

섬유가 혼입된 혼합시멘트 콘크리트의 초고온에서의 폭렬특성 및 내화성능 평가

오준환¹, 천주현², 이만수³, 유성원^{4*}

Evaluation of Spalling Characteristics and Fire Resistance Fiber-Entrained Mixed Cement Concrete at Ultra-High Temperatures

Jun-Hwan Oh¹, Ju-Hyun Cheon², Man-Soo Lee³, Sung-Won Yoo^{4*}

Abstract: The goal of this study is to evaluate the bursting characteristics and fire resistance performance of mixed cement concrete containing fibers at very high temperatures. For this purpose, FA-based, Slag-based, and each mix according to the amount of fiber mixed were heated to room temperature, 150°C, 300°C, 600°C, and 900°C, and then the burst shape, compressive strength, and elastic modulus were measured and evaluated. As a result of the experiment, it was found that relatively more surface damage occurred in FA-based specimens when heated at ultra-high temperatures than in slag-based specimens, and there was a difference between the mix without fibers and the mix with fibers when heated at ultra-high temperatures, that is, at 900°C. In the mix without fibers, a decrease in strength of more than 5% occurred. In addition, the elastic modulus also showed the same phenomenon as the compressive strength, and in particular, the decrease in elastic modulus was found to be greater than the amount of decrease in compressive strength. Meanwhile, estimation equations for compressive strength and elastic modulus according to heating temperature were statistically proposed.

Keywords: Slag concrete, Spalling, Ultra-high temperature, Fire resistance, Fiber

1. 서 론

일반적으로 보통포틀랜드 시멘트를 사용한 콘크리트는 높은 강도 및 내구성으로 인해 주요 구조물의 자재로 채택된다. 그러나 콘크리트 구조물에 화재가 발생하면 심각한 피해와 사망자가 발생할 수 있으며(Razak et al., 2021), 또한 고온에 노출되면 구조물의 내구성과 안정성이 저하된다.

이러한 콘크리트는 400~500°C에서 강도의 약 50%를 잃게 되는 것으로 보고되고 있다(Long et al., 2021). 또한 고온에서 콘크리트의 폭렬현상이 자주 발생되고는 한다. 이러한 폭렬을 방지하기 위해서는 콘크리트에 적당량의 섬유를 혼입함으로써 해결할 수 있다(Kim et al., 2020). 기존 연구결과에 의하면 PP 섬유 콘크리트를 사용하면 일반 콘크리트에 비해 비용이 약 2% 증가하지만 PP 섬유 콘크리트는 급격히 상승한 온도에서 폭렬 저항을 매우 효과적으로 향상 시킨 것으로 보고하였다(Song et al., 2023; Kwon et al., 2015). 이러한 폭렬현상은

콘크리트 내부에 생성되는 기공 속 수증기압에 의하여 발생하게 되는 것으로 보고되고 있다(Conzolazio et al., 1998). Serrano et al.(2016)에 따르면 PP 섬유의 혼입은 콘크리트가 고온에 노출될 때 기공 구조의 압력을 감소시키는 효과로 인하여 콘크리트의 균열을 현저히 감소시킨다고 보고하였다.

국내의 터널용 콘크리트 세그먼트의 품질조건은 900~1,200°C 이상의 초고온까지 요구되고 있는 실정이며(Kim et al., 2005), ASTM E119(2014)에서 제시하는 내화시험 방법에 근거를 두고 있다. 또한 국내의 터널용 콘크리트 세그먼트의 품질조건에는 섬유 사용에 대한 인식 부족하여 기존에 일반적으로 사용되는 터널용 콘크리트 세그먼트 배합에는 섬유의 사용이 누락되어져 있는 실정이다. 이러한 이유로 비용과 시간이 많이 요구되는 내화실험을 수행하기 전에 실험실적으로 섬유가 포함된 새로운 내화콘크리트에 대한 초고온에 대한 내화성능에 대한 기초자료가 필요한 실정이다.

따라서 이 논문에서는 터널에 사용되는 라이닝 세그먼트 콘크리트의 초고온에서의 내화특성을 평가하고자 하였다. 압축강도 60 MPa 정도의 콘크리트 90개의 시편을 제작하고 900°C 초고온까지의 내화성능 시험을 수행하였으며, 이때 사용된 콘크리트 배합은 기존 터널 세그먼트 콘크리트에 주로 사용되는 PP 섬유보강이 없는 플라이애쉬 시멘트 콘크리트와 본 연구진이 개발한 PP 섬유보강 슬래그 시멘트 콘크리트(Yang, 2010)를 적용하였다. 또한 콘크리트의 건조상태에 따른 폭렬특성도 평가하고자 하였다.

