

# ECC로 피복된 고강도콘크리트의 폭발저감 및 열적특성에 관한 실험적 연구

## Fire Resistant Performance of Anti-Spalling ECC Layers in High-Strength Concrete Structures

이재영\*      권영진\*\*  
Lee, Jae-Young      Kwon, Young-Jin

### Abstract

The purpose of this study is to obtain the fundamental fire resistance performance of engineered cementitious composites(ECC) under fire temperature in order to use the fire protection material in high-strength concrete structures. The present study conducted the experiment to simulate fire temperature by employing of ECC and investigated experimentally the explosion and cracks in heated surface of these ECC. In the experimental studies, 3 HSC specimens are being exposed to fire, in order to examine the influence of various parameters(such as depth of layer=20, 30, 40mm; construction method=lining type) on the fire performance of HSC structures. Employed temperature curve were ISO 834 criterion(3hr), which are severe in various criterion of fire temperature in building structures. The numerical regressive analysis and proposed equation to calculate ambient temperature distribution is carried out and verified against the experimental data. By the use of proposed equation, the HSC members subjected to fire loads were designed and discussed.

키 워 드 : 고강도 콘크리트, ECC, 내화, 폭발, 화재  
Keywords : High-strength concrete, Fire resistance, Explosive spalling, Fire, ECC

### 1. 서 론

최근 구조물의 대형화, 고층화 추세에 따라 주요 구조 부재의 효율적인 이용을 위한 콘크리트의 고강도화 및 이러한 고강도콘크리트(High-strength concrete, 이하 HSC)의 사용이 보편화 되고 있다. 한편 국내 현행 법적 기준에 의하면 콘크리트구조물은 내화재료로서, 각각의 구조부재별 피복콘크리트의 두께를 일정 이상 확보할 경우 내화성능을 갖추고 있는 것으로 규정되어 있다.<sup>1,2)</sup> 그러나 국내외 연구 및 화재사례를 살펴보면 콘크리트가 고강도화 됨에 따라 구조물에 심각한 폭발(Explosive spalling)이 발생하며, 종국적으로 구조물의 붕괴로까지 이어질 수 있다는 결과가 보고되고 있다.<sup>3,4)</sup> 이는 지금까지 콘크리트가 내화재료라는 인식과 반대되는 연구결과로서 HSC의 폭발을 제어하지 못하는 경우에는 기존의 내화기준에 큰 문제점이 발생할 소지가 있다는 것을 의미한다.

따라서 본 연구는 HSC의 폭발제어 및 내화성능 확보 방안

중 하나인, HSC에 내화성능을 갖는 피복층을 형성하는 방안  
에 대하여, 피복층을 고인성모르타르(Engineered Cementitious Composites, 이하 ECC)로 이용하는 경우 이에 대한 화재성상 및 내화특성을 실험적으로 검토하고, 수열온도 예측 등과 같은 내화설계를 위한 기초자료를 제시하는 것을 목적으로 하였다. 이를 위하여 ECC 피복층의 형태, 치수, 혼입섬유의 종류 등을 실험변수로 내화시험을 실시하여, HSC에 대한ECC 피복층의 열적 성상 및 수열온도 특성을 분석·평가하였다.

### 2. ECC 피복층에 따른 내화특성에 관한 실험

기존의 연구자들의 의한 연구 결과를 통하여 폭발을 고강도콘크리트의 폭발 메커니즘 및 억제하기 위한 다양한 연구가 국내외에서 진행되고 있는 것을 확인 할 수가 있다<sup>5,6,7,8)</sup>.

