벨라이트계 혼합 결합재의 수화열 특성에 관한 연구

이근주^{1,2)} · 조재우²⁾ · 정상화²⁾ · 김장호^{1)*}

¹⁾연세대학교 사회환경시스템공학부 ²⁾한국건설생활환경시험연구원 선행기술팀

Study on Hydration Heat of Blended Belite Binder

Kewn-Chu Lee,^{1,2)} Jae-Woo Cho,²⁾ Sang-Hwa Jung,²⁾ and Jang-Ho Jay Kim^{1)*}

¹⁾Dept. of Civil and Environmental System Engineering, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea

²⁾Advanced Technology Team, Korea Conformity Laboratories, Seoul 137-037, Korea

ABSTRACT Presently, mass concrete structures are being built in federal and private projects of civil infrastructures and building structures. The hydration heat of mass concrete structures is the most important factor in the quality of concrete matrix and construction period. Moreover, internal cracks caused by hydration heat degrades durability, water tightness, and strength of concrete. To reduce hydration heat, it is necessary to blend belite cement (β -C₂S) with industrial by-products (i.e. granulated slag and fly ash). In this experiment, 14 levels of binary binders and 4 levels of ternary binders were used to understand the effect of different replacement ratio on hydration heat, strength and microstructure (i.e. SEM and XRD) of mortar. Cumulative hydration heat at 28 days for the binary and ternary binders was affected by replacement ratio of fly ash and/or granulated slag. As fly ash content increased, hydration heat decreased. As granulated slag content increased, reduction rate of the hydration heat was lower than when fly ash was used. Especially, the hydration heat of ternary binder blended with 40% flyash and 30% granulated slag showed about 50% of hydration heat from using belite cement (P). The study results showed that the temperature rise of concrete matrix can be decreased by using blended belite binders producing low hydration heat and reasonable strength.

Keywords : hydration heat, belite low heat portland cement, fly ash, granulated slag, binary binder

1. 서 론

미래 사회 삶의 질 향상을 위한 국가 정책 로드맵 VC-10 가치 개발 사업으로 초장대 교량 사업단이 발족되는 등의 최근 국가적인 사회간접자본(SOC)에 대한 투자 요구가 증대되어 토목 및 건축 구조물의 대단위 공사 및 정비 사업이 추진되어 진행되고 있다. 이로 인해 건설 공사 현장에서는 거대한 해양 구조물, 장대 교량의 교각·교대 등의 하부 구조물, 특히 현수교 케이블과 보강 트러스를 지지하는 앵커리지부 등의 대규모의 매스 콘크리트 구조물이 다수 건설되고 있다.

대규모 콘크리트 구조물은 시공 시 다량의 시멘트 사용으로 콘크리트 매트릭스 내 높은 수화열 발생에 대한 대응 방안으로 파이프 쿨링 공법, 콘크리트 치기 간격 및 재료 배합 조정 등이 사용되고 있다. 내부 온도 저감 대책은 매스 콘크리트 공사에서 전체 콘크리트의 품질 및 시공 기간을 좌우하는데 가장 중요한 요소이다. 시멘트의 수화열에 의한 콘크리트 내부의 온도 응력이 인장

강도 이상일 경우에 발생하는 내부 균열로 콘크리트의 내구성, 수밀성 및 강도 저하로 이어지게 된다. 이로 인하여 타설시 수화열 저감은 반드시 해결해야 하는 과제로 수화열 제어 및 예측 등에 관한 연구가 활발히 진행 중에 있다.^{1,4)}

