



혼화재 조합에 따른 UHPC의 기존연구 고찰 및 강도특성 평가

정현주¹ · 김승기¹ · 김우석²

국립금오공과대학교 건축공학과 박사수료¹, 국립금오공과대학교 건축학부 교수²

State-of-the-Art Research and Assessment on Strength Properties of Ultra-High-Performance Concrete (UHPC) according to Admixtures Combination

Jung, Hyunjoo¹ · Kim, Seungki¹ · Kim, Woosuk²

¹Ph.D. Candidate, Department of Architectural Engineering, Kumoh National Institute of Technology, Gumi, Korea

²Professor, School of Architecture, Kumoh National Institute of Technology, Gumi, Korea

Abstract: Ultrahigh-performance concrete (UHPC) has higher cement and binder contents than normal-strength concrete for exhibiting high compressive strength. Research has been continuously conducted to reduce the amount of cement in UHPC and to confirm that fly ash and granulated blast-furnace slag (GBFS) can be employed as alternatives for cement without reducing the strength by up to 20% and 50%, respectively. Herein, changes in strength and fluidity were analyzed by replacing cement with fly ash and GBFS in the UHPC mix. The compressive strength of a fly ash-substituted specimen was the lowest, and a GBFS-substituted specimen showed a strength similar to that before substitution. Overall, the flexural strength of the GBFS and fly ash-substituted specimens were lower than before substitution. However, their fluidity was higher, requiring less superplasticizers.

Key Words: Ultra-High Performance Concrete, steel fiber, flyash, BFS, structure, material

1. 서론

초고성능 콘크리트(Ultra-High Performance Concrete: UHPC)는 물리적 특성이 우수하고 내구연한이 일반강도 콘크리트와 비교해서 매우 길기 때문에 일반강도 콘크리트와 비교해서 생애주기비용(Life Cycle Cost: LCC) 측면에서 우수하며, 이와 같은 측면에서 건축분야의 시멘트량 저감에 기여할 수 있을 것으로 사료된다. 여기서 단위부피당 시멘트 사용량은 기존 시멘트 대비 다소 많은 편이나, 내구성 측면에서는 동일한 시

멘트량을 저감할 수 있기 때문이다.

건축분야에서 시멘트량을 저감시키기 위해 산업부산물, 폐기물 등을 활용하고 있는데 이 연구는 초고성능 콘크리트 분야에서도 동일하게 적용되고 있다. 본 연구에서는 실리카흄, 고로슬래그, 플라이애시 등의 혼화재를 사용한 콘크리트 배합에 관한 기존 연구를 조사하여 시멘트량 저감에 따른 콘크리트의 다양한 특성 변화 양상을 분석하고 혼화재 조합에 따른 초고성능 콘크리트의 강도특성을 비교·분석하여 초고성능 콘크리트의 시멘트량 저감 연구의 기초자료로 활용하고자 한다.

Corresponding author: Kim, Woosuk

School of Architecture, Kumoh National Institute of Technology,
 61 Daehak-ro, Gumi, Gyeongbuk, Korea.

Tel: +82-54-478-7591, Fax: +82-54-478-7609

E-mail: kimw@kumoh.ac.kr

Received March 28, 2024 / Revised April 8, 2024 /

Accepted April 9, 2024

· 본 논문에 대한 토의를 2024년 05월 31일까지 학회로 보내주시면 2024년 06월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

2. 기존 연구 고찰

고로슬래그와 플라이애시는 일반강도 콘크리트부터 초고성능 콘크리트까지 다양하게 적용되고 있으며, 배합에 따른 차이는 있으나 치환율에 따른 물리적, 화학적 특성에 관한 연구가 다양하게 수행되었다. 초고성능

Table 1. Summary of Main Parameters Used as UHPC Mix Design Factors

Classification	Strength (MPa)			Binder Type				Reinforced Fiber	
	Comp.	Tensile	Flexural	Silica Fume	Fly Ash	GBFS	Others	Steel Fiber	Others
Kim et al. (2016)	80	6 (split)	X	X	X	X	ZrSF	○	X
Yang et al. (2019)	200	9	X	X	X	X	Zirconium	○	X
Bae et al. (2019)	120	X	X	X	X	X	Zirconium, Basalt	○	X
Park et al. (2008)	75-110	X	X	○	X	X	Meta kaolin	X	X
Kang et al. (2008)	190	X	20~35	○	X	X	X	○	X
Kang et al. (2009)	180-200	X	16~60	○	X	X	X	○	X
Choi et al. (2015)	80-200	7~12	10~20	○	X	X	X	○	X
Beushausen and Dittmer (2015)	120	7 (split)	5	○	X	X	X	X	X
Chen et al. (2021)	120-160	X	20~33	○	X	X	X	○	X
Zhang et al. (2021a)	130	9	X	○	X	X	X	X	PP, PE
Kim et al. (2017)	100-140	25~28	X	○	X	○	LCD glass	○	X
Kim et al. (2006)	100~130	X	X	○	○	X	X	X	X
Kang et al. (2010)	95~150	X	X	○	X	○	Anhydrite	X	X
Koh et al. (2013)	200	16	40	○	X	X	Zirconium	○	X
Guo & Han (2014)	160	6~9	X	○	X	X	Silica flour	○	X
Wang et al. (2017)	110~128	X	X	○	○	X	RCBM ⁴⁾	X	X
Yalçinkaya and Yazıcı (2017)	150	X	X	○	○	○	X	○	X
Meng et al. (2017)	100~160	X	X	○	○	○	X	○	X
Wu et al. (2018)	120	X	36	○	○	X	Slag, Nano-particle	○	X
Meng and Khayat (2018)	140~160	7~8	9~26	○	○	X	X	○	PVA
Li et al. (2019)	115	4~18	X	○	X	○	Limestone powder	X	PE
Ahmad et al. (2019)	140	18 (split)	X	○	X	X	Natural pozzolan	○	X
Alsalmán et al. (2020)	150	X	X	○	○	X	X	○	X
Ahn et al. (2021)	145~170	X	X	○	X	○	Anhydrite	X	X
Li & Zhang (2021)	140~155	10~13	X	○	X	X	X	○	PP
Zhang et al. (2021b)	130	7	X	○	○	X	X	X	PP
Zhou et al. (2021)	180	X	26	○	○	X	X	○	PVA
Test	120	X	15	○	○	○	Silica flour	○	X

※ GBFS: Granulated Blast Furnance Slag, ZrSF: Zirconia Silica Fume, PP: Polypropylene fiber, PE: Polyethylene Fiber, RCBM: Recycled Coral Based Materials, PVA: Polyvinyl Alcohol Fiber

콘크리트 분야의 경우 높은 강도를 유지하기 위해 마이크로 단위의 폐기물 및 재활용 재료를 사용하거나 나노재료를 적용하여 시멘트량 저감에 따른 특성저하를 보완하는 연구도 다양하게 수행되고 있다.

