

Heat Transfer Modeling by the Contact Condition and the Hole Distance for A-KRS Vertical Disposal

A-KRS 수직 처분공 접촉 조건 및 처분공 간의 거리에 따른 열전달 해석

Dae-Young Kim¹ and Seung-Hyun Kim^{2,*}

¹*Korea Atomic Energy Research Institute, 111, Daedeok-daero 989beon-gil, Yuseong-gu, Daejeon, Republic of Korea*

²*Korea Radioactive Waste Agency, 174, Gajeong-ro, Yuseong-gu, Daejeon, Republic of Korea*

김대영¹, 김승현^{2,*}

¹*한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로989번길 111*

²*한국원자력환경공단, 대전광역시 유성구 가정로174*

(Received June 18, 2019 / Revised July 24, 2019 / Approved September 3, 2019)

The A-KRS (Advanced Korean Reference Disposal System) is the disposal concept for pyroprocessed waste, which has been developed by the Korea Atomic Energy Research Institute. In this disposal concept, the amount of high-level radioactive waste is minimized using pyrochemical process, called pyroprocessing. The produced pyroprocessed waste is then solidified in the form of monazite ceramic. The final product of ceramic wastes will be disposed of in a deep geological repository. By the way, the decay heat is generated due to the radioactive decay of fission products and raises the temperature of buffer materials in the near field of radioactive waste repository. However, the buffer temperature must be kept below 100°C according to the safety regulation. Usually, the temperature can be controlled by variation of the canister interdistance. However, KAERI has modelled thermal analysis under the boundary condition, where the waste canisters are in direct contact with each other. Therefore, a reliable temperature analysis in the disposal system may fail because of unknown thermal resistance values caused by the spatial gap between waste canisters. In the present work, we have performed thermal analyses considering the gap between heating elements and canisters at the beginning of canister loading into the radioactive waste repository. All thermal analyses were performed using the COMSOL software package.

Keywords: A-KRS, Heat transfer modeling, Vertical disposal hole, Contact condition, Clearance

*Corresponding Author.

Seung-Hyun Kim, Korea Radioactive Waste Agency, E-mail: shkim@korad.or.kr, Tel: +82-42-601-5349

ORCID

Dae-Young Kim

<http://orcid.org/0000-0003-2916-1126>

Seung-Hyun Kim

<http://orcid.org/0000-0002-8013-2438>

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited

A-KRS는 한국원자력연구원에서 개발한 파이로프로세싱 처리된 폐기물을 처분하는 개념이다. 고준위 방사성폐기물은 파이로프로세싱에 의하여 최소화되며, 최종 발생된 고준위 방사성폐기물은 모나자이트 세라믹 폐기물 형태로 제조된다. 모나자이트 세라믹 폐기물은 처분공에 영구 처분되어 열을 발생시킨다. 발생된 열은 폐기물을 보호하는 캐니스터 및 완충재의 온도를 상승시켜 설계 기준을 초과 시킬 수 있다. 온도는 처분공 간의 거리로 조절 가능하며 한국원자력연구원에서 해석한 바 있다. 한국원자력연구원에서 해석한 경계조건은 완벽 접촉을 가정한 것이기 때문에, 최초 처분 시에 발생하는 간격에 의해 발생하는 열 저항에 의한 온도 분포는 알 수 없다. 이를 보완하기 위하여, 본 논문에서는 최초 처분 시 존재하는 간격에 의한 열 전달 해석을 수행하였다. 또한 발열체와 캐니스터 간의 공극을 추가하여 온도 분포 해석을 수행하였다. COMSOL 전산해석 소프트웨어를 이용하여 열전달 해석을 수행하였다.

