

유공 유리분말이 자기충전 콘크리트의 특성에 미치는 영향

Effect of Hollow Glass Powder on the Self-Compacting Concrete

윤 섭^{1*}

한 민 철²

Yoon, Seob^{1*}

Han, Min-Cheol²

R&D Center, Sampyo Industry, Gwangju, Gyeonggi-do 12768, Korea ¹

Department of Architectural Engineering, Cheong ju University, Naduk-Dong, Cheongju-City, 28503, Korea ²

Abstract

In this study, compacting, passing performance, segregation resistance and rheological properties were tested to improve the stability of fresh concrete in the production and construction of self-compacting concrete (SCC) using hollow glass powder(GB). As a result, T50 reaching time was shortened up to amount of GB 2.0kg/m³. The compacting according to the amount of GB was improved by ball bearing effect of GB. However, T50 reaching time was slightly increased at 4.0kg/m³. In the case of passing performance, the result showed that plain was Class 1, GB 0.5~2.0kg/m³ was Class 0, GB 4.0kg/m³ was Class 1. Therefore, the passing performance was improved with 'No blocking' up to amount of GB 2.0kg/m³. Passing performance Block step (PJ) number by J-ring method was also best at GB 1.0kg/m³. In the case of segregation resistance according to the amount of GB, dynamic segregation resistance was increased compared to plain regardless of the amount of GB. And static segregation resistance showed 2.5% of segregation rate at GB 1.0kg/m³. Therefore, it was greatly improved compared to plain (12.5%). In the case of rheology property according to the amount of GB, plastic consistency by increasing of GB content didn't show big difference. However, yield stress by increasing of GB content was decreased with GB 1.0kg/m³. In conclusion, GB 1.0kg/m³ was effective for improvement of compacting, passing performance and yield stress. Also, it will be useful for stability of SCC by improving segregation.

Keywords : SCC(self-compacting concrete), segregation resistance, hollow glass powder, filling ability, passing ability

1. 서 론

건설산업연구원에 따르면 최근 5년간 청년층 취업 비중이 지속적으로 감소한 것으로 나타났고, 제조업의 경우, 청년층 취업자의 비중이 약 14%인데 반해, 건설업은 약 5%로 매우 낮았다고 밝혔다[1]. 건설업의 인력난은 어제 오늘 일이 아니지만, 숙련공 부족은 콘크리트의 다짐 불량으로 이어져 재료분리, 채움 불량 발생으로 콘크리트의 내구성에 악영향을 미친다.

위의 문제점을 해결하기 위하여 해외 많은 국가들은 자기충전 콘크리트(Self-Compacting Concrete)를 사용하기도 한다. 자기충전 콘크리트란 굳지 않은 상태에서 사용재료의 재료분리 및 블리딩 없이 유동성과 충전성을 극대화시킨 콘크리트로써[2], 실제 구조물의 건설 시 별도의 진동 및 다짐작업 없이 콘크리트의 자중만으로 과밀 배근된 부재 사이나 거푸집 및 좁고 깊은 단면 등의 충전이 가능한 콘크리트를 말한다. 하지만 자기충전 콘크리트의 높은 유동성은 원재료의 특성 및 잔골재 함수를 변동에 따라 재료분리 및 유동성 부족 등의 영향을 받는다[3,4]. 이와 같은 문제점은 자기충전 콘크리트를 대량으로 공장 생산하는데 있어, 품질관리에 어려움으로 작용하고 있다.

자기충전 콘크리트의 재료분리에 대한 위험성을 감소시키기 위하여 본 연구에서는 유공 유리분말을 사용하였다. 유공 유리분말은 소다 라임 보로실리케이트 유리(Soda-lime-

Received : February 13, 2018

Revision received : February 28, 2018

Accepted : March 7, 2018

* Corresponding author : Yoon, Seob

[Tel: 82-10-9263-1733, E-mail: lovefdc@hanmail.net]

©2018 The Korea Institute of Building Construction, All rights reserved.

borosilicate glass)로 만들어진 고강도, 저비중의 미세한 분말 형태의 물질이다. 1990년대 개발되어 현재는 기능성 열가소성 플라스틱에 첨가하는 채움재로 사용되고 있다. 유공 유리분말의 특징으로는 구형이고 비중이 낮고(0.1~0.6), 입자크기가 작다(평균 입경 16 μ m). 이와 같은 특징은 콘크리트 재료로서 유공유리분말이 사용되었을 때, 볼베어링 효과로 인한 유동성 증가와 함께 시멘트, 잔골재, 굵은 골재 등의 입자 사이에 분포하여 재료분리 현상을 방지할 수 있을 것으로 예상된다.

그러므로 본 연구에서는 자기충전 콘크리트 생산 및 시공 시 안정성을 확보할 목적으로, 유공 유리분말 혼입량 변화가 자기충전 콘크리트의 충전성, 통과성, 재료분리 저항성 및 레올로지에 미치는 영향을 평가하므로써, 자기충전 콘크리트의 안정성 향상에 도움이 되고자 한다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험계획

본 연구에서는 유공 유리분말(이하 GB)이 자기충전 콘크리트(이하 SCC)의 특성에 미치는 영향을 분석하고자 하였는데, 실험계획은 Table 1과 같다.

