

고준위 폐기물 처분용기 주변에서의 열전달 해석

Analysis of Heat Transfer around the High Level Waste Canisters

최희주, 최종원, 이종열
한국원자력연구소
권영주
홍익대학교 기계정보공학과

요 약

고준위 폐기물 처분용기 개념설계의 일부분으로 열전달 해석을 수행하였다. 현재까지 진행된 처분개념인 지하 500 m 암반 내 처분공에 4개의 PWR 사용후 핵연료 다발을 처분용기에 넣어 처분하였을 경우에 대해 온도 분포를 구하였다. 열전달 해석에는 유한요소법을 이용하는 NISA 프로그램을 이용하였다. 처분용기 내 핵연료의 열 발생에 의한 「처분용기 + 벤토나이트 버퍼 + 처분터널 + 암반」 복합시스템의 온도분포를 구하였다. 처분터널 사이의 간격이 40m 처분공 사이의 간격이 6m인 경우 처분용기 외곽 셀과 완충재 사이의 온도는 처분 후 15~16년에 도달할 때 최대 87.5℃ 까지 증가하다가 서서히 감소하였다.

Abstract

The heat transfer analysis was conducted for the conceptual design of high level waste canisters. The temperature distribution due to the heat generation from four PWR spent fuel bundles which were contained in a canister located in a borehole 500 m below the surface was obtained. NISA computer program based upon FEM was used for the numerical solution. The temperature distribution in the composite system of 「canister + buffer + tunnel + rock」 due to heat generation from the spent fuel was obtained. In the case of 40 m tunnel spacing and 6 m borehole spacing the temperature showed the maximum value of 87.5℃ around 15~16 years after disposal and decreased.

1. 서 론

원자력발전소로부터 발생하는 사용후 핵연료 내에는 수많은 방사성 핵종들이 존재하고, 이들은 자연 방사성 붕괴를 하며 열을 발생한다. 사용후핵연료 또는 고준위폐기물의 심지층 처분에 있어서 이와 같은 붕괴열은 처분용기, 완충재(buffer) 등의 설계에 영향을 미칠 뿐만 아니라 처분공 및 처분동굴의 간격 등의 결정에 영향을 준다. 일반적으로 사용후 핵연료로부터 발생하는 열량을 추정하기 위해서는 방사성물질의 노내연소를 모사하여 선원항평가 코드로 많이 쓰이는 ORIGIN2 프로그램이 이용되고 있으며[1], 본 연구에서는 97년 국내 원자력 발전소 노형에 따라 발생된 사용후핵연료의 특징과 이의 붕괴열을 추정한 결과를 활용하였다.

지하 수백 미터 암반 내에 처분되는 고준위 폐기물은 처분용기에 넣고 그 주변을 벤토나이트와 같은 완충 재료를 이용하여 지하수와 차단한다. 완충재로서 가장 널리 이용되는 벤토나이트의 경우 온도가 증가하면 팽윤압, 수리전도도, 크립, 시멘트화가 변하는 것으로 알려져 있다[3]. 따라서 완충재의 온도를 100℃ 이하가 되도록 설계하는 것은 중요하다.

저자들은 국내 원자력발전소로부터 발생하는 고준위 폐기물을 영구처분하기 위한 처분시설을 설계하고 있다. 이를 위하여 국내 지질 조건을 고려한 처분용기, 완충재와 같은 인공방벽에 대한 개념설계를 진행 중이다. 현재까지 진행된 처분시설 개념을 이용하여 고준위 폐기물을 지하 암반 내에 처분하였을 경우 예상되는 온도를 추정하였다.

본 연구의 목적은 설계된 처분용기와 완충재에서의 열전달 해석을 통하여 처분동굴 및 처분공(borehole)의 간격 등이 적합한 지를 검토하는 것이다. 이를 위하여 선정된 처분장의 설계규격은 처분동굴의 간격이 40m, 처분공의 간격이 6m인 경우이다. 이와 같은 규격의 처분장에 대하여 본 연구에서는 처분용기내의 핵연료에서 발생하는 열에 의한 주위 벤토나이트 버퍼, 처분동굴 및 암반에서의 열전달 해석을 수행하여 처분시점부터 약 1,000년 동안 처분장 전체의 온도변화를 예측하였다.

