

기능성 재료의 액추에이터 응용



이 승 기
(단국대학교 전기공학과 부교수)



박 정 호
(고려대학교 전기공학과 부교수)

1. 서 론

MEMS(Microelectromechanical Systems)와 같은 초소형 시스템에서 구동원 등으로 사용되는 액추에이터는 전체 시스템의 소형화 및 기능 향상에 관련이 되는 중요한 요소이다. 특히 생체 관련 응용을 목적으로 하는 bio-MEMS 등의 분야에서 필요한 액추에이터는 다른 분야에 쓰이는 액추에이터와는 다른 특징과 성능을 가져야 한다. 또한 생체 내에 존재하는 생체 액추에이터의 움직임을 모사하는 생체 모방 액추에이터는 생체와 유사한 특성을 가질 필요가 있다.

이러한 목적으로 이용 가능한 액추에이터는 구동방법에 따라 장(場, field)의 힘을 이용하는 경우와 재료 자체의 성질을 이용하는 경우로 나누어 생각할 수 있는데[1], 정전형이나 전자력 등을 이용하는 액추에이터가 전자에 속하고 압전 물질이나 형상 기억합금 등이 후자에 속한다. 재료의 성질을 이용하는 경우 중에서도 그 물질이 액추에이터뿐만 아니라 센서로서의 특성도 동시에 가지고 있거나 그 물질만의 특징적인 성질을 가지고 있는 경우를 기능성 재료로 분류할 수 있다.

본 논문에서는 이와 같은 기능성 재료를 이용한 액추에이터 중에서 형상기억합금을 이용하는 경우와 전도성 고분자를 이용하는 경우를 살펴보기로 한다. 형상기억합금은 매우 큰 변위와 힘을 만들 수 있고 액추에이터의 형상에 따라 다양한 응용이 가

능한 물질이다. 비전도성 고분자를 액추에이터로 이용하는 경우는 젤(gel) 액추에이터의 형태로 이미 오래 전부터 알려져 있었으나 전도성 고분자를 이용하는 경우는 비교적 최근에 시작된 연구로서[2-4] 반도체 공정과의 결합, 생체 액추에이터와의 유사성 등으로 인해 매우 다양한 응용 가능성을 갖는 물질로 기대되고 있다.

2. 형상기억합금 액추에이터

2.1 형상기억합금 액추에이터의 원리

형상기억합금은 변형을 시킨 후 일정 온도 이상으로 가열하면 원래의 형상으로 되돌아가는 형상기억효과를 가지는 합금을 말한다. 형상기억효과는 1951년 미국 일리노이 대학의 Chang과 Read에 의해 Au-Cd 합금에서 처음 발견되었다.[5] 현재 가장 많이 쓰이고 있는 형상기억합금은 Ni-Ti의 합금인데 이것은 1961년 미국 해군병기연구소의 Beuhler가 발견하였다.[5]

형상기억효과는 기본적으로 온도 변화에 의한 상변태의 결과로 나타나게 된다. 일반 금속은 단성 한계 이상의 변형력을 받으면 그림 1(a)처럼 미끄럼 변형에 의한 소성 변형이 발생한다. 그러나 그림 1(b)에 표시한 형상기억합금은 저온 상태에서 martensite 상을 유지하다가 외부로부터 힘을 받으면 변형이 발생하는데 이는 미끄럼 변형이 아니라 쌍정 변형이다. 이 상태에서 형상기억합

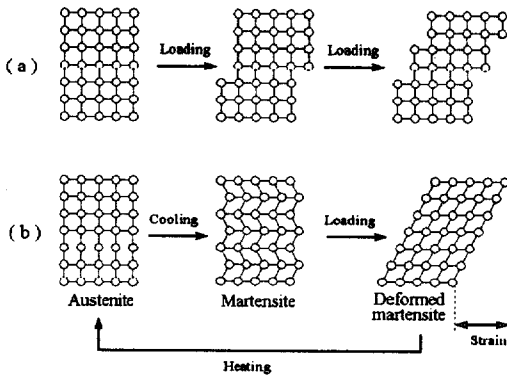


그림 1. 형상기억효과의 모식도 : (a) 일반 금속 및 (b) 형상기억합금.
(Schematic diagram of shape memory effect : (a) metal and (b) SMA)

금속 변태 온도 이상으로 가열하면 martensite 상이 austenite 상으로 변화하는 상변태에 의해 원래의 형상으로 되돌아가게 되며 이러한 복원 과정을 액추에이터로 이용할 수 있다.

상변태가 발생하는 온도는 형상기억합금을 구성하는 각 원소들의 조성에 따라 달라지게 되는데 Ni-Ti 합금의 경우 100℃ 전후의 변태 온도를 갖는 것이 일반적이다. 형상기억합금이 형상기억효과를 나타내기 위해서는 형상기억합금을 원하는 모양으로 성형하고 열처리 과정을 거쳐야 하는데, 열처리 조건에 따라 특성이 달라지게 되므로 응용 분야에 적합한 열처리 조건을 구할 필요가 있다.[6]

2.2 형상기억합금 액추에이터의 설계

형상기억합금은 이미 상용화되어 여러 가지 형태의 것을 구입할 수 있다. 가장 일반적인 형태는 다양한 선경을 갖는 소선의 형태인데 소선 자체로는 충분한 변위가 나오지 않아 스프링 형태로 가공하여 사용하는 경우가 많다. 스프링 형태로 성형할 경우 일반적인 스프링과는 달리 힘과 변위의 관계가 비선형이므로 스프링의 설계식을 그대로 적용하기가 곤란하나 응력수정계수를 사용하여 선형 스프링으로 가정하면 대략적인 설계는 가능하다.[7]

형상기억합금은 기본적으로 한 방향으로 동작하므로 이를 반복 동작이 가능한 액추에이터로 이용하기 위해서는 강제적인 복원력이 필요하다. 형상기억합금 액추에이터는 이러한 복원력을 만들어 주는 방법에 따라 크게 바이어스식(bias type)과 차동식(differential type)으로 구분할 수 있다. 바이어스식은 그림 2(a)와 같이 형상기억합금 스프링과 일반 강철 스프링 혹은 이와 유사한 역할이 가능한 재료를 조합하여 복원력을 얻는 방법이고 그림 2(b)와 같은 차동식은 두 개의 형상기억합금 스프링을 조합하여 각각의 발생력이 복원력으로 작용하도록 구성하는 방식이다.

