

## 세그먼트화 폴리우레탄을 이용한 고분자 마이크로 액츄에이터의 개발 및 마이크로 플루이드스에의 적용

정영대\*(부산대 대학원 기계공학과), 박한수(부산대 대학원 고분자공학과),  
조남주(부산대 고분자공학과), 정해도(부산대 기계공학부)

### Development of Polymer Micro-actuator using Segmented Polyurethanes and its Application for the Micro-fluidics

Y. D. Jung(Precision. Eng. Dept. PNU), H. S. Park, N. J. Jo(Polymer Eng. Dept. PNU),  
H. D. Jeong(Mechanical Eng. Dept., PNU)

#### ABSTRACT

Electro-active polymer, one of smart materials, is a new alternative technology, which can get an ultra precision movements and bio-compatibility. This paper presents the relationship between elastic modulus and maximum deflection as a key property of maxwell stress effects and also presents the relationship between dielectric constant and maximum deflection as a key property of electro-striction effects in disc-type actuators using segmented PU. To induce equation about distributed load of a disc, we use boundary condition of fully clamped circular plate and to obtain design parameters of a micro-fluidics system, CFD simulation is performed.

Key Words: Electro-active Polymer(EAP, 전기구동형 고분자), Segmented Polyurethane(SPU, 세그먼트화 폴리우레탄), Dielectric Constant(유전율), Micro-pipette(마이크로 피펫), Computational Fluid Dynamics(전산유체역학)

#### 1. 서론

현재 화학공업과 고분자기술의 발달로 인해 거의 모든 재료는 고분자로 대체될 것으로 예상된다. 이러한 과정에는 단점으로 여겨지는 열이나 독성물질의 함유 등이 있음에도 불구하고 그 장점인 대규모 합성이 가능하고 제작공정이 용이하고 저가격으로 생산이 가능하다는 점 때문에 앞으로 많은 재료적인 발전 및 응용분야 또한 다양해질 것이다.

이 중에서도 전기구동형 고분자(electro-active polymer)는 이온전도에 의한 산화환원(redox)반응에 의하여 변형이 발생하는 ionic EAP와, 유전체 내의 전계의 공급에 의한 전기왜곡(electro-striction) 현상과 정전기적 인력에 의한 맥스웰 효과(maxwell effect)가 재료내부에서 발생되어 전극간에 인장 혹은 압축응력이 발생하는 변형을 가지는 dielectric EAP로 나눌 수 있는데<sup>1</sup>, 몇 가지의 경우를 제외하면 이온 교환의 경우 대기 중에서 그 상태를 유지하는 것이 어려워 상용제품으로의 적용은 어렵다고

할 수 있다<sup>2</sup>.

최근의 dielectric EAP를 이용한 고분자 액츄에이터의 연구를 두 가지로 분류하면, 폴리우레탄 혹은 silicone등과 같은 elastomer류<sup>4,5</sup> 및 이에 액정성을 부여한 네마틱 고무(nematic rubbers)와 같은 soft actuator와 Nafion<sup>TM</sup>(Dupont)과 같은 불화화합물을 body로 하여 두 백금전극을 통해 ~1V정도의 전압만으로도 쉽게 변형이 일어나는 semi-soft actuator로 구분할 수 있다<sup>3</sup>.

본 논문에는 세그먼트화 폴리우레탄(segmented polyurethane, 이하 SPU)을 사용하여 제작한 원판형 액츄에이터를 고체역학적인 경계조건을 이용하여 해석하였다. 또한 SPU의 경도와 강도에 영향을 미치는 polyol의 화학조성비의 변화가 액츄에이터의 동특성 및 전기화학적 특성에 미치는 영향을 분석하고자 한다.

#### 2. 이론적 배경

## 2.1 전기구동형 고분자 액츄에이터

본 논문에서는 전기구동형 고분자중의 하나로 전기왜곡성(Electro-strictive) 고분자를 이용하였다. 전기왜곡성 혹은 전왜성이란 전계하에 변형이 발생하는 현상을 말하며, 이를 역압전성(depiezo)이라고도 한다. 이러한 전왜성 물질은 압전성 물질과 달리 변형을 가할 때 발생하는 기전력이 매우 약하여 센서로는 사용되지 않으며 액츄에이터로만 사용되고 있다<sup>6,7</sup>.