먼저, 단위수량과 분체량은 각각 175kg/m³와 430kg/m³으로 고정하였다. GB가 SCC의 물성에 미치는 영향을 파악하기 위하여 GB의 혼입량을 0, 0.5, 1.0, 2.0, 4.0kg/m³으로 변경시켜 총 5수준으로 실험 계획하였다. 이때, 목표 슬럼프 플로는 650 \pm 50mm으로 정하였고, 목표 공기량은 4.5 \pm 1.5%로 설정하였다.

실험사항으로써, 굳지 않은 콘크리트의 워커빌리티를 평가하기 위하여 슬럼프플로(Normal, Inverted), 슬럼프 플로 500mm 도달 시간(Normal, Inverted)(이하, T₅₀),

J-ring flow, J-ring T₅₀, L-flow를 측정하였고 유동성을 정량적으로 분석하기 위해 레올로지(항복응력, 소성점도)를 측정하였다. 재료분리 저항성은 동적 상태에서 재료분리 저항성 평가지수(EIS) 및 V-lot 유하시간(이하, V-lot)을 0분과 정치 후 5분에서 측정하여 그 차이를 평가하였고, 정적 상태에서 Column segregation 방법을 이용하였다. 본 연구의 배합 사항은 Table 2와 같다.

Table 1. Experiment factors and tests

	Items	Unit	Variables
Experiment Factor	Water	kg/m ³	175
	Binder	kg/m ³	430
	Hollow glass powder	kg/m ³	0, 0.5, 1, 2, 4
Tests	Slump flow(Normal cone)	mm	
	Air	%	
	T ₅₀ (Normal cone)	sec	
	Slump flow(Inverted cone)	mm	
	T ₅₀ (Inverted cone)	sec	
	J-ring flow	mm	
	J-ring T ₅₀	sec	
	V-lot at T ₀ minutes, T ₅ minutes	mm	
	L-flow	mm	
	Yield stress(Pa)	Pa	
	Viscosity(Pa.s)	Pa.s	
	EIS	index	
Column segregation	%		

2.2 사용재료

2.2.1 결합재

본 연구에 사용한 시멘트는 국내 S사의 1종 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였는데, 그 물리적 특성 및 화학성분은 Table 3과 같다. 고로슬래그 미분말은 국내 S사의 3종 고로슬래그 미분말을 사용하였는데, 이에 대한 물리적 특성은 Table 4와 같다.

Table 2. Mixture proportion of concrete

Mix ID	W/B (%)	Gv (%)	Pv (%)	Unit weight(kg/m ³)						SP (B*%)	AE (B*%)	VMA (SP*%)
				W	Binder	CS	SS	G	GB			
Plain	40.7	30.6	31.9	175	430	633	270	817	0.0	1.05	0.04	12
GB-0.5	40.7	30.6	31.9	175	430	633	266	817	0.5	1.05	0.04	12
GB-1.0	40.7	30.6	31.9	175	430	633	263	817	1.0	1.05	0.04	12
GB-2.0	40.7	30.6	31.9	175	430	633	255	817	2.0	1.15	0.04	12
GB-4.0	40.7	30.6	31.9	175	430	633	240	817	4.0	1.15	0.04	12

Table 3. Physical properties of cements

Physical Properties	Density (g/cm ³)	Blain (cm ² /g)	Setting time		Compressive strength(MPa)			
			Initial (min)	Final (hr)	3d	7d	28d	
	3.15	3,387	240	5:00	31.3	42.2	54.6	
Chemical composition	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O
	19.8	5.2	3.3	62.8	2.1	2.6	1.1	0.1

Table 4. Physical properties of ground granulated blast furnace slag

Density (g/cm ³)	Blain (cm ² /g)	Activity Factor(%)		Flow ratio (%)
		7day	28day	
2.91	4,014	56	89	110

Table 5. Physical properties of hollow glass powder

Density (g/cc)	90% Breaking strength (MPa)	Particle size distribution(um, by volume)			
		10th%	50th%	90th%	Effective top size (>=95%)
0.35	20.7	10	40	75	85

2.2.2 유공 유리분말(GB)

Table 5는 유공 유리분말의 물리적 특성을 나타낸 것이고 Figure 1은 유공 유리분말의 형태 및 주요 구성성분을 나타낸 것이다. 유공 유리분말은 밀도 0.3~0.4g/cm³ 정도로 경량이고 분말도가 6,000~10,000cm²/g 정도로 미세하다. 또한 구 형태를 띠고 있으며 Soda Lime Borosilicate glass의 구성성분으로 이루어진 셀로 막을 형성하며 그 안은 중공으로 되어 있다. 콘크리트에는 사용된 적이 없으며, 일반적으로 난연, 불연성과 구형으로 볼베어링 효과를 줄 수 있으므로 플라스틱 주물에 사용된다.

2.3 실험방법

2.3.1 슬럼프 플로 및 T₅₀

슬럼프 플로는 KS F 2594에 따라 측정하였는데, 그 형상을 보고 재료분리 유무를 판단하였다. T₅₀은 슬럼프플로 측정 중 슬럼프 플로 500mm 도달할 때의 시간을 측정하였다. 또한 슬럼프 콘의 상태를 반대로 하여[Inverted] cone] 슬럼프 플로와 T₅₀을 측정하였다[2].

