

## 산화물 반도체식 가스센서의 입출력 고차 캘리브레이션 방정식 도출

†박규태 · 김강민\* · 이형기\* · 윤명섭\*\*

한국가스안전공사 가스안전연구원, \*(주)이형정보기술, \*\*선두전자  
(2019년 12월 11일 접수, 2020년 3월 26일 수정, 2020년 4월 20일 채택)

### Induction of the High Order Calibration Equation of Metal Oxide Semiconductor Gas Sensors

†Gyoutae Park, Kangmin Kim\*, Hyeonggi Lee\*, Myeongsub Yoon\*\*

Korea Gas Safety Corporation, \*HIT Co., Ltd, \*\*SD Electronics Co., Ltd  
(Received December 11, 2019; Revised March 26, 2020; Accepted April 20, 2020)

#### 요약

본 논문에서는 산화주석 기반 반도체식 가스센서의 제조사양을 분석하여 측정회로를 설계하였다. 또한, 실제 가스안전관리 산업현장에서 가스센서를 사용하기 위하여 응답특성시험을 통한 최적 입출력 방정식을 도출하였다. 산화물 반도체 가스센서의 응답특성은 6종의 농도를 가진 표준가스를 제조하여 주입하며 출력전압을 측정을 통해 분석되었다. 각각 농도가 다른 가스의 주입에 대한 센서의 출력 전압의 관계를 룩업 테이블로 생성하였다. 생성된 룩업테이블의 데이터가 등간격이면 근사함수법으로 다항식을 도출할 수 있다. 그래서 5차의 다항식을 정의하고, 그 계수를 최소자승법으로 구하여 센서의 입출력 특성을 대표하는 5차 다항식을 완성하였다. 제안된 5차 다항식이 가스검지기 등에 실제로 적용되기 위해서는 다항식의 역변환이나 사이 값이 추가된 배열형태로 프로그래밍이 다시 생성되어야 한다. 본 연구에서는 사이 값을 1/5로 세밀하게 구분 및 보간을 계산하여 배열형태로 구현되었다. 제안한 5차 캘리브레이션 교정식의 성능은 표준가스를 주입 및 그 농도를 측정했을 때 일차방정식보다 오차가 감소됨을 확인되었다.

**Abstract** - In this paper, a measuring circuit is designed through analyzing manufacture specification of the sensor based on MOS. And the best input-output polynomial are induced that really gas sensors are used in gas safety management industrial fields. Response characteristics of a MOS gas sensor is analysed by through sensor's output voltages are measured after standard gases with six kinds of concentrations are manufactured and are injected to the sensor. A lookup table is created by relations of sensor's output voltages by injecting gases with other concentrations. Because data of the formed lookup table are equal interval, a polynomial can be induced of method of approximation function. So the 5th polynomial of input-output for a sensor is defined, coefficients are calculated by using least squares method, and the 5th polynomial is completed for representing characteristics of the sensor. If the proposed polynomial is applied to gas leak detectors, an inverse transformation of polynomial and programing of array codes are recreated. In this research, polynomial is implemented with array types that intervals of values of a lookup table are one-fifth sampled and interpolated. The performance of proposed 5th calibration equation is verified that errors are reduced than a linear expression when tests are performed by measurement of concentrations against injection of standard gases.

**Key words** : gas leak & sensor, calibration, polynomial, characteristics, MOS(metal oxide semiconductor)

†Corresponding author: gtparkgs2@kgs.or.kr

## I. 서론

액화천연가스(LNG)는 산업용 또는 가정용 연료과 석유화학제품을 제조하는 공장에도 많이 사용되고 있다. 이러한 곳에는 사고의 개연성이 매우 높기 때문에 주기적으로 안전관리가 필요하다[1, 2]. 도시가스 와 발전용으로 사용하는 액화천연가스와 가정용과 공업용으로 사용하는 액화석유가스(LPG)를 검지하는 기술은 가스 산업 분야에서 가장 많이 필요로 하고 중요한 기술로 기록되고 있다[3]. 휴대용 가연성 가스 누출검지기에 사용되는 가스 센서는 대부분 반도체 식, 접촉 연소식, 전기화학식 센서를 사용한다[4]. 이러한 센서들은 최대 3년 보통 2년 후 센서 소자의 재료 인 세라믹 등이 노화되어 센서의 수명과 측정 정확도는 급격히 떨어진다. 이러한 센서를 사용하는 국내의 가연성가스 누출검지기의 대부분은 일본, 미국, 유럽 산에 비하여 검지정확도가 낮고 수명이 짧다. 그러한 이유로 국내와 해외시장에서의 경쟁력이 매우 약화되어 있으며, 정확도를 개선하려는 노력이 있었다[5].

