

A-14

터널구조물의 내화성능을 위한 고인성 내화모르타르의 내폭렬 성능 평가

이재영, 권영진*, 한병찬**, 김재환**

호서대학교 소방방재학과 석사과정, 호서대학교 소방방재학과 교수*, (주)에이엠에스 엔지니어링**

Explosive Spalling Behavior of Fire Resistance High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composite in Tunnel Structures

Jae-Young Lee, Young-Jin Kwon*, Byung-Chan Han**, Jae-Hwan Kim**

Hoseo University Fire Protection Graduated School, Hoseo University Fire Protection Professor*, AMS Engineering Co. Ltd**

1. 서 론

최근 세계적으로 터널 구조물의 대형 화재사고가 빈번히 발생하고 있다. 2002년의 대구 지하철참사 및 최근 구리 공동구 화재사건에서도 알 수 있듯이 터널 등과 같은 지하 구조물에 발생하는 화재는 인명피해와 구조체의 손상 등 대형 참사로 이어질 가능성이 커 사회·경제적으로 미치는 영향이 매우 크다. 실제 화재 사고사례(Moorfleet 터널 화재(독일, 1968년), Nihonzaka 터널 화재(일본, 1979년), Caldect 터널 화재(미국, 1982년), Summit 터널 화재(영국, 1984년), 그리고 최근의 예로 1999년 3월 프랑스와 이태리를 연결하는 Mont Blanc 터널)로부터 터널 구조물의 최대온도는 1,000~1,200°C로써 이러한 온도는 터널 구조에 심각한 피해를 발생시킬 수 있으며, 화재가 발생하는 경우는 터널의 붕괴로까지 이어질 가능성이 높다고 보고되고 있다.^{1),3),4)} 심지어는 화재에 의한 콘크리트의 폭렬은 내부 콘크리트 및 보강재에 대한 화재 직접 노출 및 급격한 온도 상승으로 재료의 강도저하를 일으켜 구조물의 심각한 손상 또는 붕괴를 유발 할 수 있으며, 콘크리트가 고강도화 될수록, 또한 부재의 응력이 크게 작용할수록 폭렬현상이 심각한 것으로 여러 연구자들에 의해 보고되고 있다. 그러므로 최근 터널라이닝의 세그먼트 등에서 주로 적용되고 있는 고강도콘크리트(설계기준강도 40 MPa 이상)는 화재발생시 폭렬에 매우 취약하기 때문에 이를 방지 또는 억제할 수 있는 내화공법의 개발이 절실히 요구되고 있다.

한편, 지금까지 고강도콘크리트의 내화공법으로는 주로 콘크리트 제조·비빔시 폴리프로필렌(PP) 섬유를 일정량 혼입하여 폭렬을 억제하는 공법이 활용되고 있으나, 이러한 공법은 신설구조물에만 적용 가능하며, 기존 터널구조물의 내화대책으로 활용하기에는 곤란한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 신설 및 기설 터널구조물의 폭렬억제 및 수열온도저감이 가능할 뿐만 아니라, 보수·보강효과도 겸비한 내화·보수공법인 고인성 내화모르타르를 개발하였으며²⁾, 고강도콘크리트 기둥시험체를 대상으로 내화성능을 검증하고자 하였다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험계획

본 연구에서는 고강도콘크리트를 사용한 철근콘크리트 기둥부재에 대하여 내화피복 재료·공법에 따른 내폭렬성과 수열온도 저감성능 등의 내화성능을 검증하고자 하였으며, 이를 위한 실험계획은 표 1과 같다.

