굴착단면 형상에 따른 터널 초기탄성변위의 수치해석적 연구

A numerical study for initial elastic displacement at tunnel side-wall due to configuration of the tunnel excavation

김상환*1, 정혁일*2, 이민상*3
Kim, Sang-Hwan • Jung, Hyuk-Il • Lee, Min-Sang

Abstract

Ground reaction curve is very useful information for estimating the installation time of the tunnel support. The ground reaction curve can be estimated by analytical closed form solutions derived in case of circular section and isotropic stress condition. The nature of the ground reaction, however, depends significantly on tunnel configurations. Nevertheless, few purely analytical and experimental studies of this problem due to tunnel configurations appear to have been carried out. Therefore, it is necessary to investigate the influence of tunnel configurations in order to use simply in practical design. This paper describes a numerical study for the intial elastic displacement in the ground reaction curve due to configuration of tunnel excavation. In order to evaluate the applicability of analytical closed form solution in practical design, the parametric studies were carried out by numerical analysis in elastic tunnel behaviour. In the studies, S value, namely configuration factor, defined as the ratio between tunnel height (b) and width (a), varies between 0.5 and 3.0, initial ground vertical stress varies between 5～30 MPa for each S values. The results indicated that the self-supportability of ground is larger in the ground having low S value. It, however, is suggested that the applicability of closed form solution may not be adequate to determine directly the installation time of the support and self-supportability of ground. It should be necessary to perform the additional numerical analysis.

Keywords: Ground reaction curve, configuration of tunnel excavation

요 지

일반적으로 터널 굴착시 지보재의 설치시기에 대한 예측을 위하여서는 지반반응곡선 (Ground reaction curve)을 활용하고 있다. 이 지반반응곡선은 굴착에 따른 지반의 변위 특성을 나타내며, 일반적으로 원형단면이고 등방상태 ($K=1.0$)로 가정하여 단순화시킨 Closed Form Solution을 통해서 구해진다. 그러나, 원형단면이 아니고, 비등방 응력상태인 실질적인 현장조건을 고려해 본다면, 이 지반반응특성 예측식을 현장조건에 적용함에 있어서

*1 정회원, 호서대학교 토목공학전공 교수
*2 정회원, BAU 컨설탄트 지반/터널부
*3 BAU 컨설탄트 지반/터널부

어떠한 한계점을 갖는지에 대하여 규명할 필요가 있다. 이를 위해, 본 논문에서는 굴착단면 형상에 따른 측벽에서의 초기탄성변위 및 임계지보압의 변화 특성에 대하여 연구하였다. 터널굴착 형상은 단면의 높이 (b)와 폭 (a)의 비, 즉 굴착형상 계수 S (=b/a)값이 1.0, 0.8, 0.6, 0.4로 변화하도록 하였으며, 각각의 굴착형상마다 초기등방응력을 5～30 MPa사이에서 변화시켜가면서 수치해석을 통해 지반반응곡선을 얻었다. 수치해석을 통해 얻어진 측벽에서의 지반반응곡선을 분석하여 그에 따른 특성을 제시하였다. 검토결과 지반의 자립성을 평가하는데 있어서 Closed form solution의 사용에는 한계가 있는 것으로 판단된다.

주요어: 지반반응곡선, 터널형상

1. 서론

터널 굴착후 지반의 초기변형은 매우 중요하다. 이는 대부분 굴착에 의한 응역 이완으로 야기되는 탄성적 변형이라는 점에서 주목할 만하다. 터널 굴착시 지반은 변형이 되면서 응력은 초기응력보다 작아지게 되며, 지반의 강도특성에 따라 변형과 응력과의 관계가 다르게 나타난다. 상기에서 언급하였듯이 초기변형은 일반적으로 선형적인 탄성변형이라고 말할 수 있지만, 변형이 지속적으로 증가되면 소성, 그리고 결국 굴착부분은 파괴에 이르게된다. 따라서, 터널굴착시 지반의 변형을 어느 정도 허용 (탄성영역내)하여 최소의 지보로 터널의 안정성을 유지하기 위한 지보재의 설치시기에 대해서는 다각적으로 정성적인 연구가 지속되고 있다, 그러나, 실제적인 측면에서 많은 터널기술자들이 지보재의 설치시기에 대한 예측을 위해서 일반적으로 활용하고 있는 지반반응곡선 (Ground reaction curve)은 원형단면이고 등방응력상태 ($K=1.0$)라는 가정조건하에서 유도되어 단순화시킨 Closed form solution을 통해서 구해진다. 그러나, 원형단면이 아니고 비등방상태인 실질적인 현장조건을 고려해 본다면, 이 지보반응특성 예측식의 사용의 한계에 대하여 규명할 필요가 있다. 이러한 문제에 대하여 측압계수와 터널형상에 대한 연구는 국내에서도 수행되어 발표된바 있다. 김택곤과 김상환 (2001)은 탄소성매질 내 지하동공 해석을 위한 매개변수들의 상호관계에 대하여 Anagnostou 와 Kovari (1993)에 의하여 제시된 무차원 표현기법을 이용하여 지보반응곡선의 매계변수에 대한 간편해석기법을 제시하였다. 이 논문은 복잡한 매개변수에 대하여 간편해석기법을 제시하였다는데 큰의미는 있으나, 해석시 비등방응력과 터널형상에 대하여 추가적으로 고려 될 필요성을 남겨두었다. 이후 김상환과 정혁일 (2002)은 이와 같은 간편지보반응곡선 산정에 있어 초기탄성변위에 대하여 측압계수 및 터널의 형상에 대한 영향에 대하여 발표하였다. 이 논문에서는 주로 이방성 응력상태에 대하여 수치적해석을 통한 결과를 중점적으로 제시하였으며, 터널의 형상에 대해서는 원형과 마제형에 대해서만 비교적 간단히 언급하였다는 아쉬움이 있다. 따라서, 본 논문에서는 터널의 높이 (b)와 폭 (a)의 비, 즉 터널굴착형상계수 (S=b/a)에 따른 지반반응특성과 함께 터널 굴착 측벽에서의 초기탄성변위 및 임계지보압의 변화 특성에 대하여 고찰하였다. 터널굴착 형상계수 S값이 1.0, 0.8, 0.6, 0.4로 변화하는 조건 하에서, 각각의 굴착 형상마다 초기등방응력을 5～30MPa 사이에서 변화시켜가면서 수치해석을 통해 지반반응곡선을 얻었다. 본 연구에서 적용한 초기등방응력의 범위는 기존연구논문 (김상환 & 정혁일, 2002)에서 이용한 값으로 하여 비교 검토를 함으로써 추가적인 연구자료로 활용될 수 있게 하였다.

