

# 비개착 추진공법에서 관의 형태에 따른 축소모형 용기 및 침하 실험분석

## Analysis of Heaving and Settlement Test of Scale Model Depending on Shape of the Pipe during Pipe Roof Excavation

엄 기 영<sup>1\*</sup> Eum, Ki-Young  
최 찬 용<sup>2</sup> Choi, Chan-Yong  
천 정 연<sup>3</sup> Cheon, Jeong-Yeon

### ABSTRACT

In this study, a non-open cut method using a round or square pipe which has been commonly employed in Korea was experimentally evaluated and the behavioral features resulting from the friction while the pipe is penetrated into the ground was identified through the scale model test. To that end, a test device was fabricated by type of penetration pipe, by which the surface displacement caused by surrounding friction resistance was monitored. To simulate the settlement and heaving by excavation stage, the test was conducted based on generalized friction condition and surface displacement and the result thereof was compared and analyzed, considering the type of penetration pipe.

### 요 지

국내 지하횡단공법 중 강관추진공법에서 구조물상부의 강관 roof 구조체 건설시 원형관 및 사각관이 가장 많이 사용되고 있다. 본 논문에서는 강관추진시 관형태에 따른 특징을 규명하고자, 관이 지반에 관입될 때 상부에 작용하는 마찰로 인한 지반의 거동특성을 축소모형실험을 실시하였다. 관입관의 형태에 따라 강관추진시 관의 주변 마찰저항력에 의한 지표변위를 파악하였으며, 용기 및 침하실험 결과 동일한 토피고에서 사각관이 원형관보다 관직경의 5~10%정도 용기 및 침하가 많이 일어났다. 그러나, 토피고에 의한 변위량의 차이가 관의 형태에 의한 변위량의 차이보다 크게 측정되었다. 굴착단계별 침하량과 용기량을 모사하기 위해 마찰조건과 지표변위를 일반화된 조건들에 바탕을 둔 변수로 실험을 수행하였고, 그 결과를 관입관의 형태에 따라 비교 분석하였다.

**Keywords** : Pipe roof method, Scale model test, Pipe roof excavation

## 1. 서 론

철도지하횡단공사는 선로하부의 굴착방법 및 형식에 따라 궤도노반에 용기 및 침하의 지반거동을 야기하며, 이는 선로상부 궤도노반에 영향을 미치게 된다. 선로 구조물이 놓여진 상태에서 그 하부를 통과하여 구조물을 건설하기 때문에 지하횡단공법에는 여러가지 공법들이 제시되고 있으나 비개착식공법과 같은 강관의 추진/굴착공정의 시

공법의 경우 지반거동특성 및 궤도노반의 영향을 평가하기 위한 원인분석이 필요하다.

비개착공법은 일반적으로 유압잭을 이용하여 추진관을 압입한 후 추진관 내부에서 인력 및 장비로 수평굴착하여 토사를 외부로 반출시킨 뒤 본관을 삽입하여 지중에 매입하는 공법을 말한다. 궤도노반에 영향을 줄이고 침하나 궤도변위를 억제하여 열차 안전운행에 지장을 주지 않고 안전하게 관입하기 위해, 강관의 구경 및 토질조건에 따라

1\* 비회원, 한국철도기술연구원 철도구조연구실 책임연구원 (Non-Member, Chief Researcher, Dept. of Railway Structure Research, KRRI, E-mail: kyeum@krri.re.kr)

2 정회원, 한국철도기술연구원 철도구조연구실 선임연구원 (Member, Senior Researcher, Dept. of Railway Structure Research, KRRI)

3 비회원, 한국철도기술연구원 철도구조연구실 주임연구원 (Non-Member, Principal Researcher, Dept. of Railway Structure Research, KRRI)

유압잭의 추진력을 산정하고 이에 맞는 규격 및 수량을 적용하는 것이 일반적이다.

