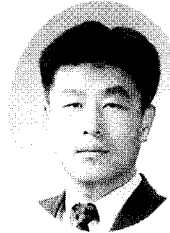
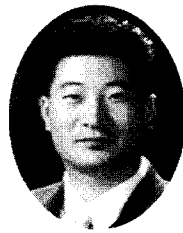


파이프쿨링에 의한 Double T-beam 교량의 온도균열제어에 관한 연구

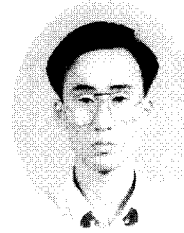
- Control of Thermal Cracking by Pipe-Cooling System in Double T-Beam Bridge -



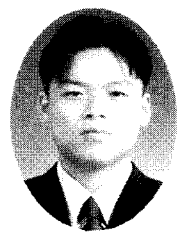
정철현*



홍민기**



전세진**



박세진***

1. 서 론

매스 콘크리트 구조물에서는 콘크리트 타설 후 시멘트의 수화열로 인한 온도응력에 의해서 온도균열의 발생 가능성이 매우 높다. 따라서, 매스 콘크리트 시공시, 온도균열을 구조물의 내구성 관점에서 최대한 억제시킬 필요가 있다. 최근에는 국내에서도 단위시멘트량이 많은 배합을 이용하는 고강도 콘크리트 구조물의 시공이 증가되고 있다. 이와 같은 매스 콘크리트 구조물은 단위시멘트량이 많기 때문에 부재 내 수화열에 의한 온도의 상승 속도가 빠르기 때문에 시공에 앞서 사전에 설계, 재료 및 시공 측면에서 온도균열 제어 대책을 검토할 필요가 있다.

온도균열 제어 대책은 크게 콘크리트의 온도를 저감하는 방법, 온도응력을 저감하는 방법, 콘크리트 자체의 인장응력에 대한 저항력을 증대시키는 방법 3 가지로 분류된다. 이들 방법 중에서 시공 현장에서 손쉽게 적용이 가능한 장점을 갖고 있는 콘크리트의 온도를 저감하는 방법에 대해

서 많은 연구가 진행되었으며, 그 성과로서 온도균열 제어 대책의 기본으로 많은 시공 현장에서 수행되고 있다. 그 예로 단위시멘트량의 저감, 저발열 시멘트의 사용 등이 적용되고 있으며, 이외에도 콘크리트 온도의 저감 대책으로서 냉각수 사용, 반죽수의 일부를 얼음으로 대체, 콘크리트에 액체 질소를 투여하여 반죽 온도를 저감시키는 프리쿨링 공법, 파이프쿨링에 의한 포스트쿨링 공법^{1),2),3)} 등이 실시되고 있다. 매스 콘크리트의 시공 대책은 이러한 각 방법들 중에서 구조물의 형상, 시공 장소, 환경 조건, 시공 조건과 콘크리트 타설량, 제어 효과 등의 조건에 의해서 선정하게 된다.

본 검토의 대상 구조물은 Double T-beam을 갖는 단경간을 갖는 프리스트레스 콘크리트 교량으로서 주형의 설계강도가 400 kgf/cm²이다. 따라서, 프리쿨링 공법 중 냉각수 사용, 반죽수의 일부를 얼음으로 대체하는 방법은 온도 저감 효과가 미흡하고, 액체 질소에 의해 반죽 온도를 저감시키는 방법은 콘크리트 타설량이 적어 경제성이 떨어지는 것으로 판단하였으며, 부재 치수가 비교적 작은 구조물의 온도균열 제어 대책으로서 온도 상승량을 저감하는 파

이프쿨링에 의한 방법을 검토하였다. 파이프쿨링 방법은 단기간에 대량의 열 제거가 가능하여 프리스트레스의 도입 시기 및 거푸집 탈형 시기 등의 지연을 방지하는 장점도 있는 것으로 판단된다.

따라서, 본 연구에서는 Double T-beam 콘크리트 교량의 온도균열 제어 대책으로서 파이프쿨링의 열 제거 효과를 검토하기 위해서 파이프의 배치 간격 및 개수, 배치 위치, 통수 온도에 대해서 3차원 유한요소 해석법을 실시하여 각 변수가 온도 저감에 미치는 효과를 평가하였다. 이들 결과를 토대로 파이프쿨링의 최적 시공 방안을 도출하였으며, 파이프쿨링이 실제 적용된 부위에서의 온도 계측을 실시하여 온도균열 제어 대책의 효과를 평가하였다.

2. 파이프쿨링에 의한 수화열 해석 방법

파이프쿨링에 의한 수화열 해석은 기존 연구자에 의해서 상세히 보고되었기 때문에^{4),5)} 본 연구에서는 해석에 적용되는 기본식에 대해서 기술하였다. 파이프쿨링에 의한 온도 저감 효과를 정량적으로 평가하기 위해서는 콘크리트 내의 열전도장에 연

* 정회원, (주)대우건설기술연구소 책임연구원
 ** 정회원, (주)대우건설기술연구소 주임연구원
 *** 정회원, (주)대우건설기술연구소 연구원

속된 열전달 경계면이 일정 간격으로 존재하고, 각 열전달 경계는 장소 및 시간에 따라 변하는 것이 해석에서 고려되어야 한다. 파이프의 배치는 1차원 방향뿐만 아니라 평면적으로 배치하는 경우가 많으며, 본 연구에서는 입체적으로 배치하기 때문에 3차원 유한요소해석법을 이용하였다.