2. 문제의 구성

개념설계에 의하면 국내 고준위 폐기물 처분 개념은 사용후 핵연료 4 다발을 처분용기 1개에 넣고, 처분공들을 일정한 간격으로 지하 500 m의 처분동굴 내에 배열하도록 되어 있다. 또 처분동굴들도 일정한 간격을 유지하고 있다. 처분 시스템 내에서의 열전달을 해석하기 위해서 처분공 및 처분용기도 원통형의 4 대칭 형상과 이 4 모델 내에 한 개의 핵연료 다발 1개를 설정하였다. 전체 처분장 내의 처분공들은 40m×6m 직사각형 규격의 무한 셀의 평면배열로 근사 시켰다. 각 처분공들은 4 대칭 형상이기 때문에 전체 복합구조물에 대한 열전달 해석을 수행하는 대신에 20m×3m의 직사각형 평면 셀을 한 개의 단위 모델로 하는 그림 1과 같은 열전달 모델을 설정하였다.

고준위 폐기물의 열 발생에 의한 처분 시스템에서의 온도 변화를 예측하기 위해서 열전달 해석 모델의 수직 경계는 처분공 위로는 지표면까지 지하로는 처분공에서 지하 500m까지를 설정하였다. 열전달은 보수적으로 지하수의 이동에 의한 대류는 무시하고 전도에 의해서만 일어난다고 가정하였다. 열전달 해석을 위해 각 수직 대칭면에서는 대칭 열 경계 조건(절연 조건)을 설정하였다[4]. 지표면은 항상 일정한 온도(20℃)로 유지된다고 가정하였으며, 지표면 밑 암반의 온도는 지표면에서부터 지하 100m 당 3℃씩 증가한다고 가정하였다.

사용후 핵연료 다발의 열 발생률은 가압경수로(PWR45) 핵연료 다발의 경우 열 발생 후 40년째 되는 해에 처분용기에 밀봉된다고 하여 $Q=14,548.7t^{0.76204}$ ($t=year$)Watt/tHM로 가정하였다. 고준위 폐기물이 처분되는 초기에 처분용기는 내부에 밀봉되어 있는 사용 후 핵연료 다발의 열 발생에 의하여 거의 일정한 온도를 유지하고 있고 처분장의 지하 암반도 일정 온도상태를 유지하고 있다. 고준위 폐기물이 처분된 후 시간이 경과에 따른 처분용기를 포함한 복합 구조시스템의 열전달에 의한 온도 변화를 예측하기 위해서는 처분용기의 초기 온도분포를 알아야 한다. 따라서 내부에 밀봉된 사용 후 핵연료의 열 발생에 의한 처분용기의 처분초기 온도분포를 구하여 계산에 이용하였다.

열전달 해석을 위해서 필요한 복합 열전달 구조 모델 시스템을 구성하는 각 물질들의 열적 물질 상수 값들은 표 1과 같다.

표 1. 열전달 해석을 위한 구성 재료들의 물성치

Material Properties	Cast iron (Insert)	Copper (Outer shell)	Compacted bentonite (Buffer)	Mixed bentonite (Backfill)	Granitic rock	Spent fuel
Mass density ρ (kg/m^3)	8,000	8,900	1,800	2,100	2,660	2,000
Thermal conductivity $k(W/m^{\circ}C)$	52	386	1.3	2.6	3.541	0.135
Specific heat C ($J/kg^{\circ}C$)	504	383	1,000	870.5	1,212	2,640

