

## 산업부산물들 혼입에 의한 친환경 초고성능 콘크리트의 유동화제 사용량 감소

김희애 · \*표석훈 · 김형기\*

한국철도기술연구원 신교통연구본부, \*조선대학교 건축학부 (건축공학전공)

### Reduction of Superplasticizer Dosage in Eco-friendly Ultra-high Performance Concrete by Adopting Industrial by-Products

Heeae Kim, \*Sukhoon Pyo and Hyeong-Ki Kim\*

New Transportation Systems Research Center, Korea Railroad Research Institute, 176 Railroad Museum Road, Uiwang 16105, Korea

\*School of Architecture, Chosun University, 309 Pilmun-daero, Dong-gu, Gwangju 501-759, Korea

#### 요 약

산업부산물을 사용한 친환경 초고성능 콘크리트(Ultra-high performance concrete, UHPC)의 시공성 확보를 위해 요구되는 초유동화제의 적정 혼입량을 검토하였다. UHPC에 적용한 산업부산물은 고로슬래그 미분말, 화력발전소 바텀애시, 급랭 슬래그였다. 일반적인 UHPC에 사용되던 기존 재료를 산업부산물로 부분 혹은 전량 치환한 배합에, 다양한 초유동화제 혼입량을 적용하였다. 부산물 사용에 의해 UHPC의 유동성이 개선되었으며, 이 때 초유동화제 혼입량을 감소시킨 경우에도 유동성 및 압축강도의 저하는 발견되지 않았다. 부산물 사용 및 초유동화제 혼입량 감소로 인해 UHPC의 재료 가격이 감소함을 확인하였다.

**주제어** : 초고성능 콘크리트, 산업부산물, 고로슬래그, 바텀애시, 급랭슬래그, 초유동화제, 유동성, 재료가격

#### Abstract

Assessment on adequate dosage of superplasticizer in eco-friendly ultra-high performance concrete (UHPC) containing industrial by-products was carried out from the standpoint of workability. Various types of industrial by-products, including blast-furnace slag, coal bottom ash and rapid-cooled electric arc furnace oxidizing slag, were utilized, and the effects of dosage of superplasticizer on the workability and strength of UHPC containing the by-products were evaluated. By utilizing the by-products, the workability of UHPC was improved and required dosage of superplasticizer was reduced. In addition, the material cost for UHPC with by-products was decreased due to reduced dosage of superplasticizer.

**Key words** : Ultra High Performance Concrete (UHPC), industrial by-products, blast furnace slag, bottom ash, rapid-cooled slag, superplasticizer, workability, material cost

· Received : March 28, 2016 · Revised : May 30, 2016 · Accepted : June 13, 2016

\*Corresponding Author : Sukhoon Pyo (E-mail : shpyo@krii.re.kr)

New Transportation System Research Center, Korea Railroad Research Institute, 176 Railroad Museum Road, Uiwang-si, Gyeonggi-do, 16105, Korea

©The Korean Institute of Resources Recycling. All rights reserved. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

## 1. 서 론

초고성능 콘크리트(Ultra high performance concrete, UHPC)는 150 MPa 이상의 매우 높은 압축강도,<sup>1)</sup> 높은 연성,<sup>2)</sup> 내충격성,<sup>3,4)</sup> 및 높은 내구성<sup>5)</sup>을 가지는 고품질 매트릭스 구조로 전 세계적으로 관심 받는 재료이다. 하지만 UHPC를 구성하는 재료들은 에너지 과소비 재료일 뿐만 아니라 높은 이산화탄소 배출량으로, 환경에 미치는 부정적 영향이 우려되는 건설재료이다. 특히 UHPC를 구성하는 재료 중 하나인 포틀랜드 시멘트는 연간 생산되는 양이 약 16억 톤으로 이산화탄소 전체 배출량의 7%를 차지하는 것으로 보고되었다.<sup>6,7)</sup>

또한, UHPC를 구성하는 재료 중 실리카 미분말(Silica powder)와 규사(Silica sand)는 일반 콘크리트의 재료에 비해 상당히 고가의 재료들이다. 때문에 값비싼 UHPC는 구조물 일부에 적용되는 등 사용이 제한적이며, 현재 실리카 미분말과 규사를 저가재료로 대체하기 위한 연구들이 활발하게 진행되고 있다.<sup>10-15)</sup> 특히 Ahmad et al.<sup>11)</sup>는 사우디아라비아에서 쉽게 구할 수 있는 자원인 천연 포졸란(Natural pozzolana), 플라이애시(fly ash), 석회석 미분말(limestone powder), 클링커 분진(cement kiln dust), 제철 슬래그 미분말(pulverized steel slag) 등을 실리카흄(Silica fume) 및 규사와 대체한 UHPC 배합을 소개하였고, Zhao et al.<sup>12)</sup>는 고가의 규사를 자연 강모래(natural sand)로 대체한 green UHPC 배합을 소개하였다. 본 연구진의 기존 연구에서는, UHPC에 대량의 국내산 산업부산물을 혼입하기 위한 연구를 수행하였으며, 이때 사용된 산업부산물에는 제강공정에서 생산된 고로슬래그(Blast furnace slag), 화력발전소에서 생산된 바텀애시 미분말(Bottom ash powder), 그리고 광산폐기물 중 하나인 폐광미(Waste mine tailing) 등이 있다.<sup>16)</sup> 특히 기존에 일반적인 시멘트 대체용 결합제로 사용되는 평균입경 20 mm급(비표면적 3000 cm<sup>2</sup>/g 급)의 고로슬래그 이외에도 이를 초미분쇄한 평균입경 2 mm급의 나노슬래그를 사용하였다. 일반적인 고로슬래그를 시멘트의 40 vol.%로 치환한 결과, UHPC의 유동성이 일부 증가한 반면, 24 시간 압축강도와 같은 극초기 강도가 명확히 감소함을 확인하였다. 나노슬래그를 실리카흄 사용량의 50 vol.%와 치환하여 배합 한 경우 명확한 유동성 증가 이외에도 3일 강도 증가 등의 효과를 얻을 수 있었다. 그 밖에, 바텀애시 미분말을 실리카 미분말과 치환하여 사용

