

특집

초음파 트랜스듀서와
유량 측정 기술

초음파 트랜스듀서와 유량 측정 기술

최 두 원*
(이오브이)

1. 머리말

유체의 유량측정은 측정 대상이 되는 유체의 주위 환경에 따라 그 방법이 다양하다. 관로를 흐르는 유체의 유량 측정은 하천과 같이 외부로 노출된 유체에 대한 그것과는 다를 수가 있다. 관로 내부 유체에 대해서는 여러 가지의 측정방법이 사용되어 왔는데 대표적으로, 터빈유량계, 마그네틱 유량계, 벤추리 유량계, 볼텍스 유량계, 오리피스 유량계, 코리올리스 유량계 등이 있다. 측정 대상 유체의 종류에 따라 필요한 방법의 유량계가 선정된다. 대부분의 유체에 모두 적용할 수 있는 측정 방법으로 주목 받고 있는 것이 초음파를 이용한 유량계이다.

하천과 같은 환경에서의 넓은 지역의 유량 측정 방법도 원리는 관로 유량 측정에 사용되는 방법들과 유사하나 측정 구역내에서 이동하면서 반복적으로 측정하여 전체 구간의 유량을 계산하는 방법을 사용하고 있다. 우리나라에서는 홍수 때처럼 하천에 직접 접근이 어려운 때에는 봉부자 방법을 이용하여 거리와 시간을 측정하여 유속을 추측하기도 한다.

하천에서의 이러한 방법들은 많은 인력과 시간이 투입되어야 하고, 불편하고 불확실하며 또한

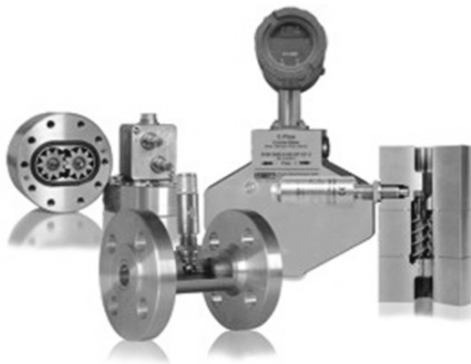
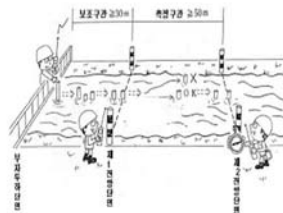


그림 1 관내 유량 측정 장치들



(a)



(b)



그림 2 하천유량 측정 방법의 예 (a)도섭법 (b) 봉부자법

* E-mail : dchoi.eofe@gmail.com / (02) 3158-3178

경우에 따라 사고가 따를 위험이 있다. 이러한 이유로 좀 더 간편하고 경제적이며 신뢰성 있는 방법이 요구되고 있는데, 이 분야에서 대안으로 여겨지는 기술이 초음파이다. 초음파 유량계는 초음파 트랜스듀서를 이용하여 어떤 종류의 유체에 대하여도 그 속도를 측정하여 유량을 계산해 낼 수 있다. 유체의 온도, 밀도 그리고 점도에 의해서 영향을 받기는 하지만 매우 정확하고 간편한 기술이다. 간편하다는 것은 관리적인 차원에서도 적용되는 장점으로써, 기계적으로 움직이는 부품이 없기 때문이다.

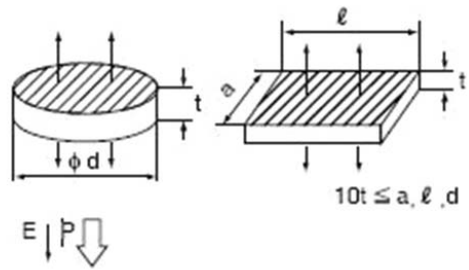
2. 초음파 트랜스듀서

초음파 유량계에서 트랜스듀서는 전체 시스템의 눈과 귀의 역할을 한다. 흔히, 초음파 시스템에서 트랜스듀서의 중요성은 카메라에서 렌즈의 중요성에 비유되기도 한다. 그만큼 전체 시스템의 성능을 가장 근본적으로 좌우하는 요소 부품임을 강조하는 것이다. 트랜스듀서는 물리적 현상을 측정 가능한 전기 신호 즉, 전압이나 전류로 변환하는 요소이다. 초음파 트랜스듀서는 전기 신호를 인가하여 물리적 진동인 초음파를 발생하고 또 반대로 물리적인 힘(변위, 속도 등)을 감지하여 전기적 신호를 발생한다.

