

특집

초음파 트랜스듀서와
유량 측정 기술

초음파 유량계의 기술 동향

안 용 관*
((주)수인테크)

1. 머리말

초음파를 이용하는 기술이나 기계는 알게 모르게 우리 생활에 밀접하게 관련되어 있다. 우선 가장 흔하게 접하는 것이 의료기기 분야로 병원에서 흔히 볼 수 있는 초음파 검사기가 있고, 초음파 물리 치료기, 초음파 미용기 등이 있다. 다음으로는 가전제품 분야로 초음파 가습기, 초음파 세척기가 있으며, 자동차 분야에는 후진시 큰 도움을 주는 자동차 후방 감지기 등이 있다. 산업용으로 사용되는 것에는 바다 속 물고기를 감지하는 초음파 어군탐지기, 플라스틱 제품을 용착하는 초음파 용착기, 산업현장의 초음파 비파괴 검사장치 등이 있고, 조금은 생소하지만 정수장이나 하수처리장 등에서 많이 사용되는 초음파 계측기인 초음파 수위계, 초음파 유량계 등이 있다.

이 글은 우리에게 조금은 생소하나 산업현장에서는 매우 다양한 분야에 중요한 역할을 하는 초음파 유량계의 기술 동향에 대해 소개 하려고 한다.

2. 초음파 유량계용 초음파 센서

초음파 진동자에는 여러 종류가 있으나 초음파

유량계에 사용되는 초음파 진동자는 압전세라믹 (piezoelectric ceramic) 즉 PZT가 일반적으로 가장 많이 사용 되고 있으며, 적용되는 관의 크기, 적용 유체, 사용온도 등에 따라 다양하게 선택되어 사용된다.

PZT의 크기는 그림 1과 같이 지름 $\varnothing 10 \sim \varnothing 50$ mm 까지 다양하며, 형태는 주로 원형을 사용하나 특별한 경우 사각형의 형태도 있다. 사용되는 주파수는 보통 500 kHz ~ 2 MHz까지 폭 넓게 사용되며, 낮은 주파수는 탁도가 높은 경우 등에서 강한 출력이 필요한 유체에 사용되며, 높은 주파수의 경우는 정수된 깨끗한 물에서 직진성과 정밀성이 요구되는 경우에 주로 사용된다.

초음파 유량계에서 사용되는 초음파센서는 물과 직접 접촉되는 경우가 많아 방수는 필수이고, 일정 수압을 견디며, 물과 매칭이 가장 잘 되는 재질, 내화학적, 경제성을 갖춘 재질이어야 한다.

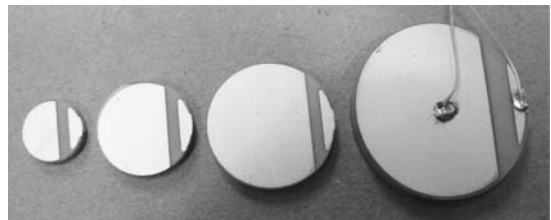


그림 1 초음파 유량계용 PZT 형상

* E-mail : ykahn@suintech.co.kr / (031) 776-3560

표 1 초음파 유량계용 PZT 스펙

PZT 주파수	500 kHz	850 kHz	1000 kHz
PZT 두께	4.10 mm	2.44 mm	2.08 mm
PZT 외경	∅30 mm	∅20 mm	∅10 mm
하우징 두께 (재질:PE)	이론:1.89 mm 실제:2.55 mm	이론:1.11 mm 실제:2.55 mm	이론:0.95 mm 실제:2.55 mm
하우징 두께 (재질:STS316)	5.88 mm	3.46 mm	2.94 mm

그래서 초음파 유량계용 초음파센서의 하우징 재질로는 가장 경제적이면서 물과 임피던스가 가장 비슷하고 내화확성도 뛰어난 PE가 가장 많이 사용되며, 그 외에도 TEFLON, TITANIUM, 황동, STS316 등이 사용된다.

