

전기활성 Poly(2-acrylamido-2-methylpropanesulfonic acid) 고분자 겔 구동기의 합성 및 특성분석

송영진 · 심우선 · 김홍경 · 김학길**** · 최혁렬**

김훈모** · 전재욱*** · 이영관* · 남재도 · 이두성†

기능성 고분자 신소재 연구센터, 성균관대 고분자공학과, *화학공학과, **기계공학과,

전기전자컴퓨터공학과, *(주)엔바이오넷

(2001년 5월 16일 접수)

Synthesis and Characterization of Electro-Active Poly(2-acrylamido-2-methylpropanesulfonic acid) Polymer Gel Actuator

Y. J. Song, W. S. Shim, H. K. Kim, H. K. Kim****, H. R. Choi**, H. M. Kim**, J. W. Jeon***

Y. K. Lee*, J. D. Nam, and D. S. Lee†

Center for Advanced Functional Polymers, Department of polymer Science and Engineering, *Chemical Engineering,

Mechanical Engineering, and *Electronic Computer Engineering,

Sungkyunkwan University, Suwon, Kyungki 440-746, Korea

****Enbionet. Co., Ltd

†e-mail : dslee@skku.ac.kr

(Received May 16, 2001)

요약: *N,N*-Methylenebisacrylamide (MBAA)로 가교 결합된 electro-active 고분자 (EAP) (poly(2-acrylamido-2-methylpropane sulfonic acid), PAMPS) 겔을 수용액 상에서 potassium persulfate를 개시제로 하여 라디칼 중합시켜 제조하였다. PAMPS 겔의 구동성을 부여하기 위하여 계면활성제로 팽윤하며 치환하였다. 계면활성제가 치환된 PAMPS 겔은 용액내의 인가된 전압하에서, 그 전기장 변화에 의해 큰 변위를 나타내는 구동특성을 보였다. PAMPS 겔은 빠른 응답속도와 가역적인 bending을 나타내었다. 겔의 구동원리는 양극과 PAMPS 겔 음이온간의 정전기 인력, 겔의 swelling-deswelling 효과 그리고 계면활성제의 소수성 반응의 협동적 과정으로 나타난다. PAMPS 겔의 응답속도는 인가된 전압 및 가교도가 증가할수록 증가하였으며, 구동이 반복적으로 진행됨에 따라 응답속도는 증가하였다. 겔의 두께가 증가하면 응답속도는 감소하였다.

ABSTRACT: An electro-active polymer (EAP) (poly(2-acrylamido-2-methyl propane sulfonic acid), PAMPS) gel crosslinked with *N,N*-methylenebisacrylamide (MBAA) has been prepared by free radical polymerization in aqueous solution with potassium persulfate as initiator. PAMPS gel was swollen in surfactant solution to substitute surfactant for using as actuator. PAMPS gel showed a large movement in the surfactant solution by electric field. PAMPS gel showed the reversible bending and fast response rate. Bending mechanism of gel is related to the cooperative process of hydrophobic interaction, swelling-deswelling of gel and the electrostatic attraction between anode(+) and the anions of PAMPS gel. The response rate of PAMPS gel was increased as the applied potential and the degree of cross-linkage were increased. The response rate was increased as the bending cycle was repeated, but it was decreased with increasing the gel thickness.

Keywords: electro-active polymer, (poly(2-acrylamido-2-methylpropane sulfonic acid), PAMPS), diffusion, swelling and deswelling, hydrophobic interaction.

서 론

생체적합성 물질들은 금속, 세라믹, 플라스틱과 같은 산업적 물질들과는 달리, 주로 wet 또는 soft 물질들로 구성되어 있다. Electro-active polymer gel은 이러한 wet 또는 soft한 물질의 하나이며, 전기적 작용에 의해 큰 변형을 일으킬 수 있다. 이 soft한 물질은 인공근육의 개발에 기초를 이루는 물질중의 하나로서 전압을 인가할 때 힘과 형태변화를 일으킬 수 있는 물질이다.

Electro-active polymer (EAP)는 3가지 물질들의 성질(force, displacement, response speed)에 초점을 맞추고 있다. EAP는 여러 종류가 있지만 만약에 큰 힘을 얻기 위해서는 piezoelectric 고분자나 electrostrictive polymer가^{1,2} 적절하며, 큰 변위를 얻기 위해서는 젤이나³⁻⁵ 전도성 고분자가⁶⁻⁸ 적절하고, 큰 응답속도를 얻기 위해서는 이온전도성 고분자 복합재료가⁹⁻¹² 적절하다. 인공근육 또는 actuator로 사용되는 고분자 전해질 젤들은 많이 연구되어 왔으며 낮은 전압 하에서도 쉽게 구동되는 장점을 가지고 있지만 응답속도는 만족할만큼 빠르게 나타나지 않는다.

