



## 양생자동화 시스템을 이용한 매스 콘크리트 온도균열 제어

하주형<sup>1)</sup> · 조윤구<sup>1)</sup> · 현대양<sup>1)</sup> · 임창근<sup>1)</sup> · 서태석<sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup>현대건설 연구개발본부

### Control of Thermal Crack in Mass Concrete Using Automated Curing System

Ju-Hyung Ha,<sup>1)</sup> Yun-Gu Cho,<sup>1)</sup> Tae-Yang Hyun,<sup>1)</sup> Chang-Keun Lim,<sup>1)</sup> and Tae-Seok Seo<sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup>Advanced Material R&D Team, Hyundai Institute of Construction Technology, Yongin 446-719, Korea

**ABSTRACT** New thermal crack control system for mass concrete was developed to increase quality and to save construction period and cost. The principle of this system is that the curing water having proper temperature is supplied automatically to the surface of mass concrete member to keep the temperature difference between center and surface of concrete less than generally recommended temperature difference (20°C). Mock-up test was conducted to investigate the validity of newly developed curing system. As a result, no crack was founded in the specimen using automated curing system developed in this study, while many cracks occurred in another specimen without automated curing system. It was also confirmed that the strength and the durability of the concrete cured by automated curing system were improved.

**Keywords** : heat of hydration reducing, mass concrete, mock-up test, automated curing system

### 1. 서 론

최근에 대규모 해양구조물, 장대교량, 발전소, 초고층 빌딩 등 토목, 건축 구조물이 대형화 되면서 부피가 큰 매스 콘크리트의 온도균열이 문제가 되고 있다. 매스 콘크리트에서 온도균열은 콘크리트의 품질을 결정하는 가장 중요한 요소이기 때문에 연구자와 실무자들에게 관심이 큰 분야이며 온도균열을 제어하기 위한 수화열 저감대책이 강구되고 있다.

일반적으로 콘크리트는 경화과정에서 수화열이 축적되어 콘크리트의 내부온도가 상승하게 되고, 낮은 콘크리트의 열전도율로 인하여 내부와 외부의 온도차가 발생하게 된다.<sup>1)</sup> 이러한 온도차는 내·외부 구속 작용에 의하여 매스 콘크리트 부재에 인장응력이 발생하게 되고 인장응력이 콘크리트의 인장강도에 도달하게 되면 균열이 발생하게 된다.<sup>1,2)</sup>

매스 콘크리트의 온도균열을 방지하기 위해서는 콘크리트에 발생하는 수화열을 제어해야 하며, 매스 콘크리트에서 발생하는 수화열을 억제하기 위해서는 프리쿨링

법, 파이프쿨링법 등이 있다. 프리쿨링법은 배합수나 골재, 시멘트 등의 사용재료를 냉각시키는 방법이고, 파이프쿨링법은 콘크리트 타설 전에 파이프를 설치하여 냉각수를 통과시켜 내부에 발생하는 수화열을 낮추는 방법이다. 특히 파이프쿨링법은 초기재령에서의 콘크리트의 수화열을 낮추어 균열을 제어하는데 효과가 있으며, 부재의 내부온도를 빠른 시간에 외부 온도까지 강하시킬 수 있기 때문에 대규모 공사에서도 주로 이용되고 있는 방법이다. 또한, 파이프쿨링 공법은 타설 콘크리트의 배합변경이 없어 별도의 품질시험이 불필요하고, 수화열 저감 효과가 분명한다는 장점은 있으나, 이 방법은 공사비용이 증가하게 되고, 시공과정이 복잡해서 공기가 증가하게 되는 문제점이 있기 때문에 보다 효율적으로 온도균열을 제어하기 위한 방안이 요구되고 있는 실정이다.<sup>3,4)</sup>

따라서 이 연구에서는 기존의 파이프쿨링 공법보다 효율적인 방법으로 매스 콘크리트에서 발생하는 온도균열을 제어하기 위해서 온도제어시스템을 통해 적정온도의 양생수를 자동으로 공급하여 내·외부 온도차가 온도균열 제어 기준 온도를 초과하지 않도록 하는 양생자동화 시스템을 개발하였으며, mock-up 테스트를 통하여 그 성능을 검토하였다.