초음파 센서제작에 있어 가장 중요한 것은 측정유체와 매칭을 맞추는 것이다. 일반적으로 초음파 하우징의 두께는 다음과 같은 식에 의해 결정된다.

$$t = \lambda / 2 \quad (1) \text{을 사용하고}$$

$$\lambda = v / f \quad (2) \text{를 사용한다.}$$

즉, 음속이 약 5882 m/s STS316 재질로 초음파 센서를 제작 할 경우, 850 kHz의 PZT를 사용하게 되면, 식 (2)에 의해 $\lambda = 5882 / 850 = 6.92 \text{ mm}$ 가 되고 하우징 두께는 식 (1)에 의해 $t = \lambda / 2 = 6.92 / 2 = 3.46 \text{ mm}$ 가 된다.

그러나 PE의 경우 같은 식으로 하면 1.11 mm 가 되나 이것은 너무 얇아서 필요한 강도를 유지할 수가 없어서 경험치에 의해 표 1과 같이 2.55 mm를 사용하게 된다.

초음파 유량계센서는 측정환경에 따라 여러 종류가 있으며, 습식과 건식에 따라 그 형태가 완전히 다르다.

습식은 다회선 방식으로 센서가 직접 측정유체와 접촉하는 형식으로 직관부가 짧은 곳에서도



그림 2 초음파 유량계용 초음파 센서 형상

그 정확도가 높은 것이 장점이고, 건식은 흔히 클램프용 유량계라 하며 관 외벽에 초음파 센서가 부착되는 방식으로 관 손상 없이 어느 곳이나 쉽게 장착하여 유량을 측정 할 수 있는 것이 최대의 장점이다. 그림 2는 습식 초음파 다회선 유량계용 센서와 건식 초음파 외벽 부착식 유량계의 일반적인 센서 형상이다.

3. 초음파 유량계의 측정 원리

초음파 유량계의 기본적인 측정원리는 아주 간단하다. 전파시간차를 이용하는 전파시간차 방식은 유속은 전파 시간차에 비례한다는 원리이고, 주파수차를 이용하는 도플러방식은 유속이 주파수차에 비례한다는 원리이다.

전파시간차방식 초음파 유량계는 건식이든 습식이든 무관하게 그 측정원리는 동일하다.

초음파 유량계의 초음파 센서는 그림 3과 같이 관로/수로의 상류, 하류에 일정 각도로 A와 B가 설치되어 신호를 서로 주고 받을 수 있도록 구성 되어 있으며, 유속이 없을 경우에는 초음파 센서 상류 A에서 하류 B로, 하류 B에서 상류 A로 전파하는 시간 t_{AB} 와 t_{BA} 는 서로 같다.

$$V = 0 \rightarrow t_{AB} = t_{BA} = \frac{L}{C} \quad (3)$$

그러나, 그림 3에서처럼 유속이 있는 경우에는 상류 A에서 하류 B로 전파하는 시간은 감소

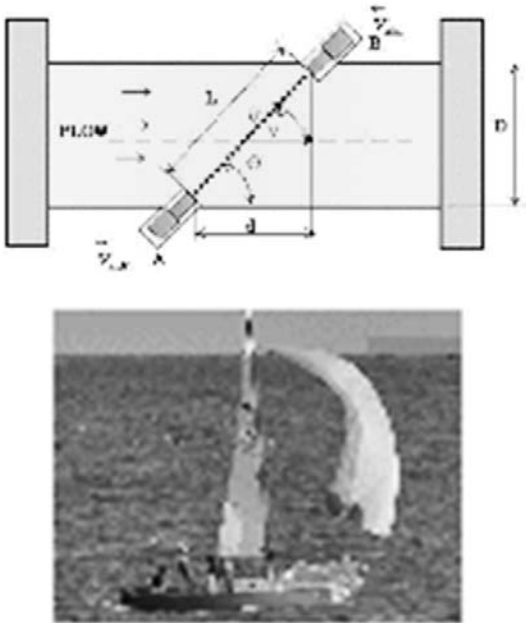


그림 3 초음파 유량계의 측정 원리

하고(전파속도는 빨라지고), 하류 B에서 상류 A로 전파하는 시간은 증가한다(전파속도는 느려진다).

