

압축공기 저장용 터널에 설치된 콘크리트 라이닝의 안정성 해석

이연규¹⁾, 박경순²⁾, 송원경³⁾, 박철환³⁾, 최병희^{4)*}

Stability Analysis of Concrete Liner installed in a Compressed Air Storage Tunnel

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

Abstract The stability assessment of a concrete liner of a compressed air storage tunnel should be performed by an approach which is different from that commonly used for the liners of road tunnels, since the liner is exposed to high air pressure. In this study, the stability analysis method for the liner of compressed air storage tunnel is proposed based on the elastic and elasto-plastic solutions of the thick-walled cylinder problem. In case of elastic analysis, the yield initiation condition at the inner boundary is considered as the failure condition of the liner, while the condition which results in the extension of yielding zone to a certain depth is taken as a failure indicator of the liner in the elasto-plastic analysis taking Mohr-Coulomb criterion. The application of the proposed method revealed that the influence of the relative magnitude of boundary loads on the stability of liner is considerable. In particular, noting that the estimation of the outer boundary load may be relatively difficult, it is thought that the precise prediction of outer boundary load is very important in the analysis. Accordingly, the emphasis is put on the selection of the liner installation time, which may govern the magnitude of outer boundary load.

Key words Compressed air storage, Concrete liner, Elasto-plastic analysis, Mohr-Coulomb yield condition

초 록 복공식 압축공기 저장 터널의 라이닝은 고압의 공기압을 견뎌야 하므로 일반 도로터널 라이닝의 경우와는 다른 접근법에 의해 안정성 해석이 수행될 필요가 있다. 이에 따라 이 연구에서는 원통형 실린더의 탄성해 및 탄소성 해를 기반으로 하여 복공식 압축공기 저장터널에 설치되는 콘크리트 라이닝의 안정성 해석법이 제안되었다. 탄성해석의 경우 라이닝 내측 경계면의 항복개시조건을 라이닝 파괴기준으로 설정하였다. Mohr-Coulomb 항복기준을 적용한 탄소성 해석의 경우 최대 허용 항복 깊이까지 항복영역이 확대되는 조건을 파괴기준으로 설정하였다. 제안된 방법을 이용한 안정성해석 결과 라이닝의 내측 공기압과 배면하중의 상대적 크기가 라이닝의 안정성에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 상대적으로 추정이 힘든 배면하중의 정확한 예측이 라이닝 안정성 평가에서 매우 중요한 것으로 나타났다. 이에 따라 배면하중의 크기에 큰 영향을 주는 라이닝 설치시점 선택의 중요성이 강조되었다.

핵심어 압축공기저장, 콘크리트 라이닝, 탄소성 해석, Mohr-Coulomb 항복조건

1. 서 론

최근 이산화탄소 배출로 인한 지구온난화 우려 속에

풍력, 태양열, 조력 등을 이용한 전력생산에 대한 관심이 국내외적으로 높아지고 있다. 그러나 자연의 힘을 이용하는 이러한 발전방식은 지속적인 전력생산이 어려워 침투부하에 즉각적인 대응이 어렵다는 단점을 가지고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위한 방안 중 하나로 잉여전력을 압축공기 포텐셜 에너지로 저장하고 침투부하 시 압축공기를 가스터빈 발전에 이용하는 CAES (Compressed Air Energy Storage) 기술 개발에 대한 관심이 높아지고 있다.

최근 미국에서는 대규모 풍력발전소의 잉여전력을 저

¹⁾ 군산대학교 해양건설공학과 교수

²⁾ 군산대학교 대학원 해양산업공학과

³⁾ 한국지질자원연구원 지구환경연구본부 책임연구원

⁴⁾ 한국지질자원연구원 지구환경연구본부 선임연구원

* 교신저자 : bhchoi@kigam.re.kr

접수일 : 2009년 11월 9일

심사 완료일 : 2009년 11월 24일

게재 확정일 : 2009년 11월 25일

장하는 버퍼시설의 유력한 후보로써 CAES식 발전이 큰 주목을 받고 있다(Baker, 2008). 현재 상업 운영 중인 대규모 CAES식 발전소는 독일 Huntorf 발전소(290MW, 1987)와 미국 알라바마의 McIntosh 발전소(110MW, 1991)가 있으며, 미국 오하이오의 Norton과 텍사스 Markham에 신규 발전소 건설이 예정되어 있다(EA Technology, 2004, Crotogino, 2001, Ter-Gazarian, 1994). 국내에서도 원자력 및 신재생 에너지를 이용한 전력생산 비중이 점차 높아질 것으로 예상됨에 따라 첨단부하 대응 수단으로써 CAES식 발전에 대한 연구 및 경제성 검토가 이미 시작되었다(김택곤 외, 2008, 김형목 외, 2009).

압축공기 저장터널은 라이닝의 유무에 따라 복공식과 무복공식으로 구분할 수 있다. 라이닝의 설치여부는 발전 시설의 운영방식, 지반의 상태 및 터널 심도 등을 고려하여 결정되어야 할 것으로 판단된다. Huntorf 발전소와 McIntosh 발전소는 모두 기밀성이 우수한 압연동굴에 압축공기를 저장하는 무복공 터널 방식을 채택하고 있다. Huntorf 발전소의 경우 최대 운전공기압은 약 7 MPa이며 McIntosh 발전소의 경우 약 7.6 MPa이다. 일본에서는 기존의 탄광 갱도를 활용하여 분할식 복공관을 조립하여 완성한 복공식 압축공기 저장터널에 대해 현장 실증시험을 실시한 사례가 보고되고 있다(合田佳弘, 2002, 横山英和 외, 2002). 복공식 압축공기 저장터널에 설치되는 라이닝은 고압의 압축공기에 대한 내압 및 기밀 기능을 한다. 따라서 압축공기 저장터널에 설치되는 라이닝의 안정성은 내측에 대기압만 작용하는 기존의 도로 및 철도터널 라이닝의 경우와 달리 라이닝의 내측에서 작용하는 공기압과 배면에 작용하는 지압의 상대적 크기에 영향을 받을 수 있다. 따라서 복공식 압축공기 저장터널의 라이닝 설계를 위해서는 내측 공기압 및 배면 하중의 상대적 크기를 고려한 안정성 검토가 필요하다.

