

콘크리트 배합요인별 상·하부 분리타설에 의한 수화열 균열지수 저감방안 및 현장적용

Method of Decreasing Cracking Index by Different Mix Conditions for Separated Placement and its Field Application

김민호¹ · 한천구^{2*}

Min-Ho Kim¹ · Cheon-Goo Han^{2*}

(Received September 1, 2016 / Revised September 18, 2016 / Accepted September 22, 2016)

In this research, considering the practical situation of separated placing method for mass concrete structure, an efficient method of controlling the heat of hydration is suggested by comparing between the simulated values and actual measurements conducted with the optimum mix design obtained from the various mix conditions with different types and amount of supplementary cementitious materials(SCMs). As the result of the research, firstly, the optimum mix designs for top and bottom layers were determined by Midas gen as OPC to FA of 85 to 15, and OPC to FA to BS of 50 to 20 to 30, respectively. The concrete mixtures prepared with the mix designs determined from the simulation satisfied the target performance range in slump, air content and compressive strength. Additionally, from temperature measurement for the actual mass concrete placed during spring, the maximum temperature difference between surface and core was about 10°C with 59 and 49°C for top and bottom layers, respectively, and 1.4 of cracking index was obtained. Therefore, considering the practical conditions of mass concrete construction, it is considered that the different heat of hydration method using different mix designs with SCMs can be an efficient method for controlling thermal cracking and settling cracking of mass concrete.

키워드 : 혼화재 다량치환 콘크리트, 온도균열, 매스 콘크리트, 수화열 해석

Keywords : High volume supplementary cementitious materials, Thermal cracking, Mass concrete, Heat of hydration analysis

1. 서론

최근 아파트 등 건축구조물의 기초형태는 구조물이 대형화 및 초고층화 함에 따라 매스 매트콘크리트의 형태를 취하고 있다.

그런데, 이와 같은 매스 매트 콘크리트의 경우는 구조적 안정성 측면에서는 유리할 수 있지만, 콘크리트 양생초기에 수화열 축적으로 인한 내·외부 온도차 등 온도 응력으로 균열이 발생할 수 있음(Kim 2008)에 플라이애시(이하 FA), 고로슬래그 미분말(이하 BS) 등 산업부산물을 적극 활용하게 된다면 자원재활용 및 품질향상 등의 측면에서 일거양득의 효과를 거둘수 있다.

또한, 기존 우리나라의 매스 매트 콘크리트 시공은 동시에 대량

의 콘크리트를 타설하게 되면 침하균열이 발생하게 됨에, 침하균열을 방지하기 위하여 절반 정도의 하부 콘크리트를 먼저 타설하고, 2~6시간 정도 경과한 후 상부를 타설하는 일명 돌리치기로 시공하는 경우가 대부분이다. 그러나 이러한 경우 침하균열은 방지할 수 있지만 상·하부 타설시간차에 의한 추가적인 균열이 문제시 되고 있다. 따라서 상부와 하부의 배합에 FA 및 BS의 혼합 비율을 효율적으로 조정하여 타설하게 된다면 침하균열을 방지하면서 매스콘크리트의 수화열 균열도 저감할 수 있을 것으로 예상된다.

그러므로 본 연구에서는 국내 W건설사 아파트 신축공사현장에서 매스 매트 콘크리트의 상·하부를 구분하여 타설하는 실무조건

* Corresponding author E-mail: cghan@cju.ac.kr

¹청주대학교 건축공학과, 박사과정 (Department of Architectural Engineering, Cheongju University, Doctor's course, Cheongju, 28503, Korea)

²청주대학교 건축공학과, 교수 (Department of Architectural Engineering, Cheongju University, Professor, Cheongju, 28503, Korea)

을 고려하여, 해석 프로그램으로 콘크리트 배합요인별 최적치를 도출하고, 실구조체에 이를 적용한 다음 해석치와 실측치간을 비교하므로써, 혼화재를 활용한 효율적인 매스 매트콘크리트의 수화열균열 저감방안을 제안하고자 한다.

2. 현장개요

본 연구의 대상건축물은 충북 청주시에 위치한 ○○아파트 신축공사 현장으로, 공사개요는 Table 1과 같고, 현장에 대한 조감도는 Fig. 1과 같다.

