

처분환경에서 고준위 방사성폐기물 처분시스템의 구조적 안정성 분석

이 양, 이종열, 최희주, 최종원 (한국원자력연구소)

1. 서 론

고준위 방사성폐기물인 사용후핵연료는 심부 지층내에 처분되는 것이 가장 현실적인 방법으로 고려되고 있다. 한국형 고준위폐기물 심지층 수직처분시스템(Korean Reference HLW Vertical Disposal System-1, KRS-V1)에서는 사용후핵연료를 포함한 처분용기가 지하 500 m의 결정질 암반내에 수직으로 처분되는 것으로 설계되어 있다(최희주 외, 2006a). 평형상태의 암반 내에 처분장이 건설·운영되면 처분장 주변에서는 다양한 공정들이 복합적으로 발생하게 된다. 특히, 대상 암반의 초기응력, 방사성 붕괴열, 지하수 등이 처분장의 거동에 큰 영향을 줄 것이다.

처분환경에서 처분시스템의 성능과 안정성을 평가하기 위해서는 다양한 공정들에 대한 복합적인 거동 분석이 필수적이다. 처분환경과 유사한 현상은 자연계에서 그 예를 찾기가 어렵기 때문에, 처분장의 설계를 위해서 수치적인 방법이 유용하게 사용된다. 그러나 이러한 복합거동을 모두 모사할 수 있는 모델이나 수치적인 기법은 거의 알려지지 않았다. 또한, 부분적인 연계 기법도 제한적으로 사용될 수밖에 없거나 매우 긴 해석시간을 요구하는 경우가 많다.

여러 하중이 복합적으로 작용하는 경우 중첩의 원리(principle of superposition)를 이용하면 분석을 단순화시킬 수 있다. 복합하중에 의한 거동의 총량은 각각의 하중에 의해 발생하는 거동의 조합으로 결정된다. 여기서 거동은 응력과 변위 모두를 의미한다. 이 원리는 작용하는 하중이 선형적이며 대상 재료가 탄성체인 경우에 대하여 적용될 수 있다(A. C. Ugural and S. K. Fenster, 1995).

본 연구에서는 중첩의 원리를 이용하여 처분장의 구조적 안정성을 분석하였다. 처분장의 성능과 안정성에 영향을 주는 주요 영향인자를 선정하고 각각의 인자에 대한 해석을 수행한 후, 그 결과를 중첩하였다. 중첩된 결과를 통해 매질에 따라 안전계수를 평가하고 취약지역을 조사하였다.

2. 고준위폐기물 처분시스템

2.1 고준위폐기물 한국형처분시스템

한국형기준처분시스템은 한국 고유의 고준위폐기물을 한국 대표 결정암질 암반 내에 지층 처분방식을 통해 처분할 수 있도록 한국원자력연구소에서 설계-안전성 평가를 자체 수행하여 개발한 시스템(KRS-V1)이다. KRS-V1 개념에서 처분터널의 심도는 지하 500 m이며, 처분터널의 간격은 40 m이

다. 처분터널 바닥에 굴착되는 처분공의 간격은 가압경수로(PWR)형 사용후핵연료 처분장의 경우에 6 m로 설정되었다. 처분장 부지의 암반은 화강암질의 결정질 암반이며, 지열 구배는 약 30°C/km이다 (이종열 외, 2005, 최희주 외, 2006b).

사용후핵연료는 주철재질의 처분용기에 밀봉되어 처분공에 안치되게 된다. 처분용기와 처분공 벽면 사이에는 벤토나이트 완충재로 채워지게 된다. 벤토나이트는 처분용기에 대한 구조적 완충재 역할 뿐 아니라 핵종과 지하수의 유동을 지연시키는 역할을 한다. 처분이 완료된 처분터널은 벤토나이트와 파쇄암의 혼합물로 뒷채움된다. 처분용기, 완충재와 뒷채움재를 일컬어 공학적 방벽이라 부르며 그 개념도를 Fig. 1에 나타내었다.

