

◆ 특집 ◆ 멀티 스케일 다중 전개형 협업 로봇의 설계 및 생산 기술 개발

복합 재료와 형상 기억 합금 코일 스프링 구동기를 이용한
유연하게 변형 가능한 바퀴 로봇의 설계 및 제작

Design and Fabrication of Soft Deformable Wheel Robot using Composite Materials
and Shape Memory Alloy Coil Spring Actuators

고제성¹, 이대영¹, 김지석¹, 김승원¹, 조규진^{1,✉}
Je-Sung Koh¹, Dae-Young Lee¹, Ji-Suk Kim¹, Seung-Won Kim¹, and Kyu-Jin Cho^{1,✉}

¹ 서울대학교 기계항공공학부 (Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul Nat'l Univ.)
✉ Corresponding author: kjcho@snu.ac.kr, Tel: +82-2-880-1663

Manuscript received: 2012.11.12 / Accepted: 2012.11.20

In order to operate a search and rescue robot in hazardous area, the robot requires high mobility and adaptable locomotion for moving in unpredictable environments. In this paper, we propose the deformable soft wheel robot that can produce three kinds of driving modes; caterpillar driving mode, normal wheel driving mode, legged-wheel driving mode. The robot changes its driving mode as it faces the various obstacles such as a small gap, stairs etc. Soft film and composite materials are used for fabrication of deformable wheel structure and Shape Memory Alloy (SMA) coil spring actuators are attached on the structure as an artificial muscle. Film lamination and an composite manufacturing process is introduced and the robot design is required to be modified and compromised to applying the manufacturing process. The prototype is developed and tested for verifying feasibility of the deformable wheel locomotion.

Key Words: Deformable Wheel (변형 바퀴), Soft Robotics (유연 로봇), Shape Memory Alloy Coil Spring Actuator (형상기억합금 구동기), Search and Rescue Robot (탐색 및 구조 로봇), Multi Scale Robotics (다중 스케일 로봇)

1. 서론

이동 로봇의 크기는 로봇의 이동성을 결정하는 첫 번째 요소이다. 크기가 정해져 있는 로봇이 틈이나 계단을 오르는 등의 장애물을 지나갈 때, 가장 먼저 로봇의 크기에 따라 장애물을 극복 가능한지 불가능한지 정해 지는 것이다. 이렇게 로봇의 크기에 의해 정해지는 장애물 극복 능력은 지형에 대한 많은 정보를 갖고 있지 않은 상황에서 로봇을 운용해야하는 수색, 구조용 로봇에게는 운용 가능성을 결정짓는 중요한 변수이다.

지금까지 다양한 로봇들이 다양한 환경에서 이동성을 유지하기 위해 개발되어 왔다. 여기에는 몇 가지 이동 방식이 있는데 먼저 사람 또는 동물의 이동 방식에서 착안하여 개발 되는 다리형태의 이동 방식(Legged Locomotion)이다. 주로 네 개의 다리를 가진 로봇들이 많이 개발되고 있는데, 대표적으로 Boston Dynamics 사의 BigDog 은 유압 실린더 구동을 이용한 사족 보행 로봇이다. 빠른 자세 및 힘 피드백 제어를 통해 다양한 험지를 이동하고 큰 짐을 싣고 이동할 수 있도록 제작되었다. 그리고 작은 크기의 Little Dog 은 크기를 줄여 연구용 또는

실제 수색용으로 개발 중에 있다. 그리고 Asimo, Hubo 등의 2족 보행 로봇들도 계단 오르기, 험지 보행 등의 이동성을 확대하려는 연구 개발이 이루어지고 있다.

이동 로봇의 또 다른 형태는 가장 일반적인 주행 로봇인 바퀴 기반의 로봇이다. 실제 우주 탐사에 쓰이는 Rocker-Bogie 구조는 바퀴 기반 로봇의 험지 극복능력을 최대화 시킨 좋은 예라 할 수 있다.

