

이수석고가 고로슬래그 미분말 베이스 무시멘트 모르타르의 기초물성에 미치는 영향

Effect of Calcium Sulfate Dihydrate (Gypsum) on the Fundamental Properties of Slag-based Mortar

백 병 훈¹

한 천 구^{2*}

Baek, Byung Hoon¹

Han, Cheon Goo^{2*}

Department of Architectural Engineering, Semyung University, Sinwoul-Dong, Jecheon-City, 390-711, Korea ¹

Department of Architectural Engineering, Cheong ju University, Naduk-Dong, Cheongju-City, 360-764, Korea ²

Abstract

With the vision of 'a low carbon green develop' various industrial by-products were used as replacement of cement, in order to reduce CO₂ emissions from the manufacturing process of cement. Blast furnace slag is one of the industrial by-products. Due to the similar chemical compositions to ordinary Portland cement, blast furnace slag have been widely used in concrete with minimum side effects. Hence, in recent years, alkali activated slag-based composites are extensively studied by many researchers. However, the alkali activator can cause a number of problems in practice. Therefore, in this study, an alternative way of activating the slag was investigated. To activate the slag without using an alkali activator, calcium sulfate dihydrate was chosen and mixed with natural recycled fine aggregate. Fundamental properties of the slag-based mortar were tested to evaluate the effect of calcium sulfate dihydrate.

Keywords : calcium sulfate dihydrate, zero cement mortar, recycled aggregate, blast furnace slag powder

1. 서 론

최근, 전 세계적으로는 지구온난화 등 환경문제의 심각성을 인식하여 이산화탄소의 배출량을 줄이는 노력을 경주하고 있다. 이에 발맞춰 국내에서도 2011년 『저탄소 녹색성장』을 바탕으로 지구환경을 보호하고자 하는 세계정세의 흐름에 동참하고 있다[1]. 특히, 건설산업 분야에서는 CO₂저감뿐만 아니라 건설폐기물이나 산업부산물을 재활용하여 환경파괴 방지 및 고갈 자원 대책에도 대비하는 영역까지 활동범위를 넓혀가고 있다.

이와 관련하여 선행 연구에서는 산업부산물인 순환골재(이하 RA)의 알칼리로 고로슬래그 미분말(이하 BS)의 잠재 수경성 반응을 자극시켜, 무 시멘트 조건에서 알칼리액티베이션(Alkali activation)화 시키는 새로운 메커니즘으로 강도 발현성을 확인한 바 있다[2,3,4,5]. 그 연구 결과에 따르면 일반 및 고강도 영역보다는 저강도 및 빈배합 영역에서 보다 활용성이 높은 것으로 나타나, 콘크리트 2차 제품인 벽돌이나 블록에 사용이 적합하고, 일반 강도 영역의 콘크리트로서의 사용은 제한되고 있다. 그러나, BS의 잠재 수경성 반응은 알칼리 자극 이외에도 황산염 자극에 의하여 강도를 발현할 수 있음 이 보고 되고 있음에 즉, 산업부산물인 이수석고(CaSO₄ · 2H₂O 이하 CS)가 강도 발현성에도 기여할 수 있을 것으로 추측되어, 본 연구를 진행하게 되었다[6,7]. 그러므로, 본 연구는 시멘트를 사용하지 않고, BS를 기반으로 하여 BS의 잠재 수경성 반응을 RA 및 CS의 자극반응을 통해 활성화시켜 모

Received : March 4, 2014

Revision received : April 16, 2014

Accepted : April 16, 2014

* Corresponding author : Han, Cheon-Goo

[Tel:82-43-229-8480, E-mail : cghan@cju.ac.kr]

©2014 The Korea Institute of Building Construction, All rights reserved.

르타르를 제조함으로써 기존 강알칼리를 투입하여 제조하는 지오폴리머 콘크리트(Geopolymer concrete) 와 또 다른 관점으로 순환잔골재(이하 RFA) 및 폐석고 자원의 재활용으로 저장도 영역이 아닌 일반 강도 영역까지 강도를 상향 발현시킨, 무 시멘트 모르타르 혹은 콘크리트의 개발에 기여하고자 한다.

