

시멘트 및 콘크리트의 수화발열특성에 관한 연구

Hydration Heat Characteristics of Cement and Concrete

김진근*

노재호**

박연동***

Kim, Jin-Keun Noh, Jae-Ho Park, Yon-Dong

한정호**** 김 훈****

Han, Jung-Ho Kim, Hoon

요 약

콘크리트 내부의 시멘트는 물과 반응하여 경화하며, 이 수화반응에 따라 진행되는 수화열은 부재의 두께 및 환경조건에 따라 국부적으로 변화하여 열응력을 발생시킨다. 특히 대량 콘크리트의 경우, 수화열은 구조물에 심한 균열을 발생시켜 구조물의 내하력 및 내구성에 심한 손상을 가져올 수 있다. 이러한 수화열응력에 의한 균열은 단위시멘트량이 많고 부재가 두꺼울수록 더욱 심해진다.

이 연구에서 시멘트 및 콘크리트의 수화열 발생 성상을 분석하기 위하여 미소수화열량계 및 콘크리트 수화열시험기를 사용하여 각종 시멘트 및 플라이애쉬, 슬래그를 혼합한 시멘트의 수화발열량 측정과 콘크리트의 단열온도상승 실험을 실시하고 그 결과를 분석한 결과, 시멘트 및 콘크리트의 수화발열 성상은 결합재의 종류 외에도 수화반응시의 주위의 온도에 따라 다르게 나타났으며, 고강도 콘크리트의 경우는 단열온도상승식에 대한 재고가 필요하다고 판단된다.

Abstract

Hydration reaction of cement paste occurs when cement is mixed with water. During the hydration reaction process, heat of hydration causes thermal stress depending on the size and environmental condition of concrete. Especially in massive concrete, crack may cause severe damage to the safety and the durability of concrete structures. The more the cement content and the bigger the size of concrete structure, this thermal stress crack becomes more severe.

In this study, a conduction calorimeter and a concrete insulation hydration heat meter were used to investigate the hydration heat characteristics of cements and concretes. Several types of cement and fly-ash, slag-added cements were used in this experiments. It is shown that hydration heat characteristics of cement and concrete were largely affected by binder type and temperature during the hydration reaction process, and adiabatic temperature rise of concrete should be reconsidered.

Keywords : hydration heat, adiabatic temperature rise, hydration reaction process, conduction calorimeter, fly-ash

* 정회원, 한국과학기술원 토목공학과, 교수, 공박
** 정회원, 동양중앙연구소, 선임연구원
*** 정회원, 동양중앙연구소, 선임연구원, 공박
**** 정회원, 동양중앙연구소, 주임연구원

• 본 논문에 대한 토의를 1995년 8월 31일까지 학회로 보내 주시면 1995년 10월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

1. 서 론

콘크리트 중의 시멘트는 물과 반응하면 발열반응을 일으켜 열을 발생시킨다. 콘크리트의 열전도율은 다른 물질에 비해 상대적으로 작아서 발생된 열의 확산 및 외부로의 발산이 느리므로, 구조물의 표면은 대기에 열을 빼앗겨 온도가 낮아지나 내부는 온도가 높아져 온도차가 발생하며 이러한 내부와 외부의 온도차는 부재 두께가 두꺼울수록 커진다. 이때, 콘크리트의 온도변화에 의해서 발생하는 내외부 변형도 차이와 외적인 구속에 의해 발생하는 응력은 구조물에 해로운 영향을 주게 된다. 또한, 수화열에 의해 발생하는 콘크리트 내외부의 온도 차이에 의한 인장응력이 콘크리트의 인장강도보다 높을 경우 구조물에 균열이 발생하게 되며, 이는 단위시멘트량이 많은 고강도 콘크리트의 경우 더욱 문제가 된다.^(1,2)

이러한 수화열응력에 대한 구조물 균열발생 여부의 관점은 유한요소해석에 의해 어느 정도 가능하며 이러한 균열안전성 예측에 있어 콘크리트 단열온도상승식의 산정은 매스 콘크리트의 온도이력과 수화열응력 계산에 매우 중요하며 지역별로 사용되는 재료에 따른 차이가 크므로 최근 국내에서도 콘크리트 단열온도상승식에 대한 연구결과가 발표되고 있다.^(3,4,5,6)

이 연구에서는 콘크리트 수화발열의 원인이 되는 결합재(binder)의 수화발열 특성을 분석하기 위하여 미소수화열량계에 의한 결합재, 즉 시멘트계 재료(cementitious materials)의 수화발열량을 측정하였으며, 콘크리트의 수화발열특성 분석을 위하여 결합재 종류 및 배합조건의 변화에 따른 콘크리트 단열온도상승실험을 실시하였다.

