

NATM Composite 라이닝 공법의 적용성 연구

Study on Applicability of NATM Composite Lining Method

마 상 준¹ Ma, Sang-Joon

강 은 구² Kang, Eun-Gu

김 동 민³ Kim, Dong-Min

Abstract

This paper presents the applicability of NATM Composite Lining method in domestic tunnel construction sites. Firstly, in order to produce high quality PC Panel, optimal steam curing condition is reviewed. And in preparation for fire inside the tunnel, the fire-resistance test of PC Panel is carried out. The constructability of NATM Composite Lining method and the drainage ability of light-weight foamed mortar is also evaluated through field construction test. And PC Panel combination program is developed to calculate the quantity of PC Panel efficiently. Besides, economic evaluation for NATM Composite Lining method is conducted. From this research, it is clearly found that NATM Composite Lining method is applicable to domestic tunnel construction site.

요 지

본 연구에서는 NATM Composite 라이닝 공법을 실제 터널 현장에 도입하기 위한 적용성 연구를 수행하였다. 먼저 고품질 PC 패널을 생산하기 위한 최적의 증기양생 조건을 도출하였으며 터널 화재 시 피해를 최소화하기 위해 화재모형 실험을 수행하여 PC 패널 라이닝의 화재 거동 특성을 고찰하였다. 또한 실제 현장에 시험시공을 수행하여 NATM Composite 라이닝 공법의 시공성과 안정성을 확인하였고, 현장 배수실험을 실시하여 경량기포 모르타르의 배수성능을 검토하였다. 그리고 추후 NATM Composite 라이닝 터널 설계 시 효율적으로 PC 패널 라이닝 수량을 산출 할 수 있도록 PC 패널 최적 조합 프로그램을 개발하였으며 공사비 분석 및 VE 평가를 통해 NATM Composite 라이닝 공법의 경제성을 검토하였다. 본 연구 결과 NATM Composite 라이닝 공법은 국내 터널 현장에 충분한 적용성을 갖는 것으로 판단된다.

Keywords : Experimental Construction, NATM Composite Lining, PC Panel Combination Program, Spalling, Steam Curing

1. 서 론

마상준 등(2011)에서는 NATM Composite 라이닝 공법 개발을 위한 기초연구를 수행하여 고성능 PC 패널

라이닝(precast panel lining)의 설치 위치별 최적 배합과 경량기포 모르타르 재료를 개발하였으며, 실험모형 실험을 통해 안정성을 평가하였다. 그러나 NATM Composite 라이닝 공법을 실제 터널현장에 적용하기 위해서는 기

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

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

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

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

초적인 재료개발 이외에도 재료의 생산 시스템에 대한 연구와 시공성의 검토가 이루어져야 하며 터널 운용 중 발생 가능한 사고 위험요소에 대한 안정성 평가가 이루어져야 한다. 또한 기존 공법과 비교 시 경제성을 확보할 수 있어야 한다.

NATM Composite 라이닝 공법의 PC 패널의 경우 증기양생 시 양생시간 및 온도 등 양생조건에 따라 품질에 큰 차이가 발생하게 되므로 고품질의 PC 패널 생산을 위해서는 최적의 증기양생 조건에 대한 고찰이 선행되어야 한다. 또한 터널의 경우 화재 시 밀폐된 공간의 특성상 급격하게 온도가 상승하여 라이닝 구조체의 안정성이 감소하게 되므로 화재손상 특성에 대한 규명도 필요하다. 그리고 실제 터널 현장에 본 공법을 적용시키기 위해서는 시험시공을 실시하여 시공성 및 사용성에 대한 검토가 선행되어야 하며 직접비 및 간접비를 고려한 전체 공사비와 생애주기비용(LCC: life cycle cost)을 고려한 경제성 분석이 이루어져야 한다.

따라서, 본 연구에서는 NATM Composite 라이닝 공법의 적용성 확보를 위하여 고성능 PC 패널을 생산하기 위한 최적 증기양생 조건을 도출하였으며 터널 화재 시 세그먼트 라이닝의 내화성능을 검토하고 화재 손상범위를 예측하기 위한 연구를 수행하였다. 그리고 실제 지하공동 현장에 시험시공을 수행하여 NATM Composite 라이닝 공법의 시공성을 검토하였으며 현장 배수실험을 통해 경량기포 모르타르의 배수성능을 검토하였다. 또한 추후 NATM Composite 라이닝 터널설계시 효율적이고 경제적으로 PC 패널 라이닝의 크기 및 수량을 산출할 수 있도록 PC 패널 최적 조합 프로그램을 개발하였고 공사비 분석 및 VE평가를 통하여 NATM Composite 라이닝 공법의 경제성을 분석하였다.

2. PC 패널 라이닝의 최적 양생조건 검토

국내의 PC(precast) 제품 생산 공장에서는 짧은 시간 내에 높은 탈형 강도를 얻기 위해 증기양생법을 도입하고 있다. 하지만 증기양생법의 경우 강도 증진이 현저하게 나타나는 초기의 양생 조건에 따라 향후 콘크리트의 품질이 크게 변하게 된다. 따라서 고품질의 PC 패널 생산을 위해서는 적정 온도, 양생시간, 온도상승구배 등의 양생조건에 대한 검토가 이루어져야 한다. 본 연구에서는 고강도 PC 패널의 생산을 위해 전양생 시간과 온도상승구배를 검토하여 최적의 증기양생 조건을 도출하기 위한 연구를 수행하였다.

2.1 실험 개요

일반적으로 PC 패널의 증기 양생에 있어 가장 효과적인 최대양생온도는 약 60~80℃ 이고 증기양생이 24시간 정도 계속될 수 있다면 이 범위 안에서 낮은 온도일수록 효과적이라고 알려져 있다(ACI Committee 517, 1969). 또한, 최대양생온도 증가 시 그에 따른 긴 온도상승 기간이 필요하며 높은 초기강도와 낮은 장기강도를 나타내게 된다(고경택과 정해문, 2005). 그리고 전양생 시간이 길수록 온도 상승에 의해 발생하는 내부 균열을 억제하여 강도가 향상되는 것으로 알려져 있다(권희성, 2008).

본 연구에서는 이러한 기존 연구를 바탕으로 PC 패널 최대 양생온도를 60℃로 고정된 뒤 전양생 시간과 온도상승구배를 변수로 선정하여 양생조건에 따른 PC 패널의 물리적 특성을 분석하였다. 표 1은 본 실험의 양생조건 변수를 정리한 것이다.

표 2는 본 실험에 적용된 PC 패널 시편의 배합표를

표 1. 양생조건 변수

구 분	시험요소	양생조건
증기양생조건	전양생 시간 : 0, 1, 2, 3(hr)	온도상승구배 : 20℃/hr 최대양생온도 : 60℃
	온도상승구배 : 10, 20, 30, 40(℃/hr)	전양생 시간 : 3hr 최대양생온도 : 60℃
	등온양생(℃) 5~8시간 후 자연방랭 6시간	

표 2. 시험체 배합설계표

강도 (MPa)	슬럼프 (cm)	공기량 (%)	잔골재율 (%)	W/C (%)	단위 중량 (kg/m ³)				
					C	W	S	G	AD
45	4.0±1.0	2.0	39.4	34.3	437.3	150.0	694.0	1084.0	4.25

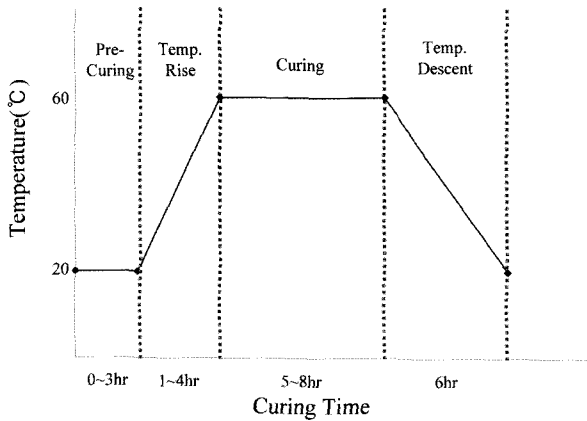


그림 1. 증기양생조건 모사 그래프

나타낸 것이다. 시편의 제작에는 제 3종 포틀랜드 시멘트(조강 시멘트)를 사용하였으며 골재는 양질의 하천사를 사용하였다. 증기양생은 0~3시간의 전양생 단계, 1~4시간의 온도상승 단계, 최대 양생온도 유지단계, 온도 자연하강 단계로 수행하였으며 총 15~18시간 동안 증기양생을 실시하였다.

그리고 증기양생 조건별 강도 성능평가를 위하여 KS F 2405에 준하여 압축강도 시험을 실시하였으며 PC 패널의 투수성 및 내구성 평가를 위하여 ASTM C 1202에 준하여 염소이온투과시험을 수행하였다. 압축강도는 증기양생을 마친 탈형 직후와 증기양생 후 14일, 28일간 수증양생을 한 후에 측정하였으며 염소이온투과저항성 시험은 재령 28일 공시체의 염소이온 투과 전하량을 측정하였다. 그림 1은 증기양생조건을 나타내었다.

