

동절기 공사시 열선을 이용한 한중 콘크리트의 보양방법 사례

A Curing Method of Cold Weather Concreting Using of Heating Cable in Winter Construction



이도범*
Do-Bum Lee



김효락**
Hyo-Rak Kim



이중완***
Jung-Woan Lee



박지훈****
Ji-Hoon Park



최일호*****
Il-Ho Choi

1. 머리말

최근 국내 건설현장에서는 공사기간의 단축 및 지연된 공사기간의 만회를 위하여 한중 콘크리트의 시공이 보편적으로 이루어지고 있는 실정이다. 이러한 한중 콘크리트의 적용기간에는 구조체 콘크리트가 초기동해를 입지 않도록 하고, 일정재령에서 소요압축강도를 확보하기 위해 적절한 보양방법을 계획하여 실시한다.

국내에서 일반적으로 많이 사용되고 있는 보양방법은 현장의 가설재를 이용하여 구조체 주위를 보양막으로 둘러싼 후, 그 내부공간을 갈탄 또는 열풍기로 급열하는 공간가열방법이다. 그러나, 이 공간가열방법은 힘든 작업여건과 투입비용(설치비용 + 연료비용)에 비해 열효율 측면에서 매우 비효율적일 뿐만 아니라 화재 및 연소가스발생으로 인해 구조체에 심각한 손상을 야기시킬 우려가 있는 것으로 알려져 있다. 또한, 열원으로부터의 거리에 따라 국부적으로 열공급이 지나치게 많거나 부족한 부위가 생겨 구조체의 강도가 균등하게 발현되지 않을 수도 있으므로, 이러한 문제점들을 개선·보완하기 위한 새로운 보양방법의 검토가 필요하다.

본 고에서는 한중 콘크리트 공사를 수행하는 현장에서의 열선을 사용하여 예상 외기온 조건에서 실물대 부재를 양생시켜 초기동해 여부를 판단하고, 적산온도법에 의한 강도추정으로 적정 보양기간을 결정하기 위한 mock-up test 사례를 소개하고자 한다.

2. 현장 개요

- * 정회원, 대림산업 건축연구지원팀 부장
dblee@dic.co.kr
- ** 정회원, 대림산업 품질보증팀 차장
- *** 대림산업 건축기획부 과장
- **** 정회원, 대림산업 전주서신e-편한세상현장 대리
- ***** 정회원, 대림산업 기술연구소 건축연구지원팀 대리

열선 보양방법을 적용한 김포홈플러스현장의 개요는 다음과 같고, 조감도는 <그림 1>과 같다.

- 공사명 : 홈플러스 김포점 신축공사
- 발주처 : 삼성테크주식회사
- 설계사 : 예송건축사사무소
- 공사기간 : 착공 후 10.5개월
- 대지위치 : 경기도 김포시 감정동 526-2 외 11필지
- 연면적 : 45,834 m²(13,865평)
- 규모 : 지하 2층, 지상 5층
- 한중 콘크리트 대상
 - B2 Mat 기초(T = 1,500)
 - B1 Mat 기초(T = 400)
 - B1, B2 외벽(T = 700)
 - B1, B2 슬래브(T = 180 ~ 200)
 - B1 내부기둥(800 × 800)