$$t_{AB} = \frac{L}{C+v} = \frac{L}{C+V \cos \theta},$$

$$t_{BA} = \frac{L}{C-v} = \frac{L}{C-V \cos \theta} \quad (4)$$

여기서

t_{AB} : 진동자 A에서 B로 전파시 초음파 전파 시간

t_{BA} : 진동자 B에서 A로 전파시 초음파 전파 시간

C : 유체 내에서의 유속

L : 진동자 A, B간의 거리

V : 유속

v : 초음파 전파에 영향을 주는 경로 방향 유속 성분

θ : 유속 방향과 초음파 빔 경로가 이루는 각
따라서, 시간차 ($\Delta t = t_{BA} - t_{AB}$)는 유체의 유속에 비례한다는 원리를 이용하여 유속 V 를 구하면

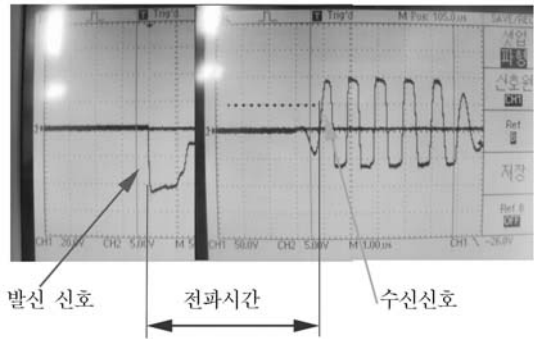


그림 4 초음파 센서의 발신, 수신 신호 형상

식 (4)에 의하여 유속 C 에 무관한 식이 성립한다.

$$V = \frac{L}{2 \cos \theta} * \frac{(t_{BA} - t_{AB})}{t_{BA} * t_{AB}} = \frac{L^2}{2d} * \frac{\Delta t}{t_{AB} * t_{BA}} \quad (5)$$

여기서 $d = L * \cos \theta$ 이다.

그리고 관로에서의 유량 $Q = V * A$ 에서

$$Q = V * \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad (6)$$

이렇게 회선별 유속을 구한후 관로 전체의 평균 유속을 구하기 위해서는 센서별로 가중팩터를 계산하여 평균유속을 구하여야 하며, 이러한 가중팩터 방식은 KS 규격이나, 여러 논문에서 자세히 나와 있어 여기서는 생략하기로 한다.

다만 어느 방식으로 평균 유속을 계산 하더라도 각각 회선별 정확하고 안정적인 유속데이터를 획득 하는것이 가장 중요하다. 헛팅없이 안정적인 데이터를 기초로 하여야만 정확하고, 안정되고, 신뢰성 있는 유량값을 계산 할 수 있기 때문이다.

그림 4는 초음파 유량계 초음파 센서의 발신, 수신 신호모양으로 발사전압은 50 V로 하고, 상류측 센서 A에서 발사하면 하류측 센서 B에서 수신하고, 곧이어 하류측 센서 B에서 발사하면 상류측 센서 A에서 수신하여 그들의 전파 시간차를 계산하는 방식이다.

