



3성분계 시멘트의 구성비 변화에 따른 페이스트 및 콘크리트의 내부온도 특성

김연승¹⁾ · 김동혁²⁾ · 지남용^{3)*}

¹⁾한양대학교 대학원 건축환경공학과 ²⁾우림건설(주) ³⁾한양대학교 건축대학 건축공학부

The Properties of Internal Temperature of Paste and Concrete according to Component Ratio Variation of Ternary System Cement

Yeon-Seung Kim,¹⁾ Dong-Hyeok Kim,²⁾ and Nam-Yong Jee^{3)*}

¹⁾Dept. of Architectural Environmental Engineering, Graduate School, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

²⁾Woolim Construction Co., Ltd., Seoul 137-070, Korea

³⁾Dept. of Architectural Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

ABSTRACT For this study, the semi-adiabatic temperature rising test is accomplished by using ternary system cement (OPC, BFS, FA) reducing temperature crack. Two tests are conducted; one is for the paste test, and the other is for the concrete test. As the results of paste tests, using fly ash is better to reduce hydration temperature than doing blast furnace slag. In the case of the paste mixed ternary system cement, the more fly ash is mixed and the less blast furnace slag is used, the lower the temperature is. The less the mixture ratio of blast furnace slag is and the more the mixture ratio of fly ash is, the later the temperature rising velocity and descending velocity are. Besides, the temperature is lower if water/binder ratio is high. The use of ternary system cement has the retardation effect of temperature rising because the time to reach the maximum temperature is in the order of OPC100, binary system cement, and ternary system cement. From the test, the maximum temperature of concrete used ternary system cement is 8~11°C lower than that of concrete used OPC100. Moreover, temperatures rising velocity and descending velocity of ternary system cement range 47~51% and 37~42% compared with OPC100. The specimen of concrete shows remarkable low internal temperature and slow temperature rising velocity and descending velocity compared with the specimen of paste because it is that temperature loss of concrete is much more than paste specimen according to aggregates.

Keywords : ternary system cement, semi-adiabatic temperature rising test, mass concrete, heat of hydration, temperature crack

1. 서 론

최근 도심지의 콘크리트 건축물이 점점 초고층화, 대형화 되어감에 따라 부재의 단면이 큰 매스콘크리트의 적용이 증가하고 있다. 매스콘크리트는 타설 후 양생초기에 수화열 축적으로 인한 내부 온도상승으로 중심부와 표면부의 온도차에 의해 온도응력이 발생하여 온도균열 발생 가능성을 증가시킨다.¹⁾ 이러한 온도균열은 콘크리트의 내구성 및 수밀성을 저하시킬 수 있기 때문에 수화열을 저감하여 온도균열을 최소화할 필요가 있다.

매스콘크리트의 수화열 저감 방안으로는 단위시멘트량 저감, 저발열 시멘트 사용, 플라이애쉬나 고로슬래그 등과 같은 혼화재의 치환 등이 있다.^{2,4,9)} 이중 혼화재 치환의 경우 플라이애쉬와 고로슬래그를 동시에 혼합한 3

성분계 시멘트 적용 시 콘크리트 내부의 최고 온도를 저하시키는 효과가 현저하다는 보고 있다.^{5,7)} 그러므로 3성분계 시멘트는 수화열 저감에 매우 효과적인 것이라 기대된다. 그러나 아직까지 3성분계 시멘트 사용에 의한 수화발열 특성에 관한 연구 및 적용 사례는 드물고 플라이애쉬만을 혼합하는 경우가 주를 이루고 있어, 대형 구조물의 내구성 증진과 수밀성 확보 차원에서 온도균열 저감 효과가 기대되는 3성분계 시멘트를 사용한 콘크리트의 내부온도 특성에 관한 데이터 축적이 요구된다.

본 연구에서는 보통포틀랜드시멘트 (이하 OPC), 고로슬래그미분말 (이하 BFS), 플라이애쉬 미분말 (이하 FA)의 단독사용 및 혼합사용 한 페이스트 및 콘크리트의 간 이 단열온도상승 실험을 통해 각 시험체 별 최고온도, 최고온도 도달시간, 온도상승속도 및 하강속도 등의 내부온도 특성에 대해 검토하였다. 이를 바탕으로 매스콘크리트 구조물의 수화열 저감 측면에서 3성분계 시멘트 적용의 활성화를 위한 기초자료를 제공하고자 한다.

*Corresponding author E-mail : nyjee@hanyang.ac.kr

Received September 8, 2008, Revised October 17, 2008, Accepted October 29

©2008 by Korea Concrete Institute

2. 수화열 상승 요인⁸⁻¹²⁾

수화열 상승에 영향을 끼치는 주된 요소로는 시멘트의 종류, 단위시멘트량, 타설시 콘크리트의 온도, 혼화재 사용 등이 있다.

2.1 시멘트 종류에 의한 영향

시멘트의 주요 구성성분인 C₃S, C₃A, C₂S, C₄AF는 각기 다른 수화발열 특성을 가지고 있어 그 구성 비율에 따라 시멘트의 수화열량이 달라진다. 이 중 C₃S, C₃A는 발열량이 크고 쉽게 수화하기 때문에 시멘트의 최종수화열량에 큰 영향을 끼친다. 한편, ACI 207.1R-96 「Mass Concrete」에서는 매스콘크리트에 사용되는 포트랜드시멘트의 종류를 수화열에 가장 큰 영향을 끼치는 C₃S, C₃A의 함량, 혹은 재령 7일에서의 수화열로서 구분하고 있다.

2.2 단위시멘트량에 의한 영향

콘크리트의 최대 상승온도와 반응속도는 단위시멘트량에 따라 달라지며 수화열 상승에 직접적으로 영향을 준다. 기존의 연구에 의하면 단위시멘트량이 증가함에 따라 최대 단열온도상승값은 증가하며, 그 값은 단위시멘트량 10 kg/m³에 대하여 약 1°C 정도라고 한다.

2.3 혼화재 사용에 의한 영향

BFS, FA와 같은 시멘트 대체 재료는 포졸란반응으로 인한 수화열 저감 효과 및 온도상승 지연효과가 있어 매스콘크리트와 같이 수화열을 고려해야 하는 구조물에 많이 사용된다. 이 중 BFS는 온도의존성이 높은 혼화재로서 주변온도가 높을수록 수화가 활발하게 진행된다.¹⁰⁾

2.4 콘크리트 온도에 의한 영향

콘크리트 타설시 주변의 높은 온도는 결합재의 반응을 촉진하기 위한 충분한 열작용을 제공하므로 시멘트의 수화시 주변온도가 높을수록 반응속도가 빨라지게 된다. 따라서 타설시 콘크리트 온도가 높을수록 초기 콘크리트의 온도상승속도는 빨라지게 된다. 콘크리트의 타설 후 급격한 내부온도 상승은 최고온도 도달시간을 단축시켜 온도균열 발생가능성을 증가시킨다.

