

## 스마트센서 기술동향 및 전망

배영민\*

\* 한국전기연구원 첨단의료기기연구센터

### 목 차

I. 서론

II. 스마트센서의 구성 및 개발

III. 의료/바이오 스마트센서 기술 개발 동향

IV. 스마트센서의 전망

### I. 서론

센서(Sensor)는 측정하고자 하는 대상의 물리적 또는 화학적 양의 정보를 판독할 수 있는 신호로 변환하는 검출기(detector)로 정의될 수 있다. 이들 센서의 대부분은 분석 장치 또는 디스플레이와의 인터페이스를 위해, 전기적 신호를 출력한다. 다양한 종류의 센서가 개발되고 있거나 시장에 출시되어 있으며, 이들을 구분하는 여러 가지 기준이 있지만, 측정 대상에 따라 물리 센서와 화학 센서의 두 종류로 구분할 수 있다. 물리 센서의 측정 대상으로는 온도, 광량, 압력, 음향 등이 있으며, 이들을 기반으로 하는 수많은 센서가 있다. 또한, 화학 센서의 측정 대상으로는 이온, 가스 등이 있으며, 최근에는 단백질, DNA, 세포 등의 검출하기 위한 바이오센서도 화학 센서의 범주에 들 수 있다. 이들 센서의 공통적인 점은 측정하고자 물성에 대해서 선택적으로 반응하는 수용체(receptor)와 반응결과에 상관성이 있는 전기적 신호로 변환하는 변환기(transducer)로 구성된다는 점이다.

이러한 센서 기술은 물리학, 화학, 재료공학, 전기전자, 기계 공학 등 다양한 기술의 융합 산물이며, 나노 기술, MEMS (Micro electromechanical systems) 기술의 발전으로 새로운 센서가 지속적으로 개발되고 있다. 이와 더불어, 최근에는 센서 기술과 정보처리 및 통신 기술과의 융합을 통해 정보의 기록 및 저장, 전송 및 피드백 과정을 수행할 수 있는 스마트센서의 연구가 활발히 진행되고 있다. 기존의 센서 기술은 측정대상을 검출하기 위한 검출기로 정의된다면, 스마트센서

는 센서와 마이크로프로세서 등의 신호처리 모듈을 결합한 형태를 가지며, 사용자에게 필요한 정보를 제공한다. 스마트센서는 각종 스마트기기의 출현을 가능하게 하였으며, 의료, 각종 생산 공정, 환경뿐 만 아니라, 주택, 사무실의 자동화시스템, 자동차, 국방, 우주항공 등 자동화 및 지능화가 필요한 거의 모든 영역으로 확대되고 있다[1].

특히, 스마트센서 기술의 여러 응용 분야 중에서 비약적인 발전을 보여주고 있는 분야는 삶의 질과 연관되어 있는 헬스케어 및 바이오 분야이다[2]. 헬스케어 분야에서 기존의 센서는 질환의 검사 및 진단에 주로 활용되고 있으나, 질병 징후의 도래 이전부터 사후적 모니터링까지 예방 시스템의 구축에도 적극적으로 활용하기 위한 시도가 계속되고 있다. 결과적으로, 장소에 구애받지 않고, 병원을 벗어나, 가정이나 사람이 생활하는 현장에서의 현장 검사 (Point-of-Care)를 위해서는 스마트센서 기술이 중요하다.

본 글에서는 스마트센서의 개발 접근 전략에 관하여 알아보고, 의료 및 바이오 분야에서의 스마트센서의 기술 개발 동향을 파악하고자 한다. 마지막으로, 스마트센서의 개발 전망 및 해결해야할 과제들을 제시하고자 한다.

### II. 스마트센서의 구성 및 개발

이상적인 스마트센서는 자체적인 검사 기능을 가지면서 자체 전원에 의해서 장시간 운영될 수 있어야 한다

다. 스마트센서는 그림1에 나와 있는 바와 같이 센서, 전원부, 신호 처리부 및 통신부로 구성될 수 있다[1].

