

세그먼트화 폴리우레탄을 이용한 고분자 마이크로 액츄에이터의 제작 및 고분자 전극의 상태에 따른 구동성능

정영대*, 박한수**, 조남주**, 정해도#

Development and Performance Evaluation of Polymer Micro-actuator using Segmented Polyurethane and Polymer Composite Electrode

Young Dae Jung*, Han Soo Park**, Nam Ju Jo** and Hae Do Jeong#

ABSTRACT

This paper is focused on the development of the flexible electrode for disc-type polymer actuators using Segmented Polyurethane(SPU). This paper consists of two parts. The one is about the mechanical property such as elastic modulus. these parameters mainly affect behaviors of polymer actuators and the other is about the electro-chemical property such as the surface resistance of the composite electrode affects the strength of electrostatic force, results in the deformation of polymer actuators. The Young's modulus was measured by UTM. As result, by increasing the modulus of a body of polymer actuators, the maximum displacement of polymer actuators are decreased. The surface resistance of the electrode was measured by 4 point probe system. Compared with the conductive silver grease, the displacement of polymer actuators using carbon black(CB) composite electrodes is comparably small but CB composite electrode should be the practical approach for the improvement of the performance of all-solid actuators, compared with another types of electrode materials.

Key Words : Polymer Actuator(고분자 액츄에이터), Segmented Polyurethane(세그먼트화 폴리우레탄, SPU), Viscoelastic Behavior(점탄성 거동), Carbon Black(카본블랙), Polymer Composite Electrode(고분자복합체전극), Surface Resistance(표면저항), Spin Coater(스핀코터).

1. 서론

현재 다양한 기능성고분자중 스마트 재료(smart material)에 대해 많은 연구들이 진행되고 있는데 대표적인 분야로는 전도성(conductive)고분자, 생체 적합형(bio-compatible) 고분자와 전기구동형 고분자

(electro-active polymer)을 들 수 있다.

전기구동형 고분자(이하 EAP)는 이온전도 혹은 유전체 내의 전자전도에 의한 정전기적 인력이 주 동력원으로 재료내부에서 발생되어 인장 혹은 압축 되어 발생하는 전계유도변형이 발생하는 물질들을 말한다. 최근에 이러한 분야의 연구는 인공근육과

접수일: 2004년 6월 20일; 게재승인일: 2004년 11월 19일

* 부산대학교 대학원 정밀정형협동과정

** 부산대학교 고분자공학과

부산대학교 기계공학부

E-mail hdjeong@pusan.ac.kr Tel. (051) 510-2463

같은 연성이나 생체적합성을 만족해야 하는 고분자 물질에 많은 장점을 가지고 있으며 큰 변형량이나 구동밀도등이 상대적으로 높아 앞으로 많은 연구가 진행될 것으로 보인다.

유전체 고분자 중 압전형(piezoelectric) 고분자의 경우 이미 70년대 이후부터 불화비닐리덴(PVDF) 고분자와 이의 공중합체(PVDF-TrFE)를 중심으로 연구가 진행되어 왔으며, 다양한 압력센서로 항공 및 자동차 분야에 적용되고 있다^{1,2}.

먼저 고분자 재료로서 구동기로 사용되는 EAP를 분류하여 보면, 전극간의 이온의 교환에 의해 구동되는 Ionic EAP와 전극간의 전위차에 의해 구동되는 dielectric EAP로 나눌 수 있다.

전극간의 이온교환에 의해 구동되는 Ionic EAP의 경우는 대부분이 수용액상에 구동되는 단점이 있는 반면, dielectric EAP는 공기중에서 구동되고 이미 상용으로 제작되는 압전형, 전왜형, 정전형(electrostatic)등이 있으며, 반도체 공정이나 몰딩공정등에 의해 쉽게 제작될 수 있기 때문에 최근에 많은 관심을 불러일으키고 있다^{3,4,12}. 특히 최근에 인공근육을 대체할 수 있는 여러 가지 물질중에 가장 근접한 운동을 하는 물질로 각광을 받고 있으며⁵, 2005년에 미 NASA에서는 인공근육과 실제 사람과의 팔씨름대회를 개최할 예정이라고 한다⁶.

