



우유 및 유제품의 안전성 평가를 위한 바이오센서의 이용

김현욱 · 한상하 · 함준상 · 설국환 · 장애라 · 김동훈 · 오미화*

농촌진흥청 국립축산과학원

Biosensor System for the Detection and Assessment of Safety in Milk and Dairy Products

Hyoun Wook Kim, Sang-Ha Han, Jun-Sang Ham, Kuk-Hwan Seol, Ae-ra Jang,
Dong-Hun Kim and Mi-Hwa Oh*

National Institute of Animal Science, RDA, Suwon 441-350, Korea

ABSTRACT

Milk and dairy products are nutritionally one of the most important food in human health and the quality of raw milk is significantly important to ensure safety of dairy products. However, milk and dairy products are commonly related with chemical and microbial contaminations. Therefore, rapid and reliable detection of hazardous (e.g. pathogenic bacteria, pesticides, antibiotics, microbial toxins) in milk and dairy products is essential to ensure human health and food safety. Conventional methods for detection of food hazardous are mostly time-consuming to yield a results. Recently, biosensors have been focused as its rapidity and high sensitivity to analyse chemical and microbial hazardous from a variety of foods and environments. This study reviewed the recent trends and applications of biosensors as rapid detection method of hazardous in milk and dairy products.

Keywords : biosensor, dairy product, milk, hazardous

서 론

산업이 발전하고 수입 자유화에 따른 식품 교역량이 늘어나면서 세계적으로 식인성 질병이 늘어나고 있으며, 최근 우리나라에서도 중국산 기생충 김치, 납 꽃게, 돼지고기에서 다이옥신 검출, 수입 소시지에서 검출된 리스테리아균 등 수입식품으로 인한 식품안전사고가 증가하고 있다. 식품 안전성 향상을 위하여 위해요소중점관리기준(HACCP) 및 우수농산물(GAP) 인증 등 식품의 안전 및 위생관리 제도가 시행됨에 따라 식품 위해물질에 대한 신속하고 정확한 검사법의 수요가 증가하고 있다(김 등, 2009).

우유 및 유제품의 안전성을 저해하는 물질은 병원성미생

물, 잔류농약, 식품첨가제, 항생제, 미생물독소 등이 있다. 병원성 대장균 O157:H7, 리스테리아균, 살모넬라균 등 병원성미생물은 선택 배지를 이용한 생물학적인 방법을 통하여 검사를 실시하고 있으며, 잔류 항생물질 등 유해물질은 주로 기체 크로마토그래피(gas chromatography, GC)나 고성능 액체 크로마토그래피(high performance liquid chromatography, HPLC) 등의 크로마토그래피 방법에 의존하여 검사하고 있다(Aprea *et al.*, 2002; Strachan *et al.*, 1997a). 그러나 이들 방법은 여러 장점들에 반하여 장시간의 시료 처리시간, 유해물질 분석용의 고가의 분석기기 요구 등 단점을 가지고 있다(이 등, 1998). 따라서 이러한 단점을 보완할 수 있는 새로운 분석법을 개발하기 위한 연구가 활발하게 이루어지고 있으며, 바이오센서는 이러한 연구 중 큰 비중을 차지하고 있다.

바이오센서는 미생물, 효소, 핵산, 항체, 인공수용체 등 생체감지물질(bioreceptor)과 분석하고자 하는 물질 간의 선택

* Corresponding author: Mi-Hwa Oh, National Institute of Animal Science, RDA, Suwon 441-350, Korea. Tel: +82-31-290-1689, Fax: +82-31-290-1697, E-mail: moh@korea.kr

적인 인지로부터 유도되는 물리적, 화학적 변화의 감지하는 함으로써 특정 대상을 정성적 또는 정량적으로 측정하는 분석 도구이다(고, 2008; 김, 2002). 바이오센서는 Clark와 Lyson에 의해 처음 제안되었으며, 현재 생물학적 정보의 측정이 요구되는 다양한 응용분야에 대하여 연구 개발이 수행되고 있다(박 등, 2011). 생체인식소자는 높은 민감도와 선택성을 가지고 있음으로 극미량의 측정 대상물질 분석이 가능한 능력을 가지고 있기 때문에, 의료·환경·제약·식품안전 등 다양한 응용분야에서 이용될 수 있다(한국전자산업진흥회, 2007).

따라서 본고에서는 최근 수요가 증가하는 있는 식품의 위해물질 분석용 바이오센서에 대해서 알아보고, 우유 및 유제품의 안전성 평가에 활용 가능한 바이오센서에 대해서 소개하고자 한다.

