

논문 2011-48SC-2-10

휴대용 전자 후각 장치에서 다채널 마이크로 센서 신호의 영상 정합을 이용한 가스 인식

(Vapor Recognition Using Image Matching of Micro-Array Sensor Response from Portable Electronic Nose)

양 윤 석*

(Yoonseok Yang)

요 약

휴대용 인공 전자 후각 시스템 (E-nose)의 가스 측정 환경은 실험실 내의 정교하게 제어되는 환경과 달리 온도, 농도, 기체 시료의 유속 등의 외부 요인의 변동이 매우 심하다. 이런 환경에서도 사용 가능한 단순하고 강인하고 정확한 가스 패턴 인식 알고리즘의 개발은 마이크로 바이오 센서의 발달과 함께 확대되고 있는 휴대용 및 소형 측정 진단 시스템에 있어 매우 중요하다. 본 연구에서는 PDA 기반의 휴대용 전자 후각 시스템을 활용해 실제 변화하는 환경에서 다채널 마이크로 센서로부터 감지되는 가스 신호를 수집하고, 여기에 영상 정합 기법을 적용하여 알고리즘의 강인성과 향상된 정확도를 검증하는 것을 목표로 하였다. 제안된 방법을 6종류의 가스 시료에 대한 7채널 마이크로 센서의 휴대 환경 측정 데이터에 적용하고, 기존의 최대 민감도 특징 추출 기법과 비교한 결과, 외부 환경의 변동에 영향 받지 않는 안정된 인식 성능 뿐 아니라 기존의 방법으로 구별하기 어렵던 2 종의 유사한 가스 시료에 대해서도 정확한 구분이 가능함을 보였다. 제안된 방법은 다양한 환경 변화에 노출되는 유비쿼터스 센서 네트워크 (USN)의 데이터 처리에도 쉽게 응용될 수 있을 것이며, 응용 현장에서 높은 안정성과 정확성을 요구하는 휴대용 의료 진단, 환경 감지 기술의 실용화에 큰 도움을 줄 수 있을 것으로 기대한다.

Abstract

Portable artificial electronic nose (E-nose) system suffers from noisy fluctuation in surroundings such as temperature, vapor concentration, and gas flow, because its measuring condition is not controlled precisely as in the laboratory. It is important to develop a simple and robust vapor recognition technique applicable to this uncontrolled measurement, especially for the portable measuring and diagnostic system which are expanding its area with the improvements in micro bio sensor technology. This study used a PDA-based portable E-nose to collect the uncontrolled vapor measurement signals, and applied the image matching algorithm developed in the previous study on the measured signal to verify its robustness and improved accuracy in portable vapor recognition. The results showed not only its consistent performance under noisy fluctuation in the portable measurement signal, but also an advanced recognition accuracy for 2 similar vapor species which have been hard to discriminate with the conventional maximum sensitivity feature extraction method. The proposed method can be easily applied to the data processing of the ubiquitous sensor network (USN) which are usually exposed to various operating conditions. Furthermore, it will greatly help to realize portable medical diagnostic and environment monitoring system with its robust performance and high accuracy.

Keywords : Portable electronic nose, Portable measurement, Image matching, Robust vapor recognition

* 정회원, 전북대학교 바이오메디컬 공학부, 고령친화복지기기 연구센터

(Div. of Biomedical Engineering and Research Center for the Healthcare and Welfare Instrument for the Aged, Chonbuk National University)

※ 이 논문은 2010년 교육과학기술부로부터 지원받아 수행된 연구임

(지역거점연구단육성사업/헬스케어기술개발사업단)

접수일자: 2011년2월14일, 수정완료일: 2011년3월7일

I. 서 론

인공 전자 후각 (electronic nose, E-nose) 시스템을 이용한 휘발성 유기 화합물 (volatile organic compound, VOC) 감지에는 다양한 기술이 사용되어 왔다^[1]. 초기의 전자 후각 기술은 오늘날의 전기화학적 센서 대신 칼로리메트릭 센서를 이용하여, 기체시료의 측정 결과를 컬러 배열, 즉 영상의 형태로 표현하는 방식을 택하기도 하였다. 마이크로 전기 화학 센서와 디지털 기술의 발달로 인해, 인공 전자 후각 시스템 (E-nose)는 더욱 소형화, 지능화되어 다양한 가스 화합물 시료의 측정과 분석에 그 응용 분야를 넓혀가고 있다^[2~6].

