압전초음파모터의 개발과 응용현황

글 _ 윤석진, 강종윤, 한국과학기술연구원 박막재료연구센터
sjyoon@kist.re.kr

1. 서 론

광학, 천문학 또는 정밀 가공 등의 분야에서 광로장(光路長)이나 위치를 서브 마이크론의 정밀도를 갖는 변위 소자가 필요하다. 광학의 분야에는 "적응적 광학계"라는 사고가 도입되고 있다. 이는 일단 설정되면 거의 고정한 대로 사용하고 있던 거울이나 렌즈의 위치, 각도 또는 초점거리를 상황에 따라 변화시키고자 하는 것으로 이를 위해서는 거울이나 렌즈의 위치를 사용 광파장 보다도 월등히 작은 정도(~Å)로 제어하기 위한 포지셔너(positioner)가 필수적으로 요구된다. 같은 기계공학의 분야에서도 상술한 것과는 다른 용도에의 수요도 급증하고 있다. 예컨대, 임팩트 프린터 헤드에 쓰이는 보이스코일 모터에 의한 구동은 작은 질량의 이동에는 적합하나 추력(推力) 및 응답 속도를 충분히 얻을 수 없고 또한 모터 자체의 크기가 대형으로 된다. 이러한 전자식의 구동 원을 대신하는 고체 소자 모터의 개발이 요구되고 있는데 그에 따라 연구되고 있는 것이 액츄에이터이다. 여기서 액츄에이터라 함은 어떤 가동에너지를 기계적 변위(變位)또는 응력(應力)으로 변환하는 것을 말하는데 현재 산업용 액츄에이터로는 전자식 모터와 유공압 액츄에이터가 주류를 이루고 있다. 이와 같은 액츄에이터는 중량에 대한 power비가 작고, 구성하고 있는 재료 등의 특성 제한으로 인해 큰 발전를 기대할 수 없기 때문에 새로운 원리가 도입된 액츄에이터가 개발되어 빠른 응답 속도, 고성능, 그리고 경량화 등이 실현되어야 한다.

압전 및 전왜 진동자에서 발생하는 강력한 초음파 진동에너지를 이용하여 동력을 발생시키는 압전/전왜 액츄에이터는 왜형(strain)을 사용하는 방식에 따라 크게 2가지로 분류할 수 있다. 즉, 인가 전계에 의해 유도되는 리지드(rigid) 왜형의 사용과 교류 전계에 의해 유도되는 공진 왜형의 사용으로 분류할 수 있다. 즉, 직류 전계에 의해 왜형이 단방향으로 유도되는 리지드(rigid) 왜형과 교류 전계에 의해 유도되는 공진 왜형으로, 초음파 모터는 교류 전계에 의해 유도되는 공진 왜형을 사용한다.

압전초음파모터는 구동방식에 따라 회전형과 리니어형으로 분류할 수 있다. 이는 압전세라믹스에서 발생하는 기계적 진동을 회전형 또는 직선형으로 변환시키는 메카니즘에 따라 구분된다. 현재 초음파모터의 연구동향은 나노미터(nanometer) 시대를 대비하는 차세대 모터로 탈바꿈하기위해 회전형은 감속기구 없이 속도제어가 가능하고 정지시 미끄러짐이 없기 때문에 정밀위치제어가 요구되는 반도체, 옵틱(optic)분야에 응용이 되고 있으며, 리니어형 역시 회전을 선형으로 바꾸는 ball screw와 같은 별도의 기구가 필요치 않아 컴팩트(compact)하고 단순구조가 가능하여 나노미터 분해능(nanometer resolution)을 갖는 소형테이블 및 기타 정밀위치가 필요한 분야에 집중하고 있다. 또한 압전세라믹스가 갖는 빠른 응답성 및 직선운동의 직접구현으로 초소형(3mm 이하) 리니어 모터가 개발되어 셀룰러 폰의 optic zoom의 구동기구에 적용을 하고 있는 실정이다.

