

고준위폐기물 처분장치와 이를 감싸고 있는 벤토나이트 버퍼에 대한 비선형 구조해석

A Study on the Nonlinear Structural Analysis for Spent Nuclear Fuel Disposal Container and Bentonite Buffer

권 영 주* 최 석 호**

Kwon, Young-Joo Choi, Seok-Ho

ABSTRACT

In this paper, the nonlinear structural analysis for the composite structure of the spent nuclear fuel disposal container and the 50cm thick bentonite buffer is carried out to predict the collapse of the container while the 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. Horizontal symmetric rock movement is assumed in this structural analysis. 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(cast iron insert, copper outer shell and lid and bottom). 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 50cm thick bentonite buffer can protect the container safely against the 10cm 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 elastoplastic nonlinear structural analysis for the composite structure of the container and the bentonite buffer is performed using the finite element analysis code, NISA.

1. 서 론(Introduction)

원자로에서 사용한 후 폐기되어지는 핵연료의 고준위폐기물은 위험한 방사능과 높은 온도를 가지고 있기 때문에 이를 관리하는 것은 상당한 주의가 필요하다. 고준위폐기물 처분장치는 어떤 조건하에서도 고준위폐기물의 방사성독성이 사라지는 10,000년 동안 폐기물을 완전히 안전하게 격리시킬 수 있게 처분장치의 수명이 확실하게 보장되어야만 한다⁽¹⁻⁴⁾. 이러한 이유로 저장된 기간 중에 구조적 결함이 없도록 처분장치의 구조적 안정성측면에서 여러 가지 조건을 고려해야 한다. 이러한 처분장치는 보통 지하 500m 아래의 안전한 장소에 보관하는 것이 좋다. 이런 여러 가지 안전성 측면에서 고려되어야할 외부조건에 대하여 충분한 안전계수를 만족해야 하는데 첫 번째로 처분장치가 화강암층의 지하 500m에 놓여서 처분장치가 정상적으로 받을 외압인 지하수압 5MPa과 벤토나이트 완충재의 팽윤압 10MPa 등 총 15MPa에 견딜 수 있는 안전계수를 만족해야 한다. 또한 처분장치 설계 시 고려되는 안전계수는 외압조건외 불확실성과 재료 특성 및 제조상의 불확실성도 함께 포함되어야 하는데 이런 경우에 사용되는 처분장치 재질의 구조와 특성에 따라 보통 1.5~2.5의 안전계수 값이 사용되어진다⁽⁶⁾. 여기서 안전계수는 처분장치를 구성하는 고체물질의 항복응력과 처분장치 구조물내부에 발생하는 최대 내부 응력 비로 정의된다. 지하에 암반구조를 가지고 있는 고준위폐기물 처분시스템 연구의 선진국인 핀란드, 스웨덴 등에서 폐기물 처분장치에 대한 구조해석 연구가 상당히 진행되고

* 정희원 · 홍익대학교 기계정보공학과 부교수

** 홍익대학교 대학원 기계설계학과

있는 실정이다.

처분장치의 설계 시 여러 가지 구조해석을 복합적으로 수행하여야 한다. 먼저 가장 기본적인 해석으로 내부 주철 삽입물의 강도를 측정하기 위한 선형정적 구조해석⁽⁷⁾을 수행하여야 한다. 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 셀에 발생할 수 있는 크리프해석 등도 수행하여야 한다. 따라서 처분장치의 구조설계 문제는 이와 같이 복합적인 해석을 동시에 해결할 수 있는 MDO기법 적용이 요구된다⁽⁸⁻⁹⁾.