본 논문에서는 액화천연가스(liquefied natural gas)와 액화석유가스(liquefied petroleum gas)의 누출 검사를 위한 장비 개발을 위하여, 접촉연소식 가스센서에 비하여 내구성은 약하지만 검지속도가 빠른 금속산화물반도체(metal oxide semiconductor) 센서를 사용한 사례를 소개하고자 한다. 가스안전관리 현장에서는 응답속도(response time) 빠르고 정확도가 우수한 가스누출검지기를 요구하고 있음에 따라 금속산화물반도체 가스센서의 측정회로를 개발하고, 6종의 표준가스주입에 따른 전압출력 응답특성 실험을 수행하여 교정 방정식(calibration equation)을 도출하고 가스검지기 개발에 적용하기 위한 단계를 서술하였다.

## II. 금속산화물 반도체식 가스센서

### 2.1. 산화물 반도체식 가스센서

산화물 반도체는 어느 종류의 가스에 접촉되면 전기전도도(傳導度)가 변화하는 점을 이용하며, 이 소자(素子)는 300℃ 이상으로 가열하여 사용하기 때문에 전극과 히터를 설계하여 박막형, 후막형, 소결형, 비드형 등 여러 가지 구조로 하여 제작된다. 감도를 좋게 하고 소모전력을 가능한 한 최소화 하려면, 가스분자가 흡착하기 쉽도록 표면적을 크게 하고, 소자 전체도 작게 제조하면 유리하다. 반도체 재료는 검출가스에 따라 여러 가지가 쓰이지만, 특히 산화주석이나 산화아연계가 주로 사용되어 실용화되고 있다[6].

그 종류는 4가지로 분류할 수 있는데, 첫째는 가스센서의 기구에 전자수용성 가스가 반도체 표면에 화학적으로 흡착되면 흡착분자에서 반도체 측으로 전자교환이 일어나, 반도체 안의 캐리어 밀도가 변화함으로써 표면전도도가 변화하는 것을 이용하기도 한다. 둘째는 금속산화물 반도체가 환원가스로 환원되어 조성의 변화를 일으켜 전기전도도가 변화하는 것을 이용하고 셋째는 반도체 내의 접촉립계면(接觸粒界面) 및 팔라듐, 백금 등 촉매 금속과의 접촉면의 전위장벽 높이가 가스층(gas cloud)과의 반응에 의해 변화하는 것을 이용한다. 넷째는 반도체 표면에 흡착된 가스분자와 산소분자 접촉연소에 의해 소자온도가 상승함으로써 저항이 변하여 전기전도도가 변하는 특성을 이용한 것이다.

반도체식 가스센서는 소형이고, 가격이 저렴하며 감도가 높고 응답속도가 빠르다. 또한 전기신호로서 가스농도를 알아낼 수가 있어 가스누출경보기, 화재경보기, 알코올검출기, 엔진연소 가스누출검지 등에 사용되기도 한다. 본 논문은 Fig. 1과 같이 4번째 방식인 산화주석( $\text{SnO}_2$ )기반 금속산화물반도체식(MOS, metal oxide semiconductor) 센서방식을 이용하여 제작한 센서를 사용하여 입출력 응답곡선을 도출하였다.

### 2.2. 산화물 반도체식 가스센서의 특징

산화물반도체 물질을 이용한 저항형 가스센서는 감지 속도가 빠르고 안정성이 높다. 두께가 수백나노미터( $10^9\text{m}$ )에서 수 마이크로미터( $10^6\text{m}$ )인 산화주석이 두 전극사이를 연결하는 구조로 제조된다. 가스가 센서에 흡착되면 시간이 지남에 따라 산화물반도체 물질에 흡착되는 가스의 양이 늘어나다가 흡착된 가스의 양이 일정하게 유지되는 정상상태에 도달하여 일정한 저항 값을 나타내게 된다. 정상상태에 도달하는 동안 이산화질소 같은 산화가스는 산화물반도체로부터 전자를 받으면서 흡착하여 산



Fig. 1. Appearances of semiconductor gas sensors based on  $\text{SnO}_2$  basis.

