

매스콘크리트의 배합설계 및 온도균열제어에 관한 연구

A Study on the Mix Design and the Control of Thermal Crack of Mass Concrete

이 상 수* 원 철** 박 상 준** 김 동 석**
Lee Sang Soo, Won Cheol, Park Sang Joon, Kim Dong Seok

ABSTRACT

This study was performed to control the thermal crack of the mat footing slab in the multi-purposed buildings. In this study, we executed the mixing design of concrete to satisfy the workability and the quality according to the site conditions. And, we evaluated quantitatively about the possibility of thermal crack by using hydration heat analysis system. Finally, we proposed the optimal mixing conditions, curing methods and curing period which all factors are considered.

As a results, the optimal mixing conditions were ; W/B 41%, unit binder 375kg/m³, FA replacement ratio 20%. Lowest thermal stress was 22.0kgf/cm² and at that time thermal crack index was over 1.5, when the coefficient of thermal conductivity was lowest among the curing conditions. And, the total curing time was estimated at 6.7 days according to curing steps.

1. 서론

매스콘크리트 시공시 가장 주안점이 되는 것은 온도균열에 대한 문제로서 온도균열은 대개 그 폭이 크고, 구조물을 관통시키므로써 구조물의 내력, 내구성, 수밀성 및 미관 등을 크게 손상시킨다. 더욱이 구조물이 대형화, 특수화, 고강도화 됨에 따라서 이에 대한 관심이 점점 더 크게 부각되고 있다.

이에 대한 대처방안의 일환으로서, 구조물내의 수화열을 예측하는 해석기술과 더불어 시멘트의 대체재로서 다양한 포졸란 재료를 치환하여 수화발열량을 낮추는 매스콘크리트 제조기술 등 여러측면에서 수화열에 의한 온도균열을 저감하기 위한 기술개발이 이루어지고 있다.

본 연구에서는 대형 주거복합 건물의 기초매트를 대상으로 물결합재비, 단위결합재량, 플라이애쉬 치환율에 따른 배합설계를 실시한 후, 최적배합을 대상으로 수화열 해석 시스템을 이용하여 매스콘크리트 타설 후의 양생조건에 따른 온도균열지수 등을 검토하고, 온도균열 발생 가능성에 대하여 정량적으로 평가하였다. 이를 바탕으로 온도균열 저감을 위한 매스콘크리트의 품질관리 방안으로서 최적의 배합조건, 양생방법 및 양생기간을 제시하였다.

* 정회원, (주)대우건설 기술연구소 선임연구원, 공학박사

** 정회원, (주)대우건설 기술연구소 주임연구원

2. 대상구조물 및 배합

2.1. 공사개요

본 연구의 대상구조물은 당사에서 서울 여의도에 시공중인 여의도 주거복합Ⅱ 신축공사 현장의 두께가 2.2m인 매트기초로서, 콘크리트 수화열에 의한 온도균열의 발생이 예상되어, 이에 대한 품질확보 방안이 요구되고 있다. 타설블럭은 그림 1에 나타난 것처럼, 2개 블럭으로 분할하여 타설하는 것으로 계획하였다. 본 적용현장의 공사개요는 표 1과 같다.

표 1 공사개요

구분	내용
공사명	여의도 주거복합Ⅱ 신축공사
건축면적	2,196.05㎡(664.31평)
대지면적	4,602.00㎡(1,392.1평)
건물높이	127.95m
구조형식	철근콘크리트조
공사규모	지하6층, 지상34층
매스콘크리트 적용부위	Mat Footing Slab
매스콘크리트 규격	25-300-15
시공사	대우건설

