

# 탄소 나노튜브를 이용한 IPMC 작동기의 기계적/전기적 성능 개선 Improvements of Mechanical and Electrical Performances of IPMC Actuators Using Carbon Nanotubes

정진영† · 오일권\*

Jin-Young Jung† Il-Kwon Oh\*

**Key Words :** 생체모방, 복합구조, IPMC, 마이크로 구조

## ABSTRACT

IPMC actuators have been developed with multi-walled carbon nanotubes(MWNT) and Nafion<sup>®</sup> ionic polymers. MWNT with different diameters of 3~5, 4~6 and 10~15 nm and length of 10~20 μm were used to enhance the mechanical and electrical performances of IPMC actuators. Ultrasonic treatment and high speed mixing were used to disperse MWNT homogeneously in Nafion<sup>®</sup> solution. The electroless plating technique is used to make electrodes on the both side of the composite membrane. SEM and TEM images were taken to characterize the surface and micro-structures of the composite actuators. In this study, improved IPMC actuators were developed and compared with respect to bending actuation performance and electrical power consumptions.

### 기호설명

- $\delta_{av}$  평균변위
- $\delta_{max}$  최대변위, 양의 방향으로의 변위
- $\delta_{min}$  최소변위, 음의 방향으로의 변위

## 1. 서론

최근 생체모방형 작동 기구들이 혁신적인 작동 기로서 각광받고 있다. 전기-반응 고분자(Electro-active polymer, EAP) 작동기들은 이러한 생체모방형 작동기의 한 예로서 화학적 에너지를 기계적 에너지로 변환시키며 높은 작동 효율을 갖는다. 이들 고분자 작동기는 세라믹 또는 형상기억 합금에 비하여 상대적으로 부드럽고 낮은 에너지 밀도를 가지며, 대변형을 생성할 수 있다.<sup>(1~2)</sup>

이온성 고분자 금속 복합체(IPMC)는 EAP 물질의 한 종류로서, EAP 작동기로서 사용될 수 있다. 주로 IPMC 작동기들은 얇은 이온교환막을 가지며, 막의 표면에는 화학적 또는 물리적인 방법

으로 도금된 금속 입자들을 갖는다. 이들 금속 입자들은 표면의 전기 전도성을 향상시키며 고분자막에 침투된 금속 입자들 역시 이온교환막의 전기 전도성을 높여주는 역할을 한다. IPMC 작동기들은 일반적으로 전해질 용액에 담겨지며, 이 과정을 통해서 충분한 이온 교환을 이루게 된다. IPMC 작동기는 전기적인 에너지가 가해졌을 때 그에 대하여 굽힘거동을 통하여 작동된다.

IPMC는 가볍고 부드러우며 낮은 전압과 낮은 주파수 환경에서 작동될 수 있기 때문에 의학용 센서나 나노 단위의 작동기 등으로 적용이 가능하다. 그러나 작동력, 작동 주파수 밴드 또는 히스테리시스 등과 같은 문제로 제한적인 범위를 갖는다.<sup>(3~6)</sup>

이러한 문제들로 인하여 몇 가지 연구들이 시도되었다. IPMC의 기계적인 성질과 성능을 개선하기 위하여 새로운 제조 방법이 연구되기도 하였으며, 금속 입자나 다른 화합물 등이 이온성 고분자에 추가되기도 하였다.<sup>(7~15)</sup>

탄소나노튜브(CNT)는 탄소 복합체로서, 특수한 구조와 우수한 기계적, 전기적인 성질을 가지고 있다. 이러한 CNT의 우수한 성질은 IPMC의 제한적인 응용범위를 해결해줄 수 있을 것으로 고려된다. 이러한 이유로 IPMC의 기계적인 성질을 개선하기 위하여 나노 입자들을 이온교환막에 첨가한 몇 가지 시도가 있었다.<sup>(17~20)</sup>

본 연구에서는 이온성 고분자막으로 널리 사용

† 정진영; 전남대학교 기계공학과  
E-mail : unapor@nate.com  
Tel : (062) 530-0076, Fax : (062) 530-1689

\* 전남대학교 기계시스템공학부

되고 있는 Nafion<sup>®</sup> 을 이용하여 이온교환막을 만들었으며, 백금이 전극으로서 사용되었다. 다중벽 탄소 나노튜브(MWNT)가 IPMC의 성능을 개선하기 위해서 첨가되었다. IPMC 작동기는 캐스팅 방법을 통하여 만들었으며, 각기 다른 직경 3~5, 4~6, 10~15 nm와 10~20 μm의 길이를 갖는 3 종류의 MWNT가 사용되었다. 이들 작동기의 마이크로 구조를 파악하기 위하여 SEM과 TEM이 사용되었다. 성능 개선효과를 측정하기 위하여 각 작동기 간의 굽힘 성능과 전기적인 성능이 측정, 비교되었다. 변위 시험과 구동 전압-소비 전류 시험이 각기 진행되었다.

