

# 저토피 구간의 신개념 고성능 터널지보시스템에 대한 연구

## New High-performance Supporting System of Shallow Tunnel in Soil

김 상 환<sup>1</sup> Kim, Sang-Hwan

윤 승 기<sup>2</sup> Youn, Seung-Ki

### Abstract

This paper presents a new high-performance supporting system of the shallow tunnel. In order to perform this research the mechanism of new supporting system is suggested and compared with the conventional existing supporting system. It is found that the new supporting system as pre-support system has several advantages such as improvement of ground before tunnel excavation and increment of capacity of the tunnel support. The construction procedures of this supporting system are also reviewed. In addition, the numerical simulation is carried out to evaluate the new supporting system. It is found that the new high-performance supporting system is very applicable in shallow depth tunnel such as portal area, tunnel in soil and weak zone, and so on.

### 요 지

본 논문은 사질토 지반에서 천층터널의 신개념 고성능 지보시스템을 연구하였으며 새로운 지보시스템의 메카니즘 제안과 기존의 지보시스템과의 비교 분석을 시행하였다. 새로운 지보시스템인 선지보 시스템은 터널의 굴착전에 지반을 보강해주는 효과와 터널의 지보력을 증가시켜주는 여러 가지 장점이 있다. 본 연구에서는 선지보 시스템의 시공순서를 분석하고 터널 시공시 선지보 시스템의 적용성을 검증하기위해 수치해석을 수행하였다. 신개념 지보시스템을 분석한 결과, 신개념 고성능 터널지보시스템은 천층터널에서의 적용성이 뛰어나며, 터널 입·출구, 토사터널, 연약지반에서의 적용성 또한 뛰어난 것으로 판단되어졌다.

**Keywords :** New high-performance supporting system, Numerical simulation, Pre-support system, Shallow tunnel

### 1. 서 론

사회의 급속한 발전으로 여러 형태의 지하공간에 대한 많은 연구가 진행되어지고 있다. 그 중 도심지 지하를 통과하는 토피가 얇은 토사 터널, 대단면 터널 및 붕적토와 같은 연약한 토사지반을 통과하는 터널은 터널 상부에서의 아칭효과가 발휘되지 못하여 구조해석에 어려움이 발생한다. 특히 터널 입구부의 경우 주변의 지반이 불안정하여 터널의 자립이 불가능할 경우 터

널은 신선한 암반이 출현하는 위치까지 개착해야만 한다. 이는 토공량의 증가뿐만 아니라 심각한 자연훼손의 문제점을 가지고 있다. 최근에는 환경훼손을 최소화하기 위하여 터널 공사에 있어 과도한 굴착을 지양하려는 방향으로 많은 연구가 진행되고 있으며 붕적층과 같은 토사지층에 대해서는 지반조건과 보강목적에 따라서 강재를 이용한 응력재를 설치하는 NATM공법의 시공이 주를 이루고 있다. 일반적인 NATM공법은 발파 또는 기계굴착에 의해 지반을 굴착한 후 강지보재 설치와

1 정회원. 호서대학교 토목공학과 부교수 (Member, Prof., Dept of Civil Engrg., Hoseo Univ., kimsh@hoseo.edu, 교신지자)

2 호서대학교 토목공학과 석사과정 (Graduate Student, Dept of Civil Engrg., Hoseo Univ.)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2010년 1월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

함께 슛크리트를 타설함으로써 지반의 강도를 최대한 유지한다. 이 때 사용되는 강지보재는 슛크리트 또는 록볼트의 지보기능이 발휘되기까지 굴착된 막장면의 초기지압 지지와 터널 선형을 맞추기 위해 설치된다. 따라서 토사 터널, 대단면 터널, 터널 입·출구가 지반이 연약한 지층에서 터널의 안정성을 확보하기 위해서는 과도한 설계가 요구된다.

이러한 보강공법들의 효과도 지반의 불균질성 및 해석상의 한계 등으로 경제성 및 안정성 측면이 충분히 반영되지 못하고 있다. 하지만 이런 문제점들을 보완하기 위해 Hoek & Brown(1980)는 수렴-구속법(convergence-confinement method)으로 지보재의 평균강성을 사용하여 지반과 지보 시스템의 상호작용을 해석하였다. Oreste (2007)는 터널 주변지반의 소성 및 탄성영역에서의 그라우팅 록볼트 영향에 대해 수치해석을 통한 연구를 시행하였다. 또한 김상환과 방규민(2005)은 터널주변 강도 정수 변화에 따라 보강된 터널 주변지반의 복합거동과 록볼트에 의한 터널주변지반에 압축거동을 하는 Arching Zone이 발생한다는 새로운 개념을 제시하였다. 따라서 본 연구에서는 터널 굴착 후 지반을 보강하는 기존 지보 시스템의 단점을 보완할 수 있는 신개념 고성능 지보 시스템을 연구하였다. 신개념 고성능 지보시스템은 선지보 네일을 다수의 위치에서 먼저 천공 설치 후 터널을 굴착하여 터널 굴착과 동시에 발생하는 지반의 응력부담을 선지보 네일이 먼저 부담한다. 또한 굴착 전 선지보 네일에 의해 지반계량효과가 발생하여 터널 굴착과 동시에 발생하는 터널 내공의 초기변위를 억제할 수 있다. 이러한 신개념 고성능 터널지보시스템의 검증을 위해 기존 연구결과 및 수치해석을 통하여 비교·검토함으로써 공법의 적용성에 대해 연구를 수행하였다.

## 2. 고성능 터널지보시스템 메카니즘

지반에 터널과 같은 공동이 굴착될 때 굴착 전 지반 응력은 굴착 후에 재분배되어 새로운 평형상태로 조정된다. 이런 응력의 변화는 변위를 수반하므로 굴착된 지반의 변위는 굴착대상 지반의 물성치, 굴착방법 그리고 공동의 크기 등에 의한 영향을 받으며 지반-지보재의 거동도 여러 인자들의 영향을 받기 때문에 이론적으로 매우 복잡하다. 따라서 지반-지보재 거동을 분석하기 위하여 Hoek and Brown(1980)은 정수압  $P_0$ 가 작용하는 원형 공동에서 공동의 내공변위와 지보압의 관계를 산정하

였는데 선형탄성거동 내에서 취급하였고 터널 주변의 변형이 탄성적일 경우 터널내공의 변위 식은 다음과 같이 제안하였다.

$$\frac{u_i}{r_i} = \frac{(1+\nu)}{E} (P_0 - P_i) \quad (1)$$

여기서  $u_i$ =반경방향변위,  $r_i$ =공동의 반경,  $\nu$ =포아송비,  $E$ =탄성계수,  $P_i$ =지보압

지보재의 경우 터널 내공의 변위를 수렴하며 굴착 후 지보재의 설치 전 터널 내공의 변위를  $u_{i0}$ 로 할때 터널에 설치되어진 지보재의 강성은  $k$ 값에 따라 지보재의 지보압  $p_i$ 의 변화는 다음과 같은 식으로 나타내었다.

$$p_i = \frac{k \cdot u_{ie}}{r_i} \quad (2)$$

여기서  $u_{ie}$ =탄성영역의 전체변형

이러한 기본적인 이론을 바탕으로 지반-지보반응곡선(그림 1 참조)에 따라 일반적인 터널지보시스템과 고성능 터널지보시스템거동을 설명하면 다음과 같다.

