

전기왜곡성 폴리우레탄 액츄에이터의 특성 평가

정은수*, 박한수**, 정해도***, 조남주**, 제우성****

Characterization of Electrostrictive Polyurethane Films for Micro-Actuators

Eun-Soo Jeong*, Han-Soo Park**, Hae-Do Jeong*** and Nam-Ju Jo**, Woo-Seong Jae****

ABSTRACT

For the purpose of applying to micro-actuator, thermal properties and displacement of electrostrictive polyurethane(PU) elastomers have been measured. In order to understand an effect of PU component, crosslinking agent are controlled by 0.5wt% and 1wt%. DMPA and anther chain extenders were used. PU sample that chain extenders are DMPA is added NaOH for comprehension of effect of ionic groups. The deposited electrode size on PU films is equal to acrylic holder size when the displacement was measured. Dynamic response according to frequency, displacement and recovery time according to PU thickness were measured. 1wt% crosslinking agent contents PU samples have higher displacement and lower recovery time than 0.5wt% crosslinking agent contents PU. If the PU thickness is increased, the actuating voltage for generating of same displacement is increased, too.

Key Words : Polyurethane(PU:폴리우레탄), Electrostriction(전기왜곡성), Electrostrictive(전기왜곡적), Electro active polymer(EAP:전기구동형 폴리머), Micro actuator(미세구동기), Artificial muscle(인공근육)

1. 서론

MEMS(Micro-Electro Mechanical System) 기술의 발달로 인한 마이크로 액츄에이터의 소형화, 고기능화, 다기능화는 많은 분야에서의 활용요구를 충족시키고 있으며, 특히 HDD, DMD(Digital Mirror Device), AFM, DNA chip, 인공근육 등의 IT, 의공학 분야에 활용되고 있다. 이런 마이크로 액츄에이터는 압전, 열전, 전기왜곡성, 정전기, 전자기, 열팽창, 전해 등을 통해 구동되며, 이런 구동력들간의 동력밀도와 변형률의 차이는 Fig.1 에서 나타난

바와 같다^[1].

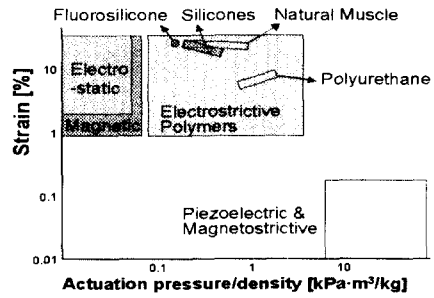


Fig. 1 Comparison of high-speed actuator technologies.

접수: 2001년 8월 17일 접수
* 부산대학교 정밀기계공학과 대학원
** 부산대학교 고분자공학과
*** 부산대학교 기계공학부
**** 동명정보대학교 정보공학부

압전소자를 이용한 액츄에이터와 정전기, 자기를 이용한 액츄에이터 간에는 동력밀도와 변형률 간의 큰 차이로 인해 그 활용분야가 제한되는 단점이 있다. 하지만 전기왜곡성을 이용한 액츄에이터는 정전기력이나 자기력을 사용하는 액츄에이터보다 높은 동력밀도를 나타내면서도 변형률은 비슷하기 때문에 그 활용분야가 확대될 것으로 예상된다. 이런 구동력을 발생시키는 재료 중에 Polyvinylidene fluoride(PVDF)와 trifluoroethylene과 tetrafluoroethylene 공중합체(copolymer) 등의 압전성 폴리머는 전기기계장치 혹은 액츄에이터로서 오랫동안 연구되어 왔다. 최근 들어서는 인공근육 혹은 마이크로 액츄에이터, 로봇, 의학 디바이스, 매니퓰레이터 등에 적용하기 위한 전기구동형 폴리머(Electro-Active polymer:EAP)에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 이런 EAP에는 Ionic Gel, Ionomeric Polymer-Metal Composite(IPMC), Conductive polymers, Nanotubes, Electrostrictive polymer(Dielectric EAP), Ferroelectric (Piezoelectric, Ferroelectric) polymer, Graft elastomer 등이 있으며, 이중에서도 전기왜곡성을 띄는 폴리우레탄은 고전압 하에서 발생하는 높은 수축률에 대한 연구가 많이 수행되고 있다^[2,3]. 지난 수십년간 폴리우레탄은 합성피혁 표면에 코팅함으로써 신발, 의류, 가방 등의 압화의 방화, 방진을 수행하는 제품으로 널리 활용되었으나 최근들어 고분자 전해질, 절연피막, 인체적합 폴리머, 전기왜곡성 폴리머로 각광받으며 활발히 연구되어지고 있다. 특별히 폴리우레탄과 실리콘 등의 재료에 나타나는 전기왜곡성이란 전계하에서 Strain 혹은 Stress를 발생하는 현상을 말하는 것으로 Fig.2에서 도식적으로 나타내었다.

