

실드 터널용 프리캐스트 세그먼트 콘크리트 라이닝의 내화성능

한병찬* · 하라다카즈노리** · 권영진*** · 김윤용****

Han, Byung-Chan*, Harada Kazunori**, Kwon, Young-Jin***, Kim, Yun Yong****

Fire Resistance Performance of Precast Segmental Concrete Lining for Shield Tunnel

ABSTRACT

Reinforced concrete (RC) shield tunnel lining must be designed for fireproof performance because the lining is sometimes exposed to very high temperature due to traffic accidents. Both experimental and numerical studies are carried out to evaluate fire resistance performance of precast RC tunnel lining systems. In the experimental studies, six full-scale precast RC tunnel segments are exposed to fire in order to examine the influence of various parameters on the fire resistance performance of precast RC tunnel lining. We used the temperature curve of the RABT criteria, which are severe conditions of fire temperatures. The fire test showed that the explosive spalling was not observed by substituting concrete to PP fiber reinforced concrete. A transient heat flow analysis was carried out in consideration of the material properties that change with temperature, and the results showed good agreement with the test results.

Key words : Fire resistance, Precast segment, Concrete lining, Heat flow analysis, RABT criterion

초록

철근콘크리트 실드 터널 라이닝은 대형화재 등과 같은 고온에 노출될 경우, 구조체에의 급격한 온도 전달 및 내하력 저하로 구조체 붕괴의 원인이 될 수 있기 때문에 내화성능을 확보해야 한다. 이 연구는 실드터널의 프리캐스트 RC 세그먼트 라이닝에 대한 내화성능을 평가하고자 실험/해석적 연구를 수행하였다. 실험적 연구에서는 프리캐스트 RC 세그먼트내의 열적 취약부위를 실험변수로 하여 6개의 실 대형 실험체에 대한 내화실험을 실시하였으며, 화재조건은 RABT 곡선에 의한 온도이력을 이용하였다. 내화실험결과 이 연구에서 제시된 실드형 터널의 PP섬유 혼입콘크리트 충전부위는 폭발이 발생하지 않는 우수한 내화성능을 나타내었다. 해석적 연구에서는 온도의존성을 고려한 재료의 열특성을 고려하여 비정상 유한요소 온도분포해석 기법을 이용하였는데, 실험결과를 잘 모사하는 것으로 검증되었다.

검색어 : 내화성능, 프리캐스트 세그먼트, 콘크리트 라이닝, 열전달해석, RABT 시간가열곡선

1. 서론

최근 세계적으로 터널 대형 화재사고가 빈번히 발생하고 있다. 2002년의 대구지하철참사에서도 알 수 있듯이 터널 등과 같은 지하구조물에 발생하는 화재는 큰 인명피해와 구조체 손상 등 대형 참사로 이어져 사회경제적으로 미치는 영향이 매우 크다. Table 1은 대표적인 터널 화재 사례로 최대 표면 온도는 1,000~1,200℃ 까지 나타났으며, 이러한 온도는 터널 구조에 심각한 피해를 발생시킬 수 있다.

* 정회원 · 우송정보대학 리모델링건축과 교수 (cchanhan@naver.com)

** 교토대학 공학연구과 교수 (harada@archi.kyoto-u.ac.jp)

*** 호서대학교 소방방재학과 교수 (jungangman@naver.com)

**** 정회원 · 충남대학교 토목공학과 교수 (Corresponding Author · Chungnam National University · yunkim@cnu.ac.kr)

Received November 12, 2013/ revised December 2, 2013/ accepted December 16, 2013

Table 1. Fire Temperature in Tunnels

Tunnel	Type	Max. fire temperature
Nihonzaka (Japan)	Road Tunnel	600~1,000℃
Caldecot (USA)	Road Tunnel	945 (1,038)℃
Mont Blanc (France)	Road Tunnel	1,000 (1,832)℃
Tauern (Austria)	Road Tunnel	1,000℃

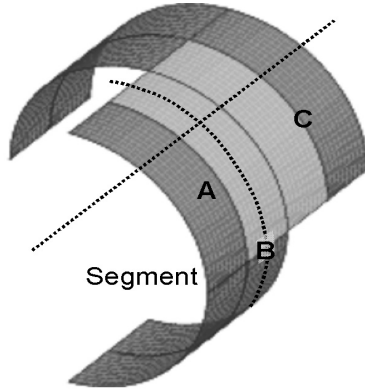


Fig. 1. Schematic Design of Precast RC Tunnel Lining and Critical Regions by Fire Attack (Dashed Lines Representing Prestressing Bars)

특히 콘크리트 라이닝이 구조체로 거동하는 실드, 침매, 개착터널 등에 화재가 발생하는 경우는 터널 붕괴로까지 이어질 가능성도 제기되고 있다(Kim et al., 2006; Lee et al., 2013; Haukur et al., 2004). 실제 실드 터널의 철근콘크리트(이하 RC) 세그먼트에 적용되는 고강도콘크리트는 내화성능을 확보하기 위한 다양한 공법에 적용되고 있는데, 콘크리트에 섬유를 혼입하여 폭렬을 억제함으로써 보강철근이 화재하중에 직접 노출되지 않도록 하거나, 2차 라이닝을 통해 구조체로 전달되는 수열온도를 저감시키는 공법이 대표적인 예이다(Park et al., 2003; Won et al., 2007). 그러나 기존의 연구에서는 라이닝 콘크리트 본체에 섬유를 혼입하여 폭렬을 억제하는 것에 초점을 맞추었다. 한편, 이 연구에서는 프리캐스트 접합면 또는 PS강재 연결부 등 라이닝 시스템 주요 부위의 내화성능

에 대한 연구와 함께 해석적 검증도 포함하고 있다. 실험적으로는 터널의 프리캐스트 RC라이닝 시스템의 내화성능 및 거동 특성을 평가하고, 온도의존성 열적특성 값을 고려할 수 있는 비정상 온도분포 해석 기법(Transient heat flow analysis)을 제안하였다. 제안된 해석기법에 의하여 얻은 해석결과는 실험결과와 비교를 통하여 검증하였다.

