

심지층 처분개념설정과 열-역학적 모델링

권상기, 박정화, 최종원, 강철형
한국원자력연구소

1. 서론

현재 한국에서 가동중인 16기의 원자력발전소와 2015년까지 건설될 발전소에서 수명기간동안 발생될 사용후핵연료는 36000톤에 달한다. 사용후핵연료에서 빠져 나온 방사성핵종들이 생태계로 유입되는 것을 막기 위해서는 처분장의 건설, 운영, 감시 기간동안에 처분장이 안전하게 유지될 수 있어야 한다. 이를 위해서는 한국의 지질조건과 폐기물 종류 등을 고려한 처분개념의 설정이 필요하다. 한국원자력연구소에서는 1997년 이후 고준위폐기물 처분 개념을 선정하기 위한 연구를 수행하고 있으며 이를 통해 2002년 말 기준처분개념을 선정할 계획으로 있다. 기준 처분개념에는 처분장의 크기와 처분공과 처분터널의 간격, 처분공의 형태 및 위치, 처분공내에서의 처분용기 위치 및 완충재, 뒷채움재, 처분용기와 같은 공학적 방벽의 재질 및 규격의 설정이 있어야 한다. 이러한 처분개념의 선정을 위해 ABAQUS, FLAC3D, 3DEC, UDEC과 같은 다양한 코드를 이용한 열적,역학적, 열-역학적 모델링이 실시되고 있다. 본 연구에서는 처분장 기준 개념을 선정하는데 사용되는 가정사항들에 대해서 소개하고 각 컴퓨터 코드들에서 얻어진 주요 결과들에 대해서 논의한다.

2. 고준위폐기물의 처분 개념

장기적인 국가 전력개발 계획에 따르면 원자력발전소의 수명기간동안 발생될 사용후핵연료의 양은 총 36,000 tHM 으로 여기에는 경수로 발전소에서 발생하는 PWR(Pressurized Water Reactor) 사용후핵연료가 20,000톤이며 중수로 발전소에서 발생하는 CANDU(Canadian Deuterium Uranium) 사용후핵연료가 16,000톤이 될 것이다. PWR 사용후 핵연료의 경우 연소도가 45,000 MWd/tHM 으로 40년 동안의 냉각기간을 거친 다음 처분하는 것이 기준 방안으로 여겨지고 있다. PWR 집합체의 한 개의 무게는 665kg 이며 크기는 21.4 cm x 21.4 cm x 453cm이다.

다양한 고준위폐기물 처분 방안들 중에서 폐기물을 처분용기에 넣은 후 화강암과 같은 결정질 암반에 건설된 심부 지하처분장에 처분하는 방안이 가장 일반적인 방법이라 할 수 있다. 한국에서 발생하는 고준위폐기물의 경우 PWR 과 CANDU 사용후핵연료로서 기준처분개념의 선정을 위해서는 이들의 특성이 고려되어야 한다. 한국원자력연구소(KAERI)에서는 여러 가지 처분대안들 중에서 기술적인 측면에서의 평가를 통해 PWR과 CANDU 사용후핵연료를 분리된 지역에 처분하며 각 처분용기는 처분터널 바닥에 수직으로 굴착된 처분공에 거치되는 것을 기준 처분 개념으로 선정한 바 있다¹⁾. 이러한 기준 처분개념을 기반으로 KAERI는 500미터 지하의 결정질 암반에 처분장을 건설하는 경우에 대한 처분장 배치에 대해 미국 산디아 국립연구소와 공동연구를 수행하였다²⁾. 그림 1은 처분장의 전체적인 배치

를 보여주고 있다. 폐기물에서 유출되는 방사성 핵종들은 처분용기, 완충재, 뒷채움재와 같은 인공방벽과 암반과 같은 자연방벽으로 구성되는 다중방벽에 의해 생태계로의 유입이 차단되도록 하고 있다. 처분장의 정량적인 설계를 위해서는 다양한 실험과 해석이 수행되어야 한다. 현재 KAERI에서는 처분터널의 크기 및 간격, 처분공의 크기 및 간격, 처분용기의 재질 및 규격, 완충재의 두께 등을 결정하기 위한 다양한 연구가 수행되고 있다. 그림 2는 기준처분개념의 선정을 위해서 결정되어야 할 인자들을 보여주고 있다.

