

LNG 저장탱크용 작업안전 환경 센싱 모듈의 특성 연구

박병진[†], 김민성^{**}

A Study on the Characteristics of the Work Safety Environment Sensing Module for LNG Storage Tanks

Byong Jin Park[†], Min Sung Kim^{**}

ABSTRACT

We have developed an embedded based environment sensing module with high-resolution temperature, humidity and gas sensors to detect gas leakage under the condition of LNG injection. The developed sensing module have linearity with gas concentration. We have confirmed the developed sensing module could detect LNG gas concentration of 5 cmol/mol and 15 cmol/mol, which are gas concentration at risk of explosion. The response time of the developed module was fast within 8 seconds. Therefore it can be used to detect LNG gas leakage.

Key words: LNG Storage Tank, Gas Sensing Module, LNG gas leakage, Gas detection

1. 서 론

최근 LNG 저장탱크의 가스 주입 작업 과정에서 발생하는 GAS 누출 또는 이로 인한 2차 폭발로 인명 피해와 시설물 피해가 염려되고 있다. 선박에서의 GAS 누출로 인한 폭발과 화재사고를 사전에 예방하고 작업환경의 안정성을 강화하기 위한 가스 주입 작업 과정을 실시간 모니터링 함으로서 각종 안전사고를 사전에 예측하고 방지할 수 있는 모니터링 시스템 연구가 요구되고 있다[1]. 선박의 LNG 사고빈도는 적지만 피해가 큰 사고의 특성을 가지고 있으며 선박에서의 사고는 인명과 물적 피해가 야기될 수 있다[2-3] LNG는 초저온(-165°C) 상태로 저장과 운송의 편의를 위해 영하의 온도를 유지하면서 체적의 600배 이상 줄인 것이 LNG이며 저장시설에서의 문제 발생은 결과적으로 엄청난 양의 가스누출로 이어질 수 있고 사고에 따른 위험성도 매우 크다. 따라서

LNG 저장시설의 작업에는 엄격한 안전기준과 설계 기준이 적용되며 사고에 대비한 2~3중의 안전장치가 필요하다[4]. 사고가 발생할 경우 뒤따르는 경제적 손실이나 사고의 파장이 아주 크기 때문에 사고 나기 전에 확인 및 감지할 수 있는 모니터링 시스템이 필요하다. 또한, LNG 가스 주입 공정 시 작업자들의 안전을 위하여 ICT 기반의 작업 환경 센서 모듈 개발 특성에 대한 연구가 이루어져야 한다. LNG 주입시 위험사항을 체크하기 위해서 파이프라인의 온도가 23에서 -163°C로 급격하게 변하는 온도 변화, 밸브 오동작, 가스 누출, 파이프라인 균열, 가스의 공급 과다 주입 등의 위험사항을 확인해야 한다[5]. 또한 LNG 가스의 주입환경에서 LNG 가스의 발화, 폭발 조건으로 모든 발화 원인(불꽃, 고온, 고압 등)으로 인한 공기 중에서 폭발할 수 있는 가스의 농도(5~15%)는, 발화 하한치(3.8~6.5%), 발화 상한치(13~17%) 범위에 있다. 이와 같은 LNG 가스 주입 특성

※ Corresponding Author : MinSung Kim, Address: (48520) 428 Sinseon-ro, Nam-gu, Busan, Korea, TEL : +82-51-629-1148, FAX : +82-51-629-1519, E-mail : minsung@tu.ac.kr

Receipt date : Feb. 14, 2022, Approval date : Feb. 22, 2022

[†] Department of Electrical, Electronics & Information Communications Engineering, Graduate School, Tong Myong University (E-mail : mrpbj@hanmail.net)

^{**} School of Artificial Intelligence, College of Artificial Intelligence Convergence TongMyong University

조건의 작업환경에서 가스 누출이 센싱 되어야하므로 압력, 온도, 가스 농도, 플로우 측정이 가능한 LNG 주입 환경에 적합한 전용의 새로운 센서 모듈 개발이 필요하다. 본 연구에서 LNG 저장탱크의 가스 누출로 인한 발화, 폭발 등의 위험성이 있는 작업 지역 내의 고농도 가스 검출이 가능한 임베디드 기반의 작업 환경 센서 모듈을 개발하였다. LNG 가스의 주입 작업주변의 환경 센싱을 위해서 온도, 습도, Gas 고분해능을 가진 센서가 포함된 임베디드 기반의 LNG 환경센싱 가스 모듈을 개발하여 그 특성을 조사하였다. LNG 가스의 안전범위의 가스 농도에서 실험을 하고 폭발 범위의 고농도의 가스 검출이 가능한 예측 방법을 제안한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 환경 센싱 모듈의 개발에 대하여 설명을 한다. 3장에서는 모듈의 성능을 평가하며, LNG 가스 농도에 따라 실험한 저항 값을 Linear Fitting 식에 대입하여 고농도에서의 예측 방법과 가스반응 응답속도 결과에 대해 기술한다. 4장에서 결론을 맺는다.

