

'09 추계학술대회 우수 논문

## 초소형 날갯짓 비행운동을 위한 복합재료 힌지 메커니즘 제작

강래형\*, 장희숙\*\*, 임주영\*\*, 한재홍\*<sup>+</sup>

### Fabrication of composite hinge mechanism for flapping-wing motion of micro air vehicle

Lae-Hyong Kang\*, Hee-Suk Jang\*\*, Ju-Young Leem\*\*, and Jae-Hung Han\*<sup>+</sup>

#### ABSTRACT

This paper deals with a fabrication method of composite hinge mechanisms for flapping-wing micro air vehicles. The fabrication process includes curing process of Graphite/Epoxy prepregs, laser cutting for high fabrication repeatability, laminating of Graphite/Epoxy prepregs with Kapton film which is used for flexure, and so on. The fabricated hinge mechanism was attached with PUMPS actuators and the measured flapping angle was 173° when driving voltage was 300V 170Hz.

#### 초 록

본 연구는 압전 작동기 기반 초소형 날갯짓 비행체의 날갯짓 운동을 위해, 압전 작동기의 펄핑 운동을 효과적으로 날갯짓 운동으로 변환하는 힌지 메커니즘 제작 기법에 대해 다루었다. 경량화를 위해 탄소섬유/에폭시(Graphite/Epoxy) 프리프레그를 사용하고, 반복적인 제작이 용이하도록 레이저 절단기를 활용하였으며, 힌지부는 얇은 캡톤 필름을 이용해 컴플라이언트(compliant) 메커니즘으로 구성하였다. 제작된 힌지 메커니즘을 압전 유니모프 작동기 PUMPS에 연결하여 동작시켜 본 결과, 300V 170Hz 인가 전압에서 173°의 큰 날갯짓 각을 가짐을 확인하였다.

**Key Words** : 날갯짓 운동(flapping-wing motion), 초소형 비행체(micro air vehicle), 힌지 메커니즘(hinge mechanism), 링크(linkage), 변위 증폭기(displacement amplifier)

#### 1. 서 론

곤충의 비행은 새와는 달리 빠른 날갯짓 주파수를 가지고 날개의 접힘이 거의 없는 특징을 가지고 있다. 이런 곤충과 같이 빠른 주파수로 날갯짓을 하는 초소형 비행체 개발을 위해서는 가벼우면서도 강성이 큰 구조와 고주파 가진이 가능하고 큰 파워를 낼 수 있는 작동기가 요구된다. 이러한 이유로 복합재료 구조물과 압전 작동기를 결합한 초소형 비행체 연구가 이뤄지고 있으며, Wood[1,2]가 개발한 날갯짓 비행체는 가

이드 와이어를 따라 이륙하는 성과를 보였다. Wood의 비행체는 무게가 60mg에 불과하지만 날갯짓 운동 뿐 아니라 날개 회전까지 고려한 힌지 메커니즘을 구현하였다(Fig. 1).

본 연구에서는 당 연구 그룹이 개발한 압전 작동기 PUMPS (Piezoelectric Unimorph with Mechanically Pre-stressed Substrate) [3]를 활용한 초소형 날갯짓 비행체를 개발하기 위해, PUMPS의 펄핑 운동을 날갯짓 운동으로 변환하는 복합재료 힌지 메커니즘을 구현하고자 하였다.

\* 한국과학기술원 항공우주공학과 대학원

\*\* 한국과학기술원 기계공학과

\*+ 한국과학기술원 항공우주공학과, 교신저자(E-mail:jaehunghan@kaist.ac.kr)

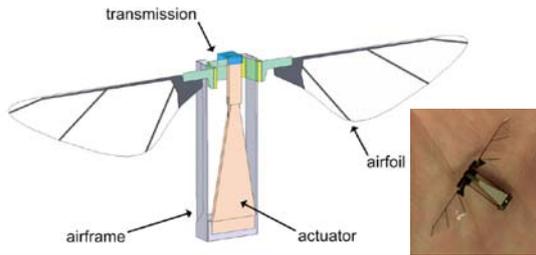


Fig. 1 60mg, 3cm wingspan MAV[1,2].