실험실 환경에서 기체 시료를 분석하는 데에는 크로마토그래피(GC)와 질량 스펙트럼 감지기(MS) 같은 전문 기기가 사용될 뿐 아니라, 컴퓨터를 이용한 측정 데이터의 복잡하고 심도 있는 분석 처리가 가능한 반면, 휴대가 가능한 소형 인공 전자 후각 시스템은 일상 생활 주변의 간단하고 반복되는 측정을 쉽게 할 수 있다는 장점이 있다. 이로 인해 식품 유통, 실내의 공기환경, 자동차의 배기 가스, 플라스틱 포장재, 산업폐기물, 피부 감염의 진단 등 그리 복잡하지 않은 측정을 필요로 하는 다양한 분야에서 그 활용이 확대되고 있다^[2~6].

그러나, 실험실 환경을 벗어난 일상 환경에서는 정확한 결과를 얻기가 쉽지 않을 뿐 아니라^[7~8], 다채널 센서를 사용하는 전자 후각의 원리상 잠시 동안 얻어지는 데이터의 양이 상당히 때문에, 이러한 일상의 측정에 적용하기 위해서는 무엇보다 주변의 잡음 노출에 강인한 특성과 대량의 데이터를 다루기 위한 간략하면서도 효과적인 알고리즘이 필수적이다^[8~12]. 아울러 적절한 성능을 유지하는 동시에, 휴대용 기기가 갖는 제한된 연산 처리 능력, 배터리, 저장 공간 등 자원에 적합하도록 데이터와 계산량을 줄이는 것이 필요하다.

기존의 연구들에서는 시간의 경과에 따라 변화하는 센서 응답 신호의 각 채널로부터 패턴 인식에 필요한 특징 (feature)을 추출하는 방법^[1, 13~14], 추출된 특징 벡터를 특징 공간 (feature space) 상에서 구분하기 위해 군집된 데이터들 간의 경계를 보다 효과적으로 설정하기 위한 방법^[15]들을 주로 연구하였다.

이에 반해, 본 연구진의 사전 연구에서는 센서와의 반응으로 인해 다채널 측정 신호의 전반에 나타나는 가스 시료의 고유한 특징^[16~17]을 유지하기 위해 채널 별

특징을 따로 추출하여 벡터 공간으로 대응시키지 않고, 센서 채널 전체의 시간의 흐름에 따른 응답을 그대로 벡터 공간 상에 대응시키는 방법을 택하였으며, 이를 위한 경제적인 방법의 일환으로, 각 채널의 측정 신호를 각 행으로 갖는 2차원 시계열 행렬로 구성하였다. 이는 2차원 영상데이터의 형태와 동등하며, 여기에 영상 인식의 기본 기법인 영상 정합 (image matching) 을 적용하여 서로 다른 가스 시료간의 구분을 보다 정확하게 한 바 있다^[18].

본 연구는 휴대용 전자 후각 시스템에 적합한 잡음에 강인하고, 향상된 가스 인식 성능을 갖는 알고리즘 개발을 위해 휴대용 다채널 마이크로 센서의 측정 신호에 영상 정합을 응용한 가스 인식 기법을 제안하고 이를 1) 실제 개발된 PDA 기반의 휴대용 전자 후각 시스템을 사용하여^[19], 2) 기체 시료의 온도, 농도, 및 유속 등 환경 요인이 제어되지 않는 상황에서 얻은 VOC 측정 결과에 대하여 적용함으로써^[7~8], 알고리즘의 효용성을 검증하는 것을 목표로 하였다.

