

Research Paper

## 석탄 가스화 용융 슬래그를 혼합잔골재로 활용한 매스 콘크리트 수화열 저감

# Reduction of Hydration Heat of Mass Concrete Using Coal Gasification Slag as Mixed Fine Aggregates

한민철<sup>1</sup> · 김종<sup>2</sup> · 최일경<sup>3</sup> · 한준희<sup>4\*</sup>

Han, Min-Cheol<sup>1</sup> · Kim, Jong<sup>2</sup> · Choi, Il-Kyeong<sup>3</sup> · Han, Jun-Hui<sup>4\*</sup>

<sup>1</sup>Professor, Department of Architectural Engineering, Cheongju University, Naduk-Dong, Cheongju-City, 28503, Korea

<sup>2</sup>Assistant Professor, Dept. of Architectural Engineering, Cheongju University, Naduk-Dong, Cheongju-City, 28503, Korea

<sup>3</sup>Eng. D, Dept. of Architectural Engineering, Cheongju University, Naduk-Dong, Cheongju-City, 28503, Korea

<sup>4</sup>Doctor's Course, Dept. of Architectural Engineering, Cheongju University, Naduk-Dong, Cheongju-City, 28503, Korea

\*Corresponding author

Han, Jun-Hui

Tel : 82-43-229-8480

E-mail : gksehxhf@naver.com

Received : August 23, 2021

Revised : September 24, 2021

Accepted : November 23, 2021

### ABSTRACT

In this study, to suggest an efficient method of using coal gasification slag(CGS), a byproduct from integrated gasification combined cycle(IGCC), as a combined fine aggregate for concrete mixture, the diverse performances of concrete mixtures with combined fine aggregates of CGS, river sand, and crushed sand were evaluated. Additionally, using CGS, the reduction of the hydration heat and the strength developing performance were analyzed to provide a method for reducing the heat of hydration of mass concrete by using combined fine aggregate with CGS and replacing fly ash with cement. The results of the study can be summarized as follows: as a method of recycling CGS from IGCC as concrete fine aggregate, a combination of CGS with crushed sand offers advantages for the concrete mixture. Additionally, when the CGS combined aggregate is used with low-heat-mix designed concrete with fly ash, it has the synergistic effect of reducing the hydration heat of mass concrete compared to the low-heat-designed concrete mixture currently in wide use.

**Keywords :** integrated gasification combined cycle, coal gasification slag, fly-ash, hydration heat

## 1. 서론

전 세계적으로 2018년 10월 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)에서 승인한 ‘지구온난화 1.5°C 특별보고서’에 따라 이산화탄소(CO<sub>2</sub>) 배출량을 2030년까지 2010년 대비 최소 45% 이상 감축하여야 하고, 2050년까지 전 지구적으로 탄소 순 배출량이 “0”이 되는 탄소중립이 부각되고 있다. 이에 따라 국내의 탄소 중립 순환경제 및 환경 부하 저감을 위한 기술 개발이 전 분야에 걸쳐 활발하게 이루어지고 있다[1,2].

따라서, 국내는 2018년부터 기존의 석탄 화력발전의 사용과 관련된 여러 문제들을 해결하고, 환경 부하 저감 측면에서 적합하면서도 경쟁력 있는 새로운 석탄 이용 기술인 Figure 1과 같은 석탄 가스화 복합발전(Inte-grated Gasification Combined Cycle: 이하IGCC)을 도입하였다[3]. 이러한 IGCC 기술은 고온·고압 하에서 석탄을 산소 및 수증기와 반응시켜 합성가스를 생산하고, 이를 연료로 가스터빈을 돌리는 가스화 발전과 아울러 가스화 과정의 열로 증기터빈을 구동하는 친환경 복합발전 시스템이다[4,5].

그러나 IGCC에서는 석탄회가 고온·고압에 용융되면서 슬래그의 형태로 배출되는 부산물인 석탄 가스화 용융 슬래그



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

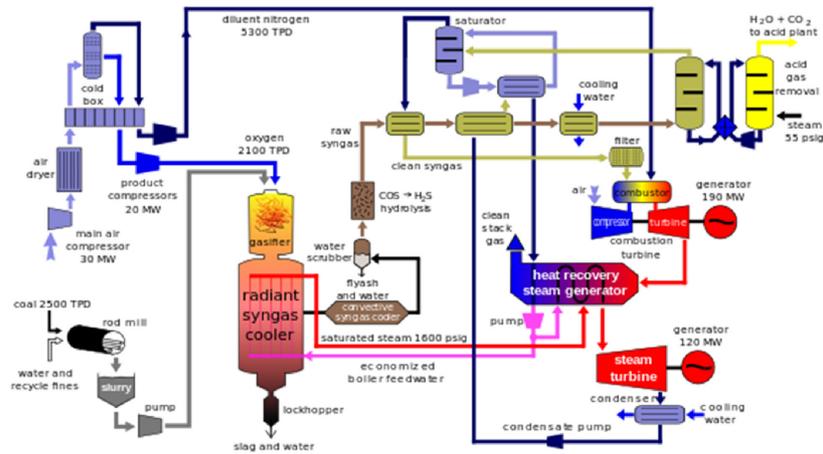


Figure 1. Flowchart of integrated gasification combined cycle

(Coal Gasification Slag, 이하 CGS)가 연간 약 8~10만 가량 발생하고 있다[6]. 부산물인 CGS는 부가가치 있는 활용 용도를 찾지 못하여 시멘트 원료 혹은 폐기처분되고 있는 실정이다.

이에 대한 대안으로 CGS를 콘크리트 골재로서의 활용하는 방안에 대하여 Park et al.[7], Park et al.[8], Yoshitaka et al.[9] 및 Acosta[10] 등이 진행한 바 있다. CGS를 콘크리트 잔골재로의 활용함에 따라 유리질 및 구형 입자 등의 영향으로 유동성이 증가하며[11,12], 미연소탄분의 영향으로 공기량은 감소하는 경향으로 보고된 바 있다[13-16].