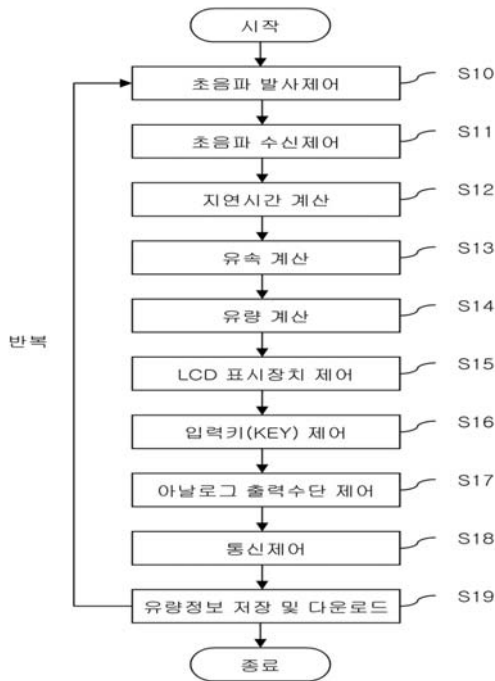


그림 5 CPU 1개에 의한 유량측정 알고리즘

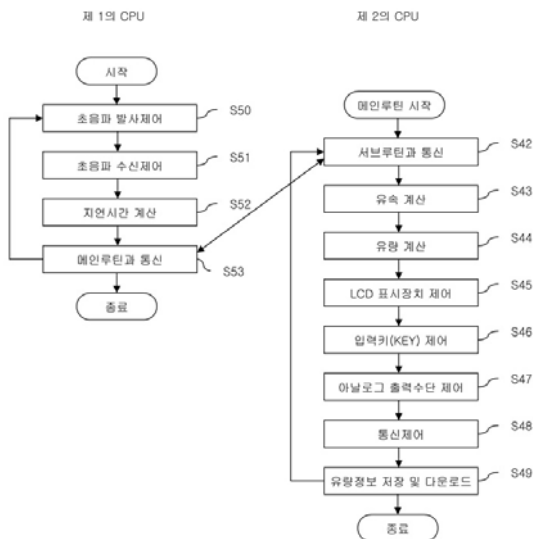


그림 6 듀얼 CPU에 의한 유량측정 알고리즘

4. 초음파 유량계의 기술 동향

4.1 듀얼CPU를 이용한 초음파 유량계

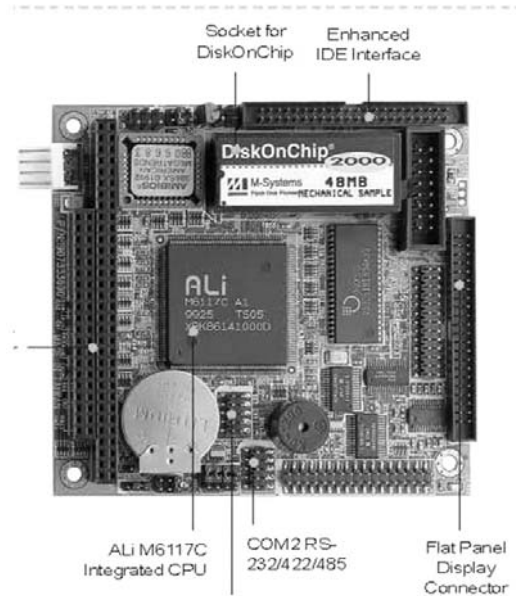


그림 7 기존 386 CPU 보드 (PCM-3336보드)

초음파 유량계의 정확도를 향상시키기 위해 여러 가지 방향으로 기술이 발전해가고 있는데 그 중에는 컨트롤러의 시간 측정 분해능을 향상시키는 방법, 유체상태에 따라 최적의 신호를 유지하는 AGC(auto gain control)회로의 개발, 컨트롤러의 연산속도를 향상시켜 많은 유속 데이터를 이용하여 유량을 계산 할 수 있도록 하는 방법 등이 있다.

여기서는 CPU 2개를 사용하여 컨트롤러의 연산속도를 향상시켜 정확도, 반복성, 안정성을 향상시킨 방법에 대해 소개 하려고 한다.

산업용 계측기의 CPU는 경제성, 호환성 등 여러 가지 이유로 386 마이크로프로세서를 사용하는 것이 일반적이는데 근래에 들어서는 원격감시 시스템의 도입 등으로 유량계가 유량계산 뿐만 아니라 압력값의 입력, 유량값의 저장, 실시간 통신, 저장 데이터의 다운 등 여러 기능을 요구하는 실정이어서 CPU의 연산능력이 한계에 다다르고 있다. 이를 해결하기 위해서는 최근의 고성능 CPU를 사용하면 되겠지만 고가의 고성능 CPU

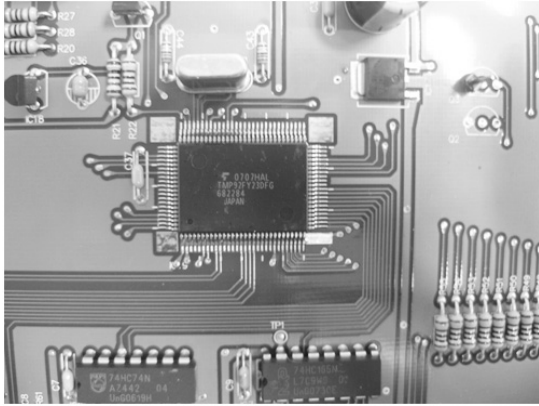


그림 8 듀얼 CPU 보드 (디지털 보드부 제 1 CPU)

