



## 결합재 조건에 따른 콘크리트의 수화발열 특성에 관한 연구

최성우<sup>1)\*</sup> · 조현태<sup>1)</sup> · 유득현<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>유진기업 기술연구소

## The Experimental Study on the Heat Hydration Properties of Concrete According to Binder Conditions

Sung-Woo Choi<sup>1)\*</sup>, Hyun-Tae Jo<sup>1)</sup>, and Deuk-Hyun Ryu<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Eugene Institute of Technology, Go-yang 412-480, Korea

**ABSTRACT** Recently, owing to the development of industry and the improvement of building techniques, concrete structures are becoming larger and higher. In hardening of these large concrete structures, the heat of hydration gives rise to considerable thermal stress depending on the size and environmental condition of concrete, which might cause thermal cracking. Especially, the crack may cause severe damage to the safety and the durability of concrete structure. This study investigates the thermal properties of concrete according to several binder conditions, such as OPC, Belite rich cement(BRC), slag cement(SC), blast furnace slag(B) added cement, fly ash(F) added cement and blast-furnace-slag and fly ash added cement. As a result of this study, the property of concrete is most better BRC than others, and fly ash(25%) added cement and BFS(35%)-fly ash(15%) added cement gets superior effect in the control of heat hydration. But, synthetically considered properties of concrete, workability, strength, heat hydration, etc, it is more effective to use mineral admixture. Especially, to be used Blast Furnace slag is more effective.

**Keywords** belite rich cement, blast furnace slag cement, fly ash, blast furnace slag powder, heat of hydration

### 1. 서 론

최근 급속한 산업의 발달과 더불어 토목 건축기술의 발달로 콘크리트 구조물의 초고층화·대형화가 이루어지고 있으며, 이러한 대형 구조물의 시공에 있어서 콘크리트의 온도상승은 부재의 내·외부 온도차이로 인한 온도응력에 의하여 균열을 발생시켜 구조물의 내하력 및 내구성에 심각한 손상을 가져올 수 있다. 수화발열에 의한 콘크리트 온도 증가를 억제시키는 방법으로 재료의 사전 냉각에 의해 콘크리트 자체의 타설 온도를 낮추는 방법, 파이프쿨링(pipe cooling) 방법 등의 시공적인 접근 방법과 수화열의 발생이 적은 결합재 및 그 조합에 의해 온도를 저감시키는 재료적인 접근방법으로 나눌 수 있다<sup>1)</sup>.

시공적인 접근 방법에 의한 콘크리트의 수화발열 억제는 초기 쿨링(cooling)설비에 대한 투자비와 적용 부재의 규모에 제한이 있기 때문에 범용적으로 사용되고 있지 못하며, 배합설계에 의한 콘크리트의 수화발열량을 최대한 저감시키는 재료적인 접근방법이 주로 사용되고 있다. 이러한 재료적인 접근방법으로서 사용재료 선정 및 배합설계에 의해 콘크리트의 수화발열량을 억제하도록

유도하여 온도응력발생을 조절하는 방법이 사용되고 있다. 특히 플라이애쉬, 고로슬래그와 같은 혼화재 사용의 배합설계를 통해 콘크리트의 수화발열량을 조절하는 방법이 일반적으로 사용되고 있다<sup>2)</sup>.

따라서 본 연구에서는 시멘트 종류 및 혼화재 종류, 사용 방법을 변화시켜 결합재 설계 조건에 따라 콘크리트의 기초물성 변화 및 수화발열 특성을 검토하였으며, 특히 고로슬래그를 활용한 매스 콘크리트의 배합설계 방법에 대해서 검토를 진행하여, 매스 콘크리트 제조를 위한 다양한 배합설계 방법을 제시하고자 하였다.

### 2. 실험 계획 및 방법

#### 2.1 실험 계획

Table 1에 배합설계 요인을, Table 2에 사용 콘크리트 배합을 나타내었다.

본 연구는 시멘트 및 혼화재 종류와 사용 방법에 따라 콘크리트의 수화발열특성을 검토하였으며, 동일한 배합에 대해 시멘트 종류 및 혼화재 사용방법에 따른 콘크리트의 기초물성 및 수화발열 특성을 검토하였다.

결합재 조건은 시멘트 종류별로 3수준(OPC, BRC, SC)을 검토하였으며, 혼화재 사용방법에 따라 3수준(2성분계(F25, B50), 3성분계(B35+F15) 등 총 6가지 결합재 조

\*Corresponding author E-mail : friendpot@eugenes.co.kr  
Received April 28, 2006, Accepted, October 23, 2006  
©2006 by Korea Concrete Institute

**Table 1** Factor of mix proportion

Binder	Kinds of cement		Ordinary portland cement(OPC) Belite rich cement(BRC) Slag cement(SC)
	M.Ad* <sup>1)</sup>	Kinds	Fly-Ash(F), Blast-furnace-slag(B)
		Combination	Binary blended : F25, B50 Ternary blended : B35 + F15
Target slump (mm)			180 ± 10
Target air content (%)			4.5 ± 1.5

<sup>1)</sup> M.Ad : mineral admixture

**Table 2** Mix proportion of concrete

Mix no.	W/B (%)	S/a (%)	Unit weight(kg/m <sup>3</sup> )								
			W	OPC	SC	BRC	F	B	G	S	
OPC	41.9	46.0	157	375	-	-	-	-	967	819	
BRC				-	-	375	-	-	-	970	820
SC				-	375	-	-	-	-	959	811
F25				281	-	-	94	-	949	803	
B50				188	-	-	-	187	960	812	
B35F15				188	-	-	56	131	952	805	

건에 대해 성능 평가를 진행하였다.

콘크리트의 기초 물성으로서 목표 슬럼프를 180±10 mm, 목표 공기량을 4.5±1.5%로 하였으며, 목표 슬럼프 및 목표 공기량을 만족시키기 위해 감수제와 AE제 사용량은 배합조건에 따라 다르게 적용하였다.

