

응결시간제어용 배합과 수평분할을 고려한 고강도 매스콘크리트의 적용성 평가

조승호¹, 백인관¹, 이동하², 노영숙^{3*}

Applicability of High-strength Mass Concrete through Setting Time and Horizontally-divided Placement

Seung-Ho Cho¹, In-Kwan Paik¹, Dong-Ha Lee², Young-Sook Roh^{3*}

Abstract: In the current study, retarding type and standard type admixture design of concrete have been proposed to control the generation of hydration heat for foundation members that use high strengths concrete. Finite element analysis also has been conducted to understand the rational placing heights of concrete. In addition, real-size structures have experimented and their results were compared to the analytical results to evaluate the reducing effect of thermal stress. For a large 6.5 m×6.5 m×3.5 m member with retarding and standard type horizontal partition placement of concrete showed the manageable possibility of temperature difference within 25-degree Celcius between the middle and surface portion while the maximum temperature was 77-degree Celcius. Also, temperature cracking index from the finite element analysis appeared to be 1.49 that predicts no formation of cracking due to the effects of temperature. Finally, it appeared that horizontal partition placement of retarding and standard type concrete has the significant effect of reducing the thermal stress that generated by the hydration heat in the high strengths mass concrete.

Keywords: Mass concrete, High strength concrete, Retarding admixture, Temperature history, Temperature crack index

1. 서 론

건축물이 초고층화, 대형화되면서 안전성, 경제성, 내구성이 높은 철근콘크리트 구조로 시공되는 사례가 증가하고 있다. 초고층 또는 대형 건축물은 구조설계에서 지반조건과 하중조건을 고려하여 매트기초 두께가 증가하고 콘크리트의 압축강도가 고강도화로 변화되고 있어 이를 위한 콘크리트의 배합설계 및 시공기술이 요구되고 있다.

수화열이 높은 고강도 콘크리트와 매스 부재의 복합적용은 시공시에 높은 수화열에 의한 온도균열 발생 문제가 기존의 경우보다 더욱 심각한 문제로 대두되고 있다.

이와 같은 매스콘크리트의 온도균열을 제어하기 위한 방법으로는 주로 저발열 시멘트의 사용, 혼화재의 치환, 프리쿨링 방법, 파이프 쿨링 방법 및 수평분할 타설 등이 활용되고 있으나 비교적 고가이고, 공기가 지연되는 등의 단점이 있다. 따라

서 수화열 해석에 의한 정량적 평가를 실시하여 온도균열 발생에 해결방안 연구가 활발히 진행되고 있으며, 매스콘크리트 구조물에서 발생하는 수화열을 효율적으로 감소시키고 공기지연 없이 저렴한 비용으로 가능토록 하기 위해 지연제를 사용하여 콘크리트 응결시간차에 따라 매스콘크리트 부재의 내·외부 온도차를 감소시킴으로서 온도응력을 최소화하는 방법의 도입이 매우 효과적인 것으로 판단된다(Jeon et al., 2005; Han et al., 2010; Lee et al., 2000; Han, 2006).

본 연구에서는 대형 건축물에 적용할 수 있는 고강도 콘크리트를 사용한 매트기초에서 최적의 시공품질을 확보하기 위하여 지연제 혼입과 플라이애쉬를 첨가한 고강도 콘크리트의 배합설계를 가지고, 단위 부재의 중심온도와 표면온도의 차이 즉, $\Delta T^{\circ}\text{C}$ 의 최소화를 위한 지연형 및 표준형 콘크리트의 수평분할 타설 방법을 실험실실험을 통해 확인하고자 하였다.

2. 고강도 콘크리트 물성 실험

2.1 실험인자 및 실험방법

본 실험에서는 결합재량, 플라이애쉬 치환율, 지연형 혼화제의 첨가율에 따른 고강도 콘크리트의 역학적 특성을 확인

¹정회원, 단국대학교 부설 리모델링연구소 연구교수, 공학박사

²정회원, 신동아건설(주) 건축사업본부 건축팀 과장, 공학박사

³정회원, 서울과학기술대학교 건축학부 건축공학과 교수, 공학박사, 교신저자

*Corresponding author: rohys@seoultech.ac.kr

School of Architecture, Seoul National University of Science and Technology, 232, Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul 01811, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2017년 4월 1일까지 학회로 보내주시면 2017년 5월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

하고자 Table 1과 같이 실험 인자 및 평가 항목을 수립하였다. 콘크리트의 목표강도는 40 MPa, 슬럼프 플로는 다량의 콘크리트를 연속타설할 때 시공성 확보를 위해 600 mm로 설정하였다. 수화발열량에 가장 큰 영향을 미치는 결합재량은 국내 레미콘사의 배합강도 40 MPa 시방배합표에 근거하여 385, 400, 415 kg/m³의 3수준으로 계획하였다. 응결속도 지연 및 수화열 제어를 위해 지연형 혼화제는 0, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2%의 5수준, 혼화제는 플라이애쉬(Fly-Ash 이하, FA)를 0, 10, 25%의 3수준으로 하였다.

본 실험에서는 목표강도 40 MPa 고강도 콘크리트의 대상으로 지연형 콘크리트를 하부에 타설하고 상부에는 표준형 콘크리트를 타설하여 수화열이 응축되는 현상을 억제하기 위한 것이다. 따라서 중심부의 수화열이 최고온도에 도달하기 전에 표면부의 최대온도가 빠르게 상승되어 중심부와 표면부

Table 1 Experiment factor and assessment

Experiment plan		Level	Experiment level
Experiment factor	Binder(kg/m ³)	3	385, 400, 415
	Fly ash(%)	3	0, 10, 25
	Retarding admixtures(%)	5	0, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2%
Assessment	Fresh concrete	Slump flow, air contents, setting time	
	Hardened concrete	Compressive strength (7, 28, 56 days)	

Table 2 Mixing design for properties of retarding low heat concrete

Type	B-FA-retarding admixture	FA WB (%) (%)	S/a (%)	Unit weight(kg/m ³)						Admixture (%)		
				W	B	C	FA	S	G	AD1	AD2	
Standard type	385-25-0.0	25	41.6	49.0	160	385	289	96	880	951	1.35	
	400-25-0.0	25	40.0	48.0	160	400	300	100	856	962	1.40	
	415-00-0.0	0	38.6	47.5	160	415	415	0	857	983	1.45	0
	415-10-0.0	10	38.6	47.5	160	415	373	42	851	976	1.40	
	415-25-0.0	25	38.6	47.5	160	415	311	104	840	964	1.35	
Retarding type	385-25-1.2											1.2
	385-25-1.0											1.0
	385-25-0.8		41.6	49.0	160	385	289	96	880	951	1.30	0.8
	385-25-0.6											0.6
	400-25-1.2	25										1.2
	400-25-1.0											1.0
	400-25-0.8		40.0	48.0	160	400	300	100	856	962	1.40	0.8
	400-25-0.6											0.6

AD1 : Super plasticizer, AD2 : Retarding admixture

의 온도차를 감소시키기 위한 것을 목적으로 콘크리트 배합 설계를 하였다. 하부용은 수화열 저감과 최고온도 도달 시간을 늦추기 위해 플라이애쉬를 25% 치환하고 지연형 혼화제를 첨가한 콘크리트로 배합설계하고, 상부용은 지연제를 첨가하지 않고 플라이애쉬를 최소화시켜 Table 2와 같이 배합설계 하였다.