UHPC 배합에 사용한 혼화재의 종류에 따른 기존 연구를 Table 1에 나타내었다. Kim et al. (2016)은 지르코니아 실리카흙으로 실리카흙을 대체하여 고강도 콘크리트의 강도를 유지하고 유동성을 증가시켰다.

Yang et al. (2019)은 지르코늄을 혼화재로 사용하여 180 MPa급 강섬유보강 초고강도 콘크리트 배합을 진행하고 재료특성을 분석하였다. 강섬유혼입으로 인한 인장응력 작용 시 균열제어 효과가 있는 것을 확인하였으

며, 직접인장강도 결과와 3점 하중재하 실험의 인장강도가 유사한 결과를 얻었다는 것을 확인할 수 있었다.

Bae et al. (2019)은 120 MPa급 초고성능 콘크리트를 활용한 프리캐스트, 프리스트레스트 콘크리트 데크 슬래브를 제작하여 성능을 검증하였다. 실험에 사용된 배합은 실리카흙, 지르코늄을 혼화재로, 강섬유를 혼입 섬유로 사용하여 120 MPa 배합을 진행하였다.

Park et al. (2008)은 실리카흙과 메타카올린을 혼화재로 사용하였다. 메타카올린 15% 혼입이 가장 높은 강도였으며, 실리카흙 10%가 이와 유사한 결과를 보였다.

Kang et al. (2008)은 실리카흙을 사용한 강섬유보강 초고성능 콘크리트의 휨거동을 평가하였다. 축방항

타설의 경우 예측모델과 유사한 휨강도를 보였으며, 최대인장강도가 타설방향의 영향을 크게 받는 것으로 판단하였다.

Kang et al. (2009)은 섬유혼입률에 따른 초고강도 콘크리트의 인장연화거동을 연구하였다. 혼입률이 증가할수록 휨인장강도가 향상되지만 연화거동은 다소 취약적인 것으로 나타났다. 섬유혼입률과 임계균열폭의 함수로 인장연화모델을 제안하였다.

Choi et al. (2015)은 강섬유 및 실리카흙을 사용한 80~200 MPa 콘크리트의 배합을 진행하였다. 일정 수준까지는 섬유혼입률로 인장강도가 향상되나, 혼입률이 증가할수록 압축강도의 증가에 따라 인장강도가 다소 완만하게 감소하는 것으로 나타났다. 이를 통해, 150 MPa 까지 높은 정확도를 가진 인장강도 추정식을 제안하였다.

Beushausen and Dittmer (2015)은 골재 유형에 따른 콘크리트의 강도와 탄성계수를 분석하였다. 안산암과 화강암 골재와 실리카흙을 사용하여, 30~120 MPa의 콘크리트 배합을 진행하였다. 화강암골재가 높은 압축강도를 보였으며, 탄성계수는 안산암골재가 높게 나타났다.

Chen et al. (2021)은 초고성능 콘크리트의 강섬유 혼입률에 따라 염화물피해를 분석하였다. 56일 염화물 피해를 받은 후 압축강도와 결합강도가 각각 10, 20% 감소하였으며, 휨인장강도는 편차가 크게 나타났다.

Zhang et al. (2021a)은 PP섬유혼입률 및 분포에 따른 초고성능 콘크리트의 폭열특성을 분석하였다. 동일한 혼입률에서는 높은 중횡비가 폭열을 저감하였으며, 혼입률이 증가하면 중횡비가 감소하여도 충분한 성능을 발현하였다. 0.3~0.4 vol% 혼입률과 300~600 사이의 중횡비를 권장하였다.

Kim et al. (2017)은 LCD 폐유리를 잔골재로 사용하여 150MPa급 초고강도 콘크리트의 강도특성을 분석하였다. LCD폐유리 치환율이 증가할수록 슬럼프플로우가 감소하였으며, 공기량은 증가하는 양상을 나타내었으나 잔골재를 치환하여 사용하기 위해서는 추가연구가 필요하다고 제안하였다.

Kim et al. (2006)은 고로슬래그 시멘트를 사용한 초고성능 콘크리트의 강도특성을 분석하였다. 혼화재료를 치환하는 경우 고로슬래그 시멘트를 사용하는 것이 고성능감수제의 사용량을 감소시킬 수 있고, 장기강도 역시 우수하게 나타났다는 것을 규명하였다. 고로슬래그 시멘트와의 혼입 시 실리카흙 10%, 플라이애시 10%에서 가장 높은 압축강도 130 MPa를 얻었다.

Kang et al. (2010)은 150 MPa 초고성능 콘크리트의 재료역학특성을 분석하였는데 고로슬래그, 실리카흙, 무수석고를 혼화제로 사용하였다. 150 MPa의 초고성능 콘크리트 배합에는 단위 시멘트량 1,030~1,150

kg/m³이 필요하며 12~14%의 물-결합재비가 적당하다고 제안하였다.

Koh et al. (2013)은 실리카흙과 지르코니아 실리카흙을 사용한 초고성능 콘크리트의 물리적 특성을 분석하였다. 유동성 향상과 목표 압축강도를 확보하여 고성능 감수제의 양을 50~70% 감소시킬 수 있음을 확인하였다.

Guo and Han (2014)은 160 MPa급 초고성능 섬유보강 콘크리트를 사용하여 분절형 박스거더를 제작하여 휨거동을 분석하였다. 강섬유 혼입률 2%의 박스거더와 강섬유혼입률 1%와 종방향 철근을 배근한 박스거더의 거동이 동일하게 관찰되었다. 초고성능 콘크리트의 높은 압축강도로 분절면의 파괴상태까지 응력이 여유를 가지고 있어 분절요소로서의 안정성을 확인하였다.

Wang et al. (2017)은 재활용 산호기반 재료를 적용하여 환경친화적인 초고성능 콘크리트를 제작하고 특성을 분석하였다. 마이크로 산호 15%와 산호 모래 30%를 혼입하였을때, 압축강도가 크게 감소하지 않았으며, UHPC의 자기수축을 감소시키는데 효과적이며, 염화물저항성도 향상시켰다. 마이크로 산호와 산호 모래가 시멘트나 모래를 적절히 대체하면 환경영향을 감소시킬 수 있을 것으로 판단하였다.

Yalçinkaya and Yazıcı (2017)은 광물질 혼화재를 사용한 UHPC의 초기수축을 분석하였다. 고로슬래그 50%, 플라이애시 30% 대체수준에서 150MPa 이상을 확보하여 시멘트함량을 낮춰 친환경 UHPC 생산이 가능하다는 것을 제안하였다.

