

지하수압 변화에 따른 심지층 핵폐기물 처분용기 내부 주철 구조물의 응력해석

A Stress Analysis of the Cast Iron Insert of Spent Nuclear Fuel Disposal Canister with the Underground Water Pressure Variation in a Deep Repository

강 신 욱* 권 영 주**
Kang, Shin-Uk Kwon, Young-Joo

ABSTRACT

In this paper, the stress analysis of the cast iron insert of spent nuclear fuel disposal canister in a deep repository at 500m underground is done for the underground pressure variation. Since the nuclear fuel disposal usually emits much heat and radiation, its careful treatment is required. And so a long term safe repository at a deep bedrock is used. Under this situation, the canister experiences some mechanical external loads such as hydrostatic pressure of underground water, swelling pressure of bentonite, sudden rock movement etc.. Hence, the canister should be designed to withstand these loads. The cast iron insert of the canister mainly supports these loads. Therefore, the stress analysis of the cast iron insert is done to determine the design variables such as the diameter versus length of canister and the number and array type of inner baskets in this paper. The linear static structural analysis is done using the finite element analysis method. And the finite element analysis code, NISA, is used for the computation.

1. 서 론

원자로에서 사용된 후 폐기되는 핵폐기물은 높은 온도와 많은 방사능을 가지고 있으므로 취급에 많은 주의가 필요하다. 처분용기는 처분 후 어떠한 조건하에서도 고준위폐기물의 방사성독성이 없어지는 기간인 10,000년 동안 폐기물을 완전히 격리시킬 수 있도록 그의 수명이 보장되어야 한다. 그러므로 보통 저장소는 지하 500m 아래의 안전한 장소에 보관하는 것이 바람직하다. 또한 예상되는 처분조건하에서도 처분용기의 수명 기간동안 화학적 저항성을 갖어야 한다. 이 처분용기는 처분용기 설계시, 기계·구조적 안전성 측면에

* 홍익대학교 기계설계학과 석사과정

** 홍익대학교 기계설계학과 교수

서 고려하여야 할 여러 가지 경우별 설계조건들을 만족해야 한다. 지하 처분장 폐쇄 후 처분장내로 유입된 지하수는 처분용기를 둘러싸고 있는 벤토나이트 완충재와 접촉하게 된다. 이때 벤토나이트 완충재의 팽윤압은 지하수에 포화되는 과정에서 균일하게 팽윤압이 발달되는 경우와 비균질적으로 처분용기에 국부적 압력으로 발달될 수 있는 경우 등으로 구분될 수 있다. 이와같은 지하수에 의한 완충재의 팽윤압 이외에 처분용기에 가해지는 외적인 영향들은 다음과 같다.

첫째, 빙하에 의한 추가하중 고려인데, 처분장 폐쇄 후 처분장 위로 3Km 두께의 얼음이 존재한다고 했을 때에는 빙하에 의한 하중까지 고려해야 한다. 그러나 보통 우리나라와 같이 빙하가 없는 경우에는 이와 같은 빙하에 의한 초기 하중을 고려할 필요가 없다. 따라서 본 연구에서는 빙하에 의한 추가 하중은 무시한다.

둘째, 급격한 지각변동이나 지진 등에 의해 Rock Movement가 작용할 때인 데, 이 경우 처분용기는 지하수압과 팽윤압에 의한 외압 이외에도 처분장 모암에 지진이나 기타의 원인에 의하여 순간적인 10cm의 전단변형이 발생할 수 있다. 이 경우에도 처분용기는 기계적 건전성을 유지할 수 있도록 설계되어야 한다.⁽¹⁾

이외에도 처분용기의 외부온도는 벤토나이트 등의 화학적인 반응을 고려하여 100°C를 넘지 말아야 한다.⁽²⁾ 이와같은 외력들에 견딜 수 있도록 처분용기를 기계적으로 견고하게 설계하여야 한다. 이와같은 기계적 하중은 대부분 처분용기의 내부삽입물인 주철구조물(cast iron insert)이 지탱한다. 따라서 처분용기설계 시 내부주철구조물(cast iron insert)의 구조형상 및 제원(직경, 길이)들이 결정되어야 한다.

본 연구에서 연구하고자 하는 처분용기는 크게 두 가지 형으로 나눌 수 있는데 원형의 핵폐기물다발로 채워진 처분용기를 CANDU형이라 하고, 사각형의 핵폐기물다발을 채워놓은 처분용기를 PWR형이라고 정의한다.

