

무선 온도계측 방식에 의한 구조체 콘크리트의 온도계측 및 양생관리 적용사례

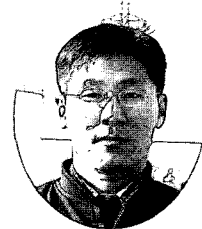
- A Curing Temperature Control of Concrete by Wireless Data Aquisition Method -



김형래*
Kim, Hyung Rae



조호규**
Jo, Ho Kyoo



조용석***
Cho, Yong Suck

1. 개 론

콘크리트 양생온도는 품질의 양부를 결정하는 매우 중요한 요소 중의 하나이다. 특히, 한중 콘크리트를 비롯하여 매스 콘크리트나 고강도 콘크리트에 있어서의 양생온도조건은 초기재령 콘크리트의 강도발현은 물론 중장기적인 강도증진에 큰 영향을 미치게 된다. 또한, 동해방지 및 후속공사의 진행을 위한 소요강도의 확보와 함께 수화발열에 따른 온도응력으로 인한 온도균열의 발생을 제어하기 위해서도 콘크리트의 온도관리는 필수적이라 할 수 있다.

한편, 이와 관련하여 한중 콘크리트나 매스 콘크리트를 시공하는 대부분의 국내 건설현장에서 콘크리트의 적절한 품질확보를 위해 온도계측을 수행해 오고 있다. 즉, 한중 콘크리트를 시공하는 경우, 급열을 위해 콘크리트 구조체를 둘러싼 보양공간 내부에 일정 바닥면적당 1개소씩 자기온습도기록계를 설치하여 온도관리를 하고 있으며, 초기 급열양생 기간을 결정하거나 후속 공정을 수행할 지의 여부를 판단하는데 활용하고 있다. 매스 콘크리트의 시공에 있어서는 수화열에 의한 온도 및

응력 해석을 통해 설정한 콘크리트의 배합조건 및 시공조건에 대하여 실제 시공시 주요 부위에 온도센서를 매입하고 양생온도를 계측함으로써 적절한 수준으로 관리하고자 노력하고 있다.

그런데, 시공현장에서 이루어지는 온도계측 및 양생관리의 근본적인 목적이 콘크리트 구조체의 품질 확보 및 관리에 있다는 점과 매스 콘크리트 및 고강도 콘크리트의 경우에는 실제 구조체 콘크리트의 온도이력이 부재 주변의 공간온도와는 크게 차이가 있다는 점을 고려할 때, 보다 합리적인 양생관리를 위해서는 콘크리트 자체의 온도이력에 대한 지속적인 계측 및 관리가 절실히 필요한 것으로 판단된다. 게다가, 기존의 온도계측방식인 자기온습도계나 자동온도기록계 또는 데이터로거에 의한 온도모니터링 방법 등은 온도 데이터를 계측하는 시점과 분석하는 시점이 일치하지 않아 주변조건의 변화에 따른 콘크리트의 상태변화에 신속하게 대처하기 곤란했으며, 현장시공관리 측면에서도 적절한 양생수준을 예측하고 후속공정을 계획하는 데에는 다소 한계가 있었다고 할 수 있다.

따라서, 이에 대한 보완 방안으로서 구조체에 온도센서를 매입하고 지근거리에 위치한 소형 데이터로거에 연결하여 데이터를 얻고, 이를 송수신 모뎀에 의해 전송

하여 사무실 내의 컴퓨터 화면으로 실시간 모니터링하는 방안이 검토되었다. 또한, 이와 같이 무선계측방식에 의해 현장 구조체 콘크리트로부터 부위별로 계측된 데이터는 현장 컴퓨터에 디스플레이 되고 저장되는 동시에 인터넷망을 통해 서버에 전송되어 축적되고 웹상에서 전문가 집단과 계측자료를 공유할 수 있도록 구현되었다.

본고에서는 콘크리트의 온도이력을 데이터 로거로 계측하는 동시에 무선모뎀에 의해 원격 데이터 송수신이 가능하도록 일체화하여 구축한 무선온도계측 시스템에 대하여 소개하고자 하며, 이를 이용하여 실제로 현장 구조체 콘크리트의 온도관리 및 양생관리를 수행했던 사례를 제시하고자 한다.

