

## Thermal Analysis of a Retrievable CANDU Spent Fuel Disposal Tunnel

### 회수 가능 CANDU 사용후핵연료 처분터널에 대한 열 해석

**Jeong-Hun Cha**, Jong-Youl Lee\*, Heui-Joo Choi\*, Dong-Keun Cho\*,  
Sang-Nyung Kim, Bum-Soo Youn and Joon-Suk Ji

Kyunghee University, 1, Seocheon-dong, Giheung-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do

\*Korea Atomic Energy Research Institute, Daedeokdaero 1045, Yuseong-gu, Daejeon

[chamanse@nate.com](mailto:chamanse@nate.com)

차정훈, 이종열\*, 최희주\*, 조동건\*, 김상녕, 윤범수, 지준석

경희대학교, 경기도 용인시 기흥구 서천동1번지

\*한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 1045

(Received March 21, 2008 / Revised April 25, 2008 / Approved May 13, 2008)

#### Abstract

Thermal assessment of a new CANDU spent fuel disposal system, which improves the retrievability of the spent fuel and enhances the densification factor compared with the Korean Reference disposal System, is carried out in this study. The canisters for CANDU spent fuels are stored for long term and cooled by natural convection in the proposed disposal system for the retrievability. The steady state thermal analyses for proposed CANDU disposal system are carried out with the ANSYS 10.0 CFX code. The thermal analyses are performed through two steps. At the first step, the sensitivity of the disposal tunnel spacing is analysed. The differences of maximum temperatures by several tunnel spacings are calculated at three points in the disposal tunnel. The result shows that the differences of the temperature at the three points are almost negligible because 99% of the decay heat is removed by natural convection. At the second procedure, 60 m tunnel spacing with a ventilation system instead of natural convection is considered. The result is applied to the calculation of the canister surface temperature in disposal tunnel as boundary conditions. Consequently, the average and the maximum surface temperature of disposal canisters are 79.9°C and 119°C, respectively. The inner maximum temperature of a basket in the disposal canister is calculated as 140.9°C. The maximum temperature of the basket meets the thermal requirement for the CANDU spent fuel cladding.

---

**Key words** : Radioactive waste management, CANDU Spent nuclear fuel, Long-term dry storage, Retrievability, Natural convection, Disposal Canister

## 요 약

본 연구에서는 사용후핵연료 회수성과 처분밀도를 향상시킨 새로운 CANDU 사용후핵연료 처분시스템의 열해석을 수행하였다. 제안된 CANDU 사용후핵연료 처분방식에서는 사용후핵연료의 회수성을 향상시키기 위해 일정 기간 동안 터널에 자연대류를 이용하여 저장하며, 처분밀도 향상을 위해 개선된 CANDU 사용후핵연료 처분용기를 이용하고 있다. 제안된 CANDU 사용후핵연료 처분방식의 열적 안전성을 검토하고자 ANSYS 10.0 CFX 코드를 사용하여 시스템 전체의 정상상태 열 해석을 2단계로 나누어 수행하였다. 1단계에서는 터널간격이 처분터널 내부 온도에 미치는 영향을 분석하기 위해 터널 간격에 따른 처분터널 내벽온도 변화를 계산하였다. 계산 결과 99%의 붕괴열이 대류에 의해 냉각되는 것을 확인하였고, 이로 인해 터널 간격은 처분터널 내부 온도에 거의 영향을 주지 않았다. 2단계 계산에서는 터널간격 60 m에서 환기 설비를 고려한 처분터널의 내벽온도를 계산하였고, 이 결과는 처분터널 내부 처분용기의 표면온도를 구하기 위해 사용되었다. 계산결과, 처분용기의 표면온도는 최대 119℃, 평균 79.9℃로 계산되었다. 처분용기 최대온도에 따른 처분용기 내부 바스켓 피복재 최대온도는 140.9℃로 계산하였으며, 이는 피복재 열적 특성을 고려하였을 때 충분한 열적 안전성을 가지고 있다고 판단되었다.

**중심단어** : 심지층처분, CANDU 사용후핵연료, 장기건식저장, 회수성, 환기, 처분용기

## I. 서론

원자력발전으로 인하여 필연적으로 발생하는 사용후핵연료의 심지층처분은 현재와 미래의 인간과 자연을 보호하는 가장 안전한 방법으로 간주되고 있다. 우리나라의 경우 사용후핵연료 관리에 관한 정책이 결정된 바가 아직 없으나, 한국원자력연구원에서는 사용후핵연료를 안전하게 심지층에 처분하고자 1997년부터 10년간 수행된 연구를 통하여 국내 결정질 암반(화강암) 특성을 대상으로 사용후핵연료의 직접 처분을 위한 한국형기준처분시스템을 개발하였다[1].

한국형처분시스템은 처분터널에 처분용기를 거치한 후 즉시 완충재 및 뒷채움재를 설치하는 개념으로, 완충재의 열적조건(100℃ 이하)으로 인하여 처분밀도(Densification factor)를 높이는 데 한계가 있다. 또한, 최근 각국은 사회적 수용성을 높이기 위하여 처분된 사용후핵연료를 회수하는 것이 가능하도록 개념을 개선하고 있는 추세에 따라[2], 이미 개발된 한국형 고준위폐기물 처분시스템의 처분밀도를 높이고 회수가 용이하도록 개량해야 할 필요가 있다.

CANDU 사용후핵연료 처분시스템에 위와 같은 개념을 적용시켜 개량하기 위해서는 여러 종류의 기초 자료가 필요하다. 본 연구는 ANSYS 10.0 CFX 코드를 이용하여, CANDU 사용후핵연료 처분시스템 개념설계를 위한 열 해석 자료를 생산하기 위해 수행되었다. CANDU 사용후핵연료 처분용기의 배열은 CARE (CAvern Retrieval) 개념[2] 및 현재 CANDU 사용후핵연료를 중간저장하기 위해 개발 중인 MACSTOR-400(건식저장시설)의 배열[3]을 참조하였으며, 기본적 처분장 구조 및 터널 배열은 한국형기준처분시스템에 바탕을 두고 있다. 본 연구의 목적은 개선된 CANDU 사용후핵연료 처분시스템 개념 도출을 위하여 자연대류 냉각시스템이 처분장 온도구배에 미치는 영향을 분석하고, 처분밀도 향상에 따른 열원 밀집이 사용후핵연료의 열적 건전성에 미치는 영향을 알아보려고 하는 것이다.

## II. 시스템 개요

### 가. CANDU 사용후핵연료 처분시스템

본 연구의 열 해석 대상인 CANDU 사용후핵연료

처분시스템의 처분터널은 폭 14 m, 높이 15 m, 길이 510 m로 이루어져 있으며, 터널 입구에서 30 m까지의 공간은 작업공간으로 활용된다. Figure 1, 2는 각각 처분터널 전체형상과 처분터널 내부 형상을 보여주고 있다. 한 개의 터널은 320개의 CANDU 사용후핵연료 처분용기를 수용할 수 있으며, 이는 CANDU 사용후핵연료 134,400다발에 해당된다. 총 9개의 처분터널은 국내 CANDU 원전 4기의 추정 운전기간(1호기 : 50년, 2,3,4호기 : 60년)동안 예상되는 사용후핵연료 1,190,000다발을 모두 수용할 수 있다. 제안된 CANDU 사용후핵연료 처분시스템의 가장 큰 특징은 처분터널에 처분용기를 거치하고 일정기간 동안 저장한 후 완충재 및 뒷채움재를 설치하는 개념으로, 저장기간 동안에는 자연대류에 의한 냉각시스템이 필요하다. 이를 위하여 터널입구 하부에 직사각형(0.5 m(H) × 5.8 m(W)) 공기 입구 2개와 터널 입구 상부에 직경 3 m의 공기 출구 1개를 가정하였다. Figure 3에서 볼 수 있듯이 처분용기 바닥은 0.5 m 높이의 대류 열전달 효율이 높은 처분용기 지지대가 있고, 처분터널의 규모는 처분용기의 배치 및 취급을 위한 천정 크레인의 작업영역을 고려하여 설정

하였다.

