

초고성능 콘크리트에서 순환재료의 활용

Utilization of Recycled Materials in Ultra High Performance Concrete



고경택 Kyung-Taek Koh
한국건설기술연구원 연구위원
E-mail : ktgo@kict.re.kr



류금성 Gum-Sung Ryu
한국건설기술연구원 수석연구원
E-mail : ryu0505@kict.re.kr



안기홍 Ki-Hong Ahn
한국건설기술연구원 연구위원
E-mail : agh0530@kict.re.kr



박승훈 Seung-Hun Park
한국건설기술연구원 연구위원
E-mail : parkseunghun@kict.re.kr

1. 서언

콘크리트는 오랫동안 현대사회의 인프라를 구축한 주요 건설재료로서 사회기반시설물의 근간을 이룬 최고의 건설재료이다. 최근 경제, 사회 및 문화 전반에 걸친 급속한 발전은 교량, 도로, 철도, 항만, 공항 등 사회기반시설물에 대한 수요를 대량으로 창출하고 있다. 또한 대형화·고층화·장대화된 구조물의 건설이 증가함에 따라 기존 재료보다 시공성, 강도, 내구성 등 성능이 향상된 고성능 콘크리트(high performance concrete)의 적용이 요구되고 있다. 세계 각국에서는 기존 콘크리트의 성능을 개선하려는 노력이 성과를 거두어 현장 실무에 고성능 콘크리트가 활발히 적용되는 단계까지 이르게 되었으며, 이렇게 성능이 향상된 콘크리트 재료의 개발로 인해 구조시스템과 공법들도 함께 발전하게 되었다. 그리고 이런 고성능 콘크리트의 발전에는 고로슬래그, 플라이애시, 실리카폼 등의 순환재료 기술도 크게 기여한 것으로 판단된다.

최근 기존 고성능 콘크리트보다 진일보된 초고성능 콘크리트(ultra-high performance concrete, UHPC)가 개발되어 다양한 분야에 적용사례가 증가하고 있다. UHPC의 용어는 1994년 프랑스 de Larrard에 의해 처음 사용되어 초고성능 섬유 보강 콘크리트(ultra-high performance fiber reinforced concrete, UHPFRC) 등으로도 불리고 있다[1]. UHPC는 개발자에 따라 다양한 재료로 구성되어 있으나, 최근에는 순환재료를 사용하여 경제적인 UHPC 개발을 하여 다양한 분야에 적용을 시도하고 있다. 본고에서는 순환재료를 사용한 UHPC의 국내외 기술 동향과 향후 전망에 대해 간단히 소개하고자 한다.

2. 국가별 초고성능 콘크리트의 개발 현황[2]

UHPC는 압축강도가 150 MPa 이상의 초고강도이면서 단섬유 단독 또는 장·단섬유를 혼합하여 높은 직접인장 또는 휨인장 특성을 보유하고 있으며, 또한 시멘트 경화체의 조직이 매우 밀실하여 열화인자의 침입이 어려워 수밀성과 내구성이 매우 뛰어난 특징을 갖고 있다.

많은 나라에서 UHPC에 대한 기술 개발이 수행되고 있으며, 그 종류로는 프랑스의 Bouygues 사에 의해 개발된 RPC(Reactive Powder Concrete), 프랑스의 LCPC에 의해 개발된 MSFRC(Multi Scale Fiber Reinforced Concrete), 덴마크의 Alborg Portland사에서 개발한 CRC(Compact Reinforced Composites), 일본의 Kajima 건설 등에 의해 개발된 SUQCEM(Super High Quality Cemetitious Material), 한국건설기술연구원의 K-UHPC 또는 SUPER Concrete 등이 있다. 그리고 독일에서는 DFG(Deutsche Forschungs Gemeinschaft, 과학재단) 프로그램 일환으로 UHPC 배합 및 적용 기술에 대해 활발히 이루어지고 있다. 호주와 중국 등에서도 재료의 현지화 및 적용기술 개발에 대해 많은 연구가 이

루어지고 있다. 국내에서는 한국건설기술연구원을 중심으로 2002년부터 기술 개발을 수행하여 180 MPa급 UHPC의 원천 기술과 이를 활용한 세계최고 수준의 저비용 장수명 하이브리드 사장교 기술 개발을 수행하였다. 그리고 2013년부터는 국가 R&D 사업으로 제조비용과 제작방법을 고려한 80~180 MPa급 SUPER Concrete 기술을 개발하고 있으며, 개발된 기술은 국내 현장은 물론 미국과 미얀마 등 해외 현장에서도 적용이 되고 있다.