2. 본 론

2.1 임베디드 기반 환경 센싱 모듈 설계 및 개발

본 연구에서는 LPG, LNG, 메탄, 프로판, H₂(가연성) 등의 누출 가스에 대한 센싱이 가능한 가스주입 환경 센싱 전용 모듈 개발이다. 가스 센서는 접촉연 소식으로 정격전압 2.5V, 회로전압 DC 9V~12V, 소비전력 100~150mA, 출력 DC 0~5V를 갖는 일본 네모토사 NAP-55A를 사용하였다. 가스 센서에 2.5V를 인가하고 가변저항에 의해 설정된 감도 별로 센서의 출력을 릴레이, 부저 그리고, LED를 통해 직 관적으로 LNG를 감지할 수 있는 테스트 보드 설계 및 기능 테스트가 가능한 모듈을 개발하였다

Fig. 1은 LNG 가스 센싱 모듈에 구성되는 각 부품의 회로도를 나타내고 있다.

Fig. 2는 주변 환경 데이터 수집용 온습도 센서 모듈 회로도이다. 온습도 센서는 Atonic 사의 산업용 온습도 센서 사용하고, 센서 출력은 전류, 전압, 데이터 타입으로 사용 가능한 제품으로 구성하였다. OP-AMP 및 사용 부품은 모두 정밀급(F급)을 사용하여

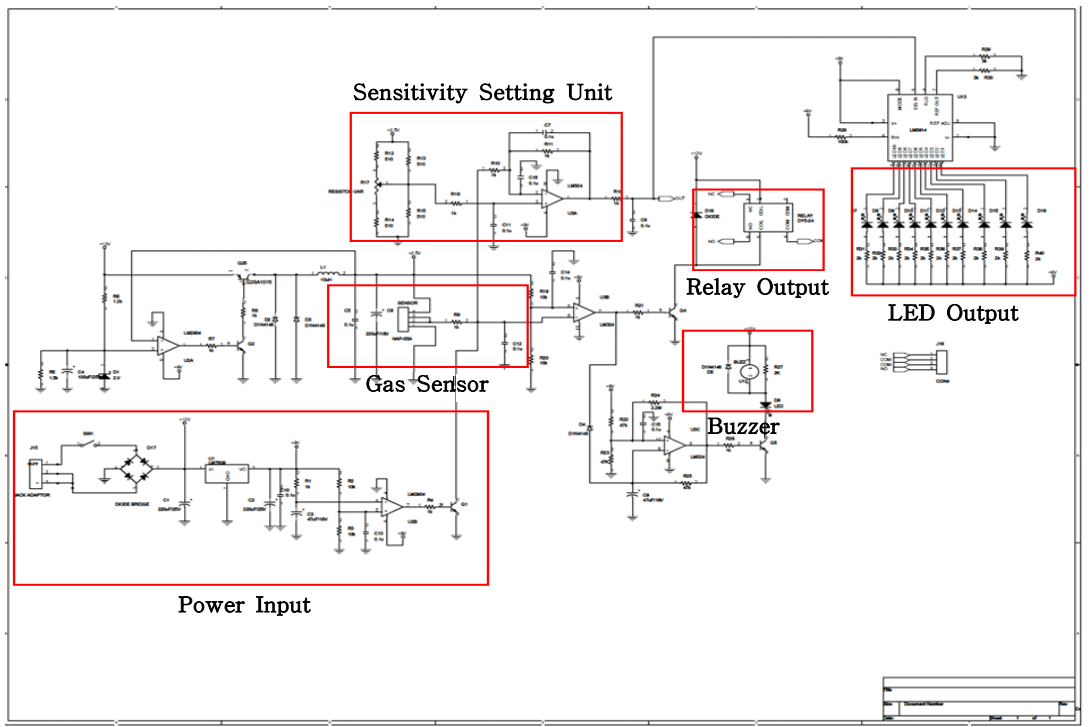


Fig. 1. Circuit diagram for LNG gas sensing module.

