

플라이애쉬를 사용한 저발열 콘크리트의 현장적용 및 품질관리

박 칠 립

〈(주) 대우건설 기술연구소 소장, 공박〉

권 영 호

〈(주) 대우건설 기술연구소 선임연구원〉

이 상 수

〈(주) 대우건설 기술연구소 주임연구원〉

- | | |
|--------------------|-------------------|
| 1. 서론 | 3. 시험결과 및 분석 |
| 2. 공사개요 및 시공계획 | 3.1 단일온도상승시험 |
| 2.1 공사개요 | 3.2 모의부재시험 |
| 2.2 저발열 콘크리트의 시공계획 | 3.3 현장적용 및 품질관리결과 |
| 2.3 사용재료 | 4. 결론 |

1. 서론

최근, 콘크리트 구조물의 대형화 및 다양화 추세에 따라 대규모 콘크리트 구조물이 많이 건설되고 있으며, 이러한 대형구조물을 시공할 경우, 시멘트 수화열에 따른 온도응력의 발생으로 인해 나타내는 균열이 사회적으로 중요한 문제로 대두되고 있다.

즉, 매스 구조물의 온도응력이 콘크리트의 인장강도보다 커질게 될 경우, 콘크리트 구조물에 온도균열이 발생하게 된다. 이러한 온도균열은 구조물의 수밀성과 기밀성 등에 중대한 영향을 미치기 때문에 매스 구조물의 경우,

시멘트 수화열에 따른 온도응력의 크기 및 균열발생 유무를 사전에 파악하고, 그의 대처방안으로 잠재수경성 물질인 플라이애쉬를 시멘트대체용으로 사용, 배합비의 조정 또는 배합수를 비롯하여 각종 재료를 냉각하는 방법(Pre Cooling) 및 액화질소를 이용하는 파이프 쿨링(Pipe Cooling) 방법 등 각종 방안들이 검토되고 있다.⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾

그러나, 수화열에 기인한 온도균열의 발생여부는 콘크리트 부재의 단면치수나 내·외부 온도차, 온도상승량의 크기 뿐만아니라 구조물의 형상(벽·보·슬래브), 시공치수(타설높이·타설길이·타설면적), 구속조건, 신축이음의 유무

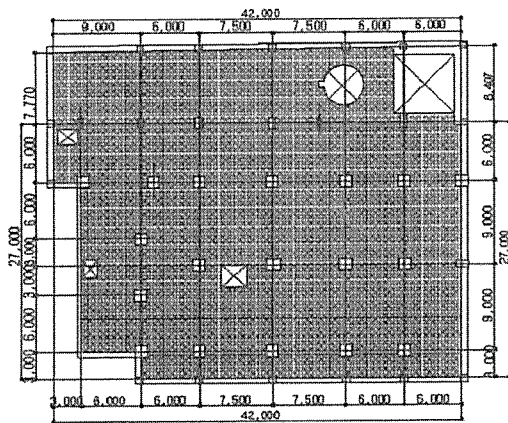
등에 따라 복합적으로 영향을 받기 때문에, 매스 구조물에서 저발열 콘크리트를 적용하기 위해서는 사전에 충분한 검토가 있어야 한다.

따라서, 본 적용현장에서는 매스 구조물에서의 급속한 수화반응으로 인한 온도응력의 발생을 억제하면서, 동시에 지속적인 수화반응으로 소기의 강도를 발현시킬 목적으로(4)(5), 배합조건에서는 플라이애쉬를 혼합하고, 사용재료를 일정온도로 냉각시키는 방안을 병행하여 적용하였다. 또한, 본 현장적용에 앞서 단열온도 상승시험과 1,200mm×1,200mm×1,400mm크기의 모의부재를 제작하여 플라이애쉬 치환율에 따른 온도이력을 검토한 후, 실제구조물에 적용하는 단계로 품질관리를 수행하였으며, 이를 중심으로 시공결과를 분석·정리하고자 한다.

2. 공사개요 및 시공계획

2.1 공사개요

적용현장은 교보생명에서 발주하고, (주)대우건설에서 시공중인 교보생명 수원사옥으로서 공사개요는 [표 1]과 같고, 콘크리트의 타설부위는 [그림 1]과 같다.



