

# 콘크리트용 잔골재로서 석탄가스화 용융슬래그(CGS)의 활용성 분석

## Analysis the Use of Concrete Fine Aggregates of Coal Gasification Slag

박경택<sup>1\*</sup> · 한민철<sup>2</sup> · 현승용<sup>3</sup>

Kyung-Taek Park<sup>1\*</sup> · Min-Cheol Han<sup>2</sup> · Seung-Yong Hyun<sup>3</sup>

(Received March 9, 2019 / Revised April 29, 2019 / Accepted June 7, 2019)

This study is analysis of the utilization as a concrete fine aggregate on CGS, a by-product of Integrated coal gasification combined cycle(IGCC). That is, in KS F 2527 "Concrete aggregate," properties of 1~12times to CGS were evaluated, focusing on quality items corresponding to natural aggregate sand(NS) and melted slag aggregate sand(MS). As a result, the distribution of grain shape, safety and expansion were all satisfied with KS standards by physical properties, but the quality was unstable at 7~12times of water absorption ratio and absolute dry density. The particle size distribution was unstable due to asymmetry distribution of coarse particles, and particles were too thick for 7~12times. The passing ratio of 0.08mm sieve was also out of the KS standard at part factor of 7~12times, but chloride content, clay contents, coal and lignite were all satisfactory. Meanwhile, chemical composition was satisfactory except for SO<sub>3</sub> in 1~6times, and content and amount of harmful substances were all within the specified value except for F in 7~12times. As a result of SEM analysis, the surface quality and porosity were 7~12times more than 1~6times, and it was the quality was degraded. Therefore, it is necessary to reduce the quality deviation by using separate measures in order to utilize it as concrete aggregate in the future, and if it is premixed with fine quality aggregate, it will contribute positively to solve aggregate supply shortage and utilize circulation resources.

**키워드** : 석탄가스화 발전, 석탄가스화 용융슬래그, 콘크리트용 잔골재, 물성

**Keywords** : Integrated coal gasification combined cycle, Coal gasification slag, Concrete fine aggregate, Properties

### 1. 서론

최근 우리나라 정부에서는 미세먼지 발생량을 줄이기 위하여 다양한 대책을 시행하고 있다. 특히, 석탄 화력발전소의 경우는 발생하는 공해물질인 황산화물, 질소산화물 및 비산먼지 등이 인체에 유해한 초미세먼지 발생의 주요 원인으로 밝혀지면서, 석탄 화력발전 산업에 대해 근본적인 회의를 갖는 여론이 점차 증대되고 있다(Woo et al, 2010).

하지만 석탄 화력발전은 2017년 전체발전량 중의 약 42%를 차지하는 매우 중요한 전력공급원이다(KEPCO, 2018). 또한, 유연탄의 경우 2018년 kWh당 정산단가가 81.8원에 불과해 원자력(62.1 원/kWh당) 다음으로 경제성이 높은 발전원에 속하기 때문에 석탄

화력발전을 무작정 줄이기에는 현실적이지 않다(EPSIS, 2019).

이와 같이 석탄 화력발전에 대한 이불리가 명확한 상황에서 발전 업계 및 전문가들은 석탄가스화발전(Integrated coal Gasification Combined Cycle, 이하 IGCC)을 대안으로 제시하고 있다(Figs 1, 2 참조). IGCC는 석탄을 공기 중에서 직접 연소시키는 기존 방식과 달리 석탄을 고온·고압의 증기에서 찌 합성가스를 활용하여 전력을 생산하는 발전방법과 불완전 연소에서 연소열을 이용하는 발전방법의 복합 발전으로 공해물질을 천연가스 수준으로 줄일 수 있을 것으로 예상되고 있다(Korea Electric Association, 2014). 이미 해외에서는 IGCC의 상용화가 진행 중이며, 국내에서도 IGCC 기술력 확보를 위한 본격적인 투자가 진행 중인 상태이다(Kim 2011).

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

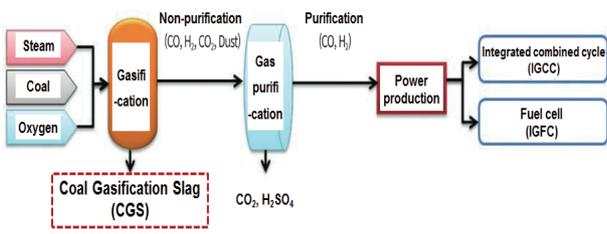
<sup>1</sup>청주대학교 건축공학과 박사과정, (주)삼표산업 대리 (Department of Architectural Engineering, Cheong-ju University, Doctor's course, Cheongju, 28503, Korea)

<sup>2</sup>청주대학교 건축공학과 교수 (Department of Architectural Engineering, Cheong-ju University, Professor, Cheongju, 28503, Korea)

<sup>3</sup>청주대학교 건축공학과 박사과정 (Department of Architectural Engineering, Cheong-ju University, Doctor's course, Cheongju, 28503, Korea)



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



**Fig. 2. Generation process of CGS**

그런데 IGCC에서도 석탄연소과정 중 회분이 용융슬래그 형태로 부산물이 배출되는데, 이것을 수냉방식으로 고체화시킨 것이 석탄가스화 용융슬래그(Coal Gasification Slag, 이하 CGS)이다. 이렇게 발생한 CGS는 순환자원 활용 및 향후 IGCC 보급 시를 고려하여 활용방안이 필요한데, 대량 사용이 가능한 건설재료 활용이 효과적일 것으로 판단된다. 하지만 국내에서는 시멘트 혼합재, 콘크리트 혼화재료 등으로 일부 가능성이 검토(Kim et al. 2018)되고 있지만, 아직 초기 단계로서 본격적인 연구가 부족한 상황이다.

