

고준위폐기물 다발의 배열구조변화에 따른 가압경수로(PWR)용 고준위폐기물 처분용기의 구조해석

A Structural Analysis of the Spent Nuclear Fuel Disposal Canister with the Spent Nuclear Fuel Basket Array Change for the Pressurized Water Reactor(PWR)

권 영 주*
Kwon, Young-Joo

요 지

가압경수로(PWR)에서 배출되는 고준위폐기물을 지하 500m의 화강암 암반의 처분장에 장기간(약 10,000년 동안) 처분하기 위하여 여러 구조적 안전성 평가 수행을 통하여 처분용기모델이 개발되었다. 기존에 설계 개발된 가압경수로용 처분용기 모델은 구조적으로 처분용기 내부에 정사각형 단면의 네 개의 고준위폐기물 다발이 처분용기 단면의 중심에 대칭되게 나란히 배열된 형태를 취하고 있다. 그러나 이와 같은 배열 형태가 최선의 구조인지는 아직 결정할 수 없다. 왜냐하면 나란한 배열구조의 처분용기는 정사각형 다발단면의 외곽모서리와 외곽 쉘과의 거리가 가장 짧아 경량화를 위한 단면 직경 축소에 한계가 있기 때문이다. 따라서 처분용기 단면 중심에 대하여 대칭형이면서 나란하게 배열된 네 개의 고준위폐기물 다발 각각을 각 다발의 중심에 대하여 일정 각도 회전하여 처분용기 단면 중심 면에 대하여 대칭성을 유지하면서 고준위폐기물 다발이 배열된 처분용기구조에 대한 구조안전성 평가가 매우 필요하다. 비록 지금까지의 연구에 이러한 회전된 다발의 배열단면을 갖는 처분용기는 발견되지 않지만 처분용기모델들의 구조적 안전성 비교 연구를 위해서 고준위폐기물 다발이 회전된 배열단면 변화에 따른 처분용기에 대한 구조해석이 요구된다. 따라서 본 연구에서는 네 개의 고준위폐기물 다발이 각각 다발의 중심에 대하여 일정각도 회전하여 처분용기 중심 면에 대하여 대칭적으로 배열된 단면의 가압경수로용 처분용기에 대하여 구조해석을 수행하였다. 구조해석을 수행한 결과 기존의 설계 개발된 처분용기 단면의 중심에 대칭되게 나란히 고준위폐기물 다발이 배열된 단면의 처분용기보다 다발의 중심에 대하여 일정각도(30~35도) 회전하여 처분용기 중심 면에 대하여 고준위폐기물 다발이 대칭적으로 배열된 단면의 처분용기가 구조적으로 좀 더 안정성이 있음이 밝혀졌다.

핵심용어 : 가압경수로, 처분용기, 안전성평가, 고준위폐기물 다발, 나란한 다발 배열, 회전된 다발 배열

Abstract

A structural model of the SNF(spent nuclear fuel) disposal canister for the PWR(pressurized water reactor) for about 10,000 years long term deposition at a 500m deep granitic bedrock repository has been developed through various structural safety evaluations. The SNF disposal baskets of this canister model have the array type of which four square cross section baskets stand parallel to each other and symmetrically with respect to the center of the canister section. However whether this developed structural model of the SNF disposal canister is best is not determinable yet, because the SNF disposal canister with this parallel array has a limitation in shortening the diameter for the weight reduction due to the shortest distance between the outer corner of the square section and the outer shell. Therefore, the structural safety evaluation of the SNF disposal canister with the rotated basket array which is also symmetric with respect to the canister center planes is very necessary. Even though such a canister model has not been found as yet in the literature, the structural analysis of the canister with the rotated basket array for the PWR is required for the comparative study of the structural safety of canister models. Hence, the structural analysis of the canister with the rotated basket array in which each basket is rotated with a certain amount of degrees around the center of the basket itself and arrayed symmetrically with respect to the center planes is carried out in this paper. The structural analysis result shows that the SNF disposal canister with the rotated basket array in which the SNF disposal basket is rotated as 30~35 degrees around the center of the basket itself is structurally more stable than the previously developed SNF disposal canister with the parallel basket array.

Keywords : *pressurized water reactor, spent nuclear fuel disposal canister, safety evaluation, spent nuclear fuel basket, parallel basket array, rotated basket array*

1. 서 론

고준위폐기물이란 원자로에서 타고 난 사용 후의 핵연료 혹은 사용 후 핵연료를 재처리 했을때 발생하는 1차 폐액 또는 이 폐액을 고형화한 폐기물을 말한다. 사용 후 핵연료를 재활용하여 원자로에서 다시 태워도 부피와 양의 차이는 있지만 고준위폐기물이 발생한다. 고준위폐기물은 방사능 붕괴에 의해서 높은 열과 다량의 방사선을 방출하므로 이의 취급에 특별히 주의가 요구되며, 또한 장반감기 핵종들을 다량 포함하고 있어, 이를 처분할 경우 장기간에 걸친 안전성이 확보되어야 한다. 고준위폐기물은 이를 없앨 수 있는 어떤 특수한 처리기술이 없는 한 이를 처리할 수 있는 한 가지 방법은 이들을 특수한 용기에 밀봉하여 인간의 주거지에서 멀리 떨어진 지하 깊은 곳에 처리하는 심지층처분기술이 유일하다. 이는 환경 친화적인 방법으로 오랜 시간이 경과되면 이들의 인간에 대한 유해성은 자연 소멸된다(예를 들어 방사능 같은 경우 약 10,000년 후에는 저장 상태에서 자연적으로 소멸되고 중금속은 지하 암반 구성 물질로 환원됨). 1970년대부터 지금까지 미국, 프랑스, 캐나다, 일본, 스위스, 벨기에, 스웨덴, 핀란드 등은 자국 실정에 맞는 심지층처분기술을 축적해 오고 있다. 특히 앞으로 많은 원전을 추가로 건설할 예정인 미국이나 일본, 프랑스 등의 국가에서는 앞으로 발생할 많은 양의 고준위폐기물의 처분기술을 확보하기 위해 국제공동(Chijimatsu 등, 2005; Millard 등, 2005; Rutqvist 등, 2005)으로 심지층처분기술을 개발해 오고 있다. 2030년까지 원전 18기를 추가로 건설하여 전체 전력소비량의 59%까지 끌어올릴 예정인 우리나라도 늦게나마 1997년부터 한국 원자력연구원을 중심으로 고준위폐기물 심지층처분기술개발을 수행해 오고 있다. 본 연구에서는 지금까지 수행했던 고준위폐기물(SNF: Spent Nuclear Fuel)의 심지층처분기술의 핵심인 처분용기의 설계기술개발에 관한 연구(권영주 등, 2002, 2003, 2004, 2007, 2009; Kwon 등, 2001)의 일환으로 처분용기에 대한 구조해석 연구를 수행하고자 한다.

기존에 설계 개발된 가압경수로(PWR)용 처분용기 모델은 구조적으로 내부에 정사각형 단면형상을 한 네 개의 고준위폐기물 다발이 처분용기 단면의 중심에 대칭되게 나란하게 배열된 형태를 취하고 있다. 그러나 이와 같은 배열 형태가 최선의 구조인지는 아직 의문으로 되어 있다. 왜냐하면 고준위폐기물 다발의 배열 구조가 다른 형태를 가질 수도 있기 때문이다. 비대칭형 배열구조는 이미 대칭형 배열 구조보다

구조적 안전성이 떨어지는 것은 기 연구를 통하여 밝혀진 바 있다(Kwon 등, 2001). 그러나 이와 같이 정사각형 단면의 나란히 배열된 고준위폐기물 다발은 정사각형 외곽 모서리와 외곽 셸과의 거리가 가장 짧아 처분용기의 경량화를 위하여 처분용기 단면의 직경을 줄이는데 한계가 있다. 이를 극복하는 한 가지 방법은 정사각형 단면을 그 중심에 대하여 회전시켜 배열하여 정사각형 외곽 모서리와 외곽 셸과의 거리를 늘리는 방법이 있다. 비록 지금까지의 연구에 이러한 회전된 다발 배열 단면을 갖는 처분용기는 발견되지 않지만 현재 개발된 처분용기모델의 구조적 안전성 비교 검증 및 좀 더 경량화 된 처분용기를 개발하기 위해서 고준위폐기물 다발이 회전된 배열단면 변화에 따른 처분용기에 대한 구조해석이 요구된다.