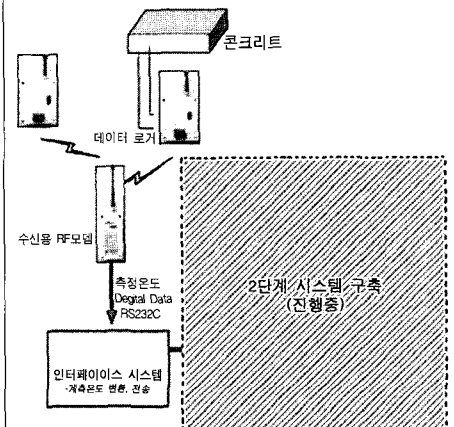


그림 1. 무선 온도계측 시스템의 구성

* 정회원, 현대건설(주) 기술연구소 과장

** 현대건설(주) 기술연구소 차장

*** 현대건설(주) 울촌복합화력현장 대리

2. 무선계측방식에 의한 양생온도 관리 시스템

본고에서 소개하는 무선계측방식에 의한 온도관리 시스템은 공사 현장의 특수성을 감안하여 온도센서와 기기의 설치 및 해제가 용이하도록 제작하였으며, 이동성 등을 고려하여 부피와 무게를 최소화하였다.

시스템의 기본적인 구성은 <그림 1>에 나타낸 것과 같으며, 온도센서 및 데이터 로거, 데이터 송수신용 RF모뎀, 수신 데이터 표시 및 확인을 위한 컴퓨터로 구분할 수 있다. 즉, 크게 구분하여 데이터를 계측하여 송신하는 송신부(현장 설치)와 데이터를 수신하고 컴퓨터 상에 디스플레이하는 수신부(현장 내 사무실 설치)로 나눌 수 있다. 온도센서는 콘크리트의 온도 측정에 일반적으로 사용되는 서미스터 방식의 온도센서로서, 콘크리트 타설 직전에 관리하고자 하는 부위의 철근 등에 결속하고 그 연장선을 뽑아 내어 현장 설치용 데이터 로거에 연결된다. 또한, 데이터 로거로부터 송신된 데이터는 수신용 RF 모뎀과 RS232C 케이블로 연결된 컴퓨터에 실시간으로 축적되도록 구축되었다. 인터넷 서버를 이용한 DB구축 및 웹상에서의 계측데이터 공유와 관련된 2단계 시스템 구축작업이 이미 완료된 상태이지만 본고에서는 실제로 현장에 적용했던 사례를 대상으로 다루고자 하며, 따라서 2단계 시스템에 관한 사항은 제외하기로 한다.

2.1 온도 센서

온도의 측정에 사용되고 있는 일반적인 센서들은 <표 1>에 나타낸 것과 같다. 이 중에서 국내의 건설현장 및 각종 콘크리트 실험에서 가장 흔히 사용되는 센서인 열전대(T형) 방식은 온도측정 범위나 정도(精度) 등의 조건이 사용에 별 무리가 없어 보이나, 단위 길이당 비용이 비싼 것이 흠이라고 할 수 있다.

이러한 점을 고려하여 본 시스템에서는 물리적 특성이 열전대와 비슷하면서도 소요비용은 상대적으로 저렴한 서미스터(th-

표 1. 실용화된 온도계의 종류와 특징

종류	사용온도범위(°C)	정도	응답속도	기록/제어	비용	
유리온도계	-50 ~ 650	0.1 ~ 2	보통	부적합	저가	
바이메탈식	-50 ~ 500	0.5 ~ 5	늦음	적합	저가	
액체충만식	-30 ~ 600	0.5 ~ 5	보통	적합	저가	
증기압식	-20 ~ 350	0.5 ~ 5	보통	적합	저가	
백금저항	-260 ~ 1000	0.01 ~ 5	보통	적합	고가	
서미스터	-50 ~ 350	0.3 ~ 5	빠름	적합	보통	
열전대	R(PR)	0 ~ 1,600	0.5 ~ 5	빠름	적합	고가
	K(CA)	-200 ~ 1,200	0.2 ~ 10	빠름	적합	보통
	E(CRC)	-200 ~ 800	3 ~ 5	빠름	적합	보통
	J(IC)	-200 ~ 800	3 ~ 10	빠름	적합	보통
	T(CC)	-200 ~ 350	2 ~ 5	빠름	적합	보통

