

# NATM Composite 라이닝 공법 개발을 위한 기초 연구

## Basic Study for Development of NATM Composite Lining Method

마 상 준<sup>1</sup> Ma, Sang-Joon

강 은 구<sup>2</sup> Kang, Eun-Gu

김 동 민<sup>3</sup> Kim, Dong-Min

신 주 열<sup>4</sup> Shin, Joo-Yul

### Abstract

This paper presents the fundamental parameters for designing the NATM Composite Lining to be used in NATM tunnel construction. Firstly, the concept of NATM Composite Lining behaviour is introduced and reviewed in construction-performance. For the fundamental study, the optimal mix ratio tests and backfill material property tests to develop high-quality composite lining (PC panel lining) are fundamentally carried out. And the light-weight foamed mortar which is used for backfill material is developed. Full-scale loading tests to verify a performance of the NATM Composite Lining is also performed. From this research, it is clearly found that the NATM Composite Lining is very applicable method to considerably increase the stability and constructability of tunnel structure.

### 요 지

본 연구에서는 기존 NATM 터널공법의 문제점을 개선한 신개념의 NATM Composite 라이닝 공법 개발에 대한 기초 연구를 수행하였다. 먼저 NATM Composite 라이닝 공법의 개요 대하여 소개하고 시공성에 대한 검토를 수행하였다. 그리고 NATM Composite 라이닝 공법의 개발을 위한 기초 연구로서 고성능 PC 패널 라이닝의 개발을 위해 다양한 혼화재료의 영향을 검토하고, PC 패널 설치 위치별 최적 배합을 도출하였다. 또한 PC 패널 배면 뒤채움재료 경량기포 모르타르 재료를 개발하였으며 실험 하중재하 실험을 통해 NATM Composite 라이닝 공법의 거동 특성을 규명하였다. NATM Composite 라이닝 공법은 기존 현장타설 라이닝 공법에 비해 안정성과 시공성을 크게 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

**Keywords** : Full-scale Loading test, In-Plane Permeability, Light-weight foamed mortar, NATM Composite Lining

### 1. 서 론

1980년대 초반 이후 국내 터널은 주로 NATM(new Austrian tunneling method) 공법을 적용하여 왔다. NATM 터널 공법은 2차 치보재로 현장타설 콘크리트 라이닝을 적용한다. 하지만 현장타설 라이닝은 시공시 공기지연,

품질관리의 어려움, 균열발생 등의 문제점이 노출되고 있다(배규진 등, 2004). 또한 기존 NATM 공법의 배수재로 이용되던 부직포는 통수 단면이 수 mm 정도로 매우 작아 지하수 유입 시 흡입자에 의한 막힘 현상(clogging)이 발생하여 배수능력이 급격하게 저하되는 문제가 나타나며 이로 인해 터널 라이닝에 과도한 잔류수압을 발

1 정회원, 한국건설기술연구원 연구위원 (Research Fellow, Korea Institute of Construction Technology)

2 정회원, 한국건설기술연구원 전문연구원 (Research Specialist, Korea Institute of Construction Technology, egkang@kict.re.kr, 교신저자)

3 정회원, 한국건설기술연구원 전문연구원 (Research Specialist, Korea Institute of Construction Technology)

4 비회원, 한국시설안전공단 부장 (Head of Department, Korea Infrastructure Safety & Technology Corporation)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2012년 6월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

생시키는 원인이 된다(Giroud, 1981).

국외의 경우 NATM 터널의 사고 사례 및 현장타설 콘크리트 라이닝의 문제점(공기지연, 품질관리 어려움, 균열발생 등)에 대한 활발한 연구가 이루어져 최근에는 일본의 NTL 공법, 노르웨이의 PCL(prestressed lining) 공법, 싱글셸(single shell) 공법 등의 개발이 이루어졌으며, 자국 실정을 고려하여 체계적으로 시공이 이루어지고 있다. 이 중 PCL 공법은 공장에서 미리 만들어진 PC 패널을 조립하여 터널 라이닝을 시공하는 방법으로 터널 공기의 단축, 보수·보강 공사비의 절감 등의 장점을 지니고 있다(이두화와 오세준, 2001). 따라서 국내 터널 현장에도 현장타설 콘크리트 라이닝을 대체하여 PCL 공법의 도입이 매우 시급하다고 판단된다.

그러나 PCL 공법은 PC 패널 이외에 추가적인 지보를 설치하지 않으며 PC 패널 배면과 지반 사이에 뒤채움재를 주입하지 않아 응력 집중이 발생할 가능성이 크다. 따라서 절리가 많고 암질이 불량한 국내 지반에 도입을 위해서는 PC 패널과 암반의 이격공간을 효과적으로 채울 수 있는 뒤채움 재료 및 지보 공법 개발이 이루어져야 한다.(마상준 등, 2006).

본 연구에서는 기존 국내 NATM 공법의 문제점을 개선하고 터널의 안정성을 향상시키기 위하여 기존 PCL 공법을 개량한 신개념의 NATM Composite 라이닝 공법을 개발하였다. NATM Composite 라이닝 공법은 슛크리트 타설면과 PC 패널 라이닝 사이의 이격공간을 경량 기포 모르타르로 충전하여 기존 배수재의 배수성능 저하를 방지하고, 터널 구조물에 작용하는 상재하중을 효과적으로 고품질 PC 패널 라이닝에 전달시켜 안정성을 극대화할 수 있는 공법으로 기존 NATM 지보재를 준용함으로써 암질이 좋지 않은 국내 터널 현장에도 바로 적용이 가능하다. 또한, 공장에서 생산한 PC 패널의 조립만으로 시공이 이루어져 라이닝 시공 기간을 대폭 단축시킬 수 있으며 부직포 및 방수막 시공 과정을 생략하여 시공 및 유지관리가 용이한 장점이 있다.

본 연구에서는 NATM Composite 라이닝 공법 개발의 기초 연구로서 다양한 혼화재의 영향을 검토하여 라이닝 설치 위치별 PC 패널의 최적 배합을 도출하였으며, 라이닝의 뒤채움재로서 하중 전달 및 배수기능을 효과적으로 발휘할 수 있는 경량기포 모르타르 재료를 개발하였다. 그리고 평면 투수실험을 통해 기존 배수재와 경량기포 모르타르의 투수성을 평가하였으며 실대형 하중재하 실험을 통해 NATM Composite 라이닝 공법의

거동특성을 규명하고 안정성을 평가하였다.

## 2. NATM Composite 라이닝 공법 개요

그림 1에 본 연구를 통해 개발한 NATM Composite 라이닝 공법의 개요도를 나타내었다. NATM Composite 라이닝 공법은 기존 NATM 공법의 지보재인 록볼트와 슛크리트를 적용하여 굴착 후 지반의 안정성을 확보하고, 공장 생산된 고품질 PC 패널의 조립을 통해 라이닝을 시공하며, 슛크리트 타설면과 PC 패널 사이의 이격공간을 경량기포 모르타르로 충전하여 추가적인 지반 이완하중을 터널 라이닝에 전달시킴으로서 터널의 안정성을 극대화시키는 공법이다.

PC 패널은 공장에서 사전 제작되어 45MPa 이상의 고강도 품질을 유지하게 되며 슛크리트 타설 후 이완하중 및 집중하중 작용 시 지보재로 거동하여 터널 구조물의 안전성을 향상시키는 역할을 한다. PC 패널 라이닝은 5개~7개 패널 조립으로 터널내부의 링을 형성하게 되는데 천단부 PC 패널은 조립 진행방향과 시공성을 고려하여 Key 형태로 제작된다.

NATM Composite 라이닝 공법의 하부 공동구는 기존 NATM 터널의 공동구와 거의 유사한 형태로 제작되며 PC 패널이 설치되는 키블록이 설치된 것이 특징이다. 하부 공동구에서는 PC 패널 홈을 기준으로 하여 PC 패널 라이닝의 연속적인 조립 시공이 이루어지게 되며 부직포와 방수막을 설치하여 경량기포 모르타르를 통해 유입된 지하수를 측방 배수관, 횡방향 배수관 및 배수구로 배수시키게 된다.

그림 2는 PC 패널 연결부의 단면의 모습을 나타내었다. PC 패널은 볼트박스에서 고장력 볼트를 이용해 조

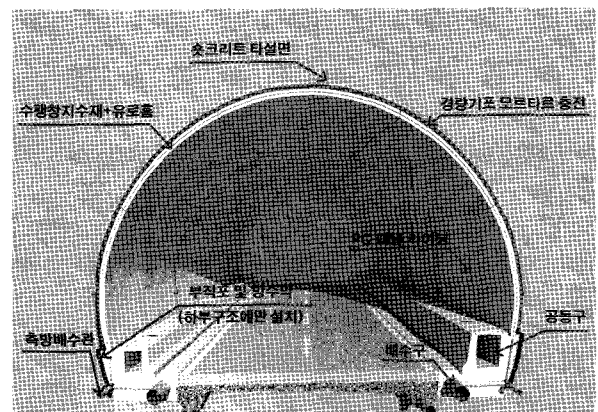


그림 1. NATM Composite 라이닝 터널 개요

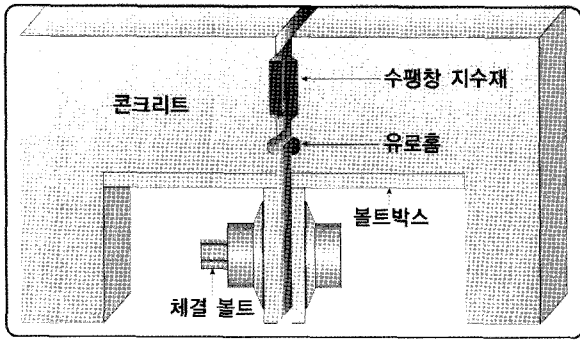


그림 2. PC 패널 단면 형상

립되며 수평창 지수재와 유로홈을 설치하여 터널 내부 누수를 방지한다.

### 3. 고성능 PC 패널 개발

고성능 PC 패널의 생산은 NATM Composite 라이닝 공법의 안정성 확보를 위한 가장 중요한 요소 기술 중의 하나이다. 기존 PC 패널의 경우 일반적으로 3종 조강시멘트를 이용하여 제작함으로써 거푸집 탈형 시기를 줄여 생산성을 높이고 있다. 하지만 조강시멘트의 경우 보통 포틀랜드 시멘트에 비하여 고가이며 재료비를 상승시키는 원인이 된다. 따라서 본 연구에서는 NATM Composite 라이닝에 적용되는 고성능 PC 패널 개발을 위해 국내에 출시된 다양한 혼화재료를 혼입한 배합의 역학적 특성을 분석하여 PC 패널 라이닝의 설치 위치별로 경제적이고 안전한 최적 배합을 도출하고자 하였다.