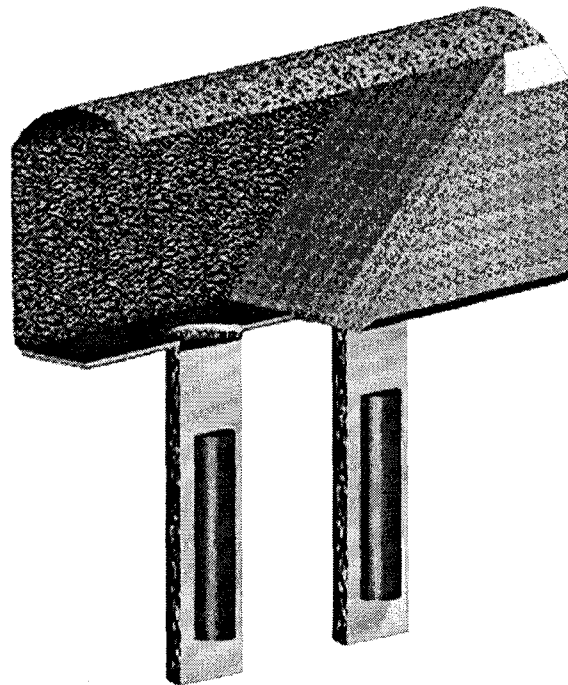


Fig. 1. Schematic of engineered barrier.

2.2 처분장 안정성의 영향인자

안정한 암반 내에 처분장을 굴착하고 폐기물을 처분하면 다양한 공정들이 복잡하게 작용하게 된다. 본 연구에서는 처분장의 역학적 안정성에 지대한 영향을 줄 것으로 예상되는 세 가지의 주요 영향인자를 선정하여 안정성 분석에 사용하였다. 그 첫 번째 인자로 고려된 것이 암반의 초기응력이다. 500 m 심부의 암반은 자중에 의하여 약 13MPa의 수직응력을 받는 것으로 고려되었다. 두 번째 인자는 완충재로 사용되는 벤토나이트의 팽윤압으로, 7MPa의 압력이 암반과 처분용기에 가해지는 것으로 가정하였다. 마지막으로 고려된 영향인자는 방사성 붕괴열에 의해 발생하는 열응력과 암반의 팽창이다. 이 외에도 수압 및 지하수 유동, 불연속면의 존재 등이 처분시스템의 안정성에 영향을 줄 수 있지만 본 연구에서는 고려하지 않았다.

3. 수치해석 모델

3.1 중첩의 원리

중첩의 원리는 보(beam)의 처짐을 구할 때 유용하게 사용되는 이론이다. 재료에 다양한 하중이 작용하고 있을 때, 모든 하중이 동시에 작용할 때의 원하는 값을 구하기 위해서 각각의 하중이 분리되어 작용할 때의 원하는 값을 구하고 나서, 각각의 결과를 중첩한다. 이 원리는 보의 처짐 외에 응력, 변위, 모멘트 및 다른 값들을 구하는데도 유용하게 사용된다.

중첩의 원리는 재료가 탄성체이며, 구하고자 하는 값이 작용하는 하중의 선형함수인 경우에 유효하다. 또한 이 원리가 적용되기 위해서는 다음과 같은 전제조건이 필요하다.

- 1) 모든 재료는 Hooke의 법칙을 따른다.
- 2) 재료의 변위는 미소하다.
- 3) 재료의 변형된 형태에 의해 하중의 작용력이 변하지 않는다.

3.2 해석 모델

처분장 모델은 KRS-V1 개념에 따라 500m 심도의 화강암층에 건설되고 처분터널과 처분공의 간격은 각각 40 m와 6 m로 하였다. 전체 처분장의 중심부에 있는 하나의 처분공과 그 주변암반으로 해석영역을 선정하였다. 해석모델의 수직 영역은 지표에서부터 1,000 m 심도까지로 하였고 모델의 대칭성을 고려해 1/4모델을 사용하였다(Fig. 2).