관래 고강도 콘크리트의 경우, 단위시멘트량의 증가로 인한 과도한 수화열 발생이 큰 문제가 되고 있으며 이러한 수화발열량 감소를 위하여 플라이애쉬가 많이 사용되고 있으므로 이 연구에서는 시멘트에 플라이애쉬를 치환첨가한 경우에 대해서도 몇가지 실험을 실시하였다.

2. 실험방법 및 실험재료

2.1 미소수화열량계 측정

미소수화열량계는 시멘트계 재료의 물과의 발열반응에 따른 수화발열량을 측정하기 위하여 시멘트와 물을 일정한 온도조건하에서 반응시켜 반응되는 열량을 측정하는 기기이다. 결합재 종류 및 플라이애쉬와 고성능감수제 첨가 등에 따른 시멘트의 수화발열특성을 파악하기 위하여 미소수화열량계를 사용하여 시멘트 수화열을 측정하였다.

2.1.1 결합재 종류에 따른 수화발열 특성

결합재의 시간경과에 따른 수화발열 특성을 파악하기 위하여 1종(보통), 3종(조강) 및 5종(내황산업) 포틀랜드 시멘트 및 슬래그 시멘트의 4종류 시멘트를 사용하였으며 물결합재비(W/B) 50%로 하여 20℃의 환경조건에서 72시간 동안의 시간경과에 따른 수화발열량을 측정하였다.

2.1.2 플라이애쉬 첨가 시멘트 발열특성

시멘트에 잠재수정성 재료인 플라이애쉬를 첨가하여 사용하면 시멘트의 수화발열속도를 감소시키고 수화발열량을 낮출 수 있다. 따라서 용도 및 첨가량에 따라서 플라이애쉬는 고강도 콘크리트 및 매스 콘크리트에서 매우 적절한 결합재로 사용되어질 수 있다.

이 실험에서는 시멘트에 플라이애쉬를 10, 20, 30% 치환첨가하고, 수화반응시의 주위온도를 5, 20, 35, 50℃로 하여 16종류 시멘트의 수화발열량을 96시간 동안 측정하였다.

2.1.3 물결합재비, 플라이애쉬, 고성능감수제 영향

시멘트를 잠재수정성 재료인 플라이애쉬로 치환한 경우, 수화열이 감소한다. 그리고 물결합재비가 낮아질 경우, 수화생성물이 차지하는 공간이 상대적으로 감소하여 동일한 단위결합재량에서 수화열이 감소할 수 있으며,⁽⁹⁾ 고성능감수제(superplasticizer : SP)의 첨가는 시멘트 입자를

분산시켜 각 결합재 입자의 수화를 촉진시키므로 수화발열량을 증가시킬 수 있다고 예상된다. 따라서 이 실험에서는 플라이애쉬 치환율 및 고성능감수제 첨가량, 물결합재비 변화의 영향 정도를 비교하기 위하여 3인자 3수준 직교배열법에 기초하여 미소수화열량계에 의한 수화열 측정실험을 9회 실시하였다. 각 인자의 종류 및 수준은 다음과 같다. (Table 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 ($C_0=2\%$, $C_1=0\%$, $C_2=1\%$)

Table 1 Test condition of the hydration heat of cement by conduction calorimeter

Lot No.	W/B (%)	F/(C+F) (%)	SP (B×%)
$A_0B_0C_2$	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

2.2 콘크리트 단열온도상승실험

미소수화열량계는 주위 온도조건을 일정하게 하고 시멘트 수화발열량을 측정하나 실제로 콘크리트 중의 시멘트는 콘크리트의 온도 상승에 따라 수화반응이 영향을 받게 된다. 이 연구의 실험에서 사용한 콘크리트 단열온도시험기는 수화반응에 의하여 시료 콘크리트(50리터)의 온도가 상승함에 따라 주위의 온도를 상승시켜 콘크리트가 완벽하게 단열된 상태에서 수화반응에 따라 온도가 상승하는 양을 파악하는 시험기기이다.

콘크리트의 수화발열특성을 파악하기 위하여 결합재 종류, 단위결합재량, 플라이애쉬의 첨가량에 따른 수화열의 경시변화를 콘크리트 단열온도

시험기를 사용하여 측정하였다. 콘크리트는 Table 2의 배합조건에 따라 제조되었다. 콘크리트의 초기 온도는 수화발열특성에 큰 영향을 미치므로 이에 따른 차이를 없애기 위하여 콘크리트는 $20\pm 5^\circ\text{C}$ 의 온도로 제조하였다.

실험에 사용된 결합재의 종류는 1종, 3종, 5종 포틀랜드 시멘트 및 슬래그 시멘트와 1종 포틀랜드 시멘트에 대해 플라이애쉬를 중량비로 15, 30%를 대체한 시멘트이다. 또한 시멘트량 증가에 수화발열특성 분석을 위하여 단위시멘트량을 300, 400, 500kg/m³으로 변화시켜 실험을 수행하였다.

