

대변형 해석기법(Coupled Eulerian-Lagrangian Technique)을 이용한 TBM 굴착손상영역 분석

A Study on the Excavation Damage Zone (EDZ) under TBM Advancement Based on Large Deformation Technique (Coupled Eulerian-Lagrangian)

이 승 연¹ Lee, Seung-Yeon

김 도 현² Kim, Do-Hyun

정 상 섬³ Jeong, Sang-Seom

Abstract

In this study, Coupled Eulerian-Lagrangian (CEL) analysis, which is one of the large deformation analyses, was incorporated to investigate excavation damage zone (EDZ) under TBM advancement. Considering the quasi-static condition, the dynamic analysis was performed to simulate the real TBM advancement and subsequently a case study on mesh and TBM excavation rate was carried out for satisfying a balance of accuracy and economic computational time. Based on this, a series of parametric studies were performed for different rock types and tunnel diameters. From the numerical analysis results, it is found that EDZ was taken to range within $0.4D$ (D =tunnel diameter) for most rocks. It is also found that the EDZ tends to increase as the tunnel diameter increases.

요 지

본 연구에서는 대변형 해석기법 중 하나인 Coupled Eulerian-Lagrangian 해석기법을 적용하여 TBM 굴진으로 발생하는 굴착손상영역을 분석하였다. 실제 TBM 굴진과정을 모사하기 위해 quasi-static 조건을 고려하여 동적해석을 수행하였으며, 해석시간의 효율성과 정확도를 만족시키는 최적의 조건을 찾기 위해 mesh 및 TBM 굴진속도를 변수로 하여 case study를 수행하였다. 또한 암반 종류 및 터널 직경이 굴착손상영역에 미치는 영향을 확인하기 위해서 매개변수 연구를 수행하였다. 수치해석 결과, TBM 굴착으로 인한 굴착손상영역은 대부분의 경우 $0.4D$ 이내로 나타났으며, 터널직경이 커짐에 따라 굴착손상영역도 증가하는 것으로 나타났다.

Keywords : Coupled Eulerian-Lagrangian technique, Large deformation FE analysis, TBM excavation, Excavation Damage Zone

1 정회원, 한국철도기술연구원 주임연구원 (Member, Assistant Manager, Korea Railroad Research Institute)

2 정회원, 연세대학교 토목환경공학과 박사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental Engrg., Yonsei Univ.)

3 정회원, 연세대학교 토목환경공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil and Environmental Engrg., Yonsei Univ., Tel: +82-2-2123-2807, Fax: +82-2-2123-8378, soj9081@yonsei.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2017년 6월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

최근 도심지 지하철 및 지하공간 개발이 활발해짐에 따라, 터널 굴착으로 인한 인접 구조물 손상 및 지반 함몰(Sink Hole) 등 굴착으로 인해 발생하는 문제 및 해결 방안에 관하여 지반공학 연구자들의 관심이 증가하고 있다. 대표적인 연구기관으로 캐나다의 URL, 스웨덴의 ZEDEX가 있으며, 국내 또한 한국원자력연구원 Underground Research Tunnel(KURT)에서 굴착손상영역에 관한 연구를 수행하였다(Bauer et al., 1996; Martin et al., 1997; Read et al., 1998; Young and Collins, 1999). 실내 및 현장실험을 수행하여 굴착손상영역을 직접적으로 산정하는 것이 바람직하지만, 현장실험을 수행하는데 있어 비용적으로, 시간적으로도 한계가 있다. 따라서 터널 굴착으로 인한 손상영역을 예측하기 위해 이론적 모델을 개발하거나, 수치해석을 수행하여 간접적으로 예측한다면 비용 및 시간을 크게 절약할 수 있기 때문에 최근에는 TBM 굴착에 관한 수치해석과 관련된 연구들이 전세계적으로 증가하고 있다.

현재까지 연구자들에 의해 개발된 TBM 터널 굴착 해석 모델로는 2차원 평면변형률, 3차원 대칭모델, 3차원 해석모델 등이 있으며, 3차원 해석 모델의 대표적인 모델로는 이탈리아 피에몬테주 토리노 국립대학의 Zhao et al.(2012)이 개발한 굴착 시 암반의 역학적 거동과 암반과 TBM 및 지보재와의 상호작용을 고려한 3차원 수치해석 모델이 있다. 그러나 기존의 해석모델들은 대부분 단계별 해석절차로 수행한 정적해석이 대부분이다. 기존의 해석은 실제 TBM 굴진과정과 굴착으로 발생하는 암반의 변형을 현실과 가깝게 모사하기에는 메쉬의 왜곡 현상 및 접촉면의 문제로 해석에 한계가 있다. 대체 해석법으로 개별요소법(discrete element method) 또는 Updated Lagrangian(UL) 방법 등이 있으나, 빠른 속도로 거동하는 구조물-지반의 동적거동을 예측하기에는 한계가 있다(Kim and Jeong, 2014; Ko et al., 2015).

