

## 강관 다단 그라우팅 공법(UAM)의 설계법 제안

### Suggestion of a Design Method for UAM

박 이 근<sup>1</sup> Park, Lee-Keun

임 종 철<sup>2</sup> Im, Jong-Chul

#### Abstract

In case of tunnel construction with a shallow soil cover in cohesionless soils or highly weathered rocks, reinforcement measures are required for a tunnel stability during the tunnel construction. Recent developments show that the use of Umbrella Arch Method(UAM) as tunnel reinforcement and water cut-off in domestic projects has increased. Unfortunately, guidelines for the design and construction of UAM have not been established, only empirical designs and applications in tunnel construction have been performed so far. In this study, behaviour of the steel pipes installed on the tunnel roof was analyzed through the monitoring of bending and axial stresses of the pipes with the advance of the tunnel face. The monitoring results were used in the establishment of the loading mechanism around the pipe. This paper suggests, the guidelines used in the determination of the total length, overlapping length and lateral spacing of the reinforcing pipes obtained from the established loading mechanism.

#### 요 지

토피고가 낮아 지반의 자립성이 적은 토사층, 풍화암층에서 시공되는 터널 구조물의 경우, 시공중 붕락을 방지하고 단기적인 안정성을 확보하기 위해서 보조공법들이 사용되는데 특히, 터널의 보강과 차수효과를 동시에 얻을 수 있는 강관 다단 그라우팅 공법(Umbrella Arch Method)이 많이 적용되고 있다. 그러나, 국내에서는 아직 본 공법의 적용에 있어 외국자료나 경험적 방법에 의한 설계 및 시공이 이루어지고 있는 실정임을 감안할 때, 합리적이고 이론적인 설계 및 해석기법의 도입이 필요하다. 본 논문에서는 강관 다단 그라우팅 공법을 적용한 NATM 현장에서 계측을 통해 터널 굴착에 따른 강관의 거동을 분석하고, UAM 설계시에 적용할 수 있는 하중계를 제안하였다. 그리고, 제안된 하중계를 바탕으로 실제 현장에서 적용할 수 있는 UAM의 설계지침 즉, 강관길이( $L_e, L_b$ ), 중첩시공거리( $x$ ), 횡방향 설치간격 등을 결정할 수 있는 설계법을 제안하였다.

**Keywords :** Design method for UAM, Loading mechanism, Overlapping length, UAM

#### 1. 서 론

도시의 광역화, 도심지의 인구 집중현상 등으로 인한 교통량의 증가 및 차량의 대형화, 고속화 등 교통상황의 변화에 따라 도로터널, 지하철 등 지하구조물의

건설수요가 증가되는 추세이다. 이러한 지하구조물들은 지반조건이나 주변환경이 매우 열악한 곳에서 시공이 이루어지는 경우가 종종 발생하고, 특히 과거에는 산악 또는 견고한 지반에서 주로 적용되었던 NATM 공법이 지하철 공사와 같이 토피고가 낮고 지

1 정회원, 부산대학교 생산기술연구소 연구원, 공학박사 (Member, Researcher of RIIT, Pusan National Univ., theman4you@korea.com)

2 정회원, 부산대학교 토목공학과 교수, 공학박사 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., Pusan National Univ.)

반의 자립성이 낮은 토사층, 풍화암층에서 시공되고 있다.

일반적으로 이처럼 지반조건이 열악한 토사 및 암반 터널 공사에서는 터널의 안전굴착을 위해 여러 가지 지반개량 및 보강공법들이 적용된다. 이러한 보조공법들은 시공중인 터널 주변 지반의 응력 및 변형 상태를 변화시키고 안정화를 이루기 위해서 사용되는데, 각 공법들은 지반 특성이나 지질조건, 지하수 상태에 따라 서로 다른 목적으로 사용될 수 있고, 경제성 및 시공성을 고려하여 2개 이상의 공법을 혼용하여 사용하기도 한다.

이들 보조공법들은 크게 지반변위를 억제하고 지반의 강성을 증대시켜 터널의 자립도를 향상시킬 수 있는 보강공법과 지하수의 유입을 최대한 억제하여 시공효과를 극대화 할 수 있는 차수공법으로 분류된다. 최근에는 지반 보강 및 차수효과를 동시에 얻을 수 있는 공법들도 많이 개발되어 적용되고 있다. 그 중에서도 강관 다단 그라우팅 공법(Umbrella Arch Method)은 파이프 루프 공법과 같이 터널 굴착에 선행하여 터널 예정단면 방향으로 소구경 강관을 일정간격으로 굴착, 설치하여 일련의 파이프루프를 형성시킨 후 강관 내에 packer를 설치, 다단으로 주입재를 주입하여 강관을 정착시킨다. 이 공법은 주입재의 침투효과에 의해 차수 및 주변지반의 보강과 함께 지반의 이완 및 지압의 확대 등을 방지하므로 사질토, 점성토, 풍화토 파쇄대층 및 풍화암 등 다양한 지반에 적용될 수 있다. 특히 지하철 터널구간 및 철도횡단, 상부구조물 횡단 등 시공이 어려운 부분의 지하구조물에 대한 안정효과 및 차수효과가 큰 것으로 밝혀져 최근 각광을 받고 있다.

국내의 경우 1990년대초 서울 지하철 건설공사 시 일부 구간에서 UAM 공법이 적용된 바가 있고, 일부 도로 터널 및 지중선 터널현장에서도 사용되고 있으며 UAM 공법을 적용한 결과 공사비 및 공기 측면에서는 타공법에 비해 유리한 것으로 알려져 있다. 그러나 기술적인 측면에서의 정량적인 효과, 즉 지반차수 및 보강효과와 터널 안정효과 등에 대해서는 관련 연구의 미흡으로 현재까지 명확하게 규명되고 있지 않고 있어서, 외국자료나 경험적 방법에 의한 설계 및 시공이 이루어지고 있는 실정이다. 따라서, 합리적이고 이론적인 설계 및 해석기법의 도입이 필요하다.

