

천공홀 가압 팽창 개념을 도입한 터널 보조 신공법 연구

조인성¹, 박정준², 김종선³, 이인모^{4*}

New tunnel reinforcement method using pressurized cavity expansion concept

In-Sung Cho, Jeong-Jun Park, Jong-Sun Kim, In-Mo Lee

Abstract A new tunnel auxiliary method is proposed in this paper which utilizes the concept of cavity expansion for tunnel reinforcement by forming an umbrella arch on the roof of tunnel. When an inflatable pipe is inserted and expanded by pressure in the bore hole of umbrella arch, the ground around the bore hole can be compacted so that the stress condition above the tunnel perimeter is favorably changed. In order to verify the reinforcement effect of new concept, pilot-scale chamber test, trapdoor test and numerical analysis were performed and compared. In pilot-scale chamber test, three types of inflatable pipes are tested to verify the capability of expansion, and the results are compared with analytical results obtained by applying cavity expansion theory and with results obtained from finite element analysis, and the experimental results showed agreeable matches with analytical and numerical ones. Numerical analysis of a tunnel and trapdoor test applied with the inflatable pipes are also performed to figure out the reinforcement effect of the proposed techniques, and the results implied that the new method with 3 directional inflatable pipe (no pressure to downward direction) can contribute to reduce tunnel convergence and face settlement.

Keywords: Tunnel reinforcement, umbrella arch method, cavity expansion, inflatable pipe

요 지 현재 널리 적용되고 있는 대표적인 터널보조공법인 강관다단그라우팅공법은 그라우팅 기술을 도입하여 지반의 물성치를 개선하는 개념이나, 풍화토 지반조건에서는 그라우트재 주입 시 입자의 막힘현상으로 주입범위가 극히 제한되어 계획했던 보강 범위 형성이 어려운 문제가 있다. 본 연구에서는 천공홀 가압 팽창 개념을 도입하여 터널 막장면에 Umbrella Type으로 천공홀을 설치하고 팽창형 강관을 삽입하여 터널을 보강하는 신공법에 대한 연구를 수행하였다. 신공법은 삽입된 강관을 팽창시킴으로써 주변 지반 다짐으로 인한 지반응력상태 변화를 유도하고 이로 인하여 터널 굴착에 의한 지반 거동을 안정하게 하는 공법이다. 본 연구에서는 천공홀 팽창으로 인한 주변 지반의 거동을 연구하기 위해서 챔버모형실험을 실시하였다. 세 가지 형태의 시험적인 팽창관에 대해 팽창 실험을 실시하여 천공홀 벽면에서의 응력과 변위를 측정하였고, 공팽창 이론과 챔버모형실험을 모델링한 수치해석 결과와 실험결과를 비교하였으며, 그 결과가 유사한 것을 확인하였다. 신공법의 터널 보강 효과를 평가하기 위하여 신공법과 강관다단그라우팅공법을 적용한 2차원 터널 수치해석과 Trapdoor 모형토조실험을 수행하였으며, 수치해석 결과와 실험 결과에서 모두 삼방향 팽창형 강관(하부 방향 무가압) 신공법을 적용하였을 경우에 터널 굴착 시 내공변위가 감소하는 결과를 보여주어 신공법의 적용가능성을 확인하였다.

주요어: 터널보조공법, 강관다단그라우팅, umbrella arch method, 공팽창, 팽창형 강관

1. 서 론

갱구부와 같은 저토포고 지반조건, 파쇄대와 같은 연약 지반 조건, 교각 기초 하부와 같이 큰 상재하중이 직접적으로 작용하는 조건, 그리고 기존 지하공간에 인접하여 새로운 지하공간이 위치하는 조건 등 여러 경우의

불리한 조건에서 지하공간의 시공 시, 붕락 혹은 과도한 내공변위를 방지하기 위하여 지하공간 보강 공법이 수행된다. 현재 시공되고 있는 지하공간 보강 공법은 대부분 그라우팅 기술을 이용하여 지반의 물성치를 개선하는 개념으로 시행되고 있으며, 그라우팅 기술 중에도 주입에 의한 지반 보강효과를 목표로 하는 보강공법이 주를 이루고 있다. 터널 보강에 있어서 가장 대표적인 공법은 강관다단그라우팅공법이 있으며, 이와 유사한 공법들은 강관에 의한 지반의 일체화 거동 및 그라우팅 주입에 의한 지반의 점착력 증가를 통해 터널의 안정성

¹(주)포스코건설 토목환경사업본부 부장

²고려대학교 건축사회환경공학부 박사과정

³고려대학교 건축사회환경공학부 박사과정

⁴정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 교수, 공학박사

*교신저자: 이인모 (E-mail: inmolee@korea.ac.kr)

을 높이고자 시행된다.

김대영 등(2009)은 풍화토 지반에서 현장시험과 실내 시험을 통하여 강관다단그라우팅공법 적용 시 그라우팅 구근의 형성 범위와 강관 주변 지반의 물성치 변화를 파악하고자 하였다. 그라우터빌리티(groutability) 검토 결과 대상 지반에서는 보통 포틀랜드시멘트 뿐만 아니라 마이크로시멘트로도 침투 주입이 불가능한 것으로 나타났으며, 강관다단그라우팅 시험시공 위치를 굴착해 본 결과 시멘트 구근(bulb)은 강관 내부와 천공홀 내부에서만 형성되어 침투에 의한 시멘트 주입은 이루어지지 않은 것으로 확인되었고 이것은 탄성파시험 결과로도 재확인되었다. 이 결과로 볼 때, 국내에 널리 분포되어 있는 가는 입자의 화강풍화토 지반조건에서는 용액 형이 아닌 시멘트계 성분의 현탁액형 주입재로는 입자에 의한 막힘 현상으로 그라우팅 주입 범위가 극히 제한되어 주입공 주변에 계획한 보강 범위를 형성하기가 어렵다고 할 수 있다.