Gary R Consolazio<sup>7)</sup>는 1990년대 많은 학자들에 의해 보고된 문헌들의 고찰을 통해 그림 1과 같이 폭발발생 메커니즘을 모델화 하였다. 또한 고정원<sup>8)</sup>은 화재가열환경에서 콘크리트의 열·수분이동 및 폭발에 관한 실험을 통하여 폭

\* 정회원, 호서대학교 소방방재학과, 초고층·장대터널방재연구실, 석사과정

\*\* 정회원, 호서대학교 소방방재학과, 교수·공박

열발생예측에 관한 모델을 제시하였다. 이러한 메커니즘을 바탕으로 폭렬억제를 위해 다음과 같은 폭렬억제방안이 제시되고 있다. 1) 표층부의 온도상승구배를 저감시키는 방안으로 부재에 내화도료를 도포하거나 내화모르타르 또는 내화보드를 피복하여, 표층부의 온도상승 및 온도구배를 저감시키는 방안<sup>5)</sup>, 2) 수증기압의 저감과 내부 수분이동을 원활하게 하는 방안으로 콘크리트에 가연성 합성섬유를 혼입하여 열응력을 완화시키며, 온도 상승 시 섬유의 용융으로 생긴 내부공극을 내부 수분 이동의 통로로써 활용하는 방안<sup>9,10)</sup>, 3) 폭렬에 의한 콘크리트의 비산을 방지하는 방안으로 외부에 강판을 부착하거나 표층부에 메쉬근 및 메탈라스를 배치하는 방법<sup>6)</sup>, 4) 부재의 코어부분은 기존의 고강도콘크리트를 사용하고 피복 부분만을 폭렬이 발생하지 않는 동일 강도 이상의 재료로 치환함으로써 콘크리트의 온도를 제어하고 폭렬을 방지하는 방안<sup>5,11,12)</sup> 등이 연구되고 있다. 그러나 이러한 일련의 연구결과는 HSC의 폭렬 억제에 대한 개념적 접근으로 HSC의 피복층을 형성하는 소재에 대한 공학적 특성 및 내화성능 및 설계를 위한 실질적인 연구 자료는 아직까지 미미한 실정이라 할 수 있다.

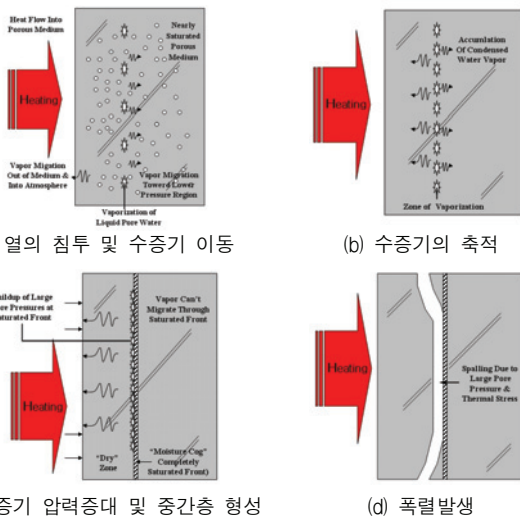


그림 1. 폭렬발생 메커니즘

따라서 이러한 연구결과를 토대로 다량의 섬유가 혼입된 고성모르타르를 피복하는 공법에 대한 폭렬저감 및 내화성능에 대한 검토에 대한 연구이다.

### 2.1 실험계획

Table 1.은 ECC 피복층의 내화성능 및 열적성상을 검토하기 위한 실험계획을 나타낸 것이다. 실험변수 중 라이닝 시공방식(Lining method)에 대한 ECC 피복층의 두께는 20, 30, 40mm의 3종류로 설정하였다. 또한, 화재하중은 ISO 834 기준 3시간 가열곡선으로 하였으며, 각 깊이별 수

열온도, 폭렬 및 균열성상을 측정·평가하였다. 그림. 2은 시험체의 개요로서 보강철근의 배치 및 열전대의 설치 위치를 나타낸 것이다.

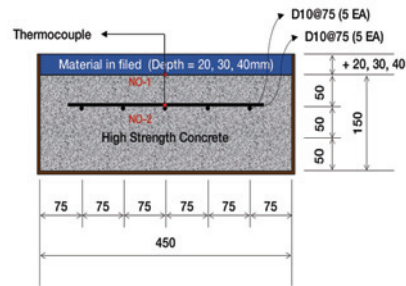


그림 2. 시험체의 개요

표 1. 시험체의 개요 및 실험계획

Specimens	Cover Depth (mm)	$f_{ck}$ (MPa)	Testing item
ECC-1	20	60	<ul style="list-style-type: none"> <li>Time-temperature curve</li> <li>Explosive spalling behavior</li> </ul>
ECC-2	30	60	
ECC-3	40	60	

### 2.2 사용재료

본 실험에 사용된 모체콘크리트 및 ECC의 배합은 표 2 및 3과 같다.

