



화재 온도를 받는 고인성 · 고내화성 시멘트 복합체의 거동

한병찬¹⁾ · 권영진^{2)*} · 김재환¹⁾

¹⁾(주)AMS 엔지니어링 ²⁾호서대학교 소방학과

Behavior of Fire Resistance Engineered Cementitious Composites(FR-ECC) under Fire Temperature

Byung-Chan Han¹⁾, Young-Jin Kwon^{2)*}, and Jae-Hwan Kim¹⁾

¹⁾AMS Engineering Co., Ltd., Daejeon 305-764, Korea

²⁾Dept. of Emergency Management Engineering, Hoseo University, Chunan 336-795, Korea

ABSTRACT Concrete tunnel lining must be designed to having the fireproof performance because the lining are sometimes exposed to very high temperature due to traffic accident. Such fire temperature may cause explosion of concrete, or collapse of tunnel structure. The purpose of this study is to obtain the fundamental fireproof behavior of fire resistance-engineered cementitious composites(FR-ECC) under fire temperature in order to use the fire protection material in tunnel lining system. The present study conducted the experiment to simulate fire temperature by employing 2 types of FR-ECC and investigated experimentally the explosion and cracks in heated surface of these FR-ECC. Employed temperature curve were hydro carbon(HC, EC1) criterion, which are severe in various criterion of fire temperature. The numerical analysis is carried out the nonlinear transient heat flow analysis and verified against the experimental data. The complex features of behavior in fire conditions, such as thermal expansion, plasticity, cracking or crushing, and material properties changing with temperature are considered. By the use of analytical model, the concrete tunnel subjected to fire loads were analyzed and discussed. With comparison of current concrete materials and FR-ECC, the experimental and analytical results of FR-ECC shows the better fire resistance performance than the other.

Keywords fire resistance, FR-ECC, nonlinear transient heat flow analysis, concrete tunnel, hydro carbon temperature curve

1. 서 론

일반적으로 국내 대부분의 터널 라이닝은 비구조 부재 또는 설계 압반 변형의 일부분만을 부담하도록 설계되기 때문에 보통 강도 콘크리트와 최소의 철근으로 보강되며, 그 구조적인 중요성이 크게 인식되지 않았다. 그러나 사용 중 터널은 예기치 않은 압반 변형의 증가 또는 지하수 유입 등과 같은 손상 요인에 의해 균열이 발생하며, 특히 이러한 터널 라이닝이 대형 화재 등과 같은 고온에 노출될 경우에는 폭렬이 발생하고 이로 인해 급격한 온도 전달 및 내력 저하로 구조체 붕괴의 원인이 될 수 있다는 것이 여러 사례를 통해 보고되고 있다¹⁾. 그러므로 유럽 등과 같은 선진국에서는 내화 콘크리트, 내화 도료 적용, 내화 뿔칠 2차 라이닝, 내화용 프리캐스트 패널 설치 등과 같은 공법을 적용하여 터널의 내화 성능 향상을 도모하고 있다²⁾. 한편 터널은 차량이나 열차 통과 시 발생하는 진동 및 내부공기압(약 25~600 Pa)이 매우 크

기 때문에, 일반 구조물용 내화 뿔칠 재료를 적용하는 경우에는 작은 강도 특성으로 인하여, 내화 성능은 확보할 수 있다 하더라도 내구성 측면에서 박리·박락될 가능성이 크다. 그러므로 터널에 적용되는 재료는 내화 성능 뿐만 아니라 부착강도와 같은 역학적 성능 및 열화되어도 박리·박락하지 않는 등, 여러 가지 성능을 만족해야 할 필요가 있다.

폴리비닐알콜(PVA) 섬유 등과 같은 합성 섬유를 시멘트 체적비 대비 2% 정도 투입하여 직접 인장 상태에서 유사변형 경화(pseudo strain hardening) 및 다수 미세균열(multiple crack)특성과 함께 3~6%의 인장 변형 능력(tensile deformability)을 갖는 고인성 시멘트 복합체 (high performance fiber reinforced cement composites, engineered cementitious composite, HPRCC, ECC)는 균열 제어 및 박리·박락 방지, 인장력 부담, 내구성, 내피로 성능이 매우 우수하기 때문에, 내화 성능을 향상시키는 경우 전술한 터널라이닝의 내화 뿔칠 재료로 매우 적합할 것으로 판단된다.³⁾ 그러므로 본 연구는 고인성 시멘트 복합체에 내화 성능을 향상시킨 고인성·고내화성 시멘트 복합체(fire resistance-engineered cementitious composite, 이하 FR-ECC)를 개발

*Corresponding author E-mail : refrete@lycos.co.kr

Received September 25, 2006, Accepted February 28, 2007

©2007 by Korea Concrete Institute

하여 이의 내화 성능 및 거동 특성을 평가하고자 하였다. 이를 위하여 본 연구에서는 FR-ECC에 있어서의 배합 요인을 실험 변수로 제 강도, 열적 특성값, 내화 시험을 실시하였으며, 비정상 온도 분포 해석 기법(nonlinear transient heat flow analysis)을 이용하여 이를 해석적으로 묘사·검증하였다. 또한, 실험 결과를 통해 검증된 해석 기법을 이용하여 터널라이닝에 대한 열전달 해석을 수행하여 FR-ECC를 내화 2차 라이닝재로 이용하는 경우의 거동 특성을 분석하였다.

2. 실험 계획 및 방법

2.1 FR-ECC의 제조 및 사용 재료

목표 재령 압축강도 30 MPa, 휨 및 직접인장 상태에서 유사 변형 경화 및 다수 균열 특성을 발현하는 FR-ECC를 제조하기 위하여 마이크로 역학적 안정 상태 균열 이론을 바탕으로 매트릭스의 배합비를 도출하였다. 안정 상태의 균열을 발생시키기 위한 에너지 조건은 다음과 같다⁴⁾.

$$J_{tip} \leq \sigma_0 \delta_0 - \int_0^{\delta_0} \sigma(\delta_0)(d\delta = J_b') \quad (1)$$

$$J_{tip} = K_m^2 / E_c \quad (2)$$

여기서 σ_0 은 δ_0 에 해당되는 최대 균열면 응력이고 K_m 과 E_c 는 각각 모르타르 매트릭스의 파괴인성과 탄성계수이다.