최근 컴퓨터 기술의 발달과 함께 대변형 수치해석에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 특히 가스, 석유 등의 시추 작업에 필요한 해상 앵커링 기술, 산사태 및 토석류 해석, 말뚝의 관입에 따른 거동 분석, 터널 굴착으로 인한 인접구조물 및 지반 영향 분석 등 지반공학적인 문제에 폭넓게 적용되고 있다(Ko et al., 2015). 대변형 해석기법으로 대표적인 것들로 Remeshing and interpolation technique by small strain(RITSS) 방법, Adopted meshing

(AM) 기법, Coupled Eulerian-Lagrangian(CEL) 기법이 있다. 이 중에서 CEL 기법은 ABAQUS에서 기본적으로 제공하기 때문에, 다른 대변형 해석기법보다 적용하기 편리하며, 구조물의 형상이나 구조에 관하여 제한사항이 없기 때문에 적용성이 우수하며, 결과 또한 정확하다는 연구 결과가 있다.

따라서 본 연구에서는 TBM 터널 굴착과정을 모사하기 위하여 대변형 해석기법 중 하나인 Coupled Eulerian-Lagrangian 해석기법을 적용하여 동적해석을 수행하였다. 또한 TBM 굴착 시 손상영역에 관계가 있는 영향인자들 중 암반 종류, 터널 직경을 매개변수로 하여 매개변수연구를 수행하였다.

2. 이론적 배경

2.1 굴착으로 암반 손상 기준

TBM 터널 굴착으로 암반은 손상되며, 손상으로 인해 암반은 균열강도, 간극, 밀도와 같은 물리적 특성, 탄성계수, 탄성과 속도와 역학적 특성, 투수계수, 전도계수와 같은 수리학적 특성이 변하게 된다. 특히 굴착으로 인해 암반의 물리적 강도는 감소하며, 투수성은 증가하게 되어, 터널 시공 현장의 안정성에 문제가 발생할 수 있다(Bauer et al., 1996; Emsley, Simon et al., 1997; Saiang, 2004). 굴착으로 인한 암반의 손상은 균열과 밀접한 관계가 있으며, 암반 내 균열이 발생하여 확장되면 암반의 탄성계수는 감소하며, 투수계수는 증가하게 된다. 따라서 암반의 균열 발생 및 확장에 관한 연구 또한 많은 연구자들에 의해서 지속적으로 수행되었다.

Martin(1994) 또한 압축하중을 받는 암반의 균열 발생을 확인하기 위하여 실내 및 현장실험을 수행하였으며, 암반 내 축차응력이 일축압축강도의 30-40%이상인 부분에서 균열이 발생하는 것을 확인하였다. Martin(1994)은 균열시작응력은 실험에 사용된 표본의 크기와 무관하며, 탄성해석을 수행하여 Canada URL의 굴착손상영역을 실제와 가깝게 예측하였다. Martin(1994)이 제안한 식은 다음과 같다.

$$\sigma'_1 - \sigma'_3 = \sigma_a = 30 - 40\% \text{ of UCS} \quad (1)$$

여기서, σ'_1 은 최대유효주응력, σ'_3 은 최소유효주응력, σ_a 는 균열시작응력, UCS는 원지반 암반의 일축압축강도를 의미한다.

Table 1. Empirical relationship between Crack Initiation stress and UCS (Diederichs et al., 2004)

Rock type	Measured σ_{ci}/UCS	Rock type	Measured σ_{ci}/UCS
Indiana limestone	0.320	Pegmatite	0.475
Lilydale limestone	0.345	Westerly granite	0.476
Pink granite	0.360	Chloritized norite	0.496
Grey granite	0.360	S.A. quartzite	0.500
Marble	0.380	Medium sandstone	0.500
Norite	0.405	Berea sandstone	0.564
Granodiorite	0.469		

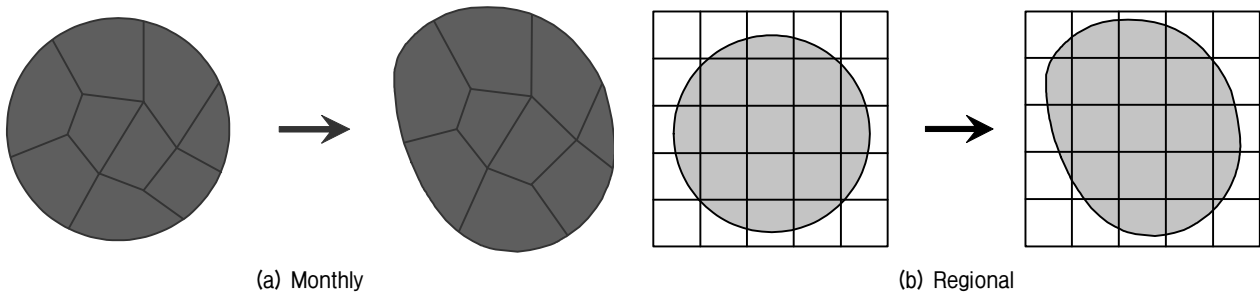


Fig. 1. Deformation of a continuum in a Lagrangian and an Eulerian analysis (Qiu et al., 2011)

이 외에도 국내외 많은 연구자들에 의해 암반 내 균열 발생에 관한 연구가 수행되었으며, Diederichs et al. (2004)은 다양한 암반 종류를 대상으로 수행한 기존의 실험결과들을 취합하고 추가적으로 실험을 수행하여 균열발생응력과 일축압축강도의 관계를 제안하였다. Table 1에서 나타난 바와 같이, 대부분의 암반의 경우 일축압축강도의 30-60%에 해당하는 크기에서 균열이 발생하는 것으로 나타났으며, 따라서 본 연구에서는 Martin (1993)이 제안한 바와 같이 일축압축강도의 30%보다 큰 축차응력을 받는 구간을 균열이 발생했다고 간주하여 굴착손상영역으로 산정하였다.

