

암반응력의 분포특성을 고려한 터널거동 분석에 관한 연구

박도현¹, 김영근^{2*}

A study on analysis of tunnel behaviors considering the characteristics of in-situ stress distribution in rock mass

Do-Hyun Park, Young-Geun Kim

Abstract In construction of a structure in underground space, in-situ stress in rock mass has great effect on the stability of the structure. Especially, the direction and magnitude of rock stress have influence on the excavation method, the choice of support and reinforcement method for establishing the stability of tunnel. Therefore, it is very important to consider the characteristics of in-situ stress in rock mass for tunnel stability analysis. In this study, a reasonable design method for underground structure was reviewed through the case study for tunnel design considering in-situ rock stress. For this purpose, the estimation for SRF (Stress Reduction Factor) as input parameter in rock classification using Q-System and the assesment for tunnel support were studied. Also, considering the characteristics of in-situ rock stress such as the magnitude of K and the direction of principal stress, the parameter studies for tunnel stability analysis were carried out. An improved method was proposed for obtaining the better results in the tunnel stability analysis.

Keywords: In-situ rock stress, SRF, support design, stability analysis, K_0

요 지 지하암반에서 지하구조물을 구축하는 경우, 지하구조물의 안정성 확보를 위한 굴착, 지보 및 대책공법은 현지 암반응력의 크기 및 방향에 큰 영향을 받게 된다. 따라서 터널과 같은 지하구조물의 설계와 안정성 해석에 있어서 현지 암반응력의 분포특성을 고려하는 것은 대단히 중요한 문제라고 할 수 있다. 본 연구에서는 암반응력을 고려한 터널설계 사례를 통하여 합리적이고, 안정적인 지하구조물 설계 방안에 대하여 고찰하고자 하였다. 이를 위하여 Q-System에 의한 암반분류시 입력변수인 응력저감계수(SRF) 평가과정 및 표준지보패턴 설계 사례에 대하여 검토하였다. 또한 터널안정성 해석시 축압계수 크기 및 주응력 방향을 변수로 한 수치해석을 수행하여 터널 안정성 해석시 개선사항에 대하여 제안하였다.

주요어: 현지암반응력, 응력저감계수, 지보 설계, 안정성 분석, 축압계수

1. 서 론

암반은 자연 상태에서 응력을 받고 있으며 이를 현지 응력장(in-situ stress field) 또는 초기 응력장(virgin stress field)이라고 한다. 지하 암반내 터널과 같은 지하구조물을 건설할 때 이러한 현지응력은 굴착으로 인한 응력재배치가 발생하게 되어 교란되게 되는데, 특히 지하구조물의 안정성 확보를 위한 굴착, 지보 및 대책공법은 응력장 교란 여부 및 범위에 따라 큰 영향을 받게 된다(Goodman, 1989).

그리고 지하구조물은 현지응력이 존재하는 암반 내를 굴착하는 것이므로 그 특성상 암반에 대한 공학적 특성 및 초기 암반응력을 합리적으로 결정하여 설계시 반영

하여야만 한다. 따라서 지하 구조물의 설계와 안정성 해석에 있어서 현지 암반의 초기응력 산정 및 재현은 대단히 중요한 과제라고 할 수 있다. 이와 관련하여 문상호와 문현구(1999)는 합리적인 축압계수 결정을 위한 연구를 수행한 바 있으나, 암반응력의 분포특성이 지하구조물에 미치는 영향에 대한 연구는 부족한 실정이라 할 수 있다.

본 연구에서는 암반응력을 고려한 터널거동분석을 통하여 합리적이고, 안정적인 지하구조물 설계 방안에 대하여 고찰하고자 하였다. 이를 위해서 먼저 Q-System에 의한 암반분류시 입력변수인 응력저감계수(SRF, Stress Reduction Factor) 평가과정 및 표준지보패턴 설계사례에 대하여 검토하였다. 또한 터널안정성 해석시 암반응력을 고려하기 위한 입력자료인 축압계수 크기 및 주응력 방향성을 변수로 한 수치해석을 수행하여 터널 안정성 해석시 개선사항에 대하여 제안하고자 하였다.

¹서울대학교 지구환경시스템공학부 박사과정

²중신회원, 삼성물산(주)건설부문 토목ENG팀 부장

*교신저자: 김영근 (babokyg@hanmail.net)

2. 현지 암반응력의 특성

현지 암반응력은 암반 상부의 지중, 지형적 굴곡, 선행 하중 그리고 구조적 특성 등의 영향에 의해 결정된다. 암반 상부의 지형이 평탄하고 암반이 등방탄성체이며 불연속면이 없다고 가정하면 연직응력은 식 (1)과 같이 단위중량에 심도를 곱한 값으로 표현할 수 있으며, 수평 응력은 식 (2)와 같이 나타난다.

$$\sigma_v = \gamma H \quad (1)$$

$$\sigma_h = \left(\frac{\nu}{1-\nu} \right) \gamma H = \left(\frac{\nu}{1-\nu} \right) \sigma_v \quad (2)$$

여기서 ν 는 포아송비(Poisson's ratio), γ 는 암반의 평균 단위중량 그리고 H 는 지표로부터의 심도이다.

그림 1은 침식 및 퇴적의 경우 지반에 작용하는 응력변화를 도시한 것이다. 그림 1(a)와 같이 침식에 의해 연직 응력은 감소하지만 수평응력은 연직응력보다 작게 감소하므로 천부암반에서 측압계수는 증가한다(Gooman, 1989). 이와 반대로 그림 1(c)와 같이 퇴적의 경우에는 수평응력의 증가에 비하여 연직응력의 증가가 더 크므로 천부암반의 측압계수는 감소한다.