**Table 1.** Electrical characteristics of a semiconductor gas sensor

항 목	사 양
히터소비전력	800±50mW
히터 전류	160 ± 10 mA
히터 전압	AC 또는 DC 5 V
회로 전압	AC 또는 DC 12 V 이하 (DC 5V RE.)
부하 저항	가변 저항
사용온도 및 습도	-10℃ ~ 50℃, 30~85%RH
보관 온도	-30℃ ~ 50℃

화물 반도체의 저항 값을 증가시킨다.

응답특성은 특정가스가 존재할 때 가스센서의 저항이 얼마나 민감하게 변하는가에 대한 정도이며 [7], 그 민감도(sensitivity)는 식(1)과 같이 일정하게 유지되는 정상상태 저항 값( $R_s$ )과 특정 가스가 없기 공기 중에서 측정된 저항값( $R_{air}$ )으로 도출된다.

$$Sensitivity(\%) = \frac{(R_s - R_{air})}{R_{air}} \times 100 \quad (1)$$

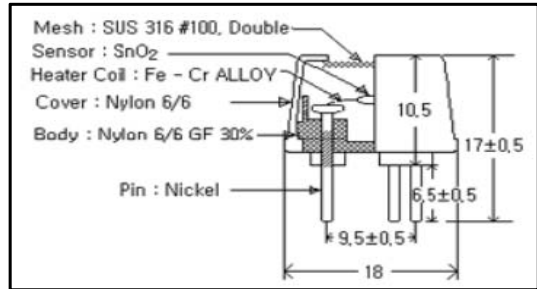
한편, 센서는 반복적으로 사용해야 하기 때문에 산화물 반도체 물질에 정상상태로 흡착되어 있는 가스를 가능한 빠른 시간 내에 탈착시켜서 처음 상태로 되돌려야 한다. 흡착된 가스가 공기 중에서 탈착되는 데 필요한 시간이 회복시간 또한 가스센서의 성능을 평가하는 중요한 요소에 속한다[7]. **Table 1**은 본 연구에서 시험하고자 하는 산화주석 기반 반도체식 센서의 전기적 특성을 나타내고 있으며, **Table 2**는 반도체식 센서의 시험 조건과 사양을 보여주고 있다.

**Fig. 2**는 반도체가스센서의 전기적 회로 연결을 위한 핀 구조를 보여주고 있다. **Fig. 3**은 반도체가스센서의 내부 재질 및 구조 나타내고 있다.

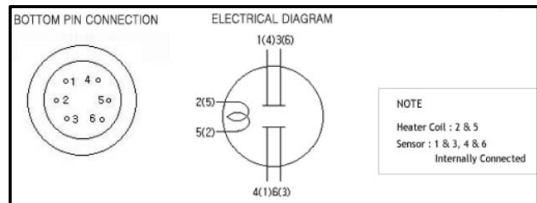
산화물 반도체 가스센서는 실리콘에 취약하고, 고온고습, 화학가스가 자주 접촉하면 경시변화가 심하게 일어나 센서의 저항이 변하여 감도가 변하므로 사용에 주의하여야 한다. 특히 먼지나 기름때가 심한 장소에서는 먼지가 스테인레스강 그물망(stainless steel mesh)을 막을 수 있으므로 주의가 필요하다. 센서는 온도, 습도, 바람에 영향을 받을 수 있으므로 이러한 영향을 최소화하기 위하여 기구와 회로를 설계할 때 온습도보상회로 등 특별한 방법이 요구되어진다.