표 1. 실험계획

시험체 기호	내화피복재의 종류	피복두께 (mm)	바탕처리 방법	가열 곡선	수열온도 측정위치	평 가 항 목
Plain	무	0	무	IOS 곡선 (3hr.)	주근 계면 로내부 (3개소)	<ul style="list-style-type: none"> ■ 가열시간-수열온도 곡선 ■ 폭렬성상 ■ 중성화깊이 (mm)
ECC(20)	고인성 내화모르타르	20	그라인딩 치핑			
ECC(30)		30				
ECC(50)		50				
PCM(30)	폴리머시멘트 모르타르	30	그라인딩 치핑			
FSM(30)	내화뿔철재	30	그라인딩			

즉, 내화피복재료의 종류에 따른 내화성능을 비교·검토하기 위해, 내화 피복재의 종류로서 내화피복층을 형성하지 않은 Plain, 고인성 내화모르타르(ECC), 폴리머시멘트모르타르(PCM), 내화뿔철재(FSM)의 4종류로 설정하였으며, ECC의 피복두께에 따른 영향을 검토하기 위해 피복두께를 20, 30, 50 mm의 3수준으로 설정하였다. 또한, ECC 및 PCM에 있어서 바탕처리방법에 따른 영향을 검토하기 위해 바탕처리방법으로써 그라인딩에 의한 표면처리, 치핑에 의한 표면처리 2수준으로 설정하였다.

한편, 본 연구에서는 가열곡선으로서 표준시간 온도곡선(ISO 834)을 활용하여 3시간 가열을 실시하였으며, 내화성능을 평가하기 위해 수열온도, 폭렬성상, 중성화깊이를 각각 측정하였다.

2.2 사용재료

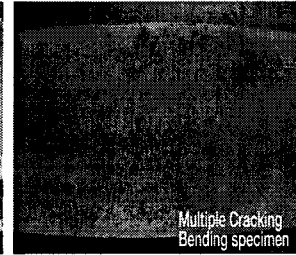
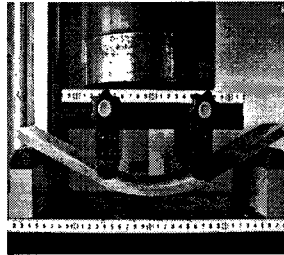
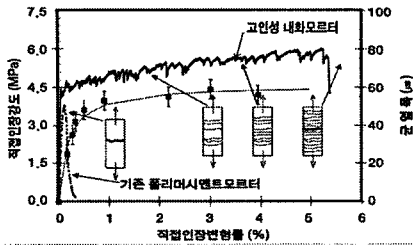
1) 콘크리트 및 철근

철근콘크리트 기둥시험체(600×600×800 mm) 제작에 사용된 콘크리트는 설계기준강도 60 MPa의 고강도콘크리트(목표 슬럼프플로우는 65±5 cm, 목표 공기량은 2±1.5%, 굵은 골재의 최대치수는 20 mm)로 국내 H사의 고강도 레미콘을 사용하였으며, 재령 28일에 있어서 실측 압축강도는 65.9 MPa로 조사되었다.

또한, 보강용 철근으로서는 SD 40을 사용하였으며, 주근은 D22, 늑근은 D10을 각각 사용하였다.

2) 고인성 내화모르타르 (ECC)

본 연구에서 개발된 고인성 내화모르타르란 매트릭스의 파괴터프리스가 조절된 특수 배합의 프리믹스형 분체와 고장력 폴리비닐알콜(PVA) 섬유 및 물로 구성된 뿔철용 보수 및 내화 겸용의 특수모르타르이며, 사진 1(a)에서 보는 바와 같이 휨 또는 직접인장 하중 하에서 초기 균열이 발생된 후에도 응력의 저감 없이 변형 및 응력이 함께 증대 되는 변형경화거동(Stain-hardening behavior)을 나타내고, 이 과정에서 사진 1(b) 및



(a) ECC-RM의 인장응력-변형곡선 일례 (b) 휨변형성능 (c) 멀티플크랙의 일례
 사진 1. ECC-RM의 인장응력-변형곡선과 휨변형성능 및 멀티플크랙의 일례

1(c)와 같이 무수한 미세균열인 멀티플크랙(Multiple cracking)특성을 나타내는 신개념의 시멘트 복합체이다. 이러한 고인성 내화모르타르는 우수한 균열제어성능 및 변형성능을 활용하여 보수·보강재로 활용되며, 더욱이 화재발생시 폭렬을 억제하고 열을 차단하는 재료이다.

