TUNNEL & UNDERGROUND SPACE Vol.31, No.4, 2021, pp.289-308
https://doi.org/10.7474/TUS.2021.31.4.289 ISSN: 1225-1275(Print) ISSN: 2287-1748(Online)

ORIGINAL ARTICLE

벤토나이트 완충재 설계 기준 온도에 따른 고효율 처분시스템 처분 간격 및 암반 조건 산정을 위한 수치해석적 연구

김광일[1], 이창수[2*], 김진섭[3], 조동건[3]

[1]한국원자력연구원 박사후연수자, [2]한국원자력연구원 선임연구원, [3]한국원자력연구원 책임연구원

A Numerical Analysis to Estimate Disposal Spacing and Rock Mass Condition for High Efficiency Repository Based on Temperature Criteria of Bentonite Buffer

Kwang-Il Kim[1], Changsoo Lee[2*], Jin-Seop Kim[3], Dongkeun Cho[3]

[1]Post-Doctoral Researcher, Korea Atomic Energy Research Institute
[2]Senior Researcher, Korea Atomic Energy Research Institute
[3]Principal Researcher, Korea Atomic Energy Research Institute

***Corresponding author:** leecs@kaeri.re.kr

Received: August 18, 2021
Revised: August 26, 2021
Accepted: August 26, 2021

ABSTRACT

This study conducts coupled thermo-hydro-mechanical numerical modeling to investigate the maximum temperature and conditions for securing mechanical stability of the high-level radioactive waste repository when temperature criteria of bentonite buffer are 100℃ and 125℃, respectively. In case of temperature criterion of buffer as 100℃, the maximum temperatures at the interface between canister and buffer are calculated to be 99.4℃ and 99.8℃, respectively for a case with disposal tunnel spacing of 40 m and deposition hole spacing of 5.5 m and for the other case with disposal tunnel spacing of 30 m and deposition hole spacing of 6.5 m. In case of temperature criterion of buffer as 125℃, spacings of disposal tunnel and deposition hole could be decreased to 30 m and 4.5 m, respectively, which reduces the disposal area up to 55% compared to the disposal area of KRS$^+$. According to analysis of mechanical stability for various disposal spacings, RMR of rock mass for KRS$^+$ should be larger than 72.4 which belongs to good rock in RMR classification to prevent failure of rock mass. As disposal spacing is decreased, required RMR of rock mass is increased. In order to prevent failure of rock mass for a case with disposal tunnel spacing of 30 m and deposition hole spacing of 4.5 m, RMR larger than 87.3 is needed. However, mechanical stability of the repository is secured for all cases with RMR over 75 considering the enhancement of rock strength due to confining stress induced by swelling of the bentonite buffer and backfill.

Keywords: High-level radioactive waste disposal, Temperature criteria of bentonite buffer, High-efficiency repository, Coupled thermo-hydro-mechanical behavior

초록

본 연구에서는 열-수리-역학적 복합거동 수치해석을 활용하여 국내 고준위방사성폐기물 처분장의 완충재의 설계 기준 온도가 100℃ 및 125℃인 경우, 처분 간격에 따른 처분시스템의 최고 온도를 계산하고,

© The Korean Society for Rock Mechanics and Rock Engineering 2021. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/ licenses/by-nc/4.0/) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

역학적 안정성을 확보하기 위한 암반의 조건을 도출하였다. 완충재의 설계 기준 온도를 현재와 같이 100℃로 유지할 때, 처분터널 간격이 40 m, 처분공 간격이 5.5 m인 경우와 처분터널 간격이 30 m, 처분공 간격이 6.5 m인 경우, 처분용기와 완충재가 접하는 점에서 최고 온도가 각각 99.4℃ 및 99.8℃로 계산되었다. 완충재의 설계 기준 온도를 125℃로 향상시킨 경우, 처분터널 간격을 30 m, 처분공 간격을 4.5 m까지 감소시켜 처분 면적을 KRS$^+$ 기반 처분시스템 대비 55%까지 감소시킬 수 있었다. 다양한 처분 간격에 대해 암반에서의 역학적 안정성을 평가한 결과, 암반파괴가 발생하지 않기 위해서는 KRS$^+$ 기반 처분시스템은 암반의 RMR 분류법의 Good rock에 해당하는 RMR 72.4 이상의 조건이어야 했다. 처분 간격이 감소할수록 암반의 RMR이 더 높아야 했으며, 처분터널 간격 30 m, 처분공 간격 4.5 m인 경우에는 RMR 87.3 이상이 되어야 암반의 파괴를 방지할 수 있었다. 그러나, 처분 이후 지하수 유입 시 벤토나이트 완충재 및 뒤채움재의 팽윤에 따른 구속압에 의한 암반 강도의 증가를 고려하면, 해석을 수행한 모든 처분 간격에 대해 암반의 RMR이 75 이상이면 역학적 안정성을 확보할 수 있었다.

핵심어: 고준위방사성폐기물 처분, 벤토나이트 완충재 설계 기준 온도, 고효율 처분시스템, 열-수리-역학적 복합거동

1. 서 론

원자력발전 시 생성되는 사용후핵연료는 높은 열과 방사성 독성을 방출하므로 사용후핵연료를 인간 생활권으로부터 영구적으로 격리하여 안전을 확보하는 것이 필수적이다. 기술력과 경제성을 고려할 때, 지하 수백 미터 심도의 균열이 적고 안정된 암반에 처분터널과 처분공을 굴착하여 사용후핵연료 처분하는 심지층처분 방식이 가장 유력하게 고려되고 있다. 심지층처분에서는 사용후핵연료를 밀봉한 처분용기를 처분공에 넣고, 처분용기와 암반 사이를 벤토나이트 완충재로 채워 암반으로부터 유입되는 지하수와 역학적인 충격으로부터 처분용기를 보호한다. 처분터널은 벤토나이트와 모래 혼합물로 된 뒤채움재를 채워 처분장을 폐쇄한다. 다중방벽시스템은 처분용기, 완충재 및 뒤채움재로 구성된 인위적인 보완시스템인 공학적방벽시스템(Engineered Barrier System, EBS)과 균열 밀도가 낮고 안정된 주변 암반인 천연방벽시스템(Natural Barrier System, NBS)으로 구성되며, 대표적으로 스웨덴 SKB가 제안한 KBS-3V 개념(SKB, 2010)이 존재한다(Fig. 1). 국내의 경우, KBS-3V 개념을 바탕으로 국내의 처분 조건에 맞추어 수정한 한국형 기준 처분시스템(Korean Reference Disposal System, KRS)이 Lee et al.(2007)에 의해 제안되었고, 2020년에

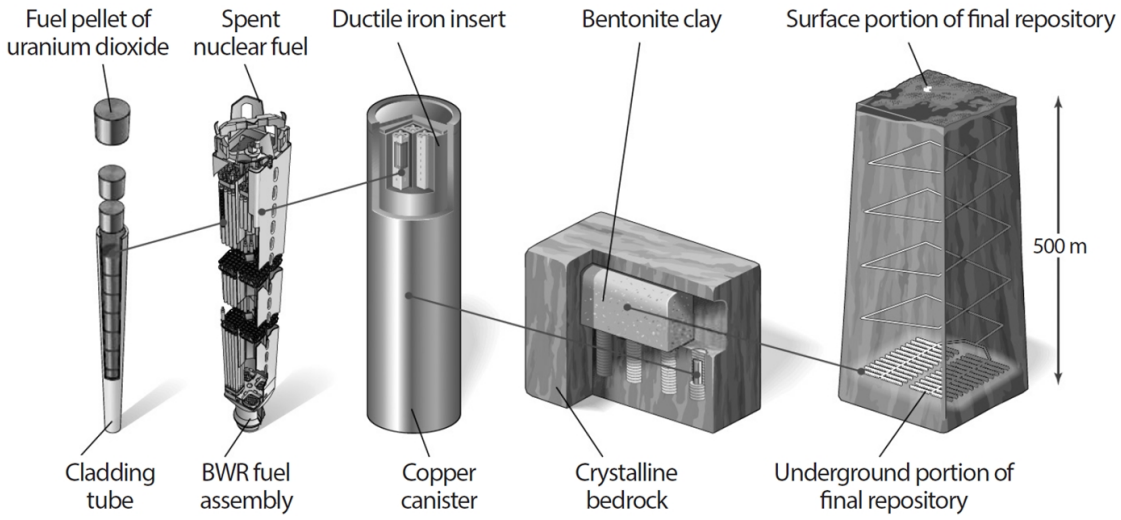


Fig. 1. Schematic diagram of KBS-3V multi-barrier system (SKB, 2010)

는 사용후핵연료의 종류 및 규격에 따라 처분 방식과 처분용기의 규격을 세분화한 향상된 한국형 기준 처분시스템(Improved Korean Reference Disposal System, KRS$^+$)이 제안되었다(Kim et al., 2021, Lee et al., 2020b).

벤토나이트 완충재가 장기간 고온에 노출될 경우 변질로 인해 공학적방벽으로서의 성능 저하가 나타날 수 있으므로 (Posiva and SKB, 2017) KRS 및 KRS$^+$ 기반 처분시스템 설계 시 완충재의 설계 기준 온도를 100°C로 설정하여 처분 간격을 산정하였으며, 처분 면적은 각각 5.98 km^{2}과 4.89 km^{2}로 계산되었다(Lee et al., 2020b). 이와 같이 고준위방사성폐기물 처분장을 건설할 넓은 규모의 양질의 암반층을 확보하는 것은 한국의 좁은 국토 면적과 높은 인구 밀도를 고려할 때 매우 어려울 수 있다. 따라서, 처분 효율을 향상시켜 동일한 면적에 더 많은 양의 사용후핵연료를 처분할 수 있는 고효율 처분시스템을 개발하여 대중 수용성과 국토 이용의 효율성을 확보할 필요가 있다. Cho and Kim(2016)은 KBS-3V 개념으로 대표되는 단층 및 단일 처분용기 개념(Single-layer and single-canister repository)을 확장하여 다층 처분(Multi-layer repository) 및 다수 처분용기 처분(Multi-canister repository)개념을 제안하고, 열해석을 수행하여 다양한 고효율 처분시스템의 적용 가능성을 분석하였다. Lee et al.(2020a)은 KRS 기반 처분시스템을 이층 및 삼층으로 확장한 다층 처분 시스템에 대해 열-수리-역학적 복합거동(Coupled Thermo-Hydro-Mechanical(THM) processes) 수치해석을 수행하였다. 다만, 다층 처분 시스템의 경우 단층 처분시스템보다 더 깊은 심도에 추가적인 처분 공간을 확보해야 하므로 기술적 및 경제적 측면을 고려할 때, 단층 처분시스템의 처분 간격을 감소시켜 처분 효율을 높이는 방식이 우선적으로 고려될 수 있다.

