Journal of Korea Robotics Society (2013) 8(2):136-142
http://dx.doi.org/10.7746/jkros.2013.8.2.136 ISSN: 1975-6291 / eISSN: 2287-3961

형상기억합금 코일 구동기와 복합재를 이용한 소형 도약 로봇 설계 및 제작

Miniature Jumping Robot Using SMA Coil Actuators and Composite Materials

정 순 필[1], 고 제 성[1], 정 광 필[1], 조 규 진†

Sun-Pill Jung[1], Je-Sung Koh[1], Gwang-Pil Jung[1], Kyu-Jin Cho†

Abstract In nature, many small insects are using jumping as a survival strategy. Among them, fleas jump in a unique method. They use an elastomer, 'Resilin', an extensor muscle and a trigger muscle. By contracting the extensor muscle, the elastic energy, that makes a flea to jump, is stored in the resilin. After storing energy, the trigger muscle begins contracting and pulling the extensor muscle. When the extensor muscle crosses the rotational joint, direction of torque generated from the extensor muscle reverses, 'torque reversal mechanism'. Simultaneously, the elastic energy stored in the resilin releases rapidly and is converted into the kinetic energy. It makes a flea to jump 150 times its body length. In this paper, miniaturized jumping robot using flea-inspired catapult mechanism is presented. This mechanism is based on the 4-bar linkage and the reversal joint and is actuated by Shape Memory Alloy (SMA) coiled springs describing the flea's muscle. The robot prototype is fabricated by SCM process using glass fiber prepregs and a sheet of polyimide film. The prototype is 20mm link length, 34mm width and 2.0g weight and can jump 103cm.

Keywords: bio-inspired, biomimetic, catapult mechanism, torque reversal, flea, jumping robot, micro robot, smart composite microstructures (SCM), shape memory alloy (SMA) coiled spring

1. 서 론

도약은 벼룩, 메뚜기와 같은 작은 곤충의 빠른 회피 방법 중에 하나이다. 크기가 작은 생물은 다리 길이 또한 작아 이동 속도에 한계가 있다. 이러한 한계를 극복하는 방법 중의 하나로, 소형 생체는 에너지를 모았다가 한번에 분출할 수 있는 도약방식을 사용한다. 생물뿐만 아니라 소형 이동 로봇에서도 크기에 따른 같은 한계가 존재하고 이를 도약 메커니즘으로 극복해 보고자 한다.

Received : May 13. 2013; Reviewed : May 21. 2013; Accpeted : May. 28. 2013
※ This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea(NRF) funded by the Ministry of Education, Science and Technology (No.2012-0000348, 2012-041247)
[1] Department of Mechanical and Aerospace Engineering/IAMD, Seoul National University, (sunpill20@snu.ac.kr, kjs15@snu.ac.kr, gwangpiljung@gmail.com, kjcho@snu.ac.kr)
† Corresponding author: Department of Mechanical and Aerospace Engineering/IAMD, Seoul National University, Gwanak-ro 1, Gwanak-Gu, Seoul, Korea (kjcho@snu.ac.kr)

Copyright ⓒ KROS

소형 도약 로봇은 대부분 스프링을 이용하여 탄성에너지를 저장했다가 스프링을 한번에 풀 수 있는 메커니즘을 이용하여 도약 메커니즘을 개발한다. 캐터펄트 (Catapult) 메커니즘은 탄성 에너지를 한번에 풀어 운동에너지로 순식간에 바꾸는 메커니즘을 지칭한다. 다양한 캐터펄트 메커니즘이 존재하는데 그 중 소형 도약 로봇에 가장 많이 사용 되는 메커니즘이 Escapement Cam 메커니즘이다. 7g Jumping 로봇[1], Grillo[2]와 같은 경량, 소형 도약 로봇에 적용이 되는 메커니즘으로서, 지름이 점진적으로 변하는 캠이 스프링을 눌러주다가 캠의 반지름이 급격히 줄어드는 지점에서 한번에 스프링이 풀리면서 운동에너지가 분출된다. 다른 메커니즘으로는 일부분 이가 비어있는 기어를 이용한 Toothless Gear 메커니즘이 있다. 기어를 이용하여 스프링을 줄이다가 이가 비어있는 부분에서 미끄러지면서