매스 콘크리트 단위의 수화 발열량은 콘크리트의 단위 시멘트양과 시멘트의 수화 발열 특성에 의해 좌우된다. 시멘트의 수화열 특성은 발열량과 발열 속도로 표현되며 매스 콘크리트용 시멘트는 총 수화 발열량이 적으면서도 전체 시간에 걸쳐 완만하게 발생하여야 한다. 이와 같이 콘크리트 타설시 초기 수화열 저감 효과를 위해 생산 온도가 보통 포틀랜드 시멘트(OPC) 1,450°C 대비 1,300°C 정도로 낮고⁵⁾ OPC 1톤 생산시 CO₂ 발생량(약 0.79톤) 이하로 저탄소 시멘트인 중용열 시멘트, 고로 시멘트, KS 4종 및 ASTM type IV 등에 규정되어 있는 저열 포틀랜드 시멘트 등의 저발열 시멘트가 사용되고 있다.⁶⁾ 그리고 국내외에서 고로 슬래그 또는 플라이애쉬를 혼입한 콘크리트의 역학 및 내구성 관련 연구^{7,8)}는 다수이지만 초저발열 결합재를 사용하여 수화열 저감에 기반한 콘크리트의 연구는 부족한 것이 현 상황이다.^{5,9-11)}

이 연구는 초장대교량의 앵커리지부 수화열 제어에 적

*Corresponding author E-mail: jhkim@yonsei.ac.kr

Received July 23, 2010, Revised February 11, 2010,

Accepted February 28, 2010

©2011 by Korea Concrete Institute

용하기 위해 미소 수화열 35 cal/g 이하의 초저발열 결합재 개발에 목적이 있으며, 매스 콘크리트용 수화열 저감 방법으로 벨라이트계 저열 포틀랜드 시멘트를 사용하고 고로 슬래그(granulated slag)나 플라이애쉬(fly ash)와 같은 산업 부산물을 일정 부분 치환하였다. β - C_2S 가 다량 함유된 벨라이트계 저열 포틀랜드 시멘트에 고로 슬래그, 플라이애쉬 등 치환율의 변화가 수화 발열량, 압축강도 및 미세 구조 등의 시멘트 페이스트 및 모르타르 물성에 미치는 영향을 비교 분석 하고자 하였다.

2. 혼합 결합재의 수화 반응

혼화제로 사용되는 고로 슬래그 미분말의 수화 반응은 불규칙 유리 구조로서 잠재 수경성과 동시에 포졸란 작용으로 물과 반응하는 성질을 가지고 있다. 배합수에 소량의 소석회, 수산화칼슘, 황산염 등 알칼리 자극 성분이 존재하면, 고로 슬래그 미분말에 수산화이온이 흡착하여 C-S-H계의 수화생성물이 생성되고 응결/경화하는 잠재 수경성을 나타낸다. 또한 플라이애쉬의 수화 반응은 시멘트 수화시 생성되는 $Ca(OH)_2$ 과 플라이애쉬 내 규산염, 알루미늄이트 상 광물 등과 반응하여 칼슘실리케이트 및 칼슘알루미네이트 수화물이 생성되는 포졸란 반응을 일으키게 된다.

고로 슬래그 미분말과 플라이애쉬와 벨라이트계 저열 포틀랜드 시멘트를 혼입하여 초저발열 결합재의 광물 구성 변화에 따라 수화 속도와 총 수화 발열량은 결합재 종류에 따라 달라지게 되고, 각각의 결합재 내 C_3S , C_2S , C_3A 및 C_4AF 등의 광물 중량비에 대한 최종 수화열은 식 (1)로 계산되며, Table 1은 시멘트의 주광물인 C_2S , C_3S , C_3A 및 C_4AF 등의 단위 g당 일반적인 수화열을 나타낸다.^{12,13)}

$$H_y(\text{Cal/g}) = 136(C_3S) + 62(C_2S) + 200(C_3A) + 30(C_4AF) \quad (1)$$

Table 1 Hydration heat of pure compounds¹⁾

Compound	Hydration heat	
	Joule/g	Cal./g
C_3S	502	120
C_2S	260	62
C_3A	867	207
C_4AF	419	100

Table 2 Outline of experiments

Experiments		Condition of sample	Curing days	Remark
Heat of hydration	72 hours	Cement paste powder	-	KS L 5121
	28 days			
Compressive & bending strength		Mortar specimen mould (40 × 40 × 160 mm)	1, 3, 7, 28 and 91 days	KS L ISO 679
Micro structure	XRD	Cement paste powder	0, 3, 7 and 28 days	Rigaku D/max 2500/PC
	SEM	Cement paste mould (10 × 10 × 10 mm)	3, 7 and 28 days	JSM-6700F