이상과 같이, 본 논문에서는 굴착단면의 형상과 지반반응곡선의 관계에 초점을 맞추어, 지반의 응력상태는 등방응력상태로 유지하고, 굴착단면의 높이 (b)가 10m로 일정할 때 폭 (a)을 변화시키면서 서로다른 터널굴착형상계수 (S=1.0, 0.8, 0.6, 0.4)에 대한 지반반응곡선을 수치해석을 통해 얻은 뒤, 측벽의 초기 탄성변위와 임계지보압이 Closed form solution (S=1-원형단면조건)에 의한 결과와 비교할 때 어떠한 경향을 갖고 변화하는지에 대하여 중점적으로 고찰하였다.

2. 지반응력-변위 관계의 영향요소

2.1 지보압-변위 관계의 기본개념

지반의 굴착에 따른 굴착면의 측벽에 발생하는 변위에 대한 개념도는 그림 1 (a)에서와 같이 나타낼 수 있으며, 굴착초기에는 지반에 탄성변위만 발생하면서 u_i의 변위가 발생하다가, 변위가 증가하면서 지반내에 소성영역이 반경 r_{e0}까지 증가하게 되고 그때의 발생 변위를 u_e라고
나타낼 수 있다. 소성변위가 발생되는 시점에서의 지보압을 임계지보압 (p_{icr})이라고 정의하며 p_{icr}이 작을 수록 지반의 자립성이 크다는 것을 의미한다. 이에 대한 지보압-변위 관계곡선을 나타내면 그림 1 (b)와 같다.

상기 언급된 내용에 대하여 일반적인 해를 수식으로 표현하면 다음과 같다 (Hoek, and Brown, 1980).

$\sigma_s > p_{icr}$인 경우

$$u_i = r_{i0}\frac{(1+\nu)}{E}(\sigma_0 - \sigma_s) \tag{1}$$

$\sigma_s < p_{icr}$인 경우

$$u_e = \frac{(1+\nu)}{E} M\sigma_c r_e \tag{2}$$

여기서, $M = \frac{1}{2}\left(\left(\frac{m}{4}\right)^2 + \frac{m\sigma_0}{\sigma_c} + s\right)^{1/2} - \frac{m}{8}$

(m, s: Hoek-Brown 상수, σ_c: 일축압축강도)

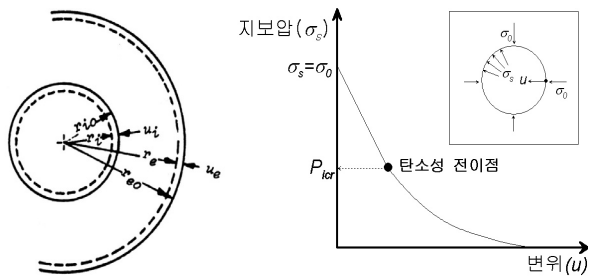
2.2 매개변수의 이해

지반 굴착에 수반되는 터널 측벽에서의 발생 변위는 다양한 요소에 의해 영향을 받는다. 그 중에서 크게 영향을 미치는 요소로 판단되는 인자는 초기응력 (σ_0), 지보압 (σ_s), 탄성계수 (E), 점착력 (c), 마찰각 (ϕ), 포아송비
(ν), 굴착직경 (B)의 7가지로 볼 수 있으며, 이를 무차원 수로 표시하게 되면 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다 (Anagnostou, and Kovari, 1993).

$$\frac{u_c}{B} = F\left(\frac{\sigma_s}{\sigma_0}, \frac{E}{\sigma_0}, \frac{c}{\sigma_0}, \nu, \phi\right) \tag{3}$$

여기서, u_c: 측벽 변위, B: 굴착 직경
σ_s: 지보압, σ_0: 초기응력
c: 점착력, ν: 포아송비, ϕ: 내부마찰각

그림 2에 보인 바와 같이 응력, 점착력, 마찰각과 관련한 σ^*항을 정의하여 식 (3)을 다시 나타내면 식 (4)와 같이 표현할 수 있으며, 식 (4)에 보인 무차원 수를 좌표축으로 지보압-변위 곡선을 그리면 초기응력의 영향이 상쇄된 지보압-변위 곡선을 얻을 수 있다 (그림 3).



