

## 탄소나노튜브 복합재를 이용한 고분자 액추에이터의 냉각 개선

박성욱\* · 석지원\*†

# Enhanced Cooling Performance of Polymer Actuators Using Carbon Nanotube Composites

Chengxu Piao\*, Ji Won Suk\*†

**ABSTRACT:** Coiled polymer actuators fabricated by twisting polymer fishing lines or sewing threads respond to heating and cooling with their contraction and relaxation. However, their actuation speed is highly dependent on the heating and cooling rates. In order to improve the actuation speed, the coiled polymer actuator was coated with polydimethylsiloxane composites. The introduction of multi-walled carbon nanotubes into the polydimethylsiloxane improved the actuation speed by about 13%.

**초 록:** 낚싯줄이나 재봉실을 꼬아서 만드는 코일형 고분자 액추에이터는 열을 가하거나 냉각하면 수축하거나 늘어나면서 작동을 하게 된다. 따라서, 코일형 고분자 액추에이터의 동작 속도는 가열 및 냉각 속도에 매우 민감하게 되는 문제가 있다. 코일형 고분자 액추에이터의 동작 속도를 개선하기 위해서, 폴리디메틸실록산 복합재를 액추에이터에 코팅하였다. 폴리디메틸실록산에 다중벽 탄소나노튜브를 혼합함으로써, 액추에이터의 동작 속도를 약 13% 개선하였다.

**Key Words:** 소프트 액추에이터(Soft actuator), 탄소나노튜브(Carbon nanotube), 복합재료(Composites), 냉각(Cooling)

## 1. 서 론

최근 전통적인 로봇 액추에이터(actuator)의 단점을 극복할 수 있는 인공 근육(artificial muscle)에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 인공 근육은 작동 힘과 변위 범위가 크고, 구동 속도가 빠르며, 가벼우면서 상대적으로 큰 파워를 낼 수 있는 장점이 있어서 다양한 분야에서 사용될 수 있을 것으로 기대된다. 대표적으로는 형상기억합금(shape-memory alloy, SMA)[1]이나 형상기억고분자(shape-memory polymer, SMP)[2]가 있는데, 전기나 빛에 의해 수축하고 팽창하는 구동을 하게 된다. 일반적으로 SMA나 SMP 기반 액추에이터는 작동 변위가 작은 특징이 있다. 이외에도, 전도성 고분자(conducting polymer)[3], 유전 탄성체(dielectric

elastomer)[4] 등이 인공 근육을 위한 액추에이터로 활용되었다.

최근에는 낚싯줄이나 재봉실을 꼬아서 만드는 코일형 고분자 액추에이터(coiled polymer actuator)가 보고되었다[5]. 코일형 고분자 액추에이터는 가열이나 냉각에 따라 수축하거나 늘어나면서 구동을 하게 되는데, 무게 대비 매우 큰 파워를 낼 수 있으며 약 8%까지의 변위를 제공할 수 있는 것으로 보고되었다[5]. 더구나, 일반적인 낚싯줄을 사용할 수 있어 저렴하고, 제작이 쉬워 차세대 인공 근육용 액추에이터로 활용될 가능성이 있다.

이러한, 코일형 고분자 액추에이터는 가열과 냉각에 의해서 구동이 되기 때문에, 가열 속도와 냉각 속도에 의해서 구동 속도가 정해지게 된다. 코일형 고분자 액추에이터의 구동 속도를 개선하기 위해서, 물을 이용하여 냉각하거나

Received 23 August 2016, received in revised form 21 April 2017, accepted 28 April 2017

\*School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University

\*†School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University, Corresponding author (E-mail: jwsuk@skku.edu)

강제적인 대류를 활용할 수 있으나, 인공 근육을 모사하는 액추에이터로 활용하기에는 부피가 커지고 추가적인 장치가 필요한 단점이 있다. 따라서, 보다 간편한 방법으로 액추에이터의 구동 속도를 개선하는 방법이 필요한 실정이다.

본 연구에서는 코일형 고분자 액추에이터의 구동 속도를 개선하기 위해서, 탄소나노소재를 이용한 방열용 복합재를 시험하였다. 열적 특성이 우수한 다중벽 탄소나노튜브(multi-walled carbon nanotube, MWCNT)에 기반한 복합재를 만들고 이를 액추에이터에 코팅함으로써 수동적인 방법으로 액추에이터의 냉각 특성을 개선하였다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 복합재 제조

코일형 고분자 액추에이터는 나일론(nylon) 낚싯줄을 꼬아서 제작하였다. 나일론 액추에이터는 표면에 은 코팅이 되어 있어서, 전기전도성을 갖고 있다. 고분자 액추에이터를 제작하기 위해서, 나일론 낚싯줄에 축방향 부하를 걸고, 줄의 한 쪽 끝단이 돌지 않도록 고정된 후에 다른 쪽 끝단을 한 쪽 방향으로 꼬아서 제작하였다.