현재 국내에서는 주로 원형관을 이용한 지하횡단공법이 주류를 이루고 있으나, 국외에서는 사각관을 이용하여 엘리먼트의 이음부가 결속되게 삽입하는 견인방식에 의한 시공사례가 다수 이루어지고 있다. 이에 따라, 본 논문에서는 국내 및 국외에서 많이 사용되는 대표적인 강관의 형태인 원형관과 사각관을 사용장재로 하여 궤도노반의 지반거동을 비교분석하였다. 관의 형태에 따른 지반의 파괴 메커니즘을 확인하고 정량적인 결과를 도출하기 위해, 실내모형실험을 통해 관이 지반에 관입될 때 상부 작용하는 마찰로 인한 지반의 거동특성을 규명하였다. 이를 위해 실제와 유사하게 지반을 모델링하고 원형관과 사각관의 강관추진시 궤도노반의 역학적 거동을 분석하여 지중 속에서 제거된 토사량의 상부 및 주변 변형분포와의 관계를 실험적으로 고찰하였다.

## 2. 축소모형실험

### 2.1 축소모형모델 선정

#### 2.1.1 차원해석

궤도노반의 변형거동을 연구하기 위해 축소모형실험을 실시할 때 현장조건이 충분히 재현할 수 있도록 현장의 모든 요소들에 대한 차원해석이 수행되어야 한다. 김종우 등(2004)은 모형실험시 실험요소에 대한 차원해석을 실시하고, 그에 따라 선정된 축소모형모델을 이용한 실험결과를

표 1. 축소율

물리적 성질	차원	축소율
길이	[L]	1/10
시간	[T]	1/3.16
밀도	[ML <sup>-3</sup> ]	1/1.12
질량	[M]	1/1120
응력	[ML <sup>-1</sup> T <sup>2</sup> ]	1/11.22

표 2. 모형강관의 제원

관 종류	직경(mm)	두께(mm)	길이(mm)
강 관	85	1.4	600mm
각 관	85(B)×85(H)	1.4	600mm
내부블럭	83.5	-	600mm

발표하였다. 표 1과 같이 세가지 기본 차원을 길이[L], 시간[T], 질량[M]으로 하였으며, 길이에 대한 축소율을 결정하고 나서 이를 이용하여 시간, 밀도, 질량, 강도 등의 축소율을 차례로 산정하였다.

길이[L]에 대한 축소율을 1/10로 하고, 다음으로 시간[T]에 대한 축소율을 결정하는데 중력가속도 일정 개념이 사용된다. 중력가속도[LT<sup>-2</sup>]는 현장과 실험조건이 모두 같으므로 식 (1)에 의해 1/3.16이 된다.

$$\frac{L}{T^2} = 1 \quad (1)$$

현장지반의 밀도와 모형재료의 밀도의 비로부터 밀도[ML<sup>-3</sup>]의 축소율은 식 (2)와 같이 계산된다.

$$\frac{M}{L^3} = \frac{1.79}{L^3} = \frac{1}{1.12} \quad (2)$$

길이[L]의 축소율이 1/10이므로 질량[M]의 축소율은 식 (3)과 같다.

$$M = \frac{1}{1.12} \times L^3 = \frac{1}{1.38} \times \left(\frac{1}{10}\right)^3 = \frac{1}{1120} \quad (3)$$

강도[ML<sup>-1</sup>T<sup>2</sup>]의 축소율은 길이[L], 시간[T], 질량[M]의 축소율이 모두 결정되었으므로 식 (4)와 같이 산정된다.

$$\frac{M}{LT^2} = \frac{\frac{1}{1120}}{\frac{1}{10} \times \left(\frac{1}{3.16}\right)^2} = \frac{1}{11.22} \quad (4)$$

#### 2.1.2 모형강관의 제원

원형관과 사각관은 축소율에 따라 실제 현장에서 사용되고 있는 관의 1/10로 축소하여 사용하였으며, 관의 변형에 의한 용기 및 침하량은 없다고 가정하였다. 길이와 직경이 동일하고 형태가 다른 2개의 관을 사용하였으며, 표 2는 실험에 사용된 모형관의 세부제원을 나타낸 것이다. 실험case는 표 3과 같다.

