

Soft Bio-inspired 로봇 연구 동향

박용재 · 조규진 (서울대학교)

I. 서론

자연에서 영감을 얻거나 살아있는 생물의 행동이나 구조를 모사한 생체모사로봇은 수많은 로봇 연구 분야 중에서 관심이 점차적으로 높아지고 있는 분야이다. 특히 생명체가 자연에서 오랜 세월 진화해오면서 최적화되고 효율이 높은 시스템을 가지고 있다는 것에 로봇 연구자들의 관심이 높아지고 이에 대한 연구 결과를 로봇에 직접적으로 적용하려고 하면서 생체모사로봇에 대한 연구가 더욱더 활기를 띠게 되었다. 이러한 생체모사로봇연구는 기존의 로봇 연구에서 진행되는 물리적인 해석 및 분석, 모델링뿐 만 아니라 자연에 대한 심도 있는 이해와 그에 대한 생물학적인 모델링에 관한 연구가 같이 수행되어야 한다.

이전의 생체모사로봇 연구가 단순하게 생명체의 모양과 움직임을 그대로 따라하는 것에 머물러 있고, 얼마나 잘 모사하였는가에 초점을 두고 진행된 반면, 현재에는 점차 생명체의 움직이는 원리와 그 모양에 대한 이해가 높아지고 이를 바탕으로 그 원리와 이해를 로봇에 구현함으로써 새로운 메커니즘을 찾아내는 것으로 변화해 가고 있다. 예를 들어 초기에 벽을 올라가는 생체모사로봇은 공기를 흡입하는 방식으로 흡입구를 벽에 부착하여 올라가는 방식을 사용하였으나, 후에 게코(Gecko) 도마뱀이 벽을 올라가는 원리를 분석하고 이를 이용하여 게코 발바닥과 유사한 특징을 갖는 발바닥을 로봇에 적용함으로써 보다 효율적인 움직임을 보이는 로봇을 구현할 수 있었다. 즉, 생체모사로봇의 연구가 생물체의 메커니즘이나 원리를 파악하고 이로부터 영감을 얻어 로봇에 적용하는 bio-inspired robot 연구로 변화하고 있다.

최근에는 연구자들이 생명체의 움직임이 연성 메커니즘에 기반을 두고 있다는 것에 특별히 관심을 기울이기 시작하면

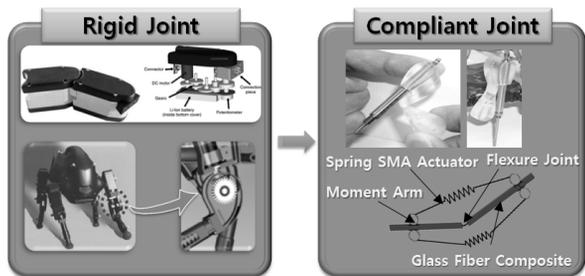
서 기존의 로봇 제작 방식에서 벗어나 연성 메커니즘을 구현할 수 있는 새로운 로봇 제작 방법과 재료, 그리고 이 연성 메커니즘을 작동할 수 있는 인공근육과 같은 새로운 액추에이터의 연구가 더욱 활발히 진행되고 있다.

본 글에서는 생체모사로봇의 많은 연구 분야 중에서 실제 생명체와 유사한 움직임을 구현할 수 있는 연성 메커니즘을 적용한 Soft Bio-inspired 로봇들의 특징을 살펴보고 이 메커니즘의 특징과 이를 구현하기 위한 새로운 로봇 제작 기술에 대하여 소개하고자 한다.

II. 연성 메커니즘과 새로운 제조방법

1. 연성 메커니즘 (Compliant Mechanism)

자연에서 관찰할 수 있는 모든 생명체의 움직임이나 몸체를 이루는 구조는 직선이 아닌 곡선으로 이루어져 있다. 이러한 곡선을 가능하게 하고 그러한 움직임을 만들 수 있게 하는 것이 유연한 구조 및 연성 메커니즘이다. 이러한 생명체의 움직임은 기존에 로봇을 제작하는데 사용하고 있는 모터와 이를 연결하는 링크, 관절과는 그 메커니즘이 많이 다르다. 이러한 연성 메커니즘은 관절로 이루어진 로봇의 구조에 추가적인 여유 자유도를 제공하기 위한 개념이라고 할 수 있다. 이를 통하여 로봇을 설계하면 의도치 않은 장애물이나 물체의 불균일한 면을 로봇 자체가 환경에 적응하여 쉽게 장애물을 넘거나 물체를 자연스럽게 잡을 수 있게 된다. 이는 기존 로봇이 환경을 정확하게 감지하고 복잡한 알고리즘을 거쳐, 각 관절 값을 이용한 기구학 계산을 통해 정확하게 위치를 제어



〈그림 1〉 강성 관절과 연성 관절의 비교^[1~3]

하여 장애물을 극복하거나 물체를 잡는다는 기존의 패러다임과는 다르다. 따라서 연성 메커니즘을 이용하면, 시스템 자체의 적응력이 높아지고 under-actuation 되는 이점이 나타난다. 이러한 이점으로 연성 메커니즘을 적용한 생체모사로봇의 효율이 강성 관절을 이용한 생체모사로봇에 비해 높을 것이라고 예상할 수 있다.