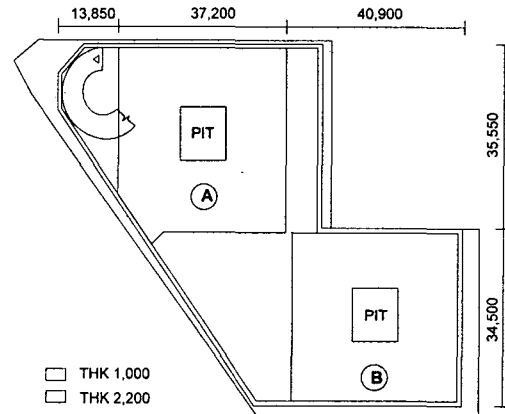


그림 1 콘크리트 타설블럭 분할

2.2. 콘크리트의 배합

현장조건에 맞는 시공성과 소요품질수준을 만족하는 최적배합을 선정하기 위하여 배합실험을 실시하였다. 배합은 적절한 강도발현성상을 가지면서 수화열을 저감할 수 있는 수준에서 단위시멘트량 및 단위수량을 최소화시키고, 포졸란재로서 플라이애쉬(이하, FA)를 사용하였다.

배합실험에 사용된 시멘트는 국내 H사의 1종 보통 포틀랜드시멘트, 혼화제는 보령산 FA를 사용하였다. 잔골재는 남양만산 세척사, 굵은골재는 용원석산의 25mm 쇄석, 혼화제는 S사의 고성능 AE 감수제 표준형을 각각 사용하였다. 배합변수는 물결합재비(이하, W/B), 단위결합재량, FA치환율로 선정하였고, 콘크리트의 요구성능은 슬럼프 15 ± 2.5 cm, 공기량 4.5 ± 1.5 %, 배합강도는 증가계수 1.2를 적용하여 360 kgf/cm^2 로 정하였다. 최적배합을 선정하기 위한 실험배합표는 표 2와 같다.

표 2 콘크리트 실험배합표

FA (%)	W/B (%)	S/a (%)	단위중량 (kg/m ³)					W/B (%)	S/a (%)	단위중량 (kg/m ³)					W/B (%)	S/a (%)	단위중량 (kg/m ³)				
			W	C	FA	S	G			W	C	FA	S	G			W	C	FA	S	G
0	39.0	41.0	156	400	-	724	1070	41.0	41.0	164	400	-	715	1058	43.0	41.0	172	400	-	707	1045
			146	375	-	743	1098			154	375	-	734	1086			161	375	-	727	1075
			137	350	-	761	1124			144	350	-	753	1114			151	350	-	746	1103
156			360	40	718	1062	164			360	40	710	1049	172			360	40	701	1037	
10			146	338	37	737	1090			154	338	37	729	1078			161	338	37	722	1067
			137	315	35	756	1117			144	315	35	748	1106			151	315	35	741	1095
			156	320	80	712	1053			164	320	80	704	1041			172	320	80	695	1028
20			146	300	75	732	1082			154	300	75	724	1070			161	300	75	716	1059
			137	280	70	751	1109			144	280	70	743	1099			151	280	70	736	1088
			156	280	120	707	1044			164	280	120	698	1032			172	280	120	690	1020
30			146	263	112	727	1074			154	263	112	718	1062			161	263	112	711	1051
			137	245	105	745	1102			144	245	105	738	1091			151	245	105	731	1080

배합실험결과는 표 3과 같이, 굳지 않은 상태의 성능은 대부분 요구성능을 만족하고 있었다. 실험 중의 육안관찰 결과, 콘크리트 성상은 단위결합재량이 375kg/m³이상인 경우에서 양호한 성상을 보이나, 단위시멘트량이 많을수록 수화열 측면에서 불리하므로, 단위결합재량 375kg/m³가 적정한 것으로 판되었다. 또한, 강도측면에 있어서, W/B 43%의 경우는 관리재령인 28일의 배합강도를 만족시키지 못하는 경우가 많았으나, 이와는 반대로 W/B 39%의 경우는 모두 배합강도인 360kgf/cm²를 크게 상회하고 있어 다소 과다한 배합설계로 분석됨에 따라, 본 연구범위에서는 W/B 41%의 경우가 가장 적합한 것으로 평가되었다.

FA치환율별로는 FA치환율이 증가할수록 강도는 낮아지는 것으로 나타나고 있으며, 이러한 결과는 FA가 포졸란재로서 자체수경성이 없기 때문에, 재령 28일까지에서는 강도발현에 대한 기여도가 적기 때문이라고 판단된다. 따라서, FA치환율이 증대할수록 수화열에 의한 온도균열의 발생억제에 유리할 것으로 예상되지만, 당 현장의 관리재령 28일의 배합강도를 만족하는 수준으로서 FA치환율은 20%로 선정하였다.