Fig 1 과 같이 전극간 정전기적 인력(hydrostatic force)에 의해 두께방향인 전극간에는 압축응력이 발생되어 수축이 발생되게 되는 반면, 길이방향으로는 인장응력에 의해 늘어나게 된다.

이를 액츄에이터로 이용하기 위해 먼저 한쪽 끝을 고정하여 강도와 경도가 높은 절연(insulated) 재료를 한 층으로 만들고 그 위에 EAP 를 적층시켜 만든 bimorph-type 으로 만들면 구동자체를 외팔보(cantilever)의 끝단의 처짐거동으로 해석할 수 있다.

반면에 원판의 가장자리를 완전고정(clamping)하여 원형판의 중앙부분에 처짐을 발생하는 형태인 disc-type 으로 제작이 가능하게 되면, 변형자체를 중앙의 최대처짐으로 간주하여 해석할 수 있다.

현재 전왜성 액츄에이터의 구동에 관한 명확한 원리는 알려지지 않고 있으나, 다음 두 가지의 동작원리가 동시에 작용하고 있다는 것이 통설이다.

먼저 맥스웰에 의해 정리된 학설로 유도되는 변형에 필요한 동력이 전극간의 정전기적 인력에 의해 작용된다는 맥스웰 효과(maxwell effect)와, 고분자 조직내부에서 일어나는 쌍극자(dipole) 모멘트를 가진 분자들의 재배열에 의한 전왜(electro-striction) 효과가 동시에 작용하고 있다고 볼 수 있으며, 현재 실험적으로 밝혀진 바로는 전체 변형 중 95% 이상이 맥스웰 효과에 의한 것으로 보고되고 있다<sup>7</sup>.

본 논문에서는 사용된 액츄에이터 재료는 SPU 를 사용하였다. SPU는 Fig 2 와 같이 -OH기를 가지고 있는 polyol과 -NCO기를 가지고 있는 isocyanate 가 중부가중합되어 생성되는데, hard segment의 함량이 높아짐에 따라 경도와 강도등이 증가하는 형태를 가지게 된다<sup>8</sup>.

## 2.2 원판형 액츄에이터의 역학적 해석

기존의 고분자 액츄에이터는 외팔보 형태가 주류를 이루어 왔는데, 이는 해석이 이미 완료된 형태이기도 하며, 단면이 일정하기 때문에 관성모멘트(moment of inertia)가 일정해지므로 변위 혹은 성능의 예측이 간단하다는 장점이 있었다.

하지만 본 연구에서 수행하였던 고분자 액츄에이터는 비교적 경도가 낮기 때문에, 박막으로 제작될 경우 외부의 하중에 의해 형태를 제대로 유지하

기가 힘들다는 단점이 있었다. 이 때문에 원판형의 박막으로 제작되는데, 원둘레에서 고정되며 중심에서 최대처짐을 보이도록 제작하였다.

이의 해석을 위해 원형판(circular plate)에 주어지는 전계유도응력을 분포하중(distributed Load)으로 간주하여 처짐과 전계유도응력과의 관계를 도출하여 처짐거동에 영향을 미치는 인자를 분석하고자 한다.

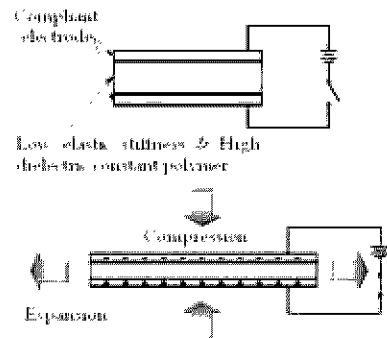


Fig. 1 Principle of disc-type polymer actuator

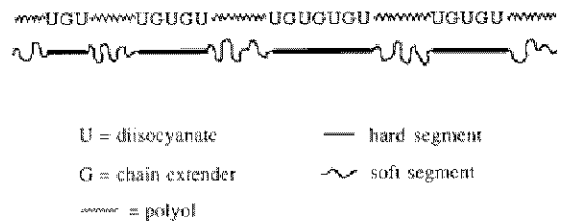


Fig. 2 Synthesis of segmented polyurethanes

Fig 3 과 같은 두께가  $h$  이고 가장자리에서 완전 구속된 원판에 수직분포하중인 전계유도응력 이 발생한다고 가정할 때, 원판 중앙에 최대처짐을 보인다고 볼 수 있으며 이 처짐과 유도된 응력과의 관계를 구하고자 한다.

