한 크립함수(Pettersson 1991)¹⁸⁾를 나타내고 있다.

(a) Creep function for copper

$$\dot{\epsilon} = 1.58 \times 10^{-17} \sigma_j^{3.4}, \quad \sigma_j < 130 \text{ MPa}$$

여기서, σ_j = von Mises stresses in MPa

$\dot{\epsilon}$ = rate of creep strain (1/s)

(b) Creep function for cast iron

$$\dot{\epsilon} = 1.58 \times 10^{-20} \sigma_j^{3.4}, \quad \sigma_j < 130 \text{ MPa}$$

여기서, σ_j = von Mises stresses in MPa

$\dot{\epsilon}$ = rate of creep strain (1/s)

일반적으로 구조물의 크립현상을 지배하는 점탄성 구성방정식(응력-변형도관계식)은 다음과 같다.

$$\sigma_{ij}(\mathbf{x}, t) = \int_{-\infty}^t G_{ijkl}(t-\tau) \frac{\partial}{\partial \tau} E_{kl}(\mathbf{x}, \tau) d\tau$$

여기서 G_{ijkl} 은 relaxation 함수 텐서, σ_{ij} 는 응력 텐서, E_{kl} 는 그린변형률 텐서이다. t 와 τ 는 시간이다.

2.3 해석과정

2.3.1 외부압력하중 적용

벤토나이트 벼파에 지하수가 완전히 포화된 후의 팽윤압인 15MPa를 처분용기 외곽에 수직으로 적용시킨다. 이 팽윤압을 사용중인 컴퓨터연산능력이 허용하는 최대시간인 1억(10^8)초(sec)까지 지속적으로 적용시킨다.

처분 용기의 외곽 쉘 및 위아래 덮개는 구리(copper)재질로서 벤토나이트의 팽윤압(10MPa)과 지하수압(5MPa)을 지속적으로 받는다고 가정하여 해석하였고, Börgesson 등¹⁸⁾의 연구에서 고려한 벤토나이트(완충재)의 석화작용으로 인한 압력하중의 감소는 고려하지 않았다.

2.3.2 크립법칙 적용

15MPa의 팽윤압을 적용시킨 후 1억(10^8)초(sec)까지 크립법칙을 적용시킨다. 크립 해석에 있어서 구리(copper)의 크립변형은 1억(10^8)초(sec)까지만 계산하였는데 이는 사용중인 컴퓨터연산능력의 한계로 1억(10^8)초(sec)이상의 연산은 가능하지 않기 때문이다.

1초(sec)까지 모든 압력 하중이 작용하고 이 압력하중은 해석 완료 시점인 1억(10^8)초(sec)까지 지속적으로 작용한다고 가정하였다.

3. 유한요소 해석

3.1 유한요소 모델링

처분 용기의 크립 해석을 위한 유한 요소모델은 8개의 절점(node)을 갖는 육면체요소(hexahedron element)를 사용하였다.

가압경수로(PWR)형의 처분용기 유한요소 모델에서 바스켓 내부가 비워진 경우에 직경의 크기는 122cm로 고정시키고 해석을 수행하기 때문에 하나의 유한요소 모델을 이용하였고 총 절점(node) 수는 2,231개이고, 총 유한요소(element)의 수는 2,941개로 모델링을 수행하였다. 현재의 모델보다 유한요소 수를 증가시켜 더 세분화된 유한요소모델을 사용할 수 있지만 그런 경우 자유도(DOF)의 증가로 현재 사용중인 시간한계인 1억(10^8)초(sec)내에서의 컴퓨터 연산능력 한계의 초과로 더 세분화된 유한요소모델은 사용하지 못하였다.

3.2 경계 및 외력조건

다음 그림 3과 같은 구조 형상에서 처분용기의 YZ 단면에 대하여 u_x , XZ 단면에 대하여 u_y , XY단면에 대하여 u_z 가 구속되어져 있고 처분용기의 상하부 면과 위아래 면에 수직하게 일정한 압력(15MPa)이 작용한다.

