4D printing with smart materials and structures

Hyeonsoo Song, Jiyun Kim[†]

School of Materials Science and Engineering, Ulsan National Institute of Science and Technology,
Ulsan 44919, Korea

스마트 소재 및 구조 기반 4D 프린팅 기술 동향

송현서, 김지윤[†]

울산과학기술원 신소재공학부

(Received March 2, 2020; Accepted March 17, 2020)

Abstracts

Recently, 4D printing technology has received considerable attention in various industries and research fields including soft robotics, tissue engineering, electronics. In 4D printing process, 3D printed object transforms itself into programmed structure by the input of external energy. Thus, this process requires not only smart materials, capable of changing their properties or features in response to external stimuli such as electricity, temperature, light, etc., but also smart structures, multi-material 3D printing, simulation and so on. In this review, the concept, technical elements and potential of 4d printing are presented.

Keywords: 4D printing, Smart materials, Programmable matter, Smart structure, 3D printing

서론

초지능, 초연결, 초융합 사회를 지향하는 4차 산업혁명의 시대가 도래했다. 이에 IoT, 빅데이터, 인공지능 등의 다양한 디지털 기술과 기기들을 기반으로 산업의 경계를 뛰어넘고 사람과 사물, 사물과 사물의 관계를 재

정립하려는 시도들이 많아지고 있다. 그러나 진정한 초지능 사회로 진입하기 위해서는, 정적인 디지털 기기에 서 나아가 사물에 대한 새로운 관점이 필요하다. 즉, 사물이 무형의 정보를 처리하는 것 뿐만 아니라 겉으로 보여지는 형상과 물성 자체를 변화시키고 프로그래밍할 수 있다면, 사람과 사물, 사물과 사물 간의 관계가 혁신

[†]Corresponding Author: Jiyun Kim
E-mail: jiyunkim@unist.ac.kr

Fig. 1. a) 4D 프린팅의 개념⁴⁻⁶⁾ b) MIT 자가조립연구소에서 개발한 4D 프린팅 구조물

적으로 재정립될 수 있을 것이다.

이러한 사물 지능을 구현하기 위해서는 형상 및 물성을 변화시킬 수 있는 소재들이 필요한데, 이들은 넓게 프로그래머블 소재 (Programmable Matter)로 불리고 있다. 가장 근본적이고 혁신적 개념으로는 카네기멜론 S. G. Goldstein 연구팀이 제안한 'Claytronics'가 있으나 이 개념에서 요구하는 초지능 나노로봇 (Catom)을 만들고 제어하는 것은 매우 어려운 일이라 아직까지는 현실성이 부족하다.¹⁾ 이 밖에도, 군집 로봇 (Swarm robotics)²⁾이나 모듈화된 로봇 (Modular robot)³⁾의 형태로 연구한 사례들이 있으나, 구성된 형상의 복잡도나 해상도 측면에서 아직 부족한 부분이 많다. 이에 프로그래머블 소재를 구현하기 위한 또 다른 기술로, 스마트 소재와 이들의 자가조립을 이용한 4D 프린팅 기술이 연구되어 왔다. 그러므로 본고에서는 4D 프린팅의 정의와 기술 요소들을 소개하고자 한다.

2. 본문

2.1. 4D 프린팅의 정의

4D 프린팅에 앞서 3D 프린팅의 특징을 살펴보면, 3D 프린팅은 기존의 금형이나 절삭이 아닌, 재료를 한 층씩 쌓는 적층 방식 (Additive manufacturing)을 이용해 3차원 사물을 만드는 기술이다. 다양한 프린팅 재료를 이용해 복잡하고 정밀한 형상의 사물을 제작할 수 있기 때문에 그 응용 분야가 넓을 뿐 아니라, 제조공정의 간소화, 다품종 소량 생산을 가능하게 하여 신시장을

창출하고 전통적인 산업 구조에 큰 영향을 미치고 있다.

하지만 이러한 3D 프린팅의 장점에도 불구하고, 기존의 3D 프린팅은 정적인 사물만을 생산하기 때문에 초지능 사회 진입을 위한 스마트 사물을 제작하기에는 부족함이 따른다. 이를 위해 제안되고 개발 중인 기술이 4D 프린팅 기술이다. 4D 프린팅은 2013년 미국 MIT 자가조립연구소 (Self-assembly Lab)의 Skylar Tibbitts 교수가 '4D 프린팅의 출현 (The emergence of 4D printing)'이라는 제목의 TED 강연에서 처음 제안한 개념으로,⁴⁾ 3D 프린팅에서 파생된 개념이다. 3D 프린팅이 개인이 상상하고 설계한 가상의 형상을 그대로 물리적 세계에 실현시켜주는 기술이라면, 4D 프린팅은 온도나 습도 등의 외부 자극 요소에 의해 따라 3D 프린팅된 사물이 시간에 따라 스스로 물성이나 형상을 변화할 수 있게 만드는 기술이다 (Fig. 1).⁵⁻⁷⁾ 즉, 4D 프린팅 기술을 이용하면, 자극 반응형 스마트 소재를 잘 설계된 3차원 구조로 프린팅할 수 있기 때문에, 3D 프린팅된 제품의 정적인 특징을 극복하고 외부 환경에 스마트하게 적응하는 능동적인 제품들을 생산할 수 있다. 이러한 관점에서 4D 프린팅은 소프트 로보틱스, 바이오 프린팅, 패션, 예술, 건축, 자동차, 의료, 콘텐츠 등 기존 3D 프린팅의 응용 분야를 모두 포함할 수 있고, 나아가 지능형 기능을 기반으로 새로운 시장을 창출할 수 있는 가능성을 지니고 있다.