즉, FR-ECC의 균열면 응력($\sigma = \sigma_B$)과 균열개구변위(δ) 관계에 의하여 계산되는 상보에너지(complementary energy, J_B')가 모르타르 매트릭스의 균열 선단 파괴인성(crack tip toughness, J_{tip})보다 항상 커야 하며, 본 연구에서는 인성비(toughness ratio = J_B'/J_{tip})

$$J_B'/J_{tip} > 3.0 \quad (3)$$

로 설정하였다. 이상의 조건으로 부터, 최적의 매트릭스와 경계면 부착응력을 만들기 위하여 Table 1과 같은 배합비를 채택하였다. 또한 사용 섬유는 폴리비닐알콜(이하 PVA) 섬유의 경우, 친수성으로 인한 과다한 화학적 부착(G_d) 및 마찰부착(τ_0)을 억제하기 위해 오일링 처리된 고

강도 PVA 섬유를, 폴리프로필렌(이하 PP) 섬유의 경우 소수성으로 인한 적은 부착강도를 증진시키기 위해 플루오렌 처리된 표면개질 PP 섬유를 이용하였으며, 혼입률 V_f 는 2.0%로 하였고 섬유의 물리·열적 특성은 Table 2와 같다.

2.2 실험 변수 및 시험체

배합 설계에 있어서 FR-ECC의 내화 성능을 향상시키기 위한 방안은 크게 사용섬유, 매트릭스 내에 다공성의 세라믹제 첨가, AE제에 의한 공기량 증가 등을 통하여 FR-ECC의 열전달 저감 및 지연 그리고 폭렬을 방지할 수 있도록 하였으며, 이러한 방안을 실험 조건으로 하여 내화 시험을 실시하였다. Table 3은 내화 시험용 시험체 일람 및 실험 변수를 나타낸 것이다. 주요 변수는 섬유 종류(PP, PVA), 섬유 혼입률 V_f (1.15, 2.0 vol%), 다공성 세라믹제 혼입률 V_C (0, 1.8, 3.6 vol%), 공기량 V_A (5, 15, 20%)로 설정하였다. 또한 역학적 특성 및 내화 성능에 대한 비교를 위하여 섬유를 첨가하지 않은 폴리머 시멘트 모르타르(이하 PCM)를 변수로 하여 총 30개를 제작하였다.

2.3 재료 시험

본 연구에서 도출된 FR-ECC의 역학적 특성을 파악하기 위하여 재료 시험을 실시하였다. 먼저 주요 변수인 공기량의 확인은 KS L 3136에 준하여 실시하였으며, 측정 방법은 비빔이 완료된 FR-ECC를 용기의 1/3씩 채운 후 각 층을 25회씩 다짐을 실시하고, 상면을 평활하게 마감한 후 측정하여 변수별 공기량을 확보하고 있는지를 검토한 후, 필요시 소정의 AE제를 추가로 첨가하였다.

압축강도는 일반적인 콘크리트 표준 압축강도 시험 방법인 KS F 2405에 준하여 100 × 200 mm의 원형공시체를 변수별 제작하여 측정하였다(Fig. 1). 시험 결과 FR-ECC의 28일 평균 압축강도는 30 MPa~36 MPa로 나타났으며, 초기 3일에 약 30%, 7일에 60% 강도가 발현되었다. 섬유의 종류별 압축강도는 차이가 없었으나, 공기량의 증가(NO7, NO8, NO9)에 따라 압축강도의 저하가 관

Table 1 Mixture proportions of matrix

Ingredient	Water/matrix (wt.%)	Fly ash/binder (wt.%)	Sand/binder (wt.%)	Polymer/cement (wt.%)	SP/binder
FR-ECC matrix	18.5	35	50	5	1.2

* Agents in binder : silica fume, antifoaming agent, shrinkage-reducing agent, superplasticizer, multi-functional agent

Table 2 Properties of fibers

Ingredient	Density (g/mm ³)	Length (mm)	Diameter (μm)	Surface (treatment)	Melting point (°C)	Thermal decomposition (°C)	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (GPa)	Elongation (%)	Alkali resistance
Polyvinylalcohol (PVA)	1.3	12	39	Oiling agent	170	263	1,700	29.4	3~113	High
Polypropylene (PP)	0.91	12	39	Fluorination	162	271	600	9.0	5~13	High

Table 3 List of specimens

Series	No.	Fibers contents V_f (%)			Ceramic contents V_C (%)	Air contents V_A (%)	Num. of specimen
		PVA	PP	Total			
PCM	Mortar	-	-	-	-	3	2
FR-ECC	NO1	2.0	-	2.0	-	5	3
	NO2	2.0	-	2.0	1.8	5	3
	NO3	2.0	-	2.0	3.6	5	3
	NO4	-	1.15	1.15	1.8	5	2
	NO5	-	1.15	1.15	3.6	5	2
	NO6	-	2.0	2.0	-	5	3
	NO7	-	2.0	2.0	3.6	5	3
	NO8	-	2.0	2.0	3.6	15	3
	NO9	-	2.0	2.0	3.6	20	3
	NO10	2.0	-	2.0	3.6	15	3