본 연구에서는 강관 다단 그라우팅 공법(UAM)을 적용한 NATM 현장에 강관의 전 길이에 스트레인 게이지

를 부착하여 터널굴착에 따라 강관에서 발생하는 응력의 변화를 분석하고, UAM 설계시 적용할 수 있는 하중계를 제안하였다. 그리고, 제안된 하중계를 바탕으로 실제 현장에서 적용할 수 있는 UAM의 설계지침을 마련하고자 한다.

## 2. 현장계측

### 2.1 현장개요

본 연구에서 강관 거동 분석을 위한 계측대상 위치는 부산지하철 3호선 309공구 터널구간으로서 총 연장 302m, 평균 토피고 18m, 터널 직경 9.6m의 마제형 터널이다(임종철 등, 2003).

본 현장에서 계측구간의 지반 주상도는 그림 1과 같으나 실제 지반의 상태는 막장면 관찰에 의한 RQD가 대부분 0~40의 범위에 있으며, 점하중시험에 의한 압석의 일축압축강도는 그림 2와 같이 300 kgf/cm<sup>2</sup> 이하

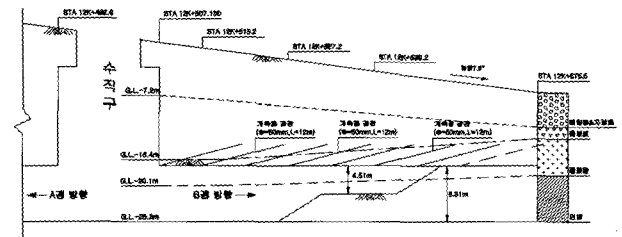


그림 1. 지반 상태

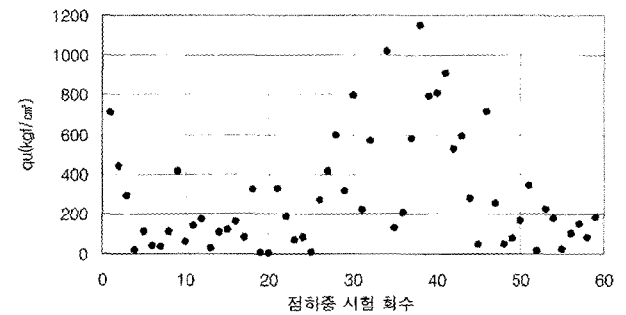


그림 2. 점하중 시험에 의한 일축압축강도

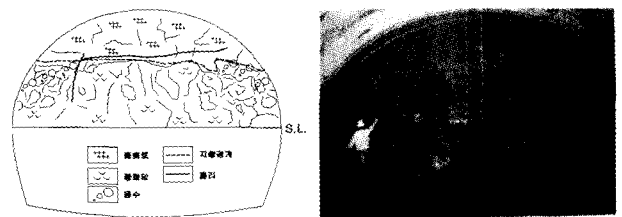


그림 3. 막장면 상부 반단면 mapping

가 대부분이었다. 또한, 강관이 시공되는 단면의 막장면 mapping 결과는 그림 3과 같이 절리가 많은 풍화암이 주를 이루었으며, 터널 양측벽으로 많은 양의 지하수 유출이 나타났다. 그러므로 실제로 터널이 굴착되는 지반은 풍화토에 가까운 지반 및 파쇄가 심한 풍화암이 대부분인 것으로 판단된다.

## 2.2 계측기 설치 단면도

계측 단면에 시공한 강관 다단 그라우팅은 강관길이 12m, 강관 직경 50mm, 강관 재시공까지의 굴진장 6m, 단면당 강관 개수는 18개로 시공단면 및 종단면도는 그림 4 및 그림 5와 같다.

현장 계측용 강관에는 전기저항식 변형을 게이지를 24개씩 부착하여, 터널 천단부와 어깨부에 각각 하나씩 설치하였다. 계측용 강관이 설치된 단면은 STA.12K515.2 으로서 수직갱(STA.12K507.1)으로부터 8.1m 떨어진 위치이다. 강관의 설치위치 및 변형을 게이지 부착위치는 그림 6 및 그림 7과 같으며, 변형을 게이지는 강관의 한 단면에서 상·하에 각각 부착하여 휨응력 및 축응력을 계측할 수 있도록 하였다(임종철, 1996).

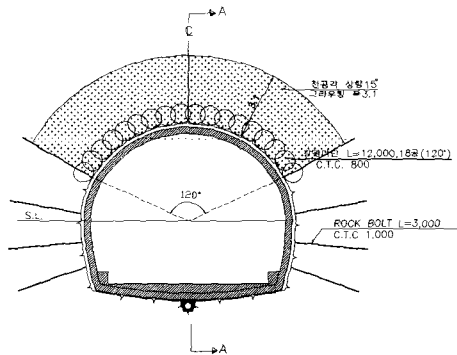


그림 4. 시공 단면도(STA.12K515.2)

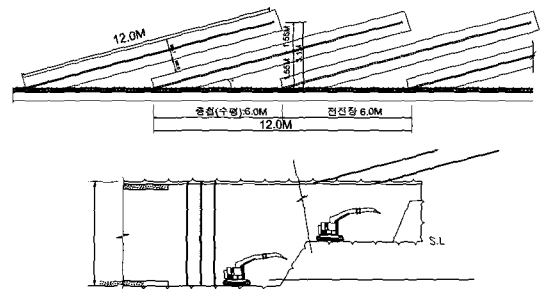


그림 5. 종단면도(A-A)

