

技術解説

초음파의 산업 응용

Industrial Applications of Ultrasound

노 용 래

(산업과학기술연구소)

I. 서 론

초음파란 성인이 들을 수 있는 범위(20KHz) 이상의 높은 주파수의 소리를 일컫는다. 가청영역 이상의 모든 소리를 일컬으므로 그 주파수 대역이 매우 넓고 중심주파수의 크기에 따라 각각 다른 응용이 가능하다. 역사적으로 초음파의 응용에 관한 연구의 시발은 유명한 1912년 타이타닉호의 침몰에 기인한다고 일반적으로 여겨진다 [1], 즉 해저의 빙하와 암초의 탐지 필요성이 본격적으로 대두되었고, 이후 전쟁기간중의 군사적인 목적으로 관련기술이 비약적으로 발전하였다. 특히 편리하고 고성능인 소형 초음파 발전기의 개발은 일반 산업에의 응용에 결정적인 기여를 하였다. 최근의 급격한 기계, 전자공학의 발달로 인해 그 응용범위는 날로 넓어지고 있다. 이러한 초음파는 알게 모르게 우리 주위에도 널리 사용이 되고 있는데, 쉬운 예로는 마취나 돌고래 등의 통신이나 거리 감지를 위해 발생시키는 것이나 어군탐지기, 산부인과에서 태아의 건강상태를 검사하기 위해 사용하는 의료진단기 등을 들 수 있다. 초음파의 발생기구는 크게 트랜스듀서(Electromechanical Transducer)와 고주파 전원(High Frequency Power Supply)으로 구성이 된다. 트랜스듀서는 여러가지 형태의 것이 있으나, 주로 전액, 사왜 재료를 사용한 것과 PZT같은 압전재료를 사용한 것이 많다. 이들재료는 공급되는 전자기장의 크기에 의해 발생하는 초음파의 형태 및 크기를 쉽게 조절할 수 있다는 장점이 있다.

본고에서는 이러한 초음파가 실제로 산업 및 과학 기술 분야에서 응용되고 있는 부분을 살펴보고, 앞으로 확대될 응용분야와 전망에 관해 고찰해보고자 한다. 여러 응용분야를 크게 나누어 큰 에너지를 가진 초음파를 이용하는 고출력 분야와 작은에너지를 가진 초음파의 민감한 특성을 이용하는 저출력 분야로 나누어 살펴본다 [2, 3]. 본고에서는 실제 산업현장에 응용이 되고 있는 사례들을 주로 살펴보기로 하고, 자세한 이론적 배경이나 원리에 관해서는 첨부된 참고문헌들에서 도움을 얻을 수 있을 것이다.

II. 고출력 초음파의 응용

고출력 초음파의 응용이란 큰 에너지를 가지는 초음파를 대상물체에 가해 물체의 형질변경을 이루거나 일을 하도록 만드는 것으로서, 통상 몇백 KHz 이하의 주파수 범위에서 몇십 KW 이하의 파워를 가진 음파를 이용한다. 여기서 기계적 파워는 초음파원으로부터 대상체에 전달되는 파의 진동속도와 대상체에 생기는 반력의 곱으로 정의된다. 통상 초음파 액츄에이터라고 부르는 것들이 이 부류에 속한다. 물체의 가공이나 일을 하도록 만드는 고출력 트랜스듀서의 사용 원리는 크게 세가지로 들 수 있는데, 이들은

- (i) 유체내에서의 Cavitation과 Micro Streaming [4]
- (ii) 유체-유체, 유체-기체 간의 경계면 불안정 [5]
- (iii) 고체에서의 가열과 피로 [6]

등이다. 이러한 원리를 이용한 대표적인 응용 예 몇 가지만 들면 아래와 같다.

