

모델 기반의 이온 전도성 고분자 필름 금속 복합체의 표면적 증가에 따른 전압생성 특성 변화에 관한 연구

박기원*[†] · 김동현**

Model Based Investigation of Surface Area Effect on the Voltage Generation Characteristics of Ionic Polymer Metal Composite Film

Kiwon Park*[†], Dong Hyun Kim**

ABSTRACT: IPMC is composed of thin ion conductive polymer film sandwiched between metallic electrodes plated on both surfaces. Ionic Polymer-Metal Composite (IPMC) generates voltages when bent by mechanical stimuli. IPMC has a potential for the variety of energy harvesting applications due to its soft and hydrophilic characteristics. However, the large-scale implementation is necessary to increase the output power. In this paper, the scale-up of surface area effect on voltage generation characteristics of IPMC was investigated using IPMC samples with different surface areas. Also, a circuit model simulating both the output voltage and its offset variations was designed for estimating the voltages from IPMC samples. The proposed model simulated the output voltages with offsets well corresponding to various frequencies of input bending motion. However, some samples showed that the increase of error between real and simulated voltages with time due to the nonlinear characteristic of offset variations.

초 록: 이온성 고분자 복합물인 IPMC(Ionic Polymer Metal Composite)는 얇고 유연한 고분자 필름의 양면에 백금 소재의 전극층이 도금된 형태로 구성되어 있다. IPMC는 외부 물리적 자극에 대응하여 전기적 에너지를 발생시키는 특성을 가지고 있기 때문에 주변환경에서 발생하는 진동으로부터 에너지를 획득하는데 응용될 수 있어 신재생에너지 획득 소자로 큰 잠재력을 가지고 있다. 그러나 실용적인 에너지 획득을 위해서는 큰 면적의 IPMC 집적 기술이 필요하다. 본 논문에서는 IPMC의 면적 증가에 따른 출력 전압의 특성 변화에 대한 연구를 수행하기 위하여 다른 면적의 IPMC 샘플들이 사용되었다. 또한 IPMC에서 발생하는 전압과 오프셋 현상을 시뮬레이션 할 수 있는 회로 모델을 사용하여 출력 전압의 추정에 사용하였다. 본 논문에서 제안된 회로 모델이 면적 변화에 따른 출력 전압을 비교적 잘 추정함이 검증되었다.

Key Words: 이온 전도성 금속 복합체(Ionic polymer-metal composite), 회로 모델(Circuit model), 출력 전압 추정(Output voltage estimation)

1. 서 론

지구 온난화 문제가 심각해지고 있는 가운데 주변 환경으로부터 다양한 방법으로 에너지를 획득할 수 있는 신재

생에너지기술에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[1-5]. 현재 태양광, 풍력, 파력 등의 신재생에너지를 획득하는 기술들은 기존의 화석 연료로부터 에너지를 획득하는 기술들에 비해서 낮은 에너지 생산성을 보이고 있지만, 무제

Received 21 November 2016, received in revised form 27 December 2016, accepted 29 December 2016

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

**Department of Mechanical Design Engineering, Youngsan University

한적인 청정 에너지원으로서 환경오염과 탄소 배출량을 줄일 수 있는 큰 장점을 가지고 있다[6,7].

최근 신재생에너지획득에 관한 연구들 중에서 기능성 고분자 복합물 (EAP; Electro Active Polymer)을 사용하여 물리적인 에너지를 전기에너지로 전환하여 활용하는 기술에 관한 많은 연구들이 진행되고 있다[6,7]. 이온성 EAP로 분류되는 IPMC는 얇고 부드러운 이온 전도성 고분자 물질인 Nafion[®] 필름 양면에 금속 전극을 입힌 형태를 가진다. 이러한 IPMC의 부드러운 성질을 활용하여 수중조류의 흐름에 대응하는 에너지획득에 관한 연구가 진행되었으며[6], 캔틸레버 빔이론(Cantilever beam theory)을 적용하여 IPMC의 출력 전압 예측 모델 개발에 관한 연구가 진행되었다[7].

IPMC 일반적으로 Platinum을 사용한 무전해 도금과정을 통하여 필름의 표면에 전극을 형성시킨다[8-11]. Fig. 1은 IPMC의 형상을 보여준다.

