10년 후 응용물리 연구 전망

DOI: 10.3938/PhiT.23.017

이상욱·임은주·이종수·이은철

Current Trends and Future Prospects for the Field of Applied Physics Research

Sang Wook LEE, Eunju LIM, Jong-Soo RHYEE and Eun-Cheol LEE

Here, we provide a brief overview of the research subjects at the Applied Physics Division of the Korean Physical Society. The research on nano devices, organic-material-based displays, energy physics, and biophysics are mainly discussed. We also present our views on future developments in the field over the next decade.

저자약력

이상욱 교수는 서울대학교 물리학과에서 고체물리실험으로 이학박사 학위(2005)를 취득한 후 2007년까지 스웨덴 예테보리 대학 물리학과에서 박사후 연구원을 거쳐 2008년부터 현재까지 건국대학교 물리학과 조교수를 거쳐 부교수로 재직하고 있다. 저차원 나노구조를 이용한 나노 전자 소자 및 나노 역학 소자의 제작과 특성 분석에 관심을 갖고 연구를 진행하고 있다. (leesw@konkuk.ac.kr)

임은주 교수는 동경공업대학 전자물리공학 박사학위(2007) 취득 후 동대학교 및 영국 캠브리지 대학교에서 박사 후 연구원을 거쳐 2010년부터 단국대 응용물리학과 조교수로 재직하고 있다. 유기반도체 소자의 전하수송 현상을 광학적으로 관측하고, 이론적 모델링을 활용한 연구를 수행하고 있으며, 다양한 학술단체들로부터 젊은과학자상, 우수발표상, 우수논문상 등을 수상하였다. (elim@dankook.ac.kr)

이종수 교수는 광주과학기술원 신소재공학과에서 재료물리로 공학박사학위(2005)를 취득한 후 독일 막스플랑크 연구소, 삼성전자 종합기술원을 거쳐 2010년 9월부터 현재까지 경희대학교 응용물리학과 조교수로 재직하고 있다. 저차원 전자계, 위상보존계를 이용한 열전소재 및 초전도체 신물질 개발 연구를 진행하고 있다. (jsrhyee@khu.ac.kr)

이은철 교수는 KAIST 물리학과에서 고체물리이론으로 이학박사 학위(2003)를 취득한 후 삼성전자 메모리사업부 책임연구원, 한국세라믹기술원 선임 연구원을 거쳐 현재 가천대학교 나노물리학과 부교수로 재직하고 있다. 나노구조체의 전자구조 및 양자전기전도도 계산, 거대이형접합 고분자 태양전지 개발, 그래핀 기반 DNA 센서 개발 분야에 관심을 갖고 연구를 진행하고 있다. (eclee@gachon.ac.kr)

이 글에서는 현재까지 응용물리 분야에서 진행되고 있는 연구 분야를 소개하고 10년 후의 연구 동향을 전망해 보고자 한다. 특별히 나노소재 및 소자, 유기물 반도체, 에너지 물리, 그리고 생물 물리 분야에서 흥미로운 주제들에 대한 연구 동향을 소개하고 이를 바탕으로 10년 후 연구 전망을 예측해 보았다.

나노소재, 소자 물리 연구 전망 (NIT 응용연구를 중심으로)

응용물리학 관점에서 나노소재 연구는 지난 20여 년간 새로운 나노 물질을 발견하고 이에 대한 물리적 특성을 평가하여 현재 우리 생활 여러 분야에 사용되고 있는 소재들에 비해 우수한 성능을 보여주는 것을 제시하는 형태로 발전해 왔다. 나노소자 연구도 이와 비슷하게 새로운 개념의 나노소자를 개발하고 이것을 기존의 전자소자에 비해 더 뛰어난 소자 특성을 보고하여 실리콘 기반 전자소자를 대체할 수 있는 가능성을 보여주는 연구를 수행하여 왔다. 향후 10년간의 응용물리 연구는 이러한 연구 경험들을 확장하여 새로운 나노소재, 소자들을 CMOS 전자 시스템을 대체하기 위해 집적화하는 과정에서 나타날 수 있는 여러 가지 흥미로운 물리현상 및 이때 생길 수 있는 문제점 및 이슈들을 점검하는 방향으로 전개될 것으로 보인다. 전자 시스템 응용 분야의 최근 연구 동향을 보면 10년 후의 나노소재, 소자 응용물리 연구의 전망을 엿볼 수 있을 것으로 판단된다. 여기에서는 여러 주제들 중 특히 최근 응용물리 분야에서 많은 연구가 이루어지고 있는 탄소 나노구조를 통한 전자소자 연구와 금속산화물, 스핀-자성물질을 이용한 메모리 응용 연구를 중심으로 10년 후 연구 전망을 분석하고자 한다.