Table 1. Field conditions

Project	○○ apartment construction
Period	2014.10.21.~2016.12.31
Location	Cheongju in Korea
Scale	2 basement floors and 22~25 ground floor 10 buildings of apartment
Construction area	164 497m ²
Structure	Wall structure of reinforced concrete
Organization	988 housings and amenities Subsidiary facility - management office and small library etc.
Mat concrete standard	25-24-150
Quantity of object concrete	432m ³
Depth of mat concrete	1,300mm



Fig. 1. Bird's eye view

3. 수화열 해석

3.1 수화열 해석 계획

본 기초 매스 매트콘크리트의 수화열 해석계획은 Table 2와 같

다. 즉, 콘크리트의 규격은 25-24-150의 레디믹스트 콘크리트(이하 레미콘)를 사용하는 것으로 매스 매트콘크리트의 배합은 보통 포트랜드 시멘트(이하 OPC)를 100% 치환하는 것을 기준으로 하였다. 수화열해석 변수로 상·하부 배합의 경우는 단위결합재량에 대한 질량비로 FA를 각각 15% 치환사용한 배합, FA 및 BS를 각각 20 및 30% 치환사용한 배합 및 상부배합의 경우는 FA를 15% 치환 사용하고, 하부배합의 경우는 FA 및 BS를 각각 20 및 30% 치환한 배합의 총 4개의 시안을 해석하는 것으로 계획하였다.

본 현장의 기초 매스 매트콘크리트 공법의 적용기간은 2015년 3월~2015년 4월로써 봄철에 해당되어 콘크리트 표면의 건조 및 내·외부 온도차이를 줄이기 위해 상부층에 이중버블시트의 단열보온양생을 적용하는 것으로 계획하였다.

Table 2. Analysis plan

Factors			Levels
Mix-ture	Ready mixed concrete	· 25-24-150	
		Draft 1	Upper · OPC : FA : BS = 100 : 0 : 0
	Bottom · OPC : FA : BS = 100 : 0 : 0		
	Draft 2	Upper · OPC : FA : BS = 85 : 15 : 0	
		Bottom · OPC : FA : BS = 85 : 15 : 0	
	Draft 3	Upper · OPC : FA : BS = 50 : 20 : 30	
		Bottom · OPC : FA : BS = 50 : 20 : 30	
	Draft 4	Upper · OPC : FA : BS = 85 : 15 : 0	
Bottom · OPC : FA : BS = 50 : 20 : 30			
Analysis point			· Temperature history of concrete · Crack index of concrete

3.2 온도이력 해석 모델링 개요 및 해석방법

3.2.1 모델링 개요

온도이력해석 모델은 기초 부재를 대상으로 가정하여 Table 3과 같이 대칭성을 고려한 1/4 해석 모델을 사용 하였고, 부재의 중심부와 표면 및 모서리 절점에서 온도이력을 평가하였다. 또한, 열전도율 및 열팽창계수 등의 열특성 데이터는 콘크리트 표준시방서를 참고하여 적용하였고, 압축강도 및 발열함수는 실험에 의한 값과

Table 3. Hydration heat analysis and boundary condition

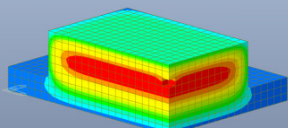
Modeling	Detail
	Ground : 16×12×1.3m Upper con. : 10×8×0.65m Bottom con. : 10×8×0.65m (1/4 Symmetry model)

