

# 폴리아닐린/탄소나노튜브 폴리머 액츄에이터의 모델링, 시뮬레이션 및 제어

손기원<sup>1</sup>, 이병주<sup>2</sup>, 김선정<sup>1,3</sup>, 김인영<sup>3</sup>, 김선일<sup>3</sup>

<sup>1</sup>한양대학교 생체인공근육 창의연구단

<sup>2</sup>한양대학교 공학대학 전자컴퓨터공학부

<sup>3</sup>한양대학교 공과대학 전기제어생체공학부

(Received March 16, 2007. Accepted May 23, 2007)

## Modeling, Simulation, and Control of a Polyaniline/Carbon-Nanotube Polymer Actuator

Kiwon Sohn<sup>1</sup>, Byung-Ju Yi<sup>2</sup>, Seon Jeong Kim<sup>1,3</sup>, In Young Kim<sup>3</sup>, Sun I. Kim<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Center for Bio-Artificial Muscle, Hanyang University

<sup>2</sup>School of Electrical Engineering and Computer Science, Hanyang University

<sup>3</sup>Department of Biomedical Engineering, Hanyang University

### Abstract

Polymer actuators, which are also called as smart materials, change their shapes when electrical, chemical, thermal, or magnetic energy is applied to them and are useful in wide variety of applications such as microelectromechanical systems (MEMS), machine components, and artificial muscles. For this study, Polyaniline/carbon-nanotube polymer actuator that is one of electroactive polymer actuators was prepared. Since the nonlinear phenomena of hysteresis and a step response are essential considerations for practical use of polymer actuators, we have investigated the movement of the Polyaniline/carbon-nanotube polymer actuator and have developed an integrated model that can be used for simulating and predicting the hysteresis and a step response during actuation. The Preisach hysteresis model, one of the most popular phenomenological models of hysteresis, were used for describing the hysteretic behavior of Polyaniline/carbon-nanotube polymer actuator while the ARX method, one of system identification techniques, were used for modeling a step response.

In this paper, we first explain details in preparation of the Polyaniline/carbon-nanotube polymer then present the mathematical description of our model, the extraction of the parameters, simulation results from the model, and finally a comparison with measured data.

**Key words :** mechatronics, artificial muscle, polymer actuator, modeling, control, polyaniline, carbon nanotube

### 1. 서 론

지능형 재료(Smart material)라 불리기도 하는 폴리머 액츄에이터(polymer actuator)는 외부로부터의 에너지(전기, 화학 성분, 열, 자계 등)에 의하여 자신의 형상을 변형하는 폴리머(중합체)이다. 특히 전기적 에너지를 기계적 에너지로 변환시키는 전기활성 폴리머 액츄에이터(electroactive polymer actuator, EAP)에는 많은 연구자들이 관심을 가져왔고, 전기활성 폴리머 액츄에이터는 인공 근육[1]은 물론 MEMS[2], 약물전달[3], 나노머

신[4] 등의 응용분야에서 각광을 받고 있으며 더 나아가 자동차 산업 등의 분야[5]에서도 그 잠재적 이용성을 인정받고 있다.

하지만 전기활성 폴리머 액츄에이터를 실생활에 활용가능하기 위해서는 히스테리시스와 스텝응답등 외부에서의 전기에너지에 따른 동적 특성을 파악하는 것이 중요하다.

히스테리시스(履歷현상)는 입력 extrema(시간적으로 가장 최근에 발생한 최대 또는 최소값)에 따라서 출력의 변화가 입력의 변화에 비해 지연되는 비선형성 입출력 관계이다[6]. 많은 동적 시스템(dynamic system)에 산재하는 히스테리시스 현상은 물리학(magnetization)[7], 경제학(shock analysis)[8], 생리학(lung mechanics)[9]등을 포함한 여러 분야의 연구자들에게 주목을 받아왔다. 전기활성 폴리머 액츄에이터도 예외는 아니어서, Tan et al.[10] 및 Chen et al.[11]이 이온성 고분자 금속 복합체(ionic

Corresponding Author : 김선정  
Sungdong P.O. Box 55, Seoul 133-791, Korea  
Tel : +82-2-2220-2321 / Fax : +82-2-2296-5943  
E-mail : sjk@hanyang.ac.kr

polymer-metal composite, IPMC) 액츄에이터의 히스테리시스를 조사하였고, Ge et al.[12], Lee et al.[13], Croft et al.[14], Song et al.[15], Jung et al.[16], 및 Changhai et al.[17]은 피에조 세라믹 액츄에이터의 정밀 제어를 위한 히스테리시스 현상을 밝혀 내었다. 또, Hasegawa et al.[18] 과 Choi et al.[19] 등이 형상기억 액츄에이터 (shape memory actuator, SMA)의 히스테리시스 모델을 제시하는 등 다수의 연구자들이 히스테리시스를 연구하여 왔다.