고준위폐기물 처분용기는 어떤 조건 하에서도 고준위폐기물의 방사성독성이 사라지는 10,000년 동안 고준위폐기물을 완전히 안전하게 격리시킬 수 있게 처분용기의 수명이 확실하게 보장되어야만 한다. 이러한 이유로 저장된 기간 중에 구조적 결함이 없도록 처분용기의 구조적 안전성측면에서 여러 가지 조건을 고려해야 한다. 처분용기가 받는 처분 환경 조건은 먼저 지하수의 유입에 의해 벤토나이트 버퍼에 발생하는 수압이다. 따라서 처분용기는 지하에 처분되는 기간 동안 이 수압에 견딜 수 있어야 한다(Kwon 등, 2001) 또 처분용기내의 폐기물 다발에서는 비록 점점 감소하지 않은 계속 붕괴열이 발생하고 있기 때문에 이 열 발생에 따른 처분용기내의 온도분포에 의한 열응력에도 견딜 수 있어야 한다(권영주 등, 2002). 이 이외에도 비록 저장 시 지진발생이 없는 안전한 지하 암반층에 저장하더라도 미래에 발생할 수도 있는 지진 등에 의한 지각변동에 의하여 발생할 수 있는 암반의 갈라짐에 의해 처분용기에 가해지는 충격에도 견디어야 한다(권영주 등, 2003). 또한 장시간 저장에 따른 내부 잔류응력 및 온도 등에 의한 처분용기에 발생할 수도 있는 크리프 변형도 견디어야 한다(권영주 등, 2004). 처분용기의 구조강도를 평가하기 위해서는 위에서 언급한 모든 구조해석을 수행하여야 한다. 그러나 이와 같은 여러 가지 구조해석들은 이미 충분히 수행되어 구조안전성에 큰 문제가 없음이 밝혀졌고 오직 정수압 및 팽윤압과 내부 고준위폐기물 다발의 붕괴열만이 처분용기 구조 안전성에 큰 영향이 있음이 밝혀졌기 때문에 본 연구는 기존에 수행했던 정적인 구조해석(Kwon 등, 2001; 권영주 등, 2002)만 수행하고자 한다. 따라서 본 연구에서는 네 개의 고준위폐기물 다발이 각

† 책임저자, 정회원 · 홍익대학교 기계정보공학과 교수
Tel: 041-860-2484 ; Fax: 041-866-6598
E-mail: yjkwon@wow.hongik.ac.kr

• 이 논문에 대한 토론을 2010년 8월 31일까지 본 학회에 보내주시면 2010년 10월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

각 다발의 중심에 대하여 일정각도 회전하여 처분용기 중심면에 대하여 대칭적으로 배열된 단면의 가압경수로(PWR)용 처분용기에 대하여 정적인 구조해석을 수행한다.

2. 구조해석 문제의 구성

2.1 구조 해석 모델

본 연구에서 구조해석을 수행하고자 하는 처분용기모델의 구조형상 및 재원은 Fig. 1과 같다. Fig. 1에서 가압경수로용 고준위폐기물 처분용기는 4개의 고준위폐기물 다발이 각 다발의 중심에 대하여 각각 일정한 각도(θ) (Fig. 1에서 $0^\circ \leq \theta \leq 85^\circ$) 만큼 회전하여 처분용기 단면 중심에 대하여 대칭으로 배열된 정사각형 단면(22.4cm×22.4cm)형상의 고준위폐기물 다발이 있고, 이를 주철(cast iron)로 된 직경 92cm의 내부삽입물(insert)이 감싸고 있으며, 이 내부삽입물을 5cm 두께의 구리로 된 외곽 셸이 감싸고 있다. 또 역시 구리로 된 5cm 두께의 위아래 덮개가 있다. 본 연구에서 회전각도(θ) 값은 0° 값부터 시작하여 5° 씩 증가시켜 85° 값까지 총 18개의 값을 갖는다. 따라서 본 연구에서는 각각의 회전각도(θ) 값에 대한 18개의 구조해석 모델에 대하여 구조해석을 수행하여 그 결과를 비교 검토하여 구조적으로 가장 안정적인 회전 각도를 갖는 처분용기 단면구조를 구하고자 한다.

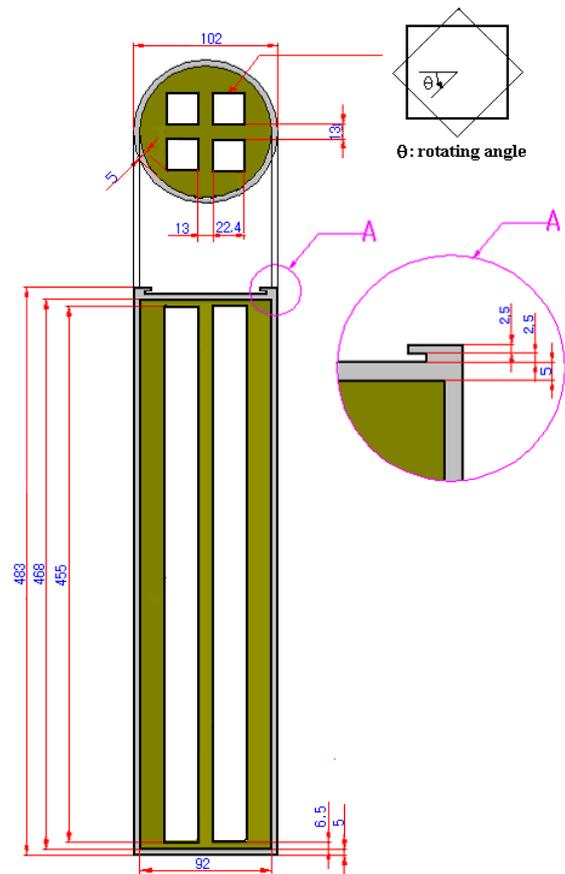


Fig. 1 Structural geometry and dimensions of the canister with rotated basket array ($0^\circ \leq \theta \leq 85^\circ$, unit : cm)

2.2 물질상수

Fig. 1에 나타난 처분용기의 각 구성부품들의 재질은 내부 삽입물은 주철(case iron), 외곽 셸 및 위아래 덮개는 구리(Cu)로 구성되어 있다. 내부의 고준위폐기물 다발은 내부에 원자로에서 타다 남은 재 형태의 고준위폐기물이 들어있는 Zry-4로 만들어진 피복 관들이 가압경수로(PWR)인 경우 가로×세로 각각 17개씩 총 289개가 한 다발로 되어 있다. 따라서 이를 정확히 구조해석에서 반영하는 것이 어렵기 때문에 이들을 균일물질로 가정하는 등가물성치를 계산하여 본 연구에서는 구조해석을 수행하였다. Table 1에 본 논문에서 사용한 각 구성 재질들의 물성치들이 나타나 있다. Table 1의 물성치 값들은 여러 문헌들의 값들을 종합하여 한국원자력연구원과 협의하여 본 연구에 타당한 값들을 도출한 것이다. 각 문헌들 마다 해당 값들이 차이가 나고 또 어떤 물성치는 일정한 값으로 주어지지 않고 범위로 주어지기 때문에 실제 해석에 적용 할 수 없어 그 대표 값(예 : 평균값)을 사용하였다. 고준위폐기물 다발(바스켓 : fuel bundle)의

Table 1 Material property values of composing parts

Material	Insert	Outer shell, Lid & Bottom	Fuel Bundle
	Cast iron	Copper	Fuel+Zry-4 tube (equivalent value)
Young's Modulus E(GPa)	126.5	117.0	29.7774
Poisson's ratio ν	0.25	0.3	0.3
Thermal expansion coefficient $\alpha(10^{-6}/^\circ\text{C})$	10.85	16.5	3.24
Mass density $\rho(\text{kg}/\text{m}^3)$	8,000	8,900	2,000
Yield stress $\sigma_y(\text{MPa})$	200	64	-
Tensile strength $\sigma_u(\text{MPa})$	1,400	200	-
Thermal conductivity k(W/m $^\circ\text{C}$)	52	386	0.135
Specific heat C(J/kg $^\circ\text{C}$)	504	383	2,640

탄성계수는 바스켓 전체 부피 중에서 실제 Zry-4튜브가 차지하는 부피에 비례한다는 가정 하에 등가 탄성계수 값을 계산하여 사용하였다(권영주 등, 2002). 그러나 그 외의 고준위폐기물 다발의 등가 물성치(열전도계수 등)들은 경수로(PWR) 고준위폐기물 다발의 물성치 값들을 계산한 기존의 문헌(Idaho National Engineering Lab., 1979)의 값들을 참조하였다. 따라서 내부 삽입물(insert), 고준위폐기물 다발(fuel bundle)과 외곽 쉘(outer shell) 및 위아래 덮개(lid & bottom)들은 각각 균일한 물성치를 갖는 연속체로 가정하였으며 각 구성부분들 간의 경계는 간극이 없는 일체화 된 상태로 가정하여 구조해석을 수행하였다.