3. 초고성능 콘크리트의 배합

[표 1]은 국내의 UHPC 관련 배합자료 101건[3,4]을 조사하여 정리한 결과이다[5]. 배합에 관련된 W/B, 단위수량, 잔골재율, 결합재 종류 및 사용량, 충전재 비율, 고성능 감수제와 강섬유 사용량에 대해 검토하였다. UHPC는 0.25 이하의 매우 낮은 물-결합재비(W/B)를 바탕으로 하여 미세한 재료, 고성능 감수제 그리고 강섬유를 다량으로 사용함으로써 높은 역학적 특성과 유동성을 확보하고 있다. 본고에서는 순환재료에 관련되어 주로 결합재와 충전재에 대해 기술하고자 한다.

[표 1] 국내외 초고성능 콘크리트의 배합 관련 현황[5]

Number of Data		101	
W/B	Range	0.12~0.28	
	Average	0.216	
	mode(%)	0.18(17%)	
Water content (kg/m ³)	Range	100~300	
	Average	181.3	
	mode(%)	160, 170(15%)	
Ratio of sand (sand/cement)	Range	0.6~4.6	
	Average	1.31	
	mode(%)	1.2(23%)	
Binder	Binder content (kg/m ³)	Range	600~2642
		Average	1057.7
		mode(%)	1000(27%)
	Cement content (kg/m ³)	Range	500~2105
		Average	855.3
		mode(%)	850(18%)
	Type of binder	Type	SF, FA, SF+FA, SF+BS, RHA, RGA+BS
		mode(%)	SF(94%)
	Replacement of mineral admixture (%)	Range	10~55
		Average	21.4
		mode(%)	25(33%)
	Ratio of filler (Filler/cement)	Range	0~1
Average		0.25	
mode(%)		0(35%), 0.3(25%)	
Superplasticizer dosage (%)	Range	2~7	
	Average	4.0	
	mode(%)	4.5(36%)	
Steel fiber content(V _f)(%)	Range	0~6.5	
	Average	1.6	
	mode(%)	0(26%), 2.5(21%)	

SF: Silica Fume, FA: Fly Ash, BS: Blast Furnace, RHA: Rice Husk Ash

4. 순환결합재의 영향

<그림 1>은 101건 UHPC 배합에서 결합재의 사용비율을

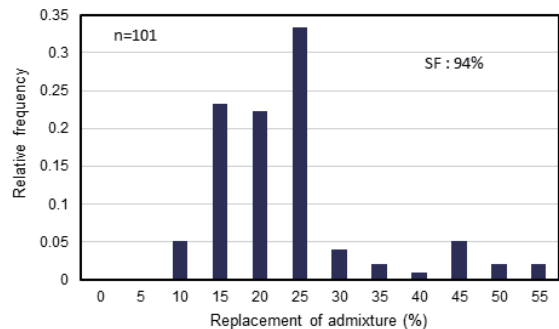
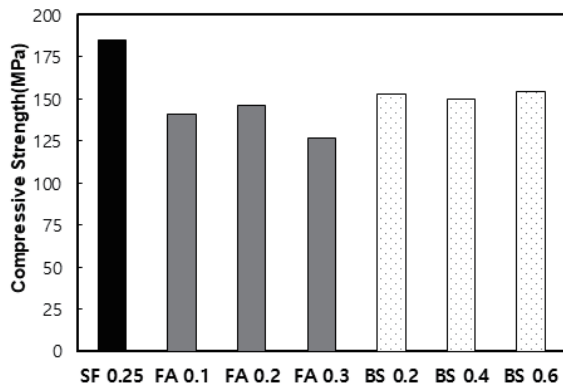