3) 폴리머시멘트모르타르 (PCM ; Polymer Cement Mortar)

현재, 열화된 콘크리트구조물의 단면보수재로 가장 대표적으로 사용되는 재료로서, 본 실험에서는 국내 R사의 단면복구용 PCM을 사용하였다.

4) 내화뿔칠재 (FSM ; Fireproof Spray Materials)

본 연구에 사용된 내화뿔칠재는 철골구조물의 내화피복재료로 대표적으로 사용되는 재료이며, 국내 K사의 습식 내화뿔칠재를 사용하였다.

2.3 시험체 제작방법

그림 1은 고강도콘크리트의 내화시험용 기둥시험체 (600×600×800 mm)의 단면도를 나타낸 것으로, 콘크리트의 피복두께는 40 mm로 설정하였으며, 수열온도를 측정하기 위해 써머커플(Thermocouple)을 모체콘크리트의 표면(콘크리트와 내화피복재의 계면)과 주근의 위치(표면으로부터 깊이 50 mm지점)에 각각 설치하였다. 또한, 제작된 고강도콘크리트 기둥시험체는 내부함수율을 6% 이하로 저감시키기 위해 타설 후 4개월간 기건양생을 실시하였다.

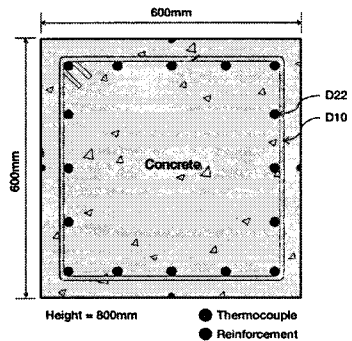
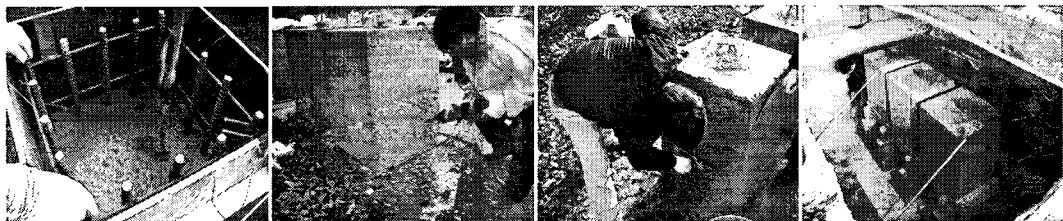


그림 1. 기둥시험체의 단면도

한편, 기둥시험체의 양생을 완료한 후, 콘크리트의 표면을 핸드그라인더 및 브레이커에 의해 각각 바탕처리하였으며, 그 후 소정의 두께로



(a) 콘크리트 타설 (b) 바탕처리 (치핑) (c) 내화재료 시공 (d) 가열로에 설치
 사진 2. 시험체 제작과정

각 내화피복재료를 시공하여 제작하였다. 사진 2는 내화시험용 기둥시험체의 제작과정 일례를 나타낸 것이다.

2.4 시험항목 및 시험방법

1) 수열온도 : 모체콘크리트의 계면 및 주근에서의 수열온도는 K형 열전대를 사용하여 가열시간에 따른 수열온도를 실시간으로 측정하였다.

2) 폭발성상 : 가열후 모체콘크리트 및 내화피복재의 폭발성상은 사진촬영 및 육안관찰에 의해 각각 평가하였다.

