

폴리프로필렌 섬유를 혼입한 폴리머 시멘트 모르타르의 폭렬특성에 관한 연구

A Study on the Spalling Properties of Polymer Modified Cement Mortar Using Polypropylene Fiber

김민성¹

심상락²

류동우^{3*}

Kim, Min-Sung¹

Sim, Sang-Rak²

Ryu, Dong-Woo^{3*}

Master's Course, Department of Architectural Engineering, Daejin University, Pocheon-Si, Gyeonggo-Do, 11159, Korea ¹

Doctor's Course, Department of Architectural Engineering, Daejin University, Pocheon-Si, Gyeonggo-Do, 11159, Korea ²

Associate Professor, Department of Architectural Engineering, Daejin University, Pocheon-Si, Gyeonggo-Do, 11159, Korea ³

Abstract

Polymer modified cement mortar (PCM) can improve the performance of adhesion strength, flexural strength, chemical resistance, etc., compared with cement mortar, and is widely used when repairing RC structures. However, PCM causes a burst in an environment with high temperature and fire rate, which causes problems in the stability of the structure. In this study, for the purpose of developing explosive reduction PCM, the polymer mixing ratio is 2%, 4%, 6%, the fiber length is 6mm, 12mm, 6+12mm, and the PP fiber mixing rate is 0.05 Vol% and 0.1 Vol%. Furnace heating experiment (600°C, 800°C) was carried out. As a result of comparative analysis of the explosive properties, it was confirmed that the explosive reduction effect due to the fiber incorporation was insufficient when the polymer mixing amount was 6% or more.

Keywords : polymer, mortar, pcm, non-spalling, polypropylene fiber, fireproof performance, repair material

1. 서 론

1.1 연구배경

폴리머 시멘트 모르타르(이하 PCM)는 시공성 뿐만 아니라 부착강도, 휨강도, 내약품성 등의 성능을 향상시키고 열화 인자의 침입에 대한 저항성이 우수하여 RC 구조물의 보수재료로서 보편적으로 사용하고 있다. 경년 열화에 따른 피복 콘크리트 보수 시 PCM은 폴리머 디스퍼전이나 재유화형 분말수지 등의 폴리머 혼화제를 시멘트 질량 대비 5~30%의

범위에서 혼입 사용하는 것이 일반적이다.

그러나 PCM은 이러한 장점에도 불구하고 화재와 같은 고온환경에서 내화능력이 크게 저하한다고 알려져 있다. Kim et al.[1]은 PCM이 고온환경에 노출되었을 때 폴리머의 열분해로 인하여 역학적 성능이 크게 저하한다고 보고하고 있다. 또한 Jang and Ryu[2]의 연구에서도 폴리머 혼입률이 증가할수록 고온에서의 폭렬발생이 증가한 것으로 나타났다. 이는 PCM으로 콘크리트 단면보수 시 화재가 발생하면 폭렬발생으로 인해 피복이 박리, 탈락되어 구조체 내부에 고온이 전달되고 단면결손이 심한 경우 철근까지도 노출이 되어 심각한 구조내력 저하에 도달할 수 있다. 이에 따라 일본건축학회 「건물의 화재진단 및 보수·보강 방법 지침(안)」[3]에서는 콘크리트 이외의 재료를 사용할 경우 보수재료의 내화성을 콘크리트와의 일체성과 함께 고려하여야 한다고 지적하고 있다. PCM 사용의 경우에는 폭

Received : July 3, 2020

Revision received : July 29, 2020

Accepted : August 4, 2020

* Corresponding author : Ryu, Dong-Woo

[Tel: 82-31-539-1949 , E-mail: dwryu@daejin.ac.kr]

©2020 The Korea Institute of Building Construction, All rights reserved.

열발생 등의 이유로 내화상 지장이 없는 범위에서 적용하고 그렇지 않은 경우 폴리머-시멘트비 4% 이하, 바름두께 20mm 이하의 범위에서 사용하도록 권장하고 있다.

따라서 화재피해로 열화된 건축물의 보수 시에는 보수재의 양이나 보수면적에 따라 박리, 탈락 및 폭발현상 등을 종합적으로 고려하여 보수재료를 선정하는 것이 무엇보다 중요하며 특히, PCM을 보수재료로 선정할 시에는 폭발저감 방안을 모색할 필요가 있다.

