

# 전기발열시트에 의한 한중콘크리트의 양생 및 온도이력에 관한 실험 연구

## An Experimental Study on the Curing and Temperature History of Cold Weather Concrete by Planar Surface Heater

김형래\*  
Kim, Hyung-Rae

조호규\*\*  
Cho, Ho-Kyu

김찬수\*\*  
Kim, Chan-Soo

지남용\*\*\*  
Jee, Nam-Yong

### Abstract

The purpose of this study is to analyze the curing effect of planar surface heater for concreting in cold weather. Some experiments were conducted to evaluate the temperature history of concrete cured with heating sheets in the laboratory conditions.

As the results, It was showed that the 130W/m<sup>2</sup>-heater could raise the inner temperature more than 20°C under the environmental condition of -5~-20°C. And the temperature of concrete cured by the 200W/m<sup>2</sup>-heater was 5~10°C higher than that of concrete cured by 130W/m<sup>2</sup>-heater. Finally, through the curing by the planar surface heater during the first 1.5~2 days, it is possible to secure the sufficient maturity of concrete.

키워드 : 전기발열시트, 한중콘크리트, 양생방법, 콘크리트의 온도이력

Keywords : Planar Surface Heater, Cold Weather Concreting, Curing Method, Temperature History of Concrete

## 1. 서 론

동절기의 콘크리트공사는 골조공사의 지연을 만회하거나 잔여 공사기간 동안 여유있는 공기확보를 통해 원활하게 공정을 진행할 목적으로 아파트공사를 중심으로 많은 현장에서 이미 보편적으로 적용되고 있다.

최근에는 철근콘크리트 골조공사에 소요되는 기간이 외국에 비해 지나치게 긴 국내의 여건을 고려하여 전체 공사기간 단축을 위해 동절기 콘크리트공사의 수행이 불가피하다는 인식이 대두되어 다양한 측면으로 검토가 이루어지고 있다. 이와 관련하여 동절기에 시공되는 콘크리트의 동해를 방지하고 적절한 강도를 확보하기 위한 방안으로서 양생지붕과 공간급열장치(갈탄난로 또는 열풍기 등)를 활용하는 방법, 방동제나 촉진형 혼화제를 이용한 방법, 단열재로 보온하는 방법 등 다양한 방법들이 이미 실용적으로 적용되어 왔다.

이 가운데 가장 보편적인 방법이라 할 수 있는 양생지붕과 공간급열장치를 활용한 양생공법의 경우, 콘크리트 부재를 둘러싸고 있는 일정한 규모의 공간을 가열하기 때문에 열손실이 과다하고 효율이 낮을 뿐만 아니라 화재발생의 위험과 관리상의 어려움이 있는 것으로 보고되고 있다. 뿐만 아니라, 콘크리트의 품질관리에 있어서 열원으로부터의 이격거리에 따라 콘크리트온도에도 큰 차이를 보여 구조체의 강도발현이

균일하지 않으며 양생효과가 미미하다는 점 등의 많은 문제점을 내포하고 있다.

한편, 이러한 문제점을 개선하고 코어월 선형공법 등 특수한 공법 적용시 급열양생을 목적으로 콘크리트 내부에 매설하거나 거푸집 표면에 부착하는 형태의 전열선 적용방안에 관한 검토가 이루어졌으며<sup>1)2)</sup>, 초고층 주상복합건물의 시공에 실제로 적용되어 그 효과가 입증된 바 있다. 그러나, 콘크리트 슬래브의 경우에는 이러한 내부 매설형 전열선공법 적용시 콘크리트 타설작업 중의 절단이나 피복박리 등으로 인해 전기공급이 불가능하여 양생에 실패할 가능성도 내포하고 있으며, 재사용이 불가능하다는 점 등이 보완되어야 할 과제라 할 수 있다.

따라서, 본 연구에서는 기존의 동절기 콘크리트 양생방법의 문제점을 획기적으로 개선하고 동절기를 포함한 저온기(일평균기온 15°C 미만인 기간으로 설정, 국내의 경우 10월 말~5월초)의 콘크리트 타설시 적용 가능한 현장가열양생공법 시스템 개발의 일환으로 전기발열시트를 활용한 한중콘크리트의 양생효과를 실험실 조건에서 검토하고 그 실용화를 위한 방안을 모색하였다.

