

# 반개착식 터널 공법에 관한 수치 해석적 연구

노병국<sup>1</sup> · 박종관<sup>2</sup> · 백승규<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>비회원, 한국철도시설공단 처장

<sup>2</sup>정회원, 서울과학기술대학교 교수

<sup>3</sup>정회원, 단우기술단 부장

## Numerical analysis for semi cut and cover tunnelling method

Byoung-Kuk Roh<sup>1</sup>, Jong-Kwan Park<sup>2</sup>, Seung-Kyu Baek<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Korea, Rail Network Authority, Construction Division Director

<sup>2</sup>Seoul National University of Science and Technology, Professor

<sup>3</sup>Danwoo E&C, General manger

**ABSTRACT:** Recently there has been increased interest for the portal and shallow tunnel for an eco-friendly tunneling method. Semi cut & cover tunnel excavation techniques applied to concrete slab and construction and a growing number of cases, but there is no load combinations and arch concrete cross section for the applicable standards. Therefore, in this study, ground conditions and tunnel overburden thickness, thickness of backfill, overburden surface slope angle changes to a variety of conditions in order to propose standards for the semi cut & cover method was performed numerical analysis. Regression analysis method to the analysis of the results of numerical analysis, and linear regression equations derived to classify and organize a rational, economical, and safe semi cut & cover tunneling method based proposed.

**Keywords:** Semi cut and cover tunnel, Numerical analysis, Regression, Arch concrete

**요 지:** 최근 터널 갱구부와 저토피 구간에 대한 환경 친화적인 터널공법에 대한 관심이 증가하고 있다. 콘크리트 슬래브를 이용한 반개착식 터널공법을 적용한 연구 및 시공사례가 증가하고 있으나, 하중조합 및 아치콘크리트의 단면에 대한 별도의 적용 기준이 없다. 따라서 본 연구에서는 반개착식 공법에 대한 기준을 제시하기 위하여 지반조건과, 터널 상부 지층 두께, 되메움 두께, 상부지반 지표면의 경사 각도를 변화시키는 등의 다양한 조건들에 대하여 수치해석을 수행하였다. 수치해석 결과들을 회귀분석법으로 분석하고, 유도된 회귀 분석식을 분류하고 정리하여 합리적이고, 경제적이며, 안전한 반개착식 터널 굴착 공법의 기준을 제안하고자 하였다.

**주요어:** 반개착식 터널, 수치해석, 회귀분석, 아치콘크리트

## 1. 서 론

### 1.1 연구 배경

산악 지형이 전체 국토의 70% 정도인 우리나라는 철도나 도로 등을 건설하기 위한 계획을 수립할 경우 터널계획이 필연적이며, 교통 인프라 건설 수요가 증가할수록 터널 수요 역시 함께 증가하고 있다. 이러한

터널의 수요증가와 더불어 터널이 대규모화, 장대화 되어가며 대규모화에 따른 갱구부의 규모 증가와 장 대화에 따른 저토피 터널 구간도 증가하고 있는 실정 이다.

국내에 시공 완료된 터널 154개소에 대한 분석결과 갱구부의 토피고가 1.0D 이하인 경우가 37.6%로 큰 비중을 차지하고 있으며, 터널 갱구부와 저토피 구간 은 터널의 지지 원리인 아칭효과를 발휘하기 어려울 뿐만 아니라 굴착이나 지반조건 변화 등으로 굴착 비탈면이 불안정한 구간이다(Han et al., 2002). 또한 갱구 위치에 따라서는 아칭효과를 기대할 수 없어 강관다단 그라우팅 등의 보조공법을 적용하여 보강하

\*Corresponding author: Seung-Kyu Baek

E-mail: bsknamin@hanmail.net

Received March 4, 2013; Revised March 13, 2013;

Accepted March 17, 2013

Copyright ©2013, Korean Tunnelling and Underground Space Association

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

므로 공사비가 과다하게 소요되거나, 대규모 비탈면 깎기로 인한 심각한 환경훼손과 공사 중 및 운영중 터널 갱구부 비탈면 붕락 등이 발생하는 문제가 발생할 수 있으므로, 굴착 비탈면에 대한 근본적인 대책 마련이 요구되고 있다.

국내·외적으로 친환경적 건설문화에 대한 사회적 관심이 증대되며 터널 갱구부와 저토피 구간에 대하여 시공성과 구조적 안정성은 물론 원지반의 훼손을 최소화할 수 있는 환경 친화적인 건설에 대한 연구와 시공사례들이 증가하고 있으며 일본, 독일 등 선진국에서는 콘크리트 슬래브를 이용한 반개착식 터널굴착 공법을 적용한 연구 및 시공사례가 증가하고 있다(An et al., 2009; Sauer 1992).

## 1.2 연구 내용

1980년대 이후 지하철 건설과 함께 NATM 터널이 도입되기 시작하며 관련된 많은 연구들이 이루어졌다. 국내의 연구 동향은 주로 아칭 효과가 발휘되지 못하는 저토피구간이나, 갱구부 구간에 대한 보조공법 등의 보강공법 연구와 개착식 터널에 대한 연구가 주된 연구 경향 이었다(Han et al., 2002).

최근 들어 NATM 또는 개착식 터널의 적용이 곤란한 저토피 갱구부, 완만한 경사의 갱구부, 도심지 저토피 구간에 대한 반개착식 터널공법 적용에 대한 관심이 증가되고 있으나, 아칭효과가 발휘되지 못하는 저토피, 갱구부에 대한 반개착식 연구에 대하여는 기초적인 실험연구들이 있었으며(An et al., 2009; Sauer 1992), 시공 사례발표(Lee et al., 2005)와 설계보고서 등이 전부이다.