¹정회원, 가천대학교 토목환경공학과 석사과정

²정회원, 한국건설생활환경시험연구원·건설기술연구원 공학박사

³정회원, 서울대학교 건설시스템공학과 교수

⁴정회원, 가천대학교 토목환경공학과 교수, 교신저자

*Corresponding author: imysw@gachon.ac.kr

Professor, Dept. of Civil & Environmental Engineering, Gachon University, Gyeonggi-do, 1312, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2023년 11월 30일까지 학회로 보내주시면 2023년 12월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

2. 실험 재료 및 방법

2.1 사용재료

본 연구에서는 결합재로 국내 S사에서 제조된 1종 보통포틀랜드 시멘트(OPC), KS 기준에 적합한 플라이 애쉬와 고로슬래그 미분말을 사용하였다. 잔골재로는 밀도가 2.56 g/cm³인 강모래와 굵은 골재는 밀도가 2.65 g/cm³인 쇄석을 사용하였으며, 또한 추가로 사용한 고 분말도 고로슬래그 미분말 혼합재(HBS: OPC+GGBS+CSA+CS+Sodium)를 사용하였다. HBS의 색상은 Dark White이고 비중은 3.06이며 분말도는 3,795 cm²/g이며 강열감량은 1.5% 이다. 이때 HBS는 OPC 50~60%, GGBS(고로슬래그) 25~40%, CSA(Calcium sulfoaluminate) 3~10%, CS(Calcium sulfate) 5~12%, Sodium aluminate계(알루미늄산 나트륨) 조강제는 0.2~0.5%의 혼합 비율을 가지며, HBS의 첨가재료들의 역할을 보면 GGBS는 고온열적 성능 발휘, CSA+CS는 OPC중 수산화 칼슘과 반응하여 에드링자이트를 형성하고 잉여의 CS는 GGBS를 자극하여 고강도 성능과 팽창성을 부여 및 조강제는 조기강도를 확보하는 역할을 한다.

2.2 실험 배합 및 양생 방법

Table 1은 본 논문에서 사용한 배합 및 재료를 정리하였다. 콘크리트의 유동성을 확보하기 위하여 고성능 AE감수제(폴

리카르 본산계)를 사용하였고, 배합표는 Table 1과 같다. 실험에 사용된 고 분말도 고로슬래그 미분말 혼합재(HBS)의 화학 조성을 Table 2에 나타냈으며, 폴리프로필렌 섬유에 관한 재료 특성은 Table 3에 나타냈다.

실험체는 한 변의 길이가 100mm인 정육면체 이며, 제작 후, 폭렬 형상을 육안 관찰하고 압축강도 및 탄성계수 실험을 실시하였으며, 제작한 실험체는 온도(23℃) 및 상대습도(60%)에서 양생을 진행하였으며, 실험체를 탈형한 후 60℃의 수중양생을 1일간 진행하여 증기양생을 대체하였다.

2.3 실험계획 및 방법

내화배합 콘크리트의 내화성능을 평가하기 위한 실험변수는 Table 4에 나타낸 바와 같이 콘크리트 배합3수준(FA계, Slag계(섬유첨가량 1, 2 kg/m³)), 온도5수준(상온, 150, 300, 600, 900 °C) 및 시편의 건조 상태 2수준(D: oven dry, SSD: saturated surface dry, 가열 전 3일간 건조조건 유지)이다. 실험시편들의 가열 세팅은 Fig. 1에, 사용된 1,000°C 용량의 전기로 형상은 Fig. 2에 나타냈다. 제작된 내화성능 시편 내부 중앙에 온도계측용 센서인 써머커플(Thermo-Couple)을 설치하고 5°C/min의 속도로 가열을 진행하며, 유지시간 2시간을 지속하였으며, 콘크리트 속의 온도를 측정하고 데이터 로거를 이용하여 가열 온도와 시간을 저장하였다.

