

수화발열시 내외부 온도차가 유발하는 균열의 제어

Control of Crack Induced by the Temperature Difference During Hydration

전 세 진^{*}
Jeon, Se Jin

최 명 성^{**}
Choi, Myoung Sung

김 영 진^{***}
Kim, Young Jin

ABSTRACT

Control of the temperature difference across a section is an effective way to minimize the hydration-heat-induced cracks for the structures where internal restraint is dominant. However, surface temperature may not be easily measured in situ due to the difficulty in maintaining the correct location during casting. A prediction equation for the temperature difference is proposed which can be applied without directly measuring the surface temperature if the curing condition and ambient temperature are known. Some strategies to control the temperature difference are revisited and a reasonable range of the temperature difference to minimize the crack is discussed.

1. 서 론

내부구속이 지배적인 구조물에서 수화열에 의한 균열을 저감하기 위해서는 단면의 내외부 온도차를 조절하는 기법이 효과적이다. 여기에서 내부구속은 수화열 발현시 부재 내외부 온도차에 의한 내외부 부피변화의 차이가 상호 구속됨을 의미한다. 내외부 온도차는 해석 또는 계측을 통해 구할 수 있으나, 계측에 의한 경우 표면온도의 정의 및 올바른 측정이 문제가 되는 경우가 많다. 따라서, 본 연구에서는 콘크리트 표면의 대류 효과를 등가의 콘크리트 두께로 치환하는 기법을 적용하여, 내부온도와 외기 온도만 측정한 경우에도 표면온도 및 내외부 온도차를 추정할 수 있는 식을 제안하였다. 또한, 국내의 내외부 온도차 관리 기준 및 제어 기법들을 고찰하고, 합리적인 내외부 온도차 수준에 대해 논의하였다. 유도된 식은 수치예제의 전산구조해석 결과와 비교하여 검증하였다.

2. 내외부 온도차 추정식

2.1 개요

유한요소해석 등의 해석을 수행할 경우 내부 및 외부(표면)온도로부터 내외부 온도차를 구하는 데 큰 어려움이 없다. 그러나, 계측시에는 표면온도의 기준 위치에 대한 정의가 우선 필요한 데 국내 기

*정회원, 대우건설기술연구원 토목연구팀 선임연구원

**정회원, 대우건설기술연구원 토목연구팀 연구원

***정회원, 대우건설기술연구원 토목연구팀 수석연구원

준에는 명확한 지침이 없는 실정이다. 표면 부근의 온도 기울기는 내부에 비해 커서 온도가 급변하므로 표면온도의 두께 방향 위치에 대한 정의가 요망된다. 이 때 주의할 점으로 표면온도와 외기 온도를 혼동해서는 안 되며, 콘크리트 표면과 외기와의 대류현상에 의해 표면온도와 외기온도는 다른 값을 갖게 된다. 해외 및 최근 국내 사례¹⁾에서는 표면에서 10mm 깊이를 표면온도로 보고 있지만, 실제 타설과정에서 이처럼 표면부 온도 계측기의 정확한 위치를 유지하는 것은 매우 어려운 일이다. 따라서, 본 연구에서는 용이하게 측정할 수 있는 외기온도를 통해 표면온도를 대체할 수 있는 방안을 고찰하였다.