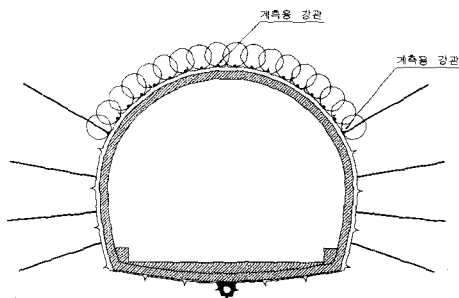


그림 6. 계측용 강관의 설치위치

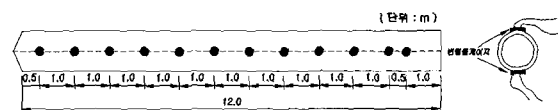


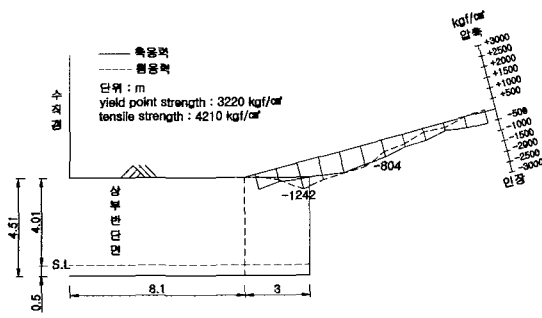
그림 7. 변형을 게이지 부착위치(상·하에 부착)

## 3. 계측 결과 및 하중계 제안

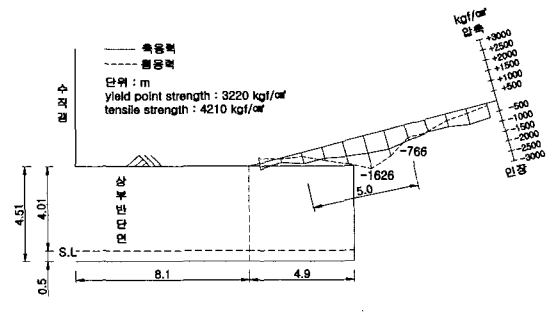
### 3.1 굴착에 따른 휨응력 및 축응력 변화

현장 계측은 막장의 진행에 따른 강관의 응력변화를 계측하는 것을 원칙으로 하였으며, 굴착에 따라 천단부 및 어깨부의 강관에서 발생하는 휨응력과 축응력의 분포양상은 다음 그림 8과 같다.

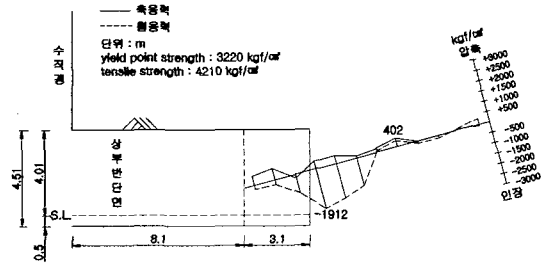
굴착이 진행됨에 따라 천단부와 어깨부 강관의 전 길이에 걸쳐 휨응력 및 축응력이 발생하며 특히, 막장면 전방에서 휨응력이 집중되어 나타났다. 지반의 상태에 따라 약간의 차이는 있겠지만 강관은 휨응력을 주로 받으며 천단부보다 어깨부에서의 값이 3.0m 굴착시 50%정도, 4.9m 굴착시 16% 정도 더 크게 나타나고 있는데, 이는 계측구간의 터널 우측부가 산지이고 지층이 우측에서 좌측으로 경사져 있기 때문에 나타나는 현상으로 판단된다. 터널 하반기 굴착시 막장면을 확인한 결과, 상반부는 하반기에 비해 육안상으로도 풍화의 정도가 훨씬 더 큰 경향을 보이고 있으며, 그림 2에서 나타나듯이 점하중 시험이 가능한 암석 자체의 일축압축강도도  $50 \text{ kgf/cm}^2$  이 채 안 되는 정도로 나타났다. 또한, 막장면 전방에서의 강관의 거동을 살펴보면 굴착에 따른 이원하중의 영향이



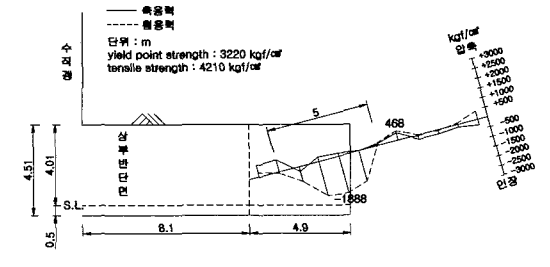
(a) 3.0m 굴착(천단부)



(b) 4.9m 굴착(천단부)



(c) 3.1m 굴착(어깨부)



(d) 4.9m 굴착(어깨부)

그림 8. 강관에서 발생하는 휨응력 및 축응력 분포

강관의 거동에 큰 영향을 미친다고 판단된다.

### 3.2 계측 결과 분석에 의한 하중계 제안

문홍득 등(1998)에 의하면, 비지보 강관의 단면을 해석하기 위해서 강관이 수평으로 시공한 것으로 가정하고, 일단고정보 또는 단순보로 가정하여 휨모멘트와 응력을 계산하여 강관의 강도와 비교함으로써 강관의 타당성 여부를 확인하는 설계법을 제안하고 있다(그림 9). 터널 굴착시의 전 지보공 위치에서 지반 가상지지점까지의 거리를 경간으로 하여 강관응력을 구하도록 하고 있는데, 이 방법은 수평으로 설치되는 기존의 파이프루프 공법과 동일한 방법을 이용하고 있어 실제로 강관이 설치되는 각도를 계산에 적용할 수 없고, 비활동영역

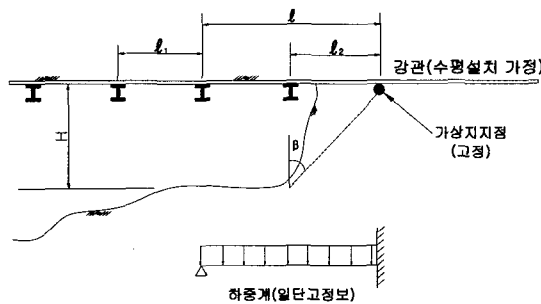


그림 9. 문홍득 등(1998)의 제안 하중계

내에 설치되는 강관의 길이를 설계에서 반영할 수 없는 등 실제와 다른 가정을 하고 있다. 또한, Fizzarotti (2001)는 그림 10과 같이 RPUM이 적용된 터널에 있어서 forepoling과 steel rib와의 관계로부터 강관을 설계하였다. Steel rib와 forepoling 하부의 막장면 지반을 탄성체로 가정하고 지보길이( $l$ )와 하중( $p$ )의 관계로부터 굴착에 따라 forepoling에서 발생하는 모멘트를 구하여 forepoling의 설계에 반영하였다. 본 설계에서는 인접한 부분에 설치된 forepoling의 다중지지보효과(multi-supported beam effect)와 막장의 무지보부분의 길이 및 지반반력계수 등에 따라 forepoling에 작용하는 하중을 감소시켜 적용하였다.

