RPUM과 유리섬유 파이프로 막장을 보강한 토사터널의 변형거동

The deformation behavior of soil tunnels reinforced with RPUM and fiberglass pipes

남기천*1, 허 영*2, 김치환*3, 유광호*4
Nam, Gi-Chun · Heo, Young · Kim, Chi-Whan · You, Kwang-Ho

Abstract

In this paper, deformation behavior of shallow subway tunnel excavated in weathered soil and reinforcement effects of longitudinal support measures are investigated via three dimensional FDM analysis. Two excavation methods, half-face excavation and full-face excavation, are considered in simulation to study the influences of excavation methods on tunnel deformation behavior. In addition, the reinforcing effects of RPUM and fiberglass pipe are compared. Face extrusion, covergence, preconvergence, and sidewall displacement are investigated to analyze tunnel deformation behavior, and surface settlement is used to analyze the effects of excavation methods and longitudinal supports measures. The simulation results show that half-face excavation induces larger convergence, preconvergence, sidewall displacement, surface settlement than full-face excavation, while full-face excavation induces larger extrusion than half-face excavation. In addition, under same excavation method, all displacements are larger when RPUM is only used for longitudinal support than when RPUM is jointly used with fiberglass pipes.

Keywords: Extrusion, convergence, preconvergence, surface settlement, 3D FDM analysis, RPUM (Reinforced Protected Umbrella Method), fiberglass pipe

요 지

본 연구에서는 풍화토층에 굴착된 지하철 터널의 변형거동과 종방향 지보재의 보강효과가 3차원 유한차분해석에 의해 조사되었다. 굴착방법이 터널 변형거동에 미치는 영향을 조사하기 위해서 반단면 및 전단면의 2가지 굴착방법이 고려되었다. 또한, 우산형 막장보강법 (RPUM) 및 유리섬유 파이프의 보강효과가 비교되었다. 터널 변형거동을 분석하기 위해 막장변위, 내공변위, 선행변위 및 측벽변위가 조사되었고, 굴착방법 및 종방향 지보재의 효과가 지표침하량를 사용하여 분석되었다. 해석 결과, 반단면 굴착이 전단면 굴착 보다 더 큰 내공변위, 선행변위, 측벽변위를 야기시키며, 반면 막장변위는 전단면 굴착이 반단면 굴착에 비해 더 크게 발생됨을 알았다.

*1 정회원, 수원대학교 토목공학과 대학원, 박사과정
*2 수원대학교 토목공학과, 교수
*3 우석대학교 토목공학과, 교수
*4 정회원, 수원대학교 토목공학과, 교수

또한, 같은 굴착방법에서는 RPUM만이 사용되었을 때가 RPUM이 유리섬유 파이프와 같이 사용되었을 때 보다 모든 변위가 더 커졌다.

주요어: 막장변위, 내공변위, 선행변위, 지표침하, 3차원 유한차분해석, 우산형 막장보강법, 유리섬유 파이프

1. 서론

도심지에서의 지하구조물은 지하철, 지하 상하수도 설비, 가스관로, 통신 및 전력 공급시설 등이 있으며 이러한 터널은 기존의 빌딩구조물, 도로, 고속도로, 철도 등을 횡단하기도 한다. 도심지에서 지하구조물을 구축하기 위해서는 크리프, 풍화, 팽창과 같은 특수한 거동을 하는 점성토, 연약한 함수층의 토사와 연약한 암반과 같은 다양하고 복잡한 지반에서의 터널 굴착이 필요하게 되었고 불량한 지반조건으로 인하여 터널시공시에 과도한 변위와 이에 따른 터널 붕괴, 주변지반의 지표침하가 발생할 수 있다.

국내에서 대부분의 터널은 NATM공법으로 시공하고 있어 NATM공법은 터널을 보강한 후에 보강작업을 하게 된다. NATM 터널에서 이용하는 보강공법은 록볼트, 숏크리트, 강지보 등의 지보재로 굴착터널주변과 막장 후방의 보강에 국한되는데 지반이 불량한 경우에는 NATM 공법만으로는 터널의 안정유지가 불충분하므로 터널 천단부와 막장 전방을 선행보강하여 막장의 지지효과를 증대시켜 터널의 안정성을 확보하는 막장 전방보강공법이 사용되고 있다. 막장 전방을 보강하는 대표적인 방법으로는 RPUM (Reinforced Protected Umbrella Method)과 막장전방을 유리섬유 파이프로 보강하는 방법이 있다.

또한 막장의 지지효과는 터널 굴착방법에도 영향을 받는 것으로 알려져 있으며, 터널의 변형거동 또한 터널 굴착방법의 영향을 받는다.

