

심부 원형터널에 시공된 콘크리트 라이닝의 새로운 탄소성해석법

이연규¹⁾, 박경순²⁾, 송원경³⁾, 박철환³⁾, 최병희^{4)*}

A New Method for Elasto-Plastic Analysis of Concrete Lining Installed in a Deep Circular Tunnel

Youn-Kyou Lee, Kyung-Soon Park, Won-Kyong Song, Chulwhan Park, Byung-Hee Choi

Abstract This paper proposes an elasto-plastic finite difference method which is useful for the stability evaluation of concrete lining installed in a deep circular tunnel. Mohr-Coulomb criterion is assumed for the condition of yielding in both the rock mass and concrete lining. In order to take into account the installation delay of lining after the excavation, the outer boundary pressure acting on the lining was calculated with the consideration of the convergence occurred before the lining installation. The distributions of stress and displacement in the rock mass and lining were calculated based on the method proposed Lee & Pietruszczak (2008). The applicability of the proposed method was demonstrated by conducting the elasto-plastic analysis of concrete lining supporting an imaginary compressed air storage tunnel. The analysis result revealed that the exact determination of the boundary pressures acting on the concrete lining is of importance in the stability analysis of concrete lining.

Key words Concrete lining, Elasto-plastic analysis, Circular tunnel, Mohr-Coulomb rockmass, Finite difference analysis

초 록 정수압 지압조건에 심부 암반에 굴착되는 원형터널의 지보재로 설치되는 콘크리트 라이닝의 유한차분 탄소성해석법을 제안하였다. 암반과 라이닝의 항복은 Mohr-Coulomb 조건식을 따르는 것으로 가정하였다. 일반적으로 콘크리트 라이닝의 설치 전 선형내공변위가 발생된다는 점을 고려하기 위하여 라이닝 바깥 경계면에 작용하는 지압의 크기를 계산하는 과정에서 굴착 후 라이닝 설치지연 효과를 반영시킬 수 있도록 하였다. 암반과 라이닝의 소성영역에서 발생하는 응력 및 변위분포 계산을 위해 Lee & Pietruszczak(2008)의 해석법을 적용하였다. 제안된 방법의 활용성을 보여주기 위해 가상의 압축공기 저장용 터널에 시공된 콘크리트 라이닝에 대해 탄소성해석을 실시하였다. 해석결과 라이닝의 안쪽 및 바깥쪽 경계부에 작용하는 압력의 크기를 정확하게 산정하는 것이 라이닝의 안정성 해석에서 매우 중요함을 알 수 있었다.

핵심어 콘크리트 라이닝, 탄소성 해석, 원형터널, Mohr-Coulomb 암반, 유한차분 해석

1. 서 론

1980년대 초 서울시 지하철 3-4호선의 건설과 더불어 국내의 터널공사에 NATM (New Austrian Tunnelling Method) 개념이 본격적으로 도입되기 시작한 이후 콘크리트 라이닝의 지보성능 평가 및 향상된 라이닝 설계

기술의 개발과 관련된 연구가 많은 연구자들의 꾸준한 관심을 끌고 있다. NATM의 기본원리에 의하면 콘크리트 라이닝은 하중을 받는 지보재로 취급되지 않으나 국내에서는 슛크리트나 록볼트 등 주지보재의 열화에 대비한 영구지보재로 취급되어 설계되는 경향이 있다(임종진 외, 2006). 영국내 터널에서의 현장타설 콘크리트 라이닝 시공실태 파악에 의하면 국내 현장의 약 70%가 콘크리트 라이닝을 역학적인 구조체 개념에 의해 설계하고 있는 것으로 나타났다(연구보고(마상준과 장필성, 2006)가 이를 잘 뒷받침한다. 복공식 압축공기 저장 터널과 같은 특수목적 터널(김형목 외, 2009)의 경우 콘크리트 라이닝은 기밀과 터널의 구조적 안정을 확보하기 위한 주지보재로 간주될 수 있다. 따라서 외력을 받

¹⁾ 군산대학교 해양건설공학과 교수

²⁾ 군산대학교 대학원 해양산업공학과

³⁾ 한국지질자원연구원 지구환경연구본부 책임연구원

⁴⁾ 한국지질자원연구원 지구환경연구본부 선임연구원

* 교신저자 : bhchoi@kigam.re.kr

접수일 : 2009년 8월 18일

심사 완료일 : 2009년 8월 27일

게재 확정일 : 2009년 8월 27일

는 역학적 구조체로서 라이닝의 지보성능 평가를 위한 효과적인 해석방법의 개발이 요구되고 있는 실정이다.

라이닝 구조체의 안정성 해석을 위해서는 라이닝의 물성뿐만 아니라 라이닝의 안쪽 및 바깥쪽 경계면에 작용하는 하중이 정확히 결정되는 것이 중요하다. 일반적으로 라이닝의 안쪽 면에 작용하는 압력은 기지의 값으로 주어진다. 반면에 라이닝의 배면에 작용하는 하중은 라이닝의 설치시기, 지하수압의 존재유무, 암반의 팽창성 등에 영향을 받으므로 정확한 추정이 매우 어렵다. Brown & Bray (1982)은 라이닝 배면의 수압이 라이닝-암반 상호작용에 미치는 영향을 연구하였다. Kim & Eisenstein (2006)은 터널 굴착 후 라이닝 설치 지연거리(delay length)의 변화에 따른 라이닝에 작용하는 하중의 변화를 실증적으로 검토하였다.

라이닝의 설치가 지연되면 설치지점 주변암반에서 응력이완이 발생하므로 라이닝 설치 후 라이닝의 배면에 작용하는 지압의 크기가 작아진다. 라이닝 설치 전 터널 주변의 응력이완은 내공변위의 증가로 나타난다. 그러므로 응력이완과 내공변위의 관계를 알 수 있다면 라이닝 시공 현장에서 내공변위 계측을 통해 라이닝의 배면에 작용하는 지압의 크기를 유추할 수 있을 것으로 판단된다. 터널막장의 전진에 따른 지반의 변형거동을 2차원 수치해석을 통해 근사적으로 분석하기 위하여 굴착 예정면에 작용하던 초기지압을 서서히 감소시키는 방법이 흔히 사용된다(Sinha, 1989). 그러므로 이 방법을 적용하면 2차원 터널의 내부압의 변화(또는 응력이완)에 따른 내공변위의 변화를 수치해석적으로 계산할 수 있다.