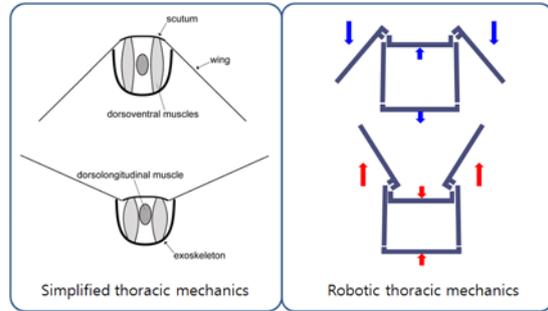


Fig. 3 Generation of the wing stroke.

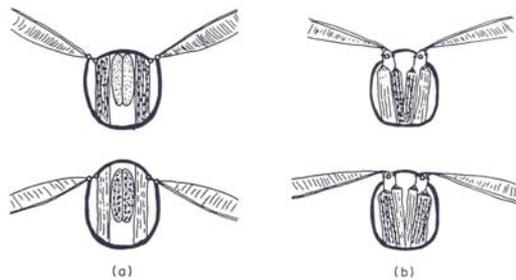


Fig. 2 Flight musculature. Contracting muscles are shown stippled: (a) indirect flight muscles, typical of flies and midges; (b) direct flight muscles, typical of dragonflies and grasshoppers [4].

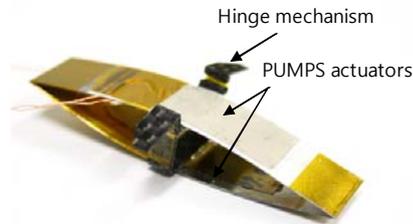


Fig. 4 Flapper with hinge mechanism using carbon plates.

## 2. 날갯짓 운동 분석 및 힌지 설계

### 2.1 곤충의 날갯짓 운동

곤충의 날갯짓 운동 원리는 근육의 형태에 따라 직접 근육과 간접 근육에 의한 구동 방식으로 구분할 수 있다. 직접 근육을 이용하는 곤충의 경우 가슴판과 날개의 관절에 연결되어 있는 근육을 이용하여 날개를 직접적으로 구동시키며 (Fig. 2(b)), 간접 근육을 이용하는 곤충의 경우에는 가슴판과 등판에 연결되어 있는 근육과 이와 수직하게 길이방향으로 존재하는 근육의 엇갈리는 수축에 의해서 날개운동을 유발시킨다 (Fig. 2(a)). 매미의 경우 후자에 속하며, 본 연구에서는 PUMPS의 크기(63.5×13.7×0.5mm<sup>3</sup>), 무게(2g)를 고려하여 곤충 중 큰 편에 속하는 매미를 선정하여 날갯짓 운동을 분석하였다. 분석 결과, 매미는 약 40Hz의 날갯짓 주파수를 가지고, 상향 날갯짓에서 56°, 하향 날갯짓에서 26°, 전체 82° 정도의 날갯짓 운동을 하는 것으로 측정되었다.

### 2.2 힌지 메커니즘 설계

곤충의 간접 근육 방식을 모사한 힌지 메커니즘은 Wood 연구[5]에서도 찾아 볼 수 있으나 압전 작동기를 하나만 이용하기 때문에 추가적인 구조 프레임이 필요하다. 본 연구에서는 구조

프레임을 없애고 또 하나의 PUMPS 작동기를 사용함으로써 보다 큰 변위를 얻도록 하였다. 두 PUMPS 작동기에서 발생하는 상하 펌핑 운동을 날갯짓으로 전달하기 위하여 Fig. 3과 같이 곤충의 몸통 진동을 모사하였다.

## 3. 복합재료 힌지 메커니즘 제작

Fig. 3의 힌지 메커니즘을 구현하기 위하여 처음 시도한 방법은 CST사의 탄소섬유 평판(Carbon Fabric Accent Plate 0.4mm)을 절단하여 만드는 방법이었다. 각 블록을 만든 후 이를 캡톤 필름(Kapton film) (Dupont Co.)에 부착하여 블록 사이의 캡톤 필름이 힌지 역할을 하도록 제작하였다. 제작된 힌지 메커니즘과 PUMPS를 결합해 놓은 모습을 Fig. 4에 나타내었다.