한편 기존의 고강도 콘크리트에 유기섬유를 혼입하여 폭발현상을 저감시키는 연구는 다수 보고되고 있다. Maluk et al.[4]은 섬유 길이와 직경이 작을수록 폭발현상 저감에 효과적인 것으로 보고하고 있다. Won et al.[5]의 연구에서는 폴리머 혼입률을 2%로 고정한 뒤 폴리프로필렌 섬유(이하 PP 섬유)를 각각 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 Vol%를 혼입한 모르타르 배합을 대상으로 PCM의 고온성상을 평가한 결과, PP 섬유를 0.1 Vol%만 혼입하여도 폭발저감에 우수한 효과를 나타냈다.

이에 본 연구에서는 PP 섬유를 혼입한 PCM의 폴리머 혼입률, 섬유길이, 섬유혼입률을 실험인자로 선정하여 폭발 특성을 평가하고 내화성능을 확보한 최적 배합을 도출하고자 하였다.

2. 실험방법

2.1 사용재료

2.1.1 시멘트

본 실험에서 사용된 시멘트는 KS L 5201에 적합한 1종 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하여 실험을 진행하였다.

2.1.2 잔골재

본 실험에서 사용된 잔골재는 SiO₂ 순도 97%이상의 규사를 사용하였다. 규사의 경우 5호사와 6호사를 1:2비율로 혼합하여 사용하였으며 조립률은 2.34로 KS F 2502의 품질기준에 적합하였다. 잔골재의 물성은 Table 1과 같다.

Table 1. Properties of silica sand

	Mesh	mm/ micron	Specific gravity	Absorption rate (%)	FM	1:2 mix
No.5	20-30	0.85-0.6	2.61	0.91	2.94	2.34
No.6	30-60	0.6-0.25			2.04	

2.1.3 재유화형 분말수지

본 실험에서 사용된 재유화형 분말수지는 VAE(Vinyl Acetate Ethylene)계 co-폴리머를 사용하였다. 폴리머의 혼입률은 기존 프리믹스타입이 2% 전후인 점을 고려하여 본 실험에서는 2, 4, 6%로 설정하였다. VAE계 재유화형 분말수지의 특성은 Table 2와 같다.

Table 2. Properties of polymer

Property	Specification
Appearance	white
Solid content	99.3%
Ash content	13.3%
Bulk density	461kg/m ³
Particle size	Max. 4% over 400 μ m
Minimum film forming temperature	4 $^{\circ}$ C

2.1.4 폴리프로필렌 섬유

본 실험에서는 현재 범용적으로 가장 많이 사용하고 있는 PP 섬유를 사용하였다. 섬유의 직경은 25 μ m로 동일하며 길이는 6, 12mm 그리고 6mm와 12mm를 1:1비율로 혼합한 6+12mm를 길이별 인자로 설정하였다. PP 섬유의 혼입률은 선행연구결과[4,5]를 참고로 하여 0.05, 0.1 Vol%로 선정하여 실험을 진행하였다. PP 섬유의 특성은 Table 3과 같다.

Table 3. Properties of polypropylene fiber

Length (mm)	Diameter (μ m)	Specific gravity	Melting point ($^{\circ}$ C)	Tensile strength (MPa)
6.0, 12.0	25	0.91	170	300 or more

2.2 실험배합

실험에 사용된 PCM 배합표는 Table 4와 같으며 폴리머 혼입 시 폴리머 질량 1%의 소포제를 첨가하였고 PP 섬유 혼입에 따른 유동성 저하를 방지하기 위하여 시멘트 질량 0.3%의 감수제를 첨가하여 배합을 실시하였다.

시멘트와 잔골재는 1:3의 비율로 배합하였으며, W/C = 0.5로 고정하였다. 배합은 기존 연구들[2,3,5]을 참조하여

폴리머 혼입률을 시멘트 질량대비 2, 4, 6%로 외할치환하여 혼입하였고, PP 섬유는 6, 12, 6+12mm의 3가지 인자를 각각 0.05, 0.1 Vol%로 혼입하여 총 18가지로 배합하였다.

Table 4. Mix proportion of PCM

Specimens	W/C	Unit Weight (kg/m ³)			
		W	C	S	Polymer
VAE 2%					10.26
VAE 4%	0.5	256.4	512.9	1538.8	20.52
VAE 6%					30.78

2.3 실험방법

2.3.1 온도별 전기로 가열 실험

섬유혼입 PCM의 폭렬특성을 평가하기 위해 ISO 834 표준화재시간-가열온도곡선의 초기 승온조건에 해당하는 40°C/min의 승온속도로 600°C와 800°C의 목표온도 도달 후 2시간 동안 정치하여 전기로 가열실험을 진행하였다. 가열조건은 Figure 1과 같다.

