

# 초음파를 이용한 센서 및 액추에이터

김진오

(승실대학교 기계공학과)

## 1. 머리말

기계적 진동(정확히 표현하자면 역학적 진동)이라 하면 바람직하지 않은 진동현상을 일컫기도 하지만 유용한 현상도 포함된다. 부정적인 의미의 진동은 소음과 연관되기도 하며 진동수 범위가 대개 수 kHz 이하이다. 긍정적인 의미의 진동은 활용할 목적으로 발생시키는 것으로써, 전기면도기나 휴대폰에서처럼 낮은 진동수로 작동되는 것도 있지만 대개 수십 kHz 또는 그 이상의 진동수 범위에서 작동되고 파동의 형태로 나타나므로 초음파라 일컬어진다.

초음파의 본래 뜻은 '인간의 가청주파수 범위(20 Hz~20 kHz)보다 높은 주파수의 음파'인데, 산업용으로 다양하게 활용되면서 '인간이 들을 목적이 아닌 기술에 활용되는 음파'로도 통하고 있다. 이러한 초음파의 주파수 범위는 대략 10 kHz 이상이다. 이와 같은 초음파를 활용하는 기술들은 초음파가 전파하는 신호를 이용하는 기술과 초음파가 전달하는 에너지를 이용하는 기술로 분류할 수 있다<sup>(1)</sup>

초음파는 전파속도가 매질의 물성치에 따라 결정되는 일정한 양이고, 전파 중에 이물질이나 매질 경계를 만나면 반사하므로, 계측용 신호로 이용된다. 그러한 사례에는 비파괴검사 또는 의료용 영상 진단 등이 있는데, 이들은 본 특집의 다른 글에서 설명된다. 이 글에서는 초음파를 이용한 센서 기술로써 초음파 액면계, 초음파 점도계, 초음파 밀도계, 차량 후방감지기 등을 소개한다.

한편 초음파는 매질의 전파가 아니고 에너지의 전파이므로, 초음파에 의해 전달되는 에너지를 이용할 수 있다. 그러한 사례 중의 하나인 의료용 초음파는 본 특집의 다른 글에서 소개되고, 이 글에서는 초음파를 이용한 액추에이터 기술로써 초

음파 세정기, 초음파 용접기, 초음파 가공, 초음파 모터 등을 소개한다.

## 2. 초음파 센서

### 2.1 초음파 액면계(수위계, Level Meter)

초음파를 공기 중에 발생하고 피측정 물체에서 반사되어 되돌아오는 초음파를 감지하여, 왕복에 소요된 시간을 계측하고 이를 센서로부터의 거리 또는 액면 높이로 환산하는 원리이다. 초음파의 왕복시간을 거리로 환산할 때 공기 중에서의 음속이 곱해지는데, 온도에 따라 달라지는 음속을 보정하는 과정이 필수적이다.

초음파를 이용한 액면계의 장점은 여러 가지이다. 비접촉 측정 방식이므로 피측정 물체의 비중, 점도, 유전율, 전도율 등의 변화에 영향을 받지 않는다. 또한 기계적인 가동부가 없으므로 부품의 파모가 없으며, 간단히 설치할 수 있고, 보수점검이 용이하다.

수입에 의존하던 초음파 액면계를 최근에 국내의 업체에서 개발하여 국산화하였다.<sup>(2)</sup> 50 kHz 주파수의 초음파를 사용하여 5 m의 최대 탐지거리를 얻을 수 있다. 그림 1의 (a)에 보인 바와 같이

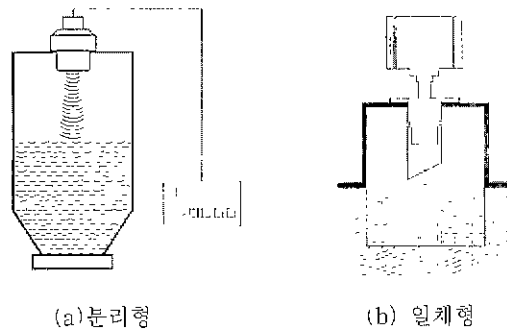
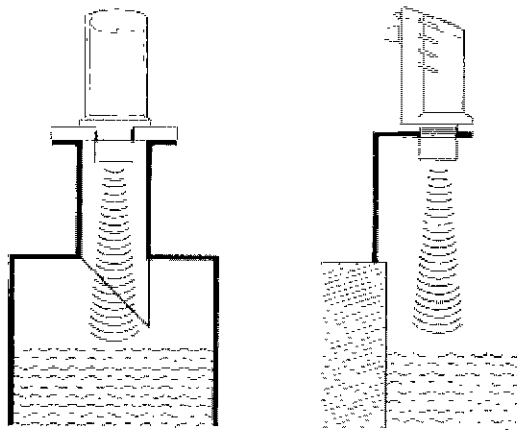