본 논문에서는 비교적 복잡한 공정한 분극공정(polarization)이 필요한 압전형과는 달리 무정형(amorphous)인 전왜성 고분자로, 세그먼트화 폴리우레탄(segmented polyurethane, 이하 SPU)에 대해 평가하였다. 액츄에이터는 중간층인 유전체 body와 상하층에 유연전극으로 구성되는데, 이중 전극으로는 카본블랙(carbon black, 이하 CB)을 이용한 고분자 복합체 전극을 적용하고 그 성능을 평가하였다.

2. 이론적 배경

2.1 전왜성 고분자 액츄에이터

전기왜곡성 혹은 전왜성(Electro-striction)이란 Fig. 1과 같이 전극간에 위치한 유전체 내부에서 전기장을 가하게 되면 응력이 발생되고, 이에 의해 변형이 생기는 현상을 말한다. 이러한 전왜성 물질은 압전성 물질과 달리 변형을 가할 때 발생하는 기전력이 매우 약하여 센서로는 사용되지 않으며 액츄에이터로만 사용되고 있다^{7,8}.

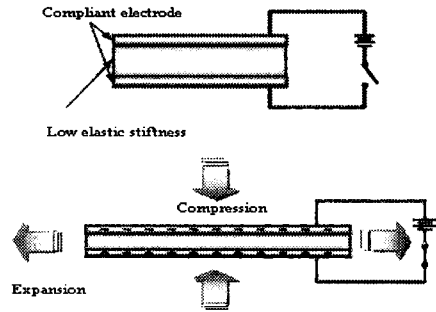


Fig. 1 Operation principle of dielectric elastomers

전왜성 액츄에이터는 압전성 액츄에이터의 제작에서 필수적인 복잡한 분극공정이 없기 때문에 제작이 용이하다는 장점이 있으나, 주로 변형에 필요한 동력이 전극간의 정전기적 인력에 의해 작용되는 맥스웰(Maxwell) 효과이므로 고변형과 높은 동력밀도를 가지기 위해서 고전압을 입력해야 한다는 단점이 있다. 또한 부가적으로 고분자 내부에서 일어나는 쌍극자(dipole) 모멘트를 가진 분자들의 재배열에 의한 전왜(electro-striction) 효과에 의해 일어나기도 하나, Maxwell effect가 주원인이라고 보고되고 있다⁸.

본 논문에서는 전왜성 고분자로 SPU를 사용하였다. SPU는 -OH기를 가지고 있는 polyol과 -NCO기를 가지고 있는 isocyanate를 중부가중합하여 생성되는데, hard와 soft한 부분을 완전히 세그먼트화시킨 PU를 말한다. 이 중 화학적인 인자로 polyol은 soft-segment, isocyanate는 hard-segment를 구성한다고 간주하여, hard-segment의 함량비(hard content)를 기준으로 고분자의 물성을 비교, 측정하였다⁹.

2.2 고분자 액츄에이터의 성능인자 추출

고분자 액츄에이터는 보통 전극/body 혹은 전극/body/전극타입으로 제작되는데, 중간에 변형을 일으키는 물질인 body부분과 body의 양면에 전계를 공급해 주는 역할을 하는 전극으로 구성된다¹¹.

고분자 액츄에이터의 변형성능에 영향을 미치는 인자로는 대표적으로 body의 두께에 의한 효과를 들 수 있는데, SPU의 두께가 감소할수록 변형에 사용되는 전압이 줄어들음을 알 수 있는데, 이는 본 연구의 선행연구로써 보고된 바 있다¹⁰.

SPU로 제작되는 고분자 액츄에이터의 body와

전극간의 상호작용으로 일어나는 전계유도변형의 성능을 평가하기 위한 특성으로써는 Table 1과 같이 기계적, 화학적, 전기적 성질로 분류할 수 있다.

먼저 기계적인 특성으로는 body부분의 점탄성을 들 수 있는데, 이 점탄성은 정밀한 액츄에이터로서의 응용에 장애가 되는 비선형성(non-linearity)으로 존재하기 때문에 이의 개선을 위해 많은 연구와 관심이 요구되고 있다. 본 연구에서는 고분자 점탄성에 대한 전반적인 내용을 다루는 것 보다는 전계에 의해 가해지는 외력을 기계적인 응력으로 간주하여 modulus를 기준으로 설명하고자 한다. 전극의 경우는 이러한 body의 고변형에 대응하기 위해 유연성(flexibility)이 필요하게 되는데, 고분자의 점탄성에 대한 내용에 대해서는 다음 절에 자세하게 다루기로 한다.

