

고준위폐기물 처분장치 및 완충장치에 대한 탄소성해석 : 비대칭 암반력

권영주* · 최석호**

(2003년 2월 27일 접수)

An Elastoplastic Analysis for Spent Nuclear Fuel Disposal Container and Its Bentonite Buffer : Asymmetric Rock Movement

Y. J. Kwon and S. H. Choi

Abstract

This paper presents an elastoplastic analysis for spent nuclear fuel disposal container and its 50 cm thick bentonite buffer to predict the collapse of the container while the horizontal asymmetric sudden rock movement of 10 cm 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 container. Analysis results show that even though very large deformations occur beyond the yield point in the bentonite buffer, the container structure still endures elastic small strains and stresses below the yield strength. Hence, the asymmetric 50 cm thick bentonite buffer can protect the container safely against the 10 cm sudden rock movement by earthquake etc.. Analysis results also show that bending deformations occur in the container structure due to the shear deformation of the bentonite buffer. The finite element analysis code, NISA, is used for the analysis.

Key Words : Spent Nuclear Fuel, Disposal Container, Bentonite Buffer, Rock Movement, Elastoplastic Structural Analysis, Yield Criterion, Finite Element Analysis

1. 서론

원자로에서 사용한 후 폐기되어지는 핵연료의 고준위

폐기물은 위험한 방사능과 높은 온도를 가지고 있기 때문에 이를 관리하는 것은 상당한 주의가 필요하다. 고준위 폐기물 처분장치는 어떤 조건하에서도 고준위폐기물의

* 홍익대학교 기계정보공학과
** 삼진정강(주)

방사성독성이 사라지는 10,000년 동안 폐기물을 완전히 안전하게 격리시킬 수 있게 처분장치의 수명이 확실하게 보장되어야만 한다.^(1~4) 이러한 이유로 저장된 기간 중에 구조적 결합이 없도록 처분장치의 구조적 안정성 측면에서 여러 가지 조건을 고려해야 한다. 이러한 처분장치는 보통 지하 500m 아래의 안전한 장소에 보관하는 것이 좋다. 이런 여러 가지 안전성 측면에서 고려되어야 할 외부조건에 대하여 충분한 안전계수를 만족해야 하는 데 첫 번째로 처분장치가 화강암층의 지하 500m에 놓여서 처분장치가 정상적으로 받을 외압인 지하수압 5MPa과 벤토나이트 완충체의 팽윤압 10MPa 등 총 15MPa에 견딜 수 있는 안전계수를 만족해야 한다. 또한 처분장치 설계 시 고려되는 안전계수는 외압조건 불확실성과 재료 특성 및 제조상의 불확실성도 함께 포함되어야 하는데 이런 경우에 사용되는 처분장치 재료의 구조와 특성에 따라 보통 1.5~2.5의 안전계수 값이 사용되어진다. 여기서 안전계수는 처분장치를 구성하는 고체물질의 항복응력과 처분장치 구조물내부에 발생하는 최대 내부 응력비로 정의된다. 지하에 암반구조를 가지고 있는 고준위폐기물 처분시스템 연구의 선진국인 핀란드, 스웨덴 등에서 폐기물 처분장치에 대한 구조해석 연구가 상당히 진행되고 있는 실정이다. Anttila^(2~3)는 고준위폐기물 처분장치의 구조안전성 확보를 위한 처분장치 구조에 대한 임계 구조강도를 계산하였고, Auerkari 등⁽⁴⁾은 처분장치 구조의 용접부위에 대한 강도해석을 수행하였다. 또한 Raiko 등^(12~13)과 Werme 등⁽¹⁷⁾은 여러 유형의 처분장치 구조설계 시 요구되는 처분장치 구조해석 문제를 다루었다. 본 연구에서는 이와 같이 핀란드, 스웨덴 등에서 연구된 처분장치 모델을 토대로 가압경수로(PWR)에서 발생하는 고준위폐기물 처분장치로 적당하다고 판단되는⁽⁶⁾ 4개의 사각형 바스켓 안에 사용 후 핵연료다발이 채워진 처분장치와 이를 감싸고 있는 완충장치에 대하여 비선형 구조해석을 수행하였다.