Nafion 필름은 다공성 소재로서 물을 잘 흡수하며 내부를 구성하고 있는 분자 사슬들의 구조가 음이온(SO₃⁻)의 형태로 끝나기 때문에 양이온만을 내부로 끌어당기는 특성을 가진다. Fig. 1(c)는 Nafion 필름의 단일 분자사슬 구조를 보여준다[10,11].

IPMC는 물속에서 주변 환경에 따라 양이온들을 물 분자와 같이 내부로 흡수한다. 수소이온(H⁺)의 경우 Nafion 필름의 내부에서 물분자와 결합하여 수화된 형태(H(H₂O)₄⁺)로 존재하며 내부 분자사슬의 음이온과 결합하여 전기적 평형 상태를 이루게 된다[12-14].

Fig. 2는 IPMC의 전압생성 원리를 보여준다. 물리적 자극이 가해지지 않을 경우(Fig. 2(a)) IPMC 내부의 수화된 양이온들은 내부 음이온들과 전기적인 평형상태를 유지하며 존재한다. 이때 Nafion 필름 양 극단의 이온량의 불균형은 측정 초기의 오프셋 전압(A in Fig. 2(d))으로 나타나게 된다. 오프셋 전압의 발생 원인은 아직까지 명확하게 규명되지 않

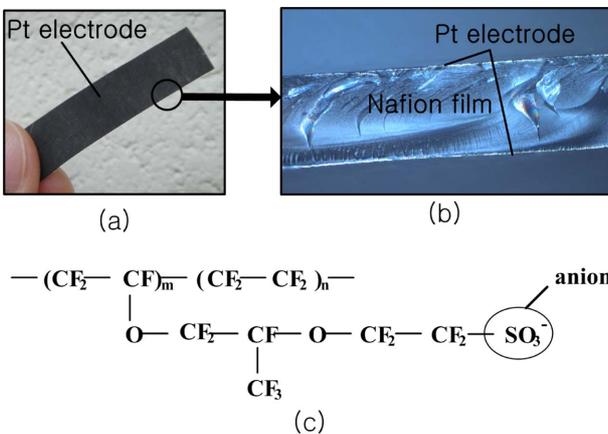


Fig. 1. Image of IPMC and structure of Nafion film: (a) Surface image of IPMC, (b) Cross sectional image of IPMC, (c) Structure of Nafion film

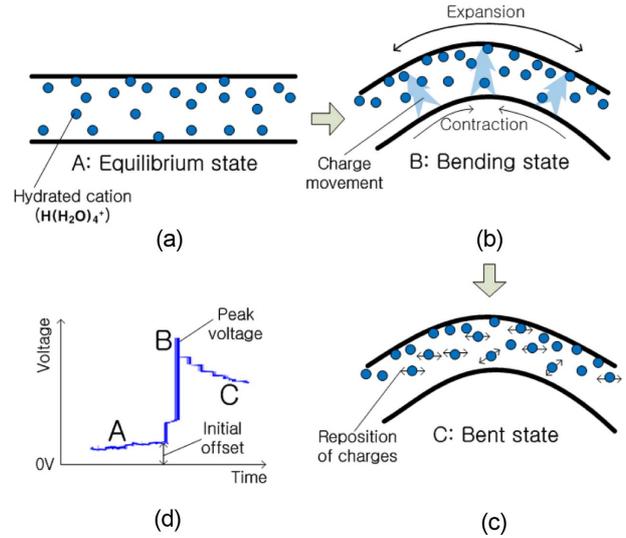


Fig. 2. Voltage generation mechanism of IPMC: Description of inside charges in (a) Equilibrium state, (b) Bedning state, (c) Bent state, and (d) Wave form of output voltages

고 있지만, Nafion 필름의 구조적인 불균일성 그리고 무전해 도금과정에서 화학반응에 의해 생성되는 불균일한 표면 전극의 두께와 같은 이유로 인한 양 전극단 내부 이온량의 편차에 의해 발생하는 것으로 사료된다.

외부 힘에 의해서 IPMC가 굽혀질 경우(Fig. 2(b)) IPMC 내부 압력 변동에 의해서 수축면에서 팽창면으로 양이온들이 이동하게 된다. 이러한 양이온의 이동 현상은 IPMC의 굽힘 시에 표면전극 양단에서 측정되는 피크전압(B in Fig. 2(d))으로 나타나게 된다. IPMC가 굽혀진 상태를 유지할 경우(Fig. 2(c)) 팽창되는 면의 내부에서는 음이온들과 양이온들 사이에 작용하는 인력과 척력에 의하여 전기적 평형상태에 도달하기 위한 양이온들의 재이동이 발생한다. 이러한 현상은 측정전압의 지수함수적인 감소현상(C in Fig. 2(d))으로 나타나게 된다.