그러나 본 연구에서는 현장 계측 결과로부터 강관에 작용하는 응력의 크기와 분포를 분석하여 강관 설계 시

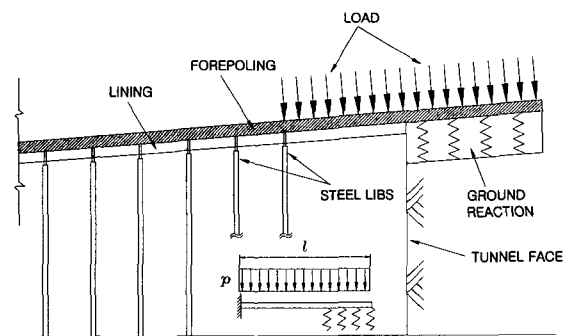


그림 10. Fizzarotti(2001)의 제안 하중계

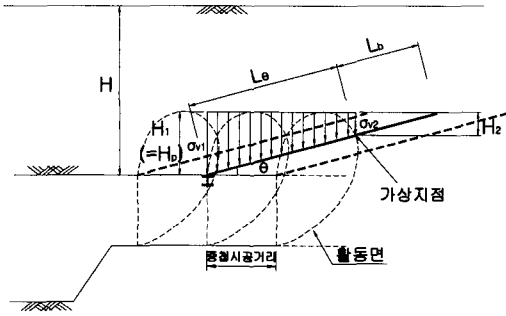


그림 11. 강관에 작용하는 하중

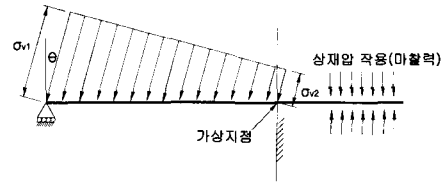


그림 12. 제안 하중계(일단고정 일단롤러의 부정정보)

적용할 수 있는 그림 11 및 그림 12와 같은 하중계를 제안 하였다. 제안된 하중계는 일단고정 일단롤러의 부정정보에 상재토압이 설치각도만큼 기울어져 작용하는 하중계로서  $L_e$  길이에 해당하는 이완하중이 강관에 가해지고,  $L_b$  길이만큼은 상재압과 지반 및 그라우트재의 영향으로 인해 마찰력이 작용하게 된다. 이 하중계에 의해 강관을 설계하면 지반 물성치, 터널 단면 및 토포고에 따른 강관의 설치각도, 강관의 중첩시공거리, 강관의 총길이 및 강관과 강관의 횡방향 설치간격 등을 결정할 수 있게 된다.

후 터널을 굴착함에 따라 이완하중이 강관에 작용하는데, 그 힘은 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 즉, 설치각도 ( $\theta$ ), 강관과 강관 사이의 횡방향 설치간격( $b$ ) 및 이완 하중높이( $H_1 = H_b$ ) 등을 고려하여 그림 13 및 그림 14와 같이 강관 표면에 작용하는 연직하중 및 수평하중으로 나눌 수 있다.

#### 4. 제안된 하중계에 의한 UAM 설계

##### 4.1 설계 개념

제안된 하중계(그림 11)에서 알 수 있듯이 강관 설치

그림 13과 같은 분포로 강관에 하중이 작용할 때, 터널 굴착에 따른 강관에서의 최대휨응력 발생 위치가 다음 강관이 시공되는 위치 즉, 중첩시공거리( $x$ )가 되며 그때의 길이로서 최종  $L_e$ 가 결정된다. 또한, 그림 14에서 강관에 작용하는 수평하중에 대해 상재압 및 지반과 그라우트재와의 마찰력에 의해 저항하는 길이 즉,  $L_b$ 가 결정된다.

또한, 강관에 작용하는 하중은 그림 15와 같이 이완 하중높이( $H_1 = H_b$ )와 강관의 횡방향 설치간격( $b$ )만

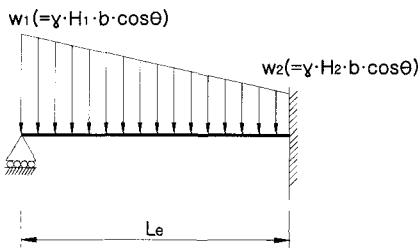


그림 13. 강관에 작용하는 연직하중

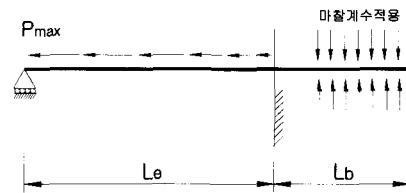


그림 14. 강관에 작용하는 수평하중

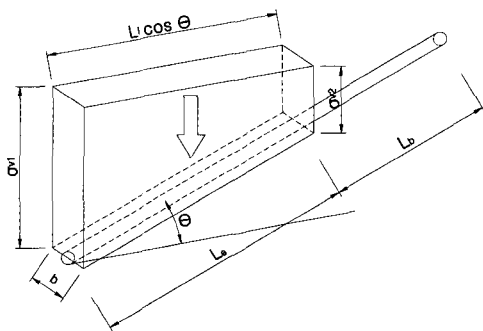


그림 15. 강관에 작용하는 토포하중

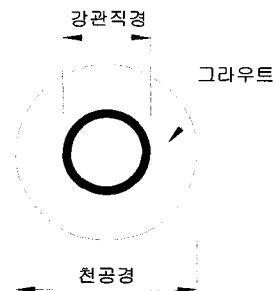


그림 16. 천공경에 의한 설계

크의 토피가 강관에 작용하는 것이며, 그라우트 주입 시 확공폭을 현장에서 확인한 천공경 만큼으로 가정하고, 강관의 단면력은 그림 16과 같이 천공경 내의 강관과 그라우트의 복합강도로 하였다.

