

폴리프로필렌 섬유 혼입량에 따른 초고성능 콘크리트의 내화 특성

Fire Resistance of Ultra-High Performance Concrete According to the Amount of Polypropylene Fiber

최정일¹ · 조기현² · 유현상² · 김희준² · 이방연^{3*}Jeong-Il Choi¹ · Ki Hyeon Cho² · Hyun Sang Yu² · Hee Joon Kim² · Bang Yeon Lee^{3*}

(Received April 29, 2020 / Revised June 18, 2020 / Accepted June 22, 2020)

The purpose of this study is to investigate the fire resistance of ultra-high-performance concrete according to the amount of polypropylene fiber. Different mixtures according to the amount of polypropylene fiber were exposed to a maximum temperature of 900°C; and explosive spalling, residual compressive strength, and ultrasonic velocity of each specimen were evaluated. Test results showed that the fire resistance can be improved by including a small amount of polypropylene fiber in ultra-high performance concrete. It was not observed that explosive spalling occur at a temperature of 900°C when the polypropylene fibers over 0.4% were included. Residual compressive strength and ultrasonic velocity decreased by 48% and 44%, respectively, compared to those at room temperature.

키워드 : 내화 성능, 초고성능 콘크리트, 폴리프로필렌 섬유**Keywords :** Fire resistance, Ultra-high performance concrete, Polypropylene fiber

1. 서론

최근 구조물은 극한 환경에서의 시공, 초고층화 및 장대화 등이 이루어지기 때문에 일반 콘크리트의 단점을 개선하거나, 장점을 극대화하여 우수한 성능을 나타내는 고성능 건설재료에 대한 요구가 증가하고 있다. 초고성능 콘크리트는 충전밀도 이론과 유변학을 바탕으로 배합의 재료 구성을 최적화하여 높은 압축강도와 고유동성을 나타내는 고성능 콘크리트 중의 하나이다(Russell and Graybeal 2013). 초기에는 압축강도 150MPa 이상인 경우만 초고성능 콘크리트로 정의하였으나 점차 강도 범위가 넓어지고 있다. 높은 충전밀도, 고유동성, 섬유보강을 통한 취성파괴의 방지는 초고성능 콘크리트가 일반 콘크리트와 구별되는 특징이다.

초고성능 콘크리트는 일반 콘크리트보다 내부가 밀실하기 때문에 고온에 노출될 경우, 폭렬에 취약할 수 있는 단점이 있다(Liang et al. 2018). 폭렬 발생 원인은 콘크리트 내부에 생성되는 수증기

층이 주된 원인이라고 보고되고 있다(Conzolazio et al. 1998; Kalifa et al. 2000; Phan 2002). 고온 환경 하에서 콘크리트 내부 공극 속의 수분은 수증기화되고, 생성된 수증기층은 고온 환경이 지속됨에 따라 더 커지게 된다. 생성된 수증기층의 압력이 콘크리트의 인장강도보다 크게 되면 콘크리트가 박리 및 비산하게 되며 이러한 현상을 폭렬이라 정의하고 있다.

Kalifa et al.(2000)은 폴리프로필렌 섬유를 혼입하면 섬유가 상호 연결되어 내부에 발생한 수증기압을 외부로 배출시키기 때문에 폭렬 발생 저감에 효과가 있다고 보고하였다. Xiao and Falkner (2006)는 압축강도가 각각 50MPa급, 80MPa급, 100MPa급인 실험체에 폴리프로필렌 섬유를 혼입하고, 900°C까지 가열하여 잔존 압축강도를 평가하였고, 400°C 이후 급격한 강도 감소가 나타난다고 보고하였다. 또한 Han et al.(2002)은 50MPa급 콘크리트에 폴리프로필렌 섬유 혼입량을 0%부터 0.1%까지 달리하여 폭렬 특성을 검토하였다. 그 결과, 잔존 압축강도가 폴리프로필렌 섬유를

* Corresponding author E-mail: bylee@jnu.ac.kr

¹전남대학교 바이오하우징연구소 박사후 연구원 (Biohousing Research Center, Chonnam National University, Gwangju 61186, Korea)²전남대학교 건축학부 학사 (School of Architecture, Chonnam National University, Gwangju 61186, Korea)³전남대학교 건축학부 교수 (School of Architecture, Chonnam National University, Gwangju 61186, Korea)