3.3 해석 방법

지하에 매설된 처분용기에 가해지는 압력하중은 벤토나

이트의 팽윤압(10MPa)과 지하수압(5MPa)을 합한 총 15MPa의 하중이 처분용기에 작용한다고 가정하여 크립해석을 수행하였다. 벤토나이트(완충재)의 팽윤압은 지하수가 완전히 포화되어 있다고 가정하여 점토 재질인 벤토나이트에서의 시간의 경과에 따라서 완충재가 경화되면서 생기는 압력하중인데 이 하중은 시간의 경과와 함께 자연스럽게 소산(消散)작용에 의해서 응력이 감소하고 크립의

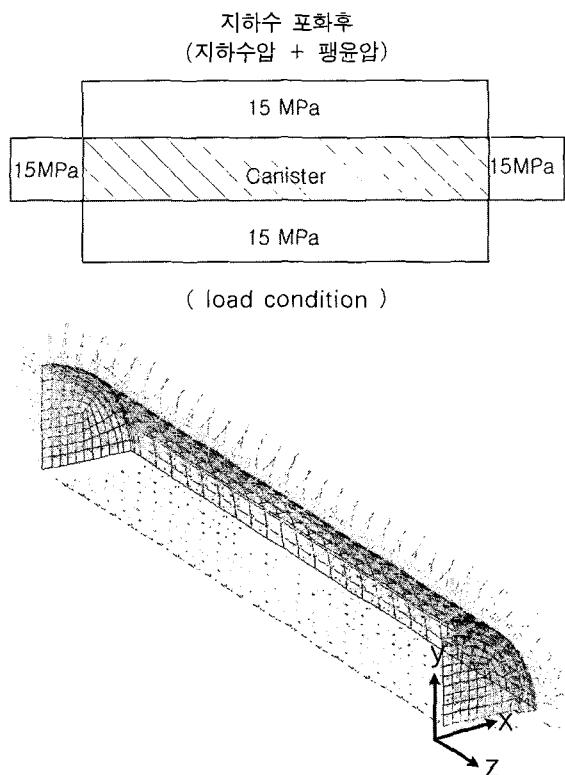


그림 3 Boundary and external load conditions

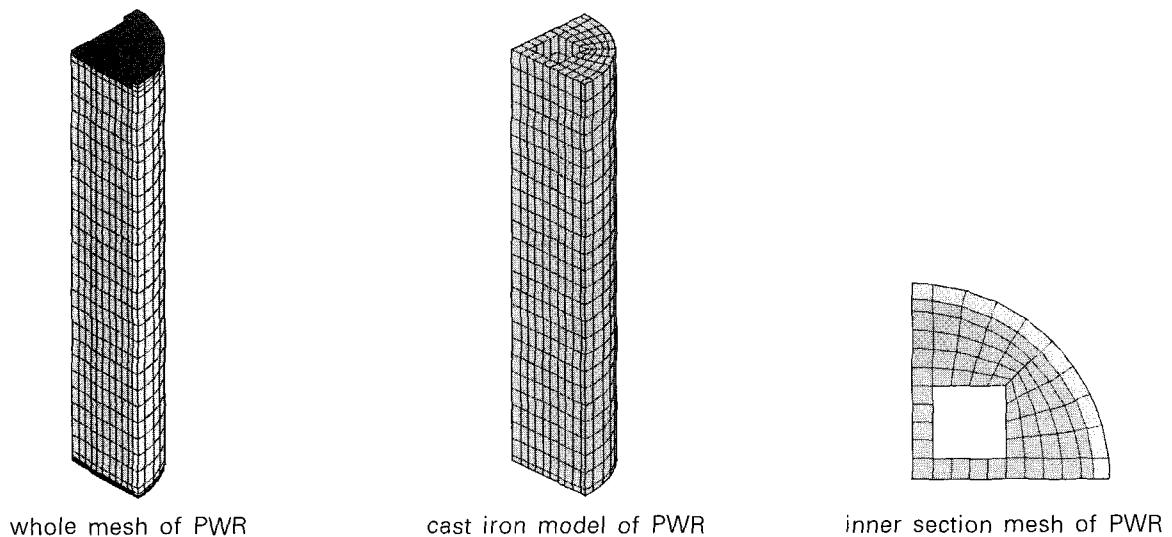


그림 2 Finite element model for the analysis

영향도 감소되어질 것이라고 생각되지만,¹⁸⁾ 본 논문에서는 좀 더 보수적인 해석결과를 얻기 위하여 벤토나이트의 팽윤압의 변화는 고려하지 않고, 15MPa의 압력하중이 일정하게 작용한다고 가정하여 해석을 수행하였다. 실제 수치계산에서 1억(10^8)초 동안 계산을 수행하기 위해서 계산초기에는 작은 시간증분(1초~10초)을 사용하지만 컴퓨터 연산능력의 한계로 시간이 경과함에 따라 작은 시간증분을 사용치 못하고 점점 큰 시간증분(1,000초~10,000초)을 사용하였다.

