수화열 해석시스템을 이용한 매스콘크리트의 균열제어 방안

이 상 수
〈(주)대우건설 기술연구소 선임연구원, 공학박사〉

원 철
김 동 석
박 상 준
〈(주)대우건설 기술연구소 주임연구원〉

1. 서 론

매스콘크리트에서 발생하는 온도균열은 대개 그 폭이 크고, 구조물을 관통시켜 구조상 결함을 유발하는 등 구조물의 내력, 내구성, 수밀성 및 미관 등을 크게 손상시키게 되나, 대부분의 건축공사에서 시공되는 매스콘크리트 구조물들은 다양한 재료의 물성이나 양생조건 및 시공조건 등에 관한 엄밀한 검토 없이, 단지 단위 시멘트량에 의한 간이 수화열 해석이나 시방서에서 제시하고 있는 간단한 수치계산 과정만을 거친 후, 시공되거나 기존의 시공실적 등에 의존하고 있는 실정이다.

그러나, 매스콘크리트는 콘크리트의 배합조건, 구조물의 구속조건, 단위시멘트량, 콘크리트 타설온도, 양생방법 및 재료, 콘크리트의 물성, 구조물의 형상, 기후조건 등 각종요인에 따라 온도나 응력의 이력이 다르기 때문에 적용현장의 특성에 따른 적절한 품질관리 방안이 요구된다.

따라서, 본 고에서는 서울 여의도 소재 대우 트럼프 월드현장의 매트기초부위에 시공된 매스콘크리트를 대상으로, 당 연구소에서 개발한 수화열 해석 시스템을 이용하여 매스콘크리트의 배합조건 및 양생조건에 따른 온도균열지수 등을 검토하고, 이를 바탕으로 온도균열발생 저감을 위한 최적의 배합조건, 양생방법 및 양생기간을 제시한 결과를 정리하였다.

즉, 소요품질을 확보하기 위한 품질관리 과정으로 매스콘크리트의 실제적용에 앞서 단열

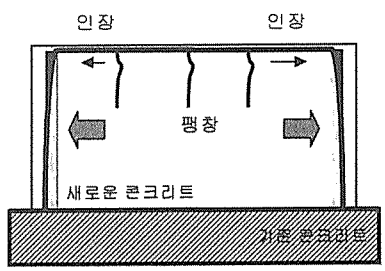
온도상승시험과 2.2m×2.2m×2.2m크기의 모의시험체 제작하고, Fly ash 치환율에 따른 온도이력을 검토한 후, 실제 구조물에 적용하는 단계로 진행된 매스콘크리트의 품질관리 방안을 제시하고자 한다.

2. 매스콘크리트의 균열발생

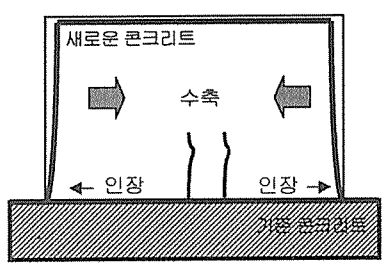
2.1 내부구속응력에 의한 균열

매스콘크리트의 온도균열 발생원인은, 내부구속에 의한 것과 외부구속에 의한 것 등으로 크게 구분할 수 있는데, 그 각각에 대해서 그 발생 원인과 균열의 특징에 대해서 간단히 정리하면 다음과 같다.

먼저, 내부구속균열은 콘크리트의 내부와 표면과의 온도가 다른 것에 의해 발생되는 것으로, [그림 1]과 같이 시멘트의 수화열에 의해 콘크리트의 내부온도는 상승하게 되지만, 표면은 외부공기와의 접촉으로 인해 낮아지게 된다. 이렇게 발생된 온도차가 매스콘크리트에 있어서 균열발생의 주요원인이 된다.



(a) 구속이 없는 경우



(b)구속이 있는 경우

[그림 1] 매스콘크리트의 균열발생기구

즉, 상대적으로 온도가 낮은 표면부분의 콘크리트가 수축하려고 하는 것을 온도가 높은 내부의 콘크리트가 구속하여 표면부에 인장응력이 작용하고, 균열이 발생하게 되는 것이다. 표면과 내부의 온도차는 콘크리트의 내부온도가 최고온도에 도달하게 되는 재령 1~5일 정도가 가장 크게 되는 경우가 대부분이며, 균열의 발생시점도 이 때이거나 거푸집의 탈형직후에 발생하게 된다. 이 때 발생되는 온도균열의 폭은 일반적으로 0.1~0.3mm정도로서 규칙성은 없고, 또한 단면을 관통하지도 않는다. 그러나, 내부구속에 의해 표면에 발생한 온도균열이 건조수축이나 외부구속에 의해 커다란 관통균열로 진전하기도 한다.

