

고준위폐기물다발의 단면형상 변화에 따른 가압경수로(PWR)용 고준위폐기물 처분용기의 구조해석

A Structural Analysis of the SNF(Spent Nuclear Fuel) Disposal Canister with the SNF Basket Section Shape 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 평가수행을 통하여 처분용기모델이 개발되었다. 기존에 설계 개발된 가압경수로용 처분용기 모델은 구조적으로 처분용기 내부에 정사각형 단면의 네 개의 고준위폐기물다발이 처분용기 단면의 중심에 대칭되게 나란히 배열된 형태를 취하고 있다. 그러나 이와 같은 배열형태가 최적의 구조인지는 아직 결정할 수 없다. 특히 경량화하는 데에는 여전히 문제가 있다. 이러한 문제를 해결하는 방법은 처분용기 단면 중심에 대하여 대칭으로 배열된 네 개의 고준위폐기물다발의 단면형상을 변경시키는 것이다. 단면형상을 변경시키는 방법에는 정사각형 형상을 유지시키면서 단면을 회전시키는 방법과 정사각형 형상을 다른 단면형상으로 변경시키는 두 가지 방법이 있다. 기 수행된 연구를 통하여 정사각형 단면형상을 유지시키면서 단면을 회전시키면 회전각도가 30~35°인 배열구조의 처분용기가 나란한 정사각형 배열구조보다 구조적으로 더 안정적이어서 경량화할 수 있음을 알 수 있었다. 그러나 이 회전한 배열구조의 처분용기가 최적인지는 역시 아직 결정할 수 없다. 왜냐하면 정사각형이 아닌 다른 단면형상의 구조물에 대해서는 아직 구조적으로 더 안정한지가 확인되지 않았기 때문이다. 따라서 처분용기 단면 중심면에 대하여 대칭성을 유지하면서 고준위폐기물다발의 단면형상이 정사각형이 아닌 다른 단면형상의 처분용기구조에 대한 구조해석이 필요하다. 본 연구에서는 네 개의 고준위폐기물다발이 처분용기 중심 면에 대하여 대칭적으로 배열되면서 단면형상이 여러 가지로 변화된 가압경수로용 처분용기에 대하여 구조해석을 수행하였다. 구조해석을 수행한 결과 기존의 설계 개발된 처분용기 단면의 중심에 대칭되게 나란히 고준위폐기물다발이 배열된 정사각형 단면의 처분용기보다 다발의 단면형상이 원형인 처분용기가 구조적으로 좀 더 안정성이 있음이 밝혀졌다.

핵심용어 : 가압경수로, 고준위폐기물 처분용기, 안전성평가, 고준위폐기물다발, 정사각형 단면형상 다발, 단면형상 변화

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 whose 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 optimal is not determinable yet. Especially, there is still a problem in weight-reduction of the canister. The cross section shape of the SNF basket should be changed to solve this problem. There are two ways in changing the cross section shape of the SNF basket; the one is to rotate the cross section itself and the other is to change the cross section shape as other shape different from the square cross section. The previous study shows that the canister with 30~35° rotated basket array is structurally more stable than the canister with un-rotated parallel basket array. However, whether this canister with rotated basket array is optimal is not either determinable as yet, because it is not revealed that the canister with other cross section different from the square cross section is structurally more stable than other canisters. Therefore, the structural analysis of the SNF disposal canister with other cross section shape which is also symmetric with respect to the canister center planes is very necessary. The structural analysis of the canister with various cross section shape basket array in which each basket is 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 circular cross section shape baskets located symmetrically with respect to the center of the canister section 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, square cross section shape basket, cross section shape change*

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

• 이 논문에 대한 토론을 2012년 4월 30일까지 본 학회에 보내주시면 2012년 6월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

원자로에서 발생한 사용 후 핵연료, 사용 후 핵연료를 재처리 혹은 재활용할 때 발생하는 폐용액, 핵무기 폐기 시 발생하는 핵 폐기물 등인 '고준위폐기물(HLW : High Level Waste)'은 장수명의 방사성 핵종을 많이 함유할 뿐만 아니라 이러한 핵종에서 나오는 붕괴열 때문에 특히 특별한 관리가 요구된다. 이를 극복하기 위하여 개발되어야 하는 핵심기술은 위험한 방사능과 높은 붕괴열을 가지고 있는 고준위폐기물처리기술이다. 이를 처리할 수 있는 한 가지 방법은 이들을 특수한 용기에 밀봉하여 인간의 주거지에서 멀리 떨어진 지하 깊은 곳에 처리하는 방법인 심지층처분기술(Disposal Technology in a Deep Geological Repository)이 유일하다. 이는 자연으로부터 얻은 이들을 자연으로 돌려보내는 환경 친화적인 방법으로 오랜 시간이 경과 되면 이들의 인간에 대한 유해성은 자연 소멸된다. 1970년대부터 지금까지 미국, 프랑스, 캐나다, 일본, 스위스, 벨기에, 스웨덴, 핀란드 등은 자국 실정에 맞는 심지층처분기술을 축적해 오고 있다. 따라서 이와 같은 심지층처분기술의 개발은 이미 몇몇 주요국에서는 상당한 기술개발이 이루어지고 있다. 2030년까지 원전 18기를 추가로 건설하여 전체 전력소비량의 59%까지 끌어올릴 예정인 우리나라도 1997년부터 한국원자력연구원을 중심으로 고준위폐기물 심지층처분기술개발을 수행해오고 있다. 현재 개발되고 있는 심지층처분기술은 지하 500~1000m 깊이에 처분장을 만들어 고준위폐기물을 묻는 방법이다. 그러나 고준위폐기물을 처분한 다음 적어도 일 만년 이상동안 안전성을 유지할 수 있을 것이란 기술적 확신을 아직 얻지 못하고 있으며, 처분 환경이 각 국가마다 다르기 때문에 각국의 사회·환경 여건에 부합되는 처분기술이 확보되어야 한다. 따라서 우리 환경에 적합한 처분기술의 자체개발이 불가피하며 장기간에 걸친 실증시험을 통한 처분 안전성 입증은 중요한 과제이다. 본 연구에서는 우리나라의 환경에 맞는 고준위폐기물 처분용기(canister)를 설계하는데 있어 반드시 요구되는 기계적 구조해석 특성을 연구하는데 목적이 있다. 지난 수년 동안 처분용기에 대한 여러 가지 구조해석을 수행하여 일차적으로 처분용기에 대한 설계를 완성하여 처분용기모형을 결정하였다(권영주 등, 2002; 2003; 2004; 2007; 2009; Kwon 등, 2001). 기존에 설계 개발된 가압경수로(PWR)용 처분용기 모델은 구조적으로 내부에 정사각형 단면형상을 한 네 개의 고준위폐기물다발이 처분용기 단면의 중심에 대칭되게 나란하게 배열된 형태를 취하고 있다. 그러나 이와 같은 배열 형태 및 고준위폐기물다발의 단면 형상이 최적의 구조인지는 아직 의문으로 되어 있다. 왜냐하면 고준위폐기물다발의 배열 구조 및 단면 형상이 다른 형태를 가질 수도 있기 때문이다.