바퀴의 간단한 주행능력과 다리를 가진 로봇의 험지 극복능력을 적절히 조합하여 단순하지만 높은 험지 극복능력을 보여주는 로봇이 있다. 바로 Rhex 와 같이 독특한 형태의 다리를 바퀴대신 장착하여 돌리는 식으로 이동을 한다.² 이를 Legged Wheel 이라 한다. 이 로봇은 바퀴처럼 단순하게 돌리는 동작을 하지만, 다리처럼 지면을 딛고 이동하기 때문에 풀밭, 진흙에서 이동이 가능하며 몸체보다 높은 단을 올라갈 수 있다.

하지만 많은 탐사로봇의 이동성 향상이 굴곡진 지형, 숲 등 큰 장애물을 효과적으로 넘어가는 것에 집중이 되어 있었다. 왜냐하면 몸체보다 작은 구멍이나 틈으로는 절대 들어 갈 수가 없다는 전제가 있기 때문이다. 최근 이러한 근본적 전제를 변형하는 물체를 이용하여 극복하려는 연구가 진행되고 있다. 부드러운 고분자 물체를 가진 소프트 로봇이 틈을 지나가거나,³ 문어와 같은 연체동물을 모사한 로봇을 만드는 연구가 활발히 진행 중이다.⁴

Fig. 1 에서와 같이 많은 금속 또는 단단한 물체를 가진 로봇들은 확실한 이동성의 한계를 가진다. 특히 왼쪽 그래프와 같이 틈을 지나가는 경우 자신의 몸보다 작은 틈은 근본적으로 지나가지 못한다. 하지만 자연에서는 연체동물과 같이 자신의 몸을 부드럽게 변형시켜 원래 몸의 크기보다 작은 틈을 빠져 나가던지 원래 몸체의 크기보다 높은 단을 넘어가는 식의 장애물 극복이 가능하다. 이러한 기능의 로봇의 설계 및 제작하기 위해서 변형이 가능하며 바퀴의 형태를 유지할 수 있는 필름 기반의 바퀴 설계,⁵ 변형을 일으킬 수 있는 스포크의 설계,⁶ 구동기 등 다양한 설계 및 제작 기술이 필요하다.

본 논문에서는 이러한 변형을 통한 장애물 극복 한계의 확장이 수색 및 이동 로봇 플랫폼에서 얼마나 큰 장점이 될 수 있는지 보여주며 시제품 제작을 통해 실제 적용 가능성을 확인해 볼 것이다.

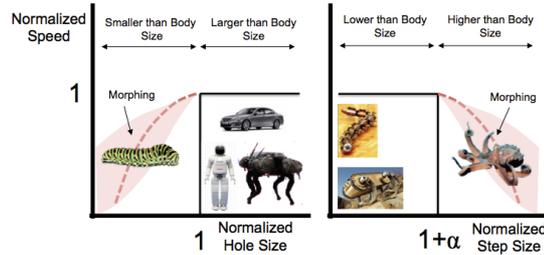


Fig. 1 Mobility of various rigid robots and Soft body animals¹

2. 변형 바퀴 로봇의 설계 및 제작

본 논문에서는 바퀴 기반의 이동 로봇에 변형을 통한 기능을 접목해 보고자 한다. 이동 로봇의 가장 효율적인 이동 방법은 모터 또는 엔진과 같은 회전운동을 만드는 구동기의 구동형태를 직접적으로 이용할 수 있는 바퀴를 이용한 이동일 것이다. 여기서 이동성의 한계는 바퀴의 크기에 따라 정해질 수 있다. 바퀴가 작으면 큰 로봇들이 가지 못하는 낮은 틈과 같은 장애물을 지나갈 수 있을 것이다. 하지만 바퀴가 작기 때문에 속도는 느려진다. 그리고 높은 장애물은 올라가기 힘들다. 반면 바퀴가 크면 속도와 높은 단과 같은 장애물 극복에는 적당하지만 바퀴보다 낮은 틈은 지나갈 수 없다. 이러한 정해진 크기의 바퀴가 가지고 있는 한계를 바퀴의 변형을 통해 해결해 보겠다.

