

## Voronoi 절리모델에 의한 터널 주변 굴착손상권(EDZ)의 해석 사례

박의섭<sup>1)</sup>, C. Derek Martin<sup>2)</sup>, 신중호<sup>3)</sup>\*

### Numerical Evaluation of Excavation Damage Zone Around Tunnels by Using Voronoi Joint Models

Eui-Seob Park, C.D. Martin, Joong-Ho Synn

**Abstract** Quantifying the extent and characteristics of the excavation damage zone (EDZ) is important for the nuclear waste industry which relies on the sealing of underground openings to minimize the risk for radionuclide transport. At AECL's Underground Research Laboratory (URL) the Tunnel Sealing Experiment (TSX) was conducted and the tunnel geometry and orientation relative to the stress field had been selected to minimize the potential for the development of an EDZ. The extent and characteristics of the EDZ was measured using velocity profiling and permeability measurements in radial boreholes. The results from this EDZ characterization are used in this paper to evaluate a modeling for estimating the extent of the EDZ. The methodology used a damage model formulated in the Universal Distinct Element Code and calibrated to laboratory properties. This model was then used to predict the extent of crack initiation and growth around the TSX tunnel and the results compared to the measured damage. The development of the damage zone in the numerical model was found to be in good agreement with the field measurements.

**Key words** Tunnel sealing experiment (TSX), Excavation Damaged Zone (EDZ), Damage model, Fractured rock

**초 록** 굴착손상권의 특성 및 범위를 규명하는 것은 방사성 폐기물의 이동 및 확산의 위험을 최소화하는 지하공동의 기밀에 영향을 받는 방사성폐기물 처분사업에선 중요하다. 캐나다 AECL의 URL에선 터널기밀시험(TSX)이 수행되었고, 굴착손상권(EDZ)의 발달 가능성을 최소화하기 위하여 응력장을 고려하여 터널 형태 및 방향을 선택하였다. EDZ의 특성 및 범위는 방사상의 시추공내에서의 탄성과 속도와 투수를 측정을 통하여 파악되었다. 이 결과는 EDZ의 범위를 추정하는 본 연구의 모델링작업에 사용되었다. 이를 위하여 UDEC 코드내에 손상모델을 형성하고, 실내실험 물성에 맞추었다. 이 모델은 TSX 터널 주변의 균열 개시와 성장범위를 예측하는데 사용되었고, 해석결과와 실제 측정된 손상과 비교되었다. 수치모델내 손상권의 발달은 현장 측정결과와 잘 일치하는 것으로 나타났다.

**핵심어** 터널기밀시험, 굴착손상권, 손상모델, 균열암반

## 1. 서 론

지하 심부에 건설하는 암반 구조물과 관련된 문제 중의 하나는 보강 요구수준을 알맞게 평가하는 것이다.

구조물의 설치 심도에 따른 보강 요구수준을 결정하는 것은 암반 물성이 정확히 평가되어야만 가능하다. 하지만 대부분의 입력자료가 표준 실내실험으로부터 추정되므로 어떤 종류의 암반에 대해서도 물성을 정확히 평가하기는 매우 어렵다. 일반적으로 실내실험 시료는 상당히 작은 크기이므로 암반의 이방성과 잠재적인 비연속적인 특성 또는 불연속면의 영향을 제대로 표현하지 못한다. 따라서 스케일링(scaling) 과정은 터널작업에 따른 변형과 파괴를 평가하는데 어떤 종류의 암석에서도 필요하다.

터널 시공과정에서 새로이 형성된 굴착면은 국부적인

<sup>1)</sup> 한국지질자원연구원 지구환경연구본부 지하공간환경 연구실 선임연구원

<sup>2)</sup> 캐나다 앨버타대학교 토목환경공학과 교수

<sup>3)</sup> 한국지질자원연구원 정책협력부 책임연구원

\* 교신저자 : jhsynn@kigam.re.kr

접수일 : 2008년 10월 9일

심사 완료일 : 2008년 10월 24일

게재 확정일 : 2008년 10월 28일

응력장의 심각한 변화를 유발한다. 이는 원형 터널에서 반경방향 응력(인터페이스에 수직한 응력)은 인터페이스에서 소멸되는 반면, 접선방향 응력은 급격히 증가하기 때문이다. 달리 표현하면, 구속응력은 0이 되고, 다른 응력성분은 점차 증가하여 신장(extension) 또는 전단(shear) 상태에서 국부적인 파괴를 유발할 수 있다. 이런 과정은 수리-역학적 연계과정에 의해 더욱 가속화될 수 있다.

이러한 과정에 의해 영향을 받는 지하구조물의 주변영역은 일반적으로 굴착손상권(Excavation Damaged Zone, EDZ)이라고 불리어지며, 이는 방사성 폐기물 지층처분장의 장기 안전성을 확보하는데 있어 매우 중요하다(Tsang et al., 2005).

굴착손상권의 기하학적 형상은 다음 인자들에 의해 좌우되므로 매우 복잡해진다.