시료로 사용된 주문진표준사의 공학적 성질을 파악하기 위해서 입도분포시험과 기본 물성실험을 실시하였으며, 실험결과 균등한 입도분포를 가지고 있으며 통일분류법상 SP로 분류되었다. 사질토지반의 상대밀도의 결정을 위해 최소 건조단위중량과 최대건조단위중량을 구하는 실험을 실시하였고, 그 결과 14.07kN/m<sup>3</sup>, 15.87kN/m<sup>3</sup>으로 측정되었다.

## 2.2 실험장치 및 방법

### 2.2.1 실험장치

그림 1(b)와 같이 토조의 크기는 105cm×60cm×60cm이고, 강관추진장치>Loading Tester of Computer Control System)는 한국철도기술연구원에서 개발한 것으로 Load Cell 1000kg을 이용하여 최대하중 500kgf 추진이 가능하며, 그림 1(a)와 같이 반력 플레이트, 전자식 로터셀, 컨트롤 박스로 구성되어 있다. 그리고 강관추진에 따른 지중변위를 측정하기 위하여 속도 및 하중을 제어하여 실시간 그래프를 출력하였다.

단계별 굴착에 의한 지반거동의 정확한 측정을 위해 지표면 상부에 1/1000mm의 정밀도를 가진 레이저변위시스템을 설치하였다. 岸田 潔 등(2009)과 같은 많은 학자들이 레이저변위계를 이용한 정밀계측에 대한 많은 연구가 수행되고 있다. 대상지반 상부의 수직, 수평변위를 측정하였으며, 측정된 데이터들은 한국철도기술연구원에서 개발한 데이터분석 프로그램을 통해 분석하였다. 계측에 사용된 상부변위시스템의 구성 내용은 표 4와 같다.

### 2.2.2 실험방법

모형지반의 조성을 위해 강사법을 사용하였으며, 그림 2(a), 2(b)와 같이 5cm간격으로 높이를 조절하며 모래를 강사하여 지반의 상대밀도에 대한 오차를 최대한 줄이면서 실험을 실시하였다. 고희성 등(1996)은 지반조성시 모

래강사법 관련 연구결과를 발표한 바 있다. 그림 2(c)와 같이 원형관 및 사각관의 토피고별(5, 10, 15, 20cm) 전면판을 각각 4개씩 제작하였으며, 관 사이로 모래유출을 방지하기 위해 직경이 83.5mm인 내부블럭을 관속에 삽입하였다. 실험관은 D=850mm인 파이프를 기준으로하여 1/10로 제작하였다.

침하실험은 그림 3(a)와 같이 강사장치로 토조 중간지점까지 지반조성을 한 뒤, 관을 아크릴 전면판을 통해 300mm까지 삽입한 후 강사장치를 이용하여 지반을 조성하였다. 그 다음, 그림 3(b)와 같이 관의 내부에 삽입되어 있던 내부블럭을 원형관추진장치를 이용하여 50mm/min의 속도로 10mm간격으로 빼내어 침하량을 레이저변위계를 사용하여 측정하였다.

용기실험은 그림 4와 같이 모래의 유출을 방지하기 위하여 내부블럭을 원형관추진 장치에 고정된 후 실험을 실시하였으며, 침하실험과 마찬가지로 원형관추진장치를 이용하여 관을 30mm씩 관입하여 그에 따른 용기량을 레이저변위계로 측정하였다.

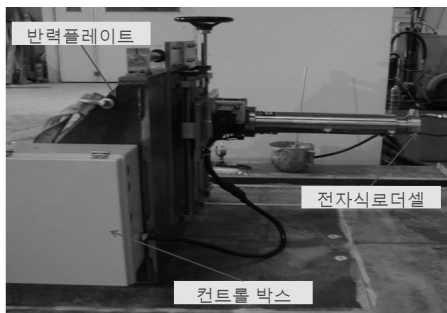
## 3. 실험결과 및 분석

### 3.1 지표변위 양상

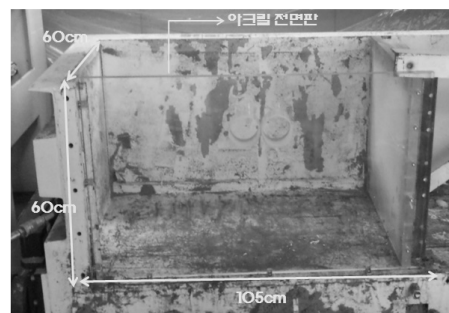
관이 관입함에 따라 관주변의 지반은 압축되거나 이완되며 이러한 지중변화는 직접적으로 지표변위에 영향을