IPMC에서 생성되는 출력 전압의 시뮬레이션을 위한 모델링에 관한 다양한 연구가 진행되었다. 관련 연구들에서는 선형모델의 도출을 위해 IPMC에서 발생하는 내부 전하들의 이동량이 굽힘 각도 혹은 거리에 비례한다고 가정하고 있다[12-14]. 또한 내부 전하들의 이동에 의해서 생성되는 전류가 전파되는 IPMC의 물리적 구조를 표현하기 위해 빔 이론과 RC 회로로 구성된 모델에 관한 연구가 진행되었다[15,16].

본 논문에서는 이온성 고분자 복합체(IPMC; Ionic Polymer Metal Composite)의 표면적 변화에 따른 출력전압의 변화를 실험을 통하여 측정하고, 이를 추정할 수 있는 회로 모델을 설계하였다. 특히 IPMC의 생성 전압에서 발생하는 오프셋 변동의 영향을 고려할 수 있는 모델을 개발하였으며 이를 사용하여 각기 다른 면적을 가진 IPMC 샘플에서 측정되는 출력 전압의 시뮬레이션을 수행하였다. 또한 IPMC

의 면적 증가에 따른 모델의 변수값을 Matlab®을 사용하여 찾고 이를 사용한 시뮬레이션 결과를 통하여 모델의 효용성을 검증하였다.

2. 실험

2.1 IPMC의 제작

Nafion 필름에 Pt 전극층을 형성시키기 위하여 무전해 도금법을 사용하였다. IPMC 제작을 위해 두께 178 μm의 Nafion 필름을 사용하였으며, 무전해 도금과정에서 platinum ammine complex ([Pt(NH₃)₄]Cl₂)를 사용하였다.

IPMC 제작을 위해 Pt를 사용한 무전해 도금법[16]을 사용하였으며, 도금 절차는 다음과 같다.

1. 탈이온수와 [Pt(NH₃)₄]Cl₂를 혼합한 용액을 준비하고 탈이온수를 사용하여 세척한 Nafion (6 cm × 6 cm) 필름을 준비한 용액에 1시간이상 담가 둔다. 혼합 용액에서 [Pt(NH₃)₄]Cl₂의 양은 최소 Nafion 필름의 4 mg/cm² 이상이 되도록 하며, 물의 양은 2 mg Pt/ml가 되도록 준비한다.
2. 필름을 탈이온수를 사용하여 가볍게 세척하고, 40°C로 가열된 탈이온수에 담근다. 약 4시간에 걸쳐 60°C까지 물의 온도를 천천히 높인다.
3. 교반기를 사용하여 물의 온도가 상승하는 동안 물을 계속 저으면서 산화제인 NaBH₄ 용액을 약 30분 간격으로 5 ml씩 넣는다.

위의 절차를 2~3차례 반복하여 표면 전극의 전도성을 향상시킬 수 있다. 본 연구에서는 IPMC의 표면적 변화에 따른 출력전압의 변동을 측정하기 위하여, 0.5 cm × 5 cm, 1 cm × 5 cm, 1.5 cm × 5 cm 크기의 3가지 샘플을 사용하여 실험을 수행하였다. Fig. 3은 준비된 샘플의 형상을 보여준다.

2.2 IPMC의 생성 전압 측정

본 논문에서는 IPMC의 출력전압 특성을 분석하기 위하여 스텝모터의 회전에 의해서 다양한 주파수의 굽힘을 인가할 수 있는 장치를 제작하였다. Fig. 4(a)는 실험 장치의 형상과 작동 메커니즘을 보여주며 Fig. 4(b)는 생성 전압의 측정 회로를 보여준다.

