

압전세라믹 리니어 모터의 동작원리와 응용



박 태 곤
(창원대 전기공학과 교수)



김 명 호
(창원대 세라믹공학과 교수)

1. 서 론

초음파 모터(ultrasonic motor) 또는 세라믹 모터(ceramic motor)라고도 부르는 압전(piezoelectric)세라믹 모터는 세라믹 진동자(vibrator)에 의해 구동되는 고정자(stator)의 표면입자의 타원진동을 이용하여 회전자(rotor)를 회전시키거나 슬라이더(slides)를 선형 이동시키므로, 기존의 전자식(electromagnetic)모터와는 다른 여러 가지 새로운 특성들을 갖는다.

주된 특성중의 하나는 저속운전하며 강한 토크(torque)를 높은 효율로서 얻을 수 있는 점이며, 변속을 위한 기어(gear)등이 필요치 않으므로 이 특성을 이용하면 소형이고 구조가 간단한 모터가 필요한 응용분야에서 경쟁력이 있다. 예를 들면 유도 내에 소형굴착기가 부착된 모터를 넣어 결석을 분쇄하는 등의 의료용 초소형 모터 등을 들 수 있다. 또 하나의 주된 특성은 코일 등에 의한 전자파 유도의 위험성이 없다는 점으로서, 이 특성을 의료용, 군사용 등 전자파에 예민한 기기의 모터로서 활용할 수 있다. 또한 세라믹 모터의 구동전원을 압전변압기로 구성하면 완벽한 전자파 제로(zero)의 기기가 이루어 질 수 있다. 그 이외에도 정밀제어 가능성, 제동장치 불필요(no break), 정숙구동(silent) 등의 특성을 지니고 있어 그 응용분야의 범위는 무척 넓

다.[1],[2] 초음파 모터의 실용화에 대한 연구 개발이 일본의 소수 연구자들에 의해 1980년대에 들어서 본격적으로 이루어진 짧은 역사를 갖고 있어 수 백년의 개발 역사를 지닌 전자식 모터에 대한 경쟁력을 아직 크게 높이지 못하고 있다. 각종기기의 고기능화, 소형-경량화가 요구되는 근래에는 초음파 모터의 효율성이 알려져, 일본 이외에도 유럽, 미국, 중국 등 다양한 나라에서 상품화에 나서고 있다. 우리나라에서도 초음파 모터를 연구하는 연구자의 수가 크게 증가하고 있으며, 한 벤처기업에서는 진행파형 회전모터를 생산 판매하고 있다.[3] 이미 본 학회의 전년도 기술특집을 통하여 초음파 모터의 전반적인 현황과 회전 모터에 대한 소개가 수 차례 되었으므로 압전세라믹 리니어 모터를 중심으로 그 동작원리와 응용 등에 대하여 기술하고, 현재 본 연구실에서 실험이 이루어지고 있는 리니어 모터의 특성에 대하여 간단히 소개하고자 한다.

2. 압전세라믹 모터의 동작원리와 분류

2.1 기본구조

압전세라믹 모터는 그림 1과 같은 구조를 갖는다. 기본적으로 고주파 구동전원과 고정자(stator) 그리고 회전자(rotor)의 세 부분으로 구성되어 있다. 고주파 구동전원에

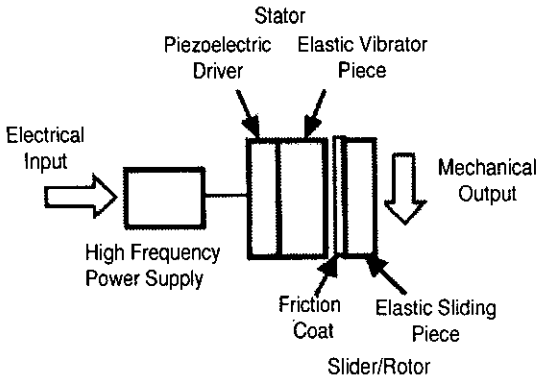


그림 1. 압전세라믹 모터의 기본 구조.

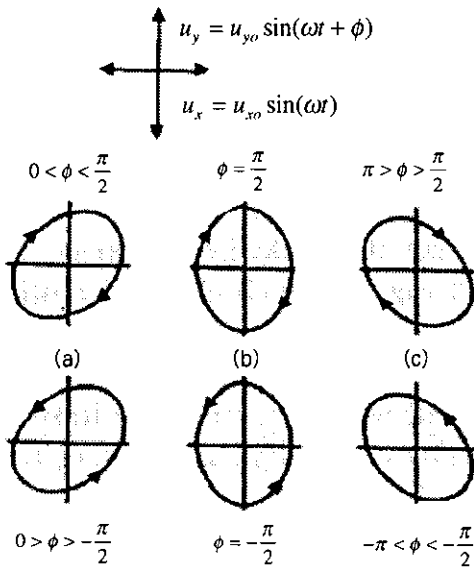


그림 2. 타원 변위의 발생원리.

