

소형전극 어레이로 구성된 흐름계형 전자혀

심준호 · 심재훈 · 서성석 · 오현준 · 한중호 · 남학현 · 차근식*
광운대학교 화학과 화학센서그룹
(2004. 3. 10 접수, 2004. 3. 26 승인)

Electronic Tongue Composed of Mini-Electrode Array in Flow Cell

Jun Ho Shim, Jae Hoon Shim, Sung Seok Seo, Hyun Joon Oh, Jong Ho Han, Hakhyun Nam and
Geum Sig Cha*

Chemical Sensor Group, Department of Chemistry, Kwangwoon University, Seoul 139-701, Korea
(Received Mar. 10, 2004, Accepted Mar. 26, 2004)

요 약 : 소형의 이온선택성 전극을 흐름계 어레이로 구성하여 전자혀 시스템을 제작하였다. 제작된 전자혀 시스템에 음용수 및 알코올성 음료를 저 농도의 완충용액 (0.005 M Tris-H₂SO₄ pH 7.2)에 묽힌 후 9개의 전극이 장착된 흐름계에 흘려 보내어 전위차를 측정하였다. 얻어진 자료는 주성분 분석 (principal component analysis; PCA)을 통하여 식음료의 맛을 평가할 수 있도록 2차원 및 3차원 좌표계에 표시하였다. 본 연구에서 제작한 전자혀 시스템은 식품의 생산공정관리의 목적으로 또는 시중에서 구할 수 있는 식음료 맛의 변화 추이를 구분해 내는 목적으로 유용하게 사용될 수 있다.

Abstract : A taste sensor system composed of mini electrode array was built in a flow cell. Potentiometric signals from 9 electrodes were collected for drinking waters and alcoholic beverages which were diluted in a low concentration buffer solution (0.005 M Tris-H₂SO₄ pH 7.2) for the measurement. The measured results were treated with the principal component analysis (PCA), and grouped on a two or three dimensional PCA coordinate to discriminate the tastes of each beverage. It is demonstrated that the taste sensor system of this work may be used for the quality control of beverages in production or the examination of their taste variation in the market.

Key words : taste sensor, electronic tongue, potentiometric sensor, ion-selective electrode, principal component analysis (PCA)

1. 서 론

센서는 인간의 오감 (시각, 청각, 촉각, 후각, 미각)을 재현하거나 또는 능가하는데 그 목표가 있으며 우수한 민감도 (sensitivity), 안정성 (stability) 그리고 우수한 선택성 (selectivity)을 가져야 한다. 빛은 시각으로

감지하고 소리는 청각에서 감지하며 압력 및 온도는 촉각으로 느낄 수 있다. 이런 종류의 감각은 빛과 소리와 같은 한가지 물리적 양에 대해서만 민감하고 선택적으로 느끼게 된다.^{1,2} 시각, 청각, 촉각과 같은 물리적 감각은 카메라, 마이크로폰, 접촉센서 등을 통하여 수월하게 묘사할 수 있으며, 물리량을 객관적이고 정량적으로 표현함으로써 각종 산업 현장에서도 인간의 감각을 대체해 나가고 있다.

반면 미각과 후각은 자극치 (stimuli)들에 대한 감각

★ Corresponding author
Phone : +82+(0)2-940-5246 Fax : +82+(0)2-911-8584
E-mail : gscha@daisy.kw.ac.kr

세포의 선택적 (specific) 또는 비선택적 (non-specific) 전기화학 반응 결과가 신경계를 통해 뇌로 전달되는 화학적 감각이다. 미각과 후각 세포로부터 전송된 신호는 개인이 가지고 있는 감성과 경험에 따라 뇌에서 다르게 인식될 수 있다. 따라서 감지 메커니즘의 인위적 구현이 쉽지 않다.³

성인의 혀에는 약 9000개의 미뢰가 있고, 1개의 미뢰 중에는 5~18개의 맛세포가 있다.⁴ 맛 성분이 입에 들어오면 혀의 표면에 분포하는 유두 중의 미뢰 (taste buds)에 존재하는 미각세포에 흡착되어 미각세포의 전위에 변화가 일어나므로 미각신경에 전기적 충격이 발생한다. 이것이 일종의 맛신호가 되어 대뇌에 전달되어 맛을 느끼게 한다. 인간이 느끼는 미각은 단맛, 쓴맛, 신맛, 짠맛, 감칠맛의 5가지로 구분되며, 수 많은 화학 종의 성분을 개별적으로 구분하는 것은 아니다. 예를 들어 차 (tea)와 커피에는 1000여종 이상의 화학 물질이 포함되어 있으나 인간의 혀는 각각의 화학물질을 구분하지 못하며 5종의 기본 맛으로 느낄 뿐이다.^{1,2,4} 이는 인간의 미각을 모사하기 위한 감지 장치를 제작하는데 있어서 수많은 화학물질에 대한 개별 센서들을 배열하여 제작할 필요가 없으며 이는 실용적이지도 않다는 것을 의미한다. 맛을 구분하는 방법으로는 감응대상 물질이 명확하게 파악되지 않더라도 다종의 화학성분에 감응을 나타내는 낮은 선택성의 전극들을 사용하여 맛의 변화에 따라 다르게 나타나는 감응도의 차이를 통계적 신호패턴으로 파악하는 방법이 실용적인 것으로 제시되어 왔다.⁵

