

# 매스콘크리트의 수화열에 관한 해석 및 온도균열 제어방안 연구 Thermal Stress Analysis and Crack Control on the Heat of Hydration of Mass Concrete

조선규\*  
Cho, Sun Kyu

서석구\*\*  
Suh, Suk Koo

홍규선\*\*\*  
Hong, Kyu Seon

윤철균\*\*\*\*  
Yoon, Cheol Kyun

## ABSTRACT

Thermal cracks are occurred when thermal stress due to the hydration of cement exceeds the tensile strength of concrete. In this study, the thermal stresses are investigated at the massive concrete like an anchorage of suspension bridge. The thermal crack can be controlled by considering the placing height, concrete type, pre-cooling and pipe cooling in the design stage.

## 1. 서 론

수경성 시멘트(포틀랜드 시멘트, 고로슬래그 시멘트등)는 수화작용시에 화학적 반응열이 발생하므로, 현수교의 앵커블럭과 같은 대단위 콘크리트 구조물의 경우 양생시 내부온도의 상승으로 균열이 발생할 우려가 있다. 이러한 온도균열은 온도강하시의 수축이 구속되어 발생하는 인장응력, 단면내의 온도차에 의한 인장응력 등이 원인으로 되어 생기는 것으로 온도상승외에 구속의 정도에 큰 영향을 받는다.

따라서 본 연구에서는 현수교 앵커블럭 콘크리트의 소요성능(내구성, 수밀성등)을 저하시키는 원인이 되는 수화열에 의한 온도응력을 제어하기 위하여 적정시멘트의 사용, 재료의 온도관리, 배합설계 및 양생시의 온도관리 등에 대하여 검토하고자 한다.

## 2. 검토조건

### 2.1 콘크리트의 배합

중용열형 고로슬래그시멘트(B종)를 사용하여 배합설계를 하였으며, 본 연구에 사용한 콘크리트 배합은 <표 2.1>과 같다.

### 2.2 외기온 및 해수온도

외기온은 지역별로 서로 상이하므로 부산지역을 대상으로 조사한 1991년 부산지방기상대의 자

<표 2.1> 콘크리트의 배합 (m<sup>3</sup>당)

설계 기준 강도 (kg/cm <sup>2</sup> )	단위 시멘트 량 (kg)	W/C비 (%)	조골재의 최대 치수 (mm)	Slump (cm)	공기량 (%)	단위 체적 중량 (kg/m <sup>3</sup> )
240	280	57.1	40	12±25	4±1	2270 이상

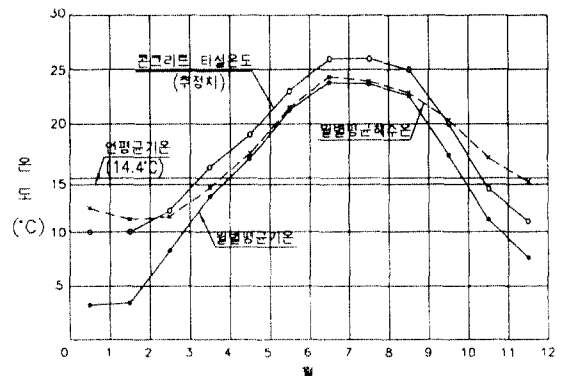
  

단위 수량 W(kg)	세골재 S (kg)	조골재 G (kg)	혼화제 Ag (g)	시멘트의 종류	비 고
166	747	1123	700	중 용 열 고로(특급)	B종 상당

료를 사용하였으며, 해수온도는 부산과 대마도사이 난류해역의 해면수온을 이용하였다.

### 2.3 콘크리트 타설온도

콘크리트 타설온도는 외기온으로부터 개략추정하도록하고 그 결과는 (그림 2.1)과 같다.

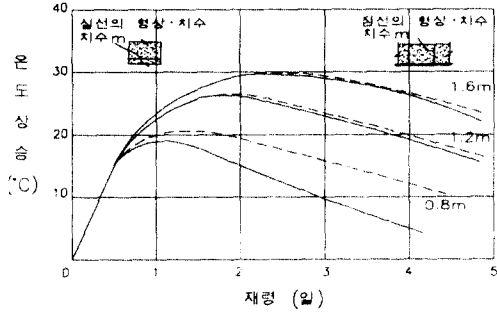


(그림 2.1) 콘크리트 타설온도

\* 정희원, (주)서영기술단 전무이사  
\*\* (주)서영기술단 상무이사  
\*\*\* (주)서영기술단 부장, 공학박사  
\*\*\*\* (주)서영기술단 차장

2.4 콘크리트의 열특성

콘크리트의 온도상승의 정도는 부재의 단면치수 및 형상, 시멘트의 종류, 혼화재료, 단위 시멘트량, 기온, 타설시 콘크리트 온도 등에 따라 변하지만 부재의 단면치수와 형상에 따라서는 일반적으로 (그림2.2)와 같은 양상을 나타내며, 그 상승량은 식(1)에 의해 추정할 수 있다.