## 2. IPMC 작동기의 성능 비교

### 2.1 제작

Nafion<sup>®</sup> 용액(5wt%) 20g과 MWNT 0.005g을 혼합되었다. MWNT는 Nafion<sup>®</sup>용액에 초음파를 이용하여 분산되었다. MWNT-Nafion<sup>®</sup>혼합용액은 MWNT의 분산과 디번들링(debundling)처리를 위하여 3시간 동안 초음파 처리되었다. 균질한 혼합을 위해서 균질기(homogenizer)를 이용한 혼합이 이루어졌으며, 용액은 4000RPM에서 1시간 동안 혼합되었으며, 다시 3시간 동안 초음파 처리되었다. 이렇게 얻은 혼합 용액은 캐스팅 형틀에서 캐스팅되었다. 막을 만들기 위해서 혼합액은 60°C에서 약 하루 동안 캐스팅되었으며, 막을 경화시키기 위해서 120°C에서 1시간 동안 풀림(annealing, 어닐링) 처리되었다. 최종적으로 30 mm × 60 mm 크기에 250 μm 두께의 CNT-Nafion<sup>®</sup>막이 만들어졌다. 풀림 과정이 끝난 후, 막의 표면을 거칠게 하여 도금이 원활하게 이루어지도록 하기 위해서 마이크로 블래스팅(micro blasting) 처리되었다.

무전해 도금 방법을 이용하여 이온성 고분자막의 양면에 백금전극을 만들었다. 7번의 1차 도금을 통하여 깊이 방향으로의 전극화가 이루어졌으며, 표면에 백금층을 형성시키고 높은 전도성 전극을 만들기 위한 2차 도금이 1회 실시되었다. 도금 과정이 끝난 후 각 시편들은 충분한 이온교환을 위하여 1.5N의 농도를 갖는 염화리튬 용액에 넣어 몇 일 동안 보관되었다.

### 2.2 복합구조 작동기의 구조

복합구조 작동기로 명명한 성능이 개선된 IPMC 작동기와 Nafion<sup>®</sup> IPMC 작동기를 제작하였으며, 작동기의 층을 보기 위해서 SEM

(HITACHI S-4700)을 이용하였다. 백금 전극이 IPMC의 양면에 도금되어 있다(그림 1). Nafion<sup>®</sup> 매트릭스에서 MWNT의 분산을 확인하기 위하여 TEM(JEOL JEM-2000 FXII)사진을 이용하였다. 그림 2는 복합구조 IPMC의 TEM 사진이다. MWNT가 Nafion<sup>®</sup> 매트릭스에 분산되어 있다. 몇몇 응집된 부분이 폴리머에 존재하며(그림 2 a, b) 침투된 백금 입자들은 MWNT 응집 부분에 집중되어 있다(그림 2 c, d, e, f). 이러한 응집부들은 작동기의 굽힘 성능에 영향을 미칠 것으로 예상된다. 또한 이들은 작동기의 전기적인 성질과 기계적인 성질에도 영향을 미칠 것으로 추측된다. 몇몇 비어있는 부분(그림 2)도 합성된 폴리머에 존재한다. 이들 영역들 역시 작동기의 성능에 영향을 미칠 것으로 보인다.

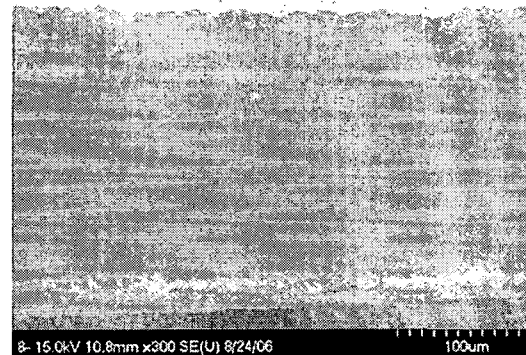
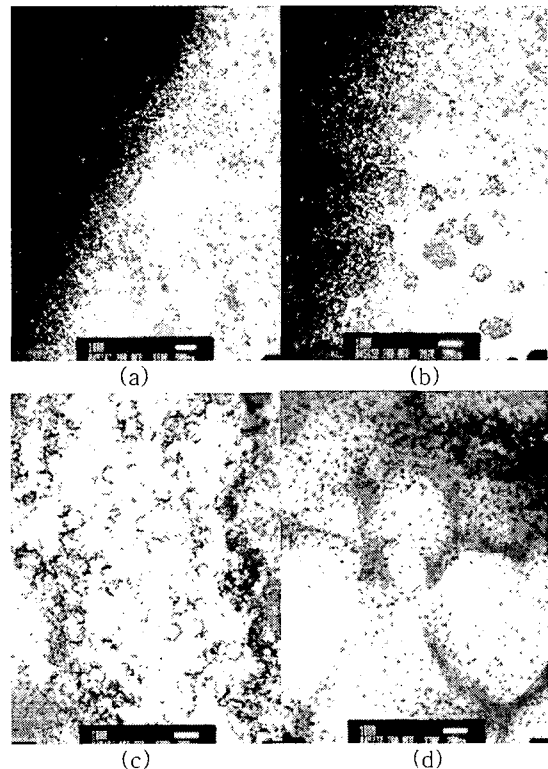