고준위방사성폐기물 처분 이후 처분시스템에서는 주변 암반으로부터의 지하수 유입과 처분용기에서의 방사성 붕괴열이 발생하며 이로 인해 열적, 수리적, 역학적 인자가 상호 영향을 주고 받는 THM 복합거동이 발생한다(Fig. 2). 완충재의 온도 상승에 의한 공극수의 증발 및 지하수 유입으로 인한 포화도 변화는 완충재의 열전도도를 변화시켜 처분시스템의 열적 성능에 영향을 미친다. 이는 열응력 발생에 의한 처분시스템의 역학적 안정성을 변화시키므로, 처분시스템의 처분 간격 산정 시 열적 해석뿐만 아니라 THM 복합거동을 고려한 수리 및 역학적 해석이 동반되어야 한다. 기존에 수행된 KRS 및 KRS$^+$ 기반 처분시스템의 THM 복합거

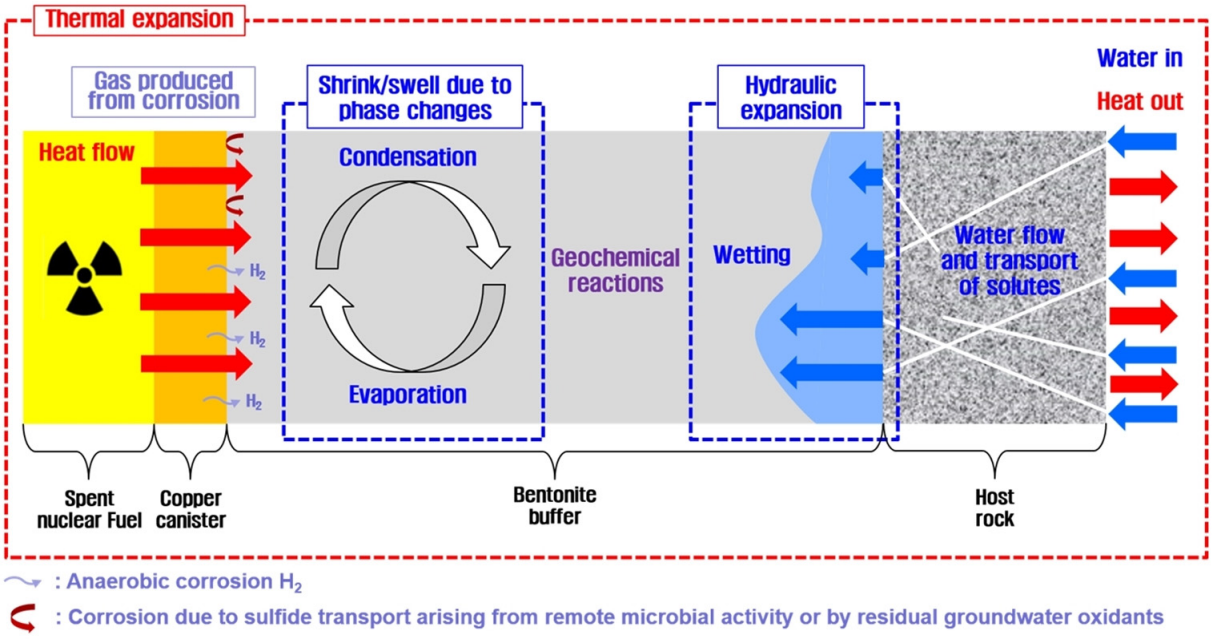


Fig. 2. Coupled thermo-hydro-mechanical (THM) processes in the high-level radioactive waste repository by decay heat and water inflow (Lee et al., 2020a)

동 수치해석은 완충재의 설계 기준 온도 100°C를 기준으로 수행되었으나(Lee et al., 2019, Lee et al., 2020a, Kim et al., 2021), 여러 국가에서 처분효율 향상을 위해 100°C 이상의 고온에서의 완충재의 물성 변화에 관한 연구를 수행하고 있으며, 일반적으로 150°C 이하의 온도에서는 완충재의 재료적, 구조적 및 광물학적 안전성에 미치는 영향이 크지 않은 것으로 나타났다(Kim et al., 2019, POSIVA, 2008, Pusch et al., 2003). 따라서, 본 연구에서는 국가별 완충재 설계 기준 온도 및 100°C 이상의 고온에서의 완충재의 물성 변화에 관한 기존 연구를 검토하고, 완충재의 설계 기준 온도를 125°C로 상향시켰을 시 KRS^+ 기반 처분시스템을 기준으로 처분 간격을 변화시킨 고효율 처분시스템의 THM 복합거동 성능평가를 수행하여 처분 간격 및 역학적 안정성을 위한 암반 조건을 산정하고자 한다.

2. 완충재 설계 기준 온도

2.1 국가별 완충재 설계 기준 온도

벤토나이트의 낮은 수리전도도와 물과 접촉 시 팽창하는 팽윤 특성은 처분용기를 주변 암반에서 유입되는 지하수로부터 차단하고, 처분공 내의 사용후핵연료와 암반 사이의 갭을 메움으로써 처분용기를 보호하기에 적합하다. 또한, 처분용기의 부식으로 인해 발생한 가스 압력으로 완충재에 균열이 생성될 시 소성 거동(plastic behavior)으로 균열을 밀봉하는 자가밀봉(self-sealing) 성능과 방사성핵종과의 화학적 반응으로 인한 흡착 및 흡수 등을 통해 처분용기가 파손되었을 경우 누출될 수 있는 방사성핵종의 이동을 제한할 수 있다. 벤토나이트가 고온에서 장기간 노출될 시 이러한 성능이 저하될 수 있기 때문에 고준위방사성폐기물의 심지층처분을 고려하는 여러 국가들은 각자의 처분 조건에 따른 완충재 및 처분시스템의 설계 기준 온도를 설정하고 있다(Table 1).

핀란드와 스웨덴은 사용후핵연료를 결정질 암반에 처분할 계획이며, 완충재의 건조와 구리 처분용기의 부식이 과도하게 발생하는 것을 방지하기 위해 설계 기준 온도를 100°C로 설정하였다(POSIVA, 2008, SKB, 2003). 스위스 NAGRA는 125°C에서 벤토나이트의 팽창성능 저하가 미미하다는 연구 결과(Pusch et al., 2003)를 바탕으로 벤토나이트 채움재의 중심(Fig. 3)에서의 설계 기준 온도를 125°C로 정하였다(NAGRA, 2002). 독일은 별도의 완충재 및 뒤채움재의 사용 없이 처분 용기를 암염층에 처분하여, 암반이 천연방벽으로서의 역할을 수행하며 암염에서의 설계 기준 온도를 200°C로 규정하고 있다(Graf and Filbert, 2006). 벨기에는 사용후핵연료를 탄소강 용기(Carbon steel overpack)에 넣고 이를 콘크리트 완충재와 스테인리스강으로 보호하는 수퍼컨테이너를 붐 점토층(Boom Clay)에 처분하는 개념으로 탄소강 용기의 표면에서의 온도가 100°C를 넘지 않도록 규제한다(Wickham, 2008). 스페인은 탄소강 용기를 둘러싸는 벤토나이트의 설계 기준 온도를 100°C로 정하였다(Alonso and Cormenzana, 2005). 캐나다는 CANDU 형 사용후핵연료를 포함한 처분용기의 부식과 벤토나이트 완충재의 변질을 방지하기 위해 완충재에서의 최대 온도가 100°C 이하로 유지되도록 하였다(Johnson et al., 1994). 미국은 별도의 완충재 및 뒤채움재 없이 사용후핵연료를 지하수위보다 위에 장기저장하는 방식으로, 저장 후 처음 500년 간은 사용후핵연료의 온도가 300°C 이하, 이후 9,500년 동안은 200°C 이하로 유지되도록 규정한다(SNL, 2007). 일본은 70 wt.% 벤토나이트와 30 wt.% 모래를 혼합한 완충재를 사용하며, 설계 기준 온도를 100°C로 정하였다(JNC, 2000). 한국의 KRS 및 KRS^+ 기반 처분 시스템도 처분용기와 완충재가 접하는 표면에서의 온도를 100°C 이하가 되도록 규정하고 있다(Lee et al., 2007, Lee et al., 2020b).

Table 1. Temperature criteria for bentonite buffer and radioactive waste repositories in countries considering subsurface radioactive waste disposal

Country	Temperature criteria (°C)	Feature	Reference
Finland	100	Disposal in crystalline rock	POSIVA (2008)
Sweden	100	Disposal in crystalline rock	SKB (2003)
Switzerland	125	Disposal in clay rock	NAGRA (2002)
Germany	200 (at salt rock)	Disposal in salt rock without buffer and backfill materials	Graf and Filbert (2006)
Belgium	100	Disposal in Boom Clay with concrete buffer	Wickham (2008)
Spain	100	Carbon steel overpack as a material for a canister	Alonso and Cormenzana (2005)
Canada	100	CANDU spent nuclear fuel	Johnson et al. (1994)
United States	200 and 300 (at radioactive waste packages)	Disposal without buffer and backfill materials	SNL (2007)
Japan	100	Mixture of 70 wt.% bentonite and 30 wt.% silica sand	JNC (2000)
Korean	100	Cast iron and copper as a material for a canister	Lee et al (2007) Lee et al. (2020b)

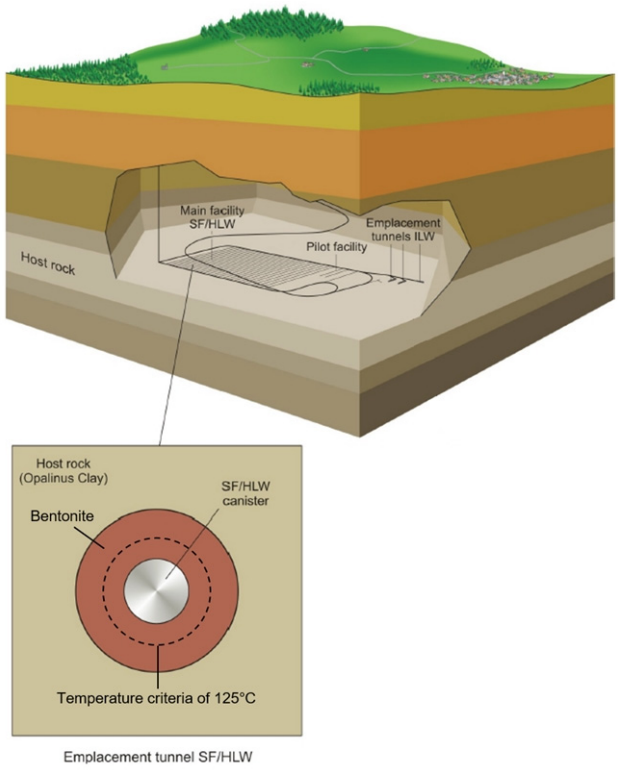


Fig. 3. Temperature criteria of bentonite with a possible layout for a deep geological repository in Opalinus Clay in Switzerland (modified from NAGRA, 2002)