탄소 기반 소재 중 지난 20여 년간 활발하게 연구되어온 탄소나노튜브와 지난 10년간 가히 폭발적이라 말할 수 있을 정도로 많은 연구 결과가 쏟아져 나오고 있는 그래핀을 이용한 전자 시스템이 미래 산업에 실질적으로 적용될 수 있는지에

대한 고찰이 이루어질 것으로 보인다. 탄소나노튜브의 경우 매력적인 전기적, 역학적 특성에도 불구하고 아직 반도체성 나노튜브와 금속성 나노튜브를 완벽하게 분리해내는 기술 및 나노튜브의 지름 및 손지기(chirality)를 제어할 수 있는 기술이 확보되지 않아 실질적인 응용 연구에 대한 회의적인 시각이 많아져 지난 10여 년 전에 비해 상대적으로 연구의 열기가 식어가고 있었다. 하지만, 탄소 나노튜브의 특성 제어 연구는 꾸준히 발전되어 왔고 특히 일본 AIST의 Kataura 그룹에서 지난 수년간 chirality 제어 연구를 수행하여 현재는 매우 95% 이상 높은 수율의 제어가 가능하다는 보고가 있어,^[1] 그래핀 연구와 함께 다시 많은 관심이 일어날 것으로 보인다. 그래핀 응용 연구의 경우 EMI shielding 물질, 투명 전극 등과 같은 분야에서는 이미 일정 부분 긍정적인 응용 가능성을 보여주고 있어 향후 그래핀 소재 및 소자 응용 연구는 더욱 확대될 것으로 보인다. 특히 그래핀 응용을 위한 연구 컨소시엄이 유럽을 기점으로 세계적으로 조성되고 있어서 향후 10년 이내에 가장 빠르고 광범위한 응용 연구가 진행될 것으로 예상된다. 특히 유럽에서 진행되고 있는 EU 그래핀 플래그십은 2013년부터 10년간 10억 유로를 투자해서 그래핀을 다양한 산업에 적용시키는 것을 최종 목표로 하고 있는 초대형 프로젝트로 2년 전 프로그램의 준비 단계에서부터 화제가 되었고 하나의 연구 주제에 대해 EU 역사상 가장 큰 금액을 투자하는 만큼 선정 이후 전 세계에서 기대와 관심을 가지고 그 진행상황을 지켜보고 있다.^[2] 지난 수년간의 연구결과에 의하면 그래핀의 밴드갭을 열어 전자 시스템에 응용하려는 연구에 대해서는 회의적인 시각이 많아졌지만 그래핀 플래그십 내 11개 work package 중 5개가 전자시스템 응용 관련 주제로 구성되어 있을 정도로 비중이 높은 것은 그래핀 응용 전자소자에 대한 기대가 아직도 매우 크다는 것을 시사하고 있다. 유럽뿐 아니라 전 세계적인 추세로 볼 때 10년 후 그래핀을 응용한 전자 시스템 개발은 어느 정도 구체적으로 전개되어 있을 것으로 예상된다.

지난 수년간 금속산화물을 이용한 전자 시스템 응용 연구는 메모리 분야에서 가장 활발하게 이루어지고 있었다. 차세대 메모리 소자의 후보군으로 ReRAM, FeRAM, MRAM 등이 계속해서 연구되고 있으며 개별 소자에서는 실리콘 기반 플래시 메모리의 성능보다 우수한 특성들을 많이 보고하고 있다. 금속산화물의 경우 여러 가지 물질을 박막형태로 제작이 가능하기 때문에 다양한 전자기적 특성을 가진 소재를 디자인할 수 있다는 점에서 많은 응용가능성을 가지고 있다. 또한 앞서 설명한 탄소기반 나노구조에 비해 CMOS 기반 나노 리소그래피 공정을 좀 더 쉽게 적용시킬 수 있는 장점 때문에 박막형태의 소재를 나노 스케일 소자로 제작하는 시도 또한 많이 이루어지고 있다. 여러 가지 우수한 특성을 가지고 있음에도 상용화

를 위해서는 해결해야 하는 이슈들이 있는데 그중 가장 큰 문제점은 메모리의 메커니즘에 대한 이해가 완전하지 않다는 것과 소자별 저항변화 제어가 CMOS 기반 플래시 메모리에 비해 완벽하지 않다는 것이다. 이러한 이슈에 대한 해결방안이 향후 10년 안에 잘 나올 수 있다면 10년 후 메모리 시스템이 실리콘 기반 소자에서 차세대 메모리 소자의 후보들 중 하나로 변화될 수도 있을 것이다. 이와 더불어 현재 플래시 메모리와 비교하여 턱없이 부족한 부분인 고집적화 이슈를 해결할 수 있는 방안을 제시하는 연구도 이루어져야 할 것이다. 이와 같은 관점에서 현재 국내외 여러 그룹에서 차세대 메모리 소자의 집적화를 시도한 보고들이 서서히 나타나는 것을 볼 수 있다.^[3]