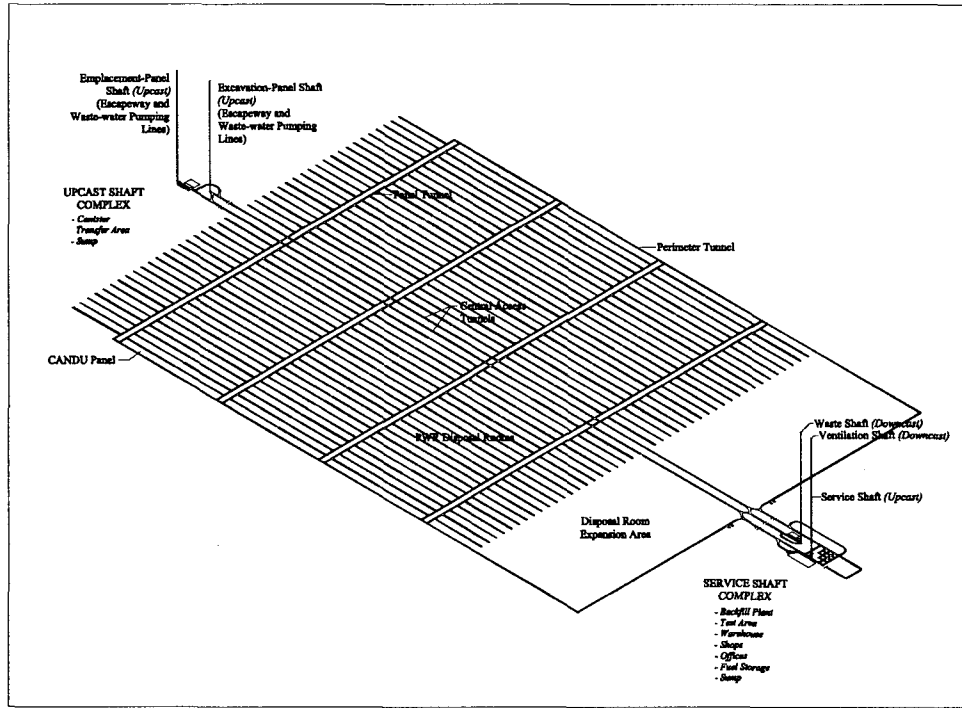


그림 1. 고준위 폐기물 지하 처분 개념

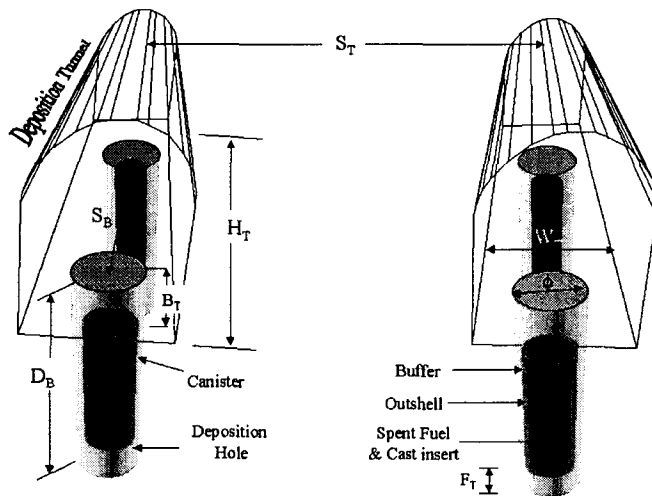


그림 2. 처분개념 설정 단계에서 선정되어야 할 인자들

3. 처분개념 선정을 위한 연구

처분개념의 선정을 위해서는 다양한 조건에서의 열, 수리, 역학적모델링이 수행되어야 한다. 역학적 해석은 처분터널과 처분공의 굴착후 응력재분포에 따른 처분장 인근에서의 구조적 안정성을 평가하기 위해 수행되어진다. 역학적 해석을 통해 소성영역의 발생이나 변위가 크게 나타나는 지점 등에 대해 파악할 수 있다. 고준위폐기물에서 발생하는 열에 의한 온도 상승을 계산하기 위해서는 열 해석이 수행되어진다. 완충재가 성능을 발휘하기 위해서는 100°C 이하의 온도가 유지되어야 하기 때문에 열 해석의 결과는 처분개념의 선정에 매우 중요하다 할 수 있다. 수리해석은 지하수의 유동을 파악하기 위한 것으로 방사성핵종들의 이동이 주로 지하수의 이동을 따르기 때문에 처분개념의 안전성을 파악하는데 반드시 수행되어야 한다. 수리해석을 통해 다공성 매질이나 균열 암반에서의 유체의 흐름이나 유동 속도를 계산할 수 있다. 이러한 기본적인 해석과 함께 상호 영향을 고려한 coupling 해석도 수행되어야 한다.

3.1 해석에 사용된 물성 자료

(a) 처분용기

사용후핵연료를 담은 처분용기는 부식에 강한 재료의 outer shell과 구조적 안정성을 높여주는 내부 충전재로 구성된다. 처분용기 outer shell 로는 구리, 니켈합금, 스테인레스 스틸이 대상 재료로 연구되고 있으며 내부 충전재로는 주철이 고려되고 있다. 열-역학적 해석에서 요구되는 주요 물성은 표 1과 같다. Outer shell 의 두께가 5cm 내외이기 때문에 outer shell 재료에 따른 열-역학적 해석 결과에는 큰 영향이 없을 것으로 판단되어 현재 모델링에서는 스테인레스 스틸만을 고려한 해석이 수행되고 있으며 처분용기 내부의 물질은 탄성거동을 보이는 것으로 가정한다.

표 1. 처분용기 외벽, 충전재와 핵연료의 열-역학적 물성

재료	단위	핵연료 PWR 사용후핵연료	충진재 주철강	Outer shell Stainless steel
탄성계수	GPa	150	120	200