2.2 고온에서의 완충재 물성 변화

대부분의 국가에서 완충재의 설계 기준 온도를 100°C로 규정하고 있으나 처분효율을 높이기 위해 100°C 이상의 고온에 벤토나이트가 노출되었을 때 나타날 수 있는 물성 변화에 대한 다양한 연구들이 수행되었다. Tohata et al.(1998)은 벤토나이트 파우더를 60°C, 100°C 및 200°C 온도에서 5일간 가열한 후 물성 측정 실험을 수행하였는데, 벤토나이트의 액성한계 및 소성한계는 온도의

영향을 받지 않았으며, 증류수와 혼합하였을 때도 팽윤성능이 저하되지 않았다. Allen et al.(1984) 및 Cho(2019)는 각각 온도 300°C 및 200°C 이하에서는 벤토나이트의 구조적 안정성이 거의 영향을 받지 않는다고 보고하였다. 스위스의 FEBEX(Full-Scale Engineered Barriers Experiment) 프로젝트에서 완충재가 일시적으로 200°C 이상의 온도에 노출되었는데, 완충재 내부에서의 비가역적인 구조적 변화가 발생하여 완충재의 팽윤성능이 저하된 것으로 보고되었다(Martin and Barcala, 2005). 벤토나이트가 150°C 이상의 수증기에 노출되었을 때, 실리카(SiO_2)의 침전으로 시멘트화(cementation)가 발생하여 벤토나이트의 팽윤성능이 현저히 감소하는 것이 확인되었다(Couture, 1985, Pusch et al., 2003). 마찬가지로, Wersin et al.(2007)에 따르면, 110°C 까지는 벤토나이트의 팽윤압과 수리전도도의 변화가 나타나지 않았으나, 130°C에서는 시멘트화 현상이 약간 발생하였고, 150°C 이상에서는 상당한 수준으로 나타났다. 각 연구마다 다양한 실험 조건으로 인해 연구 결과가 조금 다르게 나타나지만, 전반적으로 150°C 이하의 온도에서는 완충재의 재료적, 구조적 및 광물학적 변화가 크지 않는 것으로 파악된다(Kim et al., 2019).

3. 수치모델

3.1 수치해석 코드

TOUGH2(Pruess et al., 2011)는 미국 로렌스 버클리 국립연구소(Lawrence Berkeley National Laboratory)에서 개발된 다상, 다성분 유체의 열적 및 수리적 거동을 모사할 수 있는 프로그램이며, FLAC3D(Itasca, 2012)는 지반의 역학적 거동을 해석하는 3차원 유한차분법 수치해석 프로그램이다. TOUGH2와 FLAC3D가 결합된 TOUGH2-FLAC3D 시뮬레이터는 THM 복합거동 해석이 필요한 고준위방사성폐기물 심지층처분, 이산화탄소 지중저장, 지열 발전 등의 분야에 활용되고 있다(Jeanne et al., 2014, Rutqvist, 2020, Rutqvist et al., 2002). 본 연구에서는 기존의 TOUGH2-FLAC3D와 동일한 알고리즘을 기반으로 TOUGH2를 병렬해석이 가능한 TOUGH2-MP(Zhang et al., 2008)로 변경하여 해석 속도를 향상시킨 TOUGH2-MP/FLAC3D 시뮬레이터(Fig. 4)를 활용한 THM 복합거동 수치해석을 수행하였다. FLAC3D는 탄성 모델을 적용하였고, TOUGH2-MP는 처분시스템 내 지하수 유동을 고려하기 위해 EOS3(water, air) 모듈(Pruess et al., 2011)을 사용하였다.

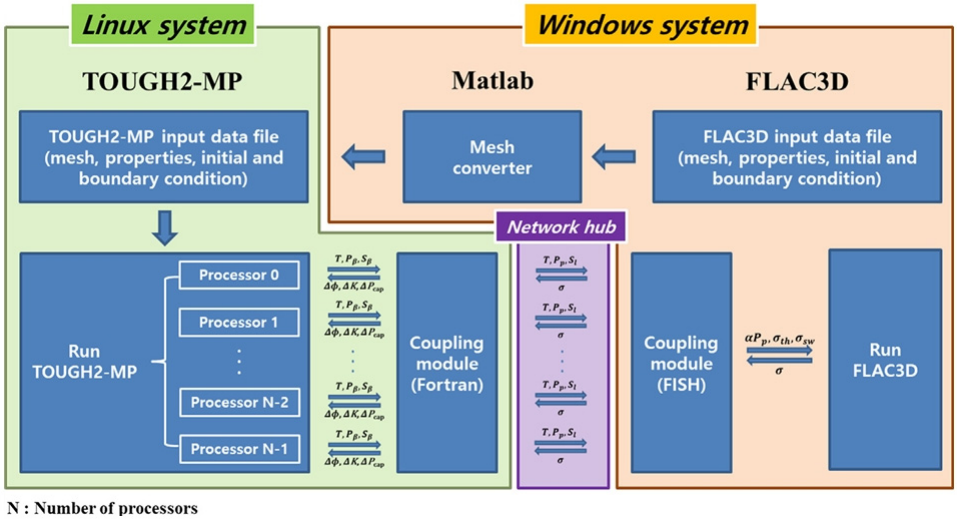


Fig. 4. Algorithm of TOUGH2-MP/FLAC3D simulator (Lee et al., 2016)

3.2 해석 조건

본 연구에서 사용된 수치모델은 Fig. 5와 같이 처분장의 중심 영역에 위치하는 단일 처분모듈의 1/4 대칭 모델을 사용하였다. 모델의 형상(Fig. 6(a)), 입력 물성(Table 2), 초기 및 경계 조건(Fig. 6(b))은 Kim et al.(2021)에서 수행한 KRS$^+$ 기반 처분시스템의 THM 복합거동 성능평가에 사용된 수치모델과 동일하며, Table 3과 같이 처분터널 및 처분공 간격을 변경시킨 고효율 처분시스템을 대상으로 해석을 수행하였다. 처분장의 굴착 및 환기로 인한 영향을 고려하기 위해 초기 및 경계 조건을 가한 후 굴착을 수행하고, 처분터널 및 처분공의 온도 및 압력을 각각 15°C와 대기압 상태로 일정하게 유지한 후 10년간 해석을 수행하였다. 사용후핵연료는 PWR R-SNF를 기준 폐기물로 사용하였으며, Lee et al.(2020b)은 PWR R-SNF를 45년간 소내 저장 후 처분하도록 KRS$^+$ 기반 처분시스템을 설계하였으나, 본 연구에서는 KRS 기반 처분시스템과 동일한 40년간 소내 저장 후 처분하는 조건에서의 발열량을 계산하여(Kim et al., 2021) 보수적인 평가를 수행하고자 했다. 기존의 연구들에서 처분시스템의 최고 온도가 나타나는 시점이 처분 후 100년 이내로 나타나므로(Kim et al., 2021, Lee et al., 2020a), 사용후핵연료 처분 이후 100년간 해석을 수행하여 완충재의 최고 온도 및 온도분포 변화를 계산하였다. 추가적으로, Case 1, Case 6, Case 11 및 Case 14에 대해 처분 이후 10,000년간 해석을 수행하여 처분시스템의 장기간 역학적 안정성을 확보하기 위한 암반의 조건을 도출하고자 한다.

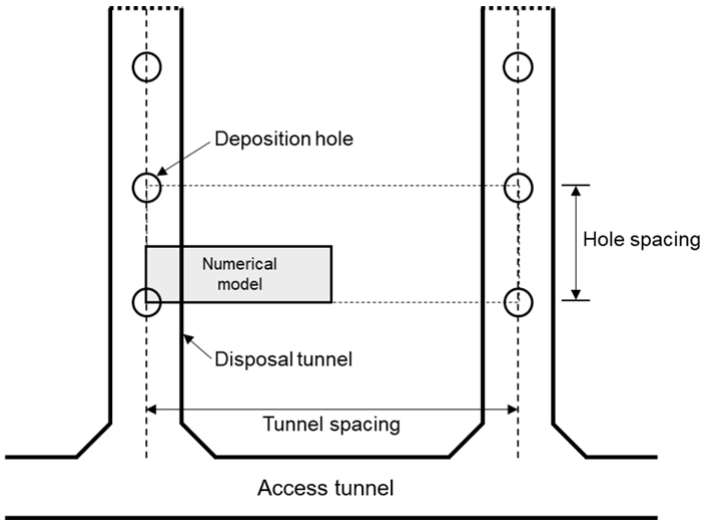


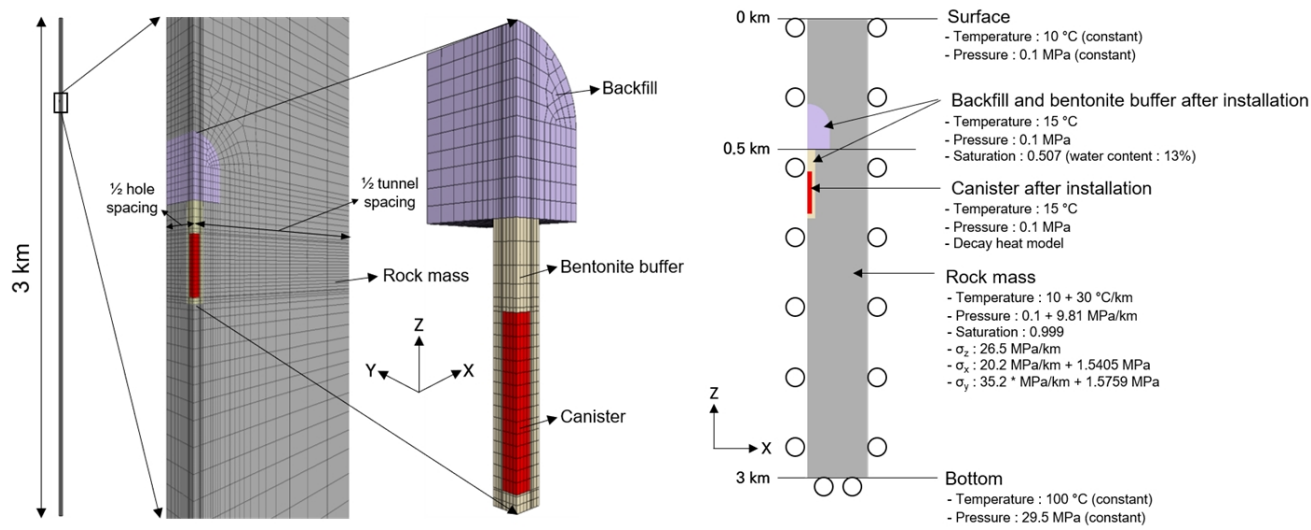
Fig. 5. Schematic diagram of the disposal tunnels and deposition holes from top-down view

Table 2. Properties of the numerical model (Kim et al., 2021)