터널 굴착 후 지반에 작용하는 응력의 변화는 터널의 내공변위를 수반하므로 원지반의 강도를 유지하고 변위를 억제하는 수단으로 굴착 후 록볼트, 슛크리트, 강지보를 이용한 원지반의 지지능력을 최대로 활용하여 지반을 안정화시키는 터널지보시스템이 사용되어 지고 있다. 하지만 기존에 사용되고 있는 터널 지보시스템은 초기 터널내공변위를 억제할 수 없는 등 여러 문제점이 나타나므로 본 연구에서는 신개념 고성능 터널지보시

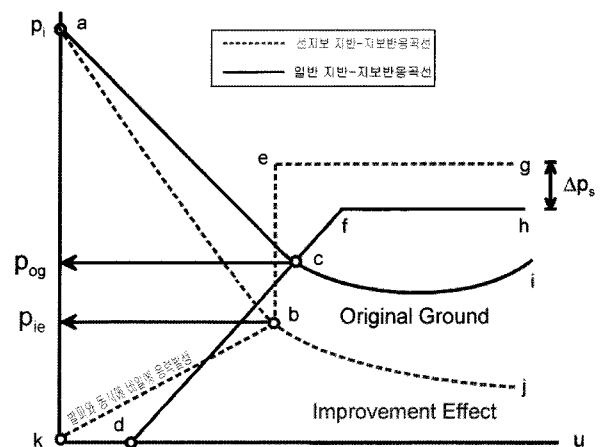


그림 1. 고성능 지보시스템 반응곡선

시스템을 기존 터널지보시스템과 지반-지보반응곡선을 통하여 비교 분석하였다. 터널의 내공변위에 반응하는 지보재의 변형은 지보재와 터널 주변지반의 특성 및 초기 현장응력에 의존한다. 그림 1의 X축은 터널 내공변위를 나타내고 Y축은 지반의 응력을 나타낸 것으로, 일반 지보반응곡선(곡선 dfh)이 지반반응곡선(곡선 aci)과 만나면 평형을 이루지만 지보재설치가 지연되면(d가 크다면) 과도한 내공변형에 의한 지반의 소성화를 억제할 수 없다. 반면 지보재의 저항능력이 부족하면 지반반응곡선(곡선 aci)과 교차( $p_{og}$ 이 작다면)하기 전에 지보재의 항복상태가 발생할 수 있다.

하지만, 고성능 터널지보시스템은 기존에 사용되고 있는 지보시스템과는 달리 터널 굴착 후 지보재를 설치하는 동안 발생하는 터널 내공 변위를 선지보 네일을 선 시공하여 선지보 네일이 터널 굴착과 동시에 억제한다. 이는 그림 1의 선지보로 보강된 지반반응곡선(곡선 abj)과 같이 선지보 네일에 의한 원지반의 계량효과로 보강된 지반의 변형은 원지반보다 천천히 진행된다. 터널 굴착전 선 시공되어진 갱외 선지보 네일은 선지보 지보반응곡선(곡선 kbeg)과 같이 발파와 동시에 선지보 네일에 응력이 발생하여 터널내공의 변위량을 억제할 수 있다. 그 결과 선지보 네일은 터널 굴착과 동시에 발생하는 지반의 응력부담을 같이 부담하여 슛크리트 및 보조지보재의 응력부담을 현저히 줄일 수 있다. 또한 지보재의 지보능력을 기존 지보시스템보다  $\Delta P_s$ 만큼 증가시킬 수 있다. 저토피 구간에서 선지보 네일은 지반의 아칭영역을 확보할 수 있고 터널 굴착과 동시에 발생할 수 있는 터널 내공의 과도한 변위를 억제할 수 있다. 지보재의 설치 지연에 의해 발생하는 터널의 과도한 내공 변위는 지반의 소성화를 일으킨다. 지반의 소성화를 조기에 억제할 수 있는 압력식 그라우팅 네일을 적용하여 네일의 인발력을 향상시킬 수 있어 터널 시공에 있어서 안정성을 향상시킬 수 있다.

### 3. 고성능 터널지보시스템의 특성 및 시공성 분석

#### 3.1 고성능 터널지보시스템 특성 분석

기존의 터널지보시스템은 터널을 굴착 후 지반의 응력이 재분배 되므로 굴착과 동시에 터널내공의 변위가 발생하며 터널의 내공변위에 반응하는 지보재의 변형은 지보재와 터널 주변지반의 특성 및 초기 현장응력에 의존하게 되는데 지보재 설치가 지연되면 과도한 내공변위에 의한 지반의 소성화를 억제할 수 없게 된다. 따라서 이러한 문제점들을 보완하기위한 지보재 연구가 많이 진행되어졌는데 Grasso, Mahtab, Pelizza, Rabajoli(1993)은 파이프 지보재를 이용한 터널지반보강방법에 대한 수치해석 연구를 하였다. Peila(1994)는 대칭축 분석에 의한 터널 막장보강에 대한 연구를 하였으나 터널주변 지반이 붕적토와 같은 연약한 토사지반이거나 도심지 지하를 통과하는 토피가 얇은 토사터널 및 대단면 터널에서는 터널지보시스템 설계 및 지반보강방법의 적용에 무리가 따른다. 그러나 본 신개념 고성능 터널지보시스템은 선지보 네일을 선 시공하여 터널 주변을 보강하여 지반의 계량효과를 얻을 수 있다. 따라서 터널 입출구와 도심터널에서 토피가 얇은 토사 터널과 파쇄대 지반에 적용이 용이하고 압력그라우팅을 실시하여 유효경증가 및 맥상그라우팅 효과를 볼 수 있으며 기존 NATM 터널의 록볼트에 걸리는 축력을 선지보 네일이 초기변형부터 부담하여 터널 굴착시의 안정성을 높일 수 있다. 터널건설에 있어서 지표면으로부터 예정된 터널의 굴착라인을 향하여 다수의 선지보 네일을 천공 설치하고 그라우팅을 하여 시공시 예정된 터널의 주변지반이 보강되면 김상환과 방규민(2005)에 의해 연구되어진 록볼트를 설치함으로써 굴착면과 연직되게 구속압( $\sigma_3$ )이 부가됨에 따라 지반 강도는 그림 2에서 보여주는 바와 같이  $\Delta\sigma_1$ 의 크기에 따라 증가되어진다. 또한 터널주변지반에 그림 3과 같은 압축거동을 하는 Arching Zone이

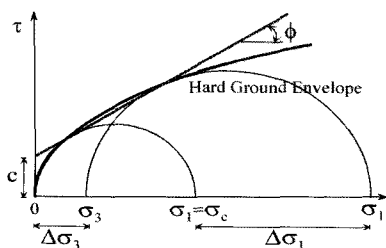
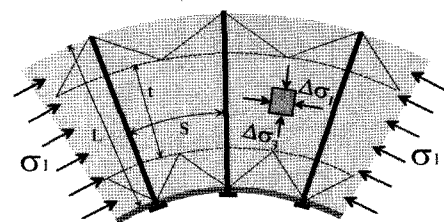


그림 2. 록볼트 지보재에 의한 지반의 하중지지력 증가 개념



발생하며 아칭영역이 확보되면 저토퍼 구간의 터널 굴착시 안전성을 확보할 수 있다.

