

고준위폐기물 처분용기와 벤토나이트 버퍼로 이루어진 복합구조물에 대한 비선형 구조해석 : 대칭 암반 전단력

A Nonlinear Structural Analysis for a Composite Structure Composed of Spent Nuclear Fuel Disposal Canister and Bentonite Buffer : Symmetric Rock Movement

권 영 주† 최 석 호* 최 종 원**
Kwon, Young-Joo Choi, Seok-Ho Choi, Jong-Won
(논문접수일 : 2003년 2월 9일 ; 심사종료일 : 2003년 11월 28일)

요 지

본 논문에서는 가압경수로(PWR) 고준위폐기물을 깊은 지하 500m에 처분 시 사용되는 처분용기 및 이를 보호하기 위하여 50cm 두께로 처분용기 주위를 감싸고 있는 벤토나이트 버퍼의 복합구조물에 지진 등의 지각 변동에 의하여 갑작스럽게 10cm의 수평한 암반 전단력이 대칭적으로 가해졌을 때, 처분용기의 안전성(붕괴)을 예측하기 위하여 「처분용기+벤토나이트 버퍼」 복합구조물에 대한 비선형 구조해석을 수행하였다. 복합구조물을 구성하고 있는 물질들은 탄소성체로 가정하였으며, 대변형 발생 시 항복을 예측하는 항복조건식으로는 처분용기를 구성하고 있는 금속물질(구리, 주철)에 대하여 von-Mises 항복조건식을, 벤토나이트 버퍼물질에 대하여는 Drucker-Prager 항복조건식을 적용하였다. 해석 결과들을 분석하면 비록 10cm의 수평한 대칭 암반 전단력에 대하여 벤토나이트 버퍼에는 항복점을 훨씬 상회하는 대변형이 발생하였지만, 내부의 처분용기를 구성하고있는 주철 및 구리에는 여전히 매우 작은 탄성변형 및 항복응력보다 작은 응력이 발생하고 있음을 알 수 있었다. 따라서, 갑작스런 10cm의 수평한 암반 전단력에 대하여 50cm 두께의 벤토나이트 버퍼는 안전하게 내부의 처분용기를 보호하고 있음을 알 수가 있다. 해석결과를 또한 벤토나이트 버퍼의 전단변형에 의하여 처분용기에 휨변형이 발생함을 보여주고 있다.

핵심용어 : 고준위폐기물 처분용기, 벤토나이트 버퍼, 복합구조물, 암반 전단력, 비선형 구조해석, 항복조건, 유한요소해석

Abstract

In this paper, a nonlinear structural analysis for the composite structure composed of the spent nuclear fuel disposal canister and the 50cm thick bentonite buffer is carried out to predict the collapse of the canister while the horizontal symmetric sudden rock movement of 10cm is applied on the composite structure. This sudden rock movement is anticipated by the earthquake etc. at a deep underground. Elastoplastic material model is adopted. Drucker-Prager yield criterion is used for the material yield prediction of the bentonite buffer and von-Mises yield criterion is used for the material yield prediction of the canister(cast iron, copper). Analysis results show that even though very large deformations occur beyond the yield point in the bentonite buffer, the canister structure still endures elastic small strains and stresses below the yield strength. Hence, the 50cm thick bentonite buffer can protect the canister safely against the 10cm sudden rock movement by earthquake etc.. Analysis results also show that bending deformations occur in the canister structure due to the shear deformation of the bentonite buffer.

Keywords : spent nuclear fuel disposal canister, bentonite buffer, composite structure, rock movement, nonlinear structural analysis, yield criterion, finite element analysis

† 책임저자, 정희원 · 홍익대학교 기계정보공학과 부교수
전화: 041-860-2484; Fax: 041-866-6598
Email: yjkwon@wow.hongik.ac.kr

* 삼진전공(주)

** 한국원자력연구소 책임연구원

• 이 논문에 대한 토론을 2004년 3월 31일까지 본 학회에 보내주
시면 2004년 6월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론(Introduction)