II. 본 론

1. 휴대 환경에서 가스 시료의 측정

일반 환경에서의 가스 시료 측정을 위해 이전 연구에서 본 연구진에 의해 개발된 다채널 마이크로 센서 및 PDA 기반의 휴대용 전자 후각 시스템을 사용하였으며^[7, 19], 휴대용 전자 후각 시스템의 센서 구성을 위해 다양한 센서 물질 중, 관련 측정 데이터의 통계 분석 결과를 바탕으로 7종류의 화합물을 선택하였다. 참고로 해당 목록을 표 1에 나타내었다^[7].

표 1. 다채널 마이크로 가스 센서에 사용된 다양한 Carbon black (CB) - 고분자 중합체
Table 1. Carbon black (CB) - polymer composites used for micro vapor sensor array.

Ch	Polymer I.D.
1	poly(4-vinyl pyridine)
2	poly(vinyl butyral)-co-vinyl alcohol-co-vinyl acetate
3	poly(vinyl stearate)
4	ethyl cellulose
5	polystyrene-b-polyisoprene-b-polystyrene
6	hydroxypropyl cellulose
7	cellulose acetate

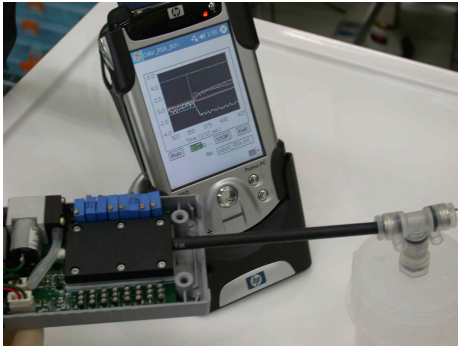


그림 1. PDA 기반의 휴대용 전자 후각 시스템을 이용한 가스 시료 측정. 용기 내부의 시료는 액체 상태
 Fig. 1. Vapor measurement with the developed PDA-based e-nose. Liquid sample of vapor is prepared in a bottle.

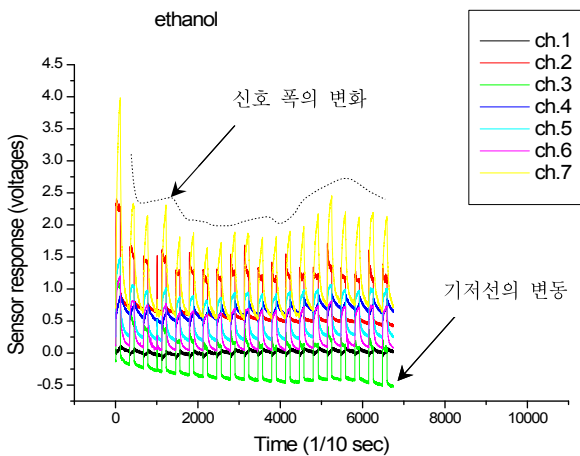


그림 2. 7 채널 마이크로 센서의 에탄올 시료에 대한 전형적인 응답곡선
 Fig. 2. Typical time-responses of 7 channel micro sensor array with respect to inflow of ethanol vapor.

제안된 알고리즘의 검증을 위해 아세톤 (acetone), 벤젠 (benzene), 클로로폼 (chloroform), 싸이클로(c-)헥산 (cyclohexane), 에탄올 (ethanol), 메탄올 (methanol) 등 총 6 종류의 액체 상태의 VOC 시료를 그림 1에서 보인 것처럼 용기에 담아 측정에 사용하였다. 각 시료에 대해 20회의 반복 측정이 시행되었다. (메탄올 측정 시 신호의 변동이 심하여 알고리즘 검증을 위한 다양한 샘플 확보를 위해 30회 반복 측정함)

그림 2는 에탄올 기체 시료를 7채널 마이크로 센서로 측정할 전형적인 응답 곡선을 나타낸다. 그래프에서 보이는 다수의 신호 피크는 20회의 반복 측정에 해당하는 감지 신호이다^[19].

