



Convergence Research Review

융합연구리뷰

재료조차도 똑똑해진다
4D 프린팅과 프로그래머블 매터

—
쓸모없는 에너지는 없다
차세대 에너지 하베스팅 기술

목차

융합연구리뷰 | Convergence Research Review
2015 June vol.1 no.3

- 03 편집자주
 - 04 **재료조차도 똑똑해진다**
4D 프린팅과 프로그래머블 매터(Programmable Matter)
 - 30 국가 R&D 현황 분석_4D 프린팅과 프로그래머블 매터
 - 34 **쓸모없는 에너지는 없다**
차세대 에너지 하베스팅 기술
 - 64 국가 R&D 현황 분석_차세대 에너지 하베스팅 기술
-

표지 이야기

프로그래머블 매터를 통한 얼굴 복제·재가공 개념도

융합연구정책센터 KIST
Convergence Research Policy Center

발행일 2015년 6월 1일
발행인 하성도
발행처 한국과학기술연구원 융합연구정책센터
136-791 서울특별시 성북구 화랑로 14길 5
tel. 02-958-4984 | <http://crpc.kist.re.kr>
편집 (주)디자인플로림 tel. 051-202-9201





| 편집자주 |

재료조차도 똑똑해진다

4D 프린팅과 프로그래머블 매터

2014년 3D 프린팅이 전세계를 휩쓸었다. 3D 프린팅은 1970년대부터 구현이 되며 정교하게 발달되어 온 기술이었지만 관련 특허들이 만료되고, 침체된 제조업의 혁신을 가져올 기술로 전세계로부터 많은 각광과 관심을 받았다. 그러한 3D 프린팅의 열기가 식기도 전에 선진국에서는 4D 프린팅의 개념이 논의되고 있다.

4D 프린팅은 2013년 스카일러 티빗츠가 TED 강연에서 조건에 따라 3D 구조물이 자유자재로 변화하는 개념을 언급하며 세상에 등장하였다. 이것이 3D 프린팅의 열기를 통해 4D 프린팅에 대한 관심 증대로 이어지기는 하였지만 개념적으로는 새로운 것이 아니었다. 4D 프린팅은 바로 과거부터 많은 연구자들이 꿈꿔왔던, 하지만 많은 연구는 진행되지 못했던 프로그래머블 매터(Programmable matter)의 일부 개념이기 때문이다.

이에 본 호의 1부에서는 3D 프린팅을 넘어 우리의 삶의 혁신을 가져올 것이라 기대되는 4D 프린팅과 프로그래머블 매터에 대해 심도 있게 소개를 하고자 한다. 본 리뷰를 통해 프로그래머블 매터의 개념과 가능성을 이해하여, 아직 전세계적으로 선도적인 연구진이 없는 이 분야에서 대한민국 연구진이 이 차세대 기술을 리드해 나가기 기대해 본다.

쓸모없는 에너지는 없다

차세대 에너지하베스팅

인간이 에너지를 이용하여 기계를 가동시킨 이후로 영구기관 제작은 인간의 꿈이었다. 열역학 제2법칙에 따르면 그것을 구현하는 것은 물리적으로 불가능함을 알고 있음에도 인간은 지속적으로 이에 대한 꿈을 버리지 않았다. 그리고 그 꿈은 에너지하베스팅으로 이어지고 있다.

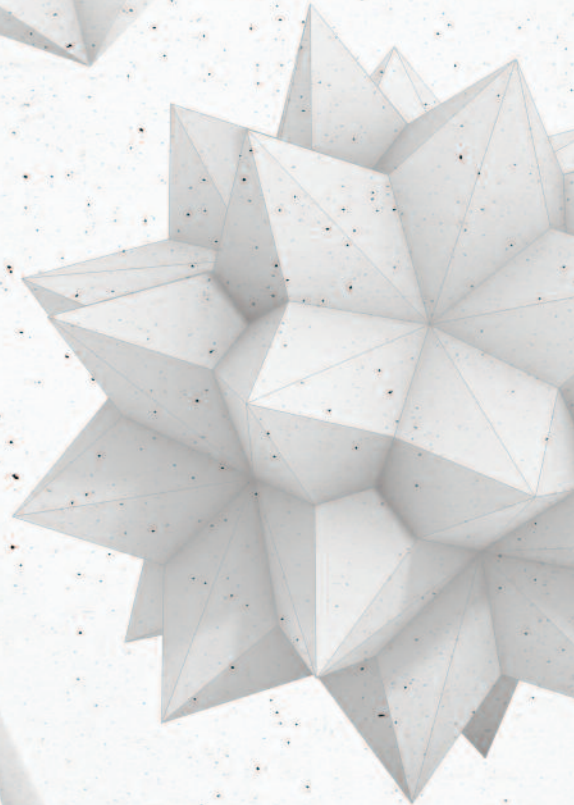
이전까지는 활용하지 못했던 에너지들을 압전, 열전 등 다양한 방식 등을 통해 활용하고자 하는 시도는 과거부터 많이 이루어져 왔다. 하지만 이를 통해 얻을 수 있는 에너지는 크지 않았고, 적용할 수 있는 분야도 제한적이었다. 그럼에도 불구하고 연구자들은 마찰전기, 페로플루이드 등 다른 방식의 에너지하베스팅 기술을 개발하는 한편, 압전/열전소자를 활용한 에너지하베스팅 효율을 비약적으로 높여 왔다. 그리고 최근 웨어러블 디바이스, 의료형 삽입기기 등 새로이 등장한 수요처들로 인하여 에너지 하베스팅에 대한 관심은 최고조에 달한 상황이다.

이에 본 호의 2부에서는 에너지 분야 중 최근 가장 관심이 높은 에너지 하베스팅에 대해 심도 있는 소개를 하고자 한다. 본 리뷰를 통해 에너지하베스팅의 연구개발 수준 및 현황을 파악하여, 향후 웨어러블 디바이스, 의료형 삽입기기 분야를 넘어 새로운 분야에서 에너지하베스팅 기술을 활용한 융합 연구가 수행되기를 기대해 본다.

재료조차도
똑똑해진다

4D 프린팅과 프로그래머블 매터

4D Printing &
Programmable Matter



01

서론

3D 프린팅 기술에 전세계가 주목하고 있다. 금형 제작, 절삭 등의 과정 없이 재료를 쌓는 적층 가공(Additive manufacturing)을 이용하여 최종 제품을 만드는 3D 프린팅은 제품 제작의 단계를 단순화할 뿐만 아니라 기존의 방법으로 제작할 수 없었던 형상을 쉽게 제작할 수 있도록 하여, 제품개발의 효율성을 획기적으로 높여줄 수 있는 기술이다.

3D 프린팅에 대한 개념이 처음 제시된 후 약 30년이 지난 지금, 3D 프린팅은 압출에서 광경화에 이르기까지 다양한 제작 방식의 개발을 통하여 더욱 복잡하고 정밀한 형상, 다양한 재료, 저가의 기기 및 재료의 활용 등을 가능하게 하며 그 응용분야를 무한히 넓혀가고 있다. 이제 3D 프린팅은 단순히 시제품 개발의 효율성을 높여줄 수 있는 방법의 차원을 넘어서 제품 제작에 대한 대중의 진입 장벽을 허물고, 저가형 일대일 맞춤형 의료기기 제작을 가능하게 하는 등 지금까지와는 전혀 다른 시장을 창출할 기술로 주목 받고 있다.

여기서 한 걸음 더 나아가 3D 프린팅 기술에 한 차원이 더해진 4D 프린팅 기술이 제안되고 있다. 4D 프린팅 기술은 기존 3D 프린팅에 'Programmable matter' (프로그래밍 가능한 물질)의 개념을 부가함으로써 새로운 차원을 제시한다. 프로그램이 가능한 물질이란, 한 가지 물질이 프로그래밍을 통하여 다른 형상이나 기능을 가지도록 스스로 변화할 수(Self-transforming) 있고, 구조를 형성할 수 있으며(Self-organization), 조립될 수 있는(Self-assembly) 물질을 의미한다. 즉 3D 프린팅이 컴퓨터 상의 형상을 그대로 현실로 가져오는 기술이라면 4D 프린팅은 여기에 움직임을 더하여 한 차원을 더 높인 기술이라 할 수 있다. 4D 프린팅 연구자인 Skylar Tibbitts는 이러한 4D 프린팅 기술을 "가상 세계의 디지털 정보를 현실 세계의 물질로 구현하는 전례가 없는 획기적인 기술"로 소개하고 있다[1].

Programmable matter는 상상 속에서만 존재하던 많은 것을 가능하게 하여 줄 것이다. 작은 블록들이 스스로 조립되어 건물을 이루고, 필요에 따라 계단이 벽이 되고, 방이 될 수 있다. 몸 속으로 주사된 작은 물질들이 몸 안에서 보형물이나 인공 장기로 조립될 수 있으며 비행기의 날개가 접혀 자동차가 되고 사고로 고장난 기계가 스스로 수리될 수 있다. 작은 상자가 필요에 따라 접시가 되거나 컵이 될 수도 있다. 하나의 물체가 정해진 형상과 기능을 가져야 한다는 관념이 깨졌을 때, 상상할 수 있는 응용분야는 무궁무진하다. 이처럼 Programmable matter는 영화 속에서 상상으로만 존재하던 개념들을 비전으로 제시한다(그림 1).

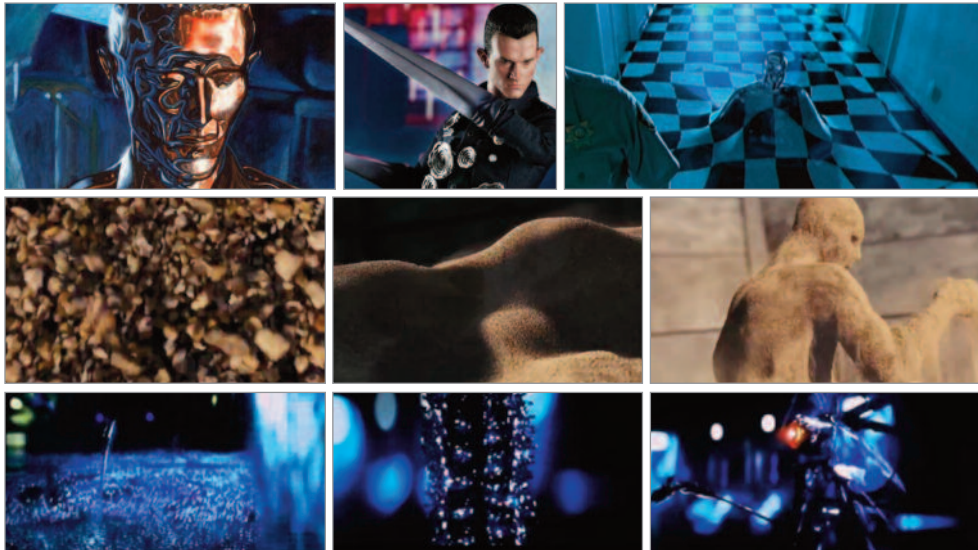


그림 1. 영화 속에 등장하는 프로그래밍 가능한 물질 개념들 - 위에서부터 터미네이터2 중 T-1000, 스파이더맨3 중 샌드맨, 트랜스포머2 중 정찰용 로봇

Programmable matter는 화학, 생명, 기계, 전자, 컴퓨터 공학에 이르기까지 관련 분야가 방대할 뿐만 아니라 파생 기술의 경계 또한 애매하여 어디까지를 Programmable matter라고 단정지어 이야기하기가 쉽지 않다. 다양한 분야의 연구자들이 'Programmable matter'의 구현을 위하여 색다른 접근 방법을 시도 중이고 앞서 언급한 4D Printing 또한 이러한 수 많은 접근 방법 중 하나라 할 수 있을 것이다. 또한 Programmable matter를 목표로 명시하고 있지 않더라도 모듈형 로봇과 같이 이와 관련된 기술로 분류할 수 있는 분야 또한 존재한다. 본 리뷰에서는 Programmable matter와 관련된 다양한 연구 분야 중 로봇 관련 분야에 집중하여 어떠한 연구가 진행되어 오고 있는지 살펴 볼 것이다.

Programmable matter라는 용어는 1991년 MIT 컴퓨터 공학자인 Tommaso Toffoli와 Norman Margolus에 의해서 가변적으로 구성되는 다수의 병렬 컴퓨팅 노드를 지칭하기 위하여 처음 사용되었다[2]. 만약 수 많은 작은 로봇이 스스로 조립되고 그 형태를 바꿀 수 있다면 이러한 개념을 현실 세계에서도 그대로 구현할 수 있지 않을까?

2000년대 이후 크게 발전한 로봇 공학 기술은 이 개념이 실제로 가능할 수 있다는 희망을 주었고, 이러한 목표를 이루고자 전 세계적으로 다양한 프로젝트들이 시작되었다.



그림 2. 모듈형 파트를 이용한 사업화 아이템들 왼쪽에서부터 Little Bits™, Cubelets™, Project ARA[3-5]

로봇을 이용한 Programmable matter를 위한 연구자들의 첫 접근 방식은 아주 작은 모듈화된 로봇으로 이를 구현하는 것이었다. 2002년 시작된 카네기 멜론 대학(CMU)의 Seth Goldstein 연구팀의 Claytronics 연구는 이 중 대표적인 성과라 할 수 있다. 이후 매사추세츠 공과대학(MIT)의 Daniela Rus 연구팀, 펜실베이니아 대학(UPenn)의 Mark Yim 연구팀 하버드 대학(Harvard)의 George Whiteside 연구팀 등 다양한 연구팀에서 모듈형 로봇을 좀 더 소형화하고, 좀 더 효율적인 구성을 가능하게 하는 다양한 연구들이 진행되었다. 모듈화 기술은 단순히 Programmable matter의 구현뿐만이 아니라 필요한 기능만을 조립하여 쓸 수 있는 개념으로 확장되어 Cubelets, Little bits, Project ARA 등 다양한 사업화 아이템으로도 활용되었다(그림 2)[3-5]. 이러한 모듈형 로봇 설계에 대한 연구와 함께 Harvard Radhika Nagpal 연구팀은 1,024 개의 로봇의 동시 제어를 성공시키며, 모듈형 로봇의 군집 지능에 대한 가능성에 힘을 실어 주었다.

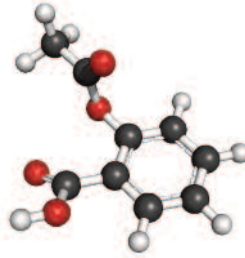
평면 형태의 종이는 접는 방법에 따라 수 만가지 형상으로 변화할 수 있다. 종이 접기 개념을 활용한 자가 조립 구조의 제작은 DNA Origami라는 이름으로 나노미터 스케일의 구조나 로봇 제작을 위하여 등장하였다. 이후 2010년 Harvard의 Robert Wood 연구팀과 Daniela Rus 연구팀은 종이 접기 구조와 지능재료를 활용하여 한 가지 목표 형상이 아닌 다양한 형상으로 변할 수 있도록 하여 Programmable matter를 구현하는 접근 방법을 제시하였다. 이후 이 연구는 3차원 형상의 2차원화 알고리즘, 스스로 접혀지고 조립되는 로봇 등의 연구로 발전하고 있다.

최근인 2013년, MIT Skylar Tibbits 연구팀에 의해서 3D 프린터로 Programmable matter를 구현하는 4D프린팅이 제안되었다. Skylar Tibbits 연구팀은 3D 프린터로 인쇄되는 물질 안에 스스로 형상을 변화시키거나, 조립될 수 있는 메커니즘을 부가하여 Programmable matter의 개념을 구현하였다.

지금부터는 Programmable matter를 위한 다양한 접근 방법들에 대해서 자세히 이야기하고자 한다.

02

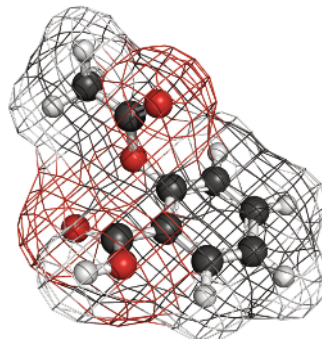
원자 구조 모사형 로봇을 통한 Programmable matter의 구현



작은 모듈화된 로봇을 이용한 Programmable matter의 구현을 처음 시도한 것은 CMU Seth C. Goldstein교수의 Claytronics 연구팀이다. Claytronics는 Catom(Claytronic atom)이라 불리는 기본 단위의 로봇들이 수많은 모여 스스로 형태를 재구성함으로써 Programmable matter의 개념을 재현하는 시스템이다. 임의의 형태를 구성함에 있어서 Catom은 물리적 복셀(Voxel, 3차원 공간의 한 점을 정의하는 그래픽 정보)로서 마치 실제 세상에서의 원자처럼 작동하며, 이러한 기술을 위해서는 로봇 모듈화 기술, 초소형화 기술 그리고 통신 및 행동 알고리즘에 대한 연구가 필요하다.

Claytronics 연구팀은 Catom 개발에 대한 연구와 Catom끼리의 상호작용을 위한 고성능의 소프트웨어 프로그램 개발에 대한 연구, 이렇게 두 개의 큰 프로젝트로 나누어 수행 중이다. 연구팀의 궁극적인 목표는 디지털 정보를 있는 그대로 현실화 하는 것이다.

로봇 기술이 점차 발전함에 따라 다양한 연구팀들이 새로운 형태의 모듈형 로봇의 개발을 진행하였다. 이 중 MIT 컴퓨터과학 및 인공지능 연구소(CSAIL)의 Distributed Robotics 연구실 Daniela Rus 연구팀은 주목할 만한 성과를 보여주었다. 연구팀은 장난감 모래와 같은 물질에 지능을 입혀 자유자재로 형상 변화가 가능한 물질을 만드는 것을 목표로 하드웨어와 알고리즘에 관한 연구를 진행해오고 있다. 해당 연구는 DARPA의 국방과학부서 DSO(Defense Science Office)를 통해 Programmable matter란 이름의 대규모 프로젝트로 진행되고 있다.



기본 단위 모듈 로봇의 개발[6, 7]

Claytronics 연구팀은 시스템 구성의 기본 단위로 Catom을 제시하였다. Catom의 크기가 작아질수록 목표하는 형상의 해상도가 높아질 수 있다. 연구팀이 개발한 밀리미터 스케일의 작은 Catom은 외부와 전선 등의 연결이 없이 스스로 움직일 수 있다. 이 Catom은 튜브형태의 껍질과 내부에 고전압 CMOS 회로가 붙어있다. 포토리소그래피로 형상을 만들고 두 층 사이의 열 응력 차이로 3차원 형상으로 말려 튜브형태로 변한다. Chip(고전압 CMOS 회로)은 개별적으로 제작되어 껍질이 3차원으로 변형 하기 전 한쪽 끝에 부착한다. Chip은 정류기, 무선충전펌프(고전압 생성을 위함), 축전기 등으로 구성되어 있다.

이 Cartom은 그림3과 같이 고전압 교류 전류가 걸려있는 스테이터 위에서 움직일 수 있다. 스테이터에 걸린 교류를 Chip이 고전압 직류로 변환하고 껍질이 순차적으로 대전되어 껍질과 스테이터가 서로 당기는 힘이 Catom을 앞으로 움직이게 한다.

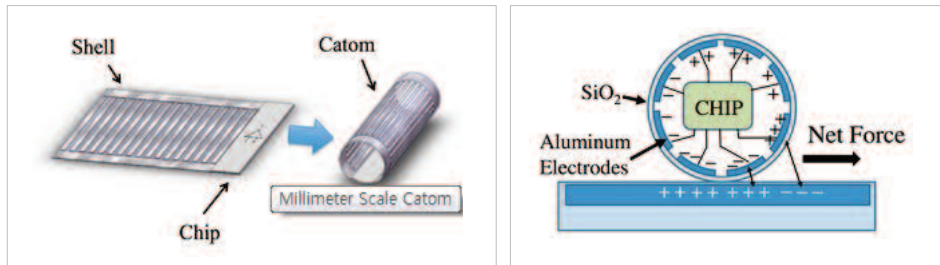


그림 3. 밀리미터 스케일 Catom. (좌)두 층의 응력차이로 스스로 3차원 형상으로 말려 튜브형상을 만든다 (우)스테이터와 껍질 사이의 전기력이 앞으로 움직이게 한다[6]

사용자와 로봇 간의 상호 작용은 Programmable matter을 위하여 필수적인 개념이다. Claytronics 연구팀은 이러한 기능을 구현하기 위하여 색이 변하고 외부의 충격과 위치에 따라 소리를 내 사용자와 교류할 수 있는 센티미터 스케일(40mm) Catom을 개발하였다. 각 블록은 자석을 이용해 연결되고 한 블록 당 최대 여섯 블록이 연결될 수 있다. 블록에는 RGB LED가 내장되어 있다. 여러 가지 색을 낼 수 있고, 기울어짐과 외력을 인지해 소리로 반응한다(그림 4).

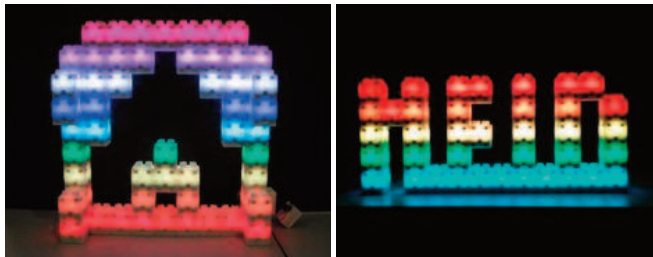


그림 4. Blinky blocks 한 블록 당 최대 여섯 블록이 연결되고, 여러 가지 색을 표현할 수 있다[7].

결합 매커니즘 개발[8-10]

모듈형 로봇에서는 단순하고 강한 모듈간 연결이 가장 기본적이면서 필수적인 기술이다. Claytronics 연구팀은 정전기력을 이용해 쉽고 강한 연결을 구현하였다(그림 5). 평행축전기를 이용하여 양쪽 판을 대전시키면 두 모듈이 연결된다. 정전기력으로 서로 당기는 힘으로 인해 두 모듈간에 전단력이 생겨 연결이 더욱 견고해진다. 서로 연결되는 판 사이에는 절연필름이 부착되어 있어 축전기에 전원을 꺼도 연결된 상태가 유지된다. Cube는 이 정전식 latch를 이용해 만든 육면체 형상의 Catom이다. 그림 6과 같이 중심으로부터 각 면 방향으로 웹기어 형상의 선형운동이 가능한 팔이 나와 있고, 그 끝에 정전식 latch가 붙어있는 형상이다. 팔의 이동으로 멀리 떨어져있는 다른 모듈에 연결되고 움직일 수 있다.



그림 5. 정전식 latch는 동일한 모양끼리 요철에 맞춰 결합된다. 나사와 달리 암수 구분이 없다[8].

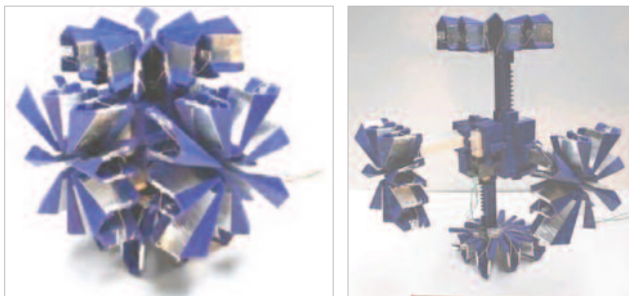
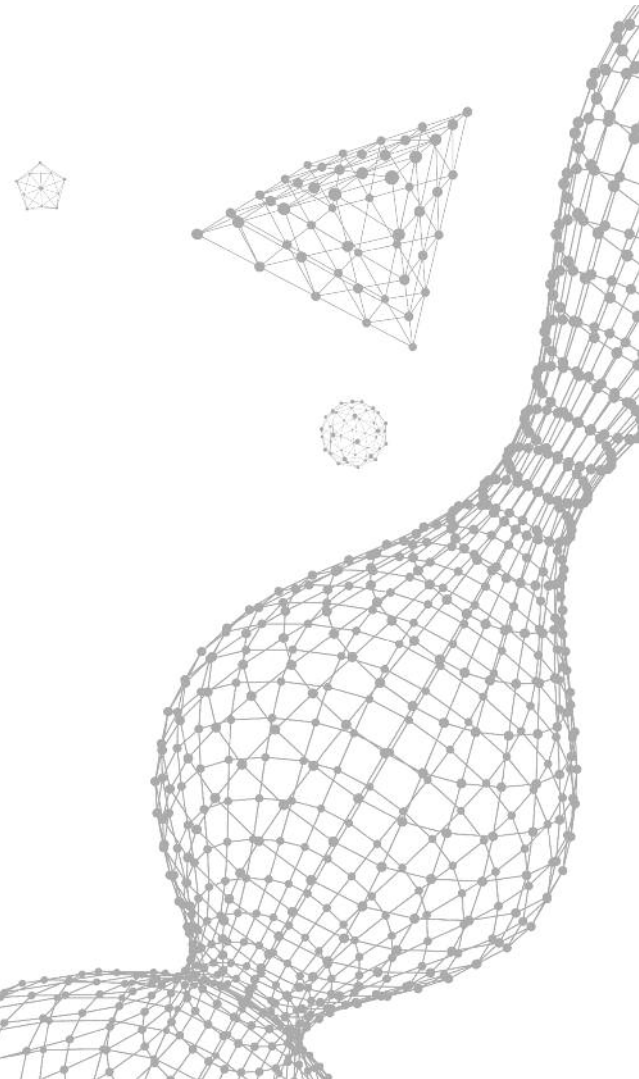


그림 6. 정전식 latch를 이용해 육면체 모양의 Catom을 만들었다. 그림과 같이 팔이 있어 각 면방향으로 latch를 이동할 수 있다[8].



