

특집

초음파 트랜스듀서와 유량 측정 기술

초음파 유량 측정 기술

박준관*, 전한용**

(* (주)파나메츠, ** 숭실대학교 대학원 기계공학과)

1. 머리말

초음파를 이용한 측정은 1880년에 Curie 형제에 의해 압전 현상(piezoelectricity)이 발견된 후, 1900년대에 여러 가지 압전 소자를 센서로 사용하면서 시작되었다. 압전 현상 발견 이전인 1877년에 출판된 Lord Rayleigh의 “소리의 이론(The Theory of Sound)”은 음파의 특성들을 이론적으로 규명하여 초음파 측정 원리의 바탕이 되었다. 1939년부터 전자 장비가 초음파 측정에 이용되어 초음파를 이용한 소나(SONAR)가 개발되었고, 20세기 중반에 초음파 비파괴검사 방법과 초음파 유량계가 개발되어 지금까지 발전을 거듭해 오고 있다.

유량을 측정하는 방법에는 여러 가지가 있다.

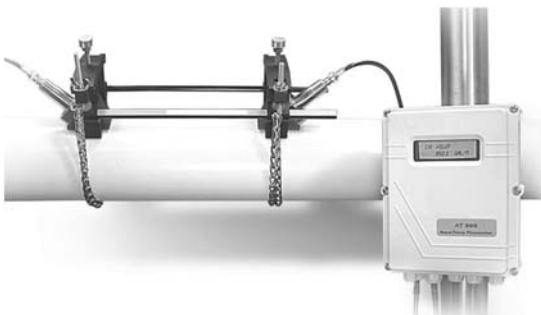


그림 1 외벽 부착 방식의 초음파 유량계

초음파, 벤투리 관(venturi tube), 피토 관(pitot tube), 자기 유량계(magnetic flowmeter), 면적식 유량계(rotameter) 등이 있다. 이와 같은 다양한 방법 중에서 측정 조건에 맞는 최적의 방법을 선택해야 한다. 선택 시 일반적인 고려사항은 정확성, 구입 가격 및 유지비용, 재현성, 설치의 간편성(최소 침습, minimum invasive) 등이다. 초음파 유량계는 관 벽을 손상하지 않고도 설치할 수 있으며, 유동 형상 정보를 알 수 있다. 또한 다른 측정 방법보다 설치 및 유지비용이 저렴하고, 응답 속도가 빠른 장점이 있다. 그림 1은 외벽 부착 방식(clamp-on)의 초음파 유량계의 한 종류이다. 초음파 유량계는 매우 다양한 현장에서 사용되고 있는데 그 분야는 다음과 같다.

- 미립자가 포함되거나 다상 매질의 유체 유동
- 지름 1 mm ~ 10 m 이상의 관에서의 유체 유동
- 폭 1 km 이상의 강, 댐 또는 개방된 수로에서의 유체 유동
- 극저온, 극고온 및 700기압 이상의 높은 압력에서의 유체 유동

2. 초음파 유량계의 기본 측정 원리

초음파를 이용한 유체 측정에는 수동적

* E-mail : joonkwan.park@panamets.co.kr / (042) 671-0015

(passive) 방법과 능동적(active) 방법이 있다. 수동적인 방법으로는 노이즈 모니터링을 이용한 유량 스위치(flow switch)와 가스 누출 탐지기 등이 있다. 이는 유체의 난류(turbulence) 유동으로 인해 발생하는 노이즈를 감지하여 스위치를 작동시키거나 가스의 누출을 탐지하는 방식이다. 능동적인 방법으로는 하나의 경로 또는 여러 경로를 지나는 음향 전달(acoustic transmission)을 이용한 유량계가 있다. 초음파 유량계는 3가지 원리의 능동적인 방법이 이용되는데 전달 시간차(transit time), 도플러(Doppler), 와류 방출(vortex-shedding) 방법이다. 이와 같은 3가지 원리에 대해서는 다음에서 자세히 다룬다.