중심단어: A-KRS, 열전달 해석, 수직 처분공, 접촉 조건, 공차

1. 서론

사용후핵연료는 재처리하지 않고 처분하는 열린 연료주기(Once-through fuel cycle)와 재처리하여 사용하는 닫힌 연료주기(Closed fuel cycle)로 나뉜다. KRS (Korea Reference disposal System)는 한국원자력연구원에서 개발한 20,000 MtU의 PWR 사용후핵연료와 16,000 MtU의 CANDU 사용후핵연료를 처분하는 개념으로 열린 연료주기의 처분 개념으로 개발되었다[1]. 또한, 사용후핵연료는 닫힌 연료주기인 파이로프로세싱-소듐냉각고속로를 통해, 자원활용을 극대화 할 수 있으며, 방사성폐기물의 양 및 독성을 감소시킬 수 있다[2]. 파이로프로세싱 핵주기 시설에서 발생하는 고준위 방사성폐기물을 처분하기 위하여, 한국원자력연구원에서는 A-KRS (Advanced Korea Reference disposal System)의 처분 개념을 개발하였다[3]. 파이로공정에서 발생한 고준위 장반감기 폐기물은 모나자이트 세라믹의 고화체 형태가 되어, 캐니스터에 적재시키고, 캐니스터를 심지층에 영구 처분하는 개념이 A-KRS이다. 기본 처분 개념은 KRS와 동일하지만, 고준위 방사성폐기물의 종류가 달라 발열량에 차이가 있다.

파이로프로세싱은 decladding, voloxidation, 전해환원, 전해정련과 전해제련 공정으로 이루어져 있다[4]. 대부분의 우라늄은 전해정련을 통하여 회수되며, 초우라늄은 전해제련을 통하여 회수되어 소듐냉각고속로의 연료로 사용된다. 하지만, 전해제련 공정을 통해서 미량의 초우라늄과 희토류 원소가 잔존하여, 발생된 미량의 고준위 방사성폐기

물은 모나자이트의 세라믹 형태의 고화체로 제조된다. 모나자이트 세라믹 폐기물은 파이로프로세싱에 의하여 형성된 고준위 방사성폐기물 형태로 A-KRS의 개념으로 최종 처분된다[5].

모나자이트 세라믹을 영구 처분 하기 위하여, 모나자이트 세라믹은 저장칸에 2개씩 적재한다. 저장칸 14개를 하나의 캐니스터에 적재하고, 캐니스터는 수평터널 처분방식이나 수직공 처분방식의 2가지 방법으로 처분된다. 캐니스터는 완충재에 의하여 보호되고, 완충재는 지하수의 유입을 최소화한다[6]. 처분공의 거리를 구조물이 일정 온도 이상 넘지 않으며, 처분장 면적을 최소화 할 수 있는 선에서 설계한다. 스웨덴에서 개발된 KBS-3V 처분 타입은 처분 용기의 최고 온도를 100℃로 제한하고 있고, 우리나라도 이에 따른 연구를 진행하고 있다[7,8]. 완충재의 온도 분포를 해석하여 적합한 처분공 간의 거리를 규정하기 위하여 한국원자력연구원은 ABAQUS 범용 소프트웨어를 이용하여 처분공 거리를 계산하였다[9].

방사성폐기물을 처분할 때, 캐니스터와 완충재 간의 공극, 주변 암석과 완충재 간의 간격이 제조 및 설치 시에 공차로 발생할 수 있으며, Posiva 에서는 공차에 대한 가정을 하여 해석에 이용하였다[7]. 한국원자력연구원에서는 이러한 간극을 고려 하지 않은 완벽한 접촉이라 가정하여 해석하였다. 이러한 가정은 열전달 해석에 있어 저항으로 작용할 수 있는 것을 고려하지 않은 것이기 때문에 온도 분포에 영향을 줄 수 있다. 본 논문에서는 수직 처분공에서 발생할 수 있는 간극을 고려하여 접촉 조건에 따라 발생할 수 있는 온도