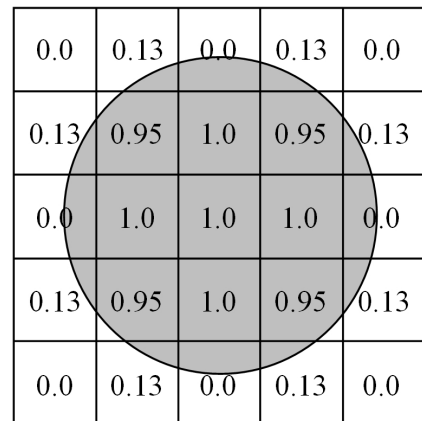


Fig. 2. Eulerian volume fraction (EVF) (ABAQUS, 2013)

3. TBM 굴착 모사를 위한 대변형 유한요소해석 모델

3.1 Coupled Eulerian-Lagrangian 해석

본 연구에서는 TBM 굴착 모사를 위해 대변형 해석 기법 중 하나인 Coupled Eulerian-Lagrangian(CEL) 해석기법을 사용하였다. Coupled Eulerian-Lagrangian(CEL) 기법은 Lagrangian 해석과 Eulerian 해석의 장점만을 부각시킨 해석기법이다. Lagrangian 해석은 일반적으로 고체역학에서 주로 적용되며, 실제 물체를 작은 요소들로 나누고, 요소의 절점 좌표와 시간에 대한 함수로 연속체

의 거동을 정의한다. Eulerian 해석은 실제 물체를 작은 요소들로 나누지 않고 공간자체를 나누는 공간좌표와 시간에 대한 함수로 연속체의 거동을 정의하며, 주로 유체 역학에 적용된다(Fig. 1). Eulerian 해석에서 물질의 거동은 Eulerian volume fraction(EVF)으로 정의되는데, 이는 각각의 요소 안에 존재하는 물질의 체적비를 나타낸다. 만약 요소 안에 물질이 가득 채워져 있다면 EVF는 1, 완전히 비어있다면 EVF는 0으로 나타낸다(Fig. 2). CEL 해석에서는 지반과 같이 변형이 많이 발생하는 요소들은 Eulerian 영역으로, 상대적으로 변형이 적게 발생하는 기초 및 구조물들은 Lagrangian 영역으로 적용한다.

3.2 Coupled Eulerian-Lagrangian(CEL) 모델링

본 연구에서는 Fig. 3과 같이 지표면으로부터 14m 아래에 위치하고 직경은 3.5m인 터널을 대상으로 CEL 유한요소해석을 수행하였다. 암반의 경우 Eulerian 요소를 적용하였으며, 물성은 Mohr-Coulomb 모델로 풍화암 물성을 적용하였다. TBM 구성요소로 라이닝 및 커터헤드는 Lagrangian 요소를 적용하였으며 물성은 등방탄성모델로 Table 2와 같다. 본 해석에서는 초기 굴착은 5m까지로 하여, 세그먼트 라이닝은 5m까지 설치되었다고 가

Table 2. Material property of lining and cutterhead

	E (MPa)	ν	γ (kN/m ³)	ϕ (°)	c (kPa)
Lining	23,000	0.15	24	-	-
Cutterhead	200,000	0.3	82.5	-	-

정하였으며, 5m 이후 커터헤드가 대상 암반으로 굴진 시 터널 전면, 상·하부에 발생하는 굴착손상영역을 평가하고자 하였다. 따라서, 라이닝 부분은 고정된 것으로 가정하였고, 커터헤드는 일정한 속도로 굴진하도록 설정하여 막장압의 관한 영향은 없도록 모델링하였다. 지반 침하 및 히빙현상을 고려할 수 있도록 지표면으로부터 2m 부분과 굴착이 완료된 5m까지의 구간은 물성이 없는 void로 지정하여 TBM 굴착 해석을 수행하였다.

본 해석에서는 앞서 언급한 바와 같이 라이닝과 커터헤드는 Lagrangian 요소 중 8절점 Lagrangian brick element (C3D8R)를 적용하였고, 암반은 Eulerian 요소 중 8절점 Eulerian brick elements(EC3D8R)을 적용하였다. 해석 진행 절차로는 먼저 암반 내 지중응력상태만을 고려하는 초기해석단계가 진행된다. 초기 해석단계에서는 커터헤드는 움직이지 않고 고정되어 있으며, 암반 내 지중응력은 깊이별로 암반 깊이에 단위중량을 곱한 값을 적

