**맛의 정량화 기술**

 **최명환**서울대학교 생명과학부

   음식은 단순히 배고픔을 해결하고 영양분을 섭취하는 것을 넘어, 삶의 질에 깊은 영향을 미친다. 맛있는 음식을 소개하는 방송이 인기를 끌고, 유명한 식당 앞에 줄이 늘어선 모습에서 맛있는 음식에 대한 사람들의 열망을 쉽게 확인할 수 있다. 이러한 소비자의 기대에 부응하기 위해 식품 업계는 더욱 맛있는 음식을 개발하기 위한 끊임없는 노력을 기울이고 있다. 이 과정을 체계적으로 접근하기 위해 맛을 정량적으로 평가하는 기술에 대한 요구가 높다.

본 논단에서는 맛을 구성하는 요소들을 제시하고, 맛을 정량화하는 기술의 현재와 미래에 대해 다루고자 한다. 일상적으로 표현되는 음식의 맛은 미각(Taste)과 후각(Olfaction)을 포함하는 포괄적인 개념인 풍미(Flavor)의 의미로 주로 사용되지만 본 논단에서는 이러한 감각적 경험 중에서 미각(Taste)에 집중하여 이를 정량적으로 평가하는 방법들에 대해 풀어보고자 한다.

***1. 맛(Taste)의 구성 요소***

   맛을 정량화하여 숫자로 표현하기 위해서는 맛의 구성하는 요소들을 정의하는 것이 필요하다. 현재 미각 분야에서는 단맛(Sweet), 짠맛(Salty), 쓴맛(Bitter), 신맛(Sour), 감칠맛(Umami)의 다섯 가지 기본 맛으로 구성되어 있다고 널리 받아들여지고 있다 (그림 1) [1]. 이러한 기본 맛은 동물 모델로 널리 활용되는 생쥐를 비롯한 다양한 동물에서 상당부분 진화적으로 보존되어 있다.

   단맛은 설탕과 같은 당류에 의해 주로 유발되는 맛으로 음식 내에 우리가 에너지원으로 활용하는 탄수화물이 존재하는 것을 알려주는 신호로 볼 수 있다. 생존을 위해 섭취해야 하는 영양속에 대한 신호로서 인간을 비롯한 다양한 동물에서 일반적으로 선호되는 맛이다. 혀에서 단맛을 감지하는 미각세포는 단맛 수용체인 T1R2/T1R3 heterodimer를 통해 감지된다 [2]. 따라서 단맛 수용체가 없는 동물은 단맛을 느끼지 못하며 대표적으로 고양이가 이에 해당한다.



**[그림1]** 다섯가지 기본맛과 알려진 미각 수용체

감칠맛은 1908년 이케다 박사가 다시마로부터 글루탐산(Glutamic acid)을 추출하면서 발견되었고, 아지노모토(Ajinomoto)사를 통해 조미료로 출시된 MSG(Monosodium glutamate)의 맛으로 널리 알려져 있다. 감칠맛은 아미노산, 특히 글루탐산에 의해 유발되며, 이는 우리 몸을 구성하는데 필수적인 단백질이 존재함을 알려주는 신호로 볼 수 있다. 고기, 치즈 등에서 느껴지며, 음식의 깊고 풍부한 맛을 형성하는 데 기여한다. 단맛과 함께 일반적으로 선호되는 맛으로, 감칠맛에 대한 대표적인 수용체는 T1R1/T1R3 heterodimer이다 [3].

쓴맛은 다양한 독성 물질에 의해 주로 유발되는 맛으로 불쾌감을 주는 맛으로 인식된다. 잠재적으로 유해한 물질을 섭취하지 않도록 경고하는 역할을 하기에 생존에 중요한 역할을 담당한다. 쓴맛에 대한 수용체인 T2R은 약 30여종이 알려져 있다 [4]. 유전적 차이에 따라 특정 쓴맛 물질을 느끼지 못하는 것이 알려져 있다. 예를 들어 TAS2R38 유전자에 따라 어떤 사람에게는 매우 쓴 PTC(Phenylthiocarbamide)가 전혀 쓰지 않게 느껴지기도 한다.

신맛은 음식물의 산성도(pH)에 의해 유발되는 부패한 음식이나 미숙한 과일과 같은 산성 음식물에 대한 경고 신호로 알려져 있다. 따라서 신맛이 강한 음식은 일반적으로 불쾌감을 주는 맛이며 수용체로 내이에서 평형감각을 유지하는데 관여하는 optopetrin-1(OTOP-1)이 미각세포에서 신맛의 수용체로 작용한다는 것이 밝혀졌다 [5].

