화재곡선과 PET섬유 혼입량에 따른 고강도 세그먼트 콘크리트의 화재저항성 평가에 대한 연구

최순욱¹ · 이규필^{2*} · 장수호³ · 박영택² · 배규진⁴

¹정회원, 한국건설기술연구원 SOC성능연구소 Geo-인프라연구실 선임연구원

²정회원, 한국건설기술연구원 SOC성능연구소 Geo-인프라연구실 수석연구원

³정회원, 한국건설기술연구원 SOC성능연구소 Geo-인프라연구실 연구위원

⁴정회원, 한국건설기술연구원 SOC성능연구소 Geo-인프라연구실 선임연구위원

Fire resistance assessment of high strength segment concrete depending on PET fiber amount under fire curves

Soon-Wook Choi¹, Gyu-Phil Lee^{2*}, Soo-Ho Chang³, Young-Taek Park², Gyu-Jin Bae⁴

¹Geotechnical Engineering Research Division, Korea Institute of Construction Technology, Researcher

²Geotechnical Engineering Research Division, Korea Institute of Construction Technology, Senior Researcher

³Geotechnical Engineering Research Division, Korea Institute of Construction Technology, Research Fellow

⁴Geotechnical Engineering Research Division, Korea Institute of Construction Technology, Senior Research Fellow

ABSTRACT: High strength concrete is not only vulnerable to the occurrence of spalling which generates the loss of cross-section in concrete structures but produces faster degradation in its mechanical properties than normal strength concrete in the event of fire. This study aims to evaluate fire resistance of high strength segment concrete with PET fibers mixed to prevent spalling under ISO834 (2hr) and RABT fire curve. As results, the samples without PET fibers show the concrete loss up to the depth of about 8 cm and 9.5 cm from the surface exposed to fire under ISO834 and RABT fire curve respectively. The samples mixed with PET fiber of 0.1% show no spalling under ISO834 fire curve and the spalled thickness of 6.5 cm under RABT fire curve after the fire tests. Finally, the sample mixed with PET fiber of 0.2% shows no spalling under RABT fire curve. The results indicate that the suitable amounts of PET fiber for securing fire resistance performance of this high strength segment concrete are 0.1% under ISO834 fire curve and 0.2% under RABT fire curve. However, even though spalling does not occur, it is necessary to repair the deterioration of concrete up to 4 cm from the surface exposed to fire after fire.

Keywords: Fire resistance, Segment lining, PET fiber, ISO834 fire curve, RABT fire curve

초 록: 화재 시 고강도 콘크리트는 보통강도 콘크리트보다 강도의 감소가 빠르게 나타날 뿐만 아니라 단면손실을 발생시키는 스포링(spalling)에 취약하다. 본 연구에서는 PET섬유가 혼입된 고강도 세그먼트 콘크리트를 대상으로 ISO834 화재곡선과 RABT 화재곡선 하에서 화재저항성을 평가하였다. 화재저항성을 시험한 결과, PET섬유가 혼입되지 않았을 경우에 ISO834 화재곡선과 RABT 화재곡선 하에서 콘크리트의 단면손실은 약 8 cm, 9.5 cm로 측정되었다. ISO834 화재곡선 하에서 PET섬유가 0.1% 혼입되었을 경우에는 단면손실이 발생하지 않았으나, RABT 화재곡선 하에서는 PET섬유가 0.1% 혼입되었을 경우에는 6.5 cm의 단면손실이 발생하였다. RABT 화재곡선 하에서는 PET섬유가 0.2% 혼입되었을 경우에 단면손실이 발생하지 않았다. 따라서 본 연구에서 사용한 세그먼트 콘크리트는 PET섬유의 혼입량이 0.1%일 때 ISO834 화재곡선 하에서 내화성능을 확보하였으며 RABT 화재곡선 하에서는 PET섬유의 혼입량이 0.2%일 때 내화성능을 가지는 것으로 나타났다. 그러나 단면손실이 발생하지 않았더라도 가열면으로부터 4 cm까지의 손상된 표면의 보수보강이 필요한 것으로 판단된다.