처분장치의 설계 시 여러 가지 구조해석을 복합적으로 수행하여야 한다. 먼저 가장 기본적인 해석으로 내부 주철 삽입물의 강도를 측정하기 위한 선형정적 구조해석을 수행하여야 한다.⁽¹¹⁾ 이를 통하여 처분장치를 구성하고 있는 내부 주철 삽입물의 재원(직경, 길이)을 결정하고 또한 처분장치의 사용 후 핵연료다발의 개수, 배열위치 등을 결정할 수 있다. 또한, 지진 등과 같은 외부 충격에 의해 발생할 수 있는 지지 암반의 붕괴에 의해 처분장치에 가해질 수 있는 갑작스런 전단변형에 대한 비선형 구조해석을 수행하여야 하며, 또한 고온의 지열 등에 의해 외곽 셸에 발생할 수 있는 크리프해석 등도 수행하여야

한다. 따라서 처분장치의 구조설계 문제는 이와 같이 복합적인 해석을 동시에 해결할 수 있는 MDO기법 적용이 요구된다.⁽⁸⁾

본 연구에서는 위에서 언급한 여러 가지 구조해석 중 지진 등에 의해 지지암반에 발생하는 약 10cm의 전단변형에 의하여 「처분장치+완충장치」 복합구조물에 발생하는 탄소성 구조해석을 수행하였다. 이와 같은 지지암반의 전단변형에 의한 「처분장치+완충장치」의 대변형 구조해석 연구는 스웨덴 등에서 수행한 연구⁽⁵⁾에서도 관찰되고 있다. 본 대변형 구조해석 문제에서는 비선형 해석기법을 적용하여 순간적인 약 10cm의 전단변형에 의한 「처분장치+완충장치」의 대변형 구조해석을 수행하였다. 이때 「처분장치+완충장치」에 대한 물질 모델은 탄소성 물질모델을 적용하였다. 약 10cm의 지지암반 전단변형은 상하 비대칭으로 작용한다고 가정하였다.

처분장치는 주철로 된 내부 삽입물(cast iron insert)에 구리로 된 외곽 셸(outer shell) 및 위아래 덮개(lid & bottom)로 감싸는 구조로 되어 있다. 또 이와 같은 처분장치를 약 50cm 두께의 벤토나이트 버퍼가 감싸고 있다. 따라서 본 연구의 해석 대상이 되는 구조물은 이들 세 가지 물질로 이루어진 복합구조물이다. 이 구성 물질 중 특히 내부 삽입물을 이루고 있는 주철과 외곽 셸 및 위아래 덮개를 이루고 있는 구리는 금속 물질로서 처분용기 제작 시 이들 사이에 간극(gap)이 전혀 없는 완전 접촉 상태가 요구되지만 약간의 간극(gap)이 존재할 수도 있다. 이와 같이 미세한 간극이 존재하는 경우 발생하는 문제점은 기 수행한 연구⁽⁹⁾에서 이미 다룬바 있다. 이와 같은 간극이 없거나 외력에 의하여 두 물질이 완전히 접촉(contact)한 경우 두 경계면 사이의 접촉조건(contact condition)을 고려하여야 한다. 그러나 두 접촉면이 서로 상대 운동(미끄럼 운동)을 하여 두 접촉면 사이의 마찰력(friction force)을 무시할 수 없는 경우에는 두 접촉면 사이에서 이와 같은 접촉조건을 반드시 고려하여야 한다.^(7,10) 본 연구에서 구리로 된 외곽 셸과 위아래 덮개는 내부 주철삽입물을 얇게 감싸고 있는 구조상 예상되는 외력(주로 외곽 면에 수직인 힘)에 의하여 절대로 상대적인 움직임이 없다고 사료되며 또 제작 시 서로 상대적인 움직임이 없도록 완전히 접촉되도록 제작된다. 또한 처분장치를 감싸고 있는 벤토나이트 버퍼 물질도 점토(cray)와 같은 물질로서 접착력이 좋기 때문에 구리와 벤토나이트 사이의 접촉면에서도 마찰력 같은 접촉조건을 고려할 필요가 없다고 사료된다. 특히 각 물질 사이의 접촉은 면접촉이기 때문에 보통 접촉문제(contact problem)가 발생하는 점접촉이나 선접촉 같은 특이접촉

(singular contact)의 경우는 아니라고 사료된다. 따라서 본 논문에서는 해석 대상인 복합구조물을 구성하고 있는 각 물질 사이의 경계면에서는 마찰력 같은 접촉 조건은 고려하지 않고 해석을 수행하였다.