3. 실험 방법

이 연구에서는 매스 콘크리트 내 적용을 위한 저발열 콘크리트의 개발에 있어서 국내외 기술 자료 분석을 통해 최근 선진 국가에서 교량 앵커리지부 등에 적용하고 있는 벨라이트계 저열 포틀랜드 시멘트에 산업부산물을 혼입한 저발열 결합재 개발을 위해 적용한 실험 종류와 방법은 Table 2와 같다. Table 3은 실험에 사용된 벨라이트 시멘트와 OPC의 C_2S , C_3S , C_3A 및 C_4AF 광물 조성 함량으로 수화발생량이 낮은 C_2S 가 벨라이트 시멘트의 대부분을 차지하고 있음을 보여준다. 벨라이트계 저발열 시멘트의 수화 반응은 OPC 대비 C_2S 의 양의 증가와 C_3S 및 C_3A 양의 감소로 초기 수화 발열량이 적으며, 장기적으로 수화가 진행되는 것으로 판단된다.⁹⁾

벨라이트계 저열 포틀랜드 시멘트와 플라이애쉬 및 고로 슬래그를 혼입한 각각의 2성 분계 및 3성 분계 결합재 치환율 및 배합 종류는 Table 4와 같다. 벨라이트계 저열 포틀랜드 시멘트를 100% 사용한 것을 기본 플레인(P)으로 하고 2성분계 배합은 플라이애쉬와 고로 슬래그를 각각 10~70% 중량 대비 7단계로 치환하였다. 또한 3성 분계 배합은 고로 슬래그 30% 치환율에 플라이애쉬 10~40% 중량 대비 4단계로 치환하였다. 재령별 수화열 분석의 미세 구조 분석은 SEM, XRD 등의 분석 장비로 시멘트 페이스트 내 물리·화학적 특성 및 수화된 조직 변화를 비교하였다.

수화열 측정용 분말과 SEM, XRD 및 강도 시험용 시험체 제작에 필요한 결합재는 Table 4의 치환율로 결합재 종류에 따라 각각의 원재료들이 충분히 혼합되도록 V-믹서로 30분 강제 혼합하였고, 모든 시멘트 페이스트 배합과 모르타르 배합에는 결합재 치환율 변수 외 다른 요인을 배제시키기 위해 ISO 표준사와 증류수를 사용하였다. 강도 시험용 모르타르 배합은 KS L ISO 679 「시멘트의 강도 시험 방법」에 따라 결합재 : 표준사 : 배합수 = 1 : 3 : 0.5로 시험체(40 × 40 × 160 mm)를 제작하여 항온 항습 챔버에서 24시간 양생 및 탈형 후, 즉시 수중 양생하였고, SEM 및 XRD용 시멘트 페이스트 배합은 결합재 : 배합수 = 1 : 0.5로 시험체(10 × 10 × 10 mm)를 제작하

Table 3 Mineral composition

Type	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
OPC	55	19	10	7
Belite cement	28	49	6	12

Table 4 Types of blended binders

Mix design	Mark [*]	Binder (%)		
		Base	Fly ash	Slag
Plain (belite cement)	P	100	-	-
Ternary blended binders				
10% fly ash + 30% slag	1F3S	60	10	30
20% fly ash + 30% slag	2F3S	50	20	30
30% fly ash + 30% slag	3F3S	40	30	30
40% fly ash + 30% slag	4F3S	30	40	30
Binary blended binders				
10% slag	1S	90	-	10
20% slag	2S	80	-	20
30% slag	3S	70	-	30
40% slag	4S	60	-	40
50% slag	5S	50	-	50
60% slag	6S	40	-	60
70% slag	7S	30	-	70
10% fly ash	1F	90	10	-
20% fly ash	2F	80	20	-
30% fly ash	3F	70	30	-
40% fly ash	4F	60	40	-
50% fly ash	5F	50	50	-
60% fly ash	6F	40	60	-
70% fly ash	7F	30	70	-

