

석탄가스화 용융슬래그를 잔골재로 활용하는 시멘트 모르타르의 기초적 특성

Foundation Properties of Cement Mortar in the Use of Fine Aggregate of Coal Gasification Slag

박경택^{1*} · 한민철² · 현승용³Kyung-Taek Park^{1*} · Min-Cheol Han² · Seung-Yong Hyun³

(Received April 8, 2019 / Revised May 20, 2019 / Accepted June 11, 2019)

This study evaluated the properties of Coal gasification slag(CGS) according to the CGS contents of cement mortar condition as a basic step to examine the applicability of CGS as concrete fine aggregate. Flow increased with increasing CGS contents for both Crushed sand a(CSa) and Crushed sand b+Sea sand(CSb+SS), but the amount of air contents decreased to the opposite tendency. Based on 28 days is maximum compressive strength was obtained at CGS 50% when CSa was used and CGS 75% when CSb+SS. The flexural strength were the maximum at 25% and 50% of CGS, but the tendency was similar to the compressive strength. Compared with CSa, the compressive strength and flexural strength 5% higher than those of CSb+SS, in CGS using of were about 5% higher than those of unused CGS. As a result of comprehensive study on the quality of mortar according to the CGS contents, it can be concluded that when CGS is mixed with fine aggregate at about 50%, it can contribute to securing workability and strength development positively so that resource recycling and quality improvement can be achieved at the same time.

키워드 : 석탄가스화 발전, 석탄가스화 용융슬래그, 시멘트 모르타르

Keywords : Integrated coal gasification combined cycle, Coal gasification slag, Cement mortar

1. 서론

천연자원이 주원료인 골재는 콘크리트 전체 체적의 70~80%를 차지하는 중요한 원재료이다. 그러나 경제·산업이 발전함에 따라 점차 천연자원이 고갈되어 골재의 절대량이 부족해지면서 전국적으로 골재 수요에 비해 공급이 부족한 수요-공급 불균형 현상이 나타나고 있다. 특히, 2020년까지 해사 채취량을 5% 이하로 감축시키겠다는 정부 정책으로 인해 골재 부족 현상은 더욱 심각해질 것으로 전망된다(Ministry of Land, Infrastructure, and Transport, 2019).

이와 같이 건설 산업에 사용되는 천연골재의 공급여건이 점차 불리해지고 있는 상황에서 관련 업계 및 전문가들은 부족한 골재 자원을 효과적으로 대처하기 위한 새로운 골재원 확보 방안이 절실히 필요한 실정이다.

한편, 최근에는 미세먼지 등으로 인한 대기오염 문제가 사회적 이슈로 부각되고 있는 가운데, 오염물질 배출을 줄이기 위한 다양한 대책들이 모색되고 있다. 특히, 석탄 화력발전 시 발생하는 미세먼지의 경우는 부정적인 여론이 점차 증가함에 따라 대기오염물질 배출을 천연가스 수준으로 획기적으로 줄일 수 있는 석탄가스화 복합 발전(Integrated coal Gasification Combined Cycle, 이하 IGCC)이 새로운 대안으로 각광받고 있다(Woo et al, 2010).

그러나 IGCC에서는 기존 석탄화력 방식과 다른 부산물이 발생하여 이의 효율적인 활용 방안이 요구되고 있다. 즉, 석탄회가 용융되어 슬래그 형태로 배출되는데, 이를 물로 급랭시켜 고체 입자로 생성된 것이 석탄가스화 용융슬래그(Coal Gasification Slag, 이하 CGS)이다. 이렇게 발생된 CGS는 현재까지 적당한 활용처를 찾지 못해 Fig. 1의 (a)와 같은 발전소에서 (b)와 같이 대부분 발전

* Corresponding author E-mail: taek5610@hanmail.net

¹청주대학교 건축공학과 박사과정, (주)삼표산업 대리 (Department of Architectural Engineering, Cheongju University, Doctor's course, Cheongju, 28503, Korea)

²청주대학교 건축공학과 교수 (Department of Architectural Engineering, Cheongju University, Professor, Cheongju, 28503, Korea)

³청주대학교 건축공학과 박사과정 (Department of Architectural Engineering, Cheongju University, Doctor's course, Cheongju, 28503, Korea)



(a) Facility view (b) Slag occurrence
Fig. 1. Integrated Gasification Combined Cycle(IGCC)

소 창고에 방치 보관되고 있는 실정이다.