2.3.2 실험인자 및 수준

실험인자 및 수준은 Table 5와 같으며, 압축강도실험 및 전기로 가열실험은 각각 기중양생 재령 28일, 56일 실험체를 대상으로 실시하였다. 전기로 가열실험 직전 중량 함수율을 측정하였다. 실험대기 실험체의 경우 래핑을 실시하여 수분증발을 차단시킨 후 전기로 가열실험 시 밀봉을 해제하여 실험을 진행하였다.

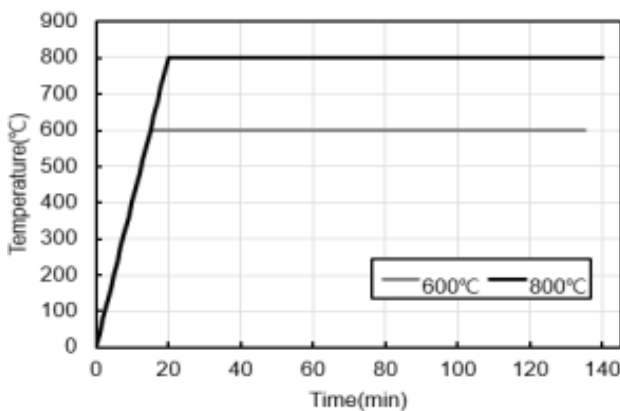


Figure 1. Heating method

Table 5. Factors and levels

Factors	Levels
Addition ratio of VAE (%)	2, 4, 6
Length of PP Fiber (mm)	6, 12, 6+12
Addition ratio of PP Fiber (Vol%)	0.05, 0.1
Heating temperature (°C)	600, 800

3. 실험결과

3.1 슬럼프

슬럼프 측정결과는 Figure 2와 같다. 슬럼프는 PP 섬유 및 폴리머 혼입에 따라 대략 130~175mm 범위로 나타났다. 폴리머의 혼입률 2% 증가 시 슬럼프 값은 약 5% 정도 증가하였으며, 이는 구형에 가까운 폴리머 입자의 불베어링 효과 및 폴리머에 함유된 계면활성제 등이 시멘트 입자의 분산을 용이하게 한 결과로 판단된다[6].

PP 섬유의 길이에 따른 슬럼프 변화는 6mm보다 12mm를 혼입하였을 때 평균 14% 감소하였으며, 특히 폴리머 혼입률 4%, 섬유혼입률 0.1 Vol%의 경우 최대 21%로 현저히 저하하였다. 또한 PP 섬유의 혼입률 증가에 따라 슬럼프 값은 약 5% 저하되는 것으로 나타났다.

3.2 압축강도

기중양생 28일 기준의 압축강도는 평균적으로 35MPa 전후로 측정되었다. 폴리머의 혼입률이 2% 증가할수록 압축강도는 약 3% 감소하였다. 이는 폴리머 혼입률이 증가할