가장 일반적인 초음파 유량계는 전달 시간차 방법을 이용하는 방식이다. 이 유량 측정 방식의 기본 원리는 다음과 같다. 유체의 유동 속도가 낮은(마하수 < 0.1) 파이프에서의 유동이라고 가정하고, 전파 거리 L , 유동 속도 V , 음속을 c 라고 하면, 상류와 하류를 전파하는 시간차는 아래와 같은 식으로 표현된다.

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{2LV}{c^2} \quad (1)$$

음속 c 는 온도에 관한 함수이므로, 온도에 따라 보정을 하지 않으면 오차가 발생한다. 따라서 음속에 관한 항을 제거하여 상류와 하류를 전파하는 주파수의 차이로 표현된 아래와 같은 식을 사용하기도 한다.

$$\Delta f = f_2 - f_1 = |1/t_2 - 1/t_1| = \frac{2V}{L} \quad (2)$$

이 식이 도플러 방법의 원리로서 적용된다.

와류 방출 방법의 측정 원리는 와류의 주파수를 측정하는 방법으로 와류 주파수 f , Strouhal 수 S , 파이프 직경을 d 라고 하면 다음 식으로 계산할 수 있다.

$$f = \frac{SV}{d} \quad (3)$$

3. 전달 시간차 방식

초음파의 전파 시간을 측정하는 방식의 유량계는 1928년부터 연구되었다. 최근에 주로 사용되고 있는 파이프 외벽 부착 방식은 1951년에 최초로 보고되었으며, 1964년에는 Knapp이 다회선 가우시안 구적법(multi-chord Gaussian quadrature)을 고안하여 단회선의 단점을 보완한 방법을 연구하였다.

이러한 방식의 유량 측정은 일반적으로 한 지점에서 같은 경로의 상류 방향과 하류 방향의 유동 속도 V 를 측정하여 유량을 계산한다. 유량계는 일반적으로 상류 방향 신호와 하류 방향 신호를 동시에 발생시키거나 혹은 약간의 간격을 두고 발생시킨다. 이때 상류 및 하류를 통과하는 초음파 신호의 전파 시간을 측정하여 유동 속도 V 를 계산한다. 전달 시간차 방식의 유량계로 측정하는 대상은 주로 깨끗한 액체이지만, 높은 압력과 온도의 플레어(flare) 가스도 측정 가능하다. 온도 범위는 극저온에서 300 °C이상의 온도에서 사용할 수 있으며, 정확성은 0.5%이고, 응답속도는 1 ms 이하이다. 그림 2는 파이프에서 초음파 전파에 대한 속도 벡터를 나타낸 것이다. 이 그림으로부터 하류 방향으로 전파하는 초음파의 시간은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$t_{DN} = \frac{L_p}{V_{SO} + \bar{V}_f \cos \theta} \quad (4)$$

또한, 상류 방향으로 전파하는 초음파의 시간은 다음 식과 같다.

$$t_{UP} = \frac{L_p}{V_{SO} - \bar{V}_f \cos \theta} \quad (5)$$

위의 상류 및 하류로 전파하는 초음파의 시간을 표현하는 식으로부터 다음과 같은 관계식을 유도할 수 있다.

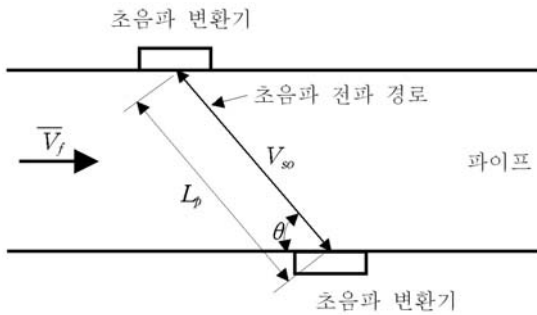


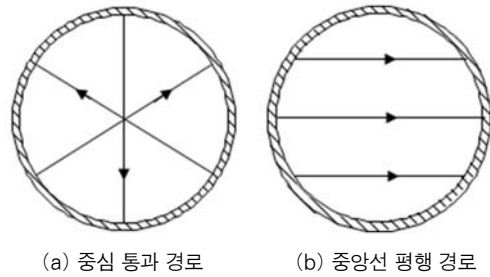
그림 2 파이프내의 초음파 전파에 대한 속도 벡터

$$\frac{1}{t_{DN}} - \frac{1}{t_{UP}} = \frac{t_{UP} - t_{DN}}{t_{DN}t_{UP}} = \frac{2 \cos \theta}{L_p} \bar{V}_f \quad (6)$$