이에 CGS의 활용 방안을 찾기 위한 연구가 초기 단계로 검토 중인데, 주로 결합재 용도(Kim et al. 2018)로만 한정되어 있어 활용성을 넓히기 위해서는 콘크리트용 골재화에 대한 연구가 필요하다.

따라서 본 연구팀에서는 자원 순환적인 관점에서 CGS를 콘크리트용 잔골재로 활용함으로써 부족한 골재자원화 대책을 마련하고자 일련의 연구를 진행하고 있다. 단, 본 연구에서는 콘크리트용 잔골재에 본격적으로 적용하기 이전 단계로서 시멘트 모르타르 조건에서 CGS가 잔골재로 활용 가능한지를 검토하고, 향후 콘크리트에서의 합리적인 활용방안을 모색하고자 한다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험계획

본 연구의 실험계획은 Table 1, 배합사항은 Table 2와 같다. 먼저 모르타르 배합비는 1:3으로 하는 배합에, 부순 잔골재에 CGS를 일정 비율별로 혼합 사용하여 품질특성을 검토하는 것으로 하였다. 즉, 양호한 석산의 부순잔골재(이하 CSa)를 사용하고 CGS를

Table 1. Experimental plan

Factors		Levels	
Mixture	C : S	1	• 1 : 3
	Binder		• OPC
	Flow(mm)		• 180±20
	Aggregate type	2	CSa ¹⁾
			CSb+SS(5:5)
CGS contents(%)	5	01), 25, 50, 75, 100	
Experiment	Fresh mortar	2	• Flow • Air content
	Hardened mortar		• Compressive strength (3, 7, 28 days) • Flexural strength (3, 28 days)

1) Plain

Table 2. Mixture proportions of mortar

C:S (W/C)	Series	CGS (%)	Unit weight(kg/m ³)						AE (C/%)
			W	OPC	CSa	CSb	SS	CGS	
1:3 (45%)	CSa	0	233	518	1,556	0	0	0	0.008
		25	234	520	1,161	0	0	399	
		50	235	522	772	0	0	795	
		75	236	524	385	0	0	1,189	
		100	237	527	0	0	0	1,582	
	CSb+SS	0	234	520	0	779	779	0	
		25	235	521	0	583	583	398	
		50	236	523	0	388	388	795	
		75	236	525	0	193	193	1,189	
		100	237	527	0	0	0	1,582	

치환하지 않은 경우를 플레인으로 하여, 목표 플로 180±20mm를 만족하도록 배합 설계한 다음 모든 변수에 동일하게 적용하였다. 이때, 물시멘트비는 45%로 하였으며, 결합재는 보통포틀랜드시멘트(이하 OPC)만을 사용하는 것으로 하였다.

골재의 실험 변수로는 CSa를 단독으로 사용한 경우와 다소 굵음으로서 불량한 입도분포의 석산B(이하 CSb)와 가늘고 미세함으로서 불량한 입자분포인 해사(이하 SS)를 5:5로 혼합한 경우인 2수준으로 계획하였다. 각 골재 변수에 대한 CGS의 치환율은 0, 25, 50, 75, 100%인 5수준으로 혼합 사용함으로써 모르타르의 물성에 미치는 CGS 잔골재의 영향을 검토하는 것으로 하였다.

2.2 사용재료

본 실험에 사용한 재료로서 먼저 OPC는 국내산 1종 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였는데, 그 물리적 성질은 Table 3과 같다. 또한, 골재로서 CSa와 CSb는 국내 A지역 석산에서 생산된 부순 잔골재를 사용하였으며, SS는 서해 배타적 경제수역(EEZ)에서 채취된 것을 사용하였는데, 그 물리적 성질은 Table 4와 같다. CGS

Table 3. Physical properties of cement

Density (g/cm ³)	Blaine (cm ² /g)	Soundness (%)	Setting time(min)		Compressive strength(MPa)		
			Initial	Final	3days	7days	28days
3.15	3 450	0.05	275	325	28.4	39.5	52.3

