

실리카퐁 종류가 초고성능 콘크리트의 공학적 특성에 미치는 영향

Effect of Silica Fume Types on the Mechanical Properties of Ultra-High Performance Concrete

박천진^{1*} · 고경택² · 안기홍² · 한민철³Chun-Jin Park^{1*} · Kyung-Teak Koh² · Gi-Hong Ahn² · Min-Cheol Han³

(Received September 17, 2015 / Revised September 22, 2015 / Accepted September 25, 2015)

Ultra high performance concrete (UHPC) uses large quantities of steel fiber, silica fume, filler and superplasticizer for a low water-to-binder ratio (W/B). Despite of exceptional mechanical performances, UHPC exhibits increased viscosity due to the adoption of silica fume and its fabrication cost is costlier than ordinary concrete because of the use of large quantities of expensive materials. Following, this study evaluates the mechanical properties of 180MPa-UHPC using zirconium silica fume (Zr) instead of silica fume with respect to the quantity and type of superplasticizer (SP) and the size of filler. The results reveal that the Zr-UHPC using W/B of 20%, 100% of Zr, amount of SP-L of 2 to 3% and 4 μm -filler with steel fiber in 1.5 vol.% can develop better fluidity than the traditional mix composition using silica fume and secure a compressive strength higher than 180 MPa. In addition, the proposed mix composition is shown to enable a reduction of the fabrication cost by 33% compared to traditional UHPC.

키워드 : 실리카퐁, 지르코늄 실리카퐁, 초고성능 콘크리트**Keywords :** Silica fume, Zirconium silica fume, Ultra-high performance concrete

1. 서론

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.

그러나 기존의 고성능 콘크리트는 압축강도에 비하여 매우 낮은 인장강도와 휨강도에 기인하여 연성과 에너지 흡수능력이 낮은 단점이 있다. 이를 해결하기 위하여 초고강도 콘크리트에 연성을 부여한 초고성능 콘크리트(Ultra-High Performance Concrete, 이하 UHPC)를 개발하고자 전 세계적으로 다양한 연

구가 활발히 수행되고 있다. UHPC는 150MPa 이상의 압축강도를 가지며, 섬유를 다량으로 혼입하여 8MPa 이상의 인장강도를 나타내는 등 높은 역학적 성능을 가진 재료이다(Richard et al. 1995). 또한 물, 염소이온, CO₂ 등의 열화인자의 침투를 거의 허용하지 않는 매우 낮은 투수계수와 탁월한 내구성능을 가지고 있다.

이러한 UHPC의 성능을 확보하기 위해서는 0.25 이하의 낮은 물-결합재비(W/B)를 바탕으로 다량의 강섬유, 실리카퐁, 충전재 및 고성능 감수제 등을 사용한다. 이로 인하여 UHPC는 고가의 재료를 다량으로 사용하기 때문에 제조비용이 일반 콘크리트에 비하여 훨씬 높은 것으로 알려져 있다. 국내에서는 UHPC를 교량 등 다양한 구조물에 적용하기 위해 한국건설기술연구원을 중심으로 UHPC에 사용되는 재료의 국산화 및 사용물

* Corresponding author E-mail: cjpark@kict.re.kr¹청주대학교 건축공학과, 한국건설기술연구원 구조융합연구소 (Department of Architectural Engineering, Cheongju University, Chungbuk, 360-764, Korea, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Kyonggi-do, 411-712, Korea)²한국건설기술연구원 구조융합연구소 (Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Kyonggi-do, 411-712, Korea)³청주대학교 건축공학과 (Department of Architectural Engineering, Cheongju University, Chungbuk, 360-764, Korea)

량 저감을 통해 제조비용을 저감시키는 연구를 수행하고 있다.

UHPC의 역학적 성능을 고려한 경우, 실리카폼은 필수적인 재료라 할 수 있다. 실리카폼의 비표면적은 200,000g/cm³ 이상으로 시멘트 입자보다 훨씬 작아 시멘트 입자 사이의 공극을 메우는 필러 역할 및 수화 시 포졸란 반응에 따른 수화물질 생성으로 강도가 증진되는 역할을 한다. 이와 같이 실리카폼과 같이 미세한 분말을 많이 사용하고 있기 때문에 UHPC의 배합 시 점성이 크게 증가하게 된다. UHPC에 슬럼프 플로 600mm 이상의 높은 유동성을 확보하기 위해 다량의 고성능 감수제가 사용이 필요하고, 이로 인해 제조가격이 높아지는 문제점을 갖고 있다.

