

# 터널 단면크기에 따른 콘크리트 라이닝 타설 방법에 대한 실험적 연구

김상환<sup>1</sup>, 신범석<sup>2\*</sup>, 박인준<sup>3</sup>

## Model tests on concrete placement method of tunnel lining due to tunnel size

Sang-Hwan Kim, Beom-Seok Shin, Inn-Joon Park

**Abstract** This paper presents the concrete placement method of tunnel lining to improve the concrete lining quality such as cavities, cracks of the concrete lining. In order to perform this study, the occurred cracks initially in the concrete lining are reviewed and analyzed. From the review, the improvement methods to minimize the defects of concrete lining are suggested. To confirm the efficiency of new concrete placement approaches and the scale of tunnel section, two types of the scaled model tests are carried out and analyzed in model scales of 1/20 and 1/7. The 1/20 scaled model tests are carried out using the existing experimental rigs. The 1/7 scaled model tests are carried out in new test rigs developed in this study. The concrete placement rates obtained from the experimental results are analyzed and compared with themselves. In the existing concrete placement method, 1/20 scale model test than 1/7 scale model test have increased concrete placement rates but It is clearly found that two kinds of experimental studies show the similar results in improvement methods and good agreement with new concrete placing approach.

**Keywords:** Cavity, crack, tunnel size, scaled model tests, placement rate

**요 지** 본 논문은 콘크리트 라이닝의 배면공동 현상, 초기 균열 등과 같은 콘크리트 라이닝 타설시 문제점들을 해결하기 위해 개선 방안을 제시하고 이를 단면크기의 변화에 따른 영향을 연구하였다. 연구를 수행하기 위해 초기 균열 형태와 발생 원인에 대한 분석을 실시하였으며 균열발생 최소화를 위한 개선된 타설 방안을 제시하였다. 제시한 타설 방안의 효율성 및 터널 단면크기에 따른 영향을 확인하기 위하여 기존의 1/20 축소모형실험 및 1/7 축소모형실험을 실시하여 타설율을 비교·분석하였다. 이에 따른 실험 결과는 기존의 타설 방안의 경우 1/20 축소모형실험 보다 1/7 축소모형실험의 타설율이 증가하여 차이를 보였지만 개선된 타설 방안의 경우 유사한 타설율을 나타내 2가지 실험 모두 신뢰성을 갖는 것으로 판단된다.

**주요어:** 배면공동 현상, 초기 균열, 단면크기, 축소모형실험, 타설율

### 1. 서 론

터널의 콘크리트 라이닝은 터널의 안정성 증대를 도모하기 위해 설치되어 역학적 기능, 내압 기능, 구조적 기능, 미적 기능 등을 갖는다. 터널 시공 현장에서는 터널 라이닝의 천단부 배면공동 현상, 라이닝의 초기 균열 등 많은 문제점이 제기되고 있으며 유지관리 단계에서도 역시 많은 문제가 나타나고 있다. 이러한 문제점은 대단면 터널일수록 심각해지는 경향을 보인다. 국내 터널 라이닝 시공시 가장 큰 문제점은 배면 공동현상으로 타설율

저하에 따른 라이닝 두께의 손실로 구조적인 문제점이 발생하여 안정적인 면이나 미관적인 면에서 문제점으로 대두되고 있다. 그러나 이와 같은 터널 라이닝의 고질적인 문제인 타설율에 대한 연구는 미흡한 실정이다.

라이닝에 대한 연구는 국외의 경우 Oreste(2002)에 의한 터널의 최종 라이닝에 대한 연구, Galli 등(2004)에 의한 터널 굴착 및 라이닝의 3차원 모델링을 통한 수치 해석적 연구가 실시되었으며 Davis 등(2004)에 의해 급속 및 경제적인 충격 반응과 충격 비파괴 방법에 의한 라이닝의 평가에 대한 연구가 실시되었다. 국내의 경우 배규진 등(2001)에 의한 복개터널 라이닝 해석 및 신종호 등(2009)에 의한 세그먼트 라이닝의 거동에 대한 연구와 같이 수치해석적 연구가 실시되었으며 또한, 서강천(2002)에 의한 라이닝의 균열 및 결함에 대한 연구도

<sup>1</sup>정회원, 호서대학교 토목공학과 교수

<sup>2</sup>비회원, 호서대학교 토목공학과 석사과정

<sup>3</sup>정회원, 한서대학교 토목공학과 교수

\*교신저자: 신범석 (E-mail: shinbumseok@naver.com)

실시되었다. 그러나 라이닝의 고질적인 문제점인 타설을 향상 위한 연구는 미진한 실정으로 터널의 라이닝의 타설성능을 향상시키기 위한 새로운 시공 개선방안을 제안하고 검증한 연구는 김상환(2006) 등에 의해 다루어진 연구가 유일하다. 이 연구는 초기 균열 패턴의 형태와 원인을 고찰하고 라이닝의 고질적인 문제인 타설에 대한 문제를 해결하기 위해 개선된 타설방안을 제시하였다. 제시한 개선방안에 대한 확인을 위해 축소모형실험 실시하였고 수치해석을 실시하여 검증을 실시하였다.