#### 3.1 PC 패널 품질성능 평가 개요

PC 패널 역학적 거동특성 평가를 위한 실험 배합표는 표 1과 같다. 본 실험에는 국내 PC 패널 제작에 사용되는 제 3종 조강포틀랜드시멘트를 사용하였으며 혼화재

로 실리카흙(SF), 플라이애쉬(FA), 고로슬래그 미분말(BFS), 스틸파우더(SPA)를 혼입하여 혼화재를 혼입하지 않은 배합(P)과의 양생 특성을 비교 분석하여 고품질 PC 패널의 최적 배합을 도출하고자 하였다.

기존 실험 사례 및 사전의 실내 실험(한국건설기술연구원, 2008)을 통하여 각 혼화재 별 최적 혼입량을 산정하였으며 실제 PC 패널 제작 과정을 동일하게 모사하기 위해 증기양생을 실시하여 시편을 제작하였다. 또한, 실제 생산조건에 가능한 한 부합되도록 증기양생 후 9시간 이상의 양생시간을 두어 시편이 충분히 양생될 수 있도록 유도하였다.

본 물성 실험에서는 각 배합별 시편의 강도특성 평가를 위하여 압축강도(KS F 2405, 2005) 및 휨강도(KS F 2408, 2000)를 측정하였으며 터널 내부에서의 열화 요인에 따른 장기내구성능 평가를 위하여 900일 간 옥외 폭로 시험장에 시편을 거치하고 상대동탄성계수 변화를 측정하여 동결융해 저항성능을 평가하였으며, 900일 간 일반 대기 중의 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)에 공시체를 노출시켜 중성화 깊이를 측정하여 탄산화 저항성을 평가하였다. 또한 900일간 옥외폭로 시킨 시편의 염소이온 투과 저항성 시험을 수행하여 투수성 평가를 통한 장기내구성능 검토를 수행하였다.

#### 3.2 PC 패널 강도 시험 결과

##### 3.2.1 압축강도 시험결과

표 2에는 PC 패널 강도 시험 결과를 나타내었다. 압축강도 시험결과 PC 패널이 증기양생 및 기건 양생을 끝내고 출하되는 재령 14일을 기준으로 하였을 때, 혼화재를 혼입하지 않은 배합(P 배합)의 압축강도가 61MPa로 가장 우수하게 나타났다. 따라서 조강시멘트를 사용할 경우에는 특별히 혼화재의 혼입 없이도 고품질의 PC

표 1. PC 패널 재료시험 배합표

배합	공기량 (%)	S/a (%)	W/C (%)	SF (%)	FA (%)	BFS (%)	SP (%)	Mixing (kg/m <sup>3</sup> )									
								C	W	S	G	SF	FA	BFS	SP	AE	
3종 조강포틀랜드시멘트 사용																	
P							437.3		694.0								
SF-5				5.0			415.5		694.0		21.9						
FA-20	2.0	39.4	34.3		20.0		349.9	150.0	694.0	1084.0		87.5					7.00
BFS-30						30.0	312.7		694.0					124.6			
SPA-4							437.3	4.0	666.2							27.8	

SF: 실리카흙, FA: 플라이애쉬, BFS: 고로슬래그 미분말, SPA: 스틸파우더, AE: AE제

표 2. PC 패널 강도 시험결과

배합	압축강도(MPa)				휨강도(MPa)			
	1일	14일	28일	90일	1일	14일	28일	90일
P	48	61	63	69	4.4	4.8	5.0	5.3
SF-5	45	55	59	61	4.3	4.6	4.7	4.9
FA-20	38	42	44	47	3.7	4.4	4.4	4.6
BFS-30	39	52	55	60	4.0	4.6	4.8	4.8
SPA-4	47	57	61	63	4.4	4.6	4.8	5.1

패널을 제작할 수 있을 것으로 판단된다. 실리카흙을 혼합한 배합에서는 포졸란 반응으로 인해 초기 및 장기 강도가 우수하게 나타났으며 스틸파우더를 혼입한 배합(SPA-4 배합)의 경우 철의 팽창으로 인해 조밀한 조직을 형성하여 우수한 결과를 나타내었다. 스틸파우더 혼화재의 경우 아직까지 성능에 대한 검증 및 적용사례가 거의 전무한 실정으므로 추후 다양한 성능 평가가 이루어져야 할 것으로 판단되지만 강도 발현 특성만은 우수한 것으로 사료된다. 플라이애쉬 혼입 배합(FA-20 배합)의 경우 고온의 증기양생 시 포졸란 반응속도가 증가하여 강도 발현효과가 나타나는 것으로 보고되고 있으나 혼입량 증가 시 초기강도가 감소하게 되는 것으로 알려져 있다(이진용, 배성용, 1998). 실험결과 플라이애쉬 혼입배합의 경우 타 혼화재에 비해 초기강도가 현저히 낮게 나타났으며 장기강도 발현 효과도 부족한 것으로 나타나 초기 탈형강도가 중요하게 생각되는 PC 패널의 혼화재료로는 부적절 할 것으로 판단되었다. 이는 플라이애쉬의 주성분인  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$ 가 시멘트의 수화생성물인  $Ca(OH)_2$ 와 반응하는 속도가 타 혼화재에 비해 느리기 때문으로 증기양생 조건하에서도 크게 개선되지 않았기 때문으로 생각된다. 하지만 압축강도 시험결과 실리카흙, 고로슬래그미분말, 스틸파우더 혼입 배합에서는 14일 탈형 강도가 45MPa 이상으로 발현되었으며 내구성능 및 경제성을 고려하여 PC 패널 라이닝 재료로 적용이 가능 할것으로 판단된다.

### 3.2.2 휨강도 시험 결과

휨강도 시험 결과 압축강도 결과와 유사한 경향을 나타내었다. 재령 14일에서 혼화재 미혼입 배합(P 배합)은 4.8MPa, 스틸파우더 혼입배합(SPA-4 배합)은 4.6MPa로 나타났는데 이는 스틸파우더 혼입 배합의 경우 혼입된 스틸파우더가 부식됨으로써 콘크리트와의 부착성을 증진시키고 팽창성 및 자체 강성으로 인해 콘크리트 매트릭스 내에서 힘에 대한 저항성을 증대시키기 때문으

로 판단된다. 고로슬래그 미분말 혼입배합(BFS-30 배합) 및 실리카흙 혼입배합(SF-5 배합)의 경우에도 14일 휨강도가 4.5~4.7MPa 범위로 나타나 혼화재의 강도발현 성능이 충분함을 확인 할 수 있었다. 하지만 플라이애쉬 혼화재의 경우 4.4~4.5MPa로 압축강도와 마찬가지로 강도 발현이 다른 혼화재에 비해 저조한 것으로 나타났다. 휨강도 시험결과 전반적인 혼화재별 강도발현 특성은 압축강도와 비슷하게 나타났으며 시험결과 28일 강도가 4.4~4.8MPa로 나타나 충분한 휨 저항 성능을 지닐 수 있을 것으로 생각된다.

### 3.3 PC 패널 장기 내구성능 시험결과

#### 3.3.1 동결융해 저항성 시험

본 연구에서는 PC 패널의 동결융해 저항성능을 평가하기 위하여 시편을 900일 동안 옥외폭로 시켜 상대동탄성계수의 저하정도를 평가하였다(KS F 2456, 2008). 그림 3은 각 혼화재별 장기폭로에 의한 상대동탄성계수의 감소를 나타낸 것이다. 시험결과 재령이 증가함에 따라 전체적으로 상대동탄성계수가 미소하게 저하됨을 알 수 있다. 하지만 모든 배합에 AE제가 첨가되어 상대적으로 동결융해 저항성능이 모두 우수하게 나타났으며 특히 실리카흙이 혼입된 SF-5 배합의 경우 900일 옥

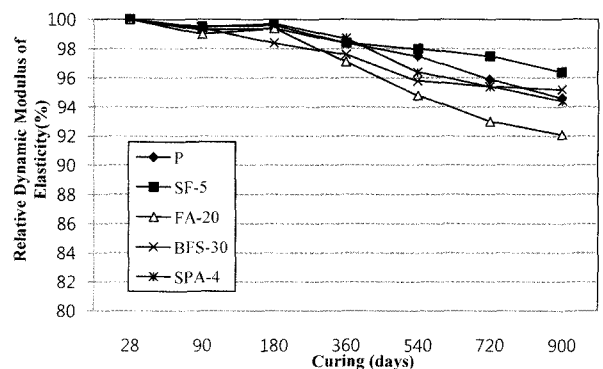


그림 3. 동결융해 저항성 시험결과

외폭로 시킨 결과 상대 동탄성계수가 96.4%로 매우 우수한 성능을 나타내었다. 또한 가장 낮은 성능을 나타낸 플라이애쉬 혼입배합 역시 900일 옥외폭로 시킨 결과 92.1%의 상대동탄성계수를 나타내어 동결융해 저항성능에는 큰 문제가 없을 것으로 판단된다.

장기 옥외폭로 900일 동안 옥외폭로 시험장의 동결기 영하 일수를 살펴보면 평균적으로 연간 60일정도 영하의 온도를 나타내었다. 2번의 동결기를 거치는 동안 120번 정도의 동결융해를 반복하였다고 볼 수 있다. 900일 정도의 옥외폭로 시험결과 동결융해 작용에 따른 상대 동탄성계수의 저하 정도가 작아지고 있으며 모든 배합에서 92% 이상을 나타내어 국내 터널 내부의 환경을 감안하여 볼 때 모든 배합이 동결융해에 의한 내구성 저하는 문제 되지 않을 것이라 판단된다.