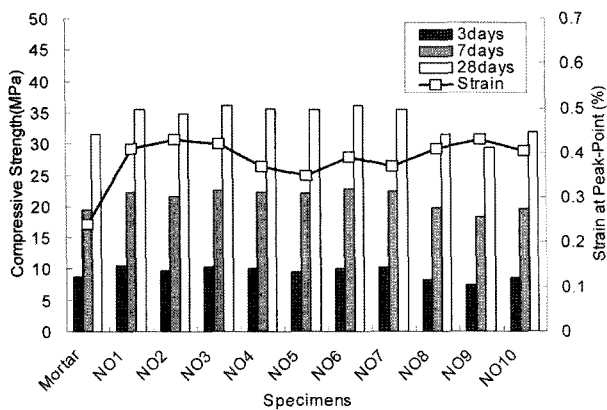


Fig. 1 Compressive strength of FR-ECC

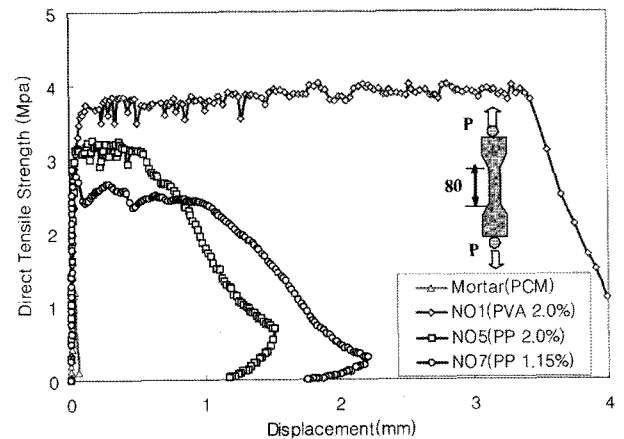


Fig. 3 Direct tensile strength of FR-ECC

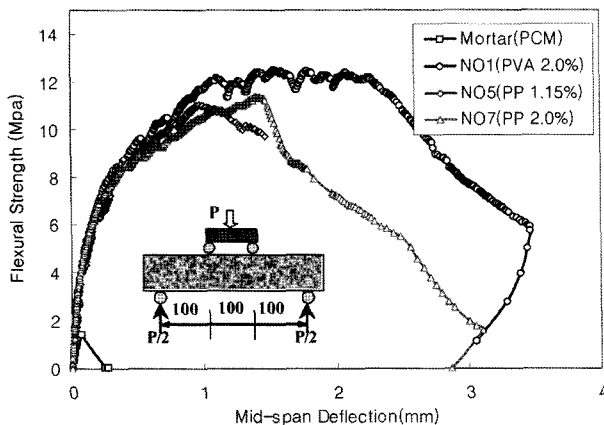


Fig. 2 Flexural strength of FR-ECC

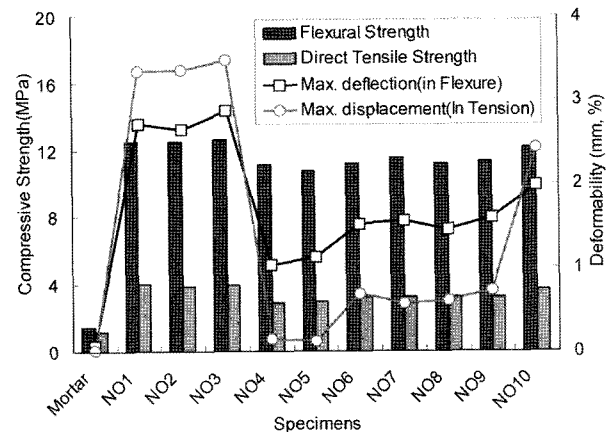


Fig. 4 Flexural and direct tensile strength

찰되었다. 또한 최대 압축강도시 변형률은 0.35~0.42%로써 모르타르(0.24%)에 비하여 큰 압축변형률을 보이고 있음을 알 수 있었다.

휨강도는 KS F 2408에 준하여 3등분점 재하하고 양측면에 LVDT를 설치하여 지점과 중앙점의 상대 변위를 측정하였다. 또한 직접 인장 시험은 측정 영역 30 mm × 80 mm, 두께 13 mm의 덤벨 형상 공시체를 변수별로 제작하여, 직접 인장강도 및 다수 균열 분포, 변형률을 측정하였다.

휨강도-중양부 처짐 곡선 및 직접 인장강도-변형률 곡선을 각각 Figs. 2, 3에, 시험 결과를 Fig. 4에 나타냈다.

FR-ECC의 휨강도는 11~12 MPa로 모르타르(1.5 MPa)의 7~8배, 최대 휨강도에서의 중앙부 처짐 또한 1 mm(PP 섬유 1.15%)~2.8 mm(PVA 섬유 2.0%)로 16~47배 높게 평가되었다. 섬유 종류에 대해서는 PVA 섬유를 사용한 경우가 PP 섬유를 사용한 경우에 비하여 휨강도 및 변형능력이 큰 것을 알 수 있었다. FR-ECC의 직접 인장강도

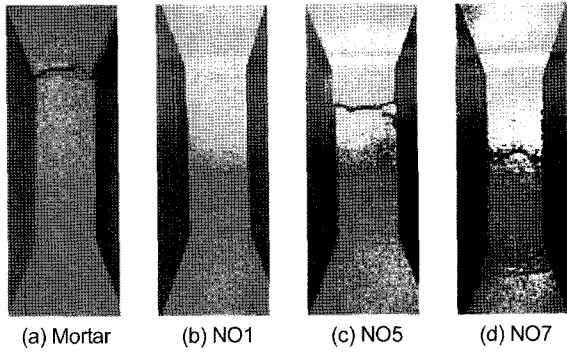


Fig. 5 Multiple crack patterns of FR-ECC in direct tensile test

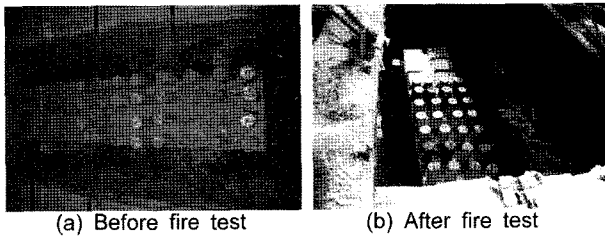


Fig. 6 Experimental set up of fire test

는 3~4 MPa로 모르타르(1.2 MPa)의 2.5~3배 높게 나타났다. 특히 직접인장-변형률 관계로부터 모르타르가 최대 인장강도 이후 급격히 파괴되는 것에 비하여, FR-ECC는 유사 변형 경화 거동 및 균열 분산 특성을 보였으며, 최대 인장변형률은 0.6%(PP $V_f=2.0\%$) 및 3.3%(PVA $V_f=2.0\%$)로 모르타르(0.015%)에 비하여 50~275배 큰 변형 능력을 가짐을 알 수 있었다. Fig. 5는 직접 인장 공시체의 균열 패턴으로, 모르타르가 큰 단일 균열(macro crack)에 의해 파괴되는 반면 FR-ECC는 미세한 다수의 균열(micro multiple cracks)이 발생하다가 최종적으로 균열의 국소화에 의해 파괴되는 것을 볼 수 있다.

2.2.3 내화 시험

내화시험은 FR-ECC의 폭렬특성 및 내부온도 측정을 위한 100×200 mm의 원주형 공시체를 제작하여 건설기술연구원 내 가열로에서 수행되었다(Fig. 6). 가열로 내의 온도에 대한 경계조건은 시험체 바닥을 제외한 모든 면에 복사 및 대류를 통한 열이 전달되도록 하였으며, 공시체의 내부 온도를 측정하기 위하여 K형 열전대(thermocouple)를 공시체 중앙(표면으로부터 50 mm)에 설치하였다. 또한 도입할 시간 가열 온도 곡선을 결정하기 위하여 실제 발생되었던 터널 화재 시 최대 온도의 예를 Table 4에, 각국의 시간 가열 온도 곡선을 Fig. 7에 각각 나타내었다.

Table 및 Fig.으로부터 실제 화재 발생시 터널내의 최고 온도는 일반적으로 $1,000^\circ\text{C}$ 정도지만, 최고온도의 지속시간은 여러 조건에 따라 차이를 보이고 있음을 알 수 있다.