평면도 콘크리트 타설부위

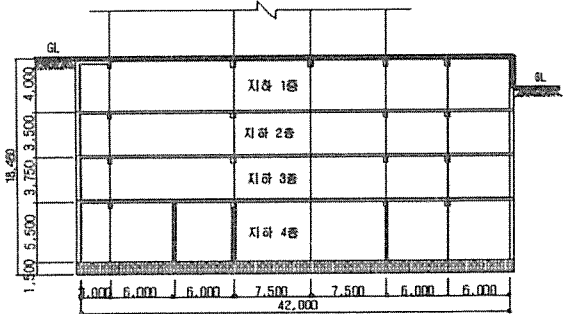
(그림 1) 저발열 콘크리트의 타설부위

[표 1] 교보생명 수원사옥의 공사개요

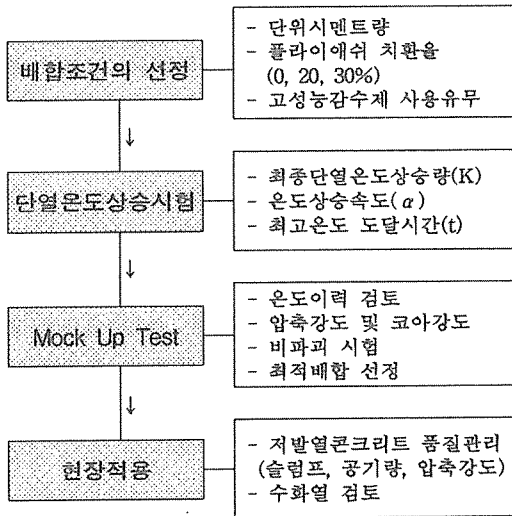
구분	내용
공사명	교보생명 수원사옥 신축공사
대지면적	1,721.59㎡(520.78평)
공사규모	지하 4층, 지상 10층
구조물의 구조	철근 콘크리트 라멘조
타설부위	Mat Footing Slab (W35m×L42m×t1.5m)
적용기간	1998. 4.11~1998. 4.20
Con'C 규격	25-240-12
Con'C 타설량	2,200m³
발주처	교보생명
시공사	(주)대우건설

2.2 저발열 콘크리트의 시공계획

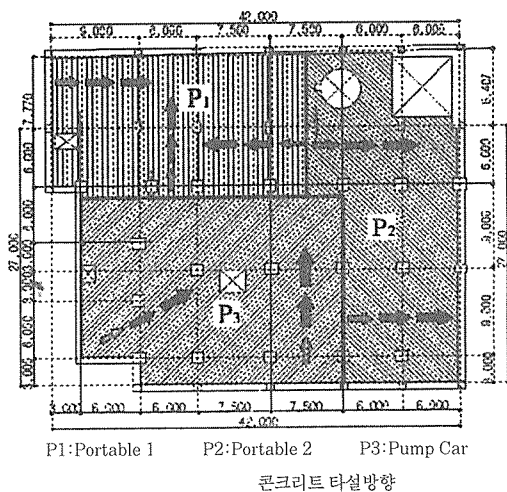
저발열 콘크리트의 시공계획 플로우는 [그림 2]에 나타난 바와 같은 방법으로 수행하였다. 한편, 적용현장에 타설한 콘크리트의 총물량이 2,200m³에 이르기 때문에, 콘크리트의 타설은 1대의 Pump Car와 2대의 Portable을 이용하여 07시부터 21시까지 총 14시간 동안 타설하였으며, 콘크리트의 타설은 [그림 3]와 같이 진행하였다.



단면도



(그림 2) 저발열 콘크리트 시공계획



(그림 3) 저발열 콘크리트의 타설

2.3 사용재료

플라이애쉬 치환율에 따른 저발열 콘크리트의 온도이력을 분석하여 최적의 배합조건을 선정한 후, 이를 현장에 적용하기 위해 사용한 재료로서 시멘트는 비중이 3.14인 국내 S사의 보통 포틀랜드 시멘트(1종)를 사용하였으며, 플라이애쉬는 보령 화력발전소에서 생성되는 F급 플라이애쉬를 사용하였다. 각각의 품질시

험결과는 [표 2]와 같다. 잔골재는 남양만산 세척사, 굵은골재는 25mm쇄석을 사용하였다.