Table 4. Physical property of materials and thermal

Physical property of materials	Existing concrete OPC: FA: BS=100:0:0	Low heat concrete OPC:FA:BS=85:15:0	Low heat concrete OPC:FA:BS=50:20:30	Ground area
Specific heat(kcal/N [°] C)	0.025	0.025	0.025	0.02
Density(kg/m ³)	2,335	2,326	2,292	1,700
Heat conduction(W/m·K)	2.3	2.3	2.3	1.7
Outdoor temperature(°C)	4			
Concrete temperature(°C)	15	15	15	-
Compressive strength at 28days(MPa)	24	24	24	-
Compressive strength at 91days(MPa)	26.71	27.93	27.93	-
Modulus of elasticity(GPa)	24.8	24.8	24.8	0.98
Coefficient of expansion	1.0×10 ⁻⁵	1.0×10 ⁻⁵	1.0×10 ⁻⁵	1.0×10 ⁻⁵
Poisson's ratio	0.167	0.167	0.167	0.2
Compressive strength index	a=4.5 b=0.95	a=6.2 b=0.93	a=6.2 b=0.93	-
Maximize adiabatic temperature(Q)	55.13	48.40	36.05	-
Reactive velocity coefficient(r)	1.419	0.594	0.312	-
Convection coefficient(W/m ² ·K)				
Outdoor	12			12
Bubble sheet	2			-
Form	8			-

콘크리트 표준시방서에 근거하여 적용하였으며, 상·하부 타설시간 간격은 3시간으로 설정하였다. 본 해석을 위한 사용재질 및 기본적인 열특성 데이터는 Table 4와 같다.

3.2.2 수화열 해석방법

본 수화열 해석은 Midas Gen, 2016, V.855의 수화열 해석프로그램을 이용하여 매트콘크리트 기초를 대상으로 해석을 실시하였다. 즉, 전처리 과정으로 기초재료 및 외기환경 특성 등의 계수를 입력하였고, 후처리 과정으로 허용인장강도의 산출을 위해 콘크리트의 강도/강성 발현에 등가재령을 반영하여 지점 표면부와 중심부에 대한 결과치를 산출하였다.

3.3 수화열 해석결과 및 분석

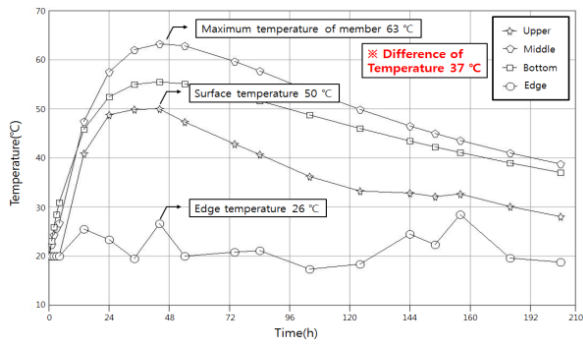
Fig. 2는 각 시안 별 콘크리트 타설시 예상온도 및 양생 등의 변수를 가정하여 수화열해석 프로그램으로 해석한 매트 콘크리트의 온도이력을 나타낸 것이고, Fig. 3은 해석에 따른 균열지수의 결과치를 나타낸 것이다. 먼저 시안 1의 경우는 상·하부 OPC 100%를 사용한 배합으로써, 타설시간 48시간에 약 63°C의 최고온도가 예상되었고, 표면부 온도는 50°C로 예상되어, 중앙부와의 온도차이가 약 13°C 발생하였다. 이때의 모서리부는 26°C로 약 37°C의 온도차가 예상되었다. 수화열해석에 의한 균열지수는 표면부와

중앙부의 극심한 온도차이로 취약점인 모서리부에서는 유해한 균열이 발생할 수 있는 범위인 0.9 이하의 균열지수를 나타내어, 이에 대한 대책을 강구해야만 하였다.

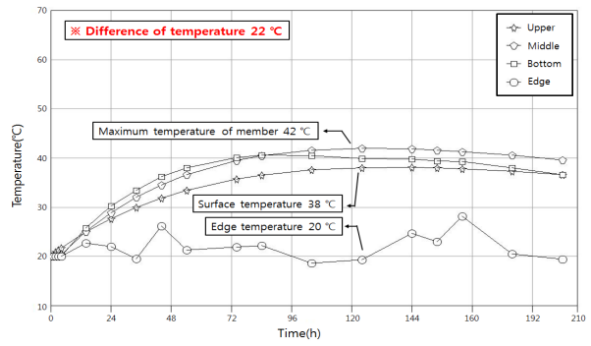
시안 2의 경우는 상·하부에 FA 15%를 치환사용한 배합으로써, 타설시간 72시간에 약 53°C의 부재최고온도가 예상되었고, 표면부 온도는 45°C로 예상되어, 중앙부와의 온도차이는 약 8°C, 이때의 모서리부는 약 23°C로 약 20°C의 온도차가 예상되었다. 해석에 의한 균열지수는 취약점인 모서리부가 시안 1의 균열지수 보다 0.2 높은 약 1.1의 균열지수를 나타내었으나, 이는 유해한 균열이 발생할 수 있음에 추가적인 대책방안을 강구할 필요성이 제기되었다.

