

무선 센서네트워크방식을 활용한 구조체 콘크리트의 양생온도관리

Curing Temperature Management of In-Placed Concrete at Early-Ages
by Application of the Wireless Sensor Network



김형래*
Hyung-Rae kim



조호규**
Ho-Gyu Cho



전재홍***
Jae-Hong Jeon



김인수****
In-Soo Kim

1. 서 론

초기 재령의 콘크리트에 있어서 온도관리는 균열발생방지 뿐만 아니라, 소요재령에 요구강도가 확보되도록 하기 위해 가장 중요한 양생관리항목 중의 하나이다.

특히, 콘크리트 내부의 온도는 양생관리의 목적에 따라 부재의 중심부와 표면부 사이의 온도차가 일정수준 이상으로 커지지 않도록 관리되어야 하며, 동해를 입기 전에 소요강도가 확보되도록 보온이나 급열양생을 통해 관리되어야 한다. 최근에는 부재의 크기가 매우 크고 고강도콘크리트가 적용되어 부재의 온도이력이 외기온의 변화와 크게 다른 구조체의 강도발현을 추정하기 위해 구조체 콘크리트의 온도관리가 중요하게 인식되고 있다.

불과 5~6년 전까지만 해도 이러한 목적으로 수행되는 구조체 콘크리트의 온도계측을 위해서는 콘크리트 타설 이전에 미리 매설한 온도센서를 현장에 설치한 데이터로거에 연결하여 측정하고 저장된 데이터를 사후 확인하는 방식이 유일했다고 할 수 있다. 또한 이러한 유선방식의 계측마저도 현장에서의 기기관리의 어려움과 낮은 데이터 활용도 등으로 인해 중요한 구조물을 제외하면 건축현장에서는 거의 이루어지지 않았다.

그러나 21세기에 들어 국내 IT산업이 급속히 발달함에 따라 건설현장에 있어서 물류·자재관리 등을 중심으로 무선 송수신 시스템이 본격적으로 적용되기 시작하였으며, 구조체 콘크리트의 온도계측 및 양생관리에 IT기술을 접목시키기 위한 연구개발도 활발히 진행되어 왔다.

현대건설은 2002년 하반기에 국내 최초로 RF모형을 이용한 무선온도계측시스템을 개발하였으며, 그동안 아파트현장에서의

한중콘크리트 양생관리를 비롯하여 부산베네시티현장(2003, 매스 콘크리트 수화열관리), 울진복합화력발전소(2003, 매스 콘크리트 수화열관리), 광양항 컨테이너부두 케이슨제작현장(2003, 슬립폼에 의한 연속타설 콘크리트 양생온도관리), 목동하이페리온-2(2004, 매스 콘크리트 수화열관리), 대구하이페리온(2004, 매스 콘크리트 수화열관리) 등에 적용해 왔다.

그러나 이러한 현장실용화에도 불구하고 무선온도계측 시스템을 전면적으로 확대 적용함에 있어 유효 송수신거리 및 장애물 유무에 따른 데이터 획득의 한계를 내포하고 있었다.

이에 최근 들어 기존의 RF모형 방식에 네트워크 방식을 접목하여 장애물의 유무 및 이격거리에 관계없이 적용 가능한 신개념 센서네트워크 방식의 무선계측 시스템을 구축하였으며, 이를 슬립폼에 의해 연속시공하는 200m높이의 타워 구조체에 적용함으로써 그 적용성을 검증하였다.

또한 계측된 콘크리트의 온도이력으로부터 콘크리트의 성숙도에 의해 압축강도를 추정하는 것이 가능함으로써 표준양생공시체와는 온도이력이 상이한 구조체 콘크리트의 압축강도를 추정하고, 이를 토대로 거푸집탈형 및 후속공정의 진행여부를 판단할 수 있는 '콘크리트용 무선온도계측 및 양생관리 시스템'을 구축하였다.

본 고에서는 현대건설이 구축한 시스템과 현재까지의 적용사례를 소개하고, 향후의 연구진행방향을 제시하고자 한다.

2. RFID/USN의 개요¹⁾

2.1 RFID(radio frequency identification)

RFID란 마이크로칩(micro chip)을 내장한 카드(card), 라벨(label), 태그(tag) 등에 저장되어 있는 데이터를 무선주파수를 이용하여 리더기와 송수신 기능을 가진 자동인식기술(automation identification)의 한 분야로서 사물에 부착되어

* 정회원, 현대건설 건축사업본부 차장

hr6460@hdec.co.kr

** 현대건설 건축사업본부 부장

*** 현대건설 건축사업본부 상무

**** 현대건설 건축사업본부 전무

있는 태그로부터 정보를 수집, 저장, 추적함으로써 위치 측정, 원격저리, 관리, 정보 교환 서비스를 제공하는 기술을 말한다.

바코드(bar code)나 자기 인식장치 등 기존 방식의 결합을 제거하고 사용의 편리성, 생산방식의 변화, 소비자의 의식변화, 문화 및 기술의 진보에 따라 활용범위가 비약적으로 증가되고 있는 차세대 핵심기술이다. 유통, 물류의 지능 네트워크화 및 보안, 안전, 환경관리업무의 혁신을 가져올 수 있다.

이러한 RFID시스템은 리더기(reader), 데이터를 송/수신할 수 있는 안테나(antenna), 데이터를 저장하고 교환하는 태그(tag), 서버(server) 등으로 구성된다.