2.3 구속조건

처분용기가 지하 처분장에 처분되어진 후 처분용기에 가해지는 하중은 첫째로 정상적으로 받는 하중으로서 처분장에 스며드는 지하수에 의한 수압을 들 수 있다. 지표의 물이 지하로 스며드는 경우 보통 지표로부터 깊이에 비례하는 정수압을 받는다고 할 수 있다. 따라서 지하 500m의 지하 처분장까지 지하수가 스며들었으면 정수압(hydrostatic pressure)은 지하수에 의한 정수압으로 그 크기는 다음과 같다.

$$P = \gamma_w h = 10,000 \text{kg/m}^2 \text{sec}^2 \times 500 \text{m} = 5,000,000 \text{Pa} = 5 \text{MPa}$$

$$\gamma_w = 9,800 \text{kg/m}^2 \text{sec}^2 \approx 10,000 \text{kg/m}^2 \text{sec}^2$$

처분용기가 지하 처분장에 처분될 때 암석으로 이루어진 처분공과의 직접적인 접촉방지 및 방사능 차폐를 위하여 처분용기 주위를 일정 두께의 완충제인 점토(clay)성분의 벤토나이트 버퍼로 감싸게 된다. 지하수가 벤토나이트 버퍼에 스며들면 벤토나이트 버퍼에 팽윤압(swelling pressure)이 발달하여 처분용기에 가해진다. 이 팽윤압의 크기는 버퍼의 종류에 따라 달라지지만(건조한 버퍼의 밀도는 $1,590 \text{kg/m}^3$, 지하수가 포화된 경우 버퍼의 밀도는 $2,020 \text{kg/m}^3$) 버퍼에 지하수가 포화되는 도중의 팽윤압 크기와 지하수가 버퍼에 완전히 포화된 후의 팽윤압의 크기는 약간의 차이가 있다(Werme, 1999; Karnland, 1998). 지하수가 버퍼에 포화되는 도중의 팽윤압의 크기는 4~5MPa로, 4MPa는 지하수가 버퍼에 포화되고 있는 중간의 팽윤압을, 5MPa는 포화되는 마지막 단계의 팽윤압으로 고려된다. 벤토나이트 버퍼에 지하수가 완전히 포화된 후 처분용기에 가해지는 전체압력은 지하수의 정수압과 벤토나이트 버퍼의 팽윤압의 합이다. 따라서 지하수가 버퍼에 완전히 포화된 후에는 5MPa의 팽윤압에 5MPa의 정수압이 가해

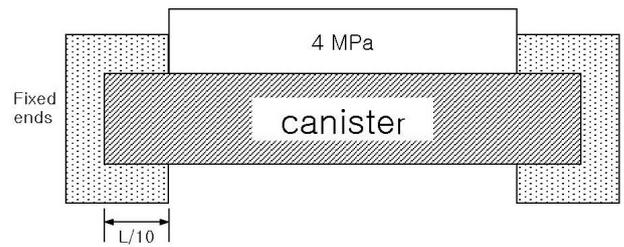


Fig. 2 Load condition during the ground water saturation(both fixed ends)

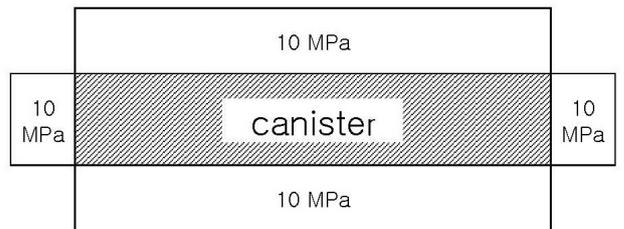


Fig. 3 Load condition after ground water saturation

저서 총 10MPa의 수압이 처분용기에 가해진다고 볼 수 있다. 만약에 처분용기가 처분공에 약간 기울어져 있거나 처분공의 형상이 약간 굴곡이 저 있으면 버퍼에 지하수가 완전히 포화된 후에 처분용기에 가해지는 수압은 비대칭 형상으로 비균일하게 발달할 수도 있다. 그러나 기존의 연구(Kwon 등, 2001)에서 이와 같은 비정상적인 외력조건은 정상적인 경우보다 내부 응력이나 변형이 심각하게 발달하지 않음이 밝혀졌다. 따라서 본 논문에서는 정상적인 다음과 같은 외력조건만 취급한다.

① 지하수 포화 과정중의 외력조건 - Load Case 1

지하수가 벤토나이트 버퍼에 포화되는 과정중의 외력 조건으로 이 때 벤토나이트 버퍼에 발달되는 팽윤압의 크기는 4MPa로 처분용기 반쪽 상단부의 일부에 가해지고 팽윤압이 가해지지 않는 양단 끝은 고정되어 있다고 가정한다(Fig. 2참조).

② 지하수 포화 후의 외력조건 - Load Case 2

수압이 처분용기 외곽 표면 전체에 균일하게 대칭적으로 발달하는 경우를 고려한다(Fig. 3참조). 이 때 구조해석 시 처분용기에 강제운동이 발생하지 않도록 적절한 구속조건을 주어야 한다.

③ 열하중(thermal loads)

사용 후 고준위폐기물 다발은 높은 고온을 유지하며 서서히 붕괴열을 방출하여 지하 처분장에 처분용기 저장 시 열원(heat source)으로 작용하여 처분용기 및 주위물질에 열을 전달하여 열팽창을 일으켜서 열 하중으로 작용한다. 이 때의 가압경수로(PWR)용 고준위폐기물 다발의 붕괴열 발생률

(Choi 등, 1999)은 다음과 같다.

$$P(t) = 852.34 \exp[1/(0.2642 + 0.130889t)] \quad (0 < t < 30 \text{ yrs})$$

$$P(t) = 14,548.7t^{-0.76204} \quad (30 \leq t < 10^6 \text{ yrs}) \quad (\text{unit : W/tHM})$$

이 때 처분용기 외곽 셸과 위아래 덮개 표면은 벤토나이트 버퍼와의 화학적인 반응을 고려하여 100℃이하로 유지되도록 하여야 한다(Ahonen, 1995). 따라서 본 논문에서는 처분용기 외곽 셸과 위아래 덮개 표면은 90℃의 온도로 유지된다고 가정한다.

3. 처분용기에 대한 수치해석

3.1 수치해석 모델

Fig. 1의 가압경수로(PWR)용 처분용기구조물의 구조해석 모델에 대한 수치해석은 상용 유한요소해석 코드인 NISA를 사용하였다. 8개 절점의 육면체 유한요소(hexahedron element)와 일부의 오면체 유한요소(wedge element)를 이용하여 5°씩 증가한 모든 회전각(0° ≤ θ ≤ 85°)에 대하여 유한요소 수치해석 모델을 만들었다(Fig. 4 참조). 지하수 포화과정 중의 외력조건(load case 1)에 대하여는 외력조건이 1/2 대칭이므로 1/2 모델(half model)을 해석에 사용하였으며, 지하수 포화 후의 외력조건(load case 2)에 대하여는 외력조건이 1/4 대칭이므로 1/4 모델(quarter model)을 해석에 사용하였다. 따라서 각각의 외력조건에 대하여 18개씩의 유한요소 모델이 해석에 사용되었다. 각 외력조건하에서 회전각도(θ)에 따른 처분용기구조(실제는 단면 구조)의 변화에 대한 구조해석 결과를 비교해야 하므로 동일한 외력조건 하의 유한요소해석은 거의 동일한 메쉬조건(유한요소의 크기, 개수 및 세장비 등)의 유한요소모델을 사용하여야 한다. 그러나 회전각도에 따라 처분용기 단면형상이 변하므로 높이방향은 동일한 조건의 메쉬분할이 가능하지만 단면은 동일한 크기 및 개수를 갖는 메쉬분할이 가능하지 않다. 또한 일부는 단면이 삼각형인 오면체 유한요소(프리즘 유한요소)의 사용이 불가피하다. 그리고 세장요소(long and slender element)의 사용을 피하기 위하여 단면요소의 크기를 유한요소 높이에 비하여 적당하게 유지시켜야 한다. 따라서 본 연구에서는 두개의 외력조건 모두 사용된 총 유한요소 개수가 대략 60,000~70,000개 범위에 있도록 유한요소 수치해석 모델을 만들었다(Table 2 참조). Fig. 4에 나타난 바와 같이 각 유한요소 모델은 높이 방향은 동일한 개수의 메쉬(위아래 덮개 부분에서는 좀 더 세밀한 메쉬)를 갖고 단면은

가능하면 형상 및 개수가 균일하게 메쉬를 분할하려고 시도하였다.

3.2 수치해석

Fig. 4의 가압경수로(PWR)용 고준위폐기물 처분용기 모델에 대하여 외력 및 경계조건을 가하여 해석을 수행한다.