강관 상부에 작용하는 이완하중의 크기는 여러 연구자들에 의해 제안되어 있는 터널의 이완하중을 이용하면 되는데, 이들 중 가장 잘 맞는 하중의 크기에 대해서는 향후 시공실적과 연구에 의해 결정되어야 할 사항이다. 전도압식은 토피가 터널단면 크기에 비해 상당히 작고 큰 상재하중이 가해지는 경우에 주로 적용하고 있으며, 터널단면에 비해 토피가 깊은 경우에는 Culmann 식이나 Bierbaumer 식들을 이용하고 있다(김영근, 1999).

본 설계에서 이완고( $H_1 = H_b$ )에 의한 이완하중( $P_v$ )은 국내 설계에서 주로 적용하고 있는 Terzaghi 이론(그림 17)을 적용하였다(박이근, 2003).

$$P_v = \frac{B[\gamma - \frac{2c}{B}]}{2K \tan \phi} (1 - e^{-K \tan \phi \frac{2H}{B}}) \quad (c \neq 0, q = 0 \text{ 일 때}) \quad (1)$$

여기서,  $B = 2 \left[ \frac{b}{2} + h \cdot \tan(45^\circ - \frac{\phi}{2}) \right]$

그림 12의 하중계로써 강관을 설계할 때, 각 파라메타(강관의 설치각도, 강관의 횡방향 설치간격, 지반물성치, 터널단면, 토피고 등)의 변화에 따라 강관에서 발생하는 최대힘응력과 축력이 다음의 조건을 만족하는 범위 내에서 강관의 최종길이가 결정된다.

$$\frac{P_{\max}}{A} \pm \frac{M_{\max}}{I} y < \sigma_y \quad (2)$$

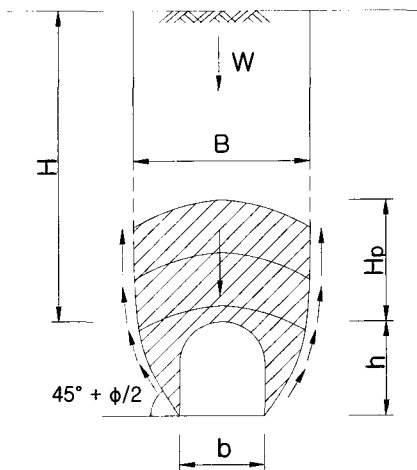


그림 17. Terzaghi 이론

여기서,  $P_{\max}$  = 수평하중의 합(그림 14)

$M_{\max}$  = 연직하중에 대한 최대휨모멘트(그림 13)

$\sigma_y$  = 강관의 항복강도(일반구조용 탄소강관일 때 3600kgf/cm<sup>2</sup>, 가설구조물로 설계)

## 4.2 활동부 강관길이( $L_e$ )의 결정

그림 18에서  $x_1, x_2$ 에 의해  $L_e$ 를 구하면 다음과 같다.

$$L_e = \frac{x_1 + x_2}{\cos \theta} \quad (3)$$

여기서,  $x_1, x_2$ 는 터널높이( $h$ ), 강관설치각도( $\theta$ ) 그리고 막장면 전방으로 가상활동면이 발생하는 각( $45^\circ + \frac{\phi}{2}$ )에 의해 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$x_1 = \frac{h(\text{터널높이})}{\tan(45^\circ + \frac{\phi}{2})}$$

$$x_2 = \left\{ \frac{x_1 \sin \theta}{\sin((45^\circ + \frac{\phi}{2}) - \theta)} \right\} \cos(45^\circ + \frac{\phi}{2})$$

굴착거리  $x_e$ 의 변화에 따른 최종  $L_e$ 는 다음과 같다.

$$L_e = \frac{x_1 + x_2 + x_e}{\cos \theta} = \frac{\left\{ \frac{h}{\tan(45^\circ + \frac{\phi}{2})} \right\} + \left\{ \frac{\left( \frac{h}{\tan(45^\circ + \frac{\phi}{2})} \right) \sin \theta}{\sin((45^\circ + \frac{\phi}{2}) - \theta)} \right\} \cos(45^\circ + \frac{\phi}{2}) + x_e}{\cos \theta} \quad (4)$$

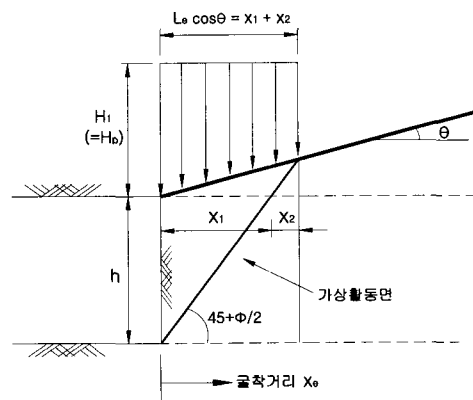


그림 18.  $L_e$ 의 결정

### 4.3 정착부 강관길이( $L_b$ )의 결정

그림 14에서와 같이  $P_{max}$ 에 저항하는 상재압 및 지반과 그라우트재와의 마찰력을 고려하여 다음과 같이  $L_b$ 를 구한다.

$$P_{max} \times FS = L_b \cdot \pi \cdot D \cdot \tau \quad (5)$$

여기서,  $\tau = c + \mu\sigma$ 이며  $\sigma$ 는 그림 19에서  $H_3$ 에 해당하는 연직응력이고,  $\mu = \tan\left(\frac{1}{3} \sim \frac{2}{3}\right)\phi$ ,  $FS = 1.5 \sim 2.0$ (가설일 때)이다.