유사한 형태인 개착식 터널에 대한 연구들은 주로 환경 훼손을 줄일 수 있는 방법에 대한 연구로 가시철을 이용한 방법(Jung et al., 2001), 개착 공기를 단축시킬 수 있는 프리캐스트 구조물을 이용한 방법(Bae et al., 2003)에 대한 연구와 개착식터널 전반에 대한 연구(Yang et al., 2010; Yoo 2002)가 주로 이루어졌다.

저토피 갱구부, 완만한 경사의 갱구부, 도심지 저토피 구간에 대한 반개착식 터널공법 적용에 대한 친환경적이며, 합리적인 반개착식 터널에 대한 연구들과 공법의 적용을 위한 기준 정립이 절실히 요구되고 있는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 먼저 반개착식 터널과 관련된 선행 연구 자료들에 대한 분석을 하였으며, 분석결과 도출된 문제점들을 검토하였다. 반개착식 공법에 대한 기준을 제시하기 위하여 지반조건, 복토두께, 등의 조건들을 적용하여 수치해석을 실시하였다. 수치해석 결과들을 분석하기 위하여 회귀분석을 실시하고, 유도된 회귀분석식을 분류하고 정리하여 합리적이고, 경제적이며, 안전한 반개착식 터널 굴착 공법의 기준을 제시하고자 하였다.

## 2. 반개착식 터널공법 개요

반개착식 터널 공법은 터널 굴착부 상부 지반조건이 불량한 저토피 및 성토지반 등의 NATM 굴착시 지반의 아칭효과를 기대하기 어려운 경우와 같은 지반조건에서의 상부지반 일부를 절토하여 현장에 적합한 형상(아치(Arch)형, 슬래브(Slab)형)의 콘크리트 구조물로 원지반과 결속 시공한 다음 깎기부를 되메우고 터널내부를 굴착하는 방법으로 터널 굴착시 아칭효과를 발휘, 상부토압 감소 및 하중 분산이 가능하고 개착터널에 비해 원지반 훼손면적 축소와 시공성이 우수한 친환경적인 터널공법이다. 이 공법이 주로 적용되는 구간은

- ① 터널 천단부 토피확보가 충분하지 못하여 통상적인 터널굴착의 적용이 곤란한 구간
- ② 주변여건(도로, 하천 등) 제약 및 안정성 확보가 불리한 지형으로 완전개착이 불가능한 구간
- ③ 터널중간 계곡부 등 대형장비 진입이 곤란한 구간
- ④ 개착으로 인한 환경훼손 문제가 심각하게 발생하는 구간 등에 적용되고 있다.

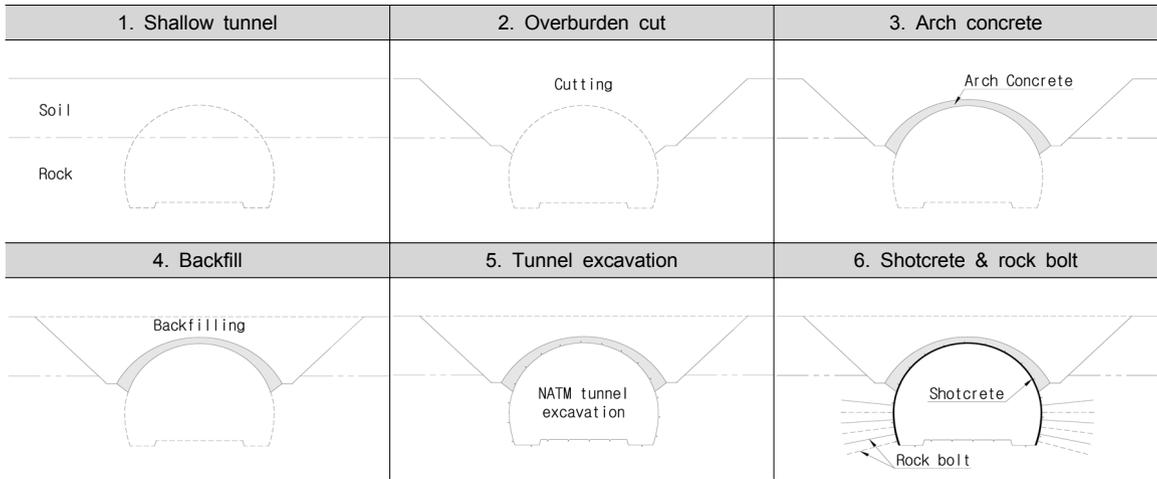


Fig. 1. Semi cut-and-cover tunnel construction procedure

반개착식 공법은 주로 계곡부 개착 터널 구간과 갱구부 저토피 구간에 적용 되었으며, 프레임슬래브 공법(frame slab), 도어프레임 공법(door frame), 카린시안 공법(carensian), 아치슬래브공법(arch slab), 거북이등 공법(turtle method)등으로 다양하게 불리고 있는 것을 알 수 있다. 국내의 사례들은 대부분 카린시안 공법으로 시공을 한 실적이 있으나, 본 연구에서는 특정 공법명은 지양하고, 반개착식 공법으로 명칭을 결정하였다.

반개착식 공법의 도입 초기에는 직선형의 슬래브로 터널 상부를 보호하는 형태에서, 점차 터널의 굴착면과 일치하는 아치 형태로 변형되었으며, 이는 본 구조물인 터널의 안정을 위하여 개선된 모습으로 변형이 이루어진 것으로 판단된다.

