

상태 관측기 설계 기법을 적용한 이온성 고분자 금속 복합체의 전압 생성 특성 모델링

이형기* · 박기원**† · 김명수***

State Observer Based Modeling of Voltage Generation Characteristic of Ionic Polymer Metal Composite

Hyung-Ki Lee*, Kiwon Park**†, Myungsoo Kim***

ABSTRACT: Ionic Polymer-Metal Composite (IPMC) consisting of soft membrane plated by platinum electrode layers on both surfaces generates electric energy when subjected to various mechanical stimuli. The paper proposes a circuit model that describes the physical composition of IPMC to predict the voltage generation characteristic corresponding to bending motion. The parameter values in the model are identified to minimize the RMS error between the real and simulated outputs. Following the design of IPMC circuit model, the state observer of the model is designed by using pole placement technique which improves the model accuracy. State observer design technique is also applied to find the inverse model which estimates the input bending angles from the output voltage data. The results show that the inverse model estimates input bending angles fairly well enough for the further applications of IPMC not only as an energy harvester but also as a bending sensor.

초 록: 이온성 고분자 복합물인 IPMC(Ionic Polymer Metal Composite)는 부드러운 고분자 필름의 양면에 백금으로 구성된 전극층이 부착된 형태로 구성되어 있으며, 외부 물리적 자극에 대응하여 전기적 에너지를 발생시키는 특성을 가지고 있다. 본 논문에서는 IPMC의 굽힘에 대응하여 생성되는 전압을 예측할 수 있는 회로 모델을 제안하였다. 모델의 내부는 IPMC의 물리적인 특성을 묘사하는 전기 소자들로 구성되어 있으며, 실제 측정된 출력 전압과 시뮬레이션 출력 전압 사이의 RMS(Root Mean Square) 오차가 최소화 되도록 파라미터들의 값이 선정되었다. 이어서, 회로 모델의 관측기를 극점 배치 기법을 사용하여 설계하였으며 관측기로부터의 출력 전압 시뮬레이션의 결과 실제 전압 신호와의 오차가 줄어들음을 확인하였다. 또한, 상태 관측기 설계 기법이 측정된 출력 전압으로부터 입력 굽힘 각도를 추정하는 역 모델의 설계에도 적용되었으며 설계된 역 모델이 입력 각도를 큰 오차 없이 추정함을 검증하였다.

Key Words: 이온성 고분자 복합재(Ionic Polymer-Metal Composite), 회로 모델(Circuit Model), 변수 추정(Parameter Estimation), 상태관측기설계(State Observer Design)

1. 서 론

신재생에너지는 주변 환경으로부터 얻을 수 있는 다양

한 형태의 에너지를 뜻한다. 최근 전기활성 고분자 복합물(EAP; Electro Active Polymer)을 활용하여 압력이나 진동 등 물리적인 에너지를 전기 에너지로 전환해 저장, 활용하는

Received 19 November 2015, received in revised form 21 December 2015, accepted 21 December 2015

*Department of Control and Instrumentation Engineering, Pukyong National University

**†Department of Green Automobile Engineering, Youngsan University, Corresponding author (E-mail: kwp@ysu.ac.kr)

***Department of Mechanical Design Engineering, Youngsan University

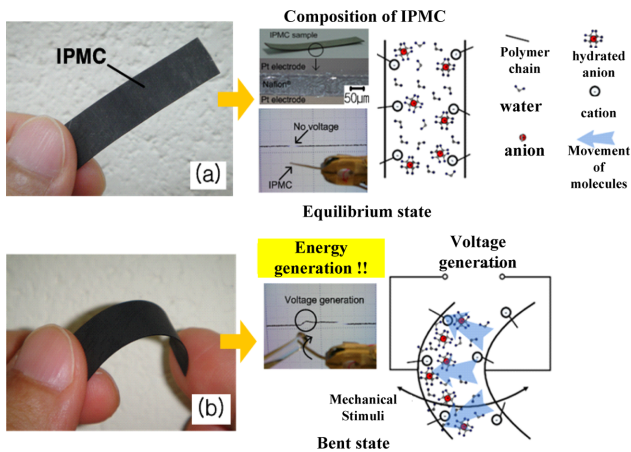


Fig. 1. Mechanism of electrical energy generation from IPMC, (a) Equilibrium state, (b) Bending state

집전 기술이 주목을 받고 있다. EAP를 활용한 집전 기술은 대기오염 물질을 생성하지 않고 자연환경에 크게 영향을 받지 않는 등 그린 에너지원으로서 큰 잠재력을 가지고 있어 많은 연구들이 진행되고 있다[1-5].

