

동절기 콘크리트공사시 콘크리트의 온도해석기법에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on Temperature Analysis Method of Concrete in Cold-Weathering Concrete Constructions

이 도 범*
Lee, Do Bum

김 효 락**
Kim, Hyo Rak

박 지 훈***
Park, Ji Hoon

최 일 호***
Choi, Il Ho

ABSTRACT

In the latest, the construction period became the most important factor in the domestic building works because buildings is higher and larger gradually. Accordingly, cold-weathering concrete constructions are performed more and more. So, the demands of concrete quality management methods are increased in cold-weathering concrete constructions.

In this study, the mock-up experiment was performed to correct input data in the kimpo H construction field. Using the results of this experiment, the method of temperature analysis was presented to prevent early aged freezing damage and to control thermal crack in this study.

1. 서론

최근 국내의 건축공사는 건축물의 고층화 및 대규모화 등으로 인하여 공기관리가 프로젝트의 사업성에 큰 영향을 미치게 되면서 동절기에도 콘크리트 공사를 수행하는 현장이 늘고 있는 현실이며, 이에 따라 한중콘크리트의 적절한 품질관리 방법에 대한 요구가 늘고 있는 실정이다. 그런데, 콘크리트는 한중 및 저온환경 하에서 타설되어 양생온도가 낮을수록, 수화반응속도가 느려져 요구되는 시점에 소요강도가 발현되지 않을 수 있으며, 초기에 잉여수의 동결로 내부조직의 파괴가 일어나 영구히 제강도가 발현되지 않는 초기동해를 입을 수도 있다. 시공현장에서는 주로 타설후 2~3일 이내에 발생하는 초기동해를 방지하기 위해 다양한 보양방법을 강구하고 있으나, 그 성능이 명확하게 규명되어 있지 않은 형편이다.

따라서, 본 연구에서는 김포 H 현장에서의 Mock-up 실험결과를 통하여 온도해석시 필요한 입력자료를 보정한 후, 동절기 콘크리트 공사시 다양한 기온조건과 보양방법에 따른 콘크리트의 초기동해방지 및 보양종료시 온도충격제어를 위한 온도해석기법을 제시하는데 그 목적이 있다.

* 정회원, (주)대림산업 기술연구소 책임연구원
** 정회원, (주)대림산업 기술연구소 선임연구원
*** 정회원, (주)대림산업 기술연구소 연구원

2. Mock-up 실험

본 실험은 온도해석시 필요한 변수결정을 위한 실험으로서, 2000년 12월 9일부터 2001년 1월 17일까지 김포 H 현장에서 실시되었다.

2.1 시험체

시험체는 그림 1~그림 4와 같이 T=10 합판과 100×100 각재를 사용하여 거푸집을 만들었다. 시험체 두께는 실 구조물과 동일하게 하였으며, 열적으로 연속인 경계면 및 대칭면 등은 T=400 아이소핑크로 완전단열과 가깝게 처리하였다. 그리고, 실험에 사용된 콘크리트는 본 현장에 납품되는 Y 레미콘사 25-240-15 규격의 제품으로서, 배합은 표 1과 같다.

표 1 콘크리트 배합표

물결합재비 (%)	잔골재율 (%)	플라이애쉬치환율 (%)	단위중량(kg/m ³)					
			물	시멘트	플라이애쉬	잔골재	굵은골재	혼화제
48.9	47.9	8.0	172	324	28	854	928	1.76