Table 1 Concrete mix proportion

Sample	W/B (%)	S/a (%)	Unit Weight Ratio (kg/m ³)									
			W	OPC	FA	GGBS	HBS	S	G	Ad	PP Fiber	
N		41.3		306	47	118	-	723	1049		-	
F1	28.1		132					470	735	996	5.18	1
F2		42.5										2

OPC: Ordinary Portland Cement, FA: Fly Ash

GGBS: Ground granulated blast-furnace slag

HBS : High-performance Binder material for Segments, Ad : Super Plasticizer

Table 2 Properties of HBS

Type	Chemical composition(%)								
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	MgO	K ₂ O	SO ₃	
HBS	23.39	7.62	2.39	53.87	0.11	3.26	0.81	7.48	

Table 3 Properties of fiber

Fiber	Diameter (μm)	Length (mm)	Tensile strength (MPa)	Density (g/cm ³)	Elastic modulus (GPa)
PP	20	10	800	1.14	4

Table 4 Test variables

Concrete mix type	Heating temperature	Dry condition
N, F1, F2	23, 150, 300, 600, 900	Oven-dried condition (D) Saturated-surface dried condition (SSD)



Fig. 1 Test setup



Fig. 2 Furnace

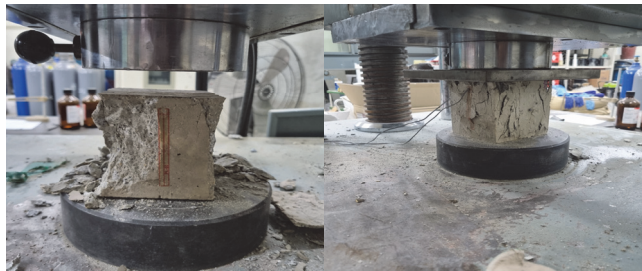


Fig. 3 Compressive strength and elasticity modulus

3. 실험결과 및 분석

3.1 가열 및 폭발 형상

제작된 실험시편에 대해 PP 섬유 혼입에 따른 가열 온도별 폭발 형상을 파악하였으며, 각 배합별 온도에 따른 폭발 형상을 Table 5에 나타냈다. 모든 배합과 온도에서 눈에 보이는 폭발은 발생하지 않았으며, 150°C는 상온과 크게 다른 부분이 육안으로 보이지 않았으며, 300°C에서는 상온과 150°C와는 다르게 콘크리트 겉면에 균열은 없었지만, 가열된 흔적은 확인할 수 있었다. 600°C에서부터 부분적인 균열이 발생하였고, 900°C부터 실험체 중앙부에서 균열이 전체적으로 이어지는 형상을 확인할 수 있었다.

PP 섬유 혼입을 무시하면 온도 및 건조에 따른 가열에 의한 콘크리트 균열 손상을 확인할 수 있었으며, 플라이애쉬 혼합 시멘트 콘크리트 시편(N계열)에서는 초고온에 근접할수록 표면 균열 등의 손상이 슬래그 혼합시멘트 콘크리트 시편(F계열)보다 상대적으로 많이 발생하였다. 시편의 건조 상태와 표면손상을 평가한 결과, 오븐건조(D계열) 시편이 표면건조 포화(SSD계열) 시편보다 균열 등의 손상이 더 적게 나타났다. 이러한 현상은 기존 연구결과인 Conzozio et al.(1998)의 폭발과 함수율의 영향인자 분석에서 확인할 수 있었다.

3.2 전기로-콘크리트 내부 온도 관계

Fig. 4는 앞의 Fig. 2에 나타난 것처럼 전기를 이용하여 가

열한 후 온도-시간 그래프로 나타냈다. 가열은 5 °C/min의 속도로 가열을 진행하였으며, 목표 온도 도달 후 유지시간 2시간을 지속하였다.

콘크리트 배합중에 써머커플(Thermo-Couple)을 내부에 넣고 제작하였으며, 가열 진행 후 데이터 로거를 사용하여 측정하였다. 그 결과 전기로 내부 온도와 콘크리트 속 내부온도의 차이가 발생하는 것을 확인하였고, 콘크리트 속 내부온도와 콘크리트 외부 온도의 차이는 온도가 상승할수록 시간이 증가함에 따라 적어지는 경향을 확인할 수 있었다.

