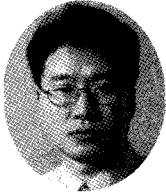


## 터널막장 보강을 위한 합리적인 선진보강공법 설계기법



**장석부**  
(주)유신코퍼레이션  
터널부, 부장



**권 승**  
(주)유신코퍼레이션  
터널부, 대리



**김기림**  
(주)유신코퍼레이션  
터널부, 대리



**허도학**  
(주)유신코퍼레이션  
터널부, 과장

### 1. 서론

터널공사에서 대부분의 터널파괴는 막장에서 발생하고 있으며, 파괴규모에 따라 터널 측벽이나 천장에서 발생하는 낙반수준의 붕락(fall)에서 터널 내부의 붕락이 지표면 함몰까지 연결되는 함몰붕괴(daylight collapse)로 구분된다(건설기술연구원, 1999). 따라서, 안전한 터널공사를 위해서는 터널막장의 안정성 확보가 가장 중요하기 때문에 설계단계는 물론 시공단계에서도 가장 세심한 주의가 요구된다.

터널막장의 안정성을 확보하는 방안으로는 무지보 굴착폭을 감소시키고 막장 배면의 지하수를 미리 배수시키기 위한 분할굴착법과 막장지반의 강도와 차수성을 강화하는 보조공법을 들 수 있다. 전통적으로는 인력과 소형장비를 이용한 소단면 분할굴착공법이 많이 적용되었으나, 최근에는 갱내작업의 기계화와 갱내 지반보강기술의 발전으로 지반보강 공법이 선호되고 있다. 즉, 터널시공 현장에서 점보드릴, 슛크리트 타설기, 버력처리 장비 등과 같은 대형장비를 사용하여 작업효율을 향상시키기 위해서는 각종 장비가 갱내에서 운용될 수 있는 공간이 확보되어야 하므로 굴착단면의 크기를 유지하면서 막장을

안정시킬 수 있는 보강공법을 적용하는 것이 유리한 경우가 많다. 또한, 90년대에 국내에 등장한 강관다단그라우팅, RPUM 등의 강관삽입형 보강공법과 같은 우수한 갱내 선진보강공법의 사용실적이 점차 증가함에 따라 근래에는 도심 저심도 지하철 터널은 물론 산악터널의 갱구부 보강공사에도 일반적으로 적용되고 있다.

터널선진보강공법은 그 적용수량에 따라 터널공사비와 공사기간을 50% 정도로 증가시키는 큰 영향을 미치나, 보강설계는 일관성 있는 정량적 설계기준이 부족하여 기존 사례나 기술자 개인별 판단에 의존하고 있는 실정이다. 이것은 설계자, 감리자, 시공자, 발주자 등의 공사수행 관련자들간에 공사비와 관련된 주요 분쟁원인이 되고 있으나, 설계실무에 활용할 수 있는 기존의 연구성이나 설계기법은 찾기 힘들다.

강관삽입형 보강공법의 보강원리 및 효과에 대한 연구는 김창용 등(1998)에 의하여 수행된 바 있으며, 주로 3차원 수치해석을 통하여 지반조건, 강관길이, 강관의 설치간격 및 각도 등의 각종 설계인자에 대한 지반침하 역제 효과가 검토되었다. 이러한 연구성과는 강관삽입형 공법의 보급에 일조 하였으나, 3차원 수치해석은 기본적으로는 과도한 수치해석 노력이 요구되며, 현재까지 사용가능

한 수치해석프로그램에서도 강관의 기하학적 설치형태 및 휨거동의 모델링에는 많은 어려움이 있다.

따라서, 본 논문에서는 강관삽입형 보강공법의 설계변수를 고찰하고 비교적 적은 전산용량과 모델링 노력으로 터널막장 지지에 요구되는 보강량을 정량적으로 구조계산할 수 있는 빔-스프링 모델을 제안하였다. 본 모델은 지반조건, 터널규모 및 지보상태 등을 정량적으로 고려할 수 있으며, 설계초기단계에서 신속하게 수행할 수 있는 장점이 있다.

