

고분자 수지를 이용한 MEMS 기술 동향

김 철 · 경북대학교 기계공학부 교수

e-mail : kimchul@knu.ac.kr

이 글에서는 최근 그 연구가 활발하며, 실리콘 MEMS 기술의 단점을 해결할 수 있는 후보로 부상하고 있는 폴리머를 이용한 MEMS 기술의 가능성과 그 연구 동향 및 응용에 대해 소개하고자 한다.

반도체 제작기술에서 발전한 실리콘재료를 이용하는(silicon-base) MEMS 소자 제작방법이 현재 광범위하게 적용되고 있으나, 이 방법은 몇 가지 한계를 보이고 있다. 실리콘 MEMS의 주재료인 실리콘은 취성재료로서 유연하지 못하며(brittle), 곡면을 가진 복잡한 3차원 입체모양으로 만들기가 쉽지 않으며, 원하는 중요한 몇 개의 층(layer)만으로 구성된 제품을 만들기조차도 쉽지 않다. 또한, 최근 MEMS의 중요한 적용 분야로 생각되는 DNA 칩 기술 등 Bio-MEMS 분야에서 필수적인 생체 적용을 위해서, 그 재료

는 인체와 친화적이고 높은 작동 변위를 가져야 하나 기존의 실리콘 기반 MEMS는 이러한 요구조건을 만족시키기 쉽지가 않다. 그래서 최근 연구자들은 이들 취약점을 해결하기 위해서 다양한 기술을 개발하고 있다. 복잡한 3차원 폴리머 MEMS 소자의 제작에 활용 가능한 Microstereolithography(MSL)에 대한 연구에 대해서 살펴보고, 각종 폴리머 작동기의 전기-기계적 작동원리 및 특성, 적용사례, 최근의 기술발전 추세 등에 관해서 소개할 것이며, 도전성 폴리머 작동기 등을 예로 들 것이다.

폴리머 MEMS란?

폴리머 MEMS는 다양한 폴리머를 주재료로 만들어지며, 적절한 움직임을 가능하게 하거나, 무엇을 탐지하는 센서의 기능을 하는 전기기계적 구성요소를 포함하는 소형의 소자이다. 현재 그 제작방법은 폴리머, 카본, CNT(Carbon Nano Tube)를 사용하는 SAM(Self Assembly Monolayer) 방식과 기능성(functionalized) CNT와 자외선 경화 폴리머(UV curable polymer)를 사용하는 폴리머 기반 MSL이 있다. MSL에서는 마

스크가 사용되지 않는다. 사용되는 재료로는 자외선 경화 반도체성 폴리머, PVDF/TrFE(70/30 또는 80/20mol%), 기타 공액 폴리머(conjugated polymer), CNT와 결합된 기능성 폴리머 등이 있다. 특히, 기능성 폴리머는 다양한 물질과 혼합될 수 있어서 반도체적, 자기적, 광학적 성질 등과 같은 다양한 특성을 나타낼 수 있다.