2. 내화실험계획 및 방법

2.1 실험 개요

Fig. 1은 대상 터널 구조물의 개요 및 화재하중 취약부위를 나타낸 것이다. 세그먼트는 폴리프로필렌(PP) 섬유를 혼입한 $f_{ck} = 50$ MPa급 콘크리트를 이용하여 프리캐스트로 제작한 후 현장에서 조립하였다. 세그먼트의 내부에 설치된 강선을 긴장한 후 긴장부위를 내화용 모르타르로 충전하여 세그먼트를 연결하였다. 또한 프리캐스트 세그먼트와 방수층 사이에는 에폭시계 접착제(sealant)를 주입한다고 가정하였다. 이러한 조건에서 화재발생 시 취약부위는 세그먼트 본체(A), 내부강선 연결부(B), 세그먼트 사이의 접합면(C)이 될 것으로 판단하였으며, 이를 변수로 실험체를 제작하여 내화실험을 실시하였다.

2.2 실험체 계획 및 제작

실험체 종류 및 상세를 Table 2 and Fig. 2에 각각 나타냈다. 주요 실험 변수는 먼저 프리캐스트 세그먼트 본체의 내화성능을 평가하기 위하여 PP 섬유를 1.5kg/m^3 (섬유 혼입률 $V_f=0.17\%$), 1.2kg/m^3 ($V_f=0.13\%$) 혼입한 경우(NO1 및 NO2)를 변수로 정했다. 섬유 혼입량 1.5kg/m^3 은 예비실험을 통하여 결정된 값이며, 1.2kg/m^3 은 보다 경제적인 재료로 내화 성능을 확보할 수 있는지를 평가하기 위하여 선정한 혼입량이다. 세그먼트 콘크리트의 배합은 Table 3에 나타난 바와 같다. 한편 프리스트레싱 강봉(PS 강봉) 연결부의 충전제에 대한 내화성능을 평가하기 위하여 Fig. 2(b)와 같이 $360 \times 150\text{mm}$, 깊이 150mm 의 연결부에 내화용 모르타르를

Table 2. List of Specimens

Specimen	Fiber content kg/m^3 (vol.%) ¹⁾	In-filled mortar types ²⁾	Gap between segments, mm	longitudinal stress, MPa
NO1	1.50 (0.17)	-	-	17
NO2	1.20 (0.13)	-	-	17
NO3	1.50 (0.17)	PPF	0.0	-
NO4	1.50 (0.17)	PP1	0.0	-
NO5	1.50 (0.17)	PP2	0.0	-
NO6	1.50 (0.17)	-	2.0	-

¹⁾ detailed in Table 3

²⁾ detailed in Table 4

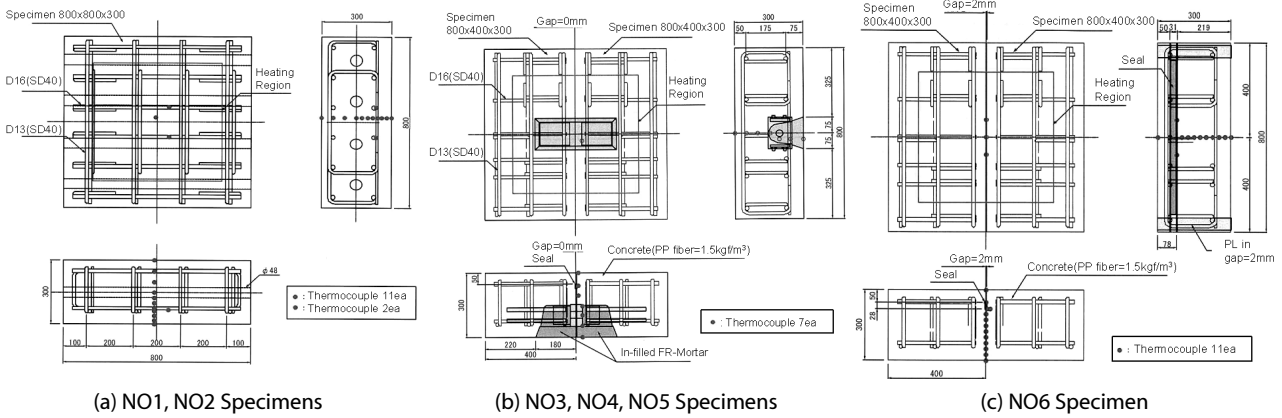


Fig. 2. Specimen Details

Table 3. Mixture Proportions of Precast Concrete

Compressive strength MPa	Max. size of aggregate mm	Slump cm	Air content %	W/C %	S/A %	Unit weight, kg/m ³					
						Water	Cement	Sand	Aggregate	SP	fiber content
50	20	16±2.5	2.5	36.5	52	177	485	878	826	4.85	1.5 or 1.2%

Table 4. Properties of In-Filled Mortar

In-filled mortar	fiber	fiber contents %	W/C wt.	Slump cm	Table flow mm	Density kg/m ³	Temp. in material °C	Environmental temp. °C	Compressive strength, MPa		
									7days	28days	39days
PPF	Fluorinated polypropylene	2.0	0.18	6.5	131×130	1,663	33.1	25.8	19.2	50.7	53.5
PP1	Polypropylene	2.7	0.13	1.0	109×107	2,078	35.2	30.2	27.3	61.6	72.1
PP2	Polypropylene	2.5	0.15	6.5	151×148	2,273	30.9	29.7	34.6	62.7	77.5

충전하여 실험체를 제작하였다(NO3, NO4, NO5). 내화용 모르타르는 PPF, PP1, PP2 등 3종류를 변수로 하였으며, 재료의 구성 성분 및 압축강도 특성은 Table 4와 같다. PPF 모르타르는 표면처리된 PP 섬유를 보강용 섬유로 사용한 모르타르(Han et al., 2007)이며, PP1과 PP2 모르타르는 일반 PP 섬유를 보강용 섬유로 사용한 모르타르이다. 또한 사공 시 발생할 수 있는 세그먼트 사이의 2mm 틈새가 화재시 방수층 접착체에 미치는 영향을 평가하기 위한 실험체(NO6)를 계획하였다.

실험체는 800×800×300mm (가열면 550×550mm)의 실제 크기로 계획하였고 제작과정은 Fig. 3과 같다. NO1 및 NO2 실험체는 일체로, NO3~5는 1/2의 세그먼트 2개를 제작하여 틈새 없이 부착하였으며, NO6 실험체는 2개의 세그먼트 사이 2mm의 틈새를 두었다. 모든 실험체에는 잔류수압 및 토압을 고려하여 17MPa의 축방향 응력을 도입하였다. 한편 수열온도 측정을 위해 각 실험체의 중앙에 깊이 방향으로 열전대를 설치하였다.

