

## 수평 터널방식 고준위폐기물 처분시스템 주변 열 해석

최희주\*, 김인영, 이종열, 김현아

Thermal Analysis of a Horizontal Disposal System  
for High-level Radioactive Waste

Heui-Joo Choi\*, In-Young Kim, Jong Youl Lee, Hyun Ah Kim

**Abstract** The thermal analysis is carried out for a geological disposal system developed for the final disposal of a ceramic high-level waste from pyroprocessing of PWR spent fuel. The horizontal disposal tunnel type is considered with the distance of 2 m between the disposal canisters and the tunnel spacing of 25 m. The temperature distributions around the disposal canisters are calculated for the horizontal tunnel based on the conceptual design. The thermal performance analysis is carried out using a FEM program, ABAQUS. The performance analysis shows that the peak temperature in a disposal system outside the disposal canister is lower than 100°C, which meets the thermal criterion of the disposal system. According the analysis, the peak temperature for the disposal canister located boundary of the disposal system is lower by 3°C than that for the canister at the central area. This implies the disposal density can be improved by locating more disposal canisters along the boundary.

**Key words** Disposal system, Ceramic waste, Engineered barrier system, Decay heat, Thermal analysis

**초 록** 경수로 사용후핵연료의 파이로 공정 처리를 통해 예상되는 고준위폐기물 처분시스템을 대상으로 열적 성능평가를 수행하였다. 처분방식으로 수평 처분터널 처분시스템을 고려하였다. 수평 처분터널 간격 25 미터와 처분공 간격 2미터를 대상으로 평가하였다. 세라믹폐기물 수평 처분터널 주변의 다양한 위치에 대해 장기간 동안 열 해석을 통하여 온도 변화를 해석하였다. 열 해석은 ABAQUS 프로그램을 이용하였다. 열 해석 결과에 의하면 처분시스템 중 어느 부분에서도 최고 온도가 100°C를 넘지 않아, 열적 성능 기준을 만족하였다. 열 해석 결과에 따르면, 처분시스템 중앙에 위치한 처분용기 주변이 외곽에 위치한 것의 주변보다 최고 온도 기준으로 약 3°C 정도 높았다. 이것은 처분시스템 설계시 가능한 외곽에 위치한 처분용기가 많도록 설계하는 것이 처분밀도를 향상시킬 수 있음을 시사하였다.

**핵심어** 처분시스템, 세라믹 폐기물, 공학적방벽, 붕괴열, 열 해석

## 1. 서 론

원자력의 이용을 통해 발생하는 사용후핵연료 관리 방안에 대한 국가 정책이 아직 결정된 바가 없다. 원자력을 이용하고 있는 국가들 중 일부는 사용후핵연료를

직접 심부 지하에 처분하는 정책을 시행 중이기도 하며, 일부 국가는 사용후핵연료를 재처리하여 부피를 감소시키고 발생된 고준위폐기물을 처분하기 위한 정책을 시행하고 있다. 한국원자력연구원은 사용후핵연료에 포함된 핵분열성 물질을 재활용하고 고준위폐기물 부피를 줄이기 위한 방안으로서 파이로 공정 처리법을 개발 중이며, 개발 중인 파이로 공정으로부터는 다양한 종류의 고준위폐기물이 발생될 것으로 예상된다(Kim et al., 2008; Cho et al., 2010). 또한, 심지층 처분시스템 개발과 관련하여, 저자들은 국내에서 발생하는 사용후핵연료의 심지층 직접 처분시스템(Lee et al., 2007)과 파이로 공정을 통해 발생하는 고준위폐기물을 위한 심지층

**Received:** Mar. 19, 2013

**Revised:** Apr. 16, 2013

**Accepted:** Apr. 22, 2013

\***Corresponding Author:** Heui-Joo Choi  
Tel) +82428682274, Fax) +82428688850  
E-Mail) hjchoi@kaeri.re.kr

Korea Atomic Energy Reserch Institute, Daedeok-Daero  
989-111, Yuseong-gu, Daejeon, Korea

처분시스템(Choi et al., 2011)을 개발하였다.

일반적으로 고준위폐기물 심지층 처분시스템은 공학 적방벽시스템과 천연방벽시스템으로 구성된다. 공학적 방벽시스템은 고준위폐기물을 담고 있는 처분용기, 처분용기를 주변 암반의 역학적 거동으로부터 보호하고 지하수와의 접촉을 억제하기 위한 완충재, 지하 굴착 공간을 되메우기 위한 뒷채움재 등으로 구성된다. 파이로 공정으로부터 다양한 종류의 방사성 폐기물이 발생되나, 발열량과 장반감기 핵종을 고려할 경우 세라믹 폐기물이 가장 중요하다(Choi et al., 2011). 본 논문에서는 처분용기로는 구리-주철 이중용기가 고려되었으며, 완충재로는 밀도  $1.6 \text{ g/cm}^3$ 으로 압축한 국내산 칼슘-벤토나이트(Choi et al., 2008a; Lee et al., 2011)를 고려하였다.