화학적 물성으로는 body의 경우 SPU의 제조를 위해 사용된 각 화학물질의 조성비(chemical composition)와 분자량을 들 수 있으며, 이 조성비는 고분자의 합성시 변경이 용이하다. 또한 전극의 화학적 물성은 body와의 접합성(contact-ability)이 가장 중요하다고 볼 수 있다. 전기적인 물성으로는 body의 유전율(dielectric constant), 정전용량(C_p , capacitance) 및 분극율(polarity)이 구동에 영향을 미치게 되며 전극의 경우는 무엇보다 전계를 전달하는 역할 때문에 표면저항과 비저항을 들 수 있다. Table 1은 EAP를 이용한 액츄에이터의 구동에 영향을 미치는 인자를 body와 전극으로 분류하여 정리하였다.

Table 1 Performance parameter of SPU actuators

	Property	Item
Body	Mechanical	Viscoelasticity
		Young's(elastic) modulus
	Chemical	Hard-segment content Molecular weight
	Electrical	Dielectric constant
Electrode	Mechanical	Flexibility of electrode
	Chemical	Contact-ability
	Electrical	Sheet resistance

2.3 고분자 액츄에이터의 점탄성 해석

일반적으로 고체 고분자는 탄성(spring)과 점성(dashpot)거동을 모두 가지는데 이를 점탄성

(viscoelasticity)이라고 한다. 이런 성질을 잘 나타내는 물질을 elastomer라고 부르며, 천연고무 혹은 실리콘 고무등과 폴리우레탄등이 이에 해당한다.

이러한 고분자 재료는 일정한 응력을 가하게 되면 재료는 시간이 흐름에 따라 크립(creep)이 발생하고 응력을 제거하면 회복(creep recovery)이 일어나며 최종적으로 영구변형이 남게 된다.

일반적인 고분자재료의 점탄 거동특성은 Fig. 2와 같이 두 개의 스프링 요소와 두 개의 데쉬팟 요소로 구성되는 4 element로 거동을 예측할 수 있는데, 일반적으로 Fig. 3과 같은 시간-변위거동을 보인다. 즉 하중이 가해지는 시점에서 순간적인 탄성 변형이 발생하고, 이어서 크립이 발생되며, 하중이 제거되는 시점에서 순간적인 탄성회복 ϵ_1 이 발생하고 시간이 지남에 따라 서서히 회복이 이루어지는 지연(time-delay)회복 ϵ_2 , 최종적으로 완전회복이 이루어지 않게 되면 영구변형(permanent deformation) ϵ_3 으로 남게 된다.

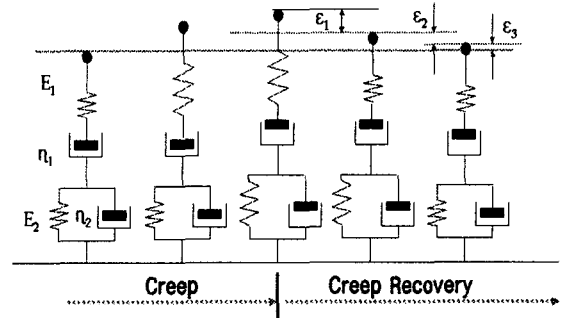


Fig. 2 Viscoelastic modeling using 4 element models

이에 반해, 고분자 탄성체의 경우 회복이 완전히 이루어질 때까지 재료에 따라 수 ms에서 수분까지 걸리기도 하는데, 완전한 회복이 이루어지기 전에 다시 전계가 가해지는 동적상태에 진입하게 되면, 아직 회복되지 못하고 비회복변형(non-recovery deformation)으로 남게 되면서, 다시 전계에 의한 변형이 유도된다. 이러한 비회복변형은 시간이 지나면 완전히 회복되므로, 소성변형인 영구변형과 구별된다. 특히 고분자 액츄에이터의 경우는 점성에 해당하는 물성이 크기 때문에 이러한 비회복변형은 동적성능의 측면에서의 단점으로 여겨진다. 본 연구에서는 화학적인 합량비에 따른 고분자의 물성이

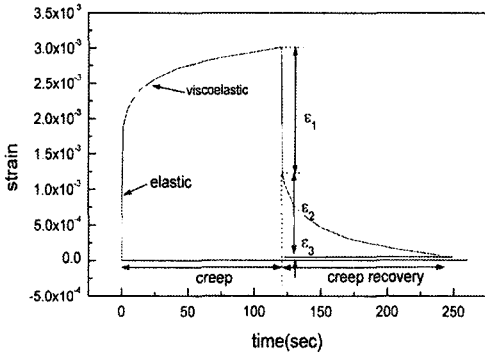


Fig. 3 Creep and recovery of solid polymers

동적구동성능에 미치는 영향을 비회복변형이라는 인자로 평가하고자 한다.