Table 2 Mix proportion of the concrete for hydration heat test

No.	Binder type	Binder content (kg/m ³)	W/B (%)	S/A (%)
1	type 1 cement	300	67	49
2	type 1 cement	400	50	45
3	type 1 cement	500	42	41
4	F/(C+F)=15%	C=425, F=75	44	42
5	F/(C+F)=30%	C=350, F=150	46	40
6	type B slag cement	400	50	44
7	type 3 cement	400	50	44
8	type 5 cement	400	50	44

2.3 실험재료

2.3.1 결합재

결합재로 사용된 1종, 3종, 5종 포틀랜드 시멘트 및 슬래그 시멘트, 플라이애쉬의 화학성분을 X선

Table 3 Chemical composition of cementitious materials (unit : weight hercentage)

type item	type 1 cement	slag cement	type 3 cement	type 5 cement	fly ash
SiO ₂	21.29	25.63	19.47	22.43	62.03
Al ₂ O ₃	5.28	8.56	4.92	3.74	30.04
Fe ₂ O 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 ₂ O	1.01	0.63	0.73	0.62	0.91
Na ₂ O	0.05	0.18	0.11	0.10	0.11
TiO ₂	0.30	0.79	0.33	0.24	1.79
Mn ₂ O ₃	0.14	0.34	0.22	0.16	0.06
P ₂ O ₅	0.11	0.12	0.22	0.16	0.52

형광분석기를 이용하여 분석하였으며, 그 결과는 Table 3과 같다.

2.3.2 골재

콘크리트 실험에 사용된 조세골재의 물성은 Table 4와 같다.

Table 4 Physical properties of aggregates

properties type	specific gravity	unit weight (kg/m ³)	F.M.
fine aggregate	2.58	1,600	2.84
coarse aggregate	2.61	1,530	6.50

3. 실험결과 및 고찰

3.1 미소수화열량계 측정결과 및 고찰

3.1.1 결합재 종류에 따른 수화발열특성

1종, 3종, 5종 포틀랜드 시멘트와 슬래그 시멘트의 수화발열량 측정결과는 Fig. 1과 같다.

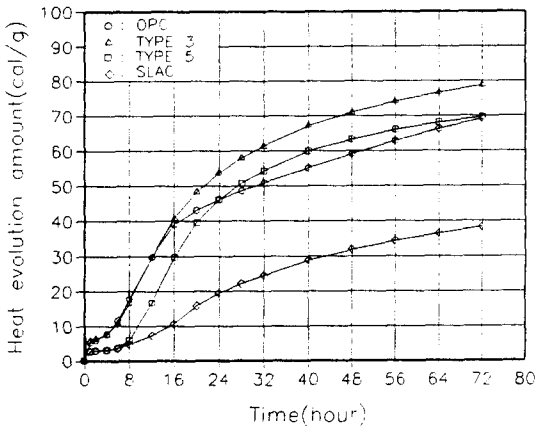


Fig. 1 Hydration heat of different types of cements (temperature : 20°C)

1종 시멘트의 수화발열량은 반응초기에는 3종 시멘트의 수화발열량과 유사하나, 시간이 지나면서 5종 시멘트의 발열량과 유사한 경향을 나타내고 있다. 슬래그 시멘트의 경우, 1종 시멘트의 수화발열량(72cal/g)의 약 55%(40cal/g)에 해당되는 수화발열량을 나타내고 있다. 규번의 실험에

서 사용한 5종 시멘트의 경우, 반응 직후에는 슬래그 시멘트와 유사한 발열량을 나타내나, 8시간이 경과한 후부터 급격히 발열량이 증가하는 경향을 보여 나중에는 1종 시멘트의 수화발열량과 유사한 값을 갖게 됨을 알 수 있다.

3.1.2 플라이애쉬 첨가 시멘트 발열특성

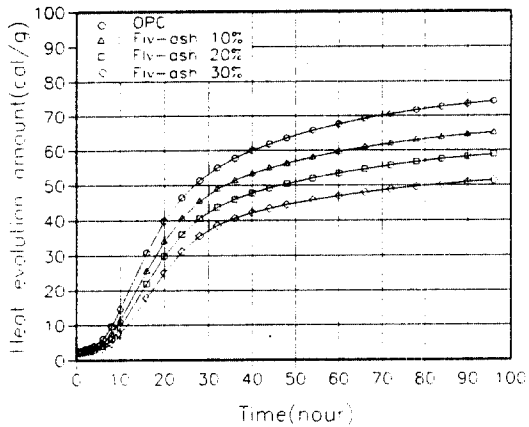
미소수화열량계에 의해 측정된 플라이애쉬 첨가 시멘트 발열특성 실험결과는 Table 5 및 Fig. 2 및 Fig. 3과 같다.