콘크리트의 배합은 물결합재비 41.9%, 단위결합재량을 375 kg/m<sup>3</sup>, 잔골재율 46%로 배합설계 하였으며, 모든 결합재 조건에 대해 동일하게 적용하였다.

**2.2 사용 재료**

본 연구에 사용된 재료의 기초물성은 Table 3에 나타내었다.

시멘트는 S사 제품의 1종 보통포틀랜드시멘트와 B사의 고로슬래그시멘트, S사 제품의 4종 시멘트(belite rich cement)를 사용하였다. 시멘트 종류에 따른 밀도 및 분말도는 제조 과정에 의해 차이가 있는 것으로 나타났다. 혼화제는 고로슬래그미분말은 분말도 4,429 cm<sup>2</sup>/g의 3종 고로슬래그미분말을 사용하였으며, 플라이애쉬는 Y화력발전소에서 부산된 분말도 3,507 cm<sup>2</sup>/g의 2종 플라이애쉬를 사용하였다.

유동성을 확보하기 위한 혼화제는 폴리카르본산계 고성능 감수제와 로진계 AE제를 사용하였으며, 각각의 사용 비율은 배합조건에 따라 다르게 적용하였다. 사용 골재는 세척사와 부순자갈을 사용하였다.

**2.3 실험 방법**

결합재 조건에 따른 수화발열특성을 검토하기 위한 실험

**Table 3** Properties of material

Cement	OPC	Density 3.15 g/cm <sup>3</sup> , blaine 3,494 cm <sup>2</sup> /g
	SC	Density 2.99 g/cm <sup>3</sup> , blaine 4,116 cm <sup>2</sup> /g, blast furnace slag blended 40%
	BRC	Density 3.20 g/cm <sup>3</sup> , blaine 3,505 cm <sup>2</sup> /g
Mineral admixture	F	Density 2.20 g/cm <sup>3</sup> , blaine 3,507 cm <sup>2</sup> /g
	B	Density 2.91 g/cm <sup>3</sup> , blaine 4,429 cm <sup>2</sup> /g
Sand	Washed sand	Density 2.60 g/cm <sup>3</sup> , FM 2.94, percentage of water absorption 0.64
Coarse aggregate	Crushed stone	Gmax 25 mm, density 2.62 g/cm <sup>3</sup> , FM 6.60, Percentage of water absorption 0.68
Chemical admixture	Super plasticizer	Polycarboxylate
	AE agent	Resin

험방법은 Table 4에 나타낸 바와 같다.

콘크리트의 유동성을 동일하게 적용하여 목표 슬럼프 범위를 만족시키는 감수제의 사용량과 목표 공기량을 만족시키는 AE제 사용량을 각각 검토하였으며, 수화발열 특성을 검토하기 위해 다음과 같은 항목에 대해 실험을 진행하였다.

**2.3.1 미소수화열 측정**

콘크리트 제조 시에는 시멘트뿐 만이 아니라 혼화제, 혼화제, 골재 등이 사용되고 있으며, 이러한 원자재들의 복합작용에 의해 수화발열 특성이 나타난다. 따라서 시멘트 및 결합재 만에 의한 수화발열 특성을 검토하기 위해 결합재 조건에 따른 미소수화열량을 측정하였다. 미소수화발열량을 검토하기 위해 물결합재비 50%로 페이스트를 제조한 후 전도형 열량계(twin conduction micro calorimeter, TCC 26)를 사용하여 7일 동안 결합재 설계 조건에 따른 수화발열량을 측정하였다.

**2.3.2 간이단열온도 상승시험**

Fig. 1에 간이단열온도상승시험 시험체 및 진행 방법을 나타내었다.

콘크리트 온도상승을 측정하기 위하여 내측길이가 600×600×600 mm인 정방형 거푸집에 두께 100 mm의 단

**Table 4** Experimental program

Item	Property of heat hydration	1) Heat evolution rate for binder 2) Hydration heat of concrete
	Fundamental property of concrete	1) Fresh concrete : dosage of admixture dosage of air agent slump, air content, elapsed time ⇒ 30, 60 min. setting time 2) Hardened concrete : compressive strength - test specimen ⇒ 1, 3, 7, 28, 56, 91 day - core specimen ⇒ 91 day

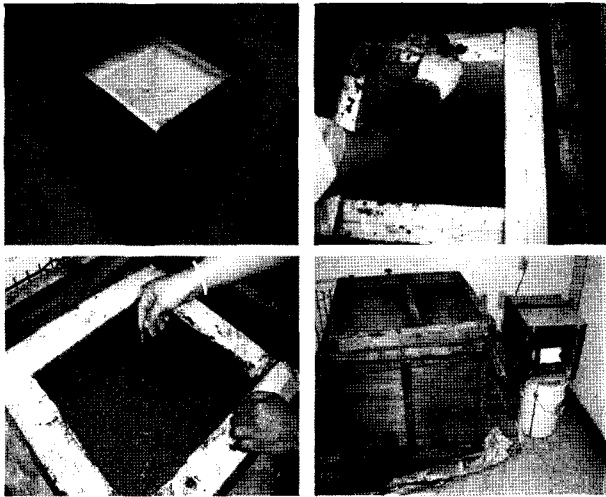


Fig. 1 Test method of heat hydration

열재로 단열장치를 만들고 중심부에 열전대(thermocouple)를 설치하였으며, 64(400×400×400 mm)의 콘크리트 내부 온도변화를 7일간 수화열 측정기(KR-100N)로써 측정하였다<sup>3)</sup>.

