

# 철근보강형강관이 적용된 터널의 안정성효과에 대한 연구

김상환<sup>1\*</sup>

## The effects of stability of the tunnel reinforced by rebar steel pipe

Sang-Hwan Kim

**Abstract** This paper presents the effects of the tunnel stability using rebar steel pipe which is the steel pipe reinforced by rebar. In order to carry out this research, not only the theoretical and experimental study for bending stiffness of normal steel pipes and rebar steel pipes but also numerical analysis of tunnel stability are performed. It is clearly found from the results that 65% of bending stiffness of the rebar steel pipe is larger than that of the normal steel pipe. The results obtained from the numerical analysis of tunnel stability show that about 10% of tunnel stability is increased in case of the rebar steel pipe. The rebar steel pipe, therefore, may be very useful to develop the tunnel stability economically.

**Keywords:** Rebar steel pipe, tunnel stability, bending stiffness

**요 지** 본 논문은 철근을 보강한 일반강관을 이용하여 지반을 보강할 경우 터널안정성의 효과에 대하여 연구한 것이다. 본 연구를 위하여 철근 보강형 강관과 일반강관의 휨강성을 이론과 실험을 통하여 비교 분석하였으며, 실질적으로 터널 안정성에 미치는 보강효과를 분석하기 위하여 수치해석을 실시하였다. 그 결과 일반강관에 비해 철근 보강형 강관의 경우 휨강성은 65% 증가되며, 터널 안정성 보강효과는 약 10% 내외 증가되는 것으로 나타났다. 따라서 철근 보강형 강관을 이용한 터널 보강공법의 경우 터널의 안정성을 경제적으로 확보할 수 있을 것으로 기대된다.

**주요어:** 철근보강형강관, 터널안정성, 휨강성

### 1. 서 론

도시의 광역화와 인구 집중현상으로 인해 교통량 증가 및 차량의 대형화 등 지하구조물의 건설 수요가 증가 되는 추세이다. 이러한 지하구조물들을 주변 환경이 연약한 토사나 암반지반에 건설할 경우 안전성을 확보하는 문제는 매우 중요한 항목이라 할 수 있으며 안정성을 확보하기 위해서 다양한 지반 개량 및 보강 공법들이 적용되고 있다. 터널 보조 공법 중 국내에 널리 적용되고 있는 강관다단그라우팅공법은 1970년대 중반 이탈리아에서 개발되어 실제 국내 터널시공에 많이 활용되고 있다. 강관다단그라우팅공법은 다단으로 주입재의 침투효과에 의해 차수 및 주변지반의 보강과 함께 지반의 이완 및 지압의 확대 등을 방지하므로 사질토, 점성토, 풍화토, 파쇄대층 및 풍화암 등 다양한 지반에 적용되고 있다. 특히 지하철 터널구간 및 철도횡단 등 시공이 어려운 지하구조물에 대해서도 안정성과 차수효과가

큰 것으로 알려져 있다(황운섭, 2008). 강관다단그라우팅공법에 대한 연구로는 강관다단그라우팅공법을 적용한 도심지 NATM 터널에서의 강관 거동 분석 및 설계 기법 제안(김대경 등, 2003)과 터널용 강관다단공법의 설계기법(이준석 등, 2000), 등을 들 수 있으며 특히 Kotake (1994)는 고압 그라우팅을 이용하여 터널 막장 상단에 콘크리트 지붕을 형성하는 경우에 대해 셀 요소를 적용한 후 수치적으로 해석하였다. 또한 Pelizza and Peila (1993) 등은 터널의 시공 중 터널 보강방안으로 지질조건과 막장주변의 암질상태로부터 강관의 간격, 길이 및 직경 등을 시공자의 경험적 판단에 의거하여 적용하였다.

이러한 강관다단그라우팅공법을 이용한 국내 사례로는 1990년대 초 서울 지하철 건설공사 일부구간, 대구지하철, 부산 전력구 등 여러 구간에서 강관다단그라우팅공법이 적용 되었으며 이외에도 터널막장 보강을 위한 합리적인 선진보강공법 설계기법(장석부 등, 2002), 도심지구간 저토퍼 토사터널 보강사례(양재원 등, 2010)와, 극 저토퍼 구간의 NATM터널 설계사례(문상호 등, 2008) 등 강관다단그라우팅공법에 대한 설계사례연구가 있다. 국외의 경우는 Flumelatte, Merone, Delle

<sup>1</sup>정회원, 호서대학교 교수

\*교신저자: 김상환 (E-mail: kimsh@hoseo.edu)

Tanze, La Perosa 등 여러 터널에 적용된 바 있다.

그러나 강관다단그라우팅공법에 대한 연구들은 강관 및 주변 암반의 거동분석에 국한되어 있었으며 강관자체에 대한 개발 및 연구는 미흡한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 강관다단그라우팅공법에 사용되는 일반강관과 철근 보강형 강관의 구조적 휨강성을 비교하기 위한 이론적검증과 휨강도 실내시험, 3차원수치해석을 실시하여 강관보강(철근)다단그라우팅에 대한 보강효과를 검증하였다.