4D 프린팅 기술에서 가장 핵심이 되는 기술 요소들은 (1) 프린팅이 가능한 스마트 소재, (2) 다중물질의 형상을 디자인하는 구조, (3) 스마트 소재의 3D 프린팅 기술

Fig. 2. 스마트 소재 (자극 반응형 소재)의 외부 자극에 따른 분류⁹⁾

그리고 (4) 설계 및 변형 시뮬레이션이다.

2.2. 4D 프린팅과 스마트 소재

4D 프린팅에서 가장 핵심적인 부분 중 하나는 자극 반응형 소재 (Stimuli-responsive material), 또는 스마트 소재 (Smart material)이다. 스마트 소재들을 적절하게 설계하여 3D 프린팅으로 제작하는 것이 4D 프린팅 기술이기 때문이다.

2.2.1. 스마트 소재의 종류

스마트 소재란 특정 외부환경의 자극에 반응하여 형상 또는 물성을 변화시킬 수 있는 소재를 의미한다. 이러한 반응을 외부 자극에 적응하는 지능적 거동이라 일컬으며, 외부 자극에는 습도, 온도, 전, 자기장, 압력, 빛, 표면장력 등 매우 다양한 에너지원이 포함된다. 대부분의 스마트 소재는 한 가지 자극에 한 종류의 기능 변화를 보여주는데, 예를 들어 온도가 높아지면 구부러지는 등 아직까지는 기초적인 기능 수준에서 동작한다. 하지만 추가적인 기능과 물성을 조합하면 복잡한 전기/기계적 시스템의 부품으로 활용될 수 있다. 이러한 특징을 기반으로 스마트 소재는 액추에이터, 센서부터 자동차, 로봇, 생체의료소자, 에너지 하베스팅 소자까지 다양한 분야에 이르는 응용 분야에 활용되는 연구가 이루어지고 있다.⁸⁾

이러한 스마트 소재를 분류하기 위해 사용될 수 있는 기준은 다양하다. 그 중에서, 소재에 가해지는 외부 자극의 종류를 기준으로 소재를 분류하면 대표적인 스마트 소재들은 다음과 같이 분류된다.⁹⁾ (1) 전기 자극에 반응하는 전도성 고분자 (Conductive polymer), 이온성 고분자 (Ionic polymer), 액정 탄

성 중합체(Liquid crystal elastomer), 유전 탄성체 (Dielectric elastomeric actuator), 전기 유변 유체 (Electrorheological Fluid), 전기 전도성 복합체(Conductive composite). (2) 자기 자극에 반응하는 자성 유체 (Ferrofluid), 자기 유변 유체 (Magnetorheological fluid), 자성 복합체 (Magnetic composite). (3) 온도에 반응하는 형상 기억 고분자 (Shape memory polymer), 형상 기억 합금 (Shape memory alloy), 액정 탄성 중합체 (Liquid crystal elastomer), 하이드로젤 (Hydrogel), 액체 금속 (Liquid metal). (4) 빛에 반응하는 아조벤젠 기반 고분자 (Azobenzene containing polymer). (5) 내부 유체의 압력에 변형되는 탄성 중합체 (Elastomer) 등이 있다.

2.2.2. 스마트 소재의 프린팅 가능성

위의 모든 스마트 소재가 4D 프린팅 소재로 사용될 수 있는 것은 아니다. 스마트 소재를 4D 프린팅 하는데 있어서 가장 중요한 것은 일단 3D 프린팅이 가능한 소재여야 한다는 것이다. 4D 프린팅을 달성하는 가장 간단한 방법으로 단일 스마트 재료를 사용한 3D 프린팅을 하는 것이 있다. 예를 들어, 고분자 소재의 경우, 열경화, 광경화 등을 통해 제작할 수 있는 기본 소재들이 매우 많기 때문에 FDM, SLA 등의 방식을 이용해 4D 프린팅을 구현하기에 유리하다.

프린팅 가능한 물질에 스마트 기능성 소재들을 섞어 복합재를 만드는 것 역시, 스마트 소재를 이용하여 4D 프린팅을 할 수 있는 소재를 만드는 방법이다. 즉, 형상 기억 고분자, 탄성 중합체, 하이드로젤 등을 이용해 복합체를 만들면 3D 프린팅이 가능한 다양한 스마트 소

재를 제작할 수 있다. 예를 들어, 온도 변화에 반응하는 스마트 소재와 특정 파장의 빛에 열을 발생시키는 입자를 이용해 복합체를 제작하면, 빛에 반응하는 스마트 소재를 제작할 수 있다.¹⁰⁾ 또한, 자성 입자와 프린팅 가능한 탄소중합체를 이용한 복합체를 제작하면, 프린팅 과정에서 자성 특성을 프로그래밍할 수 있는 복잡도 높은 스마트 소재 및 구조를 제작할 수 있다.¹¹⁾ 이러한 방법은 소재의 자극 반응 정도 뿐만 아니라 자극 반응 인터페이스를 제어할 수 있기 때문에 4D 프린팅에 적용 가능한 스마트 소재의 범위를 넓힐 수 있다. 또한, 이러한 방법들로 다양한 스마트 소재를 구조적으로 집적하여 프린팅한 물체의 형상과 물성 변화를 프로그래밍할 수 있게 되면¹²⁻¹³⁾, 복잡한 작동을 필요로 하는 로봇 공학 및 생물 의학 등 광범위한 분야에서 4D 프린팅의 응용 분야를 찾을 수 있을 것이다.