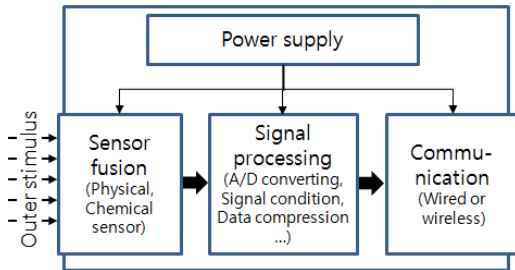


그림 1. 스마트 센서의 구조

앞에서 언급하였듯이, 센서 기술은 물리학, 화학, 재료공학, 전기전자, 기계 공학 등 다양한 기술의 융합 산물이며, 각종 물리량뿐 만 아니라 가스나 이온, 생화학 물질 등을 검출하기 위한 화학 센서가 활발히 연구되고 있다. 또한, MEMS 및 나노 기술 등이 센서의 소형화 및 감도 향상, 저전력화를 위해 적극적으로 활용되고 있다. 한 예로 폴리실리콘 와이어를 이용하여 가스를 검출할 수 있는 나노센서의 개발을 들 수 있다[3]. 이 센서는 12 $\mu$ s의 시간 상수를 가지고 있으며, 40mW를 소모하면서, 메탄가스와 헬륨 가스에 대해서 0.71ohms/ppm과 2.05mohms/ppm의 감도를 가지고 있다. MEMS 기술 활용은 센서의 저전력 및 소형화를 가능하게 할 뿐만 아니라, CMOS 공정과 호환되어, 전자 인터페이스 회로와 함께 집적될 수 있게 된다.

신호처리 및 통신부는 센서의 출력 신호를 디지털 신호로 변환하고 이를 외부로 전송하는 기능을 수행하는데, 일반적으로 무선 통신을 이용하도록 설계된다. 특히, 스마트센서에 적용되기 위해서는 소형화 함께 요구 기능 수행 등의 요건 등을 충족시켜야 한다. 이러한 신호처리 및 통신부 개발의 한 예로서, Liu 등은 monolithic IC 기술을 이용하여 ASIC (Application-specific integrated circuit) 칩을 개발하였다[4]. 이 칩은 저전력의 BiCMOS 신호처리기로써, 센서 신호를 증폭하고 무선으로 전송할 수 있는 8 채널을 2.5x2.5mm 사이즈에 구현하였다.

또한, 스마트센서를 위해서는 센서 및 각종 구성 요소들이 저전력에서 구동할 수 있도록 설계되어야 하며, 이들에 전력을 공급하기 위한 전원부가 필요하다.

대부분의 스마트센서 개발에서는 2차전지가 가장 현실적인 선택이 될 수 있으며, 이들은 대부분의 센서를 구동하기에 충분한 에너지 밀도를 제공한다. 이 밖에 최근에는 에너지 수확 (energy harvesting) 기술의 도입도 고려될 수 있다. 에너지 수확 기술은 외부로부터 에너지를 유도하여 에너지를 생산하는 기술로서, 압전 소자, 열전 소자, 태양 전지 등이 폭넓게 연구되고 있다. 한 예로, 물리적 압력에 의한 형태 변형에 의해서 전압차가 발생하는 압전소자를 이용한 에너지 수확 기술이 개발되고 있는데, 이 경우, 압전소자를 주기적인 진동이 발생하는 위치에 장착함으로써, 소자에 물리적인 변형이 가해지고, 이를 통해 전력을 생산하게 된다.

### III. 의료/바이오 스마트센서 기술 개발 동향

#### 3.1. 건강 모니터링 시스템

최근 노인 인구의 증가와 함께, 의료비의 지출이 급속도로 증가하고 있으며, 이에 따른 사회적 비용도 증가하고 있다. 이러한 비용을 줄이기 위해서 질병의 진단 및 치료뿐만 아니라 예방적 차원에서의 사람의 건강 상태를 상시로 모니터링할 수 있는 기술의 요구도 발생하고 있다. 건강 상태의 모니터링을 위해서는 각종 생체 지표를 상시적으로 계측하고 이를 데이터로 축적할 수 있어야 하며, 병원 등에 축적된 데이터를 전송할 수 있어야 한다. 이러한 시간과 공간의 제한 없이 의료서비스를 제공할 수 있는 u-헬스케어 (Ubiquitous healthcare) 체계를 구축하기 위해서는 생체 지표를 고통과 부담 없이 계측하기 위한 기술의 개발이 필요하다.

