

스마트 기기와 결합 가능한 LED 광원을 사용하는 저전력용 비분산 적외선 CO₂센서

김 종 현*, 이 찬 주°

Low Power NDIR CO₂ Sensor Using LED Light Source with a Smart Device Interface

Jong-heon Kim*, Chan-joo Lee°

요 약

본 논문에서는 스마트폰에 장착 가능하고 휴대가 가능한 고효율 NDIR CO₂ 센서 모듈을 개발하였다. 저전력 회로 설계를 위하여 텅스텐램프 대신에 적외선 LED를 사용하였으며, 센서 모듈에 최적화된 광도파로를 설계 및 제작하였다. 스마트폰과 인터페이스가 가능한 회로를 통하여 스마트폰의 전원으로 센서 모듈이 구동되도록 설계하였다. CO₂ 농도, 온도 및 습도 등 측정된 센서의 데이터는 스마트폰 앱을 통하여 화면에 표시하였다. 측정 결과, 개발된 센서 모듈은 온도-10°C ~50°C 구간에서 0 ~ 3,000ppm 범위의 CO₂ 농도를 측정할 수 있었으며 측정 오차는 ±60ppm 이내였다.

Key Words : NDIR(nondispersive infrared), CO₂ sensor, LED, CO₂ concentration, smart phone

ABSTRACT

In this paper, a portable high efficiency nondispersive infrared(NDIR) CO₂ sensor module with a smart device interface is developed. For low power consumption design, an IR LED was used instead of tungsten lamp for light source and an optical waveguide optimized to the sensor module is designed. With the smart device interface, power of the sensor module is applied from the battery of smart phone. The measured data of the sensor module such as CO₂ concentration, temperature, and humidity are displayed on the smart phone using android application. From measured results, the developed sensor module shows ±60ppm tolerance error from 0 to 3,000ppm CO₂ concentration range among -10°C and 50°C ranges.

I. 서 론

이산화탄소(CO₂) 센서는 공기 중의 오염 상태를 파악하기 위한 센서로 지하철, 철도, 버스 및 자동차와 같은 다중이용시설이나 주택 등에 사용되며, 식물의 성장이나 생육에 직접적인 영향을 주는 CO₂량을 관리

하기 위해서도 사용되고 있다.

CO₂ 센서는 검출 방식에 따라서 크게 접촉식과 광학식으로 분류되며, 접촉식은 소형, 저가인 장점과 측정 신뢰성이 낮은 단점을 가지고 있으며 광학식은 신뢰성이 좋지만 크기가 크고 충격에 약하다는 단점을 가지고 있다. 광학식 중에서 현재 사용되고 있는

* 본 논문은 중소기업청에서 지원하는 2014년도 산학연협력기술개발사업(No. C0236822)의 연구수행으로인 한 결과물임을 밝힙니다.

• First Author : Kwangwoon University Department of Electronics Convergence Engineering, jhkim@kw.ac.kr, 종신회원

° Corresponding Author : Shinhan University Department of IT Convergence, cjlee@shinhan.ac.kr, 종신회원

논문번호 : KICS2015-06-173, Received June 8, 2015; Revised July 20, 2015; Accepted August 6, 2015

NDIR(Non Dispersive Infrared)방식은 정밀도나 센서 수명에 있어서 가장 뛰어나다.

NDIR(Non Dispersive Infrared) 방식의 원리는 비분산 적외선 흡수 방식으로 가스성 물질들이 적외선(Infrared light)에 대해 특정한 흡수 스펙트럼(예: H₂O의 경우 1.4 μ m와 1.9 μ m, CO의 경우 4.7 μ m)를 갖는 것을 이용하여 특정 성분의 농도를 구하는 방식을 말한다. CO₂ 가스 농도 검출 방식은 적외선 램프로부터 방출된 4.26 μ m 파장의 빛이 센서까지 도달하는 과정에서 CO₂ 가스 농도에 따라 감소하는 빛의 양을 검출하는 방식으로 이를 전기적인 신호로 변환하여 측정하는 원리이다.^[1,2]

하지만 광원으로 텅스텐램프를 사용하는 경우 전류를 많이 소모하고 대용량 배터리를 사용하여 휴대장비에 적합하지 않다는 단점을 가지고 있다.