[표 2] 시멘트 및 Fly-ash의 품질시험결과

구분 종류	강열 감량 (%)	분말 도 (cm ² /g)	안정 도 (%)	응결시간 (hr:min)		압축강도 (kg/cm ²)		
				초결	종결	3일	7일	28일
시멘트	0.71	3,260	0.05	3:83	6:10	195	293	397
플라이애쉬	3.91	3,187	0.03*	6:25*	9:05*	121*	193*	325*

*는 플라이애쉬 30%를 치환한 혼합시멘트의 특성을 나타낸 것임.

3. 시험결과 및 분석

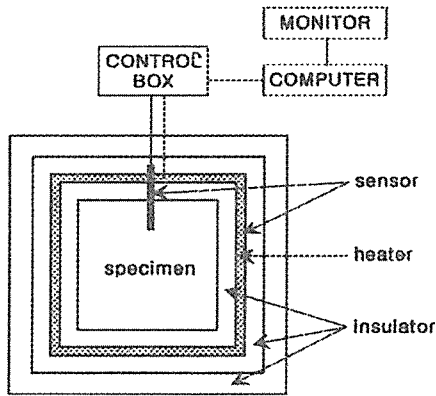
3.1 단열온도상승시험

플라이애쉬를 혼합한 저발열 콘크리트의 수화열 저감정도를 확인하기 위하여 [표 3]의 배합조건인 플라이애쉬 치환율 0%, 20%, 30%에 따라 적용현장에 사용될 재료와 동일한 재료를 사용하여 사전에 단열온도상승시험을 실시하였다. 저발열 콘크리트의 수화발열량을 구하는 방법에는 용해열법이나 전도형 미소열량계를 이용하여 시멘트의 수화열을 측정해 발열량으로 환산하는 방법과 직접적으로 단열온도상승시험장치를 이용하여 구하는 방법이 있으나, 전자의 경우는 측정된 수화열에 대하여 여러가지 보정을 통해 콘크리트의 수화발열량을 추정해야 하는 등의 문제점이 있다.

따라서, 본 시험에서는 [그림 4]과 같이 수화열을 직접적으로 측정할 수 있는 단열온도상

[표 3] 저발열 콘크리트의 배합조건

배 합 조 건				단위재료량(kg/m ³)				
FA 치환율 (%)	W/B (%)	W (kg)	S/A (%)	C1	C2	S	G	AE 감수제 (%)
0	48.1	176	44.3	366	0	773	971	0.3
20				293	73	761	956	
30				256	110	755	949	

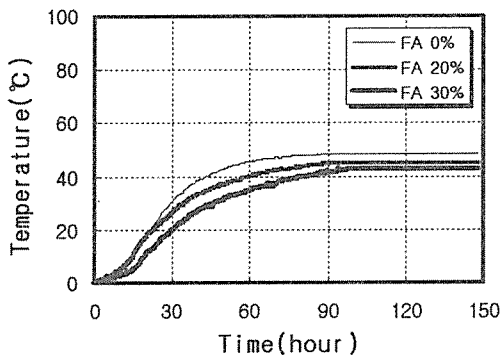


(그림 4) 단일온도상승 시험장치

승시험장치를 이용하였다. 이 시험장치는 측정이 간단하고 측정값을 그대로 저발열 콘크리트의 온도해석에 적용할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 이러한, 단일온도상승시험의 결과는 $Q(t) = K(1 - e^{-\alpha t})$ (여기서, $Q(t)$ 는 재령 t 에서의 단일온도상승량, K 는 최종단열온도상승량, α 는 온도상승속도)과 같은 e함수 형태로 표현되어 온도해석에 입력값으로 이용된다.

시험용 공시체는 한변의 길이가 15cm인 정육면체로서 타설직후부터 30분간격으로 1주일까지 측정하였다. 시험결과는 [그림 5]와 같다.

시험결과, 플라이애쉬 치환율이 증가함에 따라 단일온도상승량(K)과 온도상승속도(α)는 감소하였으며, 최고온도로 수렴되는 시간



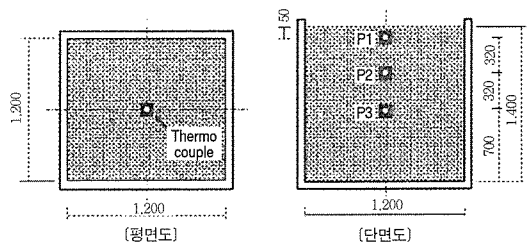
(그림 5) 배합조건별 단일온도 상승시험 결과

도 90시간을 전후하여 미소하나마 플라이애쉬 치환율이 증가할수록 길어지는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 플라이애쉬를 치환함에 따라 단위시멘트량이 비례적으로 감소한 것과 플라이애쉬의 포졸란 반응에 따른 수화지연효과 등이 복합적으로 작용한 것으로 분석된다.

