

## 강관 삽입형 선진보강공법의 정량적 설계를 위한 프로그램의 소개



송기일  
UITM 토목공학과  
조교수, 공학박사



조계춘  
KAIST 건설 및  
환경공학과 부교수,  
공학박사



장석부  
삼성물산 건설부문,  
공학박사



윤도의  
정회원,  
(주) 지중공영  
대표이사

### 1. 서론

강관다단그라우팅, UAM(Umbrella Arching Method)과 같은 강관 삽입형 갱내 선진보강공법은 저심도 도심 지하철 터널은 물론 산악터널의 갱구부 보강공사에도 일반적으로 적용되고 있다. 그러나, 강관 삽입형 선진보강공법은 터널공사비와 공사기간에 큰 영향을 미치는 보조공법임에도 불구하고, 일관성 있는 정량적 설계기준이 부족하여 기존 설계 및 시공사례나 기술자 개인별 판단에 의존하고 있는 실정이며 체계적인 설계기법에 대한 연구는 현재까지 미진한 실정이다. 기존의 연구는 과도한 시간과 노력이 요구되는 3차원 수치해석을 통해 이루어졌으며, 강관의 휨거동과 그라우팅과 지반의 계면거동 분석에 한계점을 안고 있다.

이에, 장석부 등(2002)에 의해 제안된 빔-스프링 모델을 이용하여 강관삽입형 선진보강공법의 정량적 설계를 위한 프로그램을 개발하였다. 본 전산 프로그램은 지반조

건, 터널규모 및 강지보재와 슛크리트 등의 주지보 상태 등을 정량적으로 고려할 수 있으며, 설계 초기단계에서 신속하게 사전보강량을 산정할 수 있는 장점이 있다.

### 2. 강관 삽입형 선진보강공법과 해석모델

#### 2.1 보강 원리

구조부재로서 지반에 삽입된 강관의 보강효과와 그라우팅에 의한 원지반의 개량효과가 강관 삽입형 선진보강공법의 대표적인 보강효과이다. 지반에 삽입된 강관은 무지보 구간에 작용하는 지반하중을 이미 설치된 지보재와 막장전방으로 전달하는 역할을 한다. 슛크리트 및 록볼트 등의 지보재 타설 이전 휨저항력에 의하여 무지보 구간을 지지하여 무지보 구간에 대한 안정을 도모하는 것이 선진보강공법의 주된 보강 원리이다. 천공홀에 주입되는 그라

우팅은 강관과 천공홀을 일체화 시키고, 침투를 통해 주변 지반의 점착력과 차수성을 향상시켜 강관과 강관 사이의 토사유실을 방지하는 역할을 한다.

## 2.2 설계조건 및 설계변수

표 1에 선진보강공법의 설계를 위한 설계 조건과 설계 변수를 정리하였다. 강관삽입형 선진보강공법의 설계조건은 지반조건, 터널크기 및 슛크리트나 강지보재의 특성이며, 설계변수는 강관의 제원인 강관구경 및 두께와 길이이며, 설치수량으로는 종방향 및 횡방향 간격 그리고 횡방향 보강범위이다. 강관의 타설각도는 시공여건을 감안하여 일반적으로 수평에 근사하도록 하고 있다.

일반적으로 많이 적용되고 있는 강관의 외경은 60.5mm와 114.3mm이며, 길이는 12~16m가 보편적이다. 타설각도는 15°이내를 원칙으로 하고 있으며, 천공직경은 강관규격에 따라 100mm~150mm 정도가 일반적으로 적용되고 있다. 강관의 횡방향 간격은 40~60cm를 적용하여 있으며, 횡방향 보강범위는 120°가 가장 일반적이며, 지반조건이 토사와 같이 연약한 경우에 한하여 측벽부 보강

을 위하여 180°까지 적용하고 있다.

강관의 종방향 간격은 기본적으로 기설치된 강관에 의한 막장지지범위 이내이어야 한다. 즉, 그림 1과 같이 지반층의 강관선단이내에 파괴추정선이 위치하여야 한다. 종방향 간격은 통상적으로 강관길이의 1/3이 중첩되도록 설계되고 있으나, 터널높이와 지반조건이 고려되고 있는 않으므로 강관의 길이와 종방향 타설각도, 터널높이, 그리고 지반의 내부마찰각 등을 종합적으로 고려하여 안정성을 확보하고 있는지 검토하여야 한다.