따라서 본 논문에서는 기존의 NDIR 방식의 단점을 극복하고 소형이면서도 휴대성이 편하고 스마트폰에 접속하여 추가적인 배터리 사용 없이 언제든지 측정이 가능한 휴대용 가스 센서의 개발을 목적으로 하였다.

최근 들어 이러한 센서들이 인터넷의 발전에 따라서 무선네트워크와 접속하여 지속적인 데이터를 모니터링에 하는 분야에 활용하는 연구 결과가 많이 발표되고 있으나 아직까지 스마트폰을 활용한 연구는 보고되지 않았다.^[3-6]

이를 위하여 기존의 필라멘트 램프 대신에 LED를 사용하여 저전력 소비와 열 발생이 적은 센서 모듈 개발을 하였으며, 기존의 센서 측정기에서 많은 부분을 차지한 센서 데이터의 표시나 입력 장치, 전원부와 같은 중요 설계 부분을 스마트폰의 앱으로 대체하고, 센서의 전원을 추가적인 배터리 없이 스마트폰에 의해 공급하도록 설계하였다.

II. CO₂ 센서 모듈 설계 및 제작

2.1 광 도파관 설계 및 제작

광 도파관 설계는 작은 사이즈를 만족해야 하며, 광 도파관 내에서 빛의 이동 경로를 가장 길게 설계하고, 그 빛이 Photo Detector(PD)에 정확히 도달하게 설계하여야 한다. NDIR 광센서에 적용되는 Lambert-Beer 식은

$$\frac{I_d}{I_T} = e^{-\alpha x l} \quad (1)$$

와 같으며, 여기서 $I_T[W/m^2]$ 는 적외선 광원에서 방출되는 광의 강도이고 $I_d[W/m^2]$ 는 적외선 검출기에서 수신되는 빛의 강도, α 는 특정가스의 적외선 흡수계수, x 는 가스농도[ppm], 그리고 l 은 광 공동내에서 적외선 광원과 적외선 검출기 사이의 광 경로(Optical path)의 길이이다. 광 경로가 길수록 적외선에 반응하는 가스 분자의 수가 많으므로 결과적으로 센서의 감도가 우수해 진다. 하지만 광 경로를 길게 하는 경우 가스센서의 부피가 커지고 제작비용이 증가하는 단점이 있다.^[4,5]

본 논문에서는 LED 빛이 반사되는 각도와 Photo diode(PD)에 도달하기 전의 반사각을 동일하게 함으로써 PD에 입사되는 빛의 양이 최소의 손실분을 제외하고 도달하게 하기 위한 구조로 그림 1과 같이 설계하였다.

도파관의 매질은 플라스틱이며 반사면은 Cu와 Ni 도금 후에 특수 금도금으로 장기 사용 시에도 센서 정밀도 유지 및 오차 최소화를 고려하여 제작 하였다. 도파관의 크기는 길이가 33.94mm, 높이가 3.48mm, 그리고 넓이가 9.1mm이다.

시뮬레이션 프로그램인 Tracepro를 활용하여 설계한 광 도파관에 대한 빛의 경로를 그림 2과 같이 확인하였다. 그림 2는 PD에서 검출된 광 도파로를 통과한 광 세기를 보여준다. 광 세기 시뮬레이션 결과 LED에서 출력되는 빛이 도파관의 반사각을 통하여 최종 PD에 도달하는 빛의 양은 입사되는 반사각의 경로에 따라서 약 60% 정도 결과를 확인 할 수 있다.

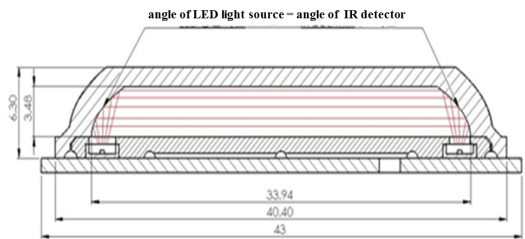
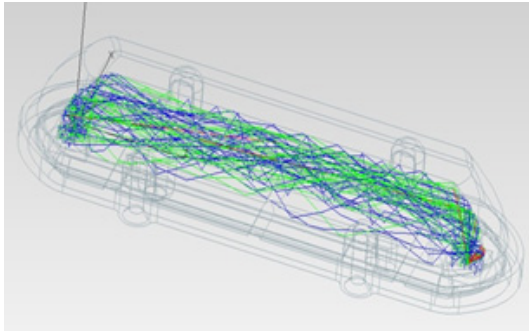