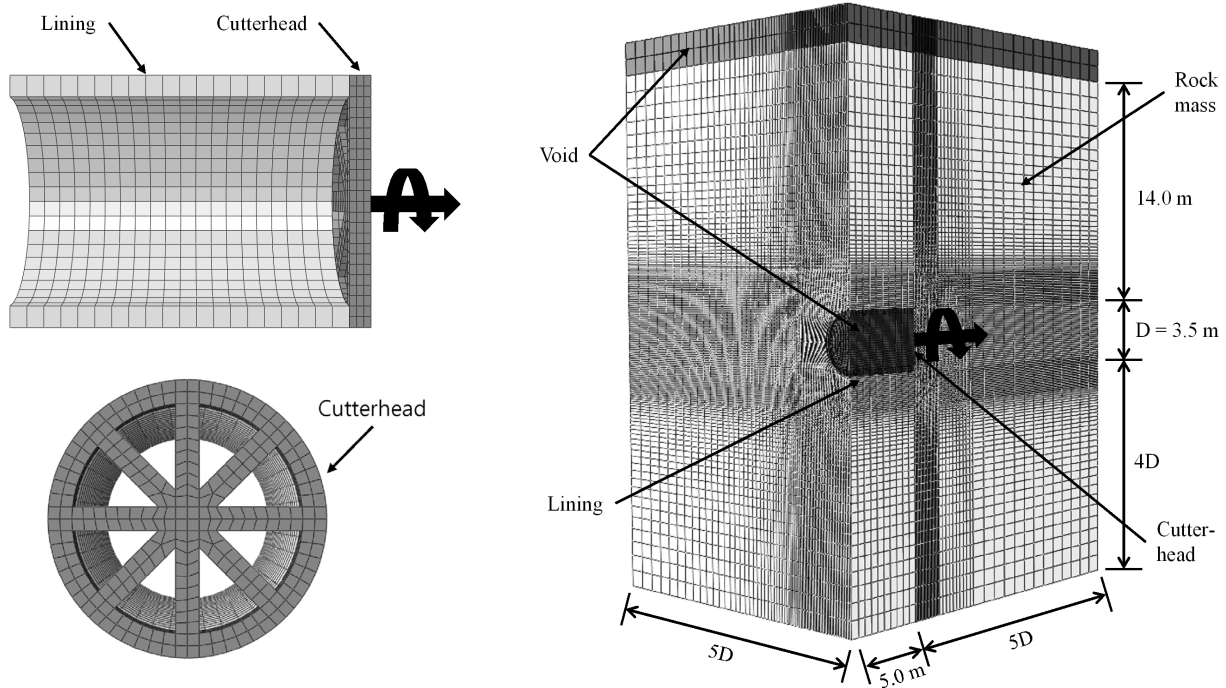


Fig. 3. Schematic representation of finite-element model

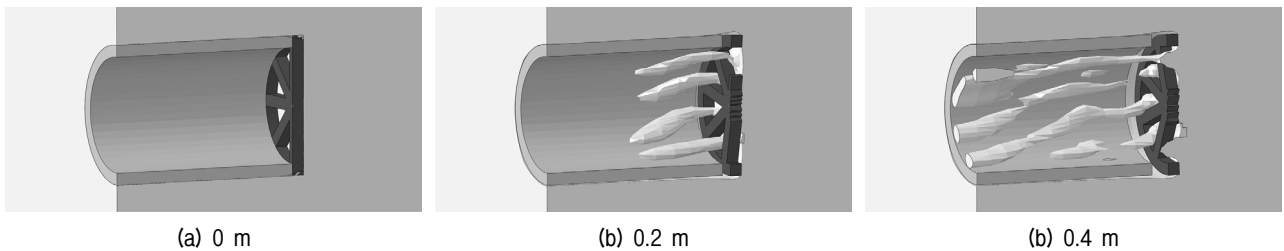


Fig. 4. Procedure of TBM advancement

용하였다. 초기해석단계가 끝나게 되면 그 결과가 다음 단계의 초기상태로 적용되어 해석이 진행되며, 이 단계에서 커터헤드의 속도가 적용되어 굴착이 진행하게 된다. Fig. 4는 본 연구에서 수행한 시간에 따른 굴착 결과를 나타내며, Fig. 4에서 굴착이 진행 될수록 배토량이 점차 증가하는 것을 알 수 있다. 이를 통해 본 해석모델이 TBM 굴진과정을 보다 현실적으로 모사할 수 있음을 알 수 있었다.

3.3 Mesh 및 경계 조건

본 연구에서는 경계 길이에 관한 case study를 수행하여 최적 경계길이를 본 모델에 적용하였으며, 경계 길이는 4D-5D(D: 굴착 직경)를 확인하였다. 유한요소해석에서는 mesh의 크기에 따라 결과 차이가 크게 달라지므로, 해석시간을 단축시킬 수 있으며 결과에도 영향을 미치지 않는 최적 mesh 크기를 결정하기 위해 5가지의 case study를 수행하였다(Table 3).