2.2 센서태그(sensor tag) 및 USN(ubiquitous sensor network)

센서 태그(sensor tag)는 기존의 수동형 RFID태그에 외부환경정보 획득을 위한 센서와 전원 공급을 위한 필름 전지를 결합한 라벨형태의 반능동형 및 능동형 RFID태그를 의미한다. 태그 칩, 안테나, 센서 및 박형 전지가 결합된 구조이다.

USN이란 '필요한 모든 곳에 센서태그(전자태그)를 부착하여 사물의 인식정보를 기본으로 주변의 환경정보(온도, 습도, 오염, 균열정보 등)까지 탐지하고, 이것을 실시간으로 네트워크에 연결하여 정보를 관리하는 것'을 말한다²⁾.

USN은 정부중심으로 주도되고 있는 IT 839 전략의 핵심인 3대 인프라의 구성요소 중 하나이며, 이러한 USN을 구현함에 있어서 가장 핵심이 되는 기술은 무선 센서네트워크(WSN: wireless sensor network)기술로서 '많은 센서(sensor)들이 무선(wireless) 방식을 통해 네트워크(network)에 연결되어 있는 것'으로 간단히 정의할 수 있다. 즉, 무선 센서네트워크 기술은 컴퓨팅 능력과 무선통신 능력을 갖춘 센서 노드를 자연이나 현장 등에 뿌려 자율적인 네트워크를 형성한 후 획득한 센싱 정보를 무선 네트워크로 상호 송수신하고, 원격지에서 감시와 제어하는 용도로 활용할 수 있는 기술을 말한다.

USN분야에서 가장 대표적인 기술로서 근거리 무선통신 기술인 Zigbee를 들 수 있다. Zigbee는 AA배터리 두 개만으로 수개월 동안 수명을 유지할 정도로 전력효율이 좋으며, 10~10,000개의 센서네트워크를 구성할 수 있다. 또한 AD-hoc네트워크 특성을 가질 수 있어 기존의 블루투스(bluetooth)보다 더 큰 PAN(personal area network)을 구성할 수 있다는 장점이 있다.

이러한 센서네트워크의 궁극적인 목적은 모든 사물에 컴퓨팅 능력 및 무선통신 능력을 부여하여 '언제', '어디서나' 사물들끼리의 통신이 가능한 유비쿼터스 환경을 구현하는 것으로 생활의 모든 분야에 걸쳐 활용될 수 있으며, 현재 스마트 홈, 물류 및 유

통, 헬스케어, 국방, 로봇, 공장자동화 등에 시범 적용되고 있다. 특히 건설분야에 있어서는 시공 및 유지관리 단계에 USN기술을 적용하기 위한 연구가 진행되고 있으며, 일부 시범사업이 수행되고 있다.

3. RFID/USN에 의한 현장타설 콘크리트 양생관리

3.1 콘크리트 양생관리 시스템 구성

3.1.1 시스템의 구성

현대건설이 개발하여 실용화한 현장타설 콘크리트 양생관리 시스템의 구성도는 <그림 1>과 같으며 크게 온도센서, 센서노드, Zigbee RF모듈, 온도이력의 PC화면 출력 및 저장, 인터넷을 통한 서버저장 및 자료공유 등 5개 단계로 구성되어 있다.

1) 온도센서

일반적으로 실험실에서 이루어지는 콘크리트의 온도측정을 위해서는 측정범위나 정도(精度) 등에서 우수한 것으로 확인된 열전대(thermo-couple, T-Type)가 주로 사용되고 있으나, 비용이 고가이며 건설현장에서 적용하기에는 무리가 있다. 따라서, 본 시스템에서는 $-30 \sim 100^{\circ}\text{C}$ (오차범위: $\pm 1^{\circ}\text{C}$)까지 측정가능한 서미스터(thermister, 저항값 15 k Ω)를 적용하였다.

서미스터는 물리적 특성이 열전대와 비슷하면서도 비용이 훨씬 저렴할 뿐만 아니라, 콘크리트의 수화열에 의한 온도 조건 및 국내의 동절기 외기온 조건을 고려할 때 가장 적절하다고 판단하였기 때문이다.

2) 센서 노드(sensor node, 데이터 로거)

센서노드는 1대당 8개의 채널을 동시에 측정할 수 있도록

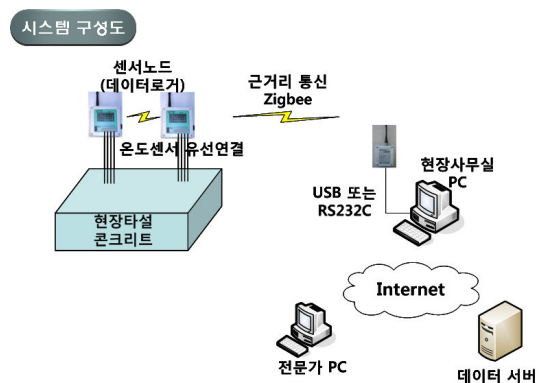


그림 1. RFID/USN 양생관리시스템의 구성도

구성하였으며, 온도 데이터는 신호처리부(온도센서를 작동시키기 위한 정전압부와 잡음제거를 위한 필터회로로 구성)를 통해 아날로그-디지털 변환기 및 마이크로 프로세서를 거쳐 내부 저장장치에 저장되는 동시에 Zigbee통신모듈을 통해 현장사무실로 전송된다. 전원보드는 사용자가 입력한 가동시간에만 작동하도록 전원을 제어하는 것으로 축전지의 전력소모를 최소화하기 위한 절전모드를 채택하였다.

