

한국원자력연구원 내 지하처분연구시설 주변의 암반 손상대 영향 평가

권상기^{1)*}, 김진섭¹⁾, 조원진¹⁾

The Influence of Excavation Damaged Zone around an Underground Research Tunnel in KAERI

S.Kwon, J.S.Kim and W.J.Cho

Abstract The development of an excavation damaged zone, EDZ, due to the blasting impact and stress redistribution after excavation, can influence on the long term stability, economy, and safety of the underground excavation. In this study, the size and characteristics of an EDZ around an underground research tunnel, which was excavated by controlled blasting, in KAERI were investigated. The results were implemented into the modelling for evaluating the influence of an EDZ on hydro-mechanical behavior of the tunnel. From in situ tests at KURT, it was possible to determine that the size of EDZ was about 1.5m. Goodman jack tests and laboratory tests showed that the rock properties in the EDZ were changed about 50% compared to the rock properties before blasting. The size and property change in the EDZ were implemented to a hydro-mechanical coupling analysis. In the modeling, rock strengths and elastic modulus were assumed to be decreased 50% and the hydraulic conductivity was increased 1 order. From the analysis, it was possible to see that the displacement was increased while the stress was decreased because of an EDZ. When an EDZ was considered in the model, the tunnel inflow was increased about 20% compared to the case without an EDZ.

Key words Excavation damaged zone, KURT, Blasting impact, Radioactive waste repository, HM modelling

초 록 지하구조물의 굴착을 위한 발파 충격과 굴착후 응력의 재분포에 의해 발생하는 암반 손상대(Excavation Damaged Zone, EDZ)의 발생은 구조물의 장기적 안정성·경제성·안전성에 영향을 미친다. 본 연구에서는 조절발파기법으로 굴착된 한국원자력연구원 내 지하처분연구시설에서 굴착 후 발생하는 손상대 규모 및 특성을 측정, 분석하였으며 이를 모델링에 적용하여 손상대가 터널의 역학적, 수리적 거동에 미치는 영향을 평가하고자 하였다. KURT에서의 손상대 현장시험을 통해 1.5m의 손상구간을 확인할 수 있었으며 Goodman jack 시험과 실험실 암석시험을 통해 암반의 물성은 발파전 물성에 비해 대체적으로 50% 정도 변화함을 알 수 있었다. 이러한 암반 손상대 크기와 물성변화를 모델링에 적용하여 수리-역학적 연동해석을 실시하였다. 손상받지 않은 구간에 비해 손상대의 변형계수는 50% 감소하며 수리전도도는 1 order 증가하는 것으로 가정하였다. 해석 결과 손상대를 고려하는 경우 변위는 증가하고 응력은 감소하며 지하수 유입량은 약 20% 정도 증가하는 것으로 나타났다.

핵심어 암반손상대, 지하처분연구시설, 발파영향, 방사성폐기물 처분장, 수리-역학적 모델링

1. 서 론

지하 암반 내에 건설되는 지하구조물의 경우, 발파충

격이나 굴착 이후의 응력의 재분포에 의해 구조물 주변 암반의 물성이 변하는 손상대(Excavation Damaged or Disturbed Zone, EDZ)가 발생하게 된다. 손상대의 발생에 의해 암반의 역학적·수리적·열적 거동에는 변화가 발생하며, 이는 구조물의 장·단기적 기능에 영향을 줄 수 있다. 이러한 측면에서 지하구조물에서의 손상대의 발생에 따른 암반 거동에 미치는 영향을 파악하

¹⁾ 한국원자력연구원 선임연구원

* 교신저자 : kwonsk@kaeri.re.kr

접수일 : 2008년 10월 17일

계재 승인일 : 2008년 11월 3일

는 것은 구조물의 장기적 안정성·경제성·안전성 측면에서 반드시 필요한 연구라고 할 수 있다. 방사성폐기물 처분장과 같이 높은 안전성 확보가 요구되는 지하 구조물의 경우, 장·단기 역학적·수리·열적 거동을 정확하게 예측하는 것은 특히 중요하다. 지하처분 환경에서의 열·수리·역학적 복합거동 분석을 위해 1992년부터 수행되고 있는 DECOVALEX 국제공동 프로젝트에서는 손상대가 주요 영향 인자로 반영되고 있다 (Tsang et al., 2005). 2007년 종료된 DECOVALEX-THMC 공동연구에서 수행되었던 5개 Task 중 3개 Task가 손상대와 연관되어 있다는 사실은 처분장에서의 장·단기 거동해석을 위한 손상대의 연구 필요성을 간접적으로 보여준다. 하지만 손상대가 지하구조물의 안전성과 안정성에 미치는 영향에 대한 중요성 평가는 시각에 따라 차이가 있는 것이 사실이다. 현재 터널 구조물의 설계에서 손상대가 미치는 영향은 안정성 평가에 반영되지 않는 것이 일반적이다. 이는 굴착 후 숏크리트, 록볼트, 강재지보, 라이닝으로 보강되는 지하구조물에서는 손상대의 존재가 구조적 안정성에 미치는 영향이 크지 않을 것이라는 측면과 손상대의 발생으로 인한 암반의 수리·역학적 거동 변화가 지하구조물의 성능에 큰 영향을 미치지 않을 것이라는 판단에 기인하는 것으로 보인다. 이에 따라 국내에서의 손상대 관련 연구는 제한적으로 이루어졌으며 손상대의 중요성에 대한 인식은 미미한 상황이다.

