

저발열 콘크리트 수화열 평가의 실험적 연구 (Belite rich 시멘트 중심)

An Experimental Study on the Evaluation of Hydration Heat of Low Heat Concrete (in case of Belite rich Cement)

현석훈* 박춘근** 신영인** 김용호**
Hyun, Suk Hoon Park, Choon Keun Shin, Young In Kim, Yong Ho

Abstract

In hardening massive concrete, the heat of hydration gives rise to considerable thermal gradients and thermal stresses, which might cause early age cracking.

This paper deals with the results of evaluation of hydration heat of low heat concrete, using Belite rich cement (low heat cement) and compared with OPC, slag added cement and fly ash added cement.

Result of evaluation of hydration are presented in this paper. The concrete made with Belite rich cement gets low temperature of center point and low thermal gradients between surface and center points.

1. 서 론

콘크리트의 주재료인 시멘트 수화발열에 의해 콘크리트는 온도 상승을 일으키며, 발생된 열의 방출 및 확산의 차이로 인해 응력이 발생되어, 이것이 콘크리트 균열발생의 주요 문제점으로 지적된바 있다. 이러한 시멘트 수화발열에 의한 콘크리트 온도 증가를 억제시키는 방법으로는 결합재료 자체의 수화열 발생이 적은 결합재료를 선택하는 방법, 콘크리트 자체의 타설온도를 낮추는 방법, 타설전 사전에 파이프를 매설한 후 냉각수 통과에 의한 파이프 쿨링방법 등으로 크게 구분될 수 있다.

본 연구는 수화발열을 초기에 적게하는 결합재료 선택에 의한 콘크리트 최고 상승온도를 억제시키

* 정회원, 쌍용연구소 책임연구원

** 쌍용양회 영종도 신공항 품질관리실장

는 방법에 대해 연구를 하였다.

또한 초기 수화발열을 적게하기 위한 결합재료를 선택하는 방법으로는 슬래그, 플라이애쉬 등의 혼합재료를 치환하는 방법과 지발열 시멘트를 사용하는 방법으로 구분될 수 있는데, 상호 비교 검토를 통해 적절한 결합재료를 검증하는 연구를 하였다.

기존에 사용되던 결합재료로써 플라이애쉬, 슬래그 치환이 가장 많이 연구되어 왔으나, 실질적으로 한국에서 부산물로 나오는 플라이애쉬는 유연탄의 공급원 변화, 입도, 입형, 소성상태 등 품질 불안정 요인이 많기 때문에 정제과정이 필연적으로 뒤따라야 한다.

따라서, 실제 사용상 제약조건으로 대두되어 많은 연구에도 불구하고 파이프 쿨링 등이 설치될 수 없는 철근 및 설치물이 매설되는 매스 콘크리트에서 사용실적이 많이 없었다. 또한, 슬래그 치환은 콘크리트 물성의 많은 장점에도 불구하고 슬래그의 온도 의존성¹⁾으로 인하여 매스 콘크리트에서 최고 온도를 저하시키는데 만족스러운 결과를 얻지 못하고 있다.

본 연구에서는 새로이 개발된 Belite rich 시멘트를 단독 사용하여 매스 콘크리트에서의 수화열 특성의 실험을 실시하였으며, 보통 포틀랜드 시멘트 단독, 보통 포틀랜드 시멘트에 플라이 애쉬 치환, 슬래그 치환 등의 수화열과 기타 콘크리트 물성의 비교 실험을 실시하였다.

2. 실험개요

2.1 사용 결합재료

사용 결합재료의 화학성분은 Table 1과 같으며, 사용 굵은 골재는 25mm 이하 영종도 신공항 석산 채석을 사용했으며, 잔골재는 영종도 신공항 세척해사를 사용하였다.

