



알칼리 활성화 슬래그 결합재를 이용한 자기충전 콘크리트의 기초 연구

송금일¹⁾ · 신경식¹⁾ · 공민호²⁾ · 송진규^{1)*}

¹⁾ 전남대학교 건축학부 ²⁾ 현대엠코(주) 기술연구소

Basic Research of Self Compacting Concrete Using Alkali-Activated Slag Binder

Keum-Il Song,¹⁾ Gyeong-Sik Shin,¹⁾ Min-Ho Gong,²⁾ and Jin-Kyu Song^{1)*}

¹⁾School of Architecture, Chonnam National University, Gwangju 500-757, Korea

²⁾Research & Development Team, Hyundai-amco, Seoul 137-130, Korea

ABSTRACT The purpose of this study is the basic research of self-compacting concrete using Alkali-Activated Slag (AAS) binder in order to emphasize the durability of structures and facilitate casting the fresh concrete in field. The AAS binder emitted low carbon dioxide (CO₂) is eco friendly material of new concept because AAS products not only emit little CO₂ during production but also reuse the industrial by-products such as ground granulated blast-furnace slag (GGBS) of the steel mill. Until now, almost of domestic and foreign research are using Ordinary Portland Cement (OPC) for self-compacting concrete, and also, nonexistent research about AAS. The self-compacting concrete must get the performance of flowability, segregation resistance, filling and passing ability. Nine concrete mixes were prepared with the main parameter of unit amount of binder (400, 500, 600 kg/m³) and 3 types of water-binder (W/B) ratio. The results of test were that fresh concretes were satisfied with flowability, segregation resistance, and filling ability of JSCE. But the passing ability was not meet the criteria of EFNARC because of higher viscosity of AAS paste than OPC. This high viscosity of AAS paste enables the manufacturing of self compacting concrete, segregation of which does not occur without the using of viscosity agent. It is necessary that the development of high fluidity AAS binders of higher strength and the study of better passing ability of AAS concrete mixes in order to use self compacting AAS concrete in field.

Keywords : blast-furnace slag, alkali-activated slag, fluidity, self compacting concrete

1. 서 론

근래에 건설 산업에서 콘크리트 구조물의 내구성 확보를 위한 자기충전 콘크리트는 매우 중요한 개발 요소 중 하나로 부각되고 있다.¹⁾ 콘크리트 구조물의 내구성능에 영향을 미치는 결합요소는 크게 재료, 시공, 열화(환경) 등이 있으며, 이중 가장 큰 내구성 위해요소는 시공결함이다. 시공결함 중에서 가장 큰 비율을 차지하는 것이 다짐불량인데 과도한 다짐은 재료분리를 야기시키고, 다짐이 제대로 수행되지 않을 경우 다짐불량으로 인한 하자가 발생한다. 콘크리트 타설 후 다짐불량에 의한 결함은 육안 상 확인하기 힘들고 결함이 발견됐을 경우 부분 또는 전체 철거 후 재시공을 해야 하기 때문에 철저한 관리

가 필요하다. 특히 구조물의 형태가 복잡하거나 철근 등의 보강재가 밀집되어 있는 콘크리트 구조물의 경우 이러한 다짐불량에 의한 결함을 줄이고자 자기충전 콘크리트를 사용하는 사례가 늘고 있다.²⁾ 일반적으로 자기충전 콘크리트란, 굳지 않은 상태에서 사용재료들의 재료분리나 블리딩이 없이 유동성과 충전성을 극대화시켜 실제 구조물의 건설 시 진동 및 다짐작업 없이 콘크리트의 자중만으로 과밀배근 된 철근 사이나 거푸집, 좁고 깊은 단면 등의 충전이 가능하며 재료의 균질성을 유지하는 콘크리트를 말한다.³⁾ 자기충전 콘크리트는 1980년대 중반 일본 동경대학의 Hajime Okamura 교수팀을 중심으로 활발히 연구되어 “자기충전 고성능 콘크리트(self-compactable high performance concrete, 이하 SCC라 약함)”로 명명되었다. 그 후, 다짐이 필요없는 콘크리트를 단순히 “자기충전 콘크리트”라 명명하고 현재 세계적으로 이 용어가 주로 사용되고 있다.⁴⁾ 자기충전 콘크리트의 유동성 및 충전성을 얻기 위해서는 잔골재율과 굵은골재의 최대 치수를 한정하고 낮은 물-결합재비와 고성능 감수제의

*Corresponding author E-mail : jgsong@chonnam.ac.kr

Received July 9, 2013, Revised August 22, 2013,

Accepted August 27, 2013

©2013 by Korea Concrete Institute

사용이 함께 이루어지는 것이 일반적이다.⁵⁾ 또한 균질하고 점착력이 있는 배합을 위해 일반적인 콘크리트보다 높은 단위 분체량을 요구한다.⁶⁾ 자기충전 콘크리트는 높은 유동성으로 콘크리트를 타설하는 과정에서 재료분리나 블리딩이 일어날 수 있으므로 충분한 점성확보가 필요하다. 이러한 문제점은 굵은골재의 최대치수나 잔골재율의 조정, 단위 분체량의 증가 또는 증점제를 사용하여 해결한다.⁶⁾ 현재까지의 자기충전 콘크리트는 보통 포틀랜드 시멘트(이하 OPC)를 기반으로 각종 미네랄 혼화재를 치환한 연구가 주를 이루고 있으며,⁷⁻⁹⁾ 알칼리 활성 슬래그(alkali activated slag, AAS) 결합재를 활용한 연구는 전무한 실정이다. AAS 결합재는 시멘트 원료인 클링커를 전혀 사용하지 않아 제조 공정에서 탄소배출량을 현저하게 줄일 수 있고, 산업부산물을 적극적으로 활용하여 산업 폐기물을 효과적으로 처리할 수 있기 때문에 전 세계적으로 OPC 대체 재료로써 AAS 결합재 개발에 관심을 가지고 연구하고 있다.¹⁰⁻¹²⁾ 일반적으로 AAS 결합재의 물리적인 성능은 활성화제의 종류와 첨가량에 따라 OPC 수준을 만족하거나 상회하며, 내화학성이 뛰어나고 초기 강도발현이 높다.¹³⁾ 자기충전 콘크리트는 높은 유동성과 충분한 점성을 확보하기 위해 고성능 감수제나 증점제를 첨가하게 되는데, 이는 콘크리트의 원가상승의 주된 원인이 된다. AAS 결합재는 OPC보다 기본적으로 높은 점성을 지녔기 때문에 자기충전 콘크리트 배합 시 증점제를 사용하지 않거나 그 사용량을 줄일 수 있을 것으로 기대된다. 이 연구는 AAS 결합재를 이용한 자기충전 콘크리트 개발을 위한 선행연구로써, AAS 결합재의 자기충전 콘크리트 적용 가능성을 검증하는 것을 목적으로 하고 있다.