ermally sensitive resister)를 적용하였으며, 건설현장과 같이 측정위치와 계측기(로거 등)까지의 거리가 먼 경우 열전대에 비해 훨씬 경제적이다. 본 시스템에서는 -30 ~ 100 °C(오차범위 : ± 1 °C)까지 측정가능하고 저항값이 15 kΩ인 서미스터를 사용하였다. 이는 콘크리트의 수화열에 의한 온도 및 동결기의 외기온 조건을 고려할 때 가장 적절한 온도범위라고 판단되었기 때문이다.

2.2 데이터 로거 및 RF모뎀

데이터 로거는 1대당 8개의 채널을 동시에 측정할 수 있도록 하였으며, 데이터의 계측주기는 1분으로 설정하였다. RF모뎀은 양방향 송수신이 가능한 것을 채택하여 데이터의 송수신 여부를 확인하여 컴퓨터 화면에 표시되도록 하였다. 온도센서 연결단자는 원터치 설치가 가능하도록 하여 편이성을 최대한 배려하였다. 한편, 기본적으로 수신용 RF모뎀 1대당 8대 이상의 데이터 로거를 무선으로 병렬 접속하는 것이 가능하므로, 계측가능한 온도측정점은 64 point 이상이 된다.

2.3 수신 데이터 표시 및 출력

무선모뎀을 통해 받은 데이터는 RS-232C 케이블을 통해 컴퓨터와 연결, 실시간으로 온도변화 상황을 사무실 내 컴퓨터의 모니터에 출력함으로써, 콘크리트나 측정대상에 이상 징후가 감지될 경우 현장요

원들이 즉각 대응책을 강구할 수 있도록 하였다.

3. 무선 온도계측 방식의 현장적용 사례

3.1 초고층 건축물의 매트기초 콘크리트(부산 해운대 베네시티 주상복합)

표 2 공사개요

- 현장명 : 베네시티 주상복합
- 발주처 : KB부동산신탁
- 설계감리사 : 일신설계종합건축사사무소
- 공사기간 : 2002. 12. 6 ~ 2005. 6. 30
- 소재지 : 부산광역시 해운대구 우동 1432
- 공사개요 :
 - 연면적 : 13만 9,726.72 m² (4만 2,266.43평)
 - 규모 : 지하 3층, 지상 29 ~ 37층, 공동주택4동 및 상가
 - 구조 : 철골철근콘크리트조

개발된 무선온도계측 시스템을 실제로 현장 타설 콘크리트에 적용함에 있어서 온도계측의 정확도 및 데이터 수집의 연속성을 평가하기 위해 초고층 주상복합 건축물의 매트기초 콘크리트를 대상으로 무선온도계측 시스템에 의한 온도계측을 수행하였다. 적용대상 매트기초는 엘리베이터 피트를 포함하는 타워동의 하부 기초로서 단면두께가 2.0 ~ 2.5 m이고 연속타설 대상 바닥면적이 1,200 m²에 이르는 대형 부재로서 타설시간에 따른 수화발열량의 차이로 인한 온도균열의 발생 가능성이 우려되었다. 이에 수화열 해석프로그램에 의한