아치 콘크리트의 설치 범위는 터널 상부 120°범위에 설치되었으며, 이는 일반적인 NATM 터널의 천단부 최소 보강 범위와 일치하는 것을 알 수 있다(Jung et al., 2001).

반개착식 공법의 아치콘크리트 설치범위, 두께 등과 같이 제원에 대한 기준이 없는 실정으므로 설계시 안전측 위주로 주관적 판단 또는 경험에 의존한 자의적인 과다 설계가 되고 있다. 따라서 반개착식 공법의 현장 적용시 합리적이며, 공학적 타당성과 안전성,

시공 일관성을 설계 기준이 필요한 실정이다. 반개착식 터널 시공 순서를 Fig. 1에 정리하였다.

### 3. 반개착식 공법 기준 제안을 위한 수치해석

#### 3.1 수치해석 개요

##### 3.1.1 해석프로그램 개요

수치해석에 적용된 범용 프로그램은 MIDAS/GTS을 이용하여 수행하였다. 지반의 구성모델은 응력-변위관계의 평가를 위해 탄소성모델을 사용하였으며, 소성영역 판정을 위해 지반의 항복거동을 잘 표현할 수 있는 M-C파괴규준을 적용하였다. 아치 콘크리트는 사각형 2차원 요소로 선형 탄성재료로 가정하여 plate 요소로 모델링 하였으며, 반개착식 터널 공법의 수치해석상 시공순서는 실제 시공순서와 동일하게 모사하였다.

##### 3.1.2 검토방법

###### (1) 해석 개요

아치 콘크리트의 두께나 설치 범위에 대해서는 별도로 규정하지 않고 있어 구조물마다 다른 방법으로

설계되고 있으며, 단면 결정을 위한 적정기준이 없기 때문에 안전율이 과다한 비경제적 설계가 될 우려가 있다. 이에 본 연구에서는 아치 콘크리트의 두께 및 설치범위를 달리해 해석을 실행하여 최적의 아치 콘크리트 단면설계를 위한 방안을 도출하고자 하였다. 아치 콘크리트 타설 후 NATM 시공시 터널의 안정성 확보를 위하여 아치 콘크리트의 두께를 크게 하는 것이 안정할 것이나 지지점에서의 지지력 문제와 경제성을 고려할 때 적정두께를 산정하는 것이 매우 중요할 것으로 판단된다.

터널의 좌우의 해석범위는 지반의 초기응력 상태에 영향을 받으며  $K_0$ 값이 클수록 영향범위는 증가한다. 해석영역은 좌우에서는 3.5D 이상으로 정하여 해석하였다.

(2) 경계조건 및 지보재의 모델링

모델링 적용 터널은 최근 시공이 가장 많이 되고 있는 고속철도 복선단면으로, 터널 하부의 경계조건은 연직방향(Y방향) 변위를 구속하였으며, 터널 좌우의 경계조건은 연직방향은 변위 허용, 수평방향은 변위를 구속하였다. 본연구의 터널 지보재는 슛크리트와 록볼트 등이며 강관보강은 고려하지 않았다.

아치 콘크리트와 슛크리트는 Beam요소로 모델링하며 각 절점에서 3개의 자유도를 가지며 휨에 저항하는 구조요소로 사용되며, Beam 요소의 강성은 단면적,

단면 2차 모멘트 및 탄성계수에 의해 정의되며 선형재로 거동하는 것으로 가정된다. 록볼트는 Embedded Truss 요소로 모델링하며 일축인장에 지배받는 1차원 부재로 계산하고, 축방향 강성은 록볼트의 단면적, 탄성계수에 의해 결정된다.

(3) 입력정수의 산정

아치 콘크리트 라이닝 설계를 위한 원지반 강도정수는 원위치 시험 등을 통하여 합리적인 값을 산정하여야 하며, 이러한 강도정수는 현장의 지질공학적 특성에 따라 넓은 범위를 보이게 된다. 따라서 본 연구에서는 수치해석을 위한 기본 입력물성치 산정을 위하여 한국건설기술연구원(1998)에서 수행한 “국내 터널설계 기술력 향상을 위한 신기술 연구(I)”(Moon et al., 1998)의 조사결과를 토대로 하여 원지반 강도정수를 산정하였다.

국내터널 38개소에 적용된 원지반의 입력물성치 가운데 터널의 수치해석에 필요한 탄성계수, 점착력, 내부마찰각의 적용 범위를 Table 1과 같이 정리하여 현장여건등에 따라 아치콘크리트 지점부에서 경암이 출현할 수 있으므로 풍화도 ~ 경암까지 모델링 하였다. 본 연구에서는 축압에 의한 변수를 배제하기 위하여 축압계수  $K_0=1.0$ 을 적용하였다. 일반적으로 도심지 터널에서는 현장 특성상 쌓기 비탈면의 경사, 형상

Table 1. Material properties

Rock type	Specific gravity (kN/m <sup>3</sup> )	Elastic modulus (kN/m <sup>2</sup> )	Cohesion (kN/m <sup>2</sup> )	Internal friction (°)	Poisson's ratio
Soil	19	3.5×10 <sup>4</sup>	10	30	0.35
Weathered rock	23	3.9×10 <sup>5</sup>	184	32	0.30
Moderate rock	25	2.1×10 <sup>6</sup>	930	37	0.27
Hard rock	27	1.9×10 <sup>7</sup>	1400	43	0.23

Table 2. Arch concrete material properties

Type	Specific gravity (kN/m <sup>3</sup> )	Elastic modulus (kN/m <sup>2</sup> )	Poisson's ratio
Concrete	27	1.35×10 <sup>7</sup>	0.40

및 토피고 등과 같이 다양한 조건의 발생 및 상기 영향인자의 변화요인이 적다고 판단되므로, 본 연구에서는 산악터널에 대한 조건을 가정하여 입력정수를 산정하였으며, 아치 콘크리트의 입력정수는 Table 2와 같다.