원자로에서 사용한 후 폐기되어지는 고준위폐기물은 위험한 방사능과 높은 온도를 가지고 있기 때문에 이를 관리하는 것은 상당한 주의가 필요하다. 고준위폐기물 처분용기는 어떤 조건하에서도 고준위폐기물의 방사능특성이 사라지는 10,000년 동안 폐기물을 완전히 안전하게 격리시킬 수 있게 처분용기의 수명이 확실하게 보장되어야만 한다.^{1)~4)} 이러한 이유로 저장된 기간 중에 구조적 결함이 없도록 처분용기의 구조적 안전성측면에서 여러 가지 조건을 고려해야 한다. 이러한 처분용기는 보통 지하 500m 아래의 안전한 장소에 보관하는 것이 좋다. 이런 여러 가지 안전성 측면에서 고려되어야할 외부조건에 대하여 충분한 안전계수를 만족해야 하는데, 첫 번째로 처분용기가 화강암층의 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 포함되어야 하는데, 이런 경우에 사용되는 처분용기 재료의 구조와 특성에 따라 보통 1.5~2.5의 안전계수 값이 사용되어진다. 여기서 안전계수는 처분용기를 구성하는 고체물질의 항복응력과 처분용기 구조물내부에 발생하는 최대 내부 응력 비로 정의된다. 지하에 압반구조를 가지고 있는 고준위폐기물 처분시스템 연구의 선진국인 핀란드, 스웨덴 등에서 폐기물 처분용기에 대한 구조해석 연구가 상당히 진행되고 있는 실정이다. 핀란드의 Anttila^{2),3)}는 고준위폐기물 처분용기의 구조안전성 확보를 위한 처분용기 구조에 대한 임계 구조강도를 계산하였고, Auerkari 등⁴⁾은 처분용기 구조의 용접부위에 대한 강도해석을 수행하였다. 특히 스웨덴의 Raiko 등^{10)~13)}과 Werme 등¹⁴⁾은 구리로 된 원통형의 얇은 외곽 쉘 내부에 원통형의 주철 삽입물을 채우고 이 주철 삽입물 내부에 여러 개의 긴 홈을 만들고, 그 내부에 고준위폐기물 다발들을 저장하는 형태의 구리 처분용기를 개발하고 이 처분용기에 대하여 구조강도 해석을 수행하여 처분용기에 대한 구조적 안전성을 평가하였다. 스웨덴의 경우 처분용기가 지하 깊이 처분되는 처분 환경이 매우 악조건(수 km의 빙하 등이 존재함)이기 때문에, 처분용기 구조안전성 평가기준으로 사용되는 안전계수 값을 1.0~1.5로 채택하고 있다. 본 연구에서는 이와 같이 핀란드, 스웨덴 등에서 연구된 처분용기 모델을 토대로 가압경수로(PWR)에서 발생하는 고준위폐기물 처분용기로 적당하다고 판단되는⁶⁾ 4개의 사각형 바스켓 안에 사용 후 핵연료다발이 채워진 처분용기와 이를 감싸고 있는 벤토나

이트 버퍼에 대하여 비선형 구조해석을 수행하였다. 또한 처분용기에 대한 구조해석 수행 시 구조안전성 평가 기준으로 안전계수 값을 스웨덴 경우 보다 더 강화된 2.0~2.5 값을 사용하였다.

처분용기의 설계 시 여러가지 구조해석을 복합적으로 수행하여야 한다. 먼저 가장 기본적인 해석으로 내부 주철 삽입물의 강도를 측정하기 위한 선형정적 구조해석^{8),9)}을 수행하여야 한다. 이를 통하여 처분용기를 구성하고 있는 내부 주철 삽입물의 재원(직경, 길이)을 결정하고, 또한 처분용기의 사용 후 핵연료다발의 개수, 배열위치 등을 결정할 수 있다. 또한, 지진 등과 같은 외부 충격에 의해 발생할 수 있는 지지 압반의 붕괴에 의해 처분용기에 가해질 수 있는 갑작스런 전단변형에 대한 비선형 구조해석을 수행하여야 하며, 또한 고온의 지열 등에 의해 외곽 쉘에 발생할 수 있는 크리프해석 등도 수행하여야 한다. 따라서 처분용기의 구조설계 문제는 이와 같이 복합적인 해석을 동시에 해결할 수 있는 MDO기법 적용이 요구된다.⁷⁾

본 연구에서는 위에서 언급한 여러 가지 구조해석 중 지진 등에 의해 지지압반에 발생하는 약 10cm의 전단변형에 의하여 「처분용기+벤토나이트 버퍼」 복합구조물에 발생하는 탄소성 대변형 구조해석을 수행하였다. 이와 같은 지지압반의 전단변형에 의한 「처분용기+벤토나이트 버퍼」의 대변형 구조해석 연구는 스웨덴 등에서 Börgesson⁵⁾이 수행한 연구에서도 관찰되고 있다. 본 대변형 구조해석 문제에서는 비선형 해석기법을 적용하여 순간적인 약 10cm의 전단변형에 의한 「처분용기+벤토나이트 버퍼」의 대변형 구조해석을 수행하였다. 이때, 「처분용기+벤토나이트 버퍼」에 대한 물질 모델은 탄소성 물질모델을 적용하였다. 약 10cm의 지지압반 전단변형은 상하 대칭으로 작용한다고 가정하였다. 탄소성 대변형 해석에서 요구되는 항복조건은 벤토나이트 버퍼에 대해서는 Drucker-Prager 항복조건을, 처분용기를 이루고 있는 내부 주철 삽입물과 구리로 된 외곽 쉘 및 위아래 덮개는 von-Mises 항복조건을 적용하였다.