이온성 고분자 복합물인 IPMC(Ionic Polymer Metal Composite)는 부드럽고 가벼운 이온 전도성 고분자 물질인 Nafion® 필름 양면에 금속 전극을 입힌 형태를 가지며, 금속 전극은 일반적으로 Platinum을 사용한 무전해 도금과정을 통하여 고분자 필름의 표면에 형성된다. 이와 같이 IPMC는 구조가 단순하며, 부드럽고 가벼운 소재적 특성을 가지기 때문에 자연환경으로부터 발생하는 다양한 물리적 자극으로부터 에너지를 생산하는 신재생에너지원으로서 큰 잠재력을 가지고 있다. Fig. 1은 IPMC의 내부 구조 및 에너지 생성의 원리를 보여준다.

Nafion® 필름은 내부를 구성하고 있는 분자 사슬 구조들이 음이온(SO_3^-)의 형태로 끝나기 때문에 양이온만을 내부로 끌어당기는 특성을 가진다. Nafion 필름은 물을 잘 흡수하는 다공성 소재이며 따라서 물속에 놓일 경우 수소 이온(H^+)을 물 분자와 함께 내부로 흡수하는데, 이때 수소 이온은 물 분자와의 인력(van der Waals force)에 의해서 결합하여 수화된 형태($\text{H}(\text{H}_2\text{O})_4^+$)로 Fig. 1에서와 같이 Nafion 필름으로 흡수되어 내부 음이온과 결합하게 되며 전기적으로 평형 상태를 이루게 된다[6].

외부의 힘에 의해 IPMC가 굽혀질 경우, 압축되는 면에 존재하는 양이온들은 압력에 의해서 반대 면으로 이동하게 되며, 양 전극 사이에 발생하는 이온 양의 편차에 의해서 전위차가 발생한다.

IPMC의 발전 특성은 다양한 연구를 통해 이루어지고 있다. 그 중에서 굽힘에 대응한 출력 전압과 전류를 추정할 수 있는 모델 개발에 관한 연구가 진행되고 있다. 관련 연구들은 공통적으로 굽힘에 의해서 발생하는 표면 전극 양단간의 전위차가 굽힘 각 혹은 굽힘 거리에 비례하는 전극 양극

단의 전하량의 불균형으로부터 기인한다는 가정 하에 모델들을 도출하였다[7-10]. 그러나 복잡한 수식으로 표현된 모델들의 경우 실제 에너지 효율을 추정하기 위해 적용할 경우 어려움이 따른다.

본 논문에서는 적용이 용이한 회로 모델을 사용하여 IPMC의 전압 생성 특성을 분석하였다. 회로 모델 내부의 소자들은 IPMC의 구조와 굽힘에 따른 전하의 이동 특성을 나타내며 각 소자들의 값은 실제 출력 전압과 모델을 사용한 시뮬레이션 출력 전압간의 RMS(Root Mean Square) error가 최소화 되도록 결정되었다. 또한 모델의 정확성을 향상시키기 위해 회로 모델을 기반으로 한 상태 관측기가 설계되어 적용되었다. IPMC의 굽힘 센서로서의 성능을 평가하기 위하여 출력 전압으로부터 입력 굽힘 각도를 추정할 수 있는 역 모델(Inverse model)을 적용하여 성능을 평가하였으며, 상태 관측기 설계 기법을 적용하여 구해진 역 모델과의 성능 비교를 통하여 제안된 방법을 검증하였다.

2. 실험

2.1 IPMC의 제작

본 연구에서는 두께 $178\mu\text{m}$ 의 Nafion 필름을 사용하여 IPMC를 제작하였다.