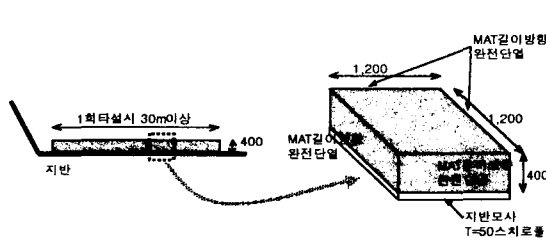


그림 1 매트기초 실구조물과 시험체

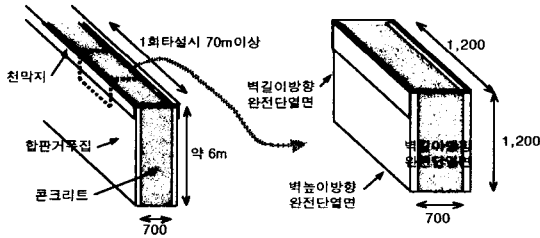


그림 2 벽체 실구조물과 시험체

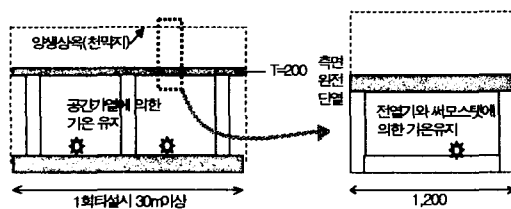


그림 3 슬라브 실구조물과 시험체

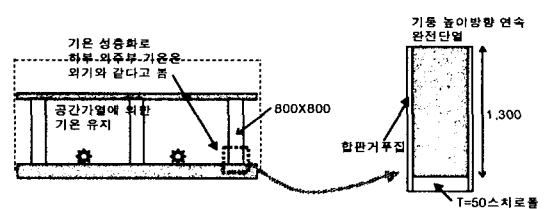


그림 4 기둥 실구조물과 시험체

2.2 온도측정

온도센서는 T-Type Thermo Couple를 사용하였으며, 콘크리트 표면온도는 철근피복(깊이 약 3cm) 위치에서 측정하였다. 온도자료는 15분 간격으로 Data Logger로 자동 저장하였다. 콘크리트의 온도는 콘크리트 타설완료 직후부터 측정하였으며, 부재에 따라 3일~7일간 측정하였다.

2.3 외기환경조건

-6℃~-10℃정도의 범위에서 양생을 하였다. 외부 기온이 높을 때는 냉동콘테이너에 시험체를 넣어 인공기후 사이클을 주었고, 콘테이너 내부에 여유공간이 있을 경우에는 외풍을 모사하기 위해서 대형 선풍기로 풍속을 5m/s로 유지하였다. 외부기온이 낮을 때는 외기 조건에서 실험하였다.

2.4 보양방법

본 실험 시, 시험체 종류에 따라 적용된 보양방법은 표 2와 같다. 온상선은 최근 국내에서 상용화된 제품으로 단위길이(m)당 22W의 발열량을 내는 제품을 사용하였다.

표 2 시험체별 보양방법

부위	기호	보양 및 급열방법	부위	기호	보양 및 급열방법
매트 기초	Mat-A	표면 비닐+부직포	슬라브	Slab-A	하부공간가열+상옥+표면 부직포
	Mat-B	표면 스티로폼(T=20)		Slab-B	하부공간가열+상옥+표면 부직포+표면 온상선
	Mat-C	표면 온상선+부직포		Slab-C	하부공간가열+표면 부직포
벽	Wall-A	거푸집 그대로		Slab-D	백열전구 가열
	Wall-B	거푸집 외측 스티로폼(T=30)	기둥	Column	거푸집 그대로
	Wall-C	철근 피복깊이 온상선			

3. 온도해석을 위한 계수 제시

콘크리트 온도해석시 사용한 프로그램은 ANSYS 5.5로서 범용 유한요소 해석 프로그램이다. 사용한 요소는 2차원 PLAN 55로서 온도에 대해 자유로운 4개의 노드를 가지고 있으며, 정상상태 및 비정상상태의 해석 모두에 사용될 수 있다. 한편, ANSYS 5.5를 통한 해석결과를 Mock-up 실험결과와 비교·분석하면서 온도해석을 위한 계수를 결정하였다. 온도해석시 고려할 항목은 다음과 같다.

