

밴딩 전파 구동을 이용한 파리지옥 로봇의 소프트 모핑 동작

Soft Morphing Motion of Flytrap Robot Using Bending Propagating Actuation

김 승 원, 고 제 성, 조 맹 효, 조 규 진*
(Seung-Won Kim¹, Je-Sung Koh¹, Maenghyo Cho¹, and Kyu-Jin Cho¹)
¹Seoul National University

Abstract: This paper presents a bending propagating actuation using SMA (Shape Memory Alloy) spring for an effective shape transition of a flytrap-inspired soft morphing structure. The flytrap-inspired soft morphing structure is made from unsymmetric CFRP (Carbon Fiber Reinforced Prepreg) structure which shows bi-stability and snap-through phenomenon. For a thin and large curved bi-stable CFRP structure, SMA spring is more acceptable than SMA wire and piezoelectric actuator which used in previous investigations. A bending propagating actuation is proposed which can induce snap-through of the bi-stable CFRP structure effectively. From this research, effective shape transition of soft morphing structure is possible.

Keywords: Venus flytrap, biomimetic, soft morphing, bi-stable composite laminate, bending propagating actuation

1. 서론

자연에서 영감을 얻고 생물의 특성에 대한 기작 (mechanism)과 원리를 이해하여 공학으로 구현하는 생체모사 공학은 산업과 연구분야 그리고 실생활에 있어서 기존의 기술들과는 다른 혁신적인 성과를 보일 것으로 기대하며 다양한 분야에 접목되고 있다[1,2]. 그 중에서 움직이는 대상에 적용하는 생체모사 공학 기술은 생물의 움직임에서 도출하는데, 일반적으로 식물이 모사 대상의 범주에 해당하는 경우는 거의 없다. 이는 대다수의 식물들이 거의 움직이지 않는다는 점을 고려하면 당연하다고 볼 수 있다. 하지만 식물 중에서도 정적인 것과는 거리가 먼 동적인 특성을 갖는 종들이 있고, 그 중에서도 파리지옥(Venus flytrap, *Dionaea muscipula*)은 자연계에서 가장 빠른 움직임을 갖는 식물로서 그것의 잎이 닫히는데 걸리는 시간은 약 0.1초에 해당한다. 파리지옥은 잎의 구조가 섬유 재질에 기반한 양방향 안정성 구조체(bi-stable structure)이며, 그 구조의 특성인 snap-through 현상을 이용한 빠른 형상 전이를 통해 곤충을 잡는다. 파리지옥의 단순한 구조와 빠른 형상 전이 특성은 하나의 구조가 서로 다른 형상으로 변형할 수 있고 외부의 에너지 공급이 없이 변형된 형상을 유지할 수 있는 모핑(morphing) 구조체의 설계에 있어서 모사 대상으로 적합하다.

모핑 구조에 활용할 수 있는 양방향 안정성 구조체와 snap-through 현상은 파리지옥처럼 섬유재질에 기반한 탄소섬유강화복합재(CFRP: Carbon Fiber Reinforced Prepreg)를 이용하

여 구현할 수 있다. CFRP는 가벼우면서도 강한 구조를 제작할 수 있는 소재이기 때문에 비행기의 동체에서부터 스포츠용품, 그리고 최근에는 소형 로봇의 프레임에도 사용하고 있다. 이 CFRP를 비대칭으로 적층하면 양방향 안정성 구조체가 된다. 복합재 구조 연구 분야에서는 양방향 안정성 구조체의 특성에 초점을 맞추어서 하나의 구조에서 형상의 변형이 가능한 모핑 구조의 개발이 시도되고 있고, 그 중에서 특별히 모핑이, 구분된 단계를 거쳐서 이루어지는 것이 아니라 부드럽게 연속적으로 이어져서 변형되는 소프트 모핑 구조체(soft morphing structure)가 최근에 활발히 연구되고 있다.

본 연구실에서는 파리지옥에 대한 연구 결과들과 비대칭으로 적층한 양방향 안정성 CFRP 구조체에 관한 연구들을 참고하여, 그림 1과 같이 파리지옥처럼 구조가 단순하면서 소프트 모핑을 통해 서로 다른 형상간의 전이가 가능한 파리지옥 로봇을 개발하였다[3,4].

파리지옥 로봇의 기본 구조는 다음과 같다. 양방향 안정성 CFRP 구조체의 양면에 각각 형상기억합금(SMA: Shape Memory Alloy) 스프링 구동기를 장착한 것이 파리지옥 잎에 해당한다. 그리고 SMA 스프링을 장착한 CFRP 구조체의 한

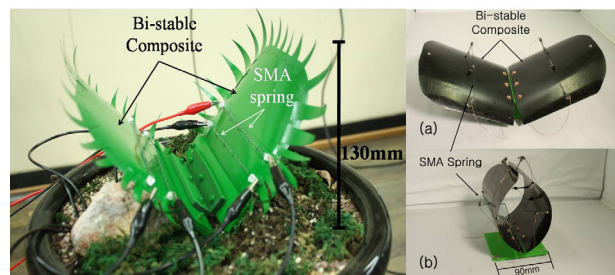


그림 1. 양방향 안정성 CFRP 구조체를 이용한 파리지옥 로봇 프로토타입 I (좌) & II (우) [3,4].

Fig. 1. Flytrap robot prototype I (Left) & II (Right) by using bi-stable CFRP structure [3,4].