필름의 양쪽 면에 Pt 전극을 도금하기 위하여 platinum ammine complex($[\text{Pt}(\text{NH}_3)_4]\text{Cl}_2$)를 사용하였다. Pt 전극을 Nafion 필름의 표면에 부착시키기 위해 Dr.Oguro에 의해서 제안된 무전해 도금 방법[11]이 사용되었으며, 무전해 도금의 절차는 다음과 같다.

1. Nafion($5\text{cm} \times 5\text{cm}$) 필름을 탈이온수와 $[\text{Pt}(\text{NH}_3)_4]\text{Cl}_2$ 를 혼합한 용액에 1시간동안 담구어 둔다. 이때 $[\text{Pt}(\text{NH}_3)_4]\text{Cl}_2$ 의 양은 최소 $4\text{mg}/\text{cm}^2$ 이상이 되도록 하며, 물의 양은 $2\text{mg Pt}/\text{ml}$ 가 되도록 준비한다.
2. 필름을 탈이온수를 사용하여 가볍게 씻은 후, 40°C 로 가열된 물속에 넣고 약 4시간에 걸쳐 60°C 까지 물의 온도를 높인다.
3. 물의 온도가 상승하는 동안 교반기를 사용하여 물을



Fig. 2. Image of IPMC sample

계속 저으면서 약 30분 간격으로 산화제인 NaBH_4 용액을 5 ml씩 넣는다.

물의 온도가 상승하면서 필름의 표면에 Pt 층이 생성되는 것을 확인할 수 있으며, 적절한 두께의 전극층이 생성될 때까지 1~3의 절차를 반복한다. Pt 도금 과정이 끝나면 $1\text{ cm} \times 4\text{ cm}$ 의 크기로 잘라 실험에 사용하였다. Fig. 2는 실험에 사용된 IPMC 샘플의 형상을 보여준다.

2.2 실험 장치의 구성

제작된 ICMP의 생성 전압을 측정하기 위해 다양한 굽힘의 각도에 따라 발생하는 전압을 측정할 수 있는 장치를 제작하였다. Fig. 3(a)는 실험 장치의 형상과 작동 메커니즘을 보여주며 Fig. 3(b)는 생성 전압의 측정 회로를 보여준다.

IPMC 굽힘의 각도는 Fig. 3(a)에서 보이는 바와 같이 스텝모터의 왕복 회전에 의해서 생성되었다. IPMC 출력 전

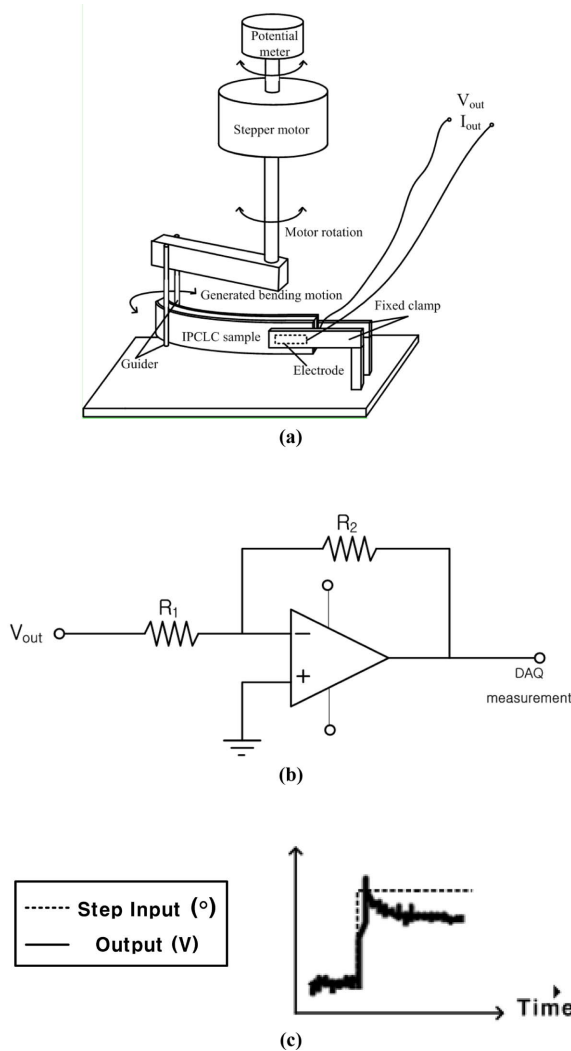


Fig. 3. Description of experimental setup: (a) Bending motion simulator, (b) voltage measurement circuit, (c) Output voltage characteristic of IPMC

