

고강도 콘크리트의 단열온도상승에 관한 실험적 연구

The Hydration Heat of High Strength Concrete

노재호 * 한정호 * 조일호 * 박연동 ** 정재동 *** 김진근 ****
Noh, Jae Ho Han, Jung Ho Cho, Il Ho Park, Yon Dong Chung, Jae Dong Kim, Jin Keun

ABSTRACT

The heat of hydration of cement causes the internal temperature rise at early age, particularly in massive concrete structures. As the results of the temperature rise and restraint condition, the thermal stress may induce cracks in concrete. The prediction of the thermal stress is very important in design and construction stages in order to control the cracks in mass concrete.

In this study, the temperature rise of high strength concrete due to the heat of hydration is investigated. Test variables are type and content of binder. As the results, the temperature rise is increased with increasing cement content. However, the increment is decreased in higher cement content range. Fly ash is effective in the reduction of hydration heat.

1. 서 론

콘크리트 내부의 시멘트는 물과 반응하여 경화하며 이 수화반응의 진행에 따라 발생하는 수화열은 부재의 두께 및 환경조건에 따라 국부적으로 변화하여 열응력을 발생시킨다. 특히 매스 콘크리트의 경우 수화열은 구조물에 심한 균열을 발생시켜 구조물의 내하력 및 내구성에 비가역적인 심각한 손상을 가져올 수 있다. 이러한 수화열응력에 의한 균열은 단위시멘트량이 높고 부재가 두꺼울수록 더욱 심해진다.

본 연구에서는 고강도 콘크리트의 수화열 발생 성상을 분석하기 위하여 단위시멘트량(단위결합재량)이 높은 배합의 콘크리트를 주된 대상으로 하여 단열온도상승 실험을 실시하고 그 결과를 분석하였다.

2. 실험방법 및 재료

2.1. 실험방법

콘크리트 수화발열의 열원인 결합재의 수화발열 특성을 분석하기 위하여 미소수화열량계에 의한 결합재 수화발열량을 측정하였으며, 고강도 콘크리트의 수화발열특성 분석을 위하여 결합재 종류 및 배합조건의 변화에 따른 콘크리트 단열온도상승시험을 실시하였다.

결합재로는 1종, 3종, 5종 포틀랜드 시멘트 및 슬래그 시멘트와 시멘트에 대해 플라이애쉬를 치환 첨가하여 사용하였다.

2.1.1. 미소수화열량계 측정

결합재의 시간경과에 따른 수화발열특성을 파악하기 위하여 1종, 3종, 5종 포틀랜드 시멘트, 슬래그 시멘트 및 플라이애쉬를 각각 10, 20, 30% 치환 첨가한 시멘트의 시간경과에 따른 수화발열특성을 물결합재비 50%로 하여 23°C의 환경조건에서 72시간 동안 측정하였다.

* 정희원, 동양중앙연구소 주임연구원
** 정희원, 동양중앙연구소 선임연구원
*** 정희원, 동양중앙연구소 이차제품연구실장
**** 정희원, 한국과학기술원 토목공학과 교수

(2) 물결합재비, 플라이애쉬, 고성능감수제의 영향
시멘트를 잠재수경성 재료인 플라이애쉬로 치환할 경우 수화열이 감소하며 물결합재비가 낮아질 경우 수화에 필요한 수량의 상대적 감소로 동일한 단위결합재량에서 수화열이 감소될 수 있다고 사료된다. 또한 고성능감수제의 첨가는 시멘트 입자를 분산시키므로 각 결합재 입자의 수화를 촉진시킬 수 있다.

