

논문

미세-작동기를 위한 전기방사 CNT/PVDF 나노섬유 기반의 탄소 복합재의
기계적 및 전기적 특성 평가구가영*, 왕작가*, 권동준*, 박종만*⁺Mechanical and Electrical Properties of Electrospun CNT/PVDF Nanofiber for
Micro-ActuatorGa-Young Gu*, Zuo-Jia Wang*, Dong-Jun Kwon*, Joung-Man Park*⁺

ABSTRACT

The electrospun PVDF containing CNT was made for fabricating materials of the actuator. The electrochemical and their actuating movement were evaluated for the actuator performance in the electrochemical environment. The actuator (which was fabricated by electrospinning) had some advantages, i.e., good dispersion and flexible properties. In the electrospinning process, the final product would have different forms based on different essential factors. In this work, electrospun nanofibers were aligned by using the drum-type collector, and the morphology was identified via the field emission-scanning electron microscope (FE-SEM). The uniform dispersion of CNT in PVDF nanofiber was observed by electron probe X-ray micro-analysis (EPMA) test. The results of tensile strength and electrical resistivity provided the aligned state. The electrospun CNT/PVDF nanofiber sheet on the aligned direction showed better mechanical and electrical properties than the case of the vertically-aligned direction. The efficiency and electrical capacities of electrospun CNT/PVDF nanofiber sheets were compared with the cast PVDF sheet for actuator application. Electrospun CNT/PVDF nanofiber sheet exhibited much better the case of actuator performance than cast neat PVDF actuator, due to the excellent electrical connecting areas.

초 록

CNT를 포함하는 전기방사된 PVDF를 작동기 제조의 소재로 사용하였다. 기계적, 전기적특성과 함께 작동기 성능을 평가하기 위해 전기화학적 환경 내에서 전기화학 및 작동기 거동을 조사하였다. 전기방사된 시트의 특징 중 하나인 유연함을 가지며 분산이 잘 되어 접촉면이 많은 이점이 있기 때문에 작동기 제작방법으로 적합하다고 생각되었다. 전기방사는 여러 가지 요인들로 방사형태가 각각 다르게 나타났다. 본 연구에서는 콜렉터를 드럼형태를 사용하여 방사된 나노섬유의 방향성을 가지게 하였으며 형태를 확인하기 위해 전자현미경을 통해 나노섬유가 정렬된 형상을 확인하였다. 전자집 X-ray 미세분석기를 사용하여 PVDF내에 CNT가 함침 되어 나노섬유가 정렬 된 상태를 확인하였으며, 이러한 형태가 미치는 기계적, 전기적 물성에 영향을 평가하기 위해 인장시험을 통해 인장강도와 전기 저항도를 측정하였다. 정렬된 방향의 나노섬유 시트가 정렬의 직각 방향의 시트보다 상대적으로 기계적 그리고 전기적 물성이 좋게 나타났다. 전기방사된 CNT/PVDF 나노섬유 시트가 작동기로 사용 되었을 때 캐스팅으로 제작된 PVDF 시트의 작동기보다 좋은 효율을 확인하기 위해 전기화학적 환경 내에서 작동기 시험을 진행하여, 작동기 효율과 전기적 용량을 측정하였다. 전기방사된 CNT/PVDF 나노섬유 시트는 CNT와 PVDF간의 접촉면이 많기 때문에, 우수한 작동성을 나타내었다.

Key Words : 작동기(actuator), 전기방사(electrospinning), 계면(interface), 기계적물성(mechanical property), 전기저항(electrical resistance), 배열(alignment)

접수: 2012년 10월 02일, 수정: 2013년 2월 12일, 게재승인: 2013년 2월 13일

* 경상대학교 나노·신소재공학부 대학원

*+ 경상대학교 나노·신소재공학부, 공학연구원, Corresponding author(E-mail:jmpark@gnu.ac.kr)