2.3.2 V-lot

V-lot는 KSCE 2003-03의 “갈대기를 사용한 유하 시



Figure 1. hollow glass power

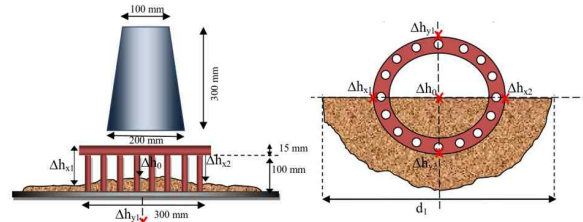


Figure 2. J-ring test

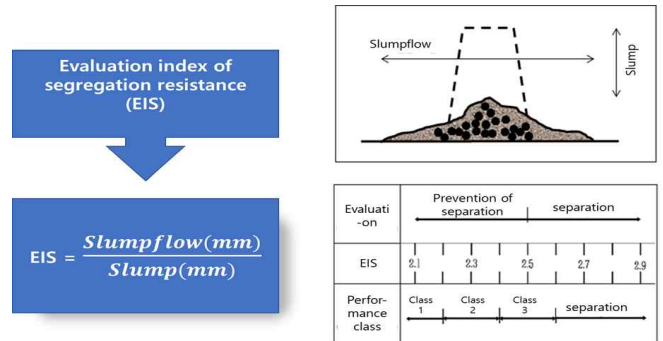


Figure 3. Evaluation index of segregation resistance

험방법”에 따라 실시하였다. 실험은 시험기구에 콘크리트를 부어넣은 다음 즉시(0분) 측정과 콘크리트를 시험기구에 부어넣은 다음 5분 정치 후 측정으로 나누어 실험하였다.

2.3.3 레올로지 시험

굳지 않은 콘크리트의 레올로지 측정은 ICAR Rheometer를 사용하여 측정하였다.

2.3.4 J-ring flow, J-ring T₅₀

J-ring test는 굳지 않은 콘크리트가 철근 사이를 통과하는 능력을 평가하는데 사용된다. 시험 규정은 ASTM C 1621에 의거하여 실험하였는데, Figure 2와 같이 ring안에 슬럼프 콘을 놓고 슬럼프 플로 시험과 동일한 방법으로 수행하여 콘크리트의 흐름이 멈춘 후 2방향으로 지름을 측정하여 평균으로 하였다. 또한 슬럼프 플로 500mm 도달시간도 함께 측정하였다.

또한 철근에 의한 차단성을 평가하기 위하여 P_j 를 계산하였는데 계산 방법 식 1과 같다.

$$P_j = (\Delta h_{x1} + \Delta h_{x2} + \Delta h_{x3} + \Delta h_{x4}) / 4 - \Delta h_0 \quad (1)$$

여기서, Δh_0 = 중앙 부분의 슬럼프(mm)

$\Delta h_{x1} \dots \Delta h_{x4}$ = J-ring 외측 부분의 높이(mm)

2.3.5 재료분리 저항성 시험

동적 상태의 재료분리 평가를 위해서 Figure 3과 같이 재료분리 정도를 정량적으로 판단하였다.

정적 상태의 재료분리 평가는 ASTM C 1610의 방법에 의거 Figure 4와 같이 평가하였다. 굳지 않은 콘크리트를 지름 8 in, 높이 26 in의 원통형 몰드에 콘크리트를 부어넣고 15분간 정치한다. 이후 상단과 하단 부분의 콘크리트를 나누어 4.75mm 체에 부어넣고 물로 씻은 후, 굵은 골재의 질량을 측정한다. 재료분리 지수의 계산방법은 식 2와 같다.

$$SI = \frac{(CA_B - CA_r)}{\left(\frac{CA_A + CA_r}{2}\right)} \times 100 \quad (2)$$

여기서, CA_r : 상단부분의 굵은 골재의 질량

CA_b : 하단부분의 굵은 골재의 질량

3. 실험결과 및 고찰

3.1 공기량

GB이 사용이 공기량에 미치는 영향은 Table 6과 같다. GB 혼입량 변화에 따른 공기량은 혼입량이 증가할수록 약간 감소되는 경향을 나타내었다. 이는 GB의 미세한 입자가 공극을 채워주는 효과로 인하여 나타난 것으로 판단된다.

Table 6. Air contents

	Plain	GB-0.5	GB-1.0	GB-2.0	GB-4.0
AE(B*)%	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
Air%	5.0	4.6	4.0	4.3	3.6

3.2 충전성(Filling ability)

Figure 5는 GB 혼입률 변화에 따른 슬럼프 플로(Normal cone, Inverted cone) 및 J-ring flow를 나타낸 것이다. 본 연구에서는 목표 슬럼프 플로를 만족하기 위하여 고성능



Figure 4. Column segregation

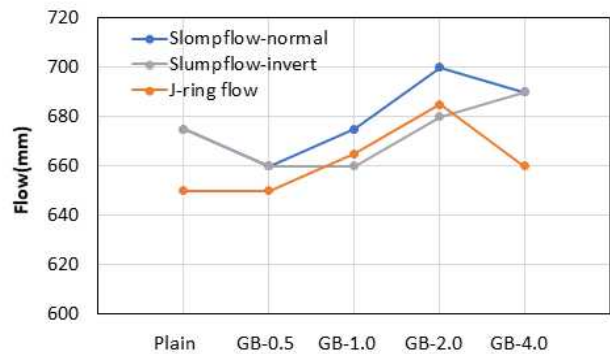


Figure 5. Measurements of slump flow(normal, inverted cone), J-ring flow according to GB ratios