두께 3 m 이상 매트기초의 경우는 고강도화를 위해 결합재량이 증가할수록 수화열이 크게 발생하기 때문에 품질 안정화의 영향을 미치지 않는 범위에서 단위시멘트의 사용량을 최소화하는 것이 가장 중요하다. 이에 수화열 저감과 시공품질 확보를 위한 최적 결합재량 및 플라이애쉬 치환율을 설정하고자 결합재량 385, 400, 415 kg/m³, 플라이애쉬 치환율 0, 10, 25%로 각각 3수준의 배합설계를 하였다. 또한, 지연제 혼입율 0, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2%의 5수준으로 설정하였다.

슬럼프 플로, 공기량, 응결시험, 압축강도의 콘크리트 물성은 KS 표준에 따라 측정하였다.

2.2 실험결과

2.2.1 굳지 않은 콘크리트의 특성

지연제를 혼입한 고강도 콘크리트의 굳지 않은 특성을 평가하기 위하여 공기량, 슬럼프 플로를 측정하였으며, 그 결과는 Table 3과 같다.

지연제를 미첨가한 콘크리트(표준형)에서는 결합재량 증가와 함께 잔골재율이 낮을수록 슬럼프 플로가 증가되는 기존의 연구 결과와 유사한 경향을 확인하였다. 또한, 동일 결합재량(415 kg/m³)에서 공기량은 플라이애쉬의 치환율이 증가

Table 3 Test results of slump flow and air contents

Type	B-FA-Retarding admixture	W/B (%)	S/a (%)	Slump flow (mm)	Air contents (%)
Standard type	385-25-0.0	41.6	49.0	640	4.3
	400-25-0.0	40.0	48.0	645	4.5
	415-00-0.0			650	5.2
	415-10-0.0	38.6	47.5	675	4.7
	415-25-0.0			660	4.4
Retarding type	385-25-1.2			510	6.3
	385-25-1.0			510	5.3
	385-25-0.8	41.6	49.0	560	4.9
	385-25-0.6			520	4.8
	400-25-1.2			580	6.6
	400-25-1.0			600	5.5
	400-25-0.8	40.0	48.0	590	5.1
	400-25-0.6			630	4.9

Table 4 Initial and final setting time according to regarding admixture ratio

Type	B-FA-retarding admixture	Setting time	
		Initial time	Final time
Standard type	385-25-0.0	8.5	11.5
	400-25-0.0	8.2	11.2
	415-00-0.0	7.2	9.7
	415-10-0.0	7.5	9.9
	415-25-0.0	8.3	10.8
Retarding type	385-25-1.2	21.8	27.3
	385-25-1.0	18.3	23.0
	385-25-0.8	14.8	18.7
	385-25-0.6	10.8	14.7
	400-25-1.2	21.2	26.1
	400-25-1.0	17.9	22.2
	400-25-0.8	14.3	17.8
	400-25-0.6	11.2	14.3

할수록 미연소탄소의 AE제 흡착으로 인해 공기량이 감소하는 일반적인 경향을 보였다(Jung et al., 2012).

지연제를 첨가한 콘크리트(지연형)의 물성을 살펴보면 지연제 혼입율이 증가할수록 공기량은 증가하며, 지연제 혼입율 1.2%의 경우 비빔 직후 공기량이 품질관리 기준(4.5±1.5%)을 초과하였지만 그 이외의 혼입율에서는 품질관리 기준을 모두 만족하였다. 또한, 지연제 첨가 시 비빔 직후의 슬럼프 플로는 미첨가 대비 최대 20% 감소하는 것으로 나타났다. 이는 응결지연제의 지연 작용에 의하여 공기량 증가 및 슬럼프 플로 손실 억제의 일반적인 경향을 보였다(KCI, 2011).

응결시간은 초결 및 종결시간을 측정하였으며, 그 결과는 Table 4와 같다.

지연제를 미첨가한 콘크리트(표준형)에서 플라이애쉬를 25% 치환한 배합의 결합재량(385, 400, 415 kg/m³)에 따른 초결과 종결시간을 나타낸 것으로 초결은 약 8시간에 발생하였으며, 종결은 약 11시간에 완료되었다. 초결과 종결시간의 차이는 약 3시간 정도이며, 결합재량이 증가함에 따라 그 차이는 감소하는 것으로 나타났다.

플라이애쉬 치환율에 따른 응결시간은 플라이애쉬 치환율이 10, 15%씩 증가할수록 종결시간은 약 20~30분 정도 지연되는 것으로 나타났으며, 초결과 종결시간의 차이는 플라이애쉬 치환율에 상관없이 약 2.5시간으로 동일한 수준으로 나타났다. 하지만, 지연제를 미첨가한 콘크리트(표준형)에서 초결시간은 결합재량에 따라 큰 차이가 없었으며, 종결시간은 결합재량이 많을수록 다소 감소하는 것으로 나타나 혼화제인 플라이애쉬 특성 중 응결시간 지연 효과를 확인하였다.

플라이애쉬를 25% 치환한 조건에서 결합재량별 지연제 첨가율에 따른 초결 및 종결 시간은 지연제 첨가율이 0.6, 0.8, 1.0, 1.2%로 증가함에 따라 종결시간은 14.5, 18.3, 22.6, 26.7시간으로 증가하였다.

결합재량이 적을수록 지연제에 의한 응결지연 효과가 큰 것으로 나타나 지연형 고강도 콘크리트의 제조를 위해서는 결합재량을 최소화하는 것이 유리한 것으로 판단된다.

결합재량에 상관없이 지연제를 첨가한 콘크리트(지연형)의 지연제 첨가율별 초결 시간과 종결 시간은 지연제 첨가율이 증가할수록 초결과 종결 시간이 급격히 증가하는 것으로 나타났다. 이는 지연제의 수산화기(OH)가 시멘트 입자 표면이나 초기 수화생성물에 흡착하여 물과의 접촉을 일시적으로 차단함으로써 수화반응을 지연시킨 때문으로 판단된다.

초결과 종결시간의 차이는 지연제를 미첨가한 콘크리트(표준형)의 경우 약 2.5~3시간인 반면 지연제를 첨가한 콘크리트(지연형)의 경우 지연제 첨가율이 증가함에 따라 증가하여 3~5.5시간으로 나타나 지연제를 첨가할 경우 초결 후 종결까지의 시간이 지연제 미첨가 대비 약 0.5~2.5시간 지연되었다.