## 2.3 해석 모델의 개요

다양한 해석조건을 고려할 수 있는 해석 모델을 도출하기 위해서는 강관 삽입형 선진보강공법의 지보 메커니즘을 합리적인 가정을 통해 단순화하였다. 기본적인 가정사항은 다음과 같다.

- 1) 정사로 설치된 강관은 수평방향에 투영된 길이에 동일 강관으로 가정한다. (실제로 HI-VP관 등 절단 또는 제거되는 강관의 길이는 제외한다)

표 1. 강관삽입형 선진보강공법의 설계 조건 및 설계변수

터널 관련 설계 조건	지반 관련 설계 조건	지보재 설계 조건	강관 관련 설계 변수	강관 종방향 설계 변수	강관 횡방향 설계 변수
터널폭 (D)	마찰각 ( $\phi$ )	강지보 단면적 ( $A_{set}$ )	강관길이 ( $L_p$ )	종방향 간격 ( $S_L$ )	횡방향 간격 ( $S_T$ )
터널높이 (H)	점착력 (c)	강지보 탄성계수 ( $E_{set}$ )	강관직경 ( $D_p$ )	종방향 타설각 ( $\theta_L$ )	횡방향 설치각 ( $\theta_T$ )
1회굴진장 ( $L_g$ )	단위중량 ( $\gamma$ )	강지보 설치간격 (d)	강관두께 ( $T_p$ )		
	측압계수 ( $K_0$ )	슛크리트 두께 ( $T_{shot}$ )	강관 탄성계수 ( $E_p$ )		
	지반 탄성계수 ( $E_g$ )	경성슛크리트의 탄성계수 ( $E_{shot}$ )			
	토피 (h)	슛크리트의 포와송비 (v)			