탄소성 대변형 해석에서 요구되는 항복조건은 다음과 같이 적용하였다. 완충장치를 구성하고 있는 벤토나이트는 일종의 진흙(cray)과 같은 물질로서 토목재료인 모래, 진흙 등의 재료의 항복을 잘 묘사하는 Drucker-Prager 항복조건을 벤토나이트 버퍼(bentonite buffer)에 적용하였다. 그러나, 처분장치를 구성하고 있는 제철인 주철(cast iron)과 구리(copper)는 대표적인 금속재료로서 금속의 항복을 잘 묘사하는 von-Mises 항복조건을 처분장치를 구성하고 있는 내부 주철 삽입물(cast iron insert)과 외곽 쉘(outer shell) 및 위아래 덮개(lid & bottom)에 적용하였다. 이와 같은 항복조건의 선택은 스웨덴에서 수행된 Borgesson의 연구⁽⁶⁾에서도 나타나고 있다.

본 연구에서는 MCAE 구조해석 프로그램인 상용 유한요소해석코드인 NISA를 이용하여 「처분장치+완충장치」 복합구조물에 대한 탄소성해석을 수행하였다.

2. 구조해석 문제의 구성

2.1 구조형상

직경 D=122cm의 처분장치(PWR type)에 두께 50cm의 완충장치(bentonite buffer)가 Fig. 1과 같이 설치되어 있을 때 갑작스런 10cm정도의 압반음직입이 완충장치(bentonite buffer) 외곽에 비대칭으로 어긋나게 가해졌을 경우 완충장치(bentonite buffer)와 내부 처분장치에 발생하는 구조변형 및 응력을 측정한다.

해석 시 완충장치(bentonite buffer)와 처분장치는 탄소성 물질(elastoplastic material)로 가정하였고, 완충장치(bentonite buffer)의 압반음직입에 대한 해석은 탄소성해석을 수행하였다. 완충장치(bentonite buffer)는 50cm의 두께로 처분장치를 감싸고 있으므로 처분장치에 직접적으로 힘이 작용하는 것을 막아주는 역할을 수행하고, 또한 지하수압에 의한 처분장치의 화학적인 변화를 막아주는 역할도 하게 된다.

2.2. 물질 상수(Material properties)

완충장치는 구성 재료가 벤토나이트로 진흙 및 압반에서의 실험치와 보다 근접한 값을 나타내는 Drucker-Prager 항복조건을 적용하였고, 물질 접착력(material cohesion)은 100KPa, 마찰각(friction angle)은 20deg로

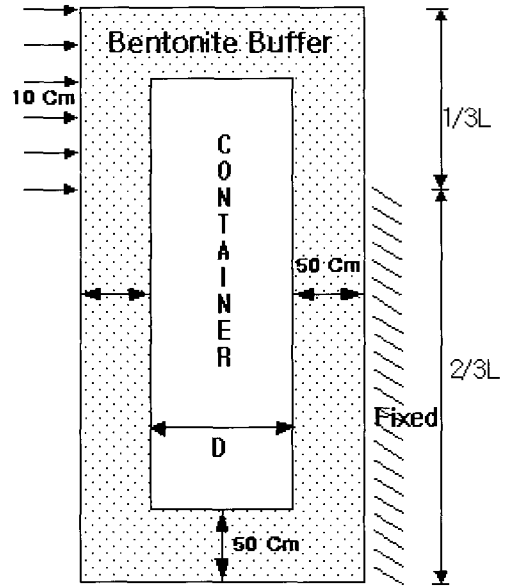


Fig. 1 Geometry and constraint condition (L = 583 cm, D = 122 cm)

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.

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 Table 1, 2, 3의 단축인장 시험 결과를 이용하여 불연속 선형경화 응력-변형률 곡선(piecewise linear hardening stress-strain curve)를 적용하였다.