저자들은 실리카폼을 사용한 UHPC의 문제점을 극복하고자 지르코늄 가공 산업에서 부수적으로 발생하는 실리카폼(지르코늄 실리카폼, 이하 Zr)을 UHPC에 대한 검토를 수행하여 양호한 유동성을 확보할 수 있는 것을 확인한 바 있다(Koh et al, 2013). 그러나 Zr을 사용함으로써 고성능 감수제 종류 및 사용량에 대해 상세히 검토가 이루어지지 않았다. 그리고 UHPC에는 계면 파괴를 방지하기 위해 충전재를 사용하고 있으나, Zr과 SF는 입자크기가 다르기 때문에 충전재가 UHPC의 성능에 미치는 영향은 다를 수 있다.

따라서 본 연구에서는 SF 대신 Zr을 사용한 180MPa급 UHPC를 제조하여 고성능 감수제(이하 SP)의 사용량 및 종류에 따른 굳지 않은 콘크리트 특성 및 역학적 특성을 분석하고, 충전재 크기에 따른 공학적 특성을 분석하여 Zr을 사용한 UHPC에 대한 참고자료로 활용하고자 한다.

2. 실험개요

본 연구에서는 180MPa급 UHPC의 경제적 배합을 도출하기 위하여 Zr을 사용한 UHPC(이하 Zr-UHPC)에 대하여 SP제의 종류 및 사용량(시리즈 1), 충전재 크기 변화(시리즈 2)에 따른 Zr-UHPC의 유동성 및 역학적 특성에 미치는 영향을 검토하였다.

2.1 사용재료 및 배합

Table 1은 저자들이 개발한 UHPC의 기본 배합을 나타낸 것이고, Table 2는 본 연구의 실험 변수를 나타낸 것이다. UHPC의 기본 배합에 대하여 실험 변수에 따라 SF 및 SP제를 변화시켜 실험을 수행하였다. 먼저 시리즈 1에서는 W/B 20%, 강섬유 사용량 1.5 vol.% 1수준에 대하여 SP제의 종류에 따른 영향을 분석하고자, 결합재로 SF를 사용한 UHPC(이하 SF-UHPC)에 기존 고가의 고성능 감수제(이하 SP-H)를 4.2, 6, 7.8%의 3수준으로, Zr-UHPC에 SP-H를 3, 2.7, 2.4%의 3수준, 저가형 고성능 감수제(이하 SP-L)를 1.2, 3, 4.8%의 3수준으로 실험계획 하였다. 시리즈 2에서는

Table 1. Mixture properties of UHPC

Ratio of Mixture							
W	C	SF	S	F	EA	SRA	Steel Fiber
0.2	1	0.25	1.1	0.3	0.075	0.01	1.5 vol.%

Table 2. Experimental items

Item		W/B (%)	SP/C (%)
Series 1*	SF0.042SP-H	20	4.2
	SF0.060SP-H		6
	SF0.078SP-H		7.8
	Zr0.024SP-H		2.4
	Zr0.027SP-H		2.7
	Zr0.030SP-H		3
	Zr0.012SP-L		1.2
	Zr0.030SP-L		3
	Zr0.048SP-L		4.8
Series 2**	F02	20	2.4
	F04		
	F12		
	F15		
	F22		

* SF0.042SP-H: SF-UHPC, SP-H 7.8%

Zr0.024SP-H: Zr-UHPC, SP-H 2.4%

Zr0.012SP-L: Zr-UHPC, SP-L 1.2%

**F02: Filler grain size 2 μ m

Table 3. Physical properties and chemical compositions of cementitious materials

Type	Item	Density (g/cm ³)	Surface area (cm ² /g)	L.O.I*	Chemical composition (%)					
					SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	ZrO ₂
OPC		3.15	3,512	3.3	23.5	5.22	3.1	64.8	3.5	-
SF		2.10	200,000	1.55	96.0	0.25	0.12	0.38	0.10	-
Zr		2.50	80,000	0.1	95.6	0.23	0.10	-	-	3.0

OPC: Ordinary Portland Cement, SF: Silica fume, Zr: Zirconia silica fume

*L.O.I: Loss on Ignition

Table 4. Physical properties and chemical compositions of filler

Grain size (μm)	Ig.loss (%)	Chemical composition (%)			
		SiO ₂	MgO	CaO	Al ₂ O ₃
2	0.01	99.3	0.004	0.03	0.15
4					
12					
15					
22					

Table 5. Physical properties compositions of superplasticizer

Type	Main ingredient	Density (g/cm ³)	Color	Solid contents (%)
SP-H	Polycarbonate	1.05	Light brown	30
SP-L	Polycarbonate	1.02	Dark brown	30

W/B 20%, 강섬유 사용량 1.5 vol.% 1수준에 대하여 시리즈 10에서 도출된 고성능 감수제와 사용량을 적용한 배합에 충전재 크기를 2, 4, 12, 15, 22 μm 의 5 수준으로 변화시켜 실험계획 하였다.