주요어: 화재저항성, 세그먼트라이닝, PET 섬유, ISO834 화재곡선, RABT 화재곡선

*Corresponding author: Gyu-Phil Lee

E-mail: freely@kict.re.kr

Received May 7, 2014; Revised May 19, 2014;

Accepted May 21, 2014

Copyright ©2014, Korean Tunnelling and Underground Space Association

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서 론

샬드터널 세그먼트는 샬드TBM의 추진을 위한 반력 지지 구조물로서의 역할과 공사 중의 안정성 확보는 물론이고 영구적인 구조체로서의 역할을 한다. 세그먼트는 구조물로서의 기능적인 측면뿐만 아니라 샬드터널의 직접공사비에서 가장 큰 비중을 차지하기 때문에 비용적인 측면에서도 매우 중요하다. 이와 같은 이유로 일본과 유럽에서는 세그먼트의 단가를 절감하고 내구성을 향상시키기 위한 고성능 세그먼트의 연구개발을 수행하였으며, 국내에서는 이규필 등(2012)이 고강도 콘크리트와 고장력 철근을 적용하여 세그먼트의 고성능화에 대한 연구를 수행하였다(Beer, 2010; Japan Research Society of Newtechnology for Shield Tunnelling, 2001; Lee et al., 2012).

샬드터널 세그먼트의 고성능화의 일환인 세그먼트 콘크리트의 고강도화는 역학적으로 구조물의 단면을 감소시켜 자재비를 경감시키는 역할을 할 뿐만 아니라 콘크리트 경화체의 조직을 치밀하게 함으로써 구조물의 내구성능을 향상시키는 효과가 있다. 그러나 콘크리트 경화체의 조직이 치밀해짐에 따라 콘크리트의 화재 저항성은 오히려 감소한다. 화재 하에서 고강도 콘크리트(High Strength Concrete)의 성능저하가 보통강도 콘크리트(Normal Strength Concrete)의 성능저하보다 더 크게 나타나는 연구 결과들은 이미 널리 알려져 있다(Khoury, 1992; Khoury et al., 2002; Kodur and Phan, 2007; Phan 1996).

화재 시 고강도 콘크리트는 강도의 감소뿐만 아니라 단면손실을 발생시키는 스폐링(spalling)의 발생에서도 취약하다. 콘크리트 경화체 조직이 치밀한 고강도 콘크리트는 화재에 의한 급격한 온도상승에 따라 내부의 수증기의 이동이 원활하지 않기 때문에 화재 가열 면으로부터 수 센티미터 내에서 수증기압의 증가에 따라 콘크리트 표면이 터져나가는 현상이 발생한다. 이것이 바로 폭발(explosive spalling)이며, 스폐링에서 가장 잘 알려져 있다. 스폐링은 폭발이외에도 박락 형태 등으로

나타나는 여러 가지 스폐링이 있다(Hertz, 2003; Khoury, 2000).

스패링은 구조물의 단면을 감소시키기 때문에 구조물의 안정성에 문제를 발생시킨다. 따라서 길이가 길고 통행이 빈번한 교통 터널에서는 화재에 의한 구조물의 안정성 확보를 위하여 내화설계가 필요하다. 내화설계 방법은 일반적으로 화재감지센서 및 스프링클러 등을 사용하는 능동적 화재보호방식(active fire protection)과 방화문 및 내화보드 등에 의한 수동적 화재저항방식(passive fire protection)이 있다. 토목 구조물에서의 내화설계는 주로 수동적 화재저항방식을 다루고 있으며, 샬드터널 세그먼트에서의 수동적 화재저항방식은 세그먼트 제작단계에서 내화섬유와 같은 스폐링 방지재를 콘크리트 내부에 혼입하는 방법과 세그먼트 시공 후 표면에 내화 보드 및 내화 스프레이를 시공하는 방법이 있다(Beard and Carvel, 2004).