이 연구에서는 Lee & Pietruszczak (2008)가 제안한 유한차분 탄소성 해석방법을 응용하여 정수압 지압조건인 Mohr-Coulomb 암반에 굴착된 2차원 원형터널의 이완응력-내공변위 관계를 계산하는 방법을 제안하였다. 또한 이를 활용하여 라이닝의 배면에 작용하는 지압을 결정한 후 콘크리트 라이닝 내부에 발생하는 응력 및 변위분포를 계산할 수 있는 간편한 유한차분 해석법을 제시하였다. 해석법을 통해 콘크리트 라이닝의 외부 경계에 작용하는 하중의 크기와 라이닝 안쪽 경계에 작용하는 압력의 크기가 라이닝의 탄소성 거동에 미치는 영향을 살펴보았다. 콘크리트 라이닝 또한 Mohr-Coulomb 항복조건을 따르는 탄성-완전소성체로 가정하였다.

2. 콘크리트 라이닝의 탄소성해석법

2.1 해석모델의 정의

정수압 상태의 초기지압(p_0)이 작용하고 있는 Mohr-Coulomb 암반에 Fig. 1과 같이 반경 d 인 원형터널이 굴착된 후 내경이 a 인 콘크리트 라이닝이 설치된다

가정 하에 라이닝 구조체 내부의 응력 및 변위 분포를 계산하였다. 콘크리트라이닝 벽면에는 내부압(p_{iL})이 작용하고 있으며 암반과 콘크리트 라이닝 영역에 대한 탄성정수(E, ν)와 강도정수(c, ϕ)의 크기는 각각 다르게 설정하였다.

평면변형률조건을 가정할 경우 해석대상 모델은 축대칭성을 고려하면 일차원 문제로 단순화 시킬 수 있으며 암반 및 콘크리트 라이닝의 항복은 다음과 같은 Mohr-Coulomb 조건식에 의해 판단할 수 있는 것으로 가정하였다.

$$\sigma_\theta = N\sigma_r + Y \tag{1}$$

여기서,

$$N = \frac{1 + \sin\phi}{1 - \sin\phi} ; Y = \frac{2c\cos\phi}{1 - \sin\phi} \tag{2}$$

이다. σ_θ 와 σ_r 는 각각 원주방향 및 반경방향 수직응력을 나타내며, 이 연구에서는 σ_θ 가 최대주응력이고 σ_r 이 최소주응력이 되는 경우만 고려하였다. 강도정수 c, ϕ 는 각각 점착력, 내부마찰각을 나타낸다.

암반과 콘크리트 라이닝에서 발생하는 소성변형률을 계산하기 위해 식 (1)과 유사한 형태의 선형 소성포텐셜 함수를 가정하였으며 이 경우 반경방향 소성변형률 증분($d\epsilon_r^p$)과 원주방향 소성변형률 증분($d\epsilon_\theta^p$)의 관계식은 다음과 같이 표시된다.

$$d\epsilon_r^p = \frac{1 + \sin\psi}{1 - \sin\psi} d\epsilon_\theta^p \tag{3}$$

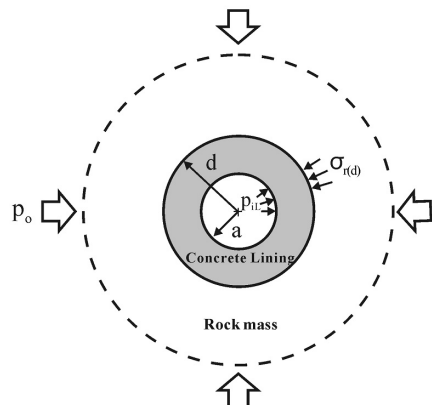


Fig. 1. Circular tunnel supported by concrete lining.

여기서 ψ 는 팽창각으로서 $\psi \neq \phi$ 이면 non-associated flow rule이 된다.

2.2 라이닝 구조체 해석을 위한 경계면 압력

라이닝 구조체에 발생하는 응력과 변위를 계산하기 위해서는 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 라이닝의 안쪽 및 바깥쪽 경계면에 작용하는 압력 p_{iL} 과 $\sigma_{r(d)}$ 가 응력 경계조건으로 주어져야 한다. p_{iL} 은 일반터널의 경우 0이지만 수압터널이나 압축공기 저장터널의 경우 운전압력이 된다. 반면에 $\sigma_{r(d)}$ 는 라이닝의 설치 지연시간과 압반의 역학적 거동특성에 영향을 받기 때문에 정확한 값을 결정하는 것이 용이하지 않다.

터널의 2차원 해석에서 막장거리의 영향은 Fig. 2와 같은 개념적 모델(Sulem, et al., 1987)에 근거하여 근사적으로 해석에 반영시킬 수 있다. 굴착면에서 초기응력이 완전히 이완되었을 때($\sigma_r = 0, \lambda = 1$) 내공변위는 최대값($u_{max}, \beta = 1$)이 된다. 그림에서 λ 는 2차원 굴착면에서 막장의 진행효과를 근사하기 위해 적용하는 초기응력 개방률을 의미한다. 그러나 굴착면의 응력이 완전히 이완되기 이전에 콘크리트 라이닝이 설치된다면 내공변위 증가량 $(1-\beta)u_{max}$ 에 대응되는 크기의 지압 $\sigma_{r(d)}$ 가 콘크리트 라이닝의 배면에 작용하는 것으로 가정할 수 있다.

이 연구에서는 Sulem et al.의 개념적 모델을 바탕으로 라이닝 설치 지연에 따라 변화하는 라이닝 외부경계

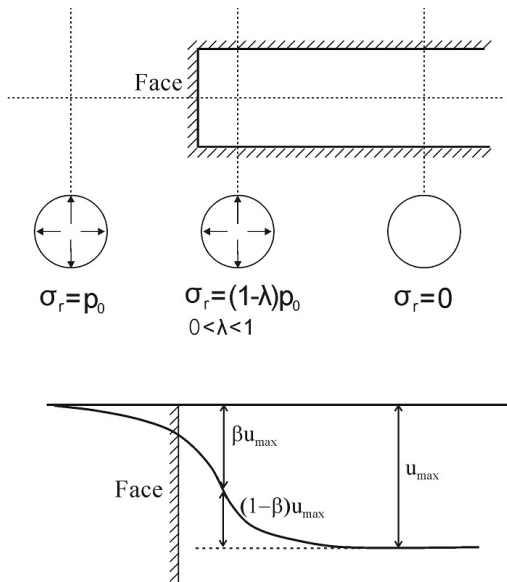


Fig. 2. Two-dimensional approximation of tunnel excavation.

에 작용하는 압력 $\sigma_{r(d),\beta}$ 를 계산할 수 있는 간단한 수치 해석 절차를 제안하였다. Fig. 3과 같이 라이닝과 터널을 가상적으로 분리한다면 $\sigma_{r(d),\beta}$ 는 반경 d 인 무지보 터널에서 내공변위 βu_{max} 를 발생시키는 지보압에 해당한다. 현장 측측을 통해 라이닝 설치시점에 해당하는 β 값이 결정된다면 $\sigma_{r(d),\beta}$ 가 라이닝의 바깥쪽 면에 작용하는 응력경계조건이 된다.

