

Research Paper

# 분체계 재료조합 및 석탄 가스화 용융 슬래그를 잔골재로 활용한 매스 콘크리트 수화열 저감

## Reducing Hydration Heat of Mass Concrete by Applying Combination of Powdered Materials and CGS as Fine Aggregate

박상원<sup>1</sup> · 한준희<sup>1\*</sup> · 한민철<sup>2</sup>

Park, Sang-Won<sup>1</sup> · Han, Jun-Hiu<sup>1\*</sup> · Han, Min-Cheol<sup>2</sup>

<sup>1</sup>PhD, Dept. of Architectural Engineering, Cheong-ju University, Naduk-Dong, Cheongju, 28503, Korea

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

\*Corresponding author

Han, Jun-Hiu

Tel : 82-43-229-8480

E-mail : gksehxhf@naver.com

Received : December 11, 2023

Revised : January 26, 2024

Accepted : February 5, 2024

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, powdered materials

## 1. 서론

국내에서는 철근콘크리트 구조물의 초고층화 및 대형화에 따라 매스콘크리트 부재의 적용사례가 증가하고 있는 추세이며, 이러한 매스콘크리트 부재는 내부와 외부의 온도차에 의한 온도균열을 방지하기 위하여 설계, 배합, 시공적 측면 등의 다양한 수화열 제어기술이 제안되고 있다.

따라서, 이와 같은 매스콘크리트의 수화열 제어기술은 다양한 공법들이 개발되어 국내 건설 현장에 적용되고 있으며, 대표적으로 Kim et al.[1]의 광물질 혼화재를 통한 저발열 배합을 사용하여 중심부와 표면부 온도차를 제어하는 공법과 Han et al.[2]의 응결지연형 혼화제를 사용하여 온도차이를 최소화하는 온도균열저감 공법과 상하부 콘크리트간의 발열량 및 발열 시간차 조정에 의한 매스콘크리트의 균열제어 공법 등이 있다[3]. 이러한 공법의 수화열 저감 원리는 콘크리트의 배합설계에서 분체계 재료조합과 화학혼화제를 사용하여 전체적인 수화열 저감 및 내부와 외부의 온도차를 축소시켜 온도균열을 방지하는 방식이다.

또한, 매스콘크리트의 수화열 제어기술로 Han and Choi[4]의 광물질 혼화재인 플라이애시와 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.

(Coal Gasification Slag, 이하 CGS)를 콘크리트용 잔골재로 활용하여 콘크리트의 수화열 저감효과가 보고된 바 있다.

이러한 CGS는 친환경 석탄 이용 기술인 석탄 가스화 복합발전(Integrated Gasification Combined Cycle: 이하 IGCC)에서 슬래그의 형태로 배출되는 부산물로 국내·외의 연구진에 의해 CGS를 콘크리트용 잔골재로 사용하기 위한 다양한 선행연구가 진행된 바 있으며, CGS를 콘크리트용 잔골재로써 KS F 2527의 품질 평가 및 콘크리트 기계적 특성에 관한 연구 이루어졌다[5-9]. 특히, 일본의 경우는 Nagataki et al.[6]에 의해 CGS 연구 및 검토과정에서 배합표준이 정리됨과 동시에 실제 규모의 RC 용벽을 제조하여 시공성 검증 및 구조성능 확인이 이루어졌으며, 2020년도에는 IGCC에서 부수적으로 발생하는 슬래그인 CGS를 JIS A 5011-5 규격에 제정하여 그 실용성 및 적용성을 확대하고 있다.

하지만, CGS에 관련하여 국내 연구는 대부분 실험실 규모에서 이루어졌으며, 특히 수화열 저감에 대한 현장 적용성 및 실용화 연구는 미진한 실정이다. 따라서, 본 연구는 Kim[10]의 연구결과에 따른 수화열 저감기술의 상부배합 및 하부배합을 분체계 재료조합 및 CGS를 잔골재로 활용하여, 기존 기술의 성능향상 및 CGS의 활용성 향상에 기여하고자 단열온도상승 시험 및 Mock-up 시험을 통하여 최적의 수화열 저감 성능을 갖는 조합비율을 도출하고, 현장 매트 기초에 대하여 수화열 해석을 실시하였으며, 이를 통해 분체계 재료조합 시멘트와 CGS 골재 조합에 의한 매스콘크리트 수화열 저감의 실용성 및 현장 적용성을 분석하고자 한다.

## 2. 실험계획 및 방법

### 2.1 콘크리트 실험계획

본 연구의 실험계획은 Table 1과 같고 각 실험계획의 배합사항은 Table 2 및 Table 3과 같다. 먼저, 배합요인으로 물-결합재비(W/B)는 45%에 대하여 분체계 재료조합에 따른 시멘트 4종과 CGS 잔골재 치환을 변화에 따라 목표 슬럼프 180±25mm, 목표 공기량 4.5±1.5%를 만족하도록 배합 설계한 다음 모든 실험변수에 동일하게 적용하였다. 분체계 재료조합에 따른 시멘트의 종류는 1성분계 시멘트로 1종 보통 포틀랜드 시멘트(Ordinary Portland Cement 이하; OPC)를 사용하였으며, 저발열성 시멘트인 2성분계 시멘트로 플라이애시 시멘트(Fly Ash Cement 이하; FAC), 고로슬래그 시멘트(Blast Furnace Slag Cement 이하; BFSC) 및 3성분계 시멘트(Ternary Blended Cement 이하; TBC)로 총 4수준으로 선정하였다. 또한, 골재 변수는 일반적으로 유통되는 석산 부순 골재를 굵은 골재로 사용하였으며, Plain으로 양호한 입도의 석산 부순 잔골재에 대하여 CGS 잔골재 치환율을 0, 25, 50%로 3수준의 변수로 계획하였다.