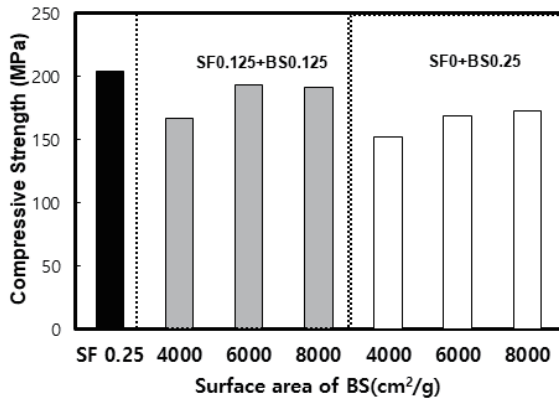
그림 1. UHPC에서 순환재료의 혼입률 현황[5]

분석한 결과이다[5]. 혼화재의 사용비율은 10~55% 정도로 다양한 비율로 사용하고 있으나, 대부분 15~25% 범위에서 사용되고 있는 것으로 분석되었다. 혼화재에서도 94% 정도가 SF를 사용하고 있으며, UHPC에는 초고강도 발현을 위해 SF 사용을 기본으로 하고 있다. 본고에서는 UHPC의 결합재로 SF 외에 사용한 사례를 소개하고자 한다.

한국건설기술연구원[5,6]에서 SF 대체재로 BS와 FA의 사용에 대해 검토하였으며, <그림 2>(a)는 FA와 SF의 혼입률에 대한 영향이고, <그림 2>(b)는 BS의 비표면적에 대한 영향을 나타내었다. FA와 BS를 각각 단독으로 사용한 경우에는 모두 혼입률이 증가할수록 강도가 저하하는 것으로 나타났으나, BS를 사용한 경우에는 압축강도 150 MPa 정도를 확보할 수 있는 것으로 분석되었다. 그리고 SF 0.25에 대해 BS를 50%



(a) 혼입률에 따른 영향

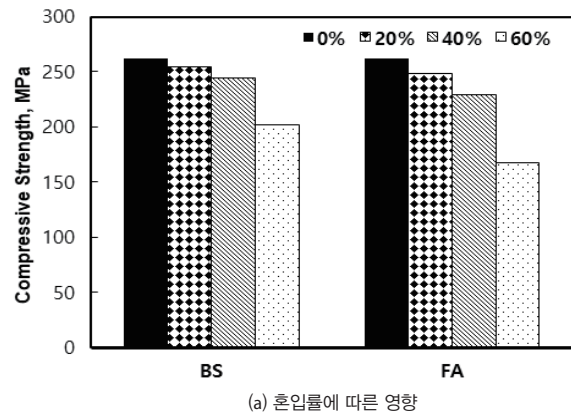


(b) BS의 비표면적에 따른 영향

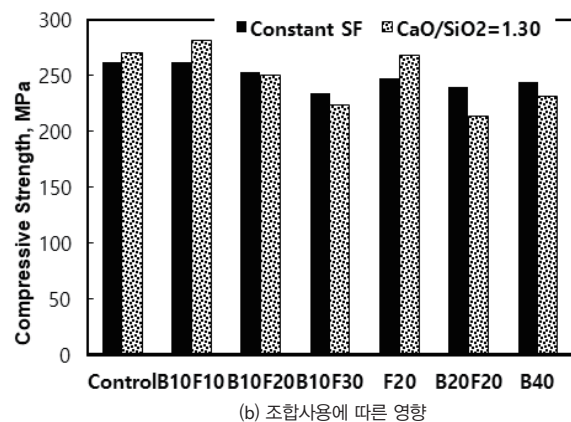
그림 2. 광물질 혼화재가 UHPC의 압축강도에 미치는 영향[5,6]

치환한 0.125 배합에서 비표면적 6,000 cm²/g, 8,000 cm²/g의 경우에는 압축강도가 모두 180 MPa 이상으로 SF만 사용한 경우와 거의 동등한 것으로 나타났다. 또한 BS만을 사용하고 비표면적을 변화시킨 경우에는 비표면적이 커질수록 압축강도가 증가하였고, 비표면적 8,000 cm²/g을 사용한 UHPC는 170 MPa 정도의 압축강도를 확보할 수 있는 것으로 분석되었다.