그림 1. 작동기의 SEM 사진



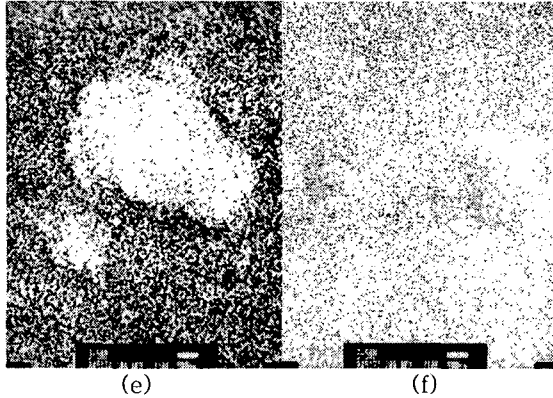


그림 2. 작동기의 TEM 사진 (a) 백금 층과 폴리머층 사이의 사진. 검은 부분이 백금층이며 밝은 부분이 폴리머 기질 부분이다. 폴리머 매트릭스에서 검은 점은 침투된 백금 입자들이다. (b) 그림 (a)의 확대된 사진 (c). (d) 시편의 위쪽부분. 침투된 백금 입자들과 분산된 MWNT가 보인다. (e), (f) 시편의 중앙부분

### 2.3 실험

#### (1) 변위 측정 실험

시편은 30 mm × 4 mm 크기로 잘라서 캔티레버형 작동기로 사용되었다. 이들 작동기로 먼저 변위 실험이 시행되었다. Nafion® IPMC 작동기와 복합구조 작동기의 직류 전압에 대한 변위와 교류 전압에 대한 변위가 비교되었다. NI PXI-1042 와 전류 증폭기가 구동 전압을 인가하는 데에 사용되었고, 레이저 변위계(Keyence, LK-031)가 작동기의 끝단 변위를 측정하는 데에 사용되었다. 모든 변위 측정 실험은 증류수(DI water)에서 시행되었다(그림 3).

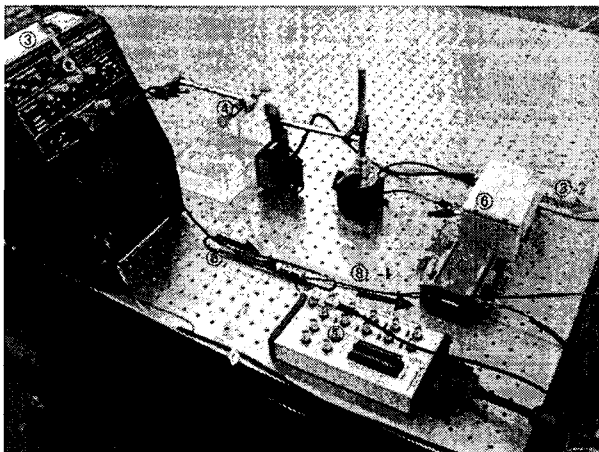


그림 3. 실험 장비 ① Output channel ② Current Amplifier ③ Resistor circuit ④ Actuator ⑤ Laser sensor head ⑥ Laser Amplifier ⑦ Laser Power supply ⑧-1: driving voltage AIO channel of 4472 ⑧-2 : displacement AII channel of 4472 ⑧-3 : current AI2 channel of 4472.

작동기의 최대 변위와 변형 지속시간을 측정하기 위하여 일정한 직류 전압인 1.5V 의 전압이 인가되었으며 작동기의 끝단 변위가 측정되었다. 복합구조 작동기의 변위가 Nafion®만으로 구성된 작동기의 변위보다 크게 나타났다(그림 4). 그리고 변형 지속시간도 복합구조 작동기가 더 길게 나타났다. 결과에 의하면 Nafion® IPMC 작동기는 빠르게 반응하지만 끝단 변위는 전압이 인가되어 변형을 일으킨 후에 급격히 감소하는 경향을 나타냈다. 반면에 복합구조 작동기의 경우는 상대적으로 천천히 변위가 증가하였다가 더 오래 지속하는 특성을 보였다. 특히 MWNT 직경 4~6 nm 를 갖는 작동기는 가장 큰 변위와 오랜 지속시간을 보였다.