## 2. 강관삽입형 선진보강공법

### 2.1 보강원리

강관삽입형 보강공법의 보강효과는 구조부재로서 지반에 삽입된 강관의 보강효과와 그라우팅에 의한 지반개량 효과를 들 수 있다. 강관은 무지보 막장면의 하중을 기설

치된 지보재와 막장전방의 지반으로 전달하는 역할을 통하여 지보재 타설 이전의 막장안정을 도모하며 이 때 강관은 휨저항력에 의하여 무지보 구간을 지지하게 된다. 지반그라우팅은 강관과 천공홀이 밀착되도록 하고, 주변지반의 점착력과 치수성을 향상시켜 강관사이의 토사유실 및 지하수 유입량을 저감시키는 역할을 하게 된다(그림 1 참조).

### 2.2 강관보강형 선진보강공법의 설계변수

강관보강형 선진보강공법 설계시에는 지반조건, 터널 크기, 터널지보재 등을 고려하여야 하며, 설계변수로는 그림 2의 보강설계사례를 참조하면, 강관제원과 설치수량으로 대별된다. 강관제원에 대해서는 강관구경 및 두께와 길이이고 설치수량으로는 종방향 및 횡방향 간격 그리고 횡방향 보강범위를 들 수 있다. 강관타설각은 시공여건을 감안하여 가능한 한 수평에 근사하도록 하여야 하므로 설계변수라기보다는 설계조건으로 고려하는 것이 적

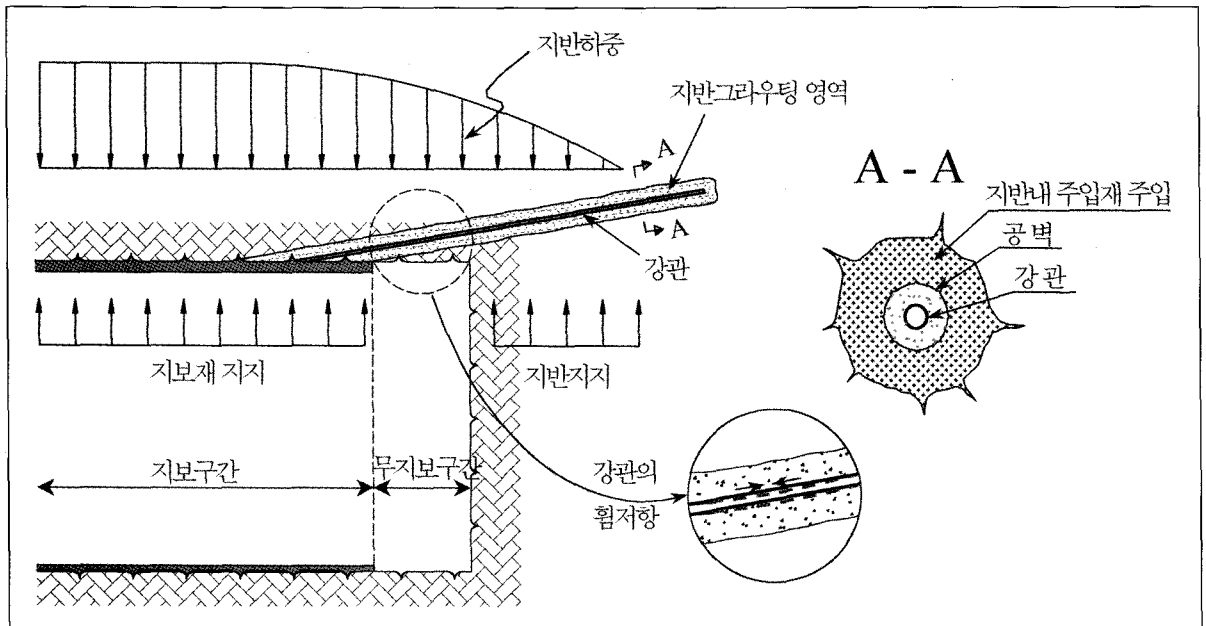


그림 1. 강관보강형 선진보강공법 개요 및 보강원리

절하다.