굽힘 입력과 IPMC 출력 전압 사이의 정특성과 동특성을

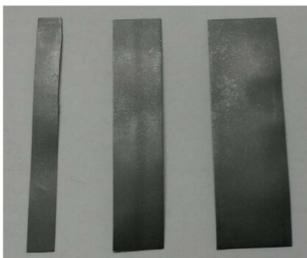


Fig. 3. Image of IPMC samples with different surface areas

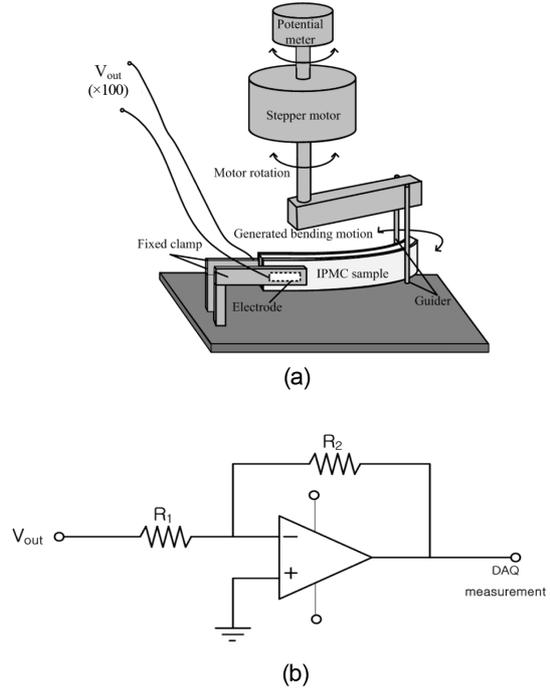


Fig. 4. Description of experimental setup: (a) Bending motion simulator, (b) Voltage measurement circuit

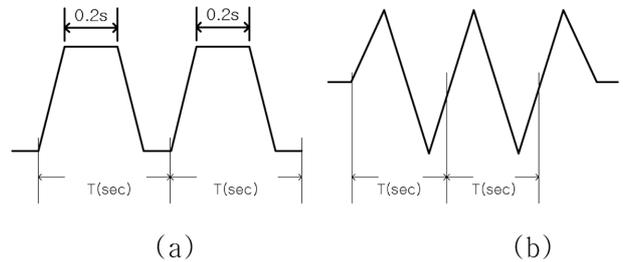


Fig. 5. Description of input bending wave form: (a) Bending wave form used for static characteristic test and (b) for dynamic characteristic test

분석하기 위하여 다양한 주파수의 사각파형과 삼각파형의 굽힘 동작을 Fig. 4(a)의 장치를 사용하여 생성하고 IPMC에 인가하였다.

Fig. 5(a)는 출력전압의 정특성 실험을 위해 IPMC에 인가된 굽힘 파형을 보여준다. 스텝모터회전에 의한 굽힘동작 후에 0.2초간(0.2 s in Fig. 5(a)) 정지하게 된다. Fig. 5(b)는 동특성 실험에 사용된 굽힘파형을 보여준다. 정특성 실험과 달리 정지동작 없이 연속적인 삼각파형이 IPMC 샘플에 인가되었다. 정특성 실험을 위해 Fig. 5(a)에 묘사된 파형의 굽힘 주기를 주파수 0.04 Hz, 0.11 Hz, 0.14 Hz, 0.18 Hz, 0.2 Hz로 변화시켜 인가하였으며, 동특성 실험을 위해 Fig. 5(b)에 묘사된 파형의 굽힘 주기를 주파수 0.05 Hz, 0.15 Hz, 0.23 Hz, 0.3 Hz, 0.5 Hz로 변화시켜 각각 인가하였다. 입력 파형의 주파수(Hz)는 입력 파형의 주기(T)를 바탕으로 1/T(Hz)로 계

산되었습니다.

전압측정을 위해 Fig. 4(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

Fig. 6는 IPMC가 외부 자극에 의해서 굽혀졌을 때 발생하는 출력 전압의 추정을 위해 사용된 회로 모델을 보여준다. 앞서 설명된 바와 같이 굽힘의 발생 시에 IPMC의 내부에서는 물분자와 결합된 양이온들의 이동이 발생하게 된다. 이로 인하여 내부 지점들 사이에 발생하는 전하량의 불균형 현상은 충전에 의한 콘덴서 양단의 전하량의 불균형 현상과 유사하다. 또한 Nafion 필름을 구성하는 분자 사슬 구조에 존재하는 음이온(SO_3^-)들과 양이온들간에 작용하는 인력 그리고 동일 극성의 이온들 사이에 작용하는 척력의 상호작용에 의하여 내부적으로 전기적인 평형상태에 도달하는 과정에서 나타나는 출력 전압의 지수 함수적인 감소 현상은 콘덴서와 직 병렬로 연결된 저항들로 구성된 RC 회로의 방전현상으로 그 특성을 표현할 수 있다. 따라서 IPMC에서 발생하는 출력 전압은 구조적 특성을 표현하는 전기

소자들로 구성된 회로 모델을 사용하여 추정할 수 있으며 본 논문에서는 Fig. 6의 회로 모델을 사용하여 출력 전압의 추정 성능에 관한 연구를 수행하였다.