2.3. 4D 프린팅과 스마트 구조

생체 소재들은 이미 다양한 수준의 형상, 물성, 구조적 기능을 가지고 있다. 예를 들어 생체 내 생명정보의 핵심인 DNA와 생명활동의 핵심인 단백질은 모두 1차원 형태의 기본 분자 시퀀스가 3차원으로 자기조립되어 있고, 필요할 경우 형상 변화를 통해 정보를 전달하거나 다양한 기능을 수행할 수 있다. 이러한 구조적 설계는 구조를 구성하는 단일 유닛의 기능에서 나아가 구조 자체로 인한 창발적 기능을 가질 수 있게 한다. 그에 비해 한 가지 물성의 스마트 소재 자체는 보통 단순 변형만 나타내기 때문에, 이들의 단순 변형을 구조적으로 설계하여 자기조립을 통해 복잡한 형상을 만드는 것이 4D 프린팅의 핵심 목표이다. 자기조립의 과정에서 원하는 형상을 어떤 방식으로 만들어낼 수 있는냐에 따라 다양한 구조적 설계 원리가 존재한다. 아래의 내용에서는 그러한 다양한 구조적 설계 방법들인 스마트 구조들을 소개한다.

2.3.1. 오리가미

종이 접기 (Origami)는 단순한 놀이나 예술적 의미에서 나아가, 엔지니어링 장치 및 구조물 디자인을 위한

하나의 설계 방식으로 활용되고 있다.¹⁴⁾ 종이접기 구조는 제작이 쉬울 뿐만 아니라 새로운 형태로 재구성하는 것이 용이하며, 고, 제작, 조립, 보관 및 변형 등 여러 측면에서 장점을 가지고 있다. 또한, 이러한 설계 원리가 거의 모든 스케일에 적용될 수 있다는 것 역시 종이접기의 큰 장점 중 하나이다. 예를 들어, 이미 생명체는 생체 소재인 DNA나 단백질을 접힘 (Folding) 기반으로 나노 스케일에서 구조를 집적한다. 이를 모방하여, 1980년대에 DNA를 접어서 나노 스케일의 빌딩 블록을 만들었던 연구와¹⁵⁾ 2000년대에 DNA 사슬을 원하는 대로 접어 원하는 형상을 만들었던 DNA origami¹⁶⁾ 연구를 시작으로 나노 스케일에서 종이 접기 원리를 활용한 다양한 연구들을 찾아볼 수 있다.

오리가미 구조는 기본구조를 접는 순서와 방식에 따라 자유로운 형상 변형이 가능하다는 특징을 가지고 있기 때문에, 4D 프린팅 분야에서도 활발하게 이용되고 있는 구조 설계법이다. 4D 프린팅 구조에서 접히는 부분을 스마트 소재로 구성하면, 외부 자극에 따라 해당 부분이 접히거나 변형되며 원하는 형상으로 스스로 모양이 바뀌게 된다. 나아가, 기존의 오리가미 구조가 단순히 접혔을 때는 접히는 부분이 견딜 수 있는 하중이 약하다는 점을 보완하기 위해서, 최근에는 쌍안정 구조 (Bistable structure)를 이용한 스프링 오리가미 (Spring origami) 설계법이 제안되어,¹⁷⁾ 오리가미 구조를 더 효과적으로 이용할 수 있는 4D 프린팅 기술이 발전하고 있다. 오리가미 구조는 각 모듈들 사이의 통신 및 결합으로 이용해서 여러 가지 형태로 구조를 변화시킬 수 있는 모듈형 로봇,¹⁸⁾ 그리고 우주선에서 태양 빛을 능동적으로 가릴 수 있는 구조까지¹⁹⁾ 거의 모든 스케일의 시스템에서 다양한 형태로 응용되어 그 가치를 증명하고 있기 때문에, 4D 프린팅 구조와 다양한 시스템을 결합시키는 데에도 매우 유리한 설계법이 될 수 있다.

2.3.2. 키리가미

키리가미는 오리가미의 변형된 형태로, 접은 종이를 미리 디자인된 선을 따라 칼로 흠집을 낸 뒤 종이를 살짝 잡아당겨 3차원 형상을 만드는 구조로, 키리가미 구

Fig. 3. a) 오리가미 구조물의 접기 전과 접기 후 모습¹⁴⁾ b) 스프링 오리가미 구조를 이용한 날개형 액츄에이터¹⁷⁾ c) 키리가미 구조를 이용한 태양전지판²⁰⁾

조는 간단한 과정을 통해 2 차원 에서 3 차원 구조를 만들 수 있다는 장점 때문에 소자설계 뿐 아니라 나노소재의 물리적 특징을 설계하는데도 사용된다. 2015년의 미시건 대학교 연구진들은 이러한 키리가미 구조의 장점을 활용하여 제시한 새로운 형태의 태양 전지판을 제시했다.²⁰⁾ 이것은 얇고 잘 휘는 넓은 태양 전지판 평면에 미리 디자인된 절단 패턴을 따라 절단을 만들고 이것을 살짝 잡아당겨 만든 3차원 형태의 태양전지판이다. 이렇게 만들어진 3 차원 태양전지판은 2 차원 평면 형태에 비해 다양한 각도의 기울기가 형성되어, 달라지는 태양 위치에 따라 태양 에너지 흡수 효율을 높일 수 있었다.