### 3.3.2 탄산화 저항성 시험

그림 4는 탄산화 저항성 시험(KS F 2584, 2010)결과를 나타낸 것이다. 중성화 깊이 측정결과 900일 동안 일반 대기 중의 CO<sub>2</sub> 가스에 노출된 공시체의 중성화 깊이는 플라이애쉬 배합의 경우 6.5mm로 나타나 가장 중성화 진행정도가 컸으며 저항성이 가장 우수한 배합은 실리카흙 및 스틸파우더를 혼입한 배합으로서 각각 5.5mm 및 5.8mm를 나타내었다. 실리카흙 배합과 스틸파우더 배합의 경우 강도, 동결융해 저항성 및 탄산화 저항성능이 우수하고 대기중의 CO<sub>2</sub>가 콘크리트 시편으로 침투하는 경향이 감소하는 것으로 나타나 타 배합에 비하여 치밀한 조직을 형성하는 것으로 판단된다. 따라서 혼화재가 혼입되지 않은 P배합에 비하여 PC 패널의 전반적인 품질을 향상시켜 주는 것으로 생각 되지만 재료가가이므로 경제성을 고려하여 적절한 혼입이 이루어져야 할 것으로 보인다. 고로슬래그 미분말 혼입 배합의

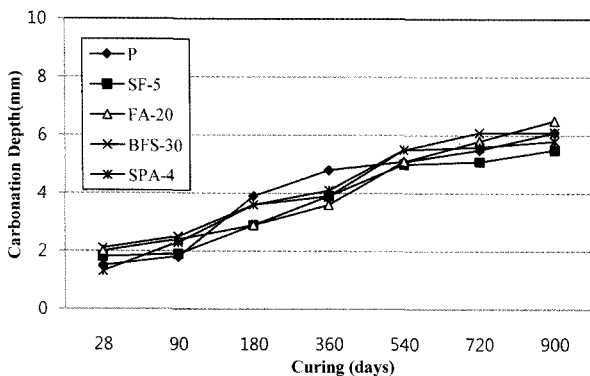


그림 4. 탄산화 저항성 시험 결과

경우 탄산화 저항성이 P 배합과 비슷한 결과를 나타내 물/시멘트비 및 유동화제 사용량을 면밀히 검토하면 조강시멘트의 양을 감소시키면서 경제적으로 콘크리트 중성화에 대한 내구성 확보가 가능하리라 판단된다.

본 PC 패널의 경우 시험을 실시한 약 2.5년 동안 중성화 침투 깊이가 5.5~6.5mm로 나타나 피복두께를 50mm로 할 경우 약 25년 후 자연적으로 철근위치까지 중성화가 진행될 것으로 예측이 가능하지만 실제 중성화는 대부분은 초기 1년 동안 발생하며 점차 그 속도가 줄어들게 되므로 그 이상의 중성화 내구연한을 지닐 수 있을 것으로 생각된다.

### 3.3.3 염소이온 투과 저항성 시험

본 연구에서는 PC패널의 투수성에 따른 장기내구성 검토를 위하여 ASTM C 1202(2010)에 준하여 염소이온 투과저항성 시험을 실시하였다. 그림 5는 염소이온 투과 저항성 시험결과를 나타낸 것이다. 통과 전하량 측정결과 실리카흙을 넣은 배합이 Very Low를 기록하여 가장 치밀한 경화구조를 가지고 있음을 간접적으로 알 수 있었으며 그 다음 배합으로는 스틸파우더를 혼입한 배합으로 나타났다.

장기 옥외 폭로에 의한 영향을 검토한 결과 모든 배합에서 재령 900일까지 초기의 값과 유사한 정도의 염소이온 투과성을 보여 옥외 폭로 열화에 의한 내부 매트릭스 미세균열 발생량이 매우 적게 나타났음을 간접적으로 알 수 있었다. 스틸파우더 및 고로슬래그 배합의 경우 옥외 폭로 기간이 증가함에 따라 전하통과량 수치가 약간 증가하는 경향을 보였지만 그 영향은 크지 않은 것으로 판단되며 P, BFS, FA 배합의 경우 거의 일정한 전하통과량을 나타내어 미세균열에 의한 중성화 및 열화 촉진현상은 나타나지 않을 것으로 판단되었다.

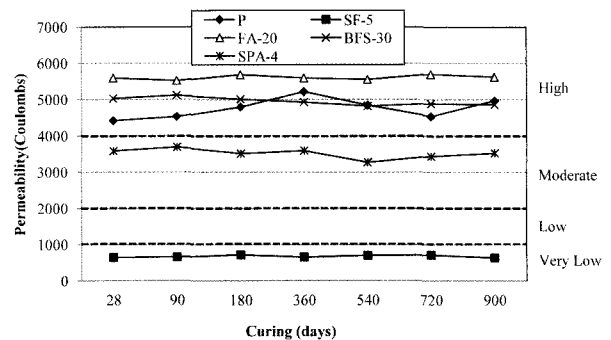


그림 5. 염소이온 투과 저항성 시험 결과

### 3.4 PC 패널 라이닝 최적 배합 도출

PC 패널 라이닝의 경우 설치위치에 따라 주로 작용하는 하중 및 열화 발생요인이 다르다. 라이닝 측벽부의 경우 지반이완에 따른 압축력이 주로 작용하며 배수 불량 등으로 수압에 대한 저항성이 요구되며 동결융해 발생 가능성이 커 이에 대한 내구성능의 확보가 필요하다. 따라서 측벽부에는 압축강도가 우수하고 치밀한 조직을 형성하는 배합이 요구된다. 실험결과 압축강도의 경우 P, SPA-4, SF-5, BFS-30 순으로 우수하게 나타났으며 동결융해 저항성의 경우 SF-5, BFS-30, P, SPA-4 순으로 우수한 것으로 나타났다. 하지만 스틸파우더의 경우 재료가 고가이며 양생 시 팽창에 따른 균열 발생 가능성이 있고, P, SF-5 배합과 BFS-30 배합의 경우 큰 성능 차이가 나타나지 않으므로 가격과 성능 측면을 고려해 볼 때 BFS-30 배합이 라이닝 측벽부에 가장 적합한 배합으로 생각된다.

라이닝 천반 아치부의 경우 휨응력이 주로 작용하게 되며 터널 내 자동차 배기가스에 노출되어 중성화에 대한 저항성능이 요구된다. 실험결과 휨강도의 경우 P, SPA-4, SF-5, BFS-30 순으로 우수하게 나타났으며 탄산화에 대한 저항성능은 SPA-4, SF-5 배합이 우수한 것으로 나타났다. 따라서 아치부 PC 패널의 경우 SF-5 배합과 SPA-4 배합을 적용 하는 것이 효과적일 것으로 판단된다. 하지만 스틸파우더의 경우 시멘트 매트릭스 형성의 메커니즘 규명 부족 및 부식 팽창압 등에 대한 연구가 부족한 실정이므로 적용 시 주의가 필요할 것으로 생각되며 SF-5 배합이 가장 효율적일 것으로 판단된다.

### 4. PC 패널 배면 충전용 경량기포 모르타르 개발

기존 라이닝 배면 충전 시 사용되는 재료에는 시멘트 모르타르, 시멘트 페이스트, 폴리우레탄 등이 있다. 하지만 시멘트 모르타르의 경우 모래의 침강으로 인한 재료 분리 현상 및 주입관의 막힘 현상이 빈번하게 발생하게 되며, 시멘트 페이스트의 경우 블리딩율이 30% 내외로 높게 발생된다. 그리고 폴리우레탄의 경우 주입압 및 발포압으로 인하여 라이닝에 손상을 줄 수 있는 문제점이 존재한다(이흥수, 2009). 그러므로 기존 충전재료들은 유지보수 비용 및 시간을 증가시켜 NATM Composite 라이닝 공법에 적용되기에는 어려울 것으로 생각된다.

NATM Composite 라이닝 공법의 배면 충전재는 공

극이 발생하지 않도록 골고루 충전이 이루어져야하며, 지반의 이완하중을 PC 패널에 효과적으로 전달할 수 있는 전달체로서 역할을 수행할 수 있는 충분한 강도를 가져야 한다. 그리고 유입되는 지하수를 하부 유공관으로 배수시킬 수 있는 충분한 통수능을 확보할 수 있어야 한다. 따라서 본 연구에서는 경량기포 모르타르를 이용해 새로운 라이닝 배면충진재를 개발하기 위한 연구를 수행하였다.

### 4.1 경량기포 모르타르 개발 실험 개요

국내·외 변상터널 및 신설터널에 적용되는 경량기포 충전재의 물성기준은 압축강도의 경우 1.0~2.0MPa 이상, 플로우 값의 경우  $25 \pm 5\text{cm}$  이하, 그리고 주입압의 경우 0.2~0.4MPa 범위에서 규정하고 있다. 또한 투수계수의 경우 일반적인 모래의 투수계수 범위인  $10^{-1} \sim 10^{-5}\text{m/sec}$ 로 유지 될 경우 숏크리트 타설면으로 유입된 최초 지하수가 24시간 내에 하부 유공관으로 배수가 될 수 있는 것으로 알려져 있다(한국건설기술연구원, 2001).

본 연구에서는 라이닝 배면 뒤채움재로 적용하기 위해 기포제를 이용하여 플로우 값 180mm 이상의 유동성과 단위체적중량  $6.0 \sim 7.0\text{kN/m}^3$ 에서 압축강도가 3.0MPa 이상 발휘 될 수 있고  $10^{-2} \sim 10^{-3}\text{cm/sec}$  범위의 투수계수를 보이는 최적의 경량기포모르타르를 개발하고자 하였다.

표 3은 본 실험에 적용된 경량기포 모르타르 배합을 나타낸 것이다. 경량기포 모르타르의 배합은 대표적인 물리 특성인 압축강도를 기준으로 설계하였는데, 압축강도와 투수계수 사이에는 반비례의 경향이 있으므로 사전에 기본 시험을 통하여 경량기포 모르타르의 압축강도, 투수계수의 목표 값에 가장 근접한 배합을 선별하여 단위수량, 기포제, 잔골재량의 조정을 통하여 최적배합비를 도출하였다. 본 실험에서는 1종 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며, 시험의 정확성을 위해 4, 5호사의 규사를 잔골재로 이용하였고 시멘트와 잔골재의 혼입률은 시멘트 대비 10~15% 내에서 정하였다. 식물성 기포제는 희석수량의 2%를 사용하였으며 W/C 비는 60~65%로 적용 하였다.

본 연구에서는 경량기포 모르타르 개발을 위하여 압축강도, 투수계수, 플로우, 겉보기 비중, 침하량 및 중금속 용출시험을 실시하여 최적 배합비를 도출하고자 하였다.