심지층 처분시스템은 지하 500미터 심도의 암반 내의 처분터널에 처분공을 굴착하고 처분용기를 매몰하는 수직공 처분 방식과 처분터널 벽면에 수평 터널을 굴착하

는 수평 터널 처분방식이 있다. 본 논문에서는 세라믹 폐기물 수평터널 처분시스템을 대상으로 열 해석을 수행하였으며, 완충재 내의 최고 온도가  $100^\circ\text{C}$ 를 초과하지 않는 것을 성능 평가 목표로 설정하였다. 처분시스템의 열적 성능평가를 위해서는 처분시스템이 위치할 지하 암반 특성이 중요하다. 국내에서는 고준위폐기물 처분부지에 대한 어떤 결정도 없어, 한국원자력연구원 주변 암반 특성(Cho et al., 2008b)을 이용하여 처분시스템에 대한 열 해석을 수행하였다. 열 해석에는 3차원 유한요소 해석 프로그램인 ABAQUS(ABAQUS, 2009)를 이용하였다.

본 논문에서 처분시스템의 열적 성능 평가는 예비 개념설계를 기반으로, 수평터널 처분시스템에 대한 심층 분석을 수행하였다. 즉, 수평 처분시스템의 예비 개념설계를 위해 파이로 공정 폐기물 특성 분석을 통해 구한 열원을 바탕으로 설계된 처분용기, 완충재 및 처분시스템 단위 모듈에 대하여 처분모듈 주변의 열 해석을 수행하였다. 완충재 내의 최고 온도가  $100^\circ\text{C}$ 를 넘지 않도록 하는 처분 간격에 대한 예비 개념설계를 바탕으로 처분시스템의 다양한 위치에서 수평터널 처분시스템의 장기간 열적 거동을 분석하여, 동일한 처분모듈이 처분터널 위치에 따라 완충재 내 최고 온도를 분석함으로써 향후 처분시스템의 처분밀도 향상을 위한 설계 개념을 도출하고자 하였다.

**Table 1.** Amount of waste from pyro-processing of 10 MtU PWR spent fuel (Choi et al., 2011)

Items	Long-Lived Waste	
	Metal	Monazite
		LiCl + KCl
Major nuclides	U, TRU	RE, KCl
Mass [kg]	3,136.4	664.9
Heat [W] 40 years after discharge	-	297
Density [ $\text{g/cm}^3$ ]	6.71	3.57

## 2. 처분시스템 설계

사용후핵연료의 파이로 공정으로부터 발생하는 다양

**Table 2.** Specification of ceramic waste block and storage canister (Choi et al., 2011)

Item	Specifications	Value
Major nuclides	Rare Earth, TRU	
Waste block	Inner Diameter (cm)	26.0
	Height (cm)	25.0
	Weight (kg)	47.4
	Decay heat (W), 40 years after discharge of spent fuels	21.2
	Center temperature ( $^\circ\text{C}$ )	50.4
	Number of block produced	14.1
Storage canister	Outer diameter (cm)	26.7
	Thickness (cm)	Wall: 0.4, Plate: 0.5
	Height (cm)	Inner: 56.0, whole: 60.8
	Number of blocks in a storage canister	2
	Total weight (kg)	125.2
Number of storage canisters produced	7.05	

한 폐기물 중 고준위폐기물로 심지층 처분의 대상이 되는 폐기물은 전해제련 과정에서 발생하는 세라믹 폐기물이다. 세라믹 폐기물은 Table 1에 ‘Monazite’로 표시되어 있으며, 10 MtU의 사용후핵연료 처리 시 약 665 kg이 발생될 것으로 예상된다(Choi et al. 2011). 세라믹 고화체의 크기를 직경 26 cm, 높이 25 cm로 추정하였으며, 10 MtU의 사용후핵연료 처리 시 이와 같은 크기의 세라믹 고화체가 약 14.1개 발생할 것으로 예상되었다. 2개의 세라믹 고화체를 1개의 저장용기(storage canister)에 넣을 경우, 20,000 MtU PWR 사용후핵연료의 파이프 공정 처리로부터 약 14,100개의 저장용기가 발생될 것으로 예상되었다. 설계된 세라믹 고화체와

저장용기의 상세한 사양을 Table 2에 나타내었다(Choi et al., 2011).

세라믹 폐기물에는 장반감기 악티나이드 핵종들이 포함되어 있으며, 장기간 높은 붕괴열을 방출하므로 심지층에 처분하여야 한다. 따라서 이 폐기물은 수명이 1,000년 이상인 처분용기에 넣어 지하 500 m 깊이에 처분하여야 한다. 본 논문에서 고려한 처분용기는 저온분사 방법으로(Choi et al., 2010) 제작된 1.0 cm 두께의 구리 외부용기와 주철 내부용기로 구성된 이중구조이며, 1개의 처분용기(disposal canister)에는 14개의 저장용기를 넣을 수 있다. Fig. 1은 저장용기와 처분용기를 나타내고 있다. 처분공 1개에 이와 같은 처분용기 2개를