3. 열선에 의한 콘크리트 보양방법

3.1 열선의 개요



그림 1. 조감도

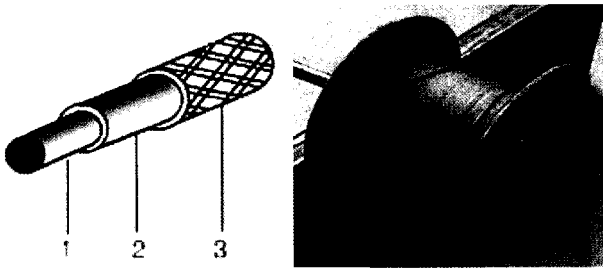


그림 2. 매입형 열선

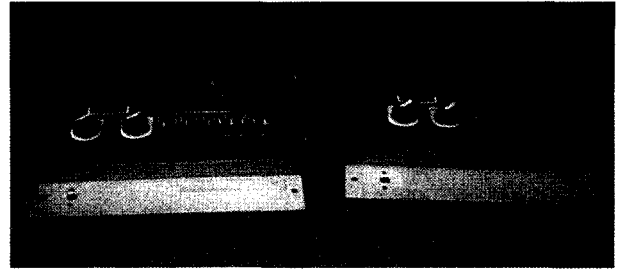


그림 3. 컨트롤 패널

매입형 열선은 <그림 2>와 같이 직경 0.6 mm의 발열선(1)에 1.0 mm 두께의 PVC 절연체(2)를 피복하고 그 표면에 콘크리트 타설시의 절단방지를 위해 0.8 mm 두께의 주석도금된 연동선 편조(3)를 피복하여 제작된 것이며, 총 직경 4.2 mm로서 Roll당 적용길이는 90 m를 원칙으로 하고 있다. 사용전압은 AC 220 V, 열선의 저항은 약 0.27 ~ 0.30 Ω/m, 발생열량은 약 20 W/m로서 콘크리트 내에서의 적정한 발열온도는 50°C 이내이다. 표준적인 열선길이에서 절단하여 사용하는 경우 동일한 발열량을 얻기 위해서는 적용전압을 변경하여야 하며, 반대로 발열량의 크기를 증대시키고자 하는 경우에는 전열선의 적용길이를 단축시켜야 한다. 그러나, 1 roll당 90 m의 열선을 5 m 절단하여 사용하는 경우 AC 220 V의 전압 하에서 발열량이 약 5 W/m 정도 증가하며, 이로 인해 과열에 따른 열선의 손상우려가 있으므로 PVC 절연체 피복 열선의 경우 5 m 이상의 절단사용은 피하는 것을 원칙으로 한다.

3.2 열선양생 시스템의 구성

매입형 열선에 의한 양생시스템은 콘크리트의 히팅을 위한 열선과 전원공급을 위한 컨트롤 패널로 구성된다(그림 3). 열선은 적용대상 평면에 대하여 열선의 설치를 위해 사전에 작성된 평면도에 근거하여 포설하며, 3 roll의 열선을 1개의 lead cable을 이용하여 컨트롤 패널에 연결시켜 1개 회로가 구성된다.

한편, 적용면적이 작아 열선의 소요 roll수가 적은 경우에는 컨트롤 패널을 사용하지 않고 1개 roll당 1개 회로를 구성하여 전원에 연결하는 것도 가능하다. 단, 이러한 경우에는 공급전력량과 열선의 소비전력과의 관계를 검토하여 적용하여야 한다.

3.3 열선에 의한 급열양생방법의 특성

열선을 사용한 급열양생방법은 콘크리트에 열선이 매입되기 때문에 열선의 재사용이 불가능하다는 점에서 경제성 측면에서는 다소 불리하지만, 단열재를 사용한 보온양생방법 및 갈탄 또는 열풍기를 이용하여 공간을 가열하는 급열양생방법 등에 비해 콘크리트를 내부에서 직접 가열하므로 열효율 측면에서 가장 유

리한 것으로 보고되고 있다. 보온양생방법 및 급열양생방법에 의해 발생하는 취약부위를 대상으로 열선과의 복합방법을 적용한다면 보양효과를 극대화시키는 것이 가능할 것이다.

또한, 시멘트의 수화에 의해 발생하는 수화열이 콘크리트 내부로부터 표면부로 열확산에 의해 이동한 후, 외기와의 온도차로 인해 손실되는 열량을 보완할 수 있을 뿐만 아니라, 상대적으로 취약한 우각부나 외곽부분에 대해서는 열선의 매입간격을 좁게 조정함으로써 구조체 전체가 동등한 보양조건 하에서 균일하게 강도발현이 이루어지도록 할 수 있다. 더욱이 일정한 열량을 방출하므로 외기조건에 따른 콘크리트 내부의 온도분포를 예측할 수 있고, 조기에 초기동해 방지를 위한 소요강도를 확보함으로써 동절기 골조공사기간의 단축도 가능할 것으로 판단된다.

