

환원슬래그를 사용한 모르타르의 저온에서의 초기동해 방지에 관한 기초적 실험

A Fundamental Experiment on Preventing Frost Damage at Early Age of Mortar in Low Temperature using Reduction Slag

민 태 범¹ 문 영 범¹ 김 형 철^{1,2*} 최 현 국¹ 김 재 영¹ 이 한 승²

Min, Tae-Beom¹ Mun, Young-Bum¹ Kim, Hyeong-Cheol^{1,2*} Choi, Hyun-Kuk¹ Kim, Jae-Young¹ Lee, Han-Seung²
R&D Center, Sungshin Cement, Bugang-Myun, Sejong Special Self-Governing City, Republic of Korea ¹
Department of Architectural Engineering, Han Yang University, Sangnok-Gu, Ansan, 426-791, Korea ²

Abstract

In this research, it used cement powder and reduction slag, which generates high hydration heat in hydration reaction without heat cure below -5°C degree. Purpose of final research is preventing freezing and thawing by making the compressive strength 5MPa in 3days below zero temperature due to own heat of concrete. and it is the result of physical characteristic and thermal property evaluation of reduction slag. Because reduction slag generates high hydration heat, compressive strength development is excellent. By generating highly hydration heat by C_{12}A_7 and C_3A in reduction slag, compressive strength is developed in low temperature. In case of displacing only reduction slag without SO_3 , it is indicated that quick-setting occurs by shortage of SO_3 . For preventing quick-setting, gypsum is used essentially. According to this research result, in case of using reduction slag and gypsum as a ternary system, compressive strength developed 5MPa in 3 days below zero temperature. It is identified to prevent early frost damage of concrete below zero temperature.

Keywords : low temperature environment, early-frost damage, reduction slag, hydration heat, gypsum

1. 서 론

한중콘크리트 공사에서 가장 중요한 문제는 굳지않은 콘크리트가 동결하지 않고, 소요의 압축강도를 발휘하도록 하는 것으로, 초기동해의 방지에 필요한 최저 강도는 보통 5MPa 이상으로 규정하고 있다[1]. 이러한 소요의 압축강도를 얻기 위해 건설현장에서는 콘크리트를 타설한 후, 양생막 또는 양생지붕을 설치하고, 막내부를 갈탄등을

사용하여 가열하며 가열방법은 공사비가 증대하며 균일한 품질을 확보하기엔 역부족이므로 긴급공사를 제외한 일반 공사에서는 활용되지 못하고 있다[2]. 또한 다른 방법으로는 내한촉진제를 사용하여 콘크리트를 제작하는 방법이 있다[3]. 내한촉진제를 사용하였을 경우 콘크리트내 수분이 -3°C 정도까지 동결되지 않고 저온 환경하에 있어서도 커다란 응결지연이 없이 콘크리트 경화를 진행 시키는 방법이다[4]. 이러한 연구들은 외기온도 -3°C 정도 까지 사용할 수 있는 방법이며 -3°C 이하의 외기 온도에서는 불가능한 실정이다. 따라서 현재 외기온도 -3°C 이하에서는 내한촉진제사용 방법과 가열양생 방법을 병합하여 사용하고 있으며 이는 공사비 증대의 문제점이 있다[5]. 따라서 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해 -5°C 이하에서도 가열 양생이 없이 영하의 온도(-5°C)에서도 수화반응

Received : September 24, 2015

Revision received : October 22, 2015

Accepted : November 3, 2015

* Corresponding author : Kim, Hyeong-Cheol

[Tel: 82-44-275-7387, E-mail: cemenman@naver.com]

©2016 The Korea Institute of Building Construction, All rights reserved.

시 수화열이 높게 발생하는 환원슬래그를 사용하여 재령 3일 이내 압축강도를 5MPa를 발현시켜 초기동해를 방지시키는 것이 최종 연구의 목적이며 본 논문에서는 모르타르 레벨에서 실험적 연구로서 저온에서의(-5℃) 모르타르의 기초적 성능평가를 하고자 한다.

2. 기존문헌 고찰

시멘트의 응결과 경화는 시멘트와 물과의 사이에 일어나는 화학반응을 수화반응이라 하며 수화반응시 열이 발생하게 되는데 이를 수화열이라고 한다. 이러한 수화열은 시멘트의 구성 화합물의 함량과 성분에 따라 발생량의 차이가 나며 반응율이 빠를수록 초기수화열은 높게 발생된다. Figure 1은 시멘트의 구성 화합물별 시간에 따른 반응을 나타낸 것이다[6].

