

사용후핵연료 처분용기의 구조해석

최종원, 권상기, 강철형

한국원자력연구소, 대전시 유성구 덕진동 150 (305-353)

권영주

홍익대, 충남 연기군 조치원읍 (339-800)

Abstract

본 연구에서는 고준위폐기물 처분시스템 개념 설정에 사용될 기준 처분용기의 규격화 자료를 도출하기 위하여 예상되는 심부 처분환경조건 하에서의 처분용기의 기계구조 해석을 수행하였다. PWR 핵연료와 CANDU 핵연료의 큰 물질적 특성차이 때문에 두가지 형태의 처분용기가 제안되었으며, 제조 및 취급의 용이성을 위하여 두가지 형태 용기의 외곽 크기는 같도록 하였다. 본 연구에서는 FEM 방법을 사용하는 NISA코드를 사용하여 예상되는 지하 처분장 주변에서의 외력조건 (지하수압 5MPa, 완충재의 팽윤압 10MPa)을 가정하여 처분용기의 기계-구조해석을 수행하였다. 안전계수 1.5-2.5사이를 만족시키는 처분용기 외경은 122cm였으며 높이는 488cm로 이때 용기 내부의 저장 바스켓 사이는 13cm, 주철 삽입물의 두께는 15cm인 것으로 평가되었다.

1. 서론

처분용기는 많은 붕괴열과 방사능을 가지고 있는 고준위폐기물을 직접적으로 포장하고 있는 실제상의 일차적인 공학적 방벽으로서 그 성능과 역할이 방사선적 안전성 측면에서 아주 중요하다. 아직 법적으로 처분용기의 설계수명 등이 정의되지는 않고 있지만 본 연구에서는 일단 “처분용기는 어떤 조건하에서도 고준위폐기물에 함유된 핵분열생성물들의 방사성독성이 무시될 수 있는 기간인 1,000년 동안 폐기물을 완전히 격리시킬 수 있도록 그의 수명이 보장되어야 한다”라고 가정하였다. 예상되는 처분조건하에서 처분용기의 수명 기간동안 화학적 저항성을 갖아야 하고, 처분용기에 예상되는 지하수압과 벤토나이트 완충재의 팽윤압 등의 외압에 견딜 수 있도록 그 기계적 강도를 충분히 유지하여야 한다 [1-4].

고준위폐기물의 처분심도가 500m 일 경우, 처분용기의 기계·구조적 안전성 측면에서 고려하여야 할 외력은 벤토나이트 완충재의 팽윤압과 처분심도에서의 지하수압등으로 예상된다. 여기서 지하수와 접촉하면서 발달되는 완충재의 팽윤압의 경우 포화과정 또는 어떤 상태에 따라 처분용기에 국부적인 외력과 균일한 외력 등으로 작용하게 될 것이다. 이와같은 처분환경 내에서 예상될 수 있는 처분용기의 기계·구조설계 해석 조건은 다음과 같은 여러 가지 경우로 설정될 수 있다. 첫째, 정상하중이 작용할 때에는 처분용기가 화강암층의 지하 500 m에 놓이기 때문에 처분용기가 정상적으로 받을 외압은 지하수압 5MPa과 벤토나이트 완충재의 팽윤압 10MPa 등 총 15MPa이다. 그런데 처분용기 설계시 고려되는 안전계수는 외압조건외 불확실성은 물론 재료특성 및 제조상의 불확실성도 포함되어야 하는데 이때 사용되는 재료의 구조와 특성에 따라 1.5-2.5의 값으로 정하였다. 여기서 안전계수는 처분용기를 구성하는 고체물질의 항복응력과 처분용기 구조물 내부에 발생하는 최대 내부응력의 비로 정의된다. 둘째, 급격한 지각변동이나 지진 또는 장시간 동안 암반이 이동하는 rock movement 경우인데, 이 경우 처분용기는 지하수압과 팽윤압에 의한 외압 이외에도 처분장 모암에 지진이나 기타의 원인에 의하여 10cm의 전단변형이 발생한다고 가정하였다. 이와같은 조건하에서도 처분용기는 기계적 건전성을 유지할 수 있도록 설계되어야 한다. 이때 안전계수는 고려되지 않는다. 셋째, 처분초기 수 십년 동안 고준위폐기물은 많은 붕괴열이 방출되는 데, 고

열에 의해 처분용기 구조에 열응력이 발생할 수 있다. 따라서 처분용기 설계시 이와 같은 열응력에 의한 구조 건전성을 확인 하여야한다. 넷째, 처분장 위로 두께 수 km에 이르는 얼음층이 형성된다는 빙하에 의한 추가하중 고려인데, 이는 환경적이고 확률적인 문제로서 본 연구 범위에서는 고려하지 않았다.