본 론

1. 바이오센서의 원리

바이오센서는 생체감지물질에 따라 면역, 효소, 세포, DNA 센서 등으로 분류되며, 측정방식에 따라 광학, 전기화학, 열 방식 등으로 분류된다(김, 2004; 이 등, 1998). 생체인식소자와 분석대상 간의 특이적 반응은 다양한 물리적 방법에 의해 전기적 신호로 변환되어 표현되며(Fig. 1), 전기화학(electrochemical), 형광, 발색, SPR(surface Plasmon resonance), FET(field effect transistor), QCM(quartz crystal microbalance) 등 다양한 물리화학적 방법에 의해서 궁극적으로 전기적 신호로 변환되고, 그 신호는 분석물질의 농도와 비례하여 정성, 정량 분석이 가능하다(Ko, 2008; Ko, 2009; Sethi, 1994). 바이오센서의 생체감지물질은 막을 형성하도록 하여 사용하거나 나노 소립자나 칩의 기관 등에 고정화시켜 특정 물질을 선택적으로 인지하도록 하며, 인지된 물질의 농도는 감지물과 반응물의 반응이 광반응일 경우 photon counter로,

발열 또는 흡열 등의 열변화일 경우 thermistor로, 진동수의 변화는 음파검출기로, 전기적 특성을 가질 때는 전극 또는 반도체 소자를 통해 전기적인 신호로 변환시키게 된다(Ko, 2009).

유용한 바이오센서는 짧은 응답시간(response time), 특정 물질에만 반응하는 높은 선택도(selectivity), 소량의 물질과도 결합하는 민감도(sensitivity), 열적 혹은 화학적 안정도(stability) 및 저비용 등의 조건들을 충족시켜야 한다(Kim, 2002; Ko, 2009). 최근 바이오센서가 가지고 있는 한계들을 개선 혹은 극복하기 위하여 나노기술을 바이오센서에 접목시키고 있는데, 나노바이오기술은 기존의 마이크로 수준의 바이오센서를 나노 수준으로 제작 가능하게 하기 때문에, 기존 바이오센서의 소형화, 감도 향상 등을 위한 연구가 이루어지고 있다(Jain, 2005; Kim et al., 2006). 나노기술뿐만 아니라 MEMS(microelectromechanical system), μ -TAS, microfluidic 등의 기술 도입을 통한 다양한 바이오센서가 연구·개발되고 있다(Ko, 2009).

2. 바이오센서의 활용분야

바이오센서는 응용 분야에 따라서 의료용, 연구용, 환경용, 식품용, 군사용으로 나눌 수 있다(한국전자산업진흥회, 2007).

바이오센서 중 수요가 가장 많은 부분은 “의료용 바이오센서”로서 시장의 약 90%를 차지하고 있는데, 의료용 바이오센서의 높은 수요는 언제 어디서든 즉각적인 측정이 가능하여 중환자뿐만 아니라 응급환자에 대한 신속한 진료로 가능케 하기 때문이며, 대표적인 것으로 혈당 측정용 바이오센서가 있다(손, 2011).

“연구용 바이오센서”는 생체물질간의 상호작용을 측정하여 생분자에 대한 다양한 정보의 확보 및 단일분자에 대한 거동 측정에 활용되고 있으며, “환경용 바이오센서”는 환경호르몬, 폐수의 생물화학적 산소요구량(BOD), 중금속, 농약 등과 같은 환경 물질을 감지하는데 사용되고 있다.

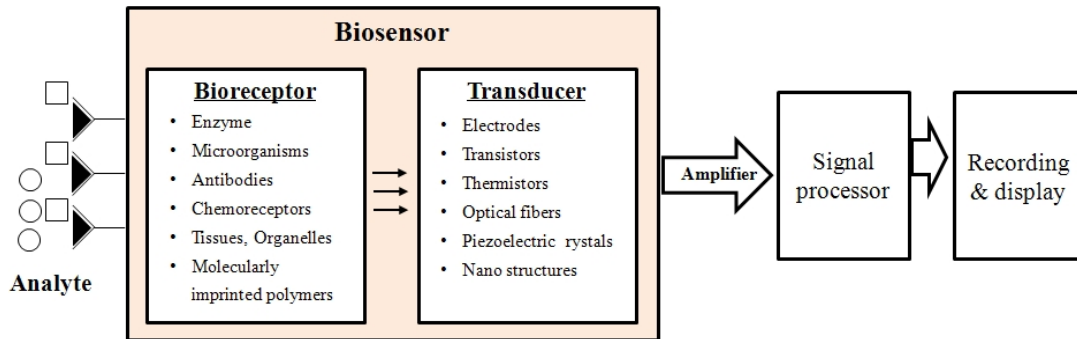


Fig. 1. Schematic diagram of a biosensor.

“식품용 바이오센서”는 주로 식품의 부패나 식품에 남아 있는 농약, 항생물질 등 잔류물질 또는 병원성미생물을 검출하여 식품의 안전성을 분석하는데 이용되고 있다.