### 3.2 아치콘크리트 안정성 검토(1) - 아치콘크리트 설치범위

아치 콘크리트가 적용된 터널의 규모는 철도 복선 터널의 표준도를 준용하였으며, 아치 콘크리트 해석 모델은 두께와 설치범위를 달리하여 총 60개의 모델을 선정하였다. 최적의 아치콘크리트의 두께를 선정하기 위해 300 mm, 400 mm, 500 mm, 600 mm, 700 mm로 변화시키며 검토하였고, 설치범위는 아치 콘크리트의 중심에서 120°로 분류하여 상호 비교 검토하였다. 두께와 설치범위만을 고려하기 위해 지점부의 아치 콘크리트 두께도 천단부와 동일한 두께를 적용하였다. 총 15개의 모델을 경암, 연암, 풍화암, 풍화토의 4종류의 지반에서 해석을 수행하였으며, 대표 수치해석 모델은 Fig. 2에 나타내었다.

### 3.3 아치콘크리트 안정성 검토(2) - 복토두께

일반적으로 터널 굴착시 복토두께가 작은 구간에서는 깎기를 통한 개착식 터널설치나 NATM 통과가

불가피할 경우 상부 지상보강 그라우팅+내부 보강그라우팅공법을 적용 후 도로 및 철도건설이 수행되고 있으며, 개착식 터널 시공시는 환경보전의 관점에서, 시공후 터널상부 지표층을 깎기를 수행하기 이전과 같은 형상으로 되메움 하는데, 이때 개착식 터널 라이닝에 편토압이 발생하게 된다.

그러나 종래의 아치형 개착식 터널 구조물의 설계에서는, 터널 천단부로부터의 되메움 높이만을 계산하여 되메움 하중을 적용하였기 때문에 편토압의 영향을 적절히 고려하지 않았으며, 반개착식 공법의 경우 아치콘크리트 상부 복토 현황에 따른 거동 분석이 전무한 상황이다. 따라서 유한요소 모델을 이용하여 터널 구조물 상부의 지반조건에 따른 깎기비탈면의 기울기 및 원지반 형상에 따른 성토비탈면의 경사각도, 되메움 두께가 아치 콘크리트 및 터널 주변지반에 미치는 영향에 대하여 검토하였다.

본 절에서는 수평지형 조건에서 터널의 계획심도에 의해 결정되는 아치콘크리트 상부 복토 두께에 대한 영향을 검토하기 위하여 Fig. 3과 같은 조건을 선정하였다.

토질 조건은 풍화토, 풍화암, 연암, 경암 4종류의 지반을 선정하였으며, 복토두께는 2 m, 4 m, 6 m, 8 m, 10 m로 결정하였고, 깎기비탈면 기울기에 의한 수평토압 증가에 대한 영향을 배제하기 위하여 기울기는 수직으로 가정하였다.

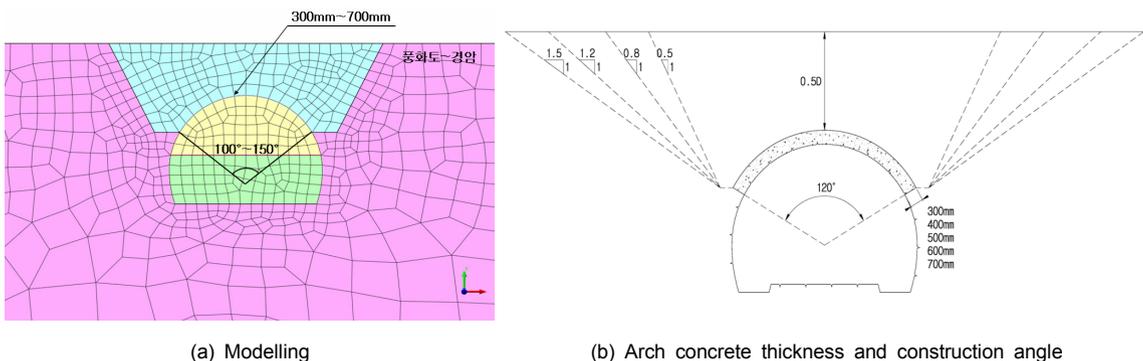


Fig. 2. Numerical analysis for arch concrete thickness and construction angle

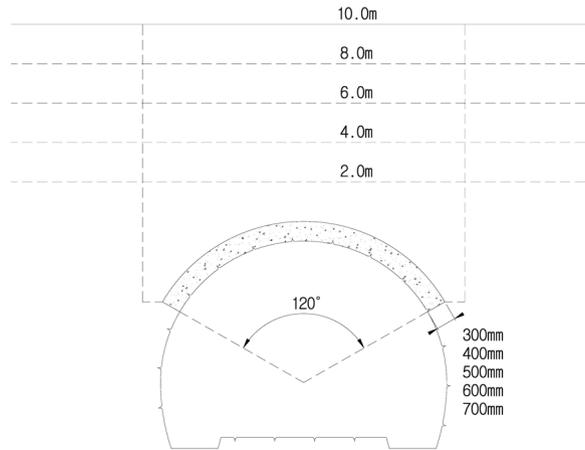


Fig. 3. Numerical analysis for arch concrete thickness and overburden

### 3.4 아치콘크리트 안정성 검토(3) - 경사각도

반개착식 터널 공법을 포함한 복개 터널 구조물은 친환경적인 건설을 위하여 성토체 시공시 지반굴착 이전의 원지반 조건으로 복원을 위하여 일정한 경사각도를 갖는 경사시공을 하게 되고, 이로 인하여 편토압이 작용이 불가피하다. 현재 복개 터널구조물의 설계를 위하여 일반적으로 적용되고 있는 구조공학적