터키 Dokuz Eylul 대학의 Yazici et al. [7]는 SF 대체재로 BS와 FA 등을 사용하여 UHPC 배합 다음 오토클레브 양생을 실시하여 강도발현을 검토하였다. 그 결과, BS와 FA를 단독으로 사용한 경우(<그림 3>(a))에는 혼입률이 증가할수록 강도가 저하되는 것으로 나타났으나, BS와 FA를 조합하여 대체하여 사용한 경우(<그림 3>(b))에는 조건에 따라서 압축강도가 저하되지 않거나 오히려 증가되는 배합도 있는 것으로 확



(a) 혼입률에 따른 영향



(b) 조합사용에 따른 영향

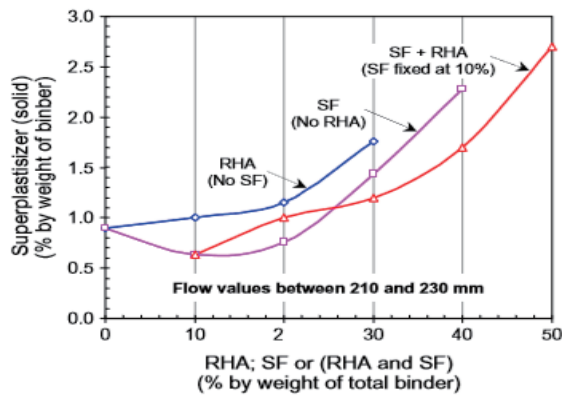
그림 3. 광물질 혼화재가 UHPC의 압축강도에 미치는 영향[7]

인되었다. 이 연구에 의하면 BS와 FA를 적절하게 조합하여 사용한 UHPC의 경우에는 강도 저하 없이 수화열 및 자기수축 저감이 되고 경제성도 향상될 수 있는 것으로 판단된다.

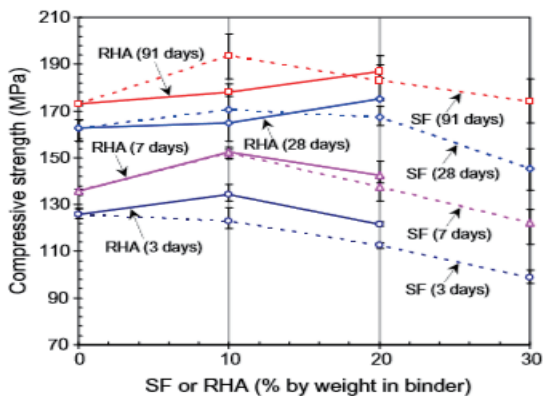
최근 동남아 국가를 중심으로 쌀겨 분말(rice husk ash; RHA)을 사용하여 HPC 또는 UHPC 제조에 관련 연구가 활발히 수행되고 있다[8,9]. <그림 4>는 RHA의 혼입률에 따른 일정한 유동성을 확보하는 데 필요한 고성능 감수제 양(<그림 4>(a))과 압축강도 발현 결과(<그림 4>(b))이다[9]. 플로 210~230mm를 확보하는데 필요한 고성능 감수제의 양을 검토한 결과, RHA 혼입률이 증가할수록 일정한 유동성을 확보하는데 필요한 고성능 감수제의 양은 증가하는 것으로 나타났다. 이처럼 RHA 사용에 의해 UHPC의 유동성이 저하되는 것은 입자가 다공질이면서 뿔족한 형상을 가지고 있기 때문으로

분석된다. 그리고 RHA의 혼입률 10%에서 재령 7일까지, 혼입률 20%에서는 재령 28일부터 SF를 사용한 UHPC보다 오히려 강도가 높은 것으로 나타났다. 그리고 이상의 혼입률에서 강도가 급격히 저하되는 것으로 나타났다. 이상의 결과로부터 RHA를 사용하여 UHPC를 제조하기 위해 혼입률을 20% 이하로 하는 것이 적절한 것으로 분석된다.

