

매스콘크리트의 타설높이 및 양생조건에 따른 온도균열 저감 방안에 관한 연구

Thermal Crack Control of Mass Concrete by Concrete Placing Height and Curing Method

민 병 소 [*]	신 길 수 ^{**}	김 대 권 ^{***}
Min, Byeong So	Shin, Kil Soo	Kim, Dae Kwon
이 현 희 ^{****}	신 성 우 ^{*****}	이 광 수 ^{*****}
Lee, Hyun Hee	Shin, Sung Woo	Lee, Kwang Soo

ABSTRACT

As many studies have performed to reduce thermal cracking in mass concrete, it is already prepared against thermal cracking, we can find many plans against thermal cracking in several reference book. But it needs practical guidelines to be available in construction site.

In this study to establish control method of thermal cracking in mass concrete, tests which have factors of placing thickness and curing method of concrete are performed.

1. 서론

과거에는 댐이나 지하구조물 같은 대형구조물에서 온도균열 문제가 발생하는 것으로 생각되어 왔으나, 최근에는 건물이 대형화, 복합화 됨에 따라 주상복합빌딩, 초고층 빌딩과 같은 건축 구조물의 기초시공시에도 온도균열 제어대책을 반드시 고려해야 하는 경우가 발생되고 있다.

당사에서도 주상복합건물 및 고층빌딩의 기초시공시 콘크리트 시방서 상에 규정된 매스콘크리트로 시공해야 하는 경우가 자주 발생되어 온도균열 저감 방안에 대해서 체계적으로 연구할 필요를 느껴왔다. 매스 콘크리트의 균열대책이 중요한 이유는 다른 균열원인과는 달리 구조물의 내력에도 영향을 미칠 우려가 있을 뿐 아니라, 이에 따른 보수, 보강 비용이 적지 않기 때문이다. 따라서 매스콘크리트의 온도균열 저감방안을 적용하게 될 경우 구조물의 안정성에도 기여할 수 있으며, 균열 보수비용 저감 측면에서도 유리하므로 이에 대한 연구는 매우 필요한 상태이다. 매스콘크리트 균열저감대책에 대해서는 이미 많은 연구가 되어 있어서 재료상, 시공상, 구조상 균열 대책들이 마련되어 있으나, 현장에서 실용적으로 적용하기 위해서는 좀더 구체적인 지침이 필요한 상태이다.

이에 본 연구에서는 매트기초를 대상으로 시공상의 여러가지 대책중 타설높이 및 양생조건을 변수로 하여 콘크리트의 온도상승효과를 예측하고 검증하기 위하여 현장적용 전에 Mockup Test를 실시하며, 실제 현장계측을 수행함으로써 경제적인 매스콘크리트의 온도균열 저감대책을 수립하고자 한다.

2. Mock up Test

2.1 실험내용 및 범위

매트기초에 사용되는 매스콘크리트의 수화열에 의한 온도발현 양상에 영향을 미치는 주요 요인인 타설높이를 변수로 하여 타설높이에 따른 온도분포상황을 Mockup 실험체를 통하여 실측하였으며, 그 결과를 「콘크리트 표준시방서」에서 정하는 기준에 따른 온도균열지수를 이용하여 평가함으로써 적정 1회 타설 높이를 산출하며 또한 타설높이에 따른 적정 보양기간을 산출하였다.

* 정회원, 두산건설 기술연구소 차장

** 정회원, 두산건설 기술연구소 상무

*** 정회원, 두산건설 기술연구소 부장

**** 정회원, 두산건설 기술연구소 대리

***** 정회원, 한양대학교 건축공학과 교수

***** 정회원, 여주대학 건축학과 교수

현재 일반적으로 사용되는 매트기초의 두께와 향후 초고층 주상복합건물 등의 기초에 활용될 것을 고려하여 Mock up 실험체의 두께를 0.8m, 1.2m, 1.6m, 2.4m로 선정하였다.