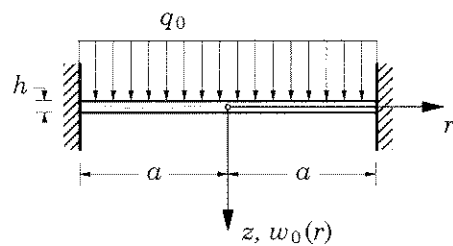


Fig. 3 Analysis of uniformly distributed load on the fully-clamped circular plate

해석해를 구하기 위해 경계조건을 이용하여 식을 유도해 낼 수 있는데, 양단이 구속되어 있으며

로 경계조건은 식(1)과 같이 구할 수 있다<sup>9</sup>.

$$w_0 = 0, \quad \frac{dw_0}{dr} = 0 \quad \text{at} \quad r = a \quad (1)$$

원판에서의 경계조건을 이용한 처짐의 일반해는 식(2)을 이용하여 유도할 수 있으며, 최대처짐은 원판의 중심점인  $r=0$ 에서 일어나므로 식(3)과 같이 유도할 수 있다.

$$w_0(r) = \frac{q_0 a^4}{64D} \left(1 - \frac{r^2}{a^2}\right)^2 \quad (2)$$

$$w_{\max} = \frac{q_0 a^4}{64D} = \frac{q_0 a^4 (1-\nu^2)}{4Eh^3} \quad (3)$$

$\nu$  는 poisson's ratio 를 나타내는데 본 연구에서 사용된 SPU 를 이상고무라고 간주할 수 있으므로 0.5 로 정의하고,  $D$  는 굽힘강성(flexural rigidity)을 나타내며,  $D = Eh^3/12(1-\nu^2)$  으로 정의된다. 위 식을 이용하여 원판의 중심에 가해지는 분포하중과 집중하중에 관한 식으로 변환하면 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$w_{\max} = \frac{3q_0 a^4}{64Eh^3}, \quad q_0 = \frac{16Eh^3}{3a^4} w_{\max} \quad (4)$$

이  $q_0$ 는 피펫(pipette)이나 펌프(pumps)와 같은 micro-fluidics 소자의 개발에서 제작이전에 필수적인 CFD(Computational Fluid Dynamics) 등의 해석 등에 구동력(actuation force)으로 계산되어 사용된다.

이러한 구동력의 유도가 필요한 이유로서는 고분자 탄성체자체가 비교적 낮은 강도와 경도를 가지므로 접촉식 측정이 어렵고, 접촉식 센서자체가 가지는 최소하중에도 매우 민감하다는 단점을 가지고 있기 때문에 고체역학적인 이론적인 계산으로 전계유도응력을 추출하고자 한다.

본 연구에서는 원판의 반지름  $a$  를 25mm 로 고정하여 사용하였으므로, 최대처짐은 원판의 두께가 증가함에 따라 급격히 줄어드는 것을 알 수 있다. 또한 UTM(universal test machine)으로부터 측정할  $E$ (Young's modulus)가 증가함에 따라 최대처짐은 줄어든다는 것을 알 수 있다.

## 2.3 원판형 액츄에이터의 전기화학적 해석

절연체(insulator)를 전기장위에 놓았을 때 표면에 전하(electric charge)가 유기되는 현상이 있는데, 이러한 절연체를 유전체(dielectric)라 하고, 전극과 인접한 표면에 전하를 띠게 된다. 이 현상을 생성하는 메커니즘은, 자성체의 자기화와 마찬가지로 전기장의 작용에 의해서 무극성분자에서는 분자 내의 양·음의 전하가 어긋나고, 극성분자에서는 쌍

극자모멘트의 방향이 가지런해져서 물질이 전체적으로 전기쌍극자모멘트를 가지게 되고, 이것이 콘덴서(condenser)의 극판에서 전하의 작용을 얼마간 상쇄하기 때문이라는 것이 밝혀졌다.

이러한 절연체를 극판사이에 넣었을 경우와 진공일때의 유전율(dielectric constant of vacuum)의 비를 유전율(dielectric constant, permittivity)이라고 하는데, 정전용량(capacitance)의 측정에 의해 변환이 가능하다. 일반적인 고체나 액체의 유전율은 2~10 정도이나 로셀염이나 티탄산바륨(BaTiO3)과 같은 압전 물질은 수백에서 수천의 유전율을 가진다.

