

결합재 조건에 따른 콘크리트의 수화발열 특성에 관한 연구

Ready Mixed Concrete Journal

최성우 유진기업(주) 기술연구소, 선임연구원
전준영 유진기업(주) 기술연구소, 수석연구원
류득현 유진기업(주) 기술연구소 소장

1 서론

최근 급속한 산업의 발달과 더불어 토목 건축기술의 발달로 콘크리트 구조물의 초고층화·대형화가 이루어지고 있으며, 이러한 대형 구조물의 시공에 있어서 콘크리트의 온도 상승은 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, Pipe Cooling 방법 등의 시공적인 접근 방법과 수화열의 발생이 적은 결합재 및 그 조합에 의해 온도를 저감시키는 재료적인 접근 방법으로 나눌 수 있다.¹⁾

시공적인 접근 방법에 의한 콘크리트의 수화발열 억제는 초기 Cooling설비에 대한 투자비와 적용 부재의 규모에 제한이 있기 때문

에 범용적으로 사용되고 있지 못하며, 배합설계에 의한 콘크리트의 수화발열량을 최대한 저감시키는 재료적인 접근방법이 주로 사용되고 있다. 이러한 재료적인 접근방법으로서 는 사용재료 선정 및 배합설계에 의해 콘크리트의 수화발열량을 억제하도록 유도하여 온도응력발생을 조절하는 방법이 사용되고 있다. 특히 플라이애시, 고로슬래그와 같은 혼화재 사용의 배합설계를 통해 콘크리트의 수화발열량을 조절하는 방법이 일반적으로 사용되고 있다²⁾.

따라서 본 연구에서는 시멘트 종류 및 혼화재 종류, 사용방법을 변화시켜 결합재 설계 조건에 따라 콘크리트의 기초물성 변화 및 수화 발열 특성을 검토하였으며, 특히 고로슬래그를 활용한 매스콘크리트의 배합설계 방법에 대해서 검토를 진행하여, 매스콘크리트 제조를 위한 다양한 배합설계 방법을 제시하고자 하였다.

II 실험계획 및 방법

2-1 실험계획

[표 1]에 배합설계 요인을, [표 2]에 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 기초 물성 및 수화발열 특성을 검토하였다.

결합재 조건은 혼화재 사용 방법과 시멘트 종류 2가지 시리즈로 실험을 진행하였다.

I 시리즈에서 혼화재 종류 및 사용방법에 따른 발열특성을 검토하였다. 혼화재 종류 및 사용방법은 1종포틀랜드시멘트(OPC) 100% 사용 배합을 기준으로 하여 현재 건설시공현장에서 주로 사용되고 있는 플라이애시(FA) 25%와 일반적으로 고로슬래그미분말의 수화저감효과가 있는 것으로 알려진 고로슬래그미분말(BFS) 50% 사용 배합 등 2성분계 배합 및 3성분계 배합으로서는 BFS 50%와 동일한 혼화재 사용량에 대해서 BFS 35%와 FA 15% 대체한 배합 등 총 4수준에 대해 발열성능 및 콘크리트 기초물성을 검토하였다.

II 시리즈에서는 현재 시판되는 시멘트를 대상으로 발열성능을 검토하였다. 시멘트 종류는 OPC를 기준으로 4종포틀랜드시멘트, 3성분계 저발열혼합시멘트, 고로슬래그시멘트 등 총 4수준에 대해 성능 검토를 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 375kg/m^3 , 잔골재율 46%의 배합을 적용하였다.

2-2 사용재료

본 연구에 사용된 재료의 기초물성은 [표 3]에 나타내었다.

시멘트는 S사 제품의 1종 보통포틀랜드시멘트(Ordinary Portland Cement)와 B사의 고로슬래그시멘트(Slag Cement) 및 3성분계 저발열혼합시멘트(Low Heat Cement), S사 제품의 4종 포틀랜드시멘트(Belite Rich Cement)를 사용하였다. 혼화재로서 플라이애시는 영흥화력발전소에서 생산되는 제품을, 고로슬래그미분말은 B사 고로슬래그미분말 2종 제품을 사용하였다.

시멘트 종류에 따른 밀도 및 분말도는 제조 과정에 따라 차이가 있는 것으로 나타났다. 혼화재는 고로슬래그 미분말은 분말도 $4,429\text{cm}^2/\text{g}$ 의 3종 고로슬래그 미분말을 사용하였으며, 플라이애시는 영흥화력 발전소

[표 1] 실험 요인

시멘트 종류		1종 보통포틀랜드시멘트 (OPC) 4종 저열포틀랜드시멘트 (BRC) 저발열혼합시멘트 (LHC) 고로슬래그시멘트 (SC)
혼화재	종류	플라이애시 (FA) 고로슬래그미분말 (BFS)
	배합비	시멘트 단독 2성분계 배합 : FA25, BFS50 3성분계 배합 : B35F15
목표 슬럼프 (mm)		180 ± 10
목표 공기량 (%)		4.5 ± 1.5