\*Corresponding author E-mail : tsseo@hdec.co.kr

Received September 26, 2012, Revised January 4, 2013,

Accepted February 1, 2013

©2013 by Korea Concrete Institute

## 2. 양생자동화 시스템

### 2.1 개요

이 시스템은 온도변화를 모니터링할 수 있는 데이터 로거와 양생수를 저장하기 위한 저장탱크(메인탱크, 보조 탱크), 그리고 양생수를 가열하기 위한 가열장치로 구성되어 있다. 이 시스템은 매스 콘크리트에 발생하는 온도 균열을 제어하기 위해서 타설 예정 매스 콘크리트 구조체 중심부와 표면부에 온도센서를 매립한 후 콘크리트를 타설하고, 온도제어시스템을 통해 내·외부 온도차이가 균열제어 기준 온도(일반적으로 20℃)를 초과하면 온도차를 그 이하가 될 수 있도록 자동으로 구조체 표면에 적정온도의 양생수를 공급하여 온도균열 발생을 제어하는 양생 자동화 시스템이다. 내부구속형 매스 콘크리트의 온도균열 제어를 위한 최대 내외부 온도차  $\Delta T_{max}$ 를 CIRIA C660<sup>5)</sup>에서는 식 (1)로 정의하고 있으며, 콘크리트 온도팽창계수  $\alpha_c$ :  $1.3 \times 10^{-5}$  초기재령에서의 콘크리트 인장한계 변형률을  $\epsilon_{cti}$ :  $70 \times 10^{-6}$ 로 해서 계산하면 19.9℃의 결과를 얻을 수 있다. 또한 BS<sup>6)</sup> 기준에서도 온도균열 제어를 위한 내외부 온도차를 20℃로 규정하고 있다.

$$\Delta T_{max} = \frac{3.7\epsilon_{cti}}{\alpha_c} \quad (1)$$

여기서,  $\epsilon_{cti}$ 는 초기재령에서의 콘크리트 인장한계 변형률이고,  $\alpha_c$ 는 콘크리트의 열팽창계수이다.

### 2.2 특징

이 시스템은 자동양생을 통해 효과적으로 온도균열을 제어하는 것 이외에도 다음과 같은 특징이 있다. 첫째, 이 시스템은 사용되는 양생수의 지속적인 재순환이 가능한 환경 친화적 구조로 만들어져 있어서 경제적이다(Fig. 1 참조), 둘째, 매스 콘크리트의 분할 타설을 줄여서 공기 단축 효과가 있으며, 자동화로 인한 인력절감 및 품질향상효과가 있다. 마지막으로 콘크리트 표면부를 지속적으로 습윤 상태로 만들어주므로 열풍기 등을 이용한 급열 양생의 결점이었던 건조수축 균열도 제어가 가능하다.

## 3. 실험 개요

이 연구에서는 양생자동화 시스템에 의한 매스 콘크리트의 온도균열 제어효과를 검토하기 위해서, 매스 콘크리트를 제작하여 mock-up 테스트를 실시하였고, 실험내용을 다음과 같이 정리하였다.

### 3.1 사용재료 및 콘크리트 배합

시멘트로는 슬래그 시멘트 2종을 사용하였고 잔골재와 굵은 골재는 강모래와 쇄석을 사용하였다(Table 1). 콘크리트 배합은 물시멘트비 38.5%, 목표슬럼프 150 mm 로 하였고 Table 2에 나타내었다.

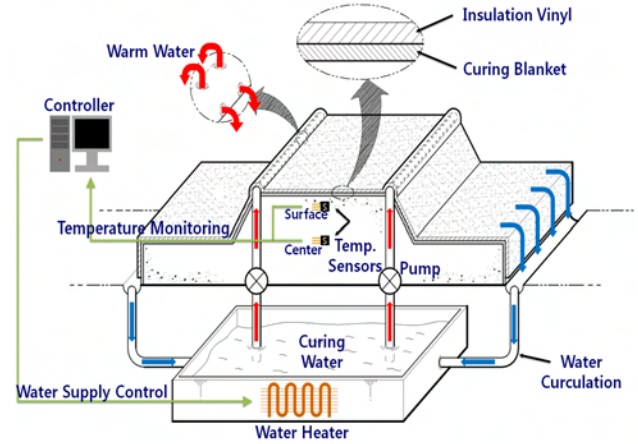
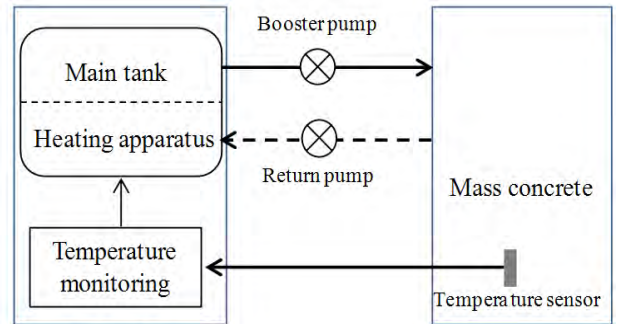