PAMPS 젤은 응답속도는 그렇게 빠르지 않지만 큰 변위를 일으킬 수 있으며, 외부 자극에 의해 쉽게 변형이 일어날 수 있는 물질이다. 또한 PAMPS 젤은 대부분의 물질들과는 달리 형태변화를 제어하기가 용이하다. 고분자 젤의 구동은 계면활성제의 알킬 사슬의 길이 및 소수성정도 그리고 전해질의 전하밀도 등에 의해서 결정된다. 고분자 젤 구동기를 만드는데 있어서 중요한 것은 어떻게 화학적 에너지가 기계적 에너지로 전환되는지 그 메커니즘을 이해하는 것이다.¹³⁻¹⁷ 온도 민감성 고분자 젤들은 온도변화에 따라 swelling-deswelling이 일어나면서 구동이 되고, 광에 의해서 구동되는 고분자 젤들은 saline 용매에 적신 다음 전기장을 가해서 구동이 일어난다. 지금까지 EAP의 구동에 있어서 계면활성제의 종류 및 농도, 그리고 전해질 농도에 따른 응답속도의 변화를 관찰하는 실험 등이 Osada 등에 의해 많이 행하여 졌다.^{3-5,18-24}

본 연구에서는 인가된 전압과 PAMPS 젤의 가교도 및 두께 등에 따라 젤의 응답속도 변화를 확인함으로써 젤의 전기화학반응에 근거를 둔 구동 메카니

즘을 이해하고자 하였다. 또한 젤의 구동 cycle 회수에 따른 응답속도의 변화를 확인하였다.

실 험

시 약. 단량체 2-acrylamido-2-methylpropanesulfonic acid (AMPS, 순도 99%, Aldrich)와 가교제 *N,N'*-methylenebis acrylamide (MBAA, Tokyo Kasei Co.)는 구입하여 정제없이 사용하였다. 개시제로 사용된 potassium persulfate ($K_2S_2O_8$)는 증류수에 재결정하여 진공 건조하여 사용하였다. 그리고 계면활성제는 dodecyl pyridinium chloride ($C_{12}PyCl$, DPC, Tokyo Kasei Co.)를, 전해질로는 sodium sulfate (Na_2SO_4 , SS)를 사용하였다.

PAMPS 젤 합성 및 계면활성제 치환. PAMPS 젤을 합성하기 위한 개시제로 $K_2S_2O_8$ 를 AMPS에 대해 0.1 mol%를 사용하였으며, 가교제로 사용된 MBAA는 AMPS에 대해 5, 7.5, 10, 12.5 mol%로 변화하여 사용하였다. 단량체, 가교제, 개시제를 증류수에 용해한 용액을 유리판 사이에 spacer를 넣고 packing한 반응조에 넣어 반응하였다. 60 °C 반응조에서 24시간 동안 중합한 후 얻어진 PAMPS 젤을 미반응물 및 잔존 단량체를 제거하기 위해서 증류수에 24시간 동안 팽윤하여 평형상태에 이르게 하였다. 여기에서 얻어진 고분자 젤을 48시간 동안 후드에서 천천히 건조하였다. 건조된 PAMPS 젤을 구동기 특성을 부여하기 위하여 계면활성제 용액에 6시간 동안 팽윤하며 치환시켰다. 계면활성제 용액을 만들기 위해서 사용된 양이온 계면활성제인 DPC는 0.02 M을 사용하였고, 전해질로 사용된 SS는 0.03 M을 사용했으며 이것을 증류수에 용해하여 사용하였다.

응답속도 측정. 계면활성제 용액에서 일정시간 팽윤된 젤의 응답속도 분석을 위하여 사용한 전기화학 분석장치를 Figure 1에 도식화하였다. 양극 및 음극 양쪽 백금전극(Pt)의 크기는 폭이 10 mm, 두께가 0.2 mm, 길이가 30 mm인 전극을 사용하였으며 그 사이의 거리는 20 mm 간격을 두었고 PAMPS 젤과의 간격은 10 mm로 하였다. 전극과 PAMPS 젤은 젤을 치환한 용액과 동일한 계면활성제 용액에 담그어 응답 특성을 관찰하였다. 전극은 two electrode