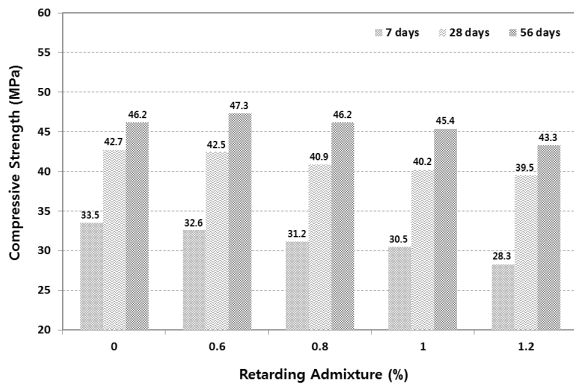
또한, 지연제를 0.6, 0.8, 1.0, 1.2% 첨가한 경우 지연제 미첨가 대비 응결 시간은 초결시간 기준으로는 약 2.6, 6.2, 9.8, 13.2시간, 종결시간 기준으로는 약 3.1, 6.9, 11.3, 15.4시간 지연되는 것으로 나타났다.

2.2.2 경화 콘크리트의 특성

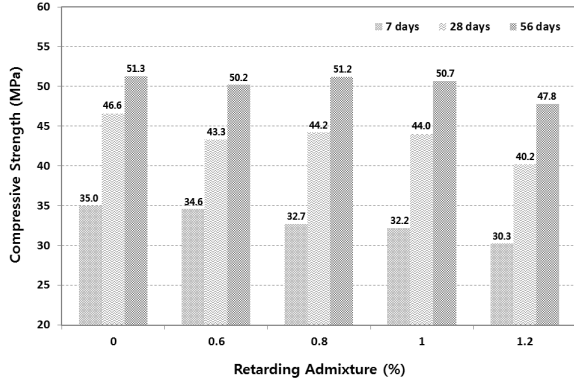
결합재량 및 플라이애쉬 치환율(표준형), 지연제 첨가율(지연형)에 따른 재령 7, 28, 56일의 압축강도는 Table 5와 같다. 재령 28일 압축강도는 모두 목표강도를 상회하였으며, 재령 7일과 56일의 압축강도는 28일 압축강도대비 약 72~80%, 104~116% 수준으로 나타났다.

Table 5 Compressive strength

Type	B-FA-retarding admixture	W/B (%)	W (kg/m ³)	FA (%)	Admixt ure (B%)	Compressive strength(MPa)		
						7	28	56
Standard type	385-25-0.0	41.6		25		33.5	42.7	46.2
	400-25-0.0	40.0		25		36.2	47.8	52.3
	415-00-0.0			0	0	37.8	48.4	50.5
	415-10-0.0	38.6		10		37.5	47.7	49.2
	415-25-0.0			25		35.0	46.6	51.3
Retarding type	385-25-1.2				1.2	28.3	39.5	43.3
	385-25-1.0	41.6	160		1.0	30.5	40.2	45.4
	385-25-0.8				0.8	31.2	40.9	46.2
	385-25-0.6				0.6	32.6	42.5	47.3
	400-25-1.2			25	1.2	30.3	40.2	47.8
	400-25-1.0	40.0			1.0	32.2	44.0	50.7
	400-25-0.8				0.8	32.7	44.2	51.2
	400-25-0.6				0.6	34.6	43.3	50.2



(a) Binder 385 kg/m³, fly ash 25%



(b) Binder 400 kg/m³, fly ash 25%

Fig. 1 Compressive strength according to regarding admixture ratio

결합재량 385 kg/m³(W/B 41.6%)과 400 kg/m³(W/B 40.0%) 배합 조건에서의 지연제 첨가율에 따른 재령별 압축강도는 Fig. 1과 같다. 재령 7일의 초기재령에서는 지연제 첨가율이 증가할수록 응결지연에 따른 초기 수화반응 지연으로 인해 압축강도 저하가 뚜렷하게 나타났다. 하지만 재령 56일의 장기재령에서는 충분한 수화반응으로 인해 동일 결합재량에서 지연제 첨가율에 따른 강도발현의 차이는 크지 않았다. 재령 56일의 장기재령에서는 목표강도(40 MPa)를 모두 만족하였으며, 특히 지연제 첨가율 1% 이하에서는 지연제 혼입이 콘크리트의 강도 발현에 영향을 미치지 않았다. 다만, 지연제를 1% 초과 적용할 경우 장기강도 발현이 크게 지연될 수 있으므로 고강도 콘크리트를 배합설계할 때에는 지연제 1% 이하로 적용하는 것이 바람직한 것으로 판단된다.

3. 모델링을 이용한 수화열 해석

3.1 수화열 해석 개요

지연제에 의한 고강도 콘크리트의 응결시간차에 의한 수평 분할 타설의 최적 높이를 선정하기 위한 해석검증은 Table 6

Table 6 Verification plan by hydration heat analysis modeling

Member size (m)	Partition placement height(m)		Removal time of the protection (days)	Concrete mix
	Top	Bottom		
3.5×3.5×3.5	3.5	0	7, 14	Top: standard type binders 410 kg/m ³ (FA : 10% substitution, retarder: unuse)
	0.5	3.0		
	1.0	2.5	Bottom: retarding type binders 385 kg/m ³ (FA : 25% substitution, retarder: 1.0% use)	
	1.5	2.0		

과 같다. 타설 방법으로는 매스콘크리트를 3.5 m를 일체 타설하는 경우와 상부층과 하부층을 0.5 m / 3.0 m, 1.0 m / 2.5 m 및 1.5 m / 2.0 m로 분할 타설하는 경우를 고려하였으며, 분할 타설의 경우 상부층은 표준형 콘크리트 배합을 적용하고, 하부층은 지연형 콘크리트 배합을 적용하는 것으로 구분하였다. 또한 대류계수의 영향에 대한 차이를 검토하기 위해 보양재 제거시기를 7일과 14일을 추가하였다.

지반은 비열과 열전도율을 가진 부재재질로 정의하였으며, 콘크리트에서 발생한 열이 지반으로 전달되도록 하였고, 지반위에 매스콘크리트가 연속되는 것으로 해석모델을 구성하였으며, 일체 타설하는 경우를 중심으로 하였다.

3.2 수화열 해석 모델링 재료의 배합과 열특성 데이터

수화열 해석 모델링에 적용된 콘크리트 배합은 Table 7과 같다. 배합은 결합재량 385 kg/m³에 플라이애시 25%를 치환 및 지연제 1.0%를 사용한 지연형 콘크리트 배합과 결합재량 415 kg/m³에 플라이애시 10% 치환 및 지연제를 사용하지 않은 표준형 콘크리트 배합으로 구분하여 사용하였다.

매스콘크리트의 재료배합에 따른 온도분포와 응력분포를 확인하여 시간이력에 따른 온도균열제어수준을 분석하기 위해 앞서 기술한 해석계획을 기초로 Table 8 및 Fig. 2와 같이 타설 측 재료배합 및 분할 타설 효과를 고려하여 4가지 조합의 해석모델을 고려하였다.