Meng et al. (2017)은 UHPC를 비용 최적화 관점에서 연구를 수행하였다. 몰바인더비는 0.2를 최적값으로 제시하였으며, 모래와 바인더의 부피비율은 1:1로 제시하였는데 이때 강섬유 혼입률은 2%로 정하였다. 혼화재 중에서는 플라이애시가 비용대비 효율적인 혼합재인 것으로 나타났다.

Wu et al. (2018)은 나노입자를 사용한 UHPC의 정적, 동적 특성을 분석하였다. 나노입자, 플라이애시를 함께 사용하면 강섬유를 혼입한 UHPC와 유사한 압축강도를 얻을 수 있었으나, 휨강도에서는 뚜렷한 차이가 발생하였다. 미세구조 분석결과 SCM과 나노입자의 결합으로 UHPC 매트릭스의 다공성이 감소하여 더 조밀한 미세구조를 달성할 수 있었다.

Meng and Khayat (2018)은 하이브리드섬유를 혼입한 UHPC의 특성을 분석하였다. 강섬유 혼입률 2%에서 0.5%를 PVA로 치환하거나 1% 이하를 후크형태 강섬유로 변경하면 압축강도, 인장강도, 인장소산에너지가 모두 증가하였으나, 후크형태 강섬유가 1%를 초과하면 섬유뭉침현상이 관찰되었다. 동일한 섬유조합에서 자기수축 역시 감소하였으나, 감수제는 강섬유만

사용하는 경우보다 증가하였다.

Li et al. (2019)은 40~120 MPa의 시멘트 복합체 성능기반 설계 연구를 수행하였다. 압축강도 증가에 따라 인장응력이 증가한 반면 변형능력은 감소하였다. 실험결과를 기반으로 PBD방법의 개념을 제안했으며, SHCC(Strain Hardening Cementitious Composite)를 설계하는 경제적인 방법 확립에 기여하였다.

Ahmad et al. (2019)은 천연 포졸란 중 하나인 마이크로 실리카를 사용하여 콘크리트의 특성을 분석하였다. 재령에 따라 천연 포졸란을 혼입한 UHPC의 강도가 치환되지 않은 UHPC와 유사한 압축강도를 보였다. 천연 포졸란을 함유하면 연성이 향상되었으며, 건조수축이 감소한 결과를 나타내었다. 천연 포졸란을 사용함으로써 UHPC의 기계적 특성의 심각한 손실 없이 시멘트 소비를 줄일 수 있음을 확인하였다.

Alsalmán et al. (2021)은 UHPC의 경제적인 배합 연구를 수행하였다. C급 플라이애시를 사용한 경우 압축강도가 가장 높게 나타났으며, 바인더 함량이 1160kg/m³인 배합은 강섬유에 상관 없이 150 MPa의 일정한 압축강도를 나타내었다.

Li and Zhang (2021)은 PP섬유와 강섬유를 혼입한 UHPC의 내화특성과 강도특성을 분석하였다. PP섬유와 강섬유를 통해 폭열에 의한 파편발생을 완벽히 방지하였으며, 강섬유의 브릿지 효과로 시편의 열손상이 다소 감소한 결과를 확인할 수 있었다.

Zhang et al. (2021b)은 섬유를 혼입한 SHUHPC의 내화특성과 기계적 특성을 분석하였다. PE섬유는 용융점이 낮으나 PP섬유보다 우수한 내화특성을 제공하지 못하였다. SHUHPC의 파괴방지를 위해서는 최소 0.3 vol.%의 PP섬유가 필요했다. PP섬유와 PE섬유는 인장 특성에서는 시너지효과가 나타나지 않았으며, 압축강도 영향 역시 크게 나타나지 않았다.

Zhou et al. (2021)은 PVA 섬유를 혼입한 UHPC의 매트릭스 특성을 분석하였다. PVA 섬유를 나노실리카로 코팅하여 결합강도를 향상시켰다. 코팅 전보다 코팅 후 UHPC의 압축강도를 10%, 휨강도를 26%이상 증가시키는 결과를 얻었다.

UHPC 배합의 선행연구 조사한 결과, 실리카흙, 플라이애시, 고로슬래그가 혼화재로 주로 적용되고 있다. 그 외에는 지르코늄이 강도저하를 최소화하면서 유동성을 향상시킬 목적으로 활용하였지만 환경적인 문제가 있어 연구가 줄어들었다. 플라이애시는 30%, 고로슬래그는 50% 수준까지 시멘트와 치환하여도 UHPC의 강도를 유지한 결과들이 확인되었다.

보강섬유의 경우 대부분 강섬유를 사용하고 있으며, 다른 섬유를 적용한 경우에도 강섬유만큼의 인장 성능 향상을 확인하지 못해, 현재는 대부분 강섬유를 사용하면서 합성섬유를 함께 사용하여 복합섬유 사용

에 따른 시너지효과나 폭열저감을 위해서만 제한적으로 사용되고 있었다.

본 연구에서는 이를 참고하여 기존에 사용하던 UHPC의 시멘트를 플라이애시, 고로슬래그로 치환하여 강도특성의 변화를 분석하고, 유동성을 측정하여 시멘트량을 저감시킨 강섬유를 혼입한 최적의 UHPC 배합을 도출하고자 한다.

3. 혼화재 조합에 따른 강도특성 평가

3.1 실험 변수 설계 및 실험체 제작

UHPFRC의 시멘트량을 저감하기 위해 기존문헌을 참고하여 플라이애시와 고로슬래그를 시멘트와 치환하여 사용하였으며, 실리카흙의 배합량은 동일하게 적용하였다(Park et al., 2019). 시멘트량 치환에 따라 배합의 유동성을 확보하기 위해 고성능 감수제의 양은 배합에 따라 변경하면서 실험을 진행하였다. 잔골재는 5호사 크기의 규사를 사용하였다. 기존 문헌에서는 높은 강도를 위해 다양한 입자크기의 규사를 혼합하여 사용하였으나, 본 연구에서는 1가지 규사를 특정하여 사용하고 실리카플로어를 충전재 형태로 사용하면서 규사 일부를 치환하여 사용하였다. 강섬유는 길이에 따른 S1, S2 2가지를 혼합하여 사용하였는데, 직경은 0.2 mm로 동일하며 길이는 S1은 16.3 mm, S2는 19.5 mm인 것을 사용하였다. 강섬유 혼입 시 S1과 S2를 2:1비율로 사용하였으며, 타설시 함께 투입하였다. 실험에 사용된 배합은 Table 2와 같으며, 배합에 사용된 재료의 특성은 Table 3~Table 7에 나타내었다.

실험배합은 물, 섬유, 감수제를 제외한 재료를 건비법 진행 후 물과 감수제를 투입하고 마지막으로 강섬유를 혼입하였다. 바인더 조합 및 실리카플로어 사용에 따른 슬럼프 플로워의 저하를 고려해 감수제의 양을 다르게 설정하였다(Park and Cho, 2021).