Table 1. Materials and mixture proportions(weight ratio to binder except fiber)

Mixture	Binder		Water	Filler	Silica sand	EA	SRA	HRWRA	Defoamer	Fiber(vol.%)	
	Cement	Zr								Steel	PP
PP0	0.8	0.2	0.20	0.24	0.88	0.06	0.008	0.0187	0.0006	1.5	0
PP0.1										1.4	0.1
PP0.2										1.3	0.2
PP0.3										1.2	0.3
PP0.4										1.1	0.4
PP0.5										1.0	0.5

Zr=zirconia silica fume, EA=expansive agent, SRA=shrinkage reducing admixture, HRWRA=high range water reducing agent
PP=polypropylene fiber

Table 2. Properties of fibers

Fiber	Diameter (μm)	Length (mm)	Tensile strength (MPa)	Density (g/cm ³)	Elastic modulus (GPa)
Steel	200	19.5	2,500	7.8	200
PP	12	10	850	0.91	6

0.05% 이상 혼입하면 섬유를 혼입하지 않은 것보다 10% 이상 높다는 것을 확인하였고, 폴리프로필렌 섬유 혼입이 폭발 방지 뿐만 아니라 잔존 압축강도 향상에도 도움이 된다고 보고하였다. Heinz et al.(2004)은 폴리프로필렌 섬유 혼입량을 0.3%, 0.66% 혼입하여 폭발 특성을 비교하였다. Peng et al.(2012)은 RPC(reactive powder concrete)에 폴리프로필렌 섬유를 혼입하여 폭발 특성을 검토하였으며, Xiong and Liew(2015)은 UHPC에 폴리에틸렌 섬유를 0.1%만 혼입하여도 폭발 저감에 매우 효과적이라고 보고하였다.

이와 같이 콘크리트의 폭발 현상 및 저감 대책 등에 대한 연구는 수행되었지만, 다양한 온도 대역별로 초고성능 콘크리트의 폭발 및 성능에 미치는 폴리프로필렌 섬유 혼입량에 대한 영향은 아직 연구가 미흡한 실정이다. 이에 이 연구에서는 900℃ 정도까지 온도 대역별로 고온에 노출된 초고성능 콘크리트에서 폴리프로필렌 섬유의 혼입량이 미치는 영향에 대하여 실험적으로 조사하고자 한다.

2. 실험 재료 및 방법

2.1 실험 재료 및 배합

Table 1은 이 연구에서 사용한 재료와 배합을 나타낸다. 기본 배합(PP0)은 압축강도 150MPa 급을 나타내는 초고성능 콘크리트 배합을 사용하였다(Choi et al. 2017). 결합재는 1중보통포틀랜드

시멘트와 지르코니아 실리카폼을 사용하였고, 시멘트와 지르코니아 실리카폼의 비율은 8:20이다. 지르코니아 실리카폼은 96% 이상의 실리카 성분으로 구성되어 있고, BET 방법으로 측정된 지르코니아 실리카폼의 비표면적은 7.05m²/g이다. 모든 배합의 물-결합재비는 20%로 고정하였다. 충전재는 평균 입경 2.2μm 크기를 갖는 순수 실리카를 결합재 대비 24% 혼입하였고, 유동성 향상 및 강도 증진을 위하여 사용하였다. 잔골재는 평균 입경이 0.5mm인 규사 7호를 결합재 대비 88% 혼입하였다.

팽창제는 수축량을 저감하기 위하여 결합재 대비 6% 혼입하였고, Hauyne(3CaO₃·3Al₂O₃·CaSO₄), 유리석회(CaO), 석고(CaSO₄)로 구성된 칼슘설포알루미네이트(CSA)계 팽창재를 사용하였다. 수축저감제도 수축량을 저감하기 위하여 사용하였고, 결합재 대비 0.8% 혼입하였다. 고성능 감수제는 섬유의 분산성이 최적화되는 유동상태를 확보하기 위하여 사용하였고, 소포제는 실험체 제작과정에서 의도하지 않게 발생한 기포가 역학 특성에 미치는 영향을 최소화하기 위하여 사용하였다.