방사성폐기물 처분장을 포함한 다양한 목적의 대규모 지하 구조물의 경우, 손상대의 발생으로 인한 지하수 유입, 열 전달 특성 변화, 응력·변위 거동 변화로 인한 구조물의 성능 변화가 예상된다. 손상대의 발생으로 인한 지하구조물의 거동 특성 변화를 이해하는 것은 구조물의 설계 단계에서 결정되는 굴착 기법, 보강 작업, 운영 방식에 대한 최적화를 가능하게 할 것이다. 이를 위해서는 심도, 암종, 발파기법, 터널 형상 등에 따른 손상대의 발생 특성 및 손상대 구간의 물성 변화를 파악하여야 한다. 또한 손상대에 의한 열·수리·역학적 영향을 이론적으로 뒷받침해줄 수 있는 해석 기법의 개발이 필요하다.

지하 암반에서의 손상대 평가를 위해 방사성폐기물의 지층처분을 고려하고 있는 세계 각국에서는 다양한 기법을 이용한 현장 및 실험실 연구가 실시된 바 있다. 여러 종류의 암반(결정질암, 암엽, 점토암, 응회

암)에 건설된 방사성폐기물 처분연구를 위한 지하연구시설에서는 터널 주변에 발생하는 손상대 평가가 주요 연구 내용으로 반영되고 있다. 손상대의 발생이 방사성폐기물 처분장의 거동에 미칠 수 있는 영향은 권상기와 조원진(2007)에 의해 (1) 구조적 안정성에 미치는 영향, (2) 수리적 거동에 미치는 영향, (3) 열적 거동에 미치는 영향, (4) 화학적 거동에 미치는 영향으로 정리된 바 있다.

본 연구에서는 조절발파기법으로 굴착된 한국원자력연구원 내 지하처분연구시설(KAERI Underground Research Tunnel, KURT)에서 굴착 후 발생하는 손상대 규모 및 특성을 측정하였으며 이를 모델링에 적용하여 손상대가 터널의 역학적, 수리적 거동에 미치는 영향을 평가하고자 하였다.

2. 국내 손상대 평가 연구 현황

2006년 이전의 손상대와 관련한 국내 주요 연구 현황은 정주환 등(2006)에 의해 정리, 보고되었다. 2006년 이후, 최병희 등(2008)은 활석광산 벽면에 발생한 손상대 평가를 위해 SHT (side hole test)와 VST (vector seismic tomography)와 같은 탄성과 기법을 이용하여 발파 손상 영역의 평균적 깊이를 실험적으로 평가한 바 있다. 권상기와 조원진(2008)은 원자력연구원내 지하처분연구시설(KURT) 건설 중 실시된 손상대 현장 시험 결과에 대해 보고하였다. 이들은 Goodman jack 시험, 암석코어 시료, 실험실 실험을 통해 손상대 규모와 물성 변화를 평가하였다. 김형목 등(2008)은 투수계수 변화를 직접 측정할 수 있는 현장수리시험 장비를 이용하여 지하공동 주변의 손상대 규모를 평가하였다. 이들은 공동 벽면으로 부터의 거리에 따른 투수계수의 변화양상을 파악함으로써 손상대가 약 1~1.5m까지 발생하며 투수계수는 최대 2~3 order까지 증가함을 보였다. 천대성 등(2007)은 진삼축 모형 실험과 컴퓨터 단층 영상 기법을 이용하여 응력 조건에 따른 원형터널 주변의 취성파괴 범위와 파괴심도에 대한 연구를 수행하였다. 정용훈(2006)은 발파에 의한 파괴 메커니즘에 대한 이해를 위해 PFC2D를 이용하여 발파공 벽면에 작용하는 폭굉압과 가스압을 고려한 암반내 균열 발생에 관한 연구결과를 보고하였다. 이창수 등(2006)은 FLAC2D를 이용하여 손상

대의 물성 변화에 따른 민감도 분석을 실시하였으며 박종성 등(2007)은 수리적 굴착손상영역에서의 지하수유동 특성에 관한 해석을 수행하였다. 한편 이연구(2006)는 원형터널 주변에 고리 형태로 소성 영역이 형성된 경우에 대한 수치해석 방법을 제안하였다.