본 연구에서는 수동적 화재저항방식 중 세그먼트 제작단계에서 내화섬유 중 하나인 PET섬유(Polyester fibres)를 콘크리트에 혼입하는 방법을 적용하였다. PET는 플라스틱(plastic)으로 알려져 있는 폴리머(polymer), 즉 고분자중합체의 일종으로 PP (Polypropylene)와 더불어 범용 플라스틱의 대표적인 재료이고 주로 컵이나 음료수 병인 PET병 등을 만드는 데 사용된다. PET로 만들어진 PET섬유는 내화섬유 중 가장 잘 알려진 PP섬유(Polypropylene fibres)보다 강도, 강성, 용융온도가 높은 특성을 가진다. 또한 친수성이 좋기 때문에 콘크리트의 부착강도 증진에 효과적이다. 특히 PET로 만들어진 음료수 병은 사용 후 버려지는 양이 많아 환경피해를 야기하고 있기 때문에 폐PET병을 재활용하여 PET섬유를 만드는 것은 친환경적인 건설재료의 사용 측면에서 효과가 높다(Kim et al., 2008; Won et al., 2008).

내화섬유 중 가장 잘 알려진 PP섬유는 세그먼트 콘크리트의 배합단계에서 고려되며 화재의 강도와 함수율 및 투수성을 고려하여 $1 \sim 3 \text{ kg/m}^3$ 의 범위에서 사용된다. 보통 1 kg/m^3 보다 작을 경우는 내화효과가 저하되고, 3 kg/m^3 보다 클 경우는 콘크리트의 워커빌리티

(workability)의 문제가 발생하는 것으로 알려져 있다 (Khoury, 2008). PET섬유의 사용범위 역시 PP섬유와 유사하므로 본 연구에서는 $1 \sim 3 \text{ kg/m}^3$ 범위의 PET섬유 혼입량에 따른 고강도 세그먼트의 내화특성을 파악하고자 하였다.

2. 시험체 제작 및 시험방법

2.1 PET섬유

본 연구에서 사용한 PET섬유의 제원은 Table 1과 같다. 내화섬유를 콘크리트에 혼입하여 폭렬을 방지하기 위해서는 화재에 의한 온도상승에 의하여 내화섬유가 녹아서 콘크리트 내부에 수증기의 이동통로가 형성되어야 한다. 내화섬유의 혼입은 콘크리트의 배합에서 콘크리트의 강도 및 워커빌리티에 부정적인 영향을 준다. 그러나 콘크리트의 내화성을 위해서는 필요한 재료이므로 강도 및 워커빌리티의 저하를 최소화시키면서 내화성을 확보하는 적정 배합이 필요하다. 또한 내화섬유의 적정 직경, 적정 길이, 그리고 콘크리트를 혼합할 때 섬유의 형상이 유지되는 것이 필요하다.

일반적으로 사용되는 PP섬유의 직경은 $15 \sim 32 \mu\text{m}$

이며, 길이는 $6 \sim 12 \text{ mm}$ 이다. 1 m^3 의 콘크리트의 중량이 $2,400 \text{ kg}$ 이라고 할 때, 마이크로 PP섬유의 혼입량은 $0.042 \sim 0.125\%$ 이며, 밀도가 0.91 g/cm^3 인 PP섬유의 경우는 1 m^3 당 $0.11 \sim 0.33\%$ 가 된다(Khoury, 2008). 본 연구에서 사용한 PET섬유는 길이, 직경, 인장강도에서 PP섬유와 유사하지만, 밀도와 용점(melting point)이 약 1.5배 정도 높다.