또한 Pan & Huang(1994)은 터널 내공변위는 1일 굴진장과 같은 터널 굴착공정, 지보재의 설치시기, 그리고 설치된 지보재의 시간에 따라 변하는 성질에 의해 야기될 수 있고 그로 인해 슛크리트 라이닝에 과도한 응력이 발생할 수 있다. 이는 구조물의 안전율과 터널 설계에 있어 매우 중요하다고 하였으나 고성능 터널지보시스템은 선지보 네일을 선 시공하여 터널주변지반이 보강되어 아칭영역을 확보할 수 있으므로 터널 굴착과 동시에 발생하는 터널 내공변위를 지보재가 설치되기 전 선지보 네일이 먼저 부담하여 다른 터널 지보재 즉 슛크리트와 같은 지보재에 부담되는 응력이 감소되므로 터널의 안정성을 확보할 수 있다. 그러므로 갱구부 사면보강을 실시하면서 동시에 선지보 네일을 수직으로 설치하여 사면보강 및 터널보강을 동시에 확보할 수 있으며 절리가 많은 파쇄대와 풍화암 구간에서 적용성이 우수할 것으로 판단되어진다. 또한 타공정에 영향이 없어 공기를 단축시키는 효과를 볼 수 있을 것으로 보이고 터널 시공시 터널의 입·출구부에서 발생하는 천층터널 상부 표층부에서의 적용성도 우수할 것으로 판단되어진다.

### 3.2 고성능 터널지보시스템의 시공성 분석

신개념 고성능 터널지보시스템은 본선 터널단면을 향하여 다수의 선지보 네일을 천공 설치하고 본선터널을 굴착하는 것으로 고성능 터널지보시스템의 개요도는 그림 3과 같으며 종단면도와 같이 터널 입구에서 나타나는 천층터널 상부 표층부에 다수의 선지보 네일을 선 시공하여 터널 시공시의 안전성을 높일 수 있다.

고성능 터널지보시스템의 시공과정의 흐름은 그림 4와 같다. 터널 굴착 예정지의 상단 부분에서 터널 굴착 전에 시공되어지는 선지보 네일 위치를 측량하고 선지보 네일의 정확한 천공을 실시하기위해 지반의 표면 정리를 하고 선지보 네일을 천공 삽입하여 터널주변지반의 보강이 이루어진다. 선지보 네일 천공 후 네일을 설치하고 압력그라우팅을 실시하여 유효경 증가 및 맥상그라우팅 효과로 주변지반의 지내력을 확보할 수 있으며 본선 터널 굴착과 동시에 선지보 네일은 터널주변지반의 응력을 분담하게 되며 터널 굴착 후 발생하는 터널 내공의 변위를 굴착과 동시에 억제할 수 있다.