3. 실험 계획

3.1 실험 인자 및 수준

본 연구는 콘크리트의 수화열에 영향을 미치는 인자 중 혼화재 사용에 의한 영향을 검토하기 위하여 페이스트 실험 및 콘크리트 실험에 대해 각각 Table 1과 같은

Table 1 Experimental factor

	Experimental factor	Level ⁽¹⁾	Unit	
Paste	W/B	0.40	1	
	Binder proportion (%)	Unary system	OPC100 BFS100 FA100	3
		Binary system	OPC70BFS30 OPC50BFS50 OPC70FA30 OPC50FA50	4
	W/B	0.35, 0.40, 0.45	3	
Binder proportion (%)	Ternary system	OPC50BFS10FA40 OPC50BFS20FA30 OPC50BFS30FA20 OPC50BFS40FA10	4	
	W/B	0.40	1	
Concrete	Binder proportion (%)	OPC100 OPC50BFS10FA40 OPC50BFS20FA30 OPC50BFS30FA20 OPC50BFS40FA10	5	

⁽¹⁾O : OPC, B : BFS, F : FA

실험 인자 및 수준으로서 실험을 진행하였다.

페이스트 실험에서의 물결합재비는 ASTM C 186-05 「Standard Test Method for Heat of Hydration of Hydraulic Cement」에서 사용된 0.40로 하였고, 3성분계 시멘트에 대해서는 0.35, 0.45의 물결합재비에 대해 추가적으로 실험을 실시하여 물결합재비가 수화열에 끼치는 영향을 검토하였다. 또한 BFS와 FA의 단독 사용시 수화진행을 위한 알칼리자극제로 Ca(OH)₂를 사용하였다. 자극제의 첨가율에 따른 알칼리 슬래그 모르타르의 강도 특성에 관한 기존의 연구¹³⁾에서 Ca(OH)₂의 첨가율이 9~12% 이상이면 28일 압축강도 증진율이 낮아지는 것으로 나타나 본 연구에서는 BFS의 자극제 첨가율을 10%로 하였으며, FA도 동일하게 하였다.

콘크리트 실험은 OPC량을 50%로 고정하고 BFS와 FA의 치환율을 달리하여 결합재 구성 비율을 5개 수준으로 하였으며 물결합재비는 페이스트실험과 동일한 0.4로 하였다.

3.2 사용 재료

3.2.1 결합재

결합재로 사용된 OPC, BFS, FA의 화학조성은 Table 2와 같다. OPC는 비중 3.15, 분말도 3,400 cm²/g인 국내 H사의 보통포트랜드시멘트를 사용하였으며, BFS는 비중 2.91, 분말도 4,325 cm²/g인 국내산 슬래그미분말을 사용하였다. 또한 FA는 국내산으로 비중 2.50, 분말도 3,328 cm²/g이다.

3.2.2 자극제

순도 95% 이상인 수산화 칼슘 (일본 Jtk)을 알칼리 자

Table 2 Chemical composition of binders

(unit: %)

Binder	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Al ₂ O ₃	TiO ₂	etc.	Ig.loss
OPC	21.95	2.81	60.12	3.32	2.11	6.59	-	3.1	1.85
BFS	33.40	0.39	42.70	6.30	0.30	14.01	-	2.9	0.50
FA	53.60	9.40	4.70	2.60	1.80	20.00	4.2	3.8	3.4

Table 3 State and specific weight of activator

Type	State	Specific weight
Ca(OH) ₂	White powder	2.24

극제로 사용하였으며, 그 정상 및 비중은 Table 3과 같다.

3.2.3 골재

잔골재는 인천산 세척사, 굵은 골재는 경기 광주산 부순자갈을 사용하였으며 물리적 성질은 Table 4와 같다.

Table 4 Physical properties of aggregate

Test item Aggregate	Fineness modulus	Surface dried density (g/cm ³)	Water absorption (%)	Passing the 0.08 mm sieve (%)	Solid volume percentage (%)	Unit volume weight (kg/l)
Fine aggregate	2.64	2.60	0.99	0.9	57	1.56
Coarse aggregate	6.95	2.65	0.72	0.3	59	1.56

Table 5 Mixture proportions of concrete and paste

Paste specimen	W/B	Unit weight (kg/m ³)				AA ⁽¹⁾ (B×%)			
		Water	OPC	BFS	FA				
OPC100	0.40	558	1394	-	-	-			
BFS100		538	-	1345	-	10.0			
FA100		500	-	-	1250	10.0			
OPC50BFS50	0.40	548	684	684	-	-			
OPC70BFS30		552	965	414	-				
OPC50FA50		527	659	-	659				
OPC70FA30		539	943	-	404				
OPC50BFS10FA40	0.35	498	711	142	569	-			
OPC50BFS20FA30		502	717	287	430				
OPC50BFS30FA20		506	723	434	289				
OPC50BFS40FA10		510	729	583	146				
OPC50BFS10FA40	0.40	531	664	133	531	-			
OPC50BFS20FA30		535	669	268	401				
OPC50BFS30FA20		539	674	404	270				
OPC50BFS40FA10		543	679	543	136				
OPC50BFS10FA40	0.45	560	623	125	498	-			
OPC50BFS20FA30		564	627	251	376				
OPC50BFS30FA20		568	632	379	253				
OPC50BFS40FA10		572	636	509	127				
Concrete specimen	W/B	S/a (%)	Unit weight (kg/m ³)						ad. (B×%)
			Water	OPC	BFS	FA	Aggregate		
							Coarse	Fine	
OPC100	0.40	48.0	152	380	-	-	954	864	1.0
OPC50BFS10FA40			152	380	38	152	935	847	
OPC50BFS20FA30			152	380	76	114	938	850	
OPC50BFS30FA20			152	380	114	76	941	853	
OPC50BFS40FA10			152	380	152	38	944	855	

⁽¹⁾AA : alkali activator

3.2.4 혼합수

시험체의 혼합에 사용되는 물은 불순물에 의한 영향을 배제하기 위해 증류수를 사용하였으며, 혼합시 온도는 23 ± 2°C로 하였다.

3.3 배합 및 시험체 제작

3.3.1 배합

페이스트 및 콘크리트의 배합은 Table 5와 같으며 중

량배합으로 하였다.

페이스트 배합은 각 결합재별 비중이 다르므로 동일한 체적에 투여되는 결합재의 질량이 다르게 되어 결합재의 질량비로서 비교하였다. 한편, 콘크리트 배합은 혼합수의 양과 결합재량을 고정하고 비중차이에 의한 체적 변화를 골재량으로 조절하였으며 콘크리트 작업성 증진을 위해 폴리카본산계 고성능 AE감수제를 결합재 중량의 1.0% 첨가하였다.

3.3.2 단열상자 제작

단열상자는 KS M 3808 발포 폴리스틸렌 (PS) 단열재의 비드법 1종 단열판 1호 규격으로서 두께 100 mm인 것을 사용하여 페이스트 시험체 100 mm × 100 mm × 100 mm (1), 콘크리트 시험체 300 mm × 300 mm × 300 mm (27)의 크기로 Fig. 1과 같이 제작하였다. 또한, 단열재가 페이스트 및 콘크리트의 수분을 흡수하는 것을 막기 위해 내부면에 폴리에틸렌 필름을 부착하였으며, 단열재의 접착면 틈새는 실리콘으로 처리하였다.