## 2. 철근 보강형 강관의 휨강성에 대한 이론적 분석

철근 보강형 강관의 휨강성을 검토하기 위하여 일반 강관과 철근 보강형 강관에 대한 2차모멘트 값을 이론적으로 비교 검토하였다.

철근 보강형 강관의 제원은 그림 1과 같으며 철근 보강형 강관의 2차 모멘트(I)는 다음과 같이 계산될 수 있다. 철근 보강형 강관의 2차 모멘트( $I_T$ )는 식 (1)과 같이 강관( $I_{SP}$ )의 2차 모멘트와 철근( $I_{RB}$ )의 2차 모멘트 값을 합하여 구한다.

$$I_T = I_{SP} + \Sigma I_{RB} \quad (1)$$

이때 강관( $I_{SP}$ )의 2차 모멘트 값은 철근 보강에 따른 강관( $I_{SP}$ )의 무게 중심이동( $x$ )을 고려하여 식 (2)과 같이 나타낼 수 있다.

$$I_{SP} = I_{SP_o} + A_{SP} \times x^2 \quad (2)$$

여기서,  $I_{SP_o}$  =무게중심이 중앙일 때 강관의 2차 모멘트,  
 $x = f(\theta)$ ,  $A_{sp}$  = 강관의 면적

또한 철근의 2차 모멘트 값은 식 (3)과 같이 철근보강에 따른 무게중심( $h_i^2$ )을 고려된 강관의 2차 모멘트( $I_{SP}$ )의 합( $\Sigma I_{RB(i)}$ )으로 계산되어진다.

$$\begin{aligned} \Sigma I_{RB} &= \Sigma I_{RB(i)} = I_{RB1} + I_{RB2} + I_{RB3} \\ I_{RB_i} &= I_{(RB)_o} + A_{RB_i} \times h_i^2 \end{aligned} \quad (3)$$

여기서,  $\Sigma I_{RB(i)}$  = 철근의 2차 모멘트 합,  
 $I_{RB1} = I_{RB2} = I_{RB3}$  = 각 철근의 2차 모멘트,  
 $I_{(RB)_o}$  = 무게중심이 중앙일 때 철근들의 2차 모멘트값,  
 $A_{RB_i}$  = 철근의 면적 합,  
 $h_i^2$  = 철근의 무게 중심,  $h_i = f(\theta)$

위에 이론적 해법에 따라 보강된 강관에 대하여 회전하여 설치될 경우에 따른 2차 모멘트는 그림 2와 같다.

그림 2는 강관과 철근의 2차 모멘트 계산결과이다. 철근 보강형 강관이 회전함에 따라 강관에 부착된 철근의 2차 모멘트 값이 변화하는 것을 알 수 있다. 하지만 3개의 철근과 강관의 2차 모멘트의 합( $I_T$ )은  $471,125.63 \text{ mm}^4$

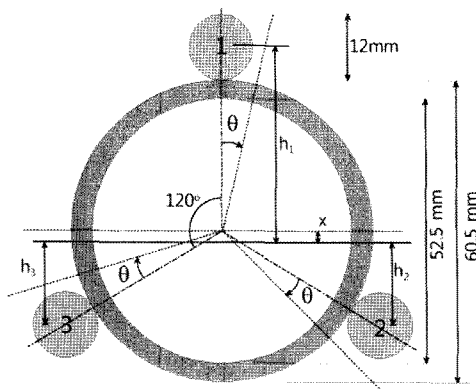


그림 1. 철근 보강형 강관의 제원

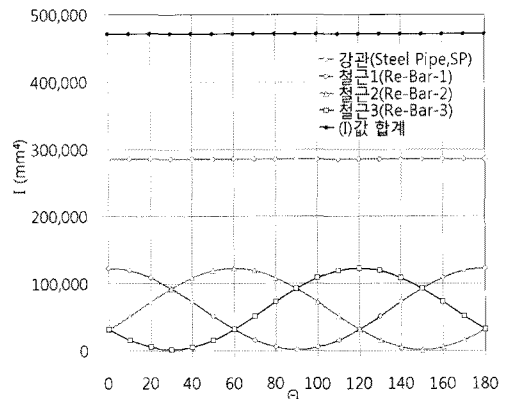


그림 2. 철근 보강형 강관의 2차 모멘트

으로 일정하게 나타났다. 이는 강관에 부착된 철근들이 120° 간격으로 부착되어 있어 각각의 철근들의 2차 모멘트값은 변화하나 철근들의 합은 일정한 것을 알 수 있다. 강관의 2차 모멘트 값( $I_{sp}$ ) 역시 284,732.16 mm<sup>4</sup>으로 일정하게 나타난다. 일반강관( $I_{sp}$ )과 철근 보강형 강관의 2차 모멘트 값을 비교하였을때 철근 보강형 강관의 2차 모멘트 값이 약 1.65배 증가된 것을 알 수 있다.

### 3. 철근 보강형 강관에 대한 강도 실내실험

#### 3.1 개요

실험에 사용된 철근 보강형 강관은 강관의 외주면에 보강용 이형철근을 길이방향으로 복수개 고정시켜 철근 보강형 강관의 휨강도를 측정하였다. 일반강관과 철근 보강형 강관의 휨강도 비교를 위하여 압축실험장비를 사용하여 하중을 재하 하였으며 철근 보강용 강관의 이형철근의 배치에 따른 보강효과를 검토하기 위하여 정삼각형 방향과 역삼각형 방향으로 설치한 후 휨강도 실험을 실시하여 비교하였다.