본 연구에서는 기존 1/20 축소모형실험의 축소율을 1/7로 변화시켜 1/20 축소모형실험 보다 더 실제 현장과의 유사한 환경에서 타설방안에 대한 재검증하고 또한, 라이닝 단면크기 변화에 따른 타설을 양상도 비교·분석을 하였다.

## 2. 콘크리트 라이닝 사례분석

### 2.1 콘크리트 라이닝의 균열형태와 원인분석

터널 구조물은 사용기간이 길어지면서 콘크리트 라이닝에 발생하는 균열량도 증가되나 최근 연구 자료에 의하면 시공부터 준공직후까지 발생하는 많은 균열발생 사례가 보고되고 있으며 초기균열은 재료적인 측면과 시공적인 측면이 복합적으로 발생된다.

균열발생 패턴은 크게 구조적 균열과 비구조적 균열로 나눌 수 있으며 구조적 균열로는 천단부 종방향 균열, SL부근 종방향 균열이 있으며 비구조적 균열은 시공 Joint 반원상 균열, 측벽부 경사균열, 측벽부 연직균열이 있다. 각 5가지 균열 패턴별 특성 및 원인을 살펴보면 천단부 종방향 균열은 터널에서 가장 빈번히 발생하는 균열로 터널 천단부 20° 범위에서 주로 발생하며 콘크리트 타설 불량에 따른 밀실탈설 부족 및 라이닝 두께가 불규칙하다. 또한, 측벽부 콘크리트 자중에 의한 압밀, 거푸집 탈형강도 부족, 지반 소성압·편압 증대로 인하여 발생하게 된다. 스프링라인 부근 종방향 균열도 천단부 종방향 균열과 같이 지반 소성압·편압 증대 및 거푸집 탈형강도 부족으로 발생한다. 시공 Joint 반원상 균열은 신설 라이닝부 거푸집 조립시 기설 콘크리트 접합부에 가해지는 Jacking Force에 의한 균열 및 시공 이음부 천단매면 공동 및 충전 불량에 의해 발생한다. 측벽부 경사균열은 흘러내림 방식의 콘크리트 타설에 따른 콘



그림 1. 콘크리트 라이닝의 균열 양상

크리트 페이스트 유동성 미확보 및 콜드조인트에 의해 발생한다. 마지막으로 측벽부 연직균열은 라이닝 콘크리트 건조·수축 및 바닥면 구속조건에 따른 구속하중에 의해 발생하며 등간격으로 발생하는 사례가 많고 균열 폭은 0.2~0.5 mm 혹은 그 이상이며, 관통균열 발달가능성이 많다. 이와 같은 균열의 양상은 그림 1과 같다.

또한 시공된 도로터널과 고속철도터널에서 단면 형상과 폭이 유사한 터널들에서 콘크리트 라이닝에 발생된 균열현황 및 특성에 대해서 조사하여 지형, 콘크리트 라이닝의 두께부족, 매면 공동, 터널단면의 크기 및 콘크리트 품질저하에 따른 콘크리트 라이닝 균열의 원인을 분석하였다.

균열은 아치부에서의 종방향 균열과 횡방향 균열, 시공 이음부 주위에 나타난 균열 그리고 측벽부 횡방향 균열로 구분할 수 있으며, 아치부에 발생하는 균열은 터널천단을 지나는 중심선으로부터 10° 범위내에서 발생하고 균열 폭은 0.1 mm~1.0 mm까지 다양하게 분포하였다.

조사된 터널 콘크리트 라이닝의 균열 원인에 따른 균열 발생 사례를 분석한 결과 분류된 모든 경우는 종방향 균열이 20~80%로 나타났으며, 종방향 균열을 기본으로 횡방향 균열이 동시에 발생하는 현상을 보이는 것이 20~80%로서 대부분의 균열이 종방향 균열을 중심으로 발생하고 있었다. 특히 위의 두 가지 경우를 하나로 분류하게 된다면 95% 내외로서 콘크리트 라이닝의 균열은 종방향 균열이 지배하는 것으로 나타났다. 횡방향 균열이 단독으로 발생하는 경우는 6% 내외로 조사되었다 (전중규, 2006).

### 2.2 콘크리트 라이닝 균열 최소화 방안

콘크리트 라이닝의 경우는 시공적인 측면에서 콘크리트 타설시 폭 300~600 mm의 좁은 폭 및 철근사이에 타설, 강제거푸집의 콘크리트 타설구(500×600 mm)를 이용하여 콘크리트를 타설해야 하는 공간적 제한성 등 특수성으로 인해 콘크리트 타설에 많은 어려움이 있는

구조물이다. 따라서 콘크리트 타설시 밀실한 라이닝을 구성하는 것을 기본 목표로 하여 타설방안의 개선이 필수적이라고 말할 수 있다.

콘크리트 타설시 타설 높이가 4.0 m 이상의 낙하고를 갖게 되면 시공시 재료 분리가 발생할 수 있다는 연구 자료(정준화, 2001)에 근거해 터널단면크기에 따라 강제 거푸집 제작시 낙하고를 고려하여 연구 자료에서 제시된 4.0 m 이내가 되도록 타설구와 타설위치를 선정하여야 한다.