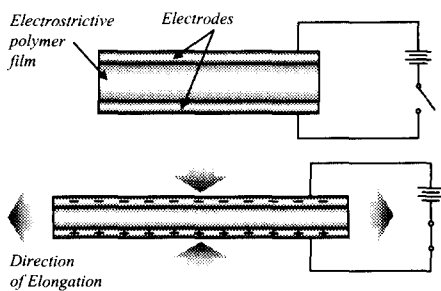


Fig. 2 Operation principle of polyurethane.

전기왜곡성 폴리머의 정확한 동작 원리는 규

명되지 않고 있으며, 아래에 3가지의 가설을 설명하였다.

1. 폴리머 상하에 증착된 전극에 인가된 전하의 인력에 의한 것^[4].
2. 폴리머 내부와 외부의 전계하에서의 반응차이^[5].
3. 폴리머층을 통과하는 소수전하와 전극에 입력되는 다수전하의 불균형^[6].

이외에도 전기왜곡성을 나타내는 물질로 보고된 것들은 silicone rubber, polyurethane, fluorosilicone, ethylene propylene, polybutadiamine, isoprene 등이 있으며, 특별히 폴리우레탄은 빠른 반응성, 성형의 용이함, 저밀도, 유연성, 저가 등의 장점들로 인해 마이크로 액츄에이터 혹은 트랜스듀서로서 활용 가능성을 높이고 있다.

이런 폴리우레탄은 EAP 중에서도 Grafted elastomer라고 분류되기도 하지만 선행연구의 결과에서 보는 바와 같이^[7], Fig.3에 나타낸 결정상에서 압전성을 나타내는 것으로 예상되기 때문에 압전성 및 전기왜곡성을 동시에 나타낸다고 여겨진다^[8,9].

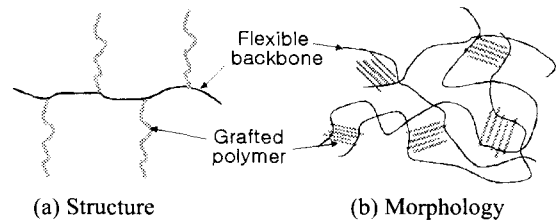


Fig. 3 Grafted elastomer.

이에 본 논문의 목적은 폴리우레탄의 구성성분 변화, 두께의 변화, 입력전압 주파수의 변화에 따른 membrane 형태의 폴리우레탄 액츄에이터의 동적인 특성을 확인하고 unimorph 형태의 액츄에이터를 제작함으로써 마이크로 액츄에이터로의 적용 가능성을 확인하는 것이다.

2. 실험장치 및 시료

2.1 시료준비

폴리우레탄은 polyol 과 isocyanate, chain extender로 구성되며, 실험에 사용된 폴리우레탄은 용액중

합법을 통해 합성하였다. 형상학적으로는 polyol 로 이루어지는 soft segment 와 isocyanate 와 chain extender 로 이루어지는 hard segment 로 구성되는, 결정상과 비결정상이 동시에 존재하는 반결정 고분자이다. 실험에 사용된 폴리우레탄의 구성은 표 1 에 나타내었으며, 폴리우레탄 가교제의 함유량을 다르게 함으로 탄성력에 미치는 영향을 확인하기 위해 0.5wt%와 1wt%로 각각 다르게 적용하였다. polyol 은 실온에서(25℃) polyol 의 결정상이 생기지 않는 polytetramethylene glycol(PTMG)을 사용하여 탄성변형을 증가시켰으며, chain extender 는 1,4-butanediol 과 isocyanate 는 diphenylmethane diisocyanate 를 사용하였다.