MIT Daniela Rus 연구팀은 전자영구자석을 이용한 새로운 결합 방법을 제시하였다. 이를 이용하여 처음 개발된 로봇은 M-block 이라고 불리는 모듈형 로봇이다(그림 7). 이 로봇들은 어떤 물체를 구성하는 기본 단위가 되어 프로그래밍에 따라 이동하고 결합해, 마치 지능형 레고블록처럼 전체가 원하는 모양으로 변할 수 있는 가능성을 제시했다. 각 모듈은 외부와의 연결이 전혀 없는 한 변 길이 4.4cm의 정육면체 블록으로, 각 블록의 표면과 모서리에는 영구 자석으로 인한 자성에 의해 다른 블록과 합체가 가능하다. 또한, 내부에는 최대 분당 회전수가 20,000인 플라이휠이 내장되어 있어 이것의 회전에 의한 각운동량 보존 법칙에 의해 블록은 서로를 뛰어넘고, 점프를 하거나 이동을 하면서 특정 형상을 만들어낼 수 있다.

이후, 연구팀은 이를 발전시켜 모래 크기에는 미치지 못하나 한 변의 길이가 1cm인 정육면체 모양으로 모듈 크기를 줄인 자갈 로봇(Robot Pebbles)을 개발하였다. 모듈 속의 자석은 영구자석이 아닌 전자영구자석이기 때문에 모듈 간 접합과 분리가 용이하다. 이 모듈들은 블록들을 연결해 목표하는 형상의 외곽선을 만들고, 그 바깥의 블록은 연결을 끊고 떨어져 나가게 하는 식의 감산 방식 알고리즘을 사용하여 복잡한 3차원 형상을 구현하는데 성공하였다. 연구팀은 이어 그림 8과 같이 복제 대상물질의 형체를 인식하여 원본 형상을 복제하는 작업에도 성공하였다.

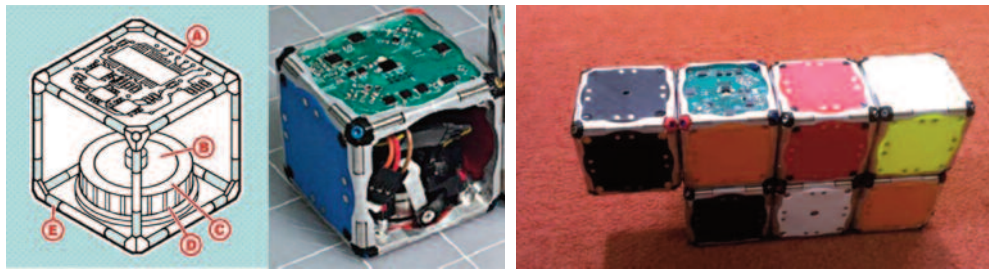


그림 7. Daniela Rus 교수 연구팀의 모듈형 로봇 M-block. (좌) M-block 내부 구조. 블록 한 면에는 기판이, 중앙에는 각 운동량을 발생시키는 플라이휠이 존재하며, 내부와 각 모서리에는 영구자석으로 이루어져 있다. (우) M-block이 알고리즘에 의해 서로 이동하고 결합하여 형상을 만든 모습[9]

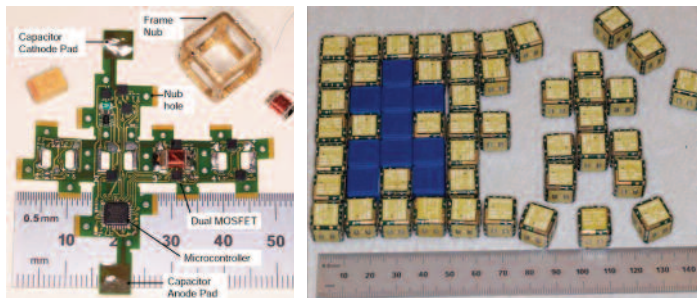
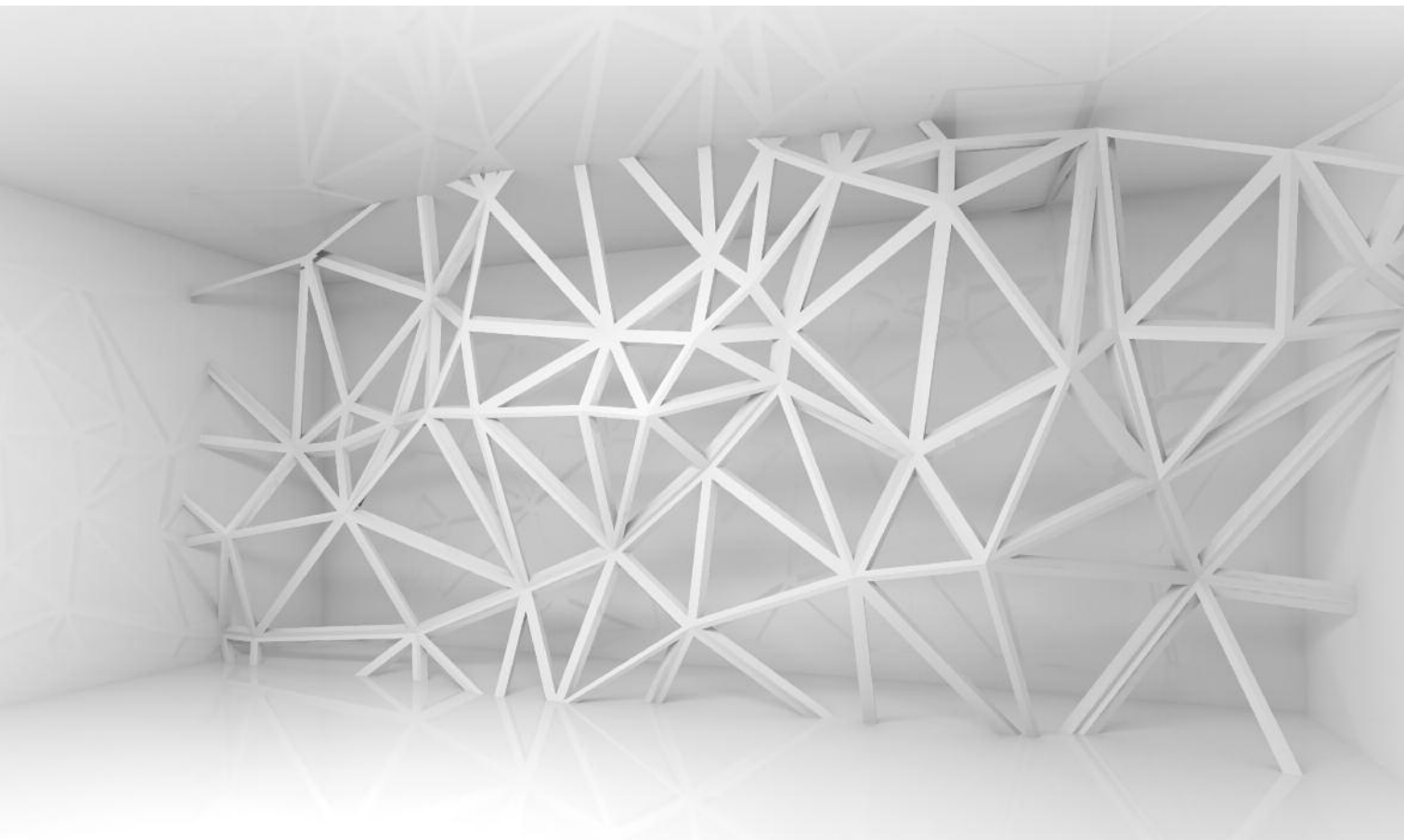


그림 8. Daniela Rus 교수 연구팀의 모듈형 로봇 Robot Pebbles. (좌) Robot Pebbles의 구성 요소. 4면에 전자 영구 자석을 사용하여 모듈 간의 상하좌우로 3차원 결합이 가능하다. (우) 주어진 형상을 인식하고 모듈들이 형상을 복제하여 구성한 모습[10]

군집 통신 기술의 발전[11, 12]

Harvard 공학 및 응용과학부 소속 Radhika Nagpal 연구팀은 수 조 개의 개별 세포들이 모여 지능을 가진 하나의 생명체를 형성하는 것과, 무리행동을 통해 전체 시스템의 균형과 존속을 유지하는 개미, 꿀벌 등의 생명 시스템의 창발적(emerging) 원리에 착안하여 군집 로봇 시스템이 특정한 형상을 가지거나, 기능을 가질 수 있는 알고리즘을 개발하고 있다.

연구팀은 군집 로봇 제어 이론을 개발하여 2014년, 개미나 꿀벌과 같은 사회성 곤충으로부터 'Stigmergy' 개념을 적용한 로봇용 알고리즘을 개발하였다. Stigmergy란, 마치 흰개미가 집을 지을 때 개별 개미가 전체 시스템의 상황을 파악하고 개인의 행동을 결정하는 것이 아닌, 단지 주변 상황에 남겨진 정보를 통해 자신의 행동을 결정하고 이로부터 협동을 이끌어 낼 수 있다는 개념이다. 흰개미는 집을 짓기 위해 흙을 운반할 때 목표지점에 이미 흙이 차있으면 자연스럽게 옆쪽으로 가서 흙을 내려놓는데 이때 자기 앞 흰개미가 남긴 화학물질과 흙이 쌓여가는 모양에 따라 행동한다. 이를 적용하면, 각자의 개미가 구조물의 전체적인 형상이나 공정 수준 혹은 다른 개미의 행동에 대한 인식 없이도 엄청난 규모의 구조물을 만들어내는 것이 가능하다. 흰개미 로봇은 길이 18cm의 소형이며, 4개의 센서와 푸시버튼만을 내장하고 있어 작동이 쉽고 견고하다. 로봇들은 센서에 의해 가까운 부분만 감지할 수 있고 로봇 상호간 제한된 신호만 받을 수 있지만 그림 9와 같이 최초로 입력한 구조물을 협동하여 짓는 데 성공하였다.



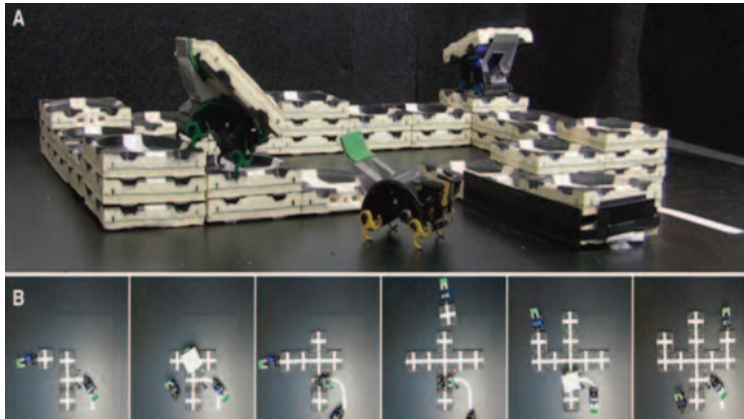


그림 9. 흰개미 로봇이 구조물을 짓고 있는 모습. 프로그래밍에 의해 구조물의 형상이 입력되면 흰개미 로봇들은 이후 추가적인 명령 없이도 전체 구조물을 지어낸다[11].

이후, 연구팀은 이에 적용된 알고리즘을 바탕으로 개별 개체를 더욱 소형화하며 1,024개의 로봇으로 이루어진 군집 로봇 시스템 Kilobot을 개발하였다. 서로 간 정보를 전송하고 협력하는 군집 로봇의 알고리즘에 의해 전체 시스템은 입력에 따른 특수한 형상을 만들어 내는데, 입력된 프로그램의 변화에 의해 다른 형상 및 기능을 가지는 만능 시스템으로서 역할을 수행할 수 있다.

Kilobot을 구성하는 개별 소형 로봇(그림 10)은 동전 크기이며 세 발에 적외선 송수신기를 장착하고, 진동 모터의 진동에 의해 움직인다. Kilobot들은 서로 간 신호를 주고받으며 전체 목표에 따라 자신의 행동을 결정하고 움직여 미션을 수행하며, 현재 그림 10과 같이 여러 가지의 형상-알파벳 문자, 불가사리, 런치 등을 형성하는 데에 성공하였다. 몇 개의 Kilobot이 좌표 중심을 형성한 후 다른 로봇들에게 완성해야 할 이미지를 전송하고, 각 로봇들은 적외선 송수신기를 통해 좌표로봇 및 주변로봇과의 거리를 측정하며 자신이 위치할 자리를 찾아가게 된다.

이 연구팀은 궁극적으로 개별 로봇의 크기를 나노 사이즈에 근접하게 작게 만들어, 마치 무수한 세포들이 유기적으로 연결되어 생명체를 이루듯, 전체로서 하나의 협력하는 군집이 되어 정교한 미션을 수행하는 집단 인공지능 시스템을 구축하는 것을 목표로 하고 있다.

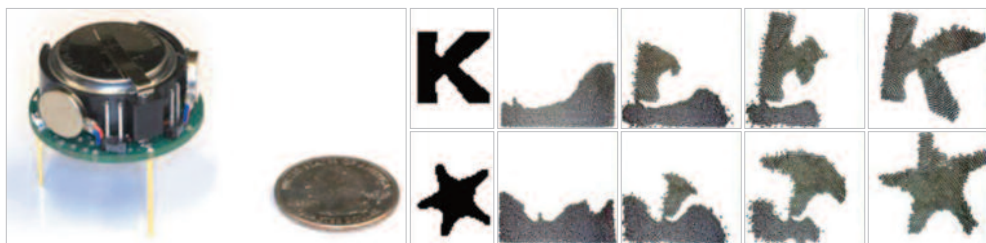


그림 10. Radhika Nagpal 교수팀의 Kilobot 시스템. (좌) 개별 Kilobot의 모습. 전체 시스템은 1,024개의 Kilobot으로 이루어진다. (우) Kilobot들이 알파벳 K와 불가사리 형상을 형성하는 모습[12]

03



다기능 모듈 기술의 발전

모듈형 로봇은 단순한 모듈들로 구성되어 주어진 목표에 따라 배열을 바꾸어 다양한 기능을 수행할 수 있다. 이 시스템은 환경에 적응성이 좋고 스스로 수리할 능력이 있어 정확한 목표달성이 용이하다. UPenn의 Mark Yim 연구팀은 기존의 모듈형 로봇에서 더 나아가 소형 비행체, 생체모방, 개인용 로봇 등에 적용하려 하고있다.

기존의 모듈 개념에서 벗어나 부드러운 소재를 활용한 모듈을 제작하고자 하는 시도 또한 이루어지고 있다. 화학자인 George Whiteside 교수가 이끄는 연구팀은, 자가결합, 미세유체공학, 소프트 로보틱스, 재료역학, 정보화학 등 수많은 분야를 연구하고 있다. 연구진이 선도하는 소프트 로보틱스는 강성이 강한 재료를 사용하는 기존 로봇공학과는 달리 고분자 화합물과 같은 부드러운 재료를 이용하여 로봇을 제작하는 연구 분야로, 유연한 몸체를 가져 충격에 강하고 자유자재로 스스로의 형태를 바꿀 수 있다는 장점이 있다.

다양한 모션의 구현[13]

이동기능은 모바일 로봇의 가장 기본적인 기능이다. 다리, 바퀴 등을 이용하거나 뱀 형상 거동, 심지어 아메바의 움직임까지 여러 이동 방법들이 연구되고 있다. 각 이동방식은 다른 환경에 적합하고 환경에 따라 좋은 효율을 낼 수 있는 이동을 해야 한다. CKbot은 전체형상이 변할 수 있어 다양한 방법의 이동이 가능하다(그림 11). 그 중 가장 빠른 속도를 가지는 것은 구르기이다. 이 움직임에는 센서기반 피드백 컨트롤러가 사용된다. 자신의 모양을 센싱하고 형상을 원모양으로 바꾼다. 그리고 지면과 접촉하는 위치보다 앞쪽으로 무게중심을 이동시켜 앞으로 구를 수 있다. 가장 빠른 속도는 26 module length/sec(1.6m/s)이다.

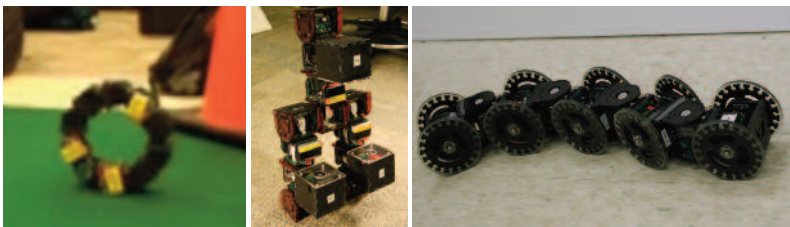


그림 11. Ckbot의 형상에 따른 이동방식 구르기, 걷기, 바퀴이용[13]

자가 재 배열 및 조립[14, 15]

자동차 범퍼가 충격을 받으면 찌그러지는 것처럼 이 로봇도 충격을 완화하기 위해 충격을 받으면 모듈간의 결합이 풀리고 다시 연결이 된다. MSR(Modular Self-Reconfigurable) robots의 핵심 기능 중 하나는 자가수리 능력이다. 해당 기술을 적용한 로봇은 분리되면 각 조각에서 불을 깜빡 거리고, 그 불빛을 통해, 서로를 인지하고 가까이 다가가 연결된다(그림 12). 또한 연결 중 다시 충격을 받아 연결과정에 방해를 받아도 다시 서로 연결되도록 기능을 수행한다.



그림 12. Ckbot의 형상에 따른 이동방식 구르기, 걷기, 바퀴이용[13]

Xbot은 격자스타일의 자가 재배열 로봇이다. 이 로봇은 외력으로 재배열을 위한 움직임을 구동한다. MSR robotics의 핵심적인 목표는 다수의 작은 모듈화이다. 많은 모듈을 제어할 수 있으면 더 다양한 형상을 만들 수 있다. 그리고 모듈을 작게 만드는 것은 더 작은 형상을 만들 수 있으며 더 높은 해상도로 전체 형상을 만들 수 있게 한다. 이 로봇은 외력으로 재배열을 하기 때문에 재배열을 위한 모터나 서보 등이 각 모듈에 들어갈 필요가 없어져 각 모듈의 크기가 작아질 수 있다.

모듈은 자석과 형상기억합금(SMA, Shape Memory Alloy)로 이루어져있다. X모양의 중심에서 여러가지 방향으로 형상기억합금이 연결되고, 그 끝에 영구자석이 붙어있다. 모듈끼리는 자력으로 연결되고 연결을 풀 때에는 형상기억합금에 열을 가해 자석을 중심방향으로 당겨 자석이 서로 떨어지게 한다. 재배열은 타원형으로 회전하는 판 위에서 이루어진다. 한 모듈은 판에 고정되고 재배열이 필요한 부분의 연결을 풀고 판을 원하는 재배열 형상에 따라 회전시킨다. 이 회전으로 생기는 모듈의 원심력으로 재배열이 이루어진다(그림 13).



그림 13. 외력을 이용한 재배열. 아래 판이 조건에 맞게 회전하고 판 위에 있는 로봇에 생기는 원심력으로 배열을 바꾼다[15].

소프트 모듈형 로봇[16, 17]

소프트 로봇은 고분자 화합물을 재료로 하므로 일반적으로 사출 몰딩을 이용하여 제작하게 된다. 또한, 소프트 로봇의 구동은 보통 공압을 이용하는데, 이러한 문제 때문에 지금까지 로봇 전체를 몰딩하는 방법으로 소프트 로봇을 제작해 왔고, 따라서 프로토타입의 빠른 제작이 힘들었다. 이러한 문제에 대한 해결책으로, Whiteside 연구팀은 레고 블록 또는 자석을 응용한 조립 소프트 로봇을 개발하는데 성공하였다. 각 소프트 로봇 하나하나를 정육면체 또는 직육면체 모양의 레고 블록형태로 만들어 사용자가 조립할 수 있게 한 것이다. 각 블록은 재료가 조금씩 달라서 강성 차이에 의해 다르게 부풀어 올라 원하는 방향으로의 굽힘 등 사용자의 의도에 따라 여러 가지 동작을 구현할 수 있다(그림 14좌). 연구진은 또한 다른 연구에서 소프트 로봇의 이음부에 자석을 넣어 각 부분간의 결합이 쉽게 하였다(그림 14우). 이를 응용하면 소프트 로봇의 다리를 붙였다 떼거나, 그리퍼의 마디 개수를 사용자가 자유롭게 조절할 수 있게 된다.

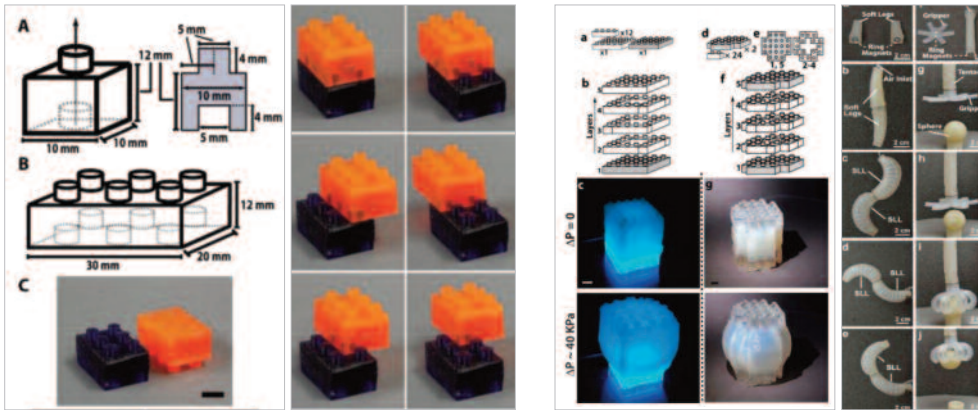
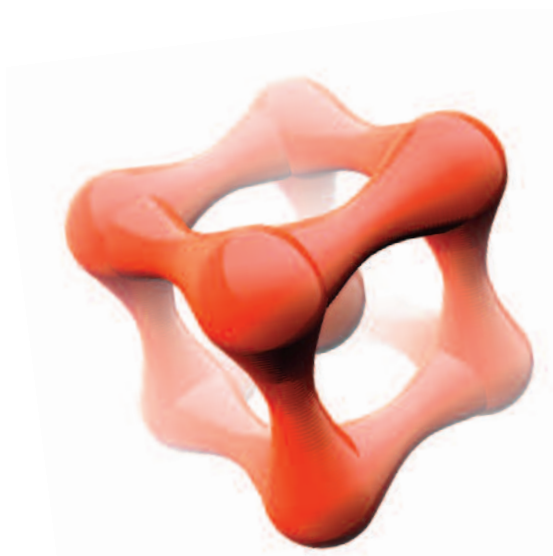


그림 14. (좌) 각 소프트 로봇을 레고처럼 만든 뒤 각 파트들을 조립하고 공압을 가하면 강성차이에 의해 의도한 대로 로봇이 동작한다. (우) 소프트 로봇 파트에 자석을 넣어 자기력으로 접합시켜 구동한다[16, 17].



04

종이접기형 Programmable Matter

종이접기 구조의 가변성은 예로부터 많은 수학자와 공학자로부터 관심을 받아왔다. 종이접기 구조에 Programmable matter라는 이름을 직접 붙여서 사용하기 시작한 것은 비교적 최근인 2010년 MIT D. Rus 그룹의 논문이지만[18], 그 개념은 DNA를 접어서 나노 스케일의 빌딩 블록을 만드는 1982년 Nadrian Seeman의 논문에서부터 이미 활용되기 시작하였다고 볼 수 있을 것이다[19]. 나노 스케일에서는 구조물 제작에 있어서 가공이 불가능할 뿐만 아니라 인위적인 배치도 거의 불가능하다. 그렇기 때문에 자가 조립형 종이접기 구조가 이 분야에서 가장 먼저 제시된 것은 어떻게 보면 필연적인 일이었을 것이다. 이후 이런 나노 스케일의 초소형 구조 및 나노 로봇은 생체 내의 특정 타겟을 추적하거나 약물을 운반하고 특정 기능을 수행하는 등 다양한 활용 분야를 목표로 연구 개발 중이다.

나노 스케일의 종이접기형 구조가 특정 형상을 만드는 것이 목표였다면, D. Rus 그룹은 종이접기 구조가 주는 다른 이점에 주목하였다. 종이접기 구조는 다양한 형상으로 변화할 수 있음에도 불구하고 모듈형 로봇의 문제점인 모듈간의 통신과 배열 및 결합 문제에서 자유로울 수 있었다. 연구팀은 다양한 형상으로 변할 수 있는 접는 선을 설계하고 지능형 구동기 등을 활용함으로써 종이접기를 활용한 Programmable matter의 구현이 가능함을 보여주었다.