고분자 액추에이터를 위한 코팅용 복합재는 MWCNT를 폴리디메틸실록산(polydimethylsiloxane, PDMS)에 0.1 wt% (0.9 mg/mL)의 비율로 혼합하여 제작하였다. 이 때, PDMS는 Sylgard 184를 사용하였으며, 경화제는 사용하지 않았다. MWCNT를 PDMS에 혼합하여 약 3시간동안 초음파 처리를 하였다. 진공 챔버에서 복합재 내에 존재하는 기포를 제거한 후, 고분자 액추에이터에 딥코팅(dip coating) 방법으로 코팅하였다.

### 2.2 액추에이터 성능 평가

코일형 고분자 액추에이터의 성능을 평가하기 위해서, 로드셀(loadcell)을 이용하여 액추에이터의 끝단에 걸리는 하중을 측정하고, 리니어 자성 엔코더(linear magnetic encoder)를 이용하여 액추에이터의 변위 변화를 측정하였다. 고분자 액추에이터의 온도는 초소형 온도센서를 액추에이터의 끝단에 부착하여 측정하였으며, 액추에이터의 끝단에 전류를 인가함으로써 줄히팅(Joule heating)을 통해 액추에이터를 가열하였다. 이 때, 온도 센서와 전원공급장치의 피드백 제어를 통해, 액추에이터의 온도를 100°C까지 가열한 후, 전류를 끊어 냉각함으로써, 액추에이터의 변위 및 온도 프로파일을 확보하였다. 액추에이터의 성능을 평가할 때는 500 g의 하중을 끝단에 부여하였다.

## 3. 실험 결과 및 논의

전기전도성을 갖는 코일형 고분자 액추에이터는 줄히팅에 의해 가열되면서 수축을 하게 되고, 전류를 끊어 자연적

인 냉각을 하면서 다시 늘어나 원상태로 돌아오게 된다. 이 때, 액추에이터의 동작 속도는 가열 및 냉각 속도에 의해 좌우되는데, 특히 자연 대류에 의한 냉각으로 인해 냉각 속도가 매우 느리게 된다. 이를 개선하고자, 액추에이터 표면에 방열 특성이 우수한 복합재를 코팅함으로써, 액추에이터의 자연적인 냉각 속도를 증가시킬 수 있다.

MWCNT는 1차원 형태의 탄소나노소재인데, 열전도도가 수백 W/mK 이상으로 매우 우수하다고 알려져 있다[6,7]. 따라서, 많은 분야에서 MWCNT를 활용한 방열 소재에 대한 연구가 진행되었다. 본 연구에서는 MWCNT를 고분자에 첨가함으로써, 코일형 고분자 액추에이터의 표면에 코팅할 수 있는 방열 소재를 제작하였다.

코팅을 위한 고분자 소재로는 PDMS를 활용하였다. PDMS는 높은 점도로 인해, 액추에이터 표면에 잘 코팅되는 성질이 있다. 일반적으로는 PDMS를 경화시켜서 사용하지만, 본 연구에서는 액추에이터의 거동에 방해가 될 수 있어서, PDMS를 경화하지 않고 사용하였다.

Fig. 1은 본 연구에서 사용한 MWCNT의 SEM(scanning electron microscopy)과 TEM(transmission electron microscopy) 사진이다. 사진과 같이 MWCNT는 지름이 약 10~20 nm이며 길이는 수  $\mu\text{m}$ 이다.

Fig. 2는 PDMS에 MWCNT를 0.1 wt% 첨가하여 딥코팅 방법으로 코팅한 고분자 액추에이터의 사진이다. 경화제를 사용하지 않았지만, 점성이 높은 PDMS를 사용하여 액추에이터에 잘 코팅된 것을 확인할 수 있다.

Fig. 3(a)는 MWCNT/PDMS 복합재가 코팅된 액추에이터 표면의 SEM 사진이다. 사진에서 보듯이, MWCNT/PDMS 복합재가 액추에이터를 구성하는 나일론 실의 표면을 따라서 잘 코팅된 것으로 보인다. 코팅된 복합재의 무게는 약 190 mg이다. Fig. 3(b)는 TGA(thermogravimetric analysis)