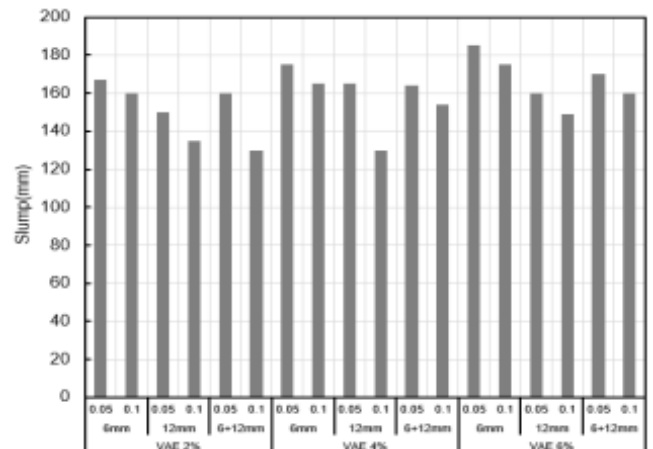


Figure 2. Results of slump test

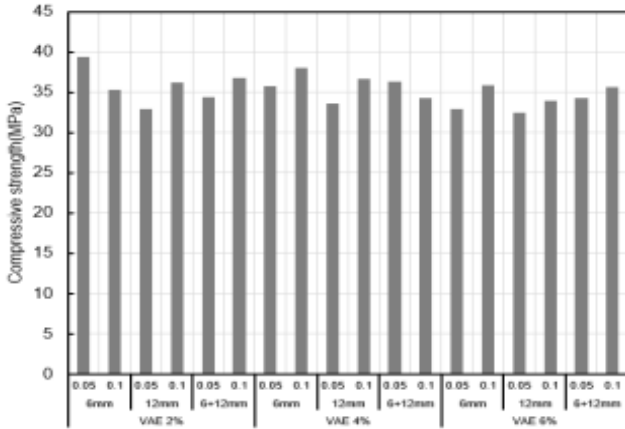


Figure 3. Results of compressive strength

수록 자체적으로 강도를 가지고 있지 않은 폴리머 필름의 형성이 증가되고 폴리머 필름이 시멘트 수화물과 골재간의 접착을 방해하여 압축강도가 감소한다는 기존의 연구와 유사한 결과를 보였다[2,7]. 섬유혼입률에 따른 압축강도 차이는 0.05 Vol%에서 0.1 Vol%로 증가할 때 약 4% 증가하는 경향이 나타났다.

한편, 동일 섬유혼입률에서 섬유길이가 6mm에서 12mm로 증가할 경우 압축강도가 약 5% 감소하였다. 이는 섬유의 혼입률이 증가함에 따라 인장강도 보강효과로 인하여 압축강도가 다소 증가했지만, 6mm 단섬유보다 12mm 장섬유의 인장보강효과가 저하하여 압축강도가 감소한 것으로 판단된다[8,9]. 압축강도 측정결과는 Figure 3과 같다.

3.3 함수율

기존의 연구들[10-12]에서는 실험체 내부의 매트릭스가 밀실하고 함수율이 높을수록 고온 시 폭발 가능성이 높은 것으로 알려져 있다. 전기로 가열실험 전 기중양생 56일 기준 각 실험체의 중량함수율을 측정한 결과는 Table 6과 같다. 본 실험에서 실험체의 중량함수율을 측정한 결과 4.2~4.7%의 중량함수율로 측정되었으며, 폴리머 및 PP 섬유혼입률에 따른 함수율의 차이는 미비하였다.

3.4 육안관찰(폭렬성상 분석)

원주형 시험체(∅100×200mm)를 대상으로 전기가열로에 의한 온도별(600, 800℃) 내화시험을 실시한 후 육안관찰을 통하여 폭렬 및 균열이 발생하지 않은 실험체를 제외하고 외관의 변화가 발생한 실험체를 대상으로 등급을 부

여하였다.

폭렬 등급의 경우 기존의 연구[2,10]를 참고하여 초기결함에 해당하는 표면균열, 폭렬로 인한 실험체의 결손 높이를 기준으로 4단계의 폭렬 등급으로 분류하였다. 폭렬 등급은 Table 7과 같으며 육안관찰 결과는 Table 8~10과 같다.

Table 6. Results of moisture content

		VAE 2%	VAE 4%	VAE 6%
6mm	0.05 Vol%	4.67	4.36	4.26
	0.1 Vol%	4.53	4.25	4.26
12mm	0.05 Vol%	4.61	4.48	4.56
	0.1 Vol%	4.62	4.29	4.41
6+12mm	0.05 Vol%	4.53	4.11	4.45
	0.1 Vol%	4.25	4.23	4.40

Table 7. Seperate of spalling grade

Grade	A	B	C	D
Spalling degree				
Division	only Crack	under 1/3 Spalling	1/3~2/3 Spalling	over 2/3 Spalling

가열온도 600℃에서는 PP 섬유의 길이, 혼입률과 관계 없이 폴리머 혼입률 2, 4%는 폭렬이 발생하지 않았다. 폴리머 혼입률 6%에서는 섬유의 길이와 상관없이 섬유혼입률 0.05 Vol%에서 일부 실험체에 폭렬이 발생하였으며 6+12mm 0.1 Vol%에서도 일부분 폭렬이 발생하였다.