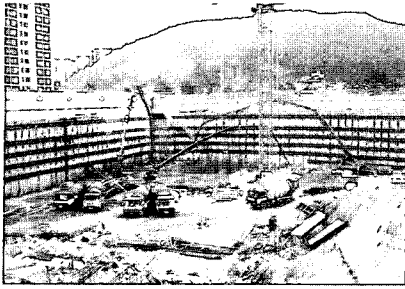


그림 2 매트기초 콘크리트 타설 장면

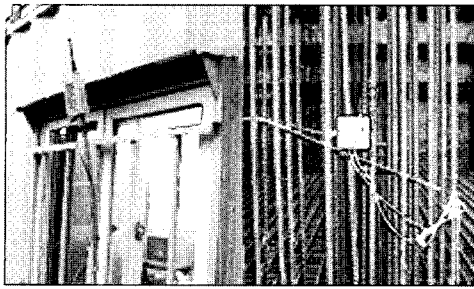


그림 3. 수신용 RF 모듈 및 데이터 로거의 설치

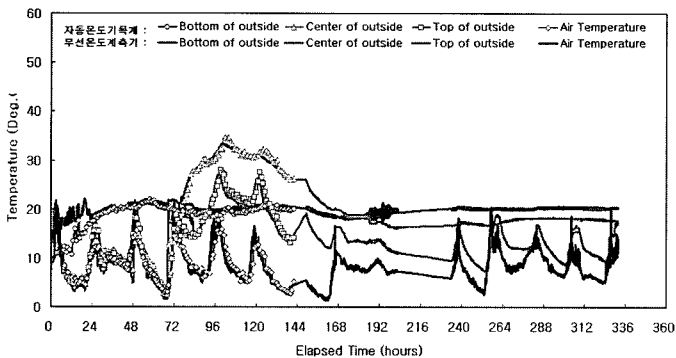
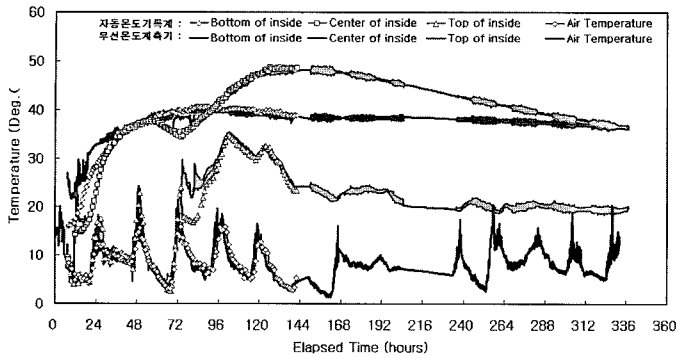


그림 4. 무선온도계측 시스템에 의한 온도계측 결과 및 자동온도기록계와의 비교

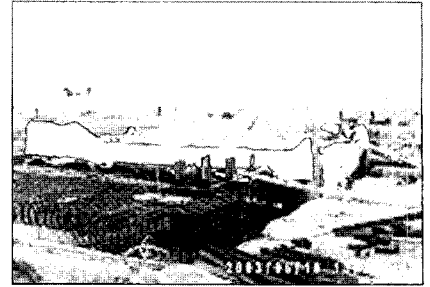
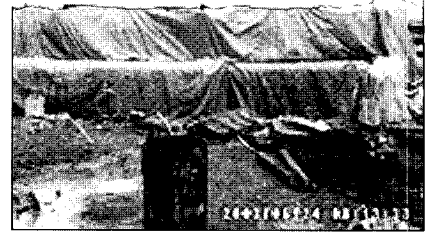


그림 5. 매트기초 콘크리트의 양생 장면



로 부재의 중심부와 표면부, 중심부와 외곽 측면부 사이의 온도차 관리 기준으로서 25°C를 설정하였는 바, 실시간으로 콘크리트의 온도이력을 모니터링하면서 표면부에 대한 보온조치를 취함으로써 적정한 양생관리가 가능하였다.

3.2 화력발전 플랜트 설치용 매트기초 콘크리트(메이아 울촌복합화력 발전소)

표 3. 공사개요

· 현장명 : 메이아 울촌복합화력 발전소
· 발주처 : 메이아 울촌전력(주)
· 공사기간 : 2003. 1. 1 ~ 2005. 6. 30
· 소재지 : 전남 순천시 해룡면 호두리 227-1
· 공사개요 :
- 울촌제1산단부지내 LNG복합발전소 건설공사
- 규모 : 가스터빈2기(184MW), 스팀터빈1기(208MW)

