

## 센서 어레이를 이용한 휘발성유기화합물 측정기기 개발

홍철호\*, 김동진, 이장훈\*, 권혁구\*

호서대학교 전기정보통신공학부, \*호서대학교 환경안전공학부

### The Development of the VOCs Measurement System using Sensor Array

Hong Chol-Ho\*, Kim Dong-Jin, Lee Jang-Hun\* and Kwon Hyuk-Ku\*

*Div. of Electrical Information and Communication Eng., Hoseo University,*

*\*Div. of Environmental and Safety Eng., Hoseo University*

#### ABSTRACT

Air quality monitoring is a primary activity for industrial and social environment. The government push for pollutants that must be monitored. Especially, the VOCs (Volatile Organic Compounds), which are very harmful for human and environment, should be controlled under the government policy. We have been developed a VOCs measurement system which recognize various kinds and quantities of VOCs, such as benzene, toluene, and xylene (BTX). Especially, we designed sensor array with various kinds of gas sensor and ANN (Artificial Neural Network) algorithm. The measured values for BTX have errors of 1~4 ppm.

**Key words :** VOCs, BTX, Gas sensor, Sensor Array, ANN

#### 서 론

휘발성유기화합물(Volatile Organic Compounds : VOCs)은 탄화수소 화합물을 총칭한다. 이는 오존 및 광화학 스모그의 원인물질일 뿐 아니라 인체에는 암을 유발시킬 수 있는 유해 물질이다(나 등, 1997). 또한 대기 중 악취 물질로서 환경 및 건강에 영향을 초래하여 VOCs 감축을 대기 관리의 주요 정책수단으로 결정하는 국가가 증가하고 있다. 이러한 유해물질인 VOCs 화합물들은 광화학 반응성과 인체에 대한 발암성 및 유해성이 다르므로

개별적인 VOCs 화합물을 분석하고 측정하는 기기의 개발이 시급한 실정이다(Jeffrey W. Vincoli, 1995).

본 연구에서는 VOCs의 농도를 경제적이고 실시간 모니터링이 가능한 효과적인 측정기기를 개발하고자 하였다. 측정기기에 다종의 센서를 어레이함으로써 가스 센서의 단일가스 선택성을 보완하고자 하였다. 시뮬레이션(유동해석)은 ANSYS를 이용하였으며, 제작은 EPA (Environmental Protection Agency) TO-14A 방법을 이용하였다. 또한 Gas농도 분석 및 분류를 하고자 인공신경망(Artificial Neural Network : ANN)의 역전파(Back Propagation : BP) 알고리즘을 이용한 추론 모듈을 만들고자 하였다(Jacke, 1999; 이, 1993).

\* To whom correspondence should be addressed.

Tel: +82-41-540-5671, E-mail: chhong@office.hoseo.ac.kr

연구 및 방법

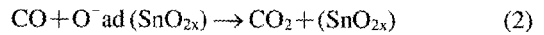
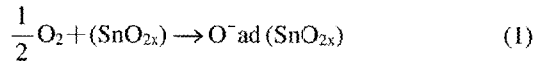
1. Gas Sensor and Sensor Array

가스 센서는 산소가 흡착되고 감지 가스가 주입 되었을 때 산소를 탈착 시키는 과정을 통해서 전기 전도도의 변화를 일으킨다. 즉 전위장벽의 변화를 일으켜 센서 내부에 전기적인 변화(센서 저항의 변화)를 이용하여 가스의 농도를 측정할 수 있다.

Fig. 1은 센서 감지부에 감지 가스가 주입되지 않은 상태에서 산소와 반응하는 모습을 나타낸 것이다. 이에 대한 화학적 반응식은 식(1)과 같다. 센서 감지부에 산소가 흡착되면 센서 내부의 전기 전도도가 낮아져 전자의 흐름을 방해하는 전위장벽이 높아진다.

센서 감지부에 감지 가스가 주입되면 표면에 흡착되어 있던 산소와 감지 가스가 화학적인 반응을

일으켜 산소를 탈착시키게 된다. 이때 센서 내부의 전기 전도도는 높아지고 전위장벽이 낮아진다. Fig. 2는 센서 감지부에 감지 가스가 주입된 상태에서의 반응을 나타내었고 화학적 반응식은 식(2)와 같다.