2.2 실험 결과

2.2.1 압축강도

그림 2는 온도상승구배를 20°C/hr로 고정하고 전양생 시간 변화에 따른 시험체의 재령별 압축강도를 나타낸 것이다. 시험 결과 전양생 시간 0시간에 비해 3시간의 경우 재령 1일 압축강도가 14.4MPa 정도 증가하였으며 재령 28일에서는 15.7MPa 정도의 강도 증진이 나타나 전양생 시간이 증가할 수록 강도 발현이 우수하게 나타나는 경향을 보였다. 이는 시멘트, 자갈, 물 및 공기 등의 열팽창 계수가 다르기 때문으로, 전양생 기간이 짧아 콘크리트가 온도 상승에 따른 팽창응력에 저항할 정도의 강도를 갖지 못하면 내부에 균열이 발생하게 되어 장기 재령 압축강도가 저하되기 때문이다(Verbeck and Helmuth, 1968). 그러나 1시간 이상의 전양생 시간을 확

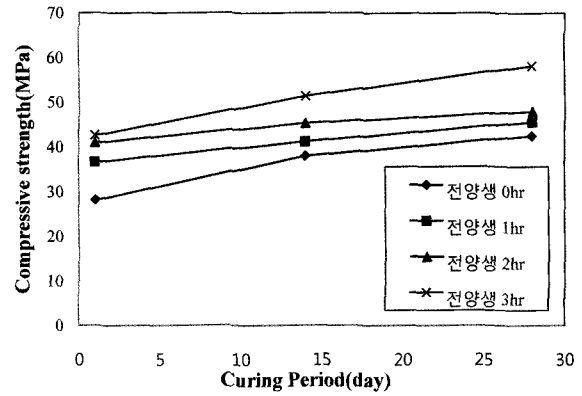


그림 2. 전양생 시간과 압축강도

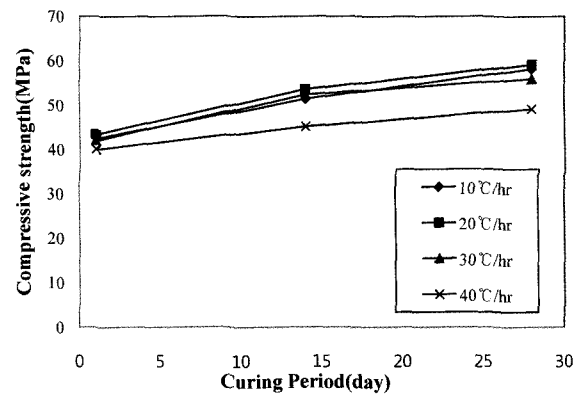


그림 3. 온도상승구배와 압축강도

보한 시편의 경우 모두 증기양생 후 지속적으로 수화반응이 이루어져 28일 재령 압축강도가 45MPa 이상으로 발현되었으며 전양생 시간에 따른 압축강도 발현의 문제는 발견되지 않았다. 따라서 전양생 시간은 경제성과 생산성을 고려하여 1~2시간 정도의 범위에서 적용되는 것이 적절할 것으로 판단된다.

그림 3은 전양생 시간을 3시간으로 고정하고 온도상승구배를 10~40°C/hr로 변화시켜 증기양생을 시킨 후 압축강도 측정 결과를 나타낸 것이다. 일반적으로 증기양생 시 PC 패널의 온도상승구배는 11~33°C/hr에서 이루어지며 온도상승구배가 작을수록 콘크리트의 품질이 좋아지는 것으로 알려져 있다(Hanson, 1965). 이는 콘크리트가 초기에 고온으로 급속히 수화되면 이후 수화반응이 지연되어 페이스트 내의 수화생성물의 분포가 불균일하게 분포되기 때문이다(한상훈 등, 2000). 하지만 온도상승구배가 너무 작을 경우 초기 양생온도 저하로 강도가 저하될 가능성이 있다. 실험 결과 온도상승구배가 20°C/hr의 경우 28일 압축강도가 약 59.2MPa로 가장 높은 압축강도 특성을 보였으며 10°C/hr와 30°C/hr의 경우에는 강도 발현 특성이 거의 유사하게 우수한

것으로 나타났다. 온도상승구배 10~30°C/hr의 범위에서는 PC 패널의 강도 발현이 우수하게 나타났으며 따라서 이 범위에서는 PC 패널의 수화반응이 충분히 균일하게 이루어지면서 초기 강도 저하가 발생되지 않는 것으로 판단된다. 하지만 온도상승구배가 40°C/hr 이상일 경우 초기 고온으로 인해 수화생성물이 불균일하게 분포하여 강도 발현이 현저히 감소되었으며 콘크리트 매트릭스 내에 미세 균열이 발생되었음을 간접적으로 알 수 있었다. 따라서 온도상승구배는 10~30°C/hr 정도로 유지되어야 할 것으로 판단된다.

2.2.2 염소이온 침투 저항성

염소이온 침투 저항성시험은 콘크리트의 간접적인 내구성 평가 방법으로서 콘크리트 내부의 경화구조에 따른 염소이온 투과정도로 콘크리트의 투수성을 평가하는 시험 방법이다. 그림 4는 온도상승구배는 20°C/hr로 고정된 뒤 최대 양생온도를 60°C로 유지하고 전양생 시간을 다르게 하여 염소이온투과저항성 시험을 수행한 결과를 나타낸 것이다. 실험 결과 전양생 시간 0~1시간의 경우 재령 28일의 염소이온 통과전하량이 ASTM(2010) 제시 기준 “High”를 기록하였으며 전양생 시간을 2시간 이상으로 한 경우 통과전하량이 “Moderate”를 기록하였다. 전양생 시간을 충분히 둔 공시체의 경우 초기 강도의 발현으로 증기양생 시 고온에서의 팽창압에 대한 저항능력이 커지므로 균열이 발생되지 않고 경화구조가 치밀해져 장기적인 내구성 측면에서도 양호할 것으로 판단된다. 하지만 전양생 시간이 길어질 경우 PC 패널의 생산성이 저하되므로 생산성과 경제성을 고려하여 1~2시간 정도의 전양생 시간을 유지하는 것이 효율적이라고 생각된다.

그림 5는 전양생 시간 3시간, 최대양생온도 60°C로 고정하고 온도상승구배만을 다르게 하여 염소이온 침

투 저항성실험을 수행한 결과를 나타낸 것이다. 시험결과 10~20°C/hr 범위에서는 ASTM 기준의 Moderate 등급에 거의 근접하게 나타나 투수 저항능이 양호할 것으로 판단되었지만 온도상승구배가 30°C/hr 이상인 경우 6개의 시편 모두 4,000coulomb을 초과하는 것으로 나타나 라이닝 설치 시 누수에 의한 내구성 저하가 심하게 나타날 것으로 판단된다. 온도상승구배에 따른 압축강도 발현 성능과 염소이온 침투 저항성을 종합한 결과 온도상승구배가 10~20°C/hr일 때 수화생성물의 분포가 균일하게 나타나 가장 치밀한 경화구조를 보이는 것으로 나타났으며 압축강도 발현 성능 또한 우수한 것으로 판단된다. 따라서 PC 패널의 공장 생산 시 증기양생에서는 온도상승구배를 10°C~20°C/hr 내외로 조절하는 것이 가장 효과적일 것으로 판단된다.

3. PC 패널 라이닝 구조물의 화재손상 예측 기술 개발

콘크리트는 낮은 열전도율과 비연소성을 가지고 있어 내화능이 우수한 재료 중 하나이지만 고온에 노출되게 되면 표면이 박리되어 단면결손이 일어나는 폭발 현상을 보이게 된다. 특히 터널의 경우 밀폐된 공간이라는 특성상 5분 내에 최대 1,000°C 이상으로 온도가 급상승할 수 있어 그 위험성은 더욱 커지며 막대한 인적, 물질 피해를 야기하게 된다. 유로터널, 몽블랑터널, 독일 Moorfleet 지하도로, 스페인 Guadarrama 지하도로 등에서는 대형 화재가 발생하여 수많은 인명피해가 발생했으며 폭발에 의한 구조물의 손상으로 큰 경제적 손실을 초래한 사례가 있다(김홍렬 등, 2009). 이 중 유로터널에서는 45cm 두께의 콘크리트 라이닝이 폭발에 의해 2cm 두께로 감소하여 터널의 구조적 안정성에 치명적인 피해가 발생하기도 하였다. 따라서 추후 장대터널의 시공

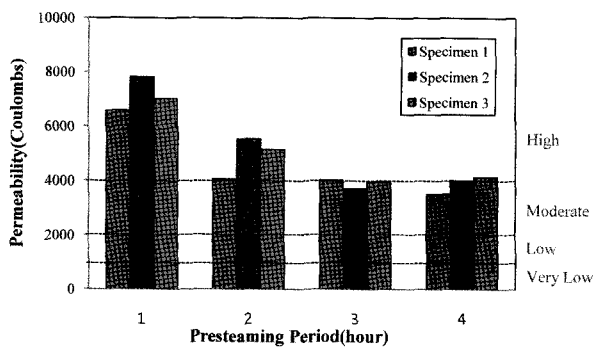


그림 4. 전양생 시간과 염소이온 투과전하량

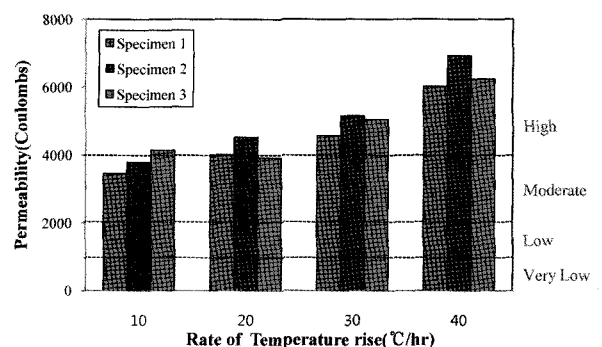


그림 5. 온도상승구배와 염소이온 투과전하량

에 적용 되기 위해서는 NATM Composite 라이닝 공법의 경우 화재에 따른 거동특성 예측 및 내구성의 검토가 필요하다고 판단된다.