Table 4. Physical properties of fine aggregate

Type	Density (g/cm ³)	Water absorption ratio(%)	Passing ratio of 0.08mm sieve(%)	Fineness modulus
CSa	2.72	1.63	3.44	2.97
CSb	2.64	1.48	6.82	3.27
SS	2.66	1.61	5.42	2.06

Table 5. Physical properties of CGS

Density (g/cm ³)	Water absorption ratio(%)	Distribution of grain shape(%)	Safety test (%)	Expansion (%)	Passing ratio of 0.08mm sieve(%)	Fineness modulus
2.70	2.26	60.37	3.0	0	1.07	2.95

Table 6. Chemical composition

CaO(%)	S(%)	SO ₃ (%)	Fe(%)
13.1	0.3	0.9	0.84

Table 7. Harmful substances

Division	Cd	Pd	CR ⁶⁺	As	Hg	Se	F	B
Elution(mg/L)	0	0	0	0	0	0	0.39	0.26
Contents(mg/kg)	0.41	0	0	1.94	0	0	0.14	108

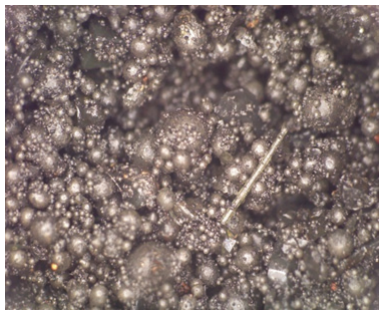
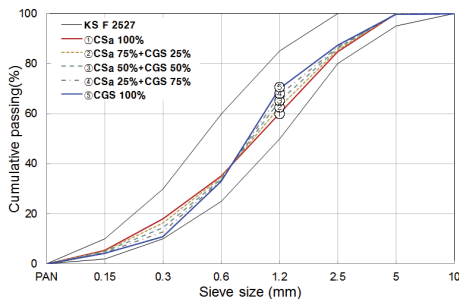
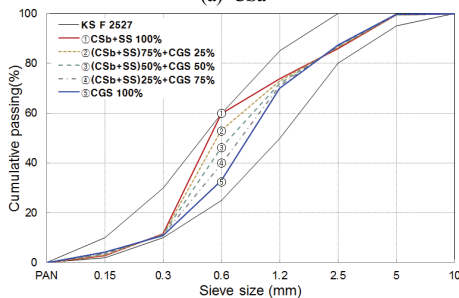


Fig. 2. Grain shape of CGS(x60)



(a) CSA



(b) CSb+SS

Fig. 3. Grading curve depending on different types of aggregate and CGS contents

는 국내 T화력발전소에 설치된 IGCC에서 발생하는 것으로 주 1회 씩 매주 샘플링한 뒤 총 6회분을 1개 시료로 혼합하여 사용하였는데, 그 물리적 성질은 Table 5, 화학성분은 Table 6, 유해물질 용출량 및 함유량은 Table 7과 같고, 입자모양은 Fig. 2와 같다. 즉, CGS는 구형의 입자로 입도가 연속으로 분포되어 있고, 절건밀도 및 흡수율 등이 KS기준에 적합하여 잔골재로서 사용 가능할 것으로 사료된다.

이때, CSa 및 CSb+SS에 대한 CGS 치환율에 따른 입도분포는 Fig. 3과 같은데, 모두 KS의 입도범위에 만족하였다. 한편, 화학혼화제로 AE제는 국내산 C사의 제품을 사용하였으며, 물은 상수도를 사용하였다.

2.3 실험방법

본 연구의 실험방법으로 모르타르의 혼합은 KS L 5109에 의거하여 실시하였다. 굳지 않은 모르타르의 특성으로 플로는 KS L 5111, 공기량은 KS F 2421에 의거하여 실시하였다. 경화 모르타르의 특성으로 압축강도 및 휨강도는 KS ISO 679에 의거하여 실시하였다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 굳지 않은 모르타르

3.1.1 플로

Fig. 4는 각 골재별 CGS 치환율 변화에 따른 시멘트 모르타르의 플로치를 나타낸 것이다. 먼저, CSa만을 사용한 플레인(CGS 0%)과 비교하여 CGS를 25% 치환한 경우 플로가 약 15mm 정도 감소하였으나, 이후 치환율이 증가할수록 플로도 점차 증가하여 CGS 75% 이상에서는 플레인보다 높은 유동성을 발휘하는 것으로 나타났다. 또한, CSb+SS를 사용한 경우는 CSa를 사용한 경우에