포아송비		0.3	0.25	0.3
밀도	Kg/m ³	10960	7400	8000
열전도도	W/m °K	7.0	52	15.2
비열	J/Kg °K	275	420	504
열팽창계수	/°K	1.2e-5	1.2e-5	1.7e-5

CANDU 사용후핵연료의 경우 발생열이 PWR 사용후핵연료 보다 상대적으로 낮다. 따라서 열-역학적 해석은 PWR 사용후핵연료를 대상으로 하고 있다. 폐기물에서 발생하는 열은 시간에 따라 감소하며 Burn-up 이 45,000 MWd/MtU인 PWR 사용후핵연료의 decay heat은 다음 식으로 계산된다.

$$P(t)=14548.7 t^{-0.76204} , t > 30 \text{ years}$$

P의 단위는 watt/ton 이며 모델링에서는 처분용기에 거치되는 사용후핵연료의 무게와 40년 동안의 냉각기간을 고려하여 발생열을 계산하게 된다.

(b) 완충재/뒷채움재 (Buffer/Backfill)

완충재는 처분용기와 암반사이의 공간에 채워지며 대상물질로 압축 벤토나이트가 고려되고 있다. 압축 벤토나이트는 투수계수가 낮아서 물의 유입을 차단함으로써 처분용기의 수명을 연장시키며 방사성 핵종에 대한 흡착능력이 뛰어나기 때문에 폐기물에서 유출된 방사성 핵종이 생태계로 유입되는 것을 막는데 효과적이다. 압축 벤토나이트의 두께는 약 50cm로서 건조시 밀도가 1.8 g/cm³ 이고 포화시 밀도는 2.1 g/cm³ 로 가정한다. 뒷채움재의 경우 파쇄암과 벤토나이트의 혼합물이 대상 재료로 고려되고 있으며 뒷채움의 시점의 경우 처분용기와 완충재를 채운 직후 또는 일정 기간의 감시기간을 거친 후 뒷채움을 하는 방안이 고려되고 있다. 완충재와 뒷채움재의 물성은 처분장 안전성에 큰 영향을 미치기 때문에 처분장 설계시 중요한 인자로 고려되어지며 따라서 세계 각국에서는 이들의 물성을 결정하기 위해 다양한 조건하에서 실험이 실시되었다. 한국에서는 경주벤토나이트의 열-역학적 물성 결정을 위한 실험이 실시되었다. 표 2는 현재 모델링에서 사용되고 있는 완충재와 뒷채움재의 열-역학적 물성을 보여주고 있다. 완충재의 경우 포화되면서 10 MPa 정도의 팽윤압 (swelling pressure)이 발생하며 물성 자체도 변화하기 때문에 장기적인 열-역학적 거동을 파악하기 위해서는 물성변화와 함께 팽윤압의 발생도 고려하여야 한다.

