

# 소각장 애쉬 및 석고치환이 고로슬래그 미분말 기반 순환골재 모르타르의 물성에 미치는 영향

## Effects of Incineration Waste Ash and Gypsum Substitution on the Properties of Blast Furnace Slag Mortar using Recycled Aggregate

한민철<sup>1</sup>

한동엽<sup>2\*</sup>

어량량<sup>1</sup>

Han, Min Cheol<sup>1</sup>

Han, Dong Yeop<sup>2\*</sup>

Lu, Liang Liang<sup>1</sup>

*Department of Architectural Engineering, Cheongju University, Cheongwon-Gu, Cheongju-City, 360-764, Korea <sup>1</sup>*

*Research Institute of Industrial Sciences, Cheongju University, Cheongwon-Gu, Cheongju, 360-764, Korea <sup>2</sup>*

### Abstract

Nowadays, all the world face to the global warming problems due to the emission of CO<sub>2</sub>. From the previous studies, recycled aggregates were used as an alkali activator in blast furnace slag to achieve zero-cement concrete, and favorable results of obtaining strength were achieved. In this study, gypsum and incineration waste ash were used as the additional alkali activation and effects of the gypsum and incineration waste ash to enhance the performance of the mortar were tested. Results showed that although the replacement ratio of 0.5% of incineration waste ash and 20% of anhydrous gypsum resulted in the low of mortar at the early age, while it improved the later strength and achieved the similar strength to that of conventional mortar (at 91 days).

Keywords : blast furnace slag microfine, recycled fine aggregates, incineration waster ash, gypsum, zero-cement mortar

### 1. 서론

제철소에서 발생하는 산업부산물인 고로슬래그 미분말(이하 BS)은 콘크리트용 혼화재로 활용할 경우 시멘트(이하 OPC) 사용량 저감에 따라 CO<sub>2</sub>발생량 저감, 수화열 저감, 장기강도 증진 및 수밀성 증대 등의 효과를 얻을 수 있지만, 초기강도 저하, 탄산화 촉진 및 발생량 증대로 BS의 다량 사용에 어려움을 겪고 있는 실정이다.

또한, 순환골재(이하 RA) 생산 시 발생하는 순환 잔골재(이하 RFA)는 천연 골재에 비해 골재 표면에 부착되어 있

는 다량의 시멘트 모르타르에 의한 강한 알칼리성 및 골재 표면 품질저하로 실무적용에는 많은 제한이 따르고 있다.

이와 관련하여 선행 연구에서는 산업부산물인 RA의 알칼리로 BS의 잠재 수경성 반응을 자극시켜, 무 시멘트 상태에서 알칼리 활성화(Alkali activation)화 시키는 새로운 메커니즘으로 강도 발현성능을 확인한 바 있다[1,2,3,4]. 그 연구 결과에 따르면 RA의 알칼리 활성화반응은 일반 및 고강도 영역보다는 저강도 및 빈배합 영역에서 보다 활용성이 높은 것으로 보고되고 있다.

그러나 BS의 잠재 수경성 반응은 알칼리 자극 이외에도 석고(이하 GM)와 같이 황산염을 포함하는 물질에 의한 황산염 자극에 의하여 강도를 발현할 수 있음이 보고되었다. 특히, Han and Kim[2]은 BS과 무수석고를 활용, PHC말뚝과 고성능 콘크리트 2차 제품에 사용 가능한 고성능 혼화재료로서의 활용 가능성을 검토하고 있어 자극제로서 무수석고의 가능성을 보고하고 있다. 또한, Lee et

Received : September 17, 2014

Revision received : October 28, 2014

Accepted : December 31, 2014

\* Corresponding author : Han, Dong Yeop

[Tel: 82-43-229-8480, E-mail: donald.dyhan@gmail.com]

©2015 The Korea Institute of Building Construction, All rights reserved.

al.[3]은 소각장 애쉬(이하 WA)의 치환에 따른 BS 다량치환 RA 콘크리트의 특성을 보고하고 있어 고로슬래그의 자극재로서 WA의 가능성을 보고하고 있다. 이에 본 연구에서는 알칼리 자극과 황산염 자극을 동시에 수행할 것으로 예측되는 WA 및 황산염 자극을 수행할 것으로 예측되는 GM의 종류 변화가 BS베이스 RA 모르타르의 강도 발현성에 기여할 것으로 예상하며 연구를 진행하였다.

