Journal of Sensor Science and Technology
Vol. 20, No. 6 (2011) pp. 428-433
http://dx.doi.org/10.5369/JSST.2011.20.6.428
pISSN 1225-5475/eISSN 2093-7563

# 감지 패턴 인식에 의한 가스센서의 선택성 연구

이성필+

# A Study on the Selectivity of Gas Sensors by Sensing Pattern Recognition

Sung Pil Lee+

**Abstract**

We report on the building of a micro sensor array based on typical semiconductor fabrication processes aimed at monitoring selectively a specific gas in ambient of other gases. Chemical sensors can be applied for an electronic nose and/or robots using this technique. Micro-sensor array was fabricated on the same chip using 0.6㎛ CMOS technology, and unique gas sensing patterns were obtained by principal component analysis from the array. $SnO_2$/Pt sensor for CO gas showed a high selectivity to buthane gas and humidity. $SnO_2$ sensor for hydrogen gas, however, showed a low selectivity to CO and buthane gas. We can obtain more distinguishable patterns that provide the small sensing deviation(the high seletivity) toward a given analyte in the response space than in the chemical space through the specific parameterization of raw data for chemical image formation.

**Keywords :** Gas Sensor, Selectivity, Pattern Recognition, CMOS, Sensor Array

## 1. 서 론

산화물반도체나 질화물반도체를 이용한 마이크로 가스센서 어레이는 가스나 습도 감지 분야에서 많은 관심을 일으키고 있다. 이는 화학센서의 소형화를 위한 필수적인 절차이며, 로봇이나 전자코에 적용 가능성이 높기 때문이다[1-3]. 사람의 오감에 역할을 하는 센서는 후각과 미각을 감지하는 가스센서와 맛 센서를 제외하고는 이미 많은 부분이 인간의 감지능력과 유사하거나 능가하는 수준에 이르렀다. 그러나 적용분야, 정밀도, 수명, 가격 등을 고려해 볼 때 그 선택범위가 매우 제한적이어서, 앞으로도 보다 진보적인 센서재료나 센서시스템 개발이 계속적으로 필요하다. 특히, 공기 중의 가스를 감지하는 가스센서는 의료, 제조, 농업, 반도체 산업뿐만 아니라 일상 주거 생활에도 아주 중요한 자리를 차지하고 있다. 그러나 가스의 물리적 특성상 빠른 응답특성과 높은 정밀도를 가지기가 매우 어려우며, 비록 우수한 성능을 가진 습도센서가 있다 하더라도 가격이 매우 비싸거나, 높은 반응성에 의해 수명이 짧아지는 단점이 있다. 또한 특정 가스를 감지하고자 할 때 주위의 가스, 온도, 습도 등에 영향을 받기 때문에 선택적으로 가스를 감지하는데 매우 어려움이 있다[4-6]. 뿐만 아니라, 재료적인 측면에서도 재료의 고유특성으로 인해 제조방법 및 응용분야가 제약을 받는다. 특히, 반도체 공정과 접목하여, 단일칩화된 센서를 만들 수 있는 센서재료는 그다지 많지 않다. 여러 가지 화학물질이 섞인 다성분 화학 매체(Multicomponent Chemical Media, MCM)[7]의 모니터링에서 선택성을 높이기 위한 연구는 많이 수행되어졌지만 항상 한계성을 가지고 있다. MCM에 관한 정보를 얻기 위해 많이 행했던 방법은 주어진 반응물에 대해 가장 높은 선택성만 찾는 것이었다. 이런 방법은 정해된 혼합물 상에서 개별적인 화학성분을 찾는 과정이다. 즉 혼합물을 결정해 놓고 그 중에서 원하는 타겟 종을 검지하는 것으로 혼합물의 성분이 바뀌면 적용하기 어려운 단점이 있다. 이러한 단점을 보완하기 위해 특정 센서의 응답으로 나타나는 개별 성분의 합을 측정하는 것이 아닌 인간의 후각 시스템과 유사하게 주어진 MCM에서 전반적으로 축약된 패턴을 얻는 방법을 사용하고 있다. 이를 화학적 영상(Chemical Image, CI)이라고 하는데[2], 다성분 화학매체에 대한 진성 파라미터들의 가상 지문과 같은 것이다. 이러한 방법은 전자코에서 주로 사용하는데 낮은 선택성이나 상호 작용이 큰 센서 어레이를 사용해 가스 MCM의 화학적 영상을 만들고 이를 분류하고 영상 인식을 통해 패턴을 찾는 과정이다. Fig. 1은 멀티센서 어레이의 일반적인 기능과정을 개략적으로 그린 것이다. 화학적 공간(chemical space)의 MCM 변수를 매핑하기 위해 m-차원(m은 센서의 수) 응답공간(response space)에서 센서 어레이를 사용한다. 센서의 신호는 MCM 요소의 특성을 나타내거나 MCM 요소와 원하는 화학적 기능을 하기 위해 형성된 선택적 화학층 간의 상호작용의 형태로부터 나온 결과물로 나타난다[2-6].