본 연구에서는 터널 막장 천단부 외곽에 umbrella type으로 천공홀을 설치하고 팽창형 강관을 삽입하여 터널을 보강하는 신공법에 대한 연구를 수행하였다. 먼저 천공홀 팽창으로 인한 주변 지반의 거동을 연구하기 위하여 챔버모형실험을 실시하였다. 전방향, 이방향, 삼방향 세가지의 팽창형 강관을 적용하여 챔버모형실험을 실시하고 그 결과를 공팽창 이론과 수치해석 결과와 비교하였다. 천공홀 가압 팽창 개념 적용시 터널 보강 효과를 평가하기 위하여 전방향, 이방향, 삼방향 팽창압을 적용한 2차원 터널 수치해석을 수행하였고, 이 결과를 바탕으로 trapdoor 모형실험을 수행하여 신공법의 적용 가능성을 확인하였다.

2. 천공홀 가압 팽창 개념을 도입한 터널 보조 신공법 개요

기존의 강관다단그라우팅은 그라우트재를 주입함으로써 강관의 주변에 그라우트 보강영역을 형성하는 공법이지만 풍화토 지반조건에서는 주입범위가 극히 제한된다.

따라서 본 연구에서는 그라우팅을 시행하지 않고 천공홀에 팽창형 강관을 삽입한 후 가압하여 관을 팽창시킴으로써 주변 지반을 압축 다짐하고 이로 인한 지반응

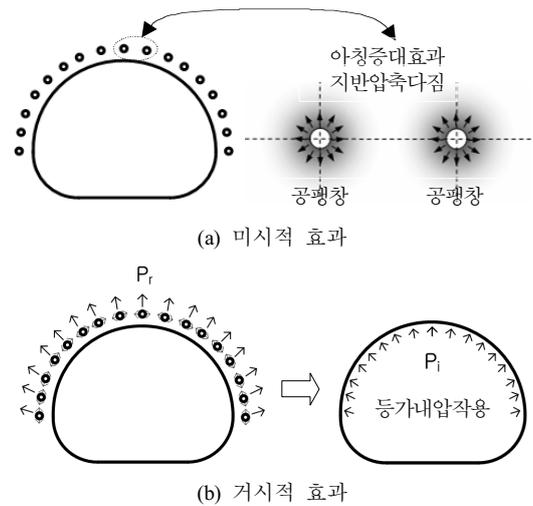


그림 1. 천공홀 가압 팽창 효과

력상태의 변화를 유도하는 방법을 시도하였다. 이 방법은 터널 굴착면 외곽에 umbrella type으로 다수의 천공홀을 배치하여 공 가압 팽창 효과를 작용시킴으로써 굴착면 주변 지반의 강성을 향상시키고 아칭 효과 증대를 도모하며 거시적으로 내압 작용 효과를 유도함으로써 터널의 안정성을 도모하는 신개념의 터널 보강공법이다.

3. 천공홀 팽창으로 인한 주변 지반의 거동 연구

이인모 등(2006, 2008)과 서형준 등(2009)은 쏘일네 일링에 있어서 가압그라우팅에 의한 지반의 거동에 대하여 공팽창 이론(cavity expansion theory)을 응용한 연구를 진행하였다. 화강풍화토(SM,SC)로 실시한 실내 모형실험을 통해 천공홀의 반경방향 변위 증가량 및 반경방향 응력 증가량을 공팽창 이론을 통해 산정한 값과 비교하였으며, 그 결과가 대체적으로 일치하였다고 보고하였기 때문에 본 연구에서는 가압그라우팅 팽창과 유사한 문제라고 판단되는 천공홀 강관 가압 팽창 시의 지반 거동을 공팽창 이론을 이용하여 평가하도록 한다.

3.1 공팽창 이론 (Cavity Expansion Theory)

신공법의 시공은 그림 2와 같이 천공 → 공 축소 → 강관 삽입 → 강관 가압 → 공 팽창의 연속적인 과정으로 시공된다. 먼저 천공을 하게 되면 반경방향응력(σ_r)

이 점점 감소하면서 공 주위는 $\sigma_r < \sigma_\theta$ 의 응력상태 (active loading state, 주동응력상태)가 되어 소성영역이 발생하게 된다. 이후 강관을 삽입하여 가압 팽창시키면 내부 팽창압에 의해 반경방향응력(σ_r)은 점점 증가하는 반면 접선방향응력(σ_θ)은 점점 감소한다. 팽창압을 일정 압력 이상으로 증가시키면 반경방향응력이 접선방향응력을 초과하게 되고 최대/최소 주응력의 회전이 일어나 $\sigma_r > \sigma_\theta$ 의 응력상태(passive loading state, 수동응력상태)에 도달하게 된다.

3.3.1 탄소성 영역의 응력해석

천공홀 가압으로 인한 천공홀 주위의 응력체계를 탄성영역과 소성영역으로 나누어 설명하면 다음과 같다.

(1) 탄성영역의 응력해 ($r > b$)

천공홀 가압 시 천공홀 주위의 탄·소성 영역은 그림 3과 같다. 이때 천공홀 벽면에 작용하는 내압을 P_i 라고 하면 탄성영역에서 반경 및 접선 방향 응력상태는 Kirsch의 해에 의해서 식 (1)과 같이 산정할 수 있다.

$$\begin{aligned} \sigma_r &= \sigma_h \left(1 - \frac{a^2}{r^2} \right) + P_i \left(\frac{a^2}{r^2} \right) \\ \sigma_\theta &= \sigma_h \left(1 + \frac{a^2}{r^2} \right) - P_i \left(\frac{a^2}{r^2} \right) \end{aligned} \quad (1)$$

(2) 소성영역의 응력해 ($a \leq r \leq b$)

천공홀 가압 시 천공홀 주변에서 탄성영역의 한계점을 지나 소성영역이 발생하게 되면 발생한 소성영역 ($a \leq r \leq b$)의 응력상태는 더 이상 Kirsch의 해를 따르지 않는다. 수동조건에서 소성영역의 응력해는 다음과 같이 유도할 수 있다.