(1) 세 척 [7]

초음파를 이용한 세척은 가장 오래되고 널리 사용되는 고출력 초음파의 응용분야이다. 기계부품, 귀납속, 화학·의료용기는 물론 최근의 반도체소자의 세척에 까지 이용되고 있는데, 기본 원리는 유체중에 기포의 Cavitation 현상을 유도하여 원치않는 불순물을 제거한다는 것이다. 세척기의 진동자에 의해 가해지는 고주파 유압변동은 유체내에 미세기포를 생성시키고 이 기포는 점점 커지다가 일정 크기에서 폭발을 해서 물체 표면의 기름이나 먼지를 떨어내게 되는데, 폭발에 도달하지 않은 기포의 안정된 공진운동이나 Micro-Streaming 운동 또한 세척작용을 발휘한다. 세척기는 전원부, 초음파 진동자부와 유향과워를 집중, 음향장도를 증가시키는 Horn부 등의 세부분으로 구성이 된다. 통상 20-50 KHz 범위의 초음파를 이용한다.

(2) 용 접 [8, 9]

1950년대 후반부터 개발되어 널리 이용되고 있는 분야로서 기타 용접법에 비해 빠르고, 깨끗하며, 용접봉 같은 소비재료가 필요없고, 자동화가 용이하다는 장점을 가지고 있다. 작동원리는 용접 대상물에 초음파를 이용한 고주파 진동을 일으켜서 열을 발생시키고, 이 열은 용접부를 국소적으로 녹여 접합이 이루어지도록 한다. 발생하는 열은 가해지는 응력의 함수로서 나타나므로 응력 집중이 될수록 유리하고, 따라서 용접기와 용접대상 물체 간에는 마소접촉이 이루어지도록 한다. 그리므로 적은 에너지를 소비하고, 여타 방법들에서 흔히 나타나는 용접부 주위의 불필요한 가열로 인한 뒤틀림이나 재질 불성저하 등을 방지할 수 있게 된다. 용접은 순식간에 이루어져 보통 몇 초 내에 완료된다. 용접기는 진동자, 음향 Horn과 용접대상 물체와의 접촉부에 설치되는 기계적 변환기로 구성이 되는데, 이 변환기는 음향에너지의 용접부로의 전달을 용이하게 하는 정합층의 역할을 한다. 이러한 용접법은 금속, 플라스틱, 섬유 등의 재료에 광범위하게 적용이 될 수 있다. 최근에는 접합부위가 깨끗하게 처리될 필요가 있는 자동차 산업과, 전자공업에서의 Micro-Bonding, Packaging 등에서 각광을 받고 있다 (그림 1).

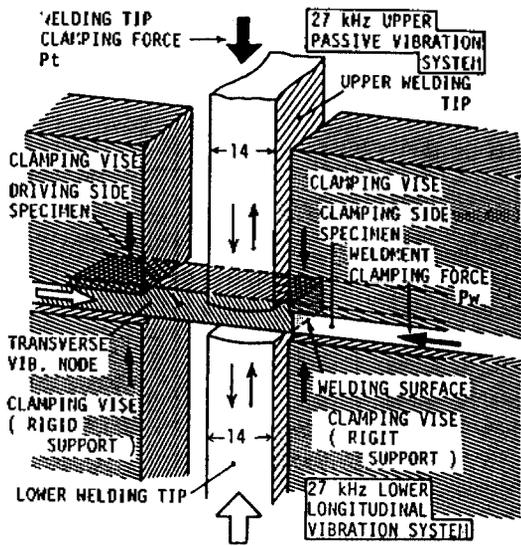


그림 1. 초음파 용접기 용접부의 실제 및 작동원리도(after J. Tshjino et al in Ref. 8)

(3) 납 땀 [10]

액상의 납을 사용하여 미소부위의 땀을 이루며 원리는 초음파 세척과 유사하다. Cavitation 현상에 의해 세척작용도 동시에 일어나므로 별도의 Flux가 필요없다는 점이 큰 장점이며, 주로 전자부품의 Wiring에 많이 사용된다.

(4) 기계 가공 [11]

단단하고 취성이 강한 재료, 즉 Alumina 같은 세라믹이나 유리의 가공에 특히 유리하며, Drilling, Milling, Threading 등의 가공작업에 사용되고 있다. 원리는 작업 Tool의 통상적인 가공운동에다 축방향의 초음파 진동성분을 추가하여 Tool에 걸리는 부하를 줄이면서 더 효율적인 작업이 가능하도록 한다. 드릴의 경우를 예로 들면, 통상적인 Drill Bit의 회전운동 외에 Bit로 하여금 축방향으로 고주파의 미세진동을 하도록 하여 천공속도를 높이고, Bit의 수명을 연장시키며, Bit에 걸리는 압력을 줄일 뿐만 아니라 냉각수내에 Cavitation을 일으켜 천공효과 및 세척작용이 향상되도록 한다. 주로 정밀가공이나, 세라믹 재질 가공, 원자로용 재료 가공, 컴퓨터용 자성재료 가공 등에 많이 쓰이고 있다.