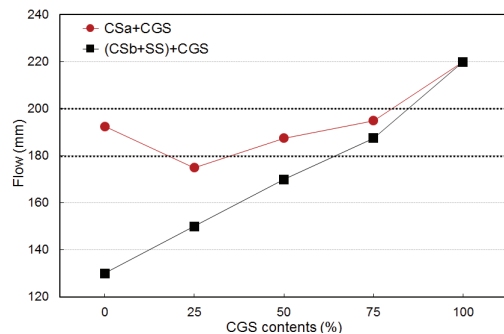


Fig. 4. Flow with fine aggregate type and CGS contents

비해 유동성이 다소 감소하였지만, CGS 치환율이 증가할수록 유동성이 향상되어 비례적으로 증가하는 경향을 보였다. 이는 Fig. 2와 같이 CGS의 입자형태가 둥근 원형의 유리질로 이루어짐에 따라 볼베어링 작용에 의해 유동성이 증가한 것으로 사료된다 (Han et al. 2018). 즉, 향후 콘크리트 적용 시 CGS의 유동성 향상 효과는 단위수량 절감으로 이어질 수 있어 콘크리트 성능향상에 긍정적인 영향을 미칠 것으로 판단된다.

3.1.2 공기량

Fig. 5는 CGS 치환율 변화에 따른 공기량을 나타낸 것이다. CSa와 CSb+SS를 사용한 경우 공히 CGS의 치환율이 증가할수록

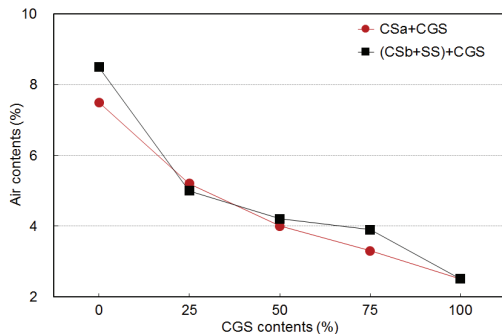


Fig. 5. Air contents with fine aggregate type and CGS contents

공기량이 감소하는 경향을 보였다. 이는 CGS의 미연소탄분에 의한 AE제 흡착작용에 기인한 것으로서(Han et al. 2018) 향후 콘크리트에 활용 시에는 공기량 감소를 보완할 수 있도록 AE제 추가 투입 등의 별도의 대책이 필요할 것으로 판단된다.

3.2 경화 모르타르

3.2.1 압축강도

Fig. 6은 CGS 치환율 변화에 따른 재령별 압축강도 및 강도발현율을 나타낸 것이다. 먼저 CSa를 사용한 경우 CGS 치환율이 증가할수록 포물선 경향을 보여 재령과 관계없이 CGS 50%에서 가장 높은 강도값을 보였고, 이후 점차 저하하는 경향으로 나타났다. 재령별 강도발현율은 CGS 0%와 비교하여 CGS 50%에서 3, 28일 재령의 경우 약 13~14%, 7일 재령의 경우 약 25%까지 높게 발현되는 것으로 나타나, 강도발현성이 우수한 것이 확인되었다. 또한, CSb+SS를 사용한 경우는 CGS 75%인 경우 가장 높은 강도값을 나타내었다. 이때, 강도발현율은 CGS 0%와 비교하여 3, 28일 재령은 약 15~17%, 7일 재령은 1% 정도 높게 발현되는 것으로 나타났다.