(a) 소성영역 변위 (b) 지반반응곡선 개념도

그림 1. 지보압-변위 관계곡선 (지반반응곡선)

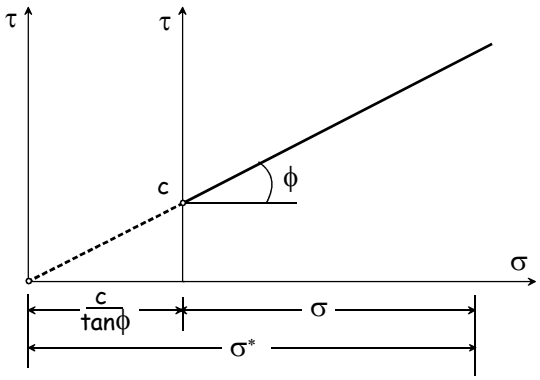


그림 2. 점착력과 마찰각이 고려된 σ^*항의 정의

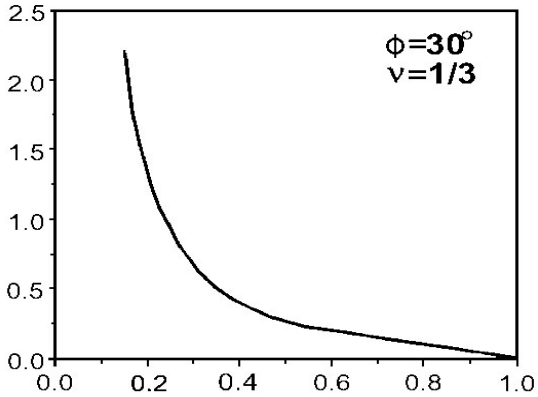


그림 3. 무차원변수로 표현된 지보압-변위 관계곡선 (Anagnostou, and Kovari, 1993)

$$\frac{Eu_c}{\left(\sigma_0+\frac{c}{\tan\phi}\right)L}=F\left(\frac{\sigma_s+\frac{c}{\tan\phi}}{\sigma_0+\frac{c}{\tan\phi}},\nu,\phi\right) \qquad (4)$$

그림 3은 초기응력에 대한 무차원적 지반반응곡선을 나타낸 것이다. 이 그림은 동일한 지반에서 서로 다른 초기응력이 작용할 때의 지반반응곡선을 식 (4)에 나타낸 무차원 변수를 이용하여 산술적으로 얻어낼 수 있음을 의미한다. 예를 들어, 균질한 지반조건을 갖는 터널에서 심도가 서로 다른 위치에 대한 지반반응곡선은 임의의 초기응력에 대한 하나의 지반반응곡선을 가지고 서로 다른 심도에 대한 지반반응곡선을 식 (4)에 의에 얻을 수 있으므로 불필요한 계산과정과 수치해석의 번거로움을 해소할 수 있음을 나타낸다 (김택곤과 김상환, 2001).

또한, 무차원수로 제시된 식 (3)은 응력의 이방성과 추가적으로 터널의 형상을 고려한 지반반응곡선의 무차원 매개변수로 나타내면 다음식으로 제시될 수 있다 (김상환 & 정혁일, 2002).

$$\frac{u_c}{B}=F\left(\frac{\sigma_s}{\sigma_0},\frac{E}{\sigma_0},\frac{c}{\sigma_0},\nu,\phi,K,S\right) \qquad (5)$$

여기서, S는 굴착형상계수로써 그림 4와 같이 굴착단면의 높이와 폭의 비 (b/a)를 나타내며, K는 측압계수를 말한다.

따라서, 식 (4)에서도 지반의 단면형상에 대한 변수가 누락되어 있기 때문에, 단면형상에 대한 변수가 고려될 경우 식 (4)와 같은 형태의 무차원 변수의 적용이 유효한지에 대한 검토가 필요하다.