고성능 터널지보시스템의 계략적인 시공 순서는 그림 5와 같으며 터널 굴착 전 선지보 네일의 시공으로

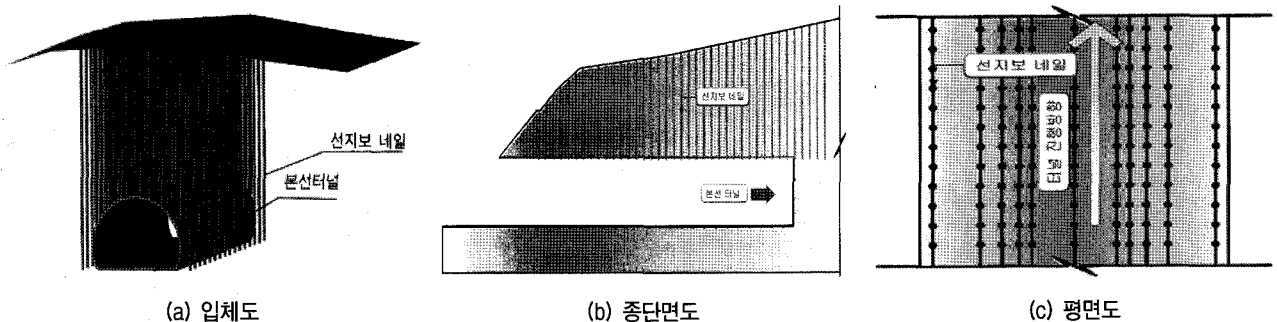


그림 3. 고성능 터널지보시스템 개요도

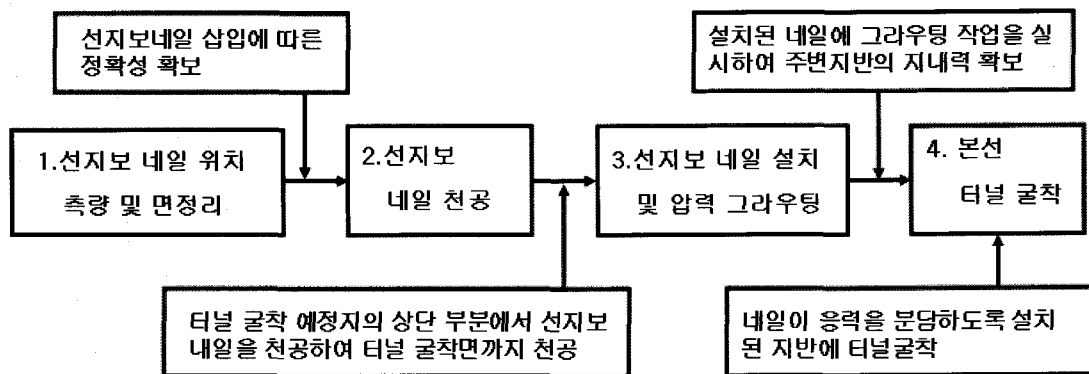


그림 4. 고성능 터널지보시스템 시공 흐름도

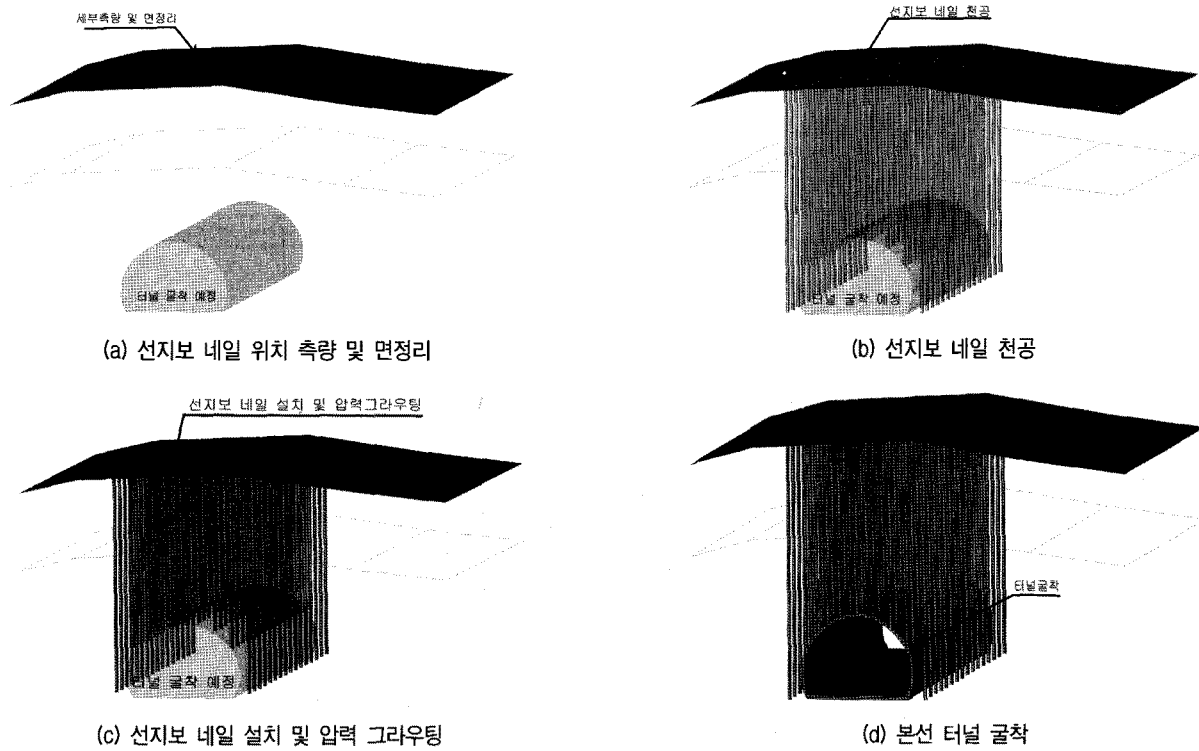


그림 5. 고성능 터널지보시스템 시공 순서

터널주변지반이 보강된다. 따라서 본 시스템은 지반의 변위량을 선지보 네일이 부담하므로 터널 굴착시에 터널내공의 변위를 최소화하여 안정성을 확보할 수 있으며 선지보 네일은 최대 축력을 받을 수 있는 압력식 그라우팅 네일을 적용하여 본선터널을 굴착한다.

고성능 터널지보시스템공법의 구조적·안정성 측면에서 터널 굴착시 천단 및 측벽의 변위량은 선지보 네일로 인하여 굴착과 동시에 억제되며 선지보 네일은 압력식 그라우팅 네일을 적용하여 네일의 인발력 향상과 지반의 보강효과를 동시에 확보할 수 있다. 또한 터널 굴착시 발생하는 지반의 응력 부담을 선지보 네일이 먼저 부담함으로써 슛크리트 및 보조지보재의 응력 부담을 현저히 줄일 수 있다. 환경성 및 시공성 측면에서도 지반조건에 따른 자립시간 및 막장 굴착면의 안정성 문제 때문에 개착공법을 적용하였던 구간을 고성능 터널지보시스템을 이용하여 터널 굴착이 가능하므로 개착터널에 비해 토공이 없고 원지반의 미세거로 자연환경 훼손을 최소화 시킬 수 있다. 또한 선지보 네일 시공으로 터널의 자립성이 개선되어 전·반단면 굴착이 가능하고 종래의 중벽분할 굴착보다 시공이 간단하다.

#### 4. 고성능 터널지보시스템의 수치해석적 검증

##### 4.1 수치해석 개요

본 연구에서는 저토퍼 구간 터널에서 고성능 터널지보시스템의 적용성을 검증하기 위하여 2차원과 3차원으로 수치해석을 실시하였다. 수치해석은 MIDAS/GTS 프로그램을 이용해 해석하였다. 지반은 탄소성 거동을 나타내는 Mohr-Coulomb Model을 적용하였으며, 슛크리트는 구조요소 중 Plate 요소로, 록볼트는 구조요소 중 Truss 요소로 모델링 하였다. 2차원 수치해석의 경우 지반의 초기응력 상태를 고려하기 위하여 토압계수( $K_0$ )를 0.5와 1로 달리하였다. 또한 일반적으로 터널이 굴착되면 터널의 거동이 3차원적으로 형성되기 때문에 실제의 시공과정에 가깝게 모델링한 3차원 해석을 통하여 수치해석을 실시하였다. 수치해석 지반의 범위설정은 경계조건이 터널에 영향을 미치지 않는 범위로 측·하부를 터널직경의 4배로 해석 영역으로 설정하였다.

추가로 ○○도로터널 저토퍼 구간을 대상단면으로 수치해석을 실시하여 터널 굴착 전 터널예정지 상단주변지반에 선 시공한 선지보 네일의 축력, 터널 내공변위 및 터널 슛크리트에 작용하는 압축응력과 기존 지보시

스텝의 터널 내공변위, 록볼트 축력, 슛크리트 압축응력의 수치해석 결과를 비교하여 고성능 터널지보시스템의 효과를 검증하였다.

#### 4.2 고성능 지보시스템거동의 수치해석적 검토

동일지반 조건하에서 고성능 터널지보시스템을 적용한 터널을 2차원과 3차원으로 모델링을 실시하였다. 2차원해석은 지반의 초기응력상태를 고려하기 위하여 토압계수를  $K_0=0.5$ 와  $K_0=1$  두가지 Case로 해석을 실시하였다. 수치해석 결과를 통하여 선지보 네일의 축력, 터널 내공의 천단변위와 슛크리트에 나타나는 압축응력의 거동을 분석하였다.

고성능 터널지보시스템을 적용한 모델링을 실시하기 위해 쏘일네일링간격, 굴진장, 슛크리트두께, 네일 그라우팅 구근, 선지보 네일 및 록볼트를 표 1과 같이 가정하여 모델링을 실시하였다. 또한 지반의 지층구조는 총 5단계로서 지반의 물성치는 최근 도로터널에 적용되었

표 1. 수치해석 가정사항

쏘일네일링간격	1.0m×1.6m
굴진장	0.8m, 상하단면굴착
스�크리트두께	20cm 적용
네일 그라우팅 구근	105mm 적용
선지보네일	SD40, 29mm
록볼트	SD35, 25mm

표 2. 지반물성치

구분	봉적층	풍화토	풍화암	IV	III
변형계수(MPa)	8.5	17.0	110.0	2,700	4,300
포아송비	0.35	0.35	0.32	0.30	0.28
내부마찰각	30	27	29	33	37
점착력(KPa)	10	20	32	1,900	2,500
단위중량(KN/m <sup>3</sup> )	17.5	18.5	19.5	21.0	24.0

던 자료를 토대로 물성의 평균값을 산정하여 사용하였다. 본 해석에서 사용된 지반의 물성치는 표 2와 같다.

고성능 터널지보시스템을 적용한 2차원과 3차원 수치해석 모델은 그림 6과 같다.