표 3 실내배합실험 결과

FA (%)	B (kg/m ³)	(1) W/B 39.0%						(2) W/B 41.0%						(3) W/B 43.0%					
		슬럼프 (cm)	공기량 (%)	압축강도(kgf/m ²)			슬럼프 (cm)	공기량 (%)	압축강도(kgf/m ²)			슬럼프 (cm)	공기량 (%)	압축강도(kgf/m ²)					
				3일	7일	28일			3일	7일	28일			3일	7일	28일			
0	400	15.0	3.8	221	416	480	15.0	4.5	188	368	433	16.0	4.7	166	337	409			
	375	15.0	3.8	322	401	455	16.0	4.4	273	359	405	15.0	5.4	241	348	392			
	350	14.5	3.5	251	363	431	15.5	4.6	224	348	390	16.0	4.6	212	318	364			
10	400	15.0	4.6	221	348	465	15.5	5.9	196	297	420	16.5	6.0	186	281	379			
	375	14.5	4.4	237	306	436	15.0	5.0	188	298	416	16.5	5.5	158	268	379			
	350	16.0	4.6	236	312	458	16.0	4.0	185	297	403	15.5	5.6	159	247	374			
20	400	16.0	4.4	223	361	384	16.5	5.2	208	317	338	17.5	5.3	203	224	290			
	375	16.0	4.5	194	320	384	15.5	4.8	186	302	372	17.5	6.3	144	255	327			
	350	17.0	3.2	208	299	457	14.5	3.4	187	273	426	14.5	3.3	174	265	409			
30	400	15.5	3.9	155	228	358	16.0	3.9	127	198	358	16.0	4.5	110	217	339			
	375	15.5	3.1	163	275	425	14.5	3.6	140	247	373	16.0	4.4	125	219	342			
	350	16.0	4.0	159	248	389	15.5	4.1	147	204	333	16.5	4.6	132	204	299			

2.3. 단열온도상승실험

콘크리트의 수화열 저감정도를 확인하기 위하여, 배합실험결과에서 적절한 작업성 및 재령 28일의 배합강도를 만족하는 것으로 판단된 FA를 20% 치환한 배합(이하, FA20)과 FA를 치환하지 않은 일반콘크리트(이하, OPC)를 대상으로 단열온도상승 실험을 실시하였다. 실험에 적용된 콘크리트 배합은 표 4, 실험결과는 그림 2와 같다.

표 4 단열온도상승실험 배합표

구분	W/B (%)	S/a (%)	단위중량(kg/m ³)					SP (%)	AE (%)
			W	C	FA	S	G		
OPC	41.0	41.0	154	375	-	734	1086	0.85	0.015
FA20	41.0	41.0	154	300	75	724	1070	0.6	0.04

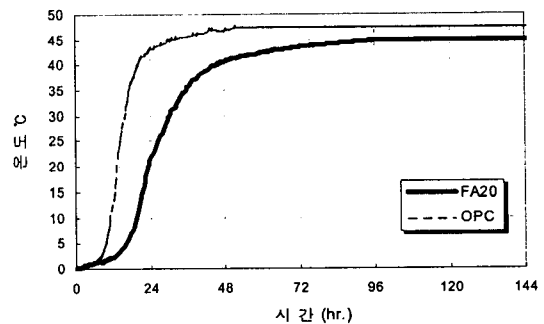


그림 2 단열온도상승 실험결과

일반적으로, 단열온도상승실험의 결과는 $Q(t) = K(1 - e^{-at})$ 와 같은 e함수 형태로 표현되고 있다. 그

러나, 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 연구에서는 단열온도상승시험식으로 초기발열상태를 실제 구조물의 발열상태와 비교적 근사하게 평가한다고 판단되는 $Q(t) = K(1 - e^{-\alpha t})$ 식을 사용하였다. 여기서, $Q(t)$:재령 t 일에서의 단열온도상승량, K :최종단열온도상승량, α, β :온도상승속도를 나타낸다.