그림 1 초음파 액면계의 센서부와 회로부 구성



(a) 밀폐 용기 (b) 개방 수로

그림 2 초음파 액면계의 설치 환경

센서부와 회로부가 분리된 형태와 (b)에 보인 바와 같이 센서부와 회로부가 결합된 형태가 있다. 또한 그림 2의 (a)와 같이 밀폐형 용기에 설치될 수 있고, (b)와 같이 개방된 곳에 설치될 수도 있다.

### 2.2 초음파 점도계 (Viscosity Meter)

비틀림 진동을 하는 원형 봉이 점성유체에 담기면 유체의 점성과 상호작용을 하여 진동특성이 변화하는 현상을 이용한다.<sup>(7)</sup> 봉이 비틀림 진동을 하는 경우 고체 봉의 운동은 인접 점성유체에 전단 응력을 가하고, 유체로부터 점성저항을 받아 봉의 고유진동수가 변화와 점성 감쇠가 나타난다. 이러한 현상을 측정하여 점도로 환산하는 원리이다.

원형의 고체 봉에서 전파하는 비틀림 탄성파를 이용하는 방안이 제시되기도 하였다.<sup>(4,5)</sup> 이 방식은 고체 봉에서의 비틀림 운동과 점성유체가 상호작용을 하여 비틀림 파동의 전파속도를 변화시키고 파동의 감쇠를 일으키는 현상을 이용하는 것이다. 파동의 전파시간 변화 또는 진폭의 감소를 측정하여 점도를 환산하는데, 그다지 편리하지 않아 일반 용도로 실용화되기에는 어려움이 있었다. 따라서 파동 대신에 진동을 이용하는 방식이 유리한 점이 있다.

비틀림 진동을 이용하되 초음파의 주파수 범위에서 사용하면 주변에서 발생하는 구조 진동의 영향을 배제할 수 있는 장점이 있어, 저주파수에서 가동되는 다른 점도계보다 유리하다.<sup>(6)</sup> 센서에 초음파 비틀림 진동을 발생시키고 점성저항에 의한 진동 변화를 감지하기 위해서는 우선 변환기가

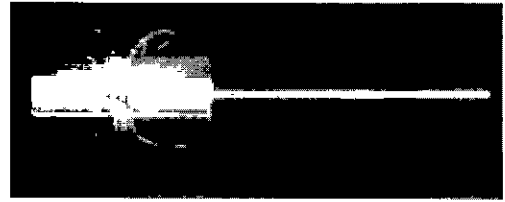


그림 3 랑주방형 압전 비틀림 변환기와 원형봉의 결합으로 이루어진 점도 센서

필요하므로, 압전체를 사용한 랑주방(Langevin)형 비틀림 변환기를 제작하였다.<sup>(7)</sup> 여기에 유체와 상호작용을 하는 원형 봉을 결합하여 점도센서를 구성한 예가 그림 3과 같다. 외국 제품이 비싼 가격으로 수입되는 현실에서 저가형 국산품을 개발하려는 작업이 진행되고 있다.