(1) 지하수 포화과정 중의 외력조건에 대한 해석

지하수가 벤토나이트 버퍼에 포화되는 과정중의 외력조건으로 이 때 내부 고준위폐기물 다발에서 발생하는 열에 의한 열하중도 동시에 고려한다. 가압경수로(PWR) 처분용기의 내부 고준위폐기물 다발 한 개의 열 발생률은 붕괴열 발생률로부터 다음과 같이 계산된다.

$$q(t) = 1,704.68 \exp[1/(0.2642 + 0.130889t)] \quad (0 < t \leq 30 \text{ yrs})$$

$$q(t) = 29,097.4t^{-0.76204} \quad (30 \leq t < 10^6 \text{ yrs}) \quad (\text{unit : W/m}^3)$$

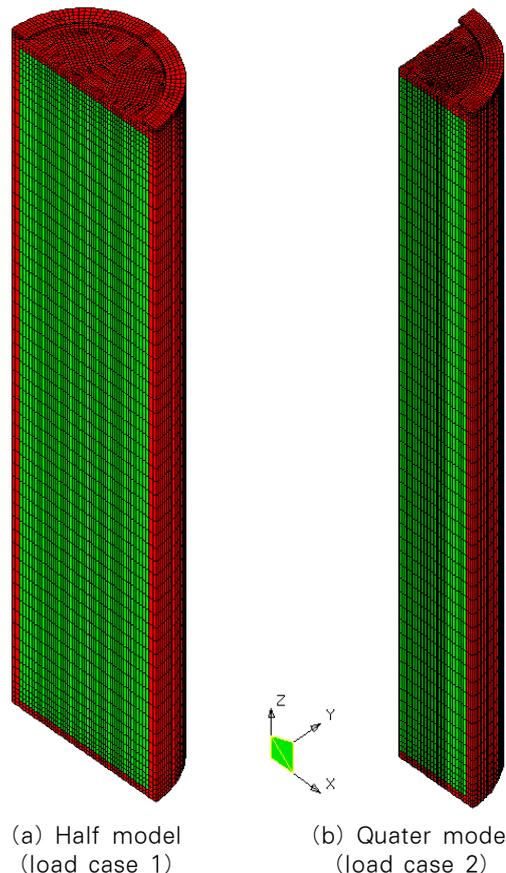


Fig. 4 Finite element model of the PWR canister (rotating angle(θ)=30°, diameter(D)=102cm)

Table 2 Node and element number of the numerical model used for the analysis

Rotating angle (θ)	Load case 1 (half model)		Load case 2 (quarter model)	
	Node no.	Element no.	Node no.	Element no.
0°	70832	66048	69495	64488
5°	67599	62928	66969	62070
10°	65250	60552	71264	66288
15°	65001	60744	68641	63708
20°	69215	64632	68971	63966
25°	78229	72744	75548	70242
30°	79205	73704	76646	71322
35°	75814	70440	78684	73320
40°	80608	74904	67360	62388
45°	65503	61032	77508	71796
50°	71883	66936	67360	62388
55°	75823	70800	78684	73320
60°	64513	59904	76646	71322
65°	70649	65808	75548	70242
70°	65647	61008	68971	63966
75°	65001	60744	68641	63708
80°	67538	62808	71264	66288
85°	67599	62928	66969	62070

해석 대상이 되는 처분용기는 고준위폐기물 다발이 열 발생 후 40년이 지난 후 고준위폐기물 다발형태로 처분용기 내에 저장 장착되어 처분공(borehole)에 처분된다. 처분공에 처분된 후 지하수가 벤토나이트에 스며들어 완전히 포화되는 데에는 30~50년, 즉 평균 40년이 걸리므로 지하수가 벤토나이트버퍼에 포화되는 과정중의 열하중은 t=60년에 해당되는 상태로 고려된다. 따라서 고준위폐기물 다발의 열발생률은 t=60년에 해당하는 $q(60) = 1,284.8 \text{ W/m}^3$ 로 계산된다. 따라서 지하수 포화과정 중의 외력조건에 대한 구조해석은 1단계로 고준위폐기물 다발의 열발생률 $q = 1,248.8 \text{ W/m}^3$ 에 대한 열전달 해석을 수행 한 후 이에 대한 열응력 해석을 수행한다. 다음 2단계로 팽윤압 $P = 4 \text{ MPa}$ 에 의한 응력 해석을 수행한다. 마지막 3단계는 이상 수행한 단계 1, 단계 2의 해석 결과를 통합(load combination)하여 열 하중 및 팽윤압에 의한 응력을 계산한다. 이 때의 구속조건은 열전달 해석에 대해서는 처분용기 외곽 셸 및 위아래 덮개 표면의 온도는 90°C 로 구속하며, 팽윤압에 의한 구조해석에 대한 구속조건은 우선 4 MPa 의 압력을 Fig. 5와 같이 1/2 모델의 반쪽 상부에 가해주고 변위는 지하수가 벤토나이트에 포화되는 과정 중에는 처분용기의 양단이 고정된다고 가정되므로 처분용기 양단(L/10) 길 표면에서 세 개의 변위 자유도(u_x, u_y, u_z)를 구속한다($u_x = u_y = u_z = 0$). 또한 처분용기는 구조적으로 1/4 대칭이지만 외력조건이 1/2 대칭이므로 1/2 대칭면 ($y = 0$ 면)에 대칭경계조건($u_y = 0$)을 적용한다(Fig. 5참조).

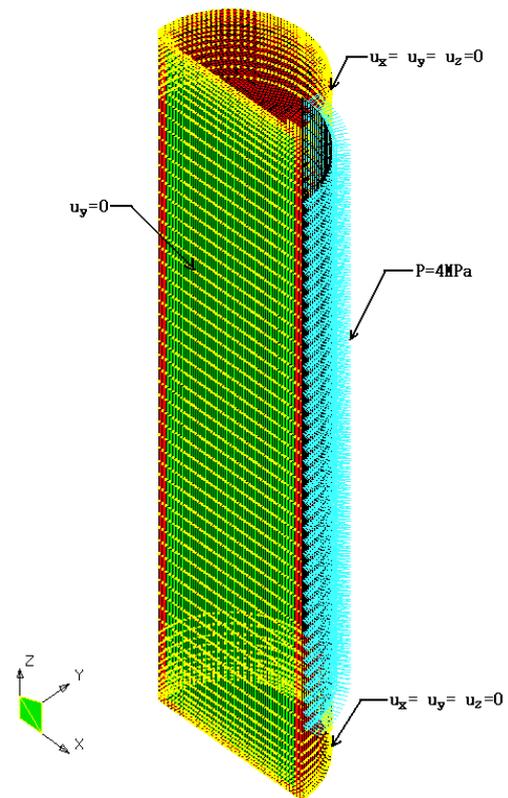


Fig. 5 External loads and boundary conditions for load case 1(half model, $\theta = 30^\circ$)

(2) 지하수 포화 후 외력조건에 대한 해석

지하수가 벤토나이트 버퍼에 완전히 포화된 후의 외력조건으로 이 때 처분용기에 가해지는 외력은 지하수에 의한 수압 (5 MPa)과 벤토나이트에 의한 팽윤압(5 MPa)의 합인 총 10 MPa 의 압력이 처분용기 외곽셸(shell) 및 처분용기의 위아래 덮개(lid & bottom) 표면에 작용한다. 이 때 압력은 균일하게 작용한다고 가정한다(Fig. 3 참조). 이 때도 역시 내부 고준위폐기물 다발에 의한 열 발생을 고려해야 한다. 벤토나이트 버퍼에 지하수가 포화되는 과정은 처분용기가 처분공에 처분되는 t=40년부터 시작하여 30~50년이 걸리므로 지하수가 벤토나이트 버퍼에 완전히 포화된 후 고준위폐기물 다발에 발생하는 열은 t=90년으로 고려된다. 따라서 고준위폐기물 다발의 열 발생률은 t=90년으로 고려하여 $q(90) = 943.3 \text{ W/m}^3$ 으로 계산된다. 따라서 지하수 포화 후의 외력조건에 대한 구조해석은 1단계로 고준위폐기물 다발의 열 발생률 $q = 943.3 \text{ W/m}^3$ 에 의한 열전달 해석 후 이에 따른 열응력 해석을 수행한 후 2단계로 압력 $P = 10 \text{ MPa}$ 에 의한 응력 해석을 수행한다. 마지막 3단계로 1단계와 2단계에서 수행한 해석 결과를 통합(load combination)하여 열 하중 및 팽윤압에 의한 응력을 계산 한다. 이 때의 구속조건은 열전달 해석에 대해서는 처분용기 외곽 셸 및 위아래 덮

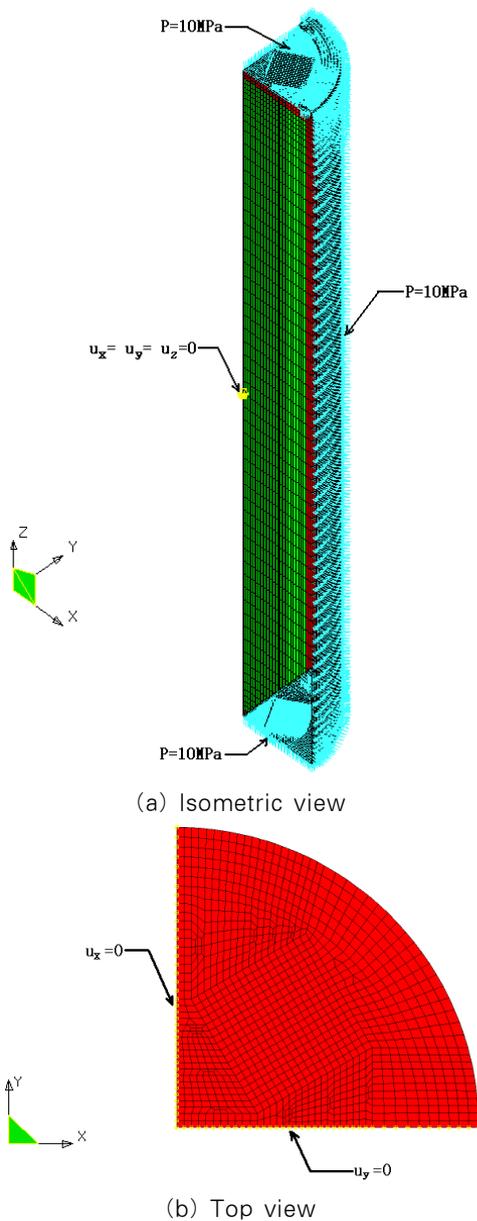


Fig. 6 External loads and boundary conditions for load case 2(quarter model, $\theta=30^\circ$)