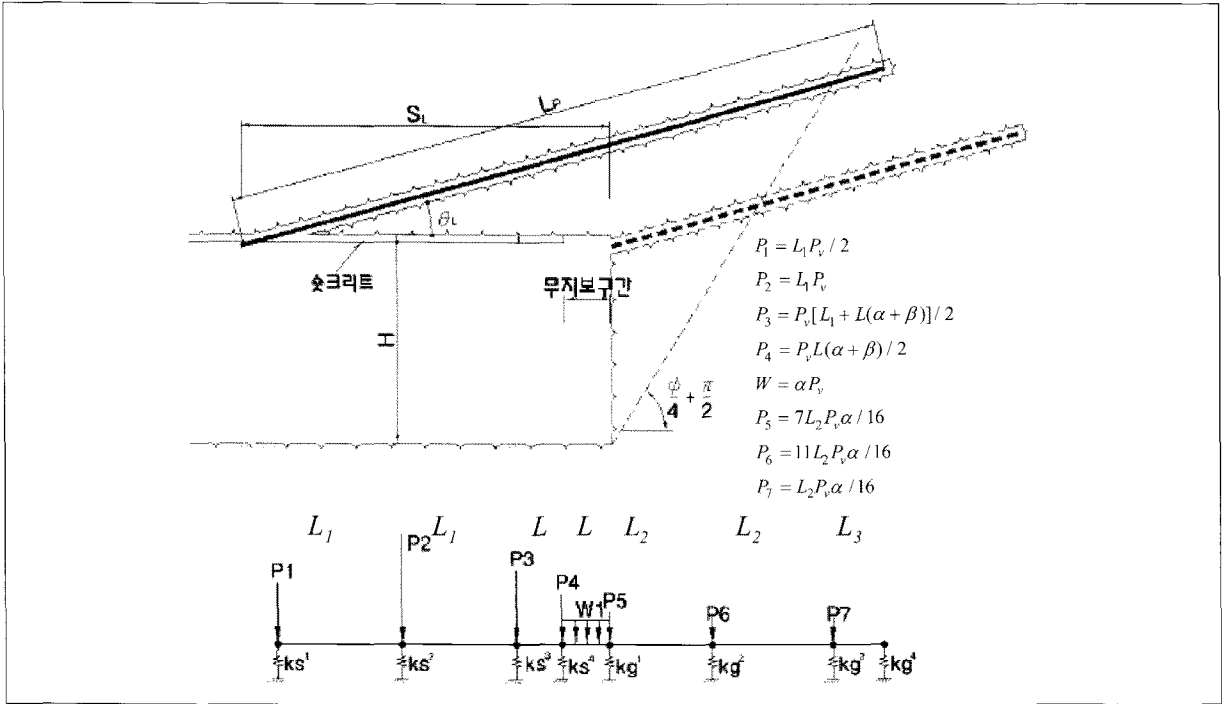


그림 1. 강관삽입형 선진보강공법 설계를 위한 해석 모델(장석부 등, 2002)

- 2) 구조계산에 고려되는 시공단계는 종방향의 다음 강관 설치공사 바로 전의 굴착상태를 대상으로 한다.
- 3) 막장면에서 추정파괴선은 직선으로써 굴착면 하부로부터의  $\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2}\right)$  각도를 이룬다.
- 4) 굴착구간과 연성쏘크리트 구간에는 총지반하중이 작용하지 않고 아칭효과에 의한 하중분배율에 따라 일정량만이 작용한다.
- 5) 굴착면에서 지반측으로는 하중이 선형으로 감소하며, 파괴선 외측의 강관에는 지반하중이 작용하지 않는다.
- 6) 지반과 지보재는 축력에만 저항하는 반력 스프링으로 강관은 휨과 전단에 저항하는 빔요소로 모델링한다.
- 7) 그라우팅 효과는 주입효과 확인 및 품질관리가 곤란하므로 본 공법의 시공중 여분의 안전율로 고려하고

본 프로그램의 구조계산에는 고려하지 않는다.

그림 1은 이러한 가정조건에 따라 도출된 해석 모델으로써 기본적인 절점은 강관의 시점과 종점, 막장부, 하중변화 위치 등에 위치한다.

### 3. 해석 프로그램의 소개

#### 3.1 강관 삽입형 선진보강공법 설계 프로그램의 고려 사항

본 연구에서 강관 삽입형 선진보강공법의 설계를 위해 적용된 전산 프로그램은 코어의 존재 유무에 따라 파괴추정선이 지반측 강관선단이내 위치하는지를 미리 확인하여 안정성 유무를 해석 단계이전 강관의 설계변수 선택시

사전 검토할 수 있다. 또한, 횡방향 설치각에 따른 강관의 안정성을 검토할 수 있는 기능을 이용하여 합리적인 횡방향 보강 범위를 결정할 수 있는 장점이 있다.

강관에 작용하는 하중( $P_v$ )을 산정하기 위해서는 지반하중( $W$ )을 산정하여야 한다. 사전보강이 적용되는 저심도 연약지반에서의 지반하중은 다음과 같은 Terzaghi의 이완도압식을 적용하는 것이 일반적이다.

$$W = \frac{B_1 \left( \gamma - \frac{c}{B_1} \right)}{K_0 \tan \phi} \left( 1 - e^{-K_0 \tan \phi \left( \frac{h+R \sin \theta_T}{B_1} \right)} \right) \quad (1)$$

식 (1)의  $B_1$ 은 다음 식으로부터 구할 수 있다.

$$B_1 = R \cdot \cot \left( \frac{\pi/4 + \phi/2}{2} \right) \quad (2)$$

여기서,  $\gamma$ 는 지반의 단위중량,  $c$ 는 점착력,  $K_0$ 는 토압계수,  $\phi$ 는 지반의 마찰각,  $\theta_T$ 는 강관의 횡방향 설치각,  $h$ 는 토피고이고,  $R$ 은 터널의 반경이다.