**Table 2.** Specification of the SnO2 semiconductor gas sensor

항 목	내 역
시험조건	- 시험가스 : 메탄 - 시험 챔버용량 : 1 l / 개 이상 표준가스 주입 - 청정공기상태 - 온도 : 20 ± 2℃ - 상대습도 : 65 ± 5% RH - 시험전 표준분위기 조건에서 48시간 예열
사 양	- 센서저항 ( $R_s$ ) · 청정 공기중( $R_s$ , air) 20 ~ 80 kΩ · 메탄 1000ppm중에서 약 1/3
반응시간	- 메탄 1000ppm 노출 후에 센서저항이 메탄 1000ppm 분위기 중에서 안정하게 된 센서 저항의 90%값에 도달하는 시간 : 5초 이내
초기 안정화 시간	- 전원 인가 후에 센서 저항이 청정공기중의 안정 상태의 센서 저항의 80%값에 도달하는 시간 : 1minute 이내



**Fig. 2.** Inner structure of a semiconductor gas sensor.



**Fig. 3.** Pin structure of a semiconductor gas sensor.

**2.3. 센서의 입출력 교정방정식의 도출**

**Fig. 4**는 반도체 가스센서의 기본측정회로를 나타내고 있으며, 실제 회로에서는 차동증폭기와 RC 하드웨어 필터가 필요하다. 센서공급 전압과 히터의 공급전압은 동일하게 5V를 인가하였고, 부하저항

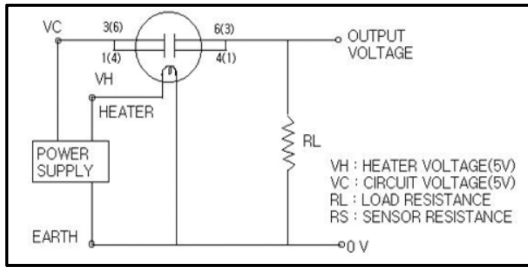


Fig. 4. Sensing circuits of a semiconductor gas sensor.



Fig. 5. Standard methane gases and vessels made of six concentrations.

(RL)은 68kΩ을 연결했다. 전압 5V를 인가하고 가스를 주입하지 않았을 때 센서의 저항(Rs)은 약 2kΩ으로 측정되었다. 6종의 농도(0.75, 1.0, 1.25, 1.5, 1.75, 2.00% Vol)를 가진 표준 메탄가스를 KOLAS 규격에 따라 제조하고 인증을 받은 시료를 사용하였다.

시험용 가스로 제조된 표준메탄가스(standard methane gas in air balances)는 Fig. 5와 같다. Fig. 6과 같이 센서와 부하저항을 PCB에 회로를 구성하여 6종 농도의 가스를 각각 5회씩 주입하며 센서의 변화에 따른 변동되는 부하저항에 걸리는 전압을 측정하였다.

일반적으로 가스센서 회로 설계하고 펌웨어를 구현할 때 2포인트의 표준가스를 주입하여 그 전압을 측정하여 1차 선형방정식을 사용하며, 방정식을 유효성을 확인을 위해 중간점의 농도를 주입하여 측정 후 큰 오차가 없을 경우 가스검지기 등 제품에 활용한다. 이러한 방법은 사이 값에 대한 비선형성 및 정확도에서 큰 오차가 발생할 수 있다. 본 논문에서는 Table 3과 같이 6종의 표준가스 주입

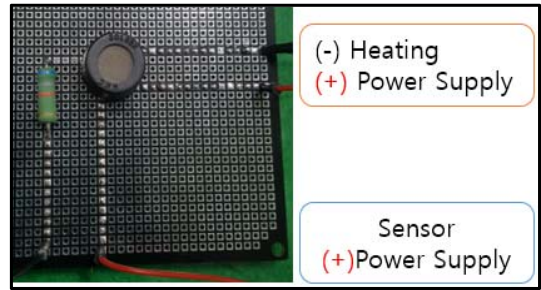


Fig. 6. Basic circuits for measuring output voltages by injected gases.

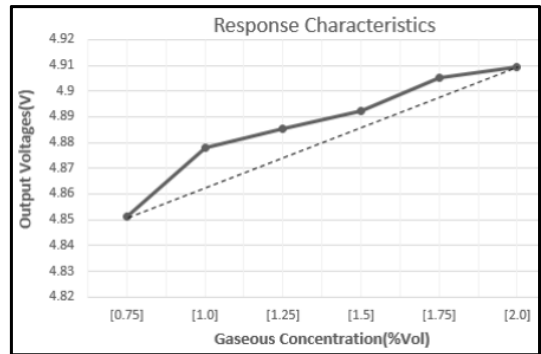


Fig. 7. Sensor output voltages by injected gases.

