

인천국제공항 여객터미널 전면 고가 교량 공사 시공방법 및 수화열 대책

Construction Method and Control System of the Heat of Hydration for Incheon International Airport Elevated Road Way

임채만^{*} 박명웅^{**} 조용기^{***} 조선규^{****} 김은겸^{****}
Im Che Man, Park Myong Ung, Cho Yong Ki, Cho Sun Kyu, Kim Eun Kyum

ABSTRACT

Incheon International Airport Elevated Road Way is located between the Passenger Terminal Building and Transportation Center which are Incheon International Airport core construction projects. The deck of the bridge is consists of 5-span or 6-span continuous pre-stressed concrete slab. Steel form has been used to enhance the quality of texture on concrete surface, lower surface of deck slab with the two way arch has been manufactured by highly professional manner in order to get an beautiful exterior architectural looks.

The prestressed concrete deck slab is mass concrete structures with a high-specified concrete strength and a varying section in the range of 0.95-2.8m thickness. Therefore high risks of thermal cracking occurrence by heat of hydration highly are expected. To resolve such problem, we adopted type 1 cement and pipe cooling method at construction site through mass concrete specimen test and 3-dimensional analysis.

For Pipe cooling we used 25mm diameter stainless pipes with wrinkles. Cooling pipe with spacing 50-60cm has been installed. And continuous pipe cooling with cooling water of 15℃ was conducted for 2days. In present 8 span of all 29 spans construction has been completed. No thermal cracking by heat hydration has been observed yet.

1. 서 론

본 구조물은 인천국제공항을 대표적으로 상징하는 여객터미널과 교통센터의 중간에 위치하고 있으며, 입국 및 출국 여객의 쾌적한 통행 조건을 제공하고, 원활한 물류 수송 기능 확보는 물론, 주변 건물과의 미적 조화를 도모하기 위한 미관설계가 요구되었다.

* 정회원, 인천국제공항 여객터미널 전면 고가교량공사 소장

** 정회원, 인천국제공항 여객터미널 전면 고가교량공사 감리단장

*** 인천국제공항공사 부장

**** 서울산업대학교 토목공학과 교수

- (1) 수지도장 거푸집면(No.3,4,7)
- (2) 강재 거푸집면(No.5)
- (3) 삼나무판 거푸집면(No.6)
- (4) 합판 거푸집면(No.1,2)
- (5) 모르타분 씻어내기 마무리면(No.17)
- (6) 의장 마무리면(No.10,12,16)
- (7) 쫓아내기 마무리면(No.8,9,11,13,14,15)

2.2 콘크리트면의 평가방법

원거리(50m) 및 근거리로부터 시각적 평가 실시를 위하여 다음과 같은 3가지 인자분석 평가척도를 사용하였다. 또한, 콘크리트면의 촉각적 평가는 평활도 하나의 인자로 나타낼 수 있으며, 평가방법은 콘크리트 면을 직접 만지면서 실시하였다.

- (1) 평활도 : 콘크리트 표면의 거칠고 매끄러운 정도
- (2) 친근감 : 쾌감이나 불쾌감을 나타내는 정도로서 부드럽게 느껴지는 정도
- (3) 습윤감 : 콘크리트 표면의 건조나 습윤의 정도

2.3 시험결과

2.3.1 시각적 평가

가. 원거리(그림 1)

콘크리트 면을 원거리에서 평가할 경우 평활도는 수지도장 거푸집면(No.3,4,7), 강재 거푸집면(No.5), 삼나무판 거푸집면(No.6) 및 합판 거푸집면(No.1,2) 등에서 상당히 좋은 결과를 보이고 있으며, 습윤감은 어느 경우나 보통 정도의 상태를 나타냈다.

나. 근거리(그림 2)

콘크리트면을 근거리에서 평가할 경우 평활도에 있어서는 수지도장 거푸집면(No.3,4,7), 강재 거푸집면(No.5) 및 합판 거푸집면(No.1,2) 등의 경우가 양호하나 친근감에 있어서는 의장처리를 한 경우가 다소 양호한 것으로 나타났다.

2.3.2 촉각적 평가

콘크리트면을 촉각적으로 평가하는 데는 평활도 하나의 인자로 나타낼 수가 있고, 친근감이나 습윤감은 표현이 거의 불가능하다는 사실을 알 수 있다. 촉각적인 평가에 있어서 평활도는 합판 거푸집면, 수지 및 강재 거푸집면의 경우가 양호한 것으로 나타났다(그림 3).

2.4 사용 거푸집의 제안

본 고가 교량의 경우 거푸집을 제거한 이후 콘크리트 표면은 평활하면서 광택을 유지해야 한다는 과업지시서에 의거할 때, 사용 거푸집은 거푸집을 제거하였을 경우 시각적인 측면에서나 촉각적인 측면에서 평활한 콘크리트 면을 얻어야 한다. 이를 만족시키기 위해서는 앞에서 논의한 바와 같이 강재 거푸집, 수지거푸집 또는 합판거푸집 등을 사용하는 것이 바람직하다.

이와 같은 관점에서 교각의 형상은 하단 부분이 원형이며 상부쪽으로 올라가면서 미려한 곡선을 이루도록 설계되어 있으며, 또한 교량 슬래브 하면은 2방향 아치형상을 가지는 미려한 곡선을 도입하여 입출국 여객으로 하여금 인간과의 친화적인 구조가 되도록 설계가 수행되었다.

이와 같은 설계조건을 수용하기 위하여 시공에 앞서 미학적인 관점에서 미려하고 환경 친화적인 콘크리트 구조물의 표면 확보 및 미려한 곡선유지, 매스콘크리트로 인한 콘크리트의 수화열에 의한 균열 발생을 방지하기 위한 대책 등이 실내 실험 및 현장 실험 등을 통하여 수립되었다.