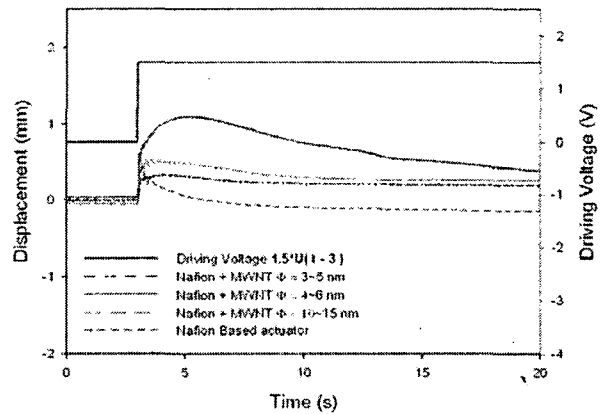
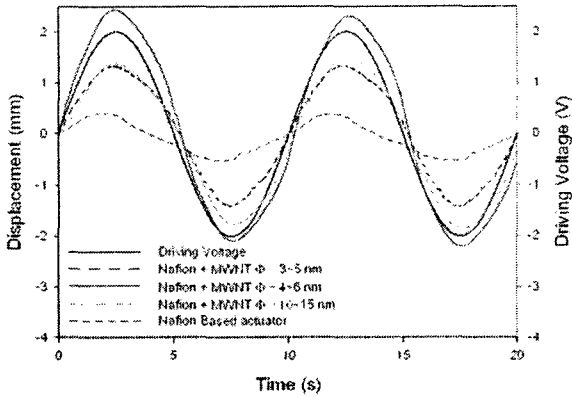


그림 4. 1.5V 의 직류 전압에 대한 작동기의 끝단 변위의 변화

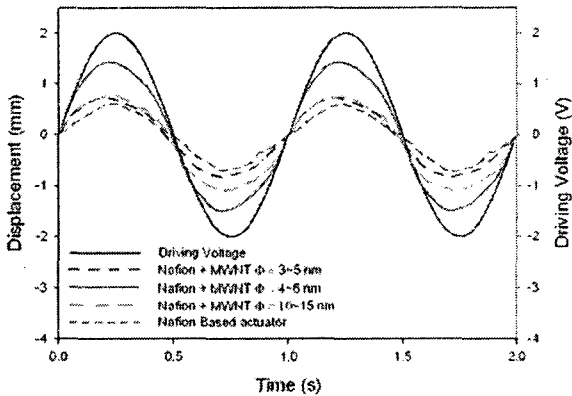
교류 전압에 대한 작동기의 끝단 변위가 측정되었다. 최대 2.0V 의 구동전압과 주파수 0.1Hz, 1Hz 의 사인파가 작동기에 인가되었으며 작동기의 끝단 변위가 측정되었다. 직류 전압 시험의 결과와 마찬가지로 복합구조 작동기의 변위가 Nafion® IPMC 작동기의 변위보다 크게 나타났으며, MWNT 직경 4~6 nm 를 갖는 작동기의 변위가 가장 크게 나타났다. 그리고 작동기의 변위는 상대적으로 낮은 구동 주파수에서 크게 나타났다(그림 5).

그림 6 은 MWNT 직경 4~6 nm 를 갖는 나노 복합구조 작동기의 구동 주파수 대 평균 끝단 변위의 그래프를 나타낸 것이다. 1V, 1.5V, 2V 의 교류 전압과 다양한 주파수의 사인파가 작동기에 인가되었다. 끝단 변위의 평균값은 다음과 같은 식에 의하여 구한 값이다.

$$\delta_{av} = \frac{|\delta_{max}| + |\delta_{min}|}{2}$$



(a) 교류전압  $2.0 \cdot \sin(2\pi \cdot 0.1 \cdot t)$  에서 끝단 변위 변화



(b) 교류전압  $2.0 \cdot \sin(2\pi \cdot 1.0 \cdot t)$  에서 끝단 변위 변화  
그림 5. 교류전압에서의 끝단 변위 변화

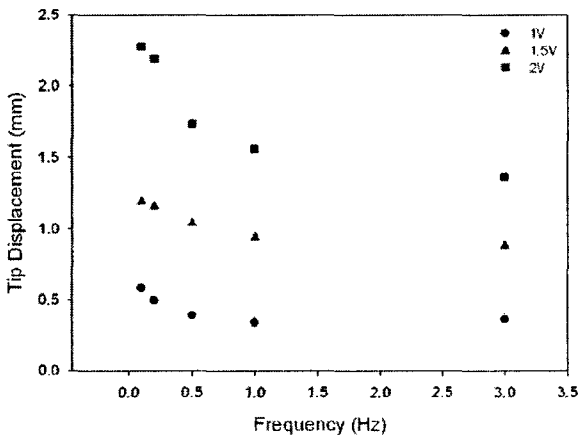
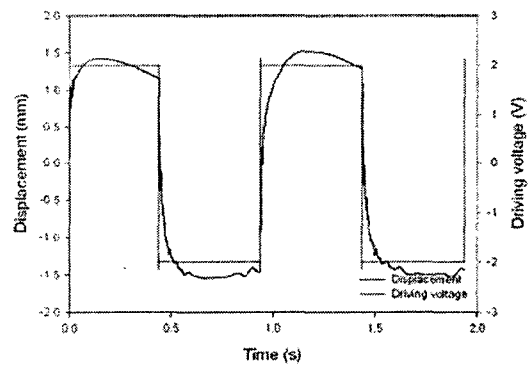