3.2. 모의부재시험

3.2.1 모의부재의 형상

레미콘 공장의 배치 플랜트에서 예비시험 및 단일온도상승시험을 수행하여 얻어진 결과를 바탕으로, 동일한 배합조건에서 Mock-up Test를 실시하였다. 콘크리트의 수화열 측정을 위하여 플라이애쉬 치환율별로 1,200mm × 1,200mm × 1,400mm (가로 × 세로 × 높이) 크기의 시험체를 각각 제작하였고, 각 시험체를 상, 중, 하로 구분하여 열전대(Thermo-Couple)를 설치하였다. 시험체의 형상 및 열전대 매립 위치는 [그림 6]과 같다.



(그림 6) Mock-Up Test용 부재 모식도

한편, 시험체 부위별 강도를 측정하기 위하여 코어를 채취하였으며, 적용현장의 여건(工程)을 고려하여 7, 14, 28일재령에서 압축강도를 측정하였다. 또한, 각 재령에서 비파괴 시험도 실시하였다.

3.2.2 굳지않은 성상 및 강도특성

레미콘 공장에서 실시한 모의부재 시험의 결

[표 4] Mock-up Test 결과

FA 치환율 (%)	슬럼프 (cm)	공기량 (%)	압축강도 (kg/cm ²)							
			표준양생			코아강도			비파괴시험	
			7일	14일	28일	위치	14일	28일	14일	28일
0	13	4.2	206	266	313	상	264	283	249	272
						중	245	302		
						하	223	277		
20	11	2.8	196	254	301	상	249	264	228	268
						중	233	288		
						하	227	285		
30	11	0.5	186	238	284	상	205	234	215	252
						중	219	251		
						하	229	248		

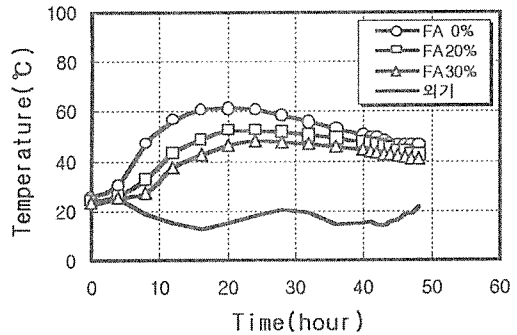
과로, 각 배합별 굳지않은 콘크리트의 정상 및 경화상태 강도특성은 [표 4]와 같이 나타났다.

굳지 않은 정상 실험결과, 슬럼프는 플라이애쉬 치환율에 관계없이 거의 유사한 것으로 나타났으나, 공기량은 기존문헌^{4),6)}에 제시된 바와 같이 플라이애쉬 치환율이 증가할수록 감소하였다. 한편, 표준양생, 코아채취 및 비파괴 시험으로 측정된 압축강도는 플라이애쉬 치환율이 증가함에 따라 감소하였으나 재령 28일에서의 압축강도는 공히, 적용현장의 설계기준강도(240kg/cm²)를 모두 상회하였다. 한편, 측정방법에 따른 압축강도는 비파괴시험 < 코아강도 < 표준양생의 순서로 나타났다.

3.2.3 수화열 측정결과

중양부에서의 플라이애쉬를 치환한 저발열 콘크리트의 수화열 특성은 [그림 7]과 같다.

시험결과, 최고상승온도는 콘크리트의 초기 온도상승에 기인하여 단일온도상승시험보다 높은 것으로 나타났으나, 최종온도상승량은 각각 36.2℃(FA 0%), 28.6℃(FA 20%), 24.3℃(FA 30%)로서 단일온도상승량(K)에 비해 평균 16℃정도가 낮은 것으로 나타났다.



