



## 대형 터빈 기초 구조물의 온도균열 제어에 관한 연구

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

<sup>1)</sup>현대건설 연구개발본부 첨단재료연구팀

### A Study on the Thermal Crack Control of Foundation for Large Turbine

Ju-Hyung Ha,<sup>1)</sup> Yun-Gu Cho,<sup>1)</sup> Kewn-Chu Lee,<sup>1)</sup> and Chang-Keun Lim<sup>1)\*</sup>

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

**ABSTRACT** Heat of hydration of mass concrete is one of the most important factors that significantly affect structural quality and construction period. Therefore, appropriate methods to control heat of hydration are essential technologies for mass concrete construction. In this study, probability of thermal cracking was checked by thermal analysis prior to the construction of a turbine foundation in a domestic power plant. Subsequently, changes of concrete mix proportion and an effective curing method were proposed to control heat of hydration of mass concrete structures. Concrete manufactured by slag cement was proposed instead of concrete produced by ordinary Portland cement, and an automated curing method was proposed to improve the curing method using typical moist curing with blanket. The automated curing method maintains the temperature difference between center and surface of concrete below a setting value by temperature monitoring. Concrete with slag cement was used for actual construction. One of two identical turbine foundations was cured by an insulated curing method, and the other was cured by the automated curing method to compare the curing methods. And then, the effects of control of heat of hydration were evaluated based on temperature/strain monitoring and crack investigations.

**Keywords** : turbine foundation, mass concrete, thermal crack, curing, automated curing method

### 1. 서 론

최근 이상기온, 전기요금 인상폭의 불확실성, 경기변동성 확대 등으로 전력 수요예측이 쉽지 않은 상황 가운데, 현재 전체 발전기의 28.8%가 20년 이상 노후 발전기로 고장건수가 급증하는 등 전력 공급 불확실성이 확대되고 있다. 이러한 상황에서 후쿠시마 원전사고, 미검증부품 논란 등으로 인하여 원전확대에 대한 국민 수용성이 저하되어 있고, 신재생에너지 보급확대를 위해 노력중이나 환경여건, 발전비용 등 현실적 한계가 존재한다. 2027년 기준 총 신규설비 2957만 kW 중 신규 화력 설비규모는 1530만 kW(석탄 10.5기, LNG 6기)로 가장 큰 비중을 차지하고, 신규 원전 600만 kW(4기)는 판단을 유보한 상태이다.<sup>1)</sup>

이렇게 최근 증가 추세에 있는 화력발전소 건설에 있어서, 터빈은 가장 핵심이 되는 건물이고, 이 터빈의 기

초 구조물은 중요한 역할을 한다. 터빈의 기초는 자체 중량과 기관운전으로 인한 진동력을 충분히 견디고, 운전으로 인한 진동이 다른 기기나 건물에 해로운 영향을 미치지 않아야 한다. 진동의 전달을 감소시키기 위해서는 보통 기초의 중량을 키우게 되는데, 이러한 콘크리트 기초는 매우 매시브한 구조물이고, 이러한 매스콘크리트에서는 시멘트의 수화열에 의한 구조물의 온도변화가 유발하는 온도응력이 구조물에 균열을 발생시키거나 구조물 설계에서 무시할 수 없는 영향을 주는 경우가 빈번히 나타나고 있다. 이러한 온도균열 제어대책으로는 적절한 재료, 배합설계, 비비기 온도 및 양생방법 선정 등을 들 수 있다.<sup>2)</sup>

이 연구에서는 대형 터빈 기초 콘크리트의 온도균열 대책의 일환으로 콘크리트 배합의 변경, 내외부 온도차를 능동적으로 제어하는 양생방법의 적용을 변수로 수화열 및 온도응력 해석을 실시하였다. 또한, 해석 결과를 토대로 변경된 콘크리트 배합과 양생조건을 실제 시공에 적용하고, 콘크리트의 온도 및 변형률 모니터링, 균열 조사를 통하여 제안된 온도응력 저감방법에 의한 터빈 기초 콘크리트 구조물의 온도균열 제어 효과를 평가하였다.

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

Received January 6, 2014, Revised March 13, 2014,

Accepted March 31, 2014

©2014 by Korea Concrete Institute

## 2. 해석방법 및 조건

### 2.1 해석개요 및 대상 구조물

이 수화열 해석에서는 터빈 기초 콘크리트 온도분포 해석을 위하여 유한요소법을 이용하였으며 이는 기하적 형상, 재료의 성질, 임의의 경계조건을 고려할 수 있는 장점이 있다. 유한요소해석을 위한 Tool로서 앞에서 제시한 사항들을 고려할 수 있는 FEM해석 프로그램인 DIANA를 이용하였다.

대상 구조물은 34 m × 9 m × 2 m 매스콘크리트이고, 지반 및 대상 구조물은 대칭 구조물로서 Fig. 1과 같이 3차원 1/2 모델링을 사용하였다.

### 2.2 콘크리트 재료 특성

이 구조물에 적용한 콘크리트의 배합은 아래의 Table 1과 같다. 시멘트는 1종 보통시멘트를 사용하는 경우와 고로슬래그시멘트(슬래그 40% 함유)를 사용하는 경우의 두 가지에 대하여 해석을 수행하였다.

해석에 사용된 콘크리트 단열온도상승 특성은 실제 단열온도 상승시험을 통하여 구하였고 Fig. 2에 나타내었

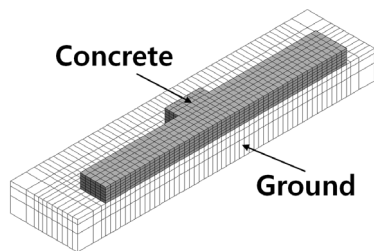


Fig. 1 Modelling for thermal analysis

Table 1 Concrete mix proportion

Type	MPa	W/C	S/A	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )					Air content (%)
				W	C	S	G	AD	
OPC	24	50.0	46.6	170	340	834	979	2.67	4.3
Slag	24	49.6	46.8	170	346	834	970	2.42	4.3

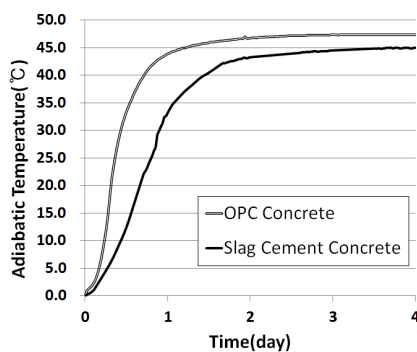


Fig. 2 Results of the adiabatic temperature rise test

다. 열전도율, 비열, 압축강도, 인장강도 및 탄성계수 발현식 등 콘크리트의 재료 특성은 콘크리트표준시방서를 참고하여 적용하였고, 그 값은 Table 2, 3 및 4에 정리하였다.<sup>2)</sup> 압축강도 발현식의 계수의 경우 슬래그시멘트를 적용한 콘크리트의 경우 중용열 포틀랜드 시멘트 콘크리트에 해당하는 것으로 가정하였다.