2.4 고분자 복합체를 이용한 유연전극개발

고분자 액츄에이터의 구동변위가 커짐에 따라 금속 및 세라믹 액츄에이터에 사용되었던 증착법과는 달리 더 큰 변형을 추종할 수 있는 전극의 개발이 요구된다. 이를 위해 본 연구에서 시도한 방법은 전도성을 가지는 분말형태의 전도성 입자인 CB를 바인더로 사용하여 유성(solvent-based) SPU보다 접도를 저감할 수 있는 수분산(water-dispersed) SPU에 분산시켜 제작하였다. 이는 CB의 우수한 전도성과 변형에 유연한 SPU의 장점을 활용할 수 있으며, body와의 접합성을 최대한 고려한 것이다.

3. 실험 및 결과

3.1 고분자 박막 액츄에이터의 제작

먼저 body의 제작은 유기용매에 녹아있는 SPU 레진을 몰드 내에서 건조 시키는 solution casting 법을 이용하였다. 이때 사용된 몰드는 극성인 SPU와의 탈형이 용이하게 하기 위하여 PTFE(TEFLON™) 몰드를 이용하였다.

본 연구이전에는 Circuitworks™사의 도전성 실버 그리스(conductive silver grease)를 사용하여 액츄에이터의 양면에 끝고루 입혀 변형을 측정하였다¹¹.

3.2 스핀공정을 통한 고분자 복합체 전극제작

높은 변형률과 구동밀도를 가지는 EAP는 전계를 가하기 위해 전극으로써, 유연성과 저저항을 동시에 가져야 한다. 이를 위해 본 실험에서는 유연

성과 body와의 접합성을 고려하여 개발된 CB 복합체 전극용 레진을 제조한 후 이를 스핀코터를 이용하여 body양면에 30~50 μ m의 두께를 가지는 코팅하여 60 $^{\circ}$ C에서 10분 동안 건식오븐에서 경화시켰다. 실험에 사용된 CB는 한국카본블랙(주)의 HIBLACK™을 사용하였다.

먼저 전극의 성능을 평가하기 위해 표면저항(surface resistance)을 측정하였다. 표면 저항은 전극 재질 자체의 저항과 표면상태에 따라 달라지기 때문에, 표면상태에 따른 표면저항의 오차를 줄이기 위해 4" wafer 위에 같은 공정조건을 주어 코팅한 후 그 결과를 4 point probe를 통해 49개의 표면 전체의 저항치를 연속적으로 측정하였다. 사용된 측정기는 Changmin Tech의 CMT-SR2000™이며 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 결과적으로 2000 rpm이하의 스핀속도로 도포할 경우는 표면저항은 작지만 막의 두께가 두꺼워질 뿐만 아니라 웨이퍼 전면에 균일한 막을 얻기가 힘들었고, 2500rpm이상의 스핀속도에서는 CB입자들이 원심력에 의해 막 전면의 입자 농도의 차이가 발생되는데 이 때문에 표면저항의 증가가 초래되는 것을 볼 수 있다.

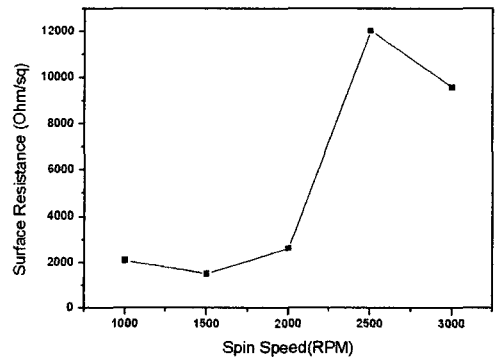


Fig. 4 Surface resistance according to spin speeds

Table 2 Characteristics of a compliant electrode

Total number of point	49 site/wafer
Ave. resistance	445 Ω /square
Std. dev	34
Film thickness	0.025
Std. dev	0.005
Spin speed(2 step)	1st 700 rpm 60 sec
	2nd 2000 rpm 180 sec