본 연구에서 사용된 액츄에이터로 사용된 일반적인 SPU의 경우, 압전재료로는 유전율이 다소 작은 10~5000 정도의 영역을 가지며, soft segment인 polyol의 종류에 따라 유전율은 변하게 된다<sup>10</sup>.

본 연구에서 사용된 3 가지의 각기 다른 soft segment 인 polyol 로는 PTMG(BASF Co. Ltd, Mw 2000), PNAD(Union Chem, Co. Ltd, Mw 2000)와 PDMS(Shinetch Chemical, Mw. 2000)를 사용하였고, hard segment 인 isocyanate 로는 MDI(BASF Co. Ltd)를 사용하여 SPU 를 합성하였다.

사용된 polyol 을 극성순으로 보면, PNAD 가 PTMG 보다 크다. 이는 고분자의 정전용량은 분자의 극성에 의한 재배열로 전하가 저장되기 때문에 극성이 높을수록 일반적으로 유전율이 높다.

유전율을 구하기 위해 식(5)을 이용하는 데, 여기서  $d$ 는 두께(thickness)이고,  $A$ 는 면적(sectional area),  $\epsilon_0$ 는 진공유전율이며,  $8.854 \times 10^{-12}$  F/m의 값을 가진다.

$$\epsilon_r = \frac{C_p d}{A \epsilon_0} \quad (5)$$

일반적으로 전왜 혹은 압전 액츄에이터와 같은 전기구동형 액츄에이터의 경우, 표면에 전하가 많이 유도될수록, 즉 유전율이 높을수록 전왜 혹은 압전 현상이 증가된다.

세라믹 콘덴서(ceramic condenser)의 경우, 정전용량을 증가시키기 위해서는 절연성은 높지 않으나 유전율을 높이기 위해 유전체를 극히 얇게 하여 적층(lamination)시키는 방법을 주로 이용하게 된다.

## 3. 실험 및 결과

### 3.1 액츄에이터의 제작공정

먼저 body의 제작은 각각의 polyol을 이용하여 isocyanate와 합성한 SPU resin을 몰드 내에서 건조시키는 solution casting 법을 이용하였다. 이때 사용된 몰드는 극성인 SPU와의 탈형(decoupling)을 위하여 비극성인 TEFLON™을 이용하였다.

본 연구이전에는 액츄에이터의 변형을 추종할 수 있어야 하므로 Circuitworks™사의 도전성 실버 그리스(conductive silver grease)를 전극으로 사용하였으나, 본 실험에서는 body와의 접합성을 고려하여 제조된 저점도의 수분산 SPU resin에 전도성 입자인 카본 블랙(carbon black)을 분산시켜 제작하는 고분자 복합체 전극을 제작하였다.

본 논문에서 사용된 고분자 복합체 전극은 30 μm의 두께와 평균 300Ω/sq의 면저항을 가지는 고분자 전극을 이용하여 액츄에이터를 제작하였다<sup>11</sup>.

### 3.2 입력전압제어 및 전계유도변형 측정장치

고분자 액츄에이터의 미소변위를 측정하기 위해 선 필름의 변형을 방해하지 않아야 하므로 비접촉식인 정반사식 가시광 반도체 laser 를 사용하는 OMRON Z4M-S40R 를 사용하였다. 측정을 위해 제작된 하드웨어와 변위측정을 위한 지그와 측정시스템의 구성도를 Fig. 4 에 나타내었다.

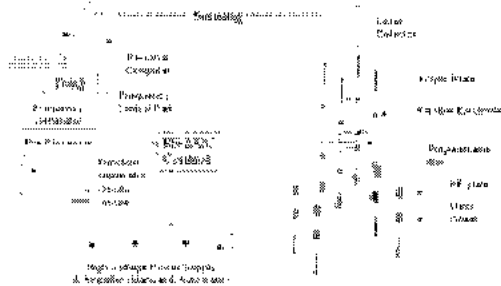


Fig. 4 Displacement control system using a DAQ board & measurement system using a laser sensor for polymer actuator

파형의 출력력을 위해 RS-232C를 통해 전압출력용 DAQ보드(DA04EX, COMFILE Technology)를 사용하여 파형을 0.1 초 단위로 샘플링하였고, 고전압 전원장치(SHV120-36KV, Converttech™)를 통해 증폭하여 고분자 액츄에이터에 공급하였다.