본 연구에서는 처분용기를 크게 두 가지 형태로 나누어 하나는 PWR형 핵연료를 처분하기 위한 것이고, 다른 하나는 원통형의 CANDU 핵연료다발을 처분하기 위한 것으로 개략적인 스케치는 그림 1과 같다. 처분용기는 내부주철 삽입물과 부식작용 등에 저항하는 구리나 니켈 합금으로 만든 외곽 셸로 이루어져 있다. 처분용기 내부주철 삽입물은 핵연료를 지지하고 외부에서 가해지는 외력의 대부분을 지탱한다. 따라서 내부주철 삽입물의 치수 및 구조형상은 외부의 하중에 견딜 수 있도록 정해져야한다. 처분용기의 구조가 외부의 하중에 기계적으로 안정되지 않는다면 처분용기는 파단 될 것이다. 본 연구에서는 예상되는 여러 가지 처분조건하에서 처분용기의 기계구조적 안전성을 만족시키는 처분용기 내부 구조 및 각부분의 제원을 도출하고자 NISA코드[5]를 사용하여 기계구조해석을 수행하였다. 먼저 가장 기본적인 해석으로는 내부주철 삽입물의 강도를 측정하기 위한 선형정적 구조해석을 수행하였으며 이를 통하여 처분용기를 구성하고 있는 내부 주철 삽입물의 제원(직경, 길이)을 결정하고 또한 처분용기의 사용 후 핵연료다발의 개수, 배열위치 등을 결정하였다. 그리고 선형정적 구조해석에 추가하여 내부주철 삽입물을 감싸고 있는 외곽 셸과 위아래 덩개의 두께를 결정하기 위한 비선형 구조해석인 외곽 셸에 대한 탄·소성해석을 수행하였으며, 처분용기 내부의 열응력 해석을 수행하였다.

2. 처분용기 내부 삽입물에 대한 구조강도 해석(지하수압 + 팽윤압)

가. 연구 내용

처분용기 구조형상 및 제원을 여러 가지로 변화시키면서 구조해석 수행하였다. 이때 좀더 보수적인 계산을 위하여 처분용기 내부에 있는 바스켓은 비어 있는 것으로 가정하였다.

PWR형 처분용기 경우, 내부 핵연료다발 바스켓의 개수를 4개로 정하고 처분용기 직경을 100cm부터 10cm씩 증가시키면서 구조해석을 수행하였다. 여기서 핵연료 바스켓 사이의 간격은 핵임계 안전을 위하여 13 cm로 고정한 경우와 그 이상 사이거리를 반경방향으로 증가시킨 경우 등의 내부응력 변화도를 비교분석하였다. 그리고 CANDU형 처분용기의 구조해석은 PWR형 처분용기 구조 안정성해석 결과를 근거로 직경을 122cm로 정하고 내부 원통형 핵연료다발 바스켓을 적절히 배열할 수 있는 의 개수를 변화시키면서 구조해석을 수행하였다.

본 계산을 위한 외력 및 경계조건은 다음과 같다.

- Case 1 하중 : 지하수가 벤토나이트 버퍼에 완전히 포화된 경우로서 「지하수압 + 팽윤압」은 15MPa (혹은 20MPa)로 처분용기 외곽 전체에 균일하게 작용시킴, 이때 경계조건은 처분용기 구조가 강체이동이 없도록 내부 중심점을 고정.
- Case 2 하중 : 지하수가 벤토나이트 버퍼에 포화되는 과정인 경우로서 「팽윤압」은 8MPa (혹은 15 MPa)로 처분용기 반쪽 상단에 작용시킴, 이때 경계조건은 양단 fixed end 조건임.

이상과 같은 두가지 경우에서 안전계수 S ($S \equiv$ 항복응력/최대내부응력) 값 1.5~2.5을 만족시키는 규격자료를 기준 처분용기 제원으로 도출하였다.

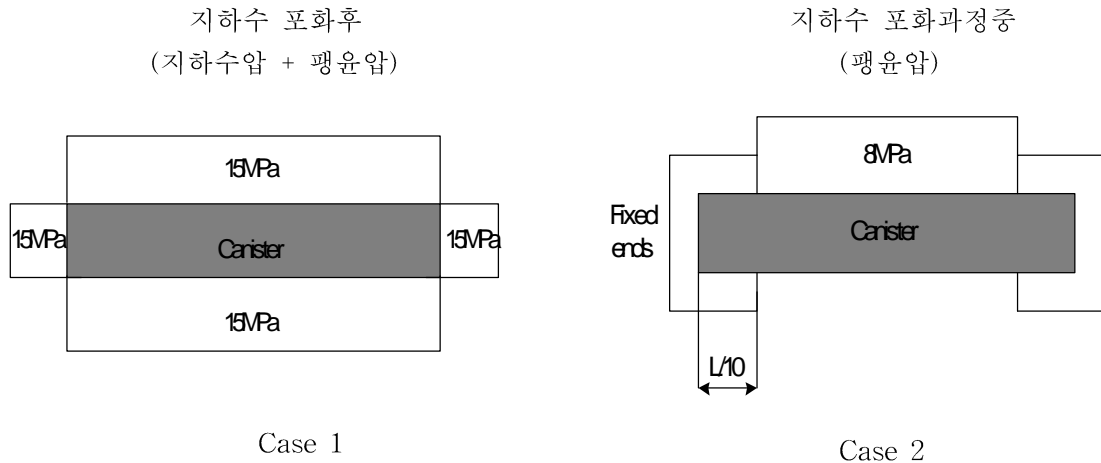


그림 1 External hydrostatic pressure and bentonite swelling pressure applied on the canister