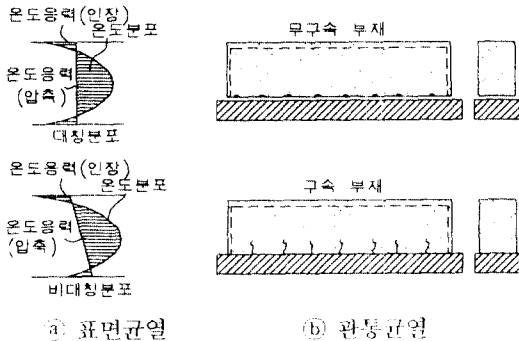


(그림 2.2) 부재의 온도상승(형상·치수의 영향)  
(보통시멘트, 단위시멘트량 320kg/m<sup>3</sup>, 타설온도 20℃의 경우)

$$Q_t = Q_{\infty}(1 - e^{-rt}) \dots \dots \dots (1)$$

- Q<sub>∞</sub> : 종말 단일온도 상승량
- r : 온도상승속도에 관한 계수
- t : 재령(일)
- Q<sub>t</sub> : 재령 t일에서의 단일온도 상승량

콘크리트의 내부온도가 상승하면서 온도응력에 의해 (그림 2.3)과 같은 ㉠표면 균열과 ㉡관통균열이 발생하는데, 표면균열은 부재의 내부온도차로 인하여 표면층에 인장응력이 발생하여 생기는 균열로서 1주정도의 초기재령에서 발생하며, 관통균열은 온도팽창한 부재가 수축하는 과정에서 주위의 구속을 받기 때문에 생기는 균열로 건조수축에 의해 균열이 촉진된다.



(그림 2.3) 콘크리트의 온도균열 형태

3. 온도해석

온도해석은 Schmidt법에 의한 1차원 해석으로 하고, 온도차에 의한 온도 균열지수로부터 균열발생화률을 판정하는 것으로 하였다.

해석은 1개월분(4Lift타설)의 타설 Lift를 고려하여 최종타설 Lift로부터 30일분의 해석을 실시하였으며, 온도균열이 콘크리트의 타설온도 및 기온에 의해 영향을 받기 때문에 동계(2월), 하계(8월), 추계(10월)의 3 Case의 해석을 실시하였다. [해석대상 구조물은 (그림4.2) 참조]

3.1 내부구속이 지배적인 경우

콘크리트 타설 Lift높이가 1.0m일 때 내부구속이 지배적인 경우의 온도균열지수는 식(2)에 의해 구하며, 그 결과를 <표 3.1> 및 (그림3.1)에 나타내었다.

$$\text{온도균열지수} = 15/\Delta T_1 \dots \dots \dots (2)$$

ΔT<sub>1</sub> : 내부최고온도시의 내외온도차(℃)

<표 3.1> 각 Case별 온도해석결과 (1)

계절	타설 온도 (℃)	내부 온도 (℃)	표면 온도 (℃)	온도차 (℃)	지수	판정
동계	10.0	30.8	9.9	20.9	0.72	△
하계	26.0	42.1	27.5	14.6	1.03	△
추계	20.0	35.0	15.7	19.3	0.78	△

3.2 외부구속이 지배적인 경우

콘크리트 타설 Lift높이가 1.0m일 때 외부구속이 지배적인 경우, 자연열 방산상태의 Lift내 평균온도와 이에따른 온도균열지수는 식(3) 및 식(4)에 의해 구하며, 그 결과를 <표3.2> 및 (그림3.1)에 나타내었다.