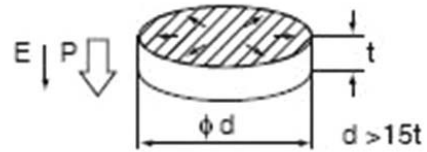
초음파 트랜스듀서의 재료로 사용되는 것은 수정, 석영 등 초기에 발견된 광물로부터 레이저, 전자기, 정전용량(capacitive) 디바이스 그리고 압전 폴리머, 압전 세라믹에 이르기까지 다양하다.

그 중에서 압전 세라믹이 가장 광범위하게 사용되고 있고 초음파 유량계에 사용되는 트랜스듀서의 재료도 대부분 압전 세라믹이다.

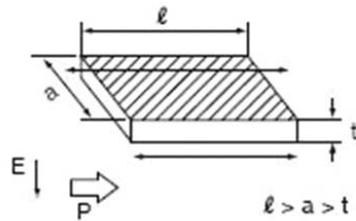
압전(piezoelectricity) 효과는 널리 알려진 것처럼 기계 에너지와 전기적 에너지가 상호 변환하는 작용이다. 압전 세라믹의 진동 거동에 따라 모



(a) 33 모드



(b) 31 모드



(c) 15 모드

E: 전기장 방향, P: 전극방향

그림 3 압전 세라믹의 다양한 진동 모드

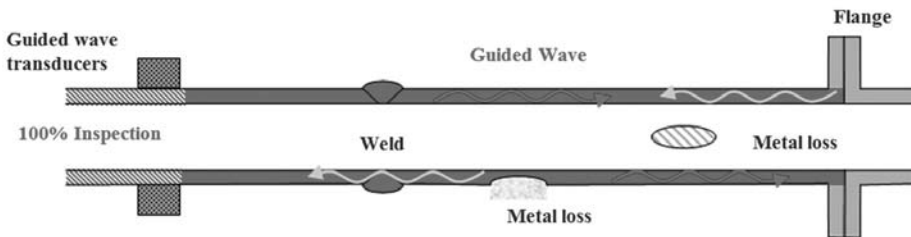


그림 4 유도초음파(guided-wave ultrasound) 기술

드(mode)를 몇가지로 나눌 수 있다. 33 모드는 두께 방향 모드로 세라믹의 진동 방향과 전극 배열 방향이 평행한 경우이고, 31 모드는 반경 방향 모드로서 세라믹이 전극 배열 방향의 연직 방향으로 진동하는 경우이다. 이 두 경우 모두 전기장 방향은 전극 배열 방향과 동일하다. 15 모드는 예외적인 경우로, 전기장 방향이 전극 배열 방향과 연직 방향으로 연결이 되어 있어서, 이 방향으로 전기적 신호를 인가하면 세라믹이 shear 모드로 진동을 하게 된다.

진동모드에 따라 초음파의 사용 용도가 달라지는데, 일반적으로 두께 방향 진동 모드가 가장 일반적인 경우로, 소나(sonar), 비파괴검사(NDT), 유량측정 등의 계측 그리고 의료용 등 산업 전반에 사용이 되며, 반경방향 진동 모드는 산업용 계측, 소나 등 저주파 대역을 요구하는 분야에서 주로 사용이 된다. 15모드의 shear 진동은 일반적으로 사용되는 모드는 아니며 유도 초음파라고 불리는 비파괴검사용 장거리초음파 기술(long range ultrasonic technique)에서 사용된다.

