pISSN 1598-2033
eISSN 2233-5706
Journal of the Korea Institute of Building Construction, Vol. 13, No. 6
http://dx.doi.org/10.5345/JKIBC.2013.13.6.602
www.jkibc.org

알칼리 자극제로서 미분시멘트와 순환골재가 고로슬래그 다량치환 콘크리트의 공학적 특성 및 미세구조에 미치는 영향

Effect of Fine Particle Cement and Recycled Aggregates as Alkali Activator on the Engineering Properties and Micro-Structure of High Volume Blast Furnace Slag Concrete

한 민 철* 이 향 재 한 천 구

Han, Min-Cheol* Lee, Hyang-Jae Han, Cheon-Goo
Department of Architectural Engineering, Cheongju University, Cheongju, 360-764, Korea

Abstract

The aim of this study is to investigate experimentally the effect of the combination of fine particle cement with high Blaine fineness (FC) and recycled aggregates on the engineering properties and micro structure of high volume blast furnace slag (BS) concrete with 75% BS and 21 MPa. FC manufactured by particle classification at the plant with Blaine fineness of more than 7000 cm2/g was used as additional alkali activator for high volume blast furnace slag concrete made with recycled fine and coarse aggregates. FC was replaced by 15, 20 and 25% OPC. Test results showed that the incorporation of FC resulted in an increase in the compressive strength compared to BS concrete without FC by as much as 30% due to accelerated hydration and associated latent hydraulic reaction. It was found that the use of FC and recycled aggregates played an important role in activating BS for high volume BS concrete by offering sufficient alkali.

Keywords : blast furnace slag, recycled aggregate, fine particle cement, alkali-activator

1. 서 론

최근 전세계적으로 환경오염 방지 및 자원재활용에 대한 관심이 집중되면서 시멘트의 경우도 탄산가스 발생 저감 측면에서 에코시멘트 혹은 플라이 애시 및 고로슬래그 미분말 등의 광물질 혼화재료를 치환하여 가능한 시멘트 사용량을 줄이려 시도하고 있다[1,2].

특히, 최근 들어서는 이러한 혼화재료 사용량을 시멘트 대비 60%이상 대폭 증가시킨 High volume fly ash 및 slag 콘크리트로의 확대를 도모하고 있으며, 더 나아가서는 지오폴리머 반응 등을 이용한 무시멘트 알칼리 활성 콘크리트까지 등장하게 되었다[2,3,4].

이러한 혼화재 다량 치환 혹은 무시멘트 콘크리트의 등장 배경에는 반응성이 미약한 고로슬래그 혹은 플라이애시의 잠재수경성 반응을 촉진시킬 수 있는 강력한 알칼리 자극제의 역할이 있었기에 가능하였는데, 특히 비교적 반응성이 양호한 고로슬래그의 경우 강알칼리인 $Na(OH)_2$, Na_2SiO_3, KOH 등의 물질과 황산염계열의 자극물질을 투입할 경우 비교적 경화가 쉽게 촉진되고 보통 포틀랜드 시멘트만으로는 해결할 수 없는 우수한 물성을 확보할 수 있게 되었다.

이와 연관하여 이 등은 $Na(OH)_2$를 포함한 다양한 알칼리 자극제를 사용한 High volume slag 콘크리트의 특성을 고찰하여 알칼리 자극제가 콘크리트의 강도증진에 기여함을

Received : September 30, 2013
Revision received : October 15, 2013
Accepted : October 18, 2013
* Corresponding author : Han, Min-Cheol
[Tel: 82-43-229-8484, E-mail: twhan@cju.ac.kr]
ⓒ2013 The Korea Institute of Building Construction, All rights reserved.

확인한 바 있다[5]. 또한, 양 등은 알칼리 활성 콘크리트의 2차제품 활용에 대한 연구를 통해 고로슬래그 기반 알칼리 활성 콘크리트의 시공성, 백화 및 알칼리 골재 반응 등의 문제점 때문에 이들의 영향이 비교적 미미한 2차 제품에 활용을 보고한 바 있다[6]. 김 등은 생석회, 천연무수석고 및 CSA를 이용하여 고로슬래그 60~70% 치환 콘크리트의 알칼리 자극을 시도하고 이들이 수화발열 및 강도에 미치는 영향을 보고 한 바 있다[7]. 또한, 류 등은 고로슬래그 대량 사용 콘크리트의 건조수축 및 중성화에 미치는 영향을 고찰한 연구에서 석고를 알칼리 자극제로 사용한 경우 건조수축에 기여하는 효과가 크며 반면에 중성화에 미치는 영향은 미미한 것으로 분석하고 있다[8].