따라서 본 연구에서는 터널 화재 시 PC 패널 라이닝의 화재 손상범위를 규명하고 거동특성을 예측하기 위해 다양한 터널 화재 조건하에서 NATM Composite 라이닝의 내화성능을 검토하였으며 라이닝에 가해지는 하중 및 라이닝 강도에 따른 라이닝의 화재 거동특성을 분석하였다.

3.1 PC 패널 라이닝의 화재조건에 따른 화재손상 분석

3.1.1 실험개요

본 연구에서는 라이닝의 화재 성상을 분석하기 위하여 KS F 2257-1 및 EFNARC(2006) 기준을 만족하고 하중재하와 화재강도 조정을 병행할 수 있는 가열 실험장비를 개발하였다. 가열 실험장비의 모습은 그림 6에 나타내었다. 본 장비는 구현 가능한 화재곡선의 온도를 99point로 입력할 수 있어 표준화재곡선(ISO standard fire)을 비롯한 다양한 화재강도(modified hydrocarbon, hydrocarbon, RWS tunnel fire curve 등)의 모사가 가능하며 온도의 오차범위가 $\pm 3\%$ 정도로 정밀한 조정이 가능하다.

화재손상 실험을 위한 시편은 600×600×200mm 규격의 고강도 콘크리트 블록으로 만들었으며 내부의 온도를 측정하기 위해 열전대를 깊이 5, 10, 20, 30, 50, 100, 150mm 위치에 설치하였다. 열전대는 시편의 좌측과 우측에 2개씩 설치하여 그 평균값을 측정하였다.

본 연구에서는 터널 라이닝의 화재성상 평가를 위하여 전 세계적으로 빌딩 구조물에서 화재에 관해 규정되어 있는 표준화재곡선(ISO)을 사용하였으며 최고 온도를 구현하는 RWS 곡선과 가장 급격한 온도상승을 보이는 modify hydrocarbon(MHC) 곡선, 그리고 일정한 온도상승과 일정한 온도를 유지하는 1°C/sec 곡선을 적용하였다(PIARC, 2003). 각 곡선의 특성은 그림 7과 같다.

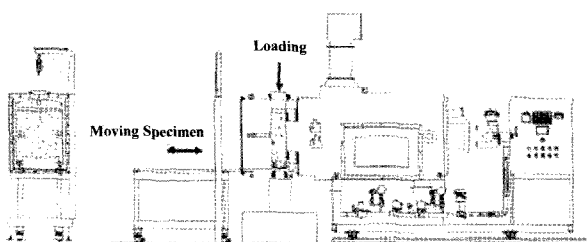


그림 6. 가열 실험장비 모습

3.1.2 실험결과

그림 8과 표 3은 화재 조건별 콘크리트 라이닝의 화재손상 실험 결과를 나타낸 것이다. 실험 결과 ISO 화재 조건 적용 시 PC 패널의 내부온도는 가열면으로부터 깊이에 따라 순차적으로 증가하였으며, 가열면 깊이 5~20mm 에서는 20~30분 사이에 급격한 온도상승이 발생하였다. 이 때 콘크리트의 온도가 380°C 이상이 되었으며 이로 미루어 보아 이 시점에서 폭발 현상이 발생한 것으로 판단된다. 가열 깊이 100mm 이상에서는 온도변화가 거의 일어나지 않았으며 외부 온도 변화에 큰 영향을 받지 않는 것으로 판단된다.

MHC 화재조건 적용 시 PC 패널은 급격한 온도상승으로 가열면으로부터 깊이 5~30mm 까지 폭발현상이 발생되었으며 가열 후 10분 내외의 시점에서 폭발이 발생하였다. 깊이 50mm 이상에서는 폭발 현상은 나타나지 않았으며 가열 후 100분 이후에 PC패널이 최고 온도로 상승되는 것으로 나타났다.

1°C/sec 시편의 거동특성을 분석한 결과 상대적으로 낮은 온도상승률 및 최대 온도로 인해 콘크리트의 폭발은 일어나지 않았다. 깊이 5~30mm의 경우 일반적인 폭발 발생 온도를 초과하였으나 가열 시간과 온도 상승률이 상대적으로 낮아 폭발에 대한 영향을 받지 않은 것으로 분석된다.

RWS 화재조건인 경우 초반 급격한 온도상승은 MHC보다 낮지만 전반적인 온도 상승 비율이 비슷하기 때문에 시편의 열특성 분포도 유사한 특성을 나타내었다. 깊이 5~30mm까지는 급격한 온도 상승으로 인한 폭발 현상이 나타났으며 콘크리트의 단면 손실로 인해 시편 깊이 50mm에서도 온도의 상승 현상이 상당히 나타났다. 지속적인 고온유지로 인해 시편의 온도는 다른 화재 곡선에 의한 온도보다 높아지는 경향성을 나타내었으며 MHC 화재 곡선의 경우와 비슷하게 가열 후 10분 내외에서 폭발 현상이 주로 발생하였다.

ITA(international tunnel association)에서는 화재로부

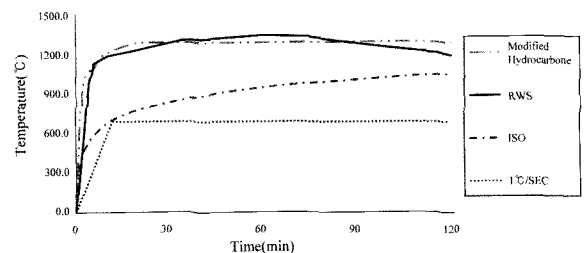


그림 7. 터널화재곡선(PIARC, 2003)

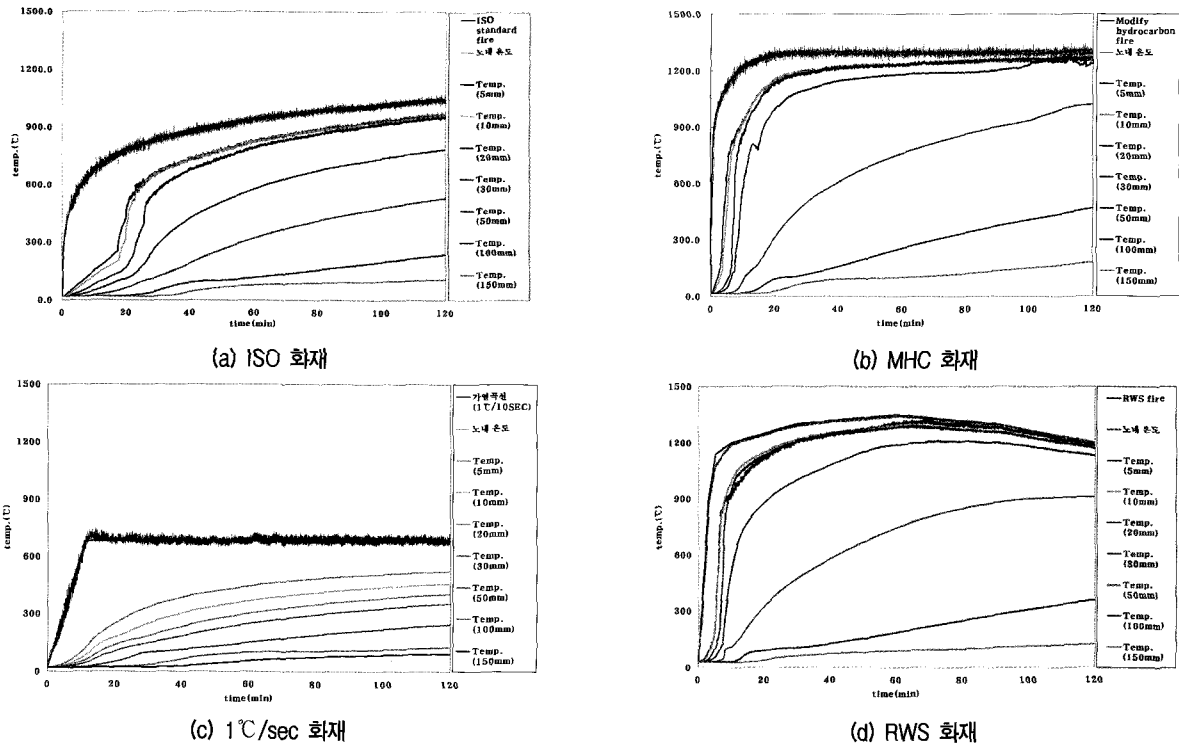


그림 8. 화재조건별 PC 패널 열분포 특성 그래프

표 3. 화재조건별 콘크리트 라이닝 화재손상 실험 결과

PC 패널 조건	화재조건 (2hr)	폭렬깊이 (mm)	기준 초과 범위 (380°C, mm)	기준초과 도달시간 (min)
40MPa	ISO	10	0~30	18
	MHC	30	0~50	3
	1°C/SEC	0	0~5	42
	RWS	30	0~100	5

표 4. 실험조건

구분	화재조건	배합강도 (MPa)	강도대비 재하비율(%)	재하하중 (kN)	열전대 위치 (mm)
L-L-1	MHC	24	20	432	10
L-L-2			40	864	20
L-L-3			20	720	30
L-L-4		40	40	1440	40
L-L-5			20	900	50
L-L-6			40	1800	75

터 구조물을 보호하기위하여 화재 열 방출 및 화재시간에 따른 도로터널 기준을 제시하였다. 이에 따르면 본 실험의 경우 압축강도 40MPa, 120분 화재 조건을 모사 하였으며 따라서 PC패널 라이닝의 성능저하를 방지 할 수 있는 한계 허용온도는 380°C로 제안하고 있다(ITA, 2004). ITA 기준에 따른 검토결과 ISO 화재 조건에 노출된 PC패널 라이닝의 화재손상 정도는 50mm로 도출 되었으며 화재 손상부위는 깊이 30mm를 초과하는 것

로 나타났고 내화 성능은 18분으로 평가되었다. MHC 조건의 경우 폭렬 깊이는 30mm, 화재손상부위는 100mm 이상으로 나타났으며 내화성능은 약 3분 정도로 예상된다. 그리고 RWS 화재조건인 경우 폭렬 깊이는 30mm, 화재손상범위 100mm 이상, 내화성능은 약 5분 정도로 평가된다. 1°C/sec 화재조건인 경우 폭렬현상은 나타나지 않았고 화재손상범위는 30mm 정도로 평가되며 내화 성능은 약 42분 정도 일 것으로 생각된다.