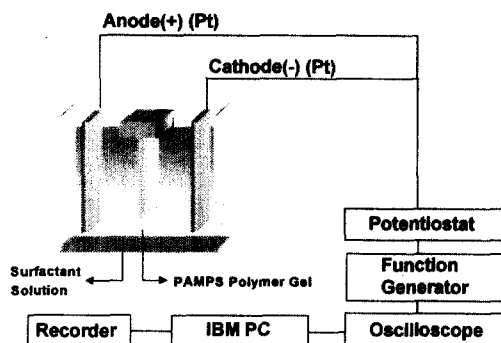


Figure 1. Apparatus for gel bending measurement.

system을 이용하였으며 전극 사이에 PAMPS 겔을 고정한 후 일정한 전압을 걸어주기 위해 Potentiostat/Galvanostat (EG&G, 263A)를, 일정한 pulse를 실어주기 위해 function generator (HAMEG, 8131-2)를, 일정한 전위가 가해지고 있는가를 확인하기 위해 Oscilloscope (EG&G OS 5020)를 각각 사용하였으며, 모든 자료는 PC를 통해 기록하였다. PAMPS 겔의 변화는 캠코더를 이용해서 분석하였으며, 모든 실험은 25 °C에서 측정하였다. 본 실험에서 측정된 응답속도는 PAMPS 겔이 5 mm 변위를 가역적으로 움직일 때 즉, 1 cycle 구동하는데 걸리는 시간을 측정하여 1/min로 나타내었다.

결과 및 고찰

팽윤비 측정. 증류수에 평형상태가 된 고분자 겔을 직육면체 모양으로 절단을 한 다음 48시간 동안 서서히 건조하였다. 건조된 고분자 겔은 각 두께 (1, 2, 3 mm)마다 건조된 무게를 측정한 다음 준비된 계면활성제 용액에 치환한 후에 무게를 측정하여 팽윤비 (W_s/W_d)를 구하였다. 여기서 W_s 는 겔이 계면활성제 용액 내에서 팽윤되었을 때의 무게를 나타낸 것이며, W_d 는 계면활성제 용액에 치환하기 전 건조된 무게를 나타낸 것이다. 이 결과를 Table 1에 나타내었으며, 결과에 나타난 바와 같이 가교밀도가 증가할수록 팽윤비는 다소 감소하는 현상을 보인다.

계면활성제 치환전의 팽윤비는 W_s/W_d 이다. 여기서 W_s 는 겔이 증류수 내에서 팽윤되었을 때 무게를 나타낸 것이며, W_d 는 건조된 무게를 나타낸 것이다.

Table 1. Swelling Ratio (W_s/W_d) of PAMPS Gel

swollen state MBAA concentration	W_s/W_d after swelling the sample in surfactant solution		
	1T	2T	3T
5 mol%	10./85	8.54	7.54
7.5 mol%	9.27	7.77	7.23
10 mol%	8.17	7.21	7.08
12.5 mol%	7.91	7.02	6.74

W_d : The weight of dry sample before swelling the sample in surfactant solution.

W_s : The weight of swollen sample in surfactant solution.

가교제 농도가 5 mol%인 고분자 겔이 증류수에 팽윤되었을 때 팽윤비 (W_s/W_d)는 215가 되었고, 가교제 농도가 10 mol% 일때의 W_s/W_d 는 34였다. 이처럼 PAMPS 겔의 물에서의 팽윤은 매우 큰 것으로 나타났다. 그러나 계면활성제로 치환된 PAMPS 겔의 팽윤비는 증류수에서의 팽윤과는 달리 그리 크지 않다 (Table 1). 그 이유는 고분자 겔 내로 들어가는 surfactant의 양은 AMPS의 음이온과 결합하기에 음이온의 양에 주로 의존하며 가교도에는 큰 영향을 받지 않는다. 이러한 계면활성제 치환시에는 $C_{12}Py^+$ 이온 또는 Na^+ 이온이 AMPS 음이온 (SO_3^-)과 결합하게 된다. 치환된 후에는 고분자 겔 내부에 차지하고 있는 계면활성제에 의해 물이 들어갈 수 있는 겔 내부의 자유부피는 그만큼 제한 받게 되며, 또한 계면활성제가 치환된 고분자 겔은 계면활성제 알킬사슬의 소수성 성질에 의해 물에 의한 팽윤이 작아지게 된다. 이러한 영향으로 인해 계면활성제 용액에서 겔의 팽윤은 증류수에서의 팽윤에 비해 작게 나타나며, 가교도 변화에 따른 팽윤비의 차이도 작게 나타나게 되는 것으로 생각된다.