Table 1 Yield function of bentonite

σ_j (Pa)	ϵ_y
113 E3	0.0025
138 E3	0.005
163 E3	0.02
188 E3	0.04
213 E3	0.2

Table 2 Yield function of copper

σ_j (Pa)	ϵ_y
50 E6	0.005
80 E6	0.015
130 E6	0.065
180 E6	0.154
210 E6	0.288

Table 3 Yield function of cast iron

σ_j (Pa)	ϵ_y
300 E6	0.005
412 E6	0.023
542 E6	0.078
697 E6	0.147

2.3. 외력 조건(External load condition)

갑작스러운 압반력이 처분장치와 완충장치로 이루어진 복합구조물의 상하 비대칭면을 기준으로 상단의 왼쪽 외곽 면에서 10cm만큼 어긋나게 작용한다. 이때 버퍼의 비대칭 중앙하단 오른쪽 외곽 면은 고정 지지시킨다.(Fig. 1참조)

3. 유한요소해석

유한요소(finite element) 모델은 해의 수렴성과 계산 시간의 경제성을 고려하여 이전에 수행되었던 선형탄성 해석의 경우¹¹⁾와는 다르게 요소의 수를 Table 4와 같이 하였으며 압반움직임이 작용하여 최대 변형이 발생 될 것으로 예상되는 구조물의 중간 단면 부분은 요소를 보다 세밀하게 구성하였다. 압반움직임에 의한 탄소성 구조해석은 큰 전단력의 영향으로 처분장치 전체에 발생할 수 있는 응력을 파악하기 위한 것이다. 덮개(lid)의 돌출된 부분은 전단력이 가해지는 부분에서 떨어져 있기 때문에 전체적인 해의 경향에 큰 영향이 없을 것으로 판단하여 생략하고 모델링 하였다.(Fig. 2) Fig. 3과 같이 압반움직임은 처분장치와 완충장치(bentonite buffer)로 이루어진 복합구조물의 상하 비대칭면을 기준으로 상단

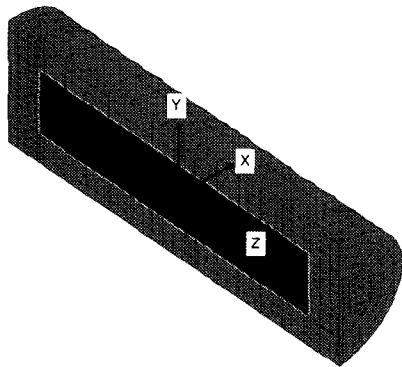


Fig. 2 F.E. model of container and its bentonite buffer

의 왼쪽 외곽 면에서 10cm만큼 어긋나게 작용하고 있다. 따라서 Fig. 3에서 완충장치(bentonite buffer)의 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 외력 조건이 좌우 대칭이기 때문에 Fig. 2와 같이 반단면 형상인 반원통만을 모델링하고 대칭구속조건($u_x = 0$)을 대칭면(x=0)에 적용하였다.(Fig. 4)

Table 4 F.E. model data

Parameter	Value
Element No.	1759 EA
Node No.	8590 EA
Element type	second order hexahedron element

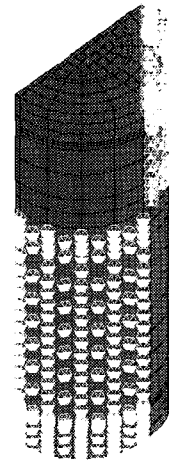


Fig. 3 Rock movement and boundary condition (upper one third left outer surface : $u_x = u_y = u_z = 0$, lower two thirds right outer surface : $u_x = u_y = u_z = 0$)

4. 해석결과 및 분석

탄소성 대변형 구조해석결과 발생 응력 및 변위는 Table 5와 같이 나타났다. 완충장치(bentonite buffer)에 발생하는 응력은 물질집착력(material cohesion) 100 KPa를 넘어 소성변형이 발생했고, 구리와 내부 주철에 발생하는 응력은 항복응력(45MPa, 200MPa)에 이르지

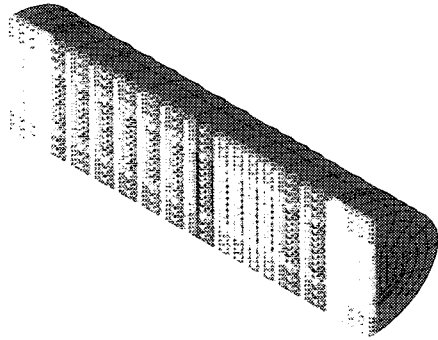


Fig. 4 Symmetric condition (symmetric plane(x=0) : $u_x=0$)