2.1.1 수화열 측정 모델

일반적으로 두께에 비하여 표면적이 훨씬 넓은 슬래브에서 수화열에 의한 온도분포는 그림 1과 같이 수평방향의 경우 경계면으로부터 일정길이를 지나면 변화가 없게 되고, 높이방향의 경우에는 상중하 높이별로 온도 차가 발생하므로, Mockup Test의 실험체 모델은 그림과 같이 실구조물의 모서리 부분을 선택하였으며, 이를 통하여 슬래브 전체의 온도분포를 파악할 수 있을 것으로 예상하였다. Mockup 실험체의 경계조건은 외기에 접하는 부분은 유로폼을 사용하였으며, 슬래브가 연속되는 연속 단열경계면은 200mm 압축발포폴리스티렌을 이용하여 단열하였다.

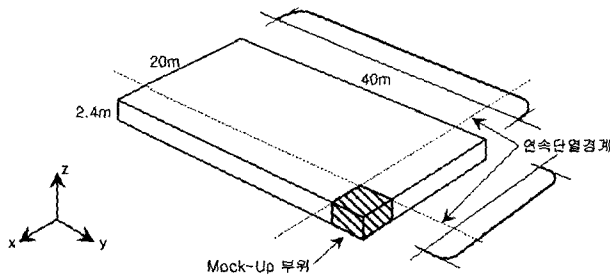


그림 1 수화열 측정 모델 선정

표 1 Mockup 실험체 크기

실험체크기(mm)	실험체명
3000×3000×800	A1
3000×3000×1200	A2
3000×3000×1600	A3
3000×3000×2400	A4

2.1.2 계측 방법

1) 수화열을 측정하기 위하여 계측기는 Data Logger(TDS 303)를 사용하였으며, 열센서는 Thermal Gauge(K Type)를 사용하였다. 측정간격은 타설종료부터 3일간은 30분 간격으로 측정하였으며, 3일 이후는 1시간 간격으로 측정하였다.

2) 계측 Point

Mockup 실험체 전체의 수평·수직방향의 온도분포를 파악하기 위하여 그림 2와 같이 수평방향으로 3point, 수직방향으로 3point에서 온도를 측정하였다. 수평방향의 온도분포는 중앙인 2번 위치에서 가장 클 것으로 예측되며, 단열 경계면인 3번 위치는 단열재의 성능에 따라 달라지지만 완벽한 단열을 기대할 수 없으므로 2번보다 낮게 나타날 것으로 예측된다.

