

초음파 상호상관 기법을 이용한 유체의 평균유속 측정 연구

A Study on Mean Flow Velocity Measurement by Cross Correlation of Ultrasonic Waves

김창호*, 이덕기*, 백종승*, 조문재**
(Chang Ho Kim, Dug Ki Lee, Jong Seung Paik, Moon Jae Jho)

요 약

초음파 상호상관 기법을 파이프를 통해 흐르는 물의 유속측정에 적용하였다. 상호상관 기법을 활용하여 비삽입 방법으로 유체의 평균 유동속도를 측정할 수 있었으며, 이 기법을 이용한 비삽입, 비접촉식 측정방식은 기존의 기계식 유량계의 유동 방해로 인한 공정에너지 손실을 크게 감소시키는 장점을 가지고 있다. 유동속도의 계산을 위해 실시간 FFT용 디지털 신호 처리기를 이용하였으며, 50mm에서 248mm의 유동관에서 유동 실험결과 0.25m/s에서 16m/s 사이의 유속범위에서 평균유속의 측정 정확도는 약 1%로 나타났다. 상호상관 기법의 유동측정 기술은 상수와 공업용수 등을 포함한 대부분의 액체유량 측정에 활용이 가능하다.

ABSTRACT

An application of the cross correlation technique by adopting ultrasonic waves for water pipe flow measuring purpose is studied. It is a non-intrusive flow metering method by determining the time of the flight of the flow turbulent noise and its non-obstructing mechanism enables to reduce process energy loss due to the flowmeter obstruction. A digital signal processor for the purpose of the real time Fourier transform was employed for the fast time calculation of the flow velocity. The overall accuracy was found as about 1% for flow velocities from 0.25 m/s up to 16 m/s and for the pipe inside diameters from 50mm to 248mm. The cross correlaton technique can be used for the tap water utility including most common liquid flows.

I. 서 론

공정조업에서 유체의 정확한 유량측정이나 고가액의 유체, 즉 액화천연가스(CNG)와 석유류 유체의

상업적 거래 등에 있어 측정량의 경제적 파급효과는 매우 크다. 최근 공정산업이 복잡대형화 됨에 따라 다루는 유체의 종류가 다양해 졌으며, 유량측정 기구의 정확도, 측정범위가 넓을 것, 압력손실이 없을 것, 유량측정 기구의 설치와 교정이 용이할 것 등 많은 요구가 있게 되었다. 특히 유량계에 의한 압력손실은 에너지 손실과 직접적으로 관련된다. 한 예로 기존에

*한국표준과학연구원 역학연구부 유체유동그룹

**한국표준과학연구원 역학연구부 음향진동그룹

접수일자: 1994년 7월 29일

산업공정에서 주로 사용하는 6인치 울리프스 미터에 의한 유량측정시 연간 유량측정에 따르는 개당 공정 에너지 손실액은 200만원 이상이다. 따라서 대단위 공정플랜트 하나에 설치되어 있는 수천개의 차압식 유량계를 비접촉식의 압력손실이 없는 유량계로 대체한다면 국가적으로 연간 수백억원 이상의 에너지 절약이 가능할 것으로 예상된다.

상호상관(cross correlation) 방식의 유량측정 기술은 원리상 이러한 에너지 절약 요구에 잘 부합되는 것으로, 1960년대 후반부터 일부 연구자^{1), 2)}들에 의해 연구가 시작되었다. 상호상관 방식의 유량측정은 울리프스 등의 차압식 유량계와는 달리 유량계 설치에 의한 압력손실이 전혀 없고, 측정범위가 획기적으로 넓으며, 기체-액체상 유동계나 고체-기체상 유동계 등의 다상 유동계는 물론 순수 액체나 기체³⁾의 유동량 측정에도 적용 가능한 점, 유동 배관의부에 탈착이 용이하게 비접촉식으로 설치되어 조업중단이 없이도 공정유량 진단이 가능한 점 등 많은 장점을 갖고 있다. 지금까지의 발표된 상호상관 방식의 연구결과들은 주로 액체와 기체 또는 액체와 고체가 서로 혼합된 혼합상 유체의 유량측정에 국한되어 있고, 유동 조건이나 유속범위도 실험실적 규모로 극히 제한되어 있다.^{(2), (10), (11)} 더우기 단일상 유동측정에의 응용은 거의 발표되어 있지 않은 상황이다. 상호상관 방식의 유량측정은 실시간 신호처리 속도와 정확도의 문제로 인해 실용화가 지연되고 있으나, 근래에 이르러 디지털회로 제작기술⁽⁴⁾과 신호처리 기술^{(5), (7), (8), (9)} 등이 발전함에 따라 단일상 유동측정 기술로서의 실용화가 가능할 것으로 전망된다.^{(12), (13)}

본 논문에서는 초음파 변환기를 사용하여 단일상태의 원형과 액체유동에서 유체의 난류잡음신호를 연속적으로 측정하고, 유동신호의 전달시간을 상호상관 함수의 계산을 통해 평균 유속을 결정하는 정밀 측정기법을 제시하고자 한다. 또한 지금까지 발표된 유량측정의 결과보다 넓은 유속범위와 다양한 크기에 배관별 유속 측정결과를 분석함은 물론 상호상관 유속측정 기법의 실용성에 대해 고찰하였다.