지 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.(Fig. 7~9) 최대 변위는 10cm의 강제변위가 가해지는 벤토나이트 버퍼에서 15.85cm가 발생하고 있다. 외부에서 가해지는 10cm의 강제변위 보다 큰 최대 변위가 발생한 것은 물체가 가지고 있는 물질특성에 기인한 것이 아닌가 사료되며 수치해석상의 오차도 이의 원인으로 사료된다. Table 5에 나타난 것과 같이 구리로 된 외곽 셸과 내부 주철삽입물 또한 최대 3.59cm의 변위가 발생하고 있으나 이것은 완충장치(bentonite buffer)의 대변형에 의해 처분장치에 가해지는 굽힘하중에 의한 휨변형에 따라서 처분장치 끝단에 발생하는 것으로 사료된다.(Fig. 6) 또한 이와 같은 굽힘하중에 의하여 완충장치 오른쪽 하단 처분장치와의 경계모서리에 응력집중 현상(Fig. 9참조)이 발생함을 알 수 있다.

Fig. 13의 von-Mises 응력 그래프를 보면 그래프의 x축은 하중매개변수(load parameter)를 나타낸다. 그러므로 본 그래프의 x축 값은 외부에서 가해지는 강제변위(암반움직임 : rock movement)이다. 모든 그래프에서 x축 값의 1은 1cm이고 10은 10cm로 강제 변위를 나타낸다. 또한 외부에서 가해지는 강제변위는 일정한 크기로 증가되고 있다. Fig. 13에서 발생하는 von-Mises 응력(stress)를 보면 내부 주철삽입(cast iron insert)부분에서의 응력 보다 구리 셸(copper outer shell)에서 보다 더 높은 응력이 발생함을 알 수 있다.

10cm 전단변형 이후 완충장치(bentonite buffer)는 소성 변형율이 90%로 Fig. 11과 같이 소성 변형을 보이고 있으며 구리 셸은 3.0%, 주철 삽입물은 1.7%의 변

형율을 보이고 있다. 구리 셸과 내부 주철 삽입물에 발생하는 변형율은 매우 작기 때문에 구리 셸과 주철 삽입물은 소성 변형이 발생하지 않는다고 볼 수 있다.

Fig. 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 처분장치 구조에 가해지는 굽힘 하중에 의한 것으로 사료된다. Fig. 14~15를 분석하면 벤토나이트 버퍼에는 항복응력 값에 도달한 후 계속해서 항복이 발생하여 소성변형이 발생하고 있지만(Fig. 14) 완충장치(bentonite buffer)내부에 있는 처분장치 구조는 아직도 항복상태에 도달하지 못하는 구조적으로 안전한 탄성변형만이 발생함을 알 수 있다.(Fig. 15) 이는 Table 5에 정리된 최대 등가응력에 의한 분석결과와도 일치한다. Fig. 11를 분석하면 완충장치에 발생하는 대부분의 소성변형은 암반움직임(rock movement)이 가해지는 부분과 가해지지 않는 부분의 외부 경계 근처에서 발생함을 알 수 있다.

Table 5 Analysis result (asymmetric shear 10cm)

	Max. von Mises stress(MPa)	Max. deflection (cm)	Plastic strain(%)
Bentonite buffer	13.58	15.85	90
Copper shell	16.69	3.59	
Cast iron insert	16.69	3.41	