전기활성 폴리머 액츄에이터의 스텝형태 전기에너지 입력에 대한 기계적 반응은 Yun et al.[20]에 의하여 조사되었다. 시스템 식별기법(system identification) 중 하나인 ARMAX 방법과 0.01 Hz로부터 0.1Hz까지 변하는 chirp 신호 입력을 바탕으로 하여 마이크로스케일PID(proportionalintegralderivative) 제어를 수행하기 위한 모델을 제시한 바 있다.

폴리아닐린(PANI)은 산화-환원반응에 의한 가역적 카운터이온 작용에 의하여 작동하는 전기활성 폴리머 액츄에이터의 일종이다. 전해질 내에서 전기에너지를 가함에 따라 상당량의 부피 변화를 보이거나 부서지기 쉬운 단점이 있다. 이에 Spinks et al.은 최근 연구에서, PANI 전기활성 폴리머 액츄에이터에 탄소 나노튜브(SWNT)를 혼합함으로써 재료의 기계적 강도와 수축력을 모두 개선할 수 있음을 보여 주었다[21].

본 연구에서는 PANI-SWNT 전기활성 폴리머 액츄에이터의 히스테리시스 특성과 스텝응답을 조사하여 수학적으로 모델화하였고 시뮬레이션을 통한 모델 검증과 逆 히스테리시스 모델을 이용한 제어 방법을 제시하였다.

## II. 실험방법

### A. PANI-SWNT 혼합물 합성

우선 Acrylamido methylpropane sulfonic acid (AMPSA, 0.5g)을 dichloroacetic acid (DCA, 20ml)에 추가하여 녹이고, SWNT(10 mg)이 DCA-AMPSA 용액에 첨가되었다. 이 혼합물

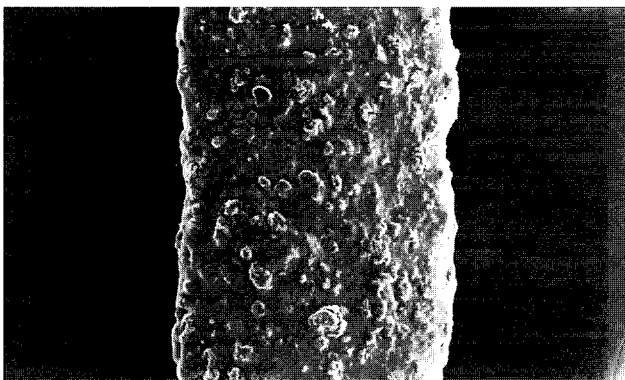


그림 1. PANI-SWNT 전기활성 폴리머 액츄에이터 샘플의 SEM 이미지  
Fig. 1. SEM image of PANI-SWNT electroactive polymer actuator

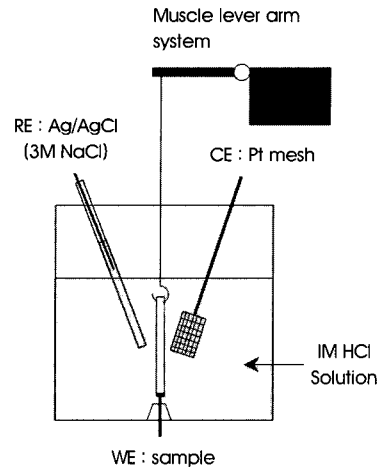


그림 2. 액츄에이션 테스트를 위한 테스트 셀  
Fig. 2. A test cell for an actuation test

은Sonics and Materials Inc. 500W Vibra Cell을 이용하여 상온에서 1시간 동안 2초간 켜고 1초간 끄는 방법으로 초음파 처리되었다. PANI emeraldine base(EB, 0.5g)를 SWNT dispersion에 천천히 첨가하고 24 시간 동안 질소 내에서 2000 rpm으로 저어졌다. Emeraldine salt (ES)의 green solution은 500 μl/min의 속도로 직경0.2밀리미터 주사기와 spinnert를 통해서 10 rpm으로 자전하는 응고액 (아세톤) 속으로 주사되었다. 응고액의 자전축에서 2 cm 떨어진 곳으로 PANI-SWNT 전기활성 폴리머 액츄에이터가 fiber의 형태로 응고되었고 de-ionized water로 수 차례 세척된 후 공기 중에서 건조되었다. PANI-SWNT 전기활성 폴리머 액츄에이터 샘플은 약 0.2밀리미터의 직경에 길이가 1.5cm 가량되는 fiber였다. Fiber의 scanning electron microscopy(SEM)의 이미지는 fig. 1에 나타내었다.