1. 서론

이온성 고분자-금속 복합체(ionic polymer-metal composites, IPMC) 작동기는 외부의 전기적인 자극에 의해 형상이 변하는 전기활성 고분자(electroactive polymer, EAP)의 하나로서 이온전도성 고분자의 면에 전극 층이 입혀진 구조로 되어 있다. 전도성 고분자 작동기와 IPMC는 기존의 작동기에 비해 저전압 구동이 가능하고 동작 시 열이나 전자기파 등을 발생하지 않으며 이러한 성질을 이용하여 인공근육의 제작 또는 팔다리의 동작을 모방하는데 이용된다[1-3]. 본 연구에서 사용된 PVDF (poly(vinylidene fluoride))는 압전능을 가진 고분자로서 작동기 재료로 사용될 수 있는 스마트 재료로 연구되고 있다[4,5]. 탄소나노튜브(carbon nanotube, CNT)의 출현은 CNT의 물리적 기계적 특성에 관해 연구되며, 발전가능성 있는 과학기술의 응용에 연구된다. 나노튜브는 우수한 강도를 갖추고 있으며, 이는 이론적, 실험적으로 모두 확인되었다[6]. CNT역시 굉장히 높은 기계적 물성뿐만 아니라 전기적, 열전도성을 가진다[7].

전도성 고분자는 고분자의 산화/환원 시에 부피의 변화를 수반하는데 이러한 부피의 변화를 작동기의 구동원리로 이용하고 있다. IPMC는 고분자막의 양 표면에 금속 전극을 형성한 후에 전계를 인가하면 막 내부에서 이온의 이동에 의한 부피의 변화가 일어나며 결과적으로 전계의 방향에 따라 인장 압축되어 구동되는 작동기이다. IPMC의 상업화를 위해서 IPMC를 구성하는 각각의 요소들의 개질 및 전기적/기계적 물성의 최적화를 통한 구동특성의 개선이 필요하다. 따라서 기본 메커니즘을 바탕으로 CNT나 ITO 나노입자와 같은 전도성 물질을 통한 전극개질, 기관의 전기적 특성 향상, 새로운 전해액 도입 등 작동기를 구성하는 요소에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[8-12].

따라서, IPMC의 전기역학적 특성을 향상시키기 위해 고분자전해질 및 전극의 개질 또는 고분자 전해질에 전도성 물질의 도입과 같은 복합화방법을 통해 전극/전해질의 계면적을 넓히려는 시도가 계속되고 있다. 일반적으로 캐스팅으로 제작된 고분자 기관을 사용하여 전극과 고분자사이의 계면특성을 향상시켜 작동변위를 증가시켰다. 이때 CNT의 함량이 높아질수록 작동기의 전류밀도, 변위속도, 변위가 증가되는 경향을 보이는 것을 확인가능하다[13].

전기방사(electrospinning)는 고분자용액이 들어있는 실린더 말단의 분사 노즐과 콜렉터 사이에 고전압을 인가하면 비표면적이 매우 큰 나노코기의 직경을 가지는 섬유를 제조하는 방법이다. 또한 입자의 분산성 측면에서도 유리한 기술로 필터, 바이오케미컬, 배터리, 센서 등 많은 분야의 연구에 광범위하게 활용되고 있다[14-15]. 본 연구는 전극과 고분자기관의 접촉면을 넓히기 위해 전기방사를 통해 기관 내에 전도성 나노입자인 CNT를 도입함으로써 전극과 기관의 접촉면을 증가시켜 작동기 제작을 하였다. 전기방사를 통해 나노섬유

의 형태를 SEM을 통해 알아보았으며, CNT/PVDF 나노섬유 기관의 인장시험 동안 기계적, 전기적 물성을 평가하였다. 나노복합재료의 작동기가 스마트소재로서의 성능을 평가하기 위해 전기화학적 환경에서 작동 된 연신율과 전류를 측정하여 작동기 성능을 연구하였다.

2. 실험

2.1 재료

전기방사를 통한 CNT/PVDF 나노섬유 기관을 제조하기 위해 직경이 10-25 nm, 형상비가 400-1000 l/d, 밀도 1.55 g/cm³인 다중벽 카본나노튜브(multi-wall carbon nanotube, MWCNT, 일진나노텍)와 평균분자량이 530,000 g/mol인 폴리비닐리덴플루오라이드(poly(vinylidene fluoride), PVDF, 347078, Aldrich)를 용매인 디메틸포름아마이드(dimethylformamide, DMF, Samchun chem.)에 각각 분산 및 용해하여 CNT 분산용액과 PVDF 용액을 제조하였다. 제조한 CNT 분산용액과 PVDF 용액을 섞어 분산시켜 제작되었다. 또한, 작동기의 전극으로 CNT를 사용하였으며, 스프레이 코팅으로 제작하였다. 코팅공정에서 CNT 용액을 제조하기 위하여, 전극 CNT의 분산 용매로 아세톤(acetone, 삼천화학)을 사용하였다.