표 3. 실험수행 CASE

토피고 (cm)	관형태	용기	침하
5	원형관, 사각관	3	3
10	원형관, 사각관	3	3
15	원형관, 사각관	3	3
20	원형관, 사각관	3	3



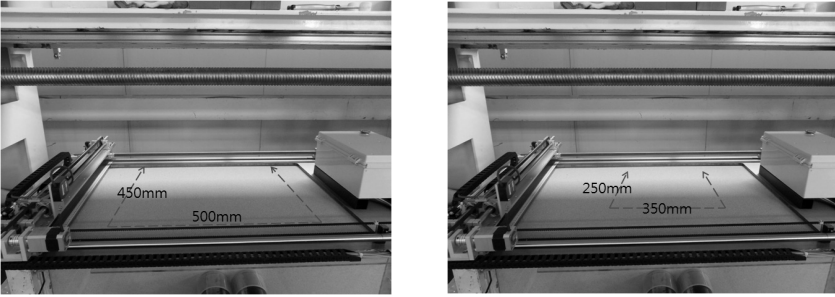
(a) 강관추진시스템



(b) 토조

그림 1. 실험장치

표 4. 상부변위시스템의 구성내용

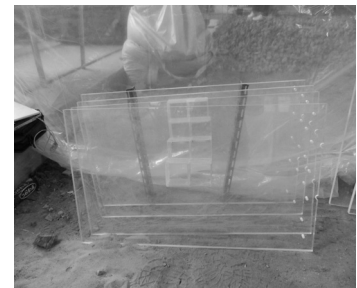
장 치	구성내용
레이저센서	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 측정범위 : 130±50mm, 1/1000mm 까지 측정 가능</li> <li>- 반응 시간 : 100ms/10ms/1ms 스위치 선택 가능</li> </ul>
레이저센서 이동용 플레이트	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 제원 : 1380 * 800mm</li> <li>- 레이저 센서 허용범위 : 700 * 500mm</li> </ul>
상부변위시스템 제어 소프트웨어	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 제어 형태 : 속도제어, 측정범위제어</li> <li>- 단계별 변위이동 설정 가능</li> <li>- 실시간 그래프 출력 기능</li> </ul>
응기 및 침하 측정범위	