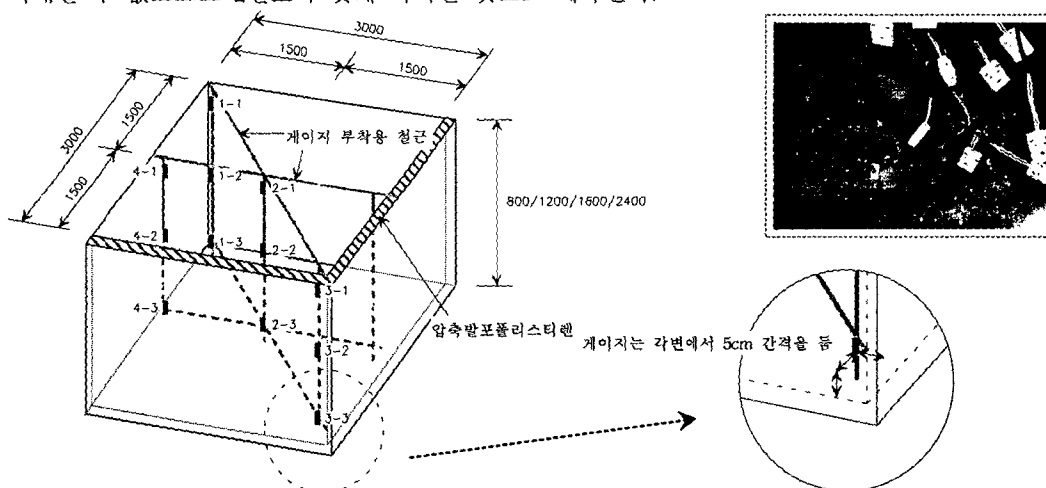


그림 2 Mockup 실험체의 온도측정 상세

2.1.3 사용 콘크리트

콘크리트의 배합선정은 실험에 의하지 않고, 문헌조사를 통하여 저발열 콘크리트용으로서 가장 많이 사용되고, 콘크리트 표준시방서에서 권장하고 있는 플라이애쉬 20% 치환 콘크리트 배합으로 하였다. 당 현장의 기초콘크리트의 호칭강도는 240kg/cm² 를 사용하였으며, 지연제가 첨가되었다. 본 콘크리트의 슬럼프값은 18cm이나, 저발열 콘크리트에서는 슬럼프값은 큰 의미가 없고, 슬럼프 플로우값이 오히려 중요한 물성으로서 레미콘 운반시간에 따른 슬럼프 로스를 고려하여 출고시 슬럼프플로우값이 45cm~50cm이어야 하는 것으로 알려져 있다. 본 콘크리트는 45cm를 슬럼프플로우 값으로 하였다.

표 2 콘크리트 배합표

골재치수 (mm)	호칭강도 (kg/cm ²)	슬럼프 (cm)	공기량 (%)	슬럼프 플로우 (cm)	W/C (%)	S/A (%)	단위용적증량(kg/m ³)					AD
							C	F/A	W	S	G	
25	240	18	4.5±1.5	45cm	47.2	48.2	271	68	160	873	938	5.42

2.2 실험결과 및 분석

2.2.1 실험결과

1) 수직온도분포

실험체의 계측위치를 표시한 그림 2의 중앙(2-1,2,3)에서 실험체별로 수직상의 온도분포를 비교한 결과를 그림 3~4에서 나타내었다. 일반적으로 타설높이의 중앙에서는 주로 재료의 단열온도상승 특성에 따른 온도이력을 나타내었으며, 온도가 가장 높게 나타났다. 상부 표면에서의 온도는 외기의 영향을 받아 일교차와 유사한 주기를 따라 변화하였는데, 타설이 지연되어 온도발현이 다소 늦게 나타났다. 하부는 완전한 지반의 온도변화로 인하여 완전한 온도이력을 나타내었다. 온도해석을 위한 단열온도상승특성치(Qmax, γ)는 배합표에 따른 단위시멘트량과 플라이애쉬 치환율을 적용하여 구한 값과 일치하고 있으나, 본 배합에 지연형 감수제를 사용하고 있는 점을 감안하면 시방서상의 단열온도 상승 특성치는 과소평가하는 것으로 판단된다.

표 3 단열온도상승 특성치

	최종단열온도상승량, Qmax(°C)	온도상승속도 계수 γ(°C)
시방서	48.29	1.076
해석	48.29	1.076

※ 단위 결합재량 : 339, 초기온도 : 30°C, FA 치환율 : 20%

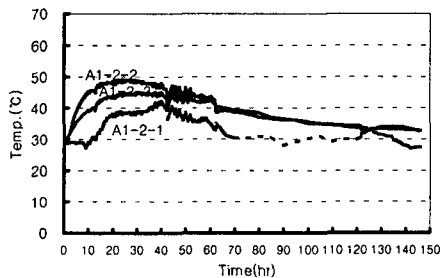


그림 3 시간에 따른 수직온도분포(A1)

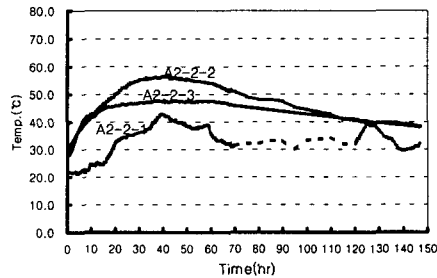


그림 4 시간에 따른 수직온도분포(A2)

2) 수평온도분포

실험체의 계측위치를 표시한 그림 2의 중앙높이(1,2,3,4-2)에서 수평방향의 온도분포를 비교한 해석 결과를 두께에 따라서 그림 5~6에 나타내었다. 일반적으로 양면이 거푸집과 함께 외기에 접하는 1번 위치가 가장 낮은 온도분포를 보였으며, 한면만 외기에 접하는 4번 위치는 1번보다 다소 높게 나타났다. 중앙위치인 2번은 부재 체적의 중심으로서 가장 높은 온도분포를 보였다. 양면이 압축발포폴리스티렌으로 단열된 3번은 완벽한 단열이 되지 못하여서 중앙보다 다소 낮은 온도분포를 나타내었다.

