

가압경수로 고준위폐기물 처분용기에 대한 점탄성 해석

권영주*.하준용**

A Viscoelastic Analysis for Spent Pressurized Water Reactor Nuclear Fuel Disposal Canister

Y.J. Kwon, J.Y. Ha

Abstract

In this paper, a viscoelastic structural analysis for the spent pressurized water reactor(PWR) nuclear fuel disposal canister is carried out to predict the collapse of the canister while the canister is stored in a deep repository for long time. There may exist some subterranean heat in a deep repository while the nuclear fuel disposal canister is stored for long time. Then, a time-dependent viscoelastic structural deformation may occur in the canister due to the subterranean heat. Hence, the viscoelastic stress variation according to time should be computed to predict the structural strength of the canister. A viscoelastic material model is adopted. Analysis results show that even though some subterranean heat may exist for quite a long time, the canister structure still endures stresses below the yield strength of the canister. Hence, some subterranean heat cannot seriously affect the structural strength of the canister.

Key Words : nuclear fuel disposal canister, subterranean heat, viscoelastic structural analysis, structural strength, yield strength

1. 서 론

원자로에서 사용한 후 폐기되어지는 핵연료의 고준위 폐기물은 위험한 방사능과 높은 온도를 가지고 있기 때문에 이를 관리하는 것은 상당한 주의가 필요하다. 고준위 폐기물 처분용기는 어떤 조건에서도 고준위 폐기물의 방사성독성이 사라지는 10,000년 동안 폐기물을 완전히 안전하게 격리시킬 수 있게 처분용기의 수명이 확실하게 보장되어야만 한다⁽¹⁻²⁾. 지하에 암반구조를 가지고 있는 고준위 폐기물 처분시스템 연구의 선진국인 핀란드, 스웨덴 등에서 폐기물 처분용기에 대한 구조해석 연구가 상

당히 진행되고 있는 실정이다.

처분용기의 설계 시 여러 가지 구조해석을 복합적으로 수행하여야 한다. 본 연구에서는 이와 같은 여러 가지 구조해석 중 지하에 존재하는 지열에 의하여 처분용기 구조물에 발생하는 점탄성 구조해석을 수행하였다. 본 구조해석 문제에서는 수 백 미터 지하에 처분용기가 저장되어 있을 때 지하에 발생하는 지열의 발생 년 수를 수십 년 혹은 수백 년으로 가정하였으며, 이때 처분용기에 대한 물질 모델은 점탄성 물질모델을 적용하였다.

본 연구에서는 MCAE 구조해석 프로그램인 상용해석코드 NISA를 이용하여 처분용기에 대한 점탄성 구조해석을 수행하였다.

* 홍익대학교 기계정보공학과
** 홍익대학교 대학원 기계정보공학과

처분용기(canister)에 대한 점탄성 해석을 수행하였다.

2. 문제의 구성

2.1 구조 형상

해석하고자 하는 가압경수로(PWR) 처분용기의 구조 및 재원은 Fig. 1과 같다. 처분용기의 외곽은 구리(Cu)로 되어 있으며 내부삽입물질은 주철로 되어 있다고 가정한다. 따라서 점탄성 변형은 주로 외곽 쉘에서 발생한다고 가정한다.

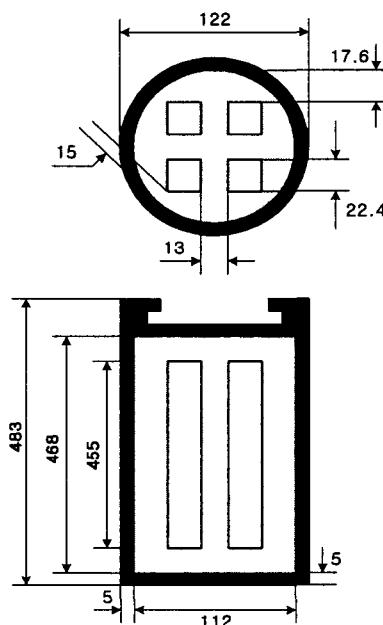


Fig. 1 The canister geometry
(PWR canister, unit : cm)

2.2 물질 상수 및 크리프 법칙

가압경수로(PWR)형 처분용기의 구조는 내부 주철 삽입물(cast iron insert)과 외곽 쉘 및 위아래 덮개로 구성되어 있다. 외곽 쉘 및 위아래 덮개는 구리(copper)재질로 이루어져 있고, 처분용기의 내부 삽입물은 주철(cast iron)로 채워져 있다. 내부삽입물의 바스켓은 비워져 있다고 가정하였다. 재질에 대한 물질 특성들이 다음 Table 1에 나타나 있다. 외곽 쉘 및 위아래 덮개는 구리(copper)재질로 이루어져 있고, 처분용기의 내부 삽입물은 주철(cast iron)로 채워져 있는데 크리프해석에서는 내부 주철 삽입물인 주철(cast iron)은 구리(copper)와 비교해서 점탄성 변형률이 무시할 만큼 작다고 가정하고