2.2 전기방사를 사용한 CNT/PVDF 나노섬유 작동기 제조

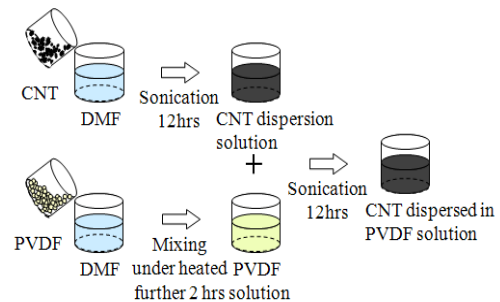


Fig. 1 Preparation process of CNT/PVDF solution for electrospinning.

Fig. 1은 CNT/PVDF 나노섬유 기관을 제작하기 위해 방사용액을 제작공정을 보여준다. CNT는 서로간의 반데르발스 힘(Van der Waals force) 때문에 서로 응집되는 현상이 있어 DMF에 잘 분산되지 않기 때문에 초음파 처리를 통해 분산시켰다. PVDF는 오븐 안에서 2시간 동안 DMF에 용해시켜 사용한다. 각각의 CNT 분산용액과 PVDF 용액을 섞어 분산하면 최종 방사용액인 CNT/PVDF 용액이 제작되었다. CNT는 PVDF 기준 2wt%함량으로 넣었으며, CNT/PVDF 용액은 30wt% 농도로 DMF 용매에 용해시켜 사용하였다.

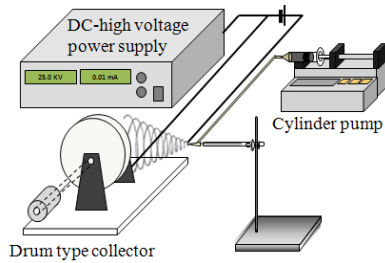


Fig. 2 Experimental scheme of electrospinning process for CNT/PVDF nanofiber sheet.

Fig. 2와 같이 제작된 CNT/PVDF 용액을 플라스틱 실린더에 주입하여 실린더펌프(KDS100, KD Scientific, 미국)를 사용하여 일정 속도로 방사하였다. 이때 실린더의 방사 바늘(steel needle, 21G)과 콜렉터(collector) 사이에 DC 고전압 발생기(KSH-P100/01CD, KSC, 한국)를 사용하여 고전압을 가하였다. 이렇게 구성된 방사 시스템을 이용하여 전기방사를 진행하였다. 방사조건은 전압 25 V, 유속 10 mL/h, 바늘과 콜렉터 사이의 거리를 20 cm 조건에서 방사하였다. 제조한 나노섬유 시트는 작동기 시편으로 제작 시 크기는 길이 40 mm, 폭 5 mm, 두께 0.05 mm로 일정하게 제작하였다.

또한 전기방사된 CNT/PVDF 나노섬유 시트로 제작된 작동기의 물성을 비교하기 위해 캐스팅된 PVDF 시트로 작동기를 제작하였다. PVDF를 DMF에 넣어 70°C 오븐 안에서 4 시간 동안 용해된 PVDF용액을 깨끗한 유리판 위에 캐스팅한 후 오븐에서 용매를 제거하였다. CNT/PVDF 나노섬유시트와 동일한 크기의 PVDF 시트를 제작하였다.

작동기의 전극으로는 균질도포된 CNT를 사용하였으며, CNT를 아세톤을 사용하여 0.1 wt%의 코팅용액을 제작하였다. 코팅용액은 전기방사된 CNT/PVDF 나노섬유 시트와 캐스팅된 PVDF 시트 위에 스프레이 코팅방법으로 전극을 제작하였다. 코팅된 CNT 층의 두께는 0.01 mm이다. 인장 및 전기저항도 측정 시편의 사이즈는 측정길이 20 mm, 폭 5 mm, 그리고 두께 0.05 mm로 제작하였다.