Kikkawa등은 지질 (lipid)을 포함한 고분자 막을 사용하여 5종류의 토마토즙을 구분할 수 있다는 연구 결과를 발표하였고,⁶ Toko등은 고분자막에 지질 성분을 도입한 막으로 제작한 다중센서 시스템으로 다양한 식음료들의 맛을 구분하였다.^{1,2,7-9} Toko와 연구자들은 29가지 상표의 맥주에 대한 맛지도 (taste map)를 보고하였고, 생수, 커피, 술 (sake)에 대해서도 적용 범위를 확대하였다. Vlasov등은 결정 (crystalline) 또는 유리재질 (vitreous)로 만든 Ni^{2+} , Cu^{2+} , Zn^{2+} , Cd^{2+} , Pb^{2+} 등의 중금속 선택성 전극들을 사용하여 전자혀의 개념을 제시하였다.^{10,11} 이들은 모두 각종 시료에서 얻어진 출력값을 분석하기 위해 주성분분석 (principal component analysis; PCA) 법을 이용하였으며, PCA 좌표상에 그 결과를 도시하여 맛에 따라 시료들을 군집별로 구분할 수 있는 맛지도를 작성하였다. 또한 MLR (multilinear

regression), PLS (partial least squares), ANN (artificial neural network)등의 여러 가지 데이터 처리 기법으로 전자혀 시스템을 이용한 정량분석법을 개발하여 다중센서를 사용한 전자혀의 응용범위를 확대할 수 있음을 보였다.¹²⁻¹⁷ 그러나 이들이 개발한 전자혀 또는 맛센서 시스템들은 모두 대형의 재래식 전극을 사용하는 것이며, 실험 방법 또한 많은 양의 시료를 사용하여 비이커에서 측정하는 방식으로는 실용적으로 현장에서 적용하는데 적합하지 않았다.

따라서 본 연구에서는 맛성분 물질들에 대해 비선택적으로 감응하는 이온선택성 고분자 막 전극 (ion-selective polymer membrane electrode)의 어레이 (array)로 구성된 전자혀 시스템을 개발하고, 자체에서 설계 제작한 소형전극을 흐름계 셀에 적용하여 작은 양의 시료로 산업현장 및 실험실 등에서 효율적으로 사용할 수 있는 시스템 구성 방법을 제시하였다. 본 연구에서 구성한 전자혀 시스템의 유용성을 보이기 위하여 시중에서 쉽게 구할 수 있는 식음료 및 알코올 음료들을 주성분분석법¹⁸⁻²⁰을 통해 구분한 결과를 보였다.

2. 실험

2.1. 시약 및 시료

지지체로 사용된 poly (vinyl chloride)는 Fluka (Buch, Switzerland)의 제품을 사용하였고, hydrophilic polyurethane type-A (HPU-A)는 자체 합성한 것을 사용하였다. 전극활성물질로 사용된 4-tert-butylcalix[4]arene-tetraacetic acid tetraethylester (Calix[4]arene), monensin decylester (MDE), Valinomycin, Nonactin, N,N-dicyclohexyl-N',N'-diisobutyl-cis-cyclohexane-1,2-dicarbamide (ETH1810), (-)-(R,R)-N,N'-(bis(11-ethoxycarbonyl)undecyl)-N,N'-4,5-tetramethyl-3,6-dioxaoctanediamide (ETH1001), N-heptyl-N',N'-bis{8-[[3-(heptylmethylamino)-1,3-dioxopropyl]amino]octyl}-N-methyl-propanediamide (ETH7075), tridodecyl amine (TDDA), tridodecylmethyl ammonium nitrate (TDMANO₃), 가소제로 사용된 bis (2-ethylhexyl)adipate (DOA), 2-nitrophenyloctyl ether (NPOE), 친유성 첨가제로 사용된 potassium tetrakis (4-chlorophenyl) borate (KTpCIPB), tetradodecylammonium tetrakis (4-chlorophenyl) borate (ETH500)은 Fluka 사 (Buch, Switzerland)의 제품을 사용하였다. 완충용액의 제조에 사용된 tris-(hydroxymethyl)aminomethane (Tris)는 Sigma사 (St. Louise, MO, USA)에서 구입하였다. 그 이외

