

가지되 초음파의 민감한 특성을 이용하는 저출력 분야로 나눌 수 있다. 이 중 고출력 초음파를 발생시켜서 원하는 일을 하도록 만드는 트랜스듀서를 액추에이터라고 부르며 초음파 용접기나 초음파 쇄석기 등이 이러한 예들이다. 반면에 저출력 초음파 트랜스듀서들은 어군탐지기, 산부인과에서 태아의 건강상태를 검사하기 위해 사용하는 의료진단기 등의 예에서 볼 수 있듯이 주로 진단 및 검사 목적으로 사용하는 것으로서 흔히 센서라고 부르는 것들이다. 본 고에서는 이 중 초음파 센서의 일반적인 구조와 종류 그리고 응용사례들에 관해 알아보고 앞으로의 전망 및 개발과제에 관해 논해보고자 한다.

II. 초음파 센서의 기본 구조

전형적인 초음파 센서의 구조는 그림 1에 나타난 바와 같이, 크게 나누어 초음파 신호를 발신, 수신하는 압전 진동자와, 진동자 앞뒤에 부착되는 음향 정합층과 후면층 그리고 외부 측정기기와의 원활한 접속을 위한 정합회로로 구성된다. 그 외에 필요에 따

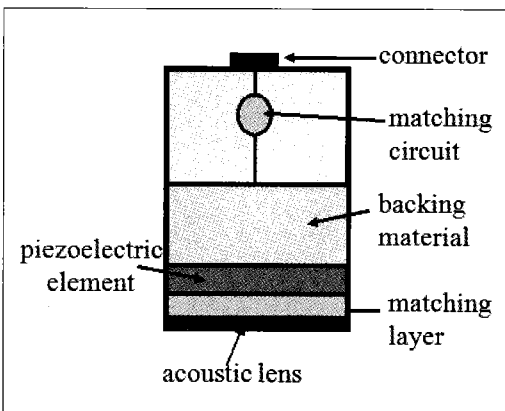


그림 1. 초음파 센서의 일반적인 구조

라 정합층 전면에 보호층(wear plate)이나 음향 렌즈(acoustic lens) 등을 설치할 수도 있다. 이들 부분품들의 특성에 따라 음향 신호를 발진하는 발진기, 그리고 수신하는 수신기로 각각 개발할 수 있으며, 필요에 따라 동일한 센서가 발진기와 수신기 역할을 동시에 할 수 있도록 개발, 사용할 수도 있다.

2.1. 압전재료

압전 재료란 재료 자체의 물성에 의해 기계적 에너지와 전기적 에너지를 서로 간에 변환시킬 수 있는 특성을 가진 재료를 말하며, 압전 효과는 재료에 가해지는 응력(T), 변형률(S), 전계(E) 그리고 전기적 변위(D)에 의해 식 (1)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} T &= c^E S - e E \\ D &= e S + \epsilon^S E \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 c^E 는 일정 전계하에서 측정된 기계적 탄성 계수(mechanical stiffness)이고, e 는 압전계수(piezoelectric constant)이고, ϵ^S 는 일정 변형률하에서 측정된 전기적 유전율(permittivity)이다. 재료의 압전효과는 전기 기계 결합계수 (K^2)를 사용하여 나타내는데, K^2 는 재료에 가해진 전기적 에너지에 대한 기계적 에너지로 변환된 에너지 양의 비율 또는 그 역으로 정의된다. 따라서 우수한 전기기계 결합계수를 가진 압전 소자에 전기적 에너지가 가하면 압전 방정식에 나타난 바와 같이 초음파 신호를 발신시킬 수 있고, 역으로 외부로부터의 초음파 신호는 압전 소자에 의해 전기적 신호로 변환이 된다.

2.2. 음향 정합층(acoustic matching layer)

압전 진동자의 음향 임피던스는 초음파가 전파해 가는 매질인 공기나 물에 비해 월등히 높아서, 대부분의 초음파는 방사 매질과의 경계면에서 반사된다. 따라서 진동자와 물 사이에 음향 정합층을 두어서 초음파가 잘 전달되도록 해야 한다. 음향 정합층용으로 쉽게 사용할 수 있는 재료로 상용화된 것은 없고, 용도에 따라 사용자가 제작을 해야만 하는데, 일반적으로 밀도와 강성이 높은 금속이나 세라믹 분말과 유연한 고분자 재료를 혼합하여 제작한다. 필요에 따라 하나의 층을 사용할 수도 있고, 둘 이상의 적층 구조를 가질 수도 있는데, 다층 구조일수록 광대역 주파수 특성을 가진다.