Table 1 Material properties

	Cast iron	Copper
Young's modulus E (GPa)	83-170	117
Poisson's ratio ν	0.25	0.3
Mass density ρ (kg/ m ³)	7,400	8,900

다음은 본 연구에서 채택한 구리(copper)와 주철(cast iron)의 점탄성 모델(Pettersson 1991)⁽³⁾를 나타내고 있다.

(a) Viscoelastic model for copper

$$\dot{\epsilon} = 1.58 \times 10^{-17} \sigma_j^{3.4}, \sigma_j < 130 \text{ MPa}$$

여기서, σ_j = von-Mises stresses in MPa

$$\dot{\epsilon} = \text{rate of viscoelastic strain (1/s)}$$

(b) Viscoelastic model for cast iron

$$\dot{\epsilon} = 1.58 \times 10^{-20} \sigma_j^{3.4}, \sigma_j < 130 \text{ MPa}$$

여기서, σ_j = von-Mises stresses in MPa

$$\dot{\epsilon} = \text{rate of viscoelastic strain (1/s)}$$

처분 용기의 외곽 쉘 및 위아래 덮개는 구리(copper)재질로서 완충재의 평윤압(10MPa)과 지하수압(5MPa)을 지속적으로 받는다고 가정하여 해석하였고 완충재(벤토나이트)의 석화작용으로 인한 압력하중의 감소는 고려하지 않았다.

점탄성 해석에 있어서 구리(copper)의 점탄성 변형은 1,000,000 초(sec)까지만 측정되어지는 것으로 가정하였는데 이는 컴퓨터 해석 작업이 상당히 많은 시간을 소비하기 때문이다.

1 초(sec)까지 모든 압력 하중이 작용하고 이 압력하중은 해석 완료 시점인 1,000,000 초(sec)까지 지속적으로 작용한다고 가정하였다. 1~100 초(sec)에서는 점탄성 해석이 적용되지 않고 100 초(sec)이후부터 1,000,000 초(sec)까지 점탄성 해석을 적용시켰다.

3. 유한요소 해석

3.1 유한요소 모델링

처분 용기의 점탄성 해석을 위한 유한 요소모델은 8개의 절점(node)을 갖는 육면체요소(eight node hexahedron element)를 사용하였다.

가압경수로(PWR)형의 유한요소 모델에서 바스켓 내부가 비워진 경우에 직경의 크기는 122 cm로 고정시키고 수행하기 때문에 하나의 유한요소 모델을 이용하였고 총 절점(node)수는 2,231개이고 총 유한요소(element)의 수는 2,941개로 모델링을 수행하였다(Fig. 2 참조).

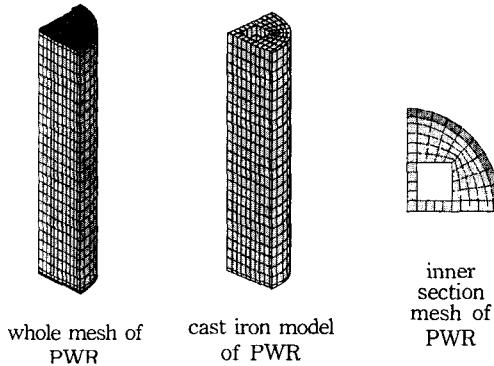


Fig. 2 Finite element mesh of canister for PWR type(empty basket model)

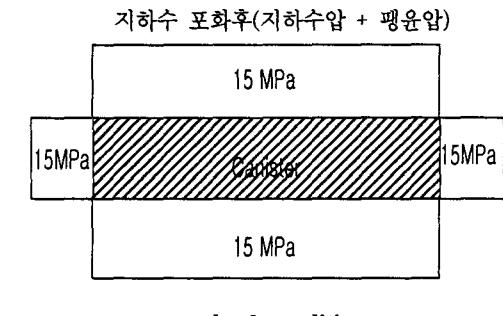
3.2 경계 및 외력조건

Fig. 3에 나타난 바와 같이 처분용기 구조 형상에서 처분용기의 YZ 단면에 대하여 u_x , XZ 단면에 대하여 u_y , XY단면에 대하여 u_z 가 구속되어져 있고 처분용기의 상하부면과 윗 아래면에 수직하게 일정한 압력(15 MPa)이 작용한다.