3.1 재료의 물성

각 재료의 열전도율, 비열 및 밀도는 표 3과 같이 여러 문헌에서 일정한 범위로 제시되어 있다. 각 재료의 물성을 제시된 값 내에서 변경시키면서 실험결과와 해석결과를 비교하여 그 값을 확정하였다.

표 3 해석에 사용된 재료의 물성

재료	열전도율(kcal/mhr°C)		비열(kcal/kg°C)		밀도(kg/m³)	
	범위	확정값	범위	확정값	범위	확정값
콘크리트	2.2~2.4	2.4	0.25~0.30	0.25	2,200~2,400	2,300
거푸집 합판	0.1111	0.1111	0.484	0.484	266	266
부직포	0.03~0.04	0.035	-	0.3	10~50	16
스티로폼	0.033~0.039	0.039	0.25~0.30	0.288	16~30	16
아이소핑크	0.028~0.025	0.028	0.25~0.30	0.288	20~40	20
지반(암)	1.85~4.63	3.24	0.18~0.26	0.22	2,150~2,680	2,415

3.2 대류경계조건

대류경계조건은 풍속에 의해 결정되는 표면에서의 대류열전달율로서 결정된다. 실험결과와 해석결과를 비교하는 과정에서 바람이 거의 없다고 판단되는 부분(천막지 등으로 바람을 막는 부분)의 대류열전달율은 10kcal/m²hr°C로 적용하고, 풍속 5%이상의 바람에 노출되는 부분(외기노출 부분)의 대류열전달율은 30kcal/m²hr°C로 적용하였다.

3.3 콘크리트의 수화열

표준시방서에는 콘크리트의 초기온도 및 시멘트의 종류에 따라 다음 식과 같은 단열온도 상승식을 적용할 것을 제시하고 있다. 여기에서, Q_{∞} 는 최종단열온도 상승량, r 은 온도상승계수, t 는 재령, $Q(t)$ 는 재령 t 일에서의 단열온도 상승량이다.

$$Q(t) = Q_{\infty}(1 - e^{-rt})$$

그리고, 본 실험에 사용된 시멘트는 보통포틀랜드시멘트로서 보통포틀랜드시멘트의 Q_{∞} 및 r 의 표준값은 표 4와 같고, 단위시멘트량 352kg/m³의 경우 타설온도에 따른 Q_{∞} 및 r 의 값은 표 5와 같다.

표 4 단열온도 상승식에서의 Q_{∞} 및 r 의 표준값

시멘트 종류	타설온도 (°C)	$Q(t) = Q_{\infty}(1 - e^{-rt})^*$			
		$Q_{\infty} = aC + b$		$r(C) = gC + h$	
		a	b	$g(\times 10^{-3})$	h
보통 포틀랜드 시멘트	10	0.12	11.0	1.5	0.135
	20	0.11	13.0	3.8	-0.036
	30	0.11	12.0	4.0	0.337

표 5 단열온도상승계수(C=352kg/m³의 경우)

온도	10°C	20°C	30°C
Q_{∞}	53.24	51.72	50.72
r	0.663	1.302	1.745

* Q_{∞} 및 r은 단위시멘트량(C)의 함수

단열온도상승식의 결과인 $Q(t)$ 는 단열상태에서의 콘크리트온도를 나타낸다. 그러나, 실제 구조물에 타설된 콘크리트는 부재의 두께 및 외기환경의 영향을 받기 때문에 해석시 $Q(t)$ 값을 그대로 사용할 수 없으며, 체적당 발열량(kcal/m³hr)으로 환산해야 한다. 단위시간 Δt 동안 체적당 발열량(q) 계산식은 다음과 같다. 여기에서, C_v 는 콘크리트의 열용량, $Q(\Delta t)$ 는 단위시간동안 콘크리트의 온도상승량이다.