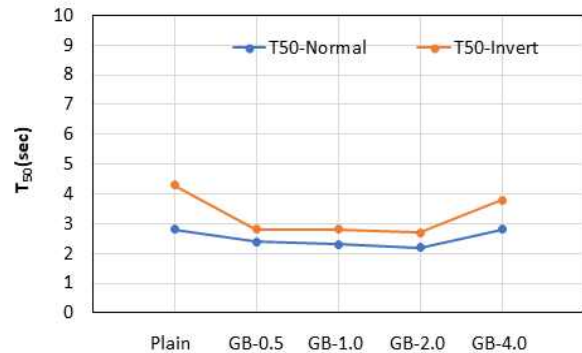


Figure 6. T50(Normal cone, inverted cone) by GB ratios

감수제 사용량을 약간씩 변화시켜 배합설계하였다. GB 혼입률 변화에 따른 고성능 감수제의 사용량 변화는 Table 2에 보는 것과 같이 GB 혼입률이 증가할수록 증가하는 경향을 나타냈다. 이는 GB가 경량이고 미세분말 형태이기 때문이기에 3.4절과 같이 굳지 않은 콘크리트의 점도를 낮추는 효과로 인해 콘크리트의 흐름성에서 미치는 힘이 낮아졌기 때문인 것으로 판단된다.

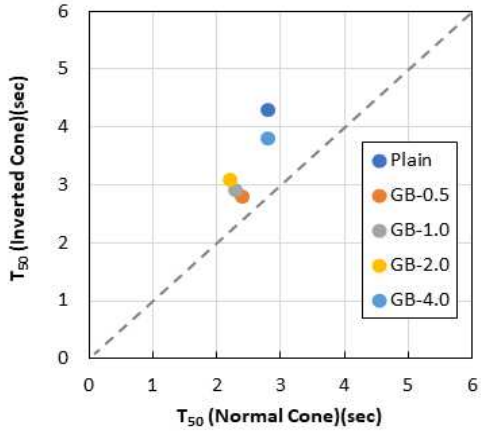


Figure 7. Relationship between T50 of normal cone and Inverted cone

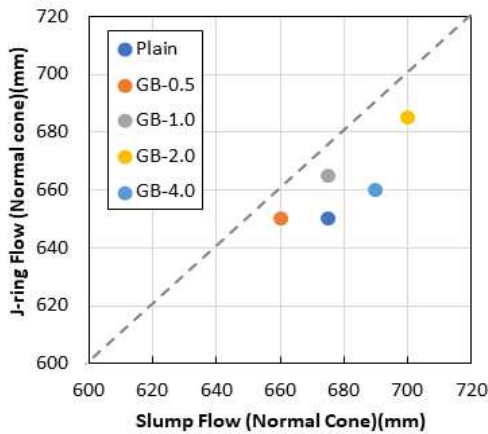


Figure 8. J-ring flow and slump flow according to GB ratios

Figure 6은 슬럼프 콘 형태(Normal cone, Inverted cone)별 GB 혼입량 변화에 따른 T_{50} 을 나타낸 것이다. 일반적으로 국내에서는 Normal cone으로 측정하나, 유럽 등의 해외 많은 나라에서는 SCC에서 콘크리트 흐름속도의 차이를 명확하게 하기 위하여 Inverted cone을 많이 사용하고 있다[2,5]. 슬럼프 콘 형태별 T_{50} 의 차이는 Normal cone 상태에서 GB 혼입률 변화에 따라 2.2초에서 2.8초로 측정되어 0.6초 범위 정도의 차이가 발생되었지만, Inverted cone 상태에서는 2.7초에서 4.3초로 측정되어 1.6초의 범위로 그 차이가 더 크게 발생하였다. 이는 Inverted cone 상태에서 T_{50} 을 측정하게 되면 슬럼프 콘의 좁은 면적이 하부에 위치하게 되고 500mm 까지 도달하는 거리가 Normal cone 상태보다 상대적으로 더 멀기 때문이다. 이 차이로 인해 SCC와 같은 빠른 흐름성을 나타내는 콘크리트 물성에서

는 Inverted cone 상태로 측정하는 것이 SCC의 흐름속도에 대한 특성을 파악하는데 유리할 것으로 판단된다.

GB 혼입량에 따른 T_{50} (Inverted cone)은 GB를 혼입하지 않은 Plain의 경우 4.3초 상대적으로 느렸지만 Figure 7과 같이 GB 2.0kg/m³까지 GB로 인하여 콘크리트의 점성이 낮아졌기 때문에 2.8, 2.8, 2.9초로 SCC의 흐름속도가 개선되었다. 하지만 일정범위 이상의 미세입도의 증가로 인해 GB 4.0kg/m³에서는 3.8초로 흐름속도가 느려졌다. 이에, GB 혼입량 2.0kg/m³까지만 사용하는 것이 SCC의 충전성에 도움이 되는 것을 알 수 있었다.