- 응력 텐서(응력의 이방성)
- 재료의 이방성(예를 들면, 퇴적 층리의 횡적 등방성)
- 암반내 자연 균열과 균열대 또는 국부적인 비균질성의 존재
- 터널의 기하학적 형상
- 굴착 방법

본 고에서는 TSX Experiment(캐나다 AECL)의 현장 시험자료를 근거로 굴착손상권의 형성에 영향을 주는 인자들을 조사하였다. TSX Experiment 현장에서 발생된 굴착손상권의 범위를 정량화하기 위해 사용한 기법 중의 하나는 속도 측면도(velocity profiling)이고, 시추공 반경 방향으로 수행된 탄성과 속도의 측면도를 가지고 있다.

TSX 시험터널 주변의 응력과 측정 속도간의 상관관

계를 추론하고자 다음 접근법을 사용하였다.

- UDEC에서 손상모델(Damage Model, DM)을 수행하는 방법론 개발
- DM과 탄성이론 결과간의 응력 분포 비교
- TSX 터널 주변에서 측정된 전단파 속도 측면도와 DM으로 구한 응력간의 비교

## 2. UDEC 손상모델의 개발

일반적으로 신선암은 복잡한 형태의 입자가 균계 결합된 재료와 같이 거동하고, 입자와 결합재 둘 다 변형 가능하고 깨어질 수 있다(Potyondy and Cundall, 2004). 이러한 암석의 거동을 모델링하고자, UDEC 코드내에 있는 Voronoi tessellation 구성모델을 이용하여 비균질 크기의 다각형 블록을 생성하였다(Itasca, 2000). 이 모델링 기법은 응력이완이 발생하고 응력재분배가 일어날 때, 암석이 인장 또는 전단 균열로 파괴되는 것을 모사할 수 있다. 본 고에서는 이 모델을 UDEC 손상모델(UDEC-DM)이라고 명칭하였다.

Lac du Bonnet 화강암 시료의 실내실험결과가 UDEC 손상모델의 물성을 결정하는데 사용되었다. 실내실험결과는 Lau & Gorski에 의해 수행된 단축 및 삼축압축 시험결과 보고서(CANMET, 1992)를 참조하였다.

### 2.1 Lac du Bonnet 화강암의 역학적 특성

단축압축강도시험으로부터 구한 Lac du Bonnet 화강암의 강도와 변형특성은 다음 표 1과 같다.

Lac du Bonnet 화강암의 파괴특성을 구하는데 사용된 Hoek-Brown 파괴 변수는 다음 표 2와 같다.

**Table 1.** Mechanical properties of Lac du Bonnet granite

Unit weight (N/m <sup>3</sup> )	Young's modulus (GPa)	Poisson's ratio	Initial dilation			Unstable crack growth			Peak	
			Axial stress (MPa)	Axial strain (%)	Circumferential strain (%)	Axial stress (MPa)	Axial strain (%)	Circumferential strain (%)	Axial stress (MPa)	Axial strain (%)
2,630	70.08	0.27	107	0.173	-0.037	160	0.252	-0.068	205	0.329

**Table 2.** Hoek-Brown failure parameters for Lac du Bonnet granite

Strength	$\sigma_c$ (MPa)	$m_i$	s	n	$R^2$
Initial dilation	114	11.88	1.0	11	0.8652
Unstable crack growth	132	19.39	1.0	11	0.6801
Peak	230	20.70	1.0	12	0.9588

n: 시료의 개수,  $R^2$ : 변형계수

2.2 절리 강성의 평가

손상모델에 사용되는 절리의 강성은 수직인 방향에 있는 영역의 등가 강성에 근거한다(Cundall, 1976).

$$\frac{K_n}{m} = \max\left[\frac{K+4/3G}{\Delta Z_{\min}}\right] \text{ (Pa/m/m)} \quad (1)$$

여기서 K(GPa), G(GPa) : 체적 및 전단 강성이고,  $\Delta Z_{\min}$ (m) : 접해있는 영역의 최소폭(절리간극)

체적 및 전단 강성을 E = 65 GPa,  $\nu = 0.3$ 로부터 구하면,

$$K = 65/[3 \times (1-2 \times 0.3)] = 54.2 \text{ GPa}$$

$$G = 65/[2 \times (1+0.3)] = 25.0 \text{ GPa}$$

단위 길이당 등가 강성을 구하면,

$$\frac{K_n}{m} = \left[\frac{54.2+4/3 \times 25}{0.0015}\right] = 58.4 \times 10^3 \text{ (Pa/m/m)}$$

이때 절리간격(Voronoi 절리모델의 평균 길이)을 0.004 m로 가정하면, 수직강성  $K_n$ 은

$$K_n = (58.4 \times 10^3)/0.004 = 14.6 \times 10^6 \text{ GPa이 된다.}$$

만약 Voronoi 절리모델이 신선한 절리와 맞물리게 되면,  $K_s$ 는  $K_n/2$  보다 작게 된다. 따라서 절리의 수직강성과 전단강성은 각각 다음과 같이 된다.

$$K_n = 14.6 \times 10^6 \text{ GPa, } K_s = K_n/2 = 7.3 \times 10^6 \text{ GPa}$$

2.2.1 Mohr-Coulomb 강도 변수와의 비교

Hoek-Brown 변수(m, s)로부터 추정된 강도 변수는 이를 Mohr-Coulomb 파괴 변수(c,  $\phi$ )의 형태로 파괴 포락선을 표현하는데 사용한다(Hoek and Brown, 1997). 암석의 팽창이 시작되는 응력수준(dilation)을 정의하는 Hoek-Brown 변수는 다음의 표 3과 같다.

