

## 굴착공법이 터널변위 거동에 미치는 영향-유한요소해석 Effects of Excavation Methods on Tunnel Deformation Behavior using Finite Element Analysis

유충식<sup>1)</sup> Chungsik Yoo, 김주미<sup>2)</sup> Joomi Kim, 김선빈<sup>3)</sup> Sunbin Kim

<sup>1)</sup> 성균관대학교 토목환경공학과 교수, Professor, Dept. of Civil & Envir. Engrg, Sungkyunkwan Univ

<sup>2)</sup> (주)마이다스아이티 기사, Engineer, MIDAS Information Technology Co., Ltd

<sup>3)</sup> 성균관대학교 토목환경공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil & Envir. Engrg, Sungkyunkwan Univ.

**SYNOPSIS :** Before getting to the actual study of the load distribution factor in various excavating methods, this research is preliminarily focused on the comparison of two different excavation methods, CD cut method and Ringcut method. Especially, the purpose of this research is to study the behavioral mechanism of two tunnels which share the same construction environment but different excavating method. Two numerical analysis models with the same tunnel section and material properties are compared in this study, and they are analyzed by 3D Finite Element Analysis. In each model, face stability, crown displacement, ground settlement, and shotcrete-lining stress are computed. Thus, the general behavior of CD cut method and Ringcut method are studied, and it certified what should be considered for the calculation of the load distribution factor.

**Key words :** Tunnel excavating methods, 3D Finite element analysis, Ringcut method, CD method

### 1. 서론

터널 공법 선정은 일반적으로 시공의 안전성, 경제성 등을 종합적으로 평가하여 이루어진다. 국내 터널시공에 있어 가장 많이 적용되고 있는 터널 공법으로는 NATM 공법으로, 현재 도심지의 지하철 터널을 비롯한 지하공간의 개발은 대부분이 NATM 방식에 의해 시공되고 있다. 이러한 NATM 공법은 원지반 자체의 지지력을 기반으로 하며 지보재를 이용하여 지반을 안정시킨 후 터널굴착을 수행하는 굴착방식으로, 지반에 따라 굴착공법 변경이 용이하며 파쇄대 및 지반 변화 적응성이 우수하다. 또한 국내 시공사례가 많이 확보되어 있고 NATM 공법 시공에 대한 숙련된 국내 기술진을 다수 보유하고 있으며 계측결과 분석 후 이에 대한 신속대응이 가능하다는 장점을 가지고 있다.

이러한 NATM 공법에 적용되는 굴착 방법으로 전단면 굴착 및 상·하반단면 굴착(Benchcut), 중벽분할(CD), Ringcut 공법등이 있다. 일반적으로 설계자는 지반조건에 따른 시공사례를 분석하여 굴착공법을 결정하며, 선정된 굴착공법을 대표단면에 적용하여 수치해석을 활용한 터널안정성 평가를 수행한다. 일반적으로 설계시 지반조건에 따른 시공사례를 분석하여 굴착공법을 결정하며, 지반이 취약할수록 전단면 굴착공법 보다 단면 분할, 굴진장등을 세부적으로 고려하는 중벽분할 및 Ringcut 공법과 같은 방법을 적용한다. 그러나 현 국내 터널 설계에 있어 관통지층이 암반등급 IV이상일 경우 중벽분할 및 Ringcut 공법을 적용하는 것이 보편화되어 있지만, 공법적용이 현장조건에 따라 체계화 되어있지 않고 대부분 시공성의 편리함으로 인해 중벽분할보다 Ringcut 공법을 더 많이 적용하고 있다. 또한, 수치해석을 활용한 터널 안정성 평가시 3차원 해석을 수행하여 각 굴착공법에 따른 3차원적 거동을 평가하는 것이 일반적이거나, 3차원 수치해석에 있어 과도한 전산용량 및 해석소요 시간등의 한계로 인해 하중분담율을 적용한 2차원 해석이 많이 수행되어지고 있다. 그러나 2차원 해석시 적용되고 있는 하중분담율은 터널의 굴착 및 원지반 특성을 전혀 고려하지 않고 획일적으로 적용하고 있어 수치해석결과의 신뢰성에 문제가 제기되고 있다. 이러한 시점에서 Ringcut 공법에 대한 기존 해석법의 문제를 검토하고 하중분담