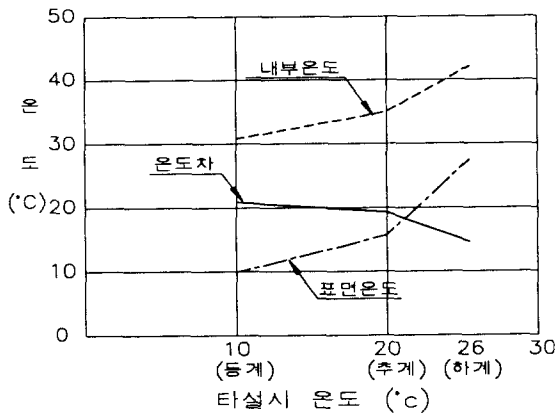
$$T_m = \frac{8mQ_eWc}{\pi^2 C\rho} \sum \frac{e^{-mt} - e^{-\frac{n^2 h^2 \pi^2}{4a^2} t}}{n^4 h^2 \frac{\pi^2}{4a^2} - n^2 m} \dots \dots (3)$$

- T<sub>m</sub> : 자연열 방산상태의 Lift내 평균온도(℃)
- h<sup>2</sup> : 열확산률(m<sup>2</sup>/day)
- a : Lift높이 (m)
- t : 재령(일)
- C : 콘크리트의 비열 (kcal/kg℃)
- ρ : 콘크리트의 단위중량 (kg/m<sup>3</sup>)
- Q<sub>e</sub> : 시멘트 총발열량
- Wc : 단위시멘트량
- n : 1, 2, 3, ...

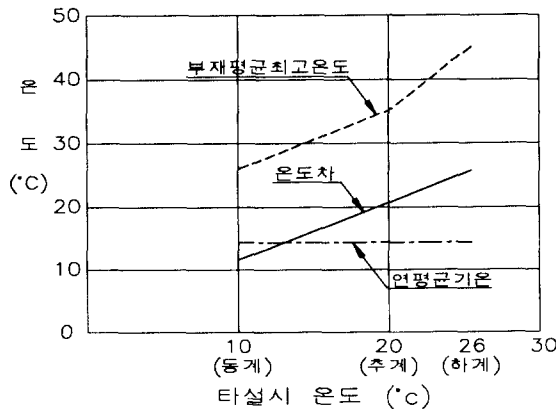
온도균열지수 =  $10/(R \cdot \Delta T_0) \dots \dots \dots$  (4)  
 $\Delta T_0$ : 부재평균 최고온도와 외기온도  
 균형시 온도차이(°C)  
 R: 외부구속의 구속도 (R=0.6)

<표 3.2> 각 Case별 온도해석결과 (2)

계절	타설 온도 (°C)	부재 평균 최고 온도 (°C)	연평균 기온 (°C)	온도차 (°C)	지수	판정
동계	10.0	26.0	14.4	11.6	1.44	△
하계	26.0	40.1	14.4	25.7	0.65	×
추계	20.0	35.1	14.4	20.7	0.81	×



(a) 내부구속이 지배적인 경우



(b) 외부구속이 지배적인 경우

(그림 3.1) 타설온도에 따른 각 Case별 온도차

이상의 온도균열해석 결과, 균열지수는 1.2이하인 경우가 대부분이므로 콘크리트 균열 제어 대책이 필요한 것으로 판명되었다.

#### 4. 균열제어 대책

내부구속 균열에 대한 대책으로는 동절기 콘크리트 타설면의 단열양생 또는 방한양생을 실시하고, 하절기에는 Pre-Cooling에 의해 콘크리트의 최고상승온도를 제어하며 Pipe Cooling에 의해 콘크리트 내부 온도상승을 억제한다. 또한 외부구속 균열에 대한 대책으로는 하절기에 Pre-Cooling에 의해 콘크리트 최고상승온도를 제어하고, Pipe Cooling에 의해 콘크리트 내부 온도상승을 억제하며 가을부터 겨울까지는 콘크리트 타설면의 양생을 강화한다. 그 외에 저발열 시멘트를 사용한다든가 타설속도 및 타설량을 조절하므로써 수화열에 의한 내부온도상승을 억제할 수 있다.

##### 4.1 저발열시멘트의 사용

저발열시멘트로 대표적인 시멘트인 중용열시멘트와 고로슬래그시멘트를 <표 4.1>과 같이 비교하였으며, 검토결과 수화열이 낮고 내화화성이 우수한 고로슬래그시멘트를 사용하도록 하였다.