### 2.3.3 콘크리트의 기초물성

결합재 조건에 따른 콘크리트의 기초물성으로서는 굳지않은 성상에서는 슬럼프, 공기량, 경과시간 30, 60분에서의 경시변화 및 응결 특성을 검토하였으며, 경화성상으로서서는 재령 1, 3, 7, 28, 56, 91일에서의 압축강도를 측정하였다. 또한 간이단열온도 상승 시험체를 대상으로 코어공시체를 채취하여 재령 91일에서의 코어공시체의 압축강도도 측정하였다.

## 3. 실험 결과 및 분석

### 3.1 결합재 조건에 따른 미소수화열량 검토

Table 5에 미소수화열 총량을, Fig. 2에 결합재 조건에 따른 미소수화발열 변화를, Fig. 3에 경과시간에 따른 누적 미소수화발열량을 나타내었다.

재령 7일까지의 미소수화열 총량을 시멘트 종류, 혼화재의 사용방법에 따라 살펴보면, 시멘트 종류에 따른 미소수화발열량은 저발열 시멘트를 사용한 BRC가 가장 낮은 값을 나타내고 있으며, SC < OPC 순으로 증가하고 있다. 특히 BRC의 경우에는 결합재 조건 중 가장 낮은 미소수화열량을 나타내고 있으며, OPC는 가장 높은 값을 나타내고 있다.

혼화재를 사용한 배합에 있어서는 B50 > B35F15 > F25

Table 5 Heat evolution rate during 7 days

Binder	OPC	BRC	SC	F25	B50	B35F15
Caloric value(J/g)	281.82	194.5	260.69	238.15	270.07	241.90

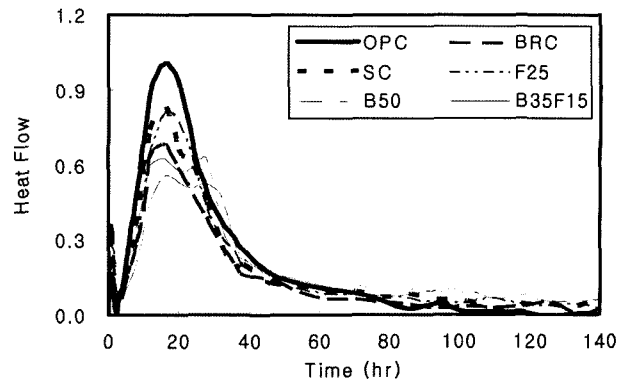


Fig. 2 Heat evolution according to binder conditions

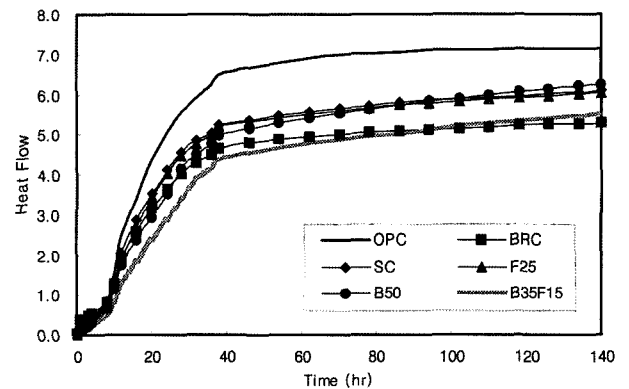


Fig. 3 Accumulation of heat evolution

의 순으로 미소수화발열 총량이 높게 나타나고 있으며<sup>3)</sup>, 고로슬래그를 혼합 시멘트로 사용한 SC는 B50 보다는 낮고 혼화재를 사용한 다른 배합에 비해서는 다소 높은 발열량을 나타내고 있다. 혼화재를 사용한 경우, 플라이 애쉬를 사용할수록 미소수화발열 총량은 감소하는 경향을 나타내고 있으며, 고로슬래그를 사용한 경우 플라이 애쉬를 사용한 경우에 비해서는 미소수화발열량이 높게 나타나고 있는데, 이는 고로슬래그의 활성도에 기인하는 것으로 사료된다.

경과시간에 따른 미소수화발열 변화를 살펴보면, 미소수화발열 총량이 가장 많은 OPC가 경과시간에 따른 미소수화발열 Peak도 가장 높은 것으로 나타났다. 그러나, 미소수화발열 총량과 달리, 미소수화발열 최대 피크(Peak)의 변화는, OPC > SC > F25 > BRC > B50 > B35F15의 순으로, 총 결합재량에 대한 시멘트의 배합설계량이 높은 순서대로 미소수화발열 피크가 높게 나타나고 있다.

또한 혼화재를 사용한 B50, SC, B35F15, F25 배합별 시간에 따른 미소수화발열량의 변화에 있어서 고로슬래그를 사용한 SC, B50, B35F15의 경우, 미소수화발열 변화에 있어서 최대 피크가 나타난 이후에 다시 미소수화발열량이 일시 증가하는 경향을 보이고 있다. 이러한 경향은 특히 고로슬래그를 혼합 시멘트로 사용한 SC에 비해 혼화재로 사용한 B50 및 B35F15에서 두드러진 것으로 나타났다. 이는 수화진행의 초기에는 단위시멘트량이 영향을 미치지 않지만, 일정 시간이 경과한 후에는 혼화재의

활성화에 의한 발열 특성이 나타나며, 특히 고로슬래그가 플라이애쉬에 비해 수화 활성도가 높기 때문에 수화 초기의 시멘트에 의한 발열 피크가 나타난 이후, 고로슬래그에 의한 2차적인 수화발열 피크가 나타난 것으로 사료된다.

경과시간에 따른 누적 미소수화열의 변화를 살펴보면, OPC는 가장 높은 누적량을 나타내고 있으며, 특히 초기 40시간까지 누적 미소수화열 변화가 가장 급격히 증가되는 것으로 나타났다.