### 2.3 지반 조건

이 구조물 하부에 암반이 있는 것으로 모델링하였고, 그 열특성계수는 콘크리트표준시방서를 참고하여 Table 5와 같이 하였다.

Table 2 Input data of concrete properties for thermal analysis<sup>2)</sup>

Properties	Input value
Conductivity (W/m°C)	2.7
Specific Heat (J/kg°C)	1155
Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )	2300
Thermal expansion coefficient	1×10 <sup>-5</sup>
Poisson's ratio	0.18
Compressive strength (MPa)	$f_{cu}(t) = \frac{t}{a+bt} \times d_i \times f_{ck}$
Young's modulus (MPa)	$E_c(t) = \psi(t) 4700 \sqrt{f_{cu}(t)}$
Tensile strength (MPa)	$f_{sp}(t) = 0.44 \sqrt{f_{cu}(t)}$

Where,  $f_{cu}(t)$  : Compressive Strength of Concrete at Age  $t$  (MPa)

$f_{sp}(t)$  : Splitting Tensile Strength of Concrete at Age  $t$  (MPa)

$f_{ck}$  : Specified Characteristic Compressive Strength at 28 Days (MPa)

$t$  : Concrete Age (day)

$d_i$  : Modification Factor for Concrete Strength at 91 Days

$d_i f_{ck}$  : Specified Characteristic Compressive Strength at 91 Days (MPa)

$E_c(t)$  : Concrete Effective Young's Modulus at Age  $t$  (MPa)

$\psi(t)$  : Modification Factor for Young's Modulus considering Creep Effect

Table 3 Coefficients for compressive strength<sup>2)</sup>

Cement type	$a$	$b$	$d_i$
Type I ordinary cement	4.5	0.95	1.11
Moderate heat cement (slag cement)	6.2	0.93	1.15

Table 4 Modification factor for Young's modulus<sup>2)</sup>

	$0 \leq t < 3$ days	$3 \text{ days} \leq t < 5$ days	$t \geq 5$ days
$\psi(t)$	0.73	$0.135t + 0.325$	1.00

## 2.4 양생조건 및 외기온도

두 가지 콘크리트 배합에 대하여 매스콘크리트 온도균열 제어를 위하여 적용될 양생자동화시스템에 의한 양생을 실제 현장상황과 유사하게 모사하여 해석을 수행하고, 일반양생을 적용한 조건에서의 해석 결과와 비교하였다.

### 2.4.1 일반양생

일반적으로 많이 사용되는 양생법으로서 “양생포+살수” 방법으로 가정하였고, 양생기간 및 거푸집 탈형 시기는 타설 후 7일로 하였다.

### 2.4.2 양생자동화시스템 양생

매스콘크리트 중심부와 표면부의 실시간 온도 모니터링을 통하여 내외부 온도차가 설정치를 초과할 경우 콘크리트 표면에 적정온도의 양생수를 자동으로 공급하여 내외부 온도차를 일정수준 이내로 유지하는 시스템이다. Mock-up 시험<sup>3)</sup>과 현장적용<sup>4,6)</sup>을 통하여 그 효과가 입증된 시스템으로서, 내외부 온도차 제어를 통해 온도균열 발생을 저감할 수 있는 자동화 양생공법이다. 이 해석에서 양생자동화시스템은 타설 후 7일 동안 콘크리트 내외부 온도차에 따라 가동여부가 결정되도록 하였다.

실제상황에서 열전달 계수의 경우 일사량, 수분 증발, 잠열, 바람, 양생수 살포, 콘크리트 표면의 거칠기, 보온재 유무 등과 같은 많은 인자에 영향을 받으며, 시시각각으로 변하기 때문에 그 값을 정확하게 예측하기는 매우 어렵다. 따라서 이 해석에서는 거푸집, 양생포+살수 유무만을 고려하여 콘크리트 표준시방서에서 제시하는 참고값을 적용하였다.<sup>7,8)</sup> 이 해석에서 사용한 열전달 계수는 아래의 Table 6과 같다.

이 해석에서 외기온도는 해당 현장 지역의 과거 기온 Data 를 참고하여  $28 \pm 3^\circ\text{C}$ 로 가정하였으며, 양생자동화

**Table 5** Input data of ground properties for thermal analysis<sup>2)</sup>

Properties	Input value
Conductivity ( $\text{W/m}^\circ\text{C}$ )	3.45
Specific Heat ( $\text{J/kg}^\circ\text{C}$ )	795
Unit Weight ( $\text{kg/m}^3$ )	2650

**Table 6** Convection heat transfer coefficients at concrete surface

Conditions	Convection coefficient ( $\text{W/m}^2^\circ\text{C}$ )	Reference
Plywood form	8	KCI, 2009
General curing (moist curing w/ blanket)	8	KCI, 2009
w/o Form	14	KCI, 2009

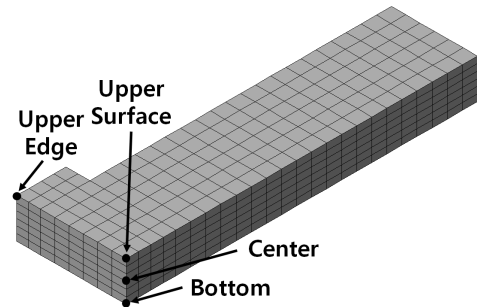
시스템 적용 해석시에는 시스템 작동을 모사하여 내외부 온도차가  $20^\circ\text{C}$  이상으로 벌어질 경우 온도차를 줄이기 위하여 양생자동화시스템 적용 표면의 외기온도를 3시간 동안  $60^\circ\text{C}$ 로 설정해 주었다. 또한 타설시 콘크리트 온도는 외기온도를 고려하여  $30^\circ\text{C}$ 로 설정하였다.

## 3. 해석 결과 및 분석

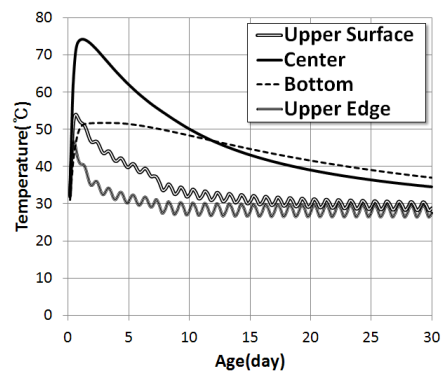
### 3.1 온도해석 결과

이 연구에서 실시한 온도해석 위치 Fig. 3에 표시하였다.

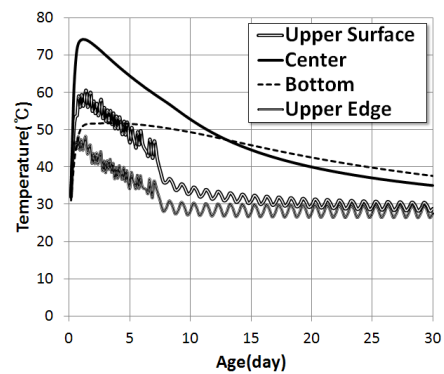
1종 보통시멘트 콘크리트와 고로슬래그시멘트 콘크리트를 사용하고, 각각 일반양생과 양생자동화시스템 양생을 적용하여 해석을 하였을 때 콘크리트 온도이력결과는 Fig. 4와 5에 나타내었다.