2.1 외부구속응력에 의한 균열

외부구속에 의한 균열은 타설한 콘크리트의 열변형이 지반 또는 기존에 타설한 콘크리트에 의해 구속되어 발생한다. 즉, 타설된 콘크리트는 온도가 최고치에 도달한 후, 최종적으로 외기온과 같게 될 때까지 내려간다. 이 온도강하에 의해 콘크리트의 체적은 수축하지만, 이것이 하층의 콘크리트 혹은 지반에 구속되어, 외부구속균열이 발생하게 되는 것이다. 실제의 온도균열 제어대책으로서는 이러한 외부구속균열을 어떻게 제어할 것인가가 매우 중요한 과제가 된다.

외부구속균열은 균열의 폭이 0.2㎜~0.5㎜ 혹은 그 이상이 되고, 많은 경우에는 세로로 곧장 뻗은 관통균열이 되기도 한다.

3. 공사개요

본 적용현장의 매스콘크리트 타설부위는

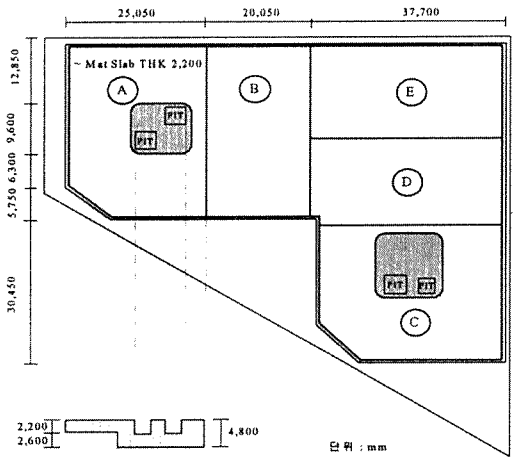
〔사진 1〕 및 〔그림 2〕에서와 같이 당사에서 서울 여의도에 지하 5층, 지상 41층으로 시공중인 Daewoo Trump World 신축공사 현장의 매트기초이다.

타설블럭의 분할은 레미콘사의 생산능력 및 적용현장의 공사여건 등을 고려하여 총 5개 블럭으로 분할하여 타설하는 것으로 계획하였으며, 금회에 타설된 매스콘크리트 타설부위는

〔표 1〕 공사개요

구 분	내 용
공 사 명	여의도 대우 Trump World 신축공사
도로현황	남측 15m 전면도로, 동측 8m도로
대지면적	5,289㎡(1,599.9평)
건물높이	132.9m
건축면적	3,158.04㎡(955.31평)
공사규모	지하 5층, 지상 41층
건축구조	철근콘크리트조 (Wide Beam+RC Core Wall+Outrigger)
매스콘크리트 적용부위	Mat Footing Slab (W25.05m×L34.5m×T2.2m)
콘크리트 규격	Gmax : 25㎜, Fc : 300kgf/㎠, Slump Flow : 50±10㎝
시 공 사	(주)대우건설

〔사진 1〕 대우 트럼프 월드



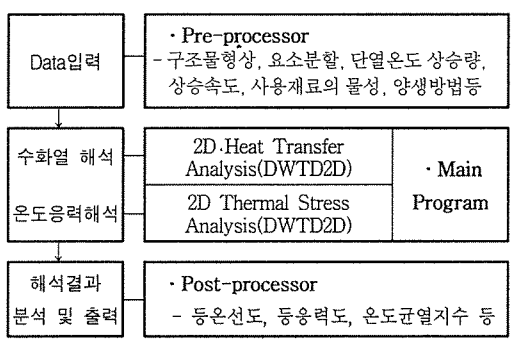
〔그림 2〕 콘크리트 타설 블럭 분할

〔그림 2〕에서의 A-Zone으로서 크기는 폭 25.05m, 길이 34.5m, 두께 2.2m이다. 금회의 콘크리트 타설량은 1,900㎥정도이며, 적용현장의 공사개요는 〔표 1〕과 같다.

4. 수화열 해석 시스템

4.1 수화열 해석 시스템의 개요

본 현장의 매스콘크리트의 수화열 해석에 사용된 프로그램은 당 연구소에서 자체개발한 것으로서 전체구성은 〔그림 3〕에서와 같이 전처리과정, 주해석과정, 후처리과정 등으로 구성되어 있다.