일반적으로 강관제원은 크게 외경 60.5mm와 114.3mm가 많이 적용되고 있으며, 길이는 12~16m가 보편적으로 사용되고 있다. 타설각도는 15° 이내를 원칙으로 하고 있으며, 천공직경은 강관규격에 따라 100~150mm 정도가 적용되고 있다. 강관의 횡방향 간격은 40~60cm, 종방향 간격은 터널굴착높이와 무관하게 통상 강관길이의 1/3 정도가 중첩되도록 하고 있다. 횡방향 보강범위는 120°가 가장 일반적이며, 지반조건이 토사와 같은 연약한 경우에 한하여 측벽부 보강을 위하여 180°가 적용되고 있다.

강관종방향 간격은 기본적으로 기설치된 강관에 의한 막장지지범위내이어야 한다. 즉, 그림 2에서 보는 바와 같이 파괴추정선은 항상 지반층의 강관선단이내에 위치

하여야 한다. 통상적으로 강관길이의 1/3이 중첩되도록 설계되고 있으나, 터널높이와 지반조건이 고려되고 있지 않다. 따라서, 강관의 종방향설치간격은 강관의 길이와 종방향타설각, 터널높이, 그리고 지반의 내부마찰각 등의 설계조건을 고려한 식(1)을 만족하도록 결정하는 것이 적절할 것이다. 또한, 지지코어가 있는 경우에는 파괴선 시작지점을 터널막장지면이 아닌 코어의 중심부로 설정하는 것이 보다 합리적일 것으로 생각된다.

$$S_L < L_p \cos \theta_L - (H + L_p \sin \theta_L) \tan \left( \frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2} \right) \quad (1)$$

선진공법이 적용되는 지반조건은 저심도의 풍화암, 풍화토, 토사층이기 때문에 축압계수는 대부분 0.5이하이므로 터널천정부의 하중이 가장 크고 측벽부는 상대적으로