콘크리트 타설 후 양생 초기조건이 내화실험에 영향을 미치지

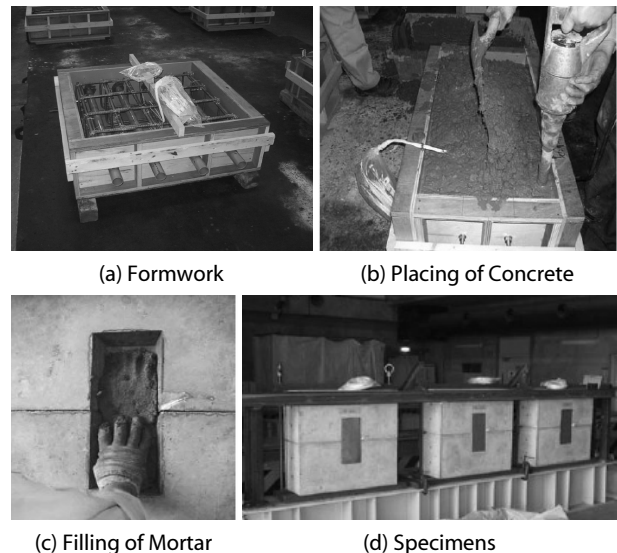


Fig. 3. Specimen Preparations

않도록 기건 상태에서 90일 동안 충분히 양생하였으며, 세그먼트 및 연결부 충전 모르타르의 함수율이 5%이하임을 확인하였다.

2.3 내화시험방법

재하 화재온도곡선은 독일 및 일본에서 보편적으로 사용하고 있는 RABT-ZTV (Train)를 이용하였다. 즉 내화시험시작 후 5분 내 1,200℃에 도달하여 60분간 지속된 이후 110분 동안 냉각시켰다. Fig. 4는 이 실험상황을 나타낸 것으로, 실험체는 1면 열 재하로 이외의 모든 면은 외기에 노출하였다.

3. 실험결과

3.1 폭렬 및 균열 특성

내화시험결과 폭렬 및 균열특성을 Table 5에 정리하였다. NO1 및 NO2 실험체는 가열개시 직후 일부 구간에서 경미한 콘크리트

표면 탈락이 발생하였으나 심각한 폭렬(explosive spalling)은 발생하지 않았다. 특히 PP 섬유 혼입량을 1.2kg/m³로 감소시킨 NO2 실험체도 폭렬 또는 현저한 콘크리트 표면 탈락은 발생하지 않았다. 일반적으로 화재시 콘크리트의 폭렬현상은 Fig. 5와 같이 콘크리트 내부에 존재하는 잉여수 등의 상변화(액체에서 기체)로 발생하는 공극압과 열응력이 원인이다(Kazunori, H., 1992). 고강도콘크리트에 혼입된 PP 섬유가 160℃ 정도에서 용융하므로 내부에 다수의 공극이 발생함으로써 공극압이 저하되어 폭렬현상이 발생하지 않은 것으로 판단된다.

세그먼트 연결부의 충전재의 내화성능을 평가하기 위한 NO3~5 실험체의 경우, 폭렬현상은 NO3 및 NO5 실험체가 발생하지 않은 반면, NO4 실험체에서는 충전재의 1/4정도가 폭렬에 의한 탈락하였다. 또한 충전재의 종류에 상관없이 충전재와 콘크리트 사이에 균열이 발생하였으며, NO4 및 NO5 실험체에서는 충전재를 가로지르는 균열도 관찰되었다. 균열폭은 PPF 모르타르를 충전재로 사용한 NO3 실험체가 0.2~0.3mm로 나타난 반면, NO4 및 NO5 실험체

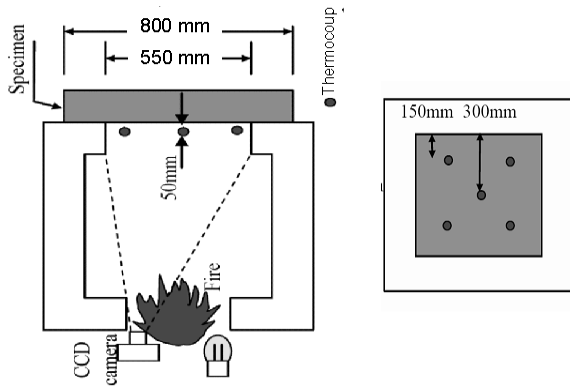


Fig. 4. Fire Heating Apparatus

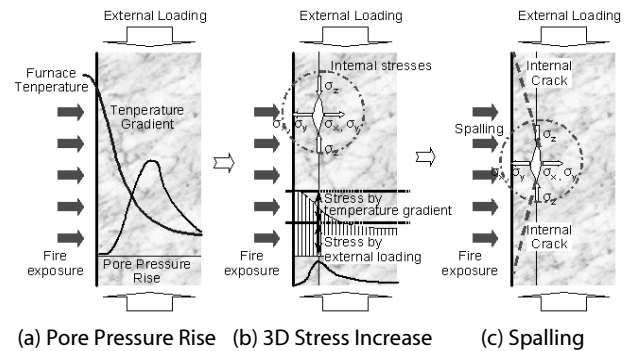


Fig. 5. Spalling Mechanism of High-Strength Concrete

Table 5. Fire Test Results

Specimen NO.	NO1	NO2	NO3	NO4	NO5	NO6
Overall behavior	· Gradually exfoliated in surface of concrete.	· Gradually exfoliated with relatively small explosive in surface of concrete.	· No spalling in infilled mortar · Small crack width and propagation	· Remarkable spalling in surface of infilled mortar · Remarkable crack occurred in interface between concrete and infilled mortar	· No spalling in in-filled mortar · But remarkable crack occurred in interface between concrete and infilled mortar	· No spalling in concrete and interface
Spalling	None	None	None	Area: 150×120mm thickness: 12mm	None	None
Crack	None	None	0.1 ~ 0.2mm	1.5 ~ 2mm	1 ~ 2mm	None
photos						