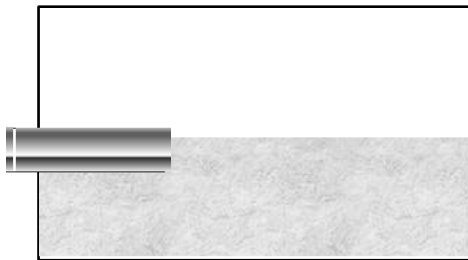
(a) 상대밀도 실험



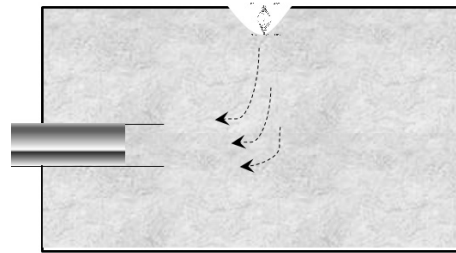
(b) 지반조성  
그림 2. 지반조성



(c) 아크릴 전면판

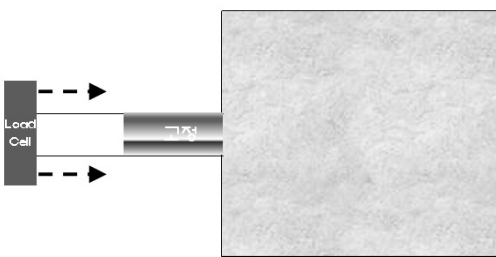


(a) 토조의 중간지점까지 모래 강사

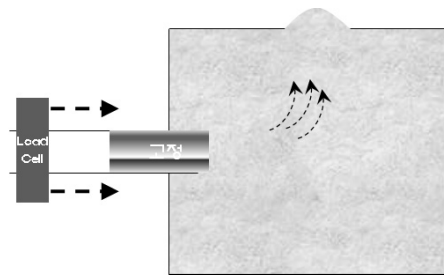


(b) 관길이의 300mm까지 관 삽입

그림 3. 침하실험 개요도



(a) 강사장치로 지반조성



(b) 내부블럭 포함한 관 관입 준비

그림 4. 응기실험 개요도

미치게 된다. 그림 5와 6은 원형관과 사각관 관입 시 상부에서의 토피고에 따른 용기량으로, 원형관과 사각관 모두 토피고가 높아질수록 용기량은 감소하는 것으로 나타났다. 각각의 경향을 비교하면 관의 50% 관입 시까지는 지속적으로 증가하다가 관의 50%이상 관입 시 부터는 더 이상 증가하지 않고 수렴하는 것으로 나타났다. 사각관 관입 시에도 원형관 관입 시와 유사하며, 관의 50% 관입 시까지는 지속적으로 증가하다가 점진적으로 용기가 감소하여 수렴하는 것으로 나타났다. 이는 관의 관입으로 인한 선단 저항력의 영향으로 관입 초기에는 지반이 용기되었다가 상부지반이 교란되어 용기량이 더 이상 증가하지 않고 수렴하는 것으로 판단된다. 용기량은 원형관의 경우 직경의 6%정도 용기되는 것으로 나타났고, 사각관의 경우에는 직경의 10%정도 용기되는 것으로 나타났다.

### 3.2 사각관 및 원형관의 형태별 용기량 비교

사각관 및 원형관의 토피고별 용기량 비교는 관 길이의

50%지점인 15cm에서의 계측 데이터를 가지고 비교분석하였다. 변위량은 관의 직경비의 %로 나타내었다.

원형관과 사각관의 용기경향을 살펴보면 토피고 5, 10cm일 경우 초기 6cm 관입 시 까지 사각관과 원형관 모두 점진적으로 증가하다 관 길이의 40% 관입 이후부터 용기량이 사각관이 원형관에 비해 약 6~7%정도 커지는 것을 확인할 수 있었다(그림 7(a), 7(b)). 토피고가 15, 20cm인 경우에도 경향은 비슷하게 나타났다. 초기 3cm 관입 시 부터는 사각관과 원형관의 용기량은 일정한 차이를 두고 증가하는 것을 확인하였고, 관 길이의 40% 관입 이후 부터는 5cm와 마찬가지로 사각관이 원형관에 비해 용기량이 각각 약 6%, 4%정도 커지는 것을 확인할 수 있었다(그림 7(c), 7(d)). 용기량을 살펴보면 원형관의 경우 직경의 6%정도 용기되는 것으로 나타났고 사각관의 경우에는 직경의 10%정도 용기되는 것으로 나타났다.

토피고에 따른 관의 형태별 용기량을 분석한 결과 전체적으로 사각관이 원형관에 비해 용기량 약 6%정도 크게

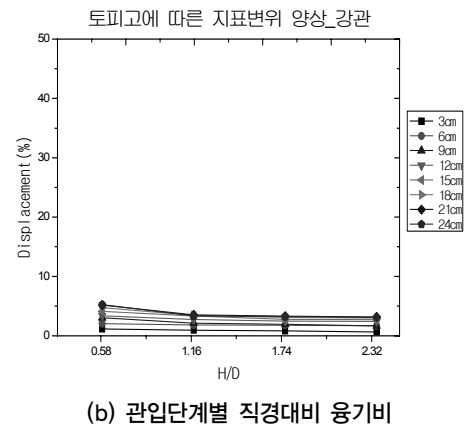
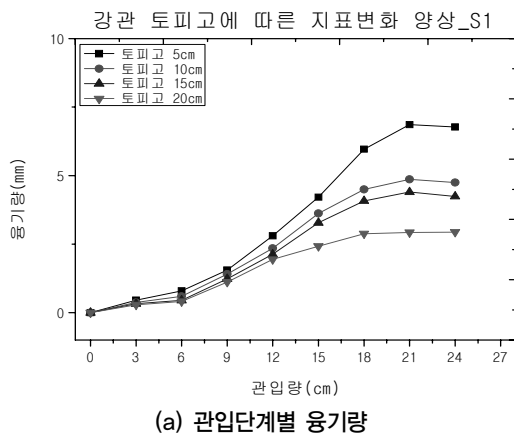