2. 실험계획 및 방법

본 연구의 실험계획은 Table 1과 같고, 배합사항은 Table 2와 같다. 즉, 모르타르 배합비는 1 : 3, 물 결합재비는 50% 1 수준에 대하여, 결합재종류는 OPC와 BS, 골재는 NFA와 RFA를 선정하였고, CS는 BS에 대한 치환율로 0, 2.5, 5, 7.5, 10, 15, 20%의 7 수준을 치환하는 것으로 실험계획 하였다. 단, OPC의 경우는 플레인 으로 하여 골재종류 만을 변화시키는 것으로 하였다.

Table 1. Experimental plan

Items		Variables	
	B ¹⁾ : S	1	1 : 3
	W/B(%)	1	50
Mixture	Binder composition	2	OPC, BS
	Aggregates ²⁾	2	NFA, RFA
	CS's replacement ratio for BS(%)	7	0, 2.5, 5, 7.5, 10, 15, 20
Test	Fresh concrete	2	Flow, Setting time
	Hardened concrete	2	Compressive strength (3, 7, 28, 91 days) Flexural strength (3, 28days)

1) B: binder OPC + BS + CS

2) NFA: natural sand RFA: Recycled fine aggregate

실험사항으로는 굳지 않은 모르타르에서 플로치 및 응결시간, 경화 모르타르에서 압축강도 및 휨강도를 측정하는 것으로 하였다.

사용재료로서 OPC는 KS L 5201의 국내산 1종을, BS는 국내산 KS F 2563의 3종을 사용하였고, CS는 국내산 시약급 시판품을 사용하였는데, 물리·화학적 성질은 Table 3, 4, 5와 같다. 골재로 NFA는 충북 W사산, RFA는 건식방식으로 제조된 충북D 사산을 사용하였는데, 표 6과 같이 NFA는 품질규준을 만족하였지만 RFA는 밀도 및 흡수율에서 KS F 2573의 품질규준에 만족하지 않았고, pH도 11 이상으로 다소 높게 나타나는 것을 알 수 있었다. 그러나, 본 연구에서는 순환잔골재에서 용출되는 높

은 알칼리를 활용하여 강도를 발현하는 메커니즘으로써, 본 연구의 사용재료로 활용하는 데에는 큰 문제가 없을 것으로 판단되었다.

실험방법은 Table 7과 같다.

Table 2. Mixture proportion of the concrete

B:S	Type of aggregate	Replacement ratio of CS (%)	Quantity(kg/m ³)				
			OPC	BS	CS	NFA	RFA
1 : 3	NFA	plain	486	0	0	1 458	0
		0	0	479	0	1 437	0
		2.5	0	467	12	1 437	0
		5	0	455	24	1 437	0
		7.5	0	442	37	1 437	0
		10	0	431	48	1 437	0
		15	0	408	71	1 437	0
	20	0	384	95	1 437	0	
	RFA	plain	451	0	0	0	1 353
		0	0	446	0	0	1 338
		2.5	0	434	12	0	1 338
		5	0	424	22	0	1 338
		7.5	0	411	35	0	1 338
		10	0	402	44	0	1 338
15		0	380	66	0	1 338	
20	0	358	88	0	1 338		

Table 3. Physical properties of OPC

Density (g/cm ³)	Blaine (cm ² /g)	Stability (%)	Setting time (min.)		Compressive strength(MPa)		
			Initial	Final	3 days	7 days	28 days
3.15	3 144	0.18	230	375	24.8	39.3	56.9

Table 4. Physical and chemical properties of BS

Density (g/cm ³)	Blaine (cm ² /g)	L.O. I (%)	Mois-ture (%)	Chemical component (%)				
				Cl	SO ₃	Mg O	SiO ₂	Ca O
2.90	4 254	1.91	0.23	0.00 2	1.95	5.26	34.2	42.5