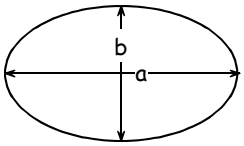


그림 4. 터널굴착형상계수의 정의 (S=b/a)

3. 지반반응곡선의 수치 Modelling 검증

본 논문에서 지반반응곡선 산출을 위한 수치해석 Modelling은 김상환과 정혁일 (2002)에 의하여 수행된 응력의 이방성 영향에 대한 연구시 제시된 방법과 동일하고, 아울러 그들이 제시한 지반반응곡선의 수치Modelling이 적절하다는 것을 입증한바 있기 때문에 본 논문에서는 Modelling과정과 이 결과에 대한 Closed form solution과의 검토과정에 대한 상세한 내용은 생략하였다. 다만, 수치해석시 사용한 입력 지반물성치는 표 1에 나타냈으며,

표 1. 수치 Modeling 검증을 위한 입력 지반물성치

입력 물성치	$c(MPa)$	$\phi(°)$	Dilation angle	Poisson's ratio(ν)	Young's Modulus (MPa)
	1.0	35	0	0.25	10,000

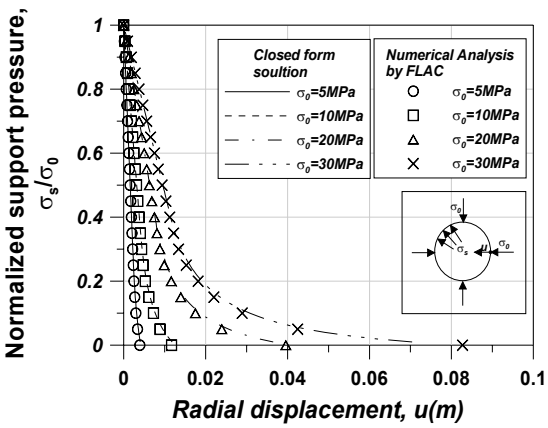
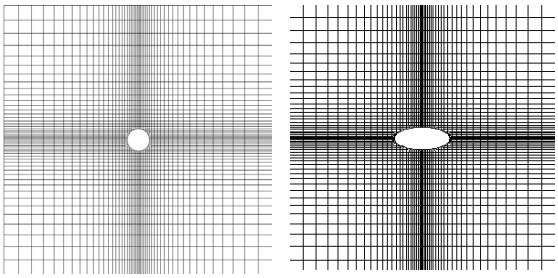


그림 5. Closed form solution과 수치 Modeling에 의해 얻은 측벽에서의 지반반응곡선 비교

이에 따라 수행된 수치해석결과와 Closed form solution에 의한 결과가 일치한다는 것은 그림 5에서 보여주는 바와 같다.



(a) 원형단면 (b) S=0.4 단면

그림 6. 해석에 사용된 대표적인 유한요소 해석 요소망

4. 매개변수영향에 대한 수치해석

4.1 수치해석 조건

본 논문에서는 지반의 굴착 단면 형상이 변화할 때 측벽의 초기 탄성변위가 어떠한 경향을 갖고 변화하는지를 분석하기 위하여 굴착단면의 높이와 폭의 비율 (굴착형상계수, S=b/a)을 1.0에서 0.4까지 변화시키고, 각 단면형상마다 등방초기응력 (σ_0)을 5, 10, 20, 30MPa의 4가지 조건으로 구분하여 해석을 수행하였다.

굴착 단면 형상은 직경 10m의 원형단면인 경우와, 터널 높이 (b)는 10m로 같게하고, 굴착형상계수 S가 0.8, 0.6, 0.4로 변화하는 세가지 단면에 대하여 해석을 수행하였다. 그림 6 (a)와 (b)는 대표적인 유한요소 해석 요소망을 나타낸 것이다.

4.2 측벽의 초기 탄성변위 변화경향

그림 7 (a)에서 (d)는 상기해석조건에 따라 수행한 수치해석결과를 통해 얻어진 지반반응곡선들을 해석 단면의 형상계수에 따라 구분하여 나타낸 것이다.

이 그림에서 보여주듯이 지반반응곡선의 형태는 굴착형상계수에 관계없이 모두 초기등방응력이 클수록 측벽의 변위가 더 크게 발생하는 경향을 보여주고 있으나, 동일한 초기등방응력하에서 단면형상이 다르면 측벽의 초기 탄성변위와 임계지보압의 크기는 서로 다르게 나타난다는 것을 알 수 있다.