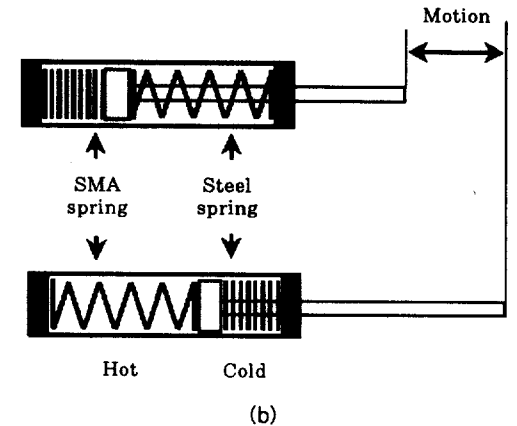
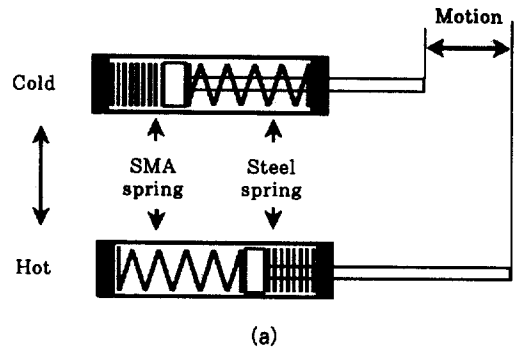


그림 2. 형상기억합금 액추에이터의 구성 방법 : (a) 바이어스식 및 (b) 차동식.
(Configuration of SMA actuators : (a) bias type and (b) differential type)

두 가지 방식 중에서 어떤 방식을 선택하는가는 응용 분야 및 요구되는 특성에 따라 달라지게 되며 이를 위해서는 먼저 각 방식의 특성이 어떻게 다른지를 알아야 한다. 각 구성 방식의 특성 차이를 동특성 변화를 통해 측정된 결과가(8,9)에 정리되어 있는데, 발생 변위 측면에서는 차동식이 좀 더 우수하고 발생력 측면에서는 큰 차이가 없는 것으로 나타난다. 그러나 차동식은 바이어스식에 비해 배선 수가 늘어나므로 복잡한 구조에는 적합하지 않다. 어떤 방식이든 소선경, 스프링경, 턴수 등의 스프링 구조 변화에 따라 특성이 달라지며 적용 분야에 적절한 최적의 조건을 구할 필요가 있다. 차동식의 경우는 동일한 형상기억합금 스프링 두 개를 사용한다는 가정 하에서 발생력과 동작 속도에 대한 최적 조건을 실험적으로 결정할 수 있으며, 바이어스식의 경우는 일반적인 스프링의 계산식과 응력수정계수를 이용하여 해석적인 방법으로 전체 구조를 고려한 최적 설계가 가능하다.[9,10]

2.3 관내주행기구의 제작 예

2.2절의 설계 방법을 적용하여 좁은 관의 내부를 자벌레처럼

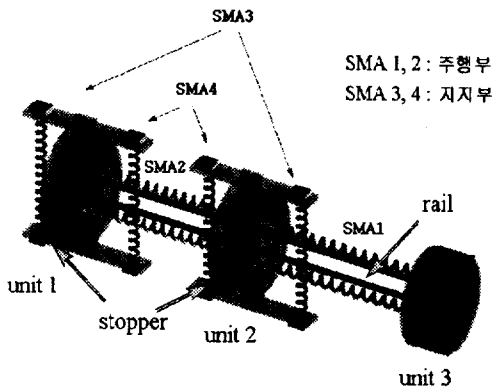


그림 3. 관내주행기구의 구조.
(Structure of pipe inspection mechanism)

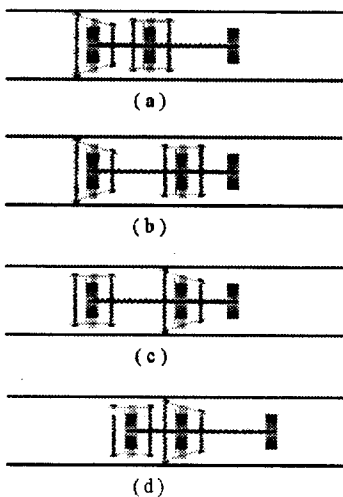


그림 4. 관내주행기구의 동작 순서.
(Working procedure of pipe inspection mechanism)

운동하는 관내주행기구를 제작할 수 있다. 그림 3은 관내주행기구의 구조도이다. 전체 구조는 3개의 유닛과 주행부, 지지부, 그리고 레일(rail)로 구성된다. 유닛 1과 유닛 3은 레일의 양끝에 고정되어 있고 유닛 2는 레일 위를 자유롭게 움직일 수 있다. 주행부는 레일과 평행하게 배치된 4개의 형상기억합금 스프링으로 구성되며 2개가 한 조가 되어 움직인다. 지지부는 관 벽을 지지하는 바(bar)와 이것을 구동시키는 형상기억합금 스프링, 그리고 복원력을 주기 위한 바이어스 스프링(그림 상에서는 모두 형상기억합금 스프링으로 표시되어 있다.) 등으로 구성된다. 또한 지지부의 한쪽에는 스톱퍼(stopper)를 설치하여 항상 지지부의 한쪽만이 관 벽을 지지하도록 설계하였다.

이러한 구조를 갖는 관내주행기구는 그림 4와 같은 순서에 의해 동작한다. 먼저 유닛 1의 지지부 형상기억합금 스프링에 전



그림 5. 제작한 관내주행기구.
(Fabricated pipe inspection mechanism)

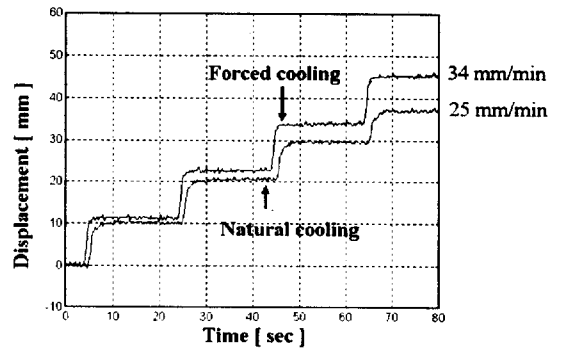


그림 6. 냉각 방식에 따른 동작 특성의 비교.
(Comparison of actuator performance varying cooling method)

류를 흘려주면 기억된 길이로 수축하여 관 벽을 지지하게 된다 (a). 이 상태에서 유닛 2와 유닛 3 사이의 주행부 형상기억합금 스프링에 전류를 흘리면 역시 기억된 길이로 수축하면서 유닛 2를 잡아끌게 된다 (b). 이번에는 유닛 2의 지지부 형상기억합금 스프링에 전류를 흘리면 유닛 2가 관 벽을 지지하게 되고, 유닛 1의 지지부에 흘려주던 전류를 끊으면 바이어스 스프링의 복원력으로 유닛 1은 원래의 형태대로 관 벽에서 떨어진다 (c). 유닛 1과 유닛 2 사이의 주행부 형상기억합금 스프링에 전류를 흘려주면 유닛 1을 잡아끌게 되는데 유닛 1은 레일의 끝에 고정되어 있으므로 레일 전체가 앞으로 나아가게 된다 (d). 이러한 과정을 반복함으로써 전진 동작이 연속적으로 발생하고 전류를 흘려주는 순서를 조절하면 반대방향, 즉 후진 동작도 가능해진다.