### 3.3 변형측정에 의한 구동력의 환산

#### 3.3.1 화학조성비에 따른 탄성계수와 유전율

식(4)에서 살펴본 바와 같이 액츄에이터의 구동력은 두께 h 와 탄성계수가 중요한 변수가 됨을 알 수 있는데, 기존의 SPU 의 기계적인 물성을 좌우하는 인자로 본 논문에서는 hard segment 를 구성하고 있는 isocyanate 의 조성비(content)를 사용하였다. 본 논문에서는 이를 hard content 라고 정의하였다.

먼저 hard content 가 탄성계수 E 에 미치는 영향을 보기 위해, UTM 을 사용하여 변형률(strain)에 따른 인장강도(tensile stress)를 측정하였다. 본 연구에

서는 100% 변형이내에서의 응력-변형률선도를 도시하였으며, 통상적으로 100% 변형 시의 강도를 상대적인 정도로 사용하는데 이를 100% modulus 라 한다. 또한 굽힘(deflection)을 이용한 액츄에이터의 경우 안정성과 제어의 용이성 때문이기도 하다.

Fig 5 는 hard content 가 증가함에 따라 기울기에 해당하는 modulus 값이 증가함을 나타내고 있다.

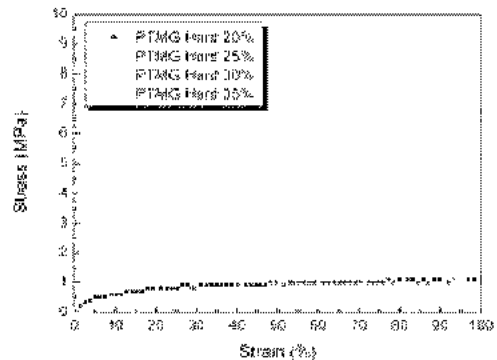


Fig. 5 Stress-strain curve within 100% elongation according to hard-segment content

또한 hard content 가 유전율에 미치는 영향을 보기 위해 Impedance Analyzer HP4192A를 사용하여 전기용량(capacitance, C<sub>p</sub>)을 측정하였으며, 식 (6)에 의해 유전율로 변환하여 Fig 6 에 나타내었다.

Fig 6 와 같이 SPU 의 hard 와 soft segment 의 성분이 같은 경우, hard segment 의 content 에 따라 유전율이 약간의 재료에 따른 차이는 있으나, 선형적으로 증가한다는 것을 알 수 있다. 이는 SPU 의 전체변형 중 전왜현상에 연관해서 설명할 수 있는데, 결론적으로는 전왜현상에 의한 변형은 hard segment 의 조성비에 비례한다는 것을 알 수 있다.

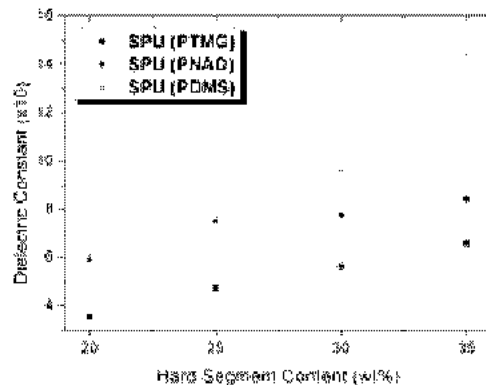


Fig. 6 Dielectric constant of SPUs using various polyols according to hard-segment content

Fig 7 에서는 이 modulus 값이 증가함에 따라 최대변위가 감소함을 보여주고 있는데, 이는 식(3)의

결과와 일치한다.

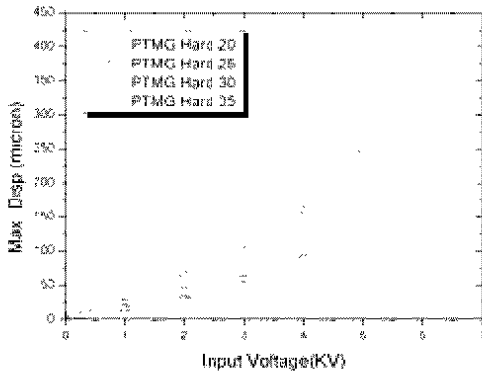


Fig. 7 Maximum displacement per unit charge according to hard-segment content

### 3.3.2 구동력 환산

본 논문에서 사용한 원판형 액츄에이터의 두께  $h$  를 0.3mm, 반지름  $a$  를 25mm 로 대입하여 식(4)를 구하면 식(6)과 같이 표현할 수 있다.

$$q_0 = 0.3686Ew_{\max} \quad (6)$$

이를 이용하여 hard-segment content 에 따른 입력 전압과 수직분포하중의 관계를 도출할 수 있는데 Fig. 8 에 이를 도출하였다.