*: Notation are related to figures or text

여 항온 항습실(온도 $20 \pm 1^\circ\text{C}$, 습도 $50 \pm 2\%$)에서 양생 하였으며 각 재령 시 에탄올 진공 포화로 수화 정지시켜 시험하였다. 시험에 사용되는 OPC, P, 3F 및 5S 등의 배합전 X-ray diffraction analysis method 분석 결과를 Fig. 1에 대표적으로 나타내었다. 배합 전후의 결합재 분말로 XRD 분석법을 실시하여, 회절 도형의 피크 상태로 부터 결정 발달의 정도를 알 수 있고 공통적으로 calcium magnesium aluminum oxide와 calcium silicate가 주결정 상으로 분석되었으며, 플라이애쉬 30% 치환한 결합재에서는 quartz [SiO_2], 고로 슬래그 50% 치환한 결합재에서는 brownmillerite 등의 성분이 주결정상으로 분석되었다.

Fig. 1 X-Ray diffraction patterns

배합 후의 각각의 결합재 시험편에서는 결정성이 좋은 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 은 27° 에서 나타나는 피크와 28° 에서 나타나는 C_3S 수화물의 상대적인 세기를 비교함과 동시에 에트린 자이트의 피크 검출로 수화 반응 변화를 직접적으로 추정할 수 있다.¹⁴⁾

4. 시험 결과

4.1 미소 수화열

매스 콘크리트에 적용을 위한 벨라이트계 저열 포틀랜드 시멘트에 고로 슬래그와 플라이애쉬를 2 및 3성 분계로 혼입한 결합재의 누적 72시간 및 28일 수화열 결과를 Table 5와 초기 72시간 시간당 수화열 그래프를 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2의 누적 수화열 그래프에 나타난 결과와 같이 모든 시멘트 페이스트 결합재에서 초기 24시간 내 두 번의 단위 시간당 수화열 증진 피크가 크게 발생 하였으며, 발생 시간 또한 모든 배합에서 동 시간에 측정되었다. 초기 피크는 1시간 내, 두 번째 피크는 11~16시간 시 발생되었고, 초기 두 번의 피크 외에는 28일 수화열 측정 종료 시까지 발생하지 않았다.

Table 5는 수화열 시험 결과로 벨라이트계 저열 포틀랜드 시멘트(P)의 경우 28일 누적 수화열은 68.4 cal/g, 플라이애쉬 치환한 2성 분계 1F, 3F 및 5F의 28일 누적 수화열을 측정한 결과는 각각 66.5 cal/g, 48.7 cal/g 및 27.9 cal/g로 벨라이트계 저열 포틀랜드 시멘트와 고로 슬래그 치환한 결합재 대비하여 플라이애쉬 함유량이 증가함에 따라 높은 수화열 저감 효과를 보여주었다.

고로 슬래그 치환한 2성 분계 결합재인 3S, 5S 및 7S의 경우 수화열 측정 결과 고로 슬래그 치환율이 증가할수록 수화열이 감소하였다. 28일 누적 수화열 결과는 각각 78.4 cal/g, 70.6 cal/g, 62.4 cal/g로 벨라이트 저열 포틀랜드 시멘트 대비 50% 치환율 경우까지 고로 슬래그가 장기에 걸쳐 수화 반응이 지속된 것을 알 수 있으며,

Table 5 Hydration heat

Mix design		Hydration heat	
		72 hours (cal/g)	28 days (cal/g)
Belite cement (plain)		42.343	68.4
Ternary	10% fly ash + 30% slag	34.062	65.8
	20% fly ash + 30% slag	34.874	57.3
	30% fly ash + 30% slag	30.402	44.8
	40% fly ash + 30% slag	27.357	34.3
Binary	30% slag	40.857	78.4
	50% slag	41.739	70.6
	70% slag	38.772	62.4
	10% fly ash	41.666	66.5
	30% fly ash	35.165	48.7
	50% fly ash	26.227	27.9

Fig. 2 Initial heat flow calorimetry on each binders (cal/g/hr)

7S는 수화 시 알칼리 성분 감소로 인한 수화 발현 감소로 보인다. 이와 같이, 고로 슬래그 치환율이 증가함에 따라 수화열 감소 효과도 더 커지게 되지만 높은 치환율 대비 수화열 감소폭이 낮음을 알 수 있다.