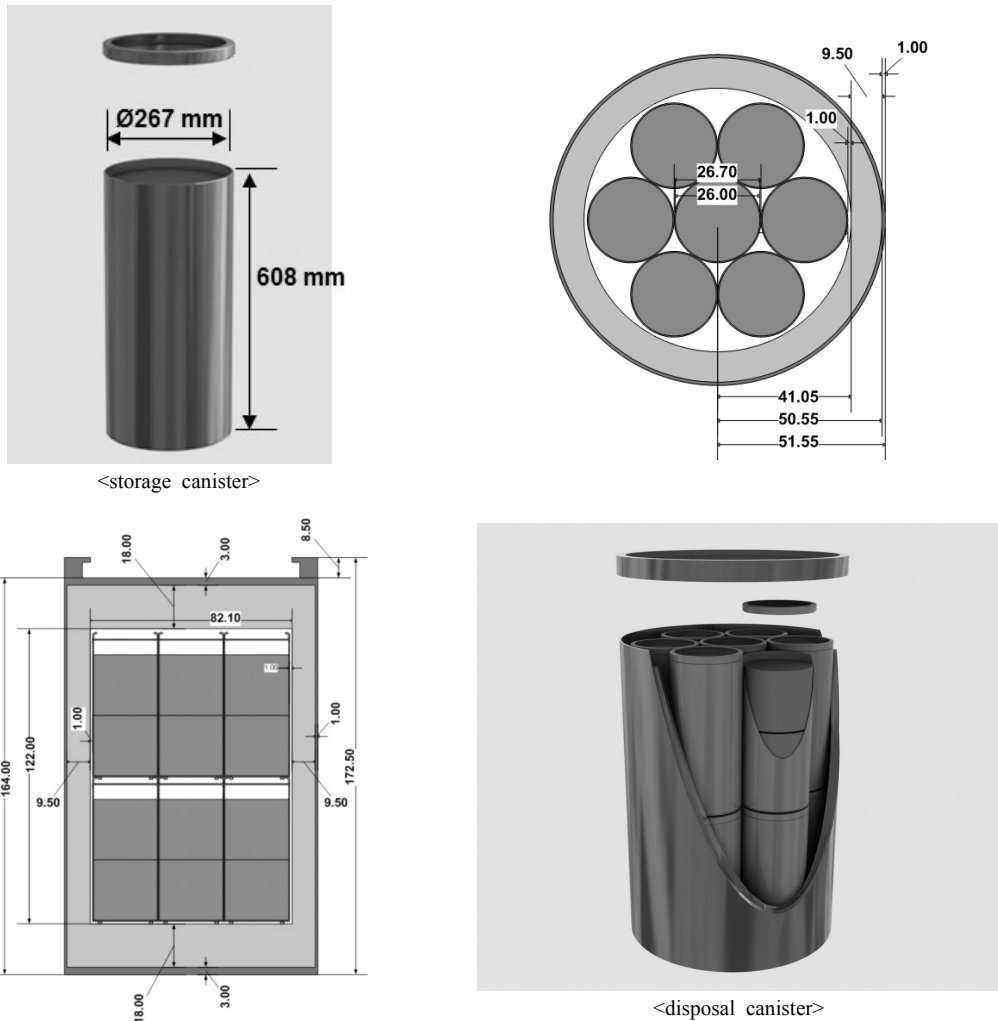


Fig. 1. Design concept of a storage canister (left, upper) and a disposal canister for pyro-processed ceramic waste (Choi et al., 2011)

넣을 경우 예상되는 발열량이 4다발의 경수로 사용후핵연료의 것과 유사한 것으로 평가되었다. 20,000 MtU의 경수로 사용후핵연료 파이프 공정 처리로부터 약 1,000 개의 처분용기가 예상되었다.

완충재는 국내산 칼슘-벤토나이트 특성을 이용하여 설계하였으며, 건조밀도 1.6 g/cm<sup>3</sup>로서 완충재 두께는 36 cm이다. 처분터널은 벤토나이트와 모래 혼합재로 구성된 뒷채움재로 되메움하도록 하였다. Fig. 2에는 수평 처분터널 개념을 나타내었다. 터널 간격 25 m와 40 m에 대한 열 해석을 수행한 결과, 처분터널 간격이 25 m일 경우, 처분용기 간격은 2 m, 처분터널 간격이 40 m일 경우 처분용기 간격이 1 m인 경우 완충재 내 최고 온도가 100℃를 초과하는 것으로 분석되었다. 최고 온도 100℃를 초과할 경우 벤토나이트 완충재의 몬모릴로나이트가 물리·화학적 특성이 서서히 변하여 일라이트화 되어 고준위폐기물 처분시스템 설계기준으로 설정하고 있다(Juvankoski and Marcos, 2010). 이와 같은 열 해석 결과를 바탕으로 터널 간격 25 m와 처분용기 간격 2 m를 갖는 수평터널 처분시스템을 기준 처분시스템으로 결정하였다(Choi et al., 2011).

### 3. 열적 성능 평가

#### 3.1 열 해석 모델

고준위폐기물 주변 열 해석을 단순화하기 위해서는 다양한 가정이 필요하며, 다음과 같은 가정을 전제로 열 해석을 수행하였다. 첫째, 처분장 주변에서의 지하수 흐름은 무시할 만하며, 따라서 열전달은 주로 전도에 의한다. 둘째, 완충재와 암반 혹은 처분용기 사이의 틈은 지하수 유입으로 인한 완충재의 팽윤에 의해 채워진다. 셋째, 처분장 내의 폐기물이 모두 동시에 처분되어 처분시스템의 대칭성을 고려할 수 있다. 상술된 가정을 통해 수평 처분터널의 1/2를 해석 영역으로 설정하여 열 해석을 수행하였다. 처분장은 지표면으로부터 500 m 깊이에 위치하며, 지표로부터 1,000 m까지를 해석 영역으로 설정하였다. Fig. 3은 열 해석에 사용된 해석 영역을 나타내고 있다. Fig. 3의 처분터널 주변에서의 3차원 열전달 방정식은 식 (1)에 주어진 바와 같다(Sizgeck, 2005):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho C_p T) = \frac{\partial}{\partial x} \left[ k \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ k \frac{\partial T}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ k \frac{\partial T}{\partial z} \right] + q(t) \quad (1)$$