스프링이 풀리는 메커니즘이며, Mini Wheg 도약 로봇의 메커니즘으로 사용 되었던 메커니즘 이다[3]. 다양한 캐터펄트 메커니즘이 로봇에 사용되었는데 탄성에너지의 저장 방법, 풀림 방법에 따라 능동형, 수동형으로 나눌 수 있으며 이들은 수동 저장, 수동 풀림 방식의 캐터펄트 메커니즘이라고 할 수 있다[4].

이전 연구에서 벼룩 다리의 독특한 근육 구조를 모방하여 소형 로봇 메커니즘을 제작하였고[5] 이 메커니즘을 단순화한 디자인을 적용하여 재도약은 할 수 없지만, 도약 성능을 향상시켰다[4]. 본 논문에서는 벼룩 모사 캐터펄트 메커니즘을 이용한 재도약이 가능한 초소형 로봇 메커니즘을 제작하고 도약 성능을 평가하여 초소형 도약 로봇으로 적용 가능성을 확인해 보고자 한다. 벼룩은 1 밀리미터 이하의 크기로 150mm 가량 도약을 하는 능력을 가지고 있고 이는 도약 다리의 토크 역전 현상에 의해 동작할 수 있다[5]. 이러한 특징을 가진 캐터펄트 메커니즘을 유리 섬유 복합재와 형상기억합금 코일 스프링 구동기를 이용하여 3센티미터 크기의 도약 메커니즘을 제작하였고, 재도약이 가능할 수 있도록 설계하였다. 이는 능동 저장, 능동 풀림 캐터펄트 메커니즘으로 분류 될 수 있으며 초소형 메커니즘으로서 순간적인 빠른 움직임이나 큰 힘이 필요한 기계 요소로 사용될 수 있을 것이다. 앞으로 국방용 소형 로봇, 의료용 도구 등의 응용 분야에 적용할 수 있는 메커니즘으로 성능 개선 및 다양한 설계안을 제시할 수 있을 것이다.

2. 개념 설계

2.1 생물학적 모사

벼룩의 해부학적 구조는 Fig. 1과 같다. 벼룩의 다리는 다리를 이루는 외골격[흉부(Thorax), 밑마디(Coxa), 넓적다리(Femur)]과 탄성체인 레실린, 신근(Extensor muscle), 굴근(Flexor muscle), 방아쇠 근육(Trigger muscle)으로 이루어져 있다. 이들을 이용해 벼룩은 자신의 신장보다 150배 높은 도약을 할 수 있다. 벼룩의 캐터펄트 메커니즘은 다음과 같다. 우선, 굴근의 수축에 의해 넓적다리가 접히게 되며, 도약을 위한 준비를 하게 된다(Fig. 2 (a)). 이후, 신근이 수축하면서 흉부와 밑마디 사이에 있는 탄성체인 레실린과 신근에 탄성에너지를 저장한다(Fig. 2 (b)). 한편, 굴근의 수축에 의해 생기는 토크의 방향과, 신근의 수축에 의해 생기는 토크의 방향이 같고, 다리의 구조적 형상에 의해 밑마디와 넓적다리가 더 접히지 않는다. 에너지를 저장한 후, 방아쇠 근육이 수축하면, 신근의 위치가 변하게 되며, 점 O에 대하여 신근의 수축에 의해 발생된 토크의 방향이 역전된다 (Fig. 2 (c)). 토크가 역전되면, 저장되었던 탄성에너지가 순간적으로 풀리면서 넓적다리가 점O에 대하여 빠르게 회전하면서 다리가 지면을 순간적으로 박차면서 벼룩이 도약한다 (Fig. 2 (d)).