강관에 작용하는 연직하중  $\alpha_v$ 와 수평방향 하중  $\alpha_h$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\sigma_v = S_T \cdot W \quad (3)$$

$$\sigma_h = \sigma_v \cdot K_0 \quad (4)$$

터널 막장의 무지보 구간에 작용하는 토압은 연직방향과 수평방향 토압으로 구분할 수 있다. 터널 상부 지반에 설치된 강관의 경우는 연직방향의 토압이 지배적으로 작용하고 수평방향의 토압은 강관을 기준으로 반대편에 위치하는 지반의 반력 스프링에 의해 상쇄되는 것으로 볼 수 있다. 한편, 터널 측벽에 설치된 강관의 경우는 연직방향의 토압은 강관 아래 위치한 지반의 반력 스프링에 의

해 상쇄되며 수평방향의 토압만이 강관의 휨거동에 지배적으로 작용하게 된다. 따라서, 이를 합성하여 강관에 작용하는 총도압  $P_v$ 을 산정하기 위하여 다음과 같은 주기함수의 특성을 이용할 수 있다.

$$P_v = \sqrt{\sigma_v^2 \cdot \cos^2 \theta_T + \sigma_h^2 \cdot \sin^2 \theta_T} \quad (5)$$

여기서,  $\theta_T$ 는 횡방향 설치각으로  $\theta_T=0^\circ$ 이면 천단부이고,  $\theta_T=90^\circ$ 이면 측벽부가 된다. 즉,  $\theta_T=0^\circ$ 이면 연직방향의 하중만 작용하고,  $\theta_T=90^\circ$ 이면 수평방향의 하중만 작용하게 된다. 무지보 구간과 연성숏크리트의 하중분배율  $\alpha$ 와  $\beta$ 는 장석부와 문현구(1998)의 연구에 의하면 다음과 같은 식으로 간편하게 구할 수 있다.

$$\alpha = 3.340L_e + 3.778 \ln E_g \quad (6)$$

$$\kappa = -3.126L_e + 3.391D \quad (7)$$

$$\beta = 100 - (\alpha + \kappa) \quad (8)$$

여기서,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\kappa$ 의 단위는 %이고,  $L_e$ 은 무지보 구간 굴착장,  $D$ 는 터널의 폭으로 단위는 meter이며,  $E_g$ 는 지반의 탄성계수로 단위는  $\text{tonf/m}^2$ 이다. 따라서, 연성숏크리트 구간에서 강관에 작용하는 하중은  $P_v''=(\alpha+\beta)P_v$ 이고, 무지보 구간에서 강관에 작용하는 하중은  $P_v'=aP_v$ 이다. 지반 반력 스프링계수는 다음 식을 적용하여 구할 수 있다.

$$k_g = \frac{2E_g}{D_p} S_T \quad (9)$$

여기서,  $E_g$ 는 지반의 탄성계수,  $S_T$ 는 횡방향 설치 간격,  $D_p$ 는 강관직경이다. 그리고, 숏크리트와 강지보의 반력 스프링계수는 다음 식을 적용하여 구할 수 있다.

$$k_{shot} = \left(\frac{1}{R}\right) \cdot \frac{E_{shot} \cdot [R^2 - (R - T_{shot})^2]}{(1 + \nu) [(1 - 2\nu)R^2 + (R - T_{shot})^2]} \quad (10)$$

$$k_{set} = \frac{E_{set} \cdot A_{set}}{d \cdot \left(R - \frac{h_{set}}{2}\right)^2} \quad (11)$$

여기서,  $E_{shot}$ 은 슛크리트의 탄성계수,  $R$ 은 터널 반경,  $T_{shot}$ 은 슛크리트의 두께,  $\nu$ 는 슛크리트의 포와송비,  $E_{set}$ 은 강지보의 탄성계수,  $A_{set}$ 은 강지보의 단면적,  $d$ 는 강지보 설치 간격,  $h_{set}$ 은 강지보의 단면 높이이다.

설치 강관의 안정성을 분석하기 위하여 강재의 휨응력과 전단응력을 계산하여 안전율을 획득하였다. 유한요소 해석으로부터 획득한 전단력  $S$ 와 강관의 단면적  $A$ 로부터 발생 전단응력  $\sigma_{shear}$ 은 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$\sigma_{shear} = \frac{S}{A} \quad (12)$$

전단응력에 대한 안전율은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$FOS_{shear} = \frac{\sigma_{allowable\ shear}}{\sigma_{shear}} \quad (13)$$

또한 휨응력  $\sigma_{bending}$ 은 모멘트  $M$ 와 단면계수  $Z$ 로부터 다음과 같이 획득할 수 있다.