키리가미 구조를 적용하는 물질이 종이에서 다양한 재료들로 확장되면, 재료에 추가된 절단 패턴에 따라 재료의 탄성 및 변형 정도 조절이 가능해진다. 2015 년에는 코넬 대학교 연구팀이 이를 활용하면 신축성을 갖는 전기 전도성 소재 개발 방안을 제시했다.²¹⁾ 그래핀은 탄소 원자들이 결합하여 만든 육각형 벌집 모형의 2 차원 소재이며 높은 안정성을 갖는 반면 인장력을 가하면 찢어지는 성질을 가진다. 이것은 2 차원 소재의 특징상 인장력이 가해졌을 때 특정 부분에 힘이 집중되면서 소재가 견디지 못하기 때문이다. 하지만, 수학적 계산을 바탕으로 소재에 절단 패턴을 추가하면, 인장력을 가할 때는 힘이 분산되어 소재의 3차원적인 변형이 일어나고, 힘을 제거할 경우 원래 상태로 돌아가는 신축성이 부여되는 것이다.

키리가미 구조 역시 4D 프린팅 구조로 활용될 수 있는데, 최근 하버드대학교 연구진들의 키리가미 기반의 스마트 액츄에이터를 이용한 소프트 로봇 개발했을 뿐 아니라 3D 프린팅을 이용한 키리가미 기반 액츄에이터

등이 다양하게 연구되고 있다. 키리가미 구조도 오리가미 구조와 같이 스마트 소재를 4D 프린팅 하는 효과적인 하나의 구조로 자리를 잡아갈 것이다.²²⁻²⁴⁾

2.3.3. 메타물질

메타물질 (Metamaterial)은 자연계 물질로는 실현될 수 없는 특성이나 기능을 가지도록 인위적으로 설계된 물질을 의미한다. 여기서 메타물질의 특성은 메타물질을 구성하는 분자나 물질의 자체적 물성보다 인위적으로 설계된 반복 구조에 의해 발현된다. 즉, 물질을 이루는 반복되는 구조의 배열과 패턴 등이 메타물질의 새로운 물리적 특성을 만드는데 중요한 역할을 하는 것이다. 대표적인 메타물질로는 광 메타물질 (Photonic metamaterial)이 있다. 물질 내 구조들의 크기와 간격을 이용하여, 예를 들어 유전율 또는 투자율이 음의 값을 가져 음의 굴절률을 가지고 있는, 자연계에 존재하지 않는 광학적 물질을 설계할 수 있다.²⁵⁾ 이러한 광 메타물질은 투명망토, 고성능 렌즈, 고효율 파동 흡수제 등 여러 분야에 적용될 수 있어 큰 주목을 받고 있다.

광 메타 물질 외에, 자연계에는 존재하지 않던 기계적 물성을 보여주는 기계적 메타물질 (Mechanical metamaterial) 이 있다. 이들이 보여주는 독특한 기계적 물성들 중에는 대표적으로 음성 푸아송 비 (Negative Poisson's Ratio, NPR) 가 있다.²⁶⁻²⁷⁾ 자연계 물질들은 일반적으로 양의 푸아송 비 (Positive Poisson's ratio)를 가지는데, 외력에 따라 변형되더라도 부피를 유지하려는 특징 때문에 특정한 방향을 따라 압축(신장)될 때 가해진 힘에 수직인 방향으로 팽창(수축)하려는 성질을 보인다. 반면 NPR를 갖는 기계적 메타물질들은 오히려

Fig. 4. a) 기계적 메타물질^[26] b) 스마트 소재를 이용해 만든 기계적 메타물질^[28]

압축(신장)될 때 수축(팽창)하려는 특징을 보인다. 이러한 물성을 기반으로 NPR 물질들은 인공근육, 충격과 흡수 재료나 센서 등 다양한 분야에 응용되고 있다.

이처럼, 메타물질은 물질의 구조를 설계하는 것만으로도 독특한 물성을 가지게 할 수 있기 때문에, 이미 3D 프린팅을 활용하여 다양한 구조들이 제작 및 연구되고 있다. 나아가 최근에는 메타물질을 스마트 소재로 제작하여, 외부 환경에 따라 형태뿐만 아니라 물성 자체를 변화시키려는 시도들이 늘어나고 있다. 예를 들어, 하이드로겔과 같은 기존의 소프트 재료는 수분 흡수시 양의 팽윤비를 보였던 것과 달리, 하이드로겔 메타물질을 설계하여 음의 팽윤비를 가지는 소프트 메타물질을 개발할 수 있다.^[28] 이를 위해서는, 스마트 재료를 이용하여 복잡한 반복 구조를 가지고 있는 형상을 제작하는 기술이 중요하다. 3D 프린팅 기술 자체가 복잡하고 반복되는 내부 구조를 구현하는데 매우 유리하기 때문에, 4D 프린팅에도 효과적으로 적용될 수 있다.