수화열 해석을 위해서는 콘크리트 및 그 밖에 해석에 적용되는 사용재료의 열특성 및 물성에 관한 데이터가 필요하며, 기존 연구된 단열온도 상승시험 및 예측식에 의한 열특성 데이터와 압축강도 데이터를 활용하여 해석에 반영하였다. 열전도율 및 열팽창계수와 같은 열특성데이터는 콘크리트 표준시방서를 토대로 대표적인 값을 적용하였으며, 해석모델에 입력되는 콘크리트 및 사용재료의 물리 및 열적 특성 데이터

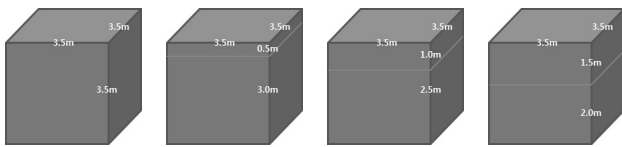
Table 7 Mix according to concrete type

Concrete type	B-FA-AD2	W/B (%)	S/a (%)	Unit weight(kg/m ³)								
				W	B	C	FA	S	G	AD1	AD2	
Retarding type	385-25	-	41.6	49.0	160	385	289	96	880	951	B×1.35%	B×1.0%
Standard type	415-10	-	38.6	47.5	160	415	373	42	851	976	B×1.40%	-

AD1 : Super Plasticizer, AD2 : Retarding Admixture

Table 8 Analysis model

Type	Partition placement height and use mix			
	Top		Bottom	
	Thickness(m)	Mix type	Thickness(m)	Mix type
PH 3.5 / 0.0	3.5	Standard	0	-
PH 0.5 / 3.0	0.5	Standard	3.0	Retarding
PH 1.0 / 2.5	1.0	Standard	2.5	Retarding
PH 1.5 / 2.0	1.5	Standard	2.0	Retarding



PH 3.5 / 0.0 PH 0.5 / 3.0 PH 1.0 / 2.5 PH 1.5 / 2.0

Fig. 2 Schematic design of the partition placement

를 정리하면 Table 9와 같다.

대류계수는 7일 및 14일에서 보양재를 제거하여 외기에 노출시키는 것으로 하였으며, 보양재로는 상부의 경우 비닐 1장과 양생포 1장, 측면은 거푸집 및 스티로폼 50 mm를 적용하는 것으로 하였다. 각 양생방법에 따라 해석에 사용된 대류계수는 Table 10과 같다. 그리고 매스콘크리트의 수화열 해석을 위해 범용프로그램인 마이더스 젠(MIDAS Gen)을 사용하였으며, 수화열 해석과정은 Fig. 3과 같다.

해석결과 검토를 위한 평가 위치는 수화열이 가장 높은 부재 중앙부의 중심과 그 중심축을 따라 분할 타설의 경계점 및 표면부(깊이 10 cm)로 총 5개소를 선정하였으며, 중심으로부터 표면부로 C-1~C-5의 기호로 표시하였다. 측면부는 중심부 1개소 및 상부 측면 1개소로 표면으로부터의 깊이는 10 cm이며, 기호는 중심부 S-1, 상부 S-2로 설정하였다. 각 위치에서의 평가항목은 온도, 응력, 허용응력 및 균열지수로 설정하였으며, 평가위치 및 사용기호는 Fig. 4와 같다.

해석의 변수는 분할 타설방법 및 보양재료 제거시기로서 첫번째 분할 타설의 경우 타설시간을 별도로 고려하지 않았

Table 9 Physical and thermal properties of used concrete

Items	Ground	Standard type	Retarding type
Specific heat (kcal/N · °C)	0.02	0.0245	0.0245
Unit volume weight(kg/m ³)	1,700	2,354	2,354
Thermal conductivity (kcal/mm · hr · °C)	0.0017	0.0023	0.0023
Convection coefficient (kcal/m ² · hr · °C)	12	12	12
Outside temperature(°C)	30	30	30
Placement temperature(°C)	-	33	33
Compressive strength (91 days) (MPa)	-	54	52
Compressive strength manifestation coefficient	-	a:3.5, b:0.95	a:6, b:0.95
Modulus of elasticity (91 days) (MPa)	980	29,984	29,984
Thermal expansion coefficient	1.0×10 ⁻⁵	1.0×10 ⁻⁵	1.0×10 ⁻⁵
Poisson's ratio(MPa)	0.2	0.167	0.167
Cement content per unit volume of concrete(kg/m ³)	-	415	385
Heating function coefficient	-	K:41.7, α:1.74	K:39.3, α:1.76

Table 10 Convection coefficient according to the curing method

Outdoor exposure	Top (Vinyl 1+curing blanket 1)	Side (Form+50 mm Expanded Polystyrene)
12 kcal/m ² · hr · °C	6.5 kcal/m ² · hr · °C	2.0 kcal/m ² · hr · °C

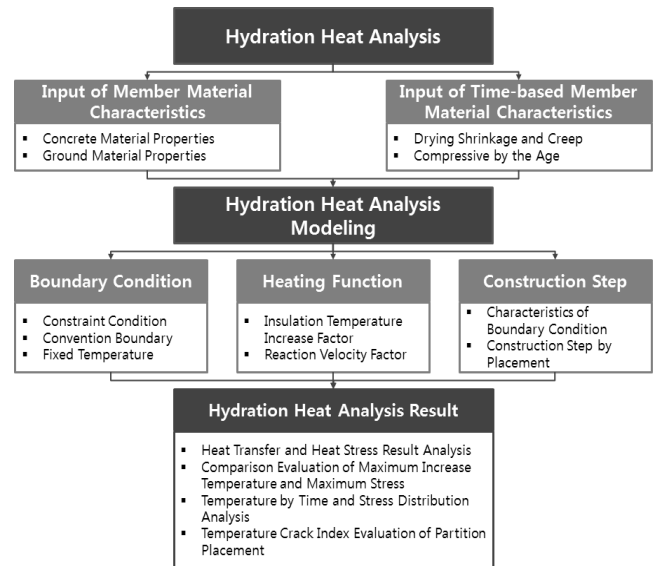


Fig. 3 Hydration heat analysis process

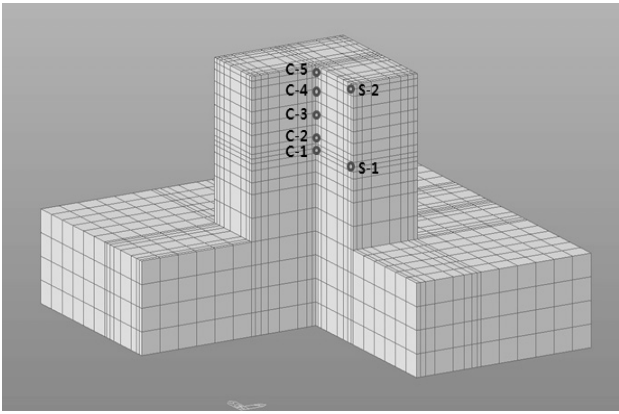


Fig. 4 Analysis Location

고, 동시 타설되어 수화반응을 시작하는 조건으로 해석을 실시하였으며, 두번째 측면의 거푸집 및 스티로폼과 상부의 비닐 및 양생포 제거는 7일 및 14일에서 동시에 제거되고 1시간의 변화구배로 외기 노출되는 조건을 적용하였다. 타설방법에 따른 4가지 변수 및 보양재료 제거시기 2가지 변수에 대해 총 8가지 경우에 대한 해석검토가 실시되었다.

