

방사성 폐기물 지하처분장의 안정성 분석에 있어서 암반내 초기응력의 역할과 의미

최성웅 (강원대학교 공과대학 지구환경공학부 교수)

초 록 : 우리나라에는 현재 고리, 월성, 영광 등 11기의 원자력 발전소가 운영되면서 전체 전력생산량의 40% 이상을 담당하고 있으며, 2006년까지는 12기가 추가 건설되어 총 23기의 원자력 발전소가 운영되어 국내 총 전력생산량의 절반 이상을 담당하게 될 예정이다. 하지만 이러한 원자력 발전은 필연적으로 인체에 유해한 각종 방사성 폐기물을 생산하게 되므로 이에 대한 처분기술은 대단히 높은 안전율을 고려하여 확보되어야 한다.

한국원자력연구소의 기초연구에 의하면 국내 실정상 지하 암반내 심층처분이 가장 유리한 시스템인 것으로 보고되고 있으며, 그 중에서도 심도 500m 이상의 고심도 지하 암반내에 터널을 뚫고 터널 바닥면에 처분공을 일렬로 굴착하여 이 처분공 내에 canister로 밀봉된 방사성폐기물을 유기하는 KBS-3 처분 시스템을 제안하고 있다.

본 연구에서는 KBS-3 처분 시스템을 고려할 경우, 필연적으로 야기되는 고심도 지하에서의 초기응력성분이 처분 시스템에 미치는 영향을 분석하기 위해 수치해석을 실시하였으며 이와 함께 제반 설계정수 중에서 초기응력값이 어떠한 비중을 차지하는지를 살펴보았다.

1. 서 론

영구시설물로 건설되어야 하는 지하 핵폐기물 처분장의 경우, 설계에 필요한 제반 지반정수에 대한 선정은 그 어떤 지하구조물에 대해서 보다도 각별히 수행되어야 할 것이다.

일반적인 지하구조물의 설계시 고려될 수 있는 주요 지반정수로는 암반의 변형계수, 포아송비, 내부마찰각 및 점착강도, 그리고 지하수 조건 등을 거론할 수 있으며 암반의 불연속 특성을 강조할 경우 이에 대한 수직 및 전단강성도, 그리고 점착강도와 마찰각 등이 추가로 고려될 수 있다.

이러한 지반물성으로서의 설계정수와 함께 반드시 고려되어야 하는 설계정수로서 지반 내에 존재하는 초기응력의 분포양상인데, 지하구조물의 형상 및 크기 그리고 위치심도에 따라 초기응력의 분포양상이 가지는 입력자료로서의 중요도는 달라질 수 있기 때문이다.

최근 지반침하 메커니즘 분석을 위한 연구를 수행하였던 최성웅 등(2005)은, FLAC, UDEC, PFC 등의 수치해석 수행을 통하여 지반침하에 영향을 미치는 요소들을 분석한 바 있으며 각 요소들의 중요도를 언급한 바 있다.

이들에 따르면, 지반의 물성값들 중에서는 ①암반의 변형계수 (또는 불연속면의 강성), ②지하수조건, ③점착강도 및 내부마찰각, ④포아송비 등의 순서로 중요도가 있음을 밝힌 바 있으며, 기하학적인 면에서는 ①채굴적의 폭, ②측압계수, ③채굴적의 심도, ④채굴적의 높이 등의 순서로 중요성이 있음을 언급한 바 있다.

결국은 채굴적의 형상과 함께 매우 중요하게 다루어져야 할 입력자료요소로서 측압계수가 제시되

었는데, KBS-3 처분 시스템 (장근무 외, 1997)과 같이 심도 500m 이상의 고심도에 위치하게 될 지하 핵폐기물 처분장의 경우 지반내 초기응력의 분포양상은 더욱 세밀히 검토되어야 할 것이다.