보강 섬유는 폴리프로필렌 섬유와 강섬유를 사용하였고, 각 섬유의 특성은 Table 2와 같다. 폴리프로필렌 섬유는 직경 12μm, 길이 10mm, 인장강도 850MPa 및 녹는점 155℃이고, 강섬유는 직경 200μm, 길이 19.5mm 및 인장강도 2,500MPa이다. 섬유 혼입량은 모든 배합에서 전체부피비의 1.5%를 혼입하였지만, 폴리프로

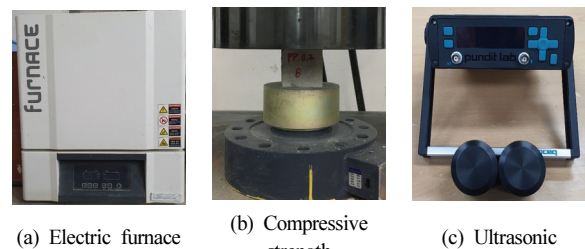


Fig. 1. Test set-up

필렌 섬유 혼입량에 따른 폭렬 특성을 파악하기 위하여 각 배합마다 폴리프로필렌 섬유 혼입량과 강섬유 혼입량을 다르게 혼입하였다.

2.2 혼합 및 양생 방법

실험체를 제작하기 위하여 분말형 재료들인 결합재와 충전재, 팽창재, 수축저감제 및 규사를 혼합기에 넣고 약 5분 동안 건비빔하였다. 건비빔이 완료된 후 배합수를 혼입하고 액상형 혼화제인 고성능감수제와 소포제를 투입하였다. 혼입한 재료들이 액상 형태의 유동상태를 나타낼 때까지 충분한 시간 동안 혼합하였고, 액상 형태의 유동상태를 나타내면 추가로 3분 동안 혼합기의 회전속도를 증가시켜 혼합하였다. 이 후, 섬유를 혼입하고 섬유의 분산성이 최적화 될 때까지 충분한 시간 동안 혼합하였다.

혼합이 완료된 후, 폭렬 성상, 잔존 압축강도 및 초음파 탐상 실험을 실시하기 위하여 한 번의 길이가 50mm인 입방형 실험체를 제작하였다. 제작한 실험체는 수분 증발을 최소화하기 위하여 플라스틱 필름으로 실험체를 덮고 2일 동안 온도(23 ± 3) $^{\circ}\text{C}$ 와 상대습도(60 ± 5)%에서 기건 양생을 하였다. 실험체를 탈형한 후 온도(23 ± 2) $^{\circ}\text{C}$ 의 양생 수조에서 재령 14일까지 수중 양생을 실시하였다.

2.3 실험 방법

양생이 끝난 실험체는 각 실험체마다 함수량이 다르기 때문에 고온 환경 하에서 폭렬 특성이 다르게 나타날 수 있다. 따라서 실험체를 가열하기에 앞서 모든 실험체의 함수율을 동일하게 조정하기 위하여 80 $^{\circ}\text{C}$ 의 건조기에서 48시간 건조하였다. 이 후, 디지털 전기로를 이용하여 실험체를 가열하였고, Fig. 1.(a)는 실험에 사용한 전기로를 나타낸다. 실험체를 가열하기 위하여 사용한 디지털 전기로는 최고 온도 1,000 $^{\circ}\text{C}$, 정밀도 $\pm 5^{\circ}\text{C}$, 분포도 $\pm 10^{\circ}\text{C}$ 를 갖는 국내 C사의 디지털 전기로이다. 가열 조건은 승온온도 40 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 로 설정하였고, 각 배합의 최고 가열 온도는 23 $^{\circ}\text{C}$, 300 $^{\circ}\text{C}$, 400 $^{\circ}\text{C}$, 500 $^{\circ}\text{C}$, 600 $^{\circ}\text{C}$, 700 $^{\circ}\text{C}$, 800 $^{\circ}\text{C}$, 900 $^{\circ}\text{C}$ 로 설정하였다. 실험체가 각각의 목표 온도에 도달하면 60분간 목표 온도를 유지하여 충분히 고온 환경에 노출될 수 있도록 한 후, 상온에서 천천히 냉각시켰다. 냉각이 완료되면 파괴 성상을 평가하였고, 잔존 압축강도 및 초음파 탐상 실험을 실시하였다. 각 배합의 잔존 압축강도는 KS L 5105에 따라 측정하였고, Fig. 1.(b)는 압축강도 실험 모습을 나타낸다. 잔존 압축강도는 가열 후 전기로에서 실험체를 빼낸 후 상온에서 식힌 후 실험을 실시하였다. 초음파 탐상은 수신자와 발신자를 실험