본 연구에서는 MCAE 구조해석 프로그램인 상용 유한요소해석코드인 NISA를 이용하여 「처분용기+벤토나이트 버퍼」 복합구조물에 대한 비선형 구조해석을 수행하였다.

2. 구조해석 문제의 구성(Formulation of structural analysis problem)

2.1. 구조 형상(Geometry)

직경 D=122cm, 길이 L=483cm의 처분용기(PWR type)

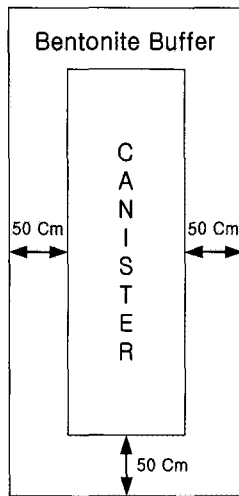


그림 1 The canister and buffer geometry

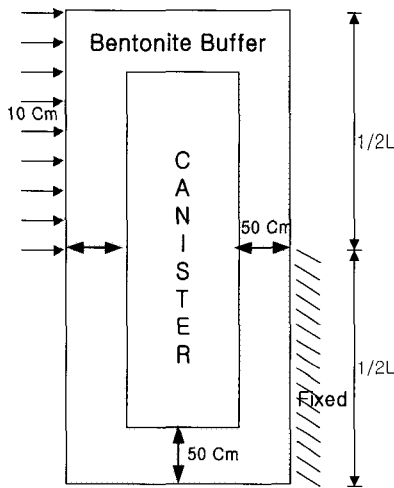


그림 2 Constraint conditions

에 두께 50cm의 벤토나이트 버퍼가 아래 그림 1과 같이 설치되어 있을 때, 갑작스런 10cm정도의 암반 전단력이 벤토나이트 버퍼 외곽에 대칭으로 어긋나게 가해졌을 경우 벤토나이트 버퍼와 내부 처분용기에 발생하는 구조변형 및 응력을 측정한다.

해석 시 버퍼와 처분용기는 탄소성체(elastoplastic material)로 가정하였다. 「처분용기+벤토나이트 버퍼」의 압반응적임에 대한 해석은 비선형 구조해석을 수행하였다. 벤토나이트 버퍼는 50cm의 두께로 처분용기를 감싸고 있으므로 벤토나이트 버퍼는 처분용기에 직접적으로 힘이 작용하는 것을 막아주는 역할을 수행하고, 또한 지하수압에 의한 처분용기의 화학적인 변화를 막아주는 역할도 하게된다.

2.2. 물질 상수(Material properties)

버퍼는 구성 재료가 벤토나이트로 진흙 및 암반에서의

실험치와 보다 근접한 값을 나타내는 Drucker-Prager 항복조건을 적용하였고, 표 1에 보인 것과 같이 물질 접착력(material cohesion)은 100KPa, 마찰각(friction angle)은 20deg로 정의하였다. 구리(copper)와 내부 주철(cast iron)은 금속류에서의 실험치와 잘 일치하는 von-Mises 항복조건을 적용하여 재료의 항복을 정의하였으며 항복응력은 각각 45MPa, 200MPa로 정의하였다(표 3, 5).

또한, 초기 항복 이후의 경화법칙은 어떤 경화매개변수(hardening parameter) 함수에 의해 항복면(yield surface)의 크기가 커지는 동안 응력장에서 그 형상(shape)이 변화하지 않는다고 가정하는 등방경화법칙(isotropic hardening rule)을 적용하였다. 초기 항복 이후 응력(stress)-변형률(strain)관계는 스웨덴의 Bergesson⁵⁾의 연구에서 사용된 값들을 적용하였다. 표 2,4,6에는 본 연구에서 적용된 불연속 선형경화 단축 응력-변형률 곡선(piecewise linear hardening uniaxial stress-strain curve)의 수치 값들을 나타낸다.