그러므로, 본 연구에서는 BS와 RFA혼합 모르타르를 기반으로 하여 추가 알칼리 자극물질로서 WA 및 GM를 치환하여 알칼리 활성화 반응을 극대화 시키므로써 일반 강도 영역까지도 무 시멘트 모르타르 혹은 콘크리트의 개발 및 적용이 가능할 수 있는지를 실험적으로 고찰하고자 한다.

## 2. 실험계획 및 방법

### 2.1 실험계획

본 연구의 실험계획은 Table 1과 같고, 배합사항은 Table 2와 같다. 즉, 모르타르 배합비는 바인더 (B)와 RFA의 비를 1 : 3으로 하고 물 결합재비(W/B)가 50%인 1 수준을 플레인으로 하였다. 본 연구의 실험변수로 WA는 결합재에 대한 치환율로 0, 0.5 1.0%를 계획하고, 석고는 이수석고(DG) 와 무수석고(AG)의 2종류로 BS에 대한 치환율로 0, 5, 10, 15, 20%의 5 수준을 실험계획 하였다. 단, OPC의 경우는 비교를 목적으로 플레인 1수준에 대하여만 적용하는 것으로 하였다. 본 연구의 실험방법은 Table 5와 같다.

### 2.2 사용재료

사용재료로서 OPC는 KS L 5201의 국내산 1종을, BS는 국내산 KS F 2563의 3종을 사용하였고, 석고는 국내에서 시판되는 DG 및 AG를 사용하였는데, WA는 Figure 1과 같이 ○○시권 광역소각시설에서 채취한 것으로 폐기물 소각 시 발생하는 분진 및 유해가스를 제거하기 위해 1차 소석회 처리한 것은 바이패스로 포집하여 사용하였다. WA의 SEM사진은 Figure 2와 같다. 각 재료의 물리·화학적 성질은 Table 3과 같다.

골재로는 RFA를 사용하였는데, RFA표면에서 최대한 많은 알칼리 성분을 얻을 수 있도록 건식방식을 제조된 충

북 D사산을 사용하였고, 저장시간도 최소한으로 관리하였다. 사용된 RFA의 물리적 성질은 Table 4와 같다. 단, RFA는 밀도 및 흡수율에서 KS F 2573의 품질규준에 만족하지 않았다. 그러나, 본 연구에서는 순환잔골재에서 용출되는 높은 알칼리를 활용하여 강도를 발현하는 메커니즘으로써, 본 연구의 사용재료로 활용하는 데에는 큰 문제가 없을 것으로 판단하였다.

Table 1. Experimental plan

Items		Variables	
Mixture	B <sup>1)</sup> : S	1	1 : 3
	W/B(%)	1	50
	WA's replacement ratio for Binder composition(%) <sup>2)</sup>	3	0 <sup>4)</sup> , 0.5, 1.0
	Kinds of GM <sup>3)</sup>	2	DG, AG
	GM's replacement ratio for BS(%)	5	0, 5, 10, 15, 20
Item of Test	Fresh mortar	3	Flow, Air content, Chloride content
	Hardened mortar	2	Compressive strength (3, 7, 28, 91 days ) Flexural strength (3, 28days)

- 1) B: binder (OPC, BS, GM, WA)
- 2) WA: Incineration Waste Ash
- 3) GM: DG + AG DG: dihydrate gypsum AG: anhydrous gypsum
- 4) Plain

Table 2. Mixture proportions of the mortar

B:S	Replacement ratio of WA(%)	Type of gypsum	Replacement ratio of GM (%)	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )								
				OPC	BS	GM	WA	W	RFA			
0	-	-	OPC	451	0	0	0	226	1	353		
			plain	0	446	0	223	1	350			
			0	0	443	0	2	223	1	350		
			5	0	420	22	2	222	1	346		
			10	0	397	44	2	222	1	344		
		0.5	-	DG	15	0	374	66	2	222	1	342
					20	0	352	88	2	221	1	340
					0	0	443	0	2	223	1	350
					5	0	421	22	2	223	1	348
					10	0	399	44	2	223	1	346
1:3	-	AG	15	0	376	66	2	223	1	344		
			20	0	354	88	2	223	1	342		
			0	0	441	0	4	223	1	349		
			5	0	418	22	4	222	1	346		
			10	0	395	44	4	222	1	344		
		1.0	-	DG	15	0	372	66	4	221	1	340
					20	0	349	88	4	221	1	339
					0	0	441	0	4	223	1	349
					5	0	418	22	4	223	1	348
					10	0	396	44	4	223	1	346
1.0	-	AG	15	0	374	66	4	223	1	344		
			20	0	352	88	4	223	1	342		