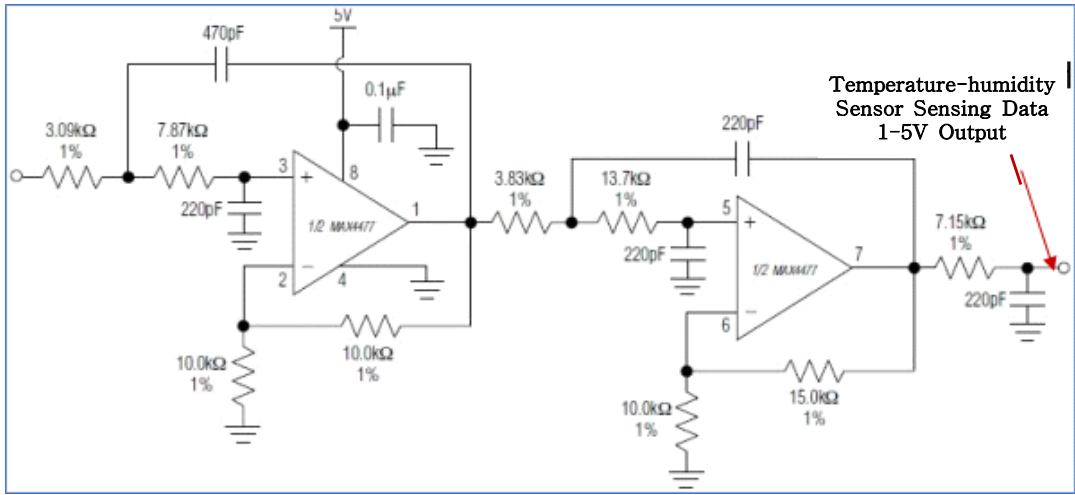


Fig. 2. Circuit diagram for Temperature-humidity Sensor module.

발생 가능한 오차를 최소화시킬 수 있도록 하였다. 임베디드 MCU 제어기 회로 설계에서 센서 모듈에서 전달되는 RAW 데이터를 저장하고 처리하기 위한 신호 채널, 제어 포트, 데이터 표시 등 센서 모듈을 통합적으로 제어 가능한 제어기를 설계하였다.

Fig. 3은 임베디드 MCU 제어기 회로 설계를 나타내고 있다.

Fig. 4는 개발한 환경센싱 모듈의 시제품 사진으로 앞모습(좌)과 뒷모습(우)을 나타내고 있다. Gas 센서와 온습도 센서 등이 부착되어 있다.

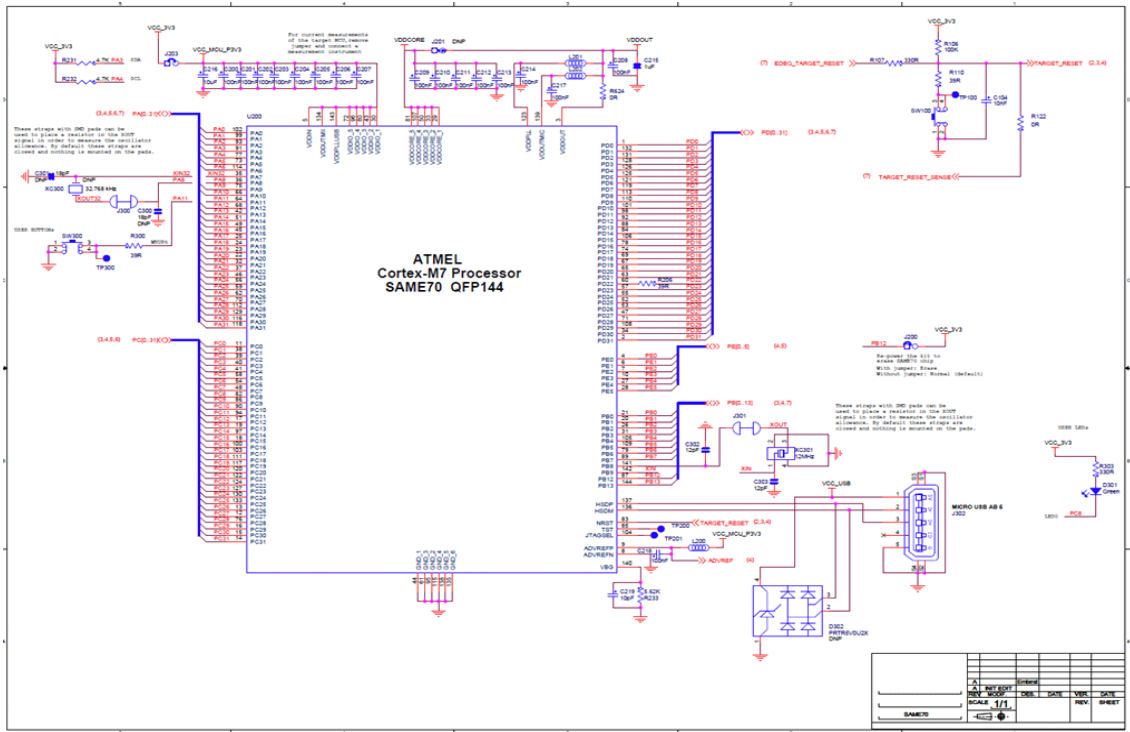


Fig. 3. Design of an embedded MCU controller circuit diagram.