한편, 골재는 콘크리트 성능에 중요한 영향을 미치는 원재료 중 하나로 대표적인 자원기반 자재이다. 그러나 최근 양질의 천연 골재가 고갈됨에 따라 만성적인 수급난 및 품질불안이 지속되고 있다. 이로 인해 관련 업계 및 전문가들은 천연골재를 대체할 수 있는 신규 골재원을 개발하는 데 많은 노력을 기울이고 있다(Han et al. 2017).

따라서 본 연구에서는 IGCC에서 발생하는 CGS의 효과적인 활용을 위하여 부족한 자원인 콘크리트용 골재로서의 활용 가능성을 검토해보고자 한다. 즉, 콘크리트용 골재의 한국산업표준(이하 KS)인 「KS F 2527」의 품질항목을 기준으로 물성을 분석함으로써, 현재 품질수준을 파악하고, 향후 CGS의 콘크리트용 골재화를 위한 기초 자료로 활용하고자 한다.

## 2. 실험계획 및 방법

### 2.1 실험계획

본 연구의 실험계획은 Table 1과 같다. 먼저, CGS는 국내 T 화력발전소에 건설된 IGCC에서 발생하는 부산물을 채취하였는데, 샘플링 주기는 주 1회 간격으로 12주에 걸쳐 총 12개 시료를 샘플링하는 것으로 하였다. 이때, CGS는 1~6회와 7~12회를 2구분(원료탄 변화)하여 매회 실험을 실시하였다. 단, 안정성, 팽창성, 점토함유량, 석탄 및 갈탄, 화학분석 및 SEM은 1~6회분을 혼합하여 1회, 7~12회분을 혼합하여 2회 실험하는 것으로 하였다.

실험사항으로는 CGS에 대한 콘크리트용 잔골재로서 품질수준을 검토하기 위해 KS F 2527(콘크리트용 골재)에서 규정하고 있는 천연 잔골재(NS)와 용융 슬래그 잔골재(MS)의 품질항목을 기준으로 실시하였다. 즉, 물리적 특성 및 유해물질 함유량에 대하여 실험을 실시하였고, 추가적으로 용융 슬래그 잔골재의 화학성분 분석 및 유해물질 용출량·함유량과 CGS의 미세구조를 확인하기 위해 SEM 촬영을 실시하는 것으로 계획하였다.

**Table 1. Experimental plan**

Factors		Levels	
Sampling number		12	• 1~12times <sup>1)</sup>
Reference standard		1	• KS F 2527(Concrete aggregate) - NS, MS <sup>2)</sup>
Material factor	Fine aggregate	1	• CGS <sup>3)</sup>
Experiment	Physical properties	7	• Absolute dry density • Water absorption ratio • Distribution of grain shape • Safety test <sup>4)</sup> • Expansion <sup>4)</sup> • Particle size distribution • Fineness modulus
	Contents of impurity	4	• Passing ratio of 0.08mm sieve • Chloride contents • Clay content <sup>4)</sup> • Coal and lignite content <sup>4)</sup>
	Chemical composition <sup>4)</sup>	2	• Component analysis • Harmful substances
	Fine structure <sup>4)</sup>	1	• SEM

- 1) Once a every week sampling
- 2) NS : Natural aggregate(Sand)  
MS : Melt-solidified salg aggregate(Sand)
- 3) Coal gasification slag aggregate
- 4) Mix 1~6times, 7~12times(Request by certificate authority)

## 2.2 실험방법

본 연구의 실험방법은 Table 2와 같다. 즉, 실험항목에 따라 각각의 KS 규정에 의거하여 실시하였으며, 유해물질 함유량은 폐기물 공정시험방법에 따라 실시하였다. 한편, SEM은 주사식 전자현미경으로 300배율로 촬영하였다.

Table 2. Experimental method

Factors		Method
Physical properties	Absolute dry density	KS F 2503
	Water absorption ratio	KS F 2504
	Distribution of grain shape	KS F 2527
	Safety test*	KS F 2507
	Expansion*	KS F 2527(annex C)
	Particle size distribution	KS F 2502
Contents of impurity	Fineness modulus	KS F 2502
	Passing ratio of 0.08mm sieve	KS F 2511
	Chloride contents	KS F 2515
	Clay content*	KS F 2512
Chemical composition	Coal and lignite content*	KS F 2513
	Component analysis*	KS F 2527(annex E)
	Harmful substances(contents)*	KS F 2527(annex F)
Fine structure	Harmful substances(elution)*	Waste process test method
	SEM*	Magnification(×300)

\* Professional testing organization

## 3. 실험결과 및 분석

CGS 1~12회 채취분에 대한 골재의 물리적 특성과 유해물질 함유량 및 이에 대한 통계치는 Table 3과 같다. 분석 방법으로는 CGS 채취 시 IGCC에 사용된 석탄 원료의 변화로 인하여 1~6회분과 7~12회분의 물성 차이가 다소 크게 발생하였기 때문에, 이를 구분하여 분석하는 것으로 하였다.