2.3. 후면층(backing material)

압전 진동자 전면에 부착되는 정합층은 초음파를 방사 매질로 잘 투과시키도록 하는 반면에, 진동자 후면에 부착되는 후면층은 진동자 후방으로 방사된 초음파를 흡수함으로써 초음파 펄스의 길이를 줄이고 주파수 대역 폭을 증가시키는 역할을 한다. 후면층의 음향 임피던스는 진동자의 음향 임피던스와 같아질수록 그 경계면에서 반사가 적어서 펄스의 지속 시간이 작아지므로 축방향 해상도가 좋아지게 되고, 이상적인 경우 짧은 양극성(bipolar)의 초음파 펄스를 얻을 수 있다. 그러나 진동자의 후면층에 의한 흡음 손실이 커짐에 따라 센서의 감도가 저하되므로 감도와 펄스길이 사이의 절충이 불가피하다. 압전 진동자의 후면층으로는 보통 고 감쇄성의 고분자 재료나 에폭시에 텅스텐 분말을 혼합하여 경화시킨 재료가 많이 사용된다.

2.4 정합 회로(matching circuit)

압전 진동자는 전기적 유전체로서 정전 용량을 갖고 있다. 이 정전 용량은 센서가 초음파를 발생시키는 송신기로 사용될 때 초음파의 rise time 을 증가시키며, 또 신호원을 shunt 시켜 필요한 전류량을 증가시킨다. 또한 수신기로 동작할 때는 센서의 부하로 작용하여 전기적 출력을 감소시키므로 이를 상쇄시키기 위한 전기적 tuning이 필요하다. Inductance에 의한 series tuning은 중심 주파수 대역에서 정전 용량을 간단히 줄일 수 있어 많이 사용된다.

III. 초음파 센서의 종류

초음파 센서장치의 기본 원리는 펄스-에코법에서 출발한다. 즉 어느 방향으로 방사된 초음파가 그 방향에 놓인 표적(target)들에 의해 반사되어 돌아오면, 돌아온 초음파 신호를 측정하여 경과 시간이나 진폭의 감쇄 등을 분석함으로써 표적들의 위치를 확인할 수 있으며, 방향을 여러 곳으로 바꾸어 이런 과정을 되풀이하면 평면적인 상을 얻을 수 있어 물체의 단면 구조에 해당하는 영상을 얻을 수 있다. 이런 영상 방법을 B-mode(brightness-mode)라 부르며, 초음파 영상 진단기에서 보통 사용되는 방법이다.

3.1. 단일 진동자형 센서

그림 1에 나타낸 구조를 가지며, 초음파를 발신/수신하는 진동자가 센서 내에 한 개만 존재하여 센서의 위치가 이동하지 않는 이상 단일 직선상의 지점에 대한 측정만 가능한 종류이다. 가장 간단한 구조

이며, 제작하거나 사용하기가 간편하여 오래전부터 널리 사용되는 구조이다.

3.2. 선형 배열 센서(linear array sensor)

그림 1에 보인 단일 진동자형 센서 다수를 직선으로 배열한 형태이며, 그림 2(a)와 같은 형태를 가진다. 단일 진동자형 센서에 비해 넓은 영역을 한꺼번에 측정할 수 있다는 장점과 동시에, 전자 구동 장치에 의해 동적 집속(dynamic focusing)이나 빔 조향(beam steering) 등의 부가적인 기능이 가능하여 의료 진단이나 비파괴 검사 같은 정밀 진단에 널리 사용된다. 선형으로 배열되는 진동자의 개수는 수십 개에서 수천 개에 이르기까지 필요에 따라 다양하게 설정할 수 있으나, 개수가 너무 많아지면 사용 편의성이나 제작상의 어려움이 대두되므로 64 - 256개의 배열 구조가 일반적이다. 센서의 길이 방향으로 는 보통 전자적 집속을 하고 폭 방향으로 는 음향 렌즈나 오목형 형태를 만들어 집속하게 된다.