플라이애쉬와 고로 슬래그를 일부 치환한 3성 분계 결합재인 1F3S, 2F3S, 3F3S 및 4F3S의 재령 28일 누적 수화열은 65.8 cal/g, 57.3 cal/g, 44.8 cal/g, 34.3 cal/g으로 모든 배합에서 벨라이트계 저열 포틀랜드 시멘트의 누적 발열량(68.4 cal/g) 보다 낮은 값을 보여주었으며, 특히 4F3S 결합제는 34.3 cal/g으로 plain 대비 약 50%의 저열 효과를 보여주었다.

4.2 모르타르 강도

Table 4의 결합제 종류별 모르타르 시험체를 제작하여 1, 3, 7, 28 및 91일 재령별 강도 시험 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 벨라이트계 저열 포틀랜드 시멘트(P)의 경우 재령 28일 압축강도는 41.97 MPa이며, 플라이애쉬를 치환한 1F, 3F 및 5F의 재령 28일 압축강도는 33.25 MPa, 20.03 MPa 및 11.25 MPa로 치환율 증가에 따른 큰 강도 감소를 보여주었으며, 50% 이상 치환한 경우 plain 대비 73% 이상 압축강도가 크게 감소되었고, 91일 장기 재령에서도 plain 배합의 7일 강도에도 미치지 못함을 확인하였다. 고로 슬래그를 치환한 3S, 5S 및 7S의 압축강도는 48.53 MPa, 44.35 MPa, 37.55 MPa로 3S의 경우 plain 대비 15% 이상 높은 압축강도 결과와 실시한 모든 배합 중에서 초기 강도 발현 대비 91일 장기 재령에서도 65.17 MPa로 높은 압축강도 값을 나타냄에 따라 3성 분계 모르타르의 배합의 경우 30% 고로 슬래그 치환율을

Fig. 3 Development of compressive and flexural strength at various curing ages

기준으로 하여 10~40% 4단계의 플라이애쉬 치환율을 변수로 배합하였다.

3성 분계 결합재 배합인 1F3S, 2F3S, 3F3S 및 4F3S의 재령 28일시 압축강도 결과는 41.63 MPa, 45.98 MPa, 40.17 MPa, 24.12 MPa를 보여주어 4F3S를 제외한 모든 배합에서 40 MPa 이상의 높은 강도 발현 효과를 보였으며, 또한 4F3S의 경우 24 MPa 이상의 강도로 벨라이트계 저열 포틀랜드 시멘트 중량 대비 치환율 70%를 기준으로 압축강도 결과는 7S > 4F3S > 7F의 결과를 보여줄 수 있다.

4.3 미세 구조

벨라이트계 저열 포틀랜드 시멘트, 고로 슬래그와 플라이애쉬를 각각 혼합한 2성 분계 결합재별 시멘트 페이스트 내의 결정 상태 및 미세 조직 구조를 촬영한 SEM image (scanning electron microscope analysis) 결과이다 (Fig. 4). 초기 수화생성물인 침상 형태의 에트린자이트 (E) 부터 경화된 시멘트 페이스트 내부의 수화생성물 즉 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 와 반응하여 C-S-H 등이 결정이 재령이 경과됨에 따라 치밀한 미세 결정 조직을 형성하였다. SEM 촬영 결과에서 C-S-H는 플라이애쉬 치환 결합재 대비 벨라이트계 저열 포틀랜드 시멘트와 고로 슬래그 치환 결합재가 다량 생성되었으며, 28일 재령의 3F 시험체에서 다량의 에트린자이트가 나타남을 알 수 있다. 재령일 증가에 따른 수화 반응이 일어남에 따라 조직 사이의 공극이 서로 연결되고 점차 구 형태로 경화되는 조직 변

화에 의해 시멘트 페이스트 매트릭스 내부 공극이 결집되어 재령 경과에 따라 강도가 증가되는 것을 알 수 있다.