Fig. 1 Conceptual diagram of system



Automated curing system

Fig. 2 Outline flowchart

Table 1 Physical properties

Material	Physical properties
Cement	Blast-furnace slag cement (density: 2.92 g/cm <sup>3</sup> , specific surface area: 4720 cm <sup>2</sup> /g)
Fine agg.	River sand (density: 2.57 g/cm <sup>3</sup> , absorption: 1.48%)
Coarse agg.	Crushed aggregate (size: 20 mm, density: 2.69 g/cm <sup>3</sup> , absorption: 0.56 %)

Table 2 Mix proportion

W/C (%)	S/a (%)	Slump (mm)	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )			
			W	C	S	G
38.5	46.3	150	165	429	634	945

Note) W: water, C: cement, S: fine agg., G: coarse agg.

### 3.2 시험체 제작

시험체는 무근의 매스 콘크리트(폭: 3000 mm, 높이: 2000 mm, 길이: 5000 mm)로 하였으며 이 연구에서 개발한 양생자동화 시스템을 적용한 시험체(Mass-1)와 적용하지 않은 시험체(Mass-2) 각각 1개씩 총 2개의 시험체를 제작하였다. 시험체 2개를 동시에 펌프카를 이용하여 타설하였으며(Fig. 3(a)), 6시간이 소요되었다. 이 실험에서 사용된 양생수를 재활용하기 위해서 Fig. 3(b)와 같이 시험체 옆에 수로를 제작하였으며, 펌프를 이용해서 양생수를 회수하였다. 완성된 시험체는 Fig. 3(c)에 나타내었다.

### 3.3 센서 설치

해석을 통해서 온도와 응력이 최고인 곳과 주응력 방향을 선정하여 센서설치 위치를 정하였으며, 설치 위치를 Fig. 4에 나타내었다. 그림과 같이 표면부와 중심부에 설치된 온도센서(thermocouple T-type, 측정범위: -60~100℃)는 양생자동화 시스템에 연결되어 온도변화를 모니터링하게 되며, 내·외부 온도차가 20℃를 넘게 되면 온도차를 20℃ 이하가 될 수 있도록 자동으로 구조체 표면에 적정온도의 양생수를 공급하게 된다. 응력센서(GK-N-202, 측정범위: 20 MPa)는 시험체의 표면부와 중심부에 설치

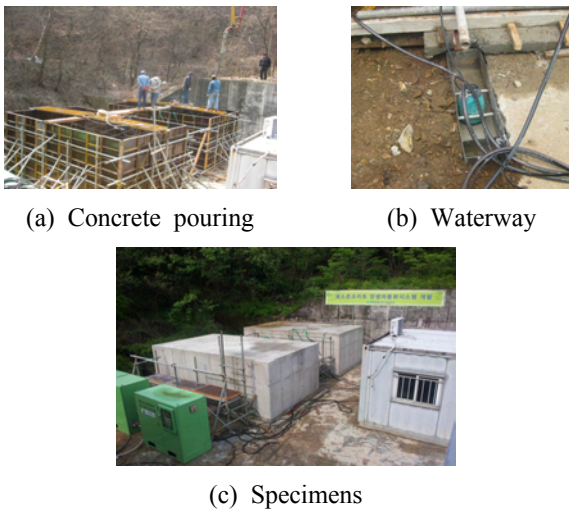


Fig. 3 Manufacture of specimens

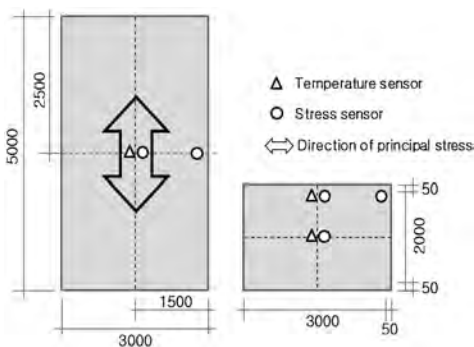


Fig. 4 Sensor location (unit: mm)