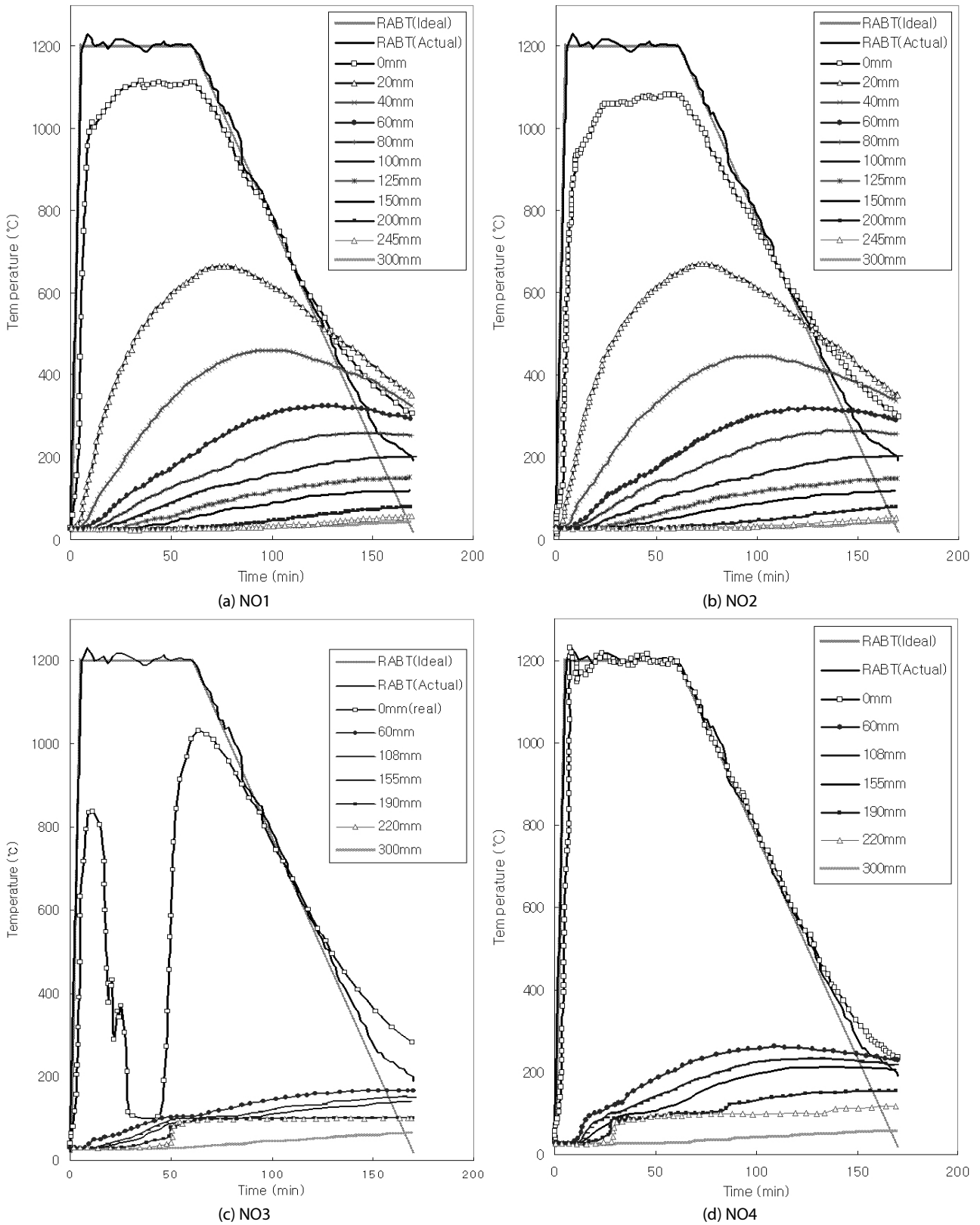


Fig. 6. Internal Temperature Distribution of Specimens (continue)

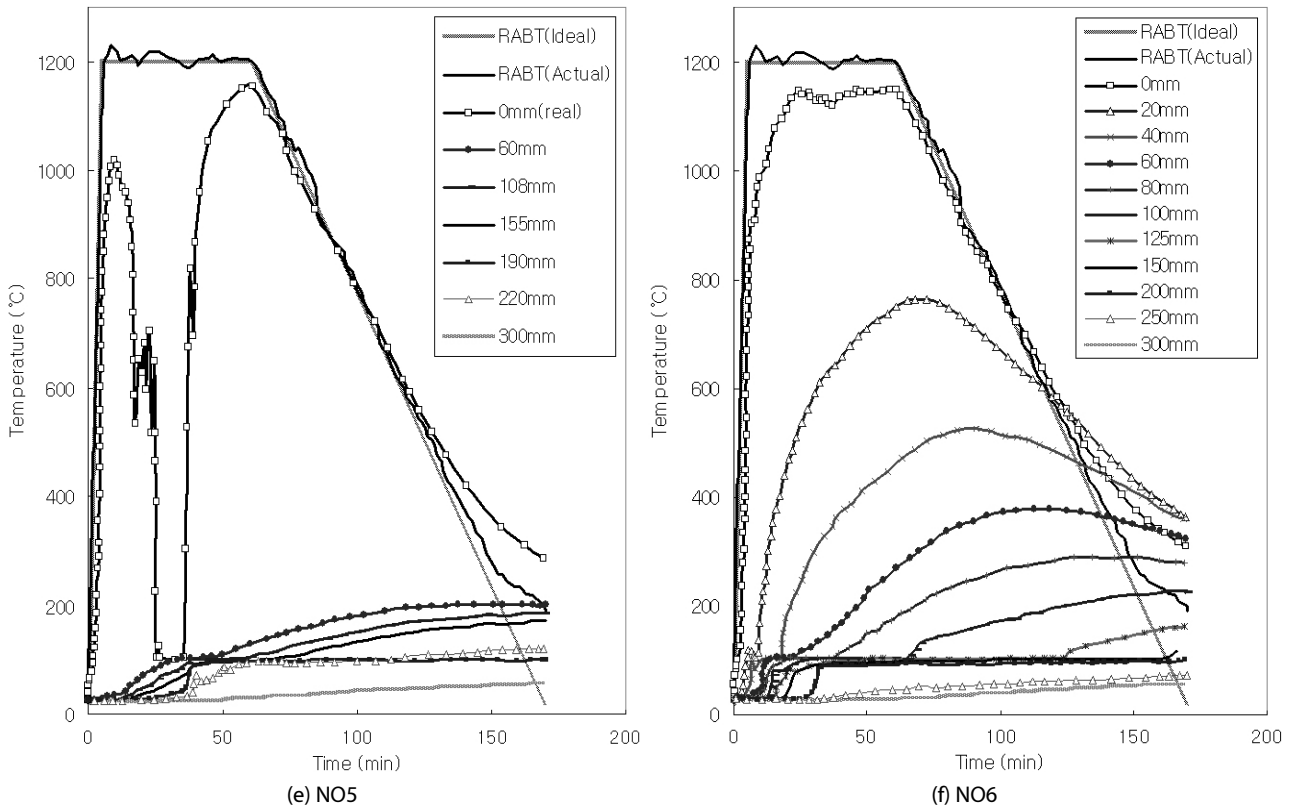


Fig. 6. Internal Temperature Distribution of Specimens

에서는 최대 2mm로 나타났다. 균열 발생 원인은 콘크리트 세그먼트와 충전재의 온도상승 차이에 의한 열변형량 및 수축량 차이인 것으로 판단되었다. 또한 PPF 모르타르의 균열이 상대적으로 작은 이유는 용융되지 않는 내부의 섬유가 일부 응력을 부담하고, PPF 모르타르의 우수한 균열분산 효과 때문인 것으로 판단된다.