식 (6)은 트랜스듀서가 직접 유체에 닿아 있는 침습형의 유량계에 적합한 식이며, 완충 봉(buffer rod) 또는 외벽 부착 방식의 유량계에서는 초음파의 전파 경로에 대한 각도를 고려하여야 한다.

전달 시간차 방식의 유량계를 사용할 때, 파이프의 직경이 중요하다. 파이프 직경 1 mm 또는 그 이하에서는 유동울과 전파 시간차가 매우 작으므로, 오차가 크게 발생할 수 있어 측정에 주의해야 한다. 파이프 직경이 커지면 초음파의 감쇠가 문제된다. 거리에 따른 회절 손실 및 초음파의 산란과 흡수로 인하여 급격한 손실이 발생한다. 주파수가 낮아지면 회절 손실이 증가하므로, 거리가 길어지면 높은 주파수의 트랜스듀서를 사용해야 한다. 또한 높은 압력(80 bar 이상)과 높은 온도(297 ℃ 이상)에 적용하기 위해서는 완충 봉(buffer rod)을 파이프 외벽에 설치하여, 트랜스듀서를 높은 온도로부터 보호해야 한다.

파이프에서 유량을 정확하게 측정하기 위해서는 파이프 내벽이 매끈하고, 직선이며, 열 구배나 유동의 교란 등이 없어야 한다. 그러나 실제의 관은 90°의 곡선(elbow) 관이나 밸브 등이 존재하여 소용돌이(swirl)와 같은 유동 교란이 발생하고, 내벽은 스케일 등으로 거칠다. 다회선 초음파 유량계는 이러한 실제적인 문제점에서 정확한 측



(a) 중심 통과 경로 (b) 중앙선 평행 경로

그림 3 3회선 측정 방식의 예

정이 가능한 최선의 방법이다. 만약 소용돌이나 교차 유동(cross-flow)이 없으면 3회선으로 충분히 정확한 유량을 측정할 수 있다. 그림 3에 3회선 측정 방식의 예를 나타내었다.

4. 도플러 방식

초음파 도플러의 원리와 방법은 1923년 Chilowsky와 Langevin에 의해 특허가 출원되었고, 잠수함의 움직임 및 속도 측정과 같이 바다에서 주로 사용되었다. 1970년대 들어서 EDO Western사에서 침습형 트랜스듀서를 사용한 도플러 방식의 초음파 유량계를 개발하였으며, 외벽 부착 방식의 초음파 도플러유량계는 Polysonic사에 의해 1970년대 후반에 개발되었다.

도플러 방식은 전달 시간차 방식과는 달리 주파수 영역에서 신호를 분석하는 방법이다. 전달 시간차 방식은 하나의 상(single-phase)에서 초음파의 전파에 의하여 측정하지만, 도플러 방식은 다상(polyphase)에서 초음파의 반사로 측정한다. 움직이는 물체에 초음파가 반사되면 산란(scatter)이 발생한다. 흐르는 유체에 고체 입자나 공기 방울 등의 산란을 일으키는 산란자(scatterer)가 있으면, 초음파는 이러한 산란자에 반사된다. 산란자의 속도는 움직이는 유체의 속도에 비례한다. 초음파 도플러 유량계는 산란자에 반사되는 초음파의 주파수를 분석하여 속도

를 측정하는 원리로 동작한다. 일반적으로 유체에서 초음파의 범위는 0.5~10 MHz이다. 산업용으로 사용하는 주파수는 1 MHz 이하로 주로 0.6 MHz 근처를 많이 사용한다.