Table 1. Experimental plan

Factors		Levels			
Mixtures	W/B(%)	45			
	Slump(mm)	1	180 ± 25		
	Air content(%)	4.5 ± 1.5			
	Powdered Combinations	Single	1	OPC <sup>a)</sup>	
		Binary	2	FAC <sup>b)</sup>	BFSC <sup>c)</sup>
		Ternary	1	TBC <sup>d)</sup>	
	Aggregate types	Coarse aggregate	1	CG <sup>e)</sup>	
		Fine aggregate	2	CS <sup>f)</sup>	CGS <sup>g)</sup>
	CGS contents(%)	3	0	25	50
	Experiment	Fresh concrete	2	Slump, Air content	
Hardened concrete		2	Compressive strength Adiabatic temperature rise test		

a) Ordinary Portland Cement, b) Fly Ash Cement(OPC:FA=8:2), c) Blast Furnace Slag Cement(OPC:BFSC=6:4), d) Ternary Blended Cement (OPC:BFSC:FA=4:4:2), e) Crushed Gravel Aggregate, f) Crushed Fine aggregate, g) Coal gasification slag

**Table 2.** Physical and mechanical properties of each mixture

W/C (%)	S/a (%)	CGS Content (%)	Unit weight(kg/m <sup>3</sup> )						AE*C (%)	SP*C (%)		
			W	Single	Binary		Ternary	CG			CS	CGS
				OPC	FAC	BFSC	TBC					
45	47	0	175	389				915	793		0.0029	0.40
			175		389			902	782	0	0.012	0.34
			175			389		907	786		0.0032	0.28
			175				389	896	777		0.016	0.22
		25	175			389		909	591	197	0.06	0.28
			175				389	897	582	194	0.072	0.28
		50	175			389		902	387	387	0.065	0.25
			175				389	909	390	390	0.055	0.20
			175					896	385	385	0.085	0
			175					896	385	385	0.085	0

**Table 3.** Mixture proportions of mock-up test

W/C (%)	S/a (%)	CGS Content (%)	Unit weight(kg/m <sup>3</sup> )						AE*C (%)	SP*C (%)		
			W	Single	Ternary		CG	CS			CGS	
				OPC	TBC							
45	47	0	175	389				915	793		0.0029	0.40
			175			389		896	777	0	0.016	0.22
			175				389	896	385	385	0.085	0

실험사항으로 콘크리트의 제반 물성으로 슬럼프 및 공기량을 측정하고, 단열온도상승시험은 매스콘크리트의 현장타설 시 표면부에 노출된 콘크리트의 외기조건에 의한 열손실을 고려하여 상부배합인 1성분계 시멘트(OPC)에서는 CGS 잔골재의 치환율에 따른 단열온도상승시험은 진행하지 않으며, 하부배합인 2성분계 및 3성분계 시멘트(FAC, BFSC, TBC)에서만 CGS 치환율에 따른 단열온도상승 시험을 진행하는 것으로 하였다.

### 2.2 모의부재 시험계획

다음으로 Table 1의 실험결과를 토대로 분체계 재료조합 및 CGS 치환율에 따른 상부 및 하부배합의 최적 혼합비율을 도출하여, Table 4와 같이 모의 부재 실험에 적용하는 것으로 계획하였다. 모의 부재 형상은 정육면체로, 부재 크기는 1,200mm×1,200mm×1,000mm이고, 두께는 200mm의 발포폴리스티렌을 이용하여 단열처리 하였다. 타설계획은 저발열 하부배합 콘크리트 선타설 후 4시간 타설시간 차이로 조강형 상부배합 콘크리트를 타설하는 것으로 설정하였으며, 현장의 유사성을 고려하여 콘크리트 표면은 양생망을 포설한 상태로 측정하도록 하였다. 측정사항으로 온도이력을 측정하는 것으로 하였으며, 온도센서의 매립 위치는 수화열 저감 성능 비교를 위하여 모의 부재 표면, 상부, 중앙, 하부 4개소에 위치별 K-type의 온도센서를 매립하여 개소별 온도이력을 측정하는 것으로 하였다.

### 2.3 수화열 해석계획

현장적용 시뮬레이션 계획은 Table 5와 같이 해석모델의 대칭성을 고려하여, 현장 매트 기초 크기는 16.2m×10.3m×1.5m, 지반은 16.2m×10.3m×3.0m으로 1/4 대칭모델을 이용하였다. 현장 매트 기초의 타설두께는 MF1(THK=900) 및 MF2(THK=1,500)를 고려하여, 모의부재 시험에서 도출된 저발열 하부배합 콘크리트를 1,050mm 선타설 후 조강형 상부배합 콘크리트를 450mm로 분할 타설하는 것으로 설정하였다.

타설시간 차이는 4시간으로 설정하고, 매스콘크리트에서 발생하는 수화열의 온도분포와 응력분포는 취약부에 대하여

측정 1시간 간격으로 총 180시간 측정하는 것으로 하였다. 배합조건별 입력변수산정은 콘크리트의 특성상 재료의 열적 특성치(열용량, 열전달률)를 KCS 14 20 42 및 Kim and Han[11]을 참고하였으며, 물리적 특성치(탄성계수, 압축강도)는 실험 측정치를 사용하였다. 또한, 외기온도는 청주지방 10년간 월별 최고기온 및 최저기온의 평균온도를 외기온도 조건으로 선정하고 콘크리트 발열함수계수는 배합별 단열온도상승 시험을 통해 도출된 상수값을 적용하였다. 해석 모델링 세부사항은 Table 6과 같다.