그런데, 이와 같은 고로슬래그 다량 치환 콘크리트의 핵심적인 역할을 담당하는 알칼리 자극제는 가격이 고가이고 사용에 제약이 따르는 문제점들이 보고되고 있어 보다 저렴한 알칼리 자극제의 필요성이 제기되고 있는데, 몇몇 연구자들의 경우 탈황석고 혹은 페인산 석고 등의 산업부산물을 알칼리 자극제로 활용하는 방법으로 접근하고 있다.

이와 연관하여 한 등은 고로슬래그 미분말을 다량 치환한 콘크리트의 경제적인 알칼리 자극제로서 미수화 시멘트를 함유하여 $Ca(OH)_2$를 기반으로 한 순환골재의 역할을 검토한 바 있는데, 표면의 미수화 시멘트가 알칼리 자극제로서 효과가 있음을 보고한 바 있다[9,10]. 그러나, 순환골재가 가지는 품질의 한계 등으로 인해 사용범위는 저강도 범위인 21 MPa이하에서 타당성 및 경제성이 인정되며, 더욱이 실무 레미콘 배합의 열악한 여건을 감안하면, 안정적 강도 확보를 위해서는 추가적인 알칼리의 공급이 필요한 실정이다. 이러한 추가적인 알칼리 공급원으로서 기존 보통포틀랜드 시멘트 생산과정에서 분급을 통한 분말도 7000 cm^2/g 이상의 미분을 포집한 미립자 시멘트(FC)의 역할에 주목하였는데, 고분말도에 의한 수화반응 속도의 향상 및 가격적 측면의 장점으로 타당성 있을 것으로 사료된다.

따라서 본 연구에서는 BS 다량 치환 콘크리트의 알칼리 자극제로서 순환골재 및 FC의 복합사용이 BS 다량 치환 콘크리트의 공학적 특성 및 미시적 특성에 미치는 영향을 분석하여 향후 보다 경제적인 BS 다량 치환 콘크리트의 개발 및 실용화에 기여하고자 한다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험계획

본 연구의 실험계획은 Table 1과 같고, 콘크리트의 배합사항은 Table 2와 같다.

먼저, 물-결합재비(W/B)는 저강도 수준인 21 MPa로 설정하였는데, 이는 순환골재의 사용에 따른 적정 강도 범위를 고려하여 결정하였다. Plain 배합은 OPC 100%에 부순자갈 및 강모래를 사용한 콘크리트로 설정하였고, 여기에 목표 슬럼프 120±25 mm 및 목표 공기량 4.5±1.5 %가 되도록 배합설계하였다. 한편, 결합재 조합으로 Plain을 제외한 모든 배합에서 BS를 OPC에 75 %를 치환하였고, 여기에 추가적인 알칼리 자극을 위하여 OPC대신 FC를 15, 20, 25 %를 치환하는 3성분계 조합으로 계획하였다.

또한, 골재 조합으로서 본 연구에서는 전술한 바와 같이 알칼리 자극제로서 순환골재를 사용하였는데, Plain 배합을 제외한 모든 배합에서 순환잔골재와 순환굵은 골재를 사용하는 것으로 하였다.

Table 1. Experimental plan

Factors		Levels
Mixture	W/B (%)	50
	Target air content (%)	4.5±1.5
	Target flow (mm)	120±25
	BS contents (%)	75
	Binder combination BS:OPC:FC (%)	75:25:0 75:10:15 75:5:20 75:0:25
	Aggregate types	Crushed stone, River sand Recycled Coarse Aggregate(RCA) Recycled Fine Aggregate(RFA)
Experiment	Fresh concrete	· Slump · Air contents · Setting time
	Hardened concrete	· Compressive strength (3, 7, 28, 42 days) · Corbonation depth · SEM (7, 28 days) · Porosity(28 days)

Table 2. Mixture proportions of the concretes

Mixture	W/B (%)	W (kg/m^3)	S/a (%)	Weight (kg/m^3)					
				OPC	FC	BS	G	S	SP
Plain	50	180	47	360	0	0	903	683	1.62
FC0	50	180	47	90	0	270	893	675	1.62
FC15	50	180	47	36	54	270	893	675	1.62
FC20	50	180	47	18	72	270	893	675	1.62
FC25	50	180	47	0	90	270	893	675	1.62

2.2 사용재료

본 연구의 사용재료로써 먼저, 시멘트는 국내 A사산 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였는데 그 물리적 성질은 Table 3과 같다. FC의 경우 국내 A사에서 시멘트 분쇄 과정중 발생되는 분말도 7600 cm^2/g의 미립자 시멘트를 백 필터로 집진한 제품을 사용하였고, 제조 과정은 Figure 1과 같으며, 그 물리 화학적 성질은 Table 4 및 5와 같다.