〔그림 3〕 수화열 해석 시스템의 개요

먼저, 전처리과정에서는 구조물의 형상, 단열온도상승량, 각 절점간격, 사용재료의 물성, 양생조건 및 콘크리트의 타설조건 등 전반적인 콘크리트의 시공조건을 입력하는 단계이며, 주해석과정은 수화열 및 응력을 해석하는 단계이다. 후처리과정은 주해석과정에서 해석된 결과를 Monitor상에서 분석하고, 출력할 수 있는 단계로서 각 재령별 등온선도, 등응력선도 및 온도균열지수 등을 예측하고, 분석할 수 있도록 구성되어 있다.

4.2 단열온도상승시험

본 적용현장에서는 실제타설에 앞서 사전에 단열온도상승시험과 모의부재시험을 실시하였는데, 먼저 Fly ash를 혼합한 콘크리트의 수화열 저감효과를 확인하기 위하여, Fly ash를 치환하지 않은 일반콘크리트(이하 OPC라 칭함)와 Fly ash를 30%(이하 FA30이라 칭함) 치환한 콘크리트를 대상으로 단열온도상승시험을 수행하였다.

일반적으로, 단열온도상승시험의 결과는 $Q(t) = K(1-e^{-\alpha t})$와 같은 e함수 형태로 표현되고 있다. 그러나, 이 식은 초기의 발열상태를 과도하게 평가하고 있어, 수화반응이 서서히 일어나는 저발열형 시멘트를 사용하거나 지연제를 첨가하는 경우에는 그 적합성에 대하여 논란이 일고 있으며, 이러한 문제점을 보완하기 위한 여러 가지 식들이 제안되고 있다.

따라서, 본 현장적용을 위한 단열온도상승시험식은 초기발열상태를 실제 구조물의 발열상태와 비교적 근사하게 평가한다고 판단되는 다음식을 사용하였다.

$$Q(t) = K(1 - e^{-at^{\beta}}) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots \text{〔식 1〕}$$

여기서, $Q(t)$: 재령 t일에서의 단열온도상승량

K : 최종단열온도상승량

α, β : 온도상승속도

4.2.1 콘크리트의 배합

단열온도상승시험에 사용한 매스콘크리트의 Slump Flow치는 콘크리트의 설계기준강도(Fc : 300kgf/㎠)를 만족하는 범위내에서 수화열 저감효과, 작업성 및 펌프 압송성 등을 고려하여 기존의 배합조건인 Slump 18㎝±2.5를 Slump Flow 50±10㎝로 수정하였다. 단열온도상승시험 및 모의부재시험에 적용된 콘크리트의 배합은 〔표 2〕와 같다.

〔표 2〕 콘크리트의 배합

구분	W/B (%)	S/a (%)	W (kg/m³)	Unit Weight(kg/m³)				
				C	FA	S	G	SP (B×%)
OPC	37.0	43.0	157	425	0	738	990	1.4
FA30				297	128	728	988	

4.2.2 사용재료

단열온도상승시험과 모의부재시험에 사용한 각종 사용재료(시멘트, 혼화재, 골재 및 고성능 AE 감수제)의 물리적 · 화학적 성질은 〔표 3〕~〔표 6〕과 같다.

시멘트는 국내 H사의 1종 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며, 혼화재로 Fly ash는 보령산을 사용하였다. 잔골재는 남양만산 세척사를 사용하였으며, 굵은골재는 용원석산의 25㎜ 쇄석을 사용하였다. 골재의 물리적 성질

〔표 3〕 시멘트의 물리적 특성

Specific gravity	Blaine (㎠/g)	Setting time (h:m)		L.O.I (%)	Sound -ness (%)	Compressive strength (kgf/㎠)		
		Initial	Final			3d	7d	28d
3.15	3200	3:50	6:10	0.7	0.05	195	293	397

〔표 4〕 Fly ash의 물리적 · 화학적 특성

Specific gravity	Blaine (㎠/g)	Ig.loss(%)	Setting time(h:m)	
			Initial	Final
2.15	3,158	3.91	6:25	9:05

Chemical Ingredient(%)					
SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3
56.4	23.7	9.0	2.5	1.3	1.1

〔표 5〕 골재의 물리적 특성

Items	Gravity	Absorp -tion (%)	F.M	Solid vol. (%)	Unit Weight (kg/m³)	Fine particle (%)
Fine. agg	2.60	0.52	2.60	64.8	1,690	0.5
Coarse. agg	2.62	0.53	6.96	58.1	1,497	0.1

〔표 6〕 고성능 AE감수제의 물리적 특성

Composition	Solid content (%)	pH	Specific gravity	Setting time diff. (min)		Compressive strength ratio(%)		
				Initial	Final	3d	7d	28d
Naphtalene	33.00 ± 5.00	8.50 ± 1.50	1.15 ± 0.05	20	30	135	126	122

은 〔표 5〕와 같다. 혼화제는 고성능 AE 감수제(표준형, S사)를 사용하였다.