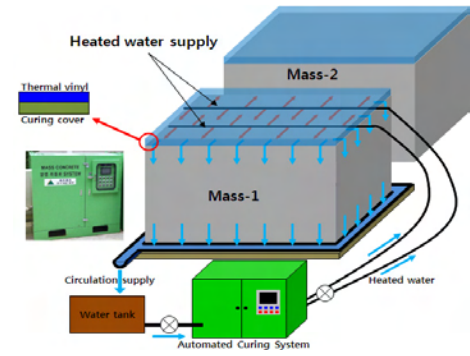


Fig. 5 Conceptual diagram of mock-up test

하여 온도응력의 변화를 관찰하였다. 이 연구에 적용된 응력센서는 로드셀이 내장되어 있기 때문에 콘크리트에 발생한 응력을 직접 측정할 수 있는 특징이 있다.

### 3.4 실험 방법

Mass-1 시험체는 양생자동화 시스템을 적용하였고, Mass-2 시험체는 비교를 위해서 양생포에 의한 일반적인 양생을 적용하였다. 온도 및 응력 계측은 타설일로부터 실시되었으며, 타설 후 초기 3일간은 15분 간격, 그 이후에는 1시간 간격으로 측정하였다. 양생자동화 시스템은 타설 후 17시간 후에 개시하였고, 타설일로부터 1주일간 실시하였다. 양생 완료 후에 균열발생 상황을 관찰하였으며, 균열발생상황은 균열수, 균열길이, 균열폭 등을 측정하여 비교하였다. 균열폭은 크랙스케일과 균열현미경을 이용하여 측정하였다. Fig. 5에 mock-up 테스트 개념도를 나타내었다.

## 4. 실험 결과 및 분석

### 4.1 온도 변화

매스 콘크리트 시험체의 온도변화를 Fig. 6에 나타내었다. 콘크리트 타설온도는 25.4℃이고, 양생자동화 시스템을 적용한 Mass-1 시험체는 콘크리트 타설 후 38시간이 지난 후에 최대 온도(61.3℃)에 도달하였고, 양생자동화 시스템을 적용하지 않은 Mass-2 시험체는 콘크리트 타설 후 35시간이 지난 후에 최대 온도(58.5℃)에 도달하였다. 최대온도 도달 후에 Mass-1 시험체는 75시간 후에 내부 온도가 40℃로 저하하였다. 반면에 Mass-2 시험체는 57시간 후에 내부 온도가 28℃로 저하하여, 양생자동화 시스템을 적용한 시험체보다 급격한 온도하강을 나타내었다.

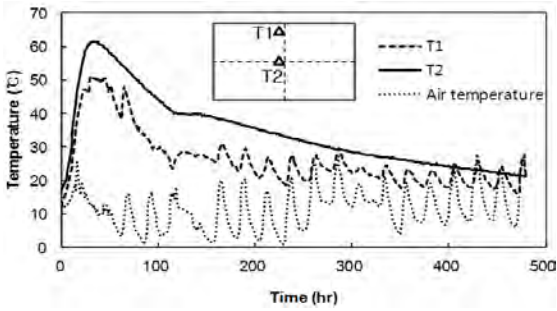
Fig. 7에 시험체의 내·외부 온도차를 나타내었다. 내·외부 온도차는 Fig. 6에서 T1과 T2의 실측값으로부터 구해졌으며, Mass-1 시험체는 내·외부 온도차가 20℃ 이하로 균열제어 기준온도를 만족하였고, Mass-2 시험체는 내·외부 온도차가 최대 29℃로 기준을 만족하지 않는 것으로 나타났다.