3.3.3 온도센서 설치

시험체의 온도측정은 T형 열전대를 사용하였고, 내부 온도측정은 시험체의 대칭성을 고려하여 Fig. 2와 같이 페이스트 시험체는 4점, 콘크리트 시험체는 9점으로 하였다. 또한 단열재의 접착부분에서의 열손실 및 단열재 자체의 열손실을 검토하기 위하여 접착부분 및 단열재

외부 표면도 측정하였다.

3.4 온도 측정

시험체의 온도 측정은 데이터로거 (TDS-102, Tokyo Sokki)를 사용하였으며, 측정기간은 5일로 하였고 측정시간 간격은 30분으로 하였다. 측정기간 중 외기온 변화의 영향을 최소화하기 위하여 시험체를 항온항습실 (25 ± 2°C)에 위치시켰다.

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 시험체별 내부온도 분포

페이스트 및 콘크리트 간이 단열온도상승 시험체의 측정점별 최고온도는 Table 6과 같다.

페이스트 시험체 내부 측정점의 온도는 시험체 별로 모두 유사한 값을 나타내었지만 ④지점의 경우 접착부 틈새로 열손실이 발생되어 ①, ②, ③지점 보다 최고온도가 약 5~8°C 정도 낮게 나타났다.

한편, 5종류의 콘크리트 시험체 내부온도분포는 시험체별로 내부의 9개 온도 측정점 모두 유사한 값을 나타냈다. 다만 시험체 모서리 부분인 ①지점의 경우 페이스트 시험체와 마찬가지로 접착부 틈새로의 열손실로 인해 다른 내부의 8개 측정점보다 약 1~4°C 정도 낮게 나타났다. 접착면의 중심부인 ①지점의 온도가 외부의 ⑧, ①지점 보다 높게 나타난 것 또한 접착부로의 열손실이 발생하였음을 보여준다.

단열온도상승실험은 단열상태를 유지하기 위해 시험체 내부의 온도측정과 동시에 시험체 주변을 둘러싼 매질의 온도를 시험체 내부의 온도와 같게 하여 순환시키는 방식으로 열손실이 거의 없어 특정 배합에서의 최대온도 및 온도상승속도를 산출할 수 있다. 반면 간이 단열온도상승실험은 시험체의 온도가 상승함에 따라 시험체 내외부의 온도차가 발생하게 되고 시험체 외부를 둘러싼 단열재로의 열관류에 의한 열손실이 발생하여 특정 배합에서의 온도 특성치를 알아내기가 어렵지만, 본 실험과 같이 동일한 조건에서의 여러 가지 배합에 대한 비교를 통해 혼화제 사용에 의한 온도특성 검토는 가능할 것으로 사료된다.

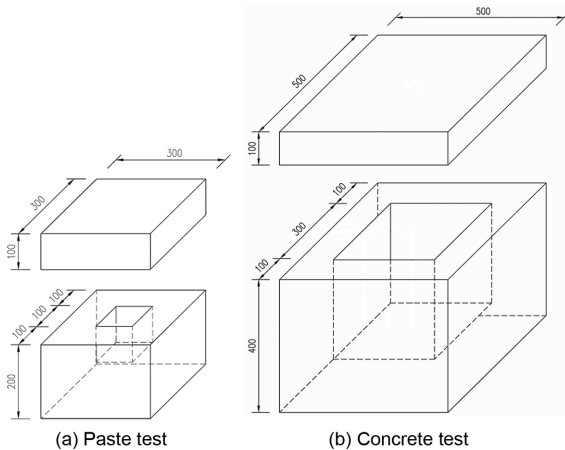


Fig. 1 Shape and size of the adiabatic box

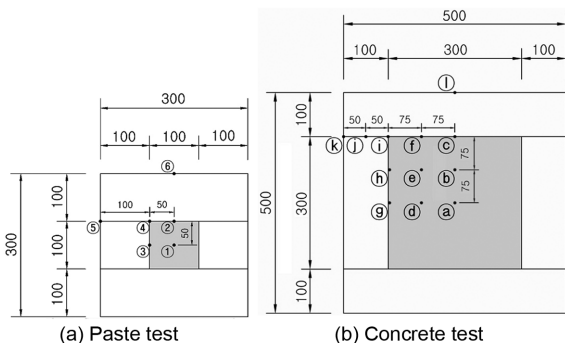


Fig. 2 Measuring points of internal temperature

4.2 시험체별 최고온도 및 최고온도 도달시간

4.2.1 결합재 단독사용 페이스트 시험체

결합재를 단독으로 사용한 페이스트 시험체 중심부의 온도이력은 Fig. 3의 (a)와 같으며 각 시험체의 최고온도 및 최고온도 도달시간은 Table 7과 같다.

최고온도는 OPC100 시험체가 104.5°C로 가장 높게 나타났으며 OPC100 시험체에 대한 BFS100과 FA100 시험체의 최고온도비는 각각 0.35, 0.29로 매우 낮게 나타났

Table 6 The maximum temperature of measuring points from each specimens (°C)

		Measuring point		①	②	③	④	⑤	⑥					
		Binder proportion												
Paste	W/B = 0.35	OPC50BFS10FA40		71.0	70.0	70.4	65.5	24.9	25.2					
		OPC50BFS20FA30		84.2	82.8	83.4	78.1	25.7	25.9					
		OPC50BFS30FA20		86.8	85.1	85.3	78.8	24.5	24.6					
		OPC50BFS40FA10		92.4	90.3	90.9	84.9	25.3	25.2					
	W/B = 0.40	OPC100		104.5	100.0	100.9	99.4	31.2	28.1					
		BFS100		36.7	36.5	36.5	35.3	27.4	27.2					
		FA100		30.3	30.3	30.3	30.0	27.1	27.3					
		OPC50BFS50		91.3	89.1	90.1	83.4	30.9	27.5					
		OPC70BFS30		100.8	98.0	99.3	92.4	27.3	26.2					
		OPC50FA50		60.2	59.2	59.5	54.5	27.4	27.1					
		OPC70FA30		76.8	75.1	75.4	70.5	30.0	26.9					
		OPC50BFS10FA40		63.6	-	62.9	57.6	28.0	27.3					
	W/B = 0.45	OPC50BFS20FA30		71.8	70.3	71.0	67.0	27.2	25.0					
		OPC50BFS30FA20		79.7	78.3	78.7	72.2	27.3	26.1					
		OPC50BFS40FA10		87.1	85.6	85.7	79.9	27.8	26.5					
		OPC50BFS10FA40		58.1	57.1	56.9	53.7	24.8	24.8					
Concrete	OPC100		49.4	49.6	49.3	49.4	49.6	49.2	48.9	49.0	45.0	35.6	27.6	27.0
	OPC50BFS10FA40		38.9	38.8	38.7	38.8	38.8	38.7	38.7	38.6	37.3	30.8	27.5	27.3
	OPC50BFS20FA30		40.4	40.3	40.0	40.3	40.1	40.4	40.1	40.0	39.2	31.8	27.8	27.8
	OPC50BFS30FA20		40.1	40.2	39.8	40.0	40.1	39.8	39.9	39.6	38.7	32.9	29.0	27.9
	OPC50BFS40FA10		41.6	41.5	41.4	41.6	41.4	41.3	41.5	41.4	40.2	33.5	28.7	27.9