의 모든 시약은 분석용 특급시약을 사용하였다. 모든 수용액의 제조는 18 MΩ·cm의 탈이온수를 사용하였다. 실험에 사용된 시료는 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Real samples used in this study

Sample	Brand name	Manufacturer
A	Hite Beer	Hite Brewery Co., Ltd.
B	Bek Se Ju	Kook Soon Dang Co., Ltd.
C	Chamjinisulro soju	Jinro Co., Ltd.
D	2% Refreshing Water, Peach Flavor	Lotte Chilsung Beverage Co., Ltd.
E	Tap Water	-
F	Mineral Water	Jinro Co., Ltd.
G	Pocari Sweat	Dong-a Otsuka Co. Ltd.
H	Gatorade, Lemon Flavor	Lotte Chilsung Beverage Co., Ltd.
I	Near Water, Peach Flavor	Namyang Daily Product Co., Ltd.
J	Powerade, Mountain Blast	Coca Cola Korea Co., Ltd.

2.2. 실험

기준전극은 Orion double junction Ag/AgCl 전극(model 90-02)을 사용하였고, 전극막은 재래식 Phillips 전극체 (IS-561, Glasblaserei Moller, Zurich)와 자체 제작한 소형전극에 장착하여 사용하였고 소형전극은 흐름계(flow injection analysis; FIA)로 구성하여 전위차를 측정하였다. 흐름계 및 이에 사용한 전극의 구조는 Fig. 1에 보인 바와 같이 제작하였다. 유로는 좁은 면적에 다중의 센서를 배열하기에 알맞도록 제작하였으며, 전극은 신호의 안정성이 높은 재래형 전극을 소형화 한 디자인을 사용하였다. 전위차 측정은 high impedance input 16-channel potentiometer (코센텍, 부산)를 사용하였고, 얻어진 데이터는 A/D 변환기를 거쳐 PC에 저장하고, 저장된 데이터는 IBM 컴퓨터의 Igor 프로그램 (Wavematrix, USA)을 이용하여 처리하였다. 흐름계에서의 시료 이동은 연동펌프(peristaltic pump, Gilson Inc., USA)를 사용하였다.

전자혀에 사용할 전극막은 Table 2와 같은 조성으로 제작하였다. 각종 전극막은 다양한 조성의 지지체(matrix), 가소제(plasticizer), 친유성 첨가제(lipophilic additive) 및 전극활성 물질(ionophore)을 용매(THF) 1 mL에 녹여 유리관에 고정되어 있는 직경 22 mm의 유리관에 부어 성형시키고, 실온의 대기 중에서 하루정도 방치하여 용매를 증발시켰다.

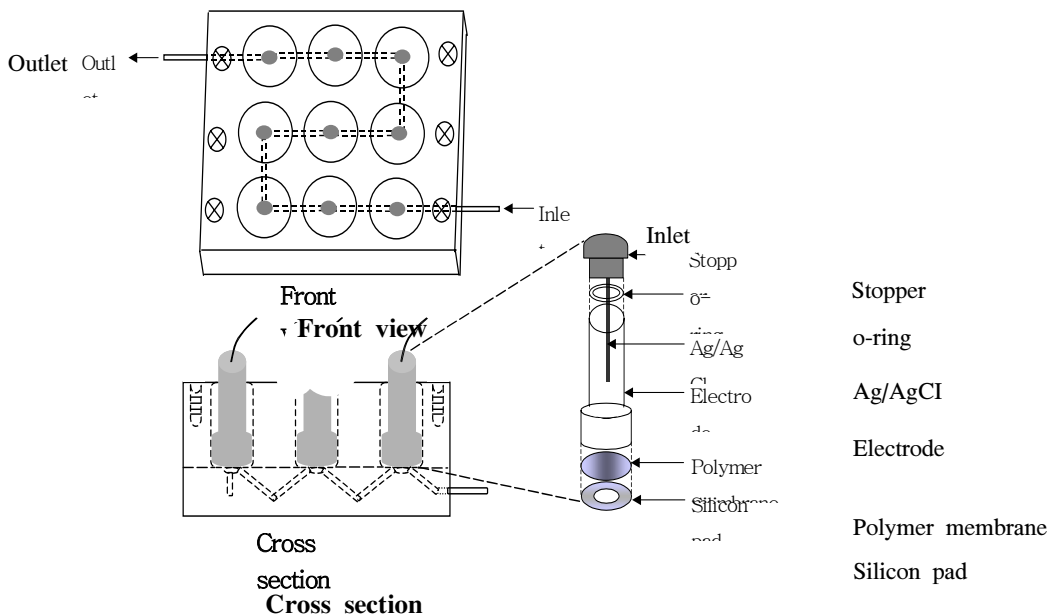


Fig. 1. Multichannel flow-cell equipped with nine polymer membrane based mini-electrodes.