비대칭형 배열구조는 이미 대칭형 배열구조보다 구조적 안전성이 떨어지는 것은 기 연구를 통하여 밝혀진 바 있다(Kwon 등, 2001). 그러나 처분용기 단면 중심에 대하여 대칭형이면서 나란하게 배열된 네 개의 고준위폐기물다발 각각을 각 다발의 중심에 대하여 일정 각도로 회전하여 처분용기 단면중심에 대하여 대칭성을 유지하면서 고준위폐기물다발이 배열된 처분용기구조에 대해서도 최근의 연구(권영주, 2010)에 의하면 일정 회전각도(30~35°)로 회전된 단면 구조형상이 구조적 안전성이 좀 더 우수함이 밝혀졌다. 그러나 나란하게 배열된 정사각형 단면인 네 개의 고준위폐기물다발에 대하여 처분용기 단면 중심에 대하여 대칭성을 유지하면서 고준위폐기물다발의 단면형상을 정사각형이 아닌 다른 형상으로 변화시켜 배열된 처분용기구조에 대해서는 아직 그 구조적 안전성이 검증되지 않았다. 스웨덴에서 정사각형이 아닌 다른 단면형상의 고준위폐기물다발의 처분용기가 개발된 바 있다(Werme, 1999). 따라서 현재 개발된 정사각형 단면 처분용기모델의 구조적 안전성 비교 검증 및 최적의 고준위폐기물다발 단면형상 설계차원에서 고준위폐기물다발의 단면형상 변화에 따른 처분용기에 대한 구조해석이 요구된다. 본 연구에서는 네 개의 고준위폐기물다발이 각각 처분용기 단면의 중심에 대하여 대칭적 배열을 유지하면서 고준위폐기물다발의 단면형상을 여러 가지로 변화시킨 가압경수로용 처분용기에 대하여 구조해석을 수행하고자 한다.

심지층처분 시 처분용기가 받는 처분 환경조건은 먼저 지하수의 유입에 의한 정수압과 벤토나이트 버퍼에 발생하는 팽윤압이다. 따라서 처분용기는 지하에 처분되는 기간 동안 이 압력에 견딜 수 있어야 한다(Kwon 등, 2001) 또 처분용기내의 폐기물 다발에서는 비록 점점 감소하지만 계속 많은 붕괴열이 발생하고 있기 때문에 이 열 발생에 따른 처분용기내의 온도분포에 의한 열응력에도 견딜 수 있어야 한다(권영주 등, 2002). 이 이외에도 지진 등에 의한 충격에도 견뎌야 하고(권영주 등, 2003), 또한 장기간 저장에 따른 내부 잔류응력 및 온도 등에 의한 처분용기에 발생할 수도 있는 크리프 변형도 견뎌야 하지만(권영주 등, 2004), 지금까지의 연구결과 정수압 및 팽윤압과 내부 고준위폐기물다발의 붕괴열만이 처분용기 구조 안전성에 큰 영향이 있음이 밝혀졌기 때문에 본 연구에서는 지하수에 의한 정수압과 팽윤압 그리고 붕괴열만을 외력으로 고려하여 가압경수로(PWR)용 처분용기에 대하여 정적인 구조해석을 수행한다.

2. 구조해석 문제의 구성

2.1 구조해석 모델

본 연구에서 구조해석을 수행하고자 하는 처분용기모델의 구조형상 및 제원은 Fig. 1과 같다. Fig. 1에서 가압경수로용 고준위폐기물 처분용기는 4개의 고준위폐기물다발이 처분용기 단면 중심에 대하여 대칭으로 배열된 여러가지 단면형상의 고준위폐기물다발이 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 고준위폐기물다발의 단면형상은 직사각형 단면형상 5가지 정사각형 1가지 정다각형 단면형상 5가지 총 11가지 단면형상을 갖는다. 단, 이 때 각 단면형상의 면적은 모두 동일하게 $22.4\text{cm} \times 22.4\text{cm} = 501.76\text{cm}^2$ 값을 갖는다. 따라서 본 연구에서는 각각의 단면형상에 대한 11개의 구조해석 모델에 대하여 구조해석을 수행하여 그 결과를 비교 검토하여 구조적으로 가장 안정적인 최적의 단면형상을 갖는 처분용기 구조를 구하고자 한다.

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 고준위폐기물다발은 내부에 원자로에서 타다 남은 재 형태의 고준위폐기물이 들어있는 Zry-4로 만들어진 피복 관들이 가압경수로(PWR)인 경우 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 문헌들마다 해당 값들이 차이가 나고, 또 어떤 물성치는 일정한 값으로 주어지지 않고 범위로 주어지기 때문에 실제 해석에 적용할 수 없어 그 대표 값(예 : 평균값)을 사용하였다. 고준위폐기물다발(바스켓 : fuel bundle)의 탄성계수는 바스켓 전체 부피 중에서 실제 Zry-4튜브가 차지하는 부피에 비례한다는 가정 하에 등가 탄성계수 값을 계산하여 사용하였다(권영주 등, 2002). 그러나 그 외의 고준위폐기물다발의 등가 물성치(열전도계수 등)들은 경수로(PWR) 고준위폐기물다발의 물성치 값들을 계산한 기존의 문헌(Idaho National Engineering Lab., 1979)의 값들을 참조하였다. 따라서 내부 삽입물(insert), 고준위폐기물다발(fuel bundle)과 외곽 셸(outer shell) 및 위아래 덮개(lid & bottom)들은 각각 균일한 물성치를 갖

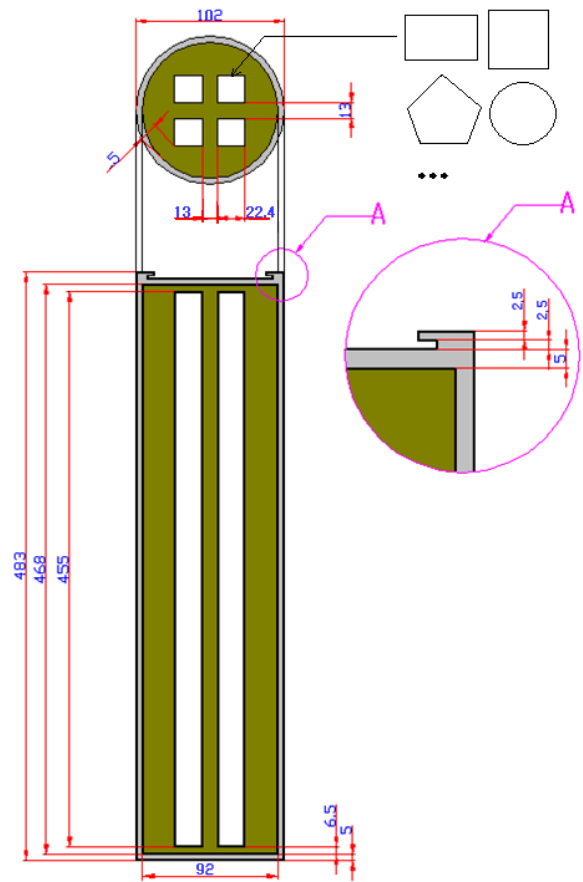


Fig. 1 Structural geometry and dimensions of the canister with various basket cross sections(unit : cm)