경남대학교 전자공학과 (Department of Electronic Engineering, Kyungnam Unversity)
+Corresponding author: sensors@kyungnam.ac.kr
(Received : Sep. 26, 2011, Revised : Nov. 3, 2011, Accepted : Nov. 8, 2011)

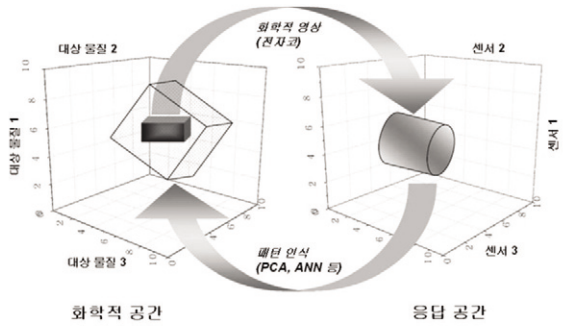


Fig. 1. General functioning procedure of the multisensor arrays[2].

MCM의 선택성을 찾기 위한 방법 중 하나로 주성분 분석(Principal Components Analysis, PCA)을 이용한다[2]. PCA는 KL(Karhunen-Loeve) 변환 또는 호텔링(Hotelling) 변환이라고도 하는데, 다차원의 특징 벡터로 이루어진 데이터에 대해서 최대한 원본의 정보를 유지하면서 낮은 차원으로 차원을 축소시켜 데이터를 처리하는 방법 중 하나이다. 즉 데이터의 특징을 잘 나타내는 고유의 성분들을 추출하고 이 값들 중 특징 성분이 높은 값들만을 취함으로서 차원을 줄이되 원본의 정보과의 차이를 최소화 하는 것이다. PCA는 원래 변수들의 선형결합으로 표시되는 새로운 주성분을 찾아서 이를 통해 자료의 요약과 용이한 해석을 목적으로 한다. PCA를 구축하기 위해서는 고유벡터(eigenvector)와 고유값(eigenvalue)을 구함으로서 축을 구할 수 있다.

본 연구에서는 여러 가지 가스를 감지할 수 있는 CMOS 마이크로 멀티센서를 제작하고 그 특성을 조사하였다. 또한 3가지 가스, 습도 및 온도에 대한 각 센서의 상관관계를 찾고, 감지하고자 하는 화학종에 대한 각 센서의 고유 패턴을 얻기 위해 주성분 분석법을 적용하였다.