4.2.3 단열온도상승시험결과

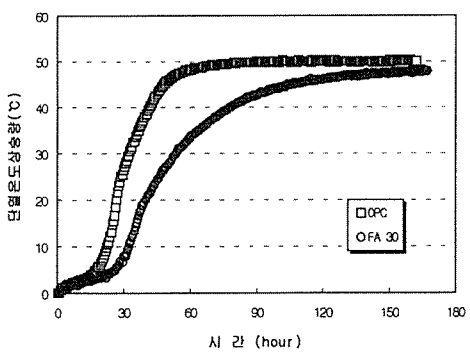
전반적으로 Fly ash 치환율이 증가함에 따라 〔그림 4〕에서와 같이 단열온도상승량(K)과 온도상승속도(α,β)는 감소하는 것으로 나타났는데, 세부적으로 OPC의 경우는 각각 K=50.2℃, α=0.38, β=2.65인 것으로 나타난 반면, FA30의 경우는 각각 K=47.1℃, α=0.13, β=2.3인 것으로 나타나, FA30의 경우가 수화열 저감효과에 유리하다는 것을 확인할 수 있었다.

한편, 최고온도로 수렴되는 시간도 OPC의 경우는 60시간 정도이나 FA30의 경우는 150시간을 전후하여 수렴되었다.

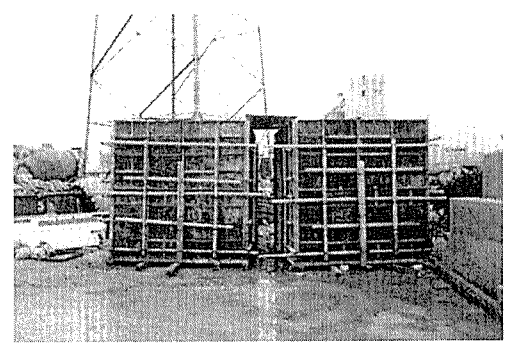
4.3 모의부재시험

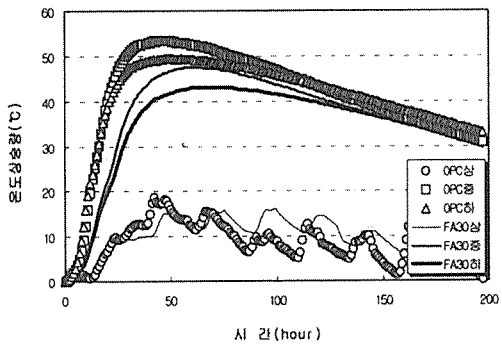
모의부재 시험체는 〔사진 2〕에서와 같이 두께 50㎜의 단열재를 거푸집 내부에 설치하여 가능한 단열온도상승시험의 조건과 유사하도록 하여 2.2m×2.2m×2.2m(가로×세로×높이)크기로 제작하였는데, 이때 시험대상 콘크리트로 OPC와 FA30을 각각 타설하였다.

콘크리트의 수화열 측정은 각 시험체를 상 · 중 · 하로 구분하여 타설 직후부터 1시간



〔그림 4〕 단열온도상승시험결과


〔사진 2〕 모의부재 시험체 사진



〔그림 5〕 모의부재의 수화발열특성

간격으로 측정하였다. 수화열에 따른 모의부재의 강도특성을 알아보기 위하여 4개 부위를 선정하여 Core시료를 채취하였는데, 이때 시료는 모의부재의 상단에서 하단까지 관통하는 형태로 하였다

4.3.1 모의부재 시험결과

〔그림 5〕는 모의부재의 수화발열특성을 나타낸 것이다. 측정결과, 앞서 실시된 단열온도상승시험의 결과보다 다소 높은 것으로 나타났다. 즉, 콘크리트의 최고상승온도는 OPC의 중앙부에서 53.4℃, FA30의 중앙부에서 47.5℃로서 Fly ash를 사용한 콘크리트의 온도가 사용하지 않은 콘크리트에 비해 대략 5.9℃정도 낮은 것으로 나타났다. 콘크리트의 최고온도상승속도(α, β)도 OPC의 경우는 각각 2.0과 2.5이고, FA30의 경우는 0.92와 2.3인 것으로서, 앞서 수행된 단열온도상승시험과는 다소 상이한 결과로 나타났다. 또한, 콘크리트 표면으로부터 10cm깊이에서 측정한 모의부재 콘크리트의 상부온도와 중앙부의 온도차에서도 OPC의 경우가 FA30에 비해 5~10℃정도 큰 것으로 나타났다.

