

5. 초음파 유량계

가. 초음파 유량계 원리

1) 개요

초음파 유량계는 1880년 압전효과가 발견된 이후 1918년 초음파 진동 소자가 선박의 항해때에 암초, 빙산, 등의 탐지를 위해 처음으로 사용되었으며, 초음파를 이용한 유량측정은 1920년경 반전파 기술을 이용한 유량계가 나왔고 점차 기술의 발달로 1970년 부터 산업현장에서 유량측정에 폭 넓게 응용되기 시작하였다.

이와 같은 초음파 유량계는 음향식 유량계라고도 부르며, 유체가 흐르고 있는 관내에 음파를 보내면 그 전반 속도는 유체의 흐름 영향을 받아 흐름과 동일방향에 대해서는 정지되어 있을때의 음속에 유속을 가한 속도로 전해지고, 반대방향에는 반대로 유속을 뺀 속도로 전해진다. 이 두가지 방향의 음속의 차를 측정하면 유속이 구해지고, 이것을 이용하여 유체의 체적 유량을 측정할 수 있도록 한 것이 초음파 유량계이다.

초음파를 이용한 유속유량 측정방법은 아래와 같이 많으며, 현재 실용화 되고 있는 것이 전반 속도차법과 도플러법이 있다. 전반 속도차법은 정수 공업 용수, 농수등 비교적 맑은물을 대상으로 하고, 도플러법은 하수, 공장 폐수, 공장배수등 이물을 다량 함유한 오수를 측정 대상으로 한다.

구분	능동.수동별 유량계 종류	측정 원리	검출하는 량	측정법의 약칭	비 고
초음파 유량계	능동형	전반속도의 변화	위상차 시간차 주파수차	전반속도차법 위상차법 시간차법 싱어라운드법	가장 넓게 사용 상수도용
		빔의 변위	수파 감도차	빔의 편위법	
		도플러 효과	변화 주파수	도플러법	하수, 배수용
	수동형	유체 발생음	음의 크기	청음법	주파수도 관계

특징은 대유량 측정에 이용되고, 이 방식은 두꺼운 금속관 외부로 부터 유량 측정이 가능하므로 기존 설치된 배관에 별도의 가공을 하지 않고도 유량 측정이 가능하다.

또한 유체 유속 방해없이 유속측정이 가능하고 초음파가 전달되는 유체 라면 어떠한 유체 유속 측정도 가능하며, 고점도액, 비전도체액 또는 가스의 유속 측정도 가능하며, 측정대상의 외형적 크기와의 무관해서 하천등의 유속도 측정이 가능하다.

2) 측정원리

가) 전반 속도차법

유체가 흐르고 있는 유체 동일면상의 서로 반대방향에서 초음파를 발사 하면 유체의 흐름과 같은 방향인 하류측으로 발사된 초음파와 그 반대방향인 상류측으로 발사된 초음파가 같은 거리를 통과하여 각각 반대편의 수신기까지 도달하는데 걸리는 시간의 차가 생기게 된다. 이와 같은 차를 직접 시간차로 검출하느냐 위상차로 검출 하느냐 또는 주파수로 검출 하느냐에 따라서 각각 시간차법, 위상차법, 주파수법으로 구분한다.

(1)전반 시간차법

초음파가 유체를 통과할때 유체가 흐르고 있는 상태에서는 정지 경우에 비해 유속분 만큼 초음파 진행속도는 변화한다. 즉, 그림에서와 같이 2조의 초음파 송수신기 T_1, R_1 및 T_2, R_2 를 유체중에 대응해서 설치한 후 한쪽은 흐름과 동일 방향으로 다른 쪽은 흐름과 역방향으로 초음파를 발사시킨다.