처분용기는 주철 삽입물과 부식작용 등에 저항하는 구리나 니켈 합금의 외곽셸로 이루어져 있다. 구조적으로 안전한 처분용기를 결정하려면 처분용기내의 주철삽입물(cast iron insert)의 직경과 길이, 외곽셸과 위아래 덮개의 두께와 이들의 재질이 결정되어야 한다. 또한 용기내부에 보관되는 핵연료다발들의 적당한 갯수와 위치배열도 결정되어야 한다. 본 연구에서는 처분용기에서 외력의 주된 지탱요소인 주철삽입물(cast iron insert)의 구조형상 및 제원을 결정하기 위한 응력해석을 수행하였다. 이와같은 유사한 연구는 이미 진행되어 왔다.⁽³⁾⁻⁽⁹⁾

위에서 언급한 설계변수들 중 가장 먼저 정해져야 하는 중요한 설계변수는 내부 주철삽입물의 제원인 그 직경과 길이, 그리고 내부에 배열된 핵연료다발의 갯 수 및 배열 위치이다. 이 내부주철삽입물의 외곽을 보통 구리(Cu)나 니켈합금(Ni-Alloy)등으로 이루어진 얇은 셸 및 덮개가 붙어있는데 이들의 두께도 역시 중요한 설계변수로서 결정되어야 한다. 그러나 이들의 두께가 얇기 때문에 두께 결정시 비선형변형해석의 요구가 예상되고, 또한 부식 등에 대한 화학적 해석의 요구가 예상된다. 본 연구에서는 내부주철삽입물의 설계 제원들을 결정하기 위한 선형구조해석만 수행하고 외곽셸과 위아래 덮개의 두께를 결정하기 위한 비선형구조해석 및 화학적 해석은 수행하지 않는다. 또한 처분용기 설계에 추가로 요구되는 파괴역학해석, 열응력해석, 구조진동해석, Rock Movement 영향해석, creep해석 등도 취급하지 않는다. 그리고, 응력해석 수행시 내부주철삽입물과 외곽 셸 및 위아래 덮개사이에 존재하는 미세한 간극(gap)은 없다고 가정하여 응력해석을 수행한다.

본 연구에서는 위에서 언급한 설계변수들의 적당한 값을 결정하기 위한 판단기준으로 구성물질의 항복응력 대 내부발생 최대응력의 비로 정의되는 안전계수(safe factor)를 사용하였으며 그 설계기준 값으로 1.5~2.5를 사용하였다. 또한 본 연구의 응력해석방법은 유한요소법을 사용하였으며 사용해석코드인 NISA프로그램을 이용하여 계산을 수행하였다.

2. 구조해석 문제의 구성

2. 1. 구조 형상

본 연구에서 연구하고자 하는 처분용기의 구조형상은 다음 그림 1에 나타난 두가지 형이다. 하나는 네 개의 사각형 핵연료다발을 보관할 수 있는 PWR형이고, 다른 하나는 여러개의 원형 핵연료다발을 보관할 수 있는 CANDU형이다. 그림 1에 주어진 처분용기의 제원들은 본 연구를 위하여 가정된 초기 개념설계 단계에서의 설계값들이다. PWR형의 처분용기에 보관되는 핵연료다발의 개수는 네 개로 고정되어 있다고 가정하고 CANDU형의 처분용기에 보관되는 핵연료다발의 개수는 본 연구를 통하여 결정하고자 한다.

(단위 : cm)