표 1 Material property of bentonite

	Value	Unit
E(Young's modulus)	100	MPa
ν (Poisson ratio)	0.4	
Material cohesion	100	KPa
Friction angle	20	Deg

표 2 Yield function of bentonite

σ_j (KPa)	ϵ_y
113	0.0025
138	0.005
163	0.02
188	0.04
213	0.1

Table 3 Material property of copper

	Value	Unit
E(Young's modulus)	114	GPa
ν (Poisson ratio)	0.35	
Yield stress	45	MPa

표 4 Yield function of copper

σ_j (KPa)	ϵ_y
50	0.005
80	0.015
130	0.065
180	0.154
210	0.288

표 5 Material property of cast iron

	Value	Unit
E(Young's modulus)	126.5	GPa
ν (Poisson ratio)	0.25	
Yield stress	200	MPa

표 6 Yield function of cast iron

σ_j (KPa)	ϵ_y
300	0.005
412	0.023
542	0.078
697	0.147

2.3. 외력 조건(External load condition)

갑작스런 압반움직임이 벤토나이트 버퍼와 처분용기로 구성된 복합구조물의 상하 대칭 중앙을 기준으로 상단의 왼쪽 외곽 면에서 10cm만큼 어긋나게 작용한다. 이때 벤토나이트 버퍼의 중앙하단 오른쪽 외곽 면은 고정 지지시킨다(그림 2).

3. 유한요소 해석(Finite element analysis)

유한요소(finite element) 모델은 요소의 수를 적절하게 표 7과 같이 구성하였다. 본 연구에서 사용된 유한요소 모델은 스웨덴의 Bergesson⁵⁾의 연구에서 사용된 유한요소 모델보다 훨씬 더 조밀한 유한요소모델을 사용하였다. 압반움직임에 의한 비선형 구조해석은 큰 전단력의 영향으로 처분용기 전체에 발생할 수 있는 응력을 파악하기 위한 것이다. 덮개(lid)의 돌출된 부분은 전단력이 가해지는 구

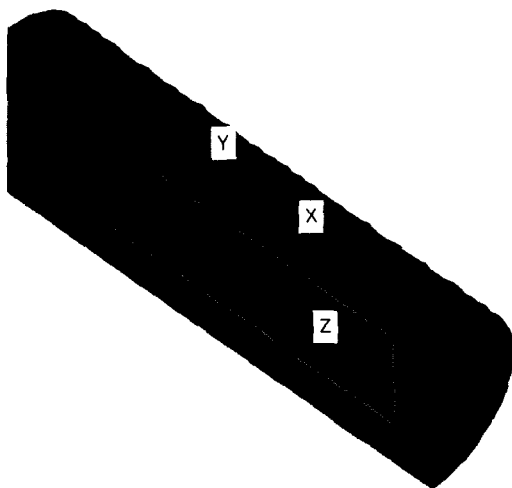


그림 3 F.E. model of composite structure composed of canister and bentonite buffer

Table 7 F.E. Model data (symmetric shear 10cm)

Parameter	Value
Element No.	1832 EA
Node No.	8946 EA
Element type	second order hexahedron element

조물 중앙에서 멀리 떨어져 있기 때문에, 전체적인 해의 경향에 큰 영향이 없을 것으로 판단하여 생략하고 모델링 하였다(그림 3). 그림 4와 같이 압반움직임은 구조물의 상하 중앙을 기준으로 정확히 상하 대칭적으로 작용하고 있다. 따라서 그림 4에서 벤토나이트 버퍼의 하단 외곽 원주방향으로는 모든 자유도를 구속하였으며 ($u_x = u_y = u_z = 0$), 상단 외곽 원주방향으로는 10cm의 강제변위 ($u_y = 10$)를 주었다. 구조형상 및 외력조건이 좌우 대칭이기 때문에 그림 5와 같이 반단면 형상인 반원통만을 모델링하고 대칭구속조건 ($u_x = 0$)을 대칭면($x=0$)에 적용하였다.

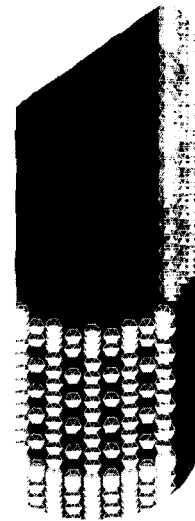


그림 4 Rock movement and boundary condition(upper half left outer surface : $u_y=10$ cm, lower half right outer surface : $u_x=u_y=u_z=0$)

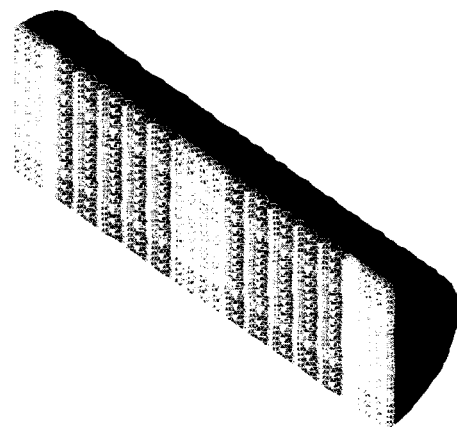


그림 5 Symmetric condition(symmetric plane($x=0$) : $u_x=0$)