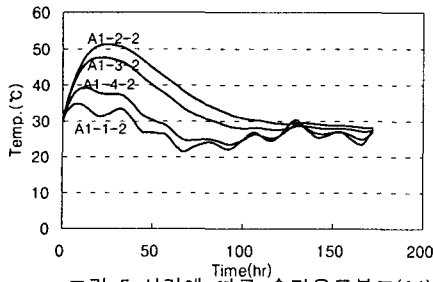


그림 5 시간에 따른 수평온도분포(A1)

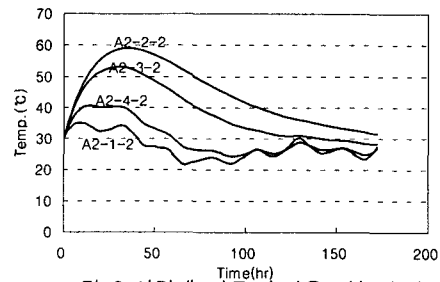


그림 6 시간에 따른 수평온도분포(A2)

3) 두께에 따른 온도분포

제1구간 각 실험체 체적의 중심에서의 온도변화를 두께별로 비교한 실측결과를 그림 7에 나타내었다. 결과를 보면 두께가 증가함에 따라 최고온도 및 최고온도 도달시간은 증가하고 있으나 증가의 폭은 줄어들음을 알 수 있다.

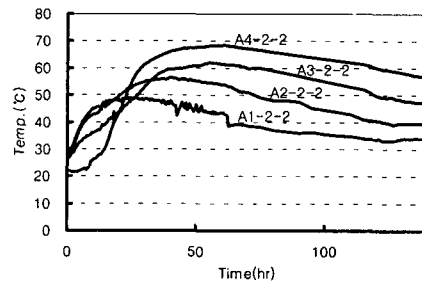


그림 7 두께에 따른 온도분포 실측 결과

2.2.2 균열지수 산정에 의한 균열 위험성 평가 및 대책

「콘크리트 표준시방서」에서는 식(1) 과 같이 간이적인 방법으로 균열지수를 구하는 방법을 제시하고 있다. 여기서 ΔT_i 는 내부온도가 최고일 때의 내부와 표면과의 온도차다. 그러나 일반적으로 내부와 표면의 온도차가 가장 크게 나타나는 시간은 내부온도가 최고일 때보다는 외기온도가 최저일 때 발생하게 되므로 ΔT_i 를 내부와 외부의 온도차가 가장 큰 값으로 정의하여야 안전치 일 것으로 판단된다.

$$I_{cr}(t) = \frac{15}{\Delta T_i} \quad (1)$$

따라서 본 연구에서는 다음과 같이 부재내 최고온도와 최저온도의 차이를 시간별로 구한 후 이중 온도차이가 가장 큰 값을 구하여 균열지수 산정식에 대입하여 산정하였다. 실험체별로 두께에 따른 균열지수를 산정한 결과 표 4와 같이 두께 1.2m까지는 유해한 균열발생을 제한할 수 있는 균열지수 0.7 이상을 확보하였다.

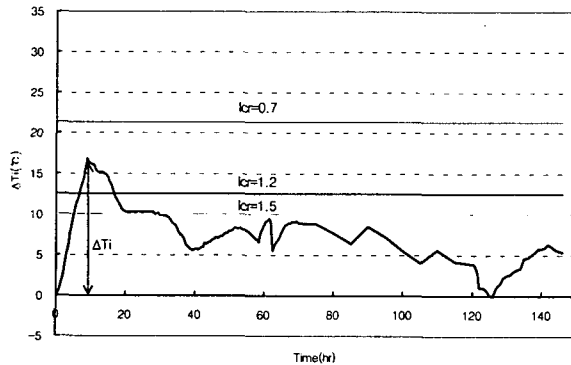


그림 8 시간에 따른 내·외부 온도차(A1-2)