토크가 역전이 되는 부분에서, 신근의 수축 방향과 방아쇠 근육의 수축 방향이 수직에 가까우므로, 작은 힘을 내는 방아쇠 근육으로도 큰 힘을 내는 신근의 위치를 바꿀 수 있으며, 이에 의해 토크 역전이 되는 순간, 저장되었던 에너지들이 순간적으로 방출되는 장점이 있다. Fig.3은 벼룩의 도약에서 토크 역전 캐터펄트 메커니즘 과정을 기계적으로 나타낸 것이다.

Fig. 3에서 몸통과 다리는 회전 조인트로 연결되어 있으며, 신근 역할을 하는 스프링에 탄성에너지를 저장하는 동안 발생하는 반 시계방향 토크에 의해 다리가 움직이게 되는데, 이를 막아주기 위한 멈춤 구조(Stopper)가 존재한다(Fig. 3 (a)). 신근 스프링에 탄성에너지가 충분히 저장된 후, 트리거 스프링이 수축하면서 토크가 역전되고, 다리는

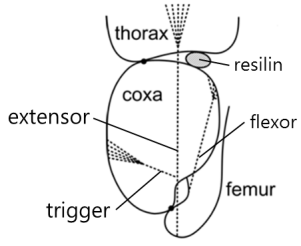


Fig. 1. Anatomical structure of flea's leg

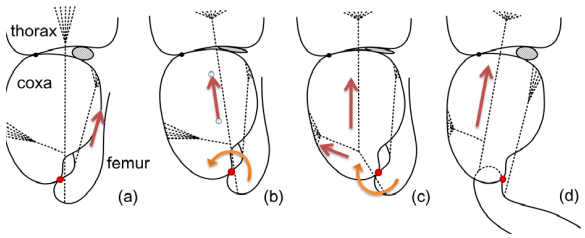
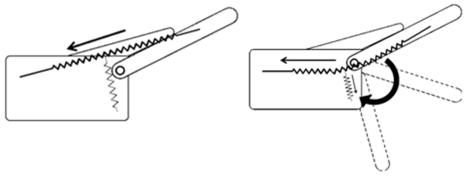


Fig. 2. Schematic of flea's catapult procedure



(a) (b)

Fig. 3. Schematic of flea's catapult mechanism procedure, expressed in mechanical elements. (a) storing elastic energy, (b) triggering and releasing elastic energy by torque reversal mechanism.

시계 방향으로 회전하게 되면서 도약(Fig. 3 (b))을 하는 캐터펄트 메커니즘이다. 이와 같이, 신근 스프링과 방아쇠 스프링, 멈춤 구조 이용해 도약을 하는 로봇을 제작한다. 또한, 여러 번의 도약이 가능하도록, 다리를 멈춤 구조까지 올려주는 굴근 스프링도 포함된 로봇을 제작한다.

2.2. 로봇 개념 설계

2.2.1 벼룩 모사 캐터펄트 메커니즘 설계

Fig. 4 의 왼쪽 그림은 벼룩의 캐터펄트 메커니즘을 모사한 로봇의 디자인이다. 마름모꼴의 4-bar 링크를 기본으로, 벼룩의 캐터펄트 메커니즘의 요소에 해당하는 구조들이 첨가되어 있는 형태이다(Fig. 4). 신근과 방아쇠 근육에 해당하는 스프링들은 형상기억합금 코일 스프링이며, 수축된 형상을 기억하고 있다. 신근 스프링은 두 윗면의 파인 홈 양 끝 단에 연결되어 있으며, 방아쇠 스프링은 둥근 구조물의 양 옆과 멈춤 구조의 사이에 연결되어있다(Fig. 5).