이 연구에서는 원통형 실린더(thick wall cylinder)에 대한 탄성 및 탄소성 해석해를 기반으로 복공식 압축공기 저장터널에 설치되는 원형 콘크리트 라이닝의 내측 압 및 배면 하중에 따른 안정성을 해석할 수 있는 간편한 수치해석법을 제안하였다. 탄성-완전 소성체로 가정한 콘크리트의 항복조건으로 Mohr-Coulomb 조건식이 이용되었다. 탄성해를 이용한 해석의 경우 라이닝의 항복개시 조건을 이용하여 라이닝의 안정성이 검토되었다. 탄소성 해석법의 경우 일정 깊이의 소성대를 허용하는 상황을 가정하고 운전 공기압 범위에서 허용 가능한 배면 하중의 범위를 계산하였다. 제안된 방법에 따라 직경 6 m의 터널에 두께 50 cm의 콘크리트 라이닝

이 설치되는 상황을 가정한 후 콘크리트의 일축압축강도 변화에 따른 라이닝의 안정성을 검토하였다.

2. 탄성해를 이용한 라이닝의 안정성 해석

2.1 원형 콘크리트 라이닝의 탄성해

Fig. 1과 같이 내경과 외경이 각각 a , b 이고 내부 경계 압과 배면 하중이 각각 p_i , p_o 인 콘크리트 라이닝의 탄성 거동은 원통형 실린더에 대한 탄성 해를 이용하여 분석할 수 있다. 대칭성에 의해 반경방향응력 σ_r 과 접선방향응력 σ_θ 가 주응력이 되며 평면변형률 조건을 가정할 경우 응력의 평형조건은 다음과 같다.

$$r \frac{d\sigma_r}{dr} + (\sigma_r - \sigma_\theta) = 0 \tag{1}$$

반경방향변형률 ϵ_r 와 접선방향변형률 ϵ_θ 는 반경방향 변위(radial displacement) u 와 다음의 관계가 있다.

$$\epsilon_r = -\frac{du}{dr} ; \epsilon_\theta = -\frac{u}{r} \tag{2}$$

한편 평면변형률 조건의 변형률-응력 관계식은 다음 식으로 표시된다.

$$\epsilon_r = A\sigma_r - B\sigma_\theta ; \epsilon_\theta = -B\sigma_r + A\sigma_\theta \tag{3}$$

여기서 $A = (1-\nu^2)/E$ 이고 $B = \nu(1+\nu)/E$ 이다.

식 (1)~(3)을 이용하면 σ_r 로 표현된 2계 동차 선형

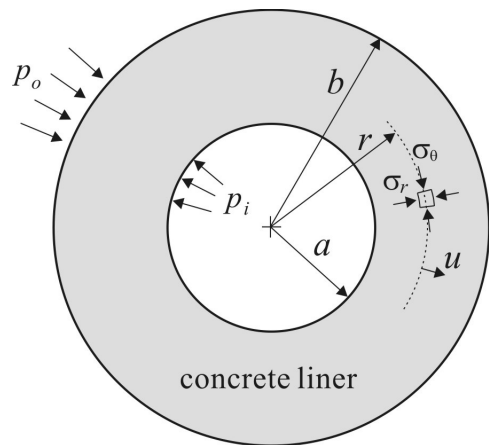


Fig. 1. Concrete liner with boundary loads

미분방정식(2nd order homogeneous linear differential equation)이 다음과 같이 얻어진다.

$$r \frac{d^2 \sigma_r}{dr^2} + 3 \frac{d\sigma_r}{dr} = 0 \quad (4)$$

응력의 경계조건 $\sigma_r|_{r=a} = p_i$, $\sigma_r|_{r=b} = p_o$ 을 이용하여 미분방정식 (4)를 적분하면 σ_r 의 분포를 구할 수 있고, 이어서 식 (1)~(3)을 이용하면 σ_θ 와 u 가 차례로 구해진다. 이 결과 식은 다음과 같으며, Airy 응력함수를 이용한 방법(Timoshenko & Goodier, 1982)으로도 동일한 결과를 얻을 수 있다.

$$\sigma_r = \frac{p_o b^2 - p_i a^2}{b^2 - a^2} + \frac{a^2 b^2 (p_i - p_o)}{b^2 - a^2} \frac{1}{r^2} \quad (5)$$

$$\sigma_\theta = \frac{p_o b^2 - p_i a^2}{b^2 - a^2} - \frac{a^2 b^2 (p_i - p_o)}{b^2 - a^2} \frac{1}{r^2} \quad (6)$$

$$u = -\frac{1-2\nu}{2G} \frac{p_o b^2 - p_i a^2}{b^2 - a^2} r - \frac{1}{2G} \frac{a^2 b^2 (p_o - p_i)}{b^2 - a^2} \frac{1}{r} \quad (7)$$

여기서 $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$ 이다.