3) Zigbee RF 모듈

측정된 데이터는 Zigbee RF모듈을 통해 현장 사무실의 PC(또는 게이트 웨이) 및 인근의 다른 데이터 로거와 상호 통신하도록 구성되어 있다.

Zigbee 통신방식은 기존의 무선 센서네트워크와 달리 가정, 사무실 등에서 저가, 저속, 저전력으로도 구동이 가능한 근거리 통신으로 주목받고 있는 기술로서, 전송 데이터량은 적지만 하나의 배터리로 수개월에서 수년간 지속될 수 있는 장점과 네트워크 유연성과 확장성이 뛰어난 근거리 통신으로 주목받고 있는 기술이다.

4) 온도이력의 PC화면 출력 및 저장

Zigbee 통신모듈을 통해 수신된 데이터는 RS232C케이블을 통해 사무실내의 컴퓨터(PC)와 연결되며, 양생관리프로그램<그림 2>에 의해 콘크리트의 온도변화 상황을 실시간으로 컴퓨터 모니터에 출력함으로써 콘크리트나 측정대상에 이상 징후가 감지될 경우 현장요원들이 즉각적으로 대응책을 강구할 수 있도록 하였다.

5) 데이터의 서버저장 및 공유

현장에서 측정된 데이터는 실시간으로 개인용 PC에 자동 저장, 설정조건에 따라 웹서버에도 저장되도록 하여 현장뿐만 아니라 본사 등 관련 전문가가 실시간으로 측정된 온도상황을 파악할 수 있도록 하여 콘크리트 양생중의 이상

유무에 대한 자문 및 대책수립이 가능하도록 하였다.

3.1.2 콘크리트 양생관리 프로그램

1) 프로그램의 구성

현장사무실의 개인용 컴퓨터에 설치되는 콘크리트 양생관리 프로그램은 무선으로 전송된 온도계측 데이터를 실시간으로 화면에 출력하는 기능과 측정대상 콘크리트의 성숙도 및 압축강도를 추정하는 기능을 갖고 있으며, 측정대상 콘크리트 및 부위에 관한 기본데이터 입력부분, 출력 데이터의 선택부분, 디스플레이 화면 등 3가지 요소로 구성되어 있다. 데이터 입력부분에서는 콘크리트의 배합조건 등 콘크리트와 관련된 기본 정보를 입력하며, 콘크리트의 배합조건에 따른 계수 등을 직접 입력할 수 있도록 하였다. 디스플레이 화면부분에서는 현장에서 실시간으로 측정된 온도이력과 이를 콘크리트의 성숙도나 강도추정 값으로 나타내는 등 원하는 화면을 선택할 수 있다.

2) 콘크리트의 성숙도 및 압축강도 추정

구조체에 적용된 콘크리트는 일정한 재령에 도달하였을 때 설계강도를 만족하도록 관리해야 함은 물론이며, 초기재령에 있어서도 한중콘크리트의 동해방지를 위한 양생방법의 적정성 판단, 슬립폼 공법 적용시 형틀의 상승속도 결정, 형틀의 제거시기 결정, 프리스트레스를 도입하는 시기 및 공장제품 등의 탈형시기 결정 등을 위해 소요강도를 정하고 관리하는 것이 매우 중요하다.

그런데 콘크리트 구조체 자체의 강도를 직접 평가하는 것이 곤란하므로 콘크리트 타설시 동일한 콘크리트로 제작된 공시체에 의해 간접적으로 관리하고 있다.

실제로 형틀내에 부어 넣은 콘크리트는 시멘트의 수화열에 의한 온도이력, 외기온, 양생방법 등의 영향에 의해 표준양생 공시체 또는 현장양생 공시체와는 동일하지 않은 조건 하에서 양생되며, 특히 매스 콘크리트나 고강도콘크리트에서는 재령별 강도발현 특성에서 더욱 큰 차이를 나타낸다. 이와 같은 문제점을 고려하여 지금까지 다양한 종류의 파괴 및 비파괴 시험에 의한 콘크리트 강도추정 방법들이 제안되어 왔다.

이에 본 양생관리 프로그램에서는 구조체로부터 실시간으로 측정하는 온도이력으로부터 콘크리트의 강도추정이 가능한 성숙도법을 채용하였다.

즉, 무선 센서네트워크에 의해 계속되어 전송된 온도데이터는 콘크리트 양생관리 프로그램에 의해 실시간으로 온도변화 그래프로 변환된 후 온도와 시간의 관계로부터 콘크리트 성숙도를 산출하고 압축강도를 추정하여 제시하도록 구축되었다.

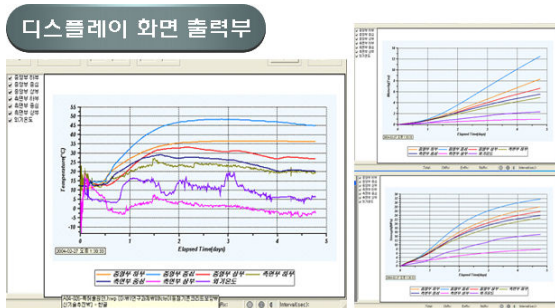


그림 2. 콘크리트 양생관리 프로그램

1) 콘크리트의 성숙도 산출

콘크리트의 성숙도는 아래의 식(1) 및 식(2)에 나타낸 바와 같이 일반적으로 널리 활용되고 있는 Nurse-Saul함수와 Arrhenius식에 의한 등가재령으로 산출하였다.