Table 1 Casting weight, thickness and symbol of samples

Sample	PU weight (mℓ)	Thick-ness (mm)	Sym-bol
PTMG - crosslinking agent (0.5wt%)	5	0.418	11-5
	9	0.760	11-9
	13	1.119	11-13
PTMG	5	0.503	12-5
	9	0.859	12-9
	13	1.147	12-13
PTMG - NaOH	5	0.392	13-5
	9	0.694	13-9
	13	0.943	13-13
PTMG - crosslinking agent (1wt%)	5	0.615	14-5
	9	0.835	14-9
	13	1.234	14-13

실험에 사용된 필름은 60mm 직경의 테프론 몰드에 casting 하여 용매를 증발시키고, 후처리 함으로 고상의 폴리우레탄 필름을 제조하였으며, Fig.4 에 테프론 몰드와 필름제조공정 그리고 아크릴 홀더, 제작된 필름의 사진을 나타내었다.

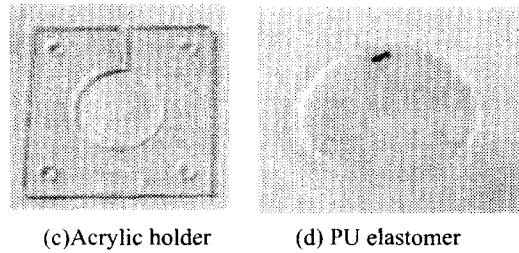
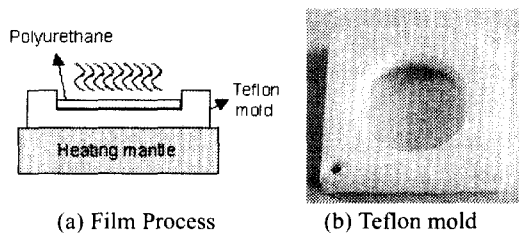


Fig. 4 Film process and component of displacement measurement system.

2.2 열적 성질 측정

폴리우레탄의 열적 성질을 확인하기 위해 유리전이온도(Tg)와 용해온도(Tm)를 시차주사열량계(Differential Scanning Calorimeter: DSC)를 통해 측정하였다

2.3 변위측정장치

폴리우레탄의 변위를 측정하기 위해선 필름의 변형에 방해가 되지 않아야 하므로 광학식 측정법인 레이저를 사용하였다. 측정에 사용된 레이저 변위측정 센서는 OMRON Z4M-S40R 로써 정반사식 가시광 반도체 레이저를 사용하며, 최대변위량은 40± 10mm 이며, 분해능은 60ms 로 측정시 3um 이다. 레이저 센서는 TechMAC Co.의 3D Scanner 에 부착되어 있으며, 방진테이블 위에 설치하여 진동에 대한 영향을 배제하였다. 폴리우레탄막의 실제 변형을 발생하는 영역 이외의 부분의 영향을 최소화 하기 위해서 직경 50 mm의 구멍이 뚫린 아크릴 홀더에 전극이 적층된 영역을 제외한 나머지 부분을 완전히 구속하였으며, 전극과 아크릴 홀더의 크기를 동일하게 구성하였다. 고전압의 누설을 막기 위해 아크릴 홀더 아래에 PE 평판으로 절연하였으며, 그 아래는 필름의 움직임에 의한 떨림을 방지하기 위해 질량역할을 하는 Steel 을 부착하였다. 전극으로 사용된 전도성 그리스는 circuitworks® Silver conductive grease 이며, 변위측정을 위한 지그와 시스템의 구성도는 Fig.5 에 나타내었다.

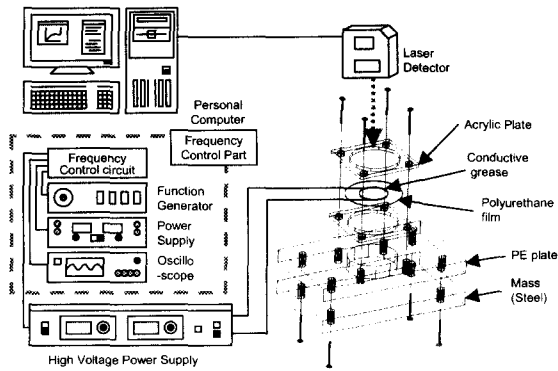


Fig. 5 Displacement measurement system.