적용대상 콘크리트 부재는 화력발전용 가스터빈 설치를 위한 매트기초로서, 부재의 단면두께 2.0m, 바닥면적 10×30m 정도의 2개의 매트기초였다. 콘크리트의 타설은 일평균 외기온도가 20~25°C로서 매우 높았던 2003년 6월과 7월에 이루어졌으며, 타설시점의 콘크리트 온도가 25~28°C로서 부재의 중심부와 표면부 간의 온도차가 매우 클 것으로 예상되었

사전검토를 통하여 균열지수를 산출하고 적정한 콘크리트 배합조건 및 표면보온 조치방안을 강구하였다. 또한, 실제 콘크리트 타설에 앞서 무선온도계측 시스템에 의한 온도센서(서미스터)와 함께 기존에 검증된 K사제 자동온도기록계에 의한 온도센서(열전대)를 매설하였다. 온도센서의 매설은 부재의 중심부와 표면부 간의 온도차이를 관리하고자 매트기초 슬래브의 중앙부와 외곽부를 대상으로 단면 깊이 방향으로 상부(상부근), 중간(중심부), 하부(하부근)에 각각 설치하였다.

(그림 3)에 나타난 바와 같이 수신용 RF모뎀은 현장 내의 사무실 외부에 설치한 후 RS 232 C 케이블에 의해 실내의 컴퓨터와 연결하였으며, 계측용 데이터 로거는 타설된 매트기초 슬래브의 노출 철근

에 결속하였다. 수신용 RF모뎀 설치 위치와 계측용 데이터 로거 사이의 거리는 직선거리로 약 300m 정도 이격되었다.

무선온도계측 시스템 및 자동온도기록계에 의한 콘크리트의 경과시간별 온도이력 측정결과를 (그림 4)에 나타냈다. 그림에서 알 수 있듯이 콘크리트 내부의 동일한 지점에 무선온도계측기와 자동온도기록계의 센서를 각각 매설하여 측정한 결과가 거의 일치하고 있는 점으로부터 센서방식 및 데이터 출력방식에 따른 차이는 없는 것으로 판단된다. 다만, 데이터 수집의 연속성에 있어서 일부 시간대에서 다소 불연속적인 경향이 나타났다. 그러나, 전반적으로 무선온도계측 시스템에 의한 콘크리트 부재의 부위별 온도계측은 양호하게 이루어졌으며, 당초 수화열 해석결과를 토대

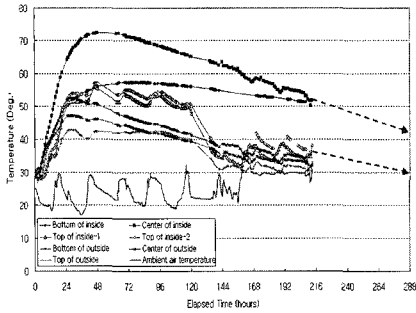


그림 6. 무선온도계측에 의한 양생관리 사례(1)

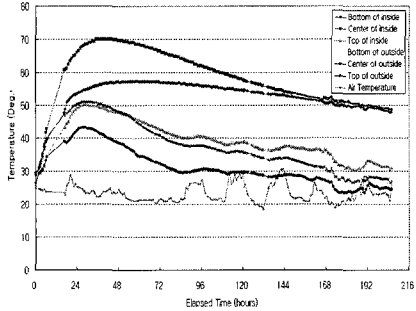


그림 7. 무선온도계측에 의한 양생관리 사례(2)

다. 따라서, 현장 콘크리트의 타설, 온도 계측 및 양생관리에 앞서 수화열 해석프로그램에 의한 온도해석 및 응력해석을 수행하였으며, 그 결과 부재 중심부에 있어서의 최고온도는 70°C, 중심부와 표면부 간의 온도차는 25°C 이내로 관리되도록 양생목표를 정하였다.