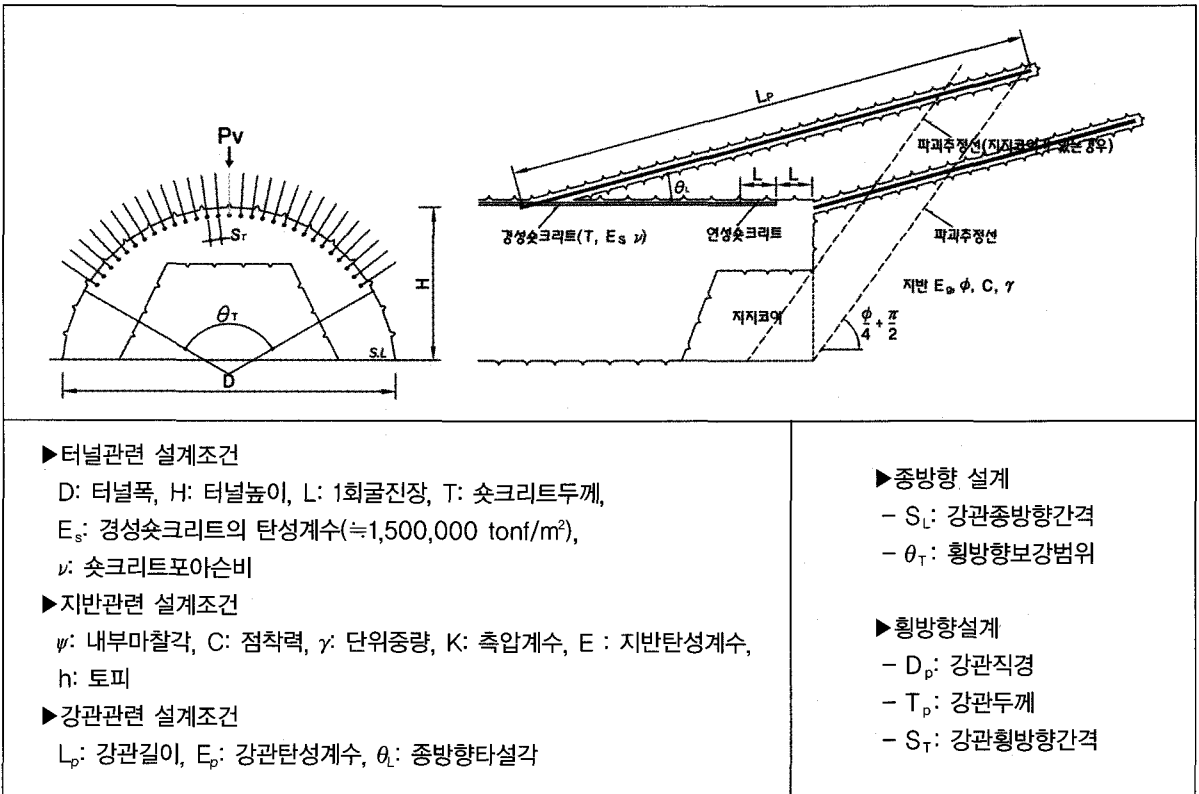


그림 2. 강관보강형 선진보강공법의 설계조건과 설계변수

작다. 따라서, 상반천정부에 비하여 측벽부 보강시에는 강관의 간격을 증가시키거나 작은 단면의 강관을 사용하여 경제적인 설계를 도모하는 것이 적절할 것으로 생각된다.

### 3. 구조해석 모델

#### 3.1 해석모델

강관보강형 선진공법의 구조계산을 위한 빔-스프링 모델의 기본적인 가정사항은 다음과 같다.

- 1) 경사로 설치된 강관은 수평방향에 투영된 길이의 동일 강관으로 가정한다.
- 2) 구조계산에 고려되는 강관은 천단부에 위치한 것을 대상으로 한다.
- 3) 터널지보구간은 슛크리트가 강지보에 비하여 강성이 크므로 슛크리트의 강성만을 고려한다.
- 4) 구조계산에 고려되는 시공단계는 종방향의 다음 강관 설치공사 바로 전의 굴착상태를 대상으로 한다.
- 5) 막장면에서 추정파괴선은 직선으로써 굴착면 하부로부터  $(\pi/4 + \psi/2)$ 의 각도를 이룬다.
- 6) 굴착구간과 연성스�크리트 구간에는 총지반하중이 작용하지 않고 하중분배율에 따라 일정량만이 적용