3.4 해석 결과 및 분석

크립해석 결과를 검토해 보면 처분용기에서의 크립 영향은 시간이 지남에 따라 최대 응력을 서서히 감소하는 응력이 완현상이 일어나지만 변형은 이와 반대로 점차 증가함을 알 수 있다(표 2 참조). 이의 물리적인 이유는 변형률은 점점 발생함에 따라 소실되지 않고 누적되지만 변형률이 누적되면서 구조물이 느슨해지면 구조물내부의 응력은 자연적으로 감소하기 때문이다. 또한 처분용기의 변형률은 다음 표 3에서와 같이 시간의 경과와 함께 증가함을 알 수 있는데, 처분용기의 위아래 덮개(lid & bottom)에서 비워진 내부バス켓 부분의 상 하부 면에서의 변형과 변형률이 가장 크게 나타남을 알 수 있다(그림 8~10 참조).

표 2 Creep analysis results(maximum stress and deformation) (PWR type canister, empty basket, D = 122cm)

Results	Time(sec)	1	10	100	1000	10000	100000	10^6	10^7	10^8
Max. von-Mises stress(MPa)		31.16	31.17	31.22	31.41	30.73	25.88	21.36	16.33	15.09
Max. deformation (cm)		0.0184	0.0184	0.0184	0.0193	0.0206	0.0238	0.0409	0.15514	0.83515

표 3 Creep analysis results(maximum strains) (PWR canister, empty basket, elastic & creep strain, D=122cm)

TIME \ ϵ	E _{xx}	C _{xx}	E _{yy}	C _{yy}	E _{zz}	C _{zz}	E _{xy}	C _{xy}	E _{yz}	C _{yz}	E _{zx}	C _{zx}
1	0.0154	0.571×10^{-6}	0.0154	0.571×10^{-6}	0.0117	62.19×10^{-6}	0.0347	10.69×10^{-6}	0.0247	19.32×10^{-6}	0.0247	19.32×10^{-6}
10	0.0154	3.951×10^{-5}	0.0154	3.951×10^{-5}	0.0117	13.94×10^{-4}	0.0347	28.65×10^{-5}	0.0247	52.11×10^{-5}	0.0247	52.11×10^{-5}
100	0.0154	3.735×10^{-4}	0.0154	3.735×10^{-4}	0.0117	86.62×10^{-4}	0.0347	17.24×10^{-4}	0.0247	33.22×10^{-4}	0.0247	33.22×10^{-4}
1000	0.0159	0.0021	0.0159	0.0021	0.0252	0.0227	0.0356	0.0064	0.0260	0.0115	0.0260	0.0115
10^4	0.0183	0.0059	0.0183	0.0059	0.0393	0.0397	0.0399	0.0149	0.0303	0.0138	0.0303	0.0138
10^5	0.0377	0.0295	0.0377	0.0295	0.0638	0.0643	0.0714	0.0483	0.0558	0.0475	0.0558	0.0475
10^6	0.1615	0.1542	0.1615	0.1542	0.1505	0.1534	0.3376	0.3153	0.2385	0.2184	0.2385	0.2184
10^7	0.7129	0.7028	0.7129	0.7028	0.5475	0.5528	1.429	1.415	1.636	1.620	1.636	1.620
10^8	1.654	1.657	1.654	1.657	1.185	1.208	2.971	2.988	0.1347	0.1982	0.1347	0.1982

Time(sec), Strain(1E-02), E_{ij} : Elastic strain, C_{ij} : Creep strain

처분용기의 내부 주철삽입물(cast iron insert)에 발생하는 크립 변형률은 위아래 덮개(lid & bottom)에 비하면 매우 작게 나타남을 확인할 수 있다(그림 9~10 참조). 비록 변형률이 시간과 함께 증가하지만 해석 수행 기간인 1억(10^8)초(sec) 동안은 구조물에 큰 영향이 없음을 알 수 있다. 처분용기의 최대 응력은 예상한대로 내부 주철삽입물의 비워진 바스켓주위에서 생기지만 주철삽입물의 항복응력 约(200~290MPa)보다 매우 작음을 알 수 있다(표 2 혹은 그림 6, 7, 그림 11 참조). 하지만 처분