스핀-자성물질을 이용한 나노소자 응용 연구는 다른 나노소자 연구에 비해 상업적 응용 가능성이 좀 더 빠를 수 있을 것으로 보인다. 예를 들면 MRAM 이후의 차세대 대용량 자기 메모리로 스핀 토크를 이용한 STT(spin transfer torque)-RAM의 경우 이를 개발하는 미국 벤처기업 Grandis가 삼성전자에 합병되는 등,^[4] 반도체 생산 대기업 등에서 생산을 추진하려는 움직임이 보이고 있어서 10년 이후에는 물리학적 관점을 넘어 상업화가 어느 정도 진행될 것으로 예상된다.

나노소재 및 소자 응용물리 연구 분야 중 몇 가지 주제에 대한 최근의 연구 동향을 보면 10년 후 연구를 전망할 수 있는 공통적인 흐름을 알 수 있는데, 그것은 지난 10여 년간의 연구는 새로운 나노소재 및 신개념 나노소자를 찾는 노력이 주가 되었다면 앞으로의 연구는 실제 CMOS 기반 전자 시스템을 대체할 수 있는 가능성을 보여주는 노력으로 진행되고 있다는 점이다. 따라서 향후 10년의 나노소재 및 소자 연구는 단일 소자의 우수한 특성을 밝혀내는 연구 수준을 넘어 신개념 소자에 대한 특성의 신뢰도 및 소자 제작의 향상성을 만족시킬 수 있는 물리적 환경 및 시스템 제작 조건을 찾는 방향으로 이루어질 것으로 예상된다.

유기 반도체 소자 응용연구 전망

유기소재 개발은 1940년대 후반부터 시작된 비교적 짧은 역사를 갖고 있지만, 2000년 전도성 고분자 연구가 노벨화학상을 안겨준 이후로 지속적인 발전과 더불어 다양한 응용연구

REFERENCES

- [1] H. Liu *et al.*, Nano Lett. **13**, 1996 (2013) (DOI: 10.1021/nl400128m).
- [2] Graphene Flagship Website (<http://graphene-flagship.eu/>).
- [3] R. Waser *et al.*, Adv. Mat. **21**, 2632 (2009).
- [4] www.bloomberg.com (August 2, 2011).

Fig. 1. Flexible organic photovoltaic and organic displays.

로 그 영역을 넓혀 가고 있다.^[5] 학계에서는 다양한 이론과 실험, 그리고 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 이러한 결과물의 핵심 메커니즘인 유기발광소자, 유기트랜지스터, 유기태양전지와 같은 유기반도체 소자 변위에 관하여 접근하고 있고,^[6] 이러한 응용 연구의 결과물로 초박막, 초대형 벽걸이 표시소자, 두루마리 컴퓨터 등이 기대되고 있다.

현재의 유기반도체 소자 분야에서는 가볍고, 얇으며, 내충격성이 좋은 플라스틱 기판 위에서의 소자 제작의 필요성이 점차 대두되고 있으며 특히, 차세대반도체 기술의 하나로 큰 주목을 받고 있는 플라스틱 디스플레이는 다양한 형태의 기술적 접근 방법으로 제품화되어 현재 활용되고 있다. 예컨대 LG 디스플레이는 77인치 커브형 초고화질 유기발광다이오드 TV를 출시할 예정이고, 삼성디스플레이에서는 유기 디스플레이에 다이나몬드 픽셀구조를 이용한 500 ppi급으로 해상도 기술을 선보이고 있다. 앞으로 더욱더 플렉서블 디스플레이가 차세대 디스플레이 시장에서 중요한 역할을 할 것은 의심의 여지가 없지만 고분자 기판이 유리 기판에 비해 떨어지는 특성인 내열성, 기체투과 특성, 열팽창계수, 내화학적 등은 계속적으로 개선되어야 할 과제이다.

유기발광소자는 1987년에 Kodak사의 Tang 등이 발광층과 전하 수송층으로 각각 Alq₃와 TPD라는 이중층 저분자 유기물 박막을 형성하여 효율과 안정성이 개선된 녹색의 발광현상을 발견한 이후로, 저분자 유기발광소자 디스플레이의 개발이 급속도로 빠르게 이루어졌다.^[7] 유기발광소자의 첫 상업화는 1990년대 후반 일본 Pioneer사에 의해 시작되었다. 이것은 유기 색소의 매우 얇은 박막에 전기를 흘려보내 발광하는 전계 발광 원리를 이용한 것으로 액정 디스플레이나 플라스마 디스플레이 패널과 비교해 훨씬 얇고, 뛰어난 재현성을 갖는다. 100만 배 이상의 높은 명암비로 시각적으로 보기 좋으며, 빠른 응답속도의 화상을 얻을 수 있다.