일반적으로 측정할 수 있는 생체 지표로는 체온, ECG(electrocardiograph), plethysmograph (PPG), 심박수, 미세 표피 혈류, 피부 저항 등이 있으며, 이들은 대부분 피부와의 접촉을 통해 계측이 가능하다. 이를 생체 지표들의 성공적인 상시 모니터링을 위해서는 비침습적이어야 하며, 무자각 상태에서 이루어져야 한다. 이를 위한 다양한 접근이 시도되고 있다[5]. 대표적으로 스마트의복 (smart wear)를 들 수 있는데, 스마트의복의 장점으로는 환자가 의복을 입기만 함으로써 센서가 적절한 곳에 위치하게 되며, 자유로운 외부 활동을 가능하게 한다. 대표적인 스마트 의복으로는 Vivonoetics사의 LifeShirt를 들 수 있다(그림 2). 의복을 착용함으로써, ECG, 산소포화도, 체온, PPG 등 다양한 생체 지

료를 계속하고, Palm이라는 단말기를 통해 수집되어진다. 또한, 이렇게 수집된 데이터는 병원 등의 무선 전송되어, 환자의 맞춤 건강관리에 활용된다.

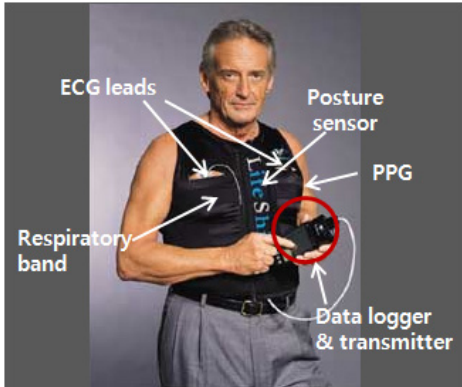


그림 2. 생체 지표 계측을 위한 스마트의복 (www.vivonoetics.com)

또 다른 건강 모니터링 시스템으로 스마트홈(smart home)에 대한 연구가 진행되고 있다. 스마트홈은 각종 센서들이 주거 공간의 내부 구조물에 장착되어 있다. 한 예로, 카펫이나 문에 움직임 감출할 수 있는 센서들과 이들 센서 신호들을 분석할 수 있는 신호처리 장치가 연동하여 거주자의 행동 패턴을 모니터링할 수 있다. 응급 상에서 비정상적인 행동 패턴을 감출하여 병원 등에 전송함으로써, 신속한 대처가 가능하게 할 것이다. 또한, 화장실에 변기 등에 혈당과 같은 생체 지표를 확인할 수 있는 바이오센서를 장착함으로써, 거주자가 인식하지 못하는 상황에서 생체 지표를 감출하고 이를 전송할 수 있는 시스템의 개발도 연구되고 있다 [6]. 이러한 스마트홈의 개발을 위해서는 각종 센서와 이를 수집하고 분석할 수 있는 신호처리 네트워크의 개발이 선행되어야 하며, 거주자의 행동 양식에 대한 분석을 통한 센서들의 최적화된 배치도 중요하다.

### 3.2. 스마트 바이오센서

바이오센서는 단백질이나 DNA 등의 생체 물질이 가지는 분자 인식 기능을 감출에 활용하는 분석 장치로서, 생체 물질과 감출 대상과의 반응을 전기 신호로 변환하기 위한 전기적/광학적 변환기와 이를 읽어들이고 정량화하기 위한 신호처리부로 구성된다 (그림 3).

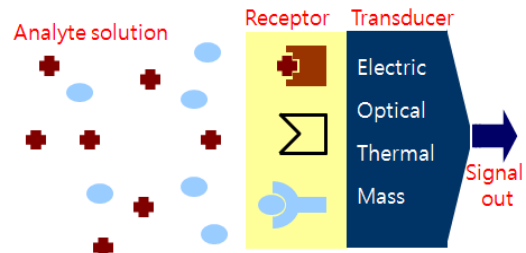


그림 3. 바이오센서의 개념

대표적인 바이오센서로는 혈당계를 들 수 있다. 혈당계는 효소 반응을 통해 발생하는 전기화학적 변화를 읽어 들이고, 이를 기설정되어 있는 검량곡선에 대입하여 혈당을 측정하게 된다. 최근에는 혈당계에 통신 기능을 추가하여 측정된 혈당 수치를 컴퓨터로 전송하여 혈당 변화의 정기적인 관리를 수행한다. 또한, Medtronic사에서는 혈당을 연속적으로 모니터링할 수 있으며 측정된 혈당 수치는 인슐린 자동주입장치로 전송되어 인슐린 주입을 자동화시킨 시스템을 시판하고 있다[7]. 최근에는 피부에 혈당 센서를 삽입하여 장시간 혈당을 모니터링하기 위한 센서의 개발도 진행되고 있다. 이를 위해서는 인체에 피부에 삽입되어 장시간 인체에 영향을 미치지 않는 생체호환성을 가지는 센서와, 긴 수명의 에너지원, 외부 기기와의 통신을 위한 통신 장치가 집적된 소형 스마트 센서가 필요하다.

