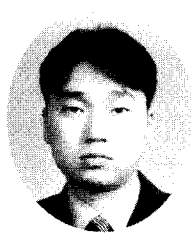
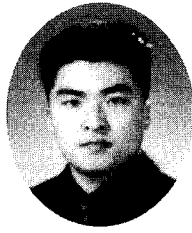


김포 홈플러스 현장 한중 콘크리트 보양을 위한 Mock-Up Test 사례

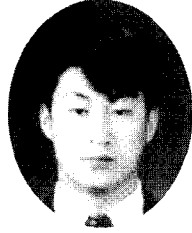
- A Mock-Up Test for the Curing Method of Cold Weather Concreting
in Kimpo Homeplus -



최일호*



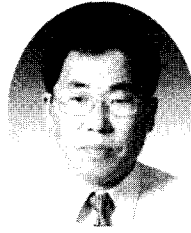
박지훈*



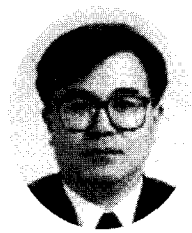
이중완**



김효락***



이도범****



홍석철*****

1. 머리말

김포 홈플러스 현장은 지하 2층, 지상 5층 규모의 대형 아울렛 매장 신축 공사로서, 절대 공기 준수(10.5개월)가 발주처에서 우선적으로 요구한 사항이었다. 따라서, 기초 및 대부분의 지하층 철근 콘크리트 구조체 공사를 동절기에 완료해야 할 필요성 때문에, 한중 콘크리트의 품질 관리가 공기 준수에 무엇보다 중요한 항목이 되었다.

일반적으로 건축 구조물은 부재의 두께가 얇기 때문에 한중 콘크리트의 여러가지 관리 항목 중에서 현장에서의 보양 방법에 의해 품질 및 공기가 결정되는 경우가 많다. 표준시방서에는 한중 콘크리트의 양생 온도 등에 대한 관리기준이 명확히 제시되어 있지만, 구체적인 보양/급열 방법에 대한 성능은 제시되어 있지 않기 때문에 현장별 특성에 맞춰 보양/급열 방법을 결정

해야 할 필요가 있다. 현장에서 일반적으로 사용하는 보양/급열 방식은 가설체를 사용하는 경우가 대부분이어서 그 성능을 요소별로 수치화 하기가 어려우므로, 전산 해석으로 콘크리트의 온도 이력을 예측하기에는 한계가 많다. 따라서, 본격적인 공사가 시작되기 전에 현장 Mock-Up Test를 통해 콘크리트의 온도이력을 예측하고 각 보양/급열 방법별 성능을 검증하였다.

본고에서는 동절기 공사가 수행되어야 할 각 부재에 대하여 현장에서 가능한 보양/급열 방법을 변수로 하여, 예상 외기온 조건에서 실물대 부재를 양생시켜 초기 동해 여부를 판단하고, 적산온도법에 의한 강도 추정으로 적정 보양 기간을 결정한 사례를 소개하고자 한다.

2. 현장 개요

·공사명 : 홈플러스 김포점 신축 공사

- 발주처 : 삼성테크주식회사
- 설계사 : 예송건축사사무소
- 공사기간 : 착공 후 10.5개월
- 대지위치 : 경기도 김포시 감정동 526-2 외 11 필지
- 연면적 : 45,834m² (13,865평)
- 구조 : 철근콘크리트조
- 규모 : 지하 2층, 지상 5층
- 한중 콘크리트 대상 :

- B2 Mat 기초(T=1,500)
- B1 Mat기초(T=400)
- B1, B2 외벽(T=700)
- B1, B2 Slab(T=180~200)
- B1 내부 기둥(800×800)

3. 실험 방법

3.1 실험시 적용 기온

각 부위별 예상 공사 기간을 바탕으로 최근 4년간(1996~99년) 김포 지역의 일최저, 일평균, 일최고 기온을 분석하였다. 각 기간별 기온 자료를 분석하여 <그림 2>와 같이 위험률 5%에 해당하는 일최저, 일평균, 일최고 기온을 설정하였다.

* 정회원, 대림산업(주) 기술연구소 사원
 ** 대림산업(주) 기술연구소 대리
 *** 정회원, 대림산업(주) 기술연구소 과장
 **** 정회원, 대림산업(주) 기술연구소 연구개발부장
 ***** 대림산업(주) 김포홈플러스 현장 소장