수치해석 결과, Fig. 5와 같이 15cm mesh 크기로 해석한 결과는 나머지 mesh 크기로 해석한 결과와 다소 차이가 있는 것으로 나타났으며, 9cm 이하의 mesh로 해

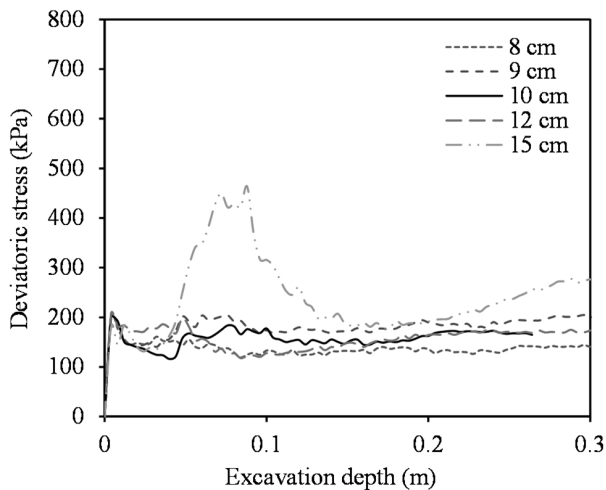


Fig. 5. Result of mesh convergence study for five different mesh size

Table 3. Convergence study for mesh

	Minimum mesh size near the tunnel (m)	D/minimum mesh size	Number of elements	Computational time (h)
Mesh 1	0.15	23.3	480,480	19.07
Mesh 2	0.12	29.2	680,056	31.05
Mesh 3	0.10	35.0	1,151,796	36.56
Mesh 4	0.09	38.9	1,323,300	43.87
Mesh 5	0.08	43.8	1,591,520	90.35

석할 경우 10cm 해석결과가 크게 다르지 않지만 너무 많은 시간이 소요되어 비효율적이므로, 본 연구에서는 10cm의 mesh를 적용하여 수치해석을 수행하였다.

3.4 접촉면 조건 및 Quasi-static 조건

유한요소해석 수행 시, 지반의 비선형성은 constitutive model을 통해 고려할 수 있으며, 암반에 주로 적용되는 constitutive model로는 Mohr-Coulomb 모델과 Hoek-Brown 모델 등이 있다. 본 해석에서는 암반은 Mohr-Coulomb 모델을 적용하였으며, 라이닝과 커터헤드 요소는 등방탄성 모델을 적용하였다.

CEL 해석에서는 Eulerian 요소와 Lagrangian 요소 사이의 경계요소를 고려하기 위한 방법으로는 주로 general contact 방법을 적용한다. 본 해석에서도 역시 TBM 구성 요소(라이닝, 커터헤드 등)와 암반 요소 사이에 경계조건을 general contact 방법과 penalty contact 방법을 적용하였으며, 기존 연구사례들을 참고하여 TBM 구성요소와 암반 요소 사이의 마찰계수는 0.3을 적용하였다(Gehring, 1996; Ramoni and Anagnostou, 2011; Zhao et al., 2012).

실제 현장에서 일반적으로 적용하는 TBM 순 굴진 속도는 1.8m/hour(5.0×10^{-4} m/s)로, 이 속도를 적용하여 EXPLICIT 해석을 수행할 경우, 간단한 해석임에도 불구하고 많은 해석시간이 소요된다. 따라서 TBM 굴진속도를 점차 증가시키면 해석시간을 줄일 수 있으며, 결과 또한 유사한 최적속도로 해석을 수행함으로써 시간을 줄일 수 있다(Wang et al., 2015). 본 연구에서도 이러한 quasi-static 조건을 반영하여 실제 TBM 속도를 적용한 해석 결과와 유사하며 해석시간도 단축시킬 수 있는 최적속도를 찾기 위해 case study를 수행하였다. 실제속도 (5.0×10^{-4} m/s)로 해석결과와 0.04m/s로 해석결과가 매우 유사한 것을 확인하였으며, 아래의 Table 4와 같이 0.04m/s를 포함하여 총 4가지 속도에 관한 case study를 수행하였다. 속도를 제외한 다른 조건들의 경우 모두 동일하게 적용하였다.

Table 4. Parametric study for quasi-static condition

	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
Excavation velocity (m/s)	0.04	0.1	0.2	0.4
Rotational velocity (rad/s)	2.4	6	12	24

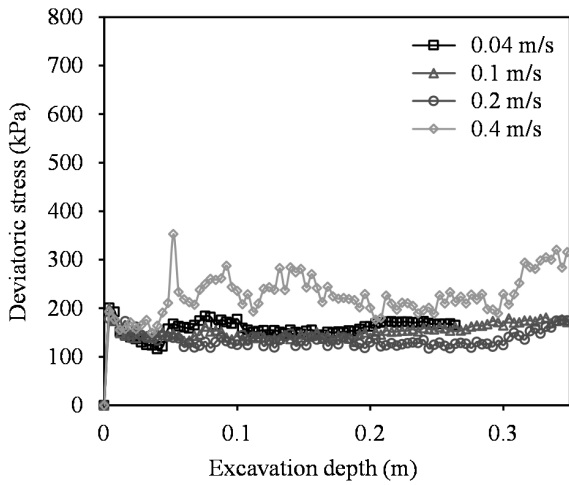


Fig. 6. Result of the parametric study for four different velocities

수치해석결과, Fig. 6에 나타난 바와 같이, 0.04m/s, 0.1m/s, 0.2 m/s는 결과가 크게 다르지 않은 것을 알 수 있었다. 그러나, 0.4m/s의 속도를 적용하여 해석한 경우, 다른 해석결과들과 다소 차이가 있는 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서는 0.1m/s의 속도로 모델링하여 TBM 굴착을 모사하였다.