한편 라이닝과 방수층 사이의 접착체에 대한 내화특성 평가를 위한 NO6 실험체는 NO1, 2 실험체와 마찬가지로 유의할만한 폭열 및 균열이 발생하지 않았다. 이를 통해 세그먼트의 시공오차로 인한 간격(2mm 이하)은 내화성능에 영향을 미치지 않았다.

3.2 내부 온도특성

깊이별 세그먼트의 수열온도 이력곡선 및 최대 온도를 Fig. 6 and Table 6에 나타냈다. 전반적인 온도 분포 특성은 가열 면과 가까운 표면일수록 RABT 곡선의 온도이력과 유사한 온도 상승 및 하강 형태를 보였으나, 표면에서는 열전달 계수(convection coefficient)의 영향으로 외기 온도조건인 최대 1,200°C 보다 낮은 1,100°C 정도를 나타냈다. 한편 표면에서 100mm 이상 떨어진 경우에는 60분 이후 가열온도의 하강에도 불구하고 점진적인 온도상승을 보였다.

3.2.1 프리캐스트 세그먼트의 내화성능 분석

Table 7은 터널에 있어서 사용재료에 대한 온도 한계상태를 나타낸 것으로, 화재 시 콘크리트 및 철근의 경우에는 350°C, 접착체의 경우 용융점인 100°C 정도에서 온도가 제어되어야 할 필요성이 있다. NO1 및 NO2 실험체의 경우 피복콘크리트(0-60mm 깊이)에서 445~1,116°C로 나타나 위의 한계온도를 초과하고 있었다. 그러나 이외의 부분(코아콘크리트)은 모두 350°C 이하의 온도특성을 나타냈다. 그러므로 화재이후 피복콘크리트만을 제거하고 재시공하는 간단한 보수공법을 통하여 콘크리트의 성능을 회복할 수 있을 것으로 판단되었다. 콘크리트 속에 매입된 철근의 수열온도를 살펴보면, 65mm 깊이에 위치한 철근의 최대온도는 각각 323°C 및 319°C로 나타나 Table 7의 한계온도(350°C) 이하로 평가되었으며, 이는 콘크리트 내에 혼입된 PP 섬유에 의해 피복콘크리트의 폭열이 발생하지 않아 콘크리트 탈락 및 화재 직접노출에 의한 급격한 온도 증가 요인이 제거되었기 때문으로 판단되었다. 한편 PP 섬유의 혼입율이 상대적으로 적은 NO2 실험체(1.3kg/m³ 혼입)에 있어서도 이러한 조건을 만족하고 있는 것으로 나타나, PP 섬유의 사용량을 완화시킬 수 있을 것으로 판단되었다.

Table 6. Maximum Temperature Measured from the Fire Test

Measured point located away from surface (mm)		Maximum temperature (°C)					
		NO1	NO2	NO3	NO4	NO5	NO6
Cover	0	1,116	1,084	1,035	1,229	1,154	1,153
	20	668	671	-	-	-	766
	40	459	445	-	-	-	522
Reinforcement	60	323	-	165	261	201	376
	65	-	319	-	-	-	-
Concrete	80	260	265	-	-	-	289
	100	202	203	-	-	-	224
	108	-	-	152	232	184	-
PS steel	125	152	150	-	-	-	170
	150	124	122	-	-	-	142
Concrete	155	-	-	143	212	171	-
	190	-	-	115	155	127	-
	200	92	91	-	-	-	105
	220	-	-	100	122	109	-
	245	81	-	-	-	-	-
Seal	250	-	78	-	-	-	88
External	300	70	67	83	78	76	74

Table 7. Ultimate Limit Temperature of Tunnel

Objects	Temperature °C	Location (Depth), mm	Mote
Concrete	250 ~ 380	0 ~ 300	-
Reinforcement(Steel)	250 ~ 350	60 ~ 65	-
Waterproofing sheet	70 ~ 110	250 ~ 300	Melting Temp.

3.2.2 연결부 충전재에 대한 내화성능 분석

Fig. 6의 화재시간-온도곡선에서 특이한 사항은 NO3와 NO5 실험체에서 실험개시 5분경부터 수증기로 보이는 기체가 분출하면서 표면(0mm)에 설치된 열전대의 온도가 급격한 변동성을 보이며 하강하는 특성을 보였으며, 이는 충전재에 첨가된 다량의 PP 섬유가 용융되면서 통로가 형성되고 이를 통하여 수증기화 된 잉여수가 의기로 분출되었기 때문으로 판단되었다. Fig. 7에, 각 열전대 위치에서의 깊이별 온도 포락선을 나타냈다. 충전재의 사용 재료별 온도특성은 PPF 모르타르가 가장 낮은 특성을 보였으며, 철근 위치인 표면으로 부터 60mm에서의 온도는 각각 165°C, 261°C, 201°C로 한계온도 350°C 이하로 나타났다.