본 연구에서는 실험 시설의 조건을 감안하여 초기 5분 900°C , 30분에 $1,100^\circ\text{C}$ 까지 온도가 상승한 후 1시간까지 지속되는 HC(hydro-carbon EC1) 곡선⁵⁾을 적용하였다. 또한, 비정상 온도 분포 해석에 있어서는 독일 교통성 도로건설부가 규정하고 있는 RABT곡선을 이용하였다. FR-

Table 4 Fire temperature in tunnels¹⁾

Tunnel	Location	Type	Maximum fire temperature
Nihonzaka	Japan	Road tunnel	$600\sim 1,000^\circ\text{C}$
Caldecot	USA	Road tunnel	$945 (1,038)^\circ\text{C}$
Mont Blanc	France	Road tunnel	$1,000 (1,832)^\circ\text{C}$
Tauern	Austria	Road tunnel	$1,000^\circ\text{C}$

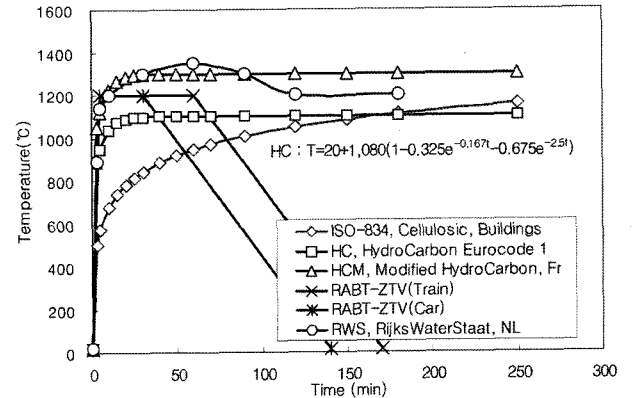


Fig. 7 Criterion curves of fire temperature

ECC의 열적특성 평가를 위한 열전도율 시험은 KS L 3306에 준하여 공시체를 제작하여 측정하였다.

3. 내화 시험 결과

3.1 폭렬 특성

HC(EC1) 시간가열곡선에 의한 내화 시험 후 변수별 시험체의 표면 관찰 결과를 Fig. 8 및 Table 5에 정리하였다. 표면 관찰은 폭렬 여부, 발생 시점, 면적 및 깊이, 발생된 균열의 수 및 균열 폭을 대상으로 하였다. PCM 시험체(NO1)는 내화 시험 이후 5분경부터 폭렬이 발생하기 시작하여 시험체 표면의 대부분에 발생되었고(Fig. 8(a)), 깊이는 최대 18 mm이었다. 균열 또한 다수가 형성되었으며 최대 균열폭은 1.3 mm이었고, 시험 종료 후 시험체는 표면이 쉽게 부스러지는 현상도 관찰되었다. 한편 PP 함유를 1.15% 혼입한 시험체(NO4, NO5)에서도 폭렬이 발생했으나 폭렬 수 및 깊이는 폴리머 시멘트 모르타르 시험체보다 작았으며, 폭렬 발생 시점 또한 지연되는 특성을 보였다.

PP 함유를 1% 이상 투입했음에도 폭렬이 발생한 이유를 Fig. 9와 같은 폭렬 메커니즘으로 분석할 수 있다. 즉 도입한 시간 가열 곡선의 온도 상승 구배가 매우 크기 때문에, 시험체 내부의 공극압 증가 속도가 PP 함유가 용융됨으로써 저감되는 속도보다 커 폭렬이 발생한 것으로 판단되었으며, 이후에는 더 이상 폭렬 현상이 지속되지 않았다.

또한 균열의 최대폭은 0.1~0.15 mm로서 NO1 시험체에 비하여 매우 작은 것을 알 수 있었다.

NO1 및 NO4, NO5를 제외한 시험체(PVA 함유, PP 함유 2.0% 혼입)에서는 폭렬 및 균열이 발생하지 않았

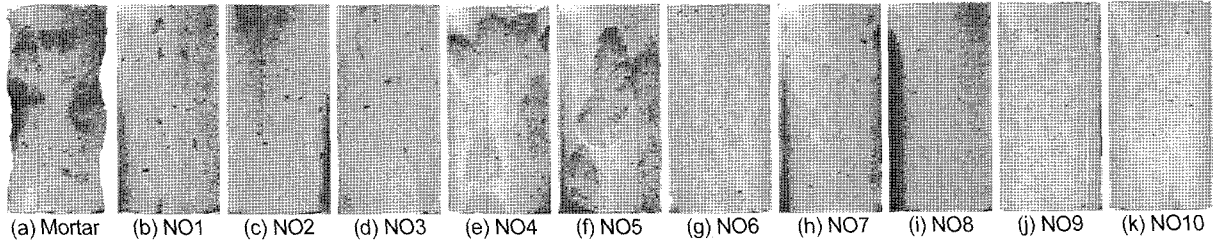


Fig. 8 Picture of FR-ECC specimens after fire test

Table 5 Explosive fracturing condition of FR-ECCs

Specimen	Area of explosion (mm ²)	Num. of large explosion	Num. of crack in surface	Steady state (min)	Crack width (mm)	Damage depth (mm)
Mortar	61,575	18	7	5	1.30	18
NO1	None	None	None	-	-	-
NO2						
NO3						
NO4	9,425	6	3	7	0.35	12
NO5	6,714	4	1	10	0.20	9
NO6	None	None	3	-	0.15	-
NO7	None	None	1	-	0.10	-
NO8	None	None	None	-	-	-
NO9	None	None	None	-	-	-
NO10	None	None	None	-	-	-

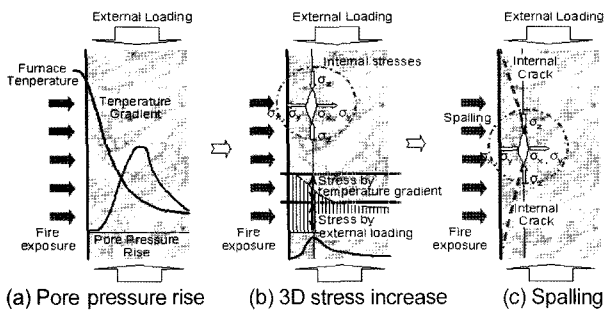


Fig. 9 Spalling mechanism of FR-ECC

다. 이는 FR-ECC의 경우 시멘트 복합체 내에 혼입된 다량의 섬유가 용융되면서 빠르게 수증기압을 외부로 배출하기 때문으로 판단되었다. 다만 PP 섬유를 2.0% 혼입한 NO6 및 NO7 시험체에는 균열이 관찰되었으나 이러한 균열은 최대 폭 0.1~0.15 mm, 길이 10 mm 이하로써 국부적인 열적 특성에 기인한 것으로 사료된다. 이상의 폭발 및 균열 특성으로 부터 본 연구에서 도입한 HC 시간가열 곡선과 같이 초기 온도 상승 구배가 상대적(ISO 834)으로 매우 큰 조건에서는, 보통 강도급의 시멘트 매트릭스, 혹은 PP 섬유를 1% 혼입하여도 폭발이 발생할 가능성이 있는 것으로 분석되었으며, 섬유를 2.0% 혼입한 FR-ECC의 경우에는 폭발 및 균열이 발생하지 않는다는 것을 알 수 있었다.