4. 매개변수 연구

4.1 암반종류의 영향

본 해석에 적용한 암반 물성으로는 그동안 국내 터널 공사 시 조사된 자료를 분석하여 가장 일반적인 암반 물성치를 선정하였고, 이를 바탕으로 1등급 암반부터 풍화암까지 Table 5와 같이 분류하였으며, 각각 단일 지반으로 해석을 수행하였다(Park et al., 2012). 본 연구에

Table 5. Summary of parametric studies on effect of rock type (Park et al., 2012)

Group	RMR	E (MPa)	UCS (MPa)	ν	γ (kN/m ³)	ϕ (°)	c (kPa)
I	81~100	30,000	90	0.2	27	45	5,000
							4,000
		20,000	75				5,000
							4,000
II	61~80	15,000	60	0.22	26	40	3,000
							2,000
		10,000	50				3,000
							2,000
III	41~60	8,000	35	0.24	25	35	1,500
							1,000
		6,000	30				1,500
							1,000
IV	21~40	4,000	15	0.26	23	32	700
							550
							400
		2,000	10				700
							550
							400
V	<20	1,000	5	0.28	22	30	200
							150
							100
		800	4				150
							200
							100
Weathered rock	-	400	3	0.30	21	32	90
							70
							50
		200	2				90
							70
							50

서는 앞에서 언급한 바와 같이, 균열이 발생한 구간을 굴착손상영역(EDZ)으로 가정하여, Martin(1999)이 제안한 일축압축강도의 30%보다 큰 축차응력이 작용하는 구간을 굴착손상영역(EDZ)으로 산정하였다.

수치해석 결과, Fig. 7, Fig. 8에서 나타난 바와 같이, RMR 1을 제외하고, 굴착손상영역은 터널 전면으로부터 0.1D-0.4D, 상부로부터 0.1D-0.4D, 하부로부터 0.2D-0.4D로 나타나는 것을 확인하였다. RMR 1과 같이 강한 암반을 굴착할 경우에 손상영역이 더 커지는 경향을 보였으

며, 그 범위는 전면으로부터 최대 0.6D 상부로부터 최대 0.9D, 하부로부터 0.8D까지 증가하였다.

4.2 터널직경(D) 의 영향

굴착손상영역(EDZ)에 관한 기존 문헌들을 보면, 굴착손상영역은 직경의 0.3D 정도로 확인되며(Chang et al., 2007; Lee et al., 2011), 본 연구에서도 터널 직경에 관한 매개변수 연구를 수행하기 위하여, Table 6과 같이

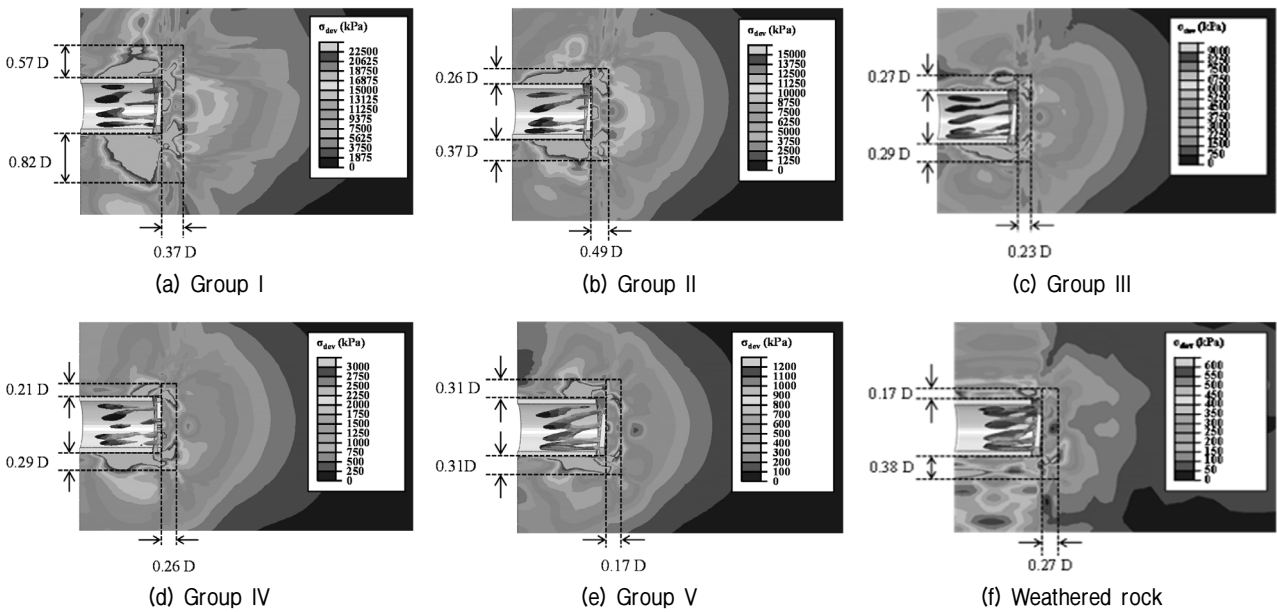


Fig. 7. Typical EDZ contours of various rock type (at 0.3 m Excavation depth)