이에 본 실험에서는 플라이애쉬 치환율, 고성능감수제 첨가량 및 물결합재비 변화의 영향 정도를 비교하기 위하여 3인자 3수준 직교배열법에 기초하여 미소수화열량계에 의한 수화열 측정실험을 실시하였다. 각 인자의 종류 및 수준은 다음과 같다. (표 1 참조)

- (1) A인자 : 물결합재비
($A_0=35\%$, $A_1=40\%$, $A_2=45\%$)
- (2) B인자 : 시멘트에 대한 플라이애쉬 치환율
($B_0=0\%$, $B_1=10\%$, $B_2=20\%$)
- (3) C인자 : 결합재에 대한 고성능감수제 첨가량
($C_0=2\%$, $C_1=0\%$, $C_2=1\%$)

표 1. 시멘트 수화열 측정실험 계획표

실험조건	물결합재비 (%)	플라이애쉬 (%)	고성능감수제 (%)
$A_0B_0C_2$	35	0	2
$A_0B_1C_0$	35	10	0
$A_0B_2C_1$	35	20	1
$A_1B_0C_1$	40	0	1
$A_1B_1C_2$	40	10	2
$A_1B_2C_0$	40	20	0
$A_2B_0C_0$	45	0	0
$A_2B_1C_1$	45	10	1
$A_2B_2C_2$	45	20	2

2.1.2. 콘크리트 단열온도상승실험

다음 표 2의 배합조건에 따라 제조한 초기온도 $20 \pm 5^\circ\text{C}$ 의 콘크리트에 대하여 콘크리트 단열상승 온도 측정장치에 의한 단열상승온도를 측정하였다.

표 2. 단열온도상승 실험용 콘크리트 배합표

No.	결합재 종류	결합재량 (kg/m^3)	W/B (%)	S/A (%)
1	OPC	300	67	49
2	"	400	50	45
3	"	500	42	41
4	C:F=85:15	C=425 F=75	44	42
5	C:F=7:3	C=350 F=150	46	40
6	슬래그시멘트	400	50	44
7	3종 시멘트	400	50	44

2.2. 실험재료

2.2.1. 결합재

결합재로 사용된 1종, 3종, 5종 포틀랜드시멘트 및 슬래그 시멘트와 플라이애쉬의 화학성분은 X선형광분석기를 이용하여 분석되었으며 그 결과는 다음 표 3 과 같다.

표 3. 결합재 화학성분

(단위 : 중량백분율)

종류 항목	OPC	슬래그 시멘트	3종 시멘트	5종 시멘트	플라이 애쉬
SiO_2	21.29	25.63	19.47	22.43	62.03
Al_2O_3	5.28	8.56	4.92	3.74	30.04
Fe_2O_3	3.03	2.20	3.23	4.44	3.11
CaO	63.12	53.69	62.48	67.35	0.19
MgO	3.16	4.90	3.28	3.38	0.32
SO_3	2.28	2.61	4.53	2.28	0.02
K_2O	1.01	0.63	0.73	0.62	0.91
Na_2O	0.05	0.18	0.11	0.10	0.11
TiO_2	0.30	0.79	0.33	0.24	1.79
Mn_2O_3	0.14	0.34	0.22	0.16	0.06
P_2O_5	0.11	0.12	0.22	0.16	0.52

2.2.2. 조세골재

콘크리트 실험에 사용된 조세골재 물성은 표 4와 같다.

표 4. 조세골재 물성

종류	물성	비중	단위용중 (kg/m ³)	실적율 (%)	조립율
세골재		2.58	1,600	62.02	2.84
조골재		2.61	1,530	58.62	6.50

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 미소수화열량계 측정결과 및 고찰

3.1.1. 결합재 수화발열특성

1종(보통), 3종(조강), 5종(내황산염) 포틀랜드 시멘트와 슬래그 시멘트 및 1종 OPC에 플라이애쉬를 치환첨가하여 미소수화열량계를 측정한 결과가 표 5 및 그림 1, 2에 나타나있다.

1종 시멘트와 5종 내황산염시멘트의 시간경과에 따른 수화발열량이 유사하며 3종 포틀랜드시멘트의 수화발열량은 2일경부터 약간 높게 나타났다.