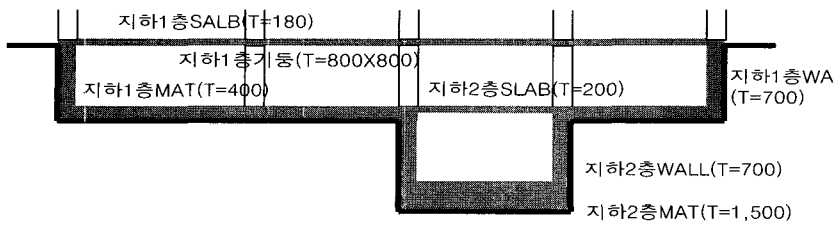


그림 1. 김포 홈플러스 현장 한중 콘크리트 대상 부재 개요도

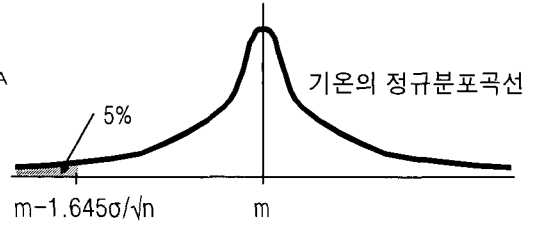


그림 2. 기간 기온의 정규분포 중 위험률 5% 기온 선정

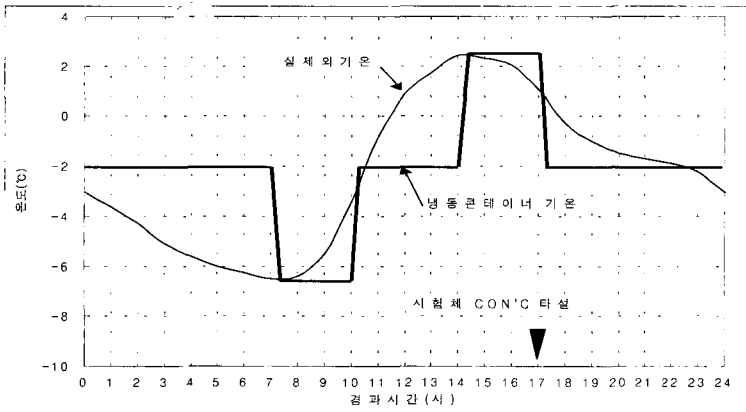


그림 3. 냉동 컨테이너 기온 변화 싸이클

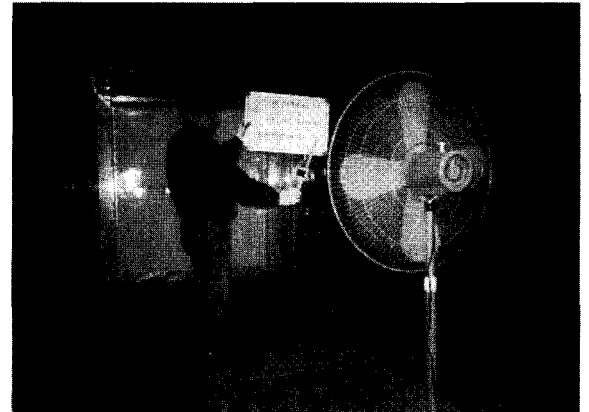


사진 1. 냉동 컨테이너 내부 풍속 확인

시험체는 콘크리트 타설 후 바로 냉동 컨테이너(20ft 규격)에 넣고, 냉동 컨테이너의 기온을 <그림 3>과 같이 설정된 일 최저, 일평균, 일최고 싸이클로 변화시켰다. 실제 공사시 콘크리트 타설은 오전 9시부터 오후 5시까지 약 8시간에 걸쳐 이루어지지만, 시험체 콘크리트는 거의 순간적으로 타설되므로 시험체 콘크리트는 실제 콘크리트 타설이 완료되는 오후 5시에 타설하는 것으로 하였다.

실제 구조물은 낮은 기온뿐 아니라 바람에도 노출된다. 따라서 냉동 컨테이너 내부에 <사진 1>과 같이 대형 선풍기를 배치하고 풍속을 일반적인 겨울철 풍속인 4~5 m/sec로 맞추었다. 대부분의 실험은 냉동 컨테이너 내부에서 수행되었지만, 기온이 -10℃ 이하로 크게 떨어지는 날에는 외부에서 실험하기도 하였다.

3.2 적산 온도-강도 관계 파악

표준시방서에 의하면 초기 동해를 방지하기 위해서는 50 kgf/cm² 이상의 압축강도가 발현될 때까지 콘크리트의 온도를

5℃ 이상으로 유지하도록 되어있다. 또한 초기 동해 방지를 위한 양생 종료 시기, 거푸집 및 동바리의 탈형 시기를 결정하기 위해서 적산 온도법에 의해 콘크리트의 강도를 추정하도록 권장하고 있다. 따라서, 본격적인 Mock-Up Test에 들어가기 앞서 사용할 레미콘에 대한 적산 온도-강도 관계식을 찾는 실험을 수행하였다.

실험 방법은 수중에서 표준 양생시킨 공시체의 온도를 계속 기록하여 적산 온도를 계산하면서 2, 3, 5, 7, 28일 강도 테스트 결과와 비교, 지수함수나 로그함수로 그 관계식을 만드는 것이다. 본 실험에서는 저온 영역에서도 동일한 수식을 적용할 수 있는지 여부도 파악하기 위해 표준 양생 공시체 외에 대기 밀봉 양생(0~10℃) 공시체에 대한 실험도 병행하였다.

실험 결과, 온도보정항이 없는 적산 온도 계산식(1)에 의해 구한 적산 온도-강도 관계는 <그림 4>와 같이 저온 영역(평균 5℃)과 표준 영역(평균 20℃)에서 서로 차이를 보였다. 그러나, 식(2)와 같이 대략가 제시한 온도보정계수 β를 곱한 적산 온도 계산식에 의해 구한 적산 온도-강도

관계는 <그림 5>와 같이 저온 영역과 표준 영역이 거의 일치하는 경향을 보였다. 따라서, 본 실험에서 사용하는 적산 온도 계산식은 온도보정계수 β를 사용하는 식(2)를 이용하는 것으로 하였고, 이를 강도로 환산하는 것은 표준 양생시의 추세식(3)을 따르는 것으로 하였다. 적산 온도-강도 관계가 일반적으로 고온 영역에서는 잘 맞지 않으므로, 적산 온도 계산시 30℃가 넘는 온도는 30℃로 환산하여 압축 강도를 과평가하지 않도록 하였다. 본 레미콘의 응결 시험 결과 저온 영역(평균 5℃)에서 10시간(중결)을 나타내었으므로, 안전을 위해 2시간 더 연장한 12시간부터 강도가 발현되는 것으로 보고, 적산 온도 누적을 12시간 이후부터 계산하였다.

식(3)은 실험으로 검증된 영역, 즉, 적산 온도 220 DD, 강도 230 kgf/cm² 이내의 범위에서만 유효하므로 콘크리트의 장기 강도 예측에는 부적절하다. 하지만, <표 2>와 같이 실험에서 확인하고자하는 콘크리트 압축 강도의 최고치가 50 kgf/cm² 내지 160 kgf/cm²이므로 본 실험에는 충분히 유효한 식이라고 할 수 있다.

표 1. 레미콘 배합표

C1	C2	W	S	G	ad	W/B	C2/B	S/A	ad/B
kg/m ³						%			
324	28	172	854	928	1.76	48.9	8.0	47.9	5

규격 : 25-240-15. 공기량 : 4.5%, C2 : 플라이 애쉬, ad : AE감수제, B=C1+C2

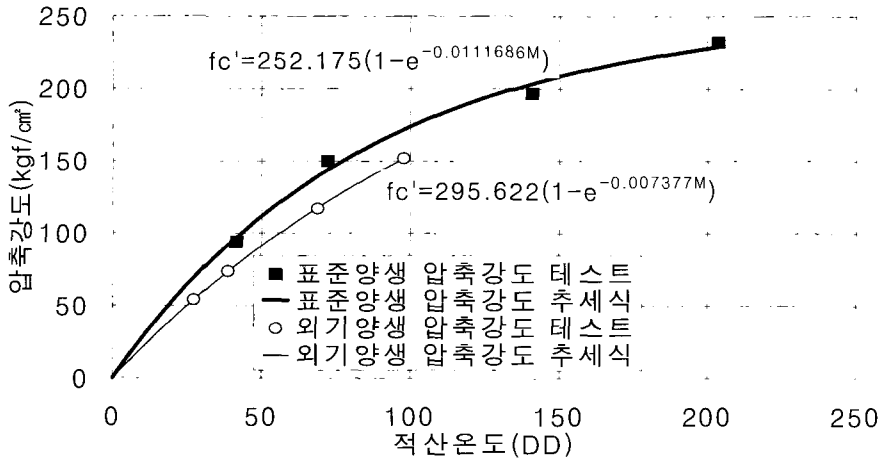


그림 4. 온도보정항(β)이 없는 적산 온도-강도 관계 그래프
(표준 양생 = 20±3℃, 외기 양생 = 0~10℃, 적산 온도는 식(1)에 따름)

$$M = \sum_0^t (\theta - \theta_0) \Delta t$$

(1) 온도보정항이 없는 적산 온도 계산식

$$M = \sum_0^t \beta (\theta - \theta_0) \Delta t$$

(2) 온도보정항이 있는 적산 온도 계산식

여기서,

$$\beta = 0.0003(\theta - \theta_0)^2 + 0.006(\theta - \theta_0) + 0.55$$

(온도보정계수)

M : 적산 온도(DD, °C·day)

θ : Δt 기간 동안 콘크리트 온도(°C)

θ₀ : 기준온도(-10°C)

Δt : 온도를 읽는 시간 간격(day)

$$f_c' = 243.82(1 - e^{-0.012496M})$$

(3) 적산 온도-강도 관계식

여기서,

f_c' : 콘크리트의 압축 강도(kgf/cm²)

M : 식(2)에 의해 구한 적산 온도(DD)

3.3 보양/급열 방법

부재에 따라 적용 가능한 보양/급열 방법이 제한된다. 이 중 비용 면이나 공기 면에서 적용 가능성이 높은 방법들을 3개 씩 선정하여 실험 변수로 하였다.