3.3. 곡률 배열 센서(convex array sensor, curved array sensor)

다수의 진동자를 1차원적으로 배열시켰다는 점에서 선형 배열 센서와 비슷하나, 그림 2(b)와 같이 압전 진동자의 표면을 곡면으로 볼록한 형태가 되도록 배열시킨 것으로서 여러 가지 유리한 점이 있다. 첫째, 물체와 접촉하는 면이 볼록하기 때문에 물체와의 밀착도가 좋게 된다. 둘째, 선형배열 센서에 비해 근거리에서 해상도가 좋고 원거리에서는 보다 넓은 시야를 갖는 장점이 있다. 셋째, 선형배열 센서에서는 물체에 의해 가려진 뒷 부분을 관찰할 수 없으

나 컨벡스 프로브는 둥근 곡면으로 인해 가려진 뒷 부분의 영역도 관찰할 수 있다. 넷째, 둥근 곡면으로 측정 대상에 압박을 할 수 있어서 의료용의 경우 장내의 가스를 밀어내어 초음파의 차폐나 감쇠를 막을 수 있다.

3.4. 동심환 배열 센서(annular array sensor)

그림 2(c)와 같이 원판형의 압전 소자를 고리모양으로 나눈 다수의 진동자를 사용하여 2차원적으로 집속을 하여 축 방향으로 원하는 곳에 쉽게 초점을 만들 수 있는 구조이다. 기하학적인 초점과 더불어 전자 구동 시스템에 의해 초점을 축상에서 이동(dynamic focusing)시킬 수도 있으며, 초점에서의 높은 신호대 잡음비에 의해 고해상도의 정밀 측정이 가능하다. 유사한 구조에 의해 초점에 높은 에너지를 집속시킴으로써 용접이나 암 치료용의 액츄에이터로 사용되기도 한다.

3.5. 평면 배열 센서

그림 2(d)와 같이 다수의 진동자를 2차원 평면으로 배열한 센서로서, 평면상의 진동자들을 동시에 구동하면 전면 물체의 3차원 실시간 진단이 가능한 구조이다. 평면상에 배열되는 진동자 수는 적게는 수백 개에서 많게는 수만 개에 이르는데, 한정된 크기 내에 이렇게 많은 진동자를 배열하자면 제작하기도 어려울 뿐더러 구동 시스템이 매우 복잡하게 되어 아직까지 상용화된 사례는 미미하다. 그러나 완벽한 실시간 3차원 영상을 얻을 수 있는 구조로서, 실용화시 많은 응용이 기대되는 차세대 초음파 센서이다.