H-B 변수와 M-C 변수간의 상관관계는 다음과 같이 정리된다.

만약  $\sigma_c = 0$  이면,

$$\phi' = \sin^{-1}\left[\frac{6a \cdot m \cdot s^{(a-1)}}{2(1+a)(2+a)+6a \cdot m \cdot s}\right] \quad (2)$$

$$c' = \left[\frac{\sigma_{\alpha}[(1+2a)s]s^{(a-1)}}{(1+a)(2+a)\sqrt{1+(6a \cdot m \cdot s^{(a-1)})/(1+a)(2+a)}}\right]$$

이상의 상관관계로부터, 점착력 c와 내부마찰각  $\phi$ 를 계산하면 다음 값이 된다.

$$c = 18.7 \text{ MPa, } \phi = 56^\circ$$

2.2.2 단축압축강도로부터 절리강도 추정

Brady & Brown(1985)은 경사진 단일 절리변수를 사용하여 단축압축강도를 평가하는 다음 식을 제안하였다.

$$\sigma_1 = \frac{2c + \sigma_3(\sin 2\theta + \tan \phi(1 - \cos 2\theta))}{\sin 2\theta - \tan \phi(1 + \cos 2\theta)} \quad (3)$$

상기 식에서, c = 15 MPa,  $\theta = 45^\circ$ 로 가정하면  $\phi = 40^\circ$ 이 된다.

2.3 UDEC-DM의 평가

다음의 그림 1은  $\phi = 50^\circ$ 이고 점착력이 변할 때 UDEC-DM을 사용하여 구한 응력-변형률 곡선이 어떻게 변화하는 지를 보여준다. 예상대로 점착력이 증가할수록 단축압축강도도 증가하는 경향을 보여주었다.

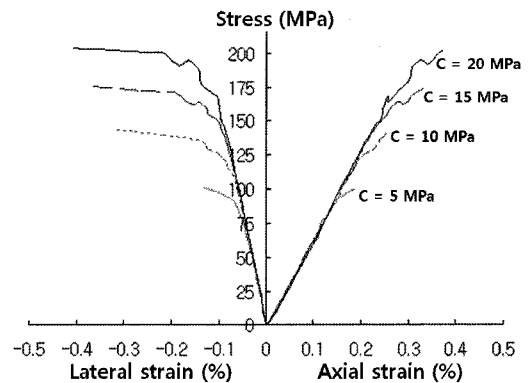


Fig. 1. Stress-strain curves from the UDEC-DM ( $\phi=50^\circ$  & varying cohesion) (after Martin, 2006)

Table 3. Hoek-Brown parameters for the onset of dilation

Crack initiation stress ( $\sigma_{\alpha}$ )	m	s	a
114 MPa	12	1.0	0.5

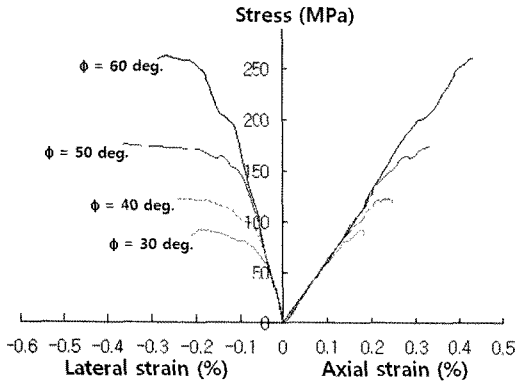


Fig. 2. Stress-strain curves from the UDEC-DM ( $c=15$  MPa & varying friction angles) (after Martin, 2006)

그림 2는 UDEC-DM을 사용하여  $c = 15$  MPa이고 마찰각이 변함에 따라 응력-변형을 곡선이 어떻게 변화하는 지를 보여준다. 예상대로 마찰각이 증가함에 따라 단축압축강도가 증가하는 경향을 나타내었다.

2.3.1 UDEC-DM과 실내실험결과와의 비교

실내실험결과에 최적화된 UDEC-DM 모델의 물성은 다음의 표 4와 같다.

UDEC-DM과 실내실험결과로부터 구한 각각의 응력-변형을 곡선이 그림 3에 나타나있다. 그림에서 보는 바와 같이 UDEC-DM 모델로 구한 응력-변형을 곡선이 실험결과와 상당히 일치하는 경향을 보이고 있다. 또한 응력-변형을 곡선으로부터 구한 탄성계수 또한 비슷한 값을 보여주었다. 다음의 표 5는 UDEC-DM과 실험실 시험결과를 각각의 파괴개시응력, 불안정한 균열이 성장하는 응력, 최대파괴응력별로 나타낸 것으로 두 응력

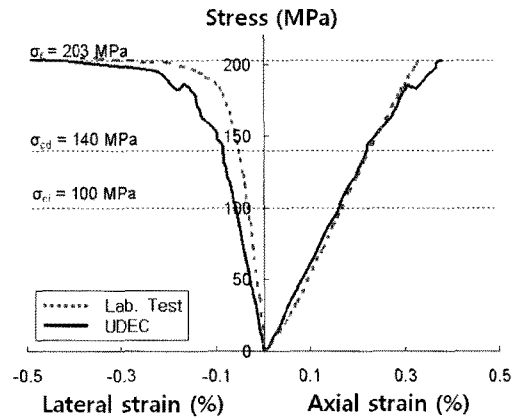


Fig. 3. Comparison of the stress strain curves from the laboratory tests and the UDEC-DM (After Martin, 2006)

값이 상당히 일치함을 알 수 있다.