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2011. 11. 15., 수정: 2011. 12. 5., 채택확정: 2011. 12. 20.
김승원, 고제성, 조규진: 서울대학교 기계항공공학부 바이오로보틱스 연구실/서울대학교 정밀기계설계공동연구소(IAMD)
(demian05@snu.ac.kr/kjs15@snu.ac.kr/kjcho@snu.ac.kr)
조맹효: 서울대학교 기계항공공학부 지능구조설계 연구실/서울대학교 정밀기계설계공동연구소(IAMD)(mhcho@snu.ac.kr)
※ 본 연구는 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단-신기술융합형 성장동력사업의 지원을 받아 연구되었음(No. 2009-0082824).

모서리를 줄기 역할을 하는 Y자 형태의 지지대에 고정한다. 안쪽 면에 장착한 SMA 스프링을 구동하면 CFRP 구조체가 snap-through를 거쳐 실제 파리지옥의 닫힘 속도와 비슷하게 약 0.1 초 만에 로봇 잎이 닫힌다. 그리고 바깥 면의 SMA 스프링을 구동하면 소프트 모핑 과정을 거쳐 CFRP 구조체를 다시 열린 상태로 만든다. 이를 통해 복합재 구조를 이용한 소프트 모핑 움직임을 생성할 수 있고, 응용 측면에서 구조적으로 단순하면서 변형을 일으키는 단계에서만 에너지를 소비하는 효율적인 gripper의 가능성을 보여주었다. 이러한 소프트 모핑 로봇을 개발하는데 있어서 중요한 것은 소프트 모핑이 가능한 소재와 구조, 그리고 해당 구조에 모핑을 일으킬 수 있는 구동기의 선정과 함께 구동기의 부착 위치이다. 그래서 소프트 모핑 소재로 양방향 안정성 CFRP 구조체를 선정한 기존의 연구들은 형상기억합금 와이어나 압전 (piezoelectric) 구동기 등을 이용하여 다양한 방법으로 형상전이를 유도하였다.

본 연구는 앞서 설명한 바와 같이 소프트 모핑 구조에 적합한 소재인 양방향 안정성 CFRP 구조체에 한정하여, 이의 효과적인 형상전이를 유도하기 위한 구동기의 선정과 함께 구동기의 부착 위치에 따른 형상전이의 동작특성에 대하여 다루었다. 기존의 양방향 안정성 CFRP 구조체를 다룬 연구와 다른 점은, 본 연구에서 사용하는 양방향 안정성 CFRP 구조가 기존의 연구에 사용된 구조보다 얇으면서 곡률이 크기 때문에 기존 연구에서 소개하는 구동기와 구동 방식은 얇고 곡률이 큰 경우에 대하여 소프트 모핑을 유도하기에 부적합하다. 따라서 본 연구는 소프트 모핑을 구현하는 파리지옥의 잎처럼, 얇은 양방향 안정성 CFRP 구조체의 큰 곡률에 대한 변형을 유도할 수 있는 구동기인 SMA 스프링과 그의 배치에 따른 특성을 비교하고, SMA 스프링으로 밴딩 모멘트를 전파시킴으로써 구조의 snap-through를 유도하여 새로운 방식의 소프트 모핑 움직임을 생성하는 방식을 소개한다.

II. 파리지옥 잎과 비대칭 적층 CFRP 구조의 원리

파리지옥의 빠른 움직임을 일으키는 원리를 이해하기 위해 1800년대 이래 지속적으로 연구가 이루어지고 있으나 그 중에서 L. Mahadevan의 연구 결과가 가장 설득력이 높다고 인정받고 있다[5]. 그 연구에 의하면 파리지옥의 잎은 성장하면서 크게 3단계로 층이 나뉘는데, 가운데 층을 제외하고 바깥쪽 두 층의 표피 섬유세포들은 특정한 방향으로 편중되어 늘어나서 방향성이 있는 응력장을 형성한다. 이 응력장은 잎이 열려있는 상태에서는 안쪽 세포들이 인장되고, 닫혀있는 상태에서는 바깥 세포들이 인장된 상태로 잎의 형상을 유지한다. 그리하여 열리거나 닫힌 어느 한 상태를 유지할 때 잎의 형상에 대한 위치에너지가 가장 낮은 상태가 되어 잎의 형상이 안정적으로 존재할 수 있다. 따라서 잎의 구조는 양방향 안정성을 갖고, 이러한 구조적 특징이 잎의 빠른 움직임을 유도할 수 있는 근본적인 요인이라고 설명한다.

한편 잎이 안정한 상태로 힘의 균형을 유지하고 있을 때, 곤충이 파리지옥의 감각기를 건드리면 전기적 신호가 발생한다. 이 신호에 의해 잎 내부의 수액이 이동하면 잎의 형상 위치에너지(shape potential energy) 준위가 올라가고, 특정 임계

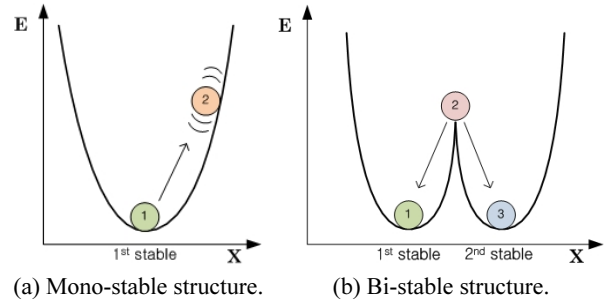


그림 2. 물체의 형상위치에너지 개형. 가로축은 물체 외형의 변형 정도, 세로축은 형상위치에너지 준위.