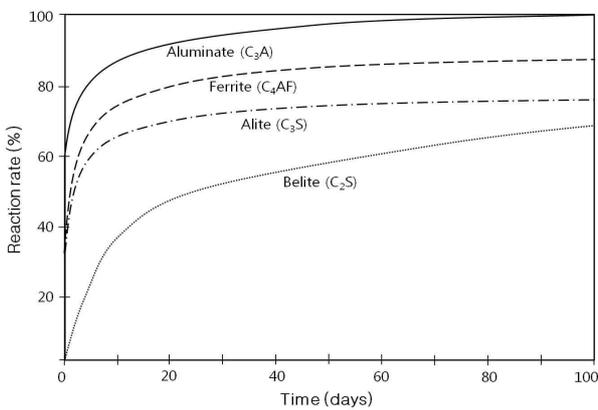


Figure 1. The hydration rate of the cement compound

Figure 1에 나타나듯이 시멘트의 화합물중 C₃A가 반응율이 가장 빠른 것을 알 수 있으며 이는 초기수화열도 가장 높게 나타나는 것으로 판단 할 수 있다. C₃A의 주성분은 CaO와 알루미늄이트계로 구성되어 있으며 알루미늄이트 광물(C₁₂A₇)은 수화열을 높게 발생시키는 것으로 알려져 있다[7]. 따라서 알루미늄이트 광물이 많은 혼화재를 사용하면 동절기에 강도발현 시간을 단축시키며 높은 수화열을 이용하여 초기동해를 방지 할 수 있을 것으로 판단된다. 알루미늄이트의 성분을 많이 포함하는 혼화재료는 철강슬래그 중 환원슬래그가 있다. 환원슬래그의 구성성분은 CaO함유량이 가장 많고, Fe₂O₃, Al₂O₃, SiO₂, MgO의 광물을 포함하고 있다. 환원슬래그의 성분조성은 보통포틀랜드

드시멘트의 성분과 비교적 비슷한 특징을 가지고 있다.

환원슬래그는 고철을 전기로에서 정련할 때 환원공정으로부터 발생하는 산업부산물이며, 공정상 용제로서 칼슘, 환원제로서 알루미늄 등을 첨가하기 때문에 칼슘실리케이트계의 화합물인 3CaO · SiO₂ · CaF₂, 3CaO · SiO₂로서, 칼슘알루미네이트계의 화합물인 11CaO · 7Al₂O₃ · CaF₂로 존재하는 것으로 알려져 있다. 이중 11CaO · 7Al₂O₃ · CaF₂는 초속경시멘트와 유사하게 초속경성을 나타내는 성분으로서, 비교적 단시간 내에 높은 강도발현을 나타내는 특성을 지니고 있다[8]. 하지만 환원슬래그는 SO₃(석고) 포함하지 않기 때문에 응결조절속도가 매우 빠르며 초기에 높은 수화열이 나타나며 수화반응이 빠르나 강도발현이 되지 않아 현재 많이 사용되지 않고 있다[9,10]. 하지만 석고를 환원 슬래그에 치환하여 사용한다면 발열재료로 사용할 수 있을 것으로 사료된다.

3. 실험개요 및 방법

3.1 실험개요

본 연구는 방동제와 수화반응시 발열량이 높은 혼화재(환원슬래그)를 사용하여 -5℃이상에서 초기동해를 방지할 수 있는 모르타르의 성능평가 실험으로서, 우선 혼화재의 성분분석, 수화열 평가를 실시하였으며 다음으로 방동제를 사용한 모르타르 실험 평가에서는 혼화재의 치환량과 석고 사용량에 따라 물리적 특성 및 단열온도 성능평가를 실시하였다. 석고를 실험인자에 추가한 이유는 응결속도 조절과 강도발현을 위해 추가하였다. 또한 모르타르의 배합은 KS L ISO 679에 의하여 시멘트와 잔골재의 비율을 1:3 으로 설정 하였으며 W/C는 50%로 설정 하였다.