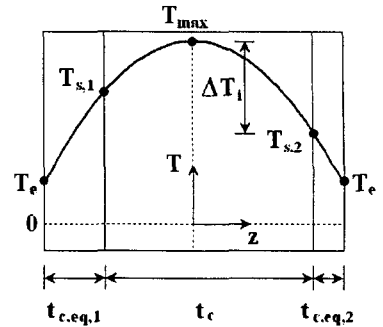


그림 1 수화열에 의한 단면온도 분포

2.2 추정식의 유도

수화열에 의한 콘크리트 단면의 온도분포는 열확산방정식을 경계조건과 함께 풀어 구할 수 있다. 이러한 편미분 방정식의 해는 복잡한 형태를 갖지만 이를 도시해보면 단면 두께 방향으로 근사적으로 포물선에 가까운 형태를 갖게 됨을 알 수 있다. 본 연구에서는 그림 1과 같이 포물선 온도분포 가정과 더불어 수식의 명확한 유도를 위해 식 (1)에 의해 계산된 콘크리트 등가두께 $t_{c,eq}$ 를 표면에 덧붙여 고려하였다. 여기에서 T_{max} 는 중심부에서 발생하는 최대온도로서, 일반적으로 이 시점에서 부재의 내외부 온도차도 가장 크다. 식 (1)은 열속의 동등성을 이용하여 대류 효과를 열전도 효과로 치환하는 방법론²⁾에 근거하고 있다.

$$t_{c,eq} = \frac{\lambda_c}{\eta_c} \quad (1)$$

여기에서, λ_c 는 콘크리트 열전도율, η_c 는 양생조건이나 거푸집 종류에 따른 대류계수(열전달율)이다. 여러 가지 경우를 포괄하기 위해 그림 1에서 두께 t_c 의 콘크리트 단면 양쪽 표면의 대류계수가 서로 다른 경우를 가정하였으며, T_{max} 가 발생하는 위치를 z 축 원점으로 잡았고, T_e 는 외기온도, T_s 는 표면온도를 의미한다. 이 때 온도 분포식을 유도해보면 식 (2)와 같다.

$$T = (T_{max} - T_e) \left[1 - \left(\frac{2z}{t_c + t_{c,eq,1} + t_{c,eq,2}} \right)^2 \right] + T_e \quad (2)$$

만약 $t_{c,eq,1} > t_{c,eq,2}$ 라면 최대 내외부 온도차 ΔT_i 는 식 (3)과 같이 유도된다. 여기에서 계수 β 는 양생조건을 고려하여 내외부 온도차와 내부-외기 온도차를 관련지어 주는 일종의 감소계수로 식 (4)와 같다. T_{max} 는 실측할 수도 있으나, 두꺼운 부재의 경우 안전측으로 수식 또는 실험으로 얻은 단열온도상승량에 타설온도를 더해서 산정하는 것도 가능하리라 생각한다. 본 유도식에는 양생조건과 같은 시공 조건의 변화(=대류계수의 변화)나 온도조건의 변화가 단면 내외부 온도차에 미치는 영향이 일목요연하게 포함되어 있는 장점이 있다.

$$\Delta T_i = \beta (T_{max} - T_e) \quad (3)$$

$$\beta = \left(\frac{t_c + t_{c,eq,1} - t_{c,eq,2}}{t_c + t_{c,eq,1} + t_{c,eq,2}} \right)^2 \quad (4)$$

3. 내외부 온도차 제어기법 및 기준

기존의 수화열 제어기법들을 살펴보면 그림 2와 같이 많은 방법들이 내외부 온도차를 경감하는 데 기여하고 있음을 알 수 있다.

국내의 경우 내외부 온도차 ΔT_i 의 제한치를 명확히 규정하고 있지는 않으나, 내부구속이 지배적인 경우에 대해 온도균열지수 $I_{cr} = 15/\Delta T_i$ 라는 간이 평가식을 제시하고 있다³⁾. 균열방지를 위한 온도균열지수 1.5를 만족하기 위해서는 $\Delta T_i < 10^\circ\text{C}$ 여야 한다. 그러나, 최근 연구⁴⁾에서 개선된 재료모형을 사용한 결과, $I_{cr} = 25/\Delta T_i$ 정도가 산출되어 균열방지를 위한 기준이 $\Delta T_i < 16\sim 17^\circ\text{C}$ 까지 완화될 수 있는 것으로 나타났다. 한편, 유럽의 중요 프로젝트⁵⁾의 경우 수많은 구조물의 시공 조건 및 균열 발생의 상관관계를 분석하여 $\Delta T_i < 15\sim 20^\circ\text{C}$ 의 기준을 적용한 바 있다.