3.4 시험체 설계

(1) 지하 외벽

지하 1층 및 지하 2층 모두 두께 70

cm, 높이 5.5 ~ 6.5m의 벽체를 VH 분리 타설로 벽체만 먼저 단독 타설하도록 계획되어 있다. 벽체의 최상 부위가 취약 부위가 되므로 시험체는 벽체 최상부만 잘라내서 1:1로 제작하였다. 벽체 길이 방향 연속 면과 벽체 하부 방향 연속 면은 T = 400 아이소핑크로 완전 단열에 가깝게 하여 실구조물의 온도 분포 및 열 손실을 그대로 반영할 수 있도록 하였다.

(2) Mat 기초

지하 2층 Mat의 두께는 1,500 mm이고, 지하 1층 Mat의 두께는 400 mm이므로 지하 1층 Mat 기초가 더 불리한 조건이 된다. 따라서 두께 400 mm의 Mat 기초 상부 표면에 대한 보양/급열 방법을 변수로 하여 시험체를 제작하였다. 1회 타설시 가로 × 세로가 30 m × 30 m 이상되는 실 구조물에서 열 흐름 및 온도구배는 Mat 두께 방향으로만 존재하기 때문에 시험체의 가로세로 절단 면은 T = 400의 아이소핑크로 완전 단열시켜 열 흐름이 수직 방향으로만 일어나게 하였다. 실구조물의 Mat가 지반 및 버림 콘크리트에 면하는 상황을 모델링하기 위해서 시험체 바닥에는 50 mm 스티로폼을 깔고 외기에 노출시키는 것으로 하였다. 이는 기존 MASS 콘크리트 연구에 의하면 동절기에 지반의 온도는 외기온보다 높고, 실제 온도 계측 결과 최고 온도를 기록하는 지점이 Mat 두께의 중앙부가 아니라 지반과 가까운 하부에 많이 치우치므로, 지반은 어느 정도의 보온 효과를 갖고 있다고 알려져 있기 때문이다.

(3) Slab

Slab 두께는 부위에 따라 180 mm 및 200 mm이지만 수화열에 의한 내부 발열 효과보다 하부 공간 가열의 영향을 더 크게 받는 점을 고려하면 때문에 오히려 두꺼운 Slab가 더 불리하게 된다. 따라서 시험체의 두께는 200 mm로 하였다.

Mat 기초와 마찬가지로 대단히 넓은 Slab에서 열류 흐름 및 온도구배는 두께

표 2. 시험체별 보양/급열 증료를 위한 소요 압축 강도

부 재	치 수	소요 압축 강도(kgf/cm ²)	목 표
지하 외벽	T=700	50	초기 동해 방지 및 거푸집 탈형
Mat 기초	T=400	50	초기 동해 방지
Slab	T=200	160(⅓f _{ck})	거푸집 및 동바리 해체
기둥	800×800	50	초기 동해 방지

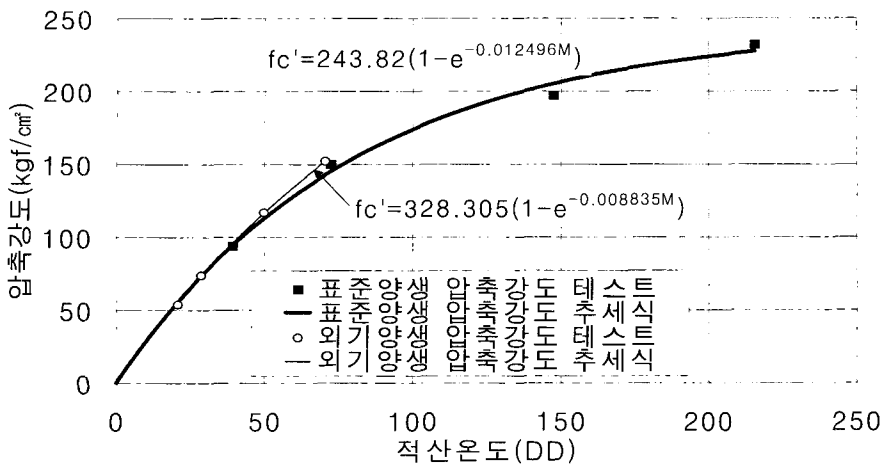


그림 5. 온도보정항(β)이 있는 적산 온도-강도 관계 그래프
(표준 양생 = 20±3℃, 외기 양생 = 0~10℃, 적산 온도는 식(2)에 따름)

표 3. 부재별 보양/급열 방법 실험 변수

부재	치수	공통 사항	변수			
지하 외벽	T=700	상부 천막지	A: 거푸집면 노출 B: 거푸집면 단열(T=30 스티로폴) C: 거푸집면 온상선(22W/m, @300) 매립			
Mat 기초	T=400	타설 후 바로 비닐 덮기	A: 타설 후 보온(부직포) 조치 B: 타설 후 바로 단열(T=30 스티로폴) 조치 C: 표면에 온상선 매립, 익일 아침 보온(부직포) 조치			
Slab	T=200		양생 상육	온상선 (@300)	표면 보온 (부직포)	하부 공간 가열
			A: 있음 B: 있음 C: 없음	A: 없음 B: 있음 C: 없음	A: 익일 아침 조치 B: 익일 아침 조치 C: 타설 직후 조치	A: 15℃로 계속 B: 20℃ 익일 아침까지 10℃ 2일째 아침까지 그 이후 없음 C: 20℃로 계속
기둥	800×800		A: 거푸집면 온상선 B: 거푸집면 노출			

- 1) Mat 기초나 Slab 표면에 타설 직후 바로 보온 조치를 취하는 못하는 경우가 발생할 수 있으므로, 표면 보온 조치 지연도 변수에 포함.
- 2) 온상선은 콘크리트 피복 두께에 매립하는 전열선으로 국내 E사 제품 사용.
- 3) Slab 하부 공간 가열은 열풍기나 갈탄화덕으로 이용하여 소요 온도를 유지하는 것으로 가정.
- 4) 양생상육은 타설 층 Slab 상부에 단관 파이프와 천막지로 조립 예정(H = 2m).

시험체를 만들어도 상육 내부의 기온이 외 기온과 유사한 수준이 되어 실제 현상을 큰 왜곡 없이 반영할 수 있다는 판단이 가능하였다.