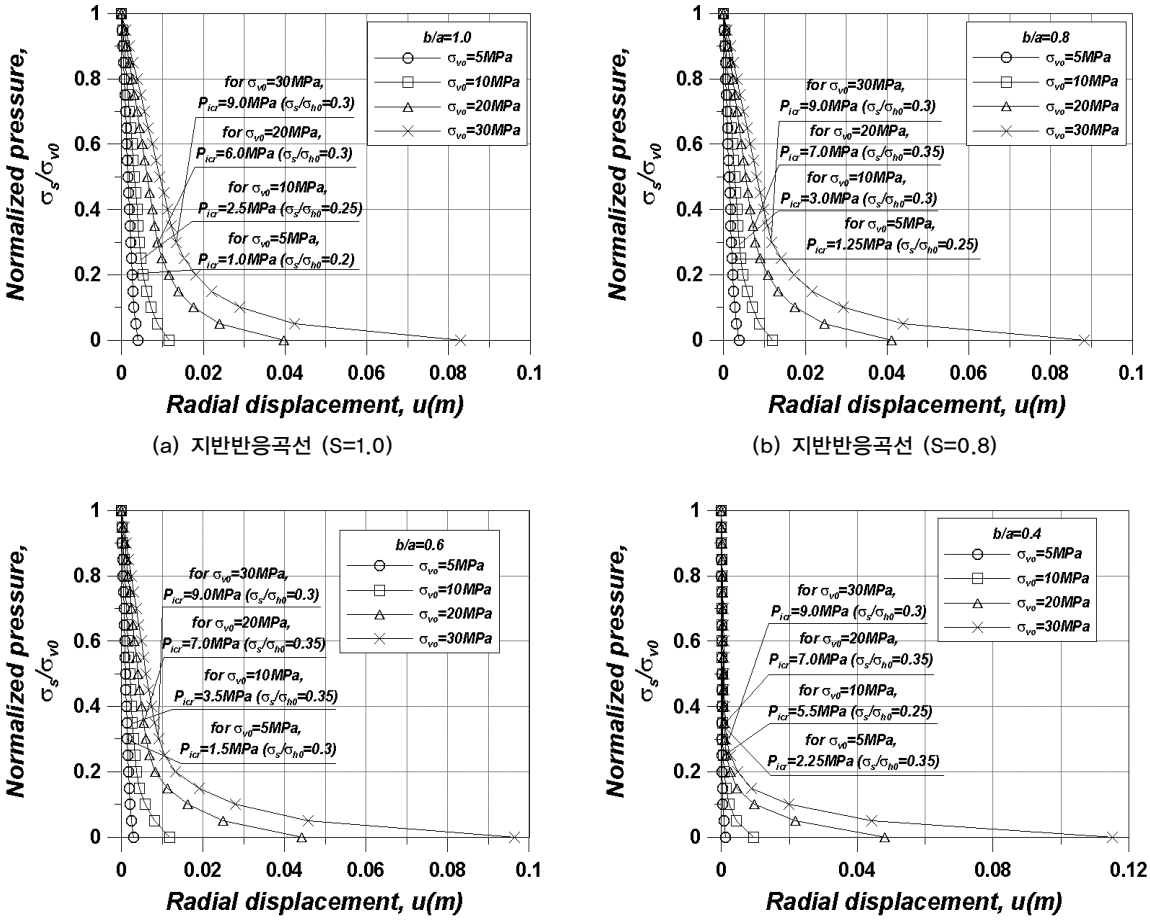
이상의 결과에서 측벽의 초기 탄성변위 변화 경향을 S=1일 때의 측벽변위와 비교하기 위해 지보압 (σ_s)은 초기등방응력 (σ_0)으로 정규화 (σ_s/σ_0)하고, 임의단면일 때
의 초기 탄성변위 (u)는 원형단면 (S=1.0)일 때의 초기 탄성변위 ($u_{(S=1)}$)로 정규화 ($u/u_{(S=1)}$) 하여, 각각 x, y
축으로 나타내면 정량적인 분석시 이용할 수 있는 대표적인 결과를 도출할 수 있다. 그림 8 (a)~(c)는 이들 결과를 나타낸 것이다. 이 결과에서 나타나듯이 굴착 초기에 각각의 S값에 대한 초기탄성변위는 원형단면 (S=1.0)일 때의 초기탄성변위와 일정한 비율을 유지하며, 일정하게 유지되는 $u/u_{(S=1)}$값은 S의 값이 작을수록 적은 값
을 보임을 알 수 있다.

그러나 지보압이 초기응력의 약 40% 이하로 작아지게 되면 변형초기에 일정하게 유지되던 $u/u_{(S=1)}$값은 지반
의 초기응력의 크기에 따라 서로 다르게 변화하고, S의 값이 감소됨에 따라 초기응력의 크기에 따른 변화의 폭이 증가한다.

굴착단면형상계수, S값에 따라 일정한 값을 갖는 초기탄성변위비율($u/u_{(S=1)}$)의 크기를 표 2에 정리하여 나타내었으며, 이 값의 변화를 S (=b/a)값을 축으로 하여 그림 9에 나타내었다. 그림 9에서 알 수 있듯이 단면의 b/a (=S)의 비가 감소할수록 즉, 단면의 폭이 증가할수록 초기탄성변위비율 $u/u_{(S=1)}$값은 비선형적으로 감소한다.

이는 높이가 일정한 단면에서 단면의 폭이 증가함에 따라 초기탄성변위는 크게 변화한다는 것을 의미한다. 다시말해, Closed form solution에 의해 얻어진 지반반응곡선은 S=1인 등방응력조건에서 구해진 것이기 때문에, S≠1.0인 실제 지반에서 발생되는 초기탄성변위는 Closed form solution에 의해 계산되는 초기탄성변위와 큰 차이를 보이게 된다는 것을 알 수 있다.

지보재의 설치 시기는 초기 측벽변위의 발생양상에 의



(a) 지반반응곡선 (S=1.0)　(b) 지반반응곡선 (S=0.8)

(c) 지반반응곡선 (S=0.6)　(d) 지반반응곡선 (S=0.4)

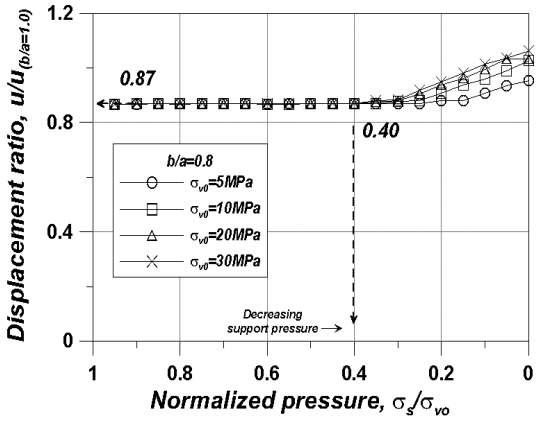
그림 7. 굴착단면형상계수의 변화에 따른 지반반응곡선

해 크게 좌우되기 때문에 S값이 고려되지 않고 Closed form solution에 의해 얻어진 지반반응곡선을 활용하여 지보재의 설치시기를 예측한다면 S≠1.0인 대부분의 현장 암반에 대한 적절한 지보설치시기의 예측이 힘들다는 것을 의미한다.