### 3.1 물리적 특성

#### 3.1.1 절대건조밀도

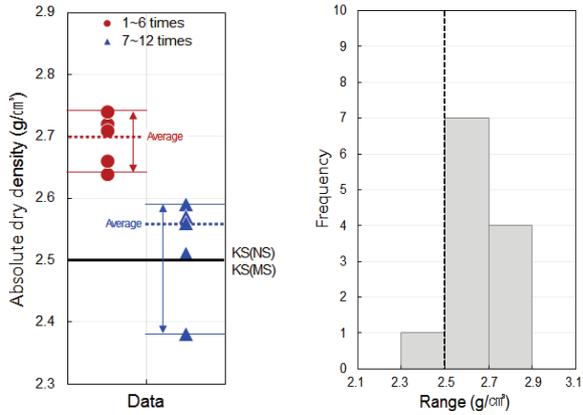
CGS의 골재화에 따른 물리적 특성의 분석으로 Fig. 3은 CGS 샘플링 횟수에 따른 절대건조밀도의 분포 및 히스토그램을 나타낸 것이다.

먼저 KS F 2527에서 천연 및 용융슬래그 잔골재의 절대건조밀도 품질기준은 동일하게 2.50g/cm<sup>3</sup> 이상으로 규정되어 있다. 1~12회분 시료의 평균값은 2.62로 나타나 KS기준을 만족하였고, 정규분포상으로는 주로 2.50~2.70 사이에 분포하는 것으로 나타났다. 단, 1~6회분과 7~12회분의 차이를 비교해보면 1~6회분의 평균값이 2.70g/cm<sup>3</sup>으로 콘크리트용 골재로서 성능이 양호하게 나타난 반면, 7~12회분은 평균값이 2.53g/cm<sup>3</sup>으로 낮게 나타났

Table 3. Basic properties of CGS fine aggregate

Division	Physical properties								Content of impurity			
	Absolute dry density (g/cm <sup>3</sup> )	Water absorption ratio(%)	Distribution of grain shape(%)	Safety test (%)	Expansion (%)	Particle size distribution (%)	Fineness modulus	Passing ratio of 0.08mm sieve(%)	Chloride contents (%)	Clay content (%)	Coal and lignite content (%)	
Standard <sup>1)</sup>	NS	≥2.50	≤3.0	-	≤10	-	In range	-	3.0≥	0.04≥	1.0≥	0.5≥
	MS			≥53		≤2			5.0≥	-	-	-
Data times	1	2.72	2.1	60.1	3.0	0	Out	3.30	1.2	0.003	0	0
	2	2.64	2.3	61.5			Out	2.25	1.1	0.002		
	3	2.66	2.2	59.8			Out	3.56	1.2	0.001		
	4	2.72	2.3	60.2			Out	3.28	0.9	0.001		
	5	2.74	2.5	60.2			In	2.70	1.2	0.001		
	6	2.71	2.2	60.6			In	2.63	0.8	0.001		
	7	2.59	3.7	64.1	4.0	0	Out	4.29	1.4	0.001	0	0
	8	2.59	5.0	65.7			Out	3.72	2.9	0.001		
	9	2.57	5.1	63.8			Out	3.98	3.0	0.001		
	10	2.38	7.5	64.2			Out	4.31	1.7	0.001		
	11	2.51	3.0	64.3			Out	3.57	6.0	0.002		
	12	2.56	4.0	63.8			Out	3.75	5.9	0.001		
Statistics (1~12 times)	Average	2.62	3.5	62.4	3.5	0	Out	3.45	2.3	0.001	0	0
	Max	2.74	7.5	65.7	4.0	0	Out	4.31	6.0	0.003	0	0
	Min	2.38	2.1	59.8	3.0	0	Out	2.25	0.8	0.001	0	0
	Standard deviation	0.11	1.7	2.15	-	-	-	0.65	1.86	0.001	-	-

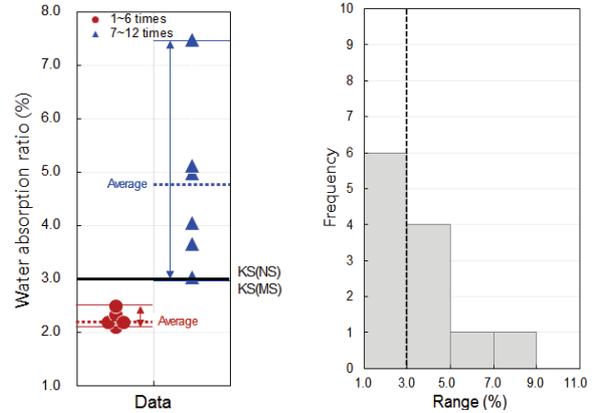
1) Based on Standard is KS F 2527(Concrete Aggregate) of NS and MS.