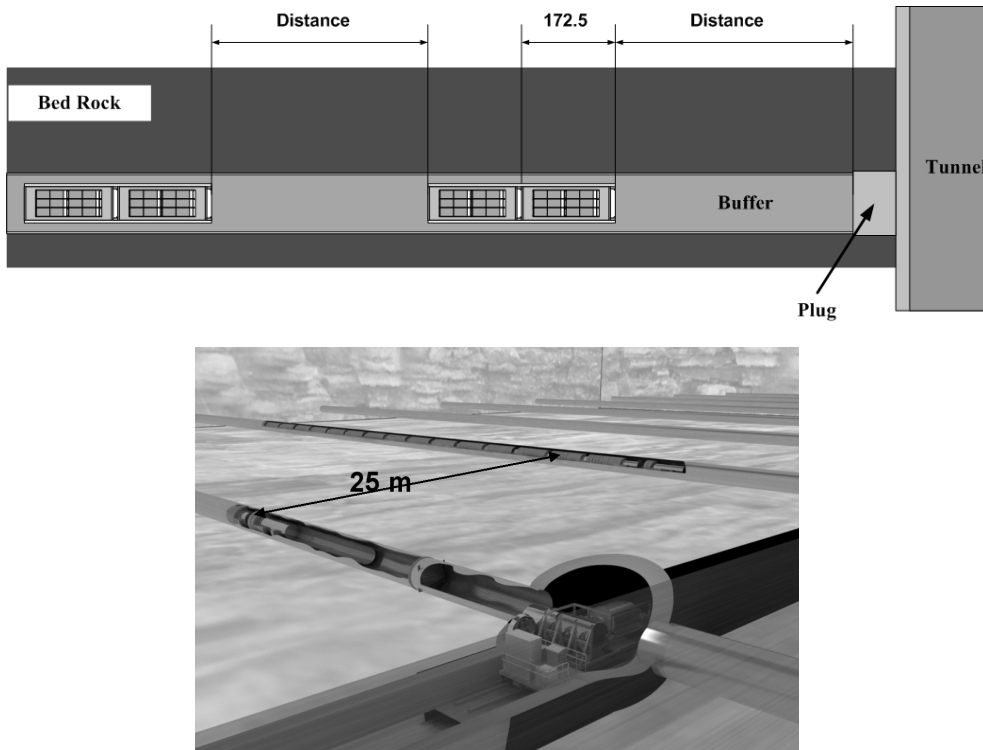


Fig. 2. Layout of horizontal disposal tunnels for ceramic waste (Choi et al., 2011)

여기서  $T$ 는 온도 [ $^{\circ}\text{C}$ ],  
 $t$ 는 시간 [s],  
 $\rho$ 는 밀도 [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ],  
 $C_p$ 는 비열 [ $\text{J}/\text{kg}^{\circ}\text{C}$ ],  
 $k$ 는 열전도도 [ $\text{W}/\text{m}^{\circ}\text{C}$ ],  
 $q(t)$ 는 열 선원항 [ $\text{W}/\text{m}^3$ ]이다.

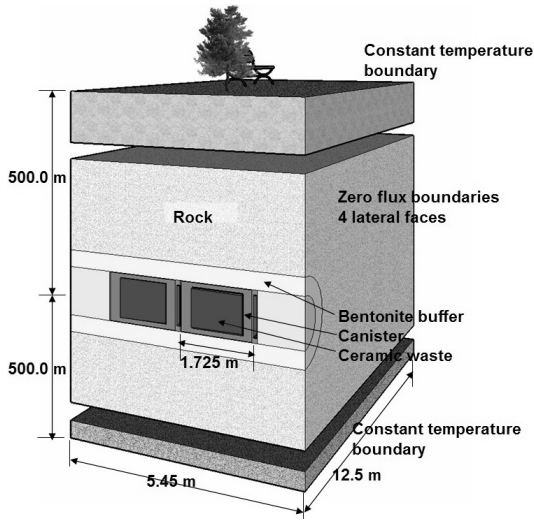


Fig. 3. Thermal analysis domain for horizontal disposal system

Table 3. Thermal properties of materials in the horizontal disposal system

Material	Properties	Values
Nodular cast insert	Density ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	7,200
	Thermal conductivity ( $\text{W}/\text{m}^{\circ}\text{C}$ )	52
	Specific heat ( $\text{J}/\text{kg}^{\circ}\text{C}$ )	504
Copper outer shell	Density ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	8,900
	Thermal conductivity ( $\text{W}/\text{m}^{\circ}\text{C}$ )	386
	Specific heat ( $\text{J}/\text{kg}^{\circ}\text{C}$ )	383
Ca-bentonite buffer	Density ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	1,970
	Thermal conductivity ( $\text{W}/\text{m}^{\circ}\text{C}$ )	0.8
	Specific heat ( $\text{J}/\text{kg}^{\circ}\text{C}$ )	1,380
Backfill	Density ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	2,270
	Thermal conductivity ( $\text{W}/\text{m}^{\circ}\text{C}$ )	2.0
	Specific heat ( $\text{J}/\text{kg}^{\circ}\text{C}$ )	1,190
Rock	Density ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	2,600
	Thermal conductivity ( $\text{W}/\text{m}^{\circ}\text{C}$ )	3.0
	Specific heat ( $\text{J}/\text{kg}^{\circ}\text{C}$ )	900

편미분방정식 (1)의 해를 구하기 위해 필요한 각 매질의 열적 특성을 Table 3에 나타내었다. Table 3에 주어진 암반의 특성은 KURT(KAERI Underground Research Tunnel) 부지 암반 시료를 이용하여 측정된 값이며(Cho et al., 2010), 완충재와 뒷채움재 특성은 국내산 Ca-벤토나이트의 건조밀도  $1.6 \text{ g}/\text{cm}^3$  압축 블록의 값이다(Cho et al., 2008). 또한, 초기 조건으로 설정한 부지의 지열 구배는  $30^{\circ}\text{C}/\text{km}$ , 지표면 평균 온도는  $10^{\circ}\text{C}$ 이다(박경우 외, 2010).