유기트랜지스터는 메모리 소자 및 각종 연산 소자의 근간이 되는 연구로서 1964년 CuPc를 사용하여 처음 제작하였고, 1983년 polyacetylene으로 이동도 $7 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 를 보고함으로써 관심을 끌기 시작하여, RFID와 같은 플라스틱 칩에 사용하기 위한 연구로 이어졌다. 최근 개발된 몇몇 용액 공정용

유기반도체들은 비정질 실리콘 반도체의 10여 배가 넘는 전하 이동도를 보이고 있으며, 여러 가지 전자소자에 대한 응용 가능성을 보여주고 있다.

유기태양전지는 빛을 흡수하여 전기를 발생하는 소자로서, 고유의 친환경적 측면으로 신재생에너지의 하나로 최근 학계와 산업계에 많은 관심을 불러 모으고 있다. 1980년대 중반 Kodak의 Tang이 진공증착을 이용한 저분자 반도체 층의 다층 박막을 이용하여 약 1%대의 효율을 구현한 이래 꾸준히 발전을 거듭해 왔으며,^[8] 2013년에는 독일의 벤처회사인 Heliateg이 Oligomers 재료를 이용하여 12%의 효율을 발표하는 등 괄목할 만한 성장을 보여 왔다.

이러한 핵심소자들을 이용하여 새롭게 대두되는 응용분야의 예로서, 각종 유기물들을 분자단위에서 제어하는 분자전자소자는 실리콘 기반의 나노기술의 한계점을 극복하는 대체기술로 그 역할이 기대되고 있고,^[9] 자동차, 항공기 이동수단, 로봇, 건축, 의료 등에 이르기까지 매우 다양한 형태로 우리의 삶 속에 적용될 것으로 보인다. 이들 기술을 인쇄 기술과 접목하여 센서 어레이와 결합하면 초대형 기능성 스마트 벽지 등으로 구현될 수 있어 생활환경을 모든 공간에서 실시간으로 감지하여 인간 삶의 질을 향상시키는 데 도움을 줄 것이다.

영화에서 보면 유기반도체 소자를 이용한 디스플레이 기술은 첨단이라는 분위기를 살리는 중요 소품 중의 하나이다. 우주를 배경으로 펼쳐지는 영화 앤더스 게임에서는 초대형 스크린 앞에 투영된 외계인을 상대로 단지 손동작만으로 시뮬레이터식 전투를 펼치고, 천재과학자 이야기 아이언맨 시리즈에서는 3차원 입체 홀로그래피로 로봇을 설계하고, 감지기능 센서 장갑이 등장하여 최첨단 홀로그램 영상 기술을 보여준다. 이외에도 사람의 말을 척척 알아듣고 마음까지 헤아리는 로봇이 등장하고, 투명한 플렉서블 디스플레이는 입체형 데이터를 완벽하게 분석한다.

이러한 디스플레이 기술은 미래의 유비쿼터스 기술과 결합하여 언제, 어디서나 수준을 뛰어넘어 무엇이든 편리하고 자유롭게 정보통신 기술을 이용할 수 있는 기회를 제공할 것이다. 정보의 혁명인 유비쿼터스 기술은 지능화된 모바일 컴퓨팅의 개념으로 범위가 확대되고 무한한 기회창출 가능성을 보여준다. 이미 주차를 스스로 하는 자동차는 시판되고 있고, 미래의

REFERENCES

- [5] H. Shirakawa and S. Ikeda, *Polymer J.* **2**, 231 (1971).
- [6] M. Iwamoto *et al.*, *Nat. Photonics* **1**, 581 (2007).
- [7] C. W. Tang and S. A. VanSlyke, *Appl. Phys. Lett.* **51**, 913 (1987).
- [8] C. W. Tang, *Appl. Phys. Lett.* **48**, 183 (1986).
- [9] T. Lee *et al.*, *Adv. Mater.* **25**, 4845 (2013).

자동차는 자율 주행을 물론 홍채 인식을 통해 사람의 컨디션도 파악을 하여 그에 맞는 드라이빙 모드로 전환해서 달리게 될 것이다. 지금까지 눈으로 하는 게임은 뇌의 전파 및 온도 변화와 같은 전체적인 물리적 변화를 파악해서 사용자의 시선을 인식했다면 이제는 홍채의 움직임을 통해 게임 내 캐릭터를 자유롭게 움직일 수 있는 시대가 올 것이다. 앞으로의 세상은 더욱 스마트하게 서비스를 제공할 것이고, 편리성과 재미를 더하여 화려한 경험을 할 수 있게 만들 것이다.

