



전자혀

# 인간의 혀를 대신하는 전자혀

미각과 후각은 자극치들에 대한 감각 세포의 화학 반응 결과가 신경계를 통해 뇌로 전달되는 감각이다. 이 중 미각은 수용액 속에 녹아 있는 각종 전해질, 비전해질 물질들이 미각 세포를 자극함으로써 발현되는 감각으로서, 식품의 맛을 판별할 때 이용된다. 식품의 맛은 단맛, 쓴맛, 신맛, 짠맛과 최근에 확인된 감칠맛 등 5가지 기본 맛의 혼합으로 이루어진다. 그 중 단맛과 쓴맛은 주로 각종 비전해질 물질들에 기인하고 신맛과 짠맛은 주로 수용액 속에 녹아 있는 전해질 물질들이 감각 세포를 자극함으로써 발현되는 것으로 알려져 있다.

## 전자혀, 인간의 맛 모방한 기계 시스템

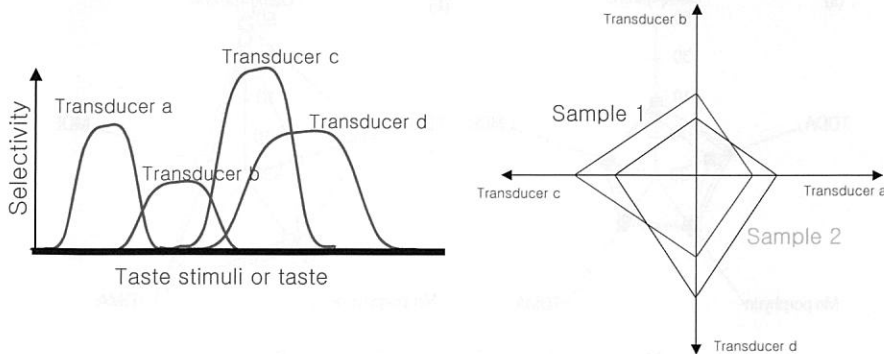
인간을 포함한 동물들이 가지는 맛의 인식 메커니즘은 다양하다, 기본적인 메커니즘은 맛물질과 맛세포에 포함되어 있는 맛수용체의 화학 반응 결과가 전기적 신호의 형태로 신경망을 통해 뇌에 전달되며, 뇌에서는 기존의 맛에 대한 경험을 토대로 하는 연상 작용을 통해 맛을 인식하게 되는 것이다. 따라서 인간의 맛 인식 메커니즘은 맛을 인식할 수 있는 감지부와 감지부로부터 획득한 맛물질 간의 반응 결과를 뇌에 전달하기 위한 신호 전달 체계, 그리고 감지부로부터 입력된 전기 화학 반응 결과를 분석하는 인식부로 나누어질 수 있다.



글 조성인

서울대학교  
바이오시스템 · 소재학부 교수

글쓴이는 서울대학교 농공(기계)학과 졸업 후 미국 퍼듀 대학교에서 석사·박사학위를 받았다. 서울대학교 농업생명과학대 바이오시스템·소재학부 학부장, 농림수산식품기획평가원 설립위원회 위원, 농림수산식품과학기술위원회 위원 등을 지냈으며 현재 서울대학교 그린바이오과학기술연구원 원장을 겸임하고 있다.



▶▶ 그림 1. (a) 센서어레이의 비선택적 반응 특성

(b) 전자 혀의 맛패턴 예

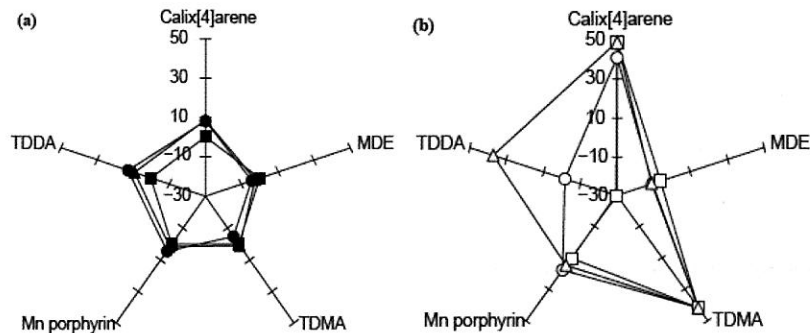
이러한 인간의 맛 인식 메커니즘을 기계적으로 모방한 시스템이 전자혀(electronic tongue)이며, 최근까지 다양한 형태로 개발되어 왔다. 이들 시스템은 맛물질과 반응하는 센서어레이, 센서어레이로부터 출력되는 신호를 조절하기 위한 신호조절부, 그리고, 데이터를 분석하여 결과를 도출하는 다변량해석부로 구성된다. 이 중 센서어레이는 전자혀의 핵심적인 요소로서 맛물질들과 반응하여 전기적 신호를 출력하는 두 개 이상의 개별 센서의 다발로 구성된다. 개별 센서들은 맛물질과 비선택적으로 반응하는 특징을 가지고 있다.