그림 6. 직경 4~6nm 의 MWNT 를 갖는 나노 복합 작동기의 다양한 구동 주파수와 전압에서 평균 끝단 변위

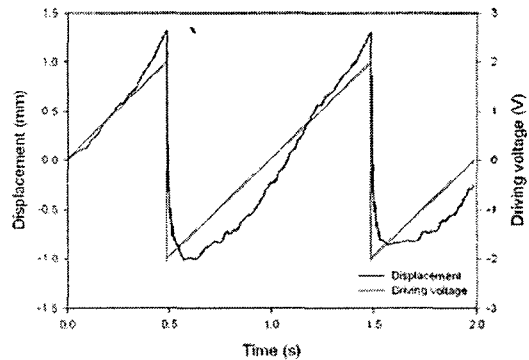
결과에 따르면 평균 끝단 변위는 구동 주파수의 감소에 대하여 증가함을 보여준다. 이는 구동 주파수가 시편 안에 존재하는 이온의 이동에 영향을 줄을 의미한다. 익히 알려졌듯이 IPMC 의 구동은 이온의 밀도에 의존한다. 이온들은 구동 전

압이 인가되었을 때에 전극 쪽으로 이동하여 고분자 내에서 밀도를 형성한다. 구동 주파수가 증가함에 따라 신호는 빠르게 바뀌는데 이온은 이와 같은 전극 변화와 같은 속도로 이동을 할 수 없기 때문에 이온 밀도 형성에 영향을 주게 되며, 이에 따라 변위가 줄어드는 것으로 보인다.

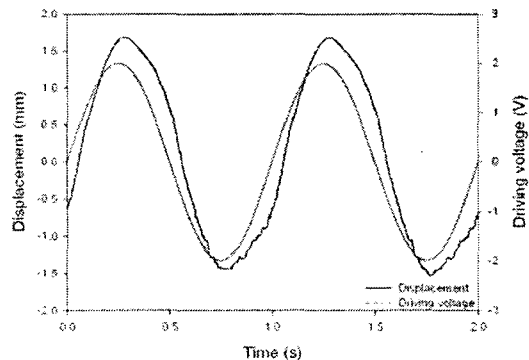
다양한 형태의 구동 전압에 대한 변위의 변화를 조사하기 위해서 사각파, 톱니파, 사인파, 삼각파가 MWNT 직경 4~6nm 를 갖는 복합구조 작동기에 인가되었다. 구동주파수는 1.0Hz 였으며, 구동 전압은 1.0V 가 인가되었다(그림 7).