우리가 세상을 살아가면서 끊임없이 과학기술을 연구하고 발전시키는 이유는 문명의 발전을 통한 이상주의적 세계의 구현을 꿈꾸고 있기 때문일 것이다. 그리고 그 가능성을 앞당겨 줄 것으로 기대되는 유기반도체 소자 분야의 기술적 진보는 향후 우리들의 삶을 더욱 풍요롭게 바꾸어 주는 핵심 열쇠가 되어 줄 것임에 틀림없다. 아울러 이러한 무궁한 잠재력을 하나하나 실현해 나가는 데에 무엇보다 우리 물리학의 지식과 역할이 더욱더 중요해질 것이라는 사실을 잊어서는 안 될 것이다.

에너지 분야에서의 응용물리

최근 전 세계적인 에너지, 환경문제로 인해 에너지 효율화에 대한 연구에 관심이 커지고 있다. 매년 에너지 사용량의 증가는 기하급수적으로 증가하고 있으나, 문제는 그 에너지 사용량 증가의 대부분이 화석연료에 의존하고 있어서 이산화탄소 배출량도 급속도로 증가하고 있다는 현실이다. 지금 맞닥뜨리고 있는 에너지, 환경문제를 해결하지 않는다면 전 지구적 재앙이 닥칠 것이라고 여러 학자들은 경고하고 있다.

지금까지의 기술이 인간의 생활을 풍요롭게 하는 데 기여했다면 앞으로의 기술은 지구를 살리는 데 초점을 맞추어야 할 것이다. 지구를 살리는 기술로서 최근 많이 연구되고 있는 에너지 분야는 여러 가지가 있지만, 물리학적 방법으로 접근하고 있는 연구는 크게 태양광, 열전, 압전, 수소저장, 핵융합 등을 대표적으로 꼽을 수 있다.

앞서 언급된 연구 분야 중 가장 상용화에 근접한 연구는 태양광 발전 연구라 할 것이다. 지구 표면에 입사되는 태양광 에너지의 1시간 분은 전 세계가 1년 동안 소비하는 전체 에너지에 해당될 정도여서 태양광 에너지의 0.01%만 유효하게 이용될 수만 있어도 에너지 문제는 해결될 수 있다. 태양광 발전의 상용화에 가장 큰 걸림돌이 되고 있는 것은 태양전지의 효율과 발전설비 단가이다. 현재 태양전지 효율은 7~20% 정도이며 수명은 20년 이상, 발전설비 단가는 5,400 \$/kW 정도 된다고 한다.^[10]

최근 태양광 발전 연구는 전통적인 실리콘 결정질 소재를 기반으로 한 태양광 모듈(1세대 결정형 태양전지)과 함께 비정질

Table 1. Development of solar cell research.

1세대 (결정형 태양전지)	2세대 (박막형 태양전지)	3세대 (염료감응형 태양전지)

실리콘, CdTe, CIS(Cu-In-Se) 및 CIGS(Cu-In-Ga-Se) 등을 기반으로 한 박막형 태양전지(2세대), 그리고 유기물이나 나노소재 등을 활용한 염료감응형 태양전지(3세대) 연구가 활발히 이루어지고 있다. 태양광 발전의 높은 효율을 구현하기 위해서는 광학, 재료공학을 비롯하여 물질의 양자상태에 대해 이해함으로써, 혁신적인 성능향상 원리의 원천 연구에 집중되어야 할 것이다. 고체의 전자구조 이해를 통한 에너지 밴드갭 조절 및 광전자 물리학의 근본적 이해를 바탕으로 신물질 및 신규구조를 갖는 태양광 물리연구는 매우 활발히 지속되고 있다. 최근에는 특히 유연하고 투명한 고효율 태양전지의 개발이 집중적으로 진행되고 있다. 이렇게 다기능 물성을 갖는 고효율 소재를 찾는 것은 매우 어려운 일로서 앞으로 많은 연구가 필요할 것이다.

신재생 에너지로 분류되는 에너지원의 사용량을 조사해 보면 실제 가장 높은 비율을 차지하고 있는 것이 버리는 열이다. 화석연료의 70%는 열로 버려지고 있기 때문에 이 폐열을 전기 에너지로 환원시킬 수 있다면 산업폐열의 10%만 회수되어도 태양광, 풍력, 지열을 다 합한 것만큼의 전력생산이 가능하다. 폐열의 전기에너지 변환기술로 연구되고 있는 열전발전 연구는 최근 들어 큰 발전을 이루고 있다.