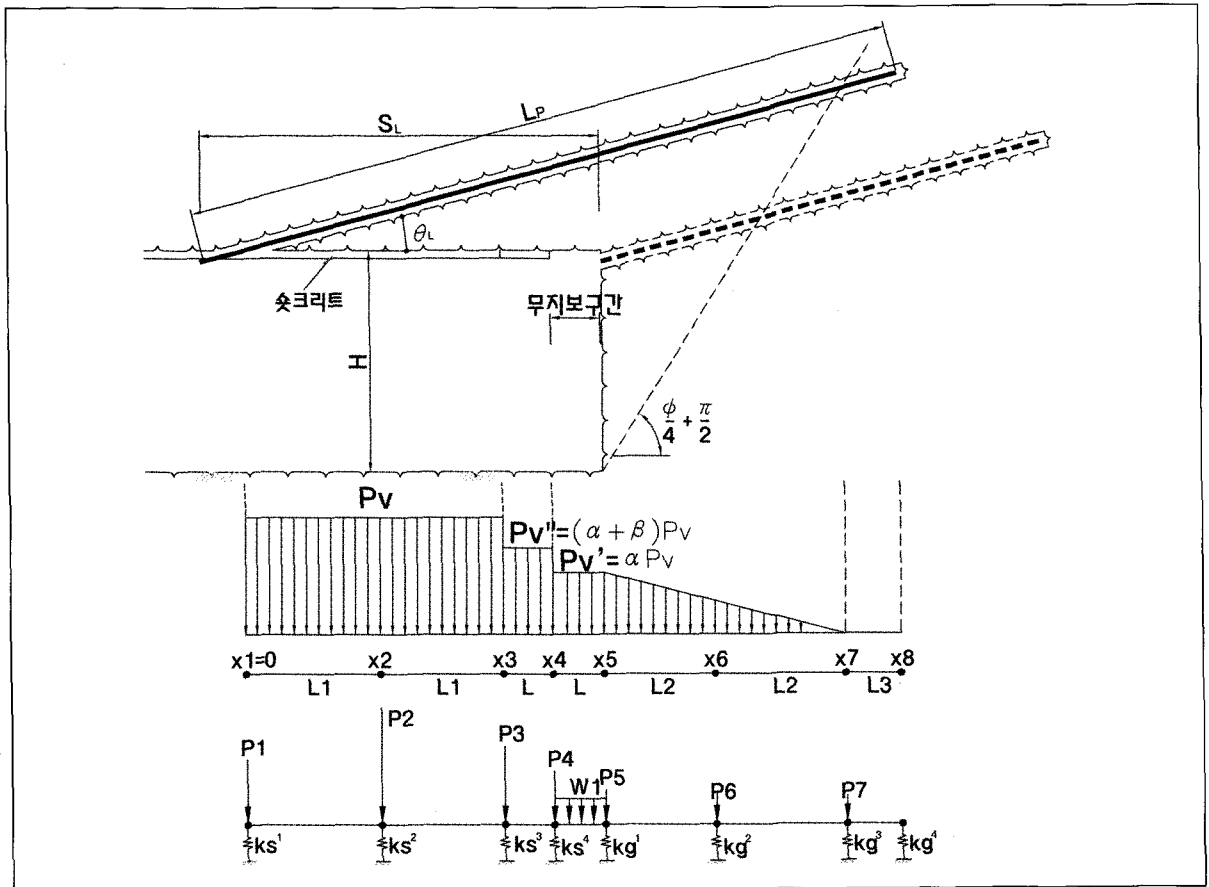


그림 3. 강관보강형 선진보강공법의 구조계산을 위한 빔-스프링 모델

한다.

- 7) 굴착면에서 지반측으로는 하중이 선형으로 감소하며, 파괴선 외측의 강관에는 지반하중이 작용하지 않는다.
- 8) 지반과 지보재는 축력에만 저항하는 반력스프링으로 강관은 휨과 전단에 저항하는 빔요소로 모델링한다.

그림 3은 위의 가정에 따라 작성된 빔-스프링 모델로써 기본적인 절점은 강관의 시점과 종점, 막장부, 하중변화 위치 등에 위치한다.  $x_1 \sim x_4$  구간과  $x_5 \sim x_8$  구간은 각각 슛크리트와 지반이 연속적으로 지지하고 있는 구간이기 때문에 가상절점에서 등분포하중에 대하여 모멘트가 발생하지 않도록 환산된 집중하중을 절점에 적용하였다. 단,  $x_4 \sim x_5$  구간은 실제로 무지지 구간이므로 등분포하중을 그대로 적용하였다. 작용하중( $P_v$ ), 지반과 지보재 반력계수( $k_g^b, k_g^s$ )의 산정에 대한 내용은 다음절에서 다루어질 것이며, 그림 3의  $x_i, k_s^i, k_g^i, P_i, w$ 에 대한 상세한 계산식은 부록에 수록하였다.

### 3.2 하중산정 및 반력계수

강관에 작용하는 하중( $P_v$ )을 산정하기 위해서는 먼저 지반하중( $W$ )을 산정하여야 한다. 지반하중은 Terzaghi의 이완토압식을 적용하는 것이 일반적이다.

$$W = \frac{B_1 \left( \gamma - \frac{C}{B_1} \right)}{K \tan \phi} \left( 1 - e^{-K \tan \phi \frac{h}{B_1}} \right) \quad (2)$$

위 식에서  $B_1$ 은 다음 식으로 계산된다.