Figure 2에는 SO_3^- 기를 가지고 있는 고분자 겔과 $C_{12}Py^+$ 의 양이온을 가지고 있는 계면활성제와 어떻게 착물을 이루는지 보여주고 있다. 증류수에서 팽윤된 PAMPS 겔은 다른 상업적 용도로 쓰이고 있지만 actuator 용으로는 적합하지가 않고, 비접촉계 시스템 (전극과 고분자 겔이 접촉이 안된 시스템)에서 전기적 저항에 견딜만한 기계적 물성이 부족하다. 그래서 본 실험에서는 actuator 용도에 맞게 계면활성제 용액에 치환하여 고분자 겔의 물성 및 안정화를 기하였다. 계면활성제는 계면활성제 용액 내에서 고분자 겔의 안정화 및 전기장 인가할 때 bending을 일으키는

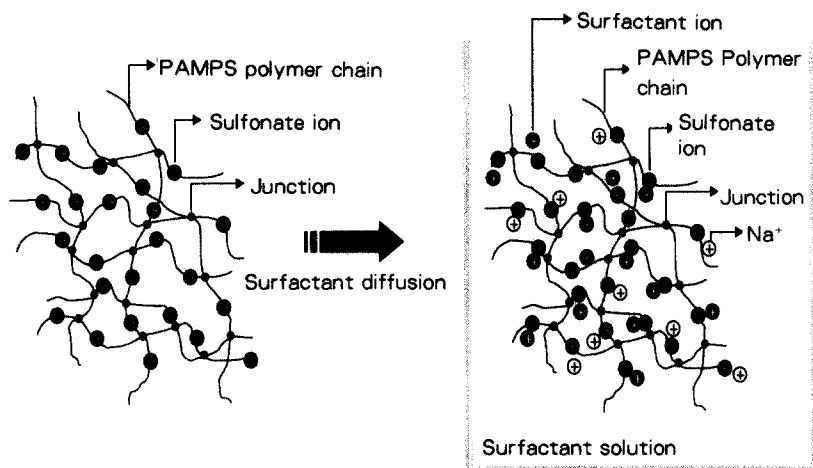


Figure 2. Schematic illustration of surfactant diffusion into the PAMPS gel.

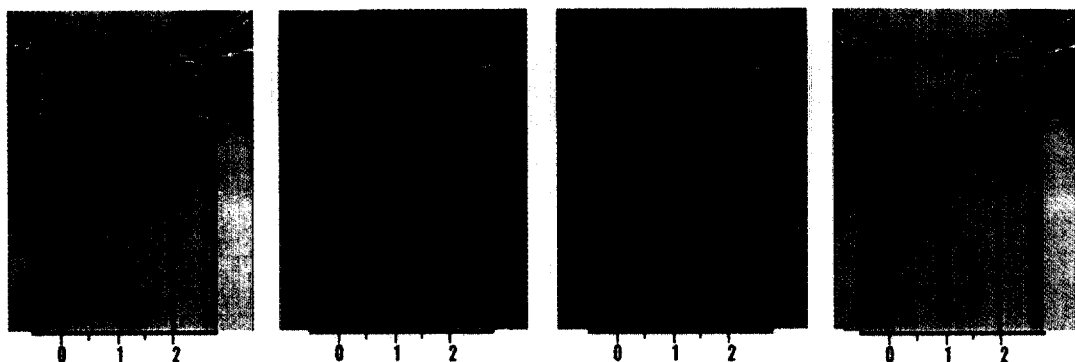


Figure 3. The bending motion of PAMPS gel in a non-contact DC field. Gel thickness: 1 mm, applied potential: 9 V, and crosslinking agent concentration of gel: 12.5 mol%.

중요한 역할을 하고 있다.

PAMPS 겔의 구동 및 응답속도. 투명하게 보이는 아크릴 셀에 폭이 10 mm, 두께가 0.2 mm, 길이가 30 mm인 한 쌍의 전극 사이에, 두께가 1 mm, 폭이 10 mm, 길이가 20 mm인 고분자 겔을 고정시킨 후 bending motion을 관찰하였다. 여기서 인가된 전압은 9 V였고, 가교제 농도가 10 mol%인 겔을 사용하였으며 전극사이의 간격은 30 mm를 유지하고 실험하였다. 9 V를 인가시 몇 분 이내에 겔이 90도 이상까지 bending이 나타나고 있다. 반대 방향으로 bending시에는 2배 정도의 시간이 더 소요되었는데 이는 한쪽 끝과 전극 사이의 간격이 멀고 고분자 겔

자체에 많은 힘이 가해져서 반대 방향으로의 소수성 작용이 일어나기 위해서는 상당한 bending 에너지가 필요하기 때문이다.