2. 압전 초음파 모터의 역사

전자기식 모터가 100여 년 전에 발명되어 산업전반에 걸쳐 여전히 주류를 이루고 있으나 자석이나 초전도물질의 획기적인 개발 없이는 커다란 진전을 기대할 수 없다. 더욱이 충분한 에너지 효율을 갖는 1cm^{3}이하의 초소형

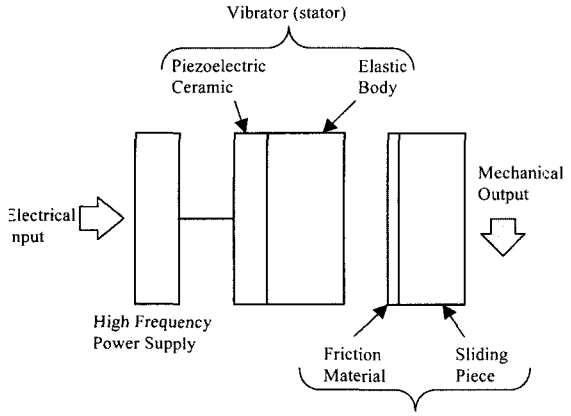

Fig. 1. Fundamental construction of the ultrasonic motor.

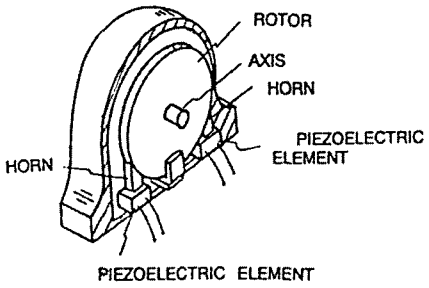

Fig. 2. Ultrasonic motor by H. V. Barth.

모터를 생산하기에는 거의 불가능하다. 따라서 강력한 초음파 진동에너지를 이용한 소위 "초음파 모터"는 주위의 관심을 끌만하다. 초음파 모터의 효율은 크기에 관계없기 때문에 소형모터 용도로 아주 적합하다. Fig. 1은 초음파모터의 기본적인 구조로 고주파 전원장치와 진동체(고정자) 그리고 이동자로 구성되어 있다. 진동체는 구동원인 압전세라믹스와 탄성체로, 그리고 이동자는 이동부분과 마찰재로 구성되어 있다.

초음파모터의 실용화의 첫 번째 모델은 1973년 IBM의 H. V. Barth에 의해서다(Fig. 2). 그림과 같이 회전자는 서로 반대편에 위치해 있는 두 개의 혼(horn)에 압착되어 있으며 한 촉 혼에 부착되어 있는 압전진동자에 전원을 공급하면 일정한 방향으로 돌고 다른 쪽에 전원을 인가하면 반대 방향으로 회전하게 된다. 같은 원리를 근거로 한 다양한 형태의 구조는 구소련 연방의 V. V. Lavrinenko와 P. E. Vasiliev에 의해서다. 온도상승, 마모 및 파손 등으로 인한 일정한 진동변위의 유지는 물론 실용성의 결여로 그 당시에는 크게 적용되지 못하였다.

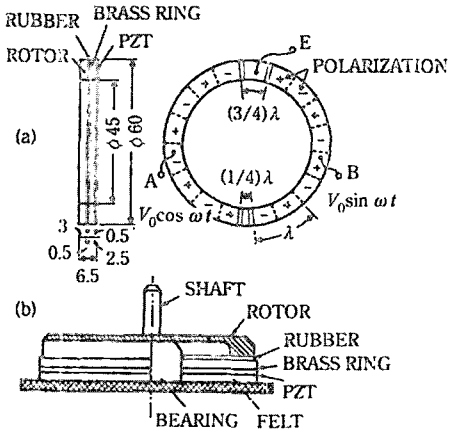

Fig. 3. Prototype of the travelling wave ultrasonic motor.

1980년대 칩 패턴의 고밀도화와 고집적화에 따라 자계의 노이즈가 발생하지 않는 매우 정밀하고 정교한 위치제어기(positioner)가 필요하게 됨으로써 초음파 모터에 대한 연구 개발이 더욱 가속화되었으며 1990년대 후반부터 Fig. 3과 같은 진행파형 모터가 개발되어 실용화에 이르게 되었다.

