

논문 2009-46SC-4-5

비분산적외선 CO₂센서를 이용한 무선 센서 네트워크 기반의 지하 공기질 모니터링 시스템

(Air Quality Monitoring System using NDIR-CO₂ Sensor for
Underground Space based on Wireless Sensor Network)

권 중 원*, 김 조 천**, 김 규 식***, 김 회 식***

(Jong-Won Kwon, Jo-Chun Kim, Gyu-Sik Kim, and Hiesik Kim)

요 약

본 연구에서는 비분산적외선(NDIR) 방식의 CO₂센서를 이용하여 무선 센서 네트워크 기반의 지하 공기질 모니터링 시스템을 구현하고 실제 지하철 승강장에 설치한 후 성능평가를 수행하였다. 서울 지하철은 하루 650만 명이 이용하는 대표적인 대중교통 수단이다. 따라서 승객뿐만 아니라 지하철 역사의 지하 공간에서 근무하는 많은 근로자들의 건강에 대한 관심이 높아짐에 따라 지하철 역사의 공기질 모니터링에 대한 요구가 매우 높아졌다. 현재 이런 요구를 충족하기 위해 환경부와 지하철 운영기관 측에서는 지하철역 공기질 모니터링 시스템을 일부 설치 운영 중이다. 그러나 고가의 수입 센서 이용으로 장비의 규모가 크고 설치 및 상시 운영에 따른 유지보수 비용이 큰 한계점이 있다. 따라서 본 연구에서는 저비용으로 CO₂ 농도를 상대적으로 정밀하게 측정할 수 있는 상용화된 CO₂ 센서에 대해 이론적으로 분석하고 신뢰성 검증 테스트를 수행하였다. 또한 무선 공기질 측정 센서 노드 및 게이트웨이 시스템을 개발하여 지하철 승강장의 실시간 공기질 데이터를 주기적으로 수집할 수 있고, 효율적으로 모니터링 할 수 있는 웹서버를 구축하였다. 본 연구 결과는 향후 지하 공간 공기질 관리 시스템의 확산 설치를 위하여 기초 연구 자료로 활용될 것이다.

Abstract

In this study, a remote air quality monitoring system for underground spaces was developed by using NDIR-based CO₂ sensor. And the remote monitoring system based on wireless sensor networks was installed practically on the subway station platform. More than 6.5 million citizens commute everyday by the Seoul subway transportation that is the most typical public transportation. They concern about air quality with increasing interest on public health or many workers in subway stations or underground shopping centers. Recently, the Korean Ministry of Environment has operated the air quality monitoring system in some subway stations for testing phase. However, it showed many defects which are large-scale, high-cost and maintenance of precision sensors imported from abroad. Therefore this research includes the reliability test and a theoretical study about the inexpensive commercialized CO₂ sensor for reliable measurement of air quality which changes rapidly by the surrounding environments. And then we develop the wireless sensor nodes and the gateway applied for remote air quality monitoring. In addition, web server program was realized to manage air quality in the subway platform. This result will be valuable for a basic research for air quality management in underground spaces for future study.

Keywords : NDIR(Non-Dispersive Infrared), CO₂, IAQ(Indoor Air Quality), Monitoring application

* 학생회원, *** 정회원, 서울시립대학교 전자전기컴퓨터공학부

(Dept. of Electrical and Computer Engineering, University of Seoul)

** 정회원, 건국대학교 환경공학과 (Dept. of Environmental Engineering, Konkuk University)

※ 본 논문은 2007년도 서울시 산학연 기반기술 특정과제(CS070160) 연구개발 지원사업의 지원으로 연구되었습니다.

접수일자 : 2009년6월29일, 수정완료일: 2009년7월17일

I. 서 론

최근 국내외로 저탄소 녹색성장 패러다임에 맞춰 실내 공기질에 대한 관심이 한층 높아지고 생활수준 향상에 따라 쾌적한 공기와 보다 나은 생활환경에 대한 시민들의 요구가 증대되고 있다. 특히, 서울지하철은 일일 이용 승객의 수가 650만 명을 초과할 정도로 우리나라의 대중이용 교통시설 중 가장 많은 시민이 이용하는 교통수단이다. 이러한 상황에도 불구하고 지하철 환경에 대한 연구가 미흡할 뿐만 아니라 지하철역의 환경을 고려하지 않은 공기질 관리가 수행되고 있는 실정이다. 최근 환경부에서는 이와 같은 문제점을 해결하기 위하여 일부 지하철역에 공기질 측정 장비를 설치하여 운영 중이다. 하지만 기존 공기질 모니터링 시스템의 경우 고가의 수입 센서를 사용하여 측정 데이터의 정확도는 높은 편이지만 장치의 규모가 크고 가격이 고가여서 지하철역사와 같은 넓은 장소를 모니터링하기에는 한계점이 있다^[1-3]. 본 연구에서는 지하철역과 같은 넓은 장소에서 다양한 환경 변수에 따라 실시간으로 변하는 공기질을 효율적으로 관리하기 위해 무선 센서 네트워크^[4-5] 기반의 통합 공기질 측정 모니터링 시스템의 프로토타입 시스템을 개발하였다. 우선 지하철역 승강장 내부의 정확한 공기질 측정을 위해 상용화된 온도, 습도 및 이산화탄소(CO₂) 센서에 대한 이론적 고찰 및 신뢰성 검증 수행하였다. 그 결과를 바탕으로 가격이 저렴하고, 상대적으로 정밀한 무선 통합 공기질 센서 노드를 개발하고 실제 지하철역 승강장에 설치하여 운영하였다.

II. 공기질 센서의 이론적 고찰 및 신뢰성 검증

1. NDIR 방식의 이론적 배경

일반적으로 CO₂ 농도를 측정하기 위하여 비분산 적외선 분광법 (NDIR; Non-Dispersive Infrared)이 적용되고 있다. NDIR^[6-9] 방식은 가스의 종류에 따라 적외선의 흡광도가 다른 점을 이용하여 적외선의 흡광도를 측정하여 특정 가스의 농도를 측정하는 방법이다. NDIR 가스 센서는 이러한 특성을 이용하여, 산소나 질소 등의 단원 분자를 제외한 대부분의 가스를 검출할 수 있어 매우 유용한 방법으로 알려졌다. 그림 1은 이산화탄소 농도를 측정하기 위한 NDIR 방식 센서의 기본적인 구성도를 보여준다. NDIR 센서는 일반적으로 적외선 광원, 광 공동, 광학 필터, 적외선 검출기로 구성

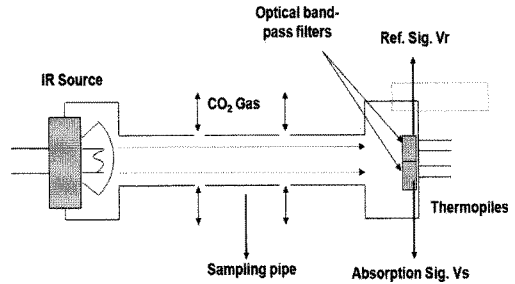


그림 1. NDIR 방식의 CO₂ 센서의 구조
Fig. 1. The Structure of NDIR-based CO₂ Sensor.