**Fig. 3** Locations of temperature results

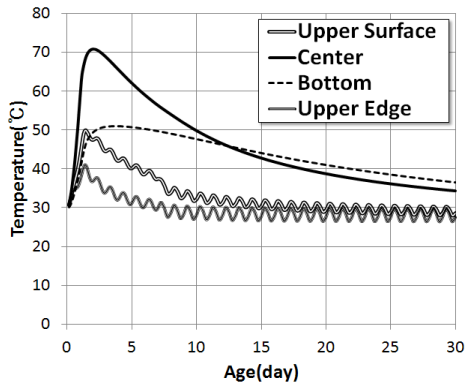


(a) General curing method

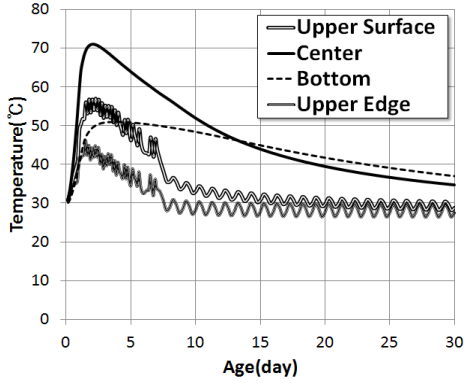


(b) Automated curing method

**Fig. 4** Results of concrete temperature - OPC concrete

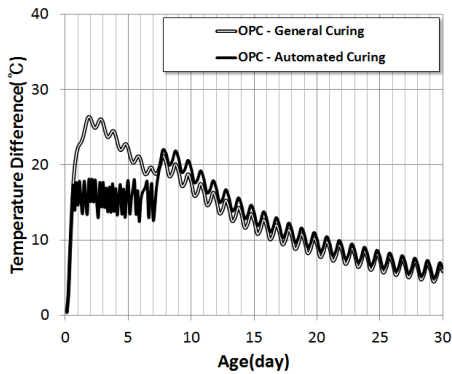


(a) General curing method

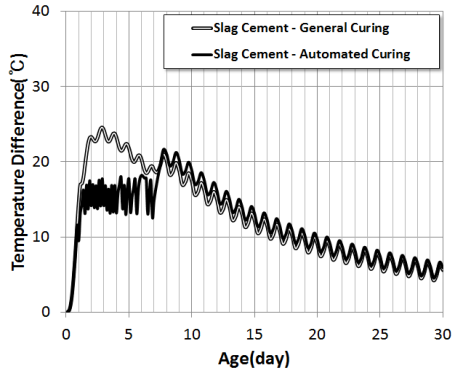


(b) Automated curing method

Fig. 5 Results of concrete temperature - slag cement concrete



(a) OPC concrete



(b) Slag cement concrete

Fig. 6 Temperature difference between center and surface of concrete

Table 7 Results of temperature

Concrete type	Curing method	Max. temperature		Max. temperature difference (center vs upper surface)	
		Temperature (°C)	Age (days)	Temperature (°C)	Age (days)
OPC concrete	General curing method	74.2	1.1	26.4	1.9
	Automated curing method	74.2	1.1	22.0	7.8
Slag cement concrete	General curing method	70.8	2.0	24.6	2.9
	Automated curing method	70.9	2.1	21.6	7.8

또한 각각의 경우에 내외부 온도차 이력 결과를 Fig. 6에 나타내고, Table 7에 전체 온도해석 결과를 정리하였다.

온도해석 결과를 살펴보면, 고로슬래그시멘트 콘크리트의 경우 1종 보통시멘트 콘크리트와 비교하여 최대온도를 3도 이상 낮출 수 있었고, 최대온도가 나타나는 시기도 고로슬래그시멘트 콘크리트의 경우 48~50시간으로서, 26시간에 최대온도가 나타나는 1종 보통시멘트 콘크리트와 비교하여 하루 정도 뒤로 미룰 수 있었다.

BS기준에서 온도균열 제어를 위한 내외부 온도차를 20°C로 규정하고 있는데<sup>9)</sup> Fig. 6에서 보면 일반양생의 경우 콘크리트 내외부 온도차가 20°C 이상 벌어지기 시작하는 시기는 약 1~2일 정도로서 초기 콘크리트 인장강도가 낮을 시기여서 온도응력에 의한 균열 가능성이 높은 반면, 양생자동화시스템을 적용한 경우 콘크리트 내외부 온도차 최대값도 일반양생과 비교하여 더 작을 뿐만 아니라 내외부 온도차가 20°C 이상 벌어지는 시기가 양생자동화시스템의 적용이 끝난 후인 인장강도가 비교적 많이 발현되는 타설 후 7일 이후로서 온도응력에 대한 저항성이 커져서 온도균열 발생 가능성이 비교적 낮을 것으로 판단되었다.

### 3.2 응력해석 결과

이 연구에서 실시한 응력해석 위치는 Fig. 7와 같다. 콘크리트 종류 및 양생조건에 따른 응력해석 결과 그래프는 Fig. 8과 9에 나타내었다.

Fig. 8(a)에서 1종 보통시멘트 콘크리트에 일반양생을 사용한 경우에는 초기 내부구속에 의한 인장응력이 해당 재령의 콘크리트 인장강도 수준까지 발생하는 것으로 나타났다. 이는 Fig. 8(b)와 같이 양생자동화시스템 적용을

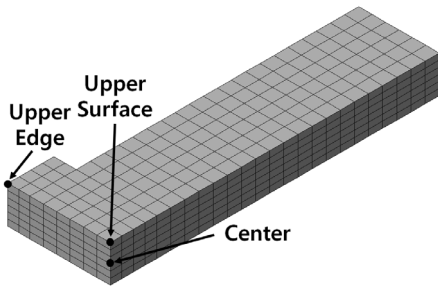
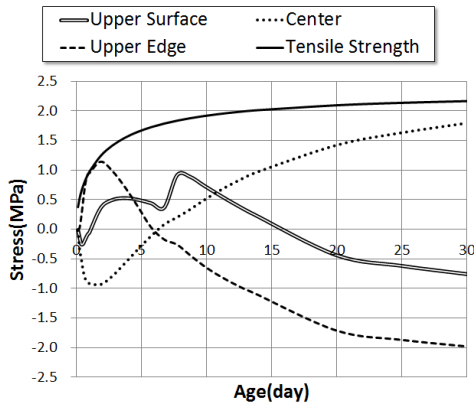
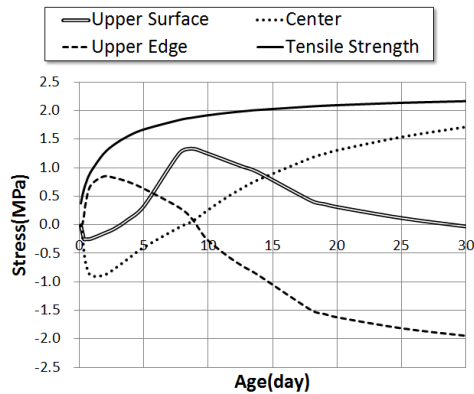