$$q = \frac{C_v \cdot Q(\Delta t)}{\Delta t}$$

4. 실험과 온도해석 결과

4.1 매트기초

매트기초의 보양방법에 따른 실험결과와 해석결과는 그림 5와 같다. Mat-A와 Mat-C의 경우 해석 결과가 실험결과에 비해 약간 작게 나타나고 있어, 안전측으로 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 한편, Mat-C의 경우 1.6일 이전에는 실험결과와 해석결과가 잘 일치하고 있으나, 1.6일 이후에는 시험체의 표면온도가 크게 낮아져 실험결과와 해석결과가 큰 차이가 나는 것을 알 수 있는데, 이는 시험시 외기 노출 시험체가 폭설에 의해 영향을 받은 것으로 해석에 반영하지 못하였다.

4.2 벽체

벽체의 보양방법에 따른 실험결과와 해석결과는 그림 6과 같다. Wall-A, Wall-B 및 Wall-C 모두 극초기재령(1.5일 이내)에서 해석결과가 실험결과에 비해 약간 작게 나타나고 있어, 안전측으로 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 한편, 벽체 실험은 냉동콘테이너 내부에서 대형선풍기로 풍속 5%의 바람을 만들어 실행하였다. 따라서, 해석시 기온은 실험에서 측정된 냉동콘테이너 내부의 설정기온을 그대로 적용하였으며, 표면열전달율은 천막지로 덮이는 거푸집면은 10kcal/m²hr°C를, 노출된 거푸집면은 30kcal/m²hr°C를 적용하였다.

4.3 기둥

기둥의 실험결과와 해석결과는 그림 7과 같이 시험체의 내부온도는 약간 편차가 있으나, 표면온도는 거의 일치하고 있음을 알 수 있다. 한편, 기둥 실험은 외기 노출실험으로 풍속이 5%정도 되었다. 따라서, 해석시 기온은 외기온을 그대로 적용하였고, 거푸집면에 작용하는 표면열전달율은 30kcal/m²hr°C로 적용하였다.

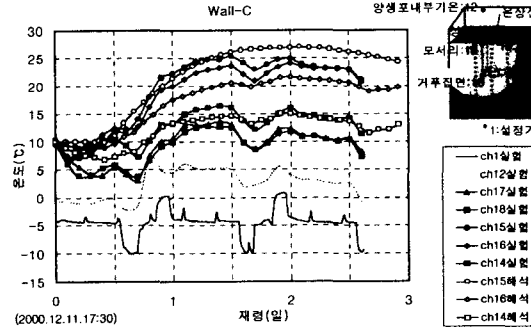
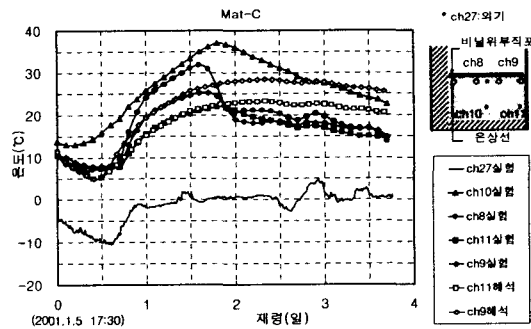
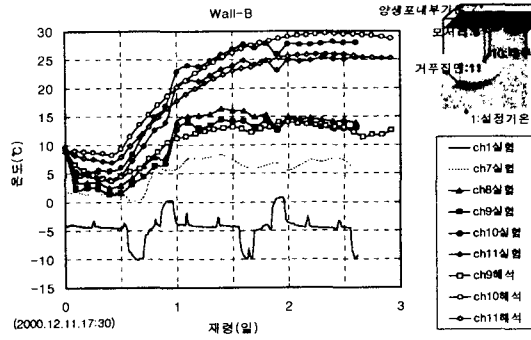
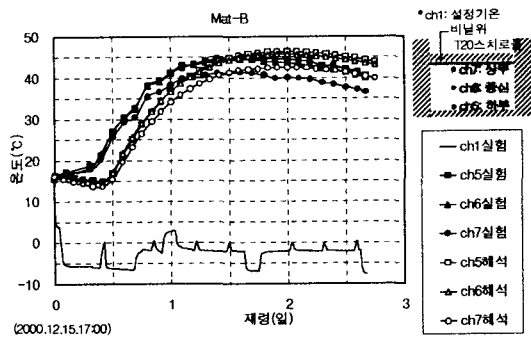
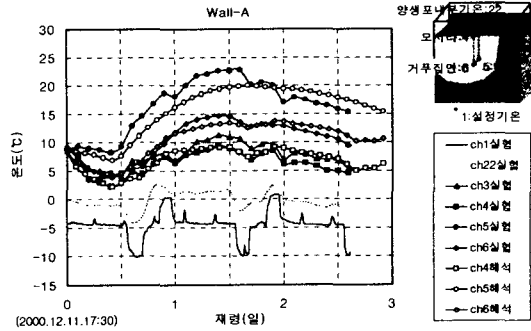
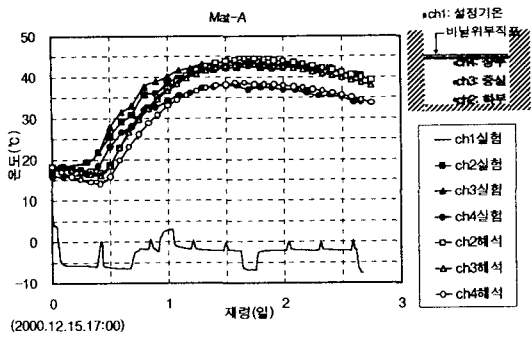