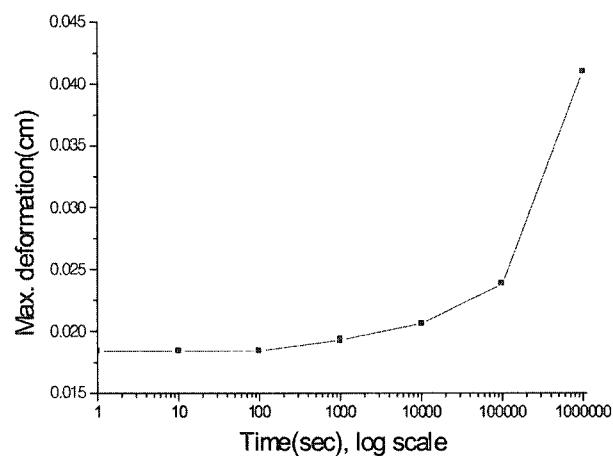


그림 4 Maximum creep deformation change for the time (PWR type canister, empty basket, D=122cm)

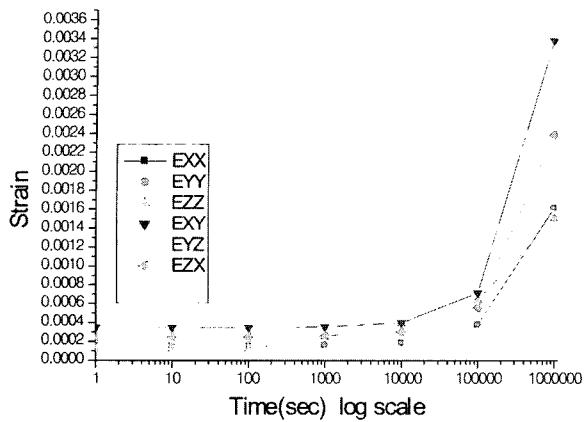


그림 5 Maximum strain change for the time
(PWR type canister, empty basket, D=122cm)

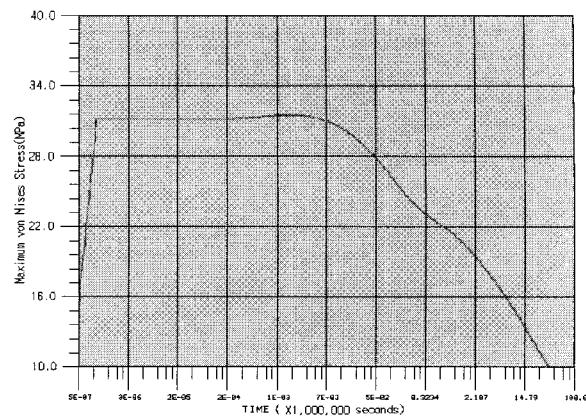


그림 6 Maximum von Mises stress change for the time
(PWR type canister, empty basket, D=122cm)

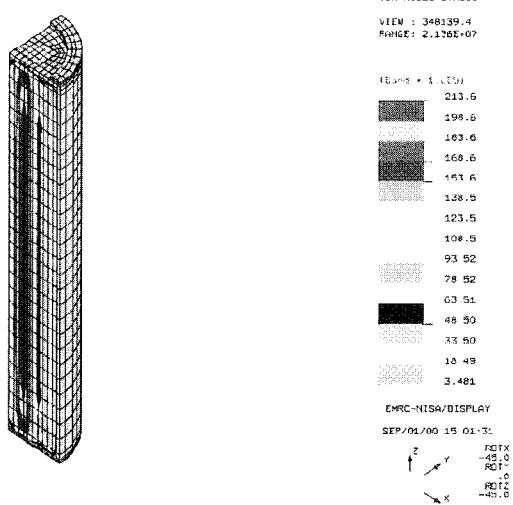


그림 7 Stress distribution in the canister
(after 1,000,000sec)(quarter overall section view)