$\sigma_{r(d),\beta}$ 를 계산하는 절차를 개략적으로 살펴보면 다음 Fig. 4와 같다. 먼저, 콘크리트 라이닝이 설치되기 전 정수압조건 초기지압(p_0)이 작용하고 있는 터널반경이 d 인 원형터널(Fig. 3)에 대해 Lee & Pietruszczak (2008)의 해석법에 따라 탄소성 해석을 수행한다. 이 단계의 탄소성해석에서는 변형률연화, 탄성-취성, 탄성-완전소성 등이 고려될 수 있다. 이때 터널 벽면에 작용하는 반경방향 응력 $\sigma_{r(d)}$ 은 0의 값을 갖으며 여기서 구해지는 터널벽면의 반경방향 변위가 u_{max} 값이 된다. 이제 터널 벽면에서 u_{max} 의 분율인 βu_{max} 가 발생하는데 필요한

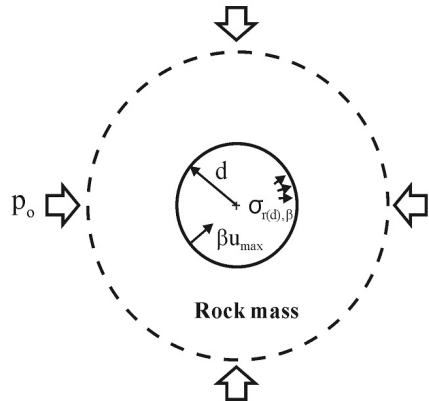


Fig. 3. Outer boundary pressure acting on the concrete lining.

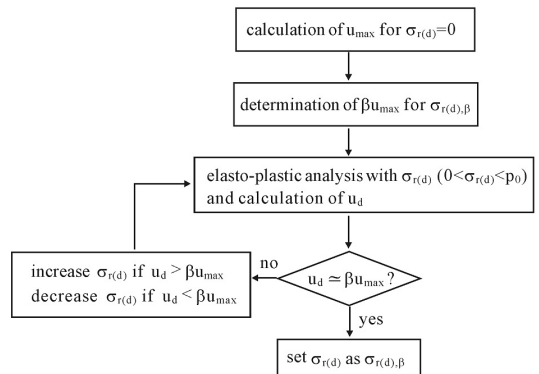


Fig. 4. Numerical procedure for the determination of $\sigma_{r(d),\beta}$.

지보압 $\sigma_{r(d),\beta}$ 는 다음에 나타낸 세 단계를 통해 구할 수 있다.

- ① 라이닝이 설치되지 않은 원형터널에 대해 임의의 지보력 $\sigma_{r(d)}$ 을 설정하여 탄소성해석을 수행한다. 이때 터널의 지보력의 크기는 $0 < \sigma_{r(d)} < p_0$ 의 범위를 갖는다.
- ② ①에서 계산한 원형터널의 최중변위 값(u_d)과 βu_{\max} 값을 비교하여 두 값이 차이가 발생하면 지보력 $\sigma_{r(d)}$ 값을 조정하여 다시 해석을 수행한다. 즉, $u_d > \beta u_{\max}$ 이면 $\sigma_{r(d)}$ 값을 증가시키고 $u_d < \beta u_{\max}$ 이면 $\sigma_{r(d)}$ 값을 감소시켜 u_d 와 βu_{\max} 값이 충분히 근사할 때 까지 반복하여 탄소성 해석을 수행한다.
- ③ u_d 와 βu_{\max} 값이 충분히 근사할 때의 $\sigma_{r(d)}$ 값을 라이닝 외부경계에 작용하는 지압 $\sigma_{r(d),\beta}$ 로 선택한다.

2.3 라이닝의 응력 및 변위분포 계산

2.2절에서 설명한 절차에 따라 콘크리트 라이닝의 응력경계조건이 결정되면 다음 단계로 Fig. 5와 같은 콘크리트 라이닝 구조체에 대해 탄소성 해석이 실시된다. 이 연구에서는 Lee & Pietruszczak (2008)의 탄소성 해석법을 적용하여 라이닝 내부의 응력 및 변위분포를 계산하는 방법을 제시하였다. 이 연구에서는 $\sigma_{r(d),\beta} > p_{iL}$ 을 가정하여 라이닝 내부에서 발생하는 원주방향의 수직응력이 최대주응력인 경우만을 고려하였다.

해석조건에 따라 콘크리트 라이닝 영역에서는 Fig. 6과 같이 소성반경 R 을 경계로 탄성영역과 소성영역이 동시에 존재할 수 있다. 바깥쪽 경계면에 작용하는 응력 σ_0 는 $\sigma_{r(d),\beta}$ 에 해당하며, 내부압력 p_i 는 p_{iL} 에 해당된다. 이 두 영역에 대한 응력 및 변위해석은 일종의 탄소성 thick wall cylinder 문제로 귀착된다. 바깥쪽 반경이 무한대인 thick wall cylinder의 탄소성해는 원형터

널의 변형거동 해석에 응용될 수 있으며 지금까지 이에 대한 많은 연구들이 수행되고 있다(이연규, 2008; Carter et al., 1986; Yu, 1992). 반면에 이 연구에서 다루고자 하는 유한한 두께를 갖는 cylinder 모델의 탄소성해석에 대한 연구는 상대적으로 미진한 실정이다.

라이닝 탄성영역의 응력 및 변위 분포는 Lamé's solution (Timoshenko & Goodier, 1982)을 이용하여 구할 수 있다. 즉, 탄성영역이 $R < r < d$ 일 때 반경방향 및 원주방향 응력과 변위를 다음식 (4)~(6)으로 나타낼 수 있다.

$$\sigma_r(r) = \frac{\sigma_0 d^2 - \sigma_R R^2}{d^2 - R^2} - \frac{1}{r^2} \frac{R^2 d^2 (\sigma_0 - \sigma_R)}{(d^2 - R^2)} \tag{4}$$

$$\sigma_\theta(r) = \frac{\sigma_0 d^2 - \sigma_R R^2}{d^2 - R^2} + \frac{1}{r^2} \frac{R^2 d^2 (\sigma_0 - \sigma_R)}{(d^2 - R^2)} \tag{5}$$

$$u_r(r) = \frac{1 - 2\nu}{2G} \frac{\sigma_0 d^2 - \sigma_R R^2}{d^2 - R^2} r - \frac{(\sigma_0 - \sigma_R) R^2 d^2}{2G(d^2 - R^2)} \frac{1}{r} \tag{6}$$

여기서 ν 는 포아송비, G 는 전단탄성계수, R 은 소성반경, σ_R 은 탄성-소성 경계에 작용하는 반경방향응력을 나타낸다.