## 2. 전기발열시트의 원리 및 구성

실험에 사용된 전기발열시트는 그림 1에 나타낸 바와 같이 탄소섬유시트에 전도성의 수지를 함침시키고 시트의 양측 단

\* 정회원, 현대건설(주) 기술연구소 선임연구원

\*\* 정회원, 현대건설(주) 기술연구소 책임연구원

\*\*\* 정회원, 한양대 건축공학부 조교수, 공학박사

부에 도전성의 금속사를 박음질하여 전류를 흘려 도전성 수지의 전기저항에 의해 발열하는 원리를 갖는 면상발열체로 구성되어 있다. 또한, 방수성의 PVC필름을 코팅하여 굳지 않은 콘크리트를 덮었을 때 수분침투에 따른 누전 가능성을 방지하였다.

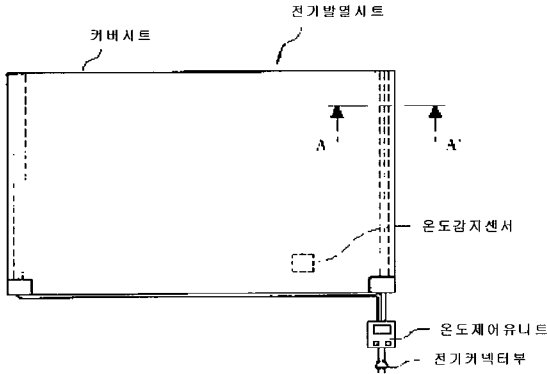


그림 1. 콘크리트 가열양생용 전기발열시트의 구성

한편, 본 실험에 사용된 전기발열시트는 시트 양단부에 있는 전기공급용 금속사를 제외하고 시트의 일부 부분이 손상되더라도 발열이 가능하므로, 못이나 스테이플 등으로 거푸집의 표면에 시트를 직접 고정하거나 콘크리트 노출면 위에 단순히 덮는 방식으로 설치가 가능하므로 취급이 용이하며, 두루마리 형태로 보관하는 것이 가능하므로 건설현장에서 수회에 걸쳐서 안전하게 재사용할 수 있는 장점이 있다.

### 3. 실험

#### 3.1 실험개요

면상발열체로 구성된 전기발열시트에 의한 한중콘크리트의 양생효과를 평가하기 위한 실험수행에 있어서 실험인자로는 우선 발열용량에 따른 차이를 파악하기 위하여 130W/㎡와 200W/㎡의 2종류의 전기발열시트를 대상으로 하였다. 즉, 1W/㎡의 전력량은 1×0.86kcal/㎡hr의 열량으로 변환될 수 있으므로, 130W/㎡ 및 200W/㎡의 발열량은 각각 111.8kcal/㎡hr 및 172kcal/㎡hr가 된다. 또한, 전기발열시트가 외기에 직접 노출되는 경우 발열량의 대부분이 외기로 손실되어 표면 보온조건에 따라 콘크리트에의 급열정도에도 큰 차이가 있을 수 있으므로, 전기발열시트의 상부표면을 건설현장에서 일반적으로 사용하는 양생매트(부직포)를 이용하여 덮는 경우를 고려하였다.

전기발열시트에 의한 급열시간 및 방법에 따른 수준을 크게 3종류로 구분하여 야간에만 급열하고 주간에는 급열하지 않는 경우, 콘크리트 타설 후 40시간 동안 급열하는 경우, 콘크리트 타설 후 60시간 동안 급열하는 경우 등을 대상으로 하였다. 이는 실제 시공현장에 있어서의 전력수급(예를들면, 전용면적 85㎡의 아파트 1개동(4개 세대)을 대상으로 하는 경우 층당 바닥면적이 대략 400㎡에 이르며, 130W/㎡ 전기발열시트를 적용한다면 52KW의 가설전력이 필요함)을 고려하

여 양중장비 등에 의한 전력소비가 많은 주간에는 급열하지 않는 조건을 실험에서 고려한 것이며, 계속급열시간의 수준에 따른 양생효과도 검토하였다.