그림 7은 터널에 고성능 지보시스템을 적용하였을 경우 터널내공의 변위를 해석하기 위해서 3차원과 2차원 모델링을 실시한 결과이다. 또한 터널내공변위는 변위량이 가장 큰 터널의 천단변위에 대한 결과로서 터널의 최종단계에서의 천단변위가 3차원해석에서는 56.2mm로 나타났고 2차원에서는 각각의 토압계수( $K_0$ )를 0.5와 1로 달리 설정하여 토압계수( $K_0$ )가 0.5일 때는 53.3mm, 토압계수( $K_0$ )가 1에서는 45.1mm의 변위값이 나타나는 것을 볼 수 있다. 전체적으로 3차원해석을 하였을 때 천단변위가 크게 나타나는 것을 알 수 있었으며 이러한 현상은 터널 진행방향의 보강범위에 따라 고성능 터널지보시스템의 거동이 다른 차이를 보이는 것을 보여준다.

그림 8은 터널의 선지보 네일 축력에 대해서 해석한 결과로 선지보 네일 축력 값을 해석한 결과 3차원해석에서는 최종축력이 77.01KN으로 나타났고 2차원에서는 각각의 토압계수( $K_0$ )를 0.5와 1로 달리 설정하여 토압계수( $K_0$ )가 0.5일 때는 45.25KN, 토압계수( $K_0$ )가 1에서는 43.65KN로 나타나는 것을 볼 수 있었는데 전체적으로 3차원해석을 하였을 때 선지보 네일 축력이 크게 나타나는 것을 알 수 있었다. 또한 전체적인 축력 값이 128.5KN이하로 선지보 네일이 부담하는 축력 값은 허

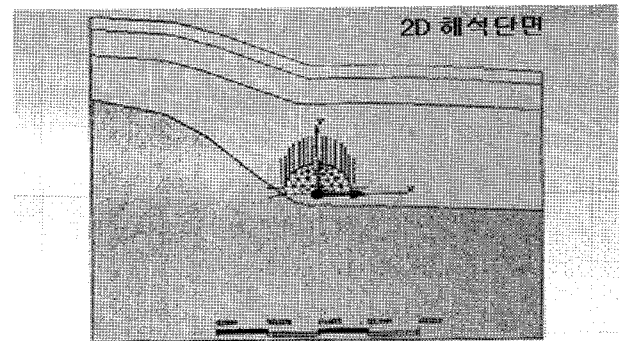
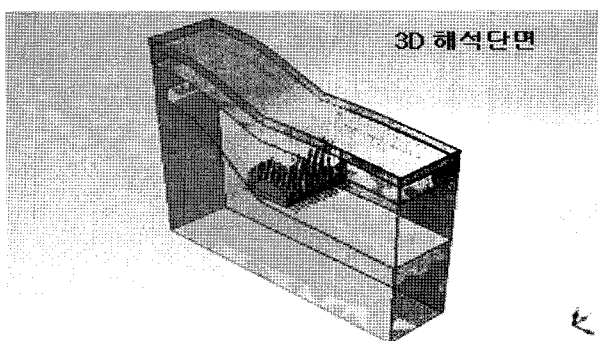
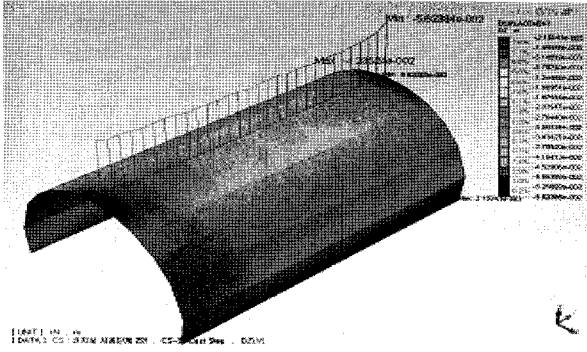
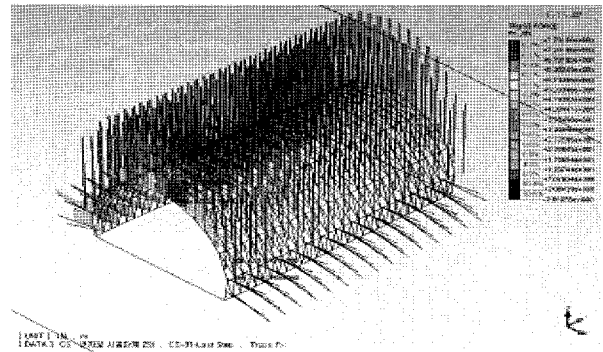