그림 5. 원형관 토피고에 따른 지표변화 양상

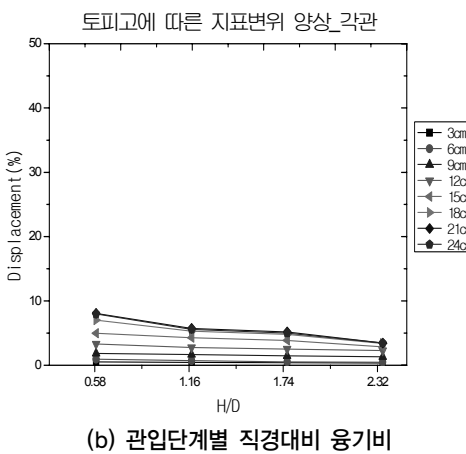
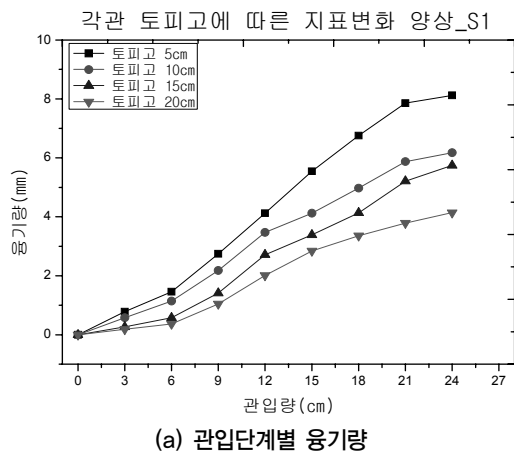
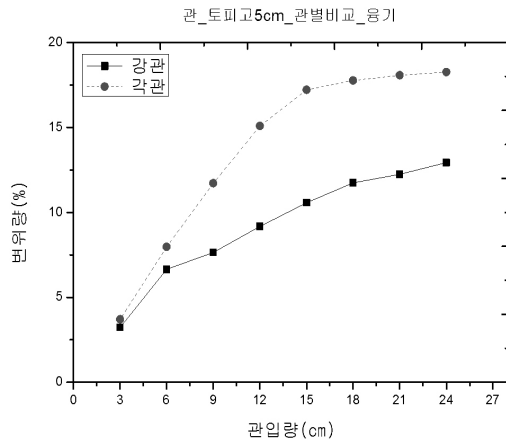
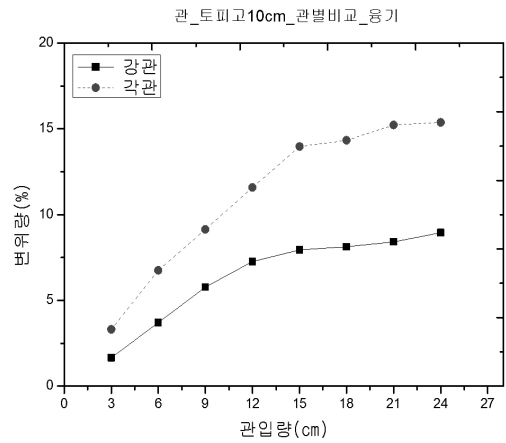