Table 1. Mixing design of mortar

Specimen	W/C (%)	W (g)	Cement (g)			Sand (g)	Anti-Freeze Agent (W×%)
			OPC	Slag	Gypsum		
Plain			450	0	0		
O/S	50	225	360	90	0	1350	20
O/S/G1			360	72	18		
O/S/G2			337.5	90	22.5		

3.2 사용재료

본 실험에서 사용된 시멘트는 일반 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며 광물조성은 Table 2와 같다. 또한 잔골재는 ISO 표준사를 사용하였으며 재료의 특성은 Table 3에 나타났다. 또한 물의 동결을 방지하기 위하여 방동제는 시중에 판매되는 제품을 사용하였다. 방동제의 물리적 성질을 Table 4에 나타내었으며 환원슬래그의 성질은 4.1의 환원슬래그의 특성분석과 같다. 또한 모든 사용재료는 24시간 이상 -5℃에서 보관 후 모르타르 배합실험 직전 꺼내어 사용하였다.

Table 2. Compound composition of cement

Type	Compound composition (%)			
	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
OPC	56	20	9	9

Table 3. Characteristics of sand and gravel

Division	Type	Density (g/cm ³)	Fineness modulus	Water absorption ratio (%)
Sand	Washed sand	2.50	2.86	1.02

Table 4. Characteristic of Anti-Freeze agent

Type	Standard usage (C/100kg)	Specific gravity (20℃)	Alkali (%)	Chloride (%)
Achosan compound	3~4kg	1.42~1.45	0.03	0.01 below

3.3 실험방법 및 측정항목

Table 5는 실험 항목을 나타낸 표이다. 본 연구의 실험은 크게 환원슬래그의 특성 분석과 물리적 특성 실험, 열적성능 평가로 구분하였으며 분체에 대한 분석 실험은 환원슬래그의 입도 분석과, 분말도 평가, 그리고 비중 실험을 실시하였다. 또한 환원슬래그의 특성상 많은 수화열을 발생시키기 때문에 단열온도 상승시험과 미소수화열측정 실험을 통해 환원슬래그의 발열특성을 -5℃로 설정하여 평가하고자 하며 -5℃로 설정된 항온·항습기에서 소요의 재령동안 양생을 실시하여 모르타르의 압축강도 성능 평가를 실시하여 초기동해유무를 판단하고자 한다.

Table 5. Measurement Items

Experiment method	Items	Standard
Feature analysis of Reduction slag	XRF	-
	XRD	-
	Blaine test	KS L 5106
	Density test	KS L 5110
	Particle size analysis	-
Analysis of physical properties	Flow test	KS F 2476
	Setting time test	KS L 5108
	Compressive strength	KS L ISO 679
Thermal characteristic analysis	Conduction calorimetry	-
	Adiabatic temperature rise test	-

4. 실험결과 분석 및 고찰

4.1 환원슬래그의 특성 분석

Table 6은 XRF 분석에 의한 OPC와 환원슬래그의 화학적 성분실험 결과를 나타낸 것이다. 환원슬래그의 성분 분석결과 환원슬래그는 OPC 보다 Al₂O₃의 성분이 많이 포함되어 있는 것으로 나타났다. 따라서 수화열이 OPC보다 높게 나타나는 것으로 사료된다. 또한 환원슬래그는 SO₃를 포함하지 않는 것으로 실험을 통해 알 수 있었다.

Table 6. Chemical composition of OPC and reduced slag

Specimen	Chemical composition (wt.%)						
	Ig-Loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃
OPC	1.20	21.86	4.95	3.66	61.70	2.75	2.16
Reduction slag	0.80	3.66	33.22	2.88	49.89	5.30	0.00

또한 그림 Figure 2는 XRD실험을 통하여 환원슬래그의 구성광물을 분석한 결과이다. 분석결과 환원슬래그의 주 구성광물은 C₁₂A₇과 C₃A, MgO로 나타났으며 대부분 수화 반응이 매우 빠른 칼슘 알루미늄계열로 구성된 것을 확인할 수 있었다. 따라서 알루미늄계열의 구성 화합물로 인하여 수화열이 저온에서도 발생하는 것으로 사료된다.