표 2. 완충재와 뒷채움재의 열-역학적 물성

	단위	완충재	뒷채움재
탄성계수	GPa	Bulk=0.345 Shear=0.258	Bulk=0.038 Shear=0.029
밀도	Kg/m ³	Dry 1800 Wet 2100	Dry 1800 Wet 2100
열전도도	W/m °K	1.47	2.0
비열	J/Kg °K	888	900
열팽창계수	/°K	3.1e-4	3.1e-4
단축압축강도	MPa	7.66	0.93
점착력	MPa	1.1	1.1
마찰각	Degree	50	17

(c) 암석

현재 모델링에서는 결정질 화강암이 처분 모암으로 사용되고 있다. 결정질 화강암반의 열-역학적 물성은 결정질 암반을 처분모암으로 고려하고 있는 스웨덴, 핀란드, 캐나다 등에서 실험을 통해 결정되었다. 표 3은 결정질 화강암반에 대한 문헌조사^{3,4,5)}를 바탕으로 결정된 것이다.

표 3. 암석의 물성

	물성	물성치
역학적 물성	밀도	2700 kg/m ³
	탄성계수	60 GPa
	포아송비	0.25
	단축압축강도	200 MPa
	점착력	15 MPa
	마찰각	30°
열적 물성	열전도도	3.2 W/m °K
	비열	815 J/Kg °K
	열팽창계수	8.3e-6 /°K

3.2 열해석

지하 수백미터에서의 지열과 폐기물에서 발생하는 열에 의해 처분용기와 완충재, 암반에서의 온도 상승을 계산하기 위해서 열해석이 수행된다. 완충재로 고려되고 있는 벤토나이트가 상변화 없이 기능을 발휘하기 위해서는 온도가 100°C 이하로 유지되어야 한다. 이러한 설계기준에 부합하는 처분장 설계를 결정하기 위해서는 다양한 조건에서의 모델링이 실시되어야 한다. KAERI에서는 3차원 상용 FEM 코드인 ABAQUS ver 5.8을 이용하여 적정한 처분터널 및 처분공 간격을 결정하기 위한 열해석이 수행되었다. 지열의 경우 일반적으로 받아들여지고 있는 100m당 3°C의 온도상승이 있는 것으로 가정하였으며 지표면 온도는 20°C로 가정하였다. 열해석의 경우 경계조건의 설정이 중요하며 처분장이 위치하는 곳에서 지표면까지 그리고 처분장 아래쪽으로 온도변화가 없을 것으로 예상되는 지점까지를 모델링에 포함하는 것이 필요하다. 처분장이 지하 500m에 위치하는 경우 열해석은 지표면에서 지하 1000m 까지를 포함하여 해석하고 있다. 지표면을 제외한 나머지 면들은 열흐름이 없는 단열면으로 경계조건을 설정하였으며 지표면에서는 대류에 의한 열배출이 있는 것으로 설정하였다. 열해석의