체의 양쪽 면에 직접 접촉하여 측정하는 방법인 직접법을 사용하여 전달속도를 측정하였고, Fig. 1.(c)는 초음파 탐상 실험에 사용한 실험 장치를 나타낸다. 초음파 전파속도 측정을 통해 실험체의 손상정도를 간접적으로 평가하였다.

3. 결과 및 분석





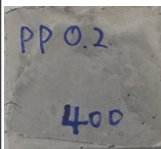
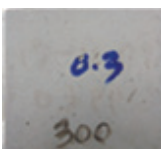

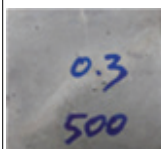

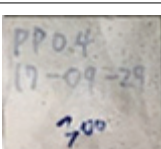
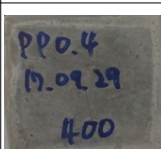
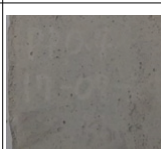
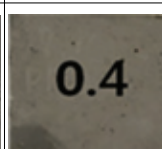
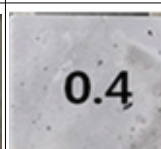
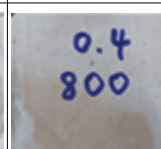
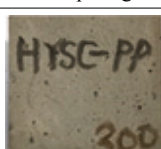

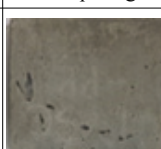
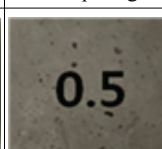
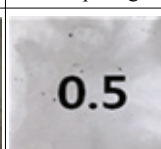
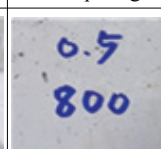
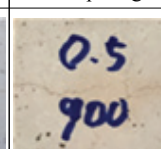
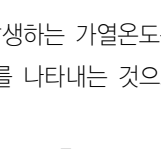
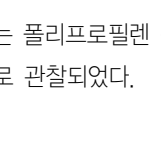
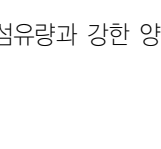
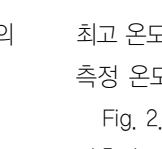
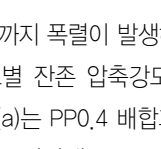
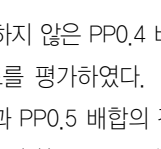
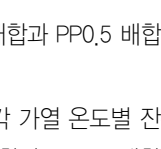
3.1 폭렬 성상

각 배합의 폭렬 성상을 통하여 폴리프로필렌 섬유 혼입량에 따른 가열 온도별 폭렬 발생을 파악하였다. Table 3은 가열 온도에 따른 각 배합의 폭렬 성상을 나타낸다. 전체적으로 초고성능 콘크리트의 폭렬 발생은 폴리프로필렌 섬유 혼입량이 증가함에 따라 폭렬이 발생하는 가열온도가 증가하는 것으로 나타났다. 이는 폴리프로필렌 섬유 혼입량이 고강도 콘크리트의 폭렬 저항 성능에 영향을 미친다는 것을 의미한다.

가열온도 300 $^{\circ}\text{C}$ 에서 폴리프로필렌 섬유를 각각 0.1%, 0.2%, 0.3%, 0.4%, 0.5% 혼입한 배합은 폭렬이 발생하지 않는 것으로 나타났다. 그러나 폴리프로필렌 섬유를 혼입하지 않은 PP0 배합은 폭렬이 발생하였으며, 실험체 중심부까지 파괴되는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 소량의 폴리프로필렌 섬유 혼입만으로도 폭렬 발생 저감에 효과가 있다는 것을 의미한다. 또한 폴리프로필렌 섬유가 매트릭스 내에서 상호간 연결되기 때문에 수증기압이 원활히 외부로 배출되어 폭렬 저감 효과가 있다는 기존 연구결과와 유사한 결과이다(Kalifa et al. 2000; Kalifa et al. 2001).