할 경우 유동성이 증가하였으며, 이는 동일한 양의 플라이애시를 실리카 미분말과 치환한 경우의 유동성 보다 더 높은 값이었다.<sup>16)</sup> 특히, 이 때 사용한 바텀애시 미분말은 플라이애시에 비해 입도가 작은 것을 사용한 것으로서, 일반적으로 입도가 작은 분말을 사용할 경우 콘크리트의 유동성이 떨어지는 기존의 결과와 반대되는 결과였다. 바텀애시 미분말을 실리카 미분말과 치환하여 적용한 UHPC의 경우 동일부피비의 플라이애시를 사용한 배합에 비해 타설 후 24시간 극초기 압축강도가 두배 이상 높은 것을 확인 할 수 있었다. 이는 일반적으로 바텀애시는 플라이애시에 비해 콘크리트의 강도에 기여하는 효과가 낮은 것으로 알려진 기존의 결과에 반하는 것이었다. 바텀애시를 파쇄할 경우, 바텀애시 내부의 높은 포졸란 반응성을 지닌 부분이 외부에 노출되기 때문에 이와 같은 현상이 발생될 것으로 추정된다.<sup>16)</sup> 이와 같이, 기존에 사용하던 시멘트, 실리카 미분말, 규사, 혹은 실리카흄 등을 적당한 산업부산물로 치환하게 되면, 큰 폭의 성능감소는 없이 친환경화 및 재료가격 감소가 가능하다.

본 연구는, 산업부산물을 사용한 친환경 UHPC의 시공성 확보를 위해 요구되는 초유동화제(초고성능감수제)의 적정 혼입량을 검토하기 위해 수행되었다. 위에서 언급한 바와 같이, 일반 UHPC에 산업부산물을 사용할 경우 얻어지는 가장 큰 장점 중 하나는 유동성의 증가이다. UHPC는 일반강도 콘크리트에 비해 분체(Powder)의 혼입량이 극단적으로 많은 배합이다. 따라서, 유동성 확보를 위해 사용하는 초유동화제의 양도 일반강도 콘크리트에 비해 매우 많은 편이다. 동일한 초유동화제 혼입량을 사용한 경우 산업부산물 사용에 의해 UHPC 유동성이 증가된다는 것은, 동일한 유동성 확보를 위해 필요한 초유동화제의 요구량이 감소한다는 것을 의미한다. 특히, UHPC에 사용되는 초유동화제는 일반강도 콘크리트에 사용되는 초유동화제보다 성능이 월등하기 때문에 가격이 매우 비싸다. 따라서, UHPC에 산업부산물을 사용하게 되면 기존 재료에 대한 비용이 감소할 뿐 아니라 초유동화제에 대한 비용도 추가적으로 감소하게 되므로, UHPC 생산가격이 대량으로 감소하게 된다. 이러한 친환경 UHPC 배합에서 초유동화제 사용량 감소에 따른 유동성과 압축강도 변화를 측정하였다. 동시에, 이 배합들의 재료단가를 계산하여 경제성을 분석하였다.

Table 1. Chemical compositions of binder and filler materials<sup>16)</sup>

Component	Contents (%)				
	Cement	Silica fume	Silica powder	GGBFS	Bottom ash
SiO <sub>2</sub>	23.0	95.0	97.2	34.1	48.0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.41	0.0	0.0	14.8	20.1
CaO	60.6	0.27	0.20	41.9	7.11
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.13	0.31	0.23	0.98	8.77
MgO	3.68	0.64	0.31	6.61	3.13
TiO <sub>2</sub>	0.0	0.67	0.77	1.00	1.11
MnO	0.08	0.15	0.13	0.30	3.13
L.O.I.	2.24	2.19	0.91	1.32	8.10