2.2 탄성 응력분포 특성 고찰

콘크리트 라이닝의 축방향 응력성분을 중간 주응력으로 가정하면 σ_r 과 σ_θ 는 라이닝의 내부 및 배면에 작용하는 경계 하중의 상대적 크기에 따라 최대 혹은 최소 주응력이 될 수 있다. 식 (5)과 식 (6)에 의하면 σ_θ 가 최소주응력이 되고 σ_r 이 최대주응력이 될 조건은 다음과 같다.

$$p_i > p_o \quad \text{또는} \quad \frac{p_i}{p_o} > 1 \quad (8)$$

반대로 σ_θ 가 최대주응력이 되고 σ_r 이 최소주응력이 될 조건은 $p_o > p_i$ 이다. 또한 내부 경계면에서 인장응력이 발생될 조건($\sigma_\theta|_{r=a} < 0$)은 다음과 같다.

$$\frac{p_i}{p_o} > \frac{2(b/a)^2}{1+(b/a)^2} \quad (9)$$

식 (9)에 의하면 라이닝에서의 인장응력 발생 여부는 경계 하중의 상대적 크기뿐만 아니라 라이닝의 두께에도 영향을 받는다는 것을 알 수 있다.

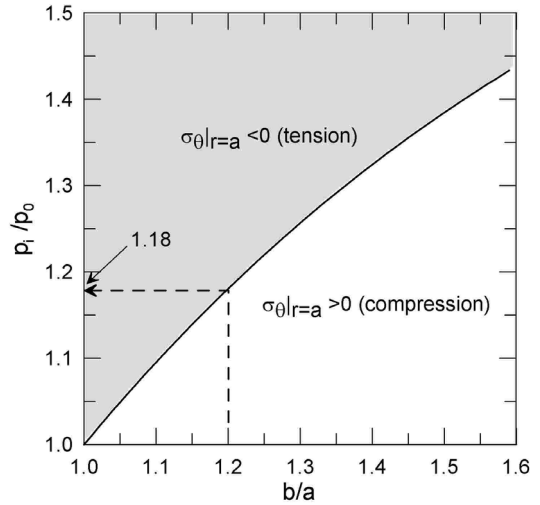


Fig. 2. Condition for the development of tensile stress at $r=a$

식 (9)을 도시한 Fig. 2의 음영부분은 라이닝의 내부 경계면에서 접선인장응력이 발생하는 조건을 나타낸다. 라이닝의 두께가 증가하면 인장응력의 발생에 필요한 내부 경계압력의 크기도 역시 증가함을 알 수 있다. 참고로 라이닝의 내경이 2.5 m, 외경이 3 m인 경우 즉 $b/a=1.2$ 일 때 라이닝에 인장응력이 발생되기 위해서는 내부 경계압이 외부 경계하중의 1.18배 이상이 되어야 함을 보여준다.

이상에서 살펴본 바와 같이 내부압력이 작용하는 원형터널 라이닝의 응력분포는 경계하중 조건에 따라 반경방향응력 및 접선방향응력이 최대주응력 또는 최소주응력이 될 수 있다. 그러므로 압축공기 저장용 원형터널에 설치되는 라이닝의 구조적 안정성 해석 과정에서는 최소 및 최대 주응력의 판별에 많은 주의가 요구된다. 반면에 통상 내부압력을 0으로 간주하는 일반터널의 경우 2차원 해석시 σ_θ 가 최대주응력이 된다.

2.3 라이닝의 항복개시 조건

콘크리트 라이닝에서 발생하는 균열은 내부 경계면에서 시작된다고 가정할 수 있으므로 내부경계면에 작용하는 응력성분들의 균열개시 조건 만족 여부를 고찰함으로써 균열발생을 판단할 수 있다. 이 연구에서는 다음과 같은 Mohr-Coulomb 식을 균열의 개시조건식으로 채택하였다.

$$\sigma_1 = k\sigma_3 + \sigma_c \quad (10)$$

여기서 σ_1 과 σ_3 는 각각 최대 및 최소주응력이며 σ_c 는

콘크리트 라이닝의 일축압축강도이다. 계수 k 는 내부마찰각(ϕ)을 이용하여 다음과 같이 정의된다.

$$k = \frac{1 + \sin\phi}{1 - \sin\phi} \quad (11)$$

2.2절에서 논의한 바와 같이 축대칭 원형 라이닝 구조에서는 σ_θ 와 σ_r 이 주응력이 되지만 이 중 어느 것이 최대 혹은 최소 주응력이 되는지는 경계압력의 상대적 크기에 달려있다. 먼저 $p_o > p_i$ 인 경우에는 σ_θ 가 최대 주응력이고 σ_r 이 최소주응력이 된다. 그러므로 라이닝의 내부 경계면에서 균열이 개시되는 조건은 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\frac{p_i}{p_o} = \frac{2b^2/a^2 - (\sigma_c/p_o)(b^2/a^2 - 1)}{b^2/a^2 + 1 + k(b^2/a^2 - 1)} \quad (12)$$

라이닝의 내부마찰각 ϕ 을 45° 로 가정하고 6가지 경우의 σ_c/p_o 에 대해 식 (12)을 Fig. 3에 도시하였다. 주어진 p_i/p_o 에 대해 일축압축강도가 감소하면 즉 σ_c/p_o 가 감소하면 균열억제에 필요한 라이닝 두께가 증가됨을 볼 수 있다. 예를 들어 콘크리트의 일축압축강도가 $\sigma_c = 24$ MPa이고 $a=2.5$ m, $b=3.0$ m일 경우 $\sigma_c/p_o=6.55$ 이면 내부 압이 존재하지 않는 상태($p_i=0$)에서 균열이 발생되기 시작한다. 이때 외부 면에 작용하는 경계 압의 크기는 $p_o=3.67$ MPa이다. 그러나 $\sigma_c/p_o=5$, 2인 경우는 내부압이 어느 정도 증가된 이후부터 균열이 발생된다.

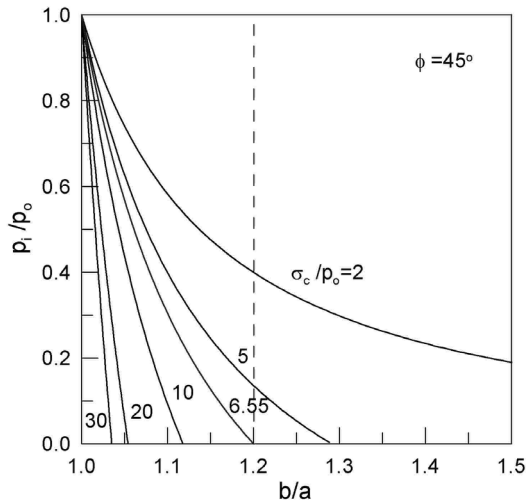


Fig. 3. Yield conditions at the inner boundary for $\sigma_\theta > \sigma_r$.