화재강도에 따른 PC패널의 열손상 정도를 분석한 결과 무피복 조건에서 모든 터널 화재조건인 경우 화재 1시간 이내에 라이닝 내부에 심각한 화재손상이 나타났다. 특히 급격히 온도가 상승하는 MHC 및 RWS 화재의 경우 화재 발생 5분 이내에 폭열이 발생하였으며 손상 범위도 10cm 이상으로 나타나 전체적인 터널 안정성에 크게 영향을 미칠 것으로 생각된다. 따라서 터널 라이닝을 지반 응력을 지지하는 지보재로 고려하게 될 경우 내화피복 처리가 반드시 필요할 것으로 판단된다.

3.2 PC 패널 라이닝의 하중조건 및 강도에 따른 화재손상 분석

3.2.1 실험 개요

콘크리트의 화재 폭열은 복합적인 원인에 의해 결정된다. 따라서 터널 라이닝의 화재 거동특성 예상을 위해서는 다양한 외적 요인에 의한 영향을 검토하여야 한다. 일반적으로 고온 가열 시 콘크리트는 하중이 재하될수록 폭열이 촉진되는 것으로 알려져 있다. 그러나 하중재하를 적정수준으로 조절할 경우 콘크리트 내부에 미세 균열이 발생하고 내부의 공극이 증가하여 수분의 흐름이 원활해져 오히려 폭열이 억제되는 현상이 나타난다(김형준 등, 2010). 또한 콘크리트의 강도 역시 폭열 특성에 큰 영향을 미칠 수 있을 것으로 판단된다.

따라서, 본 연구에서는 화재 시 PC 패널 라이닝에 작용되는 하중 크기 및 라이닝 강도에 따른 폭열 발생의 영향성을 파악하기 위한 실험을 수행하였다. 표 4는 화재손상 실험조건을 나타내었다. 본 실험에서는 MHC 화재조건을 적용하였으며 PC 패널 라이닝 시험체의 압축강도는 24, 40, 50MPa, 재하비율은 시험체 강도 대비 각각 20, 40%로 재하하였다. 하중재하는 가열 실험을 수행하기 전 시험체 150×600mm의 단면에 30kN/min의 속도로 하중을 가하여 목표치까지 재하한 후 가열실험 동안 하중을 유지하도록 하였다. 그림 9는 라이닝 하중조건 및 강도에 따른 화재손상 실험 시험체의 모습을 나타내었다.

3.2.2 실험 결과

그림 10과 표 5는 PC 패널 라이닝의 강도 및 하중조건에 따른 화재손상 실험 결과를 나타낸 것이다. 실험 결과 하중조건이 20%에서 40%로 변화 시 콘크리트 시험체의 깊이별 온도 상승 경향은 큰 차이를 보이지 않았으며 120분 화재 후 최고 온도도 거의 비슷하게 나타났

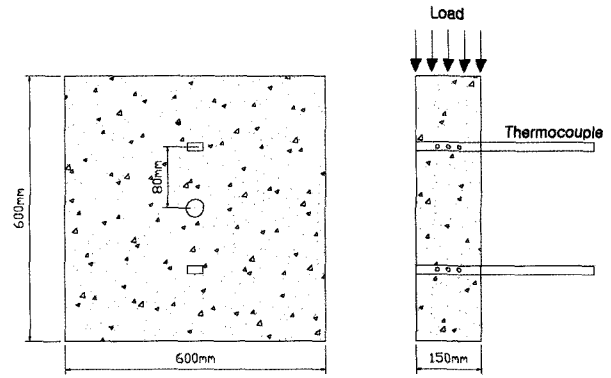


그림 9. 라이닝 하중조건 및 강도에 따른 화재손상 실험 시험체 모습

다. 최초 기준 온도(380℃) 도달 시간의 경우도 40% 하중 재하 시 20% 하중비율에 비하여 미소하게 단축되는 것으로 나타났지만 큰 차이를 보이지는 않았으며 콘크리트의 폭열 깊이도 0~10mm 정도로 비슷한 결과를 보였다. 따라서 재하비율 20%와 40% 범위에서는 하중재하에 따른 영향을 확인할 수 없었다.

그러나 3.1.2의 재하 비율이 0인 경우 40MPa 강도 라이닝의 MHC 곡선 화재손상 특성과 비교 시 폭열의 깊이가 30mm에서 0mm로 현저히 감소하는 것으로 나타났으며 최초 기준 온도 도달 시간도 3분에서 약 10분 정도로 대폭 늘어나는 것으로 나타났다. 또한 하중 증가 시 콘크리트의 균열이 전반적으로 증가하는 경향을 보임을 확인할 수 있었다. 따라서 재하비율 20~40% 범위에서는 콘크리트 내부에 미세균열 발생으로 수분의 이동통로 역할을 하여 폭열이 제어되고, 그로인해 단면의 결손이 발생하지 않아 내부 온도 상승 속도도 줄어드는 것으로 판단된다. 이는 Phan and Carino(2002)의 연구결과와 부합되는 것으로 하중 재하 비율 20~40% 범위에서 라이닝의 내화 성능이 가장 잘 발휘된다는 것을 나타낸다. 하지만 보다 정확한 경향을 파악하기 위해서는 추후 하중 재하 비율의 범위를 증가시켜 라이닝의 화재 거동특성을 평가하는 연구가 필요할 것으로 생각된다.

라이닝 강도에 의한 화재손상 영향을 분석한 결과 강도 24MPa 시험체와 40MPa 시험체의 경우 유사한 내부 온도 상승 특성을 보였으며 50MPa 시험체의 경우 하중 증가 시 내화성능이 다소 낮아지는 경향을 보였다. 강도 24MPa인 L-L-1, 2 시험체와 강도 50MPa인 L-L-5, 6 시험체 비교결과 고강도인 L-L-5, 6 시험체의 경우 가열에 따른 온도상승 속도가 약 30% 정도 높게 나타났으며 폭열면적도 더 넓게 분포하는 것으로 나타났다. 깊이별 화재 손상부위는 콘크리트 강도에 관계없이 비슷한 정도

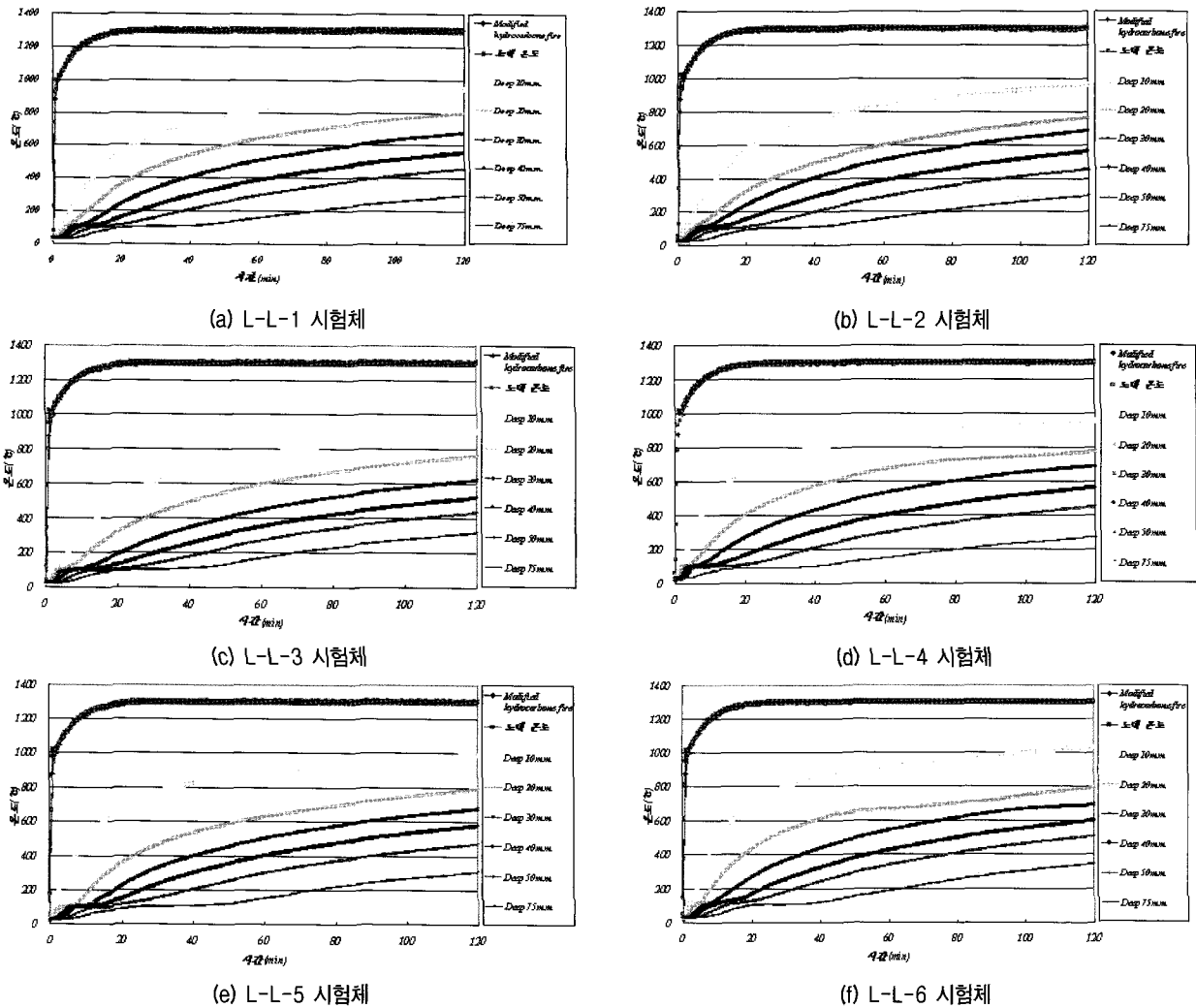


그림 10. 하중조건 및 강도에 따른 화재시 PC 패널 열분포 특성 그래프

표 5. 라이닝 하중조건 및 강도에 따른 화재손상 실험 결과

구분	콘크리트 균열 (mm)	기준초과 범위 (380°C, mm)	기준초과 도달시간 (380°C, min)	콘크리트 폭열깊이 (mm)
L-L-1	0.0	0~50	10	0
L-L-2	0.5	0~50	10	0
L-L-3	0.5	0~50	12	0
L-L-4	1.5	0~50	8	0
L-L-5	1.2	0~50	8	0
L-L-6	2.0	0~50	7	10