미국의 예를 보면, 네바다에 위치하는 Yucca Mountain 부지에서, 지표하부 약 250m 지점에 위치하는 지하실험실에서 30m 깊이로 시추한 5개의 시추공을 이용하여 수압파쇄시험에 의한 초기응력측정을 실시한 바 있다. 이 시험의 목적은 핵폐기물 처분 대상부지에 대한 지반공학적 해석을 위함이었는 데, 수직응력은 4.7MPa 였고 최대수평주응력은 2.9MPa 로서 N15°E 방향으로 최소수평주응력은 1.7MPa 로서 N75°W 방향으로 작용하는 것으로 조사된 바 있었으며, 결국 이 응력분포양상은 이 지역이 정단층의 지각조건에 놓여있음을 의미하는 것이었고, 인근 지역에서 발견되고 있는 N-S 방향의 정단층이 시험결과와 신뢰도를 향상시키고 있음을 알 수 있었다(Moo Y. Lee, 2002).

본 연구에서는 이와 같이 고심도 핵폐기물 지하처분장의 설계에서 더욱 중요성이 제기되고 있는 지반내 응력분포특성을 통하여, 응력분포양상이 지하처분장의 거동특성에 어떠한 영향을 미치는지를 살펴보고자 한다.

2. 본 론

2.1 해석모델 및 방법

처분장의 한 유니트는 이동로인 터널과 다수의 처분공으로 이루어진다. 처분공은 터널 바닥을 따라 일정 간격으로 설치하며 처분공마다 각각 한 개의 캐니스터가 안치된다. Fig. 1은 처분장 유니트의 단면구조를 보여주는데(문현구, 1994), 수치해석 모델에서는 이를 참조하여 처분공의 깊이는 7.5m, 직경은 2m이며 처분공의 간격은 5m로 설정하였으며, 이동 터널은 지표하부 500m에 위치하는 것으로 가정하였다. Fig. 2는 수치해석을 위해 제작한 3차원 UDEC 모델이며, 이동 터널 바닥에 일정간격으로 설정되어 있는 처분공을 확대하여 함께 보여주고 있다.

수치해석은, 터널 및 처분공 굴착 이전 수치모델을 완전히 평형상태에 도달하게 한 뒤, 측압계수를 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0 으로 변화시키면서 터널의 측벽 및 크라운, 그리고 터널바닥과 처분공 인접지점에 대한 변위 및 응력 상태의 변화 양상을 3차원적으로 분석하기 위해 3DEC 해석이 실시되었다.