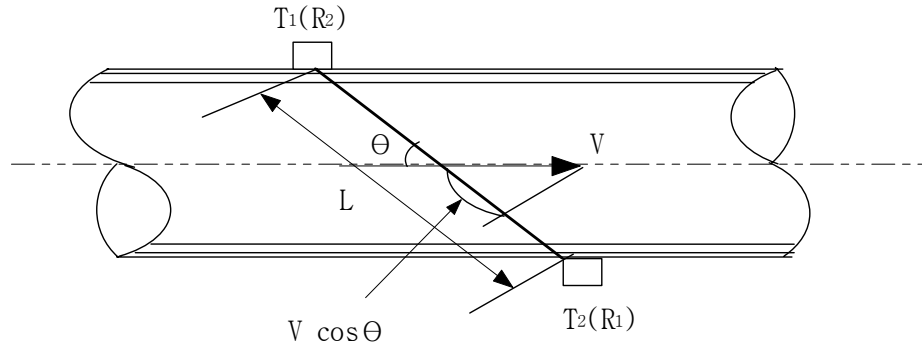
정지 유체중의 음속을 C , 유체유속을 v 라 하면은 순방향 초음파의 진행속도는 $C + v \cos \theta$, 역방향 초음파의 진행 속도는 $C - v \cos \theta$ 가 되고, $T_1 - R_1$ 및 $T_2 - R_2$ 간 거리를 L 로 동일한 상태에서 $T_1 \rightarrow R_1$ 순방향 초음파 도달 시간은 t_1 , $T_2 \rightarrow R_2$ 역방향 초음파 도달시간을 t_2 라 하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$t_1 = \frac{L}{C + v \cos \theta} \quad t_2 = \frac{L}{C - v \cos \theta}$$

여기에서 유체를 액체로 생각하면 일반적으로 액중 음속 C 는 1500 m/s정도 유속 v 는 공업적 용도로서 수 m/s를 넘지 않으므로 $C^2 \gg v^2$ 가 되고, 따라서 시간차(Δt)를 구하는 방법은 아래와 같으며, 결과식에서 L, C 값을 알면 시간차를 측정 하므로써 유속 v 를 구하는 것이다.

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{L}{C - v \cos \theta} - \frac{L}{C + v \cos \theta} = \frac{2Lv \cos \theta}{C^2 - v^2 \cos^2 \theta}$$

$$= \frac{2Lv \cos \theta}{C^2} \quad (C^2 \gg v^2 \text{ 이므로})$$



<그림 6-13 전반 시간차법의 측정원리>

직경 1 m의 관로상에 물의 유속이 100 m/s 일때 초음파 유량센서를 45° 로 설치하면 Δt 는 약 10^4 ns이고, 관직경이 10 cm/s 인 경우에는 Δt 는 약 100 ns가 된다. 따라서 Δt 를 증가시키기 위해 L을 증가시키는 다중전파 방법이나 동축 전파 기술을 채택하고 있다.

물속에서 온도변화에 따른 음속변화는 물의 온도가 20 °C일때 1 °C의 온도 증가에 대하여 음속이 약 0.2 % 변하게 되며, 이의 영향을 유속을 구하는 식에 대입하면 유속 측정시 약 0.4 % 오차를 유발하게 된다.

따라서 시간차법에 의한 초음파 유량계에 있어서는 음속 변화의 영향을 시간차를 측정하지 않고, 그 역수인 주파수 차이로 측정하는 싱어라운드 방식을 사용함으로써 해결하고 있다.

(2) 주파수차법 (싱어라운드 방식)

초음파 송파기 T₁ 로 부터 초음파 펄스가 유체 흐름 방향으로 발사되어 시간 t초 후에는 수파기 R₁ 에 수신되는 상태에서 그때 증폭기 A에서 수신 신호를 증폭하여 그 출력을 T₁ 에 가하면 T₁ 으로 부터는 다시 초음파 펄스

가

발사되고 이후에는 반복하여 행해진다. 반복주기 t는 아래와 같으며, 반복 주파수 f₁ 은 아래 오른쪽의 식과 같다 .

$$t = \frac{L}{C + v \cos \theta} \quad f_1 = \frac{1}{t_1} = \frac{C + v \cos \theta}{L}$$