Fig. 2 는 로봇의 가상 삼차원 설계 그림이다. 로봇은 변형 가능한 두 개의 전륜, 후륜 바퀴를 가지고 있으며 차체는 아주 얇게 설계 되었다. 여기서 바퀴의 크기가 장애물 극복 능력의 주요 변수가 될 수 있을 것이다. 변형 가능한 바퀴는 바퀴의 지름의 크기를 바꿀 수 있으며 모양을 바꿀

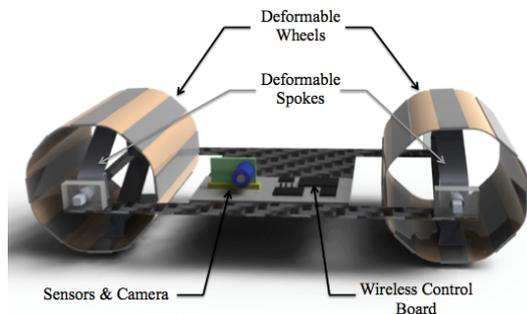


Fig. 2 3D rendering image of the deformable wheel robot

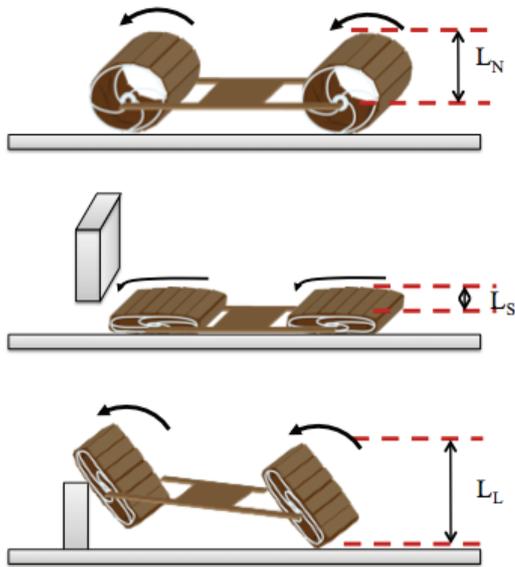


Fig. 3 Three kinds of driving modes of the deformable wheel robot¹

수 있다. 본 논문에서 사용할 바퀴의 변형 형태는 기본적으로 둥근 바퀴의 형태가 다양한 방향으로 납작하게 줄어들 수 있는 바퀴를 설계 하였다. 다양한 방향으로 줄어들 수 있는 바퀴는 Fig. 3 과 같이 세가지 이동 모드가 가능하다.

첫 번째로 기본적인 바퀴 구동 모드이다. 둥근 바퀴를 이용하여 비교적 평탄한 지형을 빠른 속도로 이동 할 때 사용 가능한 모드이다. 바퀴 중심에서 모든 방향으로 같은 길이를 가지며 모터의 회전력을 바퀴 축으로 받아 바퀴살(Spoke)을 통해 바퀴를 움직이게 된다.

두 번째 모드는 무한궤도(Caterpillar) 형태의 이동 모드이다. 다양한 방향으로 납작해 질 수 있는 바퀴의 특성을 이용하여 순차적으로 바퀴를 납작하게 만들면 바퀴 자체가 앞으로 점점 기어가는 움직임을 만들어 낼 수 있다. 원래 바퀴의 높이 보다 납작해진 상태로 앞으로 진행 할 수 있기 때문에 좁은 틈이 나왔을 경우 낮은 자세로 틈을 지나갈 수 있다. 순차적으로 변형을 일으키며 앞으로 나아가야 하기 때문에 속도는 바퀴를 돌릴 때 보다 낮아진다. 하지만 낮은 속도로 틈을 지나가는 것은 변형이 불가능 할 경우 지나갈 수 없는 것에 비하여 기능적인 측면에서 커다란 향상이라 할 수 있다.

마지막 모드는 앞서 설명한 Legged Wheel 형태이다. 납작해진 바퀴를 유지한 채 바퀴 전체를 돌

리게 되면 로봇 몸체가 아래위로 크게 흔들리며 앞으로 나아가게 될 것이다. 이는 평면 주행에서는 로봇의 진동만 가중 시키게 되지만, 로봇이 단을 만났을 경우 단을 올라갈 수 있는 가능성을 높여준다. 넓게 펼쳐진 바퀴는 펼쳐진 쪽으로 더욱 긴 반경을 가지게 된다. 길어진 반경은 더 높은 곳을 디딜 수 있게 하고, 원래 둥근 바퀴에 비하여 더 높은 단을 올라갈 수 있게 되는 것이다.