BS는 국내 A사산 3종을 사용하였는데, 그 물리·화학적 성질은 Table 6과 같고, 순환 굵은골재(RCA)와 순환 잔골재(RFA)는 국내 D사산 제품을 사용하였는데, 그 물리적 성질은 Table 8 및 9와 같다.

Table 3. Physical properties of OPC

Density (g/cm^3)	Blaine (cm^2/g)	Crystalline form	Setting(min)		Compressive strength (MPa)		
			Initial set	Final set	3 day	7 day	28 day
3.12	3390	In powder form	189	294	34.6	42.1	47.9

Table 4. Physical properties of FC

Density (g/cm^3)	Blaine (cm^2/g)	Crystalline form	Setting(min)		Compressive strength (MPa)		
			Ini. set	Final set	3d	7d	28d
3.12	7613	In powder form	180	279	35.6	42.5	48.6

Table 5. Chemical composition of FC

Chemical component (%)							
LOI	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	K_2O
0.54	21.24	5.01	3.68	62.91	2.00	3.17	1.31

Table 6. Physical and chemical properties of BS

Density (g/cm^3)	Blaine (cm^2/g)	L.O.I (%)	Moisture content(%)	Chemical component (%)			
				SO_3	MgO	SiO_2	CaO
2.90	4 254	1.91	0.23	1.95	5.26	34.2	42.5

Table 7. Physical properties of Natural aggregates

Aggregates	Density (g/cm^3)	FM	Water absorption (%)	Passing 0.08 mm sieve size (%)
NCA	2.67	6.48	0.58	-
NFA	2.58	2.86	2.63	2.87

Table 8. Physical properties of RCA

Density (g/cm^3)	FM	Water absorption(%)	Weight of unit volume(kg/m^3)	Percentage of absolute volume(%)
2.20	3.14	4.20	1 546	59.1

Table 9. Physical properties of RFA

Density (g/cm^3)	FM	Water absorption (%)	Passing 0.08 mm sieve size (%)
2.20	2.76	6.20	2.40

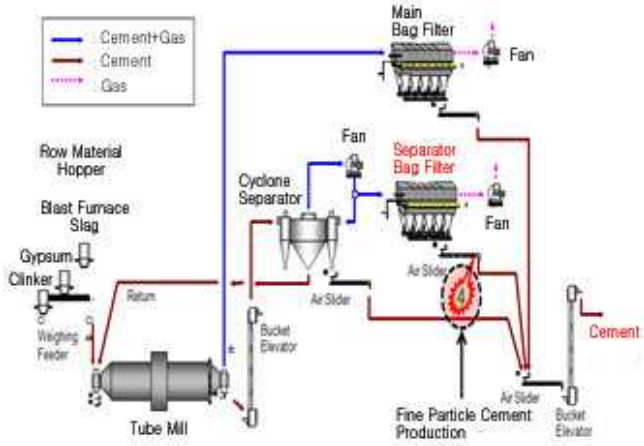


Figure 1. Process of fine particle cement manufacturing

2.3 실험방법

본 연구의 실험방법으로 콘크리트 혼합은 강제식 팬 타입 믹서를 사용하여 혼합하였다.