위의 그림과 같이 침식과 퇴적시의 응력변화는 수평 방향의 변형률이 0인 경계조건과 탄성체를 가정하여 결정할 수 있다. 초기심도가 Z_0 , 침식심도가 ΔZ 일 때, 침식에 의한 수평응력과 연직응력의 변화를 다음과 같

이 계산하였다(Goodman, 1989).

$$\sigma_h = K_0 \gamma Z_0 - \gamma \Delta Z \left(\frac{\nu}{1-\nu} \right) \quad (3)$$

$$\sigma_v = \gamma Z_0 - \gamma \Delta Z \quad (4)$$

여기서 K_0 는 초기 측압계수, ν 는 포아송비이다.

현지 암반응력의 분포는 현재 암반 상부의 자중이외에도 침식, 풍화, 퇴적현상과 같은 암반의 지질학적 변화이력 및 습곡, 절리, 단층활동과 같은 지질구조 변화이력에도 큰 영향을 미치며 절리 등과 같은 불연속대는 이방향 초기응력 분포를 야기하기도 한다(Hoek & Brown, 1980). 그림 2에는 현지 암반응력의 측정결과 및 분포양상을 나타내었다.

3. 암반응력을 고려한 암반분류

암반특성을 고려한 합리적인 터널 설계시 NMT 적용을 위하여 NGI의 Q-System에 근거한 정량적인 암반분류가 수행되었다. Q-System은 식 (5)로부터 알 수 있듯이 RMR 분류와는 다르게 현지 암반응력을 고려하는 입력변수, 즉 응력저감계수가 있으며, 이에 대한 합리적인 평가가 필수적이다. 여기서는 시추공 자료에 대한 NGI의 응력저감계수 산정방법을 분석하였다.

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF} \quad (5)$$

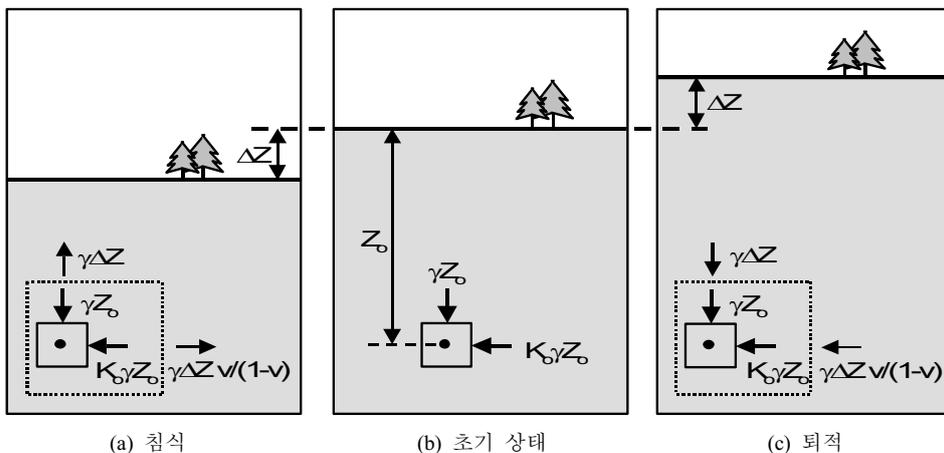


그림 1. 침식과 퇴적이 암반 응력에 미치는 영향

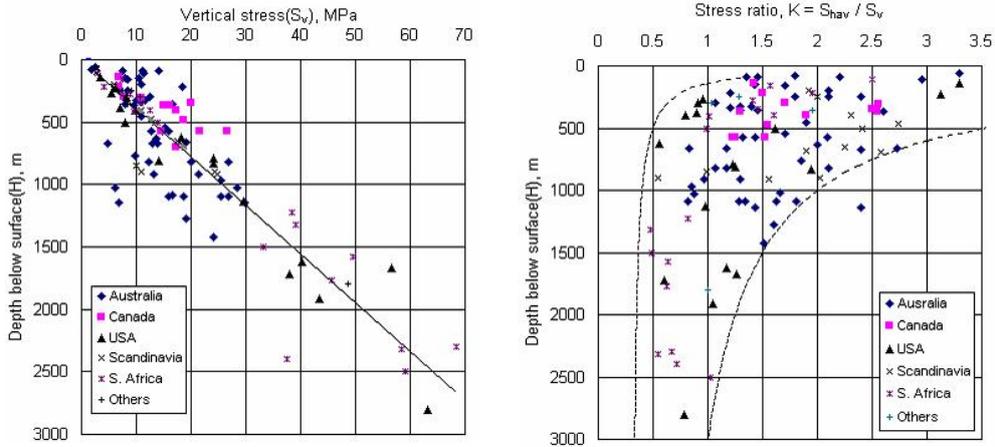


그림 2. 현지 암반응력의 측정결과 및 분포양상

여기서, RQD: Rock Quality Designation(%)

J_n : 절리군 수와 관련된 변수

J_r : 절리면 거칠기 계수와 관련된 변수

J_a : 절리면 변질정도와 관련된 변수

J_w : 출수와 관련된 변수

SRF: 응력저감계수(Stress Reduction Factor)

3.1 응력저감계수 산정

터널주변 접선응력 추정을 위해 수많은 경계요소해석(BEM)에 근거하여 산출된 식(Hoek & Brown, 1980)에 의해 제시된 다음의 상관관계를 사용하였다.

(1) 접선응력 상관식

천정부 접선응력: $S_{\theta r} = (A \times K - 1) S_v$

벽면부 접선응력: $S_{\theta w} = (B - K) S_v$

(연구대상터널의 경우 2차로 도로터널로서 $A=3.1$, $B=2.7$ 적용)

여기서, A, B는 터널형상에 따른 상수, K는 측압계수,

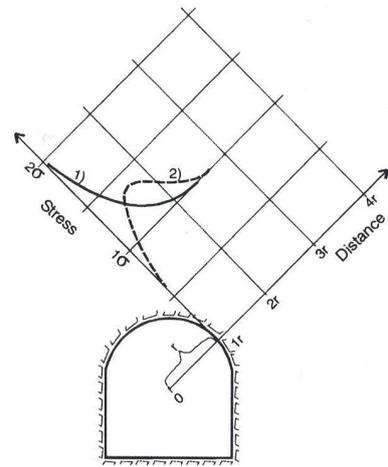


그림 3. 터널 주변 접선응력 분포 형태

S_v 는 수직응력(그림 3 참조)

(2) 터널형상에 따른 상수

터널형상에 따른 상수는 표 1을 참조하여 결정.