한편, 모의부재의 시험결과와 단열온도상승시험의 결과에 있어서 단열온도상승시험의 경우가 비교적 안정한 것으로 평가되고 있기 때문에, 대규모인 실제의 구조물에 적용할 경우, 이러한 점을 충분히 고려하여야 할 것으로 판단된다.

압축강도 측정결과, 〔표 7〕에서와 같이 각 시료채취 부위에 따라 다소 차이는 있으나, 배합의 종류 및 Core 채취부위에 관계없이 재령 28일에서 설계기준강도인 300kgf/㎠를 상회하였다. 세부적으로, 콘크리트 배합조건에 따른 특성으로는 재령 28일에서 전체 압축강도

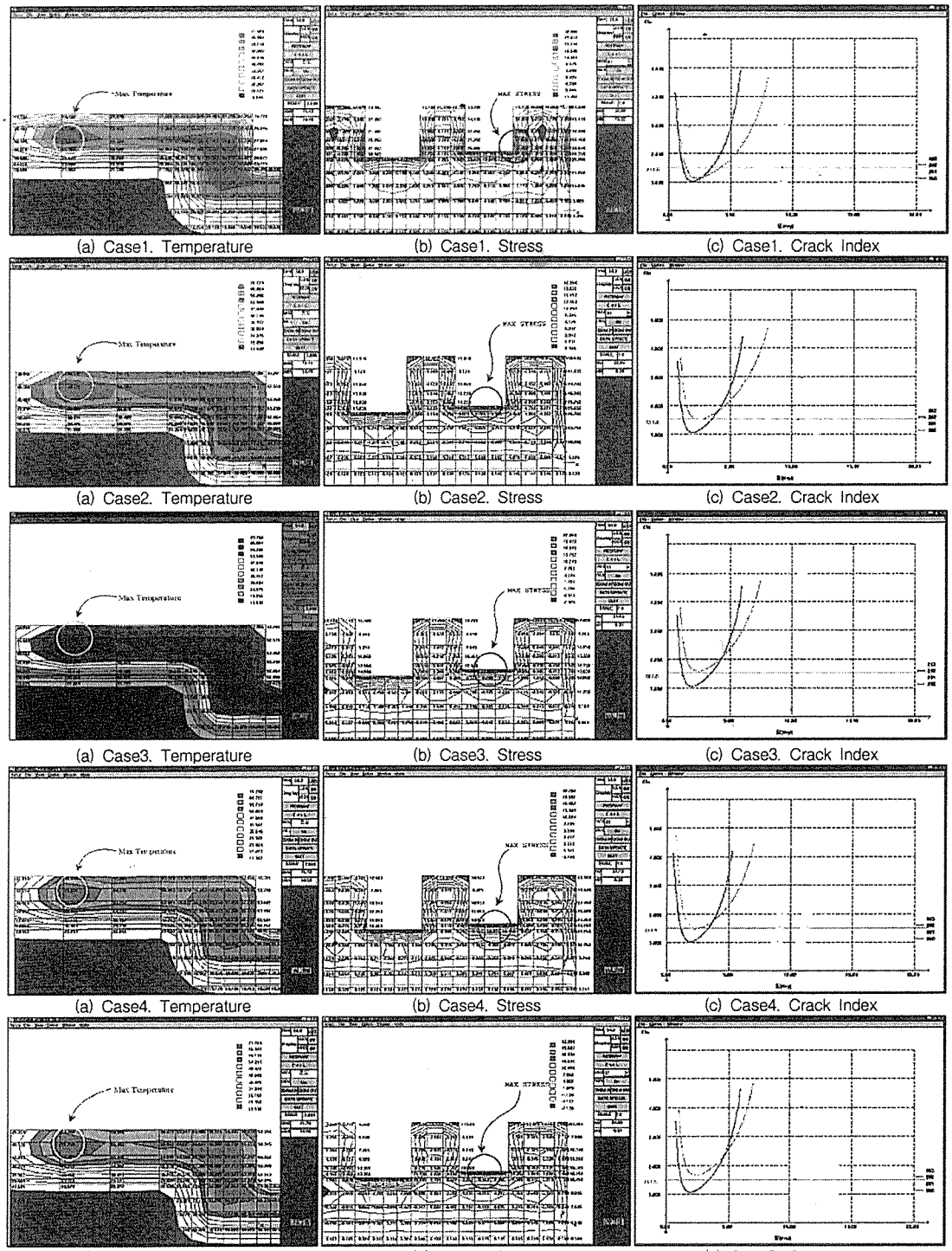
〔표 7〕 Core시료의 압축강도 시험결과

콘크리트 종류 / 수직위치	OPC (kgf/㎠)				FA30 (kgf/㎠)			
	①	②	③	④	①	②	③	④
상 단	416	388	420	408	327	378	369	310
중 단	375	404	427	380	406	390	425	380
하 단	413	392	377	375	454	428	388	448