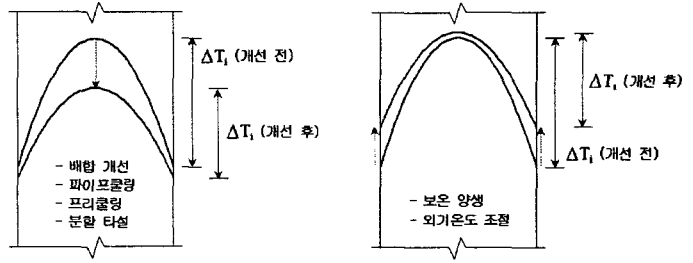


그림 2 수화열 제어기법에 의한 내외부 온도차 변화

4. 수치예제

해석예제인 그림 3은 실구물의 벽체 또는 상부슬래브를 모사하고 있으며, ABAQUS⁶⁾를 사용하여 8절점 솔리드요소로 유한요소모형을 구성하였다. 그림 3의 왼쪽과 오른쪽 면에 대류조건을 주었으며 나머지 면에는 대류가 발생하지 않는다고 보았다. 그 외의 해석조건들은 표 1과 같으며 주로 콘크리트표준시방서³⁾의 값을 참조하였다. 유한요소해석 결과를 본 연구의 내외부 온도차 예측식과 비교한 결과는 표 2와 같다. 제안식은 양생조건 변화에 따른 내외부 온도차의 변동성을 비교적 올바르게 예측하고 있음을 알 수 있다.

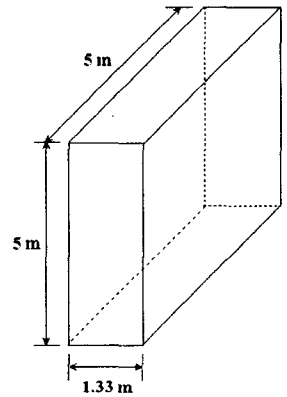


그림 3 수화열 해석 예제

한가지 주목할 만한 점은 본 예제에서 단면 한쪽 면은 보온성이 높고 다른 쪽은 낮은 경우에 내외부 온도차가 가장 크게 발생했다는 점이다. 이는 비대칭 양생조건인 경우 최대온도 발생 지점이 단면 한쪽에 편중되면서 반대편의 내외부 온도차가 벌어지기 때문이다. 즉, 내외부 온도차 저감을 위해서는 양쪽 면의 보온 양생 수준을 함께 높여야 하며, 한쪽 면만 높일 경우 오히려 보온 양생을 실시하지 않은 경우보다도 불리할 수도 있다.

표 1 예제의 해석 조건

한편, 제안된 식 (3)에서 타설온도는 T_{max} 를 변동시키는 효과가 있지만, T_{max} 는 열확산방정식을 푼 결과이므로 그 변동량은 타설온도 상승 및 하강량과 일치하지는 않는다. 예를들어 본 예제에서 타설온도를 10°C 낮출 경우 T_{max} 는 6.3°C 하강한다. 외기온도의 경우 예를들어 본 예제에서 온풍기나 스팀을 이용하여 외기온도를 10°C 상승시킬 경우 T_{max} 가 3.7°C 상승한다. 따라서, $T_{max} - T_e$ 는 6.3°C 하강한다. 이처럼 내외부 온도차 조절

항목	값	비고
대류계수	$14 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$	- 강제 거푸집 - 콘크리트 면
	$8 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$	- 합판 거푸집 - 양생포
열전도율	$2.7 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$	
비열	$1.16 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$	
밀도	$2300 \text{ kg}/\text{m}^3$	
타설온도	20°C	
평균외기온도	15°C	