초음파모터에 대한 특징을 살펴보면 첫째로 저속·고토크(low speed & high torque)로 직접 구동이 가능하고, 둘째로 빠른 응답시간(response time), 폭 넓은 속도영역, 그리고 이동자와 고정자가 서로 압착되어 있기 때문에 미끄러짐(backlash)이 없어 제어가 우수하고 정밀 위치제어가 되며, power/무게가 크고 생산과정이 쉽다. 또한 외부 자계나 방사능에 대한 영향과 발생이 없다. 그러나 고출력 전원장치가 필요하고 마찰구동이기 때문에 내구성에 문제가 있으며 속도 대 토크 특성이 감소하는 결점 등이 있으나 초음파 모터는 현재의 전자기식 모터의 응용한계를 극복하는 방향으로 꾸준히 연구하여 카메라 렌즈 구동용 모터, 공중전화기의 카드 이송용 모터, 자동차 사이드 미러를 접는 모터, 자동차의 가동식 헤드레스트의 동력원, 롤 커텐을 감는 모터, 리모콘 스테레오의 볼륨용 모터 등에 현재 사용되고 있다.

3. 압전 초음파모터의 원리와 요소기술

초음파 모터는 진동자의 형태에 따라 막대형태(rod

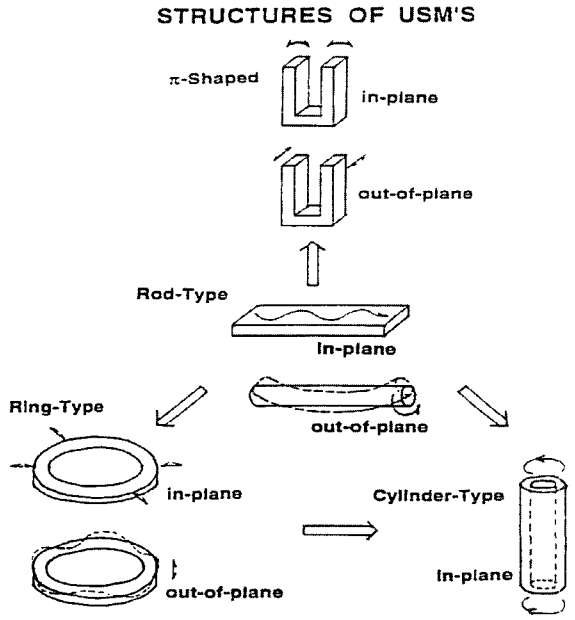

Fig. 4. Vibrator shapes for ultrasonic motors.

type), π형태, 원환형(ring type), 그리고 원통형(cylinder type) 있으며(Fig. 4) 구동형태에 따라 회전형과 리니어형으로 나뉜다.

3.1 초음파 모터의 구동원리

3.1.1 회전형 초음파 모터의 구동원리

Fig. 5는 진행파형 초음파 모터의 동작원리를 설명하는 것으로 압전세라믹스는 전기-기계 변환을 위한 압전성을 부여하기 위해 두께방향으로 균일하게 2개의 전극군으로 구성하여 교대로 분극(poling)을 한다. 이러한 전극 군에 90°의 위상차를 가진 2개의 정현파를 인가하면 진동체의 표면에서 타원형의 굴곡 진동의 진행파가 발생한다. 이와 같은 타원형의 굴곡 진행파가 발생하는 진동체의 표면에 적당한 압착력으로 이동자를 접촉시키면 이동자가 회전 또는 직선운동을 하게 되는 것이다.

3.1.2 리니어형 초음파 모터의 종류와 구동원리

리니어형 초음파 모터는 구동주파수에 따라 초음파형과 저주파형으로 구분할 수 있으며(Fig. 6) 진행파형(travelling wave-type)과 표면파형(surface wave-type)을 웨이브(wave)형 모터, 종진동(longitudinal wave), 굴곡진동(flexural wave), 그리고 중첩진동(superposition wave)을 점접촉(point contact)형 모터로 분류할 수 있다.