### 3.2 열 선원항

열전달 식 (1)에 대한 해를 구하기 위해서는 열 선원항이 필요하다. 본 논문에서는 파이로 공정에서 발생된 세라믹폐기물을 대상으로 ORIGEN-ARP 프로그램(Gauld et al., 2006)을 이용하여 열 선원항을 평가하였다. 기준 핵연료 종류는 PWR Plus-7  $16 \times 16$ , 초기 농축도는 4.5 wt%, 기준 방출 연소도는 55,000 MWd/MtU이다. 10 MtU 경수로 사용후핵연료로부터 발생하는 세라믹폐기물의 붕괴열 및 붕괴열에 대한 회귀식은 Fig. 4와 같으며, 원자로에서 방출 후 40년 시점에서의 세라믹폐기물로부터 방출되는 열 선원항은 약  $0.45 \text{ W}/\text{kg}$ 이었다.

### 3.3 수평 처분터널 주변 열 해석

고준위폐기물을 수평 처분터널을 이용하여 처분할 경우 Fig. 5에 나타낸 바와 같이 2가지 경우의 서로 다른 구역(zone)에 대한 열 해석이 필요하다. 처분장의 내부에 위치한 zone-A의 경우 폐기물 주변에 대칭 조건을 이루고 있어 열의 이동은 수직 방향으로만 고려하면 된다. 즉 zone-A의 경우 Fig. 4에 나타난 해석 영역의 4개 수직면에서의 단열(no heat flux) 조건을 경계조건으로 설정하였으며, 지표면은  $10^{\circ}\text{C}$ , 지하 1,000 m 면에서는  $40^{\circ}\text{C}$ 를 설정하였다. 그러나 zone-B와 같이 처분장 외곽

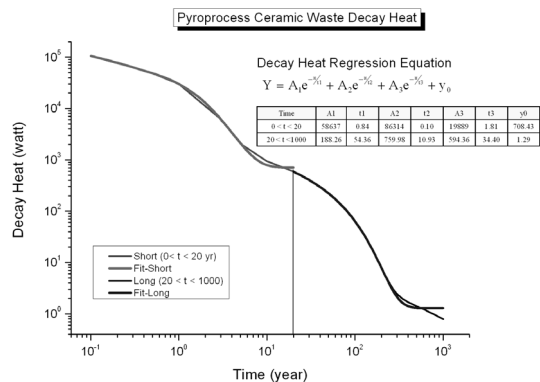


Fig. 4. Regression curve for decay heat of ceramic waste

에 위치한 폐기물 주변은 경계조건을 멀리 떨어진 암반의 초기 온도로 설정하였다. 따라서 이와 같이 서로 다른 경계조건에 대해 Fig. 5와 같이 서로 다른 해석 영역

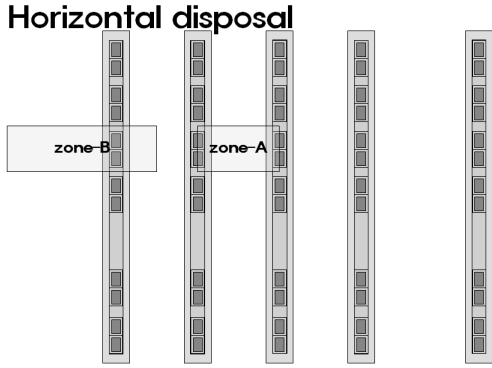


Fig. 5. Plan view of the analysis domains for different disposal locations

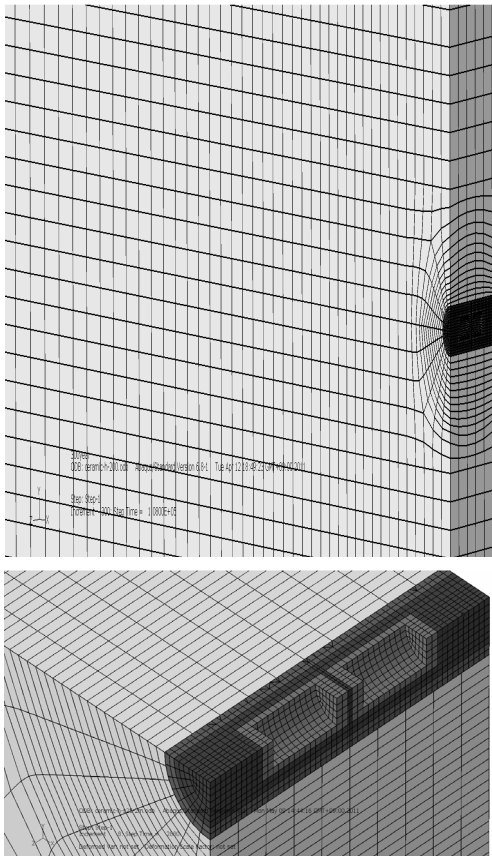


Fig. 6. ABAQUS model for thermal analysis of horizontal disposal system

을 설정하고, 열 해석 전산 프로그램인 ABAQUS(2009)를 이용하여 처분용기 주변 온도 변화를 구하였다. Fig. 6은 열 해석에 사용된 모델의 예이며, 열 해석은 처분터널 폐쇄 후 최대 300년까지 수행하였다.