2. 측정 데이터의 영상화 정합 (image matching)
 측정데이터를 2차원 영상 (행렬)의 형태로 표현한 후 각 가스 시료 측정치 간의 정합 수치 (matching score)를 식 (1)의 상관 계수 (correlation coefficient)를 이용하여 산출하였다^[18].

$$\text{correlation coefficient}_{xy} = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x \sigma_y} \quad (1)$$

여기서 x, y 는 두 개의 신호 행렬 (혹은 벡터)이며, σ_{xy} 는 두 행렬의 공분산 (covariance), σ_x 과 σ_y 는 각 행렬의 분산 (variance)이다.

기존의 방법과의 성능 비교를 위해 각 채널의 신호에서 추출된 신호 크기의 최대 변화폭, 즉 최대 민감도 (maximum sensitivity)로 표현된 특징 벡터에 식 (1)로 정의된 상관 계수를 적용하여 정합의 세기를 수치화하였다^[13].

III. 결과 및 고찰

1. 정합 수치에 의한 성능 비교

휴대용 시스템의 측정 결과로부터 산출된 정합 수치를 표 2, 표 3에 정리하였다. 6종류 시료에 대한 총 130회의 측정 결과로부터 모든 가능한 상호 정합 수치를 산출하였다. 각 셀의 수치는 같은 종류의 시료 쌍에 대하여 계산된 총 400개 (메탄올이 포함된 경우 600개) 수치의 평균을 나타낸다.

표 2. 6종류 시료에 대한 총 130회의 측정 결과에 대해 기존의 최대 민감도 특징 벡터로 산출한 모든 상호 정합 수치. 각 셀의 수치는 같은 종류의 시료 쌍에 대하여 계산된 총 400개 (메탄올이 포함된 경우 600개) 수치의 평균을 나타냄

Table 2. Matching scores between all possible pairs in 130 dataset (20 repetitive measurements for each of 5 vapor species and 30 for methanol) using the conventional max. sensitivity feature vector. Each cell value shows average of different pairs in that group.

	아세톤	벤젠	클로로폼	c-헥산	에탄올	메탄올
아세톤	0.9352	0.7076	0.7232	0.3574	0.9069	0.4568
벤젠	0	0.9927	0.8439	0.6936	0.5468	-0.1962
클로로폼	0	0	0.9550	0.4279	0.6147	-0.0540
c-헥산	0	0	0	0.8549	0.2006	-0.1888
에탄올	0	0	0	0	0.9780	0.6384
메탄올	0	0	0	0	0	0.9909

표 3. 6종류 시료에 대한 총 130회의 측정 결과에 대해 제안된 방법으로 산출한 모든 상호 정합 수치. 각 셀의 수치는 같은 종류의 시료 쌍에 대하여 계산된 총 400개 (메탄올이 포함된 경우 600개) 수치의 평균을 나타냄

Table 3. Matching scores between all possible pairs in 130 dataset (20 repetitive measurements for each of 5 vapor species and 30 for methanol) using the proposed method. Each cell value shows average of different pairs in that group.

	아세톤	벤젠	클로로폼	c-헥산	에탄올	메탄올
아세톤	0.8006	0.5516	0.6212	0.3631	-0.0029	0.4724
벤젠		0.9659	0.2513	0.6413	0.5385	0.3021
클로로폼			0.9333	0.1195	-0.4597	0.2415
c-헥산				0.8873	0.2875	0.2181
에탄올					0.9662	0.1240
메탄올						0.8975

표 2는 기존의 최대 민감도를 이용해 얻은 결과이고, 표 3은 제안된 방법에 의한 결과이다.