3.2 내부 온도 특성

3.2.1 일반적인 거동

HC(EC1) 시간 가열 곡선에 의한 가열 시 50 mm 깊이

에 설치된 열전대를 이용하여 내부 온도를 측정하였으며 그 결과를 Fig. 10에 나타냈다. 모든 시험체는 가열 시작 후 3분~5분까지 온도 변화 추이를 보이지 않다가 상승하기 시작하여 150~170°C 부분에서 일정 온도가 지속되는 특성을 보였다. 이후 온도 상승이 진행되다가 35분 정도에서 온도 구배가 급격히 상승하는 특성을 보였다. 이러한 특성은 FR-ECC내 열수분 이동설⁹⁾로 설명할 수 있다. 즉 일정 온도가 지속되는 특성은 시험체 내에 존재하는 물(물리적 흡착수 및 결정수)이 위상 변화하면서 유발되는 잠열이나 수증기의 확산에 의해 비열이 증가하기 때문이며, 이후 지속적으로 시험체에 열이 전달되어 시험체 중심부까지 수분이 증발하게 되면 낮아진 비열 특성으로 급격한 내부 온도 증가를 보이는 일반적인 거동을 잘 나타내고 있다.

3.2.2 FR-ECC의 내부 온도 특성

Fig. 10(a)은 재료 타입별 내부 온도 특성을 비교하여 나타낸 것으로, 일반적인 PCM(mortar)에 비하여 PVA 섬유를 2.0% 혼입한 FR-ECC(NO1) 및 PP 섬유를 2.0% 혼입한(NO6) 시험체의 내부 온도가 낮게 평가되고 있음을 알 수 있다. 가열 후 30분에서의 온도 분포는 mortar, NO1 및 NO6 시험체가 각각 400°C, 290°C, 및 251°C로써 FR-ECC가 일반적인 PCM에 비하여 28%, 35% 낮게 나타났다.

3.2.3 다공성 세라믹재의 효과

FR-ECC의 내화 성능을 향상시키기 위해 사용된 다공성 세라믹재의 혼입률 V_c 에 대한 시험체 내부 온도 분포 특성을 Fig. 10(b) 및 (c)에 나타냈다. 다공성 세라믹재의 혼입률이 증가할수록 내부 온도는 낮아짐을 알 수

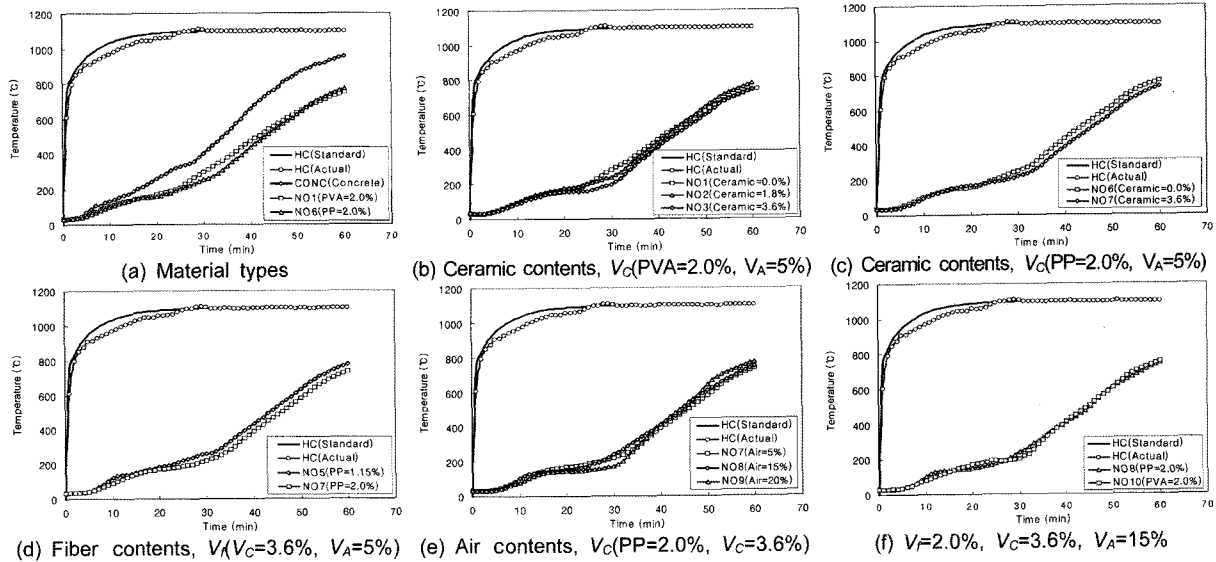


Fig. 10 Internal time-temperature curves of FR-ECCs(in 50 mm inner)

있었으며, 이는 세라믹재의 미세한 다공성이 FR-ECC의 열적특성에 영향을 미치기 때문으로 판단되었다.

3.2.4 섬유 혼입 효과

Fig. 10(d)은 동일 조건에서 PP 섬유 혼입률 V_f 가 각각 1.15%(NO5) 및 2.0%(NO5)인 경우의 내부 온도 분포를 나타낸 것이다. 그림으로 부터 섬유 혼입률이 증가할수록 온도 분포는 낮게 형성되었으며, 이를 통하여 V_f 를 증가시킴으로써 시험체의 폭렬을 방지할 뿐만 아니라 열적특성도 개선시킨다는 사실을 알 수 있었다.

3.2.5 공기량 효과

Fig. 10(e)은 FR-ECC에 강제적으로 공기량 V_A 를 변화시킨 경우에 대한 시험체 내부의 온도 특성을 나타낸 것으로서 공기량이 증가할수록 온도 분포도 낮아짐을 알 수 있었다. 이러한 특성은 FR-ECC내의 공기량은 매트릭스의 열전도율을 낮출 뿐만 아니라 공극 중에 잉여수를 포함하고 있어 비열이 증가하기 때문으로 판단되었다. 그러나 공기량의 증가는 재료의 역학적 성능인 압축강도를 저하시키므로 적절한 공기량의 설정이 필요하다고 판단되었다.

이상의 변수별 내부온도 분포에 대한 분석으로 부터 PVA 섬유 또는 PP 섬유 혼입률 $V_f=2.0\%$, 다공성 세라믹재 혼입률 $V_c=3.6\%$, 공기량 $V_A=15\%$ 의 경우가 압축강도 30~40 MPa, 휨강도 12 MPa, 직접인장강도 3~4 MPa, 직접인장변형률 0.5~3%를 확보할 수 있는 FR-ECC를 구현할 수 있는 최적배합임을 알 수 있었으며 Fig. 10(f)에 이러한 조건의 내부온도 분포를 나타냈다.