균열 최소화을 위한 방안으로는 터널단면의 크기에 따른 강제거푸집 및 콘크리트 타설방식을 개선, 효율적인 진동을 발생하게 하여 개선, 줄눈을 설치하여 천단부 종방향 균열을 유도시키는 방안 등이 있다. 추가적으로 동절기와 하절기의 특성에 따른 시스템 적용 등 부수적인 라이닝 품질 개선안의 마련도 요구된다. 상기 언급내용처럼 본 연구는 개선된 콘크리트 라이닝 타설 방법에 따라 터널 단면크기에 따른 영향을 연구하기 위하여 모형실험을 실시하였다.

### 3. 축소모형실험

#### 3.1 실험 개요

본 연구는 콘크리트 라이닝의 고질적인 문제점 중 하

나인 타설율을 증가시키기 위한 목적으로 실시되었다. 기존의 실시되었던 1/20 축소모형실험은 단면의 소형화에 따른 실제 현장 타설시와의 상이한 결과를 나타낼 것이 우려되어 추가적으로 1/7 축소율을 가진 강제거푸집을 제작하여 축소모형실험을 실시하였다. 이에 따라 기존의 타설 방법과는 다른 개선된 타설 방법을 제시하여 타설 방법 변화에 대한 양상과 1/7 축소모형실험과의 단면 변화에 따른 타설율의 양상을 파악하기 위해 실험을 실시하였다.

타설율 양상을 파악하기 위한 해석 모델은 타설방법 및 단면 변화에 따른 4가지 Case를 설정하였으며 그림 2와 같이 기존의 1/20 축소모형실험을 Case 1, Case 2로 설정하고 1/7 축소모형실험을 Case 3, Case 4로 설정하였다. Case 1은 기존 타설 방안으로 측벽부·천단부의 순으로 타설되고 타설구는 9개로 타설되며 Case 2는 측벽부·어깨부·천단부의 순으로 타설되고 타설구는 15개로 타설된다. Case 3은 Case 1과 같이 기존 타설 방안으로 측벽부·천단부의 순으로 타설되고 타설구는 8개로 타설되며 Case 4 또한 Case 2와 같이 측벽부·어깨부·천단부의 순으로 타설되고 타설구는 12개로 타설된다. 이와 같이 총 4가지 Case를 설정하여 실험을 실시해 이에 따른 타설량과 타설율을 비교·분석하였다. 축소모형실험의 기본 사항에 대해서는 표 1과 같이 정리하였다. 타

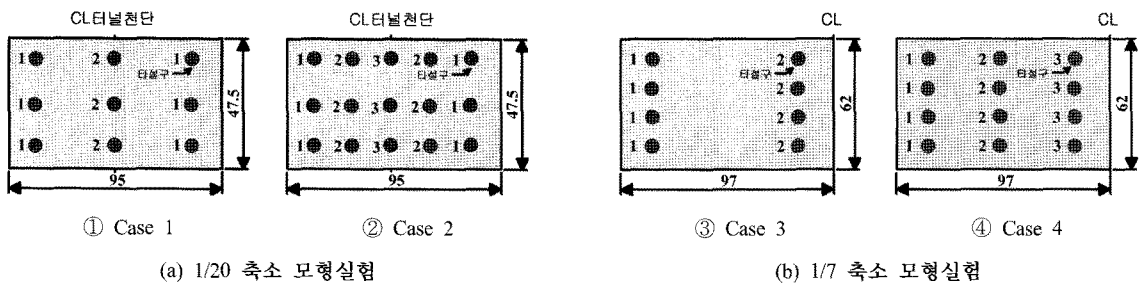


그림 2. 축소모형실험의 Case

표 1. 축소모형실험 기본사항

구분	Case	타설방법	타설단계	타설구 수
1/20 축소모형실험	1	측벽부·천단부 주입	2단계	9
	2	측벽부·어깨부·천단부 주입	3단계	15
1/7 축소모형실험	3	측벽부·천단부 주입	2단계	8
	4	측벽부·어깨부·천단부 주입	3단계	12

설 속도는 1시간 이내로 타설을 실시해 재료의 변질이 없게하여 실험의 신뢰도를 높였다.

축소모형실험을 실시하기 위해 시멘트, 물, 골재(모래) 3가지로 구성된 혼합물을 통해 라이닝을 구성하였으며 실제 라이닝과 흡사하게 조성하기 위해 축소율에 따른 슬럼프 시험을 실시해 실제라이닝의 강도와 흡사하도록 묘사해 배합비율을 선정하여 실제 라이닝을 묘사하였다.

### 3.2 실험 장비

1/20 축소모형실험과 1/7 축소모형실험을 실시하기 위한 기본적인 실험 장비는 다음과 같다.