식(1) 및 식(2)에 나타난 콘크리트의 등가재령(T_{es} 또는 T_{ea})은 시멘트의 수화열 및 외기온 조건이나 양생방법, 부재의 단면크기 등의 영향으로 온도이력이 일정하지 않은 구조체 콘크리트의 양생정도(또는, 성숙도)를 표준양생조건인 20°C 내외의 수중에서 양생된 공시체의 성숙도에 해당하는 표준양생기간으로 변환하여 나타낸 값이다. 즉 콘크리트의 타설 시점부터 일정시점까지의 구조체의 온도이력을 측정하면 그 시점까지의 콘크리트의 등가재령을 산출할 수 있다. 본 시스템에서는 이렇게 산출된 등가재령을 표준양생 콘크리트의 재령별 강도 발현식에 대입함으로써 압축강도를 추정하였다.

$$T_{es} = \frac{\Sigma(\theta - T_0)\Delta t}{(T_r - T_0)} \dots\dots\dots (1)$$

여기서, T_{es} : Nurse-Saul함수에 의한 등가재령(hr 또는 day)
 T_r : 등가재령 산정을 위한 표준양생온도(°C), 20°C
 θ : 일평균기온(또는 평균콘크리트온도)(°C)
 T_0 : 기준온도(°C), 일반적으로 -10°C를 적용
 Δt : 온도측정 시간간격

$$T_{ea} = \int_0^t \exp\left(\frac{E}{R}\left(\frac{1}{T_s} - \frac{1}{273 + T_a}\right)\right) dt \dots\dots\dots (2)$$

여기서, T_{ea} : Arrhenius식에 의한 등가재령(hr 또는 day)
 T_a : dt 시간 동안의 콘크리트의 평균양생온도(°C)
 T_s : 293°C, 절대온도(K) + 20°C
 E : 활성화에너지(시멘트 종류에 따른 고유값)로서 1종 시멘트의 경우
 $T_a \leq 20^\circ\text{C}$ 일때, $E = 33.5 + 1.47(20 - T_a)$ KJ/mol
 $T_a \geq 20^\circ\text{C}$ 일때, $E = 33.5$ KJ/mol
 R : 기체상수 8.314 J/mol·K

2) 구조체 콘크리트의 압축강도 추정

본 시스템에서 채용한 콘크리트의 재령별 강도발현 추정식은 식(3)에 나타낸 바와 같으며, ACI 강도추정식의 수정식을 활용하였다. 즉, 우변의 재령(t_e)에 실제재령(t) 대신 온도이력으로부터 산정된 등가재령(T_{es} 또는 T_{ea})을 대입하는 것으로 변환하였다. 재령28일의 압축강도란 현장적용

한 콘크리트를 표준양생한 재령28일의 평균압축강도를 의미하나 구조체의 부위에 따른 온도차를 고려하여 안전측으로 강도추정을 하기 위해서는 레미콘의 호칭강도를 적용하는 것도 가능하다.

$$f'_c(t) = \frac{t_e}{a + bt_e} f'_c(28) \dots\dots\dots (3)$$

여기서, $f'_c(t)$: 실제재령 t일에 있어서 콘크리트 압축강도
 t : 임의의 실제재령
 t_e : 임의의 재령 t일에 있어서의 등가재령
 $f'_c(28)$: 재령 28일의 압축강도. 구조체의 모든 부위에 있어서 안전측으로 강도추정을 하기 위해 적용콘크리트의 호칭강도를 적용하는 것이 적정함.
 a, b : 콘크리트의 배합조건에 따른 계수로서 보통 포틀랜드시멘트(OPC)를 적용한 일반배합의 경우 각각 4.0, 0.85를 적용. 단, OPC적용 콘크리트의 경우에도 조강성혼 화제를 적용하는 경우에는 조기강도발현성이 우수하므로, 실제로 현장에 적용하는 콘크리트의 표준양생재령 7일 및 28일 강도로부터 계수값을 산정하는 것이 정확함.

본 시스템의 양생관리 프로그램에 의해 온도이력을 이용하여 추정된 구조체 콘크리트의 압축강도와 실제 구조체로부터 채취한 코어의 강도를 비교한 결과를 <그림 5>에 나타냈으며, 추정결과와 실제 구조체의 압축강도 발현경향이 매우 유사한 것을 확인할 수 있다.

실제로 각 현장에 적용되는 콘크리트로 제작된 현장 양생공시체의 온도이력에 의한 성숙도와 압축강도의 관계를 파악함으로써 강도추정결과의 정확도를 높일 수 있다<그림 3>.