센서 표면에 산소를 흡착하고 탈착하는 반응을 통해 식(3)과 같이 센서의 저항변화를 나타낼 수 있다. 센서 저항의 변화는 가스 농도에 지수적으로 비례하는 것을 알 수 있다(Figaro, 1996; Joseph, 1993; S, 1985)

$$R_s = A[C]^{-\alpha} \quad (3)$$

where :  $R_s$ -센서 저항, A-상수, [C]-가스농도,  $\alpha$ - $R_s$  곡선의 기울기

가스 센서는 감지 가스에 대해 아주 민감하고 빠른 반응을 보여준다. 그러나 단일 가스에 대한 특정한 반응을 보여주는 선택성이 부족하다. 이러한 문제를 보완하기 위해 다종의 센서를 어레이하여 사용하였다. 센서 어레이를 설계하기 위해 ANSYS를 이용하여 시뮬레이션(유동해석)을 하였다(Fig. 3).

시뮬레이션 결과 센서 어레이는 가스 및 공기의 흐름을 단순하게 하기 위하여 내부의 가스 통로를 직선으로 하였고, 센서의 감지부가 가스의 흐름에 충분하게 노출되도록 설계하였다. 가스를 0.01 m/s

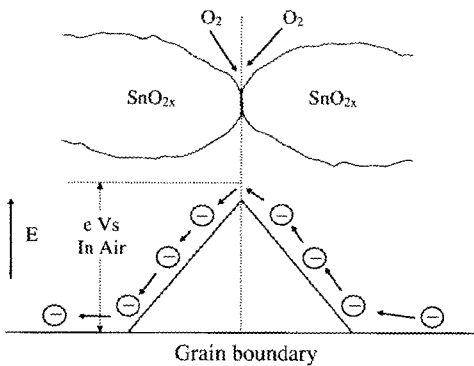


Fig. 1. Adsorption state of O<sub>2</sub>.

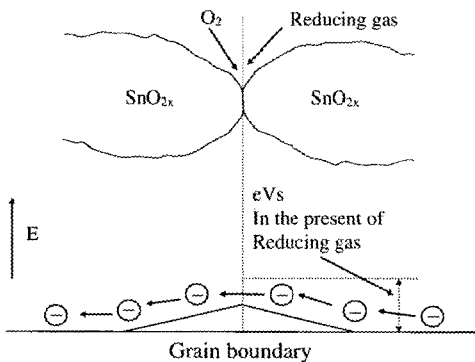


Fig. 2. Detection state.

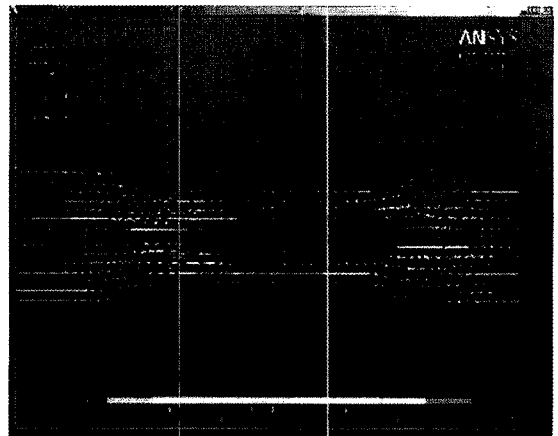


Fig. 3. Simulation of sensor array.

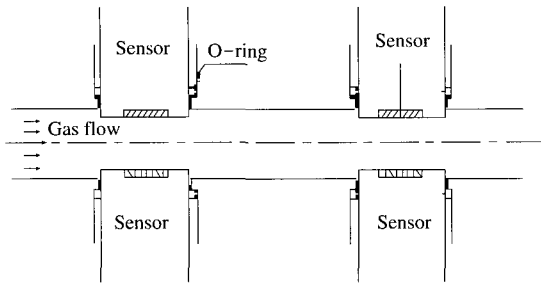


Fig. 4. Modified sensor array.

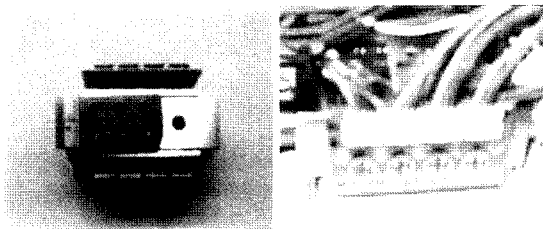


Fig. 5. Sensor array.