Properties	Rock mass	Bentonite buffer	Backfill	Canister
Density (kg/m^3)	2,650	1,600	1,600	6,577
Porosity (%)	1.16	41.0	40.0	0.001
Thermal conductivity in dry condition (W/mK)	3.05	0.521	1.00	401
Thermal conductivity in saturated condition (W/mK)	3.31	1.234	2.00	401
Specific heat of solid (J/kg·K)	820.0	1,061	980.0	390
Linear thermal expansion coefficient (/K)	Eq. (11)	5.0×10^{-6}	5.0×10^{-6}	1.7×10^{-5}
Permeability (m^2)	1.0×10^{-18}	2.32×10^{-20}	1.0×10^{-19}	0.0
n in Eq. (2) (-)	3.0	3.0	1.9	-

Table 2. Properties of the numerical model (Kim et al., 2021) (continued)

Properties	Rock mass	Bentonite buffer	Backfill	Canister
S_{lr} in Eq. (4) (-)	0.01	0.01	0.01	0.01
λ_{van} in Eq. (5) (-)	0.6	0.2941	0.5	-
$1/P_{van}$ in Eq. (5) (-)	5.0×10^{-7}	2.6×10^{-7}	3.3×10^{-7}	-
Klinkenberg parameter, b (Pa^{-1})	6.86×10^{5}	5.0×10^{8}	1.61×10^{6}	-
Tortuosity (-)	0.8	0.67	0.80	-
Biot's coefficient (-)	1.0	1.0	1.0	-
Young's modulus (GPa)	32.8	0.59	0.59	155.0
Poisson's ratio (-)	0.3	0.20	0.20	0.285
Maximum swelling pressure, $\sigma_{max,sw}$ (MPa)	-	5.0	3.0	-



(a) (b)

Fig. 6. (a) a quarter symmetric model and (b) initial and boundary conidtions of the KRS^{+} numerical model (Kim et al., 2021)

Table 3. Cases of numerical simulations with various disposal tunnel and deposition hole spacings

Case	Disposal tunnel spacing (m)	Deposition hole spacing (m)
Case 1 (KRS^{+})	40	7.5
Case 2	40	7.0
Case 3	40	6.5
Case 4	40	6.0
Case 5	40	5.5
Case 6	40	5.0
Case 7	40	4.5
Case 8	30	7.5
Case 9	30	7.0
Case 10	30	6.5
Case 11	30	6.0
Case 12	30	5.5
Case 13	30	5.0
Case 14	30	4.5

4. 수치해석 결과

4.1 처분 간격에 따른 처분시스템 열적 거동

Fig. 7에 처분 이후 100년까지의 처분용기에서의 방사성붕괴열 변화 및 처분 간격에 따른 처분용기와 완충재의 접촉면의 중간 지점에서의 온도 변화가 나타나있다. KRS$^+$ 기반 처분시스템의 최고 온도는 처분 14년 후 87.3°C로 계산되었으며, 처분 간격이 감소할수록 최고 온도는 점차 증가하였다. 완충재의 설계 기준 온도가 100°C인 경우, 처분터널 및 처분공 간격이 40 m 및 5.5 m인 Case 5의 최고 온도가 처분 22.3년 후 99.4°C로 계산되었다. 처분터널 간격을 30 m로 감소시킨 경우 처분공 간격이 6.5 m인 Case 10의 최고 온도가 처분 29.3년 후 99.8°C로 계산되었다. Case 5 및 Case 10의 단위 처분 면적은 각각 220 m^2 및 195 m^{2}으로 KRS$^+$ 기반 처분시스템에 비해 처분 면적이 약 26.7 % 및 35 % 감소하였다. 따라서, 완충재 설계 기준 온도를 100°C로 유지시킬 때, 처분공 간격만 감소시키는 것보다 처분터널과 처분공 간격을 같이 감소시키는 경우에 더 높은 처분 효율을 확보할 수 있었다. 완충재의 설계 기준 온도가 125°C인 경우, 처분 간격을 추가적으로 감소시켜 처분터널 간격 40 m, 처분공 간격 4.5 m인 Case 7의 최고 온도가 110.5°C로 계산되었다. 한편, 처분터널 간격을 30 m까지 감소시킨 Case 14의 최고 온도가 123.5°C이므로 완충재의 설계 기준 온도를 초과하지 않는 처분 간격 한계치는 처분터널 간격 30 m, 처분공 간격 4.5 m로 나타났다. 이 때, 단위 처분 면적은 135 m^{2}으로 KRS$^+$ 기반 처분시스템 대비 55 % 감소시킬 수 있다. 처분 간격에 따른 최대 온도, 최대 온도 발생 시점 및 KRS$^+$ 기반 처분시스템 기준 처분 면적비가 Table 4에 정리되어 있다.

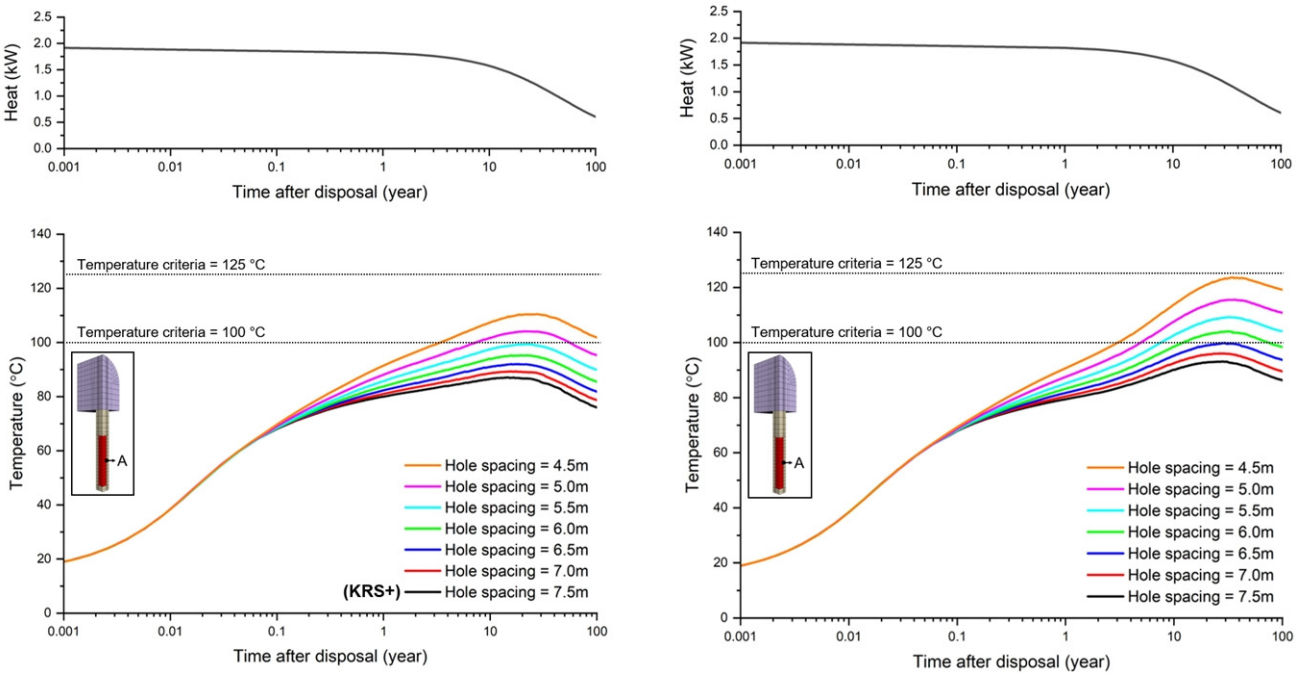


Fig. 7. Evolutions of decay heat and temperature at the middle of the interface between canister and bentonite buffer (at Point A) from 0.001 year to 100 years after the disposal of the PWR R-SNF with various disposal tunnel and deposition hole spacings. Disposal tunnel spacings are (a) 40 m and (b) 30 m, respectively as deposition hole spacing varies from 4.5 m to 7.5 m

Table 4. Maximum temperature, time of the maximum temperature, and disposal area compared to KRS$^+$ for cases 1 to 14

Case	Maximum temperature (°C)	Time of the maximum temperature (year)	Disposal area compared to KRS$^+$ (%)
Case 1 (KRS$^+$)	87.3	14.4	100.0
Case 2	89.3	15.6	93.3
Case 3	92.1	15.8	86.7
Case 4	95.3	19.7	80.0
Case 5	99.4	22.3	73.3
Case 6	104.1	21.6	66.7
Case 7	110.5	22.0	60.0
Case 8	93.1	28.0	75.0
Case 9	96.0	27.5	70.0
Case 10	99.8	29.3	65.0
Case 11	104.0	31.0	60.0
Case 12	109.2	32.4	55.0
Case 13	115.5	36.6	50.0
Case 14	123.5	35.0	45.0

일반적으로 벤토나이트 완충재의 열전도도는 암반의 열전도도보다 상대적으로 낮기 때문에 열 전달이 느리게 나타나므로 처분용기와의 거리가 멀어질수록 완충재의 온도는 빠르게 낮아지게 된다. Fig. 8 및 Fig. 9에 처분터널 간격이 40 m 및 30 m인 경우에 처분용기의 중심으로부터 암반까지의 수평 거리에 따른 온도 분포가 처분 이후 경과 시간 및 처분공 간격에 따라 나타나있다. 처분한지 일정 시간 경과 후 사용후핵연료의 온도가 가장 높게 나타나고 완충재의 안쪽에서 바깥으로 갈수록 온도가 빠르게 감소하며, 암반에서의 온도 감소는 상대적으로 천천히 나타났다. 완충재의 설계 기준 온도가 100°C이고, 처분터널 간격이 40 m 인 경우, 처분공 간격이 7.5 m부터 5.5 m까지는(Case 1~Case 5) 완충재 전체의 온도가 설계 기준 온도를 넘지 않았다. 처분공 간격이 5.0 m (Case 6)일 때는 완충재의 전체 두께 36 cm 중 완충재 부피의 약 16 %에 해당하는 안쪽 7.2 cm가 설계 기준 온도를 초과하였으며, 처분공 간격이 4.5 m (Case 7) 일 때는 완충재 부피의 57.4 %가 설계 기준 온도를 초과하였다. 처분터널 간격이 30 m 인 경우, 처분공 간격이 6.0 m (Case 11) 및 5.5 m (Case 12) 일 때, 완충재 부피의 16.9 %와 53.6 %가 100°C 이상의 온도에 노출되었으며, 처분공 간격 5.0 m 이하(Case 13, Case 14)에서는 완충재 전체가 설계 기준 온도를 초과하였다. 설계 기준 온도를 125°C로 설정하였을 때는 모든 경우에 대해 완충재의 온도가 설계 기준 온도 이하로 유지되었다. 만약 완충재의 설계 기준 온도가 100°C로 유지되더라도 일반적으로 150°C 이하의 온도에서는 완충재의 성능 저하가 크지 않다는 연구 결과(Kim et al., 2019)를 참고할 때, Case 6 및 Case 11과 같이 완충재의 일부(16~17 %)가 설계 기준 온도를 초과하더라도 처분공을 넓히고 완충재의 두께를 4.4 cm 증가시킨다면 원래의 완충재와 동일한 부피의 완충재가 본래의 성능을 유지할 수 있다.