■ KS Standard  
-NS, MS  
: 2.50 g/cm<sup>3</sup> or more

■ Statistics(g/cm<sup>3</sup>)  
1) 1~6times 2) 7~12times  
-Average : 2.70 -Average : 2.53  
-Max : 2.74 -Max : 2.59  
-Min : 2.64 -Min : 2.38  
-Standard deviation -Standard deviation  
: 0.04 : 0.08

Fig. 3. Absolute dry density due to sampling



■ KS Standard  
-NS, MS  
: 3.0% or less

■ Statistics(%)  
1) 1~6times 2) 7~12times  
-Average : 2.3 -Average : 4.7  
-Max : 2.5 -Max : 7.5  
-Min : 2.1 -Min : 3.0  
-Standard deviation -Standard deviation  
: 0.1 : 1.6

Fig. 4. Water absorption ratio due to sampling

고, 최대최소 편차 및 표준편차 또한 1~6회분보다 7~12회분이 큰 것으로 나타났으며, 10회분의 1개 시료는 품질기준에서 벗어나는 것이 확인되었다.

이는 IGCC에서 CGS 채취 시 1~6회분까지는 석탄 원료가 CGS 생성에 양호하며 비교적 품질편차가 낮게 나타난 반면, 7~12회분은 1~6회와는 다른 탄종으로, CGS 생성에 불량하며 품질편차가 다소 크게 발생한 것으로 사료된다. 결국 석탄회분으로 생성되는 용융 슬래그의 특성 상 향후 투입되는 석탄 원료에 따라 밀도 차이가 발생할 수 있는 것이 예상되기 때문에 이에 대한 충분한 고려가 필요할 것으로 판단된다.

### 3.1.2 흡수율

Fig. 4는 Fig. 3과 동일한 요령으로 CGS 샘플링 횟수에 따른 흡수율을 나타낸 그래프이다. 흡수율에 대한 KS의 품질기준 또한 천연 및 용융슬래그 잔골재가 동일하게 3.0% 이하로 규정되어 있다. 1~12회분 시료의 평균 흡수율은 3.5%로 높게 나타나 품질기준을 만족하지 못하는 것으로 나타났다. 또한, 최대최소 편차는 5.4%, 표준편차는 1.7%로 다소 편차가 크게 나타났다. 1~6회분과 7~12회분을 비교해보면 1~6회분의 평균 흡수율이 2.3%로 낮은 반면, 7~12회분은 4.7%로서 대부분 품질기준보다 높게 나타났고, 최대최소 편차 및 표준편차 또한 7~12회분이 크게 나타났다.

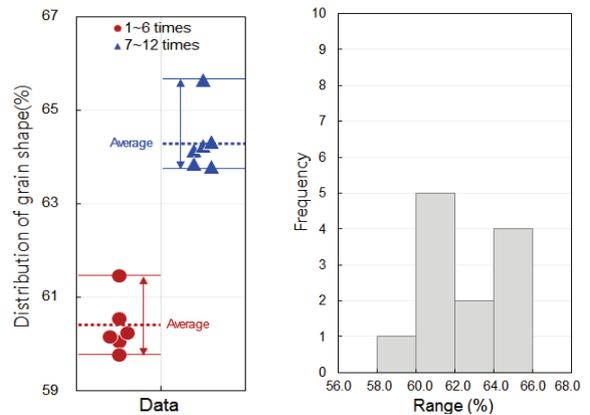
이는 절대건조밀도에서 분석한 바와 같이 7~12회분에서 탄종의 변화에 기인한 품질변동으로 파악되는데, Fig. 10의 SEM 사진에서와 같이 입자 내부에 존재하는 다공질에 기인한 것으로 사료

된다. 따라서 향후 콘크리트용 골재로 활용 시에는 충분한 고려가 필요할 것으로 판단된다.

### 3.1.3 입자모양판정실적률

Fig. 5는 CGS 샘플링 횟수에 따른 입자모양판정실적률을 나타낸 것이다.

입자모양판정실적률에 대한 KS의 품질기준으로 천연 잔골재는 별도로 규정하고 있지 않으나, 용융슬래그 잔골재는 53% 이상으



■ KS Standard  
-NS : No criteria  
-MS : 53% or more

■ Statistics(%)  
1) 1~6times 2) 7~12times  
-Average : 60.4 -Average : 64.3  
-Max : 61.5 -Max : 65.7  
-Min : 59.8 -Min : 63.8  
-Standard deviation -Standard deviation  
: 0.59 : 0.68

Fig. 5. Distribution of grain shape due to sampling

로 규정되어 있다.