Micro-stereo-

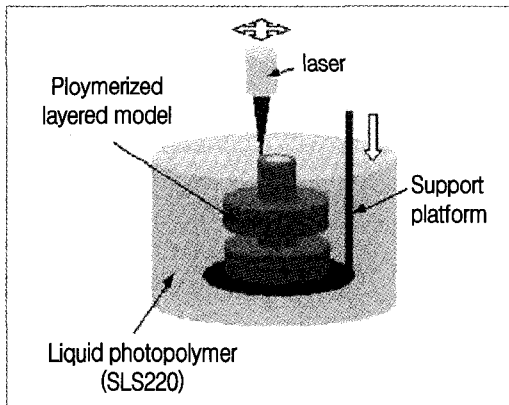


그림 1 Microstereolithography(MSL)의 개념도

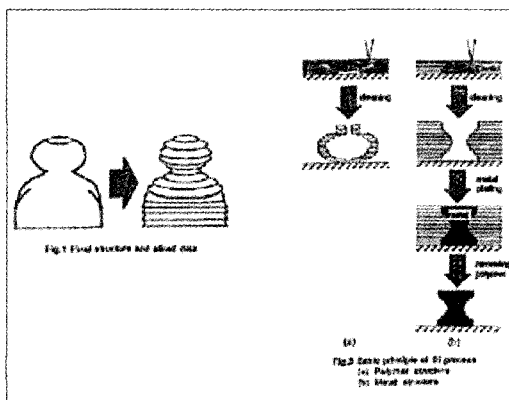


그림 2 MSL에 의한 3-D 물체 및 몰드 제작 원리

lithography

Microstereolithography 기술은 래속조형(rapid-prototyping) 기술과 유사한 방법으로 관심의 대상이 되고 있다. 3차원의 폴리머 초소형기계 또는 몰드(mold)를 제작할 수 있으며 그 개념도가 그림 1에 있다. Microstereolithography의 공정원리는, 제작하고자 하는 초소형기계 구조의 3차원 CAD 데이터를 z축(수직축)에 대하여 등간격(slice size)으로 나누고, 이 z 평면의 모든 점에 대한

x-y 평면의 단면 데이터를 자외선 주사기에 사전에 입력시켜서 평면별로 주사시킨다. 유리전이온도(glass transition temperature)에서 액체 상태인 자외선 등에 민감한 광경화 수지 (UV curable polymer) 평면에 자외선을 조사하여 중합 반응(polymerization)을 일으켜 경화시키고, 그 후 z축 방향으로 설정된 간격(slice size)만큼 이동하여 또 다시 자외선을 조사하여 그 단면을 경화시켜서

적층하는 공정을 반복적으로 수행하여 복잡한 3차원 구조물을 제작하는 기술이다.[V. K. Varadan]

Microstereolithography 기술은 반도체의 일괄공정과 비교될 정도로, 소자를 한 개씩 제작하게 되어 대량 생산이 좀 불리한 면이 있다. 그러나 매우 작은 MEMS 제작에 소요되는 시간은 그리 오래 걸리지 않는다. 단순한 형상은 수십 분에서, 복잡하고 두꺼운 구조물일 경우에는 수 시간 정도로 같은 면적에, 같은 수의 소자를 제작할 경우에, 오히려 반도체 공정보다 적은 시간이 소요된다. 또한 사용되는 재료(photopolymer)도 반도체에 비하여 저가이기 때문에 대량 생산의 면에서 경쟁력을 기대할 수 있을 것이다.

그림 2는 초소형기계 폴리머 구조를 제작하거나, 폴리머를 포함한 다양한 타재료로 된 물체를 제작할 수 있는 몰드(mold)를 제작하는 원리를 설명하고 있다. 즉, 몰드에 해당하는 3차원 CAD 데이터에 따라서 주사하면 그 부분이 경화되어 몰드가 되는 것이다. 원하는 형상으로 제작된 폴리머 몰드에 원하는 재료를 주입하여 성형하면 원하는 미세구조 소자가 만들어질 수 있다. 스위스 EPFL의 Bertsch 등은 기존의 MSL 기술에 마스크를 사용하는 사진식판기술을 접목한 장비를 개발했다(그림 3). 기존의 Point Scanning을 하는 장비와 달리,

패턴 형성기(pattern generator)를 사용하여, 한개 층 전체의 패턴을 형성하여 조사하는 방식으로, 반도체의 일괄 공정과 같이 다량의 부품을 동시에 제작할 수 있을 것으로 기대된다. 그림 4(a)는 MSL로 제작된 높은 종횡비(high aspect ratio)를 가진 3차원 마이크로 기어로서, 기존에는 LIGA 공정과 같은 복잡한 기술을 사용해서 제작되고 있으나, MSL의 도입은 그 제작공정을 훨씬 단순화시킬 수 있다. 그림 4(b)는 MSL에 의한 마이크로 터빈을 나타낸다. MSL 기술을 사용하여 제작하면 공정 후 별도의 조립과정 없이(pre-assembly) 유체 채널을 제작할 수 있기 때문에 마이크로 시스템, DNA 칩 등과 같은 유체 소자 제작에 효과적으로 응용될 수 있다. 그림 5는 Bertsch 등에 의해 MSL로 제작된 마이크로 파이프 및 마이크로 믹서를 나타내고 있다.