동일한 p_o 에 대해 p_i 의 증가에 따라 균열이 발생되지 않는 라이닝의 두께는 감소하고 있다. 이는 적정한 내부압은 σ_r 에 의한 구속효과를 발생시켜 라이닝의 안정성을 증대시키는 역할을 할 수 있음을 보여준다.

$p_i > p_o$ 이면 σ_r 이 최대주응력이 되고 σ_θ 가 최소주응력이 되므로 라이닝의 안쪽 면에서 균열이 개시될 조건은 다음과 같이 표시 된다.

$$\frac{p_i}{p_o} = \frac{2(b^2/a^2)k + (\sigma_c/p_o)(b^2/a^2 - 1)}{(b^2/a^2) - 1 + k(b^2/a^2 + 1)} \quad (13)$$

내부마찰각 $\phi=45^\circ$ 을 가정하고 5가지 경우의 σ_c/p_o 에 대해 식 (13)을 도시하여 Fig. 4에 나타내었다. 그림에는 또한 인장강도(σ_t)를 0으로 가정한 인장파괴조건도 함께 도시되었다. 그림에서 회색부분은 최소주응력 σ_θ 가 인장응력이 되는 조건을 나타낸다. 회색 영역에 포함되는 균열개시 조건에서는 σ_θ 가 인장응력이 되고, σ_r 이 압축응력이 된다. 한편 $p_i > p_o$ 인 경우 최소주응력 σ_θ 는 대부분 인장응력으로 작용하지만 압축응력인 경우도 있을 수 있다는 점을 주목할 필요가 있다. 예를 들어 식 (9)을 참고하면 $b/a=1.2$ 인 경우 $p_o < p_i < 1.18p_o$ 일 때 σ_θ 는 압축 최소주응력이 된다.

Fig. 4를 살펴보면 특정 압축강도의 라이닝에 대해 외부경계압 p_o 가 클수록 더 작은 p_i/p_o 값에서 균열이 발생됨을 알 수 있다. 즉 내부압에 의해 라이닝에 균열이 발생되는 것을 방지하기 하기 위해서는 p_o 가 클수록 라이닝 내경에 대한 외경의 비인 b/a 가 증가되어야 함을

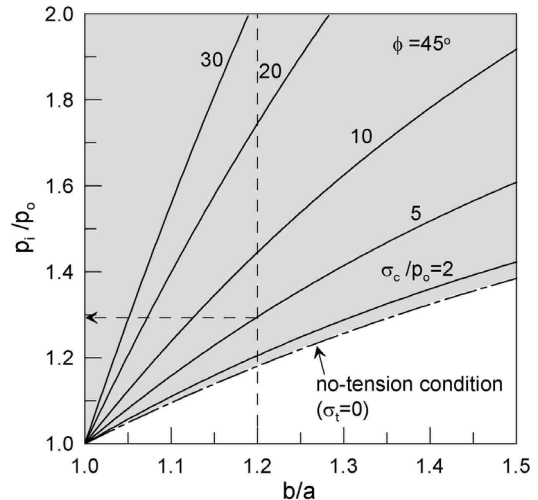


Fig. 4. Yield conditions at the inner boundary for $\sigma_r > \sigma_\theta$.

보여준다. $\sigma_c=24$ MPa를 가정하면 $b/a=1.2$ 이고 $\sigma_c/p_0=5$ 인 경우 균열이 개시되는 내부압은 $p_i \approx 6.22$ MPa이다. 주어진 p_0 에 대해 라이닝에 균열을 발생시키는 p_i 는 라이닝의 두께와 비례관계가 있음을 알 수 있다. 즉, $p_i > p_0$ 인 경우 라이닝의 두께 증가에 따라 균열을 발생시키는 p_i 역시 증가됨을 알 수 있다.

2.4 항복개시 조건을 이용한 라이닝의 안정성 검토

2.4.1 해석조건

압축공기 저장용 시험터널에 설치될 원형 콘크리트 라이닝의 안정성을 탄성 응력분포 해를 이용하여 검토하였다. 예정 터널의 반경은 3 m이고 설치될 콘크리트 라이닝의 두께는 50 cm로 가정하였다. 따라서 해석대상 라이닝의 치수는 $a=2.5$ m이고 $b=3$ m이므로 $b/a=1.2$ 가 된다. 콘크리트 라이닝의 내부마찰각 ϕ 는 45° 로 가정하였으며, 3가지 일축압축강도 24 MPa, 30 MPa, 40 MPa가 검토되었다. 저장 터널은 지하 500 m에 위치할 예정이고, 암반의 단위중량을 0.027 MPa/m으로 가정할 경우 저장 터널 위치의 지압은 13.5 MPa로 예상된다. 따라서 콘크리트 라이닝의 바깥쪽 경계면에 작용할 수 있는 하중은 $0 < p_0 < 13.5$ MPa의 범위로 제한된다. 압축공기 저장터널의 최대 운전공기압은 5 MPa로 설정하였다. 따라서 라이닝의 안쪽 면에 작용하는 공기압은 $0 < p_i < 5$ MPa의 범위를 갖는다.

2.4.2 라이닝의 항복개시 조건 분석

콘크리트 라이닝의 항복개시 조건을 검토함으로써 라이닝의 안정성이 분석되었다. 항복은 라이닝의 안쪽 경계면에서 시작되므로 식 (12)과 식 (13)를 이용하여 항복개시에 대한 라이닝의 안정성 분석이 가능하다.