Table 5 Conduction calorimeter test result of fly-ash added cement

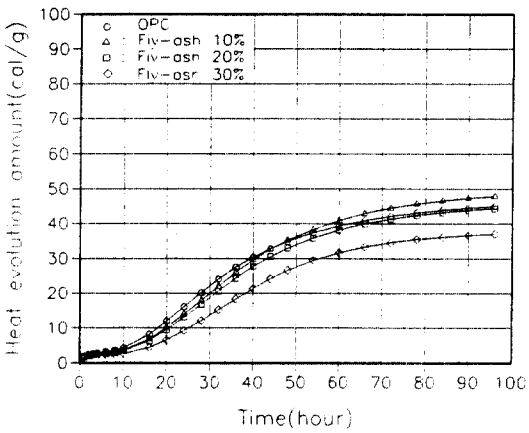
(unit : cal/g)

temp. (°C)	fly ash (%)	time(hours)											
		1	2	4	6	10	16	24	36	48	60	72	96
5	0	1.9	2.5	3.0	3.3	4.4	8.3	16.1	27.5	34.9	39.3	42.1	45.0
	10	1.8	2.3	2.7	2.9	3.7	6.8	13.9	26.0	35.3	40.8	44.4	47.8
	20	1.7	2.2	2.6	2.8	3.6	6.4	13.0	24.3	32.9	38.2	41.3	44.3
20	0	2.8	3.3	4.1	6.1	14.7	30.9	46.5	57.7	63.5	67.6	70.5	74.2
	10	2.5	2.9	3.4	4.8	11.4	25.6	40.6	51.3	56.2	59.5	62.0	65.1
	20	2.2	2.6	3.1	4.1	9.4	22.0	36.0	46.0	50.4	53.4	55.7	58.8
35	0	2.8	3.2	5.2	12.1	34.0	53.1	63.8	71.7	75.7	78.2	79.8	82.0
	10	2.6	3.0	4.4	9.9	29.9	49.0	58.7	66.5	70.7	73.4	75.2	77.5
	20	2.3	2.6	3.5	7.7	24.8	43.0	51.3	58.2	62.0	64.5	66.1	67.9
50	0	2.7	3.0	7.7	24.4	49.8	63.4	71.2	76.6	79.2	80.9	82.2	83.4
	10	2.6	2.9	6.6	20.9	45.7	58.5	66.7	72.9	75.8	77.6	78.9	80.6
	20	2.1	2.3	4.8	16.3	39.3	50.7	57.9	63.2	65.8	67.0	67.4	67.6
96	0	1.5	1.5	3.1	11.8	32.7	43.6	50.9	57.3	61.3	64.0	65.8	68.0
	10	1.5	1.5	3.1	11.8	32.7	43.6	50.9	57.3	61.3	64.0	65.8	68.0
	20	1.5	1.5	3.1	11.8	32.7	43.6	50.9	57.3	61.3	64.0	65.8	68.0

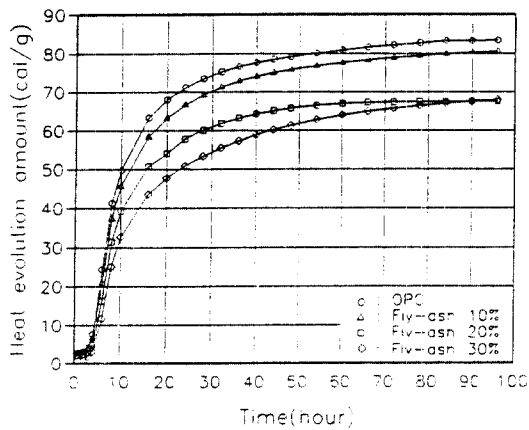
수화반응 온도에 따른 시멘트 페이스트의 수화발열량은 상온인 20°C 및 35°C 일 경우는 플라이애쉬의 첨가에 따른 수화열의 감소경향이 뚜렷하다(Fig. 2(a)에 20°C의 경우를 나타냄). 그러나 상대적으로 저온인 5°C에서 플라이애쉬 첨가율 10%와 20%인 경우 시멘트의 수화발열량이 1종 시멘트에 비해 별로 감소하지 않는다. 첨가율이 10%인 경우, 96시간에서 수화발열량은 오히려 1종 시멘트에 비해 매우 작지만 증가한다(Fig. 2(b) 참조). 상대적으로 고온인 50°C에서는 플라이애쉬 첨가율이 0%와 10%인 시멘트의 수화발열특성이 유사하고, 첨가율 20%과 30% 첨가시의 수