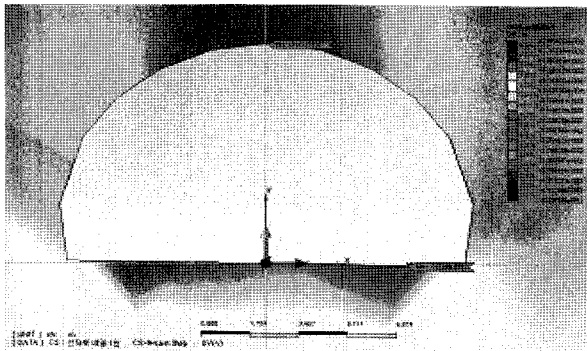
그림 6. 해석단면



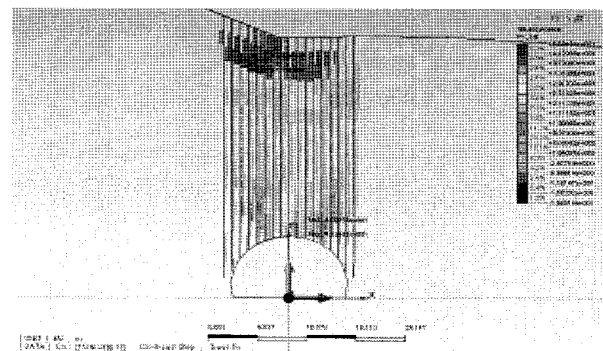
(a) 3차원 해석결과



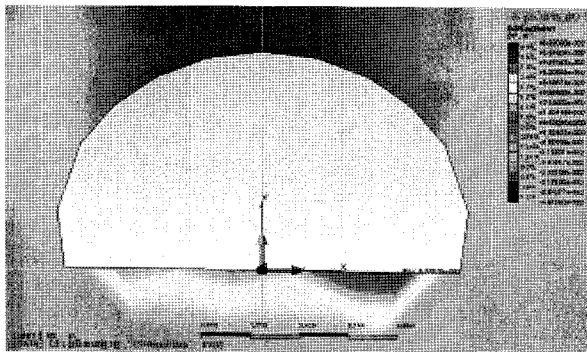
(a) 3차원 해석결과



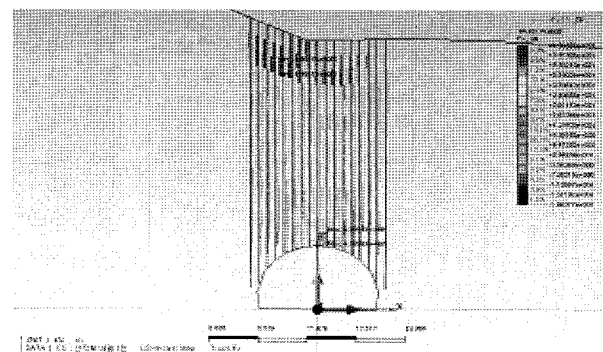
(b) 2차원 해석결과  $K_0=0.5$



(b) 2차원 해석결과  $K_0=0.5$



(c) 2차원 해석결과  $K_0=1$



(c) 2차원 해석결과  $K_0=1$

그림 7. 최종단계 천단변위

그림 8. 선지보 내일 축력

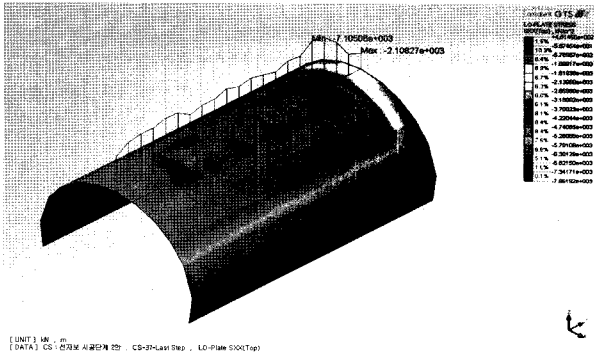
용축력에 부합하는 것으로 나타났으며 선지보 내일의 축력이 터널의 천단부에서 큰 값을 가지는 것으로 보아 터널의 천단부에서 가장 큰 변위를 일으키기 때문인 것으로 판단되어진다.

그림 9는 숏크리트 압축압력을 분석한 결과로서 3차원해석에서는 최종압축응력 값이 7.86MPa로 나타났고 2차원해석에서는 각각의 토압계수( $K_0$ )를 0.5와 1로 달리 작용하여 토압계수( $K_0$ )가 0.5일 때는 6.973MPa, 토압계수( $K_0$ )가 1일 때는 7.92MPa 값이 나타나는 것을 볼 수 있었는데 전체적으로 3차원해석을 하였을 때와 2차원해석을 하였을 때 숏크리트의 압축응력은 크게 차이

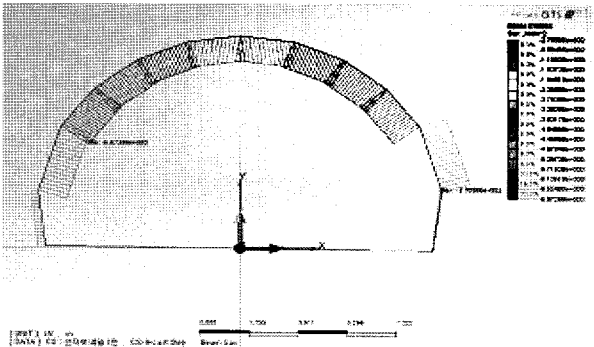
가 나지 않는 것을 알 수 있었다. 수치해석결과 터널의 전체적인 숏크리트 압축응력이 허용응력 8.4MPa이하로 해석되므로 고성능 터널지보시스템을 적용하였을 경우 허용기준 내에서 숏크리트의 압축거동이 일어난다는 것을 확인 할 수 있었다.

#### 4.3 고성능 지보시스템과 기존 지보시스템의 수치해석적 비교 검토

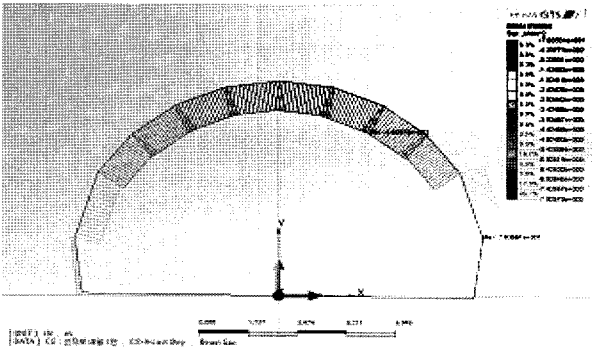
본 연구는 시공되어진 ○○도로터널의 저토피 구간을 대상 단면으로 선정하여 고성능 터널지보시스템과



(a) 3차원 해석결과



(b) 2차원 해석결과  $K_0=0.5$



(c) 2차원 해석결과  $K_0=1$

그림 9. 숏크리트 압축응력

기존 지보시스템에 대한 수치해석 결과를 비교 검토하였다. 지반의 지층구조는 총 3단계로 풍화토, 풍화암층, 연암층으로 구성되어있는 지반이며 지반의 물성치는 ○○도로터널 설계시 적용되었던 지반 물성치를 사용하였다. 본 수치해석에서 사용된 지반의 물성치는 표 3과 같다.

수치해석에 사용되어진 하중 분담율은 ○○도로터널의 설계시 적용된 사례를 기준으로 하중분담율을 각각 굴착 40%, 연한숏크리트 30%, 강한숏크리트 30%로 산정하였다.

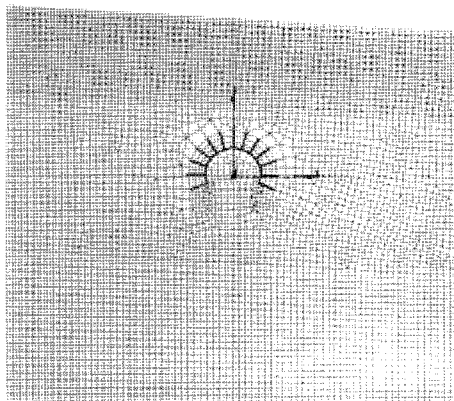
상기와 같은 조건하에서 고성능 지보시스템 적용시와 기존 지보시스템을 적용 하였을때에 대하여 2차원 모델링을 실시하였으며 토압계수( $K_0$ )는 1로 가정하였다. 본 수치해석에서 사용되어진 2차원모델링은 그림 10과 같다.

수치해석결과에 따라 동일지반 조건하에서 기존 지보시스템과 고성능 지보시스템 적용에 대한 터널 내공변위, 록볼트와 선지보 네일 축력 및 숏크리트 응력은 그림 11과 같다.