라이닝의 소성영역 응력 및 변위분포는 항복조건식과 평형조건식을 활용하여 구할 수 있다. 항복조건식 (1)을 다음과 같은 평형조건식 (7)에

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \tag{7}$$

대입하여 얻은 다음 미분방정식 (8)의

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{1 - N}{r} \sigma_r - \frac{1}{r} Y = 0 \tag{8}$$

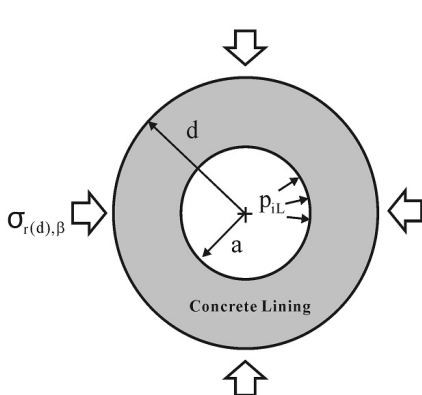


Fig. 5. Concrete lining model for elasto-plastic analysis.

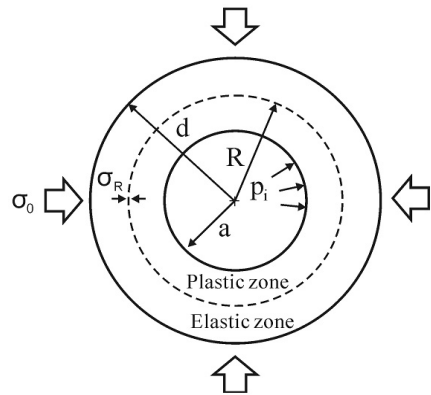


Fig. 6. Elastic and plastic zones formed in concrete lining.

적분을 통해 영역 $a < r < R$ 의 반경방향 및 원주방향 응력분포는 다음 식 (9)~(10)와 같이 구해진다.

$$\sigma_r(r) = -\alpha + (\alpha + p_i) \cdot \left(\frac{r}{a}\right)^{(N-1)} \quad (9)$$

$$\sigma_\theta(r) = -\alpha + (\alpha + p_i) N \left(\frac{r}{a}\right)^{(N-1)} \quad (10)$$

여기서, $\alpha = Y/(N-1)$ 이다.

탄소성 영역의 반경변위 분포를 계산하기 위해 Lee & Pietruszczak (2008)가 제안한 탄소성 해석방법을 적용하기 위해서는 탄성-소성 경계에 작용하는 반경방향 응력 σ_R 이나 탄성-소성 반경 R 이 미리 구해져야 한다. 탄성-소성 경계에 작용하는 원주방향 응력 σ_θ 는 탄성영역과 소성영역에서의 해석결과 값이 같다는 다음 조건식을 이용하면

$$\frac{2\sigma_0 d^2 - \sigma_R(R^2 + d^2)}{d^2 - R^2} = N\sigma_R + Y \quad (11)$$

탄성-소성 경계에 작용하는 반경방향응력 σ_R 을 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_R = \frac{d^2(2\sigma_0 - Y) + R^2 Y}{R^2(1 - N) + d^2(1 + N)} \quad (12)$$

식 (12)를 이용하여 σ_R 를 구하기 위해서는 소성반경 R 이 선행적으로 결정되어야 함을 알 수 있다. 그러나 유한 두께를 갖는 실린더 해석모델에서 소성반경 R 은 해석적으로 구하는 것이 어렵다. 이 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해 탄성-소성 경계에 작용하는 반경 응력 σ_R 은 식 (9)와 식 (12)로부터 계산한 결과 값이 같다는 조건을 이용하여 다음과 같은 관계식을 유도하였다.

$$-\alpha + (\alpha + p_i) \left(\frac{R}{a}\right)^{(N-1)} = \frac{d^2(2\sigma_0 - Y) + R^2 Y}{R^2(1 - N) + d^2(1 + N)} \quad (13)$$

결국 식 (13)은 소성반경 R 과 라이닝의 안쪽 경계압력 p_i 의 관계를 나타내므로 소성반경 R 을 가정하면 이에 대응되는 p_i 값을 계산할 수 있게 해준다. 이 연구에서는 식 (13)을 이용하여 소성반경 $a < R < d$ 을 가정한 후 이에 대응되는 콘크리트 안쪽 경계압을 설정하여 라이닝의 탄소성 해석을 수행하였다. 이런 과정을 통해 소성영역에서 변위분포는 Lee & Pietruszczak (2008)의 해석방법을 적용하여 계산할 수 있었다. 원형터널 소성영역의 탄소성 변위계산에 대한 자세한 내용은 Lee & Pietruszczak(2008)의 연구를 참고하기 바란다.

3. 콘크리트 라이닝의 탄소성해석 예

이 연구에서는 심부에 굴착된 원형터널에 설치된 콘크리트 라이닝의 안정성을 평가할 수 있는 간단한 탄소성 해석방법을 제안하였다. 제안된 탄소성해석법의 활용성을 검증하기 위해 콘크리트 라이닝의 외부경계에 작용하는 응력의 크기와 라이닝 내부에 작용하는 지보압의 크기가 라이닝의 탄소성 거동에 미치는 영향을 알아 보았다. 이 목적으로 정수압 상태의 초기응력 13.5 MPa이 작용하는 Mohr-Coulomb 암반에 굴착된 반경 2.5 m인 가상의 압축공기 저장용 원형터널에 설치된 콘크리트 라이닝에 대해 탄소성 해석을 수행하였다. 원형터널에 설치된 콘크리트 라이닝의 두께는 50 cm로 가정하였다. 해석에서 가정한 암반과 라이닝의 물성은 Table 1에 나타난 바와 같다. Table 1에 나타난 수치는 실제 현장에서 획득한 값이 아니며, 해석을 위해 가정한 값이다. 해석의 간편성을 위해 암반과 라이닝에서 소성 체적팽창은 발생하지 않는 것으로 가정하였다($\psi = 0^\circ$).

3.1 라이닝에 작용하는 경계응력의 영향 검토

터널의 지보를 목적으로 시공된 콘크리트 라이닝의 안정성은 라이닝 재료의 강도특성 뿐만 아니라 암반과 라이닝의 경계면에 작용하는 지압의 크기에 큰 영향을 받을 수 있다. 그러나 터널 라이닝에 가해지는 지압의 크기는 지질상태, 터널 굴착방법, 지반과 라이닝의 상대적

Table 1. Input data for elasto-plastic analysis of concrete lining

parameter	rock mass	concrete lining
deformation modulus (E)	3.0 GPa	10.0 GPa
Poisson's ratio (ν)	0.25	0.3
internal friction angle (ϕ)	40°	40°
cohesion (c)	0.7 MPa	2.0 MPa
dilation angle (ψ)	0°	0°

강성, 터널 직경과 깊이 등에 따라 다양한 값을 보일 수 있으므로 그 값을 예측하는 것이 대단히 어렵다. 그러므로 예상되는 여러 가지 하중조건에서 라이닝의 안정성을 평가할 필요가 있다.