3. 지하처분연구시설에서의 손상대 실험 결과

3.1 지하처분연구시설(KURT)

방사성폐기물 처분연구 개발을 위해 대전 한국원자력연구원 내에 건설된 KURT는 그림 1과 같은 배치를 가지는 마제형터널로 2005~2006년에 걸쳐 조절발파기법을 통해 굴착되었다. 하향 경사 10%를 가지는 진입터널의 길이는 180m이며 45m와 30m 길이의 연구모듈이 위치하는 터널 막장에서의 최대 심도는 약 90m이다. 터널 입구부 40m에는 콘크리트 라이닝이 설치되어있으며 나머지 구간은 슛크리트와 록볼트, 일부 취약 구간에는 철재 지보가 설치되어있다. KURT 굴착기법 및 발파진동에 대한 상세한 내용은 권상기 등(2005)에 의해 보고되었다. 현재 환기, 배수, 조명, 통신시스템이 완비되어 있으며 진입터널과 두개의 연구모듈에서 히터시험, 손상대시험, 핵종이동시험, 지하수특성연구 등이 실시되고 있다.

3.2 손상대 평가

진입터널 입구에서 60m 지점에 설치된 길이 8m의 회차구간(turning shelter, 그림 1)에서는 2005년 발파에 의한 암반 손상대의 특성을 파악하기 위한 현장시험

및 실험실 실험이 실시되었다(권상기와 조원진, 2007). 현장시험의 경우, 굴착 전후의 물성 변화를 파악하기 위해 회차구간의 굴착 후 진입터널의 굴착을 중단한 상태에서 회차구간에서 진입터널 방향으로 시추공을 천공하고 진입터널의 굴착 전 암반 물성을 측정하였다. 진입터널의 굴착이 진행된 후 천공된 시추공에서 굴착영향을 받은 이후의 암반 물성을 측정하여 이를 굴착 전 물성과 비교하였다. 암석코어를 이용한 실험실 실험과 현장시험을 통한 손상대 연구 결과는 권상기와 조원진(2008)에 의해 보고된 바 있다. 회차구간에서의 시추공 위치 및 방향은 그림 2와 같다. 표 1은 실험실 실험을 통해 결정된 회차구간에서의 손상대 물성 변화를 보여준다.

(1) Goodman jack 시험

진입터널의 굴착 후 천공된 7번, 8번 시추공(그림 2)

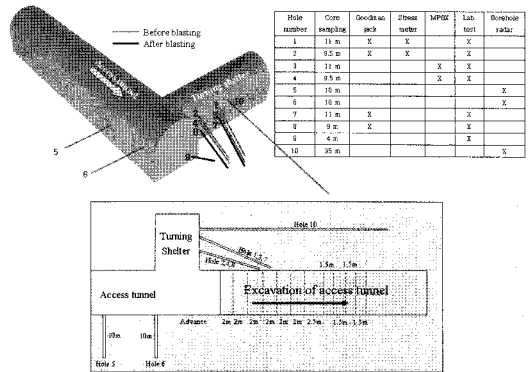
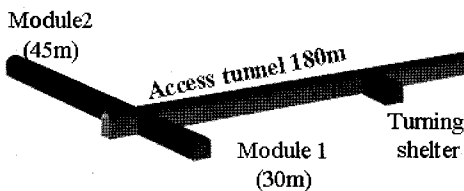


그림 2. 회차구간에서의 시추공 위치.



(a) KURT 개요도



(b) 진입터널

그림 1. KURT 개요도 및 진입터널.

표 1. 실험실 실험 주요 결과

	EDZ (m)	Property change in EDZ (%)
Uniaxial Compressive Strength	0.9	-14
P Wave Velocity	1.5	-17
S Wave Velocity	1.5	-12
Young's Modulus	1.5	-57
Triaxial Compressive Strength	1.1	-5~11
Brazilian Tensile Strength	1.1	-13
Porosity	> 1.5m	108

에서는 암반의 변형계수 상세 측정을 위한 Goodman jack 시험이 2006년 추가로 실시되었다(그림 3). 손상대의 규모 평가에 활용할 수 있도록 시험 간격을 30cm로 짧게 하였으며 수직 수평 방향의 변형계수 차이를 보기 위해 한 지점에서 수직, 수평 방향으로 가압하면서 암반변형계수를 측정하였다. 그림 4는 시추공을 따른 수직, 수평 변형계수의 변화를 보여준다. 터널 벽면에서 가까운 지점의 변형계수가 낮게 나타남을 알 수 있다. 대부분의 경우, 수직 방향으로 측정된 변형계수가 높게 나타나며 이는 시험구간의 수직 방향으로 발달한 절리특성에 따른 것으로 사료된다. 시추공과 벽면의 경사를 고려하면 터널 벽면에 수직 한 방향으로의 손상대 크기를 평가할 수 있으며 벽면에서의 거리 1.5m 지점까지 낮은 변형계수를 보이며 이후 서서히 증가하는 양상을 나타낸다. 이는 발파 충격으로 인한 암반 손상은 터널 벽면에서 1.5m까지 발생함을 보여주는 것이다.