4. Mock-Up Test 계획

4.1 실험시 적용 기온

각 부위별 예상 공사기간을 바탕으로 최근 4년간 김포지역의 일최저, 일평균, 일최고 기온을 분석하였다. 각 기간별 기온자료를 분석하여 일최저, 일평균, 일최고 기온을 설정하였다.

시험체는 콘크리트 타설 후 바로 냉동콘테이너(20 ft규격)에 넣고, 냉동콘테이너의 기온을 <그림 4>와 같이 설정된 일최저, 일평균, 일최고 사이클로 변화시켰다. 실제 공사시 콘크리트 타설은 오전 9시부터 오후 5시까지 약 8시간에 걸쳐 이루어지지만, 시험체는 거의 순간적으로 타설되므로 시험체는 실제 콘크리트 타설이 완료되는 오후 5시에 콘크리트를 타설하였다. 실제 구조물은 낮은 기온뿐 아니라 바람에도 노출된다. 따라서 냉동콘테이너 내부에 대형 선풍기를 배치하고 풍속을 일반적인 겨울철 풍속인 4 ~ 5 m/s로 맞추었다.

4.2 콘크리트 적산온도-강도 관계

콘크리트의 초기 동해방지를 위한 양생 종료시기와 거푸집 및 동바리의 탈형시기를 결정하기 위한 콘크리트 압축강도 추

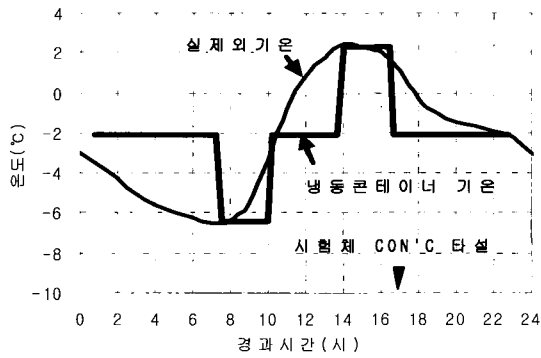


그림 4. 냉동콘테이너 기온 변화 사이클

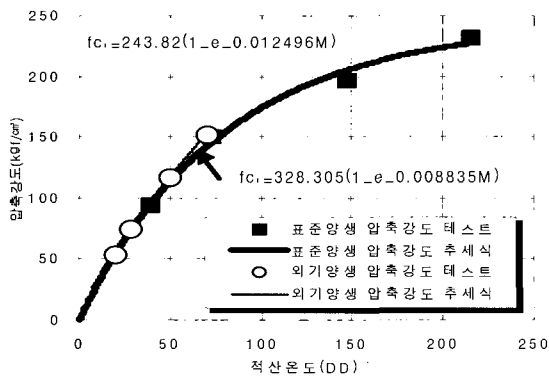


그림 5. 적산온도-강도 관계 그래프

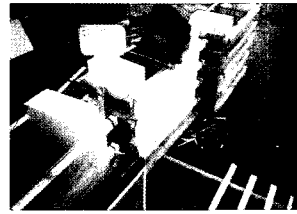
정에 적산온도법을 사용하기 위해 mock-up test에 앞서 사용할 레미콘에 대한 적산온도-강도 관계식을 찾는 실험을 실시하였다. 25-24-15 규격 레미콘 배합은 <표 1>과 같다.

실험결과, 온도보정항이 없는 적산온도 계산식에 의해 구한 적산온도-강도 관계는 저온영역(평균 5°C)과 표준영역(평균 20°C)에서 서로 차이를 보였으나, 대崎가 제시한 온도보정계수를 곱한 적산온도 계산식에 의해 구한 적산온도-강도 관계는 <그림 5>와 같이 저온영역과 표준영역이 거의 일치하는 경향을 보였다. 따라서, 본 실험에서 사용하는 적산온도 계산식은 온도보정계수를 사용하는 (1)을 이용하는 것으로 하였고, 이를 강도로 환산하는 것은 표준양생시의 추세식 (2)를 따르는 것으로 하였다. 응결시험결과 저온영역에서 종결 10시간으로 측정되어 약 12시간부터 강도가 발현되는 것으로 보고, 적산온도누적을 12시간 이후부터 계산하였다.