혼화제 사용에 따른 누적 수화열량의 변화는, 초기 30시간 정도까지는 배합설계 조건 중 혼화제의 사용량이 많은 B50 및 B35F15의 누적수화열 변화가 다른 배합에 비해 낮게 나타나고 있으며, 특히 B35F15 배합은 100시간 경과 시까지도 가장 낮은 누적량을 나타내고 있다. 또한 고로슬래그를 사용한 SC, B50, B35F15의 경우, OPC, F25, BRC에 비해 상대적으로 경과시간에 따른 수화발열이 지속적으로 진행되는 것으로 나타났으며, 고로슬래그의 잠재수경성의 활성화에 기인하는 것으로 사료된다.

결합재 조건에 따른 누적 수화열량 변화의 경우 40시간 경과후의 변화에 있어서 고로슬래그미분말을 사용한 B50 및 B35F15 배합이 다른 배합에 비해 지속적으로 수화가 진행되는 것으로 나타나고 있다. 이는 고로슬래그의 잠재수경성에 기인한 것으로 판단된다.

### 3.2 결합재 조건에 따른 콘크리트 성능 변화 검토

결합재 설계 조건에 따른 콘크리트의 시험 결과를 Table 6에 나타내었다.

#### 3.2.1 콘크리트의 굳지않은 성상

결합재 조건에 따른 콘크리트의 목표 유동성을 만족시키는 고성능 감수제와 AE제 사용량의 변화를 Fig. 4에 나타내었다.

목표 슬럼프를 만족시키는 감수제의 사용량은 OPC > SC > F25 > BRC > B50 > B35F15의 순으로, OPC에 비해 시멘트의 조성비를 변화시킨 BRC 및 혼화제를 사용한 경우 고성능 감수제의 사용량이 감소하는 것으로 나타났다. 특히 혼화제의 사용에 있어서 고로슬래그를 사용한 경우

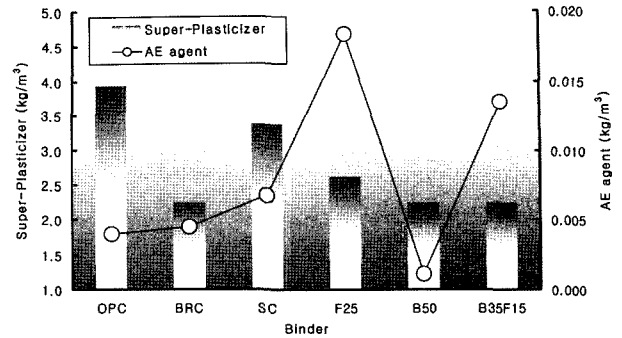


Fig. 4 Dosage of chemical admixture

플라이애쉬를 사용한 경우에 비해 유동성 증진 효과에 의한 감수제 사용량이 감소하는 것으로 나타났으며, 특히 F25배합에 비해 결합재 설계조건에 있어서 혼화제의 총 사용량이 많고, 고로슬래그미분말을 사용한 B50 및 B35F15 배합에서 유동성 증진 효과가 뚜렷이 나타나고 있다<sup>4)</sup>.

AE제 사용량 변화에 있어서는 시멘트의 종류 및 고로슬래그의 사용에 의한 영향은 거의 동일한 수준이며, 플라이애쉬의 사용 유무에 의한 AE제 사용량의 변화가 뚜렷하여, 플라이애쉬를 사용할수록 공기량 확보를 위한 AE제 사용량도 증가하는 것으로 나타났다.

결합재 설계 조건에 따른 콘크리트 유동성의 경시변화를 Fig. 5에 나타내었다.

슬럼프의 경시변화는 대부분의 배합에서 경과시간 60분에서 10 mm 내외 증진되는 것으로 나타났으나, BRC의 경우에는 경과시간에 따라 슬럼프 저하가 나타나고 있다. 폴리카르본산계 고성능 혼화제의 경우, 혼화제의 분산성 및 유지성능이 일반 감수제에 비해 우수하여, 시간이 경과하여도 슬럼프 및 슬럼프플로우의 유지성능이 우수한 것으로 알려져 있으며, 본 실험의 범위에서도 동일한 경향을 나타내고 있다. BRC의 경우에는 다른 배합에 비해 고성능 감수제 사용량이 상대적으로 낮아, 고성능감수제 사용에 따른 유동성 유지성능이 다른 배합에 비해 상대적으로 감소하여 슬럼프 저하가 발생하는 것으로 사료된다.

혼화제 사용에 의한 유동성 유지성능은 SC, B50, B35F15 배합이 양호한 성능을 발휘하는 것으로 나타나, 콘크리트의 작업성을 고려할 경우 고로슬래그를 활용하

Table 6 Test results of concrete

Mix no.	Chemical AD (kg/m <sup>3</sup> )		Slump (mm)			Air (%)			Setting time (hr : min)		Compressive strength (MPa)						
	S-P.	AE agent	Initial	30min.	60min.	Initial	30min.	60min.	Initial	Final	1	3	7	28	56	91	91 <sup>1)</sup>
OPC	3.94	0.0039	180	190	195	4.2	3.1	4.0	9:50	11:50	13.8	33.9	39.3	44.8	49.5	50.2	47.2
BRC	2.25	0.0045	190	190	180	3.0	4.2	3.3	10:40	13:20	4.8	16.4	24.5	45.5	56.1	58.4	55.2
SC	3.38	0.0068	185	200	200	4.1	3.1	4.0	13:40	16:00	5.6	20.9	32.3	51.1	55.2	57.2	53.5
F25	2.63	0.0184	185	185	195	4.0	4.1	2.5	10:20	12:20	9.6	24.9	32.5	43.0	52.4	53.9	49.3
B50	2.25	0.0011	190	195	205	4.0	3.9	3.7	10:50	13:10	7.1	17.9	31.0	47.0	54.5	57.9	52.4
B35F15	2.25	0.0135	190	190	195	3.6	3.0	2.4	10:50	13:20	6.2	18.2	29.8	47.5	53.4	56.6	51.1