가열온도 400 $^{\circ}\text{C}$ 에서 폴리프로필렌 섬유를 0.1% 혼입한 PP0.1 배합은 중심부까지 파괴되는 완전 파괴 형태의 폭렬이 발생한 반면, PP0.2 배합, PP0.3 배합, PP0.4 배합, PP0.5 배합은 폭렬이 발생하지 않았다. 가열온도 500 $^{\circ}\text{C}$ 에서 폴리프로필렌 섬유를 각각 0.2%, 0.3%, 0.4%, 0.5% 혼입한 배합은 폭렬이 발생하지 않는 것으로 나타났다. 가열온도 600 $^{\circ}\text{C}$ 에서는 PP0.3 배합, PP0.4 배합, PP0.5 배합의 폭렬은 발생하지 않았고, 폴리프로필렌 섬유를 0.2% 혼입한 PP0.2 배합이 완전 파괴 형태의 폭렬이 발생하였다. 가열온도 700 $^{\circ}\text{C}$ 에서는 PP0.3 배합, PP0.4 배합, PP0.5 배합 모두 폭렬이 발생하지 않았다. 가열온도 800 $^{\circ}\text{C}$ 에서는 폴리프로필렌 섬유를 0.3% 혼입한 PP0.3 배합이 폭렬이 발생하였다. 실험체의 모서리 부분은 박리가 발생하였고, 실험체 중앙부까지 균열이 이어지는 파괴 형태를 나타내었다. 폴리프로필렌 섬유를 0.4% 혼입한 PP0.4 배합과 0.5% 혼입한 PP0.5 배합은 가열온도 900 $^{\circ}\text{C}$ 에서도 미세 균열은 발생하였으나, 폭렬은 발생하지 않았다. 전체적으로

Table 3. Spalling of each mixture according to temperatures

Mixture ID	300°C	400°C	500°C	600°C	700°C	800°C	900°C
PP0	Spalling 	-	-	-	-	-	-
			-	-	-	-	-
PP0.1	No spalling	Spalling	-	-	-	-	-
			-	-	-	-	-
PP0.2	No spalling	No spalling	No spalling	Spalling	-	-	-
					-	-	-
PP0.3	No spalling	No spalling	No spalling	No spalling	No spalling	Spalling	-
							-
PP0.4	No spalling	No spalling	No spalling	No spalling	No spalling	No spalling	No spalling
							
PP0.5	No spalling	No spalling	No spalling	No spalling	No spalling	No spalling	No spalling
							

폭렬이 발생하는 가열온도는 폴리프로필렌 섬유량과 강한 양의 상관관계를 나타내는 것으로 관찰되었다.

3.2 잔존 압축강도

고온 환경에 노출된 콘크리트의 압축강도는 열적 특성을 평가할 수 있는 중요한 역학 성능 중 하나이다. 이 연구에서는 측정된

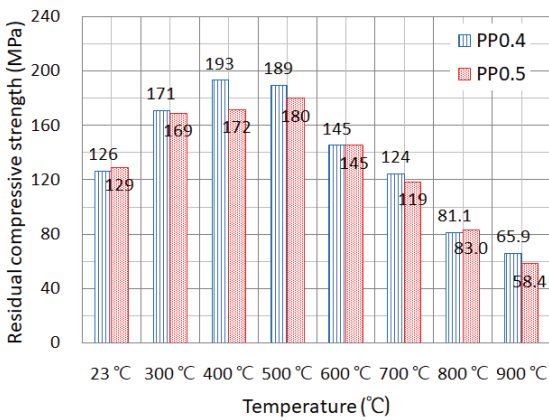
최고 온도까지 폭렬이 발생하지 않은 PP0.4 배합과 PP0.5 배합의 측정 온도별 잔존 압축강도를 평가하였다.