표 1. 터널형상에 따른 상수

상수	터널형상(Tunnel Shape)									
A	5.0	4.0	3.9	3.2	3.1	3.0	2.0	1.9	1.8	1.8
B	2.0	1.5	1.8	2.3	2.7	3.0	5.0	1.9	1.9	3.9

(3) 터널 중간부 응력저감계수 산정 및 표준지보 패턴 산정

- 측압계수: $K_{mean} = 1.59$
- 수직응력: $S_v = 480 \text{ m(토피고)} \times 2.7 \text{ tonf/m}^3 = 13 \text{ MPa}$
- 접선응력: 천정부 접선응력, $S_{0r} = (3.1 \times 1.59 - 1) \times 13 \text{ MPa} = 51 \text{ MPa}$
 벽면부 접선응력, $S_{0w} = (2.7 - 1.59) \times 13 \text{ MPa} = 14 \text{ MPa}$
- SRF 산정: 깊이 81.2~120.0 m에 대한 짐하중 강도 및 일축압축강도시험으로부터 평균 일축압축강도는 138 MPa으로 접선응력대 일축압축강도 비, S_{θ}/S_c 는 다음과 같다.

천정부 = $51/138 = 0.37$, 벽면부 = $14/138 = 0.10$
 따라서 표 2로부터 적용 응력저감계수(SRF)는 천정부는 0.5~2, 벽면부는 1로 각각 구분하여 산정하였으며, 표 3에서 보듯이 표준지보패턴이 천정부와 벽면부로 구분되어 설계되었다.

3.2 응력저감계수 산정과정 분석

위의 응력저감계수 산정방법을 분석한 결과, 견고한 암석에서 암반응력이 문제되는 경우 시추자료로부터 응력저감계수 산정과정은 다음과 같다.

- 지반조사 또는 문헌조사를 통해 해당지역 측압계수 산정
- 시추위치에서 토피고를 고려하여 수직응력 계산

표 2. 응력저감계수(SRF) 값

Competent rock, rock stress problems	S_c / S_1	S_{θ} / S_c	SRF
Low stress, near surface, open joints	>200	<0.01	2.5
Medium stress, favourable stress condition	200~10	0.01~0.3	1
High stress, very tight structure. Usually favourable to stability, may be except for walls	10~5	0.3~0.4	0.5~2
Moderate slabbing after > 1 hour in massive rock	5~3	0.4~0.65	5~50
Slabbing and rock burst after a few minutes in massive rock	3~2	0.65~1	50~200
Heavy rock burst (strain burst) and immediate dynamic deformation in massive rock	<2	<1	200~400

표 3. 표준지보패턴 산정

암반 등급	Q	천정부	벽면부
G	0.001 - 0.01	$S(fr) > 10 \text{ cm} + B + CCA$, or $RRS + B(c-c < 1.0 \text{ m}) + S(fr) > 15 \text{ cm Spiling}$	천정부 지보설계 적용
F	0.01 - 0.04	$S(fr) > 10 \text{ cm} + B + CCA$, or $RRS + B(c-c 1.0 \text{ m to } 1.2 \text{ m}) + S(fr) > 15 \text{ cm Spiling}$	천정부 지보설계 적용
	0.04 - 0.1	$RRS + B(c-c 1.2 \text{ m to } 1.3 \text{ m}) + S(fr) > 15 \text{ cm Spiling}$	천정부 지보설계 적용
E	0.1 - 0.4	$B(c-c 1.3 \text{ m to } 1.5 \text{ m}) + S(fr) 13 \text{ cm to } 15 \text{ cm Spiling}$	$B(c-c 1.4 \text{ m to } 1.7 \text{ m}) + S(fr) 6 \text{ cm to } 11 \text{ cm (Spiling)}$
	0.4 - 1	$B(c-c 1.5 \text{ m to } 1.7 \text{ m}) + S(fr) 10 \text{ cm to } 13 \text{ cm (Spiling)}$	$B(c-c 1.7 \text{ m to } 1.9 \text{ m}) + S(fr) 5 \text{ cm}$
D	1 - 4	$B(c-c 1.7 \text{ m to } 2.1 \text{ m}) + S(fr) 6 \text{ cm to } 10 \text{ cm (Spiling)}$	$S_b (c-c 1.6-2 \text{ m})$, or $s_b (2.1-2.3 \text{ m}) + S(fr) 5 \text{ cm}$
C	4 - 10	$B(c-c 2.1 \text{ m to } 2.4 \text{ m}) + S(fr) 5 \text{ cm}$	sb
B	10 - 40	$s_b (2.3-2.5 \text{ m}) + S(fr) 5 \text{ cm}$, or $s_b (c-c 2-3 \text{ m})$	sb, (or unsupported)
A	40 - 100	$s_b (c-c 3-4 \text{ m})$	무지보
	>100	무지보	무지보

- Hoek-Brown 제안식으로부터 접선응력 계산
- 접선응력 대 일축압축강도 비(S_{θ}/S_c) 계산
- Q-System 입력변수 값을 제시한 표로부터 SRF 결정

국내에서는 시추자료로부터 Q-System 분류하는 경우 입력변수 SRF를 일반적으로 “적당한 응력” 항목에 해당하는 $SRF = 1$ 로 적용하고 있다. 국내 도로나 철도터널 건설시 토피고를 고려할 때, 대부분 “적당한 응력” 항목에 해당하나, 심도가 매우 깊거나 높은 응력이 작용하는 견고한 암반에서는 응력저감계수 SRF 값을 1보다 크게 적용하여 Q값을 작게 산정함으로써 안전측으로 지보설계를 수행해야 할 것이다.

따라서 심도가 깊거나 높은 응력이 작용하는 지반 또는 Rock Burst가 예상되는 암반에서는 반드시 계획심도에서 암반응력 분포를 고려하여 SRF를 합리적으로 산정해야 할 것으로 판단된다.