2. 재료 및 실험방법

2.1 재료

Table 1은 이 연구에서 사용한 AAS의 모재료(source material, SM)인 고로슬래그의 화학성분을 나타낸다. 고

로슬래그는 KS F 2563에 규정되어 있는 3종 분말도(4204 cm²/g)인 슬래그 시멘트용 고로슬래그이며, 비중은 2.93이다. 굵은골재는 콘크리트의 유동성 확보 및 재료분리를 방지하기 위해 최대치수 13 mm를 사용 하였고, 잔골재는 강모래를 사용하였으며, 잔골재 및 굵은골재의 물리적 특성은 Table 2와 같다.

2.2 실험방법

2.2.1 페이스트 시험

AAS 결합재는 활성화제의 종류와 양에 따라 다양한 물리적 특성을 나타내는데, 일반적으로 강알칼리계인 수산화나트륨(NaOH)과 규산나트륨(Na₂SiO₃)을 활성화제로 사용한 AAS 결합재는 OPC 수준의 높은 강도를 나타내지만,¹⁴⁻¹⁶⁾ 비교적 약알칼리성의 수산화칼슘(Ca(OH)₂)을 활성화제로 사용한 AAS 결합재의 강도는 높지 않다.¹⁷⁾ 페이스트 시험은 Table 3의 결합재들을 대상으로 자기충전 콘크리트에 적용 가능한 AAS 결합재와 고성능 감수제를 선정하기 위한 유동성 시험이 목적이며, 미니 슬럼프 플로우(mini-slump flow)테스트를 통해 유동성이 우수한 AAS 결합재를 선정하여 레올로지(rheology) 특성을 분석하였다.

1) AAS 결합재 및 고성능 감수제 선정 시험

자기충전 콘크리트에 적합한 AAS 결합재와 고성능 감수제를 선정하기 위해 페이스트(물-결합재 중량비(W/B) 0.4)의 미니 슬럼프 플로우(mini-slump flow)시험을 수행하였다. 슬럼프 플로우 값은 페이스트의 유동성과 관계가 깊은데, 슬럼프 플로우 값이 크면 클수록 유동성이 좋다. 시험에 사용된 페이스트는 활성화제를 첨가하지 않은 고로슬래그 파우더와 AAS 결합재 3종, 그리고 비교대상인 OPC 등 총 5가지 페이스트를 대상으로 실시하였다. AAS 결합재 3종(B1, B2, B3)은 수산화나트륨, 규산나트륨, 수산화칼슘의 주 활성화제들과 황산나트륨(Na₂SO₄), 탄산나트륨(Na₂CO₃)의 보조 활성화제 조합 중 예비실험을 통해 결합재 대비 활성화제 첨가량을 고려한 가장 경

Table 1 Chemical composition of the sources materials (% by mass)

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₃	Blaine (cm ² /g)
GGBS	31.57	13.58	43.26	0.38	4.86	4.53	0.41	0.18	0.55	4300

Table 2 Properties of aggregate

Aggregate	Maximum size (mm)	FM (fineness modulus)	Density (g/m ³)	Water absorption (%)
Fine	5	2.86	2.58	1.20
Coarse	13	7.92	2.69	0.40

Table 3 Compositions of binders

Binder	Compositions of binder (wt)
OPC	OPC 100%
Slag	Slag 100%
B1	Slag 93%+NaOH 3%+Na ₂ CO ₃ 4%
B2	Slag 90%+Na ₂ SiO ₃ 10%
B3	Slag 89.5%+Ca(OH) ₂ 7.5%+Na ₂ SO ₄ 3%

제적이며 압축강도가 우수한 결합재를 선정하여 실험하였으며, 각각의 결합재의 구성비는 Table 3과 같다. 고성능 감수제는 모두 OPC에 최적화된 것으로써 고유동성을 갖는 AAS 결합재와 이에 적합한 고성능 감수제의 선택이 필요하다. 이를 위해 작용기의 성분 별로 리그닌(lignine)계, 나프탈렌(naphthalene, PNS)계, 폴리카르복산(polycarboxylate, PC)계의 액상과 분말 형태의 총 14 가지 고성능 감수제들을 확보하였다. 미니 슬럼프 시험 시 고성능 감수제는 각각 결합재의 중량비 0.5%를 첨가하였으며, 배합 직 후 pH미터를 이용하여 각 페이스트들의 pH를 측정하였다.

2) 레올로지(rheology) 특성 시험

페이스트의 유동성은 콘크리트의 유동성에 지대한 영향을 미치는데, 일반적으로 AAS 결합재 페이스트는 OPC 페이스트 보다 유동성이 떨어진다. 이런 유동특성의 차이를 정량적으로 비교·분석하기 위해 레올로지 분석을 실시하였다. 분석 방법은 레오메타(rheometer)를 이용하여 결합재 선정시험을 통해 선정된 AAS 결합재와 OPC 페이스트의 W/B를 각각 0.35~0.55 까지 0.05 차이로 구분하여 페이스트의 점성과 항복강도를 구하고 레올로지 특성을 서로 비교 분석하였다.

2.2.2 콘크리트 시험

자기충전 콘크리트의 굳기 전 물성시험 및 성능기준은 일본토목학회(JSCE)¹⁸⁾와 유럽통합기준(EFNARC),¹⁹⁾ 미국 콘크리트학회(ACI)²⁰⁾에서 제시되고 있는데, 국내는 대한토목학회(KSCE)의 ‘토목공사 표준일반시방서’의 부록에 ‘고유동 콘크리트의 시험기준’이 제시되어 있다. 시험은 크게 콘크리트의 유동성, 점성(재료분리저항성), 간극의 충전성 및 통과성의 4가지 성능을 평가한다. 이 연구에서는 일본토목학회의 성능기준을 평가기준으로 삼았으며, 내용은 Table 4와 같다. 콘크리트의 성능은 배근된 철근