실제로 제작한 관내주행기구의 사진이 그림 5에 나타나있다. 전체 크기는 높이 35mm, 길이 110mm이며 40mm의 내경을 갖는 관 내를 주행하는 것을 목표로 하였다. 유닛 3의 앞 부분에는 CCD 카메라를 탑재하여 관 내부를 관찰할 수 있도록 하였다.

제작한 관내주행기구는 28g의 CCD 카메라를 탑재한 상태에서 20-50mm/min의 속도로 움직이며 동작 조건의 변화에 따라 속도가 조금씩 다르게 나타난다. 예를 들어 그림 6의 결과처럼 자연 냉각 상태에서 주행하는 경우와 질소 가스를 관 내로 불어

넣어 강제 냉각시키는 경우는, 강제 냉각의 경우가 조금 더 빠른 속도를 갖는 것으로 측정된다. 이러한 결과가 나오는 이유는 형상기억합금의 연속 동작에서 방열에 많은 시간이 걸리기 때문이다. 그밖에 최적 동작 조건으로 움직이는 경우와 설계에 의해 제작한 경우 등의 조건 변화에 따라 속도가 조금씩 달라지나 대체적으로 30mm/min 정도의 속도를 유지하였다. 제작한 관내주행 기구의 견인력은 수평 상태에서 약 0.4N 정도인 것으로 측정되었으며, 이 값은 설계에 의해 계산한 값과 잘 일치하는 값이다.

2.4 초소형 작동형 내시경용 액추에이터의 제작 예

형상기억합금 액추에이터의 특성을 가장 잘 이용할 수 있는 분야 중의 하나가 초소형 내시경이다. 크기 면에서 초소형이면서 끝 부분이 자유롭게 구부러질 수 있는 내시경은 인체의 복잡한 혈관 혹은 장기 등의 특정 부위까지 쉽게 도달할 수 있고, 내시경의 중공을 통해 초소형의 각종 진단 및 치료 도구를 삽입하면 절개 부위를 최소화하는 수술(MIS : Minimal Invasive Surgery)이 가능하다. 이러한 내시경에서 가장 중요한 것은 전체 외경이 작아야 하는 것은 물론 충분한 중공이 확보되어야 한다는 점이다. 즉 내시경 전체가 얇은 튜브 형태가 되어야 하고 액추에이터는 이 튜브의 벽 사이에 위치하게 된다. 따라서 형상기억합금 스프링의 스프링경이 얇은 벽 사이에 들어갈 수 있을 정도로 작아야 한다. 일본의 Mitsubishi사와 Tohoku 대학의 연구팀 등은 50 μ m의 소선경을 갖는 형상기억합금 선으로 250 μ m의 스프링경을 갖는 스프링을 제작하여 전체 외경 2.0-2.8mm의 내시경을 제작하였다.[11]

최근에는 형상기억합금 선을 S자형으로 성형하여 배치함으로써 공간 활용의 효율성을 높이고 이에 따라 보다 넓은 중공을 확보하려는 연구 결과가 발표된 바 있다.[12] 이 연구에서는 소선경 100 μ m의 형상기억합금 선을 뜨개질과 유사한 방법으로 S자형상으로 성형하였다. 그림 7은 이러한 방법으로 제작한 S자형 형상기억합금 스프링의 모습이다.

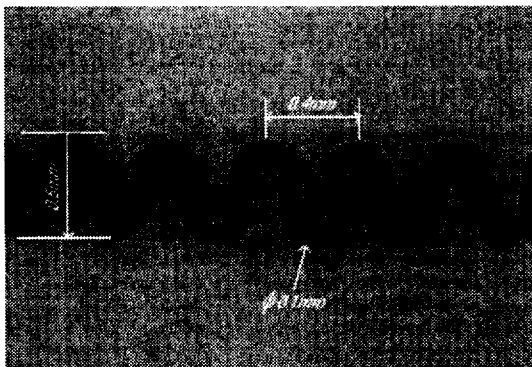


그림 7. 제작한 S자형 형상기억합금 스프링 (Fabricated S-shape SMA spring)

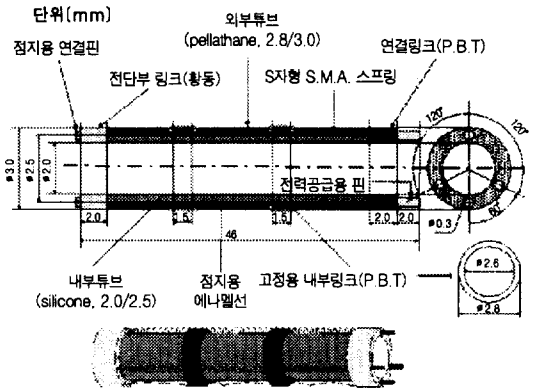


그림 8. 작동형 내시경용 굽힘 액추에이터의 구조 (Structure of bending actuator for active catheter)

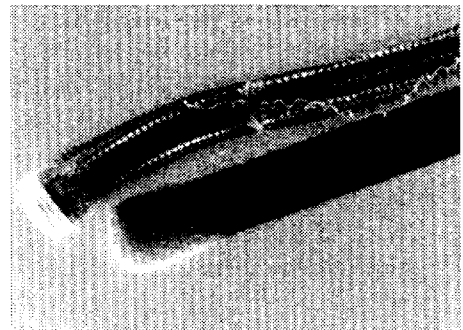


그림 9. 제작한 굽힘 액추에이터 (Fabricated bending actuator)

전체 내시경용 액추에이터의 구조는 그림 8에 나타난 바와 같이 내부 튜브, 외부 튜브, 링크, 접지용 연결핀 등으로 구성되고 S자형 형상기억합금 스프링은 내부 튜브와 외부 튜브의 사이에 120도 간격으로 세 개가 배치된다. 형상기억합금 스프링에 전류를 흘려주면 원래의 기억된 길이로 수축하고 튜브 전체가 휘어지게 되는데 세 개의 형상기억합금 스프링에 흘려주는 전류를 독립적으로 조절함으로써 임의의 방향으로의 굽힘 동작이 가능해진다.