콘크리트의 표면관리를 위해서는 배합설계에서 배려해야 할 사항을 비롯하여, 사용 거푸집의 재질 선정이 중요하며, 이들은 수화열에 의한 온도균열제어와도 관련성이 있다. 즉, 수화열을 최소화하기 위해서는 배합설계시 소요의 설계기준강도를 발현하는데 필요한 시멘트량을 최소화해야 하며, 거푸집은 콘크리트 내외부 온도차를 줄이기 위해 단열성이 있는 거푸집을 사용해야 한다.

콘크리트 표면의 단열성을 확보하기 위해서는 목재거푸집이 효과가 있는 반면, 콘크리트의 미려한 면관리를 위해서는 강제거푸집의 사용이 바람직하다. 따라서, 시공에 적용된 거푸집은 콘크리트 표면의 질감을 높이기 위하여 강제거푸집을 사용하였으며, 교량 하면의 2방향 아치 형상이 미려하게 나타나도록 하기 위해 외국전문업체에 의뢰하여 특수하게 제작하였다.

본 구조물은 상부와 하부구조를 부정정력, 건조수축 및 온도변화 등의 영향을 고려하여 분리형 구조형식을 취하였으며, LRB(Lead Rubber Bearing)교좌장치를 사용하여 내진저항성을 증가시켰다.

콘크리트의 배합은 실내시험 및 현장시험을 통해 콘크리트 표면관리 및 수화열 차원을 고려하여 선정하였으며, 콘크리트의 설계기준강도는 $f_{ck}=400 \text{ kgf/cm}^2$, 배합강도는 $f_{cr}=480 \text{ kgf/cm}^2$ 을 목표로 하였다.

교량 슬래브는 PSC구조로서 설계기준강도가 크고 단면의 두께가 0.95~2.8m로 변하고 있는 복잡한 형상을 가지는 매스콘크리트이며, 수화열에 의한 온도균열 발생의 위험이 매우 높은 조건을 지니고 있다. 이에 대한 대책을 수립하기 위해 [5중시멘트]와 [1중시멘트+pipe cooling] 방법을 적용하여 3차원 유한요소해석을 실시하였다.

또한, 이 결과를 입증하기 위하여 3m×3m×2.8m의 크기를 가지는 대형 시험체를 2체 제작하여 pipe cooling 및 균열발생 제어에 대한 효과를 검토하였다. 그 결과 본 구조물에 대해서는 [1중시멘트+pipe cooling] 방법이 5중시멘트를 사용하는 것보다 온도균열을 제어하는데 효과가 있는 것으로 나타났다.

pipe cooling에 사용된 cooling pipe는 지름 25mm의 스테인레스 주름관을 사용하였으며, 배관 간격은 50~60cm이다. 쿨링수의 온도는 15℃이며, 2일간 연속적으로 파이프쿨링을 실시하였다. 현재 총 29개 경간 가운데 8개 경간의 시공이 완료된 상태이며, 수화열에 의한 온도균열은 전혀 발생되지 않았다.

2. 거푸집 선정 및 제작 거치

2.1 실험대상 콘크리트면의 종류

거푸집을 떼어냈을 때 콘크리트 면은 평활하여야 하며, 친근감 및 습윤감이 있는 것을 목표로 거푸집 재질을 선정하였다. 이를 달성하기 위해서는 일본 名古屋大學에서 1997년에 연구된 콘크리트 면관리를 위한 거푸집을 선정 방법 및 그 결과를 활용하였다. 이 연구에 의하면, 시험에는 총 17개의 콘크리트 시험체(90cm×90cm)를 제작하여 사용하였으며, 시험에 사용된 콘크리트 면은 다음과 같은 7종류로 구분하고 있다.

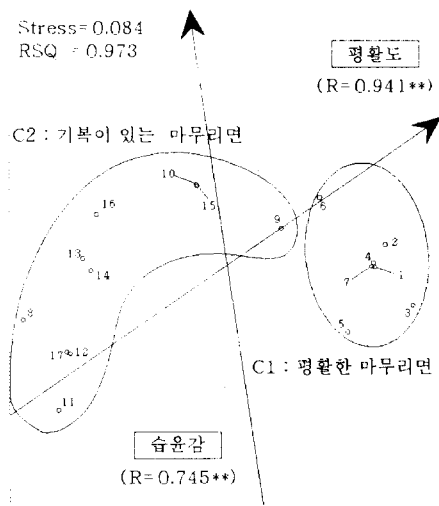


그림 1. 원거리평가

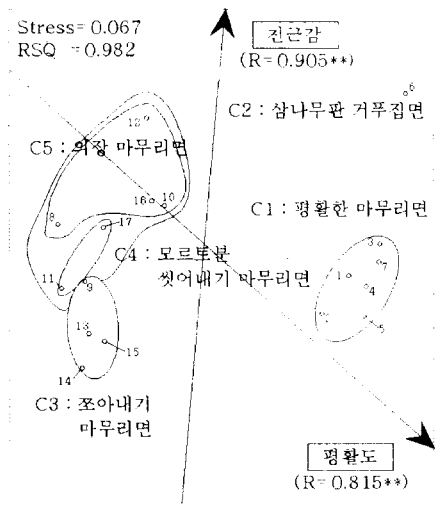


그림 2. 근거리평가

합판거푸집은 열전달율이 강재거푸집에 비하여 적으므로 수화열 대책에는 유리하지만, 반복사용에 의한 거푸집 표면의 손상으로 인하여 평활한 콘크리트 면을 얻는다는 불리한 점이 많다.