의 간격과 철근량의 조건에 의해서 결정되는데, 보통은 기준 Rank item 1 또는 2에 해당된다. 페이스트의 유동성 시험을 통해 선정된 결합재를 사용하였으며, Table 5는 단위 결합재량과 W/B에 따른 콘크리트 배합표이다. 시험 배합을 통해 각 단위 결합재량(400, 500, 600 kg/m³)에 대한 고성능 감수제의 최대 첨가량(결합재 중량비 2.5%) 내에서 슬럼프 플로우 600 mm를 넘는 최소의 W/B를 구하고, 최소 W/B에서 2%씩 W/B를 증가시켰을 때 슬럼프 플로우 600 mm를 만족하기 위한 유동화제의 최소량을 배합실험을 통해 산출하였다. 이 연구에서는 AAS 페이스트의 기본 점성만을 이용해서 재료분리가 발생하지 않는 고유동 콘크리트 개발이 목적이므로, 증점제를 전혀 사용하지 않았다. 각 재료는 중량비로 계량한 후 중력식 믹서를 이용하여 배합하였고, 콘크리트는 배합 직후 굳지 않은 콘크리트의 유동특성 시험을 실시하고, 소정의 재령까지 수중양생한 후 압축강도를 측정하였다.

1) 유동성 시험

유동성 평가 시험은 슬럼프 콘(slump-cone)에 시료를 채운 후 다짐을 하지 않은 상태에서 편심이 작용하지 않

Table 4 Performance standard criterion by JSCE¹⁸⁾

Rank items		1	2	3
Construction condition	Minimum gap between reinforcement (mm)	35-60	60-200	≥200
	Amount of reinforcement	≥350	100-350	≤100
Flowability	Slump flow (mm)	600-700	600-700	500-650
Segregation resistance	Time required to flow through V-funnel (s)	9-20	7-13	4-11
	Time required to reach 500 mm of slump flow (s)	5-20	3-15	3-15
Filling height of U-box (mm)		≥300	≥300	≥300

Table 5 Mix proportions

Mix. code.	W/B (%)	S/a (%)	Binder (kg/m ³)	Water (kg/m ³)	Aggregate				AE agent (kg/m ³)	Plasticizer (kg/m ³) (plasticizer/binder)
					Fine ⁽¹⁾ (kg/m ³)	Fv (%)	Coarse ⁽²⁾ (kg/m ³)	Cv (%)		
B400W46	46	47	400	184	790	30.6	894	33.2	0.16	6.48 (1.62%)
B400W44	44	47	400	176	800	31.0	905	33.6	0.16	6.72 (1.68%)
B400W42	42	47	400	168	810	31.4	917	34.1	0.16	9.00 (2.25%)
B500W40	40	47	500	200	725	28.1	821	30.5	0.20	4.45 (0.89%)
B500W38	38	47	500	190	738	28.6	835	31.0	0.20	4.70 (0.94%)
B500W36	36	47	500	180	751	29.1	850	31.6	0.20	8.35 (1.67%)
B600W36	36	47	600	216	748	29.0	748	27.8	0.24	4.80 (0.80%)
B600W34	34	47	600	204	765	29.7	765	28.4	0.24	6.00 (1.00%)
B600W32	32	47	600	192	782	30.3	782	29.1	0.24	9.60 (1.60%)

Fv : volume ratio of fine aggregate{(1)/(2.58(density)×1000)}, Cv : volume ratio of coarse aggregate{(2)/(2.69(density)×1000)}

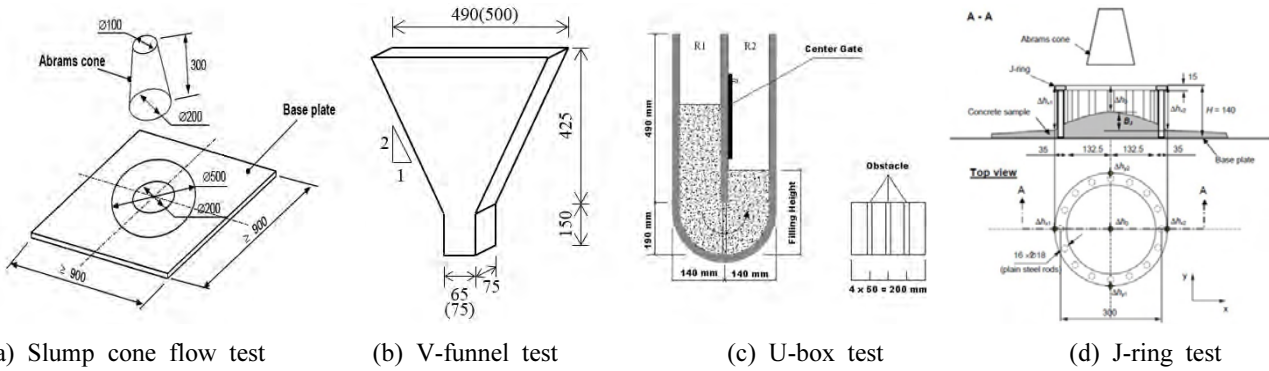


Fig. 1 Test of flowability, segregation resistance, filling and passing ability (unit: mm)

게 수직으로 들어 올려 시료의 자중만으로 흘러 퍼지게 한다. 이때 퍼진 시료의 직교하는 2개의 부분을 선택하여 측정 후 그 평균값을 슬럼프 플로우(mm) 값으로 측정한다(Fig. 1(a)). 슬럼프 플로우 값은 600~700 사이의 값을 요구하는데, 600보다 작거나 700보다 크면 펌프압송 시물성의 변화에 의한 문제가 야기된다.

2) 점성(재료분리 저항성) 시험

콘크리트의 점성 시험은 ‘T500 플로우’와 ‘V-funnel’ 시험을 실시하였다. T500 플로우 시험은 슬럼프 플로우가 500 mm까지 도달하는 시간(sec)을 측정하는 시험이고, V-funnel 시험은 V형 깔때기 모양의 시험 장치에 시료를 채운 후 하부의 입구를 개방하고 콘크리트가 완전히 흘러내렸을 때까지의 유하시간(sec)을 측정하는 시험이다. 만약 콘크리트의 점성이 낮아 재료분리가 발생하게 되면 T500 플로우 시험 시 골재는 제자리에 남고 페이스트만 흘러내리기 때문에 슬럼프 플로우가 500 mm까지 도달하는 시간이 매우 짧게 된다. V-funnel 유하속도 시험의 경우 콘크리트의 점성이 너무 낮으면 재료분리가 발생하게 되고 V-funnel 하부에서 굵은골재에 의해 토출구가 막혀 유하시간이 길어진다. 반대로 점성이 너무 높으면 콘크리트와 V-funnel 측면의 마찰저항이 커져 이 또한 유하시간이 길어지는 특징이 있다(Fig. 1(a), (b)).