굳지 않은 콘크리트의 실험으로 슬럼프는 KS F 2402, 공기량은 KS F 2421, 응결시간은 KS F 2763에 의거 실시하였다. 경화 콘크리트 실험으로 압축강도는 KS F 2405 규정에 의거하여 실시하였으며, 탄산화 저항성 시험은 KS F 2584의 시험방법에 의거하여 진행하였다. 미세구조 분석을 위한 전자주사현미경(SEM) 촬영을 실시하였으며 세공분포를 확인하기 위하여 Mercury intrusion by porosimetry (MIP) 측정을 실시하였다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 굳지 않은 콘크리트의 특성

Figure 2는 FC 치환률 변화에 따른 슬럼프 및 공기량 변화를 나타낸 것이다. Plain의 경우 배합설계에 의해 목표

슬럼프를 만족하였으나, 고로슬래그 다량치환 배합에서는 전반적으로 FC0의 경우 슬럼프가 150 mm 정도로 높아졌고 이후 치환률이 증가할수록 슬럼프가 감소하는 경향을 나타내었으나, 목표범위 이내의 값을 갖는 것으로 나타났다. 일반적으로 순환골재 및 BS가 사용되면 높은 흡수율 및 점성증가로 슬럼프가 일반골재 및 OPC를 사용한 경우보다 감소하는 경향을 보이는데, FC0배합의 경우 기존 경향과는 다소 다른 결과를 나타내었다.

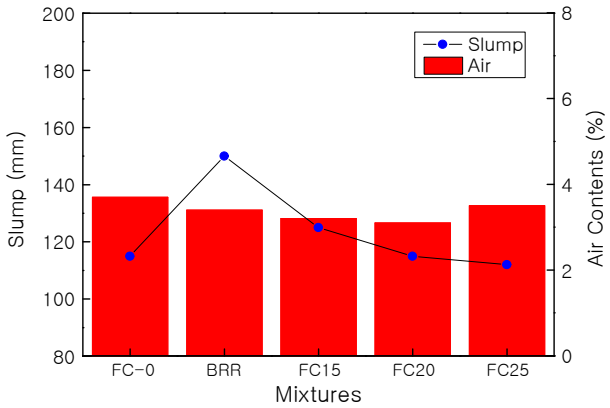


Figure 2. Slump and air contents according to FC contents

한편, 공기량은 FC 치환률 증가에 따라 다소 감소하는 경향을 보이고 있으나, 오차범위 이내의 값으로 본 연구 범위 내에서는 BS치환, 순환골재 사용 및 FC치환에 따른 공기량 변화는 크지 않음을 확인 할 수 있었다.

Figure 3은 FC 치환률 변화에 따른 관입저항치를 나타낸 것이다. 전반적으로 Plain은 7.5시간에서 종결이 측정되어 가장 빠른 응결시간을 확보하는 것을 확인 할 수 있었고, FC0의 경우가 22시간 전후로 응결시간이 가장 지연되는 것으로 나타났다. 그러나 FC 치환률이 증가함에 따라 응결시간은 비례적으로 단축되어 12~17시간 정도 소요되는 것으로 나타났다. 이와 연관하여 FC0의 경우 BS가 75 %치환된 조건으로 초기 수화반응에 관여하는 시멘트 성분이 부족함에 따라 수화가 지연되어 응결시간이 상대적으로 Plain 에 비해 지연되는 것으로 나타났고, 이후 FC 치환에 따라 미립자 시멘트의 높은 분말도에 기인한 촉진된 수화반응으로 응결시간이 Plain에 필적할 수준은 아니지만 비례적으로 단축되는 것으로 판단된다.