3.3 수화열 해석 결과

3.3.1 온도이력 해석결과

온도이력 해석결과는 Table 11과 Fig. 5에서 보는 바와 같으며 중심부의 최고온도는 수평분할 타설에 따라 다소 차이가 나타났으며, 외기 노출재령에 따라서는 최고온도 도달할 때까지 환경조건이 동일하기 때문에 최고온도 또한 동일하게 나타났다. 가장 높은 수화열 온도를 나타낸 경우는 표준형 콘크리트 배합만을 사용한 PH 3.5 / 0.0이 75.02°C로 나타났으며, PH 1.5 / 2.0 > PH 1.0 / 2.5 > PH 0.5 / 3.0의 순으로 지연형 콘크리트 배합의 타설 높이가 증가할수록 수화열 최고온도는 감소하는 경향을 보였다.

표면부의 최고온도는 약 54°C로서 중심부 최고온도에 비해 약 19~20°C 낮은 것으로 나타났으며, 중심부와 표면부의 최고온도 차이는 26~28°C 범위로 나타났다. 또한, 측면부의 최고온도는 중심부에 비해 약 11°C 낮은 63.59°C로 나타났으며, 지연형 콘크리트 배합의 타설 높이가 증가할수록 측면부 최대온도는 감소하였다.

중심부와 측면부의 최대온도 차이는 양생재료를 제거하여 외부로 노출되는 시기에 따라 변동되는 것으로 확인되었으며, 부재의 외기노출 후 약 12~24시간에서 최대 온도차를 나타내었다. 외기노출 재령시간을 증가시켜도 내·외부 최대온도 차이는 변화가 없는 것으로 나타났는데 이는 양생재료 제거시기가 재령 7일 및 14일로 수화열이 최고온도 상승 후 하강이 시작하는 초기에 내·외부 최대온도 차이가 나타나기 때

문이다. 재령 7일에서 14일로 증가 시 약 2~3°C 감소하는 것으로 나타났다. 실제 현장에서는 후속 공정 및 타설 시간을 고려하여 지연형 콘크리트 배합의 수화열 발열시간을 조정할 경우 고강도 콘크리트를 사용한 매트기초 부재에 대해서도 내·외부 수화열 온도차를 25°C 이하로 감소시켜 관리하는 것이 가능할 것으로 사료된다.

최대온도차는 표준형 콘크리트 배합을 부재 상부로부터 0.5 m 수평분할 타설한 PH 0.5 / 3.0의 경우가 재령 7일 외기노출 시 23.59°C, 14일 외기노출 시 20.59°C로 가장 낮게 나타나 온도관리가 가장 양호한 방법으로 평가되었다. 해석방법에 있어서 지연형 콘크리트 배합의 수화열 곡선이 초기에 수화발열이 없는 시간이 고려될 경우 실제적으로 최대온도 차이는 5°C 이상 감소될 것으로 판단된다.

3.3.2 온도균열지수 해석결과

온도균열지수 해석결과는 Table 12와 Fig. 6에서 보는 바와 같으며, 온도균열지수는 수화열이 최고시점에 도달하는 재령 2.5일 주변과 양생재료를 제거하는 시점에서 크게 저하하는 경향을 보이고 있다. 또한, 수평분할 방법에 관계없이 모든 해석모델링에서 중심부 C 1, C 2 및 C 3의 경우 전 재령에서 온도균열지수 5 이상을 나타냈다.

표면부 온도균열지수는 재령 7일 기준 PH 3.5 / 0.0이 중심부 1.07, 측면부 0.86으로 가장 낮은 최소 온도균열지수를 나타냈으며, PH 0.5 / 3.0의 경우 중심부 1.17, 측면부 0.92로 가장 높은 최소 온도균열지수를 보이고 있어 온도균열지수에서도 수평분할 높이를 상부 0.5 m의 경우가 수화열 관리에 가장 우수한 것으로 나타났다.

최소 온도균열지수는 중심부 표면의 경우 재령 2.1~2.3일에서 나타났으며, 측면부의 경우 7.3~7.5일인 양생재료를 제거하는 시점이 최고온도에서보다 더욱 낮은 최소 온도균열지수를 보였다. 반면 재령 14일에 양생재료를 제거하는 경우는 측면부의 최소 온도균열지수가 최고온도 상승시점 부근인 2.0~2.3일에서 나타나고 있어 수평분할 타설의 경우에 있어서도 양생재료 존치기간이 길수록 온도균열관리가 더욱 우수한 것으로 나타났다.

기존 연구(Kim, 2007)에서 3 m 타설 높이(1/2 분할 타설)에 대한 균열발생 확률은 0.52로 나타난 것과 비교할 때 본 연구는 3.5 m 일체 타설보다 매스 부재에 대해 0.5 m / 3.0 m로 수평분할 타설한 경우 0.92 이상의 온도균열지수가 나타나고 있어 수화열 관리가 우수한 것으로 판단된다. 또한, 본 연구는 기존 연구와 달리 고강도 콘크리트를 사용한 것으로 보다 열악한 수화열 환경에 있어서 높은 온도균열지수가 나타나고 있는 점을 확인할 수 있다.

Table 11 Temperature history analysis result according to the partition placement and outdoor exposure conditions

Analysis member index	Age (time) [center]	Maximum temperature(°C)			Center-surface maximum temperature difference (°C)
		Center (C)	Surface (C-5)	Side (S)	
PH 3.5 / 0.0 - 7d	62	75.02	54.67	63.59	28.20
PH3.5/0.0 - 14d	62	75.02	54.67	63.59	28.20
PH 0.5 / 3.0 - 7d	62	72.67	54.45	61.86	26.53
PH0.5/3.0 - 14d	62	72.67	54.45	61.86	26.53
PH 1.0 / 2.5 - 7d	62	72.96	54.65	61.92	26.55
PH1.0/2.5 - 14d	62	72.96	54.65	61.92	26.52
PH 1.5 / 2.0 - 7d	60	73.71	54.67	62.29	26.83
PH1.5/2.0 - 14d	60	73.71	54.67	62.29	27.08