$$\sigma_{bending} = \frac{M}{Z} \quad (14)$$

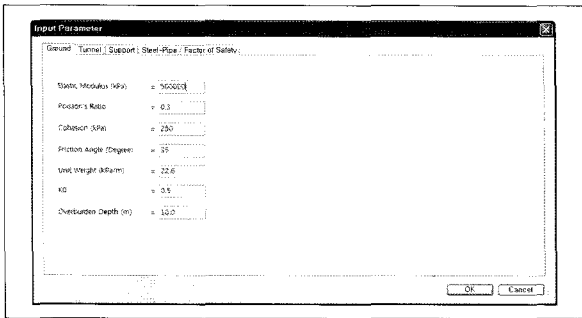
따라서, 휨응력에 대한 안전율은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$FOS_{bending} = \frac{\sigma_{allowable\ bending}}{\sigma_{bending}} \quad (15)$$

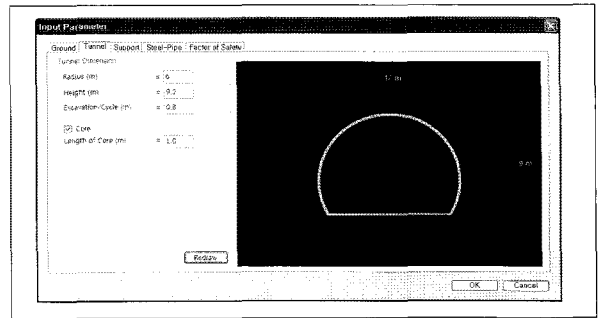
휨응력과 전단응력에 대한 안전율이 모두 1보다 크면 설계 파라미터의 강관을 이용한 사전보강은 안전한 것으로 평가할 수 있다.

### 3.2 사전보강 설계 프로그램을 이용한 해석 절차

사전보강 설계 프로그램을 이용한 강관의 설계 절차는 그림 2와 같다. 우선, 해석 대상 지반의 지반 조건을 입력한다. 터널의 재원을 입력하고 막장면 코어의 유무와 코어의 길이를 설정한다. 슛크리트와 강지보의 재원을 입력

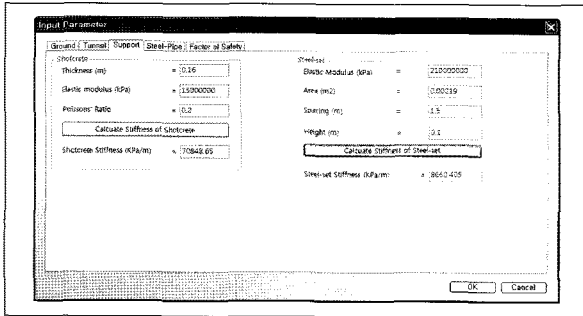


(a)

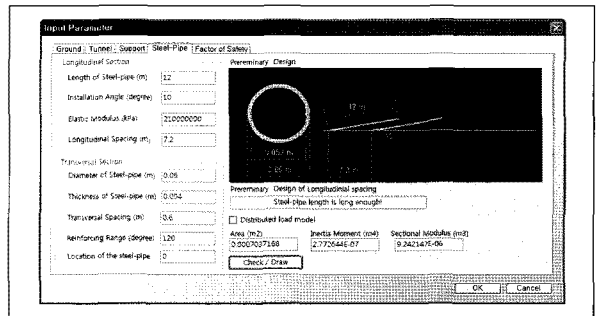


(b)