(4) 기둥

기둥 부재의 실제 크기는 800 × 800이므로 시험체도 이와 같은 단면으로 제작하였다. 실제 기둥의 높이 5 ~ 6m 중에서 가장 취약부는 하부 Slab나 Mat 기초에 접하는 하부이다. 이를 시험체에 반영시키기 위해 1.3m 높이의 시험체 하부는 Mat 기초 하부와 같이 T = 50 스티로폴로 어느 정도 보온을 한 후 외기에 노출시켰고 시험체 상부는 T = 400 아이소핑크로 완전 단열시켜 높이 방향으로 연속적인 기둥의 열적 거동을 그대로 재현할 수 있도록 하였다.

3.5 기타

(1) 온도센서

시험체 각 부분의 온도를 측정하기 위하여 T-type Thermo couple을 매립하였다. 표면부에 매립되는 온도센서는 구조적으로 중요한 철근 피복 깊이(공통으로 3cm)에 설치하였다. 온도센서의 위치가 콘크리트 타설시 움직이지 않도록 거푸집내에 고정된 철근망에 부착시켰다. 온도센서의 자료는 15분 간격으로 Data Logger로 기록하였다. 각 시험체별 온도센서의 위치는 4절 실험 결과에 그림으로 나타내었다.

(2) 콘크리트 초기 온도

실제 공사시 레미콘 관리는 현장 반입시 13℃ 이상으로 정하였고, 콘크리트 타설 완료 시점에서는 약 10℃가 될 것으로 예상되었다. 본 실험은 콘크리트 타설 완료 시점부터 실제 공사를 모사하므로 콘크리트 초기 온도를 기본적으로 10℃로 유지하는 것으로 하였다. 그러나, 레미콘 관리 미숙으로 시험체 콘크리트의 초기 온도가 이와 다를 경우도 발생하였다.

방향으로만 나타나기 때문에 약 1m²의 시험체 측면 사방은 완전 단열과 가깝게 처리하였다. 하부 공간 가열은 설정된 기온으로만 모사하기 때문에 높이 600mm 공간의 사방과 바닥은 단열 처리하고 내부에 전열기와 써모스탯을 설치하여 설정 온도를 유지할 수 있도록 하였다.

상부에 양생상육이 설치되는 경우는 시험체 전체의 크기를 고려하여 60cm 높이로 하였다. 실제 양생상육의 재료가 단열 효과를 거의 기대할 수 없는 천막지라

는 점과 가설 구조이므로 침기 손실이 상당히 크다는 점을 고려할 때 상육 공간에 별도의 공간 가열 요소가 없다면 상육 내부의 기온은 외기 온도와 거의 같다고 할 수 있다. 이는 9m × 9m × 2m 모델 양생상육에 대한 보조 실험을 통해서 밝혀진 바이므로, 양생상육의 역할은 공간 기온을 올리는 것보다는 외풍을 막아 콘크리트 표면 열 손실률을 줄이는 역할만을 수행한다고 볼 수 있다. 따라서, 양생상육의 실제 높이는 2m이지만 이를 상당 부분 줄여서

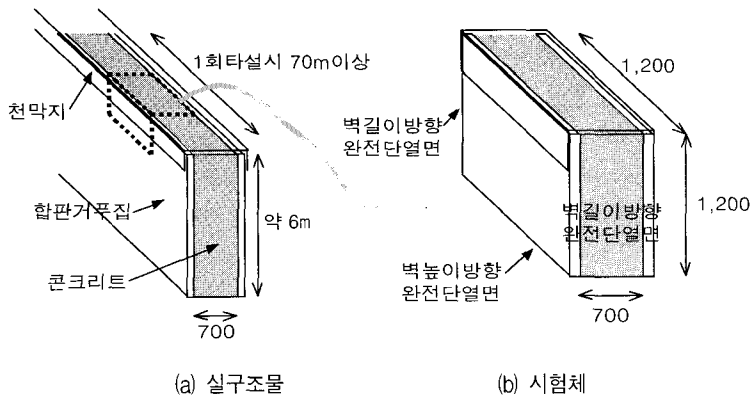


그림 6. 벽체 시험체 모델링

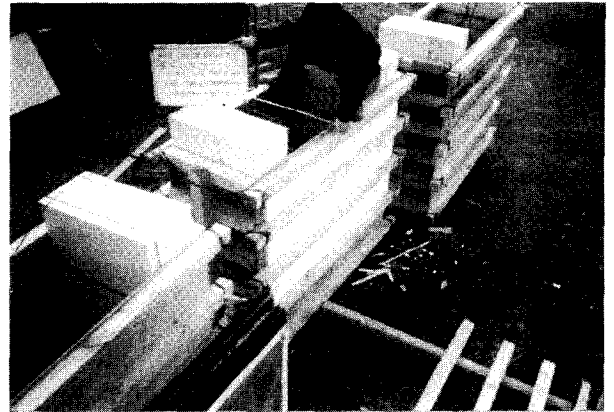


사진 2. 벽체 시험체 거푸집

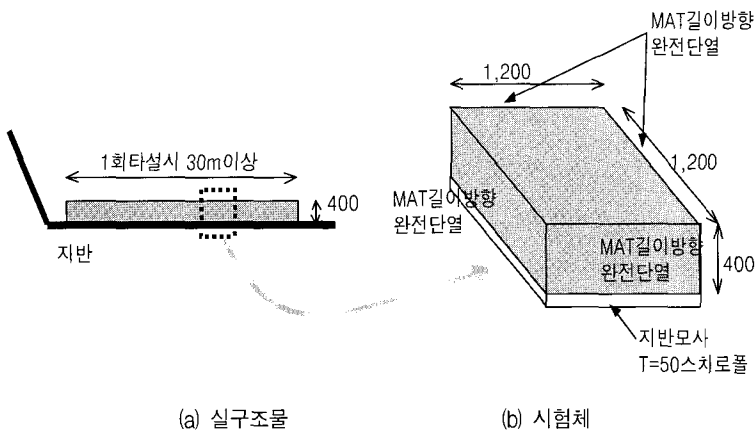


그림 7. Mat 기초 시험체 모델링



사진 3. Mat 기초 시험체 거푸집

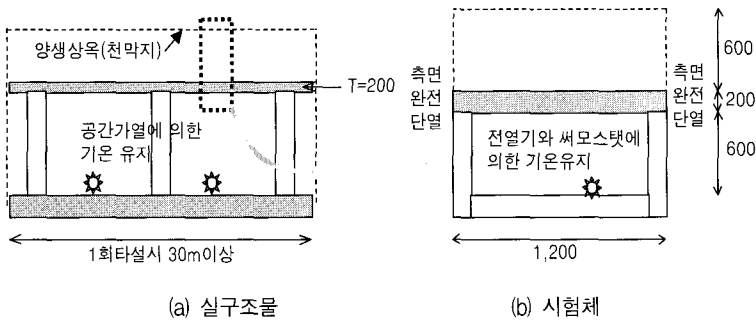


그림 8. Slab 시험체 모델링



사진 4. Slab 시험체 거푸집 (양생상옥 설치 전)