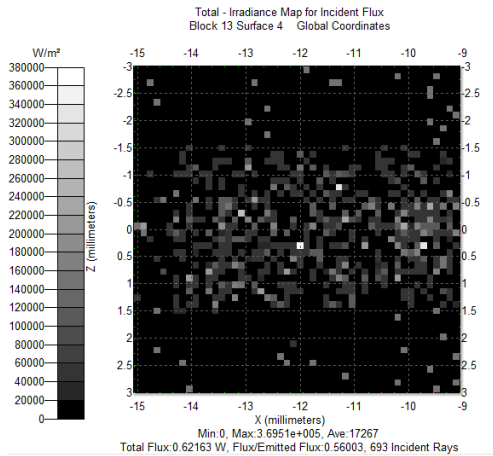
그림 1. 제안된 광 도파관의 구조
Fig. 1. Schematic of proposed optical waveguide

2.2 하드웨어 설계

스마트 폰을 이용한 저 전력 가스센서 모듈의 설계 블록도는 그림 3과 같다. 센서 모듈은 Micro USB 인터페이스를 통하여 휴대 단말기로부터 전원을 공급받아 전원 변환부에서 센서 모듈에 필요한 전원으로 변경 사용한다.



(a)



(b)

그림 2. 광도파로의 시뮬레이션 결과: (a) 광 경로, (b) 검파된 적외선의 양

Fig. 2. Simulation results of the optical waveguide: (a) optical path, (b) intensity of detected IR ray

센서 모듈의 제어부에서는 CO₂ 가스 측정을 위한 CO₂ 센서의 LED 출력을 제어하며, NDIR 방식의 CO₂ 센서에서 측정된 데이터를 입력 받아 분석 알고리즘을 이용하여 현재 CO₂ 가스 농도를 추출한다. 추출된 데이터는 Micro USB 인터페이스를 통해 휴대단말기로 전송하여 휴대단말기에 CO₂ 가스 농도가 표시되도록 한다. 또한 온도, 습도 센서(SHT21)를 이용하여 현재 온도, 습도 측정값도 제어부에서 입력받아 휴대단말기로 동시에 전송하여 휴대단말기에 CO₂ 가스 농도와 같이 표시되도록 한다.

따라서 안드로이드 애플리케이션 개발환경에서 운영되는 휴대단말기인 스마트폰 또는 태블릿 PC는 사용자 인터페이스에서 센서 모듈에서 수신된 CO₂ 가스 농도 및 현재 온도, 습도를 표시하여 실시간으로 업데이트되는 현재 측정값들을 한눈에 확인할 수 있으며, 또한 현재 위치 정보 및 데이터 로깅 기능을 사용자

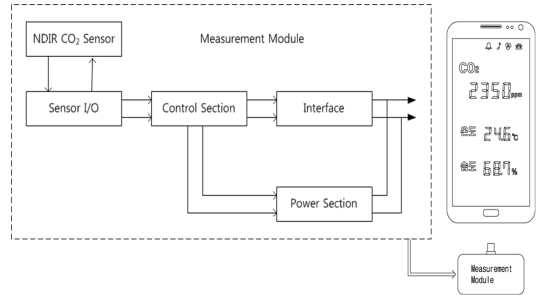


그림 3. 저전력 가스센서 모듈 구성도와 스마트폰 화면

Fig. 3. The block diagram of CO₂ sensor module and smart phone display

환경에 맞게 적용이 가능하다.