〈그림 1〉의 좌측이 기어를 이용한 강성관절을 나타내며, 모터와 기어 등 여러 부품이 조합되어 하나의 관절 역할을 한다. 반면, 우측은 여유 자유도가 존재하는 연성 메커니즘을 적용한 연성 관절을 나타내며, 이 연성관절은 유연한 재료를 사용함으로써 간단히 하나의 관절을 구성할 수 있는 장점이 있다. 실제 생명체의 관절도 이와 비슷한 구성을 가지고 있다.

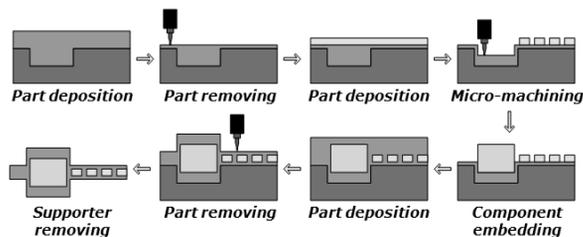
2. 새로운 제조 기술

기존의 로봇은 금속을 주조나 가공, 제련을 통하여 부품을 제작하고 이를 볼트와 너트를 이용하여 조립하는 방식으로 제작되었다. 그러나 생체의 움직임과 유사한 연성 메커니즘을 로봇 시스템에 적용하고, 소형 생체모사로봇을 제작하기 위하여 새로운 로봇 제조 기술이 대두되기 시작하였고, 생체의 연성 메커니즘을 구현하기 위하여 새로운 로봇 제조 방식이 고안되었다^[4].

가. SDM (Shape Deposition Manufacturing)

SDM 프로세스 기술은 1990년대 초에 금속을 rapid-prototyping 하기 위한 방안으로 고안되어 발전되었다. 이 제조 기술은 센서와 회로 또는 이질적인 재료들을 제조과정에서 같이 혼합할 수 있는 특징을 보인다. 이러한 SDM 프로세스는 Stanford 대학의 Mark Cutkosky 교수팀이 처음으로 로봇 제작에 응용하기 시작하였으며, 점차적으로 이를 이용하여 로봇을 제작하는 연구팀들이 확대되기 시작하였다.

〈그림 2〉와 같이 이 제조방식은 강성 재료와 연성 재료를 같이 사용하여 하나의 부품으로 만들 수 있는 장점이 있다. 따라서 이러한 장점을 이용하면 한 부품 안에 센서와 회로를 탑재하고 강성과 연성 재료를 부위별로 적용하여 다양한 강



〈그림 2〉 SDM 프로세스

성을 가지는 단일 부품을 제조할 수 있는 이점이 있다.

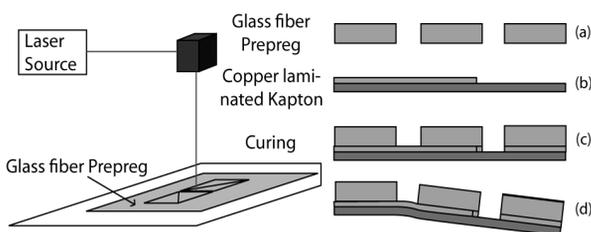
SDM 프로세스를 이용한 생체모사로봇으로는 Stanford 대학에서 만든 빠른 바퀴벌레의 움직임을 모사한 iSprawl과 게코 도마뱀이 매끄러운 벽면을 올라가는 움직임을 구현한 Stickybot, Harvard 대학에서 구현한 로봇 손인 SDM hand 등이 있다.

나. SCM (Smart Composite Microstructure)

SCM 제조기술은 마이크로 레이저를 이용하여 폴리머 필름과 같은 유연한 재료와 복합재와 같은 단단한 재료를 원하는 모양으로 절단하고 이들을 적층하여 일부는 단단하고 일부는 유연한 단일 구조를 만드는 것을 말한다. 이 프로세스는 일반적으로 기존의 제작 방식으로 제작할 경우에 마찰력이 크게 증가하거나 제작이 어려운 경우에 사용되고 있다. 특히 기존의 로봇의 관절을 제작하는데 필요한 요소들인 기어와 링크, 핀 조인트 등을 소형 생체모사로봇에 구현하고자 할 경우에 부품을 소형화하는데 많은 어려움을 겪게 된다. 따라서 이러한 한계를 극복하기 위하여 소형 생체모사로봇의 경우에 SCM 제조기술과 같은 방법을 이용하여 연성관절을 가진 로봇을 제작하려는 시도가 증가하고 있는 추세이다.

〈그림 3〉에서와 같이 SCM 제조기술은 복합재와 폴리머를 적층하여 제작함으로써 강성 복합재 사이를 연성의 폴리머 필름으로 연결하여 연성 관절을 만드는 방법이다.