II. 측정원리

초음파 상호상관 기법을 이용한 유체의 평균유속 측정의 기본 원리는 일정한 거리를 두고 분리 장착된 두쌍의 초음파 변환기(transducer)를 이용하여 난류

의 소규모 에디(eddy), 유동 유체에 혼합되어 있는 미소 입자, 기포 등이 유동방향으로 진행하면서 발생하는 잡음신호를 시간의 함수로 연속측정하여, 측정된 두 신호의 상호상관을 구하고 신호처리를 통해 유체의 전달시간(transit time)을 측정하는 것이다. 상호상관 유량측정의 유동감지 센서⁽⁶⁾로는 온도 센서, 전기전도도 센서, 초음파 변환기^{(8), (9), (10)} 등이 일반적으로 사용되고 있으나 이중 초음파 변환기는 센서를 유체와 직접 접촉시키지 않고도 유량측정이 가능하다는 장점을 가지고 있다. 한가지 예로서 초음파 변환기를 이용한 비접촉식 방식은 석탄, 기액화 공정이나 공기압 이송(pneumatic transport)에서 야기되는 다상유체 유동(multiphase flow)에 의한 측정기구의 부식과 마모를 방지할 수 있을 뿐만 아니라 단일 유체상의 경우에도 공정조업 중 대규모로 소비되는 펌핑 에너지 손실을 방지할 수 있으며, 기계적 구동부가 없기 때문에 측정지점 사이에서 유동장을 교란시키지 않고 안정된 유동상태를 유지할 수 있다.

초음파 상호상관 기법을 이용한 유체의 평균유속 측정의 기본 구성은 그림 1과 같다. 그림에 나타난 바와 같이 유체가 이동하는 원형관의 상·하류 두 지점에 일정거리(L)를 두고 송신용과 수신용 변환기를 한쌍으로 하는 두쌍 이상의 초음파 변환기를 설치한다. 각각의 송신용 변환기는 뒷쪽에서 아래쪽을 향하여 초음파를 방사할 수 있도록 설치되어 있으며, 수신용 변환기는 유동관을 통과하여 전달된 신호를 감지하기 위해 아래쪽에 장착되어 있다. 송신용 변환기에서 방사된 MHz 영역의 정현신호는 유동관을 통과하면서 유동으로 기인한 난류신호에 의해 변조되어 수신용 변환기에 입력된다. 이와 같은 과정을 통해 상·하류 변환기에 의해 감지된 두 신호의 상호상관 함수는 유체가 일정거리(L) 만큼 진행하는데 걸린 시간(τ)에서 최대값을 갖게 된다. 상호상관 함수는 다음과 같이 정의된다.

$$R_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)y(t+\tau)dt \quad (1)$$

여기서 $x(t)$ 는 상류측 유동신호, $y(t)$ 는 하류측 유동신호, τ 는 전달시간을 나타낸다. 식(1)을 단위연산 형태로 바꾸면 다음과 같다.

$$R(k \cdot \Delta t) = \left(\frac{1}{S}\right) \sum_{n=0}^S x(n \cdot \Delta t)y(n \cdot \Delta t + k \cdot \Delta t) \quad (2)$$

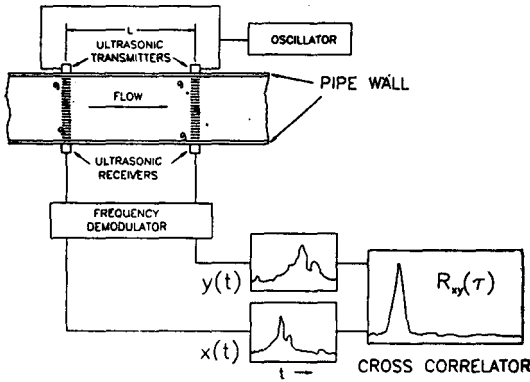


그림 1. 상호상관 유동측정 기법의 개략도
 Fig 1. Schematic diagram of the cross correlation flow measurement method

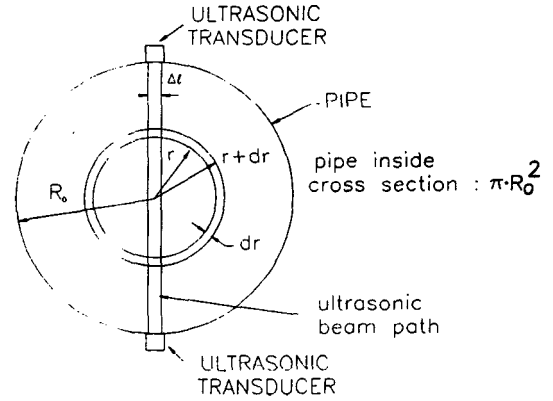


그림 2. 파이프 단면과 초음파 투과영역의 비교
 Fig 2. Pipe geometry and the scanned area of the ultrasonic wave

식(2)에서 s 는 처리신호의 전체 표본화(sampling) 갯수이고 Δt 표본화 시간간격(sampling interval)을 나타낸다. 지연시간 $\tau = k \cdot \Delta t$ 로서 k 는 전달시간의 scanning 범위를 결정하는 정수이다. 또 n 은 0, 1, ..., s 까지의 신호의 시간별 번지수이다. 식(2)에 의해 구해진 상호상관 함수는 상·하류 두 신호의 상관관계를 시간에 따른 크기로 나타내게 된다. 따라서 상류에서 수집된 유동정보가 하류측 유동정보에 대해 평균 지연시간, 즉 전달시간을 가질때 상호상관 함수는 최대 값이 된다. 따라서 유체의 평균유속(\bar{V})은 식(3)과 같이 구할 수 있다.

$$\bar{V}_{cross} = \frac{L}{\tau} \quad (3)$$

그림 2에 나타난 바와 같이 초음파 변환기를 유동관에 설치하여 유속을 측정하는 경우에는 변환기의 빔폭에 해당되는 구간의 유속(\bar{V}_{cross})만을 측정할 수 있기 때문에 유동관의 전체 단면적에 해당하는 평균 유속(\bar{V}_{pipe})으로 나타내기 위해서는 이에따른 보정이 필요하다. 상호상관 방식으로 측정된 평균 유속은 전체 파이프의 평균유속에 비해 전반적으로 크게 나타난다. 이와 같은 현상은 상호상관 방식이 유동관 중앙부분에서의 유속 성분만을 측정함으로써 유동관 전체 단면적을 고려해 볼 때 상대적으로 저유속 영역을 적게 포함하기 때문이다.

