

온도 센서 모우트를 이용한 콘크리트 수화열 측정 시스템

전준태*, 황수철**

요약

시멘트와 물이 혼합 될 때 발생하는 수화열은 콘크리트 구조물의 안정성에 중요한 영향을 준다. 일반적으로 수화열의 측정은 막대 모양의 온도 센서를 콘크리트에 묻고 유선으로 측정기에 연결하여 기록지에 출력하는 방식을 이용한다. 하지만 이러한 방식은 건설 현장과 같은 시공 조건이 열악한 환경에서는 수화열을 측정하는데 항상 어려움이 있어 왔다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해서 Tiny OS 기반의 온도 센서 모우트를 이용하여 무선으로 수화열 측정이 가능한지를 실험하고 이를 통해 얻어진 데이터를 분석하여 활용 가능성을 조사하였다. 그 결과 기존 방식과 평균 1.2℃ 차이를 보였지만 온도 센서 모우트의 방수포장을 감안하면 본 연구를 통해 측정된 값을 건설 현장에서 활용할 수 있음을 보였다.

Measure System of Concrete Hydration Heat Using Temperature Sensor Mote

Jun-Tai Jeon*, Su-Chul Hwang**

ABSTRACT

Hydration heat which occurs when cement and water blend up together has a major role in safety of a concrete building. When measuring the hydration heat, a stick shaped temperature sensor connected by a line to a recorder paper is planted in the concrete to measure the heat. But this method is always difficult to measure hydration heat in poor surroundings that the work condition is as such construction field. In this research to solve this problem, Mote based on Tiny OS is used to find that if hydration heat can be measured wirelessly and if the data from this research is usable. As a result, the temperature from our method was recorded 1.2℃ higher than conventional one, but considering the water proof wrapping of temperature sensor mote, we show that the measured data through our method can be use in construction field effectively.

Keywords : IT Fusion Technology, Zigbee Sensor Mote, Tiny OS & nesC, Concrete Hydration Heat

* 인하공업전문대학 토목환경과 (✉ jtjeon@inhac.ac.kr)

** 인하공업전문대학 컴퓨터시스템과

· 제1저자(First Author) : 전준태 · 교신저자(Correspondent Author) : 황수철

· 접수일(2013년 7월 18일), 수정일(1차 : 2013년 8월 2일), 게재확정일(2013년 8월 8일)

I. 서 론

오늘날 IT 융합기술은 자동차, 조선, 건설, 의료, 섬유 등 다양한 전통산업과 IT가 접목되어 새로운 혁신의 장을 만들고 있다[1]. 본 연구에서는 이러한 분야 중 토목의 수화열 측정 관련 분야에 관심을 갖고서 IT 기술을 접목하고자 하였다.

건설 현장에서 콘크리트 타설 시에 시멘트와 물이 혼합되면 화학반응으로 수화작용이 일어나는데 이때 발생하는 열을 수화열이라 한다[2][3]. 수화열은 시멘트가 응결, 경화하는 과정에서 발생하며 이 발열량은 시멘트의 종류, 화학조성, 분말도, 물과 시멘트의 비율 등에 의해 달라진다. 시멘트가 물과 완전히 반응하면 125cal/g 정도의 열이 발생하는데, 이 열은 콘크리트의 내부 온도를 상승시켜서 콘크리트 단면이 클 경우에는 콘크리트 내외 온도차로 인해서 균열이 발생하는 원인이 된다. 이러한 문제는 토목 구조물 안정화에 중요한 영향을 주기 때문에 고정밀도의 수화열 측정 시스템이 요구된다.

현재 수화열의 측정은 일반적으로 막대 모양의 온도 센서를 콘크리트에 묻고 유선으로 측정기에 연결하여 기록지에 출력하는 방식을 이용한다[4]. 하지만 이러한 방식은 시공 조건이 열악한 건설 현장에서는 측정하는데 항상 어려움을 겪고 있다. 그래서 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해서 Tiny OS 기반의 모우트 키트 기술[5]을 이용해서 무선으로 수화열 측정 실험을 하여 이를 통해 얻어진 데이터를 분석하였다.