3. 스케일(scale)이 UDEC-DM 모델 변수에 미치는 영향

UDEC-DM내의 결함(defect) 길이에 따른 영향을 평가하기 위하여, 그림 4와 같이 결함 길이가 각각 3, 4, 6 mm일 때의 해석을 각각 수행하였다.

해석에 사용된 절리의 수직 및 전단강성은 앞선 2.2 절의 과정으로부터 다음의 표 6과 같이 계산되었다.

3.1 동일한 절리간격 비율을 가진 모델 크기의 영향

본 해석에 적용된 Voronoi 절리 모델의 크기와 절리 간격은 다음의 그림 6과 같다.

이 때, 각 모델 크기별로 적용된 절리의 수직 및 전단

Table 4. Properties for the UDEC-DM based on the laboratory test results

Block properties			Joint Properties					
K (GPa)	G (GPa)	Density (N/m <sup>3</sup> )	Aperture (mm)	K <sub>n</sub> (10 <sup>6</sup> GPa)	K <sub>s</sub> (10 <sup>6</sup> GPa)	c (MPa)	φ (deg)	Tensile strength (MPa)
54.2	25.0	2600	1.5	14.6	7.3	15.0	52	10.0

Table 5. Stresses from the laboratory tests and the UDEC-DM

Items		Lab. test	UDEC
Stress (MPa)	Initial dilation ( $\sigma_{ci}$ )	107 (52%)	100 (50%)
	Unstable crack growth ( $\sigma_{cd}$ )	160 (78%)	145 (72%)
	Peak ( $\sigma_f$ )	205 (100%)	202 (100%)
40% Tangential modulus, $E_{T40}$ (GPa)		70.0	64.8

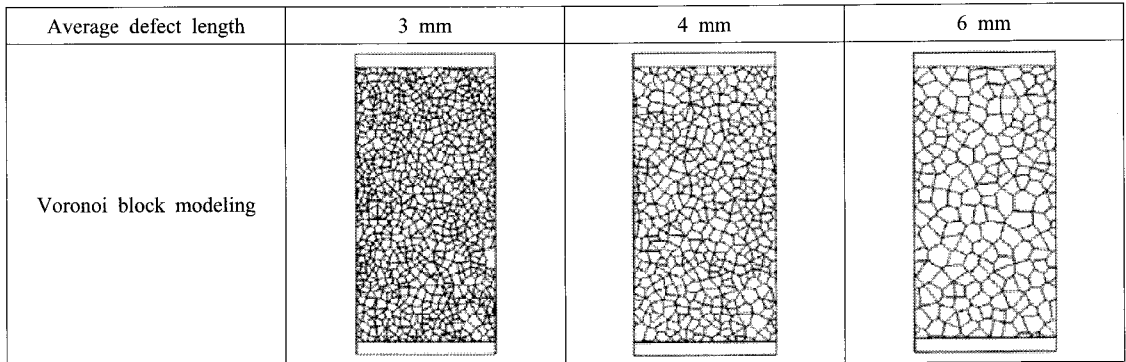


Fig. 4. Various average defect length for Voronoi block modeling (after Martin, 2006)

Table 6. Joint stiffnesses according to joint spacing

Joint spacing	$K_n$	$K_s$
3 mm	$58.4 \times 10^3 / 0.003 = 19.5 \times 10^6$ GPa	$K_n/2 = 9.75 \times 10^6$ GPa
4 mm	$58.4 \times 10^3 / 0.004 = 14.6 \times 10^6$ GPa	$K_n/2 = 7.3 \times 10^6$ GPa
6 mm	$58.4 \times 10^3 / 0.006 = 9.7 \times 10^6$ GPa	$K_n/2 = 4.85 \times 10^6$ GPa

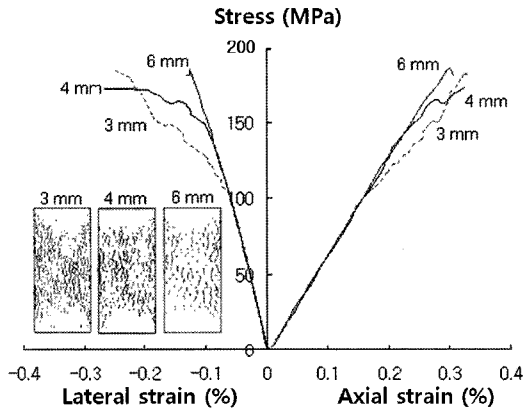


Fig. 5. Comparison of the stress strain curves from various defect length (after Martin, 2006)

강성은 다음의 표 7과 같다.

모델 크기별로 해석한 결과, 그림 7에서 보는 바와 같이 모델 크기에 상관없이 균열 개시 응력은 비슷한 값을 보여주었다. 이에 반하여 모델 크기가 큰 경우엔 변형률 곡선이 비선형적으로 변화하는 지점이 더 빨리 나타나고, 최대 강도에 일부 영향을 미치는 것으로 나타났다.