1~12회분 시료의 평균값은 62.4%로서 KS의 품질기준을 훨씬 상회하였고, 최대최소 편차는 5.9%, 표준편차는 2.2%이었으며, 정규분포상 60~66%에 주로 분포하는 것으로 나타났다. 1~6회분과 7~12회분을 비교해보면 1~6회분의 평균 입자모양판정실적률이 60.4%인 반면, 7~12회분은 64.3%로서 높게 나타났고, 최대최소 편차 및 표준편차는 유사한 것으로 나타났다.

이는 1~12회분 시료 모두 용융 슬래그를 급랭방식으로 고체화 시키면서 골재가 구형 입자형태로 생성됨에 따라 입자모양판정실적률이 높게 나타난 것으로 사료된다.

### 3.1.4 안정성 및 팽창성

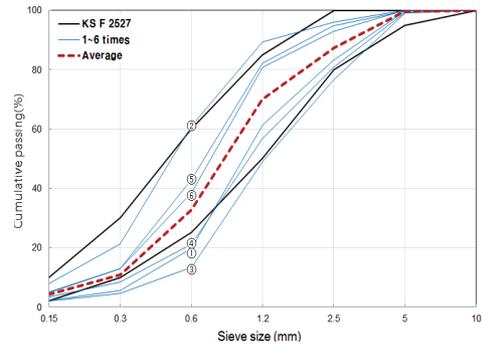
CGS의 안정성 및 팽창성은 1~6회분 시료를 혼합하여 1차, 7~12회분을 혼합하여 2차 실시하였다. 그 결과 안정성은 KS의 품질기준으로 10% 이하로 규정되어 있는데, 1차는 3.0%, 2차는 4.0%로 나타나 양호하게 품질기준을 만족시킴을 알 수 있었다. 팽창성은 용융 슬래그의 경우만 2% 이하로 규정되어 있는데, 1차, 2차 모두 0%로 나타나 품질기준을 만족하는 것으로 나타났다.

### 3.1.5 입도 및 조립률

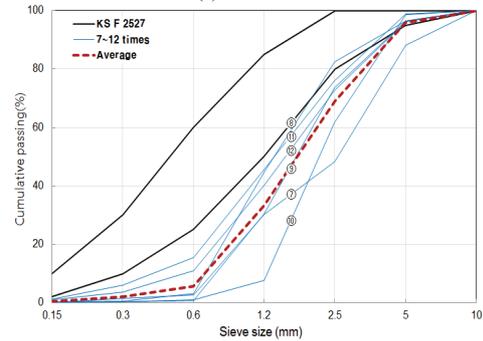
Fig. 6은 CGS 샘플링 횟수에 따른 입도분포를 나타낸 것이고, Fig. 7은 입도분포를 조립률로 계산하여 나타낸 것이다.

먼저 1~6회분 시료의 평균 입도분포는 KS에서 규정하고 있는 천연 및 용융 슬래그 잔골재의 입도규정에 적합하였으나, 각각 입도의 경우 입도범위 규정에 적합한 시료는 2수준(5, 6회분)에 불과하였고, 7~12회분 시료는 전부 부적합한 것으로 나타났다. 또한, 입도분포를 조립률로 나타내면 1~6회분 시료의 평균값은 2.95, 최대최소 편차는 2.25, 표준편차는 0.50으로 품질이 양호하게 나타난 반면, 7~12회분 시료의 평균값은 3.94, 최대최소 편차는 0.74, 표준편차는 0.31로서, 1~6회분에 비해 입자가 굵고 입도 분포 변화는 작은 것으로 나타났다.

즉, CGS는 IGCC의 분류층 가스화기 하부에서 벽면을 타고 흘러내린 슬래그가 물을 사용한 급랭 방식으로 입자가 결정화되면서 생성되는데, 1~6회분에 비해 7~12회분에서 불규칙하게 생성된 큰 입자로 인해 입도분포가 높게 나타난 것으로 사료된다. 따라서 향후 실무 적용 시 콘크리트용 골재로서 유효하게 활용되기 위해서는 입도분포에 따라 CGS 생산지에서 별도의 분쇄 및 체가름을 거쳐 입도범위에 적합하도록 생산하거나, 중간 산지에서 다른 입도분포의 골재와 혼합하여 입도범위에 적합하도록 생산하는 방법 등의 별도 강구대책을 마련해야 할 것으로 판단된다.

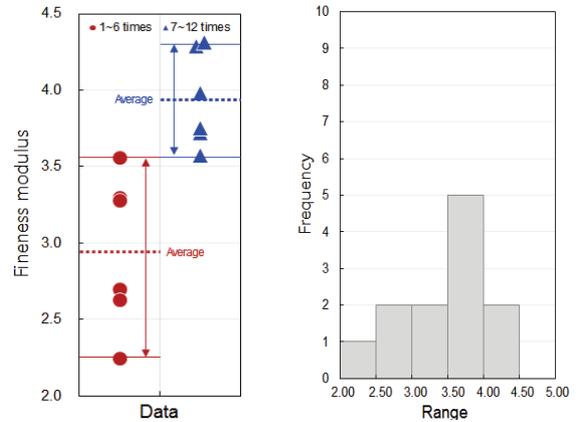


(a) 1~6times



(b) 7~12times

Fig. 6. Cumulative passing due to sampling



■ KS Standard  
-No criteria

■ Statistics(%)  
1) 1~6times  
-Average : 2.95  
-Max : 3.56  
-Min : 2.25  
-Standard deviation : 0.50  
2) 7~12times  
-Average : 3.94  
-Max : 4.31  
-Min : 3.57  
-Standard deviation : 0.31

Fig. 7. Fineness modulus due to sampling

## 3.2 유해물질 함유량

### 3.2.1 0.08mm체 통과량

Fig. 8은 CGS 샘플링 횟수에 따른 0.08mm체 통과량을 나타낸 것이다.