의해 압전진동자가 진동하면 탄성 진동체(elastic vibrator)의 표면에 타원변위(elliptical displacement)가 발생하며 이 타원변위는 마찰력에 의해 회전자의 회전 또는 슬라이더(slidebar)의 선형이동으로 변환된다.

타원변위는 그림 2와 같이 서로 위상차를 갖는 두 개의 변위가 합쳐져서 만들어지게 된다. 모든 형태의 초음파 모터는 이와 같은 원리에 의해 구동된다.

2.2 모터의 분류

연구개발이 활발하게 이루어진 결과, 현재에는 다양한 원리와 형태의 모터 들이 제안되고 만들어지고 있다. 모터를 분류하는 방법에도 여러 가지가 있으나, 일반적으로 탄성과

의 종류에 따라 크게 정재파형(standing wave type)과 진행파형(propagating wave type)의 두 가지로 구분할 수 있다. 또한 기능에 따라서는 회전형(rotary)과 선형(linear)의 두 가지로 분류된다. 정재파형 회전모터는 일본의 사시다에 의해 최초로 제안된 그림 3과 같은 딱다구리형의 회전모터를 그 예로 들 수 있으며, 정재파형 리니어 모터는 우치노가 제안한 그림 4의 π 형모터를 그 예로 들 수 있다.

진행파형 회전모터는 Canon카메라의 auto focus 장치에 채택된 그림 5와 같은 링형 모터를 예로 들 수 있으며, 진행파형 리니어 모터는 사시다가 제안한 그림 6과 같은 모노레일식 모터를 그 예로 들 수 있다.

그 이외의 분류 방법으로서 진동모드의 형태에 의한 분류 방법이 있다.〔7〕 진동모드를 단일진동모드와 복수진동모드의 두 가지로 구분하며, 단일 진동모드방식 내에서 진행파형과 정재파형으로 세분하며, 복수 진동모드방식에는 모드변환형, 다중모드형, 모드회전형, 복합진동자형의 4가지 방식으로 세분한다. 초음파 모터는 그 개발 역사가 짧고, 압전 진동자와 진동체의 형태에 따른 다양한 모드의 모터의 개발 가능성이 남아 있으므로 계속해서 새로운 형태의 모터가 개발되

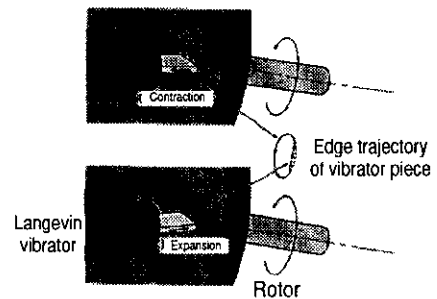


그림 3. 정재파형 회전모터.

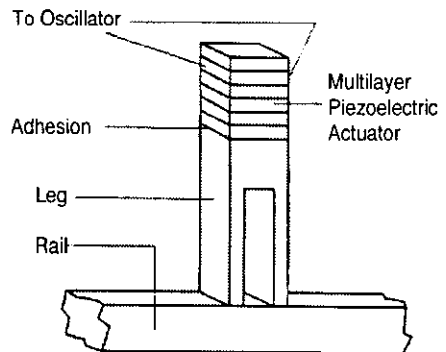


그림 4. 정재파형 리니어모터.

어 발표될 것으로 본다.

3. 리니어 모터의 동작원리와 응용(4){6-20}

리니어 모터는 진동을 발생시키는 진동체 자체가 고정되어 있는가 움직이는가에 따라 크게 非自走式(non-self moving type)과 自走式(self moving type)의 두 가지로 분류할 수 있다. 비자주식의 경우, 굴곡파(flexural wave)를 이용한 진행파형 모터와 적층된 압전세라믹의 두 개의 종진동(longitudinal vibration)을 이용하여 슬라이드를 움직이는 두 가지 형태의 모터가 포함된다. 자주 식의 경우에는 보다 더 다양한 형태의 모터들이 개발되어 발표되고 있다. 종진동을 이용한 복합변환기형(hybrid transducer type), 굴곡진동

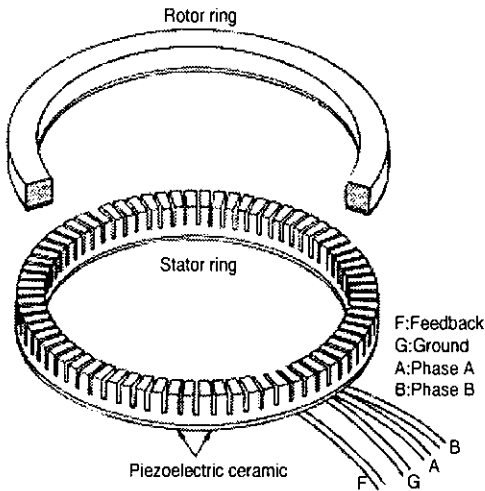


그림 5. 진행파형 회전모터.