이러한 현상을 정량적으로 해석하기 위해서 고분자 겔의 두께가 1, 2, 3 mm인 것을 각각 이용하였고, 전극사이의 간격은 20 mm를 유지하였다 (Figure 3). 고분자 겔의 일정 변위가 생길 때까지 걸리는 시간을 측정함으로써 해서 겔의 응답속도를 측정하였다.

구동 메커니즘. 용액 내에서 전기적인 자극에 의해 구동이 일어나는 재료들은 인가된 전압, 작업전극, 가교제의 농도, 고분자 겔의 두께 등에 따라 그 구동 특성이 변화하게 된다. 본 연구에서는 PAMPS 겔에

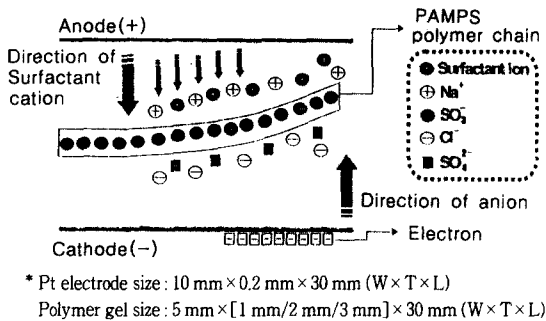


Figure 4. Schematic illustration of bending mechanism of the PAMPS gel under electric field.

일정시간 동안 정전압을 가하며 구동 특성을 관찰하였다. Figure 4에서와 같이 PAMPS 겔의 bending을 일으키는 인자에는 3가지가 있는데, 첫째로 전극과 고분자 겔과의 정전기적 인력이다. 인가된 전압이 낮을 때는 bending을 일으킬만한 양극과 PAMPS 겔 내의 음이온간의 정전기적 인력이 작기 때문에 bending이 일어나지 않는다. 그러나 인가된 전압이 높을 때는 정전기적 인력이 증가하여 겔의 구동에 한 가지 요인으로 작용하게 된다.

둘째로 전압이 인가되었을 때 용액내에 계면활성제 이온($C_{12}Py^+$)은 PAMPS 겔의 양극 쪽면의 음이온(SO_3^-)과 착물을 이루게 되고, 음극 쪽면의 겔 내의 음이온과 착물을 이루고 있던 계면활성제 이온($C_{12}Py^+$)은 겔에서 음극 쪽의 용액내로 빠져나가게 된다. 앞에서 설명한 바와 같이 계면활성제로 치환되었을 때의 겔의 팽윤에 비해 물에서의 겔의 팽윤이 매우 크게 일어나게 된다. 그래서 계면활성제가 착물을 이루고 있는 양극 쪽면의 겔의 팽윤에 비해 계면활성제가 빠져나간 음극 쪽면의 겔의 팽윤이 물의 팽윤으로 인해 크게 일어나게 되어 겔은 양극 쪽으로 bending이 일어나게 된다.^{14-17,25,26}

마지막으로 bending을 일으키는 요소는 소수성 작용이라고 할 수 있겠다. 전압을 인가할 때, 용액내의 계면활성제 이온들은 PAMPS 겔의 양극쪽 면에 있는 음이온과 결합되며, 이때 긴 알킬사슬 때문에 소수성인 계면활성제 이온들끼리 회합되면서 양극쪽으로 bending을 일으킨다. 전기장이 역으로 가해졌을 때는 양극 표면에 흡수되었던 계면활성제 분자들은 겔에서 떨어져 나가 바뀐 음극 쪽으로 이동하게 되며

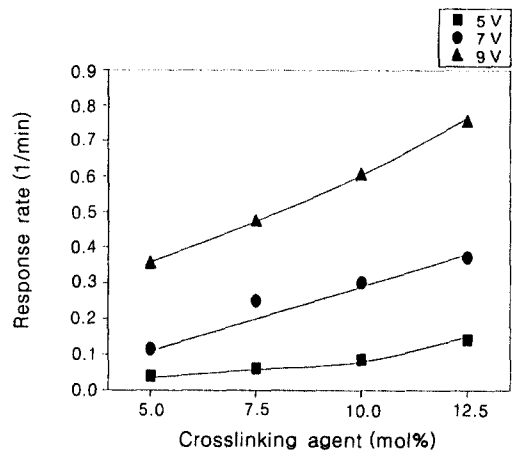


Figure 5. Response rate as a function of crosslinking agent concentration of gel. Applied potential: (■) 5 V, (●) 7 V, (▲) 9 V, and gel thickness: 1 mm.