납작하게 변형이 가능한 바퀴를 이용하면 위와 같이 다양한 이동 모드를 얻을 수 있으며 극복해야 하는 지형을 특성에 맞게 이동 모드를 선정하여 이동할 수 있다. 변형을 통해 좀더 주변 환경에 적응하여 이동을 할 수 있게 되는 것이다.

2.1 변형 바퀴의 설계 및 제작

변형 바퀴를 제작하기 위해서는 일반적인 로봇 시스템에 사용하는 금속, 각종 단단한 플라스틱 등의 재료가 아닌 부드럽게 변형이 가능한 재료를 사용하여야 한다. 본 연구에서는 필름기반의

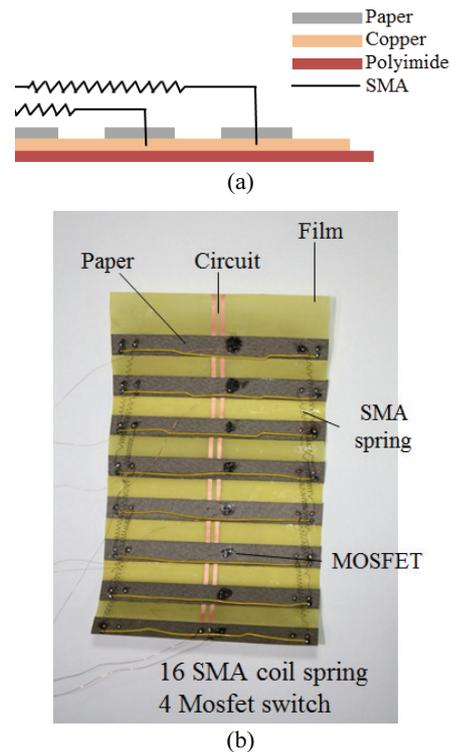


Fig. 4 (a) Illustration of film lamination for deformable wheel fabrication (b) deformable wheel imbedding a circuit and SMA coil spring actuators⁵

재료를 이용하여 유연하게 휘는 바퀴를 제작하였다. Fig. 4 와 같이 Polyimide 필름을 기반으로 종이, 구리 박막을 입혀 변형 바퀴를 설계하였다.

변형 바퀴는 8 마디의 종이 구리가 입혀져 있는 Polyimide 필름 위에 적층되어 있다. 여기서 구리는 전류를 인가하는 회로를 만들어 주는데, 회로의 모양에 맞게 마스크를 한 후 염화철 수용액에서 에칭을 하여 입혀져 있다. 종이 마디 양끝에는 형상기억합금(SMA) 코일 스프링 구동기를 붙이기 위한 작은 구멍이 나있다. 구멍을 통해 구리 회로가 노출되며 노출된 구리면에 SMA 를 납땀해 놓는다. 종이 마디 두 개 마다 SMA 를 연결하여 서로 당기는 구조이며, 종이 마디마다 2 개씩 총 16 개의 SMA 코일 스프링 구동기가 사용되었다. MOSFET 은 하나의 전원을 이용하여 디지털 신호를 이용하여 4 쌍 16 개의 SMA 를 동작시키고 끄는 스위치로 이용된다. 이 또한 구리 박막을 이용하여 바퀴에 임베딩된다.

이렇게 만들어진 구동기, 회로가 갖추어진 필름을 말아 붙여 바퀴형태로 만들면 Fig. 5(a) 와 같이 SMA 코일 구동기가 배치된다. 마주보는 쌍(a-a')의 SMA 구동기가 작동하게 되면 Fig. 5(b) 와 같이 납작하게 바퀴가 줄어든다. 그리고 그 다음 쌍(b-b')의 SMA 구동기가 작동하게 되면 납작해진 바퀴는 기어가는 동작을 만들어 낸다.