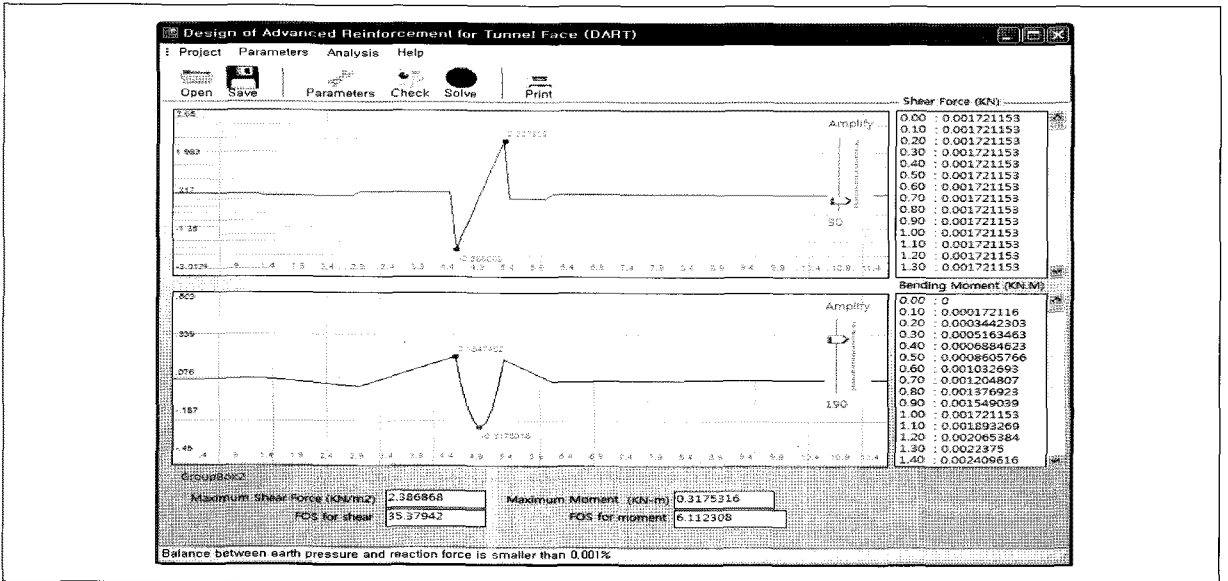
그림 2. 사전보강 설계 프로그램을 이용한 해석 절차 (a) 지반조건 입력 모듈 (b) 터널 재원 입력 모듈 (c) 슛크리트와 강지보의 지보재 특성 입력 모듈 (d) 강관의 설계변수 입력 모듈 (e) 해석 결과로부터 획득된 전단력 및 모멘트 다이어그램과 안전율



(c)



(d)



(e)

그림 2. 사전보강 설계 프로그램을 이용한 해석 절차 (a) 지반조건 입력 모듈 (b) 터널 재원 입력 모듈 (c) 슛크리트와 강지보의 지보재 특성 입력 모듈 (d) 강관의 설계변수 입력 모듈 (e) 해석 결과로부터 획득된 전단력 및 모멘트 다이어그램과 안전율(계속)

하여 지보재 반력을 획득한다. 이후, 강관 설계 변수를 입력할 수 있는 모듈에서 다양한 강관 설계 변수에 따른 해석결과를 획득할 수 있다. 해석결과는 강관에 나타나는 전단력과 모멘트의 분포이며, 앞서 설명한 안전율 계산 과정에 따라 전단력과 모멘트에 따른 설계 조건에 해당하는 강관의 안전율을 획득할 수 있다.

#### 4. 맺음말

강관 삽입형 선진보강공법의 정량적 설계를 위해 개발된 본 프로그램은 사전보강량을 정량적으로 결정하는데 큰 도움이 될 것으로 사료된다. 특히, 본 프로그램은 지반 조건, 터널규모 및 강지보와 슛크리트와 같은 주지보재의 상태 등을 종합적으로 고려할 수 있으며, 설계 초기단계에서 신속하게 사전보강량을 산정할 수 있는 장점이 있다.

본 프로그램은 현재 기본적인 개발이 완료된 상태로 2011년 이내에 현업 보급용 버전이 출고될 예정이다. 본 프로그램은 설계조건과 실제시공결과의 인과관계를 객관적이고 정량적으로 분석할 수 있기 때문에 시공성도가 축적되면 프로그램의 보정을 통해 더욱 신뢰성 높은 예측이 가능할 것으로 판단되므로 본 프로그램의 많은 활용을 기대한다.

### 참고문헌

1. 장석부, 권승, 김기림, 허도학(2002), "터널막장 보강을 위한 합리적인 선진보강공법 설계기법", 한국암반공학회지 터널과 지하공간, 제4권, 제3호, pp. 6-13.
2. 장석부, 문현구(1998), "터널설계조건을 고려한 하중분배율의 정량적 산정에 관한 연구", 한국지반공학회지, 제4권, 제5호, pp. 5-15.