이는 CSa 혹은 CSb+SS가 표준입도 범위의 잔골재일지라도 CGS를 일정량 혼합하였을 때 이상적인 입도분포가 이루어지고, 또한 CGS에 의한 공기량 감소도 일부 시멘트 모르타르의 압축강

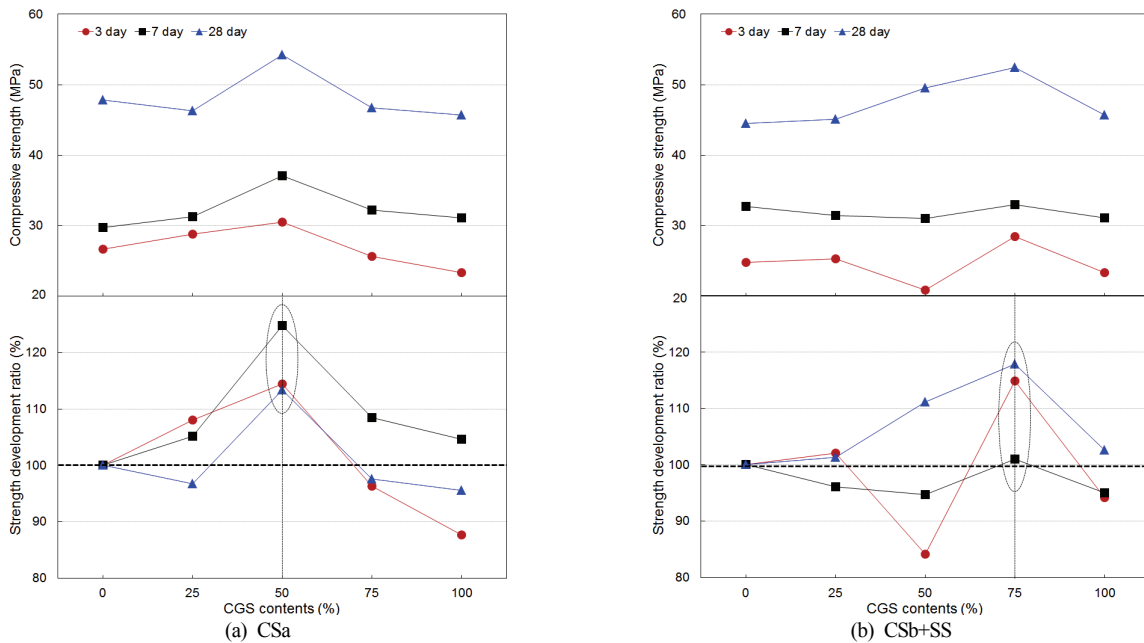


Fig. 6. Compressive strength with fine aggregate type and CGS contents

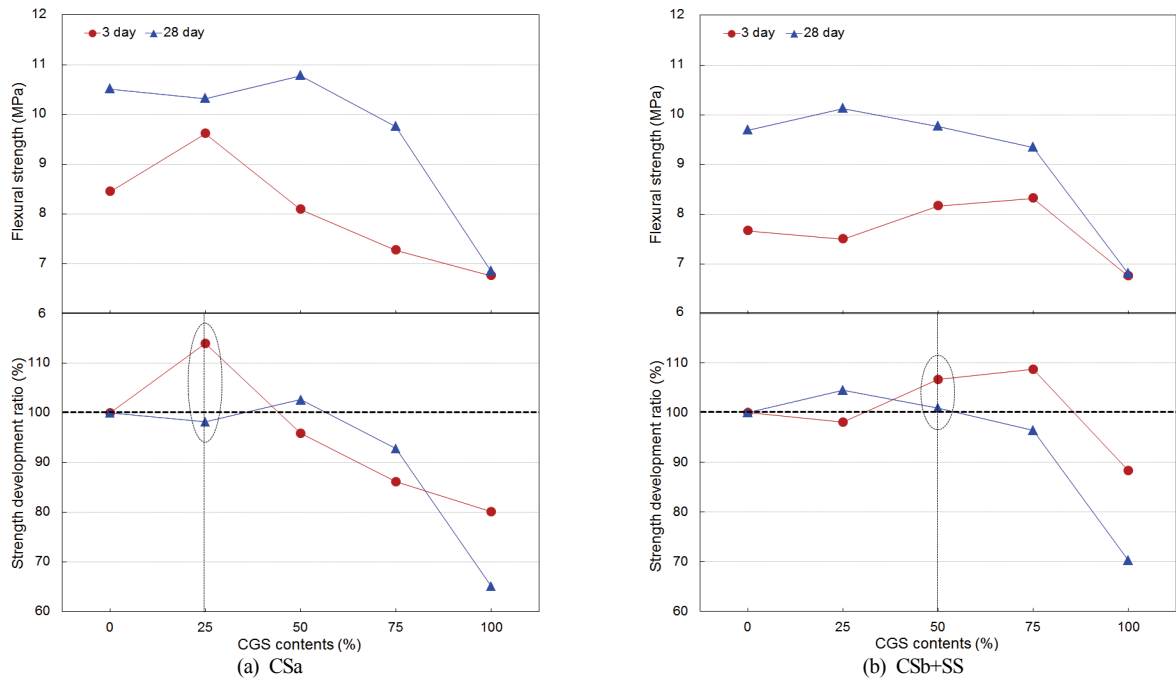


Fig. 7. Flexural strength with fine aggregate type and CGS contents

도 증진에 영향을 미쳤을 것으로 사료된다. 단, CGS를 75% 이상 사용할 경우는 압축강도가 저하하는 경향을 나타내는데, 이는 Fig. 2와 같이 CGS 입자가 구형이고 매끄러운 유리질이므로 골재와 시멘트 페이스트간 부착력 저하에 기인하여 저하된 것으로 분석된다(Han et al, 2018).

3.2.2 힘강도

