

3D 프린터와 형상기억합금을 이용한 유연 복합재 구동기

안 성 훈 서울대학교 기계항공공학부 교수

| e-mail : ahnsh@snu.ac.kr

송 성 혁 서울대학교 기계항공공학부 박사과정

| e-mail : shksong01023@gmail.com

김 형 수 서울대학교 기계항공공학부 박사과정

| e-mail : jamaisvu444@gmail.com

이 글에서는 3D 프린터를 활용하여, 형상기억합금을 구동원으로 사용하는 복합재 형태의 유연 구동기 설계 및 제작 기술에 대해 소개하고자 한다.

로봇이라고 할 때 일반적으로 떠오르는 이미지는 영화 “터미네이터” 처럼 차가운 강철로 이루어진 몸체를 가지고 있거나, 자동차 조립 라인에서 일사불란하게 움직이는 로봇팔 같은 것들일 것이다. 실제로 이제까지의 대부분의 로봇들은 목표로 하는 동작을 구현하기 위해 구동원으로 사용되는 다수의 모터와 함께 조인트(joint), 기어(gear) 그리고 링크(link) 등의 기계요소들을 조합하여 설계되어 왔다. 이러한 전통적 로봇들은 큰 힘과 정확한 동작 제어 등을 강점으로 내세우며 실로 다양한 분야에 적용되어 왔다.

하지만 생물체의 특성 및 움직임을 모사하여 생물체의 뛰어난 성능을 구현하고자 하는 생체모방공학을 로봇에 접목하려는 연구가 진행되면서 이러한 전통적 로봇에 대해 문제점이 나타났다. 모터 기반의 강성 재료들로 구성된 로봇의 경우 조인트와 같이 국부 구간에 한정되어 변형이 발생하기 때문에 생물체의 연속적인 움직임을 구현하기 위해서는 다수의 기계요소들의 조합이 요구된다. 이로 인해 생체 모사 로봇 설계에 있어 구조의 복잡성이 증가하여 로봇의 크기가 대형화되고, 무게가 증가하는 등 문제가 발생하게 된다. 그럼에도 불구하고 구조 자체가 강성 구조라는 한계로 인해 유연한 동작의 모사에도 여전히 어려움

이 존재하였다. 또한 이렇게 구조적으로 복잡해진 로봇을 제대로 제어하는 것도 쉽지 않은 문제였다.

이러한 문제를 극복하기 위해 유연 재료를 기반으로 한 새로운 형식의 구동 메커니즘에 대한 연구가 진행되고 있다. 그 결과 기존 전통 로봇 설계 방법으로는 구현하지 못한 초소형 곤충 비행 로봇이나, 문어 모사 로봇, 불가사리 모사 로봇 등 다양한 로봇들이 개발되고 있다.

유연 구동기에서 형상기억합금의 장점

유연 구동기에서 동력을 발생시키기 위해 다양한 재료 및 방법이 사용되는데 그 중에서도 지능형 재료(Smart material)로 통칭되는 형상기억합금(SMA: Shape Memory Alloy), 이온성 폴리머 금속 복합재(IPMC: Ionic Polymer-Metal Composites), 압전성 세라믹(Piezoelectric ceramic)이 많이 활용되고 있다. 이온성 폴리머 금속 복합재는 이온성 고분자에 금속 전극이 적층되어, 전기 신호가 가해지면 이온의 이동으로 대변형의 굽힘 동작을 간단히 구현할 수 있다는 장점이 있다. 하지만 내구성이 낮고, 구동 힘이 약하다는 단점이 존재한다. 압전성 세라믹은 전기 신호