Fig. 2. Diagram of potential energy of an object's configuration. Horizontal axis indicates an amount of a deformation. Vertical axis indicates the level of the potential energy.

점을 넘어서 힘의 균형이 깨지면 에너지 준위가 다음 형상의 가장 낮은 준위로 빠르게 이동하기 때문에 급격하게 잎의 형상이 바뀌게 된다. 이 때 에너지 준위의 임계점을 매우 빠르게 통과하는 현상을 snap-through라고 하는데, 양방향 안정성 구조와 snap-through 현상의 관계는 그림 2를 통해 단일 안정성 구조와 비교하면서 설명할 수 있다. 일반적으로 물체는 고유의 형상위치에너지 개형을 갖고 하나의 최저 준위를 갖는다. 따라서 물체는 외부의 에너지 공급이 없으면 안정적으로 하나의 형상을 가지고, 에너지 공급을 통해 물체에 변형이 생기면 형상위치에너지 준위가 오르게 된다. 이 때 공급하는 에너지가 다시 중단되면 물체의 형상위치에너지준위는 다시 최저준위로 돌아간다. 한편 양방향 안정성 구조의 물체는 형상위치에너지의 최저 준위가 두 개이기 때문에 안정적인 형상이 두 개가 나타난다. 두 개의 최저준위 사이에는 한계가 있는 임계준위가 있고, 하나의 최저준위에서부터 이 임계준위를 넘어서면 다음 최저준위로 급격하게 이동하게 되는데 이 현상이 snap-through라고 한다.

결론적으로 파리지옥 잎의 비대칭적인 응력장에 의한 양방향 안정성 구조는 자연에서의 생존이라는 측면에서 잎을 열고 대기하는 동안이나 잎을 닫고 소화하는 동안 에너지의 소모가 거의 없으며 곤충을 잡을 때에도 구조의 특성인 snap-through 현상을 통해 식물의 한계인 정적인 움직임을 극복하여 매우 빠른 속도로 잎을 움직이기에 매우 효율적인 모핑 구조임을 증명한다.

파리지옥의 잎과 마찬가지로 비대칭 적층 CFRP 구조체도 제조과정을 통해 양방향 안정성을 가질 수 있다. 일반적으로 CFRP 한 겹은 탄소섬유와 에폭시폴리머 접착제의 혼합으로 이루어져 있다. 탄소섬유는 길이방향으로 강성이 크기 때문에 물리적 특성이 방향성을 갖지만, 접착제는 방향성을 갖지 않는다. 이 때문에 CFRP 한 겹의 물리적 특성은 그림 3과 같이 방향성을 갖게 된다.

CFRP 두 장을 직교로 적층하여 복합재 제조과정인 경화 (curing) 과정을 거치면 중간 계면을 중심으로 위와 아래의 열팽창-수축이 서로 다르게 되어 CFRP 내부에 잔류응력이 발생하게 된다. 이 잔류응력으로 인해 CFRP 복합재는 구조 내부의 위치에너지가 두 개의 안정준위를 갖는 양방향 안정성을 갖게 되며, 그림 4와 같이 정사각형으로 제조한 경우

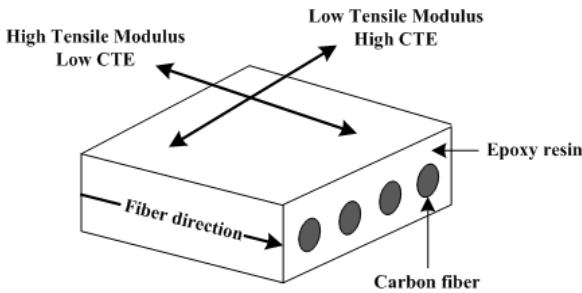


그림 3. CFRP의 탄소 섬유 방향에 따른 강성과 열팽창계수의 크기 비교.

Fig. 3. The diagram of dominant direction of tensile modulus and the coefficient of thermal expansion (CTE) depending on the direction of carbon fiber.

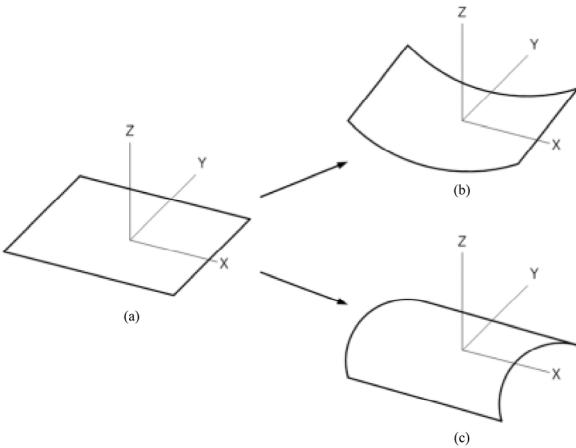


그림 4. 비대칭 적층 CFRP 구조체의 (a) 제조 전 형상, (b) 제조 후의 제 1 형상, (c) 제조 후의 제 2 형상.

Fig. 4. Unsymmetric CFRP laminate structure's (a) shape before the curing, (b) the 1st shape after curing, (c) the 2nd shape after curing.

두 개의 원기둥의 일부와 같은 형상을 가진다. 두 형상의 곡선 중심 축은 서로 직교하며 휘어지는 방향은 서로 반대 면을 향한다. 그리고 비대칭 적층 CFRP 구조는 앞서 설명한 양방향 안정성 구조이기 때문에 안정적인 형상끼리 서로 다른 형상으로 전이할 때 snap-through 현상을 보인다.