**Table 4.** Experimental plan of mock-up test

Factors		Levels		
Mock-up design	Size(mm)	1	Floor plan	Cross-section
Mixtures	3	Case types	Upper	Bottom
			1 2 3	OPC <sup>a)</sup> TBC <sup>b)</sup> TBC+CGS 50 <sup>c)</sup>
Concreting method	3	Case 1	Case 2	Case 3
Experiment	1	Temperature history of concrete		

a) Ordinary Portland Cement, b) Ternary Blended Cement(OPC:BFS:FA=4:4:2), c) Ternary Blended Cement(OPC:BFS:FA=4:4:2)+Coal gasification slag fine aggregate content 50%

**Table 5.** Hydration heat analysis design

Factors		Levels	
Design of hydration heat analysis	Modeling	Mass concrete size(m)	16.2×10.3×1.5
		Ground size(m)	16.2×10.3×3.0
	Mixtures	1/4 Shape of hydration heat analysis model	
		Top(mm)	450
Concreting method	Bottom(mm)	1,050	TBC+CGS 50 <sup>b)</sup>
	Top(mm)	450	
Temperature and stress analysis points	Bottom(mm)	1,050	
Heat of hydration analysis		Temperature history Thermal stress	

a) Ordinary Portland Cement, b) Ternary Blended Cement(OPC:BFS:FA=4:4:2)+Coal gasification slag fine aggregate content 50%

**Table 6.** Physical and mechanical properties of each mixture

Physical property of material	OPC	TBC	TBC+CGS 50%	Ground
Specific heat(kcal//N°C)	0.025	0.025	0.025	0.02
Density(N/m <sup>3</sup> )	23500	23500	23500	17000
Heat conduction(kcal/m hr °C)	2.3	2.3	2.3	1.7
Convection coefficient (kcal/m <sup>2</sup> hr °C)	2.3	2.3	2.3	12
Outdoor temperature(°C)	8	8	8	-
Concrete temperature(°C)	20	20	20	-
Compressive strength at 91 days (MPa)	46.32	45.06	42.74	-
Compressive strength index	a=4.5, b=0.95	a=16.2, b=0.82	a=16.2, b=0.82	-
Modulus of elasticity(N/mm <sup>2</sup> )	31892	30289	31116	980
Coefficient of expansion	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	0.2
Unit Weight of cement(kg/m <sup>3</sup> )	389	389	389	-
Maximize adiabatic temperature(k)	k=53.7	k=37.0	k=34.9	-
Reactive velocity coefficient(α)	α=1.33	α=0.73	α=0.85	-

## 2.4 사용재료

본 연구의 사용재료로서 분체계 재료조합 시멘트는 국내 S사에서 생산된 제품을 사용하였으며, 그 종류는 다음과 같이 1성분계 시멘트는 OPC를 사용하였으며, 2성분계 시멘트는 FAC, BFSC, 3성분계 시멘트는 TBC를 사용하는 것으로 하였다. 각각의 분체계 재료조합 시멘트의 물리·화학적 성질은 Table 7, Table 8 및 Table 9와 같다.

또한, 골재는 석산 부순 굵은 골재(Crushed Gravel 이하; CG)와 국내 석산에서 생산된 석산 부순 잔골재(Crushed Sand 이하; CS)를 사용하였는데, 그 물리적 성질은 Table 10과 같고, CGS는 국내 T화력 발전소에 건설된 IGCC에서 발생하는 것으로 주 1회씩 샘플링하여 총 40회분을 1개 시료로 혼합하여 사용하였는데, 그 물리·화학적 성질은 Table 11과 같다. 이때, CGS는 KS의 입도기준에 만족하도록 체가름하여 사용하였다. 또한, 화학혼화제는 국내 C사의 제품으로 폴리카본산계 일반 감수제를 사용하였으며, AE제는 음이온계를 사용하였다.

**Table 7.** Physical properties of ordinary portland cement

Types	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	L.O.I(%)	Setting time(min)		Compressive strength(MPa)		
				Initial	Final	3 days	7 days	28 days
OPC	3.15	3 450	2.0	275	325	28.4	39.5	55.3

**Table 8.** Physiochemical properties of binary blended cements

Types	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	L.O.I(%)	Chemical composition(%)		Compressive strength(MPa)		
				MgO	SO <sub>3</sub>	3 days	7 days	28 days
FAC	2.24	3 543	2.2	3.50	0.51	12.4	25.5	38.3
BFSC	2.92	4 340	1.3	5.50	0.61	15.2	27.5	45.3

**Table 9.** Physiochemical properties of ternary blended cement

Types	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	Chemical composition(%)				
			CaO	SiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
TBC	2.87	3 840	39.61	31.17	0.88	5.50	14.17

**Table 10.** Physical properties of aggregates

Types	Density(g/cm <sup>3</sup> )	Water absorption ratio(%)	F.M	Passing ratio of 0.08mm sieve(%)
CG	2.63	0.36	6.71	0.10
CS	2.61	1.57	2.71	1.44

**Table 11.** Physicochemical properties of coal gasification slag fine aggregate

Types	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Water absorption ratio(%)	F.M	Passing ratio of 0.08mm sieve(%)	Chemical composition(%)					
					SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>
CGS	2.53	1.72	2.94	2.07	47.73	22.47	6.04	20.73	0.52	0.25

## 2.5 실험방법

본 연구의 실험방법으로 굳지 않은 콘크리트의 실험 중 슬럼프 및 슬럼프 플로는 KS F 2402 및 KS F 2594 공기량은 KS F 2421에 의거하여 실시하였고, 경화 콘크리트의 실험으로 압축강도는 KS F 2403의 규정에 의거하여 공시체를 제작하고 수중양생 한 후 소정의 재령에서 KS F 2405의 규정에 따라 압축강도를 측정하였다.