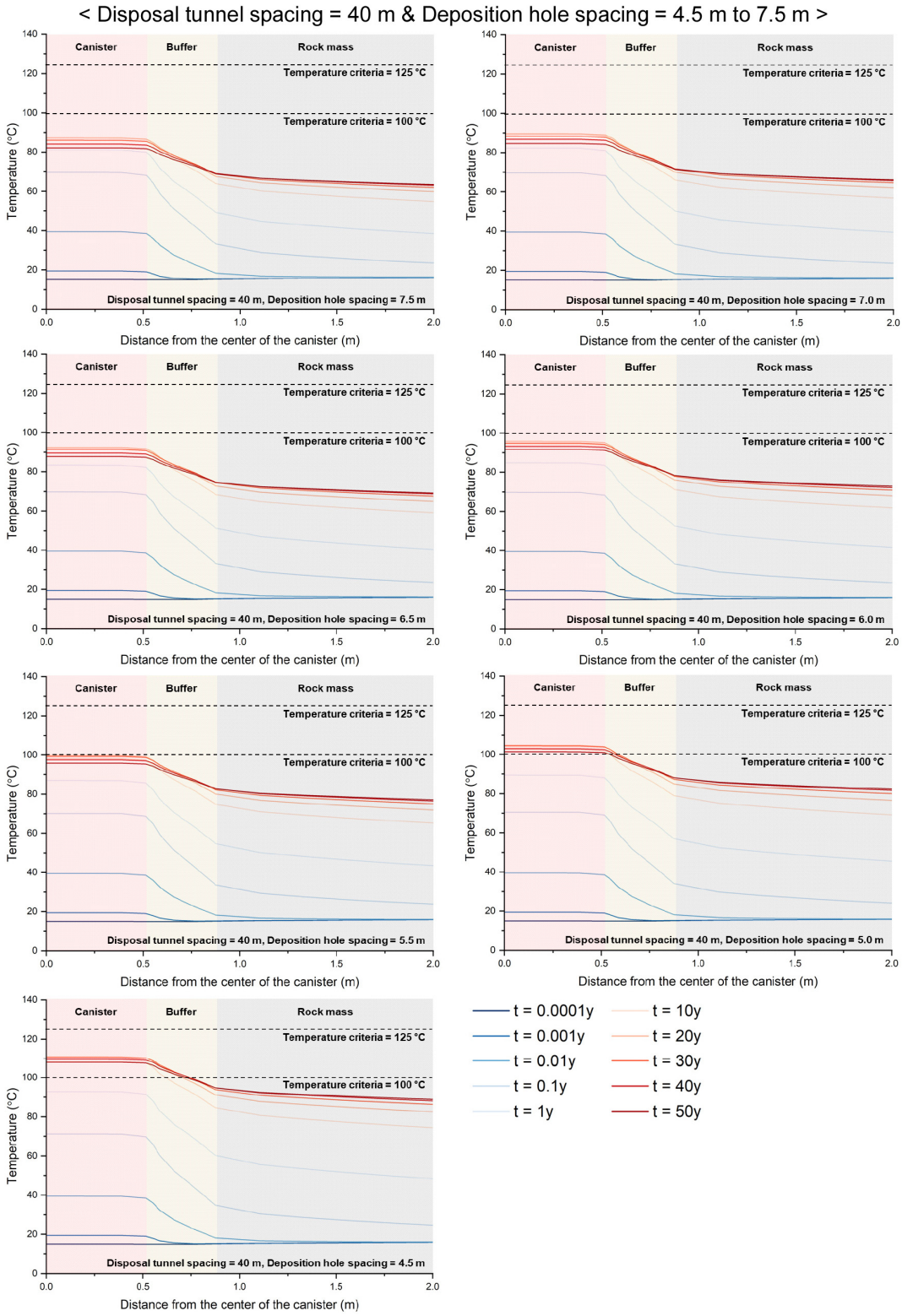


Fig. 8. Horizontal distributions of temperature from the center of the canister to the rock mass at 0.0001 year to 100 years after the disposal of the PWR R-SNF. Disposal tunnel spacing is 40 m as deposition hole spacings vary from 4.5 m to 7.5 m

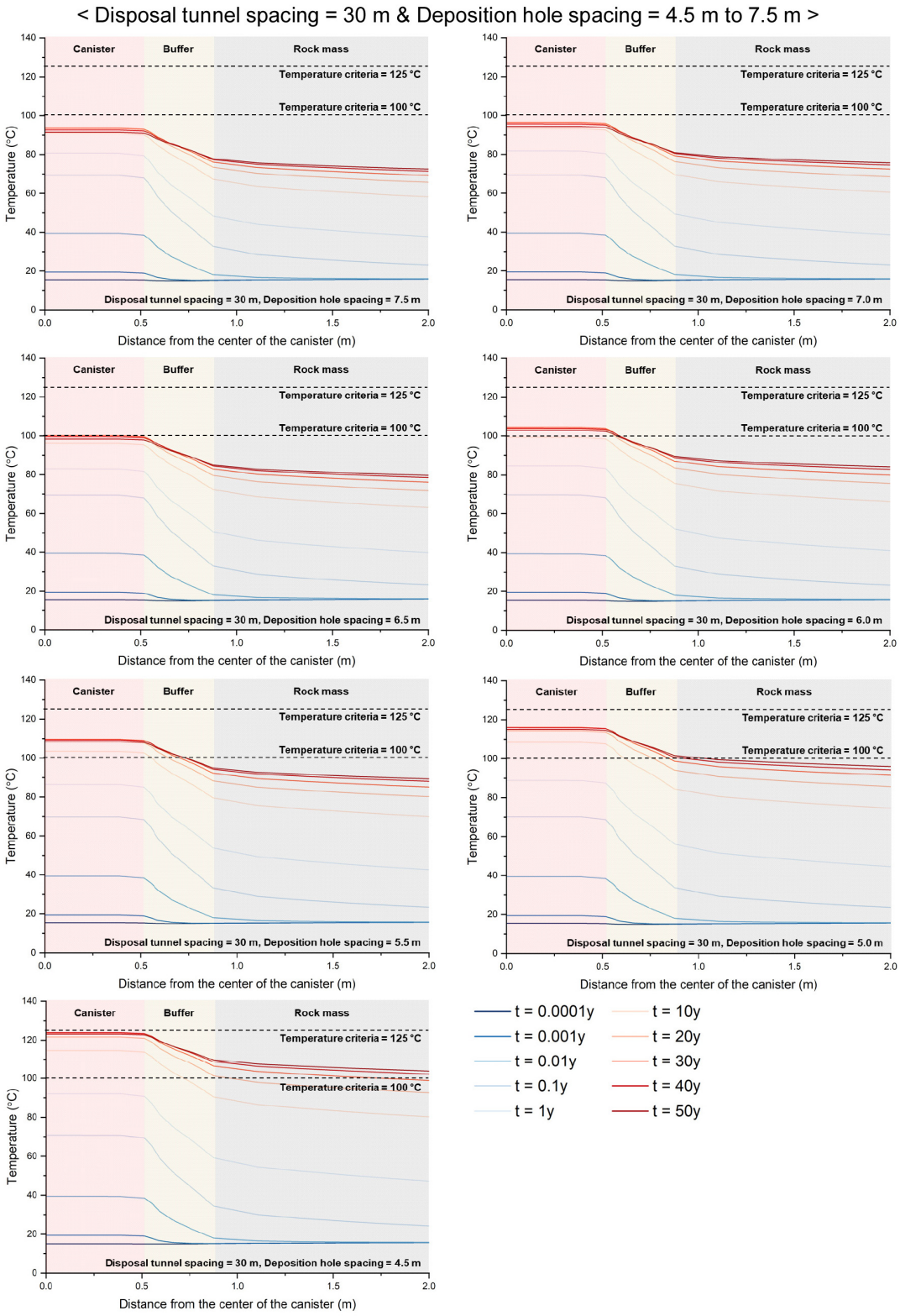


Fig. 9. Horizontal distributions of temperature from the center of the canister to the rock mass at 0.0001 year to 100 years after the disposal of the PWR R-SNF. Disposal tunnel spacing is 30 m as deposition hole spacings vary from 4.5 m to 7.5 m.

4.2 고효율 처분시스템 역학적 안정성 해석

방사성붕괴열에 의해 온도가 상승하면 처분시스템 내 열응력이 발생하고, 지하수 유입을 나타나는 포화도 증가는 팽윤압을 발생시켜 처분시스템 전반에서 응력이 증가하게 된다. KRS+ 기반 처분시스템의 암반의 탄성계수가 완충재 및 뒤채움재의 탄성계수보다 훨씬 높기 때문에 열응력에 의한 응력 변화가 더 크게 나타난다(Kim et al., 2021). 암반의 강도보다 더 큰 응력이 가해졌을 시 암반의 파괴가 발생하여 균일이 생성되면 투수율이 상승하여 지하수 유입이 가속화되고, 처분용기의 손상 시 발생 가능한 방사성핵종 이동 속도에도 영향을 미칠 수 있다. 따라서, 암반의 역학적 안정성 해석을 수행하기 위해 모어-쿨롱 파괴기준(Mohr-Coulomb failure criteria)으로부터 계산된 암반의 단축압축강도(C_0)와 응력 변화를 비교하였다. 모어-쿨롱 파괴기준식은 식 (1)로 나타낼 수 있으며 σ_1 및 σ_3는 최대 및 최소 주응력이다. C_0와 q는 점착력(S_0)과 마찰계수(($\mu = \tan(\phi)$, ϕ는 마찰각)를 이용하여 식 (2) 및 식 (3)로 나타낼 수 있다.

$$\sigma_1 = C_0 + q\sigma_3 \tag{1}$$

$$C_0 = 2S_0[(1+\mu^2)^{1/2} + \mu] \tag{2}$$

$$q = [(1+\mu^2)^{1/2} + \mu]^2 \tag{3}$$

Bieniawski(1988)는 현장이나 시추자료에서 구할 수 있는 6가지 변수(암석강도, RQD, 불연속면 간격, 불연속면 상태, 지하수 상태, 불연속면의 상대적 방향)에 대해 점수를 주어 암반의 상태를 분류한 RMR (Rock Mass Rating) 분류법을 제안하였다. 6가지 변수별로 부여한 점수를 합산한 RMR의 범위에 따라 암반의 상태를 Very poor(20 이하), Poor(21~40), Fair(41~60), Good (61-80), Very good(81-100)으로 분류하였다. Aydan and Dalgic(1998)에 따르면, 암반강도(σ_m)는 RMR 및 무결암의 단축압축강도(σ_c)를 이용하여 식 (4)와 같이 계산할 수 있다.

$$\sigma_m = \frac{\sigma_c \times RMR}{[RMR + 6(100 - RMR)]} \tag{4}$$

이 때, 무결암의 단축압축강도는 한국원자력연구원의 지하처분연구시설(KAERI Underground Research Tunnel, KURT)의 화강암 시료의 단축압축강도인 100 MPa를 이용하였다(Lee, 2012). Table 5와 같이 암반의 마찰각과 점착력을 산정하기 위한 경험적인 계산식들이 선행 연구들에 의해 제시되었으며, RMR 등급에 따라 계산된 4개의 마찰각 및 2개의 점착력 값의 평균이 Table 6에 나타나있다.