## 2. 재료 및 실험 방법

### 2.1. 사용재료

본 논문의 UHPC 배합 설계에 사용된 산업부산물은 고로슬래그 미분말(Ground granulated blast-furnace slag, GGBFS), 급랭 산화슬래그 (Rapid-cooled, electric arc furnace oxidizing slag, REOS), 바텀애시(Coal bottom ash)이다. GGBFS는 용광로에서 선철(Pig iron) 제조 시 얻어지는 부산물로서 콘크리트를 구성하는 시멘트와 부분교체 되었을 때 환경적인 측면과 경제적인 측면에 긍정적인 영향을 기대할 수 있다 보고되고 있다. 또한 콘크리트의 공극률을 낮게 만들어 내구성을 향상시키는 잠재수경성 재료로, 전 세계적으로 수년간 사용되고 있는 콘크리트 재료이다.<sup>16)</sup> REOS는 제강슬래그 부산물로서 제강슬래그를 급랭하는 도중 발생하는 전기로 산화슬래그(EAF oxidizing slag)이다. REOS의 입자는 매끄럽고 둥근 형태를 가지고 있기 때문에 REOS를 적용한 콘크리트는 Ball bearing 효과에 따른 효과적인 유동성을 기대할 수 있다 보고되고 있다.<sup>17,18)</sup> 일부 연구에서 REOS를 분쇄하여 결합재로 사용하지만, 본 연구에서는 규사를 치환하여 골재(혹은 충전재)로 사용하였다. 바텀애시는 플라이애시와 함께 화력발전소에서 생성되는 부산물로, 화석연료의 연소과정에서 발생하는 석탄재이다. 플라이애시의 대부분은 현재 다양한 용도로 재활용 되고 있지만, 석탄재 중 약 15~25%(연간 110~184 만 톤, 2009 기준)를 차지하는 바텀애시는 대부분 단순 매립되고 있어 환경적으로 문제가 크다.<sup>19)</sup> 때문에 바텀애시를 재활용하기 위해 콘크리트에 적용한 연구들이 세계 각국에서 수행되고 있다.<sup>19,20,21)</sup> 본 연구

에서는 바텀애시를 볼밀(Ball mill)로 분쇄하여 미분화한 후 사용하였다.

배합에 사용된 일반 UHPC용 재료는 1종 보통 포틀랜드 시멘트, 실리카폼, 실리카 미분말, 그리고 규사이다. 일반적으로 반응성이 있는 미분인 시멘트와 실리카폼은 결합재, 반응성이 없는 미분인 실리카 미분말은 충전재(Filler), 그리고 입자가 상대적으로 큰 규사는 골재로 구분한다. 사용된 실리카 미분말의 평균입경( $D_{50}$ )은 3.15  $\mu\text{m}$ 이다. 그 밖에 시멘트, 실리카폼, 고로슬래그 미분말, 바텀애시 미분말의 입도분포 및 평균입경은 Pyo et al.<sup>16)</sup>에 나타나 있으므로, 본 논문에서는 생략한다. 본 연구에서 결합재와 충전재로 사용된 재료들의 화학조성(XRF 실험결과)은 Table 1에 나타나 있다.

REOS의 형상은 Fig. 1과 같다. REOS는 규사의 대체 재료로 규사와 입도분포가 비슷하도록 입도조절 되었으며, 규사와 REOS는 각각 두 가지 크기로 배합시험에 사



Fig. 1. Particle shape of rapid-cooled, electric arc furnace oxidizing slag (REOS).



Fig. 2. High strength steel fibers.

용되었다. 규사 (Silica sand) I, II의 평균입자크기는 각각 0.15 mm ( $D_{min} = 0.72 \mu m$ ,  $D_{max} = 716.8 \mu m$ ), 0.53 mm ( $D_{min} = 1.15 \mu m$ ,  $D_{max} = 1660 \mu m$ )이며, REOS I, II의 평균입자크기는 각각 0.16 mm ( $D_{min} = 36.24 \mu m$ ,  $D_{max} = 948.3 \mu m$ ), 0.54 mm ( $D_{min} = 1.05 \mu m$ ,  $D_{max} = 1512 \mu m$ )이다. 포틀랜드 시멘트, 실리카폼, 실리카 미분말, 규사, 바텀애시, GGBFS, 그리고 REOS의 비중은 각각 3.15, 2.30, 2.65, 2.65, 2.47, 2.90, 3.83이다. 실리카 미분말과 REOS의 흡수율은 모두 0.2% 이하였다. 사용된 재료의 기타 물리적 특성은 Pyo et al.<sup>16</sup>에서 이미 제시하였다. 강섬유의 형상은 Fig. 2와 같이 직선형이며, 직경 0.2 mm, 길이 19.5 mm으로 2450 MPa 이상의 인장강도를 가지고 있다. UHPC 유동성 확보를 위해 사용된 초유동화제는 polycarboxylate계(고형분 25%)의 혼화제이다. 사용된 모든 재료의 단위무게당 가격은 Table 2에 나타내었다.

### 2.2. 배합설계

설계된 배합은 9가지로 배합비는 중량비로 나타내었다(Table 3, Table 4). 시멘트 일부는 GGBFS로, 실리카 미분말은 바텀애시로, 규사는 REOS로 대체되었다. Series A는 GGBFS와 바텀애시가 UHPC에 적용되었을 때 초유동화제의 양에 따른 영향을 알아보기 위해 설계된 배합으로, GGBFS를 사용한 배합명의 첫 글자를 'G'로, 이에 대한 시멘트 치환률의 퍼센트를 그 뒤의 값으로 표시하였다. 실리카 미분말을 바텀애시로 전량 치환한 배합의 경우 그 뒤에 'B'로 표시하였다. 그 뒤의 'sp'후 나타난 값은 결합재량 당 초유동화제 고형분의 혼입량을 나타내었다.