[그림 7] 저발열 콘크리트의 온도이력곡선

플라이애쉬 치환율에 따른 특성으로는 치환율이 증가할수록 저발열 콘크리트의 중앙부 최고온도와 온도 상승속도 및 하강속도는 낮아져, 플라이애쉬 치환율이 0%의 경우, 저발열 콘크리트의 중앙부 최고상승온도는 61.5℃를 나타낸 반면, 치환율 20%에서는 52.6℃, 치환율 30%에서는 47.9℃인 것으로 나타났다. 따라서, 플라이애쉬를 첨가함으로써 각각 8.9℃와 13.6℃의 수화열 저감효과를 얻을 수 있었다. 그러나, 적용현장에 타설될 콘크리트의 배합은 레미콘社의 생산설비, 압축강도 및 경제성 등을 고려하여 플라이애쉬 치환율이 20%인 경우를 최적의 배합조건으로 선정하였다.

3.3 현장적용 및 품질관리결과

3.3.1 굳지않은 성상 및 압축강도

적용현장에 타설된 저발열 콘크리트의 굳지 않은 상태 및 경화상태 품질시험은 KS의 표준적인 방법으로 실시하였으며, 아울러 압송전후에 따른 압축강도와 압송후의 경시변화에 따른 품질변화를 평가하기 위한 시험도 수행하였다.

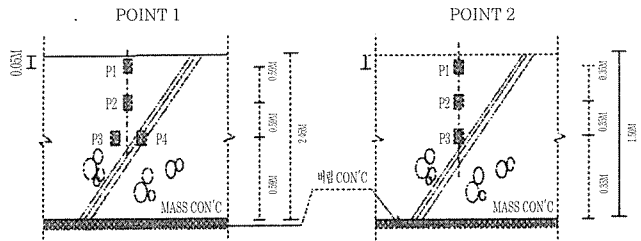
시험결과, 콘크리트 압송전과 후의 압축강도는 [표 5]에서와 같이 펌프압송등에 따른 공기량의 손실에 기인하여 약간의 강도편차가 있었으나, 압송전후에 관계없이 적용현장의 강도관리기준(240kg/cm²)를 만족하였다. 압송후 경시변화 시험에서는 [표 6]에서와 같이 굳지않은 상태 및 경화상태에서 비교적 우수한

[표 5] 압송전 · 후의 압축강도 시험결과

배합조건				압축강도(kg/cm ²)			
측정	W/B (%)	FA 치환율(%)	S/A (%)	3 일	7 일	28 일	56 일
압송전	48.1	20	44.5	134	209	282	299
압송후				125	210	298	314

[표 6] 압송후 경시변화 시험결과

배합조건			슬럼프 (cm)	공기량 (%)	압축강도 (kg/cm ²)	외기온 (Con.C온도)
시간 (분)	W/B (%)	FA치환율(%)				
압송 직후	48.1	20	13.0	2.7	302	23.7℃ (25.3℃)
30			11.0	2.4	328	22.2℃ (25.2℃)
60			7.0	1.8	316	22.4℃ (24.4℃)
90			4.8	1.1	320	22.3℃ (24.0℃)
120			5.0	1.1	311	21.4℃ (22.8℃)



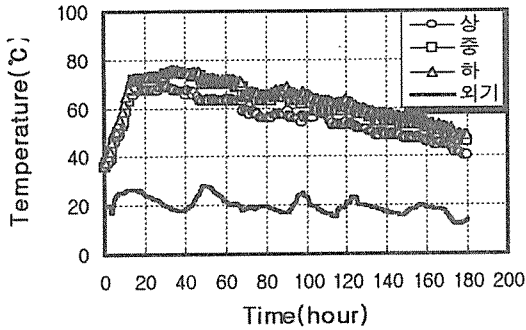
(그림 8) 열전대 매립위치

품질관리가 가능하였는데, 특히 슬럼프와 공기량은 펌프압송후 30분까지도 품질변화가 거의 없었으며, 사용재료를 냉각하므로써 콘크리트의 온도도 25℃정도로 관리할 수 있었다.