Fig. 7 Locations of stress results



(a) General curing method



(b) Automated curing method

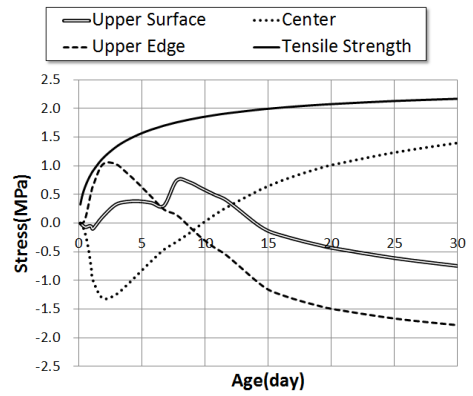
Fig. 8 Results of thermal stress - OPC concrete

통하여 26% 저감할 수 있었다.

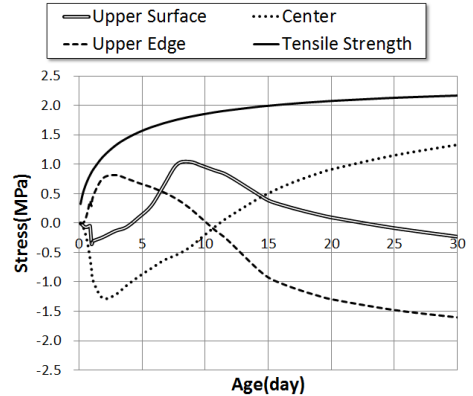
Fig. 9로부터, 슬래그시멘트 콘크리트를 사용하면 30일 재령에서 외부구속에 의해 발생하는 인장응력을 1종 보통시멘트 콘크리트를 사용할 때에 비해 22% 감소시킬 수 있음을 알 수 있었다. 또한 Fig. 9(a)를 통해 타설 초기 내부구속에 의해 표면부에 유발되는 인장응력도 1종 보통시멘트 콘크리트를 사용할 때에 비하여 9% 줄일 수 있었고, 양생자동화 시스템 적용(Fig. 9(b))을 통하여 적용 전(Fig. 9(a))에 비하여 21% 저감시킬 수 있었다.

이와 같이, 응력해석 결과를 통하여 배합변경과 양생 방법 변경에 따른 내외부 구속응력제어 효과를 확인할 수 있었다.

대상구조물의 콘크리트 온도균열 가능성은 콘크리트 표준시방서 기준에서 제시하고 있는 온도균열지수로 평



(a) General curing method



(b) Automated curing method

Fig. 9 Results of thermal stress - slag cement concrete

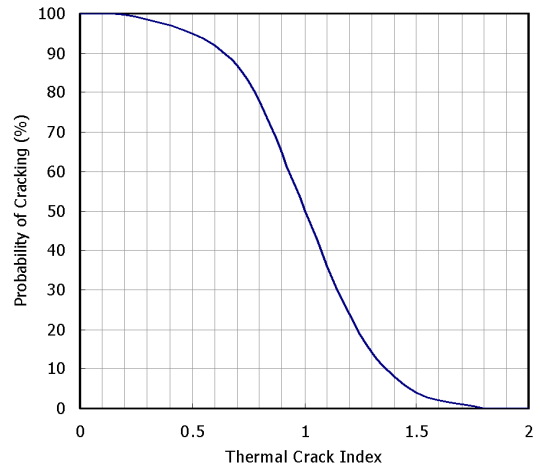


Fig. 10 Thermal crack index-probability of cracking

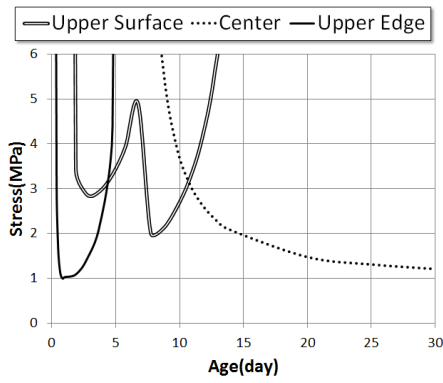
가하였다.<sup>2)</sup> 위 기준들에서 제시하고 있는 온도균열지수는 아래와 같다.

$$I_{cr}(t) = \frac{f_{sp}(t)}{f_t} \quad (1)$$

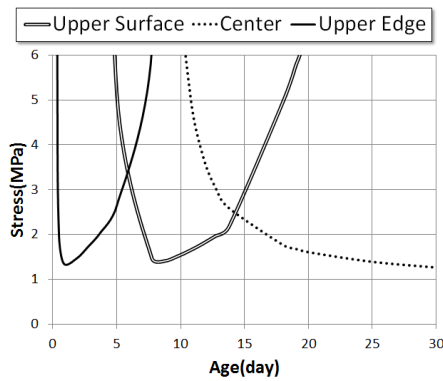
여기서,  $I_{cr}(t)$ : 재령  $t$ 일시 온도균열지수

$f_{sp}(t)$ : 재령  $t$ 일시 콘크리트 쪼갬인장강도(MPa)

$f_t$ : 재령  $t$ 일시 온도응력 최대값(MPa)

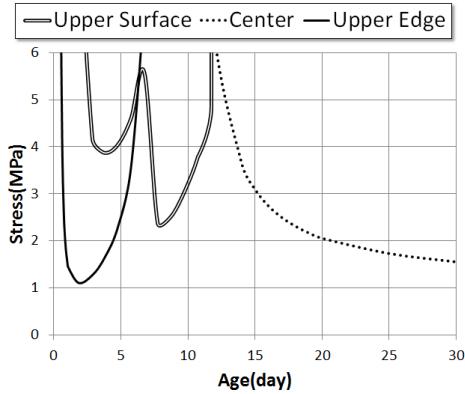


(a) General curing method

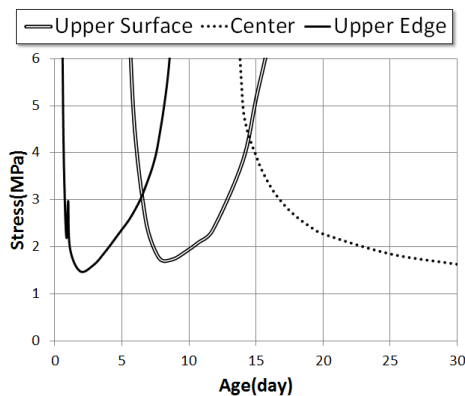


(b) Automated curing method

Fig. 11 Results of crack index  $I_{cr}$  - OPC concrete



(a) General curing method



(b) Automated curing method

Fig. 12 Results of crack index  $I_{cr}$  - slag cement concrete

온도균열지수는 구조물의 중요도, 기능, 환경조건 등에 대응할 수 있도록 선정하여야 하며, 철근이 배치된 일반적인 구조물의 표준적인 온도균열지수는 아래와 같다.