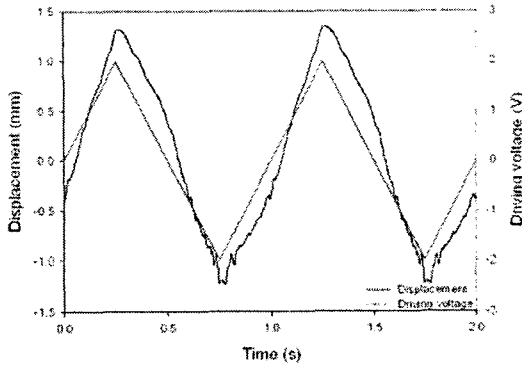
(a) 사각파에 대한 변위의 변화 추이



(b) 톱니파에 대한 변위의 변화 추이



(c) 사인파에 대한 변위의 변화 추이



(d) 삼각파에 대한 변위의 변화 추이  
 그림 7. 직경 4~6nm의 MWNT를 갖는 작동기의 다양한 파형에 따른 변위의 변화

(2) I-V 실험

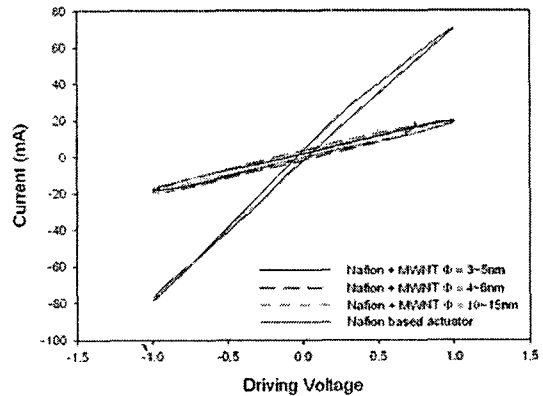
복합구조 작동기의 MWNT가 전력 소비에 미치는 영향을 알아보기 위해서 히스테리시스 곡선이 그려졌다. 측정 시스템은 PXI와 전류 증폭기, 저항(1.3Ω), 작동기 등이 사용되었다<sup>(21)</sup>. 1.0V의 전압이 작동기 구동에 사용되었으며, 작동 주파수 0.1Hz와 1.0Hz를 갖는 사인파가 인가되었다. 그림 8의 시험 결과와 같이 1.0V 0.1Hz에서 각 작동기들 간의 히스테리시스 곡선의 폭은 거의 같다(그림 8 a). 그런데 Nafion® IPMC 작동기의 전류 소비가 다른 나노 복합 작동기의 것보다 크게 나타났다. 같은 전압인 1V가 인가되었음에도 불구하고, 전류 소비는 -80~80mA 정도가 필요했지만, 복합구조 작동기를 구동되는 데에 단지 -20~20mA 정도만이 필요했다. 이는 Nafion®에 첨가된 MWNT가 작동기의 전기 전도성이나 기타 전기적인 성질을 개선했을 의미한다. 뿐만 아니라, 먼저 시행한 변위 시험의 결과를 생각해 볼 때 복합구조 작동기는 더 작은 전력 소비에도 불구하고 Nafion® IPMC 작동기보다도 더 큰 변위를 만들어낼 수 있었음을 알 수 있다.

주파수 변화에 따른 비교를 위해서 1.0V, 1.0Hz의 교류 전압이 인가되었을 때의 작동기의 히스테리시스 곡선을 구했다. 곡선의 폭이 1.0V 0.1Hz일 때에 비해서 커졌다. 소비 전류 역시 소폭 증가하였다. 이는 이온이 주파수만큼 빠르게 전극을 향하여 이동하지 못하기 때문인 것으로 보인다. 곡선 안쪽의 면적이 에너지 소비임을 고려해 볼 때 구동 주파수가 증가함에 따라서 에너지 소비가 증가함을 알 수 있다.

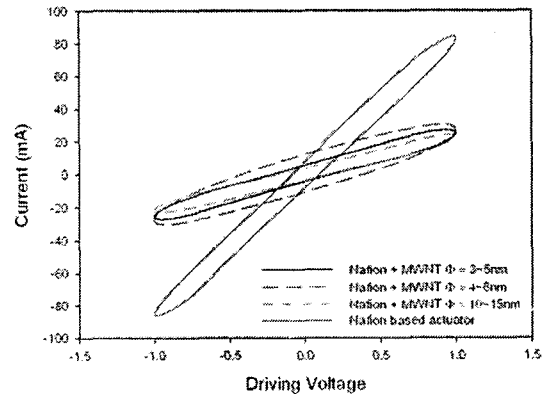
히스테리시스 곡선 그래프로부터 한가지 흥미로운 결과가 발견되었다. MWNT의 직경이 4~6nm를 갖는 나노 구조 작동기의 면적이 다른

복합구조 작동기들의 것보다 크다는 점이다. 먼저 시행한 변위 실험에서 이 작동기는 가장 큰 변위를 나타낸 작동기였다. 이러한 결과는 Nafion® 폴리머 기질 안의 MWNT의 분산 상태와 MWNT 고유의 성질로부터의 영향 때문인 것으로 보인다. 즉, MWNT가 뭉쳐있거나, 적은 부분에서는 전기적인 특성이 다를 수 있다는 점이다.

위 결과들로부터 MWNT가 IPMC 작동기의 전기적인 성능을 개선시켰음을 확인할 수 있다. 작동기의 에너지 소비는 높은 주파수에서보다 상대적으로 낮은 주파수에서 큰 폭으로 감소하였다. 작동기가 높은 주파수에서 구동될 때에는 MWNT가 전기적인 성능을 개선하는 데에 있어서 효과적으로 영향을 주지 못하는 것으로 보인다.