Park et al.[15]은 CGS의 화학적 구성 물질 중 붕소(B)를 화합물의 형태로 함유하고 있다는 것을 보고한 바 있으며, 이러한 붕소 화합물은 Metin[17] 및 Lee et al.[18]의 연구 결과 콘크리트의 응결지연 및 수화반응을 지연시키는 특성이 있다고 보고하고 있어, 이를 활용하여 CGS를 콘크리트용 원재료로서 붕소화합물에 의한 수화열 저감 효과가 기대된다.

한편, 중전 수화열 저감 공법은 대부분 광물질 혼화재료를 다량으로 시멘트에 치환하는 결합재 개념으로 성취하고 있는 상황에서 비용대비 효율성 측면에서 CGS를 골재로서 활용 시 추가적인 수화열 저감효과를 기대할 수 있을 것으로 판단된다[19].

그러므로 본 연구에서는 IGCC에서 발생하는 부산물인 CGS를 콘크리트의 원재료로서 효율적으로 활용하기 위한 방안을 제안하기 위하여 기존 매트 콘크리트의 수화열 저감을 위하여 활용되는 플라이애시 기반 저발열 결합재시스템에 CGS를 잔골재로 치환하여 이들의 조합이 수화열 저감 효과에 미치는 영향을 분석하고 수화열 해석을 통하여, CGS 골재조합에 의한 현장 매트 매스 콘크리트 수화열 저감 공법 개발에 기여 하고자 한다.

## 2. 열전달해석 및 열응력해석

본 절에서는 수화열 해석 프로그램을 이용하여 현장의 매트 기초에 적용할 매트콘크리트의 수화열 해석은 먼저, 구조물의 열적조건(발열특성 및 대류경계조건)에 의하여 구조물내의 온도분포를 산정하고, 산정된 온도이력을 온도하중의 형태로 응력해석에 입력하여 구조물에서 발생하는 온도응력을 구하는 순서로 이루어진다. 이때, 콘크리트의 특성상 재료의 열적 특성치(열용량, 열전달률)를 아래와 같이 산정하였으며, 물리적 특성치는 실험측정치를 사용하였다.

### 2.1 전도 및 대류

온도이력 해석에서 전도는 Byron Bird et al.[20] 이론을 기본으로 하였고, 콘크리트의 표면에서 발생하는 대류에 의한 열전달은 식 (1)의 식에 의해서 열전달 해석을 고려하였다[21].

$$h_c^2 = \frac{\lambda_c}{C_c \rho} \quad (1)$$

$$h_c^2 : \text{열확산율(m}^2/\text{s)} \quad C_c : \text{비열(J/kg}^\circ\text{C)}$$

$$\lambda_c : \text{열전도율(W/m}^\circ\text{C)} \quad \rho : \text{밀도(kg/m}^3\text{)}$$

## 2.2 열전달계수 산정

수화열 해석 과정에서 노출, 거푸집 접촉 등 타설 후 양생조건의 대류경계조건을 정의하게 되는데, 이는 콘크리트의 표면 부위의 적용조건 등에 따라 열전달 해석결과가 다르게 나타나는 것을 고려하기 위함이다. 따라서, 외기에 노출된 경우는 식 (2)를 이용하고, 거푸집 접촉면은 식 (3)을 적용하였으며, 풍속은 평균 1~2m/s로 가정하여 산정하였다[21-23].

$$h_\alpha = 9.60 + 1.12\nu \quad (2)$$

$$h_\alpha = 5.92 + 1.43\nu \quad (3)$$

$$h_\alpha : \text{외기대류계수(kcal/m}^2 \text{ hr } ^\circ\text{C)} \quad \nu : \text{풍속(m/s)}$$

## 2.3 탄성계수 산정

온도응력을 추정하기 위해서는 재령의 영향을 고려한 콘크리트의 유효탄성계수는 콘크리트 부재단면 내의 평균탄성계수에 크리프, 응력이완 등에 의한 강성저하를 적절히 고려하여 정하여야 한다. 하지만, 유효탄성계수 추정방법 대신에 더 간편하게 근사값으로 구하고자 한국건설기준센터(KCSC) 표준시방서에 제시되어있는 식 (4)를 사용할 수 있다[21].

$$E_c(t) = \psi(t) \times 8,500 \sqrt[3]{f_{cm}(t)} \quad (4)$$

$$E_c(t) : \text{재령 } t \text{ 일에서 유효탄성계수(MPa)} \quad \text{재령 3일 까지 : } \psi(t) = 0.73$$

$$\psi(t) : \text{온도가 상승할 때 크리프 영향이 커짐에 따른 탄성계수의 보정계수} \quad \text{재령 5일 이후 : } \psi(t) = 1.0$$

$$\text{재령 3일에서 5일까지는 직선보간법으로 구함.}$$

## 2.4 단열온도상승 시험

콘크리트 단열온도 상승곡선의 특성은 사용하는 시멘트의 종류, 단위시멘트량, 콘크리트 타설시의 온도 등에 따라 다르다. 일반적으로 콘크리트의 단열온도 상승량은 단열온도 상승시험 등을 통하여 구하는 것을 원칙으로 한다. 콘크리트 단열온도 상승 특성은 콘크리트 타설이 끝난 후, 콘크리트 내부의 온도변화를 해석하기 위한 기본적인 정수이며, 일반적으로 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다[21,22].

$$Q(t) = Q_\infty (1 - e^{-rt}) \quad (5)$$

$Q(t)$  : 재령  $t$  일에서 단열온도상승량(°C)

$r$  : 온도상승속도로써 시험에 의해 정해지는 계수

$Q_{\infty}$  : 최종단열온도상승량(°C)으로서 시험에 의해 정해지는 계수

### 3. 실험계획 및 방법

#### 3.1 실험계획

실험계획은 Table 1과 같고, 배합사항은 Table 2와 같다. 먼저, 배합 요인으로 물 결합재비(W/B)는 50%에 대하여 보통 포틀랜드 시멘트(Ordinary Portland Cement : 이하 OPC)와 석산 부순 잔골재(이하 CS)에 플라이애시(Fly-Ash : 이하 FA)와 CGS를 치환하지 않은 경우를 Plain으로 하여, 배합 설계한 다음 모든 실험변수에 동일하게 적용하였다.