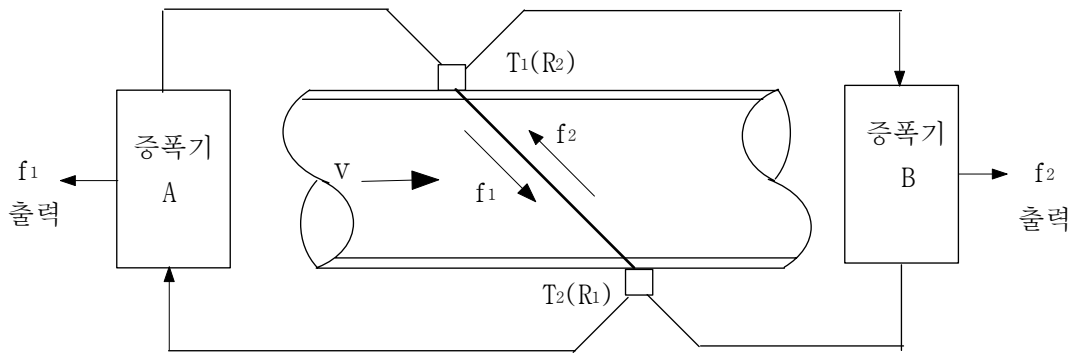
따라서, 반대 방향의 T_2 로 부터 초음파 펄스가 유체 흐름방향쪽으로 발사되어 시간 t 초 후에는 수파기 R_2 에 수신되는 상태에서 반복 주파수 f_2 은 아래의 식과 같다 .

$$t = \frac{L}{C - v \cos \theta} \quad f_2 = \frac{1}{t_2} = \frac{C - v \cos \theta}{L}$$

여기에서 f_1 과 f_2 간의 주파수 차를 Δf 라 하면

$$\Delta f = f_1 - f_2 = \frac{C + v \cos \theta}{L} - \frac{C - v \cos \theta}{L} = \frac{2 v \cos \theta}{L}$$

가 구해진다. 주파수차 방식은 C 를 포함하고 있지 않으므로 음속과는 무관하게 유속을 측정할 수 있다.



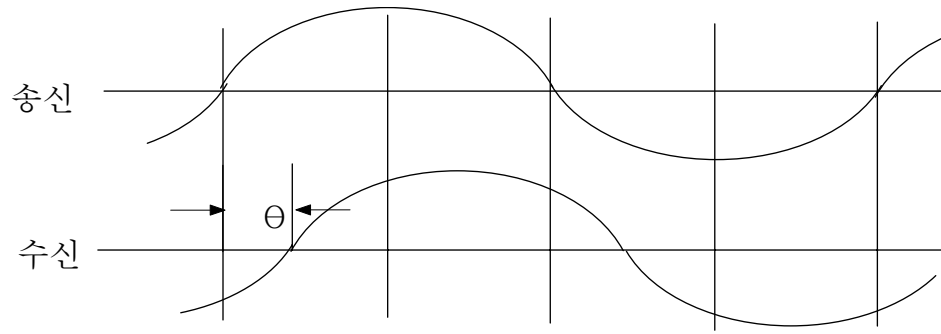
<그림 6-14 주파수차 방식의 초음파 유량계>

(3) 위상차법

위상차법 본질적인 원리는 시간차법과 동일하며 위상차법과 시간차 법 간에는 $\Delta \phi = 2 \pi f t \Delta t$ 의 관계가 성립하므로 다음과 같이 표시할 수 있다

$$\Delta \phi = \frac{2 \pi f t \cdot 2 \cdot \left(\frac{D}{\sin \theta} \right) v \cos \theta}{C^2} = \frac{4 \pi f t D \left(\frac{\cos \theta}{\sin \theta} \right) v}{C^2} = \frac{4 \pi f t D \cot \theta v}{C^2}$$

위상차는 주파수에 비례하므로 주파수를 높게 하는 만큼 측정 감도는 향상 되지만 주파수를 올리면 측정가능 최대 유속값은 내려감으로 적절한 주파수를 선정해야 한다. 또 연속파를 이용할 경우 2개 측정 경계간에는 상호 간섭이 생길 우려가 있다. 아래 그림은 위상차 측정법 원리도이다.



<그림 6-15 위상차법 측정 원리도>

나) 도플러법

도플러란 달리고 있는 기관차가 정지하고 있는 관측자에게 접근할 경우 기관차가 내는 기적의 진동 주파수는 기관차가 관측자를 지나 멀어져 갈 때에 비해 높게 되는 것과 같은 도플러 효과를 이용하여 유속이나 유량을 측정하는 원리이다.