2.2 콘크리트블록 시험체

화재곡선과 PET섬유 혼입량에 따른 고강도세그먼트의 화재저항성을 조사하기 위하여 Fig. 1과 같은 콘크리트블록 시험체를 5개 제작하였다. 콘크리트블록 시험체는 내화시험을 위한 가열로 크기에 맞도록 $1,400 \times 1,000 \times 300 \text{ mm}$ (가열면 $1,100 \times 700 \text{ mm}$)로 제작하였고 이때 사용한 콘크리트 배합은 Table 2와 같다. 콘크리트 배합에서 PET섬유의 혼입량은 Table 3과 같으며, ISO834화재곡선과 RABT (60)화재곡선 하에서 PET섬유 혼입량에 따른 내화시험을 수행할 수 있도록 PET

Fig. 1. A concrete block specimen installed on the furnace

Table 1. Details of PET(Polyester) fiber

Ingredient	Polyethylene Terephthalate
Length (mm)	12
Diameter (μm)	20, 40
Density (g/m^3)	1.38
Tensile strength (g/de)	$3.4 \sim 4.0$
Elongation (%)	40
Melting point ($^{\circ}\text{C}$)	260

Table 2. Concrete mix design

Design strength (MPa)	Gmax (mm)	W/B (%)	S/a (%)	Slump (mm)	Unit weight (kg/m ³)								
					Water (W)	Cement (C)	S/P	*Binder (B)	Sand (S)	Aggre-gate (G)	AD (%)	PET Fiber	Steel fiber
60	20	28	46	80	140	350	150	500	803	947	0.9	Refer to Table 3	-

*Binder(B)=cement+blast furnace slag

섬유가 혼입되지 않은 시험체와 0.1%가 혼입된 시험체를 두 개씩 제작하고 0.2%가 혼입된 시험체는 한 개 제작하였다.

콘크리트블록 시험체의 철근 배근은 Fig. 2(a)와 같으며,

Table 3. The content amount of PET(Polyester) fiber in concrete blocks

Specimens	Fiber content amount		Comments
	%	kg/m ³	
SP 1	0	0	ISO834 fire curve
SP 2	0.1	1.38	ISO834 fire curve
SP 3	0	0	RABT fire curve
SP 4	0.1	1.38	RABT fire curve
SP 5	0.2	2.76	RABT fire curve

내화시험을 수행하는 동안 콘크리트 내부의 온도 변화를 측정하기 위하여 시스형 열전대(sheathed thermocouple)를 Fig. 2(b)와 같이 콘크리트의 중앙부에 50 mm간격으로 6개 설치하였다. Fig. 3은 정면에서 바라본 열전대 설치위치에 대한 개요도이다.

2.3 시험방법

내화시험에 앞서, 고주파 용량식(20 MHz) 콘크리트 및 모르타르 수분측정기(Kett사 HI-520)를 사용하여 각 시험체의 함수비를 측정하였다(Table 4). 사용된 수분측정기는 설정된 일정깊이에서의 함수비의 평균값을 보여준다.

(a) reinforcements

(b) thermocouples

Fig. 2. Installation of reinforcements and thermocouples before concrete pouring

Fig. 3. The position of thermocouples in a concrete block

Table 4. Moisture contents of concrete blocks

Specimens	Moisture contents
SP 1	4.8
SP 2	4.6
SP 3	4.7
SP 4	4.9
SP 5	4.8

Fig. 4. Fire curves for fire resistance test

콘크리트블록 시험체는 28일간 양생한 후 Fig. 1과 같이 실내 수평가열로에 설치하였다. 내화시험을 위한 화재곡선은 Fig. 4와 같이 RABT (Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln, 최대 온도 유지시간 60분) 화재곡선과 ISO834 (2시간) 화재 곡선을 적용하였으며, 이때 콘크리트블록 시험체 내부 온도를 Fig. 3의 열전대 위치에서 매 1초 간격으로 측정 하였다.