그림 9는 이와 같이 제작한 전체 액추에이터의 모습이다. 외경이 3mm이고 직경 2mm의 중공을 가지며 전체 길이는 48mm이다. 첫 번째 실험 결과에서는 약 30도 정도의 각도로 굽어지는 것이 확인되었는데, 굽힘 각도를 증가시키고 튜브가 꺾어지는 현상을 방지하기 위하여 내부 튜브를 주름진 형태로 제작하였다. 이러한 구조 개선 후에는 그림 10의 결과처럼 90도 정도의 굽힘 각도를 갖는 것으로 측정되었다. 그림 11은 액추에이터가 동작하고 있는 모습으로 90도 이상의 굽힘각이 나옴을 확인할 수 있다.

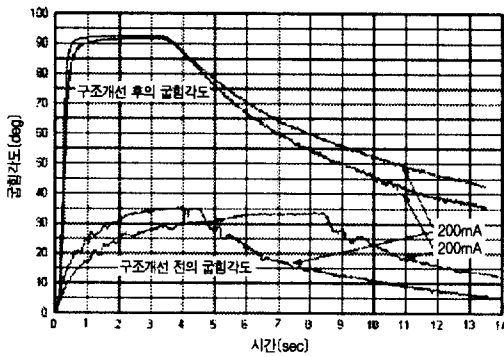


그림 10. 제작한 액추에이터의 동작 특성
(Bending performance of the fabricated actuator)

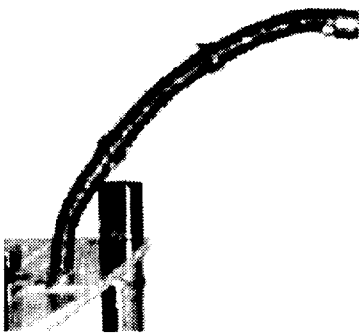


그림 11. 제작한 액추에이터의 굽힘 동작 모습
(Bending motion of the fabricated actuator)

제작한 액추에이터는 실제 혈류와 유사하도록 물의 속도, 레이놀즈 수, 유량, 온도 등을 맞추어 둔 혈관 모사 실험장치에서 테스트를 하였으며, 심장 부근의 90도 분기관에서 원활하게 굽힘 동작을 나타내어 원하는 장소까지 도달할 수 있음을 확인하였다.[13]

3. 전도성 고분자 액추에이터

3.1 전도성 고분자 액추에이터의 원리

고분자는 본래 부도체로서 절연체의 대표적인 물질이다. 그러나 1974년 일본 동경공업대학의 Shirakawa 실험실에서 전류가 흐르는 폴리에틸렌(polyethylene)이 발견된 이후 전도성 고분자에 관한 많은 연구가 진행되어 왔다.[14] 전도성 고분자가 과학적으로 그리고 공학적으로 얼마나 중요한 의미를 갖는지는 2000년 노벨화학상이 전도성 고분자의 발견에 주어졌음을 통해 단적으로 알 수 있다.

전도성 고분자의 다양한 응용 분야 중에서 액추에이터 응용은 1990년대 이후에 본격적인 연구가 시작된 새로운 분야이다. 폴리피롤(polypyrrole) 등의 고분자가 전도성을 갖기 위해서는 도판트

(dopant) 이온들이 고분자 주쇄에 결합되어 있어야 하는데, 이렇게 결합된 도판트 이온 및 이것에 대응하는 짝이온들이 고분자 내부와 외부로 출입하는 과정에서 고분자의 부피 변화가 발생하고 이것이 액추에이터의 기본 동작 원리가 된다.[15] 즉 고분자의 산화와 환원 과정에 수반되는 부피 변화가 액추에이터의 동작 원리로 작용한다. 이러한 고분자의 산화, 환원 반응은 전해질 내에서의 낮은 전압 인가에 의해 간단히 가능하고 따라서 전기적인 에너지가 중간 단계인 열 에너지 등으로의 변환 없이 직접 기계적 에너지로 변환되는 직접 구동 방식의 소자가 가능하다.[2-4]

폴리피롤과 같은 고분자는 전자들의 이동에 의해 전도도를 갖는 전자 전도성 고분자인데 비해, 이온들에 의한 전도도를 갖는 이온 전도성 고분자도 있다. 대부분의 고체 전해질은 이온 전도성 고분자라고 할 수 있으며 대표적인, 그리고 상용화된 제품을 구하기 쉬운 것 중 하나가 내피온(Nafion® : perfluorosulfonic acid, Dupont)이다. 내피온과 같은 이온 전도성 고분자와 금속간에 복합물을 형성하면 이는 매우 독특한 특성을 갖는 액추에이터 물질로 사용이 가능하다.[16] 이온 전도성 고분자를 이용한 액추에이터는 그 동작 원리가 아직 명확하게 구명되어 있지는 않으나 생체 내 액추에이터와의 유사성 때문에 생체 액추에이터 혹은 생체 모방 액추에이터로의 응용 가능성이 매우 높다.[17]

이외에도 고분자 유전체(polymer dielectric)을 이용한 전왜(electrostrictive) 소자도 액추에이터로 이용이 가능한 물질이다.[18] 그러나 전도성 고분자 액추에이터들의 동작 전압이 수 V 이하의 낮은 전압인데 비해 고분자 유전체 액추에이터는 수백 V 이상의 고전압을 필요로 하는 문제점을 갖는다.

여기에서는 전도성 고분자를 전자 전도성과 이온 전도성으로 대별하여 각 경우의 제작 방법과 기본적인 특성들을 살펴보도록 하겠다.

3.2 전자 전도성 고분자 액추에이터의 설계 및 제작

전자 전도성 고분자로는 폴리피롤, 폴리아닐린(polyaniline), 폴리시오펜(polythiophene) 등 많은 종류가 있으나 액추에이터 물질로는 폴리피롤과 폴리아닐린이 가장 많이 쓰인다. 이러한 전도성 고분자를 합성하는 방법도 여러 가지가 있으나 여기에서는 전해 중합법을 사용하여 합성한 경우를 고려한다. 전해 중합법이란 고분자의 단량체(monomer)와 도판트가 녹아있는 용액에 두 개의 전극을 넣고 전압을 걸어주면 양극 표면에 단량체가 산화되면서 고분자가 형성되는 방법으로 중합 과정 중에 도핑이 함께 일어난다. 전해 중합법에 의해 폴리피롤을 합성하는 개략적인 모습을 그림 12에 나타내었다.