맛을 발현하는 물질들은 다양하기 때문에 이들에 대한 개별적인 감지는 한계가 있다. 맛의 인식 과정에서 느끼는 맛의 강도는 다양한 맛물질들과 종합적으로 반응한 결과로 나타난다. 따라서 기존의 화학센서나 바이오센서가 특정 물질에 대해 선택적으로 반응하여 그 농도를 정량화하는데 활용되는데 비해 전자혀는 맛의 강도를 정량화하거나, 식품의 맛에 의한 판별 분석 등에 활용할 수 있다. 따라서 전자혀를 구성하는 센서어레이는 이러한 요구를 달성하기 위해 구성되어야 한다.

센서어레이를 구성하는 대표적인 방법으로 전위차법을 기반으로 하는 전기화학 센서를 들 수 있다. 전기화학 센서는 글래스나 고분자막 등으로 구현할 수 있는 내부에 도핑하는 물질을 변화시킴으로써 전해질 물질들에 대한 다양한 화학 반응 양상을 조절할 수 있으며, 비교적 소형으로 구현할 수 있는 장점이 있다. 이러한 센서어레이를 통해서 출력되는 신호의 패턴은 그 시료에 대한 맛을 표현하는 지문이 된다.

### 맛의 강도, 판별분석 위한 센서어레이 구현 방법

이러한 센서어레이를 구현하기 위한 다양한 방법들이 시도되고 있다. 전자 혀의 감응 소자로서 전해질들에 대해 비선택적으로 반응할 수 있는 감응 소자의 구성에 관한 연구들로 Hayashi 등(1995)은 고분자 막 표면에 각종 지질을 고정한 감응 소자를 개발하였다. 이들은 총 6종의 지질을 고분자 막에 고정시켜 맛물질과의 전기 화학 반응 특성을 관찰하였으며, 반응의 응용 가능성을 확인하였다. Cho와 Bae 등(2002)은 고분자 막에 각종 이온투과담체(ionophore), 이온교환체 등을 도핑한 감응막을 개발하고 각종 맛물질들에 대한 반응 특성을 구명하였다. 이들은 수소이온과 양이온과의 반응을 위한 4종의 감응막, 호프마이스터



▶▶ 그림 3. 와인의 맛패턴. (a) 레드 와인 (b) 화이트 와인

(Hofmeister) 서열에 따른 음이온 감응막과 Hofmeister 서열을 따르지 않는 음이온 감응막 등으로 구성된 센서어레이를 제안하였다.

블라소프 등(1997)은 유리 재질로 된 전극 어레이를 제작하고 이들을 이용하여 각종 액체의 성분 측정에 이용하였다. 전극 어레이를 구성하는 각 전극 소자는 Ni, Cu, Zn, Cd, Pb 등의 금속 이온에 감응하는 특성을 가지고 있으며, 유리 전극에 Ag, S 등을 첨가함으로써 교차 감응 특성을 변화시킬 수 있음을 확인하였다. 이외에 사이토 등(1992)과 사이다 등(1992)은 지질 막에 전류를 가함으로써 발생하는 막 전위차의 변화를 동력학적 관점에서 관찰함으로써 감응 소자의 개발을 시도했으며, 라비뉴 등(1998)은 광학 센서 기법을 감응 소자 개발에 적용하였다.

또한 센서어레이와 다변량해석부로 전자혀를 구성하고, 식품이나 액상 시료의 판별 분석이나 정량화 등에 활용하기 위한 연구도 수행되었다. 센서어레이로부터 출력되는 맛패턴이 다변량해석부를 통해 맛을 정량화하거나 판별 및 인식하는 과정을 거칠 때 주성분 분석 기법(PCA) 등의 통계적 기법이나 인공신경회로망(ANN)과 같은 인공지능 기법들이 활용된다.

Legin 등(1997)은 유리 재질의 전극어레이를 이용하여 차, 커피, 맥주, 주스 등의 음료를 판별할 수 있음을 증명하였다. 특히 각종 음료와 반응하는 센서어레이의 출력 신호를 분석하기 위해 주성분 분석(PCA)을 이용했는데, 제1 주성분과 제2 주성분을 2차원 평면에 표시함으로써 각 음료를 군집화할 수 있으며 이 군집은 오렌지주스의 숙성 시간과 높은 상관관계가 있음을 확인하였다.