의 유속으로 유입 배출되도록 하였을 때, 센서의 주변에서 유속이 0.0016 m/s 이하의 값을 갖는다. 이때 센서의 감지부와 가스가 흐르는 통로 주변에 있는 공간으로 인하여 가스가 흐르지 못하고 소용돌이칠 가능성도 있는 등 센서 부근에서 가스의 흐름이 좋지 않을 수 있어 센서 감지부를 가스가 흐르는 통로까지 밀어 올렸고 센서간의 거리는 4 mm로 설계하고 센서의 연결이 용이하게 하기 위하여 가스 흐름의 통로의 직경을 7 mm로 설계하였다. 또한 가스의 누설을 방지하기 위해 O-ring을 사용하여 Fig. 4와 같이 설계하였다.

센서 어레이는 EPA의 TO-14A에서 제시한 가스 샘플링에 이용되는 Canister의 제작 방법을 사용하였다. 제작된 센서 어레이는 TO-14A에 의해 가스의 성상의 변질과 어레이 내부 표면의 흡착 등을 방지하기 위하여 스테인리스 스틸 316L을 사용하였고 전해 연마를 수행하여 Fig. 5와 같이 제작 하였다(US EPA, 1999).

## 2. ANN (Artificial Neural Network)

본 연구에서는 가스 센서가 단일 가스에 대한 선택성을 부여하기 어렵기 때문에 센서 어레이를 제

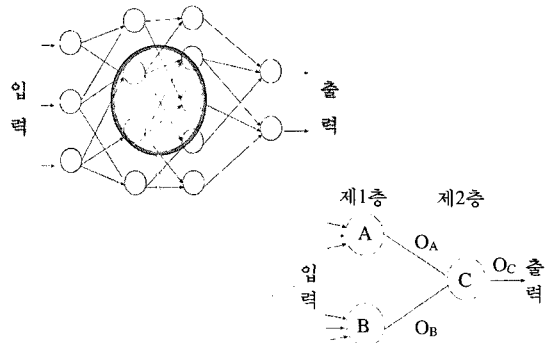


Fig. 6. ANN configuration.

작하였고 센서 어레이를 통해 10개의 센서 입력을 받아 패턴을 만들고 인공신경망 알고리즘을 이용하여 시뮬레이션과 학습을 통해 VOCs가스의 농도를 측정하였다.

ANN의 구조는 입력 층(Input Layer), 은닉 층(Hidden Layer), 출력 층(Output Layer)으로 구성된다. 이들은 처리 요소(Processing Element)들을 모아 층을 이루고 있다. 처리 요소는 활성화 함수(Activation Function)라 하는데 이것은 연결 가중치(Connection Weight)와 전이함수(Transfer Function)이다.

입력을 받아 연결 가중치를 사용하여 입력 값을 계산하고, 가중치를 고려한 입력 값을 전이 함수를 이용하여 출력 값으로 변환한다.

ANN은 각 처리 요소들의 출력 값들에 의해 최종 출력의 결과를 결정하게 된다. ANN을 이용하여 원하는 출력 값을 얻기 위해서는 연결 가중치를 조절해야 하는데 이는 입력 및 기타 주어진 자료들을 이용하여 처리 요소들 간의 연결 가중치를 스스로 조정한다. 이 과정을 학습이라 하며, 학습 방법의 가장 기본적인 분류는 지도 학습(Supervised Learning)과 자율 학습(Unsupervised Learning)이다. 지도학습은 각 입력 값에 대해 원하는 목표 출력 값을 대응시켜 학습시키는 방법이고 자율 학습은 목표 출력 값(Target Output) 이 학습 자료에 주어지지 않는 것으로 주어진 입력 패턴 자체를 기억시키거나 유사한 패턴들을 군집화(Clustering) 시키는 데 많이 이용된다.