DNA Origami

DNA Origami 기술이란 긴 DNA사슬을 특정 형태로 접어 원하는 형상을 만드는 기술을 의미한다. DNA의 폭이 약 2 nm 임을 감안 하였을 때 이는 나노 스케일의 기계 요소나 로봇을 제작하는데 핵심 기술이 될 수 있다. 2006년 Caltech Paul Rothemund 교수의 Nature 논문에서 발표된 DNA Origami를 위한 획기적인 기술은 이러한 개념에 대한 연구가 본격적인 궤도 위에 오를 수 있도록 하였다[20].

그림 15는 DNA Origami 구조 제작 방법의 모식도를 나타낸다. DNA Origami 구조는 길이가 긴 주 DNA 가닥과 짧은 DNA Staple로 구성된다. DNA Staple이라 명명된 짧게 이 끊어진 DNA 조각들이 구조를 형성하는 핵심 역할을 수행한다. 적절히 디자인된 DNA Staple들은 주 DNA와 그에 상응하는 위치에 접합하게 되고 이러한 자가 조립 방법을 통하여 특정 구조를 형성하게 된다(그림 16). 여기에 더 나아가 Harvard 의 William Shih 연구팀, G. Church 연구팀 등이 3차원 구조의 형성, 로봇 메커니즘의 제작 등 더욱 다양한 시도들을 진행 중이다(그림 17)[21].

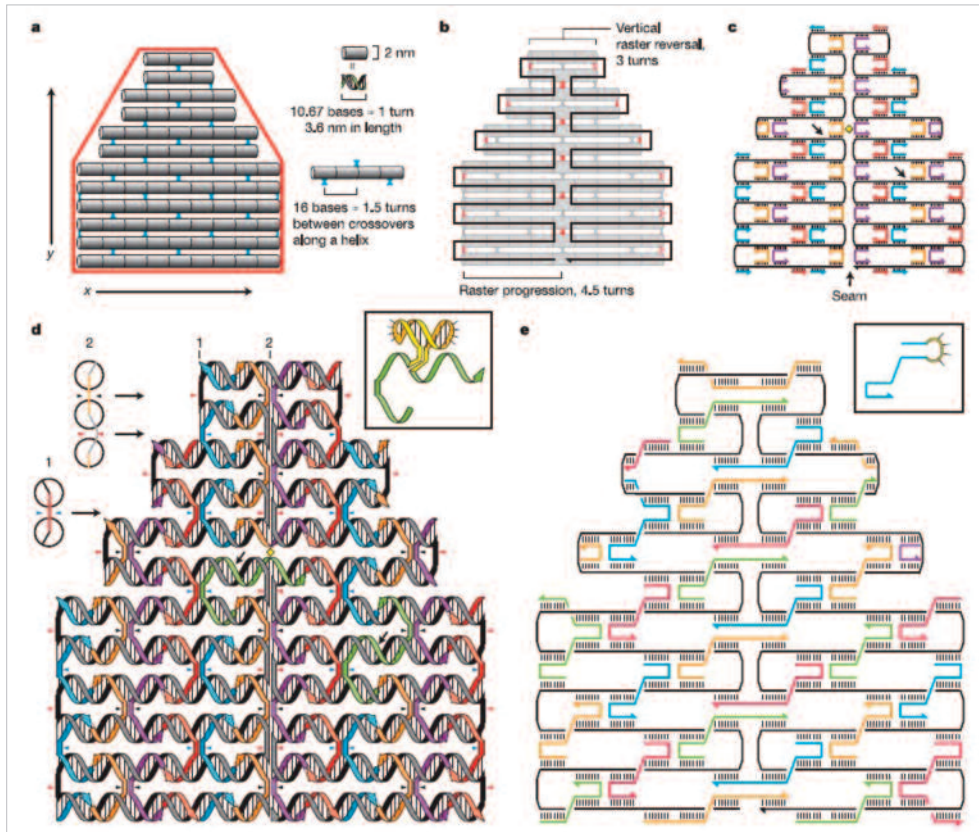


그림 15. Caltech Paul Rothemund 교수에 의하여 제안된 Origami 모식도, Staple DNA라 명명된 짧은 DNA 조각에 의하여 스스로 특정 형상으로 조립된다[20].

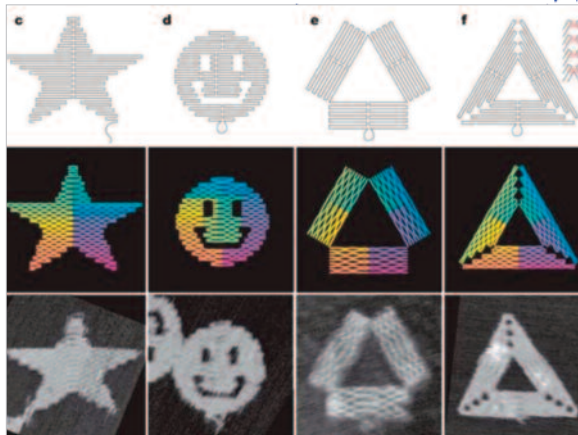


그림 16. DNA Origami를 이용하여 제작한 다양한 2차원 형상들

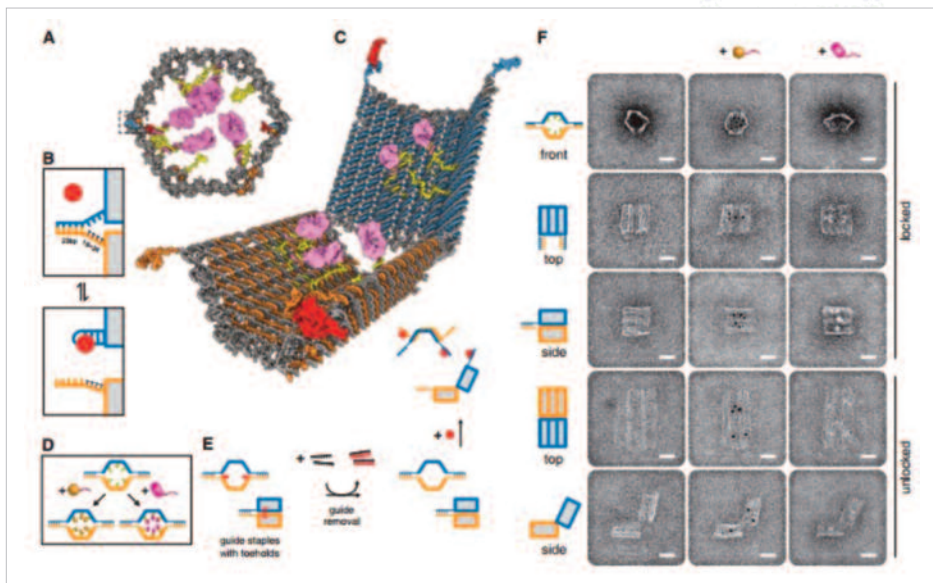
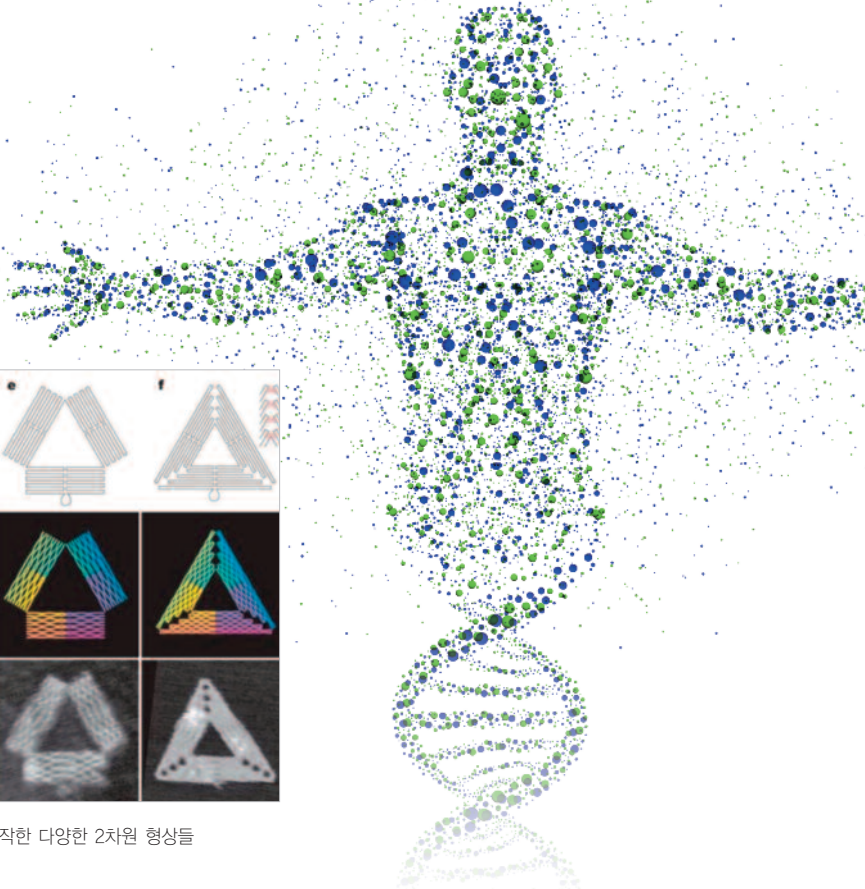


그림 17. DNA Origami를 이용한 Nano Robot. 특정 물질을 잡아서 옮길 수 있다[21].

다양한 형상으로 변화하는 종이접기 구조[18, 22]

MIT Daniela Rus 연구팀은 종이 접기를 이용한 Programmable matter 개념의 첫 번째 예로써 자가 접힘 시트를 구현하였다. 자가 접힘 시트는 상자 주름 패턴(Box-pleat Pattern)이라는 종이접기 패턴을 띠는데, 이 패턴은 MIT Demaine 교수의 연구에 의해 충분히 큰 2차원의 상자 주름 패턴을 이용한다면 모든 3차원 형상을 그로부터 접어 만들 수 있다는 것이 밝혀진 만능 패턴이다.

자가 접힘 시트의 모습은 다음 그림 18의 좌측과 같은 한 타일의 변 길이가 1cm인 작은 시트이다. 시트의 모든 주름에는 해당 방향으로 접힐 수 있게끔 편평한 모양의 형상 기억 합금 구동기가 부착되어 있고, 외부에서 전류가 흐르면 회로 상에 위치한 구동기 그룹이 작동하여 그림 18의 우측과 같이 같이 시트가 접히며 전체적으로 특정한 입체 형상을 나타낸다. 시트의 주름 부분은 필요에 따라 접히는 변형이 가능하도록 탄력성이 있는 수지인 유리섬유와 탄화수소 물질로 이루어져 있고, 각 면에는 자석이 있어 인접한 면과 일정 이하의 간격일 때 부착되어 고정된다. 연구팀은 하나의 시트에서 비행기, 배, 모자 등과 같은 다양한 형상을 접어 형성하는 것에 성공하였다. 이와 더불어 몇 가지의 다른 모양을 하나의 시트에서 구현할 때 가장 적은 구동기의 숫자를 결정하는 알고리즘, 그에 따른 회로 배열 메커니즘 등의 연구 또한 진행되고 있다.

또한, 연구팀은 여기에서 더 나아가 더욱 다양한 입체의 형상을 구현하기 위한 시트 및 주름의 패턴을 도출하는 알고리즘을 수행하는 프로그램을 개발하였다. 이 프로그램에 의하면 그림 19와 같이 사용자가 입력한 3차원의 입의 형상이 입력되면 이를 간소화한 메쉬를 구성한 후 이를 2차원의 시트 형태로 변환하여 준다. 그 후 이를 자가 조립하기 위한 복합재료의 디자인을 도출할 수 있고, 이를 통해 토끼 모양의 입체 형상이 자가 조립되어 나타난다.

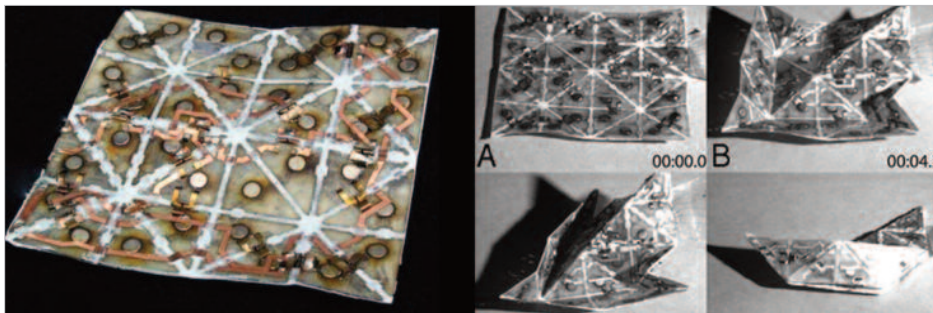


그림 18. Daniela Rus 연구팀이 개발한 자가 조립 시트. (좌) 시트의 모습 (우) 배 형상으로 접히는 시트의 모습[18]

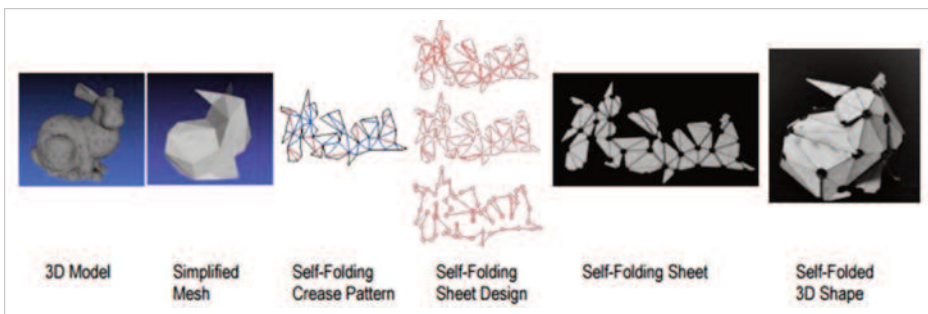


그림 19. 입체의 3차원 형상에서 자가 조립 시트와 주름 패턴을 도출하는 알고리즘을 이용한 토끼 형상 자가 조립[22]

Printable Robotics[23, 24]

종이 접기 구조를 활용한 3차원 형상의 구현은 좀 더 실제적인 활용을 위하여 변형을 특정 목표를 한정하고 이를 구현하려는 연구로 좁혀져 다시 진행되었다. 이러한 목적에서 탄생한 것이 ‘프린터블 로보틱스’라는 개념이다. 이는 평면 형상 혹은 운송, 저장이 간편한 형상으로 존재하다가, 필요 시 스스로 기능 형상으로 조립될 수 있는 자가 조립 기술의 개발을 통해 2차원 평면 형태로부터 로봇을 만들어내는 개념을 의미한다. 제작된 로봇은 2차원 형상에서 복잡한 3차원 형상을 만들어내는 종이접기의 원리에 착안하였으며, 외부에서 주는 전류로 인한 발열에 의해 수축하는 형상 기억 고분자(SMP, Shape Memory Polymer)를 구조체의 접는 선에 배열하여 스스로 접힐 수 있게 하였다. 그림 20의 좌측 그림은 이것을 적용한 스스로 접히는 학, 그리고 우측 그림은 이를 응용한 2차원 기반 자가 조립 센서의 모습을 나타낸다.

이후, Robert Wood 연구팀은 Daniela Rus, Erik Demaine의 연구팀과 공동연구를 통해 복합재의 적층 및 가공으로 이루어진 2차원 평면 형태의 시트에 배터리와 구동기만 조립하여 주면 이후에 스스로 모양 변형하여 자가 조립된 후 기능을 수행하는 변신 로봇(그림 21)을 제작하였고, 이는 2014년 Science지에 소개되었다.

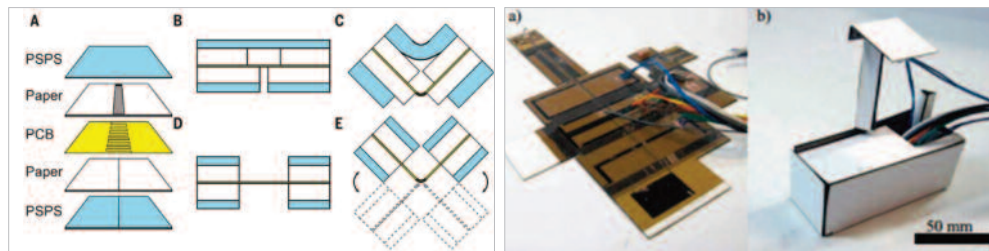


그림 20. Robert Wood 연구팀의 자가 조립 기술. (좌) 자가 조립을 위한 종이 접기 조인트의 원리. 접히지는 조인트를 형상 기억 고분자를 적용한 구조로 만들어 고온이 되었을 경우 변형되어 접히게 하였다[23]. (우) 자가 조립 기술을 응용한 2차원 기반 센서를 제작한 원리[23]

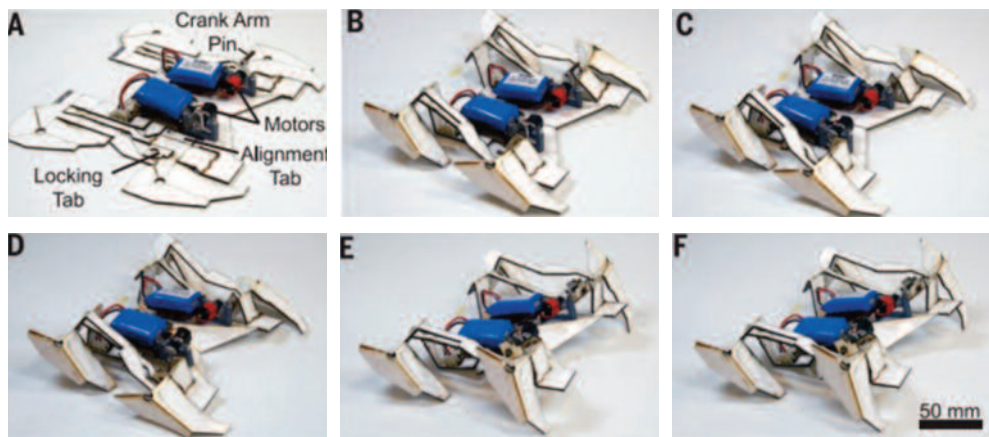


그림 21. 자가 조립이 가능한 종이접기 변신 로봇의 조립 및 구동 과정[24]

05

4D Printing - 3D Printing을 이용한 Programmable matter



2013년 설립된 MIT의 Self-Assembly 연구실은 건축학자이자 컴퓨터 공학자인 Skylar Tibbits가 이끌고 있다. 재료의 자가 변환과 물질들간의 자가 조립을 연구 주제로 하는 이 연구실은 3D 프린팅에서 시간, 또는 역동성을 추가한 4D프린팅을 기반으로 하여 '거의 대부분의 것들을 만드는 법'을 연구한다. 재료의 구조 자체를 패터닝한 뒤 열, 유체, 전기, 또는 진동을 통해 에너지를 가해 특정한 형상으로 변환시키는 연구부터 직육면체, 원, 정사면체와 같은 간단한 형태를 하나의 모듈로 하여 프로그래밍된 명령에 의해 조립된 면이 회전하거나 다른 면과 결합하는 연구 등 자가 변환 및 자가 조립을 주제로 다양한 적용 분야와 방법에 대해 여러 가지 연구를 진행하고 있다.

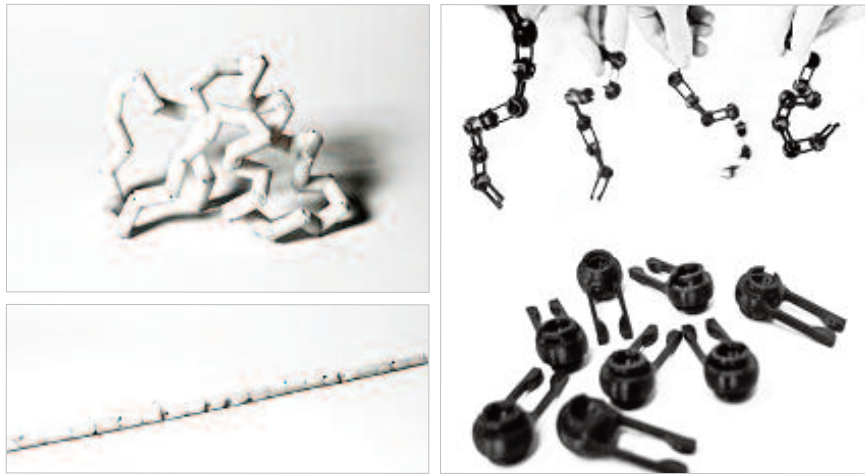


그림 22. (좌) Self-Folding (우) Proteins와 Biased Chain[25]

생명 현상을 모방한 자가 조립 구조[25]

Self-Folding Protein(그림 22좌)과 Biased Chains(그림 22우)는 Self-Assembly 연구실에서 개발한 선형의 자가 조립 구조이다. Self-Folding Protein은 선 형태의 단일 구조에 접히는 각도에 따라 적절한 형태의 홈을 새긴 것이다. 이 구조를 던지거나 흔들어 구조에 에너지를 전달해주면 각 홈이 마디가 되어 설계자가 의도한 대로 스스로 접히게 된다. Biased Chains는 이와 비슷하지만 각 마디를 사용자가 직접 조립할 수 있도록 설계되었다. 사용자가 각각의 마디를 접히는 방향과 최종 형태를 고려하며 손으로 조립한 뒤, 구조를 흔들기만 하면 그 형태로 구조가 변하게 된다. 두 가지 모두 생명체에서 리보솜이 RNA를 단백질의 접히는 구조로 번역하는 과정과 유사하며, 1차원 구조에서 3차원 구조로 변한다는 특징이 있다.

Autodesk 社와의 연계 프로젝트[26]

과거에는 재료를 가공하여 굽히려면 복잡한 장비와 많은 시간, 그리고 숙련된 기술이 필요하였다. 더군다나 재료 자체의 자연적인 패턴과 물리적 특성 때문에 복잡한 형상으로 굽히는 것은 매우 어려웠다. 하지만 복합재료 기술과 평면 프린팅 기술의 발달로 재료에 원하는 형태의 패턴을 자유자재로 새기는 것이 가능해졌고, 이를 응용하여 패턴에 따라 물체에 형상 변화를 저장한 후 특정 환경에 노출시키면 물체 스스로 형상이 변하도록 하는 것도 가능해졌다. 이러한 원리를 응용하여 Self-Assembly 연구실은 Autodesk 社와의 공동 개발로, 원하는 형상으로 재료 스스로 변화가 가능한 Programmable woods와 Programmable Carbon Fiber를 개발하였다(그림 23).

Programmable woods는 목재 복합체에 패턴 프린팅과 재료 적층 두께 차이를 통한 강성 차이를 만든 뒤 목재를 물에 넣으면 의도한 선에 따라 스스로 접히는 지능재료이다. 그림 23과 같이 3D프린터로 출력한 나무 코끼리 도면을 물에 넣으면 스스로 조립되어 완성되는 식으로, 미래에는 힘들여 조립할 필요 없이 가정에서 가구를 프린트하여 사용하는 것이 가능해질지도 모른다. Programmable Carbon Fiber는 위에서 소개한 것과 같이 패턴 프린팅과 적층으로 설계 가능하며, 재료에 열을 가하면 스스로 형태가 변화한다. 연구진은 슈퍼카 제작회사인 Briggs Automotive Company와 연계하여 이러한 탄소섬유를 자동차의 에어포일에 적용하려는 시도를 하고 있다.