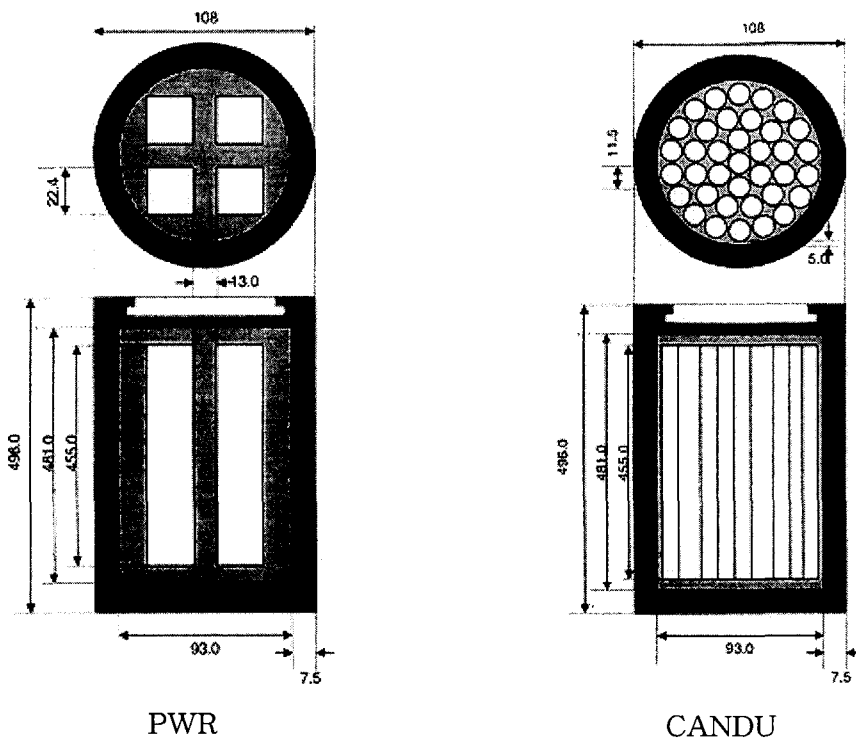


그림 1 PWR형 및 CANDU형의 구조형상 및 초기 개념설계 제원

2. 2. 처분용기의 재질

처분용기는 앞서도 언급하였듯이 내부주철삽입물(cast iron insert)과 외곽셸 및 위아래 덮개로 구성되어 있다. 본 연구에서는 내부삽입물을 구성하는 재질을 탄성계수(Young's Modulus, E)가 170GPa, 포와송비(Poisson's Ratio, ν)가 0.3, 항복응력(Yield Stress, σ_y)이 200MPa인 주철로 하였고, 외곽셸 및 위아래 덮개의 재질은 탄성계수(E)가 210GPa, 포와송비(ν)가 0.31인 니켈합금(Ni-Alloy)으로 하여 응력해석을 수행하였다. 또 밀도(ρ)는 주철인 경우 $7,400\text{kg/m}^3$, 니켈합금은 $8,800\text{kg/m}^3$ 값들을 사용하였다.

2.3. 구속 조건

처분용기의 내부주철삽입물에 대한 응력해석을 수행하기 위해서는 처분용기가 지하 500m압반내에 보관될 때 처분용기를 지지하는 방식에 의해 결정되는 경계조건(boundary condition) 및 여러가지 외력조건에 따른 처분용기에 가해지는 외부하중에 대한 구속조건(external force condition)들을 알아야 한다.

본 연구에서는 이와같은 외력조건들중 처분용기의 완충재에 저장 초기 지하수에 의하여 포화되는 과정 중 발생하는 크기 15MPa인 불균일 팽윤압(swelling pressure)인 경우에 대해서만 응력해석 결과를 제시한다. 또 이 때 처분용기의 지지방식은 처분용기 양끝 $L/10$ (L : 처분용기길이)인 곳의 모든 변위들을 구속하는 Fixed Ends(Clamped Ends)로 가정한다. 이외에도 여러 가지 외력 및 경계구속조건들이 있는데 본 논문에서는 이들 해석 및 결과들은 취급하지 않는다.

3. 유한요소 해석

3.1. 모델링

내부에 채워질 원자핵다발의 원자봉은 소결된 후의 물질로서 물질적으로 매우 취성(brittle property)을 갖기 때문에 그 기계적 강도 즉, 탄성계수는 무시할 정도로 작아 응력해석 시 그 강도를 고려하지 않아도 응력해석결과에 영향이 거의 없다고 가정한다. 즉, 응력해석을 위한 유한요소해석 시 PWR형과 CANDU형 모두 내부 바스켓은 비어있는 것으로 가정한다.

유한요소모델링에 사용되는 요소의 타입은 정6각형의 요소와 정8각형의 요소 타입이 사용된다. 주로 8Node의 정8각형의 요소 (Hexagonal 8Node Cubic Solid Element)를 사용하였다. 그림 2는 CANDU형 처분용기의 유한요소모델링 결과이다.