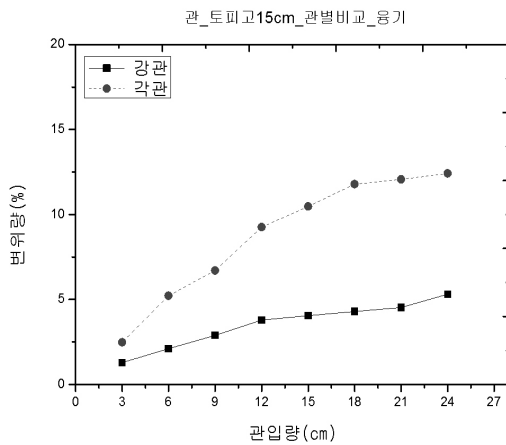
그림 6. 사각관 토피고에 따른 지표변화 양상



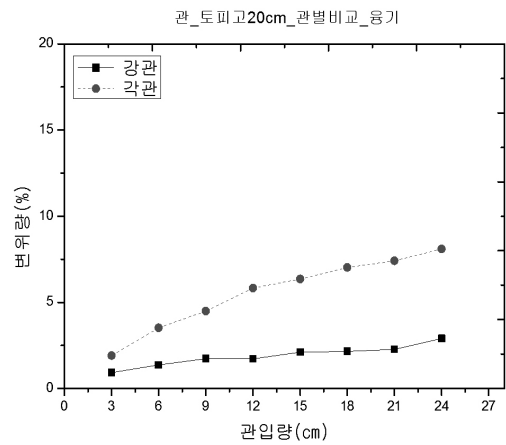
(a) 토피고 5cm



(b) 토피고 10cm



(c) 토피고 15cm



(d) 토피고 20cm

그림 7. 원형관 및 사각관 토피고별 용기량 비교

나타났다. 이는 사각관이 원형관보다 지반과 닿는 접촉면적이 넓어 상대적으로 마찰이 증가하여 용기량도 큰 것으로 판단되며, 또한 사각관의 면적이 원형관에 비해 크기 때문에 용기량이 큰 것으로 판단된다.

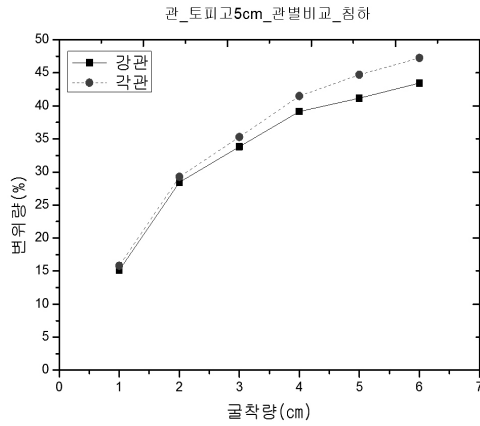
### 3.3 사각관 및 원형관의 형태별 침하량 비교

사각관 및 원형관의 토피고별 침하량 비교는 최대 침하 발생 지점인 6cm에서의 계측 데이터를 가지고 비교분석하였다. 토피고 5, 10cm일 경우 초기 1~2cm 굴착 시 까지 사각관과 원형관 모두 점진적으로 증가하다 3cm 굴착 이후부터 침하량이 사각관이 원형관에 비해 약 4~6%정도 크게 나타났다(그림 8(a), 8(b)). 토피고가 15, 20cm인 경우에도 초기 1cm 굴착 시 부터 사각관과 원형관의 차이가 서서히 나기 시작하여, 3cm 굴착 이후부터의 침하량은 사각관이 원형관에 비해 약 7~7.5%정도 크게 나타났다(그림 8(c), 8(d)).

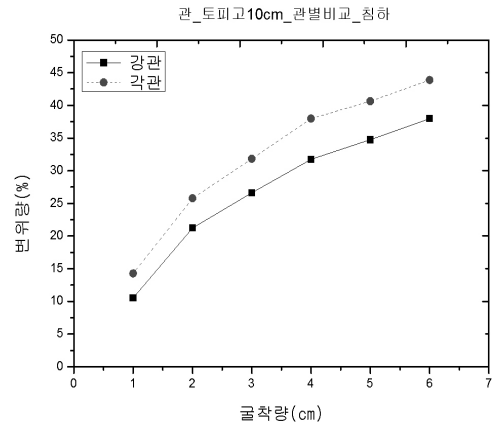
토피고에 따른 관의 형태별 침하량을 분석한 결과 전체적으로 사각관이 원형관에 비해 침하량은 약 5%정도 크게 나타났다. 이는 사각관의 면적이 원형관에 비해 크기 때문이라고 판단된다.