그러나 MSL의 단점은 이 기술에 적용 가능한 폴리머가 광에 민감하게 반응하여 경화될 수 있는 재료로 제한되고 있다. 광에 민감하지 못한 재료가 요구되는 경우에는, 수지로 제작된 소자를 타 재료로 코팅하는 방법도 있으나, 보다 광범위한 응용을 위해서는 향후 적용 가능한 많은 새로운 수지의 개발이 필요하다.

폴리머 MEMS의 적용

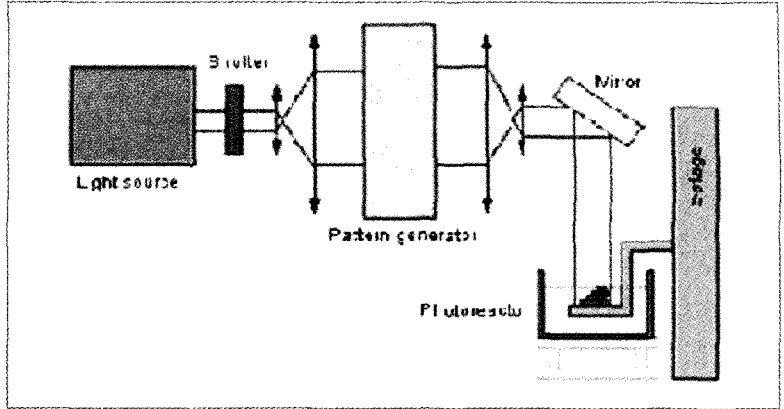


그림 3 MSL에 마스크를 사용하는 사진식판기술을 점목한 장비

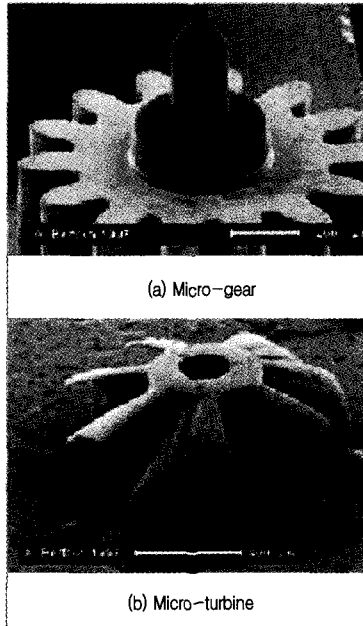


그림 4 MSL로 제작된 MEMS[Bertsch, Lorenz and Renaud]

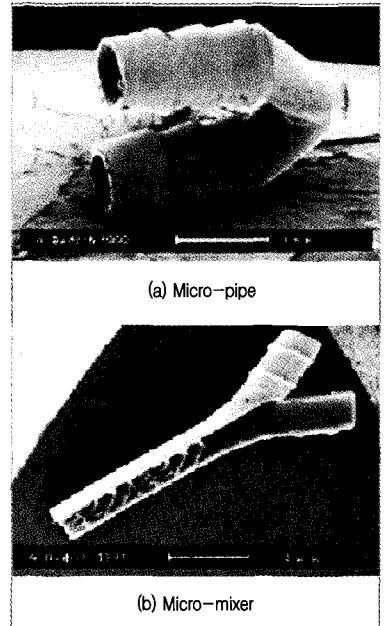


그림 5 MSL로 제작된 MEMS[Bertsch, et. al.]