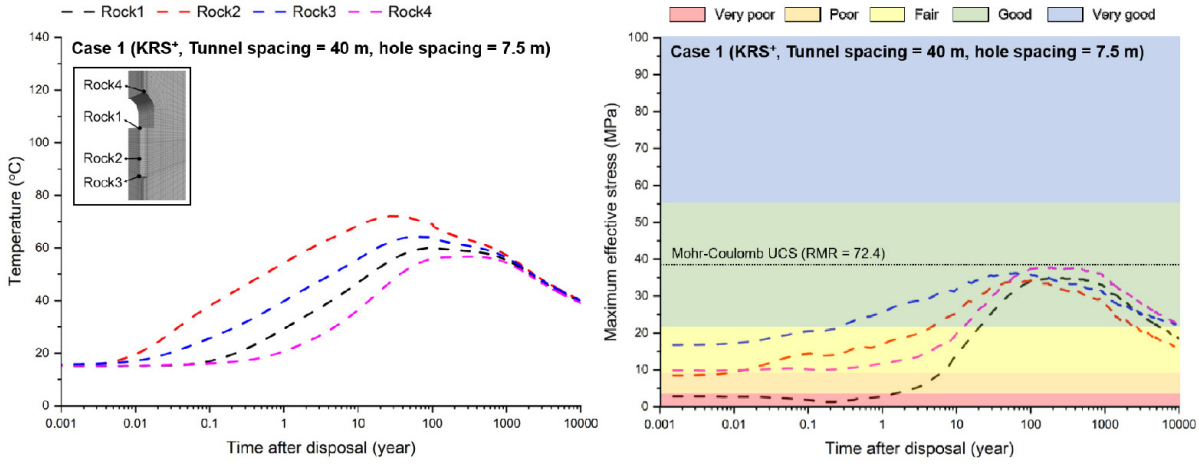
Table 5. Empirical equations to estimate cohesion and friction angle of rock mass based on RMR and rock mass strength

Properties	Equation	Reference
Friction angle (°)	$\phi = -0.086 + 0.7891RMR - 0.0031RMR^2$	Bieniawski (1989)
	$\phi = 0.25RMR + 27.5$	Kim (1993)
	$\phi = 0.5RMR + 5$	Trueman (1988)
	$\phi = 20\sigma_m^{0.25}$	Aydan et al. (1993)
Cohesion (MPa)	$S_0 = 0.25e^{(0.05\mathrm{RMR})}$	Trueman (1988)
	$S_0 = \frac{\sigma_m}{2}\frac{(1-\sin\phi)}{\cos(\phi)}$	Aydan and Kawamoto (2001)

Table 6. Average values of C_0 and q in terms of RMR of rock mass calculated from empirical equations in Table 5

RMR	C_0 (MPa)	q (-)
20	3.35	2.29
40	8.98	3.18
60	21.51	4.42
80	55.16	6.33
100	170.23	10.37

KRS$^+$ 기반 처분시스템(Case 1), 완충재 부피의 16~17%를 제외하고는 설계 기준 온도 100°C 이하로 유지시킬 수 있는 Case 6 및 Case 11, 설계 기준 온도를 125°C로 상향했을 시 가장 높은 처분 효율을 낼 수 있는 Case 14에 대해서 10,000년 간 THM 복합거동 수치해석을 수행하여 처분터널 및 처분공 주변 암반에서의 최대 유효응력 변화와 RMR 분류에 따른 암반의 단축압축강도를 그래프에 나타내었다(Fig. 10). 처분 간격이 좁아질수록 암반의 온도가 더 높아지므로 열응력에 의한 응력 변화가 더 높게 나타났다. Rock1의 경우 다른 관측지점에 비해 응력 변화가 더 크게 나타났는데, 이는 Rock1이 처분터널과 처분공의 교차지점에 위치하고 있기 때문에 다른 지점과 달리 완충재와 뒤채움재의 팽윤에 의한 응력 변화가 동시에 가해지기 때문인 것으로 판단된다(Fig. 11). KRS$^+$ 기반 처분시스템의 경우, 처분터널 상단(Rock4)에서 최대 38.0 MPa의 응력이 발생하였고, 암반의 단축압축강도가 이보다 크기 위해서는 RMR이 72.4 이상이 되어야 한다. 이는 Good rock으로 분류되는 RMR 범위의 중간 정도에 해당한다. Case 6과 Case 11의 경우에는 최대 유효응력이 각각 54.0 MPa 및 58.7 MPa로 계산되며 이에 해당하는 암반의 RMR은 79.6과 81.2로 Good rock과 Very good rock의 경계 수준에 해당한다. Case 14는 처분터널 하부(Rock1)에서 최대 유효응력이 80.7 MPa로 매우 높게 나타나 암반의 RMR이 Very good rock에 해당하는 87.3 이상이 되어야 암반의 파괴를 방지할 수 있었다. Sunwoo et al. (2011)에 의해 수행된 국내 화강암을 대상으로 한 암반 물성 및 암반분류법간의 상관관계에 관한 연구에 따르면, RMR이 80 이상인 암반의 비율이 상대적으로 적기 때문에 Case 14에 해당하는 처분 간격을 사용할 경우, 수 km^2 이상의 넓은 영역이 요구되는 고준위방사성폐기물 처분장 부지를 구하기 쉽지 않을 것으로 판단된다.



(a) (b)

Fig. 10. Evolutions of the temperature and maximum effective stress at rock mass for cases (a) and (b) 1, (c) and (d) 6, (e) and (f) 11, and (g) and (h) 14. Ranges of the Mohr-Coulomb UCS based on RMR classification suggested by Bieniawski (1988); Very poor (0 < RMR < 20), poor (20 < RMR < 40), fair (40 < RMR < 60), Good (60 < RMR < 80), Very good (80 < RMR < 100)

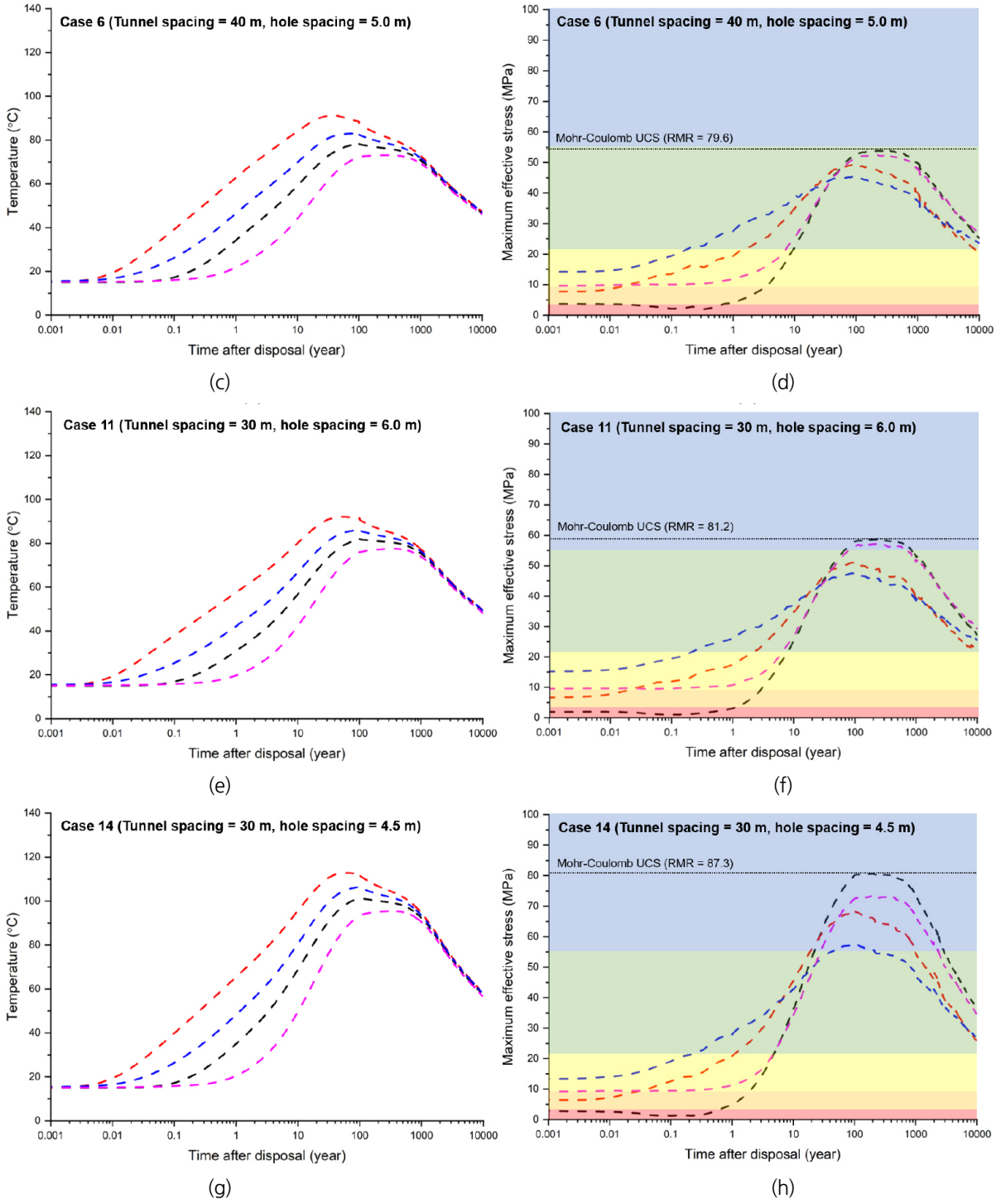


Fig. 10. Evolutions of the temperature and maximum effective stress at rock mass for cases (a) and (b) 1, (c) and (d) 6, (e) and (f) 11, and (g) and (h) 14. Ranges of the Mohr-Coulomb UCS based on RMR classification suggested by Bieniawski (1988); Very poor (0 < RMR < 20), poor (20 < RMR < 40), fair (40 < RMR < 60), Good (60 < RMR < 80), Very good (80 < RMR < 100) (continued)