2.2.1 전원변환부 및 제어부

센서의 전원은 스마트폰의 Micro USB 단자를 통하여 공급된 전원 5V로부터 MIC5203-3.3V(High Input Voltage, Low IQ μ Cap LDO Regulator)의 Ultra - Low Current Adjustable Regulator Application 회로로 설계하여 DC 3.3V 전압을 제공한다. 제어부 중앙처리장치는 ARM Cortex-M0+를 기반으로 운영되는 SAMD21 마이크로프로세서를 사용하였다. DC 3.3V 전원을 인가 받아 70 μ A/MHz의 저전력 소비로 구동되며 48MHz 속도로 동작 한다. Full-Speed USB Device와 Embedded Host를 제공하며, 12-bit ADC, 10-bit DAC를 제공한다. 중앙 처리장치인 Atmel SAM D21은 전력 절약 기술로써 CPU의 개입 없이 주변 장치가 서로 직접 통신할 수 있도록 하는 이벤트 시스템을 포함한다. Atmel sleepWalking™ 주변 장치는 또한 사전 검증된 이벤트에 대해서만 CPU를 깨우므로 전반적인 전력 소비를 줄일 수 있다.

2.2.2 인터페이스

데이터 출력부를 통하여 중앙처리장치인 SAMD21 내부적인 Full-Speed USB Device와 Embedded Host 기능을 이용하여 스마트폰과 데이터 통신을 한다. 기본적인 데이터 사양은 9600 Baud rate, 8 Data bits, 1 Stop bits이며 Parity bit와 Flow control은 없다.

2.2.3 센서 입출력부

그림 4와 같이 CO₂ 가스 센싱 회로는 인가된 +5V의 전압을 이용하여 정전류 제어를 하며, 마이크로프로세서에서 제어되는 1ms/sec turn ON 펄스를 이용하여 초당 1회 1ms 동안 적외선 LED를 정전류 구동시킨다. LED에 전원이 인가되는 1ms 동안 CO₂의 흡

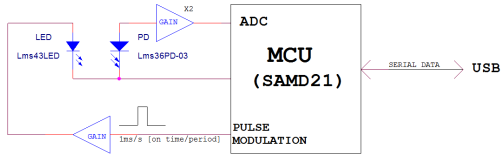


그림 4. 센서 모듈의 신호처리의 구성
Fig. 4. Signal processing configuration of sensor module

광대역인 4.3 μ m의 광과장을 발생하고 Photo Diode 광 검출기는 LED로부터 발생된 4.3 μ m 광을 도파관을 통하여 전달 받는다. 본 논문에서 기존에 사용하였던 적외선 램프대신에 LMSNT사의InAsSb/InAsSbP 헤테로 구조를 가지는 Lms43LED를 사용하였으며, 이 소자의 최대과장 범위는 4.10-4.30 μ m이며, 1 mW 이하의 저전력을 소모한다. PD는 Lms43PD-03를 사용하였다.^[7]

전달되는 광량이 많을수록 광 검출기에는 큰 전류가 흐르고, 이 전류를 OP-AMP를 이용하여 초단 증폭을 하고, 한 번 더 증폭하여 마이크로프로세서의 ADC를 이용해 그 값을 읽는다.

온도 및 습도 센서는 Sensirion사에서 공급된 SHT21(Humidity and Temperature Sensor) 센서를 사용하여 중앙제어장치와 Digital Output, I2C Interface하여 온도, 습도 데이터를 입력 받는다. 그림 5은 최종 제작된 광도파로를 실장한 센서 모듈의 실물 사진이다.



그림 5. 개발된 CO₂ 센서 모듈의 사진
Fig. 5. Photograph of the developed CO₂ sensor module

III. 실험 및 측정 결과

3.1 캘리브레이션 및 CO₂ 농도측정

그림 6과 같이 제작된 지그와 항온조를 이용하여 -10°C~ 50°C범위에서 온도별 캘리브레이션을 진행하였다. 각 온도별 설정 온도 도달 시간 및 설정 온도 유

지 시간을 지정하여 모듈 및 공급 가스의 온도 적을 시간을 할당하며, 캘리브레이션 입력 가스의 압력을 적절히 조절하여 최적의 캘리브레이션 값을 도출하였다.

기본적으로 각 온도별 Zero/Span 가스를 공급하여 캘리브레이션을 적용하며, 필요시 중간 단계의 가스를 공급하여 캘리브레이션 정밀도를 향상 시킨다. 전체적인 운영은 PC 운영 프로그램을 이용하여 진행하며, 공급되는 가스의 기준 온도 범위를 고려하여 공급한다.^[4,8]

본 논문에서는 제작된 서로 다른 모듈 5개를 표준 가스 1,000ppm, 2,000ppm 및 3,000ppm을 주입하여 측정의 정확도를 확인하였으며, 신뢰성을 입증하기 위하여 약 한 달의 기간 동안 총 4회 측정하고 그 결과를 다시 비교하였다.