## 2. 실 험

마이크로 멀티센서 시스템은 동일한 칩 내부에 5가지 센서를 설계하였으며, 툴은 AutoCAD와 Cadence를 이용하였다. 디자인된 소자의 배치도를 Fig. 2에 나타내었다. 칩 설계는 0.6 ㎛ CMOS(Complementary Metal-Oxide Semiconductor) 표준공정을 기준으로 하였으며, 크기는 9.0 mm × 5.4 mm, 30 핀으로 하였다. FET(Field Effect Transistors)는 nMOS를 사용하였고, 온도 측정용 다이오드는 P-N 접합으로 형성하였다. 브릿지형 저항센서, 히터 및 홀 소자용 단자는 각각 폴리로 구성하였다. 센서용 FET는 게이트 위에 감지물질을 올리기 위해 상부를 개방하였고, 기준용 FET는 전체를 보호막으로 덮어서 외부 변화에 FET의 문턱전압 변화가 발생하지 않도록 하였으며, 온도 변화에 따른 감도 보정용으로도 사용할 수 있도록 설계하였다. 측정용 FET는 센서와 동일한 조건으로 제작하였다. 특성을 측정하기 위해 내부 측정용과 외부 측정용으로 구분하여 각각 2개씩 디자인하였으며, 내부 측정용은 상하가 대칭되게 배치하였고, 외부 측정용은 가로 1개와 세로 1개로 배치하여 각각의 특성이 일정한지를 알고자 하였다. 습도나 가스는 FET 표면에 흡착이 되면 탈착까지 긴 시간이 소요될 수 있으므로 소자 외부를 가열할 수 있도록 폴리 실리콘으로 내장형 히터(built-in heater)를 배치시켰다. 즉, 측정 시 소자 외벽을 가열하여 습도 및 가스 등의 탈착이 빨리 이루어지도록 하기 위함이다.

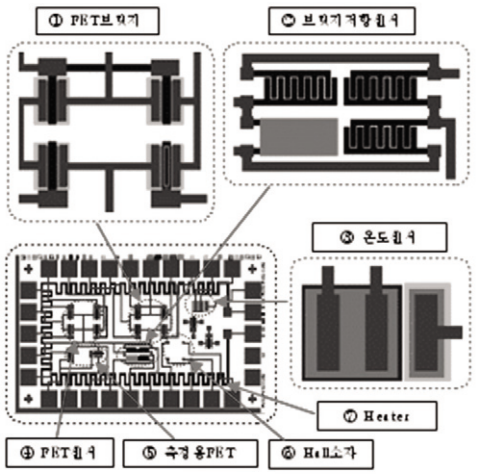


Fig. 2. Layout of designed micro multisensor array.

마스크는 Cadence를 사용하여 제작하였다. 스텝퍼를 이용하여 폴리실리콘, 액티브, 콘택트, 금속, 감지막 순으로 12.5 cm × 12.5 cm 크기의 유리 기판에 크롬으로 제작하였으며, 칩과 칩 사이는 1 mm 간격을 두었다. 기판은 면 저항이 5 ± 0.5 Ω·cm인 붕소(boron)가 도핑된 6 인치 p형 (100) 웨이퍼를 사용하였다. 실리콘 웨이퍼 위에 220 Å의 산화막을 성장시킨 후, 저압 화학기상 증착(Low Pressure Chemical Vapor Deposition, LPCVD)법을 사용하여 산화막 위에 1,600 Å의 질화막을 성장시켰다. 감광막을 12,000 Å 도포하여 건식 식각을 한 후 감광막을 제거하여 LOCOS를 형성하였다. 실리콘 산화막을 5,200 Å 성장시킨 후 식각을 하여 $Si_3N_4$를 제거하였다. 예비 산화작업으로 $SiO_2$를 430 Å 성장시킨 후 게이트 산화막을 125 Å 성장시켰다. CVD로 폴리 실리콘을 2,000 Å 증착하고 세정 후 LTO로 산화막을 1,000 Å 증착하였다. LDD 영역은 건식 식각, 세정 및 어닐링 순으로 실시하였다. FET나 저항형 센서의 감지막은 마그네트론 스퍼터에 의한 감지막과 가스 분자가 통과할 수 있는 다공성 금을 증착하였다. 이러한 후 공정은 리프트오프(lift-off)법을 이용하였다[8, 9].

Fig. 3은 표준 CMOS 공정을 사용하여 제작된 칩의 사진을 보여주고 있다. 브리지형 저항센서 및 측정용 FET 부분의 짙은 영역은 가스 감지막이 형성된 부분이다.