### 2.3 초음파 밀도계 (Density Meter)

단면이 원형이 아닌 봉이 유체 담겨 비틀림 진동을 하면, 고체봉의 운동은 인접 유체에 압력을 가하고 유체로부터 부가질량 효과를 받아 고유진동수가 변화된다. 마찬가지로, 단면이 원형이 아닌 봉에 비틀림 파동이 전파하면 인접 유체의 부가질량 효과로 인해 전파속도가 감소된다. 이런 원리에 따라 초음파를 이용한 유체 밀도 측정이 가능하다.<sup>(8)</sup>

이런 방식의 장점은 온라인 측정용으로 사용할 수 있다는 것이다. 그림 4는 단면이 마름모꼴인 봉을 환형으로 구성하여 비틀림 파동형 초음파 밀도계를 구성한 사례를 보여준다. 아직 실용성을 만족시키는 장치로 완성되지는 않았지만, 여전히 가능성이 유지되고 있다. 더욱이 두 가지 물질이 혼합된 액체 내에서 농도(concentration)를 측정하는 데에도 같은 원리로 사용될 수 있을 것으로 기대된다.



그림 4 단면이 마름모꼴인 봉을 환형으로 구성한 유체밀도 센서

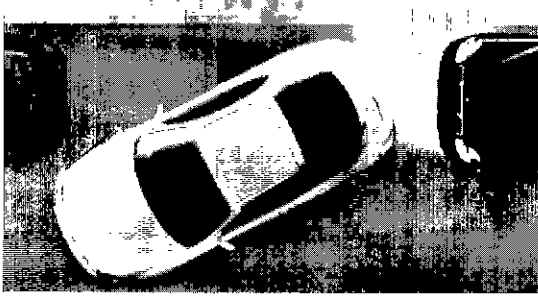


그림 5 차량 후미에서 초음파 발생과 반사

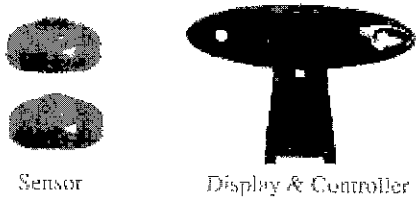


그림 6 차량 후방감지기를 구성하는 초음파 센서와 거리표시기 및 경고음 발생기

### 2.4 차량 후방감지기(Ultrasonic Parking Guide System)

액면계의 원리와 유사하게, 공기 중에 발생된 초음파가 진행하는 범위에 물체가 있으면 반사되어 되돌아오는 초음파를 감지하고, 센서로부터의 거리를 환산하는 원리를 이용한다. 자동차의 변속기가 후진위치에 놓이면 감지기가 작동하여, 차체 후미 범퍼에 부착되어있는 센서가 그림 5와 같이 초음파 펄스를 발생하고 물체에서 반사되어 되돌아온 초음파를 수신함으로써 물체의 존재를 인식한다.

물체까지의 거리 정보를 그림 6과 같은 숫자표시기에 나타내고 경고음을 내보낸다. 이러한 초음파 차량 후방감지기는 주차 시에 특히 유용하며, 차량 후방에 사람이나 다른 차량, 기둥이나 벽면 등을 쉽게 감지해낸다. 차량 소유주가 손쉽게 설치할 수 있는 제품으로 상용화되어 있으며, 감지 거리는 0.4~2.0 m이다.

## 3. 초음파 액추에이터

### 3.1 초음파 세정기(Ultrasonic Cleaner)

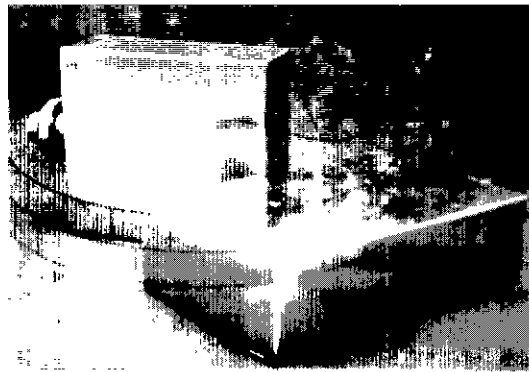
파동 에너지를 이용하는 대표적인 기술인 초음파 세정의 원리는 세정액 내부에서 고주파수의 큰 음압에 의해 발생하는 캐비테이션(cavitation) 현상과 큰 진동 가속도이다. 세정과정에 대한 자

세한 설명<sup>(4)</sup>은 이 글에서는 생략한다.

