식품이력추적제도를 위한 바이오센서

Biosensors for Food Traceability

신현민, 이경환*

Hyun-Min Shin, Kyeong-Hwan Lee*

전남대학교 지역 · 바이오시스템공학과

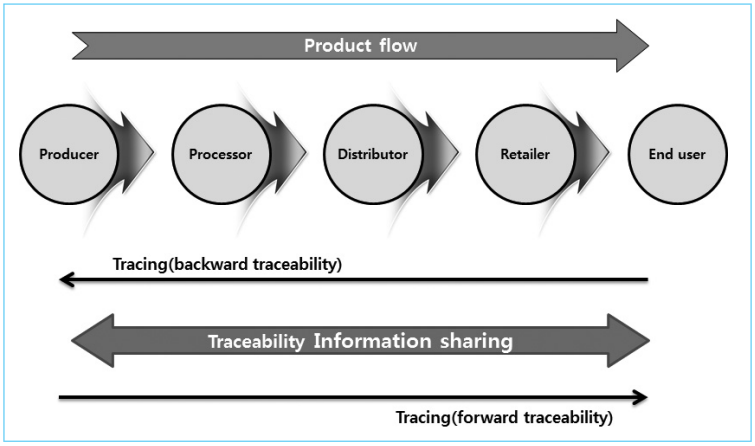
Department of Rural and Biosystems Engineering, Chonnam National University

서 론

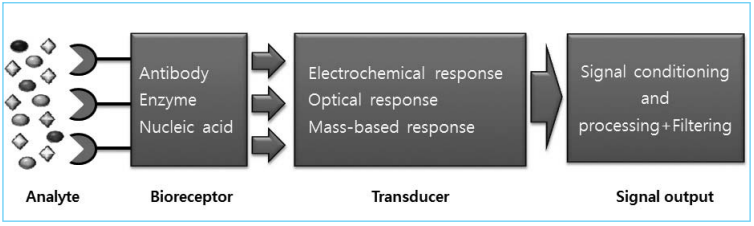
국민 소득의 증가와 삶의 질 향상으로 식품 소비패턴은 고급화 되어가고 식품 안정성에 대한 관심은 더욱 높아지고 있다. 안전하고 바른 먹거리 운동인 슬로푸드(slow food)나 생산자와 소비자의 거리를 좁혀 신선하고 안전한 먹거리를 제공하는 로컬푸드(local food) 운동이 세계적으로 활발하게 전개되고 있다. 하지만 식중독 피해 발생 건수와 피해액은 해가 갈수록 급증하고 있는 추세이다. 미국 농무부의 보고서에 의하면 해마다 식품매개질병으로 인해 미국에서만 4,800만 명이 질병에 걸리고 있고, 그 중 3,000여 명이 사망하고 있다. 우리나라에서도 세균과 바이러스에 의해 식중독 발생건수 및 환자수는 2003년 135건 7,909명에서 2007년 510건 9,686명으로 매년 급증하고 있다.

식품의 제조 및 가공 단계로부터 유통, 판매 단계까지 각 단계별로 식품의 이력을 기록, 관리하여 소비자에게 제공하는 식품이력추적관리제도(FTS: Food Traceability System)가 도입되어 시행되고 있다(그림 1). FTS를 통해 소비자들은 식품의 안정성과 관련된 다양한 정보를 확인하고 선택권을 보장 받을 수 있고, 식품제조업체는 철저한 위해요소관리와 품질관리를 통해 제품에 대한 신뢰성을 높일 수 있으며, 정부 당국은 위해식품 발생 시 근원을 신속히 찾아내어 유통을 차단함으로써 식품안전사고를 예방할 수 있다[1]. FTS의 조기 정착과 신뢰 확보를 위해서는 식품 제조에서부터 판매까지의 각 단계에서 식품의 안정성을 실시간으로 모니터링 할 수 있는 센서기술의 확보가 시급하다. 식품의 병원균 검출을 위한 기존 방법(culture and colony counting, antigen-antibody interaction, polymerase chain reaction)들은 오랜 분석시간과 전문 인력이 요구될 뿐만 아니라 고비용으로 인해 FTS에는 적합하지 못하다. 이에 반해 바이오센서는 극미량의 시료만으로 병원균을 신속히 검출할 수 있고 휴대성이 뛰어나 현장에서 식품 병원균을 실시간으로 모니터링 할 수 있는 장점이 있다. 따라서 본 논문에서는 식품이력추적관리제도하에서 식품의 안정성을 모니터