(a) At temperature 20°C



(b) At temperature 5°C

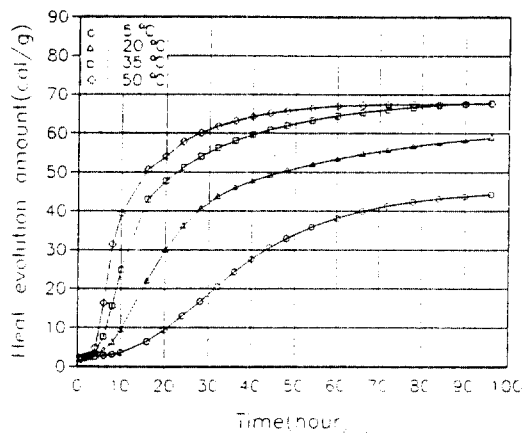


(c) At temperature 50°C

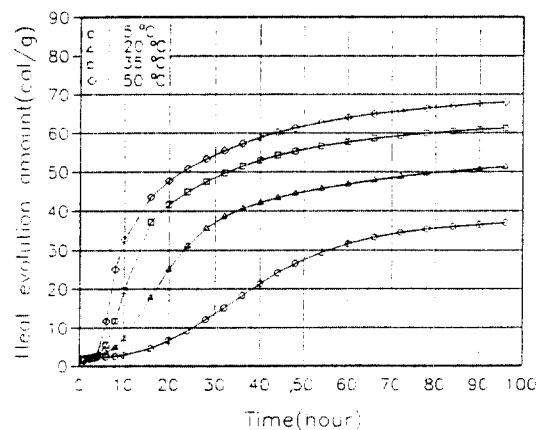
Fig. 2 Hydration heat of fly-ash replaced cements

화발열특성이 유사하다(Fig. 2(c) 참조). 따라서 플라이애쉬 치환첨가에 따른 시멘트의 수화발열량 감소는 상온영역(25, 30°C)과 저온 및 고온영역(5, 50°C)의 경향이 다르게 나타나므로 플라이애쉬는 치환율 및 온도영역에 따라 시멘트 수화반응에 미치는 영향이 다르게 나타남을 알 수 있다.

플라이애쉬 첨가량 변화에 따른 시멘트 페이스트의 수화발열량은 온도 증가에 따라 수화발열속도 및 수화발열량이 증가하는 경향을 나타내고 있으나, 플라이애쉬 첨가율이 0~20%인 경우 96시간에서의 누적수화발열량은 35°C와 50°C가 서로 거의 동일하다(Fig. 3(a)에 플라이애쉬 20% 첨가의 경우를 나타냄). 플라이애쉬 30% 첨가의 경우



(a) 20% fly ash replaced cement



(b) 30% fly ash replaced cement

Fig. 3 Hydration heat of fly-ash replaced cements(5~50°C)

는 온도에 따른 수화발열량 차이가 비교적 뚜렷하게 나타났다(Fig. 3(b) 참조). 따라서, 플라이애쉬는 어느 첨가량 이하(이 실험에서 20%)에서는 장기적으로는 콘크리트의 최대온도상승량을 높게 할 수도 있음을 알 수 있다.

이 실험에서 시멘트의 수화반응은 혼화재 첨가량외에도 시멘트와 물이 반응할 때의 온도에 큰 영향을 받는 것을 알 수 있다. 콘크리트 중의 시멘트의 수화반응은 일정한 온도하에서 진행되는 것이 아니라 콘크리트의 단열상승온도의 영향을 받게 되므로 콘크리트의 수화발열량을 시멘트 페이스트의 미소수화열량계 실험의 결과로부터 예측하기 위한 더 많은 연구가 필요하다.

3.1.3 물결합재비, 플라이애쉬, 고성능감수제 영향

물결합재비, 플라이애쉬 치환율, 고성능 감수제 첨가량이 수화발열에 미치는 영향을 직교배열법에 따라 미소수화열량계 실험을 실시한 결과는 Table 6과 같으며 이에 대하여 분산분석을 실시한 결과를 Table 7~9과 같다.