열전성능을 결정짓는 물리적 인자는 $ZT = S^2 \sigma T / \kappa$ 로 정의되며 S 는 제벡계수, σ 는 전기전도도, T 는 절대온도, κ 는 열전도도이다. 즉, 높은 열전 변환성능을 가지려면 전기는 잘 통하면서(높은 σ) 전압차가 많이 발생되어야 하고(높은 S), 열 전달은 잘 안 되어(낮은 κ) 시료 양단에 온도차를 유지해야 한다. 문제는 이 세 개의 물리량이 서로 연관되어 있어 독립적으로 물성을 제어하기 어렵다는 데 있다.

90년대 이후 최근 20년 동안 열전소재 개발은 나노기술의 접목을 통한 효율향상에 초점이 맞추어져 있었다. 나노물질에서는 열전달의 주체가 되는 양자화된 격자진동 에너지인 포논이 계면에서 잘 산란되어 열전도도가 낮아지기 때문이

REFERENCES

- [10] D. H. Kim, Current research and perspective view on the solar energy conversion technology (Report at SK Innovation, 2012).

Fig. 2. Renewable energy consumption by source from DOE, USA 2006.

다.^[11,12] 그러나 아무리 열전도도를 낮춘다고 하더라도 ZT 의 분자에 있는 파워팩터($S^2\sigma$)를 높이지 못한다면 열전의 응용 한계선인 ZT 2.0을 넘기 힘들다. 이러한 한계를 극복하기 위하여 최근에는 새로운 물리원리를 도입한 고효율 열전소재의 개발연구가 부각되고 있다.

예를 들면 불순물 도핑에 의한 공명 에너지 준위 원리를 통해 ZT 1.5를 달성한 것이나,^[13] 저차원 전자계에서 파이얼스 왜곡이 열전도도를 낮추고 제벡계수를 높인다는 원리가 그것이다.^[14,15] 최근에는 저차원 결정격자에서 ZT 2.6이 가능하다는 보고도 발표되었다.^[16] 그 동안의 추세를 보면 앞으로 10년 이후 열전연구는 새로운 물리현상을 이용한 연구와 함께 나노과학과 결합하여 비약적인 효율 증대가 이루어질 것이라 기대한다.

수소에너지는 비 화석연료라는 점과 유해한 이차생산물을 남기지 않는다는 점에서 친환경 대체에너지로 각광받고 있다. 수소에너지가 상용되기 위해서는 친환경적인 수소 생산기술, 안전한 수소저장기술이 필수적이다. 특히 수소저장기술은 물리, 화학적인 측면에서 많은 연구가 진행되고 있다. 최근 수소저장 방법으로 연구되고 있는 것은 압축수소, 액화수소, 금속수소화물, 흡착, 수소화합물 등이 연구되고 있는데 모두 장단점이 있어서 확실한 대안으로 떠오른 것은 없는 실정이다. 금속수소화물로 쓰이고 있는 LaNi_5 등의 물질은 수소저장용량이 매우 적으며 소재의 열화가 심하고, 수소 흡착제로 쓰이는 탄소나노튜브 등은 아직 수소저장 능력을 충분히 검증받지 못한 상태이다.^[17] 따라서 수소저장의 근본 원리를 밝히고 그것을 이용하여 높은 수소저장능력과 충방전의 가역성, 소재 안정성 등이 확보된 신물질 개발 연구가 앞으로 꾸준히 진행되어야 할 것이다.

기계적인 에너지를 전기적 에너지로 전환하는 기술로 압전 에너지 하베스팅이 있다. 압전 기술은 그 동안 액추에이터 등 기계부품 등으로 많이 쓰였지만 높은 에너지 변환효율이 아니더라도 생활 속에서 발생하는 진동 에너지를 효과적으로 회수

하여 사용하는 분야에서 많이 쓰일 수 있다. 압전현상은 기본적으로 소재의 강유전성을 이용하는 것이기 때문에 응력에 따른 전기분극이 큰 물질의 개발이 필요하다. 최근 압전에너지 하베스팅은 군수용 발전장치, 의료용 장치의 보조전원, 착용가 능한 전자제품에 대한 연구와 더불어 MEMS기술을 활용한 초소형 나노로봇 등에 이르기까지 다양한 분야의 응용연구가 진행 중이며 앞으로 물리와 재료과학의 측면을 넘어서 기계공학의 접목을 통해 큰 발전을 이룰 수 있는 분야로 꼽히고 있다.

바이오 물리 연구 전망

통상적으로 바이오물리라고 하면 생체계를 연구하는 데 있어서 물리학의 연구 방법 혹은 물리학에서 유래된 이론을 사용하는 광범위한 학문분야를 지칭한다.^[18] 응용물리분과의 바이오학술발표장에서는 바이오물리 중에서도 응용성이 높은 분야가 큰 관심을 끌어들였다. 그리고 이러한 연구의 관심은 바이오물리의 범주를 넘어 바이오테크놀로지 전반까지 미쳐있는 상태이다. 따라서 여기서 10년 후 응용물리분과의 바이오물리 전망을 할 때는 바이오물리의 범주에 바이오테크놀로지를 포함하여 전망하도록 하겠다.