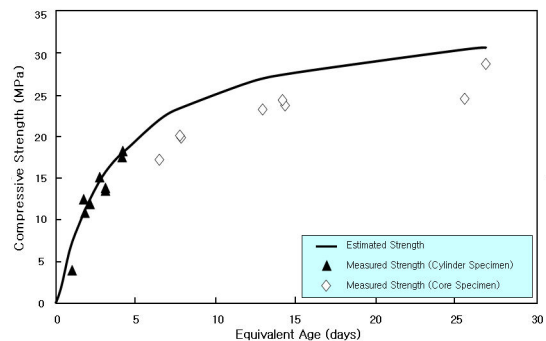


그림 3. 등가재령에 따른 추정강도와 공시체 및 코어시편체의 재령별 강도변화 비교

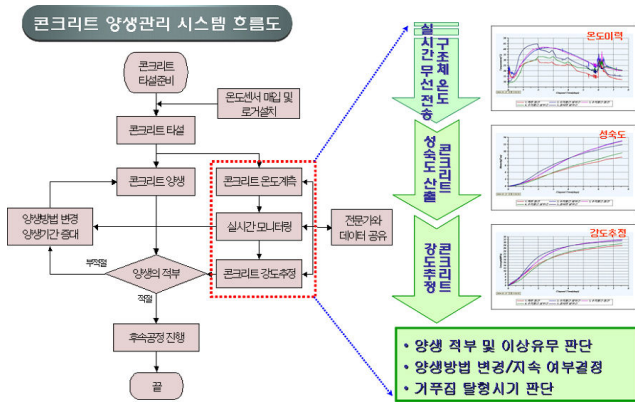


그림 4. 콘크리트 양생관리시스템에 의한 현장품질관리 흐름도

3.2 양생관리시스템에 의한 구조체의 품질관리

이상에서 기술한 무선 센서네트워크에 의한 양생관리시스템과 그를 이용하여 실시간 계측한 온도로부터 구한 성숙도에 의해 콘크리트의 압축강도를 추정하는 프로세스로 이루어지는 구조체 콘크리트 품질관리의 진행흐름을 나타내면 <그림 4>와 같다.

현장에서 콘크리트 타설 전에 콘크리트의 온도이력을 측정하고자 하는 부위에 온도센서를 매설한 후, 현장에 설치한 소형 로거에 온도센서를 연결하여 온도계측을 개시한다. 콘크리트 타설이 개시되면 타설시 콘크리트온도와 시간경과에 따른 온도이력의 실시간 계측이 이루어지며, 측정된 온도값은 동시에 현장사무실

의 컴퓨터에 연결된 수신기로 전송된다. 전송된 데이터는 현장 컴퓨터에 자동으로 저장되고 화면으로 출력되는 동시에 인터넷망을 통해 서버에 저장됨으로써 사내의 콘크리트 전문가와 데이터를 공유하게 되어 콘크리트의 양생관리와 관련한 기술적인 지원을 받을 수 있다.

현장의 품질관리 담당자는 실시간으로 구조체 콘크리트의 온도변화를 확인하는 동시에 임의의 시점에 있어서 콘크리트의 강도발현정도를 추정할 수 있으며, 외부 기상환경조건의 변화 등을 포함한 각종 현장상황에 대응하여 양생관리를 할 수 있다. 이러한 과정을 통하여 실시간으로 양생관리의 적정성에 대한 판단을 하고, 추가양생기간 또는 후속공정의 착수시기 등을 결정하는 것이 가능하다.

구조체 콘크리트에 대한 전반적인 품질관리시스템 구축을 위해서는 시공 전에 적정 배합수준을 결정하는 것이 필수적이다. 특히 최근 골조공사의 공기단축과 관련하여 강도조기발현성 콘크리트의 적용과 재령초기의 양생방법에 대한 검토가 활발히 진행되고 있다. 이에 본 시스템을 콘크리트의 수화열해석 프로그램과 연동하여 콘크리트 배합선택에 앞서 외기온과 구조체의 단면크기, 양생방법 등을 고려하여 온도이력을 추정하고, 예상되는 콘크리트의 온도이력으로부터 재령별 강도발현추이를 시뮬레이션하는 프로세스를 구축하였다. <그림 5, 6>은 그와 같은 사전검토 시뮬레이션의 예를 나타낸 것이다.

4. USN을 활용한 콘크리트의 품질관리 적용사례

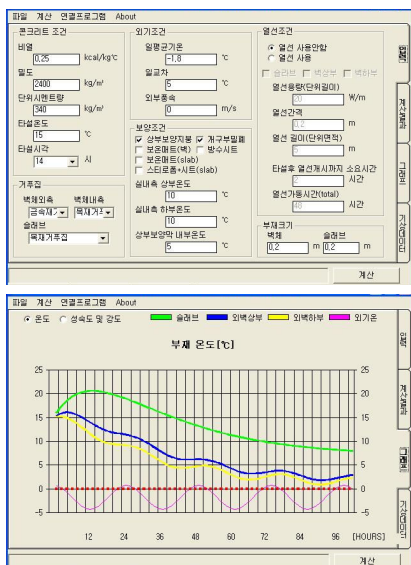


그림 5. 동절기 외기온조건하에서의 콘크리트 타설시 온도이력의 추정 결과

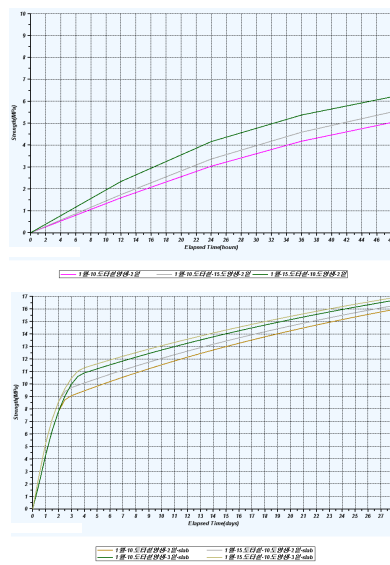


그림 6. 동절기 양생조건별 벽체 및 슬래브 콘크리트의 강도발현 시뮬레이션

본 무선 센서네트워크를 활용한 콘크리트 양생관리 시스템에 의해 온도계측 및 양생관리를 수행한 사례를 <표 1>에 나타냈다.