표 4 Mockup 실험체의 균열지수의 평가

Thk(mm)	ΔT_i	I_{cr}
800	17	0.9
1200	22	0.7
1600	35	0.4
2400	35	0.4

시간에 따른 내외부 온도차이를 보면 주로 매스콘크리트의 수화열이 최고에 도달한 시간에 외기온도가 일교차에 의하여 낮아지면서 온도차이가 심하게 나타나고 있다. 콘크리트의 내외부 온도차이가 가장크게 발생하는 시간에서 콘크리트재료의 수화열을 제어하지 않고 현장에서 온도균열을 제어할 수 있는 방안으로 이 시간에 집중적으로 표면을 보온함으로써 온도차이를 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

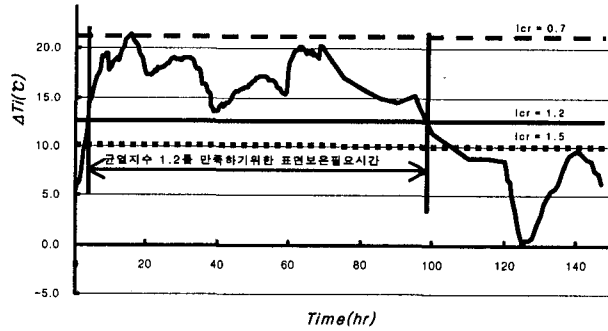


그림 9 표면보온시간의 산정

각 균열지수별로 표면보온이 요구되는 시간은 다음과 같이 나타났다.

표 5 Mockup 실험체의 균열지수별 표면보온이 요구되는 시간

슬래브 두께(m)	타설 후 보온 필요시기		
	균열지수 0.7	균열지수 1.2	균열지수 1.5
0.8	필요없음	8~18시간	5~30시간
1.2	필요없음	5~98시간	5~110시간
1.6	20~80시간	5~120시간	3~120시간
2.4	20~120시간	5~140시간	3~140시간

3. 현장 매트기초 온도측정

실구조물의 온도측정은 당사의 ○○현장 아파트 매트기초를 대상으로 하였다.

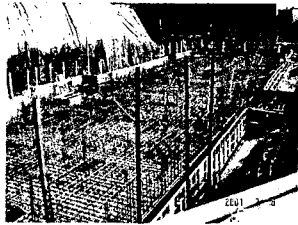


그림 10 매트기초 배근상황

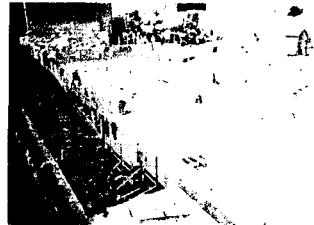


그림 11 매트기초 타설종료상황

3.1 실험 내용 및 범위

실구조물 온도측정에서는 첫째로 매트기초 제1구간에서는 수평수직 온도분포를 측정하며 이에 따른 온도균열지수를 산정하여 적정 보양기간을 산출하고자 하였다. 둘째로 매트기초 제2구간에서는 양생조건을 양생포, 비닐, 비닐+양생조건 3가지로 하여 온도분포를 측정하고 이에 따른 적정 보양방법을 산출하고자 하였다.

3.2 온도계측

온도의 계측은 Mockup 실험체와 동일한 방법으로 실시하였다. 기초타설은 암반과 연약지반이 혼합된 지반위에 10cm 정도의 버림콘크리트를 타설한 후 타설 높이 0.8m를 1회 타설하였다. 타설 후 제1구간은 표면을 비닐로 덮고 살수하였고, 제2구간은 3가지 양생조건에 따라 보양을 하였다. 측정위치는 제1구간의 경우 장변, 단변 그리고 대각선 방향의 수평온도 분포를 파악하기 위하여 그림 16과 같은 위치에서 각각 수직으로 상부, 중앙 그리고 하부에 설치하였다. 제2구간의 경우 각 양생조

건별로 상중하 3개소에 게이지를 설치하였다.