유속분포의 보정은 이론적으로 이미 정립된 윤활 원형관(smooth pipe)의 유속 분포식으로 부터 유도할 수 있다. 본 논문에서는 이미 알려져 있는 Nikuradse⁽⁶⁾

의 유속 분포식을 이용하였다. 레이놀즈 수 $4 \times 10^3 \sim 3.2 \times 10^6$ 범위에서 Nikuradse의 유속 분포식은 다음과 같다.

$$\frac{V_p}{V_{max, pipe}} = \left(1 - \frac{r}{R_0}\right)^{\frac{1}{n}} \quad (4)$$

여기서 R_0 는 유동관의 내부반경이며, r 은 임의의 반경, V_p 는 임의의 반경 지점에서의 유속, $V_{max, pipe}$ 는 최대 유속이다. Nikurads는 $4 \times 10^3 \leq Re \leq 3.2 \times 10^6$ 의 유동 범위에서 n 값이 6~10으로 변화함을 제시하였으며, r 은 레이놀즈 수($Re = \bar{V} \cdot \rho \cdot D / \mu$)의 증가함수이다 따라서 식 (4)를 유동관의 내경으로 적분하여 평균유속을 구하면 다음식과 같다.

$$\bar{V}_{pipe} = \frac{\int_0^{R_0} V_p \cdot 2\pi r \cdot dr}{\pi R_0^2} \quad (5)$$

식(5)를 정리하면 유동관의 평균유속은 다음식으로 주어진다.

$$\bar{V}_{pipe} = V_{max, pipe} \cdot \frac{2n^2}{(n+1)(2n+1)} \quad (6)$$

또한 초음파 변환기의 빔폭에 해당되는 면적인 $2R \cdot \Delta l$ 내의 평균유속은 식. (7)과 같이 step형 미소 적분구간을 설정하여 구할 수 있다.

$$\bar{V}_{cross} = \frac{2 \int_0^{R_0} V_{max, pipe} \left(1 - \frac{r}{R_0}\right)^{\frac{1}{n}} \cdot dr \times \Delta \ell}{2R_0 \cdot \Delta \ell}$$

$$= \frac{n}{n+1} \quad (7)$$

따라서 상호상관 방식으로 구한 평균유속을 전체 파이프 평균유속으로 환산하기 위한 이론적 보정계수 α' 는 다음식으로 주어진다.

$$\alpha' = \frac{\bar{V}_{pipe}}{\bar{V}_{cross}} = \frac{\frac{2n^2}{(n+1) \times (2n+1)}}{\frac{n}{n+1}}$$

$$= \frac{2n}{2n+1} \quad (8)$$

상호상관 방식으로 측정된 평균유속과 원형관 전체의 평균유속과의 이론적인 편차는 유속보정계수 α' 만큼이며, 편차의 크기는 레이놀즈수 $2.3 \times 10^4 \sim 1 \times 10^6$ 범위에서 0.930~0.946으로 레이놀즈수가 증가함에 따라 약간 증가한다. 그러나 식(8)이 만족되는 경우는 원형관이 이상적인 윤회관일 경우에 한한다. 따라서 이론적 윤회관이 아닌 일반적인 공정에 사용하는 원형관의 경우 이론적 보정과는 일정한 편차를 가질 수 있으며, 이와 같은 경우에 정확한 유량측정을 위

해서는 실험적 보정이 필요하다.

III. 실험방법

상호상관 유량측정 시스템의 특성평가를 위한 유량측정 실험은 본 연구실에서 보유하고 있는 액체 유량표준 시스템을 사용하여 수행하였다. 그림 3은 본 연구실에서 보유하고 있는 중량식 액체유량 표준 시스템의 개략도로서 수집조(reservoir), 정압탱크(constant head tank), 실험배관(test line), 수집탱크(weighing tank) 및 유량조절 밸브(control valve) 등으로 구성되어 있다. 수조의 물(tap water)은 펌프로 높이 약 16m의 정압탱크에 펌핑하고, 정압탱크에서 일정한 압력을 유지하면서 실험배관을 통과시킨다. 본 논문에서 제시한 상호상관 유량 측정 시스템의 구성을 위해 실험배관에는 두쌍의 초음파 변환기가 설치되어 있다. 또한 실험배관을 통과한 물은 수집탱크에 수집되게 한다. 이때 수집된 물의 양과 수집시간을 측정하여 평균유속을 계산하고, 이 결과를 상호상관 방식으로 측정된 평균유속과 상호 비교하였다.

유속측정에 사용된 초음파 변환기의 설치방법 및 실험배관의 제원은 표 1과 같다. 상호상관 방식을 이용한 평균유속 측정은 변환기 표면이 물과 접촉하는 접촉식(contactive type)과 유동배관의 외부벽면에 탈착식 지지대에 의해 변환기를 부착시키는 비접촉

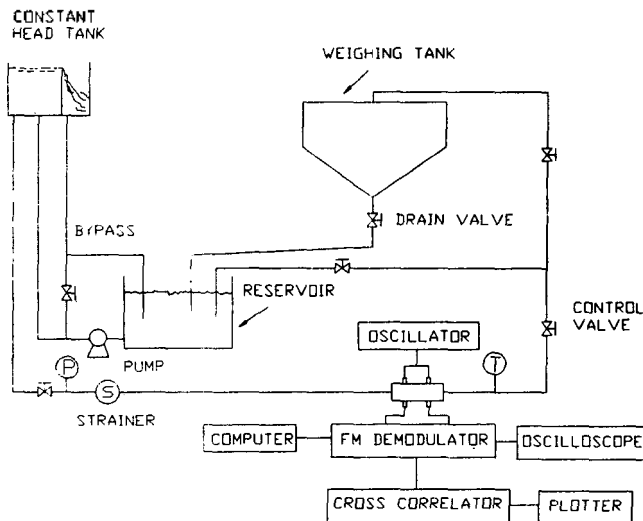


그림 3 실험장치의 개략도

Fig. 3. The schematic diagram of the experimental setup

식(non contactive type)의 두가지 방식으로 수행하였다. 접촉식의 경우는 고정된 형태의 일체형 유량계로 제작 활용할 경우를 목적으로 한 것으로, 유동배관을 12.5mm 구경으로 천공한뒤 초음파 변환기를 삽입 가공하여 송신기와 수신기의 진동판이 서로 180도로 마주보도록 독립된 형태로 제작하였다(그림 4(가)). 후자의 경우는 배관의벽에 변환기를 부착하도록하여 쉽게 장착과 탈착이 가능한 이동식의 유동진단을 목표로 한것이다. 초음파 발진용 변환기에는 15 V_{p-p}의 1MHz 정현파(sinusoidal wave)를 신호 발생기를 통해 공급하였다. 비접촉식 실험에는 75mm의 호닝(honing)관과 81.4mm의 강철관을 이용하였다. 비접촉식 유속측정의 경우 정재파(standing wave)에 의한 수신신호의 교란을 피하기 위해 초음파 변환기를 그림 4에 제시된 것과 같이 53-70° 기울어진 형태로 부착하였다.