3) 충전성 시험

충전성 시험은 콘크리트의 다짐작업 없이 자중만으로 철근사이를 통과하여 채워지는 성능을 평가하는 시험으로 U-box와 L-box 시험을 주로 실시한다. 이 연구에서는 U-box 시험을 실시하였는데, 중앙부에 철근과 격리판을 설치한 U형 장치를 이용한다. U형 장치의 한쪽에 콘크리트를 채운 후 격리판을 제거하여 콘크리트가 철근 사이를 통과하여 상승된 높이 또는 양쪽의 콘크리트 높이의 단차(mm)를 측정하여 충전성을 평가하는 시험이다(Fig. 1(c)).

4) 간극통과성 시험

간극통과성 시험은 일본토목학회 시험기준에는 없지만, 유럽통합기준¹⁹⁾과 미국표준시험규격인 ASTM²⁰⁾에는

명시되어있다. 유럽통합기준의 간극통과성 시험인 ‘J-ring’ 시험은 직경 300 mm의 J-ring 장치의 중앙에 슬럼프 콘을 넣고 콘크리트를 채워 넣은 후 다짐작업 없이 슬럼프 콘을 들어 올려 콘크리트를 자중만으로 J-ring의 16 mm봉 사이를 통과시키는 시험이다. 콘크리트가 J-ring을 통과하여 흘러 퍼졌을 때 J-ring 단부 4지점에서 높이를 측정하여 평균을 낸 후 중앙부와의 단차(mm)를 측정하는 시험으로 콘크리트의 간극 통과성능을 확인할 수 있다(Fig. 1(d)).

5) 압축강도 시험

압축강도 시험방법은 KS F 2405에 준하여 실시하였으며, 시험용 공시체는 $\Phi 100 \times 200$ mm의 원주형 몰드에 다짐을 하지 않고 성형하여 24 시간 후 몰드를 탈형 하였으며, 소정의 재령까지 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 의 수조에서 양생을 실시하였다.

3. 실험 결과 및 분석

3.1 AAS 결합재 및 고성능 감수제 선정 시험 결과

Table 6은 각 활성화제 계열별 결합재들의 유동특성과 적용 가능한 고성능 감수제 선정을 위한 실험 결과이다. OPC와 슬래그 페이스트에서는 PC계 고성능 감수제가 가장 우수한 유동성능을 보였다. AAS 결합재 중 수산화나트륨기반 B1의 유동성은 리그닌-PNS-PC계 고성능 감수제 순이고, 규산나트륨기반 B2는 PNS-PC=리그닌계 순이며, 수산화칼슘기반 B3는 PC-리그닌-PNS계 순이다. 강알칼리성을 띄는 B1 결합재는 리그닌계 적용 시 유동성 향상을 보여주지만 PNS와 PC계 고성능 감수제 사용 시는 유동성 향상이 전혀 나타나지 않는다. 마찬가지로 규산나트륨 기반의 B2 결합재 역시 B1결합재 보다는 다소 향상된 유동성을 보였지만 OPC나 B3결합재 보다는 현저히 낮은 유동성을 나타냈다. B3 결합재는 OPC보다 기본적인 유동성은 낮지만 고성능 감수제 계열별 유동성 향상 특성은 OPC와 비슷한 경향을 보이며, 특히 일부 PC계 고성능 감수제와의 조합은 플로우 400 mm 이상의 고유동성을 나타냈다. 시험 결과를 통해 PNS와 PC계 고성능

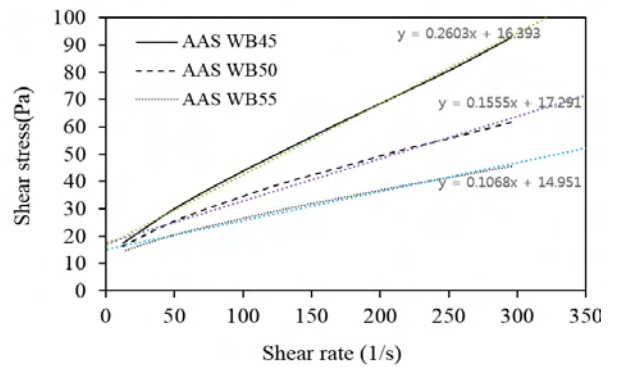
Table 6 Mini-slump flow results of AAS and OPC pastes with super-plasticizers

Super-plasticizer	Code	Type	Mini slump test (mm)				
			OPC	Slag	B1 (NaOH base)	B2 (Na ₂ SiO ₃ base)	B3 (Ca(OH) ₂ base)
-	Plain		120 (pH 12.8)	110 (pH 12.1)	100 (pH 13.4)	100 (pH 13.1)	100 (pH 12.4)
Lignine	1_Lig_L	Liquid	210	150	170	180	190
	2_Lig_P	Powder	200	250	170	170	170
Naphthalene (PNS)	3_PNS_L	Liquid	210	220	140	150	160
	4_PNS_L	Liquid	200	180	120	140	150
	5_PNS_L	Liquid	270	270	120	200	260
	6_PNS_P	Powder	300	350	120	210	270
Polycarboxylate (PC)	7_PC_L	Liquid	320	460	120	120	170
	8_PC_L	Liquid	300	260	100	110	130
	9_PC_L	Liquid	410	600	100	190	360
	10_PC_L	Liquid	400	550	100	170	260
	11_PC_L	Liquid	320	430	100	120	180
	12_PC_L	Liquid	380	560	110	130	210
	13_PC_P	Powder	450	550	100	190	420
	14_PC_P	Powder	430	550	100	180	360

