

한국형 고준위폐기물 처분시스템의 열적/구조적 거동 분석

이종열, 이양, 김성기, 최희주, 최종원 (한국원자력연구소)

1. 서 론

고준위 방사성폐기물은 핵연료주기에 따라 사용후핵연료 재활용주기의 경우 고준위폐기물은 사용후핵연료를 재처리하는 과정에서 발생하는 악티나이드/핵분열 생성물 등을 함유하는 폐기물로서 주로 유리 고화체 형태로 만들며, 직접 처분주기의 경우는 사용후핵연료 자체가 고준위폐기물이 된다. 이들 고준위폐기물 처분은 방사성물질에 의한 인간의 피폭을 가능한한 최소한으로 낮출 수 있도록 일정 기간 동안 인간 생활권으로부터 고준위폐기물을 완전 격리시키고, 누출된 방사성물질이 인간환경으로 도달하는 것을 최대한 지연시키도록 하는 것이다.

이러한 목표를 달성하기 위하여 고준위폐기물은 일반적으로 지하 수백 미터의 건전한 암반에 처분하는 것이 가장 안전한 방법으로 고려되고 있으며, 우리나라를 비롯한 세계 각 국에서 이러한 심지층 처분시스템 개발 연구가 활발하게 진행되고 있다.

현재까지 우리나라는 사용후핵연료에 대한 재활용이나 직접처분과 같은 정책결정이 지연된 상태이지만, 본 연구에서는 우리나라에서의 사용후핵연료 발생 특성 및 처분환경 등 고유의 특성을 고려하여, 고준위폐기물로서 사용후핵연료를 우리나라 현실에 적합하게 심지층에 처분하기 위한 한국형 처분시스템을 개발 중에 있다. 이를 위하여 처분 시스템 및 layout 개념을 설정하고 주요한 인자인 처분공에 설치된 완충재 성능저하를 방지하기 위한 온도 제한치를 넘지 않도록 하는 조건을 만족시키고 열적거동 분석을 위하여 처분할 시점에 있어서의 사용후핵연료 냉각기간과 처분터널/처분공 간격을 설정하고, 심부 지하에서의 굴착방법에 따른 구조적 안정성을 분석하였다. 또한, 이들 열적, 구조적 거동분석 결과를 토대로, 사용후핵연료 발생량에 따른 배치 개념을 설정하였다.

2. 처분시스템 요건 및 기준

2.1 사용후핵연료

우리나라는 1978년 고리1호기의 상업운전이 시작된 이래로 현재 가압경수로 16기와 중수로 4기가 운영 중이며, 정부에서 공고한 '제2차 전력수급기본계획'에 따르면 향후 8기의 원자료가 추가로 건설될 예정으로 2013년에 폐로 예정인 월성1호기와 현재 건설 중인 울진6호기를 고려하면 2017년에 총 27기의 원전이 가동될 예정이다. 2017년 이후 더 이상의 추가 원전건설이 없다는 가정 하에, 이들 원전으로부터 발생하는 사용후핵연료는 약 36,000톤에 달할 것으로 추정된다.

표 1. 사용후핵연료 발생량

Fuel	Amount (tU)	Assemblies	Bundles	Canisters
PWR	20,000	45,000		11,375
CANDU	16,000		842,000	2,835
Total	36,000			14,210

표 1은 원자로형별 예상 발생량을 우라늄량과 집합체로 나타내고, 그에따른 처분용기 수를 나타낸 것이며, 그림 1은 발생된 사용후핵연료의 기준 냉각기간(PWR 40년, PHWR 30년)을 고려하여 연간 처분용량을 나타낸 그림이다.