그림 7은 온도를 -10°C에서 50°C까지 변화시킨 경우에 표준가스 1,000ppm에 대한 측정 오차의 그래



그림 6. 센서 모듈의 캘리브레이션 시험 장치
Fig. 6. Experimental setup for calibration of the sensor modules

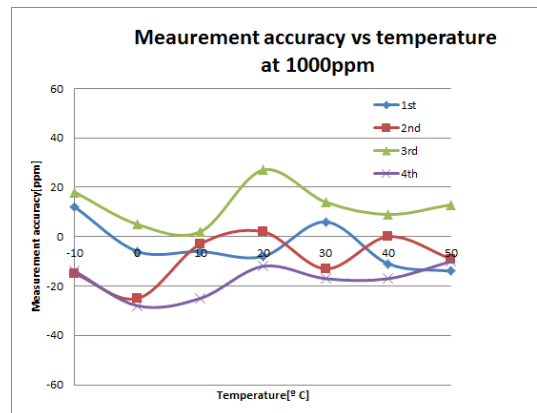


그림 7. 온도 변화에 따른 이산화탄소 농도의 측정 오차 (@1,000ppm)
Fig. 7. Tolerance error of CO₂ concentration with temperature variation (@1,000ppm)

프이다. 동일한 제품을 4회 측정하였으며 최대 측정 오차는 -28ppm으로 오차범위는 ±30ppm이내의 안정된 결과를 나타내었다.

그림 8은 온도를 -10°C에서 50°C까지 변화시킨 경우에 표준가스 3,000ppm에 대한 측정 오차의 그래프이다. 이번에는 동시에 서로 다른 5개의 모듈을 측정하여 측정 정확도를 확인하였다. 모듈에 따라서 최대 측정 오차는 ±60ppm(3%)의 안정된 결과를 나타내었다. 온도에 따른 오차의 함수관계는 없었으며 그림 7과 비교하여 볼 때 높은 농도에서 상대적으로 오차는 늘어나는 것으로 확인 되었다.

신뢰성 입증을 위하여 총 18개의 모듈을 제작하여 온도를 -10°C와 50°C까지 변화키면서 동시에 성능

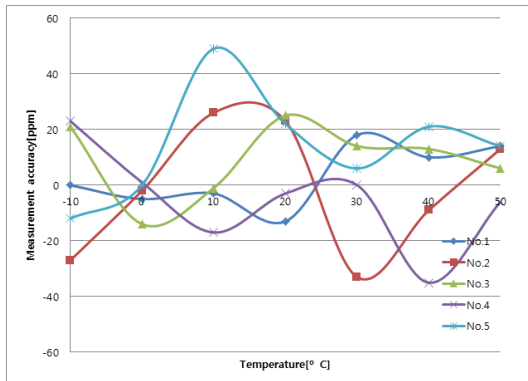
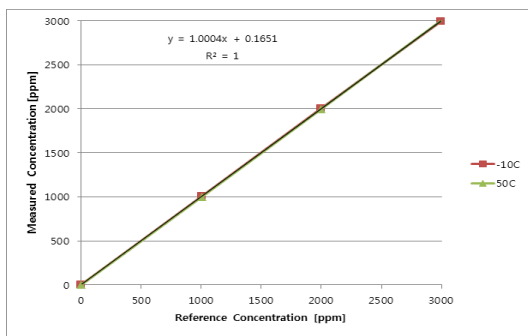


그림 8. 온도 변화에 따른 이산화탄소 농도의 측정 오차 (@3,000ppm)
Fig. 8. Tolerance error of CO₂ concentration with temperature variation (@3,000ppm)



Temp	ppm			
	0	1000	2000	3000
-10°C	6	1008	2006	2992
50°C	4	1001	1997	3001

그림 9. -10°C에서 50°C의 온도 변화에서 표준 농도와 측정 농도
Fig. 9. Measured vs. standard CO₂ concentration with temperature variation from -10°C to 50°C

을 측정하였다. 그림 9는 표준가스 농도와 측정된 가스 농도의 결과를 비교한 그래프로서 가장 낮은 온도 (-10°C)와 가장 높은 온도 (50°C) 구간에서 모두 잘 일치하였다. R제곱은 1을 만족하여 표준농도 값과 제작된 모듈의 측정값과의 상관관계는 잘 일치하였다.