<표 4.1> 저발열시멘트의 비교

종 류	특 징	용 도
중 용 열 포틀랜드 시 멘 트	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 수화열이 낮다.</li> <li>· 초기강도는 보통시멘트보다 낮지만, 장기 강도는 크다.</li> <li>· 건조수축은 적고 내구성은 크다.</li> <li>· 가격이 다소 비싸다.</li> </ul>	DAM공사 Mass Con'c Con'c포장
고 로 슬 래 그 시 멘 트	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 장기 강도가 크다.</li> <li>· 수화열이 낮다.</li> <li>· 해수에 대한 내구성이 크다.</li> <li>· 화학저항성이 크다.</li> <li>· 수밀성이 높다.</li> <li>· 내열성이 크다.</li> </ul>	DAM공사 항만공사 연안공사

##### 4.2 콘크리트의 Pre-Cooling

콘크리트의 Pre-Cooling은 콘크리트의 온도를 사전에 낮추어 주어 최고상승온도를 억제하는데 목적이 있으며, 그 방법과 효과 및 문제점을 <표 4.2>에 나타내었으며 <표 4.3>에는 일본에서의

<표 4.2> Pre-Cooling의 종류 및 장·단점

방 법		개 요	효 과	문 제 점
혼합수의 냉각		콘크리트 혼합수에 이음을 넣어서 수온을 낮춤.	혼합수 온도를 4℃ 낮추면 콘크리트 온도 1℃ 저감.	혼합수 탱크의 용량에 따라 출하량, 온도에 영향이 미침.
		콘크리트 혼합수의 일부에 frack상의 이음 사용.	8~10kg/m <sup>3</sup> 의 이음으로 콘크리트 온도 1℃ 저감.	현지조달이 곤란하므로 작빙, 계량설비등 설비비용이 많이 소요됨.
		콘크리트 혼합수 탱크에 냉각관을 부착하여 수온을 낮춤.	2~3℃ 온도저하 가능	설비비용의 전력비가 소요됨.
조골재의 냉각	살 수	비축되어 있는 조골재의 위에서부터 살수	조골재 온도를 3~4℃ 낮추면 콘크리트 온도 1℃ 저감	표면수의 관리가 매우 곤란
	살수+송풍	비축되어 있는 조골재의 위에서부터 살수, 송풍에 의한 기화열로 온도저감	조골재 온도를 3~4℃ 낮추면 콘크리트 온도 1℃ 저감	온도관리가 어려움.
	진공냉각	젖은 골재를 진공 냉각조에 넣어 진공하드로서 기화열로 온도저감.	5m <sup>3</sup> 의 골재를 10℃ 낮추는데 7~8분 소요.	진공 냉각장치등 부대설비 비용이 크고 시간당 출하량 25m <sup>3</sup> 정도
세 골재의 냉각		세골재를 Mixer 투입 전에 액체 질소를 이용하여 극저온(-30~100℃)까지 낮춤.	5m <sup>3</sup> 의 골재를 10℃ 낮추는데 7~8분 소요.	모래계량기, Mixer 등의 부대설비비용이 많이 소요됨.
콘크리트의 냉각		Mixer 또는 Agitator에 액체 질소 분사	액체 질소 분사량에 따라 상방량의 온도저감 가능	분사량의 관리가 어려움.

<표 4.3> 일본에서의 Pre-Cooling 실시사례

구 조 물	목표온도	방 법			실시시기	실 적 온 도
		조골재살수	혼합수 냉각	이음투입		
大鳴門橋 1A	25℃이하		목표 5℃	-	6~10월	
大鳴門橋 5A	30℃이하		평균 6℃ (5~7℃)	-	5~10월	30℃이하
下津井瀬戸大橋 3P-4A	29℃이하	10~15℃ (일부채택)	평균 13℃ (12~14℃)	-	6~9월	22~29℃
南北備讃瀬戸大橋 1A-2P	1A:28℃이하 2P:30℃이하	7℃	7℃	-	6~11월	1A : 22~25℃ 2P : 30℃이하
南北備讃瀬戸大橋 4A	20.5℃이하		평균 14℃ (9~19℃)	20~60kg/m <sup>3</sup>	5~11월	1982, 1983년 : 25℃이하 1984년 : 20.5℃이하
南北備讃瀬戸大橋 7A	21℃이하		6℃	최대 96kg/m <sup>3</sup> 평균 37kg/m <sup>3</sup>	5~10월	14~22℃

Pre-Cooling 실시 사례를 나타내었다.

냉각효율 및 콘크리트의 품질에 대한 영향등을 고려한다면 골재의 Pre-Cooling이 가장 양호한 것으로 판단되며, 시공현장에서 콘크리트 타설시기와 시공시 기온 등을 고려하여 적절한 방법으로 시행하는 것이 효과적이다.