#### 3.2.1 1/20 축소모형실험 장비

1/20 축소모형실험과 1/7 축소모형실험을 실시하기 위한 실험 장비는 전체적인 구성은 유사하지만 실험 장비의 핵심인 라이닝 타설 시스템의 차이점이 있다. 1/20 축소모형실험의 타설 시스템은 설비가 간단하고 청결한 장점을 갖고 있는 공압식으로 장비를 제작하였으며 거푸집의 규격은 95 cm(중) × 47.5 cm(횡)이다. 콘크리트 라이닝 타설 시스템 및 장비 전경은 그림 3과 같다.

#### 3.2.2 1/7 축소모형실험 장비

1/20 축소모형실험에서 사용된 타설 방식인 공압식은 일정한 압력을 타설할 수 없다는 단점이 있어 실험의 신뢰도를 저하시킬 우려가 있다고 판단하여 1/7 축소모형실험에서는 타설 시스템을 개선하였다. 개선된 1/7 축소모형실험의 타설 시스템은 일정한 압력을 타설할 수 있는 유압식으로 제작하여 실험의 신뢰도를 높였다. 1/7 축소모형실험에 사용된 거푸집의 규격은 1/2단면의 경

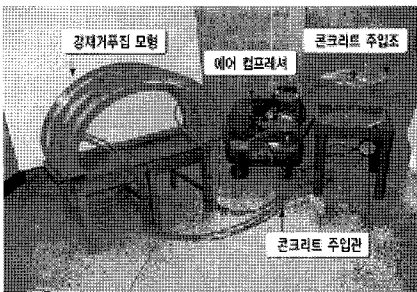


그림 3. 기존 1/20 축소모형실험장비

우 105 cm(중) × 97 cm(횡), 전단면의 경우 210 cm(중) × 97 cm(횡)으로 콘크리트 라이닝 타설 시스템 및 장비 전경은 그림 4와 같다.

강재 거푸집은 제작시 낙하고를 고려하여 연구 자료에서 제시된 4.0 m(축소율 고려시 57 cm) 이내로 제작함으로 인해 재료 분리를 최소화하였다. 또한, 1/7 축소모형실험에 사용된 강재거푸집은 콘크리트 라이닝이 좌우대칭이라는 가정하에 1/2 단면만을 사용하고 라이닝의 내부를 쉽게 관찰할 수 있도록 아크릴로 제작하였다. 1/20 축소모형실험은 실링을 하였으나 거푸집이 완전 밀폐되지 않았으며 압력 소산을 하기 위한 장치도 없었다. 1/7 축소모형실험에서는 이러한 부분을 개선하였다. 라이닝에 타설시 타설재의 유출을 방지하기 위하여 추가 실링을 하여 라이닝 Joint 부분들을 완전 밀폐하였으며, 시멘트 타설시 내부 밀폐에 따른 라이닝 내의 압력 상승을 방지하기 위하여 압력 소산용 공기 밸브를 설치하였다.

이러한 축소모형실험을 진행하기 위한 기본적인 축소 모델은 그림 5와 같이 나눌 수 있다.

### 3.3 실험재료의 특성

축소모형실험에 사용되는 모형재료는 실제의 물리적인 특성을 대변할 수 있어야 한다. 따라서 실제와 유사

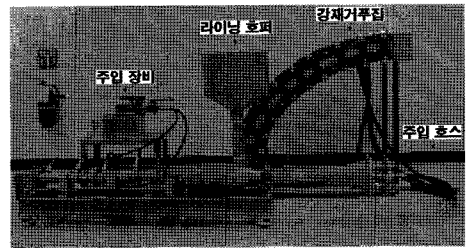
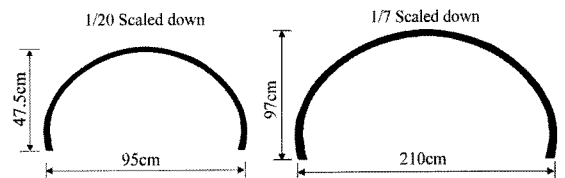


그림 4. 1/7 축소모형실험장비



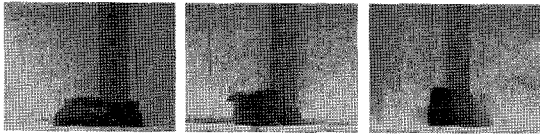
(a) 1/20 축소모형실험

(b) 1/7 축소모형실험

그림 5. 터널 콘크리트 라이닝의 축소모형

표 2. 슬럼프 시험치

시험	배합비 (물 : 시멘트 : 골재)	실제 슬럼프 시험치	슬럼프 시험치
1	1 : 2 : 2.4	20 cm	3 cm
2	1 : 2.2 : 2.7	15 cm	2.2 cm
3	1 : 2.5 : 3	10 cm	1.5 cm