$P_{max}$ 를 구하기 위하여 그림 12의 하중계에서 수평방향 하중을 그림 20과 같이 다시 나타낼 수 있다. 여기서, 횡방향 설치간격( $b$ )과 강관 설치각도( $\theta$ ) 등을 고려하면  $P_{max}$ 는 다음과 같다.

$$P_{max} = \gamma \cdot \left(\frac{H_1 + H_2}{2}\right) \cdot b \cdot \sin\theta \cdot L_e \quad (6)$$

여기서,  $H_1$  : 이완고,  $H_2 = H_1 - L_e \sin\theta$   
 그러므로,  $L_b$ 는 다음과 같다.

$$\therefore L_b = \frac{P_{max} \cdot FS}{\{c + (H - L_e \sin\theta)\gamma \cdot \mu\}\pi D}$$

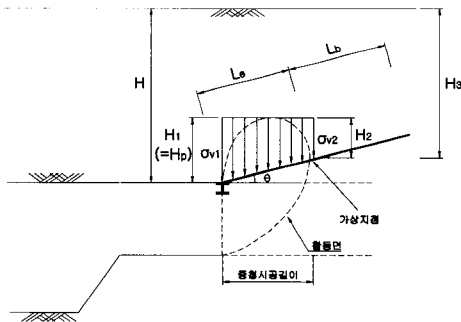


그림 19.  $L_b$ 의 결정

$$= \frac{\gamma \cdot \left(H_1 - \frac{L_e \sin\theta}{2}\right) \cdot b \cdot \sin\theta \cdot L_e \cdot FS}{\{c + (H - L_e \sin\theta)\gamma \cdot \mu\}\pi D} \quad (7)$$

### 4.4 중첩시공거리( $x$ )의 결정

강관시공 후 굴착거리( $x_e$ )가 증가함에 따라 이완하중에 의해 강관에서 발생하는 조합응력(휨응력+축응력)이 식 (2)의 조건을 만족하는 범위 내에서 다음 강관이 시공되는 거리(중첩시공거리)를 결정할 수 있으며, 식 (4)에 대입하여 최종적인  $L_e$ 를 결정할 수 있다.

굴착에 따른 이완하중에 의해 강관( $L_e$ )에서 발생하는 최대휨응력( $M_{max}$ )의 발생위치가 다음 강관을 설치하는 위치 즉, 중첩시공거리( $x$ )이며 다음과 같은 과정으로 구한다.

그림 13과 같이 강관에 작용하는 연직하중을 계산의 편의를 위해 그림 21 및 그림 22와 같이 나눌 수 있다.

여기서,  $w_2 = \gamma b H_2 \cos\theta = \gamma b \cos\theta (H_1 - L_e \sin\theta)$

$$w_3 = \gamma b (H_1 - H_2) \cos\theta = \gamma b L_e \sin\theta \cos\theta$$

위 그림 21 및 그림 22로부터 다음과 같이 강관에서 발생하는  $M_x$ 를 구한다.

$$M_x = M_{x①} + M_{x②} \quad (8)$$

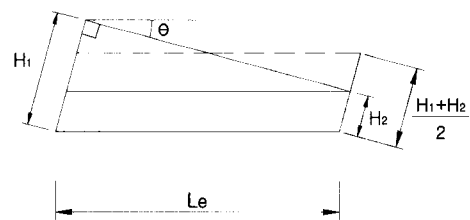


그림 20. 수평방향 하중

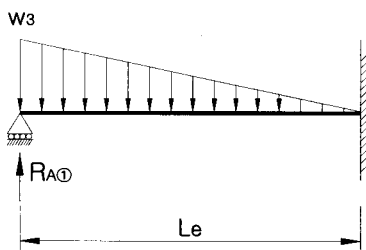


그림 21.  $M_{x①}$ 을 구하기 위한 하중계

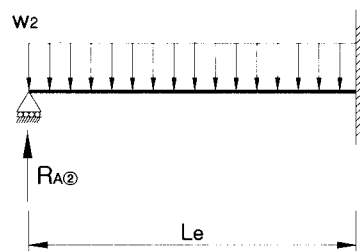


그림 22.  $M_{x②}$ 를 구하기 위한 하중계

①  $M_{x①}$ 을 구하는 과정

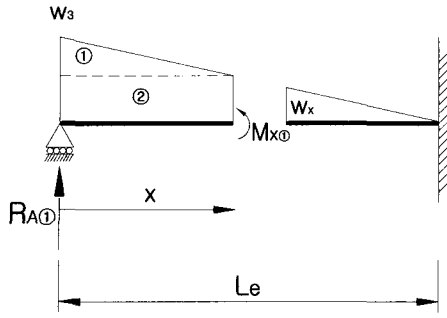


그림 23. 삼각형 하중에서의  $M_{x①}$

$$L_e - x : L_e = w_x : w_3$$

$$\therefore w_x = \frac{(L_e - x)(w_3)}{L_e}$$

그림 23에서 ①, ②의 하중은 다음과 같다.

①의 하중:  $\frac{1}{2} \cdot (w_3 - w_x) \cdot x$ , ②의 하중:  $x \cdot w_x$

그러므로,

$$\therefore M_{x①} = (R_{A①} \cdot x) - \left(\frac{1}{2}\right)(w_3 - w_x)(x)\left(\frac{2}{3}x\right) - (x)(w_x)\left(\frac{x}{2}\right)$$

여기서  $R_{A①} = \frac{11}{40} \cdot w_3 \cdot L_e$ ,  $w_x = \frac{(L_e - x)(w_3)}{L_e}$ 를 대입하여 전개하면,

$$\therefore M_{x①} = x^3 \left( \frac{w_3}{2L_e} - \frac{w_3}{3L_e} \right) - x^2 \left( \frac{w_3}{2} \right) + x \left( \frac{11w_3 L_e}{40} \right) \quad (9)$$