된다. 측정 원리는 적외선 광원으로부터 적외선이 광 공동으로 입사되면 광 공동 내에 존재하는 가스에 의해 특정 파장 대역의 적외선이 흡수된다. 이때, CO₂의 경우 약 4.28 μ m 영역에서 적외선에 대해 매우 좋은 흡수 특성을 갖는다. 따라서 흡수된 양 만큼의 적외선 에너지가 감소되고 그 후 감소된 적외선이 4.28 μ m 영역만을 필터링하는 광학 필터를 통과하여 적외선 검출기에 의해 검출되어, CO₂ 농도를 측정하게 된다. 그러나 4.2 μ m의 적외선은 열적외선으로 광 공동을 구성하는 물질의 열 진동을 유발하여 광 공동 내부의 온도를 증가시켜 측정오차를 발생시킬 수 있으므로 CO₂의 농도를 정밀하게 측정하기 위해서는 광 공동의 환기구 설계가 필수적이다.

NDIR 분광법에 이용되는 Lambert-Beer의 법칙을 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{I_a}{I_o} = e^{-\alpha \times x \times L} \quad (1)$$

여기서, I_o (W/cm^2)는 적외선 광원에서 방출되는 광 강도이고, I_a (W/cm^2)는 적외선 검출기에서의 광 강도, α 는 특정 가스의 적외선 흡수 계수, x 는 가스 농도(ppm), L 은 광 공동 내에서 적외선 광원과 적외선 검출기 간의 광 경로 길이이다. 따라서 식(1)에서 알 수 있듯이 긴 광 경로(L)가 만족되면 미량의 가스 농도(c) 변화에 민감한 센서 특성을 확보할 수 있는 방식이다. 즉, NDIR 방식의 센서는 우수한 특성을 보장하기 위해 광 경로를 최대한 길게 연장하여 가스에 의해 흡수가 많이 일어날 수 있게 하는 것이 주요 관건이다.

하지만 광 경로를 크게 하기 위해 광 공동의 크기를 크게 할 경우, 가스 센서의 부피가 커지고 단가가 상승

하게 된다. 따라서 본 논문에서는 무선 센서 네트워크의 특성인 소형화를 위해 광 경동 내부에 렌즈를 효과적으로 배치하여 광 경로를 확장시킨 NDIR 방식의 이산화탄소 센서를 채택하였다.

2. NDIR 방식의 CO₂ 센서 타당성 평가

본 논문에서 사용한 NDIR 방식의 CO₂센서는 B-530 모델로 그림 2에서 그 외관을 보여주었고 있다. B-530 CO₂ 센서의 주요 스펙은 표 1에서 설명하고 있다. 측정 원리는 NDIR 방식을 채택하고 최대 10,000ppm 까지 측정 가능할 뿐만 아니라 정밀도 측면에서 ±30ppm ±5%의 우수한 특성을 갖는다.

본 논문에서 사용된 NDIR 방식의 CO₂센서에 대한 타당성을 평가하기 위하여 CO₂농도가 시간에 따라 실제로 변화하는 교내 실험실 공간의 동일한 위치에서 세계의 CO₂센서를 설치하여 하루 동안 1분 주기로 약 1440번을 측정하였다. 그림 3은 하루 동안 측정된 교내 실험실 내부의 CO₂ 농도 변화 데이터를 기본으로 한 CO₂ 센서(1)과 센서(2), 센서(2)와 센서(3), 센서(1)과 센서(3)의 상호 차이를 측정된 결과이다. 결과적으로 상호

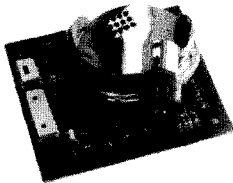


그림 2. NDIR 방식의 CO₂센서 (B-530, ELT Co., Korea)

Fig. 2. The NDIR-based CO₂ Sensor. (B-530, ELT Co., Korea)

표 1. NDIR 방식의 CO₂센서 사양
Table 1. Specification of The NDIR-based CO₂ Sensor.

사양	센서 모델
	B-530
측정 원리	비분산적외선 (NDIR)
측정 범위	0~10,000ppm
측정 정밀도	±30ppm ±5%
측정 주기	3 초
응답 시간 (90%)	이내 120 초
출력 신호	아날로그

차이 범위는 평균적으로 약 ±15ppm 정도로 제시한 사양을 만족하였고, 전체적으로 유사한 상호 차이 추세를 보여주고 있어 신뢰할 수 있는 데이터로 판단된다. 하지만 CO₂ 센서(2)와 센서(3)의 경우 약 15ppm 정도의 옅셋이 발생하는데 이는 각 센서별 하드웨어 특성에 따라 발생된 것으로 판단되며, 옅셋을 보정하면 실제 상호 차이는 옅셋이 0인 경우와 마찬가지로 ±15ppm 정도 인 것을 알 수 있다.

그림 4~6은 CO₂ 센서로부터 측정된 두 데이터간의 상관관계를 통계적인 방법으로 비교하기 위하여 단순 선형회귀 분석을 이용하였다. 단순 선형 회귀 분석을 이용하여 x축의 변수와 y축의 변수 사이의 인과관계에

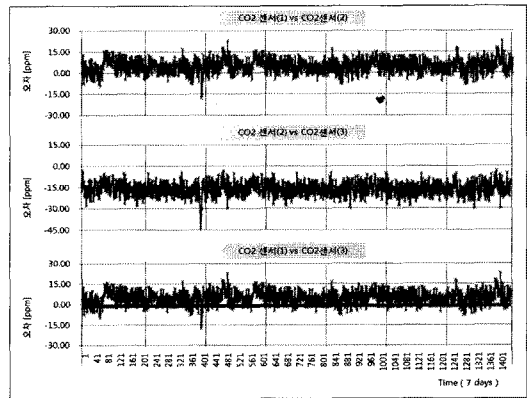


그림 3. 동일한 지점에서 세 개의 CO₂ 센서로부터 측정된 CO₂ 농도의 상호 차이

Fig. 3. Each Difference of Measured CO₂ Concentration at The Same Place.

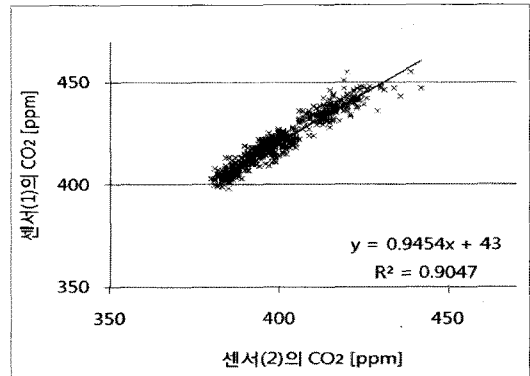


그림 4. 단순 선형 회귀 분석을 이용한 CO₂ 센서(1)과 센서(2)의 상관도

Fig. 4. Simple Linear Regression Analysis between CO₂ sensor(1) and CO₂ Sensor(2).