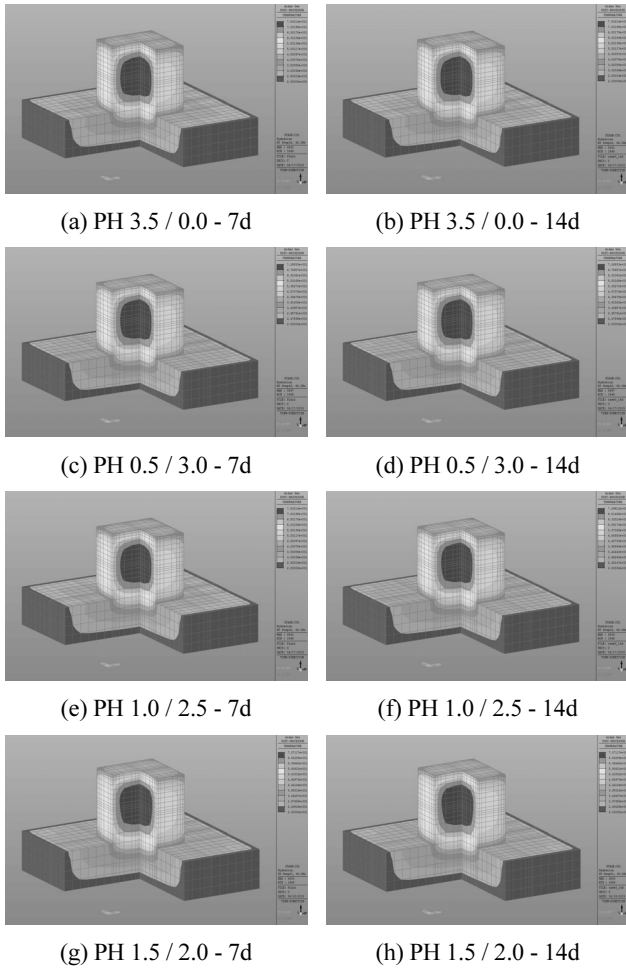


Fig. 5 Maximum Temperature History Distribution

Table 12 Analysis result of temperature crack by partition placement and outdoor exposure condition

Analysis member index	Age ¹⁾ (day)		Minimum crack index	
	Center	Side	Center (location)	Side (location)
PH 3.5 / 0.0 - 7d	2.2	7.5	1.07(C-5)	0.86(S-1)
PH 3.5 / 0.0 - 14d	2.2	2.0	1.07(C-5)	0.91(S-2)
PH 0.5 / 3.0 - 7d	2.3	7.5	1.17(C-5)	0.92(S-2)
PH 0.5 / 3.0 - 14d	2.3	2.3	1.17(C-5)	0.97(S-2)
PH 1.0 / 2.5 - 7d	2.3	7.5	1.13(C-5)	0.92(S-1)
PH 1.0 / 2.5 - 14d	2.3	2.1	1.13(C-5)	0.95(S-2)
PH 1.5 / 2.0 - 7d	2.1	7.3	1.10(C-5)	0.91(S-1)
PH 1.5 / 2.0 - 14d	2.1	2.0	1.07(C-5)	0.91(S-2)

1) Age of Minimum Crack Index at the Center or the Side

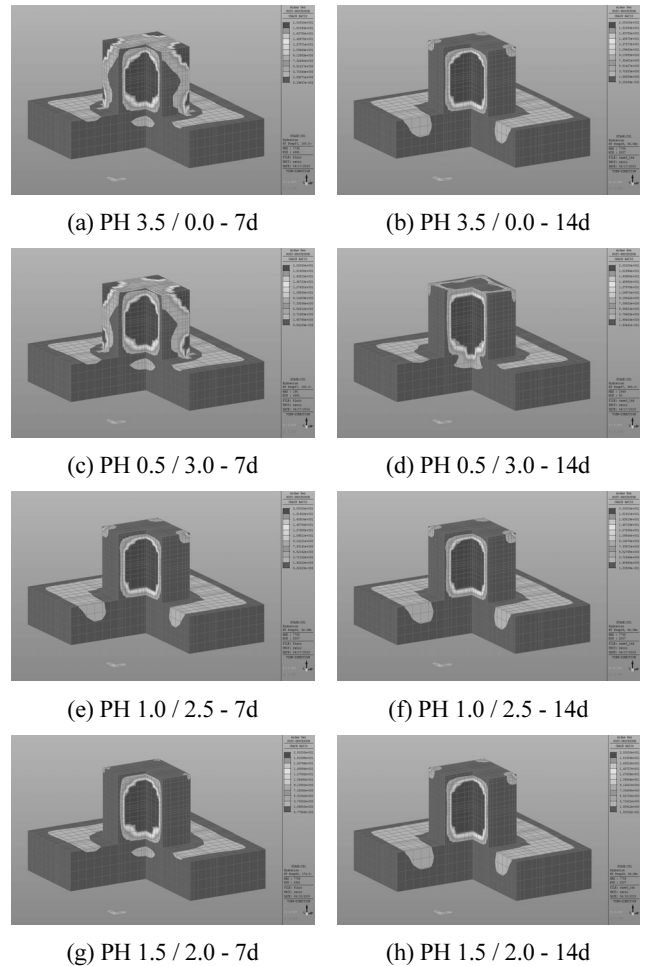


Fig. 6 Maximum temperature crack index distribution

4. 실물 실험 검증

4.1 실물 실험 계획

실물 실험을 위한 콘크리트는 Table 7에 배합을 적용하였으며, 실물 실험 부재 크기는 6.5 m×6.5 m×3.5 m로 하였다. 실물 실험체는 실제 현장에 적용되는 매트기초와 유사하게 재현하고자 철근을 Table 13과 같이 설치하였으며, 설치전경은 Photo 1과 같다. 실물 실험체 제작은 상부 0.5 m에 대해서는 표준형 콘크리트를 적용하고 하부 3.0 m에 대해서는 지연형 콘크리트를 적용하였다. 콘크리트 타설 완료 후에는 쇠퇴순

Table 13 Verification plan by hydration heat analysis modeling

Items		Contents		Remarks
Full scale specimen (6.5 m×6.5 m×3.5 m)	Arrange -ment of bar	Top	HD32@150	1 Layer (X, Y dir)
		Bottom	-	-
	Cover depth	Side	HD25@150	Horizontal rebar
		Top	50 mm	Alternation
Assessment	Fresh concrete	Bottom	80 mm	-
		Side	80 mm	-
	Hardened concrete	Slump	Flow(mm)	600±100
		Air content(%)		4.5±1.5
Assessment	Hardened concrete	Compressive strength(40 MPa)		Age (day) 3, 7, 28, 56



(a) Full view



(b) Arrangement of bar



(c) Thermocouple thermometer

Photo 1. Full scale specimen

마감을 실시하고 양생재료는 상부의 경우 비닐 1겹과 양생포 1겹, 측면의 경우 거푸집과 스티로폼 100 mm를 설치하였다. 굳지 않은 콘크리트 특성은 슬럼프 플로 및 공기량을 측정하였으며, 경화콘크리트 특성은 공시체에 의해 각 재령별 압축 강도를 측정하였다.