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 $E(\text{GPa})$	126.5	117.0	29.7774
Poisson's ratio ν	0.25	0.3	0.3
Thermal expansion coefficient $\alpha(10^{-6}/\text{C})$	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 $k(\text{W}/\text{m}\text{C})$	52	386	0.135
Specific heat $c(\text{J}/\text{kg}\text{C})$	504	383	2,640

는 연속체로 가정하였으며 각 구성부분들 간의 경계는 간극이 없는 일체화된 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 암석(화강암)으로 이루어진 처분공과의 직접적인 접촉 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(Karnland, 1998; Werme, 1999). 지하수가 버퍼에 포화되는 도중의 팽윤압의 크기는 4~5MPa로 4MPa는 지하수가 버퍼에 포화되고 있는 중간 단계의 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 가해져서 총 10MPa의 수압이 처분용기에 가해진다고 볼 수 있다. 만약에 처분용기가 처분공에 약간 기울어져 있거나 처분공의 형상이 약간 굴곡이 쳐 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.

2.3.1 지하수 포화 과정 중의 외력조건 - Load Case 1
지하수가 벤토나이트 버퍼에 포화되는 과정중의 외력조건으로 이 때 벤토나이트 버퍼에 발달되는 팽윤압의 크기는 4MPa로 처분용기 반쪽 상단부의 일부에 가해지고 팽윤압이 가해지지 않는 양단 끝은 고정되어 있다고 가정한다(Fig. 2).

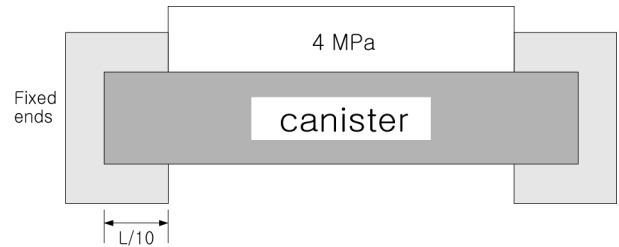


Fig. 2 Load condition during the ground water saturation(both fixed ends)

2.3.2 지하수 포화 후의 외력조건 - Load Case 2
수압이 처분용기 외곽 표면 전체에 균일하게 대칭적으로 발달하는 경우를 고려한다(Fig. 3). 이 때 구조해석 시 처분용기에 강제운동이 발생하지 않도록 적절한 구속조건을 주어야 한다.

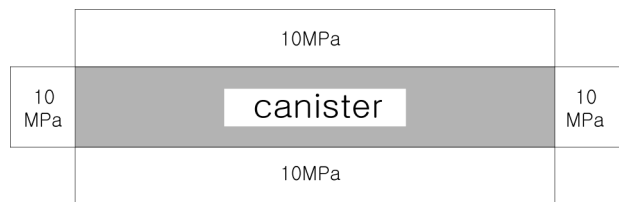


Fig. 3 Load condition after ground water saturation

2.3.3 열하중(thermal loads)

사용 후 고준위폐기물다발은 높은 고온을 유지하며 서서히 붕괴열을 방출하여 지하 처분장에 처분용기 저장 시 열원(heat source)으로 작용하여 처분용기 및 주위물질에 열을 전달하여 열팽창을 일으켜서 열하중으로 작용한다. 이때의 가압경수로(PWR)용 고준위폐기물다발의 붕괴열 발생률(Choi 등, 1999)은 다음과 같다.

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

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

(unit : W/tHM)

이 때 처분용기 외곽 쉘과 위아래 덮개 표면은 벤토나이트 버퍼와의 화학적인 반응을 고려하여 100°C이하로 유지되도록 하여야 한다(Ahonen, 1995). 따라서 본 논문에서는 처

분용기 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 여러 가지 단면형상 처분용기에 대하여 유한요소 수치해석 모델을 만들었다(Fig. 4). 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 11개씩의 유한요소 모델이 해석에 사용되었다. 각 외력조건하에서 단면형상 변화에 따른 처분용기구조의 변화에 대한 구조해석 결과를

비교해야 하므로 동일한 외력조건 하의 유한요소해석은 거의 동일한 메쉬조건(유한요소의 크기, 개수 및 세장비 등)의 유한요소모델을 사용하여야 한다. 그러나 폐기물다발 단면에 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 모든 외력조건 모든 단면형상에 대하여 높이방향의 유한요소수는 일정(206개)하게 분할하고 지하수 포화 중의 외력조건(load case 1)에서는 단면의 유한요소 개수를 2500~3000개 지하수 포화 후 외력조건(load case 2)에서는 2000~2200개의 범위에 있도록 유한요소 수치해석 모델을 만들었다(Table 2). 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.

3.2.1 지하수 포화과정 중의 외력조건에 대한 해석

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

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

$$q(t) = 29,097.4t^{-0.76204} \quad (30 \leq t < 10^6 \text{ yrs})$$

(unit : W/m³)

해석 대상이 되는 처분용기는 고준위폐기물다발이 열 발생 후 40년이 지난 후 고준위폐기물다발형태로 처분용기 내에 저장 장착되어 처분공(borehole)에 처분된다. 처분공에 처분된 후 지하수가 벤토나이트에 스며들어 완전히 포화되는데에는 30~50년, 즉 평균 40년이 걸리므로 지하수가 벤토나이트 버퍼에 포화되는 과정중의 열하중은 t=60년에 해당되는 상태로

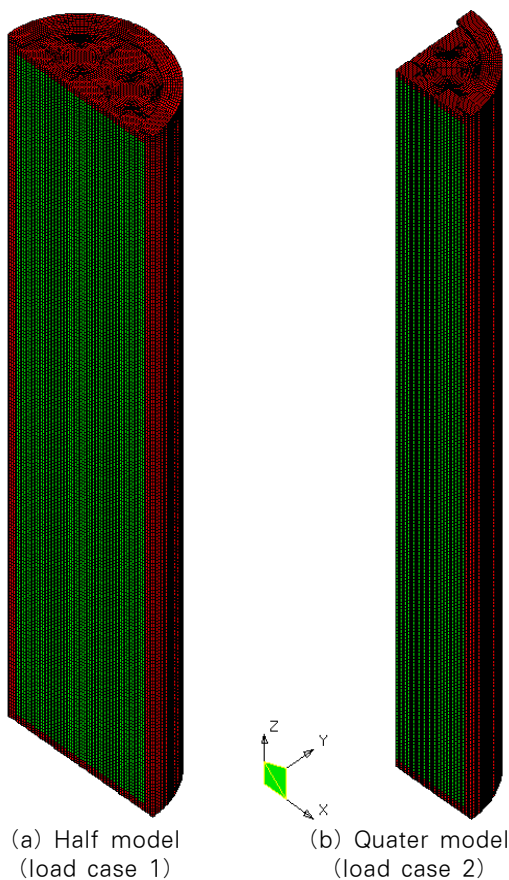


Fig. 4 Finite element model of the PWR canister with circular basket cross section(diameter(D)=102cm)

Table 2 Node and element numbers of the finite element model used for the analysis