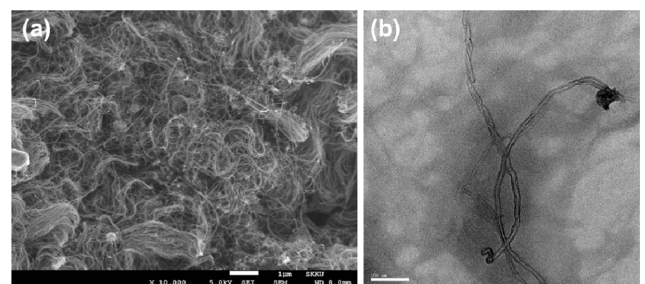
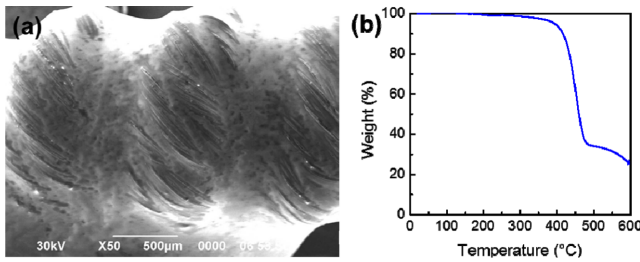


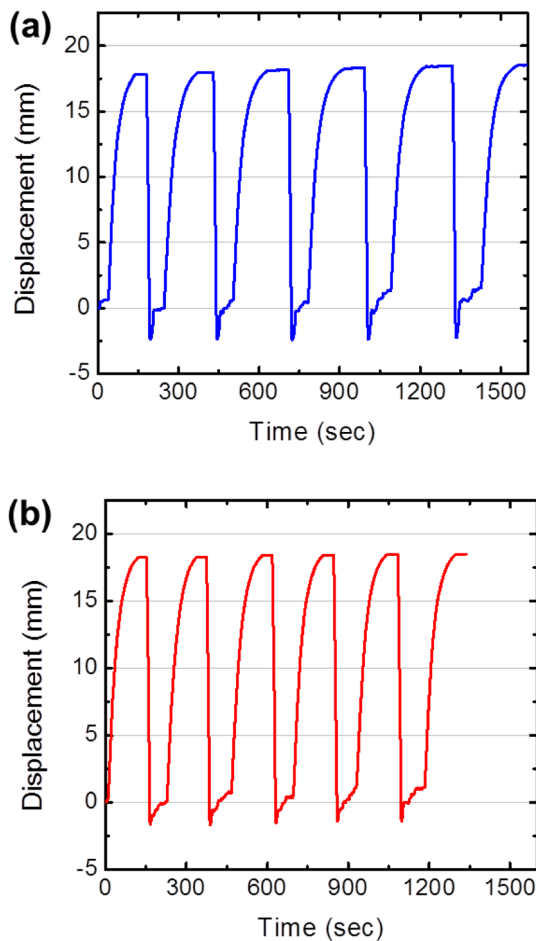
Fig. 1. Images of MWCNTs: (a) SEM and (b) TEM



Fig. 2. Image of the polymer actuator coated with the MWCNT/PDMS composite



**Fig. 3.** (a) SEM image of the polymer actuator coated with the MWCNT/PDMS composite. (b) TGA result



**Fig. 4.** Change of displacement of the polymer actuator (a) before and (b) after the composite coating. The actuator was repeatedly heated and cooled

결과로, 복합재가 코팅된 액추에이터가 구동 온도 범위(120°C 이하)에서 열적으로 안정함을 보이고 있다.

Fig. 4는 MWCNT 0.1 wt%를 PDMS에 첨가하여 코팅한 고분자 액추에이터에 대한 성능 평가 결과이다. 액추에이터를 100°C까지 가열하고 35°C까지 냉각하기를 반복하면서 시간에 따라 액추에이터의 변위를 측정된 결과이다. Fig. 4(a)와 4(b)를 비교해 보면, 고분자 액추에이터에 MWCNT와 PDMS 복합재를 코팅함으로써, 액추에이터의 냉각 시간이

**Table 1.** Actuation time of the polymer actuator

	Before coating	After coating	Change of actuation time
Heating time	$10.66 \pm 0.32$	$12.04 \pm 0.17$	12.32% increase
Cooling time	$131.38 \pm 5.54$	$112.04 \pm 1.62$	14.72% decrease
Cycle time	$142.04 \pm 5.81$	$124.08 \pm 1.64$	12.68% decrease