RPUM은 막장 전방에서 굴착될 전방부분에 마치 펼쳐진 우산모양으로 강관을 지중에 삽입시키고 제트그라우팅으로 보강하여 굴착될 터널 주변의 토사를 강화시키는 방법이다. 굴착될 터널주변을 사전에 보강한 후에 터널을 굴착하기 때문에 연약한 토사층에서도 터널시공이 가능하다. 막장 전방을 유리섬유 파이프로 보강하는 공법은 연약한 토사층에서 터널을 굴착하는 경우에 막장면이 터널내부로 심하게 변형되어 지표침하가 크게 발생하는 경우에 적용할 수 있는 공법이다. 특히 막장 전방을 유리섬유 파이프로 보강하는 공법은 RPUM에 추가하여 시공하면 터널의 역학적 안정성을 더욱 높일 수 있다 (Peila et al., 1996).

따라서 본 연구에서는 모래자갈층, 풍화토, 풍화암 등 불량한 지반에 시공되는 얕은 심도 터널의 변형거동 및 막장 전방 보강 요소의 보강효과를 3차원 유한차분해석을 통하여 분석하였다. 굴착방법이 터널의 변형거동에 미치는 영향을 분석하기 위하여 전단면 굴착, 상하반단면 굴착에 대한 해석을 수행하였다. 또한, 막장 전방 보강 요소의 보강 효과를 분석하기 위하여 RPUM 보강시, RPUM 및 유리섬유 파이프 보강시에 대한 해석을 각각 수행하여 결과를 비교하였다. 막장변위 (extrusion), 내공변위 (convergence), 선행변위 (preconvergence), 측벽변위를 통하여 터널 변형 거동을 분석하였으며, 지표침하를 분석하여 각 굴착방법 및 보강요소가 지표침하에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 해석 조건 및 해석 모델

2.1 지반 조건 및 입력 물성

지층은 지표로부터 실트 12.5m, 자갈층 4.0m, 풍화토층 5.0m, 풍화암 3.5m, 풍화암 아래는 연암으로 구성되어 있다. 터널심도는 터널천단을 기준으로 지표로부터 15m 아래에 위치하며, 상반은 풍화토층, 하반은 풍화암층을 통과한다. 그림 1에 해석 지역의 지층 분포를 나타내었으며, 각 지층의 입력 물성은 표 1과 같다.

2.2 터널 단면 및 지보 패턴

터널 단면은 폭 10.6m, 높이 8.5m의 복선 지하철 단면이며 (그림 2), 상하반분할 굴착시 상반과 하반 높이는

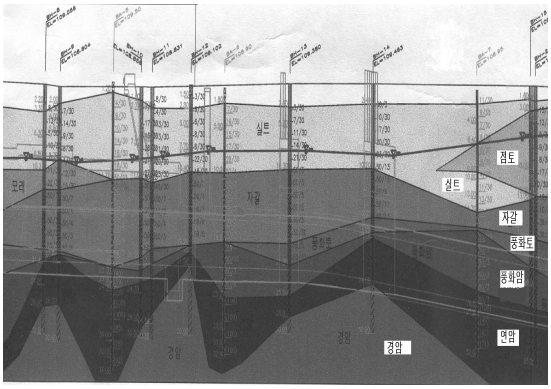


그림 1. 지층분포

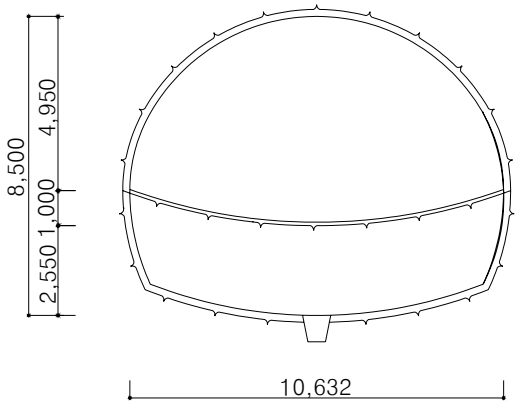


그림 2. 터널 단면

표 1. 각 층의 입력물성

구 분	변형계수 (tf/m^2)	포아송비	점착력 (tf/m^2)	마찰각 (°)	단위중량 (t/m^3)
실 트	1,000	0.30	4.0	15	1.85
자 갈	7,000	0.25	0.0	35	1.90
풍화토	5,000	0.35	2.0	30	2.00
풍화암	15,000	0.33	5.0	33	2.10
연 암	30,000	0.30	20.0	35	2.40

각각 5.95m, 2.55m이다. 표 2의 지보패턴으로 터널을 보강하였다.