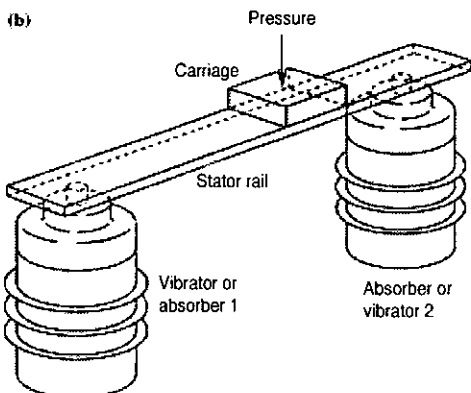


그림 6. 진행파형 리니어모터.

을 이용한 복합변환기형(hybrid transducer type), π 형변환기형(π shaped transducer type), 굴곡-굴곡 복수모드 막대형(flexural-flexural double-mode bar type), 원판형(annular plate type) 그리고 종진동-굴곡진동 복수모드 장방형 모터 등이 자주식 리니어 모터에 속한다.

본 절에서는 상기한 8가지 모터의 동작원리와 응용에 대하여 간단히 소개한다.

3.1 非自走式(non-self moving)리니어모터

3.1.1 굴곡파를 이용한 진행파형 모터

진행파 리니어모터는 사시도에 의해 처음 제안되었다. 그림 7과 같이 steel bar의 양단에 두 개의 란주반형 진동자를 결합하여 전원이 연결된 좌측의 진동자는 driver로서 bar에 굴곡파를 발생시키고 우측의 진동자는 파를 받아들이는 receiver의 역할을 하도록 하여 진행파를 발생시켰다. 진동 시스템은 서로 대칭이며 driver와 receiver의 역할을 서로 바꿈으로서 slider의 진행방향을 역전(reverse)시킬 수 있다.

양쪽의 진동자와 slider의 구조를 개선하여 진동속도

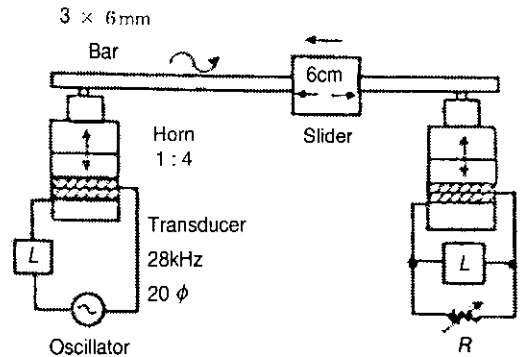


그림 7. 굴곡파를 이용한 진행파형 모터.

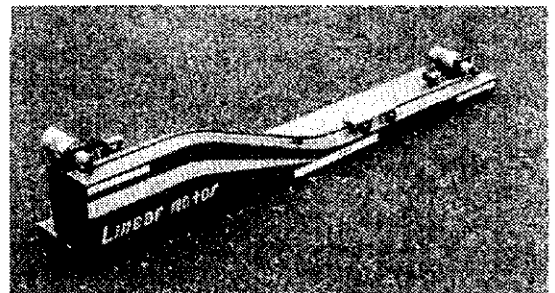


그림 8. 굴곡파를 이용한 진행파형 모터.

0.5(m/s)에서 최대 추력 5(N)을, 그리고 slider의 속도를 50(cm/s)까지 높인 것으로 보고되었다.

그림 8은 사시다가 실험용으로 구성된 진행패형 모터의 사진이다.

3.1.2 두 방향 종진동을 이용한 모터

초음파 모터의 구동력이 되는 타원변위는 그림 2와 같이 두 개의 진동변위가 위상차를 가지고 합쳐질 때 발생된다. 그림 9의 두 개의 적층된 압전세라믹이 이러한 두 개의 변위를 발생시키며 이 두 변위가 조합하여 slider와의 접촉점에 타원변위를 발생한다. Marcon Electronics Co. Ltd에서 개발한 리니어 모터는 5~8[V]의 전압에서 0.5[W]의 낮은 전력으로 부드러운 움직임으로 최대 10(cm/s)의 속도를 얻은 것으로 보고되었다. 거의 같은 구조를 갖는 리니어 모터가 Hitachi Co. Ltd에서 개발되어 발표되었다. 그림 10은 현재 인터넷상에서 공개되어 있는 리니어 모터의 사진이다.