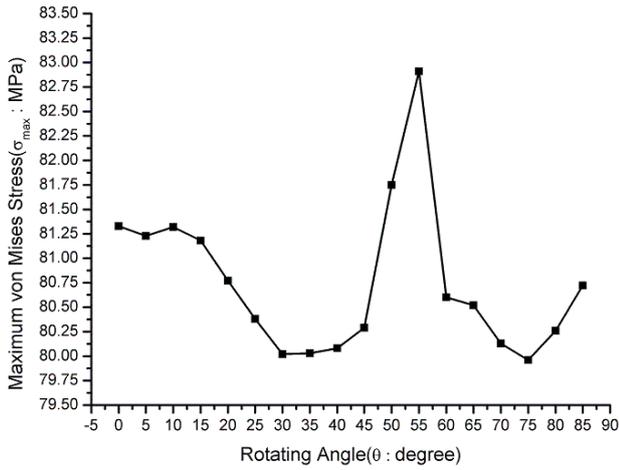
개 표면의 온도는 90°C 로 구속하며, 팽윤압에 의한 구조해석에 대한 구속조건은 우선 10MPa의 압력을 Fig. 6과 같이 1/4 모델의 모든 외부 표면에 가해주고 변위는 지하수가 벤토나이트에 포화 후에는 각 대칭면($x=0$ 면, $y=0$ 면)에서의 대칭경계조건($u_x=0$ at $x=0$, $u_y=0$ at $y=0$)뿐만 아니라 강제운동을 방지할 수 있는 경계조건($u_x=u_y=u_z=0$ at $x=y=0$, $z=2.39\text{m}$)을 적용한다(Fig. 6 참조).

사실 내부 삽입물(insert)과 외곽 셸(outer shell) 및 위아래 덮개(lid & bottom) 사이에는 처분용기 제작 시 오차에 의하여 미세한 간극이 존재할 수 있다. 그러나 본 연구에서는 간극이 존재하지 않는 일체화 된 구조물로 가정하여 구

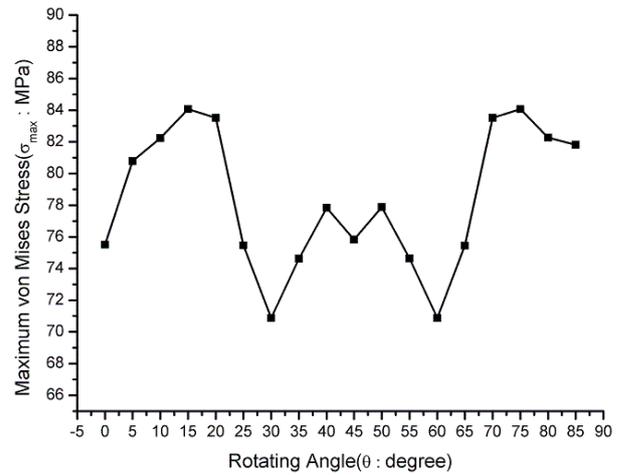
조해석을 수행한다. 그러나 간극을 고려한 추가적인 연구는 향후 필요하다고 사료된다.

3.3 해석결과 및 분석

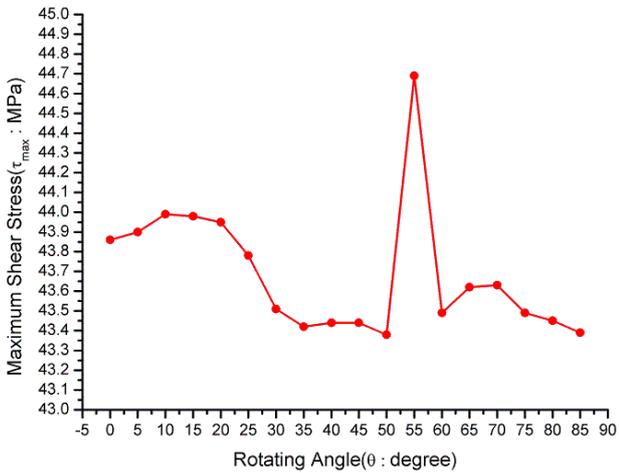
고준위폐기물 다발이 다발 중심에 대하여 일정각도 회전하여 처분용기 단면 중심에 대하여 대칭으로 배열된 가압경수로(PWR)용 처분용기에 대하여 구조해석을 수행한 결과는 다음과 같다. 처분용기 내에 발생한 온도 및 응력과 변형은 Fig. 7~Fig. 16에 나타내었다. 고준위폐기물 다발이 다발 중심에 대하여 일정각도 회전하여 처분용기 단면 중심에 대하여 대칭으로 배열된 가압경수로(PWR)용 처분용기($0^\circ < \theta \leq 85^\circ$)는 동일한 직경의 기존의 고준위폐기물 다발이 대칭으로 나란하게 배열된 가압경수로 처분용기($\theta=0^\circ$)와 내부주철 삽입물(cast iron insert)에 발생하는 응력 및 전체 구조물에 발생하는 변위와 온도가 큰 변화를 보이고 있지 않지만 그래도 약간의 차이를 보이고 있음을 알 수 있다. 전체 구조물에 발생하는 변위와 온도는 회전각도(θ)가 변함에 따라 거의 변화가 없지만 내부주철 삽입물(cast iron insert)에 발생하는 응력은 회전각도(θ)에 따라 변하고 있음을 알 수 있다. 고준위폐기물 다발 내부에 발생하는 최대온도는 고준위폐기물 다발의 회전에 따라 회전하기 전 나란한 경우($\theta=0^\circ$)에 비해 약 $0.1\sim 0.2^\circ\text{C}$ 미세하게 감소하는데(Fig. 11~Fig. 12참조) 이는 고준위폐기물 다발이 나란한 경우보다 회전한 경우가 고준위폐기물 다발로부터의 열 방출에 약간 유리하기 때문이라고 사료된다. 그러나 어떤 회전 각도의 처분용기 구조물이 구조적 측면에서 가장 유리한지는 온도해석만으로는 알 수가 없다. 왜냐하면 회전한 경우에는 회전각도 변화에 따라 최대온도의 변화가 없기 때문이다(Fig. 10참조). 구조물에 발생하는 최대변위도 회전각도에 따라 거의 변화를 보여주지 않고 있기 때문에 이를 근거로 구조물의 구조강도를 비교하는 것은 무리가 있다고 사료된다(Fig. 9 참조). 구조물에 발생하는 응력 값만이 회전각도의 변화에 따라 민감하게 변하고 있음을 알 수가 있다(Fig. 7~Fig. 8참조). 처분용기 구조물의 구조강도를 결정하는 것은 내부주철 삽입물(cast iron insert)이기 때문에 내부주철 삽입물(cast iron insert)에 발생하는 응력 값을 비교하면 회전각도 변화에 따른 처분용기 구조물의 구조강도를 비교할 수가 있다. 일반적으로 고체 구조물의 강도를 평가하는데 있어 우선적으로 고려하여야 하는 것은 예상되는 외력에 대하여 구조물의 항복 발생 여부인데, 구조물을 구성하는 금속이 주철인 경우 주철은 일반적으로 압축력에는 매우 강하고 전단력에는 약하여 압축력이 가해지는 경우는 항복강도 대신에 인장강도를 항복



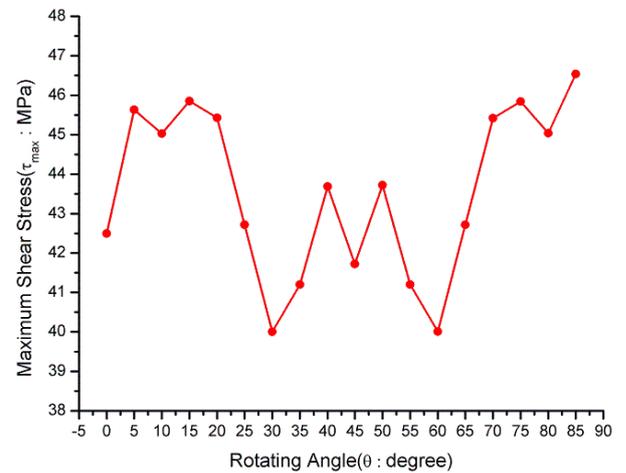
(a) Maximum von Mises stress(σ_{max}) variation