Fig. 8 에서 보는 바와 같이 micro-fluidics 의 active valve 와 같은 미세한 구동력을 전달하는 데 필요한 pascal 레벨 혹은 sub-pascal 레벨의 하중을 전달하기 위한 적절한 방법임을 알 수 있으며, 화학적인 구성비를 조절함에 따라 이 액츄에이터가 할 수 있는 구동력이나 압력등의 조절이 가능하다.

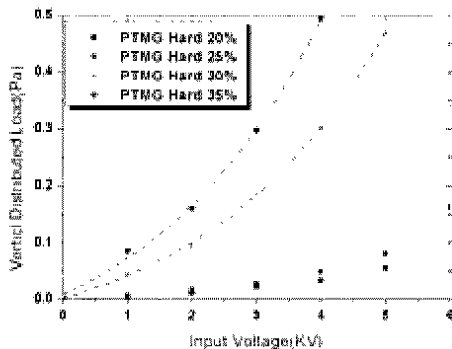


Fig. 8 Vertical distributed load according to input voltage level and hard-segment content

### 3.4 환산된 구동력을 이용한 마이크로 피펫의 CFD 시뮬레이션

마이크로 액츄에이터를 Fig. 9 과 같은 피펫등과

같은 micro-fluidics 소자 등으로 응용하고자 할 때, 전체적인 시스템에 맞는 구동력과 최대변위를 가지는 액츄에이터의 선정도 중요하지만 액츄에이터의 구동력에 맞는 출구와 입구의 치수의 결정 또한 중요하다. 이를 위해 본 연구에서는 전산유체해석 (Computational Fluid Dynamics)을 사용하였으며, CFD-ACE™을 이용하여 시뮬레이션하였다.

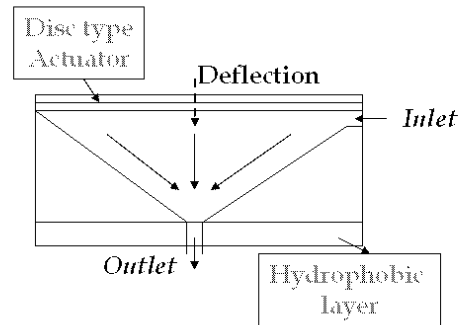


Fig. 9 Micro-pipette design using disc-type actuator

본 시뮬레이션에 적용한 조건으로는 PTMG hard content 30wt% 액츄에이터의 특성을 바탕으로, 사용하였으며, 입력전압은 4KV 일때 최대변위는 120  $\mu$ m, 수직하중은 약 0.3Pa 의 압력을 가진다.

Fig. 10 는 200  $\mu$ m의 반지름을 가지는 출구를 가지는 수직방향으로 나오는 피펫이라고 가정하였을 때, 0.5sec 의 일정시간 간격으로 유체의 변화를 시뮬레이션하였다. 1.5sec 이후 부근에서 완전 전개 (fully developed)된 흐름을 볼 수 있으며, Fig. 11 에서는 2sec 이후의 유체의 속도벡터를 함께 나타내었다.

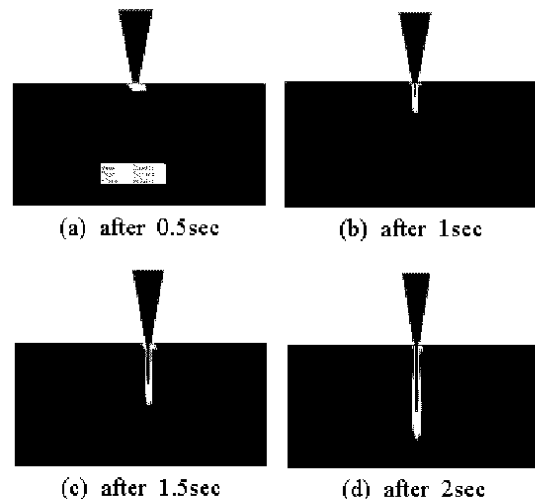


Fig. 10 Step-by-step CFD simulation of micro-pipette using polymer micro-actuator