<http://www.edoceramic.com/PEMot.htm>에 소개되고 있는 이 모터는 24[V]에서 최대 20(cm/s)의 속도를 갖고 1[micron]의 정도를 얻을 수 있으므로 정밀 위치제어가 가능한 리니어 모터이다.

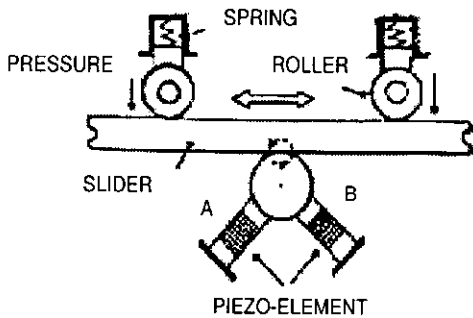


그림 9. 90도 각도의 두 방향 종진동을 이용한 리니어 모터.

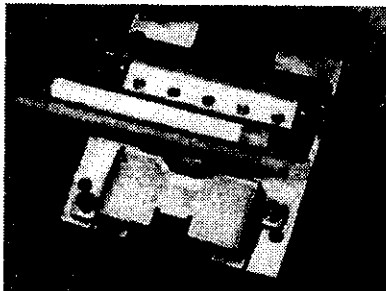


그림 10. 저전압 구동 리니어 모터.

3.2 自走式(self moving) 리니어 모터

3.2.1 종진동을 이용한 복합변환기형 모터

리니어 모터용 복합변환기(hybrid transducer)는 그림 11과 같이 종진동 진동자와 다층화된 압전 액츄에이터로 구성되어 있다. 진동자와 액츄에이터는 각각 다른 구동전원을 가지며 모터의 최적 구동조건에 맞추어 이 두 전원의 위상차를 조정하는 마치 벌레가 기어가듯 레일 위를 움직이게 되는데, 종진동 진동자는 란주반형 진동자로 구성한다.

모터의 진동자로서 직경 20(mm) 길이 83(mm)인 란주반형 진동자를 사용하고, 2(mm)두께의 PZT 소자 4장을 듀랄루민에 샌드위치시켜 구성하였다. 액츄에이터로서는 폭 5(mm)정도의 30층 정도를 다층막으로 형성하여 사용한 경우, 구동전압 15[Vrms]에서 최고 30(mm/s)의 속도를 얻을 수 있었으며 위상을 변화시켜 정-역운전이 가능한 것으로 보고되었다.

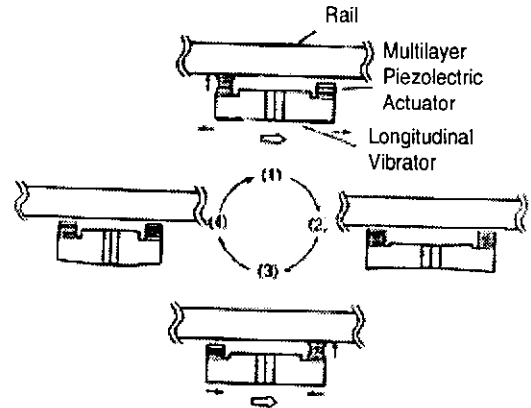


그림 11. 종진동을 이용한 복합 변환기형 리니어 모터의 구동사이클.

3.2.2 굴곡진동을 이용한 복합변환기형

앞절에서 소개한 종진동 진동자의 경우 그 크기를 줄이게 되면 공진 주파수가 너무 높아진다. 그림 12와 같이 듀랄루민 바(bar)의 상하에 장방형 PZT소자를 부착한 굴곡진동자(flexural vibrator)를 사용하면 공진주파수의 큰 상승 없이 모터의 소형화를 이룰 수가 있다. 진동체인 듀랄루민 바의 양쪽 노드(node)점의 상하에 각각 다층 압전액츄에이터(MPA: multilayered piezoelectric actuator)를 부착하고 상부 측 MPA를 통하여 레일과 접촉되도록 하였다. 굴곡진동자와 압전액츄에이터의 위상차 조절을 통해 최대 속도, 속도 반전을 얻을 수 있으며, 50[Vrms]이하에서는 동작이 잘 이루어지지 않았으나, 16[kHz], 150[Vrms]에서 최대 47(cm/s)의 속도를 얻은 것으로 보고되었다.

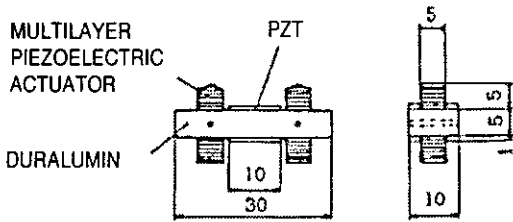


그림 12. 굴곡진동을 이용한 복합 변형기형 리니어모터.