Table 2. Membrane compositions used in this study^a

Membrane No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
PVC ^b	66	66	66	66	54.5	66	66	66	66
HPU-A ^c					11.5				
Calix-4-arene ^d	2								
MDE ^e		6							
Valinomycin			2						
Nonactin				2					
ETH1810 ^f					2				
ETH1001 ^g						2			
ETH7075 ^h							2		
TDDA ⁱ								4	
TDMANO ₃ ^j									2
DOA ^k	132		132	131		131			
NPOE ^l		126			132		126	132	132
KTpCIPB ^m		2		1	1	1	1.7	2	
ETH500 ⁿ							6		

^aIn mg, ^bpoly(vinyl chloride), ^chydrophilic polyurethane type-A, ^d4-tert-butylcalix[4]arene-tetraacetic acid tetraethylester,

^emonensin decylester, ^fN,N-Dicyclohexyl-N',N'-diisobutyl-cis-cyclohexane,

^g(-)-(R,R)-N,N'-(bis(11-ethoxycarbonyl)undecyl)-N,N'-4,5-tetramethyl-3,6-dioxaoctanediamide,

^hN-heptyl-N',N'-bis{8-[[3-(heptylmethylamino)-1,3-dioxopropyl]amino]octyl}-N-methyl-propanediamide, ⁱtridodecylamine,

^jtridodecylmethyl-ammonium nitrate, ^kbis(2-ethylhexyl)adipate, ^l2-nitrophenyloctyl ether, ^mPotassium

tetrakis(4-chlorophenyl)borate, ⁿtetradodecylammonium tetrakis(4-chlorophenyl)borate.

이러한 방법으로 제작한 각종 전극막을 직경 5.5 mm의 원형으로 잘라내어 재래식 전극 및 흐름계용 소형전극에 장착하여 작동전극으로 사용하였다.

재래식 전극과 소형전극을 사용한 흐름계에서의 각 시료에 대한 전위차는 3회 반복하여 측정하였으며 측정된 전위차는 전극수(M)와 시료수(N)의 M x N행렬로 구성하여 MATLAB 6.0 프로그램을 이용하여 제1주성분과 제2주성분에 대한 값을 얻었다.

3. 결과 및 고찰

전자혀 어레이를 구성하기 위하여 재래식 전극에 9종의 서로 다른 조성의 전극막을 선별하여 구성하였으며, 시료는 국내에서 쉽게 구입할 수 있는 수돗물 (tap water), 2% 부족할때 (2% Refreshing water), 하이트 맥주 (Hite beer), 백세주 (Bek Se Ju), 참이슬 소주 (Ch-

amjinisulro soju)로 총 다섯 종을 선정하였다. 9종의 전극은 각각 알칼리금속, 알칼리토금속, 수소이온, 음이온들에 대하여 상대적 선택성이 큰 전극들을 조합하여 구성한 것이다. 1, 2번은 소듐, 3번은 포타슘, 4번은 암모니움, 5번은 리튬, 6번은 칼슘, 7번은 마그네슘, 8번은 수소이온, 9번은 음이온에 대하여 선택성이 높은 전극들이다. 그러나 이 전극들은 모두 다른 양 또는 음이온에 대하여도 일정 수준의 감응을 보이는 특성을 나타낸다. 백세주 및 참이슬 소주는 상대적으로 높은 알코올 함량으로 인해 고분자 막에 손상이 가해지는 것을 방지하기 위해 20배로 희석하여 사용하였다. 바탕용액은 저 농도의 완충용액 (0.005 M Tris- H₂SO₄ pH 7.2)을 사용하였고, 각 시료에 대한 전위차 측정은 3회 반복하여 수행하였다. Fig 2는 9종의 전극막들의 5종의 실제 시료에 대한 3회 반복실험의 전위차 평균 값을 도시한 것이다.