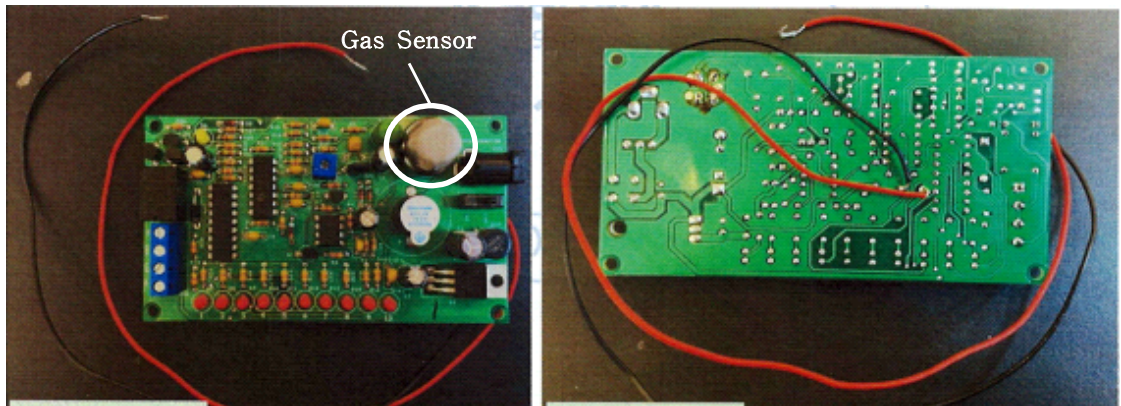


Fig. 4. Photograph of Prototype environmental sensing module (Left: front, Right: back).

3. 실험방법 및 결과

3.1 LNG 가스 실험조건

환경센싱 모듈의 실험 조건으로 N_2 가스 \rightarrow LNG 가스(1.0 cmol/mol) \rightarrow N_2 가스 \rightarrow LNG 가스(1.1 cmol/mol) \rightarrow N_2 가스의 순서로 LNG 가스 농도를 증가시키면서 연속으로 측정하였다. N_2 가스를 주입하는 이유는 LNG 가스의 농도 변화를 알기 위함이다. 시험 가스 농도별 가스 반응 확인을 위한 Resolution[%]은 LNG 가스를 1.0 cmol/mol에서 2.0 cmol/mol까지 0.1 cmol/mol 간격으로 증가시키면서 측정하였다. LNG 가스 주입 직전에 N_2 가스 주입 후 1,200초 지점에서의 저항 값(R_1)대비 LNG 가스 농도별 주입 후 600초 지점에서의 저항 값(R_2) 변화율을 말하며 수식 1과 같이 나타내고 있다.

$$Resolution[\%] = (R_2 - R_1) \div R_1 \quad (1)$$

환경센싱 모듈에 N_2 가스와 LNG 가스를 순차적으로 노출 시키는 것을 1 Cycle이라고 하며 1 Cycle은 1,800초로 한다. N_2 가스 주입시간을 1,200초, LNG 가스 주입 시간을 600초, LNG 가스 농도는 저농도에서 고농도로 변화시키면서 연속으로 주입하고, LNG 가스가 가스 챔버에 주입되고 600초가 된 시점에서 실험결과의 Digital Multimeter에서 추출되는 저항 값이 산출될 수 있도록 실험 조건을 잡았다.

농도 변화율 실험은 LNG 가스 농도의 폭발 범위인 5.0 cmol/mol(하한)와 15.0 cmol/mol(상한)에 있어서는 폭발위험이 높아 LNG 가스 농도 5.0 cmol/mol, 15 cmol/mol에서는 실험을 진행할 수 없다. 그 이유는 LNG 가스에 포함되어 있는 메탄가스가 공

기와 혼합되었을 때 앞에서의 농도의 범위에서는 폭발이 일어날 가능성이 높기 때문이다. 따라서 보통 가스 센서는 농도에 선형적으로 반응하므로 폭발 위험성이 높은 구간을 제외한 LNG 가스의 농도 0.5~3 cmol/mol 안전범위에서의 농도에 따라 실험을 진행하고, 위험도가 있는 고농도의 5 cmol/mol~15 cmol/mol에서의 반응 실험은 Linear Fitting 식에 대입하여 예측하는 방법으로 대체하여 제시한다.