- 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

온도균열지수에 대한 결과는 Fig. 11, Fig. 12, Table 8 및 Table 9에 나타내었다.

Fig. 11 및 Table 8의 해석 결과에 따르면, 1층 보통시멘트 콘크리트에 일반양생방법을 적용하였을 때의 초기 온도균열지수는 0.99로서 Fig. 10에 따르면 온도균열발생 확률이 50% 정도 되었다. 여기에 양생자동화시스템을 적용함으로써 온도균열지수를 1.34로 올릴 수 있었고, 이때의 온도균열발생확률은 10%로서 대폭 낮아지는 것을 알 수 있었다.

양생방법은 일반양생방법을 사용하고 콘크리트 배합만 슬래그 시멘트 콘크리트로 변경하였을 때(Fig. 12(a))

Table 8 Results of stress analysis - surface

Concrete type	Curing method	Min. $I_{cr}$	Age (day)	Stress at this age (MPa)	Cracking probability (%)
OPC concrete	General curing method	0.99	0.9	0.93	50
	Automated curing method	1.34	0.9	0.69	10
Slag cement concrete	General curing method	1.10	1.9	1.02	35
	Automated curing method	1.48	1.9	0.76	5

Table 9 Results of stress analysis - center at age 30 days

Concrete type	Curing method	Min. $I_{cr}$	Stress at this age (MPa)	Cracking probability (%)
OPC concrete	General curing method	1.21	1.79	24
	Automated curing method	1.26	1.71	17
Slag cement concrete	General curing method	1.55	1.40	5 under
	Automated curing method	1.63	1.33	5 under



에는 초기 온도균열지수 1.10, 온도균열발생확률 35%로서 1종 보통시멘트 콘크리트를 사용하였을 때(Fig. 11(a)) 보다는 온도균열발생확률이 낮아졌지만, 양생방법만 양생자동화시스템 적용으로 변경하였을 때(Fig. 11(b)) 보다는 온도균열 저감 효과가 크지 않았다. 또한 양생자동화시스템과 슬래그 시멘트 콘크리트로의 배합 변경을 동시에 적용하였을 때(Fig. 12(b))에는 초기 온도균열지수가 1.48, 온도균열발생확률 5%로서 온도균열이 거의 발생하지 않는 것으로 나타났다.

Table 9에 의하면 재령 30일에서 외부구속에 의한 온도균열 저감은 콘크리트 배합변경에 의한 방법이 효과적인 것으로 나타났다. 1종 보통시멘트 콘크리트 사용시 17~24%에 달하는 온도균열발생확률이 슬래그 시멘트 콘크리트 적용을 통하여 5% 이하로 떨어지는 것을 알 수 있었다.

향후 양생자동화시스템 적용시 타설 초기 시스템 가동을 위한 내외부 온도차 설정치를 더 작게 설정한다면 타설초기 표면의 온도균열지수는 더 올라갈 것으로 예상되고, 가동 정지 1~2일 전부터 공급되는 양생수의 수온을 서서히 낮춘다면, 가동 정지시 발생하는 열충격에 의해 유발되는 인장응력의 크기를 줄여 온도발생확률을 더 낮출 수 있을 것으로 판단된다.

## 4. 현장 계측

### 4.1 개요

이 연구에서 해석 및 계측 대상구조물은 국내에 위치한 화력발전소 공사 현장의 터빈 기초로서 34 m × 9 m × 2 m 규모의 동일한 2기로 이루어져 있다. 2기의 구조물에서 콘크리트 배합은 해석 결과로부터 1종 보통시멘트 콘크리트보다 유리한 것으로 보이는 슬래그시멘트 콘크리트를 동일하게 사용하였고, 양생 방법을 달리하여 각각 온도 및 변형률 모니터링, 균열조사를 수행하였다.

### 4.2 양생방법

사전 수화열 해석 결과를 참고하여 터빈 기초 매스콘크리트 중 한 기(T-1)는 일반양생의 온도균열발생 가능성을 낮추기 위하여 보온양생공법을 적용하였고, 다른 한 기(T-2)는 우수한 온도균열제어 결과를 보여준 양생자동화시스템을 각각 적용하였다.

보온양생공법은 외기온이 많이 낮지 않은 경우에 콘크리트 양생온도 유지를 위하여 많이 사용되는 양생법으로서,<sup>11)</sup> 이 현장적용시에는 보온양생을 위하여 타설 후 표면에 비닐을 덮고 그 위에 스티로폼을 얹은 후 마지막으로 양생포를 덮었다. 또한 기초콘크리트 전면을 천막을 덮어 직사광선으로 인한 물의 증발, 바람, 비 등의 외부인자에 대한 영향을 최소화 하였다.

양생자동화시스템의 경우 콘크리트 타설완료 후 기초 표면에 양생포와 양생수 공급용 호수를 설치하고, 콘크리트 내외부 온도계측을 통해 내외부 온도차가 20℃를 넘을 시 자동으로 표면에 적정온도의 온수를 공급하도록 설정하였다. 양생자동화시스템 적용시에도 역시 기초 콘크리트 전면을 천막으로 덮어 외부인자에 대한 영향을 최소화 하였다.

## 4.3 계측방법

콘크리트 온도, 변형률 계측 및 양생자동화시스템 가동을 위하여 매립 설치한 센서의 종류는 Table 10에 나타내었다. 계측은 Fig. 13에 도시한 것과 같이 표면부, 중심부, 바닥부, 모서리부에서 이루어졌으며, 온도의 경우 콘크리트 타설시 부터 3주간 실시하였고, 변형률의 경우 콘크리트 타설시 부터 1주간 실시하였다.

## 5. 계측 결과 및 분석

### 5.1 온도계측 결과

보온양생공법을 적용한 기초(T-1)과 양생자동화시스템을 적용한 기초(T-2) 매스콘크리트 온도계측 결과를 Fig. 14에 나타내었다.

Table 10 Type of sensors

Type	Purpose
I-Button	Temperature monitoring
Thermocouple (T-Type)	Operating for automated curing method
KM-100B	Strain monitoring