본 연구에서는 ANN의 BP 알고리즘을 사용하였다. BP 알고리즘의 학습에는 입력 값과 이에 대응

하는 목표 출력 값의 쌍으로 이루어진 학습 데이터를 이용하는데 입력 값을 입력 층에 인가하고 임의의 초기 값으로 주어진 연결 강도에 의해 출력되는 출력 값과 사용자가 원하는 목표 출력 값을 비교하여 그 오차를 역으로 전파하여 연결 강도를 수정한다. 이러한 작업은 모든 학습 데이터(입력 값, 목표 출력 값 등)에 대해 이루어지고 학습 데이터에 대한 오차의 합이 기준치 이하로 떨어지는 순간에 학습을 멈춘다. 이와 같이 학습이 완료된 ANN의 학습 결과는 불완전한 데이터나 학습되지 않은 데이터가 입력되더라도 적절한 출력 값을 낼 수 있다.

### 3. 측정기기 제작

개발된 측정기기는 센서 어레이를 통해 들어온 가스에 반응한 센서의 신호를 측정하여 측정된 신호를 직렬통신(RS-232C)으로 PC에 전송하고, ANN 알고리즘을 이용해 가스의 농도를 추론한다. 센서 어레이에는 10개의 센서를 부착하였고, 센서들은 감지가스의 유무에 따라 전기전도도를 변화시키는데 이는 식(3)과 같이 저항으로 출력된다. 개발된 측정기기는 센서로부터 측정된 저항을 V/F 변환기를 이용하여 식(4)와 같이 주파수로 변환한다.

$$F = \frac{V_{in}}{2.09} \cdot \frac{R_s}{R_l} \cdot \frac{1}{R_l C_l} \quad (4)$$

센서 출력 신호가 1V를 기준 전압으로 하여 이때 주파수를 2,029 Hz로 설정 하였다. 주파수 출력은 선형적으로 출력을 하며 센서의 출력 전압이 1V일 때 2,029 Hz가 되며 센서 출력 전압이 5V일 때 10,149 Hz가 된다. 식(4)의 저항과 콘덴서의 오차가 PCB 패턴에 의한 임피던스가 없는 이상적인 경우 0~5V 출력 시 약 0~10 kHz의 범위에 동작하게 된다. V/F 변환기의 분해능은(약 13비트), 따라서 12비트 A/D 변환기보다 우수한 분해능을 가지고 있다(Charles, 1986; National, 1999). 개발된 측정기기의 내부 모습은 Fig. 7과 같으며 개발된 측정기기는 Fig. 8과 같다.

### 4. 기준 데이터 및 ANN파라메타 수정

개발된 측정기기의 성능을 평가하기 위해 실험

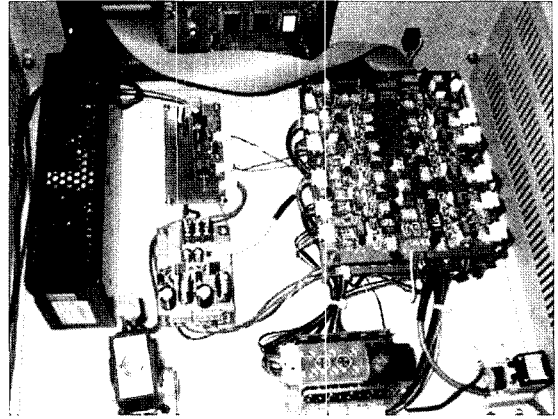


Fig. 7. Inner feature of measurement system.

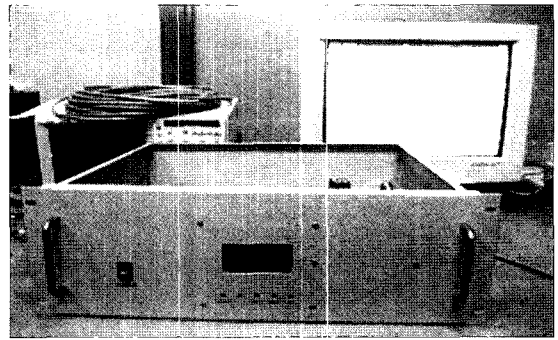


Fig. 8. Measurement system.