(a) 1V 0.1Hz일 때의 I-V graph

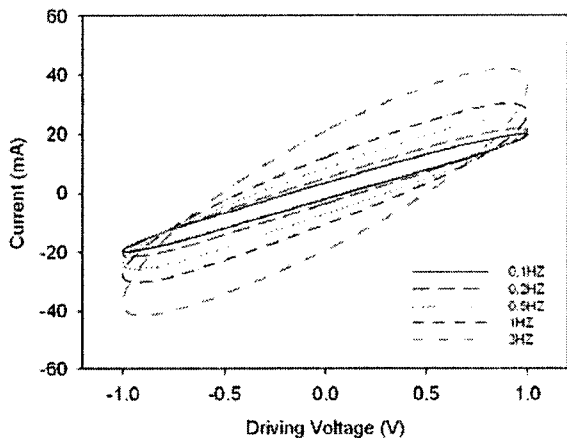


(b) 1V 1Hz일 때의 I-V graph

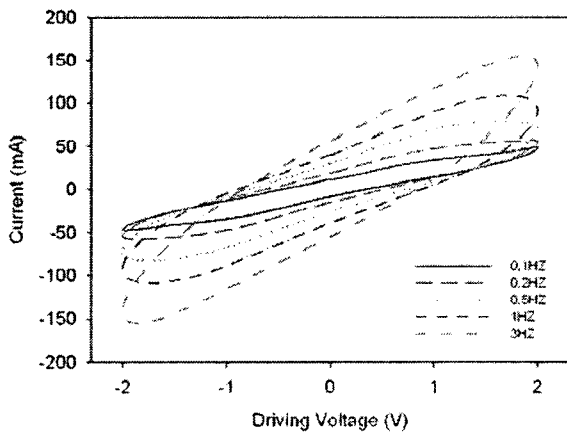
그림 8 작동기의 I-V graph 그래프의 면적은 전력소비를 의미한다. (a) 1V 0.1Hz, (b) 1V 1Hz

추가적으로 직경 4~6nm의 MWNT를 갖는 복합구조 작동기에 대한 I-V 시험을 하였다. 구동 주파수 변화와 에너지 소비 사이의 관계를 보기 위해서 다른 크기의 주파수와 구동 전압이 인가되었다. 1V와 2V의 구동 전압이 5가지 주파수의

사인과 함께 인가되었으며, 에너지 소비 변화가 측정되었다. 실험 결과에 의하면, 구동 주파수가 증가함에 따라서 그래프의 기울기는 증가하였는데, 이는 곧 전류 소비가 증가하였음을 말해주며, 에너지 소비가 증가함과 같은 의미를 갖는다. 이러한 경향은 높은 전압이 인가되었을 때 명확히 관찰되었다(그림 9).



(a) 1V의 다양한 신호를 갖는 교류 전압이 인가되었을 때의 I-V graph



(b) 2V의 다양한 신호를 갖는 교류 전압이 인가되었을 때의 I-V graph

그림 9. 직경 4~6nm의 MWNT를 갖는 나노 복합 작동기의 I-V graph

변위와 구동 전압과의 관계를 조사하였다. 구동 전압에 대한 그래프의 모양은 I-V 그래프에서 얻은 히스테리시스 곡선의 형상과 흡사하였다. 그리고 변위-구동 전압 그래프의 경향 역시 I-V 그래프의 모양과 비슷하였다. 이 그래프에 의하면, 하나의 평면에서 전압 변화에 따른 변위의 변화 추이를 쉽게 관찰할 수 있는데, 가장 큰 변위를 보였던 MWNT 직경 4~6nm를 갖는 복합구조

작동기의 변위와 다른 작동기들 간의 변위 차가 확연하게 드러남을 알 수 있다.

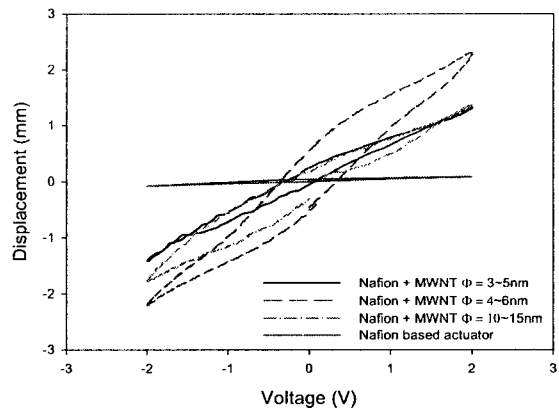


그림 10. 교류전압 2V, 0.1Hz 조건에서 각 작동기들의 변위-구동 전압 그래프. MWNT 직경이 3~5nm인 것의 그래프에서 꼬인 부분은 작동기의 초기 변형 때문에 생긴 것이다.

### 3. 결론

IPMC 작동기의 성능을 개선하기 위하여 탄소나노튜브가 첨가된 복합구조 작동기를 개발하였으며, 그 성능을 평가하였다. 캐스팅 방법을 이용하여 제작하였으며, 변위 시험과 히스테리시스 곡선을 통하여 성능을 평가하였다. 시험의 결과 복합구조 작동기의 끝단 변위는 기존 Nafion®기반의 IPMC 작동기보다 훨씬 크게 나타났다. 그리고 히스테리시스 곡선을 통하여 얻은 결과에 따르면, 에너지 소비 역시 개선되었음을 확인할 수 있었다. 비록 두 실험이 일부 낮은 주파수대에서 한정된 범위 내에서만 이루어졌지만, 전반적으로 복합구조 작동기가 Nafion®기반의 기존 IPMC 작동기보다 적은 에너지 소비와 큰 작동 변위를 보이며 개선된 성능을 보였다. 또한, 본 연구는 자기 다른 종류의 MWNT를 사용하여 실험하였다. 그 결과, 어떤 MWNT가 IPMC 작동기의 전기적, 기계적 성능을 개선시키는 데에 있어서 특별히 우수한지도 알 수 있었다. 본 연구에서는 IPMC의 성능 실험과 그를 개선하기 위한 일부분의 실험만이 행해졌지만, 이를 통하여 IPMC 작동기의 더 적은 에너지 소비를 달성함으로써, 전기적인 성능 개선을 이루었으며, 더 큰 변위를 얻어 기존의 성능을 개선하였다. 앞으로 Nafion®에 분산된 MWNT에 의하여 IPMC 작동기 성능의 개선된 사항을 더 조사하기 위해서는 힘, 탄성계수, 변형률 등을 고려한 물리적인 성질을 고려한 몇 가지 실험이 더 수

행되어야 할 것이다.