율의 보정치를 제시한 논문(장석부, 1998)이외에는 굴착공법에 따른 터널거동특성에 대한 연구가 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 하중분담을 산정연구에 앞서, 1-Arch 형태의 일반터널을 기준으로 비교적 동일한 시공조건에 적용되고 있는 중벽분할 굴착공법과 Ringcut 공법을 비교하여 각 굴착공법에 따른 터널거동 메카니즘 연구를 수행하였다. 이를 위해 터널 단면 및 지반조건을 동일하게 하여 3차원 유한요소해석을 수행하였고, 굴착공법에 따른 막장 안정 및 천단변위, 지표침하, 슛크리트 라이닝 응력에 대해 분석하였다. 이러한 연구를 통해 중벽분할과 Ringcut 공법의 전반적인 거동특성을 분석하였으며, 향후 굴착공법에 따른 하중분담을 산정시 영향요소를 확인하였다.

## 2. 기존 설계사례

현 국내 터널 설계에 있어 관통지층이 암반등급 IV이상일 경우 중벽분할 공법 및 Ringcut 공법을 적용하는 것이 보편화되어 있다. 그러나 공법적용이 현장조건에 따라 체계화되어 있지 않으며, 대부분 시공성의 편리함으로 인해 중벽분할보다 Ringcut 공법을 더 많이 적용하고 있다. 표 1은 지하철 시공사례분석 결과를 보이고 있다.

표 1. 제2기 지하철 시공사례분석(지하철 51개 공구)

구 분	제2기 지하철 표준제시안				실제 시공 사례			
	PD-2	PD-3	PD-4	PD-5	PD-2	PD-3	PD-4	PD-5
지 보 패 턴	PD-2	PD-3	PD-4	PD-5	PD-2	PD-3	PD-4	PD-5
적 용 지 반	토 사	풍화암	연경암	경 암	토 사	풍화암	연보통암	경 암
굴 착 공 법	링컷, 중벽	링컷, 상하	상하분할	전단면	링컷분할	링컷, 상하	상하분할	상하분할
굴 진 장(m)	1.0~1.5	1.2~1.8	1.35~2.0	1.5~2.5	0.6~0.8	0.8~1.2	0.8~1.35	1.0~2.0
스 트 루 트 (cm)	25	20	15	10	20~25	15~25	5~20	5~15
록 볼 트 길 이 (m)	3	3	3	random	3~5	3~5	3~5	random
콘 크 리 트 라이 닝 (cm)	30	30	30	30	30~40	30~50	30~50	30~50

표 1을 분석하면 풍화암 또는 토사층에 터널이 관통하는 경우 Ringcut 공법 및 중벽분할 공법이 적용되고 있으며, 지보재의 경우 슛크리트 두께 25cm, 록볼트 길이 4m로 비교적 동일하게 적용되고 있으나 1회 굴진장이 0.6m에서 1.5m까지 불규칙하게 적용되고 있다.

## 3. 3차원 유한요소 해석

### 3.1 대상현장

본 연구에서 적용한 터널 현장은 지하철 000정거장으로 상부에 충적층이 깊게 분포하고 터널은 풍화토를 통과하여 막장내 지반이 매우 불량한 현장이다. 그림 1은 대상현장의 중단면도를 보이고 있으며, 그림에서의 터널 1구간의 시공시점부가 본 연구에서 적용한 구간으로 연장은 약 55m이며, 전체 직경(D)은 11.7m이고 굴착단면적은 90~100m<sup>2</sup>, 편평율(H/B)은 0.76이다. 표 2에서는 연구에 적용한 지반물성을 보이고 있으며, 본 연구에서는 대상현장의 터널 설계시 적용한 물성을 사용하였다. 그림 2는 굴착공법에 따른 단면을 나타내고 있다.

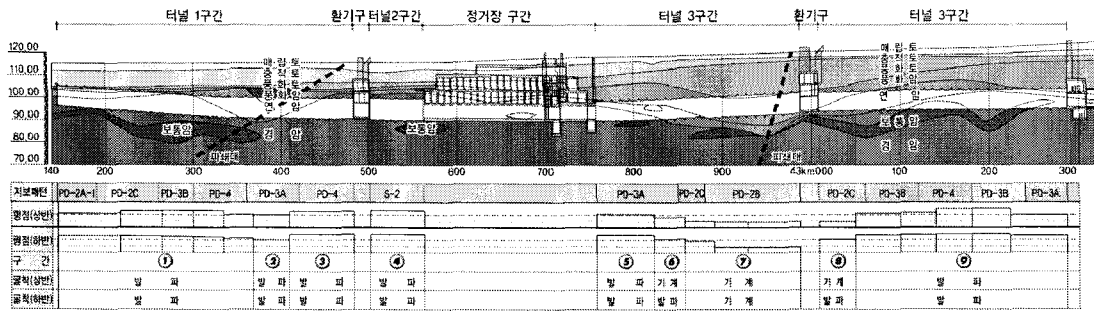


그림 1. 대상현장 중단면도(연구적용구간 - 터널1구간내 시공시점부)