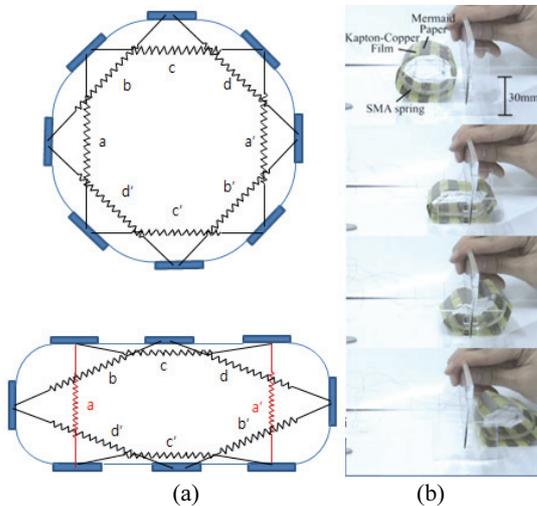


Fig. 5 (a) Configuration of the SMA coil spring actuators and actuation strategy (b) Sequential snapshot of motion of the single deformable wheel

2.2 변형 바퀴살(Spokes) 설계 및 제작

Fig. 6 과 같이 세 가지의 모드로 로봇이 움직이기 위해서는 모터의 회전력(토크)을 바퀴까지 전달할 수 있으며 바퀴가 변형함에 따라 그 기능을 유지할 수 있는 바퀴 축과 바퀴살(Spokes)이 필요하다. 이를 위해 본 연구에서는 바퀴의 필름형태의 구조와 호환이 가능한 필름형태의 다자유도 관절을 가진 바퀴살을 설계하였다. 바퀴 축을 미끄러질 수 있는 슬라이드 위에 두 개씩 두 쌍의 바퀴살이 있으며, 바퀴 축은 슬라이더에 회전력을 전달할 수 있도록 단면이 사각형으로 설계하였다. 슬라이드와 연결되는 바퀴살은 1 자유도로 접히는 관절을 가지고 있으며 바퀴와 연결되는 부분은 그림에서와 같이 바퀴가 변형해서 굴러갈 때 바퀴살과 바퀴 사이의 각도가 변할 수 있도록 6 조각의 Spherical 6 bar 메커니즘이 적용되었다. 이를 이용하면 Fig. 3 의 세가지 주행 모드에서 모두 모터의 구동력을 바퀴로 전달할 수 있으며, 일반 주행, 무한궤도 주행, Legged Wheel 주행이 가능해진다.

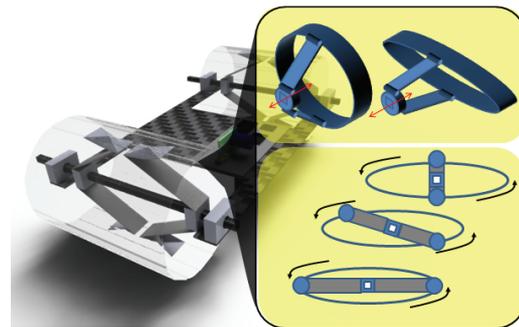


Fig. 6 Deformable spokes design⁶

일반적인 기계 요소를 사용하지 않고 평면 설계를 통해 복합재료를 사용함으로써 좀더 가볍고 제작이 용이할 수 있도록 하였다. 변형을 이용하는 만큼 최대한 자중을 줄이는 것이 필요하였고 복합재료는 충분한 강도를 가지면서 가볍게 로봇을 만들 수 있었다.