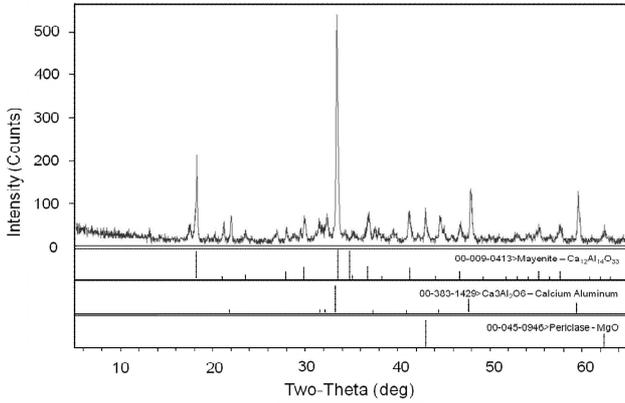


Figure 2. Analysis result of XRD on reduction slag

Table 7은 OPC와 환원슬래그의 분말도 및 비중실험 결과를 나타낸 것이다. 실험결과 환원슬래그의 분말도는 OPC보다 $2000\text{cm}^2/\text{g}$ 높게 나타난 $5320\text{cm}^2/\text{g}$ 으로 측정되었다. 또한 비중은 OPC 보다 낮은 $2.82\text{g}/\text{cm}^3$ 으로 나타났다. 따라서 환원슬래그의 높은 수화열 발생의 원인은 환원슬래그를 구성하는 광물이외에도 높은 분말도 또한 저온에서의 수화반응에 영향을 미치는 것으로 사료된다.

Table 7. Result experiment blaine, density of OPC and reduction slag

Specimen	Blaine (cm^2/g)	Density (g/cm^3)
OPC	3,390	3.15
Reduction slag	5,320	2.82

Table 8과 Figure 3은 OPC와 환원슬래그의 입도 분석 결과를 나타낸 것이다. 입도 분석결과 환원슬래그는 분말도 $5000\text{cm}^2/\text{g}$ 이상이며 $10\mu\text{m}$ 이하의 미세한 입자가 OPC에 비해 많은 것으로 나타났다. 또한 OPC의 평균입경은 $15.02\mu\text{m}$, 환원슬래그는 $5.13\mu\text{m}$ 로 나타났다. 따라서 환원슬래그는 평균입경이 낮음으로 인해 물과의 접촉면적이 증가하여 수화속도가 증가하며 수화열을 발생시키는 것으로 사료된다.

Table 8. Analysis result of Particle size of OPC and reduction slag

Specimen	Median (μm)	Distribution ratio (%)			
		$\sim 1\mu\text{m}$	$1\sim 10\mu\text{m}$	$10\sim 44\mu\text{m}$	$44\mu\text{m}\sim$
OPC	15.02	9.5	43.9	45.1	1.5
Reduction slag	5.13	14.3	53.7	30.1	1.9

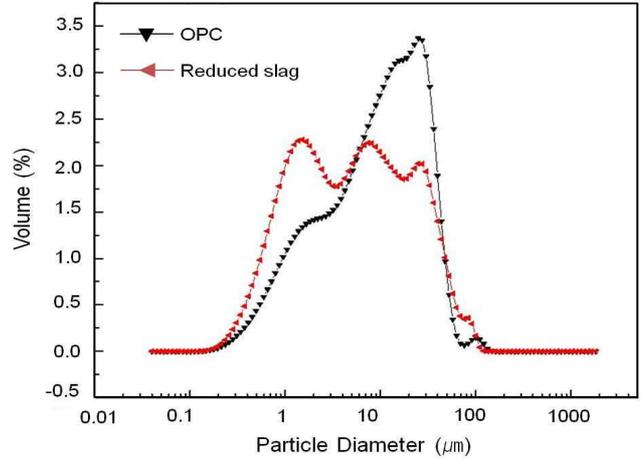


Figure 3. Result of particle size of OPC and reduction slag

4.2 물리적 특성 실험 결과

Figure 4는 실험체별 유동성 실험결과를 나타낸 그림이다. 유동성은 OPC만 사용한 실험체(Plain)가 가장 높게 나타났으며 환원슬래그만 치환된 실험체(O/S)가 유동성이 가장 낮게 측정되었다. 이는 치환된 환원슬래그에 석고의 성분이 없기 때문에 급결로 인하여 유동성이 낮게 나타나는 것으로 사료되며 석고가 치환된 실험체 O/S/G1과 O/S/G2는 급결이 발생되지 않아 유동성이 확보되는 것으로 나타났다. 또한 O/S/G1보다 O/S/G2가 유동성이 증가하는 이유는 환원슬래그의 치환량이 증가함에 따라 나타나는 현상으로 판단된다.