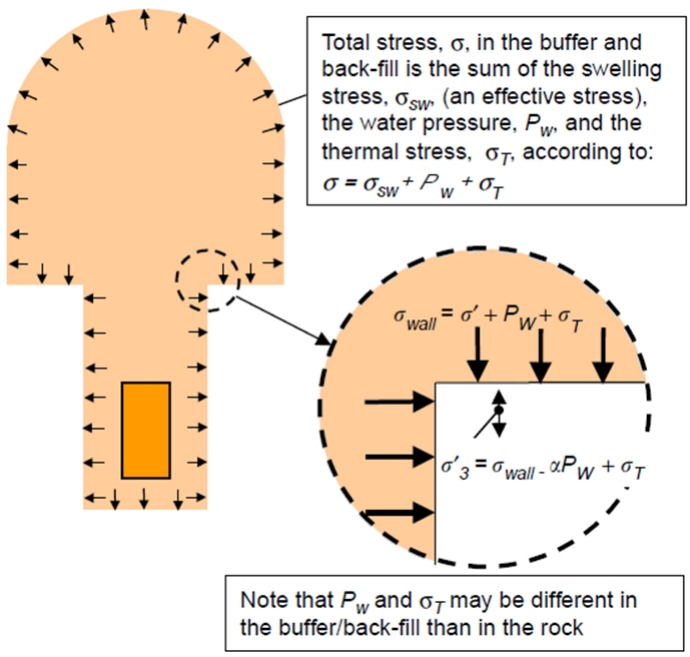


Fig. 11. Schematic diagram of the compressive stress around the disposal tunnel and deposition hole by the swelling pressure (Rutqvist et al., 2005)

처분공에 처분용기와 벤토나이트 완충재를 정치한 직후에는 암반과 완충재 사이에 갭(Gap)이 존재하여, 처분공과 인접한 암반에 수평 방향 구속압이 작용하지 않지만, 지하수 유입에 의해 벤토나이트가 팽윤함에 따라 갭을 메우고 구속압을 작용하게 된다. 따라서, 식 (1)과 같이 최소 주응력이 증가함에 따라 암반의 강도가 증가하는 영향을 고려해야 한다. Fig. 12에 Case 1, 6, 11 및 14에 대해 암반에서의 최대 및 최소 주응력 변화가 RMR이 70 및 75인 암반에 대한 모어-쿨롱 파괴기준식과 함께 나타나있다. Fig. 10과

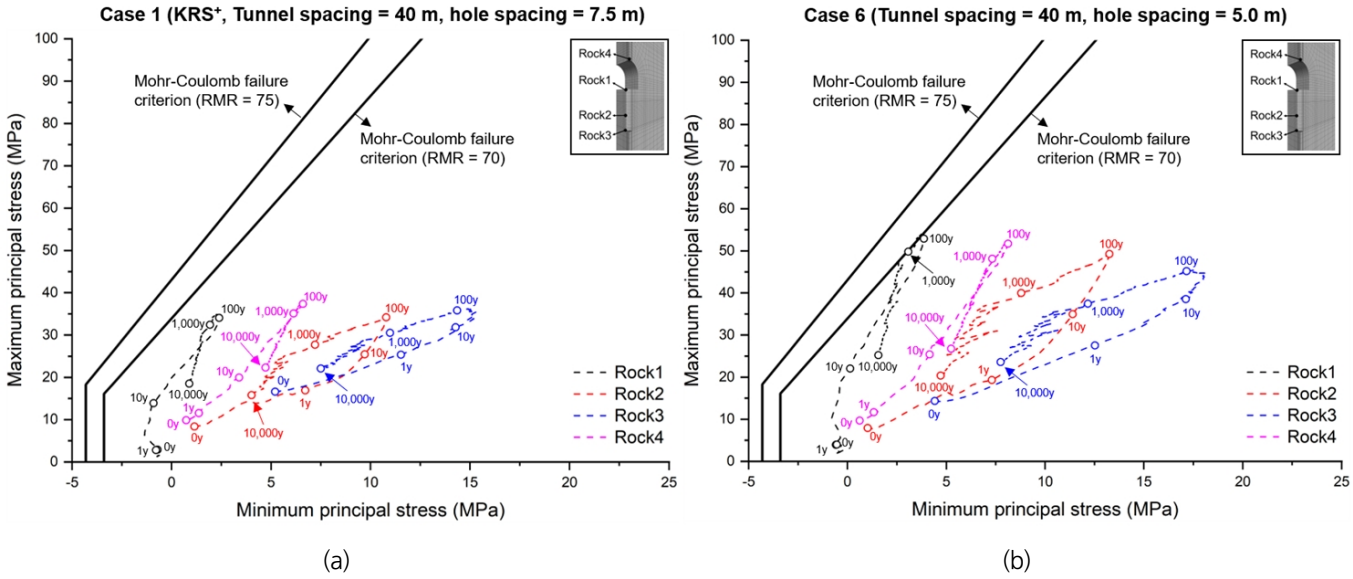
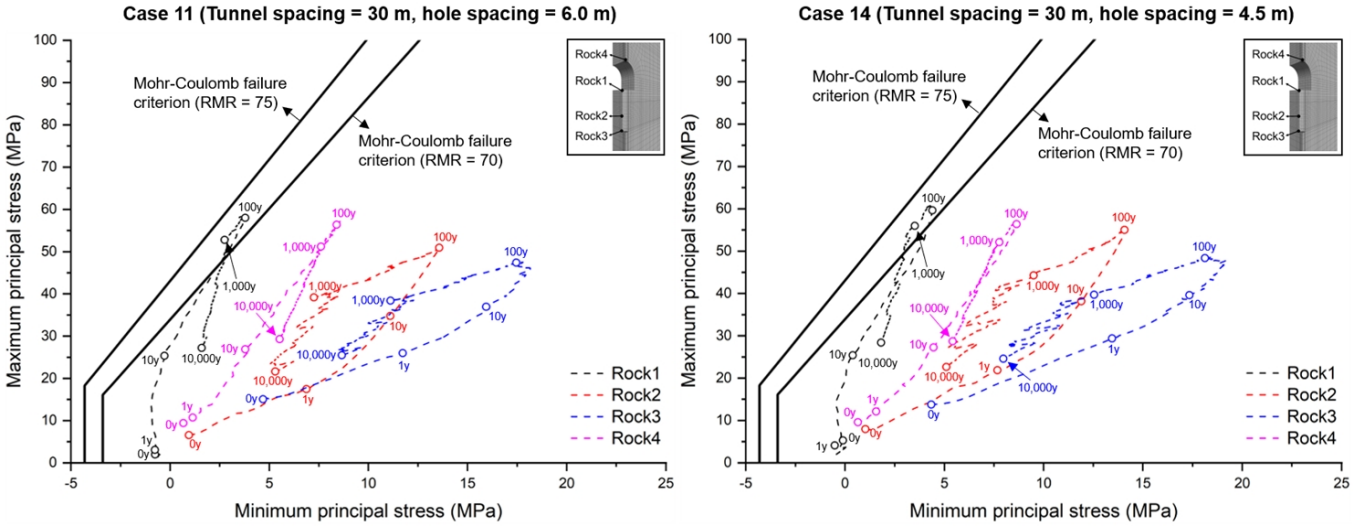


Fig. 12. Evolutions of the maximum and minimum principal stresses for cases 1, 6, 11, and 14 with Mohr-Coulomb failure criteria for RMR of 70 and 75



(c) (d)

Fig. 12. Evolutions of the maximum and minimum principal stresses for cases 1, 6, 11, and 14 with Mohr-Coulomb failure criteria for RMR of 70 and 75 (continued)

같이 구속압에 의한 암반의 강도 증가를 고려하지 않을 때, KRS$^+$ 기반 처분시스템은 암반의 RMR이 72.4 이상이 되어야 했으나, 구속압에 의한 암반의 강도 증가를 고려하면 RMR이 70인 경우에도 암반에서의 파괴가 발생하지 않았다. Case 6 및 Case 11의 경우 처분터널 하부(Rock1)에서 처분 이후 100년부터 1000년까지 RMR이 70인 경우의 모어-쿨롱 파괴기준선에 인접하게 되었다. Case 14인 경우에는 RMR이 70일 때는 처분터널 하부(Rock1)에서 파괴가 발생하고, RMR이 75일 때는 모든 관측지점에서 파괴가 발생하지 않는 결과가 나타나 구속압의 영향을 고려하지 않은 경우보다 상대적으로 더 완화된 기준의 암반을 대상으로 한 부지 확보가 가능할 것으로 판단된다.

5. 요약 및 결론

본 연구에서는 고준위방사성폐기물 심지층처분을 고려하고 있는 국가들의 완충재의 설계 기준 온도 및 100°C 이상의 고온에서의 완충재의 물성 변화를 검토하여, 국내 처분장의 완충재의 설계 기준 온도를 125°C로 상향했을 시 처분 간격에 따른 처분시스템의 최고 온도를 계산하고, 역학적 안정성을 확보하기 위한 암반의 조건을 도출하였다. 완충재의 설계 기준 온도를 현재와 같이 100℃로 유지하는 경우, 처분터널 간격이 40 m, 처분공 간격이 5.5 m인 경우와 처분터널 간격이 30 m, 처분공 간격이 6.5 m인 경우, 처분용기와 완충재가 접하는 점에서 최고 온도가 각각 99.4°C 및 99.8°C로 계산되었다. 이 때, 처분 면적은 KRS$^+$ 기반 처분시스템 대비 26.7 % 및 35 % 감소하였다. 다만, 처분용기와의 거리가 멀어질수록 완충재에서의 온도 감소가 빠르게 나타나므로 처분공 간격을 각각 0.5 m 씩 추가적으로 감소시킨 경우에는 완충재 부피의 16~17 %에 해당하는 영역만 설계 기준 온도를 초과하였다. 완충재의 설계 기준 온도를 125°C로 상향시킨 경우, 처분터널 간격을 30 m, 처분공 간격을 4.5m까지 감소시켜 KRS$^+$ 기반 처분시스템 대비 처분 면적을 55 %까지 감소시킬 수 있었다.

KRS$^+$ 기반 처분시스템(Case 1), 완충재 부피의 16~17 %를 제외하고는 설계 기준 온도 100°C 이하로 유지시킬 수 있는 Case 6

및 Case 11, 설계 기준 온도를 125°C로 상향했을 시 가장 높은 처분 효율을 낼 수 있는 Case 14에 대해서 10,000년 간 THM 복합거동 수치해석을 수행하여 역학적 안정성을 평가하였다. 그 결과, 암반파괴가 발생하지 않기 위해서는 KRS^+ 기반 처분시스템은 암반의 RMR 분류법의 Good rock에 해당하는 RMR 72.4 이상의 조건이어야 했다. Case 6과 Case 11의 경우에는 Good rock과 Very good rock의 경계 수준에 해당하는 RMR이 79.6 및 81.2 보다 높아야 했으며, Case 14는 최대 유효응력이 80.7 MPa로 매우 높게 나타나 Very good rock에 해당하는 RMR 87.3 이상이 되어야 암반의 파괴를 방지할 수 있었다. 그러나, 처분 이후 지하수 유입 시 벤토나이트의 팽윤에 따른 구속압에 의한 암반 강도의 증가를 고려하면, 해석을 수행한 모든 처분 간격에 대해 암반의 RMR이 75 이상이면 역학적 안정성을 확보할 수 있었다.