Table 3. Voltages of a load resistor by injected standard methane gases

표준CH4 (%Vol)	0.75	1.0	1.25	1.5	1.75	2.0
Output Voltages	4.8511	4.8782	4.8854	4.8921	4.9051	4.9092

다른 센서의 출력 전압이 측정되어 룩업테이블(lookup table)이 만들어졌다. 측정된 데이터를 그래프로 도시하면 Fig. 7과 같다. 이 6쌍의 데이터를 가지고 수치해석 근사함수법(method of approximation function)을 이용하여 특정 수식을 도출하고, 그 함수의 역변환을 센서시스템이나 가스검지기의 프로그램에 코드를 삽입할 경우 측정된 전압에 따른 미지의 농도를 결정할 수 있다[8]. 본 연구에서는 근사함수법 중에서 자료적합법(method of data fitting)의 하나인 직교법(method of orthogonal)을 이용하여 5차 다항식을 도출하였다.

Table 4와 같이  $m=(n+1)$ 개의 데이터 쌍이 존재

**Table 4.** The table of m-numbers's data

i	1	2	3	...	n+1
$X_i$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	...	$x_m$
$Y_i$	$y_1$	$y_2$	$y_3$	...	$y_m$

할 때 이를 근사하는 n-차 다항식을 도출할 수 있다. 식(2)와 같이 다항식을 정의하고 그 다항식의 계수들을  $c_0, c_1, \dots, c_n$  행렬이라 정의하고, 이 계수의 값을 구하여 식(2)에 대입하면 다항식을 구할 수 있다[9].

본 논문에서 측정된 센서의 입출력 데이터는 6쌍이고 등간격이므로 직교법을 이용하여 식 (2)와 같이 5차 다항식을 정의하고, 그 계수(C)를 구하여 센서의 출력특성에 대한 캘리브레이션 방정식(calibration equation)을 완성하고자 하였다. 다항식의 계수를 구하기 위해서 최소자승법(least squares method)을 이용하였으며, 그 해를 구하기 위하여 식(3)과 식(4)와 같이 행렬의 형태로 표현하였다.

$$y_{5th} = c_0 + c_1x + c_2x^2 + c_3x^3 + c_4x^4 + c_5x^5 \quad (2)$$

$$\begin{pmatrix} 1 & x_1 & x_1^2 & x_1^3 & x_1^4 & x_1^5 \\ 1 & x_2 & x_2^2 & x_2^3 & x_2^4 & x_2^5 \\ 1 & x_3 & x_3^2 & x_3^3 & x_3^4 & x_3^5 \\ 1 & x_4 & x_4^2 & x_4^3 & x_4^4 & x_4^5 \\ 1 & x_5 & x_5^2 & x_5^3 & x_5^4 & x_5^5 \\ 1 & x_6 & x_6^2 & x_6^3 & x_6^4 & x_6^5 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_0 \\ c_1 \\ c_2 \\ c_3 \\ c_4 \\ c_5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y_0 \\ y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \\ y_5 \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$\vec{X}c = \vec{y} \quad (4)$$

이 표시되는 Square 행렬 X을  $x$  벡터의 Vandermonde 행렬이라 부르며, full rank이며  $x_i$ 의 두 개의 값은 갖지 않는다. 주어진 n+1 데이터 포인트 ( $x_i, y_i$ )에 대하여 MATLAB 함수 vander(x)를 이용하여 C의 계수행렬을 구할 수도 있다. 본 논문에서 수집한 센서의 입출력 데이터 쌍을 이용하여 5차 다항식의 계수를 최소자승법과 Vandermonde 행렬을 MATLAB과 엑셀함수를 이용하여 실제 데이터를 계산하였고, 식(5)와 같이 대입하여 나타내었다.