수돗물의 경우 5번 전극과 8번 전극을 제외하고는 30.0 mV 이상의 고른 감응을 보였고, 표준편차도 비교적 적어 모든 전극들에 대해서 우수한 재현성을 나타내었다. 9번 전극에서 -70.0 mV의 감응을 보인 것은 수돗물의 정수 과정에 포함된 염소 소독으로 인한 잔류염소의 영향일 것으로 판단되었다. 음료 “2% 부족할 때”의 경우 9종의 모든 전극의 전위차가 수돗물에 비해 상당히 커진 것을 알 수 있었는데, 이는 시료 내에 다양한 이온종이 상당량 존재한다는 것을 나타내는 것이고 이러한 이온종은 각 전극들에 교차감응의 결과로 전위차값을 나타낸다. 주목할 점은 pH 변화에 민감한 8번 전극의 경우 “2% 부족할 때”에 대한 전위차는 183.7 mV이었으며, 이 변화는 대부분의 과즙음료에 포함되어 신맛과 청량감을 주는 구연산 (citric acid)의 해리에 의한 pH의 변화에 기인한 것으로 판단되었다. 백세주에 대한 전극들의 전위차값은 20배로 희석되었음에도 불구하고 고른 감응과 칼슘 선택성 전극을 제외하고는 우수한 재현성을 보였다.

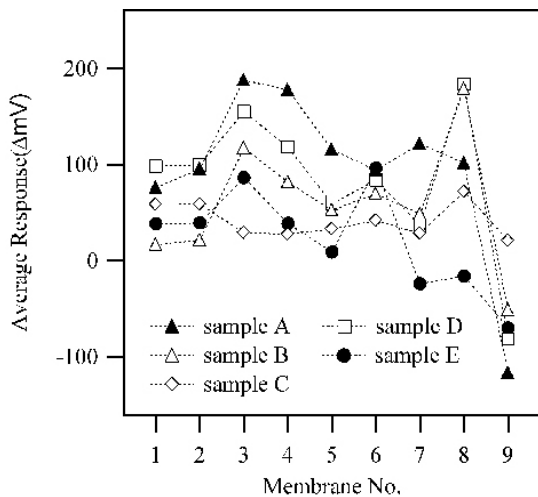


Fig. 2. Responses of the sensor array to 5 different samples.

3회에 걸쳐 얻어진 각 센서 어레이의 전위는 바탕 전위 값과의 차를 이용해 행렬로 구성하였다. 9종의 전극과 5종의 시료 그리고 3회에 걸친 반복실험은 9 x 15의 행렬로 구성할 수 있었으며 이 행렬의 공분산 (covariance) 행렬을 계산한 후 공분산 행렬의 고유치 (eigenvalue)와 고유벡터 (eigenvevtor)을 계산하여 주성

분 분석을 수행하였다. 주성분 분석 결과에 따른 주성분 방향의 고유치들은 Table 3에 나타내었다. 전자혀의 전위차 결과에 따른 변화 양상에 대해서 제 1 주성분의 방향이 63.9%를, 제 2 주성분의 방향이 22.0%의 변이를 설명하는 것으로 나타났으며 이 두성분의 값만으로 전위차 결과의 변이를 85.9% 나타낼 수 있었다. 따라서 제 3주성분 이하의 값들은 제 1, 2주성분의 값에 큰 영향을 미치지 않은 것으로 판단된다. 제1주성분과 제2주성분으로 이루어진 이차원 공간상에 5종의 시료에 대한 센서 어레이의 반응 결과를 Fig. 3에 도시하였다. 제1성분과 제2성분값의 이차원으로 도시한 결과는 5종의 시료를 명확하게 구분할 수 있었다. 따라서 본 실험에서 사용된 9종의 전극막은 전자혀로서의 역할을 충실히 수행하였고 이 전극막들을 소형전극에 응용하고 흐름계를 구성하여 각종 음료간의 맛을 판별하는데 이용하였다.

Table 3. Eigenvalue and variability in PCA for 5 different sorts of samples

Eigenvalue	Variability (%)
13187.429	63.9
4533.978	22.0
1664.000	8.1
1219.832	5.9
13.161	0.1
4.362	0.0
2.735	0.0
1.522	0.0
0.040	0.0

분 연구에서는 소형전극과 흐름계 셀을 자체 디자 인하여 제작하였다 (Fig. 1). 흐름계는 사용되는 시료의 양을 최소화 할 수 있고, 정밀도가 뛰어나는 뿐만 아니라 조작성이 간편하여 많이 응용되고 있는 방법이다. 소형전극은 고분자 막과의 접착력을 증진시키기 위하여 유기용매에 어느 정도 녹을 수 있는 polycarbonate 재질로 제작하였으며 재래식 전극과 같이 내부용액을 포함하는 구조로 제작하였다. 흐름계 셀의 9종의 전극은 3개씩 3열로 배치하여 크기를 최소화 하였다. 흐름계의 유속은 20 mL/min에서 가장 우수한 감응과 회복시