<sup>1)</sup>Compressive strength of core specimen at curing 91 days

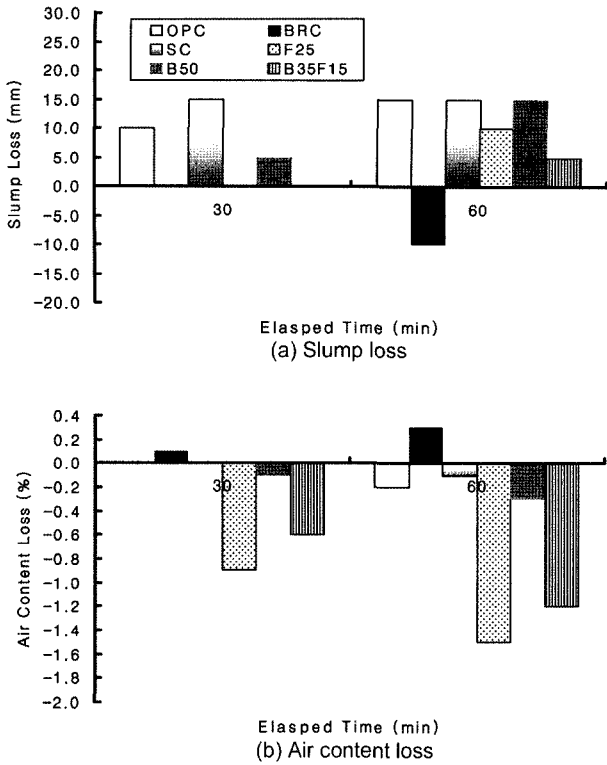


Fig. 5 Properties of fresh concrete

는 것이 콘크리트의 시공성능 개선에 효과적인 것으로 사료된다.

공기량에 의한 경시변화에 있어서는 슬럼프의 경시변화와 반대의 경향을 나타내고 있다. BRC를 제외한 나머지 배합에서는 경과시간에 따라 공기량의 로스가 증가하는 것으로 나타났다. 특히 플라이애쉬를 사용한 F25 및 B35F15 배합에서는 플라이애쉬 자체의 미연탄소분에 의한 AE제 흡착효과로 인해, 다른 배합에 비해 AE제 사용량이 월등히 높다고 하여도 경과시간에 따른 공기량 발현 유지성능은 저하하는 것으로 나타나고 있다.

### 3.2.2 결합재 조건에 따른 응결 특성

결합재 설계 조건에 따른 응결 특성을 Fig 6에 나타내었다.

응결 특성의 경우 시멘트 수화 특성에 비례하여 응결 시간의 변화가 나타나기 때문에 OPC배합이 초결 및 종결까지 도달하는 시간이 가장 짧은 것으로 나타났으며, F25 > B50 > SC > B35F15 > BRC 순으로 나타나고 있다.

시멘트 종류에 따른 응결시간은 BRC의 경우 제조 과정에서 OPC에 비해 초기 수화를 지연시키도록 광물 조성을 조정하여 제조되었기 때문에 응결 특성에 있어서 응결시간이 지연되는 것으로 나타났으며, 혼화제를 사용한 경우에 비해서도 응결 특성이 지연되는 것으로 나타났다.

혼화제를 사용한 배합에 있어서도 혼화제의 사용량에 따라 응결 특성에 차이가 발생하고 있으며, 혼화제 사용량이 가장 적은 F25가 응결시간이 가장 단축되는 것으로 나타났다.

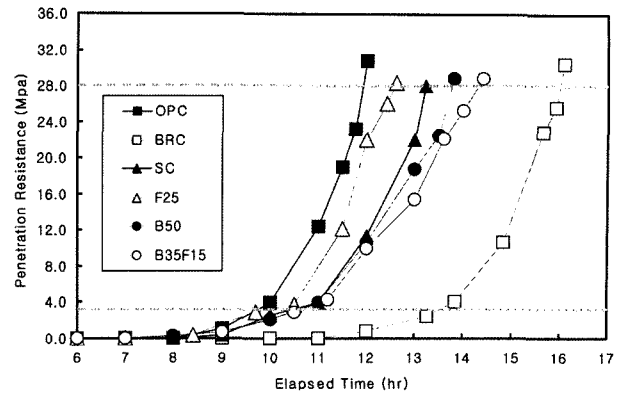


Fig. 6 Properties of setting time

동일한 혼화제량에 대해서 혼화제 배합비를 변화시킨 B50과 B35F15의 배합을 비교할 경우, B50이 B35F15보다 응결시간이 다소 단축되는 것으로 나타났다. 이는 고로슬래그의 수화도가 플라이애쉬에 비해 활발하여, 배합설계상 고로슬래그의 사용량이 많은 B50이 B35F15에 비해 응결 특성이 단축되는 것으로 사료된다.

### 3.2.3 결합재 조건에 따른 간이단열온도상승 특성

결합재 설계 조건에 따른 간이단열온도상승 시험 결과를 Fig. 7에, 최고온도 도달까지의 온도상승비를 Table 7에 나타내었다.

간이단열온도상승 곡선을 살펴보면, OPC가 가장 높은 온도상승량을 나타내고 있으며, 고로슬래그를 사용한 배합에 있어서는 SC > B50 > B35F15 배합 순으로 고로슬래그의 온도상승량이 플라이애쉬를 사용한 경우에 비해 다소 높게 나타나고 있다<sup>5)</sup>. 플라이애쉬를 사용한 F25 및 B35F15의 경우 거의 유사한 온도상승량을 나타내고 있으며, BRC는 모든 배합에서 가장 낮은 온도상승량을 나타내었다.