Fig. 7은 압축강도와 동일한 요령으로 CGS 치환율 변화에 따른 재령별 힘강도 및 강도발현율을 나타낸 것이다. 힘강도의 경우는 압축강도보다 강도증진 발현폭은 작지만 유사한 경향으로 CGS 50% 이하의 적정 치환율에서 강도발현성이 유리하게 나타났다.

즉, CSa를 사용한 경우 재령 3일과 28일 강도를 중심으로 고찰하면 CGS 25%에서 가장 높은 강도값을 나타내었고, 이후로는 점차 저하하는 것으로 나타났다. CSb+SS를 사용한 경우는 CGS 50%에서 최고치를 나타내었고, 이후로는 CSa와 유사하게 저하하는 경향이었다. 이의 원인은 압축강도의 분석과 동일한 것으로 사료된다.

3.2.3 상호비교

Fig. 8은 CSa와 CSb+SS 간의 압축강도 및 힘강도를 상관관계로 나타낸 것이다. 강도분포는 CSa를 사용한 경우가 CSb+SS보다

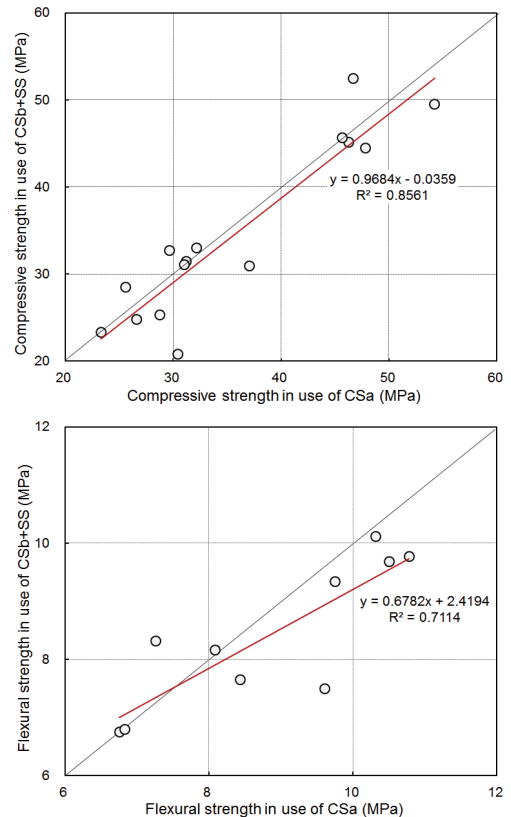


Fig. 8. Correlation between fine aggregate types(CSa and CSb+SS)