시안 3의 경우는 상·하부에 FA 20%, BS 30%를 치환 사용한 배합으로써, 타설 시간 110시간에 약 42°C의 부재 최고온도가 예상되었으며, 표면부 온도는 38°C로, 중앙부와의 온도차이는 약 4°C, 모서리부는 20°C로 약 22°C의 온도차가 예상되었다. 해석에 의한 균열지수는 혼화재 다량치환 저발열 배합을 사용했음에도 불구하고, 초기 상부와 하부의 응력차이와 응결지연에 의해 시안 2보다 0.2정도 낮은 유해한 균열이 발생할 수 있는 0.9의 균열지수를 나타내었다.

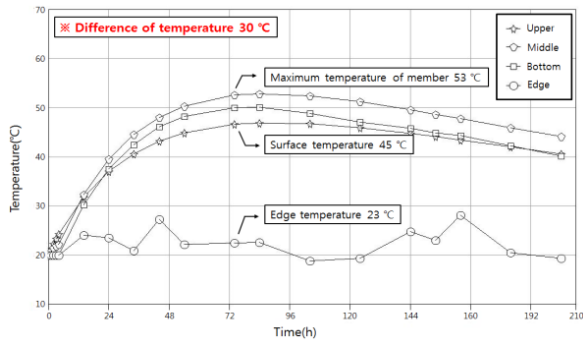
시안 4의 경우는 타설시간 96시간에 약 45°C의 부재 최고온도가 예상되며, 표면부 온도는 약 40°C로 예상되어, 중앙부와의 온도차이가 약 5°C로 예측되었는데, 이때의 모서리부는 약 19°C로 약 26°C의 온도차가 예상되었다. 해석에 의한 균열지수는 시안 1에