Table 5. Physical and chemical properties of CS

Density (g/cm ³)	Blaine (cm ² /g)	Chemical component(%)						
		SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Ca O	Mg O	SO ₃	P ₂ O ₅
2.36	4 100	3.0	1.2	0.2	39.3	0.1	54.3	0.6

Table 6. Physical properties of aggregates

Type	Density (g/cm ³)	F.M	Water absorption ratio (%)	Passing 0.08mm sieve size(%)
NFA	2.56	2.86	2.63	2.87
RFA	2.20	2.76	6.20	2.40

Table 7. Adopted codes for experiment

Test method	Standard
Flow	KS F 2402
Setting time	KS L 2763
Compressive strength	KS L 5105,
Flexural strength	KS F 2408

Table 8. Test results of the mortar

Mixture			Results								
B : S (50%)	Aggregates	CS replacement ratio (%)	Flow (mm)	Setting time (h)		Compressive strength (MPa)				Flexural strength (MPa)	
				Initial	Final	3days	7days	28days	91days	3days	28days
1 : 3	NFA	plain	210	3.9	6.4	27.1	36.6	38.6	39.3	3.8	4.4
		0	190	45.0	120.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
		2.5	194	39.5	82.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
		5	197	38.2	79.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
		7.5	199	38.0	79.2	0.0	4.9	10.6	11.5	0.0	3.0
		10	199	37.9	76.1	0.0	5.6	11.4	12.2	0.0	3.2
		15	202	36.7	74.0	0.0	6.9	12.9	13.2	0.0	3.3
		20	203	36.6	73.9	0.0	8.1	14.1	15.0	0.0	3.4
1 : 3	RFA	plain	146	1	2.3	22.4	29.0	31.8	32.5	3.4	4.2
		0	122	4.6	10.2	7.8	10.8	15.1	18.0	3.1	3.6
		2.5	122	3	8.7	8.9	13.7	16.1	19.1	3.2	3.7
		5	125	2.7	8.7	9.0	13.2	16.2	21.2	3.3	3.7
		7.5	126	2.7	8.5	9.7	14.8	16.9	21.8	3.3	3.8
		10	130	2.6	8.4	12.5	21.6	25.0	27.8	3.3	3.9
		15	132	2.5	7.4	12.8	24.7	27.6	31.7	3.3	3.9
		20	134	2.4	7.3	12.9	25.0	31.5	33.0	3.3	4.0

3. 실험결과 및 분석

3.1 굳지 않은 모르타르의 특성

본 연구의 실험결과는 Table 8과 같다. 굳지 않은 모르타르의 특성에 관한 분석으로 Figure 1, 2는 NFA 및 RFA에 있어 CS 치환율에 따른 플로값을 나타낸 것이다.

먼저, 유동특성은 모든 배합에서 Plain인 OPC보다 작은 것으로 나타났고, NFA보다 RFA가 골재의 입형, 흡수율 등 골재특성에 기인하여 70mm 전후로 작게 나타났는데, NFA, RFA 공히 CS 치환율이 20%까지 증가할수록 플로값은 12~13mm 정도 소폭 증가하는 것으로 나타났다. 이는 CS의 매끄러운 입자특성 및 높은 분말도의 작용에

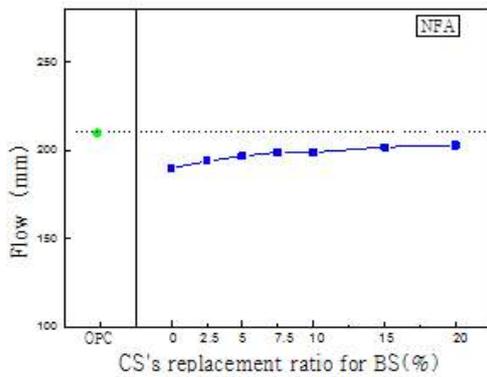


Figure 1. Flow with CS (NFA)