나. 연구결과

핵연료다발 바스켓 사이의 간격을 13cm로 고정시키면서 처분용기 직경을 증가시킨 경우가 핵연료다발 바스켓 사이의 간격을 처분용기 직경과 함께 반경방향으로 증가시킨 경우보다 그림 2에서 보는 바와 같이 발생하는 내부응력이 적으므로 구조적으로 안전하다고 볼 수 있다. 본 계산은 Case 2 하중조건을 사용하였으며 이때 팽윤압은 15MPa로 가정하였다.

PWR형 처분용기에 대하여 그림 3에서 보인 바와 같이 지하수포화 후 하중조건 (Case 1 하중 조건, 이때 「지하수압+팽윤압」은 15MPa)하에서의 처분용기 상태가 지하수 포화 과정 중에서의 하중조건 (Case 2 하중 조건, 이때 팽윤압은 8MPa)하에서 보다 용기 내부에 발생하는 응력상태가 작으므로 구조적으로 더 안전하다. 내부 주철 삽입물이 처분용기 구조의 대부분을 지탱하고 있으므로 설계 시 고려해야 되는 처분용기의 안전계수는 내부 주철 삽입물 내에 발생하는 최대 von-Mises 응력값을 기준으로 평가하였다. 일반적으로 주철 재료의 항복응력(σ_y)값이 200~290MPa임을 고려할 때 PWR형 처분용기의 직경변화에 따른 안전계수(S)값은 Case 1, 2 하중조건을 고려한 경우 모든 직경값에 대하여 2.0이상의 값을 가지므로 처분용기의 직경이 112cm 이상 (높이 496cm)에서 처분용기의 구조 안정성은 보장된다고 평가된다.

CANDU형 처분용기 경우, 직경을 122cm(높이 H=496cm)로 고정했을 때 용기 내부의 핵연료를 구조적으로 안전하게 배열할 수 있는 원통형 핵연료다발 바스켓 개수를 변화시키면서 지하수 포화과정 중의 하중조건(Case 2 하중조건)에 대하여 수행한 구조해석 결과는 표 3에 정리된 바와 같다. 이 표에서 보여주는 바와 같이 내부 핵연료다발 개수가 증가함에 따라 내부 주철삽입물에 발생하는 응력값은 증가하며 이 응력값을 기준으로 안전계수(S)를 계산하면 안전계수 $S = 1.5 \sim 2.0$ 에 적당한 내부 핵연료다발 개수는 33~37개임을 알 수 있다.

내부 응력분포(그림 4, 5 참조)를 검토하면 PWR형 처분용기인 경우 내부 직사각형 핵연료다발 바스켓 사이의 얇은 벽과 바스켓 외곽코너부근에 응력이 많이 분포하고 있으며, CANDU형 처분용기인 경우도 원통형의 핵연료다발 바스켓 사이의 얇은 벽에 응력이 많이 분포함을 알 수 있다. 그러나 일반적으로 처분용기 내부 바스켓은 핵연료들이 채워져 있으므로 실제로는 PWR형 처분용기 바스켓 외곽 코너부근의 응력집중 현상은 처분용기의 구조 안전성에 심각한 영향을 없을 것으로 예상된다. Case 2 하중조건에서는 많은 응력이 외곽셸의 fixed end 부분에 집중될 것이다.

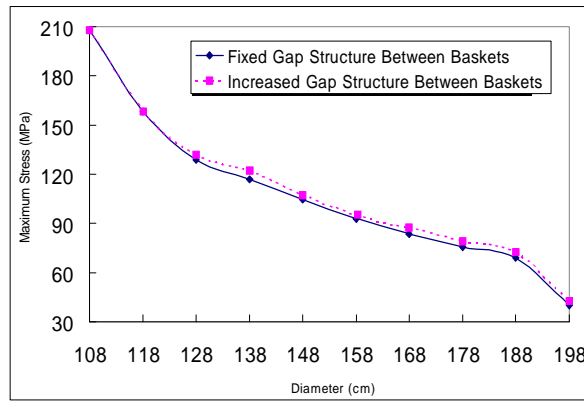


그림 2 The maximum von-Mises stress in the cast iron insert versus PWR canister diameter (Case 2, 15 MPa)

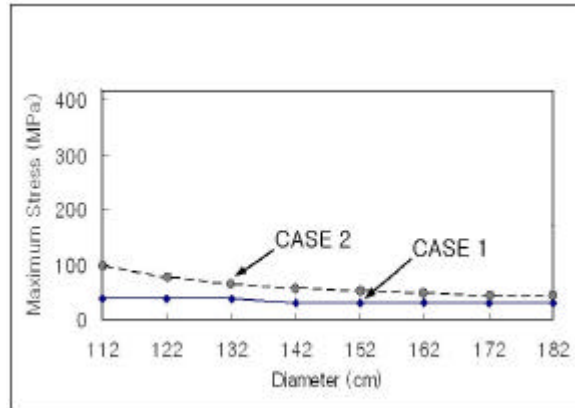


그림 3 The maximum von-Mises stress in the cast iron insert versus the PWR canister diameter under load conditions of Case 1&2.