$$B_1 = \frac{D}{2} \cot \left( \frac{\pi/4 + \phi/2}{2} \right) \quad (3)$$

강관에 작용하는 하중은  $P_v$ 는 다음 식으로 구해진다.

$$P_v = S_r W \quad (4)$$

무지보구간과 연성스프링의 하중분배율  $\alpha$ 와  $\beta$ 는 장석부와 문현구(1998)의 연구에 의하면 다음과 같은 식으로 간단하게 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \alpha &= 3.340 L + 3.778 \ln E \\ \gamma &= -3.126 L + 3.391 D \\ \beta &= 100 - (\alpha + \beta) \end{aligned} \quad (5)$$

위 식에서  $\alpha, \beta, \gamma$ 의 단위는 %이고  $L$ 과  $D$ 는 meter, 그리고  $E$ 는  $\text{tonf/m}^2$ 이다.

이상으로부터 강관에 작용하는 하중은  $P_v' = \alpha P_v, P_v'' = (\alpha + \beta) P_v$ 로 구할 수 있다.

지반 반력계수와 지보재 반력계수는 다음 식과 같이 각각 Wolfer 식과 Hoek와 Brown(1980)이 제시한 식을 적용하여 구한다.

$$k_g^b = \frac{2E}{D_p} S_r \quad (6)$$

$$k_s^b = \frac{E_s [(D/2)^2 - (D/2 - T)^2]}{(1 + \nu) [(1 - 2\nu)(D/2)^2 + (D/2 - T)^2]} \quad (7)$$

### 3.4 예제해석

제안모델의 적정성을 검토하기 위하여 토피 20m 정도의 풍화암에 위치하는 지하철 복선터널을 대상으로 다음과 같은 조건을 가정하였다.

▶ 터널제원

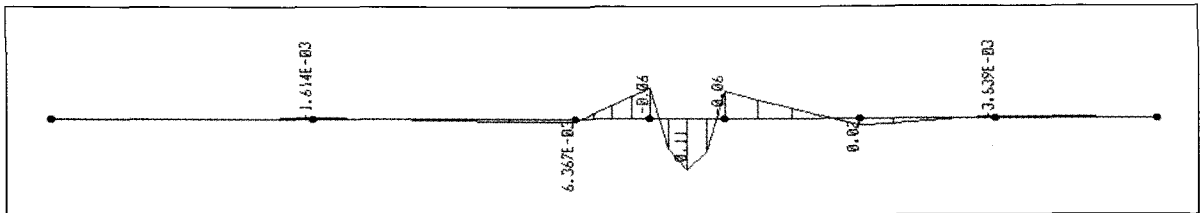
$D : 10\text{m}, H : 5\text{m}, L : 0.8\text{m}, T : 16\text{cm},$

$E_s : 1,500,000 \text{ tonf/m}^2, \nu : 0.2$

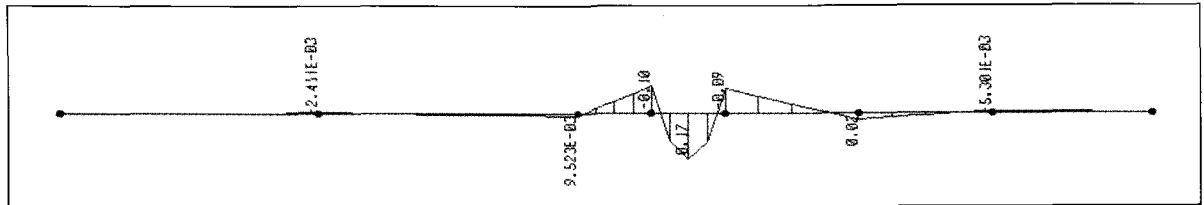
▶ 지반조건

표 1. 구조계산 결과(단면력의 )는 안전율)