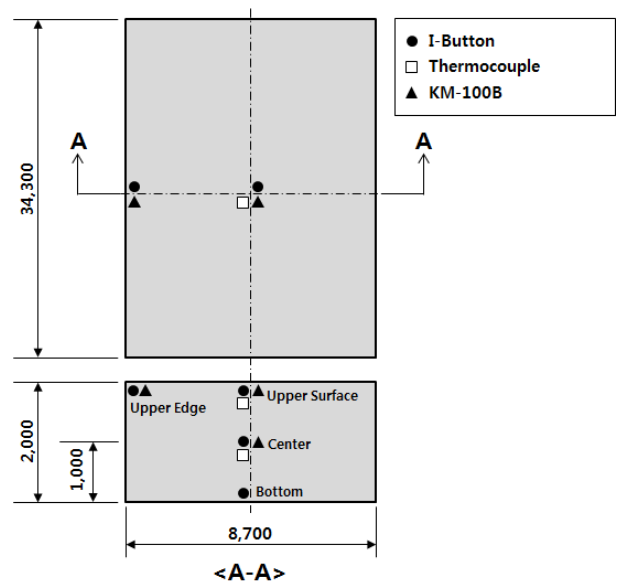
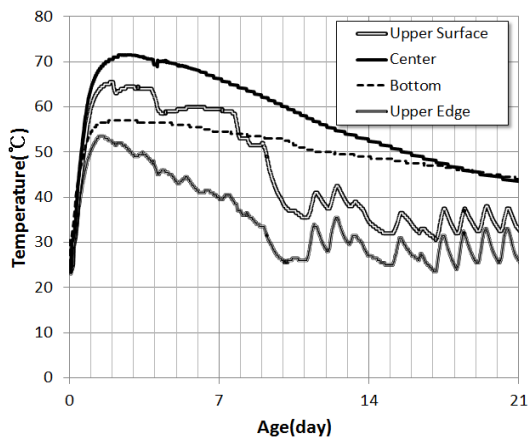
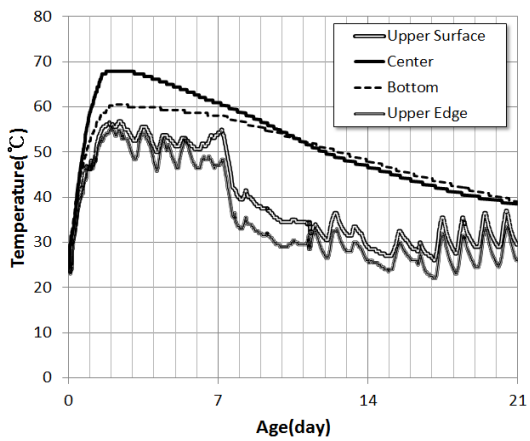


Fig. 13 Locations & type of sensors



(a) Insulated curing method (T-1)



(b) Automated curing method (T-2)

Fig. 14 Temperature histories

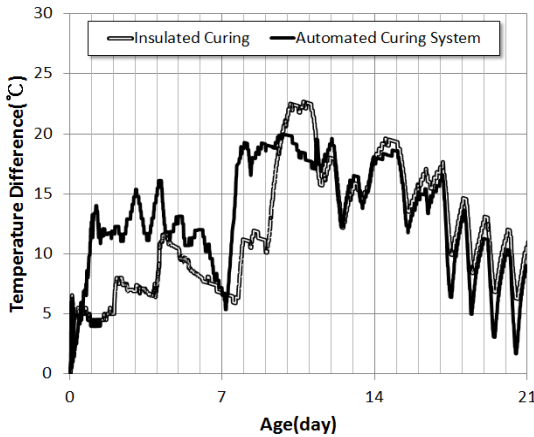


Fig. 15 Internal-external temperature difference

Table 11 Temperature monitoring results

Type	Max. temperature	Max. temperature difference (center vs upper surface)
Insulated curing method (T-1)	71.5°C	22.7°C
Automated curing method (T-2)	67.9°C	20.0°C

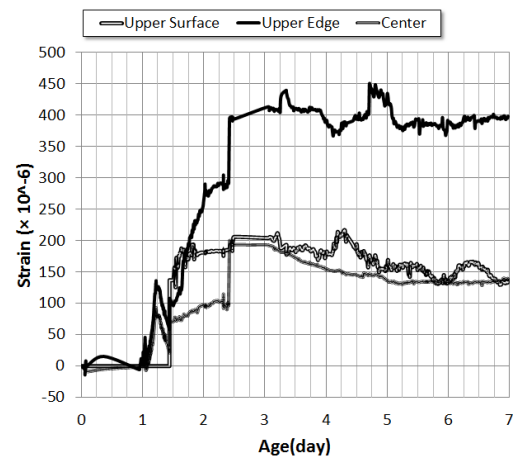
또한 내외부 온도차 이력을 Fig. 15에 나타내었고, 전체 결과를 Table 11에 정리하였다.

보온양생을 적용한 콘크리트(T-1)의 온도계측 결과를 보면 콘크리트 중심부 최대온도는 71.5°C이고 보온양생기간 동안에는 상부 표면과 중심부의 온도차가 대부분 10°C 내외로 유지되어 타설 초기 내외부 온도차에 의한 균열 발생 가능성은 매우 낮을 것으로 판단된다. 그러나, 양생 종료 후 상부 표면이 외기에 노출되어 급격히 냉각되면서 중심부와 온도차가 22.7°C까지 벌어져서 온도균열 발생 확률이 높아질 것으로 판단된다.

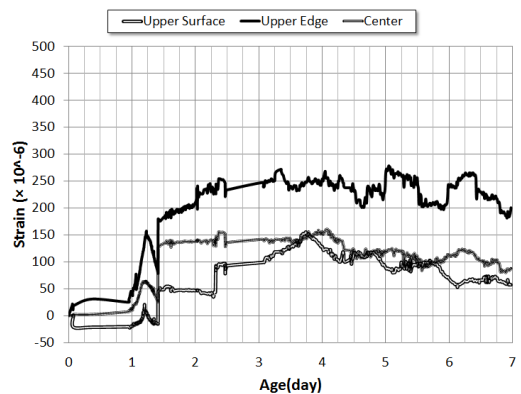
양생자동화시스템을 적용한 콘크리트(T-2)에서는 중심부 최대온도는 67.9°C까지 올라갔고, 전 계측기간에서 콘크리트 중심부와 상부 표면의 온도차는 20°C 내로 유지되는 모습을 보여주었다. 표면의 온도를 일정 수준으로 유지하면서 보온양생 적용시와 비교할 때 내부의 열이 비교적 원활하게 방출되어 양생이 종료되었을 때의 내외부 온도차를 더 줄일 수 있었다.

## 5.2 변형률 계측 결과

보온양생공법(T-1)과 양생자동화시스템(T-2)을 적용한 기초 매스콘크리트 변형률계측 결과를 Fig. 16, Fig. 17



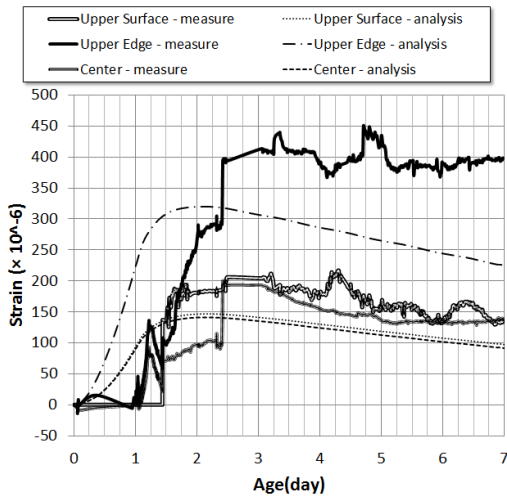
(a) Insulated curing method (T-1)