이러한 힌지 메커니즘은 수작업으로 제작하기 때문에 시간 소요가 많고 반복 제작이 어려운 단점이 있다. 이런 문제를 해결하기 위해 레이저 절단기를 이용하는 방법을 사용하였으며, 참고문헌 [5,6]에 제작 기법에 관한 노하우를 얻을 수 있었다. 기존 컴플라이언트 메커니즘을 이용한 힌지 메커니즘 구조를 Fig. 5에 나타내었으며, Fig. 1의 초소형 날갯짓 비행체에 적용된 힌지 메커니즘은 Fig. 6에 나타내었다.

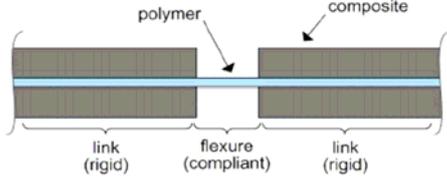


Fig. 5 Rotational flexure mechanism [5].

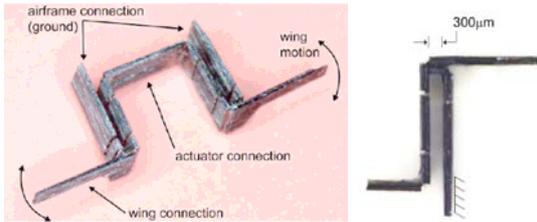


Fig. 6 MAV transmission system[1].

하지만, 레이저 절단기를 사용한다고 하더라도 복합재료의 상태 - 두께, 경화 정도, 종류 등 - 에 따라 절단이 제대로 되지 않는 경우가 많아 시행착오가 뒤따랐다. 우선, 레이저 가공 중에 절단면이 타는 현상이 발생하였는데, 섬유(fiber) 방향으로 수직인 방향으로 절단하는 경우 특히 심하게 발생하였으며, 전체 구조가 부서지는 경향을 보였다. 이에 따라 레이저의 세기 및 진행 속도, PPI(pulses per inch)에 따른 특성과 복합재료 프리프레그의 두께의 영향을 고려하여 여러 실험을 수행하였다. 그 결과, 본 연구에서 사용한 탄소섬유/에폭시(한국화이버 CU-020NS)의 경우 경화된 상태에서 VersaLaser (Universal Laser Systems, Inc.)의 설정을 파워 3%, 속도 10%, PPI 500으로 100번 반복 절단하는 것으로 설정하면 두께 40µm 프리프레그까지 잘 절단함을 확인하였다. 여기서, 절단이 잘 된 기준은 Fig. 6에 표시된 것처럼 구동부와 날개 연결부 사이의 길이가 0.3mm가 되도록 절단이 가능한 상태로 선정하였다.

본 연구에서 힌지 메커니즘 제작 과정을 Fig. 7에 요약하였으며, 각 과정에 대한 상세 설명은 Figs. 8-12에 나타내었다. Figs. 8-9는 오토클레이브에서 탄소섬유/에폭시를 경화시키는 과정을 나타내었으며, Fig. 10은 레이저 절단용 코렐드로우(CorelDraw) 도면의 크기와 Fig. 11은 레이저 가공 후 복합재료 평판에 슬롯이 새겨진 모습을 나타내었다. 라미네이터를 이용하여 캡톤 필름과 탄소섬유/에폭시 프리프레그를 접합시킬 때는 UHU extra power stic 접착제를 사용하여 미리 접합시킨 후 GMP PHOTONEX@ 350Digital 라미네이터에서 온도 160°C, 속도 1로 설정 후 10번 반복하여 경화시켰다(Fig.12). 이때, 필플라이(peel-ply)를 사용하여 경화 후 떼어내기 쉽도록 하였다. 최종 제작된 힌지 메커니즘은 Fig. 13에 나타내었으며 무게는 0.31-0.35g이었다.

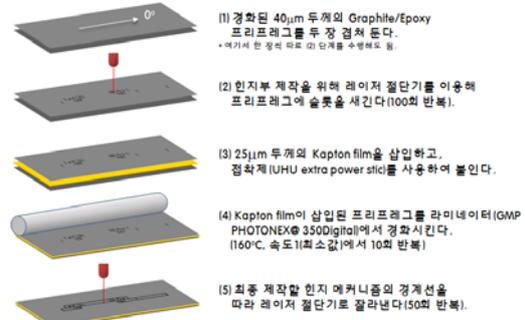


Fig. 7 Fabrication process of hinge mechanism.