$$\begin{pmatrix} 1 & 0.75 & 0.56 & 0.32 & 0.10 & 0.01 \\ 1 & 1.0 & 1.0 & 1.0 & 1.0 & 1.0 \\ 1 & 1.25 & 1.56 & 2.44 & 5.96 & 35.53 \\ 1 & 1.5 & 2.25 & 5.1 & 25.6 & 656.8 \\ 1 & 1.75 & 3.06 & 9.4 & 88.0 & 7737.6 \\ 1 & 2.0 & 4.0 & 16.0 & 256 & 65536 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_0 \\ c_1 \\ c_2 \\ c_3 \\ c_4 \\ c_5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 4.851 \\ 4.878 \\ 4.885 \\ 4.891 \\ 4.905 \\ 4.909 \end{pmatrix} \quad (5)$$

여기서, 식 (5)를 가우스소거법(Gaussian elimination)으로 풀거나 X의 역행렬을 이용하여 계수행렬(C)을 구할 수 있다.  $X^T X = B$  라고 정의하였을 때, Determinant  $\det(B) = 2.8081e+07 \neq 0$  이므로 nonsingular이며 역행렬이 존재한다. 역행렬과 계수행렬은 상용 MATLAB의 함수를 이용하여 식 (6), (7)과 같이  $\det(B)$ 와  $\text{inv}(B)$ 를 표현하였고, 다항식의 계수인 최종 C행렬도 식(8)과 같이 구하였다.

$$\det(B) = 2.8081e+07 \neq 0 \quad (6)$$

$$C = (X^T X)^{-1} X^T Y \quad (7)$$

$$C = [4.792 \quad 0.0739 \quad -0.0117 \quad -0.0047 \quad 0.0017 \quad -0.0001] \quad (8)$$

식(8)에서 C의 계수를 식(2)에 대입하면 6쌍의 데이터의 추세와 보간 값을 구할 수 있는 대표적인 다항식이 식(9)와 같이 된다. 식(9)에서 오차( $\epsilon$ )는 |0.021| 이하이므로 유효하여 입출력 다항식으로 사용할 수 있다.

$$y = 4.792 + 0.0739x - 0.0117x^2 + 0.0047x^3 + 0.0017x^4 - 0.0001x^5 \quad (9)$$

이러한 5차 센서의 입출력방정식은 Fig. 7에서 초기(0.75, 4.85)와 최종점(2.0, 4.91)을 가상의 선분(blue line)으로 연결을 때의 일차식의 직선보다 변곡점을 4개를 가지고 있으므로 센서의 실제 특성을 보다 잘 나타낼 수 있으므로 오차가 확연히 감소됨을 판단할 수 있다.

### III. 실험 결과

식(9)에서 도출된 식을 센서시스템에서 그대로 이용하려 한다면, 식(9)를 역변환하여 그 식을 펌웨어로 구현하여 크로스컴파일(cross compiling)을 통하여 가스검지기나 센서시스템에 포팅(porting)하여 사용할 수 있다. 즉, 미지의 가스를 측정할 때 센서에서 출력되는 전압에 따라 가스농도가 얼마인지 결정해야 하기 때문에 센서 입출력 특성식에서 치환( $x \rightarrow y, y \rightarrow x$ )을

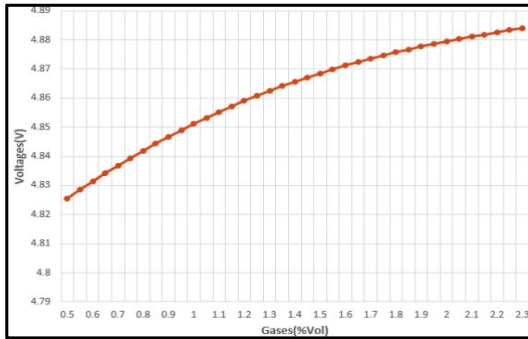


Fig. 8. Sensor output voltages calculated by the induced polynomial.