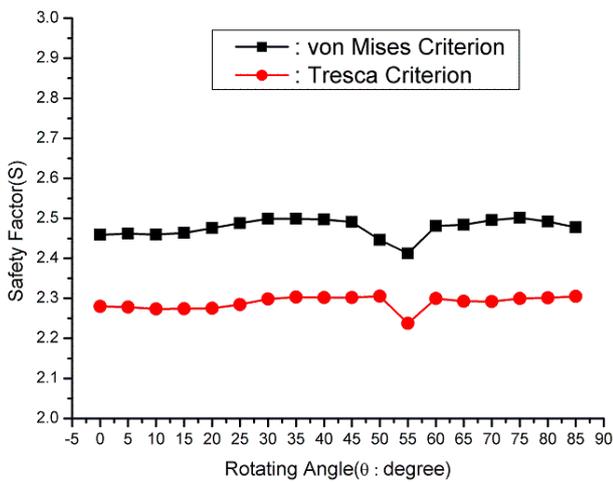
(a) Maximum von Mises stress(σ_{max}) variation



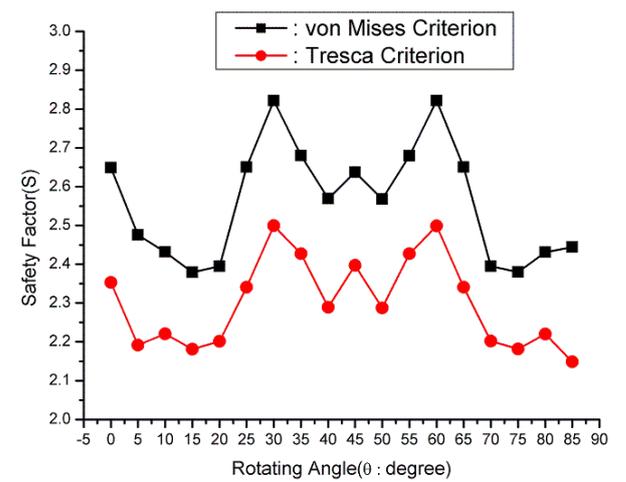
(b) Maximum shear stress(τ_{max}) variation



(b) Maximum shear stress(τ_{max}) variation



(c) Safety factor(S) variation



(c) Safety factor(S) variation

Fig. 7. Maximum stresses and safety factor(S) variations (D=102cm, load case 1)($2.0 \leq S = \sigma_y / \sigma_{max}$: von Mises yield criterion, σ_y =yield stress)

Fig. 8 Maximum stresses and safety factor(S) variations (D=102cm, load case 2)($2.0 \leq S = 0.5\sigma_y / \tau_{max}$: Tresca yield criterion, σ_y =yield stress)

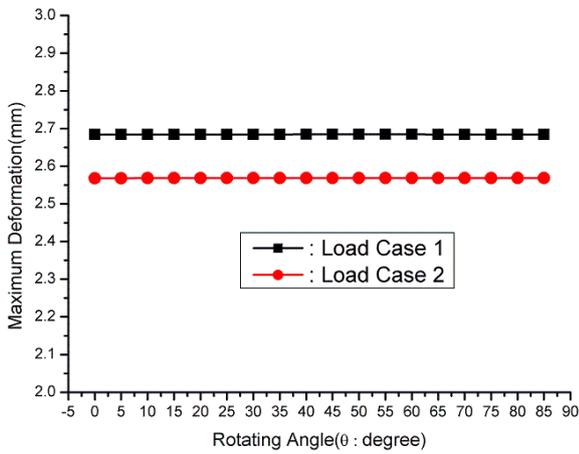


Fig. 9 Maximum deformation variation

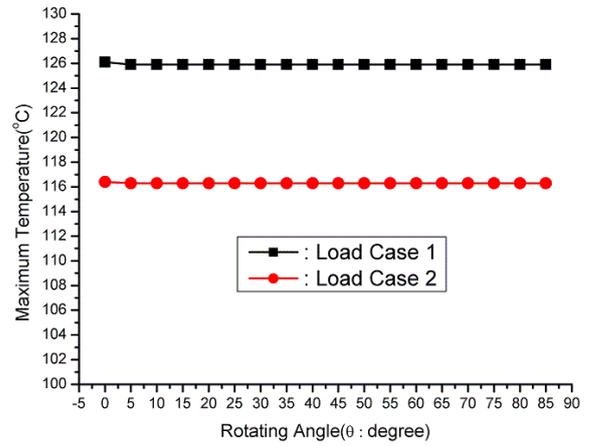
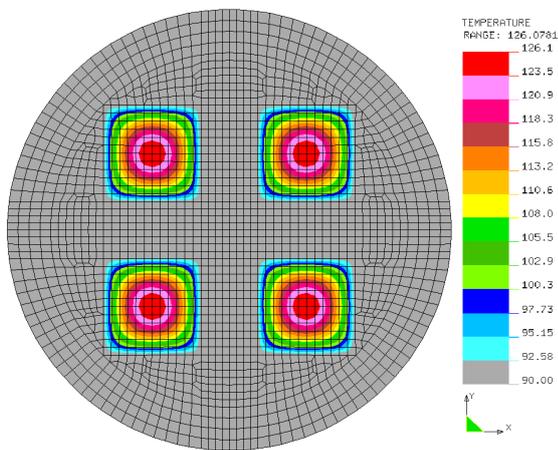
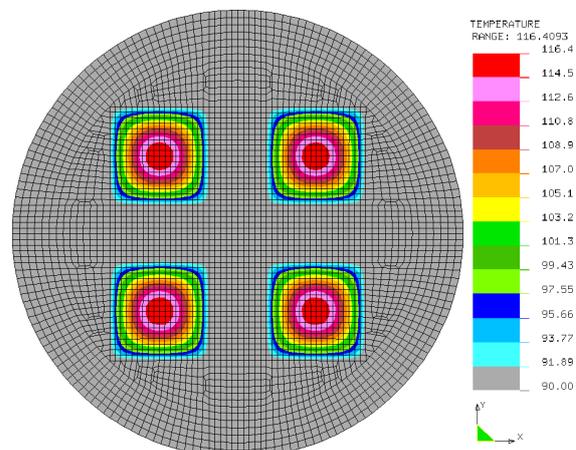


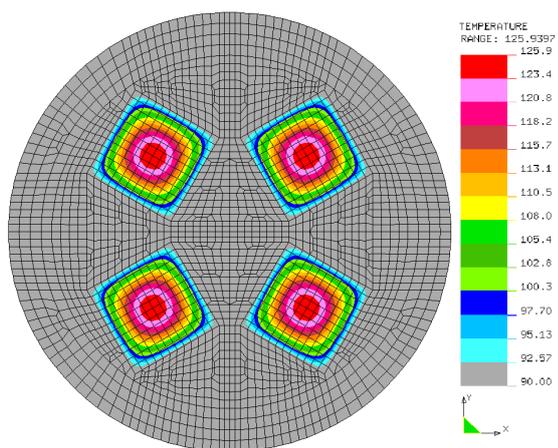
Fig. 10 Maximum temperature variation



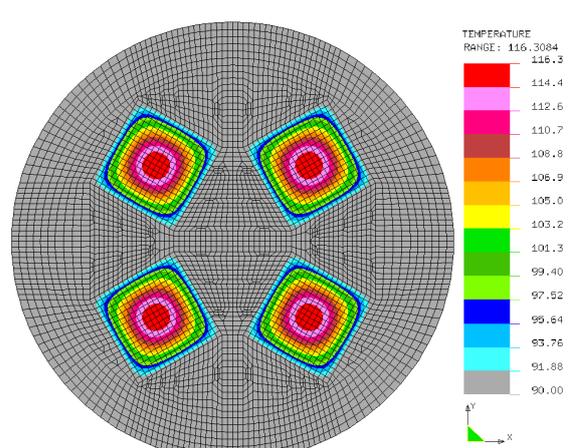
(a) $\theta=0^\circ$



(a) $\theta=0^\circ$



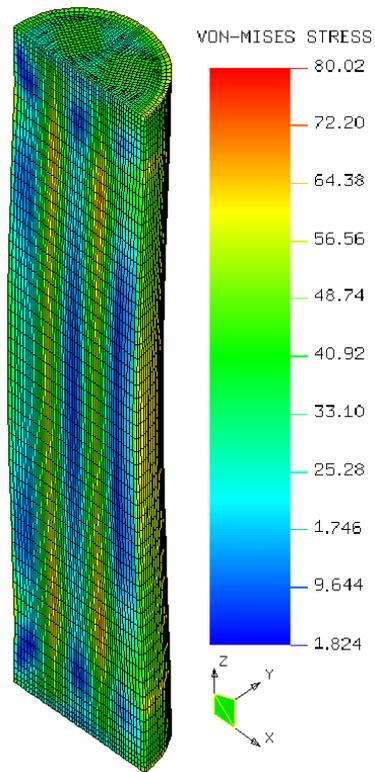
(b) $\theta=30^\circ$



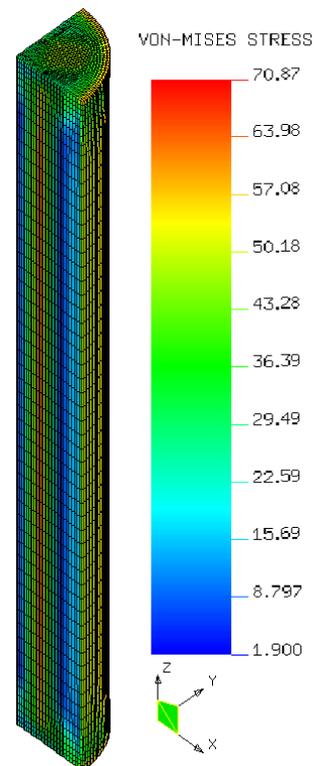
(b) $\theta=30^\circ$

Fig. 11 Temperature distribution inside PWR canister (top section view) (D=102cm, load case 1, $q=1,284.8\text{W/m}^3$, unit: $^\circ\text{C}$)