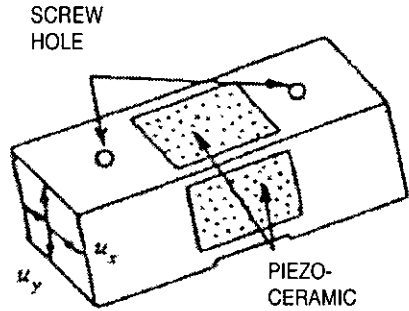


그림 14. 굴곡 복수모드 모터의 진동자.

3.2.3 π 형변환기형 모터

그림 13과 같이 두 개의 다층 압전액츄에이터(MPA)가 진동체에 접착된 형태의 π 형 초음파 모터가 제안되었다. 이 모터는 MPA가 듀랄루민 진동체의 다리와 45도의 방향으로 부착되어 아주 복잡한 진동모드를 갖는다. 복잡한 모드 속에서 다리의 종진동모드(상하 진동)과 굴곡진동모드(진행방향 진동)가 공진 하게 되면 리니어 모터의 동작을 하게 된다. 두께 5(mm) 다리간 거리 26(mm)인 진동체를 사용한 모터의 경우, 90(kHz)에서 동작되었으며, 두 압전액츄에이터의 구동전압의 위상차가 90도일 때 동작이 된다. 10(Vrms)로 구동한 경우 최대 20(cm/s)의 속도를 얻은 것으로 보고되었다.

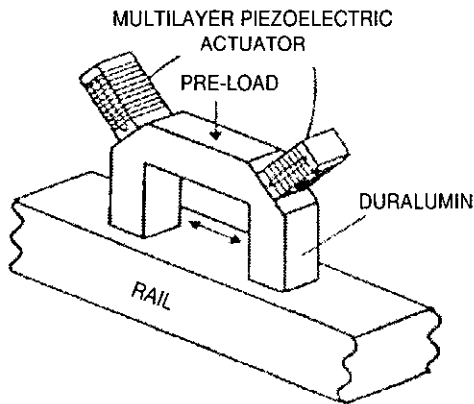


그림 13. π 형변환기형 모터.

3.2.4 굴곡-굴곡 복수모드 막대형 모터

하나의 바(bar)에서 두 개의 굴곡진동을 발생시켜 바의 표면의 타원변위를 얻는 리니어 모터가 제안되고 시험되었다. 그림 14는 압전세라믹을 부착한 막대 진동자의 구조를 나타낸다. 두 개의 압전세라믹에 적절한 위상차의 전원을 인가하면 수직방향과 수평방향의 굴곡진동이 발생하며 막대진동자의 표면에 타원변위가 생긴다. 그림 15와 같은 구조로 slid-

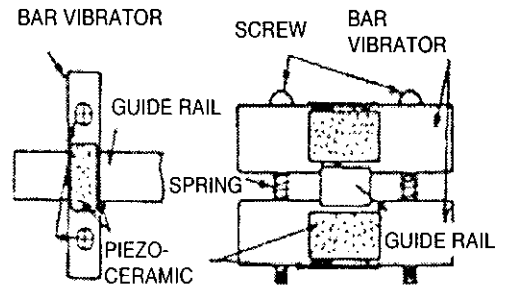


그림 15. 굴곡 복수모드 모터의 구성.

er를 결합하면 자수식 리니어 모터의 동작을 얻을 수 있다.

3.2.5 원판형 리니어 모터

그림 16에 원판형 리니어 모터에 사용된 진동자의 전극에 90도 위상차를 갖는 전원을 입력하여 원주상에 발생하는 타원변위의 모습을 나타내었다. 이러한 진동을 radial-flexural mode라고 하며 타원변위가 일어나는 부분에 원통형 회전자(rotor)를 접촉시켜 사용하면 회전형 모터가 구성된다.

그러나 이러한 원판형 진동자를 죄여진(clamped) 가이드 레일 사이에 놓고 타원변위가 발생하는 부분을 가이드레일에 압착하면 원판형 진동자 자체가 이동하는 선형모터가 된다. 즉 원판형 진동자 자체가 이동자가 되는 것이다. 그림 17은 이렇게 구성된 리니어 모터의 구성도이다.

그림 17에서 선형적으로 움직이는 원판형 진동자를 stator로 표기한 이유는, 원판형 리니어 모터가 초기에 회전형 모터로 제안되었던 모터의 변형으로 이루어 졌기 때문이다. 즉, 원판형 고정자(stator)의 접촉부위에 발생하는 타원변위가 원통형 회전자(rotor)를 회전시키는 대신 가이드레일을 타고 자체가 움직이도록 구조를 변형한 것이다.