처분터널 내부의 자연대류는 처분용기 표면과 외부공기와의 온도차에 의해 발생하는 부력 효과에 의해 이루어진다. 이는 건식저장법의 가장 큰 장점인 피동형 냉각 개념이며, 이러한 냉각시스템으로 사용후핵연료 건전성 유지를 위한 최대 허용 핵연료 피복관 온도를 만족해야 한다. 본 연구에서는 NUREG-1536(Standard Review Plan for Dry Cask Storage Systems)에 기술되어 있는 규제 피복재 온도 340℃를 최대 허용 피복관 온도로 설정하였다.

#### 나. CANDU 사용후핵연료 처분용기

처분용기는 각 터널 당 320개(횡 4개 × 열 80개)가 열 간격 6 m 횡 간격 3 m로 배치된다. CANDU 사용후핵연료 처분용기 내부에는 사용후핵연료 60다발을 수용할 수 있는 바스켓이 7단으로 적재된다. 각 처분용기는 Figure 4 및 Table 1과 같이 방사성 핵종 유출을 방지하고, 심부지하에서의 구조적 건전성 및 내부 식성을 유지하기 위하여 아래와 같이 이중구조로 구성되어 있으며, 세부제원은 Figure 4, 5와 같다.

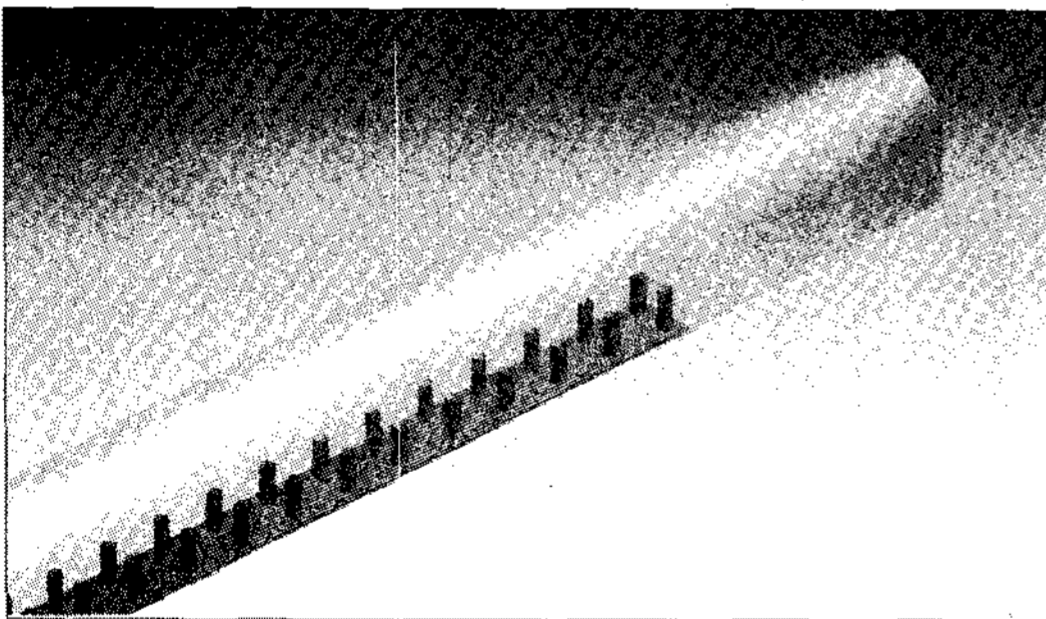


Fig. 1. Inner shape of the CANDU disposal tunnel.

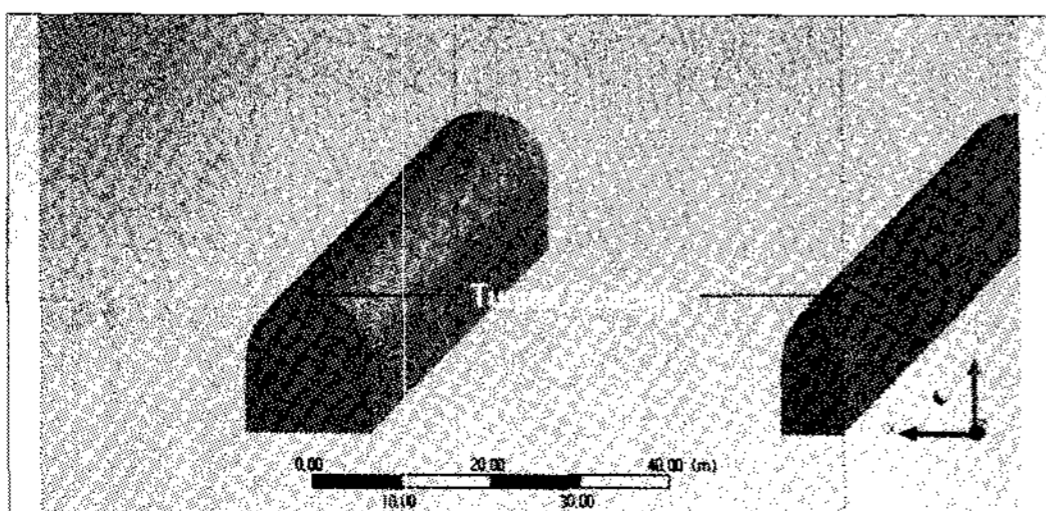


Fig. 2. Arrangement of disposal tunnels.

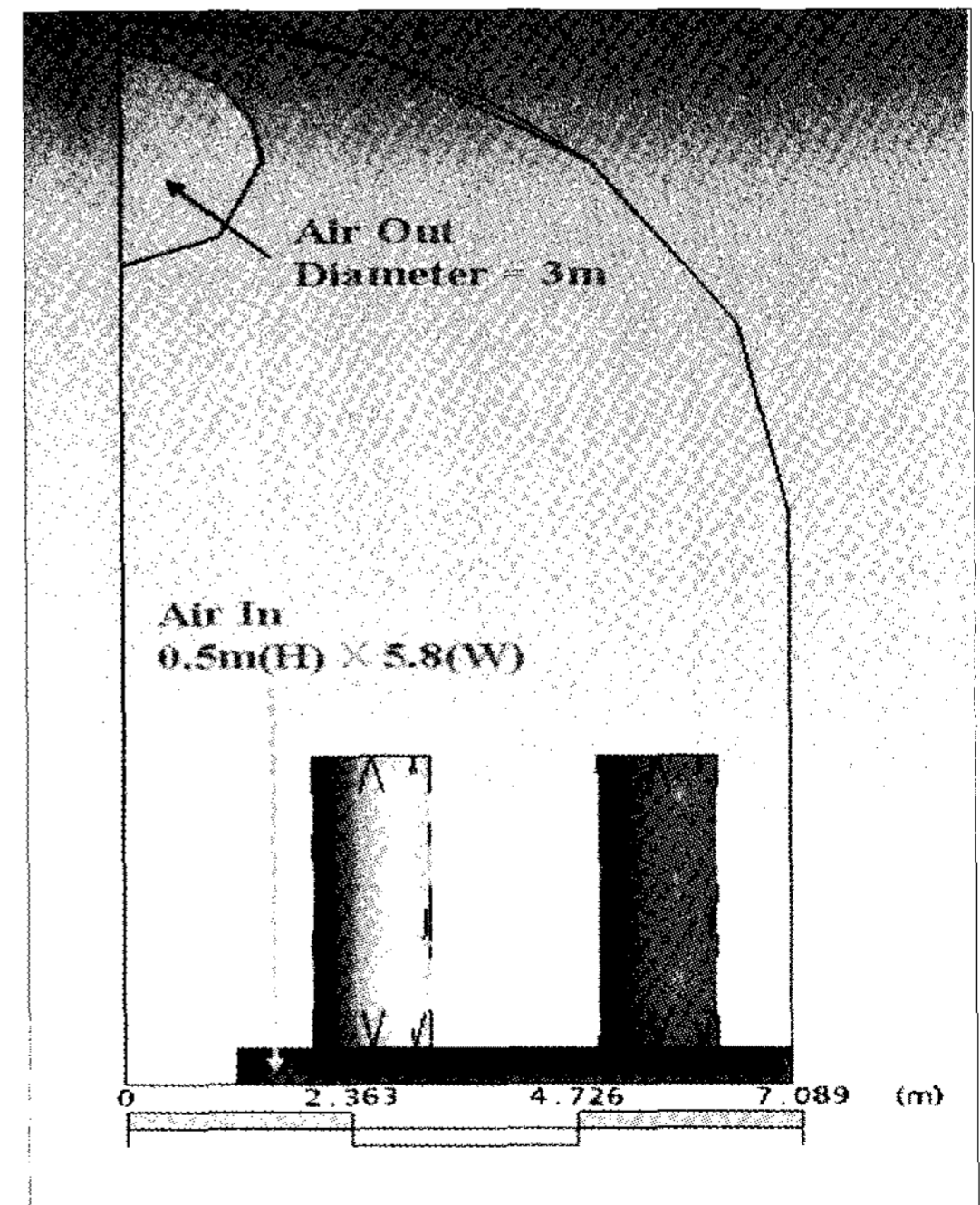


Fig. 3. Front-view of the disposal tunnel.