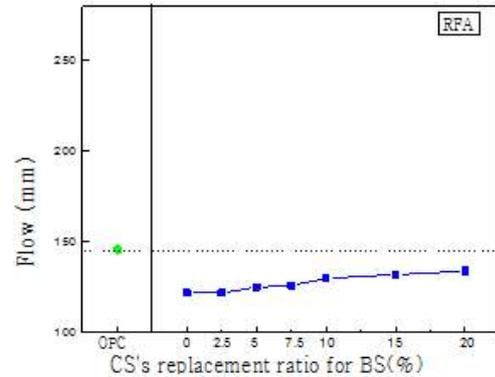


Figure 2. Flow with CS (RFA)

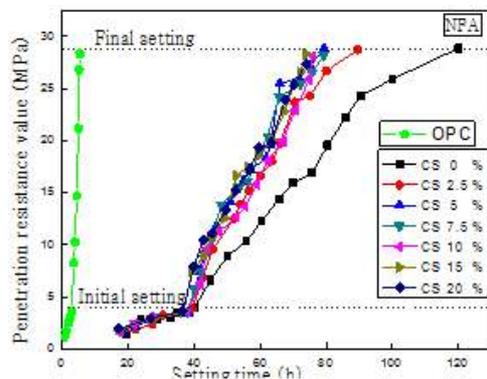


Figure 3 . Penetration resistance value with CS (NFA)

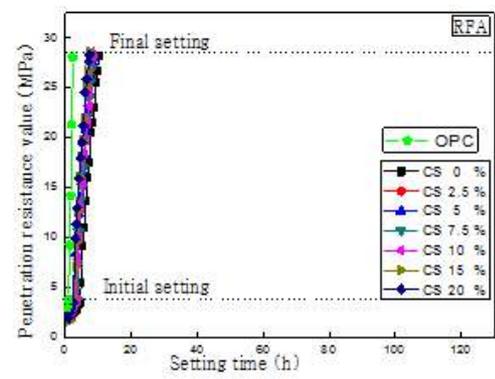


Figure 4. Penetration resistance value with CS (RFA)

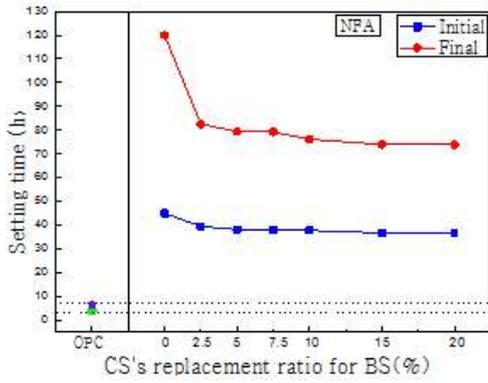


Figure 5. Setting time with CS (NFA)

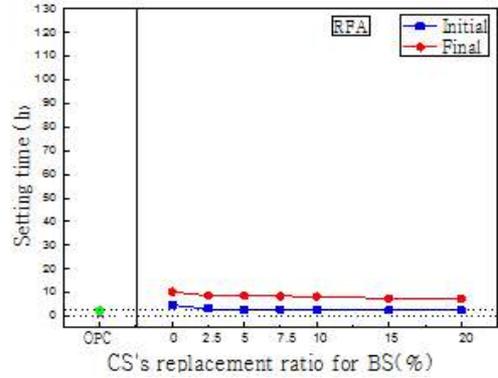


Figure 6. Setting time with CS (RFA)

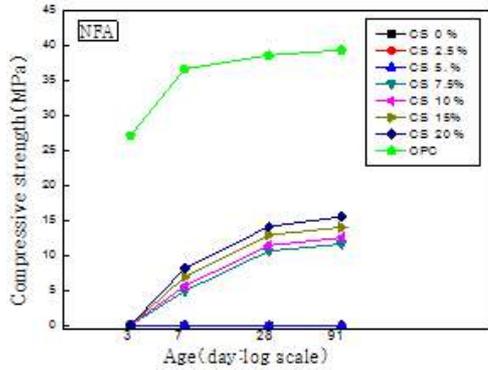


Figure 7. Compressive strength (NFA)