압은 스텝 입력이 주어졌을 경우 피크 전압을 생성하고 뒤를 이어 일정한 시정수로 감소되는 특성을 보인다. Fig. 3(c)는 입력 굽힘 각도에 대응하는 IPMC의 출력 전압 파형의 특성을 묘사하고 있다.

본 논문에서는 IPMC로 부터의 출력 특성을 분석하기 위하여 스텝모터를 사용하여 다양한 각도($0^\circ \sim 90^\circ$)의 굽힘 입력을 인가하였으며, 이에 대응한 출력 전압을 측정하였다. 전압측정을 위해 Fig. 3(b)에 보이는 반전 증폭기 2개를 직렬로 연결하여 샘플로부터 생성되는 전압을 100배 증폭한 후 데이터 후처리 과정에서 증폭도로 나누어 기록하였다. 증폭을 위해 저항 $R_1 = 1\text{ k}\Omega$, $R_2 = 10\text{ k}\Omega$ 이 각각 사용되었다. 전압을 기록하기 위해 NI-DAQ USB 6008을 사용하여 100 Hz의 샘플링 주파수로 데이터를 수집하였으며, Matlab[®]을 사용하여 분석되었다.

3. IPMC 모델

3.1 IPMC 회로 모델

Fig. 4(a)는 IPMC의 내부 구성 요소들의 특성을 고려한 회로 모델을 보여준다. IPMC는 Nafion 필름 양면이 전극층으로 둘러싸여 있는 구조로 되어 있다. 따라서 이러한 구조적 특징은 회로 모델 속에서 커패시턴스(C)로 나타난다. R_c 는 필름 내부 이온의 이동에 영향을 미치는 저항을 나타내며, R 는 Nafion 필름 자체 저항을 나타낸다. R_{e1} 과 R_{e2} 는 표면 전극이 가지는 저항을 나타낸다. Fig. 4(a)의 회로 모델에서 V_o 를 측정하는 DAQ 장비의 입력 임피던스가 IPMC의 표면저항(R_{e1} , R_{e2})보다 훨씬 크기 때문에 회로상에서 표면저항의 영향은 미약하다. 따라서 본 연구에서는 회로 모델을 단순

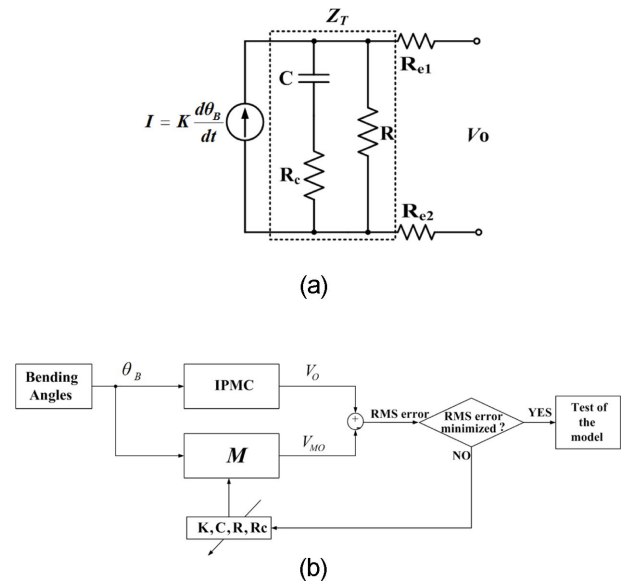


Fig. 4. Description of circuit model and parameter estimation procedure: (a) Circuit model, (b) Parameter estimation procedure

화시키기 위해 표면저항의 영향은 생략되었다.