실험은 배합완료 후 굳지 않은 콘크리트 상태에서 미니 슬럼프 플로워를 측정하였으며, 경화된 콘크리트에서는 압축강도 및 휨강도를 측정하였다. 공시체는 KS F 2401에 따라 압축강도, 휨강도 공시체를 제작하였으며, 압축강도 측정은 KS F 2405 콘크리트 압축강도 시험방법에 따라 하중제어방법으로 진행하였다. 휨강도 및 등가휨강도는 KS F 2566 섬유 보강 콘크리트의 휨성능 시험 방법에 따라 2점가력으로 변위제어 방법으로 실험을 진행하였다. 포스트 피크는 최대하중의 70%까지 하중이 감소하면 실험을 종료하였다.

3.2 미니 슬럼프 플로워

Fig. 1은 미니 슬럼프 플로워 평균치를 나타낸 것이다. 규사만 혼입한 U1, UF1, UG1 결과를 통해 바인더 조

Table 2. Mix Proportion of UHPC

ID	Water	Binder				Sand	sf	SP	Steel Fiber	
		Cement	SF	Flyash	GBFS				S1	S2
U-1	200	800	200	0	0	1400	0	40	51.7	25.8
U-2	200	800	200	0	0	1120	280	45	51.7	25.8
UF-1	200	600	200	200	0	1400	0	40	51.7	25.8
UF-2	200	600	200	200	0	1120	280	45	51.7	25.8
UG-1	200	400	200	0	400	1400	0	35	51.7	25.8
UG-2	200	400	200	0	400	1120	280	40	51.7	25.8

※ SF: Silica Fume, GBFS: Granulated Blast Furnace Slag, sf: Silica Flour, SP: Superplasticizer

Table 3. Chemical Composition and Physical Properties of Binder

Classification	Density (g/cm ³)	Fineness		L.O.I (%)	Chemical Composition (%)					
		Retention (%)	45µm		Specific Surface (cm ² /g)	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO
Cement	3.15	-	-	3,200	-	-	-	-	-	-
Silica Fume	2.20	1.0	-	-	1.04	96.32	0.41	0.08	0.09	0.55
Flyash	2.20	18	-	3.46	1.80	60.80	-	-	-	1.30
GBFS	2.90	-	-	4.17	0.39	37.49	0.16	11.58	36.22	3.02

※ L.O.I: Loss of ignition

Table 4. Physical Properties of Aggregates

Classification	Density (g/cm ³)	Fineness Modulus	Unit Weight (kg/m ³)	Absorption Ratio (%)
Quartz Sand	2.6	1.23	1,610	0.1

Table 5. Physical Properties of Filler

Classification	Density (g/cm ³)	Grain size (µm)	Chemical Composition (%)				
			SiO ₂	MgO	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃
Silica Flour	1.21	12.4	99.8	0.02	0.02	0.06	0.07

합에 따른 영향을 보면, 플라이애시를 치환하여 사용하면 U1은 19 mm, UF1은 19.5 mm로 유동성이 3% 정도 증가하는 결과가 나타났다. 고로슬래그를 사용한 경우에는 고성능 감수제의 양을 바인더 대비 0.5% 감소시킨 경우에도 유사한 유동성 결과를 보였다. 유동성 측면에는 고로슬래그+실리카흙 > 플라이애시+실리카흙 > 실리카흙 순으로 나타났다.

실리카플로어를 사용하면 유동성의 저하가 조금 발생했으며, 이를 고려해 바인더 대비 0.5%의 고성능 감수제를 추가로 투입하였다. 이는 UG1 배합의 고성능 감수제 저감량과 동일하게 증가시키는 방법으로 진행하였다. 실리카플로어를 사용하면서 배합의 고성능 감수제의 양을 동일하게 증가시켰을 때, 플라이애시를 사용한 UF2가 가장 높은 슬럼프 플로우 결과를 보였

Table 6. Chemical Properties of Superplasticizer

Classification	Ingredient	Type	Specific Gravity
Superplasticizer	Polycarbonate	Fluid	1.11

Table 7. Physical Properties of Steel Fibers

Classification	Density (g/cm ³)	Tensile Strength (MPa)	Diameter (mm)	Length (mm)
S1	7.8	2,500	0.2	16.3
S2			0.2	19.5

다. 고로슬래그가 그 다음으로 우수한 유동성 결과를 보였다. Fig. 1의 슬럼프 플로우 실험 결과의 형태를 보면, U1, UF1의 경우 다른 배합에 비해 표면이 거칠게 관찰되었다.

3.3 압축강도

콘크리트 압축강도 실험 결과는 아래 Figs. 2~7과 Table 8과 같다. 실리카플로어 유무에 따른 강도를 비교하면, 실리카플로어를 적용한 실험체가 바인더 조합에 상관없이 강도가 20~30%까지 높은 결과를 보였다. 이는 규사보다 미세한 실리카플로어를 사용한 영향으로 결과적으로 높은 압축강도 120 MPa 수준을 달성하면서 고성능 감수제의 양이 증가하였다. U1, UF1 UG1 모두 유동성 차이로 고성능 감수제량이 감소하였