3) 중성화깊이 : 가열후 모체콘크리트의 일부를 발취하고 단면에 페놀프탈레인 1% 수용액을 분무하여 중성화 깊이를 측정하였으며, 5개소를 측정하여 그 평균치를 중성화 깊이로 하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 가열시간에 따른 수열온도의 변화 및 폭발성상

그림 2 및 3은 가열시간에 따른 계면과 주근의 수열온도를 나타낸 것이고, 표 2는 시간대별 수열온도와 폭발발생 추정시간을 각각 나타낸 것이다.

우선, 그림 2에 있어서 모체콘크리트와 내화피복재 계면에서의 수열온도를 살펴보면, Plain의 경우 가열개시 약 4분에서부터 수열온도가 급격히 증가하기 시작하여 16분에 약 900℃까지 도달하였으며, 이후에는 가열온도보다 높은 수열온도를 나타내었다. 또한, ECC(20)의 경우에도 Plain과 유사한 수열온도특성을 보이고 있으며, ECC 20 mm의 도포에 의해 내화성능을 확보하기에는 곤란하다는 것을 알 수 있었다.

한편, ECC(30) 및 ECC(50)의 경우에는 계면에서 급격한 수열온도의 상승 없이 지속적으로 상승하였으나, 180분에 있어서 최대수열온도는 각각 452℃ 및 268℃로 나타나 3시간의 가열조건에서도 500℃ 이하로 모체콘크리트의 수열온도를 제어하는 것이 가능하였다.

반면, 기존의 대표적 보수재료인 PCM(30)의 경우, 가열개시 56분에서 급격한 온도 상승을 보였고, 가열개시 68분을 기점으로 가열온도와 동등한 수준으로 나타났으며, 기존 철골구조용 내화뿔칠재인 FSM(30)의 경우에는 가열개시 30분에 급격한 온도 상승을 보였고, 가열개시 68분을 기점으로 가열온도와 동등한 수준으로 나타났다. 이는 PCM 및 FSM을 사용한 경우 약 56분 및 30분경에 내화재료 자체에 폭발 또는 박락이 발생하여 급격한 수열온도 상승이 발생된 것으로 추정되며, 따라서 본 실험에 의한

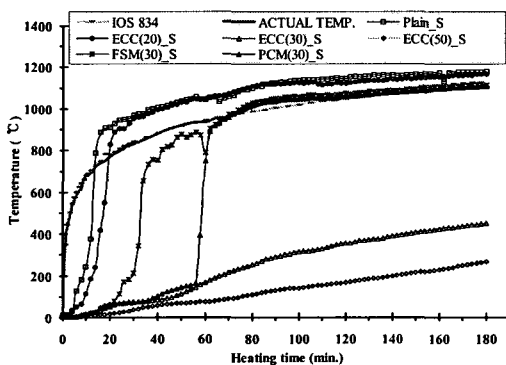


그림 2. 계면의 수열온도 변화

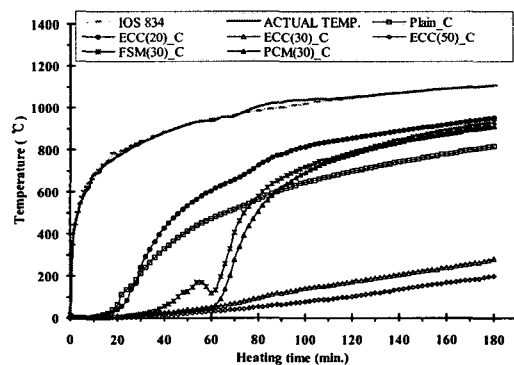


그림 3. 주근의 수열온도 변화

표 2. 각 시간별 수열온도 측정결과 및 폭발발생 추정시간

시험체 종류	수 열 온 도 (°C)						폭발추정시간 (min.)	
	가열시간 60분		가열시간 120분		가열시간 180분		1차 폭발	2차 폭발
	계면	주근	계면	주근	계면	주근		
Plain	1045	471	1148	697	1180	817	20	없음
ECC(20)	1047	605	1124	854	1167	953	8	24
ECC(30)	169	51	357	173	452	280	없음	없음
ECC(50)	75	31	169	103	268	119	없음	없음
PCM(30)	751	53	1062	781	1110	913	56	62
FSM(30)	790	120	1075	787	1115	931	30	62

1시간 내화규정을 만족시키지 못하는 것으로 조사되었다.