②  $M_{x②}$ 를 구하는 과정

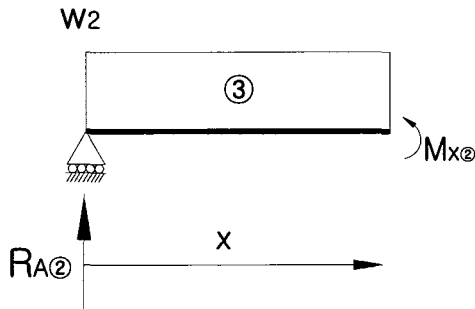


그림 24. 사각형 하중에서의  $M_{x②}$

그림 24에서 ③의 하중은  $w_2 \cdot x$ 이다. 그러므로,

$$\therefore M_{x②} = (R_{A②} \cdot x) - \left( w_2 \cdot x \cdot \frac{x}{2} \right)$$

여기서  $R_{A②} = \frac{3}{8} \cdot w_2 \cdot L_e$ 를 대입하여 전개하면,

$$\therefore M_{x②} = -x^2 \left( \frac{w_2}{2} \right) + x \left( \frac{3w_2 L_e}{8} \right) \quad (10)$$

식 (9) 및 식 (10)를 식 (8)에 대입하여  $M_x$ 를 구하면 다음과 같다.

$$\therefore M_x = x^3 \left( \frac{w_3}{6L_e} \right) - x^2 \left( \frac{w_2 + w_3}{2} \right) + x \left( \frac{11w_3 \cdot L_e + 15w_2 \cdot L_e}{40} \right) \quad (11)$$

$M_x$ 를 미분하면,

$$\therefore M'_x = x^2 \left( \frac{w_3}{2L_e} \right) - x(w_2 + w_3) + \left( \frac{11w_3 \cdot L_e + 15w_2 \cdot L_e}{40} \right) \quad (12)$$

$M'_x = 0$  일 때의  $x$  값이  $M_{max}$ 가 발생하는 거리이다. 식 (12)로부터  $x$ 를 구하면,

$$\therefore x = \frac{(w_2 + w_3) \pm \sqrt{(w_2 + w_3)^2 - 2 \left( \frac{w_3}{L_e} \right) \left( \frac{11w_3 L_e + 15w_2 \cdot L_e}{40} \right)}}{\left( \frac{w_3}{L_e} \right)} \quad (13)$$

위의 식 (13)에서 구한  $x$ 는 강관 시공 후 다음 강관이 시공되는 거리 즉, 중첩시공거리 ( $x$ )이며, 식 (12)에 대입하면  $M_{max}$ 가 구해진다.  $P_{max}$ 와  $M_{max}$  등으로부터 식 (2)의 조건을 만족하는 범위 내에서 최종적인 강관길이 ( $L_e, L_b$ )와 중첩시공거리 ( $x$ )를 구하며, 본 설계의 전체적 흐름은 그림 25와 같다.

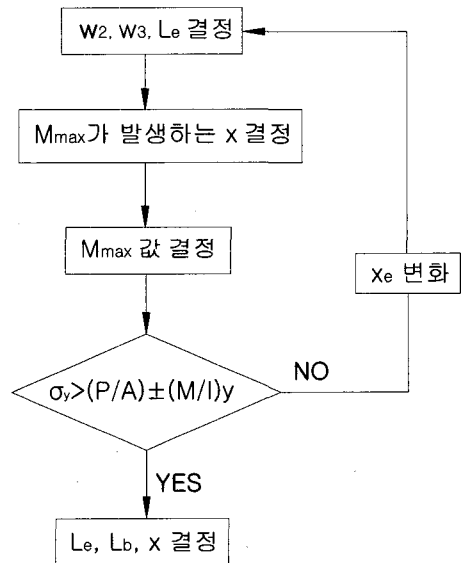


그림 25. 설계 흐름도



#### 4.5 설계법 적용 시 고려사항

지금까지의 과정과 같이 강관길이( $L_e$ ,  $L_b$ ) 및 중첩시공거리( $x$ )를 구하는 과정에서 이완고( $H_1 = H_p$ )와  $L_e$ 를 구하는 데 있어서 그림 26 및 그림 27과 같이 현장의 시공상황을 감안하여 수정된 값을 사용하여야 한다. 즉, 이완고의 경우 강관 중첩시공의 영향을 고려하

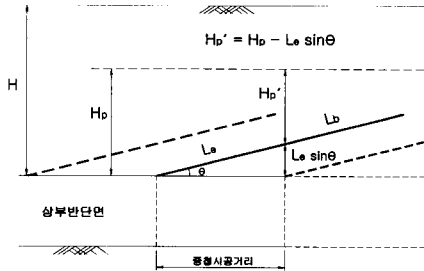


그림 26. 수정  $H_p$  ( $H_p'$ )

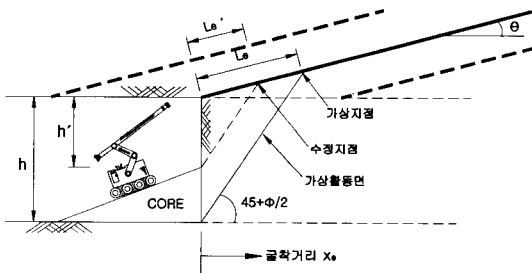


그림 27. 수정  $L_e$  ( $L_e'$ )

여 적용하여야 하고(그림 26),  $L_e$ 의 경우는 중첩시공의 영향과 광관시공 시 남겨지는 막장면 코어의 영향을 고려하여 가상지점이 변경(그림 27)되어야 한다. 이러한 영향들을 고려할 때 지반의 물성치, 터널 단면, 토피고 등에 따라 다르겠지만 이완고의 경우 수정이완고  $H_p'$ 은 무보강시의 이완고보다  $L_e \sin \theta$ 만큼 감소시키고,  $L_e$ 의 경우는 일반적으로  $(0.5 \sim 0.6) L_e$ 만큼 적용시켜  $L_e'$ 을 사용하는 것이 바람직하다고 판단된다.