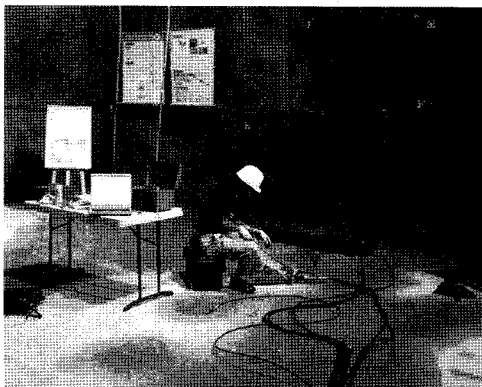


그림 3. 회차구간에서의 Goodman jack test.

(2) 암석 코어 조사

현장시험을 위해 천공된 진입터널, 연구모듈의 시추공에서도 발파충격에 의한 손상대 발생을 볼 수 있다. 암석 코어의 상태를 정량적으로 표현하기 위해 RQD를 사용하였다. 그림 5는 진입터널과 연구모듈에 위치하고 있는 25개 시추공에서의 심도에 따른 RQD 평균값의 변화를 보여준다. 발파충격이 큰 벽면 부근에서 낮은 값을 가지다가 심도의 증가에 따라 증가함을 알 수 있다. 터널 벽면의 경우 평균 RQD 값은 0~1m 구간에서 63으로 1m 이후 구간에 비해 약 30%, 0~2m 구간의 평균값은 2m 이후에 비해 16% 낮은 값을 보인다. 터널 벽면과 터널 바닥은 발파설계에 따라 손상대 규모에 차이를 보인다. 암석 코어의 RQD 값 변화를 통해 터널 벽면의 경우 손상대는 1.5m, 바닥부의 경우 2m 이상의 손상대가 발생함을 알 수 있다. 바닥부에서 상대적으로 큰 손상대가 발생하는 것은 터널 바닥부의 경우, 원활한 굴진작업을 위해 가장 많은 폭약이 사용되기 때문으로 볼 수 있다.

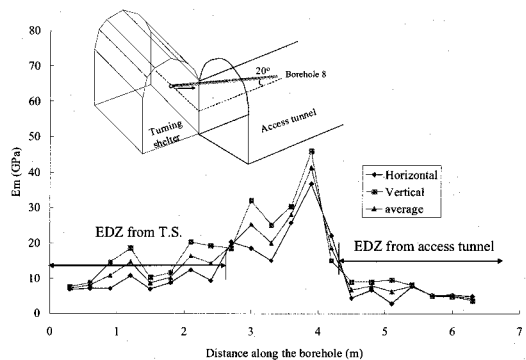


그림 4. 발파후 시추공에서의 Goodman jack 시험 결과.

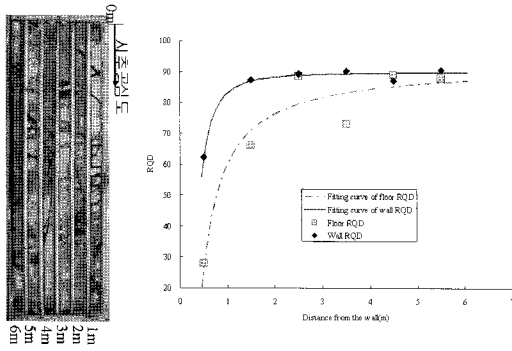


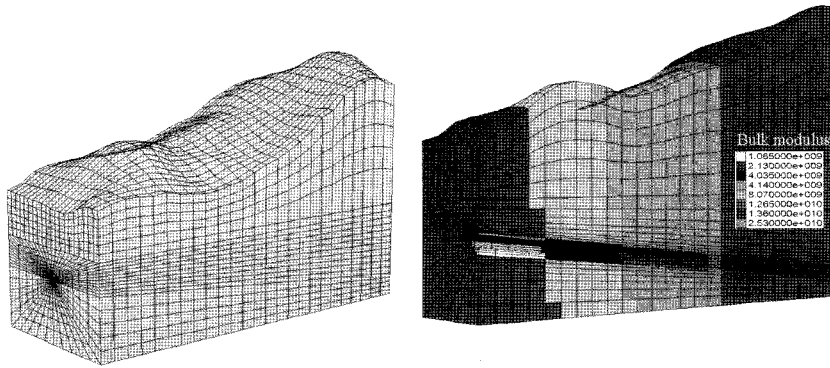
그림 5. 시추코어 및 터널 벽면을 따른 25개 시추공 평균 RQD 변화.