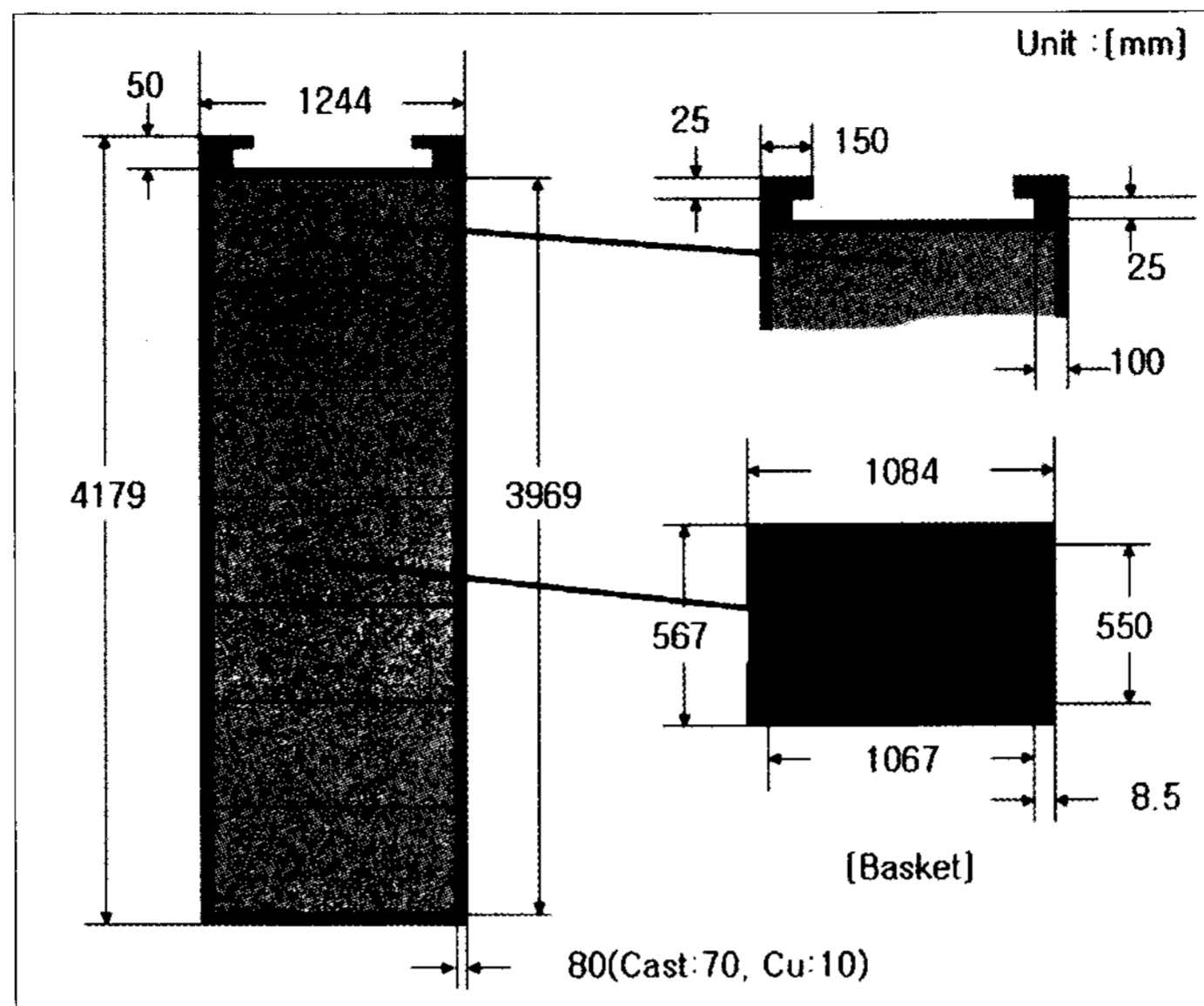


Fig. 4. Schematic of the disposal canister and the basket.

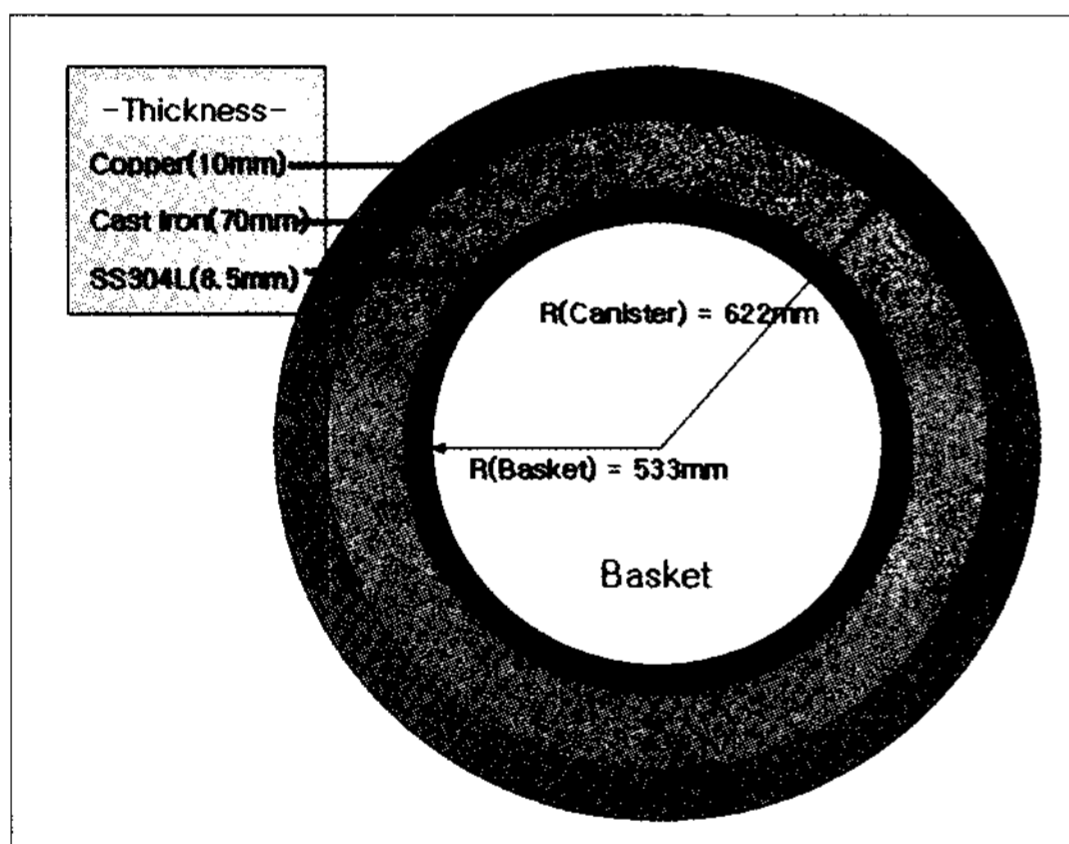


Fig. 5. Cross-Section of the disposal canister

다. 기준 CANDU 사용후핵연료

본 연구에서는 대상으로 하고 있는 CANDU 사용후핵연료의 냉각기간은 30년으로 가정하였다. 이의 붕괴열은 아래와 같은 식(1)을 이용하여 계산하였으며, 그 결과 30년 냉각된 기준 사용후핵연료의 붕괴열은 각 CANDU 다발 당 약 3 W로 제원을 Table 2에 정리하였다[3].

$$P(t) = 1524.68 [W \cdot \text{Year}/\text{MTU}] \times t[\text{Years}]^{-0.67603}, 30 \leq t \leq 1,000,000\text{yr} \quad (1)$$

$$Q(t) = P(t) \times m[\text{MTU}] [W],$$

여기서  $m$ 은 CANDU 사용후핵연료 다발의 초기 우라늄 질량이며,  $t$ 는 CANDU 사용후핵연료 냉각 기간,  $P(t)$ 는  $t$  시간에 대한 우라늄 단위 질량[MTU] 당 붕괴열량[W],  $Q(t)$ 는  $t$  시간에 대한 CANDU 사용후핵연료 다발 당 붕괴열량[W] 이다.