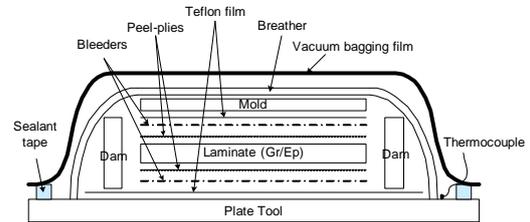


Fig. 8 Lay-up for curing of Graphite/Epoxy composite.

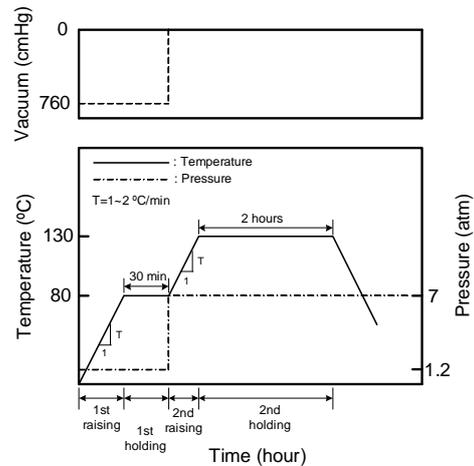


Fig. 9 Curing cycle for Graphite/Epoxy composite.

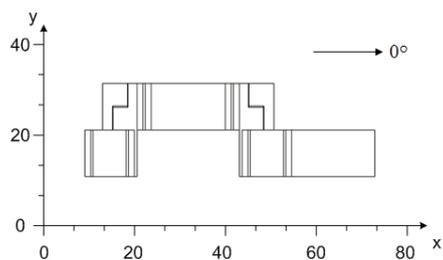


Fig. 10 Dimension of the hinge mechanism.



Fig. 11 The prepreg with slots after laser cutting.



Fig. 12 The laminating process.

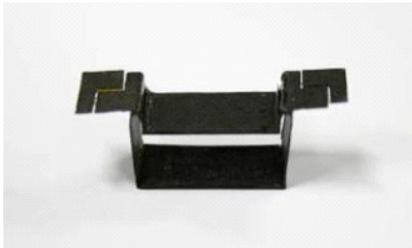


Fig. 13 A view of the hinge mechanism.

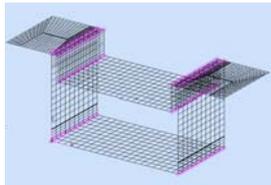


Fig. 14 FEM model of the hinge mechanism.

#### 4. 힌지 메커니즘 거동 해석

제작된 힌지 메커니즘의 성능을 측정하기 전에 해석을 통하여 그 동작을 미리 예측하여 보았다. 해석에 사용한 치수는 Fig. 10의 치수와 거의 같지만, 보다 정확한 예측을 위하여 실제 제작된 힌지 메커니즘에서 측정된 치수를 사용하였다. 힌지 메커니즘 해석시 Fig. 14와 같이 유한요소 모델링을 수행하였으며, MSC/ NASTRAN을 사용하여 해석하였다. 모델링시 각 면을 Quad8 2D 쉘 요소로 구성하였으며, 두 면이 수직 교차하는 지점은 MPC(RBAR)를 사용하여 자유도를 연결하였다.

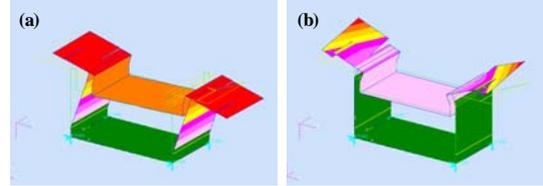


Fig. 15 1st(a) and 2nd(b) mode shapes of the hinge mechanism.

Table 1 Material properties

	CU-020NS	Kapton film
$E_1$	119GPa	3.0GPa
$E_2$	8.67GPa	3.0GPa
$G_{12}, G_{13}$	5.18GPa	-
$G_{23}$	3.29GPa	-
$\nu_{12}$	0.31	0.34
$\rho$	1,570kg/m <sup>3</sup>	1,200kg/m <sup>3</sup>

해석에 사용한 물성치는 Table 1에 나타내었다.