#### 3.2 실험장비 및 시험체 제작

그림 3의 (c)는 실험에 사용한 철근보강형 강관의 상

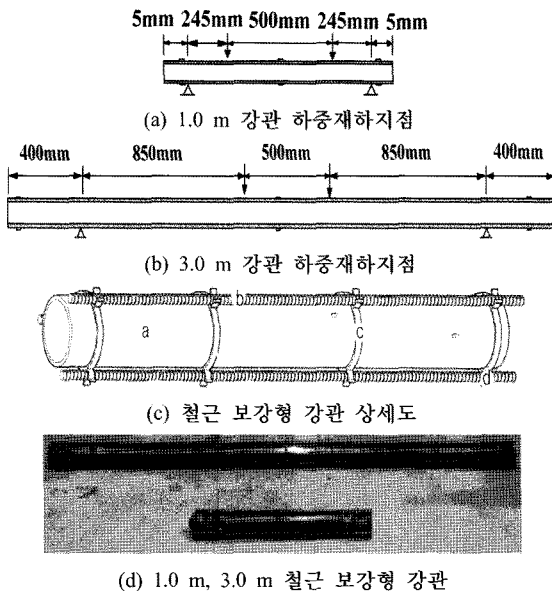


그림 3. 철근 보강형 강관

세도로 강관은 크게 강관(a), 지름 13 mm의 보강용 이형철근(b), 보강용 이형철근 홀더(c), 안내돌조(d)로 나눌 수 있다. 길이 1.0 m 보강형 강관의 구성은 보강 이형철근홀더 3개, 직경 13.0 mm 이형철근 3개, 강관에 이형철근을 부착하기 위한 용접 부위 9개로 구성되어 있다. 또한 길이 3.0 m 보강형 강관의 구성 역시 이형철근홀더 3개가 부착되어 있고 직경 13.0 mm 이형철근 3개와 강관에 이형철근을 부착하기 위한 용접부위가 21개 부위로 되어있다.

그림 4는 휨강도 실험을 위한 압축실험장비이며 하중 제어방식과 변위제어방식을 통해 압축시험을 할 수 있다. 본 실험은 변위제어방식을 선택하여 4-point 휨강도 실험을 실시하였다.

#### 3.3 실험 방법

실험방법은 1.0 m와 3.0 m의 철근 보강형 강관에 이형철근을 정삼각형 방향과 역삼각형 방향으로 배설하여 하중에 따른 변위를 측정하였다.

길이 1.0 m 철근 보강형 강관과 길이 3.0 m 철근 보강형 강관을 이용하여 그림 5의 (a), (b)와 같이 이형철근의 방향을 정삼각형 방향과 역삼각형 방향으로 나누어 압축실험장비의 액츄레이터 중앙으로 설치한 하중을 재하 하였다. 변위제어속도 7.2 mm/min을 입력 후 액츄레

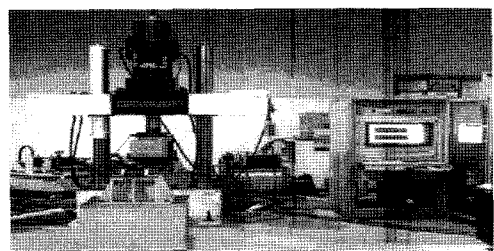


그림 4. 압축실험장비의 전경

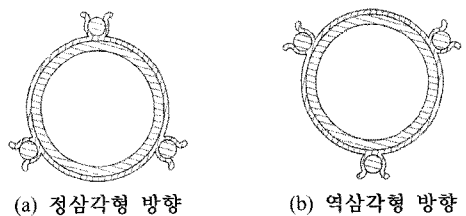


그림 5. 철근 보강형 강관의 실험 방향

이터를 철근 보강형 강관과 완전히 접촉시키고 변위제어방식을 선택하였으며 실험 전경은 그림 6과 같이 압축 실험장치에 철근 보강형 강관을 설치한 후 압력을 가하

여 데이터를 측정하였다.

### 3.4 실험 결과 분석

철근 보강형 강관에 설치된 이형철근의 방향을 정삼각형 방향과 역삼각형 방향으로 설치하여 그림 7과 같이 하중에 따른 변위량을 측정하였다.

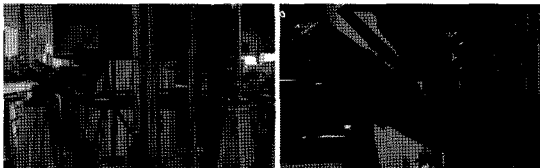


(a) 1.0 m 철근 보강형 강관

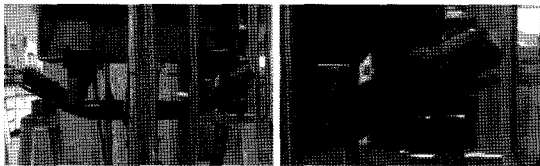


(b) 3.0 m 철근 보강형 강관

그림 6. 실험 전제전경



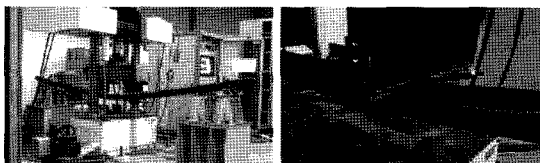
(a) 1.0 m 이형철근 정삼각형 방향 강관



(b) 1.0 m 이형철근 역삼각형 방향 강관



(c) 3.0 m 이형철근 정삼각형 방향 강관



(d) 3.0 m 이형철근 정삼각형 방향 강관

그림 7. 실험 후 전경

#### 3.4.1 1 m 철근 보강형 강관의 휨강도 분석

1.0 m 철근 보강형 강관의 최대 항복하중과 변위측정 결과는 아래의 그림 8과 같다.