결합재 조건에 따른 콘크리트의 수화발열 특성에 관한 연구



[사진 1] 콘크리트 간이단열온도 시험

[표 2] 콘크리트 배합비

시리즈	배합	W/B (%)	S/a (%)	결합재 단위 중량 (kg/m³)						
				W	OPC	BRC	SC	LHC	B	F
I	OPC	41.9	46.0	157	375	-	-	-	-	-
	FA25				281	-	-	-	-	94
	BFS50				188	-	-	-	187	-
	B35F15				188	-	-	-	131	56
II	OPC	41.9	46.0	157	375	-	-	-	-	-
	BRC				-	375	-	-	-	-
	SC				-	-	375	-	-	-
	LHS				-	-	-	375	-	-

[표 3] 원자재 기초물성

시멘트	OPC	밀도 3.15g/cm³ 분말도 3,494cm²/g
	SC	밀도 2.99g/cm³ 분말도 4,116cm²/g, 고로슬래그미분말 대체율 40%
	BRC	밀도 3.20g/cm³ 분말도 3,505cm²/g
	LHC	밀도 2.96g/cm³ 분말도 4,104cm²/g
혼화제	FA	밀도 2.20g/cm³ 분말도 3,507cm²/g
	BFS	밀도 2.91g/cm³ 분말도 4,429cm²/g
혼화제	감수제	Polycarboxylate
	AE제	Resin

에서 발생한 분말도 3,507cm²/g의 2종 플라이애시를 사용하였다.

[표 4] 실험 항목

측정 항목	
수화발열 특성	1) 미소수화발열량 2) 콘크리트의 간이 단열온도
기초물성	1) 굳지않은 성상 : 감수제 사용량, AE제 사용량 슬럼프, 공기량 경시변화 ⇒ 30, 60 min. 응결시간 2) 경화 성상 : 압축강도 ⇒ 1, 3, 7, 28, 56, 91일 코아공시체 ⇒ 91 day

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

2-3 실험방법

결합재 조건에 따른 수화발열특성을 검토하기 위한 실험방법은 [표 4]에 나타난 바와 같다.

콘크리트의 유동성을 동일하게 적용하여 목표 슬럼프 범위를 만족시키는 감수제의 사용량과 목표 공기량을 만족시키는 AE제 사용

량을 각각 검토하였으며, 수화발열특성을 검토하기 위해 다음과 같은 항목에 대해 실험을 진행하였다.

2-3-1 미소수화열 측정

콘크리트 제조 시에는 시멘트뿐 만이 아니라 혼화재, 혼화제, 골재 등이 사용되고 있으며, 이러한 원자재들의 복합작용에 의해 수화발열특성이 나타난다. 따라서 시멘트 및 결합재 만에 의한 수화발열특성을 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.

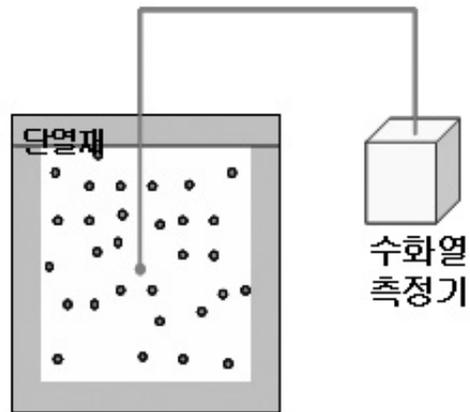
2-3-2 간이단열온도 상승시험

간이단열온도 시험의 개념도를 [그림 1]에, 간이단열온도 시험방법 방법을 [사진 1]에 나타내었다.

콘크리트 온도상승을 측정하기 위하여 내측 길이가 600×600×600 mm인 정방형 거푸집에 두께 100 mm의 단열재로 단열장치를 만들고 중심부에 열전대(Thermocouple)를 설치하였으며, 64ℓ (400×400×400 mm)의 콘크리트 내부 온도변화를 7일간 측정하였다³⁾.

2-3-3 콘크리트의 기초물성

결합재 조건에 따른 콘크리트의 기초물성으로는 굳지않은 성상에서는 슬럼프, 공기량, 경과시간 30, 60분에서의 경시변화 및 응결특성을 검토하였으며, 경화성상으로는 재령



[그림 1] 간이단열온도시험 모식도

1, 3, 7, 28, 56, 91일에서의 압축강도를 측정하였다. 또한 간이단열온도 상승 시험체를 대상으로 코아공시체를 채취하여 재령 91일에서의 코아공시체의 압축강도도 측정하였다.

III 실험결과 및 분석

[표 5]에 콘크리트 시험 결과를 종합 정리하여 나타내었다.

3-1 I 시리즈 실험 결과

3-1-1 미소수화열량 검토

[표 5]에 미소수화열 총량을, [그림 2]에 혼화재 종류 및 배합방법에 따른 미소수화 발열변화를, 나타내었다.