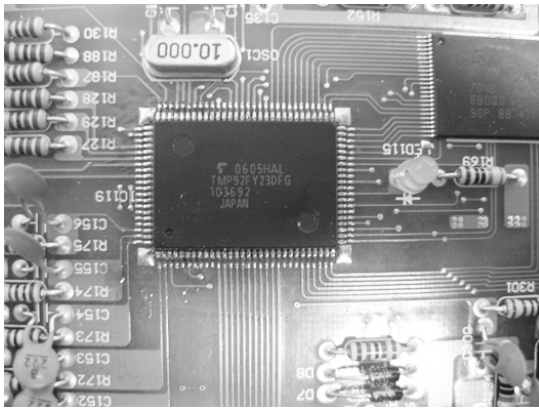


그림 9 듀얼 CPU 보드 (LCD 보드부 제 2 CPU)

를 사용하면 경제성에서 경쟁력이 떨어지므로 특별한 곳에서만 사용 하고 있다.

그래서 연산속도에 대한 문제 해결방안으로 고안된 방법이 요즘 듀얼코어 컴퓨터처럼 386CPU 2개를 병렬로 사용하여 연산속도를 증가 시키는 방법이다.

기존의 방식은 CPU 1개가 회선별로 초음파 수·발신하여 초음파 전파시간차를 연산하여, 유량을 계산하고, 저장하고, 통신하고 또한 다운로드까지 모든 기능을 혼자서 담당하게 되어서 5 회선 초음파 유량계의 경우 초당 초음파를 수·발신 할 수 있는 회수가 최대로 4회/초 까지만 가

○ 제작회사 : (주)수인테크
○ 형식 및 기기번호 : SI-FLO SF-110 SI110905-067

유량률 (m ³ /h)	유량계 측정값 X (m ³)	표준값 Y (m ³)	측정편차 (X-Y)×100 (%)	상대확률불확도 U (%)
956.04	26.959	26.808	0.56	
956.90	26.965	26.812	0.57	0.42
955.15	26.907	26.808	0.37	
746.82	21.099	21.006	0.44	
746.46	21.091	21.007	0.40	0.40
746.44	21.078	21.009	0.33	
538.86	14.997	15.002	-0.03	
538.56	15.018	15.006	0.08	0.40
538.82	15.018	15.005	0.09	
362.07	10.219	10.271	-0.51	
362.10	10.228	10.273	-0.44	0.40
361.49	10.226	10.271	-0.44	
258.75	7.140	7.223	-1.15	
258.79	7.138	7.220	-1.14	0.40
259.11	7.148	7.223	-1.04	

○ 측정배관 : Nominal Steel Pipe 300 mm
○ 포함인자 k (신뢰수준 약 95%) : 2
○ 저유도 : 78
○ 표준기 상대표준불확도 : 0.2%

교정필증
Calibration Label

그림 10 초음파 수·발신 회수 20회/초 교정성적서-1

교정 일자		2009. 06. 10.		제작회사일련형식		SF-110 / 150F	
외 회 기관		(주)수인테크		기 기 번호		SI-110906-073	
표준기 지시값		X		Y		((P-X)/Q _{max})×100	
m ³ /h	m ³ /h	mA	%	%	A형상대표준 불확도 U _A	상대확장 불확도 U _r	%
400.666	400.522	20.02	-0.04	-0.04	0.02	0.20	
400.285	400.222	20.01	-0.02	-0.02			
400.391	400.108	20.00	-0.07				
299.237	299.688	15.99	0.11				
299.369	299.668	15.99	0.07	0.13	0.02	0.20	
299.583	300.015	16.00	0.11				
200.737	200.265	12.01	-0.12				
200.708	200.225	12.01	-0.12	-0.24	0.01	0.20	
200.700	200.187	12.01	-0.13				
120.852	120.159	8.81	-0.17				
120.732	120.049	8.80	-0.17	-0.57	0.00	0.20	
120.675	119.997	8.80	-0.17				

교정시스템 상대표준불확도 : 0.10 %
피교정기기 분해능 : 0.001 m³/h
유효저유도 : 77
포함인자 k (신뢰수준 약 95%) : 2.0

그림 11 초음파 수·발신 회수 20회/초 교정성적서-2

능하여서 측정된 데이터가 1~2개 헛팅하게 되면 유속이 헛팅하게 되고 평균유속이 헛팅하고 유량값이 헛팅하게 되어서 정확도와 안정성 반복성이 떨어지게 되는 문제가 있었다.