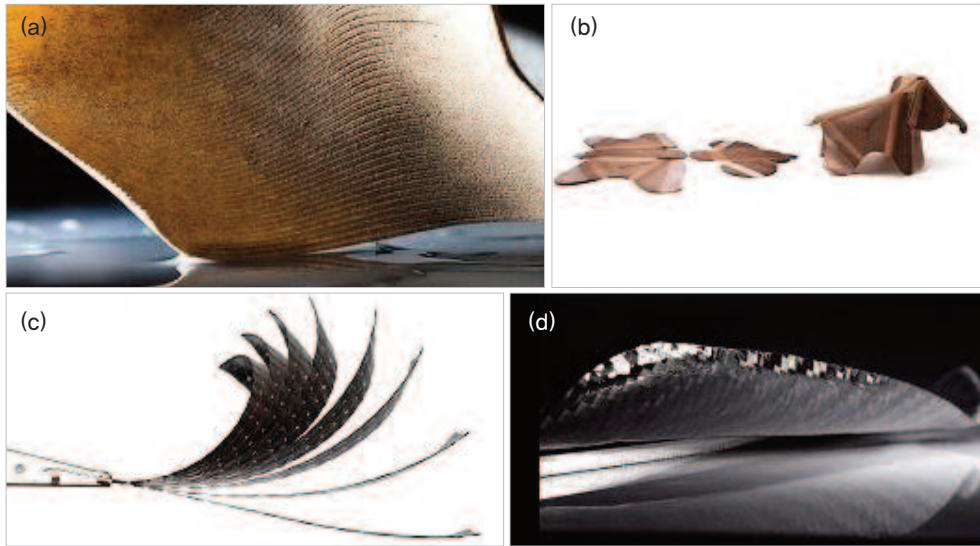


그림 23. (a,b) Programmable woods의 패턴링을 응용한 코끼리 도면을 프린트하여 물에 넣으면 스스로 완성된다. (c) Programmable Carbon Fiber와 (d) 이를 슈퍼카에 적용하여 제작한 에어포일[26]

Stratasys 社와의 연계 프로젝트[27, 28]

Skylar Tibbits 연구팀과 3D프린터 회사인 Stratasys는 다물질 3D 프린터(Multi material 3D printer)를 통한 4D프린팅을 연구하고 있다. 다물질 3D 프린터로 형상을 프린팅하면, 1차원 구조가 3차원 구조로 굽어지거나 2차원 구조가 의도된 선을 따라 접혀 3차원 구조가 되는 식이다. 이는 Stratasys에서 개발한 극친수성 고분자 복합체를 이용한 것으로, 물과 접촉하면 150퍼센트 팽창하는 성질 덕분에 다른 강성의 고분자 복합체와 함께 프린팅하면 다양한 자가변환 구조를 제작할 수 있다. 단단한 재료는 구조의 접히는 각도를 제한하는 역할을 하는데, 극친수성 고분자 복합체가 물과 접촉하여 구조가 접힐 때, 적절한 각도에서 단단한 재료들끼리 만나게 하여 더 이상 접히지 않게 한다. 이를 이용하여 연구진과 Stratasys는 물에 넣었을 때 'MIT'로 형상이 변하는 30cm길이 가량의 선형 구조와 물에 넣었을 때 큐브 형태가 되는 2차원 전개도를 프린팅하는데 성공하였다(그림 24).

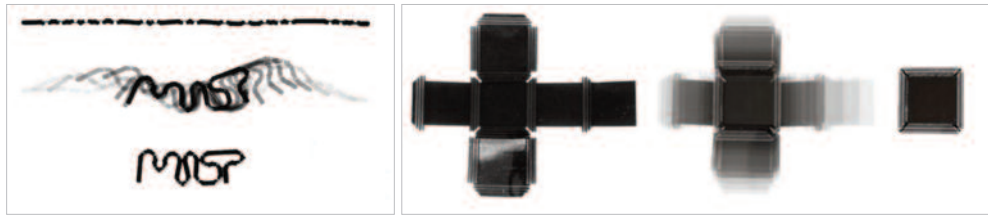


그림 24. (좌) 선형 구조를 프린팅하여 물에 넣었을 때, MIT로 형상이 스스로 변화하였다. (우) 큐브의 전개도를 프린팅하여 물에 넣었더니 스스로 조립되었다[27, 28].



06

결론



지금까지 Programmable matter의 구현을 위한 다양한 시도와 결과들을 살펴보았다. Programmable matter가 제시하는 비전은 매력적이지만 아직도 그를 위하여 필요로 하는 기술의 벽은 높다. Programmable matter에는 스스로 형상이 변할 수 있을 만큼 작으면서도 효율이 좋은 수 많은 구동기가 내재되어 있어야 하며, 이러한 다수의 구동기를 프로그래밍 된 결과에 따라 다양한 형상이 될 수 있도록 제어할 수 있는 제어기와 알고리즘이 필요하다. 개체들의 견고한 조립과 효율적인 분해를 위한 메커니즘이 필요하며, 이와 동시에 수많은 개체들의 제어를 위한 통신 기술과 알고리즘이 필요하다. 또한 각각의 개체에 에너지를 공급할 방법이 필요하며, 효율적인 제작을 위한 방법이 필요하다.

각각의 연구 이슈는 기존까지의 방법으로는 불가능한 창의적이고 도전적인 접근을 요구하며 이에 부응하기 위하여 연구자들은 지능재료의 활용, 다양한 에너지 전달 방법의 활용, 재료 변형의 활용에서 3D 프린팅의 활용까지 기존의 벽을 허물기 위하여 기계, 전자, 재료, 화학, 컴퓨터 공학을 아우르는 새롭고 다양한 융복합적인 접근을 시도 중이다.

이러한 극한의 응용분야를 위한 기술 개발은 비록 Programmable matter라는 목표에 당장은 근접하기 힘들다 할지라도 수 많은 파생 기술을 낳을 것이다. 모듈화 기술의 개발을 통한 다목적 모듈형 로봇 혹은 도구, 다량의 로봇 제어 및 통신 방법을 활용한 대규모 군집 로봇 활용, 지능재료를 활용한 자가 조립형 로봇, 초소형 메커니즘 제작 기술을 활용한 초소형 로봇 등 예상 가능한 파생 연구 분야 또한 무궁무진하다.

Programmable matter 기술과 그에 대한 파생 기술의 잠재적 가치는 가늠하기 어려울 정도로 크다. 지금은 Programmable matter 기술의 태동기라 할 수 있으며, 앞서 살펴 보았듯이 선진국에서는 원천 기술 선점을 위한 연구개발에 박차를 가하고 있다. Programmable matter는 기술적 장벽이 높은만큼 후발 연구 주자가 쉽게 개발할 수도 따라가기도 힘든 기술이 될 것이다. 따라서 원천 기술 선점을 위한 장기적 안목에서의 투자가 필요하다.



Cho kyu-jin

조규진

학력 • MIT 기계공학과 박사
서울대학교 기계설계학과 석사
서울대학교 기계설계학과 학사

경력 • 現 서울대학교 기계항공공학부 부교수
前 이탈리아 피사 Scuola Superiore
Sant' Anna 방문교수
前 미국 하버드 대학 연구원

4D Printing &
Programmable Matter

Reference

- [1] T. A. Campbell, S. Tibbits, and B. Garrett, "THE NEXT WAVE: 4D PRINTING," Atlantic, 2014.
 - [2] T. Toffoli and N. Margolus, "Programmable matter: concepts and realization," *Physica D: Nonlinear Phenomena*, vol. 47, pp. 263–272, 1991.
 - [3] <http://littlebits.cc/>.
 - [4] <http://www.modrobotics.com/cubelets/>.
 - [5] <http://www.projectara.com/>.
 - [6] M. E. Karagozler, A. Thaker, S. C. Goldstein, and D. S. Ricketts, "Electrostatic actuation and control of micro robots using a post-processed high-voltage soi cmos chip," in *Circuits and Systems (ISCAS), 2011 IEEE International Symposium on*, pp. 2509–2512, 2011.
 - [7] B. T. Kirby, M. Ashley-Rollman, and S. C. Goldstein, "Blinky blocks: a physical ensemble programming platform," in *CHI'11 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1111–1116, 2011.
 - [8] M. E. Karagozler, J. D. Campbell, G. K. Fedder, S. C. Goldstein, M. P. Weller, and B. W. Yoon, "Electrostatic latching for inter-module adhesion, power transfer, and communication in modular robots," in *Intelligent Robots and Systems, 2007. IROS 2007. IEEE/RSJ International Conference on*, pp. 2779–2786, 2007.
 - [9] J. W. Romanishin, K. Gilpin, and D. Rus, "M-blocks: Momentum-driven, magnetic modular robots," in *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2013 IEEE/RSJ International Conference on*, pp. 4288–4295, 2013.
 - [10] K. Gilpin, A. Knaian, and D. Rus, "Robot pebbles: One centimeter modules for programmable matter through self-disassembly," in *Robotics and Automation (ICRA), 2010 IEEE International Conference on*, pp. 2485–2492, 2010.
 - [11] J. Werfel, K. Petersen, and R. Nagpal, "Designing collective behavior in a termite-inspired robot construction team," *Science*, vol. 343, pp. 754–758, 2014.
 - [12] M. Rubenstein, A. Cornejo, and R. Nagpal, "Programmable self-assembly in a thousand-robot swarm," *Science*, vol. 345, pp. 795–799, 2014.
 - [13] J. Sastra, W. G. B. Heredia, J. Clark, and M. Yim, "A biologically-inspired dynamic legged locomotion with a modular reconfigurable robot," in *ASME 2008 Dynamic Systems and Control Conference*, pp. 1467–1474, 2008.
 - [14] M. Yim, B. Shirmohammadi, J. Sastra, M. Park, M. Dugan, and C. J. Taylor, "Towards robotic self-reassembly after explosion," *Departmental Papers (MEAM)*, p. 147, 2007.
 - [15] P. J. White and M. Yim, "Scalable modular self-reconfigurable robots using external actuation," in *Intelligent Robots and Systems, 2007. IROS 2007. IEEE/RSJ International Conference on*, pp. 2773–2778, 2007.
 - [16] S. A. Morin, Y. Shevchenko, J. Lessing, S. W. Kwok, R. F. Shepherd, A. A. Stokes, et al., "Using "Click-e-Bricks" to Make 3D Elastomeric Structures," *Advanced Materials*, vol. 26, pp. 5991–5999, 2014.
-

-
- [17] S. W. Kwok, S. A. Morin, B. Mosadegh, J. H. So, R. F. Shepherd, R. V. Martinez, et al., "Magnetic assembly of soft robots with hard components," *Advanced Functional Materials*, vol. 24, pp. 2180–2187, 2014.
- [18] E. Hawkes, B. An, N. Benbernou, H. Tanaka, S. Kim, E. Demaine, et al., "Programmable matter by folding," *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 107, pp. 12441–12445, 2010.
- [19] N. C. Seeman, "Nucleic acid junctions and lattices," *Journal of theoretical biology*, vol. 99, pp. 237–247, 1982.
- [20] P. W. Rothemund, "Folding DNA to create nanoscale shapes and patterns," *Nature*, vol. 440, pp. 297–302, 2006.
- [21] S. M. Douglas, I. Bachelet, and G. M. Church, "A logic-gated nanorobot for targeted transport of molecular payloads," *Science*, vol. 335, pp. 831–834, 2012.
- [22] B. An, S. Miyashita, M. T. Tolley, D. M. Aukes, L. Meeker, E. D. Demaine, et al., "An end-to-end approach to making self-folded 3D surface shapes by uniform heating," in *Robotics and Automation (ICRA), 2014 IEEE International Conference on*, pp. 1466–1473, 2014.
- [23] S. Felton, M. Tolley, E. Demaine, D. Rus, and R. Wood, "A method for building self-folding machines," *Science*, vol. 345, pp. 644–646, 2014.
- [24] B. Shin, S. M. Felton, M. T. Tolley, and R. J. Wood, "Self-assembling sensors for printable machines," in *Robotics and Automation (ICRA), 2014 IEEE International Conference on*, pp. 4417–4422, 2014.
- [25] S. Tibbits, "4D Printing: Multi-Material Shape Change," *Architectural Design*, vol. 84, pp. 116–121, 2014.
- [26] <http://www.selfassemblylab.net/ProgrammableMaterials.php>.
- [27] S. Tibbits, "Design to Self-Assembly," *Architectural Design*, vol. 82, pp. 68–73, 2012.
- [28] D. Raviv, W. Zhao, C. McKnelly, A. Papadopoulou, A. Kadambi, B. Shi, et al., "Active Printed Materials for Complex Self-Evolving Deformations," *Scientific reports*, vol. 4, 2014.
-

국가 R&D 현황 분석

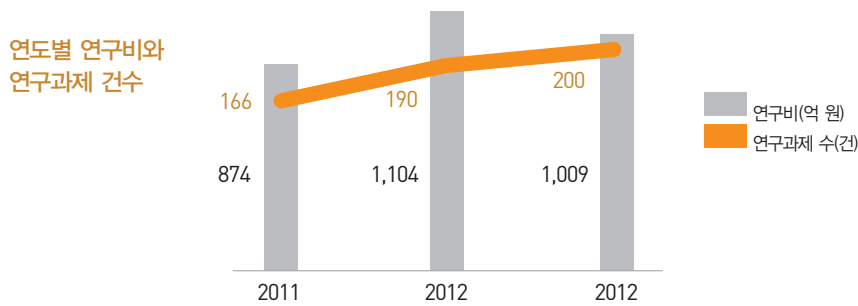
4D 프린팅과 프로그래머블 매터의 경우 아직 우리나라에서는 연구가 진행되지 않고 있어, 국가연구개발사업 분석 수행이 불가능하였다.

이에 프로그래머블 매터의 전 단계이자 개념 실행을 위해 필요한 기본연구라고 할 수 있는 화학분야 기반의 자가조립(Self-Assembly) 연구와 로봇 분야의 군집 로봇/모듈형 로봇에 대한 연구개발사업에 대하여 분석해 보았다.

과제 선별 기준
연구요약문 내 아래 키워드를 포함하고 있는 과제를 선별한 후 연구내용을 바탕으로 분석 대상 선정 ((자가) and (조립)and(!분자가)), or ((모듈) and (로봇)) or(군집) and (로봇))

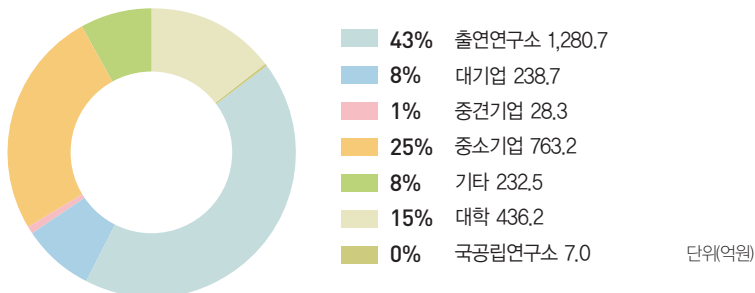
분석 결과 프로그래머블 매터의 이전 단계의 연구인 자가조립과 군집/모듈형 로봇에 대해서는 최근 3년간 총 556건의 과제에 2,986억원의 연구비가 투자됨

- 많은 연구비가 투자되고 연구가 활발히 이루어지고 있는 만큼 다음 단계의 연구라 할 수 있는 프로그래머블 매터 분야에 대한 연구 수행 독려를 통해 대한민국이 전세계 프로그래머블 매터를 선도해 나갈 가능성이 높음.



(연구수행주체) 출연연구소가 70건의 과제에 대해 1,281억원을 지원받아 큰 규모의 연구를 주로 수행하였으며, 대학이 243건의 과제에 대하여 436억원을 지원받아 가장 많은 연구를 수행함

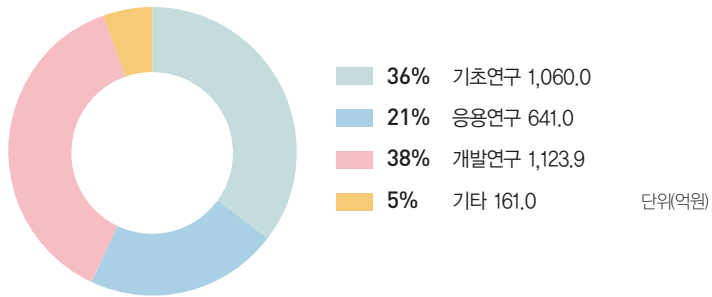
- 군집/모듈로봇의 경우 많은 연구개발 노하우의 축적을 바탕으로 중소/중견기업(27%, 792억원), 대기업(8%, 239억원)의 연구개발도 활발히 이루어지고 있는 것으로 나타남



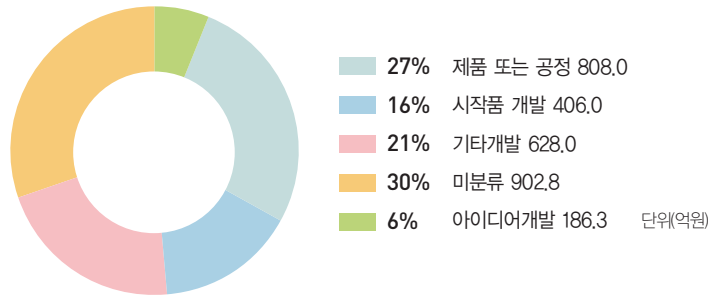
(연구수준) 연구개발단계는 개발연구가 38%, 연구개발성격은 제품 또는 공정 개발이 27%로 가장 높게 나타났으나 기술수명주기는 도입기가 57%로 가장 높게 나타남

- 일반적인 국가연구개발사업과는 다르게 기초연구(36%)나 응용연구(21%)보다 개발연구가 더 활발히 수행되고 있음
- 연구개발성격 또한 아이디어 개발(6%)보다는 제품 또는 공정 개발(27%), 시작품 개발(16%)이 높게 나타나 기초적인 연구를 넘어 실제 활용 가능성 여부를 타진하는 연구가 주를 이루고 있음
- 기술수명주기는 도입기가 가장 높게 나타난 것은 현재의 자가 조립 및 군집/모듈형 로봇 기술이 4D 프린팅이나 프로그래머블 매터와 같은 다음 단계로의 기술 발전 가능성 및 기술 활용 가능성이 높음을 의미함

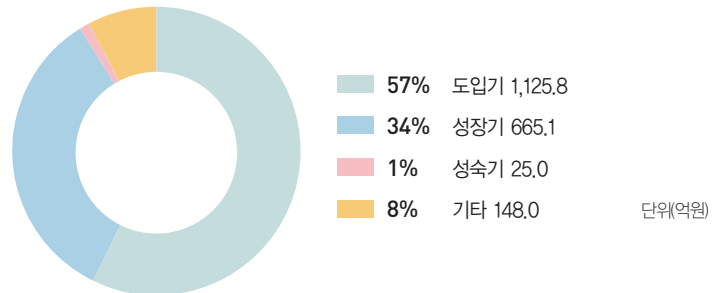
연구개발단계



연구개발성격

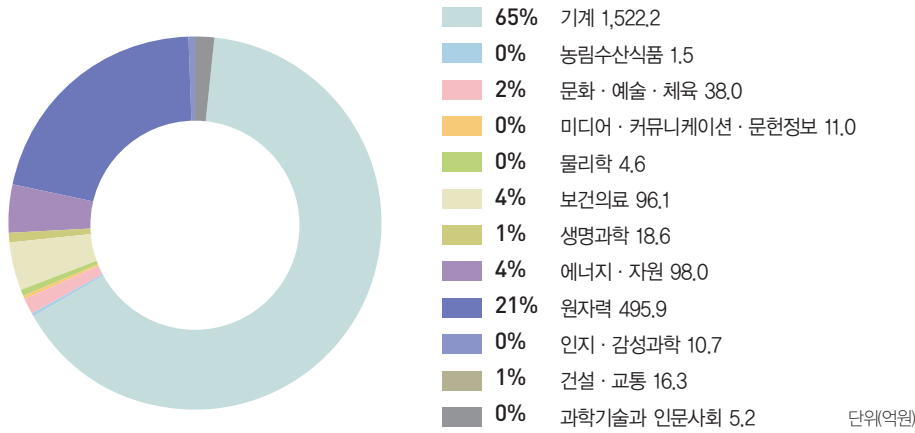


기술수명주기

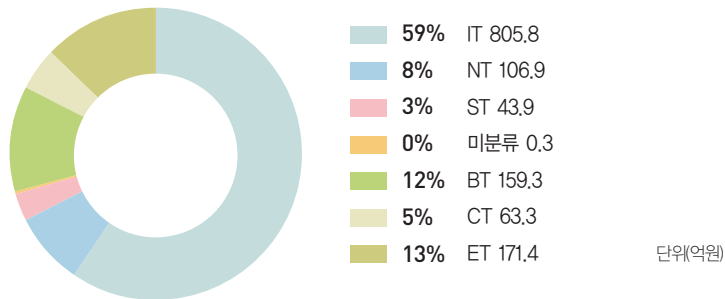


(연구분야) 국가과학기술표준분류와 미래유망 신기술분류(6T), 국가기술지도분류(NTRM)를 분석한 결과 기계 분야를 중심으로 연구가 이루어져, IT 기술, 정보-지식-지능화 사회 구현을 위해 활용될 것으로 기대됨

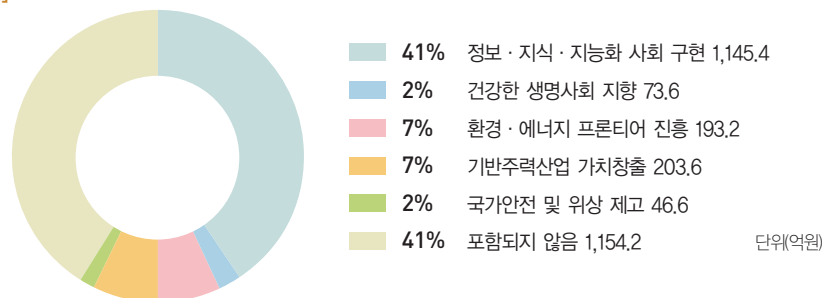
연구분야 [국가과학기술표준분류]



연구분야[6T]



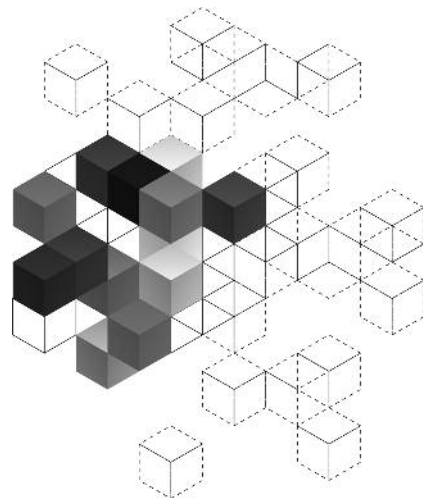
연구분야[NTRM]



- 군집/모듈형 로봇 관련 분야의 연구가 주로 기계 분야를 중심으로 이루어지고 있음
 - 원자력의 비율이 높게 나온 것은 과제당 규모가 크게 나타난 효과임
 - 인지/감성과학, 건설/교통, 과학기술과 인문사회, 교육, 농림수산물, 문화/예술/체육, 미디어/커뮤니케이션/ 문헌정보 등 다양한 분야에서 군집/모듈형 로봇 및 자가조립과 관련된 기술 활용에 대해 연구하고 있으며, 이는 향후 프로그래머블 매터로 확장이 될 경우 그 비율이 더 높아질 것으로 보임

- IT 분야가 59%로 가장 높게 나타났으나, BT와 ET에서도 각각 12%, 13%의 높은 연관성을 보임
 - 그 외에도 CT, NT, ST 분야가 다 연관성을 보이고 있는 만큼, 향후 프로그래머블 매터 기술로의 발전은 모든 기술분야의 융합을 통해 가능하다는 것을 간접적으로 확인할 수 있음

- NTRM 분석 결과도 정보-지식-지능화 사회 구현 41%로 압도적으로 높게 나타났으나, 다른 분야에서도 활용가능성이 있음을 보이고 있음
 - 또한 포함되지 않음으로 표시된 연구가 41%에 달하는 만큼 앞으로의 그 활용가능성이 무한하며, 프로그래머블 매터로의 발전이 모든 분야에 영향을 끼칠 수 있음을 간접적으로 시사함



쓸모없는
에너지는 없다

차세대 에너지 하베스팅 기술

**Energy
Harvesting**



01

서론

지난 몇 십 년간 화석 연료의 고갈로 인해 발생하는 에너지 부족 현상을 해소하기 위해 많은 연구가 진행되었다. 석탄, 석유, 천연가스 등의 화석 연료는 매장량이 한정되어 있고 화석 연료를 사용함으로써 많은 환경 문제가 발생하고 있다[1]. 이러한 문제를 해결하기 위해서 친환경 대체 에너지에 관한 연구가 많이 이루어졌고, 그 중에서도 에너지 하베스팅이 많은 관심을 받고 있다. 에너지 하베스팅은 주변 환경에서 낭비되는 에너지원인 태양에너지, 열에너지, 기계적 에너지를 전기에너지로 바꾸는 신재생 에너지 기술이다. 이 기술을 이용하면 기존에 사용했던 일회용의 화석 연료를 대체하여 에너지 공급이 가능하며 지속 가능한 에너지를 얻을 수 있다. 화석 연료 등의 에너지원에 대한 대규모 비용을 지불하는 발전소와는 달리, 에너지 하베스팅 기술은 버려지는 에너지를 이용하기 때문에 비용 소모가 거의 없다는 장점이 있다[2].

에너지 하베스팅 기술 중에서도 가장 먼저 개발된 것이 빛 에너지를 이용한 태양전지이다. 1839년 Photovoltaic 효과가 발견된 후, 1954년에 Bell Lab이 개발한 실리콘 기반의 태양전지가 첫 에너지 하베스팅 소자이다. 이후 태양 전지는 실리콘 이외에 2성분계 물질(GaAs, InP, CdTe) 또는 유기물 등을 사용하거나 여러 겹의 층을 쌓는 등 구조를 변화시켜 효율을 증가 시켜왔다. 최근에는 III-V multi-junction solar cells라는 방식을 이용하여 4개의 층을 쌓아 만든 태양 전지가 보고되었다. 이 소자는 44.7%의 효율을 가지며 이 값은 현재까지 개발된 태양 전지 중 가장 높은 효율을 갖는다. 압전 물질을 이용한 기술 분야는 1947년 높은 압전성을 가진 BaTiO₃(BTO)가 발견된 시점 이후로 발전되었다. 이후 압전 세라믹스는 음향, 초음파, 통신, 각종 계측기기 등의 분야에 활용되었는데 에너지 하베스팅 분야는 1990년대부터 연구가 진행되었으며 특히 지난 5년간 이 분야의 진보는 빠르게 가속화되었다. 또한 마찰 전기를 이용한 에너지 하베스팅의 경우, 일상 생활에서 부정적으로 여겨지던 정전기 현상을 이용하여 만든 발전기가 2012년에 처음 보고되었으며, 소자 구조를 최적화시킴으로써 2013년 기준으로 1년 사이 효율이 5배 향상되었다[3].