2014년 현재 10년 후의 바이오물리학 연구를 예측하는 것은 매우 어려운 일이지만, 10년 전인 2004년과 현재를 비교해 보면 힌트를 얻을 수 있는 것 같다. 현재 활발하게 연구되고 있는 바이오센서,^[19] 바이오이미징, 의료기기, 약물전달^[20] 등의 바이오 연구 분야는, 2004년에 이미 관련 개념이 정립되어 활발히 연구되고 있었다. 그러나 지난 10년간 신물질 및 신기술의 개발로 각 분야는 질적으로 크게 발전하였다. 대표적인 신물질로는 그래핀을 들 수 있다. 2004년 당시에 그래핀은 물리학계에서 막 발견되어 세계의 이목을 끌고 있었다. 그 당시 바이오연구에서는 그래핀이 바이오분야에서 응용된 것을 찾아볼 수 없다. 이후 그래핀은 집중적으로 연구되었고, 2010년 노벨

REFERENCES

- [11] L. D. Hicks and M. S. Dresselhaus, Phys. Rev. B **47**, 12727 (1993).
- [12] Woo Chul Kim *et al.*, Phys. Rev. Lett. **96**, 045901 (2006).
- [13] J. P. Hereman *et al.*, Science **321**, 554 (2008).
- [14] Jong-Soo Rhyee *et al.*, Nature **459**, 965 (2009).
- [15] Jong-Soo Rhyee *et al.*, Adv. Mater. **23**, 2191 (2011).
- [16] Li-Dong Zhao *et al.*, Nature **508**, 373 (2014).
- [17] L. Schlappbach and A. Züttel, Nature **414**, 353 (2001).
- [18] <http://en.wikipedia.org/wiki/Biophysics>.
- [19] A. F. Collings and F. Caruso, Rep. Prog. Phys. **60**, 1397 (1997).
- [20] N. Bertrand and J.-C. Leroux, J. Control. Release **161**, 152 (2012).

상까지 받을 정도로 이미 많은 연구가 진행될 즈음부터 바이오센서 등 바이오분야에 본격적으로 응용되기 시작하였다. 2014년 현재 그래핀 혹은 그래핀 산화물에 기반한 바이오센서 연구는 바이오횰리 연구자들 사이에서 가장 열띤 연구가 진행되고 있는 주제 중 하나이다. 2014년부터 향후 10년의 바이오 연구 동향이 과거 10년처럼 흘러간다면, 바이오 연구의 분야는 현재와 유사하게 유지되면서 기술완성도는 크게 높아질 것으로 조심스럽게 예측해 볼 수 있다.

이러한 관점에서 향후 10년간 활발하게 연구될 것으로 예상되는 한 가지 분야는 바이오센싱 분야이다. 이 분야에서는 특정 바이오횰질을 선택적으로 매우 높은 민감도로 검출하는 것을 목표로 한다. 검출하는 바이오횰질은 DNA, 단백질, 세포, 바이러스 등이 있다. 대개 바이오센싱 장비의 크기를 최소화한 바이오센서 형태의 소자에서 많은 연구가 진행된다. 바이오센싱에는 여러 가지 방법이 있는데, 많은 물리학자들이 관심을 가지고 있는 방법은 레이저를 이용한 검출방법이다. 최근에는 그래핀 산화물(graphene oxide)의 형광 소광(fluorescence quenching) 특성과 외가닥(single-stranded) DNA의 그래핀 산화물 흡착 특성을 이용한 DNA 센서에 대한 여러 연구가 발표되었다.^[21,22] 향후 10년간에는 형광,^[23] 인광(phosphorescence),^[24] 화학발광(chemiluminescence)^[25] 등을 바이오센싱에 이용 가능케 만드는 소재, SPR(surface plasmon resonance),^[26] FRET(Förster resonance energy transfer),^[27] SERS^[28]을 이용한 광기반 바이오센싱, 새로운 광 바이오센싱 메커니즘 등에 관한 연구가 진행되어 광학적 바이오센싱의 민감도가 크게 향상될 것으로 예상된다.