해석시 연직토압은 콘크리트 라이닝 상부 성토체를 상재하중으로 고려하여 산정하고, 좌, 우측에 작용하는 횡방향 토압은 정지토압 분포를 적용하고 있다. 그러나 이러한 토압분포는 콘크리트 라이닝 좌, 우측 측벽부 외측에서 성토체의 경사시공에 의한 편토압의 영향을 고려할 수 없다. 따라서 본 절에서는 성토비탈면에 의한 편토압을 고려한 합리적인 복개 터널구조물 해석 및 설계를 위한 기본연구로써, 지반공학적

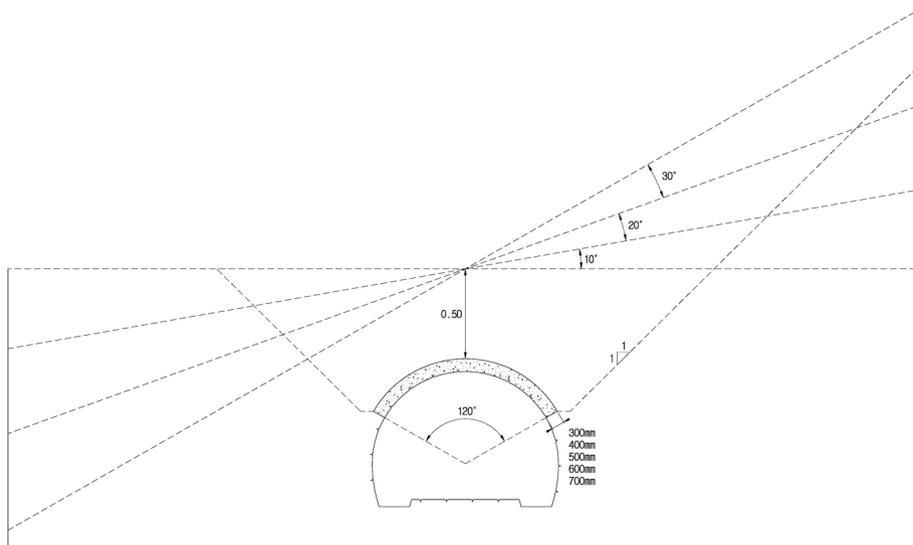


Fig. 4. Numerical analysis for arch concrete thickness and surface slope angle

모델링 기법을 이용하여 성토비탈면에 의한 편토압 영향을 고려하여 아치 콘크리트의 구조적 안정성과 공학적 거동특성을 분석하였다. 토질 조건은 풍화토, 풍화암, 연암, 경암 4종류의 지반을 선정하였으며, 복토비탈면 경사각도는 0°, 10°, 20°, 30° 로 변화시켜 수치해석을 수행하였고, 터파기 비탈면 기울기는 모든 지반에 같은 조건으로 해석을 수행하기 위해 1:1 기울기를 적용하였다(Fig. 4).

#### 4. 영향인자 상관관계 분석

본 연구에서는 반개착식 공법에 의한 아치콘크리트 설계시 구조공학적 해석기법에서는 고려할 수 없는 굴착사면의 경사각도 및 복토두께, 아치콘크리트 두께, 각도 등을 매개변수로 수치해석을 통하여 각각의 영향인자가 아치콘크리트의 안정성의 판단기준인 휨응력 및 내공변위에 미치는 영향을 검토하였다. 모멘트 및 축력은 휨응력의 인자이므로 영향분석에서 제외하였다. 또한 일반적인 NATM 터널 굴착시 강관다단을 설치하여 터널의 아칭 효과를 확보하는데 필요한 최소한 설치 범위는 상부 120°이상이며, 아치콘크리트 설치각도의 경우 시공 사례(Jung et al., 2001)가 있는 120°에 대하여만 검토하였다.

아치콘크리트 두께의 주요 인자인 지반조건, 경사각도, 복토두께와 아치콘크리트의 두께의 상관관계를 조사하기 위하여 회귀분석을 실시하고 영향 인자별 회귀식을 산정하였다. 본 연구에서는 두 변수들간의 선형적인 상관관계를 조사하는 방법인 단순 선형 회

귀분석(simple linear regression)을 실시하였다. 식 (1)은 단순회귀분석 기본식이며, 회귀분석 결과의 신뢰성 확보를 위하여 상관성 0.9 이상의 회귀식을 도출하고자 하였다.

$$Y = a + bX \quad (1)$$

$Y$  : flexural stress, inner displacement

$X$  : backfill thickness, surface slope angle, arch concrete thickness

$a, b$  : constant

##### 4.1 아치콘크리트 두께변화에 의한 영향인자 분석

아치콘크리트 두께변화에 의한 휨응력과 연직내공변위의 상관관계 분석 결과 풍화암 및 연암 조건에서의 내공변위발생 경향의 상관 관계가  $R^2=0.8$  미만이었으며, 나머지 두 경우에는 상관관계가 각각  $R^2=0.9072$ ,  $R^2=0.9992$ 로 높은 상관성이 있는 것으로 나타났으며, 지반 조건별 회귀식은 Table 3에 정리하였으며, 회귀식은 다음과 같은 관계가 성립함을 알 수 있었다.