3.3 통과성(Passing ability)

Table 7은 슬럼프 플로(SF)와 J-ring flow(SF_J)의 차이에 따른 통과성 등급 기준(ASTM C 1610)을 나타낸 것이고 [6] Figure 8은 슬럼프 플로와 J-ring flow와의 관계를 GB 혼입량별로 나타낸 것이며, Figure 9는 GB 혼입률별 통과성 등급을 나타낸 것이다.

일반적으로 슬럼프 플로와 J-ring flow의 측정값은 J-ring flow의 철근 차단 효과로 인해 슬럼프 플로보다 J-ring flow가 작은 값을 나타낸다. GB 혼입률 변화에 따른 통과성 등급은 Plain의 경우, 1 등급으로 측정되어 ‘최소 차단’ 정도의 통과성을 나타낸 반면 GB를 혼입할 경우 혼입량 2.0kg/m³까지 0 등급으로 측정되어 ‘보이는 차단 없음’ 정도로 통과성이 우수해지는 것으로 측정되었다. 하지만 그 이상 GB를 사용할 경우 통과성에 악영향을 주는 것을 알 수 있었다. 이는 3.5절의 레올로지 특성과 연관시켜 볼 수 있는데, 항복응력이 GB 1.0kg/m³에서 가장 낮은 항복응력을 나타내고 이후 GB 혼입률부터 항복응력이 증가되었기 때문인 것으로 판단되었다.

Table 7. Passing ability criteria(ASTM C 1610)

SF-SF _J	Passing ability rate	Notes
< 25mm	0	No visible blocking
25mm~50mm	1	Minimal to noticeable blocking
> 50mm	2	Noticeable to extreme blocking

*SF : Slump flow
*SF_J : J-ring flow

J-ring flow만 사용한 통과성 평가는 Figure 10과 같이 Block step(P_J) 값으로 정량화 하였다.

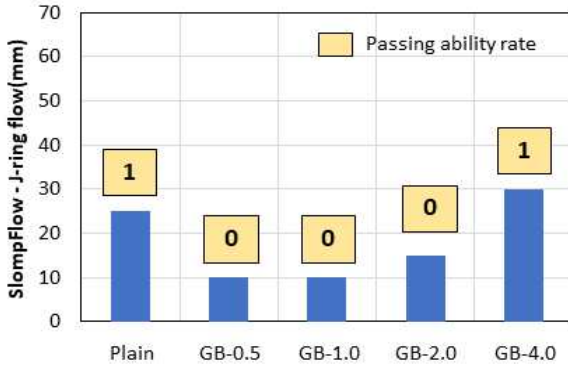


Figure 9. Passing ability rate by GB ratios by J-ring

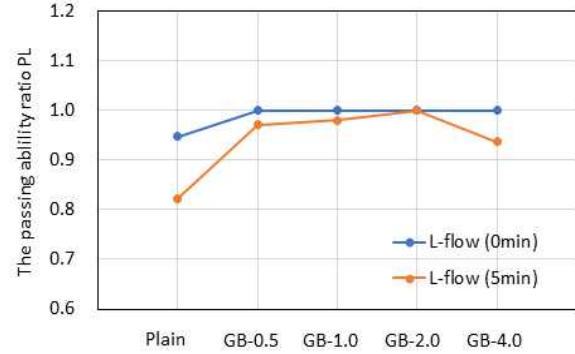


Figure 12. Passing ability ratio PL by L-flow(0min, 5min)

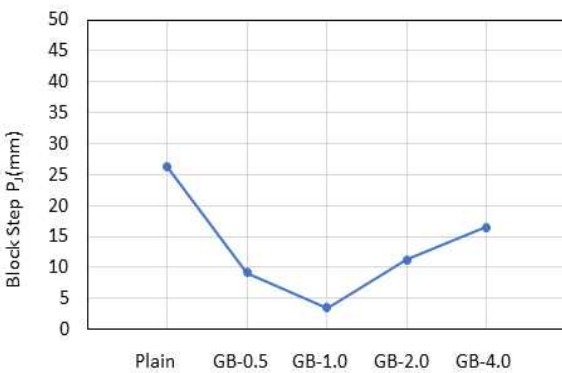


Figure 10. Block step according to GB ratios

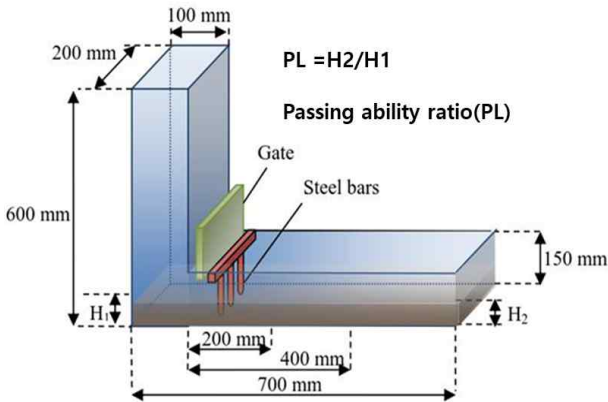


Figure 11. Measurement of PL

실험결과, GB를 혼입한 모든 배합에서 P_j 값이 낮아져 Plain 보다 낮아져 철근 통과성이 개선되었다. 특히, GB 1.0kg/m³에서 가장 낮은 P_j 값을 나타냈으며, 이후 GB 혼입률에서는 점차 증가되는 것으로 측정되었다. 이는 슬럼프 플로우와 J-ring flow의 관계로 파악한 통과성 결과와 유사한 결과이다.