2.3.4. 기타

앞서 제시한 오리가미, 키리가미, 메타물질 외에도 생체모방 구조 (Biomimetic structure), 직물구조 (Textile), 다중안정 구조 (Multi-stable structure), 무게중심 제어 구조 등이 스마트 소재를 이용한 구조 설계에 활용되고 있다. 예를 들어, 생체모방 구조의 하나인 텐세그리티 (Tensegrity) 구조는 기계적 물성이 상반되는 두 소재를 네트워크 구조로 연결하여 상보적인 기계적 물성을 만들어 낸다. 이 구조는 네트워크 구조의 복잡도를 이용해 형상을 모방하거나 물성을 설계할 수 있

으며, 동일한 부피로 구조를 제작했을 때 더 많은 하중을 지지할 수 있는 등의 장점을 가지고 있다. 최근, 형성 기억 고분자로 텐세그리티 구조를 제작하여, 프린팅된 구조물이 온도에 따라 2차원으로 전개되거나 3차원 텐세그리티 (Tensegrity) 형태로 복원되는 스마트 구조가 제작되었다.^[29] 이러한 다양한 구조적 설계 기법들을 기반으로, 스마트 소재와 3D 프린팅을 기반으로 하는 4D 프린팅 구조물의 복잡도가 점점 높아지고 있다. 다양한 스마트 소재와 스마트 구조의 융합은 4D 프린팅이 가능성과 응용분야를 확장하는데 큰 역할을 할 것이다.

2.4. 4D 프린팅 설계 및 프린팅

4D 프린팅 사물의 제작과정은 3D 프린터를 이용한 제작과, 프린팅된 사물의 자기조립 혹은 자극반응을 통한 기능 변화라는 두 단계 과정을 거쳐야 한다. 그러므로 4D 프린팅은 프린팅될 사물의 설계와 더불어 최종 변형 형상의 시뮬레이션을 필요로 한다.

2.4.1. 다물질 3D 프린팅

복잡한 형상 변화나 물성 변화를 구현하기 위해서는 여러 종류의 물질을 한번에 프린팅 할 수 있는 기술이 4D 프린팅의 필수 요소이다. 현재 많은 일반인들을 대상으로 상용화된 3D 프린터들이 2개의 노즐, 때때로 3개의 노즐까지 지원하며 다물질 프린팅을 가능케 하고 있다. 아직까지는 서로 다른 소재들 사이의 접합 및 프린팅 환경 제어 등 해결해야 할 문제들이 많지만, 3D 프린팅 뿐만 아니라 4D 프린팅의 가능성을 넓히기 위해서는 반드시 해결되어야 한다. 오리가미 구조 역시 다물질

Fig. 5. a) 다물질 프린팅 기반 오리가미⁷⁾ b) 프린팅 패턴을 이용해 서로 다른 반응을 보여주는 단물질 오리가미¹²⁾

프린팅을 효과적으로 사용해야 하는 구조이다. 오리가미 구조의 접히는 부분은 스마트 소재로, 움직이는 면 부분은 정적 소재로 프린팅하는 하는 등 어떤 부분에 어떤 재료를 이용하는지에 따라 같은 자극에도 구조가 변형되는 정도를 제어할 수도 있기 때문이다.

다물질 프린팅을 기반으로 한 오리가미 구조의 대표적인 예는 MIT의 자가조립연구소와 세계적인 3D 프린터 회사인 스트라타시스 (Stratasys)가 협업하여 다물질 3D 프린터 (Multi-material 3D printer)를 이용해 만든 구조들이라 할 수 있다. 이 구조들은 물과 접촉하며 팽창하는 극친수성 고분자 복합체와 강성의 다른 고분자 복합체를 함께 프린팅하여 만들어진다. 물이라는 외부 환경에 대해 두 물질의 반응에 차이가 나기 때문에, 해당 구조는 프로그래밍된 모양으로 스스로 변형될 수 있다. 예를 들어 1차원의 선형 구조가 'MIT'로 형상이 변하기도 하며, 2차원 전개도 구조가 육면체 형상으로 변하기도 한다.⁷⁾ 이처럼 서로 다른 종류의 물질을 어떻게 배치하고 디자인하느냐에 따라, 다양한 자극에 반응하는 다기능 스마트 시스템을 설계할 수 있다.

혹은, 여러 물질을 프린팅에 사용하지 않더라도, 한 가지 물질의 프린팅 패턴과 적층 두께 등을 위치마다 달리하여 다물질의 효과를 내는 경우도 있다. MIT의 자가조립연구소에서 제시한 프로그램 가능한 나무 (Programmable woods)는 한 물질로도 다물질의 효과를 낼 수 있는 것을 보여준다. 한 종류의 목재 복합체를 이용하더라도, 프린팅되는 패턴과 두께를 달리하면 강성 차이를 만들어낼 수 있기 때문에, 2차원의 코끼리 전개도 구조는 물에 들어가면 3차원의 코끼리 형상으로 모

양이 바뀐다. 또는 이방적인 팽창률을 이용하여 집적 패턴에 따라 반응을 달리하는 하이드로겔 구조를 제작할 수도 있다. 즉, 이러한 방식을 이용하면 같은 형상으로 출력된 물질도 서로 다른 반응성을 갖게 디자인할 수 있다.¹²⁾ 하지만 이러한 방식으로 설계할 수 있는 구조와 기능에는 한계가 있으므로, 다물질 프린팅이 반드시 필요하다.

2.4.2 설계 및 시뮬레이션

4D 프린팅의 핵심은 프린팅 된 2차원 혹은 3차원 구조물이 원하는 상황과 자극에 따라 다른 적절한 구조 및 기능을 가지도록 바뀌는 것이다. 4D 프린팅에서의 변형은 단순히 프린팅된 구조에서 스마트 소재가 변형되는 것을 반영할 수도 있고, 소재 변형에서 나아가 구조들 사이의 상호작용으로 더 복잡한 형상을 만들 수도 있다. 그러므로 4D 프린팅 사물을 설계하고 구현하는데 있어서는, 3D 프린팅된 구조 뿐만 아니라 자극 반응시 변화될 형상을 예측하고 시뮬레이션할 수 있는 기술이 필수적이다.