먼저 힌지 메커니즘의 모드 해석을 통해 고유 진동수와 모드 형상을 구하였다. 해석시 사용한 경계 조건은 힌지 메커니즘의 밑면만 고정하고 나머지 부분은 모두 자유로운 조건으로 설정하였다. 힌지부의 약한 강성으로 인해 1차 고유진동수는 65.88Hz로 Fig. 15(a)와 같은 형상을 가지며, 2차 고유진동수는 141.95Hz로 Fig. 15(b)와 같은 형상을 가진다. 본 연구에서는 힌지 메커니즘 사이에 작동기를 연결하여 수직 방향 힘을 인가할 것이므로 2차 고유진동수를 중요시 여겼다. 양단 단순지지 경계 조건에서 해석적으로 구한 PUMPS의 고유진동수가 140Hz 부근인 것을 감안하면 PUMPS를 장착한 힌지메커니즘이 공진 모드 부근에서 큰 변위로 동작할 수 있으리라 기대할 수 있다. 다음으로는 PUMPS와 연결될 힌지 메커니즘부의 상하 운동을 통해 얼마나 큰 날갯짓 운동을 할 수 있는지 해석하여 보았다. 수직 방향으로 1mm 누른 경우와 1mm 들어 올린 경우에 대해서 해석해 보았으며, 해석 결과는 Fig. 16에 나타내었다. 노드 3867번과 노드 6966번은 각각 날개 연결부의 앞전 루트(root)와 끝단(tip)에 위치하는데 이 두 곳의 수직 변위 정도를 해석하여 날갯짓 각도를 산출하였다. 두 노드간의 거리는 7.6mm이고, 힌지 메커니즘 중심부를  $\pm 1$ mm 누른 경우 두 노드간 상대변위는  $\pm 5.465$ mm였으며, 여기서 산출된 날갯짓 각은  $\pm 45.98^\circ$ 였다. PUMPS의 경우 단순지지 경계조건에서  $\pm 300$ V, 1Hz 가진시 1.14mm<sub>pp</sub>의 변위를 유발하는데[3], 이 경우에는  $\pm 55.07^\circ$ 의 날갯짓 각을 가지며, PUMPS 변위가 1.3905mm를 넘으면 날갯짓 각도가  $90^\circ$ 를 넘는 것으로 추정되었다. 2장에서 나타난 매미의 날갯짓 각과 비교해 보면 PUMPS와 본 연구의 힌지 메커니즘을 결합하면 매미의 날갯짓 각도를 충분히 낼 수 있는 날갯짓 기구를 개발할 수 있으리라 판단되었다.

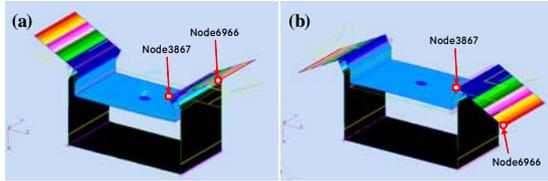


Fig. 16 Upstroke(a) and downstroke(b) motions by pulling and pushing the center plate.

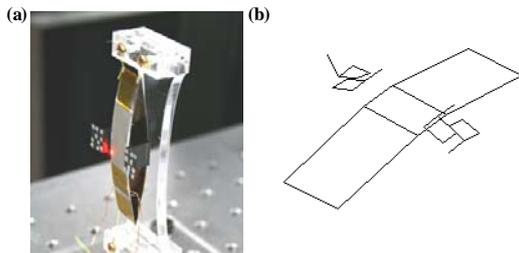


Fig. 17 Flapper for modal test(a) and 1st mode shape of the flapper(b).

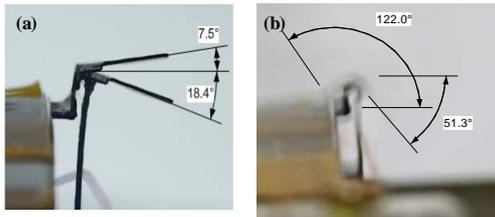


Fig. 18 Flapping angles of the flapper: (a) 300V 1Hz; (b) 300V 170Hz.