본 연구에서는 위에서 언급한 여러 가지 구조해석 중 지진 등에 의해 지지암반에 발생하는 약 10cm의 전단변형에 의하여 「처분장치+완충장치」 복합구조물에 발생하는 탄소성 대변형 구조해석을 수행하였다. 이와 같은 지지암반의 전단변형에 의한 「처분장치+완충장치」의 대변형 구조해석 연구는 스웨덴 등에서 수행한 연구⁽⁶⁾에서도 관찰되고 있다. 본 대변형 구조해석 문제에서는 비선형 해석기법을 적용하여 순간적인 약 10cm의 전단 변형에 의한 「처분장치+완충장치」의 대변형 구조해석을 수행하였다. 이때 「처분장치+완충장치」에 대한 물질 모델은 탄소성 물질모델을 적용하였다. 약 10cm의 지지암반 전단변형은 상하 대칭으로 작용한다고 가정하였다. 탄소성 대변형 해석에서 요구되는 항복조건은 완충장치인 벤토나이트 버퍼에 대해서는 Drucker-Prager 항복조건을, 처분장치를 이루고 있는 내부 주철 삽입물과 구리로 된 외곽 셀 및 위아래 덮개는 von-Mises 항복조건을 적용하였다.

본 연구에서는 MCAE 구조해석 프로그램인 상용해석코드 NISA를 이용하여 처분장치에 대한 「처분장치+벤토나이트 버퍼 완충장치」 복합구조물에 대한 비선형 구조해석을 수행하였다.

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

2.1. 구조 형상(Geometry)

직경 D=122cm의 처분장치(PWR type)에 두께 50cm의 벤토나이트 버퍼가 아래 Fig. 1과 같이 설치되어 있을 때 갑작스런 10cm정도의 rock movement가 버퍼 외곽에 대칭으로 어긋나게 가해졌을 경우 버퍼와 내부 처분장치에 발생하는 구조변형 및 응력을 측정한다.

해석 시 버퍼와 처분장치는 탄소성체(elastoplastic material)로 가정하였다. 버퍼의 rock movement에 대한 해석은 비선형 구조해석을 수행하였다. 벤토나이트 버퍼는 50cm의 두께로 처분장치를 감싸고 있으므로 버퍼는 처분장치에 직접적으로 힘이 작용하는 것을 막아주는 역할을 수행하고, 또한 지하수압에 의한 처분장치의 화학적인 변화를 막아주는 역할도 하게 된다.

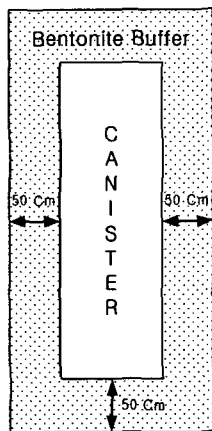


Fig. 1 The container and buffer geometry

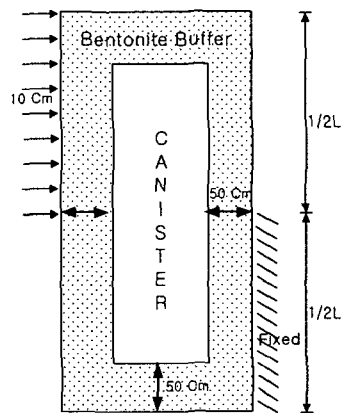


Fig. 2 Constraint conditions

2.2. 물질 상수(Material properties)

버퍼는 구성 재료가 벤토나이트로 진흙 및 암반에서의 실험치와 보다 근접한 값을 나타내는 Drucker-Prager yield criterion을 적용하였고 Table 1에 보인 것과 같이 물질 접착력(material cohesion)은 100KPa, 마찰각(friction angle)은 20 deg로 정의하였다. 구리(copper)와 내부 주철(steel)은 금속류에서의 실험치와 잘 일치하는 von-Mises yield criterion을 적용하여 재료의 항복을 정의하였으며 항복응력은 각각 45MPa, 200MPa로 정의하였다(Table 3, 5).

또한 초기 항복 이후의 경화법칙은 어떤 hardening parameter 함수에 의해 yield surface의 크기가 커지는 동안 응력장에서 그 형상(shape)이 변화하지 않는다는 가정의 isotropic hardening rule을 적용하였다. 초기 항복 이후 응력(stress)-변형율(strain)관계는 Table 2,4,6의 단축인장 시험 결과를 이용하여 piecewise linear hardening stress-strain curve를 적용하였다.