3차원 유한차분 해석코드인 FLAC3D를 사용하여 계산을 수행하였다. 중첩의 원리를 사용하기 위하여 앞 절에서 제시한 전제조건을 따르는 것으로 가정하였으며, 대상 모델을 모두 탄성인 것으로 설정하였다. 계산된 거동의 중첩과 안전계수의 산정은 FLAC3D의 내장함수인 Fish를 사용하였다.

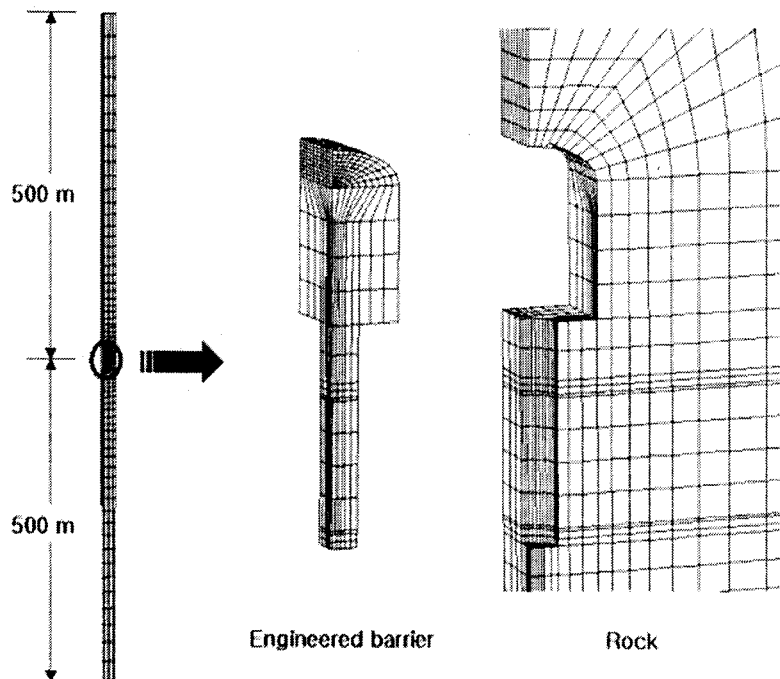


Fig. 2. Numerical model for structural stability assessment.

3.3 개별 인자들에 의한 해석

- 처분장의 건설에 의한 거동

초기응력에 의한 역학적 거동을 평가하기 위하여 암반의 초기응력에 따라 다섯 가지의 경우로 구분하고 처분장 굴착에 대한 해석을 수행하였다(Table 1). 처분장이 위치하는 500 m 심도의 암반에서 작용하는 수직응력은 약 13MPa로 고려되었다. 수직응력에 대한 수평응력의 비인 측압계수(K)가 0.5, 1, 1.5인 경우에 대한 해석을 수행하였다. 한편, 500 m 심도에서 두 수평응력간의 비는 2를 넘지 않는다는 자료에 의거하여 두 수평응력간의 비를 2로 가정한 경우를 분석하였다(박병윤과 권상기, 2000).

Table 1. Initial stress distribution at 500 meters depth in each case

Case	σ_z (MPa)	σ_x (MPa)	σ_y (MPa)	비고
1	13	13	13	K=1
2	13	19.5	19.5	K=1.5
3	13	6.5	6.5	K=0.5
4	13	19.5	9.8	최대주응력 방향 ⊥ 터널축 방향
5	13	9.8	19.5	최대주응력 방향 ∥ 터널축 방향

이 외에도 처분터널과 처분공의 형상과 규모, 그리고 이들 사이의 간격 등이 역학적 거동에 영향을 미칠 수 있으나, 본 연구에서는 고려하지 않았다. 또한, 처분터널과 처분공은 동시에 굴착되는 것으로 모사하였고 불연속면 및 수압의 영향을 고려하지 않았다.