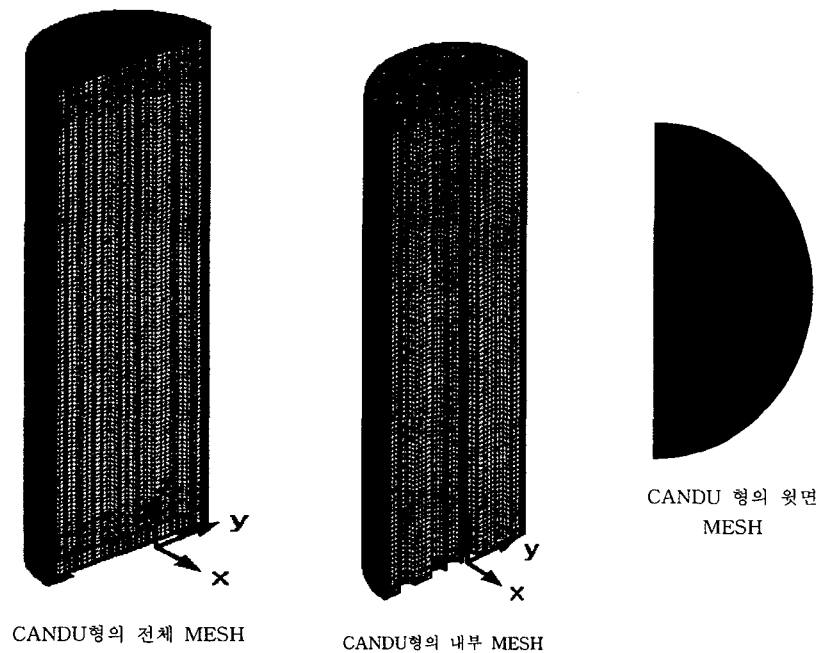


그림 2 CANDU형의 유한요소 모델

3. 2. 경계 및 하중조건

유한요소해석 시 앞에서 고려한 하중조건 및 경계조건에 대하여 구체적으로 변위 값들을 구속하고, 하중들도 주어야 한다. 앞에서 언급한 Fixed Ends 경계조건에 대해서는 처분용기의 양쪽 끝 부분(L/10 부분)에서 변위 U_x , U_y , U_z 들을 모두 구속한다. 처분용기의 대칭면($x=0$ 면)에서 변위 U_x 를 모두 구속하였으며 처분용기 상부면에 수직하게 일정한 압력 15MPa를 작용하였다.

3. 3. 해석 방법

지하매설 시 위에서 가정한 처분용기에 가해지는 하중(15MPa)이 처분용기 구조가 견디기에 매우 크면 이에 의해 처분용기에 대변형이 발생한다. 따라서 정확한 내부응력 상태와 변형상태를 알기 위해서는 비선형 구조해석법을 적용해야 한다. 그러나, 내부주철삽입물은 일반적으로 강도가 매우 크기 때문에 15MPa의 외력에 의해 큰 구조변형이 발생하지 않다고 가정 할 수 있다. 따라서, 문제에서 요구하는 설계변수 즉, 내부주철 삽입물의 제원(직경 및 길이), 내부 바스켓의 배열구조를 구하기 위해서는 선형구조해석법을 수행한다. 따라서 본 구조해석에서는 NISA의 선형 구조해석 기능을 이용하여 외부하중 15MPa에 대하여 구조해석을 수행하였다. 또한 본 연구에서는 내부주철삽입물의 응력해석 수행 시 다음과 같이 수행하였다.

처분용기의 길이는 그림 1에 표시된 초기개념설계시의 제원으로 고정시키고 이에 대한 처분용기의 직경을 증가시키면서 해석을 수행하였다. 이 때 내부주철삽입물(cast iron insert)의 직경과 외곽셀 및 위아래 덮개의 두께는 비례적으로 증가시켰다. 또한 이때 내부 핵연료다발들은 다음 두가지 방법으로 변화시켰다.

첫째방법에서는, 처분용기의 직경을 증가시키면서 내부 핵연료다발들 사이의 간격도 비례적으로 증가시켰다.

둘째방법에서는, 처분용기의 직경을 증가시키면서 내부핵연료다발들 사이의 간격은 초기 개념설계시의 간격으로 고정시키고 이들 핵연료다발들과 외곽셀과의 간격을 비례적으로 증가시켰다.

모든 해석에서 PWR형 처분용기의 핵연료다발 개수는 4개로 고정시켰고, CANDU형에서는 9개, 13개, 17개, 21개, 25개로 가정하여 직경의 크기가 각각인 경우에 따라 적절히 선택하여 해석을 수행하였다.