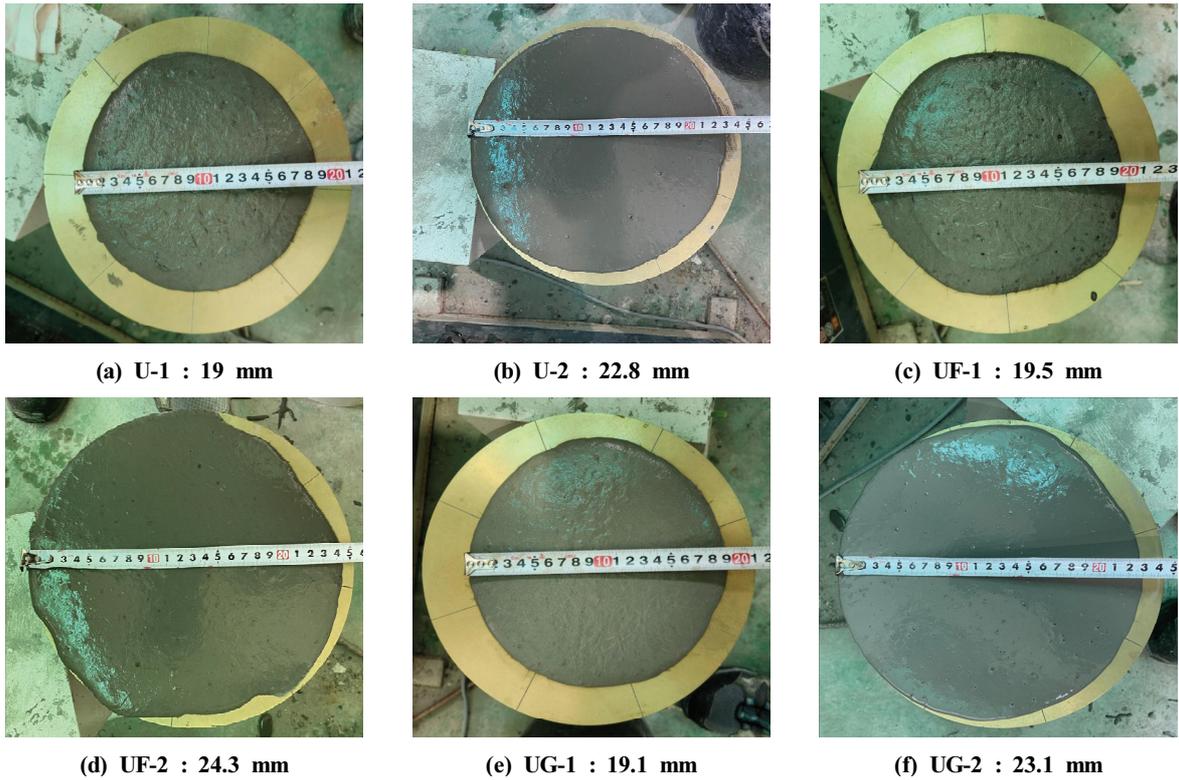


Fig. 1 Slump Flow Test Results

으나, 그에 비해 강도차이는 크게 나타나 다른 배합에 비해 강점이 부족한 것으로 판단된다.

바인더 조합에 따른 압축강도 결과에서는 플라이애시를 사용한 UF1이 가장 낮은 결과를 보였으며, 고로슬래그를 치환한 UG1은 실리카흄만 사용한 U1과 유사한 결과를 보였다. UF1은 U1에 비해 유동성이 다소 향상되었으나, 그에 비해 강도하락은 10%정도 관찰되어 플라이애시 치환량을 줄여서 U1과 유사한 유동성을 확보하면서 강도 감소를 최소한으로 한다면 시멘트량 저감 배합으로 활용 가능할 것으로 판단된다. UG1은 U1 대비 고성능 감수제의 양을 13% 저감하면서 유동성 유지가 가능했으며, 압축강도 역시 거의 감소하지 않았다. 고로슬래그는 플라이애시에 비해 시멘트량 감소에 매우 효과적인 혼화제로 판단된다. 최대응력에서의 변형률 ϵ_{cu} 은 U, UG, UF 순으로 크게 나타났다. 최대압축강도 양상과 비슷하며, 실리카플로어를 사용한 실험체가 ϵ_{cu} 이 상대적으로 작게 나타났다. UF, UG는 실험체는 실리카흄을 치환하면서 ϵ_{cu} 이 보통강도 콘크리트와 유사한 결과를 보이고 있다. U 실험체는 변형률 0.003~0.004 부근에서 기울기가 급격히 상승하였으며, UF 실험체는 이보다 낮은 0.002 부근에서 급격한 기울기 증가가 관찰되었다. UG-1의 경우 U와 유사한 지점에서 급격히 상승하였으나, UG-2는 실험체 별로 기울기 상승 지점이 다르게 관찰되었으나, ϵ_{cu} 이

큰 편차를 보였다.

3.4 휨강도

Figs. 8~13과 Table 9는 콘크리트 휨강도 실험결과를 나타낸 것이다. 압축강도가 낮게 나타났던 실리카플로어를 사용한 실험체는 휨강도 역시 낮은 경향을 보였다. 그러나 실리카플로어를 사용하지 않은 실험체 중 가장 높은 압축강도 결과를 보였던 U1이 가장 낮은 휨강도 결과를 보였다. 다음으로 UF1과 UG1 순으로 크게 나타났는데, 이는 압축강도 결과와는 반대의 양상이다.

실리카플로어를 사용한 실험체의 결과를 보면, U2 > UG2 > UF2 순서로 높은 휨강도 값을 보였는데, 실리카플로어를 혼입하지 않은 실험체의 바인더 조합에 따른 결과와 반대의 양상을 보인 것이다. 실리카흄만 사용한 실험체는 실리카플로어 사용으로 휨강도가 50%이상 향상되었으나, 플라이애시와 고로슬래그를 사용한 실험체는 실리카플로어 사용으로 10% 이내의 강도가 증가하는 결과를 보였다. 강섬유 혼입으로 모든 실험체에서 연성거동이 나타나면서 포스트피크를 확인하였다. 최대하중 이후에도 실험을 지속하였으며, 50% 이내로 감소하였음에도 완전히 파괴된 실험체는 관찰되지 않았다. 휨강도의 차이는 보였으나, 포스트 피크 양상은 유사한 결과를 보였다. 대부분의 시험체에서 첫

Table 8. Compressive Strength Test Results

	Compressive Strength, f_{ck} (MPa)				Strain (mm/mm)			
	1	2	3	Avg.	1	2	3	Avg.
U-1	106.5	105.7	97.7	103.3	0.0040	0.0048	0.0049	0.00457
U-2	125.6	136.0	129.0	130.2	0.0045	0.0040	0.0031	0.00387
UF-1	90.7	101.6	93.3	95.2	0.00255	0.00261	0.00290	0.00269
UF-2	117.4	118.7	116.7	117.6	0.00264	0.00241	0.00274	0.00260
UG-1	90.2	94.8	95.7	93.6	0.00398	0.00325	0.00374	0.00366
UG-2	129.9	124.3	134.4	129.5	0.00473	0.00254	0.00184	0.00304