Table 1 Material property of bentonite

| | Value | Unit |
|-----------------------|--------|------|
| E(Young's modulus) | 100 E6 | Pa |
| ν (Poisson ratio) | 0.4 | |
| Material cohesion | 100 E3 | Pa |
| Friction angle | 20 | Deg |

Table 2 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 | 0.1 |

Table 3 Material property of copper

| | Value | Unit |
|-----------------------|--------|------|
| E(Young's modulus) | 114 E9 | Pa |
| ν (Poisson ratio) | 0.35 | |
| Yield stress | 45 E6 | Pa |
| - | - | - |

Table 4 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 5 Material property of steel

| | Value | Unit |
|-----------------------|----------|------|
| E(Young's modulus) | 126.5 E9 | Pa |
| ν (Poisson ratio) | 0.25 | |
| Yield stress | 200 E6 | Pa |
| - | - | - |

Table 6 Yield function of steel

| 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)

Sudden rock movement가 버퍼와 처분장치의 상하 대칭 중양을 기준으로 상단의 왼쪽 외곽 면에서 10cm만큼 어긋나게 작용한다. 이때 버퍼의 중앙하단 오른쪽 외곽 면은 고정 지지시킨다.(Fig. 2참조)

3. 유한요소 해석(Finite element analysis)

유한요소(finite element) 모델은 해의 수렴성과 계산 시간의 경제성을 고려하여 이전에 수행되었던 선형탄성 해석의 경우⁽⁷⁾보다 요소의 수를 Table 7과 같이 현저히 적게 하였으며 rock movement가 작용하여 최대 변형이 발생 될 것으로 예상되는 구조물의 중간 단면 부분은 요소를 보다 세밀하게 구성하였다. Rock movement 해석은 큰 전단력의 영향으로 container 전체에 발생할 수 있는 응력을 파악하기 위한 것이기 때문에 덮개(lid)의 돌출된 부분은 높은 응력집중이 예상되지만 그 값이 조잡한 요소(mesh) 발생과 수렴의 난해함 때문에 신뢰성을 가지기 어려울 것으로 판단하여 생략하고 모델링하였다(Fig. 3). Fig. 4와 같이 rock movement는 구조물의 상하 중양을 기준으로 정확히 상하 대칭적으로 작용하고 있다. 따라서 Fig. 4에서 벤토나이트의 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 Fig. 5과 같이 반단면 형상인 반원통만을 모델링하고 대칭구속조건($u_x = 0$)을 적용하였다.

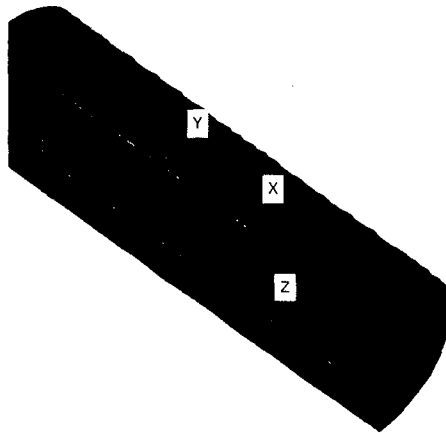


Fig. 3 FE Model of container and buffer structure

Table 7 FE Model data (symmetric shear 10cm)

| | |
|--------------|--------------------------------|
| Element No. | 1832 EA |
| Node No. | 8946 EA |
| Element type | second order hexagonal element |