가열온도 800℃에서는 폴리머의 혼입률이 높을수록 폭렬발생이 증가하였고 PP 섬유의 길이가 길고 혼입률이 높을수록 폭렬발생이 저감되는 것을 확인할 수 있었다. 이는 Maluk et al.[4]의 연구에서도 동일한 경향을 나타냈으며 상대적으로 긴 섬유가 실험체 내부의 통로 형성에 효과적인 것으로 판단된다. 폴리머 혼입률 2%와 4%의 경우 PP

Table 8. Spalling property of PCM after fire test (600°C)

600°C	VAE 2%	VAE 4%	VAE 6%
6 mm	0.05 Vol %		
	0.1 Vol %		
12 mm	0.05 Vol %		
	0.1 Vol %		
6+12 mm	0.05 Vol %		
	0.1 Vol %		

Table 9. Spalling property of PCM after fire test (800°C)

800°C	VAE 2%	VAE 4%	VAE 6%
6 mm	0.05 Vol %		
	0.1 Vol %		
12 mm	0.05 Vol %		
	0.1 Vol %		
6+12 mm	0.05 Vol %		
	0.1 Vol %		

Table 10. Spalling grade

	6 mm		12 mm		6+12 mm	
	0.05 Vol%	0.1 Vol%	0.05 Vol%	0.1 Vol%	0.05 Vol%	0.1 Vol%
600℃	VAE 2%	-	-	-	-	-
	VAE 4%	A	-	-	A	A
	VAE 6%	B	B	B	A	B
800℃	VAE 2%	B	B	A	A	B
	VAE 4%	B	A	B	A	B
	VAE 6%	D	C	B	B	C

섬유길이에 상관없이 0.1 Vol% 혼입한 실험체에서는 폭발이 확연히 저감하였고 폴리머 혼입률 6%의 경우 전 실험체에서 폭발현상을 확인하였다.

섬유길이 12mm를 0.1 Vol% 혼입했을 때 폴리머 혼입률에 상관없이 폭발이 저감되었음을 확인하였으나, 폴리머 6% 혼입 시에는 본 연구의 섬유혼입률 범위 내에서 고온시 폭발제어가 불가능한 것으로 사료된다. 한편, 본 실험에 있어서의 중량함수를 차이에 따른 폭발성상의 차이는 보이지 않았으며 폴리머와 PP 섬유, 가열온도의 영향이 큰 것으로 확인되었다.

육안관찰을 종합한 결과 가열온도가 높을수록, 폴리머의 혼입률이 증가할수록, PP 섬유의 길이가 짧고 혼입률이 낮을수록 폭발발생이 증가하는 것으로 확인되었다.

따라서 PCM의 폭발저감을 위한 폴리머 혼입률은 4% 이하, 섬유길이는 12mm를 0.1 Vol% 혼입하는 것이 바람직한 것으로 사료된다.

4. 결 론

PP 섬유혼입을 통한 PCM의 폭발저감 효과를 평가하기 위해 함수율 4.2~4.7% 범위의 실험체를 대상으로 온도별(600, 800℃) 전기로 가열실험 후 폭발성상을 비교·평가한 결과는 다음과 같다.

- 1) 폴리머 혼입률이 2% 증가할수록 슬럼프 값은 약 5% 증가, 압축강도는 약 3% 감소하였다. 폴리머 혼입률 2, 4% 범위에서는 섬유의 혼입에 따라 폭발현상이 저감됨을 확인하였다. 그러나 폴리머 혼입률 6%의 경우에는 섬유의 길이 및 혼입률에 상관없이 폭발저

감 효과가 크지 않았다. 화재발생 가능성이 높은 환경에서는 폴리머 혼입률 4% 이하의 PCM 사용이 바람직한 것으로 사료된다.

- 2) PP 섬유혼입률은 0.05 Vol%에서 0.1 Vol%로 증가함에 따라 슬럼프 값은 약 5% 감소, 압축강도는 약 4% 증가하는 경향을 보였다. 폭발성상은 0.05 Vol%보다 0.1 Vol%를 혼입하는 것이 명확하게 저감되었다.
- 3) PP 섬유길이는 6mm에서 12mm로 증가할수록 슬럼프 값 및 압축강도는 각각 약 14%, 약 5% 감소하는 경향을 보였다. 폭발성상은 PP 섬유길이 6mm보다 12mm를 혼입한 것이 폭발저감에 효과적인 것으로 나타났다.