3. 압전 복합 트랜스듀서

압전 세라믹은 약 50여년 전에 개발되었고, 이전의 단결정 압전체와 비교할 때 두가지 관점에서 큰 진보를 이루었다. 압전 세라믹 재료는 첫째는 electromechanical coupling coefficient가 월등히 뛰어나고, 둘째는 비교적 복잡한 형상도 상대적으로 쉽게 성형해 낼 수 있다는 점이다. 이러한 이유로 초음파 유량계를 비롯한 많은 초음파 시스템에 압전 세라믹이 트랜스듀서 재료로 자리를 잡고 있다. 그럼에도 불구하고, 압전 세라믹이 아직도 유체를 매질로 하는 환경에서 전기적 기계적 신호간의 변환을 주도하는 트랜스듀서로서 최적의 물성을 가지고 있다고 보기는 어렵다.

밀도 및 조성에 따라 차이가 있지만 일반적으

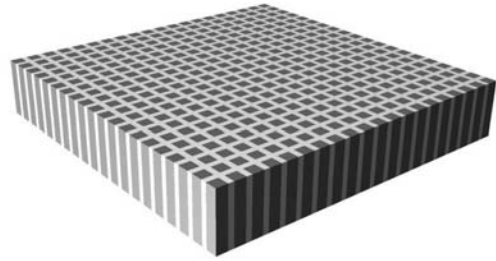


그림 5 압전 복합재 (1-3배열)

표 1 압전 세라믹 vs. 압전 복합재

	PZT 5H	압전 복합재 (50%)
음향 임피던스 Z (MRayl)	34.5	16.8
V (m/s)	4600	3773
h_{33} (V/m)	1.78×10^9	2.08×10^9
c_{33} (N/m ²) stiffness	1.59×10^{11}	0.63×10^{11}
ϵ_r^s permittivity	1470	789
k_t	0.51	0.69

로 PZT 압전 세라믹의 음향 임피던스가 보통 35 MRayl로서 물의 그것(약 1.5 MRayl)과 비교하면 엄청나게 높다. 이것은 압력 전달 상수(direct pressure transmission coefficient)가 겨우 $T_p=0.082$ 정도로 저조 하고, 비록 임피던스가 7.15 MRayl 정도인 메칭 레이어를 도입하여 압력 전달을 돕는다 하더라도 $T_p=0.118$ 정도로 여전히 매우 낮다. 압전 세라믹은 센서의 형상에 따라 원하지 않는 횡방향 진동(lateral mode)이 발생되어, 정작 센서의 기동의 근간이 되어야 할 두께 모드 진동을 상쇄 시킬 수도 있다. 그럼에도 불구하고 두께방향의 electromechanical coupling(k_t)가 0.5 정도로서 수정(quartz)이나 LiNbO₃ 등의 단결정 압전체 보다는 월등히 높지만, 아직 좀더 향상의 여지가 남아 있다. 이러한 맥락으로 1970년대에 압전성(piezoelectric properties)을 가진 세라믹과 기계적 물성(mechanical properties)을 이용할 수 있는 폴리머(polymer)를 혼합한 압전 복합재(piezoelectric

composite)이 처음 선보였다.

초기에는 이 두 재료를 이상적으로 연결할 방법이 명확치 않았으나, 오랜 노력과 연구를 통해 압전 세라믹 기둥들 사이에 폴리머를 채우는 1-3 연결방식이 가장 이상적인 물성을 나타내게 됨을 발견하였다.