상호상관 방식의 유속측정 시스템은 유동신호를 감

지하는 두 쌍의 송·수신용 초음파 변환기, 송신용 초음파 변환기를 구동하는 1MHz의 신호발생기(signal generator), 수신된 신호를 복조하는 복조기(demodulator), 복조된 상·하류 두신호를 상호 상관시키는 상관기(correlator)로 구성된다. 복조기는 수신감도를 좋게 하고 외부 노이즈의 영향을 배제하기 위하여 주파수 변조(frequency modulation) 방식을 채택하였으며, 복조를 위한 위상 비교 논리는 Exclusive OR 방식을 채택하였다. 즉, 송신신호와 수신신호의 위상을 초기에 90°에 자동으로 설정하고 유체내에 포함된 입자 또는 에디들에 의해 교란이 발생하면 수신된 초음파 신호가 변조된다. 이 변조된 신호의 위상변화만큼 복조기에서는 아나로그 출력을 발생시킨다. 그림 5(가)는 복조된 상·하류측 유동신호의 출력 결과를 보여주고 있다.

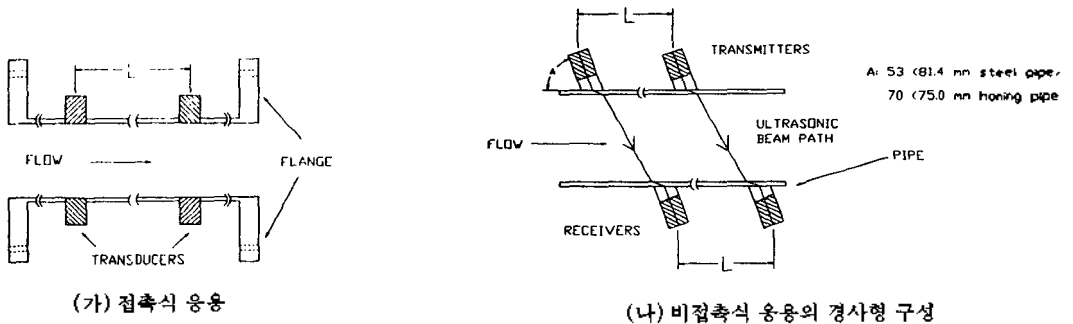


그림 4. 상호상관 유량측정에서의 초음파 변환기 배열
Fig 4. The transducer configuration of the cross correlation flow measurement

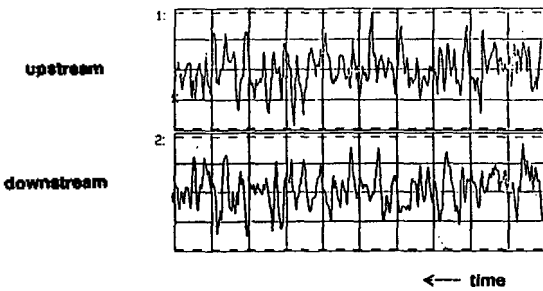
표 1. 실험에 사용된 파이프 종류 및 초음파 변환기
Table 1. Circular pipes and ultrasonic transducer used in the experiment

파이프내경 D [mm]	적용 방식	파이프 종류	변환기 거리 L [mm]	초음파 변환기 형식
50.0	접촉식	호닝관	100-200 (2-4D)	PZT재질 : lead zirconate diek 구동모드 : axial 직경 : 0.0125 m 두께 : 0.002 m 주파수 및 형상 : 1.0 MHz 정현파
75.0	접촉 및 비접촉식	호닝관	150-300 (2-4D)	
81.4	비접촉식	강철관	162.8- 325.6 (2-4D)	
100.0	접촉식	호닝관	200-300 (2-3D)	
150.0	접촉식	호닝관	150-450 (1-3D)	
248.5	접촉식	프라스틱 관	248.5- 745.5 (1-3D)	

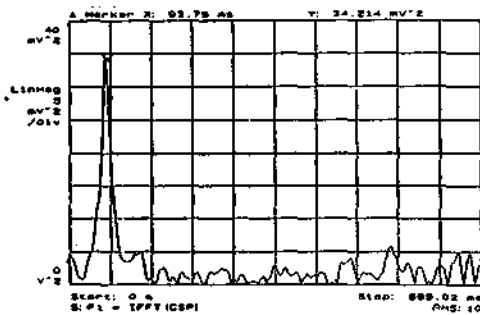
상호상관 함수는 복조신호를 받아들여 실시간으로 고속 후리에 변환(FFT)하여 계산하였으며, 이를 위해 상용의 주파수 분석기(HP 3566A)를 사용하였다. 주파수 분석기는 복조기로부터의 실시간 영역의 유동신호를 후리에 변환하여 주파수 영역에서 상호 스펙트럼(cross spectrum) 방법에 의해 상관함수를 구함으로써 전달시간을 계산한다(그림 5(나)). 주파수 영역에서 FFT 알고리즘을 통한 상관함수 해석은 신호처리 과정이 간편하며, 처리속도가 직접 연산방식에 비해 빠른 장점이 있다. 본 논문에서는 수집 신호의 갯수에 대한 영향은 실험하지 않았으며, 상·하류측 신호갯수를 각기 1,024개로 정하고 신호 수집을만 변화하였다.