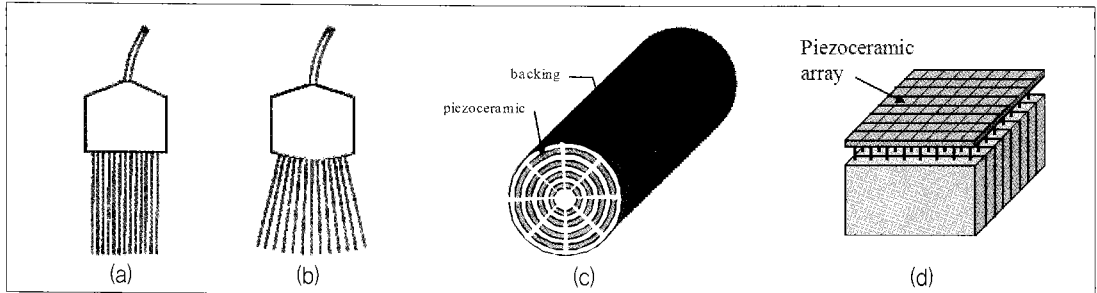


그림 2. 초음파 센서의 종류

IV. 초음파 센서의 응용 분야

초음파는 전파하는 매질에 따라서 그 성질이 바뀐다. 즉, 유체속에서는 단지 한개의 종파만이 존재하지만, 고체속에서는 한개의 종파와 두개의 횡파가 존재한다. 또, 각 매질에 따라 전파속도와 감쇄정도가 달라지고, 같은 매질이라도 이방성 재료일 경우 각 전파방향에 따라 그 특성이 모두 달리 나타나며, 둘 이상의 초음파 성분이 만나면 서로 동적결합(Dynamic Coupling)을 한다. 나아가 발생점으로부터의 거리에 따라, 즉 근거리 장(Fresnel Zone)이나 아나에 따라 파형의 형태 또한 달라진다. 이러한 성질들은 측정용으로 쉽게 이용될 수 있는데, 예를 들어서 횡파가 전파를 하다가 더 이상 전파를 못하는 부분이 나타나서 전반사가 되면 유체층이 있다는 것을 알 수가 있을 것이고, 매질에 따라 초음파의 특성이 변한다면 역으로 초음파의 특성을 측정하여 전파 매질의 물성을 알아내는 비파괴시험을 할 수 있을 것이다. 동적결합 특성을 이용한다면 유속이나 이동 중인 물체의 속도측정에 이용될 수 있다. 측정에 사용되는 초음파의 특성으로는 주로 전파속도와 감쇄계수가 이용된다. 위상변화와 중심주파수 변화 등도 이용되나 이들은 대부분의 경우 속도와 감쇄계

수의 변화에서 추론할 수 있는 것들이다.

초음파 센서를 이용해 측정할 수 있는 물리량은 매우 다양한데, 대표적인 측정 대상 및 적용분야와 측정원리들을 정리하면 표 1과 같다.

이러한 다양한 물리량을 측정할 수 있는 초음파 센서의 활용 분야는 매우 다양한데, 대표적인 분야는 비파괴 검사, 의료 진단, 해양 통신 및 탐지 그리고 고산업용 정밀 계측 등을 들 수 있다. 예를 들어서 산업용으로는 설비 구조물의 안정성 진단 및 예측 기기로서 각광을 받고 있는데, 센서를 이용해 초음파를 구조물내로 발신하여 반사되어 돌아오는 신호를 분석하여 구조물내의 결함 유무를 알아내는 능동적인 방법과 구조물 자체에서 발생하는 초음파 방사(acoustic emission) 신호를 탐지하는 수동적인 방법 등에 의해 비파괴적으로 구조물의 안전성을 진단 예측하는 것이다. 이는 조업중인 구조물, 기계류의 연속적인 상태 진단을 가능케 하고, 급작스러운 기계류의 파괴를 미연에 방지할 수 있어 큰 설비 및 작업 손실을 예방할 수 있다.

초음파 센서는 인체에 무해하고, 종래에는 진단하기 어려웠던 복잡한 구조물에도 쉽게 설치 가능하며, 여타 방법들에 비해 훨씬 저렴한 비용으로 우수한 진단 효과를 얻을 수 있다는 장점이 있다. 또한 비

표 1. 초음파 센서의 응용분야

측정대상	측정 원리
유속 [2]	유속과의 동적결합에 의한 속도 변화
온도 [3]	온도에 따른 매질 물성변화에 의한 속도 변화
밀도, 기공율 [4]	매질 밀도변화에 의한 속도 변화
압력 [5]	압력에 따른 센서 공진주파수 변화
진동 [6]	비행시간 및 동적 결합
변위 [7]	기준점에서 변위점까지의 비행시간 변화
유체점성 [8]	점성변화에 의한 속도, 감쇄도 변화
수위 [9]	기준점에서 수면까지의 비행시간 변화
위치 [10]	기준점에서 목표점까지의 비행시간 변화
가스, 습도 [11]	가스농도변화에 따른 속도, 감쇄도 변화
미세구조 [12]	매질 물성변화에 의한 속도, 감쇄도 변화
두께 [13]	두께변화에 따른 비행시간 변화
조성 [14]	매질 조성변화에 따른 속도 변화
이방성, 조직 [15]	매질 이방성, 조직에 따른 속도, 감쇄도 변화
비파괴검사 [16]	매질 내부구조에 따른 진폭, 속도 변화
응력, 변형율 [17]	매질 물성변화에 의한 속도, 감쇄도 변화
음향방사 (A. E.) [18]	매질 내부상태에 따른 신호의 크기, 빈도
형상 [19]	대상체 형상에 따른 진폭, 위상변화
물성 [20]	매질 물성에 따른 속도, 감쇄도 변화
침입자 경보 [21]	상체의 존재유무에 따른 비행시간변화
회전각 [22]	회전운동 성분과의 동적결합