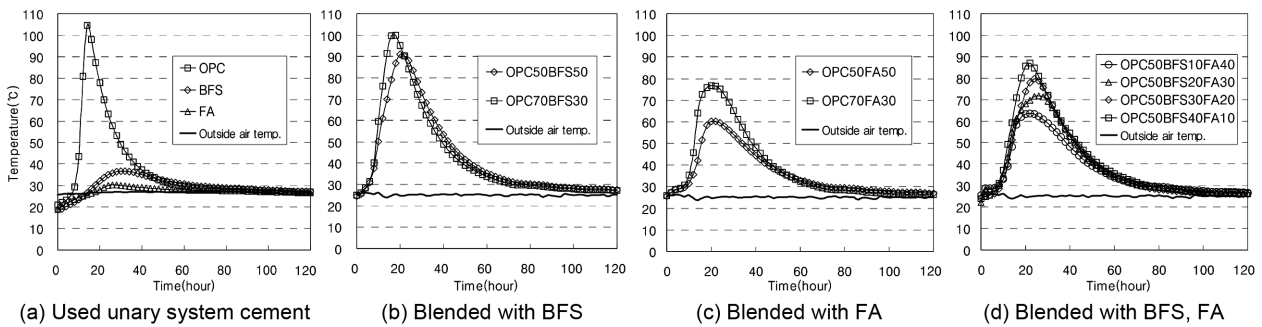


Fig. 3 Temperature history of central measuring point of paste specimen according to binder proportion

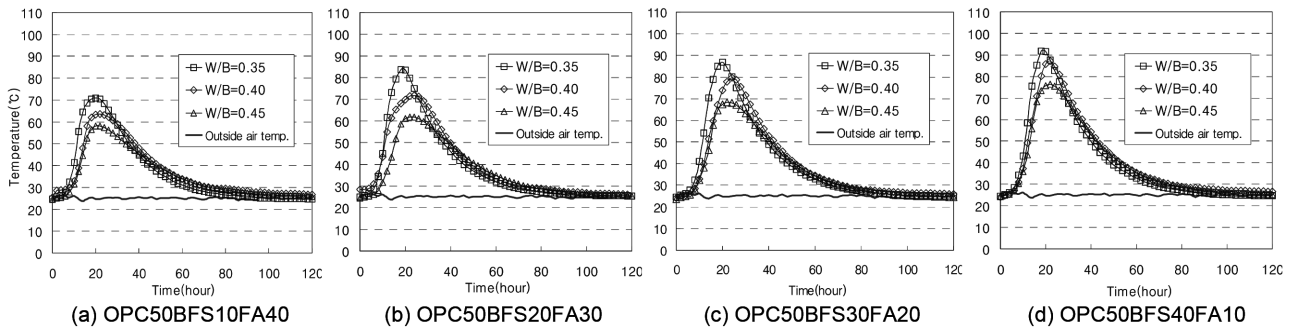


Fig. 4 Temperature history of central measuring point of paste specimen used ternary system cement according to binder proportion and W/B

Table 7 Maximum temperature and arrival time of the maximum temperature of paste specimens used unary system cement

Specimen type	Max. temp. (°C)	Arrival time of the max. temp. (h)
OPC100	104.5 (1.00) ⁽¹⁾	14 (1.00)
BFS100	36.7 (0.35)	30 (2.41)
FA100	30.3 (0.29)	26 (1.86)

⁽¹⁾The numerical value in parenthesis is ratio against to value of OPC100 paste specimen.

다. BFS100 시험체의 온도 상승량이 낮은 것은 수화열에 가장 큰 기여를 하는 시멘트조성 화합물인 C₃S, C₃A의 함량이 적기 때문으로 보이며, FA100 시험체의 온도 상승량이 가장 낮게 나타난 것은 상온에서 FA의 포졸란 반응이 긴 시간에 걸쳐 계속해서 일어나며 반응률이 낮기 때문이다.^{16,17)}

최고온도 도달시간은 OPC100 시험체가 14시간으로 나타났으나, BFS100과 FA100 시험체는 OPC100에 비해 약 16시간, 12시간 정도 지연되었다. 이러한 결과는 BFS100 시험체의 경우 수화를 위해 첨가한 수산화칼슘이 BFS와 반응하는 속도가 OPC의 반응속도 보다 늦기 때문에 최고온도 도달시간이 늦은 것으로 판단된다. 한편, Chao-Lung Hwang에 의하면 FA는 FA 내의 Al이온이 FA표면에 붙은 Ca²⁺이온과 반응하여 페이스트 내의 Ca²⁺이온의 농도를 감소시켜 Ca(OH)₂와 C-S-H의 형성이 방해된다고 하였다.¹⁵⁾ 이 때문에 FA의 수화가 지연되는 것으로 사료된다.

4.2.2 2성분계 시멘트페이스트 시험체

2성분계 시멘트페이스트 시험체 중심부의 온도이력은 Fig. 3의 (b), (c)와 같으며 각 시험체의 최고온도 및 최고온도 도달시간은 Table 8과 같다.

OPC100 시험체에 대한 OPC70BFS30 시험체의 최고온도

Table 8 Maximum temperature and arrival time of the maximum temperature of paste specimens used binary system cement

Specimen type	Max. temp. (°C)	Arrival time of the max. temp. (h)
OPC100	104.5(1.00) ⁽¹⁾	14(1.00)
OPC50BFS50	91.3(0.87)	20(1.43)
OPC70BFS30	100.8(0.97)	17(1.21)
OPC50FA50	60.2(0.58)	20(1.43)
OPC70FA30	76.8(0.74)	20(1.43)

⁽¹⁾The numerical value in parenthesis is ratio against to value of OPC100 paste specimen.

비는 0.97로 온도저감 효과가 매우 작았으며, OPC50BFS50 시험체의 최고온도비는 0.87로 나타났다. 또한, OPC70FA30 시험체의 최고온도비는 0.74, OPC50FA50 시험체의 최고온도비는 0.58로 BFS에 비해 온도저감 효과가 컸다. 이는 BFS의 온도의존성에 기인한 것으로 BFS를 단독으로 사용할 경우에는 낮은 온도를 나타냈지만 OPC와 함께 혼입되어 OPC의 수화열에 의해 BFS의 반응성이 활발해져 고온을 나타낸 것으로 보인다.

각 시험체의 최고온도 도달시간은 OPC100 시험체 보다 3~6시간 정도의 지연효과를 보였다. 이 때, BFS는 치환율에 비례하여 지연되는 경향이 있었으나 FA는 치환율에 관계없이 모두 유사하게 나타났다.