분체계 재료조합 시멘트 및 CGS 잔골재 조합에 따른 수화열 저감 성능을 확인하고자 단열온도상승시험으로 Marui사의 MIT-686-3-01을 사용하였으며, 콘크리트 내부와 외부센서의 평균 온도차를  $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 로 제어하며, 50ℓ 표본용기에 콘크리트 시료의 수화열 상승에 따라 최고온도까지 총 160시간을 측정하였다. 모의 부재의 수화열 측정은 각각의 모의 구조체 내부에 열전대선(Thermocouple T-type)를 매설한 후 데이터 로거에 의해 200시간의 온도 변화를 1시간 간격으로 측정하였다.

## 3. 실험결과 및 분석

### 3.1 분체계 재료조합에 따른 CGS 콘크리트의 기초적 특성

Figure 1은 분체계 재료조합 시멘트 종류와 CGS 치환율 변화에 따른 콘크리트의 슬럼프 및 감수제 사용량을 나타낸 것이다. 먼저, 모든 배합변수에서 목표 슬럼프를 만족하도록 감수제 사용량을 변화시켜 배합 설계하였다. 먼저, OPC를 기준으로 광물질 혼화재가 치환된 FAC, BFSC 및 TBC는 감수제의 사용량이 감소하는 것으로 나타났다. 또한, CGS 치환율에 따른 감수제 사용량은 분체계 재료조합 시멘트 종류에 상관없이 CGS 치환율이 증가할수록 감수제의 사용량은 감소하는 것으로 나타났다. 이는 Lee et al.[12]의 연구결과와 유사한 경향으로 광물질 혼화재가 갖는 유동성 증진 효과의 한 것으로 판단되며, CGS를 잔골재로 활용한 경우는 유리질 및 구형 입자 등의 영향으로 유동성 증가에 따라 감수제사용량이 감소한 것으로 판단된다.

다음으로 Figure 2는 위와 동일한 요령으로 모든 배합에서 목표 공기량을 만족하도록 배합 설계하였으며, 그에 따른 AE제첨가량을 분석하였다. 분체계 재료조합 시멘트 종류에 따른 공기량 경향은 광물질 혼화재 중 FA 치환된 FAC 및 TBC는 AE제첨가량이 증가하는 것으로 나타났으며, 분체계 재료조합에 상관없이 CGS 치환율에 따른 공기량은 전반적으로 CGS의 치환율이 증가할수록 AE제첨가량이 큰 폭으로 증가하는 경향을 보였다. 이는 Yoshitaka et al.[13]의 연구결과와 유사한 경향으로 CGS에 포함된 미연소탄분 및 미세공극질의 입자에 의한 공기량 흡착작용에 기인한 것으로 판단된다.

Figure 3는 분체계 재료조합 시멘트 종류 및 CGS 치환율에 따른 재령별 압축강도를 나타낸 그래프이다. 먼저, OPC를 사용 시 광물질 혼화재가 치환된 FAC, BFSC 및 TBC에 비해 초기 압축강도 발현이 우수한 것으로 나타났고, FAC, BFSC 및 TBC를 사용한 경우는 광물질 혼화재의 특성에 따른 장기재령에서 우수한 강도발현을 나타냈다. 이는 TBC의 광물질 혼화재 조성에 따른 단위시멘트량 감소에 기인한 것으로 판단되며, 재령 28일 이후의 장기재령에서 우수한 강도발현으로 재령이 경과 할수록 강도 발현 효과에 따라 1성분계 시멘트와 유사한 강도영역으로 수렴하는 것으로 나타났다. 한편, CGS 치환

율이 증가할수록 압축강도는 점차 감소하는 경향을 보였는데, CGS 0% 치환한 배합보다 동등 내지 약 1~5% 가량 소폭 감소하는 경향으로 나타났다.

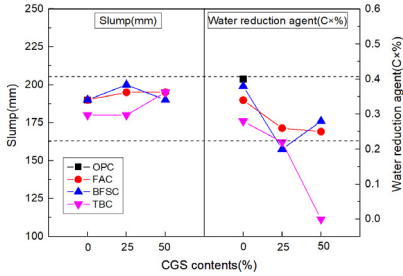


Figure 1. Slump and water reduction agent amount used according to cement type and CGS contents

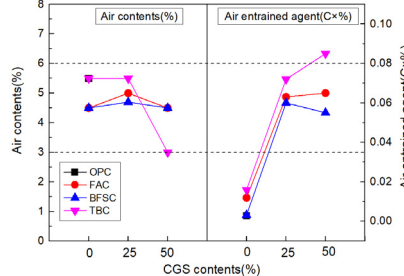


Figure 2. Air content and air entraining agent amount used according to cement type and CGS contents

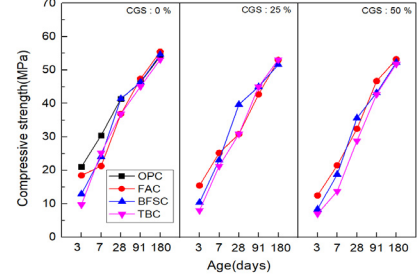


Figure 3. Compressive strength according to CGS contents with cement types

### 3.2 단열온도상승시험 및 특성

단열온도상승시험은 분체재료 조합에 따른 시멘트 4종으로 설정하였으며, CGS 잔골재의 치환율 변화에 따른 단열온도상승시험으로 하부 배합으로 사용되는 2성분계 시멘트와 3성분계 시멘트에서만 진행하였으며, 제시된 변수에 대하여 단열온도상승시험의 결과를 토대로 분체계 재료 조합 시멘트 종류 및 CGS 치환율에 따른 수화열 발생 시기 및 객관적인 실험 상수를 도출하고자 일반적으로 사용되는 한국콘크리트학회 제안식인 식 (1)을 이용하여 단열온도상승량 및 온도 발생 시기의 실험 상수값을 도출하였다[14,15].

$$Q = Q_{\infty} (1 - e^{-rt}) \tag{1}$$

여기서,  $Q$ : 재령  $t$ 에서의 단열온도 상승량( $^{\circ}\text{C}$ )

$Q_{\infty}$ : 최종 단열온도 상승량( $^{\circ}\text{C}$ )으로써 시험에 의해 정해지는 정수

$r$ : 온도상승 속도로써 시험에 의해 정해지는 정수

$t$ : 재령(일)

먼저, Figure 4는 1성분계 시멘트의 단열온도상승시험 실측값과 한국콘크리트학회 제안식에 의해 도출된 값을 그래프로 나타낸 것이다. OPC의 경우는 최고온도 도달시간으로 콘크리트 타설 후 103시간에 최고온도  $53.7^{\circ}\text{C}$ 로 나타났다.