교적 사용원리가 간단하고, 동일한 센서로 필요에 따라 여러 가지 변수의 동시 측정이 가능하다는 장점도 있다. 그리고 정밀 진단의 경우 동일한 정밀도를 가지는 여타 장비에 비해 구동 장치가 간단해 측정 장치의 이동이 용이하다는 점도 큰 장점이다. 표 1에 열거된 것들은 이미 실용화가 잘 이루어진 대표적인 응용 사례들이며, 이 외에도 대상 측정물의 특성에 따라 얼마든지 새로운 방법의 적용이 가능하다.

V. 향후 전망 및 고찰

초음파에 관한 기초적 연구 및 응용은 이미 오래 전부터 이루어져 왔고, 본문에서 알아보았듯이 매우 넓은 범위에서 실용화되었다. 그러나 이상에서 열거한 응용분야는 앞으로의 응용가능 범위에 비하면 여전히 일부분에 불과하다. 최근 산업구조가 고도화함에 따라 기기, 소자 가공에서 보다 높은 정밀도가 요구되고, 자동화가 불가피해지고 있다. 최근 음향 공학의 발달과 함께, 초음파의 발전에 필요한 진동자의 재료로도 우수한 신소재들이 속속 개발되고 있고, 관련 전자공학, 기계공학 등의 기술도 하루가 다

르게 발달하고 있는지라 향후 연구과제나 실용화 전망은 밝은 편이다. 그러나 이러한 요구들에 부응하기 위해서는 기존 초음파 기기들의 고성능화와 더불어 기기의 수명연장 즉 진동자의 시효현상 제거, 초음파 센서제작의 자동화 그리고 아직도 잘 이루어지지 않은 기기의 표준화 등의 과제들을 우선 해결해야 한다.

참고 문헌

1. K. F. Graff, Physical Acoustics edited by W. P. Mason and R. N. Thurston, vol. 15, 1981
2. H. Lechner, Journal of the Acoustical Society of America, vol 75, No. 3, p. 955~959, 1983
3. H. Ziegler and J. Tiesmeyer, Journal of the Acoustical Society of America, vol. 4, p. 363~367, 1983
4. W. B. Dress, Proceedings of Ultrasonic Symposium, p. 287~290, 1983
5. E. Tom and D. E. McGovern, Proceedings of American defense preparedness association, 1985
6. Bruel & Kjael Catalogue, 2007
7. T. Sada and M. Inoue, Monthly Automation Technology, p. 14~21, 1989
8. C. Barnes, Sensors and Actuators : part A, p. 59~69, 1991
9. D. Dieulesaint, D. Royer, O. Legras and F. Boubenider, Proceedings of Ultrasonic Symposium, p. 569~572, 1987
10. S. W. Wenzel, E. R. Minami, J. S. Huang and R. M. White, Proceedings of Ultrasonic Symposium, p. 611~614, 1987
11. N. Yamazoe and Y. Shimizu, Sensors and Actuators, vol. 10, 379~398, 1986
12. E. P. Papadakis et al, Journal of the Acoustical Society of America, vol 52, No. 3, p. 850~857, 1972
13. P. Cielo and C. K. Jen, Proceedings of Ultrasonic Symposium, p. 515~526, 1986
14. H. Hagy, Applied Optics, vol. 12, No. 7, p. 1440~1446, 1973
15. M. C. Bhardwaj, Proceedings of international conference on advanced metal & ceramic matrix composites, 1990
16. ASTM, E 114~85, 1985
17. D. E. MacDonald, IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics, vol. 28, No. 2, p. 75~79, 1981
18. R. Dukes and E. A. Culpan, IEE Proceedings, vol. 131, No. 4, p. 241~251, 1984
19. J. Yu Lu and J. G. greenleaf, Ultrasound in medicine and biology, 1990
20. C. P. Hsiao and R. A. Kline, Proceedings of Ultrasonic Symposium, p. 443~446, 1984
21. H. Ermert and J. Schmolke, Proceedings of Ultrasonic Symposium, p. 555~558, 1986
22. J. S. Burdess and T. Wren, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. 22, No. 4, 410~418, 1986