표 1 Linear structural analysis results for the CANDU canister structure(Case 2)

Results		EA	Canister Diameter = 122cm				
			17EA	19EA	25EA	33EA	37EA
Maximum von-Mises stress (MPa)	Shell (Cu)		108.8	109.9	114.1	123.4	128.8
	Lid (Cu)		8.953	8.876	8.720	8.921	9.214
	Bottom(Cu)		10.87	10.74	10.86	10.92	11.81
	Cast iron		93.06	93.11	99.75	108.2	112.7
Maximum deflection (cm)			0.097	0.099	0.106	0.11	0.112

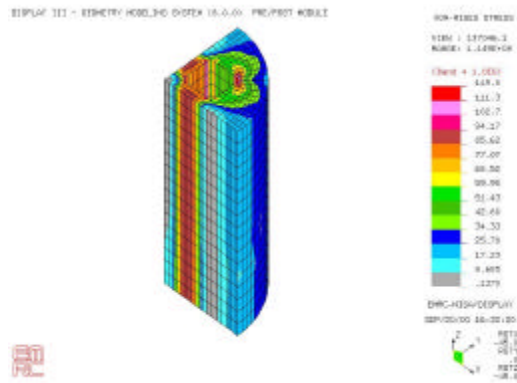


Fig. 4 Stress contour, deformed shape of canister structure
(Section view of PWR canister, Case 1)

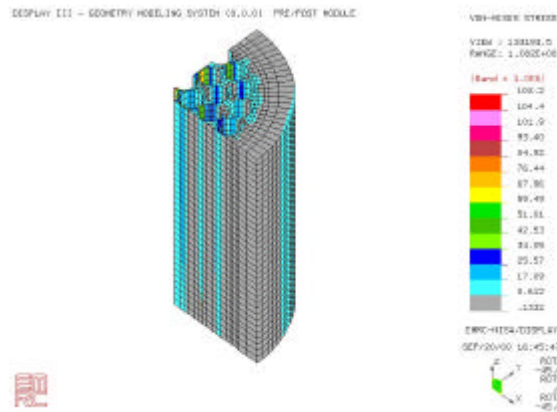


그림 5 Stress Contour, Deformed Shape of Canister Structure
(CANDU Canister, Case 2)

3. 처분용기 외곽 셸에 대한 비선형 구조해석

가. 연구내용

처분용기는 내부에 고준위폐기물을 담고 외부 충격으로부터 고준위폐기물을 보호해 줄 수 있는 주철 삽입물과 외부의 화학적 환경으로부터 처분용기를 보호하기 위한 부식방지 목적의 외곽 셸로 구성되어있다. 용기 내부 주철 삽입물(cast iron insert)과 외곽셸(outer shell)사이의 간극(gap)을 1mm로 그리고 외부 압력조건이 Case 1 경우에 대하여 구리(Cu)로 된 외곽 셸이 비선형 변형을 일으킨다고 가정하여 외곽셸의 두께를 4cm, 5cm, 6cm, 7cm로 변화시키면서 비선형 구조해석을 수행하였다. 외곽셸의 재질로 구리로 정한 이유는 다른 후보물질인 스테인레스와 니켈 합금 재료 보다 강도가 약하기 때문에 보수적인 평가를 하기 위해서다. 주어진 하중 조건하에서 발생하는 변형 중 외곽셸의 내부표면에서 처분용기 반경방향 안쪽으로 발생하는 변형크기를 계산하여 그

최대 변형크기를 간극(gap)크기인 1mm와 비교하여 그 안전성을 판정하였다.

나. 연구결과

표 2에 주어진 해석결과를 검토하면 외곽 셸의 두께가 증가할수록 외곽 셸 내부의 응력크기는 감소하고 외곽 셸에 발생하는 변형의 크기도 감소함을 알 수 있다. 간극의 크기가 1mm임을 감안할 때 외곽 셸 내부표면에서 발생하는 최대 반경방향 변형의 크기가 1mm보다 크면 내부 주철 삽입물과 외곽셸 사이에 접촉이 일어나 이차변형이 발생할 수 있으며, 이차변형이 가능한 한 작아야 하므로 내부 주철삽입물이 없다고 가정했을 때 외곽셸 내부표면에서 발생하는 반경방향 변형의 크기가 1mm보다 가능한 약간 큰 경우나 작은 경우가 바람직하다. 따라서, 표 2에서 셸 두께(thickness)가 5~6cm일 때가 구조적으로 가장 적당함을 알 수 있다.