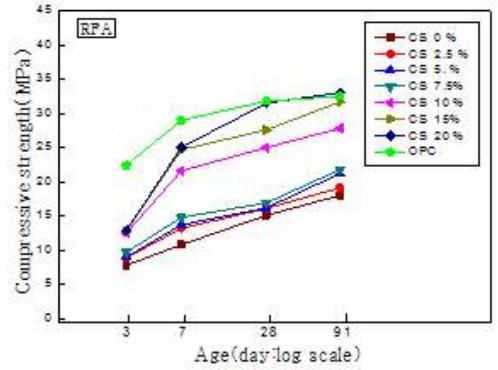


Figure 8. Compressive strength (RFA)

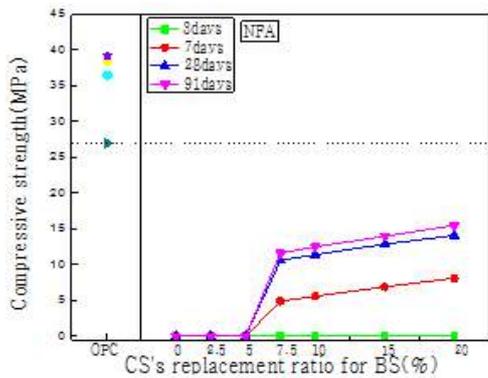


Figure 9. Compressive strength with CS (NFA)

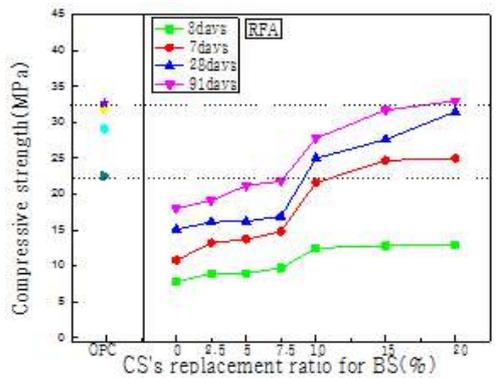


Figure 10. Compressive strength with CS (RFA)

의해 유동성이 증가 된 것으로 사료된다.

유동성면에서 특징적인 것은 일반적으로 OPC에 BS를 50%전후까지 치환하면 유동성이 증진되는 경향이 나타난 반면에, 100% 대체하여 사용하는 경우는 오히려 저하하였고, 또한 골재로서 양호한 입자특성의 NFA보다 불량한 입자특성의 RFA를 사용할 경우는 절반이상으로 유동성이

크게 저하하여 골재특성이 유동성에 매우 크게 영향을 미치는 요인임을 알 수 있었다.[3].

Figure 3, 4 및 5, 6은 골재종류별 CS 치환율 변화에 따른 응결시간을 나타낸 그래프이다. 먼저, RFA 사용한 경우, 높은 흡수율, 높은 pH치 및 CS의 자극에 의한 영향으로 BS의 반응속도가 촉진되어 응결시간이 많이 단축되

었다. CS 치환을 변화에 따른 응결시간은 점점 촉진되는 것으로 나타났는데, 특히 RFA의 경우 CS 20% 치환시에는 종결시간이 약 7시간 정도로 플레인 인 OPC 수준에 근접하는 것으로 나타난 반면 NFA의 경우 CS 치환시 응결시간이 단축되었지만 CS 0% 인 경우는 자극제가 없기 때문에 응결시간이 120시간까지 크게 지연된 것으로 나타났다.

이 경우 특징적인 것은 CS 20%까지의 치환을 범위에서 황산염자극에 의한 촉진효과 보다 NFA골재를 RFA골재로 대체하여 사용하므로써 발생하는 알칼리성 자극 효과가 월등히 큰 응결시간 촉진효과임을 알 수 있었다.