Table 1. Experimental plan

Factors		Levels		
Mixtures	W/B (%)	1	50	
	Binder compositions(%)	2	OPC : FA = 100 : 0 <sup>1)</sup>	
			OPC : FA = 70 : 30	
	Aggregate types	Coarse aggregate	1	CG
		Fine aggregate	2	CGS CS <sup>2)</sup>
CGS <sup>3)</sup> contents(%)	2	0	50	
Experi-ment	Hardened concrete	1	Adiabatic temperature rise test	
	Analysis of heat of hydration	2	Temperature History Thermal Stress	

1) Plain(OPC=100) 2) Crushed sand 3) Coal gasification slag

Table 2. Mixture proportions of concretes

FA (%)	CGS (%)	Unit weight(kg/m <sup>3</sup> )						AE/C (%)	SP/C (%)
		W	OPC	FA	CG	CS	CGS		
0	0	180	360	0	868	849	0	0.1	0.15
	50	180	360	0	868	425	424		
30	0	180	252	108	852	832	0		
	50	180	252	108	852	416	416		

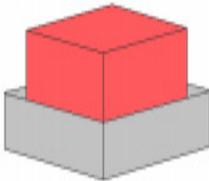
결합재는 OPC 및 FA를 사용하였는데, FA의 치환율은 시멘트 중량에 대해 0, 30%의 2수준으로 계획하였다. 골재의 실험 수준은 CS를 단독으로 사용한 경우와 CGS를 표준 입도분포 범위에 만족하도록 입도 조정한 것을 0, 50%인 2수준으로 치환함으로써 FA가 치환된 콘크리트에 미치는 영향을 복합적으로 검토하였다.

수화열 측정시험체의 경우는 기존 연구의 시험결과[19]를 토대로 간이단열온도상승 실험을 통해 도출된 수화열 저감 성능이 우수한 배합을 선정하여 저발열 결합재 및 CGS 골재의 최적 조합 1개와 여타 성능 비교를 위한 비교군 3개의 총 4개 조합에 대하여 단열온도상승 특성을 분석하였다. 더불어 기초 매트 콘크리트의 실무적용을 위한 일환으로 수화열 해석 프로그램인 Midas gen을 이용한 시뮬레이션 통해 콘크리트 온도분포, 온도이력 및 온도응력을 검토하고자 하였다.

### 3.2 수화열 해석 모델

Table 3은 수화열 해석 모델링로 해석모델의 대칭성을 고려하여 매스 콘크리트 (20m×15m×1m)와 지반(24m×20m×3m)의 1/4 대칭 모델을 이용하여 매스 콘크리트에서 발생하는 수화열의 온도분포와 응력분포를 확인하는 것으로 하였다. 또한, 타설방법으로서 매스 콘크리트를 1m 두께로 일체타설하는 경우를 고려하였는데, 측정 1시간 간격으로 총 72시간 측정하는 것으로 하였다. 지반은 비열과 열전도율을 가진 부재 재질로 정의하였으며, 콘크리트에서 발생한 열이 지반으로 전달되도록 하였고, 모델링한 지반 위에 매스 콘크리트를 올려 해석모델을 구성하였다. 또한, 해석 모델링 세부사항은 재료특성 값은 Table 4와 같다.

**Table 3.** Hydration heat analysis design

Construction stage	1/4 Shape of hydration heat analysis model	modeling
Monolithic placemen		Mass concrete size : 20m×15m×1m Ground size : 24m×20m×3m Admixture OPC : FA = 100 : 0 OPC : FA = 70 : 30 Fine aggregate CS : CGS = 100 : 0 CS : CGS = 50 : 50

**Table 4.** Physical and mechanical properties of each Mixtures

Physical property of material	FA0 CGS0	FA0 CGS50	FA30 CGS0	FA30 CGS50	Ground
Specific heat(kcal/N°C)	0.025	0.025	0.025	0.025	0.02
Density(N/m <sup>3</sup> )	23000	23000	23000	23000	17000
Heat conduction(kcal/m hr °C)	2.3	2.3	2.3	2.3	1.7
Convection coefficient(kcal/m <sup>2</sup> hr °C)	12	12	12	12	12
Outdoor temperature(°C)	12.5	12.5	12.5	12.5	-
Concrete temperature(°C)	20	20	20	20	-
Compressive strength at 91 days(MPa)	42.3	52.0	49.8	42.6	-
Compressive strength index	a=4.5, b=0.95	a=4.5, b=0.95	a=7.45, b=0.97	a=7.45, b=0.97	-
Modulus of elasticity(N/mm <sup>2</sup> )	29616	31726	31272	29686	980
Coefficient of expansion	1.0×10 <sup>-5</sup>	1.0×10 <sup>-5</sup>	1.0×10 <sup>-5</sup>	1.0×10 <sup>-5</sup>	-
Poisson's ratio	0.18	0.18	0.18	0.18	0.2
Unit Weight of cement(kg/m <sup>3</sup> )	360	360	252	252	-
Maximize adiabatic temperature(k)	k =53.7	k =45.2	k =42.8	k =39.7	-
Reactive velocity coefficient(α)	α =1.33	α =1.50	α =1.16	α =1.24	-

### 3.3 사용재료

본 연구의 사용재료로서 OPC는 국내 A사산 1종을 사용하였고, 혼화재로서 FA는 국내 M사산을 사용하였으며, 그 물리적 성질은 Table 5와 Table 6과 같다. 골재는 부순 굵은골재(이하 CG)와 석산 잔골재(이하 CS)는 국내 석산에서 생산된 것을 사용하였다. CGS는 국내 T화력발전소에 건설된 IGCC에서 발생하는 것으로 주 1회씩 6주를 매주 샘플링하여 총 6회분을 1개 시료로 하여 사용하였는데, 그 물리적 성질은 Table 7과 같고 사용 골재의 입도분포는 Figure 4와 같다.