(가) 주동응력 조건 ($\sigma_\theta > \sigma_r$)

주동응력 조건에서 반경방향응력 σ_r 은 최소주응력, 접선방향응력 σ_θ 는 최대주응력이 된다. Mohr-Coulomb의 파괴기준을 채택하면 소성영역 내에 한하여 σ_r 과 σ_θ 의 관계는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_\theta = \sigma_c + k \sigma_r \quad (2)$$

축대칭조건의 평형방정식은 식 (3)과 같다.

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \quad (3)$$

식 (2)를 식 (3)에 대입하고 $\sigma_r(r=a) = P_i$, $\lim_{r \rightarrow \infty} \sigma_r = \sigma_h$

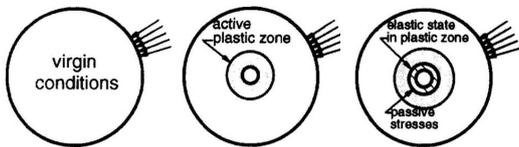
라는 경계조건을 이용하면, 소성영역에서의 반경방향응력 및 접선방향응력은 식 (4), (5)와 같다.

$$\sigma_r = \left(P_i + \frac{\sigma_c}{k-1} \right) \left(\frac{r}{a} \right)^{k-1} - \frac{\sigma_c}{k-1} \quad (4)$$

$$\sigma_\theta = \sigma_c + k \left[\left(P_i + \frac{\sigma_c}{k-1} \right) \left(\frac{r}{a} \right)^{k-1} - \frac{\sigma_c}{k-1} \right] \quad (5)$$

(나) 수동응력 조건 ($\sigma_\theta < \sigma_r$)

앞서 서술하였듯이 수동응력 조건에서는 주동응력 조건과 달리 최대·최소 주응력이 회전하게 된다. 따라서



(a) 초기상태 (b) 천공→주동응력 (c) 가압→수동응력

그림 2. 공 주변 응력 변화 과정

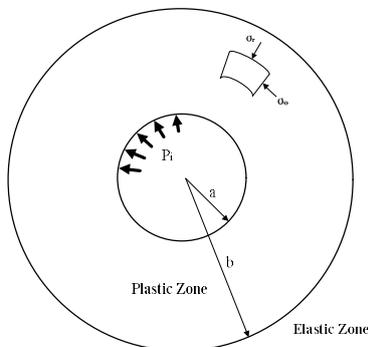


그림 3. 탄성영역과 소성영역

수동응력 조건에서 Mohr-Coulomb의 파괴기준에 따른 σ_r 과 σ_θ 의 관계는 다음의 식 (6)과 같다.

$$\begin{aligned}\sigma_r &= \sigma_c + k \sigma_\theta \\ \sigma_\theta &= -\frac{1}{k} \sigma_c + \frac{1}{k} \sigma_r\end{aligned}\quad (6)$$

따라서 앞서 주동응력 조건과 같은 방법으로 풀면 수동응력 조건에서 응력상태를 식 (7), (8)과 같이 유도할 수 있다.

$$\sigma_r = \left(P_i + \frac{\sigma_c}{k-1} \right) \left(\frac{r}{a} \right)^{\frac{1}{k}-1} - \frac{\sigma_c}{k-1} \quad (7)$$

$$\sigma_\theta = -\frac{1}{k} \sigma_c + \frac{1}{k} \left[\left(P_i + \frac{\sigma_c}{k-1} \right) \left(\frac{r}{a} \right)^{\frac{1}{k}-1} - \frac{\sigma_c}{k-1} \right] \quad (8)$$

이때, 연속성의 법칙에 의해서 주동응력 조건 및 수동응력 조건에서의 소성영역의 반경 b 는 각각 식 (9)와 식 (10)으로 나타낼 수 있다.

$$b = a \left[\left(\frac{2\sigma_h^\infty - \sigma_c}{k+1} + \frac{\sigma_c}{k-1} \right) \frac{1}{P_i + \frac{\sigma_c}{k-1}} \right]^{k-1} \quad (9)$$

(주동 응력 조건)

$$b = a \left[\left(\frac{2\sigma_h^\infty - \frac{\sigma_c}{k}}{\frac{1}{k} + 1} + \frac{\sigma_c}{k-1} \right) \frac{1}{P_i + \frac{\sigma_c}{k-1}} \right]^{\frac{1}{\frac{1}{k}-1}} \quad (10)$$

(수동 응력 조건)

3.1.2 탄소성 영역의 변위해석

소성변형률을 얻기 위해 식 (11)의 비관련유동법칙을 채택한다.

$$Q(\sigma_r, \sigma_\theta) = \sigma_\theta - K_\psi \sigma_r - 2c \sqrt{K_\psi} = 0 \quad (11)$$

(주동응력 조건)

여기서, $K_\psi = \frac{1 + \sin \psi}{1 - \sin \psi}$ 와 같으며, ψ 는 체적팽창각이다.