3.2.3 방수시트 접착제에 미치는 화재영향 분석

사공시의 발생하는 세그먼트 사이의 틈새(2mm)가 화재시 접착제에 미치는 영향을 분석하기 위한 NO6 실험체의 온도특성을 분석해 보면, 철근 위치인 표면으로 부터 60mm에서의 최대온도는 376°C로써, 동일위치에서의 NO1 실험체 온도 323°C 보다 높게

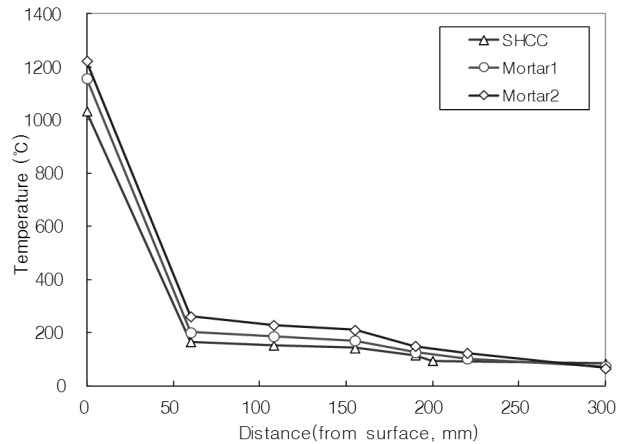


Fig. 7. Internal Temperature Distribution of In-Filled Mortar

나타났으나, 틈으로 인한 현저한 온도증가는 없었다. 그러나 세그먼트 사이의 틈이 콘크리트 내부 온도분포에 영향을 미치는 것을 알 수 있었으며, 사공시 이러한 접합부에 대한 현장 품질관리가 중요한 것으로 판단되었다. 한편 접착제 위치(표면으로 부터 250mm)에서의 온도는 88°C로 나타나 사공시 세그먼트 사이의 틈이 접착제에는 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

4. 비정상 온도분포해석 및 검증

쉴드 터널 프리캐스트 RC 세그먼트의 열절달 해석을 위하여

비정상 유한요소 온도분포해석(Transient heat flow analysis)기법을 구축하였다.

4.1 지배방정식

2차원 열전도 지배방정식은,

$$\rho C(t) \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(t) \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda(t) \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) \quad (1)$$

여기서, ρ =밀도(kg/m³), $\lambda(t)$ =열전도율(W/m·K), $C(t)$ =비열(J/kg·K) 콘크리트 및 충전재의 온도의존성 열적특성 값이다. 화재 온도(실험시 가열조건)에 대한 전체 경계조건은,

$$-\lambda(t) \frac{\partial \theta}{\partial n} = q_R + h(t)(\theta_\infty - \theta) \quad (2)$$

여기서, 복사 수열량(W/m²), h =온도의존성 열전달율(대류계수), θ_∞ 주변 공기온도로 시간에 따라 변화한다. 또한 초기조건은 $\theta(x,0) = f(x)$ 이다.

지배방정식의 공간 차분에는 갤러킨 유한요소법(standard Galerkin method)을 이용하였다. 즉, 3절점 삼각형 요소에 대하여 절점사이의 형상계수($N_1 \sim N_3$)를 직선으로 가정하고, 실제 온도 분포와의 차를 갤러킨법으로 정식화한다. 즉 Eq. (1)에서, 요소내의 $\lambda(t)$, $C(t)$ 는 일정하다고 가정하면,

$$R = \lambda \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} \right) - \rho C \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (3)$$

이고, N_1 을 중량함수로 이용하면,

$$\iint_{\Omega} N_1 R d\Omega = \iint_{\Omega} N_1 \left[\lambda \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} \right) - \rho C \frac{\partial \theta}{\partial t} \right] d\Omega \quad (4)$$

이고,

$$\sum_{j=1}^3 \left[\lambda \iint_{\Omega} N_1 \left\{ N_1 \frac{\partial^2 N_j}{\partial x^2} + N_1 \frac{\partial^2 N_j}{\partial y^2} \right\} d\Omega \theta_j \right] - \sum_{j=1}^3 \left[\rho C \iint_{\Omega} N_1 N_j d\Omega \frac{\partial \theta_j}{\partial t} \right] = 0 \quad (5)$$

Eq. (5)의 첫 번째 항의 2계 미분을 포함한 적분은 그란가우스 부분적분으로 전개하고, 요소의 경계는 선적분으로 대입하면(요소 경계가 외부 경계인 경우 Eq. (2)를 대입),

$$\sum_{j=1}^3 \left[\lambda \iint_{\Omega} \left\{ \frac{\partial N_1}{\partial x} \frac{\partial N_j}{\partial x} + \frac{\partial N_1}{\partial y} \frac{\partial N_j}{\partial y} \right\} d\Omega \theta_j \right] + \sum_{j=1}^3 \left[h \int_{\Gamma} N_1 N_j d\Gamma \theta_j \right] + \sum_{j=1}^3 \left[\rho C \iint_{\Omega} N_1 N_j d\Omega \frac{\partial \theta_j}{\partial t} \right] = \int_{\Gamma} N_1 \{ q_R + h \theta_\infty \} d\Gamma \quad (6)$$

마찬가지 방법으로 N_2, N_3 에 대해 정리하면 각 요소에 대한 방정식은,

$$[C_e] \left\{ \frac{\partial \theta}{\partial t^e} \right\} + [B_e + B_e'] \{ \theta_e \} = \{ f_e \} \quad (7)$$

Eq. (7)을 이용하여 전체방정식을 구축하면,

$$[C] \left\{ \frac{\partial \theta}{\partial t} \right\} + [B + B'] \{ \theta \} = \{ f \} \quad (8)$$

Eq. (8)의 시간미분을 근사화하면,

$$\left\{ \frac{\partial \theta}{\partial t} \right\} = \frac{1}{\Delta t} [\{ \theta^{n+1} \} - \{ \theta^n \}] \quad (9)$$

여기서 첨자 n 은 시간별 번호를 나타낸다. 그러므로 Eq. (9)는,

$$\left[\frac{[C]}{\Delta t} + [B + B'] \right] \{ \theta^{n+1} \} = \frac{[C]}{\Delta t} \{ \theta^n \} + \{ f \} \quad (10)$$

이고, 이를 이용하여 각 절점의 온도를 구할 수 있다.

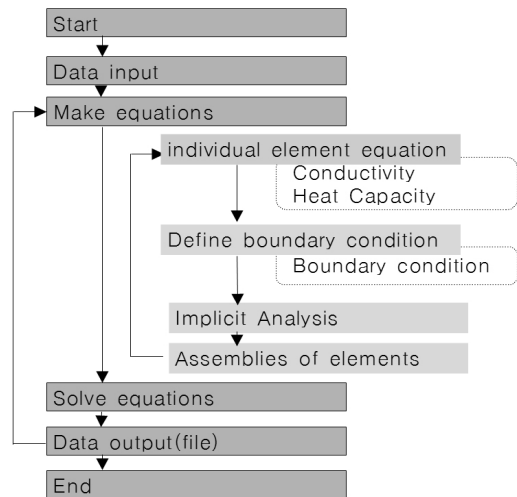


Fig. 8. Program Algorithm (Flowchart)

4.2 해석 알고리즘

해석알고리즘은 Fig. 8과 같으며, FORTRAN으로 코딩하였다. 알고리즘에서 시간에 대한 해석 단계는 해석시간과 데이터 양에서 많은 장점이 있는 양해법(explicit scheme)을 이용하였다.