측에서 측정된 것과 유사한 패턴이 하류측감지저점에도 관측되어야 만족할 만한 상관함수를 얻을 수 있다. 따라서 난류유동의 급격한 변화를 감안할 때 가능한 상·하류측 변환기들 사이의 거리는 가까울수록 유사한 패턴을 얻을 수 있다. 그러나 거리가 너무 가까와지게 되면 상·하류측 변환기의 지향특성에 의해 두 신호 사이의 상호간섭이 유발될 수 있기 때문에 최적신호를 얻기 위해서는 변환기간 거리의 최적화가 요구된다. 변환기 사이의 최적거리는 유량측정 가능범위가 크면서도, 평균유속의 정밀·정확도가 우수하게 유지되는 지점이 된다. 본 연구에서는 1-4D(D:배관의 내경)의 범위에서 거리별로 각기 비교 평가하였다.

유동실험 결과 1-4D의 변환기 사이의 거리 내에서 모든 유공 원형관에서의 상관함수의 계산이 용이하였다. 그러나 3D 이상의 거리에서 부터는 신호의 질과 반복성이 떨어짐을 보였다. 이는 유동유체의 이동경로가 길어짐에 따라 신호형태가 하류측 측정지점까지 유지되지 못하고 분산되기 때문인 것으로 분석된다. 반면에 변환기 사이의 거리가 작아지게 되며 신호의 분산은 방지할 수 있으나, 상·하류측의 초음파 신호가 서로 간섭하여 각기 신호형태의 고유성(originality)을 잃게 되기 때문에 상·하류측 수신지점을 접근시키는데는 한계가 있다. 따라서 초음파 변환기 사이의 최적거리는 간섭이 이루어지지 않을 만큼 멀어야 하고, 또한 상류신호의 고유형태(original pattern)가 분산되어 변질되지 않을 만큼의 가까운 거리가 되어야 한다. 실험결과 변환기 사이의 최적거리는 100mm 이상이 되어야 하며, 접속내경이 50.0mm에서 248.5mm의 범위에서의 최적거리는 1-2D 이내인 것으로 확인하였다.



(가) 유동신호의 복조후 시간이력
(x 축 : 1 V/div , y 축 : 100 mV/div.)



(나) 전처리 상관함수 (x 축 : 5 mV/div. , y 축 : 100 mV/div.)

그림 5. 상관신호의 한 예
Fig 5. An example of the correlation signals.

IV. 실험결과 및 논의

1. 최적거리

원형관을 따라 이동하는 유체의 난류정보는 상류

2. 유속측정 범위와 보정계수

상호상관 방식으로 유량측정이 가능한 유속범위는 최저 0.25m/s에서 최대 16.2m/s까지로 평가되었으며, 이 범위는 일반적인 공정에서의 유동범위를 포함한다. 일반적으로 상호상관 방식이 고속 유동에 대해 거의 무제한적으로 적용 가능한 것으로 알려져 있음에 비추어 볼 때 16.2m/s 보다 더욱 큰 범위까지 측정이 가능할 것으로 예측된다. 실험 결과 전반적으로 1m/s 이상의 유동속도에서는 상관관계가 잘 이루어졌으며, 유속측정 결과가 좋은 반복성을 보였다. 반면에 1m/s 이하의 낮은 유속에서는 고속 유동에 비해

상관함수가 넓은 형태로 나타나는 경향을 보였다. 이 경우 수집간격을 증가시키면 넓은 형태의 상관함수가 시간축의 중심으로 이동되면서 압축된 형태를 보여주기 때문에 결과적으로 전체 시간축이 증가되어 고속 유동에서와 같은 분해능을 유지할 수 있다. 그러나 0.25m/s 이하의 저유속에서는 유동신호의 상관화가 어려웠다.

그림 6은 접촉식(contactive type) 형태의 적용 실험에서 상호상관 방식으로 측정된 유속 \bar{V}_{cross} 와 중량식 유량표준장치로 측정된 기준유속 \bar{V}_{ref} ($=\bar{V}_{pipe}$)의 비교를 나타낸다. 여기서, \bar{V}_{pipe} 는 유동관의 실제 평균유속이며, \bar{V}_{cross} 는 상관함수 계산으로부터 얻어진 초음파 투과영역에서의 평균유속이다.

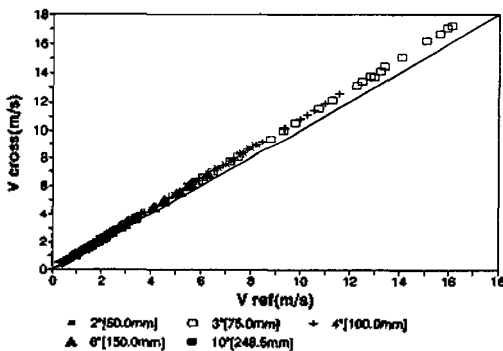


그림 6. 접촉식 응용에서 보정전 상호상관 유속과 파이프 평균유속간의 관계

Fig 6. Relationship between the cross correlated and the pipe mean velocities in contactive application

그림 6의 실험결과는 앞장에서 설명한 바와 같이 \bar{V}_{cross} 가 \bar{V}_{pipe} 에 비해 약 8% 정도 크게 나타났다. 이와 같은 원인은 앞서 언급한 바와 같이 초음파 변환기의 빔폭에 해당하는 구간에서의 평균유속은 배관 전체의 평균유속과 다르기 때문이다. 이와 같은 두가지 평균유속은 선형관계인 것으로 보이나 실제로는 선형관계로 주어지지 않는다. 그 이유는 식(8)에서 알 수 있듯이 보정계수가 유속에 의존한다기 보다는 비선형적인 관계로 주어지는 레이놀즈 수에 의존하기 때문이다. 그림 7과 같이 각 측정값을 보정계수 ($\bar{V}_{pipe} / \bar{V}_{cross}$)와 레이놀즈 수의 관계로 나타내어 보면 앞서 언급한 두가지 평균유속들이 비선형적인 관계가 있다는 것을 확인할 수 있다. 그림 7의 ---선은