이러한 회전형 리니어 모터는 추력이 강하고 무부하에서

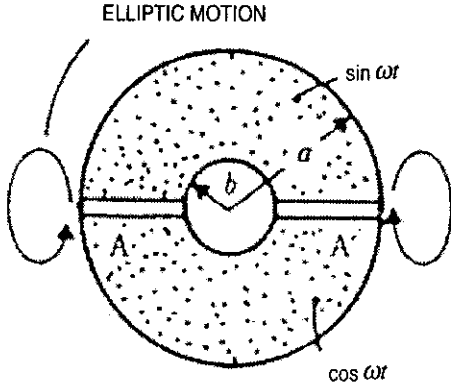


그림 16. radial-flexural 모드에 의한 타원변위.

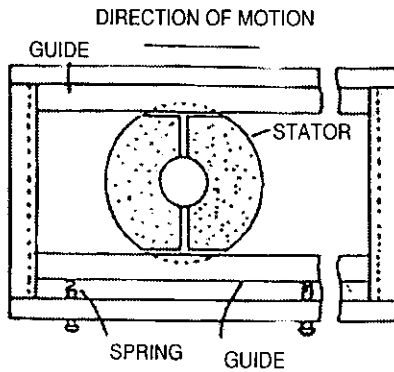


그림 17. 원판형 리니어 모터의 구성도.

최고 50[cm/s]의 속도를 얻을 수 있으며 특히 그 구조가 얇아 카드 이송기 등 많은 분야에의 응용을 기대할 수 있다.

3.2.6 종진동-굴곡진동 복수모드장방형모터

그림 18과 같이 장방형 판의 상부에 압전세라믹판 두 개를 접착하여 각각에 90도 위상차를 갖는 전원을 인가하면 적절한 공진 주파수에서 첫 번째 종진동(1st longitudinal: L1)과 네 번째 굴곡(4th flexural = bending: B4)진동의 합성을 통하여 장방형판의 표면에 타원변위가 생기도록 할 수 있다. 타원변위가 가장 크게 일어나는 좌우 양쪽 부분에 변위 확대기구(projection)를 부착하여 이를 통하여 가이드 레일에 접촉하도록 하고 적절한 압력(preload)를 가하여 주면 마치 벌레가 가이드레일 위를 기듯이 선형이동할 수 있다. 주로 진동이 없는 노드(node)부를 지지점으로 사용하는데 그림 19는 진동체의 중앙부를 지지점으로 하여 구성된 리니어 모터의 구조를 나타내고 있다.

그림 20은 일본에서 2000엔에 판매되고 있는 리니어 카의

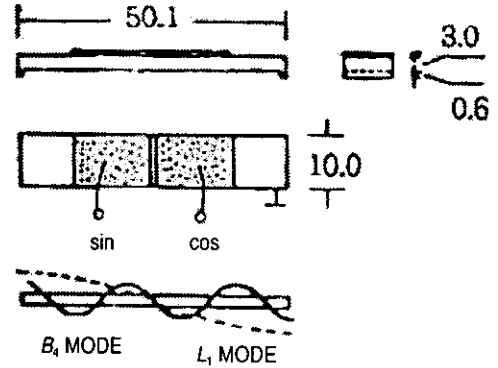


그림 18. L1-B4 복수모드 진동자의 구성.

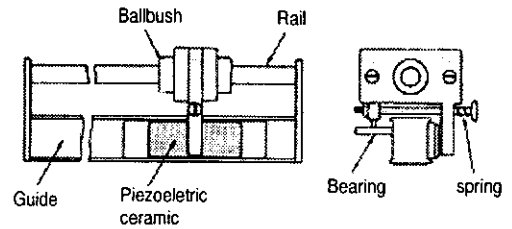


그림 19. L1-B4 리니어 모터의 구성.

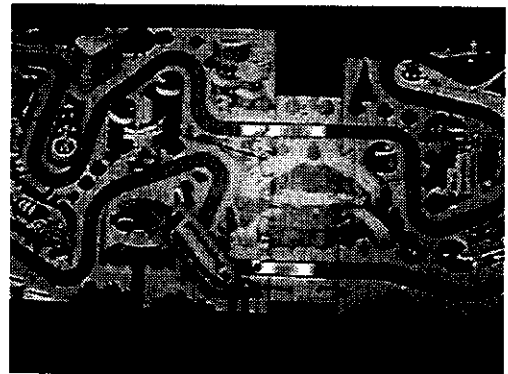
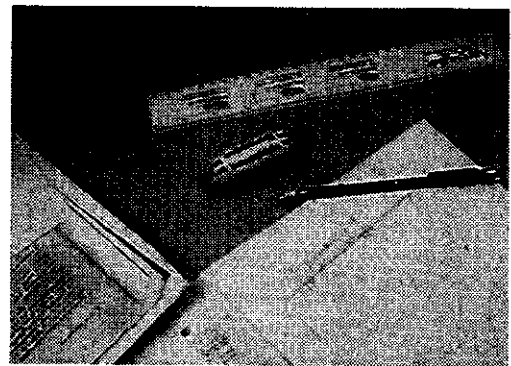


그림 20. 리니어 모터로 만든 잠난감자동차.