4.1 저온기(한중) 콘크리트의 양생관리

당초 본 시스템은 동절기의 콘크리트 동해방지를 위한 초기 양생관리용으로 개발되었으며, 시험적용을 거쳐 일평균 외기온이 10℃ 미만인 저온기에 있어서 매트기초 콘크리트를 타설할 때 온도관리를 위해 적용된 것이 최초의 사례라고 할 수 있다. <그림 7>에 개발초기 시스템의 현장설치 상황을 나타냈으며, 온도센서의 매설은 부재의 중심부와 표면부 간의 온도 차이를 관리하고자 매트기초 슬래브의 중앙부와 외곽부를 대상으로 단면 깊이 방향으로 상부(상부근), 중간(중심부), 하부(하부근)에 각각 설치하였다.

4.2 서중 매스 콘크리트 양생관리

매스 콘크리트의 경우 시멘트의 수화열에 의한 온도상승으로 인해 콘크리트 타설 후 온도변화에 따른 균열발생 가능성이 높으며

로, 사전에 수화열해석을 통해 적정한 배합과 표면보양방법을 결정하였으며, 타설 후의 양생관리를 위해 실시간 계측을 하였다. 부재 중심부와 표면부, 중심부와 외곽 측면부 사이의 온도차 관리 기준으로서 25℃를 설정하였는바 <그림 8>에 나타난 바와 같이 외기온 변화에 따른 콘크리트의 중심부와 표면부의 온도이력을 모니터링하면서 표면부에 대한 보온조치를 취하는 것이 가능하였다.

4.3 슬립폼 적용 구조체 콘크리트의 양생관리

4.3.1 컨테이너 부두용 대형 콘크리트케이스 시공

본 시스템에 의해 양생관리방안이 적용된 콘크리트 케이스는 1함당 5,170톤에 이르는 38개의 대형 철근콘크리트 구조체로서, 슬립폼 공법에 의해 8~12분당 1스트로크(2.5cm)씩 상승시키는 속도로 연속적으로 콘크리트를 타설하고 양생하여 가로 35m, 세로 15m, 높이 22m크기의 케이스가 약 5~7일의 공정으로 제작되었다<그림 9>. 이와 같은 슬립폼 공법을 적용한 대형 케이스 제작에 있어서 1함당 제작공정에 영향을 미치는 가장 중요한 요인 중의 하나가 콘크리트의 응결에 따른 굳기라고 할 수 있으며, 콘크리트의 응결시간은 배합조건을 비롯한 다른 조건들

표 1. 무선 센서네트워크를 이용한 구조체 콘크리트 양생관리시스템 적용 사례

적용 현장	대상 부위	적용 시기	특징
중로주상복합빌딩	슬래브	2002.12 ~ 2003.2	한중 콘크리트 시공에 따른 동해방지, 시험적용
부산 배내시티	매트기초	2003.2 ~ 2003.3	저온기 매스 콘크리트 수화열관리 단면두께 2.0~2.5m 구간, 송수신거리 300m
율촌복합화력	가스터빈 기초	2003.6 ~ 2003.7	서중 매스 콘크리트 수화열관리 단면두께 2.0m 구간, 송수신거리 300m
광양항 컨테이너 터미널	대형케이스 벽체	2003.9 ~ 2005.4	슬립폼 공법적용, 벽체단면 70cm, 높이 22m
이천 증일동 아파트	벽체, 슬래브	2003.12 ~ 2004.2	동절기 콘크리트 급열양생 관리
목동하이패리온-2	매트기초	2004.2	저온기 매스 콘크리트 수화열관리
대구하이패리온	매트기초	2004.9	매스 콘크리트 수화열관리
이천 초고속 엘리베이터 테스트타워	탑상형 벽체	2008.8 ~ 2008.10	슬립폼 공법적용, 벽체단면 60cm, 높이 183m 센서네트워킹 방식으로 변경, 원거리 송수신가능
광주상무힐스테이트	슬래브	2008.10 ~ 2008.12	저온기 강도조기발현, 타설 후 18시간 내 벽체탈형, 39시간 내 슬래브탈형, 5일 사이클 공기
베트남 BITEXCO	코어월, 슬래브	2008.11 ~ 현재	서중 매스 콘크리트 수화열관리, 슬래브 거푸집 탈형강도 확인, 코어월 단면 1.5m