〔표 8〕 양생방법 및 재료에 따른 열전달계수

재료종류 및 양생방법		DATA입력조건	열전달계수(kcal/m²h℃)
재료물성	OPC	배합강도:350kgf/㎠, 열전도율:2.5kcal/mh℃ 비열:0.235kcal/kg℃, Concrete 온도:20℃	
	FA30	배합강도:350kgf/㎠, 열전도율:2.3kcal/mh℃ 비열:0.225kcal/kg℃, Concrete 온도:20℃	
모의부재 시험결과	OPC	온도상승량(K):53.4℃, 상승속도(α):2.0, (β):2.5	
	FA30	온도상승량(K):47.5℃, 상승속도(α):0.92, (β):2.3	
양생조건	Case1	노출, 살수	10.0
	Case2	양생막→양생포→비닐[2]	2.5
	Case3[1]	양생막→비닐[2]→양생포→비닐[2]	1.6
	Case4[1]	비닐[2]→양생포→비닐[2]	1.6
	Case5	양생막→양생포→단열재(T=50mm)→비닐[2]	1.0

주 1) Case3은 외기온이 20℃이고, Case4는 외기온이 10℃인 경우임.
2) 비닐의 두께는 0.05mm이상



〔그림 6〕 수화열 해석 시스템을 이용한 매스콘크리트의 수화열 해석 결과(온도, 응력, 균열지수)

의 평균이 OPC의 경우 398kgf/㎠, FA30의 경우는 392kgf/㎠로서 FA30의 경우가 다소 낮은 것으로 나타났다. 그러나, 재령이 28일 이후로 경과할수록 Fly ash의 포졸란 반응에 기인하여 FA30의 압축강도가 오히려 OPC를 상회할 것으로 예상된다.

따라서, 수화특성 및 강도특성 등을 고려하여 본 현장에 적용할 콘크리트의 배합은 FA30으로 정하였다.

5. 매스콘크리트의 수화열 해석 및 타설

매스콘크리트의 실제 타설에 앞서, 모의부재 시험결과로부터 최적의 콘크리트 배합조건으로 선정된 FA30를 대상으로, 총 5Case의 양생조건에 따른 온도균열 발생여부를 검토하였는데, 그 Data 입력조건 및 양생조건은 〔표 8〕과 같다.

5.1 수화열 해석 시스템을 이용한 분석 결과

5.1.1 온도이력(Temperature)

〔그림 6〕의 (a)는 수화열 해석결과를 양생조건별로 구분하여 가상 block의 형태로 나타낸 것으로서, 전반적으로 열전달계수 값이 변화하여도 즉, 양생조건이 상이함에도 불구하고, 최고상승온도에는 큰 영향이 없는 것으로 나타났다. 그러나, 최고온도로 상승하는 절점과 그 표면부와의 온도차가 Case1의 경우는 41.98℃, Case2는 14.62℃, Case3은 10.98℃, Case4는 13.54℃, Case5는 7.46℃로서 열전달계수가 클수록 중앙부와 표면부의 온도차도 크게 되는 것으로 알 수 있었다. 한편, Case3의 경우 열전달계수가 동일한 Case4에 비하여 중앙부와 표면부의 온도차가 적은 것으로 나타났는데, 이는 Data 입력조건에서 양생막을 적용한 경우와 적용하지 않은 경우에 따라 외기온의 조건이 20℃와 10℃로 상이하기 때문에 나타난 결과로 분석된다. 최고온도 도달시간은 열전달계수가 적을수록 미소하나마 지연되는 것으로 해석되었다.

5.1.2 온도응력(Stress)

〔그림 6〕의 (b)는 (a)와 동일한 요령으로 응력분포를 나타낸 것이다. 즉, 온도응력이 가장 크게 되는 양생조건은 Case1(32.4kgf/㎠)의 경우이고, 그 이외의 양생조건은 온도응력이 22.7kgf/㎠~22.9kgf/㎠ 범위로서 큰 차이는 없는 것으로 나타났다.