표 2. 고강도콘크리트의 배합비

W/C (%)	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )						Slump flow (cm)	
	W	C	FA	BFS	S	G		Ad
22.5	168	485	112	149	629	764	8.9	63

\*FA:Fly Ash, BFS: 고로슬래그 S:잔골재, G:굵은골재, Ad:혼화제

표 3. ECC의 배합비

WB (%)	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )			Table flow (mm)
	Water	PCM	Fiber (vol.%)	
18.5	303	1640	PVA (2.0)	147

\* PCM : Premixed Cementitious Materials

\* PVA : polyvinyl alcohol

모체콘크리트는 설계기준강도 80 MPa의 HSC를 사용하였으며, W/B는 22.5%, FA/B는 15%, BFS/B는 20%, S/A는 46%로 설정하였다.

ECC는 시멘트매트릭스의 경우 프리믹스형 폴리머시멘트모르타르를 사용하였으며, 그림 3과 같이 길이 12mm, 직경 39 $\mu$ m (Aspect Ratio=300)의 고강력 PVA 섬유를 용적 혼입율 2.0 vol.%로 하여 혼입하였다.

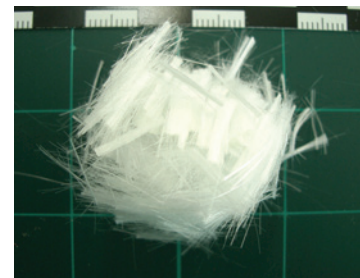


그림 3. PVA(Polyvinyl alcohol) 섬유

### 2.3 실험방법

그림. 4는 본 실험에 이용된 시험체의 제작과정이다. 라 이닝 시공방식인 ECC 1-3 시험체는 크기 450×450×300 mm의 HSC판 부재에 피복두께를 20, 30, 40 mm로 하여 ECC를 도포하였다. 또한 가열 시 변수별 내부 수열온도 측 정을 위해 K형 열전대를 매립하였다. 시험체 제작순서는 먼 저 모체콘크리트를 타설하고 7일간 기건 양생하였으며, 이 후 피복층 표면을 브러쉬로 처리한 다음 내화재료를 도포하 였으며, 이후 재령 28일간 기건 양생을 실시하여 시험체 제 작을 완료하였다. 한편 내화시험은 시험체 제작 완료 이후 3개월간 외기 중에 존치한 후에 실시하였다.

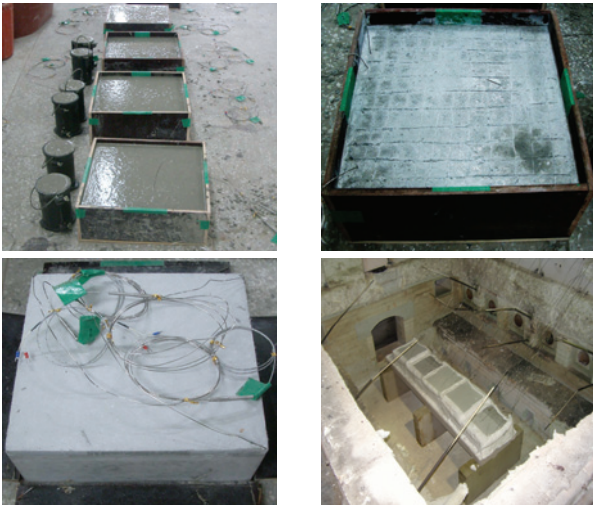


그림 4. 시험체 제작과정 및 가열로 전경

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 폭렬성상

그림 5는 가열시험 후 각 시험체 외관을 나타낸 것이다. 그림5.에서 알 수 있는 바와 같이 ECC로 피복된 고강도콘크 리트는 폭렬이 발생하지 않았으며, 또한 피복된 ECC의 경우 에서도 유해할만한 균열이 발생하지 않았다.