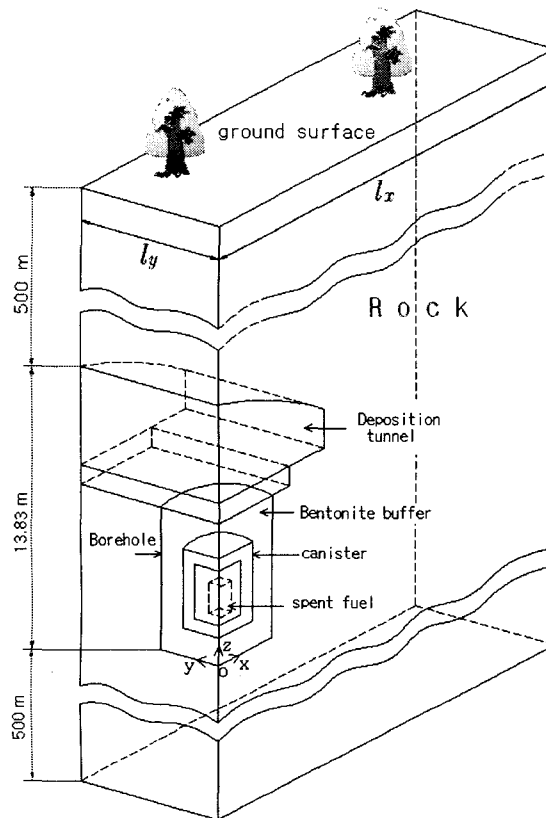


그림 1. 복합구조 열전달 해석을 위한 모델.

3. 유한 요소 해석

그림 1의 복합구조물에 대한 열전달 문제는 해석해를 구하기 어렵다. 수치적 방법을 이용하기 위하여 상용의 개발된 프로그램(NISA)을 이용하였다. NISA 프로그램은 유한 요소법을 이용하고 있으며, 이 프로그램을 이용하여 3차원 열전달 해석을 위해서 8개 절점의 육면체 요소(eight node hexahedron element)를 이용하여 모델을 만들었다. 처분용기와 처분용기 주위의 벤토나이트 버퍼 등은 세밀하게 유한요소 망을 구성하였다. 열전달 해석에 이용된 총 유한요소 개수 및 절점의 개수는 표 2와 같다.

표 2. 유한요소 모델의 총 유한요소와 절점의 개수

Parameter	개수
Element	47,120 EA
Node	52,320 EA

4. 해석결과 및 분석

고준위 폐기물이 처분된 후 처분용기 내의 사용후 핵연료는 서서히 열 발생률이 감소하면서 계속해서 열을 발생한다. 열 발생 시점부터 40년 후 처분용기 내의 초기의 온도 분포는 t=40년일 때의 열 발생률에 의한 온도분포이다. 이때의 최고 온도는 내부 핵연료다발 내에서 79.41℃이다. 이 후의 열 발생률은 시간에 따라 서서히 감소하므로 이 열 발생률에 의한 처분용기 및 주위 암반내의 온도 분포는 시간에 따라서 변화하게 된다.

복합 구조 시스템에 대한 과도 열전도해석을 수행한 결과는 그림 2와 그림 3에 표시 되어있다. 그림 2는 처분 후 1년 동안의 온도변화이며, 그림 3은 처분용기가 처분된 후 1년부터 1,000년까지의 온도변화이다. 그림 2와 그림 3을 살펴보면 처분용기 내 핵연료 다발의 온도는 처분 초기 급격히 증가하기 시작하여 처분 후 4~5년 사이에 최고 온도(130.5℃)에 도달한 후 서서히 감소한다. 또한 처분용기 외곽 표면의 온도도 처분 초기 급격히 증가하기 시작하여 처분 후 15~16년 사이에 최고 온도(87.5℃)에 도달한 후 서서히 감소한다. 처분 용기 및 벤토나이트 버퍼와 처분 터널 내 혼합벤토나이트의 온도도 처분 초기 증가했다가 서서히 감소한다. 지표면과 처분공 지하 500m 근처의 온도는 수 백년 동안 거의 일정하게 유지되다가 거의 500년을 기점으로 그 이후부터 약간 증가한다.