표 3. 경량기포 모르타르 실험 배합비

구분		Mix. A (W/C=60%)		Mix. B (W/C=65%)		Mix. C (W/C=60%)	
강도(MPa)		1.0~2.0		2.5~3.5		4.5~5.5	
		Weight (kg)	Volume (L)	Weight (kg)	Volume (L)	Weight (kg)	Volume (L)
Slurry	Cement	450	150	600	190.4	730	243.3
	Water	270	270	390	390	438	450
Subtotal		720	420	990	580.4	1168	693.3
Foaming	Foaming Agent	0.7	0.6	0.52	0.42	0.4	0.3
	Water	33.3	33.3	25.46	25.46	20.3	20.3
Subtotal		34.0	680.0	25.98	519.6	20.7	406.7
Total		754	1100	1016	1100	1189	1100

표 4. 각 배합별 압축강도

배합	압축강도(MPa)		
	3일	7일	28일
Mix. A	0.2	1.2	1.8
Mix. B	1.2	2.7	3.8
Mix. C	2.0	5.0	6.2

표 5. 배합별 투수계수 시험결과

배합	투수계수( $\times 10^{-2}$ cm/sec)			범위
	1	2	3	
Mix. A	2.7	5.2	4.8	$2.7 \sim 5.2 \times 10^{-2}$ cm/sec
Mix. B	2.5	1.8	1.6	$1.6 \sim 2.5 \times 10^{-2}$ cm/sec
Mix. C	0.86	1.1	0.33	$0.33 \sim 1.1 \times 10^{-2}$ cm/sec

## 4.2 경량기포 모르타르 개발 실험 결과

### 4.2.1 압축강도

본 실험에서는 KS F 2459(2002)에 준하여 경량기포 모르타르의 압축강도 시험을 실시하였으며 재령 3일, 7일, 28일의 압축강도를 측정하여 강도변화를 비교하였다. 압축강도 실험결과는 표 4에 나타내었다. 시험결과 A 배합의 경우 28일 재령 압축강도가 목표치인 3.0MPa에 도달하지 못하였다. B 배합의 경우 재령 28일 압축강도가 3.8MPa를 나타냈고 C 배합은 6.2MPa로 나타났다. A 배합과 B 배합의 레미탈 혼입량 차이를 비교할 때 C 배합의 경우 레미탈 증가치에 따른 강도 증가효과가 눈에 띄게 나타났다. 이는 레미탈 혼입량 증가 시 물의 양도 많아져 상대적으로 희석수량에 들어가는 기포제가 감소함에 따라 전체 공극량이 감소되기 때문인 것으로 판단된다.

### 4.2.2 투수계수

본 연구에서 개발하고자 한 경량기포 모르타르는 터

널 배면 충전용으로 지반의 이완 및 지하수 유입으로 인한 발생응력을 라이닝에 전달하는 매개체 역할을 담당하는 동시에 배수기능을 충실히 발휘하여야 한다. 따라서 NATM Composite 라이닝의 경량기포 모르타르 충전재는  $10^{-2} \sim 10^{-3}$ cm/sec 이상의 투수계수를 필요로 하게 된다. 따라서 본 논문에서는 KS F 2322(2000)에 준하여 경량기포 모르타르의 투수능력 검토를 실시하였다.

투수계수 시험 결과는 표 5에 나타내었다. 시험결과 A 배합의 경우  $2.7 \sim 5.2 \times 10^{-2}$ cm/sec의 투수계수 값을 나타내었으며 B 배합과 C 배합의 경우도 목표 투수계수 값과 비슷하거나 우수한 투수성능을 나타내었다. 따라서 세 배합 모두 라이닝 배면에 충전 시 충분한 투수성능을 보일 수 있을 것으로 생각된다.

### 4.2.3 플로우시험

경량기포 모르타르의 경우 배면 충전재의 시공은 작업장의 협소, 작업의 편리성 등으로 터널 외부에 그라우팅 플랜트를 설치하여 충전 위치까지 주입호스를 통해 충전된다. 따라서 모르타르 충전 시 라이닝 배면에 여유

공간이 남지 않고 완전하게 충전되기 위해서는 유동성이 중요하게 작용한다. 본 연구에서는 경량기포 모르타르의 유동성 평가를 위하여 KS F 4039(2004)에 준하여 플로우 시험을 실시하였다. 플로우 값 180mm의 경우 재료분리 없이 500m 정도의 펌프압송이 가능하며 타설 시 유동성을 확보할 수 있기 때문에 기준치로 설정하였다. 플로우 시험 결과는 표 6에 나타내었다. 실험 결과 A, B 배합의 경우 각각 236, 196mm의 플로우 값을 나타내어 배면 충전에 적용이 가능한 충분한 유동성을 확보하였다. 하지만 C 배합의 경우 평균 플로우 값이 164mm로 배면 충전 시 문제가 발생할 가능성이 있을 것으로 생각된다.

#### 4.2.4 겉보기 비중

경량기포 모르타르의 경우 지반이완 시 라이닝에 하중으로 작용되므로 낮은 비중을 가질수록 유리하다. 따라서 본 연구에서는 경량기포 모르타르 개발을 위해 KS F 2459(2002)에 준하여 겉보기비중시험을 수행하였다. 표 7은 겉보기비중시험 결과를 나타내었다. 본 연구에서는 0.6~0.7의 겉보기비중을 목표로 설정하였으며 시험결과 B 배합의 겉보기 비중은 0.686으로 나타나 목표치를 만족하였으나 A 배합과 C 배합의 경우 겉보기

비중이 각각 0.548, 0.961로 나타나 배면 충전재로 적용이 어려울 것으로 판단되었다.

#### 4.2.5 침하량

라이닝 배면 충전 시 배합수나 기포의 과도한 혼합 또는 기포가 불안정하게 되면 침하가 발생하게 된다. 침하는 현장에서 기포콘크리트의 시공 두께의 오차를 초래하게 되며 침하과다 발생 시 독립기포가 연결 기포로 형성되어 양생 후 경량기포 모르타르의 품질에 치명적인 영향을 줄 수도 있다. 따라서 본 연구에서는 KS F 4039(2004)에 준하여 경량기포 모르타르의 양생시 침하량을 측정하였다.

표 8은 침하량 시험결과를 나타낸 것이다. A, B, C 3배합의 경우 겉보기 비중이 0.5 이상으로 KS 기준 0.6 품에 해당하므로 6mm 이하의 침하량 기준을 만족하여야 하는데 시험결과 A 배합의 경우 6.3mm, B 배합의 경우 4.2mm, C 배합의 경우 3.0mm로 나타났다. 따라서 A 배합의 경우 침하량은 다소 과다하게 발생할 것으로 예상되어 현장 타설 시 뒤채움재의 품질에 영향을 끼칠 수 있을 것으로 판단되지만 B, C 배합은 규정에 적합하여 침하 및 이어치기에 따른 불연속 구간의 문제는 크게 나타나지 않을 것으로 판단된다. 표 8은 경량기포 모르

표 6. 경량기포 모르타르 플로우 시험결과

배합	플로우(mm)			평균	평가 >180mm
	1	2	3		
Mix. A	245	235	230	236	Appropriate
Mix. B	198	201	190	198.00	Appropriate
Mix. C	165	160	168	165.00	Inappropriate

표 7. 경량기포 모르타르 겉보기비중 시험결과

배합	비중						평균
	1		2		3		
	kg	S.G.	kg	S.G.	kg	S.G.	
Mix. A	0.84	0.534	0.93	0.590	0.82	0.521	0.548
Mix. B	1.10	0.704	1.05	0.670	1.07	0.683	0.686
Mix. C	1.52	0.974	1.19	0.948	1.51	0.962	0.961

표 8. 경량기포모르타르 침하량 시험결과

구분	시편			평균	기준	평가
	1	2	3			
Mix. A	6.5	6.0	6.5	6.3	≤ 6.0	Inappropriate
Mix. B	4.0	4.5	4.0	4.2	≤ 6.0	Appropriate
Mix. C	2.5	3.5	3.0	3.0	≤ 6.0	Appropriate



타르의 침하량 시험 결과를 나타낸 것이다.

경량기포 모르타르 개발을 위한 시험결과를 종합하여 보면 A 배합의 경우 압축강도의 목표요구치인 3.0MPa 을 만족하지 못하였고 침하량 시험결과도 기준을 초과 하였다. 그리고 C 배합의 경우 플로우 값이 낮아 배면 충전 시 문제가 발생할 수 있을 것으로 판단되었으며 겉보기 비중도 과도하게 나타나 자중에 의해 라이닝의 설계에 영향을 미칠 것으로 판단되어 NATM Composite 라이닝 공법에 적용이 어려울 것으로 생각된다. 하지만 B 배합의 경우 압축강도, 투수계수, 플로우값, 겉보기비중, 침하량 등 모든 시험에서 목표치를 만족하여 배면 충전 재료로서 충분한 적용성을 확보할 수 있을 것으로 판단되었다.

#### 4.2.6 중금속 용출 시험을 통한 환경영향 평가

표 9는 KSLT 시험법에 의한 경량기포 모르타르의 중금속 용출 시험결과를 나타낸 것이다. 시험결과 Pb, Cu, Cd 등 환경에 영향을 미치는 전 항목에서 거의 검출되지 않았으며 따라서 환경적으로 유해하지 않을 것으로 판단된다.

### 5. 경량기포 모르타르 배수 성능 시험

NATM 공법의 배수재로 가장 널리 쓰이고 있는 부직포는 외부 영향에 의해 압축응력을 받으면 두께가 감소하고, 투수성이 저하되어 배수능력이 현저하게 감소하

게 된다(ASTM D 4716-04, 2003). 따라서 본 연구에서는 기존 배수재인 부직포를 대체하여 NATM Composite 라이닝 공법의 배수재로 적용이 가능한 경량기포 모르타르를 개발하고 기존 부직포와 투수능력을 비교하기 위한 연구를 수행하였다. 배수재의 투수성 규명을 위한 연구방법은 배수재의 투수성을 지배하는 물리적 인자 변수로 하는 이론식에 의한 미시적인 방법과 투수 실험 장치를 이용한 거시적인 방법이 있다(이상호, 1992). 하지만 부직포의 이론적 변수들은 경량기포 모르타르에 대해서 적용할 수가 없으므로, 본 연구에서는 평면투수 실험을 통하여 경량기포 모르타르의 전수성을 비교하였다.