4. 암반응력을 고려한 터널거동 분석

본 장에서는 암반응력을 고려한 터널거동에 대한 수

치해석적 검토사례를 분석하여 터널 안정성 해석시 개선사항에 대하여 고찰하였다. 특히 해석상에서 암반응력을 고려할 때 사용되는 입력자료인 축압계수의 크기 및 주응력 방향성을 변수로 2차원 및 3차원 매개변수 해석을 수행하여 초기 암반응력 재현조건에 따른 영향을 평가하였다. 해석은 축압계수 크기를 변수로 한 2차원 연속체 해석, 주응력 방향성을 변수로 한 3차원 연속체 및 불연속체 해석을 수행하였다.

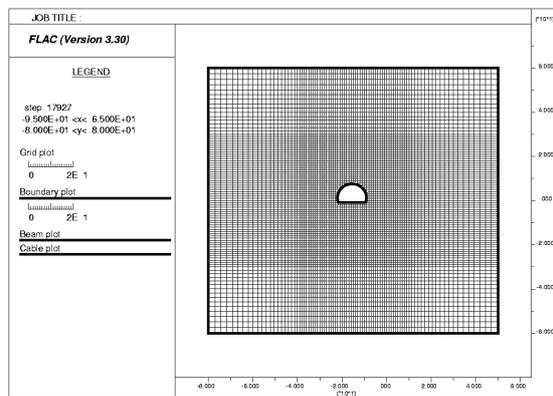
4.1 축압계수 크기에 따른 터널거동 분석

2차원 연속체 터널 안정성 해석을 통하여 축압계수 크기 변화에 따른 터널내 발생 변위 및 지보재 응력 발생 형태와 경향을 파악하였다.

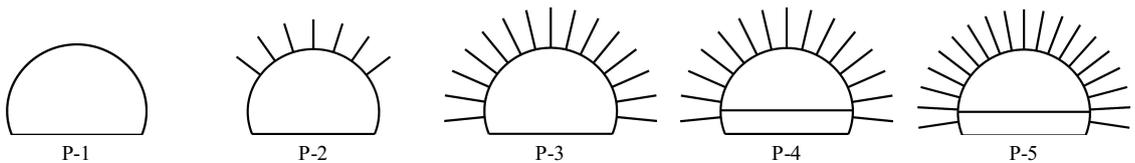
(1) 해석조건 및 방법

해석영역은 지하 50 m 심도에 위치한 터널 주변지반을 모델링하였으며, 해석프로그램은 FLAC 2D 이며, 해석모델은 Mohr-Coulomb Model을 사용하였다.

해석단면은 지보패턴별로 P-1, 2, 3은 진단면 굴착, P-4, 5는 상·하반단면 굴착으로 시공단계에 따라 해석



(a) 해석 모델링



(b) 지보패턴별 해석단면

그림 4. 해석모델링 및 지보패턴별 해석단면

표 4. 해석지반 물성치

등급	탄성계수 (MPa)	포아송비	단위중량 (kN/m ³)	내부마찰각 (°)	점착력 (MPa)
암반등급 I	32,700	0.18	2.70	46	15.0
암반등급 II	24,900	0.20	2.60	44	5.0
암반등급 III	11,400	0.24	2.50	38	2.0
암반등급 IV	3,800	0.30	2.30	32	0.5
암반등급 V	400	0.33	2.10	30	0.45

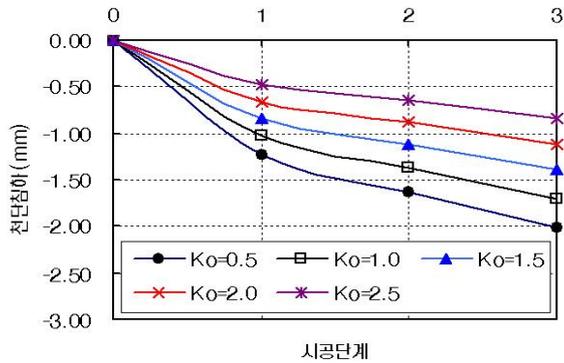
하였으며, 축압계수 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5에 대하여 지보패턴별로 해석을 수행하였다. 그림 4에는 해석모델링과 지보패턴별 해석단면이 나타나 있으며, 표 4에는 해석지반 물성치가 정리되어 있다.

(2) 해석 결과 및 분석

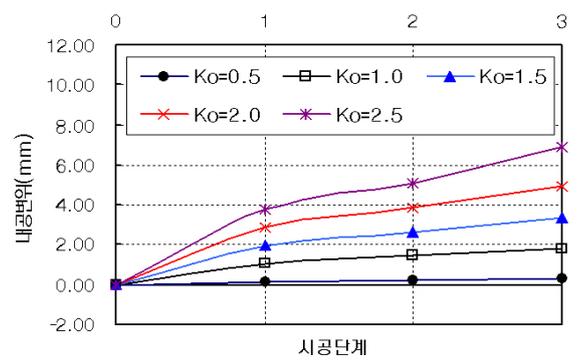
그림 5에는 축압계수 변화에 따른 천단 및 내공변위 발생 경향을 나타내었다. 그림 5에서 보는 바와 같이 지보패턴별로 축압계수가 커질수록 천단침하는 감소하는

경향을 보이고, 내공변위는 증가하는 경향을 보이고 있음을 볼 수 있다. 또한 지반등급이 낮을수록 축압계수 변화에 따른 천단침하 및 내공변위 변화량이 커지는 경향을 나타내었다. 따라서 지반이 취약한 갱구부나 파쇄대에 대한 터널 안정성 검토시 반드시 축압계수 크기에 대한 영향을 고려하여 해석을 수행해야 할 것으로 판단된다.