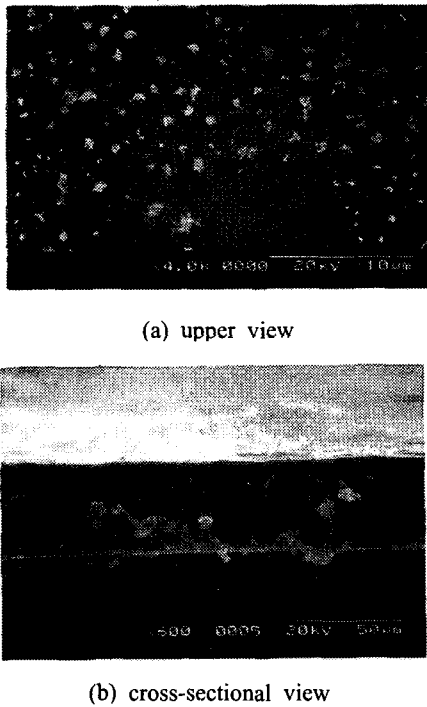


Fig. 5 SEM images of CB composite electrodes

Table 2는 웨이퍼상에 스핀코팅에 의해 제작된 유연전극의 49개의 분산된 점에서 측정된 표면저항치의 평균과 두께를 나타내었다. 또한 웨이퍼 표면에 어느 정도로 고르게 입혀졌는지를 판단하기 위해 저항치와 두께의 표준편차를 제시하였다.

이 결과를 바탕으로 본 실험을 위해 제작된 복합체 전극의 경우, 최적의 스핀속도구간을 2000rpm 부근으로 결정하여 제작하여 전극박막의 단면을 액체질소를 이용하여 절단하여 Fig. 5와 같이 SEM을 통해 관찰하였다. 같은 재질인 SPU를 사용하므로 body/전극간의 계면상태나 결합력은 매우 뛰어난을 볼 수 있다.

3.3 전압제어 및 전계유도변위측정시스템

고분자 액츄에이터의 미소변위를 측정하기 위해선 액츄에이터의 변형을 방해하지 않아야 하므로 비접촉식인 정반사식 가시광 반도체 laser를 사용하는 OMROM Z4M-S40R를 사용하였다. 또한 중심에서 최대변형을 보이도록 가장자리를 완전히 구속시킨 다이어프램형(diaphragm-type)의 액츄에이터로

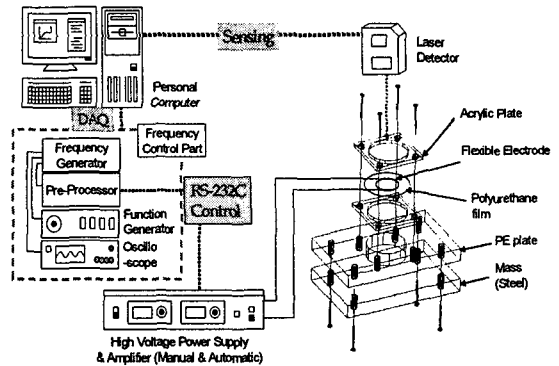


Fig. 6 Displacement control & measurement system for polymer actuator

제작하였다.

파형의 출력을 위해 RS232C를 통해 전압출력용 DAQ(DA04EX, COMFILE Technology)를 사용하여 파형을 0.1초 단위로 0-10V로 샘플링하였고, 이를 Converttech™사의 고전압증폭기인 SHV-120을 통해 100배 증폭하여 고분자 액츄에이터에 공급하였다.

변위측정을 위해 제작된 지그와 측정시스템의 구성도를 Fig. 6에 나타내었다.

4. 측정 결과 및 고찰

4.1 body의 점탄성에 따른 전계구동분석

4.1.1 Hard content에 따른 최대변위 분석

점탄성이 액츄에이터의 body의 변형에 어떠한 영향을 미치는가를 평가하기 위해 단위변형을 발생할 때 얼마나 많은 전계에 의한 응력을 발생하여야 하는가를 측정하였다. 이를 탄성계수(elastic modulus, E)를 기준으로 이를 비교하고자 한다.

Fig. 7은 UTM을 사용하여 연신율(% elongation)에 따른 인장응력(tensile stress)을 측정하였으며, 이 중 재료의 modulus를 중심으로 평가하기 위하여 stress-strain 그래프 중 100%이내의 strain 영역만을 도시하였다.