양극은 PET 위에 크롬(Cr)과 금(Au)을 증착한 것을 사용하고 음극은 백금(Pt)선을 사용하여 정전류를 흘려주면 양극의 금 위에 폴리피롤이 중합된다.

폴리피롤의 두께는 중합 조건에 따라 달라지게 되는데 중합

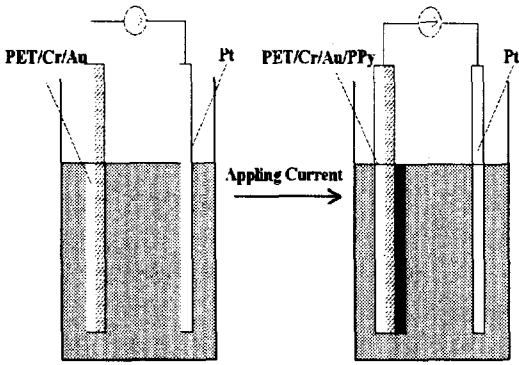


그림 12. 폴리피롤의 전기화학적 합성.
(Electrochemical polymerization of polypyrrole)

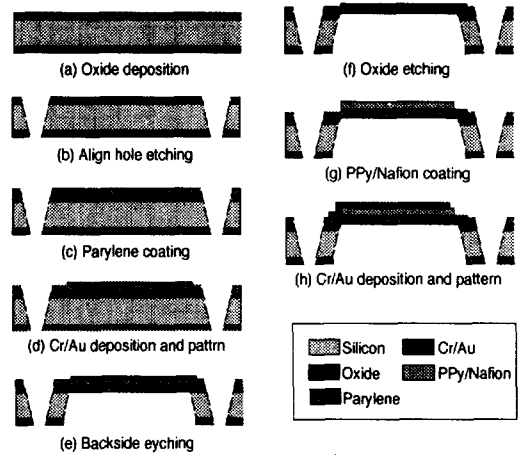


그림 14. 마이크로 펌프 구조물의 제작 공정.
(Fabrication process of micropump structure)

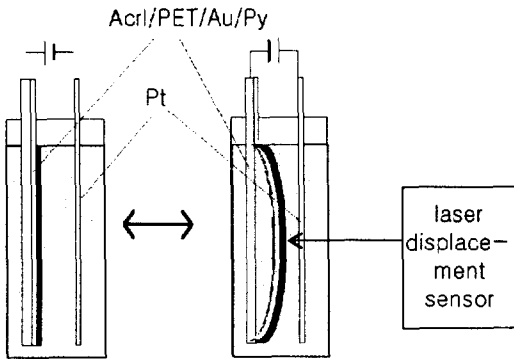


그림 13. 폴리피롤의 기계적 변위 측정.
(Measurement of mechanical displacement of polypyrrole)

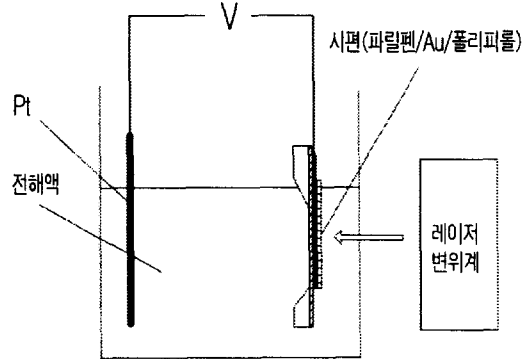


그림 15. 액체 전해질 내에서 다이어프램 변위의 측정.
(Measurement of the displacement of diaphragm in electrolyte solution)

울은 중합 시간에 대해 선형적이지만 전류값에 대해서는 선형적이지 않다.[19] 두께에 따른 기계적 변위의 변화를 살펴보기 위해 중합한 폴리피롤 박막을 아크릴 판 위에 브릿지 형태로 고정하고 그림 13과 같이 액체 전해질 내에서 움직임을 측정하였다. 측정 결과는 약 17-19 μm 의 두께에서 최대의 변위를 갖는 것으로 나타났으며 몇 가지 해석이 가능하나, 일단 이 정도의 두께가 최적 두께라고 판단할 수 있다.[19]

폴리피롤의 동작 환경으로서 액체 전해질이 필요하다는 것은 액추에이터 응용을 제한하게 된다. 따라서 액체 전해질과 동일한 역할을 하면서 고체 상태를 유지할 수 있는 고체 전해질을 사용할 필요가 있다. 고체 전해질로는 내피온을 코팅하여 사용할 수 있으나, 내피온만으로는 사용에 적합한 특성을 얻을 수 없고 다른 물질과의 적절한 배합이 필요하다.[20]

먼저 SUS 기판에 폴리피롤을 합성한 후 기판으로부터 분리한다. 여기에 액상의 내피온을 코팅하고 양면에는 페이스트(Ag paste) 등으로 전극을 형성하여 빔 형태의 시료를 완성한다. 전극 양단에 수 V 이하의 전압을 인가하면 전압의 방향에 따라 빔

이 휘어지게 된다. 액체 전해질 내에서 동작시킨 브릿지 형태의 시료가 약 0.1-1.1mm의 변위를 보인데 비해, 고체 전해질을 이용한 빔 형태의 시료는 0.1-0.8mm의 변위를 보였다.[21]

좀 더 구체적인 폴리피롤 액추에이터의 응용 가능성을 보이기 위한 실험으로서 마이크로 펌프 구조물의 제작 예를 들 수 있다. 마이크로머시닝 공정에 의해 다이어프램(diaphragm)을 제작하고 이 다이어프램 위에 폴리피롤과 고체 전해질을 형성함으로써 폴리피롤 액추에이터에 의해 동작하는 마이크로 펌프가 가능하다. 그림 14는 이와 같은 공정을 나타낸 것이다.[21] 다이어프램의 재료로는 파릴렌(Parylene[®])을 사용하였는데 부드러운 것도 기계적으로 상당히 강인한 특성을 갖는 물질이다.

그림 14의 제작 공정 중 폴리피롤을 합성한 후 고체 전해질을 코팅하지 않은 단계에서 그림 15와 같이 액체 전해질 내에서 변위 특성을 측정할 수 있다. 측정 결과는 연속적인 반복 특성은

별로 좋지 않으나 기계적인 변위가 약 200 μm 에 가까운 매우 큰 값으로 나타났다.[21] 일반적으로 마이크로 펌프의 다이어프램 변위가 수십 μm 이하인 것을 고려하면 이는 상당히 큰 변위라고 할 수 있으며 이러한 특성은 일회용 마이크로 주사기 등에 쓰이는 액추에이터에 직접 응용이 가능한 것으로 볼 수 있다.