를 나타냈으나(0~50mm) 콘크리트 손상온도인 380°C에 이르는 시간은 강도가 증가할 수록 짧아져 동일한 재하비율에서 강도가 증가 할수록 내화성능은 줄어드는 것으로 판단된다. 이는 물/시멘트비(W/C)가 낮을수록 구성 요소의 분포가 조밀하여 내부 매질에 의한 열전달이 더욱 빠르기 때문으로 고강도 PC 패널 라이닝의 경우 화재에 따른 손상 위험성이 더욱 커질 것으로 생각된다.

4. NATM Composite 라이닝 터널 현장 시험시공

4.1 시험시공 개요

NATM Composite 라이닝 공법은 기존 NATM 공법의 현장타설 라이닝에 비해 공기를 대폭 단축할 수 있으며 시공 시 품질관리 및 유지관리에 유리하다. 또한 고품질 PC 패널을 적용함으로써 안정성이 뛰어나고 기존

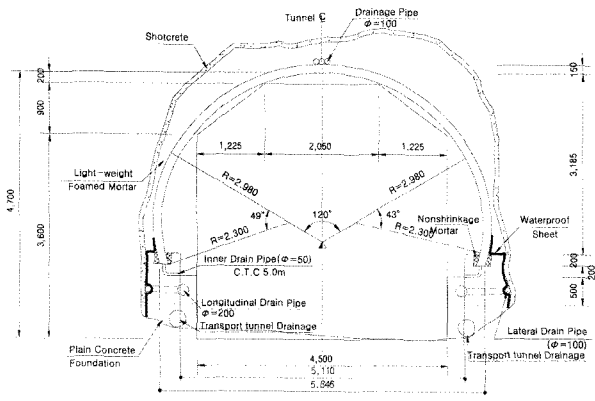


그림 11. 시험시공구간 표준 단면도

부직포 배수재의 성능 저하에 따른 잔류수압 발생 문제를 효과적으로 해결할 수 있는 장점이 있다. 하지만 터널 현장에 적용을 위해서는 국내 현장에서의 시공성을 검증하고 시공 시 발생하는 문제점들에 대한 검토가 이루어져야 한다. 따라서 본 연구에서는 NATM Composite 라이닝 공법의 공기감소 효과를 확인하고 시공성 및 실용화를 검토하기 위하여 NATM Composite 라이닝 터널의 현장 시험시공을 수행하였다.

현장 시험시공은 강원도 삼척시에 위치한 석회석광산 갱도에서 이루어졌으며 터널의 단면은 선정된 현장의 상황에 맞게 2차선 도로터널의 표준단면을 축소시켜 설계하였다. 시험시공 구간은 PC 패널의 링 단위 결합공정과 함께 5링 이상의 연결공정을 평가해 보기 위해 20m 이상으로 계획하였으며 기존 현장타설 라이닝 터널과 동일하게 보강계획을 수립하고 PC 패널 배면에 충전되는 경량 기포 모르타르의 실제적인 투수성을 평가하기 위해 PC 패널 배면에 배수관을 설치하여 투수시험을 실시하였다. 그림 11은 시험시공에 적용된 표준 단면도를 나타내었다.

NATM Composite 터널 공법의 시험시공은 먼저 발파에 의해 터널굴착을 수행하고 1차 지보재로 숏크리트를 타설한 후 하부 공동구를 시공하였으며 공동구의 타

설이 완료된 후 공장생산 된 PC 패널 라이닝을 설치하고 라이닝 배면을 경량기포 모르타르로 충전하는 과정을 통해 이루어졌다.

4.2 시험시공 수행

4.2.1 하부 공동구 타설

NATM Composite 라이닝 공법의 PC 패널 라이닝은 하부 공동구의 설치 흠을 기준으로 하여 연속적으로 시공이 이루어지므로 하부 공동구 타설 작업은 가장 기초적이면서도 중요한 공정이라고 할 수 있다. NATM Composite 라이닝 공법의 하부공동구는 기존 터널 공동구와 유사한 형태로 이루어졌으며 PC 패널이 설치되는 키블록이 있는 것이 특징이며 그림 12에 시공 모습을 나타내었다. 하부공동구는 먼저 하부공동구 타설을 위한 바닥 평탄화 및 정리 작업을 실시하고 PC 패널 하역장 및 작업공간을 확보하며, 하부 배수관을 설치한 후 공동구 하부타설을 실시하는 순서로 시공하였다. 그 후 터널 abut부 철근을 배근하고 측방배수관을 설치한 후 콘크리트를 타설하여 abut부 상부를 시공함으로써 하부공동구 및 PC 패널 설치 흠을 완성하였다. 본 시험시공에서는 하부 공동구를 현장에서 타설하여 공기가 다소 발생하였지만 추후 연구를 통해 조립식 프리캐스트 하부 공동구를 제작한다면 시공기간을 더욱 단축할 수 있을 것으로 판단된다.

4.2.2 PC 패널 라이닝 조립

하부 공동구의 양생이 완료 된 후 PC 패널의 조립을 통해 라이닝의 시공을 수행하였다. 본 시공에 적용한 PC 패널은 5개가 1조가 되어 1링을 이루며 폭 1.2m에 두께 17cm를 사용하였다. 그림 13은 본 시험시공에 적용된 PC 패널 종류 및 전개도를 나타내었다.



(a) 하부 배수관 설치

(b) 공동구 하부 타설

(c) ABUT 시공 및 설치 흠 완성

그림 12. 하부공동구 시공 모습

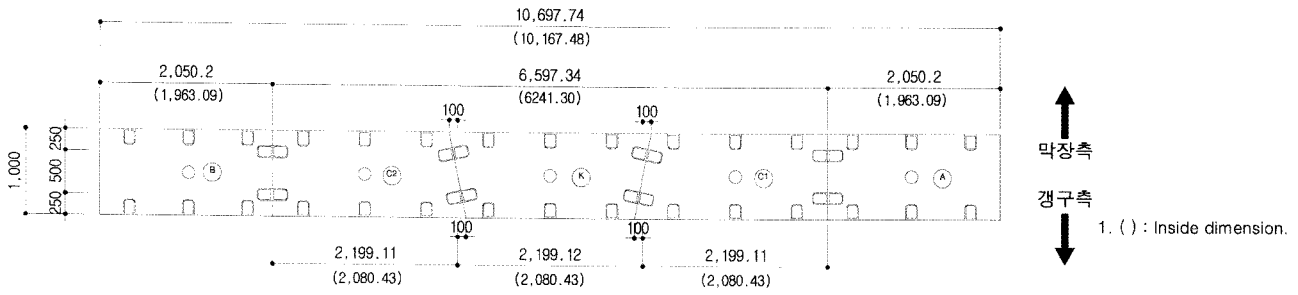
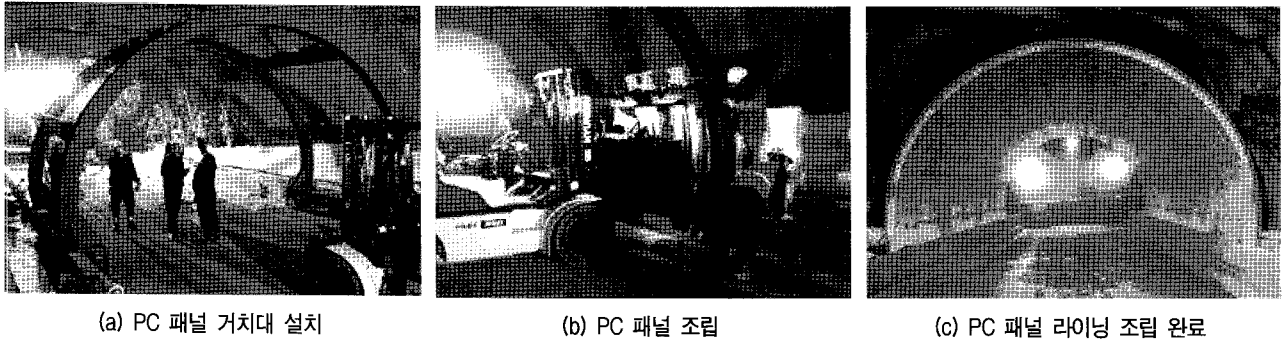


그림 13. 현장시험시공 PC 패널 종류 및 전개도



(a) PC 패널 거치대 설치

(b) PC 패널 조립

(c) PC 패널 라이닝 조립 완료

그림 14. PC 패널 라이닝 시공 모습

PC 패널 라이닝의 조립은 총 5개의 단계를 거쳐 진행되었는데, 첫 번째 단계에서는 터널 내부 설치장소에 환기설비를 설치하고 스틸 거치대를 조립하여 설치한 후, 두 번째 단계에서는 A-type 및 B-type 패널을 정위치시킨 후 패널을 거치대에 고정시키고, 세 번째 단계에서는 C1-type 및 C2-type 패널을 정위치에 위치시킨 후 A-type, B-type 패널의 볼트 구멍에 고장력 볼트를 넣어 체결하였다. 그리고 네 번째 단계에서는 링의 천정부에 K type 패널을 삽입, 볼트로 체결하여 1링을 완성하였다. 마지막 다섯 번째 단계에서는 스틸 거치대를 다음 링조립 위치로 이동시켜 고정하고 두 번째~네 번째 단계를 반복하여 NATM Composite 라이닝 시험시공을 완료하였다. 그림 14는 PC 패널 라이닝의 시공 모습을 나타내었다.