3.3 손상대 영향 평가 모델링

(1) 모델 격자망 및 물성

KURT에서의 손상대 연구결과를 바탕으로 손상대

가 터널의 수리-역학적 거동에 영향을 미칠 수 있는 다양한 인자들을 고려한 3차원 해석이 실시되었다. FLAC3D를 이용한 모델링에서는 그림 6과 같은 모델 격자망이 사용되었으며 180m의 진입터널 중 초기 40m의 라이닝 설치 구간을 제외한 구간에 대해 굴착 진행에 따른 수리-역학적 거동에 대한 모델링이 수행되었다. 실제 지형도를 이용한 지표면 형상이 모델에 구현되었으며 부지조사 단계에서 얻어진 터널을 따른 암반 물성의 변화가 반영되었다. 터널의 크기는 6m×6m이며 경사는 실제 터널의 경사인 -10%를 적용하였다. 표 2는 모델링에 사용된 물성값을, 표 3은 손상대에서의 역학적 물성을 준다. 손상구간에서의 수리전도도는 부지 조사 단계에서 실시된 터널 방향으로 천공된 경사 시추공에서 얻어진 수리전도도에 비해 1 order 높게 가정하였다(표 4).



a. 지표면 지형을 고려한 모델 격자망

b. 터널 및 암반 물성 변화

그림 6. 수리-역학 해석을 위한 모델 격자망과 구간별 암반 물성 변화.

표 2. 경사시추공을 따라 조사된 암반 물성 변화

Parameters	Range (m)				
	30~82	82~125	125~177	177~192	192~252
Interval (m)	52.9	42.6	51	15.2	60.1
Dip of the range	88	68-88	68-90	90	90
UCS (MPa)	30.8	58.4	71.6	77.6	82.7
Em (GPa)	3.2	12.1	37.9	6.21	20.4
Bulk modulus (GPa)	2.13	8.07	25.3	4.14	13.6
Shear modulus (GPa)	1.28	4.84	15.16	2.48	8.16
Cohesion (MPa)	1.7	4.2	6.7	4.6	6.4
Friction angle	35	40	46	36	42
Tensile strength (MPa)	0.014	0.102	0.49	0.047	0.23

표 3. 손상구간의 역학적 물성

Range (m)	Bulk modulus (GPa)	Shear modulus (GPa)	Cohesion (MPa)	Friction angle (deg.)	Tensile strength (MPa)
40~80	1.07	0.64	1.36	35	0.011
70~130	4.04	2.42	3.36	40	0.08
130~180	12.65	7.58	5.36	46	0.098

표 4. 손상구간에서의 수리전도도

Range (m)	40~50	50~60	60~70	70~80	80~90	90~100	100~110
Hydraulic conductivity (m/s)	7.15e-6	7.15e-6	1.75e-6	3.42e-6	3.06e-6	3e-7	1.05e-7
Range (m)	110~120	120~130	130~140	140~150	150~160	160~170	170~180
Hydraulic conductivity (m/s)	2.44e-6	5.19e-6	8.54e-9	2e-7	8.18e-9	1.86e-7	9.24e-8

(2) 초기조건

KURT에 작용하는 초기 응력은 터널 입구에 천공된 160m 길이의 수직공에서 수압파쇄시험을 통해 측정되었다. 수평응력 수직응력비 K는 심도 Z에 따라 변하며 다음 식과 같이 표현된다.

$$K=22.607 Z^{-0.5882} \quad (1)$$

지표면의 지형을 고려하는 모델링에서 수평응력이 수직응력보다 높으며 그 비율이 심도에 따라 달라지는 초기응력 측정 결과를 모델링에서 구현하기 위해 지표면 형상이 단계적으로 침식되는 과정을 거쳐 이루어지는 것으로 가정하였다(Kwon et al. 2006). 이를 위한 모델 격자망의 폭은 100m, 길이는 250m, 높이는 300m 이며 총 격자수는 27,250개 이다. 최종 모델 격자망의 높이는 지표면 지형에 따라 80m에서 160m 다르게 나타난다(그림 6.a). 일반적으로 터널의 역학적 안정성 평가에서는 터널 크기의 3~4배 정도의 모델 크기면 충분하지만 본 모델에서는 수리적 거동을 함께 보며 지표면 지형에 따른 영향을 평가하기 위해 보다 큰 모델을 사용하였다. 지표면을 제외한 각 경계면에서는 변위와 지하수 흐름이 차단되는 것으로 가정하였다. 모델링에서는 터널은 10m 간격으로 단계적으로 굴착되며 굴착 직후 손상대가 발생하는 것으로 가정하였다. 현장 측정을 통해 얻어진 손상대 크

기를 고려하여 터널 주변에 1~2m 두께의 손상대가 발생하도록 하였다. 지발당 장약량이 많은 터널 바닥부에서는 터널 벽면이나 천정부에 비해 약간 큰 손상대를 모사하였다.