본 논문은 이러한 실험과 분석을 통해서 얻어진 수화열 온도 자료를 현장에서 사용할 수 있는지 확인하고자 2장에서는 본 연구와 관련된 배경 및 관련 사항들을 언급하고 3장에서는 수화열 측정 시스템 구성 및 실험 방법을 기술하였다. 그리고 4장에서는 실험 결과와 분석을 5장에서는 연구 결

과의 활용 가능성에 대한 의견을 결론으로 제시하였다.

II. 관련 연구

고강도 콘크리트 및 Massive 콘크리트 사용이 증가하면서 콘크리트 경화 시에 발생하는 수화열에 의한 손상은 콘크리트의 품질에 큰 영향을 준다. 하지만 대부분의 건설 현장에서 콘크리트 수화열 측정의 중요성은 인식하나 전문 인력 및 장비 부족을 이유로 정밀 측정을 배제하고 있는 실정이다.

현재 널리 사용되는 수화열 측정 방식은 <그림 1>처럼 온도 센서를 유선으로 기록지 방식의 온도 측정기나 LCD 방식의 온도 측정기에 연결하는 것이다[4][6].

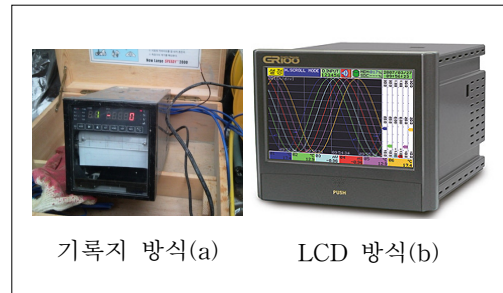


그림 1. 수화열 측정기
Fig. 1. Measure Unit of Hydration Heat

그러나 콘크리트를 타설하면서 콘크리트 내부에 온도 센서를 설치하고 이를 유선으로 데이터 로거와 연결하여 측정하는 방식은 수화열 측정 센서 설치 및 측정을 위한 전문 인력의 요구와 측정 기간 동안의 인건비 발생 요인이 된다. 또한, 수화열 측정 센서와 데이터 로거를 유선으로 연결하여 콘크리트 타설 시에 연결 케이블의 망실이 발생할 수 있으며, 데이터 로거를 현장에 상시 설치해야

하므로 이에 따른 전원 연결 및 데이터 로거 보호를 위한 설비 요구 등의 문제점이 있다.

한편, 본 연구에서 활용하고자 하는 지그비(Zigbee) 통신 기술[7]은 2000년대에 본격적으로 발전하기 시작한 통신 기술로 저속 근거리 무선 통신에 적합한 기술이다. 지그비 통신의 가장 큰 장점은 구성이 간단하고 전력소모가 작아 소형 건전지로 수개월 이상 통신이 가능하며, 통신 기술 역시 오픈된 기술로 신뢰성이 확보되어 있는 상태이다. 이러한 기술을 기반으로 본 연구와 유사한 무선 센서 네트워크에 의한 콘크리트 양생온도 측정에 관한 현장 적용성 연구[8]와 구조체 콘크리트의 양생온도 관리[9] 그리고 콘크리트 온도 측정을 위한 거푸집 일체형 무선 센서 네트워크 장치 개발[10]이 최근에 있었으며 이를 통해서 USN 장치의 활용 가능성을 보였다.

이들 연구 중 전자는 지그비 통신을 이용한다는 점에서 본 연구와 유사하지만 온도센서를 유선으로 연결하는 방식을 사용한 것이 본 연구와는 차이가 있다. 반면에 후자는 기존 유선방식의 온도 측정 방법을 무선온도 측정방식으로 하였다는데서 본 연구와 유사하지만 별도의 거푸집 일체형 무선온도 측정 장치를 만들어야 한다는 것이 다른 점이다.

이 밖에 본 연구처럼 단지 무선 방식을 이용한다는 점에서의 유사한 연구로는 콘크리트 구조물 내의 온도와 습도를 측정하기 위한 4가지 방식의 무선 센서 네트워크 활용을 제안한 연구와[11], 유비쿼터스 압전 센서 네트워크를 이용한 콘크리트의 양생 과정을 모니터링한 연구[12]가 있다. 하지만 별도의 무선 측정 장치를 제작해야 한다.