이 연구에서는 라이닝 설치 시점에 따라 라이닝의 바깥쪽 경계부에 작용하는 지압의 크기를 달리 설정하여 라이닝 내부에 발생하는 응력 및 변위분포를 고찰하였다. 즉, 해석조건에 따라 라이닝 설치 전 원형터널에는 무지보 최대변위(u_{max})의 70%, 60%, 55%, 50%에 해당하는 선형변위 값이 발생하였다고 가정한 4가지 경우에 대해 라이닝의 탄소성해석을 수행하였다. 그러므로 이 연구에서는 $\beta=0.7, 0.6, 0.55, 0.5$ 인 4가지 경우에 대해 라이닝의 바깥쪽 경계압력 $\sigma_{r(2.5),\beta}$ 를 산정하였다.

라이닝 내부에 작용하는 공기압(p_{iL})은 4가지 경우 모두 1.0 MPa로 가정하였다.

Fig. 7은 라이닝 바깥 경계에 작용하는 압력의 변화에 따른 콘크리트 라이닝의 응력분포를 나타낸 것이다. 해석결과 $\beta=0.7, 0.6, 0.55$ 인 경우 라이닝의 전체 영역에서 탄성거동이 나타나고 있음을 볼 수 있다. β 의 감소 즉, 라이닝의 지반하중 부담률이 커짐에 따라 원주방향 응력 σ_θ 가 커지는 경향도 뚜렷히 나타난다. 3가지 경우에서 라이닝 안쪽 면에 발생하는 σ_θ 값은 각각 2.15 MPa, 8.02 MPa, 12.70 MPa으로 나타났다. 그러나 $\beta=0.5$ 일 때 해석결과에서는 탄성영역과 소성영역이 동시에 나타나고 있음을 볼 수 있다. 이 경우는 라이닝이 다른 경우에 비해 상대적으로 빨리 설치되어 콘크리트 라이닝

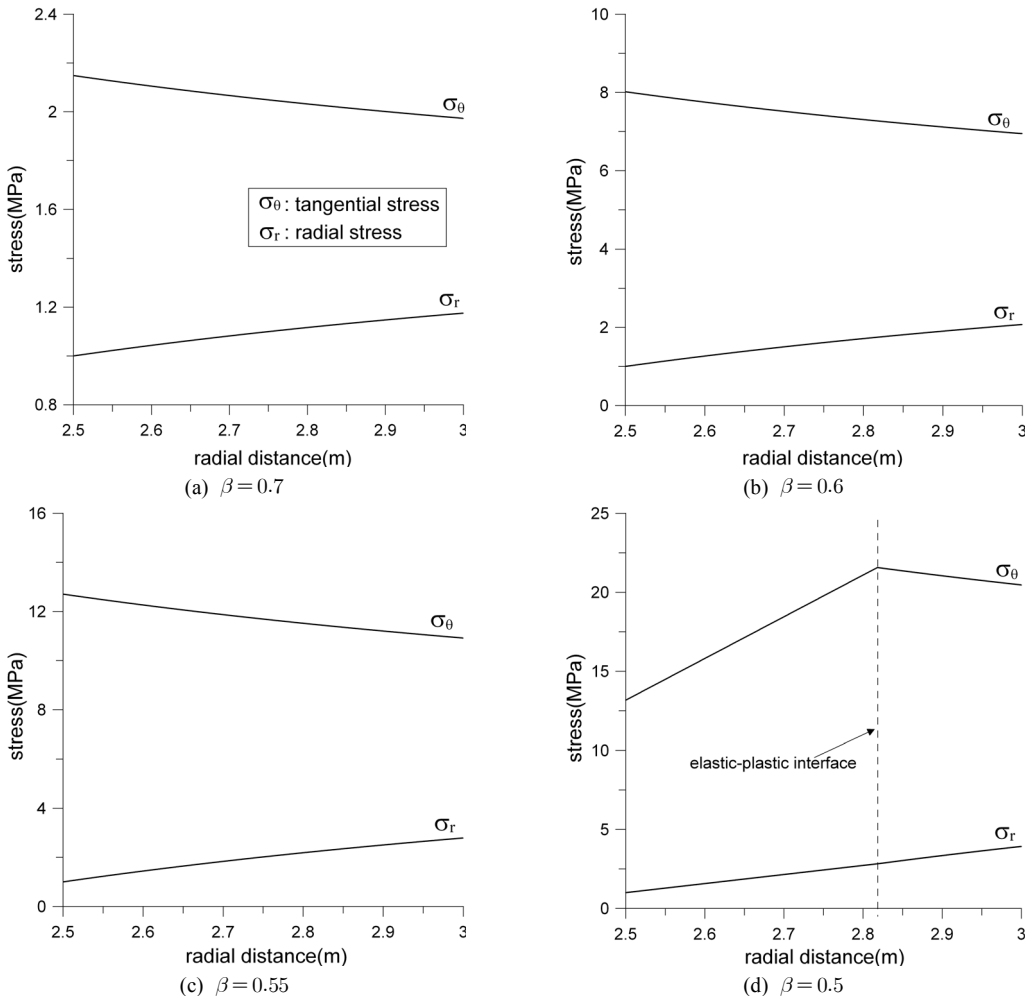


Fig. 7. Distributions of stress components in concrete lining with different values of β .

구조체가 과도한 하중을 받고 있는 상황에 해당한다. $\beta=0.5$ 일 때 σ_θ 의 정점값은 21.57 MPa으로 라이닝 내부의 탄성-소성 경계 지점에서 나타난다.

Fig. 8은 $\beta=0.7, 0.6, 0.55, 0.5$ 인 4가지 경우에 대한 변위분포를 보여주고 있다. 라이닝내부 벽면에서 발생하는 벽면변위 역시 $\beta=0.7, 0.6, 0.55, 0.5$ 인 경우 각각 0.391 mm, 1.726 mm, 2.793 mm, 5.543 mm로 점점 증가하고 있음을 알 수 있다. 또한 $\beta=0.7$ 에 해당하는 변위분포 그래프(a)는 다른 해석조건과 상이한 결과를 보여주고 있으며 라이닝 외부로 갈수록 변위 값이 증가하고 있는 특징이 나타나고 있다. 이러한 결과는 라이닝 설치 시점이 라이닝의 탄소성거동에 밀접한 영향을 미치고 있음을 보여주고 있다.