이상의 것들은 산업체에 대량으로 보급되어 오래 전부터 특히 많이 이용이 되어 왔는 예들이고, 이의

에도 널리 사용되는 산업체 응용분야들을 정리하면 표 1과 같다.

표 1. 고출력 초음파의 응용분야

응용 분야	기	능
forming [2]	금속, 플라스틱 성형	
cutting [7]	금속, 섬유질 재료의 절단	
fatiguing [13]	파괴시험, 품질검사	
cleavae [14]	결정, 복합재료의 절단	
friction reduction [2]	채(Sieve), 수송용 Hopper의 원활한 구동	
densification [6]	분말의 고밀도화 소결	
extraction [2]	화학, 의료, 식품용 압차, 추출	
homogenizing [15]	분말의 균등배합	
drying [7]	분말, 오프기술금속소석의 평균배합	
atomization [16]	분진 제거, 박막성형, 향료 발산	
degassing [2]	화학반응, 발효 촉진	
chemical process enhancement [4]	화학반응 촉진	
flow enhancement [17]	관의 막힘현상 제거	
crystallization [18]	결정성장 촉진	
thermal transport [4]	열전달효과 촉진	
pollution cleaning [19]	분진, 대기오염물질 제거	

최근에는 표 1의 것들 외에도 초음파 발생기의 정밀성을 이용한 다양한 소자 및 기기들이 속속 개발되고 있는데, 잉크젯 프린터용 직층 액츄에이터 [20], 초음파 펌프 [21], 초음파 노즐 [22], 초음파중 탄성 표면파를 이용한 초음파 모터 [23] 등이 개발되어 이미 실용화가 이루어졌다.

III. 저출력 초음파의 응용

작은 에너지를 가지는 초음파는 고출력 초음파와는 달리 주로 측정, 시험용으로 이용이 되고 있다. 초음파는 전파하는 매질에 따라서 그 성질이 바뀐다. 즉, 고체속에서는 한개의 종파와 두개의 횡파가 존재하지만, 유체속에서는 단지 한개의 종파만이 존재한다. 또, 각 매질에 따라 전파속도와 감쇄정도가 달라지고, 같은 매질이라도 이방성 재료일 경우 각 전파 방향에 따라 그 특성이 모두 달리 나타나며, 서로 다른 매질들의 경계면에서는 반사와 투과현상이 나타나고, 물 이상의 초음파 성분이 만나면 서로 동적결합(Dynamic Coupling)을 한다. 나아가 발생점으로

부터의 거리에 따라, 즉 Fresnel Zone내부이나 외부이냐에 따라 파형의 형태 또한 달라진다. 이러한 성질들은 앞에서 언급한 것처럼 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 전파매질의 불성을 알아내는 비파괴 시험을 할 수 있을 것이다. 동적결합 특성을 이용한다면 유속이나 이동중인 물체의 속도측정에 이용될 수 있다. 이렇게 초음파의 전파매질에서의 특성변화를 면밀히 관찰하면 측정, 시험, 제어용으로 적절히 이용할 수 있는데, 이러한 응용은 큰 파위를 필요치 않고 따라서 저출력 초음파의 응용분야로 분류된다. 사용되는 초음파의 특성으로는 주로 전파속도와 감쇄계수가 이용된다. 위상변화와 중심주파수 변화 등도 이용되나 이들은 대부분의 경우 속도와 감쇄계수의 변화에서 추론할 수 있는 것들이다.