다음으로 Figure 5는 2성분계 시멘트 중 FAC와 CGS 치환율에 따른 단열온도상승시험 결과를 나타낸 것이다. 먼저, FAC의 경우는 최고온도 도달시간으로 콘크리트 타설 후 121시간에 최고온도  $49.2^{\circ}\text{C}$ 로 조강형 시멘트인 OPC에 비해  $4.5^{\circ}\text{C}$ 의 수화열 저감 효과를 나타냈다. 또한, FAC에 CGS 치환율에 따른 단열온도상승시험 결과로 FAC에 CGS 25% 치환 시 최고온도 도달시간은 콘크리트 타설 후 127시간 후에 최고온도  $46.5^{\circ}\text{C}$ 로 나타났으며, CGS 치환율 50%의 경우는 콘크리트 타설 후 137시간 후에 최고온도  $42.0^{\circ}\text{C}$ 로 나타났다.

Figure 6은 위와 동일한 요령으로 2성분계 시멘트 중 BFSC와 CGS 치환율에 따른 단열온도상승시험 결과를 나타낸 것이다. 먼저, CGS를 치환하지 않은 BFSC의 경우는 최고온도 도달시간으로 콘크리트 타설 후 128시간에 최고온도  $47.2^{\circ}\text{C}$ 로 OPC에 비해  $6.5^{\circ}\text{C}$ 의 수화열 저감 효과를 나타냈다. 또한, BFSC에 CGS 치환율에 따른 단열온도상승시험 결과로 BFSC에

CGS 25% 치환 시 최고온도 도달시간은 콘크리트 타설 후 128시간 후에 최고온도 40.5°C로 나타났으며, CGS 치환율 50%의 경우는 콘크리트 타설 후 137시간 후에 최고온도 39.3°C로 나타났다.

마지막으로 Figure 7은 3성분계 시멘트인 TBC와 CGS 치환율에 따른 단열온도상승시험 결과를 나타낸 것이다. CGS를 치환하지 않은 TBC의 경우는 최고온도 도달시간으로 콘크리트 타설 후 128시간에 최고온도 37.0°C로 OPC에 비해 16.7°C의 수화열 저감 효과를 나타냈다. 또한, TBC에 CGS 치환율에 따른 단열온도상승시험 결과로 TBC에 CGS 25% 치환 시 최고온도 도달시간은 콘크리트 타설 후 128시간 후에 최고온도 36.5°C로 나타났으며, TBC+CGS 0%와 CGS 25%는 근소한 차이로 나타났으나, TBC에 CGS 치환율 50%의 치환한 경우는 콘크리트 타설 후 137시간 후에 최고온도 34.3°C로 나타났다.

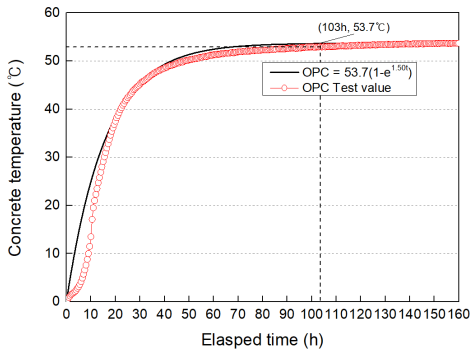


Figure 4. Properties of adiabatic temperature rise according to high early strength cement

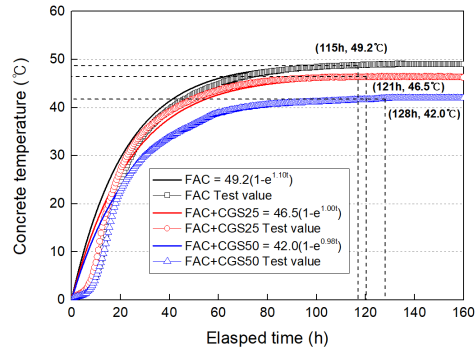


Figure 5. Properties of adiabatic temperature rise according to FAC and CGS content

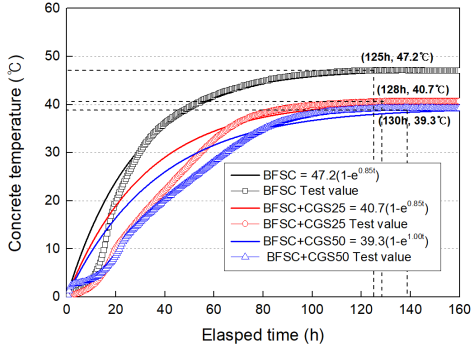


Figure 6. Properties of adiabatic temperature rise according to BFSC and CGS content

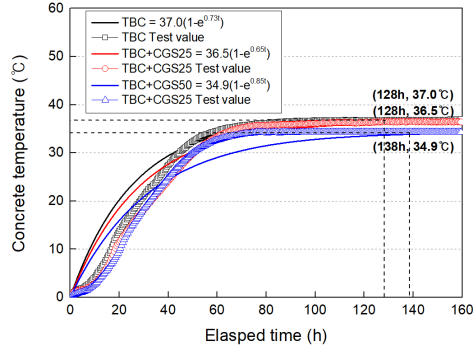


Figure 7. Properties of adiabatic temperature rise according to TBC and CGS content