- 벤토나이트 완충재의 팽윤압에 의한 거동

처분용기가 처분공 내에 처분된 후에 시간이 지남에 따라 처분장은 지하수에 의해 포화된다. 완충재로 사용된 벤토나이트 블록은 포화됨에 따라 팽윤을 하는 특성을 가지고 있다. 이로 인해 완충재와 접해 있는 처분공 벽면과 처분용기 표면은 팽윤압을 받게 된다. 본 연구에서 고려된 팽윤압의 크기는 7MPa로 가정하였다(최희주 외, 2006a).

- 방사성 붕괴열의 열응력에 의한 거동

처분용기에 밀봉된 사용후핵연료는 방사성 핵종들의 붕괴에 의해 열이 발생한다. 본 연구에서 고려된 사용후핵연료는 가압경수로(PWR)형 17 × 17 핵연료봉이며, 방출연소도는 45,000MWD/MTU이다(최희주 외, 2006a). 핵연료봉의 시간에 따른 열 발생율은 식 1과 같으며, 사용후핵연료는 40년간 냉각된 후 처분된다.

$$Q = 14,548.7t^{-0.76204} \text{ Watt/tHM} \quad (1)$$

붕괴열에 의한 열응력 및 암반팽창에 의한 거동을 분석하기 위하여 FLAC3D의 thermal 옵션을 이용하여 처분 후 100년간의 비정상 열전달 해석을 수행한 후, 원하는 시점의 온도분포를 이용하여 역학적 거동을 해석하였다. 암반의 초기온도에 의한 영향을 제거하기 위하여 암반의 초기온도는 0°C로 적용하였다.

3.4 결과의 중첩 및 안전계수 평가

개별 인자들에 의한 해석 결과를 중첩할 수 있는 Fish를 작성하였다. 각각의 해석을 통해 얻어진 응력과 변위를 중첩하여 최초의 모델에 주입하는 방법으로써 그 절차는 Fig. 3과 같다. 재료의 파괴여부는 최종단계에서 평가되므로 개별 해석에서는 소성대 발생으로 인한 응력 완화가 발생하지 않도록 모델을 탄성체로 가정하였다.

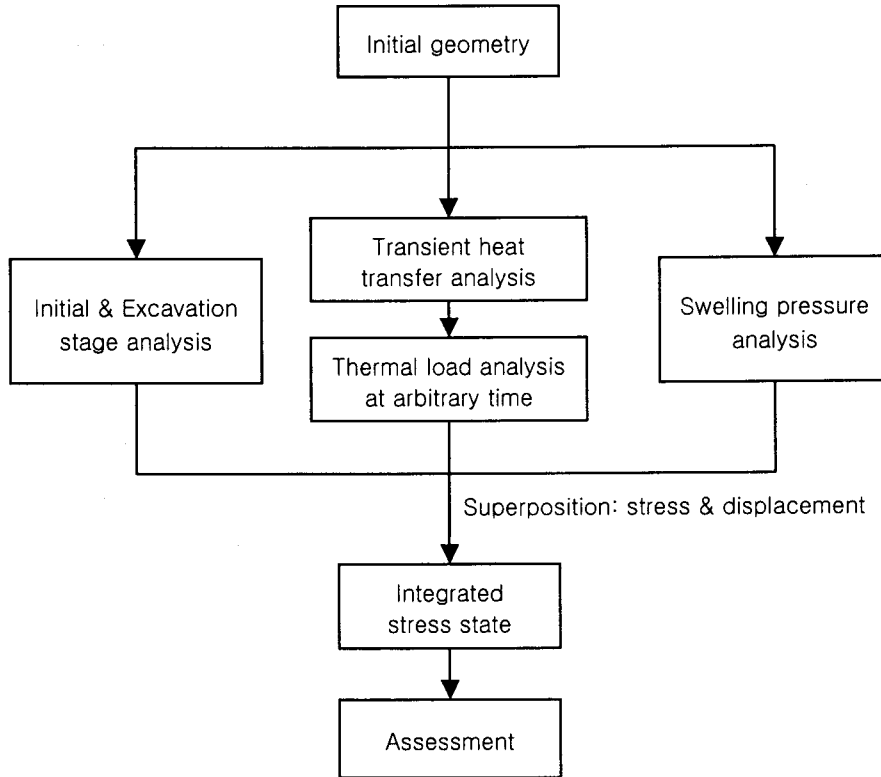


Fig. 3. Procedure for mechanical analysis.