3. 내화시험결과

3.1 ISO834(2시간) 화재곡선 내화시험결과

PET섬유가 혼입되지 않은 SP1 시험체와 PET섬유 가 0.1% 혼입된 SP2 시험체에 대하여 ISO834 (2시간) 화재곡선 하에서 내화시험을 수행하였다. 콘크리트블록 시험체 내에 설치된 열전대로부터 얻어진 시간에 따

Fig. 5. Temperature-time relationships in SP1 specimens (ISO834)

른 온도이력곡선은 Fig. 5, Fig. 7과 같다.

PET섬유가 혼입되지 않은 SP1 시험체에서는 가열면으로부터 5 cm 지점의 온도가 시험이 시작된 후 20분에서 40분 사이에 급격히 증가하였고 107분에 가열로 내의 온도에 도달하였다. 가열로에 설치된 관찰창으로 확인한 결과, 철근노출은 31분에서 발생하였다. 그리고 가열면으로부터 10 cm 지점의 최대온도가 494°C인 것으로 판단할 때 최종 단면손실깊이는 6~8 cm 정도인 것으로 예상되었다. Fig. 6(a), (b)은 내화시험 전과 후의 SP1 시험체의 표면 형상이다. Fig. 6(b)에서 보면 내화시험 후 단면손실에 의해 철근이 노출되었으며, 시험 후 조사된 최대 단면손실깊이는 약 8 cm로 나타났다. 단면손실이 철근의 피복두께보다 깊기 때문에 철근이 ISO834 화재곡선의 최고온도에 노출되었다고 판단되며, 따라서 Fig. 6(b)와 같이 노출된 철근은 Eurocode 2 (2004)에서 제시하는 철근의 항복강도 저하 비율로 판단할 때 초기강도의 10%이하로 저하된 것으로 예상할 수 있고 보수 및 보강 시에 대한 고려가 필요할 것으로 사료된다.

PET섬유가 0.1% 혼입된 SP2 시험체에서는 가열면으로부터 5 cm 지점의 온도가 시험이 종료될 때까지 완만한 증가추세를 보였으며, 최종온도가 333°C로 측정되었다(Fig. 7). SP2 시험체에서의 최대온도는 ITA (2004)에서 제시하는 콘크리트의 강도 손실온도 기준

(a) Before

(b) After

Fig. 6. Surface of SP1 concrete block before and after fire test under ISO834 fire curve

(a) Before

(b) After

Fig. 8. Surface of SP2 concrete block before and after fire test under ISO834 fire curve

Fig. 7. Temperature-time relationships in SP2 concrete block (ISO834)

인 380°C이하로 나타났다. 따라서 유지시간이 120분인 ISO834 화재곡선 하에서 내화성능을 확보하기 위한 PET섬유의 혼입량으로 0.1%는 적합한 것으로 판단된다. 그러나 보수 및 보강의 측면에서 볼 때, 비록 내화성

능의 혼입에 의해 콘크리트 내부의 수증기가 이동할 수 있는 유로가 확보되어 스폴링이 발생하지 않았지만 적어도 가열면으로부터 30 mm 까지의 콘크리트는 수분 손실 즉 콘크리트 입자사이의 공극수(capillary water)의 에도 화학적결합수(chemically bound water)의 손실이 발생하였을 것으로 예상되므로 이에 대한 고려가 필요하다. Fig. 8(a), (b)은 내화시험 전과 후의 SP2 시험체의 표면 형상이다. 가열면의 색상이 가열 전과 비교하여 노란색 계열로 바뀐 것을 확인할 수 있었다.

3.2 RABT화재곡선 내화시험결과

PET섬유가 혼입되지 않은 SP3 시험체와 PET섬유가 0.1%, 0.2% 혼입된 SP4, SP5 시험체에 대하여 최대 온도 유지시간이 60분인 RABT 화재곡선 하에서 내화

시험을 수행하였다. 콘크리트블록 시험체 내에 설치된 열전대로부터 얻어진 시간에 따른 온도이력곡선은 Fig. 9, Fig. 11, Fig. 13과 같다.