따라서, 기본배합(Control)에 바텀애시를 사용한 배합을 G0Bsp11로 표기하였고, 추가적으로 시멘트의 30 중

Table 2. Cost for materials in UHPC

Materials		Cost (KRW/kg)
Binder	Cement	80
	GGBFS	46.4
	Silica fume	728
	Silica powder	364
	Bottom ash powder	29
Aggregate	Silica I	51.9
	Silica II	42.8
	REOS I	40
	REOS II	40
Steel fiber		4,000
Superplasticizer		5,000

량%를 GGBFS로 대체한 배합은 G30Bp11으로 표기되었다. 또한 초유동화제 혼입량을 0.011에서 0.007로 줄인 배합이 설계되었다. 바텀애시가 적용된 배합은 G0Bsp7로 표기되었고, 추가적으로 시멘트 30 중량%를 GGBFS로 대체한 배합을 G40Bsp7로 표기되었다(Table 3). Series B는 시멘트 40 중량%를 GGBFS로, Silica powder를 바텀애시로 대체한 배합을 기준으로, REOS에 따른 초유동화제의 혼입량이 물리적 특성에 미치는 영향을 알아보기 위해 설계된 배합이다(Table 4). 첨가되는 혼화제의 고형분량이 0.011, 0.009, 0.008, 0.007, 0.006으로 줄어들며 첨가되는 배합은 GBsp11, GBsp9, GBsp8, GBsp7, GBsp6으로 표기되었다.

### 2.3. 실험방법

모든 배합은 Hobart type의 믹서로 동일하게 제조되었다. 실리카폼과 골재는 5분 동안 건배합 하였고, 시멘트, 실리카 미분말, 바텀애시 미분말, GGBFS를 추가하여 5분 더 건배합 하였다. 이후 물과 유동화제를 첨가 후 재배합 하였으며, 대부분의 혼합물들은 3분 안에 유동성이 확보되었다. 굳지 않은 UHPC의 유동성은 ASTM C230/C230M 기준에 준하여 측정된 Flow 값을 통해 평가하였다. Flow 측정 시 굳지 않은 UHPC의 유동성이 매우 컸기 때문에 기준에서 제시한 다짐과 Flow table의 상하 낙하는 생략되었다. 강섬유를 첨가한 배합의 Flow는 섬유 첨가 후 배합 5분 뒤 측정되었다. 그 후 50 × 50 × 50 mm<sup>3</sup>의 정육면체 몰드에 진동 없이 타설되었고, 비닐로 덮어 표면증발 및 소수수축(Plastic

**Table 3.** Mix design, performance and cost of UHPC for Series A

Series A		Control	G0Bsp11	G0Bsp7	G30Bsp11	G40Bsp7
Mix proportion						
Cement		1	1	1	0.7	0.6
GGBFS		-	-	-	0.3	0.4
Silica Fume		0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
Silica powder		0.25	-	-	-	-
Bottom Ash		-	0.25	0.25	0.25	0.25
Water		0.22	0.22	0.22	0.22	0.22
Superplasticizer (Solid content)		0.011	0.011	0.007	0.011	0.007
Fiber (volume fraction)		1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Aggregate	Silica I	0.306	0.3	0.302	0.3	0.302
	Silica II	0.714	0.7	0.705	0.7	0.705
Performance and cost						
Flow (mm)	without fiber	180	150	175	213	225
	with fiber	180	135	170	223	234
Compressive strength (MPa)	7 days	134	-	143	128	127
	14 days	154	-	140	131	149
	28 days	166	155	147	149	164
Cost of UHPC (1,000 KRW/m <sup>3</sup> )		836	764	704	757	695

**Table 4.** Mix design, performance and cost of UHPC for Series B

Series B		Control	GBsp11	GBsp9	GBsp8	GBsp7	GBsp6
Mix proportion							
Cement		1	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
GGBFS		-	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
Silica Fume		0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
Silica powder		0.25	-	-	-	-	-
Bottom Ash powder		-	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
Water		0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22
Superplasticizer (Solid content)		0.011	0.011	0.009	0.008	0.007	0.006
Fiber (volume fraction)		1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Aggregate	Silica I	0.306	-	-	-	-	-
	Silica II	0.714	-	-	-	-	-
	REOS I	-	0.385	0.386	0.387	0.388	0.389
	REOS II	-	0.899	0.901	0.903	0.904	0.906
Performance and cost							
Flow (mm)	without fiber	180	249	245	255	245	240
	with fiber	180	270	273	273	260	273
Compressive strength (MPa)	7 days	134	108	110	112	115	108
	14 days	154	-	-	134	137	131
	28 days	166	139	138	145	143	148
Cost of UHPC (1,000 KRW/m <sup>3</sup> )		836	760	735	717	700	682

shrinkage)를 막은 후 실온에서 24시간 보관되었다. 탈영된 시험체는 23°C의 수조에서 양생되었으며, 양생이 끝난 후 24시간 상온 보관 뒤 건조 상태에서 KS F 2405 규격에 따라 압축강도시험이 진행되었다.