3.3 가열 온도-압축강도 관계

Fig. 3과 같이 실험에 사용된 콘크리트의 온도에 따른 압축강도는 Fig. 5와 Table 6에 나타냈다. 150°C에서는 상온에 대비하여 10% 이내의 강도 저하가 발생하였고, 300°C는 상온에 대비하여 15% 이내의 강도 저하가 발생하였다. 300°C까지는 강도 저하가 크지 않았다. 초고온가열을 진행한 600°C부터 약 50%의 강도 저하가 발생하였고, 900°C부터 섬유를 넣지 않은 기본 배합은 강도저하가 약 80%가 발생하였으며, 섬유를 1kg/m³을 첨가한 배합은 약 73%의 강도 저하가 발생하였고, 섬유 2kg/m³ 첨가한 배합은 약 75%의 강도 저하가 발생하였다.

섬유를 혼입하지 않은 배합과 혼입한 경우의 배합에서 초고온 가열에 대한 압축강도 저하에 유의미한 결과를 확인할 수 있었다.

PP 섬유를 넣은 배합과 넣지 않은 배합에서 5%이상의 강도 차이가 발생하였고 PP 섬유를 넣은 배합이 초고온에서 강도 저하에 유리함을 확인하였으며, 섬유량의 차이에 따른 강도 저하현상은 크지 않게 나타났다.

앞의 3.1에서 얻은 표면손상 결과와 유사하게 FA계 시편보다는 Slag계 시편의 강도가 우수하게 나타났으나, 시편의 건조상태의 영향은 반대로 오븐건조 시편보다는 표면건조 포화 시편의 강도가 약간 더 크게 나타났다.

3.4 가열 온도-탄성계수 관계

가열 온도가 증가함에 따라 탄성계수는 Fig. 6과 같이 감소하는 경향을 확인할 수 있었다. 600°C는 상온에서의 탄성계수보다 90% 이상 감소하는 경향을 보였으며, 900°C는 95%

이상 감소하는 경향을 확인할 수 있었다. 압축강도가 감소폭에 비해 탄성계수의 감소폭이 더 큰 것으로 나타났다.

3.5 가열온도-압축강도와 탄성계수 회귀분석

가열한 실험체를 통해 측정된 압축강도 및 탄성계수 데이터를 상업용 통계 패키지(Statistical Package for the Social Sciences: SPSS)의 비선형 회귀분석을 수행하였다. 압축강도에 따른 결과는 식 (1), Fig. 7과 같다.

Table 5 Surface shape of specimen after heating

ID	150°C	300°C	600°C	900°C
N_D				
F1_D				
F2_D				
N_SSD				
F1_SSD				
F2_SSD				

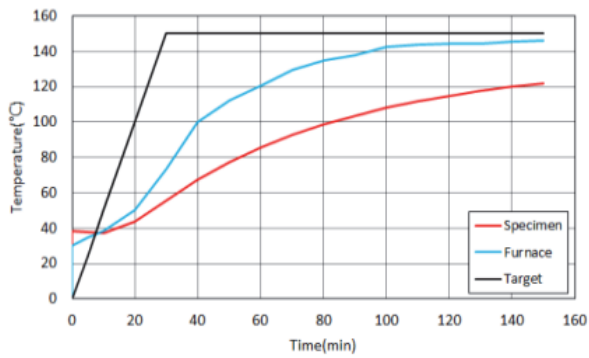
Rule of specimen name: (N, F1, F2)_(D, SSD)

N: Fly ash concrete in Table 1, F1: Slag concrete with 1% fiber in Table 1, F2: Slag concrete with 2% fiber in Table 1