정삼각형 방향의 최대 항복하중은 68.6 kN으로 측정되었으며 변위는 26.1 mm로 측정되었다. 또한 역삼각형 방향에서는 최대 항복하중과 최대변위는 70.9 kN와 23.21 mm로 측정되었다.

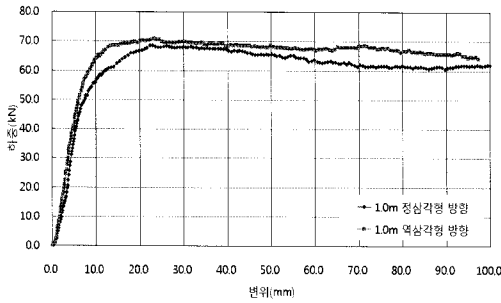
이형철근을 정삼각형 방향과 역삼각형 방향으로 설치한 후 최대 항복하중과 최대 변위를 비교한 결과 최대 항복하중과 최대 변위의 차는 2.3 kN과 2.89 mm로 미미한 것으로 나타났다. 이는 이론해에서 설명한 것과 같이 보강형 철근의 강관과 강관에 부착된 철근 3개의 2차 모멘트의 합이 120° 간격으로 회전하여 일정하므로 설치방향에 큰 영향이 없는 것으로 판단된다.

#### 3.4.2 3 m 철근 보강형 강관의 휨강도 분석

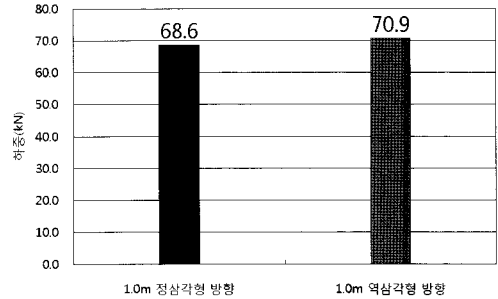
3.0 m 철근 보강형 강관의 최대 항복하중과 변위측정 결과는 아래의 그림 9와 같다.

그림 9는 3.0 m 철근 보강형 강관의 이형철근을 정삼각형 방향으로 설치한 강관과 3.0 m 철근 보강형 강관의 이형철근을 역삼각형 방향으로 설치한 강관의 최대 항복하중과 변위량을 비교한 결과 그래프이다. 정삼각형 방향의 최대 항복하중은 11.11 kN으로 측정되었으며 변위는 91.35 mm로 측정되었다. 또한 역삼각형 방향의 최대 항복하중과 최대변위는 12.11 kN과 74.5 mm로 측정되었다.

3.0 m 철근 보강형 강관 역시 1.0 m 철근 보강형 강관과 마찬가지로 정삼각형 방향과 역삼각형 방향으로 설치한 후 측정된 최대 항복하중과 최대 변위 차는 1.0 kN과 16.85 mm로 큰 차이는 보이지 않는다. 철근 보강형 강관의 길이에 따라라도 강관에 부착된 철근 3개의 2차 모멘트 합이 120° 간격으로 회전하여 일정하므로 설치방향에 큰 영향이 없는 것으로 판단된다.

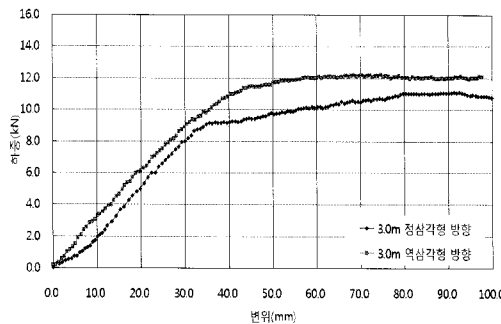


(a) 1.0 m 휨강도 실험 비교

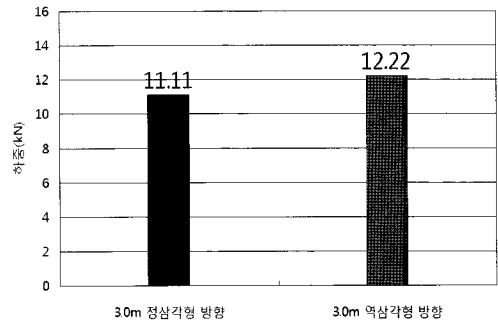


(b) 최대 항복응력

그림 8. 1.0 m 정삼각형 방향 역삼각형 방향 강관의 휨강도 비교



(a) 3.0 m 휨강도 실험 비교



(b) 최대 항복응력

그림 9. 3.0 m 정삼각형 방향 역삼각형 방향 강관의 휨강도 비교

#### 4. 실험결과에 대한 이론적 비교분석

##### 4.1 이론해를 통한 철근 보강형 강관과 일반강관 비교분석

강관다단그라우팅공법에 사용되는 일반강관과 이형철근 HD13, 3열을 부착한 철근 보강형강관과의 구조적인 휨강성을 비교하기 위하여 이론적 검토를 실시하였다.