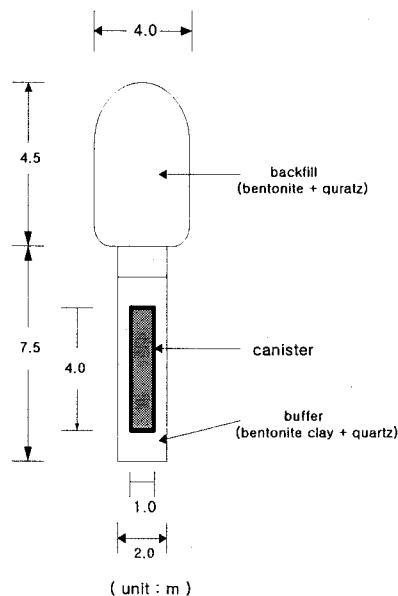


Fig. 1. Schematic diagram for the KBS-3 type disposal repository

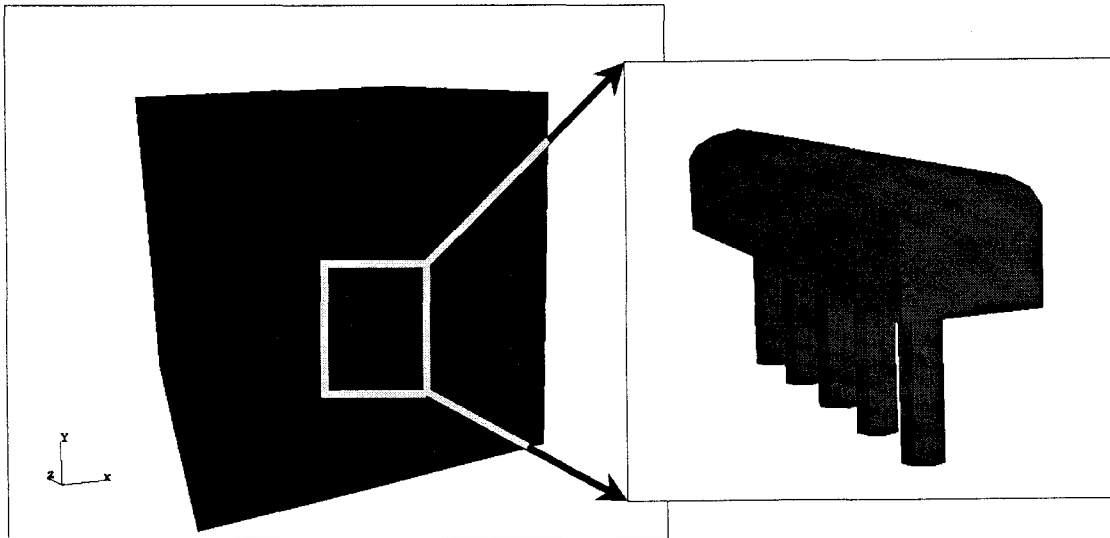


Fig. 2. 3-dimensional mesh generation for the disposal units.

2.2 해석 조건

모델의 상부면을 제외한 모든 경계면에 대해서 수평 또는 수직 방향의 변위를 구속하는 경계조건을 부여하였으며, 상부면에는 처분장 주변 암반의 응력상태를 얻기 위하여, 지표하부 500m에 위치하는 터널을 가정하여, 이 심도에 해당하는 지층 무게를 수직하중으로서 등분포 시켰다.

수평응력의 경우, 수압파쇄시험에 의한 국내 각 지역별 초기응력 양상으로부터 해당 심도에 대한 측정값이 수직응력의 0.5배에서 1.0배 사이에 있는 것으로 보고되고 있고, 오버코어링에 의한 측정값에서도 0.5배 내지 1.5배로 보고 되고 있으나 (최성용 외, 1999) 측압계수의 영향을 뚜렷이 확인하기 위해, 측압계수가 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0의 5가지 경우에 대해 살펴보았다.

또한 측압계수를 1.5로 고정한 상태에서 지반정수를 변화시켜 보았는데, 앞서 언급한 바와 같이 지반정수 중에서도 가장 그 영향이 큰 변형계수부분을 각각 5배 및 10배로 증가시켜 이에 따른 처분장의 거동특성도 함께 살펴보았다.

Table 1은 전체 6가지 해석조건에 대한 요약이며, Table 2는 기본적으로 사용된 수치모델의 역학적 특성이다.

Table 1. Cases of numerical studies.

Case No.	Description
1	$K^1) = 0.5$, bulk & shear modulus ; basic ²⁾
2	$K = 1.0$, bulk & shear modulus ; basic
3	$K = 1.5$, bulk & shear modulus ; basic
4	$K = 2.0$, bulk & shear modulus ; basic
5	$K = 3.0$, bulk & shear modulus ; basic
6	$K = 1.5$, bulk & shear modulus ; 5 x basic
7	$K = 1.5$, bulk & shear modulus ; 10 x basic

1) $K=(\text{average horizontal principal stress})/(\text{vertical stress})$

2) basic ; refer to Table 2.

Table 2. Physical properties of the numerical models.

density	2700kg/cm ³
bulk modulus	3.9GPa
shear modulus	2.8GPa
friction angle	35°
cohesion	5.0MPa
joint normal stiffness	3.0GPa/m
joint shear stiffness	2.0MPaGPa/m
joint friction angle	30°

2.3 해석 결과

Table 1에서 언급한 7가지의 해석모델에 대해 3차원 UDEC 해석을 실시한 결과를 정리하면 Fig. 3~6과 같다.

Fig. 3은 축압계수가 0.5에서 3.0까지 변함에 따라 터널의 측벽부, 크라운부, 그리고 처분공 입구부에서의 변위발생 양상을 보여주고 있는데, Fig. 3(a)는 터널 측벽부에 해당하는 그림으로서 x 방향의 변위만 보여주고 있으며, Fig. 3(b)는 터널 크라운부로서 y 방향의 변위만을 보여주고 있고, Fig. 3(c)에서는 처분공 입구부에 대해 x 및 y 방향에 대한 변위를 보여주고 있다.