PET섬유가 혼입되지 않은 SP3 시험체에서는 가열

Fig. 9. Temperature-time relationships in SP3 concrete block (RABT)

(a) Before

(b) After

Fig. 10. Surface of SP3 concrete block before and after fire test under RABT fire curve

면으로부터 5 cm 지점의 최대온도가 가열로 내의 온도에 도달하였고 가열면으로부터 10 cm 지점의 최대온도가 625°C인 것으로 판단할 때 단면손실깊이는 7~10 cm 정도인 것으로 파악되었다(Fig. 9). 가열면으로부터 5 cm 지점에서의 온도는 시험이 시작된 후 8분 이후부터 급격히 증가하여 16분에 1,000°C 이상이 되어 이 지점에서의 콘크리트의 단면이 완전히 손실되었음을 알 수 있다. 실제 관찰창으로 확인한 결과, 11분경에 철근이 노출된 것을 확인할 수 있었다. 가열면으로부터 15 cm 지점에서의 최대온도는 272°C로서 ITA(2004)에서 제시하는 콘크리트의 강도 손실온도 기준인 380°C 이하로 나타났다. 따라서 콘크리트의 강도가 손실된 깊이는 약 13 cm 까지 일 것으로 예상된다. Fig. 10(a), (b)는 내화시험 전과 후의 SP3 시험체의 표면 형상이다. Fig. 10(b)에서보면 내화시험 후 단면손실에 의해 철근이 노출되었으며, 최대 단면손실깊이는 약 9.5 cm로 나타났다. 단면손실이 철근의 피복두께보다 깊기 때문에 철근이 RABT 화재곡선의 최고온도에 노출되었다고 판단되며, 따라서 Fig. 10(b)와 같이 노출된 철근은 강도가 손실된 것으로 예상할 수 있고 보수 및 보강시 이에 대한 고려가 필요하다.

PET섬유가 0.1% 혼입된 SP4 시험체에서 얻어진 시간에 따른 온도이력곡선은 Fig. 11과 같다. Fig. 11에서는 가열면으로부터 5 cm 지점의 최대온도가 789°C였

Fig. 11. Temperature-time relationships in SP4 concrete block (RABT)

Fig. 12. Surface of SP4 concrete block before and after fire test under RABT fire curve

Fig. 13. Temperature-time relationships in SP5 concrete block (RABT)

으며, 가열면으로부터 10 cm 지점의 최대온도는 347°C에 도달하였다. 시간에 따른 온도이력곡선으로부터 추정할 수 있는 단면손실깊이는 약 5 cm 일 것으로 판단된다. 또한 가열면으로부터 10 cm 지점에서의 최대온도가 ITA (2004)에서 제시하는 콘크리트의 강도 손실온도 기준인 380°C 이하로 나타났기 때문에 콘크리트의 강도가 손실된 깊이는 약 9 cm 까지 일 것으로 예상된다. Fig. 12(a), (b)는 내화시험 전과 후의 SP4 시험체의 표면 형상이다. Fig. 12(b)에서 보면 내화시험 후 2, 3, 4사분면에 걸쳐서 단면손실이 발생하였고 3사분면에서 철근이 일부 노출되었으며 최대 단면손실깊이는 약 6.5

cm로 나타났다. 일반적으로 열전대가 설치된 중앙부 부근에서 단면손실이 최대로 나타나는 것과 다르게 SP4 시험체에서는 좌측면의 단면손실이 크게 발생하였고 우측면은 단면손실이 상대적으로 적게 발생하였다. 그 원인으로 대류방식으로 온도가 조절되는 가열로의 특성과 PET 섬유가 시험체 바닥면에 고르게 분포되지 않은 점을 들 수 있다. 열전대가 설치된 중앙부의 단면손실깊이를 실측한 결과, 중앙부의 단면손실깊이는 약 5 cm로 나타났다.