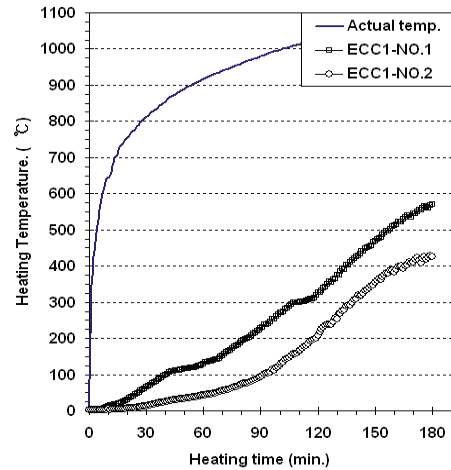
(a) ECC-1 (b) ECC-2 (c) ECC-3

그림 5. 가열후 시험체

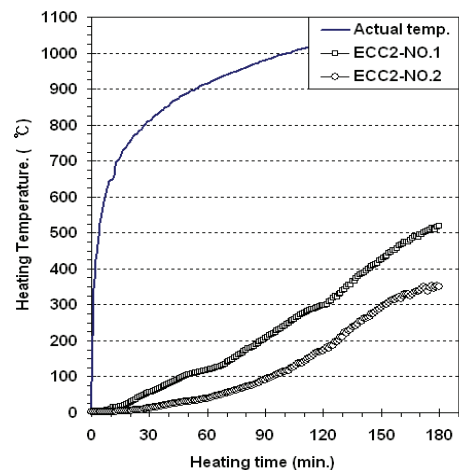
### 3.2 수열온도

그림. 6는 국내내화구조 성능 시험방법 KS F 2257에 의 한 ISO 834 가열곡선에 의한 3시간 가열시험으로 시험체의

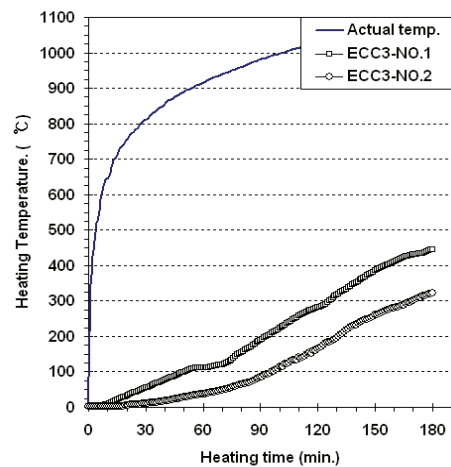
내화피복층과 HSC에서의 가열시간-수열온도 관계를 나타낸 것으로 피복부의 계면과 50 mm 깊이 지점의 철근에서 측정 한 그래프이다. 표 4는 각 시험체에서 측정된 수열온도를 시 간대별로 정리하여 나타낸 것이다.



(a) ECC-1(Layer Depth= 20 mm)



(b) ECC-2(Layer Depth=30 mm)



(c) ECC-3(Layer Depth=40 mm)

그림 6. 가열시험에 의한 시간-수열온도곡선

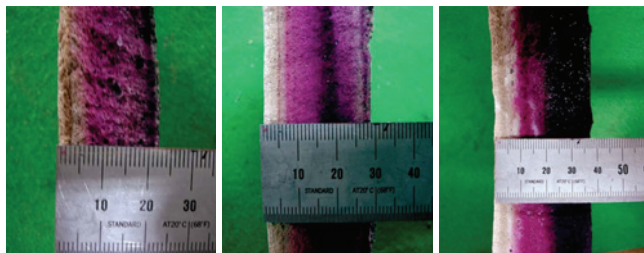
표 4. 시간 및 부위별 수열온도

Specimens	Locations of measurement	Depth of measurement (mm)	1hr.	2hr.	3hr.
ECC-1	No1. interface	20	130	326	571
	No2. section of HPC	20+50	42	208	425
ECC-2	No1. interface	30	120	298	519
	No2. section of HPC	30+50	40	171	351
ECC-3	No1. interface	40	112	281	446
	No2. section of HPC	40+50	37	166	321

각 측정위치에서 3시간 수열온도결과 HSC와 ECC 계면에서의 최대수열온도는 ECC-1, ECC-2, ECC-3이 각각 571℃, 519℃, 446℃로 나타났으며, 주 철근에서의 수열온도는 각각 425℃, 351℃, 321℃로 측정되었다.