간을 보였고 사용되는 시료의 양은 0.3 mL로 기존 방법보다 크게 줄었다. 이미 재래식 전극을 이용하여 비교적 맛의 구분이 용이한 5종의 시료들을 구분하였으므로, 흐름계로 맛을 판별하게 될 시료는 수돗물과 생수 그리고 5종의 이온음료로 성분 또는 기능성이 유사하여 맛의 구분이 힘든 총 7종을 선정하여 각 시료간의 맛을 판별하였다.

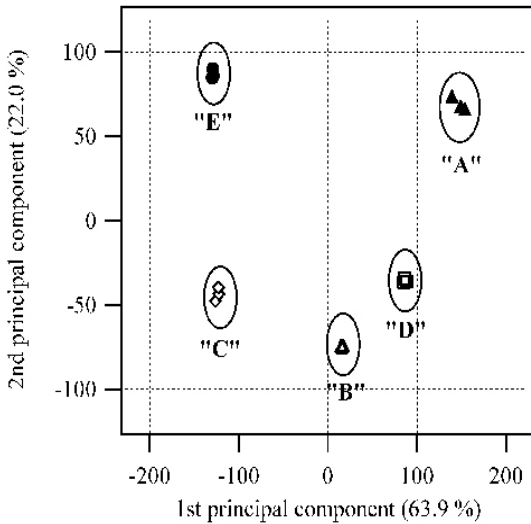


Fig. 3. Discrimination of 5 different of samples by PCA: PCA was performed with the data obtained from 9 electrodes. Measurement was carried out in a 0.005 M Tris-H₂SO₄, pH 7.4 buffer solution.

실험은 3회에 걸쳐 시행하였으며 각 전극에서 얻어진 전위차 값은 평균하여 Fig. 4에 도시하였다. 그림에서 볼 수 있듯이 각 시료별로 다른 패턴의 전위차를 보임을 알 수 있었고, 이 전위차 값들을 행렬로 구성하여 주성분 분석을 수행하였다. 9종의 전극과 7종의 시료 그리고 3회의 걸친 반복실험은 9 × 21의 행렬로 구성할 수 있으며 이 행렬의 공분산 행렬을 계산한 후 공분산 행렬의 고유치와 고유벡터를 계산하여 주성분 분석을 수행하였다. 주성분 분석 결과에 따른 주성분 방향의 고유치들은 Table 4에 나타내었다.

제1주성분이 94.0%의 변이를, 제2주성분이 3.9%의 변이를 설명하는 것으로 나타났으며, 이 두 성분이 전체 변이의 97.9%를 설명하였다.

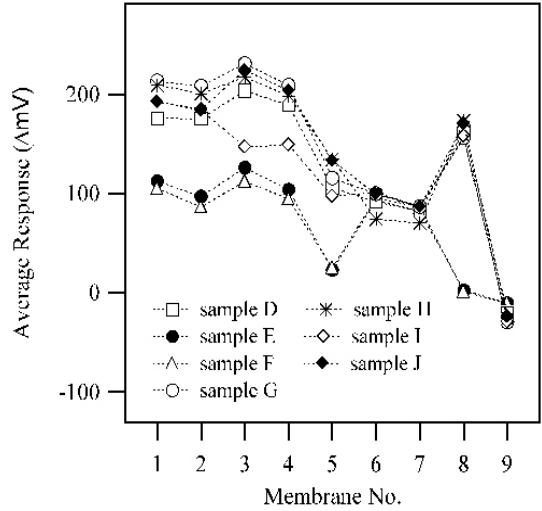


Fig. 4. Responses of the sensor array to 7 different samples.

따라서 9종의 전극에서 얻어진 변이를 단지 이차원의 공간상에서 대부분의 변이에 대한 설명이 가능하게 되었고, 이를 주성분 분석을 통하여 결과들을 도시한 것이 Fig. 5a이다.

수돗물과 생수 즉 맛을 거의 느끼지 못하는 시료는 왼쪽에, 5종의 음료들은 오른쪽에 분포하였다. 이는 음료에 기능성을 주기 위해 첨가된 각종 이온종들의 영향과 음료에 포함된 구연산의 영향으로 인한 산도변화가 좌표상의 분리를 나타낸 것으로 판단된다.