5. 결론 및 분석

이 연구에서는 벨라이트계 저열 포틀랜드 시멘트 대비 누적 수화열이 낮으면서 압축강도를 발현할 수 있는 2성 분계 및 3성 분계 벨라이트계 혼합 결합재를 사용한 실험 결과를 통해 얻어진 결론은 다음과 같다.

- 1) 플라이애쉬가 치환된 2성 분계 결합재의 28일 누적 수화열은 $P > 1F > 3F > 5F$ 의 순으로 낮게 나왔으며, 플라이애쉬 함유량의 증가함에 따른 높은 수화열 저감 효과를 보여주는 대신 28일 모르타르 압축강도에서 플라이애쉬가 50% 이상 치환한 경우 20 MPa 이하의 낮은 강도 값을 나타내었다.
- 2) 고로 슬래그가 치환된 2성 분계 결합재의 28일 누적 수화열은 $3S > 5S > P > 7S$ 의 순으로 낮게 나왔으며 고로 슬래그 치환율이 증가함에 따라 수화열 감소 효과는 높은 치환율 대비 낮은 수화열 감소폭으로 저열 효과는 낮지만, 3S, 5S는 28일 모르타르 압축강도가 44 MPa 이상의 높은 강도 발현 효과를 나타내었다.
- 3) 플라이애쉬와 고로 슬래그가 치환된 3성 분계 결합재의 28일 누적 수화열의 경우 플라이애쉬 치환율이 높을수록 낮은 수화열 결과를 보여주었다. 특히 4F3S는 미소수화열 35 cal/g 이하로 plain 대비 50%의 저열 효과를 보여주고, 28일 모르타르 압축

Fig. 4 Scanning electron microscope photos at 3, 7 and 28 days

강도의 경우에는 1F3S, 2F3S 및 3F3S가 40 MPa 이상의 높은 강도 발현 효과와 4F3S는 24 MPa의 강도를 보여줌으로써 매스 콘크리트 공사 시 3성 분계 결합재를 활용하여 수화열에 의한 온도 상승폭을 감소시켜 전체 콘크리트의 품질, 내구성, 수밀성 및 강도 등을 저하시키는 균열을 제어하는데 효과적이라고 판단된다.