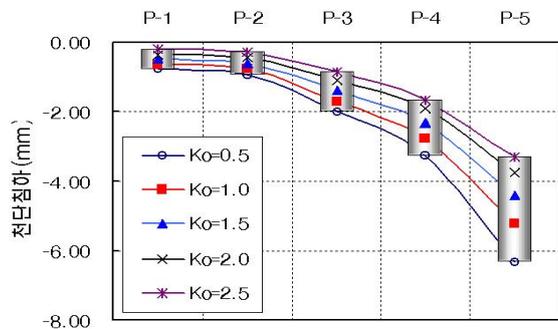
그림 6에는 축압계수 변화에 따른 지보재 응력 발생 경향이 나타나 있다. 그림 6에서는 보는 바와 같이 지보



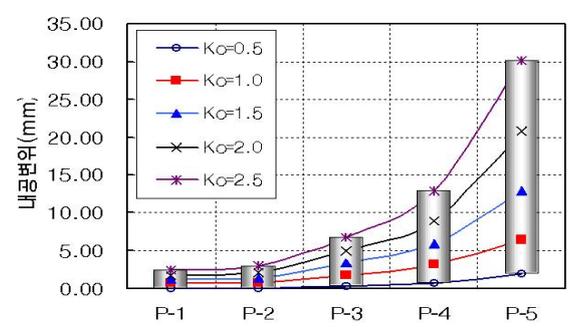
(a) 시공단계별 천단변위(P-3)



(b) 시공단계별 내공변위(P-3)

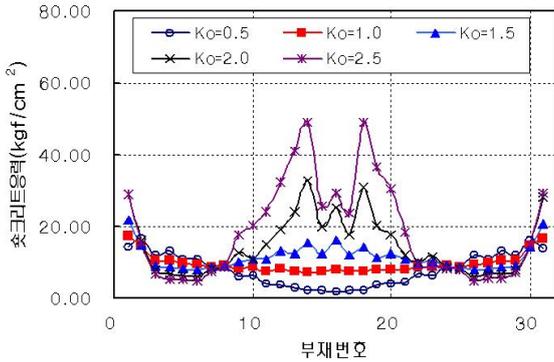


(c) 지보패턴별 천단변위

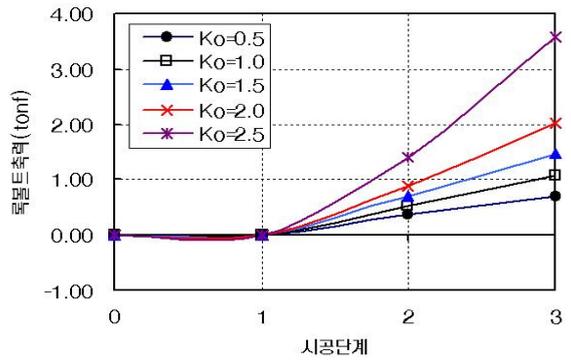


(d) 지보패턴별 내공변위

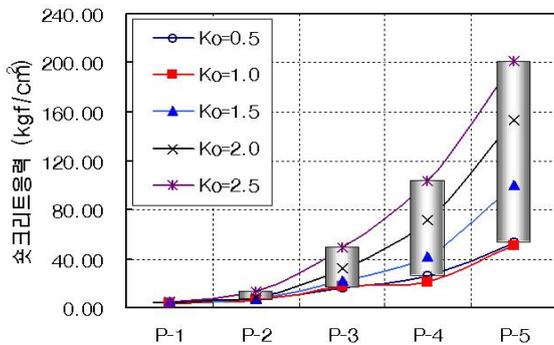
그림 5. 축압계수 변화에 따른 천단 및 내공변위 발생 경향



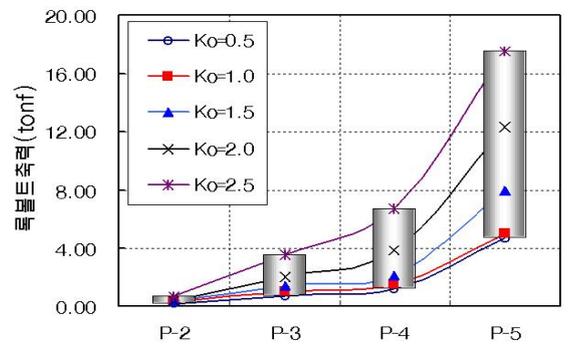
(a) 터널주변 숏크리트 응력(P-3)



(b) 시공단계별 록볼트 축력(P-3)



(c) 숏크리트 응력



(d) 록볼트 축력

그림 6. 축압계수 변화에 따른 지보재 응력 발생 경향

패턴별로 축압계수가 커질수록 천단부 숏크리트 최대 휨압축응력, 록볼트 최대 축력이 증가하는 경향을 보이며, 굴착으로 인해 발생된 변위와 마찬가지로 지반등급이 낮을수록 축압계수 변화에 따른 지보재 응력 변화량이 커지므로 갱구부 및 파쇄대 안정성 검토시에는 축압계수 크기 산정 및 적용시 주의해야 할 것으로 판단된다.

4.2 3차원 해석을 통한 주응력 방향에 따른 터널거동 분석

기존 터널해석에서는 주응력 방향을 고려하지 않고 있는 실정으로 실제 지반특성을 반영한 터널해석을 수행하기 위해서 3차원 상에서 주응력 방향 변화에 따른 터널내 응력과 변위의 영향을 해석적으로 검토하여 주응력 방향에 따른 터널 및 주변지반의 거동 특성을 파악하였다.