단열온도상승 실험결과, 그림 2와 같이 OPC의 경우는 $K=47.58^\circ\text{C}$, $\alpha=1.6$, $\beta=3.7$ 로 나타난 반면, FA20의 경우는 $K=45.02^\circ\text{C}$, $\alpha=0.5$, $\beta=3.8$ 인 것으로 나타나, FA20의 경우가 수화열 저감에 유리한 것으로 나타났다. 이러한 결과는 FA를 치환함에 따라 단위시멘트량이 비례적으로 감소한 것과 FA의 포졸란 반응에 따른 수화발열 지연효과 등이 복합적으로 작용한 것으로 분석된다. 한편, 최고온도로 수렴하는 시간은 OPC의 경우는 60시간 정도이나, FA20의 경우는 100시간 정도로 나타났다.

3. 수화열 해석 및 온도응력평가

매스콘크리트의 실제 타설에 앞서, 배합실험 및 단열온도상승실험을 통하여 최적배합으로 선정된 FA20을 대상으로, 총 4Case의 양생조건에 따른 온도균열 발생여부를 검토하였다. 수화열 해석은 당 연구소에서 자체개발한 수화열 해석프로그램을 사용하였고, 온도해석시 입력된 재료물성 및 양생조건은 표 5와 같다.

표 5 Data 입력조건

구분	입력 Data
재료물성	· 비열 : $0.23\text{kcal/kg}^\circ\text{C}$, · 열전도율 : $2.2\text{kcal/m}^\circ\text{h}^\circ\text{C}$, · 설계기준강도 : 300kgf/cm^2 · 선팽창계수 : $10 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$, · 콘크리트 온도 : 20°C , · 최대단면두께 : $2,200\text{mm}$
양생조건	① Case 1 : 노출, 살수 ⇒ 열전달계수 : $10.0\text{kcal/m}^\circ\text{h}^\circ\text{C}$ ② Case 2 : 염화비닐 ¹⁾ ⇒ 열전달계수 : $6.5\text{kcal/m}^\circ\text{h}^\circ\text{C}$ ③ Case 3 : 염화비닐 ¹⁾ + 양생포 ⇒ 열전달계수 : $3.5\text{kcal/m}^\circ\text{h}^\circ\text{C}$ ④ Case 4 : 염화비닐 ¹⁾ + 발포폴리스티렌 + 양생포 ⇒ 열전달계수 : $1.6\text{kcal/m}^\circ\text{h}^\circ\text{C}$