최근 KIST에서 개발된 리니어형 초음파모터는 Fig. 7과 같은 형태로 점접촉형 모터로 분류할 수 있으며 타원형의 변위 발생과 종진동의 크기를 확대하기위해 쉐이킹빔(shaking beam)이라는 원리를 도입하였다. 즉, 종진동을 발생시키기 위해 반파장 변환기를 사용하였으며 반파장 변환기의 끝에서 발생변위가 최대가 되도록 설계하였

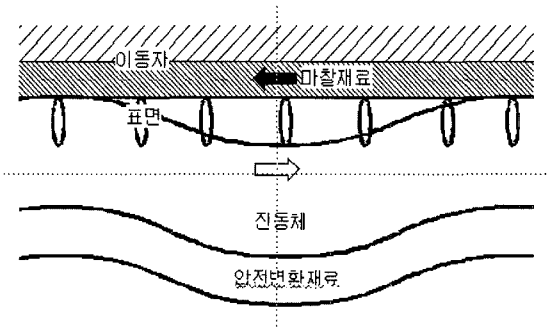

Fig. 5. Operation principle of the ultrasonic motor.

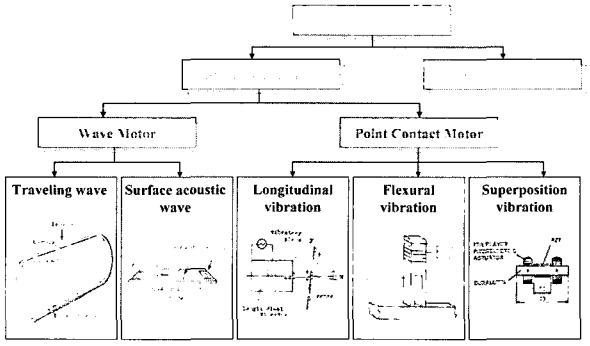

Fig. 6. Classification of piezoelectric linear ultrasonic motor.

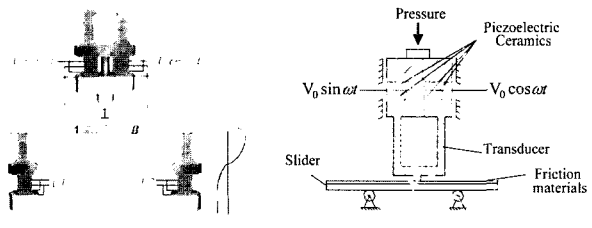

Fig. 7. Shaking beam typed piezoelectric linear ultrasonic motor (a) Analysis of linear motor, ①, ②: Half wave converter, ③: Shaking beam (b) Construction of linear motor.

고, 2개의 반파장 변환기의 양끝에 연결 쉐이킹 빔을 연결함으로써 리니어 모터를 구현하였다.

3.1.3 임팩트형 초음파리니어모터의 구동원리

임팩트 형태 압전 액츄에이터는 축이 진동할 때 이동자와 축 사이에 발생하는 마찰력의 작용시간과 이동자의 무게 등의 관계에 의해 이동자가 축에 대하여 상대적으로 이동하는 것이다. 즉 상대적으로 축이 저속으로 이동하는 때는 마찰력 작용시간이 길어지며 따라서, 이동자와 축이 동시에 움직이며, 상대적으로 축이 고속으로 움직이는 경우, 이동자와 축사이 마찰력 작용시간이 짧고, 또한 이동자의 무게에 의해 축만 움직이고 이동자는 제자리에 있는 임팩트 형태로 이와 같은 운동이 반복되어 이동자가 일정한 한쪽 방향으로 움직이게 된다. 또한, 축의 운동 속도 변화를 역으로 할 때 역방향으로 이동자가 움직이게 되는 원리를 사용하고 있다.

3.2 압전변환재료

전기적인 입력에 의해 진동체에 굴곡진동을 발생시키는 전기-기계 변환재료로서는 압전 세라믹재료를 사용하고 있다. 초음파 모터에 적합한 압전세라믹스는 전기-기계 결합계수(k_p)가 크고, 기계적 품질계수(Qm)가 크며 구동시 큰 전계나 온도변화에 의해 압전특성이 크게 변화하지 말아야 한다. 현재의 대부분 압전세라믹스는 공진자용으로 개발되어 있어 초음파 모터용 압전세라믹스를 개발하는 것이 초음파 모터의 상용화에 첫 걸음이라 하겠다.