국내에서는 광주과학기술원 (GIST)의 이용구 교수 연구팀이 4D 프린팅 시뮬레이터를 개발 및 연구 중이다. 4D 프린팅 과정에서 목표 구조물을 구현하기 위한 스마트 관절을 자동 배치 할 수 있는 자동 설계 방법을 제시하고, 제작된 구조물과 목표 형상의 유사성을 검증하였다.³⁰⁾ 해외의 4D 프린팅 시뮬레이터의 경우 코넬대학 (Cornell University) 연구팀에서 개발한 VoxCAD가 대표적이며, 연성로봇의 디자인 및 시뮬레이션에 활용되고 있다. 소스코드가 공개되어 있는 오픈소스 소프트

Fig. 6. a) GIST 연구팀의 4D 프린팅 시뮬레이터³⁰⁾ b) 코넬 대학 연구팀의 VoXCAD를 이용한 능동변형 구조 시뮬레이션³¹⁾

Fig. 7. a) 서울대학교 연구팀의 오리гами 구조를 이용한 소프트 로봇³²⁾ b) KIST 연구팀의 4D 깁스

웨어임으로 필요에 따라 변형시켜 사용할 수 있다.³¹⁾ 이외에도 오토캐드 (AutoCAD)가 개발한 4D 프린팅 시뮬레이터 (Project Cyborg)가 존재하고, 기타 상용 소프트웨어를 활용한 4D 프린팅 시뮬레이션도 가능하다.

3. 국내 및 해외 현황

국내에서는 대표적으로 서울대학교 조규진 교수 연구팀이 스마트 구조를 이용한 소프트 로봇 제작, GIST 이응구 교수 연구팀이 4D 프린팅 시뮬레이션, KIST의 문명은 계산과학연구센터장이 4D 프린팅 소재 및 디자인 개발 등 유용한 시스템 제작 및 응용까지 아우르는 4D

프린팅 연구를 수행 중이다. 예를 들어 조규진 교수 연구팀은 스마트 오리гами 구조를 기반으로 한 소프트 로봇들을 선보였으며,³²⁾ 문명은 센터장 연구팀은 열을 가하면 신체에 맞춤형으로 고정되는 4D 깁스를 선보이기도 했다.

국내 4D 프린팅 시장은 아직 크게 형성되어 있지는 않지만, 보건의료 및 산업적 응용보다는 시뮬레이션, 웨어러블 기기, 생활용품 등에 4D 소재의 활용이 집중되어 있다. 그러나 4D 프린팅 소재의 경우 3D 프린팅 시장에서도 활용될 가능성이 높기 때문에 3D 프린팅 소재를 보급하고 있는 기존 회사들의 접근이 용이하다. 또한, 4D 프린팅 기술은 스마트 소재의 개발부터 설계 디자인, 프린터, 시뮬레이션에 이르기까지 아직 해결해야 할 기술적 난제들이 매우 많으므로, 적극적인 투자와 집중된 연구가 이루어진다면 세계시장을 선점하고 이끌어갈 수 있을 것으로 기대된다.

국외에서는 대표적으로 미국의 MIT의 자가조립연구소 (Self-assemblyLab)과 글로벌 3D 프린팅 선두기업인 스트라타시스 (Stratasys)가 파트너십을 통하여,³³⁾ 하버드 공대, 일리노이 공대가 정부의 지원 아래 4D 프린팅 기술이 연구 중이다. 이 밖에도 미국 디자인 업체인 너브스 시스템은 4D 프린팅 드레스,³⁴⁾ 미국 재생의학 업체 오가노보 홀딩스의 인공 간,³⁵⁾ 독일의 자동차 제조사인 BMW 이 공개한 환경 조건에 따라 바퀴/좌석 형상 등이 변화하는 자동차 ‘비전넥스트100 (Vision Next 100)’³⁶⁾ 등 다양한 분야에서 4D 프린팅 기술이 적

Fig. 8. a) MIT 연구팀의 4D 프린팅 Shape-shifting Shoe³³⁾ b) 오가노이드 홀딩스의 인공 간³⁵⁾ c) 미국 디자인업체 너브시스템의 4D 프린팅 드레스³⁴⁾ d) BMW의 차세대 자동차 비전넥스트 100 모식도³⁶⁾

용되고 있다.

학계에서는 자극반응형 스마트 소재, 스마트 구조 설계, 다물질 프린팅, 바이오 프린팅 등 4D 프린팅의 요소 기술 연구들이 활발하게 진행되고 있으며, 소프트로봇, 웨어러블 디바이스, 조직공학 등의 다양한 분야와 융합되어 그 응용 분야를 넓혀가고 있다. 스마트 소재와 3D 프린팅 분야와 접목한 4D 프린팅 기술을 발전시키면 큰 시너지를 얻을 수 있을 것으로 예상되며 4D 프린팅 제품은 패션/생활용품 시장에서 나아가 보건의료 분야(헬스케어, 인공 근육, 인공 생체기관 등), 제조/패키징 분야, 가전제품 분야(스마트 센서 등), 사회 기반시설 분야, 자동차/항공/방위산업 분야에 이르기까지 활발하게 응용될 것으로 기대된다.