〈그림 6〉 및 〈그림 7〉에 콘크리트 타설 시점부터 경과시간별로 본 무선온도계측 시스템에 의한 부재의 온도이력 측정 결과를 나타냈다. 전반적으로 콘크리트의 실시간 온도이력은 양호하게 계속되었으나, 〈그림 6〉에서 알 수 있듯이 슬래브 중앙부의 상부표면 콘크리트 온도가 120 ~ 144 시간 경과시 급격히 하강하는 패턴을 보였다. 이는 강우로 인하여 표면보온을 위해 덮었던 양생매트와 방수천막 내부로 빗물이 유입되면서 상부 표면이 급격히 냉각된 데 따른 것이며, 본 무선온도계측 시스템의 가장 큰 특징인 “실시간 콘크리트 온도의 변동 상황에 대한 모니터링”이 가능함으로써, 현장으로부터 약 300 m 정도 떨어진 현장사무실 내의 컴퓨터를 통하여 이를 확인하고 빗물의 유입을 막기 위한 조치가 조기에 취해짐으로써 더 이상의 급속

한 온도하강이 없이 적절한 수준으로 온도를 유지할 수 있었다. 뿐만 아니라, 〈그림 6〉에 점선으로 나타냈듯이 콘크리트를 타설한 지 9일 정도 경과한 시점까지 측정된 콘크리트의 온도이력과 외기온도의 변동 경향으로부터 이후의 콘크리트 온도변화를 추정할 수 있었으며, 적기에 매트기초 측면부의 거푸집을 제거하는 것이 가능하였다.

앞서 언급한 매트기초와 동일한 규모의 매트기초 부재에 대한 콘크리트 타설 및 무선온도계측 시스템에 의한 양생관리가 수행되었으며, 〈그림 7〉에 나타난 바와 같이 콘크리트의 온도이력 측정과 양생관리에의 효용성이 확인되었다.

3.3 슬립폼 공법에 의한 벽체 콘크리트(광양항 3-1 컨테이너터미널 - 케이스 제작 현장)

표 4. 공사개요

· 현장명 : 광양항3단계1차 컨테이너터미널
· 발주처 : 조달청
· 공사기간 : 2002. 9. 2 ~ 2006. 6. 13
· 소재지 : 전남 광양시 도이동 104
· 공사개요(케이스 제작 관련) : - 철근콘크리트 케이스 (1,186M, 5170톤급 38함)

적용대상인 광양항 3단계 1차 컨테이너터미널의 케이스 제작현장에 대한 개요는 표에 나타난 바와 같으며, 제작되는 케이스는 1함당 5,170톤에 이르는 38개의 대형 철근 콘크리트 구조체이다.

케이스는 슬립폼 공법에 의해 8 ~ 12 분당 1 스트로크(2.5 cm)씩 상승시키는 속도로 1일 24시간 내내 연속적으로 슬립

폼 내에 콘크리트를 타설하고 양생하여 약 5 ~ 7일의 공정으로 가로 35 m, 세로 15 m, 높이 22 m 크기로 제작된다. 이와 같은 슬립폼 공법에 의한 케이스 제작에 있어서 1함당 제작공정에 영향을 미치는 가장 중요한 요인 중의 하나가 콘크리트의 응결에 따른 굳기라고 할 수 있으며, 콘크리트의 응결시간은 배합조건을 비롯한 다른 조건들이 동일한 경우 주변온도에 의해 가장 크게 영향을 받는다고 할 수 있다. 또한, 약 1 m 높이의 슬립폼 셔터로부터 외기에 노출된 이후의 계속양생에 의한 강도발현 및 부재의 단면 깊이에 따른 온도구배로 인한 온도균열의 발생여부와 관련하여 콘크리트의 온도이력에 대한 관리는 필수적이라 할 수 있다.

이에 본 무선온도계측 시스템을 〈그림 9〉와 같이 적용하였으며, 슬립폼 셔터 내의 깊이별 콘크리트 온도와 슬립폼 표면 온도 및 구조체 내부의 격실 공간온도 등을 실시간으로 모니터링하여 적정한 슬립폼 셔터 상승속도를 유지하고 있으며, 시간경과에 따른 콘크리트 내부의 온도이력으로 부터 콘크리트의 강도를 추정하는 등 최적의 조건으로 양생관리를 수행하고 있다. 무선온도계측 시스템에 의한 실시간 온도이력 계측결과를 〈그림 10〉 및 〈그림 11〉에 나타냈으며, 특히 〈그림 10〉에 나타난 바와 같이 슬립폼 셔터에 대한 급열양생이 일시적으로 중단되어 슬립폼 셔터 표면의 온도 및 셔터 내부의 콘크리트 온도가 급격히 하강하는 상황에서도 주요 부위에 대한 실시간 온도계측을 통해 신속히 대처할 수 있었다.