구리(Cu)보다 강도가 더 큰 니켈(Ni) 합금이나 Stainless Steel로 외곽 셸을 설치할 경우, 발생하는 변형의 크기가 더 작아지므로 외곽 셸의 두께는 1cm 정도 더 작은 4~5cm로도 가능함을 알 수 있다.

표 2 Nonlinear structural analysis results for outer shell (canister diameter = 122 cm)

Thickness	4cm	5cm	6cm	7cm
Results				
Maximum von-Mises stress (MPa) inside the outer shell	149.4	143.1	135.7	127.8
Maximum deformation value of inner shell surface (cm)	0.119	0.107	0.097	0.081

4. 처분용기 구조물에 대한 열응력 해석 (지하수압 + 팽윤압 + 열응력)

가. 연구내용

직경의 크기가 122cm인 PWR형 처분용기 내부에 불균질한 핵연료집합체 대신에 바스켓 내부를 균일한 등가물질이 채우고 있다고 가정하고 이 바스켓의 중심온도가 167°C이고 처분용기 외곽셸 표면온도가 93°C일 때 이 온도차이에 의해 추가로 발생하는 열응력을 계산하여 「지하수압 + 팽윤압 + 열응력」에 의해 발생하는 구조변형/응력을 계산하였다. 본 계산은 다음과 같은 3단계로 열변형 구조해석을 수행하였다.

- 1단계 : 온도차이에 의해 발생하는 처분용기 내에서의 열전달 해석 수행
- 2단계 : 열전달에 의한 순수 열변형/응력 해석 수행
- 3단계 : 「지하수압 + 팽윤압」 외력조건을 추가로 가하여 「지하수압 + 팽윤압 + 열응력」에 의한 구조변형/응력 해석 수행

나. 결과

온도분포(그림 6)를 검토하면 고온의 핵연료다발 바스켓 중심부근에 높은 온도가 집중 분포함을 알 수 있다. 열응력이 추가된 경우의 결과 (표 3)를 검토하면 내부 주철삽입물에 발생하는 응력 값이 커짐을 알 수 있다. 지하수 포화후의 하중조건(Case 1 하중 조건)하에서는 내부 주철삽입물에 발생하는 응력값이 주철삽입물의 항복응력값(200~290MPa)보다 작아 안전계수 S 값이 S=1.

5~2.5을 만족함을 알 수 있다. 역시 지하수 포화과정중의 하중조건(Case 2 하중 조건)하에서는 내부 주철삽입물에 발생하는 응력값이 커지지만 내부 주철삽입물의 항복응력 값(200~290MPa)보다 여전히 작아서 안전계수 S=1.5~2.5조건을 만족하기 때문에 직경 D=122cm의 처분용기가 열응력이 추가된 경우에도 대체로 구조적으로 안전함을 알 수 있다.

응력분포 및 변형형상(그림 7-11)을 검토하면 Case 1&2 하중조건에 대하여 모두 외곽 셸과 lid부분에 많은 응력이 분포함을 알 수 있다. 또 바스켓이 비어 있는 경우와는 다르게 바스켓 코너 부근에 응력집중 현상도 발생하지 않음을 알 수 있다. 이 이유는 바스켓 내부가 채워져 있으므로 구조적으로 바스켓이 빈 경우보다 안정적이기 때문이다. 예상한대로 Case 1 하중 조건인 경우 0°, 45°, 90° 면에 대하여 응력분포가 대칭으로 발생함을 알 수 있다. 바스켓 내부가 등가물질로 채워져 있는 경우 열응력이 작용하지 않으면 예상한 대로 바스켓 내부가 비어 있는 경우보다 발생하는 내부응력값이 작아짐을 알 수 있다(표 3). 응력 분포(그림 12-13)도 Case 1 하중 조건인 경우 예상한 대로 대칭성을 유지함을 알 수 있다.

표 3 PWR형 처분용기 내부의 열응력 해석 결과 (cast iron insert)

Load case Results	Specific load conditions	Case 1	Case 2
Maximum von-Mises stress (MPa)	hydrostatic pressure + swelling pressure + thermal stress (filled basket)	131.50	162.74
	hydrostatic pressure + swelling pressure (empty basket)	39.06	79.60
	hydrostatic pressure + swelling pressure (filled basket)	22.1	65.45
Maximum deflection (cm)	hydrostatic pressure + swelling pressure + thermal stress (filled basket)	0.1400	0.1690
	hydrostatic pressure + swelling pressure (empty basket)	0.0336	0.1060
	hydrostatic pressure + swelling pressure (filled basket)	0.0323	0.1050