물과 결합재가 반응하기 시작하여 1시간이 경과한 시점에서의 수화발열량에 대한 분산분석결과(Table 7 참조)는 모든 인자가 수화발열량에 영향을 미치는 것으로 나타나 물결합재비의 감소 및 시멘트에 대한 플라이애쉬 치환 첨가량의 증가에 따라 수화발열량은 감소하며 고성능감수제 첨가량이 증가할수록 수화발열량은 증가함을 알 수 있다. 물결합재비의 감소에 따른 수화열의 감소는

Table 6 Hydration heat of cements by conduction calorimeter

No.	factors	heat evolution(cal /g)		
		1시간	24시간	72시간
1	A ₀ B ₀ C ₂	4.66	44.01	63.41
2	A ₀ B ₁ C ₀	3.76	41.90	59.53
3	A ₀ B ₂ C ₁	3.21	29.85	38.15
4	A ₁ B ₀ C ₁	4.55	41.11	58.28
5	A ₁ B ₁ C ₂	4.27	38.70	55.15
6	A ₁ B ₂ C ₀	3.59	38.56	53.55
7	A ₂ B ₀ C ₀	4.43	47.92	67.98
8	A ₂ B ₁ C ₁	4.43	37.96	57.16
9	A ₂ B ₂ C ₂	4.69	24.24	49.23

Table 7 Analysis of variation for conduction calorimeter test(at 1 hour)

Factor	standard deviation	degree of freedom	variance	Fo (V _{factor} /V _{Error})	random variable at F(0.1)	random variable at 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
Error	0.209	2	0.104			
Total	0.222	8				

Table 8 Analysis of variation for conduction calorimeter test(at 24 hours)

Factor	standard deviation	degree of freedom	variance	Fo (V _{factor} /V _{Error})	random variable at F(0.1)	random variable at F(0.05)
A	11.877	2	5.939	0.385	1.886	2.920
B	279.137	2	139.563	9.040	1.886	2.920
C	93.485	2	46.742	3.028	1.886	2.920
Error	30.876	2	15.438			
Total	415.365	8				

Table 9 Analysis of variation for conduction calorimeter test(at 72 hours)

Factor	standard deviation	degree of freedom	variance	Fo (V _{factor} /V _{Error})	random variable at F(0.1)	random variable at F(0.05)
A	29.703	2	14.851	1.706	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				

동일한 결합재량에 대한 물량의 상대적 감소가 원인이며, 시멘트를 플라이애쉬로 치환한 경우의 수화발열량 감소는 플라이애쉬의 잠재수경성이 1일 이내에서 발휘되지 않기 때문으로 판단된다. 또한 고성능감수제의 첨가에 따른 수화열 증가의 원인은 고성능감수제가 결합재 입자의 분산을 활성화시켜서 동일한 체적 내에서의 동일한 결합재량과 물량에서도 각 입자의 수화가 촉진된 것으로 생각된다.

수화 개시후, 24시간 및 72시간 후의 총 수화발열량에 대한 분산분석 결과(Table 8, 9 참조)는 시멘트에 대한 플라이애쉬 치환 및 고성능감수제 첨가가 각각 수화발열량에 영향을 미치는 것으로

나타났으나 물결합재비의 영향은 인정되지 않았다. 따라서 물결합재비는 수화초기 1시간 이내에는 수화발열량에 영향을 미치나 24시간 이후의 발열량에는 큰 영향을 미치지 않으며, 플라이애쉬 첨가는 수화열을 감소시키고, 고성능감수제 첨가는 수화열을 증가시킨다. 또한 요인 B(플라이애쉬 첨가량)의 평균 제곱비 Fo가 매우 크므로 수화발열량 감소에는 플라이애쉬 치환의 효과가 매우 큼을 알 수 있다.

3.2 콘크리트의 단열온도상승 실험결과 및 고찰

콘크리트 단열온도상승의 실험결과는 Fig. 4와 같다. 콘크리트 수화열 발생 초기의 수화휴지기(dormant period)를 고려하고 단열온도상승식의 전체적인 정밀도를 높이기 위하여 단열온도상승의 수화열 실험결과를 12시간 이후의 실험치만을 사용하여 회귀식을 구하였으며 그 형태는 다음 식(1)과 같다.

$$T = K(1 - e^{-\alpha(t-t_0)}) \quad (1)$$

- 여기서, T=온도상승량
- K=최대 상승온도
- α =수화반응속도
- t=실험시간
- t_0 =수화휴지기를 고려한 초기시간

Fig. 4(a)의 1종 포틀랜드 시멘트를 사용한 실험결과를 분석해보면 단위시멘트량이 많을수록 단열온도의 상대적 상승폭은 저감되는 것으로 나타났다. 또한 Fig. 4(b)에서 플라이애쉬 첨가에 따라 초기 수화발열속도 및 수화발열량이 크게 저감되는 것을 알 수 있다. 그러나 6일 이후의 단열온도상승값은 플라이애쉬 30% 치환의 경우는 최종적인 단열온도상승값의 저하가 뚜렷하나, 플라이애쉬 15% 첨가의 경우는 오히려 단열온도상승값이 더 높게 나타났으며 이는 미소수화열량계 실험에서 플라이애쉬 치환량 20% 이내에서는 4일에서의 시멘트의 수화발열량이 온도가 높을수록 시멘트만의 수화발열량과 동일하게 되는 결과와 일치한다. Fig. 4(c)에서 시멘트 종류에 따른 차이

를 살펴 보면 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 최종 온도가 모두 낮게 나타나 수화열 저감 효과가 매우 큼을 알 수 있다. 3일간의 슬래그 시멘트 수화발열량이 1종 시멘트의 약 55%인 것에서 예상되는 콘크리트의 단열상승온도보다 실제 실험결과의 단열상승온도가 높은 것은 콘크리트 온도가 높아짐에 따라 슬래그의 수화반응이 촉진된 때문으로 생각된다.