그림 10에서 A와 B지점의 반력은 식 (4)와 같이  $R_A$ 와  $R_B$ 로 나타낼 수 있으며 공액보의 하중  $R_1$ 와  $R_2$ 는 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$R_A = R_B = P \quad (4)$$

$$R_1 = R_2 = \frac{Pl(L-l)}{2} \quad (5)$$

또한 A와 B지점은 식 (6)과 같이 처짐각  $\theta_A$ 와  $\theta_B$ 로

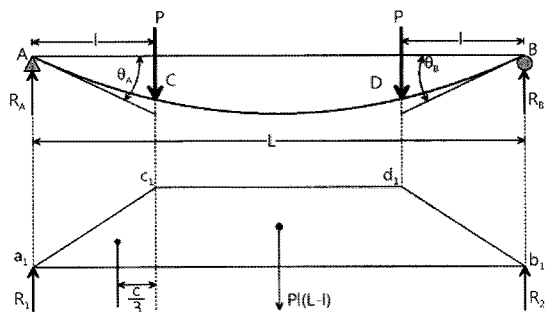


그림 10. 처짐의 이론해

표시할 수 있으며 처짐량을 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다. 그리고 보의 중앙지점의 최대 처짐량( $y_{max}$ )은 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\theta_A = -\theta_B = \frac{Pl(L-l)}{2EI} \quad (6)$$

$$y_{x=l} = \frac{Pl^2}{6EI}(3L-4l) \quad (7)$$

$$y_{\max} = y_{x=\frac{L}{2}} = \frac{Pl}{24EI}(3L^2-4l^2) \quad (8)$$

여기서,  $P$  = 하중,  $L$  = 보의 길이,  
 $l$  = 지점에서 하중까지의 길이  
 $E$  = 탄성계수,  $I$  = 2차 모멘트

구조적 휨 강성을 파악하기 위해 이론적 해석방법으로 강관다단그라우팅공법에 일반적으로 사용하는 강관과 철근 보강형 강관을 각각 길이 1.0 m, 3.0 m의 처짐량을 계산하여 일반 강관과 철근 보강형 강관을 하중 변위 그래프를 통해 비교·분석해 보았다.

1.0 m 강관에 이론해에 의한 분석결과 그림 11과 같이 동일 하중인 65.0 kN을 재하 하였을 경우 일반강관과 철근 보강형 강관의 변위량은 13.45 mm와 8.13 mm

로 계산되었으며 일반강관에 비해 철근 보강형 강관의 변위가 약 40% 감소되는 것으로 나타났다.

다음으로 3.0 m 강관에 이론해에 의한 분석결과 그림 12와 같이 동일 하중인 10.0 kN을 재하 하였을 경우 일반강관과 철근 보강형 강관의 변위량은 62.95 mm와 38.04 mm로 계산되었으며 일반강관에 비해 철근 보강형 강관의 변위가 약 40% 감소되는 것으로 나타났다. 이론해에 의한 변위산출결과와 일반강관에 비해 철근 보강형 강관의 변위가 40% 감소하는 것으로 나타났다.

#### 4.2 이론해와 실험결과 비교분석

이론해에 의한 하중 변위량과 휨강도 실험결과와의 비교·분석결과는 다음 그림 13과 같이 나타났다.

그림 13은 철근 보강형 강관의 구조적 휨강성을 파악하기 위하여 이론해와 휨강도 실험결과를 비교한 결과 이론해에 의한 철근 보강형 강관의 발생변위와 철근 보강형 강관의 실내시험결과가 유사한 것으로 나타났으며 이는 실험결과와의 신뢰성 확보는 물론 일반강관과 비교