변위의 측정은 하나의 시편의 최대변위값에 대해 2~3 회 실시하여 평균값을 취하였다. 변위량과 변형에 크게 영향을 미치는 것은 재료의 고유진동수이며, 이것은 시료의 크기와 물리적 특성과 더불어 구속된 상태 등에 좌우된다. 실제 시료에 입력되는 입력전압의 진동수가 고유진동수에 가까워지면 시료의 변위 진폭이 빠르게 증가한다. 고유진동수의 peak 에 해당하는 주파수가 입력되면 180° 의 위상차가 발생한다. 시료의 고유진동수를 피하여 최대 변위량을 측정하였다.

3. 측정결과

3.1 열적 성질 측정결과

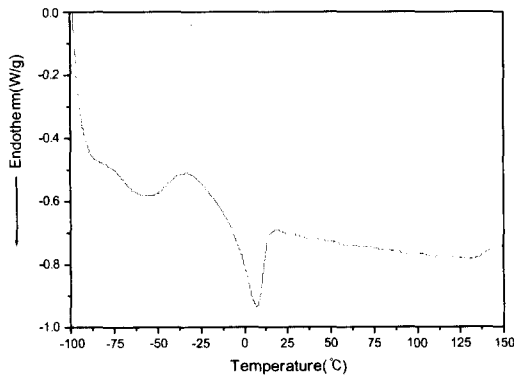


Fig. 6 DSC results of PTMG based PU11.

Sample 11 의 열전이 측정결과를 Fig.6 에 나타내었다. 폴리우레탄은 polyol, diisocyanate 와 chain

extender 로 구성되며 형상학적으로 diisocyanate 와 chain extender 로 구성되는 hard segment 와 polyol 로 구성되는 soft segment 로 구성된다. 그리고 결정상과 비결정상이 공존하는 반결정성 폴리머이다. DSC 측정결과 NaOH 가 첨가된 폴리우레탄을 제외한 나머지 3 종류는 -70 ~ -60°C 에서 soft segment 의 유리전이온도(T_g)를 나타내며, 5~7°C 에서 soft segment 결정의 용해온도(T_m)를 나타낸다. 낮은 유리전이온도는 재료의 modulus 를 낮게하며, 또한 T_m 이 낮기 때문에 재료는 실온에서 무정형상을 가지게 된다. 그리고 용매증발온도는 약 15 ~ 50°C 이며 기포발생을 방지하기 위해 수시간에 걸쳐 점진적으로 온도를 증가시켜 용매를 증발하였다. 급격한 온도상승은 필름 중에 기포가 포함되거나 필름 표면의 물결무늬가 발생하는 등의 기계적 결함을 일으키는 요인이 되기에 이를 피하기 위함이다.

3.2 변위 측정결과

고분자 재료의 기계적, 물리적 특성은 온도와 습도에 크게 좌우되기 때문에 실제 필름의 변위를 측정하기 전에 38°C의 건조로에서 24 시간 이상 건조 후 측정을 실시하였다. 폴리우레탄은 친수성 물질이기 때문에 공기 중에 방치하면 습기를 흡수하여 물리적 특성에 변화를 일으킨다. 레이저 변위센서 자체와 회로 중의 노이즈 등의 영향으로 인해 변위의 측정값들은 median filter 를 2 회 적용 후 사용하였다. Fig.7 은 median filter 적용 전후의 신호를 나타낸 그림이다^[10].

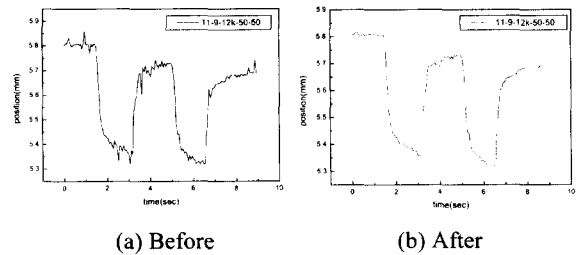


Fig. 7 Results of before and after signal median filtering.

median filter 는 인접한 두 개의 data 와 자신을 포함하여 3 개의 data 중 최대값과 최소값을 제외한 나머지 한 개의 data 를 사용하는 방식이다.