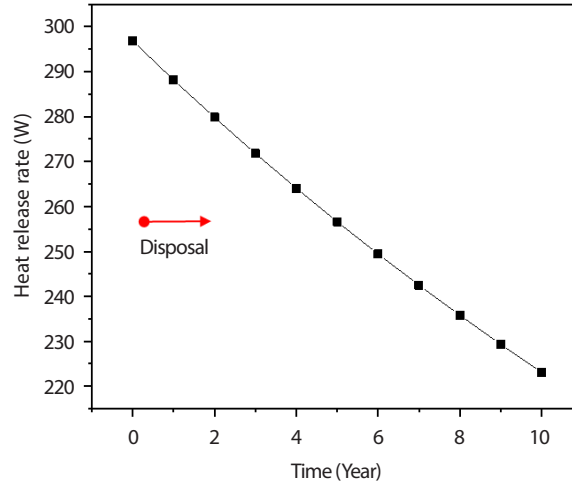


Fig. 1. The heat release rate of the canister with time after the disposal [9].

분포에 대한 영향을 예측해보았다. 해석은 수직 처분공을 기준으로 열전도 방정식을 이용하였고, COMSOL 범용 소프트웨어를 이용하였다.

2. 열전달 해석 조건

2.1 수치 해석 열전달 방정식

열 전달은 주로 완충재와 암석의 열전도에 의해서 이루어진다. 3차원 열 전달 수치 해석은 비정상상태 해석식을 바탕으로 아래 식과 같다.

$$k \cdot \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] + e^{gen} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

e^{gen} [$W \cdot m^{-3}$]은 모나자이트 세라믹의 발열량이며, k [$W \cdot (m^{-1} \cdot K^{-1})$]는 소재의 열전도도이며, ρ [$kg \cdot m^{-3}$]는 밀도이며, c [$J \cdot (kg^{-1} \cdot K^{-1})$]는 비열이다. x [m], y [m], z [m]은 3차원 축이며, t [sec]는 시간, T [K]는 온도이다. 열 해석 모델링에 의한 온도 분포는 열전도 방정식에 의하여 발열량과 열전도도와 같은 소재의 열 특성 및 경계 조건에 의하여 결정된다.

Posiva 열 전달 해석에서는 캐니스터와 완충재의 공극 및 완충재와 주변암석의 간격에서의 대류는 그 거리가 1~3.5 cm로 좁고 완충재의 거친 표면에 의하여 대류 영향이

미비 할 것이라고 가정하여 본 논문에서도 대류 영향은 고려하지 않았다[7].

복사에 의한 열 전달은 발생한 공극을 통하여 완충재 온도 영향을 주기 때문에 정확한 열전달 해석을 위해서 고려해야한다. 하지만, 본 논문에서는 복사 해석에 의한 계산의 복잡성 증가, 해석 난이도 상승의 문제가 발생하였고, 계산의 편의를 위해 모델을 단순화하여 열전도만을 고려하였다.

2.2 모나자이트 세라믹 발열량

모나자이트 세라믹의 발열량은 초기 농축도 4.5wt%를 갖으며 55 GWd/MtU의 인출 연소도를 갖는 경수로 사용후 핵연료를 ORIGEN-ARP program 이용하여 계산된 것을 참고하였고, 처분 시점 또한 사용후핵연료 인출 후 40년으로 논문에서 설정한 것을 근거로 하였다[9]. 원자로에서 인출된 사용후핵연료는 10년의 냉각기간을 거친 뒤, 파이로공정 처리된다. 파이로공정을 통하여 제조된 모나자이트 세라믹은 사용후핵연료 인출 40년 후 기준으로 약 1개의 세라믹 블록 당 21.1 W의 발열을 갖는다. 28개의 세라믹 블록이 1개의 캐니스터에 적재되며, 캐니스터 당 약 297 W의 발열을 한다. Fig. 1은 제조된 모나자이트 세라믹을 처분하는 시점(즉, 사용후핵연료 인출 후 40년 후)부터 캐니스터 발열량을 나타낸다. 열전달 해석을 수행할 때 시간에 따른 열 감소량을