SCM 제조기술을 이용한 생체모사로봇으로는, Harvard 대학에서 제작하였고, 초소형 비행체로서 처음으로 비행에 성공한 MFI(Microrobotic Flying Insect) 로봇과 UC Berkeley에서 만든 DASH(Dynamic Autonomous Sprawled Hexapod) 등이 있다.



〈그림 3〉 SCM 프로세스

Ⅲ. Soft Bio-inspired 로봇 연구 동향

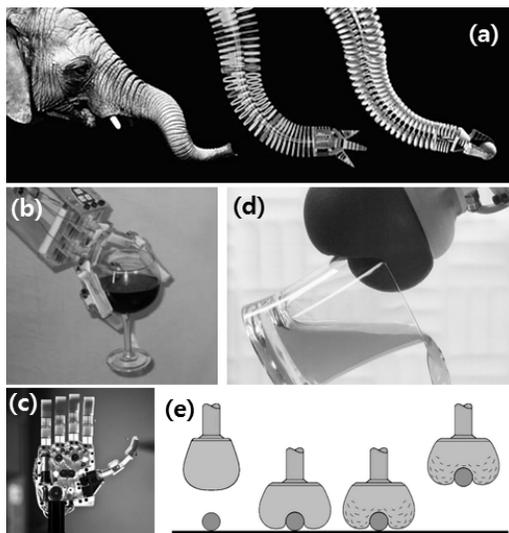
생체모사로봇에 대한 연구가 활발히 진행되는 동안에 생체의 유연성을 적용할 수 있는 soft bio-inspired 로봇에 대한 연구가 새로이 주목을 받고 있다. 생명체의 연성 메커니즘을 생체모사로봇에 구현하기 위하여 연성재료를 로봇의 몸체로 이용하기도 하고 강성 몸체 사이에 연성 관절을 접합하는 방법을 사용하기도 한다. 이러한 soft bio-inspired 로봇에 대한 연구를 소개하고자 한다.

1. 연성 재료를 이용한 로봇

가. 연성 재료를 이용한 Robotic hand 및 Gripper

기존의 로봇 팔이나 로봇 손의 경우, 모터의 움직임을 제어함으로써 각 링크의 움직임을 조절하여 원하는 곳까지 로봇 팔을 움직이거나 로봇 손을 제어하여 물체를 잡는 동작을 수행하였다. 그러나 연성 재료를 이용하면 물체를 잡을 때 정확한 힘을 감지하여 이를 로봇 손에 전달하는 과정을 거치지 않아도 그 물체의 크기와 모양에 맞추어 물체는 잡는 것과 같이 외부환경에 적응할 수 있는 장점이 있다.

〈그림 4〉의 (a)는 Festo사에서 제작한 gripper로 코끼리 코의 유연한 움직임을 모사할 수 있다. 일반적인 로봇팔과는 달리 Festo에서 제작한 BHA(Bionic Handling Assistant)는 로봇 팔 구조 자체가 유연하게 움직일 수 있으므로 사람이 로

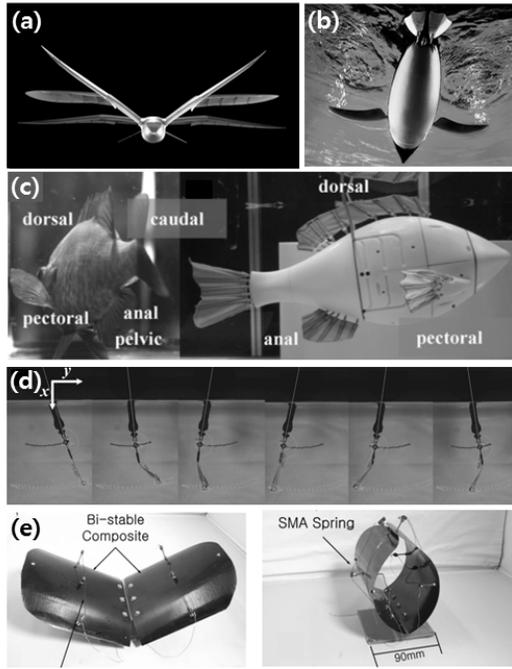


〈그림 4〉 연성 재료를 이용한 Robotic Hand 및 Gripper
(a) Bionic Handling Assistant (Festo)^[5], (b) SDM hand (Harvard)^[6], (c) Flexible robotic hands (Yale)^[7], (d) & (e) Universal robotic gripper (University of Chicago)^[8]