측정 방법은 초음파를 배관내 흐르고 있는 유체중에 조사하면 조사된 초음파는 유체중의 부유물이나 기포로 부터 산란, 반사된다. 이때 기포나 미소한 부유물은 유체와 함께 같은 속도로 이동하고 있는 것으로 볼 수 있으므로 송신과 주파수를 f_t 라 하면 기포나 미소 부유물로 부터 산란, 반사되어 들어온 수신과 주파수 f_r 은 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$f_r (C - v \cos \theta) = f_t (C + v \cos \theta)$$

$$f_r = f_t \frac{C + v \cos \theta}{C - v \cos \theta} = f_t \frac{(C + v \cos \theta)^2}{(C - v \cos \theta)(C + v \cos \theta)}$$

$$= f_t \frac{C^2 + 2v \cos \theta + v^2 \cos^2 \theta}{C^2 - v^2 \cos^2 \theta}$$

그런데 $C^2 \gg v^2 \cos^2 \theta$ 이므로

$$\Delta f = f_t - f_r = f_t \cdot \frac{2v \cos \theta}{C} \quad v = \frac{C}{2 \cdot f_t \cos \theta} \cdot \Delta f$$

가 된다. 따라서 송수신 주파수차이인 편이주파수 Δf 및 v 는 다음과 같다

$$f_r = f_t \frac{C^2 + 2v \cos \theta}{C^2} \approx f_t \left(1 + \frac{2v \cos \theta}{C} \right)$$

도플러법 초음파 유량계를 사용함에 있어 여러 부유물로 부터 반사파를 수신하게 되는데 이들 부유물 가운데는 관의 벽면에 매우 근접한 것들도 있어서 관내의 평균 유속과의 상관 관계가 매우 부정확할 우려도 있다.

도플러 유량계는 깨끗한 물에 대해서 사용할 수 없으며, 유체중에 어느 정도 크기의 부유물이 있어야 한다. 현재는 부유물의 입자크기가 약 30 μm 정도만 되면 사용할 수 있는 도플러 초음파 유량계가 상품화 되어 있다.

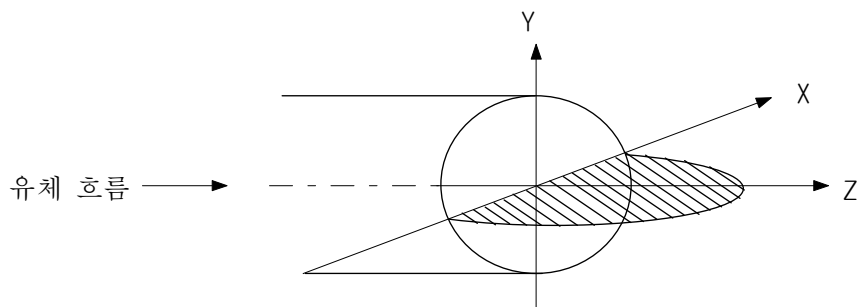
도플러 유량계는 전형적인 사용처가 슬러리나 기포가 포함되어 있는 LPG 등의 유체로 초음파 전방 시간차법의 초음파 유량계로 측정이 불가능한 유체의 유량 측정에 적용할 수 있어서 서로 상호 보완적인 관계를 가지고 있다고 볼 수 있다.

나. 유량계 특성

1) 유속분포의 영향

초음파 유량계에서 측정하게 되는 유속은 초음파 도달 시간차를 이용하는 방식에서는 초음파 전파 경로상 평균유속을 사용하고, 도플러 효과를 이용하는 방식에서는 초음파 조사 부분의 유속을 측정하고 있다. 그러나 유체는 점성의 영향으로 배관내의 벽면 부근에서는 유속이 떨어지고 배관 중심부에서는 최대 유속이 되는 유속 분포를 가지고 있기 때문에 초음파 유량계에서 검출하는 유속은 배관 단면의 실질적인 평균 유속과는 차이가 있게 된다.

초음파 전방 시간차법에 의한 초음파 유량계에서 검출되는 유속은 초음파의 전파 경로상 직경의 유속분포를 평균화한 값, 즉 관내 유속 분포도에서 사선친 면적을 관직경으로 나눈 값으로 다음과 같이 표시할 수 있다



<그림 6-16 관내의 유속 분포>

아래식은 유속 및 평균유속 (v')이다.