고체 전해질을 이용하여 공기 중에서 동작시키면 변위 자체는 많이 감소하나 반복 특성은 상당히 개선된다. 그림 16의 측정 결과를 보면 0.05-0.5Hz의 주파수에 대해 약 10-15 μm 의 변위가 반복적으로 나오고 있음을 알 수 있다. 그리고 10-15 μm 의 변위 자체도 그다지 작은 수준은 아니며 동작 전압이 3V 미만임을 감안하면 마이크로 펌프에 응용이 가능한 우수한 수준의 특성임을 알 수 있다.

폴리피롤과 같은 전자 전도성 고분자의 가장 큰 장점은 반도체 공정의 이용이 가능하다는 점이라고 할 수 있다. 그러나 고체 전해질을 함께 사용하여 공기 중에서 동작시키고자 할 때에는 고체 전해질의 공정을 함께 고려하여야 하며 이에 적절한 단위

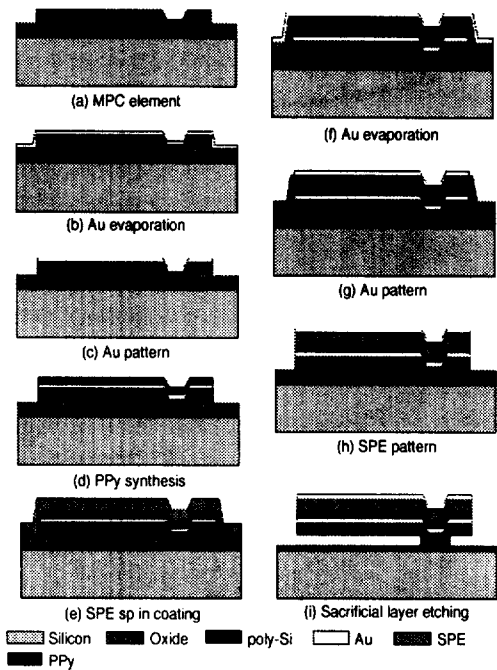


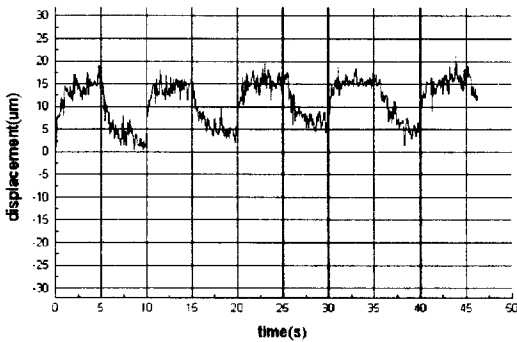
그림 17. 표면 마이크로머시닝을 이용한 고분자 액추에이터 공정. (Fabrication process of polymer actuators using surface micromachining)

공정의 개발이 필요하다. 그림 17은 고체 전해질을 포함하여, 공기 중에서 동작하는 빔 형태의 폴리피롤 액추에이터를 표면 마이크로머시닝 공정에 의해 제작하는 순서를 나타낸 것이다. 금속의 패터닝, 고체 전해질의 식각, 그리고 회생층 식각 시 폴리피롤 및 고체 전해질의 영향 등을 정량적으로 면밀히 분석할 필요가 있다. 이러한 공정의 개발을 통해 마이크로머시닝에 의한 다양한 구조를 갖는 고분자 액추에이터의 응용이 가능하다.

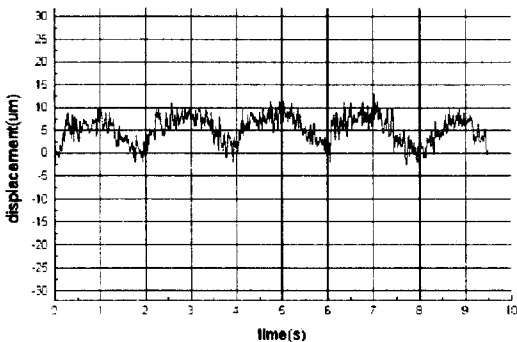
3.3 이온 전도성 고분자 액추에이터의 설계 및 제작

고체 전해질은 대부분 이온 전도성 고분자이고 대표적인 물질은 내피온이다. 이온 전도성 고분자와 금속 간의 복합물을 형성하면 이 물질을 액추에이터로 이용하는 것이 가능하다. 전자 전도성 고분자와 비교하면 훨씬 단순한 구조의 액추에이터가 가능하다. 전자 전도성 고분자의 경우 고분자 및 전해질, 그리고 양면의 전극 등으로 액추에이터가 구성되나 이온 전도성 고분자의 경우, 단순히 고분자 및 양면의 전극으로 구성된다. 물론 고분자 양면에 형성되는 전극의 성질이 전체 액추에이터 성능을 좌우하고 따라서 전극의 형성 공정이 쉽지 않은 것은 사실이나 일단 구조 자체가 단순하다고 볼 수 있으며 이는 복잡한 형상의 액추에이터를 제작하는 데에 장점으로 작용하게 된다.[22]

가장 단순한 형태로, 이온 전도성 고분자인 내피온을 빔 형태로 자르고 양면에 은 페이스트로 전극을 형성하여 생리식염수

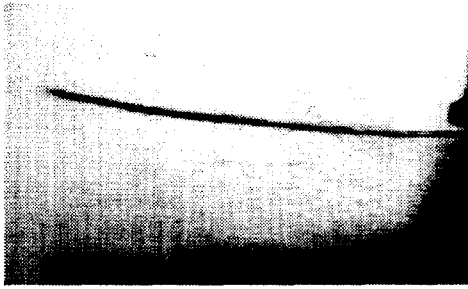


(a)

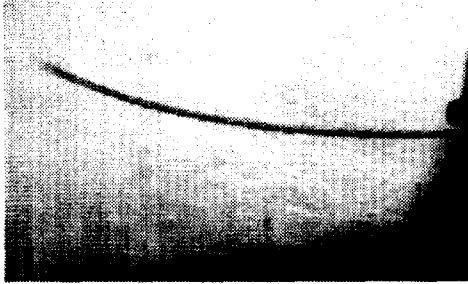


(b)

그림 16. 고체 전해질로 동작하는 폴리피롤을 다이어프램의 변위 : (a) +1.5V/-1.2V, 0.1Hz, (b) +1.5V/-1.2V, 0.5Hz (Measured displacement of polypyrrole diaphragm in solid electrolyte : (a) +1.5V/-1.2V, 0.1Hz, (b) +1.5V/-1.2V, 0.5Hz).