수지 거푸집의 경우에는 반복사용에 의한 거푸집 표면의 손상으로 인하여 콘크리트 면관리에 문제점 등이 지적되고 있다. 따라서, 본 구조물의 면관리에 적합한 거푸집으로서는 강재거푸집을 사용하는 것이 합리적이라고 판단하여 공사에 적용하였다.

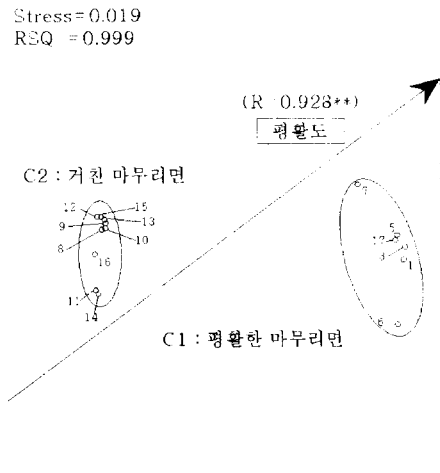


그림 3. 촉각적평가

3. 배합설계

3.1 배합설계의 조건 검토

3.1.1 콘크리트 배합조건

교량슬래브 콘크리트의 배합설계조건으로 굵은골재 최대치수는 25mm이며, 수화열 억제를 위해단위수량을 감수시킬 목적으로 고성능감수제를 사용하였다. 콘크리트의 슬럼프치는 시공이 가능한 범위 내에서 보다 낮은 슬럼프치를 갖는 콘크리트를 사용하는 것도 좋다고 판단하여 12cm로 하였다. 또한 공기량은 4.5%로 계획하여 시공하는 것으로 하였다

3.1.2 설계기준강도와 배합강도

교량슬래브는 PS콘크리트 구조로서 재령 28일설계기준강도는 $f_{ck} = 400 \text{ kgf/cm}^2$ 이고, 조기에 프리스트레스를 도입하기 위해 소정의 강도를 확보를 확보하기 위해서 재령 7일 강도 $f_7 = 320 \text{ kgf/cm}^2$ 가 되도록 배합설계를 실시하였다.

본 공사에서는 우수한 배치 플랜트에서 품질관리가 잘 되는 레미콘이 생산되므로, 콘크리트 압축강도의 변동계수를 10%로 정하여 증가계수는 1.2를 적용하였으며, 따라서 콘크리트 배합강도는 480 kgf/cm^2 로 정하였다.

3.2 사용재료

시멘트는 쌍용양회에서 생산한 비중 3.15의 보통포틀랜드시멘트(1종시멘트)와 내황산염포틀랜드시멘트(5종시멘트)를 사용하였다. 잔골재는 해사와 부순모래(신불도産)를 중량비 7 : 3의 비율로 사용하였으며, 굵은골재는 최대치수 25mm의 부순물(신불도産) 사용하였다. 화학혼화제는 단위수량을 최소화하기 위하여 고성능감수제 및 고성능AE감수제로서 나프탈렌계 및 폴리카르본산계를 사용하였다.

3.3 레미콘 배합

배합은 실내실험과 현장시험을 통하여 실시하였으며, 그 결과 얻어진 레미콘 배합은 표 1에 나타낸 바와 같으며, 에지테이터 트럭에 의한 현장실험 결과는 표 2와 같다.

표 1. 레미콘 배합비

고성능(AE) 감수제 종류	목표 슬럼프 (cm)	목표 공기량 (%)	S/a (%)	단위량 (kg/m^3)							
				물	시멘트	잔골재		굵은골재	고성능(AE) 감수제	AE제 (g)	AE감수제 (g)
						해사	부순모래				
폴리카르본산계	17	5.0	45	150	375	562	242	992	3.0	11.25 (C×0.03%)	-
나프탈렌계	17	5.0	43	160	400	523	225	1001	3.0	-	40.0 (C×0.01%)

표 2. 에지테이터 트럭에 의한 현장실험결과

고성능(AE) 감수제 종류	슬럼프 (cm)				공기량 (%)				압축강도 (kgf/cm^2)			
	믹싱 직후	30분 경과	60분 경과	90분 경과	믹싱 직후	30분 경과	60분 경과	90분 경과	7일	10일	28일	
폴리카르본산계	18.5	18.0	16.0	16.0	4.5	5.5	5.5	5.5	(0분)	324	364	409
									(30분)	308	-	410
									(60분)	314	-	391
									(90분)	324	-	403
나프탈렌계	16.5	16.0	12.5	9.5	5.9	6.3	6.5	6.5	(0분)	298	317	390
									(30분)	278	-	357
									(60분)	268	-	345
									(90분)	268	-	335

주) 콘크리트 온도 : 27°C , 실내온도 : 23°C

4. 수화열 대책

4.1 실험체 모델 해석 및 제작

4.1.1 시험체의 개요

고가교량 슬래브의 수화열에 의한 온도균열 제어 대책을 수립하기 위하여 예비실험 계획을 수립하였으며, 예비실험에는 수화열 제어 효과를 확인하기 위하여 대형시험체를 제작하였다.

「인천국제공항 여객터미널 전면 고가교량 설계보고서」에 의하면 고가교량 상부슬래브의 수화열 제어대책의 방안으로서 제1안은 [1종시멘트+pipe cooling], 제2안은 「4종시멘트(벨라이트계)」의 사용을 제시하고 있다.

이 보고서에 의하면 수화열에 의한 균열제어 대책에는 구조물 형상 및 여러 가지 조건상 재료적 측면의 접근방안(제2안)이 유리할 수도 있으나, 촉박한 공정 및 현장 사이로, B/P 여건, 공사비 측면을 고려할 때 cooling pipe 배관 등에 의해 다소 시공이 복잡해지더라도 제1안을 건의하는 것으로 되어 있다.