#### 5.1 실험 개요

본 실험에서는 경량기포 모르타르의 실제 현장 배수능력을 보다 효과적으로 평가하고자 ASTM D 4716(2004)에 의거해 평면투수실험을 수행하였다. 그림 6은 평면투수실험 장치 모습을 나타낸 것이다. 실험장치는 ASTM D 4716(2004)의 일부를 수정한 캐나다의 SAGEOS 시험장치(Palmeira and Gardoni, 2002; Mok 등, 2008)와 유사하게 제작하였다.

그림 7은 평면투수실험의 개요도를 나타낸 것이다. 본 실험에서는 화강풍화토 지반 시료를 채취하였으며 불교란 시료 채취의 어려움으로 인해 정적다짐을 실시한 재성형 시료를 사용하였다. 그리고 수압이나 동수경

표 9. 중금속 용출시험 결과

(단위 : mg/l)

구분	Pb	Cu	As	Cr <sup>6+</sup>	CN	유기인	Cd	TCE	PCE	Hg
용출량	-	0.005	-	-	-	-	0.001	-	-	-
기준	3.0	3.0	1.5	1.5	1.0	1.0	0.3	0.3	0.1	0.005

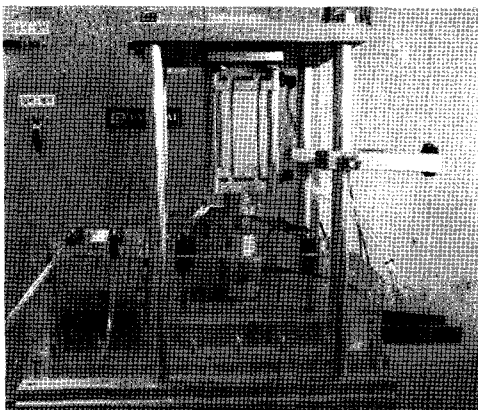


그림 6. 평면투수실험 장치 모습

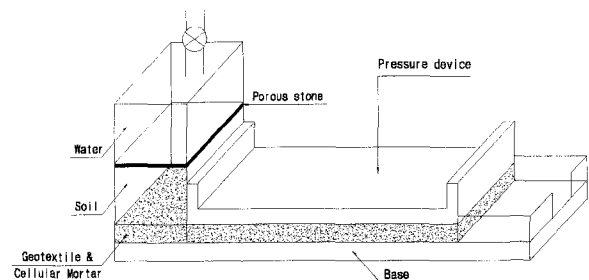


그림 7. 평면투수실험 개요도

표 10. 부직포의 역학적 특성

시험항목	시험결과	시험항목	시험결과
섬도(denier)	4.53	인장강도(MPa)	37.9
중량(g/m <sup>2</sup> )	308.3	인장신도(%)	60 ~ 100
두께(mm)	3.00	수직투수계수(cm/s)	$4.8 \times 10^{-1}$
유효구멍크기( $\mu\text{m}$ )	$0_{95}$ : 38 이하	비중	1.38

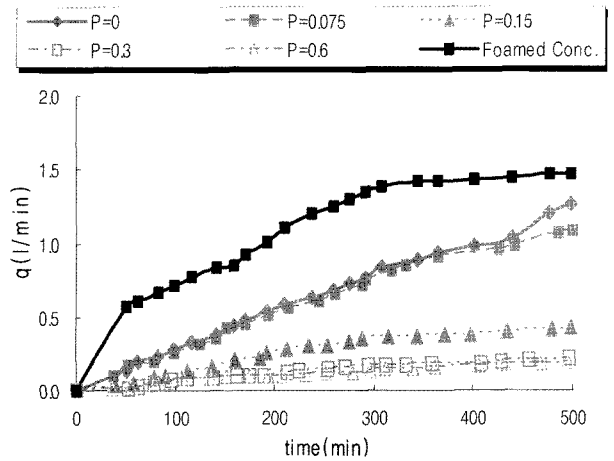
사에 의해 한계전단응력을 초과한 미세입자가 터널배수재로 침투하는 경우를 모사하기 위해, 흙에 가해지는 동수경사를 5, 10, 15로 변화시켰다. 또한, 현장타설 라이닝 시공 시 라이닝의 자중 및 수축·팽창 등의 작용으로 인해 발생하는 부직포의 두께변화를 모사하고자, 부직포에 가해지는 하중을 0, 0.075, 0.15, 0.3, 0.6kg/cm<sup>2</sup> (0, 7.35, 14.7, 29.4, 58.8 kPa)으로 변화시켜 실험을 수행하였다. 그리고 흙 입자의 세굴을 방지하기 위해 시료 상부에 다공질판을 설치하였으며, 부직포(45×12×0.3cm) 및 경량기포 모르타르(45×12×5cm) 시험체는 24시간 이상 포화시킨 후 사용하였다. 흙 시료의 포화는 물의 흐름이 일정하게 유지되었을 때를 정상상태(Steady state)의 흐름으로 보고, 이때 시료가 포화된 것으로 가정하였다.

부직포는 기존 현장타설라이닝 공법에서 가장 널리 쓰이고 있는 P.E.T(Polyester) 재질의 니들펀칭 장섬유 부직포를 사용하였다. 실험에 사용된 부직포의 역학적 특성은 표 10과 같다.

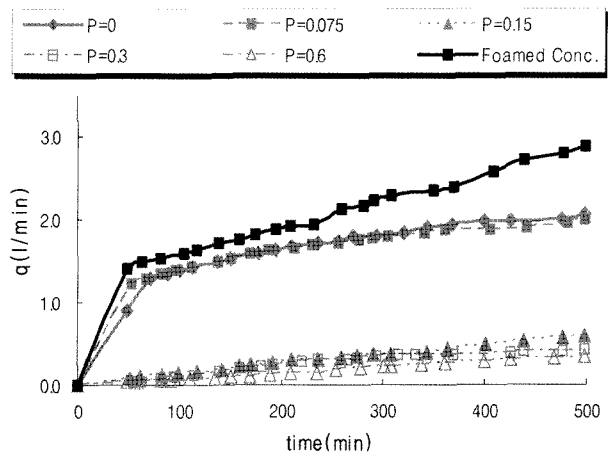
부직포와 경량기포 모르타르의 재료적 차이를 제외한 변수는 모두 동일하게 적용시켰으며 각 배수재의 최종 유출량 측정을 통해 터널 배수재로서 경량기포 모르타르의 기본적인 배수성능을 확인하였다.

### 5.2 실험 결과

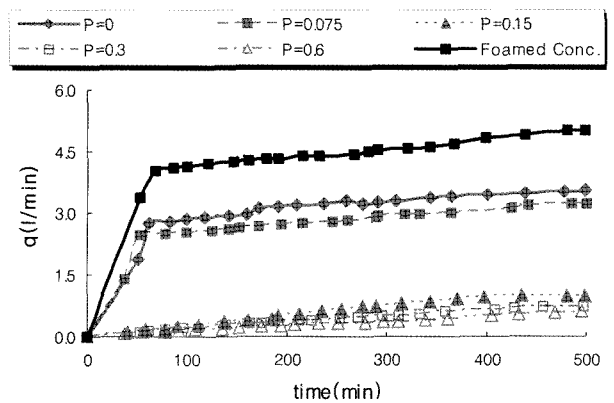
평면투수실험 결과는 그림 8에 나타내었다. 동수경사 (i) 변화에 따른 부직포와 경량기포모르타르의 누적유출량 측정 결과 부직포의 두께가 감소할수록 유출량이 감소하는 경향을 나타내었다. 특히, 부직포에 가해지는 하중이 0.15kg/cm<sup>2</sup>(14.7kPa)이상인 경우의 유출량은 하중이 0kg/cm<sup>2</sup>과 0.075kg/cm<sup>2</sup>(7.35kPa)인 경우에 비해 10-(a), (b), (c) 모두 약 77%정도의 감소 경향을 보였다. 이는 ASTM D 4716(2004)에 명시된 바와 같이 부직포에 가해지는 하중이 커질수록 두께가 감소하여 전수성 또한 감소하기 때문인 것으로 판단된다. 또한 동수경사 5를 기준으로 하여 10, 15로 증가할수록 각 최종유출량



(a) 누적 유출량(i=5)



(b) 누적 유출량(i=10)



(c) 누적 유출량(i=15)

그림 8. 동수경사 변화에 따른 누적 유출량

은 40%, 65%정도 증가되는 것으로 나타나, 동수경사가 커질수록 물의 이동량 또한 증가된다는 것을 알 수 있었다. 그러나 동수경사가 커질수록 물과 함께 흡입자의 이동도 함께 일어나 흙의 미세입자가 부직포에 폐색현상이 나타났으며 배수성능이 저하되어 시간당 유출량이 점차 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

부직포의 전수성 이론에 근거하여 실시한 경량기포 모르타르의 유출량은 시험 지속시간인 500분을 기준으로 동수경사가 5일 때 1.48L, 10일 때 2.90L, 15일 때 5.01L로 각각 나타났다. 동수경사가 5인 경우, 부직포에 가해지는 하중이 없는 경우의 유출량인 1.26L보다도 약 15%정도 높게 나타났으며, 동수경사가 10인 경우 부직포 유출량 2.07L에 비해 약 28%, 동수경사가 15인 경우 부직포 유출량 3.54L에 비해 약 30%정도 높게 나타났다. 또한 실험초기부터 시험종료 시점인 500분(약 8.3hr)까지의 측정시간 내내 부직포 보다 월등한 배수성을 보여주었다. 시험초기부터 약 50분 정도의 구간에서 배수성능이 가장 크게 나타났으며, 시험시작 대략 50분경과 후 모든 배합의 유량이 일정해지는 경향을 나타내었다. 특히, 동수경사가 커질수록 유량이 비교적 빠르게 일정해지는 경향을 나타내었다.

평면투수이론에서 터널 배수재의 전수성은 곧 배수능력을 의미하는 것으로서, 이 배수성능은 다른 조건들이 동일한 경우 배수재의 두께에 비례하게 된다. 경량기포 모르타르의 경우 일반적으로 3mm 정도 두께로 시공되는 부직포에 비해 라이닝 배면 두께를 5cm 정도로 가정할 경우 약 17배에 달하는 두께(배수공간)를 가지게 되며, 독립기포 및 연속기포가 거미줄처럼 형성되어 폐색현상을 저감시킬 수 있어 NATM Composite 라이닝 공법 터널배수재로 적용시 배수성능 향상에 큰 효과를 거둘 수 있을 것으로 판단된다.