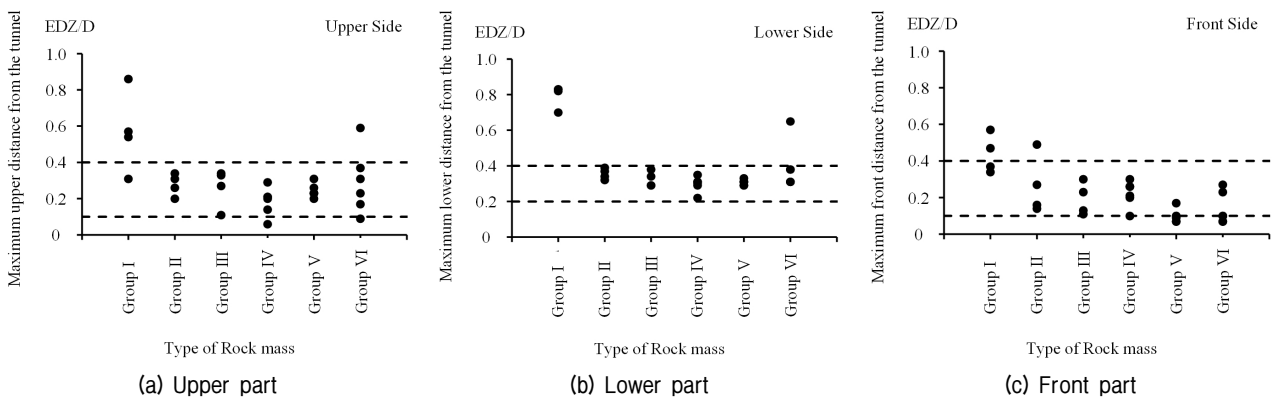


Fig. 8. Summaries of the CEL analysis results on EDZ affected by the rock type

Table 6. Summary of parametric studies on effect of tunnel diameters

Group	Initiation Excavation distance (m)	Tunnel depth (m)	Excavation velocity (m/s)	Rotational velocity (rad/s)	Tunnel diameters (m)
VI	5	14	0.1	6	2.5
					3.5
					4.5

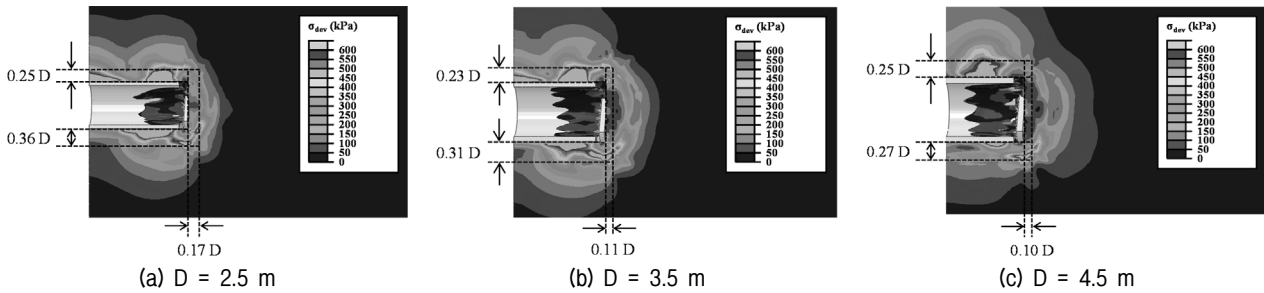


Fig. 9. EDZ contours of different tunnel diameter

터널 직경을 2.5m부터 4.5m까지 총 3가지 터널직경에 관하여 수치해석을 수행하였다. 해석에 사용된 암반 종류는 Group 6을 대상으로하여 수치해석을 수행하였다.

수치해석결과, Fig. 9에 나타난 바와 같이, 터널 직경으로 정규화 시킨 굴착손상영역 범위는 3가지 경우 모두 비슷한 결과를 보였으며, 터널 전면으로부터 0.1D-0.17D, 상부로부터 0.23D-0.25D, 하부로부터 0.27D-0.36D로 나타났다. 따라서 터널 직경이 증가할수록, 굴착손상영역은 증가하는 것으로 확인하였다.

5. 결론

본 연구에서는, ABAQUS 6.14를 사용하여 대변형 해석기법 중 하나인 CEL 해석기법을 적용하여 TBM 굴착시 발생하는 굴착손상영역을 산정하였다. 경계요소, mesh 크기, 굴진속도에 대하여 각각 case study를 수행하여 TBM 굴진 모사를 위한 CEL 해석의 최적 모델을 선정하였다. 또한 실제 TBM 굴진을 현실적으로 모사하기 위해 quasi-static 조건으로 동적해석을 수행하였으며, 굴착이 진행될수록 배토량 또한 증가하는 해석 결과를 통해 기존 해석모델보다 동적해석을 현실적으로 구현 가능함을 알 수 있었다. 본 연구결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 기존의 TBM 굴착 수치해석모델들은 정적-소변형 해석모델들이 대부분이었으므로, 본 연구에서는 Explicit Dynamic과 quasi-static 조건으로 동적-대변형 해석기법을 수행하여 TBM 굴착을 모사하였다.
- (2) 최적의 동적-대변형 해석 모델링을 위해, 경계요소, mesh 크기, 굴진 속도에 관하여 case study를 수행하였고, 해석 결과, 경계길이는 4D-5D, mesh 크기는 10cm, 굴진 속도는 0.1m/s 일 때가 가장 적합한 것으로 나타났다.