한편, 그림 3은 계면으로부터 50 mm 지점인 주근에서의 수열온도변화를 나타낸 것으로, Plain 및 ECC(20)의 경우에는 가열개시 약 22분 및 28분부터 수열온도가 급격히 상승하는 것으로 나타났으며, 이는 사진 3(a) 및 3(b)와 같이 피복콘크리트 부분이 폭발하여 수열온도가 급격히 상승한 것으로 판단된다.

또한, PCM(30) 및 FSM(30)의 경우에는 각각 가열개시 62분 및 60분에서 주근의 수열온도가 급격히 상승하는 것으로 나타났으며, 이는 사진 3(e) 및 3(f)에서 보는 바와 같이 피복콘크리트 부분이 폭발하여 주근의 수열온도가 급격히 상승된 것으로 판단된다.

반면, 본 연구에서 대상으로 한 ECC(30) 및 ECC(50)의 경우에는 수열온도의 급격한 상승은 발생하지 않았으며, 가열개시 3시간에 있어서도 최대 수열온도는 각각 280°C 및 199°C로 나타나 혹독한 가열조건에서도 주근의 수열온도를 300°C 이하로 제어함으로써 우수한 차열성능을 확인할 수 있었다. 더욱이, 사진 3(c) 및 3(d)에서 보는 바와 같이 가열종료 후에도 피복콘크리트에서의 폭발현상은 전혀 발생되지 않아 우수한 내폭렬성을 나타내었다.

3.2 중성화 깊이

일반적으로 화재발생시 콘크리트의 수열온도가 약 450~550°C에 도달하면 콘크리트 내부의 수산화칼슘(Ca(OH)₂)이 분해되어 중성화 되는 것으로 알려져 있다. 이에 본 연구에서는 가열종료 후 시험체 단면의 일부를 파취하여 페놀프탈레인 1% 수용액을 분