Cross section Shape(ID No.)	Load case 1		Load case 2		
	Node no.	Element no.	Node no.	Element no.	
Rectangle (Quadrilateral, a, b)	a:b=2 :1(1)	486725	466000	460378	439916
	a:b=3 :2(2)	515551	495492	446746	427212
	a:b=4 :3(3)	499717	480140	434808	415526
	a:b=5 :4(4)	538009	517808	433387	414314
	a:b=6 :5(5)	566151	545376	433387	414314
Square(6)	521438	501148	453523	433534	
Regular pentagon(7)	556603	534629	430709	410522	
Regular hexagon(8)	552565	530704	447797	427854	
Regular heptagon(9)	590910	567352	438943	418218	
Regular octagon(10)	569948	547364	429121	409270	
Circle(11)	595932	573220	441301	422198	

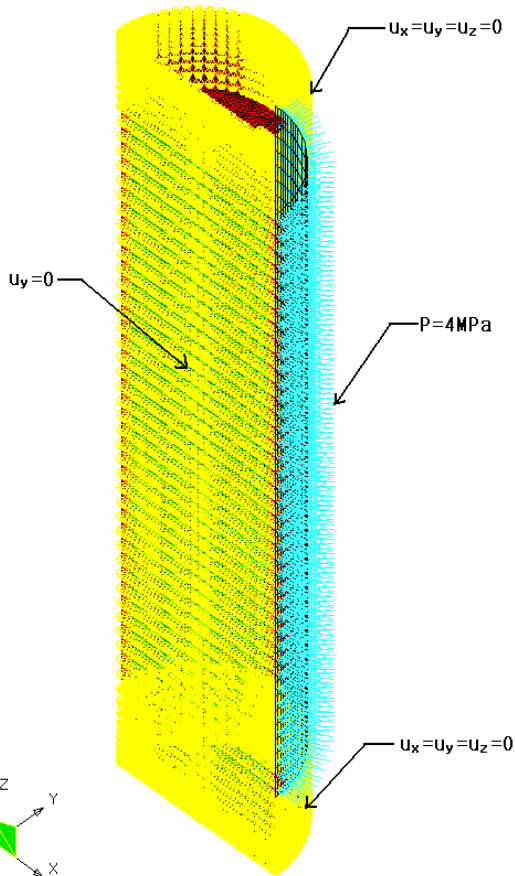


Fig. 5 External loads and boundary conditions for load case 1(half model, circular cross section)

고려된다. 따라서 고준위폐기물다발의 열발생률은 $t=60$ 년에 해당하는 $q(60)=1,284.8W/m^3$ 로 계산된다. 따라서 지하수

포화과정 중의 외력조건에 대한 구조해석은 1단계로 고준위폐기물다발의 열발생률 $q=1,248.8W/m^3$ 에 대한 열전달 해석을 수행한 후 이에 대한 열응력 해석을 수행한다. 다음 2단계로 팽윤압 $P=4MPa$ 에 의한 응력 해석을 수행한다. 마지막 3단계는 이상 수행한 단계 1, 단계 2의 해석결과를 통합(load combination)하여 열 하중 및 팽윤압에 의한 응력을 계산한다. 이때의 구속조건은 열전달 해석에 대해서는 처분용기 외곽 셸 및 위아래 덮개 표면의 온도는 $90^\circ C$ 로 구속하며, 팽윤압에 의한 구조해석에 대한 구속조건은 우선 4MPa의 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. 5).

3.2.2 지하수 포화 후 외력조건에 대한 해석

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

3.3 해석결과 및 분석

고준위폐기물다발의 단면형상이 여러 가지 형상이고 처분용기 단면 중심에 대하여 다발들이 대칭으로 배열된 가압경수로(PWR)용 처분용기에 대하여 구조해석을 수행한 결과는 다음과 같다. 처분용기 내에 발생한 온도 및 응력과 변형은 Fig. 7~16에 나타내었다. 고준위폐기물다발의 단면형상이 여러 가지로 변하면서 처분용기 단면 중심에 대하여 대칭으로 배열된 가압경수로(PWR)용 처분용기는 동일한 직경의 기존의 정사각형 단면의 고준위폐기물다발이 대칭으로 나란하게 배열된 가압경수로 처분용기와 내부주철 삽입물(cast iron insert)에 발생하는 응력 및 전체 구조물에 발생하는 변위와 온도가 큰 변화는 아니지만 그래도 차이를 보이고 있음을 알 수 있다. 전체 구조물에 발생하는 변위와 온도는 단면형상이 변함에 따라 변화가 크지 않지만 내부주철 삽입물(cast iron insert)에 발생하는 응력은 다발의 단면형상 변화에 따라 변화가 있음을 알 수 있다. 고준위폐기물다발 내부에 발생하는 최대온도는 고준위폐기물다발의 단면형상에 따라 정사각형 단면의 고준위폐기물다발을 가진 처분용기에 비해 직사각형 단면인 경우는 약 1~3°C 감소하고 정다각형 단면인 경우는 반대로 약 1°C정도 증가하는데(Fig. 11~12), 이는 고준위폐기물다발의 단면형상이 정사각형인 경우와 비교하여 고준위폐기물다발로 부터의 열방출에 차이가 있기 때문이라고 사료된다. 비교대상 고준위폐기물 단면 중 원형단면의 처분용기가 가장 큰 온도크기를 보이고 있음을 알 수 있다(Fig. 10). 구조물에 발생하는 최대변위도 중형비가 큰 일부 직사각형 단면 단면형상을 제외하고 단면형상의 변화에 따라 거의 변화를 보여주지 않고 있기때문에 이를 근거로 구조물의 구조강도를 비교하는 것은 무리가 있다고 사료된다(Fig. 9). 구조물에 발생하는 응력값, 특히 지하수 포화 후(load case 2)의 외력조건에서의 응력값 등이 단면형상의 변화에 따라 민감하게 변화하고 있음을 알 수가 있다(Fig. 7~8). 또한 유한요소수 특히 단면의 유한요소수에 민감하게 응력값이 변화하며 유한요소수가 증가함에 따라 응력값은 일정한 값으로 수렴함을 알 수 있다(Fig. 7~8). 따라서 본 논문에서 채택한 유한요소 개수(Table 2) 특히 단면의 유한요소 개수는 매우 타당한 신뢰성있는 해석결과를 보여주고 있다고 사료된다. 처분용기 구조물의 구조강도를 결정하는 것은 내부주철 삽입물(cast iron insert)이기 때문에 내부주철 삽입물(cast iron insert)에 발생하는 응력값을 비교하면 단면형상 변화에 따른 처분용기 구조물의 구조강도를 비교할 수가 있다. 일반적으로 고체 구조물의 강도를 평가하는데 있어 우선적으로 고려하여야 하는 것은 예상되는 외력