사용재료로서 OPC, SF 및 Zr의 물리·화학적 특성을 Table 3에 나타내었다. SF와 Zr은 SiO₂를 주성분으로 하고 있으나, Zr은 ZrO₂의 성분이 3.9%가 포함되어 있으며, 비표면적이 80,000g/cm²으로 SF보다 훨씬 작은 것이 특징이다. 충전재는 평균입자 2, 4, 12, 15, 22 μm 를 사용하였고, 그 물리·화학적 성질은 Table 4와 같다. 잔골재는 밀도 2.62g/cm³, 평균입경이 0.5mm 이하의 규사를 사용하였고, 굵은 골재는 사용하지 않았다. 고성능감수제로서 SP-H 및 SP-L은 폴리칼본산계를 사용하였고 그 물리적 성질은 Table 5와 같다. 자기수축 저감을 목적으로 CSA계 팽창재(EA) 및 글루클계 수축저감제(SRA)를 사용하였다. 또한 UHPC의 인성향상을 위한 강섬유로서 직경이 0.2mm인 강섬유를 길이 20mm 및 16mm로 구분하여 각각 콘크리트 체적비로 1% 및 0.5%를 조합사용 하였다.

2.2 실험 방법

실험방법으로 유동성은 KS L 5105의 플로 시험에 의거한 미니 슬럼프 플로 및 KS F 2594에 의거하여 슬럼프 플로를 측정하였고, 슬럼프 플로 측정 시 초시계를 이용하여 슬럼프 플로가 500mm에 도달하는 시간을 측정하였다. 시리즈 10에 대해서는 0, 30, 60분의 경시변화를 주어 각각 측정하였다.

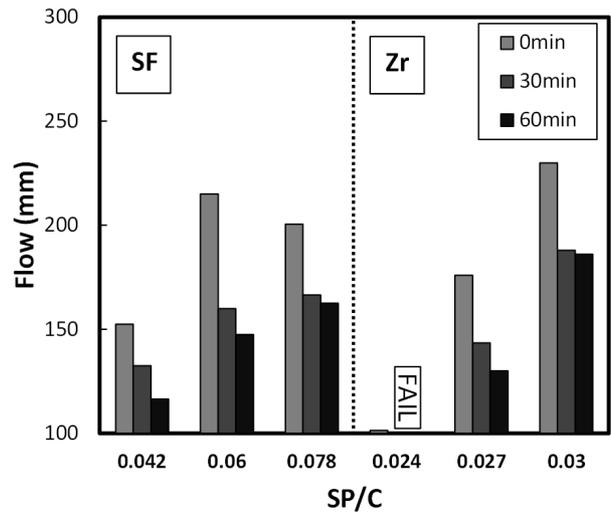
압축강도 시험은 계획된 재령에 $\varnothing 100 \times 200\text{mm}$ 의 원주 공시체를 제작하여 경화 후 90°C의 수조에서 48시간동안 고온양생 한 후 KS F 2405에 의거하여 계획된 재령에 따라 최대용량 3,000 KN의 UTM을 사용하여 수행하였다.

3. 실험결과 및 분석

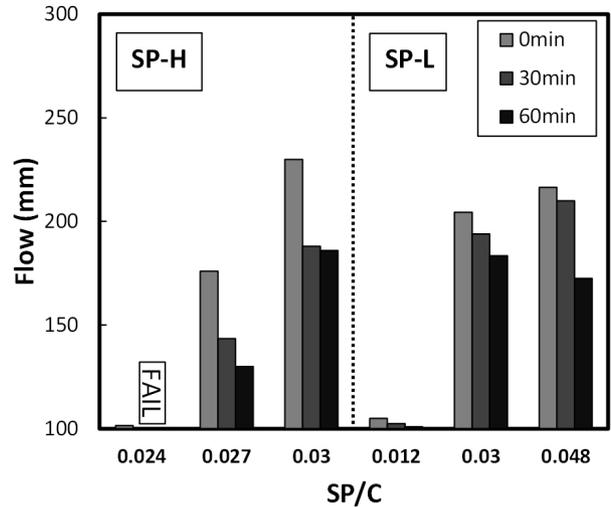
3.1 고성능 감수제 종류 및 사용량 변화에 따른 Zr-UHPC 특성

3.1.1 굳지않은 UHPC 특성

Fig. 1은 SP제 종류 및 사용량에 따른 경과시간별 UHPC의 미니 플로를 나타낸 것이다. 전반적으로 고성능 감수제 사용량이 증가함에 따라 배합 직후의 미니 플로는 증가하는 경향이있다. 또한, Zr을 사용함에 따라 미니 플로가 높게 나타났으며 특히 Zr0.030SP-H의 경우는 배합직후 미니 플로가 215mm로 가장 높게 나타났다. 그러나 경과 시간이 지남에 따라 플로값은