3.2 경화 모르타르의 특성

경화 모르타르의 특성분석으로 Figure 7, 8은 골재종류 및 CS 치환율별 재령경과에 따른 압축강도를, Figure 9, 10은 골재종류 및 재령별 CS 치환율 변화에 따른 압축강도를 나타낸 것이다. 먼저, NFA 및 RFA의 CS 치환율이 증가할수록 강도역시 증가하는 것으로 나타났다. NFA

의 경우 CS 0%는 BS의 불투수성 겔박막을 제거

해줄 알칼리자극제가 없기 때문에 91일 재령까지 거의 강도가 발휘 되지 않았다. NFA 및 RFA의 경우 CS를 20% 치환시 0%치환한 경우보다 15MPa 정도 증가한 반면 RFA의 경우는 알칼리 자극반응까지 합세하여 CS 20%를 치환했을 경우 OPC 100%를 사용한 것과 28일

및 91일 재령에서 유사한 강도값을 내었다. 이는 RFA의 알칼리와 CS의 황산염 복합작용으로 BS의 잠재수경성을 최대한으로 끌어낸 것으로 사료된다. 또한, OPC를 사용한 경우 RFA는 NFA보다 압축강도가 낮게 나타났다. 이는 RFA파쇄과정 중 페콘크리트나 모르타르분 등 각종 이물질이 다량 함유되어 Table 6과 같이 밀도가 작고 흡수율이 크게 나타나는 등 품질이 열악하여 압축강도가 저하된 것으로 사료 된다.

단, RFA를 사용시 강도는 OPC에 비해 초기강도는 낮게 나타나고 있어 또 다른 측면에서 초기강도향상대책이 요구 된다. 특이한 상황으로는 RFA를 사용한 경우 CS 7.5, 10% 치환시 강도 값이 급증하는 것을 나타내었고,

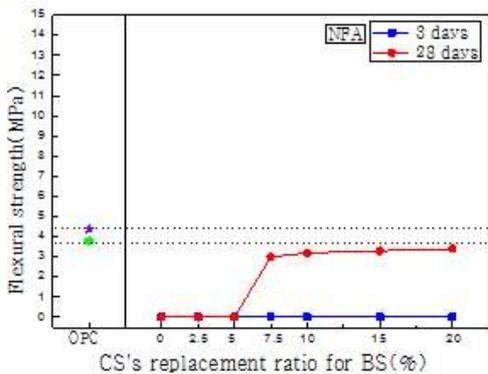


Figure 11 Flexural strength with CS (NFA)

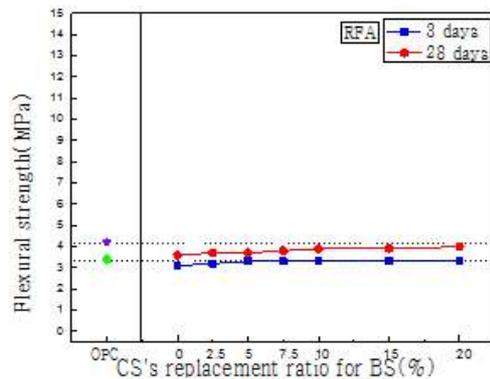


Figure12 Flexural strength with CS (RFA)