소성변형률은 소성유동법칙을 통해서 식 (12), (13)과 같이 나타낼 수 있다.

$$d\epsilon_\theta^p = \lambda \frac{\partial Q}{\partial \sigma_\theta} = \lambda \quad (12)$$

$$d\epsilon_r^p = \lambda \frac{\partial Q}{\partial \sigma_r} = -\lambda K_\psi \quad (13)$$

반경방향 및 접선방향 변형률은 탄성영역과 소성영역에서 변형률의 합으로 나타낼 수 있으며 각각 식 (14), (15)와 같다.

$$\epsilon_r = \frac{du_r}{dr} = \epsilon_r^e + \epsilon_r^p = \epsilon_r^e - K_\psi \epsilon_\theta^p \quad (14)$$

$$\epsilon_\theta = \frac{u_r}{r} = \epsilon_\theta^e + \epsilon_\theta^p \quad (15)$$

임의로 식 (15)에 K_ψ 를 곱하고 식 (14)에 대입하면 식 (16)과 같은 함수를 얻을 수 있다.

$$\frac{du_r}{dr} + K_\psi \frac{u_r}{r} = \epsilon_r^e + K_\psi \epsilon_\theta^e = f(r) \quad (16)$$

식 (16) 방정식의 경계조건은 식 (17)과 같다.

$$u_{r(r=b)} = \frac{b}{2G} (\sigma_{vo} - \sigma_{r(r=b)}) \quad (17)$$

따라서 식 (16)을 풀면 주동응력 조건에서 반경방향변위는 식 (18)과 같이 나타난다.

$$u_r = \frac{1}{2G} r^{-K_\psi} [C(1 - 2\mu) (b^{K_\psi+1} - r^{K_\psi+1})]$$

$$-D(b^{K_v-1} - r^{K_v-1})] + u_{r(r=b)} \left(\frac{b}{r}\right)^{K_v} \quad (18)$$

(수동응력 조건)

여기서,

$$C = \frac{(\sigma_{vo} - \sigma_{r(r=b)})b^2 - (\sigma_{vo} - p_i)a^2}{b^2 - a^2},$$

$$D = \frac{a^2 b^2 (\sigma_{r(r=b)} - p_i)}{b^2 - a^2} \text{이다.}$$

또한 수동응력 조건의 경우 최대, 최소주응력의 회전으로 인하여 식 (11)의 소성포텐셜함수는 식 (19)와 같고, 같은 방법으로 유도하면 수동응력 조건에서 반경방향변위는 식 (20)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q(\sigma_r, \sigma_\theta) = \sigma_r - K_v \sigma_\theta - 2c\sqrt{K_v} = 0 \quad (19)$$

(수동응력 조건)

$$u_r = \frac{1}{2G} r^{-\frac{1}{K_v}} \left[C(1 - 2\mu) \left(b^{\frac{1}{K_v} + 1} - r^{\frac{1}{K_v} + 1} \right) - D \left(b^{\frac{1}{K_v} - 1} - r^{\frac{1}{K_v} - 1} \right) \right] + u_{r(r=b)} \left(\frac{b}{r}\right)^{\frac{1}{K_v}} \quad (20)$$

(수동응력 조건)

위의 식 (20)을 통해 천공홀 가압으로 인한 공의 반경방향 변위량을 산정할 수 있다.

3.2 챔버모형실험

팽창형 강관의 팽창으로 인한 주변지반의 거동을 실험을 통하여 측정하기 위해서 챔버(강재 원통형 토조) 모형실험을 수행하였다. 실험 장치는 그림 4와 같으며, 직경 60 cm, 높이 60 cm의 챔버, 그리고 직경 6 cm의 팽창형 강관, 지중에 설치되는 토압계 및 지반변위 측정용 LVDT, 챔버와 팽창형 강관에 압력을 주는 air compressor, regulator 등으로 구성된다.

챔버 내에 팽창형 강관을 설치하고, 다짐을 통해 단위중량이 17.7 kN/m³의 모형지반을 조성하였으며, 천공홀

팽창으로 인한 지반의 응력과 변위 변화를 측정하기 위해 지중에 토압계와 LVDT를 설치하였다. 지반 조성 후에는 챔버에 300 kPa의 수직 구속압을 가하여 지중상태를 모사하고, 팽창형 강관에 압력을 가하면서 천공홀의 거동 변화를 측정하였다.

팽창형 강관은 표 1과 같이 팽창 형상에 따라서 3가지로 제작하였으며, 방사방향으로 동일하게 팽창하는 전방향 팽창형 강관, 좌, 우 방향으로만 팽창하는 이방향 팽창형 강관, 좌, 우, 상 방향으로 팽창하는 삼방향 팽창형 강관으로 실험을 수행하였다. 실제 현장에서 사용될 팽창형 강관을 제작하기 위해서는 재료적인 연구와 경제성 연구가 추가적으로 필요하며, 본 실험에서는 시험적인 형태의 강관을 제작하여 실험을 실시하였다. 전방향 팽창형 강관은 방사방향으로 균일하게 팽창하는 팩커를 사용하였고, 이방향 팽창형 강관은 팩커와 두 개의 반원형 강관으로, 삼방향 팽창형 강관은 팩커와 힌지로 연결된 두 개의 반원형 강관으로 제작하여 사용하였다.

지반 조성 시 시료는 풍화토를 사용하였으며, 체분석,

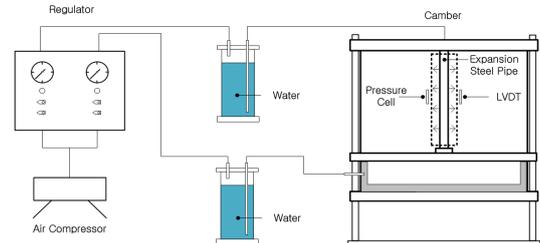


그림 4. 챔버 모형 시험 장치의 구성

표 1. 팽창형 강관

팽창형상	명칭	특징
	전방향 팽창형 강관	방사방향으로 균일하게 가압
	이방향 팽창형 강관	좌, 우 방향으로 가압
	삼방향 팽창형 강관	좌, 우, 상 방향으로 가압

표 2. 시료의 특성치

시료 종류	비중	단위중량 [kN/m ³]	내부 마찰각 (°)	점착력 [kPa]	포아송비
풍화토	2.64	17.7	34.4	25.6	0.39

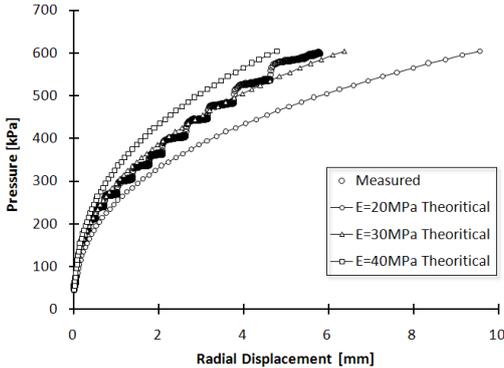


그림 5. 공팽창 이론과 실험결과

직접전단시험, 투수시험 등의 실내시험 및 현장지반조사를 통해서 각 시료의 물성을 파악하였으며 이를 표 2에 정리하였다.

