

초음파 유량계를 통하는 기체유동의 CFD 해석

김재형[†] · 김희동* · 이호준** · 황상윤**

A CFD Analysis of Gas Flow through an Ultrasonic Meter

Jae-Hyung KIM, Heuy-Dong KIM, Ho-Joon LEE and Shang-Yoon HWANG

Key Words : Ultrasonic Meter (초음파 유량계), Acoustic Wave (음파), Compressible Flow(압축성 유동), Mean Velocity (평균 유속), Mass Flow Rate (질량유량), Flow Meter(유량계)

Abstract

Ultrasonic flow metering(UFM) technology is being received much attention from a variety of industrial fields to exactly measure the flow rate. The UFM has much advantage over other conventional flow meter systems, since it has no moving parts, and offers good accuracy and reliability without giving any disturbances to measure the flow rate, thereby not causing pressure losses in the flow fields. In the present study, 3-dimensional, unsteady, compressible Navier-Stokes equations are solved by a finite volume scheme, based upon the second order upwind scheme for spatial derivatives and the multi-stage Runge-Kutta integral method for time derivatives. In order to simulate multi-path ultrasonic flow meter, an excited pressure signal is applied to three different locations upstream, and the pressure signals are received at three different locations downstream. The mean flow velocities are calculated by the time difference between upstream and downstream propagating pressure signals. The obtained results show that the present CFD method simulates successfully ultrasonic meter gas flow and the mean velocity measured along the chord near the wall is considerably influenced by the boundary layers.

1. 서론

일반적으로 초음파 유량계는 측정부 유로내에 유량 측정을 위한 기타 장애물을 설치할 필요가 없으므로, 유량 측정시 발생하게 되는 압력손실이 거의 없으며, 타의 유량 측정장치에 비하여, 유량 측정 범위가 매우 넓은 장점을 가지고 있다⁽¹⁾. 이뿐만 아니라, 유량 측정을 위해 요구되는 기계적인 운동부분이 없으므로, 초음파 유량계의 유지관리가 매우 용이한 장점을 지니고 있다.

종래 초음파 유량계는 음향 임피던스의 매칭이 좋은 액체용 유량계로 연구개발이 진행되어 왔으며, 대부분의 경우 초음파 펄스가 유동의 속도에 상대적으로 전파하는 시간 변화량을 측정하여 유량을 얻는 방법을 채택하고 있다⁽²⁾. 예를 들어, 관을 통하여 물이 유동하는 경우, 물의 음속은 대략 1500m/s 정도로 초음파 펄스가 관경을 횡단하는데, 지극히 짧은 시간을 소요하게 된다. 이 경우, 초음파 펄스의 전파시간을 측정하기 위해서는 매우 짧은 시간내에 초음파를 탐지할 수 있는 전자회로의 구성이 필요하다.

최근 전자 회로 기술의 발달로 인하여, 초음파 펄스의 전파시간의 계측 정도가 매우 향상되었으며, 초음파 펄스의 검출신호의 S/N 가 향상되어 구경이 매우 작은 관을 통하는 액체 및 기체의 유량도 충분한 정도로 계측이 가능한 것으로 알려져 있다⁽³⁾. 더욱이 최근에 환경모니터링, 반도체 제조 공정 등⁽⁴⁾의 응용분야에서는 미소유량을 측정할

[†] 안동대학교 기계공학과 대학원

E-mail : kimhd@andong.ac.kr

TEL : (054)820-5622 FAX : (054)821-5495

* (주) 창민테크 부설연구소

** 안동대학교 기계공학부

수 있는 유량계의 개발이 절실하게 요구되고 있어, 초음파 유량계에 관한 연구개발은 매우 중요한 공학적인 과제임에 틀림없다.

그러나 관경이 매우 작은 경우라든지 지극히 미소한 유량을 초음파 유량계로 측정하는 경우, 초음파 펄스의 유동에 의한 전파시간이 매우 짧아지게 되기 때문에, 실제로 유량 측정이 매우 곤란하게 되는 어려움이 있다. 더욱이 초음파 유량계는 초음파 펄스의 전파 경로상의 평균 유속으로터 유량을 얻게 되므로, 유동이 층류에서 난류로 천이를 하는 경우라든지, 유동자체가 매우 강한 난류 성분을 포함하는 경우에 초음파 유량계로 측정할 유량의 정도는 계측 유동의 속도분포에 강하게 의존하게 된다⁽⁵⁾. 따라서 초음파 펄스의 전파시간의 계측 정도의 향상과 유속분포의 변화에 의한 유량계의 유량특성의 변화 등을 충분히 고려하지 않으면 유량계측에 큰 오차를 수반하게 된다⁽⁶⁾.

한편 각종 반도체의 제조공정, 의료, 각종 화학공정 등의 분야에서 유량 계측을 위하여 적용되어 온 열식 유량계⁽⁷⁾나 기타 차압식 유량계⁽⁸⁾의 경우, 미소한 유량의 계측이 사실상 곤란할 뿐 만 아니라, 유량계의 장기간 사용시 유지 보수 및 안정성의 문제가 있을 수 있다. 따라서 이러한 점들을 극복할 수 있는 초음파에 의한 유량 측정기술은 향후 각광을 받을 것으로 기대된다.