**Table 5.** Physical properties of cement

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

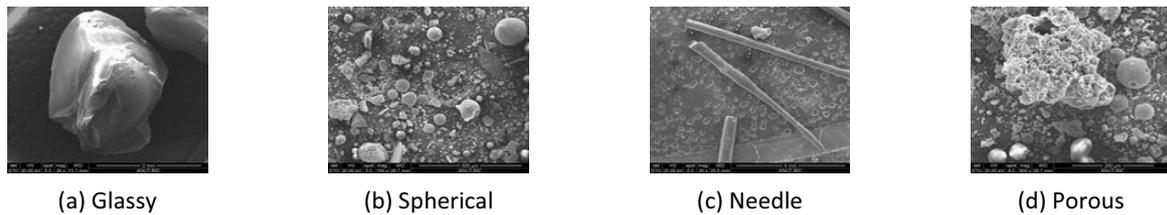
**Table 6.** Physical properties of fly ash

Density(g/cm <sup>3</sup> )	Blaine(cm <sup>2</sup> /g)	L.O.I(%)	Moisture content(%)	Activity index(%)	
				28 days	91 days
2.24	3 543	2.2	0.1	90.3	96.3

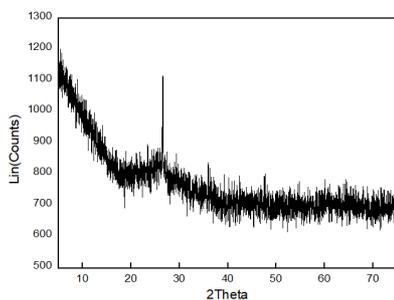
**Table 7.** Physical properties of aggregates

Type	Density(g/cm <sup>3</sup> )	Water absorption ratio(%)	Passing ratio of 0.08 mm sieve(%)	F.M	Soundness(%)
CG	2.63	0.36	0.13	6.71	-
CS	2.63	1.57	2.28	2.71	-
CGS	2.61	3.49	3.44	3.16	3.0

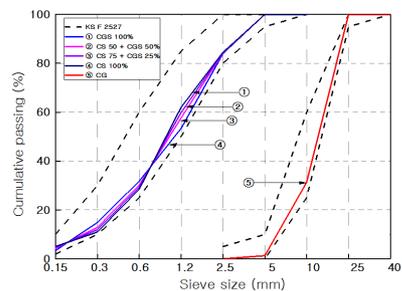
CGS의 형상 및 결정구조로 먼저, Figure 2와 같이 SEM 관찰 결과 크게 4가지 형태의 결정들이 관찰되며, (a) 유리질, (b) 구형, (c) 침상형, (d) 다공형의 입자로 관찰되었다. CGS의 결정구조는 XRD 분석결과 Figure 3과 같이 약 10°~40°에서 비정질 회절강도를 나타내는 것이 특징이며, 이 반치폭이 넓은 비정질 회절강도의 중심은 25°~30° 부근에 위치한다. 이를 통해 IGCC의 부산물인 CGS는 비정질 상으로 이루어진 것을 확인할 수 있었다.



**Figure 2.** Grain shape of CGS



**Figure 3.** XRD pattern of CGS



**Figure 4.** Grading curve of crushed coarse aggregate(CG), crushed sand(CS) of aggregate and CGS contents

화학적 특성은 XRF 분석을 통하여 Table 8과 같으며, 주성분은 SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO로 확인되었다. 또한, Table 9는 유해물질 함유량 및 용출량 시험 결과로 유해물질 용출량 및 함유량 결과에서는 유해물질 용출량에서 불소(F) 및 붕소(B)의 용출량이 상대적으로 높았으며, 이는 콘크리트의 응결지연을 야기할 수 있으므로 지속적인 샘플링을 통한 충분한 검토가 필요할 것으로 사료된다.

**Table 8.** Chemical composition of CGS(wt%)

	SiO <sub>2</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O
CGS	46.5	18.1	22.9	2.2	0.3	6.3	0.5

**Table 9.** Harmful substances elution or content

Series	Cd	Pd	Cr <sup>6+</sup>	As	Hg	Se	F	B
Elution (mg/L)	0.01 <	0.01 <	0.05 <	0.01 <	0.0005 <	0.01 <	0.8 <	1.0 <
Content (mg/kg)	150 <	150 <	250 <	150 <	15 <	150 <	4000 <	4000 <
	0.41	0	0	1.94	0	0	4.50	0.34

### 3.4 실험방법

본 연구의 실험방법 및 세부사항으로 CGS의 형상 및 화학적 특성을 분석하고자 원재료 및 재령 7일 모르타르 시편을 분쇄 후 0.08mm로 체가름하여, 미시적 분석으로 F사 Quanta 400을 사용하여 SEM(Scanning Electron Microscopy)사진을 관찰하였으며, 수화생성물 확인을 위해 Bruker사의 D8ADVANCE 장비를 사용하여 전압 40kV, 전류 40mA, Scan speed: 1sec, Diverging slit 0.5°, Receiving slit 0.2mm, Scatter slit 1.0°로 XRD(X-Ray Diffraction)를 측정하였다.

또한, CGS 수화열 저감 성능을 확인하고자 단일온도상승시험으로 Marui사의 MIT-686-3-01을 사용하였으며, 콘크리트 내부와 외부센서의 평균 온도차를 ± 1°C로 제어하며, 50l 표본용기에 콘크리트 시료의 수화열 상승에 따라 최고온도까지 15분 간격으로 160시간을 측정하였다.