마지막으로 전기발열시트가 주로 외기에 노출되는 슬래브 상부면에 적용될 가능성이 가장 크다는 점에서 슬래브 하부의 골조내부 공간에 대한 가열여부(예를들면, 갈탄난로나 열풍기에 의한 급열)와 거푸집의 종류(예를들면, 단열거푸집) 등에 의해 전반적인 콘크리트 양생조건이 크게 달라질 수 있으므로, 부재의 하부쪽에 단열재를 삽입하는 경우와 그렇지 않는 경우에 대하여 검토하였다.

#### 3.2 콘크리트 배합 및 시험체 제작

시험체로는 두께 20cm의 모의 슬래브를 제작하였으며, 사용된 콘크리트는 물시멘트비(이하, W/C라 함) 49.4%, 호칭강도 24MPa의 레드믹스트 콘크리트로서 그 배합표는 표 1과 같다.

표 1. 시험체 제작용 콘크리트의 배합표

W/C	공기량	S/A	단위 재료량 (kg/m <sup>3</sup> )					
			G	S	C	F	W	AD
49.4	4.5	47.0	952	834	317	43	178	1.80

\* W/C : 물시멘트비, S/A : 잔골재율, G : 굵은골재, S : 잔골재, C : 시멘트, F : 플라이애쉬, W : 물, AD : 혼화제

#### 3.3 실험조건 및 측정항목

본 실험에서는

- 1) 전기발열시트의 기본적인 발열특성 검토
- 2) 실험실 조건에서 양생조건에 따른 콘크리트의 온도이력 측정
- 3) 전기발열시트의 적용방법(설치방법, 보온재 유무, 공급전력량, 급열시간 등)을 고려한 양생효과 검토
- 4) 온도조건, 전기발열시트의 적용방법, 콘크리트 양생효과 등의 관계 검토

등을 목표로 앞에서 언급한 실험인자 및 수준에 따라 총 8개의 실험조건을 설정하였으며, 각각은 그림 2에 나타난 바와 같다.

실험조건이 상이한 시험체 사이에는 12mm의 코팅합판으로 구획하고 그림에서 보는 바와 같이 25mm의 폴리스티렌 폼 단열재를 삽입하여 실험조건 간의 영향을 방지하였다. 한편, 실험조건별 양생효과를 파악하기 위해 콘크리트의 내부온도이력을 측정하였으며, 온도측정은 그림 2와 같이 시험체의 중앙부와 측부를 대상으로 하여 하부(높이 1cm), 중간(높이 10cm), 상부(높이 17cm)에 각각 온도센서를 매입하였다.