III. 열해석을 위한 계산수행 절차 및 초기조건

제안된 CANDU 사용후핵연료 처분시스템의 열해석을 수행하기 위해 시스템을 모델링하기 위해서는 다음과 같은 처분시스템 내의 크고 작은 구성요소들, 예를 들면 지하 1000 m 압반, 길이 510 m의 처분터널, 320개의 처분용기, 약 0.5 m 길이의 CANDU 사용후핵연료 등등, 을 고려해야 한다. 또

Table 1. Properties of the disposal canister

구분	값	
높이	4130 [mm]	
직경	1244 [mm]	
내부바스켓 총 열량	180 [w]	30년 냉각 60 다발
처분용기 총 열량	1260 [w]	7개 바스켓 420 다발

Table 2. Properties of the standard CANDU spent fuel

항 목	값
초기농축도	0.711 wt. %
방출연소도	7.5 GWD/MTU
우라늄량	19.1 kg/bundle
30년 후 붕괴열	약 3 W/bundle

한, 건식저장시설의 특성상 복사, 전도, 대류가 시스템 전체에 걸쳐 어느 하나도 지배적이지 못하다는 특징 때문에 시스템 전체를 한 번에 코드로 모사한다는 것은 매우 불편한 일이다. 따라서 불편함과 시간소모를 덜기 위해 본 연구에서는 처분터널 간격에 대한 처분터널 내벽온도를 구하기 위한 1단계 계산과 처분터널 내벽온도에 대한 CANDU 처분용기 표면온도를 구하기 위한 2단계 계산을 수행하고 각 단계 결과에 보수성을 추가하였다. 또한 처분시스템의 운영 중 열적 안전성을 평가하기 위해서는 과도상태 열 해석을 수행하여야 하나 계산 수행에 많은 시간이 필요하다. 본 연구에서는 기존의 한국형 심지층 처분시스템[3]을 기반으로 적용된 새로운 처분시스템의 열적 안전성 분석을 첫 번째 목표로 하고 있어, 가장 보수적인 결과를 위해 내부열원을 저장초기 30년 냉각된 사용후핵연료의 붕괴열을 기준으로 하여 고정하고 계산을 수행하였다. 사용후핵연료의 붕괴열량은 시간에 따라 감소하므로, 초기의 붕괴열량이 가장 높다. 따라서, 이때의 정상상태 온도는 처분장 운영기간동안 가장 높은 온도라고 가정할 수 있다. 실제로 기존의 처분시스템에 대한 과도상태 열 해석 결과를 분석하면, 일정 기간 동안은 암반의 온도가 계속 상승하고, 그 이후부터는 온도가 하강한다. 이때, 최고 온도는 저장초기의 붕괴열을 이용한 정상상태 온도분석 결과보다 낮은 것을 볼 수 있다. 따라서 저장초기 사용후핵연료 붕괴열량에 대한 정상상태 온도 계산 결과를 이용한 처분시스템 열적 안전성 분석은 보수성을 추가하였

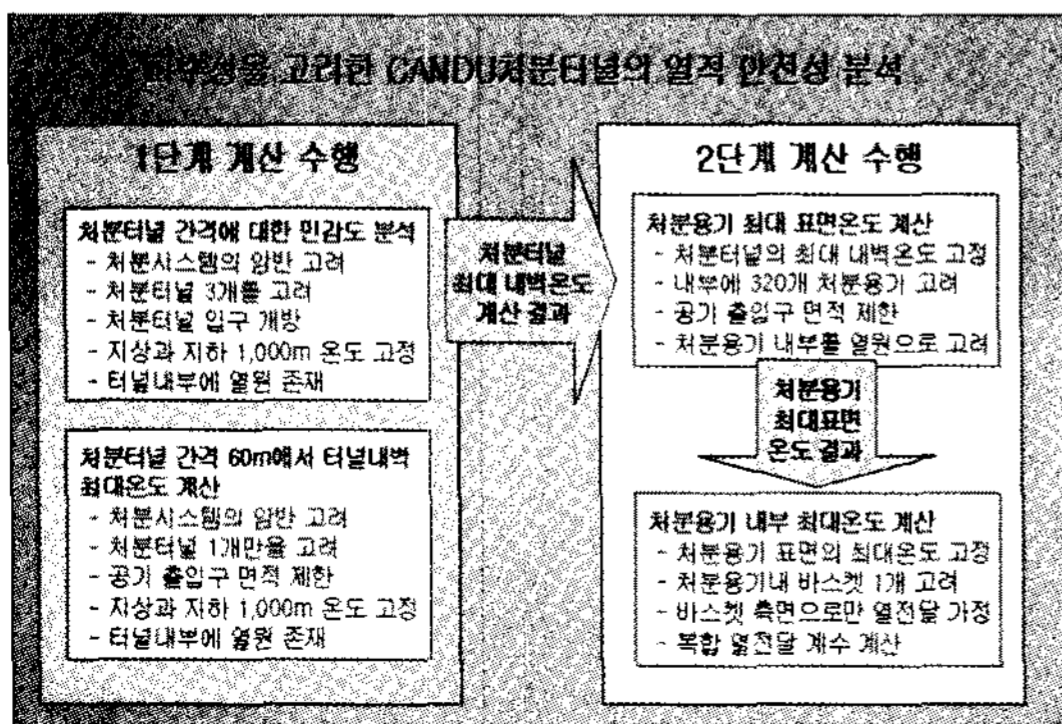


Fig. 6. Procedure scheme for thermal safety analysis

다고 할 수 있다.

**가. 계산수행 절차 개요**

전체적인 계산 수행절차는 Figure 6과 같다. 계산 수행 1단계에서는 내부열원에 대한 지상부터 지하 1,000 m까지의 전체 시스템에 대한 온도 계산을 수행하였다. 첫 번째로, Figure 7과 같이 터널입구를 개방한 상태에서 터널 간격에 대한 처분터널 내벽온도의 민감도를 분석하고, 이후 터널간격 60 m 를 기준으로 Figure 8과 같이 공기 출입구 면적을 제한한 후 처분터널 내벽의 최대온도를 계산하였다. 계산 수행 2단계에서는 1단계의 60 m 터널간격 최대내벽온도 결과를 이용하였다. Figure 9와 같이 2단계 계산수행에서는 처분터널의 내벽온도를 1단계 계산수행으로 얻은 최대온도로 고정하여 처분시스템에서 암반을 제외한 처분용기표면의 온도를 계산하고, 이에 대한 처분용기 내부 최대 온도 계산을 수행하였다.