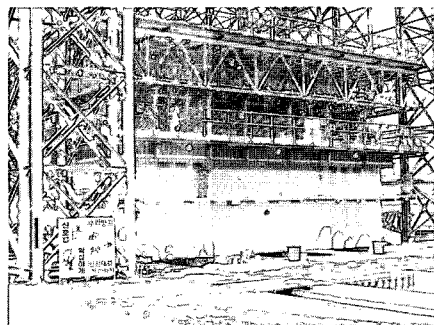


그림 8. 슬립폼에 의한 케이스 제작 장면

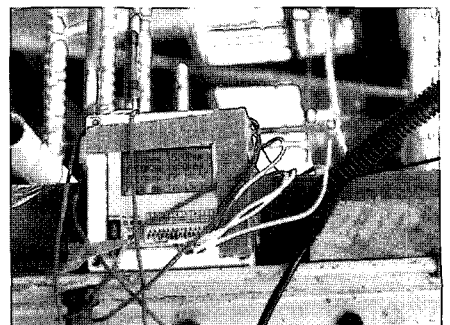


그림 9. 온도측정용 데이터로거 현장 설치

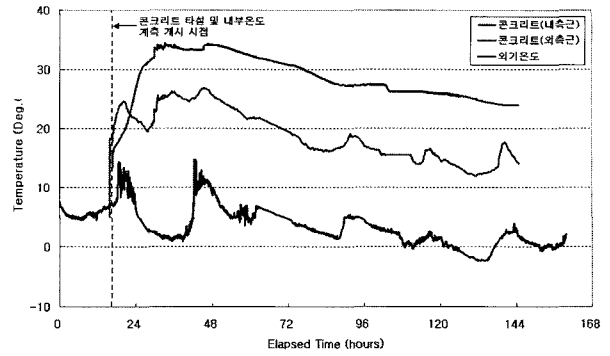
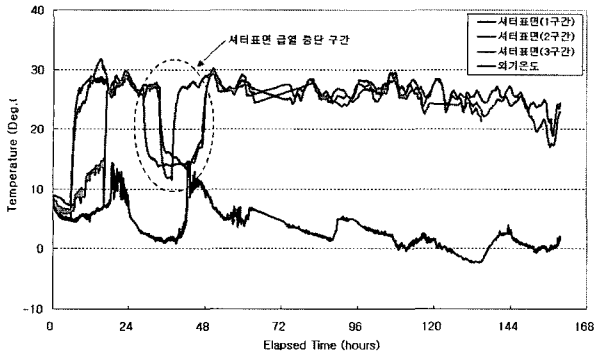


그림 10. 케이스 콘크리트의 온도계측 결과(1)

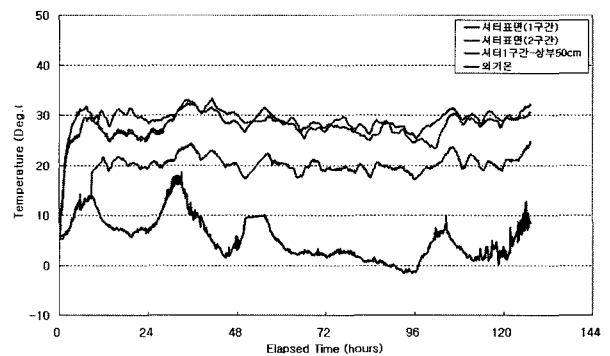
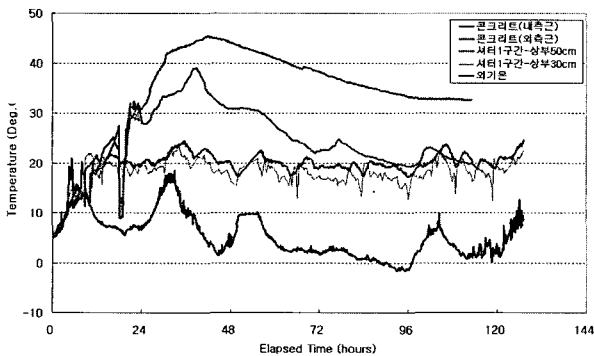