본 연구에서는 PWR형 처분용기에 대하여 위에서 언급한 해석들을 먼저 수행하고 그 결과 검토 후 CANDU형 처분용기에 대해서는 PWR형 처분용기 해석결과에서 제시하는 설계변수 값들에 대하여 해석을 수행하였다.

4. 해석결과 및 토의

4. 1. PWR형 처분용기에 대한 응력해석 결과

PWR형 처분용기에서는 위에서 언급한 대로 핵연료다발의 배열변화를 주는 것과 배열변화를 주지않는 것으로 나누어 해석을 수행하였다. PWR형 처분용기의 직경 변화는 108cm에서 198cm까지 10cm의 간격으로 증가시켜가며 해석을 수행하였다. 그 해석결과 PWR형 처분용기에서는 배열변화가 없는 처분용기가 배열변화가 있는 처분용기 보다 주철삽입물 내부의 응력분포의 크기가 작음을 알 수 있었다. 이 결과는 표 1, 2에 정리하였으며 그림 3은 처분용기 내의 응력 contour와 변형된 형상을 보여주고 있다. 또한 그림 4, 5는 표 1, 2에 정리된 결과를 그래프로 표시한 것이다. 특히 그림 5의 그래프는 처분용기 직경에 대한 안전계수(safe factor)의 변화를 그래프로 표시한 것이다.

표 1 PWR형 처분용기의 응력해석 결과(내부 핵연료다발 사이의 간격이 증가할 때)

Diameter		108cm	118cm	128cm	138cm	148cm	158cm	168cm	178cm	188cm	198cm
		Stress, Deflection									
Maximum von-mises stress (Mpa)	Shell (Ni)	311.4	284.1	246.6	202.3	192.8	171.7	158.6	145.2	129.3	115.6
	Lid (Ni)	24.31	22.81	25.64	26.88	22.38	23.81	25.21	20.11	19.35	19.33
	Bottom(Ni)	21.35	23.07	26.76	29.11	27.35	26.5	24.55	21.25	20.23	20.14
	Cast Iron	207.6	158.1	131.8	122.4	107.3	92.85	87.52	79.35	72.39	42.87
Maximum Deflection (cm)		0.263	0.1684	0.141	0.113	0.0996	0.0865	0.0788	0.0696	0.0646	0.0527

표 2 PWR형 처분용기의 응력해석 결과(내부 핵연료다발 사이의 간격이 일정할 때)

Diameter		108cm	118cm	128cm	138cm	148cm	158cm	168cm	178cm	188cm	198cm
		Stress, Deflection									
Maximum von-mises stress (Mpa)	Shell (Ni)	311.4	277.6	230.7	199.8	188.3	168.7	152.2	138.2	126.3	112.7
	Lid (Ni)	24.31	18.62	21.35	20.87	21.48	20.70	20.04	19.42	18.83	21.27
	Bottom(Ni)	21.35	20.42	22.40	22.35	23.69	23.23	22.78	22.26	21.72	24.38
	Cast Iron	207.6	158.0	128.65	116.8	104.5	92.83	83.63	75.82	69.16	40.10
Maximum Deflection (cm)		0.263	0.167	0.138	0.106	0.0987	0.0861	0.0763	0.0684	0.062	0.0505