### 5. 힌지 메커니즘 동작 성능 평가

PUMPS 작동기에 제작된 힌지 메커니즘을 장착하여 고유 진동수와 고유 모드를 측정하였다. Fig. 17(a)에 날갯짓 기구의 모습을 나타내었으며, 측정된 모드 형상을 Fig.17(b)에 나타내었다. 실험시 날갯짓 기구의 끝단에 실을 연결하여 공중에 띄운 상태로 모드 시험을 수행하였으며, 랜덤 신호 가진을 통하여 PUMPS를 동작시킨 후 힌지 메커니즘에서 유발되는 속도를 LDV (Polytec OFV303)로 측정하여 FFT 분석하였다. 측정된 1차 고유 진동수는 양쪽을 실로 연결한 경우 155.73Hz, 한쪽만 실로 연결한 경우 192.98Hz이었으며, 4장에서 예측된 140Hz 보다 조금 높은 주파수로 측정되었다. 한편, 날갯짓 기구에 연결된 전원 공급선을 이용해 날갯짓 기구를 매달아 둔 상태에서는 약 170Hz 부근에서 가장 큰 날갯짓 운동을 하였으며, 그 동작 모습을 1Hz 동작시의 날갯짓 각도와 함께 Fig. 18에 나타내었다. 4 장에서는 PUMPS의 유발 변위를 기준으로 하여  $\pm 300V$ , 1Hz 가

진시  $\pm 55.07^\circ$ 의 날갯짓 각도가 생길 것으로 기대하였으나, 실제로는 상향 및 하향 날갯짓 전체  $26^\circ$ 의 날갯짓 각을 가졌다. 이는 저주파 가진시에 경계조건, 마찰 등에 의해 힌지 메커니즘이 효율적으로 동작하지 못했기 때문인 것으로 추정된다. 한편, 170Hz에서  $\pm 300V$  인가 전압을 가한 경우 상향 날갯짓 각도  $122^\circ$ , 하향 날갯짓 각도  $51^\circ$ 를 가지는 것을 확인하였다. 이는 매미의 날갯짓에 비해서도 큰 날갯짓 각을 가지고, 날갯짓 주파수 또한 높아 보다 큰 추력을 갖는 날갯짓 비행체 개발에 도움을 줄 수 있을 것으로 판단된다.

### 6. 결론

본 논문에서는 초소형 날갯짓 비행체의 날갯짓 운동을 위한 힌지 메커니즘 제작 기법에 관하여 다루었다. 자연계 곤충 중 매미의 날갯짓을 참고하여 날갯짓 주파수 40Hz, 상향 날갯짓 각도  $56^\circ$ , 하향 날갯짓 각도  $26^\circ$  이상이 되는 힌지 메커니즘 제작을 목표로 선정하였으며, 최종 제작된 힌지 메커니즘은 170Hz 날갯짓 주파수, 상향 날갯짓 각도  $122^\circ$ , 하향 날갯짓 각도  $51^\circ$ 를 가졌다. 힌지 메커니즘에 날개가 장착되면 전체 날갯짓 주파수 및 각도가 감소하는 것을 감안하더라도 충분히 가능성 있는 날갯짓 주파수와 각도를 가지는 힌지 메커니즘 구현에 성공한 것으로 판단되며, 향후 날개의 무게, 형상에 따른 특성 변화를 고려하여 비행 가능한 초소형 비행체를 개발할 것이다.

### 후 기

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소가 지원하는 연구 과제(계약번호UD090082JD)로 수행된 것이며, 지원에 대해 진심으로 감사드립니다. 두 번째, 세 번째 저자는 KAIST 학부생 연구 참여 프로그램의 지원에 감사드립니다.

### 참고문헌

- 1) Wood, R.J., "Liftoff of a 60mg Flapping-Wing MAV," *Proceedings of the 2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2007.
- 2) Karpelson, M., Wei, G.-Y., Wood, R.J., "A Review of Actuation and Power Electronics Options for Flapping-Wing Robotic Insects," *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2008.
- 3) Kang, L.-H., Lee, J.-W., Han, J.-H., Chung, S.-J., Ko, H.-Y., "Development of Curved Shape Unimorph using a

- Pre-stressed Substrate,” *Smart Materials and Structures*, Vol. 18, No. 10, 104007, 2009.
- 4) Ward-Smith, A.J., *Biophysical Aerodynamics and the Natural Environment*, John Wiley & Sons, New York, 1984.
  - 5) Wood, R.J., Avadhanula, S., Sahai, R., Steltz, E., Fearing, R.S., “Microrobot Design Using Fiber Reinforced Composites,” *Journal of Mechanical Design*, Vol. 130, No. 5, 052304, 2008.
  - 6) <http://robotics.eecs.berkeley.edu/~ronf/Prototype/index.html>