이에 반해 CPU 2개를 사용하는 듀얼 CPU 방식은 제 1 CPU는 회선별로 초음파를 수·발신하여 전파시간만을 계산하여 제 2 CPU에 전송하면 제 2 CPU는 이 데이터로 유량 계산, 저장, 통신, 데

이터 다운로드 등의 기능을 담당하도록하여 5회선 초음파 유량계의 경우 1초에 최대 20번까지 초음파를 수·발신 할 수 있어서 20개의 데이터 중 최소값 5개, 최대값 5개를 버리고 10개의 유속 데이터를 평균해서 유속을 계산할 수 있으므로 그 안정성과 정확성, 반복성이 많은 발전을 하게 되었다.

그림 5는 기존의 CPU 1개에 의한 유량측정 알고리즘 이고, 그림 6은 듀얼 CPU를 이용한 유량 측정 알고리즘이며, 그림 7은 기존 386CPU보드의 형상이고, 그림 8,9는 듀얼 CPU의 제 1 CPU와 제 2 CPU 형상이다.

그림 10, 11은 5회선 초음파 유량계로 초음파 수·발신을 회선별 20회/초인 경우 KOLAS 교정 성적서 결과이다.

그림 10은 국가공인교정기관인 한국수자원공사 300 mm 라인에서 실류교정한 결과로 유량계의 상대확장불확도가 0.4 %대로 표준기 표준불확도 0.2 %의 2배 내외의 안정적인 반복성을 보여주고 있으며, 그림 11 역시 국가공인교정기관인 에프씨씨 150 mm 라인에서 실류교정한 결과로 유량계의 상대확장불확도가 0.2 %대로 표준기 표준불확도 0.1 %의 2배 내외의 불확도와 유동별 모두 0.2 %의 안정적인 반복성을 보여주고 있다. 물론 유동율과 표준기의 조건각각의 제품 조건에 따라 교정 결과가 약간은 다를 수 있으나 초음파 수·발신을 20회/초 함으로써 기존보다 월등히 안정적인 결과를 얻을 수 있었던 것은 명확한 사실이다.

4.2 만관-비만관 하이브리드 초음파 유량계

일반적으로 관의 만관 유무에 따라 만관과 비만관으로 나뉘며, 건식 초음파 외벽 부착식 유량계는 반드시 만관인 상태에서만 측정이 가능하나 습식 초음파 다회선 유량계는 별도의 수위 측정장치를 부착하면 수위계로 유량 단면적을 계

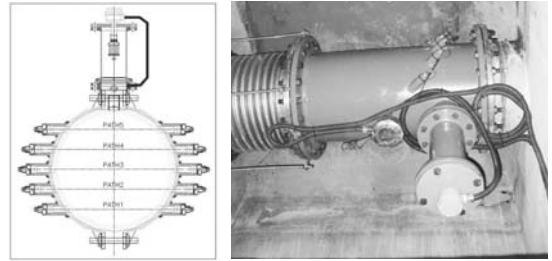


그림 12 상부 수위 측정 방식의 비만관 초음파 다회선 유량계

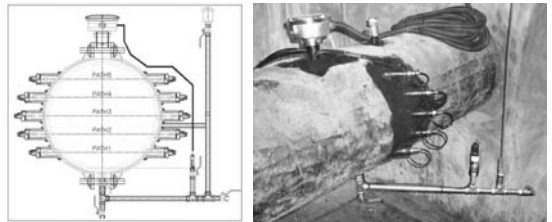


그림 13 하부 수위 측정 방식의 만관-비만관 겸용 유량계

산해서 비만관 상태에서도 유량을 측정 할 수 있는 그림 12와 같은 초음파 다회선 비만관 유량계가 상용화 되어 있다.

이렇게 상부에서 수위를 측정하는 방식의 비만관 유량계는 항상 비만관 조건에서만 측정이 가능하다. 만약에 관로내 유체가 만관이 돼서 상부 수위계까지 차오르면 상부에 설치된 수위계는 측정이 불가하거나 침수되어 고장이 날 수도 있기 때문에 반드시 비만관 상태를 유지하여야만 하는 것이다.