4.2 실물 실험 결과 및 고찰

4.2.1 굳지 않은 콘크리트 특성

배치플랜트에서 생산된 지연형 및 표준형 콘크리트의 타설 전 물성 측정 결과는 Table 14와 같다. 슬럼프 플로와 공기량은 품질관리 기준을 만족하는 것으로 나타났으며, 타설 당시 높은 대기온도에 의해 콘크리트의 초기 온도는 다소 높게 나타났다. 두 배합에 있어서 슬럼프 플로 및 공기량에서 다소 차이를 나타내고 있는데 이는 앞에서 언급한 바와 같이 플라이 애쉬 치환율 차이에 의한 것으로 판단된다.

4.2.2 압축강도

표준양생 공시체의 압축강도는 Table 15와 Fig. 7에서 보는 바와 같이 재령 28일에 지연형 콘크리트는 약 38.2 MPa, 표준형 콘크리트는 약 44.2 MPa로 목표강도의 96% 및 112%를 발현하였으며, 재령 56일에는 목표강도의 110%와 116%를 발현하였다. 현장봉합양생 공시체의 압축강도는 재령 28일에 지연형 콘크리트는 약 37.1 MPa, 표준형 콘크리트는 약 43.6 MPa로 목표강도의 93% 및 109%를 발현하였으며, 재령 56일에는 목표강도의 107%와 115%를 발현하였다. 따라서 표준양생, 현장봉합양생 공시체 모두 재령 56일에는 목표강도를 상회하는 것으로 나타났다.

4.2.3 수화열 분석

실물 실험 및 해석에서 얻은 온도데이터는 Fig. 8에 나타난 바와 같이 상·하부 콘크리트의 특성을 변경함으로써(하부: 지연형 콘크리트, 상부: 표준형 콘크리트) 수화열 상승 구간에 있어 상부(표면부) 콘크리트 부분이 기존 연구와 차별적으로 급격하게 온도가 상승되어 중심부와 표면부의 온도차를 약 25°C 이하로 관리할 수 있는 방안으로 도출되었으며, 수화열 해석결과에 있어서도 유사한 경향이 나타났다.

수화열 측정 최고온도는 77°C를 나타냈으며, 중심부 온도가 약 75°C 이상까지 상승하여도 내·외부의 온도차는 최고 23°C를 나타내었고 하강 부분에 있어서도 정상적으로 조사된 모든 구간에서 평균적으로 25°C 이내의 온도차로 관리가 가능한 것으로 나타났다.

실물 실험체의 온도균열지수를 해석에 의해 평가한 결과는 Fig. 9와 같다. 중심부의 경우 온도균열지수가 변동없이 20으로 나타나고 있고, 표면부에 있어서는 초기 수화열에 의해 온

Table 14 Properties of fresh concrete

Concrete type	B-FA-AD2	W/B (%)	S/a (%)	Concrete temperature (°C)	Slump flow (mm)	Air contents (%)
Retarding type	385-25-1.0	41.6	49.0	32.8	650	4.1
Standard type	415-10-0.0	38.6	47.5	33.1	630	5.0

Table 15 Compressive strength of full scale specimen

[Unit: MPa]

Concrete type	Curing method	Age(day)			
		3	7	28	56
Retarding type (385-25-1.0)	Standard curing	19.7	27.8	38.2	43.9
	Sealed curing at job site	19.5	26.3	37.1	42.9
Standard type (415-10-0.0)	Standard curing	21.8	36.6	44.2	46.5
	Sealed curing at job site	23.7	34.7	43.6	45.8

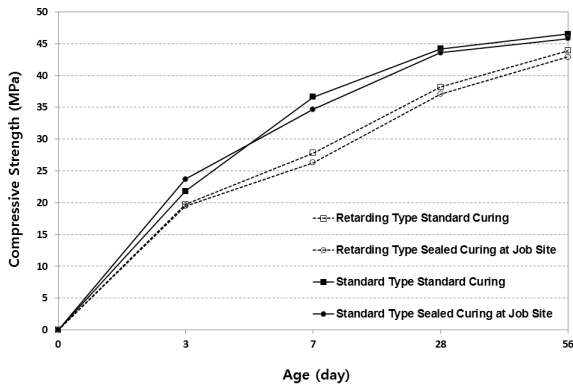


Fig. 7 Compressive strength of full scale specimen

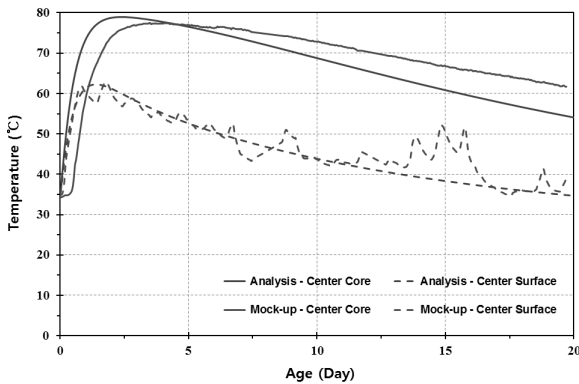


Fig. 8 Analysis result comparison of full scale specimen(temperature history)

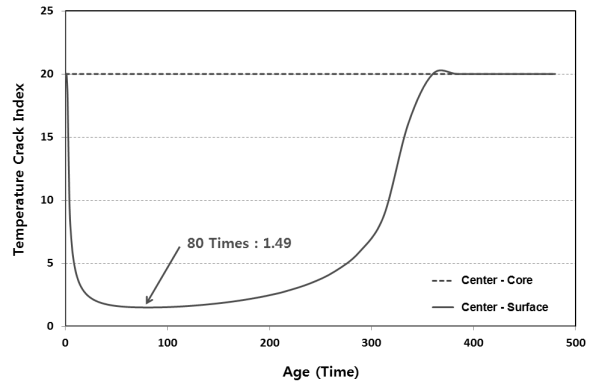


Fig. 9 Temperature crack index of full scale specimen

도가 상승하는 구간에서 온도균열지수가 감소하는 경향을 보였으며, 최소 온도균열지수는 재령 80시간에서 1.49로 나타나 콘크리트 표준시방서에서 제시하는 “균열발생을 제한하는 경우”로 나타났다.

결과적으로 40 MPa 콘크리트를 사용한 3.5 m 규모의 매스 콘크리트에 대하여 수평분할 방법과 타설 높이에 따라 콘크리트 배합을 설정하면 온도균열지수를 1.2 이상으로 충분히 관리가 가능한 것으로 나타났다.

5. 결론

고강도 콘크리트를 사용한 매스콘크리트의 수화열 저감을 위한 방법으로 수평분할 타설과 지연제를 사용한 방법을 제시하였으며, 이에 대한 수평분할 타설 방법을 해석적 기법을 통해 분석하고, 실물 실험에 의해 검증한 결과는 다음과 같다.