재령 7일까지의 미소수화열 총량은 OPC 배합이 가장 높게 나타나고 있으며, BFS50>BFS50>B35F15>FA25의 순으로 미소수화발열 총량이 높게 나타나고 있다.³⁾ 특히 단위시

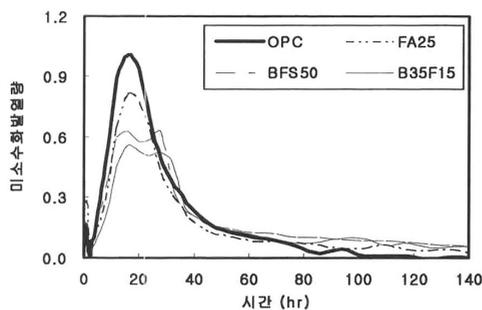
[표 5] 콘크리트 시험 결과

시리즈	배합	혼화제 (kg/m ³)		Slump (mm)			Air (%)			응결 (hr : min)		압축강도 (MPa)						
		감수제	AE제	직후	30분	60분	직후	30분	60분	초결	종결	1	3	7	28	56	91	91 ¹⁾
I	OPC	3.94	0.0039	180	190	195	4.2	4.2	4.0	9:50	11:50	13.8	33.9	39.3	44.8	49.5	50.2	47.2
	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
II	OPC	3.94	0.0039	180	190	195	4.5	4.4	4.1	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	13:40	16:00	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	10:40	13:20	5.6	20.9	32.3	51.1	55.2	57.2	53.5
	LHC	2.44	0.0122	185	190	195	4.0	3.8	3.5	14:30	16:40	3.6	13.8	20.1	41.3	48.8	52.1	50.6

1) 재령 91일에서의 코아공시체 압축강도 (단열온도시험체에서 코아공시체 채취)

[표 6] 재령 7일까지의 미소수화발열 총량

배합비	OPC	FA25	BFS50	B35F15
미소수화발열량 (J/g)	281.82	238.15	270.07	241.90



[그림 2] 경과시간에 따른 미소수화발열 특성

멘트량을 고려할 경우 단위시멘트량이 상대적으로 높은 FA25에 비해 BFS50 및 B35F15가 미소수화발열량이 높게 나타나고

있는데, 이는 고로슬래그미분말이 플라이 애시에 비해 수화 활성도가 높기 때문에⁴⁾ 단위시멘트량에 의한 수화발열 이외에 고로슬래그미분말에 의한 수화발열량으로 인해 FA25 배합에 비해서 미소수화발열량이 높게 나타난 것으로 판단된다.

경과시간에 따른 미소수화발열 변화를 살펴보면, 미소수화발열 총량이 가장 많은 OPC가 경과시간에 따른 미소수화발열 Peak도 가장 높은 것으로 나타났다. 그러나, 미소수화발열 총량과 달리, 미소수화발열 최대 Peak의 변화는, OPC>FA25>BFS50=B35F15의 순으로, 단위시멘트량이 높은 순서대로 미소수화발열 Peak가 높게 나타나고 있다. 또한 고로슬래그미분말을 사용한 BFS 50, B35F15 배합의 경우 최대 Peak는 가장 낮은 특성을 나타내고 있으나, 1차 Peak 발생 이후 2차 Peak가 나타나고 있는데, 이는 수화진행의 초기에는 단위시멘트량이 영향을 미치지 않지만, 일정 시간이 경과한 후에는 혼화제의 활성화에 의한 발열

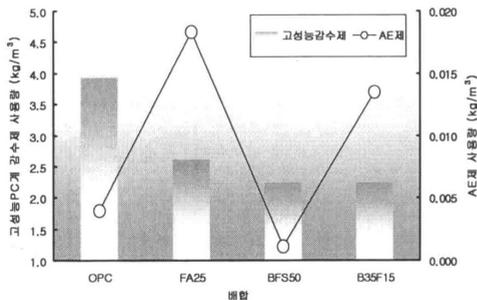
특성이 나타나며, 특히 고로슬래그가 플라이 애시에 비해 수화 활성도가 높기 때문에 수화 초기의 시멘트에 의한 발열 Peak가 나타난 이후, 고로슬래그에 의한 2차적인 수화발열 Peak가 나타난 것으로 사료된다.

3-1-2 콘크리트의 굳지않은 성상

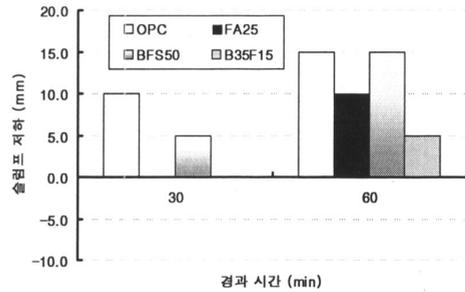
혼화재 종류 및 배합방법에 따른 콘크리트의 목표 유동성을 만족시키는 고성능 감수제와 AE제 사용량의 변화를 [그림 3]에 나타내었다.