IPMC의 회로 모델은 전류원과 병렬로 연결된 두개 가지들을 구성하고 있는 복합 임피던스 성분들로 구성되어 있다. 전류원은 내부에서 발생하는 전하들의 움직임이 IPMC의 굽힘의 각도에 비례한다는 가정($q = K_b B$)으로부터 발생 전하량의 순간변화율로 정의되었다. 전류원은 굽힘이 발생하는 IPMC 내부의 구조적 특성을 묘사하기 위하여 직렬로 연결된 3개의 RC 회로와 병렬로 연결되어 있다. 각각의 RC 회로들은 IPMC의 Nafion 필름의 중간층 및 표면층들을 묘사하고 있다. RC 회로에서 C는 Nafion 필름의 내부와 양쪽 표면층에서 각각 발생하는 전하량의 불균형 현상에 의한 충전 현상을 묘사하며, R_c 와 R 은 각각 전하들의 이동을 방해하는 저항성분과 Nafion의 필름 소재의 저항성분을 표현한다. 3개의 RC 회로들은 표면전극의 저항성분 R_c 와 필름 소재의 저항성분 R_X 에 의해서 직렬로 연결되어 있다. 전류원과 병렬로 연결된 직렬 RC 회로들에 의해서 생성된 전압은 최종적으로 표면 전극과 닿아 있는 클램프 전극을 통하여 측정되며, C_m 는 고정되어 있는 IPMC의 측정단 내부를 표현하고 있다.

Fig. 6의 회로 모델로부터 라플라스 변환을 통한 입력(I)과 출력(V_{C_m})간의 전달함수 표현은 식 (1)로 표현된다.

$$\frac{V_{C_m}}{I} = \frac{Z_T}{1 + Z_T C_m s} \tag{1}$$

여기서 Z_T 는 회로의 RC 회로 및 저항들의 직렬 총임피던스이다. 앞서 설명된 바와 같이 지속적인 굽힘에 따라 IPMC에서 생성되는 전압에서 오프셋 변동이 발생한다. 오프셋 변동은 Nafion 필름 및 도금법에 의해서 생성되는 표면 전극의 불균일한 구조와 내부 음이온과 결합되지 않은 양이온들의 움직임 등의 영향에 의한 것으로 추정된다. 본 논문에서는 C_m 에 축적되는 비선형적인 오프셋 변동의 영향을 표현하기 위하여 R, L, C 소자로 구성된 별도의 회로를 사용하였다. Fig. 7는 오프셋 변동을 고려하기 위한 R, L, C 회로를 보여준다.

여기서 전압원 V_s 는 식 (2)로 정의된다.