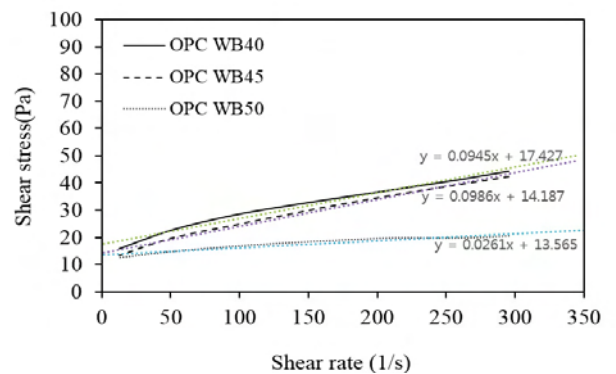
감수제는 강알칼리 상태에서 유동성이 현저히 떨어지는 것을 알 수 있다. 슬래그와 OPC 페이스트에 PNS와 PC계 고성능 감수제를 사용하면 슬래그 페이스트의 유동성이 OPC보다 더 높게 나타나지만, 슬래그 페이스트에 활성화제가 첨가되면 유동성이 현저히 저하되었다. 이는 슬래그 페이스트의 pH가 OPC 보다 더 낮지만, 활성화제가 첨가되면 pH가 급격히 높아지기 때문이며, 이런 현상은 PNS보다 PC계 고성능 감수제를 사용할 때 더 민감하게 나타난다. PC계 고성능 감수제는 측쇄(side chain)의 입자 간의 입체장애에 의한 분산효과로 우수한 유동성을 나타내지만 이 측쇄는 pH 13.0~14.0의 강알칼리 상태에서 가수 분해되어 유동성을 잃는 특징이 있다.²¹⁾ 따라서 이 연구에서는 비교적 낮은 압축강도를 나타내지만 약알칼리의 특성으로 PC계 고성능 감수제의 측쇄를 손상시키지 않는 수산화칼슘 기반 활성화제 조합인 B3 결합제를 자기충전 콘크리트의 결합제로 선정하였고, 고유동성에 탁월한 성능을 보인 PC계 고성능 감수제를 사용하였다.

3.2 페이스트의 레올로지 특성 시험 결과

Fig. 2는 수산화칼슘기반의 B3 AAS와 OPC 페이스트의 레오메터 측정 데이터이며, Table 7은 측정 데이터로부터 유변학적 특성을 분석한 결과이다. 레오메터 측정 데이터인 전단속도(shear rate)와 항복강도(yield stress)의 관계 그래프에서 추세선을 이용하여, 전단속도가 0인(y축 절편) 지점인 페이스트의 초기항복강도를 구한다. 이때 그래프의 기울기는 점성을 나타내는 점도계수(μ)가 된다. 초기항복강도는 페이스트의 플로우 값에, 점도계수는 플



(a) AAS paste



(b) OPC paste

Fig. 2 Result of rheometer

로우 속도에 영향을 미치는데, 이론적으로 초기항복강도가 크면 플로우 값이 작아지고, 점도계수가 크면 플로우 속도가 느려진다. 유동성은 이 초기항복강도와 점성에 의해 결정된다. 시험 결과 동일 W/B의 페이스트들을 비

Table 7 Rheological properties of AAS binder and OPC pastes

Binder	W/B (%)	Yeild stress (Pa)	Viscosity (μ)
AAS_40	40	-	-
AAS_45	45	16.4	0.26
AAS_50	50	17.3	0.15
AAS_55	55	15.0	0.10
OPC_35	35	-	-
OPC_40	40	17.4	0.09
OPC_45	45	14.2	0.10
OPC_50	50	13.5	0.03

교하면 AAS가 OPC보다 초기항복강도는 다소 높고, 점성은 훨씬 큰 것으로 나타났다. AAS 페이스트의 점성은 W/B 45%에서는 OPC보다 약 2.9배, W/B 50%에서는 3.3배나 높게 측정되었다. 페이스트의 점성은 일반적으로 입자 사이로 물이 빠져나가는 속도와 관계가 있는데, 물이 잘 빠져 나가면 점성이 낮고, 물이 잘 빠져나가지 못하면 점성은 높아진다. 구형을 띤 OPC 입자와 달리 AAS의 슬래그(slag) 입자는 괴상으로 입자 사이로 물이 빠져나가는 속도가 OPC보다 느리기 때문에 점성이 높은 것으로 판단된다. 이런 높은 점성으로 AAS가 OPC보다 유동성이 나쁘며, 동일한 유동성을 확보하기 위해 W/B를 높이거나 더 많은 양의 고성능 감수제가 필요하다.

3.3 콘크리트의 유동성 시험 결과

슬럼프 플로우 시험 결과는 Fig. 3과 같이 B500WB36의 배합을 제외한 모든 배합에서 650±50 mm의 슬럼프 플로우 값을 만족하였다. B500WB36의 배합 또한 고성능 감수제의 양을 늘리면, 슬럼프 플로우 기준치를 충분히 만족할 것으로 판단된다. 하지만 AAS 결합재를 이용한 자기충전 콘크리트는 일반적인 OPC용 자기충전 콘크리트 배합에 비해 고성능 감수제의 첨가량이 다소 높는데, 목표 슬럼프 플로우 값을 만족시키기 위해 단위 결합재 중량 비의 약 1.0~2.5%의 고성능 감수제가 사용 되었다.

3.4 콘크리트의 점성 시험 결과

콘크리트의 점성 시험 중 슬럼프 플로우 T500 도달시간은 Fig. 4와 같이 B500과 B600시리즈는 JSCE기준 'Rank item 2'를, B400시리즈 배합은 'Rank item 1'을 만족 시켰다. 하지만 B400시리즈의 경우 높은 점성으로 'Rank item 2'를 만족 시키지 못했다. Fig. 5의 V-funnel 유하시간 결과는 B500시리즈의 W/B 0.36의 배합을 제외한 B500과 B600시리즈의 5가지 배합에서 목표 시간인 7~20초를 만족하였지만, B400시리즈는 유하시간 50~95초 수준으로 목표 시간에서 크게 벗어나는 결과를 보였다. 일반적

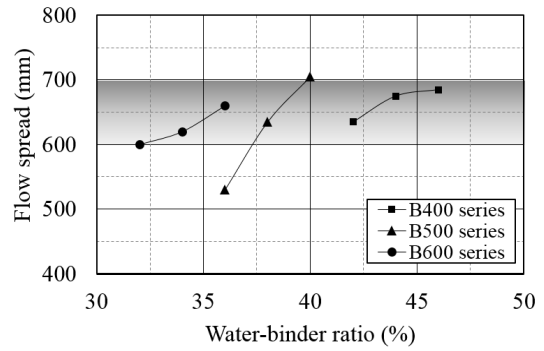


Fig. 3 Result of slump cone flow

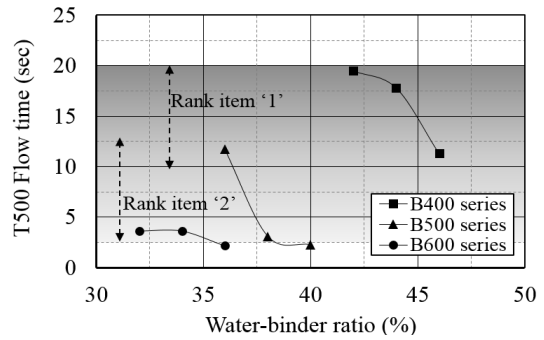


Fig. 4 Result of slump cone flow 500 mm time (T500)