Figure 11은 L-flow에 의한 통과성 등급 측정 방법을 나타낸 그림이고 Figure 12는 GB 혼입률별 L-flow에 의한 통과성을 나타낸 것이다.

먼저, GB 혼입량 변화에 따른 L-flow에 의한 통과성은 위의 여타 결과들과 유사한 경향을 나타내었다. 콘크리트를 부어넣은 즉시 측정한 경우 Plain은 PL 0.95로 철근에 의한 콘크리트의 높이 차이가 발생하였으나, GB를 사용한 경우에는 혼입량에 관계없이 PL 1.00으로 철근 통과성이 매우 우수하게 나타났다. 하지만 콘크리트를 부어넣고 5분간 정지 후 측정한 PL의 경우, Plain 0.82, GB 0.5kg/m³ 0.97, GB 1.0kg/m³ 0.98, GB 2.0kg/m³ 1.00, GB 4.0kg/m³ 0.94로 측정되어 결과값의 차이가 발생되었다. 이는 콘크리트를 부어넣은 후 5분 동안 정지하면서 콘크리트의 항복응력이 증가되었거나, 굵은 골재가 하부로 가라앉는 재료분리 현상이 약간 발생되었기 때문에 부어넣은 직후 보다 5분간 정지한 후의 실험에서 더 큰 통과성 차이를 나타낸 것으로 예상된다. GB 2.0kg/m³ 보다 높은 혼입률에서 통과성이 낮아지는 원인은 낮은 입도의 입자가 많아져 최적의 입도분포를 벗어났기 때문인 것으로 판단된다.

3.4 재료분리 저항성 평가(Segregation resistance)

3.4.1 동적 재료분리 저항성(Dynamic segregation)

Table 8은 재료분리 저항성 평가 지수(EIS)를 GB 혼입량에 따라 나타낸 것이다. EIS는 슬럼프 플로우를 슬럼프 값으로 나누어 재료분리 저항성을 판단하는 지수인데, 실험결과, 모든 배합에서 유관 상 재료분리가 발생하지 않았기 때문에 큰 차이가 발생하지 않았다. (모든 배합-평가등급 3등급)

Table 8. Evaluation index of segregation resistance(EIS)

	Plain	GB-0.5	GB-1.0	GB-2.0	GB-4.0
EIS index	2.5	2.4	2.5	2.5	2.5
EIS grade	3	3	3	3	3

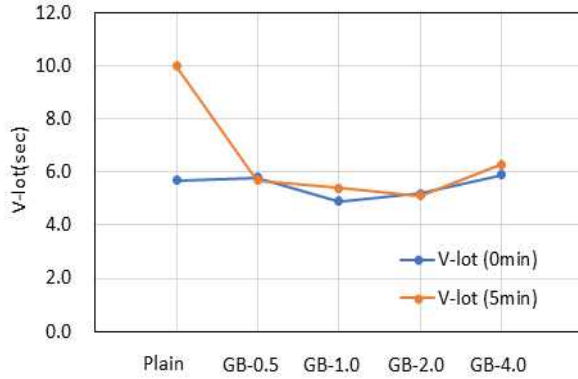


Figure 13. V-lot at 0, 5minutes according to GB ratios

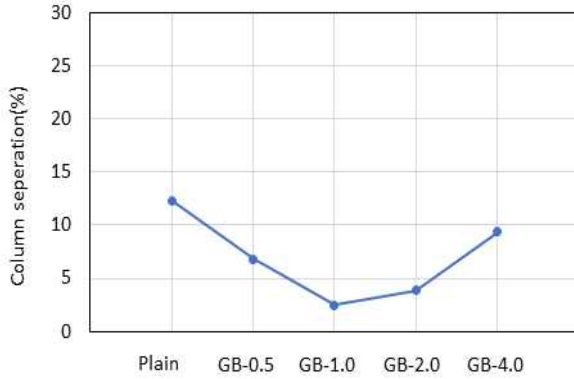


Figure 14. Column segregation according to GB ratios

Figure 13은 GB 혼입량에 따른 V-lot(0, 5분)를 나타낸 것이다. V-lot의 측정은 L-flow 측정방식과 유사하게 V-lot 시험기기에 콘크리트를 부어넣은 후 즉시(0분) 측정 및 콘크리트를 부어넣고 5분이 지난 후 측정으로 나누어 측정하였다. 결과 분석은 0분과 5분의 V-lot 측정값의 차이가 클수록 재료분리가 발생하였다고 판단하였다.

실험결과, Plain의 경우 0분 5.7초, 5분 10.0초로 그 차이가 4.3초로 그 차이가 크게 발생하여 재료분리가 발생하였다고 판단할 수 있었다. GB를 사용한 경우에는 혼입량에 상관없이 0.5초 이하의 차이를 나타내었다. 이는 미세하고 구형 상태인 경량 GB가 콘크리트의 입자사이 사이에 배치되어 각각의 재료가 가라앉지 않도록 해주어 동적 재료분리 저항성을 증가시켜 주는 것으로 판단되었다.