2.3 특성평가 방법

2.3.1. 전기방사 조건에 따른 형태 분석

전기방사는 방사조건에 따라 형태가 많이 달라진다. 드럼 형태(Drum type) 콜렉터를 사용함으로써 나노섬유는 방향성을 가지도록 정렬되어 방사되는 반면 콜렉터가 평면일 경우는 랜덤하게 방사되는 형태이다. 따라서 조건에 따라 형태를 관찰해야 하며 이는 작동기의 특성에 영향을 준다. 본 연구에서는 드럼형태 콜렉터를 사용하여 나노섬유에 방향성을 주었다. 전기방사된 형태는 전계방출 주사전자현미경(Field emission scanning electron microscope, FE-SEM, XL30S FEG, Philips)과 전자탐침미세분석기(Electron probe X-ray microanalyzer, EPMA, JXA-8100, Jeol)을 통해 관찰하였다.

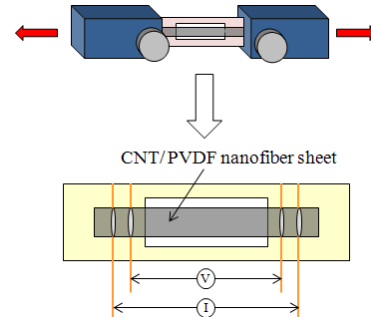


Fig. 3 Schematic illustration of tensile test specimen.



Fig. 4 Experimental scheme of electrochemical actuator in electrolyte solution using laser displacement sensor.

2.3.2. 인장시험 강도 및 전기저항 측정

작동기를 위한 복합재에서 하중을 받는 기관인 CNT/PVDF 나노섬유 시트의 인장 시험 강도 및 전기적 저항을 측정하였다. 나노섬유 시트의 전기저항은 4점 탐침법을 사용하여 측정하였다. Fig. 3은 인장 강도와 전기저항 측정을 위해 사용된 시편을 보여준다. 전기저항은 데이터수집장치(34972A LXI, Agilent, USA)를 사용하여 측정하였으며, 인장강도는 소형-만능시험기(H01KS, Hounsfield사, UK)를 사용한 0.5 mm/분에서 100 N의 로드셀을 사용하였다. 전기저항 ρ 를 계산하는 방법은 다음 식과 같다:

$$\rho = \left(\frac{A}{L_{ec}} \right) \times R \quad (1)$$

여기서 R 은 전기저항, A 는 전류가 흐르는 범위, 그리고 L_{ec} 는 전압의 전기적 접촉길이이다.

2.3.3. 전기화학적 환경에서의 작동기 실험

Fig. 4는 전기화학적 환경에서 작동기의 실험 장치를 보여준다. 전기화학적 환경에서 사용된 기기는 임의 파형발생기(FG-7002C, EZ, 한국), 전압공급기(GP-4503DU, EZ, 한국)로부터 전압을 공급받는 레이저변위센서(LK-2000 Series, Keyence, 일본), 데이터수집장치(34972A LXI, Agilent, 미국)가 사용되었다. 구동하는 원리는 전압을 공급함으로써 내부 전하이동으로 인한 작동이 발생한다. 전자의 이동으로 한쪽 면은 전자가 편중 되

어 시편이 팽창하는 반면 다른 면은 전자가 부족하게 되어 시편 수축으로 작동기가 움직이는 것을 확인하였다.

작동기의 변위는 레이저 변위센서로 측정가능 하며 변위에 대한 식은 식 (2)로 나타낼 수 있다. 이 변위를 시편의 길이와 두께에 따른 연신율로 나타낼 수 있다. 이는 식 (3)으로 표현할 수 있다.

$$\delta = \frac{PL^3}{3EI} \tag{2}$$

$$\epsilon = \frac{3y(L-x)}{L^3} \delta \tag{3}$$

여기서 δ 는 작동기의 변위를 나타내며, P 는 힘을 나타내고 L 은 시편의 총 길이, E 는 Young 강성도, I 는 안쪽으로 굽는 정도를 나타낸다. ϵ 은 작동기의 연신율을 나타내며 y 는 시편 두께, x 는 변위측정 지점을 나타낸다.