## 4.2 응력변화

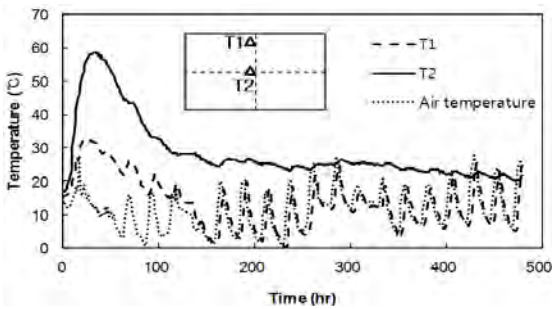
매스 콘크리트 시험체의 응력변화와 인장강도 예측 결과를 Fig. 8에 나타내었으며, 콘크리트 인장강도는 콘크리트 쪼갬인장강도 측정값(Fig. 11)에 근거한 근사식으로 구하였다. 두 시험체 모두 표면부에 인장응력이 발생하고 중심부에는 압축응력이 유발되는 내부구속에 의한 응

력거동이 지배적으로 나타났다. Mass-1 시험체의 경우, 시험체 표면부의 인장응력이 인장강도에 도달하지 않았으며, Mass-2 시험체는 표면부 인장응력이 인장강도에 도달하여, 균열이 발생할 가능성이 높은 것으로 나타났다.

Fig. 9에는 보다 자세한 온도균열 발생가능성을 확인하기 위해서 온도균열 지수를 검토한 결과를 나타내었다. KCI<sup>1)</sup> 및 JSCE<sup>7)</sup> 기준에서 제시하고 있는 온도균열지수는 식 (2)와 같다.