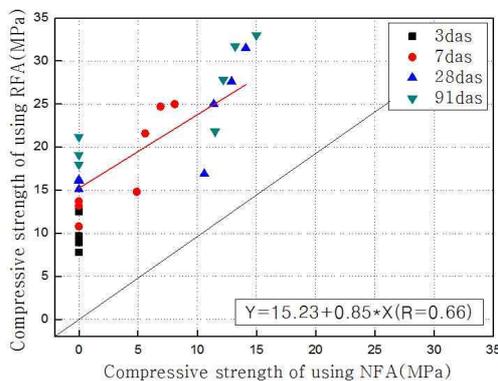


Figure13 Comparison of compressive strength of NFA and RFA

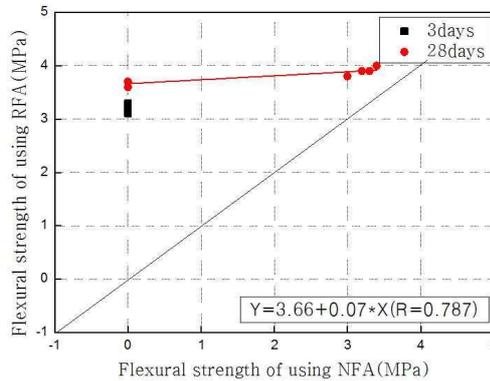


Figure14 Comparison of flexural strength of NFA and RFA

또, RFA를 사용한 경우는 NFA보다 강도값이 전반적으로 높았지만 CS 15%치환시 20%와 큰 차이 없음으로 가장 적합한 범위로 사료된다. 단, 기존문헌에 의하면 CS 치환율이 높아질 경우 에트린가이트 생성에 기인하여 건조수축을 방지하는 효과도 있지만, 장기간에 걸쳐서는 팽창과 괴의 원인도 있으므로 최적 치환율 결정과 관련하여서는 각종 내구성을 포함한 종합적인 추가 연구로 결론되어야 할 것으로 사료된다[7].

Figure 11, 12는 골재종류 및 재령별 CS 치환율 변화에 따른 휨강도를 나타낸 것이다. 역시 압축강도와 마찬가지로 CS 치환율이 증가할수록 휨강도도 증가하는 경향을 나타내었다. 특히, NFA를 사용한 경우는 OPC 100%를 사용한 것과 큰 차이를 나타낸 반면 RFA와 CS를 사용한 배합의 경우는 RFA내의 알칼리와 황산염의 복합 작용으로 인해 OPC 100% 사용한 배합과 유사한 휨강도를 나타내었는데, CS 사용 없이 RFA만 사용한 경우에도 OPC 100%와 근접하는 휨강도를 나타내었다.

Figure 13 및 14는 NFA와 RFA를 사용한 압축강도와 휨강도의 상호관계를 나타낸 그래프이다. 먼저 압축강도 면에서는 RFA를 사용한 경우에서 NFA보다 높은 강도분포를 보였는데, 이에 대한 강도 차이는 약15MPa 전후이었다. 휨강도의 경우는 NFA의 경우 3일 재령 CS 치환율 전부 및 28 일 재령의 CS 치환율 0~5% 까지는 거의 강도가 발휘 되지 않음에 비해 RFA의 경우는 3~4MPa를 발휘하여 x축 그래프 0에 y축은 3~4MPa의 분포를 보였고, NFA의 경우 CS 7.5%이상 28 일 재령에서는 급격히 증가함에 우측으로 크게 이동되어 일정한 산포를 나타내고 있다. 상관계수는 비교적 양호한 상관성을 나타내었다.

4. 결 론

지구환경보호 차원에서 산업부산물인 BS에 골재로 NFA 대신 알칼리 자극을 부가한 RFA를 사용하는 무 시멘트 모르타르에 황산염자극제로 BS에 대하여 CS의 치환율을 변화시켜 일반강도 영역까지 사용성이 확대될 수 있는지 모르타르의 기초적 특성 면에서 활용성을 검토하였는데 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 유동성 측면에서 실험변수로 고려한 BS는 Plain인

OPC보다 플로치가 작은 것으로 나타났는데, RFA가 NFA보다 골재의 입형등 골재특성에 기인하여 70mm 전후로 매우 작게 나타났다. NFA, RFA 공히 CS 치환율이 20%까지 증가할 때 플로값은 12~13mm 정도로 소폭 증가하였다.