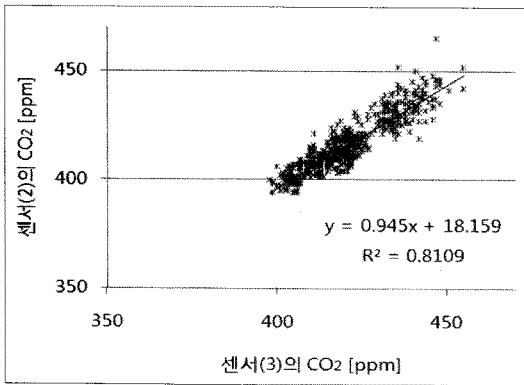


그림 5. 단순 선형 회귀 분석을 이용한 CO₂ 센서(2)과 센서(3)의 상관도

Fig. 5. Simple Linear Regression Analysis between CO₂ sensor(2) and CO₂ Sensor(3).

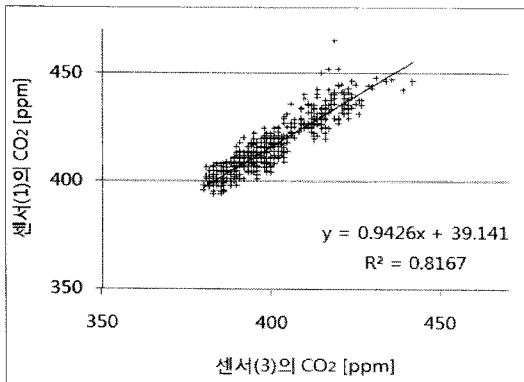


그림 6. 단순 선형 회귀 분석을 이용한 CO₂ 센서(1)과 센서(3)의 상관도

Fig. 6. Simple Linear Regression Analysis between CO₂ sensor(1) and CO₂ Sensor(3).

따라 간단한 1차의 수학적 모델을 예측할 수 있고 두 변수 사이의 상관관계의 적합성을 확인하기 위해 결정계수를 계산할 수 있다. 본 실험에서는 단순 선형 회귀 분석을 통해 얻은 결정 계수(R^2)를 가지고 두 센서로부터 측정된 데이터 간의 상관관계를 분석하였다. 전체적으로 결정계수는 0.81~0.90 사이의 값을 보인다. 이 결과는 CO₂ 센서들은 상호간에 상관관계가 있음을 증명한다. 따라서 본 논문에서 사용한 B-530 센서는 지하 공간의 원격 실시간 공기질 모니터링 시스템을 위한 무선 센서 노드 설계에 적용 가능한 것으로 판단된다.

3. 온습도 센서 타당성 평가

본 논문에서 사용된 온습도센서는 수많은 안정성 테

표 2. CMOS기술 기반의 온습도 센서 (SHT-11) 사양
Table 2. Specification of The CMOS-based SHT-11 Sensor.

사양	센서 모델
	SHT-11
습도 측정 범위	0 ~ 100% RH
상대 습도 정밀도	±3% RH
온도 측정 범위	-40 ~ 100 °C
온도 정밀도	± 0.4 (@25°C) ~ ±2.5 °C(@-40, 100°C)
응답 시간	이내 8 초
출력 신호	디지털

스트를 거쳐 높은 수준의 신뢰성을 보장하는 Sensirion사의 SHT-11^[10]을 사용하였다. 이 센서는 주변의 온도와 습도를 동시에 측정할 수 있는 듀얼방식으로 ADC 기능을 자체적으로 갖고 있다. SHT11 센서로부터 측정된 데이터를 읽기 위해서는 CPU와 직접 연결된 2개의 통신선을 통해 클럭과 명령어를 입력하여 얻을 수 있다. 이 센서의 사양은 습도측정 범위는 0~100%RH이며, 상대 습도 정밀도는 ±3%RH이다. 또한 온도 정밀도는 상온 25°C에서 ±0.4°C의 정밀도를 보장하고 온도가 상온보다 높아지거나 낮아질 경우 점차 ±2.5°C까지 오차 범위가 증가된다. SHT-11 센서의 사양은 표 2에서 설명하고 있다.

본 실험에서는 온도가 거의 일정하게 유지되는 교내 실험 내의 상온 환경에서의 온습도 센서에 대한 타당성을 평가하였다. 측정 실험 환경은 위에 언급한 CO₂ 센서와 동일한 위치에서 하루 동안 1분 주기로 측정하여 그 결과를 그림 7~12에 도식화하였다. 그림 7~9는 각 SHT-11 센서로부터 측정된 온도 데이터 간의 상관관계를 나타내는데, 이때 결정 계수는 0.45~0.60으로 높은 편이 아니지만 ±0.1°C의 상호 차이를 보이고 있으므로 상당히 정밀한 결과를 제공한다고 볼 수 있다. 습도 데이터의 경우도 마찬가지로 결정 계수는 0.69~0.74로 중간 정도이지만 1차 방정식의 추세선에 인접한 부근에서 동일한 데이터가 집중적으로 나타나고 있는 것으로 보아 습도 데이터의 정밀도 역시 신뢰성있는 것으로 판단된다. 따라서 본 논문에서 개발된 무선 센서 노드에 SHT-11 온습도 센서를 적용하는 것이 적절하다.

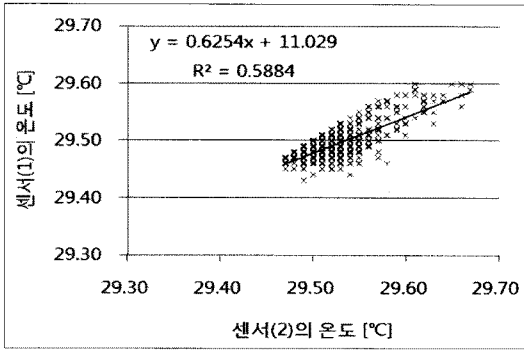


그림 7. 단순 선형 회귀 분석을 이용한 온도 센서(1)과 센서(2)의 상관도

Fig. 7. Simple Linear Regression Analysis between Temperature sensor(1) and Temperature Sensor(2).