벼룩의 캐터펄트 메커니즘에서는 신근과 방아쇠 근육이 붙어있어 방아쇠 근육이 수축하면서 신근을 당기는 구조다. 이 과정에서 토크가 역전된 후, 방아쇠 근육의 힘의 일부 성분은 신근의 수축을 방해하는 방향으로 작용하기 때문에 도약에 방해가 될 수 있으므로, 본 논문의 벼룩 모사 캐터펄트 메커니즘에서는 신근 스프링과 방아쇠 스프

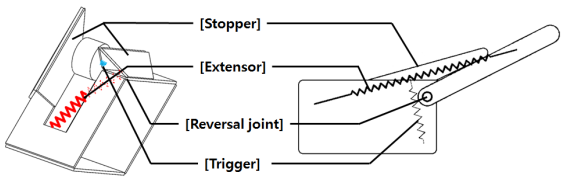


Fig. 4. Comparison of elements of flea's catapult mechanism and elements of flea-inspired jumping robot's catapult mechanism

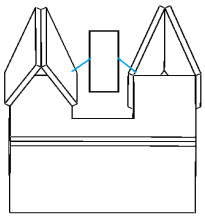
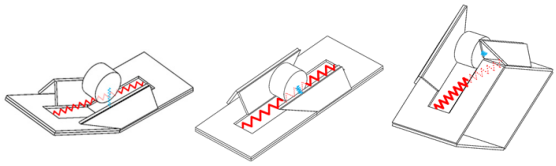


Fig. 5. The position of trigger springs. (Body)-(Trigger spring)-(Round structure)-(Trigger sping)-(Body)

링이 분리된 디자인을 제안한다. 방아쇠 스프링이 수축함에 따라 둥근 구조물을 아래로 누르게 되며, 이 구조물은 신근 스프링을 아래로 내리는 구조이다. 토크가 역전되어 로봇이 도약을 시작함과 동시에 두 스프링이 분리되어 서로 영향을 끼치지 않는 캐터펄트 메커니즘을 설계하여, 벼룩의 캐터펄트 메커니즘 구조에서 두 근육이 연결되어 있어 생기는 단점을 보완하였다.

로봇의 캐터펄트 메커니즘은 다음과 같이 작동한다 (Fig. 6). 우선, 마름모꼴의 4-bar 링크가 완전히 접혀 링크들이 멈춤 구조에 닿아있는 상태에서 신근 스프링이 수축하여 탄성에너지를 저장한다. 이때, 멈춤 구조에 의해 로봇의 구조는 움직이지 않는다(Fig. 6 (a)). 이후, 방아쇠 스프링이 수축하면서 둥근 구조물을 아래로 누르게 되고 둥근 구조물은 신근 스프링을 아래로 누르게 된다. 이 과정에서 꺾여있던 로봇의 구조가 점차 직선형태로 펴지기 시작한다(Fig. 6 (b)). 로봇이 직선 형태로 완전히 펴지면, 로봇의 위쪽에 있는 두 링크의 토크가 역전되면서 로봇은 마름모 형태로 바뀌며, 신근 스프링이 수축되면서 로봇은 도약하기 시작한다(Fig. 6 (c)).



(a) (b) (c)

Fig. 6. Schematic of flea-inspired jumping robot's catapult mechanism

2.2.2 재도약 가능 메커니즘 설계

로봇이 다시 도약을 하기 위해서는 마름모꼴의 4-bar 링크가 완전히 접힌 상태가 되어야 탄성에너지를 저장하는

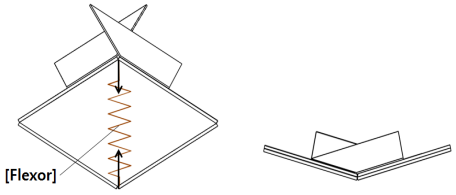


Fig. 7. Schematic of robot's re-positioning procedure

동안 구조가 멈춤 구조에 의해 움직이지 않으므로 구조를 완전히 접어줄 수 있는 굴근 스프링이 필요하다. 따라서 굴근에 해당하는 형상기억합금 스프링을 Fig. 7과 같이 연결하여 캐터펄트 메커니즘이 작동할 수 있는 준비 자세를 만들 수 있도록 설계한다.