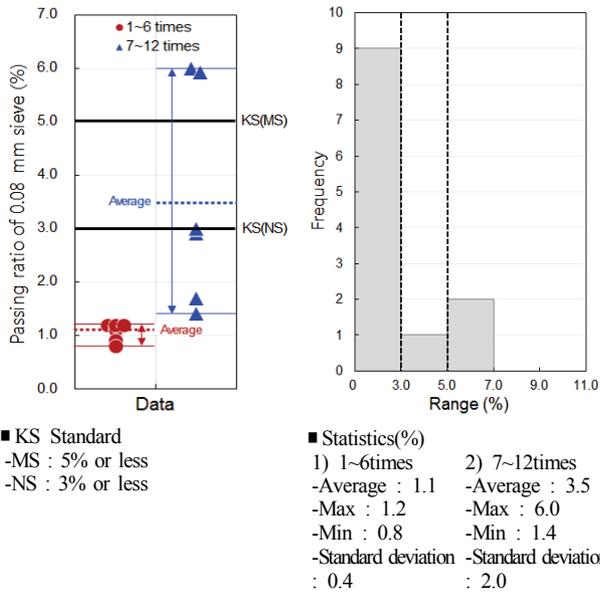


Fig. 8. Passing ratio of 0.08mm sieve due to sampling

0.08mm체 통과량에 대한 KS의 품질기준으로 천연 잔골재는 일반적인 경우 5% 이하, 표면이 마모를 받거나 중요한 경우는 3% 이하로 규정하고 있고, 용융슬래그 잔골재는 일반적인 경우 7% 이하, 표면이 마모를 받거나 중요한 경우는 5% 이하로 규정하고 있다. 본 연구에서는 가장 강화된 조건을 적용하여 천연 잔골재는 3% 이하, 용융슬래그 잔골재는 5% 이하를 기준으로 분석하였다.

먼저 1~6회분 시료의 평균값은 1.1%로서 천연 잔골재 및 용융 슬래그 잔골재의 품질기준을 충분히 만족하였고, 최대최소 편차 및 표준편차 또한 양호한 결과를 나타내었다. 그러나 7~12회분의 경우 평균값이 3.5%로서 용융슬래그 잔골재의 품질기준은 만족하였지만 천연 잔골재에는 벗어났으며, 최대최소 편차 및 표준편차가 1~6회분에 비해 비교적 크게 나타났다.

즉, CGS의 경우 슬래그가 결정화되며 생성되고, 별도의 파쇄공정이 없기 때문에 일반적인 천연골재에 비해 0.08mm체 이하의 미분이 비교적 낮게 나타나는 경향을 보였다. 하지만 일부(11회분, 12회분)의 경우는 0.08mm체 통과량이 5% 이상 높게 나타났으므로, 미분 함유량이 일정하도록 품질을 안정화시키는 것이 필요하다. 또한, 향후 콘크리트용 골재로서 활용될 경우는 전체적인 입도 분포 상 0.08mm체 통과 미분이 일정량 포함되는 것이 콘크리트 품질에 유리할 수 있으므로, 다른 양질의 골재와 혼합하는 방법으로 품질을 확보해주는 것이 바람직할 것으로 사료된다.

### 3.2.2 염화물 함유량

Fig. 9는 CGS 샘플링 횟수에 따른 염화물 함유량을 나타낸 것이다.

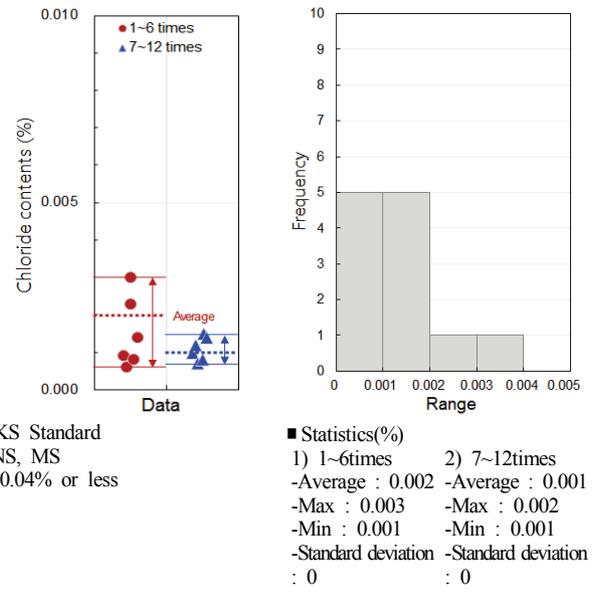


Fig. 9. Chloride due to sampling

염화물에 대한 KS의 품질기준은 천연 및 용융슬래그 잔골재가 동일하게 0.04% 이하로 규정되어 있는데, 1~12회분 시료 전부 0.01% 이하로 염화물은 거의 함유되어 있지 않은 것으로 나타났다. 이는 IGCC 연소 시 염화물이 함유된 연료가 투입되지 않거나 휘발하여 가스 상태로 제거되기 때문인 것으로 사료된다.