짠맛은 주로 소금(NaCl)과 같은 염류에 의해 유발되며, 신체의 전해질 항상성을 유지하는 데 중요한 역할을 한다. 이로 인해 짠맛은 바닷물 수준의 고농도는 일반적으로 불쾌한 맛이지만 생리적으로 요구되는 적절한 농도에서는 선호하게 된다. 음식을 조리할 때 반복적으로 간을 보며 적절한 소금의 양에 신경을 쓰게 되는 이유가 된다. 짠맛의 수용체로 신장에서 나트륨 재흡수에도 활용되는 eNaC(Epithelial sodium channel)이 알려져 있으나 고농도 소금물의 불쾌한 맛은 아직 충분하게 설명하지 못하며 추가적인 수용체가 존재할 것으로 예상하고 있다 [6].

다섯 가지 기본 맛 이외에도 제 6의 맛의 존재가 연구되고 있다. 지방산(Fatty acid)에 의해 유발되는 지방맛이나, glutathione 등에 의해 유발되며 음식의 풍미를 높이는 코쿠미(Kokumi) 맛, 동전 등의 금속이 혀에 노출되었을 때 느껴지는 금속(Metallic) 맛 등이 논의되고 있다.

혀에 노출되는 음식에 의해 일어나는 신경 신호는 맛의 종류 외에도 다양한 요소에 의해 영향을 받는다. 우선 시간이다. 예를 들어 동일한 농도의 설탕물을 입에 머금고 있다고 하여도 시간에 따라 느끼는 단맛의 농도는 감각 적응이 더해져 일반적으로 줄어든다. 추가로 몸의 상태에도 복합적으로 영향을 받는다. 예를 들어 지방세포에 의해 분비되는 렙틴(Leptin) 호르몬은 단맛 세포를 둔감하게 만든다. 아직 효과를 명확히 알지 못하는 다양한 호르몬 수용체가 미뢰 내에 존재하고, 직접 호르몬이나 신경전달물질을 분비할 수 있다는 것이 알려져 있다. 혀에서 미각 신호가 뇌로 전달되기 전부터 상당한 수준의 맛 정보에 대한 조절 메커니즘이 작용하고 있는 것이다.

***2. 맛의 정량화 방법***

음식의 느끼는 과정에서 시간적으로 변화하는 각 맛 정보를 어떻게 정량적으로 측정할 수 있을까? 맛 정보가 처리되어 가는 단계를 고려하면 여러 방법이 도출될 수 있다. 예를 들어, 맛을 감지하는 첫 단계인 미각수용체 혹은 미각세포의 활성을 측정하는 방법, 미뢰로부터 미각 정보를 받아 뇌로 전달하는 미각 신경의 활성을 측정하는 방법, 맛 정보가 뇌로 전달되어 인지되는 맛을 언어나 행동으로 표현하는 방법 등이다. 현재 널리 사용되는 방법부터 앞으로 개발될 수 있는 방법까지 살펴보도록 하자.

***2-1. 관능평가(Psychophysics study)***

식품 분야에서 가장 널리 활용되는 방법은 음식의 맛을 인간의 감각을 통해 평가하는 관능평가로 최종적인 맛의 인지 단계를 측정하는 방법이다 [7]. 이 평가 방법은 식품산업에서 제품 개발, 품질 관리, 소비자 선호도 조사 등 제품 개발 과정에서 주요한 역할을 담당한다. 관능평가는 주로 훈련된 패널이나 일반 소비자를 대상으로 하여 이루어진다. 훈련된 패널은 특정 맛을 인지하고 분류하는 능력을 갖춘 전문가들로, 제품의 세부적인 맛 프로파일을 정확하게 분석할 수 있다. 반면, 일반 소비자를 대상으로 한 평가에서는 제품에 대한 전반적인 선호도나 만족도를 파악하는 데 초점이 맞춰진다. 이 과정에서 사용되는 대표적인 평가 방법으로는 맛의 강도를 숫자로 평가하는 강도 평가법(Intensity scale test), 두 음식 간의 미세한 차이를 감지하기 위한 삼각 테스트(Triangle test), 소비자의 선호도를 파악하기 위한 선호도 평가(Preference test) 등이 있다. 예를 들어, 강도 평가법을 활용하여 특정 음식의 맛을 정량화하는 관능평가를 구성한다면 참여자가 음식의 맛을 평가하고, 단맛, 짠맛, 쓴맛, 신맛 등에 해당하는 맛의 요소 별로 점수를 매기는 형태를 생각해 볼 수 있다. 사람 간 변동성을 줄이기 위한 척도로 거의 느껴지지 않는 수준의 감각부터 상상할 수 있는 가장 강한 감각으로 정규화한 gLMS (generalized Labeled Magnitude Scale)을 활용 가능하다.
하지만 미각의 관능평가는 인간의 주관적인 경험을 보고하는 형태로 이루어지기에 평가 결과가 평가자에 따라 달라질 수 있다는 한계를 가진다. 나아가 맛에 대한 인지는 포만감, 감정 등의 내적 상태에 따라 민감하게 영향을 받을 수 있어 평가 결과의 일관성을 유지하기 어려울 수 있다. 일관성을 높이기 위해 다수의 참가자를 기반으로 한 통계적 분석이 필요해 다량의 데이터를 획득하기 어렵고, 사람을 대상으로 하기에 안정성이 불확실한 새로운 물질은 포함할 수 없다는 한계도 존재한다.