4. TSX 시험터널에 대한 UDEC-DM 모델의 적용

캐나다 AECL의 URL에서 Tunnel Sealing Experiment

(TSX)가 수행되었다. TSX는 모래로 채워진 12 m 길이의 중앙 실험실 양편에 2개의 썬기형태 차단벽(keyed bulkhead)를 가진 30 m 길이의 터널로 구성되어 있다 (Fig. 8 참조). 하나의 차단벽은 AECL에서 개발한 저열 고성능(low heat high performance) 콘크리트로 채워졌고, 다른 하나는 70% Kunigel 벤토나이트와 30% 모래로 구성된 9000개의 개별 블록으로 만들어진 점토 차단벽이다. 시험실의 크기(높이 3.5 m, 폭 4.4 m)는 차분장에서의 실규모 굴착을 대표하는 것이다(Martino & Chandler, 2004). 또한 알려진 현지암반 응력하에서의 굴착손상권을 억제하기 위하여 타원형 단면으로 폭과 높이 비가 1.25로 결정되었다. 터널의 방향은 최대압축응력의 집중을 줄이기 위해 주응력에 평행하다. 콘크리트와 점토 차단벽은 굴착손상권을 통한 유동을 차단하기 위해 암반 내에 썬기처럼 놓여졌다.

TSX-EDZ 연구를 위하여, TSX 터널로부터 2열의 시추공이 천공되었다. 8개의 NQ 직경을 가진 시추공의 배열은 콘크리트 차단벽 근처에 위치하고(8 m 배열), 다른 하나는 점토 차단벽 근처에 위치한다(32 m 배열). 각각의 굴착손상권 규명법의 결과는 TSX 터널 주위로 특정한 두께를 가진 손상권이 존재한다는 것을 알려주었다(그림 9 참조). Martino & Chandler(2004)에 의하면, 굴착손상권의 외부영역보다 속도가 급격히 감소하고 투수율이 급격히 증가하는 특성을 가진 내부 손상권이 터널벽면으로부터 0.3 m 이내에 존재함을 시추공 측정법으로 규명하였다. 시추공 카메라 조사는 내부 손상

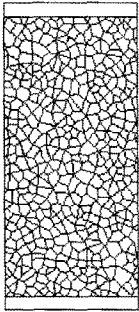
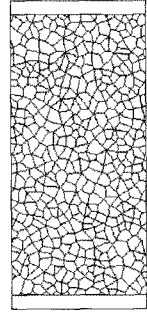
Dimension	Case-1	Case-2
Sample size (m)	0.06×0.12	6×12
Joint spacing (m)	0.004	0.4
Shapes of applied Voronoi joint model		

Fig. 6. Dimension and shapes of applied Voronoi joint model (after Martin, 2006)

Table 7. Joint stiffness according to sample size

Sample size (m)	$K_n$	$K_s$
0.06 × 0.12	$58.4 \times 10^3 / 0.004 = 14.6 \times 10^6$ GPa	$K_n / 2 = 7.3 \times 10^6$ GPa
6 × 12	$58.4 \times 10 / 0.4 = 14.6 \times 10^2$ GPa	$K_n / 2 = 7.3 \times 10^2$ GPa

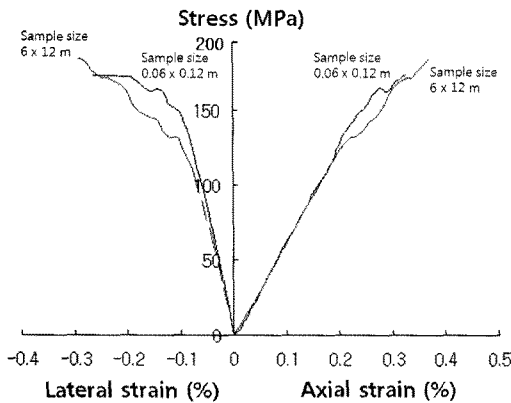


Fig. 7. Comparison of the stress strain curves from various sample size (after Martin, 2006)

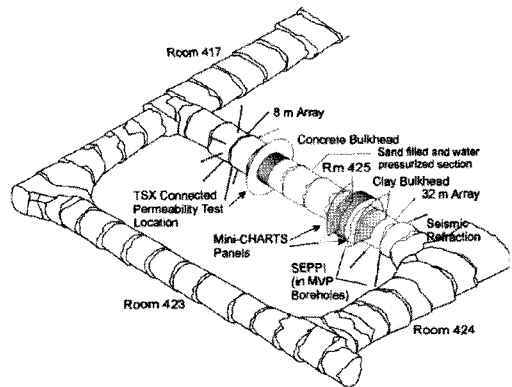


Fig. 8. Arrangement plan of Tunnel Sealing Experiment at AECL's URL, Canada (after Martino & Chandler, 2004)

권에 육안으로 관찰할 수 있는 거시 균열이 증가하였음을 보여주었다. 일반적으로 시추공 카메라가 시추공벽을 따라서 대부분의 균열이 감지된 영역에서 가장 높은 수리 투수율이 기록되었다. 터널 주변의 다른 영역에서는 내부 손상권이 점차 줄어들어 거의 0의 두께를 보였다. 이것은 손상받은 암석이 암반으로부터 탈락된 결과로 인한 것이다.

TSX 터널 주변의 굴착손상권을 측정하는데 사용된 속도 탐지기는 굴착면으로부터 주변암반으로의 간격 속도(interval velocity) 변화를 시추공을 따라 측정하여

굴착손상권을 특성화하는 간편한 측정기법을 위해 설계되었다. 속도 탐지기는 NQ-3(직경 76 mm) 시추공내에 맞춘 금속판으로 구성되어 있다. 조사에 사용된 기본 장비는 다음 그림 10과 같다(Maxwell et al, 1998).