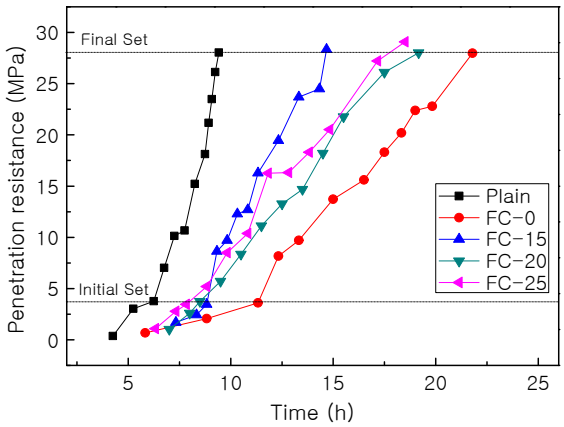


Figure 3. Penetration resistance according to FC contents with time

3.2 압축강도발현 특성

Figure 4 및 5는 FC치환률 변화에 따른 재령별 압축강도및 Plain 대비 압축강도비를 나타낸 것이다. 먼저, 재령 3일에서는 예상대로 Plain의 경우가 13.7 MPa로 가장 높게 나타났고, FC0의 경우 BS 다량치환 및 순환골재 사용에 기인하여 압축강도가 5.9 MPa로 가장 낮게 나타났으나, FC 치환률이 증가함에 따라 비례적으로 압축강도가 증가하여 8~9 MPa 수준으로 발휘되어 FC0에 비하여 30~45 %정도 압축강도가 향상됨을 확인할 수 있었다. 이는 FC의 고분말도에 의한 향상된 수화반응속도에 기인된 결과로 사료된다. 특히, 재령이 경과함에 따라 이러한 경향이 지속되었고 재령 28일에서는 Plain의 경우 27 MPa를 발휘하였으며, FC를 치환한 배합에서는 공히 설계기준강도 21 MPa를 상회하는 값을 나타내었으나, FC0는 설계기준강도에 미달하는 값을 나타내었다.

한편, FC 치환 배합에서는 동일재령에서 Plain 대비 강도비가 FC0보다 현저히 향상되는 것을 알 수 있었는데, Figure 5에서 볼 수 있듯이 FC0의 경우 Plain 대비 20~67 %정도의 낮은 강도발현을 보이고 있으나, FC가 치환됨에 따라 Plain 대비 60~83 %정도로 향상된 압축강도비를 보이고 있었다. 특히, 재령 28일에서는 FC 치환 배합의 경우 FC 및 순환골재의 알칼리 자극에 의한 잠재수경성 반응으로 Plain 대비 83 %내외의 향상된 강도비를 확보하였는데, 이는 FC0가 28일에서 Plain 대비 강도비 67 %임을 감안하면 FC 치환에 따라 16 % 정도의 강도가 향상된 것으로 FC의 강도향상 효과를 확인 할 수 있었다.

특히, FC는 기존 OPC 생산 공정에서 추가적인 설비나 원료의 공급없이 분쇄공정과정에서 bypass way 방식으로 제조할 수 있기 때문에 OPC와 유사한 가격이 형성되어 있어 고분말도의 FC를 활용할 경우 순환골재와 더불어 $Ca(OH)_2$ 기반의 비교적 저렴한 알칼리 자극제로서 활용이 가능할 것으로 사료된다.

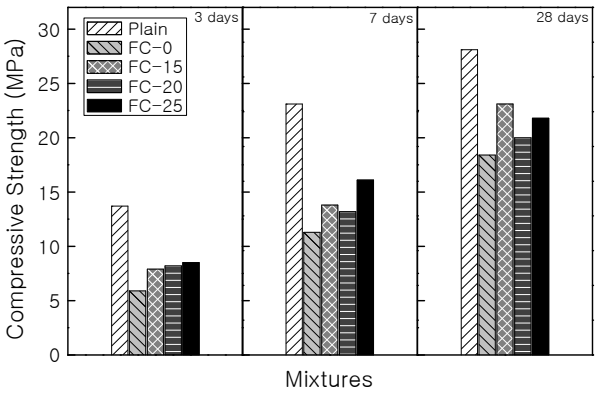


Figure 4. Compressive strength according to FC contents

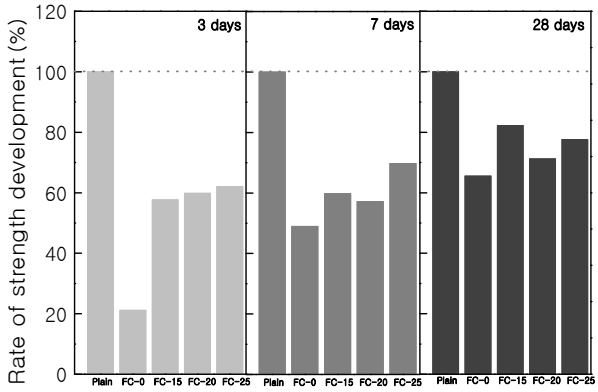


Figure 5. Rate of strength development of the FC incorporated concrete with plain concrete

3.3 탄산화 저항성

Figure 6은 재령 4주까지의 FC치환률별 탄산화 저항성 측정 결과를 나타낸 것이다. 전반적으로 Plain 배합의 경우 탄산화 깊이가 가장 낮게 나타난 반면, BS가 다량 치환된 FC0의 경우 탄산화 깊이가 증가하였는데, 이는 콘크리트 중 단위시멘트량이 감소하고 이로 인한 $Ca(OH)_2$ 의 생성량이 감소하며 BS의 잠재수경성 반응에 의한 알칼리 소비에 기인한 결과로 판단된다. 한편, FC 치환률이 증가함에 따라 탄산화 깊이는 FC0에 비해 약간 증가하거나 큰 차이가 없는 것으로 나타났는데, 알칼리 자극제를 사용할 경우 이들에 의해 용해된 알칼리 성분에 의해 pH가 서서히 감소하여 연구자별로 다소 차이는 있으나 탄산화 저항성이 증가한다는 보고가 있으나, 본 연구범위에서는 FC의 증가는 큰 차이가 없는 것으로 나타났고, 단, FC 25의 경우 향상된 수화반응속도에 기인하여 탄산화 깊이가 감소함을 확인 할 수 있었다.