이처럼 비대칭 적층 CFRP 구조는 외형상 두 개의 곡률을 갖는 형상과 snap-through 현상을 갖는 형상전이 특성이 파리지옥 앞의 거동 및 특성과 매우 유사하며, 따라서 모핑 구조로서 적합한 구조임을 확인할 수 있다.

III. SMA 와이어와 압전 구동기를 이용한 비대칭 적층 CFRP 구조체의 형상전이 방식과 한계

비대칭 적층 CFRP 구조체를 변형시키려면 구조에 힘을 가하는 구동기를 연결해야 한다. 그래서 모핑 구조 연구 분야에서는 비대칭 적층 CFRP 구조체와 구동기를 결합하여 일체형으로 만드는 것을 시도하고 있다. 현재까지 진행된 연구 결과들을 살펴보면 크게 SMA 와이어와 압전 구동기를 주로 사용하고 있다. 이는 두 구동기가 전류와 전압으로 구동이 가능하면서 CFRP 구조에 밀착시켜서 장착할 수 있는 이점이

있기 때문에 구조의 형상을 크게 변형시키거나 방해하지 않으면서 효과적으로 형상을 전이시킬 수 있다.

대표적인 예로 M. W. Hyer의 연구는 SMA 와이어와 압전 구동기를 개별적으로 사용하여 비대칭 적층 CFRP 구조체의 곡선을 평평하게 만들면서 snap-through를 일으키는 방식을 보였고, 이 후의 다른 연구진들의 결과 또한 이 방식에서 크게 벗어나지 않다[6,7]. 먼저 SMA 와이어를 사용한 경우, 인장시킨 SMA 와이어의 양 끝을 모멘트 암 역할을 하는 볼트에 연결하고, 이를 CFRP 구조체의 곡률 중심 기준으로 바깥면의 곡선을 따라 부착하였다. SMA 와이어에 전류를 가하면 인장된 SMA 와이어가 수축하고, CFRP 구조체에 밴딩 모멘트를 가해서 snap-through를 일으키면 형상 전이가 이루어진다. 압전 구동기를 사용한 경우, CFRP 구조체의 곡률 중심 기준으로 바깥 면에 구동기를 부착한 뒤 전압을 가하면 구동기가 CFRP 바깥 면의 수직한 방향으로 변위를 생성하면서 휘어진 CFRP 구조체를 평평하게 만들고 snap-through를 일으킨다. 하지만 기존의 연구들에서 보이고 있는 이 두 가지 구동기를 이용한 방식은 다음과 같은 이유에서 소프트 모핑에 필요한 얇고 큰 곡률을 갖는 CFRP 구조체에 사용하기 부적합하다.

1. SMA 와이어의 작은 변형률에 의한 한계

먼저 SMA 와이어의 경우, 와이어에 전류를 인가하여 구동할 때 도체인 CFRP 표면에 와이어가 접촉하면 구동 전류가 SMA 와이어를 통과하지 않고 CFRP 표면을 통해 흐르게 된다. 이처럼 전류의 손실로 인해 SMA 와이어 전체에 열이 발생하지 않으면 SMA의 열에 의한 상변이가 불완전하게 일어나서 충분한 힘이 발생하지 못하게 되고 snap-through를 일으킬 수 없게 된다. 따라서 큰 곡률을 갖는 CFRP 구조에 SMA 와이어를 장착할 때에는 와이어가 CFRP 표면에 닿지 않기 위해 모멘트 암의 길이를 늘려야 하고, CFRP 구조의 곡률에 따라서는 모멘트 암의 개수도 늘려야 하기 때문에 구조에 밀착시켜 장착할 수 있다는 SMA 와이어의 장점을 활용할 수 없게 된다. 또한 SMA 와이어의 경우 변형률이 대체로 본래 길이의 최대 5% 정도이기 때문에 큰 변위를 생성할 수 없다. 이는 큰 곡률을 갖는 CFRP 구조체를 snap-through 시키기 위해 거쳐야 할 평판 형상으로 만들려면, 큰 변형을 일으켜야 하는 조건을 SMA 와이어가 만족시켜야 하지만 구동기 자체의 변형률의 한계로 인해 이를 실현할 수 없다.

2. 얇은 CFRP 구조체에 SMA 와이어를 사용할 때 구조에 발생하는 부분적인 좌굴(buckling) 현상

한편 기존 방식에서 제시한 구동기의 사용이 제한되는 경우는 곡률이 큰 경우뿐만 아니라 구조의 두께가 얇은 경우에도 해당된다. 선행 연구들에서는 대체로 CFRP 구조체의 두께가 상대적으로 두껍기 때문에 형상전이가 일어날 때 큰 변형이 일어나지 않는다. 하지만 모핑 구조가 큰 변형을 일어나게 하려면 CFRP 구조의 두께가 얇아야 한다. 이는 선행연구에서 제시하는 방식으로 snap-through할 때 얇은 구조의 특성상 강체 변형보다는 유연한 박막 변형을 따라 그림 5와 같이 부분적으로 좌굴이 일어난다. 따라서 구동기의 구동으로 CFRP 구조가 평평한 상태로 형상이 변형되지 않는다.