3.2 라이닝 내부에 작용하는 공기압의 영향 검토

라이닝 내부에 작용하는 공기압(p_{iL})의 크기가 라이닝의 탄소성 거동에 미치는 영향을 알아보기 3.1절에서 이용된 라이닝 모델에 대해 탄소성해석을 실시하였다. Table 1에 제시된 역학적 상수 값들을 다시 이용하였다. 반면에 라이닝 외부 경계에 작용하는 지압의 크기는 $\beta=0.5$ 에 해당하는 σ_r 값으로 설정하였으며 라이닝 내부에 가해지는 공기압의 크기를 2.5 MPa, 2.0 MPa, 1.5 MPa, 1.0 MPa인 4가지 경우로 가정하여 탄소성해석을 수행하였다.

4가지 경우의 공기압에 따른 라이닝의 응력분포를 Fig. 9에 나타내었다. 해석결과에서 볼 수 있듯이 내부 공기압의 크기에 따라 라이닝에서 탄성거동과 탄소성거동이 나타나고 있다. $p_{iL}=2.5$ MPa, 2.0 MPa인 경우 라이

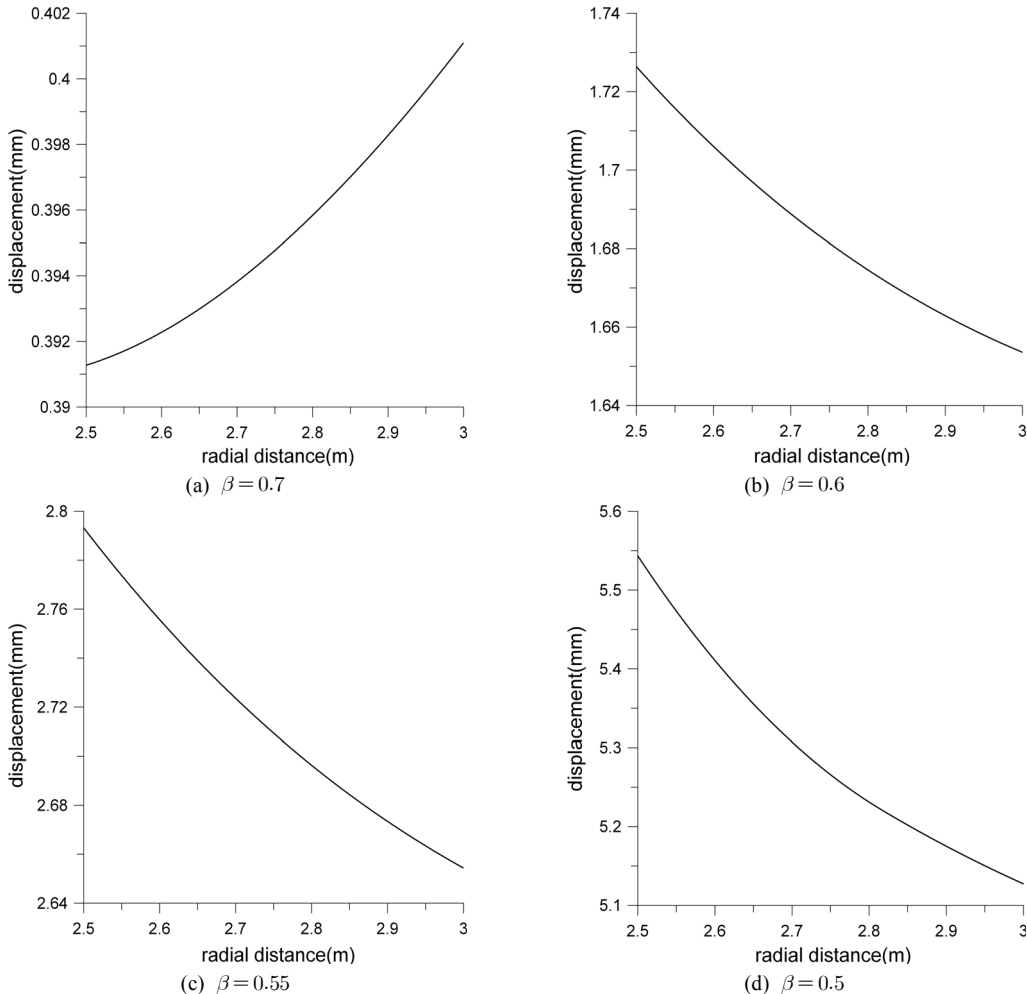


Fig. 8. Distributions of radial displacements in concrete lining with different values of β .

닝 전체영역은 탄성거동을 하는 것으로 나타났다(Fig. 9(a), (b)). 이때 라이닝 내부 벽면에서 발생하는 σ_θ 는 공기압의 감소에 따라 각각 11.82 MPa, 14.60 MPa로 증가하고 있다. 내부공기압이 $p_{iL}=1.5$ MPa, 1.0 MPa로 낮아지는 경우에는 라이닝 안쪽 부분에 소성영역이 발생되고 있음을 보여준다(Fig. 9(c), (d)). 이 경우에는 터널벽면에서 σ_θ 가 공기압의 감소에 따라 각각 15.47 MPa, 13.17 MPa로 감소하고 있다. 또한 탄소성거동시 공기압이 감소함에 따라 σ_θ 의 정점값이 더 크게 나타나고 있으며 소성반경 역시 2.56 m에서 2.82 m로 증가하고 있음을 볼 수 있다. 이 결과에서 볼 수 있듯이 압축공기 저장용 터널에 설치된 라이닝의 안정성은 내부 공기압과 바깥쪽 경계면에 작용하는 지압의 차이에

큰 영향을 받는다는 것을 알 수 있다. 따라서 상대적으로 추정이 어려운 라이닝 바깥쪽 경계에 작용하는 지압의 신중한 선택이 라이닝 구조체의 안정성 해석과정에서 매우 중요하다는 것을 알 수 있다.

Fig. 10은 라이닝 구조체의 안쪽에 작용하는 공기압(p_{iL})의 크기에 따른 라이닝 내부의 변위분포를 보여주고 있다. 라이닝 내부에 작용하는 공기압의 크기가 2.5 MPa, 2.0 MPa, 1.5 MPa, 1.0 MPa로 감소함에 따라 라이닝 내부 벽면에 발생하는 변위는 각각 2.447 mm, 3.126 mm, 3.844 mm, 5.543mm로 점점 증가하고 있음을 알 수 있다. 이상의 결과에서 볼 수 있듯이 라이닝의 응력 및 변위 분포는 라이닝 내부 경계면에 작용하는 공기압의 크기에 큰 영향을 받고 있음을 볼 수 있다.