또한, 스마트센서 기술은 감염성 질환의 검사에도 활용될 수 있다. 최근, SARS (Severe acute respiratory syndrome) 및 신종플루의 판데믹(pandemic)에서와 확인된 바와 같이, 감염성 질환은 공항과 같은 인구 밀집 지역을 거점으로 해서 빠르게 전파되기 때문에, 이에 대한 신속한 검사와 초기 대응이 중요하다. 따라서, 질환의 현장 검사 및 중앙 모니터링 시스템은 감염성 질환의 확산 방지 및 역학 조사를 위해 필요하다. 이러한 요구는 감염성 질환의 검사 및 추적을 위한 스마트센서 기술의 도입을 통해 해결할 수 있다 (그림 4). 특히, 현장 검사와 중앙 모니터링 시스템과의 안정적인 통신을 위해서는 무선인터페이스 기술이 중요하며, 이를 위해서 MICS(Medical Implant Communication System), WMTS(Wireless Medical Telemetry Service) 등의 기술들이 개발되고 있다.



그림 4. 감염성 질환 모니터링시스템의 구조

스마트 바이오센서는 유비쿼터스 헬스케어체계를 위한 핵심적인 기술로서, 최근에는 병원이 아닌 가정이나 외부에서의 신속 검사를 위한 현장 검사 기술(Point-Of-Care, POC)로 진화하고 있다. 한 예로서, 갑작스런 심장마비의 경우 현장에서의 진단을 통해 신속한 응급처치가 가능하게 함으로써, 환자 소생율을 높을 수 있다. 이러한 기술적 요구는 바이오나 MEMS 기술 뿐 만이 아니라, 현장 검사를 유지하기 위한 휴대형 에너지원 기술, 현장 검사 결과의 원격 관독을 위한 데이터 전송 및 통신 시스템의 기반 기술들이 확립되어야 한다. 이를 통해, 환자 개인에 대한 자료의 축적이 가능해지며 맞춤 치료가 가능해질 수 있다. 따라서, 이 분야에 대한 시장은 지속적으로 성장할 것으로 예상되며, 시장 선점을 위한 기술 개발이 치열해지고 있다.

### 3.3. 화학 감각 (chemical sense)

인간의 후각과 미각은 화학 감각으로 이를 통해, 시료의 냄새나 맛을 판별하는 기능을 수행한다. 특히, 감각 기관인 코와 혀에 존재하는 감각세포와의 반응을 통해 발생하는 전기적 신호들이 뇌에 전달되고 뇌는 학습된 경험치와의 비교를 통해 시료의 냄새나 맛을 판별할 수 있다. 이러한 화학 감각을 모방한 스마트센서로는 전자코(Electronic nose)와 전자혀(electronic tongue) 시스템을 들 수 있다. 전자코는 기체 냄새나 향기를 분석하고 전자혀는 액체의 맛을 정량하거나 판별하기 위한 장치로 연구되고 있다. 이들 전자코/전자혀는 인간의 화학 감각을 모방하여, 센서 어레이와 신호처리 기능을 수행하는 다변량 해석부로 구성될 수 있으며, 부가적으로 센서에서 출력되는 미세한 신호를 증폭하고 디지털 신호로 변환시키기 위한 신호처리부가 필요하다[8]. 전자코에서

는 금속산화반도체(Metal oxide semiconductor) 센서, 마이크로밸런스(Quartz crystal microbalance), SAW (surface acoustic wave) 센서와 가스 크로마토그래피 센서 등이 센서 어레이로 구성되며, 전자혀에서는 수용액의 성분과 반응하는 고분자 막이나 유리 전극 등의 센서가 어레이로 구성된다. 이들 센서 어레이들의 주요한 특징으로는 각 센서들이 여러 물질들에 대해서 비선택적으로 반응한다는 점이며, 이들 센서 어레이로부터 출력되는 신호의 패턴은 시료에 대한 지문(finger print)이 된다. 이러한 센서 어레이의 출력 패턴의 판별을 통해 인간과 유사하게 맛이나 냄새를 인지(recognition)하게 되며, 전자혀/전자코 시스템의 다변량해석부가 이러한 기능을 수행한다. 다변량해석부에서는 센서 어레이로부터 출력되는 신호들을 수집하고 정보로 제공하기 위한 데이터 압축 및 추출을 수행한 후에, 이미 학습된 패턴과의 비교를 통해 결과값을 출력한다. 이를 위해서 통계적인 기법인 주성분분석 기법(Principal component analysis, PCA) 또는 인공신경회로망(Artificial neural network, ANN) 기법 등이 주로 활용된다(그림 5).