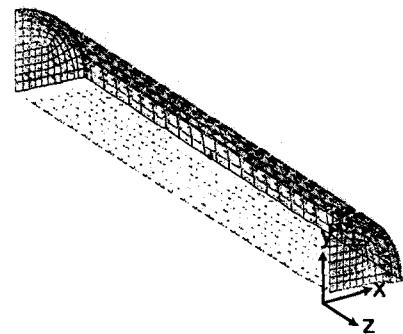
4. 해석결과 및 분석

점탄성 해석 결과를 검토해 보면 처분용기에서의 점탄성 영향은 시간이 지남에 따라 최대 응력을 서서히 감소하는 응력 이완 현상이 일어나지만 변형은 이와 반대로 점차 증가함을 알 수 있다(Table 2 참조).

처분용기에 발생하는 최대 응력은 예상한대로 내부주철 삽입물의 비워진 바스켓주위에서 발생하지만 주철 삽입물의 항복응력값(200~290MPa)보다 매우 작음을 알 수 있다(Table 2 와 Fig. 4 참조).



a. load condition



b. constraint conditions applied on the canister

Fig. 3 Conditions for boundary and external force

하지만 처분용기 외곽 셀 및 위아래 뒷개의 점탄성에 의한 영향은 비록 최대 응력은 감소하더라도 변형과 변형률은 계속 증가함을 알 수 있는데, 본 연구에서의 해석기간 동안의 결과로부터 10^8 초까지 결과를 선형적으로 추정해 보면 최대 변형률이 0.3%정도에 도달할 것이라고 예측해볼 수 있다. 구리의 소성 변형률을 0.2%로 보면 0.3%정도의 변형률은 항복에 도달하기에는 충분히 작은 변형률로 예측된다. 또한 본 해석에서는 압력하중이 계속 일정하게 작용하는 것으로 수행하였지만 벤토나이트(완충재)재질의 팽윤압은 점토의 경화작용에 의해 발생되므로 압력하중의 감소로 인한 응력에의 영향을 고려하면 본 논문의 해석 결과보다도 실제 발생하는 응력이 작아질 것이라고 생각된다. 따라서 점탄성에 의한 변형률은 처분용기의 구조적 안정성에 크게 문제가 되지 않을 것으로 사료된다. 또한 지하에 발생하는 고열 등의 점탄성 변형 발생 원인들은 지속적이지 않고 어느 일정 기간이 경과한 후에는 소멸될 것이 예상되므로 이 기간 중에 발생하는 미소의 점탄성 변형률 때문에 처분용기의

구조적 안정성에는 큰 문제가 되지 않을 것으로 사료된다.

Table 2 Viscoelastic analysis results for PWR canister(empty basket, D = 122cm)

Results	Time(sec)						
	1	10	1000	10000	100000	1000000	10000000
Max. von-Mises stress(MPa)	31.16	31.16	31.16	31.41	30.74	25.89	21.36
Max. deformation (cm)	0.018	0.018	0.018	0.019	0.021	0.024	0.041

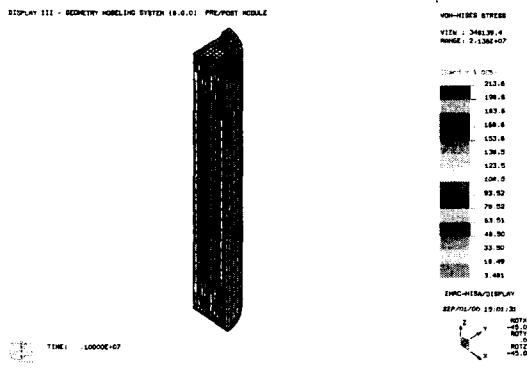


Fig. 4 Stress contour of canister after 1,000,000sec
(quarter overall section view)

5. 결 론

처분용기에 대한 점탄성 해석 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

처분용기의 내부 주철 삽입물에서 점탄성에 의해 발생하는 최대 응력은 시간의 진행과 함께 점차 감소하고 안전 계수 S=1.5~2.5조건을 만족하며 변형과 변형률은 점차

증가하지만 해석시간(10^6 초)동안은 구조적으로 안정성을 확인 할 수 있었다. 처분용기에서 벤토나이트의 팽윤 압과 지하수압에 의한 처분용기의 점탄성 영향은 시간의 경과와 함께 증가하여 10^8 초 이후부터는 어느 정도 많은 변형률이 예상되지만 본 논문에서는 벤토나이트(점토)의 경화 작용에 의한 팽윤압의 감소는 고려하지 않았기 때문에 이 기간 중에 발생하는 미소의 점탄성 변형률 때문에 처분용기의 구조적 안정성이 크게 문제되지는 않을 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- (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) 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
- (3) 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, .