2.1 콘크리트장에서의 온도 해석

본 연구에서는 콘크리트장에서 다음과 같은 3차원 비정상 열전도방정식을 이용하였다.

$$\lambda \left(\frac{\partial^2 T_c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_c}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_c}{\partial z^2} \right) + Q_c(t) = \rho c \frac{\partial T_c}{\partial t} \quad (1)$$

여기서, λ : 열전도율(W/m°C), T_c : 콘크리트의 온도(°C), $Q_c(t)$: 콘크리트 내부의 발열률(W/m³), ρ : 콘크리트의 밀도(kg/m³), c : 콘크리트의 비열(kJ/kg°C)이다. 경계 조건은 외기와 접하는 대류 경계 및 쿨링파이프 벽면과 접하는 경계가 있다. 외기와 접하는 대류 경계는 식(2)와 같이 표현된다.

$$\lambda \left(\frac{\partial T_c}{\partial x} l + \frac{\partial T_c}{\partial y} m + \frac{\partial T_c}{\partial z} n \right) + \eta(T_c - T_\infty) + q_s = 0 \quad (2)$$

여기서, l, m, n : 경계면에서의 방향 벡터, η : 콘크리트의 표면 열전달률(W/m²°C), T_∞ : 외기온(°C), q_s : 콘크리트 표면에서의 열유속(W/m²)이다. 쿨링파이프 벽면에서의 경계 조건은 쿨링파이프 내의 물과 콘크리트가 접하는 파이프 벽면에서의 열전달이 이루어지는 것으로 가정하여 식(3)과 같은 경계 조건이 설정된다.

$$\lambda \left(\frac{\partial T_c}{\partial x} l + \frac{\partial T_c}{\partial y} m + \frac{\partial T_c}{\partial z} n \right) + h(T_c - T_w) = 0 \quad (3)$$

여기서, h : 파이프 벽면에서의 열전달률, T_w : 파이프 내 물의 온도(°C)이다. 식(1)에 Galerkin법(6)을 적용하고, 식(2) 및 식(3)의 경계 조건을 적용하여 매트릭스로 나타내면 다음과 같은 식이 얻어진다.

$$[K_c]\{T_c\} - [K_{cw}]\{T_w\} + [C] \frac{\partial T_c}{\partial t} = \{F_c\}$$

$$[K_c] = \int_V [B]^T [D] [B] dV + \int_{S_1} \eta [N_c]^T [N_c] dS_1 + \int_{S_1} q_s [N_c]^T dS_1 + \int_{S_2} h [N_c]^T [N_c] dS_2$$

$$[K_{cw}] = \int_{S_1} h [N_c]^T [N_w] dS_1$$

$$[C] = \rho c \int_V [N_c]^T [N_c] dV$$

$$\{F_c\} = Q(t) \int_V [N_c]^T dV - \int_{S_2} T_\infty [N_c]^T dS_2 \quad (4)$$

여기서, $[B]$: 온도 구배 매트릭스, $[D]$: 전도계수 매트릭스, $[N_c]$: 콘크리트 온도에 관한 형상함수 매트릭스, $[N_w]$: 쿨링파이프 내 물의 온도와 관련된 형상함수 매트릭스, S_1 : 외기와의 경계면, S_2 : 파이프 벽면의 면적이다.

2.2 파이프 내 물의 온도에 관한 지배방정식

쿨링파이프 내 물의 온도는 파이프 내의 유속 u , 입구에서의 물의 온도 T_{wb} , 파이프 직경, r 파이프 벽면 온도 T_c , 파이프 벽면의 열전달률 h 및 파이프 입구로부터의 거리 S 등 많은 요인에 의해서 결정된다.

$$T_w = f(u, T_{wb}, r, T_c, h, S) \quad (5)$$

파이프 내 물의 온도에 관한 기본 방정식에서는 쿨링파이프가 입구부터 출구까지 하나의 관으로 하여 관을 따르는 극좌표상에서 관내 물의 흐름은 1차원이다. 관 입구로부터의 거리가 S 인 미소 구간 dS 에 있어서 파이프 내의 물이 S_i 부터 S_{i+1} 의 방향으로 유속 u 로 흐르는 경우의 파이프 내 수온의 지배방정식은 식(6)과 같다.

$$\begin{aligned} & \rho_w C_w r^2 \pi u \frac{\partial T_w}{\partial S} dS \\ & + 2\pi r dS h (T_w - T_c) \\ & + \rho_w C_w dS \frac{\partial T_w}{\partial t} \\ & = \rho_w C_w u \frac{\partial T_w}{\partial S} \\ & + \frac{2h}{r} (T_w - T_c) \\ & + \rho_w C_w \frac{\partial T_w}{\partial t} = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

여기서, ρ_w : 물의 밀도(kg/m³), C_w : 물의 비열(kJ/kg °C), r : 파이프의 직경(mm)이며, 식(6)에서 유속 u 는 관내에서는 일정한 것으로 가정한다.

식(6)에 콘크리트장과 마찬가지로 Galerkin법을 적용하여 파이프 내 물의 온도에 대해서 매트릭스로 표현하면 식(7)과 같다.

$$\begin{aligned} & [K_w]\{T_w\} - [K_{wc}]\{T_c\} \\ & + [W] \frac{\partial \{T_w\}}{\partial t} = 0 \\ & [K_w] = \\ & \rho_w C_w u \left[[N_w]^T [N_w] \right]_{S_i}^{S_{i+1}} \\ & - \rho_w C_w u \int_S \frac{\partial [N_w]}{\partial S} [N_w] dS \\ & + \frac{2h}{r} \int_{S_2} [N_w]^T [N_w] dS \\ & [K_{wc}] = \frac{2h}{r} \int_S [N_w]^T [N_c] dS \\ & [W] = \rho_w C_w \int_S [N_w]^T [N_w] dS \end{aligned} \quad (7)$$

표 1. 콘크리트의 배합 특성

설계기준강도 (kgf/cm ²)	굵은골재 최대 치수 (mm)	슬럼프 (cm)	공기량 (%)	절대 잔골재율 (%)	W/C 비 (%)	단위재료량(kg/m ³)					
						물 (W)	시멘트 (C)	잔골재 (S)	굵은골재	혼화제	
										AE 감수제	유동화제
400	19	15	4.0	41	34.9	180	516	660	958	6.2	2.6