(a) 시험 1      (b) 시험 2      (c) 시험 3

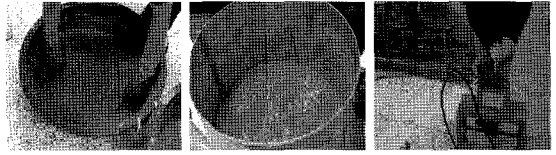
그림 6. 슬럼프 시험

한 재료의 배합비로 실험을 실시하기 위해 콘크리트의 반죽 질기를 측정하는 콘크리트의 슬럼프 시험(KS F 2402)을 실시하였다. 시험에 사용된 재료는 굳지 않은 콘크리트로 시멘트, 골재, 혼화재료, 물로 구성된다. 슬럼프 시험은 물, 시멘트, 골재(모래)의 순으로 각 배합비당 3회씩 측정을 실시하였으며 3회에 걸친 측정치의 평균값으로 슬럼프치를 나타냈다. 시험을 실시한 결과값은 표 2와 같으며 물/시멘트 비율을 변화시켜 실제 현장 타설에 사용되는 슬럼프 시험치에 해당하는 15 cm에 상응하는 배합비인 물 : 시멘트 : 골재(1 : 2.2 : 2.7)를 선정하여 축소모형실험에 사용하였다. 슬럼프 시험을 실시한 결과는 그림 6과 같다.

### 3.4 실험방법

본 연구에서 타설 방법에 따른 타설율을 비교·분석하기 위해 실시한 축소모형실험의 실험방법 및 순서는 그림 7과 같이 5가지 단계로 이루어졌다.

- ① 라이닝에 타설할 혼합물을 정해진 배합비에 따라 물과 시멘트를 혼합한다.
- ② 배합비에 따라 혼합한 시멘트 혼합물을 호퍼로 타설한다.
- ③ 호퍼에 타설된 혼합물을 가압장치를 이용하여 혼합물을 분배기로 이동시킨다.
- ④ 분배기로 이동된 혼합물은 실험 Case에 맞는 개수의 타설구로 다시 이동하게 되며 최종적으로 거푸집으로 타설된다.



시멘트 혼합      호퍼 주입      가압



피스톤 이동      타설      타설완료

그림 7. 단계별 실험 순서

표 3. 실험 Case

1/20 축소모형실험		1/7 축소모형실험	
Case 1	① 79.9%	Case 3	① 88.0%
	② 80.0%		② 88.2%
	③ 79.8%		③ 89.0%
Case 2	① 91.1%	Case 4	① 90.8%
	② 91.0%		② 91.7%
	③ 90.0%		③ 90.5%

- ⑤ 각 단계별 타설상태를 확인하고 결과를 비교·분석한다.

## 4. 실험 결과 및 분석

1/20 축소모형실험과 1/7 축소모형실험은 표 3과 같은 실험 Case에 대해 3회에 걸쳐 실험을 실시하였다. 실시한 값들은 평균치를 산정하여 분석하였다.

### 4.1 실험 결과

타설량은 호퍼를 기준으로 측정하였으며 호퍼의 규격은  $\varnothing 40$  cm로 1회 타설시 호퍼를 채운 타설량은 약 12 L 가량이며 총 4회 타설하였다. 타설율은 총 라이닝의 타설량을 기준으로 주입된 타설량을 백분율로 타설율을 산정하였다. Case별 타설소요시간은 타설량의 차이로 인해 차이를 보였으나 타설 시간의 큰 차이는 보이

표 4. Case별 실험 결과

구분	Case	실험	타설 높이	타설량
1/20 축소모형실험	1	1	20.3 cm	11669.7 cm <sup>3</sup>
		2	20.4 cm	11684.3 cm <sup>3</sup>
		3	20.2 cm	11655.1 cm <sup>3</sup>
	2	1	23.3 cm	13305.5 cm <sup>3</sup>
		2	23.1 cm	13290.9 cm <sup>3</sup>
		3	21.0 cm	13141.6 cm <sup>3</sup>
1/7 축소모형실험	3	1	69.1 cm	44617.6 cm <sup>3</sup>
		2	69.6 cm	44719.0 cm <sup>3</sup>
		3	71.4 cm	45124.7 cm <sup>3</sup>
	4	1	75.1 cm	46037.3 cm <sup>3</sup>
		2	77.2 cm	46493.6 cm <sup>3</sup>
		3	74.4 cm	45885.1 cm <sup>3</sup>

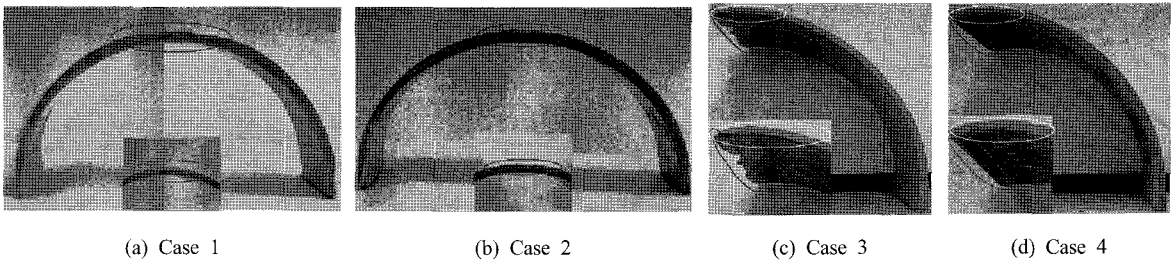


그림 8. Case별 콘크리트 라이닝

지 않았다.