Fig. 2.(a)는 PP0.4 배합과 PP0.5 배합의 각 가열 온도별 잔존 압축강도를 나타내고, Fig. 2.(b)는 PP0.4 배합과 PP0.5 배합의 상온온도와 비교한 각 가열 온도에서의 상대 잔존 압축강도를 나타낸다. PP0.4 배합과 PP0.5 배합의 잔존 압축강도 성능은 유사하게 나타났고, 가열 온도가 증가함에 따라 압축강도가 증가하다

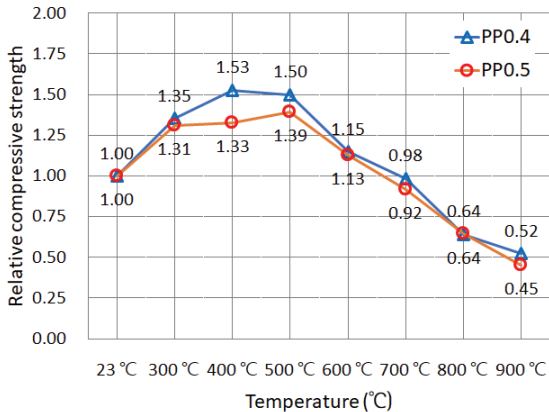
400°C ~ 500°C까지 가열온도가 올라가면 이후 점차 감소하는 것으로 나타났다. PP0.4 배합과 PP0.5 배합의 상온일 때 압축강도는 각각 126MPa과 129MPa로 나타나 섬유 혼입량에 따른 차이가 크지 않았다. PP0.4 배합은 가열 온도 300°C에서 상온에서의 압축강도보다 약 35%, 400°C에서 약 53%까지 증가하는 것으로 나타났고, 500°C부터 점차 감소하는 것으로 나타났다. PP0.5 배합은 가열 온도 300°C에서 상온에서의 압축강도보다 약 31%, 400°C에서 약 33%, 500°C에서 약 39%까지 증가하는 것으로 나타났고, 600°C보다 높은 온도에 노출된 경우 상온에 비하여 잔존 압축강도가 낮게 나타났다. 폴리프로필렌 섬유가 압축강도 60MPa에서 100MPa을 갖는 고성능 콘크리트의 내화성능에 미치는 영향을 조사한 기존 연구(Xiao and Falkner 2006)에서는 400°C까지 잔존 압축강도가 상온에서의 압축강도와 비교하여 10% 정도밖에 증가하지 않았는데 이는 기존 연구에서는 폴리프로필렌 섬유의 혼입량이 부피비로 약 0.2%로 작게 들어갔으며, 물-결합재비가 27%에서

34%로 이 연구에서 조사한 배합에 비하여 컸기 때문인 것으로 판단된다. 결과적으로 이 연구에서 잔존 압축강도는 측정된 PP0.4 배합과 PP0.5 배합의 경우 충분한 양의 폴리프로필렌 섬유 혼입을 통하여 공극 내부에 팽창된 수증기가 밖으로 배출되어 팽창압이 증가하지 않은 상태에서 양생 초기에 고온 양생을 하지 않은 실험체에서 고온에 의한 결합재들의 추가적인 화학반응에 의하여 조직이 치밀해진 것으로 판단된다.

가열온도가 500°C보다 높아지면 PP0.4 배합과 PP0.5 배합의 잔존 압축강도는 점차 감소하는 것으로 나타났다. 가열온도가 100°C씩 상승할 때, 압축강도는 PP0.4 배합이 약 31MPa, PP0.5 배합이 약 30MPa 감소하는 것으로 나타났고, 최종적으로 가열온도 900°C에서 PP0.4 배합의 압축강도는 65.9MPa, PP0.5 배합의 압축강도는 58.4MPa로 나타났다. 이는 상온일 때 압축강도와 비교하여 각각 52%, 45% 수준으로 나타났다.