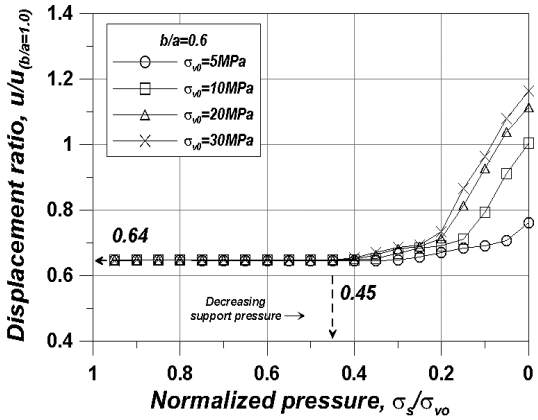
4.3 임계지보압의 변화경향

임계지보압은 굴착면에서의 변위가 탄성에서 소성상태로 변화하는 시점에서의 지보압을 나타내므로 임계지보압의 변화경향을 분석하게 되면 지반의 자립성에 대한 평가와 직접적인 연관성을 갖는다.

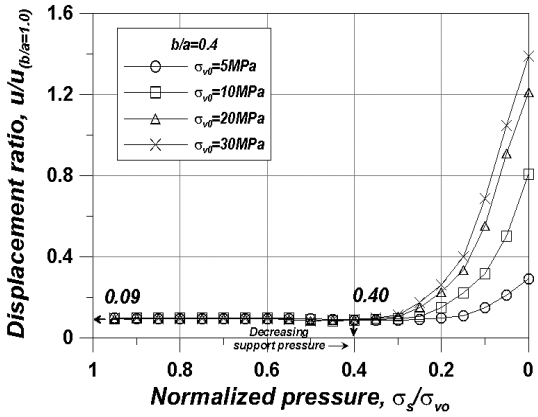
수치해석을 통해 얻어진 지반반응곡선상에서 임계지보압 (p_{icr})을 구하여 S값의 변화에 따라 임계지보압이 어떻게 변화하는지를 살펴보았다. 그림 10은 그 결과를 나타낸 것으로, 굴착형상계수 S값에 따라 변화하는 임계지보압의 변화양상을 초기등방응력 (σ_0)의 크기에 따라 보였다. 이 결과에서 나타나듯이 동일한 초기연직응력이 작용하는 지반이라 하여도 S값에 따라 서로 측벽에 작용하는 임계지보압은 서로 다른 경향을 나타낸다. 지반내의 초기응력의 크기가 5MPa와 10MPa인 경우에는 S값이 감소됨에 따라 임계지보압이 증가하는 경향을 보이지



(a) 초기탄성변위의 비율 (S=0.8)



(b) 초기탄성변위의 비율 (S=0.6)



(c) 초기탄성변위의 비율 (S=0.4)

그림 8. 굴착단면형상계수 S(=b/a)의 변화에 따른 측벽변위 비율($u/u_{(S=1)}$)

만, 초기응력의 크기가 20MPa, 30MPa인 경우에는 S 값의 변화에도 임계지보압이 거의 일정한 값을 나타냈다.

이와 같이 S값에 따라 변화하는 임계지보압의 크기가 Closed form solution (S=1.0)으로 얻어진 임계지보압의 크기와 비교할 때 어떠한 경향을 보이는지를 파악하기 위하여 각 초기응력 단계에 대한 임계지보압 (p_{icr})을

표 2. 굴착 형상계수(S=b/a)에 따른 초기탄성변위비율

$S=\frac{b}{a}$	측벽의 초기 탄성변위 비율 $u/u_{(S=1.0,\ cir)}$
0.8	0.87
0.6	0.64
0.4	0.09

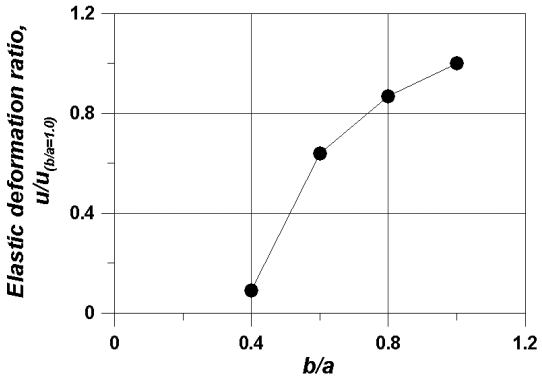


그림 9. 굴착형상계수에 따른 측벽에서의 초기탄성변위비율의 변화

원형단면인 경우의 임계지보압 ($p_{icr(S=1.0)}$)으로 나누어 그림 11과 같이 굴착형상계수 S (=b/a)와 $p_{icr}/p_{icr(S=1)}$를 축으로 하는 평면상에 나타내었다.