본 연구에서는 일반적으로 쉽게 구입할 수 있는 모우트 키트[13]를 이용하여 간단히 수화열을 측정할 수 있도록 시스템을 구현하여 현장에서의 설치 용이성을 극대화하고 활용성을 높이고자 한다.

III. 모우트 키트 기반의 수화열 측정 시스템

3.1 시스템 구성과 기능

본 연구에서 추구하고자 하는 콘크리트 수화열 측정 시스템 구성도는 <그림 2>와 같으며, 크게 콘크리트 타설 작업이 발생하는 현장과 비 현장으로 구분이 된다. 작업 현장은 지그비 RF 모듈(온도센서가 장착된 송신 모우트/송신되는 값을 받아 현장 사무실의 컴퓨터에 자료를 넘기기 위한 수신 모우트) 기반의 타설 작업장과 현장 사무실로 구성되며, 비 작업장은 이 수화열 값을 인터넷으로 전송 받아 분석 후 유용하게 사용될 수 있는 자료 분석 서버로 구성된다.

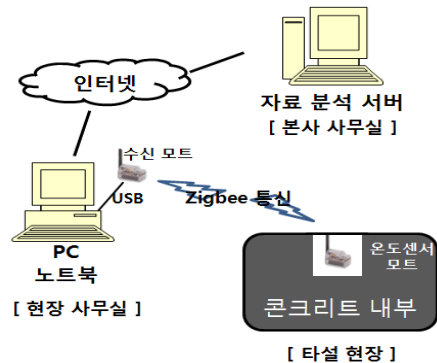


그림 2. 수화열 측정 시스템 구성도

Fig. 2. Structure of Hydration Measure System

구성도의 상세한 기능 및 수행 내용은 다음과 같다.

(1) 타설 현장

타설 현장은 콘크리트 재료들이 적절히 배합된 콘크리트에 온도 센서가 장착된 모우트를 함께 넣고 타설하는 작업 현장이다. 여기서는 콘크리트가 양생되면서 발생하는 온도를 온도센서가 측정하여 지그비 통신을 통해 작업 현장의 컴퓨터로 그 온도 값을 전송하는 기능이 수행된다.

(2) 현장 사무실

콘크리트 속의 온도센서 모우트로부터 송신되는 수화열 값을 지그비 통신을 통해 수신 모우트로 받아지면 USB 케이블을 통해 작업사무실의 컴퓨터와 연결되어 콘크리트의 양생 과정상의 온도 변화를 출력하거나 모니터 할 수 있다. 그리고 이곳에서는 작업 현장의 컴퓨터에 설치된 ftp 기능을 이용하여 인터넷을 통해 비 작업장인 본사의 자료 분석 서버로 측정된 온도를 전송하는 기능이 수행된다.

(3) 자료 분석 서버

각 작업장에서 전송된 콘크리트 양생시에 측정된 수화열 값들을 날짜별, 계절별, 시간대별 그리고 작업장별 등으로 분류하여 필요시에 활용 정보를 제공하는 기능을 수행한다. 이번 연구에는 이러한 기능에 대한 프레임만을 설정하였으며, 단지 유선과 무선의 경우에 대한 비교 자료만을 제공한다.

(4) 수행 방식

측정된 온도를 전송하고 수신하는 방법은 기본적으로 지그비 RF 통신을 통해 수행된다. 방수 처리하여 콘크리트 내부에 매설된 온도 센서 모우트가 지정한 시간 단위로 온도를 측정하여 현장 사무실의 PC로 자료를 송신하면 여기에 연결된 수신 모우트가 실측된 온도 값을 받아 PC에 저장한다. 저장된 자료는 본사 사무실의 자료 분석 서버로 전달되어 콘크리트 타설시 유용한 자료로 사용된다. 측정된 수화열 값은 수화열 해석을 실시하여 온도응력을 설계에 반영하여 수화열 관리를 통해 콘크리트 균열을 방지할 수 있다.