1960년 온실효과로 인한 지구온난화 문제가 처음 제기된 후부터, 위에서 언급한 에너지 하베스팅 기술들은 환경 친화적인 에너지로 인식되어 많은 주목을 받았다. 또한 1970년대 겪은 두 차례의 석유 파동 이후, 비석유권 국가들은 화석 연료를 대체할 값싼 에너지원에 대한 필요성을 느껴 비용 소모가 거의 없는 에너지 하베스팅 기술에 대한 연구를 진행하여 왔다.

태양전지는 연구기간이 길고 많은 투자가 있었기 때문에 기술 성숙도가 매우 높고 현재 상용화 단계에 이르렀지만, 이를 제외한 나머지 에너지 하베스팅 기술은 아직까지 많은 연구가 필요한 실정이다. 하지만 태양의 빛 에너지를 이용한 태양전지는 날씨나 시간, 공간에 따라 전기 에너지 발전에 제약을 받는다는 단점이 있다. 반면에 압전, 열전, 전자기를 이용한 에너지 하베스팅은 주변에 흔하게 존재하는 버려지는 에너지를 기반으로 전기 에너지 생성이 가능하고, 날씨, 시간, 공간에 따른 제약이 없으며 인간 친화적(human-friendly)이라는 측면에서 주목을 받고 있다[4]. 여기에 해당되는 버려지는 에너지에는 기계의 모든 움직임이나 기계에서 생성되는 열, 여러 가지 마찰로 인해 발생하는 정전기 등이 있을 수 있으며 심지어 사람의 눈 깜빡임, 어깨 또는 손가락 등 근육의 수축과 이완, 혈액의 순환 등 인간의 생물학적 활동도 포함될 수 있다[5].

과거의 연구는 에너지 하베스팅 소자의 크기를 키워 효율을 높이고 많은 양의 에너지를 만들어내는데 주력했다. 하지만 벌크형 에너지 하베스팅 소자는 큰 크기로 인해 응용분야가 철도, 교량, 도로 등에만 제한되며, 민감도(sensitivity)가 낮아 작은 움직임을 이용한 에너지 하베스팅은 불가능하다[6]. 또한 전기 소자를 구동시키는데 필요한 전압은 아주 큰 수준이 아니기 때문에 무조건적으로 크기를 키워 출력 값을 증가시킬 필요도 없다.

벌크형 소자에서 작고 유연한 소자로의 변화는 통신 기술이 발전함에 따라 자연스럽게 진행되었다. 현 시대는 누구에게나 모바일 전기소자가 필수적인 시대로, 미래에는 자유롭게 광역 정보 통신망에 접근이 가능한 유비쿼터스가 실현되고 모든 사물이 네트워크로 연결되는 사물 인터넷(Internet of Things, IoT) 시대가 구현될 것이다[7]. 모든 사물은 센서와 무선 통신을 이용하여 정보를 주고 받으며, 작동되는데 필요한 에너지는 배터리를 통해 공급된다. 하지만 고립된 위치에 있거나 독립적으로 작동해야만 하는 소자의 경우, 주기적으로 배터리를 교체해 주는 것이 불가능하므로 자가 발전(Self-Powered) 소자가 필요한데, 이러한 조건에 적합한 것이 에너지 하베스팅을 이용한 기술이다. 작고 휴대 가능한(portable)한 전기 소자에 통합되어 사용되기 위해서, 그리고 작은 에너지를 이용하여 전기를 추출하기 위해서, 에너지 하베스팅 소자 또한 작고 유연한 소자로 발전되어야만 한다. 이러한 과정에서 자연스럽게 작은 형태의 에너지 하베스팅 소자가 개발되었다. 벌크형 소자가 평평한 벽면에만 부착되어 사용되었던 것에 비하여 소형 유연 소자는 곡선의 표면에 붙어 사용될 수 있기 때문에 미래 신기술인 웨어러블 기술과 체내 의료기기 삽입 기술에 활용될 전망이다[8].

본 리뷰에서는 대표적인 네 가지 유연 에너지 하베스팅 기술인 압전, 마찰전기, 열전, 페로플루이드를 주제로, 각 기술의 원리, 장점 및 한계, 최신 연구 동향, 발전 전망, 응용 분야 등을 설명하고자 한다.

02

에너지 하베스팅 기술의 종류 및 원리

압전 및 마찰 전기를 이용한 에너지 하베스팅 기술은 각각 압전 효과와 정전기 유도 현상을 기본 원리로 에너지를 수확한다. 이 두 가지는 모두 외부의 기계적 에너지가 전위차를 만들고 이로 인해 쌍극자와 보상 전하가 형성되어 전자, 즉 전류가 흐르는 현상을 바탕으로 한다. 열전 및 페로플루이드를 이용한 에너지 하베스팅 기술은 각각 제벡 효과(Seebeck effect)와 패러데이의 전자기 유도 법칙(Faraday's Law of Induction)을 기본 원리로 에너지를 수확한다. 이어지는 본문에서는 에너지 하베스팅의 종류별 메커니즘에 대해 보다 더 자세히 알아보자.

2.1. 압전 재료를 이용한 에너지 하베스팅 기술의 원리

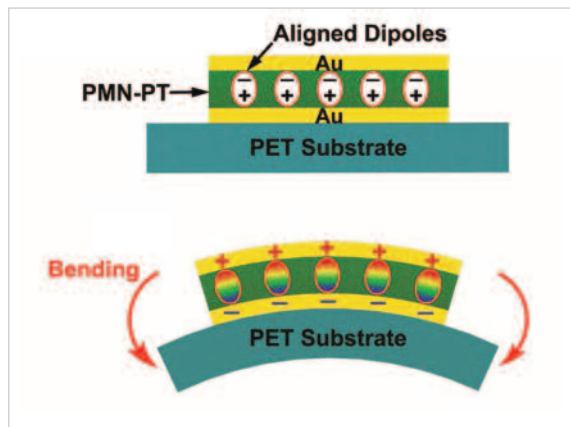


그림 1. 대표적 압전 물질인 PMN-PT를 이용하여 설명한 전기 에너지 생성 원리[5]

압전 물질인 PMN-PT를 사용하는 에너지 하베스팅 소자가 전기 에너지를 만들어내는 원리는 그림 1과 같다. 기계적 에너지를 받지 않은 상태에서 PMN-PT 박막에 존재하는 쌍극자는 폴링(poling)에 의해 소자의 표면에 수직으로 배열되어 있다. 소자가 인장 응력을 받아 휘어지면 소자의 변형으로 인해 PMN-PT 박막 내부에 압전 전위가 형성된다. 전자는 쌍극자에 의해 만들어진 전위의 균형을 맞추기 위하여 외부 회로를 통해 흐르며 결과적으로 위쪽 전극에 쌓이게 된다. 소자에 작용하던 응력이 사라져 다시 처음 상태로 돌아가면 전하 또한 회로를 통해 처음 자리로 되돌아간다. 전체적으로 소자에 압력이 가해지고 제거되는 반복적인 과정을 통해 양의 전기 신호와 음의 전기 신호가 번갈아 생기게 된다[9].

2.2. 마찰 전기를 이용한 에너지 하베스팅 기술의 원리

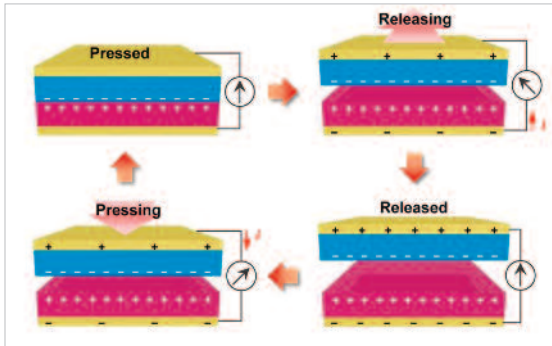


그림 2. 마찰 전기를 이용한 에너지 하베스팅의 일반적인 메커니즘의 모식도[10]

마찰전기를 이용한 에너지 하베스팅의 일반적인 메커니즘은 그림 2와 같다. 두 개의 서로 다른 물질이 접촉하면 마찰 대전에 의해 표면이 대전되는 현상이 나타난다. 두 물질이 분리되면 정전기 유도 현상에 의해 위·아래 전극에 보상 전하가 축적되고, 이에 따라 전하 균형이 맞을 때까지 외부 전극을 통해 전류가 흐르게 된다. 두 물질이 다시 가까워지면 축적되었던 보상 전하가 사라짐으로써 처음과는 반대 방향의 전류가 외부 전극을 통해 흐르게 되며, 반복되는 접촉 및 분리과정을 통해 양 전극간에 지속적으로 교류 전류(Alternating Current)가 흐른다[10].

2.3. 열전 재료를 이용한 에너지 하베스팅 기술의 원리

열전(thermoelectric) 에너지 하베스팅은 열에너지를 전기에너지로 변환시키는 방식을 이용한 기술로, 제벡 효과를 바탕으로 한다. 제벡 효과는 두 종류의 금속이나 반도체의 양 끝을 접합한 부분에 발생하는 온도 차가 전압으로 직접 변환되는 현상이다. 이 현상은 온도에 따라 자유전자의 에너지가 다르므로 자유 전자가 에너지 균형 상태, 즉 평형 상태가 될 때까지 에너지가 낮은 쪽으로 이동하여 전위차를 형성하기 때문에 발생한다.

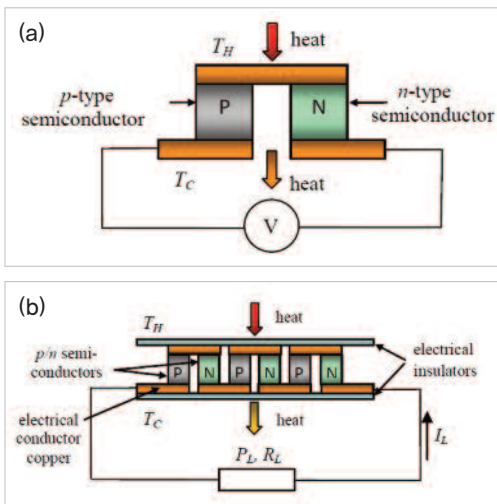


그림 3. 열전 발전기의 모식도. (a) 열전 단위소자의 구조. (b) 열전 소자의 형태[11]

열전 소자의 모식도는 그림 3과 같다. 그림 3(a)에서 보는 것과 같이, 열전 단위소자(thermoelement)는 p타입과 n타입의 반도체가 직렬로 연결되어 구성되어 있다. 일반적인 열전 소자(thermoelectric module)의 형태는 그림 3(b)처럼 전압을 증가시키기 위해 많은 수의 열전 단위소자가 전기가 흐르는 방향에 직렬로 연결되어 있으며, 열 전도도를 증가시키기 위해 열이 흐르는 방향에 병렬로 연결되어 있다[11].

2.4. 페로플루이드를 이용한 에너지 하베스팅 기술의 원리

페로플루이드를 이용한 에너지 하베스팅 기술은 자기장이 존재하는 영역에서 기계적 에너지를 받을 때 생기는 자기 쌍극자 모멘트의 변화를 원리로 한다. 그림 4(a)는 재료가 외부 자기장을받지 않을 때, 액체 안에서 쌍극자들이 무작위하게 배열한 상황을 나타낸다. 이때 총 자화(Magnetization) 값은 0이다. 만약 재료가 외부 자기장을 가한다면 액체 내부에 있는 자기 쌍극자가 그림 4(b)처럼 외부 자기장의 방향으로 정렬한다. 이후 재료가 진동을 받아 액체가 출렁인다면 그림 4(c)처럼 내부 자기 쌍극자들은 변위를 갖는다. 변위를 가진 쌍극자들은 순자기선속(net magnetic flux)을 만든다. 이 선속이 액체 주변의 코일에 영향을 주면 전자기 유도 현상이 발생하고 코일에는 전기가 흐른다[12]. 여기서 중요한 요소는 최대한 공명 진동수에 근접한 기계적 진동을 가하여 진폭이 최대가 되는 표면파를 형성시키는 것이다. 표면파가 최대 진폭을 갖는다면 이 파동이 만드는 자기 선속의 변화 또한 최대 값을 갖기 때문에 큰 전압이 출력된다[13-14].

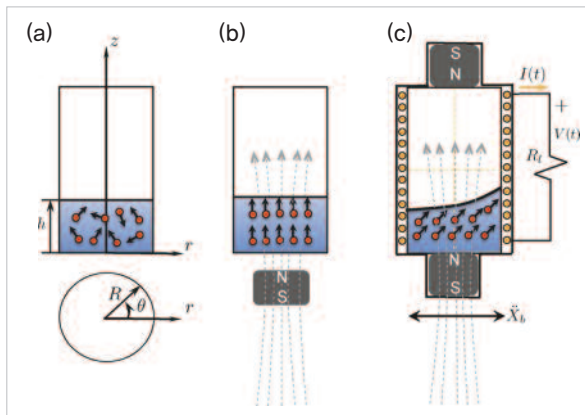
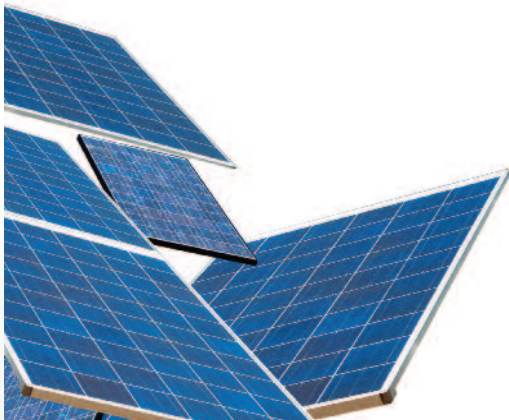


그림 4.

(a) 자기장이 가해지지 않았을 때의 페로플루이드 내부의 자기 쌍극자들.
 (b) 자기장이 가해졌을 때 자기장의 방향으로 배열이 되는 자기 쌍극자들.
 (c) 진동으로 인해 배열이 바뀌고 자기 선속을 만들어 내어 전류를 생산하는 페로플루이드[12]



03

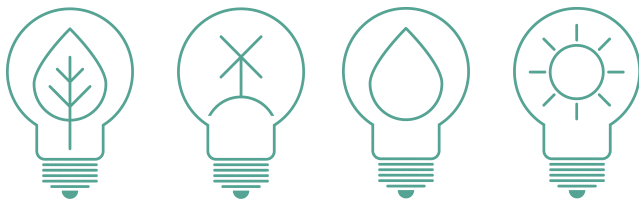
에너지 하베스팅 기술의 장점 및 한계

에너지 하베스팅 기술의 기술 성숙도, 효율, 청정도, 출력 값, 응용 분야를 비교해 보면 표1과 같이 나타낼 수 있다.

	태양열	압전 재료	마찰 전기	열전 재료
기술 성숙도	0	X	X	X
효율	10~24%	25~50%	30~60%	5~10%
청정도	0	0	0	0
출력 값	100~300W	1 μ W~20mW	~1W	0.5mW~10Mw
응용 분야	태양 전지	체내 삽입 의료기기 무선 센서 노드 웨어러블 소자	자가 발전 센서	웨어러블 소자 (스마트 워치, 구글글래스 등) 경보 센서

표 1. 다양한 에너지 하베스팅 기술 비교 표[2,15]

이미 상용화가 진행된 태양 전지를 제외하면 나머지 기술들의 산업화 및 상용화는 아직 미미한 상황이다. 각각의 에너지 하베스팅 기술은 효율과 출력 값에서 차이를 보이기 때문에 사용되는 분야에서도 차이가 난다. 출력 값이 높은 태양 전지의 경우 주로 배터리를 충전시키는 용도로 활용되며, 압전 재료의 경우 변환 효율이 높고 출력 값이 몇 mW정도이기 때문에 체내 삽입형의료기기 또는 무선 센서 노드 등에 적합하다. 마찰 전기를 이용한 에너지 하베스팅은 출력 값이 높아 높은 전력이 요구되는 자가 발전 센서에 주로 사용되며, 열전 재료를 이용한 에너지 하베스팅은 웨어러블 소자 및 인공 피부, 센서 등에 사용되기 적합하다. 특히, 열전 에너지 하베스팅은 압전재료나 마찰전기를 이용한 소자와 달리 기계적 힘이 소자에 접촉하는 과정이 없기 때문에 매우 안정적이고 소음이 없다는 장점이 있다[16-18]. 표에는 생략되어 있지만, 페로플루이드를 이용한 에너지 하베스팅 기술의 경우, 고형 자석이 아닌 나노수준의 영구 자기 쌍극자로 구성된 액체 구조를 사용하므로, 액체가 담긴 컨테이너에 따라 소자 형태가 바뀔 수 있으며 체내 또는 기계 부품 내부 등 접근 불가능한 영역에 주입될 수 있다는 장점이 있다[12].



하지만 앞서 설명했듯이 태양열을 이용한 에너지 하베스팅 기술은 날씨 및 장소에 제약을 받는다. 오직 낮 동안에만 작동될 수 있으며 일몰 후 소자가 사용되기 위해서는 캐패시터나 배터리 등 추가적인 장치가 필요하다. 압전 재료의 경우 체내 의료기기에 사용될 수 있지만, 적당한 출력 값을 내는 재료들은 모두 납 성분을 포함하고 있기 때문에 인체에 유해하다. 따라서 납을 포함하지 않으면서도 압전 특성이 높은 재료가 개발되어야 한다. 마찰 전기를 이용한 경우 유기물 기반의 폴리머를 사용하기 때문에 습한 환경에서 구동성이 떨어지고 마모 저항이 낮은 단점이 있다[19]. 따라서 마찰 전기를 이용한 에너지 하베스팅 기술은 생명 공학 및 웨어러블 분야에 적용시키기 어렵다. 열전 재료를 이용한 에너지 하베스팅 분야에서는 $\Delta T=50K$ 에서 출력밀도가 $28mW/g$ 인 웨어러블 소자를 만들었다는 연구 성과가 있지만[20], 주변 온도와 인체의 온도 차가 $50K$ 보다 훨씬 낮기 때문에 발생하는 전류가 적어 에너지 변환 효율이 매우 낮다. 따라서 열전 재료를 웨어러블 기술에 적용하여 모바일 전기 소자를 충전하거나 구동하기 위해서는 현재보다 높은 변환 효율을 갖는 소자가 제작되어야 한다. 마지막으로, 페로플루이드를 이용한 에너지 하베스팅 기술은 출력 값이 매우 낮고 아직 개발 및 연구 활동이 적어 특정 분야로의 응용보다는 효율 및 출력 값의 개선이 먼저 이루어져야 하는 상황이다.



04

에너지 하베스팅 기술의 최신 연구동향

4.1. 압전재료를 이용한 에너지 하베스팅 기술의 최신 연구 동향

유연 압전 에너지 하베스팅 소자가 처음 개발되었을 때 사용되었던 나노선 구조의 산화 아연은 출력 값이 작기 때문에 현재는 주로 페로브스카이트형 재료를 사용한다. 페로브스카이트(perovskite)형 재료인 BTO, PZT(lead zirconate titanate), PMN-PT는 산화 아연보다 압전 결합 상수(piezoelectric coupling constant, d_{33})가 각각 3, 25, 90배 크기 때문에 이 구조를 가진 물질을 기반으로 한 연구가 활발히 진행되었다[21]. 2010년 이후에는 결정화된 BTO, PZT, PMN-PT의 페로브스카이트형 박막을 벌크형 기판에서 플라스틱 기판으로 압전 성질의 손실 없이 이동시켜 유연하게 만드는 연구가 보고되었다[5, 22-24]. 플라스틱 기판으로 전사하는 방법 중 대표적인 방법인 Laser Lift Off(LLO)공법, 니켈 박리(Ni exfoliation)공법을 이용하면서, 유연 압전 에너지 하베스터의 출력 전압 및 전류는 급격히 향상되었다[1, 25-28]. 이어지는 본문에서는 압전 재료를 형태에 따라 나노 합성물(Nanocomposite), 박막(Thin film)으로 구분하여 유연 에너지 하베스팅 소자에 대해서 설명할 것이다. 특히, 박막 재료의 경우 유연하게 만드는 방식이 다르기 때문에 공정 방법에 따라 나누어 설명할 것이며, 이때 다양한 공정 방법뿐 아니라 사용되는 재료도 BTO, PZT, PMN-PT순으로 점차 압전 특성이 우수한 물질이 사용되었다는 것이 주목할 만 하다.

4.1.1. 나노 합성물을 이용한 유연 압전 에너지 하베스팅 소자

나노 합성물 발전기(Nanocomposite Generator, NCG)는 압전 물질인 BTO 나노입자와 MW-CNTs, SW-CNTs(Multi-walled and Single-walled Carbon nanotubes), RGO(Reduced Graphene Oxide)같은 흑연질 탄소를 PDMS(Polydimethylsiloxane)에 섞어 제조되었다[1]. 이때 흑연질 탄소는 압전나노입자를 분산시키는 분산제 역할과, 압전 층을 단단하게 만드는 강화제 역할을 하여 출력전압과 전류를 증가시킨다[1, 25, 29]. 또한 내부 저항을 낮추는 전도 길(conduction path)을 제공하여 전압을 증가시키고 출력을 높인다[1, 30]. 이렇게 제조된 NCG는 가격이 저렴하고 대면적이 가능하다는 장점이 있다. 후속연구에서는 BTO를 압전 성질이 우수한 PZT나 alkalineniobate(KNLN) 입자로 바꾸는 동시에, 뭉치는 성질이 있는 흑연질 탄소를 반데르발스 결합이 약해 덜 뭉치는 금속 나노로드필러로 대체하여 효율을 증가시켰다[25].

최근 연구에서는 실리콘 고무 폴리머에 PMN-PT를 압전나노입자로, MW-CNTs를 분산제 및 강화제로 섞어 사용하여 나노 합성물 압전소자를 만들었으며, 고무를 사용하여 제작 되었기 때문에 200% 정도의 뛰어난 신축성(hyper-stretchable)을 나타내었다. 이 소자는 이전에 보고된 신축성이 높은 소자 중에서 가장 우수한 전압, 전류 값을 출력했다. 소자는 스타킹에 적용되어 전기 에너지를 만들었는데, 이 연구는 유연 에너지 하베스팅 기술이 웨어러블 분야로 응용될 수 있는 가능성을 보여주었다[33].

4.1.2. 박막을 이용한 유연 압전 에너지 하베스팅 소자

Soft Lithographic 기술을 이용한 $BaTiO_3$ 유연 박막 압전 에너지 하베스팅 소자

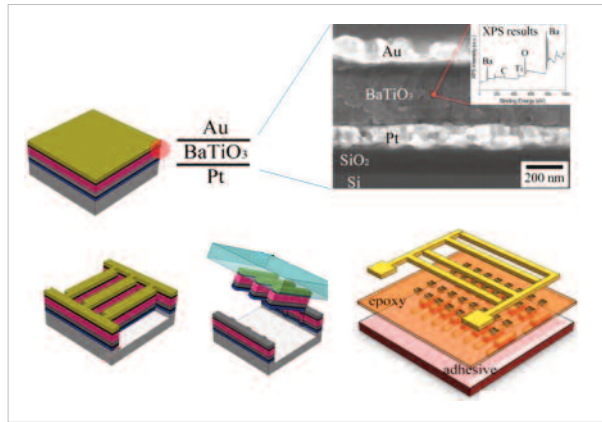


그림 5. MIM 구조를 가지는 BTO 에너지 하베스팅 소자의 제조 방식[20]

그림 5는 금속-절연체-금속(metal-insulator-metal, MIM) 구조를 가진 BTO 박막 압전 에너지 하베스팅 소자의 제작과정을 나타낸다. 먼저, Pt/Si 반도체 기판에 증착된 BTO를 700°C에서 결정화시킨 후 금속 전극을 증착한다. 생성된 MIM 구조를 사다리 모양의 패턴으로 건식 식각(etching)한 후, 아래에 놓인 Si를 이방성의 습식 식각으로 제거하여 MIM 구조를 벌크형 기판과 분리시킨다. 마지막으로 PDMS를 MIM 구조 위에 코팅한 후 플라스틱 기판에 붙이면 최종적인 소자가 완성된다. 이 소자는 플라스틱 기판의 취약한 열 특성과 무관하게, 딱딱한 실리콘 기판에서 열처리를 한 후 분리시키는 방식을 이용하여 제작되었다. 전통적인 마이크로 단위의 소자 제작법과 Soft Lithographic 기술을 이용하여 압전 성질의 손실 없이 $BaTiO_3$ 박막을 플라스틱 기판으로 옮길 수 있었다. 그림 5에 삽입된 그림은 MIM 구조를 갖는 BTO 에너지 하베스팅 소자의 단면 SEM 사진이다.