Fig. 7은 hard content가 증가함에 따라 기울기에 해당하는 modulus값이 증가하고 이 modulus값이 증가함에 따라 Fig. 8과 같이 최대변위가 감소하는 것을 알 수 있다. 즉 단위변형을 발생시키기 위해 더 많은 전계의 입력이 필요하며, hard content가 증가할수록 modulus와 단위변위당 입력전압은 커진다

는 것을 알 수 있다.

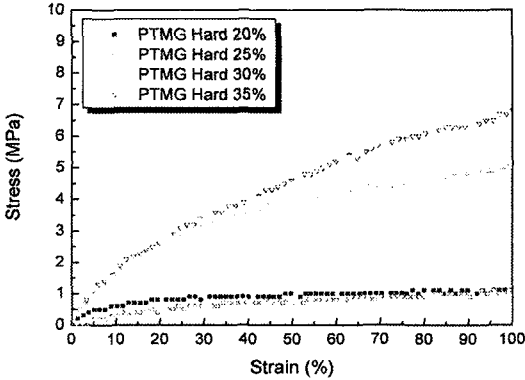


Fig. 7 Elastic moduli of micro actuators using SPUs within 100% strain according to hard content

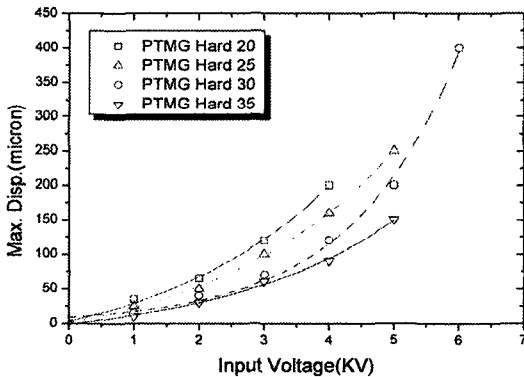


Fig. 8 Maximum displacement of micro actuators using SPUs according to hard content

결과적으로 hard content가 증가함에 따라 인장 강도와 modulus는 증가하며, 탄성구간이 커짐을 알 수 있다. 하지만 hard content가 낮으면 단위입력전계에 대한 최대변형량은 증가하지만, 탄성구간과 변형구간이 줄어들기 때문에 두 가지의 인자에 적용되는 시스템의 필요에 따라 적절한 trade-off가 필요함을 알 수 있다.

4.1.2 Hard content에 따른 비회복변형 분석

점탄성 거동의 경우 물질의 고유한 성질이기는 하나, 탄성거동을 제외한 지연변형과 비회복변형은 점성에 관련되므로 주어지는 외력이나 주파수에 따라 달라진다. 본 연구결과에서 보고자 하는 비회복변형은 액츄에이터로 사용되었을 경우 반복구동

에서의 구동오차를 발생시키는 주된 요인이 된다.

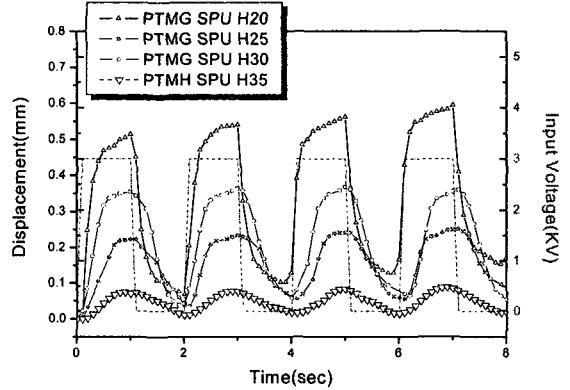


Fig. 9 Dynamic characteristics of SPU actuators according to hard content

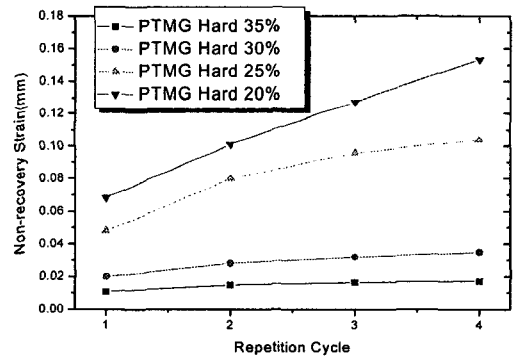


Fig. 10 Non-recovery deformation of polymer actuators using SPUs according to hard content

다양한 연구결과를 통해 검토한 결과, Fig. 9와 같이 hard content를 20wt%, 25wt%, 30wt%, 35wt%에 대해 각각 0.5Hz, 3KV의 전압파형을 인가한 후 그 동적변형을 측정하였다. Fig. 10은 비회복변형만을 hard content에 따라 구분하여 측정하였다.