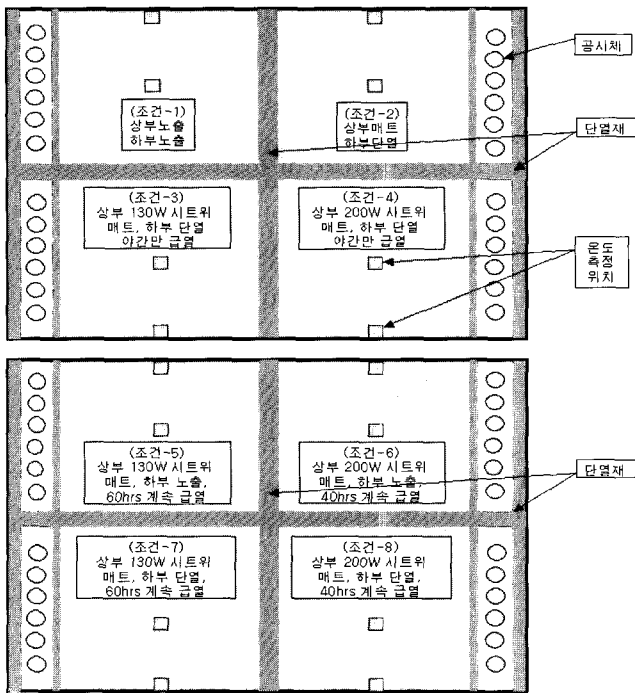


그림 2. 실험조건 및 시험체 제작

## 4. 실험결과 및 고찰

### 4.1 전기발열시트의 기본적인 발열특성

130W/m<sup>2</sup>와 200W/m<sup>2</sup>의 전기발열시트의 발열량은 앞에서 언급하였듯이 각각 111.8kcal/m<sup>2</sup>hr 및 172kcal/m<sup>2</sup>hr로서 일반적으로 열풍기 1대로 급열하는 200m<sup>2</sup> 정도의 타설면적에 대하여 각각 22,360kcal/hr 및 34,400kcal/hr의 표면급열 능력을 보유하고 있는 것으로 추정할 수 있다. 한편, 열풍기의 급열용량이 대체로 35,000~100,000kcal/hr에 이르지만, 공간급열을 하기 때문에 콘크리트 온도가 10℃ 내외에 머무는 점을 고려한다면 표면가열에 의해 확보할 수 있는 콘크리트의 양생수준은 매우 높을 것으로 기대할 수 있다.

그림 3은 130W/m<sup>2</sup>인 전기발열시트의 기본적인 발열특성을 나타낸 것이다. 발열특성의 평가를 위한 전기발열시트의 배치 방법은 하부면이 외기에 직접 접하고 있는 12mm 코팅합판의 윗면에 전기발열시트를 배치하고 전기발열시트의 상부면을 양생매트(부직포)로 덮는 경우와 덮지 않는 경우로 구분하여 검토하였다.

전기발열시트의 발열특성 검토결과, 양생매트(부직포)를 덮는 경우 외기온 -5℃~-20℃의 범위에서 전기발열시트 내부의 온도가 외기온에 비해 20℃ 이상 높게 유지되었으며, 양생매트(부직포)를 덮지 않은 경우 외기온보다 약 8℃ 정도 더 높은 수준에서 평형상태를 유지하였다.

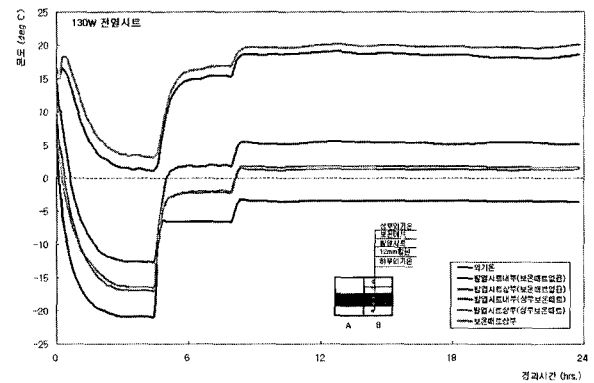


그림 3. 전기발열시트의 기본 발열특성 (130W/m<sup>2</sup>)

한편, 본 검토에서는 전기발열시트의 하부에 콘크리트가 아닌 12mm 코팅합판이 위치하고 있는 조건이므로, 실제로 135~200mm에 이르는 콘크리트 슬래브의 상부에 전기발열시트를 덮는 경우에는 전기발열시트 내부의 온도와 외기온은 더욱 큰 차이를 보일 것으로 예상되었다..

### 4.2 양생조건별 콘크리트의 온도이력

전기발열시트에 의한 양생조건별 콘크리트의 온도이력 측정결과는 그림 4~그림 11에 나타낸 바와 같다. 우선 그림 4 및 그림 5와 같이 전기발열시트로 급열하지 않는 경우 외기온이 영하에 머무는 최초 1일 동안 콘크리트 온도가 급속히 하강하는 것으로 나타났으며, 특히 보온양생을 전혀 하지 않는 경우에는 약 12시간 경과시점에서 콘크리트 온도가 0℃ 이하로 내려가는 것을 알 수 있다. 골조내부공간(슬래브 하부)을 열풍기나 갈탄난로로 가열하고 슬래브 상부의 노출표면에 보온재만을 덮는 조건을 상정한 실험조건-2의 경우 24시간 경과 시 외기온의 상승으로 콘크리트가 동결되지는 않았으나, 전반적으로 콘크리트 온도가 매우 낮은 수준을 나타냈다.