##### 4.2 복토두께 변화에 의한 영향인자 분석

영향인자간의 상관성을 0.9에 근접하게 얻을 수 있도록 복토두께 변화에 의한 휨응력과 연직내공변위

**Table 3.** Relation between flexural stress, inner displacement and arch concrete thickness

Rock type	Equations of linear regression analysis	
	Flexural stress and arch concrete thickness	Inner displacement and arch concrete thickness
Soil	$X(\text{MPa}) = 0.0028 \times A(\text{mm}) - 7.0621$	$Y(\text{mm}) = -0.0085 \times A(\text{mm}) - 22.298$
Weathered rock	$X(\text{MPa}) = 0.0050 \times A(\text{mm}) - 4.9044$	$Y(\text{mm}) = -0.0011 \times A(\text{mm}) - 3.837$
Moderate rock	$X(\text{MPa}) = 0.0056 \times A(\text{mm}) - 5.4708$	$Y(\text{mm}) = 0.0026 \times A(\text{mm}) - 3.814$
Hard rock	$X(\text{MPa}) = 0.0055 \times A(\text{mm}) - 5.2790$	$Y(\text{mm}) = 0.0036 \times A(\text{mm}) - 3.423$

X: Flexural stress, Y: Inner displacement, A: Arch concrete thickness

의 상관관계 분석 결과 상관관계는 최소  $R^2=0.8762$ , 최대  $R^2=0.9995$ 로 높은 상관성이 있는 것으로 나타났으며, 다음과 같은 관계가 성립함을 알 수 있었다. 풍화토의 경우 경향이 비선형으로 분포하여 높은 상관성을 확보하기 위하여 2차 다항식을 적용한 회귀식을 도출하였다. Table 4는 지반조건별 복토두께 변화에 대한 휨응력과 내공변위 회귀식을 정리한 것이다.

### 4.3 경사각도 변화에 의한 영향인자 분석

영향인자간의 상관성을 0.9에 근접하게 얻을 수 있도록 경사각도에 의한 휨응력과 내공변위의 상관관계 분석 결과 상관관계는 최소  $R^2=0.9354$ , 최대  $R^2=0.9999$ 로 높은 상관성이 있는 것으로 나타났으며, 다음과 같은 관계가 성립함을 알 수 있었다. 경사각도

의 상관성이 가장 양호한 것을 알 수 있었으며, 경사각도에 의한 경향이 비선형으로 분포하여 높은 상관성을 확보하기 위하여 2차 다항식을 적용한 회귀식을 도출하였다. Table 5는 지반조건별 지표면 경사각도 변화에 대한 휨응력과 내공변위 회귀식을 정리한 것이다.

아치콘크리트의 제원에 영향을 줄 수 있는 아치콘크리트의 두께, 지반조건, 복토두께, 경사각도를 변화시키며 실시한 총 260회의 수치해석결과들의 상관성 분석을 위하여 단순선형 회귀분석을 수행하였다.

분석결과 총 88개의 영향인자 회귀식을 도출하였으며, 도출된 회귀식의 상관관계는 최소 0.852이었으며, 평균 0.95이상으로 상관도가 매우 높은것을 알 수 있었다.

본 연구의 결과물인 88개의 회귀식을 이용하여 현

**Table 4.** Relation between flexural stress, displacement and backfill thickness

Arch concrete thickness	Rock type	Equations of linear regression analysis	
		Flexural stress and arch backfill thickness	Inner displacement and backfill thickness
300 mm	Soil	$X = 0.121 \times B(m)^2 - 2.073 \times B(m) + 0.902$	$Y(mm) = -5.4437 \times B(m) + 6.7579$
	Weathered rock	$X = -0.8312 \times B(m) - 0.1968$	$Y(mm) = -1.6601 \times B(m) + 2.6164$
	Moderate rock	$X = -0.8502 \times B(m) + 0.2267$	$Y(mm) = -0.8874 \times B(m) + 0.8469$
	Hard rock	$X = -0.7915 \times B(m) + 0.1524$	$Y(mm) = -0.5292 \times B(m) + 0.3503$
400 mm	Soil	$X = 0.125 \times B(m)^2 - 2.036 \times B(m) + 0.8038$	$Y(mm) = -5.5028 \times B(m) + 5.9129$
	Weathered rock	$X = -0.6297 \times B(m) - 0.1610$	$Y(mm) = -1.4827 \times B(m) + 2.0596$
	Moderate rock	$X = -0.6471 \times B(m) + 0.1191$	$Y(mm) = -0.7198 \times B(m) + 0.5229$
	Hard rock	$X = -0.5961 \times B(m) + 0.0453$	$Y(mm) = -0.3824 \times B(m) + 0.1620$
500 mm	Soil	$X = 0.1218 \times B(m)^2 - 1.9302 \times B(m) + 0.5987$	$Y(mm) = -5.7587 \times B(m) + 6.4366$
	Weathered rock	$X = -0.4766 \times B(m) - 0.2028$	$Y(mm) = -1.4660 \times B(m) + 1.8908$
	Moderate rock	$X = -0.5005 \times B(m) + 0.0085$	$Y(mm) = -0.6226 \times B(m) + 0.3024$
	Hard rock	$X = -0.4567 \times B(m) - 0.0591$	$Y(mm) = -0.2956 \times B(m) + 0.0477$
600 mm	Soil	$X = 0.1128 \times B(m)^2 - 1.7603 \times B(m) + 0.3563$	$Y(mm) = -5.7892 \times B(m) + 4.6001$
	Weathered rock	$X = -0.3682 \times B(m) - 0.2799$	$Y(mm) = -1.4808 \times B(m) + 1.6778$
	Moderate rock	$X = -0.3999 \times B(m) - 0.0670$	$Y(mm) = -0.5667 \times B(m) + 0.1430$
	Hard rock	$X = -0.3596 \times B(m) - 0.1341$	$Y(mm) = -0.2440 \times B(m) - 0.0215$
700 mm	Soil	$X = 0.0815 \times B(m)^2 - 1.3804 \times B(m) + 0.2046$	$Y(mm) = -5.9966 \times B(m) + 3.9110$
	Weathered rock	$X = -0.2947 \times B(m) - 0.3558$	$Y(mm) = -1.4939 \times B(m) + 1.3893$
	Moderate rock	$X = -0.3304 \times B(m) - 0.1130$	$Y(mm) = -0.5597 \times B(m) + 0.1180$
	Hard rock	$X = -0.2916 \times B(m) - 0.1818$	$Y(mm) = -0.2119 \times B(m) - 0.0667$