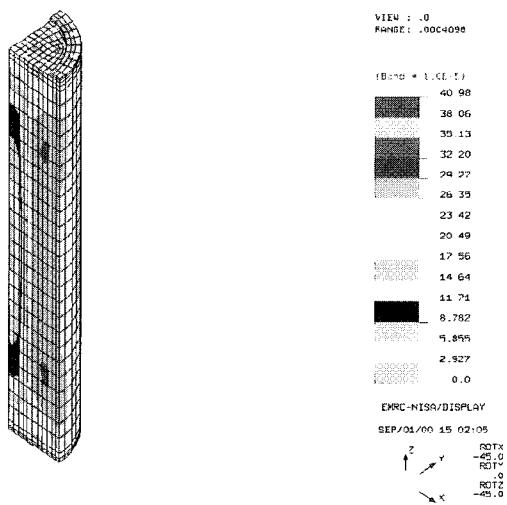


그림 8 Resultant displacement distribution in the canister
(after 1,000,000sec)(quarter overall section view)

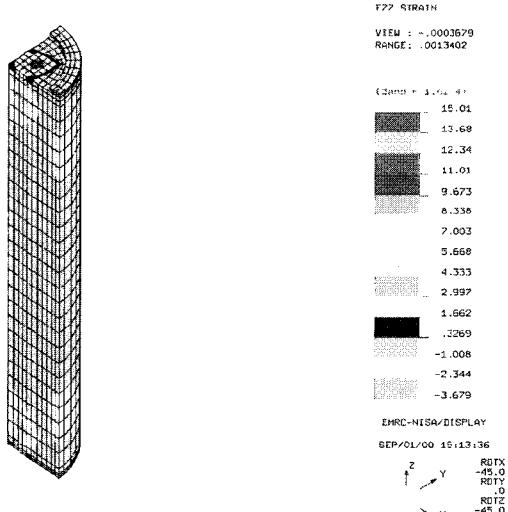


그림 9 Ezz strain distribution in the canister
(after 1,000,000sec)(quarter overall section view)

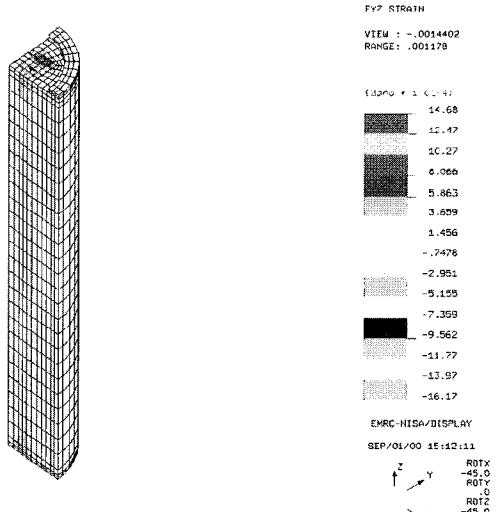


그림 10 Eyz strain distribution in the canister
(after 1,000,000sec)(quarter overall section view)

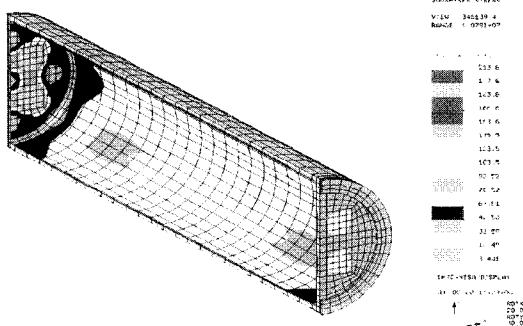


그림 11 Stress distribution in the outer shell
(after 1,000,000sec) Copper shell, half overall section view)

용기 외곽 쉘 및 위 아래덮개의 크립에 의한 영향은 비록 최대 응력은 감소하더라도 변형과 변형률은 계속 증가하다가 1억(10^8)초부터 일부 크립 변형률이 감소함을 알 수 있다(표 3 참조).