속도 기록은 굴착공동 주위의 손상범위 및 정도를 나타내는데 사용된다. P파와 S파의 속도기록으로부터 균열 밀도와 포화도는 EDZ내의 손상정도와 포화도저하를 정량화하기 위해 모델링될 수 있다. 이러한 형태의 해석은 현장 투수를 시험동안 포화도 복구뿐만 아니라 시간에 따른 반복적인 기록을 통해 점진적인 파괴와 포

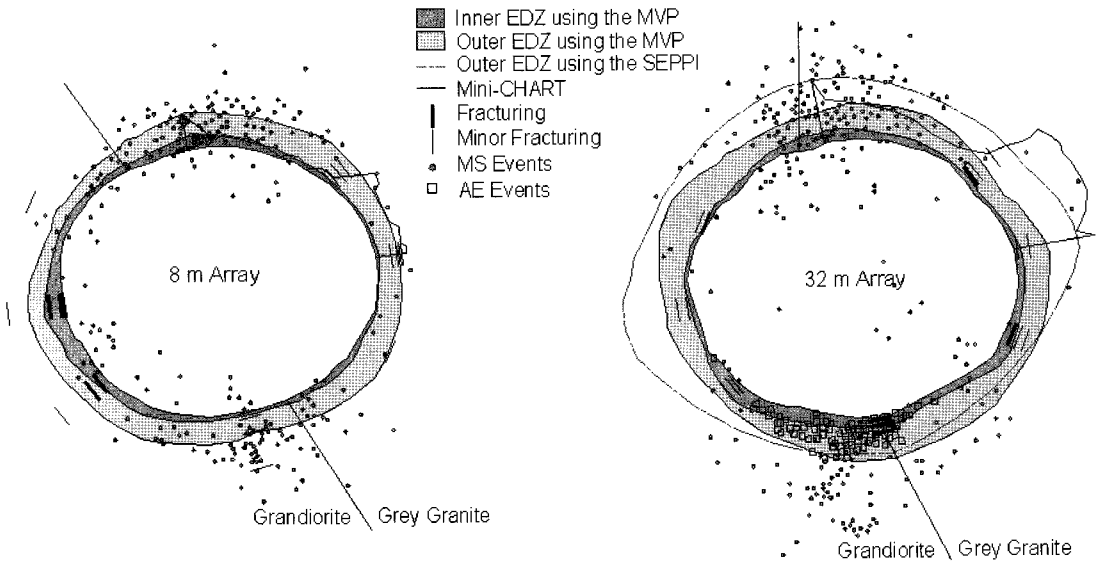


Fig. 9. Edited plots of EDZ around the TSX tunnel at two locations using measured data (after Martino & Chandler, 2004)

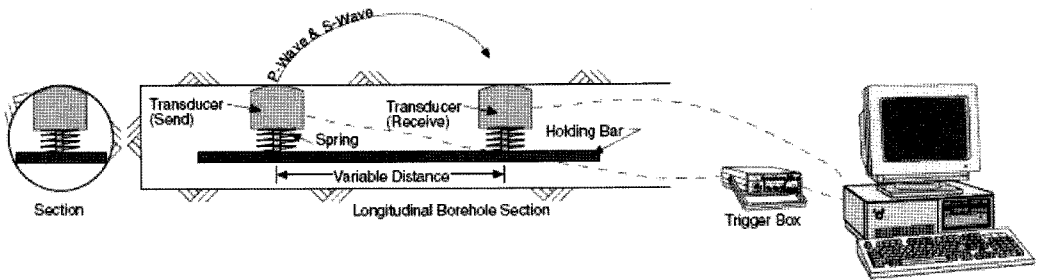


Fig. 10. Basic equipment used in the EDZ survey (after Maxwell et al., 1998)

하도 저하를 관측하는데 적용가능하다. 본 연구에서는 TSX 터널 주위의 탄성과 속도와 응력 분포간의 상관관계를 조사하였다.

4.1 UDEC-DM 모델과 입력 변수

TSX 실험을 모사하기 위하여 사용된 UDEC 모델은 다음의 그림 11과 같다.

신선암의 물성은 Lac du Bonnet 화강암의 실험결과에 근거하여 다음의 표 8과 같이 주어졌다.

Lac du Bonnet 암반을 모사하기 위하여 사용된 UDEC-DM 모델의 결합 물성은 다음의 표 9와 같다.