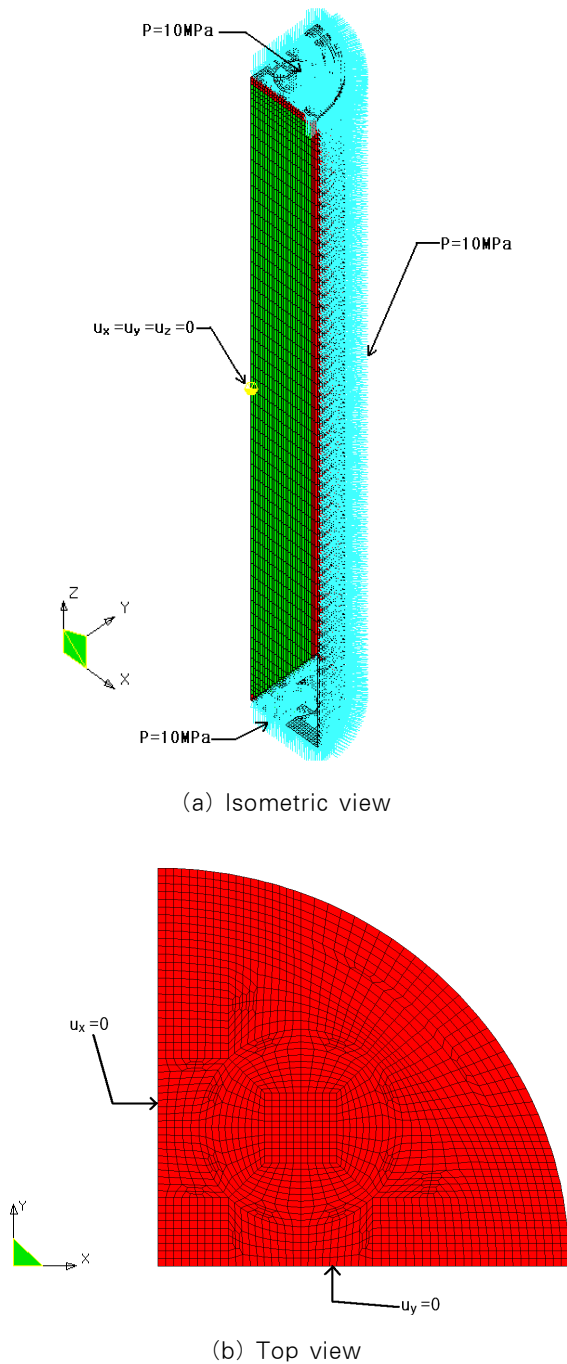
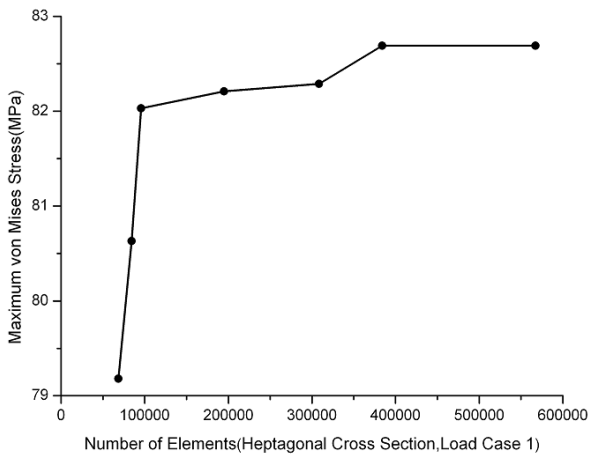


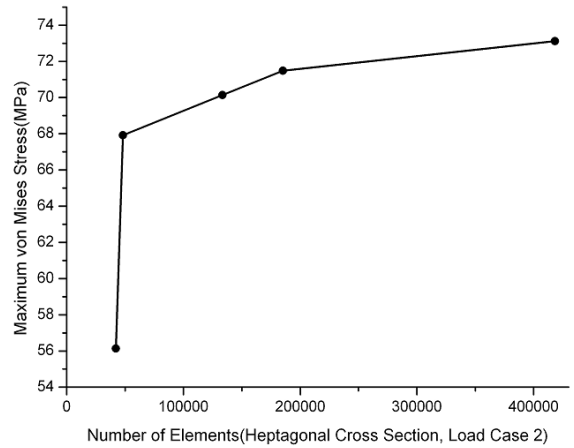
Fig. 6 External loads and boundary conditions for load case 2(quarter model, circular cross section)

을 방지할 수 있는 경계조건($u_x = u_y = u_z = 0$ at $x = y = 0, z = 2.39m$)을 적용한다(Fig. 6).

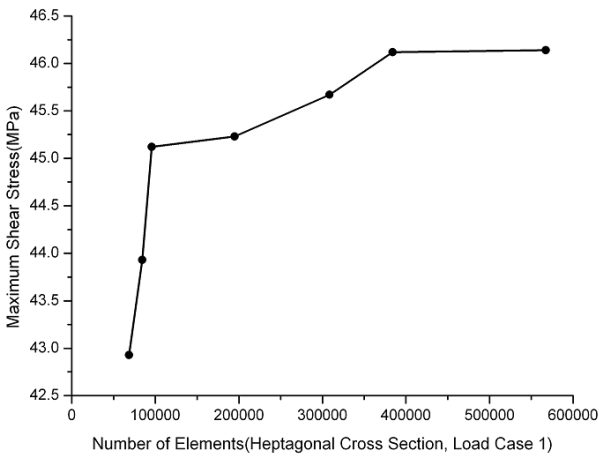
사실 내부 삽입물(insert)과 외곽 셸(outer shell) 및 위아래 덮개(lid & bottom) 사이에는 처분용기 제작 시 오차에 의하여 미세한 간극이 존재할 수 있다. 그러나 본 연구에서는 간극이 존재하지 않는 일체화된 구조물로 가정하여 구조해석을 수행한다.



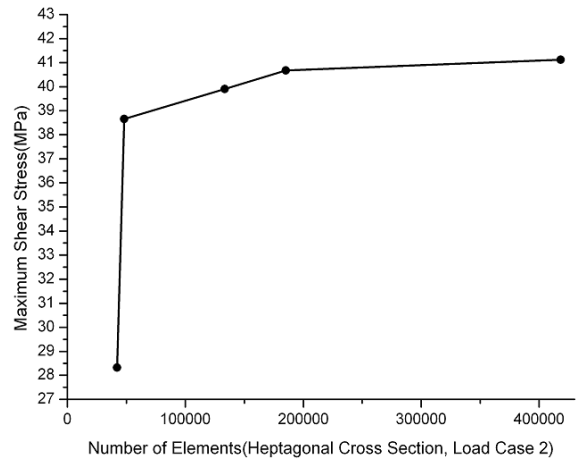
(a) Maximum von Mises stress variation vs. element no.



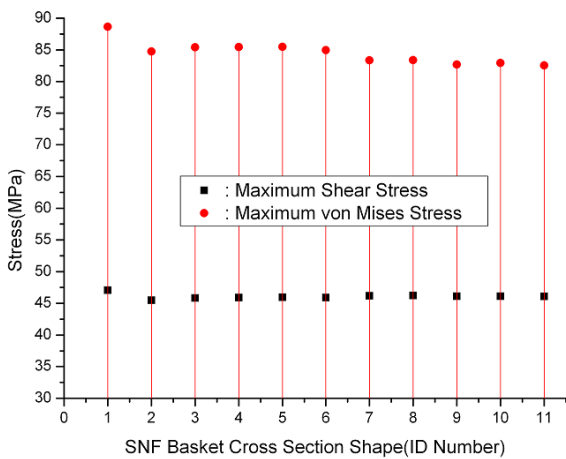
(a) Maximum von Mises stress variation vs. element no.