현재 국내 터널 현장타설 라이닝의 공중은 전체 터널 공기의 약 30~40%를 차지할 정도의 공기가 소모된다. 그리고 복잡한 시공공정에 의한 품질관리도 매우 어려운 실정이다. 하지만 PC 패널 라이닝에 의한 NATM Composite 라이닝 공법의 경우 거푸집 설치, 콘크리트 타설 및 양생, 거푸집해체 및 이동, 방수막 설치, 터널벽면 타일공 등의 과정이 생략되어 공기가 훨씬 단축되며 공장 생산으로 품질관리에도 유리하다. PC 패널 라이닝 공법은 PC 패널 제작 및 설치에 의한 공사비의 증가로 현장타설 라이닝 공법에 비해 약 13% 정도의 직접비 증

가가 발생할 것으로 판단된다. 그러나 공기 단축에 의한 간접비 감소효과와 차후 패널 대량생산에 의한 재료비 감소가 가능 할 것으로 판단되어 현장타설 라이닝 공법을 충분히 대체할 수 있을 것으로 분석된다.

현장시험시공 결과 하부공동구 타설 후 연속적으로 PC 패널 라이닝의 조립이 진행되어 기존 현장타설 라이닝 대비 3~6배 정도 공기단축이 가능할 것으로 판단되었다. 그리고 NATM 터널에 사용되는 방수슈트 및 부직포 설치 등의 공정 생략으로 시공공정이 매우 단순해져 시공인력 감축이 가능할 것으로 판단되며 라이닝 품질 관리 또한 용이할 것으로 생각된다.

또한 PC 패널의 조립을 위해 개발한 스틸 거치대의 경우 하부공동구에 레일 형식의 바퀴로 제작되어 이동이 용이하였으며 세그먼트의 하중을 충분히 지지할 수 있어 PC 세그먼트의 연속적인 조립을 가능케 하였다. 따라서 추후 약간의 개조만으로도 NATM Composite 라이닝 공법 시공 현장에 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

4.2.3 라이닝 배면 충전 및 현장배수실험

NATM Composite 라이닝 공법에 적용되는 경량기포 모르타르는 PC 세그먼트 라이닝 배면과 슛크리트 타설면 사이에 충전되어 부직포를 대신하여 PC 세그먼트 라이닝 배면으로 유입되는 지하수의 배수를 유도하고 지



(a) 경량기포 모르타르 충전

(b) 마구리면 방수작업

(c) 현장배수실험 수행

그림 15. 현장배수실험 모습

반 암반의 이완하중을 PC 세그먼트 라이닝에 전달해주는 역할을 하게 된다. 그리고 PC 패널 단면에 설치된 수팽창 지수재 및 유로흙은 라이닝 내부의 누수를 방지하는 역할을 하게 된다. 본 시험 시공에서는 라이닝 조립 완료 후 NATM Composite 라이닝 배면을 경량기포 모르타르로 뒤채움하고 경량기포 모르타르의 배수성능 및 수팽창 지수재 및 유로흙의 방수 효과를 검증하기 위한 현장배수실험을 실시하였다.

경량기포 모르타르의 충전 후 시험시공 구간의 양쪽 끝 마구리면은 에폭시 방수제를 적용하여 누수가 없도록 하였으며 지하수 유입장치를 모사한 수증 펌프를 설치하여 일정량의 물을 라이닝 배면에 유입시키고 하부 유공관을 설치하여 지하수의 배수 상태를 확인하였다. 그림 15는 현장배수실험 모습을 나타낸 것이다.

현장배수실험 결과 PC 세그먼트 유로흙 및 측방배수관에서 유출수가 확인 되었으며 배수관을 통하여 배수가 원활하게 이루어지는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 열악한 현장상황 때문에 유출수의 단위시간당 유출량 측정 및 정량적인 데이터 산정에는 어려움이 있었다. 하지만 본 실험을 통해 시험시공된 NATM Composite 라이닝 터널의 배수시스템의 효용성을 확인할 수 있었으며 충분한 통수능을 가지는 것으로 판단되어 기존 NATM 공법의 배수재인 부직포를 대체하여 배수재 역할을 충분히 할 수 있을 것으로 분석 되었다. 또한 터널 라이닝 내부의 누수가 확인되지 않아 수팽창 지수재와 유로흙에 의한 방수시스템의 성능을 확인할 수 있었다.

5. PC 세그먼트 최적 조합 프로그램 개발

5.1 프로그램 개요

본 연구에서는 NATM Composite 라이닝 공법의 효율

적이고 경제적인 설계를 위하여 터널 시공 시 필요한 최적의 PC 패널 수량을 조합하여 산출해내는 PC 패널 최적 조합 프로그램을 개발하였다. 본 프로그램은 터널 단면 형식과 구간의 선형정보, 그리고 패널의 형상에 대한 기본 정보 입력만으로 터널 내부에 맞는 패널의 최소수량과 패널 종류별 소요수량을 최적화된 결과로 제공한다.

본 연구에서 개발한 PC 패널 최적 조합 프로그램은 윈도우즈 기반의 응용 시스템으로 기하학적 도형 control 및 알고리즘 적용을 위해 시스템 구현에 가장 유리한 프로그램 개발언어인 Visual C++과 파일관리 및 user interface 기능 구현이 우수한 DELPHI-7로 개발되었다. 따라서 본 프로그램은 사용자가 IT 전문가가 아니더라도 손쉽게 사용할 수 있게 구성되었으며 다음과 같은 특징이 있다.

- (1) 터널단면 형상 및 선형에 대한 현황을 시각적으로 제공하여 간단한 수치값의 입력만으로 터널단면 확인 및 터널 전체 노선을 규정할 수 있다.
- (2) 적용하고자하는 PC 패널의 크기 및 종류를 사용자가 규정함으로써 다양한 형태의 결과를 산출할 수 있어 최적화된 결과를 도출할 수 있다.
- (3) 결과 정보에 대한 비교 분석 기능을 제공하고 입력 및 결과 정보를 파일로 저장이 가능하여 본 시스템이 설치된 다른 컴퓨터에서 재사용이 가능하다.

본 프로그램에서는 PC 패널 최적수량 산출의 시뮬레이션을 위해 조합적 기하 알고리즘을 사용하였다. 조합적 기하 알고리즘이란 일체 성형으로 사용될 조각을 구성하고 이러한 조각을 조각별 또는 그룹핑(grouping)하여 분류하고자 하는 대상 조각에 최적화 하는 알고리즘이다. 따라서 흡착 시뮬레이션을 위한 PC 패널 조합 프로그램이 가장 적합한 알고리즘이라고 할 수 있다. 본 프로그램은 해당 조각과 대상 조각의 조건에 따라 가장

최적화된 유형을 산출하는 방법을 구현함으로써 터널 내부 단면과 패널의 조건에 따라 흡착 시뮬레이션을 통해 최소 PC 패널 수량을 산출한다.

5.2 프로그램 구현

5.2.1 터널단면 형식 입력

본 프로그램에서는 상부원형 터널, 마제형 대칭 터널, 마제형 비대칭 터널 형식을 지원하여 일반적으로 터널 현장에 적용되는 터널 단면의 설계가 가능하다. 상부원형 터널의 입력변수는 상부반지름, 하부길이, 높이이며 마제형 대칭 터널의 입력변수는 상부 반지름, 하부반지름, 높이이다. 그리고 마제형 비대칭 터널의 입력변수는 상부 반지름, 상부원 각도, 왼쪽 반지름, 오른쪽 반지름, 왼쪽 높이, 오른쪽 높이이다. 그림 16에는 본 프로그램의 터널단면 설정 화면을 나타내었다.

5.2.2 터널 연장 내 선형 정보 입력

본 개발 프로그램에서는 터널연장 내 곡선 구간과 직선 구간별로 선형 정보를 입력하여 PC 패널 최적수량을 산출하게 된다. 직선 구간에서는 직선구간의 길이, 곡선 구간에서는 시점 및 종점, 곡선의 반지름, 곡선 각도, 중심점 거리, 그리고 중심의 위치를 입력하여 터널 연장 내 노선의 특성을 반영할 수 있다. 그림 17은 터널 연장 내 선형 정보 입력 화면을 나타내었다.