목표 슬럼프를 만족시키는 감수제의 사용량은 OPC>FA25>BFS50=B35F15의 순으로, OPC에 비해 혼화재를 사용한 경우가, 혼화재 종류에 있어서는 고로슬래그미분말을 사용한 경우가 동일 유동성을 확보하기 위한 고성능 감수제의 사용량은 감소하는 것으로 나타났다. 이는 혼화재의 특성에 기인한 것으로 사료되며, 특히 고로슬래그미분말의 입자특성에 의해 플라이애시에 비해서도 유동성의 증진효과가 크게 나타난 것으로 판단된다.⁵⁾

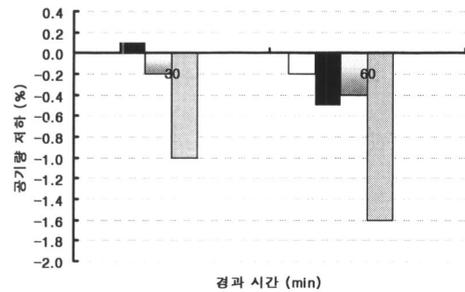
또한 AE제의 사용량에 있어서는 FA25가 가장 높은 사용량을 나타내고 있으며, OPC



[그림 3] 감수제 및 AE제 사용량의 변화량



(a) 슬럼프 저하



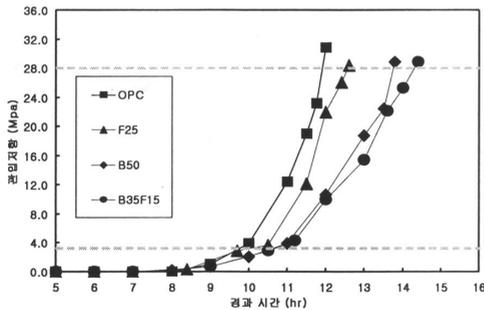
(b) 공기량 저하

[그림 4] 슬럼프와 공기량의 경시변화

및 BFS50의 경우 유사한 수준을 나타내고 있어서, 고로슬래그미분말의 사용에 따른 공기량 발현 성능은 OPC와 동일한 관리 수준이 가능할 것으로 판단된다.

[그림 4]에 경과시간에 따른 변화를 제조 직후에 대한 변화폭으로 나타내었다.

슬럼프의 경시변화는 대부분의 배합에서 경과시간 60분에서 10 mm 내외 증진되는 것으로 나타났다. 폴리카르본산계 고성능혼화제의 경우, 혼화제의 분산성 및 유지성능이 일반 감수제에 비해 우수하여, 시간이 경과하여도 슬럼프 및 슬럼프플로우의 유지성능이 우수한 것으로 알려져 있으며, 본 실험의 범위에서도 유사한 경향을 나타내고 있다. 특히



[그림 5] 응결특성

고로슬래그미분말을 사용한 경우에 있어서 유동성을 확보하기 위한 고성능감수제의 사용량은 상대적으로 낮은 수준이지만, 경과시간에 따른 유동성 유지성능은 양호한 것으로 나타나, 작업성을 고려할 경우 고로슬래그미분말의 활용이 효과적일 것으로 판단된다.

공기량 유지성능에 있어서는 B35F15가 경과시간에 따른 공기량 저하가 가장 큰 것으로 나타났으며, 이는 플라이애시에 의한 공기량 저하 효과와 더불어 AE제 사용량이 FA25에 비해 상대적으로 적은 양이 사용되었기 때문인 것으로

3-1-3 응결특성

혼화재 종류 및 배합방법에 따른 응결특성을 [그림 5]에 나타내었다.

응결특성의 경우 시멘트 수화특성에 비례하여 응결시간의 변화가 나타나기 때문에 OPC배합이 초결 및 종결까지 도달하는 시간이 가장 짧은 것으로 나타났으며, F25>B50>B35F15 순으로, 혼화재의 사용량에 따라 응결특성에 차이가 발생하여, 혼화재 사용량이 가장 적은 FA25가 응결시간이 가장 단축되는 것으로 나타났다.

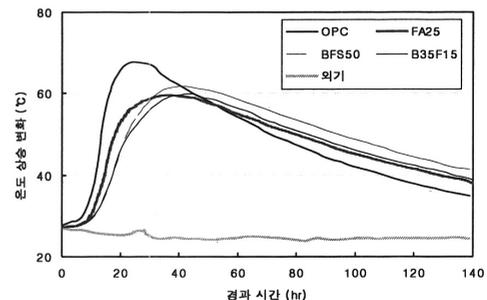
동일한 혼화재량에 대해서 혼화재 배합비를 변화시킨 BFS50과 B35F15의 배합을 비교할 경우, BFS50이 B35F15보다는 응결시간이 다소 단축되는 것으로 나타났다. 이는 고로슬래그의 수화도가 플라이애시에 비해 활발하여, 배합설계상 고로슬래그의 사용량이 많은 BFS50이 B35F15에 비해 응결특성이 단축되는 것으로 사료된다.