- 1) 결합재량이 적을수록 지연제 첨가에 의한 응결지연 효과가 큰 것으로 나타났다. 따라서 매트기초 하부에 적용하는 지연형 콘크리트는 수화열 저감과 응결지연 극대화를 위해 결합재량 385 kg/m^3 이 합리적인 것으로 판단되었다.
- 2) 플라이애쉬 치환율이 0%에서 25%로 증가함에 따라 초기 재령에서는 압축강도가 약간 감소하였으나, 장기 재령에서는 플라이애쉬 치환율에 따른 압축강도 손실은 거의 없었다.
- 3) 재령 7일의 초기재령에서 지연제 첨가율이 0%에서 1.2%로 증가할수록 압축강도는 감소하였지만 재령 56일의 장기재령에서는 목표강도를 모두 만족하였다. 또한, 지연제를 1% 초과 적용할 경우 장기 강도 저하가 크게 나타나 강도 안정성 확보 측면에서 지연제를 1% 이하로 적용하는 것이 바람직하다.
- 4) 3.5 m의 두께를 가진 고강도 매스콘크리트의 경우 지연형 콘크리트로 하부 3.0 m, 표준형 콘크리트로 상부 0.5 m 타설한 경우가 수화열 관리에 가장 우수한 것으로 나타났다.

- 5) 수평분할 타설 방법 분석결과 표준형 콘크리트로 타설하는 상부의 두께가 두꺼워질수록 중심부 최고온도가 상승하고, 중심부와 표면부 온도차도 증가하는데 이는 외기온도에 의한 표면부의 온도하락을 방지하기 위해 실시한 표준형 콘크리트의 수평분할 타설이 두꺼워짐에 따라 내부 수화열이 축적되었기 때문으로 판단된다.
- 6) 지연형 콘크리트에 의해 하부 3.0 m, 표준형 콘크리트에 의해 상부 0.5 m 타설한 수평분할 타설 방법이 기존 연구에서 1/2씩 분할 타설하는 방법에 비해 고강도 콘크리트임에도 0.4 이상의 높은 온도균열지수를 나타내어 높은 효과가 있는 것으로 나타났다.
- 7) 6.5 m×6.5 m×3.5 m 크기의 실물 실험에서의 수평분할 타설하면서 지연제를 사용한 고강도 콘크리트의 수화열 저감 성능을 검토한 결과 최고온도 77°C에서 중심부와 표면부의 온도차를 25°C 이내로 관리 가능한 것으로 나타났으며, 온도균열지수가 1.49로 나타나 지연제 사용 및 지연형과 표준형 배합 설계에 대한 적용 가능성을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 서울과학기술대학교 교내연구비 지원에 의해 일부 진행되었습니다. 이에 감사드립니다.

References

Park, C. K., Kim, B. H., Lee, H. S., (2014), Evaluation of Hydration Heat of Mass Concrete with Capsulated Slurry PCM and FEM Study for Analyzing Thermal Crack, *Journal of the Korea Institute of Building Construction*, 14(5), 379-388.

Ko, J. H., Yoo, S. Y., Koo, J. S., Moon, H. J., Kim, J. J., Park, S. J., (2012), An experimental study to apply for high-rise construction according to various technical properties of ultra high-strength concrete, *Journal of the Architectural Institute of Korea, Structure & Construction*, 28(1), 85-92.

Han, S. Y., Lee, C. S., Baek, D. H., Jang, D. B., Han, M. C., Han, C. G. (2010), Field Application of the Mass Concrete Utilizing Combined Method for Temperature Crack Reduction, *Journal of the Korea Institute of Building Construction Spring Conference*, 10(1), 37-39.

Gong, M. H., Jung, S. J., (2006), Study of Strength Development of Ultra High-Strength Concrete, *Journal of the Architectural*

Institute of Korea, Structure & Construction, 22(6), 111-118.

Baik, B. H. (2006), A Fundamental Study on the Hydration Heat Reduction of Transfer Girder Mass Concrete Controlling Setting Time, *Journal of the Architectural Institute of Korea, Structure & Construction*, 22(3), 87-93.

Han, M. C. (2006), Prediction of Setting Time of Concrete Using Fly Ash and Super Retarding Agent, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 18(6), 759-767.

Jeon, C. K., Kim, J., Shin, D. A., Yoon, G. W., Oh, S. G., Han, C. G. (2005), Field Application of Setting Time Difference Method Using SRA for Reduction of Hydration Heat of Mass Concrete, *Journal of the Korea Institute of Building Construction Spring Conference*, 5(1), 21-24.

Jeon, C. K., Yoon, C. W., Sin, D. A., Oh, S. G., Han, C. G., (2003), The Properties of Temperature History of Mass Concrete Place with Horizontal Division Using Setting Time Difference by Super Retarding Agent, *Journal of the Architectural Institute Fall Conference of Korea*, 23(2), 447-450.

Lee, J. W., Chung, K. S. (2000), Application and Concrete Mix design by Control methods of Thermal Cracking in Mass Concrete Structure considering the Constructional Condition, *Journal of the Architectural Institute of Korea, Structure & Construction*, 16(7), 87-94.

Kim, J. Y. (2007), Hydration Heat Analysis of Mass Concrete Considering Low Heat Mixture and Block Placement, Master's course Thesis, Cheongju University.

Jung, S. J., Kang, B. H., Lee, C. S., Seo, S. W., Lee, Y. D., Lim, N. G., Kim, S. S., Son, J. K., Paik, M. S. (2012), *Architecture Materials*, Kimoondang, 90.

Korea Concrete Institute (2011), *Concrete Engineering*, Kimoondang, 129-130.

Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2009), *Concrete standard specification*.

Korea Concrete Institute (1997), *Concrete Admixture*, Kimoondang, 198-200.

Felekoglu, B., Turkel, S., & Baradan, B. (2007), Effect of water/cement ratio on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete, *Building and Environment*. 42(4), 1795-1802.

Received : 11/21/2016

Revised : 12/20/2016

Accepted : 01/09/2017

요 지 : 고강도 콘크리트를 사용한 기초 부재의 수화열 제어를 위하여 지연형과 표준형 콘크리트 배합설계를 제안하고, 합리적인 타설 높이 구현이 가능하도록 유한요소해석을 실시하였다. 또한, 실물 실험을 통하여 해석결과와 비교하여 온도응력 저감 효과를 평가하였다. 6.5 m×6.5 m×3.5 m 크기의 대형 부재에 지연형 및 표준형 콘크리트를 수평분할 타설한 결과, 최고온도 77°C에서 중심부와 표면부의 온도차를 25°C 이내로 관리가 가능한 것으로 나타났다. 또한, 유한요소해석에 의한 온도균열지수가 1.49로 나타나 온도균열에 발생하지 않는 것으로 예측되었다. 지연형 및 표준형 콘크리트의 수평분할 타설이 고강도 매스콘크리트의 수화열에 의한 온도 응력 해소에 효과가 있는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 매스콘크리트, 고강도 콘크리트, 지연제, 온도이력, 온도균열지수