## 6. 실대형 모형실험을 통한 PC 패널 구조적 거동 특성 검토

터널의 라이닝은 2차 지보재로서 1차 지보재의 노후화 및 결함으로 인하여 발생하는 추가적인 하중을 지지할 수 있어야 한다. NATM Composite 라이닝 공법은 두께 15cm 내외의 고강도 콘크리트로 시공되므로 현장 적용을 위해서는 두께 감소에 따른 구조적 거동 및 안정성 검토가 필수적으로 선행되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 실대형 하중재하 실험을 통해 다양한 하중 조건하

에서 무근 및 세그먼트 라이닝의 파괴하중 및 거동특성에 대해 규명하여 현장타설 라이닝과 PC 패널 라이닝의 거동을 비교 평가하였다.

### 6.1 실험 개요

기존의 국내 연구에서는 상재하중을 고려한 라이닝의 역학적 검토 시 수치해석 및 수평재하 방식의 소규모 모형실험을 통해서만 이루어져 왔다(김재순 등, 1998). 또한 국외의 경우 실대형 재하실험을 통해 터널 지보재 및 콘크리트 라이닝의 역할을 규명하기 위한 연구를 수행하였으나, 시험체 제작이 비교적 간단한 현장타설 콘크리트 라이닝에만 국한되어 있으며 타설이 용이하도록 콘크리트 라이닝 시험체를 늘여서 재하 실험을 수행하였다. 또한 하중 재하가 이루어지는 유압 액츄에이터(hydraulic actuator)의 경우 하중제어 또는 변위제어만이 가능하여 실제 지반조건의 강성을 모사한 제어가 불가능하였다.

그러나 본 연구에서는 최신 제어기술을 적용하여 터널 주변 지반의 강성을 모사할 수 있는 강성제어 기능과 다양한 크기 및 형상을 가진 라이닝 시험체의 재하시험이 가능한 실대형 지반구조물 실험장치를 구축하였다. 그림 9는 모형실험을 위한 재하시험 장치를 나타낸 것이다. 본 실험 장비는 직경 2m에서 8m까지의 반원형 터널 라이닝 모형시험체에 대해 10° 간격으로 총 17개의 유압 서보 액츄에이터가 설치 가능하며, 동시 또는 개별적으로 강성제어, 변위제어 및 하중제어가 가능하도록 설계·제작되었다. 특히, 강성제어 시 17개의 액츄에이터에 대해 동일한 강성값을 제어할 수 있을 뿐만 아니라 각각의 액츄에이터에 서로 다른 강성조건을 부여할 수 있도록 제작하였다.

본 모형실험에서는 45° 간격으로 100톤 용량 1개와 50톤 용량 4개의 액츄에이터를 설치하였으며 하중재하 방식은 그림 10과 같다. 전체 등분포의 경우 시험체 외면 전체에 대해 등분포 하중재하를 모사하기에는 현실적으로 불가능하여, 5개의 액츄에이터를 동일한 간격으로 설치하여 하중재하를 실시하였다. 그리고 파쇄대를 통과하거나 상부지반에 응력변화가 생겼을 경우 라이닝에 편심으로 응력이 작용될 수 있는 상황을 고려하여 상부편심 하중재하를 모사하였다. 액츄에이터 끝단에는 시험체의 외부 곡률과 동일한 곡면을 가진 가압판을 설치하여 하중집중에 의한 영향을 최소화하도록 하였고,

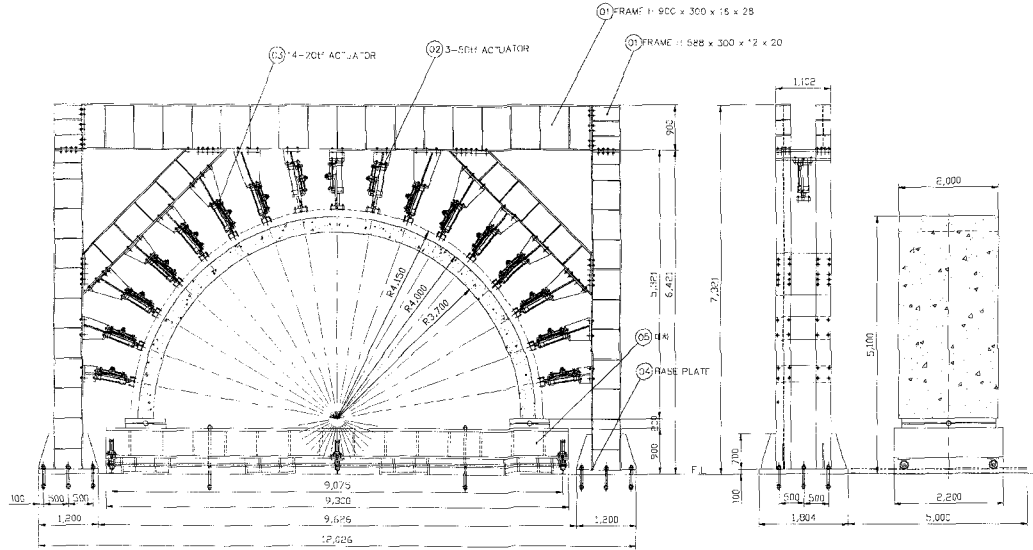


그림 9. 실대형 모형실험 재하시스템 설계도면

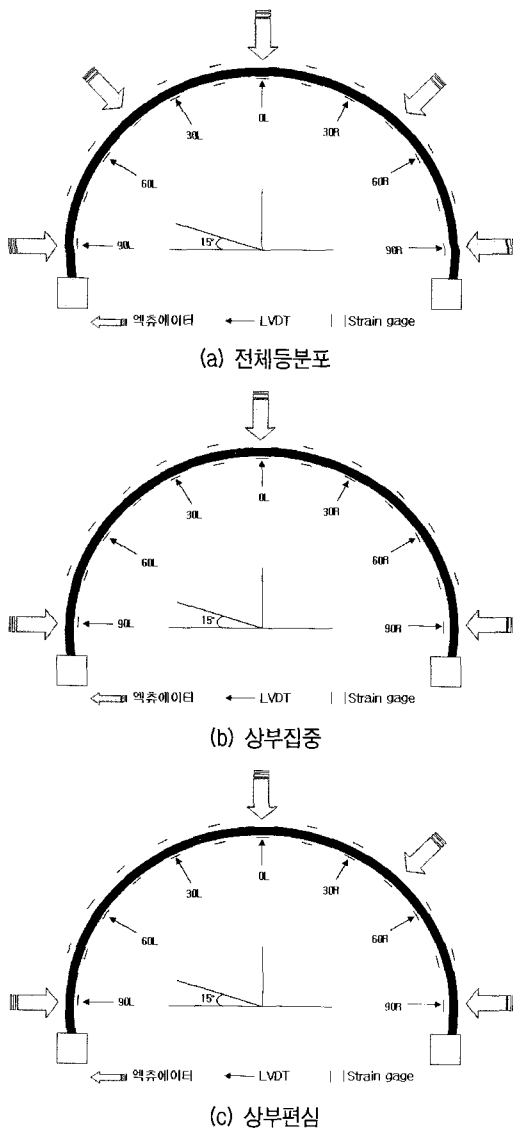


그림 10. 시험체 하중재하 방식

측벽부는 측압의 효과를 충분히 발휘할 수 있도록 구속 장치에 의해 완전 구속시켰다.

모형실험 시험체는 현장타설 콘크리트 라이닝을 모사한 일체형 무근 라이닝과 Composite 라이닝을 모사한 PC 패널 라이닝을 제작하였다. 일체형 무근 라이닝은 설계강도 24MPa, 라이닝 두께는 일반적인 현장타설 라이닝 두께인 300mm로 제작하였고, PC 패널 라이닝은 공장에서 철근배근 후 증기양생으로 제작되어 고강도 및 고품질을 갖기 때문에 상대적으로 작은 두께를 고려하여 설계강도 45MPa, 라이닝 두께는 150mm로 제작하였다.

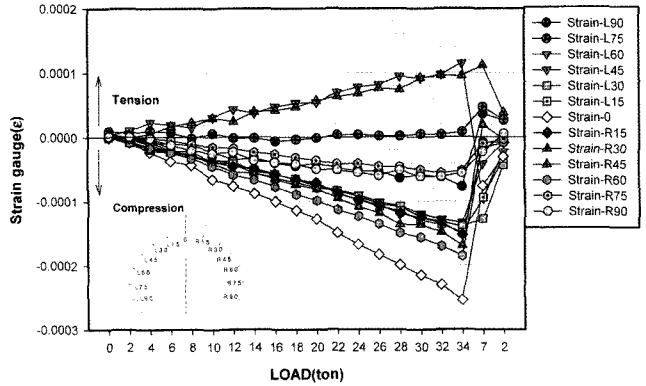
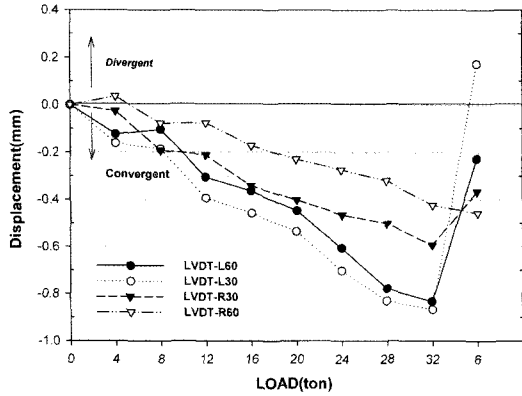
PC 패널 라이닝 시험체는 실제적인 증기양생 효과를 확인하기 위해 국내 쉘드 터널용 PC 세그먼트의 생산 공정을 그대로 준용하여 제작하였는데, 전양생시간 2시간 후 온도상승구배 10°C/hr에서 3시간, 최대 양생온도 50°C에서 6시간, 온도 자연하강 단계를 거쳐 증기양생을 실시하였다. 표 11은 모형실험 시험체의 배합표를 나타낸 것이다.