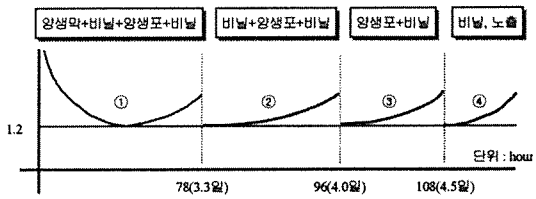
한편, 매스콘크리트의 경우 시멘트 수화에 따른 발열특성으로 인하여 최고온도가 가장 높게 되는 부위에 응력이 집중되어 그 부위가 가장 취약하게 된다는 일반적 이론과는 달리 본 해석결과에서는 최고온도에 도달하는 절점과 최고응력을 나타내는 절점의 위치가 상이한 것으로 나타났다.

5.1.3 온도균열지수(Crack Index)

〔그림 6〕의 (c)는 본 구조물의 응력이 가장 크게 되는 절점의 온도균열지수를 나타낸 것이다. 해석결과, 양생방법에 따른 구분 없이 가장 취약한 절점의 온도균열지수가 1.0정도까지 낮아지는 것으로 나타났다. 그러나, 가장 취약한 절점 이외의 다른 절점을 비교해 볼 때, 그 중에서도 Case3의 양생방법이 비교적 균열발생 확률이 적고, 시공성도 우수한 것으로 판단되어 본 현장의 양생방법으로 정하였다.

5.1.4 양생기간의 산정

매스콘크리트의 온도균열을 저감하기 위해서는 콘크리트의 배합조건 뿐 만아니라 양생방법 및 기간도 매우 중요하기 때문에, 선정된 양생조건에 따른 적정양생기간의 산정이 요구



〔그림 7〕 각 양생단계별 양생기간 산정결과

되었다. 따라서, 본 적용현장에서는 각각의 양생단계(양생재료)에서 가장 취약한 절점의 온도균열지수가 1.2를 상회하는 기간을 산정한 후, 다음 양생단계를 진행하는 방법으로, 양생단계별 적정 양생기간 및 총 양생기간(4.5일)을 제시하였다. 그 결과는 〔그림 7〕의 모식도와 같다.

5.2 매스콘크리트의 타설

〔사진 3〕은 지하 5층에 위치한 매트기초에 매스콘크리트를 타설하는 모습을 나타낸 것이다.

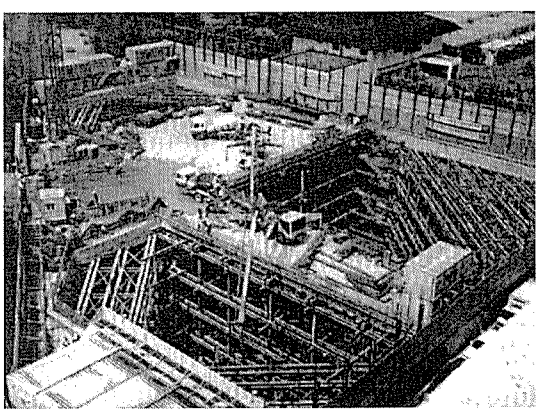
〔그림 8〕은 배합선정에서부터 수화열 해석 단계까지의 결과를 바탕으로 실제 타설된 매스콘크리트의 수화발열 특성을 동일절점에 대하여 수화열 해석 시스템을 이용하여 분석한 결과와 비교하여 나타낸 것이다. 즉, 실제 구조물에서 측정한 수화열 최고상승온도와 수화열 해석 시스템으로 분석한 최고상승온도는 각각 66.7℃와 67.7℃로서, 약 1.0℃정도의 근소한 차이가 있는 것으로 나타났으며, 제시된 양생기간 이후, 육안관찰에 의한 결과에서도 온도균열은 발견되지 않았다.

한편, 본 수화열 해석 시스템의 신뢰성을 다시 한번 확인할 수 있는 계기가 되었으며, 우수한 품질의 매스콘크리트 구조물을 제조할 수 있었다.

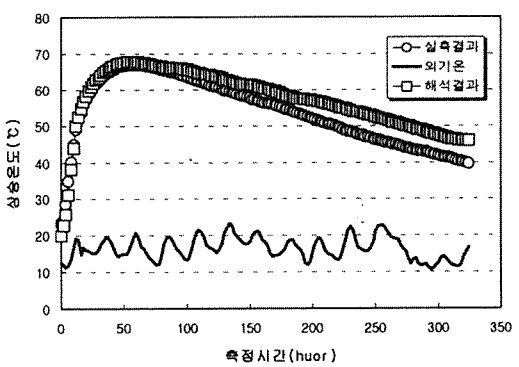
6. 결 론

매스콘크리트 구조물에서의 온도이력에 관한 연구는 이미 오래 전부터 많은 관심을 가지고 수행되어 왔지만, 매스콘크리트의 온도이력에 영향을 미치는 요인이 무수히 많고, 또한 모든 요소에 대한 고려가 사실상 곤란하기 때문에 현재까지도 매스콘크리트의 수화열에 의한 온도균열 발생여부를 정확히 평가하기 어려운 실정이다.