마지막으로 PET 섬유가 0.2% 혼입된 SP5 시험체에 대하여 내화시험을 수행한 결과, 가열면으로부터 5 cm 지점의 최대온도가 316°C였으며, 가열면으로부터 10 cm 지점의 최대온도는 173°C에 도달하였다(Fig. 13). 가열면으로부터 5 cm 지점의 최대온도는 ITA (2004)에서 제시하는 콘크리트의 강도 손실온도 기준인 380°C 이하로 나타났다. 이 기준에 근거하여 화재손상깊이를 추정해 보면 가열면으로부터 약 4 cm 까지 일 것으로 예상된다. Fig. 14(a), (b)는 내화시험 전과 후의 SP5 시험체 표면 형상이다. PET 섬유가 0.2% 혼입된 시험체에 대한 내화시험에서는 Fig. 14(b)와 같이 내화시험에 의해 표면의 폭렬은 발생하지 않았다. 또한 가열면의 색상이 가열 전과 비교하여 노란색 계열로 바뀐 것을 확인할 수 있었다. 또한 이 색상은 ISO 834 화재곡선 하에서

Fig. 14. Surface of SP5 concrete block before and after fire test under RABT fire curve

시험된 SP2 시험체의 노란색 보다 더 짙은 노란색을 띄었다.

4. 결 론

본 연구에서는 RABT 화재곡선과 ISO834 화재곡선 하에서 PET섬유의 혼입량에 따른 고강도 터널 세그먼트 라이닝의 화재저항성을 평가하기 위하여 내화시험을 수행하였고, 다음과 같은 결론을 얻었다.

내화섬유의 하나로서 사용되는 PET섬유는 PP섬유와 마찬가지로 콘크리트의 내화를 위한 재료로서 적합하였다. 또한 PP섬유에 의한 내화시험결과와의 직접적인 비교를 할 수는 없었으나, 혼입량의 범위에서 PP섬유와 유사한 것으로 나타났다.

ISO834 (2시간) 화재곡선 하에서 내화시험을 수행한 결과에서 PET섬유가 혼입되지 않은 고강도 세그먼트 콘크리트의 단면손실 깊이는 약 8 cm로 나타났으며, 또한 철근노출로 인하여 구조물의 내하력에 문제가 발생할 수 있을 것으로 예상되었다. 그러나 PET섬유가 0.1% 혼입된 고강도 세그먼트 콘크리트의 내화시험에서는 단면손실이 발생하지 않았으며, 가열면으로부터 5 cm 지점의 온도가 333°C로 측정되어 화재에 의한 손상이 구조물의 표면에서만 발생할 것으로 예상되었다. 하지만 수분손실 및 물라화학적 변화로 인한 역학적 특성 저하로 인하여 표면으로부터 4 cm 이상의 보수보강

이 필요할 것으로 판단되었다.

최대온도 유지시간이 60분인 RABT 화재곡선 하에서 내화시험을 수행한 결과에서는 PET섬유가 혼입되지 않은 경우와 0.1% 혼입된 경우에서 고강도 세그먼트 콘크리트의 단면손실 깊이가 각각 9.5 cm, 6.5 cm 정도로 나타났고 PET섬유가 혼입되지 않은 경우는 철근이 완전히 노출되었고 PET섬유가 0.1% 혼입된 경우는 일부 철근노출이 발생하였다. 또한 단면손실된 면으로부터 콘크리트 내부로 역학적 특성 저하가 발생하였기 때문에 ISO834 화재곡선 하에서와 마찬가지로 구조물의 내하력에 문제가 발생할 수 있을 것으로 예상되었다. 그러나 PET섬유가 0.2% 혼입된 고강도 세그먼트 콘크리트의 내화시험에서는 단면손실이 발생하지 않았으며, 가열면으로부터 5 cm 지점의 온도가 316°C로 측정되어 화재에 의한 손상이 구조물의 표면에서만 발생할 것으로 예상되었다. 따라서 ISO834 화재곡선 하에서와 마찬가지로 표면으로부터 4 cm 이상의 보수보강이 필요할 것으로 판단된다.