한편, 그림 7 및 그림 8과 같이 야간에만 급열을 하는 경우에도 콘크리트 온도가 매우 높게 유지되었으나, 급열 중단 시 온도하강속도가 매우 큰 것으로 나타나 이에 대한 고려가 요망된다고 하겠다.

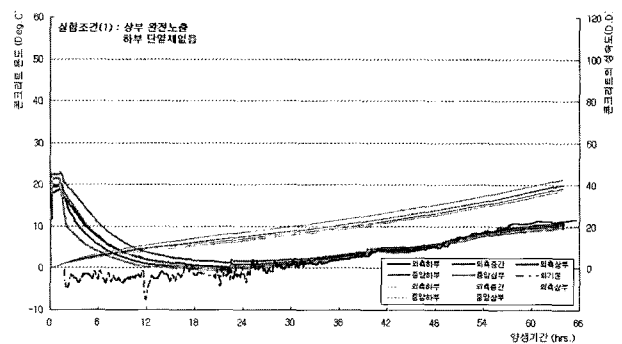


그림 4. 콘크리트의 부위별 온도이력 측정결과 (실험조건-1)

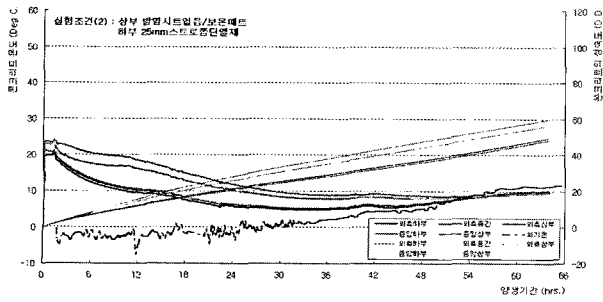


그림 5. 콘크리트의 부위별 온도이력 측정결과  
(실험조건-2)

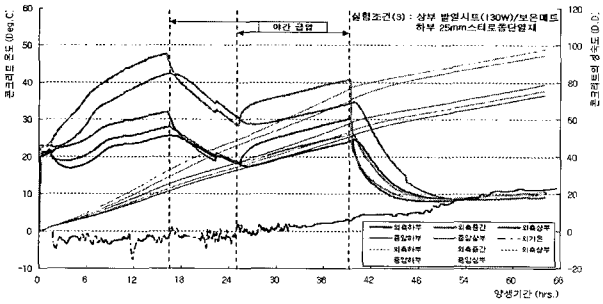


그림 6. 콘크리트의 부위별 온도이력 측정결과  
(실험조건-3)

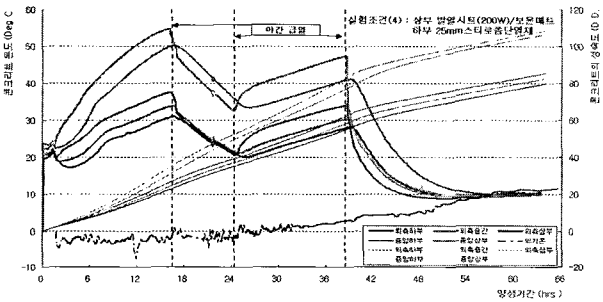


그림 7. 콘크리트의 부위별 온도이력 측정결과  
(실험조건-4)

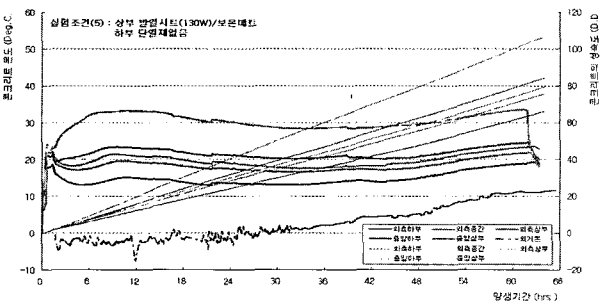


그림 8. 콘크리트의 부위별 온도이력 측정결과  
(실험조건-5)

슬래브 하부의 골조내부공간을 전혀 급열하지 않는 조건을 상정하여 하부에 단열재를 설치하지 않은 실험조건-5 및 실험조건-6의 경우에도 콘크리트 온도를 15~30℃ 정도로 일정하게 유지하는 것이 가능한 것으로 나타났다.