1억(10^8)초(sec)까지의 크립해석을 수행한 결과 시간(time)에 따른 처분용기 구조물 내에 발생하는 변형률의 변화를 구할 수 있었다. 해석결과를 분석한 결과 100,000초(sec)부터 1,000,000초(sec)사이에서 갑작스런 변형률의 증가가 발견되었다(표 3 혹은 그림 5 참조). 그러나 1억(10^8)초에 도달하면 일부 크립 변형률은 현저히 감소하고 있기 때문에(표 3) 크립 변형률의 변화를 알아보는데 1억(10^8)초(sec) 정도의 시간이면 충분하다고 사료된다. 또 1억(10^8)초(sec)까지 발생한 최대 크립 변형률의 크기는 약 3.0%미만임을 알 수 있다. 그리고 이 크립 변형률은 대부분 구리로 된 위아래 덮개(lid & bottom)에 발생하고 있다. 약 3.0%의 크립 변형률은 구리의 크립에 의한 항복변형률 5.0%보다 훨씬 작기 때문에 구리로 이루어진 위아래 덮개에는 구조적인 항복이 진행된다고 볼 수 없다. 따라서 1억(10^8)초(sec)가 경과되어도 내부 주철삽입물(cast iron insert)을 감싸고 있는 외곽 쉘(outer shell)과 위아래 덮개(lid & bottom)에는 심각한 변형률은 아직 발생하고 있지 않은 것으로 사료된다. 또한 내부 주철삽입물에는 많아야 0.003%정도의 미세한 크립 변형률(그림 9~10 참조)만 발생하고 있기 때문에, 고준위폐기물을 감싸고 있으면서 처분용기의 구조적 강도를 유지하는 내부 주철삽입물은 구조적으로 그 안전성에 큰 문제가 없다고 사료된다.

4. 결 론

처분용기의 크립해석 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

- 처분용기에서 크립에 의해 발생하는 최대 응력은 초기에 급격히 증가하여 일정한 값(약 31MPa)에 도달한 후 그 이후에는 시간의 진행과 함께 점차 감소하는 응력 이완현상을 보이고 있다. 반면에 변형과 변형률은 점차 증가하지만 크립에 의한 처분용기 내부의 응력은 안전계수 $S = 1.5 \sim 2.5$ 조건을 만족하기 때문에 응력 관점에서는 구조적으로 처분용기는 안전성을 유지한다고 볼 수 있다.

- 처분용기의 윗 덮개(lid part)와 아래 덮개(bottom part)의 내부 주철 삽입물과 접한 상 하부면에서 크립에 의한 변형과 변형률이 가장 많이 발생 하지만 처분용기의 내부주철삽입물 부분은 이에 비해 변형률이 매우 작게 발생하여 크립의 영향이 작음을 알 수 있다.

- 처분용기에서 처분용기내의 크립변형률은 시간의 경과와 함께 증가하여 본 연구에서 계산한 시간인 1억(10^8)초까지 계속 증가하지만, 이후에 발생되는 변형률의 일부는 급격히 감소하는 경향을 보이고 있으며, 또한 발생되는 대부분의 크립 변형률은 구리로 된 위아래 덮개에 발생하고, 이 때 발생하는 최고 크립 변형률의 크기는 3.0%미만으로 크립에 의한 항복 변형률(5.0%)보다 작기 때문에 처분용기의 구조적 안전성이 크게 문제되지 않을 것으로 사료된다.

- 이상의 결과는 비록 처분용기의 구조 및 재원들은 다르지만 Börgesson 등¹⁸⁾과 Raiko 등¹⁾의 연구결과와 매우 일치하고 있으며 특히, 크립변형이 위아래 덮개에 많이 발생한다거나, 이 때 발생한 변형률이 5%를 넘지 않는 점등이 일치하는 것은 본 연구의 결과가 타당하다는 것을 보여주고 있다.

- 본 논문에서 처분용기의 크립변형 해석 시 처분용기 내부의 고준위폐기물 다발에 의해서 발생하는 처분용기내의 열분포의 복잡성 및 시간 의존성 때문에 열분포에 의한 처분용기 크립변형에 대한 영향을 고려하지 못하였지만 추후의 연구에서 이에 대한 연구를 계속할 필요가 있다고 사료된다.

감사의 글

본 논문은 과학기술부 원자력중장기 개발사업 기금으로 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- Raiko, H., Salo, J.P., "Design Report of the Canister for Nuclear Fuel Disposal,"