2.3 해석 모델

해석 프로그램은 3차원 유한차분해석 프로그램인 FLAC 3D Version 2.0을 사용하였다 (Itasca consulting group, inc., 1997). 터널 단면은 터널 중심축을 따라 대칭을 이루므로 해석 시간 단축을 위해 수직 반단면만 해석에 고려하였다. 터널 상부 영역은 지표면까지 모델링하였고, 이 때 토피 두께는 15m로 터널 높이의 약 2배이며, 터널 하부영역은 42m로 터널 높이 8.5m의 약 5배로 설정하였다. 터널 우측 영역은 34m로 터널 폭 10.6m의 약 3배로 설정하였으며, 터널 진행방향 영역은 100m로 하였다. 그림 3은 상하 반단면 굴착시 해석 모델과 전단면 굴착시 해석모델이다.

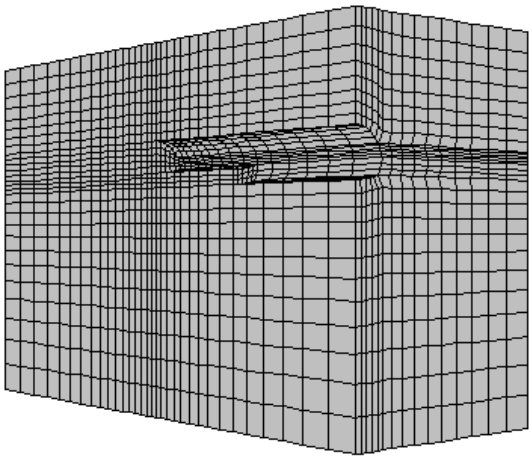
표 2. 지보 패턴

Shotcrete 두께			20cm(강섬유보강)
Rock Bolt (측벽 일부에 설치)	길 이(m)		4.0
	간격	종방향(m)	0.8
		횡방향(m)	1.2
강재지보	규 격		H-100×100×6×8
	설치간격(m)		0.8
RPU	길 이(m)		12.0
	설치 영역		상부 60
	설치 각도		10이내
	간격	종방향(m)	8.0
		횡방향(m)	0.4
유리섬유 파이프	밀도(본/m^2)		1.0
	길 이(m)		8.0

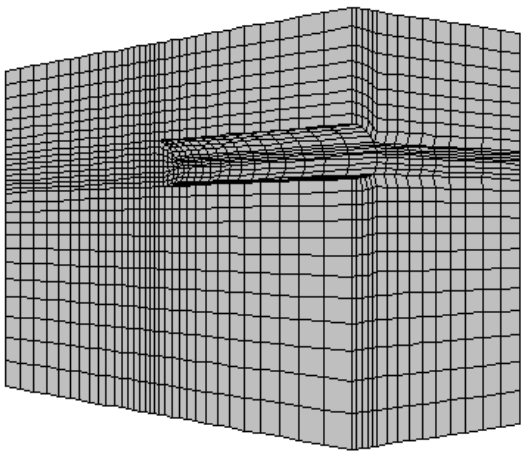
모델의 좌우, 전후 경계면은 수평방향 변위를 구속하였고, 모델의 바닥경계면은 수직방향 변위를 구속하였다. 지표면은 자유면으로 설정하였다. 전체 요소수는 13,440개, 절점수는 15,776개이다.

2.4 해석 순서 및 지보재 모델링

해석은 초기응력 (측압계수 0.5) 형성을 위한 초기화, 굴착 및 보강 순으로 수행하였다. 상하반단면 굴착시 굴착 및 보강은 상반과 하반 두 단계로 해석하였으며, 상반



(a) 상하반단면 굴착시



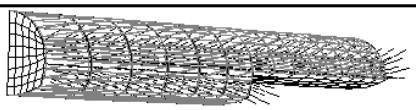
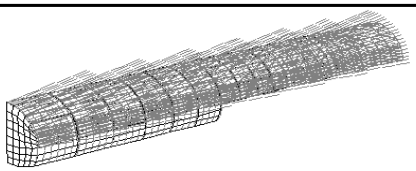
(b) 전단면 굴착시

그림 3. 해석모델

은 48m 굴진하였을 때, 하반은 상반의 20m 후방까지 굴착한 것으로 가정하였다. 반면 전단면 굴착시에는 48m를 한번에 굴착하는 것으로 모델링하였다.