초음파 세정기는 일반적으로 발진기와 진동부로 구성되는데, 이들이 한 몸체로 이루어진 단조식은 귀금속 대장 등에서 간편한 용도로 사용된다. 산업용으로 사용되는 세정기는 두 부분이 분리되어 진동부가 세정액에 잠겨있는 투입식으로, 진동부는 그림 7(a)와 같은 형태이고, 그 내부에 그림 7(b)와 같은 랑주방향 진동변환기들이 배열되어 부착되어 있다.

수십 kHz 주파수 영역에서 구동되는 초음파 세정기의 세정 성능은 캐비테이션 발생효율에 달려있고, 이는 음압 크기에 직결된다.<sup>(10)</sup> 또한 MHz 영역의 세정기의 성능은 초음파 투과율에 달려있다<sup>(11)</sup> 세정기가 주어져 있어도 사용 방법에 따라 세정 성능에 큰 차이를 나타내므로, 초음파 음압분포에 대한 이해가 필요하다.

다른 형태르써 아이디어가 제기되었던 소위 푸쉬-풀(push-pull)형 초음파 세정기<sup>(12, 13)</sup>가 최근에 출현하였다. 이는 원형 단면의 관에 부착된 진동변환기가 관에 길이방향 진동 공진을 유발시키고, 관이 포와송(poisson)비에 따른 반경방향 운동을 하여 진동에너지를 방사시키는 원리이다. 이러한 방식으로 발생된 초음파에 의한 세정 효과에 대해서는 아직 보고된 바가 없다.



(a) 진동부 외형



(b) 진동변환기

그림 7 초음파 세정기의 진동부 구성

### 3.2 초음파 용접기(Ultrasonic Bonder)

초음파의 고에너지를 이용하는 사례인 초음파 용접기는 초음파의 진동에너지를 이용한다. 초음파 와이어 용접기는 전기도체인 가는 와이어를 집적 회로와 리드프레임에 연결하는 장치로서, 초음파 발전기, 압전 진동변환기와 가는 봉의 결합체, 그리고 봉의 끝에 설치된 용접봉으로 구성된다.

열을 이용하는 용접방법은 연속적인 작업을 할 때 열의 손실이 나타나며, 고정밀 자동화에는 적합하지 않다. 반면에 초음파를 이용한 용접은 용접봉의 고속 진동에 의한 마찰을 이용하는 것으로서, 대기 중에서도 가능하며 빠른 작업이 진행될 수 있다는 장점이 있다.<sup>(11)</sup> 여기에서는 수십 kHz의 공진 주파수를 갖는 랑주방향 진동변환기가 사용된다.

### 3.3 초음파 가공(Ultrasonic Machining)

기존의 방법으로는 가공이 어려운 특수금속이나 세라믹 등을 정밀하게 가공하는 방법의 하나로 초음파를 사용한다. 가령 드릴 작업에 초음파를 사용하는 경우, 드릴 팁의 회전과 더불어 수십 kHz의 종방향 진동을 가해준다.

가공입자에 의한 기계적인 가공으로 재료 표면

에 열변형을 가하지 않아 좋은 가공표면을 제공하는 초음파 가공에서 가공면의 상태는 가공입자의 크기에 의해서 좌우된다.<sup>(15)</sup> 가공입자의 크기가 커지면 가공시간은 줄어들지만 공구의 마모량이 증가하고 가공면은 나빠진다. 초음파 가공은 공구와 가공물 사이의 가공입자가 가공물의 표면에 칩핑(chipping)현상을 일으켜서 재료를 가공하므로, 가공면은 가공입자의 크기에 따라 달라지게 된다.

### 3.4 초음파 모터 (ultrasonic motor)

초음파 모터는 높은 주파수 범위의 역학적 진동을 구동원으로 사용하는 액추에이터의 일종으로서, 압전소자가 전기신호에 따라 팽창과 수축을 반복하는 운동을 이용한다.<sup>(16)</sup> 이는 소형 화 경량화 할 수 있고 빠른 응답성과 정역전이 쉬운 직접적인 운동성, 그리고 정밀한 위치 제어 및 저속에서 높은 토크를 낼 수 있는 가능성 때문에 특정한 분야에서 기존의 전자기식 모터를 대체할 수 있다.<sup>(17)</sup> 초음파 모터의 종류는 여러 가지 방식으로 분류할 수 있는데, 기능에 따라 분류한다면 회전형 모터와 직선형 모터가 있다.<sup>(18,19)</sup> 이들의 사례를 하나씩 소개한다.