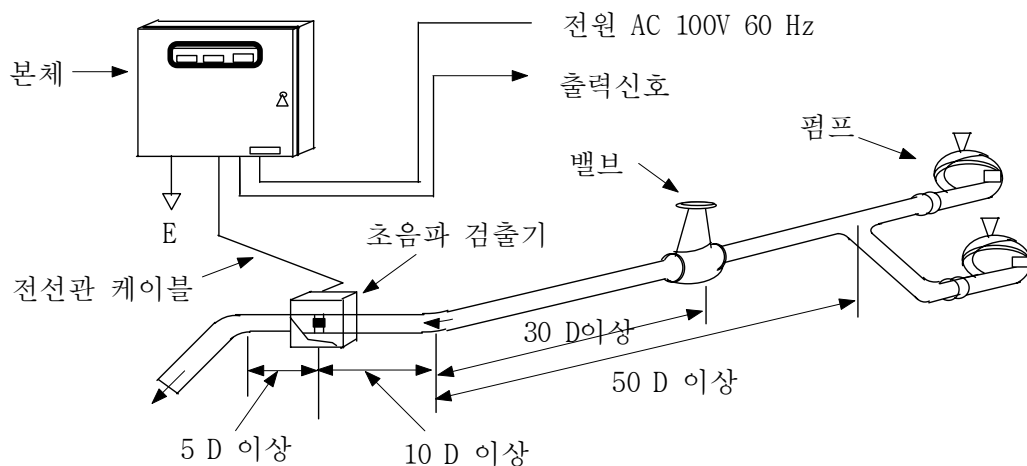
$$v = \frac{1}{D} \int u(X) dx \quad v' = \frac{1}{S} \iint u(X,Y) dx dy$$

따라서 일반적으로 $v' < C$ 이다. 이런 이유로 검출 유속 V 와 실제적인 관내의 평균 유속 v' 의 비를 유량 보정계수 K 라 하여 실제 유량계에 의해 검출한 유속값을 유량 보정 계수로 보정하여 유량을 계산하고 있다.

$$Q = A \cdot v = \frac{\pi D^2}{4} \cdot \frac{v}{K}$$

2) 배관조건에 따른 영향

초음파 유량계는 관내 유속분포가 충분히 발달된 축대칭인 것을 전제로 하고 있어 검출기 전후에는 적절한 배관길이 필요하다. 이는 초음파 전달 시간차의 경우 배관 단면의 직경상의 평균유속을 측정함에 따라 면 유속을 측정하는 전자 유량계와 비교할때 유속분포의 영향을 받기 쉽기 때문이다.



<그림 6-17 초음파 유량계 구성 및 설치방법>

다. 초음파 유량계 선정 및 설치

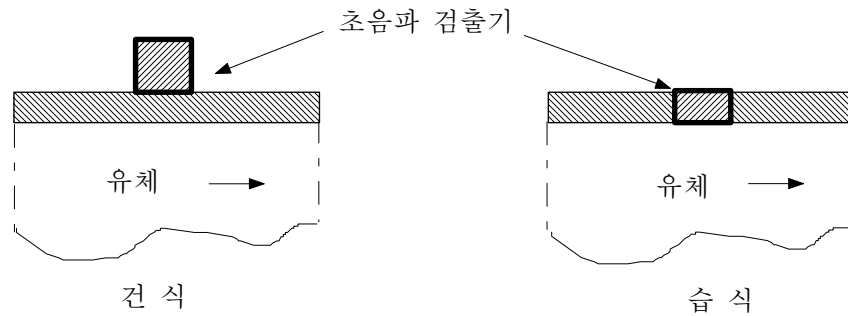
1) 초음파 유량계의 선정

가) 습식과 건식의 비교

초음파 유량계는 센서의 설치 방법에 따라 아래 그림과 같이 배관내에 직접 설치하는 습식(Wet type)과 배관 외부에 클램프등을 이용하여 설치하는 건식(Clamp on type 또는 휴대형)이 있다.

단관형(습식)은 유량계측, 제어등 공정 프로세스 라인에 설치되어 연속적으로 가동하는 것을 목적으로 설계 되었지만, 건식은 짧은 기간의 간헐 측정을 목적으로 하고 있다. 따라서 측정 목적을 명확하게 하여 습식으로 할 것인지, 건식으로 할 것인지를 결정해야 한다.