아울러 재령경과에 따른 탄산화 깊이는 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 단, 향후 장기적인 내구성 검증 차원에서 보다 장기 재령에서의 탄산화 저항성 측정 결과가 요구된다.

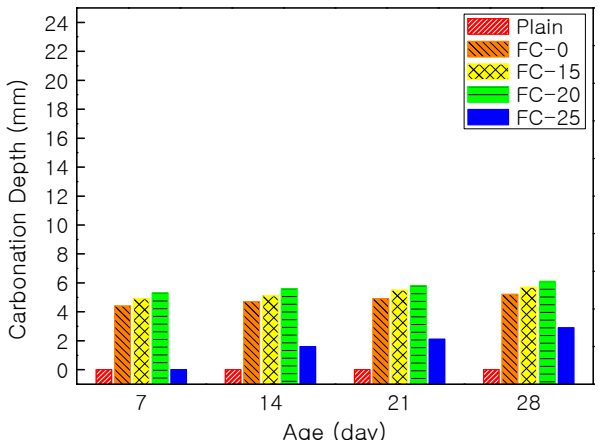


Figure 6. Carbonation depth according to FC contents with age

3.4 미시적 특성 분석

Figure 7은 BS 다량 치환 콘크리트의 FC의 효과를 확인하기 위해 누적 세공분포를 재령 28일에서 측정한 결과를 나타낸 것이다. 전반적으로 Plain에 비해 BS를 다량 치환한 경우 0.1 ㎛이하의 세공은 감소하고 있으며, BS 다량 치환 조건에서 FC 치환률이 증가할수록 반대로 0.1 ㎛이하의 미세공극은 증가하는 경향을 보였다. 이는 BS치환 및 FC 사용에 따른 향상된 잠재수경성 반응에 기인하여 미세공극인 겔공극의 증가한 것으로 사료된다[2].

Figure 8은 FC 치환률 변화에 따른 재령 7일 및 28일에서의 SEM 측정결과를 나타낸 것이다. 전반적으로 Plain의 경우 재령 7일 및 28일에서 안정적인 수화반응에 의해 C-S-H겔 및 Ca(OH)2등의 수화생성물이 양호하게 발달된 것을 확인 할 수 있으나, FC0의 경우 초기수화생성물인 에트린자이트가 재령 7일에서 보이고 있으며 구조도 치밀하지 못한 모습을 보이고 있었다. 반면에, FC 치환률이 증가함에

따라 재령 7일에서 에트린자이트는 크게 감소하였고, 비례적으로 C-S-H 및 Ca(OH)2등이 생성되어 수화 및 잠재수경성 반응물질의 생성을 확인 할 수 있었다.

이상을 종합하여 고찰하면, 본 연구 범위에서 설계기준강도 21 MPa 수준에서 BS 75 %치환 및 순환 잔·굵은골재를 사용한 콘크리트에 있어 FC를 치환함에 따라 반응속도가 향상되어 용출 알칼리량이 증가하고 기존 순환골재의 알칼리 자극과 조합되어 BS의 잠재수경성 반응이 증대됨을 확인할 수 있었다.

금후의 과제로는 순환골재의 품질변동에 따른 안정적 알칼리 자극효과 검토, FC, OPC 및 BS의 프리믹스 효과 검토 및 다양한 내구성 측면의 분석이 요구된다.