액츄에이션 테스트는 0.2V ~ 0.65V의 전기에너지를 공급하는 동안 PANI-SWNT 전기활성 폴리머 액츄에이터의 길이 변화를 조사함으로써 이루어졌다. 이 실험은 AD Instruments MacLab/4 인터페이스 및 Voltammograph CHI600B 와 AuroraScientific Inc. 300B시리즈 Muscle Lever Arm System을 사용하여 HCl(1M) 전해질 용액 안에서 실행되었다. Fig. 2는 액츄에이션 테스트를 위한 테스트 셀로서 working 전극, Ag/AgCl reference 전극, 및Pt 메쉬 counter 전극으로 이루어져 있다. Fiber의 한쪽 끝은 Pt철사를 이용, 셀 바닥으로 연결되었고, 다른 쪽 끝은 Muscle Lever Arm System에 고정되었다.

### B. PHM 이용한 PANI-SWNT 전기활성 폴리머 액츄에이터의 히스테리시스 모델

강자성 물질의 히스테리시스 현상을 기술하기 위하여 고안된 프라이어자흐 히스테리시스 모델(PHM) [6]은 히스테리시스의 물리적 원리에 대한 고려 없이 현상을 표현할 수 있는 모델이기 때문에 여러 분야에서 응용되어 사용되어 온, 가장 성공적으로 널리 활용

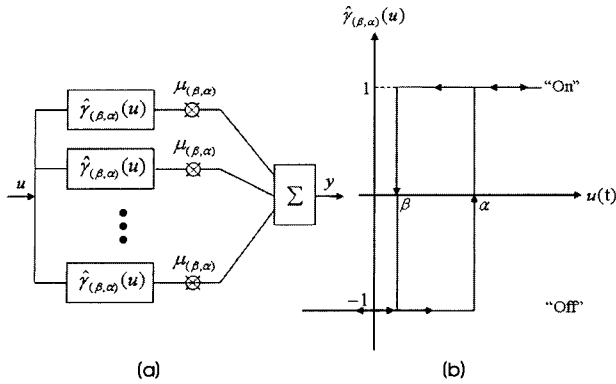


그림 3. 프라이자흐 히스테리시스 모델 (PHM)  
Fig. 3. Overview of the Preisach hysteresis model

되고 있는 히스테리시스 모델 중 하나이다. PHM은 중첩의 원리에 기초하고 있다. Fig. 3 (a) 에 나타내어졌듯이 PHM은 프라이자흐 히스테론 (preisach hysteron)  $\hat{\gamma}_{(\beta, \alpha)}(u)$  과 weight function  $\mu_{(\beta, \alpha)}$  으로 이루어진 다수의 선로를 병렬 연결 함으로써 이루어진다. 다음은 PHM을 나타내는 공식이다.

$$y(t) = y_0 + \iint_{\alpha \geq \beta} \mu_{(\beta, \alpha)} \cdot \hat{\gamma}_{(\beta, \alpha)}[u(t)] d\alpha d\beta \quad (1)$$

여기서  $u(t) \in U_0 \equiv \{u \in \mathbb{R} : u_{\min} \leq u \leq u_{\max}\}$ ,

$(\beta, \alpha) \in P_0 \equiv \{(\beta, \alpha) \in \mathbb{R}^2 : u_{\min} \leq \beta \leq \alpha \leq u_{\max}\}$

이고  $y_0$  는  $(\beta, \alpha) = (u_{\min}, u_{\min})$  를 만족시키는  $y(t)$  의 초기값이다.

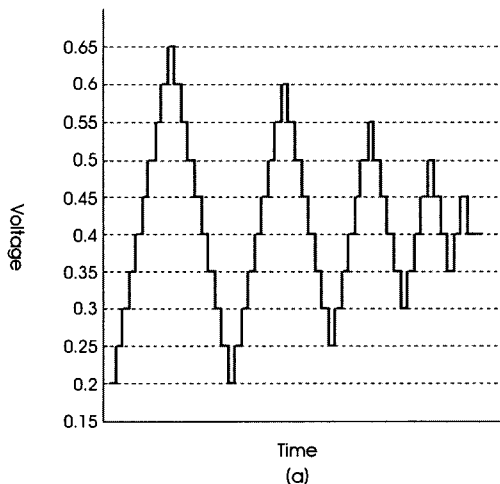


Fig.3 (a) 에서의 각 선로는 집합  $P_0$  의 각 원소에 해당하는 입력치에 할당되어 있기 때문에 그 출력치는 선로별로 다르다. Fig. 3 (b)에 나타내어진 프라이자흐 히스테론은 두 개의 문턱치  $\alpha$ 와  $\beta$ 에 의하여 on-off 전환을 하는 비선형 릴레이 소자와 같다고 볼 수 있다. "on"은 오직  $\alpha$ 에 의해서, "off"값은 오직  $\beta$ 에 의해서만 전환 될 수 있으며 각각 1과 -1의 출력치를 생성하게 된다. 수식으로 표현하면,

$$\hat{\gamma}_{(\beta, \alpha)}(u(t)) = \begin{cases} -1 & \text{if } (u(t) < \beta) \\ \vee [(\beta < u(t) < \alpha) \wedge (\frac{du}{dt}(t) < 0)] \\ 1 & \text{if } (u(t) < \alpha) \\ \vee [(\beta < u(t) < \alpha) \wedge (\frac{du}{dt}(t) > 0)] \end{cases} \quad (2)$$

이 된다.