3. 결과 및 토론

3.1 방사 조건에 따른 형태 관찰

제작된 나노섬유 시트의 형태와 성분을 FE-SEM과 EPMA를 통해 관찰되었다. Fig. 5 (a), (b)의 EPMA를 통해 CNT와 PVDF의 분산정도를 확인 할 수 있었다. Fig. 5 (a)은 불소, F를 정성분석 하여 맵핑(mapping)을 한 것이며, Fig. 5 (b)는 탄소, C를 기준으로 맵핑한 것이다. PVDF내에는 정성적으로 C와 F가 1:1비율로 존재한다. 그리고 여기에 추가로 CNT가 함침 된 것이므로 F보다 C의 함량이 더 많아야한다. 따라서 Fig. 5 (b)의 C를 기준으로 맵핑한 것이 F보다 많음을 확인할 수 있었다.

여러 가지 요인들 중 콜렉터의 타입에 따라 섬유의 형태가 달라짐을 알 수 있었다. Fig. 5 (c)의 SEM 사진을 보면 일정한 방향으로 정렬되어 있는 것을 확인 할 수 있었다. 콜렉터를 드럼 형태를 사용하여 모터를 이용하여 일정 속도로 돌려가며 방사 하였을 때 이러한 정렬된 나노 섬유를 얻을 수 있었다.

3.2 인장 시험을 통한 기계적, 전기적 물성 평가

Fig. 6은 CNT/PVDF 나노섬유 시트의 인장 시험 동안 기계적물성을 평가한 것이다. 인장 시편은 방사된 CNT/PVDF 나노섬유 시트를 사용하여 정렬된 방향과 그 방향의 직각방향으로 각각 시편을 제작하였다. 정렬된 나노섬유 시트는 상대적으로 정렬된 방향의 직각으로 하중을 주어 인장 시킨 나노 섬유보다 인장강도가 높게 측정되었다. 하지만 신율은 직각방향보다 낮다. 이는 하중을 받는 방향이 섬유의 방향과 일치하며, 또한 CNT/PVDF 나노섬유 자체가 늘어나는 것이기 때문

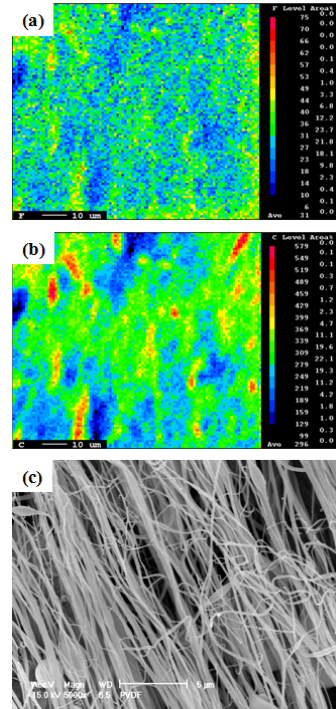


Fig. 5 Mapping image with WDS of actuator and SEM photo based on CNT/PVDF nanofiber sheet; drum type collector; (a) mapping standard carbon; (b) mapping standard fluorine; (c) SEM of CNT/PVDF nanofiber.

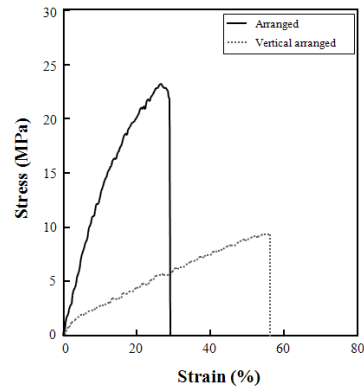


Fig. 6 Electrospun CNT/PVDF nanofiber sheet by different direction fiber with tensile test.

이다. 하지만 정렬된 방향의 직각방향으로 인장 한 시편은 얽혀 있는 섬유들 사이를 떨어뜨리는 것이기 때문에 강도가 약하나, 연신율이 증가 된다.

Fig. 7은 인장시편으로 제작된 CNT/PVDF 나노섬유의 전기 저항도를 나타내었다. 두 시편 모두 큰 저항도를 나타내지만 정렬 방향의 시편이 전기저항이 상대적으로 낮음을 확인할 수 있으며 이는 인장결과의 이유와 같다. 섬유 내에

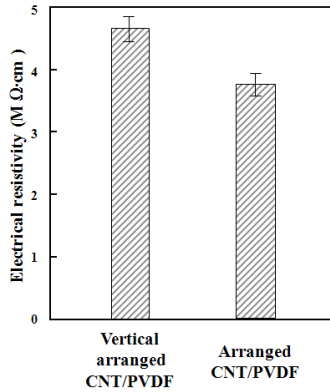


Fig. 7 Electrical resistivity of electrospun CNT/PVDF nanofiber sheet.