표 2. 적용현장 암반등급별 지반 특성치

Class	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> ) 단위중량	c (kPa) 점착력	$\phi$ (deg) 내부마찰각	E (MPa) 지반변형계수	포아송비	비고
I	26	600	38	12,000	0.22	Hard Rock
II	25	450	35	7,500	0.25	Normal Rock
III	23	250	33	2,500	0.27	Soft Rock
IV	21	30	33	150	0.30	Weathered Rock
V	18	-	33	17	0.35	Alluvium
VI	18	-	30	13	0.35	Fill

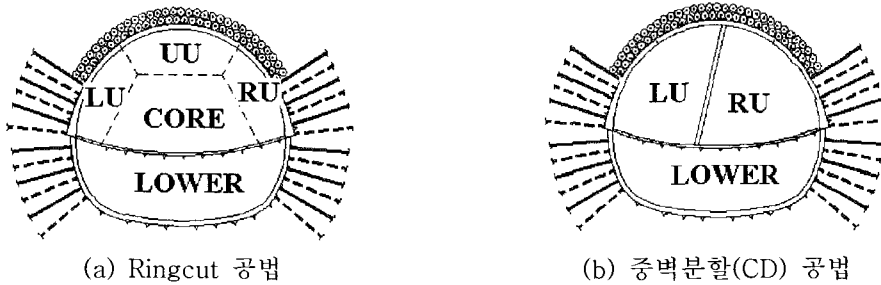


그림 2. 굴착공법에 따른 시공 단면

### 3.2 유한요소 모델링

#### 3.2.1 적용프로그램 및 모델링

3차원 유한요소해석을 이용하여 굴착공법 변화에 따른 터널의 역학적 거동 특성을 파악하기 위해 본 연구에서는 유한요소법을 근거로한 범용 프로그램 ABAQUS 6.4를 사용하였다. ABAQUS는 토목 및 기계 등 다양한 분야에 적용되는 프로그램으로서 특히 지반공학 분야에서 다양한 흙의 구성모델을 제공하고 소성거동 모사에 대한 알고리즘이 효율적이어서 지반구조물의 항복 후 거동 평가에 효율적이다. 해석 영역의 모델링에 있어서 터널은 지하철 000정거장의 시공조건 및 단면특성을 기본으로 상반터널의 굴착방법을 달리하여 모델링하였다.

해석영역은 터널중심으로부터 폭 3D(D=터널직경)이상 높이 1D 이상으로 하였고 종방향 수직 경계면은 x방향 구속, 횡방향 수직 경계면은 y방향 구속 및 바닥면 경계조건은 x,y,z 방향 구속을 하였다. 지반 및 지보재의 이산화에 있어 지반과 숏크리트 라이닝 모두 8절점 가감 적분 고체요소(C3D8R)를 적용하였다. 한편, 시공조건에서는 숏크리트와 록볼트가 지보재로 사용되나 해석의 편의상 록볼트는 모델링하지 않았으며, 록볼트에 대한 지보력을 숏크리트 설치두께를 증가하는 것으로 대신하여 모사하였다. 재료모델링에 있어 지반은 Mohr-Coulomb 파괴기준과 Davis(1968)가 제안한 비관련흐름 법칙을 적용하였고 지보재의 경우 탄성거동으로 적용하였다. 그림 3은 해석에 적용된 유한요소모델을 보여주고 있다.