Table 4. Eigenvalue and variability in PCA for 7 different sorts of samples

Eigenvalue	Variability (%)
15263.430	94.0
638.159	3.9
176.576	1.1
116.125	0.7
37.376	0.2
1.816	0.0
0.609	0.0
0.265	0.0
0.099	0.0

오른쪽에 분포된 5종의 서로 다른 시료 중 “2% 부족할 때” (sample D)와 “Near Water” (sample I)는 7종의 시료를 모두 도시한 그림에서도 명확히 구분할 수 있었고, 군집이 형성되어 확인하기 힘들었던 시료 간의 구분을 위하여 일부 시료의 전위차 변화 값을 행렬로 새롭게 구성하여 주성분 분석을 수행한 결과는 Fig. 5b와 c이다. 전체 시료를 도시한 그림에서 구분하기 힘들었던 2종의 시료인 수돗물과 생수에 대한 좌표를 확인한 것이 Fig. 5b이고, 각각의 시료에 대해서 구분이 가능하였다.

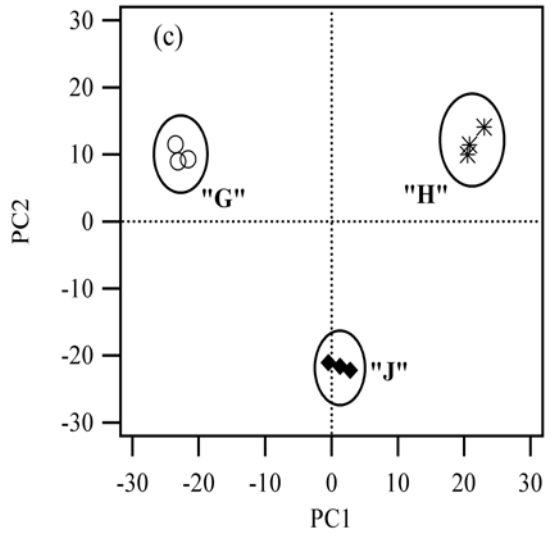
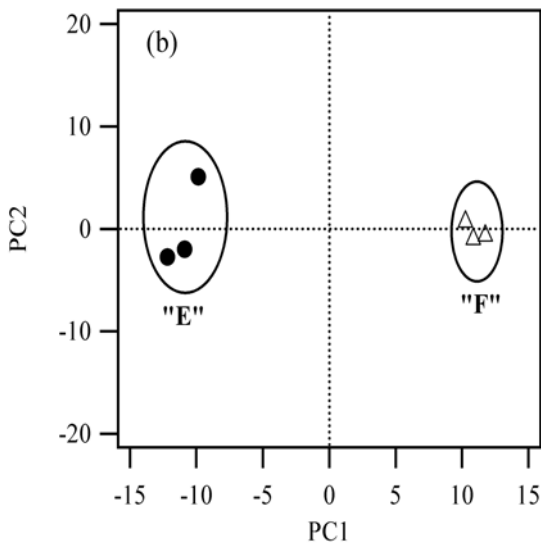
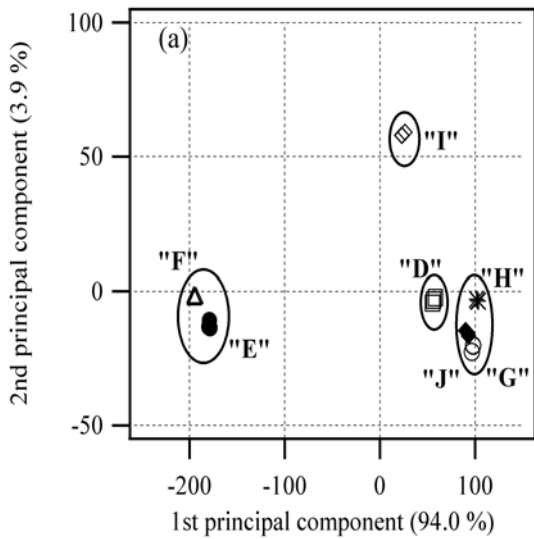


Fig. 5. PCA was performed with the data obtained from 9 electrodes. Measurement was carried out through a flow-cell (background: 0.005 M Tris-H₂SO₄, pH 7.4 buffer solution): (a) discrimination of 7 different of samples by PCA; (b) electronic tongue score-plot of 2 water samples (sample: E and F); (c) electronic tongue score-plot of 3 ionic beverage (sample: G, H and J).