Fig. 3에서 보는 바와 같이 축압계수의 증가에 따라 변위발생양상이 뚜렷이 변하고 있음을 확인할 수 있으며, 특히 터널 측벽에서의 x 방향의 변위나 처분공 입구에서의 x 방향의 변위 발생양상보다는 터널 크라운부 또는 처분공 입구에서의 y 방향 변위발생 양상이 더 큼을 알 수 있다.

이는 축압계수의 증가, 즉 수평방향의 응력이 증가함에 따라 터널 측벽부에서의 변위보다는 터널 크라운부에서의 변위가 더욱 비례적으로 증가함을 보여주고 있다.

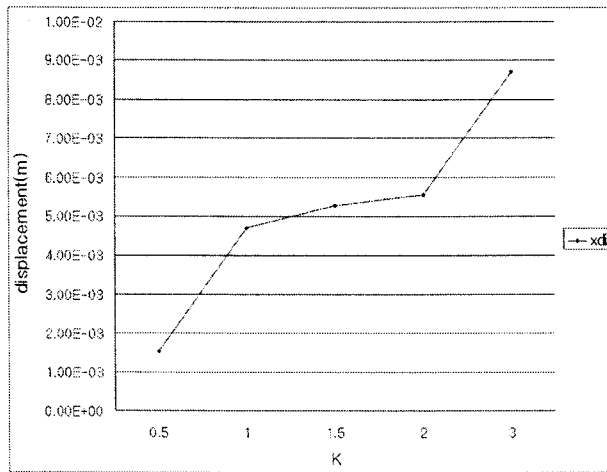
한편 x 방향 및 y 방향 모두 변위가 (+)값으로 나오고 있음을 알 수 있는데, x 방향의 변위일 경우 터널 측벽으로부터 터널 안쪽으로 변위가 발생하는 것으로 설명될 수 있으나, 터널 크라운부 및 처분공의 경우 상부에서는 위쪽으로 변위가 발생하고 있음을 알 수 있다. 이는 신희순 등(2003)의 연구결과와도 유사한 결과로서, 처분공의 존재에 의해 것으로 이해될 수 있을 것이다.

결국 고심도 핵폐기물 지하처분장의 설계시 수직응력보다 수평응력이 크게 나올 경우에는 터널 크라운부에 대한 세심한 주의가 요구된다는 점을 알 수 있다. 이러한 사실은 Fig. 4에서도 확인될 수 있는데, Fig. 4는 Fig. 3과 동일한 지점에 대하여 축압계수의 증가에 따른 최대, 중간, 최소주응력의 변화양상을 보여주고 있다.

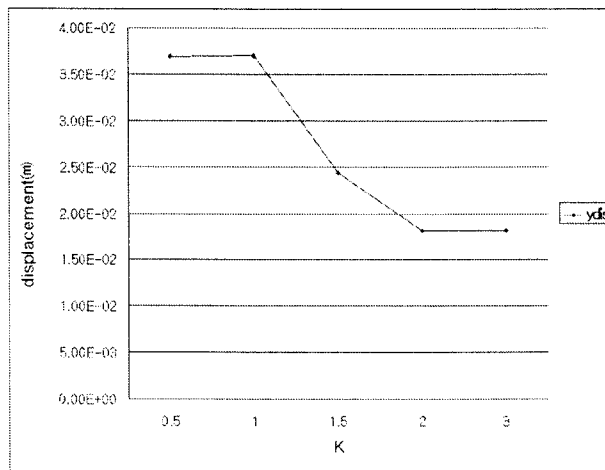
하지만 축압계수가 2.0 이상일 경우, 즉 수평응력의 크기가 수직응력에 비해 상대적으로 매우 커질 경우 터널 측벽부 및 처분공 주변에서의 x 방향 변위는 계속적으로 증가할 수 있으나, 터널 크라운부 및 처분공 주변에서의 y 방향 변위는 상대적으로 안정적인 수준에 도달하고 있음을 알 수 있다.