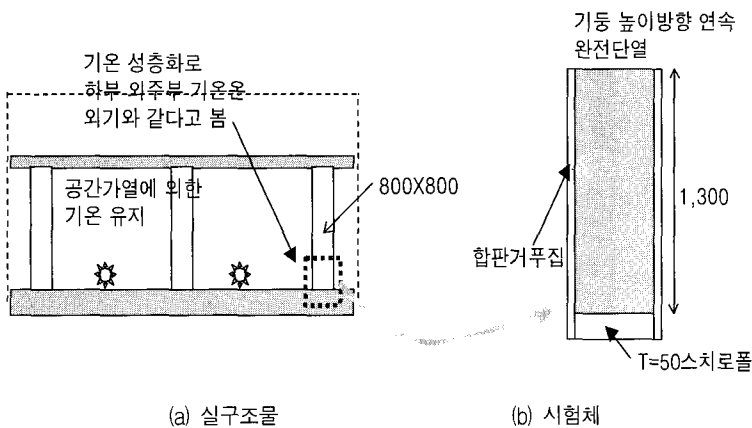


그림 9. 기둥 시험체 모델링



사진 5. 기둥 시험체

4. 실험 결과

4.1 지하 외벽

지하 외벽 시험체 A는 Mat-A 시험체는 일최저 -10°C , 일평균 -4.5°C , 일최고 1.2°C 의 인공 기온 사이클에서 실험하였다. 거푸집 면의 온도와 상부 모서리 부분의 온도가 주 측정 목적이었다. 상기 조건에서 시험체의 거푸집 면과 최상부 모서리는 동해를 입지 않으며, 거푸집 면은 1.6일, 상부 모서리는 1.9일에 보양 종료 가능한 압축 강도 50 kgf/cm^2 가 발현되는 것으로 나타났다. 두 방향에서 열 손실이 일어나는 모서리보다 한 방향으로만 열 손실이 일어나는 상부 면의 온도와 강도가 더 높은 것으로 나타났다. 상부 모서리 부분(ch4)이나, 상부면(ch3)은 Slab 및 상층 벽체와 이어지는 부분이므로 이를 중심으로 온도 및 강도 관리가 이루어져야 한다. 실험에서는 이 두 부분 모두 동해를 입지는 않았으나, 특히 모서리 부분은 초기에 수화열이 발생하기 전에 2.5°C 까지 온도가 떨어지므로 더 추운 날씨나 레미콘의 초기 온도가 조금만 더 낮으면 동해를 입기 쉬울 것으로 예상되었으므로, 실제 공사에서는 모서리 부분에 별도의 조치를 취하기로 하였다.

시험체 B는 거푸집 외부에 $T = 30$ 스티로폴(4호)를 덧대어 폼단열을 한 시험체이고 실험 조건은 시험체 A와 동일하다. 전반적인 온도는 시험체 A보다 크게 높아져 거푸집 면(ch11)의 강도 발현은 더 빠르지만, 수화열이 발생되기 전의 초기에 모서리 부분이 2.5°C 까지 떨어지는 것은 막을 수 없었다. 따라서, 모서리 부분에만 폼단열재를 사용하여 보양하는 것은 큰 효과가 없는 것으로 판단되었다.

시험체 C는 폼단열재를 사용하지 않고 거푸집 면의 철근 피복 깊이에 온상선(22 W/m)를 매립하여 가열하는 방안에 대한 실험이다. 수화열이 발생하기 전 초기에 모서리 부분의 온도를 보면, 온상선이 지나가지 않는 부분(ch18)은 약 4°C 까지

떨어지나, 온상선이 지나가는 부분(ch14)는 7°C 까지 유지되는 것으로 나타났다. 거푸집 면의 온도와 강도는 폼단열재를 사용했을 경우와 비슷하였다. 따라서 모서리 부분에만 온상선을 설치하면 거푸집 면과 모서리 부분의 50 kgf/cm^2 발현일을 1.6일로 동일시킬 수 있어 공사 일정에 상당히 유리함을 알 수 있었다. 단, 실험과는 달리 모서리 부분을 빠짐없이 보양하기 위해 실제 공사에서는 가로로 온상선을 설치하기로 하였다.

4.2 Mat 기초

Mat-A 시험체는 일최저 -7.2°C , 일평균 -2.5°C , 일최고 2.5°C 의 인공 기온 사이클에서 실험하였다. 타설 직후 바로 비닐과 부직포를 덮을 수 있다는 가정에서 실험하였으며 시험체의 상, 중, 하 세 부분의 온도를 측정하였다. 시험체에 타설하는 레미콘의 온도는 현장 조건에 맞도록 10°C 로 맞추어야 하지만, 반입시 관리 미숙으로 18°C 정도로 타설하게 되어 실험 결과를 상당히 저평가해서 분석해야 한다. 표면부의 온도는 타설 직후부터 보온이 되어 거의 떨어지지 않으며 최고 온도는 약 37°C 까지 상승한다. 따라서, 실제 공사에서 타설 완료시 콘크리트 온도를 10°C 정도로 유지하고 바로 비닐과 부직포를 덮는다면 표면부의 동해없이 최고 온도를 최소한 20°C 정도로 유지할 수 있을 것으로 판단된다. 실험에서는 표면부 압축 강도가 100 kgf/cm^2 에 도달하는 시점이 만 1.6일 정도로 나타났지만, 실제 공사에서는 이 정도 시점에서 보양을 종료해도 되는 강도인 50 kgf/cm^2 에 충분히 도달할 것으로 판단되었다.

실험 종료시 슈미트해머 테스트를 수행하였는데 적산 온도를 강도로 환산한 값인 160 kgf/cm^2 보다 작은 135 kgf/cm^2 으로 나타났다. 이는 슈미트해머의 부정확성도 이유가 있지만 표준 양생 온도 범위를 넘는 고온 영역에서 적산 온도-강도 관계가 과평가되는 경향 때문으로 판단된다.

Mat-B 시험체는 표면에 부직포 대신 $T = 30$ 스티로폴(4호)를 덮은 것 외에는 시험체 A와 같은 조건에서 수행되었다. 실험 결과는 전반적인 온도가 시험체 A보다 $2 \sim 5^{\circ}\text{C}$ 정도 높게 나타났다. 즉, 부직포보다 단열 성능이 더 좋은 스티로폴로 보양을 하더라도 동해 방지에는 별다른 이점이 없으며, 오히려 매스 콘크리트 온도균 열의 위험만 높아지는 것으로 판단되었다. 또한, 실제 공사에서 스티로폴로 표면을 보양하는 작업은 부직포를 이용하는 것보다 상당히 어려우므로 시험체 B의 보양 방법은 현장에서 채택하지 않기로 하였다.