## 4. 실험결과 및 분석

### 4.1 단일온도상승시험

단일온도상승 시험은 타설온도는 각 배합 공히 20°C로 하여 수행하였으며, 단일온도상승 특성 분석 및 평가를 위하여 기존에 사용되고 있는 식 (5)를 이용하여 Table 10과 같은 결과를 도출하였다.

**Table 10.** Adiabatic temperature rise test results  $k$  and  $\alpha$

Series	$Q = k(1 - e^{-\alpha t})$		
	$k$	$\alpha$	R <sup>2</sup>
FA0 CGS0	53.7	1.33	0.981
FA0 CGS50	45.2	1.50	0.978
FA30 CGS0	42.8	1.16	0.989
FA30 CGS50	39.7	1.24	0.984

Figure 5의 (a) 및 (b)는 CGS 잔골재 치환 유무에 따른 콘크리트의 단열온도상승시험 측정치 및 제안식 (5)에 의한 결과를 나타낸 것이다. (a)의 경우는 OPC100(FA0CGS0)으로 타설 후 약 79시간 후에 최고온도는 53.7°C로 나타났으며, (b)의 경우 CGS를 잔골재로 50%치환한 경우로 타설 후 약 91시간 후에 최고온도 45.2°C로 나타났다. 이는 Plain인 (a) 대비 8.5°C 감소로 사용한 결합재가 동일하기 때문에 결합재의 요인은 배제되며 CGS 골재의 영향으로 판단된다.

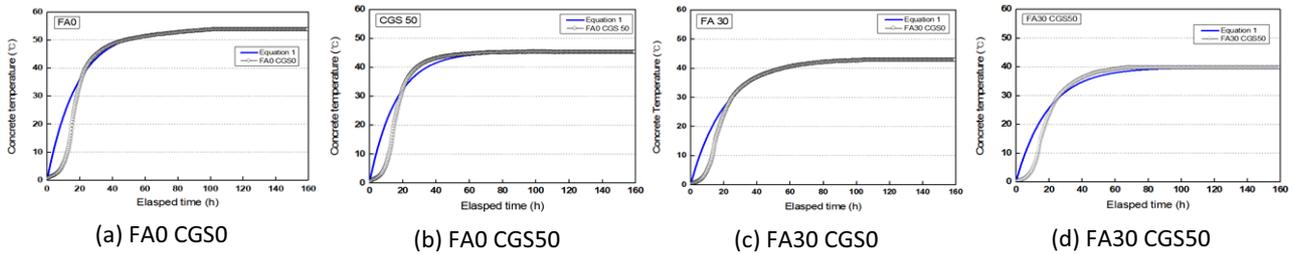


Figure 5. Properties of Adiabatic Temperature Rise according to Equation 1

즉, CGS에 함유된 붕소(B)가 용출되어 시멘트의 수화반응을 억제하는 것으로 예측된다. 이는 Davraz[23]의 연구결과로 붕소 화합물은 시멘트 입자에 불투수성 막(CBH6)을 형성하여 시멘트의 수화반응을 지연시키며, 이와 더불어 Glinicki et al.[24] 및 Antolik et al.[25]의 연구결과에 따르면 Ulexite와 같은 붕소 화합물은 시멘트의 수화반응을 억제하여 응결지연 효과가 있다.

이에 따라 본 연구진은 Figure 6과 같이 CGS 치환한 콘크리트의 붕소 화합물의 존재 여부를 확인하기 위하여, CGS 혼입한 재령 7일 수중 양생한 모르타르 경화체의 시료를 채취하여 XRD 분석을 실시한 것이다. 그 결과 시료의 구조는 비정질 구조 형태를 나타내며, 붕소 화합물 NaCaB<sub>5</sub>O<sub>6</sub>(OH)<sub>6</sub>·5H<sub>2</sub>O(Ulexite)의 피크인 34.47°, 43.69°, 47.05°, 52.23°의 2 Theta를 확인할 수 있었다.

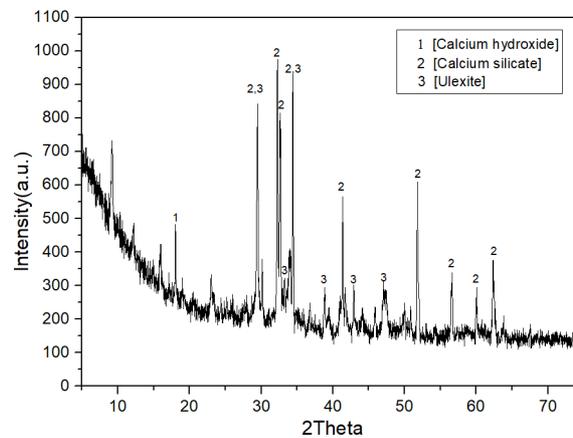


Figure 6. Analysis of concrete XRD according to CGS

다음으로 Figure 5의 (c)는 FA 30%를 치환한 경우로서 타설 후 약 105시간 후에 최고 단열온도가 42.8°C로 나타났으며, Plain인 (a) 대비 12.9°C 감소하는 것으로 나타났다. 이는 단위시멘트량의 감소 및 저발열 결합재인 FA의 수화발열 지연효과 등이 복합적으로 작용함에 기인한 것으로 판단된다. Figure 5의 (d)는 FA30% 및 CGS50%를 복합 치환한 경우로 타설 후

약 130시간 후에 최고온도는 39.7°C로 나타났으며, Plain (a)의 최고온도 53.7°C보다 수화열이 14°C 감소하는 것으로 나타났다. 이를 통해 FA 및 CGS를 복합치환 시 초기수화반응이 지연되며, 발열량 및 발열속도가 감소하는 것을 알 수 있다.