$$V_s = I Z_T \tag{2}$$

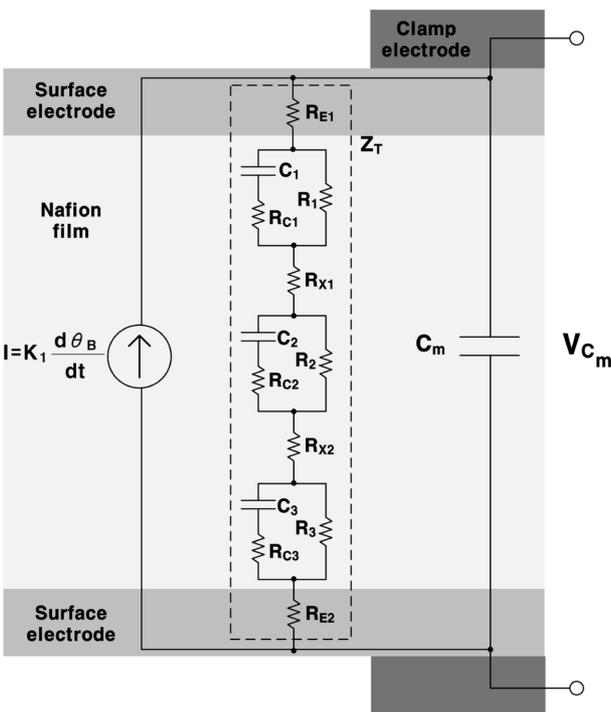


Fig. 6. Circuit model of IPMC voltage generator

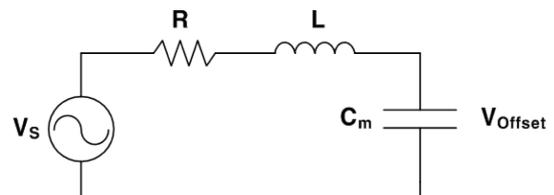


Fig. 7. Circuit model for offset voltage simulation

따라서, Fig. 7의 회로 모델로부터 입력(I)과 오프셋 전압 (V_{offset})간의 전달함수 표현은 식 (3)로 표현된다.

$$\frac{V_{\text{offset}}}{I} = \frac{\frac{1}{LC_m}Z_T}{s^2 + \frac{R}{L}s + \frac{1}{LC_m}} \quad (3)$$

본 논문에서는 파라미터 추정 절차의 간소화를 위해 식 (3)을 식 (4)로 근사화하여 연구를 수행하였다.

$$\frac{V_{\text{offset}}}{I} = \frac{K_2 Z_T}{(s+r_1)(s+r_2)} \quad (4)$$

따라서, 오프셋의 변동을 고려한 최종 생성 전압은 식 (5)로 표현된다.

$$V_{\text{out}} = V_m + V_{\text{offset}} \quad (5)$$

본 논문에서는 회로모델의 직병렬 합성 임피던스 계산을 통한 전달함수 도출을 위해 Matlab[®]의 Symbolic Math Toolbox를 사용하였으며, 파라미터값들의 추정을 위해 Parameter Estimation Toolbox를 사용하였다.

4. 결 과

Fig. 8은 굽힘에 대응한 IPMC 출력 전압의 정특성 실험 결과를 보여준다. 오프셋의 변동을 고려한 모델의 시뮬레이션 결과의 경우 굽힘에 대응한 오프셋의 변동을 추정함을 볼 수 있다. 반면에 오프셋의 변동을 고려하지 않는 모델의 경우 굽힘이 반복될수록 증가하는 오프셋 편차를 시뮬레이션하지 못함을 볼 수 있다. Table 1에서는 시뮬레이션에 사용된 파라미터 값들을 보여준다.

Fig. 9는 IPMC 출력 전압의 동특성 실험 결과를 보여준다. 실제 출력 파형의 시뮬레이션을 위해 Table 1의 변수 값

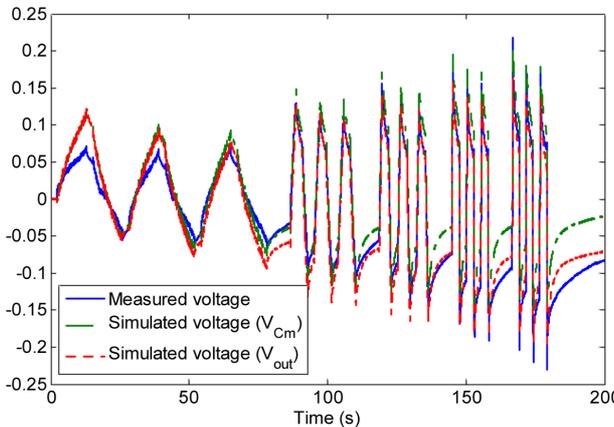


Fig. 8. Real and simulated output voltage corresponding to the static bending motion

들이 사용되었다. 본 연구에서는 변수 추정 절차의 간소화를 위해 Table 1의 $C_1 \sim R_{e2}$ 의 변수 값들은 정특성 실험에서 구해진 동일한 값들을 사용하였으며 나머지 C , K_1 , K_2 , a , b 의 변수들에 대한 추정 절차를 수행하였다.