3.2 지그비 통신을 위한 시스템 구현

콘크리트 내부에 있는 온도센서 모우트와 현장 사무실간의 무선 통신을 위해서 H사에서 공급하는

HBE-ZigbeX II 모우트[13]를 사용하였다. 이 모우트는 리눅스 환경에서 동작되도록 만들어진 TinyOS 상에서 실행된다. 이번 연구에서는 구현의 편의를 위해서 윈도우 상에서 리눅스 플랫폼을 에뮬레이션 할 수 있는 Cygwin을 설치하여 TinyOS를 실행시켰다. TinyOS는 미국 UC 버클리 대학에서 개발한 무선 센서 네트워크를 위한 전용 운영체제로서 보다 편리한 프로그램 개발을 위해 클래스 형태의 컴포넌트(component) 구조를 가지는 NesC언어로 구현되었다[14].

본 연구에서는 이 언어를 이용하여 특성(configuration) 파일과 모듈(module) 파일을 만들어서 지그비 통신이 가능하도록 구현하였다. 이때 송신부에는 30초 단위로 온도를 측정하여 송신하도록 하였으며 수신부에서는 이 값을 받아 저장하도록 하였다.

3.3 실험

온도센서 모우트를 콘크리트 타설 시에 매설하기 위해서는 철저한 방수 처리가 요구되는데, 본 실험에서는 <그림 3>의 (a)에서처럼 HBE-ZigbeX II 모우트 케이스를 실리콘으로 완벽하게 방수 처리하였다. 그리고 <그림 3>의 (b)처럼 모우트에 장착된 안테나를 연장하여 무선 통신이 가능하도록 콘크리트 외부에 노출되도록 하였다.

한편, 지그비 통신을 이용하여 수화열을 기록하는 무선 방식이 기존의 유선 방식과 얼마나 차이가 나는 지를 알아보기 위해서 막대 온도 센서와 온도 센서 모우트를 함께 묻어 <그림 3>의 (c)처럼 동일한 조건의 콘크리트 배합비로 유선 방식도 실험하였다.

이처럼 실험 환경을 준비하여 콘크리트 양생 과정에서 발생하는 수화열 값을 얻기 위해서 약 12 시간 정도 변화되는 온도를 예비 측정한 후에 본 실험을 하였다. <그림 3>의 (d)는 이러한 측정 장

면을 보인 것으로, 왼쪽은 유선을 이용하여 기록지에 온도 자료를 출력하는 화면이며, 오른쪽은 무선으로 이용하여 컴퓨터에 자료가 출력되는 화면을 보인 것이다.

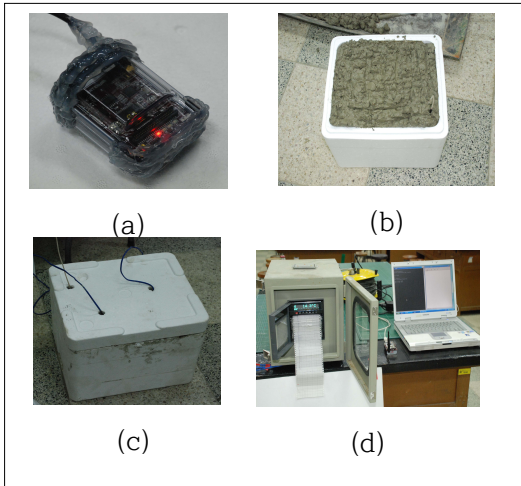


그림 3. 실험 장면들
Fig. 3. Screen Shots of Experiment

VI. 실험 결과 및 분석

실험에 사용된 시멘트는 보통 포틀랜드 시멘트, 초조강 그리고 초속경 시멘트이며, <표 1>과 같은 동일 조건의 배합으로 46~100시간 동안의 수화열을 측정 한 결과는 각각 <그림 4, 5, 6, 7>과 같다. 그래프에서 가로축은 온도를 세로축은 경과 시간을 나타낸다.