BTO는 납을 포함하고 있지 않기 때문에 인체에 무해한 재료로 주목 받고 있다. 하지만 BTO는 PZT나 PMN-PT와 같은 박막 압전 물질에 비해 압전 결합 상수가 낮아 적은 전력을 소모하는 전기 소자에만 사용될 수 있다는 한계가 존재한다[19].



Laser Lift Off기술을 이용한 PZT유연 박막 압전 에너지 하베스팅 소자

최근 연구에서 BTO의 단점이 보완된 효율이 높은 유연 박막 압전 에너지 하베스팅 소자가 개발되었다. 이 실험에서는 압전 결합 상수 d_{33} 이 높은 PZT를 재료로 사용했고 소자 크기를 키워 출력 전압을 높였다 [23,34]. 여기서 주목해야 할 점은 엑시머(excimer) 레이저를 사용하여 PZT를 플라스틱 기판에 옮기는 건식 유형의 Inorganic-Laser Lift Off(ILLO) 공법을 사용했다는 것이다. 이로 인해 생산 공정이 단순화되고 소자의 상업화가 가까워졌다[23,34]. 그림 6(a)는 ILLO를 사용한 PZT 박막 에너지 하베스팅 소자의 공정 과정을 나타낸다[19,25]. 먼저, 졸-겔(Sol-Gel)공정으로 사파이어 기판에 PZT를 스펀 코팅하고 RTA(Rapid Thermal Anneal)로 열처리를 한다. 그 후 플라스틱 기판 위에 접착 에폭시를 발라 PZT 면에 부착하고 사파이어를 ILLO 공법을 이용하여 떼어낸다.

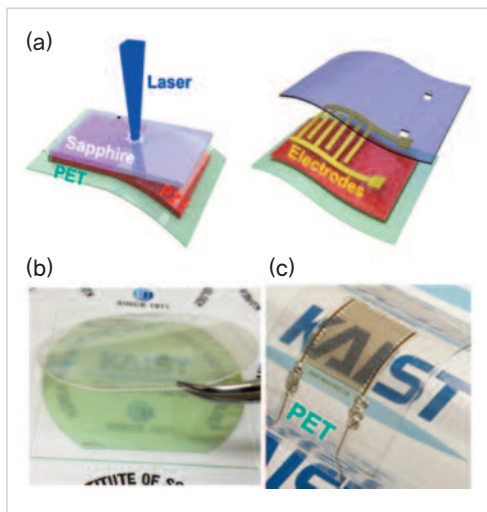


그림 6. (a) PZT 압전 에너지 하베스팅 소자의 Laser Lift Off공정. (b) LLO공정으로 떼어낸 사파이어 기판. (c)완성형 소자[19, 25]

ILLO 공법은 PZT 아래에 있는 사파이어 기판 뒤에서 엑시머 레이저를 주사시켜 PZT와 사파이어 기판 사이를 부분적으로 녹인 후 이 사이를 떼어내어 플라스틱 기판으로 옮기는 공법이다. 엑시머 레이저는 4.03eV의 에너지를 가지고 있는데, 이는 사파이어 기판의 밴드갭 에너지인 10eV보다 작고 PZT의 밴드갭 에너지인 3.4eV보다 크기 때문에 사파이어 기판을 통과하여 PZT에 흡수될 수 있다. 이 공법은 매우 단순하고 안정적이며, 떼어낼 수 있는 면적이 크다는 장점이 있다. 그 후 IDEs(Interdigitated Electrodes)와 패시베이션(passivation) 에폭시(epoxy)를 형성하고 풀링 과정을 거치면 소자가 완성된다. 그림 6(b)는 LLO공정으로 깨끗하게 떼어낸 사파이어 기판을 나타내며, 그림 6(c)는 ILLO 및 패시베이션에폭시로 코팅된 PZT의 유연성과 안정성을 보여준다[19,35]. 이 소자는 기존까지 보고된 유연 에너지 하베스팅 소자에 비해 매우 높은 출력을 나타내었음에도 불구하고, 높은 전압에 비해 낮은 전류 특성을 가져 생명 공학에서 실제 이용되는 장비를 구동 시키기에는 전류 값이 부족하다는 한계가 있다[21,23].

Ni Exfoliation 기술을 이용한 PMN-PT 유연 박막 압전 에너지 하베스팅 소자

앞서 언급한 바와 같이, PZT를 사용한 압전 에너지 하베스팅 소자는 $10\mu\text{A}$ 정도의 전류를 만들어냈지만 실제 이용 되는 장비를 구동시키기에는 부족하다. 예를 들어, 인공 심장박동기는 3V , $100\mu\text{A}$ 정도의 구동 전압과 전류가 필요하다[36-37]. 따라서 압전 결합 상수가 높은 물질인 단결정 PMN-PT를 사용한 에너지 하베스팅 연구가 진행되었다. PMN-PT를 사용한 유연 압전 에너지 하베스팅 소자는 0.22mA 의 전류를 만들어 냈으며, 이는 이전의 유연 압전 에너지 하베스팅 소자보다 수십 배 높은 수치이다[38-39].

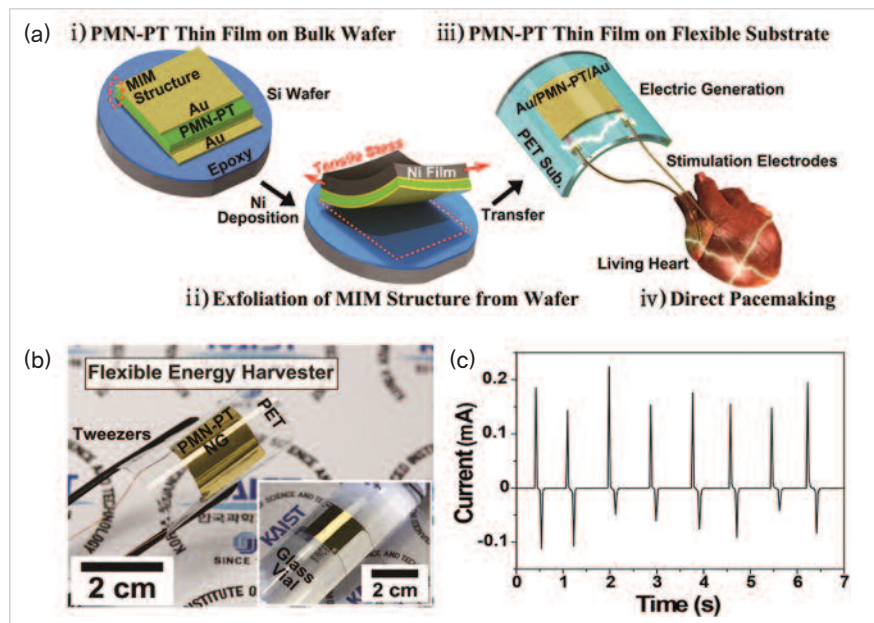


그림 7. (a) PMN-PT 압전 에너지 하베스팅 소자의 제조 공정. (b) 완성형 소자. (c) 소자의 출력 전류 값[5]

그림 7(a)는 PMN-PT 박막 에너지 하베스팅 소자의 제조 단계 및 완성된 소자가 심장을 직접적으로 자극하는 것을 나타낸 모식도이다. MIM 구조의 PMN-PT 단결정은 에폭시/금속 전극이 코팅된 Si 반도체 기판 위에 증착된 후 풀링 과정을 거친다. 이 MIM 구조를 플라스틱 기판으로 옮기기 위해서 Ni층을 이용한다. Ni층을 금속 전극에 증착시키면 Ni층은 인장 응력을 받고, Si층은 압축 응력을 받는 힘의 불균형이 자발적으로 생기게 된다. 방향성을 가지는 힘의 불균형은 MIM층과 벌크형 기판을 분리시키며 따라서 MIM 구조를 플라스틱 기판으로 이동시킬 수 있게 된다[40]. 이 방식은 기계적인 손상이 거의 없으며 앞서 설명한 LLO 공법보다 가격이 저렴하고 절차가 간단하다[41]. Ni/MIM층은 접착 에폭시가 코팅된 PET에 부착되고 Ni층은 PMN-PT층 위의 전극을 습식 부식액에 노출시켜 제거한다. 그림 7(b)는 PMN-PT 에너지하베스터의 완성형 모습을 나타내며 그림 7(c)는 손가락으로 소자를 두드리며 압력을 가했을 때 생기는 전류 그래프를 나타낸 것이다. 이 때, 최대 0.22mA 의 전류가 생긴다[5]. 이 수치는 인공 심장박동기 등 체내에 이식이 가능한 소형 장치를 구동시킬 수 있으며, 따라서 압전 에너지 하베스팅을 통한 체내 자가발전 시스템의 구현 가능성을 보여주었다[21].

4.2. 마찰 전기를 이용한 에너지 하베스팅 기술의 최신 연구 동향

마찰 전기를 이용한 에너지 하베스팅 기술의 경우, 출력 값을 결정하는 세 가지 요소가 있는데 첫 번째는 재료 선택이고 두 번째는 구조 최적화이며 마지막은 나노 표면적의 변화이다[3]. 하지만 마찰 전기를 이용한 에너지 하베스팅 소자를 제작할 경우, 재료의 선택은 제한된다. 재료마다 어떤 두 물질이 접촉할 때 각 물질에 유도되는 양 전하 혹은 음 전하 양이 차이가 나는데, 이 값은 재료의 고유한 성질이다. 두 물질이 접촉할 경우 대전되는 양은 고정되어 있기 때문에, 더 나은 재료를 발견하거나 합성하지 않는다면 양의 전하로 가장 잘 대전되는 재료와 음의 전하로 가장 잘 대전되는 재료는 항상 정해져 있다. 따라서 마찰 전기를 이용한 에너지 하베스팅 기술에서 재료의 다양성 및 선택권은 한계가 있다. 여기에서는 앞서 언급한 세 가지 요소 중에서 두 가지, 즉 다양한 소자 구조와 접촉면 형상 변화에 따른 출력 값 차이를 살펴보고자 한다. 다양한 소자 구조의 경우 접촉 방법이나 전극의 위치에 따른 네 가지 모드의 에너지 하베스팅 소자를 설명할 것이고, 접촉면 형상 변화의 경우 표면 형상을 변화시켰을 때 생기는 에너지 하베스팅 소자의 성능 변화를 설명할 것이다.

4.2.1. 마찰전기를 이용한 에너지 하베스팅 소자의 다양한 작동 모드

마찰전기 에너지 하베스팅 소자는 접촉 방법이나 전극의 위치에 따라 다양한 모드를 갖는데 버티컬컨택(Vertical contact) 모드, 컨택-슬라이딩(Contact-sliding) 모드, 싱글일렉트로드(Single-electrode) 모드, 그리고 프리스탠딩(Freestanding) 모드가 대표적인 네 가지 모드이다.

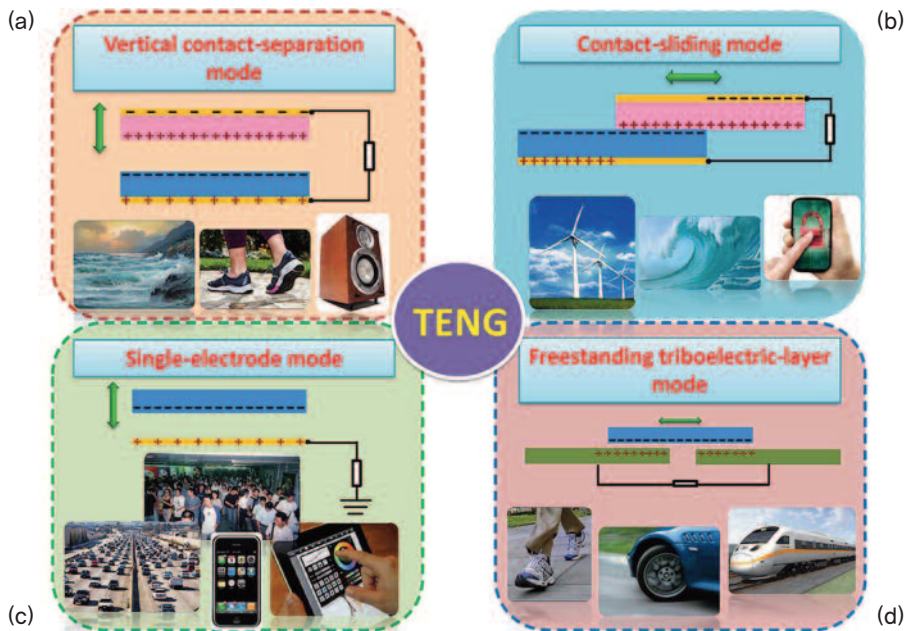


그림 8. 마찰 전기를 이용한 나노 발전기의 네 가지 기본적인 모드. (a) 버티컬컨택 모드, (b) 컨택-슬라이딩 모드, (c) 싱글일렉트로드 모드, (d) 프리스탠딩 모드[45]

그림 8(a)에 나타난 버티컬컨택 모드는 가장 기본적인 모드로, 앞서 설명한 메커니즘을 토대로 전류가 흐르게 된다. 따라서 접촉상태와 분리된 상태간의 효과적인 전환이 이루어져야 하므로 아치 형상의 구조[42]나 스프링 기반의 구조[43]가 개발되었다. 아치 형상의 경우, 한 쪽 면이 다른 한 쪽보다 약간 길어 불룩한 모양으로 제작된다. 하지만 일정한 힘 이상이 가해지지 않는다면 두 표면은 효율적으로 접촉되지 않는 단점이 있다. 따라서 최근 마찰전기 에너지 하베스팅 소자는 대부분 스프링 기반의 구조이다[44]. 스프링 4개가 두 표면을 연결시켜 주며, 일정한 힘이 가해져도 접촉되는 면이 곧 전체 표면이기 때문에 효율이 높다. 실제로, 이 구조는 현재까지 나온 소자 중에서 가장 높은 출력 값인 2mA의 전류와 1.2W의 전력을 갖는다. 이 두 가지 구조는 좁은 변위를 갖는 주기적인 운동을 이용하는데 효과적이며, 순간 출력이 높은 특징이 있다.

그림 8(b)의 컨택-슬라이딩 모드는 버티컬컨택 모드와 같은 구조를 갖지만, 두 면이 접촉하는 운동이 아닌, 미끄러져 마찰되는 운동을 전류로 바꾸는 점에서 차이가 있다. 효과적인 슬라이딩 모션을 위해 단순한 평면 구조[46]뿐 아니라 디스크 형태[47]와 실린더 형태[48]의 회전 구조가 개발되었다. 이 모드는 버티컬컨택 모드보다 효율이 높고, 제작이 쉬우며, 보다 다양한 기계적 움직임에 적합하다. 하지만 유기물 기반의 폴리머를 사용하는 마찰 전기 에너지 하베스팅 기술은 마모 저항이 낮기 때문에 여러 번 반복하여 폴리머가 마찰되면 재료가 쉽게 손상되는 단점이 있다.

싱글일렉트로드 모드[49]는 그림 8(c)에 나타난 것처럼, 아래쪽만 전극을 사용하고, 위쪽 물질은 신발의 밑창 등을 이용하여 자유롭게 움직이는 운동을 전류로 바꾸는 구조이다. 아래쪽 전극은 바닥과 접지하여, 대전되어 있는 위쪽 물질의 접촉이나 분리에 따라 바닥으로부터 전자의 이동을 통해 전하의 균형을 유지하는 과정에서 전류를 발생시킨다. 이 모드는 위쪽 물질의 움직임이 제한을 받지 않는다는 장점을 갖는다.

그림 8d의 프리스탠딩 모드[50]는 대칭적인 형태를 갖는 두 개의 마찰전기 에너지 하베스터의 전극을 연결하고, 대전되어 있는 위쪽 물질이 한쪽 전극에 접근할 때 발생하는 정전기 유도 효과를 이용하여 두 전극간에 전류를 발생시킨다. 컨택-슬라이딩 모드와 비교하여 접촉을 유지하지 않아도 된다는 이점이 있어 내마모성이 크게 향상된다.



4.2.2. 접촉면의 형상에 따른 마찰전기 에너지 하베스팅 소자의 전력 변화

접촉면의 형상이 마찰대전에 큰 영향을 미침에도 불구하고, 대부분의 마찰전기 에너지 하베스터의 연구는 작동 모드 등의 소자 구조에 초점이 맞춰져 있었다. 최근에 이르러 접촉면의 형상이 소자 특성에 미치는 영향이 주목 받게 되었는데, 이 연구에서는 블록 혼성 중합체(Block copolymer, BCP)의 자가 조립을 이용하여 접촉면의 형상을 나노스케일로 제어하고, 마찰 특성을 조절하여 매우 향상된 소자 특성을 보고하였다[46].

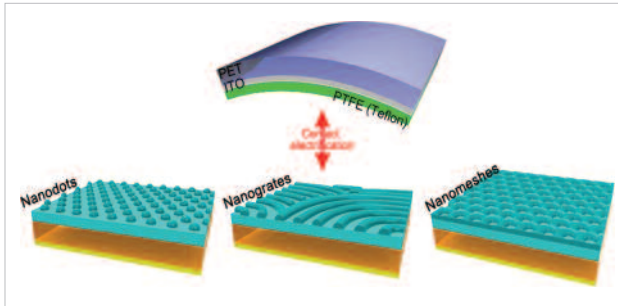


그림 9. BCP 자가조립에 의해 생성되는 효율적인 마찰 전기 생산을 위한 다양한 실리카나노패턴[46]

해당 연구에서는 그림 9에 나타난 것처럼 표면의 형상을 각각 나노 스케일에서 점(Nanodots), 선(Nanogrates), 그물망(Nanomeshes)의 형태로 제조하여, 넓어진 표면적의 비율(Widening Factor, WF)을 계산하고 그에 따라 발생하는 전류와 출력을 확인했다. 그 결과 표면적은 나노 구조에 따라 증가하였으며, 그물망 형태의 경우 약 70%까지 표면적의 증가를 나타내었다. 이 때, 전류와 출력은 평면에 비해 각각 2.5배, 6.3배까지 증가하였다. 또한 가장 뛰어난 성능을 나타내는 그물망 형태로 내구성 시험을 한 결과, 70kgf의 하중에서 10,000번의 접촉에도 전류나 전압의 저하를 나타내지 않았고, 나노 스케일의 형상도 변하지 않는 좋은 내구성을 가짐을 확인하였다.

4.3. 열전재료를 이용한 에너지 하베스팅 기술의 최신 연구 동향

열전 재료를 이용한 에너지 하베스팅 소자의 경우, 구조는 그림 3으로 제한되어 있는 반면 조건에 따라 재료를 다르게 선택할 수 있다. 유기물을 사용한 열전 에너지 하베스팅 소자는 웨어러블 전기 제품을 구동할 만큼의 전력을 출력해 내지 못하는 반면 무기물을 사용한 열전 에너지 하베스팅 소자는 벌크형 세라믹 기판을 사용했기 때문에 두꺼우며 열 에너지 손실을 유발한다. 이로 인해 출력되는 전력 밀도와 에너지 변환 효율 값이 제한된다[51]. 따라서 유기물 기반 재료 장점과 무기물 기반 재료 장점의 최적화에 관한 연구가 진행 중이다. 또한 에너지 변환 효율이 낮다는 단점으로 인해 에너지 하베스팅 기술을 독자적으로 사용한 연구 대신, 다른 기술과 통합된 모듈로 응용하는 연구가 활발히 발표되고 있다.

특히, 최근에는 상 분리된 $(\text{PbSn}_{0.05}\text{Te})_{0.92}(\text{PbS})_{0.08}$ 을 기반으로 한 기능적으로 향상된(Functionally graded) n형 열전 재료를 사용하여 열전 변환 효율을 높이는 연구가 진행되었다. 이 재료는 성능지수 (figure of merit) 2.2를 갖는 p형 $\text{Ge}_{0.87}\text{Pb}_{0.13}\text{Te}$ 와 함께 사용되어 모듈 구조로 제작되었다. 이 모듈은 50℃와 500℃의 온도 차이에서 14%의 높은 변환 효율을 갖는 것으로 나타났다[52].

4.4. 페로플루이드를 이용한 에너지 하베스팅 기술의 최신 연구 동향

1963년, NASA는 무중력 상태에서 자기장을 걸어주었을 때 연료통의 좁은 입구로 주입될 수 있는 액체를 개발하였는데, 로켓 연료로 사용되는 이 액체가 바로 페로플루이드이다. 페로플루이드는 합성법이 간단하지만 효율이 낮고 응용분야도 제한적이기 때문에 주로 우주 공학 분야에서 사용되었다. 최근에 이르러서야 에너지 하베스팅 기술과 결합된 연구가 진행되었지만, 발표 논문 수는 저조하며 결과 또한 미미한 수준이다.

최근 한 연구에서는 자연 상태의 진동이 대부분 저진동수(low frequency)를 갖는다는 사실에 초점을 두어, 페로플루이드의 '모드 진동수'를 감소시켜 에너지가 발생하는 진동수의 영역을 넓히고자 하였다. 모드 진동수란 페로플루이드 재료가 외부 자기장과 진동(출렁임)을 받을 때 전기가 생성되는 진동수, 즉 주파수 영역을 의미한다. 이와 관련된 내용의 결과가 그림 10에 나타나있다. 이 실험에서는 부피가 15% 수축된 탄화수소 기반의 미세한 Fe_3O_4 입자를 페로플루이드 재료로 사용했다. 이 재료로 액체의 높이와 컨테이너의 반지름에 따른 모드 진동수의 변화와 액체의 높이, 자기장 세기, 입력 가속도(출렁이는 정도)에 따른 출력 전압의 변화 값이 연구되었다. 전자의 경우, 높이가 증가하거나 반지름이 증가할 때 모드 주파수는 감소했으며 후자의 경우, 액체의 높이는 출력 값에 별다른 영향을 미치지 않지만 자기장의 세기가 양의 값으로 증가하거나 가속도가 증가할 때 출력 전압이 증가하는 것으로 나타났다. 추가적으로, 자기장의 세기가 음의 값으로 감소하거나 가속도의 크기가 커지면 모드 진동수가 감소하는 것도 밝혀졌다. 이 실험으로 페로플루이드의 여러 중요한 요소들을 조절하여 주파수를 바꿀 수 있고 출력 전압을 증폭시킬 수 있다는 결과가 나왔다[12].

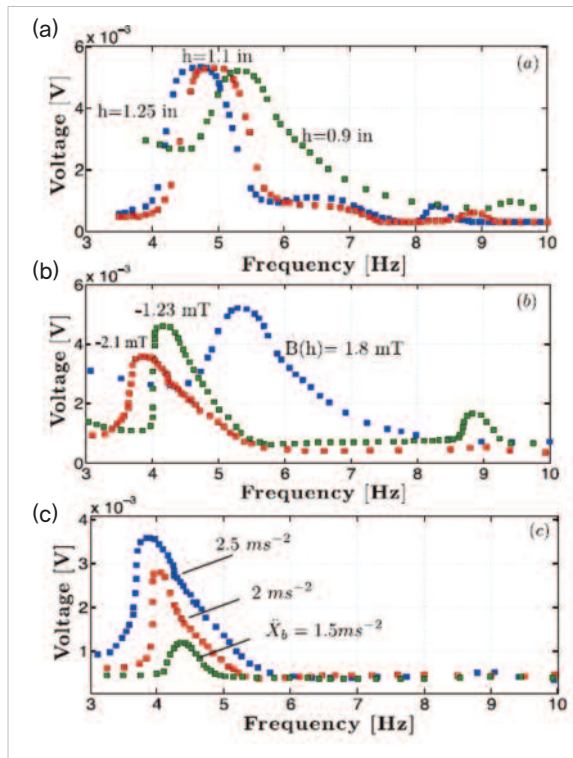


그림 10. (a) 페로플루이드 높이와 진동수에 따른 출력 전압의 변화. (b) 페로플루이드에 가해진 자기장과 진동수에 따른 출력 전압의 변화. (c) 페로플루이드에 가해진 가속도와 진동수에 따른 출력 전압의 변화.[12]

05

활용 방안

5.1. 압전재료를 이용한 에너지 하베스팅 기술의 응용 분야

유연 압전에너지 하베스팅 소자는 굴곡진 표면을 갖는 눈, 뇌, 폐, 심장 등 신체 기관의 벽면에 붙어 사용이 가능하므로 생명 공학 및 웨어러블 분야에서 가장 주목 받고 있다[22]. 이 소자는 그림 11에 나타나 있는 것처럼 인공 망막, 뇌 심부자극술(Deep Brain Stimulation, DBS), 인공 심장 박동기 등에 사용될 수 있다[54-56]. 생체 의학 분야에 적용된 예로는 자가 발전식 심장박동기[5], 생체 모방형 인공 모세포를 위한 청각 센서[57], 주기적으로 움직이는 신체 기관의 낭비되는 기계 에너지를 전기 에너지로 변환시키는 에너지 하베스팅 소자[1, 5, 21-23, 25], 광학 소자를 활용하여 신체 기관을 자극하는 광유전학(Optogenetics)[58] 등이 있다.