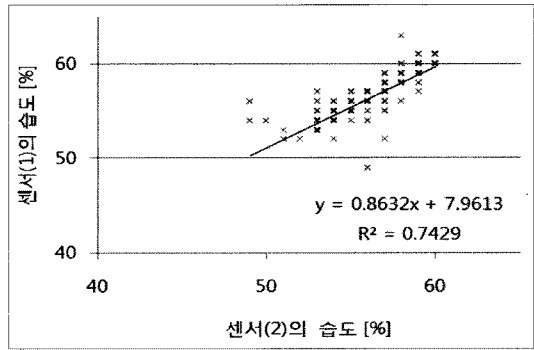


그림 10. 단순 선형 회귀 분석을 이용한 습도 센서(1)과 센서(2)의 상관도

Fig. 10. Simple Linear Regression Analysis between Humidity sensor(1) and Humidity Sensor(2).

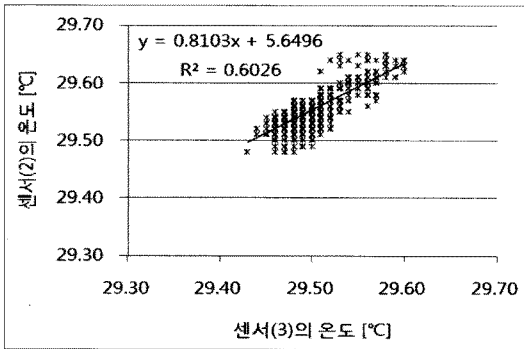


그림 8. 단순 선형 회귀 분석을 이용한 온도 센서(2)와 센서(3)의 상관도

Fig. 8. Simple Linear Regression Analysis between Temperature sensor(2) and Temperature Sensor(3).

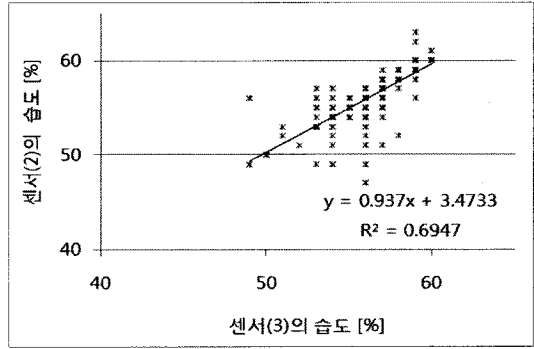


그림 11. 단순 선형 회귀 분석을 이용한 습도 센서(1)과 센서(3)의 상관도

Fig. 11. Simple Linear Regression Analysis between Humidity sensor(1) and Humidity Sensor(3).

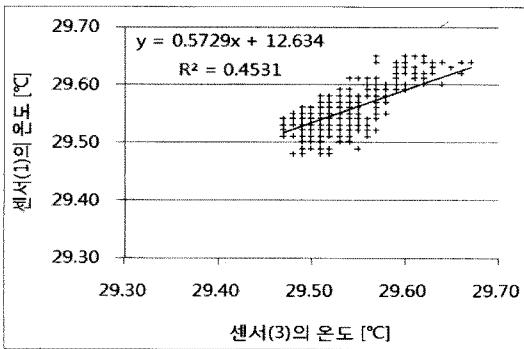


그림 9. 단순 선형 회귀 분석을 이용한 온도 센서(1)와 센서(3)의 상관도

Fig. 9. Simple Linear Regression Analysis between Temperature sensor(1) and Temperature Sensor(3).

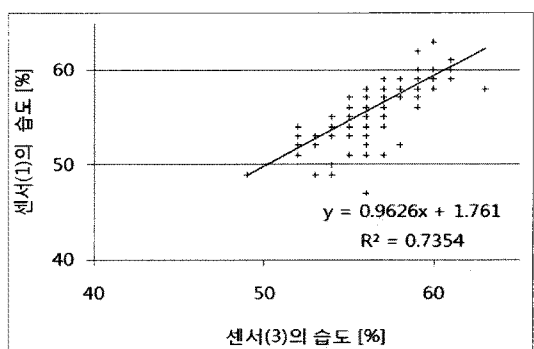


그림 12. 단순 선형 회귀 분석을 이용한 습도 센서(1)과 센서(3)의 상관도

Fig. 12. Simple Linear Regression Analysis between Humidity sensor(1) and Humidity Sensor(3).

III. 무선 센서노드 설계 및 개발

1. 무선 공기질 측정 센서 노드 개발

본 장에서는 지하철역 공기질을 실시간으로 측정하고 모니터링 할 수 있는 무선 센서 네트워크 기반의 통합형 공기질 측정 센서 노드 설계방안에 대해 기술한다. 개발된 센서노드는 실시간 공기질 측정이 가능하고, NDIR 방식의 CO₂ 센서, 온습도 센서를 각각 하나씩 장착하고 있다. 본 논문에서의 하드웨어 개발 초점은 소형, 저가, 가격 대비 센서의 신뢰도가 높은 공기질 측정 센서노드를 개발하는 것이다.

그림 13은 개발된 공기질 측정 센서 노드의 블록도를 보여준다. 센서 노드는 CPU, 메모리, 무선통신 모듈, 전원공급기, 센서 등 크게 5개의 컴포넌트로 구성되고, 하드웨어 구동의 에너지 소비를 최소화하기 위한 방안으로 CPU를 8비트 고성능 ATmega128L^[11]를 선택하였다. 또한 2.4GHz 대역의 RF를 이용한 Zigbee 기술을 제공하기 위하여 Chipcon사의 CC2420^[12]칩을 사용하여 설계하였다. 그러나 본래 무선 센서네트워크 기반의 시스템에서는 다수의 센서노드들이 기본적으로 배터리 기반으로 구현되지만 본 논문에서 개발된 센서노드는 외부 전원을 사용하도록 개발하였다. 그 이유는 센서노드에 장착된 NDIR 방식의 CO₂ 센서가 12V 전원 인가가 필요하여 배터리 사이즈가 커지고 3초마다 광원을 발생시켜야하는 측정원리로 인해 큰 소비 전력을 요구한다. 따라서 본 논문에서는 외부전원을 사용하도록 설계하였지만 차후 MEMS (Microelectromechanical Systems) 기술을 이용한 반도체 타입의 정밀한 CO₂ 센서가 개발될 경우 배터리 기반의 센서노드 개발이 가능할 것으로 보인다. 그림 14는 센서노드를 구현한 것이다.

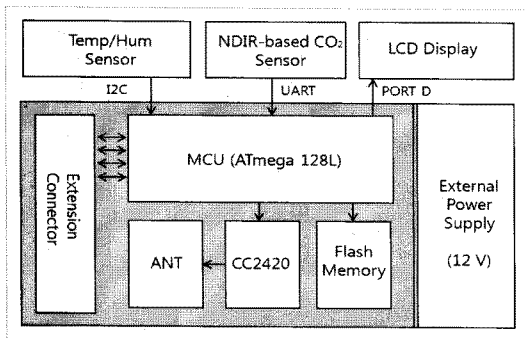


그림 13. 공기질 측정 센서 노드의 블록도
Fig. 13. The Block Diagram of Wireless Sensor Node.