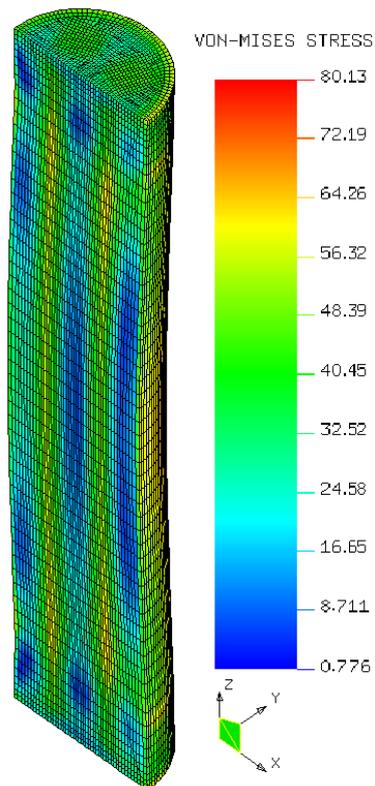
Fig. 12 Temperature distribution inside PWR canister (top section view) (D=102cm, load case 2, $q=943.3\text{W/m}^3$, unit: $^\circ\text{C}$)



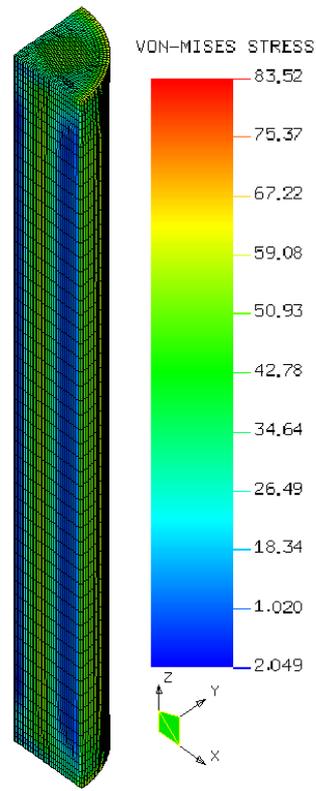
(a) $\theta=30^\circ$



(a) $\theta=30^\circ$



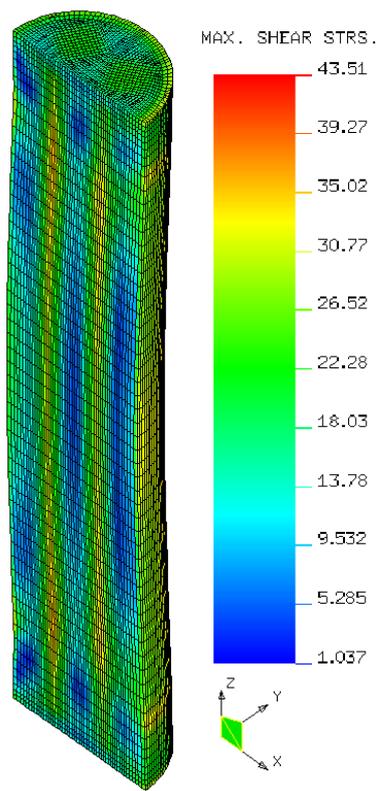
(b) $\theta=70^\circ$



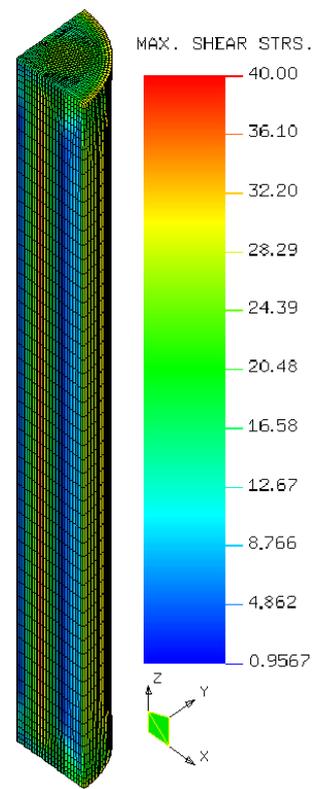
(b) $\theta=70^\circ$

Fig. 13 Maximum von Mises stress contour inside PWR canister(cast iron insert)
(D=102cm, load case 1, half view, unit: MPa)

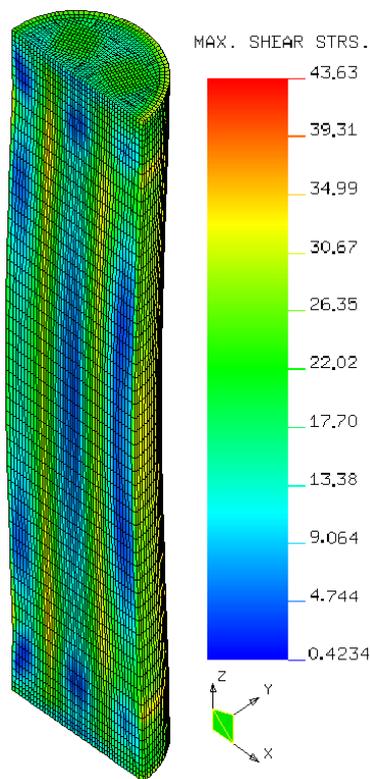
Fig. 14 Maximum von Mises stress contour inside PWR canister(cast iron insert)
(D=102cm, load case 2, quarter view, unit: MPa)



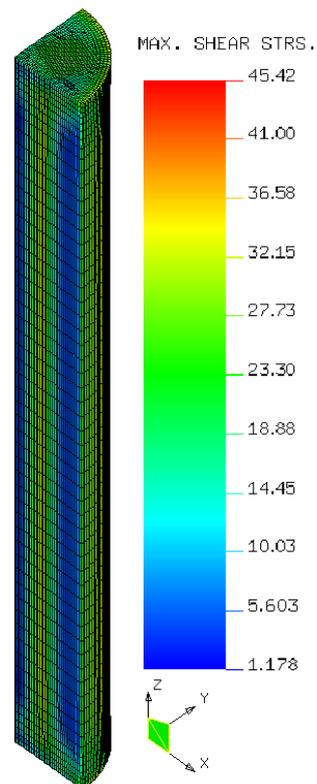
(a) $\theta=30^\circ$



(a) $\theta=30^\circ$



(b) $\theta=70^\circ$



(b) $\theta=70^\circ$

Fig. 15 Maximum shear stress contour inside PWR canister(cast iron insert) (D=102cm, load case 1, half view, unit: MPa)

Fig. 16 Maximum shear stress contour inside PWR canister(cast iron insert) (D=102cm, load case 2, quarter view, unit: MPa)