건식이 습식에 비해서 설치가 간편하다는 점을 제외하고는 측정상 정확도, 정밀도 등의 모든 면에서 습식과 비교할 때 떨어진다는 단점을 가지고 있다.



<그림 6-18 초음파 센서 부착방법>

습식 센서는 실제로 초음파의 전파경로를 임의로 선정할 수 있지만 일반적으로 단관길이를 짧게 하기 위하여 유체흐름과의 교차각도를 45° 로 하는 것이 보통이다. 이 경우 초음파 도달시간차로 감지되는 유동벡터 성분은 0.707 (45° 의 cosine 값) x 장치의 감도가 된다.

건식센서에 있어서 만약 센서를 강관상에 부착시키는 경우 강관에서 액체로 초음파가 진행할때 생기는 굴절현상으로 인하여 유체 흐름과의 교차각도가 $60 \sim 70^\circ$ 정도 되는데 이 경우 감지되는 유동벡터의 성분은 $(0.5 \sim 0.25) \times$ 장치의 감도가 되어서 두 방식으로 사용된 전자 회로의 감도가 동일하다면 습식의 경우가 크고 감도가 좋은 신호를 얻을 수 있게 된다. 또한 습식 초음파 유량센서는 유체를 통과하는 초음파가 원래의 파형을 그대로 유지할수 있으나 건식의 유량 센서는 일단 관벽을 통과하는 과정에서 잃어버리게 되어 결과치인 양 끝의 신호에 의해 동기됨으로서 신호 처리상 재현성이 나빠지게 된다.

그외에 습식은 미리 배관의 정확한 내경을 측정할 수 있어서 치수측정 부정확으로 인한 오차를 줄일 수 있는 장점이 있다.

특히 소구경 배관에서 오차를 현저히 줄일 수 있게 된다.

나) 단일빔과 다중빔 방식

단일빔 방식의 초음파 유량계에서는 원리상 초음파가 통과하거나 반사하는 관내의 한면이나 점에서의 평균유속을 측정하여 여기에 관의 단면적을 곱하여 유동율을 구하게 된다. 그러나 실제로 관내의 유속 분포는 유동율의 변화에 따라 달라지게 되어 유속 분포의 변화에 따른 보정계수의 사용이 필요하다 특히 유동이 층류에서 난류로 바뀌는 천이 영역에서는 보정

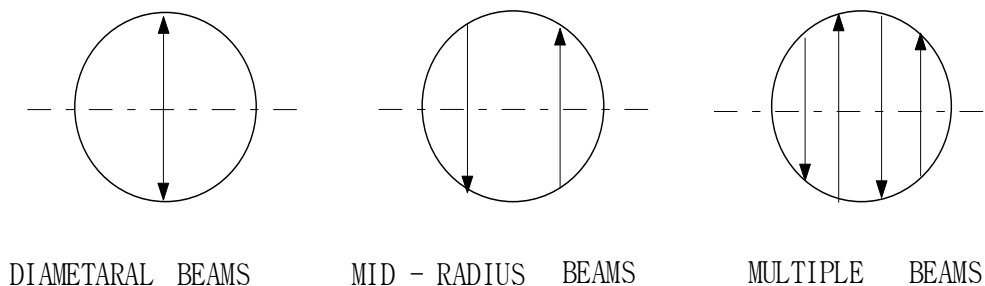
계수값의 변화가 최대 30 % 정도까지 될 수 있다.

비록 충분히 확립된 난류 유동 상태에서도 레이놀즈수가 $10^4 \sim 10^7$ 범위로 변함에 따라 보정계수 값도 최대 3.5 % 정도 변하게 된다.

이와같은 유속 분포에 의한 오차는 비대칭 유동이나 소용돌이에서는 더욱 복잡한 양상을 띠게 된다.