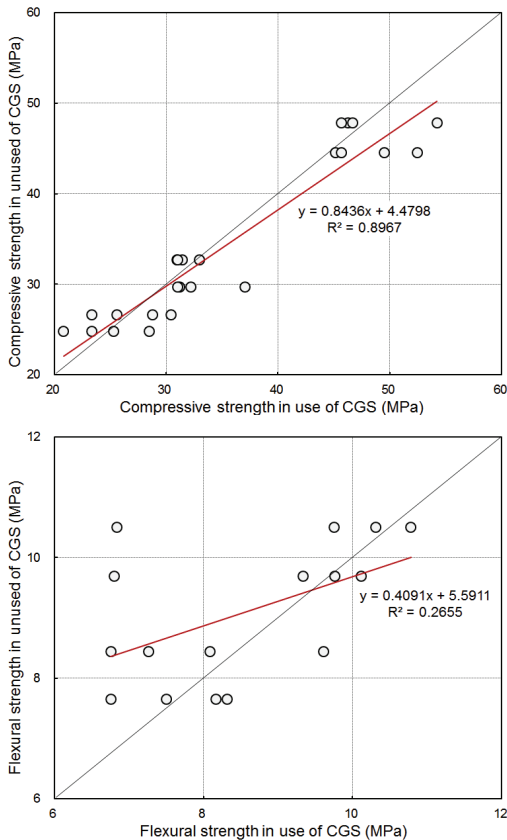


Fig. 9. Correlation between CGS with used and unused

약 5% 정도 높은 강도값을 보이는 것을 알 수 있었다.

Fig. 9는 Fig. 8과 동일한 방식으로 CGS의 사용 유무에 따른 압축강도 및 휨강도를 분석한 것이다. 전반적으로 강도분포는 낮은 강도 영역에서는 CGS를 사용하지 않은 경우에서 높게 나타났지만, 높은 강도 영역에서는 CGS를 사용한 경우에서 더 큰 강도를 나타내었다. 이는 CGS 치환율이 증가함에 따라 압축강도가 포물선의 경향을 보이고, 100% 치환의 경우 특히 저강도 영역일수록 크게 작아짐에 기인한 결과로 분석된다.

3.3 종합분석

Table 8은 골재종류 및 재령별 CGS 치환율 변화에 따른 시멘트 모르타르의 품질특성을 플레인을 기준으로 백분율로 나타낸 것이다. 전반적으로 CGS 100%인 경우에는 좋지 않은 결과이고 25~75%에서 양호한 결과인데, 각 품질특성치의 중요도를 구별하지 않아 어려운 점은 있지만, 대략 50% 전후이면 가장 양호한 치환율인 것으로 종합 고찰된다.

Table 8. Comprehensive analysis of quality rate

Series	Plain ¹⁾ (%)	CGS contents(%)					
		25	50	75	100		
CSa	Flow	100	91	97	101	114	
	Air contents	100	69	53	44	33	
	Compressive strength	3day	100	108	114	96	88
		7day	100	105	125	108	105
	Flexural strength	3day	100	97	113	98	96
		28day	100	97	113	98	96
Subtotal			97.4	100.1	89.4	83.0	
CSb + SS	Flow	100	115	131	144	169	
	Air contents	100	59	49	46	29	
	Compressive strength	3day	100	102	84	115	94
		7day	100	96	95	101	95
	Flexural strength	3day	100	101	111	118	103
		28day	100	101	111	118	103
Subtotal			96.4	96.9	104.1	92.6	
Total			96.9	98.5	96.8	87.8	

1) CGS 0%

* □ less than 100 □ 100 ~ 120 ▨ 120 ~ 140 ▩ higher than 140

4. 결론

본 연구는 CGS를 콘크리트용 골재로서 활용성을 검토하기 위한 기초 단계로서 모르타르 조건에서 CGS 치환율 변화에 따른 기초적 특성을 분석하였는데, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 플로는 CSa 및 CSb+SS 공히 CGS 치환율이 증가할수록 증가하였으나, 공기량은 반대로 감소하였다.
- 2) 압축강도는 CGS 치환율이 증가할수록 포물선 경향을 보였는데, 재령 28일을 기준으로 CSa를 사용한 경우는 CGS 50%, CSb+SS를 사용한 경우는 CGS 75%에서 가장 높은 강도값을 나타내었다. 휨강도는 CGS 25%와 CGS 50%에서 최대치를 나타냈으나 전반적인 경향은 압축강도와 유사하였다.
- 3) 상호비교로서 일반골재 변수에 대한 압축강도 및 휨강도는 CSb+SS와 대비하여 CSa에서 약 5% 정도 높게 나타났고, CGS 사용 유무에 따른 상호비교는 CGS를 사용하였을 때 높은 강도 영역에서 크게 나타났다.
- 4) CGS 치환율에 따른 품질특성을 종합적으로 분석한 결과, CGS 25~75%에서 양호한 품질을 보이는 것으로 나타났는데, 종합적으로는 CGS 50% 전후가 최적의 치환율인 것으로 분석된다.