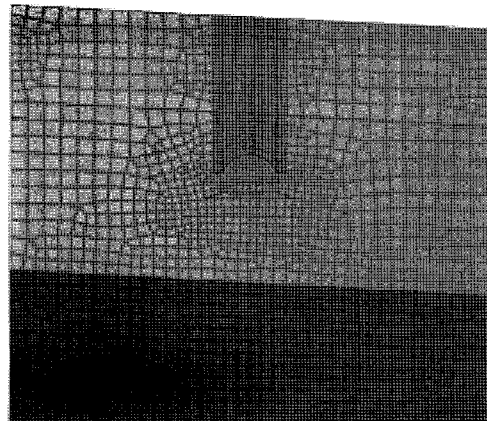
상기 수치해석검토 결과를 분석하면 기존 지보시스템 터널과 고성능 지보시스템 터널의 터널 내공변위는 그림 12와 같이 선지보 네일을 적용한 터널에서 천단

표 3. 지반물성치

구분	풍화토	풍화암	연암
변형계수(MPa)	30	200	2000
포아송비	0.35	0.32	0.28
내부마찰각	30	33	35
점착력(KPa)	15	30	300
단위중량(KN/m <sup>3</sup> )	19	19.5	23



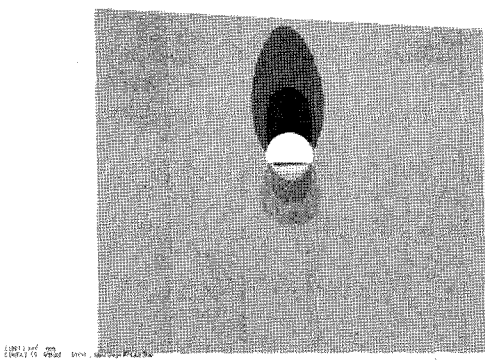
(a) 기존 지보 터널



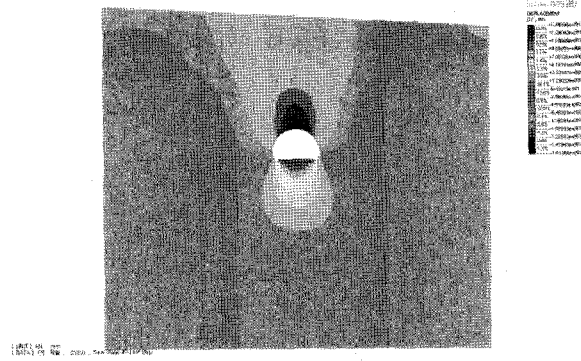
(b) 선지보 네일 공법 터널

그림 10. 해석단면

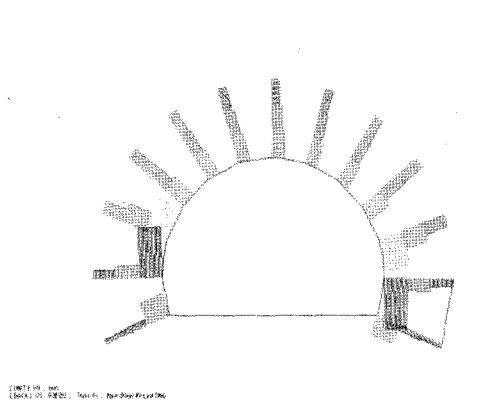




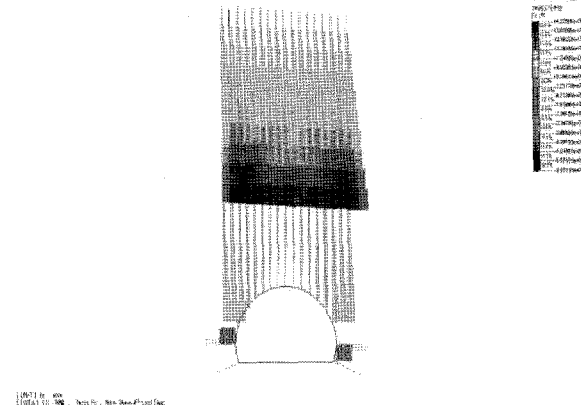
(a) 기존 지보시스템 터널



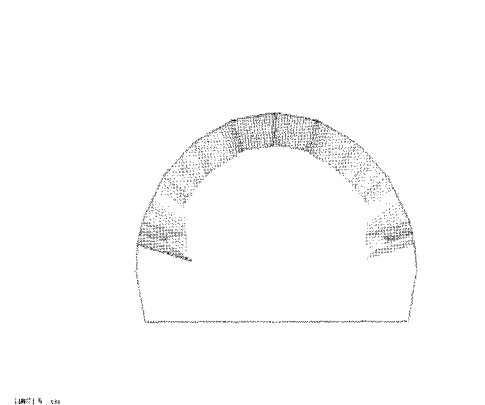
(b) 선지보 네일공법 터널



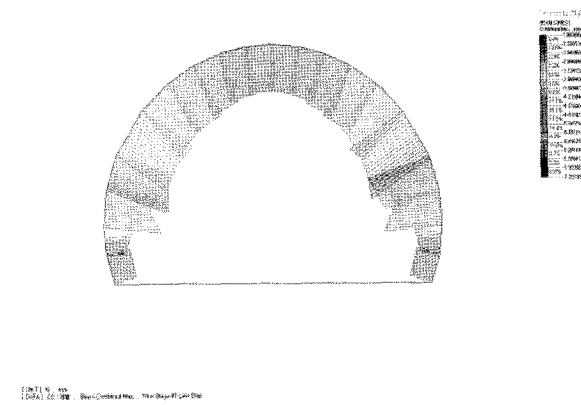
(c) 기존 지보시스템 록볼트 축력



(d) 선지보 네일공법 네일 축력



(e) 기존 지보시스템 슛크리트 응력



(f) 선지보 네일공법 슛크리트 응력

그림 11. 수치해석 최종단계

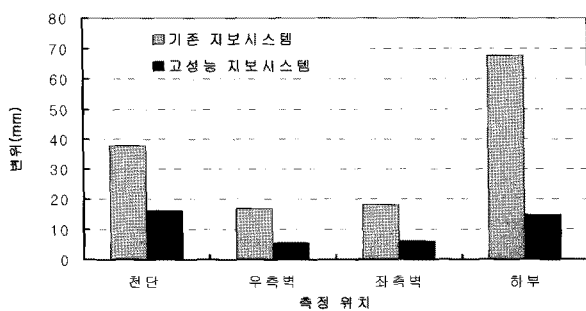


그림 12. 터널내공변위

22mm, 우측벽 11mm, 좌측벽 12mm, 하부 53mm의 차이를 보이고 있는 것으로 나타났다. 이는 선지보 네일을 적용하면 지반계량 효과로 인하여 터널 내공의 변위가 작게 일어나는 것으로 판단되어진다.

그림 13(a)는 동일한 지반 조건에서 기존 지보시스템의 록볼트 축력과 고성능 지보시스템의 네일 축력을 나타낸 것이다. 록볼트의 최대축력은 287KN으로 허용축력 128.5KN을 초과하여 추가적인 지반보강이 요구되는