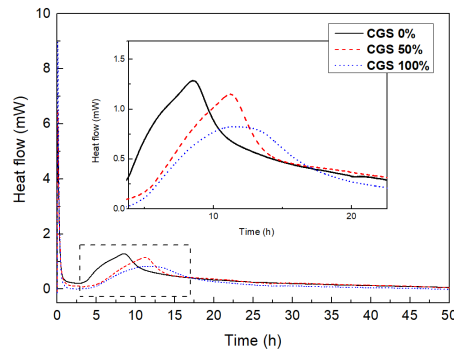


Figure 8. Properties of Isothermal conduction calorimetry in CGS and CS



이러한 CGS의 수화열 저감 원인으로는 기존 연구에서 CGS의 붕소함유량에 따른 응결지연으로 분석되고 있으며[16], 이에 따른 Figure 8은 물-결합재비 45%로 사용한 결합재는 OPC 100%를 사용하여 잔골재 변수인 CGS 치환율에 따른 미소수화열을 시간경과에 따라 나타낸 것이다. 먼저, CGS 0%의 미소수화열 측정 결과는 수화열 곡선이 수화반응의 일반적인 5단계의 수화열 흐름으로 나타났다[16-19]. 하지만, CGS를 사용한 경우 초기 수화반응 단계는 CGS 0%와 유사한 경향으로 나타났다으나, 유도 기간의 피크 높이(수화열)뿐만 아니라 가속기간의 출현시점(수화속도)도 지연시키는 것으로 나타났다. 따라서, CGS의 함유된 화합물에 의한 수화반응 억제에 기인한 것으로 판단된다[20,21].

### 3.3 모의부재 온도이력 계측결과

Figure 9는 단열온도상승 시험결과를 토대로 매스 콘크리트 상·하부 배합 선정하고 이에 따른 모의부재 개소별 온도 이력을 나타낸 그래프이다. 먼저, 모의부재에 사용한 콘크리트의 배합사항은 Table 4와 같다. 또한, 온도이력 측정 위치는 모의부재의 표면부, 상부, 중앙부, 하부에서 온도 이력을 측정하였는데, Figure 9(a)는 Table 3의 Case 1으로 상·하부 콘크리트 배합을 OPC로 통일하여, 4시간 타설시간 차이로 타설한 경우로 개소별 온도이력은 중앙부 최고온도 33.9°C일 때, 표면부 24.7°C로 표면부와 중앙부의 온도차이는 9.2°C로 나타났으며, 중앙부 최고온도 도달시간은 타설 후 약 47시간으로 나타났다.

Figure 9(b)는 위와 동일한 요령으로 Case 2로 상·하부 콘크리트 배합을 상부 OPC, 하부 TBC이며, (c)는 Case 3으로 (b)의 하부 배합에 CGS를 잔골재로 50% 치환한 콘크리트의 온도 이력을 나타낸 것이다. 먼저, Figure 9(b)는 중앙부 최고온도 29.1°C로 콘크리트 중앙부와 표면부의 온도차이가 6.8°C로 나타났으며, 최고온도 도달시간은 타설 약 57시간 후로 (a)의 경우보다 최고온도 도달시간이 10시간 지연되는 것으로 나타났다.

한편, Figure 9(c)는 중앙부 최고온도 29.7°C로 표면부와 중앙부의 온도차이는 4.5°C로 나타났으며, 최고온도 도달시간은 약 60시간 후로 (a)의 경우보다 최고온도 도달시간이 13시간 지연되는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 최고온도 도달시간이 지연될수록 콘크리트 표면부의 인장응력이 재령에 따라 증가함으로 매스 콘크리트의 표면부에 발생하는 온도균열을 저감시킬 수 있을 것으로 판단된다.

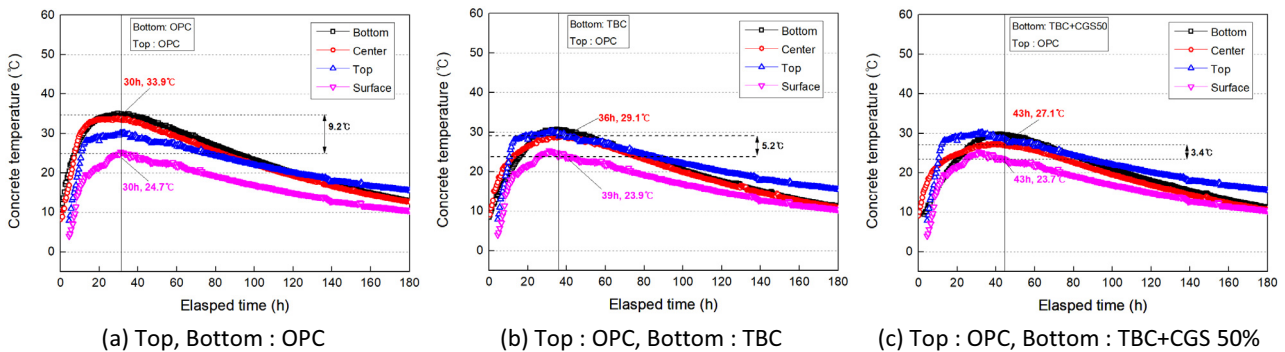


Figure 9. Temperature distribution and history

### 3.4 수화열 해석 결과

Figure 10 및 Figure 11은 타설시 예상기온, 콘크리트 온도 및 양생 등의 변수를 가정하여 해당 현장의 상·하부 콘크리트 배합변수에 따른 현장 매트 기초의 콘크리트 온도 이력 및 온도 응력을 수화열 해석한 결과이다.