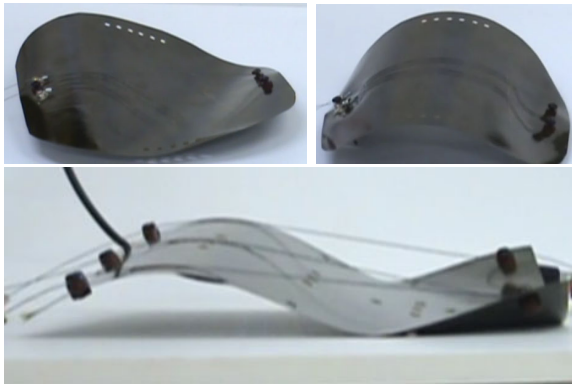


그림 5. 얇고 곡률이 큰 CFRP 구조체에 SMA 와이어를 사용한 구동에서 발생하는 좌굴 현상.

Fig. 5. Buckling problem by using an SMA wire to a thin and large curvature CFRP structure.

3. 압전 구동기의 작은 변형률의 한계

압전 구동기는 그 자체가 일종의 복합재이기 때문에 구동시킬 대상인 CFRP 구조체에 구동기를 장착할 경우 CFRP 구조의 곡률에 구동기의 곡률이 더해지면서 전체 구조의 곡률이 변하게 된다. 대체로 CFRP 구조는 크게 휘어지는 반면 압전 구동기는 곡률이 매우 작기 때문에 구동기를 구조에 부착할 경우 CFRP 구조의 곡률이 감소하게 된다. 그래서 큰 변형을 구현하려는 모핑 구조체의 설계에 있어서 변형의 범위를 줄이게 되는 단점으로 작용하게 된다. 또한 이 구동기는 본래 작은 변형의 빠른 반복 거동에 특화되어 있어서 큰 변형을 일으킬 수 없고, 따라서 큰 곡률의 CFRP 구조체에 이용하기에는 한계가 있다.

지금까지 설명한 바와 같이 SMA 와이어와 압전 구동기를 이용한 구동 방식은 비대칭 적층 CFRP를 이용한 모핑 구조체의 변형 범위를 크게 활용하기에 적합하지 않다. 따라서 얇은 비대칭 적층 CFRP 구조체에 부분적인 좌굴 현상을 일으키지 않으면서 snap-through를 통해 큰 변형을 일으킬 수 있는 새로운 구동기의 선정이 필요하고, 그 구동기의 특성을 이용할 수 있는 적절한 부착 위치를 고려해야 한다.

IV. SMA 스프링의 특성과 스프링의 장착 위치에 따른 CFRP구조의 형상 전이 특성

앞서 설명한 바와 같이 큰 변형을 가지는 모핑 구조를 설계하는데 있어 비대칭 적층 CFRP 구조의 곡률을 줄이지 않으면서 효과적으로 snap-through를 일으키기 위해서는 새로운 구동기의 개발 혹은 기존의 구동기를 다른 방식으로 활용하는 새로운 메커니즘의 개발이 필요하다. 이 중에서 기존의 구동기를 이용한 새로운 메커니즘의 개발이 새로운 구동기를 개발하는 것보다 빠른 적용 가능성을 기대할 수 있기 때문에 본 연구는 특별히 SMA 와이어를 응용하는 방안을 선택하였다.

SMA 와이어를 지능형 구동기로서 활발히 사용하고 있는 생체모방로봇 연구분야에서는 SMA 와이어의 작은 변형률의 한계를 인지하고 이를 개선할 수 있는 SMA 스프링을 사용하고 있다. 이 경우 SMA의 결정 구조가 갖는 작은 변형률이 스프링이라는 거시적인 구조 설계를 통해 구동기의 큰 변형

률로 전환된다. 따라서 같은 와이어 지름에 대하여, SMA 와이어는 본래 길이의 5% 변형률을 갖지만, SMA 스프링의 경우 본래 길이의 약 200~300% 변형률을 갖는다. 물론 이러한 변형률을 갖는 대신 SMA 스프링의 구동력은 와이어에 비하여 약 33%로 감소하게 된다. 이러한 단점은 스프링에 사용하는 와이어의 지름 혹은 스프링 형상의 내경 등 스프링 설계변수를 조절함으로써 개선할 수 있다. 이처럼 SMA 스프링의 경우, 같은 크기의 모터나 공압을 이용하는 다른 구동기들에 비해 상대적으로 큰 구동력과 큰 변형률을 가지기 때문에 자벌레를 모사한 오메가봇, 벼룩을 모사한 도약 로봇 등 소형의 생체모방로봇에 사용하기에 적합하다[8,9].

따라서 SMA 와이어를 SMA 스프링으로 대체하면 큰 곡률을 갖는 CFRP 구조에 충분한 변위를 인가할 수 있다. 하지만 이 경우에도 SMA 스프링과 CFRP 표면이 닿을 때 발생하는 전기 전도 문제가 발생할 수 있다. 이를 피할 방법으로 CFRP를 적층하여 제조할 때 표면에 얇은 폴리이미드 필름을 덧대는 방식을 이용하면, 표면에 SMA가 닿아도 전류가 CFRP로 전도되지 않고 폴리이미드 필름의 내열성에 의해 SMA 구동 온도(As 70 °C)에서도 필름이 녹지 않아 문제를 해결할 수 있다.

SMA 스프링을 이용하면 와이어와 마찬가지로 선형으로 구동 변위를 생성하는 점과 휘어진 CFRP 구조체를 snap-through시키기 위해서 구조에 밴딩 모멘트를 가해야 하는 점, 이 두 가지를 고려하여 그림 6과 같은 구동기 부착 방식을 고안했다.