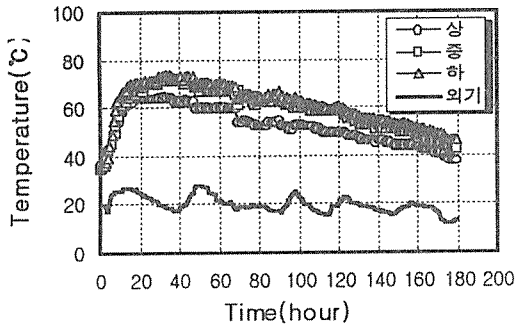
3.3.2 수화열 측정결과

콘크리트의 수화열을 측정하기 위하여 "T" type의 열전대를 매립하고, Data Logger에 연결하여 온도계측을 수행하였다. [그림 8]은 콘크리트 타설부위에 매립된 열전대의 설치위치를 나타낸 것으로서 적용현장의 시공여건상 매스 구조물의 두께가 다른 2개소에 설치하였으며, 외기온을 포함하여 총 8개소의 온도변화를 1시간 간격으로 8일간 측정하였다.

수화열 측정결과, [그림 9]과 같이 적용현장에서 두께가 상이한 두지점의 수화열 특성은 유사한 경향으로 나타났다. 그 중 두께 2.4m 인 지점의 수화열은, 측정개시 34시간후, 최고 75.6℃까지 상승하였으며, 표면부는 67.5℃까지 상승하므로써 약 8℃정도의 온도차가 있는 것으로 나타났다. 그러나, 동일시점에서 외기온은 18.4℃로서 중앙부의 수화열 최고상승온도와 약 57℃정도의 다소 큰 온도차가 있는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 사전에 수행된 단열온도상승시험이나 외부에 노출되므로써 최종온도상승량이 낮은 Mock-Up Test의 시험조건과는 달리, 적용현장의 콘크리트 타설부위가 지하 약 18m지점이고, 타설물량이 약 2,200m³인 것 등의 영향으로 분석된다.



(a) 콘크리트 두께 2.4m지점



(b) 콘크리트 두께 1.5m지점

(그림 9) 저발열 콘크리트의 수화열 측정결과

그러나, 습윤양생을 통해 대기와의 직접적인 접촉을 차단하였고, 시간당 온도상승률이 1.09, 온도하강률이 0.17°C/h인 것으로 나타나므로 온도균열을 방지하기 위한 콘크리트 온도하강률의 관리기준²⁾이 1°C/h이하인 것을 고려하여 볼 때 급속한 온도하강에 의해 발생하는 온도응력에 의한 균열발생의 위험성은 매우 적을 것으로 판단되었다.

더욱이, 수화온도이력에 의해서 나타난 중앙부의 최고온도 도달시간은 콘크리트의 두께에 관계없이 약 30시간 정도인 것으로 나타났다. 이는 일반 콘크리트의 12~15시간보다 상대적으로 오래 소요되는 것으로서 콘크리트의 균열방지에 유리한 결과이다.

거푸집을 제거한 후, 저발열 콘크리트 타설 부위의 온도균열 발생여부를 판단하기 위하여

육안관찰을 실시한 결과 수화열에 따른 온도균열은 발견되지 않았다. 이것은 사전에 수행한 단열온도 상승시험이나 Mock-up Test의 수화열 측정결과 등을 통해 예측된 결과로서 우수한 품질관리를 수행할 수 있었다.

한편, 국내 콘크리트 표준시방서에서는 매스구조물에서 콘크리트의 수화열에 따른 위험도를 나타내기 위한 지표로서 온도균열지수(I_c)를 활용하고 있다. 즉, 규정되어 있는 온도균열지수에서는 온도균열지수가 1.0인 경우 균열발생확률을 40%로 보고 있으며, 균열이 거의 발생되지 않을 것으로 예상되는 온도균열지수인 1.5의 경우는 균열발생확률이 약 8%인 것으로 보고있다.

- ① $I_c \geq 1.5$: 균열을 방지하고 싶은 경우
- ② $1.2 \leq I_c < 1.5$: 균열발생은 허락하나 그 폭이나 수를 제한하고 싶은 경우
- ③ $0.7 \leq I_c < 1.2$: 그 이외의 경우

여기서, 온도균열지수는 (식 1)과 같이 콘크리트의 인장강도와 온도응력과의 비로 정의하고 있다.

$$\text{온도균열지수}(I_c) = f_t(t) / \sigma_t(t) \quad \text{--- (식 1)}$$

$\sigma_t(t)$: 수화열에 기인하는 온도응력의 계산값
 $f_t(t)$: 콘크리트의 인장강도(kg/cm²)