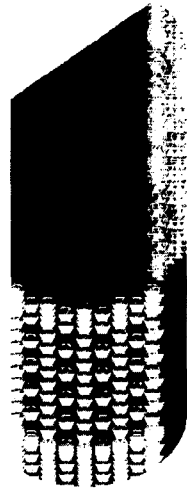


Fig. 4 Rock movement and boundary condition

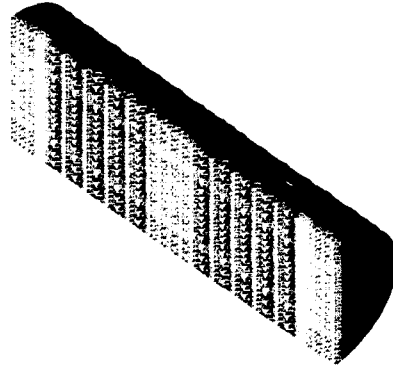


Fig. 5 Symmetric condition

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

탄소성 해석결과 발생 응력 및 변위는 Table 8과 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 rock movement가 작용하는 경계면에서 발생하지 않고 50cm정도 z축 방향으로 이동된 지점에서 구리 외곽 셸과 내부 주철삽입물의 경계에서 발생하고 있다(Fig. 8~9). 최대 변위는 10cm의 강제변위가 가해지는 벤토나이트 버퍼에서 14.33cm가 발생하고 있다. 외부에서 가해지는 10cm의 강제변위 보다 큰 최대 변위가 발생한 것은 물체가 가지고 있는 관성력에 기인한 것이 아닌가 사료되며 수치해석상의 오차도 이의 원인으로 사료된다. Table 8에 나타난 것과 같이 구리로 된 외곽 셸과 내부 주철삽입물 또한 최대 12cm이상의 변위가 발생하고 있으나 이것은 벤토나이트 버퍼의 대변형에 의해 처분장치에 가해지는 굽힘하중에 의한 휨변형에 따라서 처분장치 끝단에 발생하는 것으로 사료된다(Fig. 7). 또한 이와 같은 굽힘하중에 의하여 벤토나이트 버퍼 오른쪽 하단 처분장치와의 경계모서리에 응력집중 현상(Fig. 9참조)이 발생함을 알 수 있다.

Fig. 13의 von-Mises stress 그래프를 보면 그래프의 x축은 time으로 되어있지만 탄소성 해석에서는 time을 의미하는 것이 아니고 하중매개변수(load parameter)이다. 그러므로 본 그래프의 x축 값은 외부에서 가해지는 강제변위이다. 모든 그래프에서 x축 값의 1은 1cm이고 10은 10cm로 강제 변위를 나타낸다. 또한 외부에서 가해지는 강제변위는 일정한 크기로 증가되고 있다. Fig. 13에서 발생하는 von-Mises stress를 보면 강제변위 6cm까지는 내부주철부분의 응력이 높게 나타나지만 6cm 이후에는 구리 셸에서 보다 높은 응력이 발생함을 알 수 있다. 또한 6cm이후 결과값들이 비연속적 경향을 보이는데 이것은 사용된 FEM solver의 수렴 오차로 판단되며, 그 평균값을 결과값으로 볼 수 있다.

10cm 전단변형 이후 벤토나이트 버퍼는 소성 변형율이 70%로 Fig. 11과 같이 소성 변형을 보이고 있으며 구리 셸은 1.5%, steel 삽입물은 0.4%의 변형율을 보이고 있다. 구리 셸과 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 외

곽 셸과 내부 주철삼입물의 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) 벤토나이트 버퍼 내부에 있는 처분장치 구조는 아직도 항복상태에 도달하지 못하는 구조적으로 안전한 탄성변형만이 발생함을 알 수 있다. 이는 Table 8에 정리된 최대 등가응력에 의한 분석결과와도 일치한다.

Fig. 11를 분석하면 벤토나이트 버퍼에 발생하는 대부분의 소성변형은 rock movement가 가해지는 부분과 가해지지 않는 부분의 외부 경계 근처에서 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 | - |
| Steel | 11.57 | 12.11 | - |