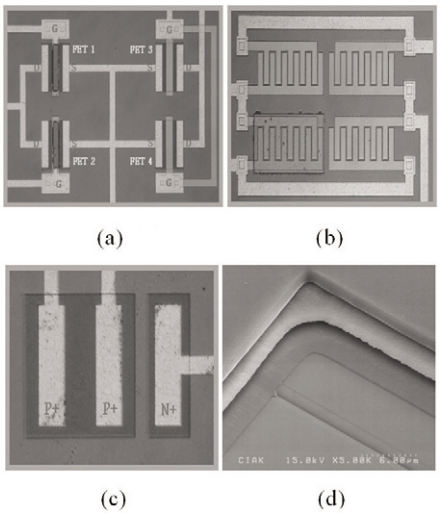


Fig. 3. Photographs of fabricated sensor chip; (a) bridge type FET sensor, (b) bridge type resistor sensor (c) diode temperature sensor and (d) sensor edge after lift-off.

## 3. 결과 및 고찰

GASFET(Gas Field Effect Transistors)는 공기 중의 가스가 흡착할 때 감지 물질의 유전율 혹은 저항률이 변화하고 이는 문턱전압의 변화를 가져온다. Fig. 4(a)는 $SnO_2$ 센서에 CO, $H_2$ 및 $C_4H_{10}$ 가스를 200 ppm, 2,000 ppm 및 10,000 ppm, 그리고 습도는 30 %RH, 60 %RH 및 90 %RH로 변화시켰을 때의 출력 특성이다. 게이트 전압은 2 V로 고정하고 드레인 전압은 0 V에서 10 V까지 1 V 스텝으로 인가하였다. 일반적으로 산화물 반도체 가스센서에서 부탄가스의 동작온도는 300 ℃ 이상이지만 본 연구에서는 실리콘을 기판으로 사용하였기 때문에 측정온도는 120 ℃로 고정하였다. 드레인 전압을 5 V로 하고, 가스 농도를 200 ppm에서 10,000 ppm으로 증가하였을 때, 드레인 전류는 수소 가스에서는 5.6 ㎂에서 24.2 ㎂로, CO 가스에서는 25 ㎂에서 42.8 ㎂로, 부탄가스에서는 9.1 ㎂에서 25.9 ㎂로 증가하였다. 이는 가스 농도가 증가함에 따라 $SnO_2$의 비유전율(εr)이 증가하고 이에 따라 문턱전압의 변화에 의해 드레인 전류가 증가하는 현상으로 설명할 수 있다. 가스농도에 따른 드레인 전류의 증가분이 감도를 결정하므로 수소에 대한 감도가 가장 높았으나, 타 가스에 대해 큰 차이가 나타나지 않았다. 측정온도가 높기 때문에 습도의 변화에 대해서는 드레인 전류의 변화를 거의 볼 수 없었다. Fig. 4(b)는 $SnO_2$/Pt 센서의 가스 및 습도 변화에 대한 응답 특성이다. $SnO_2$에 Pt가 촉매로 첨가되면 Pt에 흡착된 산소와 환원성 가스의 반응 및 스필오버(spill-over) 현상에 의해 낮은 동작온도에서 반응하며 감도도 향상된다[10, 11]. 가스 농도 및 습도는 $SnO_2$ 센서와 동일하게 적용하였고, 측정온도는 25 ℃로 고정하였다. CO 가스에 대해 가장 높은 드레인 전류의 변화를 보였으며, 부탄가스나 습도에 비해 매우 높은 선택성을 보였다. 또한 Fig. 4(c)는 $C_3N_4$ 센서의 습도 및 가스에 대한 응답특성이다. 습도가 30 %RH에서 90 %RH로 증가함에 따라 드레인 전류가 9.6 ㎂에서 26.1 ㎂로 증가하였으며, 수소 가스에 대해서는 가스 농도가 200 ppm에서 10,000 ppm으로 증가할 때 드레인 전류가 6.4 ㎂에서 7.6 ㎂로 적은 증가만 나타났다. 그러나 CO 가스나 부탄 가스에 대해서는 거의 변화가 없음을 알 수 있었다.