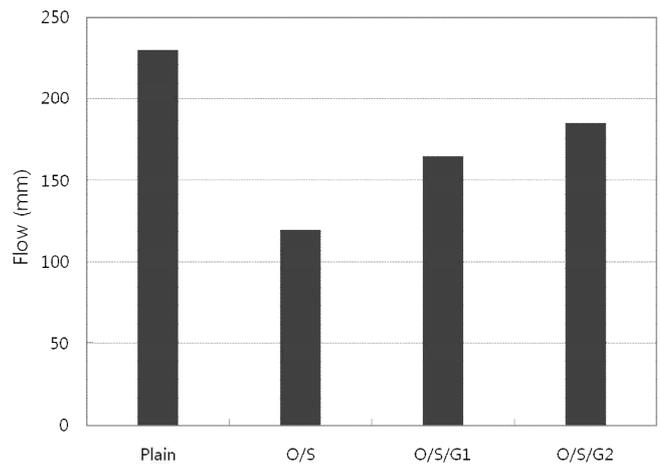


Figure 4. Result of experiment on flow test

Figure 5는 응결실험 결과를 나타낸 그림이다. 응결실험 결과 Plain비해 환원슬래그만 치환된 실험체는 급결이

일어나는 것을 알 수 있다. 이는 환원슬래그의 화합물중 알루미늄계열 성분이($C_{12}A_7$) 반응 할뿐만 아니라 환원슬래그에는 시멘트 계열의 응결조절 역할을 하는 석고가 구성되어 있지 않기 때문에 일어나는 현상으로 판단된다. 석고가 치환된 O/S/G1과 O/S/G2는 응결시간이 유사하게 나타나는 것으로 보아 환원슬래그는 필히 석고 등과 함께 사용 되어야 할 것으로 사료된다.

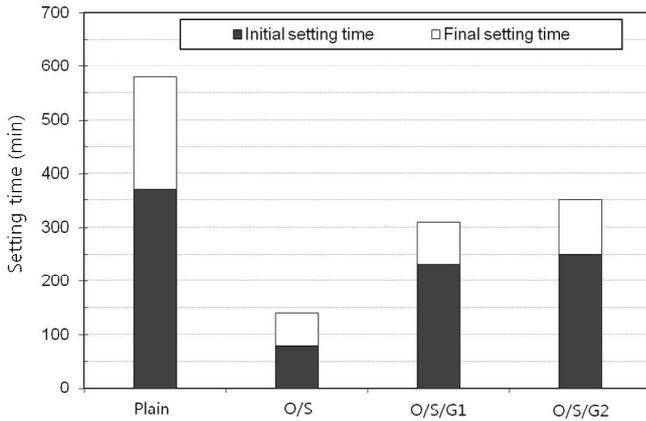


Figure 5. Result of setting time

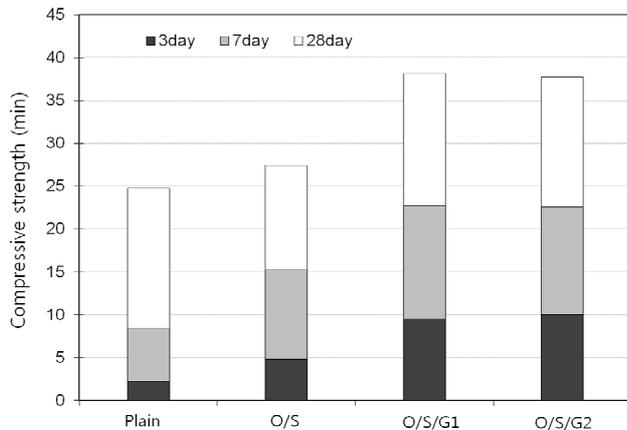


Figure 6. Result of compressive strength

Figure 6은 압축강도 실험 결과를 나타낸 그림이다. 실험결과 환원슬래그가 치환된 실험체는 Plain 실험체에 비해 강도가 높게 나타나는 것으로 나타났으며 석고가 치환된 O/S/G1과 O/S/G2는 석고가 치환되지 않은 O/S보다 강도가 높게 발현되는 것으로 나타났다. 이는 치환된 석고가 급결을 방지할 뿐만 아니라 석고의 주성분인 SO_3 가 환원슬래그인 주성분인 알루미늄과 반응하여 초기에

강도증진이 일어나는 것으로 판단되며 환원슬래그로 인하여 수화열이 높게 발생되기 때문에 저온에서도 활발한 수화반응으로 인해 강도가 발현되는 것으로 사료된다. 따라서 저온에서 환원슬래그의 치환량이 증가할수록 초기 강도증진을 나타냈으며 적정의 석고가 함께 사용 되었을 때 초기강도 및 장기강도의 증진은 더욱 효과적인 것으로 사료된다.