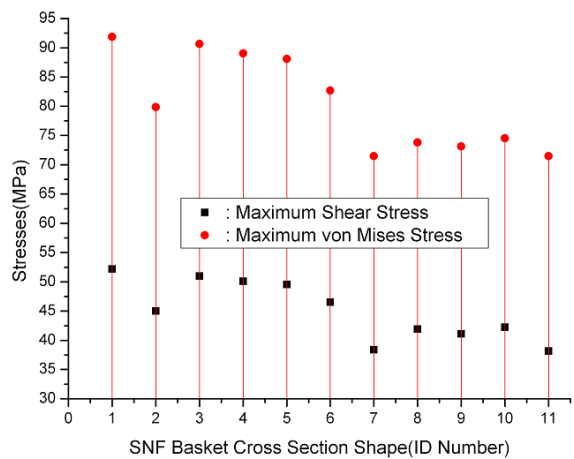
(b) Maximum shear stress variation vs. element no.



(b) Maximum shear stress variation vs. element no.



(c) Stress variation



(c) Stress variation

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

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

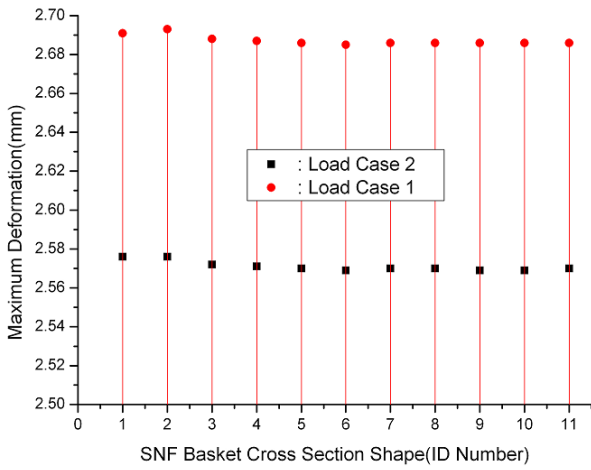


Fig. 9 Maximum deformation variation

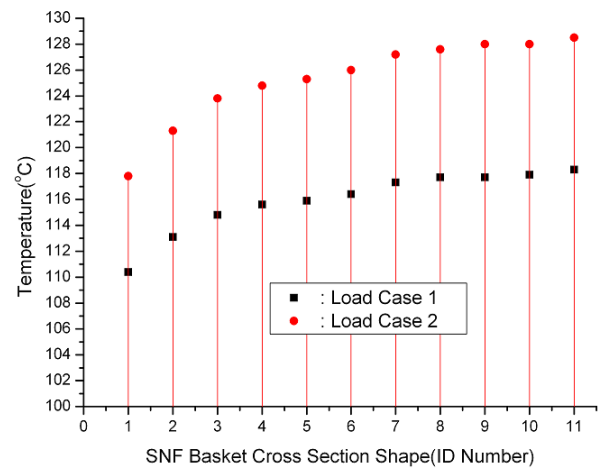
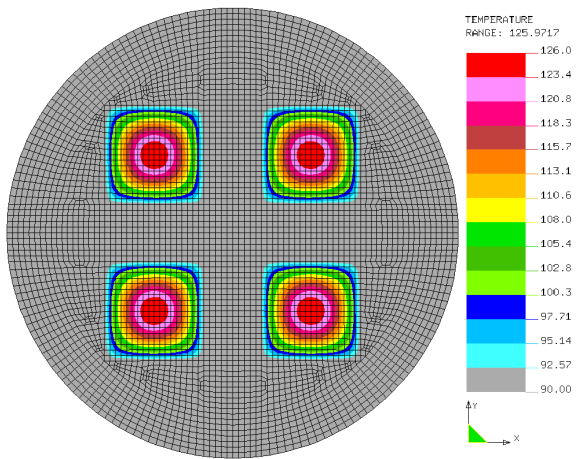
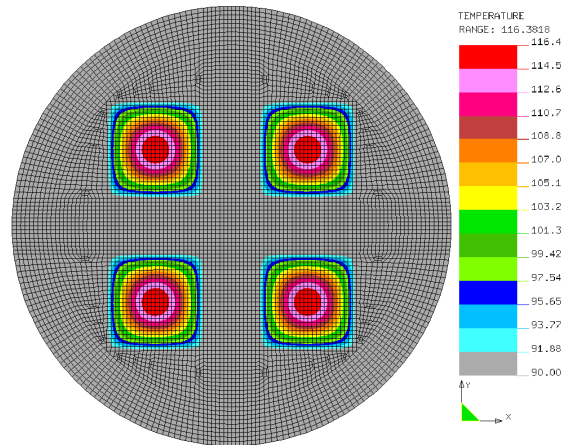