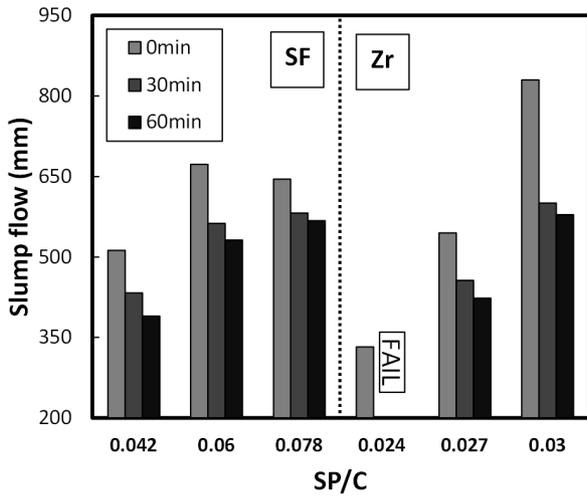


a) Flow according to SP contents and silica fume type

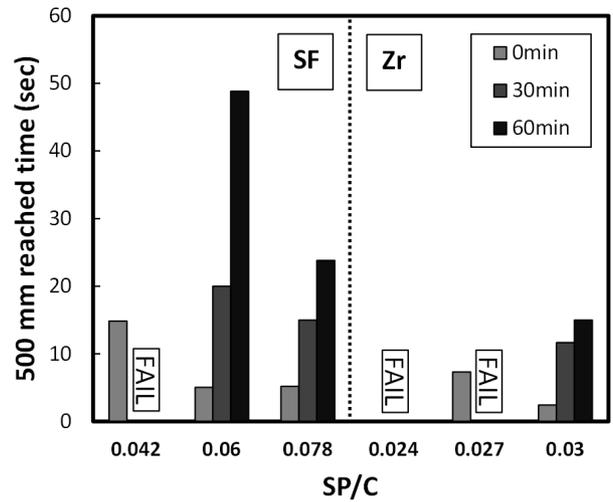


b) Flow according to SP contents and type

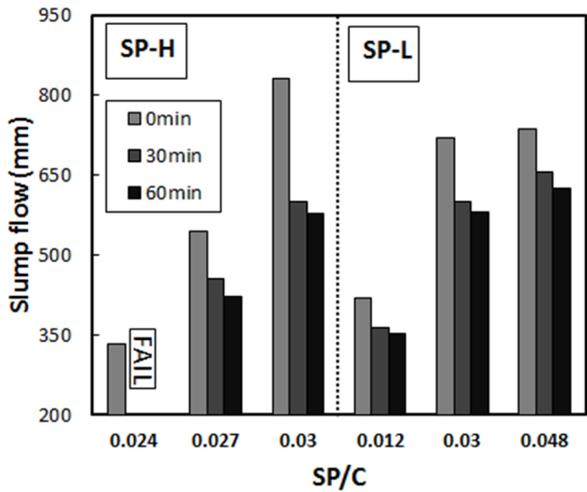
Fig. 1. Flow of UHPC according to SP content



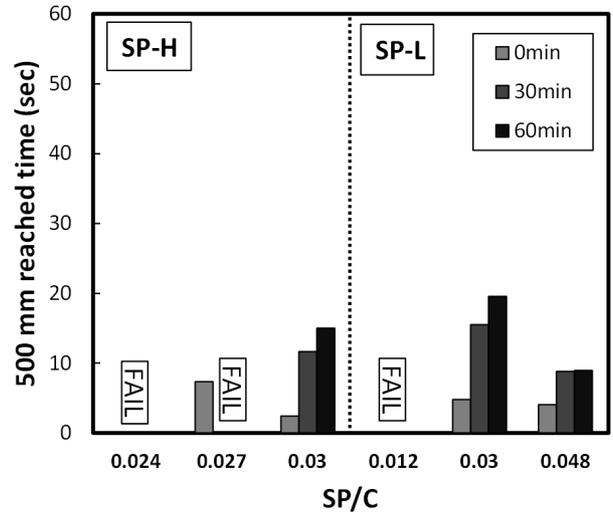
a) Slump flow according to SP contents and silica fume type



a) 500 mm reached time according to SP contents and silica fume type



b) Slump flow according to SP contents and type



b) 500 mm reached time according to SP contents and type

Fig. 2. Slump flow of UHPC according to SP content

Fig. 3. 500 mm reached time of UHPC according to SP content

저하하였고, 기존 고가의 SP제 즉, SP-H가 저가형 고성능 감수제인 SP-L에 비하여 경시변화에 취약한 경향을 나타내었다. 이를 정량적으로 검토해 보고자 반입시의 미니 플로치 대비 경시변화에 따른 미니 플로치의 저하율을 분석하였다. SF-UHPC가 Zr-UHPC에 비하여 경시변화에 취약한 것으로 나타났는데, SF0.060SP-H의 경우 배합 60분 후에 플로치가 약 31% 저하하였고, Zr-UHPC 중 Zr0.027SP-H가 SP제를 2.7% 즉, SF를 사용한 UHPC에 비하여 45%의 양만 사용함에도 불구하고 약 26%가량 저하하였다. 이는 SF의 수분흡착량이 Zr에 비하여 상대적으로 높기 때문에 경시변화에 따른 유동성 저하 정도가 높은 것으로 사료된다. 또한, 이 결과로부터 Zr-UHPC의 경우 고성능 감수제를 적게 사용하더라도 작업성의 확보가 가능하다고 판단된다.