4.3 열적성능평가 실험결과

Figure 7과 Figure 8은 미소수화열 실험의 1차피크와 2차피크를 나타낸 실험 결과이다. 실험결과 환원슬래그의 치환으로 인해 단위시멘트양이 감소하였으나 환원슬래그의 성분중 $C_{12}A_7$ 와 C_3A 의 영향으로 인해 수화열이 높게 나타나는 것을 알 수 있다. 또한 O/S/G1과 O/S/G2를 비교하였을 때 O/S/G1에 비해 O/S/G2가 단위시멘트양이 적고 석고의 사용량이 많이 사용되었지만 수화열이 O/S/G1에 비해 높게 나타났다. 이는 O/S/G1보다 환원슬래그의 사용량이 높아 발생하는 현상으로 판단된다. 또한 O/S보다 O/S/G1, O/S/G2가 수화열이 낮은 이유는 석고가 치환됨에 따라 나타나는 현상으로 사료된다. 이는 석고가 C_3A 의 표면에 흡착하여 신속하게 반응하게 되며 반응시 생성되는 ettringite가 시멘트 입자 표면을 둘러싸기 때문에 수화반응이 지연됨에 따라 수화열과 응결지연 효과가 나타나는 것으로 판단된다. 2차피크의 경우 미세하게 증가하는 것으로 나타났다. 2차피크는 주로 C_3S 에 의해 나타나며 시멘트 수화반응에서 강도에 가장 많은 영향을 미치는 수경성 수화물인 C-S-H겔을 생성하며 이때 수화열이 발생한다. 하지만 본 실험은 $-5^{\circ}C$ 미소수화열 평가를 실시함으로써 강도 발현이 낮게 나타남으로 인해 2차피크 또한 미세하게 나타났다. 따라서 미소수화열 실험결과 환원 슬래그의 성분 중 $C_{12}A_7$ 과 C_3A 에 의해 수화열이 높게 발생하는 것을 알 수 있었으며 석고에 의해 수화열 또한 낮아지는 것을 알 수 있었다.

Figure 9는 $-5^{\circ}C$ 에서 환원슬래그 사용량과 석고에 사용량에 따른 단열온도 상승시험 결과를 나타낸 결과이다. 실험결과 기존 OPC만을 사용한 Plain 실험체의 최고 발열량이 $42.5^{\circ}C$ 로서 가장 낮은 것으로 나타났으며 환원슬래그가 치환된 실험체 O/S, O/S/G1, O/S/G2의 최고 온도는 유사한 값을 나타냈다. 그러나 최고 온도발현 하는 발열 시점은 각각 실험체에 따라 다르게 나타나는 것을 알

수 있다. OPC의 경우 일반적인 온도 상승을 나타냈으나 환원 슬래그가 단독으로 사용된 실험체에서는 O/S의 경우 수화반응 초기에 급격하게 수화열이 상승되는 것을 알 수 있다. 이는 환원슬래그의 성분중 알루미늄계 성분으로 인하여 나타나는 현상으로 판단되며 급격한 수화열에 의한 따른 급결이 예상된다. 한편 급결을 방지하기 위해 석고를 첨가한 실험체는 석고에 치환량에 따라 수화발열속도가 늦어지는 것으로 나타났다. 이는 석고가 수화반응의 지연제로서 역할을 하기 때문인 것으로 사료된다. 따라서 환원슬래그와 석고를 일정한 비율로 치환하여 콘크리트 혼화재로 사용한다면 한중 콘크리트 시공시 콘크리트의 초기동해를 방지 할 수 있을 것으로 판단된다.