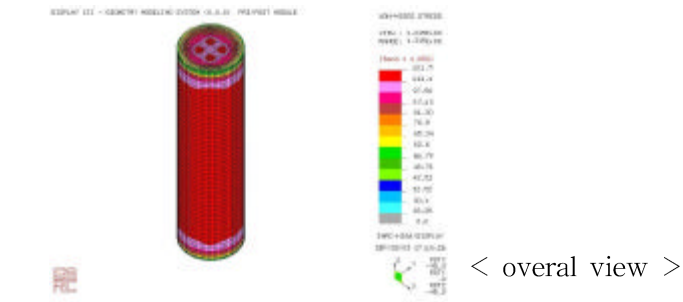
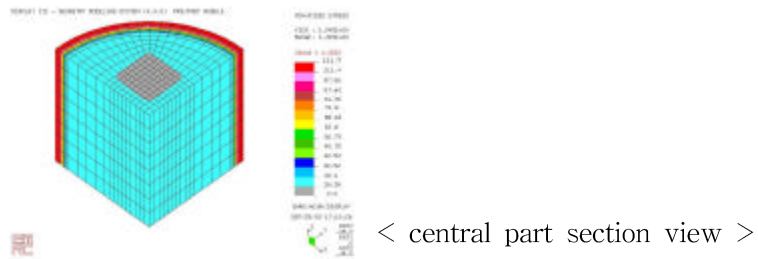
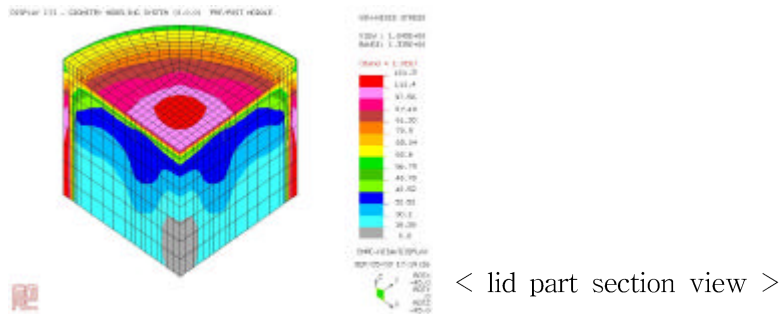


그림 7. Stress contour of canister structure(overall view) (PWR canister, Case 1)



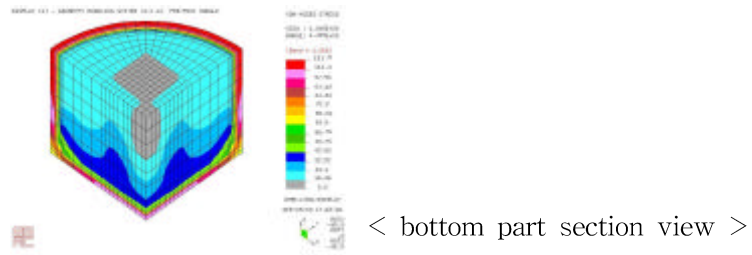


그림 8 Stress contour of canister structure(section view) (PWR canister, Case 1)

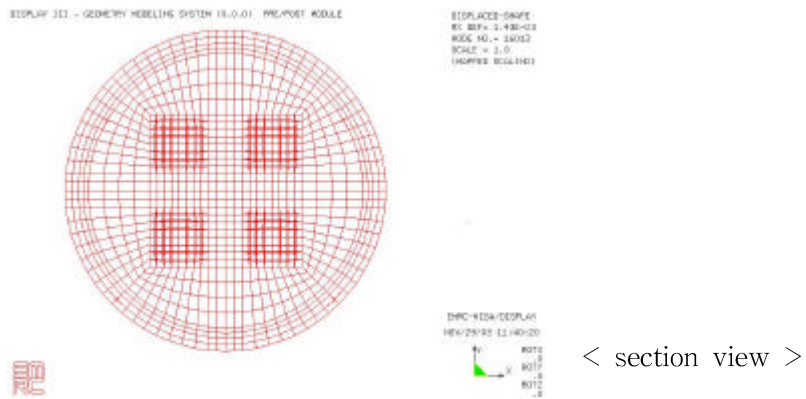
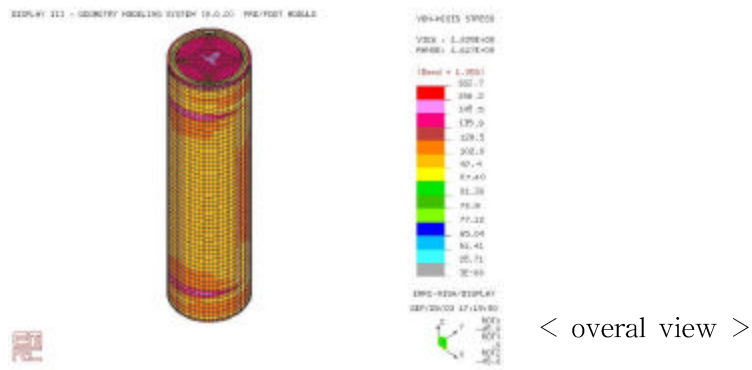


그림 9 Deformed shape of canister (PWR canister, Case 1)