따라서 국내 암반의 경우 300~500m 심도에서의 축압계수 분포양상이 1.0~1.5에 밀집하고 있음을 볼 때, 축압계수의 크기에 따른 터널 크라운부 및 처분공 주변에서의 변위발생양상에 대한 각별한 주의가 요망된다고 할 수 있을 것이다.

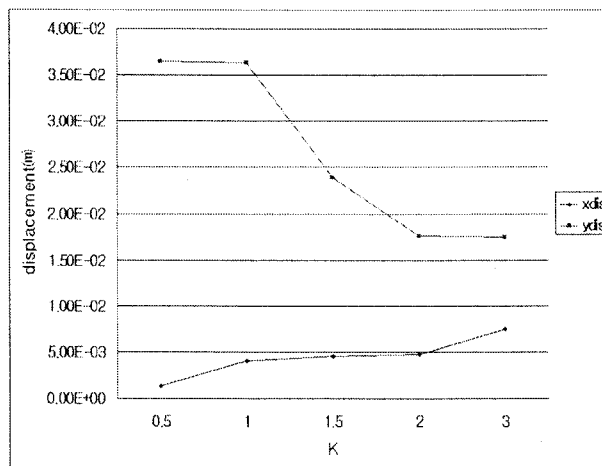
한편, 축압계수를 1.5로 고정시킨 상태에서 지반정수, 특히 변형계수의 변화양상이 터널 및 처분공 주변에 야기시키는 변위와 응력의 양상을 Fig. 5 및 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 5의 경우 변형계수의 증가에 따른 동일 지점에서의 변위발생양상을 보여주고 있는데, 앞의 축압계수의 변화에 따른 해석경우와 유사하게 변형계수의 증가에 따른 x 방향으로의 변위발생보다는 y 방향으로의 변위발생량이 더 크게 나타나고 있으며 그 증가정도는 변형계수의 증가에 따라 수렴하는 양상을 보이고 있음을 알 수 있다. 하지만 응력의 변화양상은 축압계수가 일정한 이상, 변화는 보이지 않을 것이다(Fig. 6 참조).



(a)

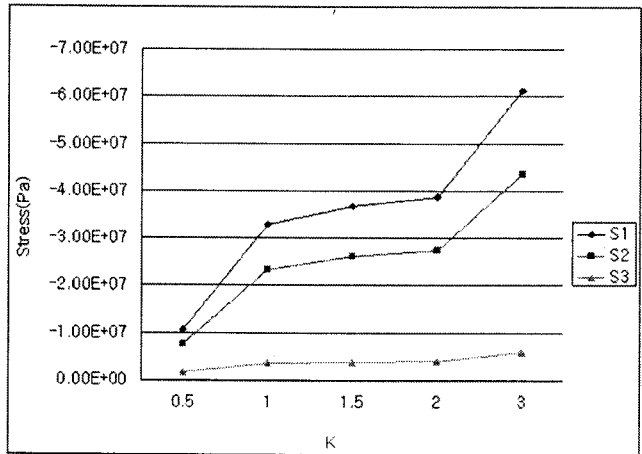


(b)

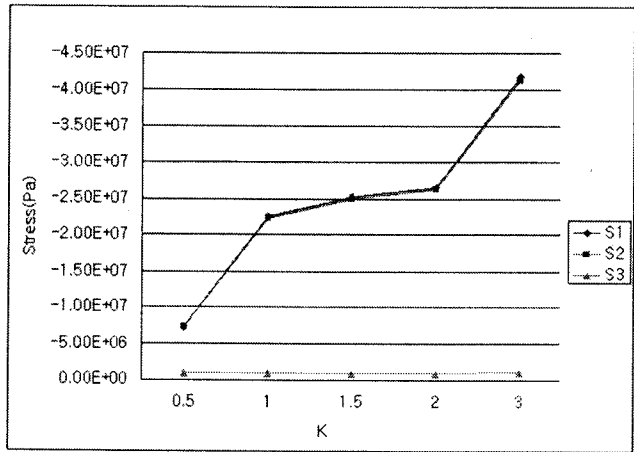


(c)