Mat-C 실험은 타설 직후 미경화 상태의 콘크리트 표면에 부직포를 바로 덮는 작업이 상당히 어려울 것이라는 예상에서 타설 직후 비닐 시트만 덮고 타설 다음날 아침(제령 0.6일)에 부직포를 덮는 실험이다. 콘크리트가 동해를 입기 가장 쉬운 타설 직후 밤부터 새벽까지 비닐 시트 한 장으로만 보양되므로 온상선(22 W/m)을 300 mm 간격으로 표면 피복 깊이에 설치하고 통전을 하였다. 또한 Mat의 측면부의 상태를 보기 위해 시험체의 측면 중 한 면은 $T = 10$ 합판 거푸집으로 처리하여 외기에 노출시켰다. 본 실험시 외기온이 상당히 낮아졌으므로 냉동 콘테이너 내부의 인공 기온 환경이 아닌 실제 외기 노출 조건에서 실험하였다. 레미콘의 초기 온도는 현장 조건과 유사한 11°C 였으며 <그림 15>와 같이 총 4지점의 온도를 측정하였다.

실험 결과 부직포를 덮기까지 표면부 온도가 천천히 하강하지만 온상선의 영향으로 위험한 수준까지 온도가 낮아지지 않으며, 부직포를 덮은 0.6일부터 수화열의 효과와 더불어 온도가 급상승하여 1.4일 만에 50 kgf/cm^2 의 강도가 발현되는 것으로 나타났다. 제령 1.6일부터 시험체가 적설량 20 cm 이상의 폭설에 노출되어 표면부 온도가 급강하하는 것으로 나타났다. 이는 콘크리트에 축적된 열량이 눈에 젖은 부직포를 통해 급속히 빠져나가기 때문으로 판단된다¹⁾.

1) 실제로 다른 부분은 20 cm 의 눈이 쌓여

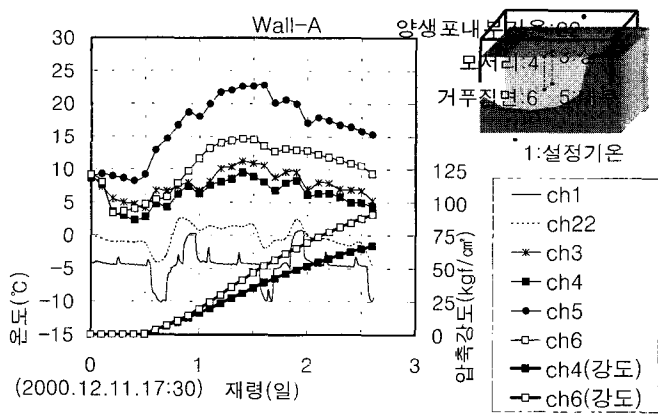


그림 10. 지하 외벽 시험체 A

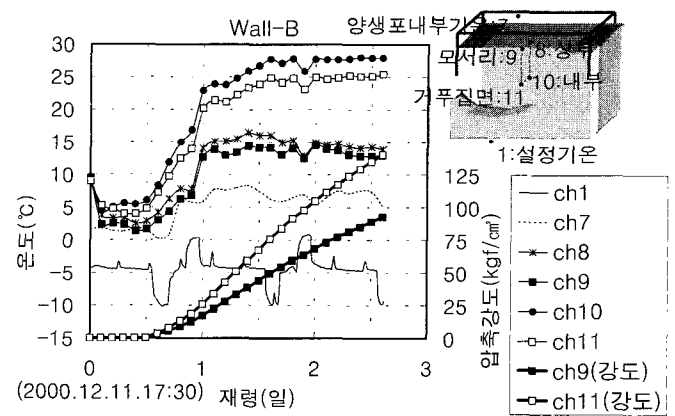


그림 11. 지하 외벽 시험체 B

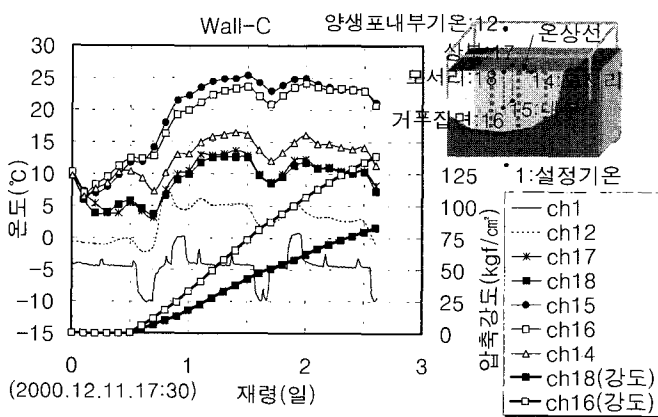


그림 12. 지하 외벽 시험체 C

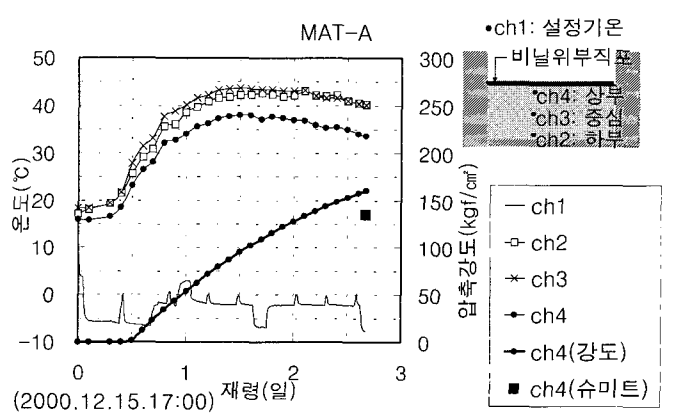


그림 13. MAT-A 실험 결과

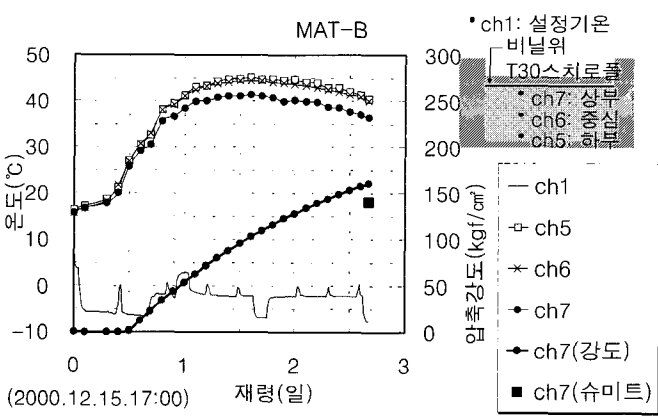


그림 14. MAT-B 실험 결과

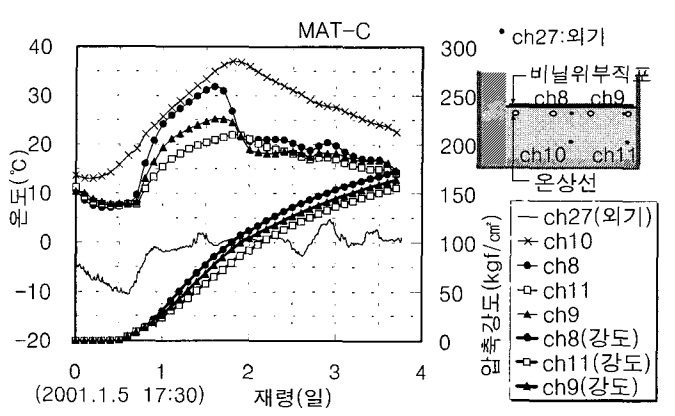


그림 15. MAT-C 실험 결과

본 실험에서는 온도가 충분히 높은 상태에서 눈이 쌓여 콘크리트의 온도가 위험한 수준까지 떨어지는 않았지만 콘크리트 타설 직후에 눈이 쌓일 경우 위험한 수준

까지 온도가 내려갈 수 있다는 판단이 가능하였다.