전기발열시트의 용량에 따라 콘크리트의 양생온도이력에도 다소의 차이가 있으므로, 현장여건 및 외기온의 변동을 고려하여 적절한 발열량을 갖는 전기발열시트의 적용이 가능한 것으로 판단된다.

한편, 발열용량이 다른 130W/㎡와 200W/㎡의 전기발열시트를 적용한 경우 전기공급시간이나 하부단열조건 등 다른 양생조건에 따라 다소 차이는 있으나, 대체로 200W/㎡의 전기발열시트를 적용한 경우 5~10℃ 정도 더 높은 콘크리트 온도이력을 갖는 것으로 나타났다.

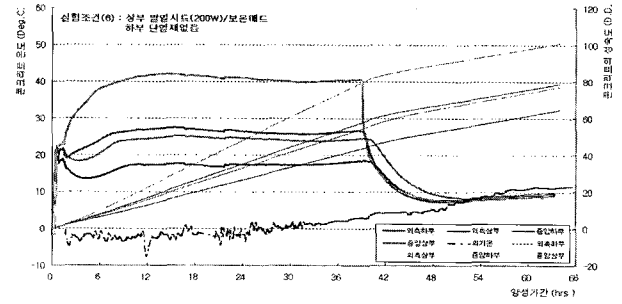


그림 9. 콘크리트의 부위별 온도이력 측정결과  
(실험조건-6)

또한, 현장적용시 골조내부 공간에 대해 기본적인 급열을 하는 경우를 상정하여 시험체의 하부에 25mm 단열재를 배치한 경우와 단열재 없이 외기온의 영향을 직접 받는 조건에 대해 비교검토한 결과, 단열재를 설치한 경우가 약 10℃ 정도 더 높은 콘크리트 온도를 나타냈다.

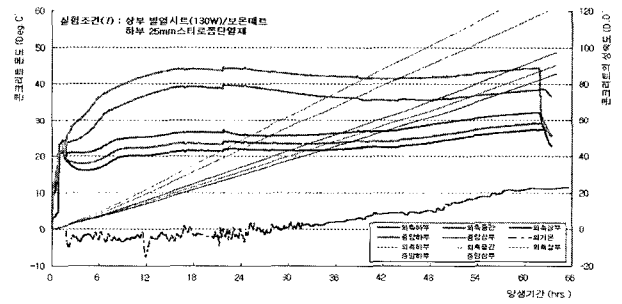


그림 10. 콘크리트의 부위별 온도이력 측정결과  
(실험조건-7)

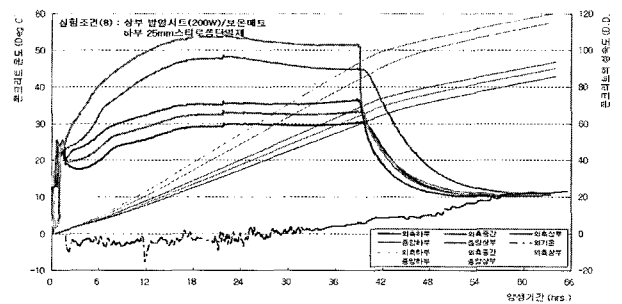


그림 11. 콘크리트의 부위별 온도이력 측정결과  
(실험조건-8)

한편, 전기발열시트와 직접 닿아 있는 슬래브 상부와 전기 발열시트로부터 다소 떨어진 슬래브 하부나 중간 부위의 콘크리트 온도는 10℃ 이내의 온도편차를 갖는 것으로 나타났다. 또한, 측면거푸집을 경계로 외기에 노출되어 있는 측면부에서는 부재의 중앙부에 비해 다소 낮은 온도분포를 보였으나, 부재의 단면깊이에 따른 온도편차는 크지 않은 것으로 나타나 부재단면이 작은 슬래브의 경우 콘크리트의 열전도에 의해 전기발열시트의 급열효과가 충분히 전달될 수 있는 것으로 판단된다.