### 3. 실험결과 및 분석

#### 3.1. 초유동화제 감소에 따른 친환경 UHPC의 유동성

Series A의 5가지 배합에 대한 유동성(Flow) 값은 Fig. 3(a)에 나타내었다. 참고로, 실험결과와 효과적인 가지적 비교를 위해 Table 3, 4의 결과 중 일부를 정리하여 Fig. 3로 나타낸 것이다. 초유동화제 혼입량을 변화 시키지 않고 실리카 미분말을 바텀애시로 대체한 경우 (Control 및 G0Bsp11), 오히려 유동성의 감소가 발생하는 것을 알 수 있다. 이는 실리카 미분말과 바텀애시의 비중 차이에서 발생한 결과이다. 실리카 미분말의 비중이 2.65인데 반해 바텀애시의 비중은 그보다 약간 작은 2.47이다. 실리카 미분말을 동일 무게만큼 치

환할 경우 분체가 차지하는 부피가 그만큼 증가하게 되고 이로 인해 단위수량(Unit weight of water, 콘크리트 1 m<sup>3</sup> 당 혼입되는 물의 양)이 감소하는 것과 같은 효과를 나타낸다. 따라서 이로 인한 유동성 감소가 발생할 수 있다. 그러나, G0Bsp7에 나타난 것 같이, 초유동화제의 고형분을 시멘트 무게 대비 0.011에서 0.007로 감소한 결과 유동성이 오히려 증가하는 현상을 확인할 수 있었다. 일반적으로 콘크리트 배합에서 유동화제의 혼입량이 증가하면 유동성은 당연히 증가하게 된다. 실제, Control 배합은 본 연구진에 의한 연구에 의해 개발된 최적의 초유동화제 혼입량을 사용한 배합으로, 이보다 혼입량이 감소할 경우 유동성이 감소하게 된다. 하지만, UHPC와 같이 분체량이 극단적으로 높은 배합의 경우, 분체의 조성이 달라진 상태에서 고형분량의 높은 점성에 의해 오히려 유동성이 감소할 수 있다는 것을 나타낸다.

초유동화제 혼입량 변동 없이 슬래그를 시멘트와 치환하게 되면 유동성이 증가하였다. Control과 G30Bsp11 배합과 같이, GGBFS를 시멘트의 30% 수준으로 치환하게 되면 Flow 값이 약 30 mm 수준으로 증가하는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 일반적인 고강도 콘크리트에서도 자주 발생하는 현상이다<sup>22)</sup>. 여기에 GGBFS를 40%까지 늘리고, 그 대신 초유동화제 혼입량을 0.007로 감소시킨 배합인 G40Bsp7의 경우 G30Bsp11보다 더 큰 유동성을 보이는 것을 알 수 있다.

Series B의 6가지 배합에 대한 유동성은 Fig. 3(b)에 나타내었다. REOS I 및 II의 혼입에 따른 유동성 변화는 Series A의 G40Bsp7과 Series B의 GBsp7과의 비교를 통해 알 수 있다. REOS I 및 II는 동일 입도의 규사와 부피비로 치환되었으므로, 단위 용적당 골재량의 증가는 없었다. 실험 결과와 같이 REOS 사용에 의해 Flow 값이 약 20~30 mm 증가한 것을 알 수 있는데, 이는 Fig. 1에 나타난 것 같이 REOS의 입형이 매우 완만한 구형이었기 때문으로 판단된다. 또한 REOS가 UHPC의 유동성에 영향을 미치는 큰 요인 중 하나는 미분량(Powder portion)이 거의 없기 때문으로 판단된다. '2.1. 사용재료'의 장에서 제시한 것 같이, 규사 I의 최소입경(D<sub>min</sub>)은 0.72 μm인 반면, REOS I의 최소입경은 36.24 μm이다. 즉, REOS I에는 입경 10 μm 이하의 미분이 거의 없다는 것을 의미한다. 본 연구에서 사용된 규사 I는 규암 원석의 파쇄분 중 0.75 mm 체를 통과하는 부분으로, 시중에서 판매하는 규사 중 가장 입경이 작은 것이다. 따라서 미세한 분진이 일부 존재하

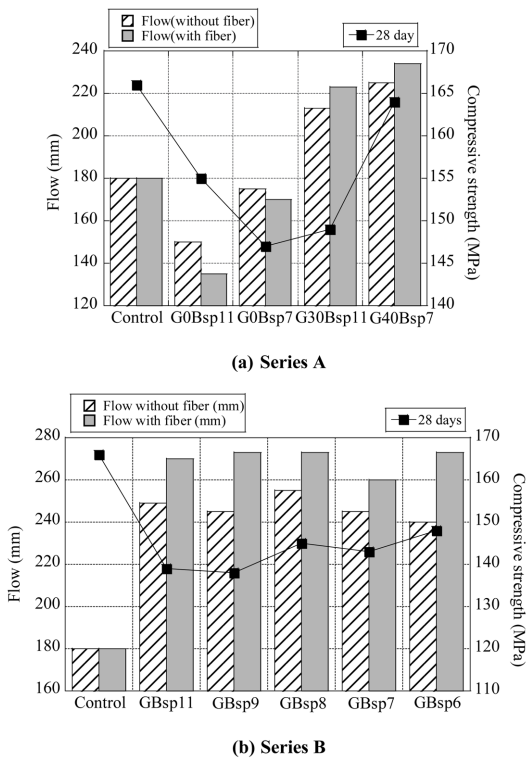


Fig. 3. Flow and compressive strength of the curing ages of 28 days: (a) Series A; (b) Series B.

는데, 이 것이 UHPC 배합의 유동성을 감소시키는 요인으로 작용할 수 있다. 한편, REOS는 용해된 제강 슬래그를 공중에 살포하여 입자화된 것을 모은 것으로 분진이 거의 없다. 따라서 분진에 의한 UHPC 유동성 감소가 발생하지 않을 것으로 판단된다.