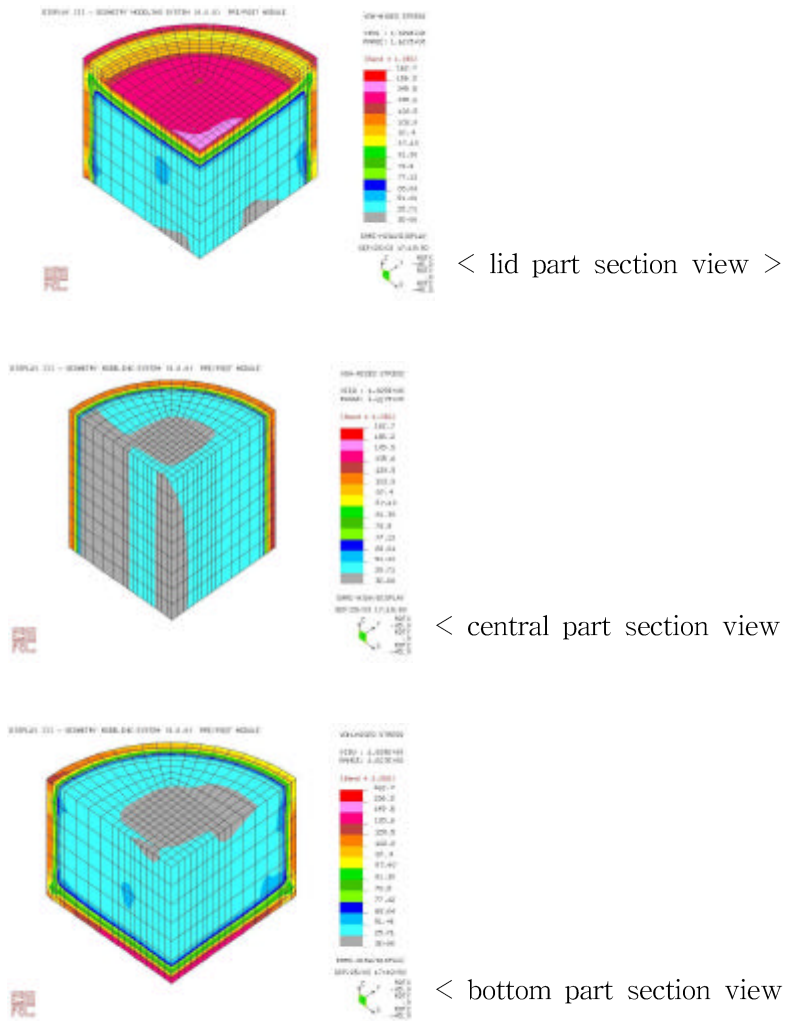
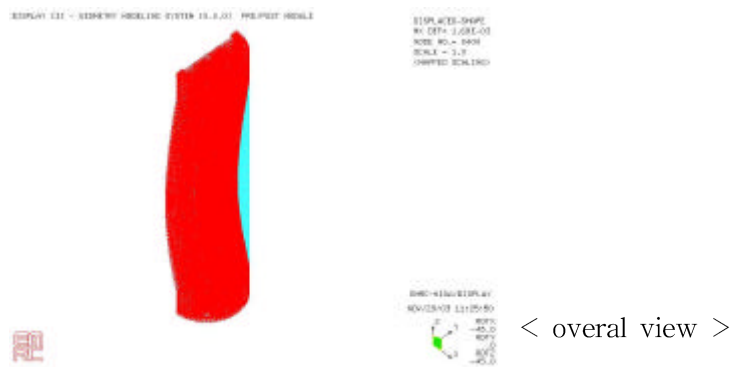
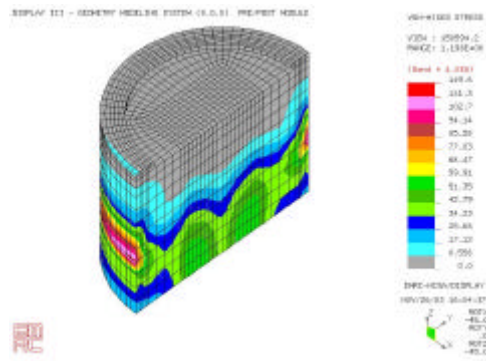


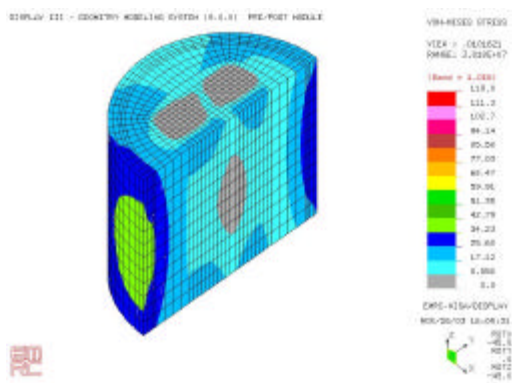
그림 10. Stress contour of canister structure(section view) (PWR canister, Case 2)