그림 10는 표준가스를 공급한 경우 온도변화에 따른 측정 데이터의 표준편차 결과이다. 일반적으로 가스농도가 높을수록 표준편차는 증가하였으며 온도에 따라서 크게 변화는 없었다. PD를 사용하는 검출기의 경우 20°C이하의 낮은 온도에서는 존슨잡음의 영향이 크고, 경우 20°C이상의 높은 온도에서는 암전류(dark current)의 영향이 큰 것으로 알려져 있다^{4,9)}. 아래의 표 1은 상온 20°C에서 표준농도 1,000ppm, 2,000ppm과 3,000ppm에서 표준편차를 보여준다. 표준편차가 가장 큰 경우는 3,000ppm에서 17.9ppm이었으며 %오차는 1,000ppm의 경우 ±0.6%로 전체 1%이내의 결과를 얻었다.

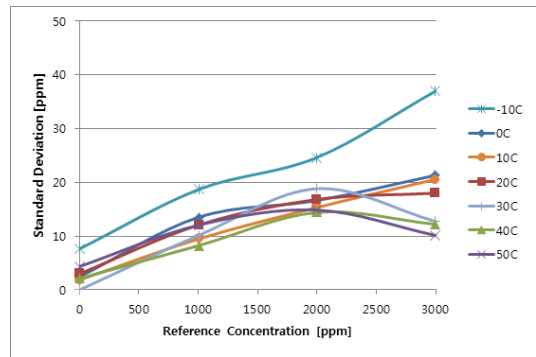


그림 10. 다양한 온도변화에 따른 측정된 이산화탄소 값과 표준편차
Fig. 10. Measured standard deviation of CO₂ concentration with temperature variation

표 1. 상온(@20 °C)에서 측정된 표준편차와 표준농도의 비교
Table 1. Comparison of standard deviation for 3 set CO₂ concentration levels(@20 °C)

Standard concentration (@20°C)	Standard Deviation(±%)
1,000ppm	12.0 , (±0.6%)
2,000ppm	16.8, (±0.42%)
3,000ppm	17.9, (±0.29%)

3.2 스마트폰과 연동 성능 측정

저 전력 가스 측정을 위하여 휴대단말기와 가스센서 모듈을 접속하면 휴대단말기로부터 전원을 공급받은 가스센서 모듈에서는 동작상태(Normal, Idle, Stop,



그림 11. 스마트 폰의 화면에 표시된 CO₂ 농도
Fig. 11. CO₂ gas concentration displayed on the smart phone display

Sleep)에 따라 전원이 ON되고, Normal 상태가 되면 가스를 센싱한다. 그 다음 센싱된 가스를 분석 및 가공하고 가스정보 데이터를 휴대단말기로 전송한다. 휴대단말기에서는 전송된 가스정보 데이터를 그림 11과 같이 휴대단말기의 표시부에 표시한다. 이때, 년, 월, 일, 시 등의 시간 정보와 GPS를 이용한 위치정보를 함께 저장할 수 있다. 그리고 저장한 정보는 유무선 네트워크와 연결하여 해당 결과를 미리 설정된 서버로 바로 전송하도록 할 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 소형이며 휴대성이 편리하고 스마트 폰과 결합하여 측정 가능한 휴대용 NDIR CO₂ 센서를 개발하였다. 기존의 텅스텐램프 사용으로 전류 소모가 많은 단점을 적외선 LED 사용으로 개선하였으며, 빛의 최적 경로 시뮬레이션을 통하여 소형 광도파관을 설계하고, 저전력 회로 설계로 CO₂ 센서를 구현하였다. 본 논문에서 제안한 센서는 전원, 디스플레이 및 입력 장치 등을 스마트폰과 인터페이스하고 앱을 활용하여 휴대용 측정장치로 활용이 가능하다.