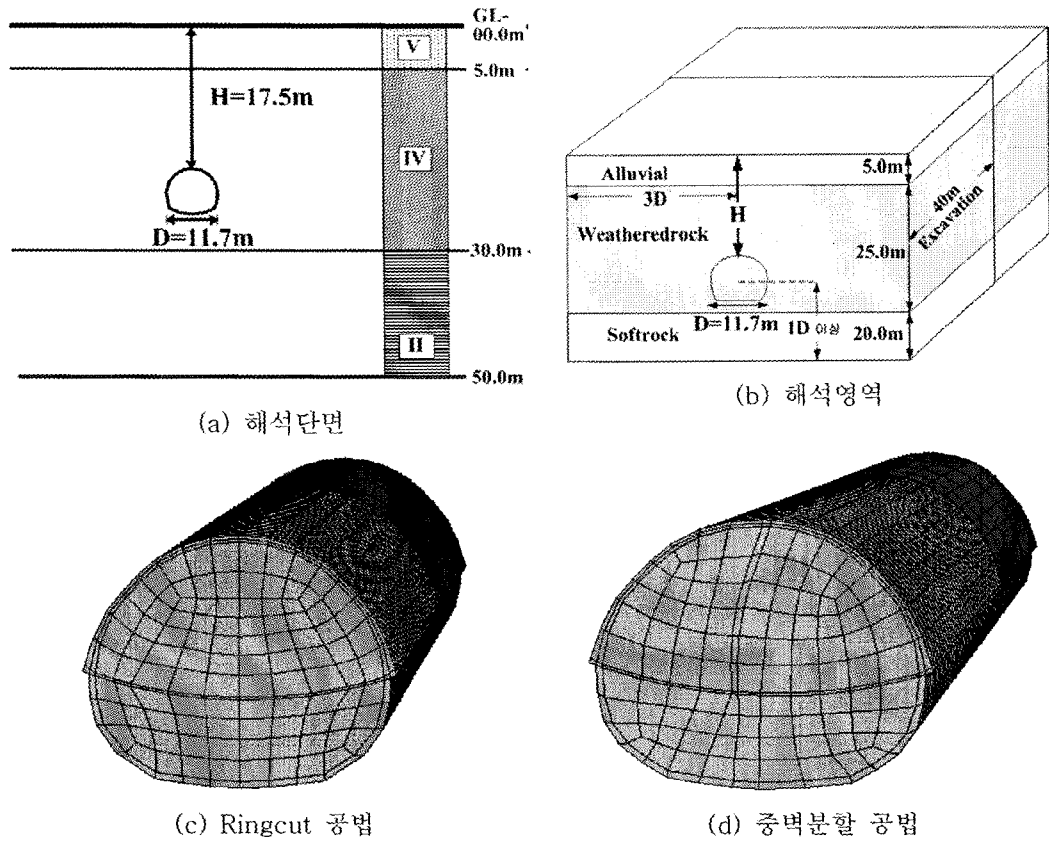


그림 3. 해석에 적용된 유한요소모델

### 3.2.2 시공과정의 모사

본 연구에서는 대상현장의 시공조건을 기반으로 굴착공법 변화에 따른 시공과정을 상세히 모사하였으며 구체적인 시공과정은 다음과 같다. 종방향 굴착 연장은 40m로 하여 막장진행에 따른 터널거동 분석이 충분하도록 하였으며, 연구를 위한 기본 조건으로 토피고 1.5D, 1회 굴진장을 1m로 하였다. 다음 그림 4와 그림5는 굴착공법별 시공과정 모델링을 보여주고 있다.