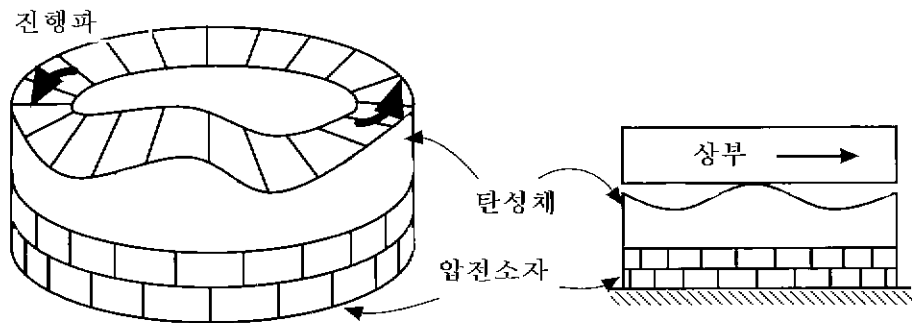


그림 8 진행파를 이용하는 회전형 초음파 모터의 개념도

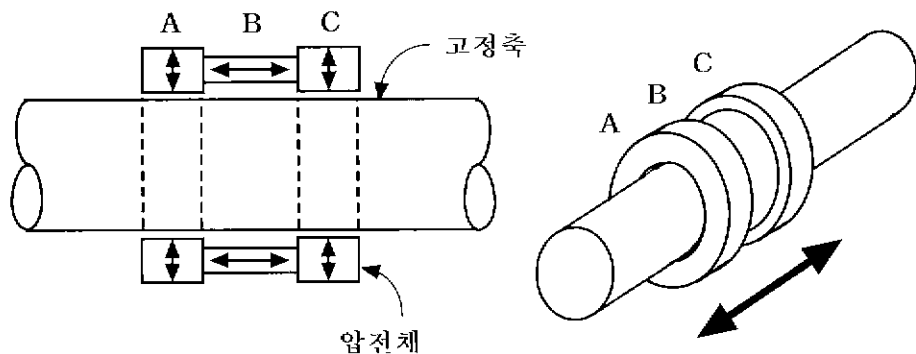


그림 9 직선형 초음파 모터의 하나인 inch-worm 모터

그림 8은 회전형 초음파 모터의 개념도이다. 탄성원반과 압전 원반이 밀착되어 있는데, 압전 원반은 영역 분할된 압전소자들이 두 층을 형성하고 있고, 각 영역은 극성이 교대로 되어 있다. 시간에 따른 조화함수형 전압이 압전 원반에 가해지면 두 원반 경계면에 표면탄성파가 진행하게 되고 이 운동으로 인해 탄성 원반이 이동한다. 이러한 모터는 중심부가 비어있어 자동 초점 카메라에 사용된다.<sup>(20)</sup>

그림 9은 직선형 모터의 한 종류로서 소위 "inch-worm모터"라고 불리는 장치이다.<sup>(21)</sup> 이는 사프트 주위에 압전체인 두 개의 링(A, C)와 이들을 연결하는 압전체 원통(B)로 구성된다. 링은 반경방향 극성을 갖고 있고 원통은 축방향 극성을 갖고 있다. 링 A가 수축하여 사프트에 고정되고 링 C가 팽창하여 자유로운 상태에서 원통 B가 팽창하여 링 C를 우측으로 이동시킨다. 다음에 링 C가 수축하여 사프트에 고정되고 링 A가 팽창하여 자유로운 상태에서 원통 B가 수축하여 링 A를 우측으로 이동시킨다. 이러한 과정을 초음파 주파수로 반복하여 압전체가 한 방향으로 이동한다. 이런 장치는 반도체 제조 공정에서 정밀 스테이지를 이동하는 데에 사용된다. 다른 방식의 직선형 모터 중에는 진행파를 이용하는 것이 있다.<sup>(21)</sup>

#### 4. 맺음 말

초음파를 이용한 센서와 액추에이터를 몇가지 나열하였는데, 이 글에 소개되지 않은 장치들이 많이 있을 뿐 아니라, 지금도 새로운 장치들이 속속 개발되고 있다. 日本工業出版(株)에서 매월 발행하는 超音波TECHNO에 특히 잘 소개되고 있다.