4. FR-ECC의 비정상 온도 분포 해석 및 검증

4.1 해석 개요

FR-ECC의 내화 시험 결과에 근거하여 외부 열원의 영향에 의한 비정상 온도 분포 해석(Nonlinear transient

heat flow analysis)을 수행하였다. 해석에 있어서는 FR-ECC에 대한 온도·시간의존 열적 특성을 온도함수로 치환하여 이를 고려하였으며, 해석방법에 대한 신뢰성 확보를 위하여 수행된 내화 시험 결과를 이용하여 이를 검증하였다. 해석 시 사용된 프로그램은 범용 유한요소해석 프로그램인 DIANA를 이용하였으며 열 전달 해석 시 도입되는 열 $q(t)$ 는 식 (4)과 같이 나타낼 수 있다.

$$q(t) = c(T, r) \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4)$$

여기서, $c(T, r)$ 는 열용량으로 다음과 같은 수치근사해석으로 나타낼 수 있다.

$$r_m = \frac{Q_m}{Q_n}, Q_m \approx \sum_{i=1}^m c(T_i^*, r_i^*) \Delta T_i, m = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

여기서,

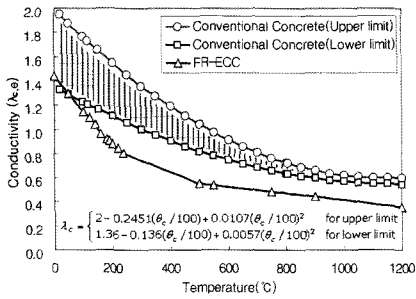
$$\Delta T_i = T_i - T_{i-1}, r_i^* = \frac{r_{i-1} + r_i}{2}, T_i^* = \frac{T_{i-1} + T_i}{2} \quad (6)$$

4.2 FR-ECC의 열적 특성

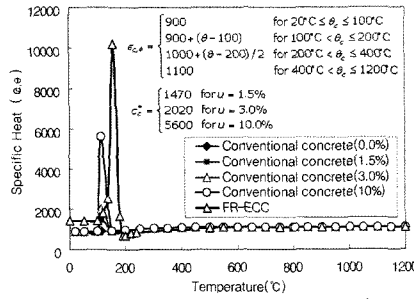
FR-ECC 해석 시 도입한 재료의 열적 특성은 Fig. 11과 같다. 본 연구에서는 재료의 열전도율 및 열용량에 대한 온도·시간 의존 해석을 위하여 측정된 열전도율을 기준으로 규준^{5,7)}에서 제시하고 있는 열적 특성에 대한 온도함수로 이를 치환하였다. 특히, 섬유의 용융에 의한 비열 증가를 고려하기 위하여 Fig. 11(b)과 같이 150~180°C 범위에서 비열을 증가시켰다.

4.3 유한요소 모델링

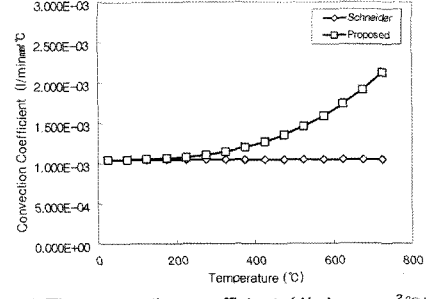
Fig. 12는 전술한 시험체에 대한 유한요소(FE) 모델링 개요를 나타낸 것이다. 해석 대상은 100×200 mm의 원주형 시험체의 축 대칭성을 고려하여 반경 50 mm, 폭



(a) The thermal conductivity λ_c (W/m°C)



(b) The specific heat $C_{p,c}$ (J/kg°C)



(c) The convection coefficients (J/min · mm²°C)

Fig. 11 Thermal properties of FR-ECCs

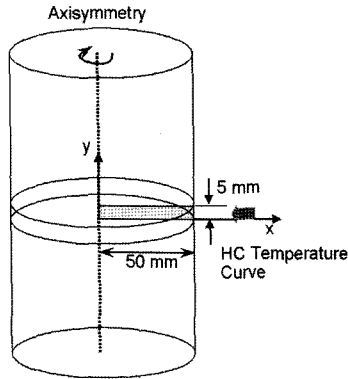


Fig. 12 FE modeling of specimen

5 mm로 하였으며, 요소 분할(mesh)은 5 × 5 mm를 기준으로 하였다. 요소는 3D 축대칭 요소(CQ16A)를 적용하였으며, 온도 하중을 고려하기 위하여 경계면은 가상의 요소(B2AHT)로 모델링하였다. 해석에 이용된 온도 이력은 내화 시험 조건과 동일하게 하였으며, 초기 온도 조건은 실험 조건인 30°C로 설정하였고, 대류계수는 실험실 내 조건을 고려하여 $h_c = 400 \text{ W/m}^2\text{°C}$ 으로 가정하였다.

4.4 해석 결과의 검증

Figs. 13, 14는 비정상 온도 분포 해석과 시험 결과를 비교하여 나타낸 것이다. Fig. 14의 NO10 시험체에 대한 가열 후 시험체의 온도 이력 곡선으로 부터 해석 결과는 시험체의 온도 이력을 매우 유사하게 추정하고 있음을 알 수 있다. 특히 실험 결과가 가열 후 30분 경과 시점으로 부터 급속하게 온도가 상승하고 있는 특성을 해석 결과도 구현하고 있는 것을 알 수 있다.

전술한 바와 같이 이러한 특성은 원형 공시체의 전면에서 열이 전달되는 특성에 기인한 것으로, 해석에 사용된 제 계수를 이용하여 입방체 형태에 1면에만 열이 전달되는 경우로 해석을 수행한 결과 그림과 같이 60분 경과 시 135°C로 평가되었다.

5. 터널 라이닝의 온도 거동 특성

5.1 해석 개요

검증된 비정상 온도 분포 해석 기법을 이용하여, FR-

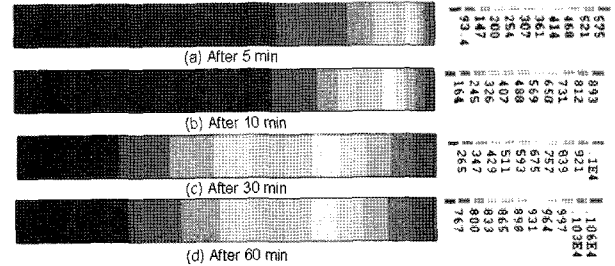


Fig. 13 Contour plot of temperature values (time steps 5, 10, 30, 60 min after)