* Corresponding Author: Kyeong-Hwan Lee
Department of Rural and Biosystems Enineering,
Chonnam National University, Gwangju, 500-757, Korea
Tel: +82-62-530-2156 Fax: +82-62-530-2159 E-mail: khlee@jnu.ac.kr



<그림 1> 식품이력추적관리제도 개념[1].



<그림 2> 바이오센서 구성.

링 할 수 있는 바이오센서에 대해 살펴보고자 한다.

본 론

1. 바이오센서

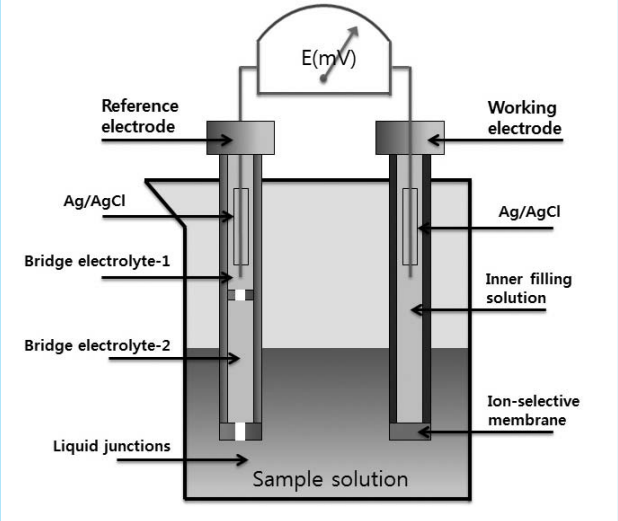
바이오센서는 항체, 효소, 핵산, 미생물 등의 선택적 반응을 이용하여 분석 물질을 검출하고 정량화하는 기기로써 선택적 반응을 유도하는 생체수용체(bioreceptor)와 선택적 반응 정도를 전기적 신호로 변환하는 신호변환기(transducer), 전기적 신호의 안정화 및 처리, 출력을 위한 신호 출력부로 구분할 수 있다(그림 2). 생체수용체는 분석 물질을 인식하고 검출하는 핵심 요소로 바이오센서의 성능(정확도, 정밀도, 반응시간 등)을 결정하며 바이오센서용 생체수용체로는 항체, 효소, 핵산 등이 일반적으로 사용된다. 생체수용체의 선택적 반응에 따른 신호변환기의 전기 신호는 일반적으로 불안정하고, 미세하며, 노이즈를 포함하고 있다. 따라서 생체수용체의 결합 반응을 감지할 수 있는 수준의 안정화된 전기신호 출력을 위해서는 신호 안정화, 필터링, 신호 증폭 과정이 필요하며 분석 물질의 정량화를 위해서는 결합 반응 정도와 전기신호 세기 사이의 검량곡선(calibration curve)을 작성하여야 한다. 신호변환기의 생체수용체와 분석 물질과의 반응을 검출하는 방식에 따라 바이오센서는 전기화학센서, 광학센서, 질량감응센서로 구분할 수 있다.

2. 전기화학 바이오센서(Electrochemical biosensor)

전기화학 센서는 생체수용체에 선택적으로 감지된 대상 물질의 특성에 따라 변하는 전기적 특성을 측정하는 방법으로 분석 방식이 단순하고, 제작비용이 저렴하며, 소형화가 가능하다. 대상 물질 검출의 선택도와 민감도를 높이기 위해 항원-항체 반응을 이용한 면역분석법, DNA를 이용한 핵산분석법과 조합하여 사용되기도 한다. 이러한 장점으로 인해 가장 일반적으로 사용되는 바이오센서 방식이다. 변환기에서의 전기신호 검출 방식에 따라 전위(potentiometric), 전류(amperometric), 임피던스(impedimetric) 센서로 세분화 할 수 있다.