손상구간의 역학적 물성은 표 1의 실험실 측정 결과를 고려하여 선정하였다. 손상대에서의 암반변형계수는 초기 암반변형계수의 50%로 가정하였으며 손상구간의 점착력과 인장강도는 손상 전 초기값의 80%를 사용하였다. 수리해석을 위해 지하수위는 터널입구부에서 위쪽 약 20m에 수평하게 높이는 것으로 가정하였다. 손상구간의 수리전도도는 수압시험을 통해 10m 구간별로 얻어진 수리전도도에 비해 1 order 높은 것으로 가정하였다(표 4).

(3) 수리-역학적 해석 결과

굴착이 완료된 이후 진입터널 위치에 따른 터널 천정, 벽면, 바닥에서의 변위는 그림 7과 같다. 손상대를 고려한 경우 손상대를 고려하지 않은 경우에 비해 변위는 약 50% 높게 나타났다. 손상대를 고려한 경우, 암반강도와 탄성계수가 낮은 터널 입구부 벽면과 바닥에서 8mm 정도의 변위가 나타난다. 암반의 bulk modulus가 25GPa 이상인 90~150m 구간에서는 변위가 거의 나타나지 않음을 알 수 있다. 손상대의 고려 유무와 함께 암반의 변형계수가 암반의 변위 예측에 중요한 인자임을 알 수 있다. 그림 8은 손상대가 존재

하는 경우, 굴착 후 발생하는 최대주응력 분포를 보여 준다. 터널 천정부에서 최대 8MPa의 압축응력이 발생하며 터널 입구부의 벽면에서 가장 낮은 응력 분포를 보인다. 이는 손상대가 고려되지 않은 경우 최대주응력 10MPa에 비해 약 20% 감소하는 것으로 나타났다. 이러한 차이는 손상구간에서 예상되는 소성영역에 의한 응력 이완 현상으로 설명할 수 있다. 손상대를 고려함으로써 터널 주변에서의 응력집중 현상은 완화되며 변위는 증가함을 볼 수 있다.

그림 9는 터널 굴착 후 지하수의 유동방향과 공극수압 분포를 보여준다. 구간마다 다른 수리전도도를 사용하였기 때문에 공극수압과 지하수 유동 속도 및 방향은 구간마다 차이를 보이고 있다. 수리전도도가 낮은 구간에서 상대적으로 높은 공극수압과 낮은 유속을 나타낸다. 터널 굴착에 따른 터널로의 지하수 유입량을 계산하기 위해 FLAC3D의 내장프로그래밍 기법인 FISH를 사용한 터널 벽면에서의 유량 변

화를 계산하였다. 그림 10은 손상대를 고려한 경우와 고려하지 않은 경우, 터널 굴착 진행에 따른 터널로의 지하수 유입량 변화를 보여준다. 각 굴착 단계마다 지하수 유입량은 굴착 직후 급속히 상승하다가 시간이 경과함에 따라 서서히 안정된 값으로 수렴함을 알 수 있다. 굴착 단계별 최대 유입량은 굴착되는 구간의 수리전도도에 따라 다르게 나타난다. 즉 수리전도도가 높은 구간이 굴착되었을 때, 지하수 유입량의 상승도 크며 수리전도도가 1e-6m/sec인 8 단계 굴착 구간의 경우, 굴착 전에 비해 굴착후 일일 지하수 유입량이 3톤 정도 증가함을 알 수 있다. 터널 길이가 늘어남에 따라 지하수 유입량도 서서히 증가하며 손상대가 고려되지 않은 경우, 약 5.5톤/일, 손상대가 고려된 경우 약 7.5톤/일로 나타난다. 이는 KURT 일일 배수량인 20톤에 비해 상당히 낮은 값이다. 이러한 차이의 원인으로 몇 가지를 들 수 있다. KURT에서 유입되는 지하수는 260m의 터널에서 유입되는 양인데 비해 본

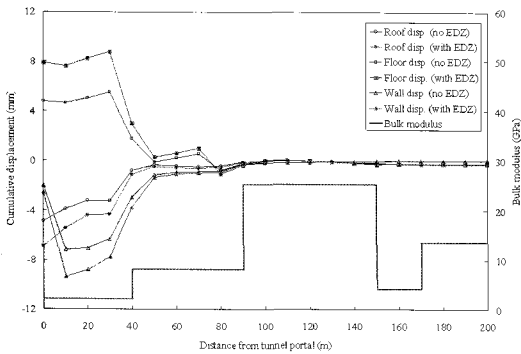


그림 7. 굴착 완료후 위치에 따른 변위.