4.2 탄성해석과 UDEC-DM 해석간의 비교

MVP-1은 최대 접선응력의 영역에 위치하고 있고, MVP

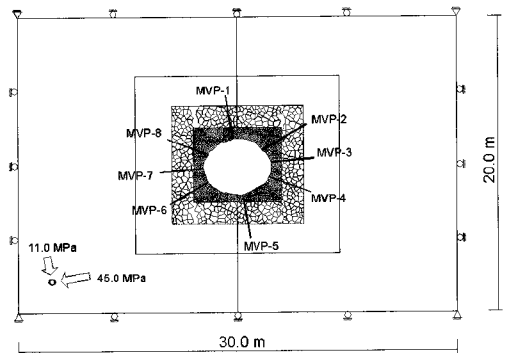


Fig. 11. The UDEC model for simulating the TSX experiment (after Martin, 2006)

-3은 최대 응력이완(unloading) 영역에 위치한다. UDEC

**Table 8.** The intact rock properties for Lac du Bonnet granite

Bulk modulus, K (GPa)	Shear modulus, G (GPa)	Unit weight (N/m <sup>3</sup> )
54.2	25.0	2,600

**Table 9.** The defect properties for UDEC-DM rock mass model

Spacing (m)	Aperture (m)	Normal stiffness, $K_n$ ( $\times 10^4$ GPa)	Shear stiffness, $K_s$ ( $\times 10^4$ GPa)	Cohesion c (MPa)	Friction angle $\phi$ (deg)	Tensile strength T (MPa)
0.3	0.01	2.9	1.4	15.0	52	10.0
0.1	0.01	8.7	4.2			

-DM 모델은 터널 경계면 주위의 손상 영향을 모사하기 위해 개발되었다. 일반적으로 굴착으로 인하여 손상이 발생한 지점에선 응력 재분배가 일어난다. 다음의 그림 12는 최대와 최소 압축응력 지점에서 UDEC-DM 모델과 Phase2D(Rocscience Inc., 2005) 탄성모델로부터 각각 구한 평균응력과 최소응력을 각각 비교하였다. 그림으로부터 보는 바와 같이, UDEC-DM 모델은 압축응력영역(MVP-1)에선 터널벽면으로부터 매우 근접한 거리에서 탄성해와 큰 차이를 보여 손상을 받았음을 알 수 있으나, 응력이완영역(MVP-3)에선 탄성응력과 차이가 거의 없으므로 암반이 탄성거동을 보임을 알 수 있다.

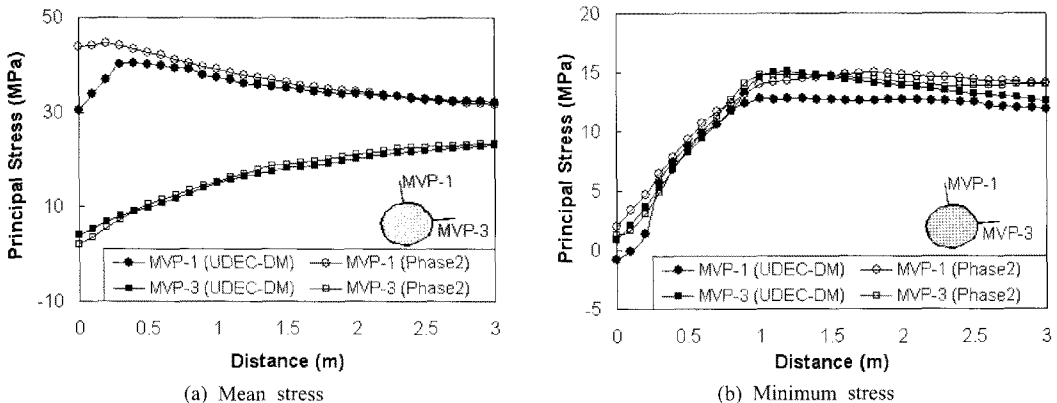
**4.3 탄성과 속도와 UDEC-DM으로 구한 평균 응력간의 비교**

TSX 터널 주위로 설치된 속도탐지기로 구한 탄성과 속도와 UDEC-DM 해석으로 구한 평균응력을 각각의 위치에서 서로 비교하였다. 그림 13에서 보는 바와 같

이 MVP-1, MVP-3에서 구한 탄성과 축선도는 터널 경계면 근처에서 속도가 감소함을 보여주었다. MVP-1은 최대 접선응력의 영역에 위치하고, MVP-3은 최대 응력이완 영역에 위치한다. 따라서 만약 이러한 속도의 감소가 터널주변의 응력발생과 응력이완 두 영역에서 모두 일어난다 할지라도, 속도의 감소를 유발하는 동일한 메커니즘이 양쪽 영역에서 발생한다고 보기는 어렵다. 또한 제하영역에선 약 1 m 깊이까지 속도의 감소가 발생한 반면, 재하 영역에선 수 cm까지만 속도의 감소가 발생하였다. 앞에서 언급한 바와 같이 전체적으로 TSX 터널 주변 EDZ의 탄성과 축선도는 UDEC-DM 모델에서 구해진 평균 응력과 일부 불일치하는 경향이 있으나, 전체적으로 상당히 유사한 경향을 보여주었다.

**5. 결론**

지하공동 주변에 발생하는 응력이완과 같은 제하(unloading)에 반응함으로써 EDZ의 생성을 모사하는 손상



**Fig. 12.** Comparisons of (a) mean stresses and (b) minimum stresses between UDEC-DM and Phase2 in the maximum and minimum compressive zone (after Martin, 2006)