초음파는 크게 체적파와 표면파로 분류가 되는데, 고출력 응용분야는 주로 체적파만을 이용한 것이고, 저출력 응용분야는 이들 둘 다를 이용한다. 대표적인 응용 예와 그 작동원리들을 정리하면 표 2와 같다. 초음파를 측정, 시험용으로 이용하는데 있어 가장 큰 장점은 비교적 사용원리가 간단하다는 점과, 동일한 탐촉자로서 필요에 따라 여러가지 변수의 측정이 가능하다는 점이다. 위의 표에 열거된 것들은 이미 실용화가 잘 이루어진 대표적인 응용사례들이며, 이외에도 대상 측정물의 특성에 따라 얼마든지 새로운 방법의 적용이 가능하다. 나아가 현재까지는 체적파의 응용이 대종을 이루어 왔으나, 측정용으로 표면파를 이용하려는 노력도 활발히 이루어지고 있는데, 여기에 대해서는 이미 Ref.47에서 언급한 바 있다.

IV. 향후 전망 및 고찰

초음파에 관한 기초적 연구 및 응용은 이미 오래전부터 이루어져 왔고, 본문에서 알아보았듯이 매우 넓은 범위에서 실용화가 되었다. 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. 고출력 초음파의 응용 필요성이 그만큼 높아지고 있다. 저출력 초

표 2 저출력 초음파의 응용분야

측정 대상	측정 원리
flowmetry [24]	유속과의 동적결합에 의한 속도 변화 (그림 2)
thermometry [25]	온도에 따른 매질 물성변화에 의한 속도 변화
density, porosity [26]	매질 밀도변화에 의한 속도 변화
pressure [27]	압력에 따른 트랜스듀서 공진주파수 변화
dynamic force, vibration, acceleration [28]	외부진동에 의해 진동자에 발생하는 진하
displacement [29]	기준점에서 변위점까지의 비행시간 변화
viscosity in fluids [30]	점성변화에 의한 속도, 감쇄도 변화
level [31]	기준점에서 수면까지의 비행시간 변화
location [32]	기준점에서 목표점까지의 비행시간 변화
humidity, gas [33]	가스농도변화에 따른 속도, 감쇄도 변화
phase, microstructure [34]	매질 물성변화에 의한 속도, 감쇄도 변화
thickness [35]	두께변화에 따른 비행시간 변화
composition [36]	매질 조성변화에 따른 속도 변화
anisotropy, texture [37]	매질 이방성, 조직에 따른 속도, 감쇄도 변화
nondestructive testing [38]	매질 내부구조에 따른 진폭, 속도 변화
stress and strain [39]	매질 물성변화에 의한 속도, 감쇄도 변화
acoustic emission [40]	매질 내부상태에 따른 신호의 크기, 반도
imaging, holography [41]	대상체 형상에 따른 속도, 감쇄도 변화
elastic properties [42]	매질 물성에 따른 속도, 감쇄도 변화
burglar detection [43]	대상체의 존재유무에 따른 비행시간변화
rotation angle, angular velocity [44]	회전운동 성분파의 동적결합
medical inspection [45]	대상체 위치, 형상, 물성에 따른 시간, 진폭변화
fish finding [46]	대상체 위치, 형상에 따른 비행시간, 진폭변화

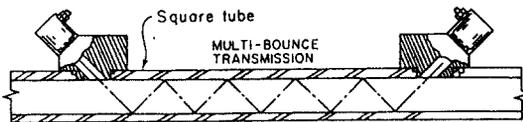


그림 2. 초음파 유속(유량)계의 형상(after L. L. Lynnworth in "Ultrasonic Flowmeters" at Physical Acoustics edited by W. P. Mason and R. N. Thurston, vol 15, 1981.)

음파의 경우 자동화 및 정밀 제어를 위한 측정, 분석에의 필요성은 물론, 정보, 통신사회를 지향하는 요즘 초음파를 이용한 resonator, oscillator, filter, correlator 등의 통신소자와 정밀 센서, 액츄에이터의 개발, 응용의 필요성은 더 언급할 필요가 없을 정도이다 [48, 49]. 최근 음향공학의 발달과 함께, 초음파의 발전에 필요한 진동자의 재료로도 우수한 신소재들이 속속 개발되고 있고 [50], 관련 전자공학, 기계공학 등의 기술도 하루가 다르게 발달하고 있는지라 향후 연구과제나 실용화 전망은 밝은 편이다. 이러한 요구들에 부응하기 위해서는 기존 초음파 기기들의 고성능화와 더불어 기기의 수명연장 즉 진동자의 시효현상 제거, 초음파 트랜스듀서제작의 자동화 그리고 아직도 잘 이루어지지 않은 기기의 표준화 등의 과제들을 우선 해결해야 한다.