지보재는 굴착과 동시에 설치하였으며, 설치된 지보재 형상 및 각 지보재 요소는 표 3과 같다. 숏크리트, 록볼트, 강지보는 막장이 있는 위치까지 설치하였다. RPUM의 강관은 보요소로 모델링하였으며, 그라우팅 보강은 터널단면당 대칭성 좌우 60영역에 강관 직경과 같은 두께 10cm의 쉘요소로 모델링하였다. 유리섬유 파이프는 풍화토층을 통과하는 상반에만 설치하였으며, 각각을 모델링하지 않고 식 (1)을 이용하여 등가의 점착력으로 환산하여 보강영역에 적용하였다 (Grasso et al., 1993).

표 3. 지보재 요소의 모델링

숏크리트, 록 볼 트	 · 숏크리트: Shell요소 (Hard 숏크리트 물성으로 한번에 설치) · 록볼트: Cable요소
강지보, RPUM, 유리섬유 파이프	 · 강지보 : Beam 요소 (상하반 굴착시 하반굴착후 상반의 강지보와 체결함) · RPUM –강관: Beam요소 –그라우팅 보강영역: Shell 요소 · 유리섬유 파이프 보강영역: 점착력 증가

$$C' = \left(C + \frac{1+\sin\Psi}{2\cos\Psi}\right) \times \Delta\sigma_3 \qquad (1)$$

여기서, C: 풍화토의 점착력 (2 tonf/m^2),

Ψ: 풍화토의 마찰각 (30°),

$\Delta\sigma_3$: 유리섬유 파이프 보강에 따른 최소주응력 증가량

을 각각 나타낸다.

3. 해석 결과

3.1 굴착방법에 따른 터널 변형거동

그림 4는 전단면굴착시와 상하반단면굴착시 터널 변위와 지표침하 곡선이다. 상하반단면굴착시 발생하는 변위

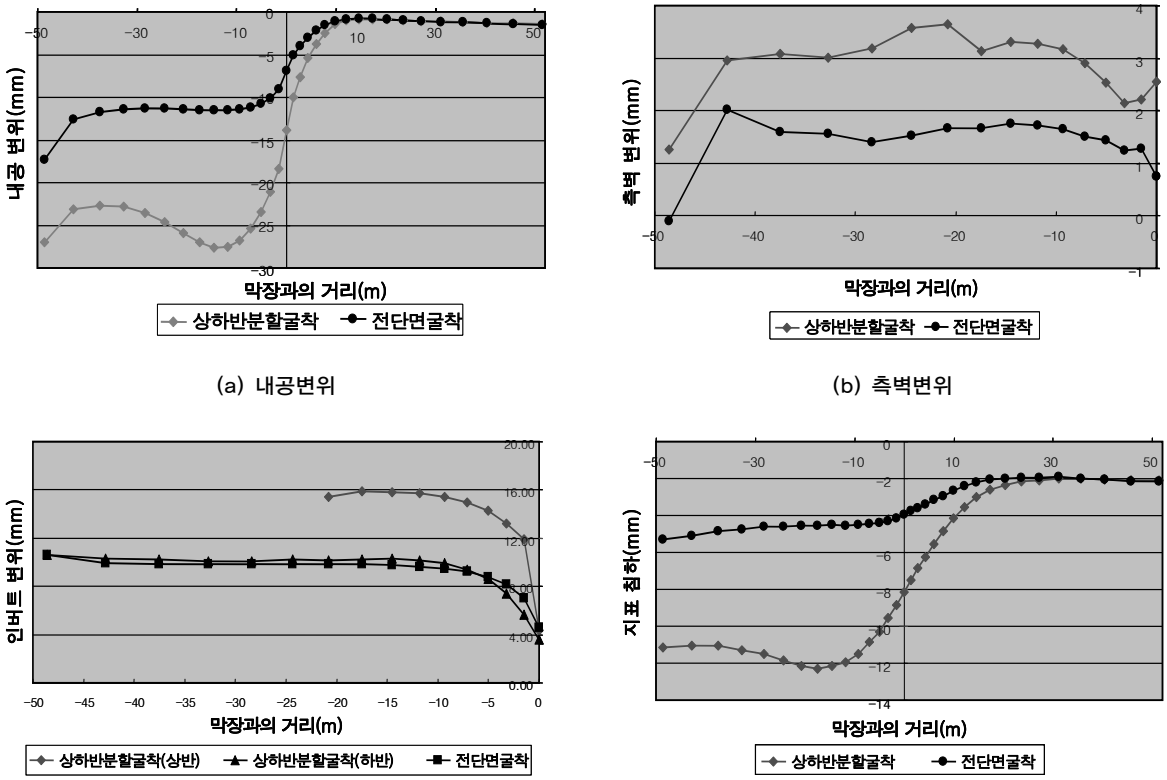


그림 4. 굴착방법에 따른 변위비교 (RPUM 유리섬유 파이프 보강시)