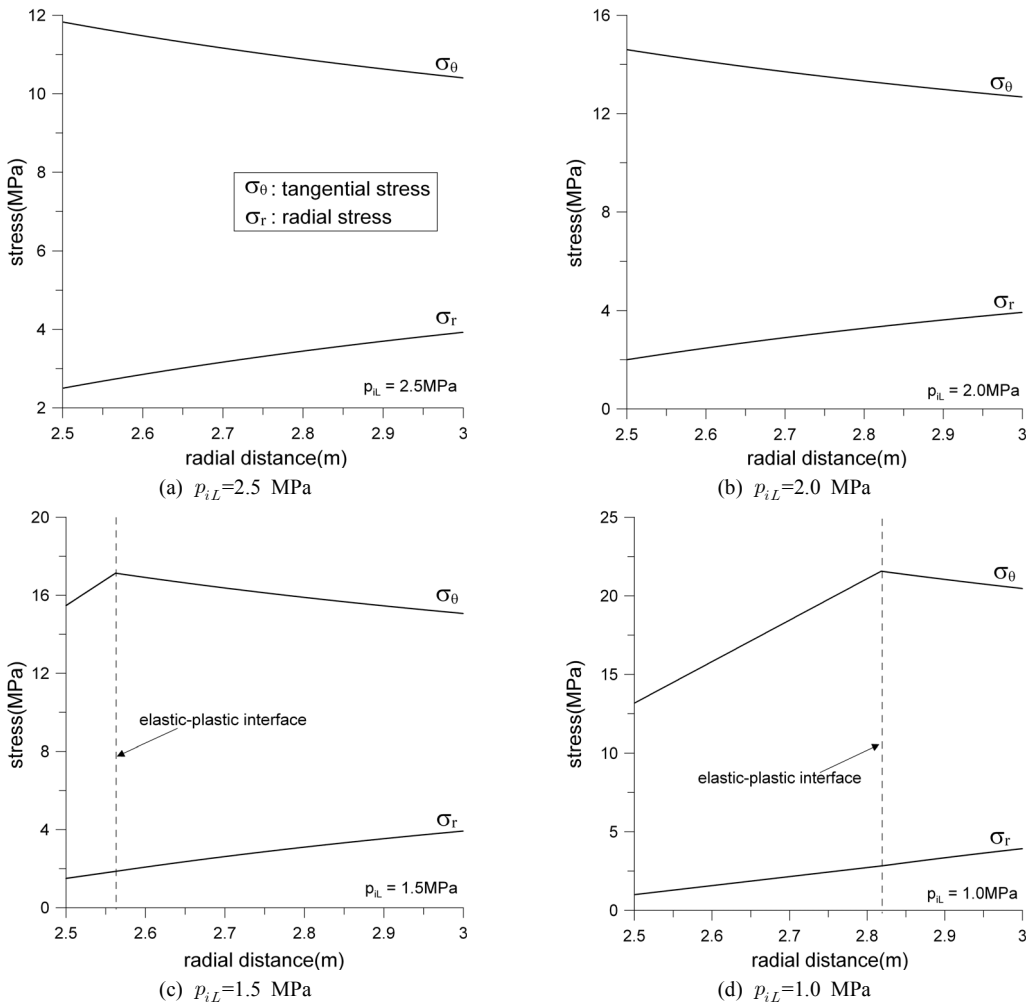


Fig. 9. Distributions of stress components in concrete lining with different values of p_{iL} .

따라서 라이닝에 내부에 작용하는 압축공기 운전압력의 크기는 수치해석 등을 통한 콘크리트 라이닝 안정성 해석에 기초하여 신중하게 선택하는 것이 필요할 것으로 사료된다.

4. 결론

이 연구에서는 정수압 지압조건인 심부 암반에 굴착된 원형터널에 설치되는 콘크리트 라이닝의 안정성을 평가할 수 있는 간단한 탄소성 해석방법을 제안하였다. 제안된 방법의 핵심은 라이닝 바깥쪽 경계면에 작용하는 지압의 크기를 라이닝 설치지연을 고려하여 결정할 수 있다는데 있다. 라이닝 바깥쪽 경계면 압력을 결정하

기 위해 Lee & Pietruszczak (2008)이 제안한 유한차분 탄소성해석법이 응용되었다. 라이닝의 경계압력이 주어진 상태에서 라이닝 내부에 존재하는 탄성-소성 경계면의 위치를 해석적으로 계산하기 어려운 점을 극복하기 위하여 라이닝 내부의 특정 지점에 미리 탄성-소성 경계를 가정하고 이에 대응되는 내부 경계 압력을 산정하였다. 라이닝의 소성영역에서 발생하는 변위를 계산하는 과정에서도 Lee & Pietruszczak의 방법이 활용되었다.

제안된 탄소성해석법의 활용 가능성을 보여주기 위해 가상의 압축공기 저장용 터널에 설치되는 콘크리트 라이닝에 대해 안정성 해석을 수행하였다. 이를 위해 라이닝의 바깥쪽 및 안쪽 경계면 압력이 라이닝의 탄소성 응력 및 변위분포에 미치는 영향을 검토한 결과 다음의