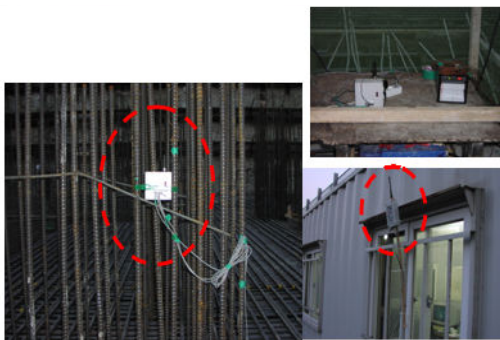


그림 7. 개발초기 시스템의 현장설치 상황

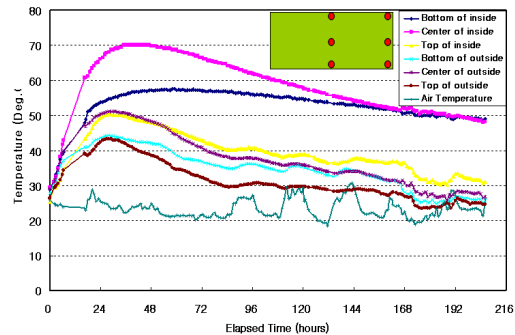


그림 8. 매스 콘크리트 온도계측/양생관리 사례



그림 9. 슬립폼에 의한 콘크리트 케이스 제작

이 동일한 경우 주변온도에 의해 가장 크게 영향을 받는다고 할 수 있다. 특히 적용기간이 동절기로서 외기온이 영하로까지 내려가는 조건하에서 약 1 m높이의 슬립 폼으로부터 외기에 노출된 이후의 계속양생에 의한 강도발현과 부재단면의 깊이에 따른 온도구배로 인한 온도균열의 발생 가능성 등을 고려할 때 콘크리트 온도이력에 대한 관리는 필수적이었다.

이에 슬립폼 내부의 깊이별 콘크리트 온도와 슬립폼 표면온도 및 구조체 내부의 격실 공간온도 등을 실시간으로 모니터링하여 적절한 슬립폼 상승속도가 유지되도록 하였으며, 시간경과에 따른 콘크리트 내부의 온도이력으로부터 콘크리트 강도를 추정하는 등 최적의 조건으로 양생관리를 수행하였다. 무선온도계측 시스템에 의한 실시간 온도이력 계측결과를 <그림 10>에 나타냈으며, 특히 슬립폼 표면급열이 일시적으로 중단되어 슬립폼 표면의 온도와 내부 콘크리트의 온도가 급격히 하강하는 상황에서도 주요 부위에 대한 실시간 온도계측을 통해 신속히 대처할 수 있었다.

4.3.2 초고속 엘리베이터 시험타워 시공

적용대상 초고속 엘리베이터 시험타워는 높이 183m에 이르는 수직 구조체로서, 수신기가 설치되어 있는 현장사무실과 송신부가 직접적으로는 보이지 않는 위치에 설치되었다. 무선온도계측기는 전파를 이용하여 송수신을 하므로, 본 시스템을 구성하고 있는 송신모들의 주파수가 1.4 GHz인 점을 고려할 때, 수신부와외의 사이에 장애물이 있는 경우에는 계측이 거의 불가능하다는 단점을 갖고 있다. 이에 기존의 1:1 직접 송수신 방식으로부터 센서노드(데이터로거)간의 네트워크가 가능한 메시방식으로 시스템을 구성하여 최초로 적용하였다. 그 결과 지상으로부터 200 m 높이에 이르는 구조체의 최상부에서 2개소를 대상으로 한 측정 및 관리가 가능하였다. 즉, 장애물이 있더라도 수신기와 가까운 쪽의 데이터로거 송신기가 다른 데이터로거 송신기의 측정데이터를 중계하여 데이터를 송신하는 것이 가능하였다.

슬립폼에 의한 수직 구조체의 연속타설 시공에 있어서는 콘크리트의 응결에 따른 슬립폼 상승속도를 유지하는 것이 가장 중요하며, 이에 따른 응결시간의 정량적인 평가가 매우 중요하였다. 특히 구조체의 단면이 커서 수화발열량이 많을 뿐만 아니라 구조

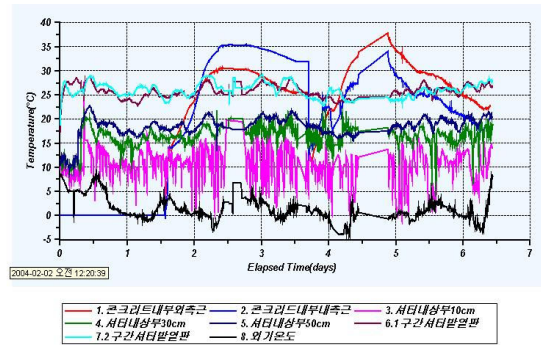


그림 10. 슬립폼에 의한 콘크리트 케이스 제작시 온도이력 계측결과



그림 11. 슬립폼에 의한 타워 콘크리트의 온도이력계측

체 내부공간의 온도가 높으므로 슬립폼 내부에서의 콘크리트 온도이력은 매우 높게 나타날 것으로 예상되었으며, 그로 인해 콘크리트의 응결속도가 일반적인 실온하에서의 시험체 응결속도와 큰 차이를 보일 것으로 예상되었다. 이러한 점을 감안하여 슬립폼 내부에서의 콘크리트 응결시간 예측과 이를 이용한 슬립폼 상승속도 유지 및 양생관리가 가능하도록 콘크리트의 양생온도조건을 고려한 초기응결속도를 정량화하여 양생관리에 반영하였다 <그림 11>.

4.4 강도조기발현 콘크리트의 구조체 강도관리


최근 골조공사의 싸이클타임 단축을 목적으로 벽체 및 슬래브의 거푸집 탈형시기를 앞당기기 위해 강도조기발현형 콘크리트의 적용이 활발하게 검토되어 실용화되고 있다. 이러한 거푸집 탈형시기를 결정하기 위해서는 구조체 콘크리트가 탈형강도를 확보했는가 확인하는 것이 매우 중요하다. 이를 위한 가장 현실적인 방법은 현장양생공시체를 제작하고 소요재령에 압축강도시험을 통해 강도를 확인하는 방법이지만, 공시체 제작과 시험에 소요되는 비용과 시간을 고려할 때 많은 어려움을 내포하고 있

다. 또한 부재의 단면이 크거나 고강도콘크리트가 적용되는 경우 현장양생공시체와 실제 구조체의 압축강도에는 큰 차이가 발생할 수 있다. 따라서 경제적이고 합리적인 콘크리트 배합선정은 물론, 현장양생공시체의 압축강도를 시험할 때 실패비용을 줄이기 위해서는 구조체콘크리트와 현장양생공시체의 압축강도 발현을 추정하는 것이 필수적이다.