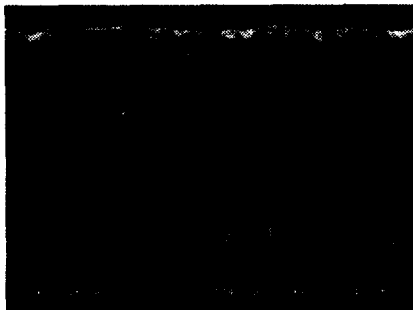


(a)

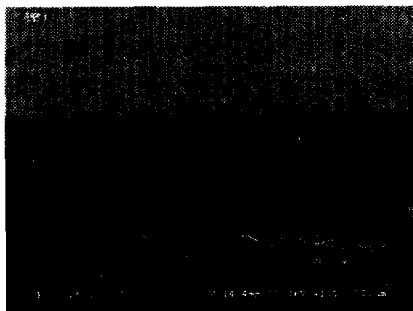


(b)

그림 18. 이온 전도성 고분자 액추에이터 (a) 전압 인가 전 및 (b) 전압 인가 후.
(Ion conductive polymer actuator : (a) before and (b) after applying voltage)



(a)



(b)

그림 19. 백금이 무전해 도금된 내피온 단면.
(Cross section of Nafion electroless plated with Pt)

내에서 전압을 인가하면 그림 18과 같이 양극 쪽으로 휘게 된다.[23] 그러나 이는 단순히 이온 전도성 고분자가 액추에이터로 사용될 수 있다는 것만을 확인하기 위한 것이고 최적의 성능을 갖도록 하기 위해서는 복잡한 공정을 거쳐야 한다.

이온 전도성 고분자와 금속의 복합물 형성은 무전해 도금을 이용하는 것으로 알려지고 있다. 무전해 도금은 도금 물질을 포함하는 금속염과 가용성 환원제의 혼합액에서 환원제의 산화에 의해 금속이 피도금 물질 상에 석출되는 것으로, 피도금 물질이 금속이든 비금속이든 가능하다. 이온 전도성 고분자 액추에이터의 성능은 이 도금 과정에 의해 크게 달라지며 재현성 있는 도금 과정의 확립이 무엇보다 중요하다. 그림 19는 백금을 무전해 도금된 내피온 필름의 표면 및 단면 SEM 사진이다. 무전해 도금에 의한 수지상 구조(dendrite structure)의 복합물 형성을 확인할 수 있다.

무전해 도금에 의한 복합물 형성 공정 외에 이온 전도성 고분자 내부에 존재하는 이온 교환 과정도 전체 성능을 결정짓는 중요한 요소이다. 이온의 종류에 따라 액추에이터로서의 특성이 조금씩 달라지는데, Na^+ 이온보다 K^+ 이온이 좀 더 우수한 특성을 갖는 것으로 보고된 예가 있다.[24]

4. 정리 및 결론

기능성 재료는 정의 방법, 분류 방법 등에 따라 상당히 많은 종류가 가능하나, 액추에이터 응용과 관련한 기능성 재료 중 가장 대표적인 것이라 할 수 있는 형상기억합금과 전도성 고분자에 관해 살펴보았다. 형상기억합금과 전자 전도성 고분자, 이온 전도성 고분자를 이용한 액추에이터의 일반적인 특성들을 다른 재료와 비교한 결과를 표 1과 표 2에 정리하였다.[25] 형상기억

표 1. 이온 전도성 고분자 및 형상기억합금 액추에이터의 특성 비교.
(Comparison of IPMC with SMA)

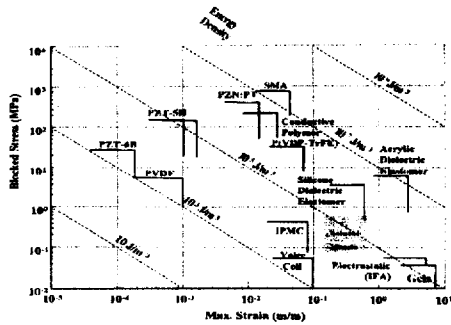
Material Property	IPMC	SMA	EAC
Displacement	>10%	<8%(short fatigue life)	0.1-0.3%
Force(Mpa)	10-30	~700	30-40
Reaction speed	μs -s	s-m	μs -s
Density	1-2.5g/cc	5-6g/cc	6-8g/cc
drive voltage	4-7V	-	50-800V
Power consumption	watts	watts	watts
Fracture toughness	resilient	elastic	fragile

※ IPMC : Ionic Polymer Metal Composite (이온 전도성 고분자), SMA : Shape Memory Alloy, EAC : Electro Active Ceramic

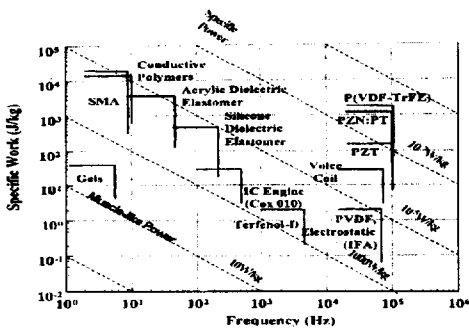
표 2. 전자 전도성 고분자 및 이온 전도성 고분자의 특성 비교.
(Comparison of IPMC with CP)

EAP Property	IPMC	CP	GEL	Electrostrictive
Driving voltage	low (1-2V)	low	low (<1V)	high (breakdown 50-20MV/m)
Displacement	large	medium	large	large
Response	fast (1-20Hz)	medium (a few Hz)	slow (400s)	very fast (10kHz)
Force & torque	weak	weak	weak	medium
Others	summarized problems	MEMS compatible	-	How to form thin film

※ IPMC : Ionic Polymer Metal Composite (이온 전도성 고분자), CP : Conductive Polymer (전자 전도성 고분자)



(a)



(b)

그림 20. 다양한 재료들의 발생력, 에너지 밀도 및 파워밀도 비교.
(Comparison of stress, energy density and specific power)

재료와 비교한 결과를 표 1과 표 2에 정리하였다. [25] 형상기억합금은 발생력 면에서, 고분자는 변위 면에서 좀 더 유리한 특성을 가짐을 알 수 있다. 이온 전도성 고분자는 전자 전도성 고분자

자보다 빠른 반복 동작에 유리하나 마이크로머싱 공정에 의한 제작이 어렵고 항상 수분이 있어야 동작한다는 단점을 갖는다.