5.2.3 PC 패널 정보 설정

본 프로그램에서는 터널 연장 내에서 PC 패널 설계를 위하여 PC 패널 종류별 수량의 최적 조합을 산출해 내게 된다. PC 패널의 가로 및 세로의 적용 가능한 최소, 최대 길이를 입력하고 최소에서 최대까지의 간격을 입력하게 되면 패널 종류별 최적조합 수량을 산출 해낼

수 있다.(예를 들어 패널 폭의 최소: 2.0m, 최대 : 3.0m, 간격 : 0.5m를 입력하게 되면 2.0m, 2.5m, 3.0m 폭을 가지는 패널의 최적 조합수량 산출이 이루어진다.) 또한 본 프로그램에서는 PC 패널 라이닝 터널의 1링을 구성하는 A, B, C1, C2, K-Type 별 PC 패널의 수량도 산출이 가능하다. 그림 18은 PC 패널 정보입력 화면을 나타내었다.

5.2.4 시뮬레이션 결과 산출

터널단면 형상, station 정보, PC 패널 정보를 입력하게 되면 패널 종류 별로 터널 설계 시 요구되는 소요 PC 패널 수량 및 조합이 자동으로 산출되며 결과창에서는 패널 폭에 따른 각 유형(Type)별, 크기별 수량을 확인하여 비교할 수 있다. 그리고 station 구간별로 PC 패널의 전개도를 확인할 수가 있다. 또한 산출된 결과는 엑셀 파일로 자동입력되어 활용성을 높였으며 PC 패널의 전개도를 캐드 프로그램으로 보낼 수 있는 기능이 있다. 그림 19는 PC 패널 최적조합 결과 화면을 나타낸 것이다.

본 프로그램은 NATM Composite 라이닝 터널 설계 시 터널단면 형식, 노선현황, 터널 연장 등을 고려하여 패널 크기별로 최적화된 PC 패널 소요 수량을 산출할 수 있으며 상용화가 이루어져 사용법이 매우 간단하다. 따라서 추후 국내에 NATM Composite 라이닝 공법 시공 시 간편하게 최적의 시공물량을 산출하는데 큰 도움이 될 수 있을 것이라고 판단된다.

6. NATM Composite 라이닝 공법의 경제성 분석

NATM Composite 라이닝의 국내 현장 적용을 위해서는 기술적인 시공성 및 안정성에 관한 검증뿐만 아니

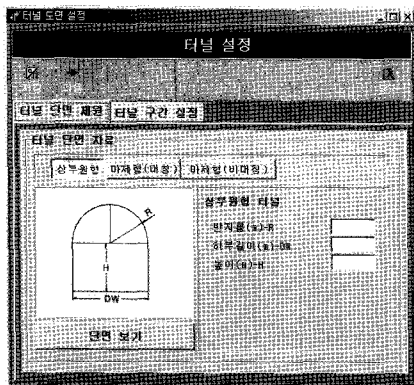


그림 16. 터널단면 설정

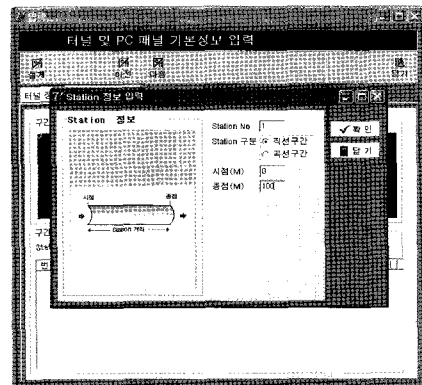


그림 17. 터널 연장 내 선형 정보 입력

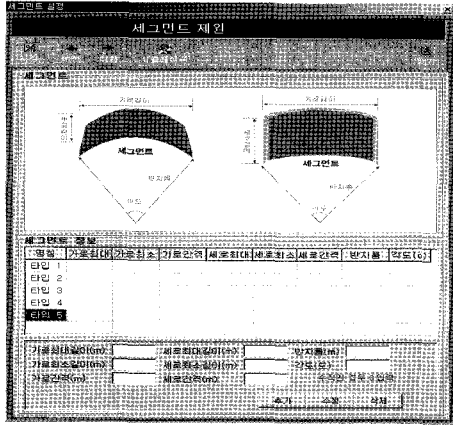


그림 18. PC 패널 정보설정

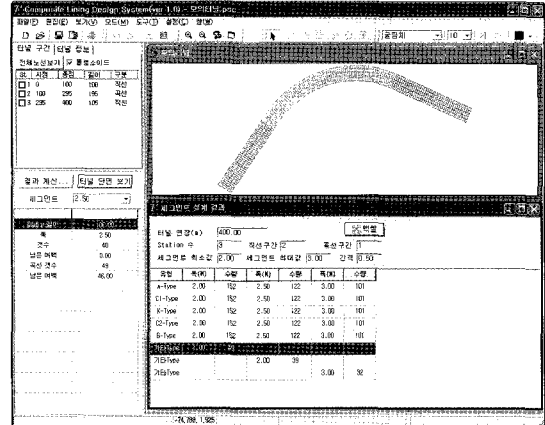


그림 19. PC 패널 최적조합 결과 산정

표 6. PC 패널 1Ring 당 단위공사비(단위: 원)

비목/구분			제조원가	구성비(%)	비고
순제조원가	재료비	직접재료비	3,509,781		
		간접재료비	497,700		
		소계	4,007,481	58.17%	
	노무비	직접노무비	1,440,038		
		간접노무비	100,803		
		소계	1,540,841	22.37%	
	경비	형틀금형비	350,000		
		운반비	483,000		
		소계	833,000	12.09%	
	제조원가			6,381,322	92.63%
일반관리비			319,066	4.63%	
이윤			188,503	2.74%	
총계			6,888,892	100.0%	

표 7. 현장타설 라이닝 공법과 NATM Composite 라이닝 공법의 단위공사비(단위: 원/m)

공종명	단위	현장타설 라이닝공법	NATM Composite 라이닝 공법	증감
라이닝 공		1,414,895	3,112,315	120.0%
1) 강재동바리및거푸집	회	604,694		-
2) 레미콘	m ³	89,142		-
3) 콘크리트 타설	m ³	16,906		-
4) 레미콘	m ³	318,457		-
5) 콘크리트 타설	m ³	62,832		-
6) 철근가공조립	ton	111,415		-
7) 철근운반	ton	2,908		-
8) 철근	ton	152,765		-
9) 라이닝신축이음	m	14,043		-
10) 라이닝 시공이음	m	16,015		-
11) 라이닝 배면그라우팅	m ³	25,718		-
12) PCL Composite 구입 및 설치	SET		2,812,118	-
13) PCL 운반	SET		42,943	-
14) 무수축몰탈	m ³		17,232	-
15) 경량기포콘크리트(배면채움)	m ³		240,022	-

표 8. 라이닝 관련 전체공종의 단위공사비(단위: 원/m)

구분	현장타설 라이닝 공법	NATM Composite 라이닝 공법	증감
라이닝 관련 직접공사비	2,789,056	3,522,556	26.3%
라이닝공	1,414,895	3,112,315	120.0%
방수공	730,643	54,359	-92.6%
부대시설공	423,561	170,045	-59.9%
공사중 임시시설	219,957	185,837	-15.5%

표 9. 현장타설 라이닝 공법과 NATM Composite 라이닝 공법의 전체공사비 비교(단위: 원)

공종명	규격	현장타설 라이닝(A)	NATM Composite 라이닝(B)	증감 (B/A)
◆ 총 공사비	L=1km	11,091,761,435	11,586,626,198	4.5%
가. 직접공사비계		7,773,616,457	8,342,434,416	7.3%
1) 간접노무비	(직노)×12.0%	339,390,426	274,334,873	-19.2%
2) 산재보험료	(노무비)×3.6%	114,035,183	92,176,517	-19.2%
3) 산업안전보건관리비	(재+직노)×1.88%	124,870,523	125,201,674	0.3%
4) 고용보험료	(노무비)×1.23%	38,962,020	31,493,643	-19.2%
5) 퇴직공제부금	(직노)×2.3%	65,049,831	52,580,850	-19.2%
6) 기타경비	(재+노무비)×7.3%	509,645,085	506,181,884	-0.7%
7) 환경보전비	(재+직노+경비)×0.9%	69,962,548	75,081,909	7.3%
8) 건강보험료	(직노)×1.59%	44,969,231	36,349,370	-19.2%
9) 장기요양보험료	(건강보험료)×6.55%	2,945,484	2,380,883	-19.2%
10) 연금보험료	(직노)×2.48%	70,140,688	56,695,873	-19.2%
11) 공사이행보증수수료	((직공)×0.016%+4300000)×공기(년)	9,978,801	7,888,705	-20.9%
12) 건설하도급대금지급 보증발급수수료	(직공)×0.064%	4,975,114	5,339,158	7.3%
나. 순공사비계		9,168,541,391	9,608,139,755	4.8%
13) 일반관리비	순공사원가의 4.2%	385,078,738	403,541,869	4.8%
14) 이윤	(노무비+경비+일반관리비)×9%	516,584,211	507,432,782	-1.8%
다. 총원가	순공사원가, 일반관리비, 이윤	10,070,204,340	10,519,114,406	4.5%
15) 정기안전점검비		13,215,147	14,182,138	7.3%
라. 공급가액		10,083,419,487	10,533,296,544	4.5%
16) 부가가치세	공급가액의 10%	1,008,341,948	1,053,329,654	4.5%

라 기존 공법 대비 경제성에 대한 검토가 이루어져야 한다. 따라서 본 연구에서는 기존 NATM 터널 공법과 NATM Composite 라이닝 공법의 경제성 분석을 통하여 NATM Composite 라이닝 공법의 적용성을 평가하였다. 먼저 PC 패널의 1ring 당 단위공사비를 산정하였으며 단위공사비 분석결과를 연장 1km인 2차선 일반 도로터널에 적용하여 기존 NATM 공법과의 전체 공사비를 비교하였다.