기존 SF를 사용한 UHPC는 역학적 특성 측면에서 매우 유리하나, 과도한 점도로 인한 유동성이 저하되어 고성능 감수제 사용량이 증가되는 문제가 지적되고 있다. 최근 이런 문제점을 해소하기 위해 한국건설기술연구원을 중심으로 기존 SF 대신에 지르코늄 모래($ZrO_2 SiO_2$) 또는 $ZrSiO_4$ 를 800℃ 이상에서 전기용해 할 때 발생하는 분진을 포집한 지르코늄 함유 실리카폼(ZrSF)을 사용하여 UHPC를 개발하고 있다[5].

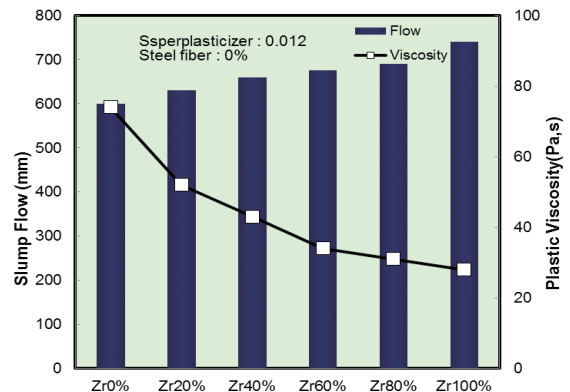


(a) 고성능 감수제

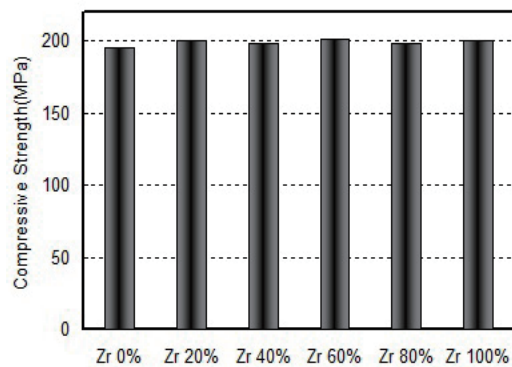


(b) 압축강도

그림 4. 쌀겨 분말이 UHPC에 미치는 영향[9]



(a) 레올로지 특성

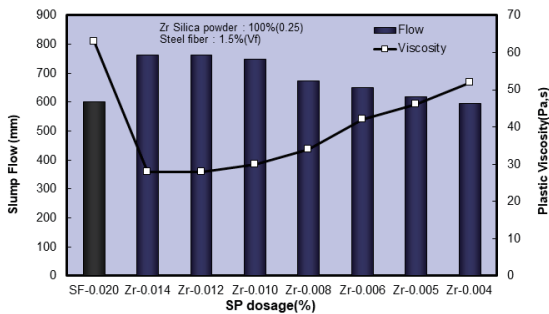


(b) 압축강도

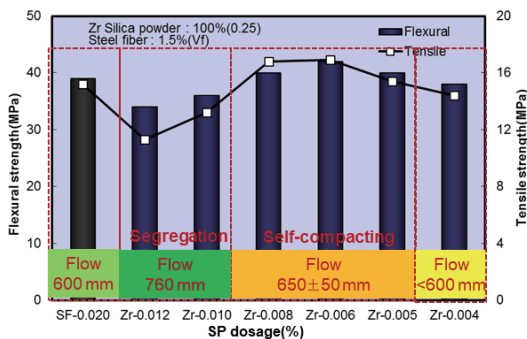
그림 5. ZrSF의 혼입률이 UHPC에 미치는 영향[10]

<그림 5>는 ZrSF의 혼입률이 UHPC의 레올로지 특성과 압축강도에 미치는 영향이다[10]. ZrSF의 혼입률이 증가할수록 UHPC의 점도가 크게 감소하여 슬럼프 플로가 크게 증가하는 것으로 나타났으며, 압축강도 저하는 거의 없는 것으로 나타났다.