그림 20은 액추에이터로 이용이 가능한 다양한 재료들의 발생력, 에너지 밀도, 파워 밀도 등을 비교한 그림이다. [25] 대체적으로 고분자 물질들의 특징은 변형률, 발생력 등은 우수하나 반응 속도가 느린 편이라고 할 수 있다. 전도성 고분자의 경우 변형률은 작아도 인간의 근육에 필적할만한 에너지 밀도를 가지고 있음은 이 물질이 생체 모방 액추에이터로서 매우 큰 가능성을 가짐을 의미한다.

참고 문헌

- [1] 마이크로머신의 세계, 김용권 역, 대영사, 1995.
- [2] Y. Bar-Cohen, "Electroactive polymers as artificial muscles - capabilities, potentials and challenges," Keynote Presentation at the Robotics 2000 and Space 2000, 2000.
- [3] J. W. Gardner and P. N. Bartlett, "Application of conducting polymer technology in microsystems," Sensors and Actuators, vol. A51, pp. 57~66, 1995.
- [4] R. H. Baughman, "Conducting polymer artificial muscle," Synthetic Metals, vol. 78, pp. 339~353, 1996.
- [5] 丹久保 熙康(編), 形状記憶合金, 産業圖書, 1984.
- [6] 김명순, 이승기, 나승우, 이상훈, "열처리 조건변화에 따른 형상기억합금 스프링의 특성변화," 전기학회 논문지, 제46권 제3호, pp. 445~449, 1997.
- [7] Tom Waram, Actuator Design Using Shape Memory Alloys, Mondo tronics Inc., 1993.
- [8] 나승우, 이승기, "Bias식 및 차동식 형상기억합금 액추에이터의 동특성," 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 2611~2613, 1997.
- [9] 나승우, 이승기, "형상기억합금 스프링을 이용한 관내주행기구의 설계 및 제작," 전기학회 논문지, 제47권, 제7호, pp. 1062~1068, 1998.
- [10] 이승기, 나승우, "Bias 스프링을 이용한 형상기억합금 액추에이터의 설계 방법," 센서학회지, 제7권, 제6호, pp. 437~445, 1998.
- [11] G. Lim, K. Minami, M. Sugihara, M. Uchiyama and M. Esashi, "Active catheter with multilink structure based on silicon micromachining", Proc. IEEE MEMS Workshop, pp. 116~121, 1995.
- [12] An-Su Lim and Seung-Ki Lee, "Thin tube-

- type bending actuator using planar S-shaped shape memory alloy springs," Proceedings of the 10th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators, vol. 2, pp. 1894~1895, 1999.
- [13] 산업자원부 초소형 정밀기계기술 선도기술개발사업 초소형 작동형 내시경 개발 과제 결과물 발표회, 2000. 9. 8., 서울대학교 136동 1층 Atrium.
- [14] J. R. Reynolds, "Electrically conductive polymer," Chemtech, July, pp. 440~447, 1988.
- [15] J. N. Barisci, T. W. Lewis, G. M. Spinks, C. O. Too and G. G. Wallace, "Responsive systems based on conducting polymer," Proc. of SPIE, Smart Materials, Structures and Integrated Systems, vol. 3241, pp. 10~19, 1997.
- [16] M. Shahinpoor, Y. Bar-Cohen, J. O. Simpson and J. Smith, "Ionic polymer-metal composites (IPMCs) as biomimetic sensors, actuators and artificial muscles - a review," Smart Mater. Struct., vol. 7, pp. R15~R30, 1998.
- [17] I. Y. Galaev and B. Mattiasson, "Smart' polymers and what they could do in biotechnology and medicine," Tibtech, vol. 17, pp. 335~340, 1999. [EAP-43]
- [18] J. Kyokane, H. Ishimoto, H. Yugen, T. Hirai, T. Ueda and K. Yoshino, "Electro-striction effect of polyurethane elastomer (PUE) and its application to actuators," Synthetic Metals, vol. 103, pp. 2366-2367, 1999.
- [19] 최영, 이승기, "합성조건의 변화에 따른 액추에이터 재료로서의 전도성 고분자의 기계적 특성," 센서학회지, 제7권, 제6호, pp. 446~451, 1998.
- [20] 안호정, 광두영, 이승기, 박정호, "액추에이터 응용을 위한 전도성 고분자 및 고체 전해질의 전도도 측정," 2000년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 2227-2229, 2000.
- [21] Seung-Ki Lee, Young Choi, Woo-Young Sim, Sang-Sik Yang, Ho-Jung An and James Jung-ho Pak, "Fabrication of electroactive polymer actuator composed of polypyrrole and solid-polymer electrolyte and its application to micropump," Proc. of SPIE's 7th International Symposium on Smart Structures and Materials, pp. 291-299, 2000.
- [22] Y. Bar-Cohen, T. Xue, B. Joffe, S. S. Lih, M. Shahinpoor, J. Simpson, J. Smith and P. Willis, "Electroactive polymers (EAP) low mass muscle actuators," Proc. of SPIE Int. Conf., Smart Structures and Materials Symposium, 1997.
- [23] 나승우, 김명순, 이승기, 이상훈, "전도성 고분자를 이용한 bending 액추에이터," 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 1997~2000, 1996.
- [24] M. Shahinpoor and K. J. Kim "Effects of counter-ions on the performance of IPMCs," Proc. of SPIE Int. Conf., Smart Structures and Materials Symposium, pp. 110~120, 2000.
- [25] S. G. Wax and R. R. Sands "Electroactive polymer actuators and devices," Proc. of SPIE Int. Conf., Smart Structures and Materials Symposium, pp. 2~10, 1999.

저 자 약 령

성명 : 이승기

◆학력

1986년 서울대학교 전기공학과 졸업

1988년 동 대학원 전기공학과 졸업 (공학석사)

1992년 동 대학원 전기공학과 졸업 (공학박사)

◆경력

1992년-1993년 일본 동북(Tohoku)대학교 기계전자공학과 특별연구원

1994년-현재 단국대학교 전기공학과 부교수

성명 : 박정호

◆학력

1985년 미국 퍼듀대 전기공학과 졸업

1988년 동 대학원 전기공학과 졸업 (공학석사)

1992년 동 대학원 전기공학과 졸업 (공학박사)

◆경력

1992년-1995년 Intel Corp. 근무

1995년-현재 고려대 전기전자전파공학부 부교수