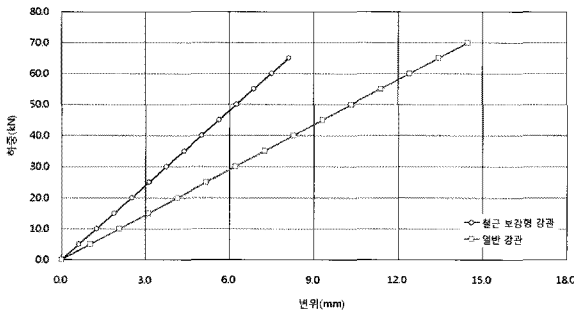


그림 11. 1.0 m 일반강관과 철근 보강형 강관의 변위 분석

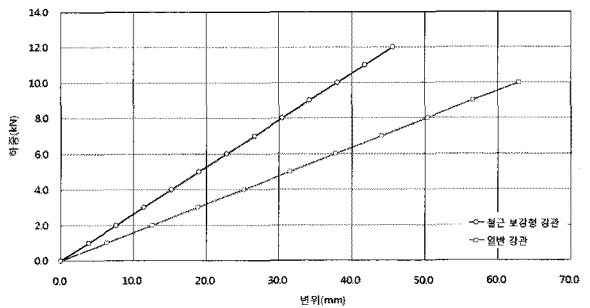
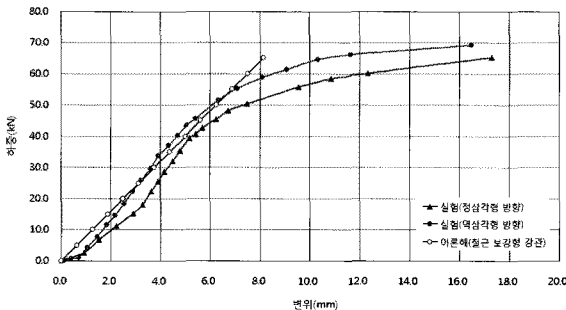
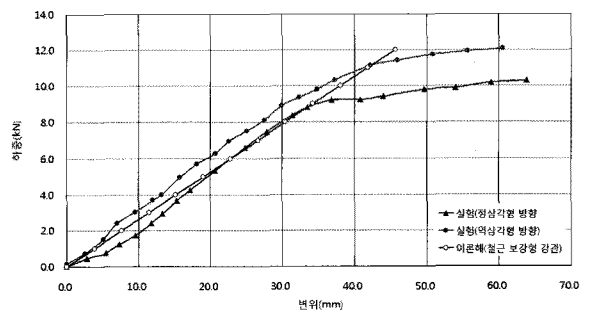


그림 12. 3.0 m 일반강관과 철근 보강형 강관의 변위 분석



(a) 1.0 m 철근 보강형 강관의 이론해와 실험결과 비교



(b) 3.0 m 철근 보강형 강관의 이론해와 실험결과 비교

그림 13. 이론해와 실험결과 비교

하여 철근보강형 강관의 보강효과가 유리하다는 것을 알 수 있다.

## 5. 수치해석

### 5.1 개요

힘장성 분석결과를 이용하여 실제 터널보강효과를 검증하기 위하여 강관으로 보강을 하지 않은 터널과 일반 강관으로 보강한 터널, 철근 보강형 강관으로 보강한 터널로 나누어 유한요소해석 프로그램인 Visual FEA를 사용하여 3차원 수치해석을 실시하였다.

### 5.2 모델 Case 및 지반 모델링

3개의 Case를 적용하여 터널의 천단 변위와 슛크리트의 휨 압축응력을 측정하였으며 적용 Case는 표 1과 같다.

본 해석에서는 지반 크기를 가로 80.0 m, 세로 80.0 m, 높이 80.0 m 터널의 직경 8.44 m로 설정하여 그림 14와 같이 각 Case별로 3차원 터널의 요소망을 생성하였다. 굴착단계는 실제 터널 시공을 고려한 상하 분할굴착으로 굴진장은 1.0 m로 하였으며 막장간 이격거리는 1.0 m로

표 1. 해석 Case

구분	모델 Case
강관 미 사용시	Case 1
일반 강관 사용시	Case 2
철근 보강형 강관사용시	Case 3

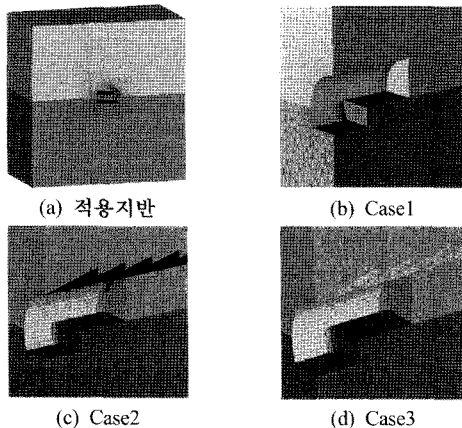


그림 14. 해석요소망

적용하여 수치해석을 수행하였다.

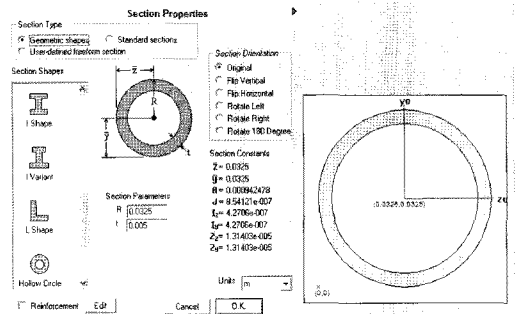
### 5.3 해석 물성치 및 지보재 모델

해석에 있어 지보재의 모델링 선택방법에 따라 지보재에 발생하는 응력 및 해설결과에 많은 차이를 보일 수 있다. 따라서 본 해석에서는 표 2와 같이 지보재의 모델요소를 설정하였다.