표 1은 압전 세라믹과 압전 복합재(세라믹+고경도 에폭시)를 수중음향 관점에서 그 물성들을 비교한 예이다. 복합재가 훨씬 낮은 음향 임피던스를 가지고 있으며, 비교적 높은 압전 상수, 낮은 stiffness 그리고 우수한 coupling 상수를 가지고 있다. 복합재는 감소된 permittivity 만 부정적인 물성으로 나타날 뿐 전반적으로 수중음향 센서로서는 압전 세라믹에 비하여 월등히 우수한 성능을 낼 수 있는 물성이 잠재되어 있다. 특별히 낮은 임피던스는 압력 전달률을 향상시켜 ($T_p=0.165$), 메칭 레이어를 도입한 압전 세라믹보다 유체(특히 액체)에서의 음향전달에 유리하다.

표 1에 언급된 이점 이외에도, 각 채널 간에 균일한 성능을 낼 수 있고, 복잡한 3차원 형상이 가능하고, 빔 패턴을 용도에 맞게 조정할 수 있는 장점들로 인하여, 배열 센서(array), 3차원 초음파 카메라 등 첨단 초음파 시스템들에 대하여 급속도로 파급효과를 일으키고 있다. 압전 복합재를 이용한 초음파 트랜스듀서는 다양한 응용 분야에서 연구 개발의 단계를 넘어 대량 생산 단계로 까지 발전하였다. 이러한 경향 속에서 산업용 유량 측정 장치에도 압전 복합재를 이용한 트랜스듀서가 점차 많이 적용되고 있다.

4. 초음파 트랜스듀서를 이용한 유량 측정 기술

머리말에서 언급한 것과 같이 초음파 기술은 측정 매질이 되는 유체의 종류에 구애 받지 않고 속도를 측정하여 유량을 얻어낼 수가 있고 또한 움직이는 부품이 없으므로 기계적인 고장의 염

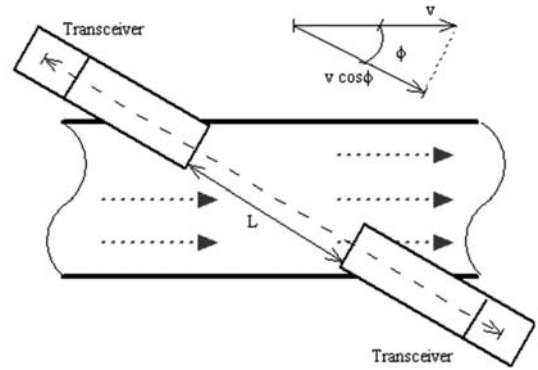


그림 6 시간차 유량계 원리

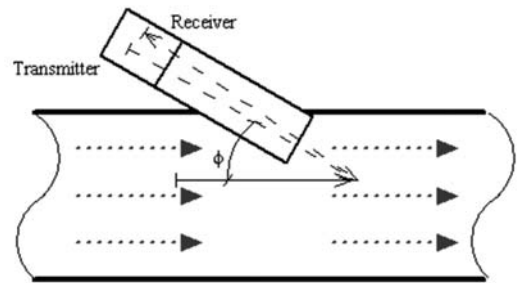


그림 6 도플러 유량계 원리

려가 없는 장점, 그리고 측정 결과가 상대적으로 정밀한 이유로 유량 측정에 각광을 받는 기술이다. 이것은 다시 세가지 정도로 구분이 되는데, (1) 시간차 유량계(transit-time Flow-meter) (2) 도플러 유량계(doppler flow-meter) 그리고 (3)개수로 유량계(open channel flow-meter)이다. 시간차 유량계/도플러 유량계는 설치 위치에 따라 다시, 삽입형(intrusive type)과 관외 부착형(clamp-on type)으로 나눌 수 있다.

(1) 시간차 유량계

초음파가 유체를 통과할 때, 유체가 움직일 때는 정지했을 때에 비해 음파의 속도는 변화한다. 유체가 통과하도록 서로 마주 보며 설치된 2개 초음파 트랜스듀서에서 하나는 유체의 움직임에 대하여 순방향으로 다른 하나는 역방향으로

초음파를 발사시키고 서로가 그 신호를 받는다.