지능형 연성 복합재 구동기

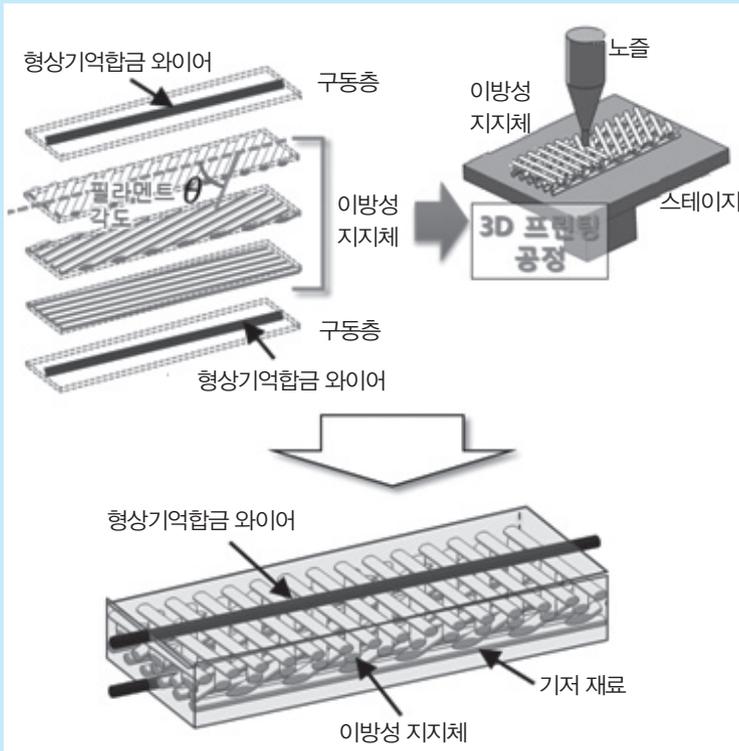


그림 1 지능형 연성 복합재 구동기(이미지 출처 : S.H. Ahn et al, 2012, Int J Precis Eng Manuf에서 수정)

가 가해지면 매우 빠른 속도로 변형될 수 있고, 정밀한 구동 제어가 가능하다는 장점이 있지만, 고전압이 요구되며 세라믹 재료의 특성상 깨지기 쉬워 대변형을 구현하기 어렵다는 문제가 있다. 형상기억합금은 온도가 상승하게 되면 상변위가 발생하면서 기억되어 있는 형상으로 복원되며 구동하게 되며, 자중 대비 발생 힘이 크다는 장점이 있다. 반면 가열을 통한 온도 상승으로 구동되므로 구동 속도가 느리다는 단점이 존재한다. 각각의 지능형 재료의 특징이 달라 각 응용분야에 따라 장단이 있으나, 다양한 재료를 활용한 복합재 형태의 유연 구동기를 구성하여 대변형을 구현하기 위해서는 큰 힘을 발생시킬 수 있는 구동원이 요구되므로 그 중에서 형상기억합금이 장점을 가지고 있다고 할 수 있다.

앞서 설명한 형상기억합금을 활용하여 대변형을 구현하기 위해 일반적으로 사용되는 방법은 형상기억합금 와이어를 스프링 형태로 만들어 사용하거나 혹은 형상기억합금 와이어를 유연 재료의 편심 위치에 삽입한 후, 형상기억합금의 가열 시 수축하는 성질을 활용하여 굽힘 구동을 발생시키는 방법이 있다. 2012년에 서울대학교에서 개발된 지능형 연성 복합재(SSC: Smart Soft Composite) 구동기는 이렇게 형상기억합금 와이어를 유연 재료의 편심 위치에 삽입하여 구동하는 방법을 활용하여 구동한다. 하지만 단순히 유연 재료의 편심 위치에 삽입하는 것 만으로는 단순 굽힘 동작 이상의 동작을 구현하기 어렵다는 문제가 존재한다. 따라서 지능형 연성 복합재에서는, 일반적으로 결점으로 간주되던 복합재의 이방성(anisotropy) 특성을 오히려 적극적으로 활용하여, 구조 이방성으로 발생하는 굽힘-비틀림 복합 변형을 구현할 수 있도록 하였다. 이로 인해 복합재 설계에 따라 목표로 하는 다양한 움직임을 복합재 형태의 단일 모듈로 구현할 수 있다는 장점을 가질 수 있다. 또한 지능형 연성 복합재는 3D 프린팅공정에 기반하여 제작이 가능하여, 목표 동작을 구현할 수 있도록 하는 복합재 설계 및 제작을 용이하게 할 수 있다.

유연 전개(deployable) 구조

유연 전개 구조는 앞서 소개한 지능형 연성 복합재 구동기를 특정 방향으로 엮어, 보다 복합적인 움직임을 구현할 수 있도록 하였다. 구동기 내부에 삽입되는 구조체에 있어, 목표 위치에서 변형량을 극대화할 수 있도록 하는 설계가 적용되었고, 가용 합금(fusible