“군사용 바이오센서”는 생화학 무기에 대한 방어용 센서로 활용되고 있으며, 이를 위하여 빠른 분석시간과 직접 사용이 가능해야 하기 때문에 소형화가 요구되고 있다.

3. 우유 및 유제품의 유해물질 검출용 바이오센서의 개발 동향

식품의 안전성과 관련된 물질 또는 생물체는 살모넬라균 등 병원성미생물, 잔류항생물질, 잔류농약, 곰팡이독소 등 매우 다양하다. 병원성미생물의 경우 선택배지를 이용한 생물학적 분석법이 이용되고 있으며, 잔류물질의 경우 GC, HPLC, 질량분석법, 원자흡광법 등에 의해 검출·분석되고 있는데, 이들은 장시간의 시료 처리 시간이 요구되는 단점을 가진다. 현재 식품 위해물질의 신속 검사를 위한 면역분석법, 바이오센서 등의 신속검사법이 연구·개발되고 있으며, 많은 제품들이 상용화되어 활용되고 있다.

1) 미생물 검출센서

바이오센서를 이용한 미생물 계측은 크게 DNA를 측정하

는 방법과 항원·항체 반응 등 미생물의 면역반응을 측정하는 방법을 사용할 수 있다. 이 중 면역센서는 항원·항체 반응을 측정한다는 점에서 면역분석법과 동일하며, 면역분석법에서 사용되는 측정원리를 거의 그대로 활용하는데, 측정원리에 따라 표지 면역센서(labeled immunosensor)와 비표지 면역센서(label-free immunosensor)로 구분된다(Kim, 2004). 표지 면역센서는 분석 대상물질(analyte)과 효소 혹은 발색단으로 표지된 항체 사이의 결합반응을 이용하며, 고감도 측정이 가능하고 다양한 계측원리의 반응 시스템을 구성할 수 있는 장점이 있으며, 그 대표적인 것으로서 광섬유 면역센서(fiber-optic immunosensor), 입자이용 면역센서(particle-based immunosensor) 및 막이용 면역센서(membrane-based immunosensor)를 들 수 있다(Kim, 2004; Maragos *et al.*, 1999; Strachan *et al.*, 1997a; Strachan *et al.*, 1997b; Zhou *et al.*, 1997). 비표지 면역센서는 항원·항체 반응결과의 진동수 변화, 굴절률 변화 등을 측정하는데 계측과정에 표지효소나 발색단을 사용하지 않으므로 간편하게 사용할 수 있는 장점과 고감도 측정이 가능한 특성을 아울러 가지고 있다. 대표적인 비표지 면역센서로는 quartz crystal microbalance(QCM) 면역센서와 surface plasmon resonance(SPR) 면역센서를 들 수 있다.

Table 1. Some examples of biosensors for the detection of pathogenic microorganisms

Microorganisms	Techniques	Detection limit	Reference
<i>S. typhimurium</i>	Optic interferometer	10 ⁵ CFU/mL	Seo <i>et al.</i> (1999)
<i>E. coli</i> O157:H7, <i>S. aureus</i> , <i>Y. enterocolitica</i>	Turbidimetry		Barco Alcala <i>et al.</i> (2000)
<i>E. coli</i> O157:H7, <i>S. typhimurium</i> , <i>Y. enterocolitica</i> , <i>Leg. pneumophila</i>	Imaging ellipsometry	10 ³ ~10 ⁷ CFU/mL	Choi and Oh(2008)
<i>E. coli</i> O157:H7	Quantum dots	10 ⁶ cells/mL	Hahn <i>et al.</i> (2008)
<i>E. coli</i> O157:H7, <i>S. typhimurium</i> , <i>Y. enterocolitica</i> , <i>Leg. pneumophila</i>	Fluorescence microscopy	10 ² CFU/mL	Choi and Oh(2008)
<i>E. coli</i> O157:H7	Amperometric	81 CFU/mL	Muhammad-Tahir and Alocilja(2004)
<i>E. coli</i>	Potentiometric	10 cells/mL	Ercole <i>et al.</i> (2003)
<i>V. parahaemolyticus</i>	Cyclic voltammetry	7.37×10 ⁴ CFU/mL	Zhao <i>et al.</i> (2007)
<i>E. coli</i> O157:H7, <i>Salmonella</i> spp.	Conductometric	7.9×10 ¹ CFU/mL	Muhammad-Tahir and Alocilja(2003)
<i>Bacillus cereus</i>	Conductometric	35~88 CFU/mL	Pal <i>et al.</i> (2008)
<i>S. typhimurium</i>	Impedimetric	4.8 and 5.4×10 ⁵	Yang <i>et al.</i> (2004)
<i>E. coli</i>	Flow-type antibody sensor	1.7×10 ⁵ ~8.7×10 ⁷ CFU/mL	Kim and Park(2003)
<i>Salmonella</i> spp.	FRET-based optical fiber	10 ³ CFU/mL	Ko and Grant(2006)
<i>S. enteritidis</i>	Impedimetric	10 ⁴ CFU/mL	Kim <i>et al.</i> (2007a)
<i>L. monocytogenes</i>	Fiber-optic	10 ⁷ CFU/mL	Kim <i>et al.</i> (2007b)
<i>E. coli</i> O157:H7, <i>S. typhimurium</i> , <i>Y. enterocolitica</i> , <i>Leg. pneumophila</i>	Immunochromatographic	10 ³ ~10 ⁷ CFU/mL	Park <i>et al.</i> (2010)
<i>Bacillus</i> spp.	Nanowire labeled direct-charge transfer	10 ¹ ~10 ² CFU/mL	Pal <i>et al.</i> (2007)