회로 모델의 입력은 IPMC의 굽힘 각도(θ_B)로서 스텝모터의 회전 각도와 동일하며 필름의 굽힘에 의해서 발생하는 IPMC 양면 전극 사이 이온양의 편차(θ)와 비례관계로 정의하였으며 식 (1)로 표현된다.

$$q = K\theta_B \quad (1)$$

따라서 굽힘에 의해서 발생하는 전류는 식 (2)로 표현된다.

$$I = K \frac{dq}{dt} \quad (2)$$

Fig. 4(a)로부터 회로 내부의 전체 임피던스는 라플라스 변환을 통하여 식 (3)으로 표현되며,

$$Z_T = \frac{sRR_c C + R}{s(R+R_c)C + 1} \quad (3)$$

최종 출력 전압은 식 (4)로 표현된다.

$$V_o = IZ_T \quad (4)$$

회로 모델 파라미터들의 값을 추정하기 위해 RMS 에러를 최소화 하도록 파라미터들을 설정하였다. Fig. 4(b)는 파라미터 추정 절차를 도식화하여 보여준다.

3.2 출력 추정 상태관측기의 설계

상태 관측기를 사용하여 시스템의 상태공간 모델을 사용하여 내부 상태 변수들의 변화를 추정할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 상태 변수들의 추정을 위해 Fig. 5와 같은 상태 관측기의 Matlab®의 Simulink 모델이 설계되었다.

Fig. 5에서 A, B, C, D는 회로 모델의 전달함수로부터 도출된 시스템 상태 행렬들로서, 시스템의 차수가 1차이기 때문에 모두 1×1 행렬들로서 식 (5)와 같이 표현되며,

$$\begin{aligned} A &= -\frac{1}{(R+R_c)C}, \quad B = 1 \\ C &= \frac{1}{(R+R_c)C}, \quad D = \frac{RR_c}{R+R_c} \end{aligned} \quad (5)$$

시스템의 상태 방정식은 다음과 같이 정의된다.

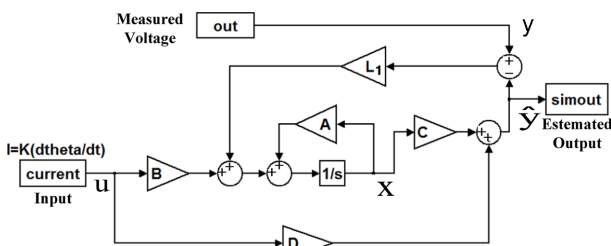


Fig. 5. State observer design to simulate sensor output

$$\begin{aligned} x' &= Ax + Bu \\ y &= Cx + Du \end{aligned} \quad (6)$$

시스템의 차수가 1차이기 때문에 가관측 행렬은 행렬 C와 동일하게 정의 되어 가관측성을 가지며, 시스템 내부 변수를 추정하는 관측기는 식 (6)으로 정의된다.

$$x' = Ax + Bu + L_1(y - \hat{y}) \quad (7)$$

식 (7)은 상태의 변화를 예측하는 예측자(Predictor)와 교정자(Corrector)로 구성되어 있으며 실제 센서의 출력(y)과 관측기로부터 추정된 출력(\hat{y}) 사이의 오차를 되먹임 함으로서 추정된 출력의 정확도를 향상시키게 된다. 오차 신호를 최소화 하는 관측기의 되먹임 이득(L_1)을 구하기 위해 극점 배치 기법이 적용되었으며 Matlab®의 'place' 함수가 사용되었다.

3.3 입력 추정 상태관측기의 설계

본 연구에서는 IPMC 센서의 출력 전압으로부터 입력 각도를 추정할 수 있는 관측기를 설계하였다.

Fig. 5의 입력 u 를 추정하기 위해서 u 를 상태변수로 시스템 행렬 (A)내부에 포함할 수 있도록 상태 행렬들을 아래와 같이 변형하였다.