본 연구에서 사용된 수치모델의 물성은 경주 벤토나이트와 KURT 화강암을 기반으로 수행된 시험에서 측정된 평균 물성을 사용하였으므로, 입력 물성에 따라 해석 결과가 달라질 수 있다. 특히, 경주 벤토나이트의 경우 100°C 이상에서의 열, 수리, 역학적 물성이 측정된 사례가 거의 없기 때문에 완충재의 온도가 100°C 이상인 경우에 대해서는 벤토나이트의 물성 변화를 반영하지 못하였다. 따라서, 추후 경주 벤토나이트의 고온에서의 물성 변화를 고려한 처분시스템의 THM 복합거동 특성 연구를 수행하여 처분간격 및 암반 설계 인자 도출 등에 활용할 필요가 있다. 또한, KRS^+ 기반 처분시스템의처분 간격을 변화시킨 고효율 처분시스템 외에도 복층 처분 및 다수 처분용기 처분 등 다양한 고효율 처분시스템의 성능평가를 수행하여 최적의 조건을 도출하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

사 사

이 논문은 2021년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 고준위폐기물관리차세대혁신기술개발사업의 지원(2021M2E3A2041312)과 사용후핵연료관리핵심기술개발사업단 및 한국연구재단의 지원(2021M2E1A1085193)을 받아 수행된 연구사업입니다.

This work was supported by the Innovative Technology Development Program for High-level waste management of the National Research Foundation of Korea (NRF) (Grant No.2021M2E3A2041312) and Institute for Korea Spent Nuclear Fuel (iKSNF) and National Research Foundation of Korea (NRF) (Grant No. 2021M2E1A1085193) funded by the Korea government (Ministry of Science and ICT, MSIT).

REFERENCES

Allen, C.C., Lane, D.L., Palmer, R.A., and Johnston, R.G., 1984, MRS Online Proceedings Library, 26, 105-112.

Alonso, J. and Cormenzana, J.L., 2005, NF-PRO deliverable (D-NO.: 5.1.1), Part 1. Phenomenological description, Reference concept (Spent fuel − carbon steel canister − bentonite − granite).

Aydan, Ö, Akagi, T., and Kawamoto, T., 1993, The squeezing potential of rocks around tunnels; theory and prediction, Rock Mechanics and Rock Engineering, 26(2), 137-163.

Aydan, Ö. and Dalgic, S., 1998, Prediction of deformation behavior of 3-lanes Bolu tunnels through squeezing rocks of Nurth Anatolian fault zone (NAFZ), In: Proceedings of the Regional Symposium on Sedimentary Rock Engineering, Taipei, Taiwan, 228-233.

Aydan, Ö. and Kawamoto, T., 2001, The stability assessment of a large underground opening at great depth, In: Proceedings of the 17th International Mining Congress and Exhibition of Turkey (IMCET2001), Ankara ,Turkey, June 2001, 277-288.

Bieniawski, Z. T., 1988, The rock mass rating (RMR) system (geomechanics classification) in engineering practice in Rock Classification Systems for Engineering Purposes, ASTM International, 17-34.

Bieniawski, Z.T., 1989, Engineering rock mass classifications, New York, Wiley.

Cho, W.J. and Kim, G.Y., 2016, Reconsideration of thermal criteria for Korean spent fuel repository, Annals of Nuclear Energy, 88, 73-82.

Cho, W.J., 2019, Bentonite − Barrier material for radioactive waste disposal, KAERI/GP-535/2019, Korea Atomic Energy Research Institute.

Couture, R.A., 1985, Steam rapidly reduces the swelling capacity of bentonite, Nature, 318, 50-52.

Graf, R. and Filbert, W., 2006, Disposal of spent fuel from German nuclear power plants − Paper work or technology, Topseal Conference, 17-20, September, Olkiluoto, Finland.

Itasca, 2012, FLAC3D, Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions, Version 5.0. Itasca Consulting Group, Minneapolis, Minnesota, Itasca.

Jeanne, P., Rutqivst, J., Dobson, P.F., Walters, M., Hartline, C., and Garcia, J., 2014, The impacts of mechanical stress transfers caused by hydromechanical and thermal processes on fault stability during hydraulic stimulation in a deep geothermal reservoir, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 72, 149-163.

JNC, 2000, H12: Project to establish the scientific and technical basis for HLW disposal in Japan, JNC TN1410 2000-003, Japan Nuclear Cycle Development Institute.

Johnson, L.H., Tait, J.C., Shoesmith, D.W., Crosthwaite, J.L., and Gray, M.N., 1994, The disposal of Canada's nuclear fuel waste: Engineerred barriers alternatives, AECL-10718, COG-93-8, Atomic Energy of Canada Limited.

Kim, G.W., 1993, Revaluation of geomechanics classifications of rock masses, In: Geotechnical Engineering and Tunneling Technology, Korean Geotechnical Society Spring 93 National Conference, Seoul Korea.

Kim, J.S., Cho, W.J., Park, S., Kim, G.Y., and Baik, M.H., 2019, A review on the design require of temperature in high-level nuclear waste disposal system: based on bentonite buffer, Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, 21(5), 587-609.

Kim, K.I., Lee, C., and Kim, J.S., 2021, A Numerical Study of the Performance Assessment of Coupled Thermo-Hydro-Mechanical (THM) Processes in Improved Korean Reference Disposal System (KRS+) for High-Level Radioactive Waste, Tunnel and Underground Space, 31(4), 221-242.

Lee, C., 2012, Characterization of thermal-mechanical behavior of rock mass in the excavation damaged zone at KURT, Ph.D. dissertation, Seoul National University, Korea.

Lee, C., Cho W.J., Lee J., Kim G.Y., 2019a, Numerical analysis of coupled thermo-hydro-mechanical (THM) behavior at Korean reference disposal system (KRS) using TOUGH2-MP/FLAC3D simulator, Journal of Nuclear Fuel Cycle and Waste Technology, 17(2), 183-202.

Lee, C., Lee, J., Park, S., Kwon, S., Cho, W.J., and Kim, G.Y., 2020a, Numerical analysis of coupled thermo-hydro-mechanical behavior in single- and multi-layer repository concepts for high-level radioactive waste disposal, Tunnelling and Underground Space Technology, 103, 103452.

Lee, J., Cho, D., Choi, H., and Choi, J., 2007, Concept of a Korean reference disposal system for spent fuels, Journal of Nuclear Science and Technology, 44(12), 1565-1573.

Lee, J., Kim, I., Ju, H.J., Choi, H., and Cho, D., 2020b, Proposal of an improved concept design for the deep geological disposal system of spent nuclear fuel in Korea. Journal of Nuclear Fuel Cycle and Waste Technology, 18, 1-19.

Lee, J., Lee, C., and Kim, G.Y., 2016, Development of TOUGH2-MP/FLAC3D simulator for the coupled thermal-hydraulic-mechanical analysis in porous media, KAERI Technical Report, KAERI/TR-6737/2016, Korea Atomic Energy Research Institute.

Martin, P.L. and Barcala, J.M., 2005, Effects of over-heating on the performance of the engineering clayed barriers of the mock-up test, Advances in Understanding Engineered Clay Barriers, Taylor & Francis Group, London.

NAGRA, 2002, Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate-level waste (Entsorgungsnachweis), NAGRA Technical Report 02-05, Natioanl Cooperative for the Disposal of Radioactive Waste.

POSIVA and SKB, 2017, Safety functions, performance targets and technical design requirements for a KBS-3V repository, Posiva SKB report 01, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

POSIVA, 2008, Quality assurance of the bentonite material, POSIVA Working Report 2008-33.

Pruess, K., Oldenburg, C., and Moridis, G., 2011, TOUGH2 user's guide, version 2, Lawrence Berkeley National Laboratory Report LBNL-43134, Berkeley, CA, USA.

Pusch, R., Bluemling, P., and Johnson, L., 2003, Performance of strongly compressed MX-80 pellets under repository-like conditions, Applied Clay Science, 23, 239-244.

Rutqvist, J., 2020, Thermal management associated with geologic disposal of large spent nuclear fuel canisters in tunnels with thermally engineered backfill, Tunnelling and Underground Space Technology, 102, 103454.

Rutqvist, J., Chijimatsu, M., Jing, L., Millard, A., Nguyen, T.S., Rejeb, A., Sugita, Y., and Tsang, C.F., 2005, A numerical study of THM effects on the near-field safety of a hypothetical nuclear waste repository − BMT1 of the DECOVALEX III project. Part 3: Effects of THM coupling in sparsely fractured rocks, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 42, 745-755.

Rutqvist, J., Wu, Y.S., Tsang, C.F., and Bodvarsson, G., 2002, A modeling approach for analysis of coupled multiphase fluid flow, heat transfer, and deformation in fractured porous rock, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 39, 429-442.

SKB, 2003, Thermal dimensioning of the deep repository, SKB Technical Report TR-03-09, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB, 2010, Choice of method − Evaluation of strategies and systems for disposal of spent nuclear fuel, SKB report, SKB P-10-47, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SNL, 2007, Total system performance assessment data input package for requirements analysis for DOE SNF/HLW and Naval SNF waste package physical attributes basis for performance assessment, DOC.20070921.0009, Sandia National Laboratories.

Sunwoo, C., Ryu, D.W., Kim, H.M., and Kim, K.S., 2011, Study on the geotechnical characteristics of granite in Korea and their correlation with rock classification method, Tunnel and Underground Space, 21(3), 205-215.

Tohata, I., Kuntiwattanakul, P., Oishi, K., and Takeuchi, N., 1998, Effect of elevated temperature on mechanical behaviour of clays, Tsuchi To Kiso, 46(10). 27-30 (in Japanese).

Trueman, R., 1988, An evaluation of strata support techniques in dual life gateroads, Ph.D. Thesis, University of Wales, Cardiff, UK.

Wersin, P., Johnson, L.H., and McKinley, I.G., 2007, Performance of the bentonite barrier at temperatures beyond 100°C: A critical review, Physics and Chemistry of the Earth, 32, 780-788.

Wickham, S.M., 2008, Evolution of the near-field of the ONDRAF/NIRAS repository concept for category C wastes, NIROND-TR Report 2007-07E.

Zhang, K., Wu, Y.S., Pruess, K., 2008, User's guide for TOUGH2-MP − A massively parallel version of the TOUGH2 code, Lawrence Berkeley National Laboratory Report LBNL-315E, Berkeley, CA, USA.