표 2. 콘크리트 압축강도 시험 결과

구 분	7일 강도(7일 강도(kgf/cm ²))	28일 강도(kgf/cm ²)
표준 공시체 측정 결과 (15×30 cm)	349.15, 367.03, 370.43, 402.46, 421.47, 372.80, 330.02, 329.46, 333.31, 327.31, 335.68	440.09, 443.48, 424.30, 483.60, 420.57, 499.90, 483.94, 464.03, 464.25, 436.52, 436.47, 440.92, 454.29, 421.40, 440.80, 426.60, 470.87, 465.84, 479.02, 413.21, 433.92
평 균	358	450

3. Double T-beam 교량의 온도균열 제어 대책

본 교량은 40 m의 단경간을 갖는 프리스트레스 콘크리트 Double T-beam 교량으로서 교폭이 11.25 m인 2차선 교량이다. Double T-beam 교량은 콘크리트 박스 거터와 달리 철근 배근이 단순하고 1회의 콘크리트 타설로 전단면을 완성시키므로 수평 시공 이음부가 발생되지 않는다. 본 교량은 교하 공간 확보를 위해 복부의 두께를 크게 하여 형고를 낮춤으로써 주형의 콘크리트 타설량이 기존 유사한 주형에 비해서 매시브한 특징이 있다. 따라서, 본 교량의 Double T-beam은 단면이 매시브하고, 주형의 설계강도가 400 kgf/cm²으로 단위시멘트량의 사용이 과다하여 적극적인 온도균열 제어 대책이 필요하다. Double T-beam 콘크리트의 배합 특성은 <표 1>에 수록하였으며, 단면의 형상은 <그림 1>과 같다.

콘크리트 시공시 제작된 표준공시체를 통해서 측정된 콘크리트의 압축강도 시험 결과는 <표 2>와 같다.

이상의 압축강도 시험 결과를 보면, Double T-beam의 압축강도는 충분히 설계강도를 만족하는 것으로 판단된다. 따라서, 온도균열 평가를

위해서 「콘크리트표준시방서」에 규정된 재령에 따른 압축강도 및 인장강도 산정 시, 안전측의 결과를 고려하여 재령 91일의 콘크리트 압축강도를 설계강도인 400 kgf/cm²를 사용하였다.

본 구조물이 건설되는 장소는 비교적 해안에서 가까운 거리에 있기 때문에 내구성 관점에서 온도균열 발생을 적극적으로 억제할 필요가 있다. 따라서, 본 연구에서는 쿨링파이프의 배치 간격 및 배치 갯수를 변수로 3차원 수화열 및 온도응력 해석을 실시하여 부재 전체에서 최소 온도균열 지수가 1.5 이상이 되도록 쿨링파이프 배치 방안을 도출하고자 하였다.

4. 파이프쿨링 효과를 고려한 수화열 및 온도응력 해석

4.1 해석 조건

본 연구에서는 <그림 1>에 나타난 단면 중 바닥판 슬래브를 제외한 Double T-beam(1회 타설)만을 해석 대상으로 하여 <그림 2>에 나타난 쿨링파이프 배치 형태에 대해서 해석을 수행하였다. 쿨링파이프 배치시 주 고려 대상은 쉬스 관 및 철근의 위치이다. 쿨링파이프의 배치 간격 및 배치 갯수를 고려한 해석 결과를 통해서 Double T-beam의 중앙부 단면과 단부 단면에 대한 온도균열 발생 여부를 검토하여 온도균열지수가 1.5 이상 가능한 쿨링파이프의 배치 방안을 포함한 시공 방안을 도출하였다. 파이프쿨링 배치에 따른 주요 해석 조건은 <표 3>, 수화열 및 온도응력 해석에 이용된 열 특성치 및 역학적 특성치는 <표 4>와 같다.

4.2 해석 방법 및 해석 모델

파이프쿨링을 고려한 수화열 및 온도응력 해석은 범용 해석 프로그램인 DIANA를 이용하였으며, 수화열 및 온도응력 해석 흐름도는 <그림 3>과 같다.

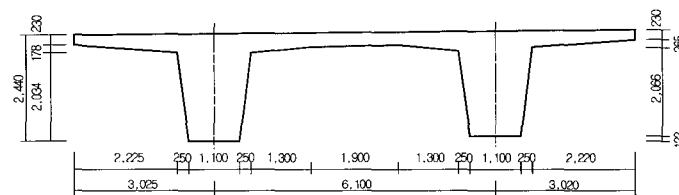


그림 1. Double T-beam의 단면 형상

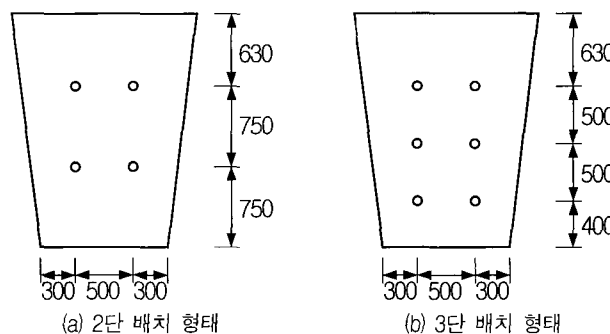


그림 2. 쿨링파이프의 배치 형태(단위: mm)

표 3. 파이프쿨링 배치에 따른 해석 조건

해석 조건	쿨링파이프 갯수	통수 온도	통수 유량	파이프 직경
쿨링파이프 미 배치	0	15°C	1.5 m ³ /hr (1개 소당)	25.4 mm
쿨링파이프 2단 배치	4			
쿨링파이프 3단 배치	6			