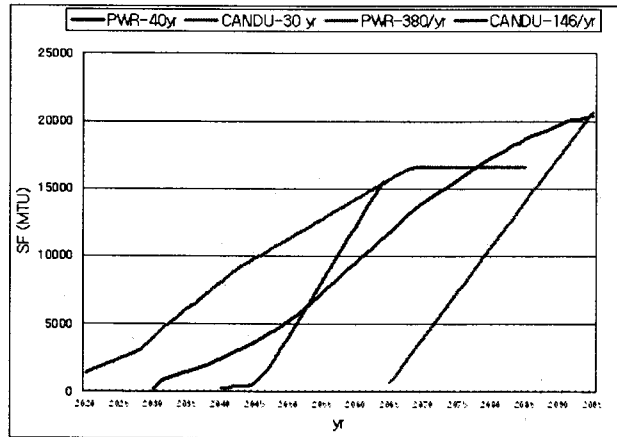


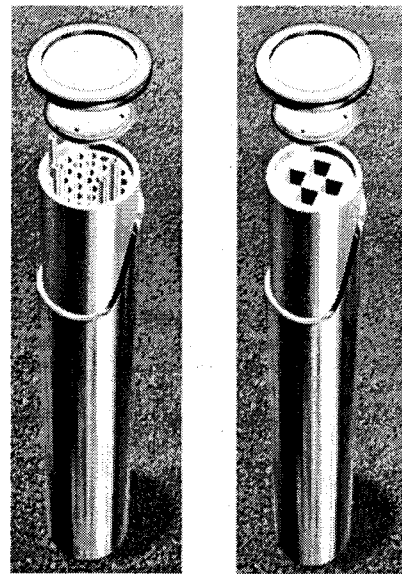
그림 1. 사용후핵연료 발생량 및 연간처분용량

2.2 처분용기

사용후핵연료를 인간 생활권으로부터 안전하게 격리하기 위하여, 영구처분 용기에 포장하여 지하 수백 미터 이하의 암반에 처분하게 된다. 따라서, 심부 지하 수백 미터 환경의 수리학적 상태에서 1000년 이상동안 부식에 대한 저항성과 구조적인 건전성을 갖는 처분용기를 개발하여, 처분 안전성을 향상시킬 필요가 있다. 이를 위하여, 외부 구조로는 부식에 대한 저항성을 갖는 구조로 하고, 내부 구조는 구조적 건전성을 유지할 수 있는 구조로 하는 이중 구조의 처분용기가 필요하며, 영구처분 후 용기 표면온도가 100 °C 이하로 유지할 수 있고, 외부 방사선량을 0.5 Gy이하로 유지할 수 있는 구조로 하여, 처분시스템의 공학적 방벽 및 작업 효율을 높일 수 있도록 하여야 한다.

표 2. 이중구조 캐니스터

구분	재질	기능
외부	cast iron	지하 500 m 수압/완충재 팽윤압에 대한 구조지지
내부	외부 구리 또는 니켈합금	심부 지하에서의 내부식성



CANDU 용 PWR용
그림 2. 처분용기 개념

2.3 균열대

고준위폐기물 처분시설은 심부지하 화강암반(*granitic rock mass*)에 위치하는 것으로 가정한다.

심부지층 암반내의 균열대는 암반의 역학적 변위를 야기할 수 있는 연약면이고 지하수 흐름의 주된 통로가 되므로, 처분장의 건설과 폐기물 처분이 절리암반의 거동과 수리적 거동에 미치는 효과를 고려하는 것이 필요하며, 처분장주변에서 고려해야할 균열대의 분류체계를 그림 3 및 표 3에 나타내었다. 이로부터 처분공과 관련된 등급 3에 대한 처분터널에 직교하는 균열로부터의 처분공까지의 이론적인 안전거리와 그에 따른 처분터널의 증가량을 표 4에 나타내었다.

표 3. 처분장 주변 균열대 분류체계

	Order	Length (m)	Width(m)	Interval(km)	T (m ² /s)	Safety distance(m)
Regional fracture zone	1	>10,000	>100	>4	1E-05	100 (처분시설)
Local major fracture zone	2	1,000 - 10,000	5 - 100	1 - 4	1E-06	50 (처분터널)
Local minor fracture zone	3A	500 - 1,000	1 - 5	1 <	1E-07 - 1E-08	5 (처분공)
	3B	<500	<1			3 (처분공)
Bedrock fracture system	4	<10	<0,01	-	<1E-9	-

표 4. 3등급 균열대에 따른 안전거리 및 증가율

Width of fracture (m)	Sum of safety distances (m)	Total (m)	Interval/1000 m	Proportion (%)
0,1	6	6,1	2	1,22
1	10	10,1	2	2,02
5	10	15	2	3,00