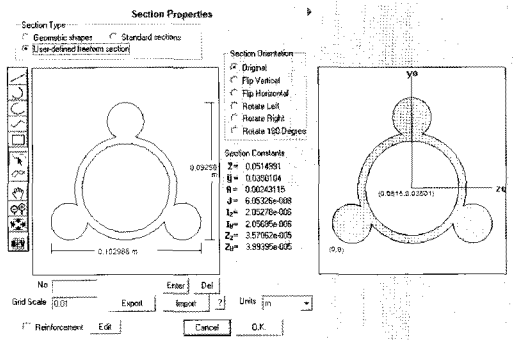
일반강관과 철근 보강형 강관의 단면형상은 그림 15와 같이 적용하였다. 또한 해석에 사용한 지반은 풍화토 지반으로 설정하였으며 일반 강관과, 철근 보강형 강관, 슛크리트, 락볼트의 물성치는 지질조사 보고서와 실내

표 2. 지보재 모델요소

구분	요소
지반	Solid
스틁크리트	Plane/Surface
강관다단	Frame
락볼트	Embedded bar



(a) 일반 강관



(b) 철근 보강형 강관

그림 15. 일반강관과 철근 보강형 강관의 모델링

실험문헌 등을 참고하여 표 3과 같이 적용하였다.

## 5.4 해석 결과

### 5.4.1 굴착단계별 변위검토

수치해석 결과 모든 Case의 변위가 그림 16과 같이 굴착 2단계에서 증가하기 시작하여 굴착 20단계에서 최대 변위량이 나타났다. 변위량은 철근 보강형 강관 적용시 가장 작게 측정되었으며 강관 미 사용시 변위량이 가장 크게 측정되었다. 결론적으로 철근 보강형 강관을 사용하여 터널 천단을 보강 후 굴착하였을 경우 일반강관을 사용했을 때보다 터널 천단의 변위값이 감소하는 것으로 나타났다.

그림 17은 Case별 터널 천단에 최대 변위량을 나타낸 그래프이다. 최대 변위량은 무보강시 84.53 mm, 일반강관과 철근 보강형 강관 사용시 78.50 mm와 76.64 mm

표 3. 적용지반 물성치

구분	탄성계수 (kPa)	단위중량 (kN/m <sup>3</sup> )	프아송비 / 두께
풍화토	75,000	20.0	0.31
숏크리트	연성	$5.0 \times 10^6$	23.5
	강성	$1.5 \times 10^7$	23.5
강판다단	$2.1 \times 10^8$	78.5	4.0mm

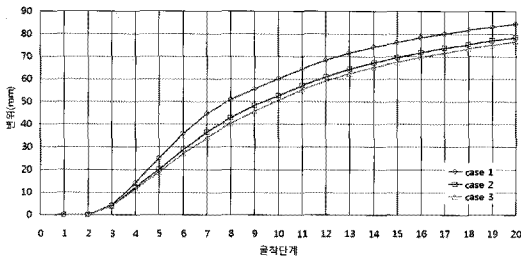


그림 16. 굴착단계별 변위그래프

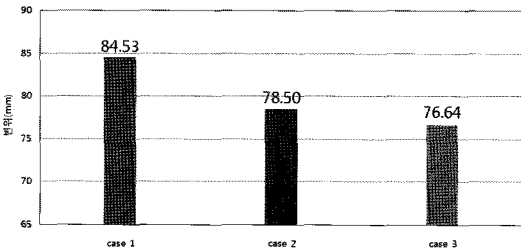


그림 17. 변위분석 비교

로 나타났다. 따라서 강관으로 보강하지 않은 터널의 최대 변위량을 기준으로 일반강관과 철근 보강형 강관을 사용한 터널의 최대 변위량을 비교해 보면 일반강관을 사용했을 경우 7.1% 감소하였으며 철근 보강형 강관의 경우 9.3% 변위가 감소하는 것으로 나타났다.

### 5.4.2 굴착단계별 숏크리트 응력 검토

Case별로 숏크리트의 휨 압축응력은 그림 18과 같이 굴착 5단계에서부터 증가되었으며 강관 미 적용시 굴착 8단계까지 휨 압축응력값이 급격히 증가하여 굴착 8단계에서 최대 휨 압축응력 5.98 MPa이 발생되었다. 일반강관과 철근 보강형 강관 적용시 10단계까지 휨 압축응력이 급격히 증가하여 10단계에서 각각 5.46 MPa와 4.85 MPa이 발생된 후 굴착 20단계까지 서서히 감소하는 것으로 나타났다.

Case별 숏크리트에 휨 압축응력을 분석해 본 결과 그림 19와 같이 강관 미 적용시 최종굴착단계에서 숏크리트 휨 압축응력은 4.43 MPa으로 발생되었으며 일반강관과 철근 보강형 강관을 적용한 경우 3.84 MPa와 3.22 MPa로 발생되었다.

수치해석결과 종방향 철근 보강형 강관에 대한 변위 억제 효과는 미미하지만 숏크리트 휨압축응력의 감소는

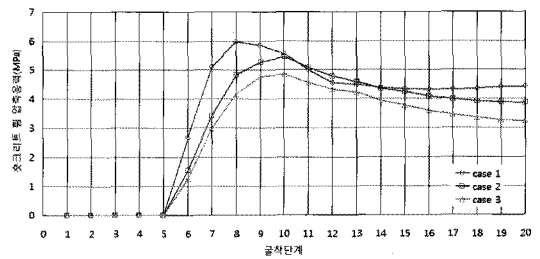


그림 18. 굴착단계별 숏크리트 휨 압축응력

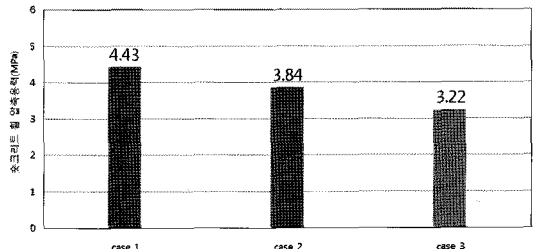


그림 19. 숏크리트 휨 압축응력 비교



큰 것으로 검토되었다.