봇과의 충돌할 경우에도 안전할 수 있으며 로봇팔의 길이를 필요한 조건에 맞추어 조절할 수도 있는 장점이 있다. 또한 로봇의 집게 부분이 실제 코끼리 코의 움직임과 비슷하게 움직이기 때문에 물체를 그것의 형태에 맞추어 잡을 수 있는 특징을 보인다. (b)는 Harvard 대학에서 제작한 로봇손인 SDM hand로서 앞에서 설명한 SDM 프로세스를 이용하여 손 부분을 제작하였다. (c)는 Yale 대학에서 제작한 SDM hand를 발전시킨 모델로서 서로 다른 강성을 가지고 있는 세 가지 플라스틱 재질을 이용하여 연성 관절과 유연한 손가락 패드, 강성 파트를 제작함으로써 다양한 물체를 손쉽게 잡을 수 있는 인공손을 제작하였다. (d)와 (e)는 시카고 대학에서 제작한 과립으로 채워져 있는 주머니를 이용한 gripper로서 물체를 잡는데 다른 로봇 손과 달리 손가락을 각각 제어하지 않고 쉽게 어떠한 모양의 물체든지 잡을 수 있다. 특히 일반적인 로봇 손과는 전혀 다른 방식으로 gripper를 설계하여 적용한 것 또한 주목할 만한 점이다. 이러한 gripper는 과립으로 채워진 주머니가 가지고 있는 유연성을 최대한 이용하여 어떠한 외부 환경 변화에도 적응할 수 있는 gripper의 성능을 보여주고 있다.

나. 구동하는 면에 얇은 연성 재료를 이용한 bio-inspired robot

일반적으로 새나 물고기를 모사한 생체모사로봇의 경우 실제 새나 물고기의 유연한 움직임을 모사하기 위하여 많은 수의 액추에이터와 관절을 사용하였다. 그러나 액추에이터와 관절의 수를 무한정으로 늘릴 수는 없기 때문에 이러한 방법으로 제작된 생체모사로봇의 경우 움직임이 완전히 유연한 모습을 보일 수 없으며, 이러한 이유로 고효율의 성능을 나타낼 수 없었다. 그러나 〈그림 5〉와 같이 유연한 재료로 지느러미나 날개 등을 제작하면, 재료의 강성을 이용함으로써 유연한 움직임을 구현할 수 있어서 생체모사로봇의 효율을 높일 수 있다. 〈그림 5〉의 (a)와 (b)는 각각 Festo사에서 제작한 Smart bird와 AquaPenguin이다. 각 생체모사로봇의 날개는 변형이 가능하게 제작되어 구동 조건에 따라 최대 추력을 낼 수 있게 한다. (c)의 경우 Drexel 대학에서 제작한 로봇물고기이다. 이 로봇 물고기는 꼬리지느러미, 등지느러미, 가슴지느러미 등을 신축성이 좋은 폴리에스테르로 제작하여 지느러미의 유연성을 증가시켰다. (d)는 본 연구실에서 진행한 꼬리지느러미의 강성에 따른 로봇 물고기 추력 변화에 대한 실험 결과이다. 꼬리지느러미가 움직이는 주파수에 따라 최대 추력이 나타나는 강성이 정해지며, 일반적으로 적당히 유연한 꼬리지느러미가 강성이 큰 지느러미나 낮은 지느러미보다 높은 추력을 나타내는 것을 확인할 수 있었다. (e)도 마찬가지로



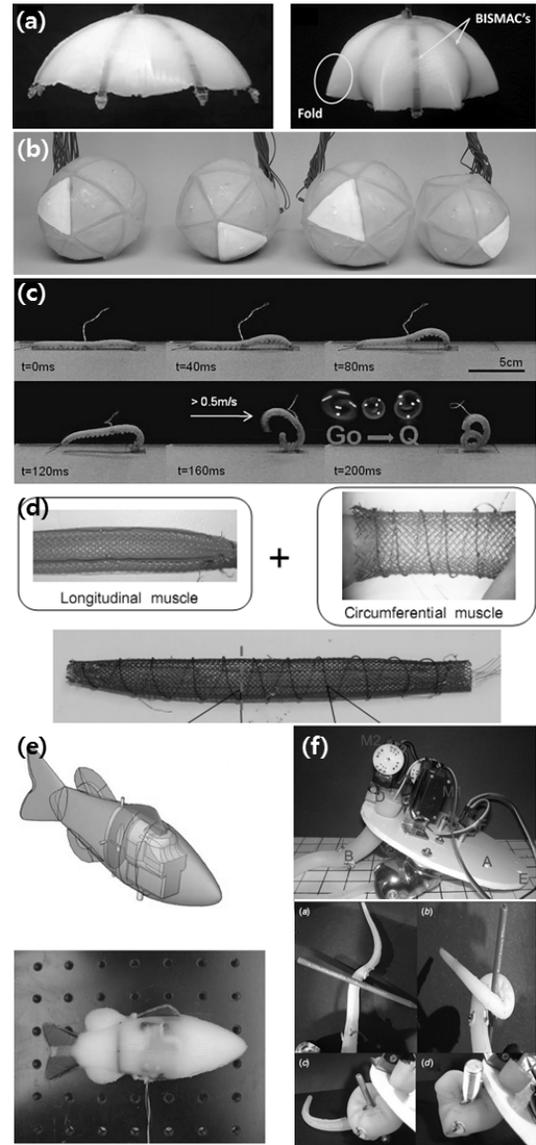
〈그림 5〉 얇은 재료를 이용하여 연성 메커니즘을 구현한 로봇 (a) Smart bird (Festo)^[5], (b) AquaPenguin (Festo)^[5], (c) Biorobotic sunfish (Drexel)^[9], (d) Motion of compliant fin (SNU)^[10], (e) Flytrap robot (SNU)^[11]