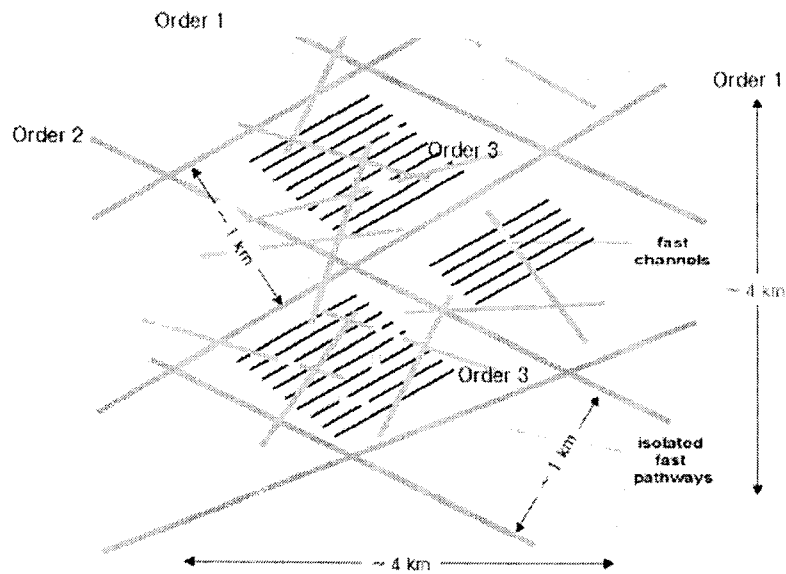


그림 3. 처분장 배치시 고려할 균열대 개념

3. 처분 시스템 개념

3.1 다중방벽 개념

사용후핵연료를 생태계로부터 안전하기 격리시키기 위하여 심지층에 처분하는 방식은 자연암반으로 구성된 자연방벽 뿐만 아니라 사용후핵연료를 담고 있는 금속용기, 완충재와 같은 공학적 방벽에 의해서도 핵종 이동이 지연되도록 하기 위한 다중방벽 시스템이 고려되고 있다.

자연방벽은 암반 또는 점토층으로 구성되며 어떠한 경우에도 방사성물질을 영구히 생태계로부터 격리시켜 처분된 방사성물질에 의한 방사선피폭으로부터 생태계의 안전성을 유지시킬 수 있어야 하겠지만, 자연계가 지니고 있는 비균질성과 불확실성이 상존하고 있기 때문에 안전성을 신뢰할 수 없는 단점이 있다. 따라서, 안전성에 대한 확고한 신뢰를 구축하기 위하여 공학적 방벽 개념을 도입하고 있으며, 이는 처분대상이 되는 사용후핵연료 또는 고준위폐기물, 처분용기, 완충재, 뒷채움재 등으로 구성(그림 4.)된다.

공학적 방벽의 구성요소로 처분용기를 둘러싸고 있는 완충재는 처분용기를 보호하고 핵종의 이동을 지연시켜야 하는데, 이를 위해 완충재는 수리전도도와 핵종의 이동성이 암반보다 작아야 하며, 온도는 100°C 이하로 유지되도록 열전도도가 커야 한다. 이러한 완충재의 온도요건은 지하 처분구역배치에 있어서 주요한 제한요건이 된다.

처분시스템은 이러한 자연방벽과 공학적 방벽 구성요소들의 일련의 조합으로서, 취급의 용이성, 처분장 운영의 효율성과 안전성, 주변 암반과 연계된 상태에서의 구조적 안정성 등을 포용할 수 있도록 이 구성요소들을 최적화하여야 한다.