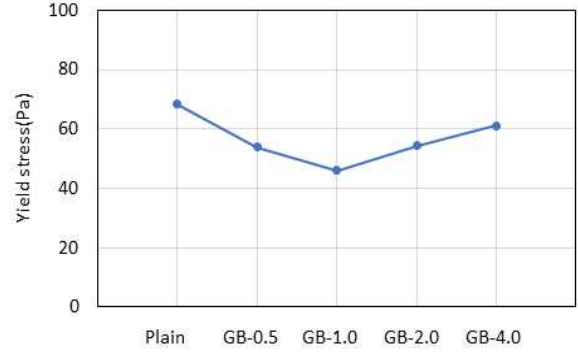


Figure 15. Yield stress according GB ratios

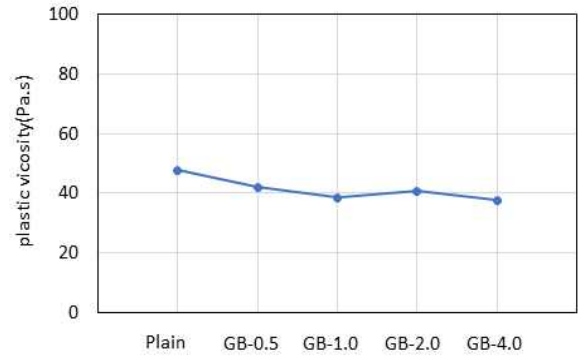


Figure 16. Plastic viscosity according GB ratios

3.4.2 정적 재료분리 저항성(Static segregation)

Figure 14는 GB 혼입량에 의한 Column segregation을 나타낸 것이다. GB를 사용하지 않은 Plain은 정적 재료분리도가 12.3% 발생한 반면 GB를 사용한 경우 0.5kg/m³ 6.8%, 1.0kg/m³ 2.5%, 2.0kg/m³ 3.9%, 4.0kg/m³ 9.4%로 정적 재료분리 저항성이 개선되는 것으로 나타났다. 특히 GB 1.0kg/m³ 2.5%로 가장 낮은 재료분리도를 나타내었고 이후 GB 혼입량이 증가할수록 재료분리도는 증가하는 것으로 나타났다. 이는 앞서서도 언급했듯이 적정량의 GB는 콘크리트의 입자 사이에 분포하여 재료분리 저항성을 증가시키지만, 이 이상 혼입하게 되면 콘크리트의 전반적인 입도 개선에 악영향을 주게 되어 유동성 저하, 감수제 사용량 증가, 통과성 저하 등의 특성이 동반하게 되고 더불어 재료분리 저항성도 낮아지는 요인으로 작용하는 것으로 판단된다.

3.5 레올로지 특성(Rheology)

Figure 15는 GB 혼입량에 따른 굳지 않은 콘크리트의 항복응력을 나타낸 것이고 Figure 16은 소성점도를 나타낸 것이다. 먼저, 소성점도의 경우, GB 혼입량이 증가할수록

점차 낮아졌으나 그 차이는 크지 않았다. GB의 증가는 낮은 입도가 많아지는 것이기 때문에 소성점도가 증가될 것으로 예상하였으나, 반대의 결과가 도출되었다. 이는 고성능감수제의 사용량과 관련하여 유추할 수 있는데, GB 사용량이 증가할수록 슬럼프 플로는 낮아졌기 때문에 동일 유동성을 만족시키기 위하여 고성능감수제의 사용량을 증가시키도록 배합설계가 되었다. 이러한 고성능감수제 사용량 증가가 소성점도를 낮추는 원인으로 예상된다.

일반적으로 항복응력을 낮추기 위해서는 슬럼프 플로값을 상승시켜야 한다[2]. 하지만 본 연구에서는 슬럼프 플로값을 거의 동일하게 배합설계 하여 슬럼프 플로가 항복응력에 미치는 영향을 배제하였다. 항복응력에 대한 실험결과를 보면, GB를 1.0kg/m^3 사용할 경우, 사용하지 않은 Plain에 비하여 GB의 작은 입자크기와 구형으로 인해 항복응력이 Plain 대비 67% 수준으로 낮게 측정되어, 항복응력 개선효과가 나타났다. 하지만 GB의 혼입량을 계속 증가시켜 2.0, 4.0kg/m^3 혼입한 경우, 오히려 1.0kg/m^3 보다 항복응력이 증가하는 것을 알 수 있었다. 즉, GB 1.0kg/m^3 혼입 시, 항복응력이 낮아지고 이로 인해 충전성 및 통과성이 양호해질 수 있지만 그 이상 혼입 시, 유동성을 낮추는 역할을 GB가 하기 때문에 항복응력도 증가되고 이로 인해 통과성, 충전성에도 악영향을 미치는 것으로 예상된다.

4. 결 론

본 연구는 자기충전 콘크리트의 생산 및 시공 시 굳지 않은 상태의 안정성을 향상시킬 목적으로 유공 유리분말(GB)를 혼입한 자기충전 콘크리트를 검토하였는데, 그 연구 결과를 정리하면 다음과 같다.

충전성 특성으로는, GB 혼입량 증가에 따른 감수제 사용량은 동일 유동성을 만족하기 위하여 약간 증가하였다. T_{50} 의 경우, GB의 볼베어링 효과로 인해 GB 2.0kg/m^3 까지 Plain에 비하여 단축되어 충전성이 개선되는 것으로 나타났다. 단, GB 4.0kg/m^3 에서는 오히려 약간 증가되었다.