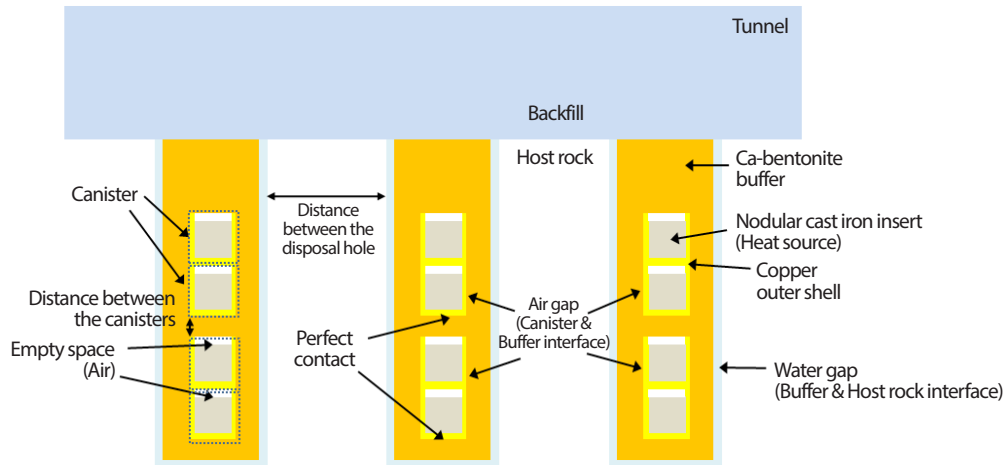


Fig. 2. The vertical disposal concept for A-KRS[9].

그래프와 같이 적용하였다.

A-KRS의 수직 처분공 개념은 Fig. 2 와 같이 모식도로 나타내었다. 터널을 기반으로 일정한 처분공 간의 거리를 두고, 처분공 당 4개의 캐니스터를 적재한 뒤, 완충재를 배치한다. 모나자이트 세라믹은 저장칸에 2개씩 적재되고, 저장칸은 14개씩 적재되어 하나의 캐니스터를 이룬다. 이와 같이 캐니스터는 모나자이트 세라믹, 세라믹 간의 공기층, Nodular cast iron insert 및 Copper outer shell로 복잡한 형상을 이룬다. 계산의 복잡성에 의하여 해당 요소를 단순화 시킬 필요가 있었으며, 발열체를 모나자이트 세라믹을 감싸고 있는 Nodular cast iron insert에서 발열한다고 가정하였다.

2.3 경계조건

소재의 열물성은 Table 1과 같이 이전 연구와 동일하게 적용하였다. 지하 500 m의 온도 분포는 이전 연구와 동일하게 1 km당 30℃가 증가하며, 지표면의 온도는 10℃로 설정하였다.

모델링은 Table 2와 같이 캐니스터와 완충재 간의 공극 여부, 완충재와 주변암석간의 접촉 조건에 차별화를 두어 해석을 수행하였다. Posiva 해외 연구 사례에 의하면, 실제 처분 시에 캐니스터 제조 및 설치에 따라 캐니스터와 완충재 및 완충재와 주변 암석 간에 공차가 발생한다고 설명하고 있다. 따라서, 본 논문에서는 해외 사례에 대한 공차를 A-KRS에 가정하여 적용하였다. 최초 처분에 발생할 수 있는 캐니스터와

Table 1. Material properties in the modeling [9]