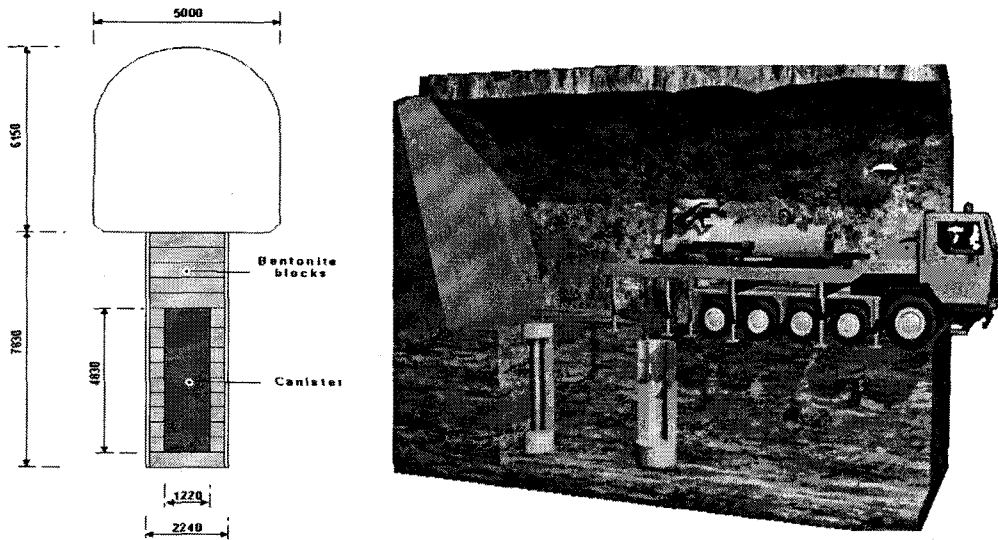


그림 4 . 공학적 방벽 및 처분터널/처분공 개념

3.2 처분장 구성요소 및 배치

지하 처분시설은 수행하는 기능에 따라 접근터널, 파넬 터널, 처분 터널 및 처분 공으로 구성되며, 각 터널의 단면 형상 및 배치는 해당 기능을 수행하기 위해 필요한 요건을 만족시키도록 하여야

한다. 터널 형상 및 배치에 영향을 주는 인자는 구조적 안정성, 건설/운전/폐쇄 용이성 및 경제성으로 서, 다음 요건이 고려되어야 한다.

- 구조적 안정성 : 터널 굴착은 구조적으로 안정하고 굴착으로 인한 변형이 최소화하도록 하여야 함.
- 작업용이성 : 건설, 운전 및 폐쇄가 안전하고 용이하게 수행되어야 함.
- 경제성 : 요구되는 단면 및 배치는 굴착량을 가능한 한 최소화하도록 하여야 함.

표 5는 지하처분시설을 구성하는 터널별 기능 및 크기를 나타내며, 그림 5는 위의 요건을 고려하여 설정한 처분시설 주요 터널에 대한 개념적인 배치를 나타내고 있다.

표 5. 지하처분장 구성요소 및 기능

구 분	기 능	크 기
진입 샤프트	지상시설에서 지하시설로의 진입 (처분용기, 공사, 작업자, 환기 등)	4 m(Φ) ~ 6 m(Φ)
접근 터널	파널 터널 및 진입 샤프트 연결 터널	7 m(W) x 8.4 m(H)
파널 터널	처분 터널로 진입하기 위한 터널로 처분 파널 주변에 굴착한 터널	6 m(W) x 7.6 m(H)
처분 터널	처분공을 일정한 간격으로 굴착하여 폐기물을 거치하기 위 한 터널	5 m(W) x 6 m(H)
처분 공	처분용기와 완충재 블록을 거치하기 위하여 처분 터널 바닥 에 굴착한 수직 홈	2.02 m(Φ) x 7.83 m(H)