(Gobi *et al.*, 2006; Kim, 2004; Ting *et al.*, 2008). 이외에도 nanowire labeled direct-charge transer, cyclic voltammetry, fluorescence microscopy 등 다양한 기술을 활용한 바이오센서가 연구·개발되었다(Table 1).

국외에서는 미국 미시간대 연구팀에서 바실러스균 검출용 나노 바이오센서를 개발하였는데, 이 센서는 $10^1 \sim 10^2$ CFU/mL의 검출감도를 나타내었다(Pal *et al.*, 2007). 또한 신선 식품에서 대장균 O157:H7의 신속 검출을 위한 연구에서는 10^1 CFU/mL(평균 81 CFU/mL)의 검출감도를 가지는 바이오센서를 개발하였다(Muhammad-Tahir *et al.*, 2004).

국내에서도 바이오센서를 이용한 미생물 검출 기술 개발이 활발하게 진행되고 있다. 한국식품연구원에서는 대장균 검출용 QCM 기반 면역센서(Kim *et al.*, 2003)와 살모넬라균 검출용 FRET 기반 바이오센서(Ko *et al.*, 2006)를 개발하였다. 특히 한국식품연구원과 미국 미주리대학이 공동으로 개발한 FRET 기반 바이오센서는 10^3 CFU/mL의 살모넬라균 검출감도를 보였다.

농촌진흥청 농업공학부에서는 10^4 CFU/mL의 살모넬라균을 3분 안에 검출할 수 있는 임피던스 기반 바이오센서를 개발하였는데, 개발된 바이오센서를 우유에 적용시킨 결과, 10^5 CFU/mL의 *S. enteritidis*를 검출하였다(Kim *et al.*, 2007a). 또한 리스테리아균 검출을 위하여 fiber-optic 바이오센서 기반 분석 기법을 개발하였는데, 프랑크푸르트 소시지에서 5.4×10^7 CFU/mL 리스테리아균을 검출할 수 있었다(Kim *et al.*, 2007b).

한경대학교 연구팀은 살모넬라균, 황색포도상구균, 대장균 O157:H7, 레지오넬라균 등 병원성미생물 검출용 면역학적 분석 strip을 개발하였다(Park *et al.*, 2010).

2) 유해 잔류물질

우유 및 유제품에서 존재 가능한 잔류물질로는 항생제,

농약, 중금속과 시안화합물 및 환경호르몬 등의 기타 유해 잔류물질을 들 수 있다. 잔류물질은 대부분 HPLC, CG/MS 같은 기기를 이용하여 분석하는데, 기존 분석법들이 가지는 고가의 장비 및 기술이 필요하다는 단점을 극복하기 위하여 바이오 및 나노 센서기술을 이용한 잔류농약 검출 연구가 활발하게 진행 중이다(Park *et al.*, 2009).

(1) 잔류 농약

미국 USDA에서는 면역센서를 이용해 물, 우유, 어류, 토양 등의 시료로부터 PBDEs(polybrominated diphenyl ethers)를 검출하고 있으며, 면역센서를 이용한 DDT, 클로로피리포스(chloropyrifos), 카르바삼염(carbamate)의 분석, 나노센서를 이용한 트리클로로에틸렌(trichloroethylene), MTBE(methyl-tert-butyl ether), 비소, 납, 크롬 등을 분석하기 위한 연구가 세계적으로 이루어지고 있다(Alvarez *et al.*, 2003; Gobi *et al.*, 2007; Jiang *et al.*, 2007; Mauriz *et al.*, 2006a,b; Park *et al.*, 2009)(Table 2).

중국 서안문통대학 연구팀은 acetylcholinesterase(AChE) 기반 바이오센서를 이용하여 우유 중 유기인계 및 카바마이트계 농약의 검출에 사용할 수 있는 휴대용 바이오센서를 제작하였는데, 이 바이오센서는 우유 중의 paraoxon과 carbaryl을 각각 $1 \mu\text{g/L}$, $20 \mu\text{g/L}$ 의 검출감도로 검출하였다(Zhang *et al.*, 2005). 중국 텐진대 연구팀은 우유 중 tetracycline의 신속 검출을 위하여 aptamer 바이오센서를 개발하였는데, 개발된 센서의 검출감도는 1 ng/mL , 검출시간은 5분이었다(Zhang *et al.*, 2010).