**나. 계산수행 1단계 초기설정**

계산 수행 1단계는 처분터널의 간격에 대한 CANDU 사용후핵연료 처분시스템의 열적 민감도를

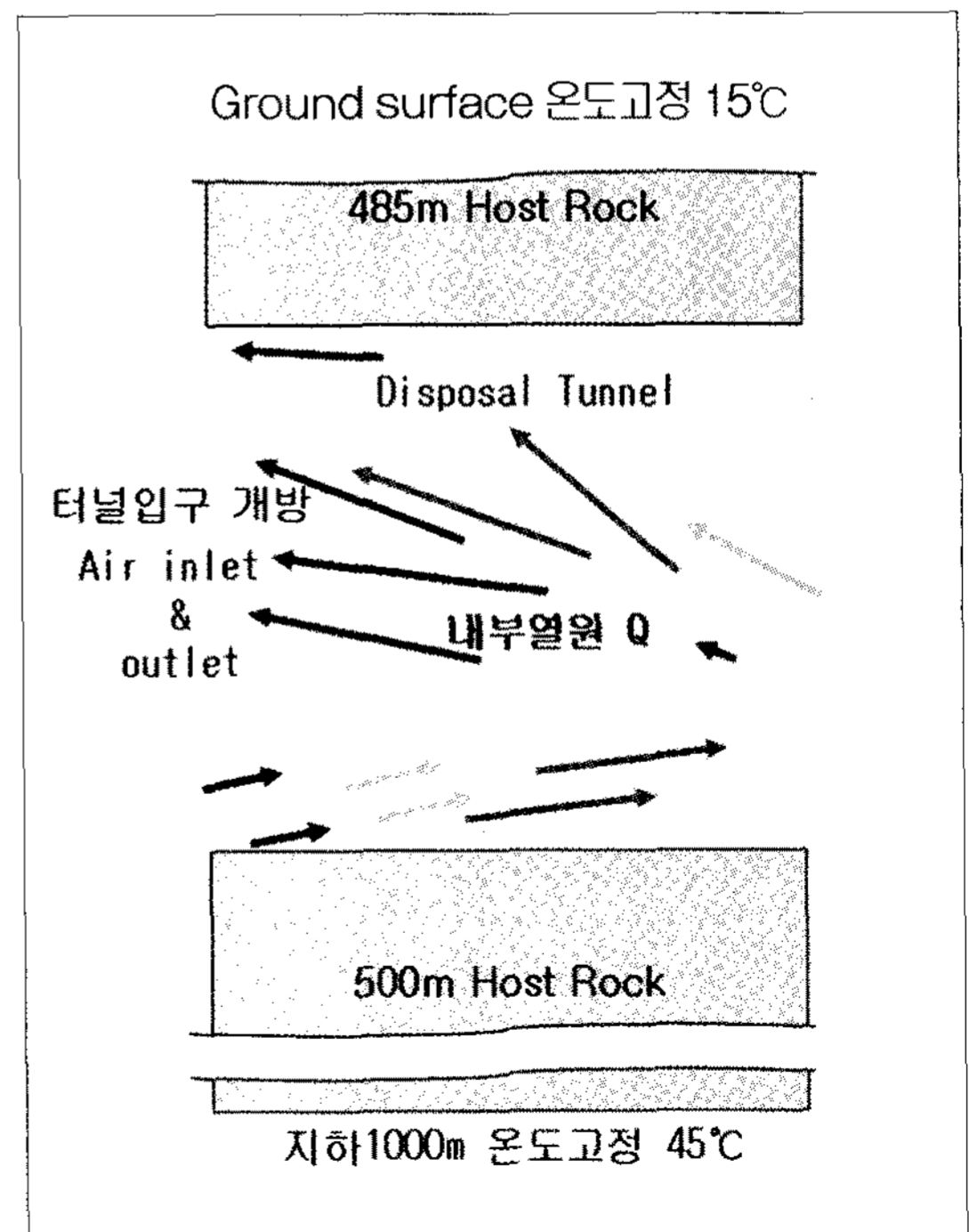


Fig. 7. A model for the calculation of tunnel spacing sensitivity

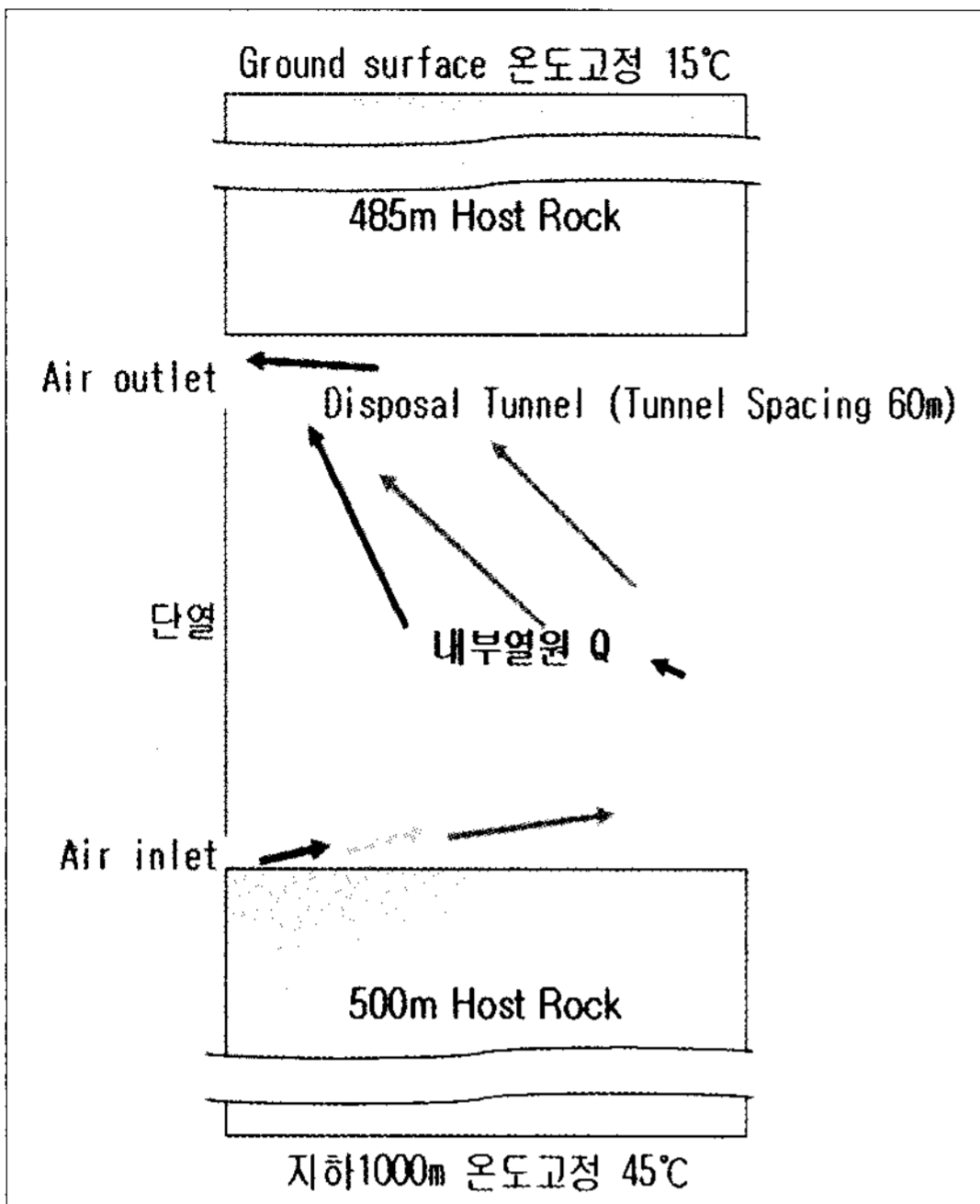


Fig. 8. A model for the calculation of tunnel wall maximum temperature

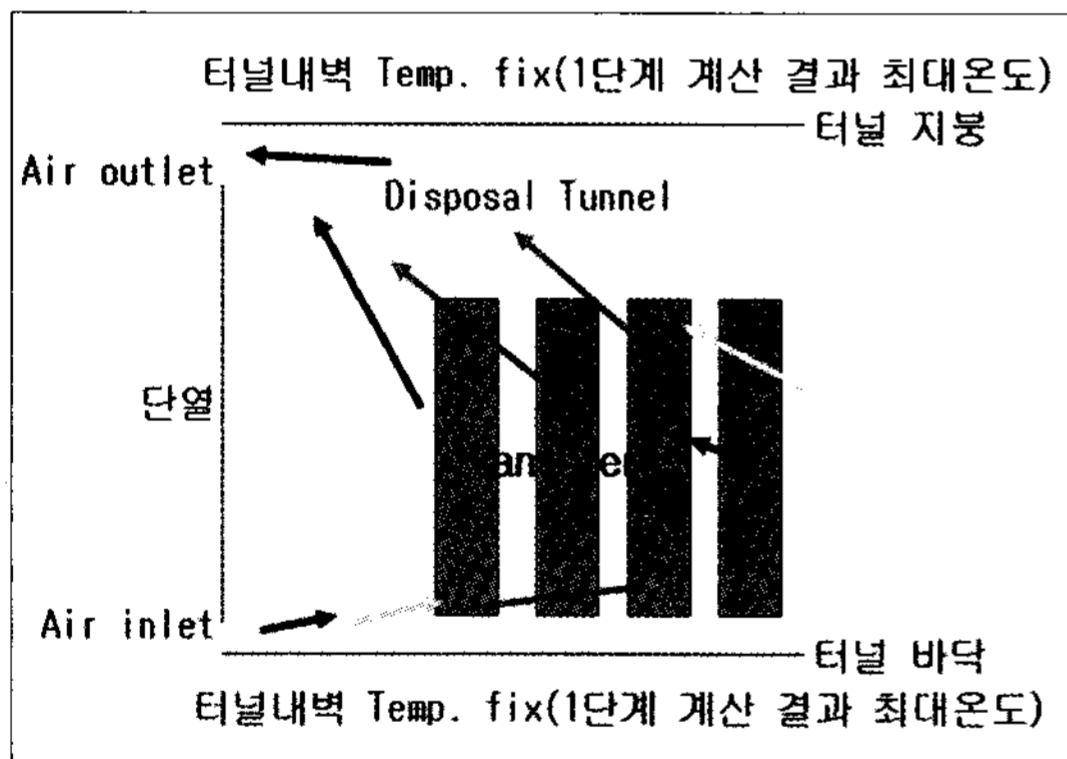


Fig. 9. A model for the maximum surface temperature calculation of disposal canister

분석하기 위한 것이다. CANDU 처분시스템의 구조를 살펴보면 복사는 표면에서 극히 짧은 거리내에서 흡수되거나 방사되기 때문에 처분용기에서 처분터널, 처분터널 사이의 암반은 전도와 대류가 지배적인 열전달 현상이다. 따라서 같은 내부 열원을 가진 터널에 대해 터널간격을 30 m에서 150 m까지 변화시켜 대류와 전도에 의해 형성되는 처분터널의 내벽온도를 계산하고 비교하여 터널간격에 대한 열적 민감도를 구하고자 하였다. 1단계에서 계산된 처분터널

의 최대 내벽온도를 2단계 계산수행 과정에 적용하여 2단계 계산결과에 보수성을 추가하였다. 계산 수행 1단계 모델에 대한 정상상태에서의 에너지 균형은 식(2)와 같다.

$$Q_{in} - Q_{out} + Q_{gen} = 0 \dots\dots\dots (2)$$

은 시스템에 전달된 순 열전달량이며, 은 내부열원이다. 위 식은 아래와 같이 대류에 의한 열전달, 전도에 의한 열전달을 이용하여 아래와 같이 다시 쓸 수 있다.

$$Q_{gen} - Q_{convection} - Q_{conduction} = 0 \dots\dots\dots (3)$$

터널 간격에 대한 처분터널 내벽의 온도를 1차원 정상상태로 나타내면 다음 식(4)와 같다.

$$Q_{gen} = 0 \dots\dots\dots (4)$$

$$Q_{conduction} = Q_{convection} - k \frac{dT}{dX} = h(T - T_{tunnel})$$

여기서 h는 처분터널 내부 대류 열전달 계수, k는 암반의 열전도 계수, T는 터널 내벽온도, T<sub>tunnel</sub>은 터널 내부 공기 온도, dX는 2개 처분터널 거리 1/2 m이다.