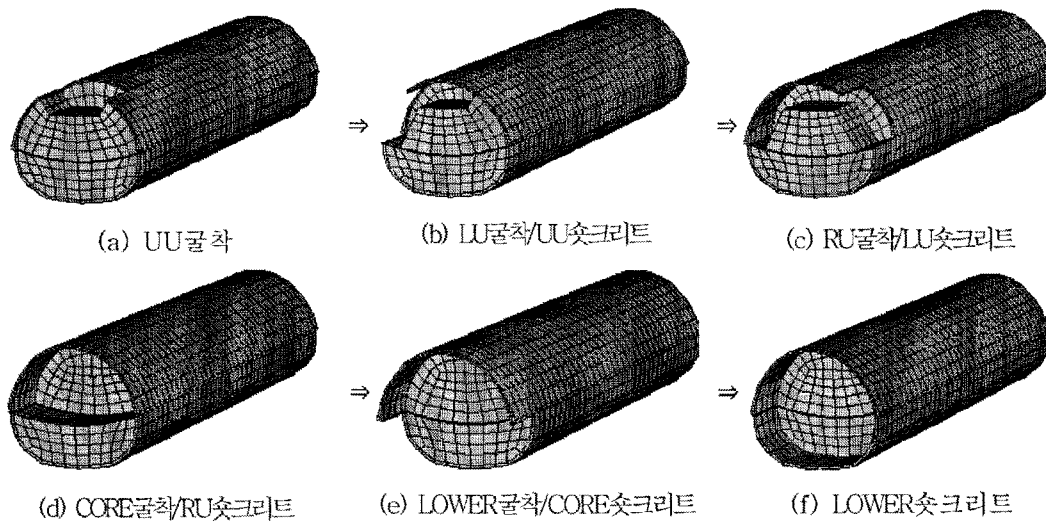


그림 4. Ringcut 공법 시공과정 모델링

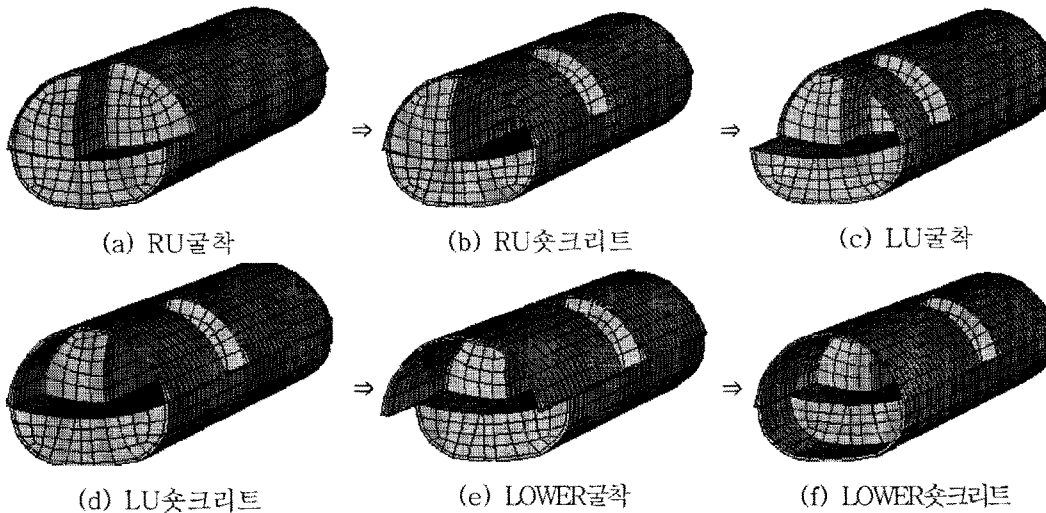


그림 5. 중벽분할(CD) 공법 시공과정 모델링

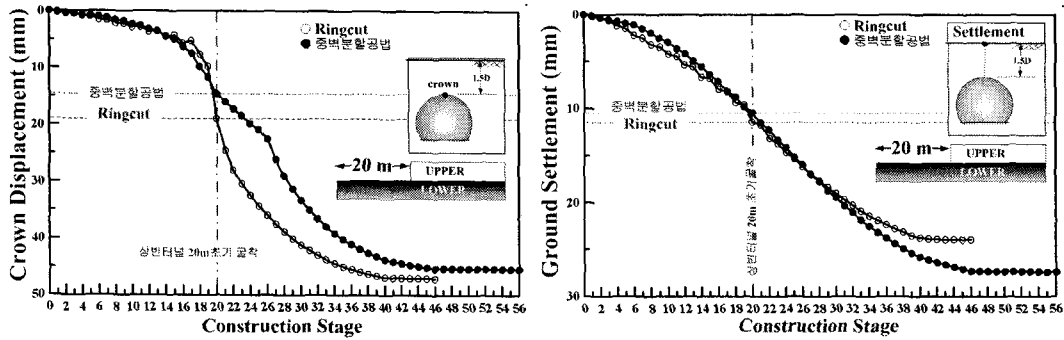
그림 4의 Ringcut 공법 시공과정은 UU 굴착→UU 슛크리트 타설→LU 굴착→LU 슛크리트 타설→RU 굴착→RU 슛크리트 타설→CORE 굴착→CORE 슛크리트 타설→LOWER 굴착→LOWER 슛크리트 타설의 순서로 시공되어 전단면 막장 굴착을 완료하며, 이때 후방 슛크리트 타설과 동시에 막장 굴착이 진행된다. 또한 1회 굴진장은 각각 1m로 상반 굴착과정 동안의 굴진과정별 이격거리는 1m이며 상반 최종 굴착인 CORE굴착과 LOWER굴착단계의 이격거리는 2m이다.

그림 5의 중벽분할(CD) 공법 시공과정은 RU 굴착→RU 슛크리트 타설→LU 굴착→LU 슛크리트 타설→LOWER 굴착→LOWER 슛크리트 타설의 순서로 시공되어 전단면 막장 굴착을 완료하며, 이때 후방 슛크리트 타설과 동시에 막장 굴착이 진행된다. 또한 1회 굴진장은 각각 1m이며, 상반굴착시 좌우이격거리는 0.5D로 하였고 상반 초기 굴착인 RU굴착과 하반 LOWER굴착단계의 이격거리는 15m이다.