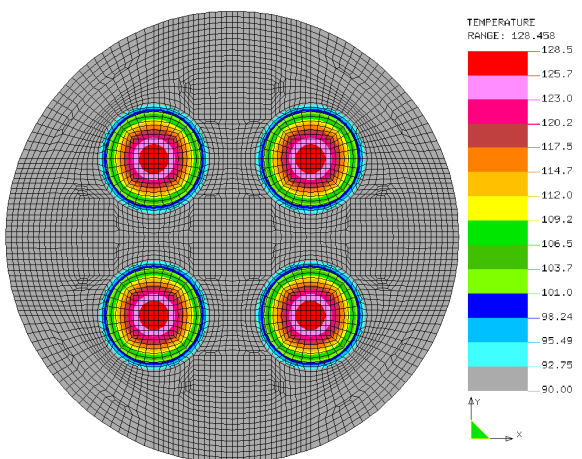
Fig. 10 Maximum temperature variation



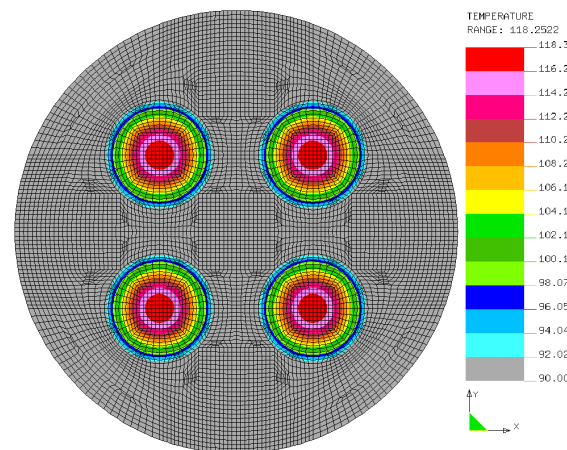
(a) Square cross section



(a) Square cross section



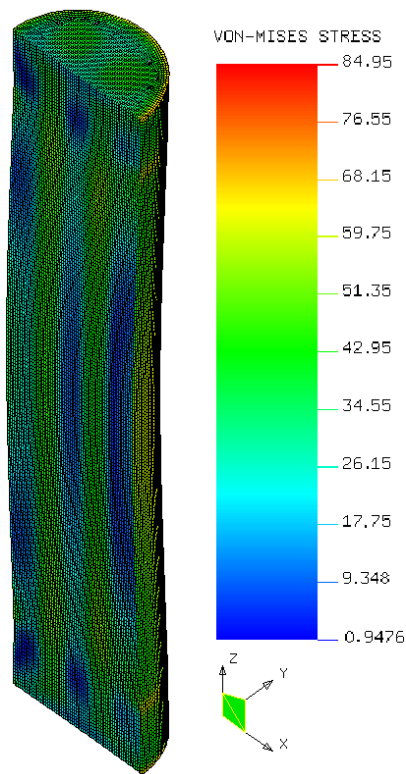
(b) Circular cross section



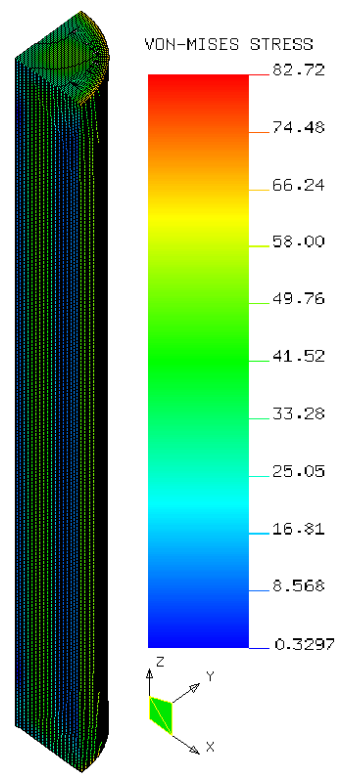
(b) Circular cross section

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

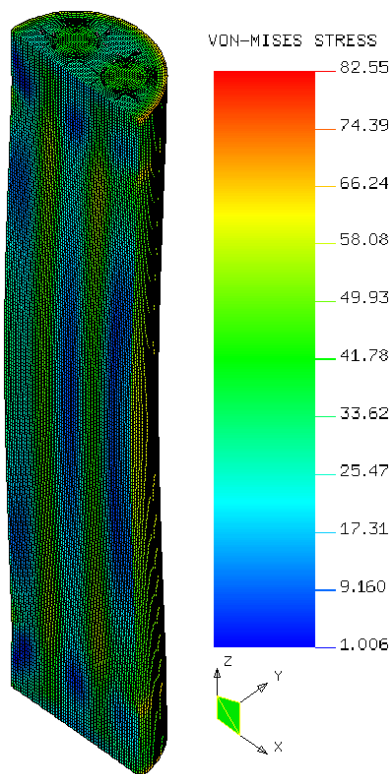
Fig. 12 Temperature distribution inside PWR canister (top section view) ($D=102\text{cm}$, load case 2, $q=943.3\text{W/m}^3$, unit: $^{\circ}\text{C}$)



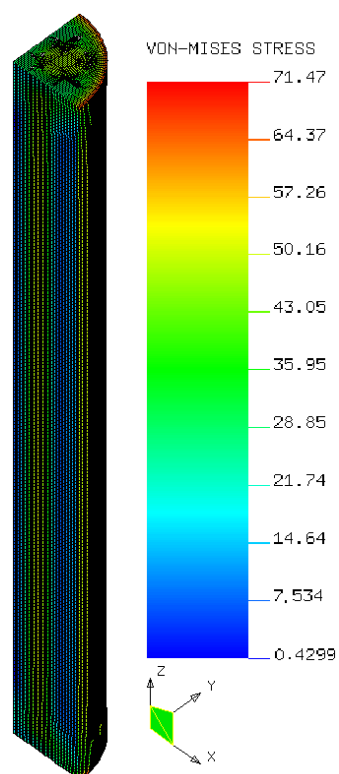
(a) Square cross section



(a) Square cross section



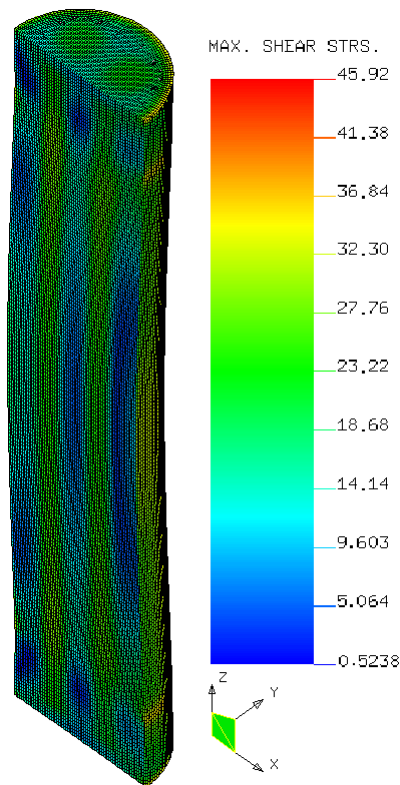
(b) Circular cross section



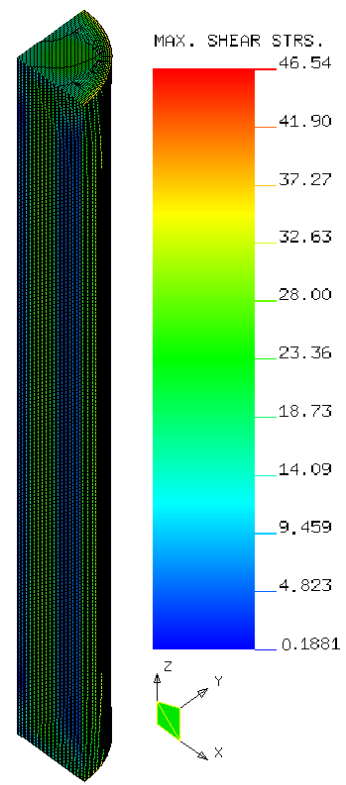
(b) Circular cross section

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

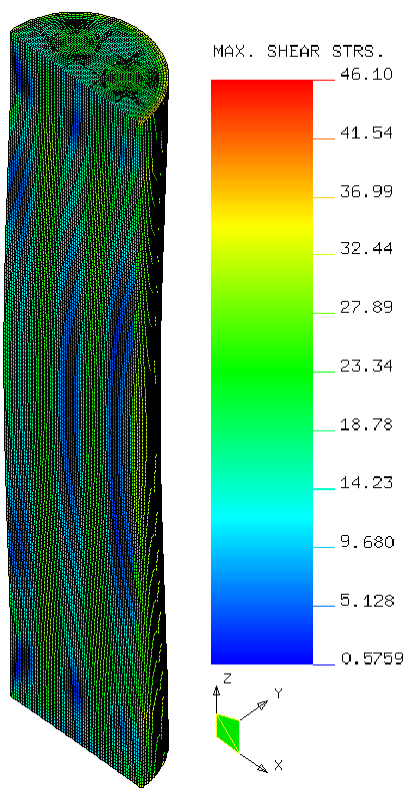
Fig. 14 Maximum von Mises stress contour inside PWR canister(cast iron insert)
($D=102\text{cm}$, load case 2, quarter view, unit: MPa)