대상 가스(BTX)를 주입하고 농도를 측정하였다. 기준 데이터베이스를 만들기 위해 여러 번 실험을 실시하였고 얻어진 기준데이터를 ANN알고리즘으로 시뮬레이션을 하여 연결 가중치 및 연결강도를 구했다. 또한 시료 가스는 순도 99.99%의 산소를 캐리어 가스로 사용하여 순도 99.9%의 BTX 가스와 혼합하여 MFC(Mass Flow Controller)를 통해 일정 흐름으로 개발된 측정기기에 주입하였다. 실험 대상 가스의 농도에 대한 기준 데이터를 만들기 위해 대상 가스를 각각 일정 농도(0~100 ppm 사이)에 일정 간격으로 주입)로 주입하여 실험을 하였다.

실험을 통해 얻어진 기준데이터는 Figs. 9, 10, 11과 같다.

실험을 통해 얻어진 기준데이터(Figs. 9, 10, 11)

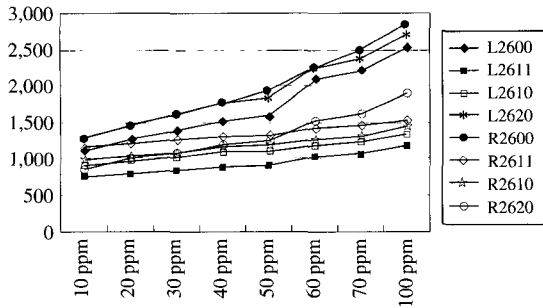


Fig. 9. Reference data for Benzene.

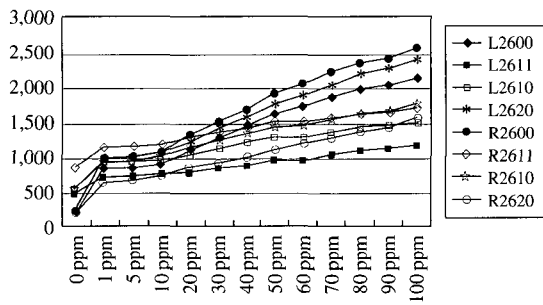


Fig. 10. Reference data for Toluene.

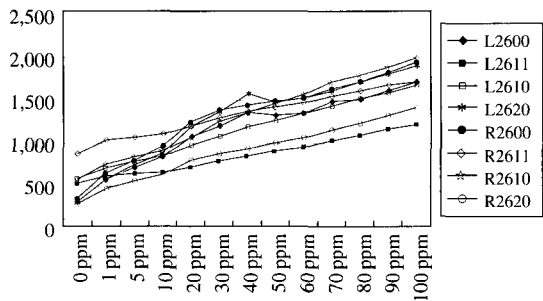


Fig. 11. Reference data for Xylene.

를 시뮬레이션 하여 가스의 농도를 실시간으로 분석 및 분류할 수 있는 ANN 추론 알고리즘의 파라메타를 얻었다. Table 1과 같이 얻어진 파라메타를 이용하여 대상가스를 주입하고 농도를 측정하였다.

### 결과 및 고찰

ANN의 시뮬레이션을 통해 얻은 파라메타(Table

Table 1. ANN parameter

Input Nodes	10	Alpha	0.95
Layer number	4	Eta	1.05
Weights	$[-2, 2]$	Gain	1.1

Table 2. Experiment result for Benzene

Test gas (Benzene)	Experiment result [ppm]		
	Benzene	Toluene	Xylene
0 ppm	0.0001	0.001	0.4559
6 ppm	5.337	0.6564	0.1605
13 ppm	13.9383	0.192	0.1952
51 ppm	52.5999	0.0354	0.2407
103 ppm	105.8519	0.0141	0.2653
250 ppm	253.1568	0.0023	0.0317
500 ppm	503.1568	0.0023	0.03177
1,000 ppm	999.4508	0.365	0.3237