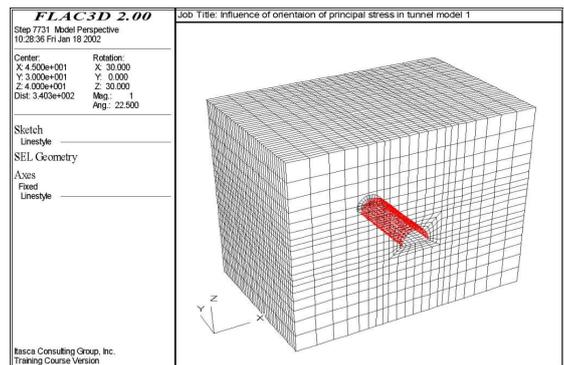


그림 7. 해석 모델링

(1) 해석조건 및 방법

해석영역은 지하 100 m 심도에 위치한 터널 주변지반을 그림 7과 같이 모델링하였으며, 해석프로그램은 FLAC 3D 이고, 해석모델은 Mohr-Coulomb Model 을 사용하

표 5. 주응력 방향 및 측압계수를 고려한 해석 Case

Case	주응력 방향(°)	측압계수(K_0)	주응력 정의
A - 1	0	0.5	$K_1 = \sigma_V$ $K_2 = K_0 \times \sigma_V$
A - 2	30		
A - 3	60		
A - 4	90		
B - 1	0	1.0	$K_1 = K_2 = \sigma_V$
C - 1	0	2.0	$K_1 = K_0 \times \sigma_V$ $K_2 = \sigma_V$
C - 2	30		
C - 3	60		
C - 4	90		

표 6. 해석지반 물성치

등급	탄성계수 (MPa)	포아송비	단위중량 (tonf/m ³)	내부마찰각 (°)	점착력 (MPa)
암반등급 III	8,000	0.23	2.50	38	0.8

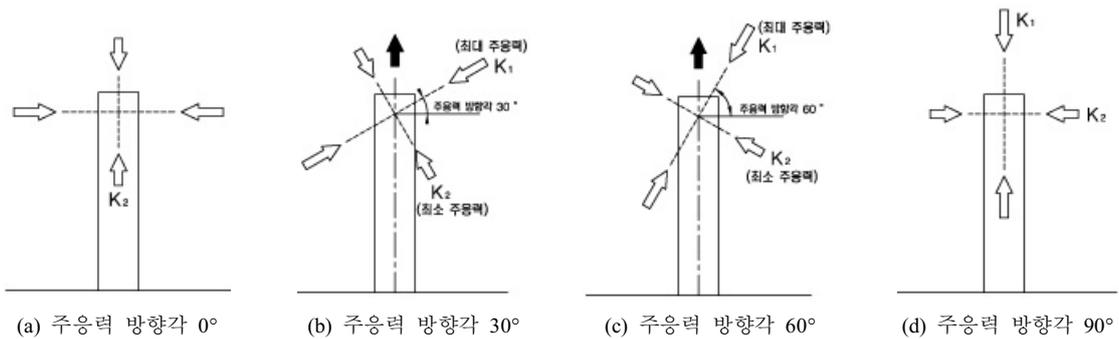


그림 8. 터널굴진방향에 대한 주응력 변화 정의

였다.

표 5는 본 검토에서 수행한 해석 Case가 나타나있다. 표에서 보는 바와 같이 측압계수 0.5, 1.0, 2.0에 대하여 해석을 수행하였으며, 각 경우에 대하여 터널진행방향을 기준으로 최대주응력과 최소주응력이 직교하는 경우에 대하여 방향각을 0°, 30°, 60°, 90°로 변화시키며 해석을 수행하였다. 그림 8에는 터널굴진방향에 대한 주응력 변화에 대한 정의를 나타내었으며, 표 6에는 해석 지반물성치가 정리되어 있다.

(2) 해석 결과 및 분석

천단침하 및 측벽변위의 발생경향을 고찰하기 위하여 다음식과 같이 천단변위비 및 측벽변위비를 정의하였다.

$$\text{천단변위비} = \frac{\text{해석조건별 천단변위}}{K_0 = 1.0 \text{의 천단변위}}$$

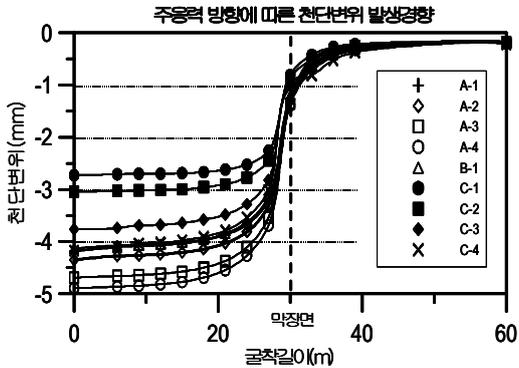
$$\text{측벽변위비} = \frac{\text{해석조건별 측벽변위}}{K_0 = 1.0 \text{의 측벽변위}}$$

그림 9에서 보는 바와 같이 천단변위비의 경우를 보면, $K_0 = 0.5$ 일 경우 주응력 방향각이 90°일 때 천단변위비가 1.2로 변위증가가 최대로 발생하였으며, $K_0 = 2.0$ 일 경우 주응력 방향각이 90° 일 때 천단변위비가 1.0으로 변위증가가 최대로 발생하였다. 또한 측벽변위비의 경우, $K_0 = 0.5$, $K_0 = 2.0$ 이고, 주응력 방향각이 0° 일 때 천단변위비가 각각 1.0, 2.9로 가장 크게 나타내는 경향을 보이고 있다.

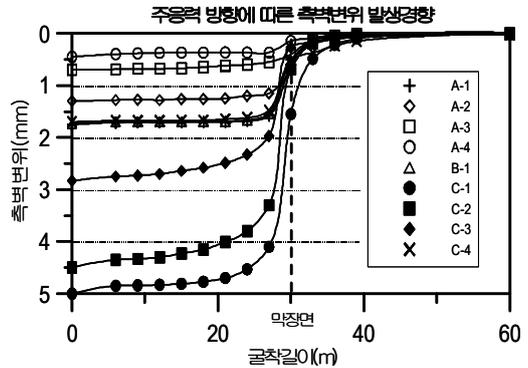
그림 10에서 보는 바와 같이 지보재(숏크리트) 전단응

력의 경우 터널의 어깨부에서 가장 큰 변화 양상을 나타내었으며, 지보재의 휨압축응력은 주응력 방향이 터널 축방향 기준으로 증가함에 따라 감소하는 경향을 보여