4.2.3 3성분계 시멘트페이스트 시험체

3성분계 시멘트페이스트 시험체 중심부의 온도이력은 Fig. 3의 (d)와 같으며 각 시험체의 최고온도 및 최고온도 도달시간은 Table 9와 같다. 또한, Fig. 5는 전체 혼화재 치환율이 50%이고 (OPC50FA50 제외) 물결합재비가 0.40인 페이스트 시험체의 혼화재 비율 변화와 최고온도와의 관계를 나타낸 것이다. 2성분계 시멘트페이스트 실

Table 9 Maximum temperature and arrival time of the maximum temperature of paste specimens used ternary system cement

Specimen type		Max. temp. (°C)	Arrival time of the max. temp. (h)
W/B = 0.40	OPC100	104.5(1.00) ⁽¹⁾	14(1.00)
	OPC50BFS10FA40	71.0(0.68)	20(1.43)
W/B = 0.35	OPC50BFS20FA30	84.2(0.81)	19(1.36)
	OPC50BFS30FA20	86.8(0.83)	20(1.43)
	OPC50BFS40FA10	92.4(0.88)	19(1.36)
	OPC50BFS10FA40	63.6(0.61)	22(1.57)
W/B = 0.40	OPC50BFS20FA30	71.8(0.69)	25(1.79)
	OPC50BFS30FA20	79.7(0.76)	24(1.71)
	OPC50BFS40FA10	87.1(0.83)	22(1.57)
	OPC50BFS10FA40	58.1(0.56)	21(1.50)
W/B = 0.45	OPC50BFS20FA30	61.8(0.59)	22(1.57)
	OPC50BFS30FA20	68.4(0.66)	23(1.64)
	OPC50BFS40FA10	76.4(0.73)	22(1.57)
	OPC50BFS10FA40	58.1(0.56)	21(1.50)

⁽¹⁾The numerical value in parenthesis is ratio against to value of OPC100 paste specimen.

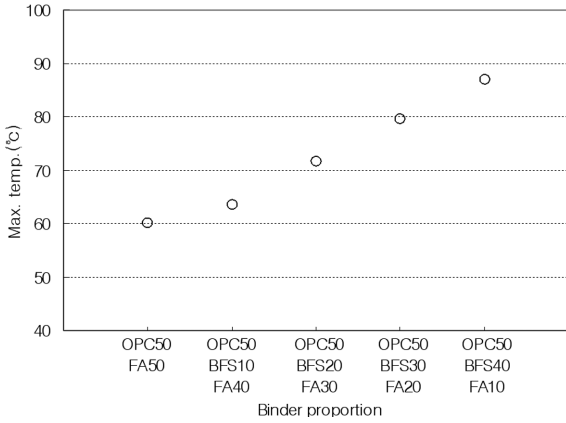


Fig. 5 Maximum temperature of paste specimen according to binder proportion

험에서 확인하였듯이 FA는 BFS에 비해 현저히 큰 온도저감 효과가 있으므로 OPC의 비율이 고정된 상태에서 나머지 혼화재 중의 BFS 비율 증가는 온도상승으로 이어졌다. 이 때 혼화재 중의 BFS 치환율 10% 이하에서 그래프 기울기가 작게 나타나 BFS의 치환율 10% 이하에서는 그 이상의 치환율에 비해 상대적으로 내부온도에 대한 영향도가 떨어짐을 알 수 있다. 이에 BFS와 FA의 치환율이 각각 10~40%인 3성분계 페이스트 시험체의 혼화재 비율변화와 최고온도와와의 상관관계를 검토하였다.

결합재량 중 OPC량이 50%로 고정된 상태에서의 FA/BFS를 독립변수로, FA/BFS의 변화에 따른 시험체의 최고온도를 종속변수로 하여 단순회귀분석한 결과 Fig. 6의 식과 같은 최고온도 추정식을 도출하였다. 3가지 물결합재비에서 모두 FA/BFS의 증가에 따라 온도가 감소하였으며, 세 가지 온도추정식의 결정계수 값이 모두 0.9 이상으로 물결합재비 0.35~0.45, 혼화재 치환율 BFS10FA40~BFS40FA10에서의 최고온도 예측이 가능할 것으로 판단된다.

한편, 3성분계 시멘트페이스트 시험체의 물결합재비에 따른 중심부의 온도이력은 Fig. 4와 같다. 동일한 결합재 비율에서 물결합재비가 클수록 중심부의 최고온도는 낮게 나타났다. 이는 물결합재비 증가에 따른 단위결합재

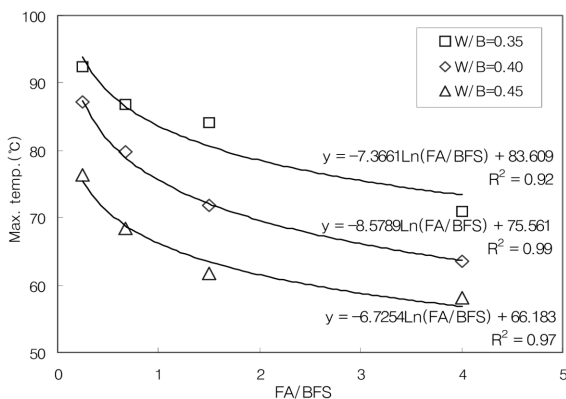


Fig. 6 Effect of FA/BFS on maximum temperature of paste specimen used ternary system cement

량 감소에 의한 OPC 양의 감소로 인해 Ca^{2+} 이온 농도가 줄어들어 혼화재의 수화반응률을 저하시켰기 때문으로 사료된다.¹⁵⁾

최고온도 도달시간은 물결합재비가 0.40인 3성분계 시멘트페이스트 시험체의 경우 22~25시간으로 결합재 비율별로 모두 유사하게 나타났으며, OPC100 시험체에 비해 약 8~11시간 정도 지연되었고 2성분계 시멘트페이스트 시험체 보다도 지연되는 것으로 나타났다. 물결합재비에 따라서는 0.40, 0.45인 경우 서로 유사하였으며 0.35인 경우는 높은 온도상승으로 인해 다소 빠르게 나타났다.

4.2.4 콘크리트 시험체

콘크리트 시험체 중심부의 온도이력은 Fig. 7과 같으며 각 시험체의 최고온도 및 최고온도 도달시간은 Table 10과 같다.

최고온도는 OPC100 콘크리트 시험체가 가장 높았으며 OPC100 콘크리트 시험체에 대한 3성분계 시멘트 콘크리트 시험체의 최고온도비는 0.79~0.84로 나타났다. 결합재 비율별로는 FA 혼입률이 증가하고 BFS 혼입률이 감소할수록 낮은 값을 보여 3성분계 시멘트페이스트 시험체와 같은 경향을 나타냈으나 그 차이는 작았다.

최고온도 도달시간은 약 60~63시간으로 모두 유사하였으며 OPC100 콘크리트 시험체 보다 약 12~15시간 정도 지연되는 것으로 나타났다.