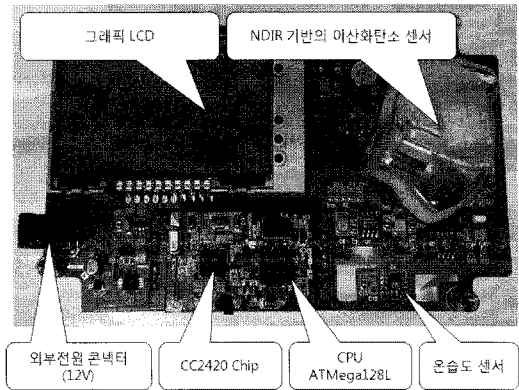


그림 14. 개발된 무선 통합 공기질 측정 센서 노드의 외관
Fig. 14. The Exterior of A Wireless Sensor Node for Air Quality Monitoring.

본 연구에서는 무선 공기질 측정 센서 노드의 구동 소프트웨어를 TinyOS 운영체제 기반으로 개발하였다. 센서노드는 타이머를 이용하여 CO₂, 온도, 습도 데이터를 매 3초마다 측정하고 CPU의 각 인터페이스를 통해 데이터를 입력받는다. 그 후 무선 통신용 데이터 포맷에 따라 패키징하여 ZigBee 무선 통신 기술을 이용하여 데이터를 전송한다. 이때 송장장 곳곳에 설치된 센서노드들은 트리 구조의 멀티홉 라우팅 방식^[1]을 이용하여 싱크노드까지 데이터를 전송하는데, 여기서 말하는 싱크노드는 무선 센서 네트워크와 TCP/IP를 연동하기 위한 게이트웨이의 일부로 다수의 센서 노드로부터 전달되는 데이터를 수신하여 UART 인터페이스를 통해 게이트웨이의 메인 CPU로 전달하는 역할을 한다. 본 논문에서는 싱크노드가 고정된 네트워크에서 매우 효과적인 트리 구조의 라우팅 프로토콜을 개발하였다. 이 프로토콜은 네트워크의 복잡한 전체 라우팅 테이블을 유지하지 않고도 네트워크의 링크 품질을 기반으로 자신의 상위 이웃노드에 대한 정보만 유지함으로써 효과적으로 싱크노드까지 최단 경로를 유지하면서 데이터를 전송할 수 있다.

2. 게이트웨이 개발

원격 공기질 모니터링 시스템을 위한 게이트웨이는 열악한 지하철역 현장 조건과 무선 통신환경을 충분히 고려하여 하드웨어가 설계되어야 한다. 따라서 게이트웨이의 클라이언트 프로그램은 무선 센서 네트워크에서 전달되는 수많은 데이터들을 처리한 후 필요한 정보만

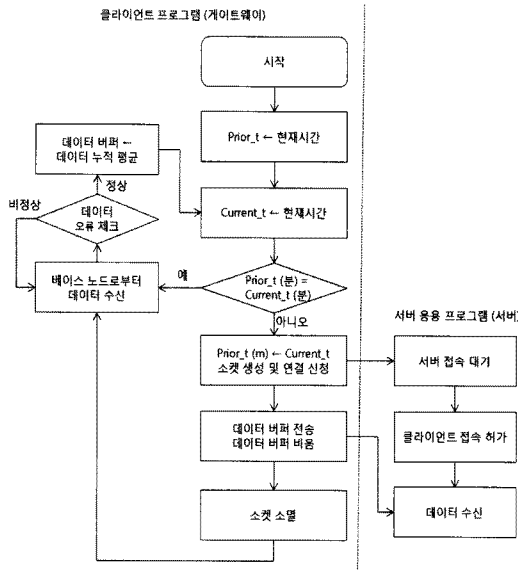


그림 15. 게이트웨이 클라이언트 프로그램의 동작 절차
 Fig. 15. The Operating Process of the Client Program in a Gateway.

취하여 수신서버로 즉시 전달할 수 있는 로직으로 구현 된다. 또한 무선 센서 네트워크에서 수신한 데이터를 지하철역 외부에 위치한 수신서버로 데이터를 전달하기 위하여 인터넷과 연동될 수 있도록 설계되었다. 본 연구에서 개발된 게이트웨이는 시스템 설계가 비교적 용이한 임베디드 리눅스를 기본 플랫폼으로 하여 수집된 데이터에 대한 선행 처리를 한다. 이를 위해 고성능 ARM계열의 Intel XScale PXA272 CPU를 사용하였다. 또한 무선 센서 네트워크로부터 데이터를 수신하기 위하여 ZigBee 통신 모듈을 포함하는데, 이는 앞에서 언급된 싱크노드의 역할을 수행한다. 게이트웨이는 승강장에 설치된 무선랜 공유기로부터 하나의 IP를 부여받아 수신서버와 소켓 통신을 이용하여 데이터를 주고받는다. 그림 15는 게이트웨이 클라이언트 프로그램의 동작 절차를 보여준다.

3. 수신서버 및 웹서버 개발

지하철역 승강장에 위치한 게이트웨이로부터 전달받은 측정 데이터를 원격에서 모니터링하기 위해 수신서버 응용 프로그램과 웹서버 프로그램을 개발하였다. 수신서버는 서울시립대학교 정보기술관 내 EPS실 내부에 위치하고, 수신서버의 하드웨어는 Sun Fire V240 Server이고, 운영체제는 CentOS 4.3을 설치하여 운영하

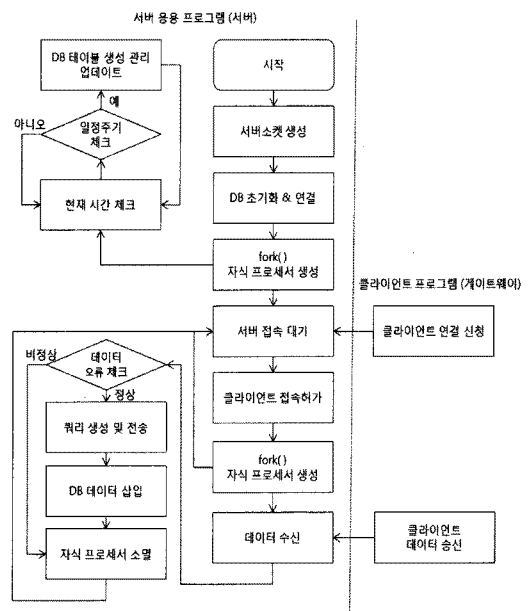


그림 16. 수신서버의 서버 응용 프로그램의 동작 절차
 Fig. 16. The Operating Process of the Server Application Program in a Main Server.