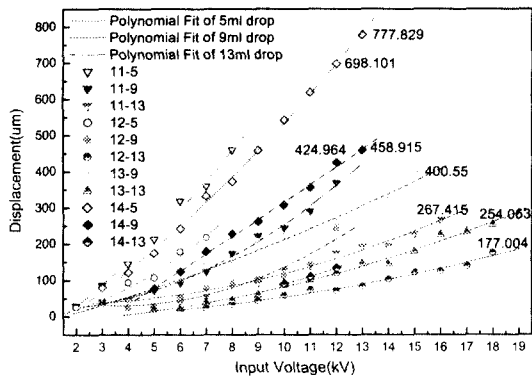


Fig. 8 Displacement of various type of PU and thickness.

Fig.8 은 시료별 두께별 최대 변위값을 나타내었으며, 14-5 필름의 최대변위량이 698.1 µm 로 가장 크게 나타났다. 그리고 필름의 두께가 증가할수록 동일한 변위를 나타내기 위한 구동전압은 증가함을 알 수 있었다. 13-5 필름은 제작 후 NaOH의 영향으로 인해 전계인가시 절연파괴가 4kV 이하에서 나타나므로 변위측정이 불가능하였으며, 13 필름들은 회복시간이 11 필름들에 비해 약 2~3 배 크게 나타났다. Fig.8의 실선들은 polynomial fitting한 결과이다. 모든 시편들이 인가한 전압의 제곱에 비례하여 움직이는 것을 볼 수 있다. 이것은 전기왜곡성의 구동원리를 정전기적 반발력에 의한 것이라고 가정할 때, 전계를 인가했을 때 필름이 받는 힘을 나타낸 아래의 식(1a)과 같이 구동되기 때문이다.

$$F_{film} = \epsilon_r \epsilon_0 E^2 = \epsilon_r \epsilon_0 v^2 / h^2 \quad (1a)$$

ϵ_r = Relative dielectric constant of polyurethane

ϵ_0 = Relative dielectric constant of air

v = Input voltage, E = Electric field

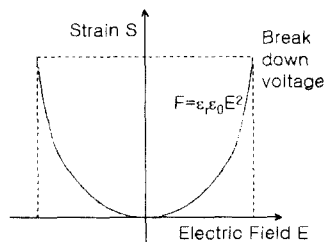


Fig. 9 Strain of PU under electric field

Fig.9 은 식(1a)를 도식화한 것으로 전기왜곡성

폴리머는 변형을 크게 하기 위해 필요한 전압이 매우 높기 때문에 구동 중 필름이 입력전압을 견디지 못하고 절연파괴가 일어나는 경우가 있다. 이것은 전기왜곡성 폴리머의 큰 단점으로 전도도가 높으며 변형률이 큰 유연한 전극의 개발과 더불어 박막 증착에 의해 필름 두께를 줄이는 것이 해결방안이라 여겨진다.

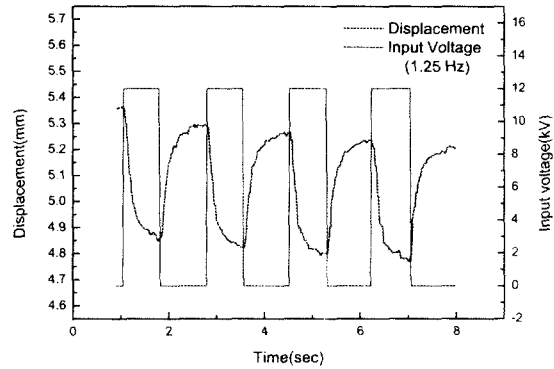


Fig. 10 Response to step function with 12kV.

Fig.10 은 11-9 필름(t=760 µm)의 1.25Hz 의 12kV 계단파 입력시 변위를 나타내는 그래프이다. 그래프에서 나타난 바와 같이 폴리우레탄 필름은 직전 위치의 약 85% 는 수십 ms 내에 회복되지만 나머지 변위는 수분에 걸쳐 회복되며, 계단파의 전압이 인가되는 시간이 경과할수록 필름의 변위가 점차 증가함을 알 수 있다. 이것은 폴리머의 점탄성 거동에 의한 것이라 예상되며, 이런 폴리우레탄의 성질은 실제 액추에이터에 적용시 위치와 성능 제어가 어려워지는 단점이 발생한다.