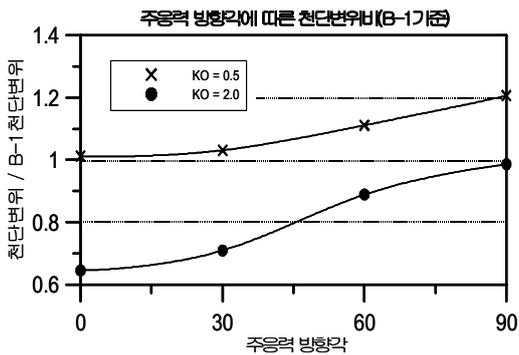
최대주응력의 방향이 터널 진행 방향과 수직인 경우 터널의 안정성에 가장 큰 영향을 보일 것으로 판단된다. 휨압축응력의 경우 터널의 천단부에서 가장 큰 변화 양



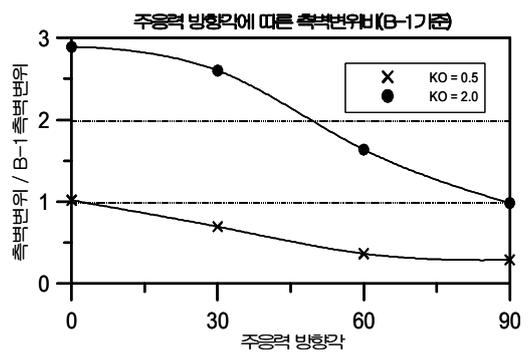
(a) 천단변위



(b) 측벽변위

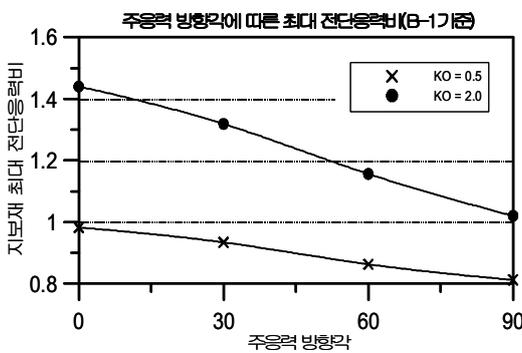


(c) 천단변위비

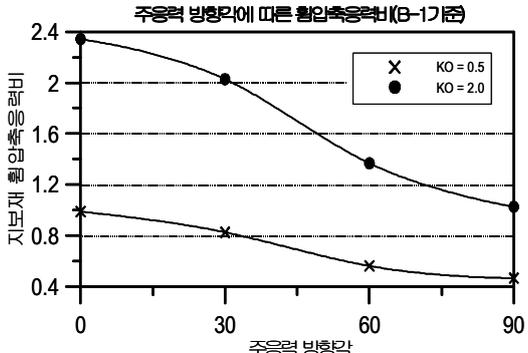


(d) 측벽변위비

그림 9. 주응력 방향에 따른 천단 및 측벽변위 발생경향



(a) 최대 천단응력



(b) 최대 휨압축응력

그림 10. 주응력 방향에 따른 슛크리트 응력 발생경향

상을 보임을 알 수 있다.

그림 11에서 보는 바와 같이 $K_0 = 0.5$ 일 경우 주응력 방향각이 90° 일 때 천단변위비가 1.2로 변위 증가가 최대를 보이며, $K_0 = 2.0$ 일 경우 주응력 방향각이 90° 일 때 천단변위비가 1.0으로 변위 증가가 최대를 나타냄을 알 수 있다. 또한 전단응력비는 $K_0 = 0.5$, $K_0 = 2.0$ 일 경우 주응력 방향각이 0° 일 때 각각 1.0, 1.45로 최대로 발생하였으며, 횡압축응력비는 $K_0 = 0.5$, $K_0 = 2.0$ 일 경우 주응력 방향각이 0° 일 때 각각 1.0, 2.3으로 최대 발생로 나타났다.

터널축에 대한 주응력 방향각의 변화에 따라 지보재 발생응력은 천단부가 가장 민감하게 변화하고, 또한 주응력 방향과 축압계수 크기에 따라 지보재의 응력은 최대 약 230% 정도까지 증가함을 확인할 수 있다.

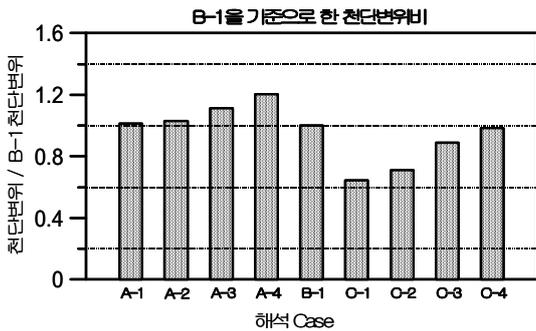
따라서 3차원 지반조건을 고려한 수치해석시 원 지반의 주응력 방향은 터널의 거동에 중요한 영향을 미치며,

해석시 주응력 방향성을 반드시 반영해야 할 것으로 판단된다.

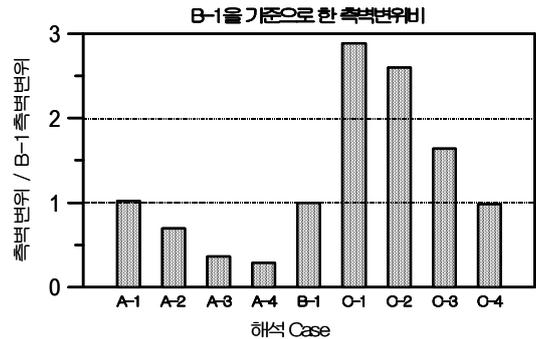
5. 결 론

본 고에서는 암반응력을 고려한 터널설계 사례를 검토·분석하여 합리적이고, 안정적인 지하구조물 설계 방안에 대하여 고찰하였다. 터널설계 사례로는 암반응력을 고려하여 암반분류 및 지보설계를 수행할 수 있는 Q-System 적용사례를 분석하였다.