2. 잡음 성분에 대한 강인성 (robustness)

그림 2에 표시된 것처럼 약 20회의 반복 측정에 걸쳐 감지 신호의 폭에서 차이가 크게 나타남을 알 수 있는데, 이는 유속 제어 장치 (mass flow control, MFC) 등을 배제하고^[7], 용기에 든 VOC 에서 증발하는 가스 시료를 휴대용 전자 후각 시스템에 장착된 소형 펌프로 흡입하도록 하였기 때문에, 센서에 도달하는 시료의 농도가 일정하게 유지되지 않아 생기는 것으로 이해된다. 또한 이로 인해 실험실 환경에서의 측정과 달리 감지 신호의 기저선의 변동도 심한 것을 볼 수 있다^[8].

기존의 다른 연구들 역시 신호의 특징 추출에 앞서, 이러한 잡음 성분들을 주파수 통과 필터나 이동 평균 (moving average) 필터 등을 사용해 제거하고 있으나^[10, 13], 앞서 기술한 것처럼 채널 독립적인 접근 방법에서는 개개의 센서에 개별적으로 작용하는 잡음 성분은 신호 특징 추출 단계에 여전히 오차의 요인으로 작용하여, 패턴 인식 성능을 저하시키게 된다^[20].

하지만, 본 연구에서 제안된 영상 정합을 사용하면 센서에 도달하는 시료의 농도차이로 인한 신호 폭과 기저선의 변동 성분이 모두 템플릿 정합치 계산에 내재된 정규화 효과를 통해 보정될 뿐 아니라, 개별 센서에 작용하는 서로 다른 잡음의 영향은 상관 계수내의 공분산 산출 과정에서 채널 상호간의 신호 변화 추세를 고려하

는 과정에서 자연스럽게 배제되게 된다. 결과적으로 잡음 환경에서 얻은 신호의 각 채널에서 추출된 특징 벡터만을 사용한 가스 패턴 인식 보다, 다채널에 걸친 신호의 상호 변화 추세를 고려한 패턴 인식이 더 우수한 성능을 보인 것임을 알 수 있다.

온도, 농도, 시료의 유속 등이 외부에서 제어되는 환경에서는 환경 변화의 영향이 모든 센서 채널에 공통으로 작용하므로 채널 상호간에는 상대적인 차이가 없는 것이 보통이나, 본 연구에서와 같이 휴대용 측정 시스템을 사용할 때의 잡음은 그림 2에서 본 바와 같이 채널마다 다르게 나타나는데, 이는 측정이 이미 끝난 기체 시료의 잔류로 인한 센서의 초기 조건이나, 다채널 마이크로 센서가 장착된 기체 시료와의 반응 공간 (reaction chamber) 내 유체 흐름의 불균일로 인한 각 채널의 감지 신호 세기에 차이가 있기 때문으로 볼 수 있다.

계산 결과의 전반적인 경향을 알아보는 한편 표에서 표현되지 않은 동일 그룹 내의 세부 결과를 확인하기 위해, 모든 정합 수치의 산출 결과를 그림 3, 그림 4 와 같은 격자 형태로 표시하였다^[18]. 각 교차지점의 화소는 해당되는 두 개의 가스 시료의 정합 수치를 밝기로 표시한다.

그림 3과 비교하여 그림 4는 주 대각선상 (동일 가스 시료)을 제외한 모든 격자 상에서 작은 값을 가지며 이는 서로 다른 가스 시료들에 대해 구분 성능이 향상되었음을 입증한다.

더욱이 외부 요인으로 인한 측정치의 매 변화에도 불

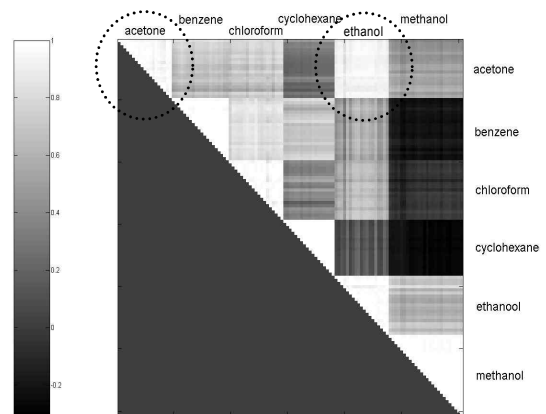


그림 3. 기존 최대 민감도 특징 벡터로 산출한 모든 상호 정합 수치의 밝기 레벨 표현

Fig. 3. Intensity level representation of all the matching scores using the conventional max. sensitivity feature vector.