본 연구에서는 설계서에서 제안하고 있는 2개안과 5종시멘트(내황산염시멘트)의 사용에 대하여도 검토하는 것으로 계획하였다. 해석에서는 이상의 3가지 경우의 시험체 모두를 검토하였으며, 그 결과에 따라 시험체 제작은 [1종시멘트+pipe cooling], [5종시멘트]의 2가지 경우로 국한하였다. 표 3은 이들에 대한 상황을 정리한 것이다.

표 3. 시험체 제작 계획

수화열 저감방법	온도 해석	응력 해석	시험체 제작	비고
1종시멘트	○	○	-	Pipe cooling 효과 검토용
1종시멘트 + pipe cooling	○	○	1체 제작	쿨링파이프 배관 시험체 제작
4종시멘트	○	○	1체 제작	검토 후 1종류 시멘트 선정 시험체 제작
5종시멘트	○	○		

4.1.2 시험체의 형상

시험체는 2체로 구성되며 1체는 [1종+pipe cooling] 시험체이고, 또 1체는 [4종시멘트] 또는 [5종시멘트] 시험체 가운데 하나를 선택하였다. 그림 4는 시험체의 단면형상을 나타낸 것이며, 그림 5는 cooling pipe의 배관 상태를 나타낸 것이다.

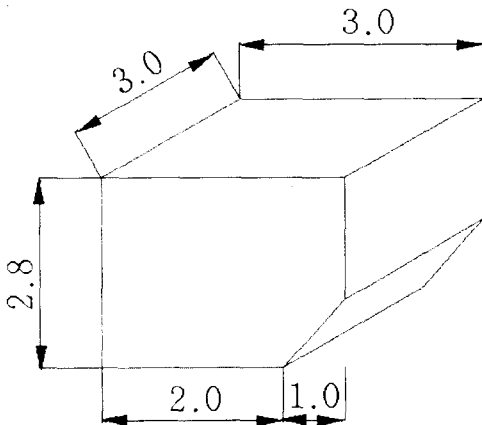


그림 4. 시험체의 형상

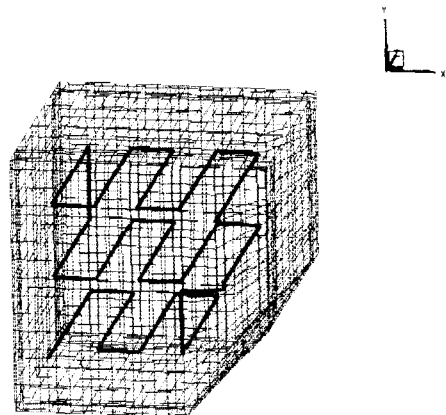


그림 5. Pipe-cooling 배관상태

그림 4에서 시험체의 높이 2.8m는 슬래브의 가장 두꺼운 부분을 묘사한 것이며, 오른쪽 경사진 부분의 단면형상은 슬래브의 변단면부를 형상화한 것이다. 특히, 변단면부를 둔 목적은 그림 5와 같이 cooling pipe를 배관할 경우 경사면에서의 쿨링에 대한 사각부분이 발생할 가능성이 있기 때문이며, 이 부분에서의 온도균열의 발생 여부를 시험을 통해 확인하고자 한 것이다.

4.1.3 수화열 해석결과 및 검토

가. 온도해석결과

그림 6은 수화열이 최대가 되는 시점인 재령 1.5일에서의 온도해석 결과를 나타낸 것이다. 이 때의 시험체 내부에서의 최대온도상승량은 61.5℃로서 non pipe cooling 시험체의 79℃에 비하여 무려 17.5℃의 온도저감 효과를 얻고 있다.

표 4의 온도해석결과 균열발생확률이 가장 적은 시험체는 [1종+pipe cooling] 시험체이며, 최저목표균열지수 0.7을 기준으로 할 경우 적합한 시험체는 [1종+pipe cooling] 및 [4종시멘트]의 경우이다.

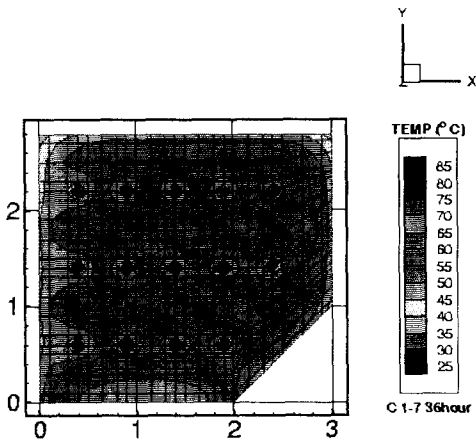


그림 6. 온도해석 결과

표 4. 온도균열지수와 균열발생확률

사용 시멘트	파이프 쿨링조건	최대 온도 (°C)	온도 차 (°C)	I_{cr}	균열발생확률 (%)
1종	non pipe cooling	79.0	30.4	0.49	96
	pipe cooling	61.5	18.3	0.82	68
4종	-	59.8	21.4	0.70	84
5종	-	70.7	26.7	0.56	93

나. 응력해석결과

그림 7은 재령 3.5일에서의 pipe cooling 시험체에 대한 온도응력해석 결과를 나타낸 것이다. cooling pipe 주변에서는 인장응력이 발생하고 있으며, 최대값은 15.3 kgf/cm² 정도이다. 표 5는 표 4에서 제시한 4가지 경우에 대한 온도응력해석 결과를 나타낸 것이다. 목표온도균열지수 0.7을 초과하는 시험체는 온도해석결과와 동일하게 [1종+pipe cooling] 및 [4종시멘트]를 사용한 시험체이다. 그러나, 4종시멘트를 현장에 적용할 경우 조기강도 발현이 지연되어 공사기간이 길어질 우려가 있어 시험체 제작에 적용하지 않는 것으로 정하였다. 5종시멘트의 경우에는 온도균열지수가 0.65로서 목표치 0.7에 미달하고는 있지만, 강도발현이 1종시멘트와 유사하고 사용실적이 많아 시험체를 제작하여 수화열 제어 효과를 판단하는 것으로 계획하였다.