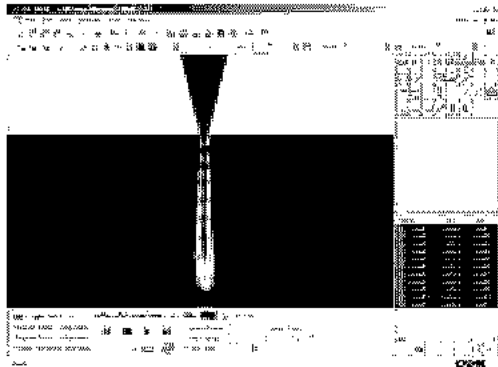


Fig. 11 CFD simulation of micro-pipettes with velocity vector when fully-developed

#### 4. 결론

본 연구에서는 고변형을 수반하는 고분자 액추에이터의 제작을 위해 성능발현에 지대한 영향을 미치는 SPU body의 Young's modulus와 유전율이 변위와 전계응력에 관한 영향을 분석하고, 중앙에서 최대처짐을 갖는 원관형 액추에이터의 구동력을 측정하기 위해 고체역학적인 분포하중으로 간주하여식을 유도하고 구동력을 환산하였다.

먼저 액추에이터 body의 경우 hard content가 증가할수록 modulus, 유전율이 증가하였다. 달리 말하면 hard content를 높이면 구동력이 증가한다는 것을 의미한다. 하지만 hard content가 높으면 최대처짐이 줄어들게 되므로 두 가지 관계를 서로 만족하는 적절한 화학조성비를 결정하여야 한다는 것을 알 수 있다.

또한 micro-fluidics에 응용하기 위해 CFD프로그램을 이용하여 적당한 시스템을 설계할 필요가 있다. 이는 시스템을 제작하기 전, 제품개발시에 결정되어야만 하는 요건으로 사용되어야 하기 때문이다. 본 논문에서는 CFD-ACE™를 이용하여 유체의 흐름을 분석하였다.

본 논문에서는 제외되었지만, 반복적으로 처짐과 회복이 일어나지 않은 상황인 정적인 상태만을 고려하였으나, 향후에는 이러한 주파수가 고려되는 동적인 움직임에 대한 고려도 수행되어야 한다고 보여진다. SPU의 동적인 특성을 DMA(Dynamic Mechanical Analysis)와 같이 반복적인 구동을 통한 점탄성의 해석과 히스테리시스 현상에 대한 좀 더 많은 현상적인 고찰이 필요하다고 여겨진다.

#### 후 기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구과제인 (R01-2003-000-11612-0)의 지원으로 수행되었으며

이에 관계자 여러분께 깊이 감사드립니다. 또한 CFD 시뮬레이션에 대해 도움을 주신 부산대학교 Bio-fluidics LAB의 김경천 교수님과 실험실원 여러분께 깊이 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. Yoseph B Cohen, "Electroactive Polymer Actuators as Artificial Muscle", SPIE Press, 2000
2. 안호경, 이승기, 박정호, "공기중에서 동작하는 전도성 고분자 액추에이터용 고체전해질의 특성 분석 및 실험적 검증", 전기학회논문집, vol 47, No 10, 1998.
3. P. Gennes, "Some Remarks on Polymer Actuators", Polymers for Advanced Technologies, vol 13, pp 681-682, 2002.
4. Roy Kornbluh, Ron Pelrine, Joseph Eckerle, Jose Joseph., "Electrostrictive Polymer Artificial Muscle Actuators," Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics & Automation, 1998.
5. Yoseph B Cohen, "http://ndeaa.jpl.nasa.gov/", Jet Propulsion Lab, NASA
6. Kim, J., etc, "Electroactive papers: its possibility as actuators," SPIE's 7th Annual Symposium on Smart Structures and Materials, 3987, 2000.
7. Wang, H. etc, "The Origins of Electromechanical Response in Polyurethane Elastomer", Proceeding of 9th IEEE Symposium on Applications of Ferroelectrics, pp 182-185, 1998.
8. Lamba, N. etc, "Polyurethanes in Biomedical Applications", CRC Press, 1998.
9. Reddy, J., "Theory and analysis of elastic plates", Taylor & Francis, pp 194-215, 1999.
10. Hepburn, C., "Polyurethane elastomers", 2nd Ed, Applied Science Publishers, pp 51-106, 1982.
11. Jung, Y., etc "Development of Polymer Micro Actuators using Conductive Polymer and Its Application", Polytronics, pp 199-204, 2003.