조건 적용 시에 사용한다. 본 연구에서 처분용기에 가해지는 외력을 검토하였을 때 지하수 포화과정 중의 외력인 팽윤압은 분명 전단력이고, 지하수 포화 후 외력인 경우 외곽 셸(outer shell)에 가해지는 벤토나이트 팽윤압은 분명히 압축력이지만 위아래 덮개(lid & bottom)에 가해지는 팽윤압은 전단력으로 두 가지 외력조건(load case 1과 load case 2) 모두 처분용기에 가해지는 외력이 전단력에서 항복이 발생할 것으로 예상되기 때문에 주철의 항복강도를 항복조건 적용 시 사용해도 큰 무리가 없다고 사료된다. 본 연구에서는 일반적으로 금속의 항복여부를 판단하는데 유용하게 사용되는 폰미세스(von Mises) 및 트레스카(Tresca) 항복조건 모두를 적용하여 처분용기에 가해지는 외력에 따른 내부주철 삽입물(cast iron insert)의 구조강도를 평가하였다. 평가결과는 Fig. 7 ~ Fig. 8에 나타내었다. 평가결과를 분석해 보면 해석을 수행한 모든 회전각에 대한 처분용기에 가해지는 외력(load case 1, load case 2)에 대하여 모든 해석대상 구조물의 안전계수(S) 값이 2.0보다 크기 때문에 내부주철 삽입물(cast iron insert)은 항복이 발생하지 않으며 정사각형 단면의 고준위폐기물 다발이 처분용기 단면 중심에 대하여 대칭되게 배열되면 다발의 회전각도에 관계없이 구조적 안전성에는 큰 문제가 없다는 것을 알 수 있다. 그러나 Fig. 7~Fig. 8에서 알 수 있는 바와 같이 응력의 차이가 크지는 않지만 지하수 포화 과정중의 외력조건(load case 1)하에서는 최대 폰미세스(von Mises) 등가응력은 $\theta=30^\circ$ 와 $\theta=75^\circ$ 의 배열구조를 갖는 처분용기의 내부주철 삽입물에 가장 작게 발생하고 최대 전단응력(maximum shear stress)은 $\theta=35^\circ$, $\theta=50^\circ$ 와 $\theta=85^\circ$ 의 배열구조를 갖는 처분용기의 내부주철 삽입물에 가장 작게 발생함을 알 수 있다. 지하수 포화 후의 외력조건(load case 2)하에서는 최대 폰미세스(von Mises) 등가응력 및 최대 전단응력(maximum shear stress) 모두 $\theta=30^\circ$ 와 $\theta=60^\circ$ 의 배열 구조를 갖는 처분용기의 내부주철 삽입물에 가장 작은 응력이 발생함을 알 수 있다. 이를 근거로 판단하면 두 외력 조건 모두에서 내부주철 삽입물에 가장 작은 응력(폰미세스 등가응력 및 최대 전단응력)이 발생하는 경우는 회전각도가 $\theta=30^\circ\sim 35^\circ$ 임을 알 수 있다. 즉 고준위폐기물 다발이 다발 중심에 대하여 $30^\circ\sim 35^\circ$ 회전하여 배열된 처분용기가 고준위폐기물 다발이 나란하게 배열된($\theta=0^\circ$) 처분용기 보다 구조적으로 더 안정성이 있음을 알 수 있다. 따라서 가압경수로(PWR)처분용기의 직경을 $D=102\text{cm}$ 보다 더 줄여서 경량화 할 수 있다는 결론을 얻을 수 있다.

처분용기에 가해지는 외력조건에 따라서 최고응력 및 변위가 발생하는 위치도 다름을 알 수 있다(Fig. 13. ~Fig. 16) 회전각도에 관계없이 모든 처분용기가 동일하게 지하수 포화 과정 중의 외력조건(load case 1)에서는 처분용기 하단 부분

외곽 셸 표면에 최대응력이 발생하지만 지하수 포화 후(load case 2)의 외력조건에서는 처분용기 상단 부분 외곽 셸 내부에 최대응력이 발생함을 알 수 있다. 최대 변위는 두 가지 외력 조건 모두 처분용기 위 덮개(lid) 최상단(grip) 내부표면에서 발생함을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 고준위폐기물 다발이 다발 중심에 대하여 일정각도 회전하여 처분용기 단면 중심에 대하여 대칭으로 배열된 가압경수로(PWR)용 처분용기에 대하여 구조해석을 수행하였다. 해석결과 고준위폐기물 다발이 다발 중심에 대하여 일정각도 회전하여 처분용기 단면 중심에 대하여 대칭으로 배열된 가압경수로(PWR)용 처분용기($0^\circ < \theta \leq 85^\circ$)는 동일한 직경의 기존의 고준위폐기물 다발이 대칭으로 나란하게 배열된 가압경수로(PWR)용 처분용기($\theta=0^\circ$)와 내부주철 삽입물(cast iron insert)에 발생하는 전체 구조물에 발생하는 변위와 온도가 큰 변화를 보이고 있지 않지만 구조물 내부에 발생하는 응력에는 차이를 보이고 있음을 알 수 있었다. 온도와 변위는 나란하게 배열된 처분용기와 일정 각도 회전하여 배열된 처분용기가 약간의 변화는 보이고 있지만 고려한 외력조건에 대하여 큰 변화를 보이고 있지 않음을 알 수 있다. 특히 회전하여 배열된 처분용기 사이에서는 차이가 없이 거의 동일한 값을 갖는 것을 알 수 있다. 그러나 처분용기에 발생하는 응력 값들은 고준위폐기물 다발의 회전각도에 따라서 차이를 보이고 있다. 특히 고려한 외력조건 모두(load case1과 load case2)에서 고준위폐기물 다발을 $30^\circ\sim 35^\circ$ 회전한 처분용기에서 내부주철 삽입물에 가장 작은 응력이 발생함을 알 수 있다. 즉 고준위폐기물 다발이 다발 중심에 대하여 회전하여 배열된($\theta=30^\circ\sim 35^\circ$) 처분용기가 고준위폐기물 다발이 나란하게 배열된($\theta=0^\circ$) 기준에 설계된 처분용기 보다 구조적으로 좀 더 안정성이 있다고 사료된다. 따라서 가압경수로(PWR)처분용기의 직경을 $D=102\text{cm}$ 보다 더 줄여서 경량화 할 수 있음을 알 수 있다.

감사의 글

이 논문은 2008학년도 홍익대학교 학술연구진흥비에 의하여 지원되었음.

참 고 문 헌

권영주 (2009) 중수로(CANDU)용 고준위폐기물 처분용기의 구조적 안전성 평가 보완 해석, 한국전산구조공학회 논문집.

- 22(5), pp.381~390.
- 권영주, 하준용, 최종원** (2002) 가압경수로 고준위폐기물 처분용기의 열응력 해석, 한국전산구조공학회 논문집, 15(3), pp.471~480.
- 권영주, 하준용, 최종원** (2004) 가압경수로 고준위폐기물 처분용기에 대한 크립해석, 한국전산구조공학회 논문집, 17(4), pp.413~421.
- 권영주, 최석호, 최종원** (2003) 고준위폐기물 처분용기와 벤토나이트 버퍼로 이루어진 복합구조물에 대한 비선형 구조 해석 : 대칭압반 전단력, 한국전산구조공학회 논문집, 16(4), pp.369~376.
- 최종원, 권영주** (2007) 가압경수로(PWR)용 고준위폐기물 처분용기의 구조적 안전성 평가 보완 해석, 한국전산구조공학회 논문집, 20(4), pp.427~433.
- Ahonen, L.** (1995) Chemical Stability of Copper Canisters in Deep Repository, Report YJT-94-13, Nuclear Waste Commission of Finnish Power Companies, Helsinki, p.101.
- Chijimatsu, M., Nguyen, T.S., Jing, L., Dejonge, J., Kohlmeier, M., A. Millard, A., A. Rejeb, A., Rutqvist, J., Souley, M., Sugita, Y.** (2005) Numerical Study of the THM Effects on the Near field Safety of a Hypothetical Nuclear Waste Repository BMT1 of the DECOVALEX III. Part 1: Conceptualization and Characterization of the Problems and Summary of Results, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 42, pp.720~730.
- Choi, J.W., Wonil, Ko, W., Kang, C.H.** (1999) Reference Spent Fuel and Its Characteristics for a Deep Geological Repository Concept Development, *Journal of the Korean Nuclear Society*, 31(6), pp.23~38.
- Idaho National Engineering Laboratory(Compiled and Edited by Hargman, D.L., A.R. Reymann)** (1979) Matro-Version II, a Handbook of Materials Properties for Use in the Analysis of Light Water Reactor Fuel Rod Behavior, NUREG/CR-0497, EG&G Idaho, Inc., p.514.
- Karnland, O.** (1998) Bentonite Swelling Pressure in Strong NaCl Solutions, Report POSIVA 98-01, Posiva Oy, Helsinki, ISBN 951-652-039-1, p.36.
- Kwon, Y.J., Kang, S., Choi, J.W. Kang, C.H.** (2001) Structural Analysis for the Determination of Design Variables of Spent Nuclear Fuel Disposal Canister, *KSME International Journal* 15(3), pp.327~338.
- Millard, A., Rejeb, A., M. Chijimats, M., Jing, L., Dejonge, L., Kohlmeier, M., Nguyen, T.S., Rutqvist, J., Souley, M., Sugita, Y.** (2005) Numerical Study of the THM Effects on the Near field Safety of a Hypothetical Nuclear Waste Repository BMT1 of the DECOVALEX III. Part 2: Effects of THM Coupling in Continuous and Homogeneous Rocks, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 42, pp.731~744.
- Rutqvist, J., Chijimatsu, M., Jing, L., Millard, A., Nguyen, T.S., Rejeb, A., Sugita, Y., Tsang, C.F.** (2005) Numerical Study of the THM Effects on the Near field Safety of a Hypothetical Nuclear Waste Repository BMT1 of the DECOVALEX III. Part 3: Effects of THM Coupling in Sparsely Fractured Rocks, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 42, 745~755.
- Werme, L.** (1999) 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, p.46.

- 논문접수일 2010년 2월 17일
- 논문심사일
 - 1차 2010년 3월 15일
 - 2차 2010년 5월 7일
- 게재확정일 2010년 6월 1일