2.1. 전위차(Potentiometric) 센서

전위차 측정 프로브는 기준 전극과 작동 전극으로 구성되며, 작동전극 표면에 결합하는 이온의 산화/환원 반응에 의한 기전력을 기준 전극과의 상대적인 전위차로 측정하게 된다[2]. 전위차 측정 방식은 일반적으로 용액 내에 존재하는 이온 검출 용도로 활용되었으며, 반도체 소자를 이용한 광지시형 전위차 센서 (LAPS: Light-addressed potentiometric sensor)가 개발되면서 식품 병원균 검출에 활용되고 있다. LAPS는 반도체에 광을 조사하여 전해질과 절연체 사이의 전위차를 측정하는 센서로서 최근에는 이미지 기술과 결합되면서 병원균의 2차원 농도 분포 및 확산속도를 고감도 고



<그림 3> 전위차 센서[2].

분해능으로 검출하는 연구가 진행되고 있다.

2.2. 전류(Amperometric) 센서

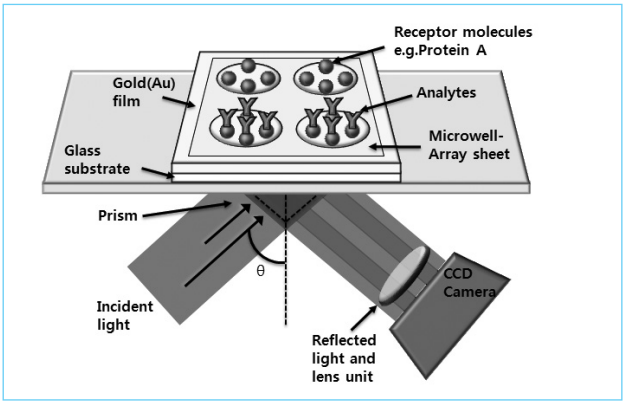
전류측정 센서는 일정한 전위차를 기준전극과 작동전극에 인가하고, 작동전극에서 감지된 분석 물질의 산화/환원 반응에 의해 발생되는 전류를 측정한다. 측정된 전류는 분석 물질의 농도에 비례하며 높은 민감도와 넓은 측정 범위를 갖지만 전기 활성 이물질에 의한 선택도 감소와 이물질의 전극 부착에 의한 전류 흐름 방해가 발생할 수 있는 단점이 있다.

2.3 임피던스(Impedimetric) 센서

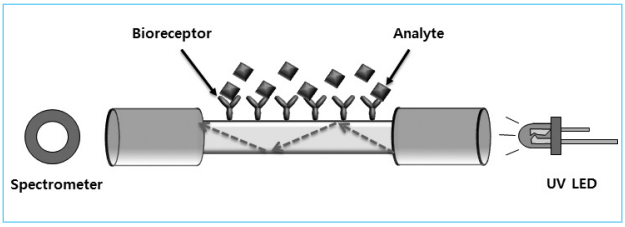
임피던스는 전류의 흐름을 방해하는 전기적인 특성을 나타낸다. 전도성 기판에 고정화된 생체수용체는 분석 물질과의 결합 정도에 따라 임피던스 변이를 야기하고 이는 전기적 신호로 검출되어 분석 물질의 농도를 정량화 할 수 있다. 임피던스 센서는 민감도가 소형화가 가능하여 식품이력추적에 용이할 것으로 판단된다.

3. 광학 바이오센서(Optical biosensor)

광학센서는 식품 병원균 검출에 있어 민감도와 선택도가 높고 실시간 현장 검출이 가능하여 식품이력추적을 위한 바



<그림 4> 표면플라즈몬공명 센서[4].



<그림 5> 광섬유 센서[5].