위의 결과에서는 hard content의 증가에 따른 modulus의 증가로 인해 액츄에이터의 최대변형량이 감소함을 알 수 있다. 또한 변형후 회복시에 나타나는 액츄에이터의 비회복변형량은 hard content가 증가할수록 작아지는데, 이는 탄성변형이 주를 이루는 탄성영역내에서 구동이 이루어지기 때문이다.

또한 위의 hard content가 20wt%, 25wt%인 경우

에는 반복되는 전압과형의 입력에 따라 이러한 비회복변형이 점점 누적되어 가는 것을 볼 수 있는데, 이러한 현상은 일정이상의 비회복변형이 누적된 이후 탄성영역을 벗어나거나, 절연과괴(insulation breakdown)와 같은 현상이 발생할 우려가 있기 때문에 바람직하지 않다. 본 연구에서는 이러한 이유로 적절한 hard content를 25-30% 영역으로 선정하였다.

4.2 전극의 표면저항에 따른 전계구동분석

제작된 고분자 액츄에이터의 body로서 250 μ m의 두께의 SPU를 사용하고 실버그리스와 CB 복합체, 두 가지 전극을 사용하여 변위를 측정하였다.

Fig. 11은 실버그리스와 고분자 복합체를 전극으로 사용하여 제작한 액츄에이터의 변형을 측정한 그래프이다. 또한 제작된 CB 복합체의 박막공정을 위한 점도저감을 목적으로 용매를 30wt%, 50wt% 첨가하였을 경우로 분리하여 나타내었다.

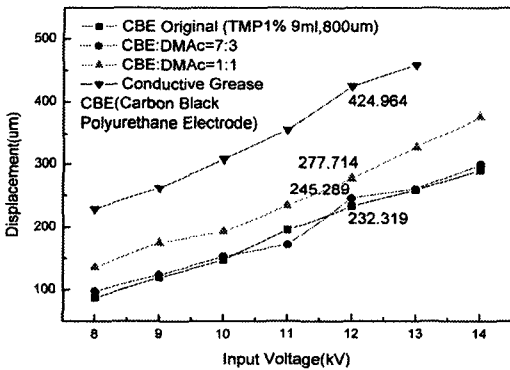


Fig. 11 Maximum displacement according to electrode materials, silver grease and CB

본 그래프에서 이론적으로 가장 저항이 낮으면서 유연성이 좋다고 간주되는 실버그리스가 가장 변형이 크게 일어났으며, CB 복합체 전극의 경우는 접합성과 표면의 안정성과는 달리 표면저항이 부분적으로 높으며 고분자 복합체 전극이 가지는 modulus의 증가로 인해 최대변형량이 소폭 감소하는 경향을 나타내었다.

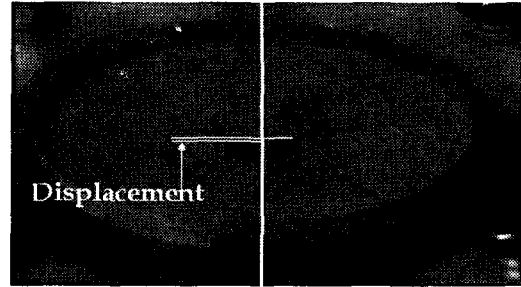


Fig 12. Example of disc-type micro-actuators

그러나 실버그리스의 경우 고체상태가 아니기 때문에 실제 상용 micro-pipette 혹은 능동형 밸브로 사용하기에는 한계가 있는 반면, CB 복합체 전극의 경우는 상대적으로 비저항이 다소 높고, CB의 분산에 의한 표면 균일도 및 자체 modulus를 가진다는 상대적인 단점을 가지고 있으나, body와의 우수한 접합성과 전체적으로 고체형 액츄에이터(all-solid actuators)로 제작이 가능하기 때문에 적용가능한 응용범위가 넓다는 장점이 있다.