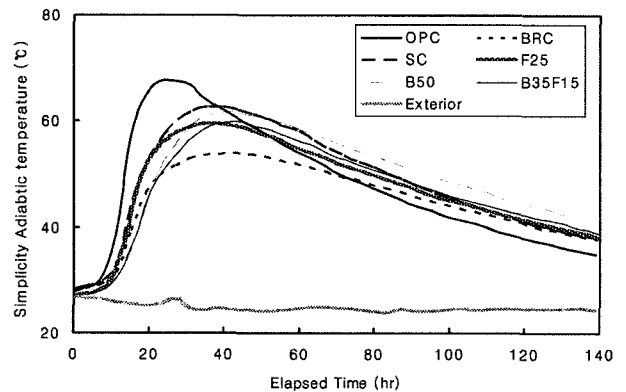


Fig. 7 Properties of adiabatic temperature rising curve

Table 7 Rising rate of temperature per hour

	OPC	BRC	SC	F25	B50	B35F15
Max temp. (°C)	67.6	54.1	62.7	59.7	61.8	59.9
Time (hr)	27	43	35	36	42	44
Rising rate (°C/hr)	2.5	1.3	1.8	1.7	1.5	1.4

타내고 있다<sup>6)</sup>.

결합재 설계 조건에 따른 단열온도 상승 변화는 응결 특성과 유사한 경향으로서 응결특성이 지연될수록 단열 온도 상승량도 감소하는 것으로 나타났으나, F25 배합의 경우 응결 특성에 있어서는 혼화제를 사용한 배합 조건 중 가장 빠른 응결 특성을 나타내고 있으나, 단열온도 상승량에서는 고로슬래그미분말을 사용한 경우에 비해서 온도상승량이 낮은 수준을 나타내고 있다<sup>7)</sup>.

최고온도 도달 후의 온도감소 변화는 고로슬래그미분말을 사용한 경우가 가장 완만히 감소하는 것으로 나타나고 있으며, 이는 미소수화발열량에서의 누적수화열량의 변화와 유사한 경향으로서, 고로슬래그의 잠재수경성 반응에 기인하여 온도의 감소경향이 다른 배합에 비해 상대적으로 완만히 나타나는 것으로 사료된다.

Table 7은 최고온도까지 도달하기 위한 시간당 온도상승비를 나타낸 것으로, 온도상승비는 수화열에 의한 콘크리트 내부의 급격한 온도응력 발생의 제어 정도를 판별할 수 있는 지표로서<sup>7)</sup>, 상승비가 낮을수록 콘크리트의 내부 온도응력 제어 가능성이 높은 것을 의미한다.

결합재 설계 조건에 따른 상승비의 변화는 최고온도와 다소 차이가 있는 것으로 나타났다. 최고 온도는 OPC > SC > B50 > B35F15 > F25 > BRC 순으로 나타나고 있으나, 상승비는 OPC > SC > F25 > B50 > B35F15 > BRC 순으로, F25의 경우 최고 도달 온도는 BRC 배합을 제외하고는 가장 낮은 값을 나타내고 있으나 상승비에 있어서는 OPC 및 SC 다음으로 상승속도가 빠른 것으로 나타났다.

결합재 조건에 따른 최고온도 값과 온도상승비의 관계를 살펴보면, OPC의 경우 최고온도 및 온도상승비 모두 매우 높게 나타나고 있으며, BRC의 경우에는 최고온도 및 온도상승비 모두 가장 낮게 나타나고 있다. 고로슬래그를 사용한 경우에는 SC가 최고온도 및 온도상승비가 높게 나타나고 있으며, B35F15가 가장 낮게 나타나고 있다. 특히 B35F15의 경우에는 F25보다 최고온도는 약 3°C 내외의 높게 나타나고 있으나, 최고온도까지의 온도상승비는 오히려 F25보다 느리게 나타나고 있다.

최고온도 도달까지의 온도상승비는 콘크리트의 수화 과정에서 발생하는 수화열에 의한 온도응력의 급격한 변화에 영향을 미치며, 본 실험의 범위에서 플라이애쉬의 경우 최고 도달 온도는 고로슬래그를 사용하는 경우에 비해 낮게 나타나고 있으나, 온도상승비는 최고 도달 온도에 비해 상대적으로 빠른 수준이며, 이는 플라이애쉬에 의한 수화 지연 효과로 인해 온도 상승량은 낮은 수준에서 관리가 가능하지만, 총 결합재량에 대한 단위시멘트량이 고로슬래그를 사용한 배합에 비해 높기 때문에 단기간의 온도상승속도는 빠르게 나타난 것으로 사료된다.

이상의 결합재 종류 및 배합설계 조건에 따른 수화발열 특성을 고려할 경우, BRC의 경우에는 가장 낮은 수화발열 특성을 나타내고 있어서, 수화열에 의한 콘크리트의 온도응력 제어를 위해서는 BRC를 사용하는 것이 가장 효과적인 것으로 나타났으나, 실 건설현장에서 시

공성 및 경제성을 고려할 경우에는 시멘트 종류에 의한 온도응력 조절 보다는 혼화제를 사용하는 경우가 보다 효과적이며, 혼화제의 사용 방법에서는 플라이애쉬 또는 고로슬래그 단독사용에 의한 2성분계 배합관리 보다는 고로슬래그과 플라이애쉬의 혼합 사용한 3성분계의 배합설계를 사용하는 것이 수화열 제어에 효과적일 것으로 사료된다.

### 3.2.4 경화 콘크리트의 특성 검토

Fig. 8에 결합재 설계 조건에 따른 콘크리트의 압축강도 발현특성을 나타내었다.

결합재 조건에 따른 재령별 압축강도를 보면, 초기 재령 7일까지는 OPC 배합이 가장 높은 강도발현을 나타내고 있으나, 재령 91일에서는 가장 낮은 값을 나타내고 있다. 또한 BRC의 경우에는 초기 재령에서는 강도발현이 가장 지연되는 것으로 나타났으나, 재령 91일에서는 가장 높은 강도를 발현하는 것으로 나타났다.