이오센서로 많은 관심을 받고 있다. 광학센서의 구성은 빛을 발생시키는 광원과 분석 물질의 분광화학적 특성을 감지하는 광 검출부로 크게 나눌 수 있다. 광학 검출 기술로는 민감도와 선택도가 뛰어난 표면플라즈몬공명법과 라만산란과 푸리에변환 적외선 분광법, 그리고 소형화가 용이한 광섬유법이 널리 사용되고 있다[3].

3.1. 표면플라즈몬공명(SPR: surface plasmon resonance) 센서

표면플라즈몬공명(SPR)은 빛 에너지가 금과 같은 금속 박막 표면에 흡수되었을 때 빛의 입사각, 금속 박막의 유전(dielectric) 특성, 금속표면에 결합된 물질에 따라 굴절률이 변하게 되며, 이는 표면플라즈마 파의 공명 현상에 영향을 주게 된다. 따라서 표면 플라즈몬 공명을 야기하는 빛의 각도 변화를 조사하면 표면에 결합된 물질의 농도를 측정할 수 있다[4]. SPR의 가장 큰 장점은 검출하고자 하는 물질을 별도의 표지(label)없이, 실시간으로 검출할 수 있으며 시료의 전처리 시간을 단축시켜 전체 검출 시간을 최소화 할 수 있

다. 따라서 식품이력추적과 수출입현장 검역등과 같은 실시간 현장 검출이 중요한 경우에 적용이 가능하다.

3.2. 광섬유(Fiber-optic) 센서

광섬유 센서는 광섬유의 뛰어난 광전도성과 빛의 내부 전반사(total internal reflectance, TIR) 현상을 이용한다. 광섬유 끝단에서 내부에 조사된 레이저 빛은 전반사되어 반대편 광 검출기에 전달되며 광섬유를 통한 빛의 전파는 광섬유 주위에 결합되어 있는 물질의 특성에 민감하므로 대상 물질을 분석할 수 있다[5]. 광섬유 주위에 항체를 고정시키고 항원이 결합하면 광섬유의 굴절률과 편극상태가 달라지므로 생체물질의 결합을 모니터링 할 수 있어 표지 없이 물질을 검출 분석할 수 있다.

3.3. 라만산란(Raman scattering)과 푸리에변환 적외선 분광(Fourier transform infrared spectroscopy) 센서

라만산란과 푸리에변환 적외선 분광법은 물질 특유의 분광학적 스펙트럼을 이용하여 물질의 분자 구조 및 특성을 검출할 수 있으며, 식품 내의 미생물을 검출하기 위해서는 다양한 유기물로부터 미생물을 분리 및 배양하는 전처리 과정이 선행되어야 한다. 라만 분광계는 분석 물질에 의해 산란되는 빛을 이용하여 분자의 진동 스펙트럼을 측정하고 이를 해석하여 분석 물질을 정성, 정량하는 기기이다. 푸리에변환 적외선 분광계는 적외선 영역의 빛이 분석 물질에 흡수되어 분자 진동에 의한 특이적 스펙트럼이 발생하고 이를 해석하여 정성, 정량 분석하는 기기이다[6].

4. 질량감응 센서 (Mass-based biosensor)