Fig. 4 (a) 와 같은 반복적 스텝 입력에 의하여 weight function  $\mu(\beta, \alpha)$  의 값을 찾아낼 수 있다. 이 과정 동안 weight function과 같은 수의 스텝입력에 대한 응답을 차례대로 측정한다. 수학적으로 보자면 다음 공식의 해를 구함으로써 weight function을 찾아낸다.

$$\left[ \sum_{(\beta, \alpha) = (u_{\min}, u_{\min})}^{(u_{\min}, u_{\min})} \mu(\beta, \alpha) \cdot \hat{\gamma}_{(\beta, \alpha)}(u(k)) \right] = y(k) - y_0 \quad (3)$$

여기서  $u(k)$ 는 k번째 step 입력이고  $y(k)$ 는 그에 대한 응답값을 의미한다. Step 입력에 대한 정확한 응답값을 측정하기 위해서는 입력에 대한 응답이 어느 한 값에 완전히 멈추기를 기다려야 한다. 본 실험에서는 길게는 5분 가량의 시간이 요구되었다. Fig.4 (b)는 Fig.4 (a)에 대한 응답값을 나타내며, 이 데이터를 이용하여 히스테리시스 모델이 표현되었다.

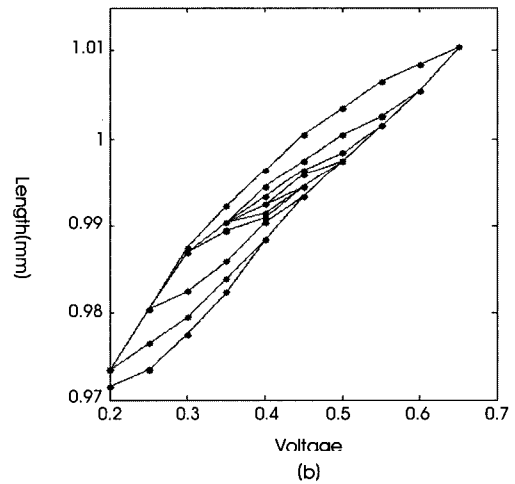


그림 4. Weight function을 찾기 위한 (a) 반복적 스텝 입력 파형과 (b) 그에 따른 응답  
Fig. 4. (a) A repetitive step input wave for identification of weight functions and (b) its response from the actuator

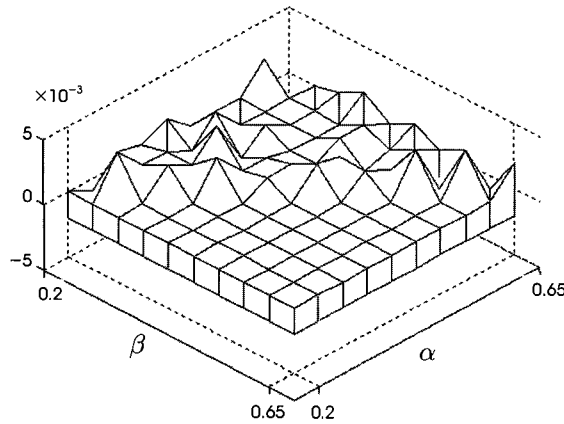


그림 5. 계산된 weight function 값  
 Fig. 5. (a) Distribution of weight functions

C. 시스템 식별기법과 스텝응답

스텝형태로 증가 또는 감소하는 전기에너지 입력에 대한 길이 변화의 특성을 모델링하기 위하여 시스템 식별기법 중 ARX방법 [22]이 사용되었다. ARX의 식은 다음과 같이 주어진다.

$$A(q)y(t) = B(q)u(t) + e(t) \quad (4)$$

여기서  $A(q)$ 와  $B(q)$ 는 입출력 신호로부터 얻어질 수 있는 파라미터들이다. 파라미터를 구하기 위한 입력신호는 0.4V부터 0.45V로 증가하는 스텝신호로서 본 연구에 사용된 전체 입력 범위,

즉 0.2V에서 0.65V의 미디언 값에 해당한다. 이와 같이 미디언 입력 값의 스텝 입력에 의해서 구해진 스텝 응답이 모든 입력 범위에서의 스텝응답과 동일하다는 가정 하에 모델링을 하였다.