## 후 기

이 논문은 2006년도 전남대학교 학술연구비 지원에 의하여 연구되었음.

## 참고문헌

- (1) R. H. Baughman. 2005, Playing Nature's Game with Artificial Muscles, *SCIENCE*, 308: pp. 63~65.
- (2) 이순기 외 2005, IPMC 성능 개선 및 날갯짓 작동기로서의 응용 소음진동공학회 2005년도 추계학술대회 논문집 pp. 723~726
- (3) M. Shahinpoor and K.J Kim, 2001 Ionic Polymer-Metal Composite: I. Fundamentals. *Smart Materials and Structures*. 10: pp. 819~833.
- (4) M. Shahinpoor and K.J Kim, 2003, Ionic Polymer-Metal composite: II. Manufacturing Techniques. *Smart Materials and Structures*. 12: pp. 65~79
- (5) M. Shahinpoor and K.J Kim, 2004, Ionic Polymer-Metal Composite: III. Modeling and Simulation as Biomimetic Sensor, Actuators, Transducers, and Artificial muscles. *Smart Materials and Structures*. 13: pp. 1362~1388
- (6) M. Shahinpoor and K.J Kim, 2005, Ionic, Polymer-Metal Composite: IV. Industrial and Medical Applications. *Smart Materials and Structures*. 14: pp. 197~214.
- (7) J. W. Paquette and K. J. Kim, 2004, Ionomeric Electroactive Polymer Artificial Muscle for Naval Applications. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. 29(3): pp. 729~37.
- (8) J. Jung et al., 2003, Tadpole robot (TadRob) using ionic polymer metal composite (IPMC) actuator. *Proceedings of the SPIE - The International Society for Optical Engineering Smart Structures and Materials 2003. Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD)*, (5051): pp. 272~80.
- (9) Kim, B., et al. 2003, A ciliary based 8-legged walking micro robot using cast IPMC actuators. *IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE ICRA 2003 Conference Proceedings*. Taipei, Taiwan: IEEE.
- (10) M. Shahinpoor, 2002 US Patent #6464655: Electrically-Controllable Multi-Fingered Resilient Heart Compression Devices. *Environmental Robots, Inc.*: USA.
- (11) M. Shahinpoor et al, 2003, US Patent #6511508: Surgical Correction of Human Eye Refractive Errors By Active Composite Artificial Muscle Implants. *Environmental Robots, Inc.*: USA.
- (12) D. Soltanpour, 2001 US Patent #6168575: Method and apparatus for controlling intraocular pressure.: USA
- (13) D. Soltanpour and M. Shahinpoor, 2003, US Patent #6589198: Implantable micro-pump assembly.: USA.
- (14) D. Soltanpour and M. Shahinpoor, 2004, US Patent #6682500: Synthetic muscle based diaphragm pump apparatuses.: USA.
- (15) S. Ashley. 2003, Artificial Muscles: Novel motion-producing devices--actuators, motors, generators--based on polymers that change shape when stimulated electrically are nearing commercialization. *Scientific American*, 289(4): pp. 53~61.
- (16) S. Iijima. 1991, Helical Micro-tubes of Graphitic Carbon. *Nature*. 354: pp. 56~58
- (17) E. Malone and H. Lipson. 2005, Freeform Fabrication of Ionomeric Polymer-Metal Composite Actuators. *Solid Freeform Fabrication*. pp. 484~502
- (18) E. Malone et al, 2003, Freeform Fabrication of 3D Zinc-Air Batteries and Functional Structural-Electric Assemblies. *Solid Freeform Fabrication Symposium*. pp. 363~374
- (19) K. J. Kim and M. Shahinpoor, 2002, A Novel Method of Manufacturing Three-dimensional Ionic Polymer-metal Composites Biomimetic Sensors, Actuators and Artificial Muscles. *Polymer*. 47: pp. 797~802
- (20) D. Y. Lee et al, 2005, Effect of Multiwalled Carbon Nanotube (M-CNT) Loading on M-CNT Distribution Behavior and The Related Electromechanical Properties of M-CNT Dispersed Ionomeric Nanocomposites. *Surface & Coatings Technology*. 200: pp. 1920~1925
- (21) C. Bonomo et al, 2006, A circuit to model the electrical behavior of an ionic polymer-metal composite. *IEEE Transactions on circuits and systems-I:Regular papers*. 53: pp. 338~350