

복합재료와 형상기억합금 스프링 구동기를 이용한 밀리 스케일 로봇 프레임 설계 및 제작

Design and Fabrication of Mili-scale Robot Frame using Composites and SMA Spring Actuators

*고제성¹, #조규진¹, 김홍집¹

*J. S. Koh¹, #K. J. Cho(kjcho@snu.ac.kr)¹, H. J. Kim¹

¹ 서울대학교 기계항공공학부

Key words : Robot frame, Composites, SMA spring actuator, Flexure joint

1. 서론

로봇은 기본적으로 링크와 관절로 구성된 프레임으로 골격이 이루어진다. 기존의 로봇제작은 금속재료 기반의 링크와 핀 조인트를 이용한 결합 구조를 이루었다. 그러나 작은 로봇을 만들기 위해서는 기존의 금속형 부품을 이용해서는 성능을 높이기 어렵다. 크기가 작아지면 부피 대비 면적비가 커지게 되고 마찰과 같은 손실 에너지가 커지게 되어 구조의 움직임을 구현할 수 없는 경우가 생기게 된다. 그리고 작은 구조는 제작에도 많은 어려움이 따른다. 따라서 정밀한 작은 구조의 개발에 있어서 여러 가지 가공기술이 개발되어 왔다. 작게는 수 나노미터 단위의 구조를 만들기 위한 MEMS 기술, 수 마이크로 정밀도를 가지는 전해, 방전 가공 기술 등이 작은 기계요소를 만들기 위해 개발되고 있는 기술이다.

본 연구에서는 복합재료와 유연한 Flexure 조인트로 구성된 로봇 프레임의 설계 및 제작을 통하여 밀리 스케일 구조에서의 효율성을 고찰해 보았다. 복합재료의 링크와 고분자 필름의 Flexure 조인트 구조의 로봇 프레임 개념은 U.C Berkeley 의 R. Fearing 연구팀에서 처음으로 소개되어 여러 가지 생체 모방 로봇의 구조로 개발되었다[1].

Smart Composite Microstructures (SCM) 공정 이라고 하는 위 제조 공정은 Fig. 1 에서 보는 것과 같이 복합재료로 만들어지는 단단한 부분의 링크와 Kapton (Polyimide) 으로 만들어지는 Flexure 조인트로 구성된다. 여기에 형상기억합금 스프링 구동기를 장착하여 이 구조를 구동시키게 된다. 형상기억합금 스프링 구동기는 일정온도 이상 가열하게 되면 원래의 형상이었던 수축된 길이로 돌아가려는 성질을 가지고 있어 이때 생기는 형상 기억 효과를 구동힘으로 이용하는 것이다. 그리고 두 가지 결정 구조를 온도에 의해 바꾸며 구동을 한다. 형상기억합금 구동기는 아주 높은 에너지 밀도를 가지고 있어 작은 구조에서 큰 힘을 낼 수 있는 특징을 가지고 있다. 이를 이용하여 Fig. 1 에서 보는 것과 같이 양쪽의 복합재료 면에 형상기억합금 스프링 구동기를 붙여 사람의 뼈와 근육의 작동 원리와 같이 작은 구조에서 관절의 형태를 만들 수 있다. 이러한 원리를 이용한 작은 로봇으로 Micro Fish fin [2], Inchworm robot [3] 등이 만들어졌다.

이러한 구조는 기존의 금속 기반의 핀 조인트 구조의 로봇과 비교하여 제작이 간편하고 관절에서의 마찰 에너지 손실을 최소화시킬 수 있어 작은 구조에 아주 유리하다. 이 구조의 특징은 복합재료를 정밀 레이저 가공을 통하여 자르고 유연한 필름과 적층하여 형상을 만들게 된다. 기본적으로 레이저 가공을 사용하기 때문에 평면에서 구조의 설계가 이루어져야 한다.

본 논문에서는 작은 로봇의 프레임으로 사용할 수 있는 복합재료의 평면 디자인과 설계 기법, 형상기억합금 스프링 구동기를 이용한 로봇 프레임의 구동 특징을 설명하였다.

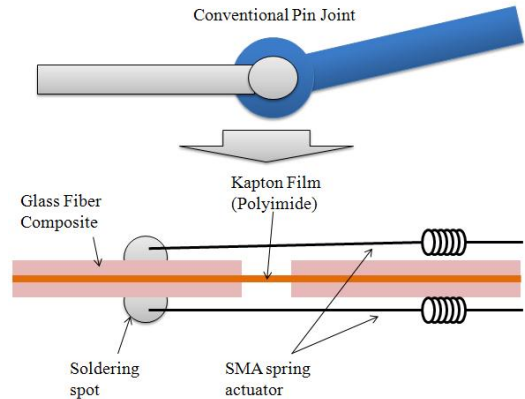


Fig. 1 Schematic diagram of the composite link and flexure joint actuated by antagonistic SMA spring actuators