### 4.2 온도이력 해석 결과

Figure 7은 콘크리트 타설 시 예상기온, 콘크리트 온도 및 양생 등의 변수를 가정하여 모든 배합에 대하여 수화열 해석결과를 나타낸 것이다. 먼저, (a) 및 (b)는 Plain(FA0% CGS0%) 배합에 대한 수화열 해석에 따른 온도이력 결과로 타설시간 36시간에 약 48.0°C의 최고온도를 기록하였으며, 표면부 온도는 17.5°C로 기록되어, 중앙부와의 온도차이가 30.5°C로 예상되었다. Figure 7의 (c) 및 (d)는 위와 동일한 요령으로 CGS를 잔골재로 50%로 치환한 배합에 대한 수화열 해석 결과이다. 타설시간 32시간에 43.3°C의 최고온도를 기록하였으며, 표면부 온도는 17.3°C로 기록되어 중앙부와의 온도차이는 26.0°C로 예상되었다.

Figure 7의 (e) 및 (f)는 저발열 결합재 FA 30% 치환한 배합에 대한 수화열 해석 결과로 타설시간 38시간에 39.7°C의 최고 온도를 기록하였으며, 표면부 온도는 16.3°C로 기록되어 중앙부와의 온도차이는 23.3°C로 예상되었다.

Figure 7의 (g) 및 (h)는 저발열 결합재 FA30% 및 CGS를 잔골재로 50% 치환한 배합에 대한 수화열 해석 결과이다. 먼저, 타설시간 36시간에 38.2°C의 최고온도를 기록하였으며, 표면부 온도는 16.2°C로 기록되어 중앙부와의 온도차이는 약 22.0°C로 예상되었다. Plain에 비해 CGS를 잔골재로 치환 시 부재 내부의 온도 저하에 따른 균열저감이 예상되며, 저발열 결합재와 복합 치환한 경우 더 효과적인 것으로 나타났다.

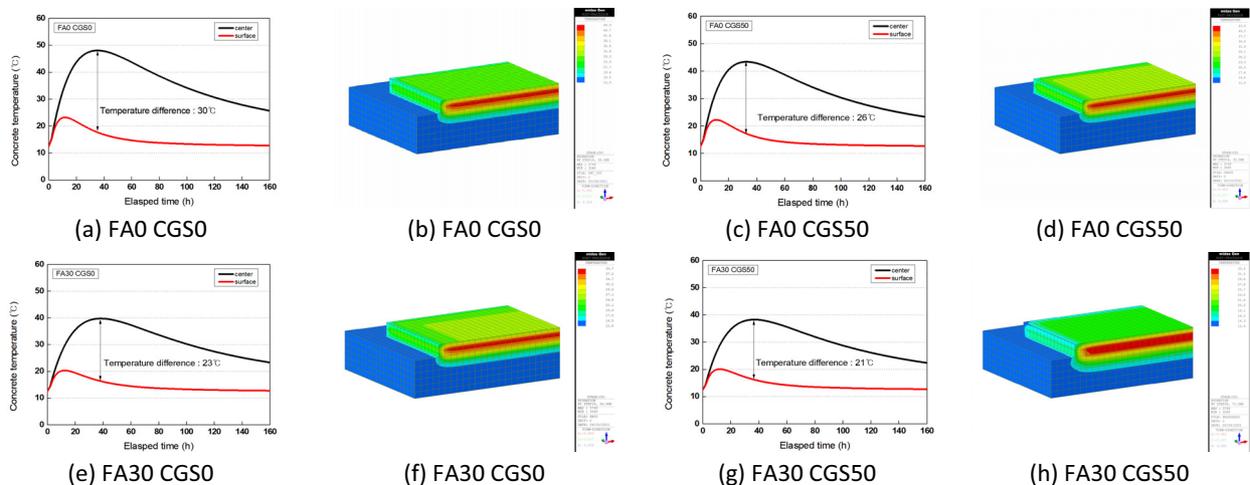


Figure 7. Temperature distribution and history

### 4.3 온도응력 해석 결과

매스콘크리트는 타설후 시간이력에 따라 발생하는 수화열에 의해 압축응력과 인장응력이 발생하게 된다. Figure 8은 시간 경과에 따른 배합조합 및 부위별 온도응력발현 성상을 나타낸 것이다. 먼저, 전반적으로 모든 배합에서 최고온도 차이가 가장 큰 구간에서 표면부의 최대 인장응력을 나타내며, 시간이 경과한 후에는 다시 인장응력도 감소하는 경향이 있음을 알 수 있다. Figure 8의 (a) 및 (b)는 Plain(FA0% CGS0%) 배합에 대한 수화열 해석에 따른 온도응력 결과로 타설시간 22시간부터 표면부의 인장응력이 허용응력을 초과하여 36시간 전후까지 유지되는 것으로 나타나 이 기간동안에는 온도균열 제어수준을 벗

어나는 것으로 나타나 균열발생 위험성이 큰 것을 확인할 수 있었다.

Figure 8의 (c) 및 (d)는 위와 동일한 요령으로 CGS를 잔골재로 50% 치환한 배합에 대한 수화열 해석에 따른 온도응력 결과이다. 먼저 표면부의 인장응력이 허용응력을 초과하지는 않는 것으로 나타났으나, 현장조건 등의 외부요인으로 이하여 표층부 균열발생이 우려됨으로 현장적용시 균열방지 대책을 강구해야할 것으로 판단된다.

Figure 8의 (e) 및 (f)는 저발열 결합재 FA 30% 치환한 배합이며, (g) 및 (h)는 저발열 결합재 FA30%와 CGS를 잔골재로 50% 치환한 배합에 대한 수화열 해석에 따른 온도응력 결과이다. 두 배합 모두 표층부 및 중심부의 온도응력이 전 재령에 걸쳐 허용응력 범위 이내로 나타나 균열발생 위험성은 크지 않음을 확인할 수 있었다.