Table 1 Chemical composition of 결합재료

구 분	화 학 성 분 (%)										광 물 조 성 (%)			
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	f-CaO	Ig. loss	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
Belite rich cement	24.4	3.9	3.3	61.0	2.1	0.35	0.09	2.7	0.9	2.7	27	58	3	9
보통포틀랜드 시멘트(OPC)	19.7	5.7	3.3	62.6	3.4	0.68	0.16	2.2	1.3	2.3	56	14	10	10
플라이애쉬	61.2	27.9	4.3	1.7	0.4	0.80	0.40	0.0	0.0	1.9				
슬래그	31.4	14.2	0.5	44.2	5.6	0.54	0.20	2.2	0.0	1.2				

슬래그 분말도 4,500cm²/g 분말 슬래그를 OPC에 20% 치환 첨가를 하였으며, 플라이애쉬는 미연카본 3.0%가 되게 정제한 플라이 애쉬를 OPC에 15% 치환 첨가를 하였다.

2.2 콘크리트 배합 및 결합재료량

실험에 사용한 콘크리트 배합과 결합재료 치환량은 Table 2와 같으며, 사용결합재료의 콘크리트 배합은 동일하게 실험을 하였다.

Table 2 Mix design of Concrete

결합재료 종류	치환 비율(%)	W/C(%)	S/A(%)	Cement(kg/m ³)
Belite rich cement	100			
보통 포틀랜드 시멘트	100	45	46	360
OPC에 플라이 애쉬 15% 치환	15			
OPC에 슬래그 20% 치환	20			

2.3 실험항목 및 방법

2.3.1 실험실 실험

(1) 압축강도와 정탄성계수 및 건조수축 실험은 콘크리트 블록을 제작할 때 공시체를 제작하여 3, 7, 14, 28, 56, 91일에서 실시하였다.

(2) 용해열법 KS수화열 실험은 물-결합재비를 Table 2의 조건과 같게 45%로하여 KSL 5121 방법에 의해, 3, 7, 28일에서 용해열법에 의한 수화열을 측정하였다.

(3) 콘크리트 단열 상승온도 실험기기를 이용하여 Table 2의 배합조건에 의한 각 결합재료에 따른 단열온도 상승 실험을 실시하였다.

2.3.2 콘크리트 블록에서의 온도상승 및 변형을 측정실험

3면을 5mm 압축 스티로폴로 단열하여 실구조물의 semi단열상태와 유사한 조건 하에서 콘크리트를 타설한후 뒷면은 거푸집을 덮어 보온한 120×120×120cm의 콘크리트 블록에서 온도상승 실험을 실시하였으며, 측정 부위는 콘크리트 표면에서 10cm 깊이에 1개소, 그 다음 25cm 깊이마다 1개소씩 측정 점을 설치하여 5개소에서 측정을 하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 압축강도 및 정탄성계수

압축강도 및 정탄성계수 실험결과는 Table 3 과 같다. Belite rich cement는 초기강도 발현은 저조하나 후기강도에서 강도발현이 Type I 보다 커지고 있다. 이것은 Table 1에서 볼 수 있듯이 Belite rich cement는 후기강도 및 고강도 발현에 절대적인 영향을 주는 골재와 시멘트페이스트 간의 transition zone 에서의²⁾ Ca(OH)₂ 가 적기 때문인데, 이것은 Ca(OH)₂ 가 적게 생성되도록 C₂S 광물이 많이 만들어지도록 Belite rich 시멘트가 제조되었기 때문이다.

3.2 용해열법 KS 수화열과 콘크리트 단열 상승온도 실험결과

용해열법 KS 수화열 측정결과는 Table 4와 같으며, 콘크리트 단열온도 상승 실험결과는 Table 5와 같다.