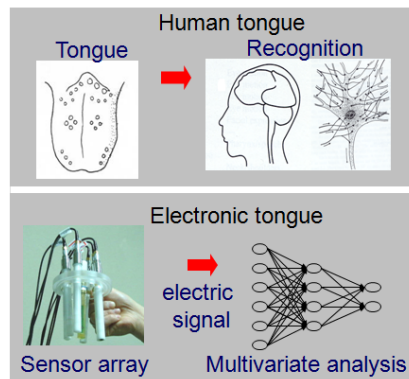


그림 5. 전자혀 시스템의 구성

특히, 전자혀 시스템의 경우, 맛을 구성하는 4원미(four primary tastes)는 여러 성분에 의해서 복잡적으로 발현하기 때문에, 전자혀의 센서 어레이는 여러 물질들에 대해서 비선택적으로 응답하는 고분자 막 또는 유리 전극으로 구성된다[9]. 센서 어레이의 개별 센서들은 액체에 포함되어 있는 각종 전해질의

농도에 따라 서로 다른 막 전위차의 값을 출력한다. 이러한 고분자막 센서 어레이와 PCA로 구성된 전자혀 시스템이 와인 또는 양주의 판별과 신맛과 짠맛의 정량 등에 활용되었다. 전자혀 시스템은 액상의 분석, 즉, 식품의 품질 관리, 수질 환경오염 평가 등에 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

이에 반해, 전자코 시스템은 가스를 분석하는데 활용되는데, 가스는 맛의 4원미 같은 것이 없이 가스에 포함되어 있는 개별 성분들을 검출하도록 되어 있다. 그러나, 전자코의 센서 어레이를 구성하는 개별 가스 센서들은 측정 가스에 대한 선택성이 낮기 때문에, 센서 어레이를 이용하여 측정하고 다변량 해석 기법을 이용하여 특정 성분에 대한 정량 신뢰도를 향상시키거나, 시료의 판별 분석을 수행한다. 상용화된 전자코 시스템으로는 프랑스의 Alpha MOS가 대표적인데, 18개의 금속산화물 센서 어레이와 가스 포집기로 구성되며, 화학 공정에서의 품질 관리에 활용되었다(그림 6).

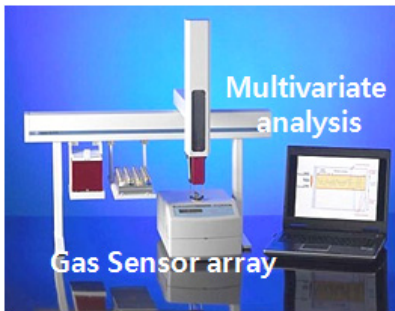


그림 6. 상용 전자코시스템 (www.alpha-mos.com)

전자코 시스템은 대기 환경 분석 및 식품/화학 공정에서 의약 및 의료용 진단까지 다양한 분야에서 연구 개발이 진행되고 있다. 특히, 의학 분야에서 각종 질환의 진단에 전자코를 활용하고자 하는 연구가 주목을 받고 있다[10]. 한 예로서, 최근에 폐질환의 진단에 전자코 시스템을 활용할 수 있다는 결과가 보고되었다[11]. 호흡시에 나오는 날숨에 대한 8종의 마이크로발란스 센서 어레이의 출력값에 대해 주성분 분석을 수행한 결과, 폐암 환자와 정상인을 구분할 수 있었으며, 또한, 폐암과 다른 폐질환을 구분할 수 있음을 확인하였다. 또한, 미생물의 대사를 통해 발생하는 각종 휘발성 유기물(volatile organic compound, VOC)들에 대한

반응 특성을 이용하여 소변 내 미생물 분석에도 적용되었다. 최근에는 발표된 논문에 따르면, 가스크로마토그래피를 이용하여 소변에서 발생하는 VOC의 변화 패턴을 측정하고 PCA를 통해서 폐결핵 환자와 정상인을 구분할 수 있었다[12].