4. 해석 결과 및 분석(Analysis results and discussions)

탄소성 대변형 구조해석결과 발생 응력 및 변위는 표 8 과 같이 나타났다. 벤토나이트 버퍼에 발생하는 응력은 물질접착력(material cohesion) 100KPa를 넘어 소성변형이 발생했고, 구리와 내부 주철에 발생하는 응력은 항복응력(45MPa, 200MPa)에 이르지 않는 탄성구간내의 거동만을 하고 있다. 또한, 최대 응력 발생지점이 암반움직임이 작용하는 경계면에서 발생하지 않고 50cm정도 -z축 방향으로 이동된 지점에서 구리 외곽 셸과 내부 주철삽입물의

경계에서 발생하고 있다(그림 8~9). 최대 변위는 10cm의 강제변위가 가해지는 벤토나이트 버퍼에서 14.33cm가 발생하고 있다(그림 6~7). 외부에서 가해지는 10cm의 강제변위 보다 큰 최대 변위가 발생한 것은 물체가 가지고 있는 물질특성 및 가해진 경계조건에 기인한 것으로 사료된다. 표 8에 나타난 것과 같이 구리로 된 외곽 셸과 내부 주철삽입물 또한 최대 12cm이상의 변위가 발생하고 있으나 이것은 벤토나이트 버퍼의 대변형에 의해 처분용기에 가해지는 굽힘하중에 의한 휨변형에 따라서 처분용기 끝단에 발생하는 것으로 사료된다(그림 7). 또한 이와 같은 굽힘하중에 의하여 벤토나이트 버퍼 오른쪽 하단 처분용기와 의 경계모서리에 응력집중 현상(그림 9참조)이 발생함을 알 수 있다.

Table 8 Analysis result(symmetric shear 10cm)

	Max. von-Mises stress(MPa)	Max. deflection(cm)	Plastic strain(%)
Bentonite buffer	7.114	14.33	73
Copper shell	11.57	12.37	-
Cast iron	11.57	12.11	-

그림 13의 von-Mises 응력 그래프를 보면 그래프의 x축은 하중매개변수(load parameter)이다. 그러므로 본 그래프의 x축 값은 외부에서 가해지는 강제변위(암반움직임)를 나타낸다. 모든 그래프에서 x축 값의 1은 1cm이고

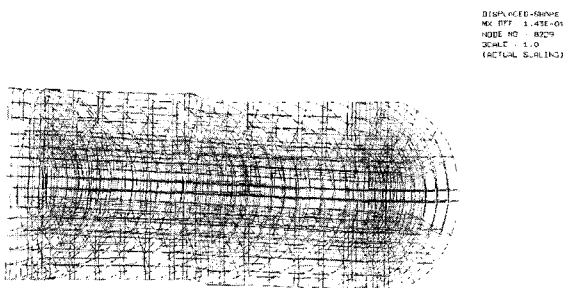


그림 6 Deformed shape of whole structure(half model) (rock movement=10cm)

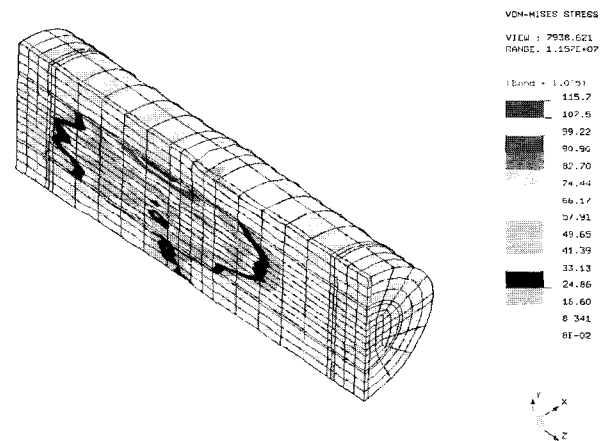


그림 8 Contour of von-Mises stress (whole part) (rock movement=10cm)