한편, Series B의 배합들을 통해 초유동화제 혼입량에 따른 유동성 변화를 좀더 세부적으로 검토 할 수 있었는데, 그 결과 초유동화제 고용분의 혼입량을 시멘트 무게에 0.011에서 0.006까지 감소시킨 결과 유동성 자체에 대한 변화가 없었음을 확인 할 수 있었다. 즉, 시멘트, 실리카 미분말, 규사 등을 사용한 일반 UHPC에 반해, GGBFS, 바텀애시, REOS를 대량 치환한 친환경 UHPC는 분체의 입도 및 형상, 그리고 입자의 전기적 성질이 변화 하기 때문에 유동성이 증가하였고, 요구되는 초유동화제 혼입량이 감소하였다는 것이다. 동시에 초유동화제량을 과잉 첨가한 경우에도 유동성 증가는 발생하지 않는다는 것 역시 실험적으로 확인하였다. 따라서 이러한 초유동화제량의 감소를 통해 경제적 인 UHPC의 생산이 가능할 것으로 판단된다.

### 3.2. 초유동화제 감소에 따른 친환경 UHPC의 압축 강도

Series A와 B의 배합에 대한 압축강도는 Tables 3, 4 및 Fig. 3에 나타나 있다. 먼저 Control, G0Bsp11, 그리고 G0Bsp7 배합을 통해, 바텀애시 혼입 및 초유동화제 혼입량 감소에 따른 압축강도의 영향을 판단할 수 있다. 초유동화제 혼입량 변화 없이 바텀애시를 활용한 G0Bsp11 배합의 경우 Control 배합에 비해 28일 압축강도가 약 10 MPa (6%) 정도 감소함을 알 수 있었다. 즉, 미반응성 물질(Inert material)이지만 비중이 크고 경도(Hardness)가 큰 실리카 미분말을, 포졸란 반응성 물질(Pozzolanic material)이지만 비중이 상대적으로 작고 경도가 작은 바텀애시로 치환한 경우 압축강도에 큰 변화가 없다는 것이다. 여기에 추가로 초유동화제 혼입량을 감소한 배합인 G0Bsp7의 경우 실험 결과만으로는 압축강도가 약 8 MPa (5%) 정도 추가로 감소하는 것을 나타내는데, 이 수준은 실험의 표준편차 이내 이다. 따라서 초유동화제 사용량 감소에 따른 압축강도의 변화는 무시할 만한 수준으로 판단된다. 한편, Table 3에서 나타난 7일 압축강도 결과를 비교할 때 바텀애시를 사용한 G0Bsp7 배합이 Control 배합에 비해 초기 강도가 동등 이상인 것을 알 수 있다. 즉 반응성 물질인 바텀애시는 초기강도 발현에 효과가 있다고 할 수 있다.

시멘트를 GGBFS로 치환한 G30Bsp11 및 G40Bsp7의 경우, Control에 비해 7일, 14일 및 28일 강도 모두 크게 변화가 없음을 알 수 있다. 특히 G30Bsp11와 G40Bsp7을 비교할 때, GGBFS 혼입량을 30%에서 40%로 증가시켰음에도 불구하고 재령 초기인 7일 강도에 차이가 없었을 뿐 아니라, 28일에서는 오히려 강도에 증가가 나타났음을 확인하였다. 즉, G30Bsp11 배합의 경우 초유동화제가 과다하게 배합되었다고 할 수 있다. 이를 적절하게 제어 할 경우 초기 및 장기 압축강도의 개선이 가능하다. 결과적으로 GGBFS를 40% 치환하고 Bottom ash를 전량 치환한 경우에도, 적정 초유동화제를 사용함을 통해 유동성 개선뿐 아니라 압축강도의 확보도 가능하다는 것을 확인하였다.

REOS를 혼입한 경우 일부 압축강도가 감소함을 확인 할 수 있었다. Series A의 G40Bsp7 배합에 비해 Series B의 GBsp7 배합의 7일 및 28일 압축강도가 각각 12 MPa 및 18 MPa 낮았다. 비록 REOS는 규사에 비해 비중은 크지만, 급랭공정을 통해 생산된 만큼 입자 내부에 온도잔류응력 및 균열이 존재할 가능성이 있으며 이것이 UHPC의 강도에 영향을 미친다는 것을 알 수 있었다. Series B의 배합에서 초유동화제 혼입량에 따른 압축강도 차이는 10 MPa 전후로 미미 하다고 할 수 있다. 하지만 전반적으로 GBsp11 배합에서 28일 압축강도 최소값인 139 MPa, GBsp6 배합에서 최대값인 148 MPa 인 점을 고려하며, 이 압축강도 변화가 초유동화제 혼입량에 따라 선형적으로 변화함을 고려 할 때, 초유동화제를 가능한 소량 혼입하면 압축강도 발현에 있어서 긍정적인 효과를 발현한다는 것을 알 수 있었다.