줄어드는 것을 확인할 수 있었다. Table 1은 코팅 전후의 액추에이터에 대한 가열/냉각 시간 변화를 정리한 것이다. MWCNT 0.1 wt%가 첨가된 PDMS를 코팅함으로써, 액추에이터의 구동 시간이 약 12.68% 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 열전도도가 높은 MWCNT를 포함하고 있는 PDMS 복합재를 통해, 액추에이터의 열이 외부로 효과적으로 배출되는 것을 나타내는 것이다. 반면, 가열 시간은 늘어나게 되는데, 이는 MWCNT를 첨가한 PDMS 코팅이 액추에이터의 구동에 다소 방해가 되거나, 방열 특성이 좋은 코팅을 함으로써 외부로 열 교환이 빠르게 일어나 액추에이터의 가열 특성은 나빠지기 때문인 것으로 보인다. 이에 대한 분석을 위해서는 추가적으로 코팅에 의한 액추에이터의 기계적 특성 및 열적 특성에 대한 심도있는 연구가 필요할 것으로 보인다. 복합재 코팅에 의해서 가열 부분에서의 구동 속도가 저하되긴 했지만, 코일형 고분자 액추에이터의 구동 속도는 냉각 시간에 의해서 크게 결정되기 때문에, Fig. 4에서 보듯이 냉각 속도의 개선이 액추에이터의 구동 속도 개선으로 이어지게 된다. 따라서, MWCNT를 PDMS와 혼합하여 제작한 복합재가 액추에이터의 방열 특성을 개선해서 구동 속도를 개선하는데 도움이 되는 것을 확인할 수 있다.

추가적으로, MWCNT 0.2 wt%를 첨가한 PDMS를 시험하였으나, 액추에이터의 구동 속도는 오히려 증가하는 것을 확인할 수 있었다. MWCNT의 함량을 늘리게 되면, PDMS 복합재의 점도는 매우 높아지게 되는데, 이러한 고점도 고분자를 액추에이터에 코팅하게 되면 액추에이터의 거동에 방해가 된다. 따라서, 열전도도가 높은 복합재를 코팅했음에도, 액추에이터의 구동이 느려지는 결과가 나타나게 되었다. 따라서, 코일형 고분자 액추에이터의 구동에 방해가 되지 않으면서 방열 효과를 얻기 위해서는 MWCNT의 함량에 대한 최적 조건이 존재할 것으로 생각되며 이에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 열적 특성이 우수한 1차원 탄소나노소재인 MWCNT를 이용하여 PDMS 기반 방열 복합재를 만들었다. 이를 코일형 고분자 액추에이터에 코팅하여 가열/냉각에 의해 구동하는 고분자 액추에이터의 구동 속도를 개선하였다. 0.1 wt%의 MWCNT를 PDMS에 첨가함으로써, 코일

형 고분자 액추에이터의 구동 속도가 약 12.68% 개선되는 것을 확인하였다.

본 연구에서 활용한 수동적인 방열 코팅 방법은 코일형 고분자 액추에이터에 추가적인 냉각 장치 없이 구동 속도를 개선하는 방법으로 활용될 수 있을 것이다.

## 후 기

본 연구는 미래창조과학부 생체모사형메카트로닉스융합 연구사업의 지원으로 수행된 것이며, 지원에 대해 진심으로 감사드립니다(No. 2014M3C1B2048175).

## REFERENCES

1. Huang, W., "On the Selection of Shape Memory Alloys for Actuators," *Materials & Design*, Vol. 23, No. 1, 2002, pp. 11-19.
2. Leng, J., Lan, X., Liu, Y., and Du, S., "Shape-Memory Polymers and Their Composites: Stimulus Methods and Applications," *Progress in Materials Science*, Vol. 56, No. 7, 2011, pp. 1077-1135.
3. Smela, E., "Conjugated Polymer Actuators for Biomedical Applications," *Advanced Materials*, Vol. 15, No. 6, 2003, pp. 481-494.
4. Matysek, M., Lotz, P., Flittner, K., and Schlaak, H.F., "High-Precision Characterization of Dielectric Elastomer Stack Actuators and Their Material Parameters," *Proceedings of SPIE*, Vol. 6927, 2008, pp. 692722.
5. Haines, C.S., Lima, M.D., Li, N., Spinks, G.M., Foroughi, J., Madden, J.D.W., Kim, S.H., Fang, S., Andrade, M.J., Göktepe, F., Göktepe, Ö., Mirvakili, S.M., Naficy, S., Lepró, X., Oh, J., Kozlov, M.E., Kim, S.J., Xu, X., Swedlove, B.J., Wallace, G.G., and Baughman, R.H., "Artificial Muscles from Fishing Line and Sewing Thread," *Science*, Vol. 343, No. 6173, 2014, pp. 868-872.
6. Aliev, A.E., Lima, M.H., Silverman, E.M., and Baughman, R.H., "Thermal Conductivity of Multi-Walled Carbon Nanotube Sheets: Radiation Losses and Quenching of Phonon Modes," *Nanotechnology*, Vol. 21, No. 3, 2010, pp. 035709.
7. Pop, E., Varshney, V., and Roy, A.K., "Thermal Properties of Graphene: Fundamentals and Applications," *MRS Bulletin*, Vol. 37, 2012, pp. 1273-1281.