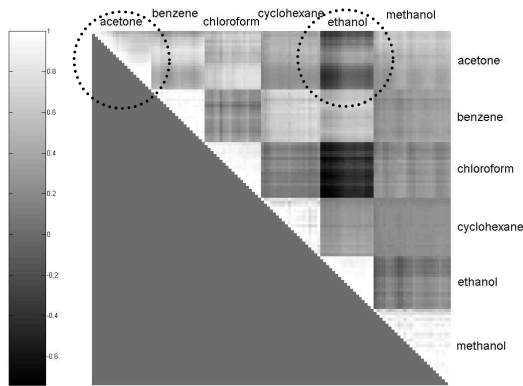


그림 4. 제안된 방법으로 산출한 모든 상호 정합 수치의 밝기 레벨 표현

Fig. 4. Intensity level representation of all the matching scores using the proposed method.

구하고 격자 내 (반복 측정 데이터)의 상호 정합 수치는 비교적 비슷한 값으로 유지됨을 볼 때, 기존의 방법에 비해 높은 가스 인식의 강인성이 입증되었다.

3. 향상된 가스 인식 성능

한편 기존의 특징 벡터를 이용한 가스 구분 과정을 principal component analysis (PCA)를 통해 보여주는 그림 5에서^[19], 점선으로 표시된 영역을 보면 아세톤과 에탄올의 특징 벡터들이 상당부분 혼재하여 분포하고 있음을 알 수 있다.

이는 표 2와 그림 3에 보인 아세톤과 에탄올의 특징 벡터를 사용한 정합치가 큰 값을 가지는 것을 통해서도

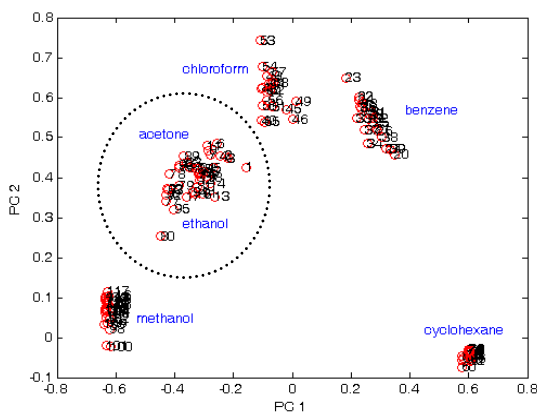


그림 5. 기존의 특징 벡터를 이용한 가스 구분 과정을 PCA를 이용해 표시. 숫자는 반복 측정을 의미함.

Fig. 5. PCA shows the clustering characteristics of the 6 vapor species. The numbers indicate the order of repetitive measurements.

알 수 있으며 이것이 결국 가스 인식 과정에서 오차로 나타나게 된다. 이는 두 기체 시료의 측정 후 각 채널에서 독립적으로 추출한 특징만으로는, 시간의 흐름에 대한 시료와 여러 센서들의 동시적인 반응 정보를 고려할 수 없기 때문에 생기는 한계로 이해된다^[20].

그러나 제안된 방법에 의한 두 가스 측정 신호의 정합치는 표 3과 그림 4에서보는 바와 같이 매우 낮은 값으로 감소하여, 혼동하기 쉬운 두 가스 시료가 확실히 구분될 수 있음을 보여준다.

IV. 결론

본 연구에서는 영상 매칭 기법을 PDA 기반의 휴대용 전자 후각 시스템에 적용하여, 잡음에 보다 강인하고, 정확도가 향상된 가스 인식 기법을 개발하고 이를 실험을 통해 검증하였다.