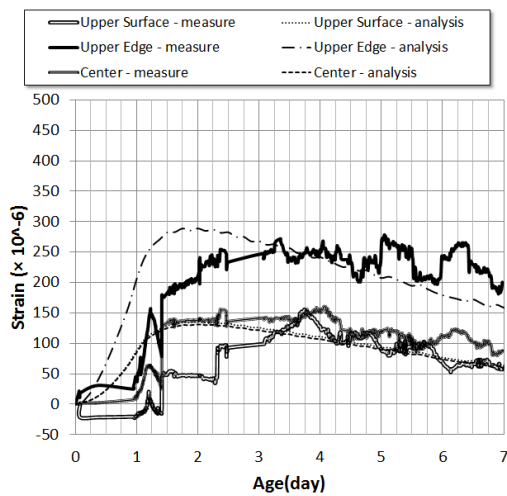
(b) Automated curing method (T-2)

Fig. 16 Strain measurement results





(a) Insulated curing method (T-1)



(b) Automated curing method (T-2)

Fig. 17 Strain histories - measurement vs analysis

Table 12 Strain monitoring / analysis results

Location	Measure / Analysis ( $\mu$ )			
	Upper surface	Upper edge	Center	Max. Difference (upper edge vs center)
Type				
Insulated curing method (T-1)	216.8 / 146.8	450.7 / 320.0	200.0 / 141.1	303.9 / 178.9
Automated curing method (T-2)	155.5 / 135.5	278.3 / 288.9	159.9 / 131.2	155.5 / 158.7

및 Table 12에 나타내었다.

변형률계측 결과를 살펴보면 보온양생을 적용한 콘크리트(T-1)와 양생자동화시스템을 적용한 콘크리트(T-2) 모두에서 대체로 중심부와 상부 표면부의 최대 변형률

변화는 100~200  $\mu$  로 비슷한 모습을 보여주었고, 상부 모서리 부분은 200~450  $\mu$  로서 다른 위치와 비교할 때 큰 변형률을 나타내었다. 보온양생을 적용한 기초 콘크리트(T-1)와 양생자동화시스템을 적용한 기초 콘크리트(T-2)에서 발생한 변형률을 비교해보면, 보온양생의 경우가 상부 표면에서는 39%, 상부 모서리에서는 62% 정도 최대변형률이 양생자동화 공법을 적용한 경우보다 크게 계측되었고, 중심부의 최대변형률 역시 보온양생의 경우가 25% 정도 크게 계측되었다. 이는 해석 결과에서의 경향과 일치한다. 그리고 양생자동화시스템을 적용한 콘크리트(T-2)에서는 계측값이 해석값에 비해 +4~22% 정도의 차이를 보여주었으나, 보온양생을 적용한 콘크리트(T-1)에서는 계측값이 해석값에 비해 +41~48%의 차이를 보였다.

양생자동화시스템을 적용한 콘크리트(T-2)에서는 상부 모서리와 중심부에서의 변형률 계측값 차이가 최대 155.5  $\mu$  이었으나, 보온양생을 적용한 콘크리트(T-1)에서는 상부 모서리와 중심부에서의 변형률 계측값 차이가 최대 303.9  $\mu$ 로서 최대 95% 높아서 보온양생을 적용한 콘크리트에서 내부 구속에 의한 균열 가능성이 더 높을 것으로 판단되었다.

### 5.3 균열조사

보온양생공법과 양생자동화시스템을 적용한 기초 매스콘크리트의 균열조사는 타설후 28일 경과후에 수행하였다. 거푸집 제거 후 균열에 대한 외관 조사 결과는 Fig. 18와 Table 13에 나타내었다.

Fig. 18에 도시한 결과와 같이 보온양생공법을 적용한 매스콘크리트(T-1)의 균열조사 결과로부터 상부 표면부 3개소, 측면부 5개소 및 측면에서 상부 표면으로 연결되는 3개소의 총 8개소 균열이 발생하였다.

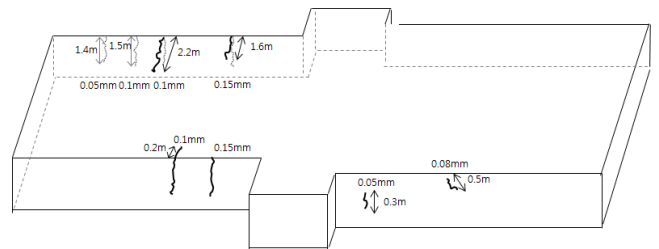


Fig. 18 Diagram of cracking at T-1 (insulated curing)

Table 13 States of cracking

Crack width	Insulated curing method	Automated curing method
> 0.15 mm	-	-
0.10~0.15 mm	2	-
0.05~0.10 mm	4	-
0.05 mm >	2	-

반면, 양생자동화시스템을 적용한 매스콘크리트(T-2)의 균열조사 결과, 표면 및 측벽을 포함한 모든 부위에서 균열이 발생하지 않았다. 이는 현장계측과 수화열해석 결과로부터 예상되었던 결과와 일치하며, 이로부터 양생자동화시스템이 온도균열의 제어에 효과가 있음을 확인할 수 있었다.

### 5.4 발생균열에 대한 원인 분석

보온양생 시험체에 발생된 균열의 원인을 분석하기 위하여 추가 수화열 해석을 수행하였다. 보온양생은 타설 후 7일 동안 적용하였고 보온양생 중의 열전달 계수는 콘크리트표준시방서(2009)<sup>2)</sup>를 참고하여 “발포스티로폼+시트”에 해당하는 2 W/m<sup>2</sup>°C로 하였으며, 나머지 입력조건은 2장과 동일하다.

해석 결과는 Fig. 19, Fig. 20 및 Table 14에 나타내었다.

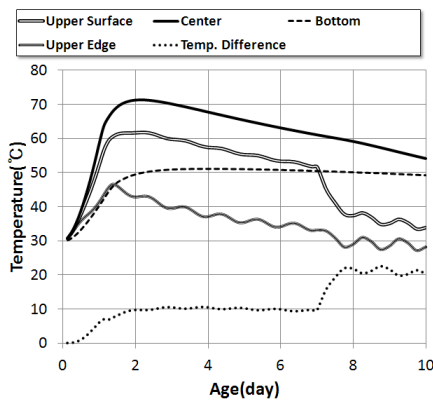


Fig. 19 Insulated curing analysis - temperature results

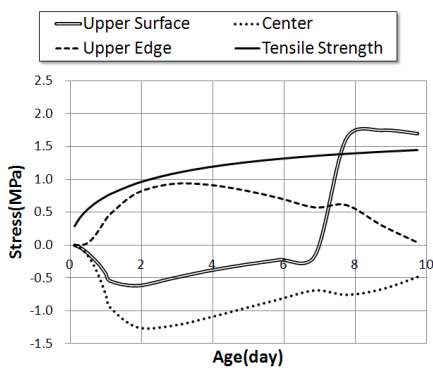


Fig. 20 Insulated curing analysis - stress results

Table 14 Results of stress analysis

Time	Min. $I_{cr}$	Age (day)	Stress at this age (MPa)	Cracking probability (%)
During insulated curing	1.16	2.9	0.93	28
After insulated curing	0.81	8.8	1.74	77

해석 결과에 따르면 보온양생 기간 동안에는 온도균열 지수가 1.16 이하로서 온도균열발생확률이 30% 이하로 유지되지만, 보온양생 종료 후 단열재를 제거했을 때 표면의 온도가 급격히 냉각되면서 생기는 열충격에 의하여 균열발생확률이 높은 것으로 나타났다. 타설 후 8.8일에 온도균열지수 0.81, 온도균열발생확률은 77%로 나타났다.