이상을 종합하면 CGS를 잔골재에 일부 치환하여 사용하게 되면 유동성 확보 및 강도증진 측면에서 긍정적으로 기여할 수 있는 것으로 밝혀졌다. 따라서 금후의 과제로는 내구성 실험을 포함한 콘크리트 실험을 통해 콘크리트용 잔골재로서의 최적 치환율을 검증할 필요가 있을 것으로 사료된다.

Conflict of interest

None.

감사의 글

본 연구는 2017년도 한국서부발전(주)(과제번호 20170151000)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

References

Han, C.G., Park, B.M. (2017). Analyzing the engineering properties of cement mortar using mixed aggregate with reject ash, *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, **5(3)**, 247–252 [in Korean].

Han, M.C., Moon, B.Y. (2017). The effect of combinations of electric arc furnace slag and lime stone aggregates on engineering

properties of ultra high strength concrete with 80MPa, *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, **5(3)**, 253–260 [in Korean].

Kim, B.K., Lee, S.J., Chon, C.M., Choi, H.S. (2018). Potential of coal gasification slag as an alkali-activated cement, *Journal of the Korea Institute of Resources Recycling*, **27(2)**, 38–47 [in Korean].

Kim, S.C. (2011). Ceramic Material and IGCC (Integrated Gasification Combined Cycle), *News & Information for Chemical Engineers*, **29(5)**, 600–604 [in Korean].

Korea Agency for Technology and Standards. (2016). KS F 2527 (Concrete Aggregate), *Korea Standard* [in Korean].

Ministry of Land, Infrastructure, and Transport. (2019). *Aggregate Supply and Demand Plan* [in Korean].

Oh, S.H., Seo, C.H. (1997). An experimental study on the properties of concrete with replacement of fine aggregate by reject-ash, *Architectural Institute of Korea*, **17(2)**, 1311–1315.

Woo, S.K., Kim, S.Y., Hong, K.S., Seo, D.W. (2010). CCS and IGCC (Integrated Gasification Combined Cycle), *Ceramist*, **13(2)**, 32–40 [in Korean].

Yu, M.Y., Lee, J.Y., Chung, C.W. (2009). The property estimation of fine aggregate blended with natural, crushed, and recycled fine aggregate, *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction*, **25(11)**, 113–120.

석탄가스화 용융슬래그를 잔골재로 활용하는 시멘트 모르타르의 기초적 특성

본 연구는 석탄가스화 용융슬래그(이하 CGS)를 콘크리트용 잔골재로의 활용성을 검토하기 위한 기초 단계로 시멘트 모르타르 조건에서 CGS 치환율에 따른 특성을 평가하였는데, 그 결과를 요약하면 다음과 같다. 플로는 양호한 품질의 부순 잔골재(이하 CSa) 및 불량 입도의 부순 잔골재와 해사를 혼합한 잔골재(이하 CSb+SS) 공히 CGS 치환율이 증가할수록 증가하였으나, 공기량은 반대의 경향으로 감소하였다. 압축강도는 CGS 치환율이 증가할수록 포물선의 경향을 보였으며, 재령 28일을 기준으로 CSa를 사용한 경우는 CGS 50%, CSb+SS를 사용한 경우는 CGS 75%에서 가장 높은 강도값을 나타내었다. 휨강도는 CGS 25% 및 50%에서 최대치를 나타냈으나 전반적으로는 압축강도와 유사한 경향으로 나타났다. 상호비교로서 CSb+SS와 대비하여 CSa에서 압축강도 및 휨강도가 약 5% 정도 높게 나타났으며, CGS 사용 유무에 따라서는 CGS를 사용하였을 때 높은 강도일수록 크게 나타났다. CGS 치환율에 따른 모르타르의 품질을 종합적으로 검토한 결과, CGS를 잔골재에 50% 전후로 혼합하여 사용한다면 유동성 확보 및 강도증진에 긍정적으로 기여하여 자원 재활용 및 품질향상을 동시에 도모할 수 있을 것으로 사료된다.