Table 3 각 결합재료의 콘크리트 압축강도와 정탄성계수

구 분	양생 기간	Belite rich cement	OPC	OPC에 플라이애쉬 15% 치환	OPC에 슬래그 20% 치환
압축강도 (kg/cm ²)	3일	123	206	171	180
	7일	211	307	253	271
	14일	275	319	289	302
	28일	331	345	317	347
	56일	425	396	416	422
정탄성계수 (×10 ⁵ kg/cm ²)	3일	1.71	2.10	1.90	2.01
	7일	2.21	2.52	2.43	2.32
	14일	2.58	2.78	2.61	2.54
	28일	2.65	2.91	2.66	2.64
	56일	3.14	2.95	3.10	3.11

Table 4 용해열법 KS 수화열(cal/g) 측정결과

구 분	Belite rich cement	보통 포틀랜드 시멘트(OPC)	OPC에 플라이애쉬 15% 치환	OPC에 슬래그 20% 치환
3일 수화열	58.8	64.2	56.5	61.3
7일 수화열	63.9	85.1	79.6	82.4
28일 수화열	70.0	94.3	87.2	84.9

Table 5 콘크리트 단열 상승온도 실험 결과

구 분	Belite rich cement	보통 포틀랜드 시멘트(OPC)	OPC에 플라이애쉬 15% 치환	OPC에 슬래그 20% 치환
최고 온도 (°C)	53	65	56	61
단열 상승온도 (°C)	32	46	35	41

3.3 콘크리트 블럭에서의 온도상승 시험

Table 6은 120×120×120cm의 콘크리트 블럭의 최고온도 상승시간과 온도의 결과이다. OPC의 최고온도는 66.3°C, Belite rich Cement의 최고온도는 OPC에 비해 8.3°C 정도 낮게 나타났으며, 슬래그 20% 치환일 경우는 OPC에 비해 2.8°C정도 낮게 나타나 저발열 콘크리트 제조에 크게 기여를 하지 못하는 것으로 나타났다.

Table 6 콘크리트 블럭(120×120×120cm)의 최고온도 및 도달시간과
중심부위와 표면부위의 최대온도 차이 및 도달시간

구 분		Belite rich cement	OPC	OPC에 플라이애쉬 15% 치환	OPC에 슬래그 20% 치환
콘크리트 타설 온도 (°C)		28	27	28	27
양생시작후 중심부(85cm지점)의 최고온도	최고온도(°C)	58	66.3	62.7	63.5
	도달시간(hr)	61	34	36	38
결합재료 간의 최고온도 차이 (Belite rich cement 기준)		0	8.3	4.7	5.5
양생시작후 중심부와 표면부의 최대온도 차이	최대온도 차이 (°C)	13.7	14.5	15.5	20.5
	도달시간(hr)	61	40	38	42

Table 6의 콘크리트 블럭 실험은 타설온도가 27~28°C 이었으며, Belite rich cement 는 최고온도가 낮고, 최고온도 도달 시기가 늦으며, 온도 상승속도가 완만하고, 중심부와 표면부의 온도 차이가 적고, 중심부와 표면부의 온도 최대 차이 도달 재령이 길어져서 인장강도가 발현될 시간적 여유가 있기 때문에 온도 차이에 의해 발생하는 인장응력을 인장강도가 초과할 수 있는 여지가 있으므로 콘크리트에 온도 균열 발생 확률이 적어 질 것으로 추정되나, 초기재령에서의 콘크리트 물성과 관련하여 연구 검토될 사항이다.

플라이애쉬와 슬래그 치환에 의한 최고온도는 OPC에 비해 그다지 저하되고 있지 않는데, 이것은 시멘트 KS 수화열 실험 결과와는 상이한 결과를 보여주고 있다. 이것은 실험 방법 상의 차이에 기인되는 것으로 용해열법 KS 수화열은 23°C에서 양생되는 관계로 콘크리트 온도 상승에 의한 포조란 반응의 수화 촉진 가속화가 없기 때문이며, 결합재의 수화촉진의 가속화가 일어나는 콘크리트 블럭의 중심부에서 최고온도와는 다른 결과를 보여 주고 있다.

위의 내용을 뒷받침 할 수 있는 것은 플라이애쉬, 슬래그 첨가의 경우 보통 포틀랜드 시멘트의 경우 보다도 중심부와 표면부의 최대온도 차이가 더 크게 나타나고 있다.