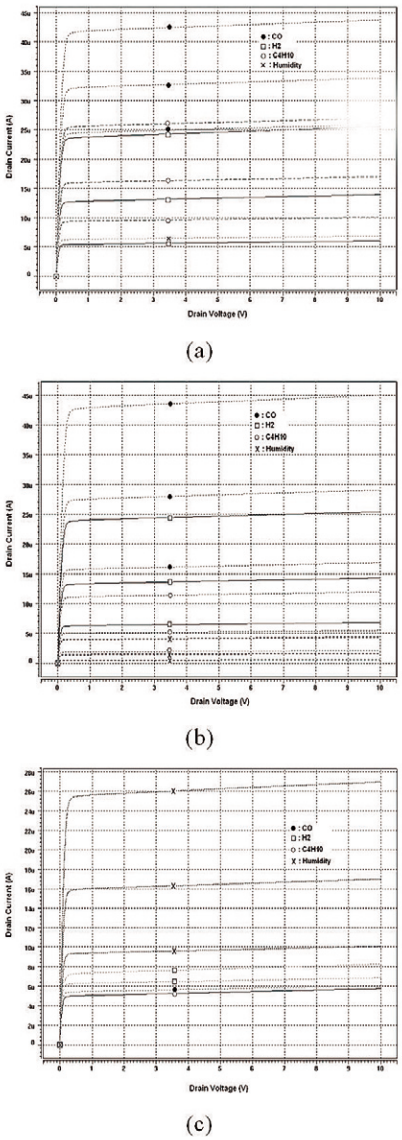


Fig. 4. Current-voltage characteristics of GASFETs for gases; (a) $SnO_2$ sensor, (b) $SnO_2$/Pt sensor and (c) $C_3N_4$ sensor.

Table 1은 이들 각 센서들의 측정 조건을 나타낸 것으로, 이 값들은 주성분 분석법을 적용하기 위한 센서의 변수로 사용할 수 있다. 센서 재료에 따라 가스농도, 가스종류, 측정온도 및 습도를 변수로 주었으며, 주어진 측정온도나 습도들은 각 개별 센서들의 기초 측정으로부터 나온 결과를 바탕으로 설정한 것이다.

Table 1. Measured dimensions of micro platforms

| Sensors | Gas Concentration (ppm) | Humidity (%RH) | Gases | Temperature (℃) |
|---|---|---|---|---|
| $SnO_2$ | 200~10000 | 30~90 | CO, $H_2$, $C_4H_{10}$, $H_2O$ | 120 |
| $SnO_2$/Pt | 200~10000 | 30~90 | CO, $H_2$, $C_4H_{10}$, $H_2O$ | 25 |
| $C_3N_4$ | 2000 | 30~90 | CO, $H_2$, $C_4H_{10}$, $H_2O$ | 25 |

주 성분 분석법을 수행하기 전에 각 센서의 응답 행렬은 중심점 예비 처리(mean centering pre-processing) 기술을 적용하였다[5, 12]. 이는 센서들이 비슷한 응답특성 패턴을 가지기 때문이다. 마이크로 센서 어레이 안의 각 센서의 응답특성은 컨덕턴스 변화로 통일하여 추출하였다. 즉 감도 $\triangle G = G_g - G_a$로 나타낼 수 있는데, 여기서 $G_a$는 특정가스가 주입되기 전의 공지 중의 센서 컨덕턴스이고, $G_g$는 특정가스가 정해진 농도로 주입했을 때의 센서 컨덕턴스이다. 그리고 $\triangle G$는 이들 컨덕턴스 성분의 차이이다. 각각의 마이크로 센서 어레이에 대한 응답 행렬은 어레이 당 센서 당 한개 행과 가스 종류 × 농도 × 측정횟수 열로 표현되었다. $C_3N_4$ 센서의 경우 상위 두 주 성분 (PC1 + PC2)은 데이터 중심점의 85 % 이상을 처리할 수 있고, $SnO_2$/Pt 센서는 80 % 이상, $SnO_2$ 센서는 70 % 이상을 각각 처리할 수 있다. 같은 종류 가스에 대한 측정값들이 스코어 플롯(score plot) 상에서 전형적인 클러스터(cluster)를 만들게 되면 이러한 패턴은 센서의 감도 및 선택성을 결정하는 도구가 될 수 있다[13]. Fig. 5는 $SnO_2$/Pt 센서의 경우 측정온도는 25 ℃, 상대습도를 50 % 그리고 가스농도를 2,000 ppm으로 했을 때의 각 가스들의 감지 패턴을 제 1 주 성분(59.2 %)과 제 2 주성분(23.5 %)의 스코어 플롯 상에 나타낸 것이다. 각 센서 당 5번의 측정 결과를 비교하였고, 가스 탈착 후 재 흡착 시 나타나는 히스테리시스 현상을 최소화하기 위해 가스 탈착 후 재 주입하는 간격은 30분으로 설정하였다. 제 1 주 성분 센서의 응답 데이터에서 주된 변화를 나타내는 것이고, 제 2 주 성분으로 산란하는 것은 감도의 저하 혹은 센서의 반복 측장 시 나타나는 특성 열화 현상 때문이다. $SnO_2$/Pt 센서는 CO 가스나 수소 가스에 대해 비교적 높은 감도를 나타냈지만 부탄가스나 습도에 대해서는 감도가 매우 낮은 것을 알 수 있다.