ABAQUS 프로그램을 이용하여 구한 처분터널 폐쇄 후 100년 동안 Fig. 7의 zone-A(지하 500 m 수평면)의 위치별 온도 변화를 Fig. 8에 나타내었다. 최고 온도는 처분터널 폐쇄 후 약 8년이 지나 발생하였으며, 이때 온도는 약 91°C이었다. 계산결과를 살펴보면 Node 2가 Node 4보다 고준위폐기물로부터 위치가 더 떨어져 있는 데에도 불구하고 온도는 더 높았다. 이것은 암반의 열전도도가 크기 때문으로 판단된다. Fig. 9에는 세라믹 폐기물 처분용기 주변 온도 분포에 대한 ABAQUS 프

zone-A

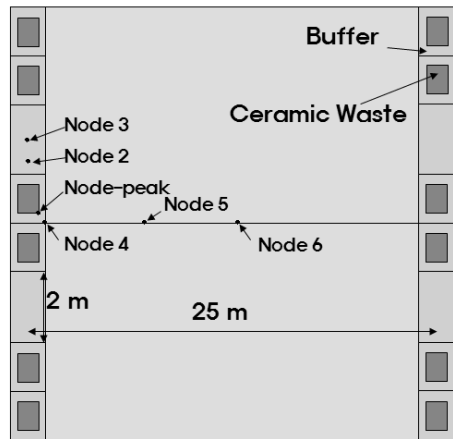


Fig. 7. Temperature calculation locations for horizontal section of the zone-A

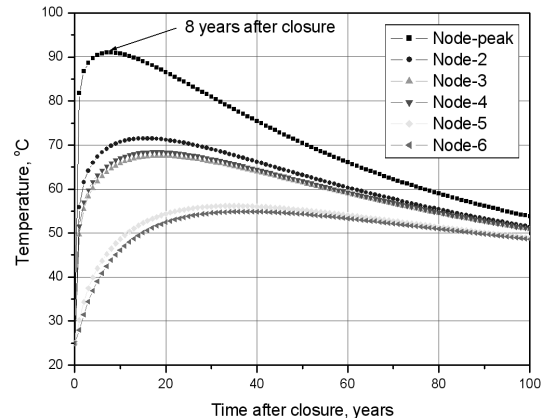


Fig. 8. Time-dependent temperature distributions of zone-A

로그를 계산 결과를 나타내었다.

한편, 폐쇄 후 100년 동안 Fig. 10에 나타난 zone-A의 수직방향 위치별 온도 변화를 Fig. 11에 나타내었다. 또한 Fig. 11에는 처분용기와 완충재의 경계면(Fig. 10의 Node A와 Node B)에서의 온도변화를 함께 나타내었다. Fig. 11에서와 같이 처분용기와 완충재 경계면에서의 온도는 위치에 따른 차이를 거의 나타내지 않았으며, 처분용기로부터 20 m 범위의 암반까지는 50°C 가깝게 온도가 상승하였다.

zone-B의 특성은 전술한 바와 같이 처분시스템 외곽에 위치한 처분터널로서, zone-A와 달리 한 쪽 경계조건으로 대칭 조건 외에 처분터널로부터 멀리 떨어진 곳의 온도가 암반의 온도를 유지한다는 경계조건을 적용

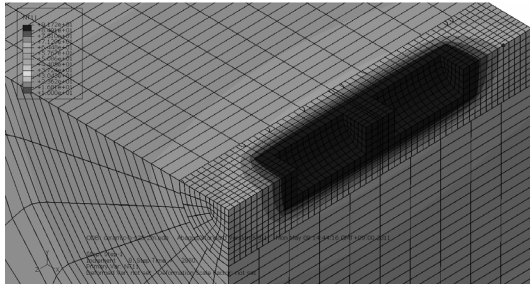


Fig. 9. Temperature distribution near disposal packages (8 years after the closure of disposal tunnel)

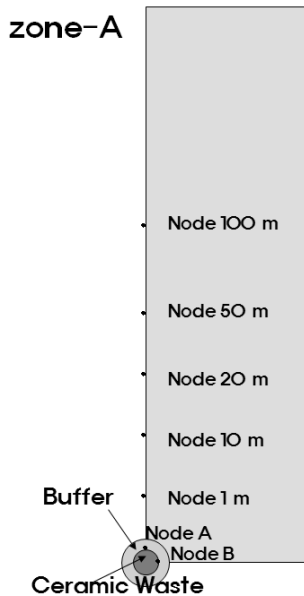


Fig. 10. Temperature calculation locations for vertical section of the analysis domain

하였다. Fig. 13에는 Fig. 12에 표시된 처분터널의 수평방향 위치별 처분터널 폐쇄 후 100년간의 온도분포 중 일부를 나타내었다. 해석 결과, zone-B의 경우 최고온