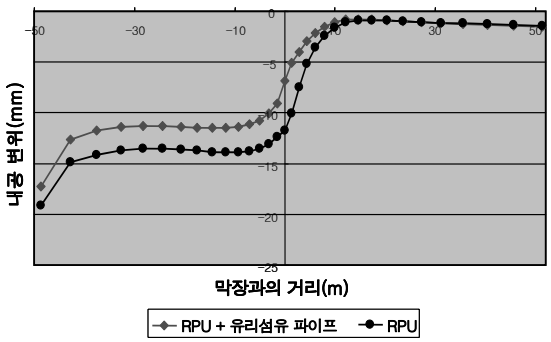
가 전단면굴착시 발생하는 변위보다 크다. 이는 굴착되지 않은 하반에 의해 인버트 폐합시기가 늦어지기 때문에 발생하는 현상이다 (Lunardi, 2000). 내공변위는 두 경우 모두 RPUM보강의 끝부분 (약 12m 지점)에서 급격히 증가하기 시작한다. 전단면굴착시 막장후방 1D거리에서 일정한 값으로 수렴되는 반면, 반단면굴착시 하반의 중간지점 (−14.5m)에서 최대값을 보인 후 감소하는 경향을 보인다.

측벽변위는 측압계수가 0.5이므로 내공변위와 인버트 변위에 비해 변위발생량이 적으며 막장과의 거리 2m 이상에서는 막장과의 거리에 관계없이 일정한 값을 보인다. 인버트 변위는 상하반단면굴착시 상반의 바닥에서 크게 발생하며 하반이 굴착된 후에는 전단면굴착시 발생하는 인버트 변위와 유사한 값을 보인다. 지표침하는 반단면굴착시 발생량이 전단면굴착시 발생량의 약 2배이다.

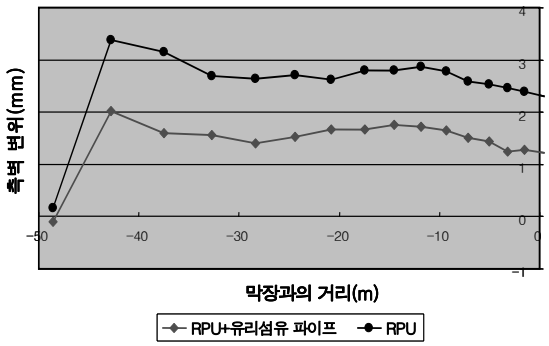
3.2 보강방법에 따른 터널 변형거동

그림 5는 전단면 굴착시 막장 전방 보강방법에 따른 변위 변화를 보여준다. 막장전방에서 발생하기 시작하는 선행변위는 두 경우 모두 RPUM보강의 끝부분에서 급격히 증가하나 지표침하는 막장전방 1.5D지점에서 증가하기 시작한다. 측벽변위와 인버트 변위는 발생량에서 차이를 보이지만 발생 양상은 두 해석의 경우가 유사하다.

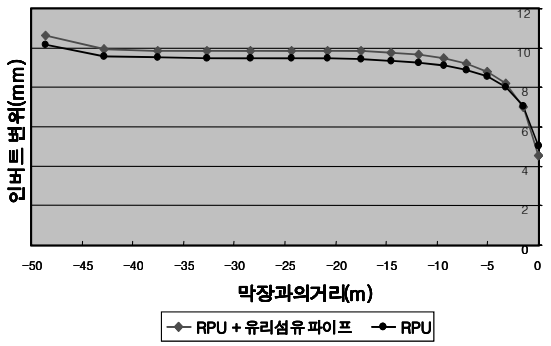
RPUM만으로 막장 전방을 보강할 때의 변위가 RPUM 외에 유리섬유 파이프로 막장면 전방을 보강한 것보다 큰 변위가 발생한다. 이는 막장 전방 코어 (advance core)를 보강하면 지보재가 이미 설치된 막장 후방에서 발생하는 내공변위와 측벽변위 뿐만 아니라 지표침하도 제어할 수 있음을 보여준다.