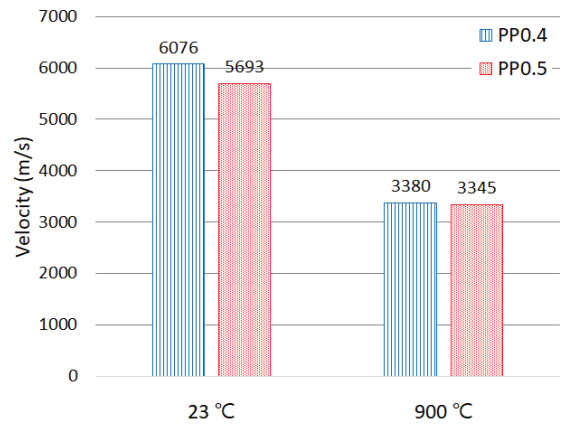


(a) Residual compressive strength

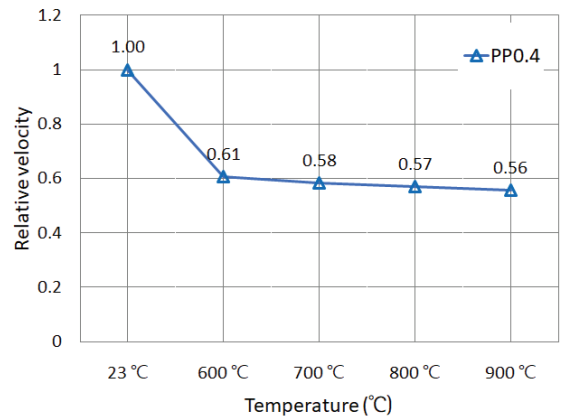


(b) Relative compressive strength

Fig. 2. Residual compressive strength according to elevated temperatures



(a) Ultrasonic velocity at 21°C and 900°C



(b) Relative ultrasonic velocity of PP0.4

Fig. 3. Ultrasonic velocity according to elevated temperatures

3.3 초음파 탐상

최고온도 900°C 온도에서 폭발이 발생하지 않은 PP0.4 배합과 PP0.5 배합의 초음파 탐상법을 실시하여 초음파 전달속도를 측정하였다. Fig. 3.(a)는 각 배합의 상온 및 900°C일 때 초음파 속도를 나타내고, Fig. 3.(b)는 PP0.4 배합의 상온부터 900°C까지의 초음파 전달속도를 나타낸다. PP0.4 배합과 PP0.5 배합의 초음파 속도는 유사하게 나타났고, 상온일 때 평균 5,885m/s, 900°C일 때 평균 3,512m/s로 나타났다. 900°C에서 PP0.4 배합의 초음파 전달속도는 3,380m/s로서 상온보다 44% 감소한 것으로 나타났고, PP0.5 배합의 초음파 전달속도는 3,345m/s로서 상온보다 41% 감소한 것으로 나타났다. 이는 잔존 압축강도에 비하여 다소 낮은 감소율이다.

잔존 압축강도와 달리 PP0.4 배합의 각 온도구간에서 초음파 전달속도는 상온에서 600°C까지 약 39%로 매우 크게 감소한 반면, 600°C부터 900°C까지 초음파 전달속도는 약 5% 정도로 감소폭이 크지 않았다. 이는 600°C 이전에 폴리프로필렌 섬유가 모두 녹아 초음파 전파 속도가 크게 감소하고, 온도상승에 따라 재료의 손상정도가 증가하고 부피팽창에 따라 밀도가 증가하였기 때문인 것으로 판단된다.

4. 결론

이 연구에서는 초고성능 콘크리트의 폴리프로필렌 섬유 혼입량에 따른 내화 특성을 조사하였다. 이를 위하여 섬유 혼입량이 다른 각각의 배합을 가열온도 900°C까지 가열한 후, 폭발 생성, 잔존 압축강도 및 초음파 전달속도를 측정하였다. 실험을 통해 도출한 결론은 다음과 같다.

- (1) 초고성능 콘크리트에 폴리프로필렌 섬유를 혼입하면 폭발 저항 성능이 향상되는 것으로 나타났다. 폴리프로필렌 섬유를 0.1%만 혼입하여도 가열온도 300°C까지 폭발이 발생하지 않은 것으로 나타났고, 0.4% 이상 혼입하면 가열온도 900°C까지 폭발이 발생하지 않은 것으로 나타났다.
- (2) 잔존 압축강도는 폴리프로필렌 섬유를 0.4% 이상 혼입하면 상온에서의 압축강도보다 가열온도 500°C까지 약 45% 증가하고, 이 후, 지속적으로 감소하는 것으로 나타났다. 900°C에서의 잔존 압축강도는 상온에서의 압축강도보다 약 51% 감소하는 것으로 나타났다.
- (3) 초음파 전달속도는 상온에서의 전달속도와 비교하여 가열온도

가 600°C일 때, 약 39%로 크게 감소하였고, 600°C부터 900°C까지는 약 5% 감소하여 감소폭이 크지 않은 것으로 나타났다.