Material	Properties	Values
Nodular cast iron insert	Density ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	7200
	Thermal conductivity ($\text{W}\cdot(\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$)	52
	Specific heat ($\text{J}\cdot(\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$)	504
Copper outer shell	Density ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	8900
	Thermal conductivity ($\text{W}\cdot(\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$)	386
	Specific heat ($\text{J}\cdot(\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$)	383
Ca-bentonite buffer	Density ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	1970
	Thermal conductivity ($\text{W}\cdot(\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$)	0.8
	Specific heat ($\text{J}\cdot(\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$)	1380
Backfill	Density ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	2270
	Thermal conductivity ($\text{W}\cdot(\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$)	2
	Specific heat ($\text{J}\cdot(\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$)	1190
Host rock	Density ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	2600
	Thermal conductivity ($\text{W}\cdot(\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$)	3
	Specific heat ($\text{J}\cdot(\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$)	900

완충재 간의 1 cm의 공극에 의한 영향을 평가하기 위하여 모델링에 적용하였으며, 완충재와 암석 간의 지하수가 3.5 cm 간격으로 채워져 있는 것을 해외사례를 참고하고 가정하여 모델링 하였다[7]. 또한, 처분공 간의 거리를 7 m, 8 m, 9 m의 차이를 두어 해석을 수행하였다.

Table 2. The difference of modeling boundary condition with previous study

Boundary condition	Previous study [9]	This study
Canister and Buffer interface	Unknown	1 cm air gap applied [7]
Heat source and canister interface	Not applied	Perfect contact
Buffer and rock interface	Perfect contact	3.5 cm water gap applied [7]
Distance between canisters	0.5 m	0.5 m
Distance between disposal holes	4,5,6,7,8 m	7, 8, 9 m
Heat source	Unknown	Nodular cast iron insert (Assumption)

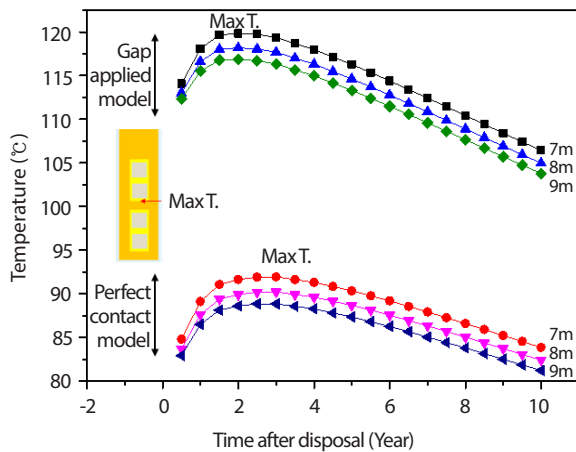


Fig. 3. The maximum buffer temperature after disposal with gap applied and the perfect contact applied model in this paper.

3. 모델링 해석 결과

3.1 시간에 따른 완충재 온도 분포

모나자이트 세라믹은 시간이 지남에 따라 내부 핵분열생성물의 방사성붕괴로 인하여 발열이 감소한다. 이에 따라 완충재의 온도 분포 또한 유동적으로 변하게 된다. 처분공의 완충재에서 가장 온도가 높은 위치는 Fig. 3에서 표기 하였듯이 캐니스터 사이에 있으며, 상단의 캐니스터와 직접 맞닿아

있는 부분이다. 이 부분은 캐니스터와 완벽한 접촉이 이루어지고 있어 발열체의 영향을 직접적으로 받는다.

그래프는 최고 온도를 보이는 완충재 위치를 그림과 같이 선정하여 처분 시점에서부터 시간에 따른 온도 변화를 나타내었다. 간격이 적용된 모델이 완벽한 접촉 조건을 갖는 모델보다 온도가 전반적으로 높았으며, 처분공 간의 거리가 증가할수록 두 모델에서 동일하게 온도가 감소하였다. 간격이 적용된 모델은 완충재의 온도가 10년이 지나도 100℃ 이상 유지되었다.

완충재의 온도가 최고 온도로 도달하는 시점은 두 모델이 상이 했다. 간격이 적용된 모델은 처분 뒤 2년 후에 최고 온도에 도달했으며, 완벽한 접촉 조건의 모델은 3년이 지난 뒤 완충재 최고 온도에 도달하였다. 온도 분포 경향이 완벽한 접촉 조건을 갖을 때 간극이 적용된 모델보다 완만한 곡선을 보이는 것은 효과적으로 열을 방출하여, 최고 온도 도달을 지연 시키는 것이라고 판단된다.