기존 실시한 실험을 Case 1, 2로 설정하였으며 이번 연구에 위해 실시한 실험을 Case 3, 4로 설정해 축소모형실험을 실시하고, 이에 따라 4가지 Case가 타설율에 미치는 영향을 검토하였다. 실험 결과는 각 Case별로 2차례에 걸친 실험값으로 나타냈으며 각 Case별 실험 결과는 표 4와 같다. 그림 8과 같이 완성된 콘크리트 라이닝은 기존 타설 방안의 경우 개선된 타설 방안 보다 천단부에서 재료분리가 발생하여 균일한 라이닝을 구성하지 못하였다. 기존의 방안은 개선된 방안에 비해 낙하고에 따른 불량개소가 존재하는 것으로 판단된다.

## 4.2 축소모형실험 결과의 비교 분석

### 4.2.1 1/20 축소모형실험

#### 4.2.1.1 실험에 대한 분석

타설율 향상을 위해 개선된 타설 방법에 따른 1/20 축

소모형실험을 실시하기 위해 측벽부·천단부로 타설되는 Case 1과 측벽부·어깨부·천단부로 타설되는 Case 2의 2가지로 구성하여 실험을 실시하였다. 실험을 실시한 결과 Case 1의 타설량은 11.7 L, 타설율은 79.9%로 나타났으며 Case 2의 타설량은 13.5 L, 타설율은 90.7%로 나타났다.

타설량과 타설율의 결과로 인해 새롭게 제시한 단계별 타설 방법이 기존의 타설 방법 보다 타설량은 1.8 L 상승하고 타설율은 9.8%가 상승하였다. 그 결과 새롭게 제시한 타설 방법의 적합성을 판단할 수 있었으며 추가적으로 유동분석을 실시한 수치해석 결과를 참고로 실험을 검증하였다.

#### 4.2.1.2 기존 수치해석 결과의 비교

1/20 축소모형실험에서 개선된 타설 방안에 대해서 기존 연구된 논문의 해석에 따른 유동분석을 통한 효율

성이 검증되었다. 본 연구에서는 수치해석과 모든 제반 사항을 같이 적용하여 1/20 축소모형실험을 실시해 기존에 실시되었던 유동분석과의 비교·분석을 실시하여 재평가하였다.

콘크리트 라이닝의 밀실탈설 여부에 대한 검증을 위해 유한체적법(FVM: Finite Volume Method)을 사용되었다. 모든 유동에 대해서는 식 (1)과 같은 기본적인 연속방정식과 식 (2)와 같은 운동량 방정식을 적용하며 유동의 유형에 따라서 필요한 방정식을 추가 및 제거하여 해석되었다.

$$\text{연속 방정식: } \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{\rho v}) = S_m \quad (1)$$

운동량 방정식:

$$\frac{\partial (\vec{\rho v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{\rho v v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\vec{\tau}) + \vec{\rho g} + \vec{F} \quad (2)$$

여기서,  $S_m$ : 질량 생성항,  $\mu$ : 점성,  $\vec{F}$ : 체적력,  $\vec{\tau}$ : 난류응력

유동분석을 실시하기 전 콘크리트 라이닝 유동해석의 초기조건은 강제 거푸집 내부는 초기에 공기만이 존재하며 타설시에는 공기의 타설은 없다는 것으로 각 해석조건별로 타설구에 따라 개별적인 경계조건을 적용시켰다.

수치해석 결과 Case 1의 최소 밀실도는 72%, Case 2의 최소 밀실도는 96%로 나타났으며 기존 타설 방안과 개선된 타설 방안은 최소 20% 이상의 차이를 보이는 것으로 나타나 상당한 차이를 보이는 것을 알 수 있었다. 이와 같은 타설 방법에 따른 유동분석을 통한 밀실도의

양상은 그림 9와 같으며 추가적으로 실제 실험한 콘크리트 라이닝 사진과 비교·분석할 수 있게 하였다. 비교한 결과 유사한 양상을 보이며 1/20 축소모형실험의 타설 방안에 대한 타당성을 검증할 수 있었다.

#### 4.2.2 1/7 축소모형실험에 대한 분석

1/7 축소모형실험은 1/20 축소모형실험과 비교를 위해 모든 제반사항을 같이하여 실험을 실시하였다. 1/20 축소모형실험과 같이 측벽부·천단부로 타설되는 Case 3과 측벽부·어깨부·천단부로 타설되는 Case 4의 2가지로 구성하여 실험을 실시하였다. 실험을 실시한 결과 Case 3의 타설량은 44.6 L, 타설율은 88.4%로 나타났으며 Case 4의 타설량은 46.1 L, 타설율은 91.0%로 나타났다. 이와 같은 나타난 타설량과 타설율의 결과로 인해 새롭게 제시한 측벽 어깨 천단에 따라 단계별 타설 방법이 기존의 측벽 천단부 타설 방법 보다 타설량은 1.5 L 증가하고 타설율은 2.6%가 증가하였다.