새로운 계면활성제 분자들이 바뀐 양극 쪽면의 PAMPS 겔의 음이온과 결합해 바뀐 양극 쪽에서 bending이 일어나게 된다. 고분자 겔이 90도 이상으로 bending이 될 수 있는 것은 인가된 전압이나 swelling and deswelling의 효과보다 bending을 일으키는 마지막 요소인 소수성작용의 영향 때문이다.²⁵⁻²⁷

인가전압 및 가교도에 따른 응답속도. 두께가 1 mm (1T)인 고분자 겔의 인가전압 및 가교도에 따른 응답속도를 Figure 5에 나타내었다. 인가전압이 증가하게 되면 전기장이 증가되어 고분자 겔의 음이온과 양극과의 정전기적 인력이 증가하고, 용액내의 이온의 이동도가 증가하여 단위시간 동안 PAMPS 겔로 유입되는 계면활성제와 이온의 양이 증가하게 된다. 따라서 겔의 bending 응답은 빠르게 나타나게 된다.

인가된 전압이 일정할 때는 계면활성제나 이온의 양, 이온의 이동도는 일정하다. 그러나 Table 1에 나타난 바와 같이 가교도가 높을 때에, 팽윤비가 작게 나타나며, 이 상태는 $C_{12}Py^+$ 이온 또는 Na^+ 이온이 겔 내에 적게 치환되었으며, 따라서 겔 내부에는 착물을 이루지 않은 SO_3^- 이온이 가교도가 적은 겔에 비해 상대적으로 많이 남아 있는 상태라고 볼 수 있다. 이 상태에서 전압이 인가되면, 가교도가 높을 때에 겔 내부의 정전기적 인력이 크며, 또한 겔의 양면

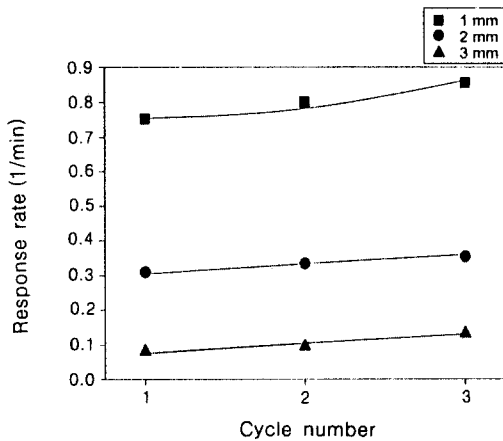


Figure 6. Response rate as a function of cycle number. Gel thickness: (■) 1 mm, (●) 2 mm, (▲) 3 mm, applied potential: 9 V, and crosslinking agent concentration of gel: 12.5 mol%.

에서의 계면활성제의 드나듬에 따른 효과 (swelling과 deswelling)가 빨리 나타나게 되어 고분자 젤의 bending 응답은 빠르게 나타나게 된다고 생각된다. 또한 가교도가 너무 크게 되면 (MBAA : 12.5 mol% 이상) PAMPS 젤의 기계적 물성이 너무 brittle해져서 구동을 나타내기에 적절하지 않은 것으로 나타났다. 두께가 2T, 3T인 고분자 젤 또한 1T에서와 같이 가교도가 증가함에 따라 유사한 형태로 증가하였다.

응답속도의 가속화. PAMPS 젤의 가교제 농도가 12.5 mol% 이며 두께가 1T (1 mm)인 고분자 젤을 인가된 전압 9 V에서 cycle number에 따른 응답속도의 변화를 측정하였다 (Figure 6). 각 시편의 cycle number가 증가할수록, 즉 bending cycle이 반복됨에 따라 응답속도는 증가하는 경향을 나타내었다. 첫번째 cycle에는 bending을 일으키는데 소요되는 시간이 많이 걸리지만 cycle number가 증가할수록 응답속도가 증가하는 경향을 나타내었다. 이것은 초기 bending에 의해 PAMPS 젤 내부에 계면활성제와 이온의 이동 통로가 형성되어, cycle number가 증가할수록 이온의 이동이 빨라지기 때문으로 생각된다. 그리하여 전기장에 의한 젤의 응답속도는 점차 빨라지게 된다. 두께가 2T, 3T인 고분자 젤에 대하여도 같은 실험을 하였다. 결과는 마찬가지로

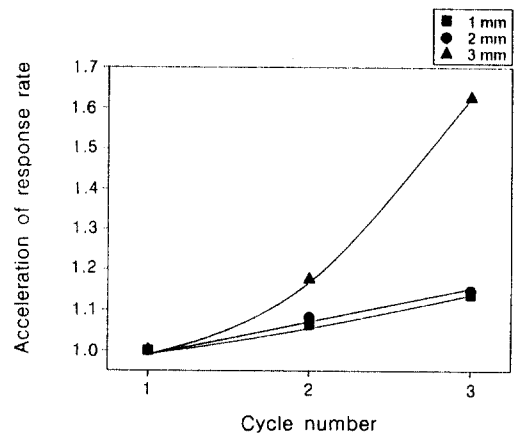


Figure 7. Acceleration of response rate as a function of cycle number. Applied potential: 9 V, and crosslinking agent concentration of gel: 12.5 mol%.