미국의 UIUC[Angel 등, 2003]는 듀폰사의 Polyimide 필름을 기지로 하는 감지 스킨(sensing skin)의 개발에 성공하였다. 이 센서는 이전의 많은 폴리머 센서의 기지(substrate)가 유연하지 못한 실리콘으로 제작되어서 유연성이 요구되는 부

분에 사용되지 못하는 점을 개선한 것이다. 폴리머 기지를 사용함으로써 유연하고, 강하며, 저가이고, 추가적인 폴리머 층을 더 할 수 있는 장점을 갖고 있다. 이 폴리머 센서는 온도, 열전도도, 접촉력, 경도 등 네 가지를 감지할 수 있는 각각의 금속 센서로 구

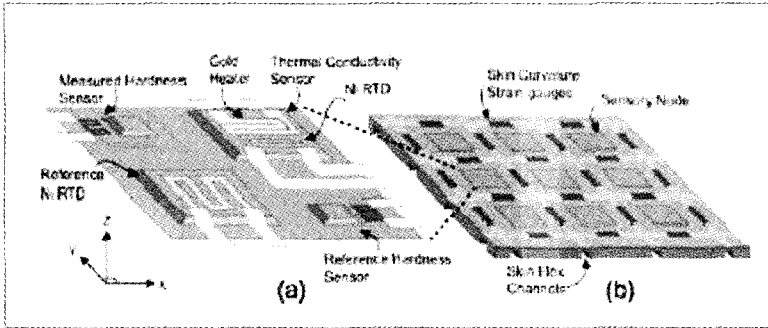


그림 6 네 가지 감지센서가 내장된 폴리머 센서

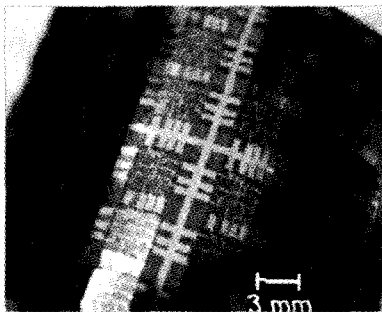


그림 7 곡면으로 변형된 유연한 모습의 폴리머 센서

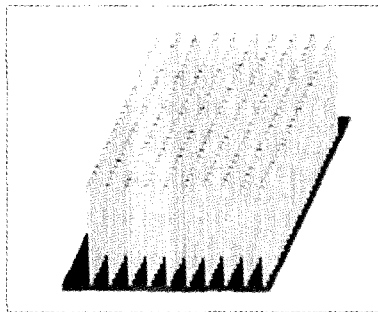


그림 8 마이크로 액츄에이터 Array의 개념도

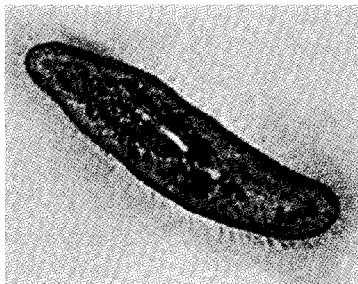


그림 9 박테리아 같은 인공 섬모 (artificial cilia)

성되어 있다.

유기화학(organic chemistry)에서 획기적인 발견으로 간주되어 2000년에 노벨화학상이 수여된 도전성 폴리머(conducting polymer)를 MEMS 기술에 적용시키려는 연구도 활발히 진행 중이다. 미국 캘리포니아대 어바인

의 Xu 등은 Polypyrrole과 같이 전기 신호에 따른 체적변화가 큰 도전성 폴리머를 이용하여 Lab-on-a-chip 시스템 상의 개별 분자들을 움직이게 할 수 있는 도전성 폴리머 액츄에이터를 연구하고 있다. 우선 그림 8과 같은 각각의 Micro-array 기동을 움직일 수 있는 액츄에이터의 제작을 연구하고 있으며, 궁극적으로는 그림 9와 같은 유연한 기지 상에 있는 array 기동을 붙여서 자연을 모방한 섬모(cilia)를 제작하려고 하고 있다.