발열체의 열은 캐니스터를 통과하여 완충재 온도에 영향을 준다. 즉, 발열체의 온도 분포에 따라서 완충재 온도에도 영향을 준다. 발열체의 온도 분포는 위의 열 전달 방정식과 같이 소재 열전도도, 비열, 밀도에 의하여 정해진다. 캐니스터는 모나자이트 세라믹, 공기 층, Nodular cast iron insert 및 구리와 같이 여러 소재로 이루어져 있기 때문에 각각의 소재 특성에 따라 다른 온도 분포특성을 갖는다. 본 논문은 Nodular cast iron insert에서의 발열을 가정하였기 때문에 보다 정확하게는 발열체 부분을 실제와 같이 모델링 하는 것이 바람직하다. 다만, 여기서 주목해야 할 것은, 간극의 영향이 완충재의 온도상승을 초래한다는 것이며, 처분 개념을 설계할 때 이러한 접촉 저항과 관련된 부분을 상세히 따져봐야 한다는 것을 알 수 있다.

3.2 처분공 수직 방향 온도 분포

본 논문에서, 수평 방향으로의 완충재 온도 분포보다 중요한 것은 수직 방향으로의 완충재 온도 분포이다. 캐니스터 사이의 완충재가 상단과 하단의 발열체에서 열을 공급 받아 가장 높은 온도 분포를 갖기 때문에 수직방향 온도 분포가 중요한 지표가 될 수 있다.

처분에서의 수직 방향으로의 온도 분포 측정 위치는 Fig. 4의 모식도와 같이 중앙에 위치하게 나타내었다. 전반

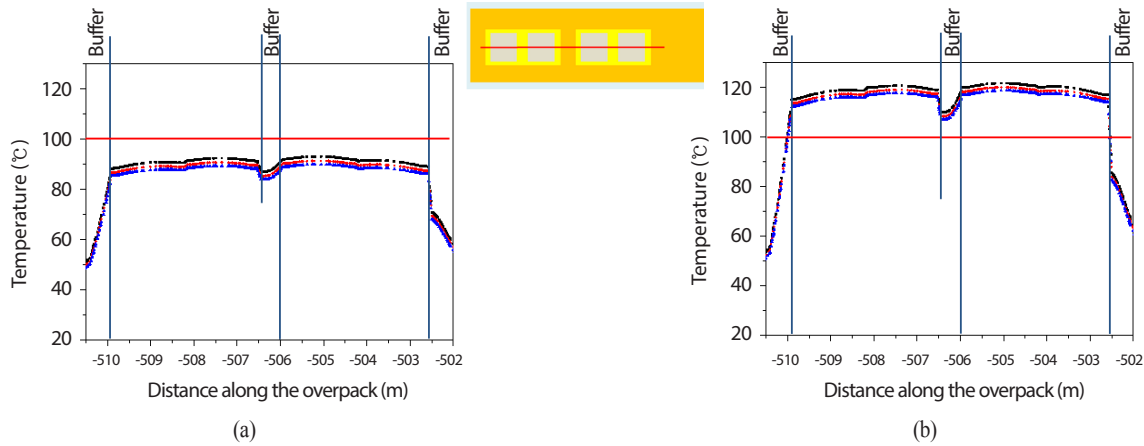


Fig. 4. Vertical temperature distribution according to the perfect condition model (a) and the gap applied model (b).