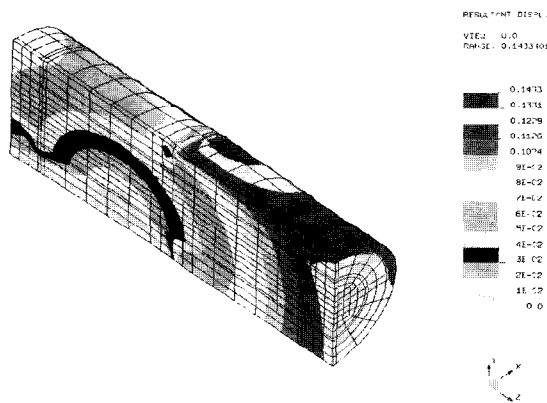


그림 7 Resultant displacement of buffer and canister (rock movement=10cm)

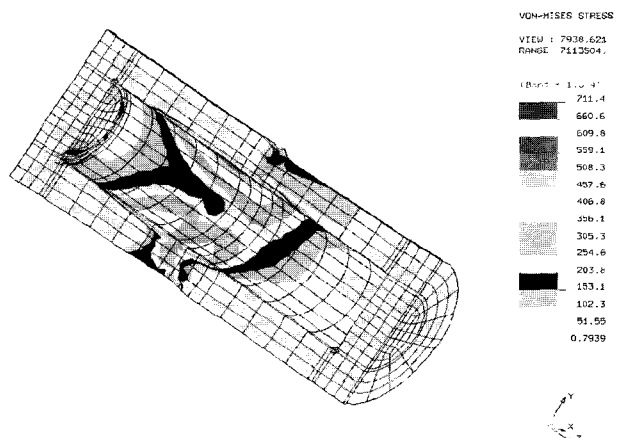


그림 9 Contour of von-Mises stress (bentonite) (rock movement=10cm)

10은 10cm로 강제 변위를 나타낸다. 또한 외부에서 가해지는 강제변위는 일정한 크기로 증가되고 있다. 그림 13에서 발생하는 von-Mises 응력(stress)를 보면 강제변위 6cm

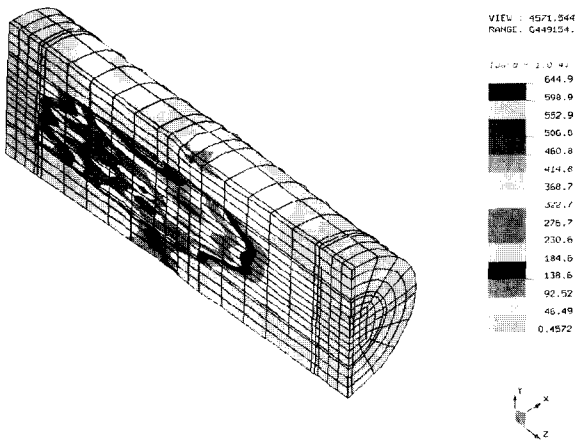


그림 10 Contour of max. shear stress (whole part) (rock movement=10cm)

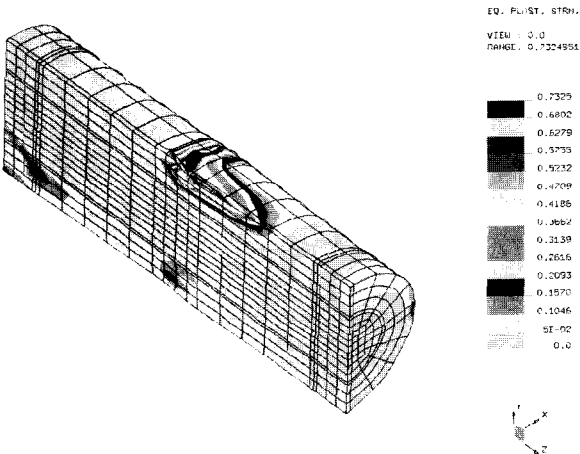


그림 11 Contour of equivalent plastic strain (whole part) (rock movement=10cm)

까지는 내부주철부분의 응력이 높게 나타나지만 6cm 이후에는 구리 셸에서 보다 높은 응력이 발생함을 알 수 있다.

10cm 전단변형 이후 벤토나이트 버퍼는 소성 변형율이 73%로 그림 11과 같이 소성 변형을 보이고 있으며 구리 셸은 1.5%, 주철 삽입물은 0.4%의 변형율을 보이고 있다. 구리 셸과 내부 주철 삽입물에 발생하는 변형율은 매우 작기 때문에 구리 셸과 주철 삽입물은 소성 변형이 발생하지 않는다고 볼 수 있다.