1종 포틀랜드 시멘트를 사용한 콘크리트의 단열온도상승 모델식에 대하여 이 연구의 실험식과 塚山식⁽⁶⁾ 및 일본콘크리트공학협회식⁽⁷⁾을 비교하면 Table 10과 같다.

이 연구결과의 K값은 단위시멘트량 300, 400kg/m³의 경우는 앞의 두 모델식에 비해 높게 나타났으며 500kg/m³의 경우는 앞의 두 식의 중간값을 나타냈다. 값은 단위시멘트량이 300kg/m³인 경우는 塚山식에 비교하여 낮으나 보다 고강도 영역인 단위시멘트량이 400kg/m³ 및 500kg/m³의 경우는 높다. 일본콘크리트공학협회식과 비교하면 단위시멘트량이 300, 400kg/m³일 때는 낮은 값이나 500kg/m³일 때는 높은 값을 나타낸다.

이 실험에서 사용된 콘크리트는 고성능감수제를 사용하지 않고 제조된 것이므로 미소수화열량계 실험에서 고성능감수제의 사용이 수화열 발생을 증가시키는 효과가 있다는 점을 고려하면 고강도 콘크리트의 수화열 해석에 있어 단열온도상승 곡선식에 대한 재고려가 필요하다고 사료된다.

Table 10 Coefficients of Concrete hydration heat temperature formulas

(initial concrete temperature : 20℃)

unit cement content (kg/m ³)	Tsukayama		Japan Concrete Institute		this study	
	K	α	K	α	K	α
300	37.30	0.97	42.10	0.97	46.22	0.89
400	48.00	1.15	53.18	1.39	56.81	1.21
500	58.70	1.33	64.26	1.80	62.18	2.31

4. 결 론

국내에서 사용되는 시멘트와 혼화재를 가지고 미소수화열량계를 사용하여 시멘트 수화발열특성을 파악하고 콘크리트 단열온도시험기를 이용하여 수화열 실험을 실시한 결과는 다음과 같다.

(1) 시멘트의 종류별 수화발열특성

- 3종 시멘트는 1종 시멘트와 비교하여 20시간 이후부터 수화발열속도가 빨라지고 수화발열량이 많아졌다.

- 금번에 사용한 1종 시멘트와 5종 시멘트 시료의 1일 이후의 수화발열특성은 유사하였다.

- 슬래그 시멘트의 3일간의 누적수화발열량은 1종 시멘트(약 70cal/g)의 60% 이하였다.

(2) 물결합재비, 플라이애쉬 및 고성능감수제 첨가가 시멘트 수화발열에 미치는 영향(온도 20℃)

- 물결합재비는 약 24시간 이후의 수화발열량에 큰 영향을 미치지 않았다.

- 플라이애쉬 첨가는 시멘트의 수화열을 크게 감소시켰다.

- 고성능감수제 첨가는 시멘트 입자를 분산율 원활하게 하여 수화발열을 촉진시켰다.

(3) 시멘트에 대한 플라이애쉬 첨가량은 각 수화반응온도에 따라 서로 다른 영향을 나타내었다.

- 플라이애쉬의 첨가는 대체적으로 시멘트 수화발열량을 감소시켰다.

- 저온(5℃)에서 플라이애쉬 치환율이 20% 이내일 경우는 수화열이 감소하지 않았다.

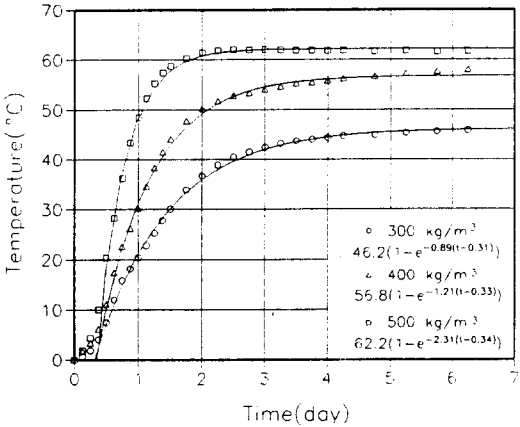
- 고온(50℃)에서 플라이애쉬 첨가량 10% 이내일 경우는 수화열이 감소하지 않았다.