였다. 본 논문에서 수신서버는 두 가지 프로그래밍 모듈을 탑재하고 있는데, TCP/IP 소켓 통신 및 데이터 처리를 위한 응용 프로그래밍 모듈과 측정 데이터의 효율적인 관리 및 디스플레이를 위한 웹서버 모듈로 구성된다. 웹서버 모듈은 현재 웹서버 중 가장 많이 사용되는 아파치 웹서버를 선택하였다. 아파치 웹서버는 다중 스레드 및 파일 캐시를 기본적으로 지원하고, 안정적이며 다양한 기능을 제공할 수 있다^[13].

수신서버 응용 프로그램은 우선 시작과 동시에 데이터베이스를 초기화하고 그 직후 데이터베이스와의 연결을 수행한다. TCP/IP 소켓 연결 요청이 들어오면 다중 접속 처리를 위해 새로운 프로세서를 생성한 후 전달받은 데이터를 형식화된 데이터 포맷에 맞춰 해석하고 데이터베이스의 해당 테이블을 업데이트한다. 반면 새롭게 생성된 다른 프로세서는 클라이언트 즉, 게이트웨이와의 통신을 담당하여, 많은 클라이언트가 통신을 요청하더라도 모두 처리할 수 있도록 설계하였다. 이와 같은 수신서버 응용 프로그램의 동작 절차는 그림 16에서 설명하고 있다.

DB 테이블 생성 관리 업데이트는 효율적인 데이터베이스의 조직화와 과거 데이터의 구간 검색 시간을 단축하기 위하여 동적으로 테이블을 생성하도록 설계하였

다. 수신서버에서 동작되는 서버 응용 프로그램의 부모 프로세서는 비교조건으로 분, 시간, 주, 월을 체크하여 비교조건에 변화가 발생할 경우 그에 따른 데이터 테이블을 생성하도록 하였다. 예를 들어, 수신서버의 리얼타임 클릭이 2009년 6월 10일 오후 11시 59분에서 6월 12일 오전 12시 00분으로 변경될 경우 (즉, 2009년 6월 11일 오전 12시 정각) 부모 프로세서는 시간 단위 데이터를 저장할 "DayNode20090611" 테이블을 새롭게 생성한다. 그 후 2009년 6월 10일 23시부터 24시까지의 데이터를 저장하고 있는 "HourNode2009061023" 테이블로부터 각각의 데이터를 이용하여 한 시간 동안의 평균값을 계산하여 "DayNode20090611" 테이블에 저장한다. 즉, "DayNode20090610" 테이블에 저장되던 데이터는 일자가 변경되어 새로 생성된 "DayNode20090611" 테이블에 저장하게 된다. 따라서 하나의 테이블에 과도한 양의 데이터 저장을 피할 수 있으므로 과거 데이터를 검색할 경우 검색시간을 단축시킬 수 있고, 데이터베이스의 테이블을 효율적으로 조직화할 수 있다.

지하철역 승강장에 설치된 3개의 센서노드로부터 전달된 데이터는 서버 응용 프로그램에서 적절하게 해석되고 원격 모니터링 웹서버를 통해 사용자가 원할 경우 언제든지 접속하여 확인할 수 있다. 본 논문에서는 기본적으로 아파치와 연동하여 실행되는, HTML embedded 언어인 PHP (Professional Hypertext Preprocessor)를 사용하여 웹서버를 개발하였다. 따라서 수신서버에 저장되어 있는 데이터를 사용자에게 일방적으로 전달하는 형태가 아닌, 사용자와 수신서버 간의 양방향 통신이 가능하도록 설계하여 사용자에게 편리성을 제공한다.

지하철역 승강장에 설치된 3개의 센서노드로부터 획득된 데이터는 서버 응용 프로그램에서 적절하게 해석되고 원격 모니터링 웹서버를 통해 출력된다. 즉, 개발된 원격 모니터링 웹서버는 웹페이지를 통해 사용자의 요구에 따른 입력을 받은 후 CGI (Common Gateway Interface)를 활용하여 실시간으로 처리하고 그 결과를 웹사이트에 출력한다. 개발된 웹서버는 도메인 주소 http://mnl.uos.ac.kr (IP:210.125.176.184)에서 확인할 수 있다.

그림 17은 웹서버 메인화면의 캡처된 사진이다. 메인 화면에서는 지하철역 승강장의 센서노드에서 취득한 최신 전체 데이터가 센서노드별로 상단에 표 형태로 출력된다. 또한 하단의 2D-바차트 (2D-bar chart)는 실내

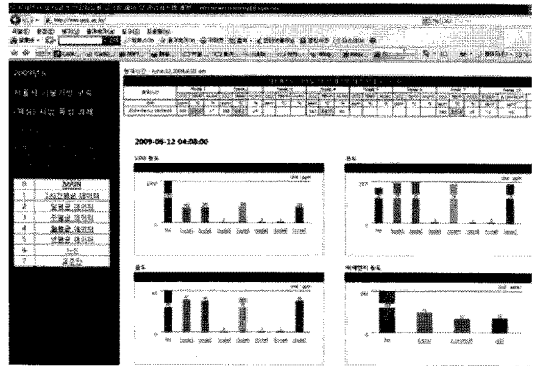


그림 17. 원격 모니터링 웹서버의 기능(1) : 웹서버의 메인화면에서 각 지점별 현재 데이터를 한눈에 볼 수 있도록 바(bar) 차트로 제공

Fig. 17. The Function of Remote Monitoring Web Server(1) : Bar Chart.

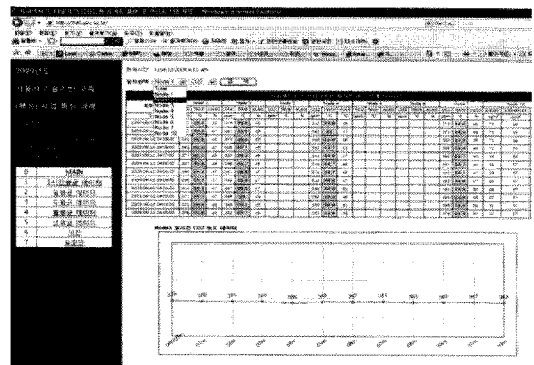


그림 18. 원격 모니터링 웹서버의 기능(2) : 센서노드 별 최근 데이터의 변화 추세 정보를 표와 그래프로 제공

Fig. 18. The Function of Remote Monitoring Web Server(2) : Data Table and Trend Line.

공기질 유지 기준 이상의 오염이 발생된 지점을 한 눈에 쉽게 확인할 수 있도록 도와준다.

그림 18은 원격 모니터링 웹서버를 이용하여 사용자가 원하는 일정기간을 웹페이지를 통해 입력받아 그 결과 데이터를 표 형태로 제공하고 시간 축에 따라 데이터의 변화 추세를 그래프로 출력하는 화면이다. 이때 실내 공기질 유지 기준^[14] (다중이용시설 중 지하역사의 경우 이산화탄소(CO₂) 1000ppm 이하 유지) 이상의 값이 출력될 표 안의 영역은 노란색 바탕과 붉은 글씨체로 출력하도록 하여 사용자로 하여금 정상 데이터와 쉽게 구분할 수 있도록 개발하였다.