III. 결 과

A 히스테리시스 모델

Fig. 4 (a) 과 같은 반복적인 형태의 입력을 이용함으로써 PHM의 weight function을 구해낼 수 있고 그 값은 fig. 5 에 나타내었다. 이렇게 구해진 히스테리시스 모델을 실험으로서 검증하고, 또

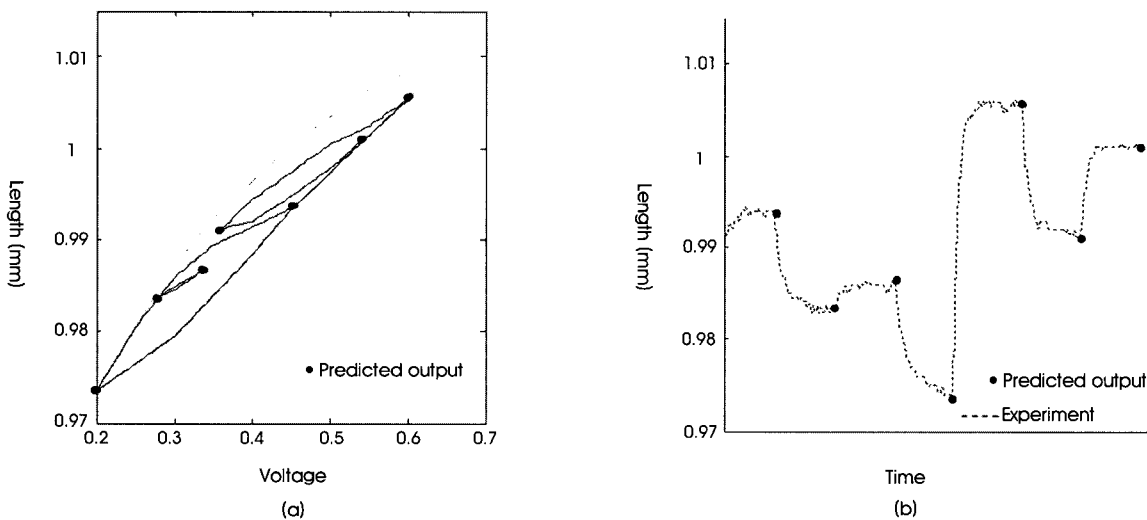


그림 6. (a) 입력 시퀀스 [0.45 V, 0.28 V, 0.34 V, 0.20 V, 0.60 V, 0.36 V, 0.54 V]에 대한 시뮬레이션 결과. 각 점은 입력 시퀀스에 대응하는 출력 값이고 검은 실선은 출력값 사이로 예상되는 이동 경로이다. 회색 실선은 시뮬레이션에 의한 메이저 히스테리시스 곡선을 나타낸다. (b) 같은 입력 시퀀스에 대한 실제 측정치를 점선으로 나타내었고, 점으로 표시된 시뮬레이션 출력 값과 비교할 수 있다.

Fig. 6. (a) Simulation results of an input sequence [0.45 V, 0.28 V, 0.34 V, 0.20 V, 0.60 V, 0.36 V, 0.54 V]. The gray line is a major hysteresis loop while the black line indicates a predicted trajectory. (b) The dashed line shows what was measured during experiments and can be compared to simulation results.

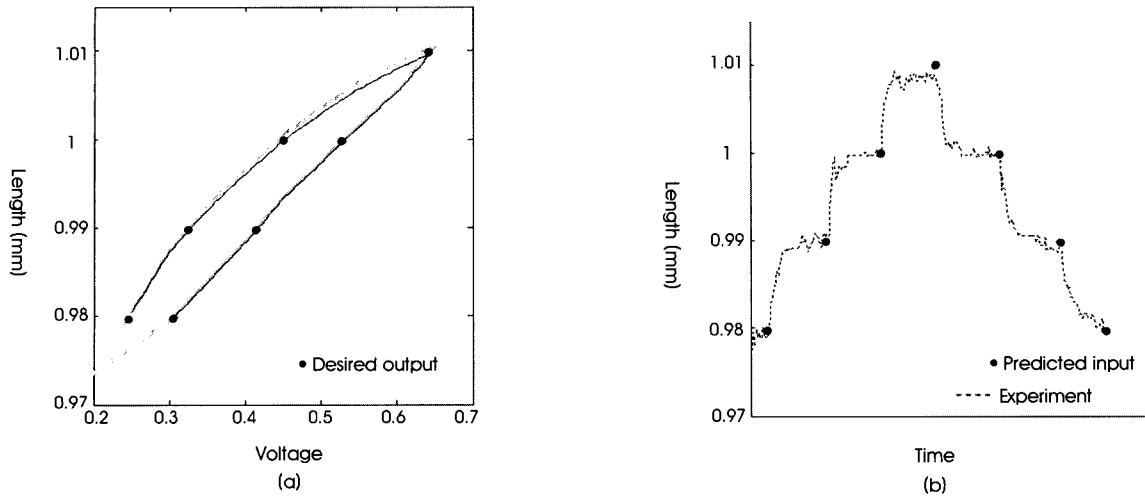


그림 7. (a) 임의의 출력 시퀀스 [0.994mm 0.983mm 0.986mm 0.974mm 1.006mm 0.991mm 1.001mm]에 대응하는 입력 시퀀스를 찾아내기 위한 시뮬레이션 결과. (b) 시뮬레이션을 통하여 찾아낸 입력 시퀀스를 실제 액추에이터에 인가하여 테스트한 결과가 점선으로 표시되었다. 이 테스트 결과는 점으로 표시된 원래의 출력 시퀀스와 비교되었다.