중첩된 응력성분을 이용하여 모든 요소의 안전계수를 계산하였다. 안전계수의 평가를 위해 금속재질인 사용후핵연료와 처분용기는 von Mises 파괴기준을 적용하였고 완충재와 뒷채움재는 Mohr-Coulomb 파괴기준을 적용하였다. 한편, 암반의 경우에는 Hoek-Brown 파괴기준과 Mohr-Coulomb 파괴기준을 각각 적용하여 안전계수를 비교하였다. 각각의 파괴기준식을 주응력으로 표시하면 식 (2) ~ (4)와 같다. 여기서 Hoek-Brown 기준식의 상수 m과 s는 무결암 화강암에 해당하는 값으로 각각 30과 1을 대입하였다(박병윤과 권상기, 2000).

- von Mises 파괴기준식

$$\sigma_{yp} = \sqrt{3J_2} \quad (2)$$

여기서 $J_2 = \frac{1}{6} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}$ 이다.

- Hoek-Brown 파괴기준식

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c \sqrt{\sigma_3 \frac{m}{\sigma_c} + s} \quad (3)$$

- Mohr-Coulomb 파괴기준식

$$(\sigma_1 - \sigma_3) = (\sigma_1 + \sigma_3) \sin \phi + 2c \cos \phi \quad (4)$$

4. 해석결과

4.1 영향인자들의 개별해석에 대한 결과

각각의 인자들을 독립적으로 적용한 모델의 해석결과를 Table 2에 나타내었다.

Table 2. Results of separated analyses

영향인자		최대 변위 (mm)	최대주응력의 최대값 (MPa)	최소주응력의 최소값 (MPa)
초기응력 및 굴착	case 1	1.4	36.8	-9.6
	case 2	2.2	56.5	-15.1
	case 3	1.4	25.6	-5.9
	case 4	2.2	58.3	-14.1
	case 5	1.3	36.5	-8.7
완충재의 팽윤압		0.2	9.1	-6.8
열응력 및 열팽창 (처분 후 71년)		Z축 방향 변위: 65.2 (지표면) 30~40 (처분장 주변)	29.7	-3.8
		X축 방향 변위: 0.5		
		Y축 방향 변위: 0.5		

초기응력의 크기 및 방향에 대한 해석 결과, 축압계수가 커질수록 처분터널 벽면의 변위가 증가하며, 응력집중은 처분공 벽면에서 발생하였다. 반면에 축압계수가 0.5인 경우에는 처분터널 바닥부에서 최대변위가 발생하였으며, 처분터널 벽면의 상부에 응력집중이 발생하였다. 한편, 수평응력의 크기를 다르게 고려한 결과 수평방향의 최대주응력이 터널의 축방향과 수직인 경우에 역학적으로 더 불안정한 결과를 보였다.

처분장 주변에서 암반의 온도가 최고에 이르는 시점인 처분 후 71년의 온도분포를 이용하여 역학 해석을 수행한 결과, 열팽창에 의해 암반이 광범위하게 상승하는 것을 볼 수 있었다. 그 최대값은 지표면에서 약 65 mm에 이르고 처분장에 인접한 부분에서는 약 30~40 mm의 변위가 발생하였다. 한편, 완충재의 팽윤에 의한 역학적 거동은 다른 인자에 비해 상대적으로 크지 않은 것으로 나타났다.

4.2 개별 거동의 중첩 및 안전계수 평가

측압계수가 1인 경우의 굴착에 의한 거동, 완충재가 포화되어 팽윤압에 의한 거동, 처분 71년 후의 열응력에 의한 거동을 중첩하였다. 이 결과는 처분장이 건설되고 사용후핵연료의 처분과 동시에 완충재와 뒷채움재가 설치되며, 처분 후 71년이 되는 시점에서의 열응력과 완충재의 팽윤압이 종합적으로 작용한다고 가정한 것이다. 이때의 변위는 암반의 열팽창에 의해 수직 상승이 두드러졌으며 처분장의 굴착과 완충재의 팽윤의 영향은 매우 미미한 것으로 나타났다(Fig. 3).