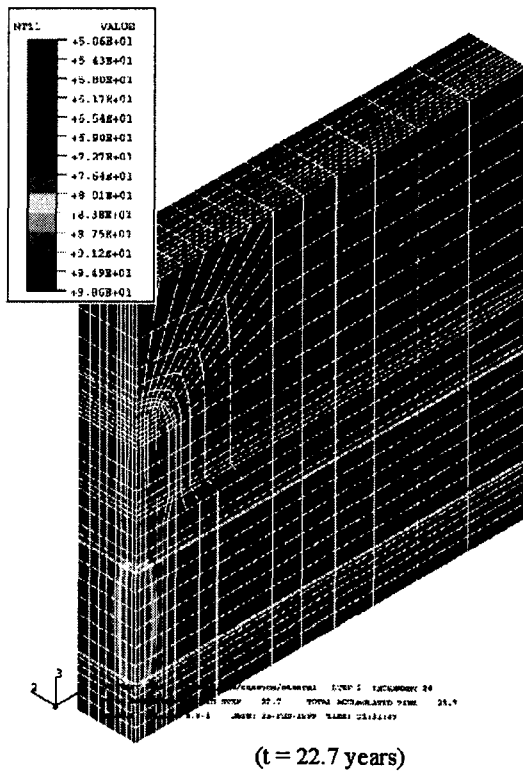


그림 3. ABAQUS를 이용한 열해석 결과

경우 역학적 해석과 같은 세밀한 메쉬를 필요로 하지 않는다. 하지만 동일한 모델 메쉬를 열-역학적, 열-수리-역학적 해석에 적용하기 위해 그림 3 과 같은 세밀한 모델 메쉬가 작성되었으며 이를 이용한 열해석이 수행되었다. 그림 3 은 처분터널의 간격은 40m, 처분공간

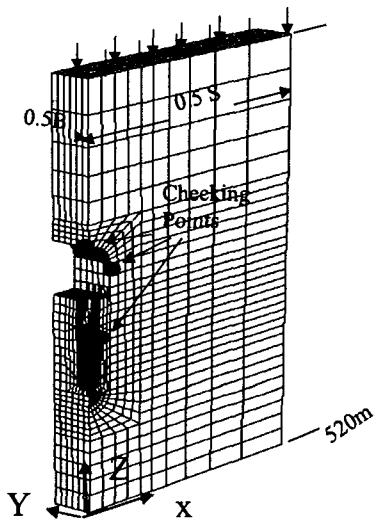
격은 6m 인 경우 처분용기에서의 온도가 최고점에 도달하는 처분후 22.7년 되는 시점에 처분장 인근에서의 온도분포를 보여주고 있다. 완충재와 뒷채움재를 채우는 작업은 처분용기 거치 직후 실시되는 것으로 가정하였다. 열해석을 통해 PWR 처분용기의 경우 처분터널 간격 40m, 처분공 간격 6m, CANDU 처분용기의 경우 처분터널 간격 40m, 처분공 간격 3m 인 경우 설계기준을 만족함을 알 수 있었다.

3.4 역학적 해석

역학적 해석은 처분용기를 포함하여 처분장 인근에서의 구조 안정성을 평가하기 위해 실시된다. 설계인자 및 지질조건이 역학적 안정성에 미치는 영향을 파악하기 위해 연속체 모델을 사용한 민감도 분석이 실시되었다. 또한 불연속면이 포함되는 경우의 역학적 안정성을 평가하기 위해 불연속체 모델을 사용한 해석이 실시되었다.

(a) 연속체 모델에서의 역학적 해석

처분개념의 설계를 위해서는 각 인자들이 처분 안정성에 미치는 민감도를 분석 주요 인자를 선정하여야 한다. 민감도 분석을 효과적으로 하기 위해서는 연속체 모델을 사용하는 것이 유리하며 인자들이 많은 경우 이들을 효과적으로 변화시키면서 각각의 영향 및 각 인자들 간의 상호작용을 분석하는 것이 필요하다. 불연속면의 간격과 물성을 사용하여 암반의 탄성계수와 포아송비를 계산하는 방법⁶⁾으로 불연속면의 영향을 간접적으로 고려하였다. 3차원 FDM 코드인 FLAC3D를 이용하여 처분장의 설계인자와 암반물성이 역학적 안정성에 미치는 민감도를 분석하였다. 효과적인 분석을 위해 Fractional Factorial Design 이 사용되었다. 그림 4는 민감도 분석에 사용된 모델메쉬와 응력 및 변위의 측정지점을 보여주고 있다. 표 4는 민감도 분석에서 고려된 인자들과 이들의 변화 범위를 보여준다. 먼저 이들 13개 인자가 각각 최대 최소값으로 변화할 때의 측정지점에서의 응력 및 변위의 변화를 파악하여 다음 5개의 주요인자를 선정할 수 있었다.