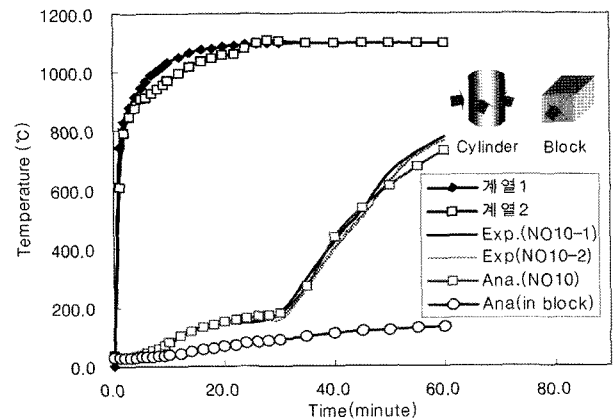


Fig. 14 Verifications: Internal temperature distribution of specimens

ECC 40 mm 라이닝 유무에 대한 터널 내의 온도 분포를 해석적으로 검토하였다. Fig. 15는 대상 터널에 대한 유한요소(FE) 모델링 개요를 나타낸 것이다. 터널은 지름 6,000 mm, 라이닝 250 mm로 대칭성을 고려하여 1/2로 분할하였으며 깊이는 1,000 mm, 암반은 1,500 mm까지로 설정하여 각각의 경계조건을 부여하였다. 요소 분할 (mesh)은 100 × 100 mm를 기준으로 화재에 직접 노출되는 부분을 세분하였다. 요소는 콘크리트, FR-ECC, 암반에 대하여 3D Solid 요소(CHX60)를 적용하였으며, 경계면은 가상의 요소(BQ4HT)로 모델링하였다. 해석에 사용된 FR-ECC의 역학적·열적 특성은 전술한 시험 결과를 이용하였으며, 콘크리트의 경우는 Fig. 11 및 Table 6과 같고, 지반의 경우는 밀도 2,650 kg/m³, 비열 0.795 kJ/kg°C, 열전도율 3.45 W/m°C로 가정하였다. 또한 온도 이력은 Fig. 7의 RABT 곡선을 이용하였다. 온도하중은 Fig. 15에 나타난 바와 같이 터널라이닝의 1/3이 직접 노출되고, 나

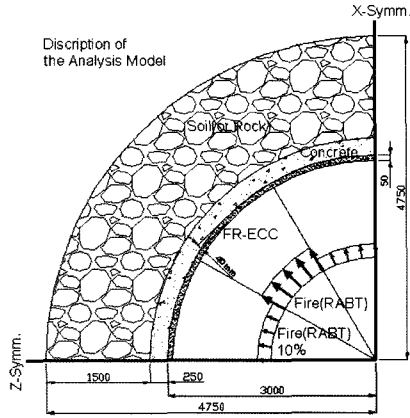


Fig. 15 FE modeling of tunnel

Table 6 Material properties for concrete used in analyses

Objects	E_c (GPa)	f_c (MPa)	f_t (MPa)	Expansion coef.
Concrete	28	25	2.2	1.2E-5
steel	210	400	400	1.2E-5

머지 부분은 도입 온도 이력의 1/10이 작용하는 것으로 가정하였으며, 초기 온도조건은 20°C로 가정하였다.

5.2 해석 결과

Figs. 16, 17은 일반적인 터널 라이닝 및 내화 성능 향상을 위해 FR-ECC로 40 mm 2차라이닝 한 터널에 대한 비정상 온도 분포 해석 결과를 나타낸 것이다. 그림으로부터 일반적인 터널의 경우(Fig. 17(a)), 철근 위치(두께 40 mm)에서 40분에 350°C에 도달하였으며, 100분에 530°C에 까지 증가하였다가 감소하는 특징을 보였다. 이에 반하여 FR-ECC로 40 mm 라이닝 한 경우(Fig. 17(b))는 콘크리트 표면의 온도(40 mm)가 최대 338°C(100분 경과 시점)로 나타났으며 철근 위치(표면으로 부터 80 mm)에서의 온도는 최대 150°C(130분 경과 시점)로 분포하고 있음을 알 수 있다. Table 7은 일반적인 터널 라이닝에 있어 한계 온도 값을 나타낸 것으로 콘크리트와 철근 위치에서의 온도는 250~380°C 정도로 제어하는 경우 구조물의 화재 피해를 방지할 수 있을 것으로 판단되며, 본 연구에서 개발된 FR-ECC를 40 mm 정도 라이닝 하는 경우에는 콘크리트 및 철근 위치에서 상기조건을 만족함을 알 수 있다.

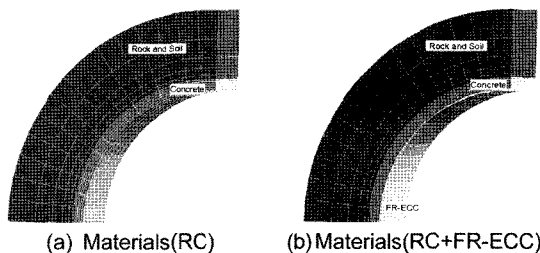
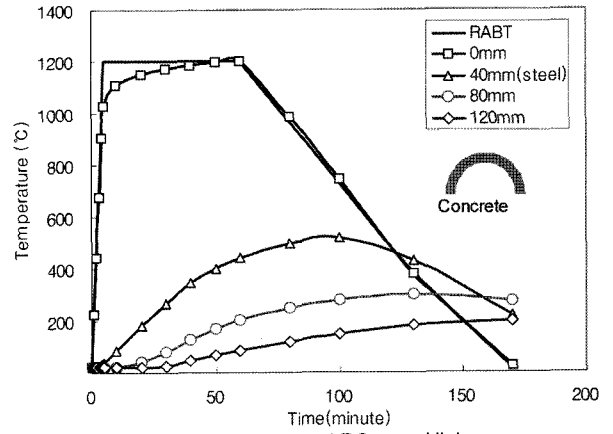
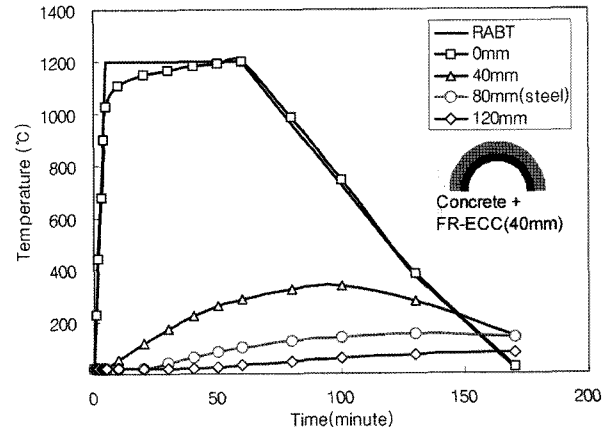


Fig. 16 Analytical results of tunnel



(a) Conventional RC tunnel lining



(b) RC and FR-ECC tunnel lining for fire resistance

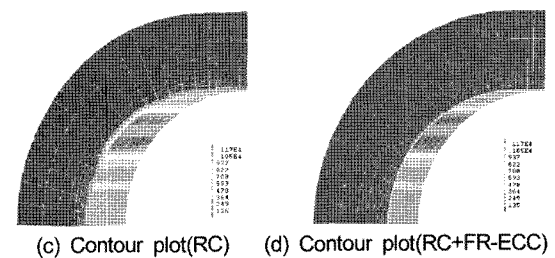
Fig. 17 Analytical results in internal temperature distribution of RC and RC + FR - ECC tunnel lining for fire resistance

Table 7 Ultimate limit temperature of tunnel

Objects	Temperature (°C)	Location (depth), (mm)	Mote
Concrete	250~380	0~250	-
Reinforcement(steel)	250~350	40~50	-
Waterproofing sheet	70~110	250~300	Melting temp.