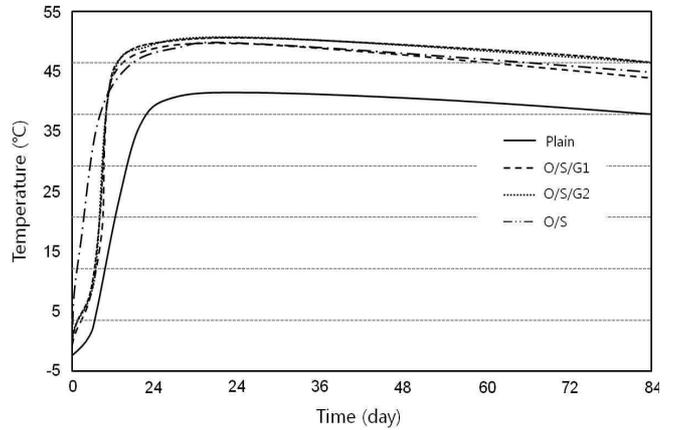


Figure 9. Adiabatic temperature rise test result according of -5°C

5. 결 론

환원슬래그를 시멘트 분체와 치환사용 하여 -5°C 에서도 압축강도를 재령 3일 이내 5MPa를 발현시켜 초기동해를 방지하는 모르타르 실험결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 본 실험에서 사용한 환원슬래그는 C_{12}A_7 의 성분으로 인하여 높은 수화열을 발생시키며 SO_3 의 함량 부족으로 급결이 일어나는 것으로 사료되며 높은 $5000\text{cm}^2/\text{g}$ 의 분말도 또한 수화반응에 영향을 미치는 것으로 판단된다.
- 2) 응결실험 결과 환원슬래그는 급결을 나타내며 급결을 방지하기 위해서는 석고의 사용이 필수적인 것으로 나타났으며 유동성 실험결과 또한 급결로 인하여 유동성이 감소함으로 석고의 사용이 필수적인 것으로 판단된다.
- 3) 압축강도 측정결과 O/S/G1과 O/S/G2는 석고가 치환되지 않은 O/S보다 강도가 높게 발현되는 것으로 나타났으며 석고의 주성분인 SO_3 가 환원슬래그인 주성분인 알루미늄과 반응하여 수화초기에 에트링자이트 생성을 촉진시켜 초기에 강도증진이 일어나는 것으로 판단된다.
- 4) 미소수화열량계를 통한 시멘트의 수화속도와 총 수화열 측정 결과 환원 슬래그의 성분 중 C_{12}A_7 과 C_3A 에 의해 수화열이 높게 발생하는 것을 알 수 있었으며 석고에 의해 수화열 또한 낮아지는 것을 알 수 있었다.
- 5) 단일 온도 상승 시험 결과 기존 OPC만을 사용한

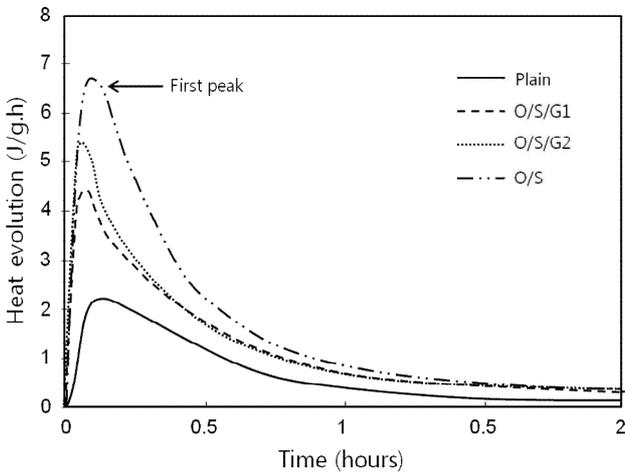


Figure 7. Hydration rate of the first peak point depending

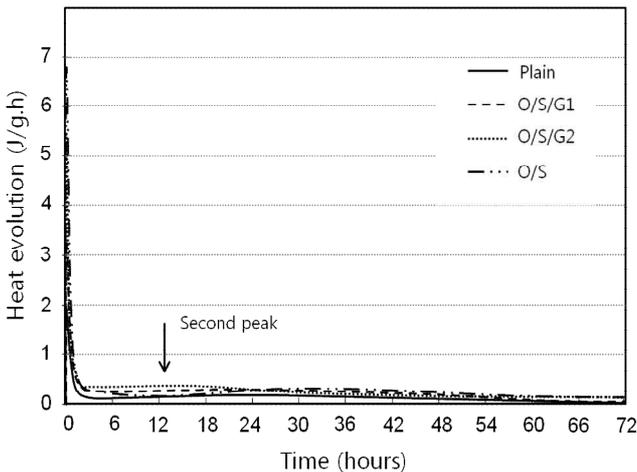


Figure 8. Hydration rate of the second peak point depending

Plain 실험체의 최고 발열량이 가장 낮은 것으로 나타났으며 환원슬래그가 치환된 실험체 O/S, O/S/G1, O/S/G2의 최고 온도는 유사한 값을 나타냈다. 또한 환원 슬래그로 인하여 초기에 급격하게 수화열이 발생하는 것으로 나타났으며 석고의 치환량이 증가 할수록 수화발열 속도는 감소되는 것으로 나타났다.