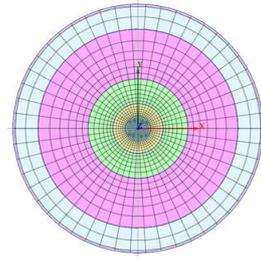
3.3 공팽창 이론과 챔버실험결과 비교 (전방향팽창)

전방향 팽창형 강관의 경우, 모든 반경방향으로 발생하는 응력과 변위가 동일하므로 공팽창 이론과 비교가 가능하며, 그 결과는 그림 5와 같다. 챔버에 초기지중상태 모사를 위한 수직방향 구속압 300 kPa를 가하였을 때 측정된 수평방향 구속압의 크기는 45 kPa이었고, 팽창압은 초기지중응력 45 kPa로부터 점차적으로 증가시켜 최대 600 kPa까지 가해주었고 이때 발생한 천공홀의 최대 변위는 5.8 mm였다.

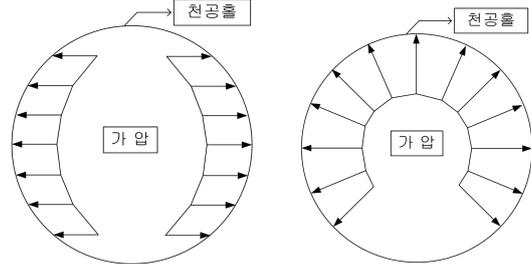
공팽창 이론은 지반의 탄성계수에 따라서 응력과 변위의 거동이 다르게 되며, 지반의 탄성계수(E) 값이 30 MPa인 경우, 실험 결과와 거의 일치하는 거동을 보여주었다.

3.4 수치해석과 챔버실험결과 비교 (이방향, 삼방향 팽창)

이방향 팽창형 강관 챔버실험의 경우, 챔버에 초기지



(a) 해석 mesh



(b) 이방향 팽창형 강관 (c) 삼방향 팽창형 강관

그림 6. 챔버모형실험 수치해석 모델링

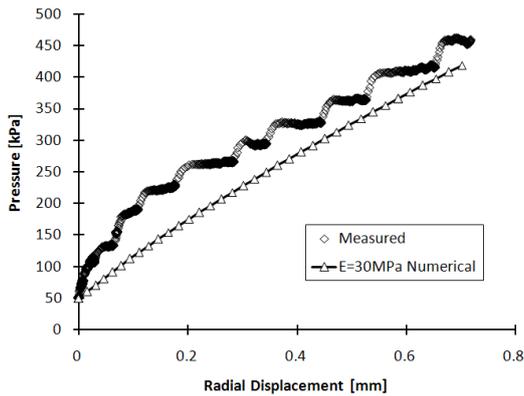
중상태 모사를 위한 수직방향 구속압 300 kPa를 가하였을 때, 측정된 수평방향 구속압의 크기는 50.4 kPa 이었고, 팽창압은 초기 지중응력 50.4 kPa로부터 점차적으로 증가시켜 최대 460 kPa까지 가해주었으며, 이때 발생한 최대 변위는 0.72 mm였다.

삼방향 팽창형 강관 챔버실험의 경우, 수직방향 구속압 300 kPa를 가하였을 때, 측정된 수평방향 구속압의 크기는 49.5 kPa이었다. 팽창압은 초기지중응력 49.5 kPa로부터 점차적으로 증가시켜 최대 167 kPa까지 가해주었고 이때 발생한 최대 변위는 0.34 mm였다. 삼방향 팽창형 강관은 팍커에 압력을 가하여 팍커가 강관을 변형시키는 형태로 제작되어 있으며, 따라서 팍커에 가해진 압력이 지반에 그대로 전달되지 않고 강관을 변형시키는데 일정 압력이 소요된다. 삼방향 팽창형 강관의 경우 이러한 강관 변형에 소요되는 압력이 비교적 크게 필요하여 팍커에 최대 압력인 650 kPa의 압력을 가하였으나 지반에 전달되는 압력은 167 kPa에 불과하였다. 이로 인하여 변위 역시 0.34 mm 정도로 작게 발생하였다.

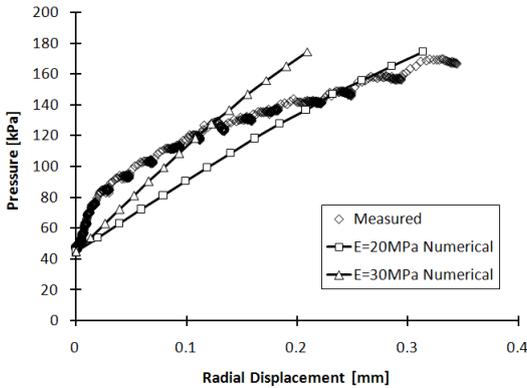
이방향 팽창형 강관과 삼방향 팽창형 강관의 경우에는 가압으로 인한 팽창형상이 모든 반경방향으로 동일한 것이 아니라 이방성(異方性) 팽창 형태를 가진다. 따

라서 공팽창 이론과 실험 결과의 직접 비교가 어려우므로 챔버모형실험을 모델링한 유한요소해석을 수행하여 실험 결과와 비교하였다. 수치해석은 plane strain 2D 모델로 수행하였다. 해석 mesh는 그림 6(a)와 같이 챔버의 직경과 동일하게 60 cm의 원형 실린더 형태로 모델링하였고 이방향 팽창형 강관은 그림 6(b)와 같이 좌, 우 방향으로, 삼방향 팽창형 강관은 그림 6(c)와 같이 상, 좌, 우 방향으로 가압하여 모델링 하였다.