표 4. 열 특성 및 역학적 특성

사용 재료 물 성	유한요소해석 시 입력자료	
비열 (kcal/kg·°C)	0.25	
밀도 (kg/m ³)	2,500	
열전도율 (kcal/m·hr·°C)	2.3	
대류계수 (kcal/m ² ·hr·°C)	대기 노출면	12
	목재 거푸집	7
외기온도 (°C)	25	
타설온도 (°C)	25	
91일 압축강도 (kgf/cm ²)	400	
t일에서 압축강도 (kgf/cm ²)	$f_{ct(t)} = \frac{t}{4.5 + 0.95t} f_{ct(91)}$	
t일에서 인장강도 (kgf/cm ²)	$f_{sp(t)} = 1.4\sqrt{f_{ct(91)}}$	
탄성계수 (kgf/cm ²)	$E_e(t) = \phi(t) \times 15000\sqrt{f_{ct(t)}}$	
열팽창계수 (/°C)	10.0E-6	
포아송비	0.2	
단열온도상승식 [$T = K(1 - e^{-at})$]	$K = 69.76^\circ\text{C}, a = 1.92$	
파이프 내 통수온도 (°C)	15	
파이프 벽면에서의 열전달계수(kcal/m ² ·hr·°C)	320	
통수 유량 (m ³ /hr)	1.5 (1개 소당)	

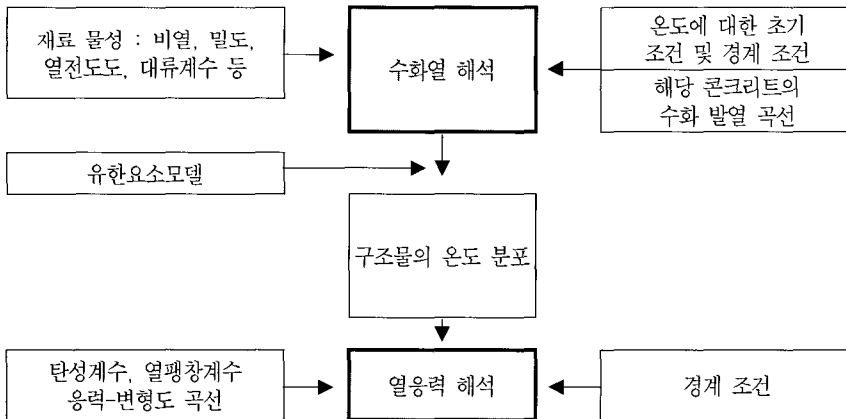


그림 3. 수화열 및 온도응력 해석 흐름도

표 5. 수화열에 의한 온도 해석 결과

해석 종류	해석 단면	최대 온도 도달 시간(hr)	최대 온도 (°C)	비 고
제 1 안 (쿨링파이프 미 배치)	단 부	30	64.3	· 타설 온도(25°C)에서 최대 39°C 상승
	중앙부	30	63.3	
제 2 안 (쿨링파이프 2단 배치)	단 부	20	52.1	· 최대 상승 온도 12°C 저감 효과
	중앙부	20	51.6	
제 3 안 (쿨링파이프 3단 배치)	단 부	20	48.0	· 최대 상승 온도 16°C 저감 효과
	중앙부	20	48.0	

해석 모델은 40m 경간 전체를 고려하였으며, 단면의 대칭성을 고려해 1/2 단면만 모델링하였다. 쿨링파이프를 미 배치한 경우, 쿨링파이프를 2단(4개) 배치한 경우, 쿨링파이프를 3단(6개) 배치한 경우 각각에 대한 유한요소모델의 형상은 <그림 4>와 같다.

4.3 해석 결과

4.3.1 수화열 해석 결과

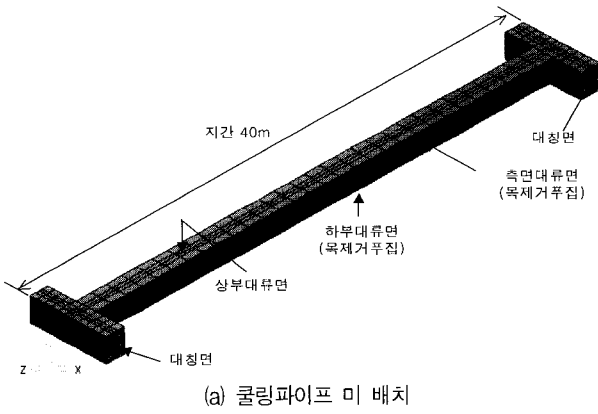
쿨링파이프 배치 여부에 따른 해석 결과를 비교하기 위해서 동일한 유한요소모델로 해석을 수행하였으며, 쿨링파이프가 배치되는 경우에는 쿨링파이프가 설치되는 위치에 쿨링파이프 요소(cooling pipe element)를 추가하였다. 수화열에 의한 온도 해석 결과는 <표 5>에 요약하였으며, 최대 온도 발생시 각 단면 내 온도 분포의 형상은 <그림 5>~<그림 7>과 같다. 수화열에 의해 최대 온도가 발생하는 지점에서의 온도이력을 <그림 8>에 나타내었다.

이상의 온도 해석 결과에서 보면, 쿨링파이프를 2단 배치하는 경우에는 약 12°C, 쿨링파이프를 3단 배치하는 경우에는 약 16°C의 온도 저감 효과가 있는 것으로 평가되었다. 또한, 최대 온도가 발생하는 시점이나 수화열에 의해 발생하는 온도가 대기온도에 수렴하는 시기도 파이프쿨링 효과가 클수록 빠른 것으로 나타났다.

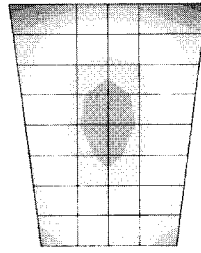
4.3.2 온도응력 해석 결과

온도응력 해석 결과 및 온도균열지수는 <표 6>에 요약하였으며, 최대 주 인장응력 발생시 각 단면의 응력 분포는 <그림 9>~<그림 11>과 같다.