### 4.3 양생중 Pipe Cooling 실시

이것은 콘크리트 중에 ϕ20~25mm 정도의

Pipe를 매설하고 콘크리트 타설 직후부터 냉각수를 통과시켜 콘크리트를 냉각하는 방법으로 콘크리트뎀 등에 널리 사용되고 있다.

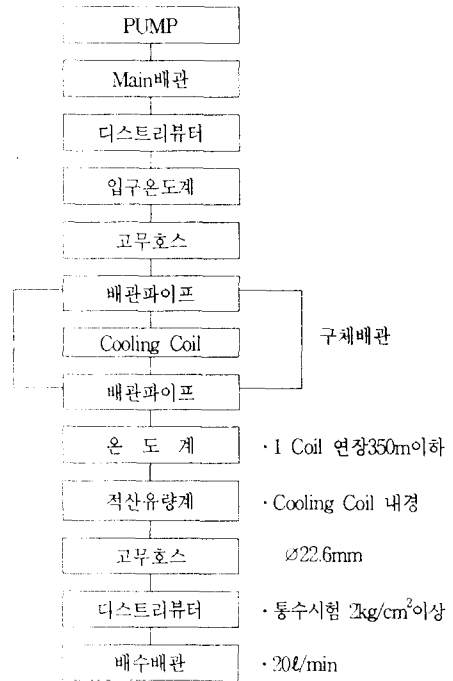
일반적으로 1일 500m<sup>3</sup>를 타설한 콘크리트의 온도를 냉각시킬 경우 2일 후에 Peak시 평균온도를 약 3℃강하시킬 수 있으며, Pipe시 배관량을 증가시키므로써 Peak시의 평균온도를 5~6℃까지 강하시킬 수 있으므로 Pipe Cooling배관을 밀집하게 하면 콘크리트 온도억제 효과가 크게 된다.

따라서 본 연구에서는 앵커블럭 구체내에 내경 22.6mm관을 매설하여 매분당 20ℓ의 해수를 통과시켜, 콘크리트의 최고상승온도억제 및 여름부터 가을에 걸쳐서 기온의 강하에 따른 구체내의 온도구배를 억제할 목적으로 Pipe Cooling을 실시하였다.

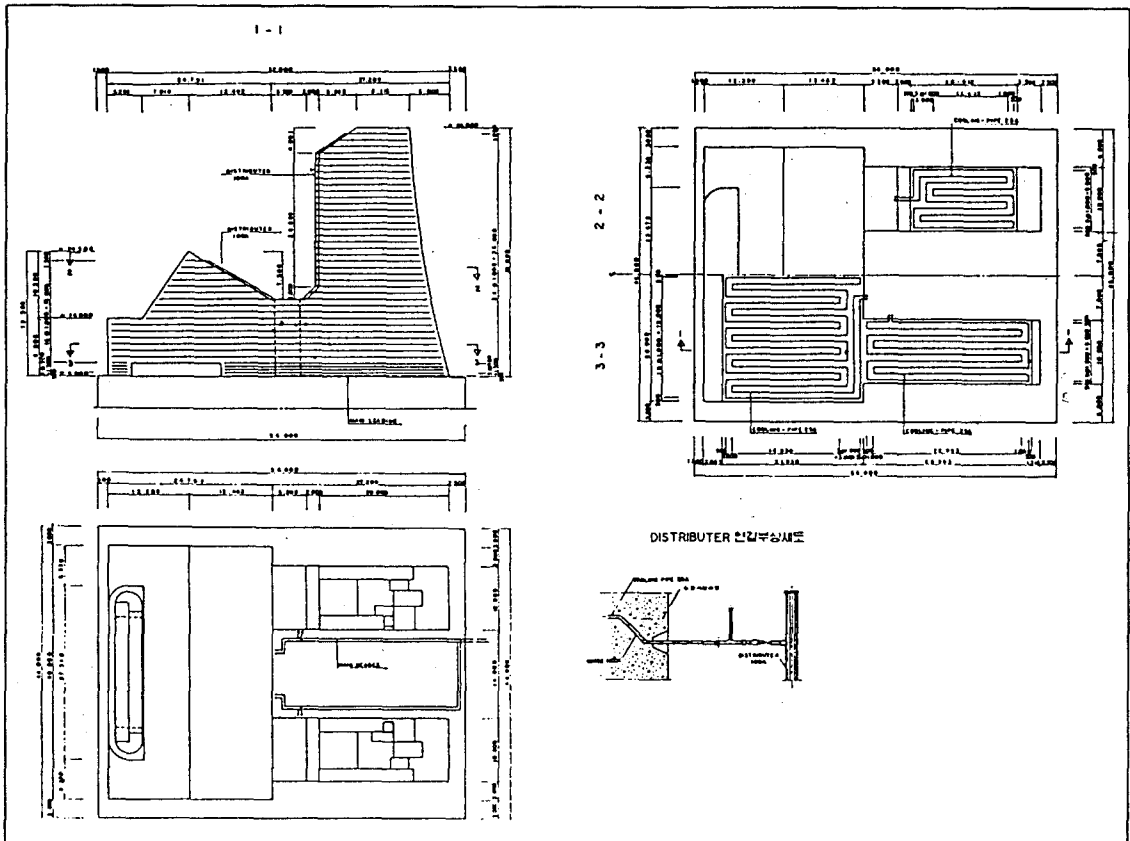
Pipe Cooling은 Green Cut종료후 앵커블럭의 콘크리트 타설면 위에 1m간격으로 Cooling Pipe를 설치하고, 콘크리트 타설개시 시각부터 소정의 시간동안 해수를 통과시켜 콘크리트의 최고상승온도를 억제하도록 하였다. Pipe Cooling의 계통도 및 배관개요를 (그림 4.1)과 (그림 4.2)에 나타내었다.