3.3 사용 콘크리트

콘크리트의 배합은 당현장의 기초콘크리트 배합을 사용하는 것으로 하였다. 최근 기초콘크리트의 경우 원가절감 차원에서 플라이애쉬 10%를 기본적으로 사용하는 추세이다. 본 논문에서는 현장기초콘크리트의 경우 보양방법에 따른 균열저감대책을 강구하는 것을 목표로 하였으므로, 저균열배합을 채택하지 않고, 일반콘크리트 배합으로 하였다. 구간별로 타설일자의 차이가 발생하여 배합에 다소의 변경이 있었다.

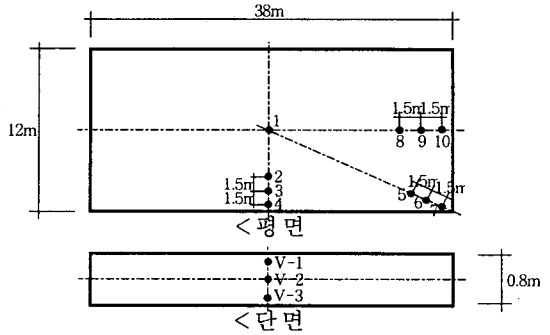


그림 12 매트기초 수화열 측정 위치도

표 6 콘크리트 배합표

위치	골재치수 (mm)	호청강도 (kg/cm ²)	슬럼프 (cm)	공기량 (%)	W/C (%)	S/A (%)	단위용적중량(kg/m ³)					AD
							C	F/A	W	S	G	
제1구간	25	240	18	4.5±1.5	49.1	49.3	338	37	184	828	882	1.5
제2구간	25	240	18	4.5±1.5	50.3	47.0	331	37	185	813	927	0.74

3.4 온도분포 분석 및 결과

3.4.1 수직온도분포

실구조물의 온도측정위치(그림 12 참조)에서 중앙(1번)과 단부(4번)에서의 수직온도분포에 대한 실측 결과를 그림 13과 그림 14에서 나타내었다. 일반적으로 온도분포는 Mockup 실험체와 동일한 양상을 나타내었으며, 단부는 측면에서 외기의 영향으로 중간높이에서도 다소 외기의 영향을 받고 있다.

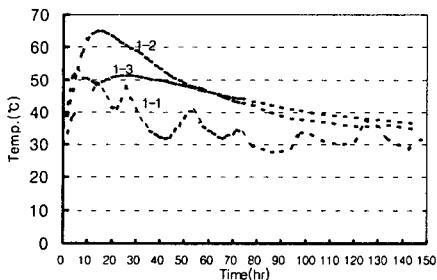


그림 13 시간에 따른 수직온도분포(중앙)

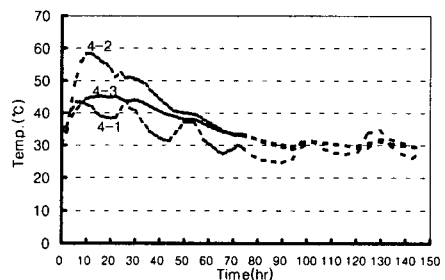


그림 14 시간에 따른 수직온도분포(단부)

3.4.2 수평온도분포

중간높이에서 단변과 장변방향의 온도분포를 그림 15 및 그림 16에 나타내었다. 측면으로부터 1.5m 이내의 온도는 거의 동일하게 나타나 온도기울기가 이 구간 내에서 일어나는 것을 알 수 있다.