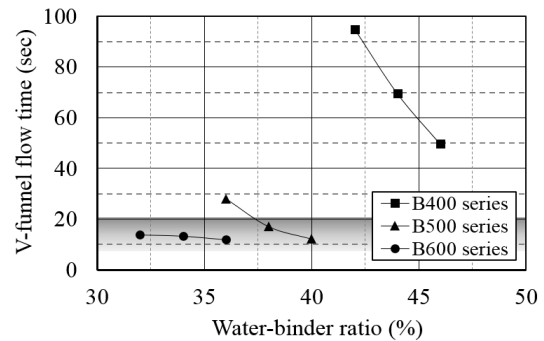


Fig. 5 Result of V-funnel flow time

으로 시멘트를 사용한 자기충전 콘크리트의 경우 W/B가 같을 때 단위 결합재량이 많아질수록 점성이 높기 때문에 T500 도달시간과 V-funnel 유하시간이 길다. 하지만 AAS 콘크리트는 W/B는 다르지만 단위 결합재량 B600시리즈가 가장 짧았고, B400시리즈가 가장 길게 나타났다. B400 시리즈에서 V-funnel 유하시간이 매우 길게 나타난 이유는 굵은골재의 맞물림 영향 때문인 것으로 판단된다. B400 시리즈는 굵은골재의 용적률이 33~34% 수준으로 상대적으로 높은 반면, 페이스트의 용적률은 낮다. 이 경우 콘크리트 내에서 유회 역할을 하는 페이스트의 양이 부족하여 골재 간 맞물림 현상이 커지는데, 이 때문에 콘크리트가 V-funnel 하부의 좁은 토출구를 지날 때 많은 저항을 받게 되어 유하시간이 길어진 것이다.

3.5 콘크리트의 간극 충전성 시험 결과

U-box 장치를 이용한 콘크리트의 간극 통과성능은 Fig. 6에서 보는 바와 같으며 모든 배합에서 양호한 성능을 나타내었다. U-box 시험은 일반적으로 충전높이(H : JSCE 300 mm 이상) 또는 좌우 충전된 높이 차이로 간극 충전성을 평가하는데, 시험 결과 모든 배합에서 320 mm 이상 충전되는 결과를 보였으며, U-box의 좌우 콘크리트의 높이 차이 값인 R1-R2 값이 35 mm 이하를 나타내었다. JSCE에서 권장하는 R1-R2 값이 120 mm이므로 모든 배합이 충분한 간극 충전성능을 보였다.

3.6 콘크리트의 간극 통과성 시험 결과

간극 통과성능 평가시험인 J-ring 시험 결과는 Fig. 7에서 보는 바와 같이 모든 배합에서 기준에 미달되는 것으로 나타났다. 특히 B400시리즈가 가장 성능이 나빴으며, B500과 B600시리즈는 비슷한 수준을 보였다. 간극 통과성능은 굳지 않은 콘크리트의 항복강도 및 점성과 관계가 깊은데, 항복강도와 점성이 높으면 간극통과 시 저항이 커져 통과성능이 나빠진다. U-box 충전시험 시 충전성은 양호한 결과를 보였지만, J-ring의 간극 통과성능이 불량한 이유는 골재 맞물림 영향과 페이스트의 높은 점성 때문으로 사료된다. B400시리즈와 B500시리즈 중 B500W36 배합은 다른 배합에 비해 페이스트의 용적 대비 골재의 용적률이 높기 때문에 골재 맞물림 영향에 의해 간극 통과성능이 저하된 것이며, B600 시리즈는 낮은

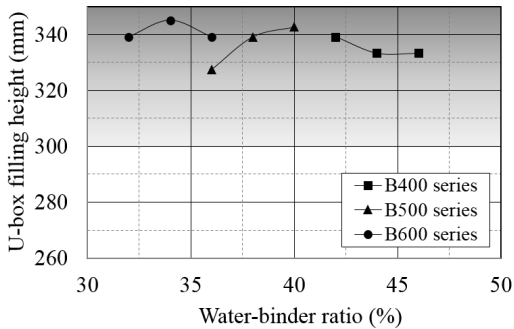


Fig. 6 Result of U-box filling height

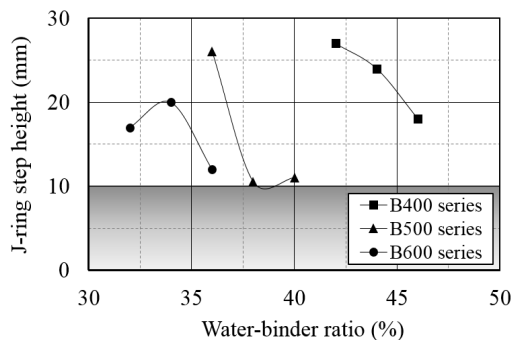


Fig. 7 Result of J-ring step height

W/B로 인한 페이스트의 높은 점성 때문으로 보인다. 고성능 감수제에 의해 콘크리트의 항복강도가 낮아져서 유동성능이 좋아지고 이로 인해 충전성능은 양호하지만, 높은 AAS 콘크리트의 점성은 간극통과 시 콘크리트가 많은 저항을 받게 되는데, 결합재량이 같을 때 W/B가 높을수록 간극 통과성능이 향상되는 것도 이와 관련이 있다. 이런 간극 통과성능을 개선하기 위해서는 콘크리트의 페이스트 양을 늘리거나 페이스트 자체 점성이 낮춰야 하는데, B400시리즈와 B500W36 배합은 페이스트의 양이 상대적으로 부족하기 때문에 철근이 과밀배근된 현장적용에는 무리가 있을 것으로 판단된다.