국내에서는 농촌진흥청에서 carbofuran, carbaryl, ethoprosfos 등 잔류 살충제를 검출할 수 있는 휴대용 SPR 바이오센서를 개발하였는데, 개발된 센서의 검출감도 및 검출시간을 조사한 결과, 최소 0.01 ppm의 검출감도와 100초 미만의 검출시간을 나타내었다(Yang *et al.*, 2008).

Table 2. Some examples of biosensors for the detection of residual pesticides

Pesticide	Detector	Detection limit	Reference
2,4-Dichlorophenoxyacetic acid	Impedimetric	45 nmol/L	Navrátilová and Skládal(2004)
2,4-Dichlorophenoxyacetic acid	SPR	0.1 ng/mL	Gobi <i>et al.</i> (2007)
Atrazine	Impedimetric	20 ng/mL	Hleli <i>et al.</i> (2006)
Chlorpyrifos	SPR	45~64 ng/L	Mauriz <i>et al.</i> (2006a,b)
DDT	Nanomechanical	Below nM rage	Alvarez <i>et al.</i> (2003)
Trifluralin	Optical waveguide	100 ng/mL	Székács <i>et al.</i> (2003)
Organophosphate and carbamate	Acetylcholinesterase		Kim <i>et al.</i> (2006)
Carbofuran	Cobalt phthalocyanine	$0.5 \mu\text{g/mL}$	Yu <i>et al.</i> (2010)
Carbofuran, Carbaryl, Cadusafos, Ethoprosfos, Chloropyrifos	SPR	0.01 ppm	Yang and Cho(2008)

제주대학교에서 유기인계 및 카바마이트계 농약을 검출하기 위한 AchE-strip형 바이오센서(Kim *et al.*, 2006)와 농약 잔류량 측정을 위한 cobalt phthalocyanine 탄소유기전극 센서(Yu *et al.*, 2010)를 연구하였다. AchE-strip형 바이오센서는 chlopyrifos, cabaryl, carbofuran, methidathion에 대하여 기존의 정밀분석법에 의한 검출한계에 근접한 검출감도를 나타내었고, cobalt phthalocyanine 탄소유기전극 센서는 0.5 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 의 carbofuran을 검출할 수 있는 감도로 개발되었다.

(2) 잔류 항생물질

항생제의 경우, 효소가수분해를 받는지의 여부에 따라 페니실린 화합물 등은 전위차법 효소센서에 의하여 pH/mV meter에 의하여 간단하게 측정할 수 있으며, 센서 개발에 적합한 효소반응이 잘 보고되지 않고 있으나, 항체 생성이 가능한 클로람페니콜 등 거의 대부분 항생제는 면역센서에 의하여 측정할 수 있다(Kim, 2004).

Stermesjö(1995) 등은 우유에서 흔히 검출되는 항생제인 sulfamethazine(SMZ)을 분석하기 위하여 SPR을 이용한 면역센서를 개발하였는데, 이 면역센서는 SMZ을 금 필름에 부착한 carboxy-methyl dextran에 붙이고 SMZ 함유시료와 SMZ에 대한 항체를 함께 흘려 경쟁시키는 방식을 사용하였으며, 주로 우유의 잔류항생제 분석에 적용되고 있다.

스웨덴 농과대학(SLU)의 연구팀은 우유 중의 베타락탐계 항생물질을 검출하기 위하여 SPR 바이오센서를 개발하였다. 이 바이오센서는 carboxypeptidase 활성을 나타내는 미생물 수용체 단백질을 사용하였는데, 실제 우유에 적용된 결과 유럽의 MRL인 4 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 보다 낮은 2.6 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 의 penicillin G를 검출하였다(Gustavsson *et al.*, 2002).

(3) 미생물 독소

Thompson(1996) 등은 옥수수를 오염시키는 곰팡이 *Fusarium moniliforme*과 *Fusarium proliferatum*의 독소인 fumonisin B₁ (FB₁) 분석을 위하여 FB₁에 대한 항체를 광섬유에 고정화시키고, 시료의 FB₁과 FB₁-FITC를 경쟁시키는 방식으로 광섬유 면역센서를 개발하였다. Strachan 등(1997b)은 particle 기반 immunosensor에 대한 크립 중의 *S. aureus* enterotoxin B 검출능을 확인하였는데, 5 ng/g 수준의 독소를 10분 안에 검출할 수 있었다고 보고하였다. Paniel 등(2010)은 우유 중에 오염된 aflatoxin M₁(AFM₁)을 검출하기 위한 electrochemical biosensor를 개발하였는데, 개발된 센서는 EU의 우유 중 AFM₁ 최대허용량인 0.05 $\mu\text{g}/\text{L}$ 보다 낮은 0.01 $\mu\text{g}/\text{L}$ 까지 검출하여 높은 민감도를 나타내었으며, 시판 우유 시료에 대한 검사 결과, 0.01~0.1 ppb 범위에서 AFM₁을 검출하였다. 이외에도 aflatoxin B₁ 등과 같은 곰팡이독소 및 *Clostridium botulinum*

Toxin A를 분석하기 위한 센서도 개발되었다(이 등, 1998; Strachan *et al.*, 1997a).