Fig. 9(a)는 Fig. 3에 보이는 $0.5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$ 크기의 IPMC 샘플로부터 굽힘에 대응하여 측정된 실제 출력 전압과 회로 모델을 사용한 시뮬레이션 출력 전압의 파형을 보여주며, Fig. 9(b),(c)는 각각 $1 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$, $1.5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$ 크기의 샘플

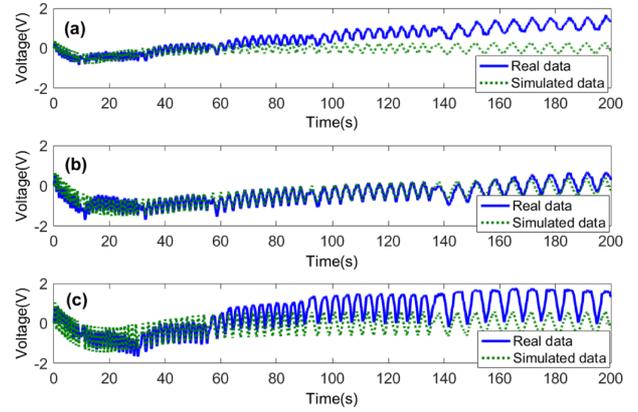


Fig. 9. Real and simulated output voltage corresponding to the dynamic bending motion, (a) $0.5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$ size sample, (b) $1 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$ size sample, (c) $1.5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$ size sample

Table 1. Estimated parameter values

Sample size	C(F)	Static test		Dynamic test	
		0.5 cm × 5 cm	0.5 cm × 5 cm	1 cm × 5 cm	1.5 cm × 5 cm
	4.29×10^{-4}	1.01×10^{-3}	2.06×10^{-4}	8.95×10^{-4}	
	4.58×10^{-5}	2.06×10^{-6}	3.36×10^{-6}	5.19×10^{-6}	
	1.95×10^{-4}	0.40	0.35	0.13	
	2.22×10^{-4}	0.14	0.09	0.12	
	2.22×10^{-4}	0.22	0.39	0.12	
Parameter values	C_1 (F)	0.01			
	R_1 (Ω)	36.38			
	R_{C1} (Ω)	10.36			
	C_2 (F)	0.01			
	R_2 (Ω)	48.85			
	R_{C2} (Ω)	60.94			
	C_3 (F)	0.01			
	R_3 (Ω)	36.38			
	R_{C3} (Ω)	10.36			
	R_{X1} (Ω)	8.01			
	R_{X2} (Ω)	17.65			
	R_{e1} (Ω)	9.82			
R_{e2} (Ω)	7.56				

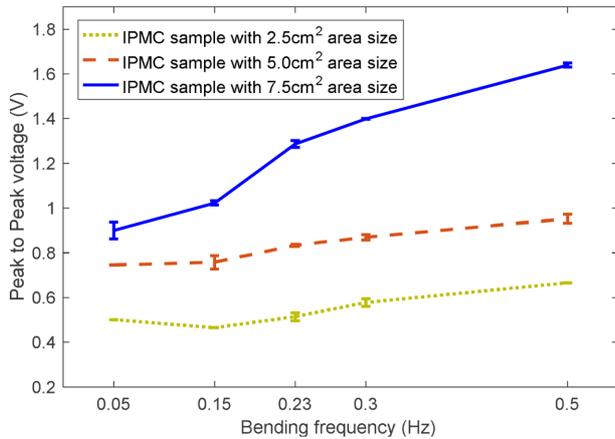


Fig. 10. Peak-to-Peak voltage variations corresponding to the area variations under the stimuli of bending motion

들로부터 측정된 전압 파형과 시뮬레이션 파형을 보여준다.

Fig. 9로부터 IPMC 샘플들의 폭의 변화에 따른 면적 증가에 따라 IPMC 생성 전압이 증가함을 볼 수 있다. 결과로부터 1 cm × 5 cm 샘플의 시뮬레이션 결과의 오차가 가장 작았으며, 나머지 2가지 샘플들의 출력 파형 시뮬레이션 결과에서는 굽힘이 지속될수록 오프셋 오차가 점점 증가함을 볼 수 있다.