그림 5 매트기초의 실험결과와 해석결과 비교

그림 6 벽체의 실험결과와 해석결과 비교

4.4 슬라브

슬라브의 실험결과와 해석결과는 그림 8과 같이, 해석결과가 약간 낮게 나타나지만 대체적으로 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 시험체 Slab-A의 경우, 0.7일에 표면결빙현상이 확인되어, 이후에 추가로 부직포로 보온을 하였다. 이때 외기온은 -10°C , 콘크리트 표면온도는 -0.3°C (적외선온도계), 3cm깊이의 콘크리트 온도는 1°C (Thermo Couple)로 나타났다. 시험체 Slab-A는 실험종료 후 적산온도에 의한 강도보다 코아공시체의 강도가 훨씬 떨어져 재령 0.7일에 표면부에서 초기동해가 발생한 것으로

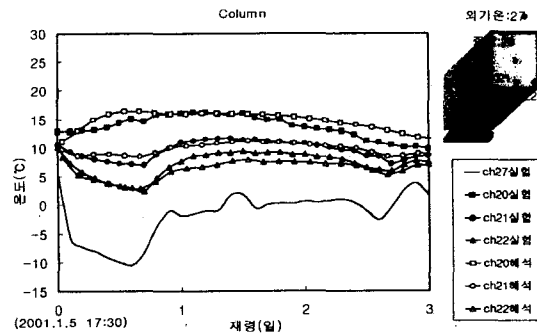


그림 7 기둥의 실험결과와 해석결과 비교

판단된다. 또한, Slab-A 실험결과 특정깊이(d=0.03m)의 콘크리트 온도($T_c=1^\circ\text{C}$), 표면보양조건(r:상옥내 노출조건표면열저항=0.1m²hr $^\circ\text{C}/\text{kcal}$), 콘크리트의 열전도율(k=2.4kcal/mhr $^\circ\text{C}$), 외기온($T_{air}=-10^\circ\text{C}$)을 알면 다음과 같이 열평형방정식을 이용해 콘크리트의 표면온도($T_s,^\circ\text{C}$)를 계산할 수 있음을 확인하였다.

$$T_s = T_c - \frac{(T_c - T_{air}) \cdot d/k}{r + d/k} = -0.22(^\circ\text{C}) \quad (\text{실측결과는 } -0.3^\circ\text{C})$$