Di Natale 등(1997)은 유리 전극어레이의 각 소자들이 각종 이온에 비선택적으로 반응하는 특성을 이용하여 오염된 강물에 포함되어 있는 각종 중금속을 측정하려는 연구를 수행하였다. 이들은 자체 제작한 22개의 유리 전극으로부터의 출력 신호를 분석하기 위해 주성분 분석(PCA), PLS, 인공신경회로망(artificial neural network)을 이용했으며 각 중금속 별로 4% 이내의 오차를 보였다. 이로써 비선택성 센서소자의 어레이가 정량적 분석에서 응용될 수 있음을 보였다. Bae 등(2005)은 5종의 센서어레이로 구성되는 전자

▶▶ 그림 4. 알파모스 전자혀



혀를 구성하고 짠맛과 신맛의 정량 및 와인의 관별에 적용하기 위한 연구를 수행하였다. <그림 3>에 나와 있는 바와 같이 레드와인과 화이트와인은 서로 다른 맛패턴을 가지고 있으며, 개별 와인들이 가지는 미세한 맛의 차이도 통계적 기법을 통해 서로 구분할 수 있음을 확인하였다.

### 광학형 맛센서 연구

최근에는 광학 스펙트럼 또는 색 변화 분석을 통해 맛에 대한 정보를 얻는 광학형 맛센서 또한 연구되고 있다. Goodey(2001)는 폴리스타이렌-폴리(에틸렌 글리콜)와 아가로스 미립자에 수용체 또는 지시체를 부착시켜 센서칩에 배치시킨 뒤 시료와 반응시킨 뒤 변화하는 색상값 또는 형광값을 측정하여 산, 염기, 금속 양이온 등을 검출했으며 Marquez(2005)는 NIR 센서를 이용하여 올리브 오일의 산성도와 지방산의 함량을 예측하는 모델을 개발하기도 하였다.


또한 Zang 등(2006, 2007)은 염료를 프린트한 소수성 멤브레인을 이용한 색상 변화를 측정하여 18종류의 맥주와 14종류의 탄산음료를 구분 가능함을 연구를 통해 보여 주었다. 필자는 화학염료를 마이크로 비드에 결합시켜 음료의 단맛, 신맛, 짠맛 등의 맛을 느끼게 하는 성분과 염료의 반응에 의한 색상 변화를 통해 맛을 관별하는 맛센서에 대한 연구를 진행하고 있다.

### 일정한 성분에 정확한 반응...상용화 기대

전자혀 기술의 개발과 더불어 상용화된 사례도 있다. 대표적인 전자혀의 상용화 사례로는 ASTREE 전자혀(www.alpha-mos.com)를 들 수 있다. 센서어레이는 ChemFET (Chemical modified field effect transistor) 기술로 구현된 7개의 센서로 구성되며, 이들은 각종 전해질에 대해 반응하도록 설계되어 있다. 또한 기본 맛의 하나인 짠맛을 정량화하기 위한 센서가 상용화되기도 하였다. 이 센서는 센서어레이 대신 백금 전극을 검출기로 하는 염도계로 개발되어 가정에서 조리된 국 또는 찌개의 염도를 실시간으로 측정 가능한 제품이다.

전자혀가 사람의 혀보다 기능적으로 뛰어난 특성은 일정한 성분에 언제나 정확히 반응한다는 점이다. 이러한 특성에 따라 식품의 맛을 정량화하고 객관화하는 분야에 활용할 수 있다. 요쿠르트나 간장 등 식품 고유의 맛을 객관화된 수치로 표현함으로써 소비자의 맛에 대한 세부적 기호를 충족시킬 수 있는 것이다.

가짜 양주를 가려내는 등 식품의 맛 차이를 평가하는 데도 전자혀를 활용할 수 있다. 식품의 제조 공정에서 원료 및 제조 방법 변경에 따른 맛의 차이를 신속하고 객관적으로 평가할 수 있다. 그리고 사람의 혀가 맛을 시험할 수 없는 비위생적인 물질에도 전자혀가 사용될 수 있다. 전자혀 시스템은 액상의 분석, 즉 식품의 품질 관리나 수질 환경오염 평가 등에 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

또한, 식품의 맛을 표시하는 맛코드가 정립된다면 앞으로 전자혀는 더욱 광범위한 분야에 응용될 수 있을 것으로 기대되며, 식음료 업체들을 비롯해 상당수의 업체들이 전자혀의 상용화에 관심을 보이고 있다. 



▶ 그림 5. 기미상공