4.3 수치해석 및 검증

4.3.1 해석모델

해석 대상 모델은 Fig. 9와 같이 NO1 실험체와 내화실험 시 충전재 중 가장 우수한 내화성능을 갖는 NO3 실험체로 설정하였다. 그림에서 실험체의 축 대칭성을 고려하여 1/2인 400×300mm를 대상으로, 4.1절에서 유도한 3절점 삼각형 요소를 이용하였다.

재료의 열적특성 값은, PP섬유 혼입 콘크리트, PPF, 강재에 대한 온도시간의존 열적특성(Eurocode 2, 1996)을 온도함수로

치환하여 이를 적용하였다. 경계조건은 대류경계(열전달 경계) q_0 와 복사열경계 q_R 을 동시에 고려한 등가대류계수를 적용하였다.

$$q_e = (h_c + \alpha_r)(T_f - T_s) \tag{11}$$

$$\alpha_r = \epsilon\sigma(T_f^2 + T_s^2)(T_f + T_s) \tag{12}$$

여기서, h_c 는 대류계수 = 200 W/m²°C(JSCE, 2004), σ 는 슈테판 볼츠만 상수 = 5.6697×10⁸ W/m²K, ϵ 는 복사율 = 0.8이다.

4.4 해석 결과의 검증

Fig. 10은 비정상온도분포해석과 실험결과를 비교하여 나타낸 것이다. 폴리프로필렌섬유를 혼입한 프리캐스트 RC 세그먼트

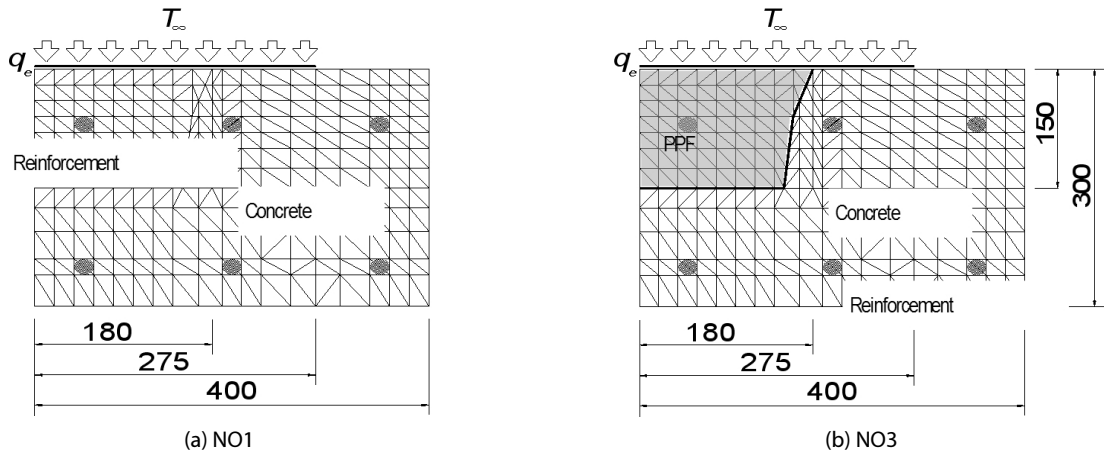


Fig. 9. Analysis Model for Segment Specimens

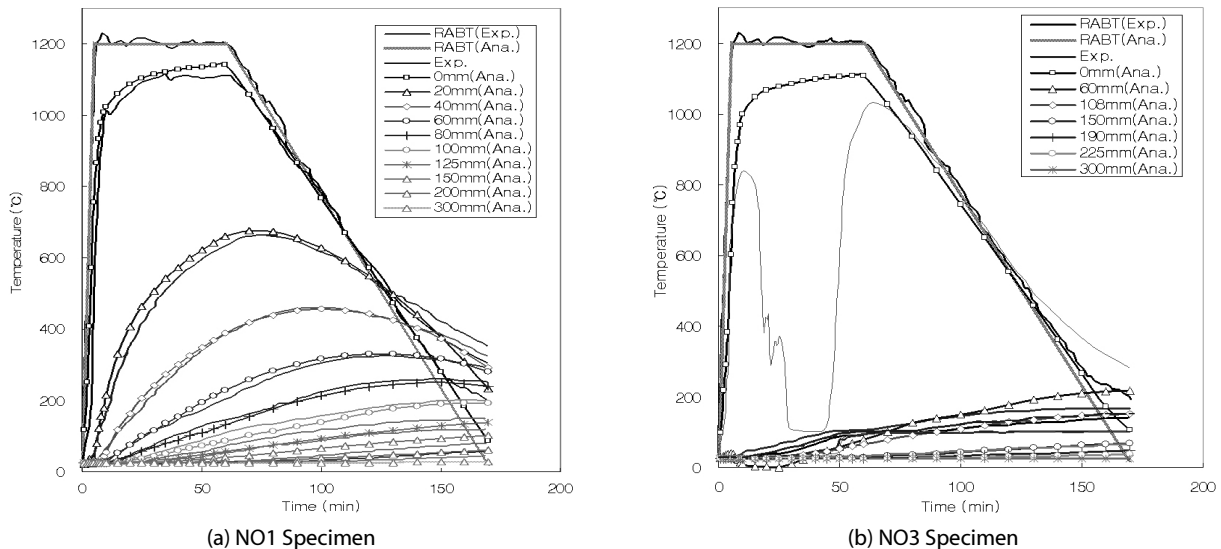


Fig. 10. Comparison Between Experiments and Analysis Results in Terms of Internal Temperature Profiles