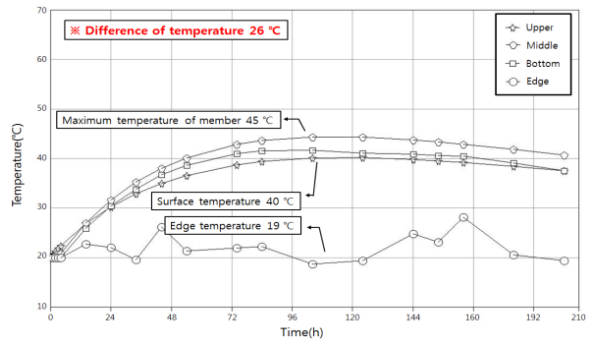
1) Draft 1



3) Draft 3

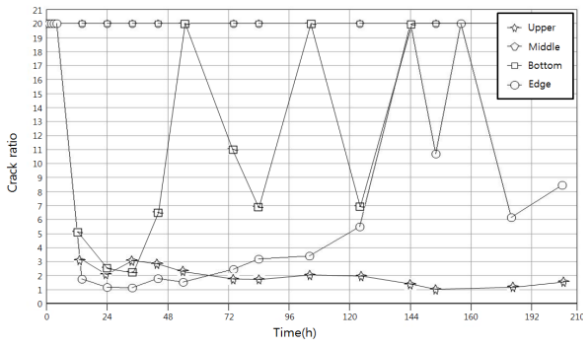


2) Draft 2

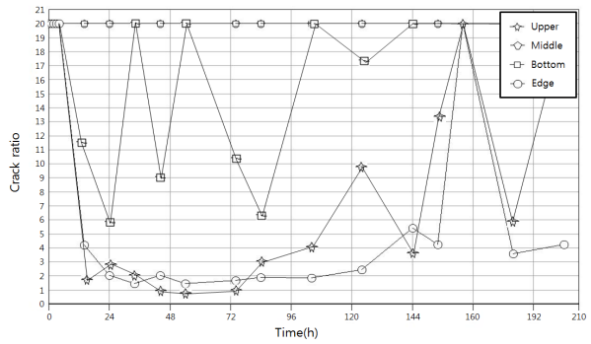


4) Draft 4

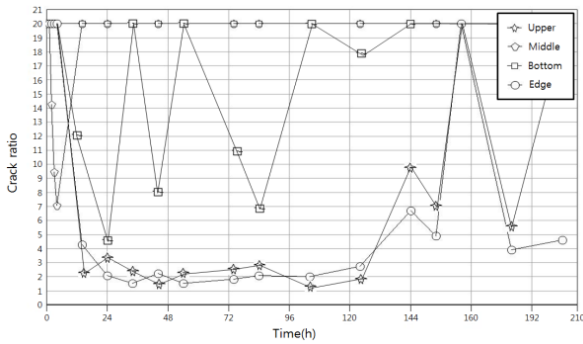
Fig. 2. Hydration heat analysis for concrete temperature history of kinds draft



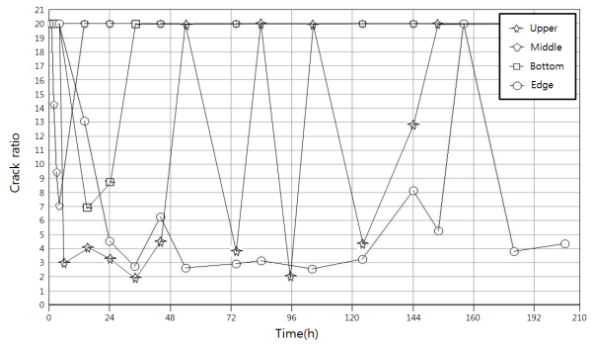
1) Draft 1



3) Draft 3



2) Draft 2



4) Draft 4

Fig. 3. Hydration heat analysis for crack index of kinds draft

비해 0.9정도 높은 값으로 균열을 방지하는 범위인 1.8의 균열지수를 나타내었다.

즉, 상·하부에 다량의 혼화재를 사용하는 저발열 배합이 부재 내부의 온도 및 응력저감에 따른 균열저감을 예상하였으나, 다량의 혼화재 사용은 상부와 하부의 타설시간에 따른 응력차이로, 상부측에 소량의 혼화재를 사용한 배합보다 작은 균열지수를 나타내었다. 따라서, 하부에는 다량의 혼화재 사용으로 응결 지연을 유도하고, 상부에는 소량의 혼화재 사용으로 하부에 비해 응결 촉진성을 나타낸 배합이 효과적인 것으로 나타났다. 따라서, 현장에서 관리하고자 하는 온도균열지수를 1.2~1.5 이상으로 설정할 경우 본 시안 4의 배합을 현장 기초매스 매트콘크리트의 타설방법으로 제안하였다.

4. 현장 적용

4.1 현장 적용 계획

본 현장적용을 위한 계획은 Table 5와 같다. 콘크리트의 규격은 25-24-150의 레미콘을 사용하였으며, 선행해석에서 도출된 효과적인 배합을 101동 기초 매트에 타설하여 해석치와 비교하는 것으로 계획하였다. 실험사항으로 굳지 않은 콘크리트에서는 슬럼프, 공기량 및 콘크리트 온도를 측정하는 것으로 하였고, 경화 콘크리트에서는 재령 별 압축강도 및 수화열 온도이력을 측정하는 것으로 하였다.

Table 5. Experimental plan

Items		Levels	
Mixture	Ready-mixed concrete	1	· 25-24-150
	Applied spot (floor)		· 101 building BF1
	Field application binder(%)	1	· Upper - OPC : FA : BS = 85 : 15 : 0 · Bottom - OPC : FA : BS = 50 : 20 : 30
Experiment	Fresh concrete	4	· Slump · Air contents · Concrete temperature
	Hardened concrete	2	· Compressive strength(7, 28days) · Concrete temperature history

4.2 현장 적용 방법

본 실무현장 적용방법으로 구조체의 현장타설 방법은 두께 1300mm의 매스부재를 FA 20% 및 BS 30%를 치환사용한 배합을 하부에, FA 15%를 상부에 적용하는 것으로 하였다. 또한, 매스콘크리트의 온도이력을 측정하기 위한 열전대 매설위치 및 모습은 Fig. 4와 같다.