### 5. 실험 결과에 따른 영향 비교

#### 5.1 타설 방법에 따른 영향 비교

1/20 축소모형실험의 경우 Case 1은 79.9%의 타설율이 나타났다. Case 2는 90.7%의 타설율이 나타났으며 Case 1에 비해 10.8% 가량 타설율이 증가하였다. 1/7 축소모형실험을 실시한 결과 Case 3의 경우 타설량은 44.6 L, 타설율은 88.4%이다. Case 4의 경우 타설량은 46.1 L, 타설율은 91%로 Case 3에 비해 2.6%가량 타설율이 증가하였다. Case에 따른 결과는 그림 10과 같이

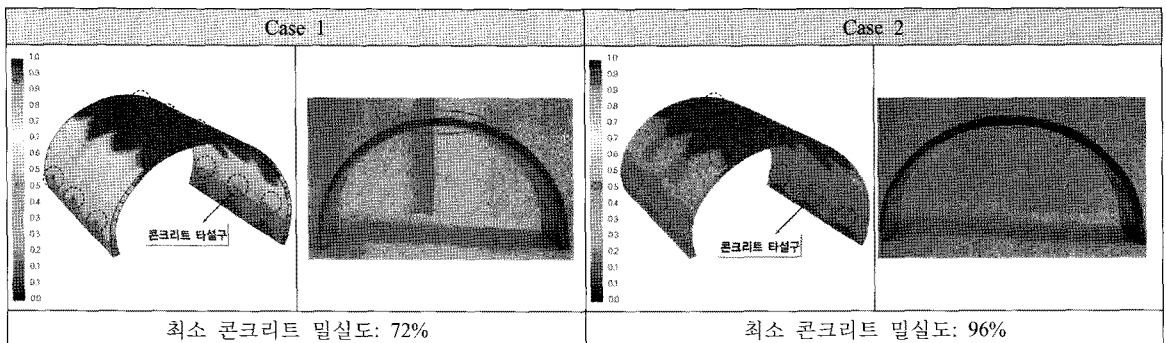


그림 9. 해석 Case별 결과분석

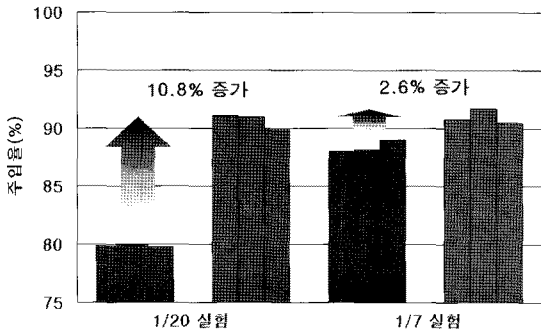


그림 10. 타설 방법에 따른 타설율 그래프

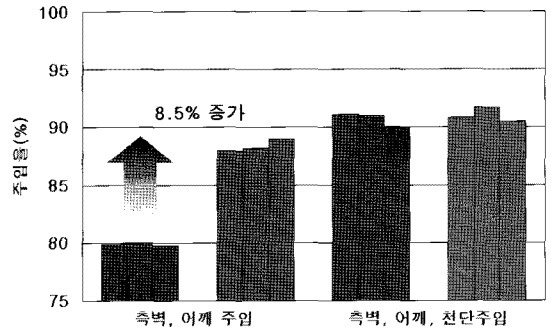


그림 11. 단면 변화에 따른 타설율 그래프

축소율에 따라 타설율을 그래프로 나타냈다. 이와 같이 타설율이 증가한 결과는 개선된 타설 방법이 기존의 타설 방법 보다 낙하고를 지속적으로 감소시켜 단계적인 타설이 이루어져 타설율이 증가된 것으로 판단된다. 또한, 실험 종료 후 콘크리트 라이닝을 확인한 결과 증가된 타설율로 인해 개선된 타설 방법인 Case 4는 Case 3 보다 전체적인 라이닝의 두께가 균일하게 나타났으며 Case 3의 경우 천단부에서 약 8 cm 가량의 공극이 발생하였으나 Case 4의 경우 천단부에서는 약 5 cm 가량의 공극이 발생하였다. 이러한 결과는 거푸집 개선 및 타설 방안 개선에 따른 콘크리트 라이닝의 품질이 개선된 것으로 판단되며 이에 따라 개선된 타설 방법에 대한 적용성 및 내구성에 대해 확인할 수 있었다.

## 5.2 터널 단면변화에 따른 영향

단면 변화에 따른 영향을 살펴보기 위해 타설 방법이 같은 경우는 기존 콘크리트 라이닝의 타설 방법인 측벽·천단부로 타설하는 방법 Case 1, Case 3의 경우와 개선된 타설 방법인 측벽·어깨·천단부로 타설하는 방법 Case 2, Case 4의 경우로 2가지로 나누어 분석을 실시하였다.

그림 11과 같이 1/20 축소모형실험 Case 1, Case 2의 타설율은 79.9%, 90.7%이고 1/7 축소모형실험 Case 3, Case 4는 타설율은 88.4%, 91%로 나타났다. 타설율은 1/20 축소모형실험 Case 1의 경우의 타설율이 79.9%로 가장 낮게 나타났으며 1/7 축소모형실험 Case 4의 경우가 91%로 가장 높게 나타났다.