Mohr-Coulomb 파괴기준에 의한 암반의 안전계수는 처분터널의 바닥과 천단 부분에서 1 이하로 평가되었다(Fig. 4). 처분터널의 벽면은 높은 안전계수 값을 보였다. 한편, Hoek-Brown 기준에 의한 안전계수는 모든 부분에서 1보다 큰 값을 보였으며, Mohr-Coulomb 파괴기준으로 계산된 값보다 훨씬 크게 예측되었다.

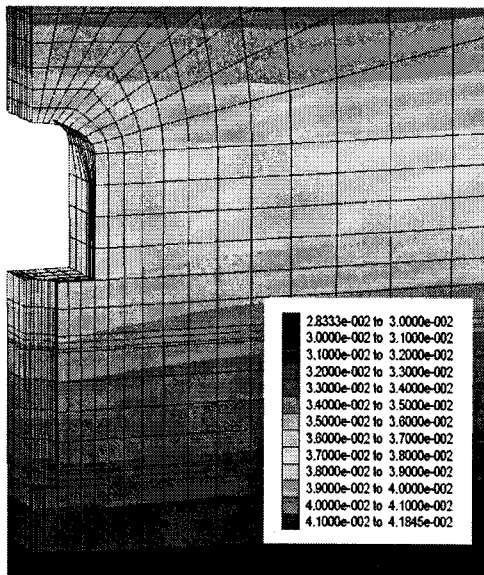


Fig. 4. Displacement, (m)

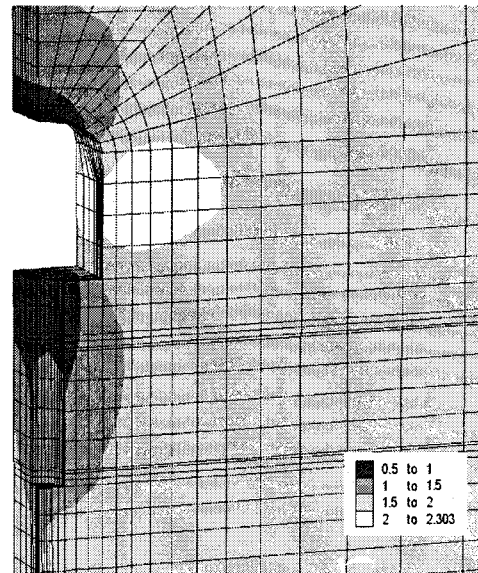


Fig. 5. Factor of safety.

Table 3. Minimum value of Factor of safety at each part

매 질	파괴기준	최소 안전계수	취약지역
처분용기	von Mises	4.3	
완 충 재	Mohr-Coulomb	0	상부/하부
뒷채움재	Mohr-Coulomb	0.8	전 영역
암 반	Hoek-Brown	3.8	
	Mohr-Coulomb	0.5	처분터널 바닥 및 천단

처분장 구성요소별 각 부분의 최소 안전계수와 구조적으로 취약한 부분을 Table 3에 표시하였다. Fig. 6과 Fig. 7은 각각 처분터널과 처분공의 굴착면에 해당하는 요소의 Mohr-Coulomb 파괴기준에 의한 안전계수 분포를 나타내었다. 처분터널의 바닥과 천단부에서 안전계수가 1 이하의 값을 보이고 있다.