- (1) 현지응력비
- (2) 처분장 심도
- (3) 처분 터널 크기
- (4) 불연속면 간격
- (5) 불연속면 물성

예비 민감도 분석을 통해 선정된 주요인자에 암석의 강도와 마찰각을 더하여 7개 인자들 상호간의 영향을 분석하기 위해 Fractional Factorial Design을 통해 민감도 분석이 실시되었으며 처분터널과 처분공 간격, 터널 크기와 같은 설계 인자들이 역학적 안정성에 미치는 영향과 이들 인자 상호간의 영향을 파악하기 위한 민감도 분석이 실시되었다.

그림 4. FLAC3D 모델 메쉬

이러한 민감도 분석을 통해 현지 응력비와 처분장 심도 변화가 역학적 안정성에 가장 큰 영향을 미치는 반면 탄성계수, 포아송비, 밀도, 처분공간격과 처분터널 간격은 역학적 안정성에 미치는 영향이 미미하다는 것을 알 수 있었다. 또한 중요인자들간의 상호 작용에 대한 영향 분석을 통해 현지응력비가 터널 벽의 변위에 미치는 영향이 심도가 증가함에 따라 특히 증가한다는 것을 알 수 있었다.

표 4. 민감도 분석에 사용된 물성치 및 그의 범위

	Parameter	Unit	Min.	Mean	Max.
Variables	탄성계수 (E)	GPa	50	60	70
	포아송비 (ν)		0.2	0.25	0.3
	밀도(ρ)	Kg/m ³	2600	2700	2800
	응력비 (σ_h/σ_v)(K)		0.5	1.0	2.0
	마찰각 (ϕ)	Degree	20	30	40
	인장강도 및 점착력	MPa	10	15	20
	처분장 심도 (Z)	m	300	500	700
	터널 폭 (W)	m	-	4	5
	터널 높이 (H)	m	4.5	5	5.5
	터널 간격 (S)	m	30	40	50
	처분공 간격 (B)	m	5	6	7
	절리 간격 (J)	m	0.2	0.6	1.0
Constants	절리면 강성 (Kn&Ks)	GPa/m	50 5	100 10	150 15
	모델 크기	m	40		
	처분공 직경	m	2		

(b) 불연속체 모델에서의 역학적 해석

불연속면이 지하 구조물에 미치는 영향은 크기 때문에 정확한 암반의 거동을 이해하기 위해서는 불연속면을 직접 고려할 수 있는 모델을 사용한 해석이 요구된다. 2차원해석의 경우 불연속면의 경사각과 길이를 고려할 수 있으나 불연속면의 주향 방향은 고려하지 못하는 단점이 있다. 처분터널과 처분공의 경우 불연속면의 주향 방향에 따라 안정성에 영향이 미칠 것으로 예상되므로 주향 방향을 해석에 고려할 수 있는 3차원해석이 적합하다고 할 수 있다. 본 연구에서는 불연속면을 고려한 역학적해석에 적합한 3차원 DEM 코드인 3DEC을 이용하여 처분터널과 처분공 부근 암반의 역학적 안정성을 해석함으로써 처분장의 개념을 선정하고자 하였다. 3DEC을 이용한 해석에서는 처분터널의 크기, 모델에 포함되는 처분공의 수, 불연속면의 간격, 불연속면의 물성, 암반의 물성, 불연속면의 경사, 현지응력비 등이 미치는 영향을 분석하였다. 그림 5는 터널의 크기가 4mx5m에서 6mx7m 로 바뀌는 경우, 처분터널과 처분공 주위 암반의 안정성을 보여주고 있다. Hoek-Brown failure criteria 를 적용하였으며 그림에서 보듯이 파괴가 일어날 수 있는 부분은 처분터널과 처분공 인접한 암반에 제한되며 불연속면이 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 터널의 크기 변화에 따른 영향은 상대적으로 미미한 것으로 판단되며 따라서 6mx7m 인 터널의 경우도 역학적으로 안정하다는 것을 알 수 있다.