***2-2. 세포 기반 기술***

혀에서 맛을 감지하는 첫 단계를 측정하는 미각 수용체 수준의 방법도 식품 분야에서 활용되고 있다. 세포에 맛 수용체 및 하부 신호전달물질에 대한 재조합 유전자를 도입하여 발현하도록 한 센서 세포를 제작하여 센서로 활용한다. 이 세포에 특정 화합물 혹은 음식의 성분이 노출되면, 맛 수용체가 이를 감지하고 세포 내에서 일련의 신호 전달 경로가 활성화된다. 이 때 수반되는 세포 내 칼슘 농도 변화, cAMP 수준의 변화 등을 정량적으로 측정한다. 예를 들어, 단맛 수용체(TAS1R2/TAS1R3)를 발현한 세포에 설탕이나 다른 단맛을 내는 화합물을 노출시키면, 세포 내부에서 칼슘 농도가 변화한다. 이 변화를 세포 내 칼슘 농도에 따라 형광 밝기가 변하는 탐침자(e.g., Fura-2)를 도입하여 단맛의 강도를 정량적으로 평가할 수 있고, 이를 통해 식품 개발 과정에서 새로운 감미료, 쓴맛 억제제 등을 발굴하거나 정량적으로 스크리닝 할 수 있다 [8]. 이 기술의 주요 장점은 인간의 주관적인 미각 평가에 의존하지 않고도 맛의 강도를 객관적으로 평가할 수 있다는 것이다. 또한, 인공적으로 만들어진 세포 시스템을 사용하기 때문에 반복성 있고 표준화된 실험을 수행할 수 있다. 이로 인해 기초과학적 미각 연구 및 다양한 식품 산업 분야에서 활용되고 있다.
이를 적극적으로 활용한 대표적인 생명공학 기업인 Senomyx는 새로운 맛 물질과 향미 증진제를 개발하는 것을 목표로 1998년 맛 분야 연구자인 찰스 주커 교수와 로버트 스트라이어 교수에 의해 설립되었다 [9]. 이 회사는 인간의 미각 수용체를 활용한 세포 기반의 스크리닝 기술을 통해 단맛 증진제(Sweetmyx), 감칠맛 증진제(Savorymyx), 쓴맛 억제제(Bittermyx) 등의 다양한 맛을 강화하거나 억제할 수 있는 물질을 개발하여 PepsiCo, Nestle 등의 다수의 글로벌 식음료 기업과의 협력을 구축하였다. 나스닥에 상장되며 미각 스타트업의 성공인 기업으로 꼽혔으나, 제품에 낙태된 태아의 조직이 사용된다는 루머에 의해 어려움을 겪기도 했다. 이는 스크리닝을 위한 세포주로 HEK-293(Human embryonic kidney) 세포를 사용한 것을 태아가 들어갔다고 착각한 몰이해에서 비롯된 것이었으나 소비자에게 이미지가 중요한 식품 기업과 밀접한 관련을 맺고 있는 이 회사에 상당한 어려움을 주었다. Senomyx는 2018년 유럽의 글로벌 향료 및 향수 제조업체인 Firmenich에 인수되어 현재는 Firmenich의 일부로 운영되고 있다.