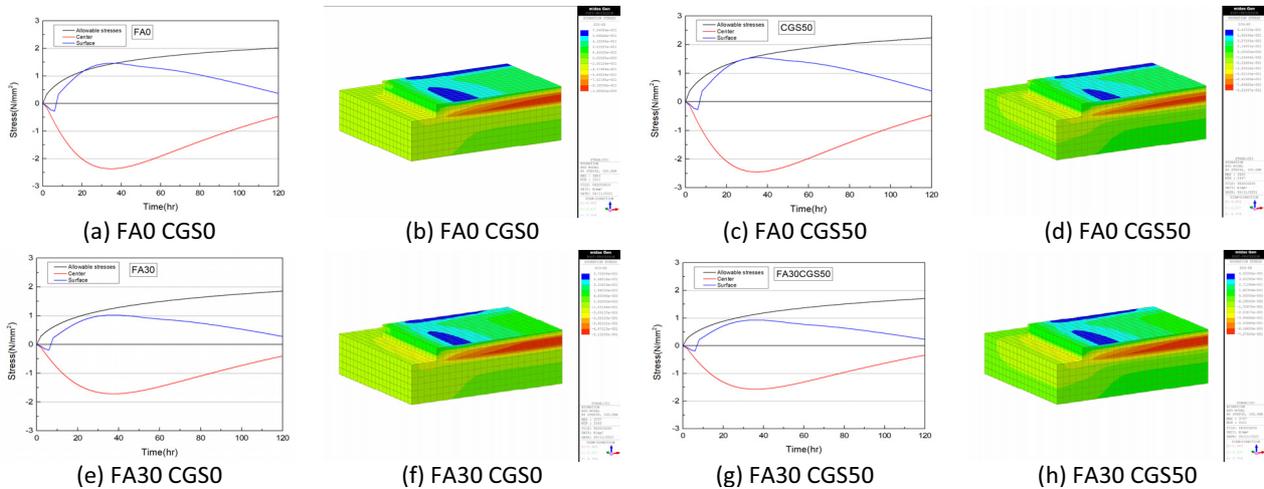


Figure 8. Stress and allowable tensile stress

## 5. 결론

본 연구에서는 IGCC에서 발생하는 부산물인 CGS를 콘크리트용 혼합 잔골재로써 효율적으로 활용하는 방안을 제시하기 위하여 매스 콘크리트의 수화열 저감 효과를 확보하기 위한 방안으로 CGS 기반 혼합잔골재와 플라이애시 치환에 따른 수화열 저감 특성 분석 및 수화열 해석을 실시하였는데, 이를 종합적으로 요약한 결과를 아래와 같이 제시하고자 한다.

- 1) 단일온도상승 시험결과 일반 콘크리트보다 CGS를 50% 잔골재로 치환 시 붕소 화합물에 의해 수화열이 감소하는 것으로 판단되며, CGS 50% 및 FA 30%로 복합치환 시 수화열 저감 효과가 가장 높은 것으로 나타났다.
- 2) 수화열 해석 결과 Plain에 비해 CGS를 잔골재로 치환 시 부재 내부의 온도저하에 따른 균열저감이 예상되며, CGS 및 저발열 결합재를 사용 시 부재 내부의 수화열 저감에 효과가 있으며, 저발열 결합재 FA 30%와 CGS를 잔골재로 50% 치환한 배합이 수화열 저감에 효과적인 것으로 나타났다.
- 3) 수화열 해석에 따른 온도응력 결과이다. CGS 50% 치환 및 저발열 결합재 모두 표층부 및 중심부의 온도응력이 허용응력 범위 이내로 나타났으며, 저발열 결합재 FA 30% 및 CGS 50%를 잔골재를 복합 치환한 배합에서 표층부 및 중심부의 온도응력이 허용응력 범위 이내로 나타나 균열발생 위험성은 크지 않음을 확인할 수 있다.

이상을 종합하면 매스 콘크리트의 수화열 저감을 위하여 활용되는 플라이애시 기반 저발열 결합재에 CGS를 잔골재로 치환하여 사용할 경우 저발열 결합재 FA를 단일 치환한 경우보다 복합상승 효과에 따라 수화열 저감 성능이 더 크게 나타났다. 따라서 산업부산물인 CGS 골재 조합에 플라이애시를 복합 치환한 분체-골재조합 재료 시스템은 매스 콘크리트 수화열 저감 공법의 효율적인 대안으로서 활용이 기대된다.

## 요약

본 연구에서는 IGCC에서 발생하는 부산물인 CGS를 콘크리트용 혼합 잔골재로써 효율적으로 활용하는 방안을 제시하기 위하여 플라이애시 치환 매스 콘크리트의 수화열 저감 효과를 확보하기 위한 방안으로 CGS 기반 혼합 잔골재와 플라이애시 치환에 따른 수화열 저감 특성 분석 및 해석을 실시 하고자 한다. 따라서, 매스 콘크리트의 수화열 저감을 위하여 활용되는 플라이애시 기반 저발열 결합재에 CGS를 잔골재로 치환하여 최적의 조합으로 FA 30% 및 CGS를 잔골재로 50% 치환할 경우 저발열 결합재 FA를 단일 치환한 경우보다 복합상승 효과에 따라 수화열 저감 성능이 더 크게 나타났다. 따라서 산업부산물인 CGS 골재 조합에 플라이애시를 복합 치환한 분체-골재조합 재료 시스템은 매스 콘크리트 수화열 저감 공법의 효율적인 대안으로서 활용이 기대된다.