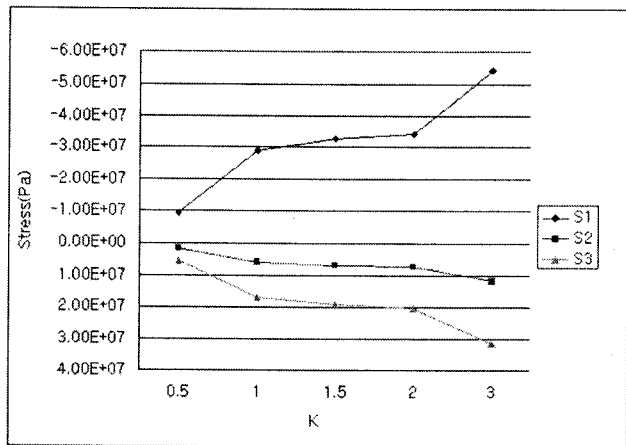
placement distribution patterns with the variation of K-value; (a) at the of tunnel, (b) at the crown of tunnel, (c) at the corner of canister.



(a)

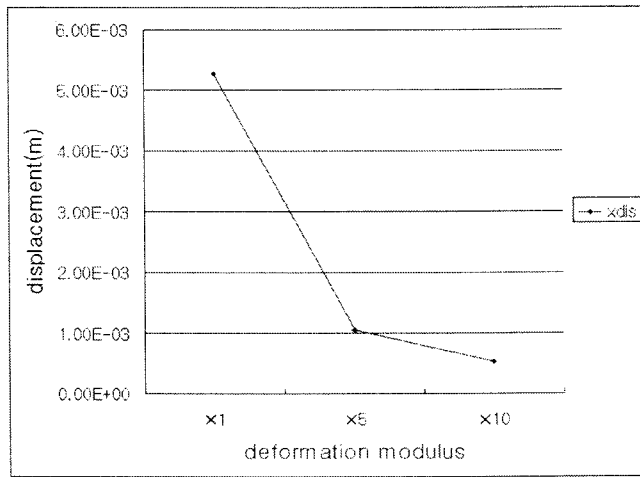


(b)

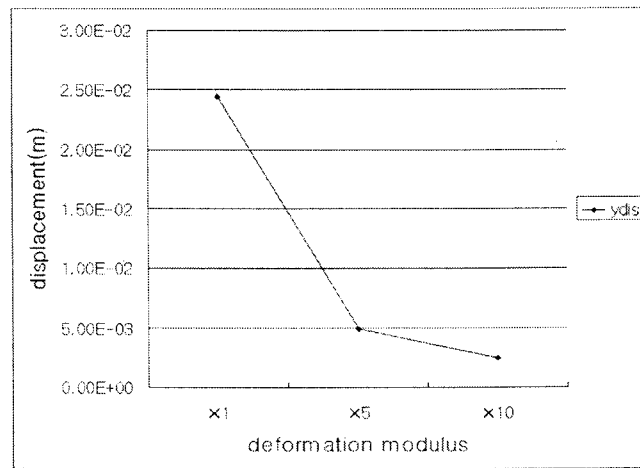


(c)

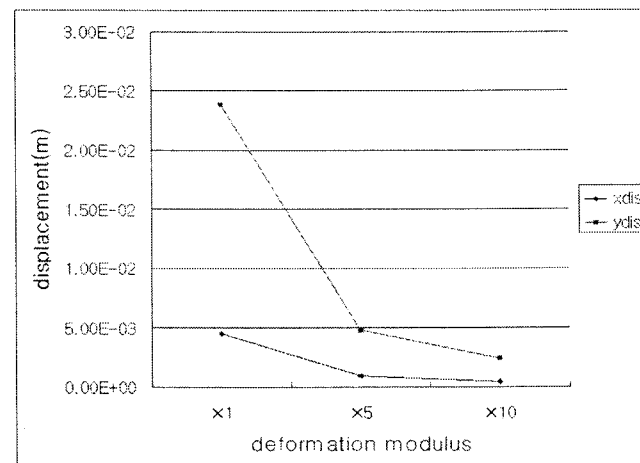
Fig. 4. Distribution patterns of principal stresses with the variation of K–vaule; (a) at the side wall of tunnel, (b) at the crown of tunnel, (c) at the corner of canister (S1; major principal stress, S2; intermediate principal stress, S3; minor principal stress).