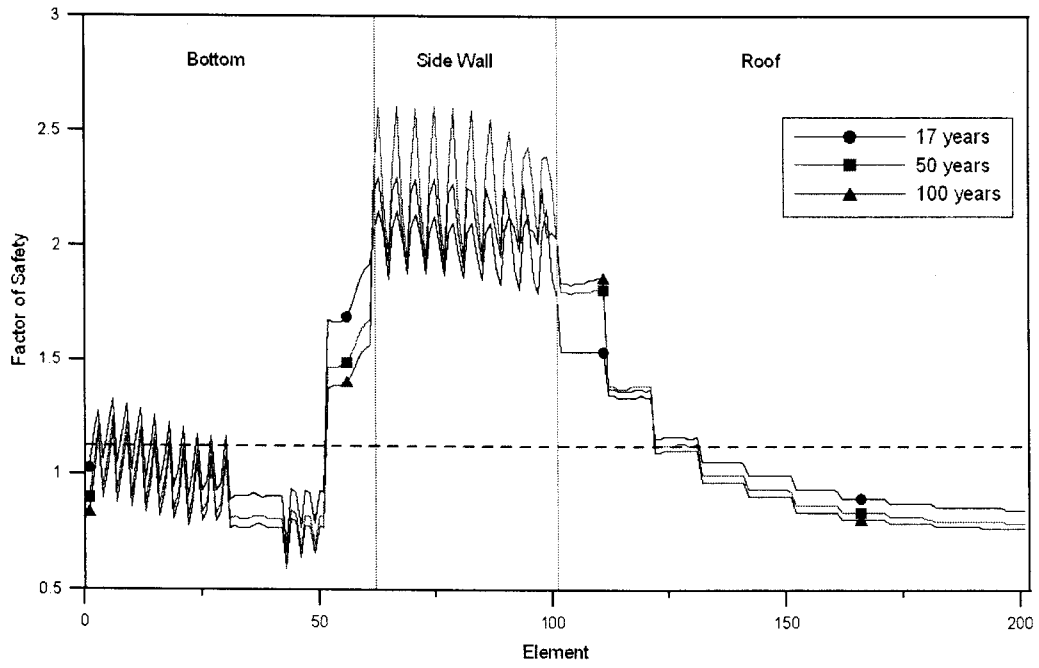


Fig. 6. F.O.S. distribution of elements around disposal tunnel

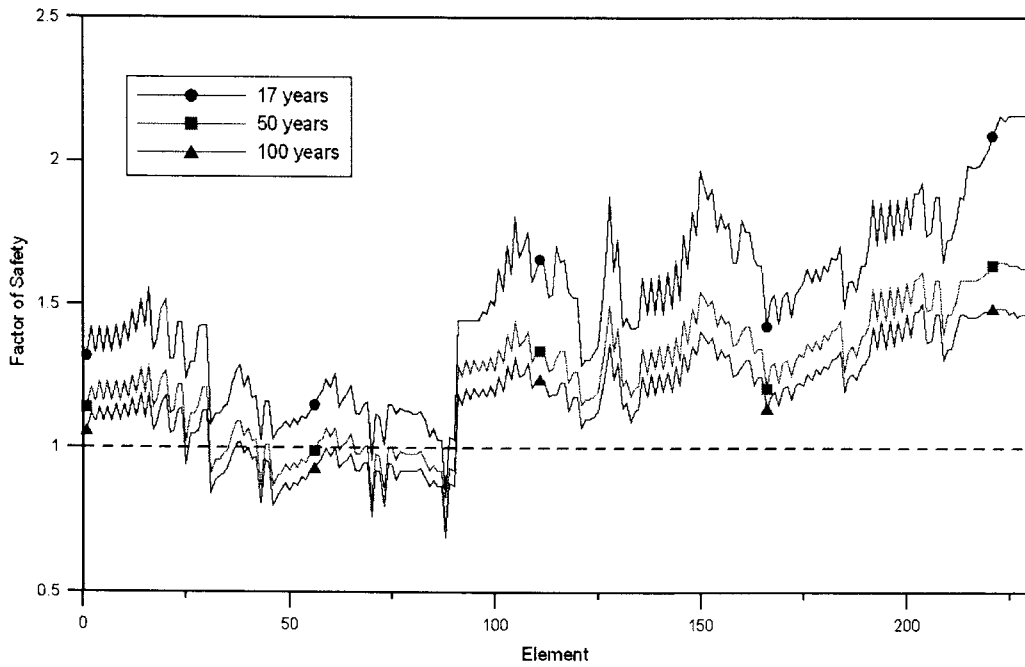


Fig. 7. F.O.S. distribution of elements around deposition hole

5. 결 론

처분환경에서 고준위폐기물 처분장의 성능과 안정성에 영향을 주는 인자를 개별적으로 분석하였다. 암반 초기응력의 크기와 방향에 따라 처분장 주변암반의 거동에 큰 차이가 나타났다. 또한, 축압