Fig. 12에는 제작된 액츄에이터의 구동시의 모습을 보여주고 있으며, 현재 micro-fluidics나 인공근육과 같은 다양한 응용분야에 적용하기 위해 많은 노력을 기울이고 있으며 상용 MEMS device의 active valve로 사용이 가능할 것으로 예상된다.

5. 결론

본 연구에서는 고변형을 수반하는 고분자 액츄에이터의 성능을 평가하기 위해 SPU body의 elastic modulus의 측정과 이를 점탄성의 비회복변형의 측정을 통해 분석하였고, 전극의 경우는 표면저항을 측정하고 전극의 물성을 통해 최대변형량을 측정하여 이를 비교, 분석하였다.

먼저 액츄에이터 body의 경우 modulus가 증가할수록 변형을 위해 요구되는 응력이 증가하여 각 전압에서의 변형량과 최대 변형량은 감소하나, 상대적으로 더 넓은 탄성변형 구간을 가지므로 정해진 외력이나 입력전계에서의 비회복변형량은 감소함을 알 수 있다. 또한 넓은 탄성변형구간에 의해 회복되는 속도가 빠른 것이 비회복변형량의 감소에 영향을 주는 것으로 보인다.

본 연구에서 또한 다루고자 하는 부분인 전극의

성능은 전극의 표면저항과 body와의 접합성에 의해 평가되는데, 현재 LCD등의 디스플레이에 주로 사용되고 있는 전극인 상용 ITO(Indium tin oxide)의 경우가 약 50~500Ω /square임을 감안한다면 비교적 좋은 성능을 가지고 있다고 평가된다. 따라서 CB 복합체 전극의 면저항과 분산 상태를 보다 개선한다면 현재 액츄에이터에 적용이 검토되고 있는 금속 전극과 비교하여도 충분한 경쟁력을 가질 것으로 생각된다.

위의 결과로부터 향후 연구되어야 할 과제로서는 인계전압에 따른 변형량의 극대화와 비회복변형량의 최소화를 위해 다양한 hard content에 따른 점탄성 특성을 비교할 필요가 있으며, 원하는 성능이 정의되면 그에 따라 화학적인 함량비를 결정하여 액츄에이터를 제작하게 되는 과정이 필요할 것으로 보인다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구과제인 (R01-2003-000-11612-0)의 지원으로 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 깊이 감사드립니다.

참고문헌

1. Kawai, H., "The Piezoelectricity of poly(vinylidene fluoride)," Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 8, pp. 975-976, 1969.
2. Furukawa, T., "Piezoelectricity and pyroelectricity in vinylidene fluoride/trifluoro-ethylene copolymers," J. Appl. Phys, Vol. 56, No. 3, 1984.
3. Fukada, E., "History and Recent Progress in Piezoelectric Polymers," IEEE Transactions on ultrasonics, ferroelectrics and frequency control, Vol. 47, No. 6, 2000.
4. Cohen, Y., "Electroactive Polymer Actuators as Artificial Muscle," SPIE Press, 2000.
5. Kornbluh, R., Pelrine, R., Eckerle, J., Joseph, J., "Electrostrictive Polymer Artificial Muscle Actuators," Proceedings of the 1998 IEEE Int. Conference on Robotics & Automation, 1998.
6. Cohen. Y., "<http://ndeaa.jpl.nasa.gov/>," Jet Propulsion Lab, NASA.
7. Kim, J., Kim, Y., "Electroactive papers: its possibility as actuators," SPIE's 7th Annual Symposium on Smart Structures and Materials, 3987, California U.S.A., 2000.
8. Lamba, N., Woodhouse, K., Cooper, S., Polyurethanes in Biomedical Applications, CRC Press, 1998.
9. Wang, H., "The Origins of Electromechanical Response in Polyurethane Elastomer," Proceeding of 9th IEEE Symposium on Applications of Ferroelectrics, pp. 182-185, 1998.
10. Jung, Y., Jeong, E., Jeong, H., Park, H., Jo, N., "Development of thin film actuator using electrostrictive phenomena," ASPE annual meeting, Saint-Louis, 2002.
11. Jung, Y., Jeong, E., Jeong, H., Park, H., Jo, N., "A Study on Development of Polymer Microactuator using Conductive Polymer and Its Application," Proc. of Korean MEMS conf, 2003.
12. Ahn, H., Lee, S., Park, J., "Characteristics analysis and experimental evaluation of solid electrolytes for CP actuators in air," Journal of Korean Electrical Society, Vol. 47, No. 10, 1998.