#### 4. 굴착공법에 따른 터널거동 특성

본 연구에서는 굴착공법 변화에 따른 터널 시공시 역학적 거동 특성을 파악하기 위해 단면특성 및 지

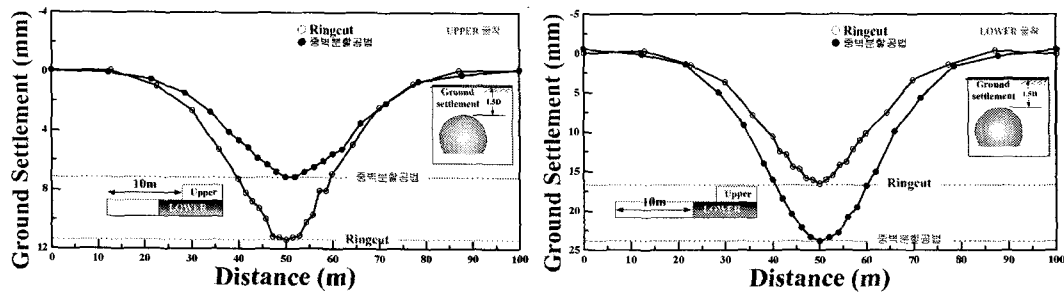
반조건을 동일하게 하여 시공단계별 막장위치에 따른 중방향 천단변위 및 지표침하, 슛크리트 라이닝 거동을 분석하였다. 또한 굴착공법에 따른 직접적인 비교를 위해 관통지층을 풍화도로 적용하였고, 중벽분할 공법 및 Ringcut 공법의 터널거동 비교 연구를 수행하였다. 모든 시공조건은 지하철 000정거장으로 동일하다. 그림 6은 굴착공법 변화에 따른 이력곡선을 보이고 있으며, 그림 7은 상.하반 10m 굴착시 횡단면 지표침하곡선을 나타내고 있다. 또한 그림 8은 굴착에 의한 막장수평변위를 보이고 있다.



(a) 갱구부 20m 천단변위 이력곡선 ( $\delta_{CR,v}$ )

(b) 갱구부 20m 지표침하 이력곡선 ( $\delta_{S,v}$ )

그림 6. 굴착공법에 따른 이력곡선



(a) 10m 상단 굴착시 횡단면 지표침하곡선 ( $\delta_{S,h}$ )

(b) 10m 하단 굴착시 횡단면 지표침하곡선 ( $\delta_{S,h}$ )

그림 7. 횡단면 지표침하곡선

그림 6에서 관찰할 수 있는 것과 같이  $\delta_{CR,v}$ 는 동일한 시공 조건상에서 막장굴착시 중벽분할공법이 Ringcut 공법보다 변위발생이 적은 것을 확인할 수 있다. 그러나  $\delta_{S,v}$ 는  $\delta_{CR,v}$ 와 다르게 굴착공법에 따른 큰 차이를 보이지 않는데, 이는 지표침하의 경우 천단변위 뿐만 아니라 막장수평변위의 영향을 받아 산정된 결과라 판단할 수 있다. 즉, 막장수평변위는 동일 막장에서 굴착위치와 시점이 언제인가에 따른 영향이 가장 크기 때문에 그림 6의  $\delta_{S,v}$  결과는 막장위치만을 고려한 것 이어서 변위차이가 크지 않다는 것을 확인할 수 있다. 그림 7에서와 볼 수 있듯이 굴착공법에 따른 지표침하 양상은 종단면 결과보다는 횡단면 침하곡선을 통해 변위차이를 판단할 수 있으며, 그림 7(a)의 막장초기 굴착에서는 천단 변위와 같이 Ringcut 공법이 중벽분할공법보다 변위발생이 더 크지만, 그림 7(b)의 막장굴착이 완료된 상태에서는 천단변위와 다르게 중벽분할공법이 Ringcut 공법보다 지표침하가 더 큰 것을 보여 앞서 언급한 것과 같이 막장수평변위 영향이 있음을 판단할 수 있다. 이러한 결과는 그림 8에서 보여지며 중벽 분할 공법이 Ringcut 공법보다 막장수평변위가 더 크게 발생하는 것을 확인할 수 있다.