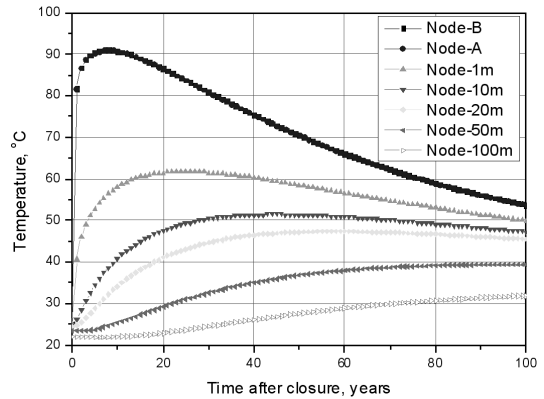


Fig. 11. Time-dependent vertical temperature distributions of zone-A

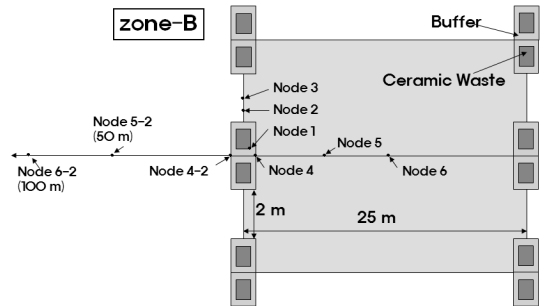


Fig. 12. Temperature calculation locations for horizontal section of the zone-B

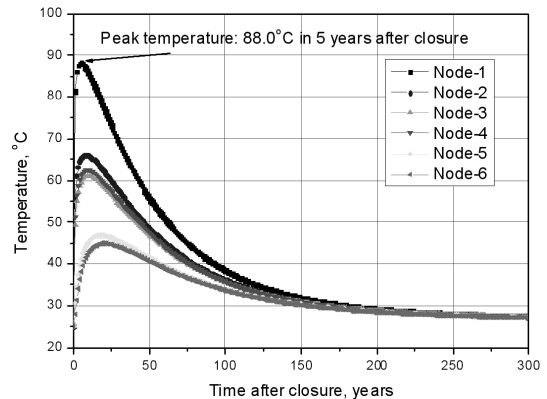


Fig. 13. Time-dependent horizontal temperature distributions of zone-B

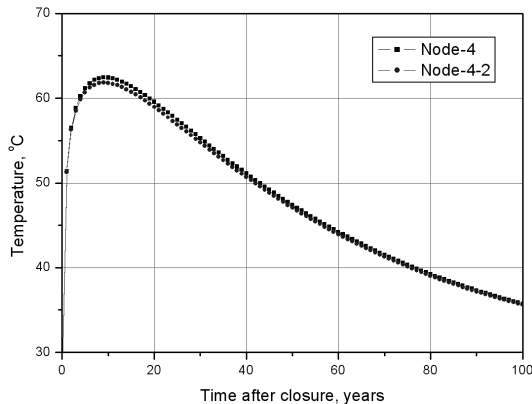


Fig. 14. Interface temperature between buffer and rock with different boundary conditions

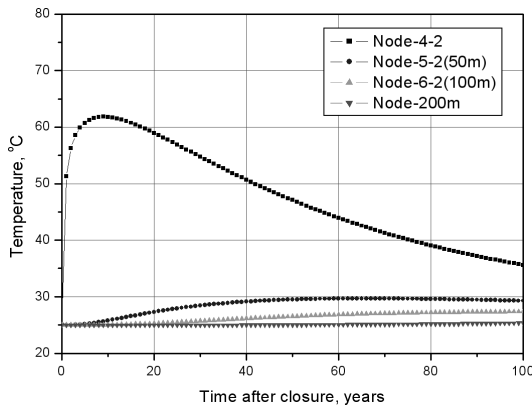


Fig. 15. Time-dependent horizontal temperature distributions of rock in zone-B

도는 처분터널 폐쇄 후 5년이 지나 발생하였다. 이때 최고 온도는  $88^{\circ}\text{C}$ 이었으며, zone-A보다 약  $3^{\circ}\text{C}$  낮았다. 이것은 암반이 커다란 열 제거원(heat sink)으로 작용하였기 때문이다. 경계조건에 따른 차이를 비교하기 위하여 Node 4와 Node 4-2에 대해 온도변화를 구하고 Fig. 14에 나타내었다. Fig. 14에 나타난 바와 같이 암반과 접하고 있는 외곽에 위치한 Node 4-2의 온도가 Node 4에 비해 약간 낮았으나 큰 차이를 보이지는 않았다. Fig. 15에는 외곽 암반 위치별 온도 변화를 나타내었다. Fig. 15에 나타난 바와 같이 처분장으로부터 50 m 이상 떨어진 암반의 온도 변화는  $10^{\circ}\text{C}$  미만으로 극히 적었다.

#### 4. 결론

PWR 사용후핵연료의 파이로 공정으로부터 발생될

것으로 예상되는 다양한 고준위폐기물의 처분을 위한 시스템의 설계가 요구되고 있다. 이에 본 논문에서는 고준위폐기물 중 특히 중요한 세라믹폐기물에 대한 특성을 평가하고 저장용기, 처분용기, 완충재, 뒷채움재, 천연암반, 지표지질 및 생태계로 구성된 수평 처분시스템에 대한 열 해석을 수행하였다.

3차원 유한요소 해석코드인 ABAQUS를 이용해 처분시스템의 열적 성능 평가결과를 기반으로 터널 간격 25 m, 처분용기 간격 2 m를 갖는 기존 수평터널 처분시스템을 평가 대상으로 결정하였다. 기존 수평 처분시스템과 주변 암반에 대하여 최대 300년간의 열적 거동을 분석한 결과, 처분시스템 중 처분용기를 제외한 어느 부분의 온도도 최고 온도가  $100^{\circ}\text{C}$ 를 넘지 않아, 열적 성능 기준을 만족하는 것을 확인할 수 있었다.