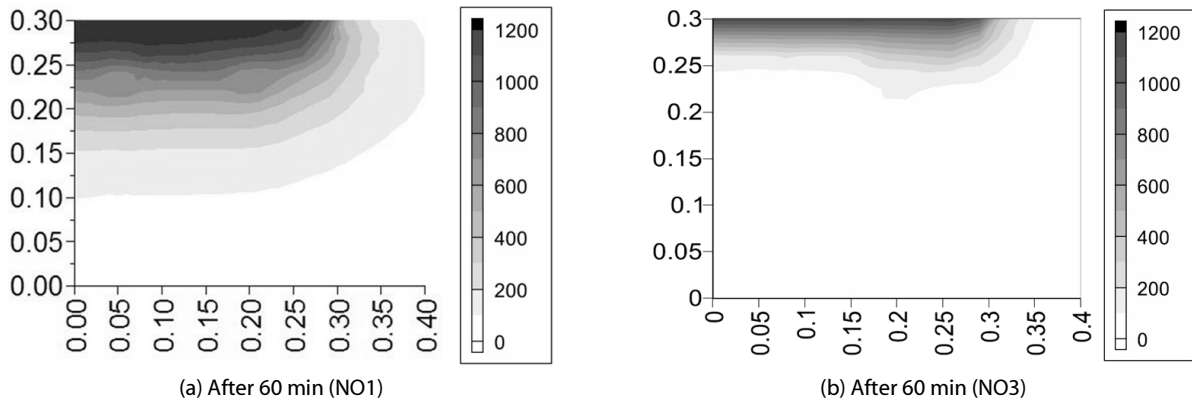


Fig. 11. Temperature Distributions Obtained From Numerical Analysis

(NO1)에 관한 열전달해석결과(Fig. 9(a)), 실험체에 대한 가열 후 실험체의 온도이력 곡선에 관한 비교분석으로 부터 해석결과는 실험체의 온도이력을 매우 유사하게 추정하고 있음을 알 수 있다. 또한 PPF 모르타르로 충전한 실험체(NO3)에 있어서도 표면에서의 급격한 온도변화는 예측하지 못하지만 내부의 온도분포는 비교적 정확하게 예측하고 있음을 알 수 있다. Fig. 11은 가열시간 60분에서 내부 온도분포를 나타낸 것으로, NO3 실험체의 해석결과가 동일한 조건에서 NO1 실험체보다 작은 온도분포 특성을 보이는 것을 알 수 있다. 다만 Fig. 11(b)에서 PPF 모르타르와 콘크리트의 경계부에서 온도 분포의 구배가 급격한 것을 알 수 있었으며, 이로 인해 균열이 발생하는 것으로 판단되었다.

5. 결론

이 연구에서는 실드 터널에 있어 국내실정에 적합한 내화대책의 한 방법을 제시하기 위하여 프리캐스트 RC 라이닝 공법의 열적 취약 부위에 대한 내화실험 및 비정상 온도분포해석 기법을 이용한 해석을 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 실드터널 세그먼트를 구성하는 프리캐스트콘크리트에 대하여 폴리프로필렌을 1.2~1.5kg/m³ 혼입하는 경우 RABT 화재곡선에 의한 내화실험결과 폭발이 발생하지 않았으며, 표면으로부터 60mm (철근 매입위치)에서 한계온도 상태인 350℃ 이하로 제어되었다.
- (2) 프리캐스트 RC 라이닝 연결부의 충전재에 대한 내화성능 평가 결과 폭발발생 여부, 세그먼트와의 균열 및 탈락여부, 내부 온도제어성능 등에서 PPF 모르타르가 가장 우수한 것으로 평가되었으며, RABT 화재곡선에 의한 최대온도는 철근 매입 위치(60mm)에서 165℃로 나타났다.

- (3) 시공시의 발생한 세그먼트 사이 틈새의 영향을 분석하기 위한 내화실험으로부터 2mm의 틈새까지는 현저한 온도증가가 나타나지 않아 시공시 세그먼트 사이의 틈새가 콘크리트 내부의 온도분포 및 방수시트 접착제에 영향을 미치지 않았다.
- (4) 사용재료의 열전도율 및 열용량에 대한 온도시간의존성을 고려한 비정상온도분포 해석을 수행하고 이를 실험결과를 통해 검증하였으며, 이와 같은 해석기법을 이용하여 프리캐스트 RC 세그먼트 및 연결부내 PPF 모르타르의 화재시 온도분포 특성을 매우 정확하게 추정할 수 있을 것으로 판단되었다.
- (5) 이 연구에서 구축한 비정상 유한요소 온도분포해석에서는 수분이동을 고려하지 않아 100~200℃ 사이의 온도구배 완화 특성을 반영하지 못했다. 향후 연성모델 구축 등의 지속적인 연구를 통해 이를 개선하고자 한다.

감사의 글

이 연구는 2011년 국토해양부 첨단도시개발사업 지원(11CHUD-C058202-01, 연구책임자: 권영진)을 통해 수행되었고, 관계자에게 감사드립니다.

References

Eurocode2 (1996). "Design of concrete structures part 1, 2 general rules-structural fire design." *DO ENV* 1992.

Han, B. C., Kwon, Y. J. and Kim, J. H. (2007). "Behavior of fire resistance engineered cementitious composites (FR-ECC) under fire temperature." *Journal of the Korea Concrete Institute, KCI*, Vol. 19, No. 2, pp. 189-197 (in Korean).

Haukur, I. and Anders, L. (2004). "Recent achievements regarding measuring of time-heat and time-temperature development in tunnel." *Safe & Tunnels, 1st International Symposium, Prague*,

- pp. 87-96.
- JSCE (2004). *Fire resistance performance of Concrete Structures*, Fire Resistance Committee Report, *Japan Society of Civil Engineers*, p. 292 (in Japanese).
- Kazunori, H. (1992). *A study on prediction of temperature rise in concrete for fire resistance test*, Ph.D. Dissertation, Kyoto University, Kyoto, Japan (in Japanese).
- Kazunori, H. (1992). *A study on the evaluation of temperature distribution in concrete subjected to fire loading*, Ph.D. Dissertation, Kyoto University, Kyoto, Japan (in Japanese).
- Kim, J. H., Park, H. G., Won, J. P. and Lim, Y. M. (2006). "Study of fire proof performance for newly developed fire protection material coated RC tunnel lining." *Proceeding of The Korean Society of Civil Engineers, KSCE*, pp. 1569-1572 (in Korean).
- Lee, D. S., Bae, J., Choi, H. and Min, I. G. (2013). "Experimental study on the fire proofing characteristic of fire resistance panel that it attaches to PSC airpit-slab." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers, KSCE*, Vol. 33, No. 2, pp. 465-473 (in Korean).
- Park, H. G., Lee, S. B., Lee, M. S. and Kim, J. K. (2003). "Research of fire-resistance characteristics for shield tunnel." *Proceeding of Annual Conference & Civil Expo, KSCE*, pp. 4801-4804 (in Korean).
- Won, J. P., Choi, S. W., Park, C. G. and Park, H. G. (2006). "Temperature distribution of wet-mixed high strength sprayed polymer mortar for fire resistance of tunnel." *Journal of The Korean Society of Civil Engineers, KSCE*, Vol. 26, No. 4C, pp. 283-290 (in Korean).