- 2) 응결시간은 RFA 사용한 경우의 높은 pH치 및 CS의 자극에 의한 영향으로 BS의 반응속도가 촉진되었고, 그에 따라 응결시간이 많이 단축되었다. CS 치환율 변화에 따른 응결시간은 점점 촉진되는 것으로 나타났는데, 특히 RFA의 경우 CS 20% 치환시에는 응결시간이 약 7시간 정도로 플레인 인 기존 OPC에 근접하는 수준인 것으로 나타났다.
- 3) 압축강도와 휨강도 모두 CS 치환율이 증가할수록 증가하는 경향을 나타내었다. 특히, NFA를 사용한 경우는 OPC 100%를 사용한 것의 50%이하의 수준으로 큰 차이를 나타낸 반면 RFA와 CS를 사용한 배합의 경우는 RFA내의 알칼리와 황산염의 복합 작용으로 인해 OPC 100% 사용한 배합과 유사한 강도를 발휘하였다.

이상을 종합하여 볼 때, RFA의 유동성 저하 및 초기강도 저하문제만 해결 될 수 있다면 BS에 CS를 15% 치환하고 RFA골재를 사용하는 무 시멘트 모르타르가 OPC 100%를 사용한 종래의 시멘트 모르타르 만큼의 품질을 발휘할 수 있을 것으로 사료된다. 따라서 금후의 과제로는 콘크리트로서의 활용과 아울러 내구성적인 측면에 대하여도 심도 있게 검토할 필요가 있는 것으로 밝혀졌다.

요 약

최근에 저탄소녹색성장 및 OPC 절감의 요구에 따라 BS와 같은 산업 부산물을 많이 사용하고 재건축의 증가 및 건설폐기물 발생량이 많아지면서 RA 사용 확대하게 되며, RA 및 무 시멘트 결합재 관심 증대 되고 있다. 무 시멘트 결합재와 RA의 활용을 모두 만족시키기 위하여, RA와 철강 산업 부산물인 BS을 혼합함으로써, 100% 순환자원만을 활용하여 무 시멘트 상태에서 강도발현성을 확인한 바 있다. 이에 본 연구는 OPC를 사용하지 않고, BS과 RA 및 CS를 사용하여 모르타르를 제조함으로써 기존 강알칼리를 투입하여 제조하는 지오폐리머 모르타르

(Geopolymermortar)와 또 다른 관점에서 접근하였다.

결과적으로, RFA의 유동성 저하 및 초기강도 저하문 제만 해결 될 수 있다면, BS에 CS를 15% 치환하고 RFA 골재를 사용하는 무 시멘트 모르타르가 OPC 100%를 사 용한 종래의 시멘트 모르타르 만큼의 품질을 발휘할 수 있을 것으로 사료된다.

키 워 드 : 이수석고, 무 시멘트 모르타르, 순환골재, 고로슬 래그 미분말

Acknowledgement

This work was financially supported by Semyung University in 2013.

References

1. Kim DG, Development of zero-cement brick using blast furnace slag powder, recycled fine aggregates and functional fine particle [Dissertation], [Choonju (Korea)]: Cheongju university; 2012, 200p.
2. Park KT, Effect of Mix Proportions on the Properties of Blast Furnace Slag Mortar Using the Recycled Fine Aggregates, Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute, 2010 May;2(1):47-50.
3. Shim JW, A Study on the Strength Property of Recycled Fine Aggregate (Wet Type) Mortar with Blast Furnace Slag, Korea institute for Structural Maintenance Inspection, 2006 Oct;1(5): 153-9.
4. Son SH, Development of Zero-Cement Mortar Using Reactivity of Recycled Fine Aggregates and Mineral Admixtures [Dissertation], [Choonju (Korea)]: Cheongju university; 2012, 159p.
5. Park KT, Hydration Reaction Mechanism of the Recycled Aggregate and Blast Furnace Slag Powder. Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute, 2010 May;2(1):37-40.
6. Han DY, A Study on the Properties of Non-Sintered Mortar with Industrial Waste used, Architectural Institute of Korea, 2011 Oct;31(2): 345-46.
7. Park HE, Hydration of non-cement CaO-activated slag with various gypsum contents. Proceedings of the Korea Concrete Institute, 2013 Oct;25(2):301-2.