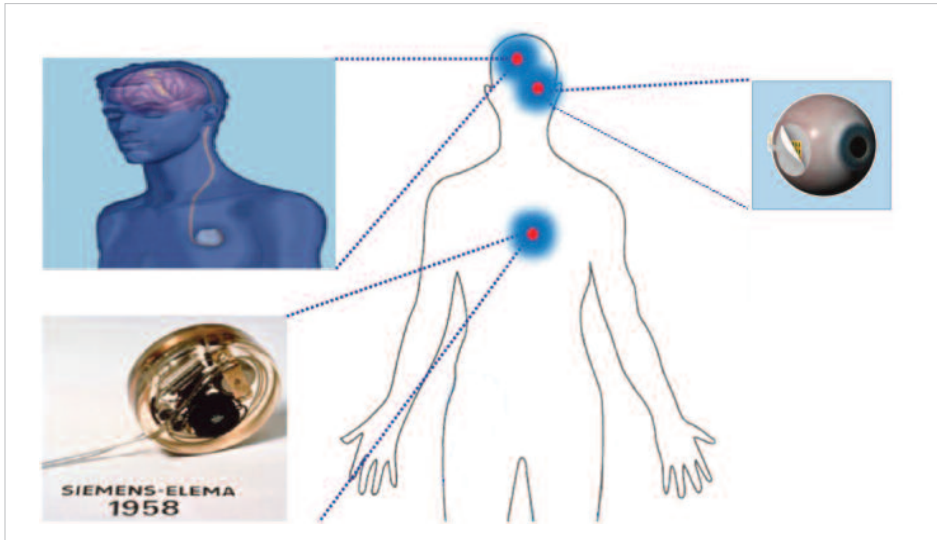


그림 11. 유연 압전 박막 에너지 하베스팅 소자의 응용. 인공망막, 뇌 심부자극술, 인공 심장 박동기[59]

5.1.1. 압전에너지 하베스팅을 통한 심박 조정

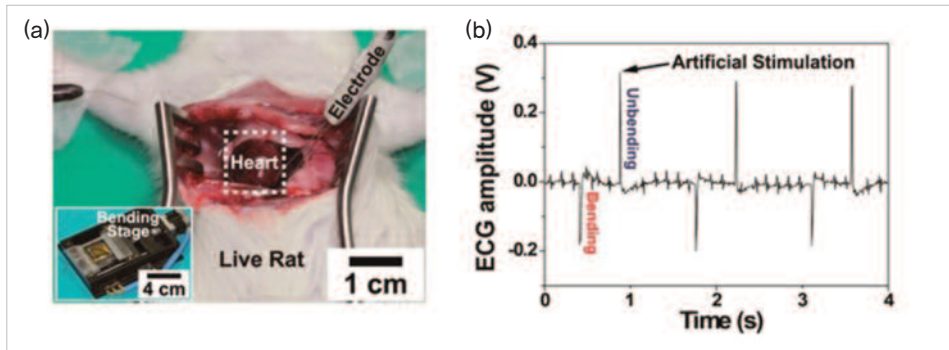


그림 12. (a) 압전 에너지 하베스팅 소자가 단독으로 만들어낸 전기 에너지를 이용하여 살아있는 쥐의 심장을 자극하는 실제 실험. (b) 쥐의 심전도 그래프.[5]

앞서 언급한 것처럼, 다양한 에너지 하베스팅 방법 중 압전 에너지 하베스팅이 생체 의학적인 응용분야에 가장 적합하다. 그 중 하나의 예가 하베스팅된 전기 에너지로 심장, 뇌, 척수 등을 자극하여 비정상적인 심장 거동 혹은 관련 질병 등을 치료하거나 경감시키는 것이다[5,60]. 이때 발생하는 전기 에너지는 심장 박동, 횡격막의 상하 움직임, 혈액의 순환 등 인간의 수명이 다하기 전까지 고갈되지 않는 인간의 생물학적인 특성을 에너지원으로 이용한다[21,61]. 최근 연구에서 압전 에너지 하베스팅 소자가 단독으로 만들어낸 전기 에너지를 이용하여 살아있는 쥐의 심장을 자극하는데 성공했다[5]. 그림 12(a)는 실제 실험 사진을 나타낸다. PMN-PT를 사용한 에너지 하베스팅 소자는 쥐의 심장에 붙어 있는 금속 전극과 연결되어 있으며, 소자에서 생성된 에너지는 곧바로 쥐의 심장을 자극했다. 이때 쥐의 심전도 그래프가 그림 12(b)에 나타나있다. 에너지 하베스팅 소자를 주기적으로 구부렸다 폈을 때 생기는 날카로운 피크(peak)가 심전도 그래프에 기록되었으며, 이는 쥐의 심장이 정상적으로 자극되었다는 것을 나타낸다. 이때 생긴 전기 에너지는 $2.7 \mu\text{J}$ 정도로 소형 동물들의 심장을 자극하는데 필요한 전기 에너지보다 큰 값이었다[62].

5.1.2. 생체 모방형 인공 모세포 역할을 하는 청각센서

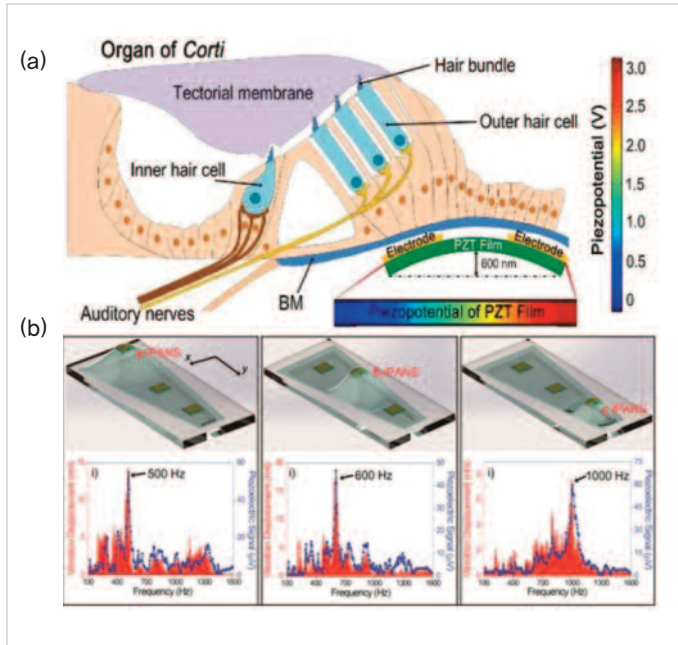


그림 13. (a) 코르티 기관 안의 기저막 아래에 놓인 PZT 압전 에너지 하베스팅 소자의 모식도, (b) 100에서 1600Hz 사이에서 측정된 인공 청각센서가 만들어 내는 전기신호[57]

압전 에너지 하베스팅 소자가 전기 에너지를 만들 때 필요한 에너지원은 아주 미세한 근육의 움직임 또는 혈액의 순환, 그리고 음파의 진동 등이 있다. 압전 물질의 민감도는 매우 우수하기 때문에 아주 작은 움직임까지 감지할 수 있으며, 이 움직임을 이용하여 전기 에너지를 생산한다[63]. 최근의 연구에서는 이 성질을 이용하여 청력 손실, 청각 장애를 보완할 수 있는 청각 센서를 개발했다. 이 연구에서는 ILLO 공법으로 만들어진 유연한 PZT 박막을 이용하여 인공 모세포의 역할을 하는 압전 청각 나노센서를 개발하였다[64]. 압전 에너지 하베스팅 소자를 이용한 청각 센서는 달팽이관 안에 있는 기저막 아래에 위치하여, 인간의 귀로 들어오는 음파의 진동을 감지해 전기 신호로 변환한 후 뇌로 전달한다[21, 57].

그림 13(a)는 코르티기관과 기저막 아래에 놓인 PZT센서를 나타낸다. 실험적으로 센서는 600nm수준의 기저막 수평 진동에 반응하여 3V의 압전 전위를 만들었다[63]. 그림 13(b)는 세 개의 i-PAN(organic-based Piezoelectric Acoustic Nanosensor)을 이어 붙여 만든 청각 센서이다. 이 때 앞쪽에 있는 넓은 영역의 a-i-PAN은 낮은 주파수의 소리를 감지하여 구분하며, 뒤쪽에 있는 좁은 영역의 c-i-PAN은 높은 주파수의 소리를 감지하여 구분한다. 이와 같은 실험 결과는 그림 13(b)의 아래 그래프에 나타나있다[57].

5.1.3. 체내 기관의 움직임을 통한 에너지 하베스팅

신체 내부의 자연적인 움직임이나 압력을 이용하여 전기 에너지를 생산하는 에너지 하베스팅 기술은 체내에 이식된 소자를 구동시키는 역할을 한다[66]. 앞서 설명한 바와 같이, 심장이나 폐, 횡격막은 인간의 수명이 다하지 않는다면 항상 움직이는 기관으로, 에너지 하베스팅의 좋은 에너지원이 된다[21, 61]. 2010년의 연구에서는 ZnO 나노선을 사용하여 만든 에너지 하베스팅 소자가 쥐의 횡격막, 심장의 움직임을 이용하여 1mV, 1pA의 전압과 전류를 만들었다. 비록 이 실험에서는 실제 소자에 적용할 정도의 효율에 미치지 못하는 낮은 수치를 기록했지만, 자가 발전 시스템이 실현될 수 있는 가능성을 보여주었다[19, 67]. 그림 14은 PZT 에너지 하베스팅 소자가 정류기 및 배터리와 통합되어 소의 심장에 붙어 사용된 것을 보여준다[65]. 이 실험에서 소의 심장이 수축, 이완을 거치는 동안 소자가 소의 우심실에 정확히 맞닿은 채로 3~5V의 전기를 만들었다. 여러 층을 중첩시켜 제작한 다층(multi-layer) 구조에서는 전압 8.1V, 출력밀도 1.2 μ W/cm²의 전기 에너지를 출력했다[68].

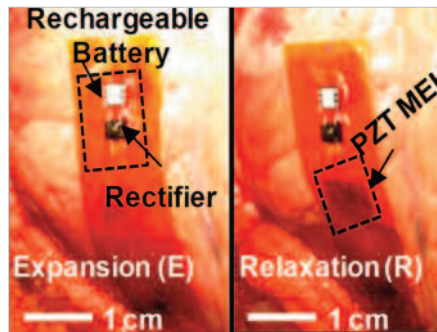


그림 14. 정류기 및 배터리가 통합된 PZT 하베스팅 소자가 소의 심장에 부착되어 에너지를 추출하는 실험의 사진[65]



5.2. 마찰 전기를 이용한 에너지 하베스팅의 응용

마찰 전기를 이용한 에너지 하베스팅 기술은 출력 값이 크고 모든 종류의 기계적 에너지를 에너지 하베스팅 분야에 접목시킬 수 있기 때문에 에너지 하베스팅 소자 자체가 곧 응용 분야에 사용된다. 특히 마찰 전기를 이용한 에너지 하베스팅은 인간의 작은 움직임, 걷는 동작, 진동 및 회전 에너지, 풍력 에너지, 흐르는 물, 빗방울, 조류 및 파도 에너지 등으로 부터 크고 작은 수준의 에너지 모두를 추출할 수 있다[45]. 또한 앞서 언급한 소자의 다양한 구조, 작동 모드와 표면의 형상을 이용하여 최적화된 소자는 압력센서[47], 화학센서[48-49] 및 UV센서[69] 등 다양한 자가발전 센서로의 응용이 가능하다. 여기에서는 파력 에너지 하베스팅 기술, 마찰 전기를 이용한 자가 발전 센서를 설명하도록 하겠다.

5.2.1. 마찰 전기를 이용한 파력 에너지 하베스팅 기술

마찰 전기를 이용한 에너지 하베스팅 기술은 출력 값이 크기 때문에 작은 움직임을 이용하여 에너지를 추출해도 전기 소자를 작동시킬만한 충분한 전력이 생성된다. 특히, 소자의 제조법이 간단하고 대량 생산이 가능하기 때문에 광범위한 영역에서 에너지 추출이 가능하다. 그 중 한 예가 바다에서 항상 존재하는 파력 에너지를 전기 에너지로 변환시키는 기술이다[70].

최근 한 연구에서는 마찰 전기를 이용하여 에너지 하베스팅 소자를 만들었는데, 이 소자는 FEP 박막(Fluorinated Ethylene Propylene)과 그 밑에 전극을 붙여 만든 IE-TENG(Interfacial electrification enabled TENG)과 나노 구조의 PTFE박막(Polytetrafluoroethylene)과 탄성력이 있는 유연 전극을 붙여 만든 impact-TENG, 두 부분으로 구성되어 있다. IE-TENG은 FEP 필름과 물 사이 접촉 면적이 변화할 때 물과 고체 사이 계면으로부터 생기는 정전기 에너지를 추출하며, I-TENG은 파도에 의해 PTFE 필름과 전극이 접촉되고 분리되는 과정을 이용하여 교류 출력 값을 만든다. 파도가 0.5m/s로 전파될 때, IE-TENG과 I-TENG은 각각 5.1 μ A와 4.3 μ A의 전류를 생성했다. 뿐만 아니라 이 소자는 떨어지는 빗방울을 이용하여 에너지를 추출할 수 있는데, IE-TENG과 I-TENG은 각각 9.1 μ A, 3.9 μ A의 전류를 출력했다. 이 연구에서는 에너지 하베스팅 소자와 LED를 통합하여 조난 신호를 나타내는 구명조끼를 개발하였는데, 직렬로 50개가 연결된 LED 소자를 구동시켜 성공적으로 SOS 신호를 발광했다[70].



5.2.2. 마찰 전기 에너지 하베스팅을 이용한 자가 발전 센서와 건강 관리 시스템

최근 막 형태의 마찰 전기 센서(membrane-based triboelectric sensor, M-TES)가 개발되었는데, 이 센서는 기압 변화로 인해 표면 전하가 형성되고 이로 인해 전압이 생성되는 과정을 원리로 한다. 이 센서는 대기압에 비하여 주변 기압이 증가하거나 감소할 때, 각각 0.34Pa, 0.16Pa의 매우 높은 감지 분해능을 가지는 것으로 측정되었다. 또한 M-TES를 단일 처리 장치(Single Processing Unit)에 연결하면 걸음 걸이, 호흡, 심장 박동 등의 생물학적인 정보를 알 수 있어 건강 관리 분야에 응용될 수 있다[71].

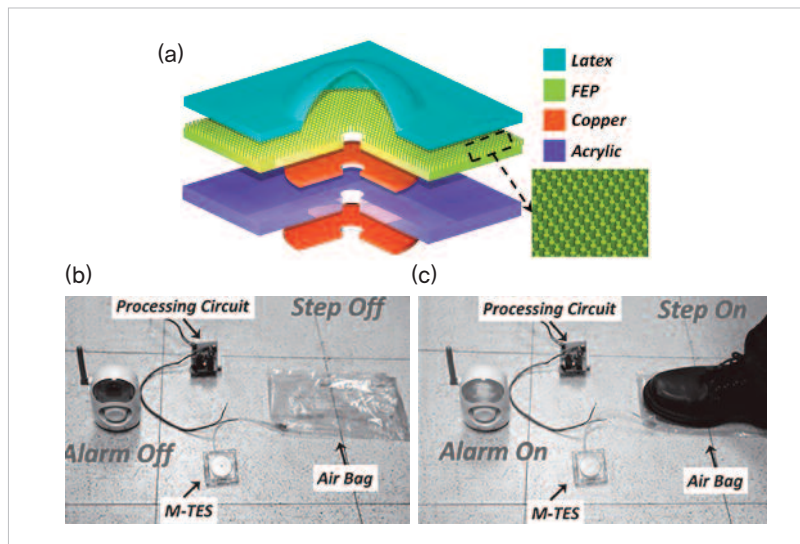


그림 15. 마찰 전기 에너지 하베스팅을 이용한 자가 발전 센서와 건강 관리 시스템. (a) 자가 발전 센서의 구조, (b) 인간의 걸음걸이를 감지하는 처리 장치와 통합된 M-TES, 발기 전 작동하지 않는 센서. (c) 밟은 후 작동하는 센서.[71]

그림 15(a)는 막 형태의 마찰 전기 센서 소자의 구조를 나타내며 그림 15(b)와 (c)는 단일 처리 장치에 이 센서가 연결되었을 때, 인간의 걸음걸이를 감지하는 모습을 나타낸다. 이 센서의 구조는 아크릴 기판 위에 전극의 역할을 하는 구리가 양면으로 증착되는 형태를 기반으로 한다. 그 후 FEP(Fluorinated ethylene propylene)필름이 위쪽 전극에 붙여지며 공기가 통하는 채널이 소자의 중간에 형성된다. 마지막으로 라텍스 막은 FEP 필름에 놓여지며 에폭시는 막과 FEP 표면에서 생길 수 있는 공기의 누출을 막는데 사용된다. 이 때 M-TES는 더 높은 민감도를 갖기 위하여 나노로드 형태로 표면처리를 시킨다. 표면 처리는 탑-다운(top-down) 건식 식각 방식을 사용한다. 이러한 방식으로 제작된 M-TES가 에어백, 논리 회로 및 경보 알람과 연결되면, 에어백이 압력을 받을 때 생기는 압력 차이를 이용하여 전압 신호를 만들 수 있다. 이 압력 센서는 안전 감시 시스템 또는 움직임을 감지하는 기술에 사용될 수 있으며 특히 압력 센서는 의학, 약학, 간호 분야와 같은 넓은 분야에 응용이 가능하다[71].

5.3. 유연 열전 에너지 하베스팅의 응용

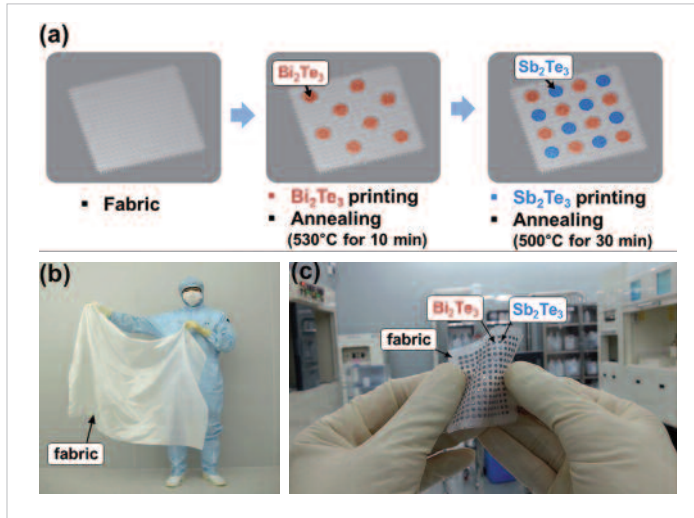


그림 16. (a) 유리섬유물에 스크린 프린팅된 Bi₂Te₃와 Sb₂Te₃막의 공정과정. (b) 상업적인 유리 섬유직물. (c) 40 mm x40 mm 의 직물 위에 형성된 Bi₂Te₃ and Sb₂Te₃점들.[51]

열전 소자의 응용으로는 배터리를 대체 할 수 있는 자가 발전 무선 센서[72-74]나, 사람의 체온과 주변 온도 차를 이용한 생체의학으로의 응용[75-77], 엔진에서 연소 시 발생하는 열의 하베스팅[78-80], 경보 시스템[81], 그리고 지열발전[82]등이 있다. 특히, 열전 에너지 하베스팅 소자를 직물에 붙이거나 섬유 형태로 제작하여 웨어러블 기술에 접목시킨 기술이 각광받고 있다. 더 나아가서, 에너지 하베스팅 소자를 인공 피부 형태로 만드는 연구도 진행되고 있다.

최근 한 연구는 유리섬유직물(glass fabric)을 기반으로, 열전 에너지 하베스팅 소자를 얇고(~500 μm) 가벼우며(~0.13g/cm²), 유연하게 만들어[51] 웨어러블(wearable) 자가 발전 시스템을 구현했다. 유리섬유직물에 제작된 열전 하베스터는 스크린 프린팅(screen printing) 기법을 이용하였는데, 그림 16(a), 16(b)는 각각 공정 과정의 모식도와 유리 섬유 직물을 나타낸 것이며, 그림 16(c)는 스크린 프린팅 기법으로 제작된 Bi₂Te₃ (n-type) 와 Sb₂Te₃ (p-type)의 점(dots)을 나타낸 것이다. 공정 과정 중, 열처리 동안 무기물 기반의 재료인 Bi₂Te₃와 Sb₂Te₃는 어떠한 손상도 입지 않았다. 이렇게 제작된 열전 에너지 하베스팅 소자는 기존의 유연 열전 소자들에 비해 수십 배 향상된 출력밀도(ΔT=50K에서 3.8mW/cm²와 28mW/g)를 나타내었고, 20mm의 낮은 곡률반경을 가졌다[51].

06

결론

버려지는 에너지를 이용하여 주위 환경으로부터 에너지를 수확하는 에너지 하베스팅 기술은 비용 소모가 거의 없고, 응용 분야에 직접 부착되어 사용이 가능하기 때문에 지속적으로 각광받고 있는 기술이다. 그러나 기존의 부피가 큰 벌크형 에너지 하베스팅 소자는 응용분야가 제한적이고 감도(sensitivity)가 떨어지므로, 최근의 연구는 소자를 유연하고 작게 만드는 것을 중점적으로 진행되고 있으며, 이렇게 제작된 유연 소자들은 다양한 분야로의 기술 적용 및 발전을 이루어 내고 있다.

특히, 미래에는 사물 인터넷의 시대가 도래하여 모든 사물에 네트워크가 형성되기 때문에 무선 통신 기술과 정보 기술이 통합된 창조적 융합 기술인 ICT가 새로운 산업 분야로 자리매김할 것이다[2,7,53]. 그러나 모든 사물에 네트워크용 배터리를 부착하고, 주기마다 배터리를 갈아 끼우는 것은 불가능하다. 따라서 ICT 산업에 에너지 하베스팅 소자를 에너지원으로 활용한 무선 통신 방식은 필수적이다. 뿐만 아니라 웨어러블 기술과 통합된 에너지 하베스팅 기술은 구글 글래스, 스마트 워치, 전자 섬유로 이루어진 패치형 직물, 센서 제품 등 다양한 분야로의 활용은 물론 에너지 하베스팅 소자로 작동되는 센서나 LED는 체내에 삽입되어 체내의 변화를 감지하거나 기관을 서포팅하는 역할로 생명 공학 분야에서 활용될 것이다.

본 리뷰에서는 대표적인 네 가지 에너지 하베스팅 방법으로 압전, 마찰전기, 열전, 페로플루이드를 소개했다. 압전 에너지 하베스팅은 LLO 공법 및 니켈 박리 공법을 바탕으로 BTO, PZT, PMN-PT 등 높은 압전 결합상수(d_{33})를 갖는 물질로 소자를 제작하여 자가발전 심장 박동기, 청각 센서 등 생체공학으로의 응용 연구가 진행되었다. 마찰전기를 이용한 에너지 하베스팅은 다양한 작동 모드를 기반으로 출력량이 많은 에너지 하베스팅 기술, 자가 발전 센서 등 다양한 분야에서 실현 가능성을 보여주었지만 습한 환경에서 구동성이 떨어지고, 마모저항이 낮다는 한계가 존재한다. 유리섬유직물을 기반으로 웨어러블 자가 발전 시스템의 구현에 초점을 맞추고 연구가 진행된 열전 재료나, 액체 구조를 기반으로 유동적인 형태를 가질 수 있는 페로플루이드는 그들 각각이 가지고 있는 장점에도 불구하고 아직까지 에너지 변환 효율이 너무 낮다는 단점이 있다.

이러한 한계들을 극복하기 위하여, 압전 재료의 경우, 사업화 및 상용화를 위해서 소자 제작 비용의 절감과 소자의 고효율화, 소자의 대면적화, 양산 공정 등에 대한 연구개발이 필요하다. 또한 압전 에너지 하베스팅 소자의 특성상 체내에 삽입되는 재료로 활용 가치가 높기 때문에, 압전 특성이 뛰어난 비납(lead-free)계 압전 재료의 개발이 핵심적인 연구 과제가 될 것이다[15]. 센서로 활용 가치가 높은 마찰 전기를 이용한 에너지 하베스팅 기술은 두 물질이 마찰되어야 한다는 메커니즘적 한계를 가지고 있으며, 앞서 언급했듯이 습한 환경에서 구동성과 내구성이 떨어진다[19]. 전자의 경우 소자의 구조를 변화시켜 문제를 개선하는 연구가 진행되어야 하며, 후자의 경우 유기물 기반 물질이 아닌 다른 재료를 선택하거나 밀폐형 구조를 만들어 단점을 보완해야 할 것이다. 또한 웨어러블 분야의 핵심으로 각광받고 있는 열전 재료의 경우, 주변 환경과 인간의 체온 사이의 온도 차가 50K 정도로 크지 않기 때문에 아직까지 직접적인 응용이 어렵다. 따라서 에너지 변환 효율을 더 높여 스마트워치(smart watches)나 의학 센서 등의 차세대 웨어러블 전자 장비에 활용될 수 있도록 연구가 지속적으로 진행되어야 할 것이다. 마지막으로, 페로플루이드는 액체라는 큰 장점이 있기 때문에 연구할만한 가치가 있는 매력적인 소재이다. 하지만 페로플루이드를 이용한 에너지 하베스팅은 아직 연구 실적이 미미하며, 생성되는 전력 또한 1mW 정도의 수준이다. 따라서 이 재료를 활용할 수 있는 응용 분야를 찾는 것보다는 소자의 효율을 높이는 쪽으로 연구가 진행되어야 할 것이다.