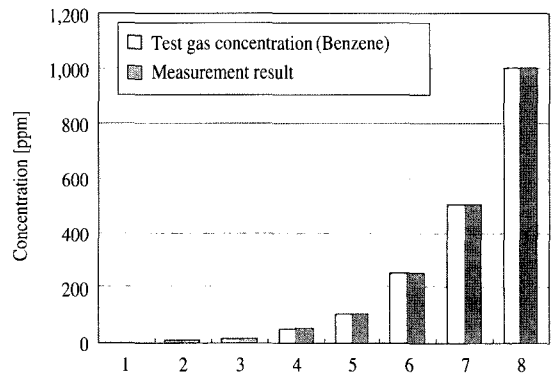


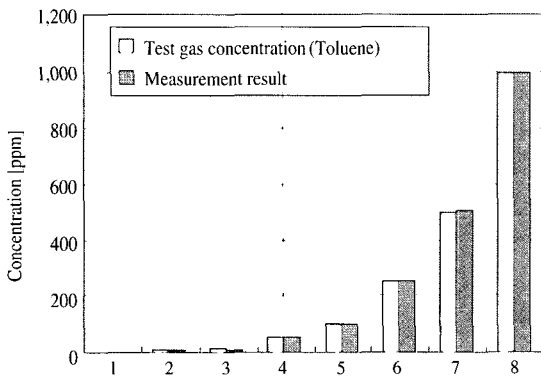
Fig. 12. Compare Test Gas and Result (Benzene).

1)를 이용하여 실시간으로 주입된 가스에 대해서 농도를 측정하여 개발된 측정기기의 성능을 평가 하였다. 측정기기의 성능평가는 대상가스를 각 농도별로 주입하고 주입된 가스에 대해 10개의 센서의 측정값을 받아 ANN알고리즘으로 농도를 분석 및 분류하여 주입가스와 측정결과를 비교하여 평가하였다.

Table 2와 Fig. 12는 벤젠가스를 농도별(0~1,000 ppm)로 주입하였을 때 측정된 결과이다. 벤젠 단일 가스를 주입한 결과 주입가스의 농도를 비교적 정확하게 분석하였으며 주입하지 않은 대상가스에 대해서는 거의 존재하지 않을 정도의 적은 양으로

**Table 3.** Experiment result for Toluene

Test gas (Toluene)	Experiment result [ppm]		
	Toluene	Benzene	Xylene
0 ppm	0.8283	0.0018	0.0045
5 ppm	7.9444	0.0095	0.001
10 ppm	8.8432	0.0086	0.0001
50 ppm	48.0926	0.1568	0.0549
100 ppm	99.8818	0.05	0.0173
250 ppm	251.0087	0.0266	0.1189
500 ppm	503.357	0.0208	0.1427
1,000 ppm	999.4675	0.1094	0.6788

**Fig. 13.** Compare Test Gas and Result (Toluene).

분석 하였다. 또한 주입한 가스가 벤젠가스라는 것을 분류 할 수 있었다.

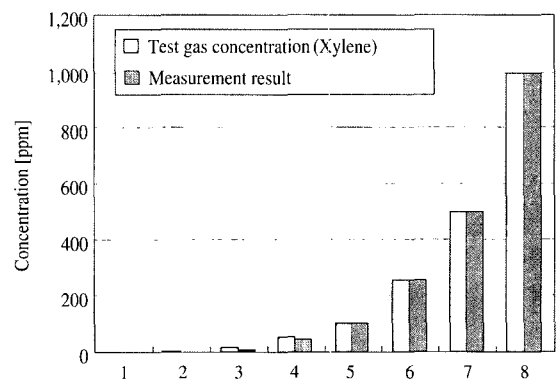
톨루엔도 벤젠과 같은 방법으로 일정 농도별 (0~1,000 ppm)로 가스를 주입하여 측정 하였으며 결과는 Table 3과 Fig. 13과 같다.

자일렌도 같은 방법으로 가스를 일정 농도별 (0~1,000 ppm)로 주입하여 측정하였고 Table 4와 Fig. 14에 측정 결과를 나타내었다. 자일렌의 경우에는 주입하지 않은 가스에 대해서 아주 정확하게 분류하였다.

Table 2, 3, 4에서 보여준 것과 같이 BTX의 단일 가스를 주입하여 측정된 값은 주입한 가스의 농도와 비교하면 약간의 오차를 가지고 있지만 비교적 정확한 결과를 얻었다. 주입농도와 측정 결과를 비교해보면 낮은 농도 보다 높은 농도에서 더 좋은 결과를 얻을 수 있었으며 전체적으로 1~4 ppm 정도의 오차를 가지고 있었다. 또한 주입 가스가 아닌 다른 가스에 대해서도 0.5 ppm 이하의 아주 작

**Table 4.** Experiment result for Xylene

Test gas (Xylene)	Experiment result [ppm]		
	Xylene	Benzene	Toluene
0 ppm	0.001	0.0022	0.0001
5 ppm	0.7851	0	0.0004
10 ppm	8.7137	0	0.0001
50 ppm	46.0726	0	0
100 ppm	98.9892	0	0.4042
250 ppm	250.9199	0	0
500 ppm	501.6298	0	0
1,000 ppm	999.444	0	0

**Fig. 14.** Compare Test Gas and Result (Xylene).

은 양의 가스가 있다는 결과를 얻었다. 이러한 오차의 발생에는 여러 가지의 요인들이 있는데 그중 가장 큰 요인으로 측정 당시의 환경적인 외란(온도 및 습도 등)에 의해 발생하는 것이다.