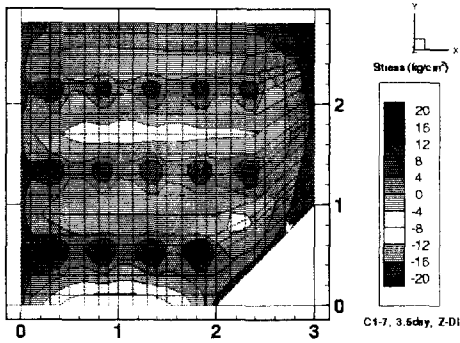


그림 7. 온도응력해석 결과

표 5. 시험체 응력해석 결과

파이프 쿨링조건	인장강도 (kg/cm^2)	인장응력 (kg/cm^2)	I_{cr}	균열발생 확률 (%)
1종+파이프 쿨링무	12.1	22.5	0.54	94
1종+파이프 쿨링	13.1	15.3	0.85	63
4종	14.5	18.5	0.78	74
5종	13.1	20.2	0.65	88

4.1.4 수화열계측 및 균열조사

그림 8(A)는 [1종시멘트+pipe cooling] 시험체에서 수화열이 가장 높은 곳에서의 콘크리트 온도이며, 그림 8(B)는 쿨링파이프 사이에서의 수화열에 의한 콘크리트 온도를 나타낸 것이다. 그림 9(A)는 [5종시멘트] 시험체에 대한 수화열이 가장 높은 곳에서의 콘크리트 온도이며, 그림 9(B)는 경사진 단면 부근에서의 콘크리트 온도를 나타낸 것이다.

이들 그림으로부터 해석치와 계측치는 서로 잘 일치하고 있으며, 냉각수의 쿨링을 정지한 시점인 재령 36시간에서의 콘크리트 내부의 수화열에 의한 온도거동을 잘 표현하고 있다. 또한 [1종+pipe cooling] 시험체는 [5종시멘트] 시험체 보다 최대 온도를 10°C 이상 저감시켜 pipe cooling에 의한 온도 제어 효과가 크게 나타나고 있음을 알 수 있다.

또한, 시험 완료 후 재령 15일 시점에서 균열조사를 실시하였으며, 그 결과 [1종+pipe cooling] 시험체는 균열이 전혀 발생되지 않았으며, 5종시멘트를 사용한 경우에는 벽체 2개소에서 0.1mm 정도의 수직균열이 발생되었다.

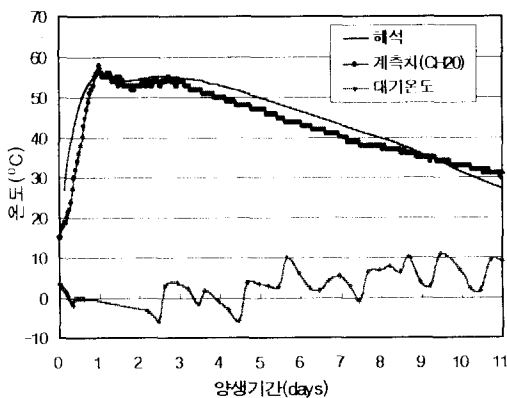


그림 8(A). [1종+pipe cooling] 시험체

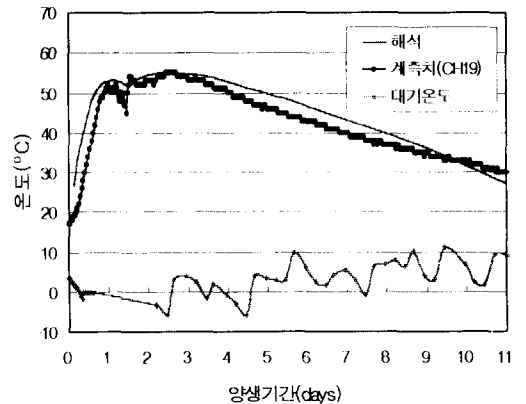


그림 8(B). [1종+pipe cooling] 시험체

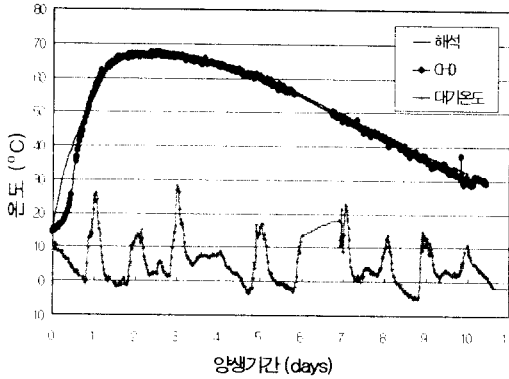


그림 9(A). [5중시멘트] 시험체

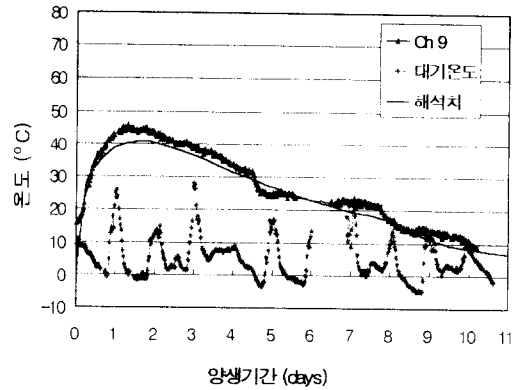


그림 9(B). [5중시멘트] 시험체

4.2 슬래브 온도균열 제어대책

4.2.1 수화열 해석 방법

[1중시멘트+pipe cooling]은 시험체 시험결과에서 확인한 바와 같이 슬래브 시공에 가장 적합한 수화열 제어대책 수단이지만,, cooling pipe 배관간격을 50cm로 할 경우 슬래브의 철근배근 및 쉬스관 배치 등과 복잡하게 겹쳐져 시공성이 저하될 우려가 있으므로 [5중시멘트]에 대하여도 검토를 실시하였다.