2. 설계

2.1 Revolute Joint

Fig. 2 에서 볼 수 있는 구조는 로봇의 가장 기본이 되는 1 자유도 회전 관절인 Revolute 조인트에 해당하는 Flexure 조인트를 복합재료 링크와 고분자 필름의 적층을 통해 구현한 것이다. 핀 관절에서 나타나는 마찰은 줄어들지만 flexure 자체의 탄성력은 다음의 식 (1)과 같이 존재한다. 따라서 형상기억합금 구동기는 이 탄성력을 넘어서는 힘으로 이 관절을 구동 시키게 된다.

$$K_{eq} = \frac{EI}{L} \left(I = \frac{wt^3}{12} \right) \quad (1)$$

위 식 (1) 은 Beam 굽힘 탄성 계수에 해당한다. E 는 재료의 Young's modulus 이고 I 는 관성 모멘트, w 는 beam 의 폭, t 는 두께, L 은 beam 의 길이이다. 두께가 두꺼울수록 beam 의 탄성력이 증가하며 길이가 길어지면 감소하는 경향을 식을 통해 확인할 수 있다. 그리고 형상기억합금 구동기의 구동 길이에 따라 Fig. 2 (b) 의 그림과 같이 회전 각도를 달리 움직일 수 있다.

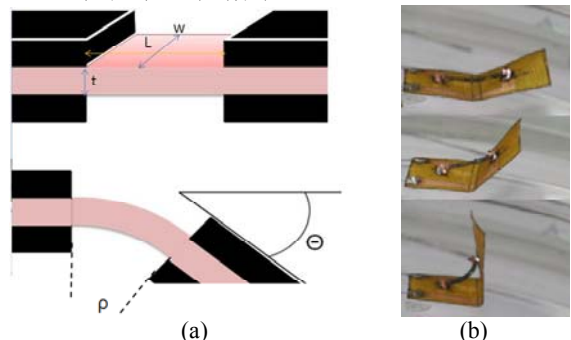


Fig. 2 (a) Schematic diagram of Flexure Revolute Joint (b) Flexure joint actuated by SMA spring actuators

2.2 Universal Joint

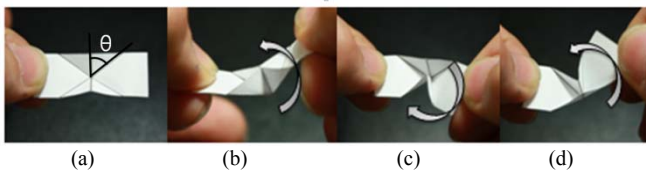


Fig. 3 Paper origami trial version of SCM universal joint (a) Neutral state. (b) Pitch bending motion. (c)-(d) Yaw bending motions [3]

SCM 공정은 2D process 이기 때문에 일반적인 방법으로 는 1 자유도 Revolute 조인트 밖에 만들 수 없다. 1 자유도 Revolute 조인트 만으로는 다양한 움직임을 만들기 어렵기 때문에 다자유도 조인트가 필요하게 된다. 기계 요소 중 2 자유도를 가지는 Universal 조인트가 대표적인 예이다. 두 개의 Revolute 조인트가 수직으로 교차하고 있는 구조로 되어있는데 이로 인해 광범위한 workspace 를 가지게 된다. 2D 패턴으로 Universal 조인트를 만들기 위해서는 평면 설계를 통하여 두 방향의 회전 자유도를 얻어야 한다. 한 평면 상에서 2 개의 축을 만들기 위해서는 회전축이 일정한 각을 가지고 교차되는 방법으로 2 개의 회전축을 가지는 관절을 만들 수 있다. Fig. 3 은 2D 패턴 Universal 조인트의 설계도와 실제 모습을 나타내고 있다. 서로 교차하는 두 사선이 두 방향의 회전 축이 되며, 아래쪽과 위쪽 삼각형이 반으로 접히며 수축하면 각 방향으로 회전하게 되고, 두 쪽 다 접으면 앞으로 회전하게 되기 때문에 2 자유도를 가지게 된다. 3D U-조인트와 달리 2D에서는 R-조인트가 수직하게 교차 할 수 없기 때문에 각도 θ 를 가지고 만나게 된다.

2D Universal 조인트에 관한 Forward kinematics 해석을 통해서 Revolute 조인트 사이의 각도 θ 와 workspace 간의 관계를 얻어낼 수 있다. θ 가 커지면 커질수록 workspace 가 양 옆으로는 넓어지지만 위아래로는 좁아진다.

이 사실을 실제로 확인해보기 위해 $\theta = 55^\circ, 65^\circ$ 인 경우에 대해서 실험을 수행해 보았다. Universal 조인트에 형상기억합금 스프링 구동기를 달고 전류를 이용해서 제어했으며, actuating 했을 때 end effector 의 궤적을 관찰 할 수 있다.