국내에서는 MOSFER(Metal-oxide-semiconductor field-effect transistor)형 바이오센서를 이용하여 0.1 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 의 검출감도를 가지는 디옥시니발레놀 분석용 바이오센서가 개발되었다(Lim *et al.*, 2010).

결론

산업이 발전하고 수입 자유화에 따른 식품 교역량이 늘어나면서 식품의 안전성 확보는 중요한 문제로 대두되고 있다. 또한 소비자들의 건강에 대한 관심의 증가로 안전하고 위생적인 식품의 소비가 증가하고 있으며, 안전한 식품에 대한 요구가 높아지고 있다. 이러한 소비자의 요구와 식품 관련 사고의 증가로 인하여 식품의 안전성 확보를 위한 HACCP과 같은 식품안전관리 프로그램이 실행되고 있으며, 이에 따른 신속하고 정확한 검사법이 요구되고 있다.

우유 및 유제품의 안전성을 위협하는 위해물질로는 식중독균 등 위해미생물과 잔류농약, 잔류항생제 등이 있는데, 이러한 위해물질이 유제품에 오염되었을 경우 식중독, 신경계 질환 및 정신적 질환 등을 유발할 수 있다. 위해물질에 의해 발생하는 질병을 예방하고, 우유 및 유제품의 안전성을 확보하기 위하여 위해요소를 고감도로 간편하게 검출할 수 있는 바이오센서들이 개발되고 있다. 또한 위해물질을 현장에서 실시간으로 고감도로 검출할 수 있는 소형화된 바이오센서 기술 개발을 위한 나노기술, 반도체공학, 전기화학, 광학, 미생물학, 생화학 등 다양한 분야의 전문지식과 기술의 융합을 통해 바이오센서 기술이 발전되고 있다.

현재 전 세계의 다양한 연구그룹에서 바이오센서 개발을 위해 매진하고 있으며, 상용화된 제품들이 속속 등장하고 있다. 이러한 기술의 발전은 가까운 미래에 식품의 안전성을 확보하여 식품 매개질병의 발생을 획기적으로 감소시켜 경제적 손실을 줄이고, 국민건강 향상에 크게 기여할 것으로 예상된다.

감사의 글

본 논문은 농촌진흥청 공동연구사업(과제번호: PJ007586)의 지원에 의해 이루어진 것입니다.

참고문헌

- Alvarez, M., Calle, A., Tamayo, J., Lechuga, L. M., Abad, A. and Montoya, A. 2003. Development of nanomechanical