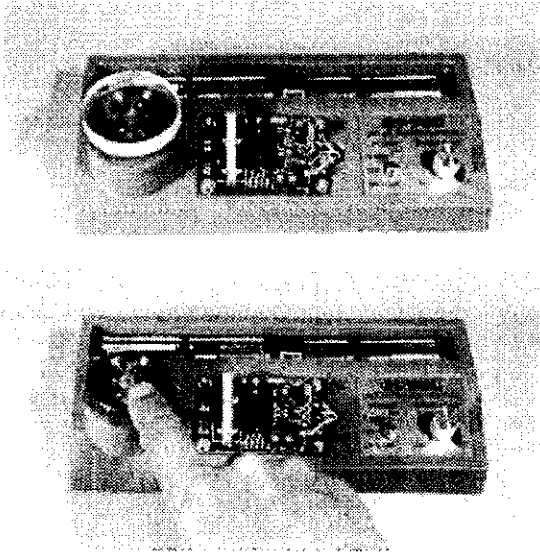


그림 21. 교육용으로 만든 진행파형 회전모터.

사진이다. 1.5[V] AA 밧배리 하나로 구동되며 표면이 매끄러운 곳에서는 미끄러지듯 소리 없이 움직이며 바닥 부분에 두 개의 변위확대기구를 가지고 있어 증진동-굴곡진동 복수모드를 이용한 것으로 짐작할 수 있다. 그림 21의 상부사진은 진행파형 회전모터의 고정자에 투명한 회전자를 올려놓아 구동원리를 알리고 하부사진은 손으로 진행파의 진동을 느끼고 있는 사진으로서 일본 Shinsei사에서 제작한 것이다. 위의 두 사진을 통하여 일본의 압전세라믹 모터가 장난감으로도 팔리고 있으며 교보재를 통하여 동작원리를 교육하고 있는 환경을 짐작할 수 있다.

4. 리니어모터 연구 소개(5)

본 연구실에서는 3.2.6절에서 소개한 L1-B4 리니어 모터를 중심으로 리니어 모터의 실용화 실험을 하고 있다. bar의 진동이론으로 설계를 하고 유한요소 해석법으로 시뮬레이션을 하여 제작하고 세라믹진동자의 형태 및 변위확대기구의 위치에 따른 구동특성의 개선을 실험하고 있다. 현재 최대 20(mm/s)의 속도를 얻을 수 있으며, 세라믹 진동자를 다층막으로 구성하여 구동전압을 낮추는 실험을 행하고 있다.

5. 결 론

압전세라믹 모터는 저속 고투오크의 특성을 살린 소형모터의 영역에서 기존의 전자모터에 대한 경쟁력을 갖는다. 또한 전자장 간섭을 피해야 하는 특수한 분야에서 강점을 나타

낼 수 있다.

또한, 단점으로 지적되고 있는 비싼 세라믹 제조가격과, 고주파 구동장치가 필요한 점, 그리고 마찰에 의한 구동에서 생기는 접촉부의 마모 등의 문제가 실용화 연구가 진행되면서 점차 해결될 것으로 예상되므로 이에 따른 시장성의 확대가 기대된다.

특히 리니어 모터는 간단한 구조에서 정밀한 선형동작을 얻을 수 있으므로 소형화 되는 전자기기의 구동원으로서의 응용분야를 다양하게 찾을 수 있는 소재이다. 본 테마기획을 통하여 이 분야에 대한 관심이 커져 연구자가 많아지기를 기대하여 본다.