한편 SP-L을 사용한 Zr-UHPC의 경우에는 배합 후 60분에서 20% 이하의 저하율을 나타내었다. 이는 Zr을 사용함에 따라 고성능 감수제의 종류, 브랜드 등에 제약이 없는 UHPC의 제조가 가능하다는 것을 시사한다.

Fig. 2는 SP제 종류 및 사용량에 따른 경과시간별 UHPC의 슬럼프 플로를 나타낸 것이고, Fig. 3은 500mm 도달시간을 나타낸 것이다.

먼저 저가 고성능 감수제를 사용한 Zr0.030SP-L의 경우 배합직후 슬럼프 플로는 720mm로 양호하게 나타났고, 60분경과 후에도 슬럼프 플로 580mm으로 우수한 유지성능을 보이고 있다. 500mm 도달시간도 Zr0.030SP-L이 배합직후 4.7초, 배합

60분 후에 19.5초로 나타났고, Zr_{0.030}SP-H의 경우는 500mm 도달시간이 배합직후 2.4초, 배합 60분 후에 15초로 나타났다. 500mm 도달시간이 2초~4초 사이로 나타나는 배합의 경우 점성이 상당히 낮기 때문에 강섬유와 UHPC 매트릭스 사이에 접착능력이 저하한다. 이로 인하여 밀도가 큰 강섬유가 UHPC 경화 전에 밑으로 가라앉는 재료분리 현상을 야기할 수 있다. 따라서 UHPC에 고성능 감수제를 다량으로 사용해서 초기 유동성을 급격히 증가시키는 것은 오히려 품질 저하의 원인이 될 수 있기 때문에 배합시 적절한 점성의 확보도 중요한 요소라고 판단된다.

경시변화에 따른 슬럼프 플로 저하는 SF-UHPC의 경우 경시변화에 따라 슬럼프 플로가 저하하여 SF_{0.042}SP-H는 배합 후 60분에서 약 24%정도 슬럼프 플로가 저하하였다. 또한 Zr-UHPC의 경우 SP-H를 사용한 배합이 오히려 SP-L을 사용한 배합보다 슬럼프 플로 저하율이 크게 나타났다. 이는 기존에 사용해왔던 SP-H가 100MPa급 이상 초고강도 콘크리트에 사용할 목적으로 개발되어서 배합 초기의 시멘트 매트릭스에 작용하는 분산력 증가에 초점이 맞춰짐에 기인한 것이라고 판단된다. 반면 SP-L의 경우는 현재 실무 건설공사에 사용되고 있는 종류로서 레미콘 운반 및 타설 시간 확보를 위한 유지시간이 고려되어 있다. 이에 따라 Zr-UHPC에도 SP-H에 비하여 경시변화에 대해 우수한 성능이 발현된다고 사료된다.

Fig. 4는 미니 플로 측정치와 슬럼프 플로 측정치의 관계를 나타낸 것이다. 전반적으로 미니 플로와 슬럼프 플로의 관계는 0.92 이상의 높은 상관관계를 나타내었다. 미니 플로는 100~250mm의 범위에서 데이터를 확보할 수 있었으나 슬럼프 플로

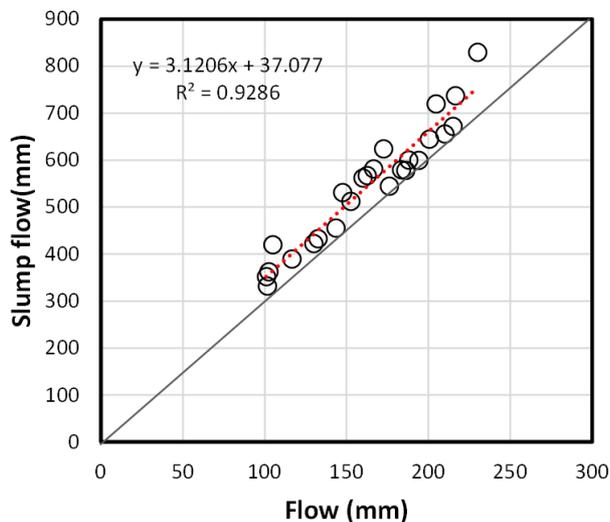


Fig. 4. Relationship between flow and slump flow

는 300~900mm의 범위에 데이터가 분포해 있었다. 이는 슬럼프 플로의 경우 미니 플로보다 플로 데이터의 세분화가 가능하다는 것을 시사한다. 또한 슬럼프 플로를 측정할 때 500mm 도달시간을 측정하여 UHPC의 점성에 대한 평가를 동시에 진행할 수 있는 장점이 있다.