그러나 배수지 유출이나, 하수처리장 유출 같은 경우에는 현장 조건에 따라 관로의 내부 유체가 비만관에서 만관, 만관에서 비만관으로 변하는 경우가 있을 수 있다. 이런 경우에는 유량을 측정할만한 적당한 방법이 없어서 유량측정을 못하거나 만관형을 설치하고 비만관시에는 유량오차를 감수 하는 방법밖에 없었으나 최근 국내 일부 제품 중에는 상부가 아닌 하부에서 수위를 측정하여 수위와 관내경을 비교하여 만관, 비만관 여부를 먼저 판단한 후 만관이면, 만관 프로

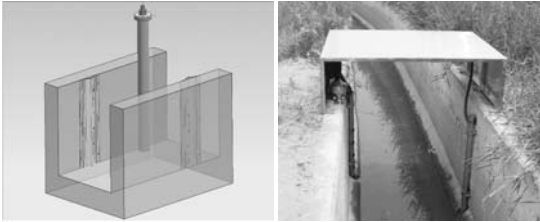


그림 14 개거형 초음파 다회선 개수로 유량계

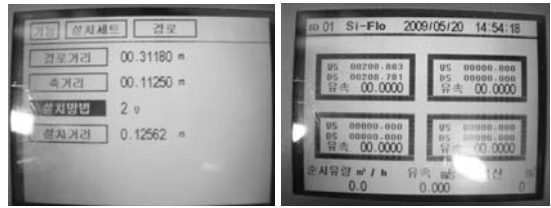


그림 16 멀티패스 클램프온 유량계의 화면

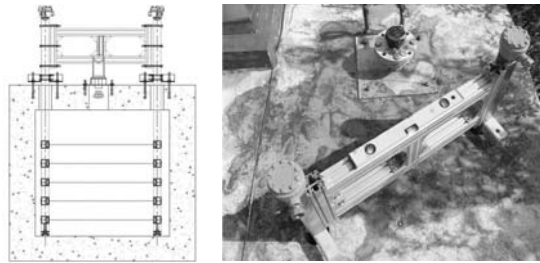


그림 15 압거형 부단수 초음파 다회선 개수로 유량계



그림 17 멀티패스 크램프온 유량계 설치사진

그램을 비만관이면 수위로 단면적을 계산하여 유량을 산출하는 비만관 프로그램을 실행토록 하는 만관/비만관 겸용 유량계가 개발되어 판매 중에 있다.

4.3 압거형 개수로 부단수 초음파 유량계

초음파 다회선 유량계의 또 다른 측정 분야는 사각 농수로나 하수관로와 같은 개수로의 유량을 측정하는 개수로용 초음파 다회선 유량계이다. 개수로 유량계도 앞에서 설명한 비만관 유량계와 같이 수위를 측정하여 유량 단면적을 구하고 회선별 유속을 측정하여 평균유속과 유량을 계산하는 원리이다.

그 동안에는 그림 13과 같이 상부가 열린 개거형 개수로의 경우에 한해 단수 후 그 안에 사람이 들어가서 구조물을 부착하는 방법이 일반적이어서 상부가 막힌 압거형 개수로는 상부를 파쇄해야 하므로 설치가 어렵고 아니면 수위계만을 이용하는 웨어식 유량계를 사용 할 수 밖에 없어

서 측정 불확도가 너무 큰 단점이 있었다.

요즘에는 안전성 등의 이유로 압거형 개수로도 많이 사용 되고 있으며, 특히 수질 TMS의 법제화로 기존 압거형개수로의 정확한 유량측정이 필요하게 되면서 압거형 개수로에 부단수로 정확한 유량측정이 가능한 초음파 다회선 개수로 유량계를 설치하는 방법이 개발되어 설치되고 있는 실정이다.

그림 15와 같이 전용 설치지그를 이용하여 압거형 개수로에 초음파 유속계용 센서 장착 구멍 2개와 초음파 수위계용 센서 장착 구멍1개, 총 3개의 구멍만을 천공함으로써 단수 없이 관로 밖에서 초음파 다회선 개수로 유량계를 설치 할 수 있도록 하는 방법이다. 도면에 따라 센서 취부 위치를 천공한후 센서 샤프트에 설치용 프레임을 부착하고 수평계로 하부 수평장치 높이를 조절하여 수평을 맞춘 후 상부 날개 브라켓을 앵커 볼트로 고정하는 것만으로 설치가 쉽게 완료되는 방식이다.