감사의 글

이 논문은 국토해양부 초장대교량사업단(과제번호 08 기술혁신 E01)의 재정적 지원을 받아 연구되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Metha, P. K. and Monteiro, P. J. M., "Concrete, Microstructure, Properties and Materials," *McGraw Hill*, New York, 2006, 659 pp.
2. Neville, A. M., "Properties of Concrete," *Wiley*, New York, 1996, 884 pp.
3. Garcia, E. J. I. and Sharp, J. H., "The Microstructure and Mechanical Properties of Blended Cement Hydrated at Various Temperatures," *Cement and Concrete Research*, Vol. 31, I. 5, 2001, pp. 695~702.
4. Kim, J. J. H., Jeon, S. E., and Kim, J. K., "Development of New Device for Measuring Thermal Stresses," *Cement and Concrete Research*, Vol. 32, I. 10, 2002, pp. 1645~1651.
5. Popescu, C. D., Muntean, M., and Sharp, J. H., "Industrial Trial Production of Low Energy Belite Cement," *Cement and Concrete Composites*, Vol. 25, I. 7, 2003, pp. 689~693.
6. Guerrero, A., Goni, S., Macias A., and Luxan M. P., "Effect of the Starting Fly Ash on the Microstructure and Mechanical Properties of Fly Ash-Belite Cement Mortars," *Cement and Concrete Research*, Vol. 30, I. 4, 2000, pp. 553~559.
7. Schutter, G. D., "Hydration and Temperature Development of Concrete made with Blast-Furnace Slag Cement," *Cement and Concrete Research*, Vol. 29, I. 1, 1999, pp. 143~149.
8. Song, H. W., Lee, C. H., and Lee, K. C., "Corrosion of Steel in Blended Concrete Containing OPC, PFA, GGBS and SF," *Corrosion Science and Technology*, Vol. 8, No. 5, 2009, pp. 171~176.
9. Zhang, Y., Sun, W., and Liu S., "Study on the Hydration Heat of Binder Paste in High-Performance Concrete," *Cement and Concrete Research*, Vol. 32, I. 9, 2002, pp. 1483~1488.
10. 손영준, 하재담, 임태선, 이종열, 김태홍, "저열 포틀랜드 시멘트를 사용한 댐 콘크리트의 특성에 관한 연구," 한국콘크리트학회 봄 학술대회 논문집, 18권, 1호, 2006, pp. 445~448.
11. 하재담, 권태훈, 유성영, 김영우, 권태문, 안병락, "저열 포틀랜드 시멘트를 활용한 일반강도 저발열 자기충전 콘크리트의 지하박스 구조물 현장적용에 관한 연구," 한국콘크리트학회 봄 학술대회 논문집, 21권, 1호, 2009, pp. 215~216.
12. Tennis, P. D. and Jennings, H. M., "A Model for Two Types of Calcium Silicate Hydrate in the Microstructure of Portland Cement Pastes," *Cement and Concrete Research*, Vol. 30, I. 6, 2000, pp. 855~863.
13. Meinhard, K. and Lackner, R., "Multi-Phase Hydration-Heat Release of Blended Cements," *Cement and Concrete Research*, Vol. 38, I. 6, 2008, pp. 794~802.
14. Pelletier, L., Winnefeld, F., and Lothornbach, B., "The Ternary System Portland Cement-Calcium Sulphoaluminate Clinker-Andyrite: Hydration Mechanism and Mortar Properties," *Cement and Concrete Composite*, Vol. 32, I. 7, 2010, pp. 497~507.

요 약 전국적으로 토목 및 건축 구조물의 대단위 공사 및 정비 사업이 발족 및 추진되어 부재 크기가 큰 매스 콘크리트 구조물이 많이 건설되고 있다. 대규모 콘크리트 구조물의 콘크리트 매트릭스 내 높은 수화열 발생은 콘크리트의 품질 및 시공 기간을 좌우하는 가장 중요한 요인이 되고 있다. 이로 인해 발생하는 내부 균열이 콘크리트의 내구성, 수밀성 및 강도를 저하 시키게 된다. 벨라이트계 저열 포틀랜드 시멘트와 산업부산물을 이용한 수화열을 저감시키는 방법으로 이 연구에서는 고로 슬래그 또는 플라이애쉬를 7단계로 치환한 2성 분계 결합재와 4단계로 치환한 3성 분계 결합재를 사용하였고, 혼화재의 치환율 변화가 재령에 따른 수화 발열량, 강도 및 SEM, XRD 등의 기초 물성에 미치는 영향을 비교 분석하였다. 플라이애쉬가 치환된 2성 분계 결합재의 28일 누적 수화열은 플라이애쉬 함유량의 증가함에 따른 높은 수화열 저감 효과를 보여주며, 고로 슬래그가 치환된 2성 분계 결합재의 28일 누적 수화열은 고로 슬래그 치환율이 증가함에 따라 감소하지만 수화열 감소 효과는 높은 치환율 대비 낮은 결과를 나타내었다. 3성 분계 결합재의 28일 누적 수화열의 경우 플라이애쉬 치환율이 높아짐에 따라 낮은 수화열 결과를 보여주며 특히 40% 플라이애쉬 및 30% 고로 슬래그 결합재는 벨라이트계 저열 포틀랜드 시멘트 대비 50%의 저열 효과를 보여주었다. 연구 결과를 통해 수화열 발생이 낮고 시공 가능한 압축강도를 가진 벨라이트계 혼합 결합재를 사용하여 콘크리트 내 온도 상승이 감소된 것을 보여주었다.

핵심용어 : 수화열, 벨라이트계 저열 포틀랜드 시멘트, 플라이애쉬, 고로 슬래그, 이성 분계