4. 결론

지금까지 4D 프린팅의 정의와 기술 요소들을 개괄적으로 살펴보았다. 지능형 사물이라는 4D 프린팅이 제시하는 비전은 매우 높지만, 아직 해결해야 할 기술적 난제들이 매우 많다. 특히, 프린팅 가능한 스마트 소재들이 한정되어 있기 때문에 아직까지는 4D 프린팅의 결과물은 대체로 동력이 약하고 형상 변환 속도가 느리다. 또한 대부분 제작 과정에서 미리 정해진 물성에 따라 몇 가지 혹은 단순한 형태의 형상 변화만을 보여주고 있기 때문에 고도화가 가능한 진정한 ‘지능화’의 수준에 도달

하지 못한 상태이다.

그러므로, 4D 프린팅은 큰 강성이 요구되는 산업적 응용분야보다는 생활용품 분야와 더불어 생체 구조와 접목되는 의료 분야에서 좀 더 빠른 시기에 두각을 드러낼 수 있을 것이라 예상된다. 특히, 생체 환경에서 구동되어야 하는 삼입형 기기의 경우에는, 삼입 및 제거과정에서 다양한 인터페이스를 활용할 수 있고, 구동 중에는 다양한 생체 환경 변화에 능동적으로 대응할 수 있는 스마트 소재의 활용이 필수적이기 때문에 4D 프린팅 소재들이 활용될 여지가 매우 크다고 할 수 있다.

위에서 소개한 4D 프린팅의 모든 기술요소(소재, 구조, 3D 프린팅, 설계, 시뮬레이션 등)들은 창의적이고 도전적인 접근을 요구하며, 특히 복잡한 시스템을 제작하기 위해서는 4D 프린팅에서 나아가 재료공학, 기계공학, 전기공학, 컴퓨터공학, 생명공학 등에 이르기까지 거의 모든 공학을 아우르는 융복합적 접근이 필요하다. 이 목표를 향해가는 과정에서 다양한 원천기술들이 개발될 수 있으며, 이는 4차 산업혁명 시대에 진정한 시물지능을 구현하는데 다양한 방면에서 도움이 될 것이다. 이러한 과정을 거쳐 멀지 않은 미래에, 4D 프린팅 기술의 발전은 3D 프린팅이 가져다줄 것이라 예상하는 산업구조의 변화 수준을 넘어서, 물리적 세계에 대한 인식 자체를 달리하는 파급력 있는 사회적 효과를 가져올 수 있을 것으로 기대된다.

REFERENCES

1. C. Goldstein, J. D. Campbell and T. C. Mowry, "Programmable matter," *Computer*, **38** [6] 99–101, (2005).
2. M. Brambilla, E. Ferrante, M. Birattari, M. Dorigo, "Swarm robotics: a review from the swarm engineering perspective," *Swarm Intell.*, **7** [1] 1–41 (2013).
3. A. Pamecha, I. Ebert-Uphoff and G. S. Chirikjian, "Useful metrics for modular robot motion planning," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, **13** [4] 531–545 (1997).
4. S. Tibbits, "Skyler Tibbits: The Emergence of