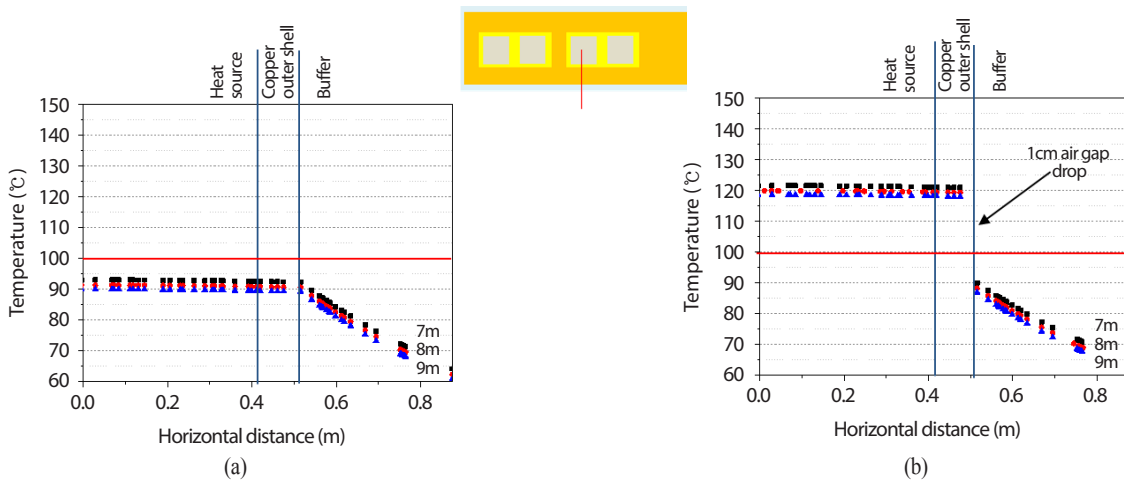


Fig. 5. Horizontal temperature distribution according to the perfect condition model (a) and the gap applied model (b).

적인 온도 분포는 수평 방향의 온도 분포와 마찬가지로 처분공의 거리가 멀어 질수록 감소하였고, 완벽한 접촉 조건 일 때가 열전달이 효율적으로 이루어져 상대적으로 발열체의 온도가 낮아 100℃ 이하로 해석 되었다. 이와는 반대로, 간극이 존재할 때, 접촉 저항이 발생하여 열이 효과적으로 빠져나가지 못하고, 발열체 부분의 온도가 상승하였다. 이 때문에 완충재의 온도 또한 동시에 상승한 것으로 판단된다.

캐니스터 사이의 완충재의 온도 상승을 최소화하는 설계 관점에서 보았을 때, 완충재와 상단 캐니스터 사이에 단열재를 설치하여 열 저항이 발생할 수 있도록 하는 것이 완충재에 직접 가해지는 온도를 낮춰 주기 때문에 처분에 유리할

것으로 판단된다. 이는 분명, 발열체의 온도를 상승 시키는 단점을 갖으며, 냉각 측면에서 비효율적이지만, 완충재 온도 관점에서 보았을 때 유리하다.

3.3 처분공 수평 방향 온도 분포

처분공에서의 수평 방향으로의 온도 분포 측정 위치는 Fig. 5의 처분공 모식도에 있는 선의 자료를 이용하였고, 발열체, 캐니스터 및 완충재의 온도 분포를 그래프에 나타내었다. 전반적인 온도 분포는 처분공 사이의 거리가 멀어 질수록 온도 분포가 감소하였다. 완벽한 접촉 조건의 Fig. 5 (a)는

열전달이 효과적으로 이루어져 (b)와 같이 저항으로 작용하는 간극이 있는 모델보다 발열체의 최고 온도가 전체적으로 낮았다.

완벽한 접촉 조건 일 때와 간극이 존재하였을 때의 완충재의 최고온도는 각각 92.3℃, 89.9℃로 간극이 있을 때 완충재의 온도가 낮았다. 간극은 완충재의 최고 온도 하강 측면에서는 유리하지만, 발열체의 온도를 상승시키는 단점을 갖고 있다. 이와는 반대로, 완벽한 접촉 조건일 경우, 열전달이 효율적으로 이루어지기 때문에, 완충재 최고 온도 상승 효과를 야기하지만, 발열체 온도 하강에 효과적임을 알 수 있다.