주어진 해석조건에서 3가지 일축압축강도에 대한 항복 개시 경계압력 관계식을 Table 1에 제시하였다. Table 1에 제시한 3가지 경우의 항복 개시 조건을 각각 Fig. 5~Fig. 7에 도시하였다. 각 그림에서 회색 부분은 라이닝에 항복영역이 형성되는 경계하중 조건을 나타낸

Table 1. Yield initiation conditions for different uniaxial compressive strengths

Uniaxial compressive strength, σ_c (MPa)	$p_0 > p_i$ (MPa)	$p_i > p_0$ (MPa)
24	$p_i = 0.58p_0 - 2.11$	$p_i = 1.15p_0 + 0.72$
30	$p_i = 0.58p_0 - 2.64$	$p_i = 1.15p_0 + 0.90$
40	$p_i = 0.58p_0 - 3.52$	$p_i = 1.15p_0 + 1.20$

다. 각 그림의 우측 하단 회색 영역은 σ_θ 가 최대주응력이며 압축응력으로 작용하는 경우를 나타낸다. 반면에 좌측 상단의 회색 영역은 σ_θ 가 최소주응력이며 인장응력으로 작용하는 경우를 나타낸다. 또한 그림에서는 압축공기 저장터널의 운전 공기압이 0~5 MPa임을 고려할 때 라이닝에서 항복이 발생되지 않을 수 있는 p_0 의

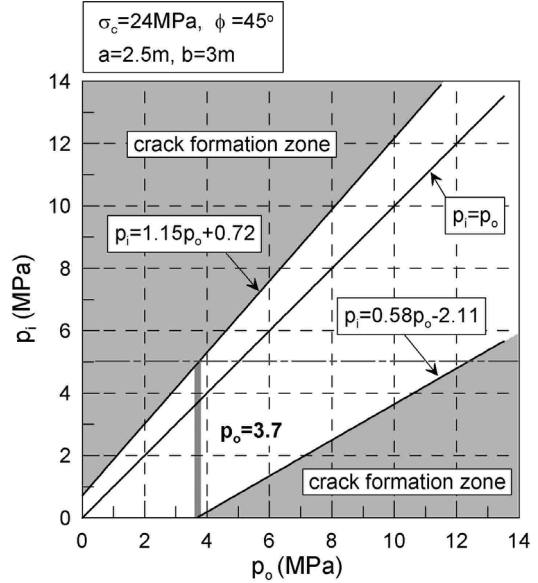


Fig. 5. Yield zone forming conditions for $\sigma_c=24$ MPa

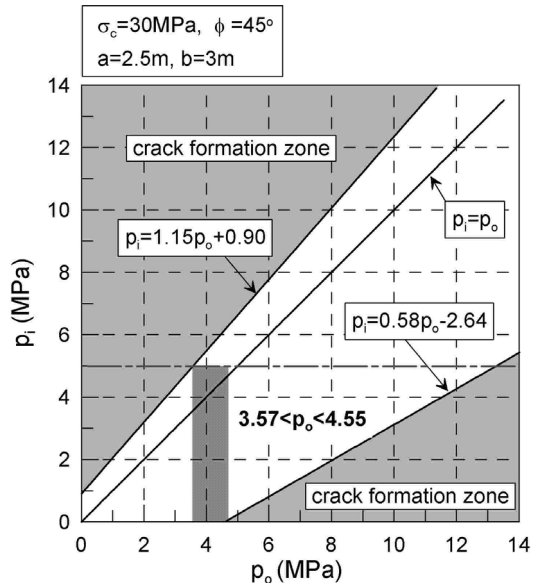


Fig. 6. Yield zone forming conditions for $\sigma_c=30$ MPa

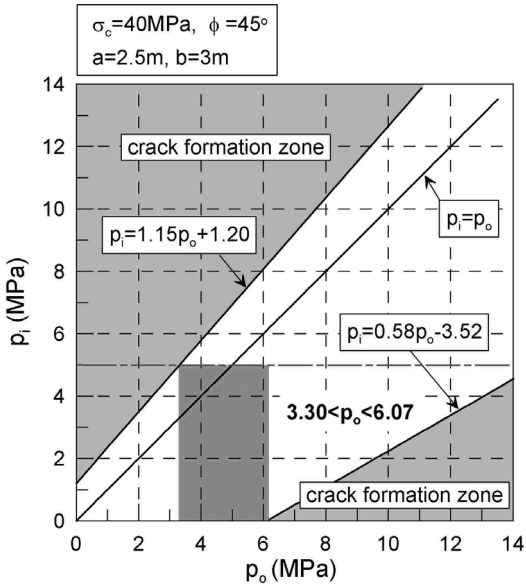


Fig. 7. Yield zone forming conditions for $\sigma_c=40$ MPa

범위를 Fig. 5~Fig. 7에서 보라색으로 표시하였다. 분석 결과 얻어진 안전한 p_o 값의 범위는 각각 $p_o=3.7$ MPa, 3.57 MPa~4.55 MPa, 3.30 MPa~6.07 MPa으로 나타났으며, 일축압축강도가 증가하면 균열생성에 대해 안전한 p_o 의 범위가 넓어짐을 볼 수 있다. 이 해석결과에 의하면 항복에 대해 안전한 p_o 의 범위가 존재하기 위해서는 콘크리트 라이닝의 일축압축강도는 적어도 30 MPa 이상이 되어야함을 알 수 있고, 라이닝 강도와 관련된 여러 가지 불확실성을 고려할 경우 40 MPa 이상의 일축압축강도가 요구됨을 추정할 수 있다.