3-1-4 간이단열온도상승 특성

혼화재 종류 및 배합방법에 따른 간이단열 온도시험 결과를 [그림 6]에, 최고온도 도달까지의 온도상승비를 [표 7]에 나타내었다.

간이단열온도상승 곡선을 살펴보면, OPC가 가장 높은 온도상승량을 나타내고 있으며, BFS50>B35F15>FA25 순으로, 고로슬래그를 사용한 배합이 다소 온도상승량이 높게 나타나고 있으며⁶⁾, 이는 미소수화발열특성과 동일한 결과이다.

최고온도 도달 후의 온도감소 변화는 고로슬래그미분말을 사용한 경우가 가장 완만히 감소하는 것으로 나타나고 있으며, 이는 미소수화발열량 총량과 유사한 경향으로서, 고로



[그림 6] 경과시간에 따른 온도변화

[표 7] 최고 온도 도달 속도

	OPC	FA25	BFS50	B35F15
최고 온도 (°C)	67.6	59.7	61.8	59.9
시간 (hr)	27	36	42	44
상승속도 (°C/hr)	2.5	1.7	1.5	1.4

슬래그의 잠재수경성 반응에 기인하여 온도의 감소경향이 다른 배합에 비해 상대적으로 완만히 나타나는 것으로 사료된다.

[표 7]은 최고온도까지 도달하기 위한 시간 당 온도상승비를 나타낸 것으로, 온도상승비는 수화열에 의한 콘크리트 내부의 급격한 온도응력 발생의 제어 정도를 판별할 수 있는 지표로서⁷⁾, 상승비가 낮을수록 콘크리트의 내부 온도응력 제어 가능성이 높다.

온도 상승비의 변화는 최고온도 경향과 다소 차이가 있는 것으로 나타났다. 최고 온도는 OPC>BFS50>B35F15>FA25 순으로 나타나고 있으나, 상승비는 OPC>FA25>BFS50>B35F15 순으로, FA25의 경우 최고 도달 온도는 가장 낮은 값을 나타내고 있으나, 온도상승비에 있어서는 OPC 다음으로 상승속도가 빠른 것으로 나타났다.

최고온도 도달까지의 온도상승비는 콘크리트의 수화과정에서 발생하는 수화열에 의한 온도응력의 급격한 변화에 영향을 미치며, 본 실험의 범위에서 플라이애시의 경우 최고 도달 온도는 고로슬래그를 사용하는 경우에 비해 낮게 나타나고 있으나, 온도상승비는 최고 도달 온도에 비해 상대적으로 빠른 수준이며, 이는 플라이애시에 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

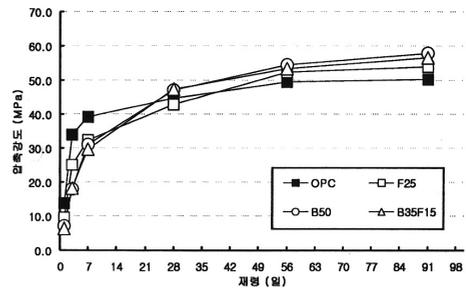
것으로 사료된다.

3-1-5 경화 콘크리트의 특성 검토

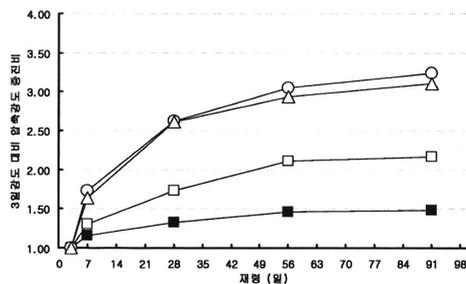
[그림 7]에 혼화재 종류 및 배합방법에 따른 콘크리트의 압축강도 발현특성을 나타내었다.

재령 14일까지는 OPC 배합이 가장 높은 강도발현을 나타내고 있으나, 혼화재를 사용한 배합에서는 재령에 따른 강도증진 효과로 인해 대부분의 배합에서 재령 28일에서는 강도가 OPC 배합에 비해 증가하는 것으로 나타났다으며, 재령 91일에서는 OPC 배합이 가장 낮은 강도발현 수준을 나타내고 있다.

이러한 강도발현특성은 OPC대비 강도발현



(a) 재령별 압축강도



(b) 재령 3일 강도 대비 재령별 강도 증진율

[그림 7] 압축강도 발현 특성

율을 살펴보면 더욱 분명하게 나타나고 있다. 모든 재령에서 OPC의 강도 증진비가 가장 낮은 것으로 나타났으며, 고로슬래그미분말을 사용한 BFS50 및 B35F15가 강도증진효과는 우수한 것으로 나타나고 있다. 수화발열특성에 나타난 바와 같이 고로슬래그미분말은 플라이애시에 비해 수화활성도가 높기 때문에 장기재령에서의 강도증진효과가 크게 나타나고 있는 것으로 판단된다.