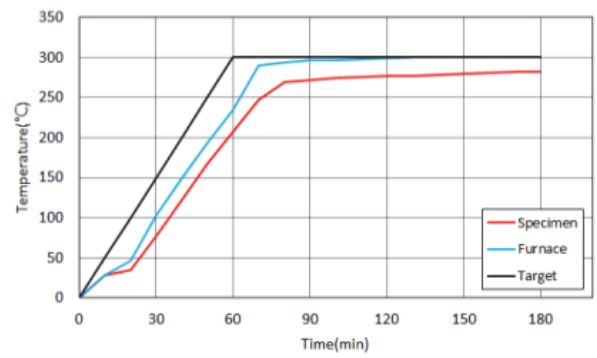
D: Oven dry, SSD: Saturated surface dry

Table 6 Compressive strength at temperatures

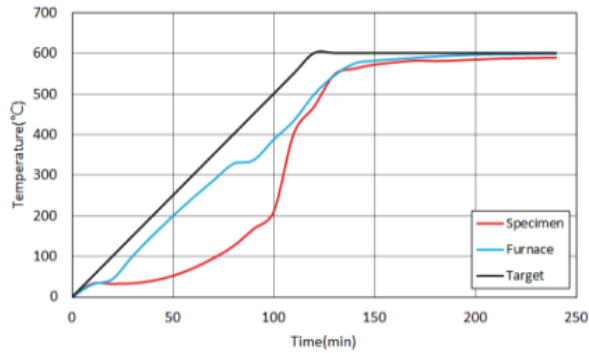
ID	Compressive Strength at Temperatures (MPa)				
	23°C	150°C	300°C	600°C	900°C
N_D	63.22	52.69	42.70	31.41	12.06
N_SS	65.72	57.96	53.15	34.40	13.20
F1_D	61.54	52.69	46.49	31.41	14.40
F1_SS	61.94	57.88	53.92	33.01	15.96
F2_D	63.83	54.26	50.32	27.11	15.31
F2_SS	64.13	58.84	51.52	32.86	15.56



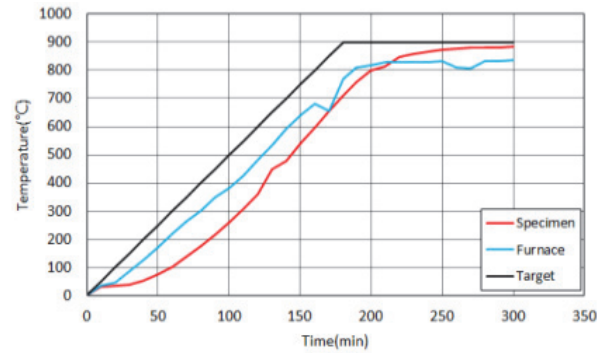
(a) 150°C



(b) 300°C



(c) 600°C



(d) 900°C

Fig. 4 Temperature history of high strength concrete

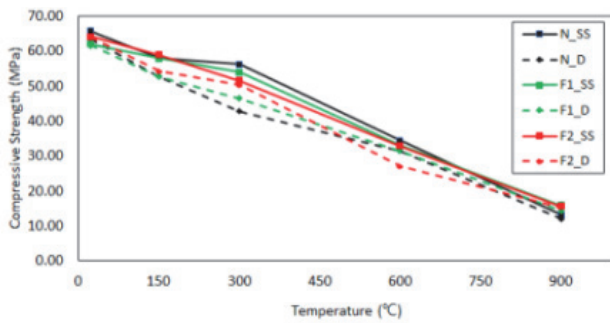


Fig. 5 Temperature-compressive strength

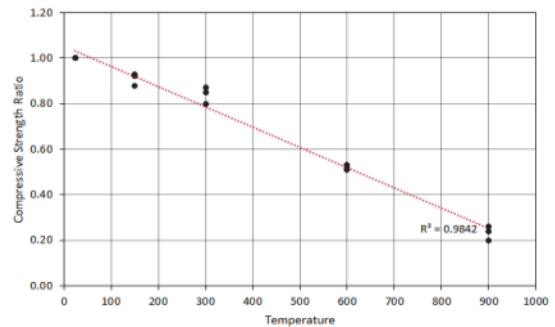


Fig. 7 Relationship between temperature and compressive strength ratio

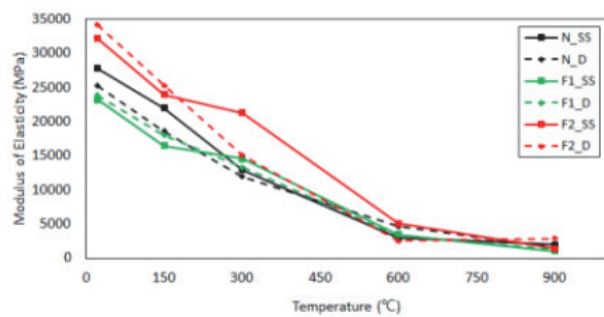


Fig. 6 Temperature-modulus of elasticity

$$P/P_0 = (t + 273)^a + b \quad (1)$$

여기서 P는 가열 온도에서의 압축강도(MPa), P₀는 상온에서의 압축강도(MPa), t는 가열 온도(°C)이며, a와 b는 SPSS 분석 결과 a=-0.001, b=1.295과 같이 산출되었다. 산출된 선형회귀 모델의 R(상관계수) 제곱 값은 0.98이며, 우수하게 나타났다.