카본나노튜브와 도전성 폴리머의 결합

카본나노튜브와 도전성 폴리머는 모두 전기 신호에 따라서 변형을 일으킨다. 두 재료의 이러한 특성을 결합하면 배가된 움직임을 가질 수 있는 유용한 액츄에이터를 개발할 수 있다. 최근, SWNT(Single-Walled carbon NanoTubes)와 도전성 고분자 PANi(polyaniline)을 결합시킨 복합재료 합성물질이 제조되었고, 그 전기적 기계적 특성이 실험적으로 조사되었다[경북대 김철 등]. 이러한 재료는 인공근육 등으로 사용될 수 있어서 미소 인공생물체 및 로봇의 구동에 응용될 수 있다. 이 작동기는 90% 순도 SWNT와 화학적 중합반응을 이용하여 제조되었다. 이 재료의 양음이온의 배열과 변형의 개념이 그림 10에 묘사되어 있다.

본 재료를 만들기 위해서 다음의 제조 공정이 적용되었다. SWNT와 1g의 TritonX100 1%(w/w) 표면활성제 용액을 증류수 50ml에 첨가하고 6시간 동안 초음파로 분쇄시켰다. PANi 분말을 NMP 용매에 용해시켜 4%용액을 만들었다. SWNT와 PANi은 3:1의 무게비로 혼합하여 에탄올/증류수(50:50)로 적신 PVDF 막에 투과시켰다. 에탄올을 이용해 TritonX100을 제거한 후 필름을 염산(1mol/L)에 담그고, 마지막으로 필름을 제거하기 전에 자연건조 시켰다.

후주의 Tahhan 등은 SWNT

/PANI 복합재를 만들기 위해서 순수 CNT 매트(mat)에 PANi 용액을 붓고 여과하여 건조시키기 때문에 인공근육 등의 액츄에이터에서 요구되는 유연성(flexibility)이 부족하고, 매우 강성이 커서 잘 깨졌다. 또한, 긴 필름을 만드는 것이 힘들었다. 개선된 공정에서는 SWNT 분말, TritonX 100 1%(w/w) 표면활성제 용액, 증류수를 섞어서 용액을 만든 후 이를 다시 PANi 용액과 혼합하는 용액간의 혼합방법을 새로이 개발하여 적용하였다. 이 결과 그림 11과 같은 유연하면서 작동변위가 향상된 필름을 얻을 수 있었다.

그림 12의 (a), (b)는 각각 PANi 필름의 표면과 한 변의 SEM 단면사진이다. (c), (d)는 SWNT/PANI 복합재 필름의 표면과 단면사진이며 (e), (f)는 각각 PANi과 복합재 필름의 사진이며 여기서 가지(lattice)의 폭이 측정되었다. PANi는 50.09nm, 복합재 필름에서는 130.68nm이다. 복합재 필름의 SEM 사진을 보면 수 많은 탄소 나노튜브가 PANi의 사이사이에 잘 결합되어 있음을 알 수 있다. 그림 13은 개발된 액츄에이터의 작동변위를 실험과 개발 식에 의해서 각각 구한 후 그 값을 비교하였으며, 최대 변위가 잘 일치하였다.