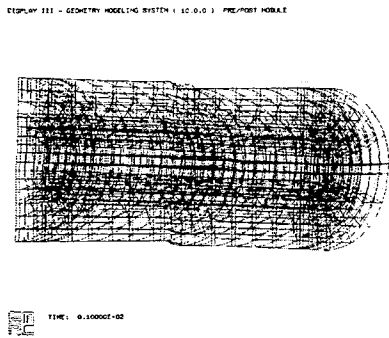


Fig. 6 Deformation shape of whole structure

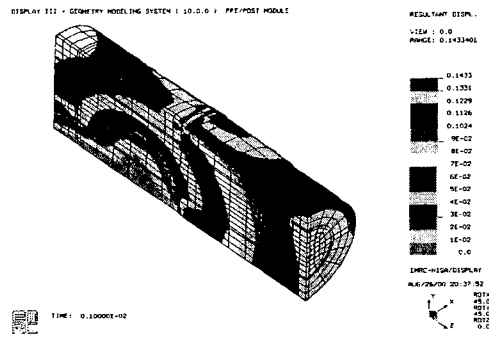


Fig. 7 Resultant displacement of buffer and container

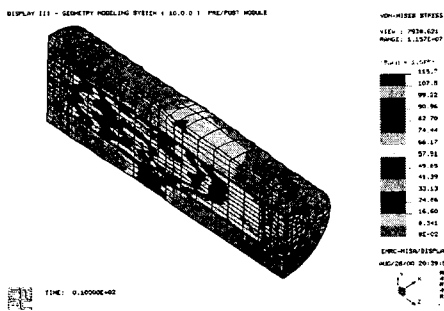


Fig. 8 Contour of von-Mises stress (whole part)

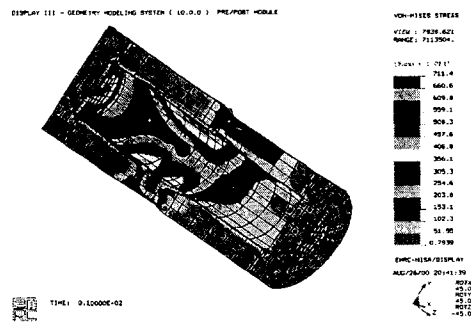


Fig. 9 Contour of von-Mises stress (bentonite)

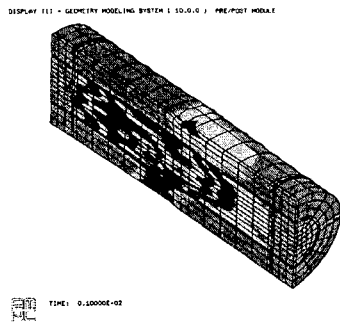


Fig. 10 Contour of max. shear stress (whole part)

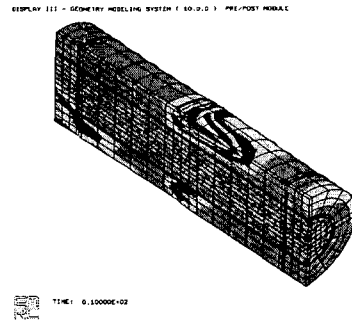


Fig. 11 Contour of equivalent plastic strain (whole part)

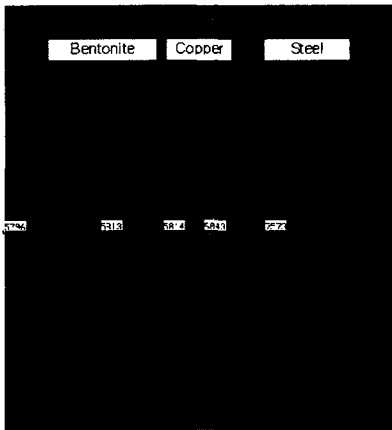


Fig. 12 Selected node location

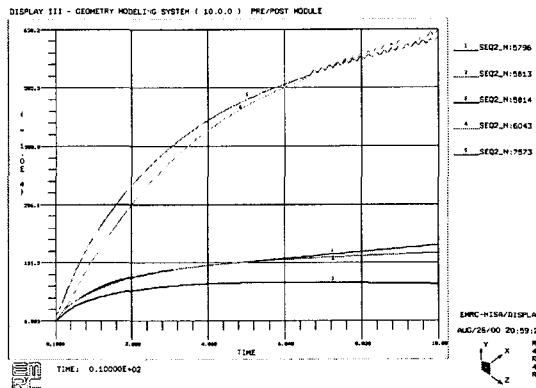


Fig. 13 Graph of von-Mises stress at selected node

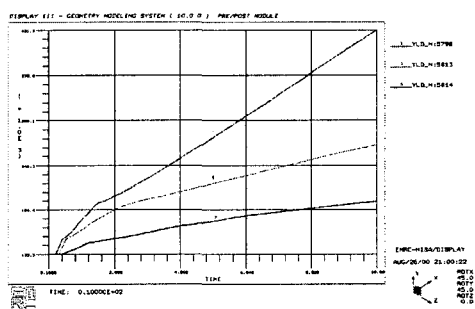


Fig. 14 Effective yield stress at bentonite buffer node(5796, 5813, 5814)