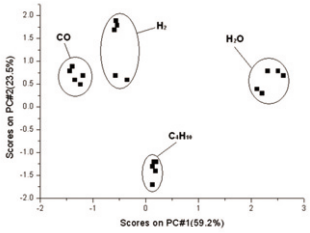


Fig. 5. Scores plot of a PCA on gas data using the $SnO_2$/Pt gas sensor array.

Fig. 6은 마이크로 센서 어레이 내 $SnO_2$/Pt 센서, $SnO_2$ 센서 및 $C_3N_4$ 센서의 응답특성을 PCA법에 의해 3차원으로 그린 것이다. $SnO_2$/Pt 센서나 $C_3N_4$ 센서의 경우 데이터 변화의 59.2 %와 66.3 %로 첫 번째 주요소(PC1)로 설정될 수 있기 때문에 PCA의 결과는 센서들이 비교적 연관성이 있는 것으로 나타났으며, 이는 높은 선택성을 말해 주고 있다. 그러나 $SnO_2$ 센서의 경우는 데이터 변화의 42.3 %가 첫 번째 주요소(PC1)로 설정되기 때문에 상대적으로 선택성이 높지 않다는 것을 알 수 있다.

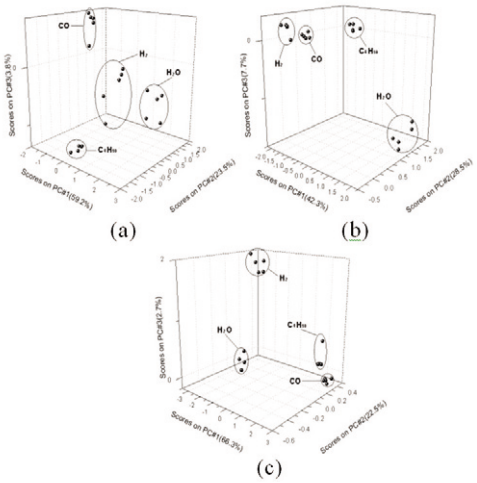


Fig. 6. Scores plot of a PCA performed on gas data obtained with GASFETs; (a) $SnO_2$/Pt, (b) $SnO_2$ and (c) $C_3N_4$.

각 센서 별 선택성은 (대상 가스의 감도 평균치/최대 감도를 나타내는 가스의 감도 평균치) × 100으로 정의하여 Table 2에 정리하였다. $SnO_2$/Pt 센서는 CO 가스를 주 가스로 했을 때 수소 가스에 대한 선택성은 비교적 낮지만, 부탄이나 습도에 대해서는 선택성이 매우 높음을 알 수 있다. 이는 CO 가스나 수소 가스는 같은 환원성 가스이고 흡착 메카니즘이 비슷하여 구별이 어렵기 때문이다. 그러나 부탄가스는 가스 흡착에 필요한 활성화 에너지가 많이 요구되기 때문에 낮은 측정 온도에서는 감도가 떨어진다. 한편 $SnO_2$ 센서는 수소를 주 가스로 했을 때, CO 가스나 부탄가스에 대한 선택성이 좋지 않음을 알 수 있다. $C_3N_4$ 센서의 경우는 타 가스에 대해 습도에 대한 선택성이 매우 높음을 알 수 있다. 이 결과는 Fig. 6의 스코어 플롯의 결과와 일치함을 알 수 있다.