수화열 해석에는 1개 지간을 cooling pipe 배관에 의해 18~22개의 블록분할(이 블록은 6 Type으로 구분됨)하였으며, 1 loop의 cooling pipe 배관 길이는 150m이하가 되도록 하여 수화열해석을 실시하였다. 그러나, [5중시멘트]를 사용하는 경우에는 유효요소 mesh수가 적어 지간의 1/2 또는 전 지간을 하나의 블록으로 간주하여 수화열해석을 실시하였다.

4.2.2 수화열해석 결과 및 검토

가. 온도해석 결과

(1) [1중시멘트+pipe cooling]의 경우

그림 10은 Type I 에 대한 온도해석 결과를 나타낸 것이며, 그림 11은 재령 3일에서의 온도분포를 나타낸 것이다. 그림 10으로부터 콘크리트 내외부의 최대온도차는 15.7°C이며, 온도균열지수는 0.96으로서 온도균열발생 확률이 낮음을 알 수 있다.

그림 11은 cooling pipe 횡단면에 대한 온도분포로서, cooling pipe 부근에서의 온도는 30~45°C 정도이며 파이프로부터 멀어질수록 온도는 점점 상승하고 있다.

(2) [5중시멘트]를 적용하는 경우

그림 12는 BR4-① 블록에 대해 [5중시멘트] 를 사용하여 증기양생을 실시한 경우의 온도해석 결과를 나타낸 것이다. 증기양생에는 양생온도를 30°C로 하고 그 지속시간 10일간으로 하였으며, 콘크리트 초기온도는 15°C이다. 이 그림에서 초기재령에서의 콘크리트 내외부 최대 온도차는 23.4°C이며 온도균열지수는 0.64가 되어 균열발생확률이 증가하고 있다.

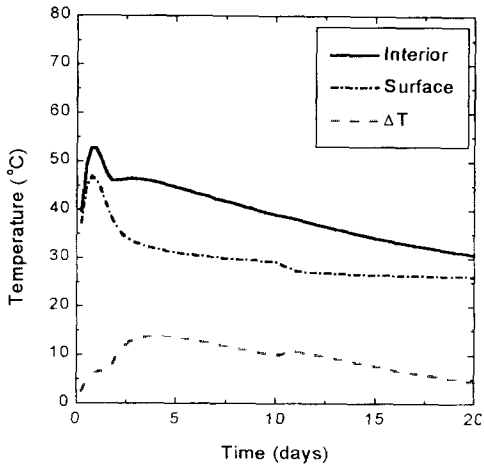


그림 10. 양생기간별 콘크리트의 온도이력 (1종+pipe cooling, Type I, 치기시기 8월)

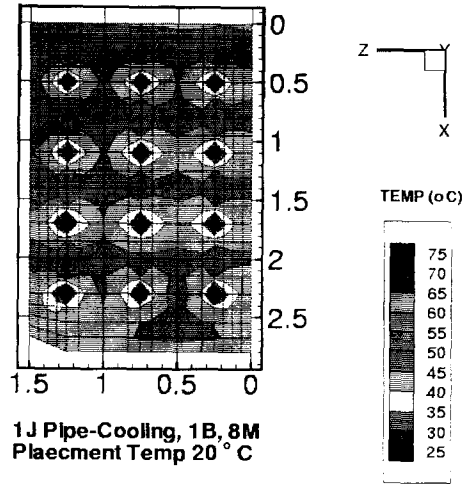


그림 11. 교축 직각방향 단면의 수화열 온도분포 (1종+pipe cooling, Type I, 치기시기 8월)

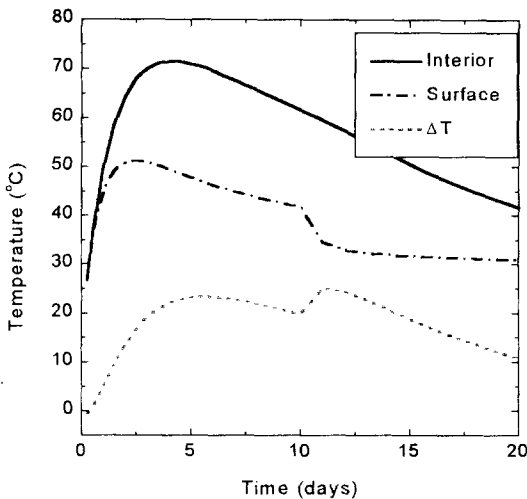


그림 12. 양생기간별 콘크리트의 온도이력 (5종시멘트, BR4-①, 증기양생)

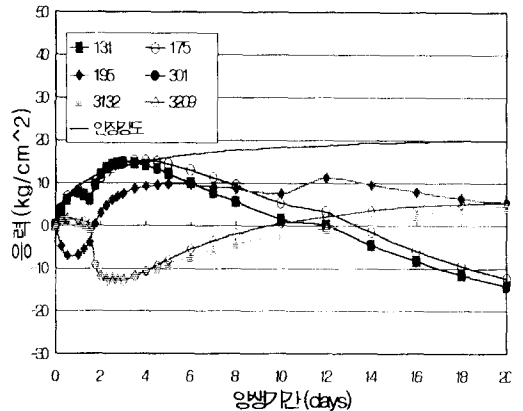


그림 13. 양생기간별 콘크리트의 온도이력 (1종+pipe cooling, Type I, 치기시기 8월)

나. 응력해석결과

(1) [1종+pipe cooling]을 실시하는 경우

그림 13은 재령별 수화열에 의한 온도응력이력을 나타낸 것이다. 인장응력은 14.2 kgf/cm^2 이며, 온도균열지수는 0.92이다. 그림 14는 재령 3.5일에서 콘크리트 온도응력분포를 나타낸 것이다.