### 4. 결론

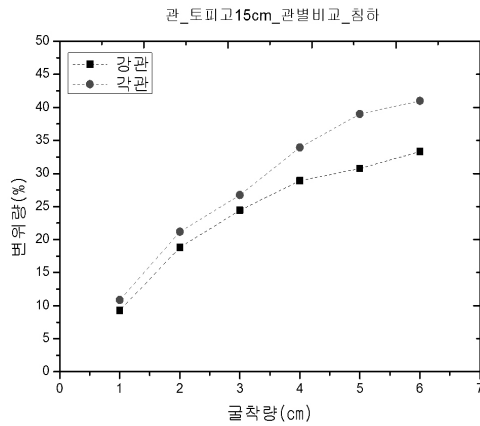
본 논문에서는 선로하부를 통과하는 여러가지 비개착 공법의 대표적인 특징인 관입관의 형태에 따라 관 관입시에 상부지반의 거동을 실내모형실험으로 재현하였다. 관의 추진 및 굴착에 따른 침하 및 용기거동을 확인하고자 수행된 실험으로 대표적으로 표준사를 이용하여 지반을 조성하였다. 이를 위해 먼저 현재 국내에서 많이 시공되고 있는 대표적인 지하횡단 공법을 조사하여 관의 형태별로 분류하였고, 105cm(폭), 60cm(높이), 60cm(길이) 크기의 실내모형실험 장치에 토피고를 5, 10, 15, 20cm별로 변화시키며, 관입관을 원형관과 사각관으로 나누어 용기 및 침



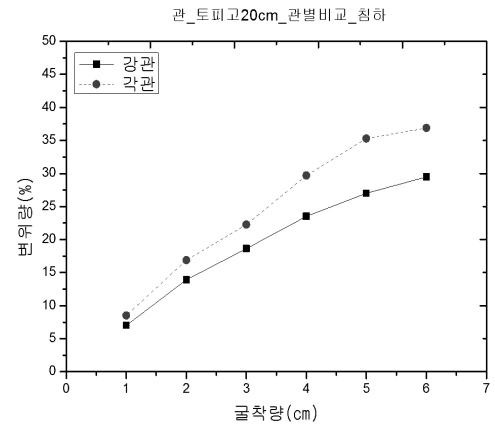
(a) 토피고 5cm



(b) 토피고 15cm



(c) 토피고 15cm



(d) 토피고 20cm

그림 8. 원형관 및 사각관 토피고별 용기량 비교그림

하 실험을 수행하였다. 실내축소모형 실험의 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 용기실험 결과, 관의 초기 관입 시 모든 토피고에서 가장 급격한 용기의 증가량을 보이며, 관입량이 많아지고 토피고가 높아질수록 그 증가량은 작아졌으며, 관의 50% 정도 관입 시부터 용기량 증가율은 점점 감소하는 경향을 보였다.
- (2) 동일한 지반에서 관의 관입 및 굴착을 통한 용기 및 침하량을 측정된 결과 동일한 토피고에서 사각관이 원형관보다 관의 직경의 5~10% 정도 용기와 침하가 많이 일어났다.
- (3) 토피고에 의한 변위량의 차이가 관의 형태에 의한 변위

량의 차이보다 크게 나타났다. 토피고에 의한 변위량의 차이는 대략 10~15% 정도로 토피고가 낮을수록 점점 커지는 경향을 보이는 반면, 형태에 의한 변위량의 차이는 대략 5~10% 정도로 토피고에 상관없이 일정한 경향을 보였다.

### 참고문헌

1. 고호성, 임종철, 박이근, 오명렬 (1996), “모래지반내의 터널 굴착시 지반거동에 관한 실내모형실험”, *대한 토목학회 학술발표 논문집*, pp.371-374.
2. 김중우, 박지용 (2004), “상굴터널 주변지반의 변형거동에 관한 모형실험 연구”, *한국암반공학회지*, 제14권, 제5호, pp. 381-390.
3. 岸田 潔, 柳 民峰, 崔 瑛, 木村 亮 (2009), “パイプルーフ工法の余掘り掘削による地表面沈下特性に関する模型実験”, *土木学会論文集C*, Vol.65, No.3, pp.609-616.

(논문접수일 2010. 10. 12, 심사완료일 2010. 12. 14)