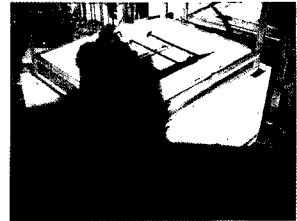
$$M = \sum_0^t \beta(\theta - \theta_0) \Delta t \quad (1)$$

$$f'_c = 243.82(1 - e^{-0.012496M}) \quad (2)$$

여기에서,



(a) 지하 외벽



(b) 슬래브



(c) 기둥

그림 6. 부재별 실험체 형상

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

M : 적산온도(°D·D, °C·day)Δt

θ : Δt기간동안 콘크리트 온도(°C)

θ₀ : 기준 온도(-10°C)

Δt : 온도를 읽는 시간간격(day)

f'_c : 콘크리트의 압축강도(kgf/cm²)

4.3 실험체 및 보양방법

실험체는 <그림 6>과 같이 지하외벽, 슬래브 및 기둥 부재를 대상으로 제작하였다. 실험체는 실무재의 1:1 크기로 외기에 취약하다고 판단되는 일부분을 제작하였으며, 연속되는 면에 대해서는 T = 400 아이소핑크로 완전 단열에 가깝게 하여 실구조물의 온도분포 및 열손실과 유사하게 반영할 수 있도록 하였다. 실험체의 콘크리트 타설시 온도는 현장 콘크리트 온도의 관리 기준인 10°C로 하였으며, 각 부위의 온도측정을 위해 T형 열전대를 매립하였다.

실험체별 소요강도 및 적용 보양방법은 <표 2 및 3>과 같다. 열선은 300간격으로 매립하였으며, 22 W/m의 전류를 통전하였다.

5. Mock-Up Test 결과

표 1. 25-24-15 규격 레미콘 배합표

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

표 2. 실험체별 소요강도

실험체	치수	소요강도 (MPa)	목표
지하외벽	T = 700	5	동해방지/거푸집탈형
슬래브	T = 200	16	거푸집/동바리해체
기둥	800 × 800	2	초기동해방지

표 3. 실험체별 보양방법

실험체	보양방법
지하외벽	거푸집면 열선 매립
슬래브	상옥 + 열선 + 표면보온(익일아침) + 하부공간가열 (20℃익일아침 / 10℃2일아침)
기둥	거푸집면 열선 매립

5.1 지하외벽

지하외벽 실험체는 일최저 -10℃, 일평균 -4.5℃ 및 일최고 1.2℃의 인공 기온 사이클에서 실험하였다. 지하외벽 실험체의 온도측정 위치 및 온도측정 결과는 (그림 8 및 9)와 같다. 온도측정 결과, 콘크리트의 수화열이 발생하기 전 초기에 모서리 부분의 온도는 열선이 지나가지 않는 부분(ch 18)은 약 4℃까지 떨어지나, 열선이 지나가는 부분(ch14)은 약 7℃까지 유지되었다. 거푸집 면의 온도와 강도는 폼단열재를 사용한 경우와 비슷하게 측정되었다. 따라서, 모서리 부분에만 열선을 설치하면 거푸집 면과 모서리 부분의 초기동해 방지강도(5 MPa) 발현일을 1.6일로 통일시킬 수 있어 공사 일정에 상당히 유리함을 알 수 있었다. 단, 실험과는 달리 모서리 부분을 빠짐없이 보양하기 위하여 실제 공사에서는 가로로 열선을 설치하여 시공하였다.

5.2 슬래브

슬래브 실험체는 실제 일최저 기온이 -10℃까지 떨어져 외기 노출 조건으로 실험을 수행하였다. 콘크리트 타설 직후 부직포를 덮어 보온을 하지 못하는 대신 300mm 간격으로 설치된 열선과 하부 공간가열 기온을 1일간 20℃로 높여 초기동해를 방지하는 목적으로 수행되었다. 부직포는 콘크리트 타설후 0.7일에 덮었고, 하부 공간가열 기온은 0 ~ 0.7일은 20℃, 0.7 ~ 1.7일은 10℃로 유지하였으며, 그 이후에는 열선에 의한 열원공급을 고려하여 공간가열 열원은 제거하는 것으로 하였다. 또한, 3.7일부터는 양생상옥을 해체하여 실제 공사 스케줄과 유사하게 보양조건을 적용하였다.