계수의 크기에 따라 응력 재분포와 변위의 경향이 달라지므로 처분장 설계시 정확한 초기응력의 측정이 선행되어야 할 것이다. 그리고 처분터널을 수평방향의 최대주응력 방향과 평행하게 하면 안정성을 높일 수 있다는 것을 확인하였다.

방사성 붕괴열은 대상 암반의 광범위한 상승을 야기하는 것으로 나타났다. 사용후핵연료 처분 후 100년이 되는 시점에서 지표면은 열팽창에 의해 최대 82.5 mm, 처분장 부근에서는 약 40 mm의 변위가 발생하는 것으로 나타났다. 한편, 완충재의 팽윤압에 의한 거동은 다른 두 인자에 비해 상대적으로 작게 나타났다.

중첩의 원리를 이용하여 처분 후 71년의 처분장에 대한 안정성을 분석하였다. 처분용기의 안전율은 높은 것으로 평가되었지만 완충재와 뒷채움재는 많은 부분이 탄성한계를 넘는 결과를 보였다. 하지만 완충재와 뒷채움재는 처분시스템의 완충역할을 하는 요소이므로 이 결과는 처분장의 구조적 안정성에는 큰 영향을 주지 않을 것으로 판단된다. 천연방벽인 암반에서는 처분터널의 상부와 바닥, 처분공 상부에서 소성거동을 보이는 것으로 평가되어 이 부분에 대한 보강이 필요할 것으로 보인다.

처분장의 구조적 안정성 분석을 위해 영향인자의 개별적 분석결과를 중첩하는 절차를 사용하였다. 이 절차를 통해 일반적인 연계해석보다 계산시간을 줄일 수 있었다. 또한, 영향인자를 선택적으로 중첩할 수 있으므로 활용도가 높을 것으로 판단된다. 현재는 수압, 불연속면 등 다른 영향인자와 비선형 거동(Creep 현상 등)의 적용에 대한 추가적인 연구가 수행중이다.

■ 참고문헌 ■

1. 박병윤, 권상기, 2000, 고준위폐기물 처분장의 최적 공동간격 및 처분공간격을 결정하기 위한 역학적 안정성 해석, 터널과 지하공간(한국암반공학회지), 10.2, 237-248.
2. 이종열, 조동건, 김성기, 이양, 최희주, 최종원, 한필수, 2005, 고준위폐기물 심지층 수직처분 (KRS-V1) 지하시설 개념설계, 한국원자력연구소, TR-3012.
3. 이종원, 김문생, 조효남, 2004, 재료역학, 인터비전.
4. 최종원, 전관식, 최희주, 이종열, 권영주, 2004, 한국형 고준위 폐기물 처분용기 열 및 크립 해석, 한국원자력연구소, TR-2691.
5. 최희주, 이양, 최종원, 권영주, 2006, PWR 사용후핵연료 처분용기의 구조적 안전성 해석, 한국방사성 폐기물학회지, 4.3.
6. 최희주, 이종열, 조동건, 이양, 김성기, 최종원, 2006, 고준위폐기물 한국형처분시스템 특성, 한국방사성폐기물학회 학술논문요약집, 4.1, 151-152.
7. A. C. Ugural and S. K. Fenster, 1995, Advanced Strength and Applied Elasticity, Prentice-Hall PTR.
8. Jongwon Choi, Dong-Keun Cho, Yang Lee, Heui-Joo Choi, Jong-Youl Lee, 2006, Assessment of a Pre-conceptual Design of a Spent PWR fuel Disposal Container, J. of the Korean Radioactive Waste Society, 4.1, 41-50.