<그림 12>에 강도조기발현 콘크리트의 양생관리를 위해 본 시스템을 활용한 사례를 나타냈다. 그림에서 알 수 있듯이 일평균 기온이 15°C 미만인 저온기에 있어서 콘크리트의 조기강도 발현을 위해 PC(폴리카보산)계 조강형 혼화제를 사용한 경우, 콘크리트 타설 후 24시간 이내에 구조체 콘크리트는 수화열에 의한 높은 온도이력을 갖는 것에 비해 현장양생공시체는 외기온과 동일한 수준의 온도이력을 보이는 것을 확인할 수 있다. 이에 본 시스템에 의해 계측한 현장양생 공시체의 온도와 구조체의 온도를 계측하고 일정시점에 성숙도 및 강도추정을 한 후, 현장양생공시체에 대한 압축강도시험을 통해 구조체 콘크리트의 압축강도를 추정하였다. 현재 구조체 콘크리트의 강도추정과 관련하여서는 현장양생공시체의 압축강도 측정결과와의 비교를 통해 안전적으로 활용하고 있으며, 향후 강도추정결과의 신뢰도 향상을 위한 현장데이터를 축적하고 있다.

5. 결 론

본 고에서 소개한 무선 센서네트워크 방식에 의한 콘크리트 양생관리시스템은 지난 몇 년간 많은 현장에서 실용화되고 개선되어 왔으며, 다양한 형태의 구조체에서 실시간 온도계측을 통한 양생관리와 그에 따른 균열예방, 계속시공 여부 판단을 위한 근거자료를 제시하는데 효과적으로 활용되어 왔다. 뿐만 아니라 단순히 실시간 온도계측을 넘어 계측된 온도데이터로부터 구조체 콘크리트의 압축강도 추정이 가능하도록 시스템을 구축함으로써 특수한 기상조건하에서 시공되는 구조체나 품질관리가 중요한 구조체에 한정되지 않고, 아파트를 비롯한 일반적인 콘크리트 구조체에서도 경제적이고 합리적인 방법으로 골조공기를 단축하기 위해 활용할 수 있게 되었다.

향후 많은 관련 연구들이 수행되어 궁극적으로는 굳지 않은 콘크리트의 반입관리 및 초기 품질관리는 물론 콘크리트의 다양한 역학적 성능의 계측관리가 가능한 통합 품질관리시스템으로 발전되기를 기대한다. 

참고문헌

1. 대한주택공사 주택도시연구원, 건설공사 현장에서의 RFID/USN

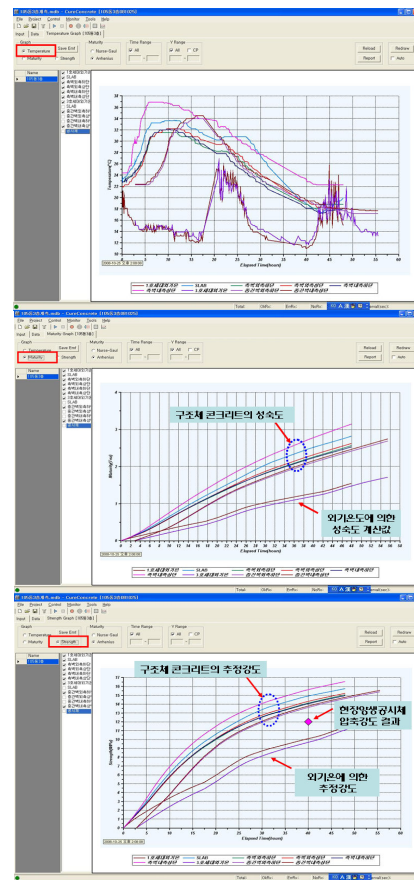


그림 12. 구조체콘크리트의 강도추정

활용실태 및 적용에 관한 기초연구, 2007.

2. 여준호(ETRI), RFID 최신기술 및 표준화 동향, RFID/USN 기술 및 표준화 동향 세미나(제2회 RFID/USN 연구 논문작성자 대상), 2006. 9.
3. 김형래 외 2인, 성숙도 개념을 이용한 한중콘크리트의 양생관리 프로세스에 관한 연구, 대한건축학회구조논문집, Vol.9, No.10, 2003. 10, pp. 51 ~ 58,
4. 김영해 역, 센서 인터페이스링-온도-습도 센서 활용편, 기전연구사, 1993.
5. ASTM, Standard Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method, ASTM C 1074-93.
6. ACI Committee 209, Prediction of Creep, Shrinkage, and Temperature Effects in Concrete Structures, 1992.
7. 十河茂幸, 콘크리트 기술におけるコンピュータ利用の現象と展望, 콘크리트工学, Vol.38, No.1, 2000. 1, pp. 12 ~ 16,
8. Usizima Sakae, 強度推定, 콘크리트工学, Vol.39, No.5, 2001. 5, pp. 73 ~ 77,

담당 편집위원 :

김한수(건국대학교) hskim@konkuk.ac.kr