(a)

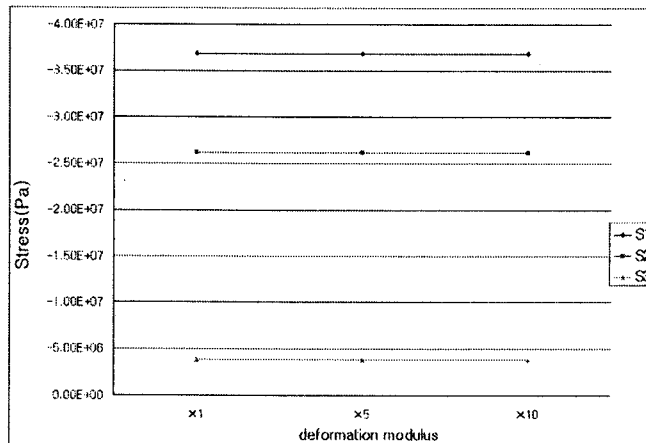


(b)

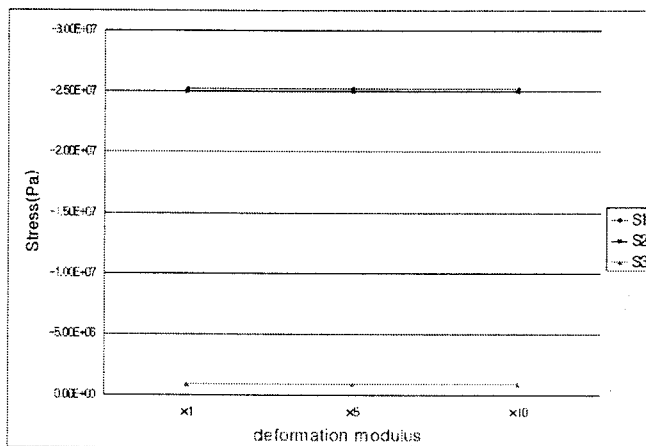


(c)

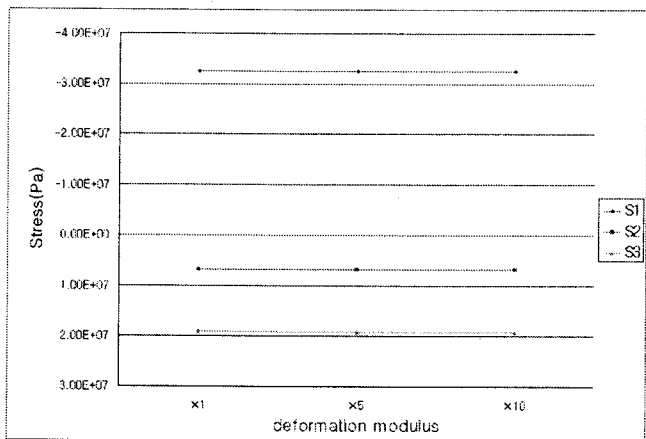
l. 5. Displacement distribution patterns with the variation of deformation modulus; (a) the side wall of tunnel, (b) at the crown of tunnel, (c) at the corner of canister



(a)



(b)



(c)

Fig. 6. Distribution patterns of principal stresses with the variation of deformation modulus; (a) at the side wall of tunnel, (b) at the crown of tunnel, (c) at the corner of canister (S1; major principal stress, S2; intermediate principal stress, S3; minor principal stress).

3. 결 론

우리나라 지반 조건에 가장 적합한 형태로 보고되고 있는 고심도 핵폐기물 지하처분장 건설과 관련하여 지표하부 500m 지점에 굴착한 이동로 터널과 그 하부에 굴착한 다수의 처분공을 가정하여 초기응력의 분포양상이 지하구조물에 미치는 영향을 살펴보았으며, 이와 함께 지반 물성치 중 지하구조물의 안정성 분석에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 보고되고 있는 변형계수를 변화시키면서 지하구조물의 거동양상을 수치해석적으로 살펴보았다.