한편, Slab-A 및 D의 실험결과 상옥내 기온은 외기온보다 약간 높게 나타나는 것으로 보아, 상옥은 보온의 역할은 하지 않고 외풍을 막아 표면 대류열전달을 줄이는 역할만을 하고 있는 것을 알 수 있다. 전구로 콘크리트의 면을 직접 가열할 경우(복사열), 콘크리트의 온도는 주변기온보다 3~5 $^\circ\text{C}$ 정도 높아지는 것으로 나타났는데, 이는 해석의 경우에도 잘 나타나 실험결과와 해석결과가 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

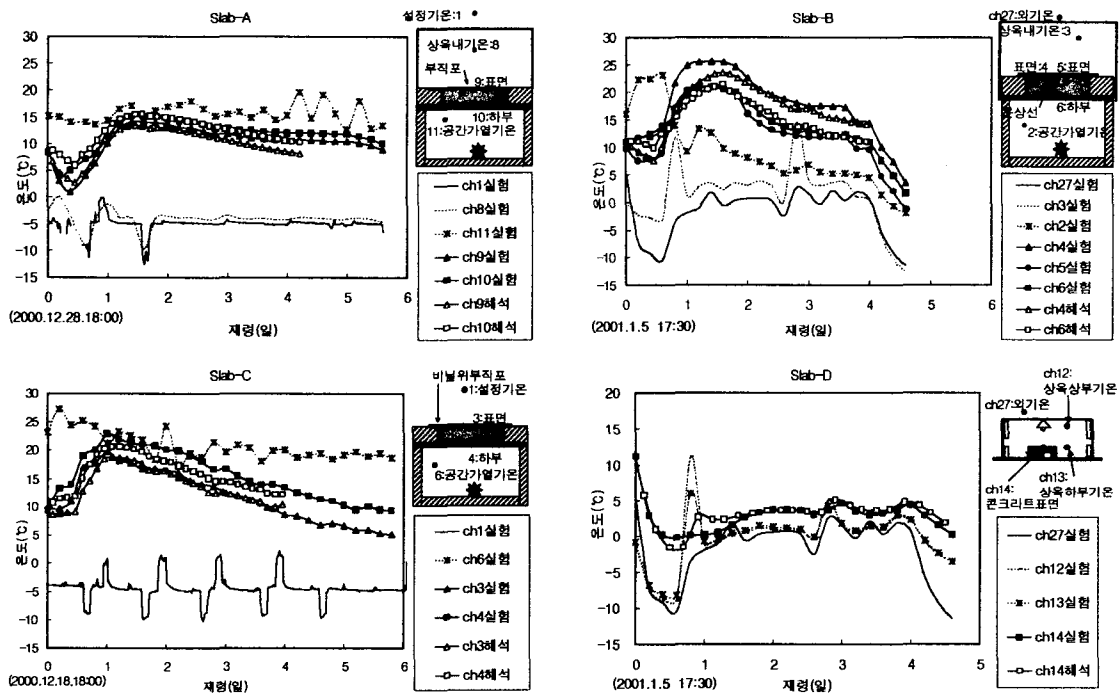


그림 8 슬라브의 실험결과와 해석결과 비교

5. 결론

본 연구의 결론은 다음과 같다.

- (1) 본 연구에서 제시한 온도해석기법의 결과가 실험결과와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.
- (2) 동절기 콘크리트의 온도해석시, 본 연구에서 제시한 온도해석기법을 다양한 외기조건 및 부재크기에 따라 적용 가능함을 알 수 있다.
- (3) 콘크리트 특정깊이의 온도를 이용하여 표면부의 온도를 계산할 수 있음을 알 수 있다.

참고문헌

1. 대한건축학회, “건축설계자료집 - 환경계획편”, 1994. 4
2. FRANK P. INCROPERA 외 1인, “Introduction to heat transfer”, 1993. 8
3. ASHRAE, “FUNDAMENTALS”, 1993.