먼저, Figure 10(a)의 경우는 상부배합 OPC 및 하부배합 TBC에 따른 온도분포로 하부배합 TBC는 타설시간 36시간에 약 36.3°C의 최고온도를 기록하였으며, 표면부 온도는 21.5°C로 기록되어, 표면부와 중앙부의 온도차이는 13.6°C로 예상되었

다. 다음으로 Figure 11(a)는 위와 동일 요령으로 상부 OPC, 하부 TBC+CGS 50% 배합으로 4시간 간격 분할 타설시 그에 따른 매스 콘크리트의 온도이력을 해석한 결과를 나타낸 것이다. 온도분포로 타설시간 47시간에 약 34.6°C의 최고온도를 기록하였으며, 표면부 온도는 22.3°C로 기록되어, 중앙부와와의 온도차이가 12.9°C로 예상되었다. 또한, Figure 10과 Figure 11(b)와 같이 두 배합 모두 표면부의 허용인장응력이 표면부와 모서리 부분에 발생하는 응력보다 높으므로 표면부의 유해한 균열이 발생하지 않을 것으로 판단된다.

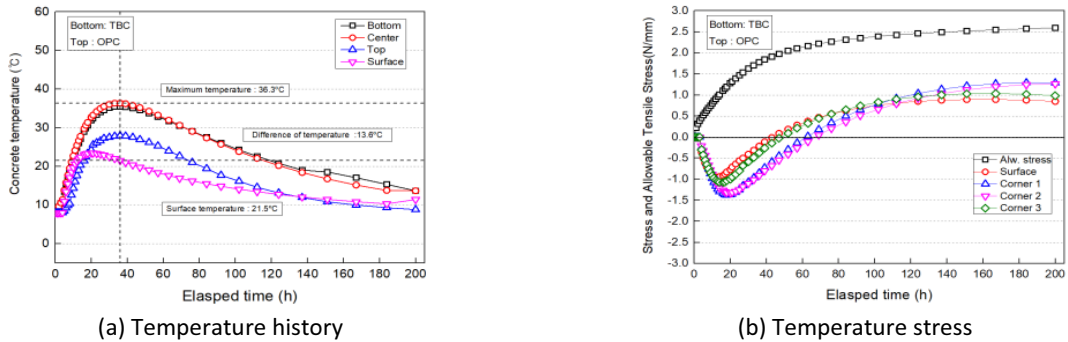


Figure 10. Analysis of heat of hydration according to the upper and lower mix of OPC and TBC

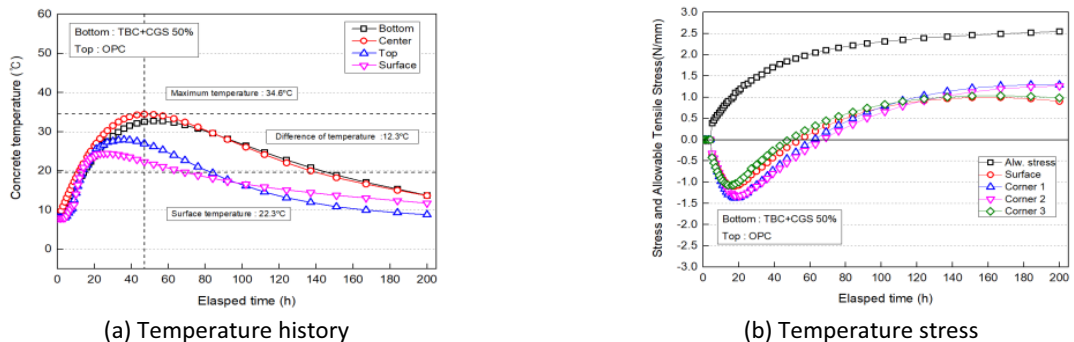


Figure 11. Analysis of heat of hydration according to the upper and lower mix of OPC and TBC+CGS 50

#### 4. 결론

본 연구는 분체계 재료조합에 따른 시멘트와 CGS 치환율에 따른 콘크리트의 단열온도상승시험 및 Mock-up 시험을 통하여 최적의 수화열 저감 성능을 갖는 조합비율을 도출하고, 현장 매트 기초에 수화열 해석을 실시하여, CGS 골재 조합에 의한 현장 매트 기초의 콘크리트 수화열 저감의 실용성 및 현장 적용성을 분석하였는데, 그 결과를 종합적으로 요약하면 다음과 같다.

- 1) 콘크리트의 품질 평가결과는 분체계 재료조합 시멘트 종류 및 CGS 치환율의 변화에 따라 슬럼프 및 공기량은 목표 범위를 만족하였다. 감수제 첨가량은 CGS 잔골재 및 FAC, BFSC 및 TBC 사용 시 감소하는 경향으로 나타났다.
- 2) 단열온도상승시험 결과는 OPC의 최고온도를 기준으로 광물질 혼화재 시멘트는 FAC, BFSC, TBC 순으로 감소하는 경향으로 나타났다. 특히, TBC는 OPC 대비 29.2%의 수화열 저감 성능을 보였으며, CGS 골재를 사용시 치환율에 따라 TBC에 CGS 50%를 치환한 경우 약 35%의 수화열 저감 효과를 나타냈다.
- 3) 모의부재 실험결과는 상·하부 OPC로 동일한 배합의 경우는 중앙부와 표면부의 온도차이는 9.2°C로 나타났으며, 상·

하부 OPC 및 TBC로 배합하여 타설한 경우는 중앙부와 표면부의 온도차이가 6.8°C로 나타났으며, 최고온도 도달시간은 OPC 배합보다 10시간 지연되는 것으로 나타났다. 또한, 하부 배합 TBC에 추가적으로 CGS를 잔골재로 50% 치환한 경우는 표면부와 중앙부의 온도차이가 4.5°C로 나타났으며, 최고온도 도달시간은 OPC 대비 최고온도 도달시간이 13시간정도 지연되는 것으로 나타났다.