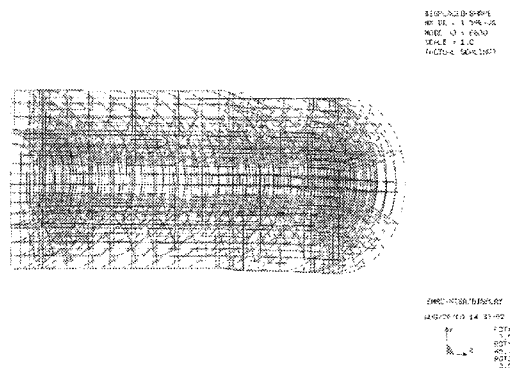


Fig. 5 Deformed shape of whole structure

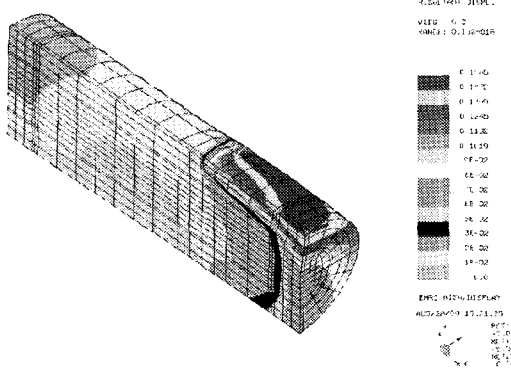


Fig. 6 Resultant displacement of whole part (buffer and container)

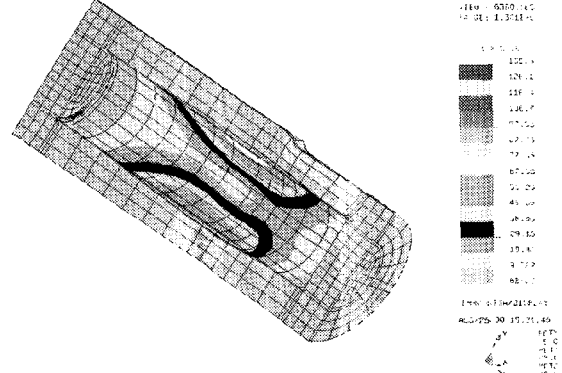


Fig. 9 Contour of von-Mises stress of bentonite buffer

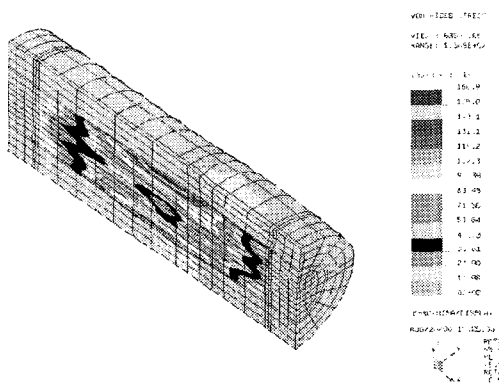


Fig. 7 Contour of von-Mises stress of whole part

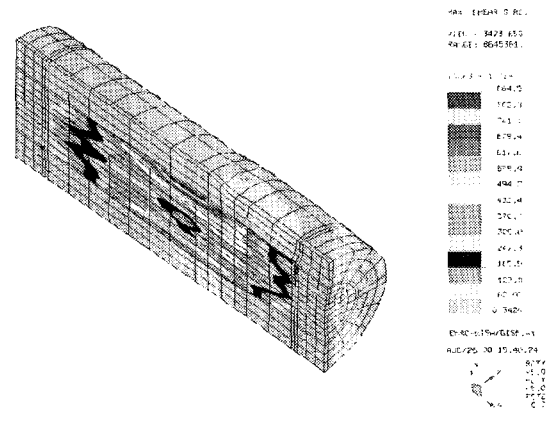


Fig. 10 Max. shear stress contour of whole part

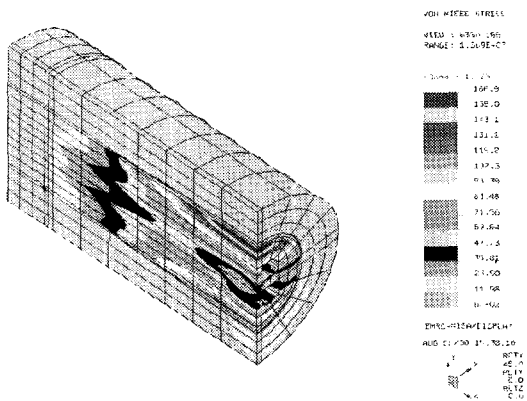


Fig. 8 Contour of von-Mises stress of whole part (section view)