***2-3. 전기화학적 센서 기반 기술***

전기화학적 센서를 기반으로 인간의 미각을 모방하여 맛을 감지하고 분석하는 인공혀(Artificial tongue) 혹은 전자혀(Electronic tongue) 기술 또한 활발하게 개발되고 있다. 이 기술은 주로 특정 맛 성분에 민감하게 반응하는 센서를 기반으로 개발된다. 센서가 특정 맛 물질에 결합할 때 발생하는 화학적 신호를 전기 신호로 변화하는 형태가 일반적이다. 예를 들어 사람 단맛 수용체를 도입한 나노소낭을 탄소섬유 기반 트랜지스터에 도입하여 단맛 센서로 활용하거나, 자가조립 앱타머(Aptamer)를 기반으로 쓴맛을 감지하는 센서를 개발한 연구가 있다 [10,11]. 다양한 맛을 병렬적으로 센싱하거나 기본맛 이외의 떫은맛(Astringency) 등에 대해서도 전자혀가 보고되었다 [12]. 나아가 미각 수용체 활성 이후의 맛 정보처리 과정을 인공신경망을 도입하여 모방하여 복잡한 맛 인지 과정을 모사하는 연구도 제시된 바 있다.

***2-4. 동물 모델 기반 정량화***

  맛을 수용체 수준에서 정량화 하는 것이 음식의 맛을 대변하는 충분한 정보일까? 음식은 일반적으로 다양한 맛의 조합으로 이루어 진다. 미뢰 내에는 수십 개의 미각 세포 및 미각교세포(Glia-like taste cell)가 밀집하여 상호작용을 통해 맛 정보를 복합적으로 조절할 수 있다는 것이 조금씩 밝혀지고 있다. 이를 볼 때 조합된 맛에서 나타나는 맛 정보의 변화를 보다 정확하게 측정하기 위해서는 미뢰 내 미세환경을 고려하는 것이 필요하다. 특히 시간에 따른 맛 신호의 변화나 내적 상황에 따른 맛 정보의 변조를 고려하기 위해서는 생리적 상태 그대로의 미뢰 내 환경이 중요하다. 이러한 측면에서 현재는 실험적으로만 활용되고 있으나 생체 모델을 미각 정보의 정량화에 활용하고자 하는 노력이 진행되고 있다.
미각 분야에서 실험적으로 미각 정보의 변화를 측정하는 전통적인 전기생리학적 방법이 있다. 혀에서 미각 정보를 전달하는 신경인 고삭 신경(Chorda tympani nerve) 혹은 혀인두 신경 (Glossopharyngeal nerve)에서 전기적 신호를 측정하여 맛 정보를 측정하는 방식이 널리 사용되어 왔다. 전기생리학 기술은 미각에 대한 이해에 크게 기여하고 있으나 신경 다발에서 나오는 통합된 신호를 측정하는 방식은 맛 별로 구분이 안되기에 정보이 제한이 크고, 단일 신경 섬유 별로 측정하는 방식은 침습도가 높고 실험 준비가 까다로워 스크리닝에 활용하기에는 어려움이 있다.
최근 생체 이미징을 기반으로 미뢰에서 나타나는 세포 및 분자수준의 활성을 측정하는 기술이 제시되고 있다 [13]. 미각 세포 혹은 신경에 칼슘 혹은 신경전달물질에 대한 형광 프로브를 도입하고, 생체 이미징이 가능한 다광자 현미경(Multiphoton microscopy) 혹은 공초점 현미경(Confocal microscopy) 등의 생체 영상 기술을 적용하여 측정하는 방식이다. Cre-Lox 시스템을 활용하여 원하는 세포 혹은 신경 서브타입을 선택적으로 표적하여 원하는 신호전달물질(예, Ca2+, ATP, 5-HT 등)을 관측하는 것이 가능하다. 이 과정에서 혀 표면에 액체 상태의 맛 물질을 전달하면서 이미징에 대한 방해를 최소화하기 위해 미세유체기술을 도입한 microfluidics-on-a-tongue 시스템이 활용되고 있다. 이밖에 미뢰의 신호가 전달되는 슬신경절(geniculate gangion)을 노출하고 신경세포의 활성을 칼슘 표지자를 통해 측정하는 방식도 활용되고 있다. 이러한 생체 이미징 기반 기술들은 미뢰 내 미세환경이 생리학적으로 유지한 상태에서 관측이 이루어지기에 세포 모델에서는 불가능한 고농도 혹은 장시간의 맛 물질 노출 실험이 가능하며 세포 간 신호전달을 통한 맛 정보의 변조과정이 반영된 결과를 측정할 수 있다.