로 본 연구실에서 진행한 연구의 결과인 파리지옥의 움직임을 모사한 로봇이다. 파리지옥은 입의 모양이 두 가지 안정한 상을 갖고 상 전이는 snap-through를 통하여 매우 빠르게 이루어지는 특징을 가지고 있다. 이 원리에 착안하여 탄소섬유를 이용한 복합재가 두 가지 상을 가질 수 있도록 제작하여 파리지옥의 빠른 움직임을 구현하였다. 이와 같이 얇은 재질의 물질을 새의 날개, 물고기의 지느러미, 식물의 입을 모사하는 구조에 적용함으로써 연성 메커니즘을 구현하였다.

다. 로봇의 몸체를 연성 재료로 만든 bio-inspired robot

구동하는 면을 연성 재료로 구성하는 경우와 달리 생체모사로봇을 제작함에 있어서 몸체 자체를 실리콘과 같은 연성 재질을 이용하여 제작함으로써 연성 메커니즘을 구현하는 방법도 있다. 연성 재료를 사용하여 몸체를 제작함으로써 생체모사로봇 전체를 시스템적으로 유연하고 효율적인 움직임을 구현할 수 있는 구조로 만들 수 있으며, 외부환경에 대한 적응력을 보다 높일 수 있는 장점 가질 수 있게 한다.

〈그림 6〉의 (a)는 버지니아 공대에서 제작한 해파리를 모사한 로봇이다. 몸의 전체 구조를 실리콘을 이용하여 제작함으로써 Robojelly의 움직임이 실제 해파리의 움직임과 그 메커니즘을 최대한 비슷하게 구현하였다. (b)는 시카고 대학에서 제작한 JSEL(Jamming Skin Enabled Locomotion)을 이



〈그림 6〉 실리콘 재질을 이용한 bio-inspired robot (a) Robojelly (Virginia Tech)^[12], (b) JSEL(Jamming Skin Enabled Locomotion)을 이용한 soft robot (University of Chicago)^[13], (c) GoQBot (Tufts)^[14], (d) Earth worm-like prototype (Harvard)^[15], (e) Biomimetic compliant fish-like robot (MIT)^[16], (f) Octopus-bioinspired soft robot (Italian Institute of Technology)^[17]

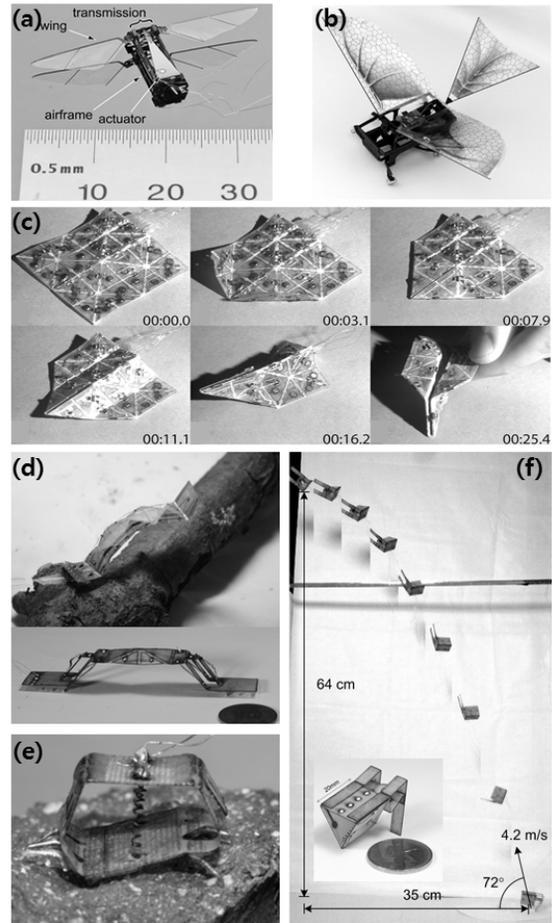
용한 soft 로봇이다. 과립으로 채워진 부분과 채워지지 않은 부분의 차이로 인하여 전체 로봇의 모양이 변하고 이로 인하여 굴러가는 움직임이 생성되는 구조를 가진 것이 특징이다. 전체 로봇의 모양을 변화시키기 위하여 실리콘을 이용하여 제작하였다. 이 구조 또한 앞의 Robojelly의 경우와 마찬가지로 연성 재료인 실리콘을 사용함으로써 이 유연성으로 로봇의 실제 움직임을 결정하게 된다. (c)는 Tufts 대학에서 제작한 GoQBot이다. 몸체를 실리콘으로 제작하여 쉽게 구부러질 수 있도록 설계하여 실제 애벌레가 굴러가는 것처럼 로봇이 굴러갈 수 있다. (d)는 Harvard 대학에서 시작한 지렁이의 움