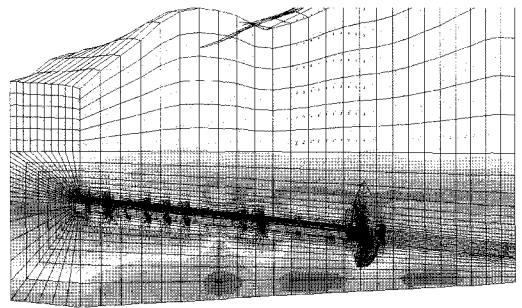


그림 9. 굴착 완료후 공극수압 및 지하수 유동속도 변화.

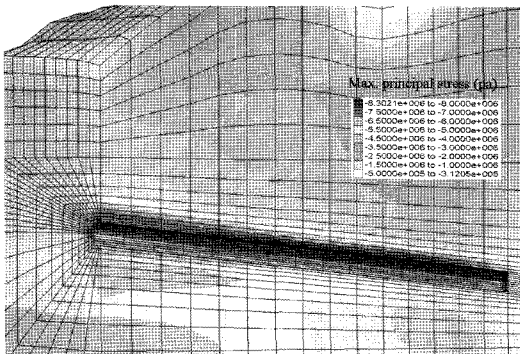


그림 8. 굴착 완료후 최대주응력 분포.

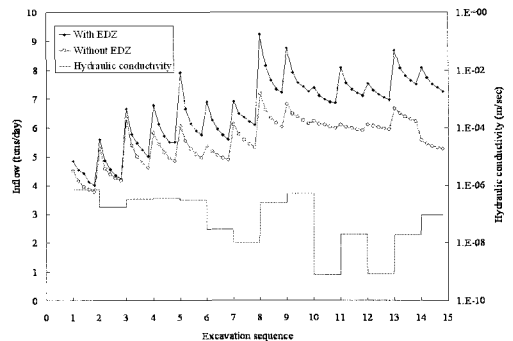


그림 10. 터널 굴진에 따른 지하수 유입량 변화.

모델에서는 150m 구간만을 고려하였다. 또한 일반적으로 손상구간에서 수리전도도는 원암에 비해 2 order 이상의 수리전도도 증가가 예상되지만 본 모델에서는 1 order 증가를 고려하였기 때문에 실측값에 비해 낮은 유입량을 보인 것으로 판단된다. 향후, 손상대의 구간에 따른 규모 변화와 실측된 수리전도도의 변화를 고려한 해석을 통해 보다 정확한 계산이 가능할 것으로 보인다.

4. 결론

발파에 의한 충격이나 응력 재분포에 의해 구조물 주변에 발생하는 암반손상대는 암반의 역학적·수리적·열적 거동에 영향을 미치며, 이는 구조물의 장·단기적 기능과 경제성에 영향을 줄 수 있다. 따라서 현장시험, 실험실 실험, 컴퓨터 모델링을 통해 손상대의 발생에 따른 암반 거동에 미치는 영향을 파악하는 것은 구조물의 장기적 안정성·경제성·안전성 측면에서 반드시 필요한 연구라고 할 수 있다. 방사성폐기물 처분장과 같은 초장기 안전성 확보가 요구되는 지하구조물의 경우, 손상대를 고려한 역학적·수리·열적 거동의 예측은 특히 중요하다.

한국원자력연구원에서는 고준위폐기물 처분연구를 위해 2006년 11월 지하처분연구시설(KURT)을 건설하였으며 처분개념 설계 및 안전성 평가를 위한 다양한 현장 시험들이 준비되고 있다. 현장시험의 적합한 설계 및 해석을 위해서는 시설 주변에 존재하는 손상구간에 대한 평가 및 이해가 요구된다. 본 연구에서는 KURT 건설을 위한 발파에 의해 발생하는 암반 손상대의 규모를 평가하기 위해 현장시험과 암석코어 조사를 실시하였다. 회차구간에서의 Goodman jack 시험 결과, 벽면거리 1.5m까지 발파영향을 받는 것으로 나타났다. KURT에서 천공된 25개 시추공에서 회수된 암석 코어에 대한 관찰 결과, 발파의 영향을 받은 구간(0~2m)에서의 암석 코어의 RQD 값은 발파영향을 받지 않은 구간(2m~)에 비해 16% 낮게 나타났다. 터널 벽면의 경우 1.5m의 손상대가 발생하며 폭약이 많이 사용되는 바닥에서는 2m 이상의 손상대가 발생하는 것으로 보인다.

손상대의 발생이 지하구조물의 수리적, 역학적 거동에 대한 영향을 파악하기 위해 KURT를 대상으로

수리·역학적 연동해석을 실시하였다. 손상대의 크기와 물성은 현장 및 실험실에서 측정된 값을 사용하였으며 수리전도도의 경우, 손상구간에서 1 order 높은 값을 가지는 것으로 가정하였다. 터널 굴착 후 변위는 손상대를 고려하는 경우, 약 2배 높게 나타났으며 터널로의 유입량은 약 20% 정도 상승하는 것으로 나타났다. 터널 진행에 따라 지하수 유입량도 증가하며 손상대가 고려되지 않은 경우, 약 5.5톤/일, 손상대가 고려된 경우 약 7.5톤/일로 나타났다. 이는 KURT 일일 배수량 20톤에 비해 상당히 낮은 값으로 이는 터널 길이의 차이와 손상구간에서의 수리전도도를 일반적인 경우보다 낮은 1 order 증가를 고려하였기 때문으로 판단된다.