4. 결론

이전 연구의 완벽한 접촉 조건의 해석 조건에서 이를 보완하기 위하여 최초 처분 시 존재 할 수 있는 공학적 공차를 적용하여 모델링을 수행하였다. 간극을 적용하였을 때, 열전달이 상대적으로 비 효율적이기 때문에 완벽한 접촉 일 때 보다 발열체의 온도가 높게 나타났다. 하지만 수평 방향으로의 완충재 최고 온도는 간극에 의하여 완벽한 접촉보다 낮게 나타났다. 간극에 의하여 높아진 발열체의 온도가 캐니스터 사이의 완충재의 온도에 영향을 주기 때문에 캐니스터와 완충재 간에 온도를 낮출 수 있는 설계가 필요하다. 열 저항을 적용하는 것은 발열체의 온도 상승을 초래하지만 완충재의 온도 감소 측면에서는 유리할 수 있다.

보다 정확한 완충재의 온도 분포 해석을 위하여는 처분 공에서의 기하학적 형상을 단순화 할 것이 아니라, 실제로 적용되는 경계 조건과 발열체, 발열체를 적재하는 저장칸, 캐니스터 및 그 사이를 채우는 공기 층을 실제로 적용하여 모델링을 해야한다. 뿐만 아니라, 열전도도 해석만을 적용하여 완충재의 온도 분포를 모델링 하는 것에서 복사 및 대류를 도입하여 완충재 온도 분포 해석에 적용하여야 보다 정확한 모델링이 가능하다.

REFERENCE

[1] J. Lee, D. Cho, H.J. Choi, and J.W. Choi, "Concept

- of a Korean Reference Disposal System for Spent Fuels", *J. Nucl. Sci. Technol.*, 44(12), 1565-1573 (2007).
- [2] F. Gao and W.I. Ko, "Dynamic Analysis of a Pyroprocessing Coupled SFR Fuel Recycling", *Sci. Technol. Nucl. Install.*, 2012, 10, Article ID 390758.
- [3] J.Y. Lee, M.S. Lee, H.J. Choi, D.S. Bae, and K.S. Kim, "A Study on the Conceptual Development for a Deep Geological Disposal of the Radioactive Waste from Pyro-processing", *J. Korean Radioactive Waste Soc.*, 10(3), 219-228 (2012).
- [4] K.C. Song, H. Lee, J.M. Hur, J.G. Kim, D.H. Ahn, and Y.Z. Cho, "Status of Pyroprocessing Technology Development in KOREA", *Nucl. Eng. Technol.*, 42(2), 131-144 (2010).
- [5] S. Frank, W. Ebert, B. Riley, H.S. Park, Y.Z. Cho, C.H. Lee, M.K. Jeon, J.H. Yang, and H.C. Eun, "Waste Stream Treatment and Waste Form Fabrication for Pyroprocessing of Used Nuclear Fuel", INL/EXT-14-34013, July (2015).
- [6] S. Stothoff, "A Consequence Model for Bentonite Buffer Defects in Fractured Rock", IHLRWM, Charleston, SC, April 12-16 (2015).
- [7] K. Ikonen, "Thermal Analyses of Spent Nuclear Fuel Repository", Posiva Report, 2003-04 (2003).
- [8] J.O. Lee, M. Lee, and H. Choi, "Establishing the Concept of Buffer for a High-level Radioactive Waste Repository: An Approach", *J. Nucl. Fuel Cycle Waste Technol.*, 13(4), 283-293 (2015).
- [9] H.J. Choi, M. Lee, and J.Y. Lee, "Preliminary Conceptual Design of a Geological Disposal System for High-level Waste From the Pyroprocessing of PWR Spent Fuels", *Nucl. Eng. Des.*, 241(8), 3348-3356 (2011).