한편, 캐터펄트 메커니즘이 작동하는 과정에서 굴근 스프링이 늘어나므로, 도약을 위한 탄성에너지의 일부가 굴근 스프링을 늘이는데 소모된다. 따라서, 굴근 형상기억합금 스프링을 양방향 형상 기억효과(Two Way Shape Memory Effect)를 가지도록 설계한다. 즉, 자세를 조정할 때는 스프링이 가열되어(Austenite) 수축하며 자세를 조정한 이후에는 스프링이 식으면서(Martensite) 늘어나는 특성을 가진 형상기억합금 스프링을 사용한다.

2.2.3 시제품 설계

로봇의 시제품은 낱장의 2D 구조(Fig. 8 (a))을 접어 3D 구조(Fig. 8 (b))를 만드는 방법으로 제작하도록 설계되었고, 재도약이 가능한 벼룩 모사 캐터펄트 메커니즘을 가진다. 2D 구조의 구멍은 형상기억합금 코일 스프링이 통과하거나 연결되는 부분이다.

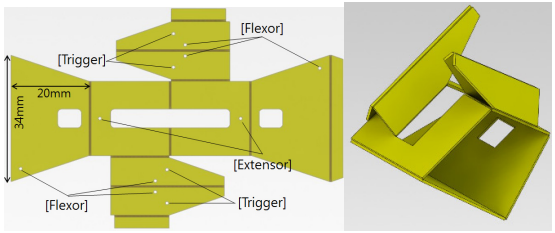


Fig. 8. (a) Planar body design of the prototype (b) 3D structure of prototype, made by folding the planar body design

3. 제 작

Fig. 9 는 2D 구조(Fig. 8 (a))로 제작된 패턴을 접고 접착제를 이용해 붙이는 작업을 거쳐 로봇의 3D 구조를 만들고 여기에 형상기억합금 스프링을 연결하여 완성된 시제품의 형상이다. 완성된 시제품의 크기와 무게에 대해서 Table 1에 정리하였다.

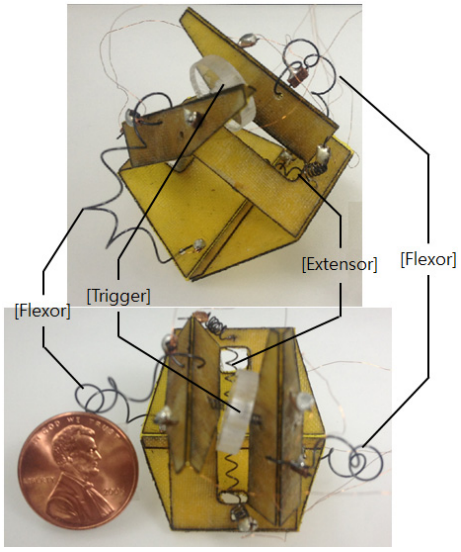


Fig. 9 Prototype of flea-inspired catapult mechanism

Table 1. Jumping Mechanism Specification

Properties of Body Components	A link of 4-bar linkage length	20 mm
	Maximum width	34 mm
	Weight	2.0 g
SMA Coil Spring Used at Tensile Test	Wire dia. (d)	0.3 mm
	Coil dia. (D)	1.5 mm
	Coil number (n)	24
	Stiffness (k) at actuation	100 N/m

3.1. 로봇 구조

시제품의 로봇 구조는 유리섬유 복합재와 폴리이미드 필름을 사용한 Smart Composite Microstructures(SCM) 과정으로 제작되었다. 2D 패턴으로 유리섬유 복합재를 레이저 커터(CO2 laser, Universal Laser, Co.)를 이용해 자른 후, 그 위에 로봇의 외곽선을 따라 자른 폴리이미드 필름을 적층하고, 다시 2D 패턴의 유리섬유 복합재를 적층하여 로봇

의 2D 구조를 제작하였다. 유리섬유 복합재는 강체들을 구성하며, 유리섬유 복합재의 잘려진 부분들은 폴리이미드 필름으로 연결되어 회전 조인트의 역할을 한다.