표 1. 콘크리트 배합 설계 배합비
Table 1. Mix Ratio of Concrete Mix Design

배합 강도 (Mpa)	Slump (cm)	S/A (%)	W/C (%)	단위재료량 (kg/m ³)			혼화제 (%)	
				시멘트	물	모래		
22	8±1	47.9	60.8	268	163	899	978	0.3-1.0

4.1 보통 포틀랜드 시멘트

보통 포틀랜드 시멘트는 콘크리트 구조물에 가장 많이 사용되는 시멘트이며 수화열 측정결과는 <그림 4>와 같다.

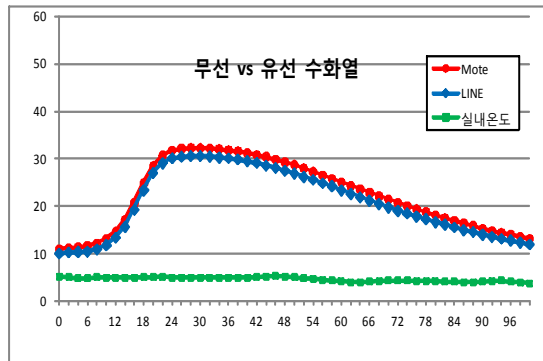


그림 4. 보통 포틀랜드 시멘트 수화열
Fig. 4. Hydration Heat of Normal Portland Cement

<그림 4>에서 콘크리트 외부온도는 5.0°C로 무선 방식의 내부 콘크리트 수화열과는 약 26.1°C의 차이를 나타내고 있으며, 수화열은 시간의 경과에 따라 상승하여 유, 무선 방식 모두 약 28시간 후에 최대값을 나타내고 이후 서서히 감소하여 약 100시간 후에는 수렴하는 경향을 나타내고 있다. 온도 센서 모우트를 이용한 무선 방식의 수화열 측정 결과의 최대값은 31.5°C로 나타났고, 측정기기를 사용한 유선 방식의 수화열은 30.6°C로 약 0.9°C의 차이를 보였다. 이러한 온도 차이는 무선 방식을 통해 얻어진 수화열을 실무 현장에 적용할 수 있는 값이다

4.2 초조강 시멘트

초조강 시멘트를 사용한 콘크리트는 수화열을 단시간에 많이 발생시키므로 주로 동기공사나 수중공사 등 단기간에 강도를 필요로 하는 공사에 사용된다. 수화열 측정결과를 <그림 5>와 같다.

<그림 5>에서 콘크리트 외부 온도와 무선 방식의 콘크리트 내부 수화열과의 온도 차이는 39.3°C의 차이를 보이며, 그래프에서 수화열은 시간의 경과에 따라 상승하여 약 18시간 후에 최대값을 나타내고 이후 서서히 감소하여 약 80시간 후에는 수렴하는 경향을 나타내고 있다.

수화열을 측정된 결과 무선 방식의 최대값은 46.0°C로 나타났고, 유선 방식의 수화열은 44.5°C로 약 1.5°C의 차이를 보이고 있는데, 이 차이 값 또한 보통 포틀랜드 시멘트 경우에서 언급한 것처럼 무선방식의 수화열 측정시스템을 실무에 사용하여도 무리가 없다고 판단된다.

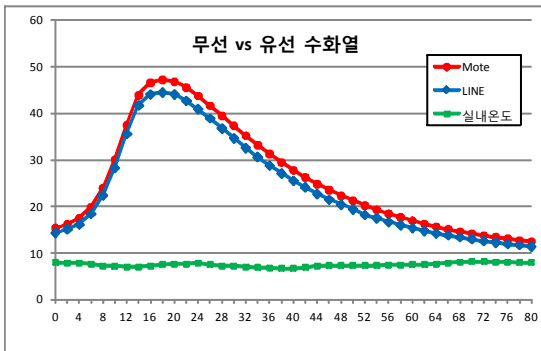


그림 5. 초조강 시멘트 수화열

Fig. 5. Hydration Heat of Super High Early Strength Cement

4.3 초속경 시멘트

초속경 시멘트를 사용한 콘크리트는 수화열을 단시간에 많이 발생시켜서 콘크리트 양생 속도가 상당히 빠른 특성이 있는데 실험에서의 수화열 측정결과는 <그림 6>과 같다.