그림 11로부터 S값이 감소함에 따라 $p_{icr}/p_{icr(S=1)}$는 증가한다는 것을 알 수 있으며, 특히, 초기등방응력 (σ_0)이 5와 10MPa인 경우에 S값의 증가에 따른 $p_{icr}/p_{icr(S=1)}$의 증가 경향이 더욱 두드러진다는 것을 알 수 있다. 반면 σ_0가 20 및 30MPa인 경우에는 S값의 증가에 따라 $p_{icr}/p_{icr(S=1)}$는 거의 일정하게 유지된다.

$p_{icr}/p_{icr(S=1)}$값이 크다는 것은 Closed form solution으로 구한 임계지보압의 크기 ($p_{icr(S=1)}$)가 실

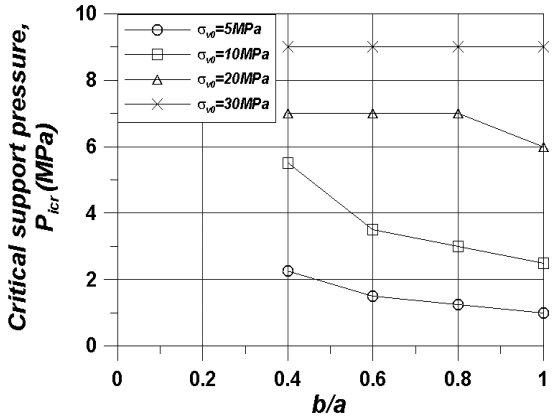


그림 10. S값에 따른 임계지보압의 변화

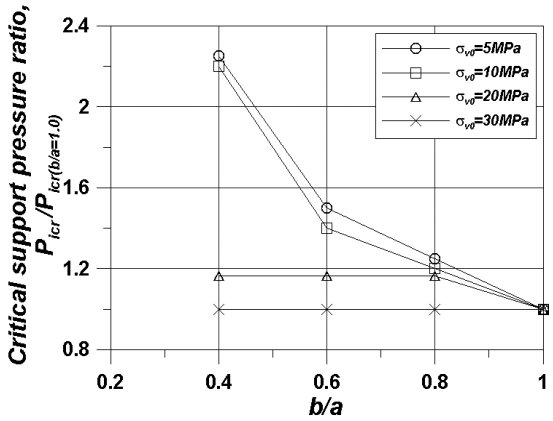


그림 11. 굴착형상계수(S)에 따른 임계지보압 비율 $p_{icr}/p_{icr(S=1,cir)}$의 변화

제 현장에서 나타나는 임계지보압의 크기 (p_{icr})와 큰 차이를 나타낸다는 것을 의미한다. 즉, S값이 감소함에 따라 $p_{icr}/p_{icr(S=1)}$ 값이 증가한다는 것은 Closed form solution으로 구한 임계지보압으로 암반의 자립성을 평가할 경우, S〈1인 단면으로 굴착되는 지반의 자립성을 실제보다는 과대 평가하게 된다는 것을 나타낸다.

이 때 특이한 점은 S값에 따른 지반의 자립성에 대한 과대평가가 초기연직응력이 5MPa, 10MPa인 경우에 매우 크게 발생한다는 점이다. 비록 그림 10에 나타난 바와 같이 초기연직응력이 작을수록 임계지보압의 크기 자체는 작아지지만 Closed form solution에 의한 임계지보압 $p_{icr(S=1)}$의 비율로 평가할 경우 자립성의 과다평가 정도는 초기연직응력이 작을수록 크게 발생하게 된다.

4.4 지반반응곡선의 영향인자

지반반응곡선에 영향을 미치는 변수를 초기등방응력 (σ_0), 지보압 (), 탄성계수 (E), 점착력 (c), 마찰각 (ϕ),
포아송비 (v) σ_s, 굴착직경 (B)의 7가지로 판단하여 식 (3), 식 (4)와 같이 나타낸 연구 결과가 있으나 (G., Anagnostou,
and K., Kovari, 1993), 여기에는 굴착단면의 형상변화가 지반반응곡선에 영향을 미치는가에 대한 검토가 누락되어 있음을 앞서 언급한 바 있다.

이를 위해 굴착단면형상계수 S≠1.0인 경우에도 식 (4)에 나타낸 무차원 변수가 지보압-변위관계를 나타내는 데 유효한 변수인가를 검증한 후, 단면의 높이와 폭의 비에 따른 형상이 지반반응곡선에 영향을 주는 요소인가에 대하여 검토하였다.