3.7 콘크리트의 압축강도 시험 결과

Fig. 8~10은 B400, B500, B600 시리즈의 물-결합재비 및 재령에 따른 압축강도 발현을 나타낸 것이다. B400

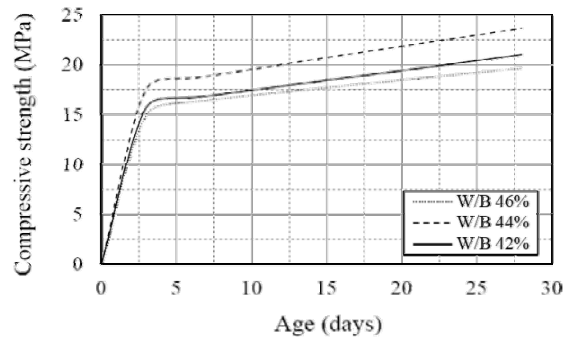


Fig. 8 Compressive strength of B400 series

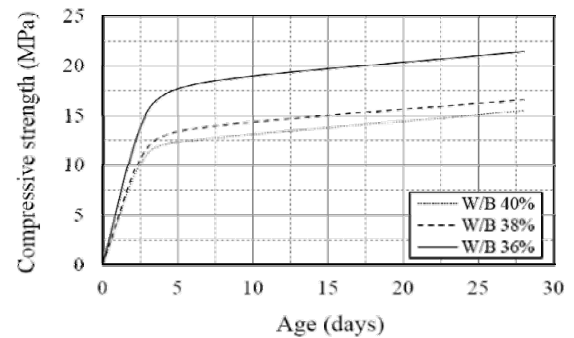


Fig. 9 Compressive strength of B500 series

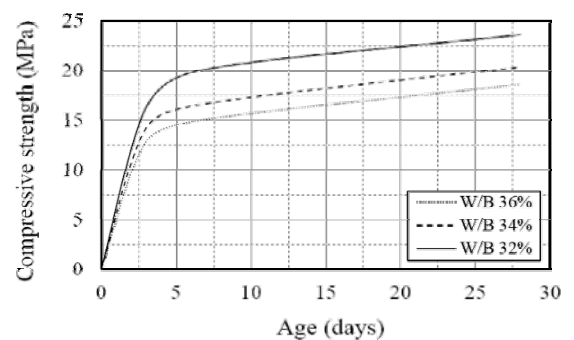


Fig. 10 Compressive strength of B600 series

시리즈의 W/B 0.42 공시체를 제외하고 모든 공시체에서 W/B가 낮을수록 강도가 높게 나타났다. 재령에 따른 압축강도는 재령 3일에 28일 강도의 약 75% 정도의 강도가 발현되었다. OPC의 3일 강도가 28일 강도의 50%이하인 것에 비교하면 AAS 콘크리트의 초기강도발현 속도가 빠른 것을 알 수 있다. B600시리즈의 W/B 0.32가 23.69 MPa로 가장 높은 강도를 나타내었고, B500시리즈의 W/B 0.40가 15.48 MPa로 가장 낮은 강도를 보였다. 동일한 단위 결합재량에서 W/B의 차이에 따라 강도의 차이는 보이지만, 시멘트 콘크리트와 달리 단위 결합재량이 절대적으로 많아진다고 해서 강도가 증가하지는 않았다. 이는 결합재 자체 강도가 낮기 때문에 단위 결합재량이 많아져도 그 이상의 압축강도 성능이 발현되지 않는 것으로 판단된다. 압축강도와 굳기 전 콘크리트의 유동성능을 평가하였을 때, 경제적인 배합은 단위 결합재량은 500 kg/m³ 수준이며, 이때 물-결합재 비율은 약 0.36, 고성능 감수제는 결합재 중량비 1.0~2.0% 정도가 적합할 것으로 판단된다. 후속 연구로서 유동성을 고려하여 PC계 고성능 감수제의 적용을 위해 수산화칼슘기반의 활성화제를 사용한 AAS 결합재의 압축강도 증진 연구와, 이와 더불어 강알칼리 상태에서도 유동성을 잃지 않는 새로운 고성능 감수제의 개발이 필요할 것으로 판단된다. 또한 이 연구에서는 최대치수 13 mm의 굵은골재를 사용하였는데, 최대치수 19, 25 mm의 굵은골재를 사용한 자기충전 콘크리트의 연구도 진행되어야 한다.

4. 결 론

이 연구는 AAS 결합재를 이용하여 자기충전 콘크리트를 개발하기 위한 기초연구로서 고유동성의 AAS 결합재 조합과 이에 적합한 고성능 감수제의 선정, 그리고 이를 이용한 자기충전 콘크리트의 유동 특성을 조사하였으며, 이를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 규산나트륨이나 수산화나트륨 등의 강알칼리계 활성화제를 사용한 AAS 결합재는 높은 강도를 발현할 수 있지만, 고유동성 확보를 위한 폴리카르본산(PC)계, 나프탈렌(PNS)계의 고성능 감수제가 제 성능을 발휘할 수 없기 때문에 자기충전 콘크리트용 결합재로 적용할 수 없다.
- 2) 고성능 감수제의 적용을 위해 비교적 약알칼리인 수산화칼슘기반의 활성화제를 사용해야 하지만 시험 결과, 이 결합재를 이용한 콘크리트의 압축강도가 약 15~25 MPa 수준으로 낮기 때문에 고강도용 자기충전 콘크리트용으로는 적합하지 않다.
- 3) 레올로지 분석 결과 AAS 페이스트는 OPC 보다 초기항복강도와 점성이 높아 유동성이 떨어진다. 하지만 유동성을 확보할 경우 AAS 결합재의 높은 기본 점성으로 증점제 없이 재료분리가 발생되지 않는 자기충전 콘크리트 제조가 가능하다.

- 4) AAS 결합재를 이용한 자기충전 콘크리트의 적합한 단위 결합재량은 500 kg/m³ 이고 이때 W/B는 약 0.36이며, 고성능 감수제의 첨가량은 결합재량의 약 1.0~2.0% 수준이다.
- 5) AAS결합재를 이용한 자기충전 콘크리트의 굳기 전 물성 시험 결과 고유동성(slump flow)과 충전성(U-box)은 대부분 JSCE 기준을 만족하는 수준이지만, 점성(T500, V-funnel)과 간극통과성(J-ring, 유럽 통합기준)은 기준을 만족하지 못했다. 이를 만족시키기 위해서는 페이스트 양을 늘리거나 페이스트 자체 점성을 낮춰야 한다.
- 6) 현장적용이 가능한 AAS 자기충전 콘크리트 제조를 위해 약알칼리계 활성화제를 사용하면서도 고강도를 발현 할 수 있는 AAS 결합재의 개발과 높은 pH에서도 유동성을 잃지 않는 AAS 결합재 전용의 고성능 감수제의 개발 및 다양한 최대치수의 굵은골재의 적용에 관한 연구가 필요하다.

감사의 글

이 연구는 국토교통부 건설교통기술지역특성화사업 연구개발사업의 연구비지원(10 RTIP B01)에 의해 수행되었고 이에 감사드립니다.