<그림 6>의 수화열 그래프를 보면 콘크리트 외부 온도는 11.1°C로 무선 방선 방식의 콘크리트 내부 수화열과는 38.7°C의 차이를 나타내고 있으며, 수화열은 초기에 급하게 상승하여 약 6시간 후에 최대값을 나타내고 이후 서서히 감소하여 약 48시

간 후에는 수렴하는 경향을 나타내고 있다.

수화열을 측정된 결과 무선 방식의 최대값은 49.2°C로 나타나고, 유선 방식의 수화열은 47.9°C로 약 1.3°C의 차이를 보이고 있다. 이 차이 값을 고려했을 때 무선 방식의 수화열 측정시스템을 실무에 사용하여도 적합하다고 판단된다.

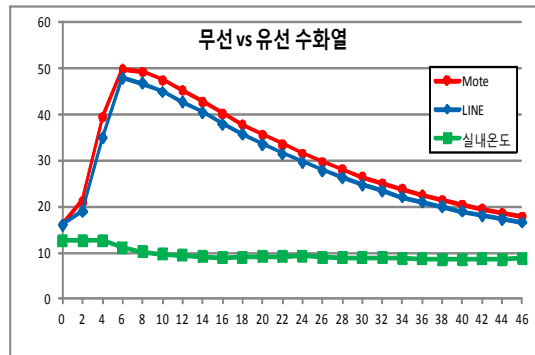


그림 6. 초속경 시멘트 수화열

Fig. 6. Hydration Heat of Ultra Rapid Hardening Cement

4.4 시멘트 종류별 수화열 특성

<그림 7>에서 유-무선을 통한 시멘트의 종류별 수화열 측정 결과의 특성을 보면, 콘크리트 구조물에 가장 많이 사용되는 보통 포틀랜드 시멘트는 초조강시멘트나 초속경시멘트를 사용한 콘크리트에 비해 수화반응이 늦어 수화열을 적게 발생시키며 오랜 시간동안 수화열을 발생시킨다. 반면에 초조강이나 초속경은 콘크리트 타설 초기에 높은 온도를 보이고 급하게 온도가 내려간다.

한편, 수화반응의 속도는 초속경, 초조강, 보통포틀랜드 시멘트 순으로 수화열이 최고인 시간은 초속경시멘트 6시간, 초조강시멘트는 18시간, 보통포틀랜드시멘트는 28시간 경과 시에 발생한다.

이는 초속경, 초조강, 보통포틀랜드 시멘트 순으로 수화반응이 빨리 발생되고 수화열도 높아 콘크리트가 빨리 경화함을 알 수 있다.

유·무선 방식으로 측정된 수화열 값을 가지고 시멘트 종류별 특성을 비교한 결과가 유사하다는 것은 본 연구에서 제시한 측정 방식과 측정 결과 값을 현장에서 사용할 수 있다는 것을 의미한다.

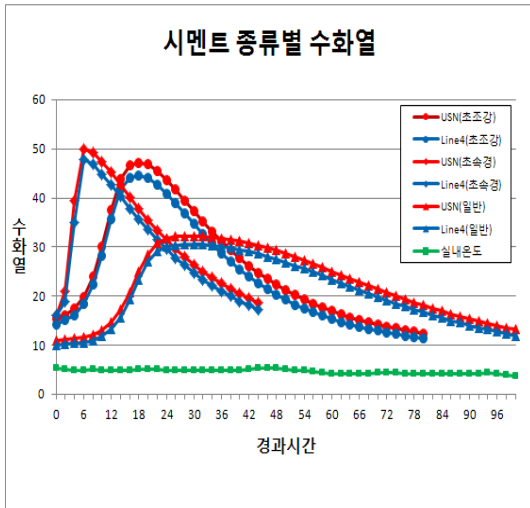


그림 7. 시멘트 종류별 수화열
Fig. 7. Hydration Heat of Cement Type

V. 결 론

본 연구에서 제시한 무선 방식이 유선 방식 보다 온도가 높게 측정된 것은 방수처리로 인한 것이라 사료된다. 하지만 그 차이는 실무 현장에서 커다란 영향을 주지 않으므로 지그비 통신을 하는 온도 센서 모우트를 사용해서 콘크리트의 수화열을 측정하는 방식은 기존의 유선 방식보다 시공 현장에서 매우 효율적이다. 아울러 측정된 수화열 값은 건설 현장에서 유용하게 활용될 수 있다.