4-탐침 측정법(4-probe method)을 사용하여 이 필름형

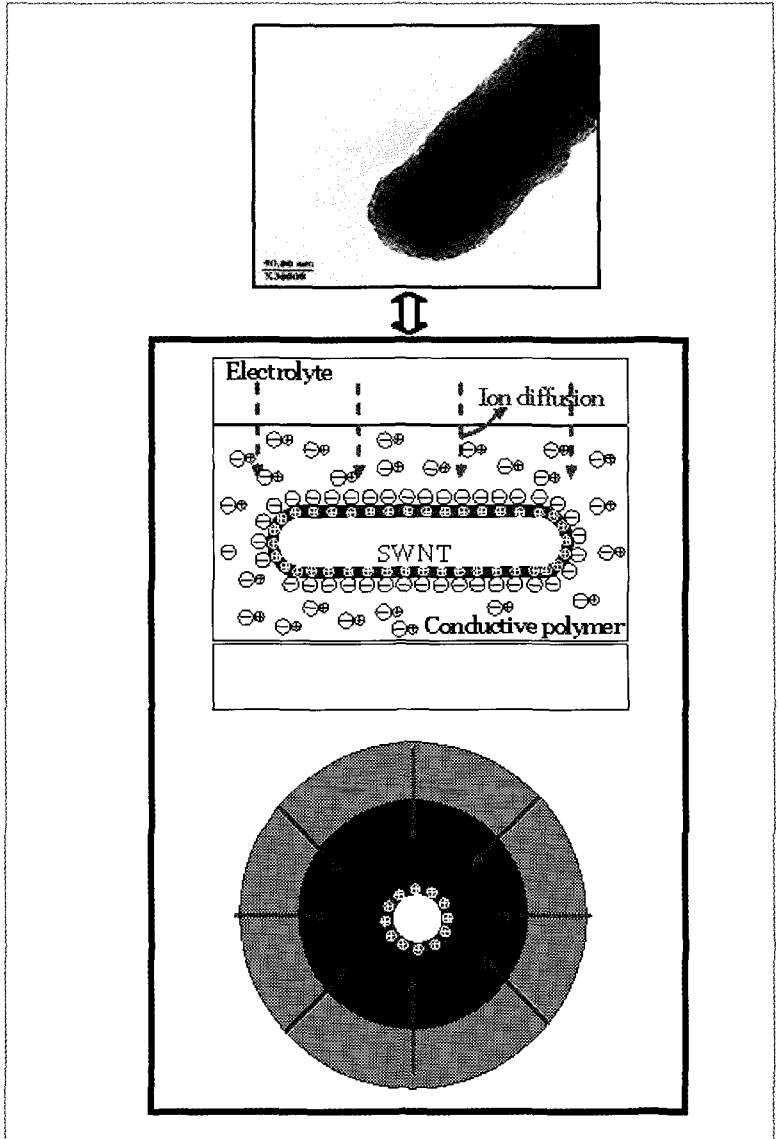


그림 10 CNT와 PANi 이온의 배열 및 변형의 원리 개념도

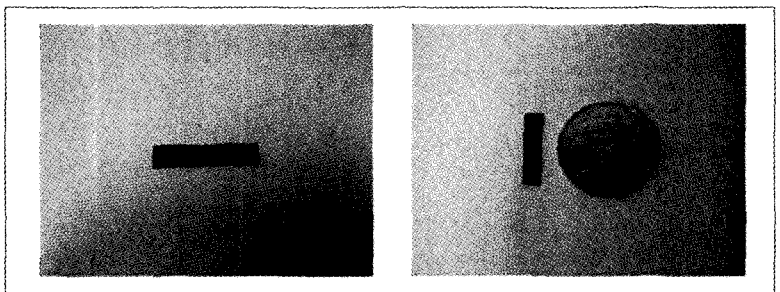


그림 11 제작된 SWNTs/PANI 액츄에이터 필름

액츄에이터의 전기전도도를 측정
한 결과 56.15 S/cm의 값을 나
타냈으며, 순수 PANi은 17.38
S/cm를 나타내었다. 순수한 도
전성 폴리머 보다 3.2배 높은 전
도성을 나타내었다. 전압이 작용
할 때 변형률을 측정하기 위해서
레이저 측정 센서가 부착된 측정
장치가 개발되었으며, NaNO₃
용액 속에서 작동되며, 1볼트의
전압이 가해졌다. 초기 길이
12.690mm에서 12.733mm로 늘
어났으며, 0.34%의 변형률이 계산
되었다. 이 값은 호주 Tahhan의
0.23%보다 48% 정도 높은 변형
률이다.

실리콘 재료에 비해서 그 가격
이 저렴한 폴리머 기지를 사용한
MEMS 기술은 진화를 계속하고
있다. 인체 친화적이고 유연하여
곡면에 부착가능하며, 3차원의
임의 형상을 기존의 방식과 다르
게 제작할 수 있는 장점은 많은
연구자의 관심을 끌고 있으며 향
후 실리콘 기반의 MEMS 기술을
대체할 수 있는 기술로 부상하고
있다. 화학, 재료, 전자, 기계 분
야 간의 학제융합적인 연구가 분
격적으로 수행되면 많은 성공 사
례가 나타나리라고 예상되며, 그
실용화를 앞당길 수 있을 것이다.
머지않은 장래에 우리는 바이오
기술과 결합된 폴리머 기반
MEMS 기술의 파생제품을 손쉽
게 볼 수 있을 것이다.