**다. 계산수행 2단계 초기설정**

계산 수행 2단계는 단일 처분터널에 대해 처분터널 내벽과 처분용기 표면간의 대류에 의한 열전달을 계산하는 과정으로, 공기유로의 면적이 처분터널 내부 온도 상승에 영향을 줄 수 있다고 예상하였다. 이에 1단계 계산결과를 바탕으로 일정 터널 간격에 대해 공기 유로 면적을 적용하여 CANDU 처분터널의 내벽온도를 계산하고 이에 대한 CANDU 처분용기의 표면온도를 계산하였다. 또한, 계산된 CANDU 처분용기의 최대온도를 CANDU 처분용기에 적재된 바스켓 내부의 최대온도를 구하기 위한 초기 설정으로 적용하여 계산결과에 보수성을 추가하였다. 바스켓의 내부온도 구배는 복사 및 대류와 전도가 영향을 받을

것으로 예상하였으며, 바스켓 내부의 복잡한 형상을 모델링하여 코드로 계산하기보다는 기존에 수행된 실험 결과값을 정상상태 복합층에 대한 온도계산식에 적용하여 복사와 대류의 복합 열전달 계수를 도출하고, CANDU 처분용기 최대표면온도에 대한 바스켓 내부 최대온도 계산을 수행하였다.

#### 라. CANDU 사용후핵연료 처분시스템 환경 조건

한국원자력연구원에서 개발된 심지층 사용후핵연료 처분시스템을 바탕으로, CANDU 사용후핵연료 처분터널은 지하 500 m에 위치한다고 가정하였다. 암반의 지열구배는 지표면 온도를 15°C로 고정하고 지하 100 m당 암반온도가 3°C씩 증가한다고 가정하여 지하 1000 m에서의 암반온도를 45°C로 가정하였다[3]. 암반은 일반적인 화강암으로 이에 대한 열전도도 특성은 3.2 W/m·K이며, 열확산율은 1.48 × 10<sup>-6</sup> m<sup>2</sup>/s이다. 일반적으로 암반내의 지하수에 의한 대류현상은 열적 측면에서 보았을 때, 더 낮은 암반 온도 형성에 기여할 수 있다. 하지만 본 연구에서 다루기에는 현상자체가 매우 복잡하고, 보수적인 결과를 위해 고려하지 않았다[4].

#### 마. CANDU 사용후핵연료 냉각 시스템

CANDU 사용후핵연료 처분터널은 각 각 독립된

**Table 3. Wall temperatures of the disposal tunnel according to the tunnel spacing**

터널간격	평균벽면온도 [°C]	온도 (지붕①, 옆면②, 바닥③)[°C]
30 m	36	40.0, 38.8, 37.5
40 m	36	40.4, 38.8, 37.6
90 m	36	39.7, 38.8, 37.5
150 m	35.9	39.6, 38.7, 37.3