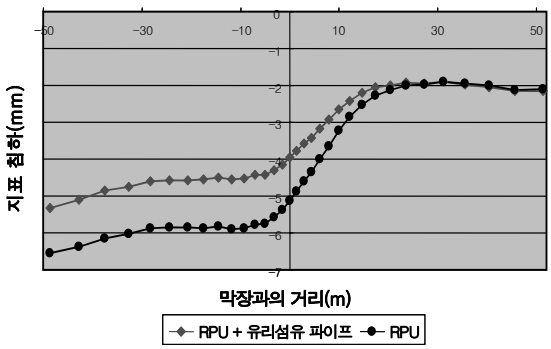
(a) 내공변위



(b) 측벽변위



(c) 인버트 변위



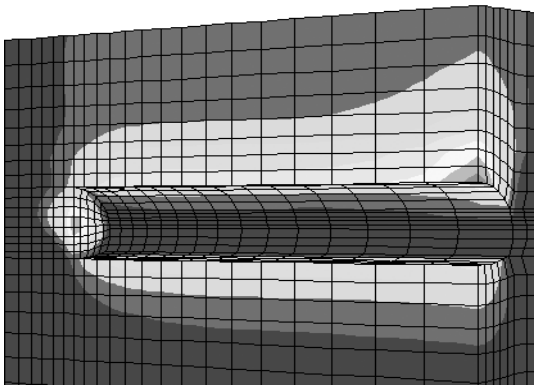
(d) 지표침하

그림 5. 막장 전방 보강 방법에 따른 변위비교 (전단면굴착시)

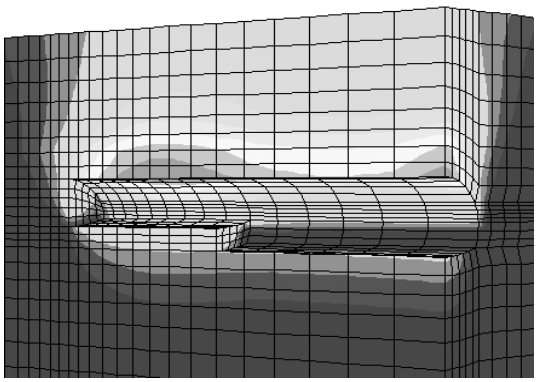
3.3 해석결과 비교

그림 6은 세 가지 해석 경우에 따른 변위도이다. 상하반단면 굴착시 가장 큰 변위는 터널 천단에서 발생하나 전단면 굴착시에는 막장면에서 수평방향 변위 (extrusion)가 발생한다. 또한 반단면 굴착시 터널굴착의 영향범위가 전단면굴착시보다 더욱 크게 나타난다. 이는 굴착되지 않고 남아있는 하반으로 인해 인버트 폐합시기가 늦어져 변위 발생량이 증가하는데 비해, 굴착되지 않은 하반의 변위 제어 효과가 크지 않음을 의미한다. 이러한 현상은 그림 7의 최소주응력도를 통해서도 확인할 수 있다. 즉, RPUM과 유리섬유파이프로 막장전방을 보강한 전단면굴착시, RPUM과 유리섬유파이프로 막장전방을 보강한 상하반단면굴착시, RPUM로 막장전방을 보강한 전단면굴착시 터널 주변의 최소주응력도로 막장면에 작용하는 최소주응력 최소값은 각각 0.0028, 0.0016, 0.0025MPa로 상하반단면 굴착시 막장면에 작용하는 최소주응력이 세 경우중 최소값으로 하반의 막장구속효과가 가장 작음을 보여준다.

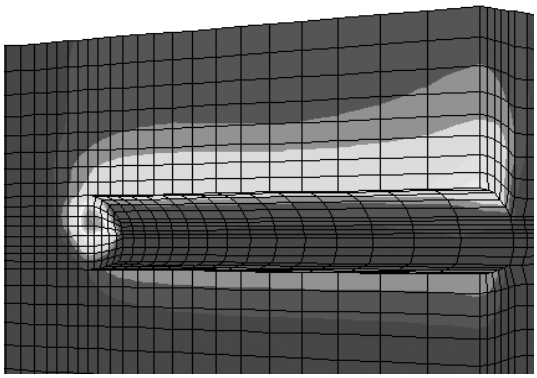
그림 8에서 세 가지 해석경우에 따른 각 변위의 최대값을 비교하였다. 각 그래프에서 A, B, C는 각각 RPUM과 유리섬유파이프로 막장전방을 보강한 상하반분할굴착시, RPUM만으로 막장전방을 보강한 전단면굴착시, RPUM과 유리섬유파이프로 막장전방을 보강한 전단면굴착시의 변위이다. 막장변위를 제외한 모든 변위는 상하분할굴착시 발생량이 가장 크다. 특히 선행변위는 A, B, C가 각각 13.9, 11.7, 6.9mm로 RPUM과 유리섬유파이프로 막장전방을 보강했음에도 불구하고 상하반분할굴착시의 변위가 가장 크게 발생한다. 지표침하 또한 상하반분할굴착시 발생량이 가장 크다.