초음파의 물리적 현상은 백여년 전부터 이미 이론적으로 확립되어 왔으면서도, 초음파 활용 기술에 관한 연구가 지금도 많은 사람들에 의해 활발히 진행되고 있다. 창의적인 아이디어에 따라 그 응용범위가 더욱 넓어질 것이며, 산업발달과 인간의 복지 향상에 기여하리라 기대한다.

#### 참고 문헌

- (1) 김진오, 1998, "초음파 기술 응용 사례", 기계저널, 제 38권, 제 3호, pp. 34~39.
- (2) (주)신창, 1999, "초음파 수위레벨계", 기계

저널, 제 39권, 제 1호, p. 25.

- (3) 김진오, 전한용, 2000, "봉의 비틀림 고유진동에 대한 인접 점성유체의 영향", 한국소음진동공학회지, 제 10권, 제 1호, pp. 168~173.

- (4) Bau, H. H., Kim, J. O., Lynnworth, L. C., Nguyen, T. H., 1990, "Torsional Wave Fluid Sensor and System", United States Patent 4, 893, 496.

- (5) 김진오, 1999, "초음파 점도계용 고체 매질의 탄성파와 인접 점성유체 간의 상호작용", 한국음향학회지, 제 18권, 제 5호, pp. 28~34.

- (6) 谷澤 公彦, 坂本 泰弘, 1995, "ねじり振動ランジュバン型超音波粘度計", 超音波TECHNO, 2月号, pp. 23~27.

- (7) 권오수, 김진오, 2000, "압전 비틀림 변환기의 진동특성 해석", 한국소음진동공학회지(심사중).

- (8) Kim, J. O. et. al., 1993, "Torsional Sensor Applications in Two-Phase Fluids", IEEE Trns. on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, Vol. 40, No. 5, pp. 563~576.

- (9) 김진오, 1998, "초음파 기술 응용 사례", 기계저널, 제 38권, 제 3호, pp. 34~39.

- (10) 김진오, 김정호, 최주영, 조문제, 1995, "초음파 세정기의 진동/음향 해석에 의한 수명/성능 향상 연구", 대한기계학회논문집, 제 19권, 제 11호, pp. 2939~2953.

- (11) Choi, S., Kim, J. O., Kim, Y.-H., 1997, "Acoustic Analysis of a High-Frequency Ultrasonic Cleaner", The Journal of the Acoustical Society of Korea, Vol. 16, No.1E, pp. 49~56.

- (12) Freik, K., 1985, "Apparatus for Generation and Radiating Ultrasonic Energy", U. S. Patent 4,537, 511

- (13) Walter, M., Weber, D., 1991, "Ultrasonic Transducer", U. S. Patent 5, 200, 666.

- (14) 이진복, 김희수, 1996, "초음파 트랜스듀서의 종진동을 이용한 알루미늄 와이어 용접", 한국정밀공학회지, 제 13권, 제 11호, pp. 38~45.

- (15) 주종남, 김규만, 김성운, 2000, "미세형상가공을 위한 방전·초음파 가공기술", 한국정밀공학회지, 제 17권, 제 7호, pp. 20~27.

- (16) Sashida, T., Kenjo, T., 1993, An Introduction to Ultrasonic Motors, Clarendon Press, Oxford.

- (17) 김제환, 1997, "압전모터의 원리와 응용",

대한기계학회지, Vol. 37, No. 7, pp. 43~48.

(18) Ueha, S., Tomikawa, Y., Kurosawa, M., Nakamura, N., 1993, Ultrasonic Motors, Clarendon Press, Oxford.

(19) Uchino, K., 1997, Piezoelectric Actuators and Ultrasonic Motors, Kluwer Academic

Publishers, Boston.

(20) Miu, D. K., 1993, Mechatronics, Springer-Verlag, New York, Ch. 6.

(21) 한우석, 김연보, 노용래, 1999, "진행파를 이용한 쌍방향 초음파 리니어 모터 설계 및 제작", 한국음향학회지, 제 18권, 제 8호, pp. 25~31.