그림 10을 분석해 보면 구조물에 발생한 응력의 거의 절반이상(약 56%)은 전단응력(shear stress)임을 알 수가 있고 이 전단응력은 최대 등가응력과 마찬가지로 축방향(-z축 방향)으로 약 50cm 밑에 위치한 구리 외곽 셸과 내부 주철삽입물의 경계에서 발생함을 알 수 있다. 이도 역시 벤토나이트 버퍼에 발생하는 대변형에 의해 처분용기 구조에 가해지는 굽힘 하중에 의한 것으로 사료된다. 그림 12~15를 분석하면 벤토나이트 버퍼에는 항복응력 값에 도달한 후 계속해서 항복이 발생하여 소성변형이 발생하고 있지만(그림 14), 벤토나이트 버퍼 내부에 있는 처분용기

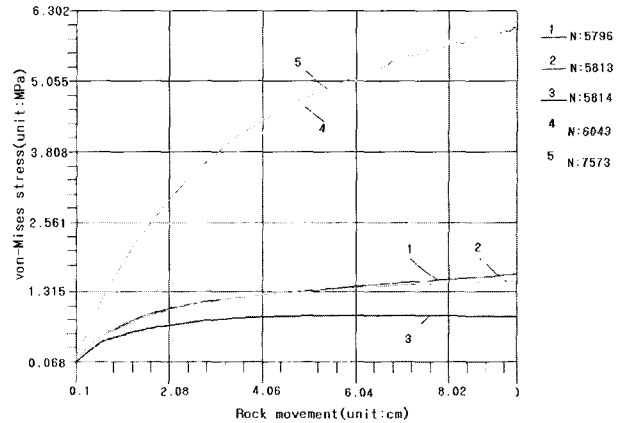


그림 13 Graph of von-Mises stress at selected node

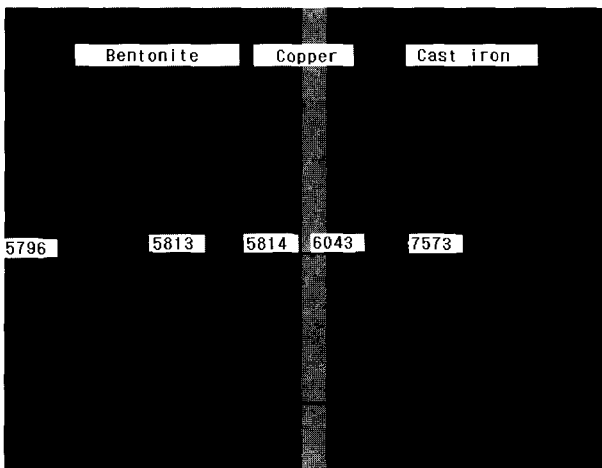


그림 12 Selected node location

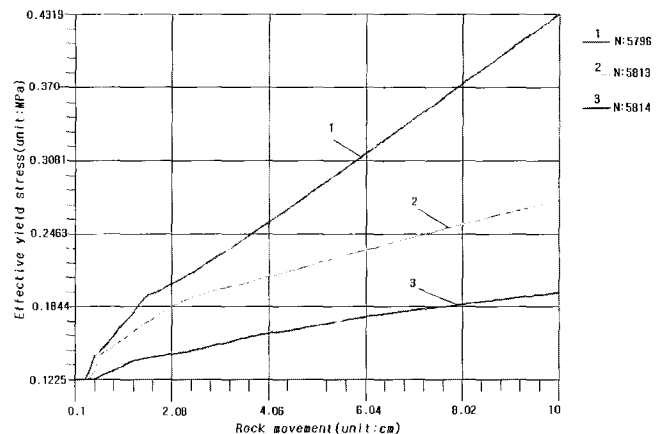


그림 14 Effective yield stress at bentonite buffer node (5796, 5813, 5814)

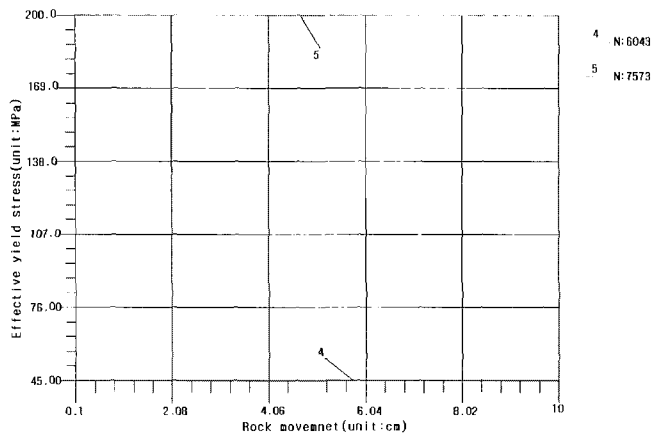


그림 15 Effective yield stress at canister node(6043, 7573)

구조는 아직도 항복상태에 도달하지 못하는 구조적으로 안전한 탄성변형만이 발생함을 알 수 있다(그림 15). 이는 표 8에 정리된 최대 등가응력에 의한 분석결과와도 일치한다.