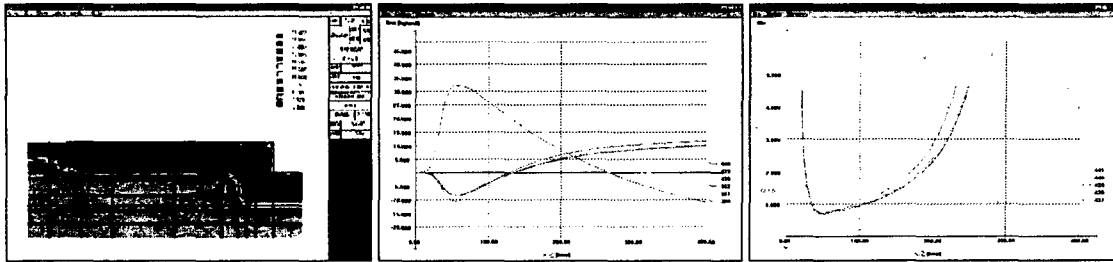
주 1) 비닐두께는 0.05mm이상

3.1. 온도 해석결과

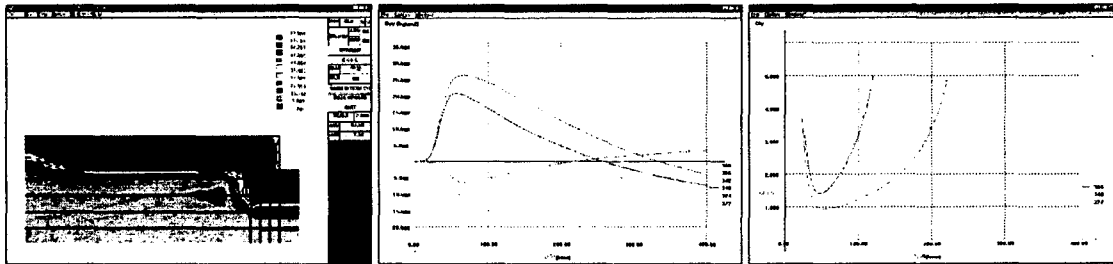
그림 3의 (a)는 양생조건별로 온도 해석결과를 가상블럭의 형태로 나타낸 것으로 전반적으로 열전달계수 값이 변화하여도 즉, 양생조건이 상이함에도 최고상승온도에는 큰 영향이 없는 것으로 나타났다. 그러나, 최고온도로 상승하는 절점과 그 표면부와의 온도차가 Case 1의 경우는 29.85°C 로서 가장 높은 값을 나타내고 있으나, Case 4는 26.19°C 로서 열전달계수가 클수록 중앙부와 표면부의 온도차가 약간 더 커지는 것을 알 수 있었다.

3.2 온도응력 해석결과

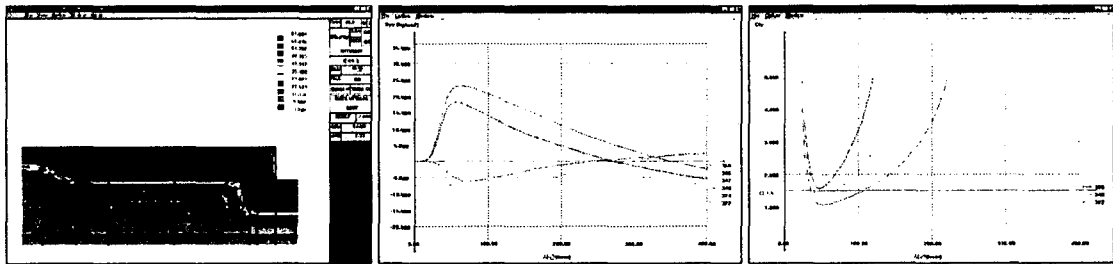
그림 3의 (b)는 양생조건에 따라 최대응력이 나타나는 절점의 온도응력 분포를 나타낸 것이다. 온도응력은 Case 1의 경우에 32.1kgf/cm^2 로 가장 크게 되는 양생조건으로 나타나고 있었으며, Case 2는 27.05kgf/cm^2 , Case 3는 23.75kgf/cm^2 , Case 4는 22.0kgf/cm^2 로 나타나고 있어, Case 4의 경우가 가장 유리한 것으로 나타났다. 그러나, 최대응력 도달시간은 각각 56시간, 68시간, 64시간 및 60시간으로 나타나고 있어, 양생조건과 최대응력 도달시간과는 상관관계를 갖지는 않는 것으로 분석되었다.



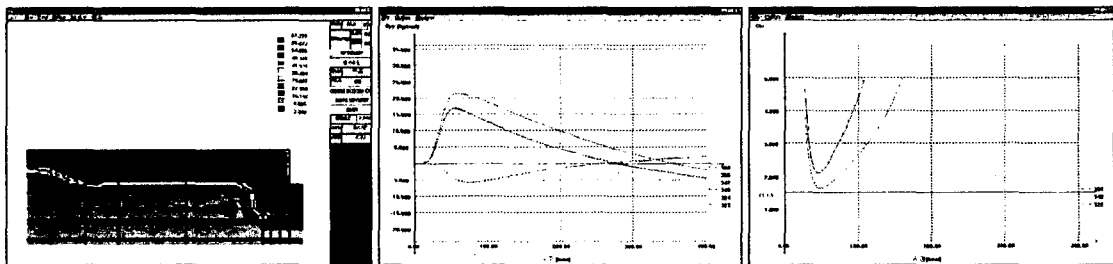
Case 1.



Case 2.



Case 3.



Case 4.