수치해석에서는, 불연속면을 독립적으로 고려할 수 있으며 또한 최소수평주응력 및 최대수평주응력을 입체적으로 고려할 수 있는 3DEC을 해석 툴로 사용하였으며, 변형계수를 고정시킨 상태에서 축압계수를 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0 으로 변화시키는 경우와 축압계수를 1.5로 고정시킨 상태에서 변형계수를 1배, 5배, 10배로 변화시키면서 총 7가지에 대한 수치해석을 실시하였다.

그 결과, 축압계수가 변함에 따라 터널의 측벽부, 크라운부, 그리고 처분공 입구부에서의 변위발생 양상은, 터널 측벽에서의 x 방향이나 처분공 입구에서의 x 방향의 변위 발생보다는 터널 크라운부 또는 처분공 입구부에서의 y 방향 변위발생 양상이 더 큼을 알 수 있었으며, 응력의 분포양상도 유사한 결과를 얻을 수 있었다.

하지만 축압계수가 2.0 이상이 될 경우, 터널 측벽부 및 처분공 주변에서의 x 방향 변위는 계속적으로 증가할 수 있으나, 터널 크라운부 및 처분공 주변에서의 y 방향 변위는 상대적으로 안정적인 수준에 도달하고 있음을 알 수 있다.

따라서 국내 암반의 경우 300~500m 심도에서의 축압계수 분포양상이 대부분 1.0~1.5의 값을 보이고 있기 때문에, 축압계수의 크기에 따른 터널 크라운부 및 처분공 주변에서의 변위발생양상이 더더욱 중요하게 고려되어야 할 것이다.

한편, 축압계수를 고정시킨 상태에서 변형계수를 변화시키면서 지하구조물의 거동특성을 분석한 결과, 변형계수의 증가에 따른 동일 지점에서의 변위발생양상은 증가하는 형태를 보여주고 있으나, 응력의 변화양상은 거의 없다. 이는 곧 축압계수가 일정한 이상, 주응력에는 큰 변화가 생기지 않는다는 것이다.

따라서 고심도 핵폐기물 지하처분장의 안정적 설계를 위해서는 축압계수의 규명이 필수적으로 선행되어야 할 것이며, 수평응력이 수직응력보다 크게 나타날 경우 터널 크라운부 및 처분공 주변에서의 변위발생양상에 대한 면밀한 검토가 선행되어야 할 것이다.

■ 참고문헌 ■

- Itasca Consulting Group Inc., 2003, 3DEC User's Guide.
- Moo Y. Lee, 2002, Hydraulic Fracturing in situ stress measurement in the Yucca Mountain, http://www.sandia.gov/eeselector/gm/gm/project_hf.html
- 문현구, 주광수, 1994, 방사성 폐기물의 열하중에 의한 절리암반의 거동에 관한 수치해석적 연구, *터널과 지하공간, 한국암반공학회지*, 제4권, 제 2호, pp. 102- 118.
- 신희순, 최성웅, 송원경, 2003, 방사성 폐기물 지하처분장의 열역학적 거동에 관한 수치해석적 연구, *한국지질자원연구원 논문집*, 제17권 제1호, pp. 31-45.
- 장근무, 황용수, 김선훈, 1997, KBS-3 개념에 따른 포화된 암반내 사용후 핵연료 처분을 위한 열수리역학적 특성 해석, *터널과 지하공간, 한국암반공학회지*, Vol. 7, pp. 39-50.
- 최성웅, 신희순, 박찬, 신중호, 배정식, 이형원, 박종인, 전한석, 1999, 유류비축기지 설계를 위한 대심도 경사공에서의 수압파쇄 초기응력 해석, *한국지반공학회지*, 제15권, 제4호, pp.185-205.
- 최성웅, 전양수, 박의섭, 정용복, 천대성, 2005, 지반침하 메커니즘 분석 및 평가 프로그램 개발, *터널과 지하공간, 한국암반공학회지*, 제15권 제3호, pp. 195-212.