3. 결과

두 개의 변형 가능한 바퀴를 가진 소형 이동 플랫폼은 Fig. 7 과 같이 조립되었다. 본체는 최대한 무게를 줄이되 견고한 카본 복합재 판을 이용하여 제작되었고, 본체 위에는 DC 모터와 바퀴, 모터의

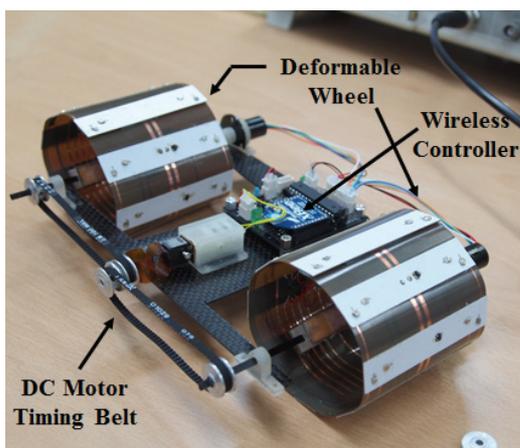


Fig. 7 Prototype of the deformable wheel robot

무선 조종을 위한 마이크로 프로세서가 장착되어 있다. 모터의 회전력은 두 개의 타이밍 벨트와 풀리를 통해 두 바퀴로 전달 된다.

장애물 통과 실험을 통해 앞서 설명한 구동모드의 실제 응용 가능성을 보여 주고자 한다.

3.1 평면 주행

바퀴의 변형 없이 모터만을 돌리게 되면 Fig. 8(a)와 같이 일반적 바퀴 구동이 가능하게 된다. Fig. 8(a)는 3 대의 시제품을 동시에 구동시킨 모습이다. 본 로봇은 종이, 복합재 등을 이용하여 최대한 단순한 설계를 통해 제작되어 최종적으로 빠르게 대량생산이 가능할 수 있도록 하였다. 그리고 실제 시제품 또한 여러 대를 제작하여 실험해 볼 수 있도록 하였다.

3.2 장애물 극복 주행

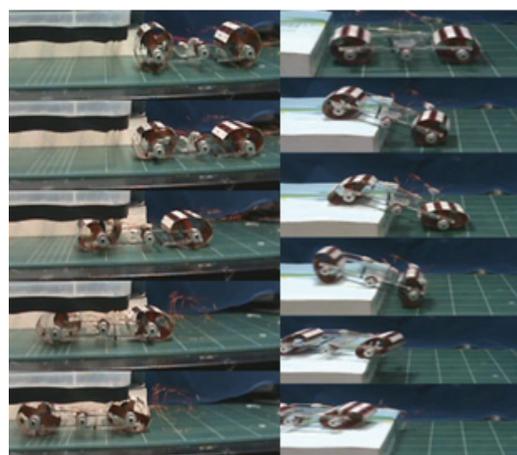
좁은 틈이 나올 경우와 높은 단을 만났을 경우 본 로봇이 가진 주행 모드를 이용하여 극복하는 모습을 Fig. 8 에서와 같이 확인 할 수 있다.

실제 로봇의 높이는 5 cm 정도의 높이를 가지고 있으며 로봇의 높이보다 낮은 3 cm 의 틈을 Caterpillar 주행 모드로 통과하는 모습을 Fig. 8(b)에서 확인 할 수 있다. 이는 변형 바퀴에 장착된 4 쌍의 SMA 코일 구동기를 순차적으로 구동시켜 모터와 함께 돌리며 앞으로 나아가는 모습이다.

일반적으로 바퀴의 반지름 보다 높은 단은 충분한 마찰력을 가지고 있지 않다면 둥근 바퀴를 이용하여 올라가는 것은 불가능하다. 이러한 단의 극복 가능성을 바퀴의 변형을 통해 좀더 올리는



(a)



(b)

Fig. 8 (a) Configuration of the SMA coil spring actuators and actuation strategy (b) Sequential snapshot of motion of the single deformable wheel

것이 Legged Wheel 주행 모드의 장점이 될 수 있을 것이다. 늘어난 바퀴의 장축을 통해 높은 단을 짚으며 올라가는 것이다. 이를 Fig. 8(b)에서 확인할 수 있다. 한 바퀴는 마찰력을 이용해 올라 갔지만 로봇 전체가 올라가기에는 힘들었다. 하지만 바퀴의 모양을 길쭉하게 만들어 단을 짚으며 올라 가는 것으로 장애물을 극복할 수 있었다.