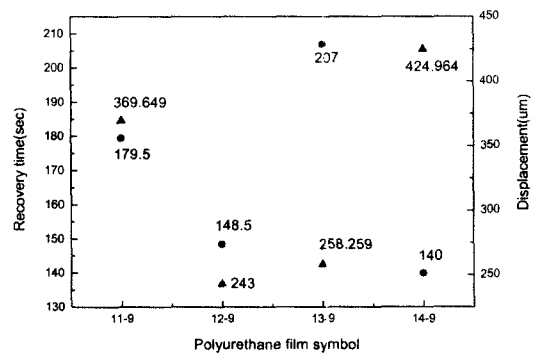


Fig. 11 Recovery time and displacement of 9ml drop of each sample.

11-9,12-9,13-9,14-9 필름의 12kV 의 전압을 3 초 간 인가시 변위와 탄성회복시간을 기록한 그래프를 Fig.11 에 나타내었다. 가교제의 함량이 0.5wt% 인 11-9 필름의 회복시간 보다 가교제의 함량이 1wt% 인 14-9 필름의 회복시간은 약 39.5 초가 단축되었으며, 변위 또한 약 55.315 μm 가 증가하였다. Na⁺ 이온이 포함된 13-9 필름은 가교제가 포함되지 않은 12-9 필름과 비슷한 변위를 나타내지만 회복시간이 증가함을 볼 수 있는데, 이는 이온에 의해 필름의 탄성이 감소한 결과라 예상할 수 있다.

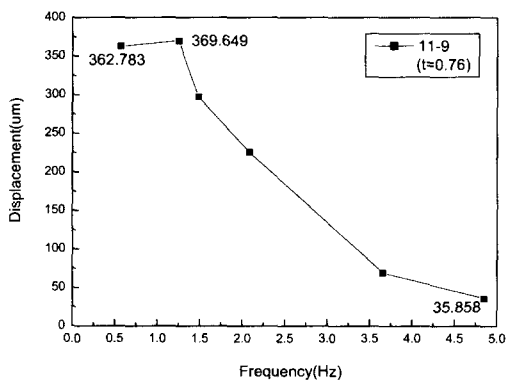


Fig. 12 Results of according to frequency with 12kV.

Fig.12 는 11-9 필름의 주파수에 따른 변위량의 변화를 나타낸 그래프이다. 1.25Hz 이상이 되면 변위가 급격히 줄어드는 것을 볼 수 있다. 이것은 필름의 부피와 밀도 등에 따른 고유진동수에 종속되는 변수이기 때문에 막의 부피를 줄이므로 해결 가능하리라 예상된다.

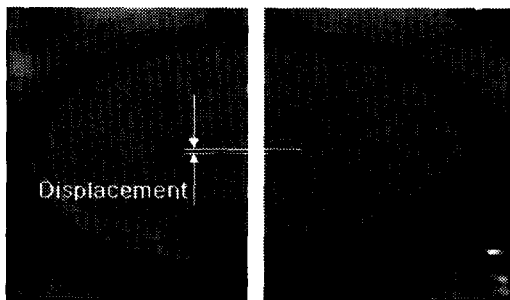


Fig. 13 Displacement of 11-9 with black point.

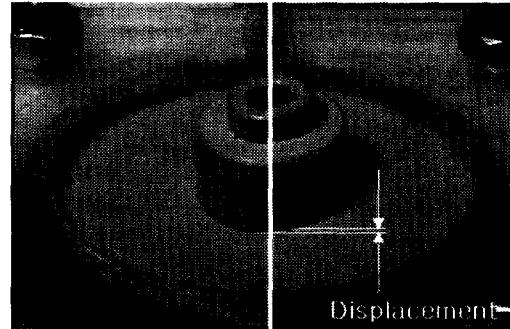


Fig. 14 Displacement of 11-9 with 13g mass.

Fig.13 과 Fig.14 는 동작확인을 위해 표식종이와 13g 의 추를 올려놓은 상태에서 동작하는 사진이다. 추를 올려놓은 상태에서는 회복시간이 15 ~ 30ms 증가하는 것을 알 수 있었다.