식(8)에 의해 산출한 이론적 보정값을 나타내는데 이는 실험값보다 크다는 것을 알 수 있다. 결과적으로 이론적 보정값을 평균유속 산출에 적용할 경우 실제 평균 유속보다 1~5% 정도 큰 측정결과를 나타내게 된다. 따라서 실험결과를 최적조건으로 대표할 수 있는 경험적 보정이 필요하며, 실험결과를 토대로 한 회귀분석 결과, 원형관 레이놀즈 수를 함수로 하는 경험적 보정식은 다음 식으로 주어진다.

$$\alpha = 0.7111 + 3.274 \times 10^{-2} \cdot \text{Log}_{10} Re \quad (9)$$

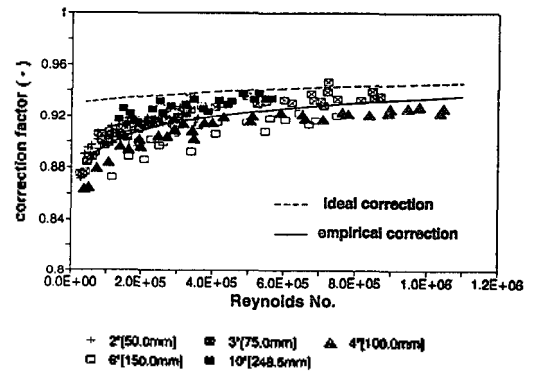


그림 7. 접촉식 응용에서 보정계수와 레이놀즈수의 관계

Fig 7. Correction factors vs Reynolds number in contactive application

경험적 보정값은 $3 \times 10^4 < Re < 2 \times 10^5$ 범위에서 0.86 $< \alpha < 0.91$ 이며, 레이놀즈 수에 대해 비선형적으로 증가한다. $Re > 2 \times 10^5$ 이상의 영역에서는 거의 1차적으로 증가하였다. 식(8)로 표현되는 이상적 윤활 원형관의 경우를 비교해 보면, 그림 7에 나타난 바와 같이 이상적 보정곡선은 최대 5%까지 경험적 보정곡선과 차이가 있다. 이 차이는 낮은 레이놀즈 수 영역에서 더욱 두드러지며, 레이놀즈 수의 증가에 따라 편차가 감소하는 경향을 보인다. 이러한 현상은 윤활 원형관과 실험에 사용된 공정 배관과의 유속분포 차이에 기인하는 것으로 보인다. 즉, 원형관의 벽면마찰(wall friction)이 윤활 원형관의 벽면마찰 보다 크기 때문에 동일한 평균유속에서 원형관에서의 유속분포가 더욱 가파르게 되며, 초음파가 투과되는 부분에서 더욱 큰 유속정보를 가지게 되기 때문이다. 이상의 결과를 종합해 볼 때 실제 공정상태에서는 이상적 보정곡선 보다 경험식을 이용하는 것이 더욱 정확하게 평

관유속을 결정할 수 있다는 것을 알 수 있다. 그림 8은 경험적 보정식을 이용하여 상호상관 방식으로 측정한 유속을 원형관의 평균유속으로 보정한 것으로, 0.25m/s - 16.2m/s의 범위에서 최대 표시눈금(full scale) 대비 $\pm 1\%$ 이내의 오차로 평균유속 측정이 가능함을 보여준다.

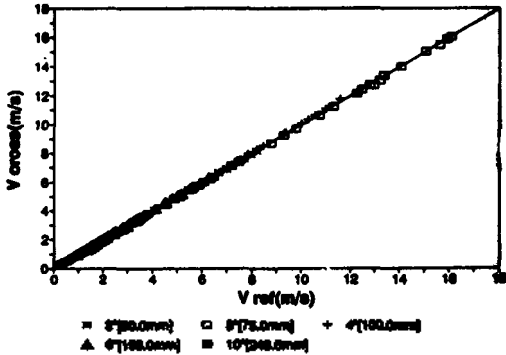


그림 8. 접촉식 응용에서 보정된 상관유속과 파이프 평균 유속과의 관계
 Fig 8. Relationship between the corrected and the pipe mean velocities in contactive application

3. 유속측정의 정확도

가. 접촉식 응용

그림 8은 최대 표시눈금(full scale)을 기준으로 해서 상호상관 방식으로 측정한 유속과 기준유속을 비교한 것이므로 상대적으로 낮은 유속에서의 정확도 평가는 불분명하다. 따라서 전반적인 정확도 평가를 위해서는 유속 범위별로 정확도를 평가해야 한다. 그림 9는 접촉식 실험방법으로 각 유속점에서의 유속 측정오차를 환산하여 나타낸 것이다. 종축의 편차는 식(9)에 의해 보정했을 때의 유속별 편차를 나타낸다. 여기서 ----선은 식(8)에 의해 산출된 이상적 유효관의 보정곡선을 나타낸다.

그림 9는 $10^4 < Re < 10^6$ (유속: 0.25m/s - 16.2m/s) 범위에서 상호상관 방식으로 측정된 평균유속의 정확도의 변화를 나타낸다. 이러한 유속범위는 대부분의 공정이나 산업적인 응용의 범위를 포함한다. 전체 데이터는 95% 신뢰구간에서 $\pm 2.0\%$ 이내의 불확도 (uncertainty)를 나타내었다. 불확도는 고속유동으로 갈수록 1% 정도로 점차 작아지는 경향을 보였다. 이와 같은 경향은 상호상관 방식의 측정원리가 고속

유동에 있어서의 거의 제한없이 측정 가능하다는 점에 비추어 볼 때 예상되는 결과이다. 또한 공정배관의 경우 표면이 상당히 매끄럽다 하더라도 이론적인 유효관의 경우와 차이가 있음을 알 수 있는데, 이상적 유효관의 유속분포를 그대로 적용할 경우 낮은 레이놀즈 수에서는 약 5%, 높은 레이놀즈 수 영역에서는 1% 정도로 평균유속이 높게 예측된다.