그림 11. 케이스 콘크리트의 온도계측 결과(2)

4. 맺음말

이상에서 현대건설(주) 기술연구소가 개발한 무선방식에 의한 콘크리트 온도계측 시스템에 대해 간단히 소개하고 실제로 현장에서 콘크리트의 양생관리를 위해 적용했던 사례를 제시하였다. 위에서 언급한 바와 같이, 무선 송수신 모듈과 서미스터 방식의 센서를 이용한 본 무선온도계측 시스템은 현장적용에 앞서 데이터 로거에 의한 온도계측의 정확도 및 데이터 전송의 연속성에 대해 수백만 회의 검증과정을 거쳐서 구현되었으며, 실제 현장 콘크리트를 대상으로 하여 기존의 열전대 타입 센서를 이용하는 자동온도기록계에 의한 계측값과의 비교에서도 거의 동일한 결과가 얻어졌다.

최근 들어 철근 콘크리트 구조물이 대형화되고 초고층화됨에 따라 매스 콘크리트나 고강도 콘크리트의 적용이 증가하고 있으며, 동절기의 콘크리트 공사 수행도 보편적인 현상이 되었다. 이러한 콘크리트 들은 일반적인 환경조건하의 부재단면이 작은 콘크리트와는 달리 초기재령에 있어서의 온도이력이 외기온과는 매우 큰 차이

를 보일 뿐만 아니라, 부재의 단면깊이에 따른 온도차이로 인한 균열발생 가능성을 내포하고 있어 외기온에 대한 계측과 함께 콘크리트 자체의 온도계측관리가 현장시공 관리에 있어서 매우 중요한 사항이 되었다.

본고에서 다룬 무선온도계측 시스템은 그 자체만으로도 콘크리트 온도의 급격한 변화와 양생관리 상황을 실시간으로 확인하고 적절한 조치를 취하는데 매우 유용한 것으로 판단되며, 나아가 외기온도조건 및 콘크리트의 시공조건을 고려한 시공전 온도이력 시뮬레이션, 양생 중의 온도계측관리, 품질관리 및 확인 등이 가능한 "현장 품질관리 시스템"의 구축에 있어서 중추적인 역할을 할 것으로 판단된다.

한편, 이와 관련하여 당 연구소에서는 실시간으로 계측된 콘크리트 온도로부터 콘크리트의 성숙도(Maturity)를 산정하고 구조체의 강도발현정도를 추정할 수 있는 "구조체 콘크리트의 양생온도 및 강도 관리 시스템"을 최근 구축하였으며, 무선방식에 의한 구조체 콘크리트의 온도계측과 인터넷망을 통한 계측자료의 축적은 물론 웹상에서 양생관리 전문가와 데이터를 공

유함으로써 합리적인 현장 콘크리트의 품질관리가 가능하게 되었다. 금번 구축된 시스템에 대해서는 향후 현장적용 및 검증과정을 거쳐 그 적용방안에 대해 소개할 예정이다. □

참고문헌

1. 김형래, 정하선, "IT 기술을 이용한 콘크리트 시공관리", 콘크리트학회지, Vol.14, No.3, 2002. 5, pp.24~27.
2. 김형래 외, "성숙도 개념을 이용한 한중콘크리트의 양생관리 프로세스에 관한 연구", 대한건축학회논문집 구조계, Vol.19, No.10, 2003. 10, pp.51~58.
3. 김형래, 조호규, "무선온도계측에 의한 현장타설 콘크리트의 양생온도관리", 대한건축학회 가을학술발표논문집, Vol.23, No.2, 2003. 10, pp.383~386.
4. 十河 茂幸, "콘크리트技術におけるコンピュータ利用の現象と展望", 콘크리트工學, Vol.38, No.1, 2000. 1, pp.12~16.
5. 김영해 역, "센서 인터페이스 - 온도·습도 센서 활용편", 기전연구소, 1993.