3.1.2 압축강도 특성

Fig. 5는 SP제 종류 및 사용량에 따른 UHPC의 압축강도를 나타낸 것이다. SF를 사용한 UHPC의 경우에는 SP제 사용량에 관계없이 180MPa 이상의 압축강도를 발현하였다. 그러나 Zr 미분말을 사용한 배합의 경우에는 압축강도가 약간 저하하였으나 Zr_{0.024}SP-H를 제외하고 180MPa 이상으로 나타났다. Zr_{0.024}SP-H배합은 151MPa를 나타내었는데, 이는 Zr_{0.024}SP-H의 경우 슬럼프 플로가 350mm 이하를 나타내어 굳지않은 상태에서의 유동성 저하에 의하여 콘크리트의 충전이 잘 이루어지지 않은 것으로 분석된다. Zr를 사용한 UHPC의 여타 배합은 유동성이 확보된 상태에서 180MPa급 강도 발현이 가능한 것으로 판단된다.

3.2 충전재 크기 변화에 따른 Zr-UHPC 특성

3.2.1 굳지않은 UHPC 특성

Fig. 6~7은 충전재 크기에 따른 Zr-UHPC의 슬럼프 플로 및 500mm 도달시간을 나타낸 것이다. 전반적으로 충전재 크기 증가에 따른 슬럼프 플로는 일정한 경향은 나타내지 않았다. 먼저 기존 UHPC에 사용하는 충전재인 F02의 경우 슬럼프 플로그가 590mm로 나타났고, 이보다 1단계 큰 사이즈인 F04의 경우