## 5. 결 론

본 연구는 현수교 앵커블럭과 같은 대단위 콘크리트 구조물의 구조적 성능(내구성, 수밀성 등) 저하의 원인이 되는, 시멘트 수화열에 의한 내부온도응력을 효과적으로 제어할 목적으로 콘크리트의 열특성 고찰 및 콘크리트타설 Lift 높이가 1m에 대한 동계(2월), 하계(8월), 추계(10월) 3Case의 온도해석을 실시하여 이에따른 온도균열



(그림 4.1) Pipe Cooling 계통도



(그림 4.2) Pipe Cooling 배관개요도

제어 대책을 정리·제시 하였다.

1) 콘크리트 타설 Lift 높이 1m에 대한 온도해석결과, 온도균열지수가 외부구속이 지배적인 경우의 동계에만 1.44로 크게 나타나고, 나머지 대부분의 경우 1.2보다 작게 나타나므로 콘크리트 균열제어 대책이 필요한 것으로 판명되었다.

2) 계절별로 달라지는 타설시 온도에 따른 온도분포는, 내부구속이 지배적인 경우에 내부온도 및 표면온도 모두 타설시 온도가 증가함에 따라 같이 증가하나 표면온도의 증가속도가 빨라 온도차는 상대적으로 감소하는 경향을 보이며, 외부구속이 지배적인 경우는 기준온도가 연평균 기온이어서 타설시 온도가 증가함에 따라 온도차가 증가함을 보이고 있다.

3) 균열제어 대책으로는 수화열이 낮고 내화확성이 우수한 중용열형 고로슬래그 시멘트를 사용하고, 콘크리트 생산시 냉각효율 및 콘크리트 품질에 대한 영향 등을 고려하여 골재의 Pre-Cooling을 실시하도록 하며, 콘크리트 양생중의 내부균열온도를 저하시키기 위하여 앵커블럭 구체 내에 내경 22.6mm관을 1m간격으로 매설하여 매분당 20ℓ의 해수를 통과시키도록 하였다.

4) 이상의 온도균열제어 대책을 실시할 경우 골재의 Pre-Cooling 및 콘크리트 양생시 Pipe Cooling에 의해 약 10℃정도의 콘크리트 내부온도 저감효과를 기대할 수 있으며, 온도해석 결과가 가장 혹독한 조건이 하계시 외부구속에 의한 경우이므로 콘크리트 타설시기를 적절히 선택함으로써 온도균열에 대하여 효과적으로 대처할 수 있을 것으로 사료된다.

#### < 참 고 문 헌 >

1. 쌍용양회공업주식회사, 콘크리트기술, 1993.
2. 쌍용양회공업주식회사, 쌍용슬래그시멘트 이용 기술, 1993.
3. Ross A.D and J.W.Bray, The Prediction of Temperatures in mass Concrete by Numerical Computation, Mag. of Concrete, 1949-1.
4. 한국콘크리트학회, 최신 콘크리트 공학, 1992.
5. 부산직할시 광안대로 건설사업소, 광안대로 건설 실시설계 종합보고서, 1994.
6. 부산직할시 광안대로 건설사업소, 광안대로 건설 실시설계 구조계산서, 1994.
7. 本州四國連絡橋公園, 重力式直接基礎アンカレッジ設計要項(案)・同解説, 1980.