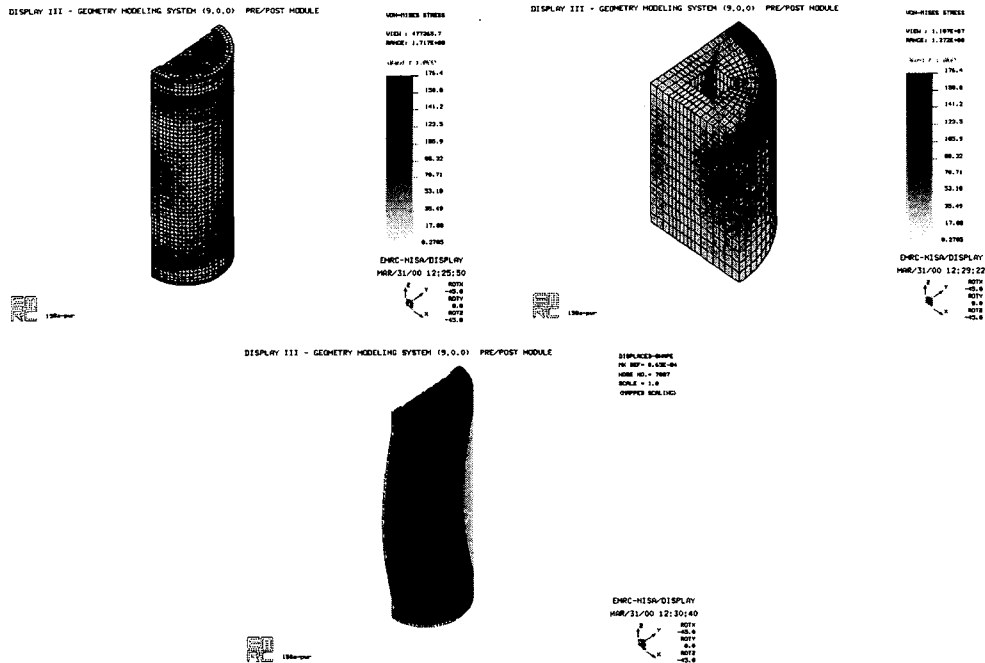


그림 3 PWR 처분용기내의 응력분포(Stress Contour), 변형형상(Deformed Shape)
(내부 핵연료다발사이의 간격이 증가하는 경우, 처분용기의 직경 : 158cm)

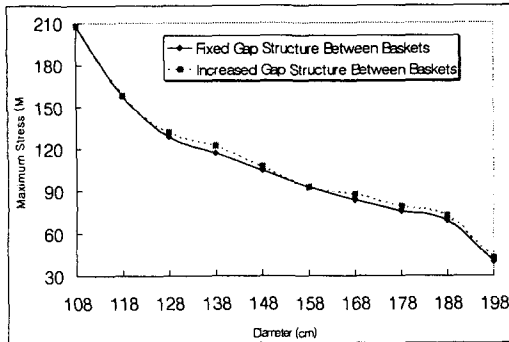


그림 4 PWR형 처분용기의 직경에 대한 처분용기 내부 발생 최대응력 그래프

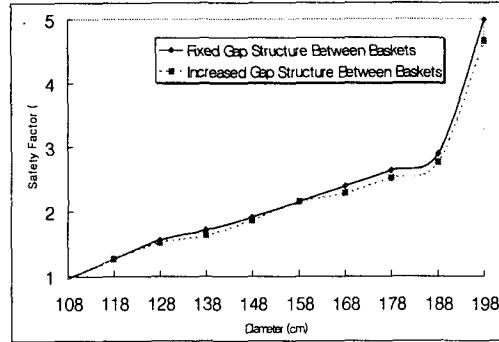


그림 5 PWR형 처분용기의 직경에 대한 안전계수그래프

해석결과(표 1, 2 와 그림 4, 5)를 분석하면 처분용기 설계 시에서 고려해야 할 안전계수 값이 1.5~2.5라고 가정하면 이에 상응하는 처분용기의 직경은 128cm~168cm 범위 값을 갖는 것을 알 수 있다. 이는 이 범위의 직경을 갖는 처분용기(이때 처분용기 길이는 496cm)가 구조적으로 안전한 구조임을 알게 해준다.

4. 2 CANDU형 처분용기에 대한 응력해석 결과

CANDU형 처분용기에 대해서는 PWR형 처분용기 응력해석에서 얻은 결과인 안전계수 1.5~2.5에 상응하는 처분용기 직경의 크기가 128cm~168cm인 결과를 고려하여 CANDU형 처분용기와 PWR 처분용기의 제원을 갖게 설계한다는 가정에 의해서 CANDU형 처분용기의 직경을 148cm, 158cm, 168cm로 가정하여 해석을 수행하였다. 해석결과 CANDU형 처분용기에 대해서도 PWR형 처분용기와 같이 내부 핵연료다발의 배열 변화가 없는 경우가 구조적으로 좀더 안정함이 밝혀졌으며, 위해서 가정한 각 직경에 대하여 CANDU형 처분용기 내부의 핵연료다발의 개수를 여러 가지로 변화시켜 해석을 수행하였다. 그 결과는 표 3에 정리 제시하였다. 표 3에 직경 198cm에 대한 결과도 제시하였다.

표. 3 CANDU형 처분용기의 지름변화에 따른 연료봉의 수의 변화.