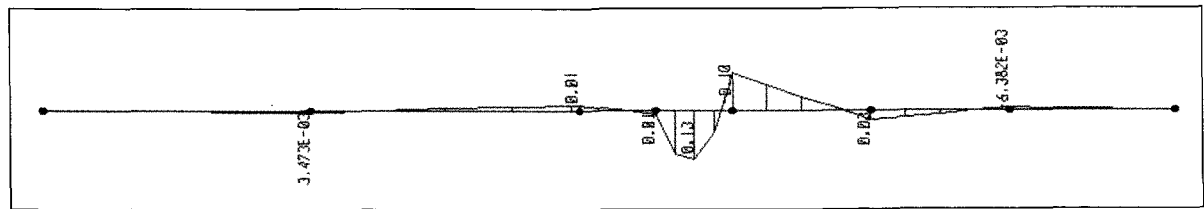
구분	계산조건		단면력		비고
	강관규격	횡방향간격	모멘트 (tonf-m)	전단력 (ton)	
Case 1	외경 60.5mm, 두께 4mm	40 cm	0.1108 (1.78)	0.8703 (9.79)	- 강재의 허용휨응력
Case 2	외경 60.5mm, 두께 4mm	60 cm	0.1659 (1.19)	1.3040 (6.53)	2,100 kgf/cm <sup>2</sup>
Case 3	외경 114.3mm, 두께 5.6mm	40 cm	0.1277 (8.16)	0.9991 (22.8)	- 강재의 허용전단응력
Case 4	외경 114.3mm, 두께 5.6mm	60 cm	0.1915 (5.44)	1.5050 (15.2)	1,200 kgf/cm <sup>2</sup>



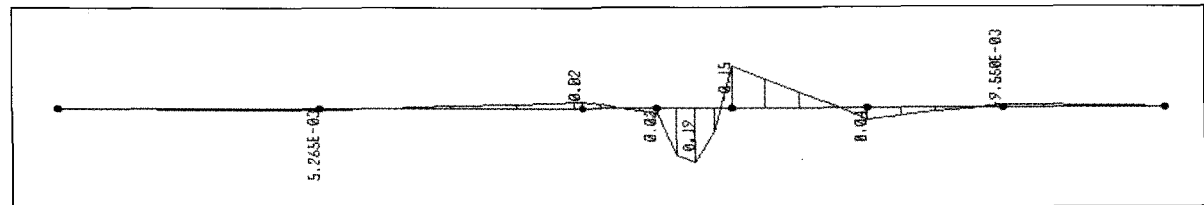
(a) Case 1 : 강관직경 60.5mm, 횡간격 40cm



(b) Case 2 : 강관직경 60.5mm, 횡간격 60cm



(c) Case 3 : 강관직경 114.3mm, 횡간격 40cm



(d) Case 4 : 강관직경 114.3mm, 횡간격 60cm

그림 4. 모멘트 분포도

$\psi : 30^\circ$ ,  $C : 10 \text{ tonf/m}^2$ ,  $\gamma : 2.1 \text{ tonf/m}^3$ ,  $K : 0.5$ ,  
 $E : 1,5000 \text{ tonf/m}^2$ ,  $h : 20\text{m}$

▶ 강관설치조건

$L_p : 12\text{m}$ ,  $S_L : 7.2\text{m}$ ,  $E_p : 21,000,000 \text{ tonf/m}^2$ ,  
 $\theta_L : 10^\circ$

상기 조건과 강관규격 및 횡방향 간격에 따른 4 경우에 대하여 구조계산을 수행하여 각 경우에 대한 단면력을 표 1에 수록하였다. 안전율을 분석해 보면 강관은 전단보다는 휨응력이 단면결정에 주요한 영향을 미침을 알 수 있다. 또한, 강관규격이 크고 횡방향간격이 좁을수록 안전율이 높아짐을 알 수 있다.

그림 4는 4 경우에 대한 모멘트 발생양상을 보여주고 있으며 강관직경에 따라 지보구간과 무지보 구간에서의 부모멘트 발생양상이 다소 차이가 있다. 60.5mm 강관의 경우(case 1과 2)에서는 지보구간과 지반측에서 부모멘트가 거의 같게 발생하나 114.3mm 강관의 경우에는 지반측에서만 부모멘트가 발생함을 알 수 있다. 이는 강관의 휨강성차이로 인하여 비교적 연성인 60.5mm 강관은 무지보구간에서 양단지보와 유사하게 거동하고 상대적으로 약 10배의 강성이 높은 114.3mm 강관은 일단지보와 유사하게 거동하였기 때문이다.