6. 결 론

직접 인장 상태에서 유사 변형 경화 거동 및 분산 균열 특성 그리고 큰 변형 성능을 갖는 ECC에 대하여 내화 성능을 향상시킨 FR-ECC를 개발하고, 화재 시험을 실시하여 내화 거동 특성을 평가하며, 비정상 온도 분포 해석 기법 및 이의 검증을 통해 터널라이닝에 FR-ECC



가 사용된 경우의 내화 성능에 관한 해석을 실시·분석한 본 연구로 부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 본 연구에서 개발된 고인성·고내화성 시멘트 복합체(FR-ECC)의 역학적 특성은 재령 압축강도 30~36 MPa, 휨강도 11~12 MPa, 직접인장강도 3~4 MPa로 나타났으며, 직접 인장 상태에서 변형률 0.5~3.3%, 유사 변형 경화 거동 및 다수의 미세균열이 분산하는 특성을 보였다.
- 2) 터널 등과 같은 토목 구조물에 적용되는 시간 가열 곡선은 화재 발생 후 초기 온도 상승 구배가 매우 크기 때문에, PP 섬유를 $V_f=1.15\%$ 혼입하여도 폭렬이 발생하였으며, 이러한 이유는 큰 온도 상승 구배에 의한 시험체 내부의 공극압 증가 속도가 PP 섬유가 용융됨으로써 저감되는 속도보다 빠르기 때문으로 판단되었다.
- 4) FR-ECC는 PP 섬유 및 PVA 섬유의 혼입률 V_f 가 2.0%인 경우 HC(EC1) 시간 가열 곡선에 의한 내화 시험 시 폭렬이 발생하지 않았다.
- 5) 내화 성능을 향상시키기 위한 FR-ECC의 최적 배합은 PVA 섬유 또는 PP 섬유 혼입률 $V_f=2.0\%$, 다공성 세라믹재 혼입률 $V_C=3.6\%$, 공기량 $V_A=15\%$ 로 하는 경우 역학적 성능을 감소시키지 않으며 우수한 내화 성능을 가질 수 있을 것으로 판단되었다.
- 6) FR-ECC의 열전도율 및 열용량에 대한 온도 시간 의존성을 고려한 비정상 온도 분포 해석을 통하여 FR-ECC 내에 포함된 수분 및 섬유의 용융에 의한 위상 변화가 유발하는 온도 상승 구배의 완화, 수분 이동 및 발산에 의한 급격한 온도 증가 특성을 구현 검증할 수 있었다.
- 7) 검증된 비정상 온도 분포 해석 기법을 이용하여 실제 터널라이닝에 40 mm FR-ECC를 추가 라이닝 한

경우에 대한 해석 결과, 콘크리트 및 철근의 온도 분포가 모두 350°C 이내에서 제어되어 터널 내 콘크리트 및 철근에 대한 화재 피해를 방지할 수 있을 것으로 판단되었다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구(R01-2004-000-10348-0)지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Haack, A., "The European State of the Art of Concrete and Fire Safety in Tunnels", *Japan Concrete Institute Annual Convention*, Tokyo, 2003, 8, pp.156~162.
2. Haukur, I. and Anders, L., "Recent Achievements Regarding Measuring of Time-Heat and Time-Temperature Development in Tunnel", *Safe & Tunnels, 1st International Symposium*, Prague, 2004, 7, pp.87~96.
3. Yun, H. D., "Manufacture/Construction/Structural Applications of High performance Fiber Reinforced Cementitious Composites", *2nd Korea-Japan International Joint Symposium*, Seoul, 2005, 10, pp.56~64.
4. Kim, Y. Y., Kong, H. J., and Li, V. C., "Design of Engineered Cementitious Composite Suitable for Wet-Mixture Shotcreting", *ACI Material Journal*, Vol.100, No.6, 2003, pp.511~518.
5. Eurocode 2, *Design of Concrete Structures Part 1, 2 General Rules-Structural Fire Design*, DO ENV 1992, 1996, pp.16~25.
6. 原田和典, "耐火試験におけるコン크ロートの温度上昇の豫測に関する研究", 京都大學博士論文, 1992.
7. Eurocode 4, *Design of composite steel and concrete structures Part 1, 2, Structural Fire Design*, CEN/TC250/SC4, N39, prENV 1994-1-2, 2nd Draft, 1992.

요 약 터널 라이닝은 대형 화재 등과 같은 고온에 노출될 경우, 폭렬이 발생하고 이로 인해 급격한 온도 전달 및 내력 저하로 구조체 붕괴의 원인이 될 수 있다는 것이 여러 사례를 통해 보고되고 있다. 본 연구는 터널라이닝의 내화 뽐칠 재료로 매우 적합할 것으로 판단되는 고인성·고내화성 시멘트 복합체(FR-ECC)를 개발하고 이의 역학적 특성 및 내화 성능을 평가하고자 하였다. 이를 위하여 FR-ECC에 있어서의 배합 요인을 실험 변수로 내화 시험을 실시하였으며, 비정상 온도 분포 해석 기법(nonlinear transient heat flow analysis)을 이용하여 이를 해석적으로 묘사·검증되었다. 또한, 실험 결과를 통해 검증된 해석 기법을 이용하여 터널라이닝에 대한 열전달 해석을 수행하여 FR-ECC를 내화 2차 라이닝 재료 이용하는 경우의 거동 특성을 분석하였다. 실험 결과 내화 성능을 향상시키기 위한 FR-ECC의 최적 배합은 PVA 섬유 또는 PP 섬유 혼입률 $V_f=2.0\%$, 다공성 세라믹재 혼입률 $V_C=3.6\%$, 공기량 $V_A=15\%$ 로 나타났으며, 검증된 비정상 온도 분포 해석 기법을 이용하여 기존 터널에 40 mm FR-ECC를 추가 라이닝 한 경우에 대한 해석 결과, 콘크리트 및 철근의 온도 분포가 모두 350°C 이내에서 제어되어 터널 내 콘크리트 및 철근에 대한 화재 피해를 방지할 수 있을 것으로 판단되었다.

핵심용어 : 내화 성능, FR-ECC, 비정상 온도 분포 해석, 콘크리트 터널, HC(EC1) 시간 가열 곡선