수치해석과 실험결과의 비교는 그림 7에 나타나 있다. 이방향 팽창형 강관의 경우, 지반의 탄성계수(E) 값이 30 MPa 일 때 수치해석과 실험 결과가 개략적으로 유사한 변위 발생 경향을 보여주고 있다. 삼방향 팽창형 강관의 경우, 변위의 발생 경향이 변위가 작은 초기에는 탄성계수(E) 30 MPa의 경향을 따르다가 변위가 커지면



(a) 이방향 팽창형 강관



(b) 삼방향 팽창형 강관

그림 7. 수치해석 결과와 실험결과 비교

20 MPa 일 때의 거동에 근접하는 것으로 나타났다.

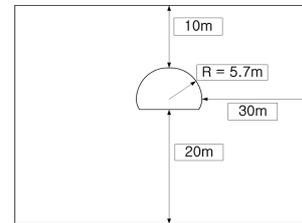
4. 천공홀 가압 팽창 개념 적용시 터널 보강 효과 평가

4.1 수치해석

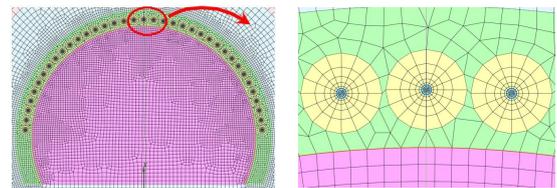
천공홀 가압 팽창으로 유도되는 주변 지반의 응력 변화로 인한 터널 보강 효과를 평가하기 위해서 유한요소 해석을 수행하였다. 해석을 위하여 2D 터널 단면을 모델링하였으며, 강관다단그라우팅을 터널 주변부에 umbrella type으로 배치한 단면과, 3가지 팽창 형상(전방향, 이방향, 삼방향)의 팽창형 강관을 umbrella type으로 배치한 단면에 대해 각각 해석을 수행하고 보강효과를 비교하였다.

4.1.1 수치해석 모델링

해석 단면은 그림 8과 같으며, 토괴고 10 m의 풍화도가 분포하는 천층터널로 모델링하였다. 그림 8(b)와 같



(a) 해석 개략도



(b) 터널 상단부 강관

그림 8. 해석 단면

표 3. 해석에 사용된 지반정수

단위 중량 [kN/m ³]	변형 계수 [MPa]	내부 마찰각 [°]	점착력 [kPa]	포아송 비	팽창각 [°]	정지 토압 계수 [K ₀]
20	50	30	20	0.3	30	1

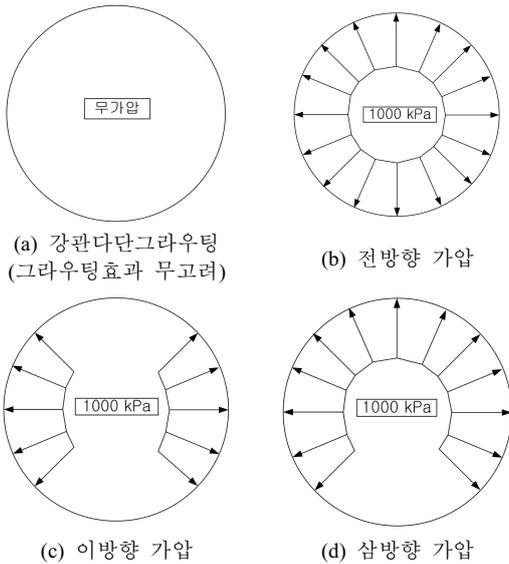


그림 9. 강관 모델링

이 터널 상단면을 따라서 직경 6 cm의 강관을 umbrella type으로 배치하였다.

해석 대상 지반은 풍화토로 이루어진 토사지반으로 설정하였으며, 적용한 지반의 물성치는 표 3과 같다.

강관다단그라우팅의 모델링은 풍화토에서 그라우팅이 제대로 시행되지 못하는 점을 고려하여 주변 물성치 증가 없이 직경 6 cm의 원형 강관으로 단순하게 적용하였다. 팽창형 강관의 모델링은 챔버모형실험 결과를 토대로 터널 수치해석에 적용하였으며, 가압 형상은 그림 9와 같다. 팽창형 강관이 팽창함에 따라 주변 지반에 가해주는 압력의 최대 크기는 1000 kPa로 설정하였으며, 이는 초기지중응력의 5배에 해당하는 응력이다.

4.1.2 수치해석 결과

강관다단그라우팅(그라우팅효과 무고려)과 세 가지 팽창형 강관을 적용하였을 경우, 터널 굴착에 따라 발생하는 내공변위와 슛크리트 최대압축응력은 표 4와 같다. 강관다단그라우팅에 비하여 전방향, 이방향 팽창형 강관의 경우에는 내공변위의 변화가 거의 없으나 삼방향 팽창형 강관의 경우에는 터널의 천정에서는 37.3%, 어깨에서는 25.5%, 측면에서는 31.5%의 변위 감소를 보여주었다. 내공변위의 결과와 유사하게 슛크리트 최대

표 4. 수치해석 결과

공 법	내공변위 [mm]			스틉크리트 최대 압축응력 [MPa]
	천정	어깨	측면	
강관다단 그라우팅 (그라우팅 효과 무고려)	29.5	32.1	72.4	5.66
전방향 팽창형 강관	31.5	33.8	72.9	5.70
이방향 팽창형 강관	29.8	32.6	73.0	5.67
삼방향 팽창형 강관	18.5	23.9	49.6	4.92

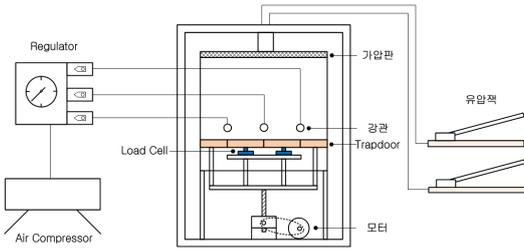
압축응력 결과는 삼방향 팽창형 강관의 경우에서 강관다단그라우팅에 비하여 13.1% 감소한 결과를 보여주었다.