그림 11를 분석하면 벤토나이트 버퍼에 발생하는 대부분의 소성변형은 암반움직임(rock movement)이 가해지는 부분과 가해지지 않는 부분의 외부 경계 근처에서 발생함을 알 수 있다.

5. 결론(Conclusions)

본 연구에서는 원자로에서 사용한 후 폐기되어지는 고준위 폐기물을 지하 500m의 암반 처분장에 처분 시 사용되는 처분용기의 안전한 구조설계를 위하여 지하 500m의 처분장에 처분 시 지진 등 지각변동에 의해 발생할 수 있는 암반 등의 절리에 의해 「처분용기+벤토나이트 버퍼」 복합구조물에 가해지는 전단변형에 대한 대변형 구조해석 문제를 다루었다. 특히, 10cm의 암반 전단력이 「처분용기+벤토나이트 버퍼」 복합구조물에 수평으로 상하 대칭적으로 작용할 때 처분용기를 감싸고 있는 50cm의 벤토나이트 버퍼가 안전하게 내부의 처분용기를 구조적으로 보호할 수 있는지를 평가하였다. 평가기준으로는 암반 전단력이 가해질 때 처분용기를 구성하고 있는 주철과 구리 재질의 항복여부를 검토하였다. 이때, 사용된 항복조건은 벤토나이트 버퍼에 대해서는 Drucker-Prager 항복조건을 처분용기를 구성하고 있는 주철 및 구리에 대하여는 von-Mises 항복조건을 사용하였다.

10cm의 수평 암반 전단력이 복합구조물에 상하 대칭적으로 가해질 때, 처분용기를 감싸고 있는 벤토나이트 버퍼에는 항복점을 넘는 많은 소성변형 및 응력이 발생하여 구조적 붕괴가 발생하지만 벤토나이트 버퍼 내부의 처분용기를 구성하고 있는 주철 및 구리 재질에는 아직도 구조적 항복에 이르기에는 아주 적은 탄성 응력 및 변형만이 발생하

고 있어 구조적으로 안전함이 확인되었다. 따라서, 50cm 두께의 벤토나이트 버퍼가 10cm의 대칭 암반 전단력에 대하여 내부 처분용기를 충분히 구조적으로 보호하고 있음을 보여주고 있다.

참고 문헌

1. Ahonen, L., "Chemical Stability of Copper Canisters in Deep Repository", *Report YJT-94-13, Nuclear Waste Commission of Finnish Power Companies, Helsinki, p.101, 1995*
2. Anttila, M., "Criticality Safety Calculations for the Nuclear Waste Disposal Canisters", *Report POSIVA-96-11, Posiva Oy, Helsinki, 1996*
3. Anttila, M., "Criticality Safety Calculations of the Nuclear Waste Disposal Canisters for Twelve Spent Fuel Assemblies", *Working Report 99-03, Posiva Oy, Helsinki, p.20, 1999*
4. Auerkari, P. and 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*
5. Bergesson, L., "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, p.83 appendixes, ISSN 0284-3757, 1992*
6. Choi, J. W., Choi, Y. S., Kwon, S. K., Kuh, J. E., and Kang, C. H., "Technology Assessment of the Repository Alternatives to Establish a Reference HLW Disposal Concept", *Journal of the Korean Nuclear Society, Vol.31, Number 6, pp.83~100, 1999*
7. 권영주, 김재희, "액체금속로 핵연료교환장치의 구조해석 I : 기구동역학해석", *한국전산구조공학회 논문집, 제12권, 제4호, pp.573~581, 1999*
8. Kwon, Y.J., Kang, S.U., Choi, J.W., and Kang, C.H., "Structural Analysis for the Determination of Design Variables of Spent Nuclear Fuel Disposal Canister", *KSME International Journal, Vol.15, No.3, pp.327~338, 2001*
9. 강신욱, "심지층 고준위 핵폐기물 처분용기의 구조해

- 석”, 석사학위 논문, 홍익대학교, p.76, 2000
10. Raiko, H. and 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
 11. Raiko, H. and 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
 12. Raiko, H. and Salo, J. P., “Design Report of the Disposal Canister for Twelve Fuel Assemblies,” *Report Posiva-99-18, Posiva Oy*, Helsinki, Finland, 1999
 13. Salo, J. P. and 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
 14. Werme, L. and Eriksson, J., “Copper Canister with Cast Inner Component,” *Technical Report TR-95-02, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. (SKB)*, Stockholm, Sweden, ISSN 0284-3757, 1995