초음파 도플러 유량계의 성능에 영향을 미치는 몇 가지 원인이 있는데 속도 구배, 난류와 같은 비축 유동(nonaxial flow), 산란자의 분포, 산란자로 인한 주파수 범위 확대 등이다. 이와 같은 영향을 줄이고 정확한 측정을 위하여, 1984년 Waller가 제안한 방법들은 다음과 같다.

- 측정 유체는 액체이며, 속도가 충분히 커야함 (최소 유동 속도: 0.2~0.7 m/s)
- 유체가 파이프에 가득 차 있으며, 완전히 발달된 유동
- 레이놀즈 수 4,000 이상의 난류 유동

5. 그 이외의 방식들

5.1 스펙클 추적(speckle tracking) 방식

스펙클 추적 방식은 1985년에 혈류의 유동 연구에서 시작되었던 방법으로 1987년에 Jacobson에 의해 산업 현장에 사용되었다. 이 방식은 펄스를 산란된 매질에 투과하여 되돌아오는 신호의 상관관계를 분석하는 방법이다. 도플러 방법과 유사하게 유체 내에서 산란을 이용하나 초음파 도플러 유량계에 비해 측정 범위가 넓고, 아주 낮은 속도도 측정 가능한 장점이 있다. 그러나 초음파 도플러 유량계에 비해 가격이 고가이다. 또한 전달 시간차 방식과 비교하여 아주 작은 직경의 파이프에서도 측정 가능한 장점이 있다.

5.2 와류 방출(vortex-shedding) 방식

1970년대에 사용한 와류 방출 방식의 초음파 유량계는 와류가 주위 유체와의 관계 속도에 따라 주기적으로 발생하고, 속도에 비례하는 주파수를 가지고 있다는 원리에 기초를 두고 개발되

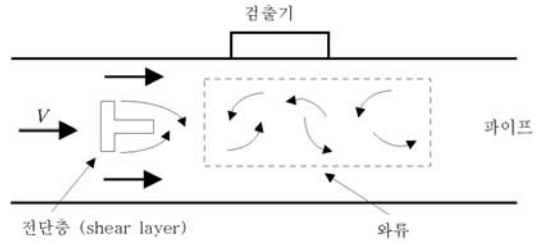


그림 4 와류 방출 방식의 측정 원리

었다. 그림 4는 와류 방출 방식의 측정 원리를 나타낸 그림이다. 유체 내의 압력과 속도가 변화하면 그 결과로 와류가 방출된다. 압력 또는 초음파 감지기로 발생된 와류의 주파수를 측정하여 유동 특성을 알아내는 방식이다.

5.3 태그 상호 상관(tag cross correlation) 방식

초음파 태그 상호 상관 방식의 유량계는 알려진 거리의 하류를 통과하는 특성 태그의 시간을 측정하는 방법이다. 태그는 난류나 불연속, 열, 굽어진 관 등으로 발생하는 유체의 고유한 특성을 포함한다. 일반적인 태그 상호 상관 방식은 난류나 밀도 변화와 같이 자연적으로 발생하는 태그로, 두 개 이상의 음향 빔의 상호작용을 이용한다. 이 장치는 고가의 가격으로 1985년까지 상업적인 사용은 제한적이었다. 이 방법은 도플러 방식이나 스펙클 추적 방식과는 달리 음속을 알지 못해도 유동 속도를 구할 수 있다는 장점이 있다.

6. 초음파 유량계의 일반적인 측정 알고리즘

초음파 유량계의 측정 알고리즘은 매우 다양하다. 같은 전달 시간차 방식이어도 잡음(noise)을 어떻게 제거할 것인지, 어떤 방식으로 시간차를 측정하면 정확한지 등등 특허도 수백 건이 넘는다. 여기에서는 일반적인 알고리즘에 대하여 설명한다. 그림 5는 초음파 유량계의 측정 알고리즘 개략도이다. 신호 발생기(signal generator)에서 펄스 또