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} A & B \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \bar{C} = [C \ D], \quad \bar{X} = [x \ u]^T \quad (8)$$

변형된 상태 행렬로부터 시스템의 상태 방정식은 다음과 같이 정의 된다.

$$\bar{X}' = \bar{A}\bar{X}, \quad y = \bar{C}\bar{X} \quad (9)$$

또한, 가관측성 행렬 $[\bar{C}; \bar{A}\bar{C}]$ 의 계수가 시스템의 차수와 동일하기 때문에 시스템은 가관측성을 가진다. 따라서, 변형된 상태 행렬들을 사용하여 상태변수(x)와 입력(u)를 추정하는 관측기는 다음과 같이 정의된다.

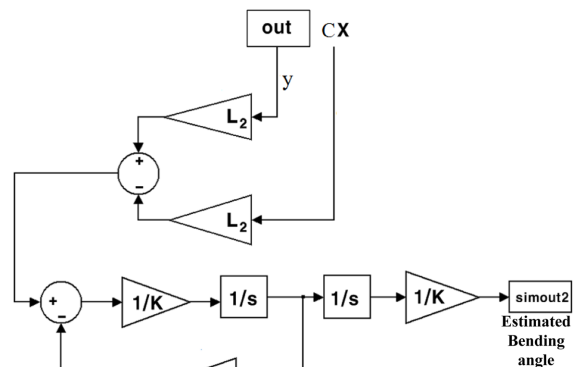


Fig. 6. State observer design to estimate input bending angle

$$\hat{x}' = \bar{A}\hat{x} + L_2[y - \bar{C}\hat{x}]I \quad (10)$$

여기서, \hat{x} 은 관측기에 의해서 추정된 \bar{x} 를 나타내며, $\hat{x} = [x^* \ u^*]^T$ 로 정의된다. I 는 단위 행렬을 나타내며, 식 (11)으로부터 시스템의 입력(u)을 추정할 수 있는 함수가 다음과 같이 유도된다.

$$u^* = L_1y - L_2Cx^* - L_2Du^* \quad (11)$$

식 (11)에서 $x^* \approx x$ 로 가정하면, 실제 센서의 출력(y)으로부터 입력(u)의 추정이 가능해진다. Fig. 6은 입력 추정을 위해 사용된 Simulink 모델을 보여준다.

4. 결 과

Fig. 7은 각각의 모델들을 사용한 출력 전압의 시뮬레이션 결과를 보여준다.

Table 1은 실제 출력과 모델들로부터의 시뮬레이션 출력 전압들 사이의 오차들과, 실제 입력 각도와 모델들을 사용하여 추정한 입력 굽힘 각도들 사이의 오차들을 보여준다.

관측기를 사용하였을 경우 회로모델을 사용하였을 경우에 비해 실제 출력 전압과 시뮬레이션 출력전압 사이의 오차가 64% 정도 감소하였다. 이것은 관측기 내부의 되먹임 이득 L_1 의 영향 때문이며 설계 과정에서 관측기를 포함한 시스템의 극점이 라플라스 영역에서 안정영역에 위치하여 시뮬레이션 출력전압 \hat{y} 이 실제 출력전압 y 를 추종하도록

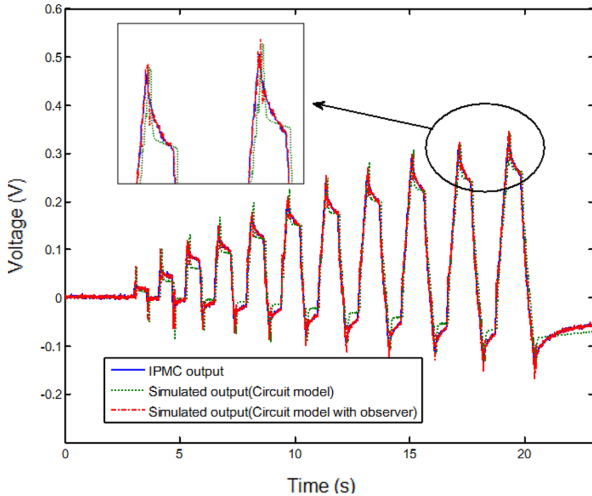


Fig. 7. The comparison of model performances to simulate output voltage

Table 1. RMS errors between the real and simulated signals

	Sim. Output (Cir. Model)	Sim. Output (Obs. Model)	Est. Angle (INV Cir.Model)	Est. Output (Obs. Model)
RMS error	0.0212	0.0077	3.3757	0.7913

설계가 되었기 때문이다.