Fig. 10은 IPMC의 실험에 사용된 IPMC 샘플들의 면적 변화에 따른 출력 전압의 변화를 보여준다. 2.5 cm², 5.0 cm², 7.5 cm²의 면적을 가지는 샘플들 모두 주파수 증가에 대응하여 출력 전압의 크기가 증가하였다. 또한 샘플의 면적이 증가함에 따라 출력 전압의 크기가 증가함을 볼 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 무전해 도금법을 사용하여 IPMC를 제작하고 각각 다른 면적의 IPMC 샘플들에서 생성되는 전압을 시뮬레이션 할 수 있는 회로 모델에 대한 연구 결과를 보여준다. 연구를 통하여 출력전압에서 발생하는 오프셋의 변동을 고려할 수 있는 모델을 설계하였으며, 실제 파형과 모델의 시뮬레이션 결과들의 비교를 통해 그 성능을 검증하였다. 또한 IPMC의 면적 증가에 따른 출력 전압 파형의 변화를 실험을 통해 확인하고 회로 모델을 적용하여 각각의 전압 파형에 대한 시뮬레이션 성능을 시험하였다. 결과로부터 출력 전압의 정특성 및 동특성 실험 파형과 오프셋 변동의 시뮬레이션에 있어서, 오프셋 변동을 고려한 모델이 그렇지 않은 모델에 비해 적은 오차를 보였으며 출력 파형을 비교적 잘 추정하였으나 특정 IPMC 샘플들의 출력 전압신호들을 추정함에 있어서는 비선형적으로 변화하는 오프셋 변동으로 인하여 측정시간이 길어질수록 오차가 커지는 한계를 보였다.

향후 지속적인 연구를 통하여 다양한 물리적 자극에 대

응한 출력을 예측하는데 적용하고 모델의 정확성을 높여 나갈 계획이다. 동시에 IPMC의 출력 예측을 위해 환경적 변수들을 고려한 모델 개발의 연구를 수행할 예정이다. EAP의 한 종류인 IPMC는 부드럽고 친수성 소재이기 때문에 앞으로 신재생에너지 획득을 위해 다양한 분야에서 활용 가치가 클 것으로 예상된다.

후 기

이 연구는 2016년 한국연구재단의 신진연구자지원사업(과제번호:2016R1C1B1012828)과 2016년도 영산대학교 교내연구비의 지원을 받아 수행되었습니다.

REFERENCES

- Falnes, J., "Ocean Waves and Oscillating Systems", Cambridge University Press, Cambridge(UK), 2002.
- Cruz, J., Ed., "Ocean Wave Energy: Current Status and Future Perspectives", Springer, Berlin(Germany), 2008.
- Salter, S.H., "World Progress in Wave Energy", *J. Ambient Energy*, Vol. 10, No. 1, 1989, pp. 3-24.
- Evans, D.V., "Power from Water Waves", *Fluid Mechanics*, Vol. 13, 1981, pp. 157-187.
- Sjolte, J., Tjensvoll, G., and Molinas, M., "Power Collection from Wave Energy Farms", *Appl. Sci.*, Vol. 3, 2013, pp. 420-436.
- Aureli, M., Prince, C., Porfiri, M., and Peterson, S., "Energy Harvesting from Base Excitation of Ionic Polymer Metal Composites in Fluid Environments", *Smart Materials and Structures*, Vol. 19, No. 1, 2009, 015003.
- Brufau-Penella, J., Puig-Vidal, M., Giannone, P., Graziani, S., and Strazzeri, S., "Characterization of the Harvesting Capability of an Ionic Polymer Metal Composite Device," Vol. 70, No. 1, 2008, 015009.
- Park, K., Yoon, M.K., Lee, S., Choi, J., and Thubrikar, M., "Effects of Electrode Degradation and Solvent Evaporation on the Performance of Ionic Polymer-metal Composite Sensors," *Smart Materials and Structures*, Vol. 19, No. 1, 2010, 075002.
- Nemat-Nasser, S., "Micromechanics of Actuation of Ionic Polymer-Metal Composites," *Journal of Applied Physics*, Vol. 19, No. 1, 2002, pp. 2889-2915.
- Shainpoor, M., and Kim, K.J., "Ionic Polymer-Metal Composites: I. Fundamentals," *Smart Materials and Structures*, Vol. 10, 2001, pp. 819-833.
- Kim, K.J., and Shainpoor, M., "Ionic Polymer-Metal Composites: II. Manufacturing Techniques," *Smart Materials and Structures*, Vol. 12, 2003, pp. 65-79.
- 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.
- 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.

14. 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, 1477.
15. 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", *J. Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 14, 2003, pp. 633-642.
16. Park, K., Lee, H.K., and Kim, M.S., "State Observer Based Modeling of Voltage Generation Characteristic of Ionic Polymer Metal Composite," *The Korean Society for Composite Materials*, Vol. 28, No. 6, 2015, pp. 383-388.