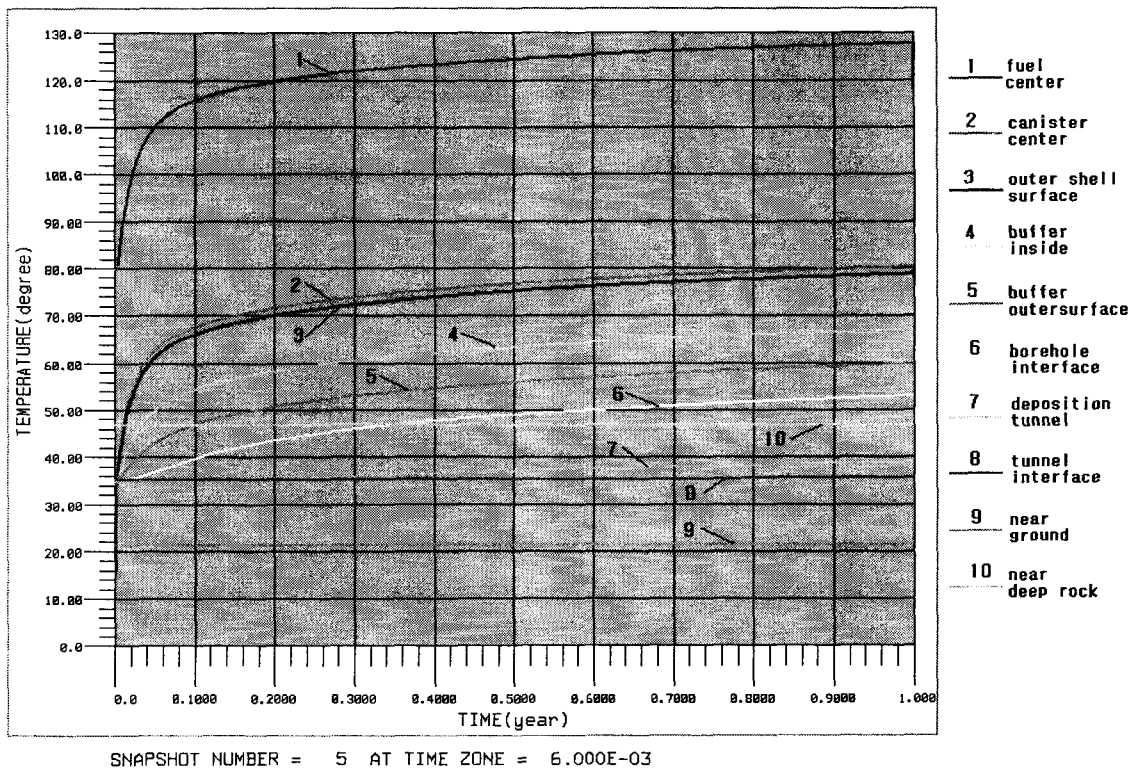


그림 2. 처분 직후 1년 동안의 온도 변화.