Fig. 8은 회로 모델의 역 전달함수와 관측기 설계 기법을 사용하여 구해진 모델들의 입력 굽힘 각도 추정 성능을 비교한 결과를 보여준다. 관측기 설계기법을 적용하여 구해진 모델을 사용하였을 경우 역 회로모델을 사용하였을 경우에 비해 실제 입력 굽힘 각도와 추정된 굽힘 각도 사이의 오차가 23% 정도 감소하였다.

Fig. 9는 상태 관측기 설계 기법을 적용한 모델을 사용하여 임의의 굽힘 입력을 추정한 결과를 보여준다. 결과로부터 설계된 모델이 20° 이하의 입력 굽힘 각도에 대해서는 큰 오차 없이 각도를 추정함을 볼 수 있다. 그러나 20° 이상의 큰 굽힘 각도에 대해서는 입력 각도가 정적 상태인 경우 상대적으로 큰 오차가 발생함을 볼 수 있다.

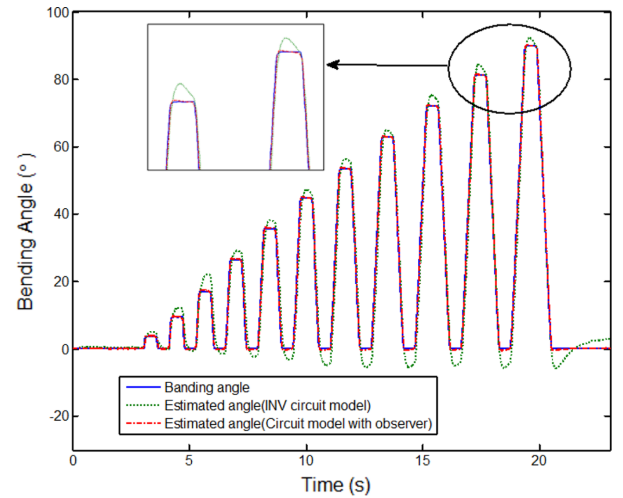


Fig. 8. The comparison of model performances to estimate input bending angle

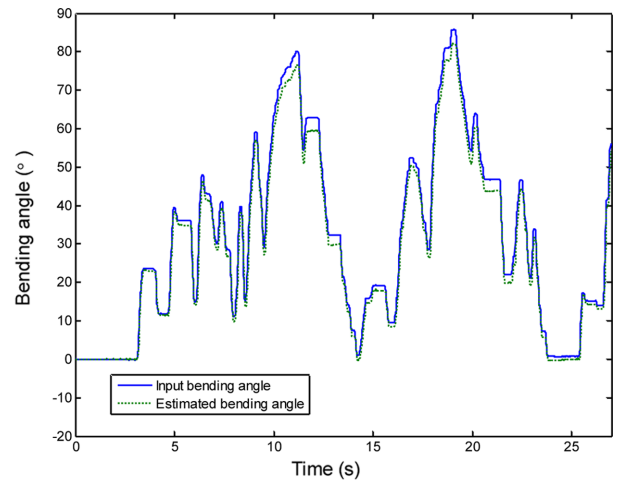


Fig. 9. The performance test of model with state observer design technique to estimate input arbitrary bending motion

5. 결 론

본 논문에서는 실제 적용에 용이한 회로 모델을 사용하여 입력 굽힘 각도에 대응한 IPMC의 출력 전압을 시뮬레이션하고, 측정된 출력으로부터 입력 굽힘 각도를 추정할 수 있는 모델을 설계하여 그 성능을 시험하였다.

설계 과정에 있어서 회로 모델의 상태 관측기 설계 기법이 적용되었으며, 단순 모델을 사용할 경우의 출력 시뮬레이션 및 입력 추정 성능과 비교하여 모델링에 있어서 상태 관측기 설계 기법 적용의 우월성을 검증하였다.