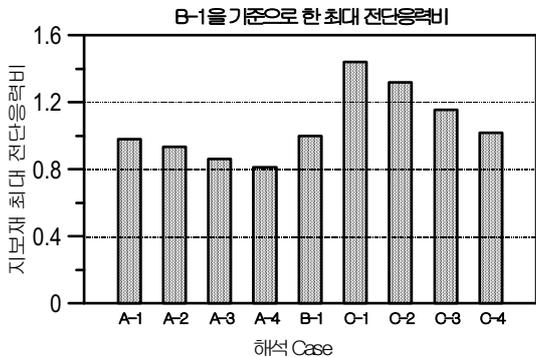
도로터널설계에 NGI의 Q-System 분류 중, 특히 암반응력을 고려하는 입력변수인 SRF 산정과정을 상세분석하고, 그에 따른 표준지보설계 사례를 분석하였다. 또한 터널 안정성에 대한 수치해석적 검토시 축압계수 크기 및 주응력 방향성을 매개변수로 한 해석을 수행하여 터널 안정성 해석시 개선사항에 대하여 검토하였으며, 그



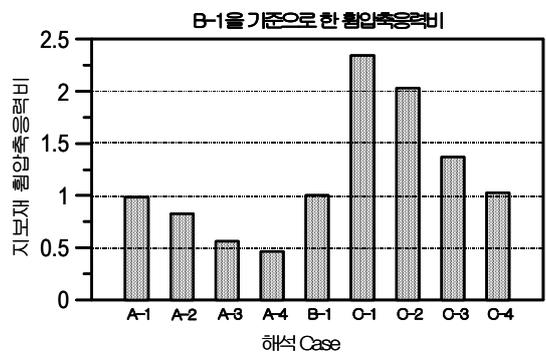
(a) 터널 천단변위비 ($K_0 = 1$ 기준)



(b) 터널 축벽변위비 ($K_0 = 1$ 기준)



(c) 숏크리트 최대 전단응력비 ($K_0 = 1$ 기준)



(d) 숏크리트 최대 횡압축응력비 ($K_0 = 1$ 기준)

그림 11. 해석 Case에 따른 변위 및 응력 발생비교

결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 국내에서는 시추자료로부터 Q-System 분류하는 경우 입력변수 SRF를 일반적으로 “적당한 응력” 항목에 해당하는 $SRF = 1$ 로 적용하고 있으나, 심도가 깊거나 높은 응력이 작용하는 지반 또는 Rock Burst가 예상되는 암반에서는 반드시 SRF 산정시 계획심도에서 암반응력 분포를 계산하여 SRF를 합리적으로 산정해야 할 것으로 사료된다.
2. 축압계수 크기를 변수로 한 2차원 연속체 해석결과 축압계수 크기에 따라 터널 주변 변위 및 응력이 상이하게 나타나므로 반드시 지반조사 결과를 반영하여 안정성 해석을 수행해야 하고, 특히 지반조건이 불량한 갱구부나 파쇄대 구간에서는 지반조사결과이외의 축압계수에 대한 해석을 수행하여 안전측 설계를 하는 것이 합리적이라고 판단된다.
3. 3차원 연속체 해석에 의해 터널 안정성 검토를 하는 경우 기존의 터널 진행방향과 일치하는 주응력 방향을 고려하는 해석수행을 지양하고, 지반조사로부터 획득된 주응력분포 방향성을 고려하여 해석을 수행함으로써 터널 안정성 해석의 신뢰도를 제고해야 할 것으로 판단된다.

암반응력, 특히 축압계수 크기 및 주응력 방향성에 대한 상기의 제안사항은 우선적으로 지반조사결과와 신뢰도 확보를 전제로 한 것으로서 암반응력을 고려한 터널 설계 이전에 반드시 신뢰도 높은 지반조사기법을 적용하여 합리적으로 현지 암반응력 상태를 파악해야 할 것이다. 한편 터널설계시 안정성 검토를 위해 흔히 수행되는 수치해석기법은 일견 매우 정밀하게 보이나 실제 현장에서 발생하는 터널거동 메커니즘 중에 단지 일부만

을 단순화하여 구현할 뿐이다. 따라서 최대한 현장상태를 고려한 안정성 검토를 수행하기 위해서는 축압계수 크기 뿐만아니라 현지 암반응력의 방향성을 반드시 고려해야 할 것으로 판단되며, 향후 실제에 가까운 현지 암반응력을 재현하기 위한 기법들에 대한 체계적인 연구가 추가적으로 수행되어야 할 것이다.

참고문헌

1. 문상호, 문현구 (1999), “합리적인 축압계수 결정을 위한 인공신경 전문가 시스템의 개발”, 한국지반공학회지, 제15권 제1호, pp. 99-112.
2. 이희근, 양형식 (1997), “응용암석역학”, 서울대학교출판부, p. 487.
3. 한국지반공학회 (2000), 토목기술자를 위한 암반공학, 구미서관.
4. 한국터널공학회 (2002), 터널의 이론과 실무.
5. 한국자원연구소 (1997), 지하 저장공동의 최적 형상과 규모에 관한 모델 연구.
6. Amadei, B. (1996), “Importance of anisotropic when estimating and measuring insitu stress in rock”, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 33, No. 3, pp. 293-325.
7. Goodman, R.E. (1989), Introduction to Rock Mechanics, pp. 25-27.
8. Hoek, E., Brown, E.T. (1980), Underground Excavation in Rock, Institution of Mining and Metallurgy, p. 527.
9. Obert, L., Duval, W. (1967), Rock Mechanics and The Design of Structure in Rock, Wiley, New York, p. 650.
10. Sheorey, P.R. (1994), “A theory for in situ stresses in isotropic and transversely isotropic rock”, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 31, No. 1, pp. 23-34.
11. Wittke, W. (1990), Rock Mechanics, Springer-Verlag, p. 1075.



박도현

서울대학교
지구환경시스템공학부
박사과정
E-mail: jparkdo@nate.com



김영근

삼성물산(주)
건설부문 토목ENG팀
부장
E-mail: babokyg@hanmail.net