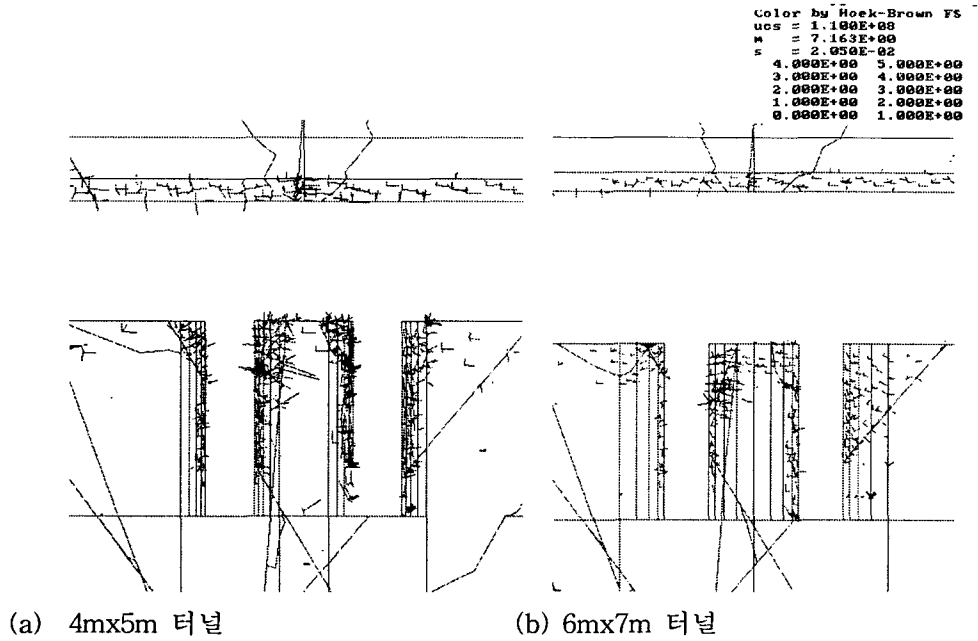


그림 5. Hoek-Brown 파괴조건식을 이용한 암반의 안전계수 분포

3.5 열-역학적 해석

수백미터 지하 암반에 고준위폐기물 처분장이 건설되는 경우 심부 암반의 하중에 의한 응력과 폐기물에서 발생하는 열에 의한 열-역학적 거동은 처분장의 안정성 측면에서 중요하다. 본 연구에서는 처분터널과 처분공 주변에서의 열-역학적 상호작용을 고려한 해석을 통해 처분공에서의 적절한 처분용기 위치를 결정하고자 하였다. 보다 효과적인 열-역학적 해석을 수행하기 위해 FISH 프로그램이 작성되었으며 이를 이용하여 표 5에서와 같은 조건 하에서의 해석이 수행되었다.

표 6은 각 경우에서 처분용기에서의 최대온도와 최대온도에 도달할 때까지 소요된 시간을 보여주고 있다. 처분용기의 위치가 바뀌고 완충재 및 뒷채움재의 두께 변화에 따른 최대 온도 변화는 미미한 것으로 나타난다. 하지만 본 해석을 통해 상부 완충재와 뒷채움재의 두께가 줄어들어 따라서 최대온도가 상승하는 경향을 파악할 수 있다. 최대온도에 도달하는 시점의 경우 처분후 26년-27년 사이로 나타난다. 이와 같은 해석결과와 처분터널이 발파에 의해 굴착되는 경우 예상되는 EDZ의 크기, 팽윤압이 작용하는 경우 처분공 주위에서의 소성영역의 발생, 하부 완충재에서의 두께 변화 등을 종합하여 상부완충재와 뒷채움재의 두께는 2m 이상이 되는 것이 바람직하다는 결론을 얻을 수 있었다.