IV. 도시 지하철역 현장 성능평가

본 논문에서는 제안한 실시간 지하철역 공기질 모니터링 시스템 프로토타입에 대한 검증 및 문제점 도출을 위하여 실제 지하철역 내에서 현장 성능평가를 수행하였다. 이 원격 모니터링 시스템의 네트워크는 그림 19에서 보듯이 지하역사의 승강장 한쪽 방면에 3개의 센서노드와 한 개의 게이트웨이를 70m 간격으로 설치하여 트리구조를 기본으로 구성하였다. 이때 각 센서노드와 게이트웨이 간의 멀티홉 통신은 IEEE 802.15.4기반의 ZigBee 기술을 사용하였고, 게이트웨이와 수신서버 간의 통신은 IEEE 802.11b 기반의 무선랜을 이용하여 전체 네트워크를 구성하였다.

현장에 설치된 지하철역 공기질 모니터링 시스템의 기본적인 동작은 다음과 같다. 우선 3개의 센서노드에서 CO₂, 온도, 습도를 3초마다 측정하여 게이트웨이로 전송한다. 게이트웨이는 1분 동안 각 센서노드로부터 수신된 데이터를 평균하여 표준화된 데이터 포맷에 맞춰 데이터 스트림을 생성한 후 매분 0초에 수신서버로 전송한다.

그림 20~22는 실제 지하철 승강장에서 센서노드에 의해 측정된 데이터를 수신서버에 저장한 데이터 가운데 일주일 (2009년 5월 21일 (목) 오전 0시~5월 28일 (금) 오전 0시) 데이터를 분석한 결과이다. 그 분석 결과를 보면 각 센서노드의 데이터는 승강장의 동일한 위치에서 측정하지 않았지만 실내 공기의 분자확산 및 대

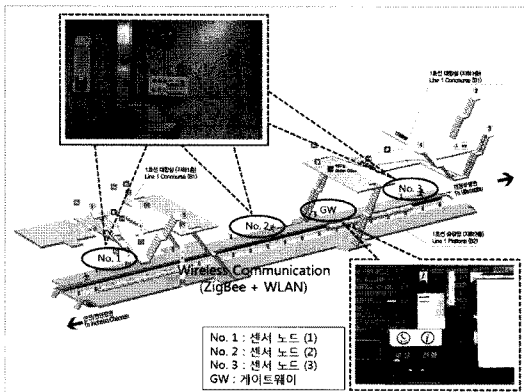


그림 19. 지하철역 승강장에서 제안된 원격 공기질 모니터링 시스템의 성능평가를 위한 설치환경
 Fig. 19. The Install Environment for Performance Test of The Proposed Remote Air Quality Monitoring System in a Subway Station Platform.

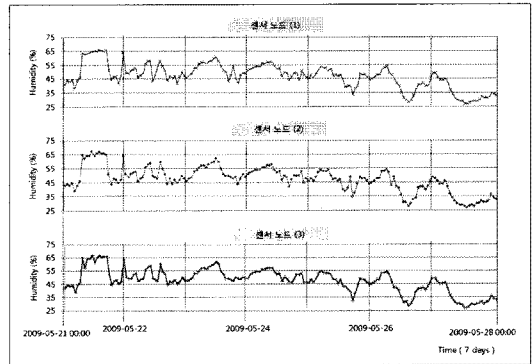


그림 20. 시간 축에 따른 승강장 세 지점에서의 습도 변화
 Fig. 20. The Variation of the Measured Humidity from SHT-75 Sensor.

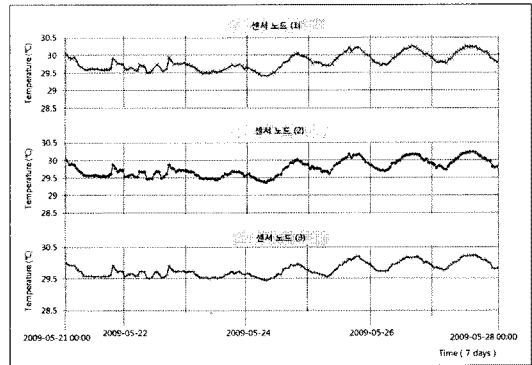


그림 21. 시간 축에 따른 승강장 세 지점에서의 온도 변화
 Fig. 21. The Variation of the Measured Temperature from SHT-75 Sensor.

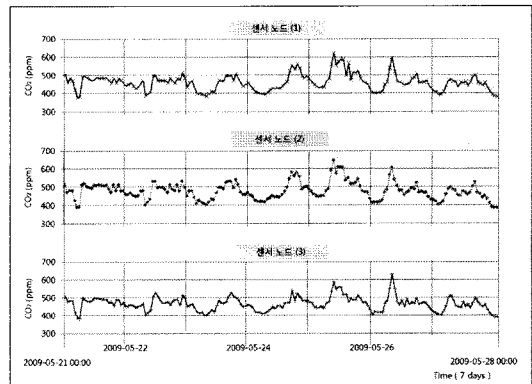


그림 22. 시간 축에 따른 승강장 세 지점에서의 CO₂ 변화
 Fig. 22. The Variation of the Measured CO₂ Concentration from NDIR-based CO₂ Sensor.

유이동으로 인해 시간에 따른 변화 추세가 3지점에서 모두 유사한 것을 확인할 수 있다. 또한 그 결과를 바탕으로 각 공기질 측정 센서의 우수한 신뢰성을 확인할 수 있다. 왜냐 하면 센서노드에 장착된 공기질 측정 센서별 특성은 실질적으로 약간씩 차이가 날 수 있지만 3지점에서 모두 동일한 변화를 보이기 때문이다.

그림 20과 그림 21은 시간 축에 따라 달라지는 지하철역 승강장에서의 습도와 온도를 각각 보여주고 있다. 그림 20에서 볼 수 있듯이 습도의 변화 폭은 25~65% 사이로 시간에 따라 급격하게 변하는 특성을 보이고, 온도의 경우 29~30°C 사이로 비교적 변화 폭이 적은 것을 관찰할 수 있다.

결과적으로 지하철역 승강장의 평균 실내 온도는 대중시설의 실내 적정 온도 26~28°C보다 약간 높은 편이고, 승강장의 평균 습도는 실내 적정습도인 55%~60%를 적절하게 유지하고 있음을 확인할 수 있다. 그림 22는 시간 축에 따라 CO₂ 농도의 변화를 보여준다. 그 결과를 살펴보면 평균적으로 500ppm을 기준으로 ±100ppm의 변화율을 보여주고 있으며, 최소 400ppm에서 최대 600ppm에까지 관찰된다. 또한 매일 오전 0시~오전 9시까지 CO₂ 농도가 감소하고 있는 것을 확인할 수 있는데, 그 이유는 새벽시간대 승강장 내 유동 인구가 거의 없고 승강장 물청소로 인한 것으로 판단된다.