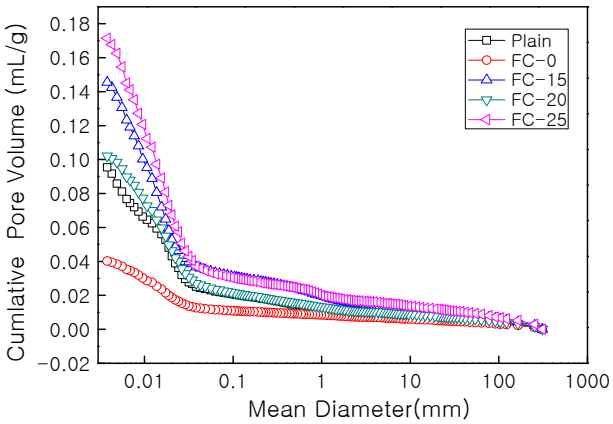
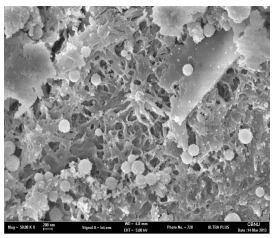
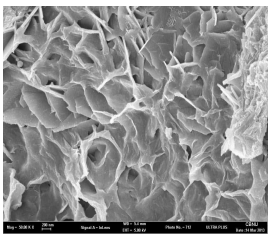
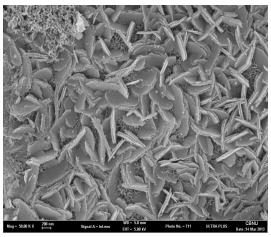


Figure 7. Accumulative pore distribution according to FC contents at 28 days

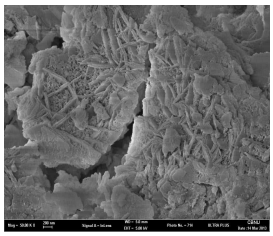

a) Plain (7 days)

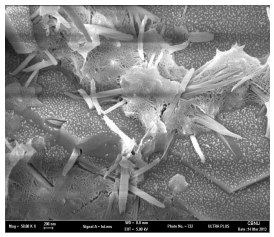

b) Plain (28 days)

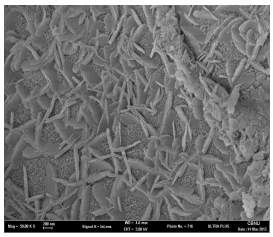
c) FC-0 (7 days)

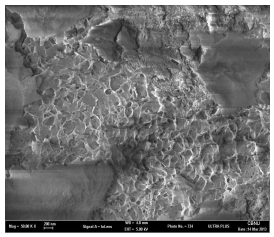

d) FC-0 (28 days)

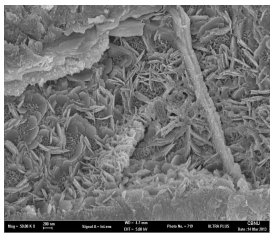
e) FC-15 (7 days)


f) FC-15 (28 days)


g) FC-20 (7 days)


h) FC-20 (28 days)


i) FC-25 (7 days)


j) FC-25 (28 days)

Scale : 200nm

Figure 8. SEM image according to FC contents at 7 and 28 days

4. 결 론

본 연구에서는 BS다량 치환 콘크리트의 알칼리자극제로서 순환골재 및 고분말도의 FC를 복합 사용한 콘크리트의 제반 공학적 특성 및 미시적 분석을 실시하였는데, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) FC 치환에 따른 BS 다량 치환 콘크리트의 슬럼프 및 공기량은 FC 치환률이 증가할수록 다소 증감은 있으나 큰 변동없이 유지되는 것으로 나타났는데, 이는 BS 및 FC 치환에 따라 점성이 증대되어 OPC를 단독사용한 경우보다 저하한다는 기존의 경향과는 다소 다른 결과를 보였다.
2) 응결시간의 경우 Plain이 가장 빠른 응결시간을 보였고, BS를 다량치환한 경우 응결이 지연되었으며 여기에 FC가 치환됨에 따라 Plain에 필적하는 수준은 아니어도, 응결시간이 단축되는 것으로 나타났는데, 이는 FC의 고분말도에 의한 촉진된 수화반응에 기인된 결과로 판단된다.