CNT가 함침 되어 있을 때 섬유면들의 길이 방향으로 전기 저항도를 측정하였을 때 좀 더 낮은 결과를 확인가능하며, 섬유면들의 두께 방향으로 저항을 측정하였을 때 섬유에 함침된 CNT 들의 접촉면이 낮아지기 때문에 저항도가 상대적으로 높은 것을 확인하였다. 결과적으로 섬유의 정렬된 방향에 따라 강도와 저항도가 상이함을 확인 할 수 있었다.

3.3 전기화학적 환경에서 전기방사 CNT/PVDF 나노 섬유 시트 작동기와 캐스팅 PVDF 시트 작동기의 작동 비교

Fig. 8의 (a)는 전기방사 된 CNT/PVDF 나노섬유 시트를 바탕으로 제작 된 작동기의 전기화학적 환경 하에서 구동과 전기적 특성을 보여준다. (b)는 캐스팅 방법으로 제작한 PVDF 시트를 바탕으로 만든 작동기의 전압에 따른 전류와 변위를 나타낸다. 전기화학적 환경이란 수용액 안에서 시편에 실질적인 전기에너지를 주었을 때 전기적 반응뿐만 아니라 화학적 반응도 일어나는 환경을 의미하며, 본 연구에서는 4 M NaCl수용액을 사용하였다. 전기방사를 통해 제작된 CNT/PVDF 나노섬유 시트는 일반적인 캐스팅 방법으로 제작한 PVDF 시트보다 유연한 특성을 가져 작동기 변위가 증가한다. 또한, PVDF내에 CNT를 함침 시킴으로서 전극과 기판사이의 접촉을 증가시킨다. 따라서 전기적 용량을 증가시킴으로 인해 변위 값이 증가함을 확인 할 수 있었다.

Fig. 9의 데이터 역시 Fig.8과 마찬가지로 전기화학적 환경 내에서 전기화학적 특성과 전기역학적 특성을 반응 시간으로 나타내었다. 전기화학적 특성은 전류 측정값으로 알 수 있다. 캐스팅한 PVDF 시트를 기반으로 만든 작동기는 전기화학적 환경 내에서 전류가 전기방사로 제작한 CNT/PVDF 나노섬유 시트 작동기보다 불안정하게 나타난다. 이는 전도성 나노재료인 CNT와 전기방사의 유무의 차이이다. CNT가 들어감으로써 PVDF와 CNT간의 계면이 증가한다. 따라서 PVDF에 인가되는 전류가 증가되고 안정적이기 때문에 전류밀도가 증가하며 안정적이다. 또한, 이러한 영향으로 작동기의 변위가 증가하게 되었다.

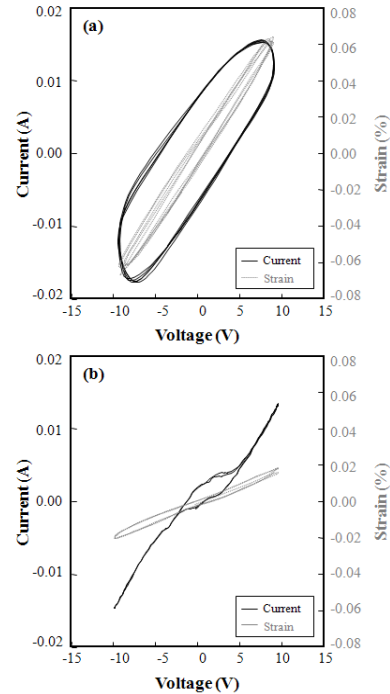


Fig. 8 Actuated strain, current versus voltage curve for actuator; (a) actuator based on CNT/PVDF nanofiber sheet by electrospinning and (b) actuator based on PVDF plate sheet by casting.