### 3.2.3 점토함유량 및 석탄·갈탄

CGS의 점토함유량 및 석탄·갈탄의 KS 품질기준은 천연 잔골재에서만 규정되어 있으며, 1~6회분 시료를 혼합하여 1차, 7~12회분을 혼합하여 2차 실시하였다. 그 결과 1차, 2차 모두 0으로 미검출되어 품질기준에 만족하는 것으로 나타났다.

### 3.4 화학성분 및 유해물질 용출량·함유량

CGS의 화학성분 및 유해물질 용출량·함유량의 KS 품질기준은 용융 슬래그 잔골재에서만 규정되어 있는데, 1~6회분 시료를 혼합하여 1차, 7~12회분을 혼합하여 2차로 실시하였다. 그 결과는 Table 4 및 5와 같다.

먼저 화학성분 분석 결과, 1~6회분 혼합시료에서 삼산화황(SO<sub>3</sub>)을 제외한 나머지 항목은 규정치를 만족하였고, 7~12회분 혼합 시료는 전 항목이 만족되는 것으로 나타났다. 삼산화황(SO<sub>3</sub>)의 경우는 향후 개질처리 등 별도의 조치와 함께 모르타르 및 콘크리트 단계에서 팽창성에 대한 면밀한 검토가 필요할 것으로 사료된다.

유해물질 용출량 및 함유량 결과에서는 유해물질 용출량에서 7~12회분 혼합시료의 불소(F)를 제외한 나머지는 KS의 규정치를

Table 4. Chemical composition

Division	Composition(%)			
	CaO	S	SO <sub>3</sub>	Fe
Standard	45 or less	2.0 or less	0.5 or less	1.0 or less
1~6times	13.1	0.3	0.9	0.84
7~12times	11.8	0.18	0.5	0.36

Table 5. Harmful substances

Division	Cd	Pd	CR <sup>6+</sup>	As	Hg	Se	F	B
Standard	0.01 or less	0.01 or less	0.05 or less	0.01 or less	0.0005 or less	0.01 or less	0.8 or less	1.0 or less
Elution (mg/L)								
1~6times	0	0	0	0	0	0	0.39	0.26
7~12times	0	0	0	0	0	0	1.00	0.90
Contents (mg/kg)								
Standard	150 or less	150 or less	250 or less	150 or less	15 or less	150 or less	4 000 or less	4 000 or less
1~6times	0.41	0	0	1.94	0	0	0.14	108
7~12times	0	0	0	0	0	0	4.50	0.34

전부 만족하는 것으로 나타났다. 여기에서 불소(F)의 경우 본 연구에서는 규정치를 소량 벗어났지만, 과다하게 함유되면 콘크리트의 응결지연을 야기할 수 있으므로 지속적인 샘플링을 통한 충분한 검토가 필요할 것으로 사료된다.

### 3.5 SEM

Fig. 10은 CGS 1~6회분을 혼합한 시료와 7~12회분을 혼합한

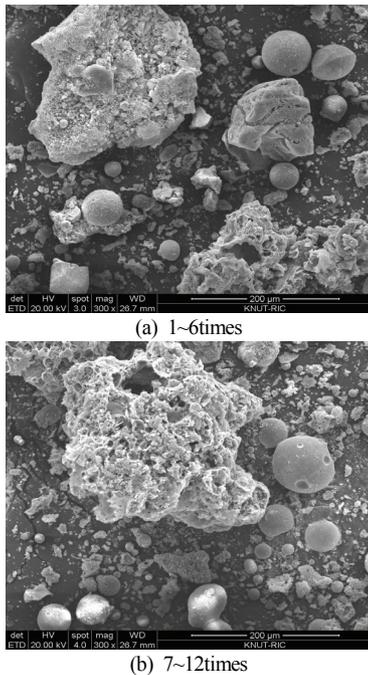


Fig. 10. SEM result of CGS

시료 2수준의 SEM 화상을 300배로 확대하여 나타낸 것이다.

먼저 1~6회분과 7~12회분이 유사하게 구형 및 다각형의 입자로 관측되었는데, 이는 전술한 바와 같이 CGS의 생성원리 및 플라이 애시의 구형 입자가 일부 포함됨에 기인한 것으로 사료된다. 따라서 향후 콘크리트용 골재로 활용 시 콘크리트 유동성 증진에 긍정적인 영향을 미칠 것으로 판단된다.