직임을 모사한 로봇이다. 이 로봇은 다른 로봇들과는 달리 실리콘이 아닌 동근 망을 이용하여 몸체를 제작하여 유연한 움직임을 구현한다는 것과 원주 방향과 길이 방향으로 형상기억합금 액추에이터를 장착하여 구동한다는 특징을 가지고 있다. (e)는 MIT에서 제작한 SDM 프로세스를 이용한 로봇 물고기로서 기존의 로봇 물고기들과 달리 몸체 중간부터 꼬리까지가 모터가 당기는 tendon에 의해 구부러지며 추력을 발생하는 원리로 설계되었다. 이 또한 실리콘을 사용함으로써 몸체의 구부러지는 움직임을 구현하였고, 이를 통하여 보다 자연스러운 물고기 움직임을 모사할 수 있었다. (e)는 Italian Institute of Technology에서 제작한 문어를 모사한 로봇이다. 문어의 다리를 실리콘으로 제작하고 이를 제어함으로써 외부 환경에 적응하며 물체를 잡는 것을 보여주고 있다. 이 연구는 제어를 적게 하면서 많은 일들을 수행할 수 있는 생체모사 로봇을 제작할 수 있다는 결과를 보여주고 있다.

2. 새로운 제조 기술을 이용한 로봇

연성 메커니즘을 탑재한 생체모사로봇을 제작하기 위해서는 앞에서 제시한 새로운 제조 기술을 적용하는 것이 실제 생체의 움직임에 근접한 로봇을 만드는 것에 유리하다고 할 수 있다. 특히 소형 생체모사로봇을 제작할 경우에는 더욱더 새로운 제조 기술이 필요하다. 앞에서 연성 재료를 이용한 로봇의 예를 설명하면서 일부 생체모사로봇이 SDM 프로세스를 이용하여 제작되었다고 언급한 바 있다. 이러한 또 다른 새로운 제조 기술인 SCM 제조기술을 이용하여 제작된 생체모사 로봇은 어떠한 것들이 있고 어떠한 특징이 있는지 살펴보고자 한다.

〈그림 7〉에서 볼 수 있듯이 SCM 프로세스를 이용하여 다양한 생체모사로봇들이 개발되고 있다. 그리고 이 로봇들의 크기가 전체적으로 보면 소형화된 로봇이라는 것도 확인할 수 있다. SCM 프로세스의 경우 복합재와 폴리머 필름을 적층하여 제작하고, 특히 폴리머 필름을 연성 관절로 사용하기 때문에 질량이 무겁고 크기가 큰 생체모사로봇에 적용하기에는 어려움이 따른다. 〈그림 7〉의 (a)는 Harvard 대학에서 제작한 MFI (Microrobotic Flying Insect) 로봇이다. 이 MFI 로봇은 비슷한 크기의 생체모사로봇 중에 유일하게 날 수 있는 로봇이다. 다른 생체모사로봇과 달리 이 로봇이 날 수 있는 이유는 SCM 프로세스를 적용하여 로봇의 크기와 무게를 줄였을 뿐만 아니라 연성 관절을 이용하여 transmission 장치를 제작할 수 있었기 때문이다. 따라서 MFI 로봇의 날갯짓이 다른 메커니즘이나 액추에이터를 추가하지 않고도 실제 파리의 날갯짓과 비슷하게 구현될 수 있었다. (b)는 UC Berkeley에서 제작한 것으로 기존에 SCM 프로세스로 제작된 DASH라는 이



〈그림 7〉 SCM 제조 기법 등을 이용한 bio-inspired robot
 (a) Biologically inspired microrobotic flying insect (Harvard)^[17], (b) Wing-assisted running robot (UC Berkeley)^[18], (c) Programmable matter (Harvard)^[19], (d) Omegabot (SNU)^[20], (e) Adaptive gripper (SNU)^[21], (f) Flea-inspired robot (SNU)^[22]

름의 로봇에 날개를 부착하여 뛰는 것을 보조하는 생체모사 로봇이다. (c)는 Harvard 대학에서 제작한 특정한 모양으로 접히는 로봇이다. 이 로봇은 특정한 생체를 모사한 로봇은 아니지만, 다른 생체모사로봇과 같이 SCM 프로세스를 이용하여 제작하여 연성 관절을 구현했다는 공통점이 있다. 이 로봇은 연성 관절을 이용하여 로봇의 각 부분을 원하는 모양으로 접어서 다양한 구조를 생성할 수 있는 장점이 있다. 각각의 접히는 부분을 변경함으로써 같은 시트를 다양한 모양으로 변화시킬 수 있다. 이러한 구조를 생성하는 것은 SCM 프로세스를 이용하여 연성 관절을 구현하지 못하였다면 기존의 메커니즘으로는 만들기 어려웠을 것이다. (d)~(f) 모두 본 연구실에서 제작한 생체모사 로봇이다. (d)는 자벌레의 움직임을 모사한 Omegabot이다. 자벌레의 움직임은 일반적인 애벌레와 달리 몸을 구부려서 Q 모양을 만들어서 전진한다. 이러한 움직임을 구현하기 위하여 복합재와 폴리머 필름을 이용하여 몸체를 만들고 이를 형상기억합금 스프링으로 구동함으로써 자벌레 모사 로봇을 제작하였다. 본 로봇의 몸체는 여러 부분