Table 2. Selectivity of each sensors by PCA results

| Sensors | CO | $H_2$ | $C_4H_{10}$ | Humidity |
|---|---|---|---|---|
| $SnO_2$/Pt | 100 | 67.3 | 12.4 | 5.2 |
| $SnO_2$ | 72.3 | 100 | 52.8 | 8.8 |
| $C_3N_4$ | 3.6 | 10.7 | 2.8 | 100 |

멀티센서나 스마트 센서는 여러 가지 MCM의 분류나 인식을 필요로 한다. 가스센서가 전자코(electronic nose)의 단계로 발전하기 위해서는 가스의 차별 능력(discrimination ability) 기술이 매우 중요하다. 그 기술 중 한 단계로 Fig. 1에서처럼 가스 MCM의 화학적 영상을 만들고 이를 분류하고 영상 인식을 통해 패턴을 찾는 과정이 필요하다. 즉 화학적 공간 상의 화학적 영상(Chemical Image, CI)을 응답 공간 상의 패턴인식으로 변화시킬 수 있어야 한다[2]. Fig. 7은 센서 어레이 간의 정량적 비교를 통해 CI 기본 데이터를 매개 변수화(parameterization)한 것이다. 여기서 센서 1은 $SnO_2$/Pt 센서, 센서 2는 $SnO_2$ 센서 그리고 센서 3은 C3N4 센서를 각각 나타내고 있다. 화학적 공간으로 표시한 Fig. 6과 비교해 볼 때 응답 공간으로 표시한 Fig. 7이 편차가 적고 더욱 분명한 패턴을 형성함을 알 수 있다.

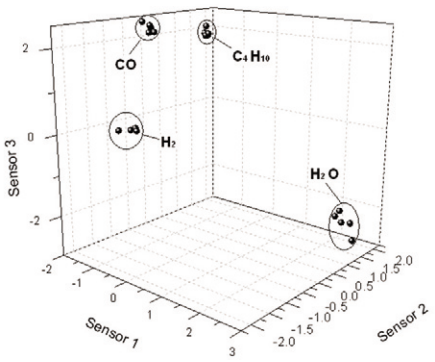


Fig. 7. Selectivity comparison of the multisensor array on the response space.

## 4. 결 론

마이크로 센서 어레이의 개발을 위해 0.6 ㎛ CMOS 기술을 기반으로 FET형 센서를 동일 칩 상에 설계 · 제작하고 그 특성을 조사하고, 응답 공간 상의 패턴 인식으로 주위의 타 가스, 온도변화 및 습도변화에서 선택적으로 가스를 검출하기 위한 연구를 수행하였다. 제작된 시스템 칩은 기존 공정에 추가된 폴리-질화 에치스탑 공정에 큰 영향을 받지 않았으며, 칩의 크기 축소와 공정단계를 줄여주는 효과를 보였다. $SnO_2$/Pt GASFET는 게이트 전압을 2 V로 고정하고, 드레인 전압을 0 V에서 10 V까지 1 V 스텝으로 전압을 인가하였을 때, CO 가스 농도를 200 ppm에서 10000 ppm로 증가함에 따라 드레인 전류는 16.2 ㎂에서 43.5 ㎂로 증가하였다. 측정된 감도 패턴을 PCA법으로 수행한 결과 $SnO_2$/Pt 센서의 경우 CO 가스를 주 가스로 했을 때 수소 가스에 비해서는 1.49배, 부탄 가스에 비해서는 8.06배 그리고 습도에 대해서는 19.23배로 선택성이 높다는 것을 알 수 있었다. 즉 $SnO_2$/Pt 센서는 부탄 가스나 습도에 대해서는 CO 가스의 선택성이 높지만 수소 가스에 대해서는 선택성이 떨어짐을 알 수 있다. 한편 $C_3N_4$ 센서의 경우는 CO 가스에 대해서는 27.78배, 수소 가스에 대해서는 9.35배 그리고 부탄 가스에 대해서는 35.71배로 측정된 모든 가스에 대해 습도의 선택성이 매우 높음을 알 수 있었다. 그러나 $SnO_2$ 센서는 선택성이 떨어졌다. 센서 어레이 간의 정량적 비교를 통해 CI 기본 데이터를 매개 변수화한 결과 화학적 공간으로 표시할 때에 비해 응답 공간으로 표시한 경우 편차가 적고 더욱 분명한 패턴을 형성함을 알 수 있었다.