Fig. 7. (a) Using simulation of inverse hysteresis, inputs from a desired out sequence [0.994mm 0.983mm 0.986mm 0.974mm 1.006mm 0.991mm 1.001mm] were computed. The gray line is a major hysteresis loop while the black line indicates a predicted trajectory. (b) The dashed line shows what was measured during experiments based on the predicted inputs. It can be compared to the desired output sequence.

그 모델을 이용하여 逆히스테리시스의 값을 구하는 것을 보여 주려 한다.

모델의 검증을 위해서 임의의 입력 시퀀스 [0.45 V, 0.28 V, 0.34 V, 0.20 V, 0.60 V, 0.36 V, 0.54 V]를 PANI-SWNT 전기활성 폴리머 액추에이터에 인가하였을 때의 예측 출력치와 실제 측정치를 비교하였다. Fig. 6 (a)는 히스테리시스 루프의 시뮬레이션과 인가된 입력 시퀀스에 대하여 예측된 출력값을 보여준다. Fig. 6 (b)는 예측된 출력치를 측정된 출력치와 함께 시간 영역에

나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 측정값과 예측값이 매우 비슷하기 때문에 모델이 정확하다고 볼 수 있다.

逆히스테리시스 현상을 조사하고 시뮬레이션을 하는 이유는 원하는 출력치를 얻기 위한 입력치를 찾아냄, 즉 PANI-SWNT 전기활성 폴리머 액추에이터의 길이 (출력치)를 원하는 대로 제어할 수 있게 하기 위함이다. 아래의 식에서 입력치  $v_p$ 를 찾음으로써 逆히스테리시스를 구할 수 있다.

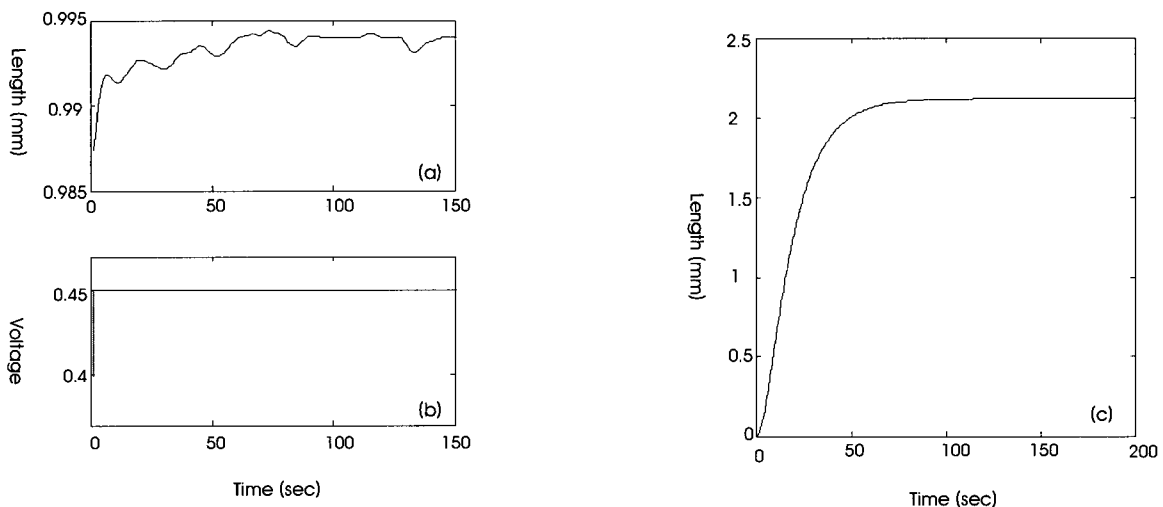


그림 8. (a) 스텝 입력에 대한 액추에이터의 출력 (길이변화). (b) 인가된 스텝 입력 (전기에너지). (c) ARX방법을 이용하여 시뮬레이션한 결과  
Fig. 8. (a) An output (length change) of the actuator during a step input. (b) A step input applied to the actuator. (c) An ARX simulation result of a step input.