다만, 7~12회분의 경우 1~6회분에 비해 표면이 거칠고 공극이 다소 많이 발견되었는데, 이로 인해 절건밀도는 낮게, 흡수율은 높게 나타나 품질이 저하된 것으로 사료된다.

## 4. 결론

본 연구는 CGS의 콘크리트용 골재로서 활용성을 검토하기 위하여 KS F 2527의 천연 및 용융슬래그 잔골재 품질항목과 비교하여 분석하였는데, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 물리적 특성으로 절대건조밀도는 10회분의 1개 시료를 제외하고 전부 KS의 품질기준을 만족하였고, 흡수율은 1~6회분에 비해 7~12회분이 높게 나타나 KS의 품질기준을 만족하지 못하였다. 입자모양판정실적률은 품질기준을 상회하여 양호한 품질을 보였고, 안정성 및 팽창성은 1~6회분 혼합시료와 7~12회분 혼합시료 모두 KS의 품질기준을 만족하였다.
- 2) 입도의 경우는 전반적인 입도분포가 굵은 것으로 나타났는데, 1~6회분에 비해 7~12회분이 입도기준에 크게 부적합한 것으로 나타났다. 입도를 환산한 조립률도 마찬가지로 1~6회분에 비해 7~12회분이 크게 나타났다.
- 3) 유해물질로서 0.08mm체 통과량은 1~6회분이 낮게 분포한 반면, 7~12회분은 높게 나타났고, 일부는 KS의 품질기준에 불합격하였다. 단, 염화물함유량, 점토함유량, 석탄 및 갈탄은 모두 KS기준을 만족하였다.
- 4) 화학성분의 경우 1~6회분 혼합시료에서 삼산화황(SO<sub>3</sub>)을 제외하고 전부 KS의 규정치를 만족하였으며, 유해물질 용출량 및 함유량에서는 용출량에서 7~12회분 혼합시료의 불소(F)를 제외하고 전부 규정치를 만족하는 것으로 나타났다.
- 5) SEM 분석 결과, CGS의 미세구조는 구형 및 다각형 입자로 관측되었는데, 1~6회분 혼합시료에 비해 7~12회분 혼합시료가 표면이 거칠고 공극도 다수 분포되어 품질이 좋지 않은 것으로 사료된다.

이상을 종합하면 CGS를 콘크리트용 골재로서 활용하기 위해서

는 품질편차를 줄여야 할 것으로 판단되고, 특히 입도에 대해서는 향후 분쇄, 체가름 등의 과정을 거쳐 입도범위에 들어올 수 있도록 별도의 조치가 필요할 것으로 사료된다.

또한, 경우에 따라서 CGS의 부족한 품질을 서로 상호 보완할 수 있도록 다른 품질의 천연골재와 혼합하여 사용한다면, 골재수급난 해소 및 품질확보 차원에서 합리적인 대안이 될 수 있을 것으로 판단되고, 모르타르 및 콘크리트 실험을 거쳐 콘크리트용 골재로서의 활용 가능성을 검증해야 할 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 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].  
 KEPCO. (2018). Statistics of Electric Power in Korea, **87** [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].  
 Korea Electric Association. (2014). Journal of the Electric World, **452**, 29-34 [in Korean].  
 Korea Power Exchange. (2019). Electric Power Statistics Information System, EPSIS [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.

#### 콘크리트용 잔골재로서 석탄가스화 용융슬래그(CGSS)의 활용성 분석

본 연구는 석탄가스화발전(IGCC)에서 발생하는 부산물인 CGS에 대한 콘크리트용 잔골재로서의 활용성을 분석한 것이다. 즉, KS F 2527「콘크리트용 골재」에서 천연 및 용융슬래그 잔골재에 해당하는 품질항목을 중심으로 CGS 1~12회분에 대한 물성평가를 실시하였다. 그 결과, 물리적인 특성으로 입자모양판정실적률, 안정성 및 팽창성은 KS의 품질기준을 전부 만족하였으나, 절건밀도와 흡수율은 7~12회분에서 품질이 불안정한 것으로 나타났다. 입도의 경우 불균일한 굵은 입자분포로 인해 품질이 다소 불안정하였고, 7~12회분은 입자가 너무 굵은 것으로 나타났다. 유해물질 특성으로 0.08mm체 통과량 또한 7~12회분의 일부 수준에서 KS기준을 벗어났으나, 염화물함유량, 점토덩어리, 석탄 및 갈탄은 모두 만족하는 것으로 나타났다. 한편, 화학성분은 1~6회분에서 SO<sub>3</sub>를 제외하고 전부 만족하였으며, 유해물질 함유량·용출량은 함유량에서 7~12회분의 F를 제외하고 전부 규정치 이내로 나타났다. SEM분석 결과 1~6회분에 비해 7~12회분이 거친 표면성상 및 다공질을 보여 품질이 저하된 것으로 판단되었다. 따라서 향후 콘크리트용 골재로서 활용하기 위해서는 별도 조치를 통한 품질편차 감소가 필요하고, 양질의 골재와 혼합하여 품질을 보완한다면 골재수급난 해소 및 순환자원 활용에 긍정적으로 기여할 수 있을 것으로 판단된다.