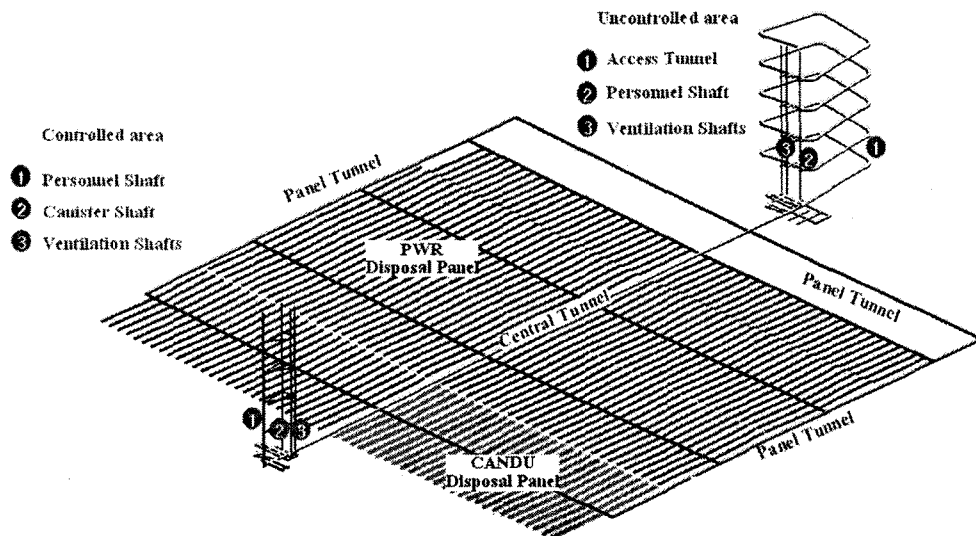


그림 5. 고준위폐기물 지하처분장 배치개념

4. 처분 시스템 열 및 구조 거동 분석

4.1 해석 모델

사용후핵연료 지하 처분장에 대한 열적 구조적 거동 분석을 위한 모델은 처분장 배치에서 다수의 처분동굴과 처분공이 동일 간격으로 나란하게 배치되어 있으므로 3차원의 1/4모델을 이용하였으며, 해석모델의 기하학적 형상은 그림 6.에 나타낸 바와 같다. 그림에서 보는 바와 같이 모델 상하부 수평경계는 방사성 붕괴열에 의한 영향이 미치지 않도록 충분한 거리인 처분용기 중심으로부터 상하 500 m를 고려하였다.

또한, 처분공 주변에 영향을 미치는 방사성붕괴열(w/tHM) P(t)는 사용후핵연료 냉각기간에 따른 붕괴열 이력에 따라 다음 식으로 표현된다.