Table 3. Physical and chemical properties of binders' used

Type	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	Chemical component(%)					
			CaO	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
OPC	3.15	3 144	63.4	22.0	3.44	2.13	1.96	5.27
BS	2.90	4 254	42.5	34.2	0.41	5.26	1.95	13.2
DG	2.36	4 100	39.3	3.0	1.2	-	50	0.6
AG	2.85	4 140	43.3	1.09	0.48	-	54.3	-
WA	2.64	1 930	39.5	7.6	2.4	2.1	-	4.9

Table 4. Physical properties of aggregates

Type	Density (g/cm <sup>3</sup> )	F.M	Water absorption ratio(%)	Passing 0.08mm sieve(%)	pH
RFA	2.20	2.76	6.20	2.40	11.0

Table 5. Standards for tests conducted

Test method	Standard
Flow	KS F 2402
Air content	KS F 2409
Chloride content	KS F 2714
Compressive strength	KS L 5105
Flexural strength	KS F 2408

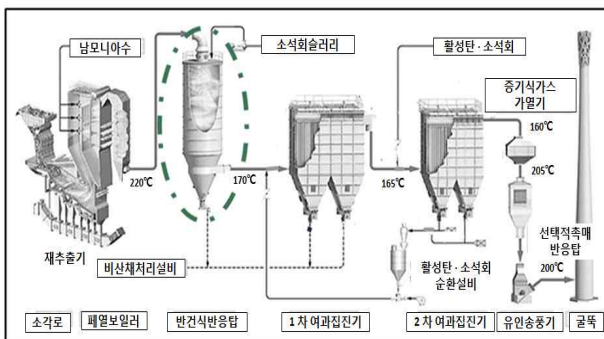


Figure 1. Schematic illustration of incineration waste ash obtain

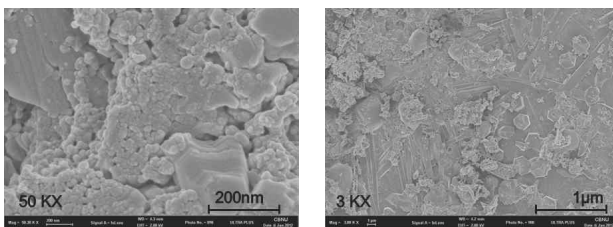


Figure 2. SEM images of WA

### 3. 실험결과 및 분석

#### 3.1 굳지 않은 모르타르의 특성

본 연구의 실험결과 중 굳지 않은 모르타르의 특성에 관한 분석으로 Figure 3은 WA치환율 및 석고종류별 석고치환율 변화에 따른 플로값을 나타낸 것이다. 먼저, 플로치는 Plain인이 OPC보다 작은 것으로 나타났고, 석고치환율에 따라 비례적으로 증가하는 것으로 나타났다. 단, WA는 0.5%보다 1.0%치환할 때 13%정도 저하하는 것을 알 수 있었다. 이는 Figure 2에서 보는 바와 같이 거친 입형을 가지고 있어 모르타르 미세구조 내 유동에 저항을 주는 것으로 생각되며 추가적으로 높은 흡수율에 의한 유동에 필요한 배합수를 소모함에 따른 유동성 저하도 생각된다[3].

특히 석고의 경우는 혼입율이 증가할수록 유동성이 향상되었는데, DG를 사용한 경우 AG보다 양호한 결과이지만 그 차이는 미미하였다. 이 때 석고 20%를 사용한 경우는 OPC보다 유동성이 훨씬 좋아 졌는데, 이는 석고의 매끄러운 입자특성 및 높은 분말도의 점성증진에 따른 안정적인 미세구조 확보 및 불충분한 계면 충전성능에 따른 공기량 증가가 유동성 증진에 기여한 것으로 보인다[4].