**Table 4. Results of temperature estimation for the disposal tunnel with 60 m tunnel spacing.**

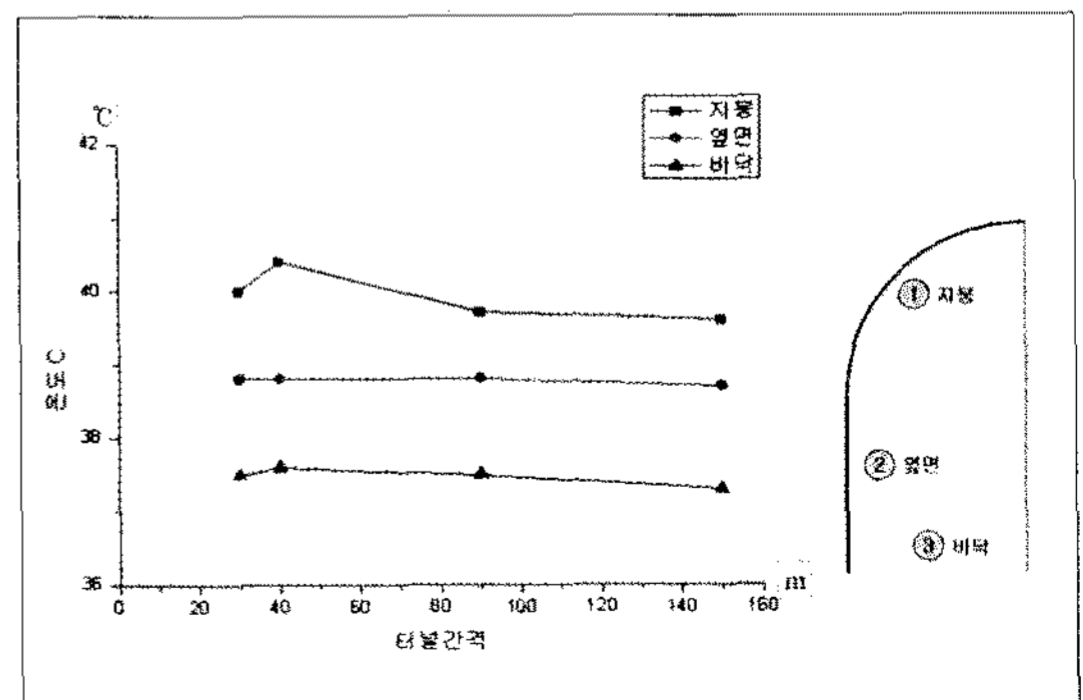
	구분	내용
1. 지붕	Max.	46.8°C
2. 옆면	Max.	44.7°C
3. 바닥	Max.	41.6°C
Tout (공기출구)	Ave.	45.3°C
	Max.	46.2°C
Tin (공기입구)	Ave.	30.3°C
	Max.	39.6°C
터널내부 공기온도	Ave.	40.1°C
공기유량	Ave.	13.1 kg/s
대류냉각 열량		200,935 [W]

냉각계통을 가지고 있으며, 지하 500 m에서 유입되는 공기의 온도가 30°C로 유지되고 있다고 가정하였다. 공기 출입구의 압력 및 처분터널 내부의 압력은 1기압으로 유지되고 있으며 이 후 처분터널 내부의 부력효과로 인한 압력차이로 공기가 유입 및 배출된다고 가정하였다.

#### IV. 계산 결과

##### 가. 처분터널 간격에 대한 민감도 분석

CANDU 사용후핵연료 처분터널 간격에 대한 처분터널 내부 온도를 알아보기 위하여 터널 입구 전체가 개방되어 있어 충분한 냉각유로가 확보된다고 가정한 상태에서 터널 간격 30 m, 40 m, 90 m, 150 m에 대한 처분터널 내벽온도를 계산하였다. 각 터널간격에 대해 내부 총 열에너지는 약 403 kW(3 W × 60다발 × 7바스켓 × 320처분용기)로 설정하였다. Table 3과 Figure 10에서 볼 수 있듯이, 처분터널의 내벽온도와 평균온도는 처분터널의 간격에 상관없이 거의 일정한 값을 보여 주고 있다. 이에 따라 처분터널 간격 60 m에 대해서는 터널 전면 상·하부에 Figure 3과 같은 공기 출입구 면적을 제한하고 처분 터널 내벽온도를 계산하였다. 그 결과 Table 4와 같이 처분터널 내부의 총 붕괴열량(201,600 W)의 약 99%가 대류효과에 의해 냉각되었다. 또한, 공기 출입구 면적으로 터널 입구전체를 이용할 때보다 공기 출입구 면적이 약 7%로 축소되자 처분터널 내벽의 온도가 약 6°C 정도 상승 하였다.



**Fig. 10. Wall temperature graphs of the disposal tunnel according to the tunnel spacing**

### 나. 처분용기 표면온도 및 처분용기 내부 최대 온도 계산

2단계 계산 수행은 1개의 처분터널 1/2을 모사하였다. 2단계 계산 수행과정에서는 처분터널의 내벽 온도를 1단계 수행에서 계산된 터널간격 60 m 조건에서의 최대내벽온도로 고정하고 이에 대한 처분용기 표면온도를 보수적으로 계산하였다. Table 5는 2단계 계산 수행 결과를 보여주고 있다. 2단계 계산 수행결과 처분용기의 표면온도는 평균 약 80℃에서 최대 약 119℃로 계산되었다. 또한 터널 내벽온도를 최대온도로 고정하여 평균 터널 내부 공기의 온도가 1단계 계산 수행결과보다 약 4℃ 상승하였으며 이에 따라 대류냉각 열량은 증가하였다. 처분용기의 내부 최대온도를 계산하기 위해서 Whiteshell에서 수행된 실험결과를 분석하여 적용하였다[5]. Whiteshell에서 수행된 실험 중 내부열원이 균일하게 분포되어 있는 경우의 결과 값을 정리하여 Table 6에 나타내었다. 이 결과 값을 통하여 내부열원이 클수록 최대온도가 커지고 있음을 알 수 있다.

또한, 공기로 채워진 CANDU 사용후핵연료 다발의 내부열량 변화에 따라 대류 및 복사에 의한 열전달 현상 중 대류가 차지하는 비율이 벽면온도 100℃ ~ 200℃까지는 거의 일정한 것으로 알려져 있다[6]. 또한, Table 6에서 보여주는 Whiteshell 실험결과에서도 내부열원에 따라 복사비중의 차이가 작음을 확인할 수 있었다. 따라서 바스켓 내부의 지배적인 열전달 현상인 복사와 대류의 비중을 일정하다고 가정하고 복합 열전달 계수를 설정하여 바스켓 내부의 최대

**Table 5. The surface temperature of the disposal canister.**

구 분		온도
Tout (공기 출구)	Ave.	46.6℃
	Max.	46.9℃
Tin (공기 입구)	Ave.	30.4℃
	Max.	33.5℃
터널내부 공기 온도	Ave.	44.0℃
공기 유량	Ave.	13.2 kg/s
대류 냉각 열량	219,500 [W]	79.9℃
CANDU 사용후핵연료 처분용기 표면 온도	Ave.	118.6℃
	Max.	

**Table 6. Results of the experiment in Whiteshell laboratory.**

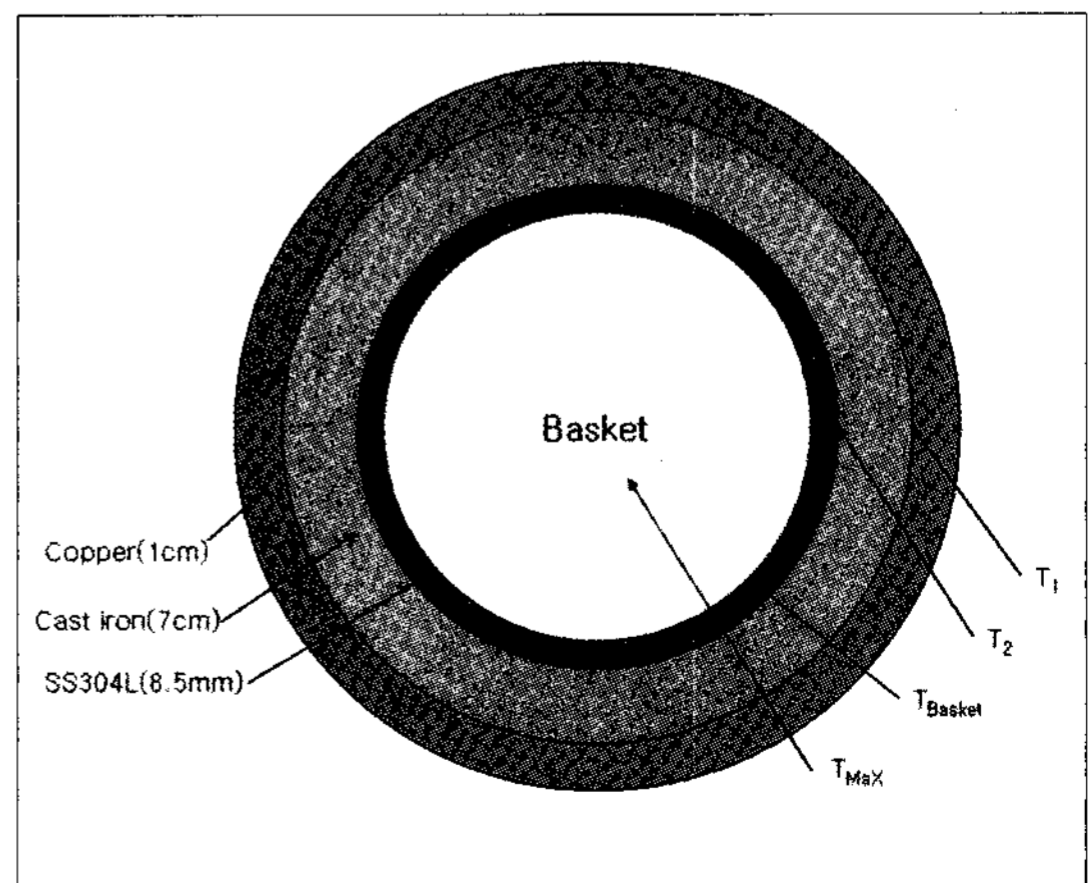
바스켓 내부열원	최대온도차(벽면온도)	복사비중
360 W	43.4℃(116℃)	55.5 %
585 W	56.3℃(154℃)	59 %