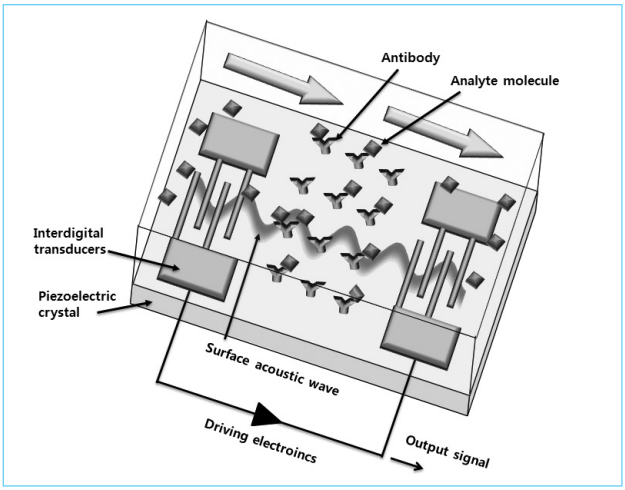
질량감응 바이오센서는 미세한 질량 변화를 감지하여 식품 병원균을 검출하는 센서로서 질량 분석은 일정한 주파수의 전기 신호에 의해 진동하는 압전 진동자(piezoelectric crystal)를 이용한다. 압전소자의 진동 주파수는 가해지는 전기신호의 주파수와 진동자의 질량에 의해 결정되며, 압전소자로는 수정을 많이 사용하고 있다. 식품 병원균 검출을 위해서는 진동자 표면에 생체물질을 고정화 시키고 분석 물질에 노출시킨 후 진동자의 주파수 특성을 분석하면 대상 물질의 검출 농도를 정량화 할 수 있다. 압전 진동자를 이용한 질량감응 바이오센서는 표지 없이도 분석 물질만을 선택적으로 측정할 수 있으며, 측정제한범위가 낮으며, 장비를 값싸고 소형으로 구성할 수 있다는 장점이 있다. 질량감응 센서는 크게 수정진동자미량저울(QCM: quartz crystal microbalance), 표면탄성파(SAW: surface acoustic wave), 마이크로캔틸레버(Microcantilever)로 구분할 수 있다[7].

4.1. 수정진동자미량저울(QCM) 센서

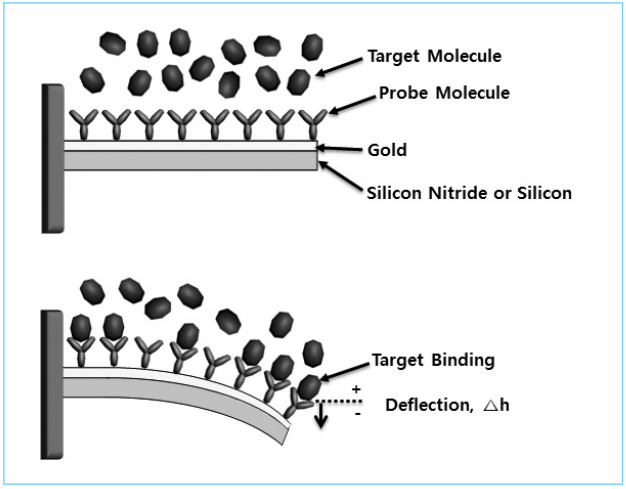
수정진동자미량저울은 얇은 수정 디스크로 구성된 전극에 교류 전압을 가하면 수정의 역압전현상으로 인해 공진주파수로 진동하게 되고 전극 표면에 흡착된 물질의 양에 따라 공진주파수가 변하게 된다. 따라서 측정된 공진주파수를 분석하면 흡착된 물질의 농도를 측정할 수 있을 뿐만 아니라 흡착속도 및 구조적인 변화까지도 측정할 수 있다.

4.2. 표면탄성파(SAW) 센서

표면탄성파 센서는 압전 수정체, 송신 변환기(IDT: interdigital transducer)와 수신 변환기로 구성되며, 송신 변환기에 의해 발생된 표면탄성파는 분석물질 감지부



<그림 6> 표면탄성파 센서[8].



<그림 7> 마이크로 캔틸레버 센서[9].

를 지나 수신 변환기에 전달된다. 따라서 수신 변환기에 전달된 표면 탄성파는 분석물질 감지부에서 결합된 물질의 농도에 따라 파의 특성이 변하게 되고 그 특성을 분석하면 분석 물질을 정량화 할 수 있다[8].

4.3. 마이크로 캔틸레버(Microcantilever) 센서

마이크로 캔틸레버 센서는 캔틸레버의 질량하중효과 뿐만 아니라 표면 스트레스 변화에 의해 센서의 공진주파수가 변하는 원리를 이용하여 분석 물질을 정량화 할 수 있다[9]. 마이크로 캔틸레버 센서는 기존 질량 감응 센서인 수정진동자 미량저울과 표면탄성파 센서보다 뛰어난 민감도를 가지고 있고 제작이 간단하고 다양한 응용이 가능하다는 장점이 있지만 재현성 부족과 표면 코팅방법의 기술적 제한이라는 문제점을 가지고 있다.