그림 6(a)의 경우 선행연구 [4]와 같이 SMA 와이어를 배치한 경우에서 구동기만 SMA 스프링으로 대체한 경우이다. 이 경우 SMA 와이어를 적절하게 늘인 길이로도 snap-through가 일어날 수 있지만, 와이어를 인장할 때 그 길이를 snap-

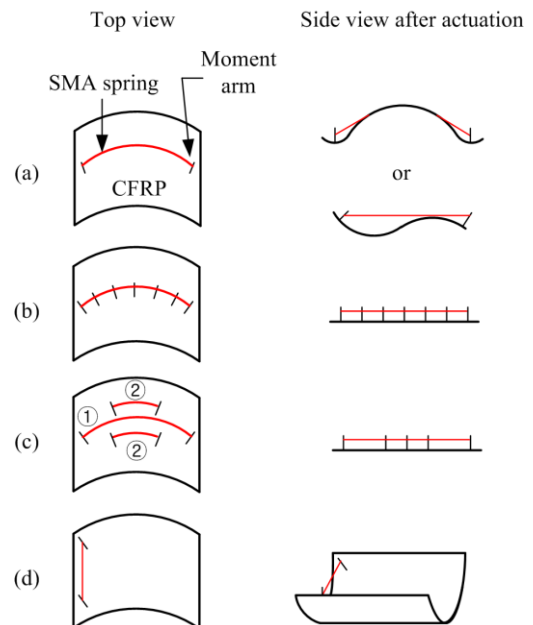


그림 6. SMA 스프링의 부착위치와 SMA 스프링 구동 이후의 CFRP 구조 형상.

Fig. 6. Attachment lines of SMA spring and its configurations of CFRP structure after actuation of SMA spring.

through가 일어나게끔 정확하게 맞추기 힘들다. 또한 이러한 배치에서 발생하는 문제점은 와이어와 스프링 두 경우 모두 해당하는데, CFRP 구조가 얇으면서 많이 휘어져 있어서 밴딩을 구조에 가하면 그림 5와 같이 구조의 끝단에서만 부분적으로 밴딩이 일어나거나 비대칭으로 밴딩이 일어나는 부분적인 좌굴 현상이 발생한다. 따라서 이러한 배치는 반복적인 모핑 동작에 적합하지 않다.

그림 6(b)의 경우 그림 6(a)와 같은 스프링 배치에서 추가 모멘트 암을 중간 경로에 배치하는 것이다. 이 경우 구동기가 CFRP 구조에 가하는 힘이 고르게 분포하여 부분적인 좌굴 현상 없이 snap-through를 일으킬 수 있으나, 모멘트 암을 CFRP에 추가해서 부착할수록 구조의 곡률이 줄어들게 되며 구조의 전체 형상이 복잡하고 제작하기 힘들다.

그림 6(c)의 경우 2번 스프링을 먼저 구동하여 구조의 곡률을 작게 만든 뒤 1번 스프링을 구동하여 snap-through를 일으키는 것이다. 이와 같이 단계를 나누어 구동하게 되면 안정적으로 snap-through를 유도할 수 있지만 앞서 설명한 그림 6(b)와 같이 제조상의 어려움과 단계별 구동으로 시차를 두는 단계별 제어가 필요하다.

그림 6(d)의 경우 앞선 세가지 경우와는 다른 방식으로 SMA 스프링을 장착한다. 이는 스프링을 CFRP 구조의 휘어 있는 곡선을 따라 장착하지 않고 일직선인 모서리를 따라 장착한 것이다. 이렇게 함으로써 SMA 스프링의 수축력이 구조의 양 끝에 밴딩 모멘트를 가하게 되고, CFRP 구조가 얇기 때문에 밴딩 모멘트가 곡면을 따라 전파된다. 따라서 구동기를 구조의 모서리에 설치해서 구동기 설치 후의 모핑 구조체 형상이 CFRP 구조의 외형과 크게 다르지 않고, SMA 스프링의 선형 움직임이 효과적으로 snap-through를 유도한다.

앞서 고려한 네 가지의 SMA 스프링 배치들을 종합적으로 비교해보면, 양방향 안정성 CFRP 구조의 모핑을 일으키기 위해 적합한 방식은 그림 6(d)와 같은 밴딩 전파 방식이다. 이 방식으로 구동하기 위해서는 CFRP 구조가 밴딩 모멘트에 의해 휘어지면서 snap-through가 될 때의 필요 하중을 알아야 하기 때문에 비대칭 적층 CFRP 구조체의 밴딩 전파에 대한 인장실험을 수행하였다.

V. 밴딩 전파 방식의 인장실험 및 결과

앞서 설명한 밴딩 전파 방식은 밴딩 과정 동안 CFRP 구조에 유지되어야 하는 필요 하중을 알아야 이에 맞는 SMA 스프링을 장착하여 구현할 수 있다. 따라서 150 mm x 150 mm 크기의 비대칭 적층 CFRP 구조체를 만들어서 그림 7과 같은 방식으로 인장실험을 수행하였다. 실험에 사용한 CFRP 구조의 재원인 CFRP의 물성은 표 1에 기재하였다.