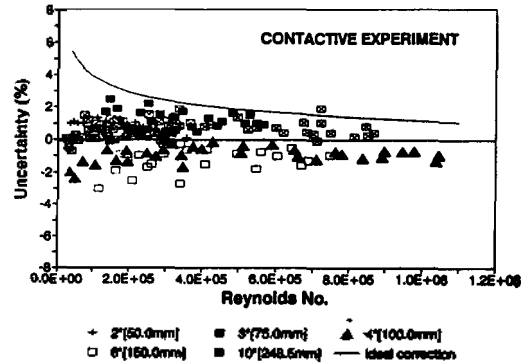


그림 9. 레이놀즈수에 따른 평균유속의 불확도
 Fig 9. Uncertainty of the flow mean velocity vs Re

나. 비접촉식 응용

상호상관 유속측정 기술의 비접촉식 적용은 공정배관의 외벽에 부착하여 현장진단이 용이하기 때문에 매우 중요하다. 부착식(clamp-on) 변환기는 그림 4(나)의 형태로 제작하여 내경 75.0mm 및 81.4mm의 원형관 외벽에 부착하여 실험하였다. 비접촉식 실험 결과는 그림 10에 접촉식 유동측정 결과와 함께 제시하였다. 경험적 보정을 하였을 때 비접촉식 측정결과는 주어진 유속에 대해 접촉식 측정결과보다 1.5% 더 크게 지시하였으며, 이상적인 보정곡선에 보다 접근하는 결과를 얻었다. 이러한 계통적인 차이는 비접촉식 경우에는 초음파 변환기와 송·수신용 변환기의 진동판을 유체와 접촉시키기 위한 천공이 없기 때문에 유동상태가 보다 안정되기 때문인 것으로 분석된다. 경험적 보정식을 사용할 경우 비접촉식 실험결과의 불확도 범위는 우연 및 계통오차를 모두 포함하여 95% 신뢰구간에도 $\pm 2.8\%$ 로 나타났다. 비접촉식 측정결과는 접촉식 측정결과에 비해 이론적 보정식에 더 접근하는 경향을 보였다. 그러나 비접촉식 측정의 경우에도 이론적 보정보다는 경험적 보정식을 이용하는

것이 측정오차가 감소되었다. 따라서 두 종류의 초음파 변환기 부착방법 모두 경험적 보정을 적용하는 것이 적합한 것으로 나타났다. 실험결과를 통해 볼 때 상호상관 방식을 이용한 비접촉식 측정방법은 불확도 범위 $\pm 3\%$ 이내에서 공정유동 진단에 활용할 수 있을 것으로 평가된다.

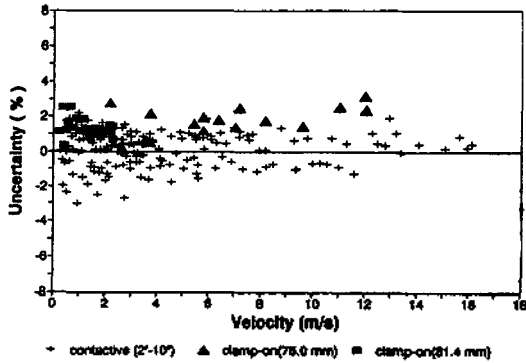


그림 10. 경험적 보정의 경우 접촉식과 비접촉식 응용의 유속 측정오차의 비교

Fig 10. Comparison of the flow velocity deviation between contactive and non-contactive application when applying the empirical correction

다. 개별 교정

지금까지 설명한 접촉 또는 비접촉식 상호상관 유량측정 기술은 공정 유동 원형관에서 평균유속 또는 유량측정의 새로운 진단 기법으로 활용될 수 있다. 그러나 상호상관 유량측정의 연구결과는 이러한 진단 기법에의 적용 외에도 독립적인 유량계의 설계와 제작에 응용될 수 있다.

그림 11은 접촉식 응용의 경우 구경별로 각기 개별 교정을 할 경우의 유속측정 정확도를 보여준다. 즉, 경험적 보정을 일률적으로 적용하지 않고 표준유속과 비교하여 각 구경별로 개별적인 보정을 하게 될 경우의 정확도이다. 실험결과는 0.25m/s에서 16.2m/s까지의 범위에서 정확도 수준이 $\pm 1.3\%$ 이내로 나타났다.

이 결과는 독립적 형태의 유량계를 제작하여 개별적 교정과정을 거치면 기존의 유량계보다 우수하거나 동등한 성능의 유량측정 기기로 활용될 수 있음을 나타낸다. 이러한 형태의 유량계는 일반적인 올리피스 등의 차압식 유량계가 큰 압력손실을 가져온다는

점과 터어빈형이나 볼텍스형의 유량계가 갖는 부식 (corrosion) 및 마모(erosion) 등의 기계적 단점을 해결할 수 있는 좋은 해결방안이 될 수 있다.

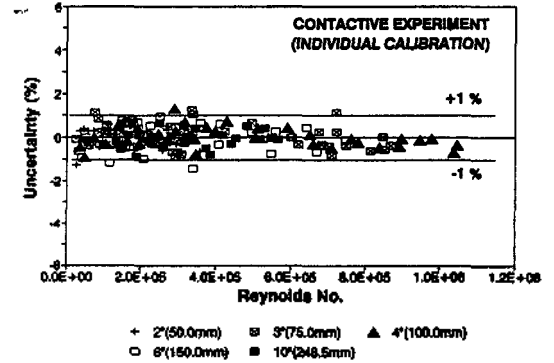


그림 11. 개별교정의 경우 레이놀즈 수의 함수로 나타낸 유속측정 오차

Fig 11. Velocity measurement deviation as a function of Reynolds number in case of individual calibration

V. 결 론

본 논문에서는 고속 후리에 연산을 이용한 상호상관 방식의 초음파 유속 측정기법을 원형관의 공정 유동측정에 적용하였다. 상호상관 신호는 상·하류측의 초음파 변환기 사이의 거리가 원형관의 내경과 같거나 2배 이내일 때 신호의 크기와 감도가 우수하였음을 확인하였다. 아울러 상·하류 변환기 사이의 거리가 배관 직경의 2배 이내의 범위에서도 100mm 이하 일 경우에는 변환기 사이의 상호 신호간섭으로 인해 오차가 야기됨을 확인하였다.