(3) 본 연구에서는 암반 종류에 관하여 매개변수연구를 수행하였으며, 수치해석결과, 대부분의 암반의 경우, 굴착손상영역은 터널 주위로 최대 0.4D로 나타났다. Group 1(RMR 1)과 같이 강한 암반에서 굴착손상영역이 크게 나타났다.

(4) 본 연구에서는 터널 직경이 굴착손상영역(EDZ)에 미치는 영향을 확인하기 위하여 매개변수연구를 수행하였으며, 수치해석결과, 터널 직경과 굴착손상영역(EDZ)은 비례하는 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 2011년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단(No. 2011-0030842)의 지원과 2013년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원(No. 20131010501790)을 받아 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌 (References)

1. ABAQUS. (2013), *ABAQUS user's and theory manuals*, Version 6.13. Rhode Island: Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc.
2. Bauer, C., Homand-Etienne, F., Ben Slimane, K., Hinzen, K. G., and Reamer, S. K. (1996), "Damage Zone Characterization in the Near Field in the Swedish ZEDEX Tunnel using in Situ and Laboratory Measurements", *Eurock '96, Balkema, Rotterdam*, pp.1345-1352.
3. Chang, S. H., Lee, C. I., and Lee, Y. K. (2007), "An Experimental Damage Model and its Application to the Evaluation of the Excavation Damage Zone", *Rock mechanics and rock engineering*, Vol.40, No.3, pp.245-285.
4. Diederichs, M. S., Kaiser P. K., and Eberhardt E. (2004), Damage Initiation and Propagation in Hard Rock during Tunnelling and the Influence of Near-face Stress Rotation, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol.41, No.5, pp.785-812.
5. Gehring, K. H. (1996), Design criteria for TBM's with respect to real rock pressure. Tunnel boring machines—trends in design & construction of mechanized tunneling, *International lecture series TBM tunnelling trends*, Hagenberg. AA Balkema, Rotterdam, pp.

- 43-53.
6. Kim, Y. H. and Jeong, S. S. (2014), Analysis of Dynamically Penetrating Anchor based on Coupled Eulerian-Lagrangian (CEL) Methods, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol.34, No.3, pp.895-906.
 7. Ko, J. Y., Jeong, S. S., and Lee S. Y. (2015), A Study on the 3D Analysis of Driven Pile Penetration Based on Large Deformation Technique (Coupled Eulerian-Lagrangian), *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol.31, No.8, pp.29-38.
 8. Lee, C. S., Jeon, S. W., Kwon, S. K., and Choi, J. W. (2011), "Assessment of Excavation Damage Area of KAERI Underground Research Tunnel using Change of Physical Properties of Rock in Korean", *2011 Korean Rock Mechanics Society Fall Conference and Symposium celebrating its 30th anniversary in Korean*, pp. 181-185.
 9. Lee, C. S., Kwon, S. K., Choi, J. W., and Jeon, S. W. (2011), "An Estimation of the Excavation Damaged Zone at the KAERI Underground Research Tunnel", *Journal of Korean Society for Rock Mechanics*, Vol.21, No.5, pp.359-369.
 10. Martin, C. D. (1994), The strength of massive Lac du Bonnet granite around underground openings, University of Manitoba.
 11. Martin, C. D., Read, R. S., and Martino, J. B. (1997), "Observation of Brittle Failure around a Circular Test Tunnel", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, (34), 7, pp.1065-1073.
 12. Park, J. J., Kim, D. H., and Jeong, S. S. (2012), Analysis of Tunnel Lining Behavior under Tunnel Load. *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.28, No.8, pp.79-88.
 13. Qiu, G., Henke, S., and Grabe, J. (2011), Application of a Coupled Eulerian-Lagrangian Approach on Geomechanical Problems Involving Large Deformations, *Computers and Geotechnics*, 38, pp.30-39.
 14. Ramoni, M. and Anagnostou, G. (2011), The interaction between shield, ground and tunnel support in TBM tunnelling through squeezing ground, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol.44, No.1, pp.37-61.
 15. Read, R. S., Chandler, N. A., and Dzik, E. J. (1998), "In Situ Strength Criteria for Tunnel Design in Highly-stressed Rock Masses", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol.35, No.3, pp.261-278.
 16. Saiang, David. (2004), "Damaged Rock Zone around Excavation Boundaries and its Interaction with Shotcrete".
 17. Wang, D., Bienen, B., Nazem, M., Tian, Y., Zheng, J., Pucker, T., and Randolph, M. (2015), "Large Deformation Finite Element Analyses in Geotechnical Engineering", *Computers and Geotechnics*, 65, pp.104-114..
 18. Young, R. P. and Collins, D. S. (1999), "Monitoring an Experimental Tunnel Seal in Granite using Acoustic Emission and Ultrasonic Velocity", *37th Rock Mechanics Symposium, Balkema, Rotterdam*, pp.869-879.
 19. ZEDEX (1997), "A Study of Damage and Disturbance from Tunnel Excavation by Blasting and Tunnel Boring. No. SKB-TR--97-30", *Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.*
 20. Zhao, K., Janutolo, M., and Barla, G. (2012), A completely 3D model for the simulation of mechanized tunnel excavation, *Rock mechanics and rock engineering*, Vol.45, No.4, pp.475-497.

Received : March 24th, 2016

Revised : October 11th, 2016

Accepted : November 25th, 2016