- 4D Printing," *TED*, (2013),. Available: http://www.ted.com/talks/skylar_tibbits_the_emergence_of_4d_printing.
5. F. Momeni, S.M.M. Hassani, N.X. Liu, J. Ni, "A review of 4D printing," *Mater. Des.*, **122** 42–79 (2017).
 6. D. Raviv, W. Zhao, C. McKnelly, A. Papadopoulou, A. Kadambi, B. Shi, S. Hirsch, D. Dikovsky, M. Zyacki, C. Olguin, R. Raskar, S. Tibbits, "Active printed materials for complex self-evolving deformations," *Sci. Rep.*, **4** 7422 (2014).
 7. S. Tibbits, "4D printing: Multi-material shape change," *Architect. Des.*, **84** [1] 116–121 (2014).
 8. C. Majidi, "Soft-Matter Engineering for Soft Robotics," *Adv. Mater. Technol.*, **4** [2] 1800477 (2019).
 9. L. Hines, K. Petersen, G. Z. Lum, M. Sitti, "Soft Actuators for Small-scale Robotics," *Adv. Mater.*, **29** [13] 1603483 (2017).
 10. E. Lee, D. Kim, H. Kim, J. Yoon, "Photothermally driven fast responding photo-actuators fabricated with comb-type hydrogels and magnetite nanoparticles," *Sci. Rep.*, **5**, 15124 (2015).
 11. Y. Kim, H. Yuk, R. Zhao, S. A. Chester, X. Zhao, "Printing ferromagnetic domains for untethered fast-transforming soft materials", *Nature*, **588** [7709] 274–279 (2018).
 12. A. S. Gladman, E. A. Matsumoto, R. G. Nuzzo, L. Mahadevan, J. A. Lewis, "Biomimetic 4D printing," *Nat. Mater.*, **15** [4] 413–418 (2016).
 13. G. Liu, Y. Zhao, G. Wu, J. Lu, "Origami and 4D Printing of Elastomer-derived Ceramic Structures," *Sci. Adv.*, **4** [8] (2018).
 14. J. L. Silverberg, J.-H. Na, A. A. Evans, B. Liu, T. C. Hull, C. D. Santangelo, R. J. Lang, R. C. Hayward, I. Cohen, "Origami structures with a critical transition to bistability arising from hidden degrees of freedom," *Nat. Mater.*, **14** [4] 389–393 (2015).
 15. N. C. Seeman, "Nucleic acid junctions and lattices," *Journal of theoretical biology*, **99** [2] 237–247, (1982).
 16. P. W. K. Rothemund, "Folding DNA to create nanoscale shapes and patterns," *Nature*, **440** [7082] 297–302 (2006).
 17. J. A. Faber, A. F. Arrieta, A. R. Studart, "Bioinspired spring origami," *Science* **359** [6382] 1386–1391 (2018).
 18. E. Hawkes, B. An, N. M. Benbernou, H. Tanaka, S. Kim, E. D. Demaine, D. Rus, R. J. Wood, "Programmable matter by folding," *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, **107** [28] 12441–12445 (2010).
 19. L. Wilson, S. Pellegrino, Rolf Danner, "Origami sunshield concepts for space telescopes," *54th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conf.*, 1594 (2013).
 20. A. Lamoureux, K. Lee, M. Shlian, S. R. Forrest, M. Shtein, "Dynamic kirigami structures for integrated solar tracking," *Nat. Commun.*, **6** 8092 (2015).
 21. M. K. Blees, A. W. Barnard, P. A. Rose, S. P. Roberts, K. L. McGill, P. Y. Huang, A. R. Ruyack, J. W. Kevek, B. Kobrin, D. A. Muller, P. L. McEuen, "Graphene kirigami," *Nature* **524** [7564] 204–207 (2015).
 22. A. Rafsanjani, Y. Zhang, B. Liu, S. M. Rubinstein, K. Bertold, "Kirigami skins make a simple soft actuator crawl," *Sci. Robot.*, **3** [15] eaar7555 (2018).
 23. A. Rafsanjani, L. Jin, B. Deng, K. Bertoldi, "Propagation of pop ups in kirigami shells," *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, **116** [17] 8200 (2019).
 24. T.H.Kwok, C.C.L. Wang, D. Deng, Y. Zhang, Y. Chen, "4D printing for freeform surfaces: design optimization of origami and kirigami structures," *Trans. ASME, J. Mech. Des.* **137** [11] (2015).
 25. D. R. Smith, W. J. Padilla, D. C. Vier, S. C. Nemat-Nasser, S. Schultz, "Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity," *Phys. Rev. Lett.*, **84** [18] 4184 (2000).
 26. K. Bertoldi, P.M. Reis, S. Willshaw and T. Mullin, "Negative Poisson's Ratio Behavior Induced by an Elastic Instability," *Adv. Mater.*, **22** [3] 361–366 (2010).
 27. J.T.B. Oovervelde, S. Shan and K. Bertoldi, "Compaction Through Buckling in 2D Periodic,

- Soft and Porous Structures: Effect of Pore Shape," *Adv. Mater.*, **24** [17] 2337–2342 (2012).
28. H. Zhang, X. Guo, J. Wu, D. Fang, and Y. Zhang, "Soft mechanical metamaterials with unusual swelling behavior and tunable stress-strain curves," *Sci. Adv.*, **4** [6] eaar8535 (2018).
 29. K. Liu, J. Wu, G. H. Paulino, H. J. Qi, "Programmable Deployment of Tensegrity Structures by Stimulus-Responsive Polymers," *Sci. Rep.*, **7** [1] 3511 (2017).
 30. S. Ham, and Y.G. Lee., "A study on the automatic design of 4D printing to follow the target shape," *Korea Journal of Computational Design and Engineering* **21** [3] 306–312 (2016).
 31. N. Cheney, R. MacCurdy, J. Clune, and H. Lipson, "Unshackling evolution: evolving soft robots with multiple materials and a powerful generative encoding," *ACM SIGEVOlution* **7** [1] 11–23 (2014).
 32. W. Kim, J. Byun, J. Kim, W. Choi, K. Jakobsen, J. Jakobsen, D. Lee, and K. Cho. "Bioinspired dual-morphing stretchable origami," *Sci. Robot.*, **4** [36] eaay3493 (2019).
 33. "MIT Self Assembly Lab creates Shape-shifting Minimal Shoe," All3DP, last modified Nov 10, 2015, accessed Feb 28, 2020, www.all3dp.com/mit-self-assembly-lab-minimal-shoe/
 34. J. Rosenkrantz, J.L. –Rosenberg, "Dress/code democratising design through computation and digital fabrication," *Architectural Design*, **87** [6] 48–57 (2017).
 35. "Organovo Subsidiary Samsara Sciences Launches Commercial Operations, Will Be Dedicated Cell Provider for 3D Bioprinting Company," 3Dprint.com, last modified Jan 13, 2016, accessed Feb 28, 2020, www.3dprint.com/115090/organovo-samsara-sciences/2/
 36. "BMW i Next : une voiture lectrique autonome pour 2021," Automobile Propre, last modified May 14 2016, accessed Feb 28, 2020, www.automobile-propre.com/breves/bmw-i-next-voiture-electrique-autonome-2021/

●● 송현서

- 2014–2018 울산과학기술원 화학공학부 학사
- 2018–현재 울산과학기술원 신소재공학 석박사통합과정

●● 김지윤

- 2010 서울대학교 전기전자공학부 학사
- 2013 서울대학교 전기전자공학부 박사
- 2014 서울대학교 전기전자공학부 박사 후 연구원
- 2016 미국국립보건원(NIH) 박사 후 연구원
- 2016–현재 울산과학기술원 신소재공학 조교수