또한 3종의 음료가 한곳에 집중되어 분포하였던 좌표만을 따로 모아서 행렬로 구성하여 확인한 Fig. 5c는 수돗물과 생수의 경우와 마찬가지로 3종의 시료에 대해서 재현성 있게 구분하였다. 따라서 소형전극과 흐름계를 이용한 전자혀는 총 7종의 시료간의 맛의 차이와 유사 성분의 시료에 대한 맛을 명확하게 구분하였다.

4. 결론

본 연구에서는 소형전극과 흐름계를 이용한 각종 음료간의 맛의 차이를 구분할 수 있는 전자혀를 개발하였다. 흐름계를 사용함으로써 시료의 부피 (≤0.3 mL)를 줄일 수 있었으며 시중에서 구할 수 있는 식음료 시료들을 사용한 반복실험에도 극소 편차를 보임으로 음료간의 미세한 맛의 차이까지도 구분을 할 수 있었다. 본 연구에서 개발된 전자혀는 식품산업의 공정제어, 시판되는 식음료의 변질 여부, 인간의 미각으로 접근하기

힘든 독성물질의 판별 등에도 널리 응용될 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 2003년도 광운대학교 교내학술연구비 지원 및 두뇌한국 21사업, 그리고 보건복지부 보건의료 기술진흥사업 (02-PJ3-PG6-EV05-0001)에 의하여 이루어 졌으며, 이에 감사 드립니다.

참고 문헌

1. K. Toko, *Meas. Sci. Technol.*, **9**(12), 1919-1936 (1998).
2. K. Toko, *Electroanalysis*, **10**(10), 657-669(1998).
3. 배영민, “고분자 막 전극 센서 어레이를 이용한 전자 혀 개발”, 서울대학교 박사학위 청구 논문, 2001.
4. 강인수, 김정숙, 성태수, 조득문, 조효현, “현대식품화학”, 지구문화사, 서울, 2000.
5. K. Albert, N. Lewis, C. Schauer, G. Sotzing, S. Stitzel, T. Vaid and D. Walt, *Chem. Rev.*, **100**(7), 2595-2626(2000).
6. Y. Kikakawa, K. Toko and K. Yamafuji, *Sensor. Mater.*, **5**(2), 83(1993).
7. K. Toko, *Mat. Sci. Eng. C*, **4**(2), 69-82(1996).
8. K. Toko, *Biosens. Bioelectron.*, **13**(6), 701-709 (1998).
9. K. Toko, *Sensors and Actuators B*, **64**(1-3), 205-215(2000).
10. Y. Vlasov, A. Legin, and A. Rudniskaya, *Sensors and Actuators B*, **44**(1-3), 532-537(1997).
11. A. Legin, E. Bychkov, B. Seleznev and Y. Vlasov, *Sensors and Actuators B*, **27**(1-3), 377-379(1995).
12. A. Legin, A. Rudnitskaya, Y. Vlasov, C. Natale, F. Davide and A. D’Amoco, *Sensors and Actuators B*, **44**(1-3), 291-296(1997).
13. A. Legin, A. Rudnitskaya, Y. Vlasov, C. Natale, E. Mazzone and A. D’Amoco, *Electroanalysis*, **11**(10-11), 814-820(1999).
14. A. Legin, A. Rudnitskaya, Y. Vlasov, C. Natale, E. Mazzone and A. D’Amoco, *Sensors and Actuators B*, **65**(1-3), 232-234(2000).
15. C. Natale, F. Davide, J. Brunink, A. D’Amico, Y. Vlasov, A. Legin and A. Rudnitskaya, *Sensors and Actuators B*, **34**(1-3), 539-542 (1996).
16. C. Natale, A. Macagnano, F. Davide, A. D’Amico, A. Legin, Y. Vlasov, a> Rudnitskaya and B. Seleznev, *Sensors and Actuators B*, **44**(1-3), 423-428(1997).
17. C. Natale, R. Paolesse, Antonella Macagnano, A. Mantini, A. D’Amoco, Mario Ubigli, A. Legin, L. Lvova, A. Rudnitskaya and Y. Vlasov, *Sensors and Actuators B*, **69**(3), 342-347(2000).
18. F. Winqvist, P. Wide and I. Lundstrom, *Anal. Chim. Acta*, **357**(1-2), 21-31(1997).
19. P. Ivarsson, Y. Kikkawa, F. Winqvist, C. Krantz-Rulcker, N.-E. Hojer, K. Hayashi, K. Toko and I. Lundstrom, *Anal. Chim. Acta*, **449**(1-2), 59-68 (2001).
20. S. Holmin, F. Bjorefors, M. Eriksson, C. Krantz-Rulcker and F. Winqvist, *Electroanalysis*, **14**(12), 839-847(2000).