cycle number가 증가할수록 응답속도는 증가하는 경향을 나타내었다. 또, cycle number에 따른 가속화되는 정도를 Figure 7에 나타내었다. 응답속도의 가속화란 첫 번째 bending cycle시 소요되는 시간에 대한 두 번째, 세 번째 bending cycle시 소요되는 시간의 비를 나타낸다. 두께가 증가하게 되면 젤이 구동됨에 따라 상대적으로 bending 가속화가 크게 나타났는데 이는 젤의 두께가 크면 그만큼 젤 내부의 이동통로의 형성 효과가 더 크게 되고 이로 인해 응답속도의 변화도 크게 나타나게 되는 것으로 생각된다. Figure 8에는 젤의 가교제 농도가 변화하는 경우, 고분자 젤이 cycle number의 증가에 따라 응답속도의 변화를 측정하였다 (인가된 전압, 9 V). 이것 또한 젤의 구동에 따른 이온의 이동통로의 증가로 인해 응답속도는 증가하는 것으로 볼 수 있다.

두께에 따른 응답속도. PAMPS 젤의 두께에 따른 응답속도를 Figure 9에 나타내었다. 두께가 증가하게 되면 고분자 젤이 bending하기 위해서는 그만큼 더 큰 에너지를 필요로 하게 된다. 따라서 일정전압에서 bending이 일어나는데 그만큼 시간이 더 걸리게 되며 고분자 젤의 응답속도는 감소하게 된다. 또한 5 V의 낮은 전압에서는 고분자 젤을 구동시킬 수 있는 에너지가 작아 두께가 3T인 PAMPS 젤의 경우에는 가교제 농도에 관계없이 구동되지 않았다.

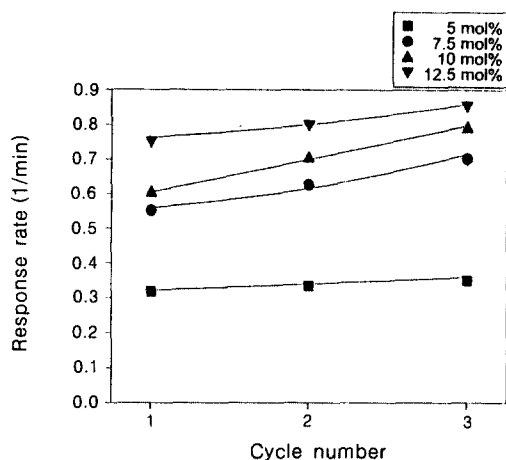


Figure 8. Response rate as a function of cycle number. Gel thickness: 1 mm, applied potential: 9 V, and crosslinking agent concentration of gel: (■) 5 mol%, (●) 7.5 mol%, (▲) 10 mol%, (▼) 12.5 mol%.

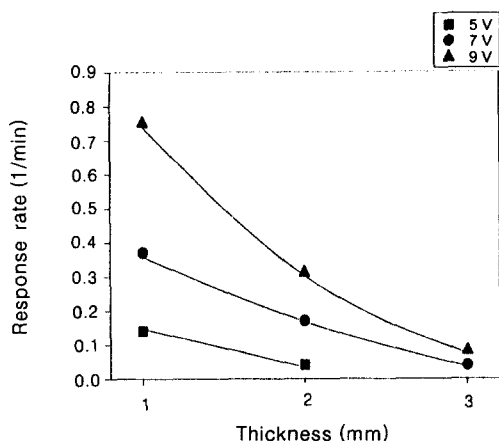


Figure 9. Response rate as a function of gel thickness. Applied potential: (■) 5 V, (●) 7 V, (▲) 9 V, and crosslinking agent concentration of gel: 12.5 mol%.