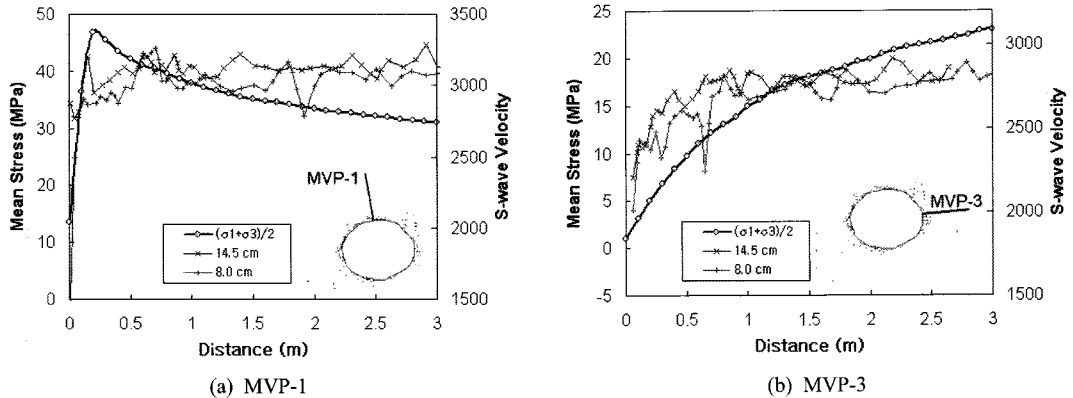


Fig. 13. Comparison of mean stress from UDEC-DM with velocity (after Martin, 2006)

모델을 UDEC 코드에서 사용가능하도록 개발하였다. 개발된 모델의 검증을 위하여 캐나다 AECL의 TSX 시험터널의 실험결과와 비교하였다. 이를 통하여 Martin (2006)은 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) Voronoi 절리 모델개념을 도입한 UDEC 해석은 응력 이완이 발생되고 재분배가 발생될 때 인장 또는 전단 균열에 의해 파괴되는 암반 모델링을 가능케 하였다.
- 2) TSX 터널 주변의 탄성응력과 UDEC 손상모델에서 얻은 응력과의 비교를 통하여 본 모델이 굴착손상권을 제대로 묘사하였음을 밝혔다.
- 3) TSX 시험터널 주변 굴착손상권의 탄성과 속도 축선도는 UDEC 손상모델에서 구해진 평균 응력과 매우 잘 일치하는 경향을 보여주었다.
- 4) 결론적으로, 본 연구에서 개발된 UDEC 손상모델은 결함을 가지고 있는 현지 암반을 묘사하는데 적합한 것으로 나타났다.

향후 SKB의 Äspö HRL 시험터널(심도 450 m)에서 구해진 탄성과 속도자료와 비교를 통하여 현지응력 수준이 크지 않은 균열암반의 손상을 특성화하는데 본 UDEC 손상모델이 적용될 예정이다.

## 감사의 글

본 연구는 한국지질자원연구원 기본사업인 “고심도 지하연구실험실(URL) 구축 및 실증실험연구” 과제의 일환으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

- Brady, B.H.G. and E. Brown, 1985, Rock mechanics for underground mining, George Allen & Unwin. 527p.
- CANMET, 1992, Uniaxial and triaxial compression tests on URL rock samples from boreholes 207-045-GC3 and 209-069-PH3. Canada Center for Mineral and Energy Technology. Division report. MRL92-025 (TR).
- Cundall, P.A., 1976, Explicit finite difference methods in geotechnics. In Proc. the EFconference on numerical methods in geomechanics. Virginia. 11: 132-150.
- Hoek, E. and E. Brown, 1997, Practical estimates of rock mass strength. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 34(8):1165-1186.
- Itasca Consulting Group Inc., 2000, UDEC-Universal Distinct Element Code in 2Dimensions, Minneapolis: Itasca.
- Martin, C.D., 2006, Quantifying the excavation damaged zone (EDZ) in a fractured rock mass, University of Alberta Progress report (Year 1) to KIGAM, Korea. Issued as KIGAM Report No. JCA2003011-2006(2).
- Martino, J. and N. Chandler, 2004, Excavation-induced damage studies at the underground research laboratory. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 41(8):1413-1426.
- Maxwell, S., R. Young and R. Read, 1998, A micro-velocity tool to assess the excavation damage zone. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 35(2):235-247.
- Potyondy, D. and P. Cundall, 2004, A bonded-particle model for rock. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 41:1329-1364.
- Rocscience Inc., 2005, Phase2 v6.0 - a two-dimensional finite element analysis program.
- Tsang, C. et al., 2005, Geohydronechanical 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.*, 42: 109-125.

**박 의 섭**



1989년 서울대학교 공과대학 자원공학과  
공학사  
1991년 서울대학교 대학원 자원공학과  
공학석사  
2000년 서울대학교 대학원 자원공학과  
공학박사  
Tel: 042-868-3098  
E-mail: [espark@kigam.re.kr](mailto:espark@kigam.re.kr)  
현재 한국지질자원연구원 지반안전연구부  
선임연구원

**신 중 호**



1983년 서울대학교 공과대학 자원공학과  
공학사  
1985년 서울대학교 공과대학 자원공학과  
공학석사  
1990년 서울대학교 공과대학 자원공학과  
공학박사  
Tel: 042-868-3242  
E-mail: [jhsynn@kigam.re.kr](mailto:jhsynn@kigam.re.kr)  
현재 한국지질자원연구원 지반안전연구부  
책임연구원

**C. Derek Martin**

1993 University of Manitoba 토목지질  
공학과 공학박사  
1983 University of Alberta 토목지반공학과  
공학석사  
1972 Memorial University 지질학과 이학사

E-mail: [derek.martin@ualberta.ca](mailto:derek.martin@ualberta.ca)  
현재 캐나다 University of Alberta 토목환경  
공학과 교수