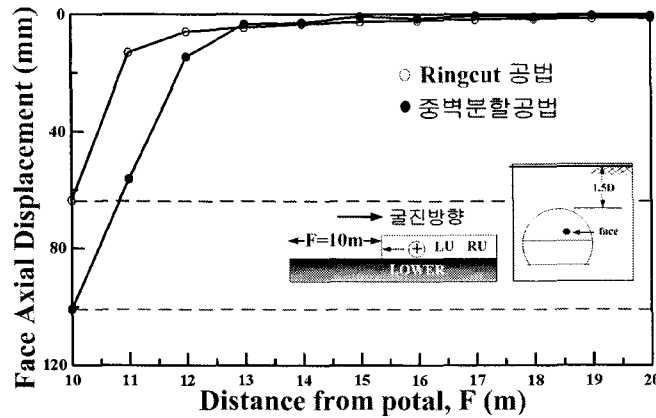
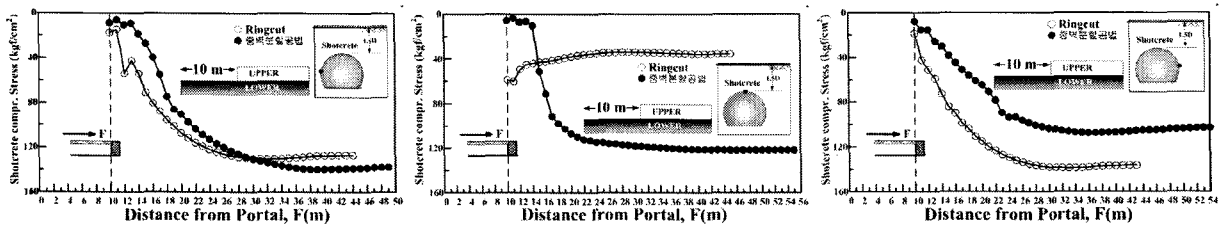


그림 8. 굴착공법에 따른 막장수평변위

다음의 그림 9는 종방향 10m지점 슛크리트 라이닝의 굴착공법에 따른 압축응력 경시변화를 나타내고 있으며, 그림 10은 중벽분할공법과 Ringcut 공법의 슛크리트 응력도를 나타낸 것으로 40m 최종굴착 후 후방 0.5D 지점에서의 하반굴착이 완료된 직후의 결과이다.



(a) LU\_Springline(right)

(b) Crown

(c) RU\_Springline(right)

그림 9. 종방향 10m지점 슛크리트 라이닝의 굴착공법에 따른 압축응력 경시변화

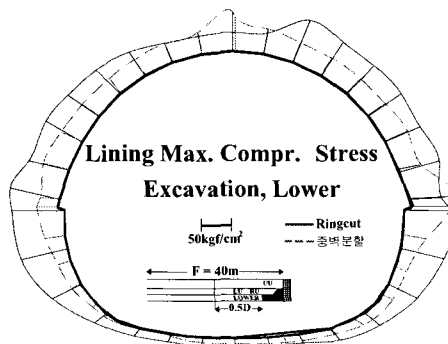


그림10. Ringcut vs 중벽분할공법 슛크리트 라이닝 응력도

변위이력곡선의 결과는 그림 9의 종방향 10m지점 슛크리트 라이닝의 굴착공법에 따른 압축응력 경시변화를 통해서도 보여지고 있으며, 그림 6의 결과에서와 같이 변위발생이 작을수록 응력이 크게 발생하는 것을 나타내고 있다. 이러한 결과를 바탕으로 천단변위에 있어 중벽분할공법이 Ringcut 공법보다

변위 발생이 적고, 지표침하에서는 중벽분할공법과 Ringcut 공법의 침하 차이가 비교적 크지 않은 것을 확인하였다.

그림 11은 시공시점으로부터 중방향 10m 지점의 단면굴착이 완료된 직후의 Ringcut 공법과 중벽분할공법의 막장부 소성변형률을 보이고 있다.