## 감사의 글

이 논문은 2010년도 경남대학교 연구년 연구비 지원에 의한 것임.

## REFERENCES

[1] J. W. Gardner and P. N. Bartlett, “A brief history of electronic noses”, *Sensors and Actuators B*, vol. 18/19, pp. 211-220, 1994.

[2] B. A. Snopok and I. V. Kruglenko, “Nonexponential relaxations in sensor arrays: forecasting strategy for electronic nose performance”, *Sensors & Actuators B*, vol. 106, pp. 101-113, 2005.

[3] N. El Barbri, et al., “Building of a metal oxide gas sensor-based electronic nose to assess the freshness of sardines under cold storage”, *Sensors & Actuators B*, vol. 128, pp. 235-244, 2007.

[4] Ali Gulbag, “A study on quantitative classification of binary gas mixture using neural networks and adaptive neuro-fuzzy interface systems”, *Sensors & Actuators B,* vol. 115, pp. 252-262, 2006.

[5] M. Stankova, et al., “Sputtering and screen-printed metal oxide-based integated microsensor arrays for the quantitative analysis of gas mixtures”, *Sensors and Actuators B*, vol. 103, pp. 23-30, 2004.

[6] O. Gualdron, E. Llobet, J. Brezmes, X. Vilanova, and X. Correig, “Coupling fast variable selection methods to neural network-based classifiers: Application to multisensor systems”, *Sensors and Actuators B*, vol. 114, pp. 522-529, 2006.

[7] S. E. Manahan, *Industrial ecology. Environmental chemistry and hazardous waste*, Lewis Publishers, Boca Raton, 1999.

[8] J. G. Lee, S. H. Lee, and S. P. Lee “Design and fabrication of CMOS micro humidity sensor system”,

*Journal of The Institute of Signal Processing and Systems*, vol. 9, no. 2, pp. 146-153, 2008.

[9] S. P. Lee, "Fabrication and sensing properties of a micro-humidity sensor system using CMOS technology", *Electronic Materials Letters*, vol. 6, no. 1, pp. 7-12, 2010.

[10] K. S. Kang, and S. P. Lee, "CO gas sensors operating at room temperature", *J. of Materials Science*, vol. 38, pp. 4319 - 4323, 2003.

[11] G. Pajonk, S. Teichner, and J. Germain, *Studies in Surface Science and Catalysis*, New York, Elsevier, p. 17, 1983.

[12] G. Carpenter, S. Grossberg, N. Markuzon, J. Reynolds, and D. Rosen, "Fuzzy ARTMAP: a neural network architecture for incremental supervised learning of analog multidimensional maps", *IEEE Trans. Neural Networks*, vol. 3, pp. 698-713, 1992.

[13] S. J. Lee, S. T. Kim, and H. S. Kim, "A study on the measurement of halitosis of human mouth with chemical gas sensor arrays", *Journal of Sensor Science and Technology*, vol. 20, no. 4, pp. 279-285, 2011.

**이 성 필 (Sung Pil Lee)**

- 1989년 경북대학교 전자공학과 (공학박사)
- 1988년 – 현재 경남대학교 전자공학과 교수
- 관심분야: 센서 재료 및 시스템, 반도체 가스센서, MEMS, 변위센서