온도를 계산하였다. 대상 바스켓은 처분용기 내부 중간 바스켓으로 상하 벽면으로는 열전달이 없고, 1차원 정상상태로 가정하였다. 내부열원 360 W일때 Whiteshell 실험값을 복합층 원통 정상열전도 식(5)에 적용하여 복합 열전달 계수를 구하고자 하였다.

$$Q = \frac{T_{MAX} - T_{Basket}}{\frac{1}{D_{Basket} \times \pi \times H \times h_{combined}}} \quad (5)$$

여기서  $h_{combined}$ 는 대류와 복사에 대한 복합 열전달 계수이며,  $T_{max}$ 와  $T_{Basket}$ 은 바스켓 내부 최대온도 및 내벽 온도로 Table 6에 따라  $T_{max}-T_{Basket}$ 는 43.4℃,  $D_{Basket}$ 와 H는 바스켓의 직경 및 내부 높이로 각각 1067 mm(D) 및 550 mm(H) 이다. 계산 결과 복합열전달 계수  $h_{combined}$ 는 4.5 W/m<sup>2</sup>℃로 계산되었다. 검증을 위해 내부열원이 585 W일때 Whiteshell 실험 결과값과 복합열전달계수를 이용한 계산 결과를 비교하였다. 내부열원이 585 W일 때 Whiteshell 실험결과 값에 따른 바스켓 내부 최대 온도는 210.3℃이며, 복합열전달계수를 이용한 계산 결과는 224.5℃로 약 6.8%의 근소한 차이를 나타내었다.

처분용기 내부는 Figure 11과 같으며, 바스켓의 최대온도를 계산하기 위해 처분용기 표면온도 값을 식(6)에 대입하여 바스켓 내벽온도를 계산하면 다음과 같다.



**Fig. 11. Calculation model of the inner disposal canister**



$$Q = \frac{T_1 - 119^\circ\text{C}}{R_{Cu}} = \frac{T_2 - T_1}{R_{Cast}} = \frac{T_{Basket} - T_2}{R_{SS304}} \quad (6)$$

$$R_{Cu} = \frac{1}{2 \times \pi \times H \times k_{Cu}} \times \ln \frac{0.622}{0.612}$$

$$R_{Cast} = \frac{1}{2 \times \pi \times H \times k_{Cast}} \times \ln \frac{0.612}{0.542}$$

$$R_{SS304} = \frac{1}{2 \times \pi \times H \times k_{SS304}} \times \ln \frac{0.542}{0.5335}$$

여기서  $T_1$ 은 구리와 주철의 경계온도,  $T_2$ 는 주철과 SS304의 경계온도,  $T_{Basket}$ 은 Basket 내벽온도이다. 또한  $k_{Cu}$ ,  $k_{Cast}$ ,  $k_{SS304}$ 는 구리, 주철, 스테인리스 304에 대한 열전도도로 각각  $386 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ ,  $52 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ ,  $17 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ 이다. 계산결과 바스켓 내벽온도는  $119.2^\circ\text{C}$ 이다. 바스켓 내벽온도와 복합열전달계수를 식(5)에 대입하여 바스켓 내부의 최대온도는  $140.9^\circ\text{C}$ 로 계산되었다. 이는 NUREG-1536(Standard Review Plan for Dry Cask Storage Systems)에 기술되어 있는 규제 피복재 온도  $340^\circ\text{C}$ 보다 낮은 온도로 열적 측면에서의 안전성이 확보되었다고 판단되었다 [7].

## V. 결론

본 연구에서는 CANDU 사용후핵연료 처분터널의 터널간격에 대한 열적 영향을 계산하고 터널간격 60 m에서의 처분용기 표면온도를 계산하였다. 그 결과 30 m와 40 m에서 지붕의 최대온도가 약  $0.4^\circ\text{C}$ 의 차이를 보이고 있지만, 그 온도차이가 매우 미약하고 30 m ~ 150 m까지의 평균 벽면온도가 거의 같은 값을 보이고 있어 CANDU 사용후핵연료 처분터널의 내부온도는 대류의 영향으로 처분터널 간격에 대한 영향을 거의 받지 않는 것으로 판단하였다. 또한 공기 출입구 면적이 제한되었을 때, 처분터널의 내벽온도는 약  $6^\circ\text{C}$ 의 차이가 나는 것으로 보아 처분터널의 냉각효율을 향상시키기 위해서는 대류를 감안한 최적 공기 출입구 설계가 이루어져야 할 것이라고 판단된다. 터널간격 60 m를 적용시켜 계산한 처분용기의 최대 표면온도 및 처분용기내부에 적재된 바스켓 내부 최대 온도는 각각  $119^\circ\text{C}$ 와  $140.9^\circ\text{C}$ 로 나타났

며, 규제 피복재온도 이하로 열적 안전성을 유지하는 것으로 판단되었다.

본 연구에서는 다루어지지 않았지만 이 후 공기 중의 수분이나, 암반의 지하수에 의한 효과 및 시간에 따른 사용후핵연료 붕괴열량의 감소를 고려하면 본 연구결과보다 낮은 처분용기 내부온도를 얻을 수 있다고 생각된다. 또한 처분시스템의 위치상 지하 500 m까지의 긴 공기의 유로에 대한 영향을 고려하지 않은 점은 처분시스템의 열적 안전성에 악영향을 미칠 수 있기 때문에 이 후 필히 연구되어야 할 과제이다.

본 연구 결과는 처분효율을 향상시키기 위한 CANDU 사용후핵연료 처분시스템 개념 최적화에 활용될 것이며, 향후 처분터널의 과도상태에 대한 열해석과 처분시스템의 심도 및 지온구배가 미치는 영향을 고려할 예정이다.

## 감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발 사업의 일환으로 수행하였습니다.

## 참고문헌

- [1] Jongwon, CHOI, Wonil KO, and Chul-Hyung KANG, "Reference Spent Fuel and Its Characteristics for a Deep Geological Repository Concept Development", Journal of the Korean Nuclear Society, Vol. 31, Number 6, 1999, pp. 23~28.
- [2] Sumio Masuda, Hideki Kawamura, Ian G. Mc Kinley, Fiona B. Neall and Hiroyuki Umeki, "Optimising Repository Design for the CARE Concept", IHLRWM 2006, Las Vegas, NV, April 30-May 4, 2006.
- [3] 최종원, "고준위폐기물 처분기술개발", 한국원자력연구원 기술보고서, KAERI/RR-2765/2006, 2006.
- [4] 강철형, "고준위폐기물처분장 THM해석을 위한

기본암반물성”, 한국원자력연구원 기술 보고서,  
KAERI/AR-528/99, 1999.

- [5] 이건재, “사용후핵연료 저장 기반기술 개발”,  
한국수력원자력(주) 1차년도 중간보고서, 2006.
- [6] Moon-Hyun Chun, Young-Ho Ryu, "Thermal  
analysis of a simulated CANDU-37 element  
spent fuel bundle with air backfill", Nuclear  
Engineering and Design, 199, 85-99(2000).
- [7] U.S. Nuclear Regulatory Commission,  
"Standard Review Plan for Dry Cask  
Storage Systems", NUREG-1536, January  
1997.