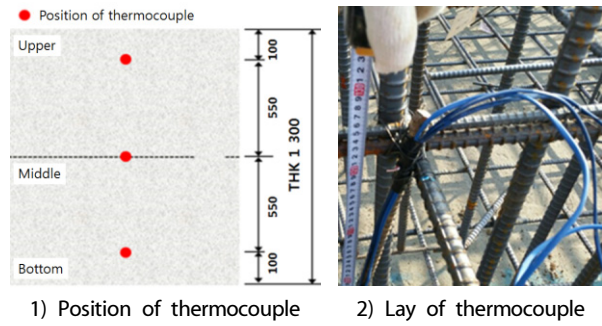


Fig. 4. Position of thermocouple

4.3 현장 적용 결과 및 분석

4.3.1 굳지 않은 콘크리트 특성

본 현장에 적용된 기초매스 매트콘크리트는 101동으로, Table 6은 굳지 않은 콘크리트의 품질시험 결과를 나타낸 것이다.

전반적으로 상·하부 혼화재를 치환사용한 저발열 배합의 경우 슬럼프 및 공기량은 모두 목표 범위를 만족하는 것으로 나타났다.

Table 6. Quality test result of fresh concrete

Division	Experiment	Measurements						
		1	2	3	4	5	6	
Low heat mix	Bottom	Slump	165	165	155	-	-	-
		Air content	4.3	4.1	4.2	-	-	-
		Temperature	23.5	23.3	22.8	-	-	-
	Upper	Slump	-	-	-	160	165	165
		Air content	-	-	-	4.1	4.1	4.2
		Temperature	-	-	-	23.2	23.8	24.0

4.3.2 경화 콘크리트 특성

Fig. 5는 저발열 배합의 상·하부 구분 및 재령 별 측정회수에 따른 압축강도를 나타낸 것이다. 먼저, 하부배합의 경우는 혼화재를 다량치환 사용함에 따라 재령 28일에서 평균 28.4MPa의 강도 발현을 나타내었고, 상부배합의 경우는 재령 28일에서 평균 29.0 MPa를 나타내어, 모두 호칭강도를 만족하는 것으로 나타났다.

Fig. 6은 현장적용 콘크리트의 수화열 온도이력을 나타낸 것이다. 상·하부 혼화재를 달리 치환사용한 저발열 배합 콘크리트의 경우는 약 18℃의 타설온도 시작으로 60시간을 전 후 중심부의 최고 온도는 약 59℃, 표층부 온도는 약 49℃로 나타나, 중심부와 표층부의 온도차가 약 10℃를 나타내었다. 이는 하부에 3성분계의 저발열 배합을 사용함에 따라 수화온도가 낮고, 매스부재 표면에 버블시트로 단열 양생함에 따라 표면부와의 온도차가 적어진 것으로 판단된다.

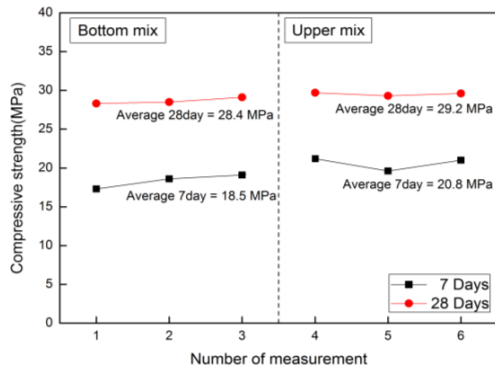


Fig. 5. Compressive strength of low heat mixture

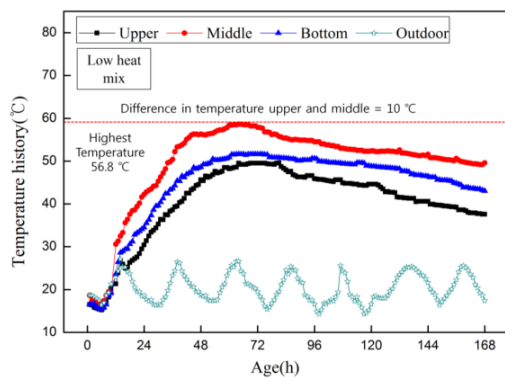


Fig. 6. Temperature history of low heat mixture

5. 수화열 해석결과 및 계측결과 비교 분석

Fig. 7은 실제 현장의 외기온을 적용하여, 저발열 배합의 수화열을 재해석하여 온도이력 및 균열지수를 나타낸 것이다.