3.3 마찰재료

진동체(고정자)의 표면의 손상과 원치 않는 소음 등을 막기 위함은 물론 모터의 에너지 변환효율을 증가시키기 위해 마찰재의 선정은 매우 중요하다. 마찰재료는 진동체와 이동체와의 접촉 마찰면에 접착 고정되어 진동체와 이동체 사이의 마찰력을 효율 좋게 이동체에 전달시키기 위한 역할을 하는 것이다. 마찰재는 주로 PTFE(poly tetra fluoro ethylene, Teflon), PPS(Ryton), PBT(poly butyl terephthalate) 등을 사용하고 있으며 초음파 모터의 수명은 이의 마찰재 선정에 좌우하는 아주 중요한 구성요소이다. 현재 채택하고 있는 마찰재로 초음파 모터의 수명은 3,000시간 이상이어서 초음파 모터의 실용화에 더 이상 수명이 문제가 되지 않는다. 마찰재로서 요구되는 특성은 마찰력이 크고 마모가 작아 접촉 마찰력의 경시변화가 작아야 하며 마찰 잡음이 발생되지 않아야 한다.

3.4 구동/제어 방식

초음파 모터에 관한 연구는 모터 자체에 관한 연구 이외에도 그것을 구동시키기 위한 발진 회로에 대한 연구도 병행되고 있다. 발진 회로는 초음파 모터를 구동하기 위해 동일한 크기의 $\lambda/4$의 위상차를 가지는 두 종류의 정현파 신호를 발생하여야 한다. 또한, 발진 회로에 의해 초음파 모터의 회전 속도를 제어할 수 있으며, 설계 방법에 따라 전압 제어(voltage control), 주파수 제어(frequency control), 위상 제어(phase control), 그리고 진폭변조(pulse width modulation) 방식으로 분류된다. 전압제어 방식은 공진주파수에서 진동체에 가하는 전압을 조절하는 것으로 인가하는 전압에 의해 어느 정도 속도는 조절이 가능하나 어떤 임계이상의 전압을 가하여야 구동이 가능한 것으로 정밀 위치제어에는 부적합하다. 주파수 제어 방식은 일정한 인가전압으로 초음파 모터의 공진주파수 부근을 조절하는 것으로 변화하는 주파수에 비해 속도의 조절이 선형으로 얻기 어렵다. 또한 위상제어 방식은 진동체의 표면에서 진행파를 얻기 위해 인가하는 90°의 위상차를 가하는 두 개의 정현파 신호를 조절하는 것으로 위상 변화에 대한 속도변화가 선형으로 얻을 수 있어 이의 방식이 바람직하나 일정한 효율과 선형적인 속도 조절면에서는 진폭변조 방식 채택이 유리하다.

4. 압전 초음파 모터의 활용 가능 분야

4.1 로봇용 액츄에이터

오늘날 사용되고 있는 대부분의 산업용 로봇은 유압으로 구동되고 있다. 그러나 로봇과 압력발생기가 압력관에 의해 연결되기 때문에 자유로이 움직이는 차세대용 로봇에는 부적절하다. 한편 10Nm 정도의 토크를 갖는 전자기식 모터는 중량이 무겁고 또한 구동 메카니즘이 매우

크게 된다. 따라서 10Nm정도의 토오크를 갖는 경량의 모터가 필요하게 되는데 초음파모터는 그와 같은 조건을 충족시킬 수 있다. 로봇의 조인트에 원환형이나 실린더형의 모터가 사용된다면 조인트가 가벼워질 뿐만 아니라 속이 빈 구조로 시그널이나 동력전달계가 사용될 수 있다. 점차적으로 노령화되는 사회에서는 가정부 로봇과 같은 특별한 용도의 로봇이 우리 가정에서 중요한 역할을 할 때가 올 것이다. 그와 같은 로봇 또한 큰 토크를 발생할 수 있는 경량의 액츄에이터가 더욱 더 요망될 것이다.