### 3.3. 초유동화제 감소에 따른 친환경 UHPC의 가격

배합비와 각 재료가격을 고려해 계산된 1m<sup>3</sup>당 UHPC의 재료가격은 Table 3과 4에 나타내었다. 이 가격은 UHPC 제조 및 생산에 소요되는 노임, 시공비 및 양생비 등을 고려하지 않은 순수한 재료가격을 나타낸 것이다. 기존에 생산되던 UHPC인 Control 배합과 비교할 때 친환경 UHPC는 재료의 투입, 시공, 양생 등의 생산절차가 동일하므로, 이후 UHPC의 최종 출하가격을 고려 할 때 재료의 가격변동에 영향을 미치는 요인은 오직 재료비의 변동일 것으로 판단된다. Series A의 경우와 같이 초유동화제 혼입량의 감소는 재료가격에 직접적인 변화를 가져온다. Control 배합에 비해 바텀애시를 혼입한 G0Bsp11 배합의 경우 실리카 미분말의 가격 감소로 인해 약 70,000원/m<sup>3</sup>의 UHPC 재료



가격 감소가 가능했으며, 이 때 초유동화제 혼입량을 감소함에 따라 (G0Bsp7 배합) 약 60,000원/m<sup>3</sup>의 재료가격이 추가적으로 감소되었다. 이 배합에 GGBFS 사용을 통해 시멘트 사용량을 감소할 경우 (G40Bsp7 배합) 최종적으로 기존 Control 배합에 비해 141,000원/m<sup>3</sup> 감소 (17% 감소)가 가능한 것으로 계산 되었다. 특히 이 G40Bsp7 배합의 유동성과 7일 및 28일 강도가 Control 배합과 동일한 수준이며 유동성은 월등한 점을 고려 할 때, 부산물 사용을 통한 초유동화제 혼입량 감소가 UHPC의 성능뿐 아니라 가격 측면에서도 매우 효과적인 것임을 알 수 있다.

한편 규사를 REOS로 치환한 Series B의 GBsp6 배합의 경우 Series A의 G40Bsp7 배합에 비해 추가적인 가격감소가 약 10,000원/m<sup>3</sup> 수준으로 그 폭이 작았으며, 유동성은 개선되었지만 강도는 일부 감소하였으므로 효과적인 치환방법으로 판단하기는 어렵다. 단지 G40Bsp7 배합에 유동화제량을 증가시켜도 유동성이 개선되지 않으나 골재를 REOS로 치환하면 유동성이 개선된 점을 감안할 때, 유동성이 매우 주요한 구조에 친환경 UHPC를 사용할 경우 Series B의 GBsp6 배합의 적용을 고려해야 한다고 판단된다.

#### 4. 결 론

본 연구는 산업부산물인 고로슬래그 미분말 (GGBFS), 화력발전소 바텀애시, 급랭슬래그 골재(REOS) 등을 적용한 친환경 UHPC의 적정 초유동화제 혼입량을 결정하기 위해 수행하였다. 산업부산물 및 초유동화제의 혼입량을 변화 시켜 UHPC의 기초적 물성인 유동성과 압축강도가 어떻게 변화하는지 실험적으로 확인하고, 이로 인한 재료가격 변동을 계산하였다. 본 연구를 통해 얻어진 주요 결론은 다음과 같이 요약할 수 있다.

실리카 파우더를 바텀애시로 전량 치환하고 1종 포틀랜드 시멘트를 GGBFS와 무게비로 40% 부분치환 할 경우, 적절한 유동성을 갖는 UHPC 제작을 위해 필요한 초유동화제의 혼입량을 기존 대비 약 40% 이상 감소시킬 수 있다. 이러한 초유동화제 혼입량 감소에도 불구하고 친환경 UHPC의 유동성과 압축강도는 부산물을 사용하지 않은 일반 UHPC와 동등 이상의 수준으로 발현되었다. 특히, 부산물 활용 및 초유동화제 혼입량 감소에 의해, UHPC의 가격은 기존 대비 약 17 % 이상 감소하였다.

규사를 100% REOS로 치환한 UHPC는 유동성 측

면에서 매우 우수하였다. 따라서 추가적인 초유동화제 감소가 가능했다. 그러나 부산물을 사용하지 않은 기존의 UHPC와 비교할 때 10% 수준의 약한 강도감소가 발생하였다. 규사는 UHPC에 적용되는 다른 재료에 비해 상대적으로 가격이 저렴하므로 REOS 치환이 UHPC의 가격에 미치는 영향은 미미 한 반면, 초유동화제 혼입량 감소로 인한 UHPC 가격감소가 가능하다는 점에서 경제적인 부산물이라고 할 수 있다.

#### 감사의 글

본 연구는 한국철도기술연구원 주요사업의 연구비 지원으로 수행되었습니다. 또한, 본 연구는 한국연구재단 신진연구자지원사업(2015017603)의 연구비 지원의 연구비 지원으로 수행되었습니다. 이에 감사 드립니다.