- 플라이애쉬 첨가율이 20% 이내일 경우, 96시간에서의 누적수화발열량은 수화반응시의 온도 35℃와 50℃가 같아졌다.

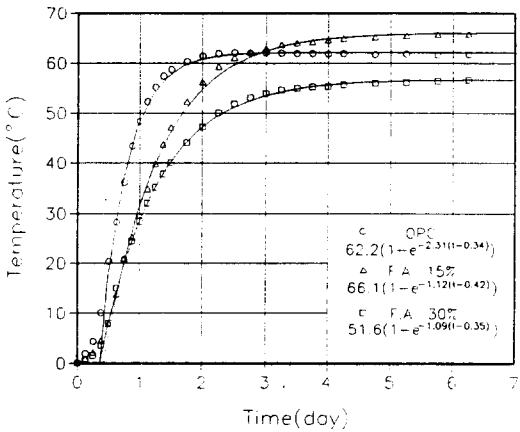
(4) 콘크리트 단열온도시험기에 의한 수화열 실험결과는 다음과 같다.

- 1종 시멘트의 실험결과, 단위시멘트량 증가에 따른 최대상승온도는 증가하나 그 증가율은 단위시멘트량 증가에 따라 감소하는 경향을 나타내었다.

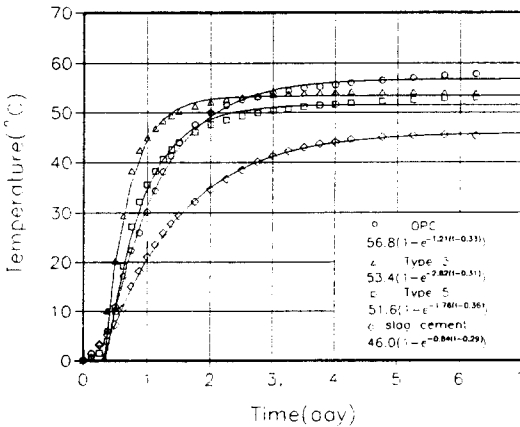
- 플라이애쉬 첨가에 따라 수화발열속도 및 수화발열량은 크게 저감되었다. 그러나 15% 첨



(a) Using type 1 cement



(b) Using fly-ash replaced cement
(unit cement content 500kg/m³)



(c) Using various types of cements
(unit cement content 400kg/m³)

Fig. 4 Hydration heat of concrete

가의 경우는 미소하나마 최종상승온도가 1종 시멘트보다 높게 나타나 향후 플라이애쉬 콘크리트에 대한 심도 깊은 연구가 필요하다고 판단된다.

- 기존의 단열온도상승식을 고강도 콘크리트에 적용할 경우는 온도상승식의 기울기를 좀 더 높게 산정할 필요가 있다고 판단된다.
- 슬래그는 주위 온도 증가에 따라 수화가 촉진되어 수화발열량이 증가하였다. 그러나 슬래그 시멘트 콘크리트는 다른 시멘트를 사용한 콘크리트에 비해 수화열 저감 효과가 매우 크게 나타났다.

참 고 문 헌

1. Carson, R. W., "A Simple Method for the Computation of Temperature in Concrete Structures", ACI, Vol. 34, 1938, pp. 89~104.
2. 佐藤英明, 佐谷靖朗, "마스콘크리트의 온도應力に關する研究", 熊谷技報, 第33號, 1983, pp. 35~49.
3. 김진근외 5인, "고강도 콘크리트 단열온도상승에 관한 실험적 연구", 한국콘크리트학회 1994년도 봄 학술발표회 논문집(통권 제 10집), 1994, pp. 209~214.
4. 정철현외 4인, "매스 콘크리트의 온도분포에 영향을 주는 주요 변수에 관한 연구", 콘크리트학회지, Vol. 6, No. 5, 1994. 10. pp. 203~212.
5. 오병환, 백신원, "대형 콘크리트 구조물의 수화열 예측 및 균열제어 연구", 한국콘크리트학회 논문집, 제 1권 7호, 1995년 2월
6. 오병환, 백신원, "매스 콘크리트 구조의 열응력 해석에서의 크리프 및 건조수축효과", 대한토목학회 논문집, 제 15권 1호, 1995년 1월, pp. 97~106.
7. Taplin, J. H., "A Method for Following the Hydration Reaction in Portland Cement Paste", Austral. J. Appl. Sci., 10, 1959, pp. 329~345.
8. 塚山隆一, "マツシブな鐵筋コンクリートの溫度上昇ならびに溫度ひび割れに關する基礎研究", 東大學位論文, 昭和 49. 3.
9. 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.

(접수일자 : 1995. 4. 25)