CFRP 모서리에 장착된 볼트에 줄이 고정되고, 이 줄은 고정 고리(fixed ring)를 거쳐서 인장 고리(hook)에 걸치게 된다. 이러한 줄의 배치는 CFRP의 모서리에 가해지는 줄의 장력이 항상 일직선으로 향하며 밴딩 모멘트를 발생시켜서 실제로 SMA 스프링을 장착했을 때의 상황을 구현해 준다. 이 과정에서 자중에 의한 구조의 처짐을 방지하기 위해 CFRP 윗부분에 보조 줄을 부착하여 CFRP 구조체가 바닥에 닿지 않도록 하였고, 마찰을 최소화하기 위하여 줄과 고리가 닿는 부분에 윤활유를 발랐다. 인장속도는 20 mm/min으로 하여 실험

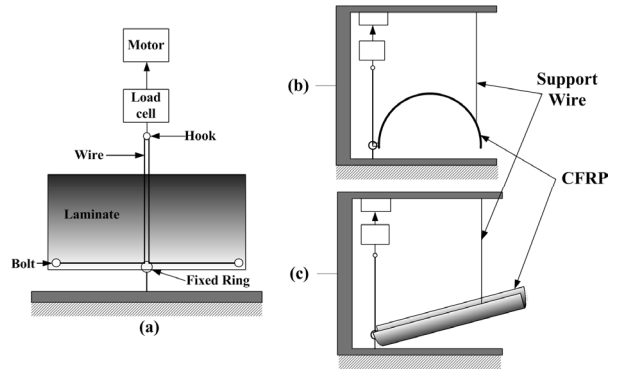


그림 7. 밴딩 전파 구동 방식의 인장실험 구조도. (a) 인장 장치의 뒷면에서 본 상태. 인장 장치 측면에서 본 (b) snap-through 전 상태. (c) snap-through 이후 상태.

Fig. 7. The tensile test setup of the bending propagating actuation. (a) Backside view of tensile test setup. Side views of tensile test setup (b) before snap-through and (c) after snap-through.

표 1. CFRP 재료 물성표.

Table 1. CFRP material properties.

	Unit	
Axial tensile modulus	GPa	230
Transversal tensile modulus		15
Shear modulus		4.47
Poisson's ratio		0.3
Density	g/cm ³	1.8
Thickness	mm	0.092
Axial CTE	°C ⁻¹	0.19x10 ⁻⁶
Transversal CTE	°C ⁻¹	30.0x10 ⁻⁶
Temperature change	°C	-145

* Temperature change is the difference between room temperature and the curing temperature. This data is from HANKUK CARBON CO. LTD.

결과가 동적인 거동에 의한 영향을 받지 않도록 하였다.

다음으로 CFRP 구조체의 밴딩 전파 구동에 필요한 하중을 만족하며 동작할 수 있는 SMA 스프링 인장 실험을 수행하였다. SMA 스프링은 CFRP 구조체의 밴딩 전파 방식 구동에 필요한 하중 값에 안정계수를 1.15로 설정하여 충분한 구동력이 나오는 범위로 설계하였다. SMA 스프링을 인장한 뒤 0.6A의 전류로 4W의 전력을 가하면 전류에 의해 발생된 열로 SMA 결정의 상변이가 일어나면서 늘어나기 전 상태로 되돌아 가려는 수축력이 발생한다. SMA 스프링 인장 실험에 사용한 SMA 스프링의 물성은 표 2에 기재하였다.

표 2. SMA 스프링 물성표.

Table 2. SMA spring properties.

	Unit	
Wire diameter	mm	0.254
Spring mean diameter		1.254
Initial length		38.5
Coil number		137
Austenite starting temperature	°C	70
Actuating input current	A	0.6

표 3. 인장 실험 측정 결과.

Table 3. Result of tensile test.

	Displacement (mm)	CFRP Load (N)	SMA Spring Load (N)
1	0	0.26	3.97.
2	8.3	2.49	3.71
3	16.7	2.93	3.50
4	25.0	2.75	3.29
5	33.3	2.09	3.09
6	41.7	1.67	2.89
7	50.0	1.60	2.68
8	58.3	1.64	2.46
9	66.7	1.61	2.24
10	75.0	1.66	2.01
11	79.0	0.58	1.90
12	81.0	0.79	1.84

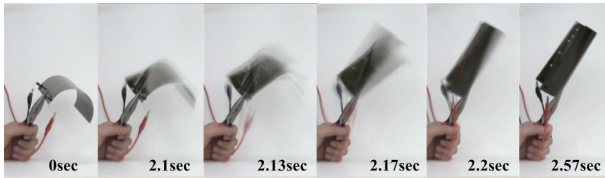


그림 8. SMA 스프링을 장착한 CFRP 구조체의 밴딩 전파 구동 장면.

Fig. 8. Sequence of bending propagating actuation of CFRP structure with SMA spring.

CFRP 구조체의 밴딩 전파 방식의 측정 하중과 SMA 스프링의 인장실험을 수행하여 얻은 하중 결과는 표 3에 기재하였다. 실험에서 측정된 변위(displacement)는 CFRP 구조체의 양 끝 모서리의 볼트 사이 거리가 줄어드는 양을 의미한다. SMA 스프링은 CFRP 구조체의 양 끝단 모서리의 볼트에 늘여서 장착하므로, 스프링의 인장 실험 결과는 변위가 줄어들면서 따라 하중이 감소하게 된다. 따라서 표 3에서 CFRP 구조체의 양 끝단이 줄어드는 양인 변위가 증가함에 따라, CFRP 구조체의 밴딩 전파 구동을 위한 필요 하중은 증가하고 SMA 스프링의 구동력은 감소하게 된다. 그림 8은 실험 결과를 바탕으로 SMA 스프링을 장착한 CFRP 구조체의 밴딩 전파 구동 모습이다. SMA 스프링의 작동으로 생긴 밴딩 모멘트가 CFRP 구조의 한 부분에서부터 반대 부분까지 전파되면서 처음의 안정 형상에서 다른 안정 형상으로 빠르고 안정적으로 전환됨을 확인할 수 있다.