슬래그 시멘트는 1종포틀랜드 시멘트에 비하여 약 절반 정도의 수화발열량을 나타내며 플라이애쉬의 첨가는 72시간까지 치환율 만큼의 수화발열량 저감 효과를 가져온다.

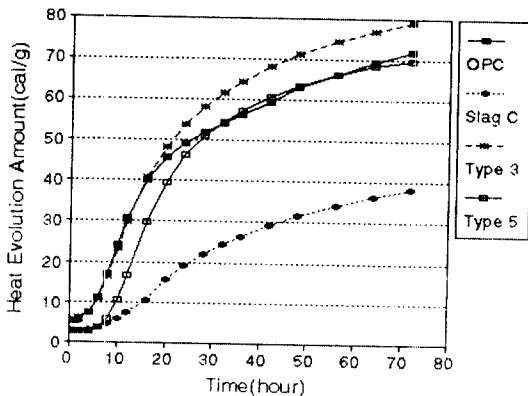


그림 1. 시멘트 수화발열량

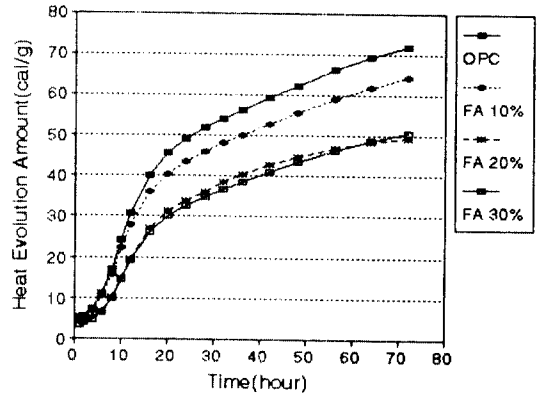


그림 2. 플라이애쉬 치환첨가 시멘트 수화발열량

표 5. 결합재 수화발열량 측정결과

(단위 : cal/g)

종류	성분	1시간	24시간	48시간	72시간
OPC		5.31	46.13	59.12	69.10
3종 시멘트		5.80	53.71	70.90	78.76
5종 시멘트		2.73	46.13	63.21	68.69
슬래그 시멘트		2.63	19.44	31.69	38.28
FA:OPC=1:9		4.95	43.55	55.45	64.34
FA:OPC=2:8		3.95	34.07	44.86	50.61
FA:OPC=3:7		3.59	32.63	43.35	49.43

3.1.2. 물결합재비, F.A. 치환율, SP 영향 비교

물결합재비, 플라이애쉬 치환율, 고성능감수제 첨가량의 영향을 직교배열 실험계획법에 따라 미소수화열량계를 이용하여 실험한 결과는 표 6과 같으며 그 결과에 대한 분산분석 실시 결과는 표 7~ 9와 같다.

물과 결합재가 반응하기 시작하여 1시간까지의 총 수화발열량에 대한 분산분석결과는 모든 인자가 95%의 확률로 유의하다고 나타나, 물결합재비 감소 및 시멘트에 대한 플라이애쉬 치환첨가량의 증가에 따라 수화발열량은 감소하며 고성능감수제 첨가량이 증가할수록 수화발열량은 증가함을 알 수 있다.

물결합재비의 감소에 따른 수화열의 감소는 동일한 결합재량에서 물량의 상대적 감소를 의미하므로 이는 수화에 필요한 수량의 감소가 그 원인이라고 생각할 수 있다. 시멘트를 플라이애쉬로 치환할 경우의 수화발열량 감소는 플라이애쉬의 잠재수경성이 1일 이내에서 발휘되지 않기 때문으로 판단된다. 또한 고성능감수제 첨가량 증가에 따른 수화열 증가는 고성능감수제가 결합재 입자의 분산을 활성화시켜 동일한 체적내에서의 동일한 결합재량과 물량에서도 각 입자의 수화가 촉진된 것이 그 원인이라 판단된다.