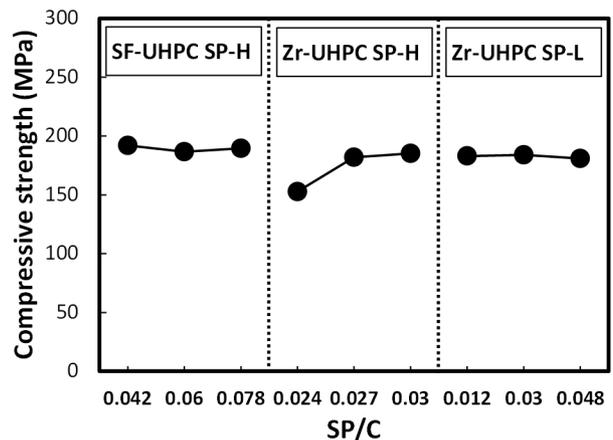


Fig. 5. Compressive strength of UHPC according to SP types and contents

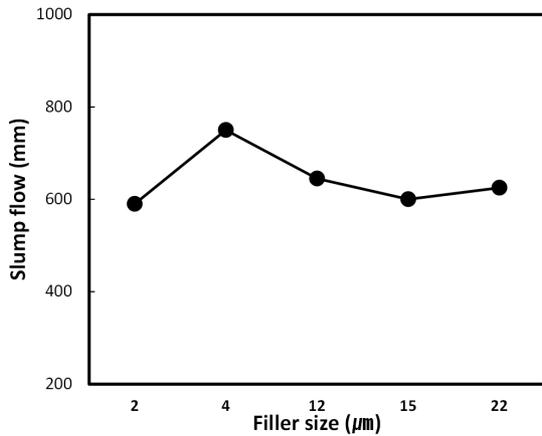


Fig. 6. Slump flow with filler size

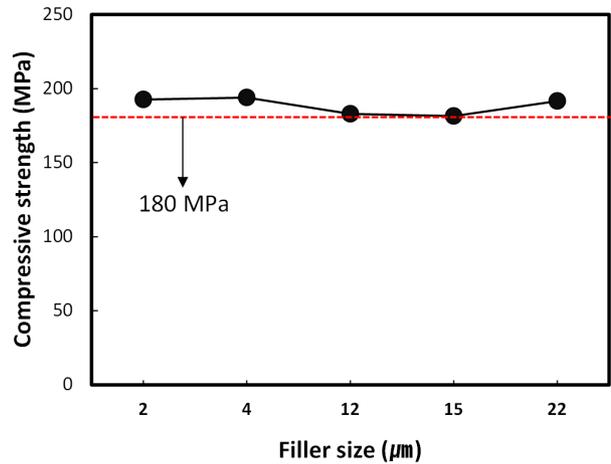


Fig. 8. Compressive strength according to filler size

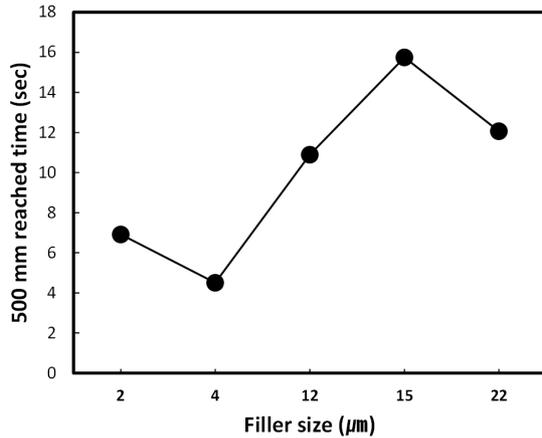


Fig. 7. 500 mm reached time with filler size

는 750mm로 가장 높게 나타났다. 이는 4μm 충전재를 사용함으로써 시멘트와 Zr 크기의 중간 범위에서 충전을 해줌과 동시에 구형 입자로 인한 볼 베어링 효과에 의한 것으로 판단된다. 한편, 충전재 크기가 12μm 이상인 경우는 전반적으로 600~645mm로 나타났다.

500mm 도달시간은 4μm를 제외하고 충전재의 크기가 증가함에 따라 증가하는 경향이었다. 이는 12~22μm의 크기가 시멘트의 평균 입자 사이즈와 비슷한 범위를 나타내는데, 이와 같이 비슷한 크기의 입자 간에 인력이 발생해서 생기는 응집현상에 의해 분체의 점성이 증가한 것으로 분석된다.

3.2.2 압축강도 특성

Fig. 8은 충전재 크기에 따른 Zr-UHPC의 압축강도를 나타낸 것이다. 충전재의 크기 변화에 관계없이 모든 배합에서 압축강도 180MPa 이상 발현하였다. 또한 충전재 크기가 증가함에 따

른 압축강도의 증감 경향은 보이지 않았다. Zr-UHPC의 경우 충전재의 크기 변화에 따른 압축강도 차이는 보이지 않았지만, 앞서 검토했던 유동성 실험 결과로 미루어 볼 때 평균입경 4μm의 충전재가 압축강도, 유동성 및 점성 세가지 측면에서 모두 우수한 성능을 나타내었다. 또한 SF-UHPC 배합에서는 충전재의 입경을 2μm로 사용하였는데, 충전재의 크기가 커지는 만큼 충전재 생산 과정 중 분쇄 공정이 단축됨에 따라 판매가격의 저하를 기대할 수 있다.

3.3 Zr-UHPC의 제조비용 검토

Fig. 9는 SF-UHPC 및 Zr-UHPC의 재료단가율을 나타낸 것이다. 먼저, SF-UHPC를 제조하는데 들어가는 제조비는 약 1,500천원/m³으로 분석되었다. 이 때, SF의 경우 전체 비용의 약 6.9% 수준으로 나타났고, SP-H의 경우 전체 비용의 약 25.7% 수준으로 나타났다. 반면 Zr-UHPC를 제조하는데 들어가는 제조비는 약 1,000천원/m³으로 분석되었는데, SF를 사용한 배합에 비하여 약 33% 절감할 수준이다. 각 재료별 비용의 비율로서 Zr은 21.7% 수준으로 SF-UHPC에서 차지하는 SF의 비용에 비하여 증가하였으나 SP-L 즉, 저가형 고성능 감수제의 비용은 Zr-UHPC 제조비용의 2.6%로 나타나 SF-UHPC에 비하여 크게 낮아졌다. 충전재 및 잔골재의 비율은 상대적으로 증가하였으며 수축저감제 및 팽창재의 비율도 증가하였다. 이에 따라 향후 Zr을 사용한 UHPC의 추가적인 경제성 확보 방향은 사용량에 비하여 비교적 고가인 수축저감제 등의 재료를 위주로 검토되어야 한다고 사료된다.

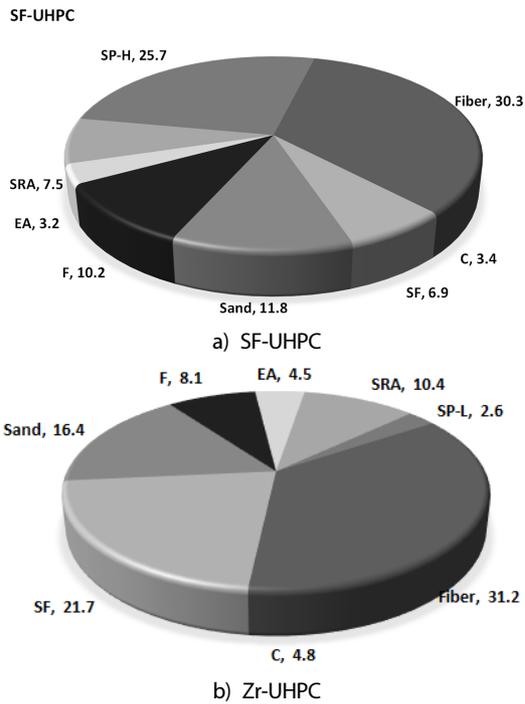


Fig. 9. Material unit price ratio of UHPC

4. 결론

본 연구에서는 Zr을 사용한 UHPC에 대하여 고성능 감수제 사용량 및 종류, 충전재 크기 변화에 따라 공학적 특성을 분석하고 제조비용을 검토하였는데, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