4. 결론 및 토의

최근 부드러운 재료를 이용한 로봇, 기계 시스템의 개발이 활발히 이루어지고 있다. 이는 기존의 단단한 재료를 이용한 로봇 및 기계 시스템의 복잡성에 비하여 여러 가지 환경변화에 취약한 특성을 지니고 있기 때문이다. 정해진 환경에 정확한 제어를 통해 기능을 수행하기 때문에 조금의 예측 불가능한 환경에서는 기 기능을 수행할 수

없다. 하지만 부드러운 재료와 적응형 메커니즘의 개발을 통해 미처 예상치 못한 상황에서도 기능을 수행해 나갈 수 있도록 하는 새로운 개념의 기계 시스템을 개발 한다면 좀더 신뢰성 있는 시스템이 될 수 있을 것이다.

그리고 보통의 금속 기반 기계 시스템의 경우 수 만개의 부품을 이용하여 조립 공정을 통해 생산이 된다. 이러한 수 많은 부품이 서로 연결되어 정확한 동작을 보여준다. 하지만 수 많은 부품의 연결에서 단 하나의 부품의 잘못된 문제가 시스템 전체에 영향을 줄 경우 부품의 개수가 늘어나면 문제가 일어날 가능성 또한 높아진다. 여러 개의 부품의 조립으로 만들어지는 하나의 메커니즘을 스마트 재료 또는 예측 가능한 부드러운 재료 하나로 대체 가능할 경우 부품의 개수가 획기적으로 줄어 들 수 있다. 최종 시스템의 복잡성이 줄어 들고 생산 공정의 단순화 또한 기대할 수 있다.

본 연구를 통해 개발된 변형 가능한 바퀴 또한 이러한 맥락에서 많은 자유도를 가진 변형이 가능 하지만 무게, 부품의 개수를 줄여 단순화 시키고 환경에 적응하여 움직일 수 있는 기능을 만들어 낸 것이라 할 수 있다. 얇은 필름 기반의 재료를 이용하고 높은 구동력을 갖지만 무게와 부피는 아주 작은 SMA 코일 스프링 구동기를 이용하여 가볍고 소형의 이동 플랫폼을 만들 수 있었다.

앞으로 다양한 스케일에서 그 스케일에 맞고 다양하게 응용 가능한 제조 공정 및 다양한 재료를 이용한 설계 방법 개발이 지속되어 기존의 금속 및 단단한 재료를 이용한 기계 설계에서 가능할 수 없었던 혁신적인 시스템이 본 논문에서와 같은 새로운 기계 시스템의 개발로 이어질 수 있을 것이라 생각한다.

후 기

이 논문은 2011 년도 정부 (교육과학기술부) 의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초 연구사업임 (No. 2009-0087640).

참고문헌

1. Koh, J., Lee, D., Kim, S., and Cho, K., "Deformable soft wheel robot using hybrid actuation," Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and System, 2012.
2. Saranli, U., Buehler, M., and Koditschek, D., "RHex: A Simple and Highly Mobile Hexapod Robot," The International Journal of Robotics Research, Vol. 20, No. 7, pp. 616-631, 2001.
3. Shepherd, R., Iliovski, F., Choi, W., Morin, S., Stokes, A., Mazzeo, A., Chen, X., Wang, M., and Whitesides, G., "Multigait Soft Robot," PNAS, Vol. 108, No. 51, pp. 20400-20403, 2011.
4. Cianchetti, M., Arienti, A., Follador, M., Mazzolai, B., Dario, P., and Laschi, C., "Design concept and validation of a robotic arm inspired by the octopus," Materials Science and Engineering: C, Vol. 31, No. 6, pp. 1230-1239, 2011.
5. Koh, J. S., Kim, S. W., Oh, I. C., Song, S. H., Ahn, S. H., and Cho, K. J., "Hybrid Actuating System Based Morphing Robot For Disaster Area Exploration," Proc. of KSPE Spring Conference, pp. 793-794, 2011.
6. Koh, J. S., Lee, D. Y., Kim, S. W., and Cho, K. J., "Design and Fabrication of Composite Sheet Spoke for Torque Transmission of Small Scale Morphing Wheel," Proc. of KSPE Spring Conference, pp. 561-562, 2012.