(a) RPUM과 유리섬유 파이프로 보강한 전단면굴착

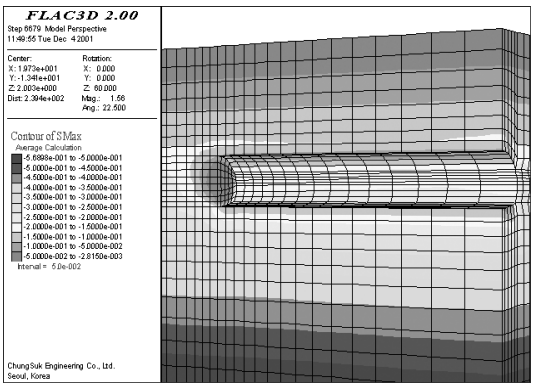


(b) RPUM과 유리섬유 파이프로 보강한 상하반단면분할굴착

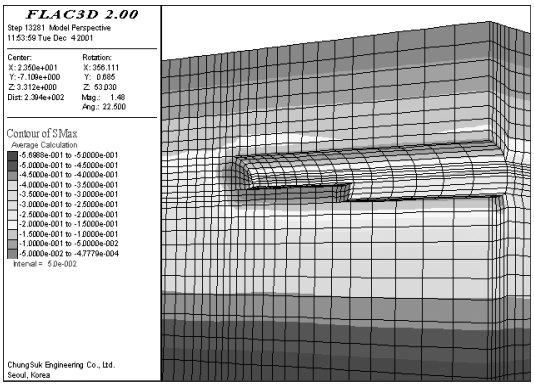


(c) RPUM으로 보강한 전단면굴착

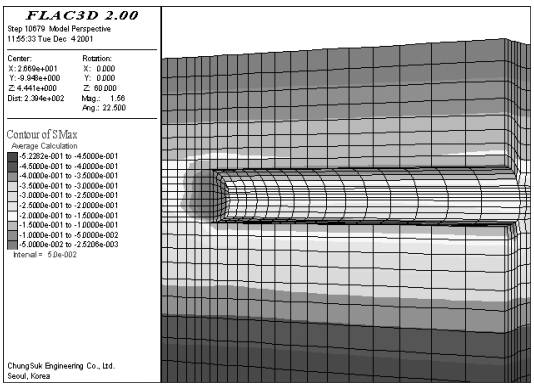
그림 6. 변위도



(a) RPUM과 유리섬유 파이프로 보강한 전단면굴착

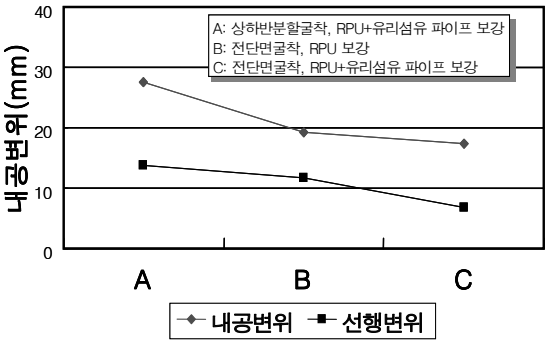


(b) RPUM과 유리섬유 파이프로 보강한 상하반단면분할굴착

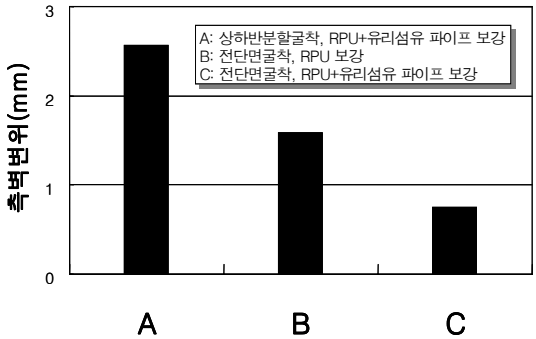


(c) RPUM으로 보강한 전단면굴착

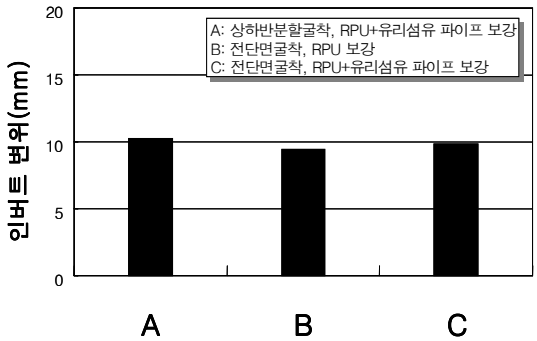
그림 7. 최소주응력도



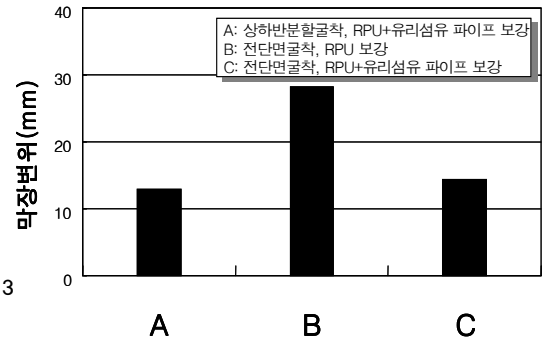
(a) 내공변위



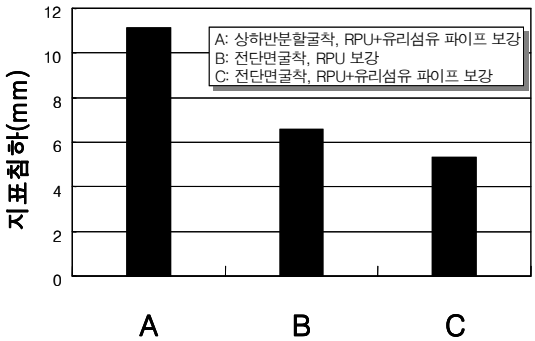
(b) 측벽변위



(c) 인버트 변위



(d) 막장변위



(e) 지표침하

그림 8. 해석 경우에 따른 변위 비교

4. 결론

모래자갈층, 토사층, 풍화암층을 통과하는 터널의 변형거동을 분석하기 위하여 3차원 해석을 수행하였다. 굴착방법이 터널의 변형거동에 미치는 영향을 분석하기 위하여 상하반분할굴착과 전단면굴착에 대한 해석을 각각

수행하였다. 또한 막장 전방 보강 요소가 터널의 변형거동에 미치는 영향을 분석하기 위하여 RPUM만으로 막장 전방을 보강한 경우와 RPUM과 유리섬유 파이프로 동시에 보강한 경우에 대한 해석을 수행하였다. 해석결과 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 터널의 변형거동은 굴착방법에 영향을 받는다. 동일한 보강요소로 막장 전방을 보강한 토사터널의 경우 전단면굴착시에 비해 상하반단면굴착시 터널 주변의 변위가 크게 발생한다. 지표침하 또한 전단면굴착시 발생량이 상하반단면굴착시 발생량보다 적다. 이는 상반의 막장 구속효과가 제대로 발휘되지 못하여 터널 주변 변위를 제어하지 못하기 때문이며, 이에 따라 터널 굴착의 영향 범위가 더 넓어지기 때문이다. 따라서 토사터널은 변위 억제, 터널 안정성 증대 및 지표침하 억제를 위하여 상하반단면 굴착보다는 전단면굴착방법을 적용하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.