$$P(t) = 14548.7t^{-0.76204} \quad (30 \leq t \leq 10^6)$$

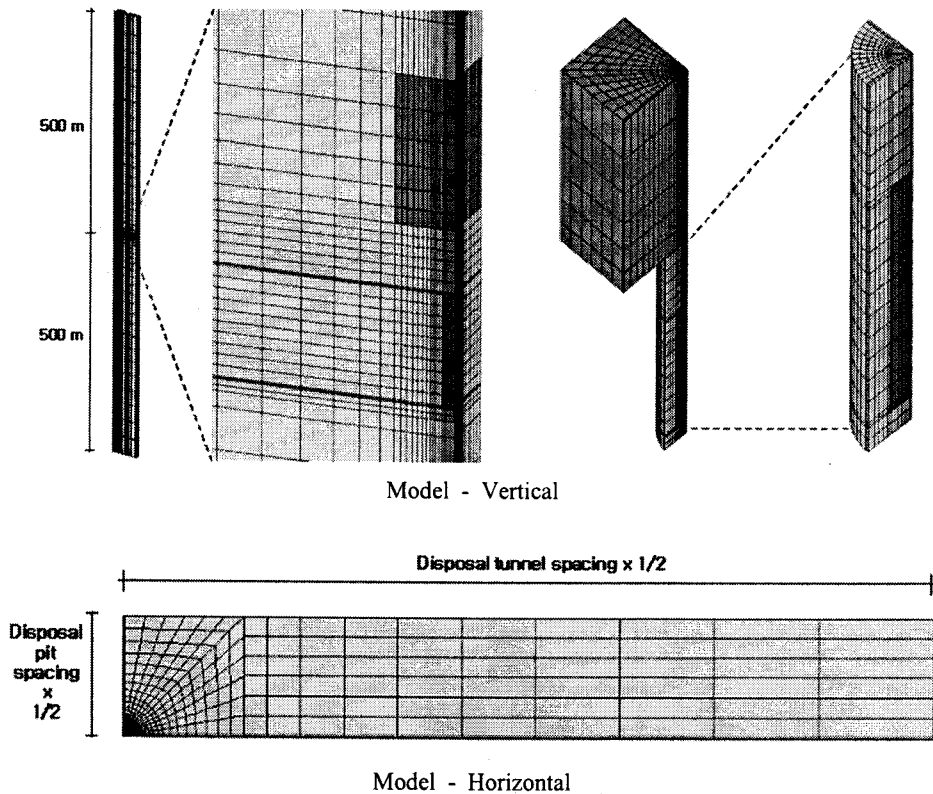


그림 6. 열적 거동분석을 위한 해석 모델

구조적 거동 분석은 처분터널 및 처분공 굴착시 순차적 굴착에 따른 구조적 거동분석을 하였으며, 이를 위한 기하학적 해석모델은 1/2모델로서 그림 7과 같으며, 범위는 처분용기 중심의 심도를 500 m 로 하여 용기중심 상향 100 m까지 모델링 하였다.

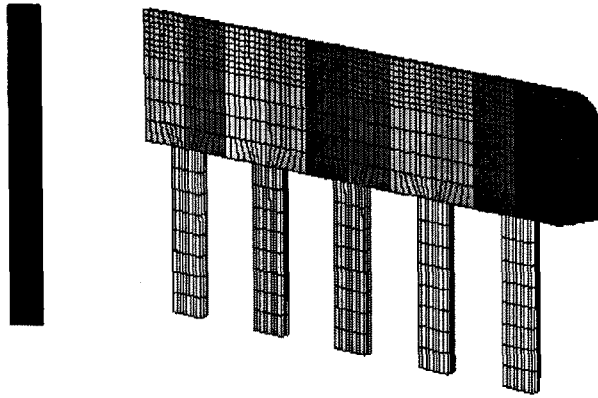


그림 7. 구조거동 분석을 위한 해석 모델

4.2 초기/경계조건 및 입력 물성

처분장 열해석을 위한 본 해석의 대칭적 모델에 따른 경계조건은 해석모델의 양쪽 수직 경계면과 바닥은 단열 경계로 설정하였으며, 온도 분포는 지표 하 지하수대의 온도를 15 °C로 가정하여 이를 기준으로 지하 100 m 깊이마다 3 °C씩 상승하는 것으로 초기조건을 설정하였다

또한, 구조해석을 위한 경계조건은 모델의 측면과 바닥면의 Normal 변위는 고정으로 하였으며, 초기 응력조건은 모델 중심에서 13 MPa로 설정하였다. 그리고 굴착은 처분터널에 대해 1회 굴진장을 3 m로 하였다. 표 6은 본 열 및 구조 해석에 입력된 사용후핵연료, 처분용기, 완충재블럭, 뒷채움물질 및 암반의 물성자료를 나타내고 있다.

표 6. 해석을 위한 입력 물성

Items	Density (kg/m ³)	Thermal Conductivity (W/m°C=J/s/m°C)	Specific Heat (J/kg°C)
Spent fuel	2,000	0.135	2,640
Cast insert	7,200	52	504
Outer shell	8,900	386	383
Buffer	1,970	1.7	1,380
Backfill	2,270	2	1,190
Rock	2,650	3.2	815

4.3 처분시스템 열적/구조적 거동 분석

4.3.1. 열적거동 분석

처분시스템의 열적 요건인 처분시스템 공학적 방벽인 완충재 블럭의 성능저하 방지를 위한 처분용기 표면에서 100 °C이하를 만족시키는 처분터널과 처분공의 간격은 PWR 사용후핵연료의 경우 와 CANDU 사용후핵연료의 경우 각각 40 m, 6 m와 40 m, 3 m로 나타났으며, CANDU 사용후핵연료 처분공의 간격은 인접 처분공과의 간격을 고려하여 표 7에 나타낸 바와 같이 설정하였다.

표 7. 사용후핵연료별 처분터널/처분공 간격

구분	PWR	CANDU	비고
처분터널 간격	40 m	40 m	
처분공 간격	6 m	4 m	

또한, 처분장 주변암반의 장기적 온도변화를 예측하기 위하여 처분장 전체를 포함하는 모델을 이용하여 지표에서부터 지하심부 1,000 m까지 심도별로 암반의 장기적 온도변화를 추정하였다. 처분심도 및 처분 후 시간에 따른 원계(Far field)의 장기적 열적거동 및 처분장 주요지점에서의 온도변화는 그림 8에 나타난 바와 같다. 그림에서 보는 바와 같이 처분장 중심, 처분장 모서리 부분, 처분장 중심하부의 암반 등 관심영역에서의 온도는 처분 후 수백 년 후에 최고 온도에 도달하게 되며, 수만 년이 경과한 후에 암반의 초기온도에 근접하게 된다.