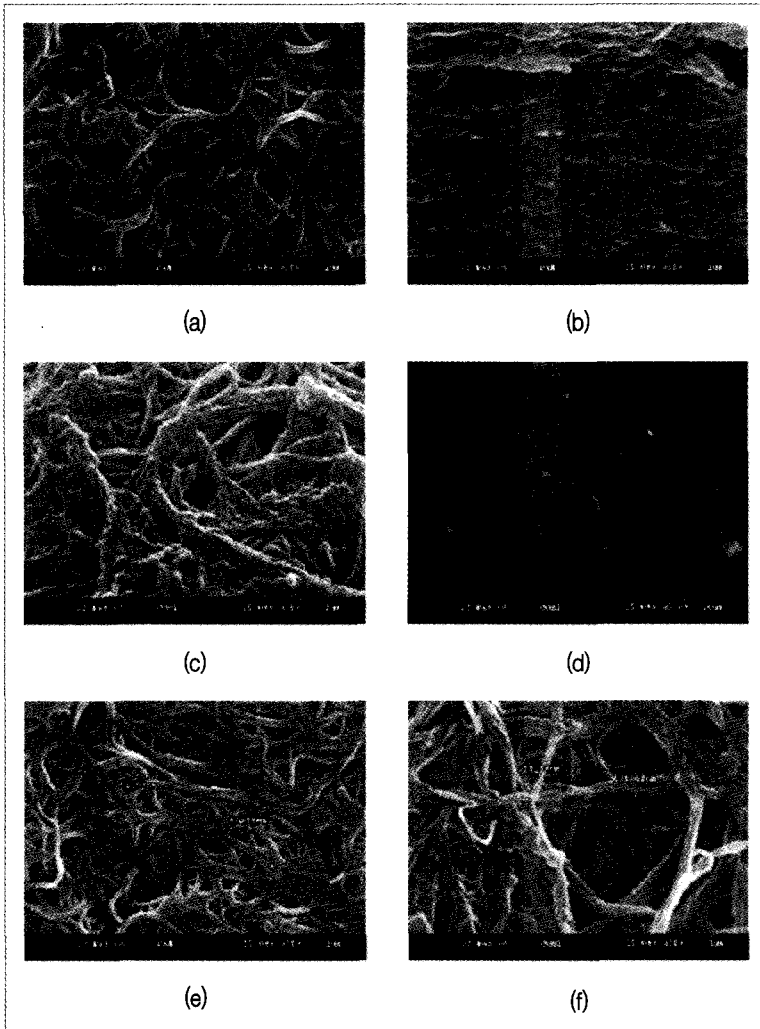


그림 12 샘플 단면과 표면의 SEM 사진

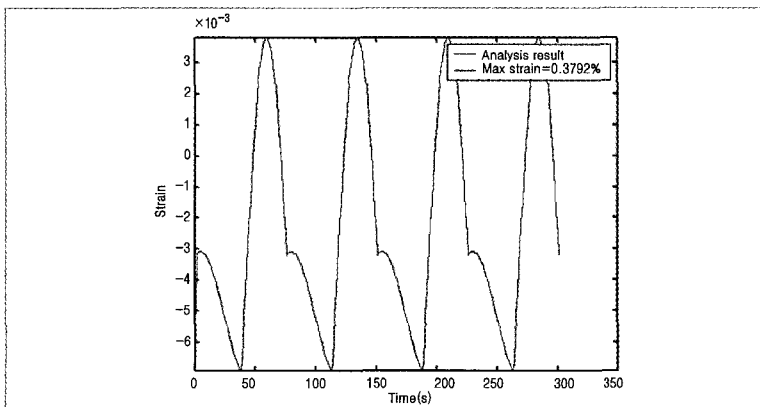


그림 13 실험과 개발 식에 의한 작동 변위의 비교