#### 4.6 제안 UAM 설계법에 대한 고찰

제안된 하중계로 설계한 UAM에 대해 지반강도정수( $c, \phi$ )를 제외한 다른 조건은 309공구 현장과 같게 하여 굴착거리(중첩시공거리) 및 강관의 총길이를 구한 결과 그림 28과 같았다. 또한, 그림 29와 같이 309공구 현장과 비슷한 조건으로 UAM을 설계하여 비교한 결과 강관길이 및 중첩시공거리에 있어서 실제 시공과 유사한 결과가 나타나 본 제안 설계법으로 향후 UAM을 설계할 수 있을 것으로 판단된다.

#### 5. 결론

본 연구는 현장계측을 통해 강관의 거동을 분석하고, 이를 바탕으로 실제 현장에서 적용될 수 있는 UAM의

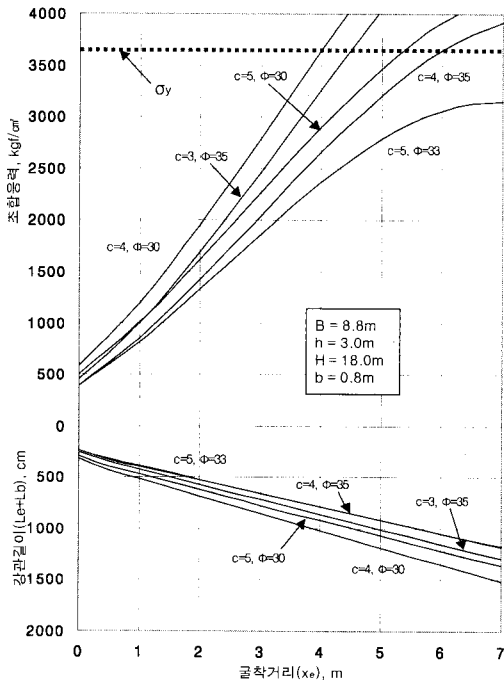
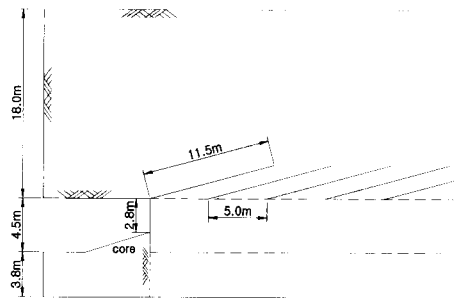
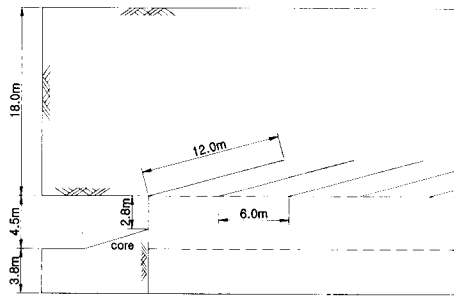


그림 28. 지반물성치에 따른 설계



(a) 제안 UAM 설계법에 의한 결과  
( $c = 2 \text{ t/cm}^2, \phi = 30^\circ$ )



(b) 309공구 현장의 시공사례

그림 29. 설계결과와 현장사례의 비교

설계지침을 제안하였으며, 결론은 다음과 같다.

- (1) 현장계측을 통해 강관의 거동을 분석한 결과, 터널 굴착에 따라 강관에 작용하는 하중의 분포와 크기로부터 그림 9와 같은 하중계를 제안하였다. 제안된 하중계는 일단고정 일단롤러의 부정정보에 이완하중 높이만큼의 상재토압이 강관설치각도만큼 기울어져 작용하는 하중계이다(그림 11).
- (2) 제안된 하중계로부터 UAM 적용 시 강관 길이(식 (4)와 식 (7)) 및 강관의 중첩시공거리(식 (13))를 설계할 수 있는 식을 제안하였다. 설계는 식 (2)의 조건을 만족하는 범위 내에서 결정되는 것이며, 지반의 물성치, 터널의 단면, 토피고, 강관의 횡방향 설치간격, 강관직경 등을 모두 고려하여 설계할 수 있다.
- (3) 강관길이 및 중첩시공거리를 구하는 데 있어, 강관의 중첩시공과 강관 시공 시 남겨지는 막장면 코아 및 터널 굴착과 함께 시공되는 강지보 등에 의해 강관에 작용하는 하중의 감소효과를 고려하여야 한다(그림 26 및 그림 27).
- (4) 본 연구에 의해 제안된 UAM 설계법에 의한 결과와 현장 시공사례를 비교한 결과 거의 유사하였다(그림 29).
- (5) 본 연구에서 제안하는 설계법은 종래의 제안 설계법

에서 고려하고 있지 않은 강관의 설치각도를 고려하고 있어 실제에 더 가까운 설계법이라 볼 수 있다.

## 감사의 글

본 연구는 2002년도 부산지하철 3호선 309공구 건설공사 과정에서 부산교통공단과 현대산업개발(주)의 적극적인 지원에 힘입어 이루어진 것으로서 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참고 문헌

1. 문홍득, 배규진, 마상준, 조만섭 (1998), 국내 터널설계 기술력 향상을 위한 신기술 연구(I), 한국건설기술연구원.
2. 김영근 (1999), 터널에 작용하는 지압의 추정방법에 관한 고찰, 터널과 지하공간, 한국암반공학회, Vol.9, pp.89-98.
3. 임종철 (1996), 변형율게이지의 원리와 응용, 부산대학교 대학원 토목공학과 강의교재.
4. 임종철, 박이근, 김대경 (2003), 부산지하철 3호선 309공구 터널 구간의 강관다단공법의 효과적인 적용을 위한 계측 및 분석 보고서, 부산대학교 생산기술연구소.
5. 박이근 (2003), 얇은 토사터널 굴착시의 주변지반거동 특성과 마이크로 파일의 침하억제효과에 관한 연구, 부산대학교 박사학위 논문.
6. Fizzarotti E.M. (2001), Symposium on Reinforced Protection Umbrella Method(RPUM) In Tunnelling, September 21, Seoul, Korea.

(접수일자 2003. 10. 16, 심사완료일 2004. 4. 14)