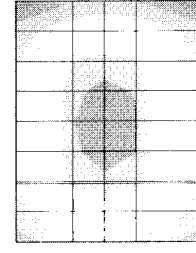
이상의 온도응력 해석 결과에서 파이프



(a) 쿨링파이프 미 배치

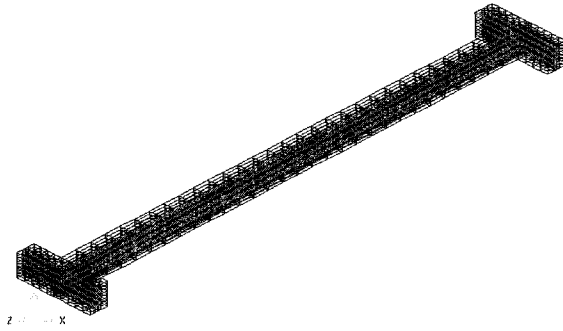


(a) 중앙부 복부 단면의 온도 분포

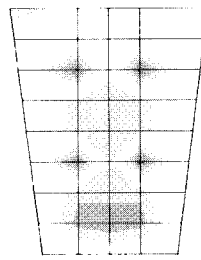


(b) 단부 단면의 온도 분포

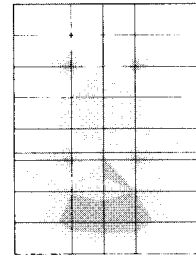
그림 5. 쿨링파이프 미 배치시 온도 분포



(b) 쿨링파이프 2단 배치(4개)

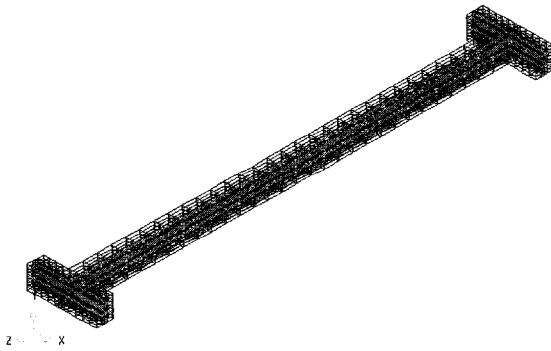


(a) 중앙부 복부 단면의 온도 분포

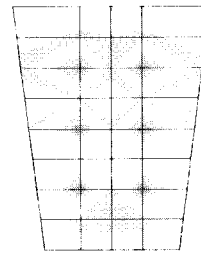


(b) 단부 단면의 온도 분포

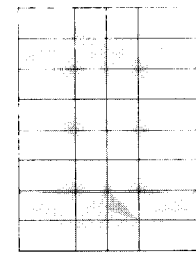
그림 6. 쿨링파이프 2단 배치시 온도 분포



(c) 쿨링파이프 3단 배치(6개)



(a) 중앙부 복부 단면의 온도 분포



(b) 단부 단면의 온도 분포

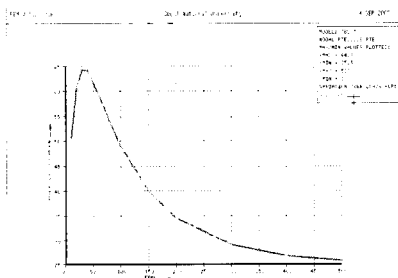
그림 7. 쿨링파이프 3단 배치시 온도 분포

쿨링이 실시되지 않는 경우에는 단부와 복부의 연결부 부근에서 타설 후 1.67일경에 약 20.3 kgf/cm^2 의 인장강도를 초과하는 22.2 kgf/cm^2 의 온도응력이 발생한다.

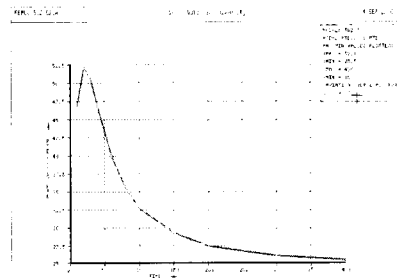
이때 온도균열지수는 0.91 정도로 온도균열의 발생 가능성이 매우 높은 것으로 판단된다. 또한, 부재의 표면 모서리부에서도 큰 인장응력이 발생되어 온도균열의 발

생 가능성이 높은 것으로 나타났다.

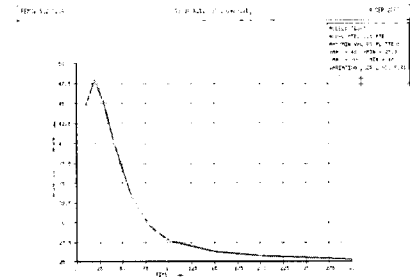
쿨링파이프가 2단 배치되는 경우에는 쿨링파이프 주변에서 타설 후 약 1.25일경에 단부에서 10.5 kgf/cm^2 정도의 최