4.2 Trapdoor 모형토조실험

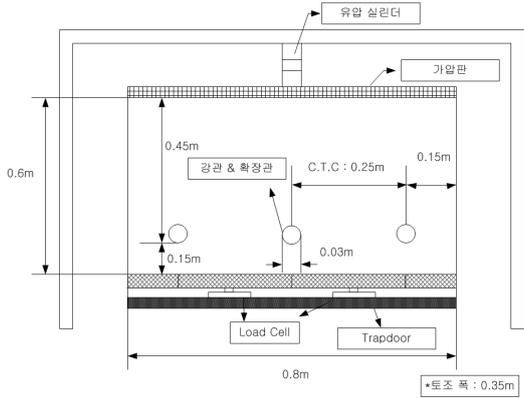
4.2.1 시험개요

팽창관 개념 신평법과 강관다단그라우팅공법은 터널 천단부에 천공홀을 굴착하고 강관을 삽입하여 터널을 보강하는 공법으로, 삽입된 강관은 터널 굴진면이 앞으로 진행되었을 때 상부의 하중을 지지하는 역할을 하게 된다. 본 연구에서는, 터널의 굴착이 진행되면서 강관이 상재하중을 지지하게 되는 일련의 과정을 trapdoor 모형 토조실험을 통하여 모사하였다. 터널 굴착은 trapdoor가 하강하는 것으로 모사되며, 터널 수치해석에서 보강효과가 나타난 삼방향 팽창형 강관과 강관다단그라우팅(그라우팅효과 무고려)을 설치하여 두 공법의 보강효과를 비교하였다.

토조 아래 부분의 trapdoor는 그림 10(b)와 같이 4개의 plate로 분리되어 있으며, 토조 하부의 전동모터와 연결되어 일정한 속도로 하강할 수 있도록 제작되었다. 중앙에 위치한 2개의 plate에는 각각 load cell이 설치되어 강관과 강관 사이에 작용하는 하중을 측정하도록 제작되었다. 팽창형 강관은 터널 수치해석에서 가장 뚜렷한 보강 효과를 나타낸 삼방향 팽창형 강관만을 제작하여 실험하였다. 세 개의 강관을 토조에 설치하였고 trapdoor



(a) 시험 장치 개략도



(b) Trapdoor 모형토조

그림 10. Trapdoor 시험 장치의 구성

가 하강함에 따라 강관이 상재하중을 지지하도록 하였다. 토조의 상부에는 유압을 이용하여 상재하중을 가압할 수 있도록 제작하였으며, 팽창형 강관은 공압을 이용하여 팽창하도록 제작하였다.

시험 장치는 실제크기의 1/2로 축소하여 제작하였으며, 강관의 직경은 30 mm, 강관과 강관 사이의 거리는 250 mm, 상재하중은 100 kPa를 가하였다. 시험에 사용한 시료는 챔버모형시험에서 사용한 풍화토 시료를 사용하였으며, 단위중량 17.7 kN/m³으로 지반을 조성하였다.

4.2.2 실험 결과

Trapdoor를 50 mm까지 하강시키면서 load cell에 작용하는 하중을 측정하였으며, trapdoor 변위 대비 trapdoor 응력(load cell 하중을 trapdoor 단면적으로 나눈 값)으로 결과를 표시하면 그림 11과 같으며, 5 mm 변위 단위로 결과를 정리하면 표 5와 같다. Trapdoor가 하강하면 토조의 중간에 설치된 강관과 강관 사이에 아칭 효과가

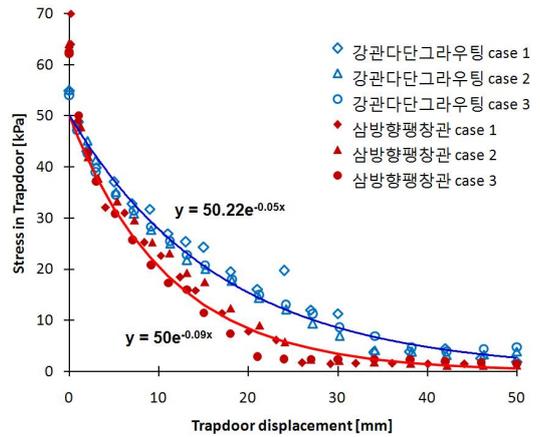


그림 11. Trapdoor 실험 결과

나타나면서 상재하중을 지지하게 되어 trapdoor 응력은 점차 감소하였다.

강관다단그라우팅(그라우팅효과 무고려)의 경우, 초기 상재하중 작용시 trapdoor 응력은 55 kPa였으며, trapdoor 하강에 따라 그 크기가 점차로 감소하다가 trapdoor 변위 34 mm 발생 후에 수렴하는 경향을 보였다.

삼방향 팽창형 강관 신공법의 경우, 초기 상재하중 작용시 trapdoor 응력은 63 kPa로, trapdoor 하강에 따라 그 크기가 점차로 감소하다가 trapdoor 변위 26 mm 발생 후에 변위가 수렴하는 경향을 보였다.