먼저, 현장적용 저발열 배합의 경우는 타설시간 60~70시간에 약 55°C의 최고온도를 나타내었고, 균열지수의 경우는 1.4를 나타내었다. 이는 저발열 배합사용에 의한 최대 단열온도 상승계수가 낮고, 해석부재의 내·외부 온도차가 적어짐에 따라 온도균열지수가 높게 나타난 것으로 판단된다.

Fig. 8은 해석에 의한 온도이력을 실제 현장온도이력과 비교한 것이다. 온도이력 비교의 경우 전반적으로 실제 측정치와 해석치가 유사한 경향성을 나타내었으나, 부재의 중심부 및 표층부의 온도차이로 약 2~7°C 범위의 오차가 발생되었다. 이는 수화열 해석시 사용되는 타설온도, 단열온도 상승량 및 외기온 계수에 의해 해석치의 오차가 발생된 것으로 판단된다.

따라서 수화열해석 프로그래밍을 실시한 온도이력 및 온도균열지수는 실제현장에서의 측정치와 다소 차이가 있었으나, 그 차이는 크지 않아, 결과적으로 매스콘크리트의 수화열 온도이력을 검

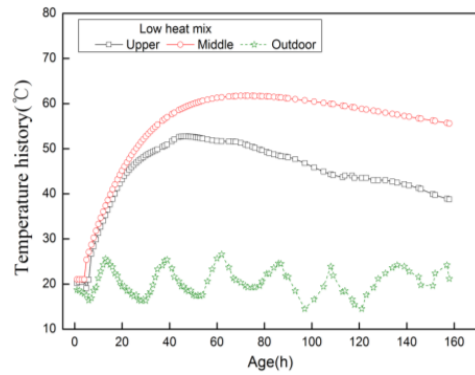


Fig. 7. Temperature and crack index of Hydration heat analysis

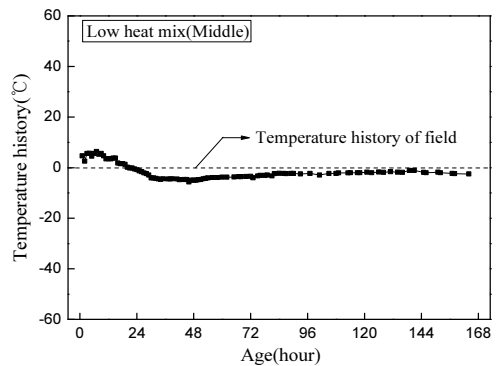


Fig. 8. Comparison of temperature history

토하기 위하여는 수화열 해석프로그래밍의 활용이 바람직하며, 매스콘크리트의 온도균열제어에 효과적일 것으로 사료된다.

6. 결론

본 연구에서는 매스 매트 콘크리트의 상·하부를 구분하여 타설하는 실무조건을 고려하여, 해석 프로그램으로 기존 OPC 100% 배합과 상부 및 하부배합의 혼화재 종류 및 치환율을 동일 및 달리

하는 배합 조건 변화로부터 최적치를 도출한 다음, 실구조체에 적용하여 해석치와 실측치간을 비교하므로써, 혼화재를 활용한 매스 매트콘크리트의 효율적인 수화열균열 저감방안을 제안하고자 하였는데, 그 내용을 요약하면 다음과 같다.