3) FC 치환에 따른 압축강도의 경우 FC가 치환됨에 따라 촉진된 수화반응 및 순환골재의 미수화 시멘트의 알칼리 용출로 인해 BS의 잠재수경성 반응을 촉진시켜 초기 및 28일 재령에서의 Plain 대비 강도저하를 상당부분 회복할 수 있었으며, 특히 향후 재령이 경과함에 따라 포졸란 반응의 활성화로 추가적인 강도향상이 기대된다.
4) 탄산화 저항성의 경우 BS를 다량 치환함에 따라 Plain에 비해 탄산화 깊이가 증가하는 것으로 나타났고, FC 치환에 따라서는 큰 차이는 나타나지 않았다. 단, FC 25의 경우 탄산화 깊이가 감소하여 탄산화 저항에 기여할 것으로 사료된다.
5) 미세구조 분석으로 세공분포의 경우 FC 치환률이 증가함에 따라 BS의 잠재수경성 반응 및 수화반응 촉진에 의해 0.1㎛이하의 미세 공극분포가 급격히 증가하는 경향을 보였고, SEM 측정결과 FC 치환에 따른 7일 및 28일에서의 C-S-H 및 $Ca(OH)_2$의 생성을 확인하여 FC가 BS 다량치환 순환골재 콘크리트의 알칼리 자극에 기여함을 확인할 수 있었다.

요 약

본 연구에서는 BS다량 치환 콘크리트의 알칼리자극제로서 순환골재 및 고분말도의 FC를 복합 사용한 콘크리트의 제반 공학적 특성 및 미시적 분석을 실시하였다. FC 치환에 따른 슬럼프 및 공기량은 큰 차이가 없었으며, 응결시간은 FC 치환에 따라 비례적으로 단축되는 것으로 나타났다.

FC 치환에 따른 압축강도는 고분말도의 FC가 치환됨에 따라 촉진된 수화반응 및 순환골재의 미수화 시멘트의 알칼리 용출로 인해 BS의 잠재수경성 반응을 촉진시켜 초기 및 28일 재령에서의 Plain 대비 강도저하를 상당부분 회복할 수 있었으며, 특히 향후 재령이 경과함에 따라 포졸란 반응의 활성화로 추가적인 강도향상이 기대된다. 탄산화 저항성의 경우 큰 차이가 없으며, 세공분포의 경우 FC 치환률이 증가함에 따라 0.1 ㎛이하의 미세 공극분포가 급격히 증가하는 경향을 보였고, SEM 측정결과 FC 치환에 따른 7일 및 28일에서의 C-S-H 및 $Ca(OH)_2$의 생성을 확인하여 FC가 BS 다량치환 순환골재 콘크리트의 알칼리 자극에 기여함을 확인 할 수 있었다.

키워드 : 고로슬래그 미분말, 순환골재, 알칼리 자극제

References

1. Turner LK, Collins FG. Carbon dioxide emissions:a comparison between geopolymer and OPC cement concrete. Construction and Building Materials. 2013 Jul;43:125-30.
2. Zhang YM, Sun W, Yan HD. Hydration of high volume fly ash cement paste. Cement and Concrete Composites. 2000 Dec;22(6):445-52.
3. Lim NG, Jeong SW, Ann KY. Properties of cement free concrete by finely grained nanoslag with NaOH-based alkali activator. Construction and Building Materials. 2012 Oct;35:557-63.
4. Hubler MH, Thomas JJ, Jennings HM. Influence of nucleation seeding on the hydration kinetics and compressive strength of alkali activated slag paste. Cement and Concrete Research. 2011 Aug;41(8):842-6.
5. Moon JH, Lee SS. Dynamic and durability properties of the low carbon concrete using the high volume slag. Journal of the Korea Institute of Building Construction. 2013 Aug;13(4):351-9.
6. Sim JI, Yang KH. Practical application of GGBS-based alkali activated binder to secondary products of concrete. Journal of the Korea Institute of Building Construction. 2010 Oct;10(5):37-44.
7. Choi SW, Ryu DH, Kim HS, Kim KY. Hydration properties of low carbon type low heat blended cement. Journal of the Korea Institute of Building Construction. 2013 Jun;13(3) 218-26.
8. Ryu DW, Kim WJ, Yang WH, Park DC. An experimental study on the carbonation and drying shrinkage of concrete using high volumes of ground granulated blast furnace slag. Journal of the Korean Institute of building construction. 2012 Dec;12(4):393-400.
9. Han CG, Son SH, Park KT. Effect of recycled aggregates Powder on the properties of zero cement mortar using the blast furnace slag powder and recycled fine aggregates. Journal of Architectural Institute of Korea. 2011 Jun;27(6):99-106.
10. Park KT, Han CG, Kim DG. Effect of fine particle cement on the quality of recycled fine aggregates mortar using the blast furnace slag powder. Journal of Architectural Institute of Korea. 2012 Jun;12(3):315-22.