Figure 4는 WA치환율 및 석고종류별 석고치환율 변화에 따른 공기량을 나타낸 그래프이다. 먼저, WA를 사용한 경우는 치환율이 증가할수록 미소하게 저하하는 경향을 나타내었다. 단, 석고치환율이 증가할수록 공기량은 증가하는 경향으로 나타났는데, 특히 AG를 사용한 것보다 DG에서 다소 증가하였다. 이는 석고의 분말도가 BS보다 다소 낮고 석고 치환율이 증가함에 따라 페이스트가 골재 계면사이에 충분히 충전되지 않고, 공극이 유발됨에 기인하여 공기량이 증가한 것으로 사료된다[8]. 그리고 AG의 경우는 분말도가 DG보다 미미하게 높음에 따라 공극충전효과로 공기량이 저하한 것으로 추측된다.

Figure 5은 WA치환율 및 석고종류별 석고치환율 변화에 따른 염화물량을 나타낸 그래프이다. 석고 및 WA의 치환율이 증가 할수록 Plain과 OPC보다 증가 하는 것을 알 수 있었다. 특히 WA 1.0%를 사용한 경우 또한 석고치환율 10%이상에서는 KS F 4009규정치인 0.3kg/m<sup>3</sup>보다 약간 높은 값을 나타내었다. 이는, 소각장에서 가연성쓰레기를 소각할 때, 음식물이 포함된 것 및 석고에 포함된 미량의 염화물에 기인하여 나타난 결과로 사료된다[3].