- biosensors for detection of the pesticide DDT. *Biosens. Bioelectron.* 18:649-653.
2. Aprea, C., Colosio, C., Mammone, T., Minoia, C. and Maroni, M. 2002. Biological monitoring of pesticide exposure: a review of analytical methods. *J. Chromatogr. B.* 769:191-219.
 3. Barco Alcalá, E., García Gimeno, R. M., Castillejo Rodríguez, A. M. and Zurera Cosano, G. 2000. Turbidimetry as a fast method to determine microorganisms in foods. *Alimentaria.* 37:109-112.
 4. Choi, J. W. and Oh, B. K. 2008. Optical detection of pathogens using protein chip. *Adv. Environ. Monit.* 348-362.
 5. Ercole, C., Del Gallo, M., Mosiello, L., Baccella, S. and Lepidi, A. 2003. *Escherichia coli* detection in vegetable food by a potentiometric biosensor. *Sens. Actuat. B.* 91:163-168.
 6. Gobi, K. V., Kim, S. J., Tanaka, H., Shoyama, Y. and Miura, N. 2006. Novel surface plasmon resonance (SPR) immunosensor based on monomolecular layer of physically-adsorbed ovalbumin conjugate for detection of 2,4-dichlorophenoxyacetic acid and atomic force microscopy study. *Sens. Actuat. B.* 123: 583-593.
 7. Gustavsson, E., Bjurling, P. and Sternesjö, Å. 2002. Biosensor analysis of penicillin G in milk based on the inhibition of carboxypeptidase activity. *Anal. Chim. Acta.* 468:153-159.
 8. Hahn, M. A., Keng, P. C. and Krauss, T. D. 2008. Flow cytometric analysis to detect pathogens in bacterial cell mixtures using semiconductor quantum dots. *Anal. Chem.* 80:864-872.
 9. Hleli, S., Martelet, C., Abdelghani, A., Burais, N. and Jaffrezic-Renault, N. 2006. Atrazine analysis using an impedimetric immunosensor based on mixed biotinylated self-assembled monolayer. *Sens. Actuat. B.* 113:711-717.
 10. Jain, K. K. 2005. Nanotechnology in clinical laboratory diagnostics. *Clinica Chimica Acta.* 358:37-54.
 11. Kim, G., Morgan, M., Ess, D., Hahn, B. K., Kothapalli, A. and Bhunia, A. 2007b. An automated fiber-optic biosensor based inhibition assay for the detection of *Listeria monocytogenes*. *Food Sci. Biotechnol.* 16:337-342.
 12. Kim, G., Mun, J. H. and Om, A. S. 2007a. Nano-particle enhanced impedimetric biosensor for detection of foodborne pathogens. *J. Phys.: Conf. Ser.* 61:555-559.
 13. Kim, N. S. and Park, I. S. 2003. Application of a flow-type antibody sensor to the detection of *Escherichia coli* in various foods. *Biosens. Bioelectron.* 18:1101-1107.
 14. Kim, U. R. 2002. Microbial biosensors for environmental and food industrial applications. *Korean J. Biotechnol. Bioeng.* 17:213-227.
 15. Kim, Y. K., Oh, B. K. and Choi, J. W. 2006. Development trends of nano-biochips technology. *Prospectives of Industrial Chemistry.* 9:19-27.
 16. Kim, Y. M., Kim, J. Y., Cho, M. J., Chang, K. M., Hyun, H. N. and Cho S. K. 2006. Acetylcholinesterase-based biosensor for detection of residual organophosphates and carbamates insecticides. *J. Korean Soc. Appl. Biol. Chem.* 49:315-321.
 17. Ko, S. H. 2008. Nanobiosensors for detection of foodborne pathogens. *Food Sci. Indus.* 41:59-62.
 18. Ko, S. H. 2009. Nanobiosensors for detection of food hazards. *Bulle. Food Technol.* 22:518-526.
 19. Ko, S. H. and Grant, S. A. 2006. A novel FRET-based optical fiber biosensor for rapid detection of *Salmonella typhimurium*. *Biosens. Bioelectron.* 21:1283-1290.
 20. Liang, X., Li, D., Xu, X., Ying, Y., Li, Y., Ye, Z. and Wang, J. 2007. Immunosensors for detection of pesticide residues. *Biosens. Bioelectron.* 23:1577-1587.
 21. Maragos, C. M. and Thompson, V. S. 1999. Fiber-optic immunosensor for mycotoxins. *Nat. Toxins.* 7:371-376.
 22. Mauriz, E., Calle, A., Abad, A., Mpanopya, A., Hildebrandt, A., Barceló, D. and Lechuga, L. M. 2006b. Determination of carbaryl in natural water samples by a surface plasmon resonance flow-through immunosensor. *Biosens. Bioelectron.* 21:2129-2136.
 23. Mauriz, E., Calle, A., Lechuga, L. M., Quintana, J., Montoya, A. and Manclús, J. J. 2006a. Real-time detection of chlorpyrifos at part per trillion levels in ground, surface and drinking water samples by a portable surface plasmon resonance immunosensor. *Anal. Chim. Acta.* 561:40-47.
 24. Mellgren, C., Sternesjö, Å., Hammer, P., Suhren, G., Björck, L. and Heeschen, W. 1996. Comparison of biosensor, microbiological, immunochemical, and physical methods for detection of sulfamethazine residues in raw milk. *J. Food Protec.* 59:1223-1226.
 25. Muhammad-Tahir, Z. and Alocilja, E. C. 2003. A conductometric biosensor for biosecurity. *Biosens. Bioelectron.* 18:813-819.
 26. Muhammad-Tahir, Z. and Alocilja, E. C. 2004. A disposable biosensor for pathogen detection in fresh produce samples. *Biosystems Engineering.* 88:145-151.
 27. Navrátilová, I. and Skládal, P. 2004. The immunosensors for