6.1 단위 공사비 분석

표 6은 2차선 도로터널을 표준단면으로 계획하여 NATM Composite 라이닝 공법의 PC 패널 1ring 당 단위공사비를 나타낸 것이다. 공장제작 및 50km 운반 거

리 기준 운임비를 고려하여 단위공사비를 산정한 결과, 1ring 당 공사비는 약 6.9백만원이 소요되는 것으로 파악되었다.

표 7은 현장타설 라이닝 공법과 NATM Composite 라이닝 공법의 라이닝 공중에 대한 m당 공사비를 산출한 것이며 표 8은 라이닝 관련 전체 공종의 단위공사비를 나타낸 것이다. 표와 같이, 라이닝공만 비교할 경우 NATM Composite 라이닝 공법의 경우 현장타설 라이닝 대비 약 120% 정도의 공사비가 증가하는 것으로 판단된다. 그러나 라이닝 공장제작을 통한 타설 및 양생기간 단축, 기계화 시공을 통한 시공속도 향상에 따른 공기절감 효과 등을 고려하면 라이닝 관련공종(공사 중 임시시설, 부대시설 등)의 공사비 절감이 가능할 것으로 판단된다. 방수공의 경우 방수막, 드레인보드, 지수판 미적

표 10. 라이닝 관련 전체공종의 단위공사비(단위: 원/m)

구분	현장타설 콘크리트 라이닝 공법	NATM Composite 라이닝 공법		
성능점수	73	89		
Star Diagram				
비용지수	1.079	1.000		
가치지수	67.9	88.5		
검토결과	가치유형	성능향상률	비용향상률	가치향상률
	가치혁신형	▲ 20.7%	▼ 7.3%	▲ 30.3%

용으로 인한 공사비 절감이 가능하며 부대시설공의 경우 라이닝 공동구에서 어깨부까지의 타일붙임 미적용으로 인한 공사비 절감이 가능하다. 또한 공사 중 임시 시설의 경우 라이닝 공기단축으로 공사 중 임시 전기기 계배수설비 사용기간 단축을 통해 공사비의 절감이 가능한 것으로 평가된다. 따라서, 라이닝과 관련된 공종 전체에 대하여 m당 단위공사비를 분석할 경우, 현장타설 라이닝 대비 약 26.3%의 단위공사비가 감소할 것으로 판단된다.

6.2 전체 공사비 분석

본 연구에서는 터널 m당 단위공사비를 바탕으로 연장 1km인 2차선 도로터널의 전체 공사비를 산정하여 현장타설 라이닝과 NATM Composite 라이닝 공법의 경제성을 분석하였다. 표 9는 라이닝 전체 공사비를 산정한 결과를 나타낸 것이다. 주요 공종별 단위 공사비 외에 간접비, 이윤 등 공사비와 관련된 전체 항목을 검토한 결과 NATM Composite 라이닝 공법의 경우 현장타설 라이닝 대비 약 4.5% 정도 공사비가 증가되는 것으로 파악되었다.

그러나 NATM Composite 라이닝 공법의 경우 라이닝 공법 선정 시 요구되는 평가지표인 친환경성, 구조안정성, 시공능력, 유지관리성, 현장적용성 등을 고려한 가치평가와 생애주기비용(LCC)을 기준으로 산정한 비

용분석 결과, NATM Composite 라이닝 공법이 현장 타설 콘크리트 라이닝 공법보다 경제성 측면에서 우수한 것으로 평가되었다. 표 10은 VE(value engineering) 검토 결과를 나타낸 것이다.

7. 결론

본 논문에서는 NATM Composite 라이닝의 적용성 확보를 위한 연구를 수행하였다. 본 연구를 통해 얻은 결론을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 최적의 PC 패널 라이닝 생산을 위한 증기양생 조건 도출결과 전양생 기간은 1~2시간 정도, 온도 상승 구배는 10~20℃로 유지하는 것이 강도 및 내구성능을 발휘하는데 가장 효과적일 것으로 판단된다.
- (2) 화재강도에 따른 PC 패널의 열손상 정도를 분석한 결과 무피복 조건에서는 모든 터널화재 조건에서 화재손상이 발생되어 터널 라이닝을 지보재로 고려할 경우 내화피복이 반드시 필요할 것으로 판단되었다.
- (3) 콘크리트 폭렬에 미치는 하중과 라이닝 강도의 영향을 검토한 결과 재하 비율 20~40%일 때 콘크리트 내부 미세균열 발생으로 폭렬 현상이 억제되는 것을 확인할 수 있었으며 라이닝 강도가 증가할수록 열전달이 빠르게 일어나 내화성능이 줄어드는

결과가 나타났다.

- (4) NATM Composite 라이닝 터널의 시공성 검증을 위한 현장시험시공 수행 결과 하부 공동구 시공, PC 패널 라이닝 조립, 경량기포 모르타르의 충전 등 시공 전체 과정이 무리 없이 진행되었으며 현장타설 라이닝 공중에 비해 공사기간을 현저히 감소시킬 수 있을 것으로 판단된다. 그리고 본 연구를 통해 제작한 PC 패널 조립장비 및 스틸 거치대의 적용성을 검증하였으며 차후 간단한 개조만으로도 NATM Composite 라이닝 터널의 시공에 이용될 수 있을 것으로 생각된다.
- (5) 본 연구에서는 NATM Composite 라이닝 터널의 효과적인 설계를 위해 조합적 기하 알고리즘을 사용하여 PC 패널 최적 조합 프로그램을 개발하였다. 본 프로그램은 터널 시공 관련 제원(터널 단면, PC 패널, 구간별 터널 길이 등)을 입력하면 PC 패널의 크기 및 유형별로 수량을 산출하며 그 결과가 엑셀 문서와 캐드파일 형식으로 변환이 가능하다. 따라서 추후 PC 패널 라이닝 터널 시공 시 최적의 시공물량을 산출하는데 큰 도움을 줄 수 있을 것으로 판단된다.
- (6) NATM Composite 라이닝 공법의 경제성 평가 결과 기존 현장타설 라이닝 공법에 비해 전체 공사비는 약 4.5% 정도 증가하지만 가치평가와 생애주기비용을 고려하면 경제성 측면에서 약 7.3% 비용 절감이 가능한 것으로 분석된다.
- (7) 본 연구에서는 NATM Composite 라이닝 공법의 적용성 확보를 위하여 PC 패널 증기 양생 조건 도출을 통해 효율적인 PC 패널 생산 시스템을 제안하고, 현장 시험 시공을 통해 시공성을 검증 하였으며, 경제성 분석을 통해 NATM Composite 라이닝 공법의 시장성을 확인 할 수 있었다. 또한 PC 패널 최적 조합 프로그램 개발을 통해 보다 효율적인 설계가 가능 할 수 있도록 하였다. 그리고 PC 라이닝의 화재 손상 거동을 평가하여 터널 내부 화재시 터널 라이닝의 거동 예측 및 안정성 평가에 대한 기초적인 연구 자료를 마련 할 수 있었다. 연구 결과 NATM Composite 라이닝 공법의 적용성을 확인 할 수 있었으며 추후 PC 패널의 대량 생산 시스템 마련, PC 패널 조립 설비 개발 및 암반 등급별 PC 패널 설계 표준안 도출 등

의 추가적인 연구가 이루어진다면 국내 터널 현장에 널리 적용 될 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

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

참고 문헌

1. 고경택, 정해문 (2005), “양생온도에 따른 콘크리트 특성”, *한국 콘크리트학회지*, 제17권 제1호, pp.22-27.
2. 권희성 (2008), *증기양생을 실시한 고강도 모르타르의 강도발현에 관한 실험적 연구*, 석사학위논문, 단국대학교, p.77.
3. 김형준, 김홍렬, 박경훈, 안찬술, 권기혁 (2010), “고온화재조건 콘크리트 라이닝의 하중비에 따른 폭렬영향성 및 화재손상특성에 관한 실험적 연구”, *한국화재소방학회지*, 제24권 제3호, pp.145-151.
4. 김홍열, 김형준, 조경숙, 이계승, 권기혁 (2009), “터널화재시 콘크리트 라이닝의 폭렬 및 화재손상에 관한 실험적 연구”, *한국화재소방학회지*, 제23권 제3호, pp.110-120.
5. 마상준, 강은구, 김동민, 신주열 (2011), “NATM Composite 라이닝 공법 개발을 위한 기초연구”, *한국지반공학학회지*.
6. 한상훈, 김진근, 송영철 (2000), “콘크리트의 재료역학적 성질에 대한 양생온도와 재령의 효과”, *한국콘크리트학회논문집*, 제12권 제6호, pp.23-34.
7. ACI Committee 517 (1969), “Recommended practice for atmospheric pressure steam curing of concrete”, *Journal ACI*, Vol.66, pp.629-646.
8. ASTM C 1202 (2010), “Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete’s Ability to Resist Chloride Ion Penetration”.
9. EFNARC (2006), “Specification and Guidelines for Testing of Passive Fire Protection for Concrete Tunnels Linings”, pp.15-27.
10. Hanson, J. A. (1965), “Optimum steam curing procedures for structural lightweight concrete”, *Journal ACI*, Vol.62, pp.661-672.
11. ITA Working Group No.6 (2004), “Guidelines for Structural Fire Resistance for Road Tunnels, International Tunnelling Association”.
12. Phan, L. T., and Carino, N. J. (2002), “Effects of Test conditions and mixture Proportion on Behaviour of high-strength Concrete Exposed to high Temperatures”, *ACI Material Journal*.
13. PIARC Committee on Road Tunnel Operation C-5 (2003), “PIARC Proposal on Design Criteria for Resistance to Fire for Road Tunnel Structures”.
14. Verbeck, G. J., and Helmuth, R. A. (1968), “Structures and Physical Properties of Cement Paste”, *Proc. 5th Int. Symp. on the Chemistry of Cement*, Tokyo, Part III, pp.1-32.

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