경우에는 콘크리트 타설을 연기하도록 고려하였다.

있었지만 시험체 위에는 눈이 전부 녹아 물로 변하였다. 이는 콘크리트에 축적된 열량이 눈을 녹이는 데 소진되는 것으로도 판단할 수 있다.

온상선 설치 작업은 상당히 비용이 많이 들기 때문에, 실제 공사에서는 부직포를 바로 덮을 수 없는 조건에서만 부분적으로 적용하기로 하였다. 또한, 콘크리트 타설일 당일 및 익일 눈이 예보된

4.3 Slab

Slab-A 시험체는 양생상속 속에서 레미콘을 타설한 후 다음날 아침까지(0.7일)까지 방치한 후 표면이 경화된 후 부직포

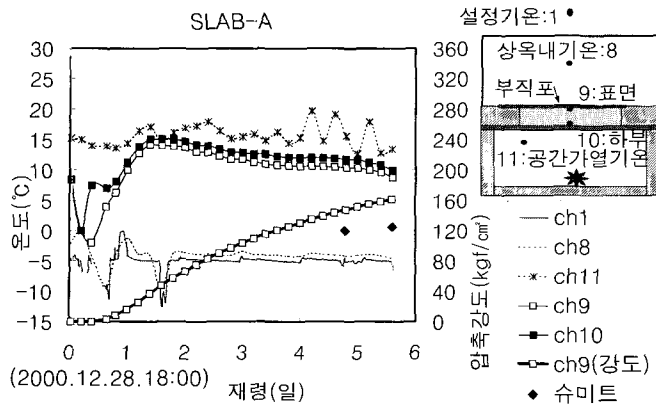


그림 16. SLAB-A 실험 결과

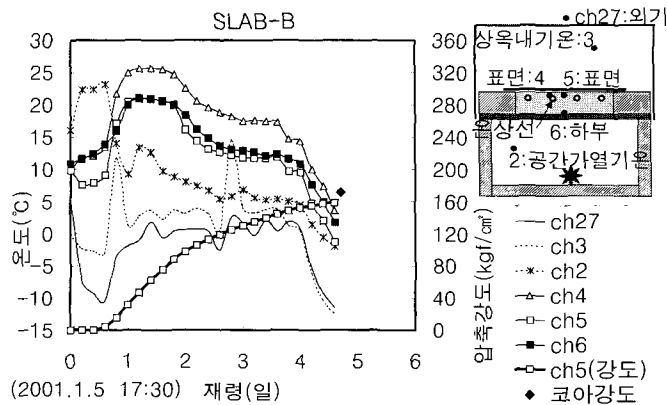


그림 17. SLAB-B 실험 결과

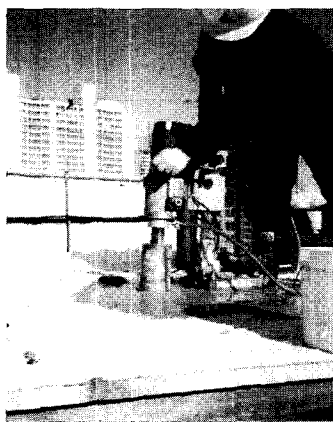


사진 6. SLAB 시험체 코어 채취

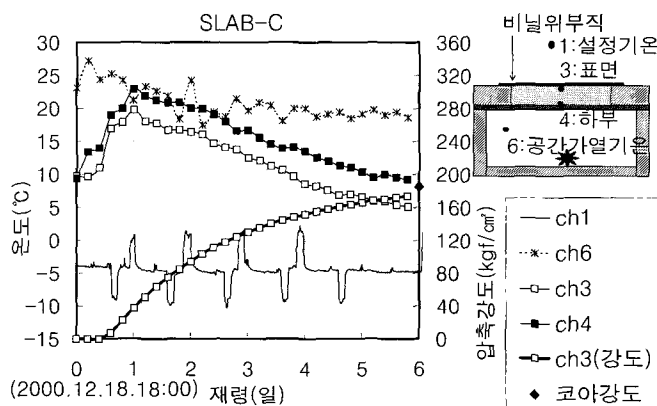


그림 18. SLAB-C 실험 결과

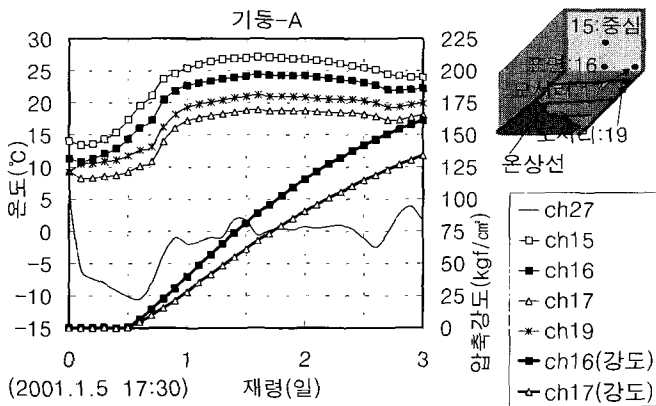


그림 19. 기둥-A 실험 결과

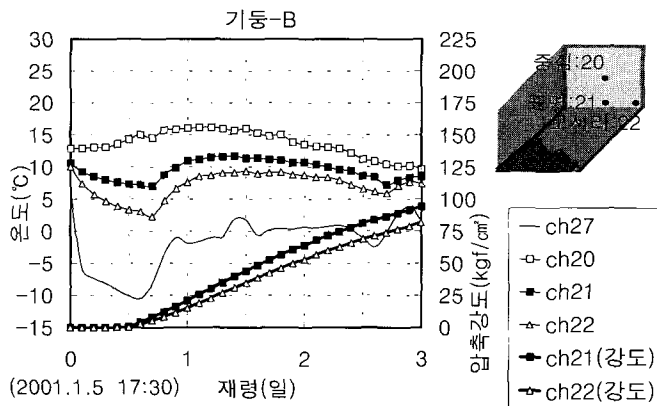


그림 20. 기둥-B 실험 결과

를 덮는 조건으로 실험하였다. 일최저 -10°C , 일평균 -5°C , 일최고 0°C 의 인공 기온 사이클로 실험을 수행하였다.