초음파 다회선 개수로 유량계의 장점은 수위별로 유속을 측정하고 수위계로 수위를 측정 단면

적을 계산하여 유량을 구하므로 같은 수위에서도 퇴적 등의 원인으로 유속의 변화가 있으면 유량이 변하게 되어 있어, 유량 오차가 적다는 것이 가장 큰 장점이다. 반면 수위만으로 유량을 계산하는 웨어식 개수로 유량계의 경우는 여러 가지 이유로 같은 수위에서 유속이 변하더라도 수위만 같으면 같은 유량을 나타내므로 환경에 의한 오차가 클 수밖에 없다.

4.4 멀티패스 클램프온 유량계

앞에서 간단히 설명 하였듯이 건식 초음파와 외벽 부착식 유량계(흔히 클램프온(clamp on)유량계라 부름)는 단수 후 플랜지 연결방식으로 설치하거나 부단수시에는 관을 천공, 용접하고 설치해야 하는 습식 초음파 다회선 유량계와는 다르게 관의 천공이나 용접 등 관의 손상 없이 부단수로 어느 관이나 설치 할 수 있다는 것이 가장 큰 장점이다. 이러한 장점 때문에 간접 비교 측정용 유량계로는 휴대용 클램프온 유량계가 사용되고 있다.

반면에 클램프온 유량계는 습식 초음파 다회선 유량계에 비해 정확도가 떨어지는 단점이 있어서 클램프온 유량계의 기술은 클램프온 유량계의 설치 편리성이라는 장점은 최대한 활용하면서 측정 정확도를 높이는 방향으로 기술이 발전하고 있으며, 그 대표적인 예가 측정 회선수를 늘려서 정확도를 높이는 것이다.

그동안 클램프온 유량계는 전부 미국, 일본, 독일, 호주 등에서 수입 판매 하던 것을 국내에서도 1~2개 회사가 국산화하여 보급중에 있으며, 일부 회사는 순수 국산 기술로 전메뉴를 한글화하여 사용편리성을 높이고, 4회선까지 확장하여 설치할 수 있도록 한 제품까지 출시되고 있다.

클램프온 유량계는 관외부에 초음파 센서가 설치되어 관두께를 통과한 후 유체를 통과해서 초음파 전파시간을 측정하므로 오래된 관의 경우 관내부에 퇴적물이나 스케일이 쌓여서 관내경이 축소되어 측정오차의 원인이 되기도 하고, 관내부가 녹 등으로 인해 초음파 신호가 왜곡되어 측정 오차가 발생 할 수 있으므로 현장 여건에 맞는 적절한 유량계 선택이 가장 중요하다.

5. 맺음말

앞으로 개발해야 할 초음파 유량계 기술 방향으로 는 기포양에 따라 전파시간차법과 도플러법을 자동으로 선택하여 유량을 측정 할 수 있는 기술, 유체의 상태에 따라 최적의 초음파 신호를 수·발신 하는 기술, 초음파신호 이외의 노이즈신호를 완전하게 제거 할 수 있는 기술, 유량계에 인터넷을 연결하여 원격으로 양방향 통신이 가능케 하는 기술 등 개발해야 할 분야가 너무나도 많다.

현재 국내 제품은 수입제품에 비해 일부 성능이 떨어지는게 사실이나, 일부 제품은 실적용 분야에 있어서 수입 제품에 비해서 앞선 제품도 있음을 인식하고, 사용자나 정부는 국산제품에 대한 편견을 버리고 다양한 적용기회나 여러 지원을 통해서 경쟁력을 키울 수 있도록 도와주어야만 거대한 다국적기업 제품에 대응 할 수 있는 기반이 마련 될 것이다.

유량계의 선택에 있어서 어느 유체든 어느 장소든 모든 경우를 완벽하게 측정 할 수 있는 만능 유량계는 없으므로 전문가의 도움을 받아 현장 조건에 적합한 최적의 유량계를 선택하는 것이 정확한 유량을 측정 할 수 있는 가장 기본적인 일이라 생각한다. 