최종 제작된 센서는 캘리브레이션 후에 -10°C에서 60°C까지 10°C 간격으로 온도에 노출, 온도 적응 유지 시간 이후에 0, 1000ppm, 2000ppm 및 3000ppm의 4가지 표준 가스를 공급 후 측정결과는 오차 범위는 ±60ppm이하를 만족하였다.

이동통신 단말기나 스마트폰을 활용한 측정은 언

제, 어디서나 무선 네트워크를 이용한 데이터 전송이 가능하므로 산업분야뿐만 아니라 농축산업, 생산시설 및 일반 생활에서도 쉽게 측정이 가능하며 GPS와 함께 위치정보 등 다양한 자료를 공유할 수 있다는 장점을 가지고 있다.

References

- [1] G.-S. Kim, J.-T. Oh, H. S. Kim, and J.-C. Kim, "A study on CO₂ sensor module using NDIR method," *J. IEEK*, vol. 46SC, no. 2, pp. 36-40, Mar. 2009.
- [2] S. H. Yi, Y. H. Park, S. O. Han, N. K. Min, E. S. Kim, and T. H. Ahn, "Novel NDIR CO₂ sensor for indoor air quality monitoring," *Technical Digest of The 13th Int. Conf. Solid-State Sensors, Actuators Microsystems*, pp. 1211-1214, Seoul, Korea, Jun. 2005.
- [3] D. Garcia-Romeo, H. Fuentes, N. Medrano, B. Calvo, P. A. Martinez, and C. Azcona, "A NDIR-based CO₂ monitor system for wireless sensor networks," *2012 IEEE 3rd Latin Am. Symp. Cir. Syst. (LASCAS)*, pp. 1-4, Feb.-Mar. 2012.
- [4] D. Gibson and C. MacGregor, "A novel solid state non-dispersive infrared CO₂ gas sensor compatible with wireless and portable deployment," *J. Sensors*, vol. 13, no. 6, pp. 7079-7103, 2013.
- [5] J.-W. Kwon, J.-C. Kim, G.-S. Kim, and H. Kim, "Air quality monitoring system using NDIR-CO₂ sensor for underground space based on wireless sensor network," *J. IEEK*, vol. 46, no. 4, pp. 28-38, Jul. 2009.
- [6] Y. Wang, M. Nakayama, M. Yagi, M. Nishikawa, M. Fukunaga, and K. Watanabe, "The NDIR CO₂ monitor with smart interface for global networking," *IEEE Trans. Instrumentation and Measurement*, vol. 54, no. 4, pp. 1634-1639, Aug. 2005.
- [7] http://lmsnt.com/datasheets/Standard%20chip/Lms43LED/lms43led_series_rev040512.pdf http://lmsnt.com/datasheets/PD/Lms43PD/-03/Lms43PD-03series_rev070515.pdf Retrieved July, 20, 2015, from <http://lmsnt.com/>

- [8] "AN131-CO2 Sensor Calibration: What You Need to Know" Retrieved July, 20, 2015, from <http://www.co2meters.com/Documentation/App Notes/AN131-Calibration.pdf>
- [9] H. P. Beerman, "The pyroelectric detector of infrared radiation," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 16, no. 16, pp. 554-557, Jun. 1969.

김 종 현 (Jong-heon Kim)



1990년 6월 : 독일 Ruhr Univ. Bochum 전자공학과 공학석사
1994년 8월 : 독일 Dortmund Univ. 전자공학과 공학박사
2002년 1월~2007년 4월 : 캐나다 SFU Research Associate

2005년 3월~2008년 12월 : IT 국제 표준화 전문가
1995년 4월~현재 : 광운대학교 전자융합공학과 교수
<관심분야> 고효율 전력증폭기, 선형화기, 스펙트럼 공학, 마이크로파 센싱

이 찬 주 (Chan-joo Lee)



1987년 2월 : 광운대학교 전자통신과 공학사
1989년 8월 : 광운대학교 대학원 전자통신과 공학석사
1994년 8월 : 광운대학교 대학원 전자통신과 공학박사
1996년 3월~1997년 2월 : 독일

RWTH Aachen 공대 Post Doctorial research
1993년 3월~현재 : 신한대학교 IT 융합공학부 교수
<관심분야> 초고주파 회로설계, 레이더 및 비콘 회로 설계, 전자파 간섭 및 측정