## 결 론

현재 VOCs를 측정할 수 있는 기기로는 PID (Photo Ionization Detector)센서를 이용한 휴대용 VOCs 측정기기가 출시되고 있으나 가스를 분류하는 기능은 가지고 있지 않고 단지 총량을 측정할 수 있는 기능만 있고, MS (Mass Spectrometer)는 가스 분류 및 농도 분석이 가능하나 가격이 고가이므로 영세한 업체에서는 사용이 불가능한 실정이다. 또한 GC (Gas Chromatograph)라는 장비는 MS와 같이 가스 분류 및 농도 분석이 가능하나 가격이 고가이고 측정 시간이 오래 걸린다는 단점을

가지고 있으며, 또한 가스의 분류 및 농도 분석에 있어 전문적인 기술과 지식을 가지고 있는 사람만이 할 수 있어 일반사용자들은 분류 및 농도 분석을 하기가 어렵다.

본 연구에서는 감지속도가 빠른 가스 센서를 이용하여 측정시간이 아주 짧고 휴대가 가능하며 분류 및 농도 분석이 가능하다. 또 누구나 쉽게 측정을 할 수 있고 가스의 분류 및 농도 분석을 할 수 있으며, 실시간으로 모니터링이 가능한 저가의 VOCs 측정기기로 개발하였다.

개발된 측정기기는 유해한 물질인 VOCs 중 BTX의 농도를 ANN 알고리즘 추론 모듈을 이용하여 실시간으로 농도를 측정할 수 있는 측정기기이다. 측정기기에 가스를 주입하고 측정한 결과 농도 분석에 있어서 1~4ppm 정도의 작은 오차를 보였으며, 주입하지 않은 가스에 대한 농도 분석에서는 0.5ppm 미만의 오차를 보여주었다. 측정결과 농도 분석에 있어서 약간의 오차를 가지고 있으나 가스의 분류에 대해서는 정확한 결과 보여주었다. 그리고 낮은 농도에서는 높은 농도에서 측정한 결과에 비해 오차가 더 컸다. 이러한 오차는 실험을 할 당시의 여러 가지 환경적인 외란에 의해 발생하는 것이다. 보다 안정적이고 정확한 결과를 얻기 위해서는 외란적인 요소들을 줄여야 할 필요성이

있으나 이는 많은 실험과 데이터베이스의 구축으로 해결될 수 있을 것으로 생각된다.

## 참 고 문 헌

- 나규환, 이장훈, 이종화, 정명규, 감상규, 황갑수, 환경 독성학 개론, 동화기술 1997; 186-218.
- 이상원, 학습하는 기계신경망 Ohm, 1993.
- Charles A. Schuler and William L. Mcnamee. Industrial Electronics and Robotics, Mc Graw Hill. 1988.
- Figaro ENG. Inc, Technical Information on Usage of TGS Sensors for Toxic and Explosive Gas Leak Detector, Figaro ENG. Inc. 1996.
- Jacke M. Zurada. Introduction to Artificial Neural Systems, West Publishing Co. 1992.
- Jeffrey W. Vincoli. CSP, Basic Guide to Industrial Hygiene, John Wiley & Sons, Inc. 1995.
- Joseph J. Carr. Sensors and Circuits, Prentice-Hall Inc. 1993; 304-316.
- National Semiconductor. Precision Voltage-to-Frequency Converter, National Semiconductor Co. 1999.
- Sze SM. Semiconductor Devices Physics and Technology. Bell Telephone Laboratories Inc. 1985.
- US EPA. Compendium of Methods for the Determination of Toxic Organic Compounds in Ambient Air, US EPA, Method TO-14A, January. 1999.