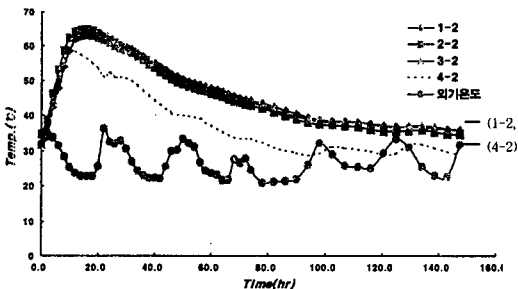


그림 15 단변방향 온도분포

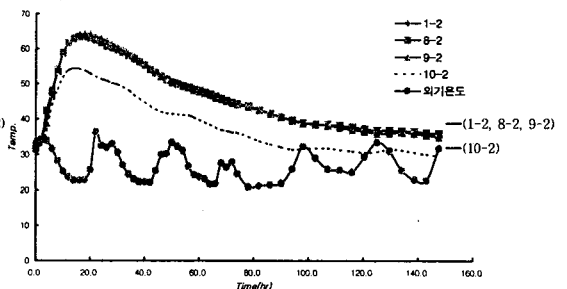


그림 16 장변방향 온도분포

3.4.3 단열온도 상승특성

플라이애쉬 치환율 20%를 기준으로 한 콘크리트 표준시방서의 단열온도상승 특성(Qmax, γ)보다 크고 빠르게 수화반응을 보였다. 당현장의 콘크리트 배합에서 플라이애쉬 치환율이 10%로 적기 때문인 것으로 사료된다.

표 7 매트기초의 단열온도상승 특성

	구분	최종단열온도상승량, Qmax(°C)	온도상승속도 계수 γ (°C)
제1구간	시방서	52.25	1.184
	해석	55	1.8
제2구간	시방서	51.48	1.163
	해석	52.16	0.89

※ 단위 결합재량 : 제1구간 375, 제2구간 368, 초기온도 : 30°C

3.4.4 결과 분석

1) 매트기초 제1구간의 결과 분석

Mockup 실험체와 동일한 방법으로 균열지수를 산정하였으며, 해석결과를 보면 유해한 균열을 제한하기 위하여 1m 이내의 타설깊이를 유지하여야 하는 것으로 나타났다. 실구조물의 경우 표 8에서와 같이 동일한 두께의 Mockup 실험체보다 균열발생 위험도가 높게 나타났는데 이는 Mock up 실험체에 사용된 지연제의 영향으로 최고온도가 낮아졌기 때문인 것으로 판단된다.

표 8 제1구간의 균열지수 산정결과

Thk(mm)	ΔT_i		I_{cr}	
	실측	해석	실측	해석
800	22	20	0.68	0.75
1000	-	26	-	0.58
1200	-	30	-	0.5
1400	-	33	-	0.45
1600	-	35	-	0.43

2) 매트기초 제2구간의 결과 분석

매트기초 제2구간의 양생조건별 수직온도분포에 대한 실측결과를 그림 17~그림 19에 나타내었다. 본 실험체도 Mockup 실험체와 동일한 양상을 나타내었다. 양생포+비닐의 경우 보온효과가 다른 방법보다 우수하여 온도상승량은 더 높은 것으로 나타났으나, 균열지수에 영향을 미치는 내외부 온도차는 적은 것으로 나타났다.

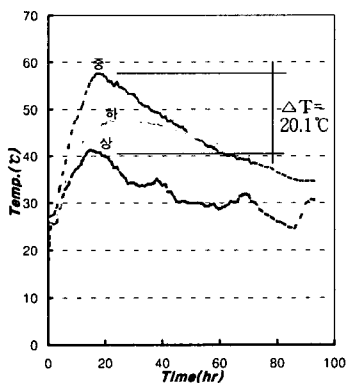


그림 17 양생포 보양

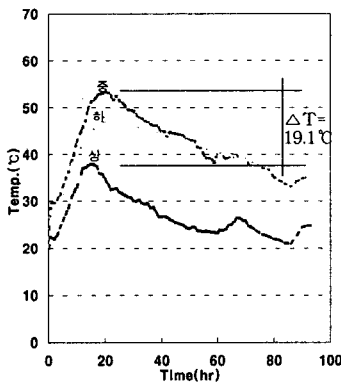


그림 18 비닐 보양

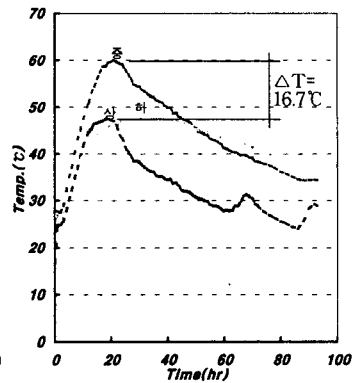


그림 19 양생포+비닐 보양

3.4.5 온도균열 저감대책

1) 매트기초 제 1구간 온도균열 저감대책

콘크리트 재료의 수화열을 제어하지 않고 현장에서 온도균열을 제어할 수 있는 방안으로 콘크리트의 내외부 온도차이가 가장 크게 발생하는 시간에서 집중적으로 표면을 보온함으로써 온도차이를 줄일 수 있을 것으로 판단되며, 실험결과에 의하여 표면보온이 요구되는 시간을 산정한 것은 표 10과 같다.