특히 열 해석 결과 중 처분시스템 중앙에 위치한 처분용기 주변 온도가 외곽에 위치한 처분용기 주변 온도보다 동일한 위치에 대해 최고 온도 기준으로 약  $3^{\circ}\text{C}$ 정도 높았다. 이와 같은 해석 결과를 통해 처분시스템 설계 시 시스템 외곽에 위치한 처분용기의 수가 많도록 시스템을 설계한다면 처분시스템의 처분밀도 향상에 기여할 수 있을 것으로 사료되었다. 본 연구결과는 향후 고준위 방사성폐기물 처분장 설계, 최적화 및 처분밀도 향상을 위한 자료로 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

#### 감사의 글

본 연구는 교육과학기술부의 원자력연구개발 사업의 일환인 공학적방법 성능향상 기술개발 과제를 통해 수행하였습니다.

#### 참고문헌

1. 박경우, 고용권, 김경수, 2010, KURT 주변 지역의 지온구배 특성, 한국방사성폐기물학회지 2010 추계학술대회 논문집, 185-186.
2. ABAQUS, 2009, ABAQUS/CAE Ver.6.9, Dassault System Simulia, Inc., USA.
3. Cho, W. J. and Lee, J. O., Kwon, S. K., 2008a, Thermal Conductivity of Compacted Bentonite and Bentonite-sand Mixture, J. Korean Radioact. Waste Soc., Vol. 6, 101-109.
4. Cho, W. J., Kwon, S. K., Park, J. H., 2008b, KURT, a small-scale underground research laboratory for the research on a high-level waste disposal, Ann. Nucl. Energy, Vol. 35, 132-140.
5. Cho, W.-J., Kwon, S., and Lee, J.-O., 2010, Empirical model to estimate the thermal conductivity of granite with various water contents, J. Korean Radioact. Waste Soc., Vol. 8, 135-142.



6. Cho, Y-Z., Jung, J-S., Lee, H-S., and Kim, I-T., 2010, Reuse Technology of LiCl Salt Waste Generated from Electrolytic Reduction Process of Spent Oxide Fuel, J. of the Korean Radioactive Waste Society, Vol. 8, 57-63.
7. Choi, H. J., Lee, M. S., Lee, J. Y., 2010, Application of a cold spray technique to the fabrication of a copper canister for the geological disposal of CANDU spent fuels, Nucl. Eng. Des., Vol. 240, 2714-2720.
8. Choi, H. J., Lee, M. S., Lee, J. Y., 2011, Preliminary Conceptual Design of a Geological Disposal System for High-level Wastes from the Pyroprocessing of PWR Spent Fuels, Nucl. Eng. Des., Vol. 241, 3348-3356.
9. Gauld, I. C., Bowman, S. M., and Horwedel, J. E., 2006, ORIGEN-ARP: Automatic Rapid Processing for Spent Fuel Depletion, Decay, and Source Term Analysis, ORNL/TM-2005/39, ORNL, USA.
10. Juvankoski, Markku and Marcos Nuria, 2010, Design Basis for Buffer Components, Working Report 2009-132, POSIVA, Finland.
11. Kim, E-H., Park, G-I., Cho, Y-Z., and Yang, H-C., 2008, A New Approach to Minimize Pyroprocessing Waste Salts through a Series of Fission Product Removal Process, Nucl. Technol., Vol. 162, 208-218.
12. Lee, J. Y., Cho, D. K., Choi, H. J., Choi, J. W., 2007, Concept of Korean Reference Disposal System for Spent Fuels, J. of Nucl. Sci. and Tech., Vol. 44, No. 12, 1565-1573.
13. Lee, J. O., Cho, W. J., Kwon, S. K., 2011, Thermal-hydro-mechanical properties of reference Bentonite Buffer for a Korean HLW Repository, Journal of Korean Society for Rock Mechanics, Vol. 21, No. 4, 264-273.
14. Sizgek, G. D., 2005, Three-dimensional thermal analysis of in-floor type nuclear waste repository for a ceramic waste form, Nucl. Eng. Des., 235, 101-109.

---

### 최희주



1983년 한양대학교 공과대학 원자력공학과 공학사  
 1985년 한국과학기술원 원자력공학과 공학석사  
 1996년 한국과학기술원 원자력공학과 공학박사

Tel: 042-868-2274  
 E-mail: hjchoi@kaeri.re.kr  
 현재 한국원자력연구원 방사성폐기물 처분연구부 책임연구원

---

### 김인영



2010년 서울대학교 원자핵공학과 공학사  
 2012년 서울대학교 에너지시스템공학부 원자력공학 전공 공학석사

Tel: 042-868-2505  
 E-mail: iykim@kaeri.re.kr  
 현재 한국원자력연구원 방사성폐기물 처분연구부 연구원

---

### 이종열



1986년 서울시립대학교 건축공학과 공학사  
 1993년 충남대학교 대학원 건축공학과 공학석사

Tel: 042-868-2071  
 E-mail: njylee@kaeri.re.kr  
 현재 한국원자력연구원 방사성폐기물 처분연구부 책임연구원

---

### 김현아



1995년 한남대학교 수학과 이학사  
 1999년 한남대학교 건축공학과 공학사

Tel: 042-868-4961  
 E-mail: it-k2@hanmail.net

---