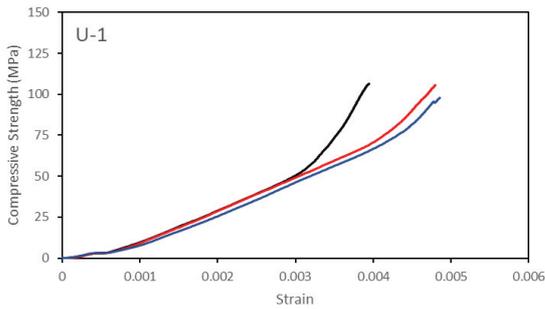


Fig. 2 Compressive Strength vs Strain Curve of U-1

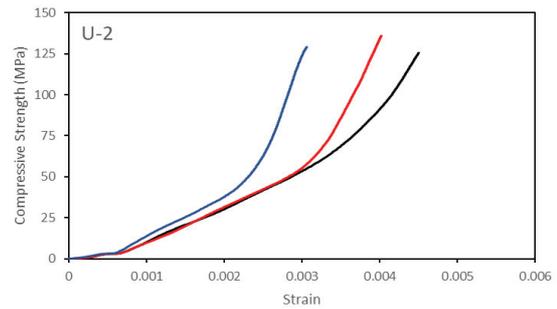


Fig. 3 Compressive Strength vs Strain Curve of U-2

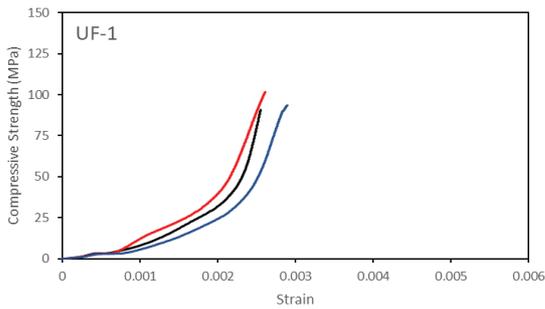


Fig. 4 Compressive Strength vs Strain Curve of UF-1

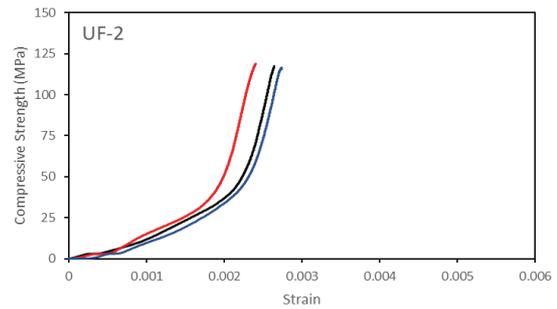


Fig. 5 Compressive Strength vs Strain Curve of UF-2

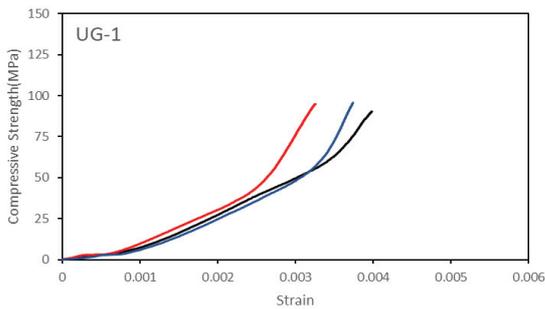


Fig. 6 Compressive Strength vs Strain Curve of UG-1

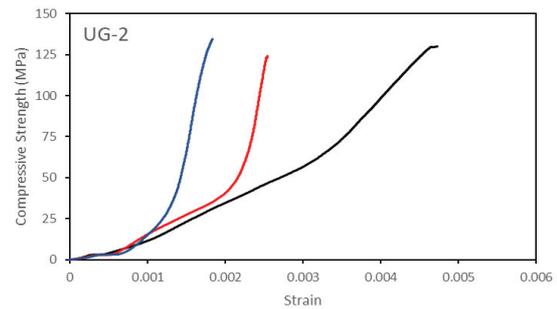


Fig. 7 Compressive Strength vs Strain Curve of UG-2

피크하중과 최대하중이 일치하지 않는 양상을 보였다.

Table 9의 등가휨강도 결과를 보면, 배합 간의 차이가 휨강도 결과와 유사하지만, 실리카흙을 사용한 U는 강도 차이에 비해 휨인성이 다른 배합보다 상대적으로 크게 나타났다. U-1, UF-1, UG-1을 비교해 보면, 휨강도는 UG-1 > UF-1 > U-1 순으로 크게 나타났으

나, 등가휨강도는 U-1이 UF-1 보다 크게 계산되었다.

4. 결론

본 연구에서는 초고성능 콘크리트 배합 관련한 선행논문들을 분석하여 혼화재 및 치환율을 결정하였으며, 이

Table 9. Flexural Strength Test Results

	Flexural Strength, f_r (MPa)				Equivalent Flexural Strength, f_r (MPa)			
	1	2	3	Avg.	1	2	3	Avg.
U-1	9.35	8.35	8.36	8.69	6.66	6.61	6.59	6.62
U-2	15.43	12.98	13.51	13.97	9.93	9.93	9.91	9.92
UF-1	9.92	11.21	10.63	10.58	5.35	5.53	4.53	5.14
UF-2	9.70	11.43	12.40	11.18	6.61	7.31	6.87	6.93
UG-1	11.24	12.97	12.19	12.13	6.73	8.62	7.28	7.54
UG-2	13.78	12.55	12.51	12.94	9.11	8.40	7.79	8.43