방아쇠 스프링에 의해 눌려지며 신근 스프링을 눌러 토크를 역전시키는, 지름 12mm-두께 3mm의 둥근 구조물은 아크릴로 제작되었다.

3.2. 구동기

형상기억합금 코일 스프링은 형상기억합금 와이어(Dynalloy Co.)를 감아 고온에서 구워 제작하였다. 형상기억합금 코일 스프링은 전류를 흘려주면 내부저항에 의해 열이 발생한다. 내부저항에 의해 발생한 열은 형상기억합금 스프링을 Austenite phase shape(본 논문에서 사용한 형상기억합금 코일 스프링의 Austenite phase shape는 압축스프링의 형상)로 만든다.

Fig. 10은 신근 형상기억합금 스프링에 전류를 가해주면서 수행한 인장실험의 결과이다. 실험에 사용한 형상기억합금 스프링의 구체적인 사항들은 Table 1에 정리하였다. 인장실험에서 이 스프링은 (2.4V, 0.8A)에서 가장 좋은 성능을 보이며, 변형길이와 힘이 선형적인 관계를 보이므로, 100N/m의 강성을 가지는 일반적인 스프링으로 가정할 수 있다.

한편, 신근 형상기억합금 코일 스프링의 변형된 길이가 같더라도, 가해주는 전류의 크기에 따라 탄성력의 크기가 다르다(Fig. 10). 즉, 형상기억합금 코일 스프링은 전류의 세기에 따라 가변 강성을 가지므로, 시제품의 구동기로 사용하면, 도약 높이를 조절할 수 있는 장점이 있다. (능동형 저장방법)

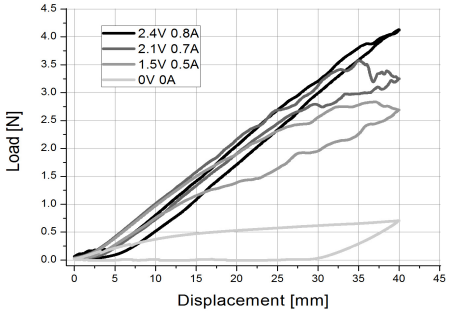


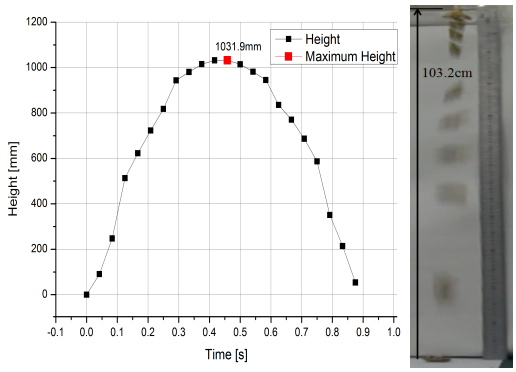
Fig. 10 Result of extensor SMA coil spring's tensile tests

4. 결 과

로봇의 시제품에 사용된 신근 형상기억합금 코일 스프링은 인장실험에 사용한 스프링과 동일한 재질과 조건으로 만들어 졌으며, 코일 수가 14개이다. 이전 인장실험에서 코일수가 24개인 스프링에 0.8A의 전류를 흘려주었을 때 스프링 상수가 100N/m이므로, 코일수가 14개라면 스프링은 171.43N/m(100N/m*24/14)의 강성을 가짐을 계산할 수 있다. 시제품의 기하학적 구조에 의해 신근 형상기억합금 코일 스프링은 25.3mm만큼 변형된다. 따라서 탄성에너지 식($Ee=kx^2/2$)에 의해, 신근 형상기억합금 코일 스프링에 54.86mJ의 탄성에너지가 저장된다.