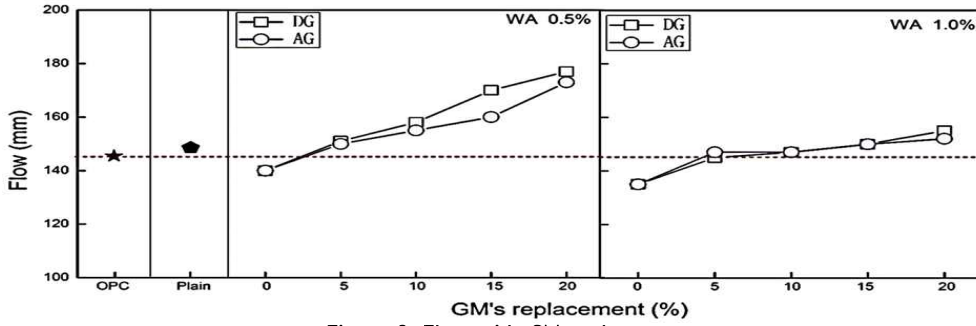


Figure 3. Flow with GM replacement

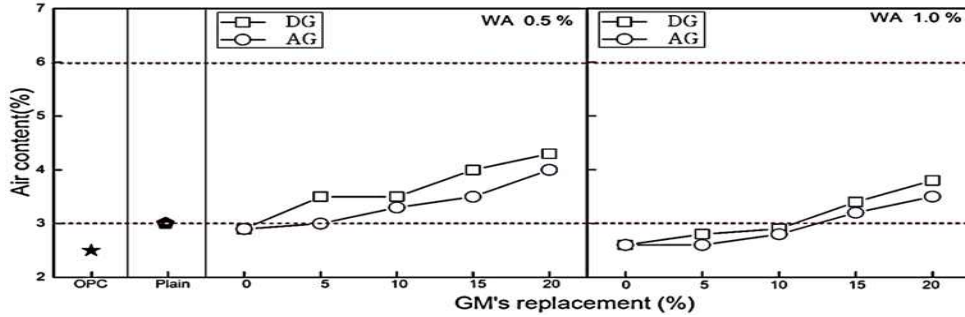


Figure 4. Air content with GM replacement

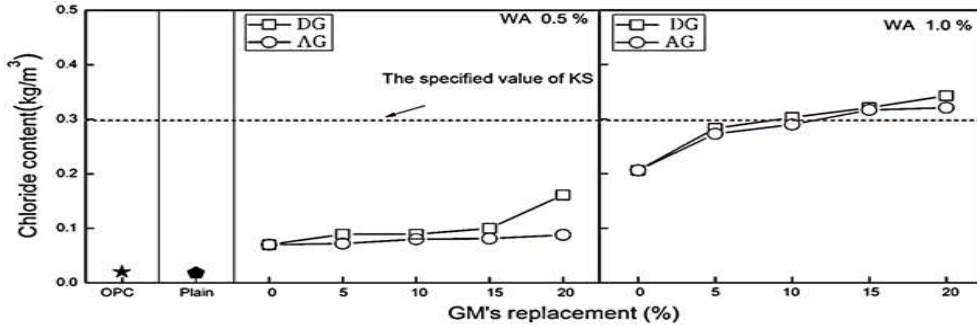


Figure 5. Chloride content with GM replacement

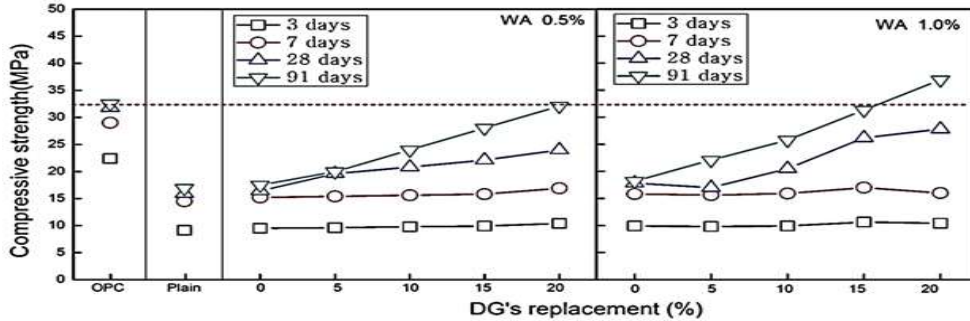


Figure 6. Compressive strength with DG replacement

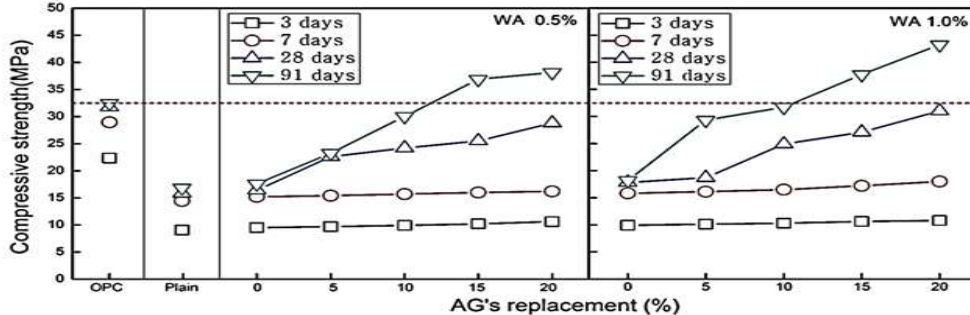


Figure 7. Compressive strength with AG replacement

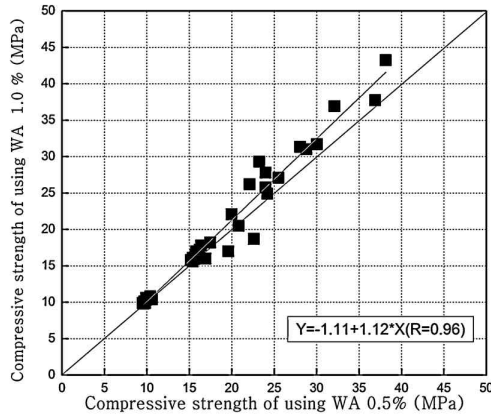


Figure 8. Comparison of compressive strength of WA 0.5% and WA 1.0%

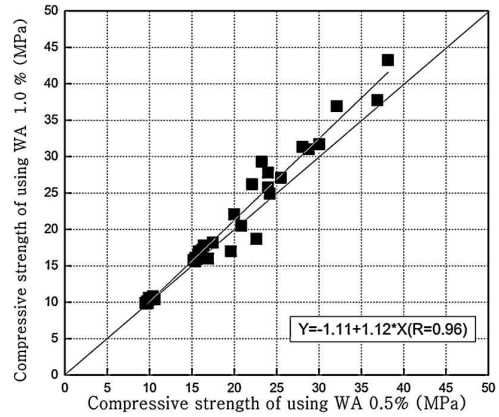


Figure 9. Comparison of compressive strength of DG and AG

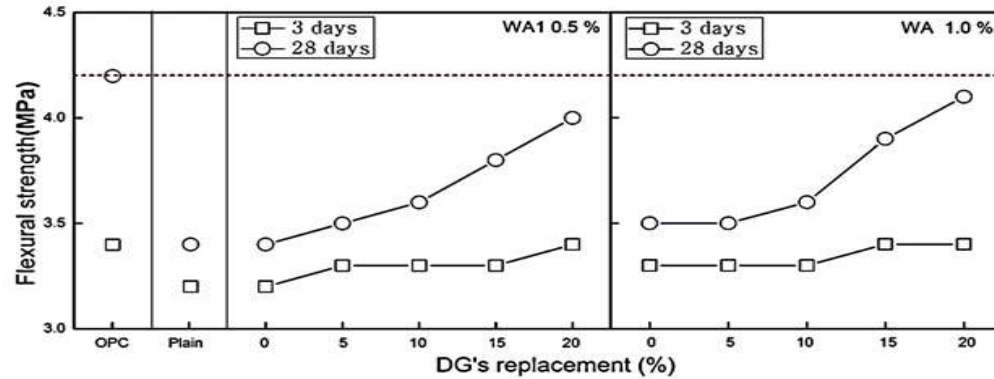