한편 최근의 인공 후각 연구는 냄새와 1:1로 반응하는 많은 개수의 센서를 사용하여 생물학적 후각 시스템을 모방하려는 시도를 하고 있으며 그 중에는 후각 유전자를 배양한 바이오센서를 활용하는 연구도 시도되고 있다^[21]. 생물체의 시각 기전에 비해 후각 기전은 아직 자세히 밝혀지지 않았는데^[22], 본 연구에서와 같이 후각 감지 신호를 그대로 영상화 하여 처리하는 방식은 후각 정보에 시각정보처리의 기전을 적용하는 과정을 통해 후각과 시각 정보 처리의 유사성과 차이점을 동시에 밝혀감으로써, 후각 정보 처리 기전의 전반을 이해하는데 도움을 줄 수 있을 것으로 생각된다.

끝으로, 본 연구를 통해 휴대용 전자 후각 시스템에서 검증된 영상 정합 응용 기법은 여러 가지 환경에 노출된 다양한 유비쿼터스 센서 네트워크의 데이터 처리에도 활용 가능하며, 안정성과 정확성을 요구하는 의료 진단, 환경 감지 등을 위한 실용적인 기술로 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

참고 문헌

- [1] T. C. Pearce, S. S. Schffman, H. T. Nagle and J. W. Gardner, *Handbook of machine olfaction*, John Wiley & Sons, 2003.
- [2] C. D. Natale, A. Macagnano, E. Martinelli, R. Paolesse, G. D'Arcangelo, C. Roscioni, A. Finazzi-Agrò and A. D'Amico, "Lung cancer identification by the analysis of breath by means