그림 12는 각각의 높이와 폭의 비에 대해 수치해석을 통해 얻어진 지보압-변위 곡선을 식 (4)에서 정의한 무차원 변수축으로 나타낸 것이다. 이 그림에서 알 수 있듯

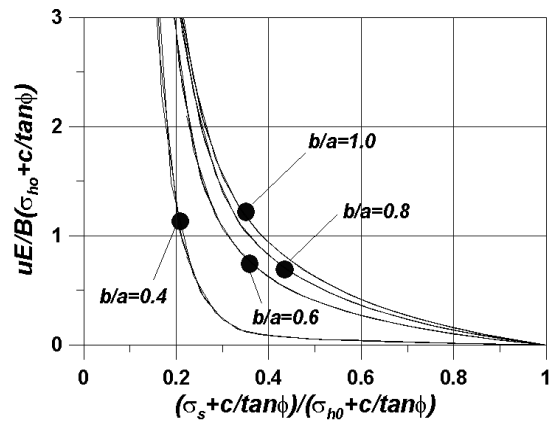


그림 12. 무차원 변수를 축으로 나타낸 지보압-변위 관계 곡선의 측압계수에 따른 변화

이, S≠1.0인 경우에도 각각의 높이와 폭의 비에 대해 지보압-변위 관계곡선이 서로 다른 유일한 곡선으로 표현되고 있다. 이는 식 (4)에 의한 무차원변수가 S≠1.0인 경우에도 유효하게 적용될 수 있음을 나타낸다.

즉, 굴착단면의 높이와 폭의 비는 지반반응곡선에 영향을 미치는 변수중의 하나임을 식 (4)에 의한 무차원변수 분석을 통해 다시 한번 알 수 있다.

5. 결론

굴착단면의 높이와 폭의 비가 변화함에 따라, 측벽에서 발생되는 초기탄성변위와 임계지보압이 어떻게 변화하는 가를 알아보기 위하여 동일한 지반물성을 갖는 지반을 대상으로 굴착단면형상계수 (S=굴착단면의 높이와 폭의 비율=b/a)를 변화시켜 수치해석을 수행하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 높이와 폭의 비를 변화시키면서 얻어진 측벽에서의 변위 u를 원형단면 (S=1)일 때의 측벽변위 $u_{(S=1)}$에 대한 비율로 표시하면, 동일한 굴착단면형상계수 (S)를 갖는 단면에서는 측벽에서의 초기탄성변위비율
($u/u_{(S=1)}$)이 구속응력의 크기에 상관없이 일정한 값
을 갖는다. 이 초기탄성변위비율은 굴착단면형상계수 (S)가 증가함에 따라 비선형적으로 증가하는 경향을 나타낸다.
2. Closed form solution에 의해 얻어진 지반반응곡선은 S=1 (원형단면)인 이상적 조건에서 구해진 것이기 때문에, S<1 인 실제 터널굴착단면에서 발생되는 측벽에서의 초기탄성변위를 다소 과대 평가하는 문제점을 내포하고 있다. 따라서, Closed form solution에 의해 얻어진 지반반응곡선으로 지보재의 설치시기를 예측하는 것은 바람직 하지 않으며, 수치해석을 통한 검토가 수반되어야 한다.
3. 동일한 물성을 갖는 지반에서 굴착단면의 S값이 감소할 때 각 단면에 대한 임계지보압 (p_{icr})과 원형단면 (S=1)일 때의 임계지보압 ($p_{icr(S=1)}$)과의 비율 ($p_{icr}/p_{icr(S=1)}$)
은 증가한다. 이는 Closed form solution으로 구한 임계지보압으로 암반의 자립성을 평가할 경우, S<1로 이루어 지는 대부분의 실제 터널에 대한 측벽에서의 자립성을 과소평가하게 된다는 것을 나타낸다.
4. 이상의 연구 결과에 따르면, 굴착단면의 높이와 폭의 비는 지반반응곡선에 영향을 미치는 변수로 판단할 수 있으며, 지반반응곡선에 영향을 미치는 요소들은 식 (5)와 같이 재평가됨이 타당하다.

참고문헌

1. 김택곤, 김상환 (2001), "탄소성 매질 내 지하공동 해석시 매개변수들의 상호관계에 대한 이해", 터널협회지 기술강좌, 제3권 3호, pp.58-73.
2. 김상환, 정혁일 (2002), "측압계수와 굴착단면 형상의 변화가 측벽의 초기탄성변위에 미치는 영향에 대한 수치해석적연구", 지반공학회 제출논문 (심사중).
3. Anagnostou, G. and Kovari, K. (1993), "Significant parameters in elastoplastic analysis of underground openings", Vol.119, No.3, pp.401-419.
4. Brown, E.T., Bray, J.W., Ladanyi, B. and Hoㄷㅏ, E. (1983), "Ground response curves for rock tunnels", ASCE, Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 109, pp.15-39.
5. Hoek, E. and Brown, E. T., (1980), "Underground excavations in rock", The institute of mining and metallurgy, pp.244-324.
6. Hoek, E., (1999), "Rock engineering", course note
7. Kovari, K., (1985), "Rock deformation problems when using full-facing cutting equipment in roc k", Tunnel 3, pp.236-224 (Part I), pp.289-298

(Part II).

김상환

호서대학교 토목공학전공 교수
kimsh@office.hoseo.ac.kr

정혁일

BAU 컨설탄트 지반/터널부
hijung@bau.co.kr

이민상

BAU 컨설탄트 지반/터널부
imsang@bau.co.kr