<그림 6>은 고성능 감수제의 사용량에 따른 레올로지 특성(<그림 6>(a))과 역학적 특성(<그림 6>(b))의 결과이다[11]. ZrSF를 사용함으로써 SF를 사용한 경우에 비해 유동성이 크게 증가하여 고성능 감수제의 사용량을 60~70% 정도 저감시킬 수 있어 경제적인 UHPC 배합이 가능한 것으로 분석되었다. 또한 적정 양의 고성능 감수제를 사용하여 슬럼프 플로 650±50mm 정도를 확보한 경우에는 SF를 사용한 UHPC 이상의 휨인장강도와 직접인장강도를 확보할 수 있는 것으로 나타났다.



(a) 레올로지 특성

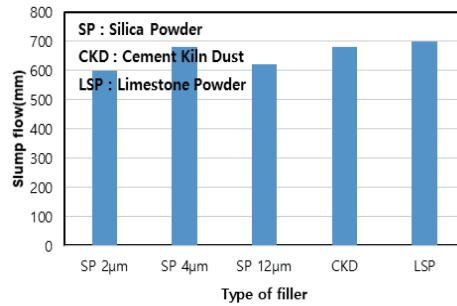


(b) 휨인장과 직접인장 강도

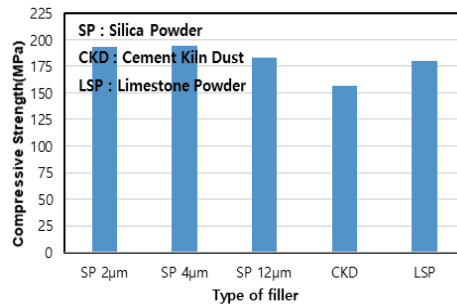
그림 6. ZrSF 사용 UHPC의 고성능 감수제 양에 따른 영향[11]

5. 순환충전재의 영향

UHPC의 충전재는 시멘트 페이스트와 모래의 계면 파괴 또는 시멘트 복합체와 섬유와의 계면 파괴를 방지하는 역할을 한다. 충전재로서 시멘트 입자 크기 이하의 석영 미분말을 주로 사용하고 있다. 그러나 석영 미분말은 고가이기 때문에 UHPC의 제조원가 상승 원인이 되므로 최근에 석영 미분말 대신에 석회석 미분말(lime stone powder: LSP), CKD(cement kiln dust) 등 사용에 대해 검토하고 있다. 여기서 LSP는 CaO 50% 이상, 비표면적 6,000 cm²/g 정도이고, CKD는 CaO 43% 이상, 비표면적 8,000 cm²/g 정도의 것을 사용하였다. <그림 7>은 충전재 종류와 크기에 따른 UHPC의 유동성과 압축강도의 결과이다[11]. 실리카질 미분말(SiO₂ 90% 이상)을 사용할 경우에는 입자크기 2μm와 4μm에서 유동성은 다소 차이가 있으나, 강도는 차이가 없는 것으로 나타났다. 그



(a) 슬럼프 플로



(b) 압축강도

그림 7. 충전재 종류와 크기에 따른 UHPC의 특성[11]

리고 12 μm 를 사용한 경우에는 입자크기 2 μm 와 4 μm 에 비해 강도 저하가 발생하는 것으로 나타났다. 또한 충전재로서 CKD와 LSP를 사용한 경우에는 유동성 증진에 효과가 있으나, 강도 저하가 있는 것으로 나타났다. 그러나 LSP는 실리카 질 미분말 12 μm 를 사용한 경우와 동등한 압축강도 확보가 가능하고, CKD를 사용한 경우에도 압축강도 150 MPa 정도를 확보할 수 있는 것으로 분석된다. CKD와 LSP의 가격은 실리카 질 미분말의 1/10 정도이기 때문에 CKD 또는 LSP를 UHPC의 충전재로 적절하게 사용하면 경제적인 UHPC 제조가 가능할 것으로 판단된다.