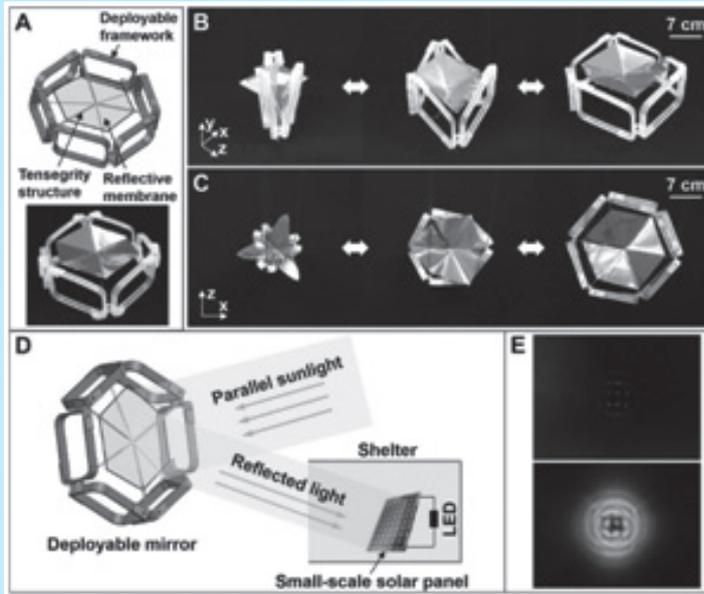


그림 2 유연 전개구조; A: 유연 전개 거울 개념도, B-C: 유연 전개 거울의 구동 형상, D: 유연 전개 거울 반사 실험 개념도, E: 유연 전개 거울의 빛 반사 성능 측정(이미지 출처 : W. Wang et al, 2016, Sci Rep)

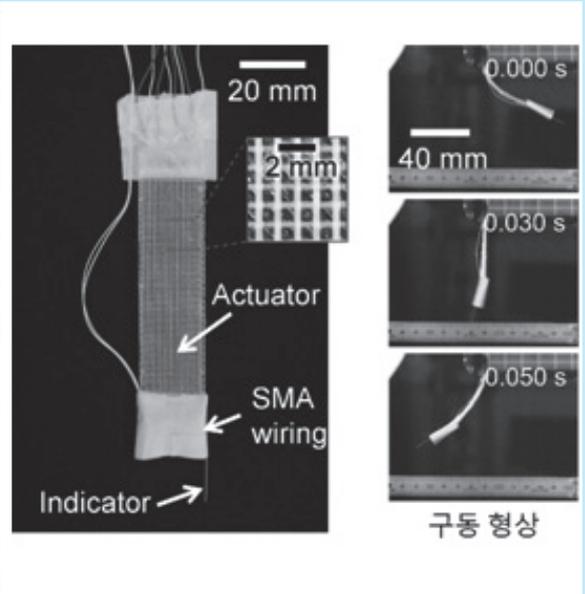


그림 3 유연 고속 구동기 구성과 구동 형상(이미지 출처 : S.H.Song et al, 2016, Sci Rep)

alloy)를 구동기 내에 같이 삽입하여 온도에 따라 강성을 바꿀 수 있도록 하였다. 따라서 경량의 구조에서 유연한 동작을 구현함과 동시에 높은 지지 용량을 가질 수 있다는 장점이 있다. 이에 더하여 3D 프린터로 제작된 경첩 구조를 지능형 연성 복합재 구동기에 결합할 경우 삼각형 기둥 구조, 육각 루프 모듈로 구성된 평면 전개 구조, 사변형 구동부를 루프 형태로 구성한 고리 전개 구조 등 보다 입체적이고 복합적인 움직임을 구현할 수 있다. 또한 고리 전개 구조에 접이식 반사체를 부착하여, 구조가 전개된 후 반사체가 펼쳐지면서 태양광 발전 패널이 위치한 곳으로 태양광을 반사시킬 수 있는 구조를 제시하였다. 그 외에도 앞서 언급한 유연 전개 구조의 장점으로 인해 접이식 안테나 및 접이식 텐트 등의 다양한 분야에 활용이 가능할 것으로 예상된다.