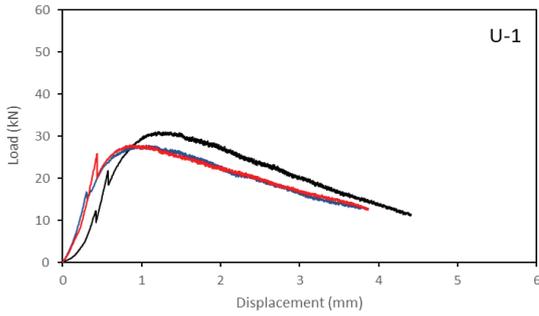


Fig. 8 Load vs Displacement Curve of U-1

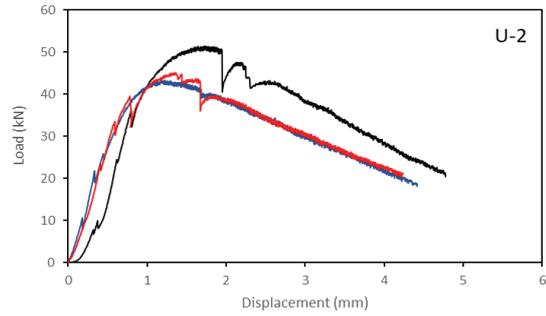


Fig. 9 Load vs Displacement Curve of U-2

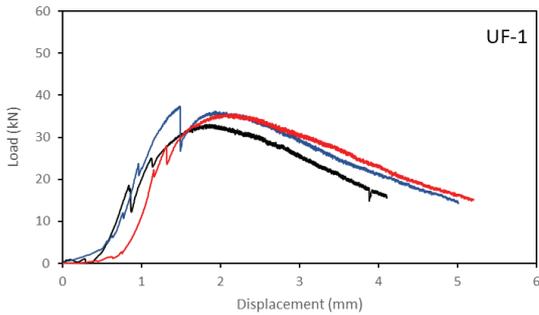


Fig. 10 Load vs Displacement Curve of UF-1

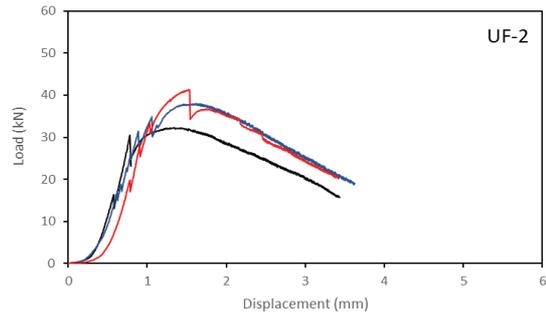


Fig. 11 Load vs Displacement Curve of UF-2

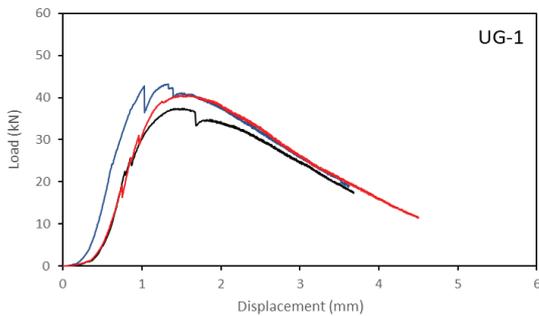


Fig. 12 Load vs Displacement Curve of UG-1

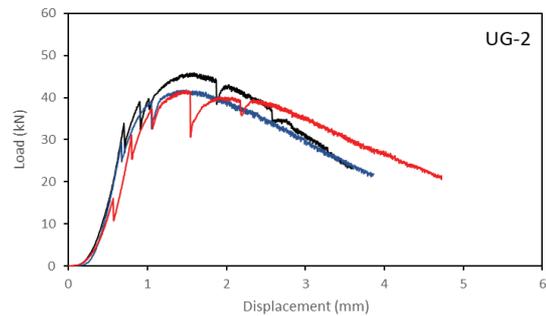


Fig. 13 Load vs Displacement Curve of UG-2

를 활용해 초고성능 콘크리트 강도특성을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 초고성능 콘크리트 배합에 관한 기존 연구에서는 실리카흙, 플라이애시 및 고로슬래그가 가장 많이 적용되고 있다. 실리카흙은 높은 강도를

위해 20% 정도로 많이 적용되고, 플라이애시 및 고로슬래그는 시멘트를 저감하기 위해 치환하여 사용하는데, 콘크리트의 압축강도 저하를 최소화하는 치환율이 어느 정도 도출된 상태로 유사한 치환율로 적용되고 있다.

- (2) 초고성능 콘크리트의 보강섬유는 강섬유가 가

장 효과적인 섬유로, 대부분의 연구에서 적용되고 있으며, 합성섬유를 적용하는 경우는 강도향상을 위한 연구는 일부이며, 폭열특성 등의 강도 이외의 특성향상을 위해 적용하고 있다.

- (3) 플라이애시, 고로슬래그 실험체 모두 강도의 급격한 저하가 발생하지 않았으며, 플라이애시는 다소 저하가 발생하여 선행논문과 다소 다른 결과를 얻었다. 실리카플로어를 사용한 경우도 유사한 결과를 보였으며, 고로슬래그는 50% 치환한 경우에도 강도저하가 거의 발생하지 않아 활용 가능한 배합으로 판단된다.
- (4) 선행논문에서 확인한 혼화재를 통한 시멘트량 저감방법은 초고성능 콘크리트 강도에서는 어느 정도 유사한 결과를 얻을 수 있으며, 고로슬래그는 강도, 유동성 측면에서 기존 초고성능 콘크리트 배합의 성능 향상에 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 국립금오공과대학교 대학 연구과제비로 지원되었음(2022~2023).

REFERENCES

- Ahmad, S., Mohaisen, K. O., Adekunle, S. K., Al-Dulaijan, S. U., and Maslehuddin, M. (2019), "Influence of Admixing Natural Pozzolan as Partial Replacement of Cement and Microsilica in UHPC Mixtures," *Construction and Building Materials*, Vol. 198, pp. 437-444. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.11.260
- Ahn, J. S., Yoo, T. A., Kim, J., Bae, J. W., and Kim, G. (2021), "An Experimental Study on Mix Design of High-Flowable and High-Strength Concrete," *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 33, No. 2, pp. 347-348.
- Alsalmán, A., Dang, C. N., Marti-Vargas, J. R., and Hale, W. M. (2020), "Mixture-proportioning of Economical UHPC Mixtures," *Journal of Building Engineering*, Vol. 27, p. 100970. doi: 10.1016/j.job.2019.100970
- Bae, J. H., Hwang, H. H., and Park, S. Y. (2019), "Structural Safety Evaluation of Precast, Prestressed Concrete Deck Slabs Cast Using 120-MPa High-Performance Concrete with a Reinforced Joint," *Materials*, Vol. 12, No. 8, p. 12183040. doi: 10.3390/ma12183040
- Beushausen, H., and Dittmer, T. (2015), "The Influence of Aggregate Type on the Strength and Elastic Modulus of High Strength Concrete," *Construction and Building Materials*, Vol. 74, pp. 132-139. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.08.055
- Chen, Q., Ma, R., Li, H., Jiang, Z., Zhu, H., and Yan, Z. (2021), "Effect of Chloride Attack on the Bonded Concrete System Repaired by UHPC," *Construction and Building Materials*, Vol. 272, p. 121970. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121971
- Choi, H. G., Bae, B. I., and Choi, C. S. (2015), "Mechanical Characteristics of Ultra High Strength Concrete with Steel Fiber Under Uniaxial Compressive Stress," *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 27, No. 5, pp. 521-530. doi: 10.4334/JKCI.2015.27.5.521
- Guo, Q., and Han, S. M. (2014), "Flexural Behavior of Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete Segmental Box Girder," *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 26, No. 2, pp. 109-116. doi: 10.4334/JKCL.2014.26.2.109
- Kang, H., Ahn, J. M., and Shin, S. W. (2010), "Evaluation on Mechanical and Mixing Properties of Ultra-high Strength Concrete with fck=150MPa," *Journal of the Korea Institute of Building Construction*, Vol. 10, No. 3, pp. 113-120.
- Kang, S. T., Hong, K. N., Han, S. H., and Kim, S. K. (2009), "The Effect of Fiber Volume Fraction on the Tension Softening Behavior of Steel Fiber-Reinforced Ultra High Strength Concrete," *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 21, No.1, pp. 13-20. doi: 10.4334/JKCI.2009.21.1.103
- Kang, S. T., Kim, Y. Y., Lee, B. Y., and Kim, J. K. (2008), "Fiber Orientation Impacts on the Flexural Behavior of Steel Fiber Reinforced High Strength Concrete," *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 20, No. 6, pp. 731-739. doi: 10.4334/JKCI.2008.20.6.731
- Kim, J. B., Shin, K. S., and Park, K. B. (2012), "Mechanical Properties of Ultra High Strength Concrete Using Ternary Blended Cement," *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, Vol. 16, No. 6, pp. 56-62. doi: 10.11112/jksmi.2012.16.6.056
- Kim, J. M., Gong, M. H., Yang, D. I., Ko, H. J., Lee, Y. D., and Jung, S. J. (2006), "The Properties Strength of Ultra High Strength Concrete Using Blast-furnace Slag Cement," *Journal of the Architectural Institute of Korea*, Vol. 26, No. 1, pp. 449-452.
- Kim, S. H., Kwon, B. U., and Kang, H. K. (2016), "Seismic Performance Assessment of Roof-Level Joints with Steel Fiber-Reinforced High-Strength Concrete," *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 28, No. 2, pp. 235-244. doi: 10.4334/JKCI.2016.28.2.235
- Kim, S. K., Jang, P. K., and Jang, I. Y. (2017), "Material Behavior and Strength Character of 150 MPa Ultra High Strength Concrete Using LCD Glass Powder as Fine Aggregate," *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 29, No. 6, pp. 615-623. doi: 10.4334/JKCI.2017.29.6.615