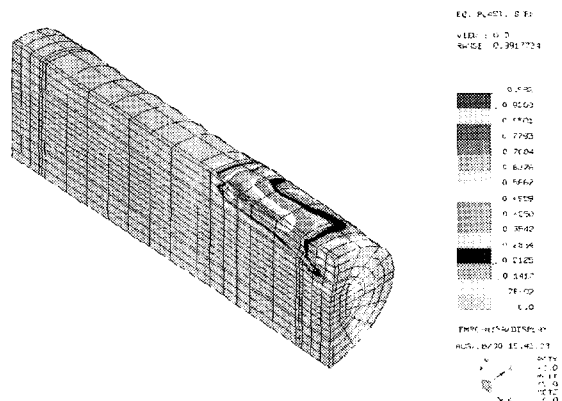


Fig. 11 Contour of equivalent plastic strain of whole part

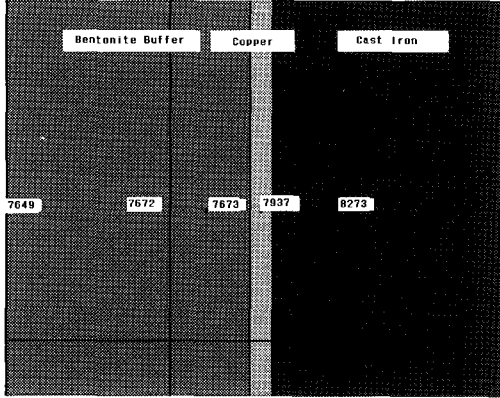


Fig. 12 Selected node location

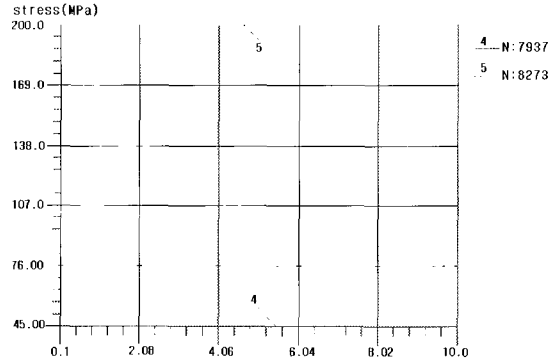


Fig. 15 Effective yield stress at container node(7937, 8273)

5. 결론

처분장치(container)의 외곽을 감싸고 있는 완충장치(bentonite buffer)에 10cm의 강제변위가 비대칭적으로 작용하였을 때 완충장치 내에 발생하는 최대 응력이 13.58 MPa임을 알 수 있다. 이 때 완충장치(bentonite buffer)에 발생하는 최대 응력은 물질접착력(material cohesion)인 100KPa를 넘어 완충장치는 소형변형을 일으키고 있음을 알 수 있다.

상당소성변형율이 전단면에 집중적으로 발생하고 있음을 알 수 있다. 또, 최대응력이 구리 셸과 내부 주철삼입물 사이에서 발생하고 있으나 처분장치(container)의 기존 형상에는 큰 변형이 발생하지 않고 있다.

강제변위가 4cm까지 가해졌을 때 완충장치의 변형율이 실험적 결과 값 이내에 존재 하지만 4cm 이후에는 암반움직임(rock movement)이 작용하는 전단면에서는 그 한계값을 넘어 정의되지 않은 응력-변형을 관계를 보이고 있으며 이는 재료가 붕괴되었다고 볼 수 있다.

10cm의 강제 변위가 가해질 때 완충장치는 탄성변형 및 소성 변형을 거쳐 붕괴 상태까지 진행하지만 처분장치는 그 발생 응력이 최대 16.69MPa로 재료의 항복응력과 비교하였을 때 현저히 낮게 나타나는 것을 알 수 있다. 따라서 10cm의 강제 전단변형이 처분장치를 감싸고 있는 완충장치 외곽에 작용하여 완충장치에 대변형인 소성변형이 발생하여 버퍼가 붕괴된다고 내부의 처분장치는 구조적으로 안전함을 알 수 있다. 이는 50cm 두께의 완충장치가 10cm의 비대칭 압반 전단력에 대하여 내부 처분장치를 충분히 구조적으로 보호하고 있음을 보여 주고 있다.