수화 개시후, 24 및 72시간까지의 총 수화발열량에 대한 분산분석결과는 시멘트에 대한 플라이애쉬 치환 및 고성능감수제 첨가가 각각 95%의 확률로 유의하다고 나타나 1시간까지의 수화발열량 측정과 유사한 결과를 나타냈으나 물결합재비의 영향은 90%의 확률에서도 유의차가 인정되지 않았다. 따라서 물결합재비는 수화 초기 1시간이내에서는 수화발열량에 영향을 미치나 24시간 경과 후의 발열량에는 영향을 미치지 않음을 알 수 있다. 또한 요인 B(플라이애쉬 첨가량)의 평균제곱비 F_0 가 매우 크므로 24시간 이내의 수화발열량의 감소에 플라이애쉬 치환의 효과가 매우 큼을 알 수 있으며 24시간에 비해 72시간에서의 F_0 가 크므로 1일 보다 3일에서 플라이애쉬의 수화열 감소효과가 증대했음을 알 수 있다.

표 6. 결합재 종류에 따른 수화발열량 측정결과

번호	실험조건	수화발열량(cal/g)		
		1시간	24시간	72시간
1	A ₀ B ₀ C ₂	4.656	44.009	63.414
2	A ₀ B ₁ C ₀	3.756	41.897	59.533
3	A ₀ B ₂ C ₁	3.212	29.852	38.145
4	A ₁ B ₀ C ₁	4.554	41.113	58.278
5	A ₁ B ₁ C ₂	4.272	38.703	55.147
6	A ₁ B ₂ C ₀	3.589	38.561	53.548
7	A ₂ B ₀ C ₀	4.425	47.919	67.977
8	A ₂ B ₁ C ₁	4.429	37.959	57.157
9	A ₂ B ₂ C ₂	4.689	24.239	49.227

표 7. 수화열 실험결과(1시간) 분산분석표

요인	S	ϕ	V	F ₀	F(0.1)	F(0.05)
A	0.620	2	0.310	2.970	1.886	2.920
B	0.769	2	0.384	3.685	1.886	2.920
C	0.623	2	0.312	2.988	1.886	2.920
E	0.209	2	0.104			
T	0.222	8				

표 8. 수화열 실험결과(24시간) 분산분석표

요인	S	ϕ	V	F ₀	F(0.1)	F(0.05)
A	11.877	2	5.939	0.385	1.886	2.920
B	279.127	2	139.563	9.040	1.886	2.920
C	93.485	2	46.742	3.028	1.886	2.920
E	30.876	2	15.438			
T	415.365	8				

표 9. 수화열 실험결과(72시간) 분산분석표

요인	S	ϕ	V	F ₀	F(0.1)	F(0.05)
A	29.703	2	14.851	1.0761	1.886	2.920
B	404.705	2	202.352	14.661	1.886	2.920
C	125.900	2	62.950	4.561	1.886	2.920
E	27.603	2	13.802			
T	578.912	8				

3.2. 콘크리트 단열온도상승 실험결과 및 고찰

콘크리트 단열온도상승실험결과는 그림 3~ 5와 같다. 그림 3~ 5에서는 초기의 수화휴지기(dormant period)를 고려하여 전체적인 정밀도를 높이기 위하여 단열온도상승의 수화열 측정결과를 12시간 이후의 실험치만을 사용하여 회귀식을 구하였다.

그림 3의 1종포틀랜드 시멘트를 사용한 실험결과를 분석해보면 단위시멘트량이 높을수록 단열온도의 상대적 상승폭은 저감되는 것으로 나타났다.