LNG 가스 농도 0.5~3 cmol/mol은 시험에 사용된 농도 범위이며, 해당 농도에서의 측정값으로 Linear Fitting 식의 수식 2를 이용하여 5 cmol/mol, 15 cmol/mol 값을 대입하고 예측하여 결과를 산출한다. 선형 Fitting한 식은 아래와 같다

$$Y = 5.468X + 65.665 \quad (X = \{5, 15\}) \quad (2)$$

LNG 가스를 0.5 cmol/mol에서 3.0 cmol/mol까지 0.5 cmol/mol 간격으로 증가시키면서 주입하였을 때 추출한 저항 값을 갖고 선형 Fitting 수식을 이용하여 C_{LNG} 값에 5.0 cmol/mol, 15.0 cmol/mol을 대입하여 계산된 C_R 값을 예측 값으로 잡았다.

센서 응답속도는 농도 변화율 시험의 Raw Data를 이용하여 계산하며 T(C)에서 T(0) 시간을 뺀 값의 절대 값이고 수식 3과 같다. 여기서 T(0)는 LNG 가스 농도에 따라 LNG 가스를 주입하기 직전의 N_2 가스 주입 후 1,200초 지점에서의 시간이며, T(C)는 LNG 가스 농도에 따라 LNG 가스를 주입하기 직전의 'T(0) 지점에서의 저항 값'을 기준으로 LNG 가스를 주입한 후 출력 값이 반응하기 시작한 지점(10% 이상 변화)에서의 시간이다. 센서 응답속도 식은 수식 3과 같다.

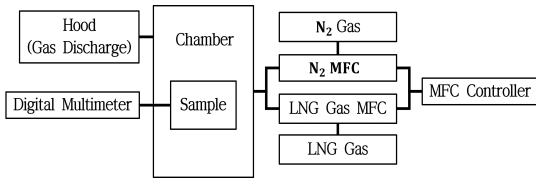


Fig. 5. Test configuration Diagram : Resolution, Change of concentration, Sensor response speed.

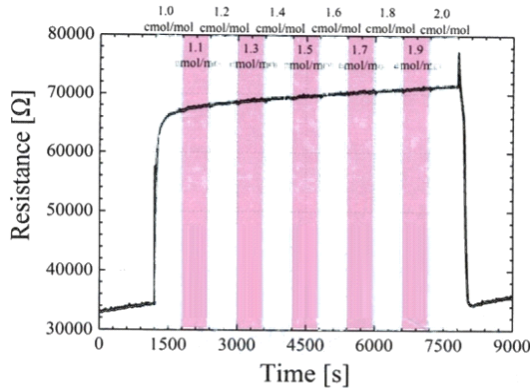


Fig. 6. Resolution test Raw Data graph(LNG gas concentration 1.0 cmol/mol~2.0 cmol/mol, 0.1 cmol/mol interval).

$$Sensor\ Response\ Speed[S] = |T(C) - T(0)| \quad (3)$$

센서 응답 실험 측정 방법과 조건에서 농도변화를 실험의 Raw Data를 이용하여 응답속도를 산출한다. 산출된 센서 응답속도의 기준을 '20초' 이하일 경우에 센서 응답속도 값이 유효하다.

환경센싱 모듈의 LNG 가스에 대한 성능평가를 위한 실험방법으로 Resolution, 농도 변화를 그리고 센서 응답속도를 측정하기 위해서 Fig. 5와 같이 실험장치를 구성하였다. Fig. 5에서 보는바와 같이 시료

를 챔버 안에 넣고, 시료를 Digital Multimeter에 연결하고 USB 허브를 통해 Notebook과 연결한다. 챔버 안에 N₂ 가스 및 LNG 시험가스를 교정 받은 MFC로 주입하여 Digital Multimeter에서 출력되는 저항값을 산출할 수 있도록 장치를 구성하였다. 챔버안의 시료에 각각의 가스농도를 조절하면서 가스를 주입하고 Digital Multimeter를 통해서 모듈의 저항을 측정하여 Resolution, 농도 변화율 그리고 센서 응답속도를 조사하였다.