많은 물리학자들이 관심을 갖고 있는 또 다른 바이오센싱 방법은 트랜지스터(transistor)를 바이오센싱에 활용하는 것이다. 트랜지스터는 쇼클리, 바딘, 브래튼 등의 물리학자들이 1947년에 벨연구소에서 처음 개발하였고, 1956년에는 이들에게 노벨 물리학상이 수여되었다. 현재 트랜지스터 연구는 공학 쪽에서 더 활발하게 이루어지고 있긴 하지만, 반도체 물리의 배경을 가진 여러 물리학자들이 여전히 이 분야에 친숙하고 많은 관심을 갖고 있다. 따라서 많은 물리학자들이 트랜지스터를 이용하여 바이오센서를 제작하는 연구를 수행할 것으로 예상된다. 최근에는 그래핀으로 전계효과 트랜지스터(field effect transistor)를 제작하여 바이오센서에 활용하는 연구가 활발하게 진행되었다.^[29,30] 향후 10년 동안에는 바이오 표지자(probe)를 효율적으로 그래핀에 고정화(immobilization)하는 연구, 새로운 소재로 바이오트랜지스터를 개발하는 연구, 양자전기전도도(quantum conductance)를 바이오센싱에 응용하는 연구 등이 활발하게 행해질 것으로 예상된다.

물리학자들에게는 다소 생소하지만 전기화학(electrochemistry)을 이용한 바이오센서 제작이 화학, 생물, 공학계열에서

널리 행해지고 있다. 이 방법은 수용액 상에서 화합물이 산화, 환원되면서 전기가 흐르는 현상을 이용하기 때문에 바이오센서 제작에 적합하다.^[31] 세계적인 연구의 흐름이 다전공간의 융합연구를 독려하는 방향으로 흘러가고 있고, 많은 물리학자들이 학문경계를 뛰어 넘은 다양한 응용연구를 수행하고 있기 때문에, 앞으로는 전기화학적 방법론을 이용하여 바이오센서를 연구하는 그룹이 물리학계에서도 많이 등장할 것으로 예상된다.

바이오센싱 분야 외에도 바이오이미징 분야에서 많은 연구가 이루어질 것으로 보인다. 연구 목적에 따라 상대적으로 큰 생물체의 전신부터 단세포/단분자 수준의 작은 크기까지의 바이오이미징이 연구되고 있다. 그동안 단세포/단분자 수준의 생체 물질 거동 규명, 암세포 추적, 생체 조직의 정확한 관찰 등의 다양한 연구가 수행되었다. 현재는 주로 형광염색물질이나 형광을 지닌 나노입자(nanoparticle)를 이용한 바이오이미징 연구가 많이 수행되고 있다. 이외에도 MRI(magnetic resonance imaging)나 OCT(optical coherence tomography) 등을 이용한 연구도 수행되고 있다. 향후 10년 동안에는 물리학자들이 새로운 광학적인 방법론과 나노광학을 이용하여, 뛰어난 시간 및 공간 분해능을 갖는 현미경 관찰법(microscopy)에 기반한 바이오 이미징 기법을 개발할 것으로 예상된다.

이외에도 바이오소자에 응용될 나노구조체 및 소재, 약물전달기술, 나노치료제 개발, 의료기 개발, 바이오인포매틱스 등 다양한 분야에서 물리학자들이 활약할 것으로 예상된다. 2012년 바이오산업 생산규모는 총 7.1조 원이며 연평균 증가율은 12.1%로 제조업(7.7%), 전자 산업(9.7%)을 능가하는 빠른 성장을 보이고 있다. 이러한 성장률로 볼 때 바이오 분야의 전망은 매우 유망하다. 따라서 앞으로 많은 물리학자들이 이 분야에 더욱 큰 관심을 가지고 활발하게 연구에 뛰어드는 것이 필요해 보인다.

REFERENCES

- [21] Z. Tang *et al.*, *Small* **6**, 1205 (2010).
- [22] S. He *et al.*, *Adv. Funct. Mater.* **20**, 453 (2010).
- [23] <http://en.wikipedia.org/wiki/Fluorescence>.
- [24] <http://en.wikipedia.org/wiki/Phosphorescence>.
- [25] <http://en.wikipedia.org/wiki/Chemiluminescence>.
- [26] S. Zeng, K.-Y. Yong, I. Yoy, X.-Q. Dinh, X. Yu and F. Luan, *Plasmonics* **6**, 491 (2011).
- [27] A. Periasamy, *J. Biomed. Opt.* **6**, 287 (2001).
- [28] P. L. Stiles, J. A. Dieringer, N. C. Shah and R. P. V. Duyne, *Annu. Rev. Anal. Chem.* **1**, 601 (2008).
- [29] X. Dong, Y. Shi, W. Huang, P. Chen and L.-J. Li, *Adv. Mater.* **22**, 1649 (2010).
- [30] T.-Y. Chen *et al.*, *Biosens. Bioelectron.* **41**, 103 (2013).
- [31] T. Tian, Z. Li and E.-C. Lee, *Biosens. Bioelectron.* **53**, 336 (2014).