References

1. Brouwers, H. J. H. and Radix, H. J., "Self-Compacting Concrete: Theoretical and Experimental Study," *Cement and Concrete Research*, Vol. 35, No. 11, 2005, pp. 2116-2136. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.06.002>)
2. Assie, S., Escadeillas, G., and Wallter, V., "Estimates of Self-compacting Concrete 'Potential' Durability," *Concrete Building Materials*, Vol. 21, No. 10, 2007, pp. 1909-1917. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.06.034>)
3. Okamura, H., *Self-compacting High Performance Concrete*, Social System Institute, Tokyo, 1999, pp. 50-54.
4. Okamura, H. and Ozawa, K., "Mix-Design for Self-compacting Concrete," *Concrete Library JSCE*, Vol. 25, 1995, pp. 107-120.
5. Topcu, I. B. and Uygunoglu, T., "Effect of Aggregate Type on Properties of Hardened Self Consolidating Lightweight Concrete (SCLC)," *Construction and Building Materials*, Vol. 24, No. 7, 2010, pp. 1286-1295. (doi: [10.1016/j.conbuildmat.2009.12.007](http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.12.007))
6. Khayat, K. H., "Workability, Testing and Performance of Self-consolidating Concrete," *ACI Material Journal*, Vol. 96, No. 3, 1999, pp. 346-353.
7. Ye, G., Liu, X., De Schutter, G., Poppe, A. M., and Taerwe, L., "Influence of Limestone Powder Used as Filler in SCC on Hydration and Microstructure of Cement Paste," *Cement Concrete Composites*, Vol. 29,

- No. 2, 2007, pp. 94-102. (doi: 10.1016/10.1016/j.cemconcomp.2006.09.003)
8. Poppe, A. M. and Schutter, G. D., "Cement Hydration in the Present of High Filler Contents," *Cement Concrete Research*, Vol. 35, No. 12, 2005, pp. 2290-2299. (doi: 10.1016/j.cemconres.2005.03.008)
 9. Tukmen, I., "Influence of Different Curing Conditions on the Physical and Mechanical Properties of Concretes with Admixtures of Silica Fume and Blast Furnace Slag," *Materials Letters*, Vol. 57, No. 29, 2003, pp. 4560-4569. (doi: 10.1016/S0167-577X(03)00362-8)
 10. Song, J. K., Yang, K. H., Kim, G. W., and Kim, B. J., "Properties of Sodium Alkali-Activated Ground Granulated Blast-Furnace Slag (GGBS) Mortar," *Journal of Architectural Institute of Korea*, Vol. 26, No. 6, 2010, pp. 61-68.
 11. Yang, K. H., Sim, J. I., Lee, S., and Hwang, H. J., "Workability, Compressive Strength and Fire Resistance Characteristics of Cementless Alkali-Activated Lightweight Mortars," *Journal of Architectural Institute of Korea*, Vol. 25, No. 8, 2009, pp. 151-158.
 12. Yang, K. H., Oh, S. J., and Song, J. K., "Mechanical Properties of Alkali-Activated Slag-Based Concrete Using Lightweight Aggregates," *Journal of Korea Concrete Institute*, Vol. 20, No. 3, 2008, pp. 405-412.
 13. Krivenko, P. V., *Alkaline Cements and Concretes, Paper Presented at the First International Conference on Alkaline Cements and Concrete*, Kiev, Ukraina, 1994, pp. 12-129.
 14. Malolepszy, J. and Petri, M., "High Strength Slag Alkaline Binders," *8th International Congress on the Chemistry of Cement*, Rio de Janeiro, Brazil, Vol. 4, 1986, pp. 108-111.
 15. Slota, R. J., "Utilization of Water Glass as an Activator in the Manufacture of Cementitious Materials from Waste By-products," *Cement and Concrete Research*, Vol. 17, No. 5, 1987, pp. 703-708.
 16. Shi, C. and Li, Y., "Effect of the Modulus of Water Glass on the Activation of Phosphorus Slag," *Il Cemento*, Vol. 86, No. 3, 1989, pp. 161-168.
 17. Bellmann, F. and Stark, J., "Activation of Blast Furnace Slag by a New Method," *Cement and Concrete Research*, Vol. 39, Issue 8, 2009, pp. 644-650. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.05.012>)
 18. JSCE, *Standard Test Methods for Self-compacting Concrete*, Japan Society of Civil Engineers, Concrete Engineering Series, 31, 2000, pp. 50-77
 19. EFNARC, *Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete*, 2002, pp. 4-32.
 20. ASTM C 1621/C 1621M-09b, *Standard Test Method for Passing Ability of Self-Consolidating Concrete by J-Ring*, 2009.
 21. M. Palacios and F. Puertas., "Effect of Superplasticizer and Shrinkage Admixtures on Alkali-Activated Slag Pastes and Mortar," *Cement and Concrete Research*, Vol. 35, 2005, pp. 1358-1367. (doi: 10.1016/j.cemconres.2004.10.014)

요약 이 연구는 알칼리 활성화 슬래그(alkali-activated slag, AAS) 결합재를 이용하여 자기충전성을 갖는 콘크리트 개발을 위한 기초 연구로서 자기충전 콘크리트에 사용될 AAS 결합재 및 고성능 감수제의 유동성능 평가를 통해 선정하고, 선정된 결합재 및 고성능 감수제를 사용하여 자기충전 콘크리트를 배합한 후 굳기 전 콘크리트의 유동특성을 평가하였다. 높은 pH에서 폴리카르본산계 고성능 감수제의 성능이 저하됨에 따라 비교적 강도가 낮은 약알칼리성 활성화제를 사용한 AAS 결합재를 선정하였다. 시험 결과 일본토목학회(JSCE) 기준인 고유동성, 재료분리 저항성, 간극 충전성은 대부분 만족시켰으나, AAS 페이스트의 기본 점성이 OPC에 비해 높은 이유로 유럽통합기준의 간극 통과성은 만족시키지 못했다. 하지만, AAS 결합재를 이용하면 증점제의 사용 없이 재료분리가 발생되지 않는 자기충전 콘크리트 제조가 가능함을 확인하였다. 이 연구는 AAS 결합재를 이용한 자기충전 콘크리트 개발의 기초연구로서 앞으로 현장적용이 가능한 AAS 자기충전 콘크리트 개발을 위해 더 높은 강도의 고유동 결합재와 간극 통과성을 높이기 위한 콘크리트 배합비의 연구가 필요하다.

핵심용어 : 유고로슬래그, 알칼리 활성화 슬래그 결합재, 고유동성, 자기충전 콘크리트