3.2 실험 결과

3.2.1 Resolution 실험 결과

Resolution[%] 실험의 저항 값은 약 9,000초(150분) 동안 1초 간격으로 측정되었으며, 100초 간격으로 데이터를 얻었다. Fig. 6에서 LNG 가스를 1.0 cmol/mol에서 2.0 cmol/mol까지 0.1 cmol/mol 간격으로 증가시키면서 주입하였을 때 얻은 저항 값을 나타내고 있다. LNG 가스농도가 1.0 cmol/mol이 주입되는 시점인 1,300초부터 저항 값이 약 66KΩ으로 증가하여 약 70KΩ의 근처의 저항 값으로 일정하게 유지되다가 2.0 cmol/mol 가스 주입이 끝나는 8,000초 지점에서 저항 값이 감소하는 그래프의 경향을 나타내고 있다. 가스 주입량과 저항 값이 비례하여 일정하게 유지되는 관계를 나타내고 있다.

Tabled 1에서 보는 것과 같이 가스주입 실험 조건에서 LNG 가스를 1.0 cmol/mol에서 2.0 cmol/mol까지 0.1 cmol/mol 간격으로 증가시키면서 주입하였을 때, 측정된 가스 농도와 Resolution[%] 값을 선형 Fitting한 수식에 대한 결과 값을 나타내고 있다. 측정된 가스 농도에 따른 Table 1 안의 R^{2*}은 선형 Fitting한 수식에서 얻어지는 값으로, 입력과 출력간의 선형

Table 1. Resolution test result (LNG gas concentration 1.0 cmol/mol~2.0 cmol/mol, 0.1 cmol/mol interval).

Linear Fitting formula		Y = 11.876 X + 85.654		
R ^{2*}		0.9826		
Concentration [cmol/mol]	1.0	1.1	1.2	1.3
Resolution [%]	96.445 018 1	98.891 942 5	100.003 565	101.245 701
Concentration [cmol/mol]	1.4	1.5	1.6	1.7
Resolution [%]	102.542 316	104.106 136	105.238 208	106.008 046
Concentration [cmol/mol]	1.8	1.9	2.0	X
Resolution [%]	107.076 844	107.948 094	108.638 566	
Confirmation Yes/No ** of Resolution precision				Yes

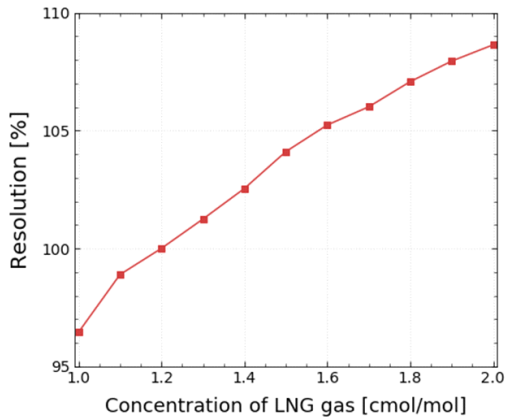


Fig. 7. Resolution test result graph (LNG gas concentration 1.0 cmol/mol~2.0 cmol/mol, 0.1cmol/mol interval).

성 관계를 나타내는 계수로서 '1'에 가까울수록 상관 계수가 높다. R^2 값이 0.9826으로 산출되었다. LNG 가스 농도 1.0 cmol/mol에서 2.0 cmol/mol까지 0.1 cmol/mol 간격으로 주입하였을 때 Resolution[%] 실험 결과는 Fig. 7에서와 같이 LNG 가스 농도에 따라서 Resolution[%] 값이 비례하여 선형적인 그래프를 나타내고 있다.

3.2.2 농도 변화율 결과

농도 변화율 시험에서 저항 값은 각 농도의 가스 분위기에서 약 12,000초(200분) 동안 1초 간격으로 저항을 측정하였으며, 약 120초 간격의 Raw Data만 기록하였다. 농도 변화율 시험의 Raw Data 그래프는 Fig. 8과 같다. 선형 Fitting한 수식을 산출하기 위한 C_{LNG} 값을 X축으로 하고 C_R 값을 Y축으로 하는 농도 변화율 시험의 그래프는 Fig. 9에 나타내고 있다. 가스 농도 변화율의 저항 값 결과를 Table 2에 나타내고 있다. LNG 가스 농도 0.5~3 cmol/mol, 0.5 cmol/mol 간격은 실험에 사용된 농도범위이며, 해당 농도에서의 측정값으로 Linear Fitting 식을 이용하여 5 cmol/mol, 15 cmol/mol 농도의 예측한 값으로 나타

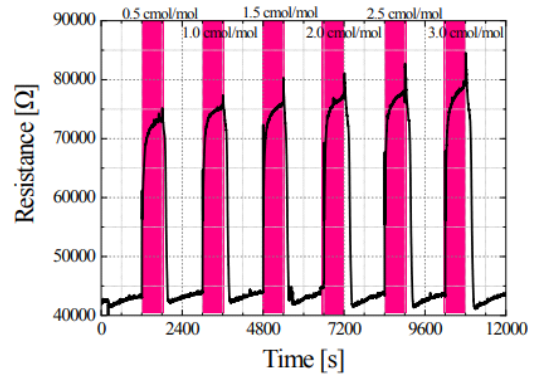


Fig. 8. Test resistance graph according to gas concentration change rate(LNG gas concentration 0.5 cmol/mol~3.0 cmol/mol, 0.5 cmol/mol interval).