그림 4에서와 같이 플라이애쉬 첨가에 따라 초기 수화발열량이 크게 저감됨을 알 수 있다. 그러나 6일 이후의 단열온도상승값에 있어서는 플라이애쉬 30% 치환의 경우는 최종적인 단열온도상승값

의 저하가 뚜렷하나 플라이애쉬 15% 첨가의 경우는 오히려 단열온도상승값이 더 높게 나타나 향후 초기온도의 영향, 수화반응시의 온도영향 등에 대하여 더 많은 연구가 필요하다고 사료된다.

그림 5에서 시멘트 종류에 따른 차이를 살펴보면 3종 시멘트가 1종 시멘트에 비해 초기 단열온도상승값의 기울기는 크나 6일 이후의 최종값은 낮게 나타나 이에 대하여도 더 많은 연구가 필요하다고 사료된다. 슬래그 시멘트를 사용한 경우의 단열온도상승값은 다른 시멘트에 비해 기울기와 최종온도가 모두 낮게 나타나 수화열저감효과가 매우 큼을 알 수 있다.

일반적인 콘크리트 단열온도상승 모델식은 초기의 수화휴지기를 고려하지 않은 식 (1)의 형태로 나타나므로 본 실험결과를 일반적인 기존의 모델식 (1),(2) 형태로 나타내어 비교하면 다음 표 11 과 같다.

$$T = K (1 - e^{-\alpha t}) \quad \text{-----} \quad (1)$$

표 10. 단열온도상승식 계수값

결합재 종류	결합재량 (kg/m³)	K	α
OPC	300	46.23	0.89
	400	56.82	1.21
	500	62.36	2.15
C:FA=85:15	500	66.10	1.12
C:FA=7:3	500	53.74	1.09
Slag C	400	45.97	0.84
Type 3	400	53.44	2.53

표 11. 기존 단열온도상승식 계수값
(OPC 사용, 콘크리트 온도 20°C의 경우)

결합재량 (kg/m³)	塚山式		일본 콘크리트 공학 협회식	
	K	α	K	α
300	37.30	0.97	42.10	0.97
400	48.00	1.15	53.18	1.39
500	58.70	1.33	64.26	1.80