두 트랜스듀서 사이 음파 전달 시간은 순방향(downstream) 유체에 대하여 $td = L / (c + v \cos \Phi)$ 이며(이때, $L =$ 두 트랜스듀서 거리, $c =$ 유체의 음속, $v =$ 유속) 역방향(upstream) 유체에서의 음파 전달 시간은 $tu = L / (c - v \cos \Phi)$

이 두 시간의 차이는 $t = td - tu = 2 v L \cos \Phi / (c^2 - v^2 \cos^2 \Phi) = 2 v L \cos \Phi / c^2$ (4) 이며, 이렇게 하여 유체의 속도를 정확하게 구해낼 수가 있으며 이를 이용하여 유량을 산출해 낸다.

(2) 도플러 유량계

도플러 유량계는 하나의 트랜스듀서로 초음파를 흐르고 있는 유체에 조사하면 조사된 초음파는 유체중의 부유물이나 기포로부터 신호가 반사된다. 이때 기포나 미세 부유물은 유체와 함께 같은 속도로 이동하고 있는 것으로 가정하면, 이들에 의해 반사된 신호는 그 주파수가 초기 조사된 신호의 주파수와 비교하여 기포나 부유물의 속도에 따라 변하게 된다. 이것이 도플러 효과인데, 유체의 속도는 다음 식으로 구할 수 있기 때문에 조사 신호와 반사신호의 주파수 차이를 도출해 내는 것이 핵심적인 원리이다. 이 도플러 주파수를 도출해내는 기술로는 FFT법, 위상차법, PRF법 등이 있는데 유속의 크기, 수심 및 관의 크기 등 측정 환경에 따라 적절한 방법을 선택하여야 한다.

$$v = c (f_r - f_t) / 2 f_t \cos \Phi$$

($f_r =$ 반사 신호의 주파수, $f_t =$ 조사 신호의 주파수, $c =$ 유체내의 음속)

관내 유량 측정법의 두 라이벌인 시간차 유량계와 도플러 유량계는 응용 방법에 따라 선호도가 다르기는 하지만, 일반적으로 6 대 4 정도로 시간차 유량계가 더 많이 사용되고 있다. 하지만 기술의 발달에 따라 이 구도는 언제든지 역전될

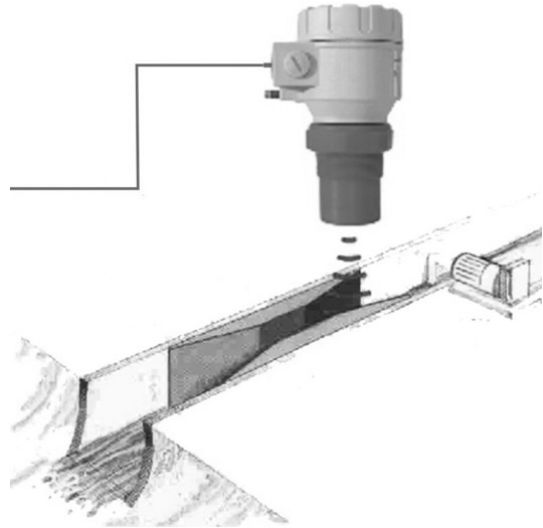


그림 7 계수로 유량계 작동 원리 (flume형)

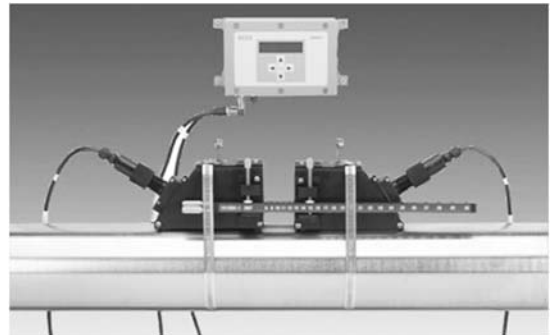


그림 8 장착 유량계

소지를 가지고 있다.