표 10 매트기초 제1구간의 균열지수별 표면보온이 요구되는 시간

슬래브 두께(m)	타설 후 보온 필요시기		
	I _{cr} =0.7	I _{cr} =1.2	I _{cr} =1.5
0.8	필요없음	8~48시간	8~50시간

2) 매트기초 제2구간 온도균열 저감대책

균열발생을 제한하기 위하여 시방서 상에서 제시하는 균열지수 1.2이상을 만족하기 위한 온도차를 초과하는 시간을 해석결과를 이용하여 표 11에 정리하였다. 표면 열전달율이 낮을수록 콘크리트 온도는 높아 지지만 상대적으로 내·외부 온도차이가 작아져 균열지수가 증가함으로써 안전율이 증가하게 된다. 따라서 표면 보온이 요구되는 시간에는 방열을 억제할 수 있도록 보온성이 좋은 재료를 이용하여 양생하여야 할 것으로 판단된다.

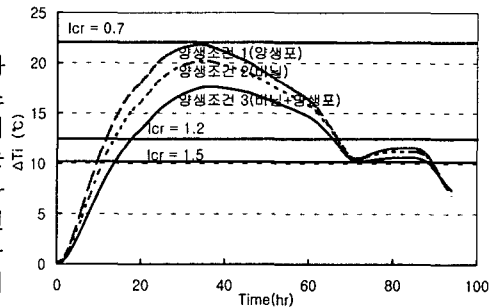


그림 17 양생조건별 내외부 온도차

표 11 매트기초 제2구간의 균열지수 평가

양생조건	T _{max} (°C)	ΔT_i	I _{cr}	보온양생요구시간(hr) (I _{cr} =1.2)
양생포	53.2	20.1	0.75	12~68
비닐	57.7	19.1	0.79	14~66
비닐+양생포	60	16.7	0.9	18~66

4. 결론

- 1) 시간에 따른 내외부 온도차이는 주로 매스콘크리트의 수화열이 최고에 도달한 시간에 외기온도가 일교차에 의하여 낮아지면서 온도차이가 심하게 나타나고 있다. 지연제를 포함하지 않은 일반 콘크리트를 사용한 매트기초의 경우 두께 0.8m 에서는 8~48 시간의 적절한 표면보온이 필요하다.
- 2) 저발열 콘크리트배합으로 한 Mockup Test의 경우 지연제를 사용하여 매트기초의 두께 1.2m까지는 유해한 균열을 제한할 수 있었으나, 지연제를 사용하지 않은 현장 매트기초의 경우 동일한 균열지수를 확보하기 위하여 1m 정도 이내로 타설하여야 하는 것으로 사료된다.
- 3) 두께 0.8m 매트기초의 내·외부 온도차이를 비닐, 양생포 및 비닐+양생포에 따라 검토한 결과 모두 매스콘크리트의 내부구속에 의한 균열을 제어하기 위한 값인 균열지수 0.7을 만족하였으며, 이 중에서 비닐+양생포를 이용한 양생조건이 가장 유리한 것으로 나타났다.
- 4) 시방서상의 단열온도상승 특성 및 표면열전달율은 실험결과보다 다소 적게 평가하고 있어 안전율이 작은 것으로 판단된다.
- 5) 타설깊이가 증가할수록 수화열에 의한 최고온도와 최고온도 도달시간은 증가하지만 증가의 폭은 줄어들음을 알 수 있었다.

참고문헌

1. 김효각 외 2인, "매스콘크리트 온도균열 제어연구 I", 대림산업 기술연구부, 1999.9.
2. 小野定 외 2인, "マスコクリートの温度ひび割れ制御技術の現状", コクリート工学, Vol.36, No.8, 1998.8.
3. Ferrando A.Branco, "Heat of Hydration Effects in Concrete Structures", ACI Materials Journal, March-April, 1992.