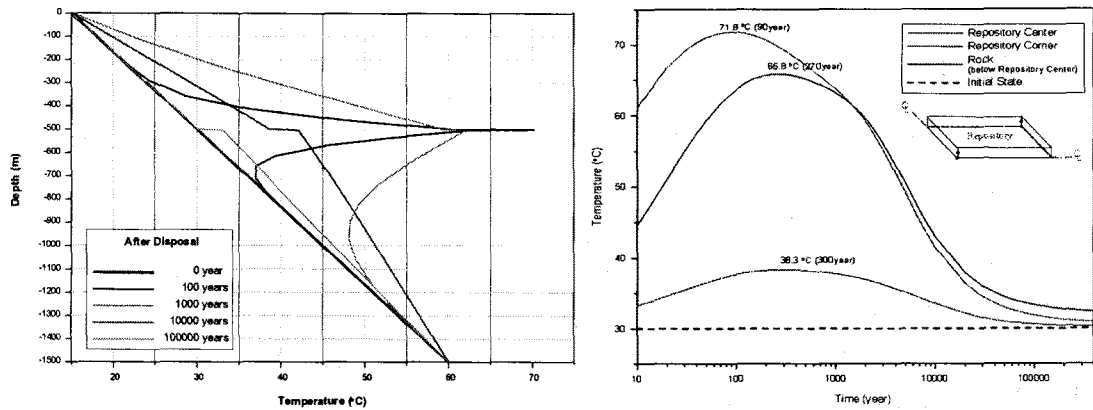


그림 8. 원계에서의 장기적 열적 거동

4.3.2. 구조적거동 분석

3개의 처분공을 포함한 모델을 이용하여 처분터널 및 처분공의 굴착 순서를 고려하여 역학적 안정성을 분석하였다. 즉, 처분터널의 1회 굴진장은 3m로 하였으며, 처분터널과 처분공을 동시에 굴착한 모델의 해석결과와 비교하여 표 8에 나타내었다.

표 8. 분할굴착과 동시굴착 해석 결과

굴착 방법	분할굴착	동시굴착
모델 상부의 최대변위 (400m심도) (mm)	-0.4	-0.3
처분터널의 최대 수직변위(mm) (천단/바닥)	-1.1/1.2	-1.0/1.2
처분터널의 최대수평변위(mm)	1.4	1.4
최대주응력 (MPa)	33.84	31.87
최소주응력(인장응력) (MPa)	-0.8	-1.43

수직 처분장 굴착에 대한 구조안정성 해석결과 처분장 주변암반에 발생된 응력집중의 크기는 암반의 강도보다 훨씬 작은 값을 나타냈으며, 소성파쇄대 발생은 없는 것으로 나타나 처분장의 굴착과

운영에 대한 안정성은 확보된 것으로 판단되었다.

한편, 처분터널의 1회 굴진장과 처분공의 굴착순서를 고려한 경우와 처분터널과 처분공을 동시에 굴착한 경우의 결과가 거의 유사한 것으로 보여, 계산시간 단축을 위해 동시굴착 모델을 이용하는 것도 합리적일 것으로 판단되었다.

또한, 파넬터널의 굴착에 대한 안정성과 파넬터널/처분터널과의 교차부에서의 역학적 안정성을 분석하였으며, 굴착순서는 파넬터널 굴착후 처분터널을 굴착하는 것으로 설정하였다. 파넬터널 굴착후 발생한 응력은 암반 강도에 비해 훨씬 낮았으며 소성대가 발생하지 않음, 굴착면에서의 최대변위는 1.8mm로 파넬터널 굴착에 대한 안정성은 확보된 것으로 판단된다(표 9). 한편, 파넬터널의 벽면에 처분터널을 굴착한 후에는 응력집중과 변위가 더 커지는 것으로 나타났으며, 특히, 교차부의 벽면 하단에서 큰 압축응력이 발생하였으며 터널주변에 광범위하게 인장응력이 발생하여 접속부에서의 응력집중에 대한 보강을 통해 안전율을 높여줄 필요가 있는 것으로 나타났다.