- 6) 환원슬래그를 콘크리트 초기동해 방지용 혼화재로 사용하기 위해 기초적인 실험을 실시한 결과 환원슬래그는 높은 수화열을 발생시키기 때문에 저온에서도 압축강도 발현이 우수함을 알 수 있었으며 석고의 사용이 필수적으로 사용되어야지만 급결을 방지하며 저온에서도 재령 3일에서 5MPa 압축강도를 나타내는 것으로 판단된다.

요 약

본 연구에서는 -5°C 이하에서도 가열 양생이 없이 수화 반응시 수화열이 높게 발생하는 환원슬래그를 시멘트 분체와 치환사용 하여 영하의 온도에서도 콘크리트의 자체 발열로 인해 압축강도를 재령 3일 이내 5MPa를 발현시켜 초기동해를 방지시키는 것이 최종 연구의 목적이며 이에 대하여 환원슬래그의 물리적 특성 평가와 열적 특성 평가를 실시한 결과 환원슬래그는 높은 수화열을 발생시키기 때문에 저온에서도 압축강도 발현이 우수함을 알 수 있었다. 이는 환원 슬래그의 성분 중 C_{12}A_7 과 C_3A 에 의해 수화열이 높게 발생됨 저온에서도 압축강도가 발현되는 것으로 나타났다. 하지만 환원슬래그 단독 치환하였을 경우 SO_3 함량 부족으로 급결이 발생하는 것을 알 수 있었다. 급결을 방지하기 위해서는 석고의 사용이 필수적으로 사용되어야 한다. 따라서 본 연구 결과 환원슬래그와 석고를 3성분계로 사용하였을 경우 저온에서도 재령 3일에서 5MPa 압축강도를 나타내는 것으로 보아 저온에서도 콘크리트의 초기동해를 방지할 수 있을 것으로 판단된다.

키워드 : 저온환경, 초기동해, 환원슬래그, 수화열, 석고

Acknowledgement

This study is part of the output of the research

funding for Advanced-City Development project 2014 of the Ministry of Land, Transport, and Maritime Affairs(14CTAP-0078650-01)

References

1. Lee SS, A Study on the improvement of Strength delay according to Low Temperature of Cold Weather Concrete, Journal of the Korean Recycled Construction Resources institute, 2012 Mar;7(1):51-9
2. Won C, Park SJ, Lee SS, A Site Application of Winter Concrete using Freezing Protection Accelerator, Journal of the Korea Concrete institute, 2006 Nov;18(6):38-45
3. Kim YJ, Lee SS, Won C, Park SJ, Strength Properties of Mortar Mixed with Accelerator for Freeze Protection in Constant and Variable Temperature Condition, Journal of the Korea Concrete institute, 2002 Dec;16(6):942-8
4. Cho HW, Shin HS, Lee JH, Development Ultra Rapid Hardening Construction Materials on Cold Weather Environment Considering Curing Temperature, Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, 2013 Sep;17(5):59-66
5. Lim CK, Han MC, Curing and Mixture Design of Cold Weather Concrete Applying Heat Insulation and Heat Supplying Curing, Journal of the Architectural Institute of Korea, 2010 Jun;26(6):77-84
6. Bullard JW, Jennings HM, Livingston RH, Nonat A, Scherer GW, Schweitzer JS, Scrivener KL, Thomas JJ, Mechanisms of cement hydration, Cement and Concrete Research, 2011 Dec;41(12):1208-23
7. Lee KJ, Koo JS, Kim JM, OH SY, Study on Physical and Chemical Properties of $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3$ System Melting Compound, Journal of the Korea Concrete institute, 2013 Apr;25(2):209-15
8. Kim JM, Choi SM, Kim JH, Evaluation for Applicability as the Inorganic Binder with Rapid Setting Property for Construction Material of LFS Produced from Various Manufacturing Process, Journal of the Korean Recycled Construction Resources institute, 2012 Jun;7(2):70-7
9. Choi JS, Jang PS, JO YJ, Experimental Study on the Application of Concrete Admixture using the EAF Reduction Slag, Journal of the Korea Academin-industrial cooperation society, 2014 Nov;15(11):6890-7
10. An YJ, Choi JS, Bae KH, Kim HS, Hydration Property of Electric Arc Furnace Reduction Slag, Journal of the Korean Institute of Resources Recycling, 2010 Dec;19(6):93-101