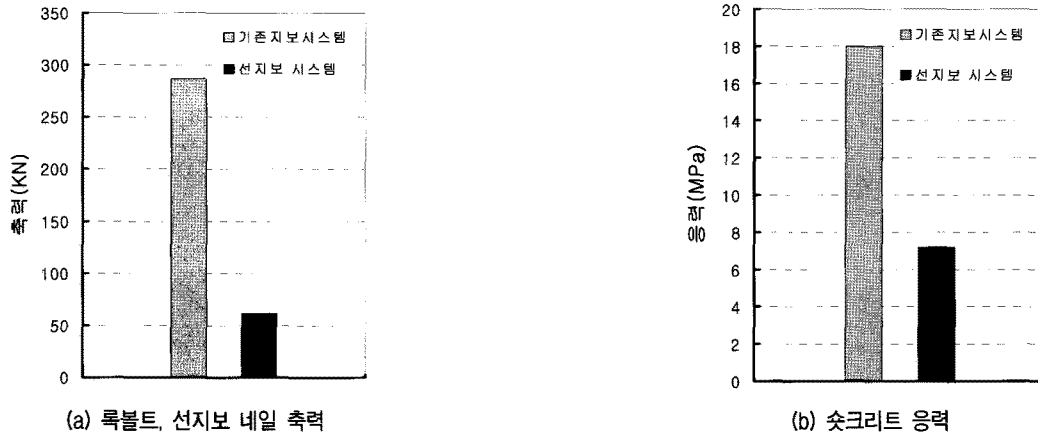


그림 13. 최종단계 지보재 수치해석 값

것으로 나타났다. 그러나 선지보 네일의 최대축력은 62KN으로 허용응력 이내로 나타났다. 따라서 설계시 기존 지보시스템을 적용할 경우 록볼트 이외에 강관다단 그라우팅 같은 지반보강 공법을 추가로 적용해야 하는 것으로 판단되어진다. 결과적으로 고성능 지보시스템을 적용하면 과도한 설계를 방지할 수 있고 경제성 및 안전성 측면에서 우수할 것으로 판단되어진다.

그림 13(b)는 동일한 지반 조건에서 기존 지보시스템과 고성능 지보시스템의 슛크리트 최대응력 검토결과를 나타내는 것이다. 기존 지보시스템 터널의 슛크리트 최대응력은 18MPa로 허용응력 8.4MPa를 초과하는 것으로 나타났다. 고성능 지보시스템 터널의 슛크리트 최대응력은 7.2MPa로 허용응력 초과하지 않아 지보재의 기능을 충분히 하는 것으로 판단되어진다.

기존 지보시스템과 고성능 지보시스템의 수치해석적 검토결과 동일한 지반조건에서 기존의 지보시스템을 적용한 경우 허용기준을 초과하는 터널 지보거동이 나타나 터널의 설계시 추가적인 보강공법이 필요할 것으로 판단되어진다. 그러나 고성능 지보시스템을 동일한 지반조건에 적용할 경우 터널 내공변위, 네일 축력과 슛크리트의 응력이 허용기준에 부합하는 것으로 나타났다. 따라서 저토퍼 구간에서 선지보 네일공법의 적용이 기존 지보시스템에 비하여 지반계량의 효과가 있어 지반의 초기 변형을 억제하고 지보재에 부담되는 응력이 감소하는 것으로 판단되어진다.

## 5. 결론

본 연구는 기존의 터널 지보시스템의 단점을 보완한 저토퍼 구간의 신개념 고성능 터널지보시스템에 대한

연구이다. 본 연구에서 제안한 고성능 터널지보시스템을 간단히 정리하면 지표면으로부터 예정된 터널의 굴착라인을 향하여 다수의 선지보 네일을 천공 설치하고 본선터널을 굴착하는 방법이다. 즉 선지보 네일이 선 시공되어 Arching Zone이 발생하며 아칭영역을 터널 굴착전에 확보할 수 있으므로 터널 굴착시 터널주변지반의 강도는 높아지고 터널 굴착과 동시에 발생하는 터널내공의 변위를 지보재가 설치되기 전에 선지보 네일이 먼저 부담하므로 다른 터널 지보재 즉 슛크리트와 같은 지보재에 부담되는 응력이 감소하여 터널의 안정성을 확보할 수 있는 시스템이다. 검증 방법으로 기존의 터널 지보시스템과의 수치해석을 통한 비교 검토를 실시하였고 그 결과 고성능 터널지보시스템에 대한 적용성을 요약 정리하면 다음과 같다.

- (1) 선지보 네일이 선 시공되어 Arching Zone이 발생하며 아칭영역을 터널 굴착전에 확보할 수 있으므로 갱의 고성능 터널지보시스템은 토사, 연약대 터널 및 터널 갱구부등의 보강에 적합한 것으로 판단되어진다.
- (2) 터널의 갱구 입구의 보강에 있어서 기존의 보강공법보다 갱의 고성능 터널지보시스템의 적용이 환경적측면, 경제적측면과 안정성측면에서 좀 더 유리하다고 판단되어진다.
- (3) 지반이 불안정한 4차선이상의 대단면 터널 시공에 있어서 기존 지보시스템의 사용에 비하여 갱의 고성능 터널지보시스템의 적용이 터널 선형, 구조적 안정성 및 공기단축의 효과가 뛰어나다고 판단된다.

그러나 본 논문에서 연구한 고성능 터널지보시스템

은 초기단계의 신개념 터널지보시스템으로 시공성, 현장 적용성 및 이론적으로 더 많은 연구가 이루어져야 할 것으로 판단되어진다.

## 감사의 글

본 연구는 한국과학재단의 기초과학연구지원사업 중 “신개념 고성능 터널지보 시스템 이론 및 지보재료 개발에 대한 연구”(과제번호 : R01-2008-000-11783-0) 과제의 일환으로 수행되었습니다.

## 참 고 문 헌

1. 손영현, 박우진 (1998), 강섬유보강숏크리트의 역학적 특성 및 경제성 평가, *한국안전학회지*, 제 13권, 제 2호, pp.122-129.
2. 이상준, 문현구 (2000), 시간의존성을 고려한 터널지반과 숏크리트의 상호반응거동에 관한 연구, *한국자원공학회지*, 제 37권, 제 5호, pp.350-361.
3. 김상환, 방규민 (2005), 록볼트로 보강된 터널주변지반의 강도정수 변화에 대한 연구, *터널기술논문집*, 제 7권, 제 5호, pp.51-61.
4. Hoek, E. and Brown, E. T. (1980), “*underground Excavations in Rock*”, p.252.
5. Pella, D., Oreste, P.P, Pelizza, S. and Kim, S.H. (2004), “A study of tunnel face reinforcement”, *Tunnelling Technology*, Volume 6, pp.259-266.
6. Verman, M., Singh, B., Jethwa, J.L. and Viladkar, M.N. (1995), “Determination of support reaction curve for steel-supported tunnels”, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Volume 10, pp. 217-224.
7. Márcio Muniz de Farias, Álvaro Henrique Moraes Júnior, André Pacheco de Assis (2004), “Displacement control in tunnels excavated by the NATM: 3-D numerical simulations”, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Volume 19, pp.283-293.
8. Kolymbas, D. (2005), *Tunnelling and Tunnel Mechanics*, springer, pp.307-310.
9. Pan, Y.W. Huang, Z.L. (1994), “A Model of the Time-dependent Interaction Between Rock and Shotcrete Support in a Tunnel”, *int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr*, Volume 31, No.3, pp.213-219.
10. Grasso, P., Mahtab, M.A., Pelizza, S. and Rabajoli. G. (1993), “Consideration for design of shallow runnels”, *Proceedings of Int. Conf. Underground Transportation Infrastructures*.
11. Peila, D. (1994), “A theoretical study of reinforcement influence on the stability of a tunnel face”, *Geotechnical and Geological Engineering*, pp.145-168.

(접수일자 2009. 6. 8, 심사완료일 2009. 7. 24)