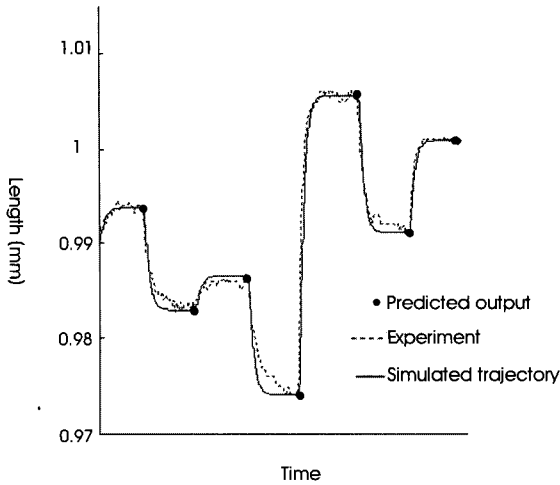


그림 9. 입력 시퀀스 [0.45 V, 0.28 V, 0.34 V, 0.20 V, 0.60 V, 0.36 V, 0.54 V]에 대한 액추에이터의 길이 변화(점선), 시뮬레이션에 의한 길이 변화(각 점), 그리고 각 점간의 궤적 변화(실선)

Fig. 9. The dashed line shows a change in the length of the actuator based on an input sequence [0.45 V, 0.28 V, 0.34 V, 0.20 V, 0.60 V, 0.36 V, 0.54 V]. The dots are simulation results for the length of the actuator. The solid line shows a simulated trajectory between the dots.

$$\min |y(v_p) - y_d| \quad (5)$$

여기서  $y_d$ 는 원하는 출력치이고,  $y(v_p)$ 는 식 (1)에서 입력치  $u(t)$  대신  $v_p$ 를 대입함으로써 찾을 수 있다. 역히스테리시스를 구한 결과는 fig. 7에 표현되어 있다. Fig. 7 (a)에서는 앞서 검증된 히스테리시스 모델과 식(5)를 이용하여 임의의 출력 시퀀스 [0.994mm 0.983mm 0.986mm 0.974mm 1.006mm 0.991mm 1.001mm]에 대응하는 입력 시퀀스 [0.31V 0.42V 0.53V 0.64V 0.45V 0.33V 0.25V]를 구하는 것을 보여준다. Fig. 7 (b)에서는 예측된 입력 시퀀스를 실제 샘플에 적용한 액추에이션 테스트 측정치를 점선으로 나타내고, fig. 7 (a)에서 사용된 출력 시퀀스 [0.994mm 0.983mm 0.986mm 0.974mm 1.006mm 0.991mm 1.001mm]도 함께 표시하였다. 앞에서 설명하였듯이 히스테리시스 모델과 식 (5)를 이용하여 출력 시퀀스에 대한 입력 시퀀스를 구할 수 있었다.

### B. 스텝 응답 모델

Fig. 8 (a) 와 (b)는 ARX방법을 이용하여 모델의 파라미터를 구하기 위하여 활용된 출력(길이변화) 및 입력(전기에너지)신호를 나타낸 것이다. 파라미터는 다음과 같이 계산되었다.

$$\begin{aligned} A(q) &= 1 - 1.1762q^{-1} + 0.7732q^{-2} \\ B(q) &= 0.01188q^{-1} + 0.01188q^{-2} \end{aligned} \quad (6)$$

Fig. 8 (c) 에서는 위의 파라미터와 ARX방법을 이용하여 시뮬레이션한 결과를 보여준다.

### C. 히스테리시스 모델과 스텝 응답 모델을 활용한 시뮬레이션

위에서 설명된 히스테리시스 모델과 스텝 응답 모델을 동시에 활용하여 PANI-SWNT 전기활성 폴리머 액추에이터의 길이 변화의 궤적을 예측하였다. 입력 시퀀스는 3.1에서 사용된 [0.45 V, 0.28 V, 0.34 V, 0.20 V, 0.60 V, 0.36 V, 0.54 V]를 그대로 인가하였다. Fig. 9에서는 시뮬레이션된 궤적의 결과를 fig. 6 (b) 위에 그려넣었다. 실제 측정 결과는 점선으로 나타내었으며 히스테리시스 모델로서 예측할 수 있는 길이 변화의 최종 값은 점으로 표시되었다. 그리고 각각의 최종값으로 변화하는 동안의 궤적은 실선으로 표기되었다.

Fig. 9에서 아래로 향하는 스텝입력 동안, 응답 곡선의 실측치와 예상치가 두드러지게 차이나는 것을 볼 수 있다. 이는 전체 입력 범위 중 미디언 값만을 가지고 스텝응답을 모델링 한 것에 기인하는 것으로 보인다. 그렇지만 본 연구에서 제시된 히스테리시스 및 스텝 응답 결합 모델을 이용하여 PANI-SWNT 전기활성 폴리머 액추에이터를 정밀하게 제어할 수 있는 큰 가능성을 보여주고 있다.

## IV. 결론

본 논문에서는 PANI-SWNT 전기활성 폴리머 액추에이터의 히스테리시스와 스텝 응답의 수학적 특성을 PHM 과 ARX 방법으로 각각 모델링하였다. 또, 컴퓨터 시뮬레이션 결과와 실제 실험 측정 결과의 비교를 통하여 모델의 타당성을 검증한 후, 역히스테리시스 모델을 이용한 액추에이터의 제어 방법을 제시하였다.