내고 있다.

선형 Fitting한 식 : $Y = 5.4568X + 65.665$ (X값에 5, 15를 대입)

선형 Fitting한 수식의 X 값에 5.0과 15.0을 대입하여 LNG 가스 농도의 폭발 범위인 5.0 cmol/mol(하한)과 15.0 cmol/mol(상한)에서의 저항 값을 예측하여 결과를 산출하였다. 농도 5 cmol/mol, 15 cmol/mol 일 때 예측 값은 92.95%, 147.52%를 얻었다. 이 결과 값은 실험에 사용한 LNG 가스 농도 0.5~3 cmol/mol, 0.5 cmol/mol 간격의 실험에서 사용된 농도범위의 농도변화율에서 5 cmol/mol, 15 cmol/mol 농도를 Linear Fitting 식에 적용 산출 예측한 값을 알아냄으로써 환경센서의 고농도에서 예측 가능성을 알 수 있다.

Fig. 8에서 가스 주입시 반응하는 저항값(Ω) 나타내고 있다. LNG 가스 농도가 0.5~3.0 cmol/mol, 0.5 cmol/mol 간격으로 가스 주입시 반응을 하여 각각 저항 값으로 0.5 cmol/mol 일 때 약 73KΩ, 1.0 cmol/mol 일 때 약 75KΩ, 1.5 cmol/mol 일 때 약 75KΩ, 2.0 cmol/mol 일 때 약 76KΩ, 2.5 cmol/mol 일 때 약 77KΩ, 3.0 cmol/mol 일 때 약 78KΩ으로 가스 농도를 증가시키면 저항 값이 상승하고 있음을 알 수

Table 2. Test result of gas concentration change rate.

Item	Concentration[cmol/mol]							
	Measurement Values						Prediction Values	
Change of Resistance [%]	0.5	1	1.5	2	2.5	3	5	15
	69.59	70.94	72.81	75.94	78.45	83.56	92.95	147.52

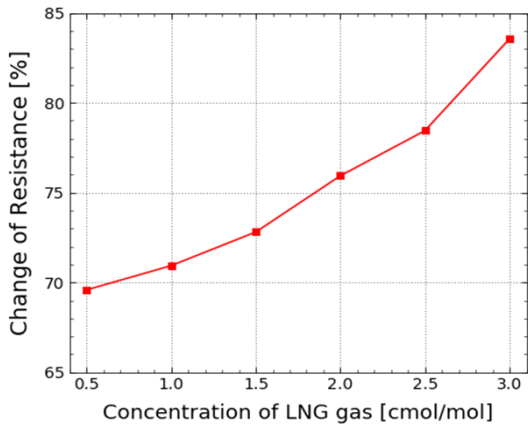


Fig. 9. The graph of the rate of change in resistance according to the concentration(X axis: C_{LNG} , Y axis: C_R).

있다. 각각의 주입된 가스 농도에서 측정된 저항 값이 각각 나타내고 있다. 이는 모듈이 가스에 반응을 통해서 데이터 측정이 잘되고 있음을 확인하고 있다.

Fig. 9에 보는바와 같이 농도에 따른 저항 변화율 그래프에서 가스 농도 대비 저항 변화율은 선형적인 관계를 나타내고 있다.

3.2.3 LNG 가스 응답속도 결과

일반적으로 가스센서는 LNG 가스 감지를 한 후 20~30초 정도의 감지시간이 걸린다. N_2 가스 주입 하였을 때의 저항 값을 기준으로 시험 가스 주입 후, 20초 이내로 저항 변화가 관찰되는지 확인하였다. 시험가스 농도 조건으로 0.5~3 cmol/ mol, 0.5