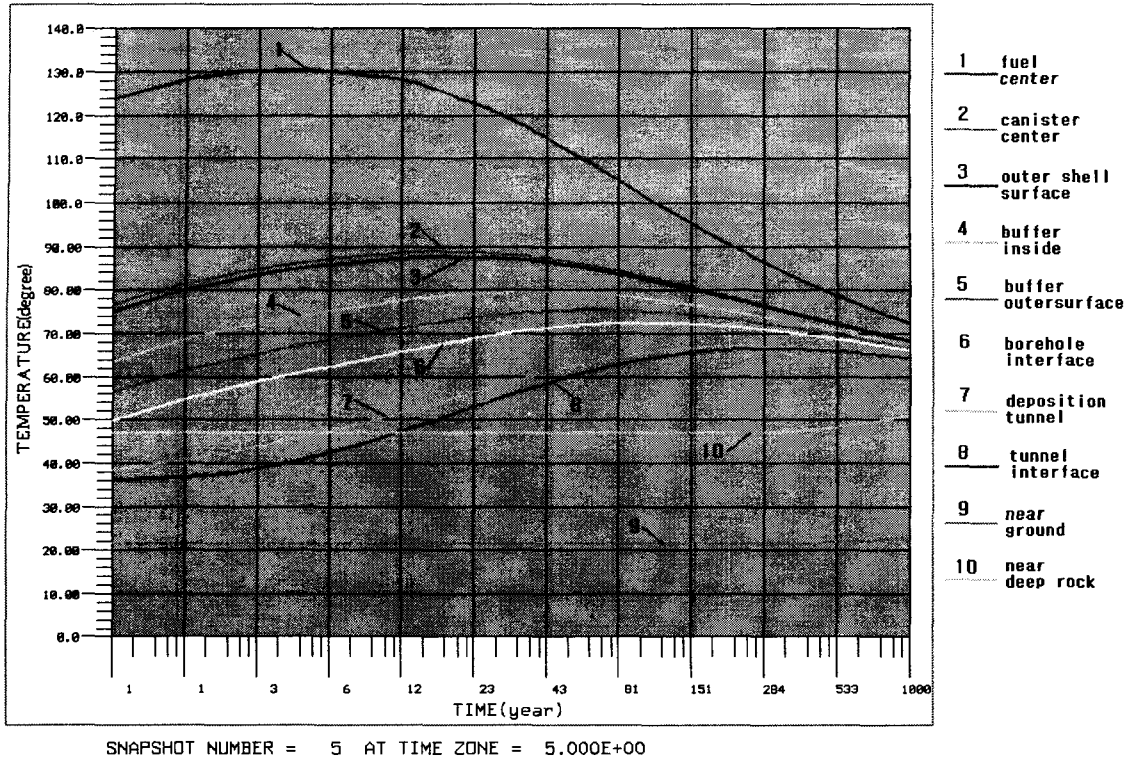


그림 3. 처분 후 1년부터 1,000년 사이의 온도 변화.

5. 결 론

처분용기 개념설계의 일부분으로 지하 500 m 암반 내 처분공에 4개의 PWR 사용후 핵연료 다발을 처분하였을 경우에 대해 현재까지 진행된 처분개념을 적용하여 이에 대한 열전달을 해석하였다. 해석에 이용된 프로그램은 유한요소법을 이용하고 있는 NISA 프로그램이었다.

처분용기 내 핵연료의 열 발생에 의한 「처분용기 + 벤토나이트 버퍼 + 처분터널 + 암반」 복합 시스템의 온도분포에 대한 열전달 해석결과를 분석하면 시간이 지남에 따라 핵연료 다발의 열 발생은 점점 감소하지만 핵연료 다발 주위를 감싸고 있는 내부 주철 삽입물, 압축 벤토나이트 버퍼, 처분터널 내를 채우고 있는 혼합 벤토나이트, 주위 암반들의 온도는 처분 초기 어느 일정한 기간 동안에는 꾸준히 증가하다가 그 이후부터는 서서히 감소함을 알 수 있다.

처분터널 사이의 간격이 40m 처분공 사이의 간격이 6m인 경우 처분용기 외곽 셸 표면의 온도는 15~16년에 도달할 때 최대 87.5°C 까지 증가하다가 서서히 감소함을 알 수 있다. 이는 외곽 셸 표면의 최대 허용온도 93°C를 초과하지 않기 때문에 처분터널 사이의 간격이 40m 처분공의 간격이 6m인 경우 처분용기의 안전성에 문제가 없었다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력중장기 연구개발사업의 일환으로 수행되었음.

참 고 문 헌

1. JNC, H12 Project to Establish Technical Basis for HLW Disposal in Japan, Japan Nuclear Cycle Development Institute, (1999).

2. 최종원 등 "Reference Spent Fuel and Its Characteristics for a Deep Geological Repository Concept Development, J. KNS, Vol.31. No.6 (Dec. 1999).
3. Pusch, R., O. Karnland, H. Hoekmark, T. Sanden, and L. Borgesson, Final Report of the Rock Sealing Project-Sealing Properties and Longevity of Smectitic Clay Grouts, Stripa Project Technical Report 91-30 (1001).
4. Thunvik, R. and Carol Braester, Heat Propagation from a Radioactive Waste Repository. SKB 91 Reference Canister, SKB TR 91-01 (1991).