이 절에서는 라이닝 내부 경계면에서 항복이 시작 되는 조건을 이용하여 라이닝의 안정성을 판단하였다. 그러나 라이닝 안쪽 경계면에서의 항복 발생이 곧 라이닝의 구조적 불안정성을 의미하지는 않는다는 점을 주의할 필요가 있고, 항복영역의 발생과 관련된 라이닝의 안정성은 항복영역의 깊이가 함께 고려되어 판단되어야한다. 이를 위해서는 라이닝 구조체에 대한 탄소성 해석이 요구된다.

3. 일정 항복 깊이가 허용된 라이닝의 안정성 해석

3.1 라이닝의 항복 깊이와 외부 경계하중의 관계

압축공기 터널 라이닝의 항복을 고려하지 않고 항상 탄성거동을 하도록 설계할 경우 라이닝의 두께 증가와 고강도 콘크리트의 사용이 필수적이다. 이는 과잉설계

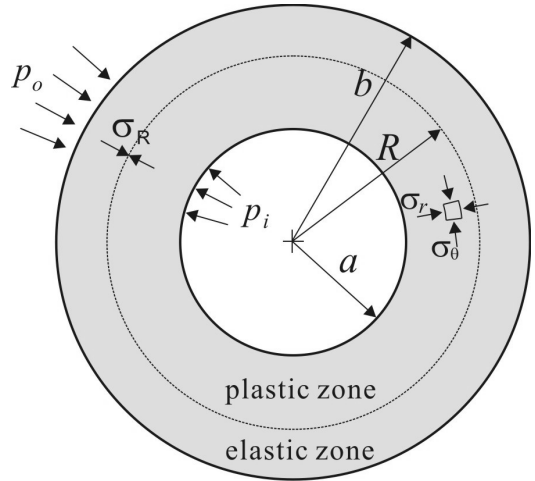


Fig. 8. Yield zone formed in a concrete liner

에 따른 경제성 저하를 가져올 수 있다. 따라서 일정 깊이의 항복을 허용하는 라이닝의 설계가 검토될 필요가 있다. 이연구 외(2009)의 연구에서 라이닝의 항복을 고려한 탄소성 응력 및 변위 분포 해석이 시도되었으나 $p_o > p_i$ 인 경우만을 대상으로 하였다. 이 연구에서는 $p_i > p_o$ 인 경우도 포함하는 탄소성 라이닝 안정성 해석법을 제안하였다.

압축공기 저장터널에 설치되는 콘크리트 라이닝의 항복을 허용할 경우 내부 공기압 및 배면 하중의 크기에 따라 Fig. 8과 같이 라이닝 내부 영역에 소성영역이 형성될 수 있다. 그림에서 R 은 소성-탄성 경계면의 반경이며, σ_r 은 이 경계면에 작용하는 반경방향 수직응력을 나타낸다.

콘크리트 라이닝이 Mohr-Coulomb 항복조건식을 따르는 탄성-완전소성체라고 가정하면 $p_o > p_i$ 인 경우 경계하중과 소성반경 R 의 관계식을 다음과 같음을 보일 수 있다.

$$-\alpha + (\alpha + p_i) \left(\frac{R}{a} \right)^{(k-1)} = \frac{b^2(2p_o - \sigma_c) + R^2\sigma_c}{R^2(1-k) + b^2(1+k)} \quad (14)$$

여기서 $\alpha = \sigma_c / (k-1)$ 이다. 반면에 $p_i > p_o$ 인 경우 경계하중과 소성반경 R 의 관계식은 다음과 같다.

$$-\alpha + (\alpha + p_i) \left(\frac{R}{a} \right)^{\left(\frac{1}{k} - 1 \right)} = \frac{b^2(2p_o k + \sigma_c) - R^2\sigma_c}{R^2(k-1) + b^2(k+1)} \quad (15)$$

식 (14)~(15)에서 내부 공기압 p_i 는 기지의 값이므로

소성반경 R 를 가정하면 이에 대응되는 라이닝의 배면 하중 p_o 가 결정될 수 있다. 따라서 식 (14)과 식 (15)을 이용하면 허용 소성반경이 R 일 때 p_i 와 p_o 의 관계식을 유도할 수 있다. 식 (14)~(15)의 자세한 유도과정을 알고 싶은 독자는 이연규 외(2009)의 연구를 참조할 수 있다.

R 과 σ_R 이 결정되면 라이닝 소성영역 및 탄성 영역의 응력 및 변위분포는 각각 Lee & Pietruszczak(2008)의 해석방법과 Lamé 해를 이용하여 계산할 수 있다.

3.2 항복영역 허용에 따른 설계 경계하중의 변화

소성영역은 콘크리트 라이닝 안쪽 경계면에서 시작되어 점차 바깥쪽으로 확대된다. 소성영역의 두께가 크지 않을 경우 소성영역의 발생은 실제 라이닝의 파괴를 의미하지 않기 때문에 허용 소성대 깊이를 고려하여 라이닝의 안정성이 평가될 필요가 있다. 이 연구에서는 식 (14)와 식 (15)를 이용하여 일정 깊이의 항복을 허용하는 상황을 가정하고 압축공기 터널 라이닝의 안정성이 분석되었다.

라이닝의 규격과 물성은 2.4절의 경우와 동일하게 가정하였으며 일축압축강도가 24 MPa인 경우에 대해 항복영역의 허용 깊이에 따른 p_o 의 설계 범위를 계산해 보았다. 이 연구에서는 항복영역의 허용 깊이를 넘어서는 항복이 발생할 경우 라이닝이 불안정해져 파괴되는 것으로 가정하였다. 이를 위해 항복영역 허용 깊이를 각각 5 cm, 10 cm, 20 cm로 가정하고 이에 따라 허용 가능한 라이닝의 배면하중 p_o 의 범위를 계산하였다. 각 허용 항복 깊이의 항복영역을 발생시키는 p_i 와 p_o 의 관계식은 Table 2와 같다. 이 표에 나타난 각 식은 최대 허용 항복 깊이까지 항복영역이 확대되는 조건에 해당하는 p_i 와 p_o 의 관계식이다.