하여 사용할 수 있다. 이러한 과정은 식(9)를 치환한 후 식(2)부터 식(8)까지 다시 계산하여야 한다. 그러나 실제 개발현장에서는, 가스검지기에 사용되는 임베디드시스템은 처리속도와 실수 계산 메모리의 제약 등으로 인하여 고차방정식을 계산하도록 프로그래밍 코드에 포함시키지 않고 있다. 미리 입력에 대한 출력의 값을 등간격으로 보간하고 그 값을 구하여 프로그램 코드 내에서 행렬 등을 이용하여 데이터베이스를 구축해 놓은 후, 측정되는 전압 값에 따라 대입하여 농도 값을 결정하고 있다. 상기에서 도출된 식(9)를 이용하여 가스농도를 0.5% ~ 2.3%Vol까지 사이 값을 초기 값의 1/5인 0.05%Vol 간격으로 주입했을 때 측정되는 값을 시뮬레이션을 수행하여 나타낸 값은 Fig. 8과 같이 비교적 단조 증가 형태의 그래프로 표현되었다.

#### IV. 결론

본 논문에서는 산화주석 기반 반도체센서의 제조 사양과 특성을 파악한 후 센서회로를 구성하여 입출력 특성방정식을 도출하고 그 센서특성을 고찰하는 연구를 수행하였다. 산화물 반도체 가스센서를 가스 안전관리 현장에서 활용될 수 있도록 센서의 입력에 대한 출력 전압을 측정하기 위하여 6종의 농도를 가진 표준가스를 제조하여 실험을 수행하였고, 룩업 테이블(lookup table)을 생성하였다. 생성된 룩업테이블의 데이터 쌍을 대표할 수 있는 근사함수법 중 직교법을 이용하여 5차 다항식을 도출하였다. 도출된 식이 가스센서나 가스검지기에 실제 사용되기 위해서는 룩업 테이블의 보간 값을 미리 계산해서 프로그램 코드에 데이터베이스나 배열 형태로 코딩해 놓은 후, 실제 가스가 주입되었을 때 측정되는 전압과 데이터베이스의 값이 매칭되는 농도 값을 결정하도록 하였다. 한편, 5차 다항식은 역변환하여 프로그램 코드에 삽입할 수

있다. 그러나 이것은 임베디드시스템에서는 처리속도가 지연되어 검지속도가 늦어지는 단점이 될 수 있다. 본 연구에서는 실제적인 활용도를 고려하여 5차 다항식을 구한 후 데이터 범위를 확대하고 그 간격(interval)을 1/5로 좁혀서 센서의 출력을 계산하고 보간하는 모의실험을 수행하였다. 실제로 산업현장에서 사용하기 쉬운 방법을 제시하였으며, 이를 가스센서 모듈과 검지기 및 원거리 레이저 메탄검지기(remote laser methane leak detector)에 활용되어 가스 사고예방에 도움이 되기를 바란다.

#### 감사의 글

본 연구는 산업자원통상부 “최소 검지농도 100ppm·m급 휴대용 고감도 원거리 레이저 메탄누출검사장비 상용화 개발(20172220100330)”의 결과로 수행되었으며, 지원에 감사를 드립니다.

#### REFERENCES

- [1] Incident Investigation & Safety Checkup Division, *Gas Incident Statistics*, Korea Gas Safety Corporation, (2018)
- [2] Gyoutae Park, Hiesik Kim and et. al, “Development of Gas Safety Management System for Smart-Home Services,” *International Journal of Distributed Sensor Networks*, **2013**(591027), (2013)
- [3] 2018 gas accident yearbook, *Gas Incident Statistics*, Korea Gas Safety Corporation, (2018)
- [4] Sabrie Soloman, *Sensor Hand Book*, 2nd ed., McGraw-Hill, 1313-1332, (2010)
- [5] Gyoutae Park, Hiesik Kim and et. al, “A Study on the Development and Accuracy Improvement of an IR Combustible Gas Leak Detector with Explosion Proof,” *KIGAS*, **18**(3), 1-12, (2014)
- [6] <http://www.newcera.co.kr/ko/introduction.html>
- [7] Junhee Lee, Hyeri Jang and Gyoutae Park, “Calculation of Response Characteristics of Various Hydrocarbon Gas Sensors,” *International Journal of Future Revolution in Computer Science & Communication Engineering*, **4**(12), (2018)
- [8] Joel M. Morris et. al, “Results on Gas Detection and Concentration Estimation Via Mid-IR-Based Gas Detection System Analysis Model,” *IEEE Sensors Journal*, **12**(7), 2347-2355, (2012)
- [9] Wilson et. al, *Test and Measurement*, Newnes, 3-99, 281-293, (2009)