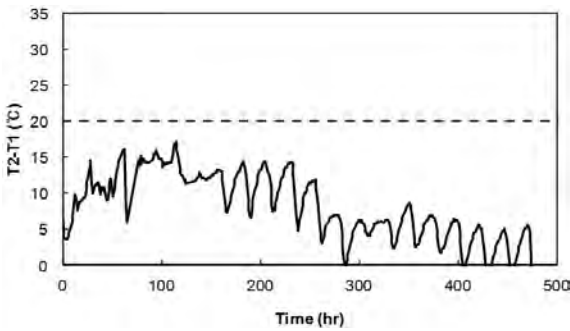


(a) Mass-1 specimen

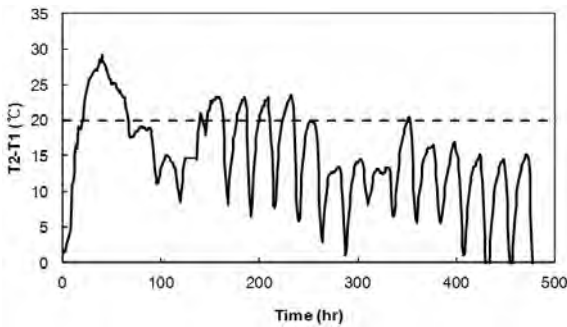


(b) Mass-2 specimen

Fig. 6 Temperature change

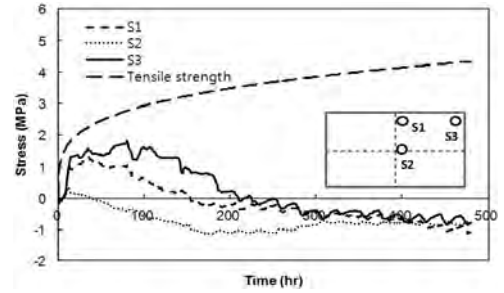


(a) Mass-1 specimen

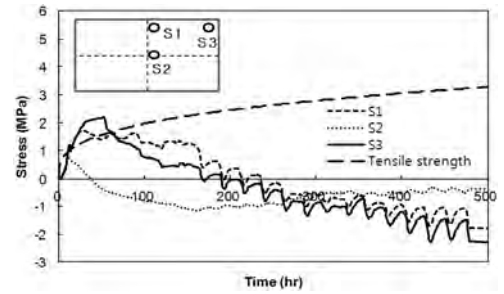


(b) Mass-2 specimen

Fig. 7 Internal-external temperature difference

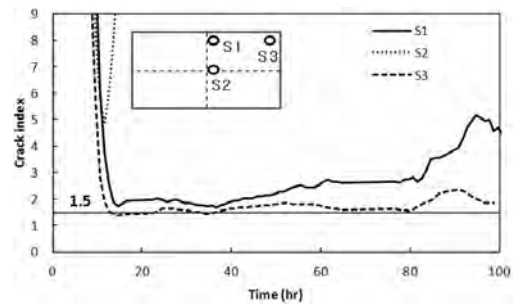


(a) Mass-1 specimen

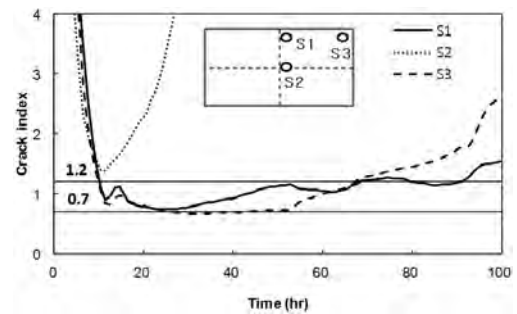


(b) Mass-2 specimen

Fig. 8 Behavior of stress



(a) Mass-1 specimen



(b) Mass-2 specimen

Fig. 9 Crack index histories

$$I_{cr} = \frac{f_{sp}(t)}{\sigma_t(t)} \quad (2)$$

여기서,  $f_{sp}(t)$ 는 재령  $t$ 일에서 콘크리트의 쪼갬인장강도(MPa)이고,  $\sigma_t(t)$ 는 재령  $t$ 일에서의 온도응력을 의미한다.

콘크리트의 쪼갬인장강도는 측정값에 근거한 근사식으로 구하였고, 온도응력은 응력센서에 의한 측정값을 이용하였다. 온도균열지수는 콘크리트 구조물의 중요도, 기능, 환경조건 등에 대응할 수 있도록 선정해야 하며, 일반적인 콘크리트 구조물의 표준적인 온도균열지수의 값은 다음과 같다.<sup>1,6)</sup>

- ① 균열발생을 방지하여야 할 경우: 1.5 이상
- ② 균열발생을 제한할 경우: 1.2 이상 1.5 미만
- ③ 유해한 균열발생을 제한할 경우: 0.7 이상 1.2 미만

Mass-1 시험체의 균열지수 최소값은 1.47로 균열발생을 방지하여야 할 경우에 해당하는 1.5에 근접하는 것으로 나타났으며, Mass-2 시험체의 균열지수는 최소값이 0.67로 균열이 발생할 확률이 높은 것으로 나타났다.

### 4.3 균열 검토

균열발생 상황을 Table 3에 나타내었다. 주응력에 직각인 방향으로 5개의 균열이 발생하였으며, 주응력 방향에 평행한 방향으로도 3개의 균열이 발생하였다. 내부구속이 강한 매스 콘크리트의 경우 표면에 균열이 불규칙적으로 발생하는 경향이 있으므로 주응력 방향에 평행한 방향으로도 균열이 발생한 것으로 사료된다. 양생 자동화 시스템을 적용한 Mass-1 시험체에서는 균열이 발생하지 않았다. 하지만 Mass-2 시험체에서는 Table 3에 정리한 바와 같이 총 8개의 균열이 발생하였으며, 특히 구조물의 내구성에 유해한 영향을 미칠 수 있는 0.4 mm 이상의 균열폭도 관찰되었다.

### 4.4 콘크리트 품질 검토

두 시험체의 양생조건에 따른 콘크리트의 품질을 검토하기 위하여 표준양생(20±1°C 수중양생), Mass-1 시험체와 동일한 양생조건, Mass-2 시험체와 동일한 양생조건으로 하여 강도(압축, 인장) 특성과 염화물 이온 침투 저항성능을 검토하였다. 콘크리트의 압축강도 특성을 검토하기 위해서 KS F 2403<sup>8)</sup>에 준하여 Φ 100×200 mm의 원주공시체를 제작하였고, KS F 2405<sup>9)</sup>에 준하여 압축강도 실험을 실시하였다. 인장강도 특성을 검토하기 위해서, KS F 2423<sup>10)</sup>에 준하여 쪼갬인장강도 테스트를 실시하였고, 강도 Test는 재령 2일, 7일, 28일에 실시하였다. 염화물 이온 침투 저항성능은 ASTM C 1202<sup>11)</sup>에 준하여 실시하였고, 그 결과를 Fig. 10~12에 나타내었다. 강도특성 (Fig. 10, 11)은 양생자동화 시스템을 적용한 콘크리트가 고온양생과 습윤양생에 의한 활발한 수화반응에 의해서 표준양생을 적용한 콘크리트보다 36% 정도 높게 나왔으며, 양생포에 의한 일반양생을 적용한 시험체의 경우 강