을 위해 외기온도를 일정량 조절하는 것은 타설온도를 반대방향으로 일정량 조절하는 것과 거의 유사한 효과를 나타낸다. 왜냐하면 타설온도 차이에 따른 발열특성 차이가 크지 않다고 가정할 때 양생조건이 같다면 결국 내외부 온도차는 외기온도와 타설온도의 상대적인 차이에 의존하기 때문이다. 표 3에는 벽체의 경우 양쪽 면이 강제 거푸집, 상부슬래브의 경우 하면이 강제 거푸집이고 상면이 노출된 콘크리트 면일 경우, 이처럼 시공조건의 변화를 통해서 저감된 내외부 온도차를 제안된 예측식으로 계산하여 비교하고 있다. 만약 균열이 발생되는 임계 ΔT_i 를 15°C 정도로 본다면 예로 든 세가지 방안 중 한가지를 적용하여 균열저감 효과를 거둘 수 있다. 세가지의 방안들은 모두 유사한 효과를 산출하고 있지만 시공 상황에 따라 좀 더 경제적이고 효율적인 대안을 도출해야 하며, 이 때 본 예측식이 유용하게 활용될 수 있다. 이와 더불어 목표하는 내외부 온도차 이하를 확보하기 위한 거푸집 종류, 양생포 종류 및 개수와 같은 보온 양생의 수준을 가능하고, 거푸집 탈형이나 양생포 제거시에도 역시 목표 내외부 온도차 이하를 유지하면서 효율적으로 제거할 수 있도록 시공 계획을 세우는 데 도움을 줄 것으로 생각된다.

표 2 예제의 해석 결과

양생 조건		T_{max} (°C)	ΔT_i (°C)		비율 [2]/[1]	비고
한쪽 면	반대쪽 면		FEM [1]	제안식 [2]		
강제 거푸집	강제 거푸집	42.9	17.4	16.7	0.96	벽체
합판 거푸집	합판 거푸집	44.8	14.5	13.1	0.90	
강제 거푸집	양생포	43.8	18.4	18.1	0.98	상부 슬래브
합판 거푸집	콘크리트 면					
강제 거푸집	콘크리트 면	42.9	17.4	16.7	0.96	
합판 거푸집	양생포	44.8	14.5	13.1	0.90	

표 3 내외부 온도차 저감을 위한 대안의 비교

항목	ΔT_i (°C)		차이 (°C) [1]-[2]	비고
	적용 전 [1]	적용 후 [2]		
보온 양생	16.7	13.1	3.6	대류계수 14에서 8 W/(m ² ·°C)로 감소
프리쿨링	16.7	13.0	3.7	타설온도 20에서 10°C로 감소
스텝 양생	16.7	13.0	3.7	외기온도 15에서 25°C로 상승

5. 결론

수화열에 의한 구조 거동 평가시 실구조물의 온도 예측결과를 활용한 평가는 실측 결과를 활용한다는 면에서 매우 유력한 방법론이다. 하지만, 이 경우 필요한 부재 표면온도를 현장에서 정밀하게 측정하는 데에는 어려움이 있다. 따라서, 본 연구에서는 비교적 획득이 용이한 내부온도와 외기온도만 가지고도 표면온도 및 내외부 온도차를 추정할 수 있는 식을 제안하였다. 이러한 기법은 수화열에 의한 내외부 온도차를 목표 수준으로 관리할 수 있도록 시공계획을 세울 때 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

1. Daewoo E & C, "Busan-Geoje Fixed Link(Tunnels and Ramps): Technical Specifications for Concrete Structures", 2005.
2. 전세진, 정철현, 진병무, "LNG 저장탱크의 개선된 온도해석 모델", 대한토목학회 논문집, 제23권 6A호, 2003, pp. 1087-1094.
3. 한국콘크리트학회, "콘크리트표준시방서", 2003.
4. 전세진, 최명성, 김영진, "내부구속에 의한 수화열 균열의 개선된 평가방법", 한국콘크리트학회 논문집, 제18권 5호, 2006.
5. Lykke, S., Skotting, E. and Kjær, U., "Prediction and Control of Early-Age Cracking: Experiences from the Øresund Tunnel", Concrete International, Vol. 22, No. 9, 2000, pp. 61-65.
6. "ABAQUS/Standard 6.3 - User's Manual", Hibbitt, Karlsson & Sorensen, USA, 2002.