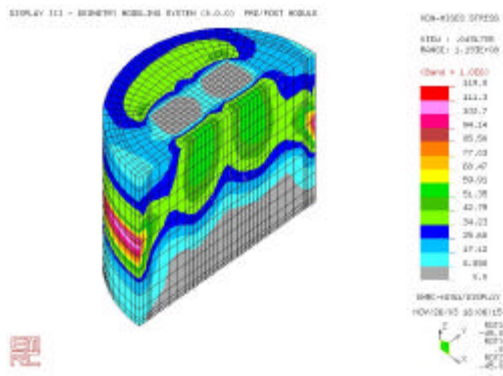
< overall view >



< lid part half section view



< central part half section view >



< bottom part half section view >

그림 13. Stress contour of canister structure(section view)
(PWR canister, no thermal stress, case 2)

5. 결론

고준위폐기물 처분시스템 개념 설정에 사용될 기준 처분용기의 규격화 자료를 도출하기 위하여 예상되는 심부 처분환경조건 하에서의 처분용기의 기계구조 해석을 수행하였다. 그결과는 다음과 같이 요약될 수 있다.

- 처분용기 내부주철삽입물에 대한 구조강도해석(지하수압 + 팽윤압)
 - 핵연료다발 바스켓 사이 간격을 고정하는 것이 바스켓 사이의 간격을 처분용기 직경과 함께 반경방향으로 증가시킨 경우보다 내부응력이 적으므로 구조적으로 안전함.
 - Case 1, 2 하중조건 모두를 만족시키는 처분용기 직경은 최하 112cm, 높이 488cm (안전계수 값 $S = 2$)
 - CANDU형 처분용기 경우 내부 핵연료다발 개수가 증가함에 따라 내부 주철삽입물에 발생하는 응력값은 증가하며 이 응력값을 기준으로 안전계수(S)를 계산하면 안전계수 $S = 1.5 \sim 2.0$ 에 적당한 내부 핵연료다발 개수는 33~37개 임.
- 처분용기 외곽셸에 대한 비선형구조해석(외곽셸 두께의 결정)
 - 외곽셸의 두께가 증가할수록 외곽셸 내부의 응력크기는 감소하고 외곽셸에 발생하는 변형의 크기도 감소.
 - 외곽셸이 구리일 경우 구조적으로 가장 적당한 셸 두께(thickness)는 5~6cm이며, 보다 강도가 더 큰 니켈(Ni) 합금이나 Stainless Steel 경우 두께는 1cm 정도 작아도 구조적으로 안정,
- 처분용기 구조물에 대한 열응력해석(지하수압 + 팽윤압 + 열응력)
 - Case 1&2 조건 모두 내부 주철삽입물의 항복응력 값(200~290MPa)보다 작아서 안전계수 $S=1.5 \sim 2.5$ 조건을 만족하기 때문에 직경 $D=122\text{cm}$ 의 처분용기가 열응력이 추가된 경우에도 대체로 구조적으로 안전함.

감사의 글

본 논문은 과학기술처 원자력중장기 개발사업 기금으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. L. Borgesson, "Interaction between rock, bentonite buffer and canister. FEM calculations of some mechanical effects of canister in different disposal concepts," *Technical report TR 92-20. Swedish Nuclear fuel and Waste Management Co. (SKB)*, 1992.
2. H. Raiko, J.P. Salo, "Design report of the canister for nuclear fuel disposal," *Report POSIVA 96-13, Posiva Oy, Helsinki*, 1996
3. Heikki Raiko, Jukka-Pekka Salo, "Desing Report of the Disposal Canister for Twelve fuel Assemblies", 1999.
4. Alex E Bond, Andrew R Hoch, Gareth D Jones, "Assessment of A Spent Fuel Disposal Canister", 1997.
5. EMRC Inc., NISA/DISPLAY™ User's Guide ver. 8.0

Mechanical Structural Analysis of Spent Fuel Disposal Container

Jongwon CHOI, Sangki Kwon and Chul-Hyung KANG

Korea Atomic Energy Research Institute

150 Dukjin-Dong, Yusong-Ku, Taejon 305-353, Korea

Youngjoo Kwon

Hong Ik Univ., Chochiwon-Eup, Younki-Gun, Chungnam 339-800, Korea

Abstract

This paper presents the mechanical structural analyses of the disposal container to provide basic information for dimensioning the container and configuration of the container components. Because of big differences in PWR and CANDU fuel properties, two types of containers were conceived. For manufacturing and operational reasons and standardization, however, both containers have the same outer diameter, and length and the same container components. The structural analysis was carried out using a finite element analysis code, NISA, and focused on the mechanical stability of the container against the expected external pressures due to the swelling of the bentonite buffer and the hydrostatic head. Consequently, the containers presented here contain 4 PWR fuel assemblies and 33x9 CANDU fuel bundles. The outside diameter of the container for both fuels is 122 cm and the insert diameter is 112 cm. The total length is 488 cm including the insert lid/bottom and the outer shell lid and bottom of 5 cm.