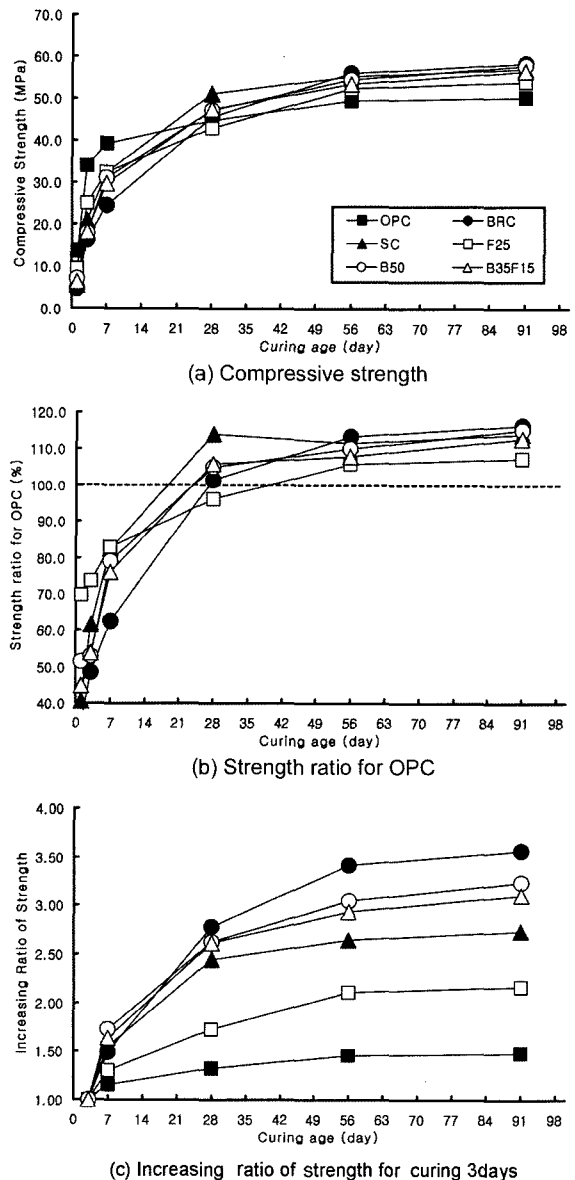


Fig. 8 Properties of strength revelation

이러한 강도발현 특성은 OPC대비 강도발현율을 살펴보면 더욱 분명하게 나타나고 있다. 재령 7일까지는 모든 배합이 OPC에 비해 강도발현율이 저하하는 것으로 나타나, 혼화재를 사용한 배합에서 상대적으로 혼화재 사용량이 가장 적은 F25가 발현율 80%를 다소 상회하는 수준이며, BRC는 60% 내외로 나타나고 있지만, 재령 28일에서는 F25를 제외한 모든 배합에서 OPC에 비해 100% 이상 압축강도를 발현하고 있으며, 재령 91일에서는 모든 배합이 110% 내외의 강도발현율을 나타내고 있다.

고로슬래그미분말을 사용한 B50 및 B35F15 배합의 경우 초기재령 3일에서는 F25 배합에 비해 강도발현율의 저하 경향이 뚜렷하지만, 재령 7일에는 F25와 유사한 발현율을 나타내고 있으며, 재령 28일에서는 OPC 대비 105% 이상의 높은 강도를 발현율로, F25 배합의 강도발현율 98% 내외보다 우수한 강도발현성을 나타내고 있다. 따라서, 강도발현 성능을 고려한 배합설계를 진행할 경우, 플라이애쉬보다는 고로슬래그를 활용하는 것이 보다 효과적인 것으로 나타났다.

재령 3일 압축강도 대비 재령별 강도증진율을 살펴보면, OPC배합이 강도증진 효과가 가장 저하하는 것으로 나타났으며, BRC를 사용하는 경우가 강도증진 효과는 가장 우수한 것으로 나타났으나, 이는 초기강도가 다른 배합에 비해 매우 낮기 때문에 장기재령에서의 증진 효과가 매우 양호하게 나타난 것으로 사료된다.

혼화재 사용 조건에 따른 강도증진 효과를 살펴보면, 재령 28일에서 F25의 재령3일 강도대비 강도증진비는 1.72로 나타났으나, B35F15 및 B50은 2.62, SC는 2.44로 나타났다. 특히 이러한 경향은 재령 91일에서는 더욱 뚜렷해지는 것으로 나타나, 고로슬래그를 활용하는 경우가 플라이애쉬를 활용한 경우에 비해 강도발현성능 측면에서 보다 효과적인 것으로 사료된다<sup>8)</sup>.

플라이애쉬의 경우 기존의 연구 결과를 고려할 경우, 강도 증진을 고려한 적정 대체율이 10~20%로 알려져 있으며<sup>9)</sup>, 본 실험에서는 적정 대체율을 초과하여 사용하였기 때문에 강도발현 측면에서는 플라이애쉬의 사용에 의한 강도증진 효과가 낮게 나타나는 것으로 사료되지만, 혼화재의 사용량 및 강도발현 성능을 고려할 경우에는 플라이애쉬보다는 고로슬래그를 활용하는 것이 보다 효과적일 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

이상 결합재 설계 조건에 따른 콘크리트의 수화발열 특성 및 강도발현 성능을 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 결합재 조건에 따른 유동특성에 있어서 고성능 감수제 사용량의 변화는 BRC가 가장 우수한 것으로 나타났으며, 총결합재 중 단위시멘트량이 많을수록 고성능감수제의 사용량은 증가하며, 고로슬래그를

사용하는 것이 효과적인 것으로 나타났다.