이와 같이, 전자혀/전자코 시스템은 특정 성분을 선택적으로 검출하는 일반적인 센서와는 다르게, 센서 어레이로부터의 출력 신호의 패턴을 학습을 통해 인지함으로써, 다수개의 성분에 의해서 결정되어 질 수 있는 시료의 판별 분석이나 특정 파라미터의 지수화에 활용될 수 있다.

#### IV. 스마트센서의 전망

스마트센서는 신호처리 또는 통신 모듈과의 결합을 통해, 검출 성능을 향상시킬 뿐만 아니라, 각종 스마트 기기의 지능화를 통해, 새로운 시장을 창출할 수 있다. 그 예로써, 가스 센서 및 화학센서를 이용한 식품의 안정성 및 독성 평가, 환경 오염 및 생화학무기 검출, 그리고 건강 모니터링 및 원전 진단 등을 들 수 있으며, 이 밖에도 다양한 산업적 활용도를 가질 것이다. 기술적 측면에서는 제어 환경 내의 다중 위치에서의 정보를 수집하기 위한 분산 센서 네트워크를 구성하며, 이를 통해 시스템의 지능화를 이끌 것으로 사료된다.

또한, 스마트센서의 응용 분야가 확대되기 위해서는 소형화 및 집적화, 그리고, 저전력화는 중요한 개발 방향이 될 것이며, MEMS 기술은 이러한 이슈에 접근을 위한 중요한 역할을 할 것으로 예상된다. 또한, 나노 물질이 가지는 특성을 이용하여 고감도의 센서 개발도 중요한 연구 방향일 될 수 있다. 금속 나노입자가 가지는 나노플라즈몬닉 효과는 이미 바이오센서에서 널리 활용되고 있다. 또한, 전도성 고분자 등의 유연 재료를 이용한 센서 개발을 통해 가격적 측면에서의 경쟁력 확보도 중요한 연구 개발 방향이다.

결과적으로, 스마트센서는 시스템의 지능화 뿐 아니라, 자체적인 지능 내장을 통해 사용자에게 신뢰도 있는 정보를 제공하는 필수적인 기술로 진화할 것으로 사료된다.



## 참고문헌

- [1] Hunters et al., "Smart sensor systems", The Electrochemical Society Interface Winter:p. 29-34, 2010.
- [2] 고은지, "헬스케어 혁명을 선도하는 스마트 센서", LG Business Insight, 2009. vol. 4, p. 37 - 44, 2009.
- [3] National nanotechnology Initiative Workshop,, "Nanotechnology-enabled sensing", Virginia, (www.nano.gov), 2009.
- [4] Liu et al., "A multichannel, wireless telemetric microsystem for small animal studies", IEEE Sensors Journal 6:p.187-202, 2006.
- [5] Axia et al., "Flexible technologies and smart clothing for citizen medicine, home healthcare, and disease prevention", IEEE Transactions on information technology in biomedicine 9: p.325-336, 2005.
- [6] Miyashita et al., "Development of urine glucose meter based on micro-planer amperometric biosensor and its clinical application for self-monitoring of urine glucose", Biosensors and Bioelectronics 24:p.1336-1340, 2009.
- [7] Medtronic, Inc-USA , <http://www.medtronicdiabetes.net/continuousglucosemonitoring>
- [8] 배영민, "고분자 막 전극 센서 어레이를 이용한 전자 혀 시스템 개발", 서울대학교 박사학위논문, 2001.
- [9] Bae et al., "Response of polymer membranes as sensing elementes for electronic tongue", Transactions of ASAE 45:p.1511-1518, 2002.
- [10] erner et al., "Electronic noses and disease diagnostics", Nature Review Microbiology 2:p.16-166 , 2004.
- [11] D'Amico et al., "An investigation on electronic nose diagnosis of lung cancer", Lung Cancer 68:p.170-175, 2010.
- [12] Banday et al., "Use of urine volatile organic compounds to discriminate tuberculosis", Analytical Chemistry 83:p.5526-5534, 2011.

## 저자소개

배영민 (Young Min Bae)



1994년 2월 서울대학교 농공학과 졸업

1996년 2월 서울대학교 농공학과 석사 졸업

2001년 2월 서울대학교 농공학과 박사 졸업

2001년 3월 ~ 9월 (주)파이맥스 기술연구소 근무

2001년 10월 ~ 2003년 12월 서강대학교 박사후연구원 / 연구교수

2004년 2월 ~ 2005년 12월 Texas A&amp;M University Post. Doc. Associate

2006년 3월 ~ 현재 한국전기연구원 선임연구원

※관심분야 : 바이오센서, 화학센서, 의료용 초음파