(a) 쿨링파이프 미 배치시



(b) 쿨링파이프 2단 배치시

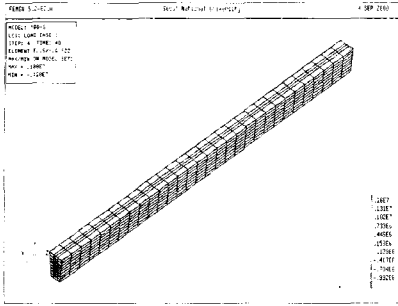


(c) 쿨링파이프 3단 배치시

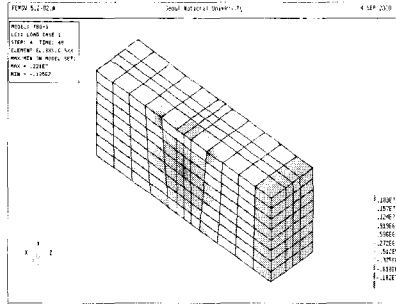
그림 8. 최대 온도 발생 지점의 온도이력

표 6. 온도응력 해석 결과

해석 종류	해석 단면	최대 응력 도달 시간	최대 인장응력 (kgf/cm ²)	온도균열지수	비 고
제 1 안 (쿨링파이프 미 배치)	단 부	40	22.2	0.91	· 인장강도 = 20.3 kgf/cm ² · 단부와 중앙부의 연결부, 복부 단면의 모서리에서 균열 발생 가능성 높음.
	중앙부	40	18.8	1.08	
제 2 안 (쿨링파이프 2단 배치)	단 부	30	10.5	1.60	· 인장강도 = 16.8 kgf/cm ² · 파이프 주위에서 최대 인장응력 유발
	중앙부	30	10.2	1.65	
제 3 안 (쿨링파이프 3단 배치)	단 부	20	9.42	1.74	· 인장강도 16.4 kgf/cm ² · 파이프 주변에서 최대 인장응력 유발
	중앙부	20r	9.07	1.81	

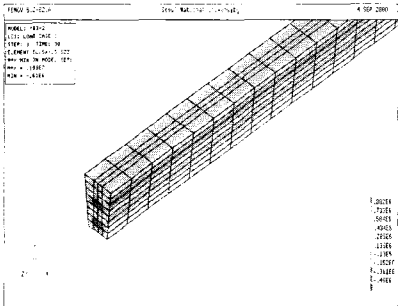


(a) 중앙부 복부 단면의 응력 분포

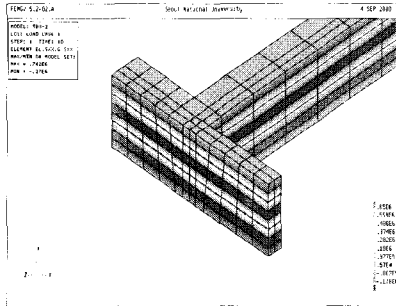


(b) 단부 단면의 응력 분포

그림 9. 쿨링파이프 미 배치시 응력

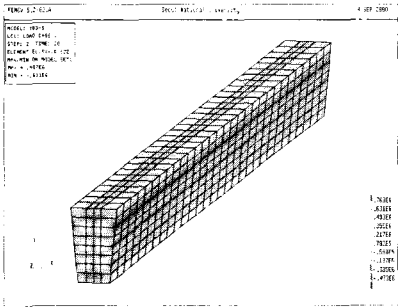


(a) 중앙부 복부 단면의 응력 분포

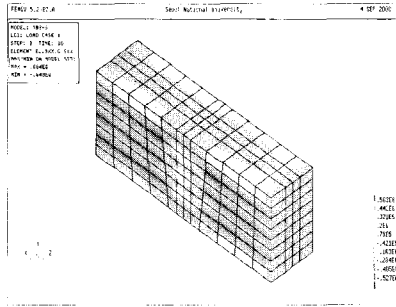


(b) 단부 단면의 응력 분포

그림 10. 쿨링파이프 2단 배치시 응력분포



(a) 중앙부 복부 단면의 응력 분포



(b) 단부 단면의 응력 분포

그림 11. 쿨링파이프 3단 배치시 응력 분포

대 인장응력이 발생하나, 인장강도 16.8 kgf/cm²보다 작은 수준인 것으로 나타났다. 이때의 온도균열지수는 약 1.60 정도로 대부분의 온도균열이 억제될 것으로 판단된다. 이외에도 부재의 표면 모서리부에서 큰 인장응력이 유발되나 인장강도보다 낮은 수준이다.

쿨링파이프가 3단 배치되는 경우에는 쿨링파이프 주변에서 타설 후 약 0.83일 경에 단부에서 9.42 kgf/cm² 정도의 최대 인장응력이 발생하나, 인장강도 16.4 kgf/cm²보다 작은 수준이다. 이때의 온도균열지수는 약 1.74 정도로 대부분의 온도균열이 억제될 것으로 판단된다. 이외에도 부재의 표면 모서리부에서 큰 인장응력이 유발되나 인장강도보다 낮은 수준이다.

4.3.3 파이프쿨링에 의한 온도균열

제어 효과

수화열에 의한 온도 및 응력 해석 결과를 토대로 쿨링파이프의 배치에 따른 온도균열 제어 효과를 비교 분석하였으며, 시간의 중앙부와 단부에서 쿨링파이프 배치에 따른 온도균열 제어 효과는 <그림 12> ~ <그림 14>와 같다.

<그림 12> ~ <그림 14>에서 보면, 쿨링파이프를 2단 배치(총 4개)함으로써 파

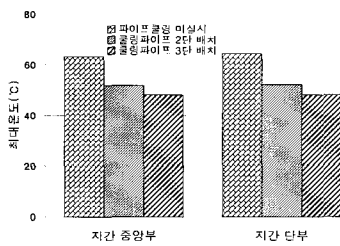


그림 12. 쿨링파이프 배치에 따른 최대 발생 온도의 비교

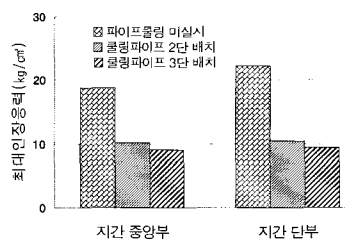


그림 13. 쿨링파이프 배치에 따른 최대 인장응력의 비교

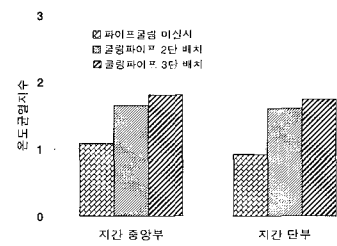


그림 14. 쿨링파이프 배치에 따른 온도균열지수의 비교

이프쿨링 미 실시에 비해 지간의 중앙부에서는 약 11.7°C의 온도 저감 효과가 있고, 최대 인장응력은 약 8.6kgf/cm²가 저감되어 온도균열지수가 1.08에서 1.65로 증가하는 결과를 보이고 있다. 지간 단부에서는 약 12.2°C의 온도 저감 효과가 있고, 최대 인장응력은 약 11.7kgf/cm²가 저감되어 온도균열지수가 0.91에서 1.60으로 증가하였다.