고속 유연 구동기

앞서 설명한 바와 같이 형상기억합금은 구동 속도가 느리다는 단점이 있어, 다양한 응용분야에 사용되기에 한계가 존재했다. 이에 형상기억합금의 냉각 속도를 극대화 하여 구동 속도를 증가시키고자 하는 연구가 진행되어 왔지만, 구동 속도와 변위를 동시에 효과적으로 증가시키는 방안이 개발된 바 없었다. 하지만 지능형 연성 복합재 구동기에서 형상기억합금을 미세 굽기 와이어 다발로 구성하여 동일 부피 대비 표면적을 최대화하면서, 다수의 미세 굽기 와이어 위치를 안정적으로 고정시킬 수 있도록 복합재로 구성하여, 대변형의 안정적인 고속 구동을 구현할 수 있도록 하였다. 이와 더불어 목표 구동 속도와 구동기의 고유 진동수를 일치시킬 수 있도록 하기 위해 3D 프린터로 제작되는 지지체 구조를 이용한 최적 강성 설계 기법을 도입하였고, 이에 따라 구동기 구동 시 공진 특성

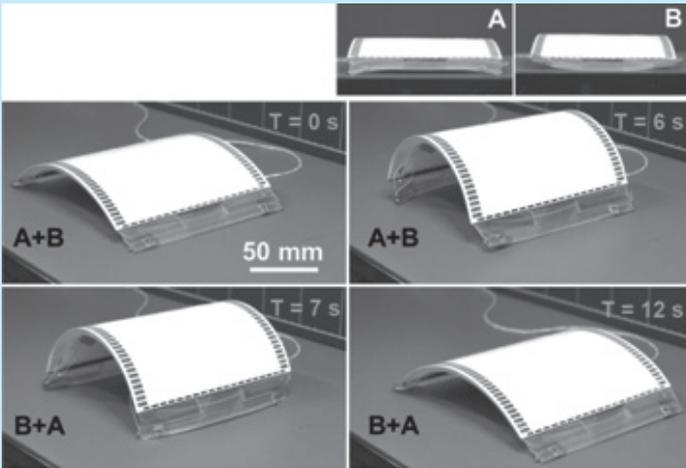


그림 4 자벌레 모사 로봇(이미지 출처 : Wang W. et al, 2014, Bioinspir Biomim에서 수정)

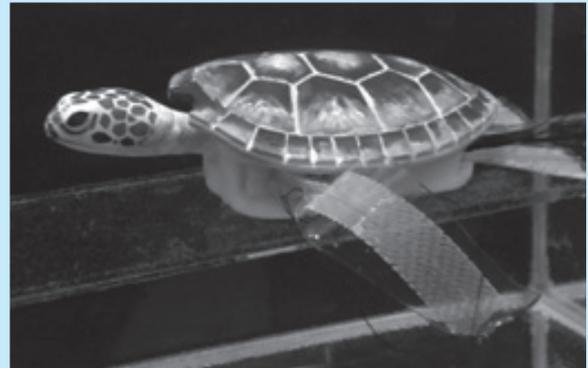


그림 5 바다거북 모사 로봇(이미지 출처 : S.H. Song et al, 2016, Bioinspir Biomim에서 수정)

을 극대화할 수 있도록 하였다. 그 결과 최대 35Hz의 구동 속도를 구현하여, 일반적인 형상기억합금 구동 속도를 약 10배 정도 향상시킬 수 있었다. 뿐만 아니라, 방향성 지지체 설계를 이용하여 굽힘-비틀림 복합 변형 또한 10Hz의 고속으로 구현할 수 있다는 장점이 있다.

유연 생체모사로봇

복잡하고 유연한 동작을 복합재 형태의 단일 구조체 내에서 간단히 구현할 수 있다는 지능형 연성 복합재 구동기의 장점을 활용하여 다양한 생체모사 로봇들이 개발되었다. 모사 대상 생물체의 움직임에 따라 적합한 지지체 설계를 도출하여, 목표로 하는 구동 형상 및 변형 크기를 구현할 수 있도록 하였다. 이에 따라 자벌레, 바다거북 및 가오리의 동작을 모사할 수 있는 유연 로봇이 개발되었다.

자벌레는 긴 몸통을 굽혔다 펴는 움직임을 반복함으로써 전진하는 생물로, 이를 모사하기 위해 몸통 전체를 지능형 연성 복합재로 제작하였다. 로봇은 크게 뒷발, 몸통, 앞발로 나눌 수 있으며 각각 독립적으로 움직이도록 설계되었다. 세 부분을 관통하여 길이방

향으로 형상기억합금이 삽입되어 있으며 3D프린터를 활용하여 폴리머 주형틀을 제작, 각 구동부가 단일 복합재로 형성될 수 있도록 하였다. 앞발과 뒷발에는 각각 가로방향으로 형상기억합금이 삽입되어 있으며 이를 구동시켰을 때의 굽힘으로 앞, 뒷발의 바닥과의 접촉 면적을 조절한다. 앞, 뒤 접촉 면적의 차이로 인해 로봇을 원하는 방향으로 전진시킬 수 있으며, 측정 결과 로봇의 전진속도는 최대 3.6mm/s가 구현되었다.