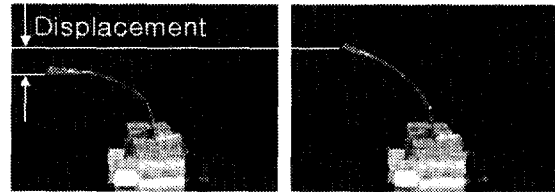


Fig. 15 Displacement of unimorph 11-9 sample.

Fig. 15 는 Uni-morph type 의 11-9 sample 의 8kV 인가시 동작하는 형상을 찍은 사진이다. 상부전극은 3 μm 두께의 Al 전극을 사용하였으며 하부전극은 전도성 그리스를 사용하였으며 변위량은 약 14mm 정도이다.

4. 결론

본 연구에서는 마이크로 액츄에이터 제작을 위한 폴리우레탄 필름의 전기왜곡성과 함께 기계적, 열적 특성에 대한 기본적인 평가를 실시하였다. 13kV 인가시 발생하는 폴리우레탄 필름의 최대 변위량은 14-5 필름의 698.1 μm 이다. 폴리우레탄 필름의 두께, 탄성회복시간, 변위 그리고 폴리우레탄 필름 구성성분의 변화에 대한 변위와 회복시간의 변화를 확인한 결과 폴리우레탄은 PTMG 기반에 crosslinking agent 가 첨가된 폴리우레탄 종류가 가장 좋은 특성을 나타내었으며, 가교제의 함량을 0.5wt%에서 1wt%로 증가하였을 때 약 39.5 초의

탄성 회복시간이 단축되었으며, 55.315 μm 의 변위가 증가하였다. Na^+ 이온이 첨가된 폴리우레탄은 필름의 탄성력 저하로 인해 탄성 회복시간이 증가하고 변위가 줄어들음을 확인하였다. 본 연구를 통하여 폴리우레탄 필름의 회복시간 단축이나 낮은 구동전압, 유연한 전극 등의 향후과제가 남아있지만 마이크로 액츄에이터나 Muscle-like 액츄에이터로의 적용가능성은 충분하다고 여겨진다.

Automation, pp. 2152 - 2157, 1997.
10. 화상처리응용기술, 이양범, 기문사, 1999.

참고문헌

1. Ron Pelrine, Roy Kornbluh, Jose Joseph, and Seiki Chiba, "Electrostriction of polymer films for microactuator," IEEE 97, pp. 238 - 243, 1997.
2. Roy Kornbluh, Ron Pelrine, Joseph Eckerle, Jose Hoseph , "Electrostrictive polymer artificial muscle actuators," International conference on Robotics & Automation, pp. 2147 - 2154, 1998.
3. T. Ueda, T. Kasazaki, N. Kunitake, T. Hirai, J. Kyokane and Yoshino, "Polyurethane Elastomer Actuator", Synthetic Metals 85, pp. 1415 - 1416, 1997.
4. R. Heydt, R. Kornbluh, R. Pelrine, V. Mason, "Design and performance of an electrostrictive-polymer-film acoustic actuator," Journal of Sound and Vibration, pp. 297 - 311, 1998.
5. Q.M.Zhang, J.Su, Chy Hyung Kim, "An experimental investigation of electromechanical responses in a polyurethane elastomer," Journal of Applied Physics. Vol 81, pp. 2770 - 2776, 1997.
6. Masashi Watanabe, Hirofusa Shirai, Toshihiro Hirai, "Bending electrostriction in polyurethane using in situ ultraviolet and visible spectroscopies," Journal of Applied Physics. Vol. 88, pp. 5328 - 5333, 2000.
7. Eun-soo Jeong, Han-soo Park, Hae-Do Jeong, Nam-Ju Jo, "Development of electrostrictive polyurethane(PU) films and its characterization," 10th ICPE , pp. 406 - 410, 2001.
8. Yoseph Bar-Cohen, "Electroactive Polymers(EAP) Actuators as Artificial Muscles - Reality, Potential and Challenges," SPIE Press, 2001.
9. Mchran Mojarrad, Mohsen Shahinpoor, "Biomimetic Robotic Propulsion using polymeric artificial muscles," International conference on Robotics &