6. 결론

향후 건설산업의 미래는 현재 연장선상의 예측 가능한 변

화가 아닌 친환경 생활공간, 국토의 효율적 활용, 물류의 초고속화 등 경제 사회 및 산업환경 변화에 이르기까지 광범위한 분야에서 새로운 국면이 예상된다. 또한 해외 건설시장이 경쟁이 심화되는 현상이 가속되는 시점에서 해외 경쟁력은 무엇보다 중요하며, 이를 위해서는 UHPC와 같은 혁신적인 건설재료의 적용이 필수적이다.

UHPC를 보다 많은 분야에 적용하기 위한 중요한 과제 중 하나인 제조비용 절감을 위해서는 순환재료의 사용이 필수적이라 할 수 있다. UHPC의 성능을 고려하여 결합재로 실리카 폼 대체재로 고로슬래그, 플라이애시, 쌀겨 분말, 지르코늄 실리카폼을 사용하고, 충전재로 석회석미분말과 CKD 등을 사용할 경우에는 제조비용이 대폭 절감되어 경제적인 UHPC 제조가 가능하다. 그리고 순환재료를 UHPC와 같은 혁신적인 건설재료로 폭 넓게 적용되기 위해서는 순환자원 업계의 적극적인 참여가 필요하다.

참고문헌

1. Richard P., Cheyrez M., "Composition of Reactive Powder Concrete", Cement and Concrete Research 25(7), pp. 1501-1511, 1995.
2. 고경택, 류금성, 강수태, "초고성능 콘크리트의 재료적 특성 및 개선방향", 한국콘크리트학회지 Vol.28, No.1, pp.21-25, 2016.
3. Schmidt, M., Felhing, E. et al., "Ultra-High Performance Concrete and Nonotechnology in Construction", Proceedings of Hipermat 2012, 2012.
4. UHPFRC 2013, Proceedings of the RILEM-fib-AFGC interbation Symposium on Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete, Edited by Francois TOUTLEMONDE, Jacques RESPLENDINO, RILEM, 2013.
5. 한국건설기술연구원, 국토교통과학기술진흥원, "80 MPa~180 MPa급 맞춤형 SUPER Concrete의 제조기술 및 재료모델 · 지침 개발", 2015.
6. 박정준, 고경택, 류금성, 강수태, 김성욱, "고로슬래그 미분말이 초고강도 SFRCC의 압축강도에 미치는 영향", 한국콘크리트학회 가을학술발표회 논문집, 2005.
7. Yazıcı, H., Yardımcı, M.Y., Aydın, S., Karabulut, A.S., "Mechanical properties of reactive powder concrete containing mineral admixture under different curing regimes", Construction and Building Materials, Vol.23, pp.1223-1231, 2009.
8. Le Thanh Ha, Karsten Siewert, Horst-Michael Ludwi, "Synergistic Effect of Rice Husk Ash and Fly Ash on Properties of Self-Compacting High Performance Concrete", Proceedings of Hipermat 2012.
9. Tuan, N.Y., Ye, G., Breugel, K.V., Fraaij, A.L.A, Dai, B.D., "The study of using rice husk ash to produce ultra high performance concrete", Construction and Building Materials 25, pp.2030-2035, 2011.
10. Koh K.T., Park J.J., Kang S.T., Ryu G.S., "Influence of the type of silica fume on the rheological and mechanical properties of ultra-high performance concrete", Key Engineering Materials, 488-489, pp.274-277, 2012.
11. Koh, K.T., Ryu, G.S., An, G.H., Park, C.J., "Development of economic ultra high performance concrete", EASEC-14, pp.589-594, 2016.

담당 편집위원 : 고경택(한국건설기술연구원)