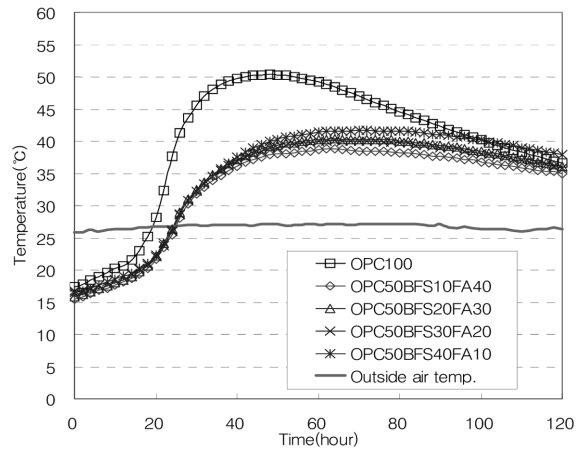


Fig. 7 Internal temperature history by binder ratio of concrete specimen

Table 10 Maximum temperature and arrival time of the maximum temperature of concrete specimens

Specimen type	Max. temp. (°C)	Arrival time of the max. temp. (h)
OPC100	49.4(1.00) ⁽¹⁾	48(1.00)
OPC50BFS10FA40	38.9(0.79)	63(1.31)
OPC50BFS20FA30	40.4(0.82)	62(1.29)
OPC50BFS30FA20	40.1(0.81)	60(1.25)
OPC50BFS40FA10	41.6(0.84)	63(1.31)

⁽¹⁾The numerical value in parenthesis is ratio against to value of OPC100 concrete specimen

4.3 시험체별 온도상승속도 및 하강속도

시멘트 매트릭스의 온도상승속도 및 하강속도는 온도 균열 발생의 주요 영향인자이다. 온도상승속도가 빠르면 최고온도 도달시간을 단축시켜 온도응력에 의한 균열발생 가능성이 증가하게 되며 온도하강속도가 빠르면 시멘트 매트릭스의 빠른 수축으로 인해 외부가 구속됐을 경우에 구속면에서의 균열발생 가능성이 증대된다.¹⁴⁾ 이에 본 연구에서는 시험체 별 온도상승속도 및 하강속도를 검토하였다.

온도상승속도는 타설 후 수화반응이 활발해지기 전 단계인 수화휴지기를 타설 후 온도상승률이 0.8°C/h가 되는 시점까지로 보고 그 이후부터 최고온도에 도달할 때까지의 단위시간당 온도상승량을 온도상승속도로 하였으며, 온도하강속도는 최고온도로부터 온도하강률이 급격히 감소하는 시점인 0.2°C/h가 될 때까지의 단위시간당 온도하강량을 온도하강속도로 하였다. 단, 콘크리트 시험체의 온도하강속도는 최고온도부터 측정종료시점까지의 온도하강률이 거의 일정하였으므로 최고온도로부터 측정종료시점까지의 단위시간당 온도하강량으로 하였다.

4.3.1 결합재 단독사용 페이스트 시험체

결합재를 단독으로 사용한 페이스트 시험체의 온도상승속도 및 하강속도는 Table 11과 같다.

OPC100 시험체의 온도상승속도는 8.94°C/h로 나타났으며 BFS100, FA100 시험체는 OPC100 시험체의 5~7% 수준으로 매우 작은 값을 나타냈다. 온도하강속도 또한 OPC100 시험체가 빠르게 나타났으며 BFS100, FA100 시

Table 11 Temperature rising velocity and descending velocity of paste specimen used unary system cement

Specimen type	Rest period of hydration (h)	Temp. rising velocity (°C/h)	Temp. descending velocity (°C/h)
OPC100	5.0	8.94(1.00) ⁽²⁾	1.82(1.00)
BFS100 ⁽¹⁾	-	0.59(0.07)	0.19(0.10)
FA100 ⁽¹⁾	-	0.45(0.05)	0.06(0.03)

⁽¹⁾BFS and FA do not show clear rest period of hydration but indicate a slow temp. rising from the finishing time of concrete placing. As a result, temp. rising velocity is calculated from the finishing time of concrete placing.

⁽²⁾The numerical value in parenthesis is ratio against to value of OPC100 paste specimen.

Table 12 Temperature rising velocity and descending velocity of paste specimen used binary system cement

Specimen type	Rest period of hydration (h)	Temp. rising velocity (°C/h)	Temp. descending velocity (°C/h)
OPC100	5.0(1.00)	8.94(1.00) ⁽¹⁾	1.82(1.00)
OPC50BFS10FA40	4.5(0.90)	3.94(0.44)	1.13(0.62)
OPC50BFS20FA30	4.5(0.90)	5.75(0.64)	1.30(0.71)
OPC50BFS30FA20	9.5(1.90)	2.68(0.30)	0.61(0.34)
OPC50BFS40FA10	7.5(1.50)	3.73(0.42)	0.99(0.54)

⁽¹⁾The numerical value in parenthesis is ratio against to value of OPC100 paste specimen.

험체는 OPC100 시험체의 3~10% 수준으로 나타났다.

4.3.2 2성분계 시멘트페이스트 시험체

2성분계 시멘트페이스트 시험체의 온도상승속도 및 하강속도는 Table 12와 같다.

BFS 혼입시 수화휴지기는 혼입률에 관계없이 OPC100 시험체와 유사하게 나타나 수화지연효과가 없었으며, FA는 초기수화시 시멘트 중의 C₃S의 수화반응을 지연시키는 효과가 있어서 혼입률에 비례하여 수화지연효과가 크게 나타났다.

온도상승속도는 BFS혼입 시험체가 OPC100 시험체의 44~64% 수준, FA혼입 시험체가 OPC100 시험체의 30~42%수준으로 혼화재의 혼입률이 많을수록 효과가 컸으며 BFS에 비해 FA가 온도상승속도저감에 유리한 것으로 나타났다.

온도하강속도는 BFS혼입 시험체의 경우 OPC100 시험체의 62~71% 수준이었으며, FA혼입 시험체의 경우 OPC100 시험체의 34~54% 수준으로 온도상승속도와 같은 경향을 나타냈다.

4.3.3 3성분계 시멘트페이스트 시험체

3성분계 시멘트페이스트 시험체의 온도상승속도 및 하강속도는 Table 13과 같다.

수화휴지기는 OPC100 시험체에 비해 0.5~3시간 정도 지연효과가 있었으며 FA 혼입률이 증가하고 BFS 혼입률이 감소할수록 수화지연효과가 컸다. 또한 물결합재비 0.40과 0.45는 유사한 값을 보였으나 0.35의 경우는 지연효과가 떨어지는 것으로 나타났다.

온도상승속도는 OPC100 시험체의 26~44% 수준, 온도하강속도는 OPC100 시험체의 37~59% 수준으로 FA 혼입률이 증가하고 BFS의 혼입률이 감소할수록 온도상승속도 및 하강속도가 저감되는 것으로 나타났다. 이는 FA량 증가로 인한 온도 저하가 온도상승속도 및 하강속도의 저하로 이어진 것으로 보여진다. 또한, 같은 결합재 비율에서는 물결합재비가 높아질수록 낮게 나타났다.

4.3.4 콘크리트 시험체

콘크리트 시험체의 온도상승속도 및 하강속도는 Table 14와 같다.