표 6은 콘크리트 수화열 저감 대책 조건별 온도응력해석 결과를 종합한 것이다. Type I의 경우 응력해석에 의한 온도균열지수는 0.91~0.94로서 목표값인 0.9를 초과하고 있으며, Type IV의 경우도 온도균열지수가 1.32~1.41로 상당히 큰 값을 나타내고 있다.

(2) 5종시멘트를 사용하는 경우

그림 15는 양생기간에 따른 온도응력 이력을 나타낸 것이다. 수화열에 의한 콘크리트 표면의 인장 응력은 20 kgf/cm^2 이며, 온도균열지수는 0.74로 평가되었다.

표 7은 온도해석결과를 총괄한 것으로서 5종시멘트를 사용하는 경우, 치기온도를 15°C 로 하더라도 BR4-① 및 ②블럭에서의 온도균열지수는 0.57~0.74로서 목표치 0.9에 미달하고 있다.

또한, 콘크리트 치기온도를 10°C 로 할 경우 BR4의 온도균열지수는 0.80~0.84정도로서 목표치 보다 작다. 더욱이 콘크리트 치기온도 10°C 는 현장 사정을 고려할 때 pre-cooling에 의한 비용의 과다로 본 구조물에서는 적용하지 않는 것으로 하였다.

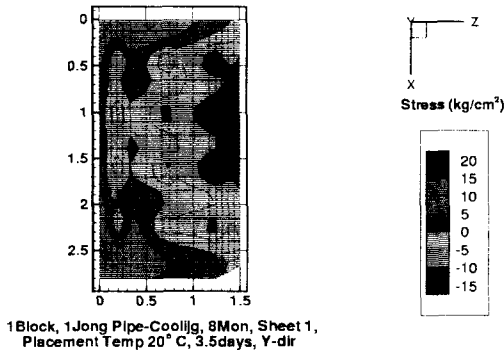


그림 14. 슬래브 교축직각방향의 온도응력분포 (1종+pipe cooling, Type I, 치기시기 8월)

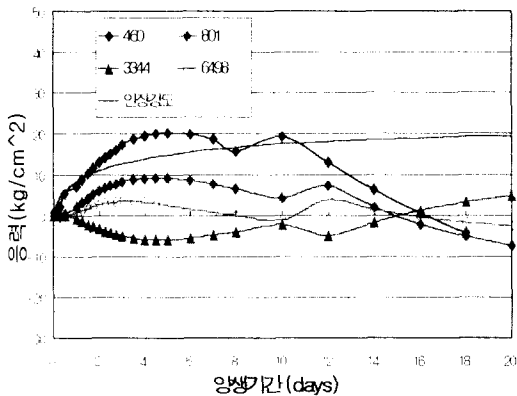


그림 15. 양생기간별 콘크리트의 온도이력 (5종, BR4-①, 증기양생)

표 6. [1종시멘트+pipe-cooling]시 응력해석 결과

해석 위치	치기 시기 (월)	대기 온도 ($^\circ\text{C}$)	양생방법	응력해석 (kgf/cm^2)		온도 균열지수 (I_{cr})
				인장 강도	인장 응력	
Type I	1	-2.4	증기양생 시트1장	8월 준함.		-
	2	-0.6				-
	3	4.2	시트 2장 Airbag1장	13.9	15.0	0.92
	4	9.8		13.9	14.7	0.94
	5	15.7	시트 2장	13.9	15.1	0.92
	6	20.4		13.9	15.3	0.91
	7	24.6	시트 1장	8월 준함.		-
	8	25.7		13.1	14.2	0.92
	9	20.9	시트 1장	6월 준함.		-
	10	14.3	시트 2장	5월 준함.		-
	11	7.5	시트 2장 Airbag1장	4월 준함.		-
	12	0.2	증기양생	8월 준함.		-
Type IV	3	4.2	시트 2장	13.9	10.5	1.32
	8	25.7	시트 1장	13.1	9.3	1.41

표 7. [5종시멘트] 적용시 응력해석 결과

치기 온도 ($^\circ\text{C}$)	양생방법	해석 부위	응력해석 (kgf/cm^2)		온도 균열지수 (I_{cr})
			인장 강도	인장 응력	
10	증기양생 10일간 30°C 양생시트 1장	①	14.3	18.5	0.84
		②	14.7	23.3	0.80
①		14.7	20.0	0.74	
②		14.3	24.9	0.57	

5. 파이프쿨링 현장 적용

5.1 쿨링파이프 배관

교량슬래브 수화열 해석에서는 컴퓨터의 수치해석 능력 등을 감안하여 1개의 지간을 여러 개의 블록으로 나누었으나, 실제의 시공에서는 슬래브 두께를 4단으로 구분하여 cooling pipe를 배관하였다.