그림 11과 표 5에서 알 수 있듯이 강관다단그라우팅(그라우팅효과 무고려)에 비하여 삼방향 팽창형 강관 신공법의 경우 동일한 trapdoor 변위가 발생하였을 때 더 작은 응력이 trapdoor에 작용하였으며 이완되는 응력의 크기가 12%~78% 작았다. 바꾸어 말하면 이것은 동일한 trapdoor 응력이 작용하기까지 더 작은 변위가 발생한다는 것을 의미하고, 터널 굴착으로 인하여 동일한 응력 이완이 발생하였을 때 터널의 내공변위가 더 작게 발생한다는 것을 의미하며, 터널 보강에 더 효과적이라고 판단할 수 있다.

Trapdoor 응력의 수렴 값 역시, 강관다단그라우팅(그라우팅효과 무고려)의 3~4 kPa에 비하여 삼방향 팽창형 강관 신공법은 1~2 kPa로 더 작은 값에서 수렴하여 최종 이완하중의 크기도 감소됨을 알 수 있다.

표 5. Trapdoor 모형토조실험 결과

Trapdoor 변위 [mm]	Trapdoor 응력 [kPa]		차이 [1-B/A] [%]
	강관다단 [그라우팅무고려] [A]	삼방향 팽창관 [신공법] [B]	
5	36	31.6	12.2
10	27.1	21.8	19.7
15	21.6	14.4	33.3
20	17.4	8.2	53.0
25	13.6	3.3	75.6
30	8.91	2.0	78.0
35	4.62	1.8	61.0
40	4.01	1.6	61.3

5. 결 론

본 연구에서는 천공홀 팽창으로 인한 주변지반 거동 연구와 천공홀 가압 팽창 개념을 적용한 신공법의 터널 보강 효과에 대하여 연구하였다.

1. 챔버모형실험을 통하여 세 가지 형상의 팽창형 강관의 팽창 성능을 검증하고, 천공홀 팽창으로 인한 지반의 응력과 변위를 측정하였다. 방사방향으로 동일한 거동을 하는 전방향 팽창형 강관의 실험결과를 공 팽창 이론과 비교한 결과, 지반의 탄성계수(E)가 30 MPa일 때 이론과 실험값이 거의 일치하였다. 이방성(異方性)의 팽창 형상을 가지는 이방향, 삼방향 팽창형 강관의 실험결과는 수치해석 결과와 비교하였으며 지반의 탄성계수(E)가 20~30 MPa일 때 대체적으로 유사한 거동을 보여주었다.
2. 천공홀의 팽창으로 유발되는 주변 지반의 응력 변화로 인한 터널 보강 효과를 평가하기 위해서 2D 터널 단면을 수치해석으로 모델링 하였으며, 강관다단그라우팅(그라우팅효과 무고려)과 세 가지(전방향, 이방향, 삼방향) 팽창형 강관을 모사하여 터널 보강효과를 비교하였다. 비교 분석 결과, 전방향 팽창형 강관과 이방향 팽창형 강관은 뚜렷한 보강효과를 보여주지 못한 반면, 삼방향 팽창형 강관은 강관다단그라우팅(그라우팅효과 무고려)에 비해 천단변위가 37.3% 감소하였고, 슛크리트 압축응력도 13.1% 감소하는

결과를 보여주어 삼방향 팽창형 강관이 터널의 보강 측면에서 효과가 있음을 확인하였다.

3. 삼방향 팽창형 강관 신공법 적용 시의 보강 효과를 실험적으로 증명하기 위하여 trapdoor 모형토조실험을 수행하였다. 실험은 강관다단그라우팅(그라우팅효과 무고려)과 신공법을 모사한 삼방향 팽창형 강관을 사용하여 그 결과를 비교하였다. Trapdoor를 하강함에 따라 trapdoor에 작용하는 응력이 강관의 지보 효과에 의해 감소하게 되는데, 동일한 trapdoor 변위 일 때 강관다단그라우팅(그라우팅효과 무고려)에 비해 삼방향 팽창형 강관의 경우 trapdoor 응력이 12~78% 작게 발생하는 결과를 보여 주어 삼방향 팽창형 강관이 천단변위 저감, 슛크리트 응력 감소 등의 터널 지보 효과를 보여 줄 수 있음을 확인하였다.

감사의 글

이 연구는 교신저자가 고려대학교로부터 2010년도에 연구년을 부여받아(연구 제목: 공팽창에 의한 지반보강 효과와 이를 이용한 터널보조공법 개발), 집중적인 연구로 이루어진 결과이다.

참고문헌

1. 김대영, 이홍성, 천병식, 정종주 (2009), "UAM 효과 평가를 위한 현장실험 및 정량적 2차원 수치해석기법 개발에 관한 연구", 한국터널공학회논문집, 제11권, 1호, pp. 57-70.
2. 서형준, 박성원, 정경한, 최항석, 이인모 (2009), "공팽창 이론에 의한 압력식 쏘일네일링의 인발저항력 산정", 한국지반공학회논문집, 제25권, 7호, pp. 35-46.
3. 이인모, 박성원, 정경한, 최항석 (2006), 실내 챔버 실험을 이용한 압력식 쏘일네일링의 거동 분석, 대한토목학회 정기학술대회발표, pp. 186-190.
4. 이인모, 최항석, 정경한, 박성원, 이충원 (2008), 가압 그라우팅 쏘일네일링의 인발저항력 증가 원인에 관한연구, 한국지반공학회논문집, 제 24권 4호, pp. 1-14.
5. 이인모 (2001), "암반역학의 원리", 새론 도서출판, pp. 294-326.
6. 이인모 (2004), "터널의 지반공학적 원리", 새론 도서출판, pp. 11-33.

접수일(2010.7.31), 수정일(2010.10.30), 게재확정일(2010.11.15)