Figure 10. Flexural strength with DG replacement

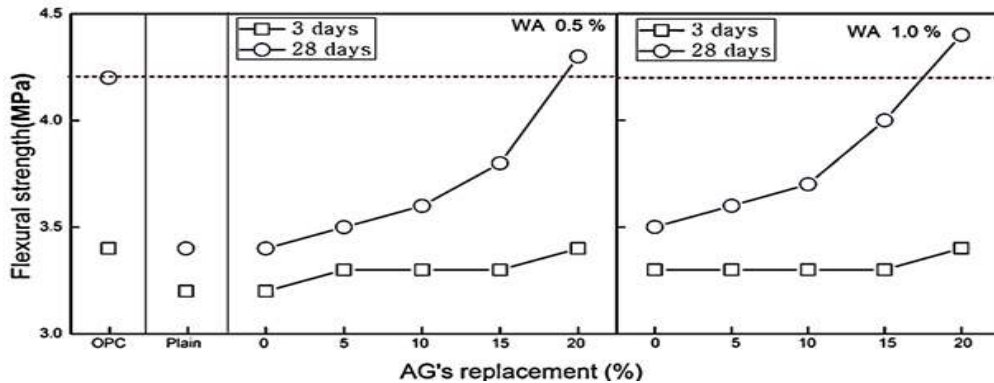


Figure 11. Flexural strength with AG replacement

### 3.2 경화 모르타르의 특성

경화 모르타르의 특성분석으로 Figure 6~9는 WA치환율, 석고종류 및 재령별 석고치환율 변화에 따른 압축강도 및 상호관계를 비교하여 나타낸 것이다. 먼저, 석고 및 WA치환율이 증가할수록 강도역시 증가하는 것으로 나타났다. 특히 WA의 경우는 Figure 8과 같이 0.5%보다

1.0%치환시 압축강도가 큰 30~40MPa 영역에서 5~10% 전후로 증가하는 추세를 보였다. 이는 WA의 높은 CaO 및 SiO<sub>2</sub> 함량이 BS와의 수화반응에 기인하여 나타난 결과로 추측된다[3].

석고를 사용한 경우는 Figure 9와 같이 AG의 압축강도가 DG보다 큰 강도값을 나타내는데, 특히 압축강도가 큰

30~40MPa 영역에서는 15~20% 정도로 압축강도가 증가하는 경향이였다. 이는 RFA 중 알칼리 성분 용출에 의한 자극 및 GM의 CaSO<sub>4</sub>로 인한 추가적인 자극이라는 공통적인 요인 외에 AG가 콘크리트 배합에서 배합수를 흡수함으로써 물시멘트비를 다소 감소시키는 요인에 의해 높은 압축강도가 얻어진 것으로 사료된다[4,5].