X: Flexural stress, Y: Inner displacement, B: Backfill thickness

**Table 5.** Relation between flexural stress, displacement and surface slope angle

Arch concrete thickness	Rock type	Equations of linear regression analysis	
		Flexural stress and surface slope angle	Inner displacement and surface slope angle
300 mm	Soil	$X = -0.036(S)^2 + 0.3696(S) - 6.4438$	$Y(\text{mm}) = -0.0845(S)^2 + 1.3832(S) - 30.306$
	Weathered rock	$X = -0.0301(S)^2 + 0.1985(S) - 4.2170$	$Y(\text{mm}) = -0.0507(S)^2 + 0.3561(S) - 5.9905$
	Moderate rock	$X = -0.0324(S)^2 + 0.2278(S) - 4.5323$	$Y(\text{mm}) = -0.0424(S)^2 + 0.2967(S) - 3.7967$
	Hard rock	$X = -0.0362(S)^2 + 0.2778(S) - 4.6789$	$Y(\text{mm}) = -0.0441(S)^2 + 0.4431(S) - 2.9482$
400 mm	Soil	$X = -0.0239(S)^2 + 0.2404(S) - 5.9400$	$Y(\text{mm}) = -0.0731(S)^2 + 1.1315(S) - 30.906$
	Weathered rock	$X = -0.0220(S)^2 + 0.0710(S) - 3.1687$	$Y(\text{mm}) = -0.0348(S)^2 + 0.147(S) - 5.6411$
	Moderate rock	$X = -0.0220(S)^2 + 0.0642(S) - 3.4112$	$Y(\text{mm}) = -0.0275(S)^2 + 0.1503(S) - 3.1607$
	Hard rock	$X = -0.0250(S)^2 + 0.1288(S) - 3.5351$	$Y(\text{mm}) = -0.0239(S)^2 + 0.1849(S) - 2.0193$
500 mm	Soil	$X = -0.0152(S)^2 + 0.1633(S) - 5.6214$	$Y(\text{mm}) = -0.0682(S)^2 + 0.9843(S) - 31.743$
	Weathered rock	$X = -0.0160(S)^2 + 0.0081(S) - 2.4746$	$Y(\text{mm}) = -0.0279(S)^2 + 0.0518(S) - 5.7116$
	Moderate rock	$X = -0.0157(S)^2 - 0.0010(S) - 2.5829$	$Y(\text{mm}) = -0.0192(S)^2 + 0.0689(S) - 2.7911$
	Hard rock	$X = -0.0164(S)^2 + 0.0249(S) - 2.7057$	$Y(\text{mm}) = -0.0141(S)^2 + 0.0845(S) - 1.5306$
600 mm	Soil	$X = -0.0102(S)^2 + 0.1284(S) - 5.2446$	$Y(\text{mm}) = -0.0646(S)^2 + 0.8486(S) - 32.681$
	Weathered rock	$X = -0.0121(S)^2 - 0.0172(S) - 2.0069$	$Y(\text{mm}) = -0.0263(S)^2 + 0.0199(S) - 5.9527$
	Moderate rock	$X = -0.0120(S)^2 - 0.0189(S) - 2.2065$	$Y(\text{mm}) = -0.015(S)^2 + 0.0389(S) - 2.6258$
	Hard rock	$X = -0.0112(S)^2 - 0.0193(S) - 2.1599$	$Y(\text{mm}) = -0.0091(S)^2 + 0.0463(S) - 1.2666$
700 mm	Soil	$X = -0.0071(S)^2 + 0.1063(S) - 4.7696$	$Y(\text{mm}) = -0.0613(S)^2 + 0.7229(S) - 33.754$
	Weathered rock	$X = -0.0095(S)^2 - 0.0271(S) - 1.6776$	$Y(\text{mm}) = -0.0252(S)^2 + 0.0036(S) - 6.3034$
	Moderate rock	$X = -0.0097(S)^2 - 0.0210(S) - 1.8801$	$Y(\text{mm}) = -0.0161(S)^2 + 0.0875(S) - 2.6382$
	Hard rock	$X = -0.0084(S)^2 - 0.0270(S) - 1.7981$	$Y(\text{mm}) = -0.0065(S)^2 + 0.0317(S) - 1.1171$

X: Flexural stress, Y: Inner displacement, S: Surface slope angle

장 조건에 맞는 최적의 아치콘크리트의 두께를 결정이 가능할 것으로 판단된다.