표 8은 1개 경간에 대한 cooling pipe 배관길이를 나타낸 것으로서 cooling pipe 1 loop의 최대 길이는 150m가 된다. 또한 각 단의 loop수는 1단 26개, 2단 14개, 3단 및 4단은 각각 6개이며, cooling pipe 총 배관길이는 29개 경간에 대하여 82,913.4m가 된다.

cooling pipe의 배치는 단면 두께가 2.8m인 부위에서는 4단으로 배치하고, 0.95m인 부위는 2단으로 배치하였다. Cooling pipe의 수평간격은 $50 \pm 10\text{cm}$, 수직간격은 $60 \pm 10\text{cm}$ 로 하고 구조물의 연직평면 연단과의 이격거리는 $50 \pm 10\text{cm}$, 파이프 배관 평면에서의 구조물과의 이격 연단거리는 $30 \pm 5\text{cm}$ 로 하여 pipe cooling에서 사각부분이 발생하지 않도록 하였다.

표 8. Cooling pipe loop별 배관길이(m)

cooling pipe loop 번호	1블럭 26.9m의 경우				cooling pipe loop 번호	1블럭 26.9m의 경우			
	1단	2단	3단	4단		1단	2단	3단	4단
①	141.1	121.5	53.6	24.4	⑪	-	134.8	-	-
②	141.1	130.5	97.7	34.8	⑫	-	-	-	-
③	141.3	121.5	-	-	⑬	-	-	-	-
④	141.2	121.0	60.8	29.3	⑭	139.1	-	-	-
⑤	141.1	-	109.2	41.2	⑮	139.2	-	-	-
⑥	141.1	-	-	-	⑯	139.4	-	-	-
⑦	105.2	-	-	-	⑰	139.3	-	-	-
⑧	-	135.4	-	-	⑱	139.1	-	-	-
⑨	-	145.3	-	-	⑲	139.1	-	-	-
⑩	-	135.4	-	-	⑳	103.9	-	-	-
총 계	3,387.6m								

5.2 파이프쿨링

표 9는 pipe cooling의 조건을 나타낸 것이며, 표 10은 수화열 계측관리치를 나타낸 것이다. 시공중에는 규정된 콘크리트 시기온도, 대기온도, 냉각수 온도 및 유량 등이 허용치 내에 들도록 상시 감시 체계 구축하였다.

온도계측결과 계측온도가 허용치를 초과하는 경우에는 cooling pipe의 냉각수 온도, 통수 유량 및 콘크리트 표면의 시트양생 방법 등을 조정하여 균열발생을 억제하였다.

수화열에 의한 온도계측은 15일 동안 실시하였으나, 어느 경우라도 계측결과 콘크리트 표면과 내부의 온도차가 15°C 이하로 될 때까지 파이프쿨링을 계속하였다.

표 9. 파이프 쿨링 조건

쿨링 조건	
Stainless steel 주름관의 통수유량	12±1
Cooling pipe inlet에서의 냉각수 온도(℃)	15±2
Pipe cooling 실시간(hr)	48±2

표 10. 계측관리치

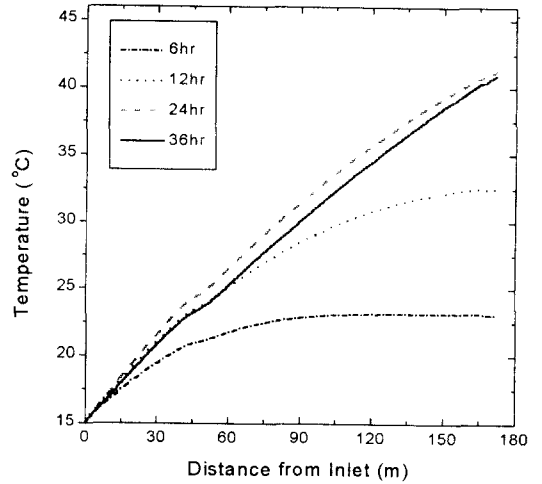
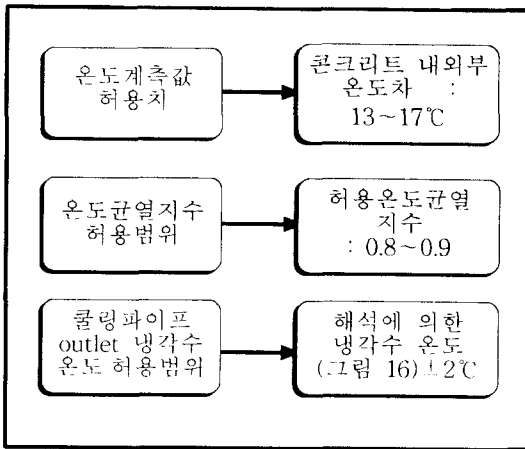


그림 16. Coolig pipe 냉각수 온도 계측 관리치

6. 결론

1. [1종 pipe cooling]을 실시할 경우, Type I의 온도응력 해석에 의한 균열지수는 0.91~0.94로서 목표값인 0.9를 모든 경우 초과하고 있으며, Type IV도 1.32~1.41로서 수화열에 의한 유해한 균열은 발생하지 않을 것으로 판단된다.
2. 5종시멘트를 사용할 경우 콘크리트의 초기온도를 15℃로 낮추더라고 BR4-① 블록의 온도균열지수는 0.74, BR4-② 블록은 0.57로서 목표 온도균열지수 0.9에 크게 미달하고 있다.
3. 따라서, 상부슬래브와 같이 매시브하고 또 사용 시멘트량이 많은 구조물의 경우 pipe cooling을 실시할 경우 수화열에 의한 온도균열 발생을 억제하는데 매우 유효한 방법임이 제시되었다.
4. 본 연구결과를 현장에 적용하여 pipe cooling을 실시한 결과 수화열에 의한 온도균열발생은 전혀 없었으며, 현재까지 총 29개 경간 중 8개 경간의 시공이 완료된 상태에 있다.