특히 Figure 7에서 보는 바와 같이 AG 20% 치환시에 91 강도에서 OPC만 사용하는 경우보다 더 큰 압축강도를 나타내었다. 단, 이 경우 초기강도는 OPC에 비해 낮게 나타나고 있어 또 다른 측면에서 초기강도 향상대책이 요구된다. 특이한 상황으로는 석고 5% 이상 치환시에는 강도 값이 급증하는 경향을 나타내었는데, 이는 기존문헌에 의하면 석고 치환율이 높아질 경우 에트란가이트 생성에 기인하여 건조수축을 방지하는 효과도 있지만, 장기간에 걸쳐서는 팽창파괴의 원인도 있으므로 최적 치환율 결정과 관련하여서는 각종 내구성을 포함한 종합적인 추가 연구로 결론되어야 할 것으로 사료된다[6,7,8].

Figure 10은 AG 치환에 따른 휨강도 변화를 나타낸 것이다. 28일 강도에 있어서 AG를 치환한 경우 OPC와 비교하여 20%를 치환한 경우를 제외하고 모두 낮은 휨강도를 나타내었다. 하지만, AG의 치환율이 증가함에 따라 휨강도는 증가하였고, 치환율 10% 이상에서 급격히 증가하는 경향을 나타내었다. Figure 11에서 보는 바와 같이 DG를 치환한 경우도 AG와 유사한 경향을 나타내었는데, 압축강도의 결과와 유사하게 DG가 AG보다 높은 휨강도 증진 효과를 나타내었다. 이는 압축강도의 경우와 동일하게 AG의 수분 흡수로 인한 물시멘트비 저감에 기인한 것으로 예상된다. Figure 12는 WA 치환율에 따른 휨강도의 상관관계를 나타낸 그래프이다. 전반적으로 높은 휨강도 영역에서 WA 치환율이 1.0%인 경우에 높은 휨강도를 나타내었는데, 이를 통해 WA가 휨강도증진에도 영향을 주는 것으로 판단되었다[2,3,4].

Figure 13은 AG와 DG가 휨강도에 미치는 영향을 비교 분석한 그래프이다. Figure 10, 11의 휨강도값에서 확인한 바와 같이 대체적으로 AG가 압축강도를 더욱 크게 증진시키는 경향을 확인할 수 있었다.

종합적으로는 AG 20%, WA 1.0%를 치환한 경우에 OPC 100% 경우보다 높은 휨강도를 얻을 수 있었다.

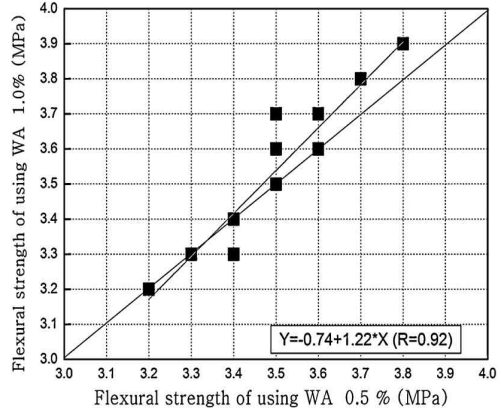


Figure 12. Comparison of flexural strength of WA1 0.5 % and WA1 1.0 %

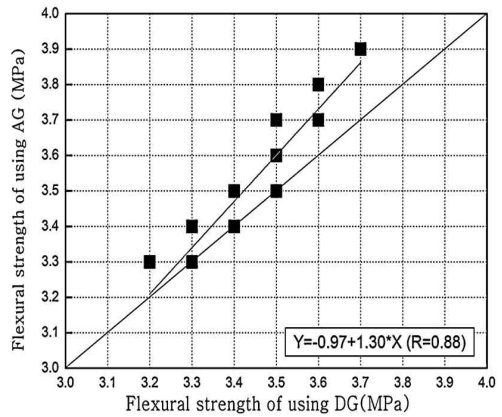


Figure 13. Comparison of flexural strength of DG and AG

#### 4. 결 론

본 연구에서는 산업부산물인 BS에 골재 및 알칼리 자극제로 RFA를 사용하는 무 시멘트 모르타르에 추가 자극제로 WA 및 석고의 치환율을 변화시켜 일반강도 영역까지 사용성이 확대될 수 있는지를 고찰하였는데 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 유동성 측면에서 Plain은 OPC사용한 경우의 플로치보다 작게 나타났고, 실험변수로 고려한 WA치환율이 증가할수록 저하하였지만 석고 치환율에 따라서는 증가하는 것으로 나타났다. 특히 석고의 경우 플로치는 DG, AG공히 치환율이 20%까지 계속 증가하여 OPC보다 큰 값을 나타내었다.
- 2) 공기량의 경우는 WA의 사용량이 증가할수록 저하하는 경향을 나타내었지만 석고 치환율이 증가할수록

증가하는 경향이였다. 특히 석고의 경우 DG는 AG를 사용한 것보다 다소 증가하였다.