Fig. 4 (a)는 θ 가 55° 일 때 end effector 의 회전각을 나타낸 것이고, Fig. 4 (b)는 θ 가 65° 일 때 end effector 의 회전각을 나타낸 것이다. R-조인트 사이의 각도 θ 가 늘어난 결과 좌우 굽힘각(α)가 양 옆으로 넓어지고 위아래로는 좁아진 것을 확인할 수 있다.

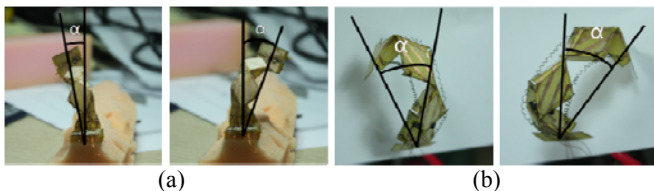


Fig. 4 Bending angle of U-Joint (a) $\theta = 55^\circ$ (b) $\theta = 65^\circ$

3. 제작

Fig. 5 에서 보는 것과 같이 SCM 공정은 크게 레이저 커팅 공정과 적층, 진공 열처리 공정으로 이루어진다. 단단한 링크가 되는 복합재료를 레이저 커터를 이용하여 정밀하게 절단을 하고, 일정한 평면 패턴을 가진 복합재료와 정렬을 시켜 유연한 고분자 재료 필름을 적층 하여 복합재료의 접착제가 붙을 수 있도록 진공 압착하여 열을 가하여 최종적으로 구조를 만들게 된다. 본 연구에서는 유리섬유

복합재를 이용하여 단단한 부분의 링크를 제작하였고, 고분자 필름의 경우 Polyimide 필름인 Kapton 을 사용하여 Flexure 부분을 구현 하였다. 그리고 그림에서 보는 것과 같이 형상기억합금의 전류를 인가해 주기 위한 회로 패턴 또한 Kapton 표면에 구리가 증착되어 있어 에칭을 통해 구현할 수 있다.

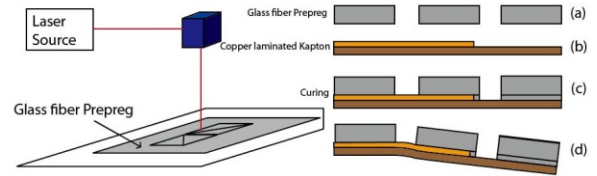


Fig. 5 . Overview of the laser micro machining step of the SCM process. (a) Composite prepreg (b) Thin-film copper laminated polymer are laser cut and etched to make circuit (c) Curing of the laminae to form segments (d) finally, circuit embedding structure capable of bending

이렇게 만들어진 복합재료 링크와 flexure 조인트에 형상기억합금 스프링 구동기를 근육과 같이 장착한다. Kapton 필름 위에 새겨져 있는 구리 필름 회로에 형상기억합금 스프링을 납땀을 통해 붙이고 전류를 흘려 형상기억합금의 온도를 올리고 구동을 시키게 된다.

4. 결론

본 연구에서는 작은 로봇을 만들기 위한 기본 기계 요소가 될 수 있는 프레임에 복합재료와 유연한 고분자 재료 필름으로 구현하였다. 이는 작은 구조일수록 커지는 마찰과 같은 손실을 최소화 할 수 있는 Flexure 조인트 구조로서 작게는 마이크로, 크게는 밀리 스케일 로봇의 프레임으로 유리한 구조이다. 그리고 기본적으로 레이저 가공을 통하여 절단이 이루어지기 때문에 평면 설계를 통하여 구조가 만들어 진다. 여기에 있을 수 있는 구조상의 한계를 적절한 평면 설계를 통하여 극복 할 수 있었다. 1 자유도 관절뿐 아니라 2 자유도를 가지는 Universal 조인트를 평면 설계를 통하여 구현 할 수 있었다. 그리고 설계 변수의 설정을 통하여 사이의 각도 θ 와 workspace 의 관계를 Forward kinematics 와 실험을 통해 알아보았다.

작은 복합재료 구조에 맞는 구동기로 형상기억합금 스프링 구동기를 이용하여 위 구조를 구동하여 동물의 뼈와 근육의 구조를 모사해 볼 수 있었으며, 이는 앞으로 작은 생체모방 로봇의 골격으로 사용 될 수 있는 가능성을 확인할 수 있었다.

후기

이 논문은 2009 년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(No. 2009-0087640, 2009-0070058)

참고문헌

1. Wood, R., Avadhanula, S., Sahai, R., Steltz, E., and Fearing, R., "Microrobot design using fiber reinforced composites," Journal of Mechanical Design, **130**, 052304, 2008.
2. Cho, K., Hawkes, E., Quinn, C., and Wood, R., "Design, fabrication and analysis of a body-caudal fin propulsion system for a microrobotic fish," IEEE International Conference on Robotics and Automation. ICRA 2008, 706-711, 2008.
3. Koh, J. and Cho, K., "Omegabot: Biomimetic Inchworm Robot using SMA coil actuator and Smart Composite Microstructures(SCM)", Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics(RoBio 2009), 1154-1159, 2009.