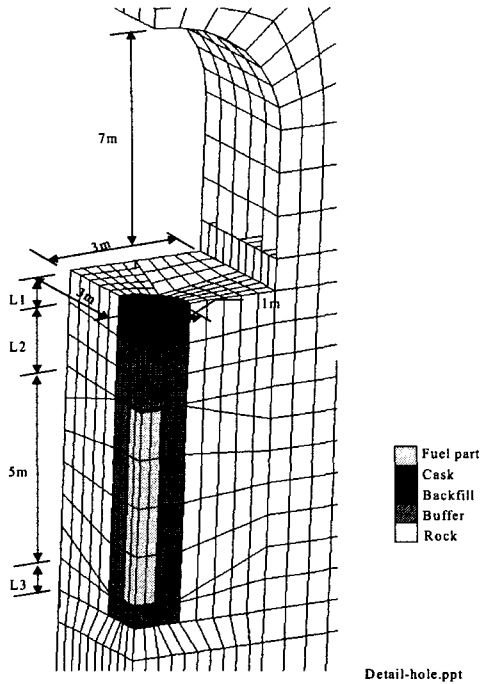


그림 6. 열-역학적 해석을 위한 FLAC3D 모델메쉬

표 5. 처분공 설계를 위한 모델링 cases

Cases	L1 (m)	L2(m)	L3(m)	처분공길이
1	1	1.5	0.5	7.96
2	1	1	0.5	7.46
3	1	0.5	0.5	6.96
4	0.5	1.5	0.5	7.46
5	0.5	2	0.5	7.96
6	0.5	0.5	0.5	6.46
7	1	1	1	7.96

표 6. 처분용기에서의 최대온도 및 도달 시간

Cases	최대온도	최대온도 도달시간
1	92.1 °C	26.80 년
2	92.2 °C	26.22 년
3	92.3 °C	26.18 년
4	92.0 °C	26.81 년
5	91.8 °C	27.30 년
6	92.5 °C	25.70 년
7	92.0 °C	26.76 년

4. 결론

고준위폐기물 처분장의 개념설계를 위해 다양한 컴퓨터 모델링이 실시되었다. ABAQUS를 이용한 열해석을 통해 완충재의 온도가 100°C를 넘지 않도록 하기 위해서는 PWR 사용후핵연료의 경우 처분터널 간격 40m 처분공의 간격 6m 가 되어야한다는 것을 알 수 있었다. FLAC3D를 이용한 민감도 해석을 통해 처분터널과 처분공의 역학적 안정성에 영향을 미치는 13개의 인자들 중에서 현지응력비, 처분심도, 터널크기, 불연속면의 분포와 같은 주요 인자들을 선정할 수 있었으며 fractional factorial design을 적용, 이들 상호간의 영향을 효과적으로 분석할 수 있었다. 또한 불연속면이 역학적 안정성에 미치는 영향을 보기 위해 3DEC을 이용한 모델링이 실시되었으며 이를 통해 처분터널의 크기, 처분공의 간격, 불연속면의 분포 및 물성, 암반의 물성 등이 처분장 주위의 응력 및 변위 분포에 미치는 영향을 파악할 수 있었다. 기존의 4mx5m 터널을 6mx7m 로 변경하더라도 처분장 주변암반에 발생하는 소성영역의 크기에는 큰 변화가 없음을 알 수 있었다. 폐기물에서 발생하는 열과 지열은 열응력을 발생시키기 때문에 폐기물을 거치한 이후의 암반거동은 열-역학적 해석을 통해 결정되어야 한다. 본 연구에서는 FLAC3D를 이용하여 처분공에서의 처분용기의 적정한 위치 결정을 위한 열-역학적 해석이 실시되었다. 이를 통해 처분용기 상부의 완충재와 뒷채움재의 두께가 2m 이상이 되는 것이 바람직하다는 결론을 얻을 수 있었다.

참 고 문 헌

1. 최종원, 강철형, 권상기, 최영성, 1999, 고준위폐기물 심지층 처분시스템 예비 개념 선정을 위한 기술성 평가, KAERI/TR-1361/99.
2. Kang, C.H. et al., 2000, Preliminary conceptual design and performance assessment of a deep geological repository for high-level waste in the republic of Korea, KAERI-SANDIA final report.
3. Tolppanen, P., E. Johansson, and M.Hakala, 1995, Rock mechanical analyses of in-situ stress/strength ratio at the TVO investigation sties Kivetty, Olkiluoto and Romuvaara, Published by Nuclear Waste Commission of Finnish Power Companies, Report YJT-95-11, ISSN-0359-548X.
4. Heikkila, E. and M. Hakala, 1998, Laboratory testing of Kivetty granite in borehole KI-KR10, Working Report 98-21e, Finland.
5. Simmons, G.R. and P.Baumgartner, 1994, The disposal of Canadas nuclear fuel waste: Engineering for a disposal facility, AECL Research, AECL-10715.
6. Fossum, A.F., 1994, Effective elastic properties for a randomly jointed rock mass, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr. 22, 467-470.