#### References

1. Wille, K., Naaman, A.E., Parra-Montesinos, G.J., 2011: *Ultra-high performance concrete with compressive strength exceeding 150 MPa (22 ksi): A simpler way*, *ACI Materials Journal*, **108**(1), pp. 46-54.
2. Pyo, S., Wille, K., El-Tawil, S., Naaman, A.E., 2015: *Strain rate dependent properties of ultra high performance fiber reinforced concrete (UHP-FRC) under tension*, *Cement and Concrete Composites*, **56**, pp. 15-24.
3. Pyo, S., El-Tawil, S., 2015: *Capturing the strain hardening and softening responses of cementitious composites subjected to impact loading*, *Construction and Building Materials*, **81**, pp. 276-283.
4. Tran, N.T., Kim, D.J., Tran, T.K., Park, J.K., Jeon, J.K., 2016: *Fracture energy of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete under high strain rates*, *Cement and Concrete Research*, **79**, pp. 169-184.
5. Alkaysi, M., El-Tawil, S., Liu, Z., Hansen, W., 2016: *Effects of silica powder and cement type on durability of ultra high performance concrete (UHPC)*, *Cement and Concrete Composites*, **66**, pp. 47-56.
6. Mehta, P.K., 2001: *Reducing the environmental impact of concrete*, *Concrete international*, **23**(10), pp. 61-66.
7. Blok, K., de Jager, D., Hendriks, C., Kouvaritakis, N., Mantzos, L., 2001: *Economic evaluation of sectoral emission reduction objectives for climate change- Comparison of topdown and bottom-up analysis of emission reduction opportunities for CO2 in the European Union*, Ecofys, AEA and NTUA, Report for European Commission, DG Environment, Brussels, September.



8. Oner, A., Akyuz, S., 2007: *An experimental study on optimum usage of GGBS for the compressive strength of concrete*, Cement and Concrete Composites, **29**(6), pp. 505-514.
9. Yazıcı, H., Yardımcı, M. Y., Yiğiter, H., Aydın, S., Türkel, S., 2010: *Mechanical properties of reactive powder concrete containing high volumes of ground granulated blast furnace slag*, Cement and Concrete Composites, **32**(8), pp. 639-648.
10. Yang, S. L., Millard, S. G., Soutsos, M. N., Barnett, S. J., Le, T. T., 2009: *Influence of aggregate and curing regime on the mechanical properties of ultra-high performance fibre reinforced concrete (UHPC)*, Construction and Building Materials, **23**(6), pp. 2291-2298.
11. Ahmad, S., Hakeem, I., Maslehuddin, M., 2014: *Development of UHPC Mixtures Utilizing Natural and Industrial Waste Materials as Partial Replacements of Silica Fume and Sand*, The Scientific World Journal, 2014.
12. Zhao, S., Sun, W., 2014: *Nano-mechanical behavior of a green ultra-high performance concrete*, Construction and Building Materials, **63**, pp. 150-160.
13. Yu, R., Tang, P., Spiesz, P., Brouwers, H. J. H., 2014: *A study of multiple effects of nano-silica and hybrid fibres on the properties of Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPC) incorporating waste bottom ash (WBA)*, Construction and Building Materials, **60**, pp. 98-110.
14. Yu, R., Spiesz, P., Brouwers, H. J. H., 2015: *Development of an eco-friendly Ultra-High Performance Concrete (UHPC) with efficient cement and mineral admixtures uses*, Cement and Concrete Composites, **55**, pp. 383-394.
15. Song, H. W., Saraswathy, V., 2006: *Studies on the corrosion resistance of reinforced steel in concrete with ground granulated blast-furnace slag—an overview*, Journal of Hazardous Materials, **138**(2), pp. 226-233.
16. Pyo, S., Kim H.K., Kim H., 2016: *Characteristics of an eco-friendly UHPC incorporating coal bottom ash*, Proceedings of HiPerMat 2016 4th International Symposium on Ultra-High Performance Concrete and High Performance Construction Materials, Kassel, Kassel University Press, March 9-11, **118**, pp. 6.
17. Koh, T., Hwang, S., 2015: *Field evaluation and durability analysis of an eco-friendly prestressed concrete sleeper*, Journal of Materials in Civil Engineering, **27**(7), B4014009.
18. Koh, T. H., Lee, S. J., Shin, M. H., Kim, B. S., Lee, J. K., Lee, T. Y., 2010: *Evaluation for contents of contaminants and leaching characteristics of bottom ash*, Journal of The Korean Geo-Environmental Society, **11**(6), pp. 77-83.
19. Kim, H. K., and H. K. Lee., 2011: *Use of power plant bottom ash as fine and coarse aggregates in high-strength concrete*, Construction and Building Materials, **25**(2), pp. 1115-1122.
20. Yu, R., Spiesz, P., Brouwers, H.J.H., 2015: *Development of Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPC): Towards an efficient utilization of binders and fibres*, Construction and Building Materials, **79**, pp. 273-282.
21. Sua-Iam, G., Natt, M., 2015: *Utilization of coal-and biomass-fired ash in the production of self-consolidating concrete: a literature review*, Journal of Cleaner Production, **100**, pp. 59-76.
22. Kim, H. K., Lee, H. K., 2012: *Effects of high volumes of fly ash, blast furnace slag, and bottom ash on flow characteristics, density, and compressive strength of high-strength mortar*, Journal of Materials in Civil Engineering, **25**(5), pp. 662-665.

---

### 김희애



- 세종대학교 건설환경공학과 학사
- 세종대학교 건설환경공학과 시멘트복합재료연구실 석사
- 현재 한국철도기술연구원 석사후연수연구원

---

### 표석훈



- 한양대학교 토목공학과 공학사
- 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 석사
- University of Michigan, Dept. of Civil & Environmental 공학박사
- University of Michigan 연구조교
- 현재 한국철도기술연구원 선임연구원

---

### 김형기



- 일본 Hokkaido University 사회공학부 공학사
  - 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 박사
  - 현재 조선대학교 건축학부(건축공학 전공) 조교수
-