1. 현장적용 전 사전검토를 위해 Midas Gen을 이용하여 수화열 해석을 실시한 결과 혼화재 치환율이 증가할수록 콘크리트의 수화열 온도는 낮고, 균열지수는 커져 균열발생 확률은 낮아졌다.
2. 다양한 배합검토 중 상부는 OPC:FA=85:15 배합, 하부는 OPC:FA:BS=50:20:30 배합의 경우가 균열지수 1.8을 나타내어, 가장 우수한 것으로 밝혀져 이를 현장 매스 매트콘크리트의 배합으로 결정하였다.
3. 실제 현장의 저발열 배합을 적용한 결과 슬럼프 및 공기량은 목표범위를 만족하였고, 압축강도는 호칭강도를 상회하였다.
4. 봄철 실제 현장의 매스 매트콘크리트 온도특성은 중심부의 최고 온도 약 59℃, 표층부 온도 약 49℃로 나타나, 약 10℃의 온도차가 나타났다.
5. 실제현장의 외기온을 적용하여 매스 매트콘크리트의 수화열을 해석한 결과 매스 매트콘크리트의 균열지수는 약 1.4로 균열을 방지할 수 있는 값이었다.
6. 측정치와 해석치의 상호비교 특성으로 온도이력의 경우 측정치와 해석치가 유사한 경향성을 나타내었으나, 해석시 사용되는 타설온도, 외기온 및 단열온도 상승량에 의해 약 2~7℃ 범위의 온도차가 발생하였지만, 매스 매트콘크리트의 온도균열 제어에는 효과적인 방법으로 사료된다.

이상을 종합하여 볼 때, 실무를 고려한 매스 매트콘크리트의 경우 상·하부 타설 콘크리트간의 저발열 배합정도를 달리고려하는 수화발열량차 공법적용은 침하균열방지 및 수화열 균열제어에 효과적인 방법이 될 것으로 사료된다.

References

Han, M.C., Kim, S.Y., Han, D.B. (2008). Hydration heat analysis of mass concrete, Journal of the Architectural Institute of Korea, **24(1)**, 63-70 [in Korean].

Kim, H.S., Han, M.C., Kim, J.Y., Han, S.B. (2008). Hydration heat analysis of mass concrete considering low heat mixture and block placement, Journal of the Architectural Institute of Korea, **24(1)**, 63-70 [in Korean].

Kim, J.S. (2013). Characteristics of Hydration Heat in Mass Concrete Using Low-Heat Cements, Master's Thesis, Chungnam University [in Korean].

Kim, Y.R., Lee, S.H., Kim, D.S., Khil, B.S., Choi, T.H., Lee, H.I. (2008). An application of thermal crack control technology using PSLB in mass concrete, Proceedings of the Korea Concrete Institute, **20(3)**, 62-66 [in Korean].

Lee, M.H., Khil, B.S., Yun, H.D. (2013). Hydration heat property of mass concrete according to cements of ternary cement, Proceedings of the Korea Concrete Institute, **25(2)**, 575-576 [in Korean].

콘크리트 배합요인별 상·하부 분리타설에 의한 수화열 균열지수 저감방안 및 현장적용

본 연구에서는 매스 매트 콘크리트에 있어, 상·하부를 구분하여 타설하는 실무조건을 고려하여, 상부 및 하부배합의 혼화재 종류와 치환율을 동일 및 달리하는 배합 조건 변화로부터 최적치를 도출한 다음, 실구조체에 적용하여 해석치와 실측치간을 비교하므로써, 혼화재를 활용한 매스콘크리트의 효율적인 수화열균열 저감방안을 제안하고자 하였다. 연구결과 먼저, 현장적용 전 사전검토를 위해 Midas gen을 이용하여 수화열 해석을 실시한 결과 상부는 OPC:FA=85:15 배합, 하부는 OPC:FA:BS=50:20:30 배합을 본 대상 구조물 매스 매트콘크리트의 최적배합으로 결정하였다. 이를 적용한 실제 현장의 시험결과 슬럼프, 공기량 및 압축강도는 모두 목표범위를 만족하였다. 또한, 봄철 실제 현장의 매스 매트콘크리트의 온도특성으로 최적배합의 경우는 중심부의 최고 온도 약 59℃, 표층부 온도 약 49℃로 나타나, 약 10℃의 온도차가 나타났으며, 수화열 해석결과 약 1.4의 균열지수를 나타내었다. 따라서, 실무를 고려한 매스 매트콘크리트의 경우 상·하부 타설 콘크리트간의 저발열 배합정도를 달리 고려하는 수화발열량차 공법적용은 침하균열 방지 및 수화열 균열제어에 효과적인 방법이 될 것으로 사료된다.