표면온도는 가장 낮은 부분인 열선사이(ch 5)가 최고 21℃, 열선 위치(ch 4)가 최고 26℃ 등으로 양호하였다. 약 1.2일만에 초기동해 방지강도인 5MPa이 확보되었고, 4.6일만에 거푸집 및 동바리 해체

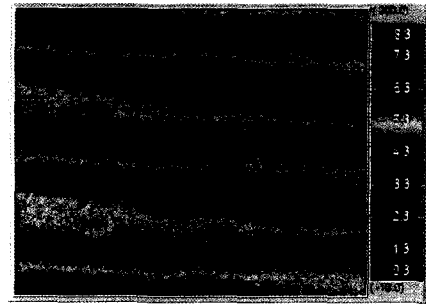
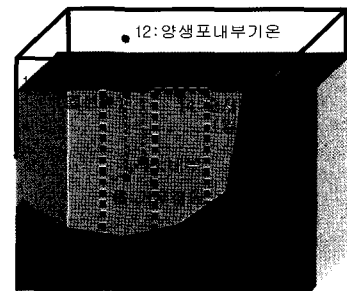


그림 7. 적외선 촬영사진



1: 설정기온

그림 8. 지하외벽 실험체 온도측정 위치

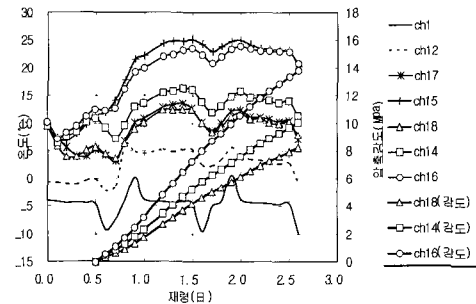


그림 9. 지하외벽 실험체 온도측정 결과

강도인 16MPa이 확보되었다(그림 10 및 11). 실험체의 코어를 채취하여 압축강도시험을 통해 확인한 결과, 4.6일 재령에서 17.5MPa로 측정되어 적산온도-강도 관계식의 정확성을 확인할 수 있었다.

5.3 기둥

기둥 실험체는 외기노출(최저 -10℃) 조건에서 실험을 수행하였다. 기둥의 경우 실제 공사에서는 공간가열이 실시되는 상옥내에 위치하게 되지만 외주부 하부의 경우 거의 외기와 비슷한 온도의 공기에 노출될 것을 가정해서이다.

열선의 영향으로 콘크리트 온도는 타설시 온도를 거의 유지하였으며, 가장 취약한 모서리의 경우 5MPa 강도발현이 1.8일에 소요되는 것으로 나타났다(그림 12 및 13). 한편, 기둥 실험체의 경우 부재크기가 커서 수화열의 영향으로 온도가 바로