의 조립체가 아니라 전체적으로 하나의 부품이라 할 수 있다. 이는 SCM 프로세스의 장점을 살리고 작은 부품의 조립 공정을 없애기 위해 각각 필요한 링크지지를 하나의 평면에 넣을 수 있도록 디자인되었기에 구현이 가능할 수 있었다. 몸체는 두 개의 4-bar 링크지와 하나의 Spherical 6-bar 링크지가 하나의 시트에 구현되어 있어 몸체의 구조 변경에 따라 전후좌우의 움직임을 구현할 수 있다. (e)는 자벌레가 자신의 다리를 이용하여 물체를 잡는 원리를 분석하여 적용 제작한 adaptive gripper이다. 특히 이 gripper는 몸체가 유연하고 각각의 연성 관절들로 구성되어 있어서 바닥면이 고르지 않아도 gripping을 할 수 있도록 설계되었다. 이 Gripper는 기존에 기계 설계에서 피해야하는 현상인 좌굴(Buckling) 현상을 이용하여 많은 수의 발톱을 환경에 맞게 적응하여 배치될 수 있도록 하였다. 이러한 연성 메커니즘의 적용으로 gripper가 물체를 잡을 수 있는 확률이 증가할 수 있으며, 보다 안정적인 성능을 가질 수 있도록 설계할 수 있었다. (f)는 벼룩이 뛰는 원리를 분석하고 이를 로봇에 적용한 생체모사로봇이다. 기존의 점핑 로봇들이 모터와 캠, 스프링 등을 이용하여 수백 년 전 레오나르도 다빈치에 의해 제안되었던 래치 메커니즘을 사용하거나 그 변형 메커니즘을 사용하여 제작되었으나, 이 로봇은 실제 벼룩이 뛰는 원리를 연성 관절과 형상기억합금 스프링을 이용하여 구현하였으며, 이를 이용하면 작은 스케일에서 적용할 수 있는 설계가 가능해진다. 현재 2cm인 로봇은 자기몸체 크기의 최대 32배인 64cm까지 도약을 할 수 있다.

이와 같이 소형 생체모사로봇의 경우 연성 메커니즘을 구현하기 위하여 새로운 제조방법인 SCM 프로세스를 많이 사용하였으며, 이렇게 제작된 생체모사로봇의 성능 또한 기존의 기술을 이용하여 제작된 생체모사로봇보다 동등하거나 보다 뛰어난 성능을 보이고 있다.

IV. 결론

생체모사로봇의 연구는 여러 방면에서 다양한 시도가 진행되고 있다. 그 중에서 연성 메커니즘을 통한 soft bio-inspired 로봇 연구는 향후 로봇의 성능과 효율을 상승시킬 뿐만 아니라 실제 생물체와 비슷한 로봇을 제작할 경우에도 큰 역할을 할 것으로 사료된다. 생체모사로봇 연구의 미래는 이러한 연성 메커니즘을 어떻게 보다 로봇에 잘 구현하는가와 이를 구현하기 위한 기술의 발전에 달려있다고 해도 과언이 아니다. 그러나 이러한 연성 메커니즘을 이용한 구조는 그 자체가 유연하기 때문에 모델링하기가 어렵고 액추에이터를 이용하여 정확하게 제어하기가 어려운 문제가 있다. 더 나아가

가 소형 생체모사로봇을 제작하려면 연성 메커니즘을 적용해야 하는 것이 반드시 필요하며, 이를 구동할 수 있는 인공근육과 같은 새로운 액추에이터의 개발도 또한 병행되어야 할 것이다. 또 다른 측면으로는 이러한 메커니즘을 대량으로 생산할 수 있는 생산기술에 대한 연구도 병행되어야 새로운 연성 메커니즘을 적용한 Soft bio-inspired 로봇이 넓은 분야에서 사용될 수 있을 것이다.

참고문헌

- [1] Alessandro Crespi, André Badertscher, André Guignard, and Auke Jan Ijspeert, "AmphiBot I: an amphibious snake-like robot", *Robotics and Autonomous Systems*, Vol.50, pp.163-175, 2005.
- [2] www.bostondynamics.com
- [3] Jorge G. Cham, Sean A. Bailey, Jonathan E. Clark, Robert J. Full, and Mark R. Cutkosky, "Fast and Robust: Hexapedal Robots via Shape Deposition Manufacturing", *The International Journal of Robotics Research*, Vol.21, pp.869-882, 2002.
- [4] Kyu-Jin Cho, Je-Sung Koh, Sangwoo Kim, Won-Shik Chu, Yongtaek Hong, Sung-Hoon Ahn, "Review of manufacturing processes for soft biomimetic robots", *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing(IJPEM)*, Vol.10, No.3, pp.171-181, 2009.
- [5] www.festo.com
- [6] A. M. Dollar and R. D. Howe, "The Highly Adaptive SDM Hand: Design and Performance Evaluation," *The International Journal of Robotics Research*, Vol.29, No.5, pp.585-597, Apr., 2010.
- [7] Technology Review's TR35, Aaron Dollar, Creating flexible robotic hands
- [8] E. Brown et al., "Universal robotic gripper based on the jamming of granular material," *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Vol.107, No.44, pp.18809-18814, Nov., 2010.
- [9] James L. Tangorra, Member IEEE, Anthony P. Mignano, Gabe N. Carryon, Jeff C. Kahn, Jr., "Biologically Derived Models of the Sunfish for Experimental Investigations of Multi-Fin Swimming", *International Conference on Intelligent Robots and Systems(IROS)*, 25-30 Sept., 2011, pp.580-587.
- [10] Yong-Jai Park, Useok Jeong, Jeongsu Lee, Ho-Young Kim and Kyu-Jin Cho, "The effect of compliant joint and caudal fin in thrust generation for robotic fish," *Proceedings of the 2010 3rd IEEE RAS/EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics(BIOROB)*, 2010,