Fig. 9~Fig. 11은 0~5 MPa 범위의 운전 공기압에 대해 허용 가능한 라이닝 배면하중의 범위를 보여주고 있다. 회색으로 표시한 부분은 허용 항복 깊이를 넘어서는 항복이 발생할 조건 즉 라이닝의 파괴가 발생하는 조건이다. 각 허용 항복 깊이에 대해 파괴에 안전한 p_o

의 범위는 각각 3.71~4.19 MPa, 3.68~4.67 MPa, 3.64~5.57 MPa로 나타났다. 2.4절에서 살펴보았듯이 항복을 전혀 허용하지 않는 경우 p_o 가 약 3.7 MPa일 경우만 라이닝이 안전한 것으로 해석되지만, 라이닝의 허용 항복 깊이가 증가함에 따라 파괴에 안전한 p_o 의 범위가 확대되고 있음을 볼 수 있다. 즉 항복 깊이에 대한 안정성 분석을 통해 설계 안전율을 약간 낮춤으로써 허용 가능한 p_o 의 설계범위를 넓힐 수 있음을 알 수 있다.

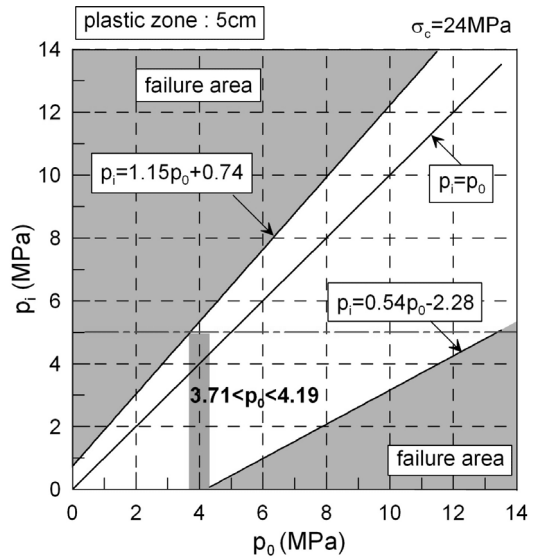


Fig. 9. Acceptable range of p_o for the yielding depth of 5 cm

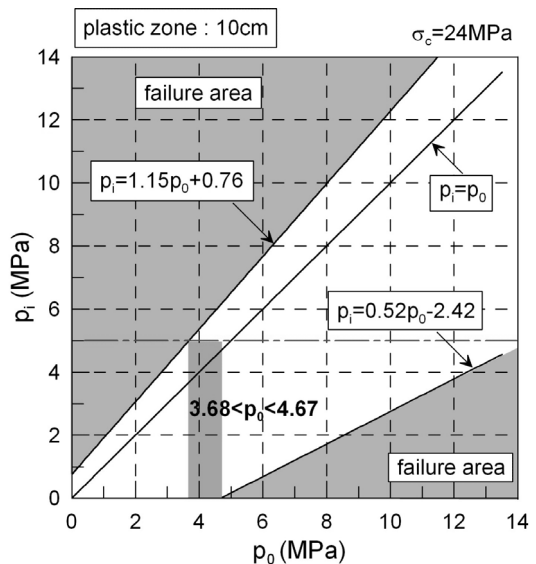


Fig. 10. Acceptable range of p_o for the yielding depth of 10 cm

Table 2. p_i and p_o relations leading to the different yielding depth in a liner of $\sigma_c=24$ MPa

Max. yielding depth	$p_o > p_i$ (MPa)	$p_i > p_o$ (MPa)
5 cm	$p_i = 0.54p_o - 2.28$	$p_i = 1.15p_o + 0.74$
10 cm	$p_i = 0.52p_o - 2.42$	$p_i = 1.15p_o + 0.76$
20 cm	$p_i = 0.47p_o - 2.64$	$p_i = 1.16p_o + 0.78$

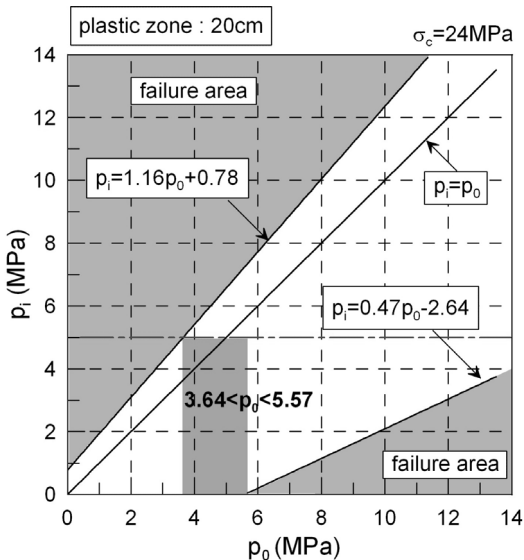


Fig. 11. Acceptable range of p_o for the yielding depth of 20 cm

운전기간 동안 라이닝을 완전한 탄성 상태로 유지시킬 수 있다는 확신을 가질 수 없다면 이 연구에서 제안된 방법에 의해 소성영역을 일부 허용하는 개념의 설계가 유용할 수 있다. 제안된 방법이 압축공기 터널 라이닝의 설계에 적용되기 위해서는 라이닝의 규격별 허용 항복 깊이가 먼저 결정될 필요가 있다. 이를 위해서는 수치해석적 방법뿐만 아니라 현장 실증시험을 통한 콘크리트 라이닝의 구조적 안정성 평가가 더욱 깊게 연구될 필요가 있다.

4. 요약 및 결론

복공식 압축공기 저장터널과 같은 특수 터널의 콘크리트 라이닝은 내측에서 작용하는 고압의 공기압을 견뎌야 하므로 일반 도로터널 라이닝의 경우와 다른 방법을 적용하여 그 안정성이 평가될 필요가 있다. 이 연구에서는 원통형 실린더에 대한 탄성해와 탄소성 해석해를 이용하여 내압 p_i 와 배면하중 p_o 가 동시에 작용하는 압축공기 터널 라이닝의 안정성을 평가하는 방법을 제안하였다.