따라서, 시방서에서는 간이적으로, 온도계산 결과만을 이용하여 온도균열지수를 구하는 방법도 제시되어 있는데 즉, 내부구속력에 대한 영향이 적고, 외부구속이 우월한 경우에 대하여 다음과 같이 제안하고 있으며, 본 적용현장의 시공여건을 고려하여 볼 때 다음(식 2)을 이용하는 것이 바람직할 것으로 예상된다.

$$\text{온도균열지수}(I_c) = 10 / R \Delta T_i \quad \text{--- (식 2)}$$

ΔT_i : 내부온도가 최고일 때의 내부와 표면
과의 온도차(°C)

R: 외부구속도계수(구속도계수로 100%
구속일 때 1.0으로 한다.)

따라서, 본 적용현장의 경우 온도균열지수측
면에서의 결과는 $1.2 \leq I_c \leq 1.5$ 에 해당하는 것
으로, 저발열 콘크리트의 온도응력에 따른 균
열발생확률은 줄일 수 있는 것으로 나타났다.

그러나 여기에서 사용된 온도균열지수는 간
이적인 방법으로 구조물의 조건에 따라 상이
하기 때문에 앞으로 수화열에 따른 온도균열
지수를 정확하게 파악하기 위해서는 온도측정
게이지뿐만아니라 온도응력 게이지를 활용하
여 동시에 측정하여 평가하는 것이 바람직할
것이다.

4. 결론

플라이애쉬를 혼합한 저발열 콘크리트의 품
질관리결과를 정리하면 다음과 같다.

1) 단열온도상승시험에서는 플라이애쉬 치
환율이 증가할수록 단열온도상승량(K)과 온
도상승속도(α)는 감소하였으며, 최고온도로
수렴되는 시간도 90시간을 전후하여 미소하나
마 길어졌다.

2) 모의부재실험에서 저발열 콘크리트의
압축강도는 플라이애쉬 치환율에 구분없이 강
도관리목표인 $240\text{kg}/\text{cm}^2$ 를 만족하였으며, 플
라이애쉬를 각각 20%와 30%씩 첨가하므로
서 8.9°C 와 13.6°C 의 수화열 저감효과를 얻을
수 있었다.

3) 본 현장에 적용한 저발열 콘크리트의 중
양부 최고상승온도는 75.6°C 까지 상승하였으
나, 시간당 온도상승률이 1.09, 온도하강률이
 $0.17^\circ\text{C}/\text{h}$ 인 것으로 나타나므로써, 급속한 온

도하강에 따른 균열발생의 위험성은 없었다.

4) 수화열로 인한 내력저하가 예상되는 저
발열 콘크리트의 품질관리방안으로, 사전에
단열온도상승시험과 모의부재실험을 수행하
여 최적의 배합을 선정 한 후, 이를 현장에 적용
하므로써 우수한 품질관리를 수행할 수 있었
으며, 저발열 콘크리트의 품질관리 흐름도
(Flow)를 제시하였다.

참고문헌

- (1) 朴七林, "매스콘크리트의 온도龜裂 豫測 및
施工制御 시스템 研究", (株)大宇建設技術研
究所, 技術論文, 1995.12
- (2) 윤영수, 장일영, 원종필, 최응규, "1400kg/cm²
의 초고강도 콘크리트의 배합, 타설 및 수화온
도 이력에 관한 연구", 한국콘크리트학회, 학
술발표논문집, 제9권 2호, 1997.11, pp.430
~435
- (3) 김진근, 정재동 외 4인, "고강도콘크리트 단열
온도상승에 관한 실험적 연구", 한국콘크리트
학회 학술발표논문집, 제6권 1호, 1994.5,
pp.209~214
- (4) 日本土木學會, "マスコンクリト技術現狀動
向(コンクリト技術シリーズ), Concrete
Engineering Series 8, 1989,
- (5) 日本建築學會, "建築工事標準仕様書・同解説
(JASS 5)鐵筋コンクリト工事, 1993.5,
pp.372~391
- (6) ACI Committee 207., Mass Concrete
for Dams and Other Massive Struc-
tures, Journal of ACI, No4, Vol.67,
1970.4, pp.273~309
- (7) ACI Committee 301., Suggested
Specifica-tions for Structural Concrete
for Buildings, Journal of ACI, No.10,
Vol.60, 1963, pp.1321~1373