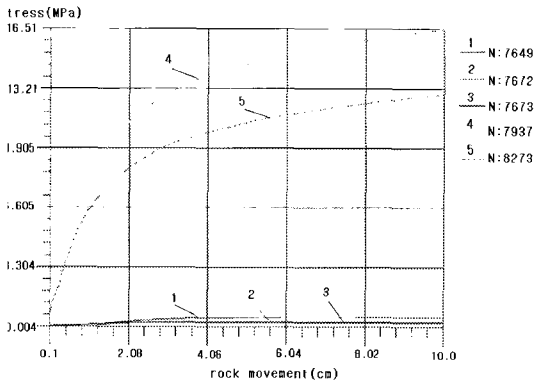


Fig. 13 Graph of von-Mises stress at selected node(7649, 7672, 7673, 7937, 8273)

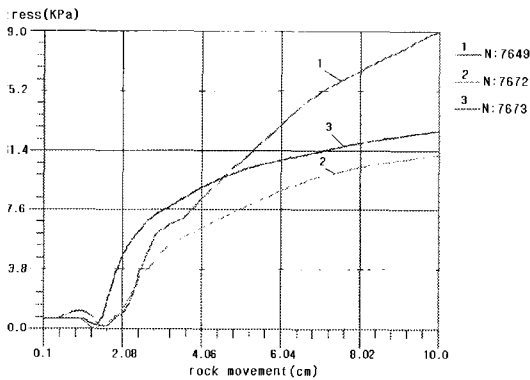


Fig. 14 Effective yield stress at bentonite buffer node(7649, 7672, 7673)

참 고 문 헌

- (1) 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.
- (2) Anttila, M., 1996, "Criticality Safety Calculations for the Nuclear Waste Disposal Canisters," Report POSIVA-96-11, Posiva Oy, Helsinki.
- (3) Anttila, M., 1999, "Criticality Safety Calculations of the Nuclear Waste Disposal Canisters for Twelve Spent Fuel Assemblies," Working Report 99 03, Posiva Oy, Helsinki, p. 20.
- (4) Auerkari, P. and Holmstrom, S., 1997, "Long-term Strength of EB Welds of the Canister for Nuclear Fuel Disposal," Working Report 97-35e, Posiva Oy, Helsinki, p. 21.
- (5) 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. p. 83 + appendixes, ISSN 0284-3757.
- (6) Choi, J. W., Choi, Y. S., Kwon, S. K., Kuh, J. E., and Kang, C. H., 1999, "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.
- (7) 장동환, 조승환, 황병복, 2003, "축대칭 변형체의 마찰접촉문제에 관한 유한요소 해석," 한국소성가공학회지, 제12권 제1호, pp. 26~33.
- (8) 권영주, 김재희, 1999, "액체금속로 핵연료교환장치의 구조해석 I : 기구동역학해석," 한국전산구조공학회 논문집, 제12권, 제4호, pp. 573~581.
- (9) 권영주, 강신욱, 2002, "가압경수로 고준위폐기물 처분장치 외곽 셸에 대한 비선형 구조해석," 홍익대학교 논문집, 산업기술, 제12집, pp. 131~139.
- (10) 김영식, 손현성, 한수식, 2002, "튜브 하이드로포밍 공정에서의 마찰특성에 관한 연구," 한국소성가공학회지, 제11권 제6호, pp. 475~481.
- (11) Kwon, Y.J., Kang, S.U., Choi, J.W., and Kang, C.H., 2001, "Structural Analysis for the Determination of Design Variables of Spent Nuclear Fuel Disposal Canister," KSME International Journal, Vol. 15, No. 3, pp. 327~338.
- (12) Raiko, H. and 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, Finland.
- (13) Raiko, H. and Salo, J. P., 1996, "Design Report of the Canister for Nuclear Fuel Disposal," Report POSIVA 96 13, Posiva Oy, Helsinki, ISBN 951 652-012-x, Finland.
- (14) Raiko, H. and Salo, J. P., 1999, "Design Report of the Disposal Canister for Twelve Fuel Assemblies," Report Posiva-99-18, Posiva Oy, Helsinki, Finland.
- (15) Salo, J. P. and 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, Finland.
- (16) Vieno, T. and Nordman, H., 1999, "Safety Assessment of Spent Fuel Disposal Canister in Hastholmen, Kivetty, Olkiluoto and Romuvaara TILA-99," Report POSIVA 99-07, Posiva Oy, Helsinki, p. 253.
- (17) Werme, L. and Eriksson, J., 1995, "Copper Canister with Cast Inner Component," Technical Report TR-95-02, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. (SKB), Stockholm, Sweden, ISSN 0284-3757.