표 9. 파넬터널과 처분터널 굴착후의 해석결과

굴착 방법	파넬터널 굴착후	처분터널 굴착후
굴착면의 최대변위 (mm)	1.8 (터널 벽면)	2.3 (교차부 상부)
최대주응력 (MPa)	36.34	53.43 (교차부 벽면 하부)
최소주응력(인장응력) (MPa)	-1.05	-1.44

5. 결론 및 향후 계획

본 연구에서는 사용후핵연료를 대상으로 우리나라 환경에 적합한 고유의 고준위 방사성폐기물 심지층 처분시설의 규모 및 배치 설정을 위하여 국내 사용후핵연료 발생특성, 처분용기 등 설계요건을 분석하고, 처분터널/처분공 간격을 설정하기 위한 처분시스템에 대한 열적 안전성 및 구조적 건전성 등 거동을 분석하였다.

이를 위하여 처분 시스템 공학적 방벽 및 처분동굴/처분공 개념을 설정하고 열적거동 분석을 통하여 주요한 인자인 처분공에 설치된 완충재 성능저하를 방지하기 위한 온도 제한치를 넘지 않도록 하는 조건을 만족시키는 처분할 시점에 있어서의 사용후핵연료 냉각기간과 처분터널/처분공 간격을 설정하고, 심부 지하에서의 굴착방법에 따른 구조적 안정성을 분석하였다. 또한, 이들 열적, 구조적 거동분석 결과를 토대로, 사용후핵연료 발생량에 따른 배치 개념을 설정하였다.

본 연구에서의 결과는 향후 사용후핵연료뿐만 아니라 다양하게 발생이 예상되는 고준위폐기물에 대한 처분시스템 설계시 유용하게 활용될 것이며, 개념설정 단계에서의 부지에 대한 불확실성을 줄이기 위하여 보다 정확한 처분부지특성 자료를 통한 상세한 분석이 필요하다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력중장기 연구개발사업의 일환으로 수행하였습니다.

■ 참고문헌 ■

1. C. H. Kang, " Preliminary Conceptual Design and Performance Assessment of a Deep Geological Repository for High Level Waste in the Republic of Korea, KAERI and Sandia National Lab., 2000.
2. Harald Hokmark, Johan Claesson, "Use of an analytical solution for calculating temperatures in repository host rock", Engineering Geology Vol. 81, Elsevier Science, 2005
3. Kari Ikonen, "Thermal Analyses of Spent Nuclear Fuel Repository", Posiva Oy, POSIVA 2003-4, 2003
4. T. Kukkola, T. Saanio, J. Choi, C. Kang, "KAERI's Spent Fuel Repository Design Evaluation and Cost Estimation," Posiva Oy, R&D Report 2003-02, 2003.
5. 최희주, 이종열, 조동건, 최종원 외, "고준위폐기물 한국형 처분시스템 개념설계 요건," 한국원자력연구소, KAERI/TR-3003/2005, 2005.
6. 이종열, 최희주, 조동건, 최종원 외, "고준위폐기물 심지층 수직처분(KRS-V1) 지하시설 예비개념설계," 한국원자력연구소, KAERI/TR-3012/2005, 2005.
7. E. Johansson, M. Hakala, L. Lorig, "Rock Mechanical, Thermomechanical and Hydraulic Behaviour of the Near Field for Spent Nuclear Fuel," Report YJT-91-21, Helsinki, 1991.
8. J. W. Kim, D. S. Bae, "Thermohydromechanical Behavior Study on the Joints in the Vicinity of an Underground Disposal Cavern," J. of Korean Society of Engineering Geology, Vol. 13(2), 2003.
9. J. W. Choi, C. H. Kang, "Reference Spent Fuel and Its Characteristics for a Deep Geological Repository Concept Development," J. KNS, Vol.31(6), 1999.