참 고 문 헌

1. K. F. Graff, "A history of ultrasonics," Physical Acoustics edited by W. P. Mason and R. N. Thurston, vol.15, 1981.

2. A. Shoh, "Industrial applications of ultrasound-a review I. high power ultrasound," IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics, vol.22, No.2, p.60-71.
3. L. C. Lynnworth, "Industrial applications of ultrasound a review II. measurements, tests and process control using low intensity ultrasound," IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics, vol.22, No. 2, p.71-101.
4. L. Marton and C. Marton, *Methods of Experimental Physics*, Academic Press, New York, 1981.
5. A. W. Doyle, B. V. Mokler and R. R. Perron, API Research Conference Paper CP 62-1, 1962.
6. J. A. Kleppe, *Engineering Applications of Acoustics*. Artech House, Nevada, 1982.
7. E. A. Neppiras, "Macrosonics in industry," *Ultrasonics*, Jan, 1972.
8. J. Tshjino, T. Ueoka, M. Yabuzaki, H. Suzuki, T. Hirikoshi, M. Nagura and M. Kobayashi, "Some recent applications of high power ultrasonics using multiple transducers and vibration systems," *Proceedings of Ultrasonic Symposium*, p.593-598, 1986.
9. J. Tsujino, "Ultrasonic wire bonding using a complex vibration welding tip," *Proceedings of Ultrasonic Symposium*, p.615-620, 1987.
10. E. A. Gootbier, "Ultrasonics in mass soldering," *Western Electric Engineer*, vol.13, No.1, Jan. 1969.
11. W. Grauer, "Ultrasonic Machining," Grumman Aerospace Corp. Technical Report AFML TR 73 86, Apr. 1973.
12. B. Langenecker, S. Ilhewich and O. Vodep, "Basic and applied research on metal deformation in macrosonic fields at PVL-Austria," *Ultrasonics*, 1973.
13. J. M. Wells, *Proceedings of the First International Conference on Fatigue and Corrosion Fatigue up to Ultrasonic Frequencies*, 1981.
14. A. Klink, M. Midler and J. Allegretti, "A study of crystal cleavage by sonifier action," *Chemical Engineering Progress Symposium series*, vol.67, No. 109, 1971.
15. L. D. Rosenberg, "Physical principles of ultrasonic technology," vol.2, p.391-409, 1974.
16. H. L. Berger and A. E. Ericson, "Ultrasonic liquid atomizer, particularly for high volume flow rates," US Patent 4541564, 1985.
17. A. Semmelink, "Ultrasonically enhanced liquid filtering," *Ultrasonics*, 1967.
18. L. D. Rosenberg, "Physical principles of ultrasonic technology," vol.2, p.145-273, 1974.
19. G. Reethof, "Acoustic power agglomeration of power plane fly ash," Report to US Department of Energy, 1980.
20. F. C. Lee, "PZT printing applications, technologies, new devices," *Proceedings of Ultrasonic Symposium*, p.693-697, 1988.
21. D. Murphy, "Acoustic pump," US Patent 4684328, 1987.
22. M. E. Kawasaki, K. K. Atsugi, H. H. Yachiyo, Y. N. Urawa and D. H. Kawajima, "Vibrating element for use on an ultrasonic infection nozzle," US Patent 4756478, 1988.
23. P. Hagedorn and J. Wallaschek, "Traveling wave ultrasonic motors, part I: working principle and mathematical modeling of the stator," *Journal of Sound and Vibration*, vol.155, No.1, p.31-46, 1992.
24. H. Lechner, "Ultrasonic flow metering based on transit time differentials which are insensitive to flow profile," *Journal of the Acoustical Society of America*, vol.75, No.3, p.955-959, 1983.
25. H. Ziegler and J. Tiesmeyer, "Digital sensor for IR radiation," vol.4, p.363-367, 1983.
26. W. B. Dress, "A high resolution ultrasonic densitometer," *Proceedings of Ultrasonic Symposium*, p.287-290, 1983.
27. E. Tom and D. E. McGovern, "Intrusion detection using ferroelectric sensor technology," *Proceedings of American defense preparedness association*, 1985.
28. *Bruel & Kjael Catalogue*, 1993.
29. T. Sada and M. Inoue, "Optical micro non contact displacement sensor and its applications," *Monthly Automation Technology*, p.14-21, 1989.
30. C. Barnes, "Development of quartz crystal oscillators for under liquid sensing," *Sensors and Actuators: part A*, p.39-49, 1991.
31. D. Dieulesaint, D. Royer, O. Legras and F. Boubenider, "Acoustic wave liquid level sensor," *Proceedings of Ultrasonic Symposium*, p.569-572, 1987.
32. S. W. Wenzel, E. R. Minami, J. S. Huang and R. M. White, "Sonic oscillator position sensor," *Proceedings of Ultrasonic Symposium*, p.611-614, 1987.
33. N. Yamazoe and Y. Shimizu, "Humidity sensors: principles and applications," *Sensors and Actuators*, vol.10, 379-398, 1986.
34. E. P. Papadakis et al, *Journal of the Acoustical Society of America*, vol.52, No.3, p.850-857, 1972.
35. P. Cielo and C. K. Jen, "Laser generation of con