도가 가장 낮게 나타났다. 염해저항성능 시험 결과를 Fig. 12에 나타내었다. 염소이온 투과실험은 매 시편마다 6시간 동안 30분 간격으로 전류값을 측정하고, 식 (3)을 이용하여 총 전하량을 산정하였다. 양생자동화 시스템을 적용한 콘크리트의 전하량은 1543 coulomb으로 표준양생을 적용한 콘크리트보다 작게 나타났으며, ASTM C 1202 기준(Table 4)과 비교했을 때 염화물침투성이 낮은 것으로 나타났다. 그러나 양생포에 의한 일반양생을 적용한 콘크리트의 전하량은 4276 coulombs으로 염화물침투성이 높은 것으로 나타났다.

Table 3 Cracks in Mass-2 specimen

Crack number	Length (mm)	Maximum width (mm)
①	2000	0.3
②	250	0.15
③	1800	0.15
④	1200	0.2
⑤	800	0.2
⑥	2900	0.4
⑦	830	0.2
⑧	1800	0.2

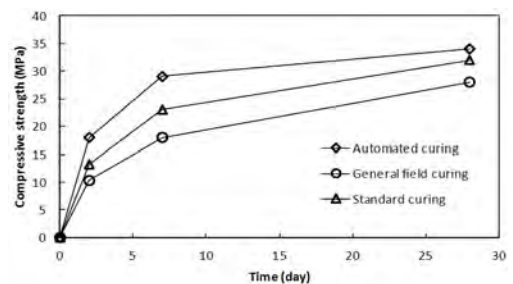
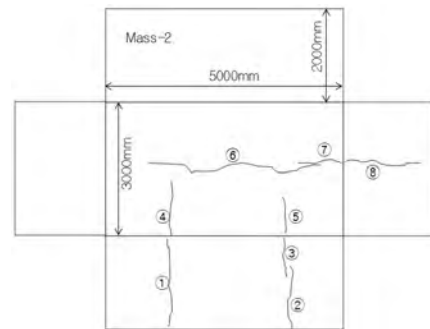


Fig. 10 Compressive strength

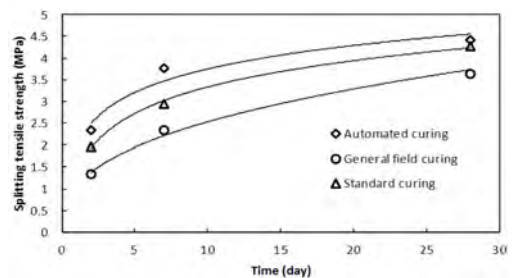


Fig. 11 Splitting tensile strength

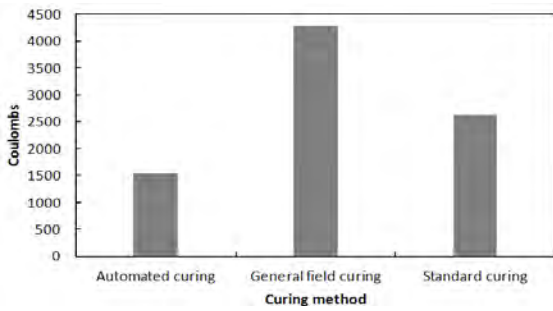


Fig. 12 Total passed charge

Table 4 Chloride ion penetrability based on passed charge<sup>10)</sup>

Passed charge (coulombs)	Chloride ion penetrability
>4000	High
2000~4000	Moderate
1000~2000	Low
100~1000	Very Low
<100	Negligible

$$Q = 900(I_0 + 2I_{30} + 2I_{60} + \dots + I_{360}) \quad (3)$$

여기서,  $I_n$ : n분 후 전류(amperes)