PANI와 SWNT가 혼합된 전기활성 폴리머 액추에이터는 편리함과 안정성, 그리고 높은 에너지 효율로 인하여 많은 관심을 끌어왔으나, 선형 또는 비선형 동적 특성에 대한 연구는 그다지 많이 수행되지 않아왔다. 본 연구를 통하여 전기활성 폴리머 액추에이터의 실용적 활용 방법에 대한 도움이 되기를 희망하는 바이다.

### 참고문헌

- [1] Y. Bar-Cohen, *Electroactive Polymer (EAP) Actuators as Artificial Muscles*, Bellingham, WA: SPIE Press, 2001.
- [2] E. W. H. Jager, E. Smela, and O. Ingnas, "Microfabricating conjugated polymer actuators," *Science*, vol. 290, pp. 1540-1545, 2000.
- [3] R. Lobenberg, "Smart materials: Applications of nanotechnology in drug delivery and drug targeting," in *Proc.the International Conference on MEMS, NANO and Smart Systems (ICMENS'03)*, 2003.
- [4] J. P. Collin, C. Dietrich-Buchecker, P. Gavina, M. Jimenez-Molero, and J. P. Sauvage, "Shuttles and muscles: Linear

- molecular machines based on transition metals," *Acc. Chem. Res.*, vol. 34, pp. 477-487, 2001.
- [5] B. Fleming, "Automotive electronics," *IEEE vehicular technology magazine*, pp. 49-52, 2006.
- [6] I. D. Mayergoyz, *Mathematical Models of Hysteresis and Their Applications*: Elsevier, 2003.
- [7] G. Bertotti, *Hysteresis in Magnetism*: Academic Press, 1998.
- [8] J. B. Davis, D. W. Hands, and U. Maki, *The Handbook of Economic Methodology*: Edward Edgar, 1995.
- [9] J. R. Axe and P. H. Abbrecht, "Analysis of the pressure-volume relationship of excised lungs," *Ann Biomed Eng.*, vol. 13, pp. 101-117, 1985.
- [10] X. Tan, J. S. Baras, and P. S. Krishnaprasad, "Control of hysteresis in smart actuators with application to micro-positioning," *Syst. Control Lett.*, vol. 54, pp. 483-492, 2005.
- [11] Z. Chen, X. Tan, and M. Shahinpoor, "Quasi-static positioning of ionic polymer-metal composite (IPMC) actuators," in *Proc. the IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, Monterey, CA, 2005.
- [12] P. Ge and M. Jouaneh, "Modeling hysteresis in piezoceramic actuators," *Precis. Eng.*, vol. 17, pp. 211-221, 1995.
- [13] S.-H. Lee, T. J. Royston, and G. Friedman, "Modeling and compensation of hysteresis in piezoceramic transducers for vibration control," *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, vol. 11, pp. 781-790, 2000.
- [14] D. Croft, G. Shed, and S. Devasia, "Creep, hysteresis, and vibration compensation for piezoactuators: Atomic force microscopy application," *ASME J. Dyn. Syst. Meas. Control*, vol. 123, pp. 35-43, 2001.
- [15] G. Song, J. Zhao, X. Zhou, and A. DeAbreu-Garcia, "Tracking control of a piezoceramic actuator with hysteresis compensation using inverse Preisach model," *IEEE trans. mechatronics*, vol. 10, pp. 198-208, 2005.
- [16] H. Jung, J. Y. Shim, and D. Gweon, "Tracking control of piezoelectric actuators," *Nanotechnology*, vol. 12, pp. 14-20, 2000.
- [17] R. Changhai and S. Lining, "Hysteresis and creep compensation for piezoelectric actuator in open-loop operation," *Sens. Actuators A*, vol. 122, pp. 124-130, 2005.
- [18] T. Hasegawa and S. Majima, "A control system to compensate the hysteresis by Preisach model on SMA actuator," presented at International symposium on micromechatronics and human science, 1998.
- [19] B.-J. Choi, Y.-J. Lee, and B.-Y. Choi, "Fast Preisach modeling method for shape memory alloy actuators using major hysteresis loops," *Smart Mater. Struct.*, vol. 13, pp. 1069-1080, 2004.
- [20] K. Yun and W.-J. Kim, "Microscale position control of an electroactive polymer using an anti-windup scheme," *Smart Mater. Struct.*, vol. 15, pp. 924-930, 2006.
- [21] G. M. Spinks, V. Mottaghitlab, M. Bahrami-Samani, P. G. Whitten, and G. G. Wallace, "Carbon-nanotube-reinforced polyaniline fibers for high-strength artificial muscles," *Adv. Mater.*, vol. 18, pp. 637-640, 2006.
- [22] L. Ljung, *System Identification: Theory for the Users, 2nd edition*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1999.