신근 스프링에 저장된 탄성에너지가 설계된 캐터펄트 메커니즘에 의해 운동에너지로 전환된다. 그러므로 운동에너지 식($Ek=mv^2/2$)에 의해, 시제품을 질점(point mass)으로 가정하여 모든 탄성에너지가 수직방향 직선 운동에너지로 전환된다면, 시제품의 초기 도약속도는 7.41m/s이다. 하지만 실제 시제품은 연속체(continuous mass)이므로, 4-bar 캐터펄트 메커니즘의 동작과정에서 링크들은 직선 운동에너지와 회전 운동에너지를 모두 가진다. 따라서 저장된 탄성에너지를 수직방향 직선 운동에너지로 전환하는 효율은 캐터펄트 메커니즘의 기계적 디자인에 종속적이다. 초고속 카메라를 이용해 측정한 실제 시제품의 초기 도약속도는 5.83m/s이다. 즉, 시제품의 캐터펄트 메커니즘은 62%의 효율로 탄성에너지를 운동에너지로 전환한다.

위치에너지의 식이 $Ep=mgh$ 이므로, 시제품의 도약속도가 5.83m/s이면, 공기저항을 무시한 시제품의 이상적인 최고 도약높이는 173.2cm이다. 하지만 실제 도약과정에서는 공기저항이 도약을 방해하는 외력으로 작용한다. 한편, 공기저항은 시제품의 속도와 정면의 형태, 면적에 대한 함수이다. 시제품의 속도는 높은 도약을 위해 큰 값을 가질수록 좋으므로, 시제품의 정면의 형태와 면적을 변화시켜 공기저항을 줄일 수 있다. 즉, 공기저항에 대한 효율은 시제품의 디자인에 종속적이다. 시제품의 도약과정을 촬영하여, 영상 처리를 통해 시제품의 도약궤적과 최고 도약높이를 측정하였다(Fig. 11). 시제품의 최고 도약높이는 103.2cm이며, 시제품의 공기저항에 대한 도약 효율은 59.6%이다.



(a) (b)

Fig. 11. (a) Jumping height-time graph of the prototype, measured by image processing (b) Jumping trajectory of the prototype

Table 2. Experimental Results

Experimental Results	Take off Velocity (Vt)	5.83 m/s
	Jumping Height	103.19c m
Energy Efficiency	Stored Elastic Energy (Ee)	54.83 mJ
	Kinetic Energy at take off (Ek)	33.99 mJ
	Potential Energy at Max height (Ep)	20.25 mJ
	Mechanism Mechanical Efficiency (Ek/Ee)	62%
	Drag Efficiency (Ep/Ek)	59.6%

시제품의 도약 실험의 결과와 이를 이용하여 계산한 각 과정에서의 도약 효율들을 Table 2에 정리하였다.

5. 결 론

본 논문에서는 벼룩의 독특한 캐터펄트 메커니즘을 이용한 초소형 로봇 메커니즘을 제작하였다. 이 메커니즘은 형상기억합금 코일 스프링에 탄성에너지를 저장하며 토크 역전현상을 이용하여 빠르게 에너지를 풀어 줌으로서 도약하는 캐터펄트 메커니즘이다. 4-bar 링크를 기본 골격으로 가지며, 로봇은 유리 섬유 복합재의 SCM 과정으로 제작되었다. 제작된 로봇은 크기가 3.4cm, 무게 2g의 초소형 도약로봇이다. 대부분의 소형 도약로봇은 Escapement Cam을 이용한 수동 저장, 수동 풀림 방식의 캐터펄트 메커니즘을 가지고 있는 반면, 본 논문의 초소형 도약로봇은 모터와 기어 대신 형상기억합금 코일 스프링을 이용한 능동 저장, 능동 풀림 방식의 캐터펄트 메커니즘을 가지고 있다.