- Koh, K. T., Ryu, G. S., Park, J. J., An, K. H., Kim, S. W., and Kang, S. T. (2013), "Effects of the Composing Materials on the Rheological and Mechanical Properties of Ultra-High Performance Concrete (UHPC)," *RILEM-fib-AFGC Int. Symposium on Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete*, pp. 749-756.
- Kwon, I. P., Kim, Y. R., W, D. S., Park, C. H., Joo, D. C., and Kim, J. H. (2006), "A Study on Ultra High Strength Concrete with the Domestic Materials," *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 18, No. 2, pp. 433-436.
- Lee, B. S., Jun, M. H., and Lee, D. H. (2012), "The Effect of Mixing Ratio of Blast Furnace Slag and Fly Ash on Material Properties of 80MPa High Strength Concrete with Ternary Cement," *Journal of the Korea Institute of Building Construction*, Vol. 12, No. 2, pp. 203-210. doi: 10.5804/LHIJ.2012.3.3.287
- Li, L., Cai, Z., Yu, K., Zhang, Y. X., and Ding, Y. (2019), "Performance-based Design of All-grade Strain Hardening Cementitious Composites with Compressive Strength from 40MPa to 120MPa," *Cement and Concrete Composites*, Vol. 97, pp. 202-217. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2019.01.001
- Li, Y., and Zhang, D. (2021), "Effect of Lateral Restraint and Inclusion of Polypropylene and Steel Fibers on Spalling Behavior, Pore Pressure, and Thermal Stress in Ultra-high-performance Concrete (UHPC) at Elevated Temperature," *Construction and Building Materials*, Vol. 271, p. 121879. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121879
- Meng, W., and Khayat, K. H. (2018), "Effect of Hybrid Fibers on Fresh Properties, Mechanical Properties, and Autogenous Shrinkage of Cost-Effective UHPC," *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 30, No. 4, p. 04018030. doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.00022
- Meng, W., Valipour, M., and Khayat, K. H. (2017), "Optimization and Performance of Cost-effective Ultra-high Performance Concrete," *Materials and Structures*, Vol. 50, No. 29, pp. 1-16. doi: 10.1617/s11527-016-0896-3
- Park, C. B., Kim, H. S., Jeon, J. Y., Kim, E. K., and Ryu, D. H. (2008), "Properties of Ternary or Quaternary High Strength Concrete Using Silica Fume & Meta Kaolin," *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 20, No. 3, pp. 307-315.
- Park, C. D., Yang, J. M., Chang, C. H., and Kwon, O. K. (2019), "Effect of Warm Water Curing on Compressive Strength of Concrete," *Journal of Korean Society for Advanced Composite Structures*, Vol. 10, No. 5, pp. 45-53. doi: 10.11004/kosacs.2019.10.5.045
- Park, O. S., and Cho, H. K. (2021), "Evaluation of Ultra High Performance Mortar Properties Using Crushed Cement and Chemical Admixture," *Journal of Korean Society for Advanced Composite Structures*, Vol. 12, No. 2, pp. 41-49. doi: 10.11004/kosacs.2021.12.2.041
- Wang, X., Yu, R., Shui, Z., Song, Q., and Zhang, Z. (2017), "Mix Design and Characteristics Evaluation of an Eco-friendly Ultra-High Performance Concrete Incorporating Recycled Coral based Materials," *Journal of Cleaner Production*, Vol. 165, pp. 70-80. doi: 10.1016/j.jclepro.2017.07.096
- Wu, Z., Shi, C., Khayat, K. H., and Xie, L. (2018), "Effect of SCM and Nano-particles on Static and Dynamic Mechanical Properties of UHPC," *Construction and Building Materials*, Vol. 182, pp. 118-125. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.06.126
- Yalçınkaya, Ç., and Yazıcı, H. (2017), "Effects of Ambient Temperature and Relative Humidity on Early-age Shrinkage of UHPC with High-volume Mineral Admixtures," *Construction and Building Materials*, Vol. 144, pp. 252-259. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.03.198
- Yang, I. H., Park, J. H., and Lee, J. H. (2019), "An Experimental Study on Tensile Properties of Steel Fiber-Reinforced Ultra High Strength Concrete," *Korean Recycled Construction Resources Institute*, Vol. 7, No. 3, pp. 279-286. doi: 10.14190/JRCR.2019.7.3.279
- Zhang, D., Liu, Y., and Tan, K. H. (2021a), "Spalling Resistance and Mechanical Properties of Strain-Hardening Ultra-high Performance Concrete at Elevated Temperature," *Construction and Building Materials*, Vol. 266, Part B, p. 120961. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120961
- Zhang, D., Zhang, Y., Dasari, A., Tan, K. H., and Weng, Y. (2021b), "Effect of Spatial Distribution of Polymer Fibers on Preventing Spalling of UHPC at High Temperatures," *Cement and Concrete Research*, Vol. 140, p. 106281. doi: 10.1016/j.cemconres.2020.106281
- Zhou, Y., Huang, J., Yang, X., Dong, Y., Feng, T., and Liu, J. (2021), "Enhancing the PVA Fiber-matrix Interface Properties in Ultra High Performance Concrete: An Experimental and Molecular Dynamics Study," *Construction and Building Materials*, Vol. 285, p. 122862. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122862

주요어: 초고성능 콘크리트, 강섬유, 플라이애시, 고로슬래그, 구조, 재료

국문초록: 초고성능 콘크리트(UHPC)는 높은 압축강도를 위해 일반콘크리트에 비해 높은 시멘트 및 바인더 함량을 가지고 있다. UHPC의 시멘트량을 줄이기 위한 연구가 지속적으로 수행되었으며, 그중 플라이애시와 고로슬래그는 각각 20%, 50% 수준까지는 강도 저하 없이 적용 가능하다는 연구가 확인되었다. 본 연구에서는 UHPC 배합에서 시멘트를 플라이애시와 고로슬래그로 치환하여 강도변화 및 유동성 변화를 분석하였다. 압축강도는 플라이애시 치환 실험체가 가장 낮으며, 고로슬래그는 치환 전과 유사한 강도를 보였다. 휨강도는 고로슬래그, 플라이애시 치환 실험체 모두 감소하였다. 그러나 유동성은 플라이애시, 고로슬래그 실험체 모두 향상되면서 고성능감 수제 저감이 가능한 것을 확인하였다.