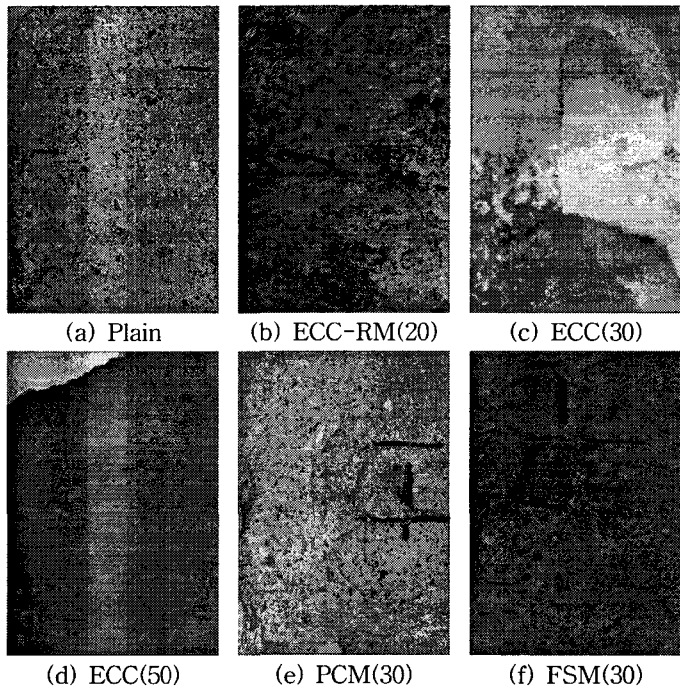


사진 3. 가열후 시험체 외관

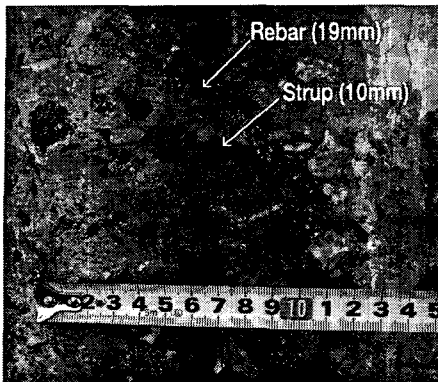


사진 4. 중성화 측정 일례

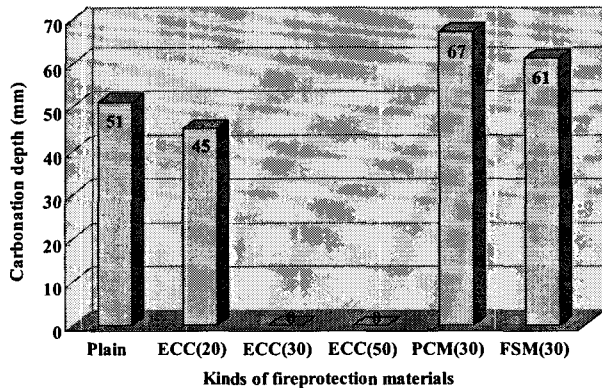


그림 4. 중성화깊이 측정결과

무하여 중성화깊이를 측정하였으며, 사진 4는 중성화 측정 일례를 나타낸 것이다.

그 결과는 그림 4에 나타난 바와 같다. 즉, 모체콘크리트 표면(계면)의 수열온도가 약 450°C 이하로 나타난 ECC(30)과 ECC(50)의 경우에는 표면에 있어서도 중성화가 진행되지 않는 것으로 조사되었다. 반면, 내화피복재 또는 피복콘크리트에 폭발이 발생된 Plain, ECC(20), PCM(30), FSM(30)의 경우에는 중성화가 피복콘크리트 내부까지 진행된 것을 확인할 수 있었다.

4. 결론

고강도콘크리트를 사용한 철근콘크리트 기둥시험체의 내화성능을 실증적으로 검토한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 본 연구에서 개발된 고인성 내화모르타르(ECC)를 30mm 이상 도포한 경우에는 모체콘크리트의 폭발현상이 전혀 발생되지 않았으며, 가열시간 180분에 있어서도 주근을 수열온도를 280°C(30mm) 및 119°C(50mm) 이하로 제어할 수 있어 터널구조물 등의 내화재료로 적용이 효과적일 것으로 판단된다.

2) 반면, 기존의 대표적 보수재료인 폴리머시멘트모르타르(PCM)과 내화뿔칠재(FSM)를 사용한 경우에는 재료 자체뿐만 아니라 모체콘크리트에 심각한 폭발현상이 발생되었고, 주근의 수열온도도 800°C 이상으로 나타나 터널의 내화공법으로 활용하기에는 곤란한 것으로 판단된다.

3) 또한, 고인성 내화모르타르를 30mm 이상 도포한 경우에는 화열에 의한 모체콘크리트의 중성화를 방지할 수 있는 것을 확인할 수 있었다.

참고문헌

- 1) Kodur, V.K.R., "Fire performance of high-strength concrete structural members", Construction Technology Update No.31, Institute for Research in Concstrcution, National Research Council of Camada, 1999
- 2) 한병찬, 김재환, 장승엽, 권영진, 고인성·고내화성 모르타르(FR-ECC)를 이용한 RC터널구조물의 내화공법, 구조물진단학회지, Vol.10, No.6, 2006
- 3) 한민철, 허영선, 한천구, 고강도콘크리트의 폭발발생 및 방지 메커니즘, 한국콘크리트학회지, Vol.19, No.1, 2007
- 4) <http://www.eng-ams.com>