상호상관 방식의 평균유속 측정범위는 최소 0.25m/s에서 유동장치의 최대발생 유속인 16.2m/s($10^4 < Re < 10^6$)까지 최대최소 유속비가 60:1 이상으로 좋은 결과를 얻었다.

실험범위 내에서 원형관 유속측정의 정확도는 배관에 초음파 변환기를 배관에 삽입하기 위해 구멍을 낸 접촉식 측정의 경우 50mm-248.5mm까지의 배관 직경에서 $\pm 2\%$ 이내, 배관의벽에 비접촉식으로 설치할 경우에는 $\pm 2.8\%$ 이내로 측정이 가능하였다. 또한 접촉식을 공정 측정용의 기기로 활용하기 위하여

일정한 크기의 공정 배관별로 교정하여 사용할 경우에는 $\pm 1.3\%$ 이내로 측정이 가능하다.

본 연구결과는 대형 상수관 또는 원자력 발전소의 주급수 유량측정등 유동액체를 다루는 제반 산업공정의 진단을 위해 활용될 수 있다. 또한 독립된 유량계의 형태로 기계적 구동부가 없는 유량계로서의 활용도 가능하다. 이의 일환으로 현재 본 연구실에서는 실시간 상호상관 연산을 실행하여 평균유속을 진단할 수 있는 디지털 신호처리(DSP) 기기의 제작을 진행 중에 있다.

참 고 문 헌

- Bentley, P. G. and G. Dwason, "Fluid Flow measurement by transit time analysis of temperature fluctuations", *Trans. Soc. Instrum. Tehnol.*, pp. 183-193, 1966.
- Olszowski, S. T., J. Coulthard and I.R.S Sayles, "Measurement of dispersed two-phase gas-liquid flow by cross correlation of modulated ultrasonic signals," *Int. J. Multiphase Flow*, 2, pp. 537-548, 1976.
- Goh, C. K. and Bentley, O. P., "Investigation into cross correlation techniques to measure low velocity flow gases", *Flow-con '77*, London, The Institute of Measurement & Control, pp. 409-432, 1977.
- Kippan, H. and F. Mesch, "Flow measurement Systems using transit time correlation", *FLOMEKO '78-Flow measurement of Fluids*, pp. 409-416, 1978.
- Henry, R. M., "An alternative algorithm for performing polarity correlation", *2nd British Conf. on Technique of correlation and Spectral Techniques*, pp. 4, 1978.
- Nikuradse, J., "Gesetzmäßigkeit der turbulenten Strömung in glatten Röhren", *Forsch. Arb. Ing. Wes.*, no. 356, (1932) in Schlichting, H., "Boundary-Layer Theory," 7th ed., McGraw-Hill, 1979.
- Beck, M. S., "Recent Developments and future of cross-correlation flowmeters", *Int. Conf. Advances in Flow Measurement Technique*, pp. 241-252, 9-11 September, University of Warwick, England, 1981.
- Keech, R. P., "Multichannel Correlation Signal Processor for Velocity Measurement", *Technical paper of Kent Industrial Measurement, LTD (reprint form Trans. Inst Measurement and Control, vol.4, no.1, 1982), 1983.*
- Coulthard, J., "Cross-correlation flow measurement history and the state of the art," *Measurement and Control*, vol.16, pp. 214, 1983.
- Sidney, J. K., N.W. King and J. Coulthard, "The measurement of individual phase-flow rates using an ultrasonic cross-correlation flowmeter in Air-Kerosene mixtures", *2nd Int. Symp. Fluid-Control, Measurement, Mechanics and Flow Visualization*, pp. 134-137, 5-9 september, sheffield, England, U. K. 1988.
- Xu, L. A., R. G. Green, A. Plaskowski and M.S. Beck, "The Pulsed ultrasonic cross correlation flowmeter for two phase flow measurement", *J. Phys. E: Sci, Instrum*, 21, pp. 406-1988.
- 김창호 등, "Cross Correlation 기법을 활용한 유량측정기술 개발," *특정연구보고서 KRISS-92-085-IR*, 1992.
- Kim, C. H. and D. G. Lee, "Application of Cross Correlation Technique for Water Flow Measurements", paper presented at *Int. Conf. Flow Measurement for the Utilities*, 4-5 November, Amsterdam, 1993.

▲ 김 창 호



1956년 2월 28일 생
 1979년 2월 : 아주대학교 화공과 (공학사)
 1981년 2월 : 한국과학원 화공과 (공학석사)
 1985년 12월 : 프랑스 툴루즈국립 공대(I.N.P.T.)
 화공대학(E.N.S.I. G.C.) (공학박사)
 1985년~1986년 3월 : 프랑스 CNRS 192연구소(연구원)
 1990년 11월~1992년 1월 : 독일연방물리연구소(P.T.B.),
 유체역학연구소(방문연구원)
 1986년 3월~현재 : 한국표준과학연구원 역학연구부 유체유동그룹(선임연구원)
 ※주관심분야 : 유동해석, 유체기계, 난류신호처리

▲이 덕 기



1960년 6월 14일 생
1986년 2월 : 인하대학교 전자공
학과(공학사)
1986년 3월 ~현재 : 한국표준과학
연구원 역학연구부 유
체유동그룹(연구원)
※ 주관심분야 : 유체기계, 신호
처리

▲조 문 재 : 13권 1호 참조

▲백 중 승



1948년 5월 19일 생
1970년 : 서울대학교 문리대 화
학과(이학사)
1981년 : 미국 위스컨신 대학교
재료공학과(Ph.D.)
1981년 ~ 1983년 : 위스컨신 대 연
구원
1983년 ~ 현재 : 한국표준과학연구
원 역학연구부 유
체유동그룹(책임
연구원, 부장)

※ 주관심분야 : 유량계측, 유체기계