통과성 특성으로는, 통과성 등급은 Plain 1등급, GB $0.5\sim 2.0\text{kg/m}^3$ 0등급, GB 4.0kg/m^3 1등급으로 GB 혼입량 2.0kg/m^3 까지 '보이는 차단 없음'으로 통과성이 개선되었다. J-ring에 의한 통과성 Block step(P_j) 값도 GB 1.0kg/m^3 에서 가장 우수한 통과성을 나타내었다.

재료분리 저항성 특성으로는, 동적 재료분리 저항성은 EIS 등급 경우, 모든 배합에서 3등급으로 GB 혼입량에 따른 차이는 발생하지 않았으나 V-lot에 의한 동적 재료분리 저항성은 Plain 보다 GB를 사용하게 되면 그 혼입량에 상관없이 동적 재료분리 저항성이 크게 개선되었다. 정적 재료분리 저항성은 GB 1.0kg/m^3 에서 재료분리도 2.5%를 나타내어 Plain(12.5%) 대비 크게 개선되었다.

레올로지 특성으로는, GB 혼입량 증가에 따른 소성 점도는 큰 차이가 발생하지 않았으나 항복응력은 1.0kg/m^3 까지 낮아졌고 이후 혼입량에서는 점자 증가하였다. GB 1.0kg/m^3 사용 시 항복응력 개선에 효과가 있는 것으로 판단되었다.

이상을 종합하면, GB를 1.0kg/m^3 사용하게 되면 자기충전 콘크리트의 충전성, 통과성, 항복응력 개선시키고 재료분리 저항성을 증가시켜 자기충전 콘크리트의 안정성에 도움이 될 것으로 판단된다.

요 약

본 연구는 자기충전 콘크리트의 생산 및 시공 시 굳지 않은 상태의 안정성을 향상시킬 목적으로 유공 유리분말(GB)를 혼입한 자기충전 콘크리트에 대하여 충전성, 통과성, 재료분리 저항성 및 레올로지 특성을 평가하였다. 실험결과, GB 혼입량에 따른 충전성은 GB의 볼베어링 효과로 인해 GB 2.0kg/m^3 까지 T_{50} 도달시간이 Plain에 비하여 단축되어 충전성이 개선되는 것으로 나타났다. 단, GB 4.0kg/m^3 에서는 오히려 약간 증가되었다. 통과성의 경우에는 Plain 1등급, GB $0.5\sim 2.0\text{kg/m}^3$ 0등급, GB 4.0kg/m^3 1등급으로 GB 혼입량 2.0kg/m^3 까지 '보이는 차단 없음'으로 통과성이 개선되었다. J-ring에 의한 통과성 Block step(P_j) 값도 GB 1.0kg/m^3 에서 가장 우수한 통과성을 나타내었다. GB 혼입에 따른 재료분리 저항성은 동적 재료분리 저항성은 Plain 보다 GB를 사용하게 되면 그 혼입량에 상관없이 동적 재료분리 저항성이 증가하였다. 정적 재료분리 저항성은 GB 1.0kg/m^3 에서 재료분리도 2.5%를 나타내어 Plain(12.5%) 대비 크게 개선되었다. GB 혼입에 따른 레올로지 특성은 GB 혼입량 증가에 따른 소성 점도는 큰 차이가 발생하지 않았으나 항복응력은 1.0kg/m^3 까지 낮아졌다. 이상을 종합하면, GB를 1.0kg/m^3 사용하게 되면 자기충전 콘크리트의 충전성, 통과성, 항복응력 개선에 효과적인 것으로 나타났다.

다. 또한 재료분리 저항성을 증가시켜 자기충전 콘크리트의 안정성에 도움이 될 것으로 판단된다.

키워드 : 자기충전 콘크리트, 재료분리 저항성, 유공 유리 분말, 충전성, 통과성, 레올로지

Acknowledgement

This research was supported by Research & Development Division, Hyundai Engineering & Construction.

References

1. Construction Trend Briefing[Internet]. Seoul(Korea): Construction Economy Reserch Institute of Korea, 2017-[cited 2017 Nov. 636]. 1-13. Available from: <http://www.cerik.re.kr/01/report.asp?page=3&startpage=1&totalpage=82&subject=&team=&pcls=3#>
2. Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete[Internet]. EFNARC, Association House, 99 West Street, Farnham, Surrey GU9 7EN, UK, 2002-[cited 2002 Feb 1]. Available from: <http://www.efnarc.org/pdf/SandGforSCC.PDF>
3. Shen L, Jovein HB, Shen S, Li M, Effects of aggregate properties and concrete rheology on stability robustness of self-consolidating concrete, *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2015 May; 27(5):1-10.
4. Kwan AKH, Ng IYT, Optimum superplasticiser dosage and aggregate proportions for SCC, *Magazine of Concrete Research*, 2009 May;61(4):281-92.
5. Malhotra VM, The rheology of fresh concrete, *Canadian Journal of Civil Engineering*. 1984 Nov;11(1):128-9.
6. American Society for Testing and Materials C 1610/C 1610/M:Test Method for static Segregation of Self-Consolidating Concrete Using Column Technique. *Annual Book of ASTM Standard*, 2009; 04(2):856-9.