(a) 온도 해석결과

(b) 온도용력 해석결과

(c) 온도균열지수

그림 3 수화열 해석시스템에 의한 수화열 해석결과

3.3 온도균열지수

그림 3의 (c)는 온도용력이 가장 크게 되는 절점의 온도균열지수를 나타낸 것이다. Case 4를 제외한 양생조건에서는 모두 온도균열지수가 1.5이하로 나타나고 있었으며, 특히 Case 1, 2의 경우에는 1.0이하를 나타내고 있어 균열에 취약한 것으로 분석되었다. 따라서, 온도균열지수 1.5를 상회하고 있으므로 균열제어에 가장 유리한 것으로 판단되는 Case 4의 경우를 당 현장의 양생방법으로 정하였다.

3.4 양생기간의 산정

온도균열의 저감을 위해서는 매스콘크리트 시공 시 적정배합이 적용되고, 초기양생이 적절하게 이루어졌더라도 온도균열지수가 안정하게 되기까지는 양생방법과 양생기간도 매우 중요하게 되므로, 매스콘크리트 타설 후 재령에 따른 적정한 양생방법과 양생기간의 산정이 요구된다. 따라서, 본 적용현장에서는 각각의 양생단계에서 가장 취약한 절점의 온도균열지수가 1.5를 상회하는 기간을 산정한 후, 다음 양생단계로 진행하는 방법으로 양생단계별 적정양생기간을 산정하였다. 그 결과, 총 양생시간은 6.7일로 산정되었으며, 모식도는 그림 4와 같다.

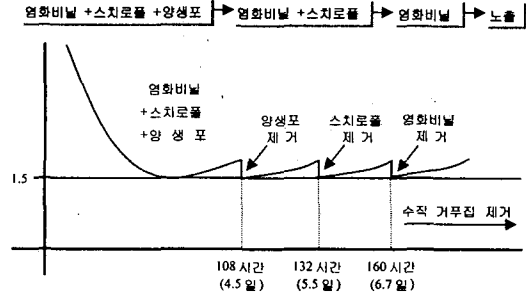


그림 4 각 양생단계별 양생기간 산정결과

4. 결론

본 연구에서는 대형 주거복합 건물의 기초매트를 대상으로 배합시험을 수행하고, 수화열 해석 시스템을 이용하여 온도균열 발생 가능성에 대하여 정량적으로 평가함으로써 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 배합시험을 수행한 결과, 적용현장의 시공성과 강도 및 수화열의 관계를 고려한 매스콘크리트의 최적배합은 W/B 41%, 단위결합재량 375kg/m³, FA치환율 20%인 것으로 나타났다.

(2) 양생조건에 따른 온도응력은 Case 1의 경우에 32.1kgf/cm²로 가장 크고, 열전달계수가 가장 작은 Case 4는 22.0kgf/cm²로 나타났으며, 온도균열지수도 Case 4를 제외한 양생조건에서는 모두 1.5이하로 나타나고 있어, 표면부와 외기의 열전달계수가 작을수록 균열제어에 유리한 것으로 분석되었다.

(3) 매스콘크리트 타설 후 재령에 따른 각각의 양생단계에서 가장 취약한 절점의 온도균열지수가 1.5를 상회하도록 적정한 양생기간을 산정한 결과, 총 양생시간은 6.7일로 산정되었다.

참고문헌

1. 한국콘크리트학회, "콘크리트표준시방서", 1999.
2. ㈜대우건설, "매스콘크리트의 온도균열 예측 및 시공제어 시스템 연구", ㈜대우건설기술연구소 기술지도서, 1995. 12.
3. 이상수와 5인, "수화열 해석시스템을 이용한 매스콘크리트의 품질관리, 제5회 한·일건축재료시공 Joint Symposium 논문집, 2000. 8. pp.73~78.
4. 日本土木學會, "마스콘크리트技術現狀動向(콘크리트技術シリーズ)", Concrete Engineering Series 8, 1989.
5. ACI Committee 207, "Mass Concrete for dams and other massive structure", Journal. of ACI, No.4, Vol.67, 1970. 4.