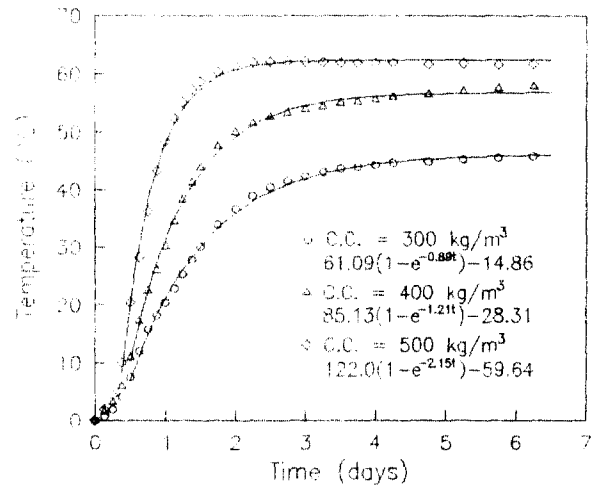


그림 3. 단위시멘트량과 콘크리트 단열상승온도

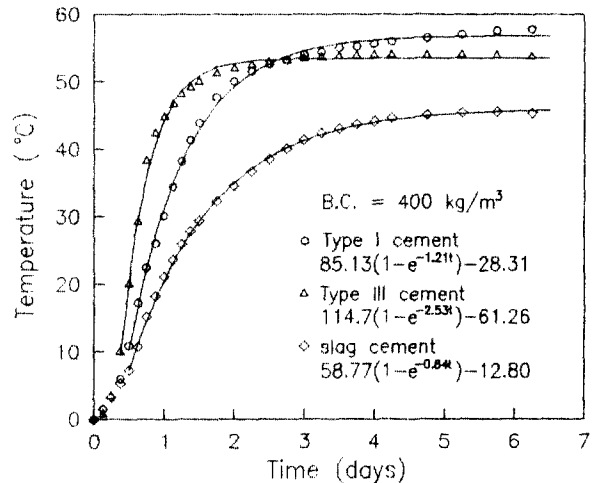


그림 4. 시멘트 종류와 콘크리트 단열상승온도

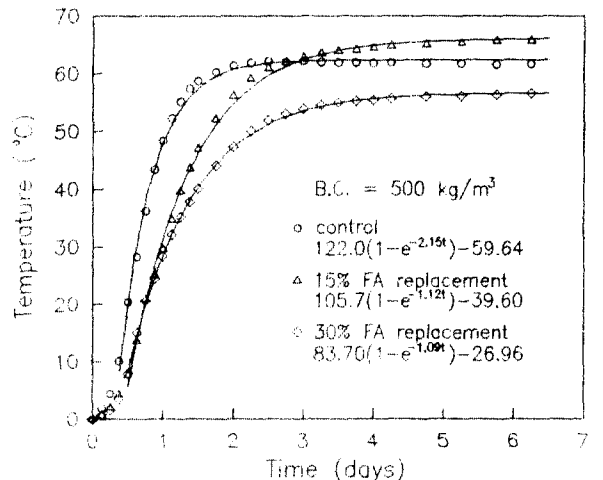


그림 5. F.A. 첨가량과 콘크리트 단열상승온도

1종 시멘트 사용시의 본 연구결과의 K값을 기존 모델식에 의한 값과 비교하여 보면 단위시멘트량 300kg/m³ 및 400kg/m³의 경우는 모두 높으나 500kg/m³의 경우는 기존 두 식의 중간 값을 나타낼 수 있다. α값은 단위시멘트량이 300kg/m³인 경우는塚山식에 비교하여 낮으나 고강도 영역인 단위시멘트량이 400kg/m³ 및 500kg/m³인 경우는 높으며 일본 콘크리트협회식과 비교하면, 300kg/m³ 및 400kg/m³일 때는 낮은 값이나 500kg/m³일 때는 있어서는 높은 값을 나타낸다.

본 실험에 사용된 콘크리트는 고성능감수제를 사용하지 않고 제조된 것이므로 본 연구의 미소수화열량계 실험결과로부터 고성능감수제를 사용할 경우 수화열 발생을 증대시키는 효과가 있다는 점을 고려할 때, 고강도 콘크리트 수화열 해석에 있어서 단열온도상승곡선의 기울기에 대한 재고려가 필요하다고 판단된다.

4. 결 론

고강도 콘크리트의 수화발열특성을 파악하기 위한 본 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 기존의 단열온도상승 모델식을 고강도 콘크리트에 적용할 경우 온도상승 기울기를 좀 더 높게 산정할 필요가 있다고 판단된다.

(2) 시멘트에 대한 플라이애쉬 치환첨가는 콘크리트 단열온도상승곡선의 기울기를 저감시키는 효과는 있으나 15% 첨가의 경우는 단열온도상승량이 1종 시멘트만을 사용한 경우보다 높게 나타나 이에 대한 좀더 심도있고 다각적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

(3) 단위시멘트량의 증가에 따라 단열온도상승량은 증가하나 그 증가율은 단위시멘트량이 증가할수록 둔화되는 경향을 나타내었다.

(4) 미소수화열량계에 의한 분석결과 시멘트를 플라이애쉬로 치환할 경우 수화발열량 저감의 효과가 큼을 알 수 있었다.

(5) 고성능감수제의 첨가는 시멘트 입자분산효과로 인하여 콘크리트 수화발열을 촉진시키는 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

1. 塚山隆一, “マッシュな鉄筋コンクリートの溫度上昇ならびに溫度ひび割らに關する基礎研究” 東大學位論文, 1974. 3.
2. 日本コンクリート工學協會, “マスコンクリートの溫度應力研究委員會報告書”, 1985. 11.