바다 거북은 장거리 이동을 하면서 가장 빠른 속도로 움직이는 파충류 중 하나로, 이러한 바다거북의 장점을 로봇에 적용하기 위해 바다거북의 운동 메커니즘을 모사할 수 있는 로봇이 개발된 바 있다. 하지만 복잡하고 연속적인 바다 거북 플리퍼 움직임을 구현하기 위해서는 복잡한 기계 요소 설계 등이 요구되어 대부분 바다 거북 모사 로봇들의 크기가 크고 무겁다는 문제가 있었다. 하지만 거북 플리퍼 움직임을 플리퍼 부위 별로 단순화시키고, 단순화된 움직임을 구현할 수 있는 지지체를 구동기의 각 해당 부위에 위치시킴으로써 소형화-경량화된 단일 구동 모듈 내에서 바다거북의 복합적인 움직임을 구현할 수 있도록 하였다. 이렇게 제작된 구동기는 실제 바다거북 플리퍼의 움직임 궤적, 각 순간의 비틀림 각도를 구현할 뿐 아

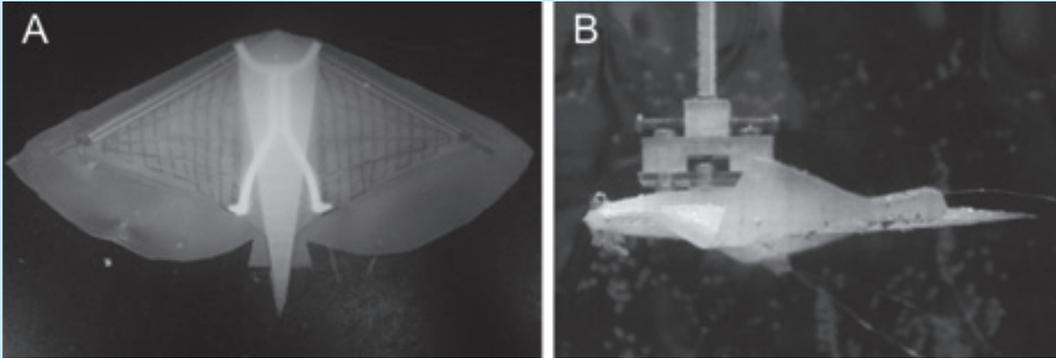


그림 6 가오리 모사 로봇; A: 가오리 로봇 형상, B: 가오리 로봇의 파동형 움직임

나라, 연속 비틀림 동작 등 기존 모터 기반 로봇에서 구현할 수 없던 동작까지 구현할 수 있도록 하였다. 또한 구동기에 삽입되는 네 가닥의 형상기억합금 와이어에 각기 서로 다른 전류 프로파일을 인가하여, 바다거북의 두 가지 서로 다른 영법을 단일 구동기에서 구현할 수 있도록 하였다.

가오리의 경우 바다거북과 다르게 몸통 전체가 움직여 추력을 발생시키는 구조이다. 유연한 몸통의 파동형 움직임을 통해 와류를 지속적으로 발생시키며 이를 통해 매우 효율적인 수영이 가능하다. 이를 모사하기 위해 몸체 전체를 유연 복합재로 제작하였으며 지느러미 앞부분에 지능형 연성 복합재를 삽입하였다. 앞부분의 단순 진동운동을 통해 몸통 전체에 파동형 움직임을 생성하며 이를 통해 실제 가오리와 마찬가지로

가지로 와류를 생성해 추력을 얻게 된다. 내부의 뼈대 및 지지체는 모두 3D 프린터로 제작되었으며 여러 번의 폴리머 경화 작업을 통해 로봇 전체가 하나의 복합재로 이루어져 단일 로봇 몸체 내에서 유연한 움직임을 보이는 것이 가능하다.

앞서 살펴본 바와 같이 생물체의 유연한 동작을 모사할 수 있다는 장점이 있는 지능형 연성 복합재를 이용하여 다양한 구동 성능을 구현할 수 있었다. 향후에도 물론 모터 및 강성 구조 기반의 로봇이 많은 분야에서 사용되겠지만, 생체 모사 로봇처럼 기존 모터 기반 설계로는 구현하지 못했던 새로운 성능을 구현할 수 있는 실마리를 유연 로봇 기술이 제시할 수 있을 것으로 기대한다.