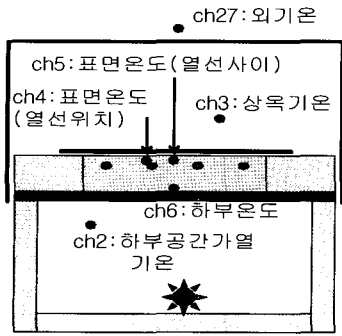


그림 10. 슬래브 실험체 온도측정 위치

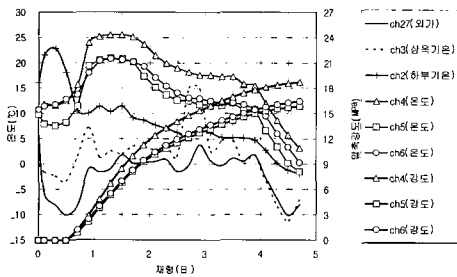


그림 11. 슬래브 실험체 온도측정 결과

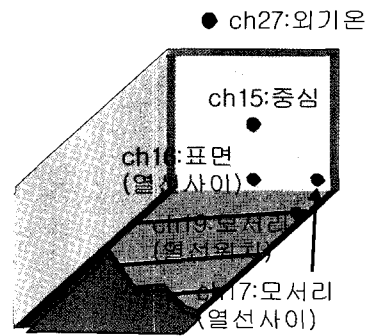


그림 12. 기둥 실험체 온도측정 위치

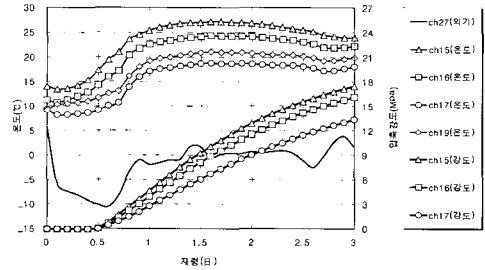


그림 13. 기둥 실험체 온도측정 결과

상승하는 것을 알 수 있었다.

6. 맺음말

당 현장에서는 열선을 이용한 mock-up 실험 결과를 바탕으로 동절기 콘크리트의 양생관리를 성공적으로 수행하였다. 실제 시공 시에도 온도센서를 매입하여 콘크리트의 온도이력이 실험 결과와 유사하게 나타나는지를 지속적으로 체크하여 열선을 이용한 보양기간(통전시간) 등에 반영하였으며, 적산온도에 의한 강도 추정으로 시방서에 제시된 표준 양생일수보다 최소 1일씩 보양기간을 단축하여 원가 및 공정관리에도 많은 도움을 받을 수 있었다.

열선을 이용한 한중 콘크리트의 보양비용은 기존의 갈탄 또는 열풍기 등을 이용한 급열방법에 비하여 다소 상승되는 부분이 있으나, 상옥설치에 의한 급열양생의 경우 상옥 내부에서도 부위 및 위치별로 양생온도의 편차가 극심하여 콘크리트의 균등한 강도발현이 곤란하다는 점과 강도발현 측면에서 가장 취약한 부위가 전체 구조체의 보양기간을 좌우함으로써 소요강도 확보를 위한 급열기간의 장기화 우려 등을 고려한다면 동절기 골조공사의 원활한 수행 및 공기단축에 따른 전반적인 비용절감 효과를 도모할 수 있을 것으로 판단된다.

열선에 의한 보양은 그 적용방법 및 시공법의 변경 또는 개선을 통하여 향후 혹한기를 포함한 동절기 전반에 걸쳐 콘크리트 시공을 가능하게 할 수 있을 것으로 판단되며, 이를 위해서는 기존 방법들과의 복합적인 적용이 필요할 것으로 판단된다. 당 현장에서의 열선을 이용한 한중 콘크리트의 보양방법 사례가 향후 다른 공사에서도 작으나마 도움이 되기를 기대한다. □

참고문헌

- 1 한국콘크리트학회, 콘크리트 표준시방서, 2003, pp. 158 ~ 167.
- 2 최일호, 박지훈, 김효라, 이도범, 동절기 콘크리트공사시 콘크리트의 온도해석기법에 한 실험적 연구, 한국콘크리트학회 학술발표논문집, Vol.13, No.1, 2001, pp. 801 ~ 806.
- 3 (주)이코이엔씨, 매입형 열선에 의한 한중콘크리트 양생방법의 적용에 관한 연구, 2001, pp. 3 ~ 5.
- 4 길배수, 조민형, 권영진, 남재현, 김무한, 로지스틱곡선과 고펜퍼즈콘선에 의한 콘크리트의 압축강도 예측, 대한건축학회 학술발표논문집, Vol.18, No.1, 1998, pp. 1007 ~ 1012.
- 5 오병환, 이명규, 홍경옥, 김광수, 성숙도 개념을 이용한 콘크리트 초기 강도 예측모델 개발 연구, 콘크리트학회 논문집, Vol.8, No.3, 1996, pp. 197 ~ 207.