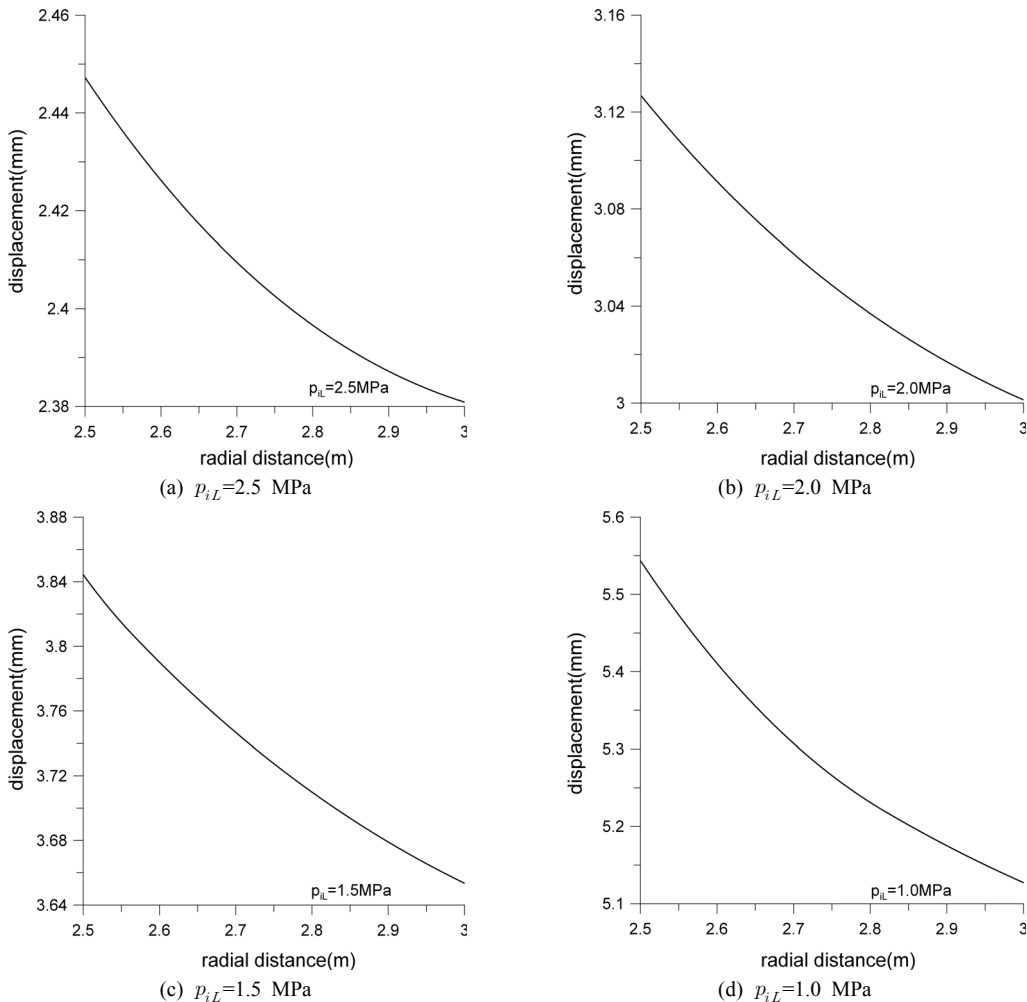


Fig. 10. Distributions of radial displacements in concrete lining with different values of p_{iL} .

결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 콘크리트 라이닝 설치 이전에 발생하는 선형변위 크기가 라이닝의 안정성에 미치는 영향을 검토하기 위하여 내부 공기압의 크기를 고정시킨 조건에서 β 값을 4가지(0.7, 0.6, 0.55, 0.5)로 변화시키면서 라이닝 구조체의 탄소성 해석을 수행한 결과 외부의 경계에 작용하는 응력의 크기에 따라 탄성거동과 탄소성거동이 콘크리트 라이닝에 발생할 수 있음을 알 수 있었다. 이러한 결과는 라이닝 설치 시점이 라이닝의 안정성에 큰 영향을 미치고 있음을 보여주었다.
- 2) 압축공기 터널 라이닝 외측 경계압력을 고정시킨 상태에서 내부에 작용하는 공기압을 감소시킴에 따라 라이닝 내부 벽면에 발생하는 변위는 점점 증가하고, 소성영역의 범위가 확대됨을 알 수 있었다. 따라서 압축공기 터널 라이닝의 안정성 평가과정에서는 전 압력의 크기 뿐만 아니라 라이닝의 설치시점도 함께 고려되어야 할 것으로 나타났다.

이 연구에서 제안된 라이닝의 탄소성해석 절차에서는 라이닝 안쪽에 작용하는 경계압보다 외부경계에서 작용하는 지압 값이 더 큰 경우를 가정하였으나 라이닝 내부의 공기압이 더 큰 경우에도 쉽게 응용될 수 있을 것으로 기대되며 이에 대한 연구는 추후 논문을 통해 발표될 예정이다.

감사의 글

본 연구는 한국지질자원연구원 기본사업인 ‘지하 압반내 복공식 에너지저장시스템 개발’의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. 김형목, 류동우, 정소걸, 송원경, 2009, 복공식 압축공기 지하저장을 위한 가변성 분할 라이닝 터널기술, 터널과 지하공간 (한국암반공학회지), 19.2, 77-85.
2. 마상준, 장필성, 2006, 국내 터널에서의 현장타설 콘크리트 라이닝 시공실태 파악, 대한토목학회지, 54.12, 68-79.
3. 이연규, 2008, Mohr-Coulomb 암반에 굴착된 원형터널의 보강효과 해석을 위한 간편 수치해석법, 터널과 지하공간 (한국암반공학회지), 18.2, 98-106.
4. 임종진, 신휴성, 이성원, 2006, 일체형 터널 라이닝 지보 성능에 대한 수치해석적 연구, 한국암반공학회 춘계학술 발표회논문집, 305-310.
5. Brown, E.T and J.W. Bray, 1982, Rock-support interaction calculations for pressure shafts and tunnels, In Rock Mechanics: Caverns and Pressure Shafts, ISRM Symp., Aachen, 555-565.
6. Carter, J.P., J.R. Booker and S.K. Yeung, 1986, Cavity expansion in cohesive frictional soils, Geotechnique, 36, 349-358.
7. Kim, H.J. and Z. Eisenstein, 2006, Prediction of tunnel lining load using correction factors, Engineering Geology, 85, 302-312.
8. Lee, Y.K. and S. Pietruszczak, 2008, A new numerical procedure for elastic-plastic analysis of a circular opening excavated in a strain-softening rock mass, Tunnel. Underg. Space Technol., 23.5, 588-599.
9. Sinha, R.S., 1989, Underground structures, Design and Instrumentation, Elsevier
10. Sulem, J., M. Panet and A. Guenot, 1987, An analytical solution for time-dependent displacement in a circular tunnel, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 24.3, 155-164.
11. Timoshenko, S.P. and J.N. Goodier, 1982, Theory of elasticity (3rd Ed.), McGraw-Hill.
12. Yu, H.S., 1992, Expansion of a thick cylinder of soils, Computers and Geotechnics, 14, 21-41.



이 연 구

1987년 서울대학교 공과대학 자원공학과
공학사
1989년 서울대학교 대학원 자원공학과
공학석사
1994년 서울대학교 대학원 자원공학과
공학박사
Tel: 063-469-1864
E-mail: kyoulee@kunsan.ac.kr
현재 군산대학교 해양과학대학 해양건설
공학과 교수



박 경 순

2007년 군산대학교 해양과학대학 해양
시스템공학과 공학사
Tel: 063-469-1861
E-mail: drj000@nate.com
현재 군산대학교 대학원 해양산업공학과
석사과정



송 원 경

1982년 서울대학교 공과대학 자원공학과
공학사
1986년 서울대학교 대학원 자원공학과
공학석사
1966년 프랑스 에콜데민 지질공학과 공학
박사
Tel: 042-868-3247
E-mail: songwk@kigam.re.kr
현재 한국지질자원연구원 지구환경연구
본부 책임연구원



박 철 환

1979년 서울대학교 공과대학 자원공학과
공학사
1981년 서울대학교 대학원 자원공학과
공학석사
1987년 서울대학교 대학원 자원공학과
공학박사
Tel: 042-868-3244
E-mail: cwpark@kigam.re.kr
현재 한국지질자원연구원 지구환경연구
본부 책임연구원



최 병 희

1988년 서울대학교 공과대학 자원공학과
공학사
2002년 전남대학교 대학원 자원공학과
공학석사
2005년 전남대학교 대학원 지구시스템공
학과 공학박사
Tel: 042-868-3237
E-mail: bhchoi@kigam@re.kr
현재 한국지질자원연구원 지구환경연구
본부 선임연구원