Conflicts of interest

None.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통기술촉진연구사업의 연구비지원(19CTAP-C151882-01)에 의해 수행되었습니다.

References

- Choi, J.I., Jang, S.Y., Kwon, S.J., Lee, B.Y. (2017). Tensile behavior and cracking pattern of an ultra-high performance mortar reinforced by polyethylene fiber, *Advances in Materials Science and Engineering*, **2017**, 1–10.
- Consolazio, G.R., McVay, M.C., Rish III, J.W. (1998). Measurement and prediction of pore pressures in saturated cement mortar subjected to radiant heating, *Materials Journal*, **95(5)**, 525–536.
- Han, C.G., Yang, S.H., Lee, B.Y., Hwang, I.S., Jun, S.C. (2002). Properties of fire resistance of high performance concrete with varying contents of polypropylene fiber and specimen size, *Journal of the Korea Concrete Institute*, **14(4)**, 449–456 [in Korean].
- Heinz, D., Dehn, F., Urbonas, L. (2004). Fire resistance of ultra high performance concrete (UHPC)—Testing of laboratory samples and columns under load, In *International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, Kassel Germany, 703–715.
- Kalifa, P., Chene, G., Galle, C. (2001). High-temperature behaviour of HPC with polypropylene fibres: From spalling to microstructure, *Cement and Concrete Research*, **31(10)**, 1487–1499.
- Kalifa, P., Menneteau, F.D., Quenard, D. (2000). Spalling and pore pressure in HPC at high temperatures, *Cement and Concrete Research*, **30(12)**, 1915–1927.
- Liang, X., Wu, C., Su, Y., Chen, Z., Li, Z. (2018). Development of ultra-high performance concrete with high fire resistance, *Construction and Building Materials*, **179**, 400–412.
- Peng, G.F., Kang, Y.R., Huang, Y.Z., Liu, X.P., Chen, Q. (2012). Experimental research on fire resistance of reactive powder

- concrete, *Advances in Materials Science and Engineering* **2012**, 1–6.
- Phan, L.T. (2002). High-strength concrete at high temperature—an overview, *Proceedings of 6th international symposium on utilization of high strength/high performance concrete*, Leipzig, Germany, 501–518.
- Russell, H.G., Graybeal, B.A. (2013). *Ultra-High Performance Concrete: A State-of-the-Art Report for the Bridge Community*, Federal Highway Administration, McLean.
- Xiao, J., Falkner, H. (2006). On residual strength of high-performance concrete with and without polypropylene fibres at elevated temperatures, *Fire Safety Journal*, **41(2)**, 115–121.
- Xiong, M.X., Liew, J.R. (2015). Spalling behavior and residual resistance of fibre reinforced Ultra-High performance concrete after exposure to high temperatures, *Materiales de Construcción*, **65(320)**, e071, 1–10.

폴리프로필렌 섬유 혼입량에 따른 초고성능 콘크리트의 내화 특성

이 연구의 목적은 초고성능 콘크리트의 폴리프로필렌 섬유 혼입량에 따른 폭렬 특성을 조사하는 것이다. 이를 위하여 섬유 혼입량이 다른 각각의 배합을 가열온도 900°C까지 가열한 후, 폭렬 성상, 잔존 압축강도 및 초음파 전달속도를 평가하였다. 실험 결과, 소량의 폴리프로필렌 섬유를 혼입하여도 폭렬 저항능력이 향상되는 것으로 나타났다. 폴리프로필렌 섬유를 0.4% 이상 혼입하면 가열온도 900°C에서도 폭렬이 발생하지 않은 것으로 나타났다. 가열온도 900°C일 때, 잔존 압축강도는 상온 압축강도보다 48% 감소하고, 초음파 전달속도는 상온 전달속도보다 44% 감소하는 것으로 나타났다.