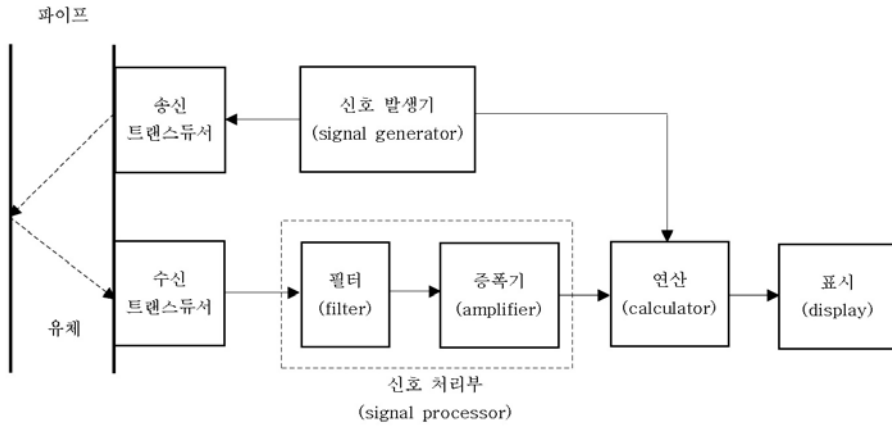


그림 5 초음파 유량계의 측정 알고리즘 개략도

는 연속된 사인파와 같은 신호를 송신 트랜스듀서 (transducer)에 인가한다. 송신 트랜스듀서로부터 발생된 초음파 신호는 유체를 통해 전파하여 수신 트랜스듀서에 전달된다. 수신된 신호는 여러 가지 잡음이 포함된다. 따라서 원하는 신호를 얻기 위해서는 몇 가지 신호처리 과정이 필요한데, 필터 (filter)와 증폭기(amplifier)를 사용한다. 먼저 필터를 통해 송신 신호의 주파수가 아닌 다른 주파수 대역의 신호를 걸러낸다. 다음으로 필터링 된 신호를 증폭시켜 측정 가능한 크기의 신호로 만든다. 신호처리를 거친 수신 신호와 송신신호의 시간차를 연산기(calculator)에서 계산하여 유량으로 환산한다. 이 때, 아주 작은 값이지만 전자 장비에 의한 시간 지연(delay)이 발생하는데, 정확한 측정을 위해서는 보정 작업이 필요하다. 이러한 과정을 상류 방향과 하류 방향을 교대로 실시하거나 동시에 실시하여 유량을 측정하게 된다.

최근에는 좀 더 정확한 측정을 위하여 신호의 상관관계(correlation)를 이용하는 방법도 많이 사용된다. 이 방법은 송신 신호와 수신 신호의 상관 관계를 이용하는데, 송신 신호의 파형 및 시간 간격을 불규칙하게 송신한 후, 수신 신호와 비교하여 정확한 수신 신호만으로 시간차를 계산한다. 이러한 방식의 장점은 잡음 제거에 효과적일뿐

만 아니라, 여러 가지 상황으로 인한 오차 발생을 줄일 수 있다. 단, 신호처리 과정이 복잡해지는 단점이 있다.

7. 맺음말

산업 현장에서 측정은 모든 분야에 적용되고 있다. 수많은 분야만큼 한 가지를 측정하는 방법도 매우 다양하다. 다양한 측정 방법 중 어떤 방법이 얼마나 정확하고 빠르며, 저렴하고 간편하게 측정할 수 있는지는 하는 것은 중요한 요소이다. 초음파 유량계는 앞에서 설명한 것과 같이 정확한 측정이 가능하며, 외벽 부착 방식은 설치가 간편하다. 따라서 최근에는 플랜트와 같은 거대한 산업 현장뿐만 아니라 우리 주변에도 적용되고 있다. 유량 측정은 우리 실생활에도 밀접한 관계가 있다. 생활용수 사용을 위한 상수도, 난방이나 취사를 위한 도시가스 등은 지하에 매설된 파이프를 통하여 집집마다 공급된다. 상수도나 도시가스의 유량을 정확하게 측정하지 않으면, 누설 여부를 알 수 없어 위험한 상황에 이르게 될 가능성도 있다. 이러한 곳곳에 점차 초음파 유량계의 사용이 증가하는 추세이며, 계속 발전된 기술로 요구에 맞는 제품이 개발되고 있다. 