플라이애시의 경우 기존의 연구결과를 고려할 경우, 강도증진을 고려한 적정 대체율이 10~20%로 알려져 있으며¹⁾, 본 실험에서는 적정 대체율을 초과하여 사용하였기 때문에 강도발현 측면에서는 플라이애시의 사용에 의한 강도증진효과가 낮게 나타나는 것으로 사료된다.

3-2 II 시리즈 실험 결과

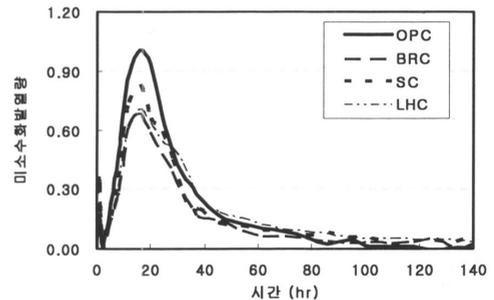
3-2-1 미소수화열량 검토

[표 8]에 시멘트 종류에 따른 미소수화열 총량을, [그림 8]에 경과시간에 따른 미소수화발열 변화를 나타내었다.

시멘트 종류에 따른 미소수화발열 총량은 OPC>SC>LHC>BRC의 순으로 나타났다. BRC를 제외한 나머지 배합은 OPC에 대한 혼화재를 혼합하여 제조된 시멘트로서, OPC의 사용에 의한 미소수화발열량이 증가하는 것으로 판단되며, BRC와 같이 시멘트 조성을

[표 8] 재령 7일까지의 미소수화발열 총량

시멘트 종류	OPC	BRC	SC	LHC
미소수화발열량 (J/g)	281.82	194.5	260.69	201.3



[그림 8] 경과시간에 따른 미소수화발열 특성

변화시킨 경우에는 수화발열의 감소 기대효과가 가장 큰 것으로 판단된다.

경과시간에 따른 미소수화발열 변화를 살펴보면, 미소수화발열 총량과 동일한 경향을 나타내고 있다. 최대 Peak는 OPC>SC>LHC>BRC의 순으로 나타났으며, I 시리즈의 결과와 유사한 경향으로 고로슬래그미분말이 혼입된 SC 및 LHC는 시간에 따른 발열 Peak의 변화에 있어서 2차 변곡점이 나타나고 있다.

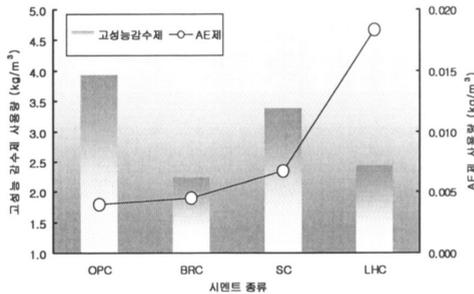
3-2-2 콘크리트의 굳지않은 성상

시멘트 종류에 따른 목표 유동성을 만족시키는 고성능 감수제와 AE제 사용량의 변화를 [그림 10]에 나타내었다.

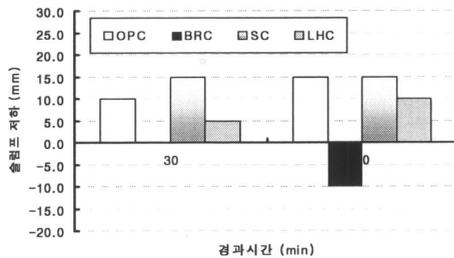
목표 슬럼프를 만족시키는 감수제의 사용량은 OPC>SC>LHC>BRC의 순으로, 혼화재를 사용하거나, 시멘트의 조성비를 변화시킨 경우 OPC에 비해서 유동성능이 개선되는 것으로 나타났다.

AE제 사용량 변화에 있어서는 플라이애시가 혼입된 LHC가 시멘트 종류 중 가장 많은 AE제 사용량을 나타내고 있으며, SC>BRC>OPC의 순으로 나타났다.

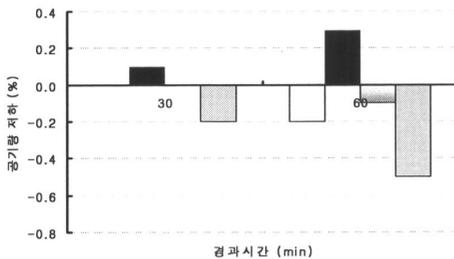
시멘트 종류에 따른 콘크리트 유동성의 경



[그림 10] 감수제 및 AE제 사용량의 변화량



(a) Slump Loss



(b) Air Content Loss

[그림 11] 슬럼프와 공기량의 경시변화

시변화를 [그림 11]에 나타내었다.