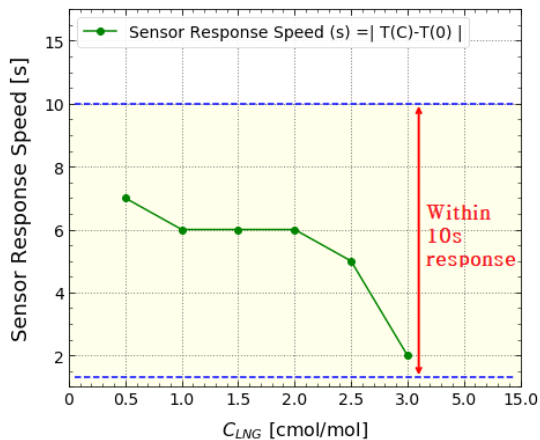


Fig. 10. Gas response speed graph.

cmol/mol의 스텝으로 측정된 결과 그래프를 Fig. 10에 나타내고 있다. 실험 측정 결과에서 C_{LNG} 의 측정 농도 범위인 0.5 cmol/mol에서 3.0 cmol/mol까지의 응답속도가 10초 미만으로 결과값이 나오기 때문에 폭발 범위인 5.0 cmol/mol(하한), 15 cmol/mol(상한)에서 10초 이내에서의 센서 응답속도를 예측할 수 있다. LNG 가스 주입농도 대비 가스 응답 속도는 가스 주입 농도가 높을수록 센서 응답속도가 빨라지며, 응답속도가 20초 이내의 기준에 대비하여 측정된 모듈의 응답속도는 2초에서 8초 사이의 범위에 있으며 빠르게 동작함을 확인하였다.

4. 결 론

LNG 가스 주입에 있어서 환경센싱을 위한 임베디드 기반 가스 주입 환경 센싱 모듈을 개발하였다. 환경센싱 모듈에 대한 성능평가에서 LNG 가스를 1.2 cmol/mol에서 2.0 cmol/mol까지 0.1 cmol/mol 간격으로 증가시키면서 주입하였을 때 저항 값을 선형 Fitting한 수식으로부터 산출 한 결과, 입력과 출력간의 선형성 관계를 나타내는 계수 R^{2*} 값은 '1'에 가까운 상관계수로 0.9826을 얻었으며 선형적인 Resolution을 확인하였다. 농도 변화율 실험에서 LNG 가스 농도 0.5~3 cmol/mol는 실험에 사용된 해당 농도에서의 측정된 저항 값의 결과를 주입환경에서의 고농도의 5 cmol/mol, 15 cmol/mol 일 때를 환산하는 Linear Fitting식에 대입하여 산출된 예측 값은 95.95%, 147.052%를 얻었다. 이는 가스 농도에 따른 저항 변화율을 나타내며 LPG 가스의 폭발 위험이 있는 가스농도 범위에서도 환경센싱 모듈이 가스 검출 예측 가능함을 확인하였다. 환경센싱 모듈의 응답속도는 N_2 가스 주입 하였을 때의 저항 값을 기준으로 시험 가스 유입 후, 20초 이내로 저항 변화율로 체크하는데 응답속도가 8초 이내의 값을 나타내어 모듈의 가스 감지 반응 성능이 우수함을 확인하였다.

REFERENCE

[1] S.M. Lee and N.H. Kim, "Failure Mode and Effects Analysis of LNG Bunkering Monitoring System," *Proceedings of the Korean Institute of Information and Commucation Sciences Conference*, pp. 19-21, 2019.

- [2] S.K. Yun, "Thermal Analysis of LNG Storage Tank for LNG Bunkering System," *Journal of Advanced Marine Engineering and Technology*, Vol. 39, No. 9, pp. 876-880, 2015.
- [3] A. Lee, S.O. Song, and J.H. Yu, "The Study of Fiber Optic Cable for LNG Tank Leakage Monitoring," *Proceeding of Conference of The Korean Institute of Gas*, pp. 149-149, 2021.
- [4] S. Kumar, H.T. Kwon, K.H. Choi, Wonsub. Lim, J.H. Cho, K.J. Tak, I. Moon et al., "LNG: An Eco-friendly Cryogenic Fuel for Sustainable Development," *Applied Energy*, Vol. 88, No. 12, pp. 4264-4273, 2011.
- [5] HSE, *Failure Rate and Event Data for Use within Risk Assessments*, England: Health & Safety Executive, 2012.



박 병 진

2013년 부경대학교 전기공학과
공학석사
2019년 동명대학교 전기전자정보
통신공학과 박사과정
관심분야: 신호처리, 환경센서 응
용, 전기설비 AI 응용



김 민 성

1993년 3월 와세다대학 공학석사
1997년 3월 Tokyo Institute of
Technology 공학박사
1997년 11월~2000년 2월 (주)삼성
전자 정보통신총괄 선임
연구원

2000년 3월~현재 동명대학교 AI학부 교수
관심분야: 광통신, IoT, 센서네트워크 등