VI. 토의 및 결론

앞서 수행한 실험에서 확인할 수 있듯이, 밴딩 전파 방식으로 양방향 안정성 CFRP 구조체의 모핑을 시도할 경우, 모핑 과정 중에서 좌굴이 일어나지 않고 효과적으로 snap-through를 일으킬 수 있다. 또한 밴딩 하중의 분포가 인장 초기에 최고치를 보인 뒤 서서히 감소하고, 일정 구간에서는 하중이 유지되다가 snap-through가 발생한다. 이러한 하중 분포는 SMA 스프링을 사용하는 것이 적합함을 보여준다. SMA 스프링은 전류를 가하여 열 변형이 일어난 후의 변위-하중

개형이 일반적인 금속 스프링의 변위-하중 개형과 같이 변위와 하중이 비례하기 때문에, 늘어나있는 상태에서 CFRP 구조체의 양 끝 모서리에 장착한 뒤 구동하면 변위가 줄어들면서 SMA 스프링의 구동력 또한 감소한다. 하지만 CFRP 구조체의 모핑에 필요한 하중도 변형이 일어나면서 감소하기 때문에 구조의 하중에 맞춰 SMA 스프링의 생성 하중도 따라가는 효율적인 설계가 가능하다.

본 논문에서는 파리지옥 잎의 양방향 안정성 구조와 snap-through 현상을 보고서 영감을 얻어 모핑 구조체로 활용 가능한 얇고 곡률이 큰 양방향 안정성 CFRP 구조체를 SMA 스프링을 이용한 밴딩 전파 구동 방식으로 구조의 좌굴 현상이 없이 형상전이가 가능하게 하였다.

향후에는 구동기를 구조에 장착한 형태를 모듈화 하고, 여러 개의 모듈을 이어 붙여 다양한 모핑 움직임과 형상을 구현하는 연구를 수행할 것이다. 이를 통해 소프트 모핑 구조체의 효율적인 형상 전이 및 제어가 가능할 것으로 기대한다.

참고문헌

- [1] Y. S. Ryuh, C. H. Chung, S. H. Lee, K. S. Kim, and Y. S. Cha, "optimization of input parameters by using doe for dynamic analysis of bio-inspired robotic fish 'Ichthus,'" *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 16, no. 8, pp. 799-803, 2010.
- [2] Y. J. Lee, J. H. Seo, and H. M. Son, "New gel-type biomimetic variable-focus lens system," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 16, no. 11, pp. 1082-1088, 2010.
- [3] S. W. Kim, J. S. Koh, M. H. Cho, and K. J. Cho, "Towards a bio-mimetic flytrap robot based on a snap-through mechanism," *IEEE RAS & EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics*, no. 5627994, pp. 534-539, 2010.
- [4] S. W. Kim, J. S. Koh, M. H. Cho, and K. J. Cho, "Design & analysis a flytrap robot using bi-stable composite," *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, no. 5980318, pp. 215-220, 2011.
- [5] Y. Forterre, J. M. Skotheim, J. Dumais, and L. Mahadevan, "How the Venus flytrap snaps," *Nature*, vol. 433, no. 7024, pp. 421-425, 2005.
- [6] M. L. Dano and M. W. Hyer, "SMA-induced snap-through of unsymmetric fiber-reinforced composite laminates," *International Journal of Solids and Structures*, vol. 40, no. 22, pp. 5949-5972, 2003.
- [7] M. R. Schultz and M. W. Hyer, "Snap-through of unsymmetric cross-ply laminates using piezoceramic actuators," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 14, no. 12, pp. 795-814, 2003.
- [8] J. S. Koh and K. J. Cho, "Omegabot: Biomimetic inchworm robot using SMA coil actuator and SCM (Smart Composite Microstructures)," *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, no. 5420752, pp. 1154-1159, 2009.
- [9] M. K. Noh, S. W. Kim, and K. J. Cho, "A miniature jumping robot with flea-inspired catapult system: active latch and trigger," *Proc. of International Workshop on Bio-inspired Robots*, poster no. 53, 2011.



김승원

2009년 서울대학교 기계항공공학부 졸업. 2009년~현재 서울대학교 대학원 기계항공공학과 석박통합과정 재학 중. 관심분야는 생체모사로봇, 지능형 구동기, 양방향 안정성 구조체.



고제성

2008년 서울대학교 기계항공공학부 졸업. 2008년~현재 서울대학교 대학원 기계항공공학과 석박통합과정 재학 중. 관심분야는 지능형 구동기를 이용한 생체모방로봇 설계와 소형 로봇 설계.



조맹효

1984, 1986년 서울대학교 항공공학과 학, 석사. 1993년 서울대학교 항공우주공학과 박사. 1994년~1999년 인하대학교 항공우주공학과 조교수. 1999년~현재 서울대학교 기계항공공학부 교수. 관심분야는 멀티스케일 모델링 및 수치해석, 복합재 구조 설계 및 해석, 형상기억합금 구동기 설계 및 해석.



조규진

1998, 2000년 서울대학교 기계설계학과 학, 석사. 2007년 M.I.T. 기계공학박사. 2008년 Harvard 박사 후 연구원. 2008년~현재 서울대학교 기계항공공학부 조교수. 관심분야는 생체모사로봇, 의료용 로봇, 의료보조로봇, 지능형 구동기.