Diameter		148cm				158cm		168cm		198cm			
		13EA	17EA	21EA	25EA	21EA	25EA	21EA	25EA	9EA	12EA	13EA	17EA
Maximum von-mises stress (Mpa)	Shell (Ni)	182.1	189.5	196.3	203.6	165.2	173.1	150.5	158.2	121.4	130.7	160.2	186.5
	Lid (Ni)	29.25	27.6	26.23	24.26	21.25	23.17	20.25	23.95	29.0	28.7	28.49	28.65
	Bottom (Ni)	22.23	23.11	23.25	25.76	24.14	25.19	24.56	25.98	31.02	30.73	30.62	31.48
	Cast Iron	110.2	124.3	131.9	137.7	119.2	125.2	107.7	115.2	66.88	86.5	109.8	113.2
Maximum Deflection (cm)		0.0558	0.084	0.099	0.102	0.082	0.0889	0.0542	0.079	0.0544	0.0552	0.0556	0.0561

5. 결 론

본 연구에서는 처분용기내의 주철구조물에 대하여 선형 정적구조해석을 유한요소법을 이용하여 수행하였다. 유한요소해석 코드인 NISA를 이용하여 처분용기의 최적 직경과 내부 핵연료다발의 개수와 배열방식을 구하였다.

해석 방법은 처분용기의 길이를 고정시키고 일정 비율로 직경의 크기를 증가시켜 정적 구조해석을 수행하였다. 이 때 내부 주철삽입물의 직경 뿐만 아니라 이에 비례하여 외곽셀과 위아래 덮개의 두께도 증가시키면서 해석을 수행하였다. 내부 핵연료다발들 사이의 간격은 일정하게 고정시킨 경우와 직경 크기의 증가에 비례하여 간격의 크기를 증가시킨 두 가지 경우에 대하여 해석을 수행하였다. PWR형 처분용기는 내부 핵연료다발의 개수는 4개로 가정하였고 CANDU형 처분용기는 내부 핵연료다발의 개수를 여러 개로 가정하였다.

해석결과 다음의 결론을 얻을 수 있었다. 첫째로, 처분용기의 길이에 대한 직경이 증가하면 처분용기의 구조적 안정성은 커진다. 이때 내부 핵연료다발사이의 간격을 고정시킨 경우가 핵연료다발 사이의 간격을 직경에 비례하여 증가시킨 경우 보다 약간 더 구조적으로 안정적임을 알 수 있었다. 둘째로, 처분용기 설계시의 안전계수를 1.5~2.5로 가정했을 때 이에 상응하는 처분용기의 직경은 128~168cm(길이 496cm)을 알 수 있었다. 셋째로 이에 상응하는 CANDU형 처분용기인 경우 직경의 크기가 158cm일 때 핵연료다발 개수는 25개임을 알 수 있었다.

REFERENCES

1. Borgesson, L. 1992. 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), Stockholm. 83 p. + appendixes. ISSN 0284-3757.
2. Ahonen, L. 1995. Chemical stability of copper canisters in deep repository. Report YJT-94-13, Nuclear Waste Commission of Finnish Power Companies, Helsinki. 101p.
3. Raiko, H & Salo, J. -P. 1996. Design report of the canister for nuclear fuel disposal. Report POSIVA 96-13, Posiva Oy, Helsinki. 51p. ISBN 951-652-012-x.
4. Salo, J.P. & Raiko, H. 1990. The copper/steel canister design for nuclear waste disposal. TVO/KPA Turvallisuus ja tekniikka, Work Report 90-10, Rev. 1., Teollisuuden Voima Oy, Helsinki. 26 P.
5. Werme, L. & Eriksson, J. 1995. Copper canister with cast inner component. Technical Report TR-95-02, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. (SKB), Stockholm. 14 p. ISSN 0284-3757.
6. Raiko, H., Salo, J.-P. 1992. The design analysis of ACP- canister for nuclear waste disposal. Report YJT-92-05, Nuclear Waste Commission of Finnish Power Companies, Helsinki.
7. Salo, J.-P., Raiko, H. 1990. The copper/steel canister design for nuclear waste disposal. TVO/KPA Turvallisuus ja tekniikka, Work Report 90-10, Rev. 1., Teollisuuden Voima Oy, Helsinki.
8. Anttila, M. 1996. Criticality safety calculations for the nuclear waste disposal canisters. Report POSIVA-96-11, Posiva Oy, Helsinki.
9. Ahonen, L. 1995. Chemical stability of copper canisters in deep repository. Report YJT-95-19, Nuclear Waste Commission of Finnish Power Companies, Helsinki.