- pp.528-533.
- [11] Seung-Won Kim, Je-Sung Koh, Maenghyo Cho and Kyu-Jin Cho, "Design & Analysis a Flytrap Robot using Bi-stable Composite", Robotics and Automation (ICRA), 2011 IEEE International Conference on, pp.215-220, May, 2011.
- [12] A. Villanueva, C. Smith, and S. Priya, "A biomimetic robotic jellyfish (Robojelly) actuated by shape memory alloy composite actuators," Bioinspiration & Biomimetics, Vol.6, p.036004, Sep., 2011.
- [13] E. Steltz, A. Mozeika, N. Rodenberg, E. Brown, and H. M. Jaeger, "JSEL: Jamming Skin Enabled Locomotion," in IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems(IROS), 2009, pp.5672-5677.
- [14] H.-T. Lin, G. G. Leisk, and B. Trimmer, "GoQBot: a caterpillar-inspired soft-bodied rolling robot," Bioinspiration & Biomimetics, Vol.6, p.026007, Jun., 2011.
- [15] Sangbae Kim, E. Hawkes, Kyujin Choy, M. Joldaz, J. Foley, and R. Wood, "Micro artificial muscle fiber using NiTi spring for soft robotics," in IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems(IROS), pp.2228-2234, 2009.
- [16] B. Epps, P. Valdivia y Alvarado, K. Youcef-Toumi, and A. Techet, "Swimming performance of a biomimetic compliant fish-like robot," Experiments in Fluids, Vol.47, No.6, pp.927-939, Dec., 2009.
- [17] M. Calisti et al., "An octopus-bioinspired solution to movement and manipulation for soft robots," Bioinspiration & Biomimetics, Vol.6, p.036002, Sep., 2011.
- [18] N. O. Pérez-Arancibia, K. Y. Ma, K. C. Galloway, J. D. Greenberg, and R. J. Wood, "First controlled vertical flight of a biologically inspired microrobot," Bioinspiration & Biomimetics, Vol.6, p.036009, Sep., 2011.
- [19] K. Peterson, P. Birkmeyer, R. Dudley, and R. S. Fearing, "A wing-assisted running robot and implications for avian flight evolution," Bioinspiration & Biomimetics, Vol.6, p.046008, Dec., 2011.
- [20] E. Hawkes et al., "Programmable matter by folding," Proceedings of the National Academy of Sciences, Vol.107, No.28, pp.12441-12445, Jul., 2010.
- [21] Je-Sung Koh and Kyu-Jin Cho, "Omegabot: Crawling robot inspired by Ascotis Selenaria," 2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2010, pp.109-114.
- [22] Gwang-pil Jung, Je-sung Koh and Kyu-Jin Cho, "Meso-scale Compliant Gripper Inspired by

Caterpillar's Proleg", 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2011.

- [23] M. Noh, S. Kim, and K.-J. Cho, "A Miniature Jumping Robot with Flea-inspired Catapult System: Active Latch and Trigger," In Proc. International Workshop on Bio-inspired Robots, 2011.



박용재

1997년 3월~2004년 2월 서울대 공학사.
 2005년 9월~현재 서울대 석박사통합과정중.
 2003년 12월~2005년 4월 삼성전자 반도체총괄 근무.
 2005년 5월~2005년 8월 서울대학교 정밀기계설계공동연구
 소 연구원.
 <관심분야> Biologically Inspired Robotics, mechanisms
 using smart structures, medical robot



조규진

1992년 3월~1998년 2월 서울대 공학사.
 1998년 3월~2000년 2월 서울대 공학석사.
 2000년 9월~2007년 2월 M.I.T. 공학박사.
 2007년 2월~2007년 5월 Post Doc, MIT.
 2007년 6월~2008년 7월 Post Doc, Harvard Microbotics
 Lab.
 2008년 9월~현재 Assistant Professor, Mech. & Aerospace
 Eng., SNU.
 <관심분야> Biologically Inspired Robotics, robotics
 systems using smart actuators, novel
 mechanisms using smart structures, and
 rehabilitation and assistive robotics