키워드 : 석탄가스화발전, 석탄가스화발전 용융 슬래그, 플라이애시, 수화열

## Funding

Not applicable

## ORCID

Min-Cheol Han,  <https://orcid.org/0000-0002-2555-673X>

Jong Kim,  <https://orcid.org/0000-0001-9802-3726>

Il-Kyeung Choi,  <https://orcid.org/0000-0002-7365-1272>

Jun-Hiu Han,  <https://orcid.org/0000-0002-4655-3001>

## References

1. Lee HK, Woo YM, Lee MJ. The needs for R&D of ammonia combustion technology for carbon neutrality - Part II R&D Trends and technical feasibility analysis. *Journal of the Korean Society of Combustion*. 2021 Mar;26(1):84-106. <http://doi.org/10.15231/jksc.2021.26.1.084>
2. Park WK, Ku TY, Lee IW. Energy maestro and development Status of the DNA-oriented energy – ICT technology for carbon neutrality. *Electronics and Telecommunications Trends*. 2021 Feb;36(1):109 – 19. <https://doi.org/10.22648/ETRI.2021.J.360112>
3. Lee JW, Yoo YD, Yun YS. Research and development & commercial deployment status for coal gasification technology - Mainly from GTC 2010. *Journal of Energy Engineering*. 2011 Jun;20(2):123-42. <http://dx.doi.org/10.5855/ENERGY.2011.20.2.123>
4. Kim CK. A study on the power generation compared to the capacity of power generation facilities by energy sources in summer season. *Journal of the Korean Institute of Gas*. 2019 Feb;23(1):36-40. <https://doi.org/10.7842/kgas.2019.23.1.36>
5. Gerdes K, Stevens R, Fout T, Fisher J, Hackett G, Shelton W. Current and future power generation technologies: pathways to reducing the cost of carbon capture for coal-fueled power plants. *Energy Procedia*. 2014 Nov;63:7541-57. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.11.790>
6. Ku JH. Melting characteristics and generation of slag in coal gasification plant [dissertation]. [Daejeon (Korea)]: Daejeon University; 2019. 63 p.

7. Park KT, Han MC, Hyun SY. Engineering properties of concrete using of coal gasification slag as the fine aggregates. *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*. 2019 Sep;7(3):194-201. <https://doi.org/10.14190/JRCR.2019.7.3.194>
8. Park KT, Han MC, Hyun SY. Properties of lean mixed mortar with various replacement ratio of coal gasification slag. *Journal of The Korean Institute of Building Construction*. 2019 Oct;19(5):391-9. <https://doi.org/10.5345/JKIBC.2019.19.5.391>
9. Yoshitaka I, Fuminori T, Fuminori T. A basic study on application of granulated coal slag collected from integrated coal gasification combined cycle system to fine aggregate for concrete. *Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ)*. 2010 May;75(651):887-93. <https://doi.org/10.3130/aijs.75.887>
10. Acosta A, Iglesias I, Aineto M, Ma Rincon J. Utilisation of IGCC slag and clay steriles in soft mud bricks (by pressing) for use in building bricks manufacturing. *Waste Management*. 2002 Dec;22(8):887-91. [https://doi.org/10.1016/S0956-053X\(02\)00075-2](https://doi.org/10.1016/S0956-053X(02)00075-2)
11. Sin DG. A study on the possibility of coal gasification slag as a concrete admixture [dissertation]. [Chungju (Korea)]: Korea National University of Transportation; 2019. 63 p.
12. Cho HS. A study on the high value-adding method of coal gasification slag as cement binder [dissertation]. [Chungju (Korea)]: Korea National University of Transportation; 2020. 92 p.
13. Choi IK, Han MC. Analysis of fundamental properties and durability of concrete using coal gasification slag as a combined aggregate. *Journal of the Korea Institute of Building Construction*. 2020 Aug;20(4):331-8. <https://doi.org/10.5345/JKIBC.2020.20.4.331>
14. Park KT, Han MC, Hyun SY. Properties of Lean Mixed Mortar with Various Replacement Ratio of Coal Gasification Slag. *Journal of The Korean Institute of Building Construction*. 2019 Oct;19(5):391-9. <https://doi.org/10.5345/JKIBC.2019.19.5.391>
15. Park KT, Han MC, Hyun SY. Analysis the use of concrete fine aggregates of coal gasification slag. *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*. 2019 Jun;7(2):101-8. <http://dx.doi.org/10.14190/JRCR.2019.7.2.101>
16. Park KT, Han MC, Hyun SY. Properties of lean mixed mortar with various replacement ratio of coal gasification slag. *Journal of The Korean Institute of Building Construction*. 2019 Oct;19(5):391-9. <https://doi.org/10.5345/JKIBC.2019.19.5.391>
17. Metin D. Effect of boron compound to cement hydration and controllability of this effect. *ACTAPHYSICA POLONICA A*. 2015 Aug;128(2B):26-33. <https://doi.org/10.12693/APhysPolA.128.B-26>
18. Lee BN, Lee JS, Min JY, Lee JH. Examination of the characteristics of mortar mixed with boron compounds presenting various levels of alkalinity. *Journal of the Korea Concrete Institute*. 2017 Feb;29(1):85-92. <http://dx.doi.org/10.4334/JKCI.2017.29.1.085>
19. Han MC, Choi IK. A study on the fundamental and heat of hydration properties of fly ash replacement concrete mixed with coal gasification slag for fine aggregate. *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction*. 2020 Jan;36(1):155-62. [https://doi.org/10.5659/JAIK\\_SC.2020.36.1.155](https://doi.org/10.5659/JAIK_SC.2020.36.1.155)
20. Byron Bird R, Warren ES, Edwin NL. *Transport phenomen*. 2nd ed. Wisconsin (USA): Wiley; 2006. 928 p.
21. Ministry of Land. *Concrete Standard Specifications*. 5th ed. Seoul (Korea): Korea Concrete Institute; 2016. Chapter 2, Curing; p. 55-7.
22. Korea Concrete Institute. *Explanation of standard specifications for concrete*. 1st ed. Korea (Seoul): Kimoondang Ltd; 2009. 364 p.
23. Davraz M. The effect of boron compounds on the properties of cementitious composites. *Science and Engineering of Composite Materials*. 2010 Mar;17(1):1-18. <https://doi.org/10.1515/SECM.2010.17.1.1>
24. Glinicki MA, Antolik A, Gawlicki M. Evaluation of compatibility of neutron-shielding boron aggregates with Portland cement in morta. *Construction and Building Materials*. 2018 Mar;164:731-8. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.228>
25. Antolik A, Glinicki MA, Gawlicki M. Effect of boron-containing aggregates on setting and hardening of Portland cement mortars. *MATEC Web of Conferences*. 2018 Jun;163:1-6. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201816304003>