2. 또한 터널의 변형거동은 막장전방 보강방법에 영향을 받는다. 동일한 굴착법 적용시 RPUM만으로 막장 전방을 보강한 경우와 RPUM과 유리섬유파이프로 동시에 막장 전방을 보강한 경우 터널 주변의 변위와 지표침하 모두 전자의 경우에 더 크게 발생하였다. 이는 막장 전방 코어 (advance core)를 보강함으로써 지보재가 이미 설치된 막장 후방에서 발생하는 내공변위와 측벽변위 뿐만 아니라 지표침하도 억제할 수 있음을 보여준다.

참고문헌

1. P. Grasso, G. Russo, S. Xu, S. Pelizza, 1993, "Un criterio per la valutazione speditiva del comportamento ndi gallerie mediante classificazione geomeccanica", Gallerie e Grandi Opere Sotterranee, Vol.39, pp.26-34.
2. D. Peila, P. P. Oreste, S. Pelizza, A. Poma, S., 1996, "Study of the influence of sub-horizontal fiber-glass pipes on the stability of a tunnel face", North American Tunnelling '96 (Ozdemir eds.), pp.425-431.
3. Itasca consulting group, inc., 1997, Fast lagrangian analysis of continua in 3 dimensions, Version 2.0, Minnesota, USA.
4. P. Lunardi, 2000, The design and construction of tunnels using the approach based on the analysis of controlled deformation in rocks and soils, Tunnels & Tunneling, ADECO-RS Approach.

남기천
수원대학교 토목공학과 대학원, 박사과정
thnam@hanafos.com

허 영
수원대학교 토목공학과 교수
huhyoung@mail.suwon.ac.kr

김치환
우석대학교 토목공학과 교수
kimcheen@korea.com

유광호
수원대학교 토목공학과 교수
khyou@mail.suwon.ac.kr