- 3) 염화물량은 WA, 석고 치환율이 증가할수록 증가하였다. 특히 WA 1.0%사용한 경우 석고 10%이상에서는 KS규정치인  $0.3\text{kg}/\text{m}^3$ 보다 높은 것으로 나타났다. 이는 가연성소각물에 음식물이 포함된 것 및 석고에 포함된 염화물에 기인하여 나타난 결과로 사료된다.
- 4) 압축강도와 휨강도 모두 WA 및 석고 치환율이 증가할수록, 특히 석고의 경우는 DG보다 AG를 치환할 경우 증가하는 경향을 나타내었다. 또한 압축강도의 경우 91일 재령에서 WA 1.0%, AG를 20% 사용한 경우는 RFA내의 알칼리와 AG의황산염 복합 작용에 기인하여 OPC 100%를 사용한 것보다 큰 강도 값을 나타내었다.

이상을 종합하여 볼 때, BS에 RFA를 사용하는 무 시멘트 모르타르에 WA 0.5%와 AG 20%를 사용할 경우 초기 강도는 낮을 지라도 91일 강도는 OPC만큼 발휘 되어 양호한 결과를 얻을 수 있었다. 따라서 금후의 과제로는 증기양생 등 초기강도 향상의 검토와 콘크리트로서의 내구성적인 측면에 대하여도 심도 있게 검토할 필요가 있는 것으로 사료된다.

## 요 약

최근, 전 세계적으로는 지구온난화 등 환경문제의 심각성을 인식하여 이산화탄소의 배출량을 줄이는 노력을 경주하고 있다. 이와 관련하여 선행 연구에서는 산업부산물인 RA의 알칼리로 BS의 잠재 수경성 반응을 자극시켜, 무 시멘트 조건에서 알칼리 활성화(Alkali activation)화 시키는 새로운 메커니즘으로 강도 발현성을 확인 바 있다. 본 연구는 제조과정에 따른 석고의 종류 및 소각장에서 발생한 WA 등을 자극제 용도로 추가하여 강도등 품질에 미치는 영향에 대해 검토를 진행하였다. 그 결과, BS에 RA를 사용하는 무 시멘트 모르타르에 WA 0.5%와 AG 20%를 사용할 경우 초기강도는 낮을 지라도 91일강도는 OPC강도이상으로 발휘 되어 양호한 결과를 얻을 수 있었다.

**키워드** : 고로슬래그 미분말, 순환잔골재, 소각장 애쉬 석고 종류, 무 시멘트 모르타르

## References

1. Park KT, Han MC, Han CG, 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.
2. Han CG, Kim JB, Development of Admixture for PHC Pipe Concrete Using Anhydrite and Blast Furnace Slag Powder, Architectural Institute of Korea, 2011 Aug; 27(8):123-9.
3. Lee HJ, Kim JH, Han CG, Properties of High Volume Blast Furnace Slag Concrete using Recycled Aggregate with Incineration Waste Ash, Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute, 2013 Sep;1(2):107-13.
4. Baek BH, Han CG, Effect of Calcium Sulfate Dihydrate (Gypsum) on the Fundamental Properties of Slag-based Mortar, The Korea Institute of Building Construction, 2014 Jun;14(3):252-8.
5. 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.
6. Han DY, Bae SC, Hyung WG, A Study on the Properties of Non-Sintered Mortar with Industrial Waste used, Architectural Institute of Korea, 2011 Oct;31(2):345-6.
7. Park HE, Hydration of Non-Cement CaO-Activated Slag with Various Gypsum Contents, Proceedings of the Korea Concrete Institute, 2013 Oct;25(2):301-302.
8. 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, Architectural Institute of Korea, 2011 Jun;27(6):99-106.