슬럼프의 경시변화는 I 시리즈와 유사한 경우로서 대부분의 배합에서 경과시간 60분에서 10~15 mm 증진되는 것으로 나타났으

나, BRC의 경우에는 경과시간에 따라 슬럼프 저하가 나타나고 있다. 이는 BRC의 경우 OPC와 시멘트 조성을 다르게 제조함에 따라 초기 유동성은 OPC에 비해 개선되지만, 혼화제 사용량이 OPC에 비해 매우 낮아 유지성능에 있어서는 오히려 성능 저하가 크게 나타나는 것으로 사료된다.

3-2-3 결합제 조건에 따른 응결특성

시멘트 종류에 따른 응결특성을 [그림 12]에 나타내었다.

시멘트 종류에 따른 응결시간은 OPC>SC>BRC>LHC의 순으로 단축되는 것으로 나타났다. 특히 LHC의 경우 시멘트 이외에 혼화제로서 고로슬래그 및 플라이애시가 혼합되어 제조된 시멘트로서 혼합비율에 따라 수화특성이 크게 차이가 발생하며, 본 실험의 범위에 사용된 LHC의 경우에는 시멘트의 수화가 매우 지연되는 특성을 갖고 있는 것으로 판단된다.

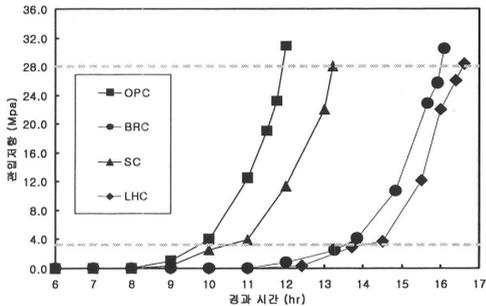
또한, 이러한 응결특성과 연관지어 시멘트의 수화발열특성을 이해하는 것이 가능할 것으로 사료된다.

3-2-4 간이단열온도상승 특성

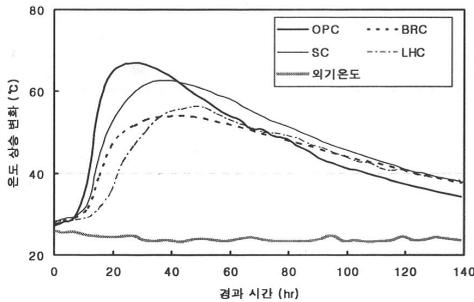
시멘트 종류에 따른 간이단열온도 시험 결과를 [그림 13]에, 최고온도 도달까지의 온도상승비를 [표 9]에 나타내었다.

간이단열온도상승 곡선을 살펴보면, OPC가 가장 높은 온도상승량을 나타내고 있으며, 그 다음으로 SC>LHC>BRC의 순으로 나타났으며⁸⁾, 온도상승이 가장 높은 OPC와 가장 낮은 BRC는 13.5℃의 온도차이가 있는 것으로 나타났다. SC의 경우 OPC에 비해 낮은 온도

결합재 조건에 따른 콘크리트의 수화발열 특성에 관한 연구



[그림 12] 응결특성



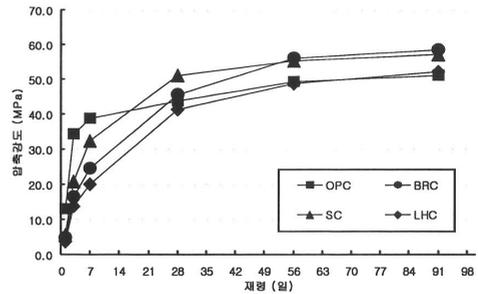
[그림 13] 경과시간에 따른 온도변화

[표 9] 최고 온도 도달 속도

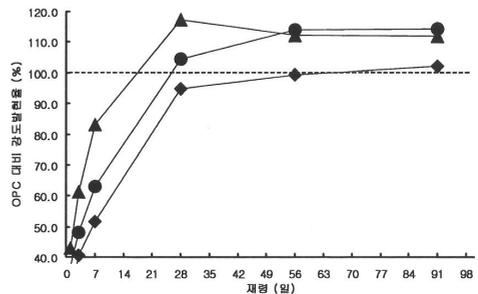
	OPC	BRC	SC	LHC
최고 온도 (°C)	67.0	54.1	62.7	56.3
시간 (hr)	28	43	35	47
상승속도 (°C/hr)	2.4	1.3	1.8	1.2

를 나타내고 있으나 고로슬래그미분말의 활성도에 의해 BRC 및 LHC에 비해 상대적으로 높은 온도상승값을 나타내고 있다.

[표 9]는 최고온도까지 도달하기 위한 시간당 온도상승비를 나타낸 것으로서, 상승속도는 OPC>SC>BRC>LHC의 순으로 나타났다. 특히 상승속도에 있어서는 BRC가 LHC보다 빠른



(a) 압축강도



(b) OPC 대비 강도발현율

[그림 14] Properties of Strength revelation

것으로 나타났으며, 이는 LHC 제조과정에서 혼화재의 배합비에 따라 최초 수화진행속도가 지연되는 것을 의미하며, 다만 고로슬래그미분말의 수화활성도에 의해 최고온도는 BRC보다 높게 나타나고 있는 것으로 사료된다.