무선 방식의 수화열 측정시스템은 복잡한 현장에서 유선 측정보다 설치 및 사용이 간단하고, 콘크리트 품질 관리가 용이하며, 비전문가도 정밀한 수화열 측정이 가능한 장점이 있다.

한편, 무선으로 데이터 수집을 편리하게 할 수 있으므로 해서 추후 유지관리시스템의 구축이 쉽고 신뢰성 있는 자동화 유지관리가 가능하여 콘크리트 구조물 설계 및 유지관리 기술 향상에 기여할 수 있다.

참고문헌

- [1] K. W. JEONG, "Jumping Strategy of IT Fusion Industry," *Korea Information & Communications Society Review*, V28, NO.1, pp.15-21, 2011.
- [2] J. T. Jeon, *Construction Material Experiment*, Inha Tech. College Press, 2007.
- [3] Y. B. Jeon, C. W. Hong, K.T. Sung, and D.S. Shim, *Construction Material and Test*, Dongwha Technology, 2012.
- [4] *KR-100N User's Manual*, Dongyang Tech, 2010.
- [5] S. Y. Nam, *Application of Wireless Sensor Network using MOTE-KIT*, Sanhakdang, 2005.
- [6] *Paperless Digital Recorder VR-18 User's Manual*, Dongyang Tech, 2010.
- [7] D.H. Chok, S.S. Bae, and K.T. Choi, *ZigBee Technology and Application*, Sewha Book Publishing, 2007.
- [8] H.R. Kim, H.G. Cho, J.H. Jeon, and I.S. Kim, "Curing Temperature Management of In-Placed Concrete Early-Ages by Application of the Wireless Sensor Network," *Magazine of the Korea Concrete Institute*, Vol. 21, No. 2, pp.50-57, 2009.
- [9] S.B. Lee, B.K. Sun, and D.H. Lee, "Application for Measurement of Curing Temperature of Concrete in a Construction Site using a Wireless Sensor Network," *Journal of the Korea Institute of Building Construction*, Vol. 11, No. 3, pp.282-291, 2011.
- [10] S.B. Lee and S.S. Park, "Development of Integrated Wireless Sensor Network Device with Mold for Measurement of Concrete Temperature," *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, Vol. 16, No. 5, pp.129-136, 2012.
- [11] N. B., Luis M. Borges, F. J. Velez, F. Monteiro, M.

Górski, and João Castro-Gomes, "Wireless sensor networks for temperature and humidity monitoring within concrete structures," *Construction and Building Materials*, Volume 40, pp1156-1166, 2013.

[12] Ondrej Krejcar, *Modem Telemetry*, INTECH, 2011.

[13] HANBACK Electronics LTD's R&D Center, *Ubiquitous Sensor Network Systems using ZigbeX*, INFO-TECH Corea, 2008.

[14] Philip Levis and David Gay, *Tiny OS Programming*, Cambridge, 2009.

저자소개



전준태(Jun-Tai Jeon)

1984년 중앙대학교 토목과(학사)
1986년 중앙대학교 대학원 토목공학과
(공학석사)
1993년 중앙대학교 대학원 토목공학과
(공학박사)

1994~현재 인하공업전문대학 교수

* 관심분야: 구조공학, 건설재료, 토목설계, IT융합



황수철(Su-Chul Hwang)

1986년 중앙대학교 전자계산학과(학사)
1988년 중앙대학교 대학원 전자계산
학과 (이학석사)
1993년 중앙대학교 대학원 전자계산
학과 (공학박사)

1991~현재 인하공업전문대학 교수

* 관심분야: 지능형시스템, 인터넷/모바일 응용, IT융합