이 로봇은 최대 54.83mJ의 탄성에너지를 저장하여 5.83m/s의 속도로 도약하며 최대 도약높이는 103.2cm이다. 본 논문에서 제작한 로봇의 기계적 캐터펄트 메커니즘의 에너지 전환 효율은 62%이며, 공기저항에 대한 도약 효율은 59.6%이다.

기계적 캐터펄트 메커니즘의 에너지 전환 효율과 공기저항에 대한 도약 효율 모두 로봇의 디자인에 종속적이다. 따라서 기계적 에너지 전환 효율과 공기저항에 대한 도약 효율을 높이려면 시제품의 디자인 설계가 가장 중요하다.

6. 추후 연구

이 로봇은 전력 공급원이 로봇 외부에 있다. 로봇 스스로 도약하기 위해서는 로봇 내부에 전력공급원을 내장시켜야 한다. 하지만 로봇의 전체 무게가 2g밖에 되지 않기 때문에 아무리 가벼운 전력공급원이라도 상당히 무거울 것이다. 따라서 전력 공급원을 로봇에 내장시켜도 효과적인 도약을 할 수 있는 방법에 대한 연구가 필요하다.

또한, 제작된 로봇은 방향 전환을 하는 구조가 없고, 수직방향으로만 도약을 한다. 따라서 도약을 하면서 원하는 지점으로 이동할 수 있는 메커니즘이 필요하다. 전방으로 도약하면서 도약의 방향을 설정할 수 있는 메커니즘이나 수직으로 높이 도약 후 글라이딩을 하면서 이동하는 등 여러 방법에 대한 연구가 필요하다.

References

[1] M. Kovač, M. Fuchs, A. Guignard, J.-C. Zufferey, and D. Floreano, “A miniature 7g jumping robot,” in Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2008, pp. 373-378.

[2] U. Scarfogliero, C. Stefanini, and P. Dario, “The use of compliant joints and elastic energy storage in bio-inspired legged robots,” Mechanism and Machine Theory, vol. 44, no. 3, pp. 580-590, 2009.

[3] B. G. A. Lambrecht, A. D. Horchler, and R. D. Quinn, “A small, insect-inspired robot that runs and jumps,” in Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2005, pp. 1240-1245.

[4] J. –S. Koh, S. –P. Jung, M. –K. Noh, S. –W. Kim and K.

–J. Cho, “Flea Inspired Catapult Mechanism with Active Energy Storage and Release for Small Scale Jumping Robot,” in Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2013.

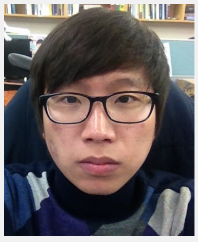
[5] M. –K. Noh, S. –W. Kim, S. –M. An, J. –S. Koh and K. –J. Cho, “Flea-Inspired Catapult Mechanism for Miniature Jumping Robots”, Robotics, IEEE Transactions on (TRO), vol. 28, no. 5, p1007-1018, Oct. 2012.

정 광 필

2010 KAIST 기계공학과(공학사)

2010~현재 서울대학교 대학원 기계항공공학부 박사과정

관심분야 : 생체모사로봇, 스마트 재료 및 구동기



정 순 필

2013 서울대학교 기계항공공학부 (공학사)

2013~현재 서울대학교 대학원 기계항공공학부 석・박사통합과정

관심분야 : 생체모방로봇, 스마트 구동기

조 규 진

1998 서울대학교 기계설계학과 (공학사)

2000 서울대학교 기계설계학과 (석사)

2007 MIT 기계공학박사

2008 하버드 박사후연구원

2008~현재 서울대학교 기계항공공학부 조교수/부교수

관심분야 : 생체모사로봇, 의료용 로봇, Smart 액추에이터, 의료보조로봇

고 제 성

2008 서울대학교 기계항공공학부 (공학사)

2008~현재 서울대학교 대학원 기계항공공학부 박사과정

관심분야 : 생체모방로봇, 스마트 구동기