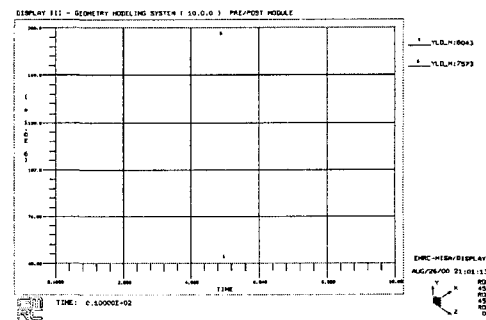


Fig. 15 Effective yield stress at bentonite buffer node(6043, 7573)

5. 결 론(Conclusions)

처분장치(container)외곽을 감싸고 있는 벤토나이트 버퍼에 10cm의 강제변위가 대칭적으로 작용하였을 때에 처분장치 내에 발생하는 최대 응력이 14.33MPa 임을 알 수 있다. 이 때 벤토나이트 버퍼에 발생하는 최대 응력은 material cohesion인 100KPa를 넘어 버퍼는 소성변형을 일으키고 있음을 알 수 있다.

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

강제변위가 4cm까지 가해졌을 때에 벤토나이트 버퍼의 변형율이 실험적 결과 값 이내에 존재 하지만 4cm 이후에는 rock movement가 작용하는 전단면에서는 그 한계값을 넘어 정의되지 않은 응력-변형을 관계를 보이고 있으며 이는 재료가 붕괴되었다고 볼 수 있다.

10cm의 rock movement가 발생한 이후에도 전단면과 그 반대면을 제외한 대부분의 버퍼에서는 변형율이 5% 이내의 소성변형을 보이고 있으며, 처분장치(container)에서는 구리와 주철 모두 탄성적 거동을 보이고 있다.

10cm의 강제 변위가 가해질 때 벤토나이트 버퍼는 탄성변형 및 소성 변형을 거쳐 붕괴 상태까지 진행하지만 처분장치는 그 발생 응력이 11.57MPa, 16.69MPa로 재료의 항복응력과 비교하였을 때 현저히 낮게 나타나는 것을 알 수 있다. 따라서 10cm의 강제 전단변형이 처분장치를 감싸고 있는 외곽 벤토나이트 버퍼에 작용하여 버퍼에 대변형인 소성변형이 발생하여 버퍼가 붕괴되었다고 내부의 처분장치는 구조적으로 안전함을 알 수 있다. 이는 50cm 두께의 벤토나이트 버퍼가 내부 처분장치를 충분히 구조적으로 보호하고 있음을 보여주고 있다.

참고 문헌(References)

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. Borgesson,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. Vieno,T., and Nordman,H., "Safety Assessment of Spent Fuel Disposal Canister in Hastholmen, Kivetty, Olkiluoto and Romuvaara TILA-99," *Report POSIVA 99-07, Posiva Oy, Helsinki*,p.253,1999
7. Youngjoo Kwon, Shinuk Kang, Jongwon Choi, Chulhyung Kang, "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
8. Sobieszczanski-Sobieski,J., "Multidisciplinary Design Optimization : An Emerging New Engineering Discipline," *Advances in Structural Optimization*, edited by J.Herskovitz,Kluwer,Dordrecht,The Netherlands, pp.483-496, 1995
9. Alexandrov,N.,and Hussaini,Y.,(eds), "Multidisciplinary Design Optimization : State of the Art," *SIAM Publications*, Philadelphia,PA, 1997