3-2-5 경화 콘크리트의 특성 검토

[그림 13]에 시멘트 종류에 따른 압축강도 발현특성을 나타내었다.

시멘트 종류에 따른 강도발현특성은 I 시리즈와 동일한 경향으로 재령 28일 이전에는 OPC가 가장 높은 강도발현특성을 나타내고 있으나, 장기재령에서는 SC, BRC가 높은 강도발현특성을 나타내고 있다. LHC의 경우에

는 장기재령 56일에 있어서도 OPC에 비해서는 압축강도가 저하하는 것으로 나타나고 있으며, 재령 91일에서 OPC보다 강도가 증가하는 것으로 나타났다. 이는 LHC 제조 과정에서의 결합재의 배합비에 의한 영향으로 혼화재의 사용량이 OPC 보다 많기 때문에 초기재령에서의 수화의 진행이 매우 지연되지만, OPC에 비해 상대적으로 장기재령에 있어서는 지속적으로 수화가 진행되기 때문에 91일 이후에는 강도의 역전현상이 나타나는 것으로 판단된다.

IV 결론

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

1) 결합재 조건에 따른 유동특성에 있어서 고성능 감수제 사용량의 변화는 고로슬래그 미분말을 사용하거나 BRC를 사용하는 경우가 가장 효과적인 것으로 나타났다.

2) 결합재 조건에 따른 응결특성에 있어서는, 단위시멘트의 사용량이 감소하거나, BRC를 사용하는 경우도 응결시간이 지연되는 것으로 나타났으며, 응결특성을 고려하여 수화발열특성의 검토가 가능할 것으로 판단된다.

3) 결합재 조건에 따른 미소수화열량을 살펴보면, BRC가 가장 낮은 수화열량을 나타내고 있으며, 플라이애시를 사용할수록 수화열량은 낮아지는 경향을 나타내고 있다. 고로슬래그를 사용한 경우 경과시간에 따라 수화특성은 플라이애시에 비해 지속적으로 증가하는 경향을 나타내고 있다.

4) 결합재 조건에 따른 간이단열온도변화를 살펴보면, OPC가 가장 높은 온도변화를

나타내고 있으며, 단위시멘트량이 낮을수록, BRC를 사용한 경우가 온도상승을 낮출수 있는 것으로 나타났으며, 혼화재의 사용에 있어서는 플라이애시를 사용하는 경우가 고로슬래그를 사용하는 경우에 비해 온도저하효과가 현저한 것으로 나타났다.

5) 결합재 조건에 따른 단열온도 변화에 있어서 온도상승속도를 살펴보면, 온도상승속도는 단위시멘트량의 영향이 가장 큰 것으로 나타났으며, 최고온도의 경향과는 다소 차이가 있는 것으로 나타났다.

6) 결합재 조건에 따른 강도발현특성을 살펴보면, 초기재령에서는 혼화재 사용량이 적을수록, 장기재령에서는 혼화재의 사용량이 많을수록 강도발현특성이 우수하게 나타나고 있으며, BRC를 사용한 경우에 있어서도 혼화재를 사용한 경우와 유사한 강도발현특성을 나타내고 있다.

7) 수화발열특성을 종합 고려할 경우, 저발열콘크리트를 제조하기 위한 결합재의 설계 조건은 고로슬래그와 플라이애시의 혼합 사용 또는 4중 저열포틀랜드시멘트의 사용이 효과적일 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 한국콘크리트학회 “최신 콘크리트공학”, 기문당, pp.604~635, 2005.
2. 김진근 외, “매스콘크리트 구조물에서의 시멘트 종류별 수화발열 특성 평가”, 한국콘크리트학회논문집, 1999.12, pp.3~12
3. 김무한 외, “혼화재 종류 및 대체율에 따른 고강도콘크리트의 수화열 저감 효과”, 한국콘크리트학회 가을학술발표대회 논문집, 2001, pp.409~414

4. 沼田晋一, “高爐スラグ微分末混和コンクリートの傾向”, 콘크리트工學, Vol.33, No.5, 1995
5. 이상수 외, “고로슬래그미분말을 사용한 콘크리트의 공학적 특성에 관한 연구”, 한국콘크리트학회 논문집 제12권 4호, 2000.8, pp.49~58
6. 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
7. 현석훈 외, “저발열 콘크리트 수화열 평가의 실험적 연구”, 한국콘크리트학회 가을학술발표논문집, 1996, pp.345~351
8. 김진근 외, “결합재 종류에 따른 콘크리트의 단열온도상승특성 및 단열온도상승에 따른 압축강도특성에 관한 연구”, 한국콘크리트학회 봄학술발표대회, 2001.5, pp.527~532