본 연구를 통해 밝혀진 바와 같이 발파에 의해 굴착되는 터널 주변에는 상당한 크기의 손상대가 발생하며 이러한 손상대의 발생을 고려하는 경우 수리적, 역학적 거동에는 상당한 차이가 발생함 알 수 있다. 따라서 지하 구조물의 설계나 안정성 평가 시, 손상대의 존재를 고려한 해석이 필요하며 이를 위한 손상대 구간의 정확한 규모 평가 및 손상대에서의 암반 물성 평가에 대한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

지하암반에서의 손상대에 대한 연구는 방사성폐기물 처분장과 관련된 시스템 설계와 안전성 평가뿐 아니라 현재 국내외에서 지하공간에 건설되고 있는 지하 유류비축기지, 양수발전소, 수로터널, 도로터널, 지하철, 철도터널, 및 유해 폐기물 저장소 등의 설계 및 건설에도 활용될 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부에서 주관하는 원자력 중장기 연구개발 사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. 권상기, 조원진, 김득수, 2005, 한국원자력연구소내 지하처분연구시설 건설에 따른 발파영향, 화약·발파(대한화약발파공학회), Vol.23, No.4, pp.1-18.
2. 권상기, 조원진, 2008, 지하처분연구시설에서의 암반 손상대 발생 및 영향 평가, KAERI/TR-3511/2008.
3. 권상기, 조원진, 2007, 발파에 의한 터널주변 암반 손상대 발생 평가, 화약·발파(대한화약발파공학회), Vol.

- 25, No.1, pp.15-29.
4. 권상기, 조원진, 최종원, 2007, THM 복합거동 해석을 위한 DECOVALEX 국제공동연구 현황, 방사성폐기물학회지, Vol.5, No.4, pp.323-338.
5. 김형목, 류동우, 신중호, 2008, 굴착영향영역(EDZ) 투수특성의 실험적 평가기술, 터널과 지하공간, Vol. 18, No.2, pp.91-97.
6. 박중성, 류동우, 류창하, 이정인, 2007, 수리적 굴착손상영역에서의 지하수유동 특성에 관한 연구, 터널과 지하공간, Vol.17, No.2, pp.109-118.
7. 이연규, 2006, Mohr-Coulomb 암반에 굴착된 원형 터널의 변형률연화 거동해석, 터널과 지하공간, Vol.16, No.6, pp.495-505.
8. 이창수, 전석원, 권상기, 조원진, 서용호, 박현익, 박연준, 2006, 한국원자력연구소 내 지하처분연구시설에서의 암반손상대 평가, 암반공학회 창립 25주년 기념 특별심포지엄, pp.15-24.
9. 정용훈, 2006, 발파에 의한 굴착손상영역의 수치해석적 산정, 서울대학교 박사학위논문.
10. 정주환, 양형식, 최병희, 류창하, 2006, 발파손상영역에 관한 문헌 고찰, 대한화약발파공학회 추계학술발표회 논문집, 한국지질자원연구원, pp.67-73.
11. 천대성, 박찬, 박철환, 전석원, 2007, 응력조건에 따른 원형터널 주변의 취성파괴범위와 파괴심도, 터널과 지하공간, Vol.17, No.4, pp.311-321.
12. 최병희, 정주환, 신중호, 조철현, 2008, 탄성파 탐사법을 활용한 광산갱도 주벽의 발파손상대 평가, 대한화약발파공학회 추계학술발표회 논문집, 한국과학기술회관, pp.21-31.
13. Tsang, C.F., Bernier, F., and Davies, C., 2005, Geohydromechanical Processes in the Excavation Damaged Zone in Crystalline Rock, Rock Salt, and Indurated and Plastic Clays-in the Context of Radioactive Waste Disposal, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.42, pp.109-125.
14. Kwon, S., Cho, W.J., and Han, P.S., 2006, Concept development of an underground research tunnel for validating the Korean reference HLW disposal system, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 21, pp.203-217.



권 상 기

한국원자력연구원 선임연구원

Tel : 042-868-8914
E-mail: kwonsk@kaeri.re.kr



김 진 섭

한국원자력연구원 선임연구원

Tel : 042-868-2874
E-mail: kverity@kaeri.re.kr



조 원 진

한국원자력연구원 선임연구원

Tel : 042-868-2852
E-mail: wjcho@kaeri.re.kr