## 6. 결 론

본 연구는 강관다단그라우팅공법에 사용하는 일반강관과 철근 보강형 강관의 구조적 휨강성을 비교하기 위하여 이론해와 실내시험에 의한 비교·분석을 실시하였으며 이를 검증하기 위한 3차원 유한요소해석을 실시하였다. 그 결과 다음과 같다.

1. 이론해에서 길이 1.0 m의 일반강관과 철근 보강형 강관의 변위 비교결과 하중 65.0 kN 일 때 일반강관의 변위량은 13.45 mm로 나타났으며 철근 보강형 강관의 경우 8.13 mm 나타났다. 또한 3.0 m의 일반강관과 철근 보강형 강관의 변위 비교결과 하중 10.0 kN 일 때 일반강관의 변위량은 62.95 mm로 나타났으며 철근 보강형 강관은 38.04 mm로 나타났다. 일반강관과 비교하여 철근보강형 강관의 변위값은 약 40% 감소하는 것으로 나타났다.
2. 휨강도 실험결과 길이 1.0 m 철근 보강형 강관의 정삼각형 방향일 경우 최대 항복하중 68.6 kN 일 때 변위량은 26.1 mm로 측정되었으며 역삼각형 방향일 경우 최대 항복하중 70.9 kN 일 때 변위량은 23.12 mm로 측정되었다. 또한 길이 3.0 m 철근 보강형 강관의 휨강도 실험결과 정삼각형 방향일 경우 최대 항복하중 11.11 kN 일 때 변위량은 91.35 mm으로 측정되었으며 역삼각형 방향일 경우 최대 항복하중 12.11 kN 일 때 변위량은 74.5 mm로 측정되었다.
3. 휨강성 분석결과를 이용하여 실제터널 보강효과를 검증하기 위한 수치해석결 강관 미적용시와 비교하여 일반강관과 철근보강형 강관의 보강효과는 변위의 경우 일반강관이 7.13%, 철근 보강형 강관이 9.30% 감소하는 것으로 나타났다. 또한 숏크리트 휨압축응력은 일반강관이 13.32%, 철근보강형 강관이 27.30% 감소하는 것으로 나타났다.

본 연구결과 일반강관에 비하여 철근 보강형 강관의 보강효과가 큰 것으로 나타났다. 본 연구는 실내실험

과 수치해석을 통하여 철근보강형 강관의 휨강성을 분석한 것으로 실제 시공현장의 적용성에 대한 추가 연구가 진행되어 진다면 경제성 및 안정성 확보가 유리한 터널 보강공법의 발전을 이룰 수 있을 것으로 판단되어 진다.

## 감사의 글

본 연구는 과학재단 “신개념 고성능 터널지보 시스템 이론 및 지보재료 개발에 대한 연구”(과제번호: 2010-0000251) 과제의 일환으로 수행되었으며 실험재료를 공급해주신 신영기술개발에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. 김대경, 임종철, 박이근, 심재규(2003), “강관 다단 그라우팅 공법을 적용한 도심지 NATM 터널에서의 강관 거동 분석 및 설계기법 제안에 관한 연구”, 대한토목학회 정기 학술대회, No. 10, pp. 4768~4773
2. 문상호, 나승훈, 이상필(2008), “극 저토피 구간의 NATM 터널 설계사례”, 한국터널공학회, Vol. 10, No. 4 pp. 32~40
3. 이준석, 방춘석, 최일윤, 엄주환(2000), “터널용 강관다단공법의 설계기법에 관한 연구”, 대한토목학회논문집, Vol. 20, No. 3 pp. 305~314
4. 양재원, 최병석, 윤일병, 임현철(2010), “도심지구간 저토피 토사터널의 보강사례”, 터널공학회 논문집, Vol. 12, No. 2, pp. 47~57
5. 장석부, 권승, 김기림, 허도학(2002), “터널 막장 보강을 위한 합리적인 선진보강공법 설계기법”, 한국 터널공학회지, 터널기술, Vol. 4, No. 3 pp. 6~12
6. 황운섭(2008), “수치해석을 이용한 강관다단그라우팅 보강터널의 보강효과” 경북대학교 석사학위논문
7. Kotake, N., Yamamoto, Y. and Oka, K.(1994). “Design for umbrella method based on numerical analyses and field measurements”, Tunnelling and Ground Conditions, Proc. of Tunnelling Congress, Cairo, pp. 501~508
8. Pelizza, s., and Peila, D.(1993), “Soil and rock reinforcements in tunnelling, Tunnelling and Underground Space Technology”, Vol. 8, No. 3, pp. 357~37

접수일(2010.9.1), 수정일(2010.9.10), 게재확정일(2010.9.25)