한편, 탄성계수에 따른 결과도 분석하였으며, 결과는 식 (2), Fig. 8과 같다.

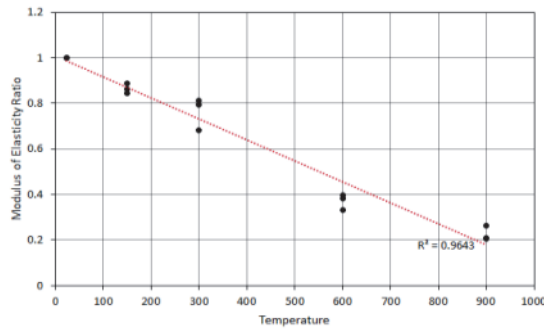


Fig. 8 Relationship between temperature and modulus of elasticity ratio

$$\sqrt{E/E_0} = (t + 273) * a + b \quad (2)$$

여기서 E는 가열 온도에서의 탄성계수, E0는 상온에서의 탄성계수, t는 가열 온도(°C)이며, a와 b는 SPSS 분석 결과 a=-0.001, b=1.26과 같이 산출되었다. R(상관계수) 제곱 값은 0.96으로 우수하게 나타났다.

4. 결론

이 논문에서는 섬유가 혼입된 혼합시멘트 콘크리트의 초고온에서의 폭발특성 및 내화성능을 평가하였다. 이를 위하여 혼합시멘트 종류 및 섬유 혼입량에 따른 각각의 배합을 상온 ~ 900°C의 온도로 가열한 후, 폭발 형상, 압축강도 및 탄성계수를 측정 및 분석하였다. 본 연구의 결론을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 플라이애쉬 혼합 시멘트 콘크리트 시편에서는 초고온에 근접할수록 표면균열 등의 손상이 슬래그 혼합시멘트 콘크리트 시편보다 상대적으로 많이 발생되었다. 즉, 섬유의 영향을 무시한다면 슬래그 혼합시멘트가 플라이애쉬 혼합시멘트보다 더 우수한 내화성능을 발휘함을 파악할 수 있었다.
- 2) 오픈건조 시편이 표면건조포화 시편보다 균열 등의 손상이 더 적게 나타났다.
- 3) 플라이애쉬 혼합시멘트 시편보다는 슬래그 혼합시멘트 시편의 압축강도가 우수하게 나타났으며, 오픈건조 시편보다는 표면건조포화 시편의 강도가 약간 더 크게 나타났다.
- 4) 탄성계수 역시 압축강도와 동일한 현상이 나타났으며, 특히 압축강도가 감소하는 양에 비해 탄성계수의 감소 폭이 더 큰 것으로 나타났다.
- 5) 가열온도에 따른 압축강도와 탄성계수의 추정식을 통계적으로 제안하였으며, 추정식은 우수한 상관성을 가지는 것으로 나타났다.

6) 본 논문에서는 실험실적으로 국한된 내화콘크리트에 대하여 가열 온도별 압축강도, 탄성계수, 폭발현상을 확인하였으나, 향후 다양한 광물성 혼화재료가 첨가된 콘크리트 배합의 내화특성에 대한 심도 있는 연구가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 TBM 굴진향상을 위한 연속굴착 기술개발 사업(과제번호: RS-2022-00144188)의 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