- of an array of non-selective gas sensors”, *Biosensors and Bioelectronics*, Vol. 18, no. 10, pp. 1209-1218, Sep. 2003.
- [3] J. W. Gardner, H. W. Shin and E. L. Hines, “An electronic nose system to diagnose illness”, *Sens. Actuators B Chem.*, Vol. 70, no. 1-3, pp. 19-24, Nov. 2000.
- [4] A. M. Taurino, D. D. Monaco, S. Capone, M. Epifani, R. Rella, P. Siciliano, L. Ferrara, G. Maglione, A. Basso and D. Balzarano, “Analysis of dry salami by means of an electronic nose and correlation with microbiological methods”, *Sens. Actuators B Chem.*, Vol. 95, no. 1-3, pp. 123-131, Oct. 2003.
- [5] A. Guadarrama, M. L. Rodríguez-Méndez and J. A. Saja, “Conducting polymer-based array for the discrimination of odours from trim plastic materials used in automobiles”, *Anal. Chimica Acta.*, Vol. 455, no. 1, pp. 41-47, March 2002.
- [6] H.-T. Chueh, and J. V. Hatfield, “A real-time data acquisition system for a hand-held electronic nose (H2EN),” *Sens. Actuators B Chem.*, Vol. 83, no. 1-3, pp. 262-269 March 2002.
- [7] S. Ha, Y. S. Kim, Y. Yang, Y. J. Kim, S. Cho, H. Yang and Y. T. Kim, “Integrated and microheater embedded gas sensor array based on the polymer composites dispensed in micromachined wells”, *Sens. Actuators B Chem.*, Vol. 105, no. 2, pp. 549-555, March 2005.
- [8] E. J. Severin, B. J. Doleman and N. S. Lewis, “An investigation of the concentration dependence and response to analyte mixtures of carbon black/insulating organic polymer composite vapor detectors”, *Anal. Chem.*, Vol. 72, no. 4, pp. 658-668, Jan. 2000.
- [9] 박종근, 이철희, “국부잡음에 강인한 웨이블릿 기반의 홍채 인식 기법”, 전자공학회논문지, 제42권, SP편, 제2호, 121-130쪽, 2005년 3월
- [10] D. M. Wilson and S. P. DeWeerth, “Signal processing for improving gas sensor response time”, *Sens. Actuators B Chem.*, Vol. 41, no. 1-3, pp. 63-70, June 1997
- [11] 이희성, 김은태, 김동연, “KNN 규칙과 새로운 특징 가중치 알고리즘을 결합한 패턴 인식 시스템”, 전자공학회논문지, 제42권 CI편, 제4호, 43-50쪽, 2005년 7월.
- [12] 오선문, 강대성, “얼굴인식을 위한 해마의 뇌모델링 학습 알고리즘 개발”, 전자공학회논문지, 제42권, SP편, 제5호, 55-62쪽, 2005년 9월
- [13] B. J. Doleman, M. C. Lonergan, E. J. Severin, T. P. Vaid and N. S. Lewis, “Quantitative study of the resolving power of arrays of carbon black-polymer composites in various vapor-sensing tasks”, *Anal. Chem.*, Vol. 70, no. 19, pp. 4177-4190, August 1998.
- [14] C. Distanto, M. Leo, P. Siciliano and K. C. Persaud, “On the study of feature extraction methods for an electronic nose”, *Sens. Actuators B Chem.*, Vol. 87, no. 2, pp. 274 - 288, Dec. 2002.
- [15] S. M. Briglin, M. S. Freunda, P. Tokumarub and N. S. Lewis, “Exploitation of spatiotemporal information and geometric optimization of signal/noise performance using arrays of carbon black-polymer composite vapor detectors”, *Sens. Actuators B Chem.*, Vol. 82, no. 1, pp. 54-74, Feb. 2002.
- [16] R.G. Osuna, H.T. Nagle and S.S. Schiffman, “Transient response analysis of an electronic nose using multi-exponential models”, *Sens. Actuators B Chem.*, Vol. 61, no. 1-3, pp. 170 - 182, Dec. 1999.
- [17] R. G. Osuna, A. G. Galvez and N. Powar, “Transient response analysis for temperature-modulated chemoresistors”, *Sens. Actuators B Chem.*, Vol. 93, no. 1-3, pp. 57 - 66, Aug. 2003.
- [18] Y. S. Yang, S. Ha and Y. S. Kim, “A matched-profile method for simple and robust vapor recognition in electronic nose (E-Nose) system”, *Sens. Actuators B Chem.*, Vol. 106, no. 1, pp. 263-270, April 2005.
- [19] Y. S. Kim, S. C. Ha, Y. Yang, Y. J. Kim, S. M. Cho, H. Yang and Y. T. Kim, “Portable electronic nose system based on the carbon black - polymer composite sensor array”, *Sens. Actuators B Chem.*, Vol. 108, no. 1-2, pp. 285-291, July 2005.
- [20] K. J. Albert, N. S. Lewis, C. L. Schauer, G. A. Sotzing, S. E. Stitzel, T. P. Vaid, and D. R. Walt, “Cross-reactive chemical sensor arrays,” *Chem. Rev.*, Vol. 100, no. 7, pp. 2595-2626, July 2000.
- [21] H. J. Ko and T. H. Park, “Enhancement of odorant detection sensitivity by the expression of odorant-binding protein”, *Biosensors and Bioelectronics*, Vol. 23, no. 7, pp. 1017-1023, Feb. 2008.
- [22] K. Persaud, and G. Dodd, “Analysis of discrimination mechanisms in the mammalian olfactory system using a model nose,” *Nature*, Vol. 299, no. 5881, pp. 352-355, Sep. 1982.

— 저 자 소 개 —



양 윤 석(정회원)-교신저자

1996년 서울대학교 제어계측공학과 학사 졸업.

1998년 연세대학교 협동과정 생체공학과 석사 졸업.

2002년 서울대학교 공과대학 협동과정 의용생체공학전공 박사 졸업

2002년~2005년 한국전자통신연구원(ETRI).

2005년 현재 전북대학교 바이오메디컬공학부.

<주관심분야 : 바이오센서, 임베디드 시스템, 신경재활공학, 에너지 수확>