요 약

기존 폴리머 시멘트 모르타르(PCM)는 일반적인 시멘트 모르타르에 비해 부착강도, 휨강도, 내약품성 등의 성능을 향상시킬 수 있어 철근콘크리트(RC)구조물의 보수·보강시 폭넓게 사용하고 있다. 하지만 PCM은 화재와 같은 고온 환경에서 폭발발생 가능성이 높아 구조안전성에 문제를 발생시킨다. 본 연구에서는 폭발저감 PCM 개발을 목적으로 폴리머 혼입률(2%, 4%, 6%), PP 섬유길이(6mm, 12mm, 6+12mm), PP 섬유혼입률(0.05 Vol%, 0.1 Vol%)을 실험인자로 선정하여 전기로 가열실험(600℃, 800℃)을 진행하였다. 폭발특성을 비교분석한 결과 폴리머 혼입률이 6% 이상인 경우에는 섬유혼입에 따른 폭발저감 효과를 기대할 수 없었다.

키워드 : 폭렬, 폴리머 시멘트 모르타르, 폴리프로필렌 섬유, 내화시험, 보수재료

Funding

This research was supported by grant (20AUDP B100368-06) from Urban Architecture Research Program funded by Ministry of Land, Infrastructure and Transport of Korean government.

ORCID

Min-Sung Kim, <http://orcid.org/0000-0003-2748-9910>
Sang-Rak Sim, <http://orcid.org/0000-0003-3004-0540>
Dong-Woo Ryu, <http://orcid.org/0000-0002-5240-1899>

References

1. Kim HJ, Park JY, Suh HW, Cho BY, Park WJ, Bae SC. Mechanical degradation and thermal decomposition of Ethylene-Vinyl Acetate(EVA) Polymer-modified Cement Mortar(PCM) exposed to high-temperature. *Sustainability*. 2019 Jan;11(2):1-18. <https://doi.org/10.3390/su11020500>
2. Jang KY, Ryu DW. Residual bond strength of polymer-modified mortars using re-dispersible polymer powder at elevated temperature. *Journal of the Korea Concrete Institute*. 2019 Apr;31(4):339-46. <http://doi.org/10.4334/JKCI.2019.31.4.339>
3. Yoshida M, Ikeda K, Kuroiwa S, Sakaguchi A. Outline of recommendations of diagnosis and repair methods of fire-damaged buildings. *Architectural Institute of Japan*. 2010. p. 1-217.
4. Maluk C, Bisby L, Terrasi GP. Effects of polypropylene fibre type and dose on the propensity for heat-induced concrete spalling. *Engineering Structures*. 2017 Jun;141:584-95. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.03.058>
5. Won JP, Kang HB, Lee SJ, Lee SW, Kang JW. Thermal characteristics of high-strength polymer-cement composites with lightweight aggregates and polypropylene fiber. *Construction and Building Materials*. 2011 Oct;25(10):3810-9. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.03.023>
6. Chang CI, Yoo DR, Yum HS. An experimental study on properties of polymer cement concrete with a kind of admixtures. *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance Inspection*. 2004 Apr;8(1):121-8.
7. Bae SC, Hyung WG. Properties of polymer modified mortars using re-dispersible polymer powders. *Journal of the Korea Institute of Building Construction*. 2013;13(3):235-41. <http://dx.doi.org/10.5345/JKIBC.2013.13.3.235>
8. Yang KH. Slump and mechanical properties of hybrid steel-pva fiber reinforced concrete. *Journal of the Korea Concrete Institute*. 2010 Oct;22(5):651-8. <https://doi.org/10.4334/JKCI.2010.22.5.651>
9. Karimipour A, Ghalehnovi M, Brito JD, Attari M. The effect of polypropylene fibres on the compressive strength, impact and heat resistance of self-compacting concrete. *Structures*. 2020 Jun;20:72-87. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.02.022>
10. Kim DJ, Han BC, Lee JY, Harada K, Kwon YJ. The influence of compressive strength and moisture contents on explosive spalling of concrete. *Fire Science and Engineering*. 2011 Feb;25(1):42-9.
11. Kim DJ, Lee JY, Harada K, Kwon YJ. Relation between explosive spalling and pore structure of high-strength concrete. *Proceedings of the Korea Institute of Fire Science and Engineering Conference*. 2011 Apr;2011(Spring):89-93.
12. Hertz KD. Limits of spalling of fire-exposed concrete. *Fire Safety Journal*. 2003 Mar;38(2):103-16. [https://doi.org/10.1016/S0379-7112\(02\)00051-6](https://doi.org/10.1016/S0379-7112(02)00051-6)