V. 결 론

본 논문에서는 제안된 실시간 공기질 모니터링 시스템의 신뢰성을 검증하기 위해 센서노드에 장착될 이산화탄소와 온습도 센서의 신뢰성 조사를 먼저 수행하였다. 그 후 신뢰성 조사를 바탕으로 소형, 저가의 통합 공기질 측정 센서노드를 개발하였다. 또한 무선 센서 네트워크 기술을 기반으로 하는 실시간 지하철역 공기질 모니터링 시스템 프로토타입을 구현하고, 실제 지하철역 승강장에서 현장 성능시험을 수행하였다.

결론적으로 제안된 방법은 저가의 초기 설치비용으로 지하철역의 승강장, 대합실 및 환승통로 등 여러 지점의 공기질에 대해 실시간 모니터링이 가능하다. 또한 각 지점의 공기질 상황을 실시간으로 감시함에 따라 차후 지하철역사의 환기 설비와 연동하여 실내 공기질 유지 기준에 따라 효과적으로 운영이 가능하다. 그러므로 지하철역 공기질 관리의 효율성을 향상 시키고 설치 및

유지보수 비용의 절감효과를 가져올 것으로 판단된다. 현재 개발된 프로토타입은 기본적인 작동 가능성만을 검증할 수 있는 수준이므로, 추후 더욱 높은 신뢰성 및 내구성을 갖는 공기질 측정 센서에 대한 조사 연구가 필요하다. 추가적으로 현재 장착된 센서들의 측정 오차를 줄일 수 있는 방안에 대한 연구가 필요하고, 원격 모니터링을 위한 웹서버의 GUI 인터페이스를 실무자의 편의 및 요구사항을 고려하여 실용적인 측면으로 개선할 예정이다.

참 고 문 헌

- [1] 조영민, 박덕신, 박병현, 박은영 “수도권 전철 과천선 지하역사의 실내공기질 연구”, 대기환경학회, 한국대기환경학회 2005년 춘계학술대회논문집, pp. 463~464, 2005년 5월
- [2] 박덕신, 박병현, 박성수, “유비쿼터스 센서네트워크에 이용되는 공기질 측정 센서의 보정 방안 연구”, 한국대기환경학회, 한국대기환경학회 2006년 춘계학술대회논문집, pp. 527~528, 2006년 4월
- [3] M. Li and Y. Liu, “Underground Structure Monitoring with Wireless Sensor Networks,” In Proceedings of the 6th international Conference on information Processing in Sensor Networks, pp 69 - 78, April 2007.
- [4] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci., “A survey on sensor networks”, IEEE Communications Magazine, 40(8), pp. 102-114, August 2002.
- [5] A. Cerpa, J. Elson, D. Estrin, L. Girod, M. Hamilton, and J. Zhao. “Habitat monitoring: Application driver for wireless communications technology”, In Proceedings of the 2001 ACM SIGCOMM Workshop on Data Communications in Latin America and the Caribbean, April 2001.
- [6] Yi, S.H. Park, Y.W. Han, S.O. Min, N. Kim, E.S. Ahn, “T.W. Novel NDIR CO₂ sensor for indoor Air quality monitoring”, The 13th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems, June, 2005.
- [7] Yanfeng Wang, Masakatsu Nakayama, Mikiko Yagi, Makoto Nishikawa, Masaichi Fukunaga, and Kenzo Watanabe, “The NDIR CO₂ Monitor With Smart Interface for Global Networking”, IEEE Transactions on instrumentation and measurement , VOL. 54, NO. 4, pp1194-1198, August 2005.
- [8] Kimlo Mlyatake, Kozo Ishida, and Hiroji

Kohsaka, Neal Harvey, "Fast Response NDIR for Real-Time Exhaust Measurement", Measurement Science and Technology, pp1776-1786, December 1996.

[9] Kim, W. S., Lee, J. H., Park, Y. M., and Yoo, J. S. "Development of fast-response portable NDIR analyzer using semiconductor devices", Journal of Mechanical Science and Technology Vol.19 No.4, pp1001-1005, April 2005.

[10] SHT11, "Data Sheet humidity sensor SHT1x SHT7x E", <http://www.sensirion.com/>

[11] ATmega 128(L) Preliminary Complete. Atmel product document, 2004. http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc2467.pdf

[12] CC2420, "2.4GHz IEEE 802.15.4 / ZigBee RF Transceiver. Chipcon product data sheet", <http://chipcon.com>

[13] 정기훈, 염미령, 노삼혁, "아파치 웹서버의 성능 비교 분석", 한국정보과학회 2001년도 가을 학술발표 논문집 제28권 제2호 (III), pp.694~696, 2001년

[14] 서병량, 정만호, 정경훈, 전준민, "다중이용시설에서의 실내공기질 실태 파악" 한국대기환경학회, 2005년 춘계학술대회논문집, pp. 55~56, 2005년 5월

저 자 소 개



권 중 원(학생회원)
 1995년 서울산업대학교 전자정보공학과 학사 졸업.
 2007년 서울시립대학교 전자전기컴퓨터공학부 석사 졸업.
 2009년 서울시립대학교 전자전기컴퓨터공학부 박사과정.

<주관심분야 : 무선센서네트워크, 임베디드 리눅스, 신호처리, 컴퓨터 네트워크>



김 조 천(정회원)
 1982년 전남대학교 화공특성학과 학사 졸업
 1988년 서울대학교 환경대학원 석사 졸업.
 1995년 미국 플로리다 주립대학교 박사 졸업

현재 건국대학교 환경공학과 교수
 <주관심분야 : 센서, CO₂ 신호처리, 환경>



김 규 식(정회원)
 1981년 서울대학교 전자공학과 학사 졸업
 1983년 서울대학교 제어계측공학과 석사 졸업
 1990년 서울대학교 제어계측공학과 박사 졸업

1988년~1992년 대우중공업 중앙연구소 선임 연구원
 1993년~현재 서울시립대학교 전자전기컴퓨터공학부 교수
 2003년~2005년 Univ. of Wisconsin-Madison 방문교수(Visiting Scholar)

<주관심분야 : 센서네트워크, 비선형제어, 에너지 변환>



김 희 식(정회원)
 1977년 서울대학교 기계설계학과 학사 졸업
 1979년 한국과학원 생산공학과 석사 졸업
 1987년 독일 Stuttgart 대학교 공학박사 졸업

1979년~1982년 과학기술부 원자력국, 감사관실 (사무관)
 1987년~1989년 한국과학기술원 CAD/CAM연구실 (선임연구원)
 1989년~현재 서울시립대학교 전자전기컴퓨터공학부 교수

<주관심분야 : 센서, 생산공학, 원격계측, 계측네트워크>