4. 결론

강관삽입형 선진보강공법은 90년 초반에 국내 적용이 시작된 이래로 많은 현장에 적용되어 취약조건인 터널막

장의 안정에 이바지해왔다. 그러나, 본 공법이 터널공사 비는 물론 공사기간에 큰 영향을 미침에도 불구하고 합리적인 설계기법이 제시되지 않아 설계자의 주관 또는 모호한 경험에 의존해 왔다. 따라서, 본 논문에서 제시한 빔-스프링 모델은 정량적으로 강관보강형 선진공법의 설계에 큰 도움이 되리라 생각된다. 특히, 본 모델은 지반조건, 터널크기, 굴진장 등의 다양한 터널설계조건을 고려할 수 있음에도 불구하고 비교적 단순한 구조계산방법으로 강관삽입형 선진보강 설계가 가능한 장점이 있다. 또한, 본 논문에서 제시한 방법은 강관삽입형 보강공법에 수평제트그라우팅과 같은 다른 선진보강공법에도 충분히 적용될 수 있다.

참고문헌

1. 건설기술연구원(1999), Neural Network을 이용한 터널설계 적정성 평가용 Expert System 개발(II).
2. 김창용, 배규진, 문현구, 최용기 (1998), "Umbrella Arch 공법이 적용된 터널의 3차원 유한요소 해석에 관한 연구", 터널과 지하공간, 한국암반공학회, Vol.8, pp. 209~225.
3. 장석부, 문현구 (1998), 터널 설계조건을 고려한 하중분배율의 정량적 산정에 관한 연구 - ring cut 공법을 중심으로 -, 한국지반공학회지, 14권5호, pp.5-15
4. Hoek, E. and Brown, E.T., 1980, Underground excavations in rock, Institution of Mining and Metallurgy.
5. Oreste, P.P. and Pelia, D.(1998), "A new theory for steel pipe umbrella design in tunnelling", Tunnels and Metropolises, pp. 1033~1039.

## 《 부록 》

$$x_1 = 0$$

$$x_2 = (S_L - 2L_1)/2$$

$$x_3 = S_L - 2L_1$$

$$x_4 = S_L - L$$

$$x_5 = S_L$$

$$x_6 = (x_7 - S_L)/2$$

$$x_7 = S_L + \sim H \tan(\pi/4 - \phi/2)$$

$$x_8 = L_p \cos \theta_L$$

$$P_1 = \frac{1}{2} L_1 P_v$$

$$P_2 = L_1 P_v$$

$$P_3 = \frac{1}{2} P_v [L_1 + L(\alpha + \beta)]$$

$$P_4 = \frac{1}{2} L P_v(\alpha + \beta)$$

$$w = \alpha P_v$$

$$P_5 = \frac{7}{16} L_2 P_v \alpha$$

$$P_6 = \frac{11}{16} L_2 P_v \alpha$$

$$P_7 = \frac{1}{16} L_2 P_v \alpha$$

$$L_1 = x_2 - x_1$$

$$L_2 = x_6 - x_5$$

$$L_3 = x_8 - x_7$$

$$k_s^1 = \frac{1}{2} L_1 k_s^b$$

$$k_s^2 = L_1 k_s^b$$

$$k_s^3 = \frac{1}{2} k_s^b (L_1 + \frac{L}{6})$$

(∵ 경성숏크리트의 탄성계수가 연성숏크리트의 3배임을 고려)

$$k_s^4 = \frac{1}{6} L k_s^b$$

$$k_g^1 = \frac{1}{2} L_2 k_g$$

$$k_g^2 = L_2 k_g$$

$$k_g^3 = \frac{1}{2} (L_2 + L_3) k_g$$

$$k_g^4 = \frac{1}{2} L_3 k_g$$