(3) 개수로 유량계

개수로 유량계는 공기중 초음파 또는 수중 초음파를 이용하여 개수로의 수위를 측정하여 수로의 형상 데이터로부터 유량을 환산해내는 방법이다.


크게 위어(weir)형과 플룸(flume)형으로 나누어진다. 위어형은 수로에서 유체흐름의 직각방향으로 격벽(weir)을 설치하고, 이곳을 넘쳐흐르는 유체의 속도가 위어 직전에서의 수위와 일정한

함수 관계를 가지고 있음을 이용하여 유량을 산출하는 방법이다. 플룸형은 수로에서 유체흐름과 나란한 방향으로 수로의 단면적을 줄여 조임부(flume)를 만들고 이곳에서의 수위와 유량의 함수 관계를 이용하는 방법이다.

(4) Clamp-on 유량계

장착 방법에 따라 장착(clamp-on) 방식도 유량계 중 하나의 종류로 구분 짓기도 하는데, 글자 그대로 유체가 흐르는 파이프에 유량계를 장착하기 위하여 기존 파이프의 일부를 센서가 장착된 파이프로 교체하지 않고, 기존 파이프 외벽에서 트랜스듀서를 장착하는 방식이다. 사용이 편리하고, 장착 및 탈거 비용을 대폭 줄일 수 있는 장점이 있다. 하지만 초음파 신호가 트랜스듀서로부터 파이프를 통과하여 유체를 통하여 전달되기 때문에, 상당한 량의 에너지가 파이프를 통과할 때 감쇄가 된다. 일반적으로 파이프의 직경 대비 파이프 벽 두께는 1/10을 넘지 않아야 하며, 벽 두께가 1인치 이상이 되는 파이프에서는 장착 유량계가 적절하지 않다.

5. 맺음말

이 글을 준비하면서 산업에서 상당한 큰 부분을 차지하고 있는 유량 측정 분야의 많은 기술 중에서 초음파 기술을 이용한 유량계 시장이 이미 수년간 그래 왔던 것처럼 여전히 꾸준하게 빠른 속도로 성장하고 있음을 알 수 있었다. IT 기술이 발전과 더불어서 국내 기업들의 이러한 시장 동향에 대한 발빠른 대응이 가능한 것이 다행스러운 일이다. 유량 측정 시장의 규모와 발전 속도를 볼 때, 그를 위한 가장 전방위에 위치한 기술인 트랜스듀서 기술에 대한 중요성과 앞으로의 기대치도 작지 않음을 쉽게 예측할 수 있다. 그럼에도 불구하고 국내 초음파 트랜스듀서 기술은 성숙단계에 도달하였다고 하기에는 아직 많이 부족함을 인식하게 된다. 초음파 트랜스듀서 기술의 발달은 수중음향, 비파괴검사, 의료 그리고 산업용 측정에 이르기까지 많은 파급효과를 유발하는 중요한 분야로써 깊은 관심을 기울여 할 것이다. 

소음·진동 용어해설

(출처 : “소음·진동 용어해설집”, (사)한국소음진동공학회 발행)

Absorption 흡수(吸收)

임의의 에너지가 다른 형태의 에너지로 비가역적으로 전환되는 것으로, 음향 에너지의 흡수는 흡음으로 나타낸다.

Absorptivity 흡수율, 흡음률

임의의 음파가 어떤 물질에 입사하면 일부는 반사되고, 일부는 흡수 혹은 투과되는 현상이 발생하는데, 이러한 경우 입사에너지에 대한 흡수에너지의 비율을 나타내는 용어이다. 참고) Absorption coefficient

AC(Alternating Current) 교류(交流)

원어적 관점에서 직류는 진동 없이 일정한 상수값을 갖는 형태의 물리량에 대하여, 교류는 평균 0을 중심으로 진동하는 형태의 물리량에 대하여 사용된다. 이와는 달리 계측기에서는, 일반적으로 DC신호는 DC성분을 포함하는 것을, AC신호는 DC성분을 제외한 것을 말한다.