단면에 따른 결과 Case 1과 Case 3의 경우는 약 9%가량 타설율의 차를 보였으며 Case 2와 Case 4의 경우는 약 0.3%가량 타설율의 차를 보였다.

1/20 축소모형실험이 콘크리트 라이닝의 축소율이 커서 실제 현장 타설시와 상이한 결과를 나타낼 것이 우려되었다. 하지만 1/7 축소모형실험과의 결과와 비교시 약간의 차이는 있지만 유사한 타설율을 나타내므로 기존의 1/20 축소모형실험과 1/7 축소모형실험이 모두 신뢰성을 갖는 것으로 판단된다. 이것은 기존 실험 장비를 개선하여 실험의 신뢰성이 증가되어 타설율이 증가된 것으로 판단된다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 터널 콘크리트 라이닝의 고질적인 문제점을 개선하기 위하여 타설율을 증가시키기 위한 방안을 제시하였으며 이를 검증하기 위한 실험을 실시하였다. 축소모형실험은 라이닝의 단면크기 및 타설 방법의 변화에 따른 4가지 실험 Case를 통하여 이들이 타설율에 미치는 영향을 분석하였다. 이로부터 얻어진 주요 결과는 다음과 같다.

1. 제시한 타설 방법이 타설율에 미치는 영향을 알아보기 위해 축소모형실험을 실시한 결과 개선방법인 Case 4의 경우가 기존의 타설 방법인 Case 3의 경우보다 2.6%의 타설율이 향상되었다.
2. 향상된 타설율은 개선된 타설 방법이 기존 타설 방법에 비해 재료의 타설이 단계적으로 이루어져 재료분리가 적게 나타나 배면 공극이 상당량 감소하였다.
3. 터널의 단면크기에 대한 변화가 타설율에 미치는 영향을 알아본 결과 Case 1, 3의 경우 Case 3이 8.5%가량 타설율이 향상되었고 Case 2, 4의 경우는 0.3%



가량 타설율이 향상되었다.

4. 1/20 축소모형실험과 1/7 축소모형실험의 타설율은 Case 1, 3의 경우는 상당량의 타설율 차이를 보였지만 Case 2, 4의 경우 유사한 타설율을 나타내어 개선방안에 대해 유사한 신뢰성을 갖는다.
5. 개선된 타설 방법은 기존 타설 방식에 비하여 향상된 타설율에 따라 경제적인 시공 효과와 콘크리트 라이닝의 고품질에 따른 유지보수비의 절감 효과를 얻을 것으로 기대된다.

본 연구에서는 고품질 콘크리트 라이닝 시공방안의 일환으로 강재거푸집 개선 및 개선된 타설방안에 대하여 제시한 개선된 타설 방법이 기존 타설 방식 보다 타설율이 향상되었음을 확인하였다. 개선 타설 방법에 의해 타설율이 향상됨으로 인해 시공시 라이닝의 고질적인 문제점을 해결하였으나, 향후 배합설계 및 구조물의 유지관리 등에 대한 콘크리트 라이닝의 고질적인 문제점에 대해서 지속적인 연구가 요구된다.

## 감사의 글

본 논문은 호서대학교 교내 특별연구과제의 지원으로 이루어졌습니다.

## 참고문헌

1. 김상환, 나경웅, 고성일 (2006), “대단면 터널 라이닝 콘크리트 타설 기법 개선에 관한 연구”, 터널기술, 한국터널공학회 논문집, 제8권, 제1호, pp. 77-86.
2. 배규진, 이규필 (2001), “복개터널 라이닝 해석을 위한 모델링 기법에 관한 연구”, 터널기술, 한국터널공학회 논문집, 제3권, 제2호, pp. 13-22.
3. 신중호, 신용석, 박동인, 채성은, 최규훈 (2009), “수치해석을 이용한 세그먼트라이닝의 수리거동과 누수제어 연구”, 터널기술, 한국터널공학회 논문집, 제11권, 제2호, pp. 131-140.
4. 서강천 (2002), “터널콘크리트 라이닝의 균열현황 및 분석”, 한국구조물 진단학회, 제6권, 제3호, pp. 22-29.
5. 정준화 (2001), “대단면 터널의 지보 및 라이닝 CONC. 시공”, 제 1회 터널 시공기술 향상 대토론회, pp. 63-78.
6. Allen G. Davis, Malcolm K. Lima and Claus Germann Petersen (2005), “Rapid and economical evaluation of concrete tunnel linings with impulse response and impulse radar non-destructive methods”, NDT & E International, Vol 38, Issue 3, pp. 181-186.
7. Galli, G., Grimaldi, A. and Leonardi, A. (2004), “Three-dimensional modelling of tunnel excavation and lining”, Computers and Geotechnics, Vol. 31, Issue 3, pp. 171-183.
8. Oreste, P. P. (2002), “The importance of longitudinal stress effects on the static conditions of the final lining of a tunnel”, Tunnelling and Underground Space Technology 17, pp. 21-32.

접수일(2009.7.29), 수정일(2009.8.14), 게재확정일(2009.8.20)