이를 통하여 지나친 보온양생방법이 콘크리트의 온도균열발생확률을 높이는 것을 알 수 있었다. 단, 실제시공시 외기와 양생가능 기간 등의 조건을 고려한 사전 수화열 해석을 통해 보온의 정도를 결정하면 수화열에 의한 균열을 제어할 수 있을 것으로 예상된다.

## 6. 결 론

이 연구에서는 대형발전소 터빈 기초 콘크리트의 온도균열을 제어하기 위하여 콘크리트의 배합 변경, 양생방법 변경 등을 변수로 수화열 해석과 현장적용 및 계측을 수행하였으며 그 결과는 다음과 같다.

- 1) 매스콘크리트의 경우 수화열에 의한 내외부 구속에 의하여 균열이 발생할 위험이 있고, 그 위험성 및 대책방안의 효과는 사전 수화열해석을 통하여 실제 시공시와 비슷하게 예측이 가능할 것으로 판단된다.
- 2) 1종 보통시멘트 콘크리트 배합을 슬래그시멘트 콘크리트 저발열 배합으로 변경함으로써 대형 매스콘크리트 구조물의 수화열에 의한 균열발생 가능성을 낮출 수 있음을 확인할 수 있었다.
- 3) 콘크리트 내외부 온도차를 능동적으로 제어해주는 양생자동화시스템을 적용함으로써, 콘크리트 타설 초기 내외부 온도차를 20°C 이내로 제어할 수 있었고, 특히 수화열 내부구속에 의한 표면 균열을 효과적으로 제어할 수 있었다.
- 4) 보온양생 적용시 양생기간동안의 내외부 온도차는 매우 작게 제어할 수 있었으나, 양생 종료 후 단열재를 제거할 때 표면이 급격히 냉각되며 발생하는 열충격에 의하여 표면부 균열발생 가능성이 나타났다. 이를 방지하기 위해서는 사전 수화열 해석을 통하여 보온의 정도를 적절히 조절해야 할 것으로 판단된다.
- 5) 대형 발전소 터빈 기초는 매우 중요한 구조물로서 그 크기로 인하여 콘크리트 수화열에 의한 균열이 발생할 위험성이 높으나 사전 수화열 해석으로 균열발생 가능성을 검토한 후 필요시 저발열 배합, 능동적인 온도제어 양생을 통하여 균열을 적절히 제어할 수 있을 것으로 판단된다.

## References

1. Ministry of Knowledge Economy, *The Sixth Basic Plan for Electricity Supply and Demand*, MKE Announcement

- 2013-63, Ministry of Knowledge Economy, Korea, 2013, pp. 15-29.
2. Korea Concrete Institute, *Concrete Standard Specifications*, Korea Concrete Institute, 2009, pp. 352-368.
  3. Ha, J. H., Cho, Y. G., Hyun, T. Y., Lim, C. K., and Seo, T. S., "Control of Thermal Crack in Mass Concrete Using Automated Curing System," *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 25, No. 2, 2013, pp. 195-200.
  4. Ha, J. H., Cho, Y. G., Hyun, T. Y., Lim, C. K. Seo, T. S., and Lee, K. C., "Field Application of Concrete Automated Curing System (I)," *Proceedings of the Korea Concrete Institute*, Vol. 24, No. 2, 2013, pp. 725-726.
  5. Ha, J. H., Cho, Y. G., Hyun, T. Y., Lim, C. K. Seo, T. S., and Lee, K. C., "Field Application of Concrete Automated Curing System (II)," *Proceedings of the Korea Concrete Institute*, Vol. 25, No. 1, 2013, pp. 635-636.
  6. Ha, J. H., Cho, Y. G., Lee, K. C., Lim, C. K., and Seo, T. S., "Field Application of Concrete Automated Curing System (III)," *Proceedings of the Korea Concrete Institute*, Vol. 25, No. 2, 2013, pp. 43-44.
  7. Kim, J. K. and Lee, Y., "Estimation Method of Thermal Stress at Early Age in Mass Concrete Structures," *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 17, No. 4, 2005, pp. 41-44.
  8. Kim, J. K. and Muhammad, N. A., "Thermal Stress Simulation of Mass Concrete Using Thermal Stress Device," *Proceedings of the Korea Concrete Institute*, Vol. 18, No. 1, 2006, pp. 474-477.
  9. Committee B/525/2, *Structural Use of Concrete - Part 2: Code of Practice for Design and Construction*, BS 8110-2:1985, British Standards Institution, London, 1985, 23 pp.
  10. Kang, S. H., Jeong, H. J., and Park, C. L., "Evaluation on the External Restraint Stress in Mass Concrete," *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 8, No. 5, 1996, pp. 111-122.
  11. Han, C. G., Oh, S. G., Shin, D. A., Jeon, C. K., and Kim, J., "The Insulating Curing Method of Cold Weather Concreting Using Double Bubble Sheets," *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 18, No. 6, 2006, pp. 51-59.

**요 약** 최근 증가 추세에 있는 화력발전소 건설에 있어서, 터빈 기초 구조물은 규모가 매우 큰 매스콘크리트이다. 매스콘크리트의 수화열은 구조물의 품질과 공기 등에 중대한 영향을 미치는 요인 중 하나이므로, 수화열 제어를 위한 적절한 방안은 필수적이다. 이 연구에서는 국내 복합화력발전소 터빈 기초 시공에 앞서 수화열 해석을 통하여 수화열 균열 발생 가능성을 예측하고, 수화열 제어 방안으로서 콘크리트 배합 및 양생방법 변경을 제안하였다. 콘크리트 배합은 기존 1종 보통시멘트 콘크리트 배합에서 슬래그시멘트 콘크리트 배합으로 변경을 제안하였고, 기존 양생포 및 살수양생방법을 개선하기 위하여 매스콘크리트 중심부와 표면부의 온도를 모니터링하여 온도차를 일정수준 이하로 일정하게 유지시켜주는 양생자동화시스템을 적용한 양생방법을 제안하였다. 실제 시공시에는 슬래그콘크리트 배합을 사용하고, 2기의 동일한 터빈 기초 구조물에 대하여 각각 보온양생공법과 양생자동화시스템을 적용하여 양생방법에 따른 온도균열 제어효과를 비교하였으며, 2기의 매스콘크리트에서 온도, 변형을 모니터링 및 균열 조사를 통하여 수화열 제어 효과를 평가하였다.

**핵심용어** : 터빈 기초, 매스콘크리트, 수화열 균열, 양생, 양생자동화시스템