- measurement of 2,4-dichlorophenoxyacetic acid based on electrochemical impedance spectroscopy. *Bioelectrochemistry*. 62:11-18.
28. Pal, S., Alocilja, E. C. and Downes, F. P. 2007. Nanowire labeled direct-charge transfer biosensor for detecting *Bacillus* species. *Biosens. Bioelectron.* 22:2329-2336.
 29. Pal, S., Ying, W., Alocilja, E. C. and Downes, F. P. 2008. Sensitivity and specificity performance of a directcharge transfer biosensor for detecting *Bacillus cereus* in selected food matrices. *Biosys. Eng.* 99:461-468.
 30. Paniel, N., Radoi, A. and Marty, J. L. 2010. Development of an electrochemical biosensor for the detection of aflatoxin M1 in milk. *Sensors*. 10:9439-9448.
 31. Park, T. J., Yang, M. H., Lee, S. Y. and Kim, S. H. 2009. Biosensor system for the detection of agrichemicals and its applications. *KSBB*. 24:227-238.
 32. Park, J. N., Park, S. J. and Kim, Y. K. 2010. Multiplex detection of pathogens using an immunochromatographic assay strip. *BioChip J.* 4:205-312.
 33. Seo, K. H., Brackett, R. E., Hartman, N. F. and Campbell, D. P. 1999. Development of a rapid response biosensor for detection of *Salmonella typhimurium*. *J. Food Prot.* 62: 431-437.
 34. Sethi, R. S. 1994. Transducer aspects of biosensors. *Biosens. Bioelectron.* 9:243-264.
 35. Strachan, N. J. C., John, P. G. and Millar, I. G. 1997a. Application of an automated particle-based immunosensor for the detection of aflatoxin B₁ in foods. *Food Agri. Immunol.* 9:177-183.
 36. Strachan, N. J. C., John, P. G. and Millar, I. G. 1997b. Application of a rapid automated immunosensor for the detection of *Staphylococcus aureus* enterotoxin B in cream. *Int. J. Food Microbiol.* 35:293-297.
 37. Strenesjö, Å., Mellgren, C. and Björck, L. 1995. Determination of sulfamethazine residues in milk by a surface plasmon resonance-based biosensor assay. *Anal. Biochem.* 226:175-181.
 38. Székács, A., Trummer, N., Adányi, N., Váradi, M. and Szendrő, I. 2003. Development of a non-labeled immunosensor for the herbicide trifluralin via optical waveguide lightmode spectroscopic detection. *Anal. Chim. Acta.* 487:31-42.
 39. Thompson, V. S. and Maragos, C. M. 1996. Fiber-optic immunosensor for the detection of fumonisin B₁. *J. Agric. Food Chem.* 44:1041-1046.
 40. Xu, T., Wang, Z., Miao, J., Yu, L. and Li, C. M. 2008. Micro-machined piezoelectric membrane-based immunosensor array. *Biosens. Bioelectron.* 24:638-643.
 41. Yang, G. and Cho, N. H. 2008. Development, validation, and application of a portable SPR biosensor for the direct detection of insecticide residues. *Food Sci. Biotechnol.* 17: 1038-1046.
 42. Yang, L. J., Li, Y. B., Griffis, C. L. and Johnson, M. G. 2004. Interdigitated microelectrode (IME) impedance sensor for the detection of viable *Salmonella typhimurium*. *Biosens. Bioelectron.* 19:1139-1147.
 43. Yu, Y. H., Cho, H. J., Park, W. P. and Hyun, H. N. 2010. Development of electro-biosensor for the residual pesticides using organic carbon and cobalt phthalocyanine. *Kor. J. Environ. Agri.* 29:722-76.
 44. Zhang, J., Zhang, B., Wu, Y., Jia, S., Fan, Ting, Zhang, Z. and Zhang, C. 2010. Fast determination of the tetracyclines in milk samples by the aptamer biosensor. *Analyst.* 135: 2706-2710.
 45. Zhang, Y., Muench, S. B., Schulze, H., Perz, R., Yang, B., Schmid, R. D. and Bachmann, T. T. 2005. Disposable biosensor test for organophosphate and carbamate insecticides in milk. *J. Agric. Food Chem.* 53:5110-5115.
 46. Zhao, G. Y., Xing, F. F. and Deng, S. P. 2007. A disposable amperometric enzyme immunosensor for rapid detection of *Vibrio parahaemolyticus* in food based on agarose/nano-Au membrane and screen-printed electrode. *Electrochem. Commun.* 9:1263-1268.
 47. Zhou, C., Pivarnik, P., Auger, S., Rand, A., Letcher, S. 1997. A compact fiber-optic immunosensor for Salmonella based on evanescent wave excitation. *Sensors and Actuat. B.* 42:169-175.
 48. 김기영, 문지혜, 엄애선, 양길모, 모창연, 강석원, 조한근. 2009. 살모넬라균 검출을 위한 임피던스 바이오센서의 항체고정화 방법 평가. *바이오시스템공학* 34, 254-259.
 49. 김남수. 2004. 식품의 품질측정 및 유해물질 검출을 위한 바이오센서. *식품과학과 산업* 37, 4-10.
 50. 박소정, 박소은, 김영기. 2011. 면역센서의 기술동향 및 전망. *공업화학 전망* 14, 10-18.
 51. 손영수. 2011. 바이오센서 동향. *전기전자재료* 24, 9-16.
 52. 이혜성, 이용태. 1998. 식품의 안전성 평가를 위한 바이오센서의 이용. *식품과학과 산업* 31, 93-113.
 53. 한국전자산업진흥회. 2007. 바이오센서 산업동향.