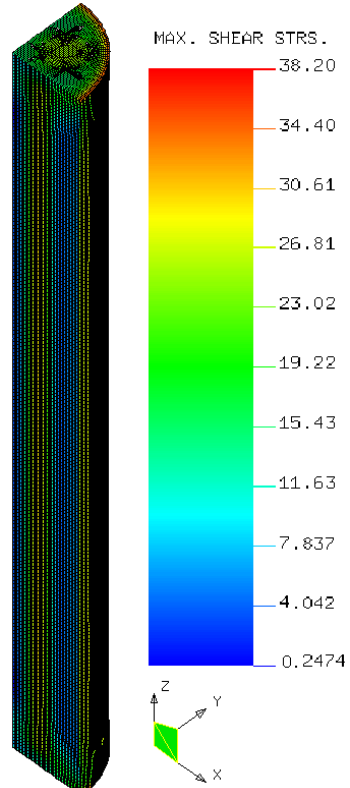
(a) Square cross section



(a) Square cross section



(b) Circular cross section



(b) Circular cross section

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

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

에 대하여 구조물의 항복발생 여부인데 구조물을 구성하는 금속이 주철인 경우 주철은 일반적으로 압축력에는 매우 강하고 전단력에는 약하여 압축력이 가해지는 경우는 항복강도 대신에 인장강도를 항복조건 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. 평가결과를 Fig. 7~8에 나타내었다. 평가결과를 분석해 보면 해석을 수행한 모든 경우에 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 고준위폐기물다발이 처분용기 단면 중심에 대하여 대칭되게 배열되면 다발의 단면형상에 관계없이 구조적 안전성에는 큰 문제가 없다는 것을 알 수 있다. 그러나 Fig. 7~8에서 알 수 있는 바와 같이 응력의 차이가 크지는 않지만 지하수 포화 과정중의 외력조건(load case 1)과 지하수 포화 후의 외력조건(load case 2) 모두에서 최대 폰미세스(von Mises) 등가응력 및 최대 전단응력(maximum shear stress) 모두 고준위폐기물다발의 단면형상이 원형인 배열 구조를 갖는 처분용기의 내부주철 삽입물에 가장 작은 응력이 발생함을 알 수 있다. 이를 근거로 판단하면 두 외력조건 모두에서 내부주철 삽입물에 가장 작은 응력(폰미세스 등가응력 및 최대 전단응력)이 발생하는 경우는 폐기물다발의 단면형상이 원형임을 알 수 있다. 즉 고준위폐기물다발의 단면형상이 원형인 처분용기가 고준위폐기물다발이 정사각형인 처분용기보다 구조적으로 더 안정성이 있음을 알 수 있다. 따라서 가압경수로(PWR)처분용기의 직경을 D=102cm보다 더 줄여서 경량화할 수 있다는 결론을 얻을 수 있다.

처분용기에 가해지는 외력조건에 따라서 최고응력 및 변위가 발생하는 위치도 다름을 알 수 있다(Fig. 13~16). 단면형상에 관계없이 모든 처분용기가 동일하게 지하수 포화과정 중의 외력조건(load case 1)에서는 처분용기 하단부분 외곽 셸 표면에 최대응력이 발생하지만 지하수 포화 후(load

case 2)의 외력조건에서는 처분용기 상단부분 외곽 셸 내부에 최대응력이 발생함을 알 수 있다. 최대변위는 두 가지 외력조건 모두 처분용기 위 덮개(lid) 최상단(grip) 내부표면에서 발생함을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 고준위폐기물다발의 단면형상이 여러 가지로 변화하는 가압경수로(PWR)용 처분용기에 대하여 구조해석을 수행하였다. 해석결과 고준위폐기물다발의 단면형상이 원형인 가압경수로(PWR)용 처분용기는 동일한 직경의 기존의 고준위폐기물다발이 대칭으로 나란하게 배열된 정사각형 단면의 가압경수로(PWR)용 처분용기와 전체 구조물에 발생하는 변위는 큰 변화를 보이고 있지 않지만 구조물 내부에 발생하는 온도와 응력에는 차이를 보이고 있음을 알 수 있었다. 변위는 정사각형 단면의 처분용기와 다른 단면의 처분용기가 약간의 차이는 보이고 있지만 고려한 외력조건에 대하여 큰 변화를 보이고 있지 않음을 알 수 있었다. 특히 정사각형 단면의 처분용기 사이에서는 차이가 없이 거의 동일한 값을 갖는 것을 알 수 있었다. 그러나 처분용기에 발생하는 온도와 응력값들은 고준위폐기물다발의 단면형상 변화에 따라서 차이를 보이고 있다. 특히 고려한 외력조건 모두(load case 1과 load case 2)에서 고준위폐기물다발의 단면형상이 원형인 처분용기에서 내부주철 삽입물에 가장 작은 응력이 발생함을 알 수 있었다. 즉 고준위폐기물다발의 단면형상이 원형인 처분용기가 고준위폐기물다발의 단면형상이 정사각형인 기존에 설계된 처분용기보다 구조적으로 좀 더 안정성이 있다고 사료된다. 따라서 가압경수로(PWR)처분용기의 직경을 D=102cm보다 더 줄여서 경량화할 수 있음을 알 수 있다.

감사의 글

이 논문은 2010학년도 홍익대학교 학술연구진흥비에 의하여 지원되었음.

참 고 문 헌

- 권영주, 하준용, 최종원 (2002) 가압경수로 고준위폐기물 처분용기의 열응력 해석, 한국전산구조공학회 논문집, 15(3), pp.471~480.
- 권영주, 최석호, 최종원 (2003) 고준위폐기물 처분용기와 벤토나이트 버퍼로 이루어진 복합구조물에 대한 비선형 구조해석

- : 대칭압반 전단력, 한국전산구조공학회 논문집, 16(4), pp.369~376.
- 권영주, 하준용, 최종원** (2004) 가압경수로 고준위폐기물 처분 용기에 대한 크립해석, 한국전산구조공학회 논문집, 17(4), pp.413~421.
- 최종원, 권영주** (2007) 가압경수로(PWR)용 고준위폐기물 처분용기의 구조적 안전성 평가 보완 해석, 한국전산구조공학회 논문집, 20(4), pp.427~433.
- 권영주** (2009) 중수로(CANDU)용 고준위폐기물 처분용기의 구조적 안전성 평가 보완 해석, 한국전산구조공학회 논문집, 22(5), pp.381~390.
- 권영주** (2010) 고준위폐기물다발의 배열구조 변화에 따른 가압경수로(PWR)용 고준위폐기물 처분용기의 구조해석, 한국전산구조공학회 논문집, 23(3), pp.289~301.
- 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.
- Choi, J.W., Ko, W.I., 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., and Reymann, A.R.)** (1979) Matro-Version II, a Handbook of Materials Properties for Use in the Analysis of Light Water Reactor Fuel Rod Behavior, NUR- EG/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.U., 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.
- 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 2011년 8월 5일
- 논문심사일 2011년 8월 16일
- 게재확정일 2011년 11월 17일