4.2 가정소비재용 액츄에이터

원환형 초음파모터가 자동초점 렌즈의 구동 메카니즘으로 사용되고 있는 것은 이미 알려져 있다. 이것은 렌즈형태에 잘 맞는 원환형 구조의 좋은 사용 예이며 또한 초음파 모터의 형태의 유연성, 제어 및 정숙구동을 충분히 이용한 것이다. 저속.고토크 및 정숙구동과 같은 초음파 모터의 특성을 충분히 이용하는 연구를 계속하여 창문이나 블라인드 등의 구동 등에 응용될 수 있다.

4.3 정밀위치제어용 액츄에이터

나노메터 정도의 정밀도를 갖는 빠른 위치제어 기구가 반도체 제조공정에 사용되고 있다. 집적도를 더 높이기 위해서는 높은 정밀도가 필요하다. 구동 토크를 증가시키기 위해 전자기식 모터에 사용되는 기어 때문에 정밀도를 향상시키기 어려운 백래시(backlash)가 존재하게 된다. 그러나 초음파모터는 직접구동이 가능하기 때문에 사용된 기준 게이지의 정밀도에 의해 한정된 게이지가 적절한 제어방식으로 얻을 수 있다. 현재는 선형, 회전형 초음파 모터와 적절한 제어 방법이 위치제어용 기구의 다양한 용도로 개발되고 있다.

4.4 초소형 기계용 액츄에이터

전자기 모터에서 필요한 자기회로와 코일의 포화로 인해 소형화에 한계가 있다. 가장 작은 전자기식 모터의 지름은 기껏해야 수 mm이지만 그와 같은 크기의 초음파 모터는 이미 실험적으로 개발되었다. 모터의 직경이 1mm 또는 그 이하로 만들어질 수 있다면 곤충 크기와 같은 마이크로 메카니즘의 구동에 사용될 가능성이 있다. 현재 정전형 전기모터와 바이오 액츄에이터가 마이크로-메카니즘 사용에 대한 연구를 계속해서 하고 있지만 아직까지 생산된 결과가 없다.

4.5 우주선용 액츄에이터

진공과 중력이 없는 상태에서의 구동중에 일어날 수 있는 반자동을 막기 위해 사용된 기계가 일반적으로 작은 속도로 구동된다. 또한 이러한 환경에서 윤활유가 사용될 수 없다. 그와 같은 장비는 또한 구동 메카니즘에 초음파모터가 사용될 수 있는데 이는 초음파모터의 느린 속도와 어떠한 윤활유도 필요치 않기 때문이다.

4.6 물체 이송용 액츄에이터

부품이송을 위해 저주파 기계적 진동을 이용한 기계가 이미 사용되고 있지만 소음이 매우 크다. 초음파 모터의 이동부분 즉, 이동자 및 슬라이더를 이용한 정숙 구동과 간결한 물체 이송장치의 연구가 진행되고 있다.

5. 압전초음파 모터의 전망

마찰을 구동력으로 하는 초음파 모터는 저속 · 고토크의 특성이 얻어지며 유지토크(holding torque)가 크기 때문에 응답성이 우수하고, 소형 경량화가 가능하고 구조가 단순하기 때문에 저 가격이 기대되며, 형상의 자유도가 커 장치의 최적 설계가 가능한 등의 특징을 가지고 있다. 그러나 작은 변위(~10mm)을 효율적으로 이용하기 위해서는 마찰면에서의 高精度의 가공법, 가청음을 내지 않는 구조설계, 지지방법의 개선, 그리고 피이드 백(feed-back) 회로를 겸비한 초음파모터의 발진/제어 회로가 필요하다. 또한 마찰계수가 큰 마찰재료, 기계적 강도가 보다 큰 압전세라믹스의 검토에 의해 높은 변환효율을 실현시킬 수 있을 것이다.

초음파 모터는 마찰재료 · 진동재료 · 변환재료 등의 재료 검토와 더불어 진동해석 · 구조설계 및 구동회로의 최적화에 의해 소출력의 분야에 사용되던 전자기식 모터와 다른 액츄에이터가 탄생할 수 있을 것으로 기대된다.