이것은 중심부에서 단열상태에 의한 온도 상승으로 인해 포조란 물질의 수화촉진에 기인되는 것으로 열의 방출이 용이한 표면부의 수화가 상대적으로 중심부 보다 느리기 때문에 온도 차이가 발생하는 것이다. 특히 슬래그의 경우는 수화활성이 온도 의존도가 보통 포틀랜드 시멘트 보다 크기 때문에" 중심부와 표면부의 최대온도 차이가 더 크게 나타나고 있는 것으로 판단된다.

따라서 실험실에서 용해열법 KS수화열과 콘크리트 단열 상승온도 결과치에서의 결합재료의 수화열 특성을 비교하는 것은, 실제 mock-up 실험이나 매스 콘크리트 실 구조물에서의 결과를 크게 오판할 수 있는 결과를 얻을 수 있다.

그러므로 저발열 콘크리트 제조에 있어서 슬래그를 어느 한계점 이하로 치환할 경우, 오히려 온도 구배차이에 의한 균열 발생 확률이 높아 질 수 있다고 판단된다.

3.4 건조수축 시험결과

Fig. 1 은 건조수축시험 결과로써 Belite rich cement의 경우는 장기재령에서 건조수축이 적었다. 이것은 Table 1의 광물조성상에서 이해할 수 있듯이 콘크리트 건조수축에 절대적인 영향을 주는 시멘트 광물중에 C3S, C3A의 성분이 적기 때문이다.

균열은 수화열에 의한 내외부차에 의해서 유발되는 온도균열과 건조수축에 의한 균열이 복합적으로 작용하여 콘크리트에 균열로써 나타나는데, Belite rich cement의 경우는 균열 요인이 타 결합재보다 적기 때문에 균열발생 확률이 적어질 것으로 판단된다.

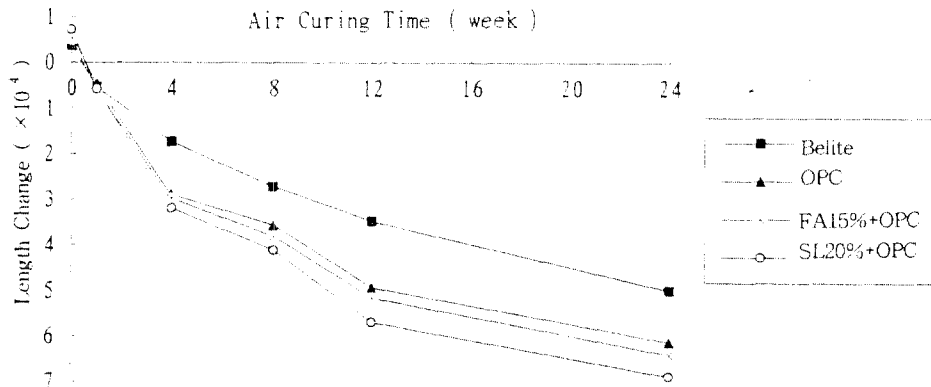


Fig.1 결합재료의 건조수축 실험 결과

4. 결 론

- 1) Belite rich cement는 콘크리트 중심부의 최고온도가 보통 포틀랜드 시멘트에 비해 8.3 ℃ 낮았으며, 최고온도 도달 시기도 27시간 정도 지연되어, 61시간후에 나타났다.
- 2) Belite rich cement는 콘크리트 중심부와 표면부의 온도 차이가 적고, 중심부와 표면부의 온도 최대 차이 도달 재령이 길어져서, 61시간후에 나타났다.
- 3) 지발열 콘크리트 제조에 있어서 포조란 물질을 적게 치환할 경우, 오히려 온도 구배차이에 의한 균열 발생 확률이 높아 질 수 있다고 판단되며, 특히 슬래그 치환이 중심부와 표면부의 온도 차이가 크게 나타났다.

● 참고문헌 ●

1. 中本純次 外 2人, 高爐슬래그高含有콘크리트의強度發現特性におよぼすの養生溫度の影響, セメント・コンクリート論文集, No.48, 1994 pp.358-363.
2. H.Uchikawa, Effect of Hardened Structure of Blended Cement Mortar and Concrete on their Strength, Journal of Research of the ONODA Cement Company, vol.42, No.126, 1990 pp.2-14.