탄성해를 이용한 안정성 평가방법으로 라이닝의 내측면에서 항복이 시작되는 조건식이 이용되었다. 라이닝의 안정성은 내측 공기압과 배면하중의 상대적 크기에 따라 크게 영향을 받는 것으로 나타났다. 공기압의 크기는 인위적으로 조절 가능한 변수인 반면 배면하중은 그 크기의 예측이 매우 어려운 변수이므로 라이닝의 배

면하중의 정확한 예측이 라이닝 안정성 해석의 성패를 좌우할 것으로 예측되었다.

50 cm 두께의 콘크리트 라이닝이 설치된 직경 6 m의 압축공기 저장터널이 지하 약 500 m에 설치되는 상황을 가정하고 항복개시 조건을 라이닝 안정성 평가기준으로 설정하여 라이닝의 안정성 해석이 수행되었다. 최대 공기압을 5 MPa로 설정할 경우 콘크리트 압축강도는 최소 30~40 MPa 이상이 되어야 배면하중 설계 범위를 어느 정도 확보할 수 있을 것으로 나타났다.

일정 항복 깊이를 허용하는 탄소성해에 기초한 안정성 해석결과 허용 항복 깊이의 증가에 따라 배면하중의 설계범위가 항복을 전혀 허용하지 않는 경우에 비해 상당히 확대되는 것을 확인할 수 있었다. 허용 소성대 깊이가 파괴에 안전한 배면하중의 설계범위를 결정하는데 큰 영향을 미치므로 라이닝 구조체의 불안정성에 영향을 미치는 허용 항복 깊이의 선택에 신중을 기할 필요가 있는 것으로 판단되었다. 최대 허용 항복 깊이와 라이닝 구조체 파괴의 상관관계에 대한 명확한 기준의 확립을 위해서는 더 많은 수치해석적 연구 및 현장 실증연구가 수행되어야 할 것으로 사료된다.

이 연구 결과 라이닝의 경계압력 p_i 와 p_o 의 크기가 압축공기 저장터널 라이닝의 안정성에 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있었다. 일반적으로 터널 굴착 후 라이닝이 신속히 설치되는 경우는 큰 p_o 값이 예상된다. 반면에 내공변위가 충분히 발생한 후에 라이닝이 설치된다면 낮은 p_o 값이 예상된다. 주어진 지반조건 및 압축공기 저장터널 운전조건에 적합한 p_o 값의 범위는 해석적 및 수치해석적 방법과 실험적 방법을 통하여 신중히 설정될 필요가 있고, 이 연구결과는 이러한 과정에서 큰 기여가 예상된다. 결국 적절한 배면하중을 발생시키기 위해서는 굴착 후 적절한 시기에 라이닝이 설치될 필요가 있는 것으로 판단된다. 결론적으로 라이닝의 안정성에 유리한 p_o 값의 범위를 정확히 계산하고, 현장에서 예상된 배면하중이 작용하도록 적절한 시점에 라이닝을 설치하는 것이 라이닝 구조체의 안정성 확보를 위해 매우 중요함을 알 수 있다. 적절한 p_o 값을 발생시키기 위한 라이닝 설치시점의 선택을 위해서는 현장 내공변위 추이분석 연구와 라이닝 주변 암반의 탄소성거동에 대한 수치해석적 연구가 병행 수행되어야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

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

참고문헌

1. 김택곤, 김지연, 이진무, 2008, 압축공기에너지 저장 (CAES)의 현황과 전망, 2008 한국암반공학회 춘계학술 발표회 논문집, pp. 123-131
2. 김형목, 류동우, 정소걸, 송원경, 2009, 복공식 압축공기 지하저장을 위한 가변성 분할 라이닝 터널기술, 터널과 지하공간, 한국암반공학회지, 19.2, pp. 77-85
3. 이연규, 박경순, 송원경, 박철환, 최병희, 2009, 심부 원형 터널에 시공된 콘크리트 라이닝의 새로운 탄소성해석법, 터널과 지하공간, 한국암반공학회지, 19.4, pp. 355-365
4. Baker, J., 2008, New technology and possible advances in energy storage, Energy Policy, 36, 4368-4373
5. Crotagino, F, K.-U. Mohmeyer and R. Scharf, 2001, Huntorf CAES: More than 20 Years of Successful Operation, http://www.uni-saarland.de/fak7/fze/AKE_Archiv/AKE2003H/AKE2003H_Vortraege/AKE2003H03c_Crotogino_ea_HuntorfCAES_CompressedAirEnergyStorage.pdf
6. EA Technology, 2004, Review of electrical energy storage technologies and systems and of their potential for the UK, DTI report, UK
7. 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, pp. 588-599
8. Ter-Gazarian, A., 1994, Energy storage for power systems, Peter Peregrinus Ltd.
9. Timoshenko, S.P. and J.N. Goodier, 1982, Theory of elasticity (3rd Ed.), McGraw-Hill
10. 合田佳弘, 2002, 地下深部岩盤内における新しい高圧圧縮空気貯蔵技術の開発, 日本土木學會誌, 87, 39-41
11. 横山英和, 篠原俊彦, 加藤拓一郎, 2002, 壓縮空気貯蔵發電パイロットプラントの 實証運轉, 電力土木, 150-154

이 연 규



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 해양건설공학과 교수

박 경 순



2007년 군산대학교 해양과학대학 해양시스템공학과 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
1996년 프랑스 에콜데민 지질공학과 공학박사
Tel: 042-868-3247
E-mail: songwk@kigam.re.kr
현재 한국지질자원연구원 지구환경연구본부 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 지구환경연구본부 책임연구원

최 병 희



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