결론적으로 PET섬유 혼입량에 따른 고강도 세그먼트 콘크리트에 대하여 ISO834 화재곡선과 RABT 화재곡선 하에서 내화시험을 수행한 결과, ISO834 화재곡선의 경우에는 0.1%의 혼입량이 적절하고, RABT 화재곡선의 경우에는 0.2%의 혼입량이 적절한 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 한국건설교통기술평가원의 건설기술혁신사업인 “TBM 핵심 설계·부품기술 및 TBM터널의 최적 건설기술(과제번호: 10기술혁신E091) - 2세부과제: 고성능 세그먼트 라이닝의 개발”의 일환으로 작성되었습니다.

References

1. Beard, A., Carvel, R. (2004), THE HANDBOOK OF TUNNEL FIRE SAFETY, Thormos Telford, pp. 113-121.
2. Beer, G. (2010), “Technology innovation in underground construction”, CRC Press, pp. 299-314.
3. Eurocode 2 (2004), Design of concrete structures, Part 1-2: General rules - Structural Fire Design, EN 1992-1-2: 2004, December, Brussels, pp. 32-34.
4. Hertz, K.D. (2003), “Limits of spalling of fire-exposed concrete”, Fire Saf. J., Vol. 38, pp. 103-116.
5. ITA (2004), Guidelines for structural fire resistance for road tunnels, Working Group No. 6 Maintenance and Repair, pp. 5-9.
6. Japan Research Society of New Technology for Shield Tunnelling (2001), New Technology for Shield Tunnelling, Doboku books[in japanese]; シールドトンネルの新技術研究會(2001), “シールドトンネルの新技術”, 土木工學社.
7. Khoury, G.A. (1992), “Compressive strength of concrete at high temperatures: a reassessment” Magazine of Concrete Research, Vol. 44(161), December, pp. 291-309.
8. Khoury, G.A., (2000). “Effect of fire on concrete and concrete structures” Prog. Struct. Engng Mater. Vol. 2, pp. 429-447.
9. Khoury, G.A., Majorana, C.E., Pesavento, F., Schrefler, B.A. (2002), “Modelling of heated concrete”, Magazine of Concrete Research, Vol. 54, No. 2, pp. 77-101.
10. Khoury, G.A. (2008), “Passive fire protection of concrete structures”, Structures & Buildings, Vol. 6, SB3, pp. 35-45.
11. Kim, S.B., Nam, J.W., Yi, N.H., Kim, J.J.H., Choi, H.S. (2008), “Flexural behavior of hwangtoh concrete beams with recycled PET fiber.” Journal of the Korea Concrete Institute, Vol. 20, No. 5, pp. 619-626.
12. Kodur, V.K.R., Phan, L. (2007), “Critical factors governing the fire performance of high strength concrete systems.” Fire Saf. J., Vol. 42, pp. 482-488.
13. Lee, G.P., Park, Y.T., Choi, S.W., Bae, G.J., Chang, S.H., Kang, T.S., Lee, J.S. (2012), “An experimental study on mechanical behavior of shield segment with high-strength concrete and high-tension bar”, Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 14, No. 3, pp. 215-230.
14. Phan, L.T. (1996), Fire Performance of High-Strength Concrete: A Report of the State-of-the-Art, NISTIR 5934, National Institute of Standards and Technology, pp. 54-56.
15. Won, J.P., Park, C.G., Choi, M.J. (2008), “Bond and flexural properties of fiber reinforced concrete with recycled poly ethylene terephthalate waste”, Journal of the Korean Society of Civil Engineers, Vol. 28, No. 3A, pp. 401-406.