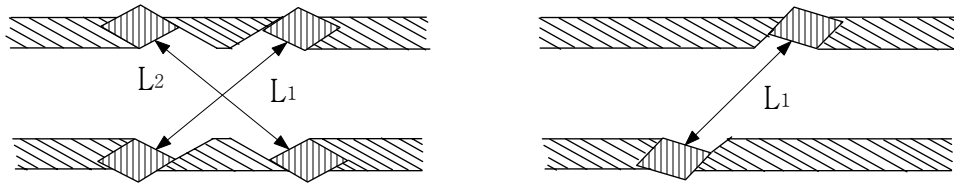
유속 분포에 의한 영향은 기본적으로 변환기를 관의 중심선에서 벗어난 위치에 적절히 설치함으로써 그 오차를 어느정도 최소화할 수 있는데 단일 빔만을 사용할 경우에는 그림과 같이 Mid-radius 한쪽에 변환기의 위치를 설정하는 것이 가장 적합한 것으로 평가되고 있다. 그러나 이같은 것으로는 유량계 상류측에 설치된 곡관, 티, 밸브등으로 인한 비대칭 와류등에는 그 효과를 기대할 수 없기 때문에 같은 상태에서의 측정 정확도 향상을 위해 다중빔 방식을 채택하게 되었다.

다중빔 방식에서 변환기의 위치는 한조의 변환기가 고장 났을경우 신호 처리 장치에서 적절한 조작을 통하여 나머지 변환기만으로 유량을 측정할 수 있는 점이다. 그러나 다중빔 방식은 다음과 같은 단점을 가지고 있는데 유의 하여야 할 것이다.



<그림 6-19 초음파 유량계의 여러가지 빔 전파방식>

아래 그림에서 보는것과 같이 이중빔의 경우 변환기 설치또는 검사과정에서 L_1 또는 L_2 의 거리가 변경될 수 있으며 이 경우 영점이 변하게 되어 전체적인 측정에 영향을 미칠 수 있다. 단일빔의 경우 거리 L_1 이 변하더라도 상류 또는 하류측 방향으로의 초음파 전파 거리는 항상 동일하게 유지할 수 있다. 따라서 온도나 압력 등의 영향으로 파이프가 불균일하게 변경될 가능성이 있는 경우 다중빔 방식은 초음파 전파 경로 변화의 영향으로 측정상 오차가 발생된다.



<그림 6-20 이중빔과 단일빔 방식의 비교>

2) 초음파 유량계 설치

초음파 유량계가 좋은 측정정도를 가지며 장기간에 걸쳐 안정되게 사용하기 위해서는 다음과 같은 점에 유의하여 설치 하여야 한다.

가) 일반적인 조건

- ① 주위온도가 급격하게 변화하지 않는 장소
- ② 설치된 주위습도가 90 % 이하인 장소
- ③ 진도이나 충격이 가급적 적은 장소
- ④ 물이 차지 않는 장소
- ⑤ 스위치 및 전기 기기류의 점접등의 전자기 장애가 없는 장소
- ⑥ 부식성이 아닌 장소
- ⑦ 유지보수를 위한 공간이 확보되어 있으며, 설치작업 공간이 있는 장소

나) 배관 및 설치상 주의점

- ① 배관안에는 항상 유체가 콕차 흐르도록 되어야 한다.
- ② 유체중에 기포가 혼입되지 않아야 하며, 만일 혼입될 우려가 있을경우에는 기체분리기를 상류측에 가급적 멀리 떨어진 지점에 설치한다.
- ③ 배관 내면은 깨끗하고 요철이나 부착물이 없어야 하며, 검출기가 접촉하는 배관표면도 깨끗한 상태로 하고 돌출부가 없도록 한다.
- ④ 검출기의 상류측과 하류측에는 충분한 길이의 직관부를 두어야 한다.
- ⑤ 배관재질의 외경 치수, 배관 두께, 배관 내,외면 (특히 내면)의 재질과 두께를 정확히 실측하여 알아야 한다.
- ⑥ 변환기를 취급시 부주의로 떨어뜨리거나 충격을 주게 되면, 정확도에 영향을 미치므로 주의를 해야한다.
- ⑦ 검출기와 배관과의 접촉부에는 음향 결합재(구리스 또는 접착제등)을 칠한다. 이때 기포나 이물질이 혼합되지 않도록 한다.
- ⑧ 수평 배관 일때는 기체의 체류, 모래의 퇴적등에 의한 영향을 배제하기 위해 수평면에서 $\pm 45^\circ$ 이내에 설치하며 배관이 구부러졌거나 플랜지 및 용접부위 등이 있는 장소는 피한다.
- ⑨ 출력 신호용 배선 및 전원용 배선은 반드시 별개의 전선관을 사용한다.