## 5. 고찰 및 결론

본 연구에서는 시공성 및 경제성과 안정성이 향상된 친환경 터널 공법인 반개착식 터널공법에 대하여, 산악지형과 계곡 등이 발달한 국내 실정에 맞는 설계 기준을 제시하고자 하였으며, 저토포 갱구부 시공 현장조건을 고려한 반개착식 공법인 설계 기준에 관련된 자료를 제공함으로써 새로운 반개착식 굴착공법의 설계기준 제안을 목적으로 연구를 수행하였다.

현재 반개착식 터널공법에 대해서는 하중조합 및 아치콘크리트의 단면에 대하여는 별도로 정해진 기준이 없으며, 또한 단면력을 산정할 때 고려해야 할 하중들의 종류 및 계수도 명확히 정립되어 있지 않아

설계자 마다 다른 방법으로 설계되고 있는 실정이며, 단면 결정을 위한 적정한 기준이 없기 때문에 안전율이 과다한 비경제적인 설계가 될 우려가 있어, 본 연구에서는 관련기준 및 문헌들을 참고하여 안전성과 경제성을 고려한 반개착식 터널공법의 설계 기준 정립에 도움이 되고자 한다. 이를 위해 지반조건에 따른 천층 터널의 파괴 특성을 검토하기 위하여 지반조건을 변화시키며 수치해석 실시하였으며, 토사 및 풍화토로 형성된 천층 터널의 터널 상부 지층 두께별 파괴 특성을 검토하기 위하여 상부 복토 두께를 변화시키며 수치해석 실시하였고, 편경사 지형의 영향을 알아보기 위하여 상부 경사각도를 변화시키는 등의 다양한 조건들에 대하여 수치해석을 수행하여, 합리적이고 경제적이며, 안전한 단면 설계 방안을 도출하고자 하였다.

또한 도심에 건설되고 있는 천층 터널은 건설비, 토목기술, 공사기간, 선형조건상의 이유로 개착식 공법이 주로 적용되어 왔으나 이는 노면교통에 막대한 지장을 초래하는 문제점을 안고 있어, 본 연구는 그중 비교적 연약한 토사 및 충적층, 풍화토/풍화암층, 단층 파쇄대층과 같은 불량한 연약 지반에도 반개착식 터널공법의 도심지 천층터널 적용성을 검토하여 이러한 문제점들을 해결하고자 하였다. 이상의 결과들을 요약하면,

1. 반개착식 터널공법의 적용성 및 아치콘크리트 두께 및 설치 범위에 대한 영향인자 분석을 위하여 260회의 수치해석을 실시하였으며, 영향인자들에 대한 회귀분석을 통하여 기반암 지반조건, 아치콘크리트 설치범위, 아치콘크리트 두께, 상부 복토두께, 원지반 비탈면 경사각도에 대한 총 88개의 회귀식을 도출하였다.
2. 갱구부 또는 저토피부 천층터널에서 현장 시추조사를 통하여 지반조건 자료를 획득하고, 터널 천단부 복토두께와 현지의 경사각도를 알고 있을 경우 본 연구에서 도출된 영향인자 회귀식을 적용하여 아치콘크리트의 두께를 결정하여, 반개착식 공법의 적용 결정을 위해 신속한 의사결정이 가능할 것으로 판단된다.
3. 향후 본 연구에서 제시한 영향인자 회귀식을 이용하여 반개착식 터널공법의 제원을 결정할 수 있을 것으로 판단되며, 반개착식 터널공법의 정립을 위하여 본 연구 결과를 참고로 보다 합리적이고 경제 적이며, 안전한 프로그램 개발과 같은 많은 연구가 이루어져 철도터널 뿐만 아니라 도로터널, 전력구 터널 등에 널리 확대 적용되어 지기를 기대한다.

## 참고문헌

1. Han, K.M., Park, I.J. (2002). "An environmentally tunnel construction method at low overburden",

J of Korean tunneling and Underground space Association, Vol. 4, No. 3, pp. 207-216.

2. An, J.H., Lee, S.D. (2009). "Behavior of braced rib arch in shallow tunnel excavated by semi cut-and-cover method", J of Korean tunneling and Underground space Association, Vol. 11, No. 4, pp. 419-425.

3. Sauer, G. (1992). "The schurzberg tunnel. oberrieden, sept., proc, 1st international symposium on tunnel construction and underground structures", Ljubljana, Slovenia, Chap. 2, pp. 151-165.

4. Lee, S.J., Na, S.M., kim, S.H., Lee, S.D. (2005), "Development and verification of the new method for shallow overburden tunnel", Proc of KSCE, pp. 3684-3687.

5. Jung, M.K., Park, C.M., Lee, H., Kim, S.R. (2001). "A case study on the shallow overburden tunnelling with a frame slab method", KGS Spring National Conference.

6. Bae, G.J., Chung, H.S., Lee, G.P. (2003). "A study on eccentric load acted on cut and cover tunnel by numerical approach", J of Korean tunneling and Underground space Association, Vol. 5, No. 3, pp. 227-239.

7. Yang, J.W., Lee, S.D. (2010). "Behavior of arch slab in the shallow tunnel constructed perpendicular to the slope by Semi cut-and-cover method", J of Korean tunneling and Underground space Association, Vol. 12, No. 2, pp. 157-164.

8. Yoo, K.S. (2002). "Effect of surface slope on structural behavior of cut-and-cover tunnel", Journal of KSCE, Vol. 22, No. 1-C, pp. 99-109.

9. Moon, H.D., Bae, G.J., Cho, M.S. (1998), "A study on the improvements of tunnel design technologies in KOREA(1)", KICT, KOREA, pp. 45-46.