라이닝 시험체의 변형은 내·외부면에 부착된 변형률 게이지와 라이닝면에 법선방향으로 설치된 LVDT를 통해 데이터를 획득하였다. LVDT는 상부중앙 내측면을 기준으로 양방향으로 30° 간격으로 설치하였고, 변형률 게이지는 시험체 내외측면으로 하중이 재하되는 부분을 제외하고 15° 간격으로 설치하였다. 하중은 1ton/min (9.8kN/min)의 속도로 재하하였으며, 라이닝 시험체에 균열이 최초로 발생하는 균열하중과 시험체가 구조적

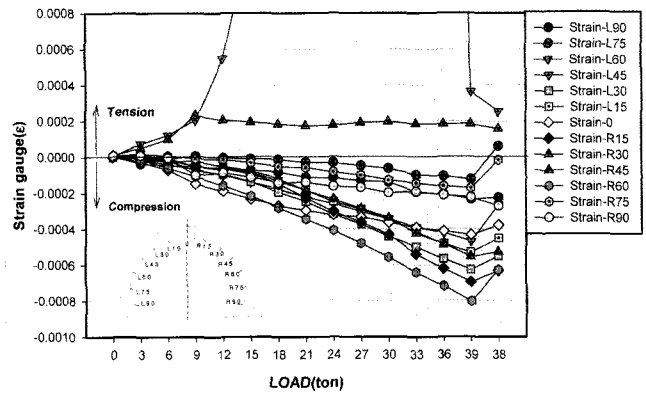
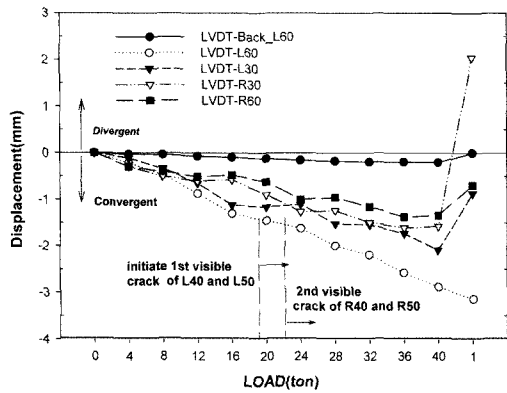
표 11. 일체형 하중재하 실험 시험체 배합표

구분	W/C	S/a	단위결합재량(kg/m <sup>3</sup> )					설계강도	두께(mm)
			W	C	S	G	AD		
일체형 무근 라이닝	51.3	47.0	178	347	823	961 <sup>1)</sup>	1.74	24MPa	300
PC 패널 라이닝	34.2	38.4	142	415	692	1127 <sup>2)</sup>	4.25	45MPa	150

1) G<sub>max</sub> : 25mm      2) G<sub>max</sub> : 20mm



(a) 일체형 무근 라이닝



(b) PC 패널 라이닝

그림 11. 전체 등분포하중 재하 시 라이닝 시험체 거동특성

으로 파괴를 일으키는 파괴하중을 측정하였다.

## 6.2 실험 결과

### 6.2.1 전체 등분포 하중 재하

그림 11은 전체등분포 재하시의 라이닝 시험체 거동 특성을 나타낸 것이다. 일체형 무근 라이닝의 경우 최대 하중 32ton(313.6kN) 일 때 L30° 지점(시험체 왼쪽 어깨 부)에서 최대내부변위 0.87mm를 기록하며 파괴가 발생하였고, 이때 최대 변형율은 천단부에서 0.00025를 나타내었다.

PC 패널 라이닝의 경우에는 재하하중이 18.9ton(185.2kN) 일 때 L40° 및 L50° 중간 지점에서 초기 균열이 발생하

였고, 이 때의 최대내부변위는 1.5mm를 기록하였다. 이후 점차적으로 균열이 전파되었으나 시험장치에 설치된 액츄에이터의 최대용량까지 재하 하였지만 파괴는 발생하지 않았고, 최대하중 40ton(392kN)일 때 L60° 지점에서 최대내부변위 2.9mm를 기록하였다. 일체형 무근 라이닝과 달리 PC 패널 라이닝은 세그먼트에 설치된 볼트박스과 연결볼트에 의해 결합되기 때문에, 접합부 부근에서 라이닝 내측으로 지압파괴가 발생하면서 모멘트 전달에 변화가 생겨 상대적으로 낮은 위치인 L60° 지점에서 수렴변위가 크게 발생된 것으로 판단된다.

최대 변형률도 일체형 무근 라이닝과 다르게 R60° 지점에서 0.00081로 나타났는데, 볼트박스가 설치된 세그먼트 연결부에서 압축변형이 가장 크게 발생하였다. 그

리고 초기균열이 발생한 재하하중 19ton(186.2kN)에서 일체형 무근 라이닝의 천단부 지점 압축변형은 0.00012, PC 패널 라이닝은 0.00024로 2배를 나타내었는데, 두 시험체의 두께 차이가 2배이며 탄성계수의 차이가 미소한 것으로 고려하면 Hooke's Law를 만족하는 결과를 보였다.

### 6.2.2 상부 집중하중 재하

그림 12는 상부집중 하중 재하시의 라이닝 시험체 거동특성을 나타낸 것이다. 일체형 무근 라이닝의 경우 최대하중 16.2ton(158.8kN) 일 때 R30° 지점(시험체 오른쪽 어깨부)에서 최대내부변위 0.61mm를 기록하며 파괴가 발생하였고, 천단부에서는 인장변형이 양쪽 어깨부에서는 압축변형이 나타났는데, 최대 변형율은 0.00016으로 천단부와 양쪽 어깨부 45~60° 지점에서 발생하였다.

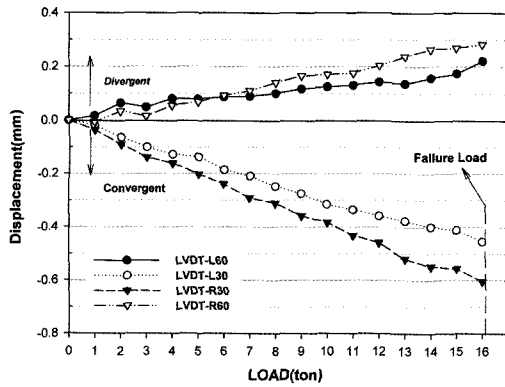
PC 패널 라이닝의 경우에는 재하하중이 6.5ton(63.7kN) 일 때 L15° 및 R15° 지점에서 초기 균열이 발생하였고, 7.8ton(76.4kN)일 때 L90° 및 R90° 지점에서 2차 균열이 발생하였다. 이 후 재하하중이 8.5ton(83.3kN)일 때 파

괴가 발생하였는데, 철근 배근 효과로 연성적인 거동을 보이면서 최대내부변위는 일체형 무근 라이닝의 30배가 넘는 21mm로 나타났다. 상부집중 하중의 경우에도 세그먼트 접합부 부근에서 라이닝 내측으로 지압파괴가 발생하면서 R45° 지점에서 최대 압축변형율 0.00045를 기록하였다.

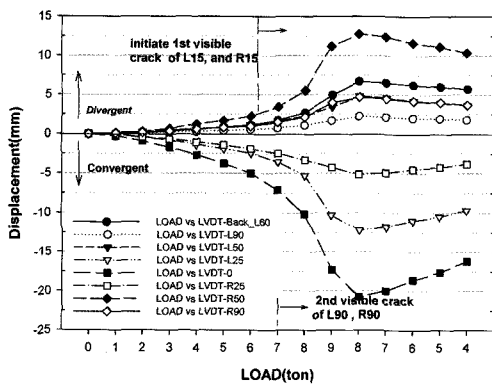
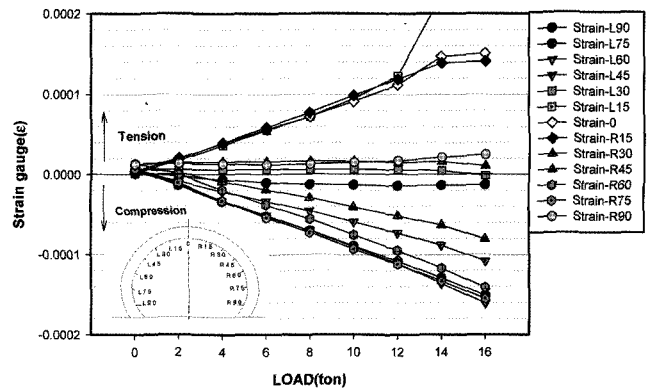
실험 결과 PC 패널 라이닝의 경우 두께 감소로 인해 집중하중에 의한 저항성이 일체형 무근 라이닝에 비해 약 50%정도 수준으로 감소하였지만 뛰어난 연성 효과를 보여 파괴에 이르기까지 큰 변형이 발생하였으며 파괴 이후에도 일정 수준의 지지력이 발현되었다. 따라서 PC 패널 라이닝은 파괴 이전에 사고에 대한 예측이 가능하며 파괴 이후에도 연성에 의한 지지력 발현으로 터널 붕괴 사고 시 피해를 크게 줄일 수 있을 것으로 생각된다.