쿨링파이프를 3단 배치(총 6개)하는 경우에는 파이프쿨링 미실시에 비해 지간 중앙부에서 약 15.3°C의 온도 저감 효과가 있고, 최대 인장응력도 약 9.73kgf/cm²이 저감되어 온도균열지수가 1.08에서 1.81로 증가하였다. 지간의 단부에서는 약 16.3°C의 온도 저감 효과가 있는 것으로 나타났으며, 최대 인장응력은 약 12.8kgf/cm²이 저감되어 온도균열지수가 0.91에서 1.74로 증가하는 결과를 보였다.

이상의 결과에서 보면, Double T-beam 매스 콘크리트 시공시 파이프쿨링을 실시하는 경우, 뚜렷한 온도균열 제어 효과가 있는 것으로 판단된다. 파이프쿨링을 미 실시 하는 경우에는 단부와 중앙부의 연결부 및 복부 단면의 표면부에서 인장강도를 초과하는 최대 인장응력이 발생되어 균열 발생 가능성이 높은 것으로 나타났으나, 파이프쿨링을 실시하는 경우에는 파이프 주변에서 최대 인장응력이 유발되지만 인장강도보다 작은 수준으로 온도균열 발생이 대부분 억제될 것으로 판단된다.

5. 실 시공에서의 온도균열 제어 효과의 평가

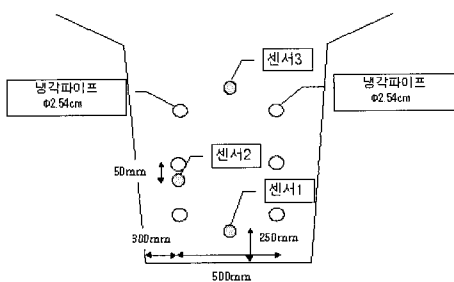


그림 15. 쿨링파이프 배치 및 온도 측정 위치

5.1 실 시공시 온도계측 및 쿨링파이프의 배치

본 연구에서는 대상 구조물인 Double T-beam 교량이 비교적 해안에서 가까운 거리에 위치하기 때문에 내구성 관점에서 온도균열 발생을 보다 적극적으로 억제할 필요가 있는 것으로 판단하여 해석 결과를 토대로 온도균열 제어 효과가 보다 뛰어난 쿨링파이프 3단 배치를 결정하였다.

파이프쿨링에 의한 온도 저감 효과를 평가하기 위해서 Double T-beam 시공시 지간 중앙부 단면부의 온도 및 파이프 내 냉각수의 유출입 온도를 측정하였다. 온도계측은 쿨링파이프를 3단 배치한 해석 결과를 토대로 수화열에 의한 발생 온도가 높은 지점 2개 소와 냉각 파이프 주변 1개 소에 대해서 수행하였으며, 자세한 측정 위치는 <그림 15>에 나타내었다.

쿨링파이프는 주형당 6개씩 총 12개를 배치하였으며, 양수기를 이용한 강제순환 방식으로 약 1.04 m/s의 유속을 유지해 수화열에 의한 온도가 대기온도에 수렴하는 시점까지 관리하였다. 파이프쿨링을 실시하는 경우, 유량 및 통수 온도가 열 제거 효과에 큰 영향을 미친다⁴⁾. 파이프쿨링 실시시 유량이 크게 변하는 경우, 열 제거 효과에 큰 영향을 미쳐 사전에 예측한 온도균열 제어 효과가 충분치 않을 것으로 예상된다. 따라서, 유량의 안전 공급과 출입구 온도계측을 위해서 자동관리 장치를 설치하였다. 파이프쿨링 종료 후 쿨링파이프는 그라우팅으로 충전하였다.

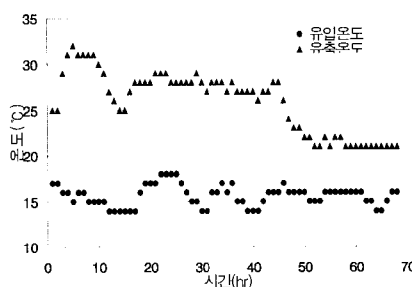


그림 16. 쿨링파이프 내 냉각수의 출입구 온도이력

5.2 온도계측 결과

쿨링파이프 내 냉각수의 출입구 온도 측정 결과를 <그림 16>에 나타내었다. 유출입 온도의 변화를 보면 대기온도가 증가하는 시간대에는 3~4°C 정도 증가하는 경향을 보이고 있다. 유출입 냉각수의 온도는 수화열에 의해 Double T-beam 단면 내에서 최고 온도가 발생하는 시점 전 후에서 가장 크고, 점차적으로 감소하는 경향을 보이고 있으며, 이로 미루어 파이프쿨링에 의한 냉각 효과가 효과적으로 적용되고 있는 것으로 판단된다.

<그림 17>에 나타난 온도 측정 결과에서 보면, 센서 1과 센서 3에서 최대 발생 온도가 약 50°C 정도이며 센서 3 부근 콘크리트의 타설 시간이 센서 1에 비해서 상대적으로 어느 정도 시간이 경과한 후에 이루어졌기 때문에 최대 온도의 발생 시기가 지연된 것으로 판단된다. 냉각 파이프 주변에 설치된 센서 2에서는 최대 발생 온도가 약 44°C 정도로 수화열에 의해 최대 온도가 발생하는 지점은 아니지만 다른 센서에 비해서 파이프쿨링 영향을 크게 받는 것으로 판단된다.