관측기의 설계 기법은 제어 공학의 적용 분야에 있어서 실제 시스템 내부의 상태의 측정이 어려울 경우 시스템 모델을 사용하여 내부 상태의 변화를 추정하는 방법으로 실제 상태와 추정된 상태의 오차를 최소화 할 수 있는 방법이다.

기존 IPMC의 출력 특성을 시뮬레이션 할 수 있는 모델들이 복잡한 물리적 수식으로 표현되어 실제 적용에 있어서 어려움이 있는 반면 본 연구에서 제안한 방법은 IPMC를 단순한 회로 모델을 사용하여 표현하였으며 이로부터 발생한 오차가 관측기 설계 기법에 의해서 보상되어 최소화 되었다. 또한 입력 굽힘을 추정할 수 있는 모델 또한 단순 역 모델을 사용하였을 경우에 비해 성능이 향상되었음을 확인할 수 있었다.

향후 연구를 통하여 생성 전압 시뮬레이션 모델을 실제 신재생에너지 적용 분야에 적용하고 외부 물리적 자극에 대응한 출력을 예측하는데 적용하여 모델의 정확성을 높여나갈 계획이다. 또한 입력 굽힘 각도를 추정하는 모델 또한 IPMC를 굽힘 센서로서 활용할 경우 그 활용 가치가 크기 때문에 부드러운 표면의 굽힘 정도나 의용 분야 적용 등 다양한 분야에서 활용 가치가 클 것으로 예상된다.

후 기

본 연구는 부경대학교 자율창의학술연구비 (2014년)에 의하여 연구되었음.

REFERENCES

1. Sodano, H.A. and Inman, D.J., "Generation and Storage of Electricity from Power Harvesting Devices," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 16, No. 1, 2005, pp. 67-75.
2. Nemat-Nasser, S., "Micromechanics of Actuation of Ionic Polymer-Metal Composites," *Journal of Applied Physics*, Vol. 19, No. 1, 2002, pp. 2889-2915.
3. Aureli, M., Prince, C., Porfiri, M., and Peterson, S. D., "Energy Harvesting from Base Excitation of Ionic Polymer Metal Composites in Fluid Environments," *Smart Materials and Structures*, Vol. 19, No. 1, 2010, 015003.
4. Giacomello, A. and Porfiri, M., "Underwater Energy Harvesting from A Heavy Flag Hosting Ionic Polymer Metal Composites," *Journal of Applied Physics*, Vol. 109, No. 8, 2011, pp. 84903-84903.
5. Brufau-Penella1, J., Puig-Vidal1, M., Giannone, P., Graziani, S., and Strazzeri, S., "Characterization of the Harvesting Capabilities of An Ionic Polymer Metal Composite Device," *Smart Materials and Structures*, Vol. 17, No. 1, 2008, 15009.
6. Kim, H.I., Kim, D.K., and Han, J.H., "A Study on Mechanical Properties of IPMC Actuators," *Journal of the Korean Society for Composite Materials*, Vol. 20, No. 3, 2007, pp. 50-54.
7. Biddiss, E. and Chau, T., "Electroactive Polymeric Sensors in Hand Prostheses: Bending Response of An Ionic Polymer Metal Composite," *Medical Engineering & Physics*, Vol. 28, No. 6, 2006, pp. 568-578.
8. Farinholt, K. and Leo, D., "Modeling of Electromechanical Charge Sensing in Ionic Polymer Transducers," *Mechanics of Materials*, Vol. 36, No. 5, 2004, pp. 421-433.
9. Chen, Z., Tan, X., Will, A., and Ziel, C., "A Dynamic Model for Ionic Polymer-Metal Composite Sensors," *Smart Materials and Structures*, Vol. 16, No. 4, 2007, pp. 1477-1488.
10. Paquette, W.J., Kim, J.K., Nam, J.D., and Tak, Y.S., "An Equivalent Circuit Model for Ionic Polymer-Metal Composites and Their Performance Improvement by A Clay-Based Polymer Nano-Composite Technique," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 14, 2003, pp. 633-642.
11. http://ndeaa.jpl.nasa.gov/nasa-nde/lommas/eap/IPMC_Prep-Procedure.htm