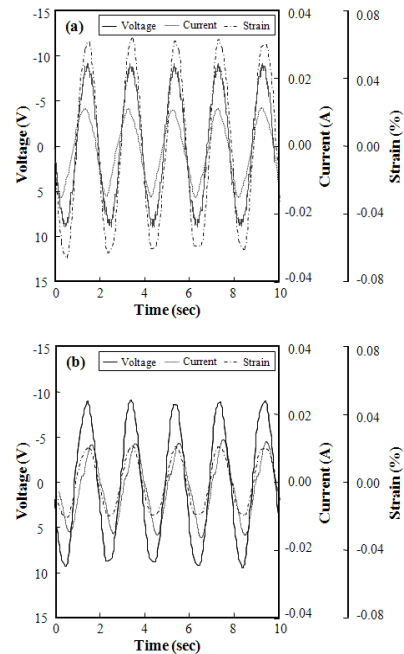


Fig. 9 Actuated strain, current versus elapsing time curve for actuator; (a) actuator based on CNT/PVDF nanofiber sheet by electrospinning and (b) actuator based on PVDF plate sheet by casting.

이는 Fig. 10과 같이 모델링으로 설명이 가능하다. 전극으로 CNT를 사용하고 있으며 나노섬유 시트 내부에도 CNT가 2 wt% 함유 되어 있다. Fig. 10과 Fig. 11의 모델링을 보면 PVDF 내에 CNT가 함유되어 있으며 또한 그 위에 CNT 전극 층을 입힘으로써 전극 층과 PVDF내의 CNT와 PVDF가 서로 접촉하는 면이 발생하게 된다. 따라서 전도성 물질과 고분자간의 계면이 더 많이 생성이 된다. 이는 전기전도도가 증가하여 임피던스를 감소시켜 전압손실이 낮아진다. Fig. 11의 그림과 같이 CNT와 PVDF간의 전자 호핑의 효과로 전기적인 상호작용의 영향도 있기 때문에 접촉면이 증가 할수록 전기역학적 움직임이 증가됨을 확인하였다.

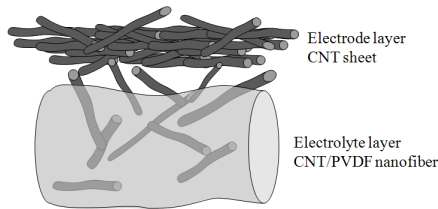


Fig. 10 SEM scheme of the actuator morphology.

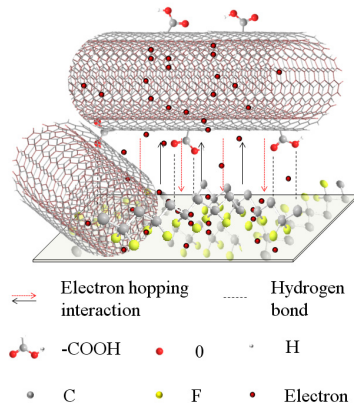


Fig. 11 Scheme of the CNT-PVDF interaction.

4. 결론

전기방사된 CNT/PVDF 나노섬유 시트를 기반으로 제작한 작동기의 형태에 따라 기계적, 전기적 물성을 측정하였으며, 작동기로 응용 시 변위를 평가하였다. CNT/PVDF 나노섬유 시트를 전기방사를 통해 제작하였으며 이는 전도성 물질이자 전극인 CNT와 PVDF간의 접촉면을 증가시켰으며, 전기방사된 시트의 특성인 유연성을 향상시켜 작동기 응용 시 효율적인 결과를 확인하였다. 먼저 전기방사는 여러 가지 요인들로 나노섬유의 형태가 정해지며 그 중 콜렉터를 바피 형태변화

가 어떻게 되는지 SEM을 통해 확인하였다. 드럼 타입의 콜렉터를 사용한 전기방사는 정렬된 나노섬유 시트를 제작할 수 있었다. 기계적, 전기적 물성은 인장시험을 통해 인장강도와 전기 저항도를 확인하였다. 정렬된 나노 섬유 시트가 인장강도가 높으며 전기적 특성이 좋음을 확인 할 수 있었다. 또한, 전기화학적 환경 내에서 작동기 응용시 CNT/PVDF 나노섬유 시트를 기반으로 제작한 작동기가 캐스팅으로 제작된 PVDF 시트를 기반으로 제작된 작동기보다 변위와 전류밀도가 높다. 이는 전극과 고분자 간의 전기적 접촉면이 증가하여 전기적 특성이 증가한다. 이를 작동기로 작동시켰을 때 변위 값과 전기적 용량이 상대적으로 크고 효율적임을 확인하였다. 따라서, 전기방사를 통해 제작된 나노복합재료의 기계적, 전기적, 전기화학적 물성이 작동기 응용에 적합하다는 것을 평가하였다.