- Report POSIVA 96-13, Posiva Oy, Helsinki, ISBN 951-652-012-x, Finland, 1996*
2. Raiko, H., Salo, J.P., "Design Report of the Disposal Canister for Twelve Fuel Assemblies," *Report Posiva-99-18*, Posiva Oy, Helsinki, Finland, 1999
3. Bond, A. E., Hoch, A. R., Jones, G. D., Tomczyk, A. J., Wiggin, R., M., Worraker, W. J., "Assessment of A Spent Fuel Disposal Canister", *AEA Technology*, Harwell, UK, 1997
4. Mayer, E., "Spent Fuel Encapsulation Plant, Preliminary Design of Dold-process Plant," *TVO/KPA Turvallisuus Ja Tekniikka, Work Report 89-1*, Teollisuuden Voima Oy, Helsinki, 1985
5. Kwon, Y.J., Kang, S.U., Choi, J.W., Kang, C.H., "Structural Analysis for the Determination of Design Variables of Spent Nuclear Fuel Disposal Canister," *KSME International Journal*, Vol.15, No.3, 2001 pp.327-338
6. Savås, L., "Canister for Nuclear Waste Disposal, Preliminary Design of the Steel Cylinder," *Arbetsrapport 93-38*, VBB Viak AB, Stockholm, Sweden, 1993
7. O'Neil, W.C., Gregg, D.W., Heckman, J.N., Russel, E.W., Stein, W., "Preclosure Analysis of Conceptual Waste Package Design for a Nuclear Waste Repository in Tuff," Lawrence Livermore National Laboratory, 1984
8. Thunvik, R., Braester, C., "Heat Propagation from a Radioactive Waste Repository. SKB 91 Reference Canister," *Royal Institute of Technology*, Stockholm, Sweden, March, 1991
9. Renström, P., "Heating of Copper/Steel Canisters by Decay Power of Encapsulated Nuclear Waste-Finite Element Analysis," *Arbetsrapport 93-29*, VBB Viak AB, Stockholm, Sweden, 1993
10. 권영주, 하준용, 최종원, "가압경수로 고준위폐기물 처분용기의 열응력 해석," 한국전산구조공학회 논문집, 제15권 제3호, pp.471~480, 2002
11. Ahonen, L., "Chemical Stability of Copper Canisters in Deep Repository," *Report YJ T-94-13, Nuclear Waste Commission of Finnish Power Companies*, Helsinki, p.101, 1995
12. Anttila, M., "Criticality Safety Calculations for the Nuclear Waste Disposal Canisters," *Report POSIVA-96-11*, Posiva Oy, Helsinki, 1996
13. Anttila, M., "Criticality Safety Calculations of the Nuclear Waste Disposal Canisters for Twelve Spent Fuel Assemblies", *Working Report 99-03*, Posiva Oy, Helsinki, 1999, p.20
14. Auerkari, P., Holmstrom, S., "Long-term Strength of EB Welds of the Canister for Nuclear Fuel Disposal," *Working Report 97-35e*, Posiva Oy, Helsinki, p. 21, 1997
15. Raiko, H., Salo, J. P., "The Design Analysis of ACP-Canister for Nuclear Waste Disposal," *Report YJT-92-05*, Nuclear Waste Commission of Finnish Power Companies, Helsinki, Finland, 1992
16. Salo, J. P., Raiko, H., "The Copper/ Steel Canister Design for Nuclear Waste Disposal," *TVO/KPA Turvallisuus Ja Tekniikka, Work Report 90-10*, Rev. 1., Teollisuuden Voima Oy, Helsinki, Finland, 1990
17. Werme, L., "Design Premises for Canister for Spent Nuclear Fuel," *Technical Report TR-98-08, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.(SKB)*, Stockholm, Sweden, ISSN 0284-3757, 1998, p.46
18. Börgesson, L., "Interaction between Rock, Bentonite buffer and Canister. FEM Calculations of Some Mechanical Effects on the Canister in Different Disposal Concepts," *Technical report TR 92-20, Swedish Nuclear fuel and Waste Management Co.(SKB)*, Stockholm, appendixes, ISSN 0284-3757, 1992, p.83
19. Choi, J.W., Choi, Y.S., Kwon, S.K., Kuh, J.E., Kang, C.H., "Technology Assessment of the Repository Alternatives to Establish a Reference HLW Disposal Concept," *Journal of the Korean Nuclear Society*, Vol.31, 1999, pp.83~100
20. Choi, J.W., Ko, W.I., Kang, C.H., "Reference Spent Fuel and Its Characteristics for a Deep Geological Repository Concept Development," *Journal of the Korean Nuclear Society*, Vol.31, No.6, 1999, pp.23~38
21. Skrzypek, J. J., "PLASTICITY and CREEP-Theory, Examples, and Problems," CRC Press, 1993

22. Compiled and Edited by Hagrman, D. L.,
A. R. Reymann, "Matro-Version II, a Hand-
book of Materials Properties for Use in the
Analysis of Light Water Reactor Fuel Rod
Behavior," *Idaho National Engineering
Laboratory*, 1979