### 3.3 중성화 깊이 측정

HSC를 포함한 시멘트계 재료는 화재시 고온상태에서 화학적-기계적 성능저하가 발생하며, 특히 중성화 등과 같은 열화가 빠르게 진행된다.<sup>4,5)</sup> 그림. 7은 가열시험 종료 후 내화피복층 및 충전부 재료의 중성화 정도를 평가한 것으로 표 5에 중성화 깊이 및 폭렬성상을 정리하였다.



(a) ECC-1 (20mm) (b) ECC-2 (30mm) (c) ECC-3 (40mm)

그림 7. 중성화 깊이 측정 결과

표 5. 폭렬성상 및 중성화 깊이 측정 결과

Specimens	Depth of Spalling		Width of Crack	Depth of carbonation (mm)
	HSC	Lining		
ECC-1	-	None	None	7
ECC-2	-	None	None	7
ECC-3	-	None	None	9

측정결과 ECC-1~3의 ECC에 의한 피복층 및 충전재 중성화 깊이는 7~9 mm로 측정되어 화재시 높은 중성화 저항성을 갖은 것으로 평가되었다.

## 4. 결 론

고강도콘크리트 구조물의 폭렬방지 및 내화성능 확보방안

의 일환으로써, 본 연구의 고인성모르타르(ECC)의 피복 공법으로 화재와 같은 가열시험조건 범위 내에서는 고강도콘크리트의 폭렬방지가 확인 되었으며, 온도특성 분석결과 높은 차열성능을 확인할 수 있었다. 따라서 ECC를 활용한 고강도 콘크리트의 폭렬방지대책의 하나로 제안하고자 한다.

## 참 고 문 헌

1. 건설교통부령 523호 건축물의 피난·방화구조 등의 기준에 관한 규칙, 2006.
2. 건축법 시행령 제2조 제1항 제7호의2 건설교통부령이 정하는 기준에 적합한 구조, 2000.
3. 고정원, 火災加熱環境下におけるコンクリート中の熱・水分移動および爆裂に関する研究, 東京大 博士學位論文, 2006. 9. 30
4. 권영진, 장재봉, 나철성, 김무한 [특집]고성능 콘크리트의 폭렬 현상과 대책에 관한 연구 동향 콘크리트학회지 : Vol.17, No.3 pp.20-25. 2005.
5. 김현정, 최은규, 신영수, 이차돈, 권영진 ; 폴리프로필렌 섬유를 혼입한 고강도 RC 및 SRC 압축부재의 온도분포, 대한건축학회 학술발표대회 논문집, pp 261-265, 2006. 10
6. Gary R. Consolazio, Michael C. McVay, Jeff W. Rish III, Measurement and prediction of pore pressures in saturated cement mortar subjected to radiant heating, ACI Materials Journal, Vol.95, pp. 525 ~ 536, 1998.
7. George C. Hoff, "Fire Resistance of High-Strength Concretes for Offshore Concrete Platforms," Proceedings, Third CANMET/ACI International Conference, ACI SP-163, V.M. Malhotra, Editor, pp.53-87.
8. Haack, A. The European State of the Art of Concrete and Fire Safety in Tunnels, Japan Concrete Institute Annual Convention, 2003.
9. 百瀬晴基, ポリプロポエン纖維を混入した設計基準強度 150N/mm2の超高強度コン크ロートの耐火性に關する實驗的研究, 콘크리트工學年次論文集, Vol. 25, No.1 2003.
10. 本田 義博1 大岡 督尚2 藤卷 敏之3 ; 高強度コン크리트の耐火性能に關する實驗的研究 (その1 定常溫の一軸試驗), 日本建築學會大會學術講演梗概集 Vol.1996 pp.23-24. 1996.
11. 小阪英生, 超高強度コン크ロートを用いたRC柱の開発, 大成建設技術センター報, 第36号, 2003.
12. 한민철, 허영선, 한천구, 고강도콘크리트의 폭렬발생 및 방지메커니즘, 한국콘크리트학회지, Vol.19, No.1, 2007.