굳지않은 콘크리트의 특성으로 Zr-UHPC 배합은 SF-UHPC 배합에 비하여 고성능 감수제 사용량을 절반 이상 저감할 수 있는 것으로 나타났고, 저가형 고성능 감수제인 SP-L을 사용해도 우수한 유동성을 발현하였다. 또한 충전재 크기 4mm에서 유동성 및 점성이 우수하게 나타났다. 역학적 특성으로 Zr-UHPC의 압축강도는 180MPa 이상으로 나타나 SF-UHPC와 동등한 수준이었다.

실험 결과들로부터 W/B 20%, Zr 100% 사용, SP-L 사용량 2~3%, 강섬유 혼입율 1.5 vol.%인 Zr-UHPC 배합을 도출하였다. 도출된 배합은 SF-UHPC 대비 33%의 제조비용 절감이 가능한 것으로 분석되었다.

이상을 종합하면, 압축강도 180MPa급 UHPC를 제조함에 있어서 반응성 분체로서 SF 대신 Zr을 사용하면 콘크리트의 품질 저하 없이 경제적인 UHPC를 제조할 수 있을 것으로 판단된다. 추후 Zr-UHPC에 사용되는 팽창재, 수축저감제 등의 사용량 및 종류에 대한 검토를 하여 보다 경제적인 UHPC를 개발할 필요가 있다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원 건설기술연구사업의 연구비지원(13건설연구A02)에 의해 수행되었습니다.

References

Boulay, C., Rossi, P., Tailhan, J.L. (2004). Uniaxial tensile test on a new cement composite having a hardening behavior, In: Proceeding of Sixth RILEM Symposium in Fiber-reinforced Concretes (FRC), BEFIB, Varenna, Italy.

Cavill, B., Rebentrost, M., Perry, V. (2006). Ductal®-An Ultra-High Performance Material for Resistance to Blasts and Impacts, In 1st Specialty Conference on Disaster Mitigation.

Koh, K.T., Ryu, G.S., Park, J.J., An, K.H., Kim, S.W., Kang, S.T. (2013). Effects of the composing materials on the rheological and mechanical properties of ultra-high performance concrete (UHPC), RILEM-fib- AFGC International Symposium on Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete, 749-756. Korea Institute of Civil and Building Technology. (2012). Development of the Advanced Technology of Toughness in Ultra High Performance Concrete for Hybrid Cable Stayed Bridge [in Korean].

Naaman, A.E., Wille, K. (2012). The Path to Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHP-FRC) : Five Decades of Progress, Proceedings of Hipermat, 3-16.

Richard, P., Cheyrezy, M.H. (1994). Reactive Powder Concretes with High Ductility and 200-800MPa Compressive Strength, ACI Spring Convention.

Richard, P., Cheyrezy, M.H. (1995). Reactive Powder Concrete, Cement and Concrete Research, **25(7)**.

Wille, K., Kim D.J., Naaman A.E. (2011). Strain hardening UHP-FRC with low fiber contents, Mater Struct, **44**, 583-598.

Wille, K., Naaman, A.E., Parra-Montesinos, G.J. (2011). Ultra-high performance concrete with compressive strength exceeding 150MPa (22 ksi): a simpler way, ACI Mater J, **108(6)**, 46-54.

실리카폼 종류가 초고성능 콘크리트의 공학적 특성에 미치는 영향

초고성능 콘크리트(UHPC)는 낮은 물-결합재비를 바탕으로 다량의 강섬유, 실리카폼, 충전재 및 고성능 감수제를 사용한다. UHPC는 높은 역학적 성능을 가지는 대신 실리카폼을 사용함에 따라 점성이 증가되며 고가의 재료를 다량으로 사용하기 때문에 제조비용이 일반 콘크리트에 비하여 고가이다. 따라서 본 연구에서는 180MPa급 UHPC의 점성 저하를 위하여 실리카폼 대신 지르코늄 실리카폼(Zr)을 사용한 UHPC의 고성능 감수제(SP)의 사용량 및 종류, 충전재 크기에 따른 공학적 특성을 분석하였다. 그 결과 W/B 20%, Zr 100% 사용, SP-L 사용량 2~3%, 강섬유 혼입율 1.5 vol.%이고 4 μ m의 충전재를 사용하는 Zr-UHPC의 경우 기존의 실리카폼을 사용한 배합에 비하여 우수한 유동성을 발현하고 압축강도 180MPa이상 확보 하였다. 또한 기존 UHPC 대비 33%의 제조비용 절감이 가능한 것으로 분석되었다.