**[그림2]** 생체 이미징 기반 맛 정량화 기술

***3. 미래의 맛 정량화 기술***

   전통적으로 식품 산업에서 활용되었던 관능평가, 세포 혹은 전기화학적 센서 기반 미각 수용체 활성도 측정, 동물 모델 기반의 전기생리학 및 이미징 기술까지 다양한 기술이 제시되고 있으나 아직 음식의 맛 정보를 정량적으로 표현하기에는 넘어야 할 산이 많다. 우선 어떠한 요소들의 조합이 맛을 구성하는지 아직 명확하지 않으며 이 요소들 간의 상호작용은 더욱 복잡하다. 이를 극복하기 위해 지속적인 기초과학적 연구와 기술적 발전이 요구된다. 우선 미각 수용체에서 맛 인지과정까지의 기초과학적 이해를 높여야 한다. 현재의 미뢰 내 정보처리를 넘어 조합된 맛에서 일어나는 미각 세포 간의 상호작용이나 내적 상태에 따라 바뀌는 맛 정보처리 등 다양한 생리학적 상황에 대한 폭넓은 지식이 필요하다. 다음으로 다양한 맛 물질에 대한 수용체 반응, 신경반응 혹은 관능평가에 대한 대규모의 데이터베이스를 확보하여야 한다. 대규모의 데이터는 최근 급속도로 발전하는 인공지능과의 결합을 통해 새로운 물질의 맛을 정량적으로 예측하는 것이 가능케 할 것이다. 유사한 예로 후각 분야에서는 최근 대규모 데이터를 기반으로 분자 구조를 기반으로 향을 예측하는 알고리즘이 제시되고 있다. 이러한 일련의 노력이 융합된다면 미각을 넘어 후각, 촉각 등의 정보가 종합적으로 고려된 음식의 풍미(flavor)를 정량화하고, 나아가 예전 수시간 줄서서 기다리던 맛집의 풍미를 집에서 원격으로 느낄 수 있는 날이 오지 않을까 기대한다.

**참고문헌**

* 1. Roper, Stephen D., and Nirupa Chaudhari. "Taste buds: cells, signals and synapses." Nature Reviews Neuroscience 18.8 (2017): 485-497.
* 2. Nelson, Greg, et al. "Mammalian sweet taste receptors." Cell 106.3 (2001): 381-390.
* 3. Nelson, Greg, et al. "An amino-acid taste receptor." Nature 416.6877 (2002): 199-202.
* 4. Chandrashekar, Jayaram, et al. "T2Rs function as bitter taste receptors." Cell 100.6 (2000): 703-711.
* 5. Teng, Bochuan, et al. "Cellular and neural responses to sour stimuli require the proton channel Otop1." Current Biology 29.21 (2019): 3647-3656.
* 6. Taruno, Akiyuki, and Michael D. Gordon. "Molecular and cellular mechanisms of salt taste." Annual Review of Physiology 85.1 (2023): 25-45.
* 7. Pfaffmann, Carl, Linda M. Bartoshuk, and Donald H. McBurney. "Taste psychophysics." Handbook of sensory physiology 4.Part 2 (1971): 75-101.
* 8. Wang, Teng-Hao, Guo-Hua Hui, and Shao-Ping Deng. "A novel sweet taste cell-based sensor." Biosensors and Bioelectronics 26.2 (2010): 929-934.
* 9. Wolfson, Wendy. "The Tastemakers: Semonyx Targets Taste Receptors." Chemistry & biology 16.11 (2009): 1123-1124.
* 10. X. Wu, H. Onitake, Z. Huang, T. Shiino, Y. Tahara, R. Yatabe, H. Ikezaki, K. Toko, Improved durability and sensitivity of bitterness-sensing membrane for medicines. Sensors 17, 2541 (2017).
* 11. S. R. Ahn, J. H. An, H. S. Song, J. W. Park, S. H. Lee, J. H. Kim, J. Jang, T. H. Park, Duplex bioelectronic tongue for sensing umami and sweet tastes based on human taste receptor nanovesicles. ACS Nano 10, 7287-7296 (2016).
* 12. Yeom, Jeonghee, et al. "Soft and ion-conducting hydrogel artificial tongue for astringency perception." Science Advances 6.23 (2020): eaba5785.
* 13. Han, Jisoo, and Myunghwan Choi. "Comprehensive functional screening of taste sensation in vivo." BioRxiv (2018): 371682.

**저자약력**

* 2003-2006 KAIST 바이오및뇌공학과, 학사
* 2006-2010KAIST 바이오및뇌공학과, 박사
* 2015-2020 성균관대학교 글로벌바이오메디컬공학과, 조교수/부교수
* 2023-2024 Monell Chemical Senses Center, 방문교수
* 2020-현재 서울대학교 생명과학부, 부교수

**한국분자세포생물학회 뉴스지, 2024년 9월호, 논단**