수화휴지기는 OPC100 콘크리트 시험체에 대한 비율이 1.23~1.29로 지연효과가 있었다. OPC100 콘크리트에 대

Table 13 Temperature rising velocity and descending velocity of paste specimen used ternary system cement

W/B	Specimen type	Rest period of hydration (h)	Temp. rising velocity (°C/h)	Temp. descending velocity (°C/h)
0.40	OPC100	5.0(1.00)	8.94(1.00) ⁽¹⁾	1.82(1.00)
0.35	OPC100BFS10FA40	5.5(1.10)	3.13(0.35)	0.87(0.48)
	OPC100BFS20FA30	4.5(0.90)	4.11(0.46)	1.10(0.60)
	OPC100BFS30FA20	5.0(1.00)	4.15(0.46)	1.13(0.62)
	OPC100BFS40FA10	4.5(0.90)	4.55(0.51)	1.23(0.68)
0.40	OPC100BFS10FA40	8.0(1.60)	2.40(0.27)	0.68(0.37)
	OPC100BFS20FA30	7.0(1.40)	2.29(0.26)	0.91(0.50)
	OPC100BFS30FA20	7.5(1.50)	3.03(0.34)	1.02(0.56)
	OPC100BFS40FA10	5.5(1.10)	3.91(0.44)	1.07(0.59)
0.45	OPC100BFS10FA40	7.0(1.40)	2.32(0.26)	0.55(0.30)
	OPC100BFS20FA30	6.5(1.30)	2.28(0.26)	0.63(0.35)
	OPC100BFS30FA20	6.5(1.30)	2.56(0.29)	0.79(0.43)
	OPC100BFS40FA10	5.5(1.10)	3.04(0.34)	0.91(0.50)

⁽¹⁾The numerical value in parenthesis is ratio against to value of OPC100 paste specimen.

한 온도상승속도비는 0.47~0.51로 네 가지 시험체 모두 유사한 값으로 상승속도 저감 효과가 있었다. 또한, OPC100 콘크리트 시험체에 대한 온도하강속도비는 0.33~0.42로 느린 속도를 나타냈다.

4.4 페이스트 및 콘크리트 시험체의 내부온도특성 비교

물결합재비가 0.4인 3성분계 시멘트를 사용한 페이스트 및 콘크리트 시험체의 온도특성은 Table 15와 같다. 페이스트 시험체의 최고온도는 결합재의 비율에 따라 비례적으로 증감하지만 콘크리트 시험체의 최고온도는 페이스트 시험체와 같은 경향을 나타내나 증감의 폭이 매우 작았다. 이는 콘크리트 용적의 약 70%를 차지하고 있

는 골재의 영향에 기인한 것으로 페이스트가 단독으로 수화할 경우 주변의 영향 요인은 단열재료의 열관류 및 접촉부 틈새에 의한 열손실뿐이지만 콘크리트 중의 페이스트는 단열재를 통한 열손실 이외에 발열성이 없는 골재가 결합재의 수화열을 흡수하기 때문에 페이스트에 비해 상당히 낮은 온도를 나타내어 BFS의 반응성이 떨어져 네 가지 콘크리트 시험체 모두 유사한 값을 나타낸 것으로 보인다. 이와 같은 이유로 콘크리트 시험체의 단열온도상승량은 페이스트 시험체보다 현저하게 떨어지게 되며 이는 온도상승속도 및 하강속도의 저하로 이어진 것으로 사료된다.

이상과 같이 콘크리트의 온도상승은 골재에 의한 영향을 크게 받으며 3성분계 시멘트에서 전체 혼화재의 치

Table 14 Temperature rising velocity and descending velocity of concrete specimen

Specimen type	Rest period of hydration (h)	Temp. rising velocity (°C/h)	Temp. descending velocity (°C/h)
OPC100	15.5(1.00)	0.86(1.00) ⁽¹⁾	0.19(1.00)
OPC100BFS10FA40	19.5(1.26)	0.40(0.47)	0.07(0.37)
OPC100BFS20FA30	19.0(1.23)	0.43(0.50)	0.08(0.42)
OPC100BFS30FA20	20.0(1.29)	0.41(0.48)	0.07(0.33)
OPC100BFS40FA10	20.0(1.29)	0.44(0.51)	0.07(0.33)

⁽¹⁾The numerical value in parenthesis is ratio against to value of OPC100 concrete specimen

Table 15 The comparison of temperature properties between paste and concrete used ternary system cement

Specimen type	Max. temp. (°C)		Arrival time of the max. temp. (h)		Rest period of hydration (h)		Temp. rising velocity (°C/h)		Temp. descending velocity (°C/h)	
	Paste	Concrete	Paste	Concrete	Paste	Concrete	Paste	Concrete	Paste	Concrete
O100	104.5(1.00) ⁽¹⁾	49.4(1.00)	14(1.00)	48(1.00)	5.0(1.00)	15.5(1.00)	8.94(1.00)	0.85(1.00)	1.82(1.00)	0.19(1.00)
OPC50BFS10FA40	63.6(0.61)	38.9(0.79)	22(1.57)	63(1.31)	8.0(1.60)	19.5(1.26)	2.40(0.27)	0.41(0.48)	0.68(0.37)	0.07(0.37)
OPC50BFS20FA30	71.8(0.69)	40.4(0.82)	25(1.79)	62(1.29)	7.0(1.40)	19.0(1.23)	2.29(0.26)	0.43(0.51)	0.91(0.50)	0.08(0.42)
OPC50BFS30FA20	79.1(0.76)	40.1(0.81)	24(1.71)	60(1.25)	7.5(1.50)	20.0(1.29)	3.03(0.34)	0.42(0.49)	1.02(0.56)	0.07(0.37)
OPC50BFS40FA10	87.1(0.83)	41.6(0.84)	22(1.57)	63(1.31)	5.5(1.10)	20.0(1.29)	3.91(0.44)	0.45(0.53)	1.07(0.59)	0.07(0.37)

⁽¹⁾The numerical value in parenthesis is ratio against to value of OPC100 paste and concrete specimen

환율이 같을 경우 BFS, FA의 비율변화에 의한 영향은 크지 않은 것으로 사료된다.

5. 결 론

3성분계 시멘트 사용에 의한 수화열 저감 효과를 검토하기 위하여 페이스트 및 콘크리트의 간이 단열온도상승 실험을 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 페이스트 시험체별 최고온도는 결합재 단독사용시 OPC100 104.5°C, BFS100 36.7°C, FA100 30.3°C로 나타났다. 2성분계 시멘트 시험체의 경우, BFS보다 FA의 온도저감 효과가 우수하였으며 혼입률이 클수록 그 효과도 컸다. 3성분계 시멘트 시험체의 경우 FA의 혼입률이 크고 BFS의 혼입률이 작을수록 온도저감 효과가 컸다. 한편, 콘크리트 시험체별 최고온도는 3성분계 시멘트 사용의 경우가 OPC100시험체에 비해 약 8~11°C 정도 저감되었으며 FA량이 많고 BFS량이 작을수록 낮은 온도를 나타냈다.
- 2) 최고온도 도달시간은 2성분계 페이스트 시험체의 경우 BFS와 FA의 지연효과가 치환율별로 모두 유사하였으나 OPC70BFS30은 약 3시간 정도 빠르게 나타났다. 3성분계 페이스트 시험체의 경우는 2성분계 시험체보다도 효과가 있었으며 물결합재비에 따라서는 0.40, 0.45가 서로 유사하였고 0.35가 다소 빠르게 나타났다. 한편 3성분계 시멘트 콘크리트 시험체의 경우는 OPC100 시험체에 비해 약 12~15시간 정도 지연되었다.
- 3) 온도상승속도 및 하강속도는 2성분계 페이스트 시험체의 경우 BFS보다 FA에 의한 저감효과가 컸다. 3성분계 페이스트 시험체의 경우 FA의 혼입률이 크고 BFS의 혼입률이 작을수록, 물결합재비가 클수록 저감효과가 컸다. 콘크리트 시험체의 경우 OPC100 시험체에 대한 3성분계 시멘트 콘크리트 시험체의 저감효과는 매우 크게 나타났으며 결합재비율별로 모두 유사하였다.
- 4) 3성분계 시멘트페이스트와 콘크리트의 온도특성 비교 결과 두 가지 시험체 모두 FA의 혼입률이 크고 BFS의 혼입률이 작을수록 낮은 온도를 나타냈으나 콘크리트 시험체에서는 그 차이가 매우 작았다. 이는 콘크리트 용적의 약 70%를 차지하는 골재의 영향으로 페이스트에 비해 현저히 낮은 온도를 나타내 결합재 중 BFS의 반응성이 작아져 결합재 비율에 따른 효과가 작아졌기 때문으로 사료된다.