결 론

국민 생활수준의 향상과 사회 의식변화로 인해 식품의 안정성에 대한 관심은 더욱 높아지고 있다. 선진국들은 자국 생산 식품뿐만 아니라 수입식품의 안전성을 확보하기 위해 많은 노력을 기울이고 있다. 하지만 새로운 식품 병원균의 출현과 식품 산업의 세계화로 인해 식중독 발생 건수와 피해액은 매년 급증하고 있는 추세이다. 식품의 제조부터 판매까지 각 단계별로 이력을 관리하여 식품의 안전성을 확보하기 위한 식품이력추적관리제도를 실시하고 있지만 조기 정착과 신뢰 확보를 위해서는 식품의 안정성을 실시간으로 모니터링 할 수 있는 센서기술의 확보가 시급하다. 식품의 병원균 검출을 위한 기존 미생물학적인 방법들은 분석시간이 오래 걸리고 현장 적용성이 낮아 식품이력추적관리제도에 활용하기에는 제한적이므로 분석시간이 짧고 휴대성이 뛰어난 바이오센서의 필요성이 대두되고 있다. 식품의 위해물질 검출을 위한 바이오센서로는 생체물질에 선택적으로 감지된 분석 물질의 특성에 따라 변하는 전기적 특성을 측정하는 전기화학 센서, 분석 물질의 분광화학적 특성을 감지하는 광학 센서, 압전소자의 진동 주파수 해석을 통해 미세한 질량 변화를 감지할 수 있는 질량감응 센서로 구분할 수 있다. 최근 바이오센서의 연구동향은 nanoparticle, nanotube, graphene 등의 신소재를 사용하여 분석 물질에 대한 선택도와 민감도를 높이고, 다양한 물질을 동시에 검출하기 위해 많은 노력을 기울이고 있다. 식품 위생에 대한 규제가 강화되면서 현장에서 실시간으로 식품 위해물질을 검출할 수 있는 바이오센서의 시장규모는 더욱 확대될 것으로 예상되며, 반도체 공정기술, 전자, 정보통신 기술과 융합하여 바이오센서 기술은 비약적으로 발전할 것으로 예상된다.

참고 문헌

1. Bosona, T. and G. Gebresenbet. 2013. Food traceability as an integral part of logistics management in food and agricultural supply chain. Food Control 33: 32-48.

2. Lindner, E. and B. D. Pendley. 2013. A tutorial on the application of ion-selective electrode potentiometry: An analytical method with unique qualities, unexplored opportunities and potential pitfalls; Tutorial. Analytica Chimica Acta 762:1-13.

3. Shinde, S.B., C.B. Fernandes and V.B. Patravale. 2012. Recent trends in in-vitro nanodiagnostics for detection of pathogens. Journal of Controlled Release 159:164-180.

4. Caygill, R. L., G. E. Blair and P. A. Millner. 2010. A review on viral biosensors to detect human pathogens. Analytica Chimica Acta 681:8-15.

5. Sai., V. V. R., T. Kundu., C. Deshmukh., S. Titus., P. Kumar and S. Mukherji. 2010. Label-free fiber optic biosensor based on evanescent wave absorbance at 280nm. Sensors and Actuators B: Chemical 143:724-730.

6. 김아람, 고성호. 2012. 식중독균의 유비쿼터스 검출을 위한 나노바이오센서. 식품과학과 산업 45(3):1-13.

7. Velusamy, V, K. Arshak, O. Korostynska, K. Oliwa and C. Adley. 2010. An overview of foodborne pathogen detection: In the perspective of biosensors. Biotechnology Advances 28:232-254.

8. Lange, K., B. E. Rapp and M. Rapp. 2008. Surface acoustic wave biosensors: a review. Anal Bioanal Chem 391:1509-1519.

9. Wu, G., R. H. Datar., K. M. Hansen., T. Thundat., R. J. Cote and A. Majumdar. 2001. Bioassay of prostate-specific antigen(PSA) using microcantilevers. Nature 19.