결론

본 실험에서는 electro-active actuator로 작용하는 고분자 겔을 제조하여 전기장에 의해서 유도된 고분자 겔의 구동 변화에 대해 확인하였다. 인가된 전압이 증가하게 되면, PAMPS 겔의 음이온과 양극과의 정전기적 인력이 증가하고, 이동 이온의 양이 증가하여 PAMPS 겔의 swelling과 deswelling 효과

는 증가한다. 또한 계면활성제의 겔로의 이동 또한 증가하여 소수성 작용이 증가한다. 이러한 영향으로 인가된 전압이 증가하게 되면 PAMPS 겔의 bending 에너지는 증가하여 응답속도는 증가하였다. PAMPS 겔의 가교도가 증가하게 되면 겔 안으로의 이온의 유입에 의해 상대적으로 큰 bending force를 받게 되어 상대적으로 빠른 응답속도를 나타내었다. 또한 PAMPS 겔의 두께가 증가하면 겔을 구동 시키는데 더 큰 에너지를 필요로 하게 되어 그만큼 bending 응답은 느려지게 된다. PAMPS 겔이 구동됨에 따라 겔 내부의 이동통로의 형성이 증가하게 되고 이로 인해 응답속도는 구동이 진행됨에 따라 증가하게 되며, 두께가 증가할수록 그 영향은 상대적으로 증가한다. 이 고분자 겔은 이에 유사한 응답속도와 bending force가 요구되는 actuator로의 이용이 가능하며, 또한 다른 종류의 구동기와 같이 사용하여 그 효율을 높이는 곳에도 이용될 수 있다.

감사의 글: 본 연구는 프론티어연구개발사업 중 지능형마이크로시스템개발사업의 일환으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. K. Sawahata, M. Hara, H. Yasunaga, and Y. Osada, *J. Contr. Release.*, **14**, 253 (1990).
2. R. Kornbluh, R. Perline, J. Eckerle, and J. Joseph, *IEEE Int. Conf.*, p. 2147 (1998).
3. T. Hirai, H. Nemoto, M. Hirai, and S. Hayashi, *J. Appl. Polym. Sci.*, **53**, 79 (1994).
4. Y. Osada, H. Okuzaki, and H. Hori, *Nature*, **355**, 242 (1992).
5. T. Shiga, Y. Hirose, A. Okada, and I. Kurauchi, *J. Appl. Polym. Sci.*, **47**, 113 (1993).
6. L. Barsi, A. Buki, D. Szabo, and M. Zrinyi, *Progress in Colloid and Polymer Science*, **102**, 57 (1996).
7. J. M. Sansinena, V. Olazabal, T. F. Otero, C. N. Poloda Fonseca, and Macro-A. De Paoli, *Chem. Comm.*, 2217 (1997).
8. E. Smela, O. Inganas, and I. Lundstrom, *Science*, **268**, 1735 (1995).
9. S. A. Ashraf, F. Chen, C. O. Too, and G. G. Wallace, *Polymer*, **37**, 2811 (1996).

10. S. Sewa, K. Onishi, K. Asaka, N. Fujiwara, and K. Oguro, *Proc. MEMS 98*, p. 148 (1998).
11. R.Kanno, S. Tadokoro, T. Takamori, and M. Hattori *IEEE Int. Conf.*, p. 219 (1996).
12. M. Mojarad and M. Shahinpor, *IEEE Int. Conf.*, p. 2152 (1997).
13. Y. Bar-Cohen, S. P. Leary, M. Shahimpoor, J. O. Simpson, and J. Smith, *Proc. SPIE 6th Int. Conf.*, p. 321 (1999).
14. T.Narita, J. P. Gong, and Y. Osada, *Macromol. Rapid Commun.*, **18**, 853 (1997).
15. T.Narita, J. P. Gong, and Y. Osada, *J. Phys. Chem. B*, **102**, 4566 (1998).
16. E. D. Goddard, *JAOCs*, **71**, 1 (1994).
17. I. Stake and J. T. Yang, *Biopolymers*, **15**, 2263 (1976).
18. Y. Osada and M. Hasebe, *Chem. Lett.*, 1285 (1985).
19. K. Umezawa and Y. Osada, *Chem. Lett.*, 1795 (1987).
20. Y. Osada, K. Umezawa, and A. Yamauchi, *Makromol.*, **189**, 597 (1988).
21. Y. Osada and K. Ohnishi, *Macromol.*, **24**, 3020 (1991).
22. J. P. Gong, I. Kawakami, V. G. Sergeyev, and Y. Osada, *Macromol.*, **24**, 5246 (1991).
23. R. Kishi and Y. Osada, *J. Chem. Soc., Faraday Trans.*, **85**, 655 (1989).
24. H. Okuzaki and Y. Osada, *Makromol.*, **502**, 27 (1994).
25. F. Yeh, E. L. Sokolov, A. R. Khokhlov and B. Chu, *J. Am. Chem. Soc.*, **118**, 6615 (1996).
26. D. W. McQuigg, J. I. Kaplan, and P. L. Dubin, *J. Phys. Chem.*, **96**, 1973 (1992).
27. Y. Ueoka, J. P. Gong, and Y. Osada, *J. Intell. Mater. Syst.*, **8**, 465 (1997).