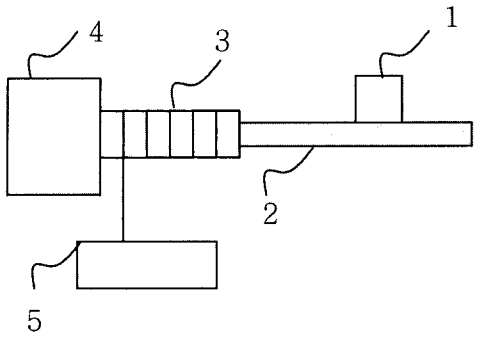

Fig. 8. Impact typed Linear Motor by Minolta 1) Mobile element, 2) Shaft, 3) Piezoelectric Multilayer Actuator, 4) Supporting Part, 5) Generative Circuit.

이와 더불어 기기 · 장치에서도 새로운 구성의 설계가 가능하리라 생각된다.

6. 압전초음파 모터의 시장

초음파 모터가 실제 시장에 등장하게 된 것은 1986년으로 일본의 新生공업의 진행파형을 이용한 초음파 모터의 제작에서 비롯된다. 그 후 신생공업은 꾸준한 연구와 개발 끝에 핵자기공명장치(Nuclear Magnetic Resonance Medical Instrument)에 응용하게 되었으며 1990년에 일본의 신동경청사에 자동커텐 장치(automatic curtain drawers)용으로 초음파 모터를 1500개 채택하게 된 것이 최초의 대량생산에 의한 것이다.

또한 자동차에의 응용으로는 일본의 Toyota New Crown의 seat 조절용으로 채택되게 되었으며 Canon사

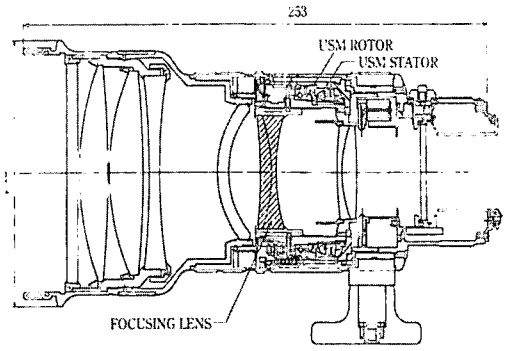

Fig. 9. Application of ultrasonic motor for the camera.

의 성공적인 카메라 렌즈의 자동조절 장치용 모터(Fig. 9) 등은 초음파 모터의 시장의 확대를 가져오게 되었다. 현재는 카메라 자동 필름감기용으로 저가격의 소형모터가 개발중이며 일본의 Seiko사의 손목시계용 10mm 초음파 모터가 응용되었다. 또한 파트 피더(part-feeder)용으로 개당 $500로 년 20,000개가 판매되고 있는 등 초음파 모터의 시장은 99년 현재 천만 달러에 이르며 향후 초음파 모터의 큰 시장은 Automatic Window Shutter System, Floppy drive, CD/laser disk drive 등이 될 것으로 연 10만개의 생산으로 2억 달러의 시장이 예측된다.

결론적으로 전체적인 압전액츄에이터에 대한 시장현황은 세라믹 액츄에이터 부품에 대한 연간 판매량 5억 달러, 카메라 부품관련 3억 달러, 초음파모터 1억 5천만 달러 등에 이르며 특히 압전/전왜 액츄에이터와 초음파 모터의 시장은 21C초에 약 100억 달러로 예측되는 등 많은 분야에서 활용이 기대된다.

윤 석 진

- 1983년 연세대학교 전기공학과(학사)
- 1985년 연세대학교 전기공학과(석사)
- 1992년 연세대학교 전기공학과(박사)
- 1995년-1997년 Pennsylvania State University Post doc.
- 2003년 한국 세라믹 학회 총무 이사
- 2000년~현재 한국 센서 학회 편집위원
- 2000년~현재 한국 전기 전자 재료 학회 편집위원
- 1988년~현재 한국 과학 기술 연구원 박막 재료 연구센터 센터장

강 종 윤

- 1993년 연세대학교 전기공학과(학사)
- 1995년 연세대학교 전기공학과(석사)
- 2000년 연세대학교 전기컴퓨터공학과(박사)
- 2002년~2004년 The University of Birmingham Post doc.
- 1988년~현재 한국 과학 기술 연구원 박막 재료 연구센터 선임 연구원