vergent acoustic waves and applications to materials evaluation," Proceedings of Ultrasonic Symposium, p.515-526, 1986.

36. H. Hagy, Applied Optics, vol.12, No.7, p.1440-1446, 1973.

37. M. C. Bhardwaj, "Simple ultrasonic NDC for advanced ceramics development & manufacture," Proceedings of international conference on advanced metal & ceramic matrix composites, 1990.

38. ASTM, "Standard practice for ultrasonic pulse echo straight beam examination by the contact method," E 114-85, 1985.

39. D. E. MacDonald, "On determining stress and strain and texture using ultrasonic velocity measurements," IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics, vol.28, No.2, p.75-79, 1981.

40. R. Dukes and E. A. Culpan, "Acoustic emission: its techniques and applications," IEE Proceedings, vol.131, No.4, p.241-251, 1984.

41. J. Yu Lu and J. G. Greenleaf, "Pulse echo imaging using a nondiffracting beam transducer," ultrasound in medicine and biology, 1990.

42. C. P. Hsiao and R. A. Kline, "The measurement of viscoelastic moduli using an ultrasonic spectroscopy technique," Proceedings of Ultrasonic Symposium, p.443-446, 1984.

43. H. Ermert and J. Schmolke, "Adaptive ultrasonic sensor for object identification," Proceedings of Ultrasonic Symposium, p.555-558, 1986.

44. J. S. Burdess and T. Wren, "The theory of a piezoelectric disc gyroscope," IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol.22, No. 4, 410-418, 1986.

45. S. W. Smith, R. F. Wagner, J. M. Sandrik and H. Lopez, "Low contrast detectability and contrast/detail analysis in medical ultrasound," vol.30, No.3, 164-173, 1983.

46. T. Tanaka, "Piezoelectric devices in Japan," Ferroelectrics, vol.40, p.167-187, 1982.

47. 노용래, "탄성표면파 센서," 한국음향학회지, vol.11, No.4, p.45-52, 1992.

48. C. Campbell, SAW devices and their signal processing applications, Academic Press, New York, 1989.

49. S. Middelhoet and Z. C. Hoogerwerf, "Smart sensors: when and where?," Transducers '85, p.2-7.

50. K. Uchino, "Recent topics of ceramic actuators how to develop new ceramic devices," Ferroelectrics, vol.91, p.281-292, 1989.

▲ 노 용 래



1984년 2월 : 서울대학교 자원공학
학과

1986년 2월 : 서울대학교 대학원
자원공학과

1990년 4월 : Pennsylvania State
University, Dept.
of Engineering Science and Mech-
anics(major in Ac-
oustics)

1990년 5월 ~ 현재 : 산업과학기술연구소