감사의 글

본 연구자 중 구가영은 2단계 BK21의 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- Shahinpoor, M., Bar-Cohen, Y., Simpson, J.O., and Smith, J., "Ionic polymer-metal composites(IPMC) as biomimetic sensors, actuators and artificial muscles - a review," *Smart Materials and Structures*, Vol. 7, No. 6, 1998, pp. 15-30.
- Shahinpoor, M., and Kim, K.J., "Ionic polymer-metal composites: I. Fundamentals", *Smart Materials and Structures*, Vol. 10, No. 4, 2001, pp. 819-833.
- Kim, H.I., Kim, D.K., and Han, J.H., "A study on mechanical properties of IPMC actuator," *Journal of the Korean Society for Composite Materials*, Vol.20, No. 3, 2007, pp. 50-54.
- Choi, B.K., and Lee, W.H., "A study on the energy harvesting system using piezoelectric direct effect of piezo film," *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 25, No. 9, 2008, pp. 78-85.
- Gu, G.Y., Wang, Z.J., Kwon, D.J., and Park, J.M., "Interfacial durability and electrical properties of CNT or ITO/PVDF nanocomposites for self-sensor and micro actuator," *Journal of the Korean Society for Composite Materials*, Vol. 24, No. 6, 2011, pp. 12-16.
- Thostenson, E.T., Ren, Z., and Chou, T.W., "Advances in the science and technology of carbon nanotubes and their composites: a review," *Composites Science and Technology*, Vol. 61, No. 13, 2001, pp. 1899-912.

- 7) Che, J., Cagin, T., and Goddard, W.A., "Thermal conductivity of carbon nanotubes," *Nanotechnology*, Vol. 11, No. 2, 2000, pp. 65-73.
- 8) Bennett, M.D., and Leo, D.J., "Ionic liquids as stable solvents for ionic polymer transducers," *Sensor and Actuators A*, Vol. 115, No. 1, 2004, pp. 79-90.
- 9) Onishi, K., Sewa, S., Asaka, K., Fujiwara, N., and Oguro, K., "Morphology of electrodes and bending response of the polymer electrolyte actuator," *Electrochimica Acta*, Vol. 46, No. 5, 2000, pp. 737-743.
- 10) Luqman, M., Lee, J.W., Moon, K.K., and Yoo, Y.T., "Sulfonated polystyrene-based ionic polymer-metal composite (IPMC) actuator," *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, Vol. 17, No. 1, 2011, pp. 49-55.
- 11) Man, M.J., Park, J.H., Lee, J.Y., and Jho, J.Y., "Ionic polymer-Metal composite actuators employing radiation-grafted fluoropolymers as ion-exchange membranes," *Macromolecular Rapid Communications*, Vol. 27, No. 3, 2006, pp. 219-222.
- 12) Lee, J.W., Kim, J.H., Goo, N.S., Lee, J.Y., and Yoo, Y.T., "Ion-conductive poly(vinyl alcohol)-based IPMCs," *Journal of Bionic Engineering*, Vol. 7 No. 1, 2010, pp. 19-28.
- 13) Noh, T.G., Tak, Y., Nam, J.D., and Choi, H., "Electrochemical characterization of polymer actuator with large interfacial area," *Electrochimica Acta*, Vol. 47, No. 13-14, 2002, pp. 2341-2346.
- 14) Huang, Z.M., Zhang, Y.Z., Kotaki, M., and Ramakrishna S., "A review on polymer nanofibers by electrospinning and their applications in nanocomposites," *Composites Science and Technology*, Vol. 63, No. 15, 2003, pp. 2223-2253.
- 15) Choi, S.W., Jo, S.M., Lee, W.S., and Kim, Y.R., "An electrospun poly(vinylidene fluoride) nanofibrous membrane and Its battery applications," *Advanced Materials*, Vol. 15, No. 23, 2003, pp. 2027-2032.
- 16) Rana, S., and Cho, J.W., "Core-sheath polyurethane-carbon nanotube nanofibers prepared by electrospinning," *Fibers and Polymers*, Vol. 12, No. 6, 2011, pp. 721-726.