예상과 같이 양생상옥 내부의 기온(ch8)은 외기온(ch1)보다 1°C 밖에 높지 않아 상옥 내에 별도의 공간 가열 요소가 없다면 보온 역할은 하지 못하는 것으로

나타났다. 즉, 상옥은 콘크리트 타설 작업 시간 및 양생 기간 동안 외풍을 막아 표면 열 손실을 줄여주는 역할만을 수행한다는 가정이 맞는 것을 알 수 있다.2) 부직포를

2) 겨울철의 일반적인 풍속 6 m/sec 에서 표면대류열전달률은 $30\text{ kcal/m}^2\text{h}^{\circ}\text{C}$ 이고, 자연대류(바람없음) 상태에서 표면대류열전달률은 $8\text{ kcal/m}^2\text{h}^{\circ}\text{C}$ 로 알려져 있다.

덮은 0.7일부터 콘크리트의 온도는 공간 가열 기온 근처로 상승하지만 그 전에 이미 콘크리트의 동결 온도인 -2°C 미만으로 표면부 온도는 떨어졌다. 표면부 온도(ch9)는 철근 피복 깊이이므로 실제 표면부터 깊이 3 cm 까지는 이미 동결 응해를 한번 거친 것으로 판단된다. 실제로 0.7일

이 되는 시점에 부직포를 덮기 위해 표면 상태를 확인해본 결과 이미 결빙이 되었음을 확인할 수 있었다. 따라서, 이후의 적산 온도-강도 환산은 큰 의미가 없으며 재령 4.8일과 재령 5.6일의 슈미트헤머 테스트 결과도 계산된 강도에 크게 미치지 못하는 것으로 나타났다. 따라서, 현장 Slab 시공시 부직포를 바로 덮지 못하는 상황일 경우에는 별도의 조치를 취하기로 하였다.

Slab-B 시험체는 실험 A를 보완하는 것으로서, 타설 직후 부직포를 덮어 보온을 하지 못하는 대신 300 mm 간격으로 설치된 온상선(22 W/m, @300)과 하부 공간 가열 기온을 1일간 20 °C로 높여 초기 동해를 방지하려는 의도에서 수행되었다. 실제 일최저 기온이 -10 °C까지 떨어지는 조건이므로 외기 노출 조건으로 실험하였다. 부직포는 실험 A와 마찬가지로 0.7일에 덮었고, 0일부터 0.7일까지 하부 공간 가열은 기온을 20 °C로 유지하도록 하였고, 0.7일부터 1.7일까지는 10 °C로 하였으며, 그 이후에는 공간 가열 열원을 없애는 것으로 하였다. 이는 온상선에 의해 어느 정도의 열원이 공급될 수 있다는 판단에 의한 것이다. 또한, 3.7일부터는 양생상속을 해체하여 실제 공사 스케줄과 유사하게 보양 조건을 반영하였다.

표면 온도는 가장 낮은 부분인 온상선 사이(ch5)가 최고 21 °C, 온상선 위치(ch4)가 최고 26 °C 등 양호하게 유지되었다. 약 1.2일만에 동해 방지 강도인 50 kgf/cm²가 발현되었고, 4.6일만에 거푸집 및 동바리 해체 강도인 $\%f_{ck}$ (160 kgf/cm²)가 발현되었다. 두께가 얇은 Slab 시험체이므로 코아를 채취하여 강도를 확인한 결과 4.6일 재령에서 175 kgf/cm²로 나타나 적산 온도-강도 관계식

의 정확성을 확인할 수 있었다.

지금까지의 실험 결과를 볼 때 양생상속보다는 타설 직후 표면에 부직포를 덮어서 보온하는 것이 비용도 절감하면서 온도 관리에도 유리한 것으로 파악되었다. 따라서, Slab 표면 마감이 STF로 설계되지 않은 부분은 양생상속 없이 타설 직후 바로 부직포로 보양하고 하부 공간 가열을 하는 방안에 대하여 검토하였다.

Slab-C 시험체로 타설 후 바로 부직포 보양을 실시하고, 1일간 하부 공간 가열을 25 °C로 유지하고 그 이후에는 20 °C로 유지하는 간단한 보양/급열 방법을 검증하였다. 외기 조건은 일최저 -9 °C, 일평균 -4 °C, 일최고 1 °C의 인공 기온 사이클로 하였다. 실험 결과, 상부 부직포의 보온과 하부 공간 가열의 영향으로 타설 직후부터 콘크리트의 온도가 상승하는 것을 확인할 수 있었으며, 수화열의 영향으로 표면부의 온도가 최고 20 °C까지 상승하다가 완만히 하강하는 것을 알 수 있었다. 이에 따라 4.5일만에 거푸집 및 동바리 해체 강도인 160 kgf/cm²가 발현되는 것으로 나타났다. 이는 시험체 B와 마찬가지로 코아 채취 강도로 검증할 수 있었다. 따라서, 현장에서는 Slab 표면 마감의 종류에 따라 양생상속 + 온상선 + 공간 가열의 방법(실험 B) 및 부직포보온 + 공간 가열(실험 C)의 방법을 병용하기로 하였다.

4.4 기둥

기둥 시험체는 A, B 모두 외기 노출(최저 -10 °C)조건에서 실험하였다. 실제 공사에서는 공간 가열이 되는 공간안에 위치하게 되지만 외주부 하부의 경우 거의 외기와 비슷한 온도의 공기에 노출될 것을

가정해서이다.

시험체 A의 경우 온상선의 영향으로 초기 타설 온도가 거의 유지되었다. 가장 취약한 모서리의 경우 50 kgf/cm² 강도 발현에 1.8일이 소요되는 것으로 나타났다.

온상선이 없는 시험체 B의 경우 초기에 모서리 부분이 2.5 °C까지 떨어지지만 수화열의 영향으로 바로 온도가 상승하는 것을 알 수 있다. 또한 50 kgf/cm² 강도 발현까지는 1.9일이 소요되는 것으로 나타났다. 기둥은 실제 시공시 공간 가열되는 내부에 위치하므로 모서리 부분의 온도가 시험체 B보다 더 낮게 떨어지는 일은 거의 없을 것으로 판단된다. 따라서, 실제 시공시 기둥에는 따로 보양 및 급열을 하지 않기로 하였다.

5. 맺음말

당 현장에서는 이번 Mock-Up Test 결과를 바탕으로 동절기 콘크리트 보양 관리를 성공적으로 수행하였다. 실제 시공 시에도 온도센서를 매입하여 콘크리트의 온도이력이 실험 결과와 유사하게 나타나지기를 지속적으로 체크하여 공간 가열 열원의 공급량 조정 등에 반영하였으며, 적산 온도에 의한 강도 추정으로 시방서에 제시된 표준 양생일 수보다 최소 1일씩 보양 기간을 단축하여 원가 및 공정 관리에도 많은 도움을 받을 수 있었다.

동절기에 공기 지연이 불가피한 콘크리트 공사에 있어서, 현장 실험 및 계측을 통한 품질 관리로 이런 한계를 상당 부분 극복할 수 있었다는 점에서 본 Mock-Up Test의 의미를 찾을 수 있으며, 구체적인 보양/급열 방법별 성능을 제시한 한 사례로서 다른 공사에도 작으나마 도움이 되기를 기대한다. 