### 6.2.3 상부 편심하중 재하

그림 13은 상부편심 재하시의 라이닝 시험체 거동특성을 나타낸 것인데, 시험체의 좌측 어깨부에 하중을 재



(a) 일체형 무근 라이닝



(b) PC 패널 라이닝

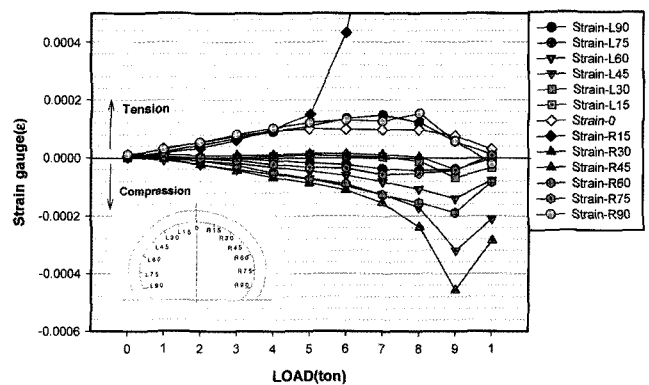
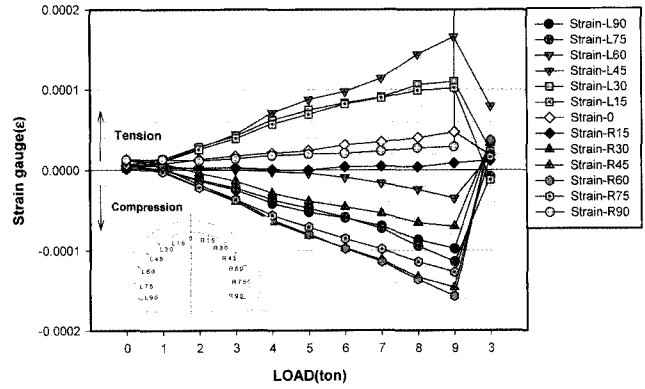
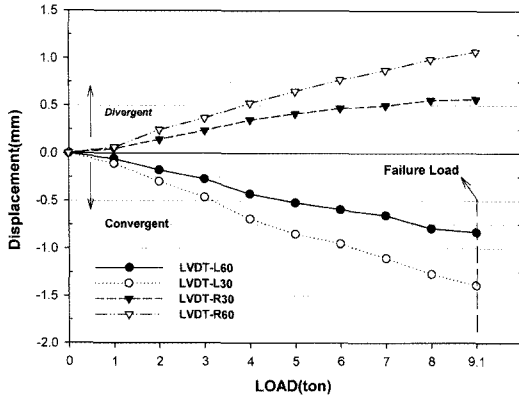
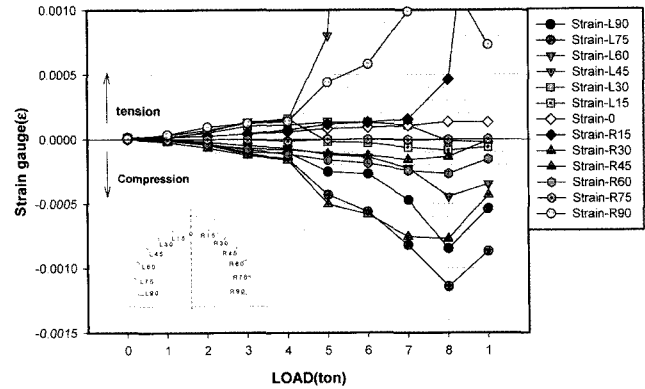
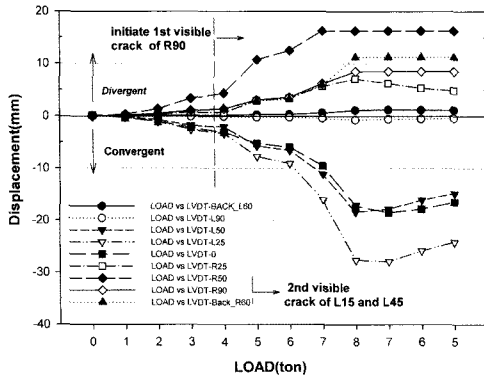


그림 12. 상부 집중하중 재하 시 라이닝 시험체 거동 특성



(a) 일체형 무근 라이닝



(b) PC 패널 라이닝

그림 13. 상부 편심하중 재하 시 라이닝 시험체 거동특성

하하였기 때문에 일체형 무근 라이닝의 경우 L30° 지점에서 최대하중 9.1ton(89.2kN) 일 때 최대변위 1.39mm를 기록하며 파괴가 발생하였다. 상부편심 재하 시 파괴하중은 상부집중 재하 시 파괴하중의 0.5배 정도이지만 최대발생 내부변위는 2배 이상으로서, 양 측벽부가 완전히 구속되어 있는 말굽형상의 라이닝이 구조적으로 편심에 취약한 특성을 확인할 수 있었다. 또한, 시험체 좌측 어깨부에 하중이 재하됨으로 인해 L45° 및 R60° 지점에서 압축 및 인장 변형이 최대로 발생되어 명확한 비대칭형 거동을 나타내었다.

PC 패널 라이닝의 경우에는 재하하중이 3.7ton(36.3kN) 일 때 편심하중 반대편인 R90° 부근에서 초기균열이 발생하였고, 편심하중을 가한 L25° 지점에서 최대내부변위 27mm를 기록하였다. 또한, 상부집중 재하시와 유사하게 파괴하중 8ton(78.4kN) 이후 연성적인 거동을 보이면서 시험체 파괴가 일어났고, R60° 지점에서 최대압축 변형이 나타났다.

PC 패널 라이닝의 경우 일체형 무근 라이닝에 비하여 상대적으로 편심하중에 의한 영향이 적은 것으로 나타

났으며 최대 파괴하중이 비슷한 수준을 보였다. 하지만 PC 패널 라이닝은 파괴 이후 연성 거동을 보였으며 최대 내부변위가 약 20배에 달해 일체형 무근 라이닝에 비해 구조적으로 유리할 것으로 판단된다.

## 7. 결론

본 연구에서는 기존 NATM 터널 공법에 적용되던 현장타설 라이닝의 문제(공기지연, 품질관리 어려움, 균열 발생 등)를 해결 할 수 있고 공기를 대폭 단축시킬 수 있는 NATM Composite 라이닝 공법을 개발하였다. 본 연구를 통해 얻은 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) NATM Composite 라이닝 공법의 측벽부분은 압축 강도가 크고 지하수에 의한 동결융해 저항성이 좋은 배합이 유리하므로 가격과 성능 측면을 고려해 볼 때 본 연구에서 실험한 4가지 배합 중 BFS-30 배합이 라이닝 측벽부에 가장 적합한 배합으로 생각된다.

- (2) NATM Composite 라이닝 공법의 천반 아치부는 휨 강도가 우수하고 탄산화 저항성능이 우수한 배합이 유리 하므로 SF-5 배합과 SPA-4 배합을 적용하는 것이 효과적일 것으로 판단된다. 하지만 스틸파우더의 경우 시멘트 매트릭스 형성의 메커니즘 규명 부족 및 부식 팽창압 등에 대한 연구가 부족한 실정 이므로 적용 시 주의가 필요할 것으로 생각된다.
- (3) 경량기포 모르타르 개발을 위한 시험결과 B 배합의 경우 압축강도, 투수계수, 플로우값, 겔보기비중, 침하량 등 모든 시험에서 목표치를 만족하여 배면 충전 재료로서 충분한 적용성을 확보할 수 있을 것으로 판단되었다.
- (4) 부직포와 Composite 라이닝 공법의 터널 배수재인 경량기포모르타르의 평면투수성을 비교한 결과, 경량기포모르타르는 부직포에 비해 넓은(배수공간)을 가지고 있어 배수성능이 우수할 뿐만 아니라, 다량의 공극이 형성되어 있어 흙의 세립분이 배수재에 미치는 폐색현상을 저감시킬 수 있을 것으로 예상된다. 따라서 경량기포 모르타르는 NATM Composite 라이닝 공법의 터널배수재로서 배수성능 향상에 큰 기여를 할 수 있을 것으로 판단된다.
- (5) PC 패널 라이닝의 재하시험 결과 전체 등분포 하중 재하 시 최대 하중에서도 파괴가 일어나지 않아 일체형 무근 라이닝에 비해 상대적으로 안정성이 우수한 것을 확인 할 수 있었으며, 상부 집중하중 및 편심하중 재하 시 파괴하중은 작았지만 충분한 연성 거동을 보여 터널 현장에 적용 시 사고의 위험을 최소화할 수 있을 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 국토해양부의 2006년 건설기술혁신사업의 지원으로 수행된 것으로 연구를 가능케 한 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

1. 김재순, 김영근, 이희근 (1998), “숏크리트 및 콘크리트 라이닝의 역학적 거동에 관한 실험 및 수치해석적 연구”, *한국암반공학회지*, 제8권, pp.307-320.
2. 마상준, 김동민, 장필성 (2006), “새로운 터널 라이닝 공법 개발을 위한 터널 방·배수 시스템 제안”, *2006년 대한토목학회 정기 학술대회 논문집*, pp.4322-4325.
3. 배규진, 장수호, 이석원, 박해균, 이명섭, 김재권 (2004), “고성능 숏크리트 라이닝의 설계 및 시공기술 분석”, *한국암반공학회지*, 제14권 제1호, pp.1-15.
4. 이두화, 오세준 (2001), “프리캐스트 관널을 이용한 터널 내부 라이닝의 적용”, *대한토목학회 추계학술발표회 논문집*, pp.395-404.
5. 이상호 (1992), “배수용 Geotextile의 평면투수 성능분석”, *한국지반공학회지*, 제8권 제3호, pp.61-74.
6. 이진용, 배성용 (1998), “증기양생이 플라이 애쉬 콘크리트 강도 발현에 미치는 영향”, *콘크리트학회지*, 제10권 제1호, pp.101-108.
7. 이흥수 (2009), *터널 배면 뒤채움재인 경량기포 모르타르의 현장 적용 가능성에 관한 실험적 연구*, 석사학위논문, 서울시립대, pp.11-12.
8. KS F 2322 (2000), “흙의 투수 시험 방법”, 기술표준원.
9. KS F 2405 (2005), “콘크리트의 압축강도 시험방법”, 기술표준원.
10. KS F 2408 (2000), “콘크리트의 휨강도 시험방법”, 기술표준원.
11. KS F 2456 (2008), “금속 동결 융해에 대한 콘크리트의 저항 시험 방법”, 기술표준원.
12. KS F 2459 (2002), “기포 콘크리트의 겔보기 밀도, 함수율, 흡수율 및 압축강도 시험방법”, 기술표준원.
13. KS F 2584 (2010), “콘크리트의 축진 탄산화 시험방법”, 기술표준원.
14. KS F 4039 (2004), “현장 타설용 기포 콘크리트”, 기술표준원.
15. 한국건설기술연구원 (2001), *고속전철 구조물 안전성 기술개발 (터널부문) 2단계 2차년도 보고서*, 경기도, pp.22-23.
16. 한국건설기술연구원 (2008), *신개념 NATM Composite 라이닝 공법 개발*, 한국건설기술연구원, 경기도, pp.215-234.
17. ASTM C 1202 (2010), “Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration”.
18. ASTM D 4716-04 (2004), “Test Method for Determining the (In-plane) Flow Rate per Unit Width and Hydraulic Transmissivity of a Geosynthetic Using a Constant Head”.
19. Palmeira, E. M., and Gardoni, M. G. (2002), “Drainage and Filtration Properties of Non-Woven Geotextiles Under Confinement Using Different Experimental Techniques”, *Geotextile and Geomembranes*, Vol.20, No.2, pp.97-115.
20. Giroud, J. P. (1981), “Designing with Geotextiles”, *Materiaux et Constructions*, Vol.14, No.82, pp.257-272.
21. Mok, M. S., Blond, E., Mlynarek, J., and Jeon, H. Y. (2008), “Relationship Between Short-term Compression Strength and Transmissivity Properties of Geonets”, *Proceeding of the 4th Asian Regional Conference on Geosynthetics*, Geosynthetic in Civil and Environmental Engineering, Shanghai, China, pp.546-551.

(접수일자 2011. 6. 23, 심사완료일 2011. 12. 26)