5.3 해석 결과와 계측 결과의 비교

<표 5>에 정리된 수화열에 의한 온도 해석 결과에서 보면, Double T-beam 지간 중앙부 단면에서 최대 발생온도는 타설 후 약 20시간 경과 후에 약 48°C 정도이다. <그림 17>에 나타난 계측 결과에서 보면, 동일한 지점에서 최대 발생온도는 타설

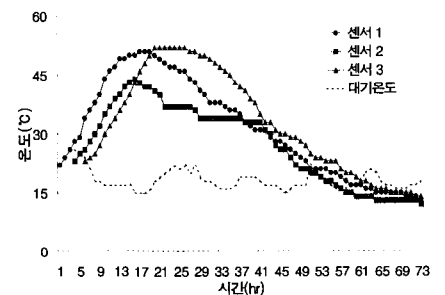


그림 17. 단면 내 온도 측정 결과

후 약 19시간이 경과 후에 51°C(센서 1)인 것으로 측정되었다. 이와 같은 결과에서 보면 인장강도의 크기와 크게 관련이 있는 최대 온도 발생 시기는 해석 결과와 계측 결과가 잘 일치하는 것으로 판단된다. 최대 발생온도는 실측치가 해석치보다 약 3°C 정도 크게 측정되었는데 이는 해석시 쿨링파이프의 통수 온도는 약 15°C인 데 비해서 실 시공시 측정된 통수 온도는 14~18°C 사이로 해석치보다 약 2~3°C 정도 높았던 것이 가장 큰 원인인 것으로 판단된다. 이상의 결과에서 보면, 3차원 유한요소법에 의한 사전 해석을 통해서 쿨링파이프의 입체 배치를 결정하는 것이 실 시공시 유효하게 적용 가능한 것으로 판단된다.

6. 결론

본고에서는 Double T-beam을 갖는 프리스트레스 콘크리트 교량 구조물의 파이프쿨링에 의한 온도균열 시공 사례에 대해서 기술하였다. 3차원 유한요소해석법을 이용한 사전 해석에서 쿨링파이프의 입체 배치에 따른 온도균열 제어 효과를 검토하

여 최적의 쿨링파이프 배치를 선정하였으며, 실 시공에서의 온도균열 제어 효과를 확인하기 위해서 온도계측을 수행하였다.

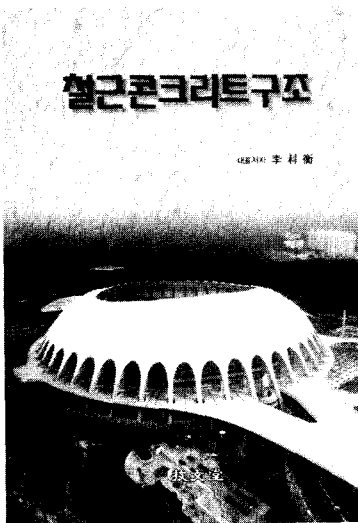
Double T-beam 시공시 쿨링파이프 배치에 따른 3차원 유한요소 해석 결과, 쿨링파이프 미 배치시에 비해서 쿨링파이프의 2단 배치시 온도균열 저감 효과가 큰 것으로 나타났으며, 쿨링파이프 3단 배치 시에는 2단 배치시에 비해 약간의 온도균열 저감 효과를 보이는 것으로 나타났다.

이상의 해석 결과를 토대로 쿨링파이프를 3단 배치한 Double T-beam의 실 시공을 통해서 해석 결과가 실측치와 유사함을 확인하였으며, 시공 후 파이프쿨링에 의한 온도균열 저감 효과를 확인하였다. 따라서, 향후 파이프쿨링을 통한 매스 콘크리트 구조물 시공시 쿨링파이프 배치에 대한 사전 해석이 온도균열 저감 대책에 유용하게 이용될 수 있을 것으로 판단된다. □

참고문헌

1. 김진근, 김국한, 양주경, "온도저감 공법을 고려한 콘크리트의 수화열 해석기법에 관한 연구," 콘크리트학회지, Vol.2, No.6.

1995. 12, pp.176 ~ 185.
2. 차홍윤, 김은경, 김래현, 신치범, "시트양생 및 파이프쿨링에 의한 매스 콘크리트의 구조물의 온도제어," 1995년도 봄 학술발표회 논문집, Vol.7, No.1, 1995, pp. 263 ~ 267.
3. 溝淵利明, 蜂村修 外 2人, "アーチ式ダムにおける2次クーリングが温度應力に及ぼす影響に関する検討," コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.1, 1997, pp. 1513 ~ 1518.
4. 田邊忠頭, 山川秀次, "マスコンクリートにおけるクーリング効果の解析," 土木學會第36回年次學術講演概要集, 第V部門, 1981, pp.53 ~ 54.
5. 田邊忠頭, 山川秀次 外 1人, "マスコンクリートにおける管壁面の熱傳達率の決定ならびに冷却効果の解析," 土木學會論文集, No.343, 1984. 3, pp.171 ~ 179.
6. Gallagher, R. H., "Finite Element Analysis Fundamentals," Maruzen Co., Ltd, 1976. pp.117 ~ 124.
7. 溝淵利明, 蜂村修 外 2人, "アーチ式ダムにおける2次クーリングが温度應力に及ぼす影響に関する検討," コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.1, 1997, pp. 1513 ~ 1518.



철근콘크리트구조

- 대표저자 : 이리형 (한양대학교 건축공학부 교수)
- 출판사 : 기문당
- 출판일 : 2002년 1월
- 정 가 : 22,000원
- 페이지 : 696면
- ISBN : 89-7086-392-3

■ 소개

이 책에서는 대한건축학회가 제정한 철근콘크리트설계기준과 ACI 기준을 기초로 하여 극한강도설계법과 허용응력설계법을 모두 다루고 있다. 책의 내용은 철근콘크리트 구조에 대한 일반적인 사항, 구성 재료의 성질, 설계 방법에서부터 내진설계를 위한 원리와 예제 등을 소개하고 있다.