사물인터넷 시대로 대변되는 미래의 ICT기반 기술은 대전력 청정 에너지원의 개발과 이동형 자가 발전 시스템을 동시에 요구하고 있다. 두 가지를 동시에 해결이 가능한 유연 에너지 하베스팅 소자의 실용화는 사물인터넷의 실현에 큰 기여를 하게 될 것이다. 이를 위해선 유연 에너지 하베스팅 소자의 제작 비용 절감과 고효율화를 위한 노력 및 연구가 더 진행되어야 할 것이다.





Energy Harvesting



Lee Keon-jae

이건재

학력 • University of Illinois 재료공학과 박사
연세대학교 신소재공학과 학사

경력 • 現 KAIST 신소재공학과, 전기공학과 부교수
現 코오롱-KAIST 라이프스타일 이노베이션 센터 컨설턴트
前 미국 하버드의대 방문교수

Wang Hee-seung

왕희승

학력 • KAIST 신소재공학과 석사과정
고려대학교 신소재공학부 학사

Kim Dong-hyun

김동현

학력 • KAIST 신소재공학과 석사과정
성균관대 신소재공학부 학사

Reference

- [1] Park, K. Il, Lee, M., Liu, Y., Moon, S., Hwang, G. T., Zhu, G., Lee, K. J., *Adv. Mater.*, 2013, 24(22), 2999–3004.
 - [2] 정영훈, “압전 에너지 하베스팅 기술”, 한국세라믹기술원, 2014.
 - [3] Wang, Z. L., *ACS Nano*, 2013, 11, 9533–9557.
 - [4] Wang, Z. L., & Wu, W. *Angewandte Chemie – International Edition*, 2012, 51(47), 11700–11721.
 - [5] Hwang, G. T., Park, H., Lee, J. H., Oh, S., Park, K. Il, Byun, M., Lee, K. J., *Adv. Mater.*, 2014, 26(28), 4880–4887.
 - [6] Z. L. Wang, *Adv. Funct. Mater.* 2008, 18, 3553–3567.
 - [7] 노임준, 신백균, “나노기술 기반 마이크로 에너지 하베스팅”, 조명·전기 설비 학회지, 2014
 - [8] Kim, S. J., We, J. H. & Cho, B. J., *Energy Environ. Sci.*, 2014, 7, 1959.
 - [9] M. Southcott, K. MacVittie, J. Halamek, L. Halamkova, W. D. Jemison, R. Lobel, E. Katz, *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 2013, 15, 6278.
 - [10] Ha, M., Park, J., Lee, Y. & Ko, H., *ACS Nano*, 2015, 150319161103007
 - [11] Ahiska, R. & Mamur, H., *International Journal of Renewable Energy Research*, 2014, 4, 128–136.
 - [12] Bibo, a., Masana, R., King, a., Li, G., & Daqaq, M. F., *Physics Letters, Section A: General, Atomic and Solid State Physics*, 2012, 376(32), 2163–2166.
 - [13] F. Matsuura, Y. Matsubara, T. Sawada, T. Tanahashi, *Advanced Computational and Design Techniques in Applied Electronic Systems*, 1995, 517.
 - [14] J. Neuringer, R. Rosensweig, *Physics of Fluids*, 1964, 7, 1927.
 - [15] 이수진, 김상우, 함영복, “압전 에너지 하베스팅 기술동향 및 전망”, 한국과학기술정보연구원, 2013
 - [16] Ahiska, R. & Mamur, H., *International Journal of Renewable Energy Research*, 2014, 4, 128–136.
 - [17] Mamur, H. & Ahiska, *IET Renew. Power Gener.*, 2013, 7, 700–706.
 - [18] Hsu, C.-T., Yao, D.-J., Ye, K.-J. & Yu, B., *J. Renew. Sustain. Energy*, 2010, 2, 013105.
 - [19] Lee, S. H., Jeong, C. K., Hwang, G.-T., & Lee, K. J. *Nano Energy*, 2014, 1–15.
 - [20] Park, K. Il, Xu, S., Liu, Y., Hwang, G. T., Kang, S. J. L., Wang, Z. L., & Lee, K. J., *Nano Lett.*, 2010, 10(12), 4939–4943.
 - [21] Hwang, G.-T., Byun, M., Jeong, C. K., & Lee, K. J., *Adv. Healthcare Mater.*, 2014.
 - [22] Park, K. Il, Xu, S., Liu, Y., Hwang, G. T., Kang, S. J. L., Wang, Z. L., & Lee, K. J., *Nano Lett.*, 2010, 10(12), 4939–4943.
 - [23] K.-I. Park, J. H. Son, G.-T. Hwang, C. K. Jeong, J. Ryu, M. Koo, I. Choi, S. H. Lee, M. Byun, Z. L. Wang, K. J. Lee, *Adv. Mater.*, 2014, 26, 2514.
 - [24] J. Kwon, W. Seung, B. K. Sharma, S. W. Kim, J. H. Ahn, *Energy Environ. Sci.*, 2012, 5, 8970.
 - [25] K.-I. Park, C. K. Jeong, J. Ryu, G.-T. Hwang, K. J. Lee, *Adv. Energy Mater.*, 2013, 3,
-

1539.

- [26] R. Yang , Y. Qin , C. Li , G. Zhu , Z. L. Wang , *Nano Lett.*, 2009, 9, 1201.
- [27] Y. F. Hu , Y. Zhang , C. Xu , L. Lin , R. L. Snyder , Z. L. Wang , *Nano Lett.*, 2011, 11, 2572.
- [28] 이수재, “압전 나노 발전소자의 기술개발 동향”, 압전발전지식연구회, 2012.
- [29] Park, K. Il, Jeong, C. K., Ryu, J., Hwang, G. T., & Lee, K. J., *Adv. Energy Mater.*, 2013, 3(12), 1539–1544.
- [30] H. Sun, H. Tian, Y. Yang, D. Xie, Y. C. Zhang, X. Liu, S. Ma, H. M. Zhao, T. L. Ren, *Nanoscale*, 2013, 5, 6117–6123.
- [31] K.-I. Park, M. Lee, Y. Liu, S. Moon, G. T. Hwang, G. Zhu, J. E. Kim, S. O. Kim, D. K. Kim , Z. L. Wang , K. J. Lee , *Adv. Mater.*, 2012, 24, 2999–3004.
- [32] K. Y. Lee, D. Kim, J. H. Lee, T. Y. Kim, M. K. Gupta, S. W. Kim, *Adv. Funct. Mater.*, 2014, 24, 37–43.
- [33] Jeong, C. K., Lee, J., Han, S., Ryu, J., Hwang, G.-T., Park, D. Y., Lee, K. J., *Adv. Mater.*, 2015.
- [34] T. R. Shrout, S. J. Zhang, *J. Electroceram.*, 2007, 19, 113.
- [35] Y. H. Do, M. G. Kang, J. S. Kim, C. Y. Kang, S. J. Yoon, *Sens. Actuators, A-Phys.*, 2012, 184, 124.
- [36] Y. F. Hu, L. Lin, Y. Zhang, Z. L. Wang, *Adv. Mater.*, 2012, 2, 110.
- [37] M. Southcott, K. MacVittie, J. Halamek, L. Halamkova, W. D. Jemison , R. Lobel , E. Katz , *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 2013, 15, 6278.
- [38] Z. W. Yin , H. S. Luo , P. C. Wang , G. S. Xu , *Ferroelectrics*, 1999 , 229 , 207.
- [39] H. X. Fu, R. E. Cohen, *Nature*, 2000, 403, 281.
- [40] S. W. Bedell, K. Fogel, P. Lauro, D. Shahrjerdi, J. A. Ott, D. Sadana, *J. Phys. D Appl. Phys.*, 2013, 46, 152002 .
- [41] Y. J. Zhai, L. Mathew, R. Rao, D. W. Xu, S. K. Banerjee, *Nano Lett.*, 2012, 12, 5609.
- [42] Wang, S., Lin, L. & Wang, Z. L., *Nano Lett.*, 2012, 12, 6339–46.
- [43] Zhu, G., Lin, Z. H., Jing, Q., Bai, P., Pan, C., Yang, Y., Wang, Z. L., *Nano Lett.*, 2013 13(2), 847–853.
- [44] Zhu, G., Lin, Z. H., Jing, Q., Bai, P., Pan, C., Yang, Y., ... Wang, Z. L., Toward large-scale energy harvesting by a nanoparticle-enhanced triboelectric nanogenerator. *Nano Letters*, 2013, 13(2), 847–853.
- [45] Wang, Z. L., *Faraday Discuss.*, 2014, 176, 447–458.
- [46] Jeong, C. K., Baek, K. M., Niu, S., Nam, T. W., Hur, Y. H., Park, D. Y., Hwang, G. T., Byun, M. H., Wang, Z. L., Jung, Y. S., Lee, K. J., *Nano Lett.*, 2014, 14, 7031–7038.
- [47] Bai, P., Zhu, G., Jing, Q., Yang, J., Chen, J., Su, Y., Ma, J., Zhang, G., Wang, Z. L., *Adv. Funct. Mater.*, 2014, 24, 5807–5813.
-

Reference

- [48] Lin, Z.-H., Zhu, G., Zhou, Y. S., Yang, Y., Bai, P., Chen, J., Wang, Z. L., *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.*, 2013, 52, 5065–9.
- [49] Lin, Z.-H., Xie, Y., Yang, Y., Wang, S., Zhu, G., Wang, Z. L., *ACS Nano*, 2013, 7, 4554–4560.
- [50] Wang, S., Xie, Y., Niu, S., Lin, L. & Wang, Z. L., *Adv. Mater.*, 2014, 26, 2818–24.
- [51] Kim, S. J., We, J. H. & Cho, B. J., *Energy Environ. Sci.*, 2014, 7, 1959.
- [52] Hazan, E., Ben-Yehuda, O., Madar, N., & Gelbstein, Y., *Advanced Energy Materials*, 2015.
- [53] 임영택, 이선우, “유연 압전 에너지 하베스팅 -기술”, 조명.전기설비학회지, 2014.
- [54] G. D. Nelson, *Tex. Heart Inst. J.*, 1993, 20, 12.
- [55] J. S. Perlmutter, J. W. Mink, *Annu. Rev. Neurosci.*, 2006, 29, 229.
- [56] M. Schwarz, R. Hauschild, B. J. Hosticka, J. Huppertz, T. Kneip, S. Kolnsberg, L. Ewe, H. K. Trieu, *IEEE Trans. Circuits*, 1999, 46, 870.
- [57] Lee, H. S., Chung, J., Hwang, G., Jeong, C. K., Jung, Y., Kwak, J., Lee, K. J., *Adv. Funct. Mater.*, 2014, 24(44).
- [58] Jeong, C. K., Park, K.-I., Son, J. H., Hwang, G.-T., Lee, S. H., Park, D. Y., Lee, K. J., *Energy Environ. Sci.*, 2014, 7(12), 4035–4043.
- [59] G. T. Hwang, D. Im, S. E. Lee, J. Lee, M. Koo, S. Y. Park, S. Kim, K. Yang, S. J. Kim, K. Lee, K. J. Lee, *ACS Nano*, 2013, 7, 4545.
- [60] D. N. Rushton, *Physiol. Meas.*, 1997, 18, 241.
- [61] L. Gu, N. Y. Cu, L. Cheng, Q. Xu, S. Bai, M. M. Yuan, W. W. Wu, J. M. Liu, Y. Zhao, F. Ma, Y. Qin, Z. L. Wang, *Nano Lett.*, 2013, 13, 91.
- [62] T. E. Starzl, R. A. Gaertner, R. C. Webb Jr., *Circulation*, 1955, 11, 952.
- [63] E. Venkatragavaraj, B. Satish, P. R. Vinod, M. S. Vijaya, *J. Phys. D, Appl. Phys.*, 2001, 34, 487.
- [64] G. A. Zhu, R. S. Yang, S. H. Wang, Z. L. Wang, *Nano Lett.*, 2010, 10, 3151.
- [65] C. Dagdeviren, B. D. Yang, Y. W. Su, P. L. Tran, P. Joe, E. Anderson, J. Xia, V. Doraiswamy, B. Dehdashti, X. Feng, B. W. Lu, R. Poston, Z. Khalpey, R. Ghaffari, Y. G. Huang, M. J. Slepian, J. A. Rogers, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, 2014, 111, 1927.
- [66] C. Pan, Z. Li, W. Guo, J. Zhu, Z. L. Wang, *Angew. Chem.*, 2011, 50, 11192.
- [67] Wang, Z. L., & Song, J., *Science (New York, N.Y.)*, 2006, 312(5771), 242–246.
- [68] M. A. Karami, D. J. Inman, *Appl. Phys. Letters*, 2012, 100, 4.
- [69] Lin, Z.-H., Cheng, G., Yang, Y., Zhou, Y. S., Lee S. M., Wang, Z. L., *Adv. Funct. Mater.*, 2014, 24, 2810–2816.
- [70] Su, Y., Wen, X., Zhu, G., Yang, J., Chen, J., Bai, P., Lin Wang, Z., *Nano Energy*, 2014, 9, 186–195.
- [71] Bai, P., Zhu, G., Jing, Q., Yang, J., Chen, J., Su, Y., Wang, Z. L., *Advanced Functional Materials*, 2014, 24(37), 5807–5813.
-

-
- [72] Leonov V, Torfs T, Fiorini P, Van Hoof C., IEEE Sens J, 2007, 7, 650–657.
- [73] Dalola S, Ferrari V, Guizzetti M, Marioli D, Sardini E, Serpelloni M, Taroni A., In Proceedings of the 2008 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2008, 1376–1380.
- [74] Samson D, Kluge M, Becker T, Schmid U., Sensor Actuat A-Phys, 2011, 172, 240–244.
- [75] Torfs T, Leonov V, Yazicioglu RF, Merken P, Van Hoof C, Vullers RJM, Gyselinckx B., In Proceedings of the IEEE Sensors 2008, 1269–1272.
- [76] Lay-Ekuakille A, Vendramin G, Trotta A, Mazzotta G., In Proceedings of the MeMeA 2009 – International Workshop on Medical Measurements and Applications, 2009, 1–4.
- [77] Koplw M, Chen A, Steingart D, Wright PK, Evans JW., In Proceedings of the 5th International Summer School and Symposium on Medical Devices and Biosensors, 2008, 322–325.
- [78] Park A, Yoo J, Kim S., In: Proceedings of the 2010 International Conference on Electrical Machines and Systems, 2010, 2012–2015.
- [79] Karri MA, Thacher EF, Helenbrook BT., Energ Convers Manage, 2011, 52, 1596–1611.
- [80] LaGrandeur J, Crane D, Hung S, Mazar B, Eder A., In Proceedings of the 2006 International Conference on Thermoelectrics, 2006, 343–348.
- [81] Hasebe M, Kamikawa Y, Meiarashi S., In Proceedings of the 2006 International Conference on Thermoelectrics, 2006, 697–700.
- [82] Niu X, Yu J, Wang S., J Power Sources, 2009, 188, 621–626.

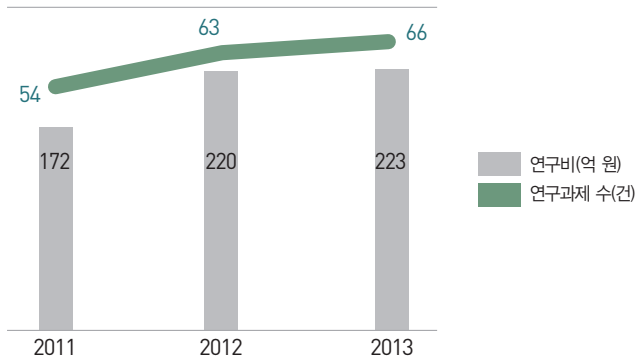
국가 R&D 현황 분석

최근 3년간('11~'13년) 에너지하베스팅과 관련된 연구개발사업을 분석해 보았다.

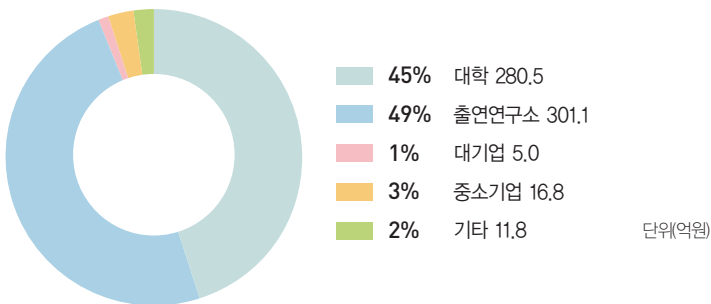
과제 선별 기준
연구요약문 내 아래 키워드를 포함하고 있는 과제를 선별한 후 연구내용을 바탕으로 분석 대상 선정
(압전) and (에너지), or (열전) and (에너지) or (정전) and (에너지) or (자성) and (에너지)

분석 결과 최근 3년간 총 183건의 과제에 615억원의 연구비가 투자됨

연도별 연구비와
연구과제 건수



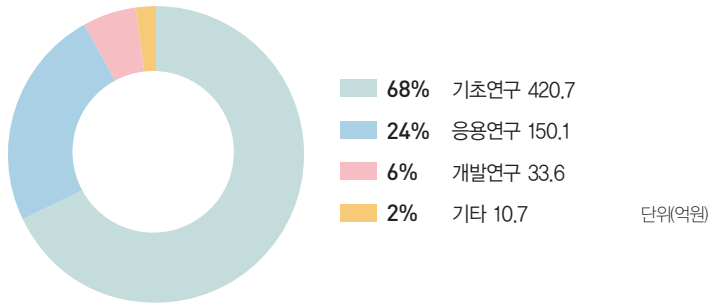
(연구수행주체) 출연연구소가 30건의 과제에 대해 301억원을 지원받아 큰 규모의 연구를 주로 수행하였으며, 대학이 141건의 과제에 대하여 280억원을 지원받아 가장 많은 연구를 수행함



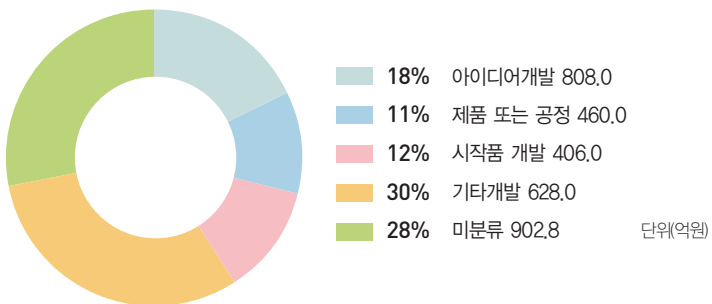
(연구수준) 연구개발단계는 기초연구단계가 68%로 주를 이루었으나, 연구개발성격 및 기술수명주기는 에너지하베스팅의 기술 성격 상 다양하게 분포하는 것으로 나타남

- 기초연구를 중심으로 에너지하베스팅 기술이 연구되고 있으나 이를 응용(24%, 150억원), 개발(6%, 34억원) 하기 위한 연구도 활발히 이루어지고 있음
- 에너지하베스팅 기술을 활용한 아이디어 개발(18%), 제품 또는 공정 개발(11%), 시작품 개발(12%) 등 다양한 성격의 연구가 진행되고 있음
- 기술수명주기적 측면에서 도입기(46%)와 성장기(35%)가 큰 차이를 보이지 않고 일부는 성숙기(1%)에 접어든 것으로 보아 이미 활용이 충분히 가능한 기술임을 확인할 수 있음

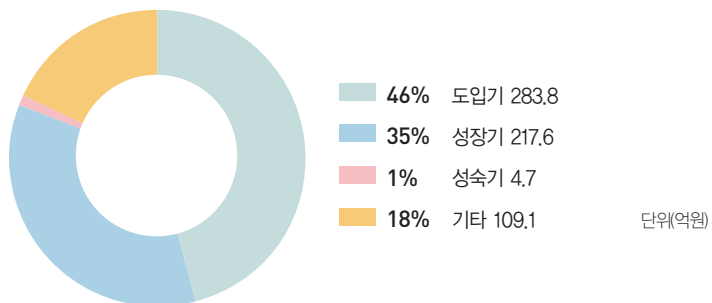
연구개발단계



연구개발성격

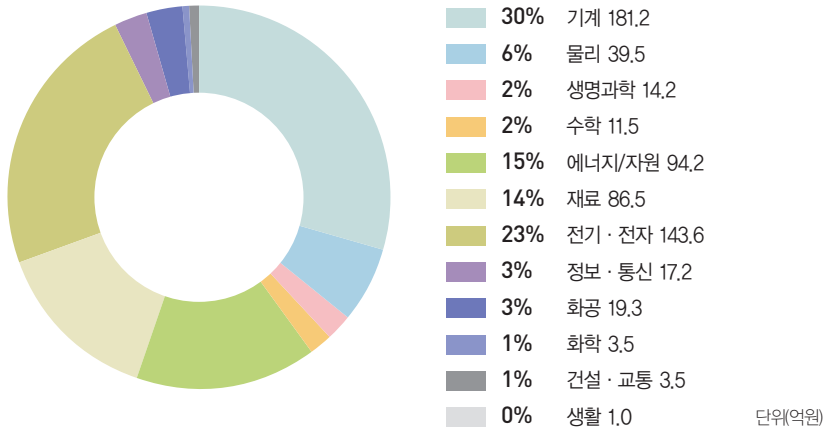


기술수명주기

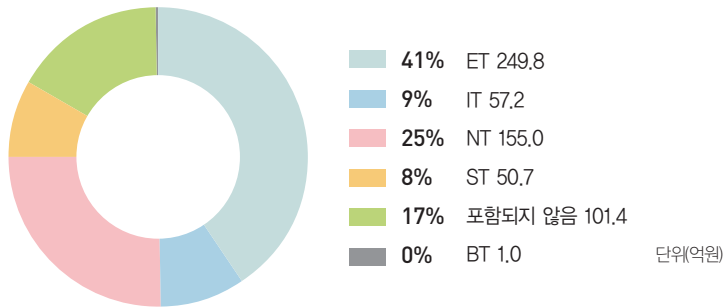


(연구분야) 국가과학기술표준분류와 미래유망 신기술분류(6T), 국가기술지도분류(NTRM)를 분석한 결과 기계, 전기/전자 분야를 중심으로 에너지 기술 개발 연구가 주를 이룸

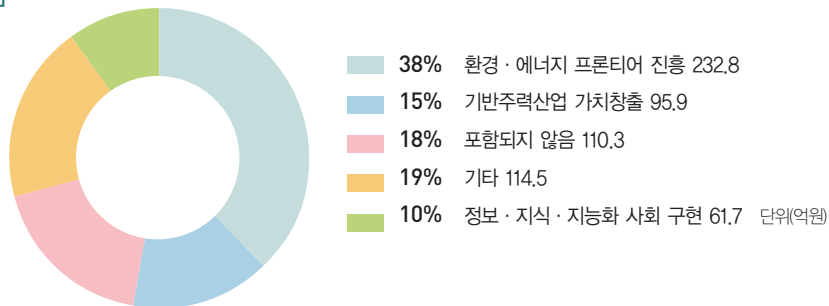
연구분야 [국가과학기술표준분류]



연구분야[6T]



연구분야[NTRM]



- 에너지하베스팅 기술 구현을 위한 장치 개발 및 시스템 구현 연구가 주를 이루어 기계, 전기/전자 분야 비율이 높게 나타남

- 하지만 에너지하베스팅을 위한 재료 연구나 원리 탐구, 효율 증진을 위한 연구를 위해 물리, 재료, 에너지/자원, 화공, 화학 분야에서도 많은 연구가 이루어지고 있음
- 더 나아가 에너지하베스팅 기술을 활용하는 분야에서도 이를 효율적으로 활용하기 위한 연구가 진행되어, 건축/교통, 생명과학, 생활, 정보/통신 분야에서도 연구가 이루어지고 있는 것으로 나타남

- 에너지하베스팅은 기술명 그대로 에너지를 수확하는 기술이기 때문에 6T 분석에서 ET(41%)에 가장 많이 포함됨

- 하지만 에너지하베스팅 구현을 위한 재료나 공정기술이 대다수 NT와 관련이 있기 때문에 NT 또한 25%로 높게 나타남
- 반면 IT와 ST의 경우 에너지하베스팅 기술 활용되는 것과 관련하여 각각 9%와 8%의 연구가 이에 해당되는 것으로 나타남

- NTRM 분석 결과도 역시 환경/에너지 프론티어 진흥이 38%로 가장 높게 나타났으며, 에너지하베스팅 기술이 다양한 분야에 활용될 수 있는 만큼 정보-지식-지능화 사회 구현(10%) 및 기반주력산업 가치창출(15%)로도 많이 나타남

- 그럼에도 불구하고 기타나 포함되지 않음이 각각 19%와 18%가 존재하는 것으로 보아 앞으로 그 활용처가 더욱더 다양해 질 것으로 생각됨





4D PRINTING & PROGRAMMABLE MATTER
—
ENERGY HARVESTING