## 5. 결론 및 제안사항

본 연구에서는 면상발열체로 제작된 전기발열시트에 의한 한중콘크리트의 양생공법 개발의 일환으로서 전기발열시트의 발열용량, 전기공급 방법 및 기간, 표면보온조건 등에 따른 콘크리트의 양생효과를 검토하였으며, 연구결과 도출된 결론은 다음과 같다.

- 1) 전기발열시트 위에 양생매트(부직포)를 덮어서 보온하는 경우 외기온이 -5~-20℃인 조건하에서 전기발열시트 내부의 온도가 외기온에 비해 20℃ 이상 높게 유지됨으로써 충분한 급열양생효과를 발휘할 수 있는 것으로 판단된다.
- 2) 발열용량 130W/m<sup>2</sup> 및 200W/m<sup>2</sup>인 전기발열시트를 적용한 경우 양생조건에 따라 약간의 차이는 있으나, 200W/m<sup>2</sup>인 경우 5~10℃ 정도 더 높은 콘크리트 온도이력을 갖는 것으로 나타났다.
- 3) 현장적용시 골조내부 공간의 급열을 고려하여 시험체의 하부에 25mm 단열재를 설치한 경우와 단열재 없이 외기온에 노출된 조건을 비교 검토한 결과, 단열재 설치에 의해 콘크리트 부재의 깊이별 온도가 약 10℃ 정도 더 높아지는 것으로 나타났다. 따라서, 벽식구조 아파트에서 벽체 콘크리트의 동결방지 및 탈형강도 확보를 위해 최소한의 급열을 하는 경우 슬래브 콘크리트에 대한 보양효과가 더욱 증진될 수 있는 것으로 판단된다.

- 4) 20cm 두께의 슬래브 콘크리트 상부에 전기발열시트를 덮는 경우, 전기발열시트와 접하고 있는 슬래브 상부의 콘크리트 온도와 다소 이격되어 있는 하부 및 중간 부위의 콘크리트 온도는 10℃ 이내의 편차를 갖는 것으로 나타났다. 한편, 기둥이나 벽체에 의해 지지되지 않는 슬래브의 단부에서 다소 낮은 온도분포를 보였으나 부재의 단면깊이에 따른 온도편차는 크지 않은 것으로 나타나, 부재단면이 작은 슬래브의 경우에도 콘크리트의 열전도에 의해 전기발열시트의 급열효과를 충분히 얻을 수 있는 것으로 판단된다.
- 5) -3.5℃ 정도의 온도조건하에서 약 2일 동안 130W/m<sup>2</sup>의 전기 발열시트로 양생하는 경우 지속적인 급열을 할 때 충분한 양생효과를 얻을 수 있었으며, 야간에만 전기공급을 하여 급열하는 경우에도 콘크리트의 온도가 동결온도 이하로 내려가지 않고 충분한 양생효과가 있는 것으로 나타났다.
- 6) 130~200W/m<sup>2</sup>의 발열용량을 갖는 전기발열시트에 의한 한중 콘크리트의 양생시 초기재령 1.5~2일 정도의 급열을 통하여 표준양생조건하의 콘크리트보다 높은 성숙도 확보가 가능한 것으로 나타나 외기에 노출되는 슬래브 상부의 동결방지는 물론 콘크리트 압축강도의 조기발현에 따른 동절기 골조 공사의 원활한 수행이 가능할 것으로 판단된다.

## 참 고 문 헌

1. 김형래 외, “열선양생에 의한 콘크리트의 온도이력에 관한 현장실험연구”, 대한건축학회 학술발표논문집, 제21권 제1호, 2001년 4월, pp.529~532
2. 김형래 외, “매입형 열선에 의한 한중콘크리트의 보양방법 적용에 관한 연구”, 한국콘크리트학회 봄 학술발표회 논문집, 제13권1호, 2001년 5월, pp.769~774
3. 한국콘크리트학회, 콘크리트 표준시방서, 1999
4. 日本建築學會, 寒中コンクリト施工指針同解説, 1989
5. 洪悅郎, “RILEM 『寒中コンクリト施工指針』의附録, Part I, II, III, IV”, セメント・コンクリト, No.526~529, 1990.12~1991.3