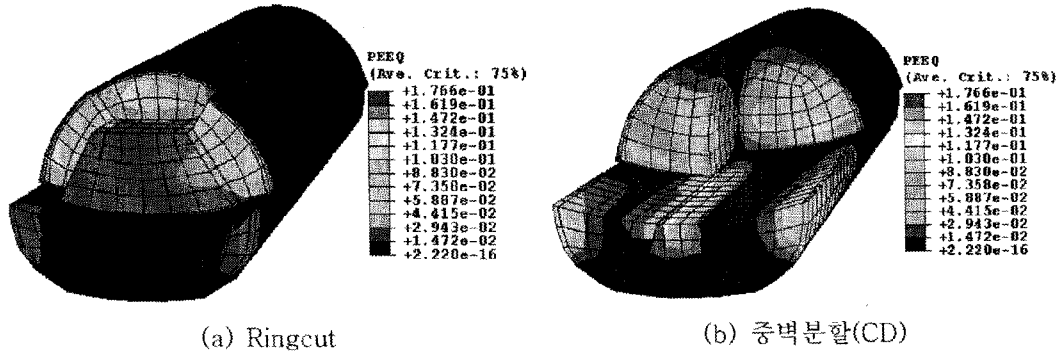


그림 11. Ringcut 공법과 중벽분할공법의 막장부 소성변형률

그림 8과 11에서 확인할 수 있는 것과 같이 막장 수평변위 및 소성변형은 천단과 지표침하 결과와 달리 중벽분할공법이 Ringcut 공법보다 더 크게 발생하는 것을 확인할 수 있다. 즉 본 연구 결과를 토대로 Ringcut 공법은 막장면 안정에 유리하며 중벽분할공법은 주요 지장물 침하 억제에 유리한 것으로 판단할 수 있다. 그러나 일반적으로 터널 설계시 지반조건에 따라 중벽분할공법 및 Ringcut 공법이 고려될 때, 시공성이 유리한 조건의 Ringcut 공법을 대부분 적용하고 있는 시점에서 Ringcut 공법 적용시 터널 천단부 보강이 필수적 요소로 적용해야 한다.

## 5. 결론

1-Arch 형태의 일반터널을 기준으로 비교적 동일한 시공조건에 적용되고 있는 중벽분할 굴착공법과 Ringcut공법을 비교하여 각 굴착공법에 따른 터널거동 메카니즘 연구를 수행하였다. 이를 위해 터널 단면 및 지반조건을 동일하게 하여 3차원 유한요소해석을 수행하였고, 굴착공법에 따른 막장 안정 및 천단변위, 지표침하, 슛크리트 라이닝 응력에 대해 분석하였다. 이러한 연구를 통해 중벽분할 굴착공법과 Ringcut공법의 전반적인 거동특성을 분석하였으며, 향후 굴착공법에 따른 하중분담을 산정시 영향요소를 확인하였다. 다음은 세부 연구 결과를 보이고 있다.

- 굴착으로 인한 전반적인 터널 변위발생은 중벽분할공법이 Ringcut 공법에 비하여 작은 것으로 나타났다.
- 천단변위 발생은 중벽분할공법이 Ringcut 공법보다 작은 것으로 나타났지만 터널내 막장 안정성 있어 Ringcut 공법이 중벽분할공법보다 더 변위를 억제하는 것으로 나타났다.
- Ringcut 공법의 경우 막장안정에 유리하며, 중벽분할공법은 주요 지장물 침하억제에 유리한 것을 알 수 있다.
- 중벽분할공법 대신 시공성이 우수한 링컷공법 적용시 터널 천단부 보강에 주의해야 한다.

## 감사의 글

본 연구는 2005년 건설교통부가 출현한 한국형 싱글셀 터널공법 메카니즘 이론 정립 및 설계/해석 요소기술 개발(과제번호 : C103A1000026-04A0200-02320)과 IT 기반의 지하공간 지보시스템 설계기술 개발(과제번호 : C104A1010001-05A0501-00220)에 의한 것이며 연구비 지원에 감사드립니다.



## 참 고 문 헌

1. 장석부, 문현구(1998), “터널 설계조건을 고려한 하중분배율의 정량적 산정에 관한 연구”, *한국지반공학 회 논문집*, 제14권 5호
2. 서울시 지하철 000정거장 실시설계 보고서
3. *ABAQUS users manual, Version 6.5. (2005)*. Hibbitt, Karlsson, and Sorensen, Inc., Pawtucket, Providence, R.I.
4. Marcio Muniz de Farias(2004), “Displacement control in tunnels excavated by the NATM : 3-D numerical simulations”, *Tunnelling avd Underground Space Technology*, Vol 19, pp. 283~293
5. G. Galli, A. Grimaldi, and A. Leonard(2004), “Three-dimensional modelling of tunnel excavation and lining”, *Computers and Geotechnics*, Vol. 31, pp. 171~183
6. M. Karakus and R.J. Fowell(2003), “Effect of different tunnel face advance excavation on the settlement by FEM”, *Tunnelling avd Underground Space Technology*, Vol. 18, pp. 513~523