참 고 문 헌

- [1]Toshiiku Sashida and Takashi Kenjo, "An Introduction to Ultrasonic Motors", Oxford, 1993
- [2]Kenji Uchino, "piezoelectric Actuators and Ultrasonic Motors", Kluwer Academic Publishers, 1997
- [3]피에조테크사, <http://www.piezo-tech.com/>
- [4]S.Ueha, Y.Tomikawa, M.Kurosawa, N.Nakamura "Ultrasonic Motors Theory and Applications", OXFORD, 1993.
- [5]김태열, 김범진, 박대곤, 김명호, Kenji Uchino, "L1-B4 샌드위치형 진동자를 이용한 선형초음파 모터의 설계 및 특성" 전기전자재료학회논문지, 13권 12호, 1025-1031, 2000.12
- [6]Manabu Aoyagi and Yoshiro Tomikawa. "Ultrasonic Motor Based on Coupled Longitudinal-Banding Vibrations of a Diagonally Symmetric Piezoelectric Ceramic Plate", Electronics and Communications in Japan, Part 2, Vol. 79, No. 6, pp. 60-67, 1996.
- [7]Yoshiro Tomikawa, Takehiro Takano and Hidenobu Umeda. "Thin Rotary and Linear Ultrasonic Motors Using a Double-Mode Piezoelectric vibrator of the First Longitudinal and second Bending Modes", Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 31, pp.3073-3076, 1992
- [8]Kenji Uchino, Koichiro Kato and Masatuki Tohda. "Ultrasonic Linear Motors Using a Multilatered Piezoelectric actuator", Ferroelectrics, Vol. 87, pp. 331-334, 1988.
- [9]Junichi Toyoda and Knaji Murano. "A Small-

Size Ultrasonic Motor". Japanese Journal of Applied Physics. Vol. 30, No.9B, September, pp. 2274-2276, 1991

[10] Minoru Kuribayashi, Sadayuki Ueha and Eiji Mori. "Excitation Conditions of Flexural Traveling Waves for A Reversible Ultrasonic Linear Motor", J. Acoust. Soc. Am. 77(4), pp. 1431-1435, April 1985.

[11] Akira Yabuki, Manabu Aoyagi, Yoshiro Tomikawa and Takehiro Takano. "Piezoelectric Linear Motors for Driving Head Element of CD-ROM", Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 33, pp. 5365-5369, 1994.

[12] T. Kosawada, K. Suzuki and T. Tomikawa. "A Card Sending Linear Ultrasonic Motor Using Multi-Bean Piezoelectric vibrators", International Journal of Applied Electromagnetics in Materials 2, pp. 285-290, 1992

[13] Takehiro Takano and Yoshiro Tomikawa. "Characteristics of the Ultrasonic Linear Motor Using Radial and Nonaxisymmetric Vibration Modes of an Annular Plate", Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 34, pp. 5288-5291, 1995.

[14] Tomoki Funakuvo, Toshigaru Tsubata, Yoshihisa Taniguchi, Kazuhiro Kumei. "Ultrasonic Linear Motor Using Multilayer Piezoelectric Actuators", Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 34, pp.2756-2759, 1995.

[15] Y. Tomikawa and T. Ogasawara. "Ultrasonic Motors-Constructions/ Characteristics/ Applications", Ferroelectrics, vol. 91, pp. 163-178, 1989.

[16] Hiroaki Saigoh, Mayumi Kawasaki, Nobuhiro Maruko and Kouichi Kanayama. "Multilayer Piezoelectric Motor Using the First Longitudinal and the Second Bending Vibrations", Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 34, pp. 2760-2764, 1995.

[17] Kenji Uchino. "Piezoelectric Ultrasonic motors : Overview", smart Mater. Struct. 7, pp. 273-285. Printed in the UK. 1998.

[18] Siyuan He, Weishan Chen, Xie Tao and Zaili Chen. "Standing Wave Bi-Directional Linearly Moving Ultrasonic Motor", IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, Vol. 45, No. 5 pp.1133-1139, Sep-

tember 1998.

[19] Thilo Bein, Elmar J Breitbach and Kenji Uchino. "A Linear Ultrasonic Motor Using the First Longitudinal and the Fourth Bending Mode", Smart Mater. Struct. 6, pp. 619-627, Printed in the UK, 1997.

[20] W. Seemann. "A Linear Ultrasonic Traveling Wave Motor of the Ring Type", Smart Mater. Struct. 5, pp. 361-368, Printed in the UK, 1996.

저 자 약 력

성명 : 박 태 곤

◆**약력**

1976년 2월 홍익대 공과대학 전기공학과(학사)
 1980년 8월 연세대 대학원 전기공학과(석사)
 1985년 2월 연세대 대학원 전기공학과(박사)

◆**경력**

1982년 2월-1987년 2월 홍익공업전문대 조교수
 1987년 3월- 현재 창원대 공과대학
 전기공학과 교수
 1989년 12월-1991년 2월 일본 동경공대 객원연구원
 1998년 2월-1999년 2월 미국 팬실바니아 주립대
 객원교수

성명 : 김 명 호

◆**약력**

1979년 2월 고려대 재료공학과 공학사
 1981년 2월 고려대 재료공학과 공학석사
 1987년 7월 독일 Erlangen-Nuernberg Univ.
 재료공학과 공학박사

◆**경력**

1987년 8월-1989년 8월 독일 Fraunhofer 반도체 연구소
 연구원
 1989년 9월- 현재 창원대 세라믹공학과 교수