그러나, 본 현장에서는 지금까지 제안되어진 매스콘크리트의 균열저감 대책방안을 바탕으로, 배합선정 단계에서부터 현장적용에 이르기까지의 전과정에 걸쳐 단계적이고, 체계적으로 수행된 매스콘크리트의 시공 · 품질관리를 수행함으로서 우수한 품질의 콘크리트 구조물



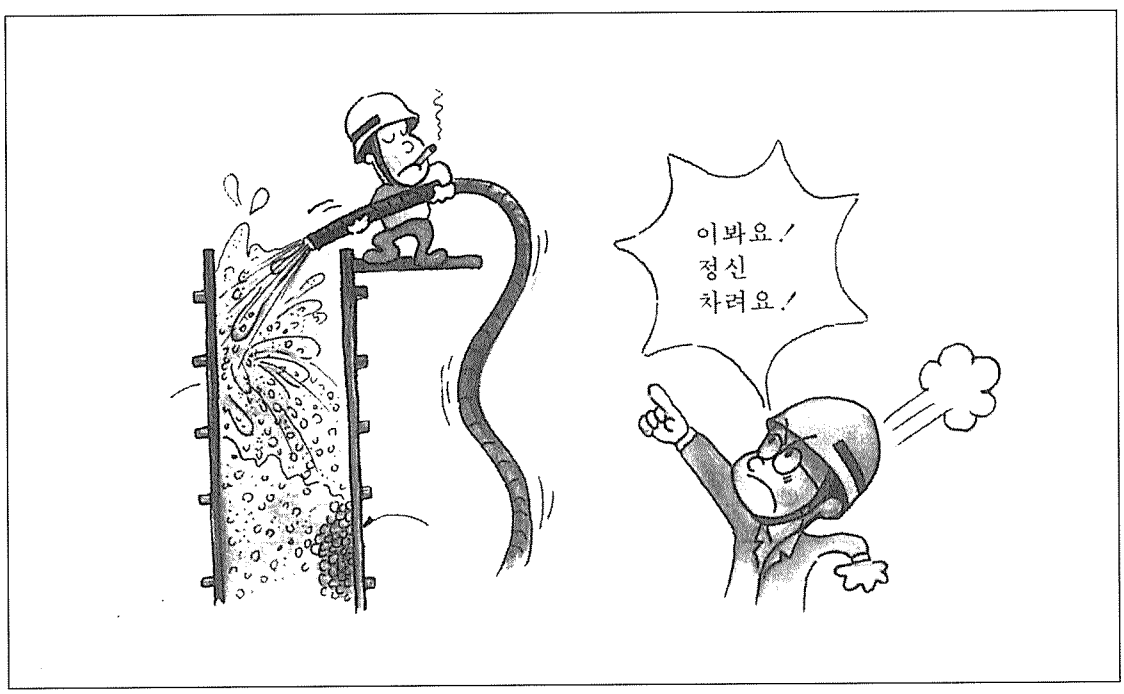
〔사진 3〕 매스콘크리트 타설 전경



〔그림 8〕 해석 수화열과 실측 수화열의 비교검토

을 제조할 수 있었다. 따라서, 본 고에서는 매스콘크리트의 품질관리 방안으로 본 적용사례에 대하여 간략하게 나마 소개하였다.

끝으로, 본 공사진행을 위해 도움을 주신 (주)대우건설 Trump World현장, 한일레미콘(주) 영등포 공장 및 성보넥스코(주)에 깊이 감사한다.

參考文獻

1) 한국콘크리트학회, 콘크리트표준시방서, 1999
2) 대우건설기술연구소, 매스콘크리트의 온도균열 예측 및 시공제어 시스템 연구, 1995.12
3) 이상수 외 5인, 수화열 해석 시스템을 이용한 매스콘크리트의 품질관리, 제5회 한 · 일건축재료시공 Joint Symposium 논문집, 2000.8, pp.73~78.
4) 日本土木學會, コンクリート標準示方書 施工篇, 1986.9, p.119.
5) 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發生メカニズムに關するコロキウム論文集, 1982.
6) 高爐スラグ微分末を用いたコンクリートの技術現狀, 日本建築學會, 1992.
7) ACI Committee 207, "Mass concrete for dams and other massive structures", Journal. of ACI, No.4, Vol.67, 1970.4.
8) Carlson, R.W. and Johonson, R., "Curing of mass concrete", Journal. of ACI, No.9, Vol.48, 1952.