- 2) 결합재 조건에 따른 응결 특성에 있어서는, 단위시멘트의 사용량이 증가할수록 응결 시간이 단축되는 것으로 나타났으며, BRC의 경우가 응결 시간이 가장 지연되는 것으로 나타났다.
- 3) 결합재 조건에 따른 미소수화열량을 살펴보면, BRC가 가장 낮은 수화열량을 나타내고 있으며, 플라이애쉬를 사용할수록 수화열량은 낮아지는 경향을 나타내고 있다. 고로슬래그를 사용한 경우 경과시간에 따라 수화 특성은 플라이애쉬에 비해 지속적으로 증가하는 경향을 나타내고 있다.
- 4) 결합재 조건에 따른 간이단열 온도변화를 살펴보면, OPC가 가장 높은 온도변화를 나타내고 있으며, BRC가 가장 낮은 온도상승을 나타내고 있으며, 플라이애쉬를 사용하는 경우가 고로슬래그를 사용하는 경우에 비해 온도저하효과가 있는 것으로 나타났다.
- 5) 결합재 조건에 따른 단열온도 변화에 있어서 온도상승속도를 살펴보면, 고로슬래그를 사용한 경우가 플라이애쉬를 사용한 경우에 비해 다소 완만한 상승속도를 나타내고 있으며, 혼화재의 사용량이 많을수록 이러한 경향은 나타나고 있다.
- 6) 결합재 조건에 따른 강도발현 특성을 살펴보면, 초기재령에서는 혼화재 사용량이 적을수록, 장기재령에서는 혼화재의 사용량이 많을수록 강도발현 특성이 우수하게 나타나고 있으며, 장기재령에서는 BRC가 가장 양호한 강도발현 특성을 나타내고 있다.
- 7) 수화발열 특성을 고려한 저발열 콘크리트의 결합재 조건은 저발열 시멘트를 사용하는 것이 가장 효과적이며, 시공성 및 경제성 등을 종합 고려할 경우에는 혼화재를 사용할 경우에는 플라이애쉬만을 사용하는 것보다 고로슬래그미분말과 혼용 사용하는 것이 가장 효과적인 것으로 사료된다.

#### 참고문헌

1. 한국콘크리트학회 “최신 콘크리트공학”, 기문당, 2005, pp.604~635.
2. 김진근, 강석화, 김상철 “매스콘크리트 구조물에서의 시멘트 종류별 수화발열 특성 평가”, 콘크리트학회 논문집, 11권 6호, 1999.12, pp.3~12.
3. 김무한, 김상규, 김상윤, 최세진, 김용로, 유범재, “혼화재 종류 및 대체율에 따른 고강도콘크리트의 수화열 저감 효과”, 한국콘크리트학회 가을학술발표대회 논문집, 13권 2호, 2001, pp.409~414.
4. 이상수, 원철, 김동석, 박상준, “고로슬래그미분말을 사용한 콘크리트의 공학적 특성에 관한 연구”, 콘크리트학회 논문집, 12권 4호, 2000.8, pp.49~58.
5. 國府早勝郎 外, “高爐スラグ微分末の用いたコンクリートの斷熱溫度上昇”, 日本土木學會 高爐スラグ微分末の用いたコンクリートの適用の關するシンポジウム, 1987.3, pp.51~58.
6. 현석훈, 박춘근, 신영인, 김용호, “저발열 콘크리트 수화열 평가의 실험적 연구”, 한국콘크리트학회 가을학술발

표논문집, 8권 2호, 1996, pp.345~351.

7. 김진근, 노재호, 박연동, 한정호, 김훈, “시멘트 및 콘크리트의 수화발열특성에 관한 연구”, 콘크리트학회 논문집, 7권 3호, 1995. 6, pp.211~219.
8. 김진근, 하재담, 김태홍, 이종열, “결합재 종류에 따른 콘

크리트의 단열온도상승특성 및 단열온도상승에 따른 압축강도특성에 관한 연구”, 한국콘크리트학회 봄학술발표대회, 13권 1호, 2001. 5, pp.527~532.

9. 日本コンクリート學會, “マスコンクリートの溫度應力研究委員會報告書”, 日本コンクリート學會, 1985.11.

---

**요 약** 최근 급속한 산업의 발달과 더불어 토목 건축기술의 발달로 콘크리트 구조물의 초고층화·대형화가 이루어지고 있으며, 이러한 대형 구조물의 시공에 있어서 콘크리트의 온도상승은 부재의 내·외부 온도차이로 인한 온도응력에 의하여 균열을 발생시켜 구조물의 내하력 및 내구성에 심각한 손상을 가져올 수 있다. 연구에서는 시멘트 및 혼화재의 종류 및 배합설계 조건에 따라 콘크리트의 수화발열 특성 및 콘크리트의 공학적 특성에 대해 실험을 진행하였다. 시멘트 종류는 1종 보통포틀랜드시멘트, 혼합시멘트인 고로슬래그시멘트 및 4종 포틀랜드시멘트(벨라이트시멘트)를 사용하였으며, 혼화재 종류로는 플라이애쉬와 고로슬래그미분말을 사용하였다. 혼화재의 사용방법은 일반적으로 사용되는 플라이애쉬 25% 대체한 경우와 비교용으로 고로슬래그미분말을 50% 대체한 경우(2성분계 배합)와 또는 플라이애쉬와 혼합 사용(3성분계 배합) 방법을 적용하였다. 본 연구 결과, 결합재 종류 및 설계 조건에 따른 수화발열특성에 있어서는 벨라이트시멘트를 사용하는 것이 가장 효과적이며, 플라이애쉬를 사용한 경우도 수화열 저감 효과는 우수한 것으로 나타났으며, 수화발열특성을 비롯한, 콘크리트의 품질 특성을 종합적으로 고려할 경우, 고로슬래그미분말의 사용이 효과적이며, 특히 고로슬래그미분말과 플라이애쉬를 혼합사용한 3성분계의 배합설계가 가장 효과적인 것으로 판단된다.

**핵심용어** 벨라이트시멘트, 고로슬래그시멘트, 플라이애쉬, 고로슬래그, 미소수화발열