## 5. 결 론

매스 콘크리트에서 발생하는 온도균열을 제어하기 위해 개발된 양생자동화 시스템의 성능을 검토하기 위하여 mock-up 테스트를 실시하였으며 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 양생자동화 시스템을 적용한 Mass-1 시험체는 내·외부 온도차가 20℃ 이하로 균열제어 기준온도를 만족하였고, 양생자동화 시스템을 적용하지 않은 Mass-2 시험체는 내·외부 온도차가 최대 29℃로 기준을 만족하지 않는 것으로 나타났다.
- 2) Mass-1 시험체의 균열지수 최소값은 1.47로 균열발생을 방지하여야 할 경우에 해당하는 1.5에 근접하는 것으로 나타났으며, Mass-2 시험체의 균열지수는 최소값이 0.67로 균열이 발생할 확률이 높은 것으로 나타났다.
- 3) 양생조건에 따른 콘크리트의 품질을 검토한 결과 콘크리트의 강도특성은 양생자동화시스템을 적용한 콘크리트가 표준양생을 적용한 콘크리트보다 높게 나타났으며, 양생포에 의한 일반양생을 적용한 시험체의 강도가 가장 낮게 나타났다. 염분침투 특성

은 양생자동화 시스템을 적용한 콘크리트의 전하량이 표준양생을 적용한 콘크리트보다 작게 나타났으며, 양생포에 의한 일반양생을 적용한 콘크리트의 염화물침투성이 가장 높게 나타났다.

- 4) 양생자동화 시스템을 사용하여 양생할 경우 내·외부 온도차를 적절히 제어하여 온도균열을 제어하는데 효과적인 것으로 나타났으며, 콘크리트의 강도 및 내구성 측면에서도 우수한 것으로 확인되었다. 따라서 향후 대형구조물 또는 주요 구조물의 매스 콘크리트 온도균열 제어에 유용하게 활용될 것으로 판단된다.

## 참고문헌

1. Korea Concrete Institute, *Thermal Crack Control in Mass Concrete*, Kimoondang Publishing Company, Seoul, Korea, 2010, 166 pp.
2. Kanda, T., "Quantitative Evaluation of Shrinkage Cracking Initiation," *Concrete Journal*, Vol. 43, No. 5, 2005, pp. 60-65.
3. Kim, H. S., Han, S. B., and Kim, H. R., "Hydration Heat Analysis according to Heat Transfer Coefficient of Massive Concrete using Coarse Particle Cement," *Journal of Architectural Institute of Korea*, Vol. 25, No. 5, 2009, pp. 63-70.
4. Baek, D. I. and Kim, M. S., "Application of Heat Pipe for Hydration Heat Control of Mass Concrete," *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 20, No. 2, 2008, pp. 157-164.
5. Bamforth, P. B., *Early-Age Thermal Crack Control in Concrete*, CIRIA C660, London, 2007.
6. BS 8110-2, *Structural Use of Concrete-Part1: Code of Practice for Special Circumstances*, British Standard, 1985, 23 pp.
7. JSCE, *Specification for Design and Construction of Concrete Structures (Construction part)-Mass Concrete*, 1996, pp. 173-193.
8. KS F 2403, *Standard Test Method of Making and Curing Concrete Specimens*, Korean Agency for Technology and Standard, 2010, pp. 1-8.
9. KS F 2405, *Standard Test Method for Compressive Strength of Concrete*, Korean Agency for Technology and Standard, 2010, pp. 1-6.
10. KS F 2423, *Method of Test for Splitting Tensile Strength of Concrete*, Korean Agency for Technology and Standard, 2006, pp. 1-7.
11. ASTM C 1202, *Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration*, ASTM International, 2005, pp. 1-6.

**요 약** 이 연구에서는 기존의 수화열저감 공법에서 문제가 되었던 시공성, 공기, 공사비용 등의 효율성을 높이기 위해 새로운 매스 콘크리트의 온도균열 발생 저감시스템을 개발하였다. 이 시스템은 매스 콘크리트에 발생하는 온도균열을 제어하기 위해서 타설 예정 매스 콘크리트 구조체 중심부와 표면에 온도센서를 매립한 후 콘크리트를 타설하고, 온도제어시스템을 통해 내·외부 온도차이가 균열제어 기준 온도를 초과하면 온도차를 그 이하가 될 수 있도록 자동으로 구조체 표면에 적정온도의 양생수를 공급하여 온도균열 발생을 제어하는 양생 자동화 시스템이다. 이 시스템의 타당성을 검토하기 위해서 mock-up 테스트를 실시하였으며, 이 시스템의 우수성을 확인할 수 있었다.

**핵심용어** : 수화열저감, 매스 콘크리트, mock-up 테스트, 양생자동화 시스템