1. Abd Razak, S. N., Shafiq, N., Nikbakht, E. H., Mohammed, B. S., Guillaumat, L., and Farhan, S. A. (2022), Fire performance of fly-ash-based geopolymer concrete: Effect of burning temperature on mechanical and microstructural properties, *Materials Today: Proceedings*, 66, 2665-2669.
2. Amran, M., Huang, S. S., Debbarma, S., and Rashid, R. S. (2022), Fire resistance of geopolymer concrete: A critical review, *Construction and Building Materials*, 324, 126722.
3. ASTM international (2014), Standard Test Methods for Fire Tests of Building Construction and Materials. ASTM E119-14.
4. Choi, J.-I., Cho, K. H., Yu, H. S., Kim, H. J., and Lee, B. Y. (2020), Fire Resistance of Ultra-High Performance Concrete According to the Amount of Polypropylene Fiber, *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, 8(2), 212-218. (in Korean)
5. Consolazio, G. R., McVay, M. C., and RISH III, J. W., (1998), Measurement and prediction of pore pressures in saturated cement mortat subjected to radiant heating, *ACI Materials Journal*, 95(5), 525-536.
6. Kim, M. S., Sim, S. R., and Ryu, D. W. (2020), A Study on the Spalling Properties of Polymer Modified Cement Mortar Using Polypropylene Fiber, *Journal of the Korea Institute of Building Construction*, 20(4), 305-311. (in Korean)
7. Kim, H. G., Park, K. W., Yoon, M. O., and Lee, C. W. (2005), A study on the deterministic temperature-time curves and required resistance times by fire model for assessment of fire resistance of tunnel structures, *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, 7(2) 165-176. (in Korean)
8. Kim, S. K., and Kim, W. S. (2015), Performance Evaluation of High Strength Concrete with Composite Fibers in Accordance with High Temperature, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 19(6), 63-71. (in Korean)
9. Kwon, K. S., and Ryu, D. W. (2015), Fire Resistance Performance Test of High Strength Concrete by Type of Mineral Admixture, *Journal of the Korea Institute of Building Construction*, 15(6), 597-605. (in Korean)
10. Lee, J. H. (2013), Evaluation on Fire Resistance of Ultra-High-Strength Concrete Depending on Aggregates and Fibers

Type, *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, 13(6), 091-097. (in Korean)

11. Long, W. J., Xie, J., Zhang, X., Fang, Y., and Khayat, K. H. (2021), Hydration and microstructure of calcined hydrotalcite activated high-volume fly ash cementitious composite, *Cement and Concrete Composites*, 123, 104213.
12. National Fire Protection Association. (2006), Standard Methods of Tests of Fire Resistance of Building Construction and Materials. from ASTM E119-14. 2006:4-299.
13. Serrano, R., Cobo, A., Prieto, M. I., and de las Nieves González, M. (2016), Analysis of fire resistance of concrete with polypropylene or steel fibers, *Construction and Building Materials*, 122, 302-309.
14. Song, C., Zhang, G., Lu, Z., Li, X., and Zhao, X. (2023), Fire resistance tests on polypropylene-fiber-reinforced prestressed concrete box bridge girders, *Engineering Structures*, 282, 115800.
15. Razak, S. N. A., Guillaumat, L., and Shafiq, N. (2021), Effect of fire flame exposure on basalt and carbon fiber-reinforced concrete. In ICCOEE2020: Proceedings of the 6th International Conference on Civil, Offshore and Environmental Engineering (ICCOEE2020) 573-579.
16. Yang, H. H., Kim, W. J., Park, D. C., Lee, S. H., and Kim, D. H., (2010), An Evaluation of Fire Resistance and Mock-up Test of the Alumino-Silicate Ceramic Panel, *Korea Concrete Institute, Korea*, 22(2), 181-182. (in Korean)

Received : 09/07/2023

Revised : 09/18/2023

Accepted : 09/20/2023

요 지 : 본 연구는 섬유가 혼입된 혼합시멘트 콘크리트의 초고온에서의 폭발특성 및 내화성능을 평가하는 것이 목표이다. 이를 위해 FA계, Slag계 및 섬유 혼입량에 따른 각각의 배합을 상온, 150°C, 300°C, 600°C, 900°C의 온도로 가열한 후, 폭발 형상, 압축강도 및 탄성계수를 측정 및 평가하였다. 실험 결과, Slag계 시편보다 FA계 시편이 초고온 가열에서 표면손상이 상대적으로 많이 발생한 것으로 나타났으며, 초고온 가열 즉 900°C에서 섬유를 혼입하지 않은 배합과 혼입한 배합의 차이가 발생하였는데, 그 결과 섬유를 혼입하지 않은 배합에서 약 5% 이상의 강도 저하가 발생하였다. 또한 탄성계수 역시 압축강도와 동일한 현상이 나타났으며, 특히 압축강도가 감소하는 양에 비해 탄성계수의 감소 폭이 더 큰 것으로 나타났다. 한편 가열온도에 따른 압축강도와 탄성계수의 추정식을 통계적으로 제안하였다.

핵심용어 : 슬래그 콘크리트, 폭발, 초고온, 내화, 섬유