본 실험을 통해 3성분계 시멘트 사용에 의한 페이스트 및 콘크리트의 내부온도 특성을 검토한 결과, 내부 온도 저감 효과, 온도상승속도 및 하강속도 저감 효과가 우수하여 대형 콘크리트 구조물과 같이 온도균열에 주의해야 하는 구조물에 적용할 경우 온도균열 저감에 효과적일

것이라 기대된다.

참고문헌

1. American Concrete Institute, *Mass Concrete*, ACI 207.1R-96, 2005, pp. 2~6.
2. American Concrete Institute, *Guide to the Selection and Use of Hydraulic Cement*, ACI 225.R-99, 2005, pp. 11~12.
3. American Concrete Institute, *Slag Cement in Concrete and Mortar*, ACI 233.R-03, 2005, pp. 4~5.
4. American Concrete Institute, *Use of Fly Ash in Concrete*, ACI 232.2R-03, 2005, pp. 9~10.
5. Zhang, Yunsheng, "Study on the Hydration Heat of Binder Paste in High-performance Concrete," *Cement and Concrete Research*, Vol. 32, 2002. 9, pp. 1483~1488.
6. 김승진 외, 고로슬래그미분말을 활용한 시멘트·콘크리트 생산기술 개발, 한국 전자재 시험 연구원, 2001. 2, pp. 800~802.
7. 김용로 외, "잠열성 수화열 저감제를 사용한 저발열 콘크리트 개발에 관한 실험적 연구," 대한건축학회 학술발표대회 논문집, 2006. 10, pp. 345~348.
8. 김국한 외, 매스콘크리트의 수화열에 의한 균열발생 여부에 관한 연구, 한국도로공사 도로연구소, 1999. 12, pp. 7~13.
9. 안태승 외, 콘크리트 구조물의 수화열 저감 및 성능개선을 위한 연구, 한국도로공사 도로연구소, 1996, pp. 22~53.
10. 김상철, 강석화, 김진근, "매스콘크리트 구조물에서의 시멘트 종류별 수화발열 특성 평가," 콘크리트학회 논문집, 1999. 12, pp. 3~12.
11. 김진근, "매스콘크리트의 수화열 및 온도응력에 대한 해석," 한국콘크리트학회 연구소위원회 발표집, 1999, pp. 57~87.
12. 김진근, 양은익, "매스 콘크리트의 수화열 및 온도응력에 대한 영향요인," 한국콘크리트학회지, 9권 3호, 1997. 6, pp. 15~23.
13. 이한승, 지남용, "자극제 종류 및 양생온도에 따른 알칼리 활성화 슬래그 모르타르의 강도 특성에 관한 실험적 연구," 대한건축학회 학술발표대회논문집, 2005. 10, pp. 349~352.
14. 한국콘크리트학회, 최신 콘크리트공학, 한국콘크리트학회, 2005, pp. 604~606.
15. Chao-Lung Hwang, Der-Hsien Shen, "The Effect of Blast-Furnace Slag and Fly Ash on the Hydration of Portland Cement," *Cement and Concrete Research*, Vol. 21, 1991, pp. 410~425.
16. Shunsuke Hanehara, "Effects of Water/Powder Ratio, Mixing Ratio of Fly Ash, and Curing Temperature on Pozzolanic Reaction of Fly Ash in Cement Paste," *Cement and Concrete Research*, Vol. 31, 2001, pp. 31~39.
17. Tatsuhiko Saeki, Paulo J.M. Monteiro, "A Model to Predict the Amount of Calcium Hydroxide in Concrete Containing Mineral Admixtures," *Cement and Concrete Research*, Vol. 35, 2005, pp. 1914~1921.
18. Caijun Shi and Robert L. day, "A Calorimetric Study of Early Hydration of Alkali-Slag Cements," *Cement and Concrete Research*, Vol. 25, 1995, pp. 1333~1346.
19. Schutter, G. De, and Taerwe, L., "General Hydration Model

for Portland Cement and Blast Furnace Slag Cement,”
Cement and Concrete Research, Vol. 25, 1995, pp. 593~604.

20. P. Jason Williams, “Microanalysis of Alkali-Activated Fly

Ash-CH pastes,” *Cement and Concrete Research*, Vol. 32,
2002, pp. 963~972.

요 약 본 연구에서는 온도균열 저감이 기대되는 3성분계 시멘트를 사용한 페이스트 및 콘크리트의 간이단열온도 상승실험을 실시하여 3성분계 시멘트의 활성화를 위한 기초자료를 제공하고자 하였다. 페이스트 실험은 3가지 결합재를 단독사용 및 혼합사용 하였으며, 콘크리트 실험은 3가지 결합재를 동시에 혼입하여 실시하였다. 페이스트실험 결과 BFS보다 FA의 사용이 온도저감 효과가 좋았으며, 3성분계 시멘트페이스트에서는 BFS의 혼입률이 작고 FA의 혼입률이 클수록 온도가 낮게 나타났다. 온도상승속도 및 하강속도 또한 BFS의 혼입률이 작고 FA의 혼입률이 클수록 늦어졌다. 한편, 물결합재비가 높을수록 최고온도가 낮게 나타났다. 최고온도 도달시간은 OPC100, 2성분계 시멘트, 3성분계 시멘트 순으로 짧게 나타나 3성분계 시멘트 사용은 온도상승지연효과가 있었다. 콘크리트 실험 결과 3성분계 시멘트를 사용한 콘크리트는 OPC사용 콘크리트에 비해 최고온도가 약 8~11°C 정도 낮게 나타났고, 온도상승속도는 47~51% 수준이며, 온도하강속도는 37~42% 수준으로 나타났다. 콘크리트 시험체는 페이스트 시험체에 비해 현저히 낮은 온도와 느린 온도상승속도 및 하강속도를 보였는데, 이는 콘크리트 중의 골재에 의한 영향으로 페이스트 시험체보다 열손실량이 컸기 때문이다.

핵심용어 : 3성분계 시멘트, 간이 단열온도상승실험, 매스콘크리트, 수화열, 온도균열