- 4) 수화열 해석결과는 하부배합 TBC+CGS 50%는 하부배합 TBC보다 약 5% 정도의 수화열 저감 성능을 갖는 것으로 판단되며, 전반적으로 허용 인장 응력이 중앙부에 발생하는 응력보다 낮게 나타나 표면부의 유해한 균열이 발생하지 않을 것으로 판단된다.

이상을 종합하면 현장 매트 콘크리트 수화열 제어공법에 적용할 경우 타설층 상부배합은 OPC, 하부 배합은 TBC+CGS 50% 조합으로 적용 시 상·하부 콘크리트의 타설시간 차에 의한 콘크리트 발열량차를 최소화하고, CGS를 콘크리트용 잔골재로 활용하여 매스 콘크리트의 하부 콘크리트의 수화열을 추가로 저감시키므로 매스 콘크리트의 수화열에 의한 온도균열 제어효과가 있을 것으로 판단된다.

## 요약


본 연구는 분체계 재료조합 시멘트 및 CGS 잔골재 조합에 따른 콘크리트의 단열온도상승 시험결과를 통해 최적의 조합 비율을 도출하고, 이를 토대로 모의부재 시험 및 수화열 해석을 통하여 매스 콘크리트 구조물에서의 수화열 저감 성능에 대한 현장 적용성을 분석하였다. 분석결과 TBC+CGS 50%조합에서 콘크리트 중앙부와 표면부의 온도차이가 감소하며, 최고 온도 도달시간이 지연되어 시간경과에 따른 표면부 인장강도 증가로 온도응력에 따른 온도균열 발생을 저감시킬 수 있을 것으로 판단된다.


키워드 : 석탄가스화발전, 석탄가스화발전 응용 슬래그, 분체계 재료조합 시멘트


## Funding

Not applicable

## ORCID

Sang-Won Park,  <https://orcid.org/0009-0005-4370-984X>

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

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

## References

1. Kim JK, Noh JH, Park YD, Han JH, Kim H. Hydration heat characteristics of cement and concrete. Magazine of the Korea Concrete Institute. 1995 Jun;7(3):211-9. <https://doi.org/10.22636/MKCI.1995.7.3.211>
2. Han CG, Lee JS, Noh SK. Mock-up test of temperature crack reduction method application by setting time control of mat foundation mass concrete. Journal of the Korea Institute of Building Construction. 2009 Aug;9(4):55-61. <https://doi.org/10.5345/JKIC.2009.9.4.055>

3. Han CG, Kim MH. Reducing thermal cracking of mat-foundation mass concrete applying different mix designs for upper and lower placement lifts. *Journal of the Korea Institute of Building Construction*. 2017 Feb;17(1):39-46. <https://doi.org/10.5345/JKIBC.2017.17.1.039>
4. 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)
5. Ku JH. Melting characteristics and generation of slag in coal gasification plant [dissertation]. [Daejeon (Korea)]: Daejeon University; 2019. 63 p.
6. Nagataki S, Abe M, Matsuura Y. Outline of establishment of JIS A 5011-5 coal gasification slag fine aggregate. *Journal of the Japan Concrete Institute*. 2021 Jun;59(6):496-501. [https://doi.org/10.3151/coj.59.6\\_496](https://doi.org/10.3151/coj.59.6_496)
7. 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>
8. 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 May;7(3):194-201. <https://doi.org/10.14190/JRCR.2019.7.3.194>
9. 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>
10. Kim MH. Crack reducing with heat of hydration mat-foundation mass concrete with different mix designs for upper and lower placement lifts [dissertation]. [Cheongju (Korea)]: Cheongju University; 2017. 135 p.
11. Kim MH, Han CG. Method of decreasing cracking index by different mix conditions for separated placement and its field application. *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*. 2016 Sep;4(3):292-8. <http://dx.doi.org/10.14190/JRCR.2016.4.3.292>
12. Lee SS, Won C, Kim DS, Park SJ. A study on the engineering properties of concrete using blast-furnace slag powder. *Journal of the Korea Concrete Institute*. 2000 Aug;12(4):49-58. <https://doi.org/10.22636/JKCI.2000.12.4.49>
13. 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>
14. Ministry of Land. Concrete Standard Specifications. 5th ed. Seoul (Korea): Korea Concrete Institute; 2016. Chapter 2, Curing; p. 55-7.
15. Korea Concrete Institute. Explanation of standard specifications for concrete. 1st ed. Korea (Seoul): Kimoondang Ltd; 2009. 364 p.
16. Wang XY. The use of fly ash in concrete. *Magazine of RCR*. 2019 Dec;14(4):50-5. <https://doi.org/10.14190/MRCR.2019.14.4.050>
17. Taylor HFW. Chemistry of cements. 2nd ed. London (UK): ICE Publishing. 1997. 480 p.
18. International Congress on the Chemistry of Cement. Seventh International Congress on the Chemistry of Cement. Paris (France): Editions Septima; 1980. p. 1-6.
19. Michael WG, Ramachandran AR. An integration of tricalcium silicate hydration models in light of recent data. *Cement and Concrete Research*. 1987 Jan;17(1):164-70. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(87\)90071-8](https://doi.org/10.1016/0008-8846(87)90071-8)
20. Torben K. The dispersion model for hydration of portland cement I. General concepts. *Cement and Concrete Research*. 1984 Sep;14(5):622-30. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(84\)90024-3](https://doi.org/10.1016/0008-8846(84)90024-3)
21. Glinicki MA, Antolik A, Gawlicki M. Evaluation of compatibility of neutron-shielding boron aggregates with portland cement in mortar. *Construction and Building Materials*. 2018 Mar;164:731-8. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.228>