본 연구에서는 다회선 초음파 유량계의 개발을 위하여, 수치해석적 방법으로 초음파 유량계를 통하는 유동장을 모사하였다. 수치계산에서는 비정상, 압축성 Navier-Stokes 방정식에 유한체적법을 적용하였으며, 난류모델로는 표준형 $k-\epsilon$ 난류모델을 이용하였다. 또 관벽상의 임의의 지점으로부터 조사되는 초음파를 모사하기 위하여, 유동장에 미소한 압력변동을 부여하여, 압력변동의 신호가 유동장을 횡단하여 반대편 관벽에 도달하는데 걸리는 시간을 수치해석적으로 조사하였다.

본 연구는 다회선 초음파 유량계 유동을 예측하고, 초음파의 전파경로와 유동의 속도분포와의 상관관계를 규명하고, 다회선 초음파 유량계의 효과적인 유량산출의 기법을 개발하기 위한 기초연구로, 본 연구의 결과로부터 수치해석적 방법으로 초음파 유량계를 통하는 유동의 예측이 가능하다는 것을 알았다.

2. 초음파 유량계의 계측 원리

초음파 유량계에 있어서, 초음파 센서의 취부 방식에 관해서 종래 많은 연구가 수행되어 왔으며, 또 작동유체가 액체인가 기체인가에 따라 센서의 취부 방법에 차이가 있을 수 있다. 또 관경이 매우 작은 경우, 초음파의 전파시간이 지극히 짧아져, 초음파 검출의 분해능력에 한계가 있을 수 있

으므로, 이 경우 실험적 방법으로 초음파 유량계의 특성을 조사하는 것은 사실상 곤란하다. 예를 들어 직경이 내경의 수 mm 정도인 관에서 초음파의 전파시간은 수 ns 정도로 초음파 탐지를 위해서는 고도로 정밀한 전자회로를 구성하지 않으면 초음파의 전파시간을 사실상 계측하기가 어렵다. 더욱이 측정부의 유로직경이 매우 작은 경우, 초음파 센서의 취부에 어려움이 있게 되며, 유량계측의 정도가 나빠지게 되는 문제가 있다. 이 경우 수치해석적 방법은 초음파 유량계의 연구개발에 매우 유용한 도구가 될 수 있으며, 장래 초음파 유량계의 설계 및 성능을 평가하는데 필수적이라 할 수 있다.

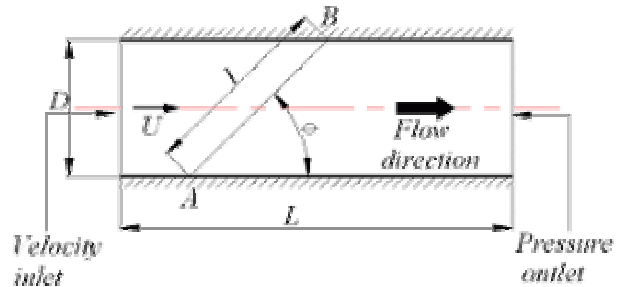


Fig. 1 Schematic of a Ultrasonic meter

Fig. 1 에는 초음파 유량계의 유량계측 원리를 설명하기 위하여, 직경인 D 인 관을 통하는 비압축성 유동을 개략적으로 도시하였다. 유동은 그림의 왼쪽에서 오른쪽으로 향하며, 그림에서 관 단면을 횡단하는 국소유동의 속도를 U 라고 정의한다. 그림의 관 벽의 임의의 점 A 와 B 에서 초음파 센서를 설치한다. 그림에서 점 A 와 B 사이의 거리는 l 로 정의하며, 점 B 는 점 A 와 ϕ 의 각도를 이룬다. 이 경우 점 A 의 초음파 센서로부터 조사된 초음파는 유동의 속도방향으로 진행하여 점 B 에 도달하는데 까지 걸리는 시간을 t_1 이라고 가정하며, 반대로 점 B 의 센서로부터 조사된 초음파가 유동을 거슬러 점 A 의 센서까지 도달하는데 걸리는 시간을 t_2 로 하는 경우, t_2 는 t_1 보다 크게 된다. 구체적으로 점 A 로부터 조사된 초음파는 초음파의 전파속도(음속, a)와 국소유속(u)의 합인 속도($a+u$)로 점 B 를 향해 전파하게 되며, 반대로 점 B 의 센서로부터 센서 A 로 향하는 초음파의 전파속도는 $a-u$ 로 주어진다.

위에서 기술한 초음파의 전파시간은 각각 다음의 식으로 주어진다.

$$t_1 = \int_0^l \frac{dl}{a - U \cos \phi} \quad (1)$$

$$t_1 = \int_0^t \frac{dl}{a + U \cos \phi} \quad (2)$$

위의 두 식으로부터 t_1 과 t_2 가 얻어지는 경우, 초음파 경로상을 통과하는 유동의 평균유속은 U_m 은 다음의 식으로 얻어진다.

여기에서 Δt 는 $t_2 - t_1$ 이며, 은 초음파 경로상의 미소길이이다. 또 초음파 경로상에서 얻어지는 평균유속 U_m 으로부터 평균유량을 얻을 수 있다.

$$U_m = \frac{l \Delta t}{2t_1 t_2 \cos \phi} \quad (3)$$

3. 수치해석 및 경계조건

본 연구에서는 다회전 초음파 유량계의 유동장을 모사하기 위하여, 3 차원, 비정상, 압축성 Navier-Stokes 방정식에 유한체적법을 적용한 수치계산을 수행하였다.

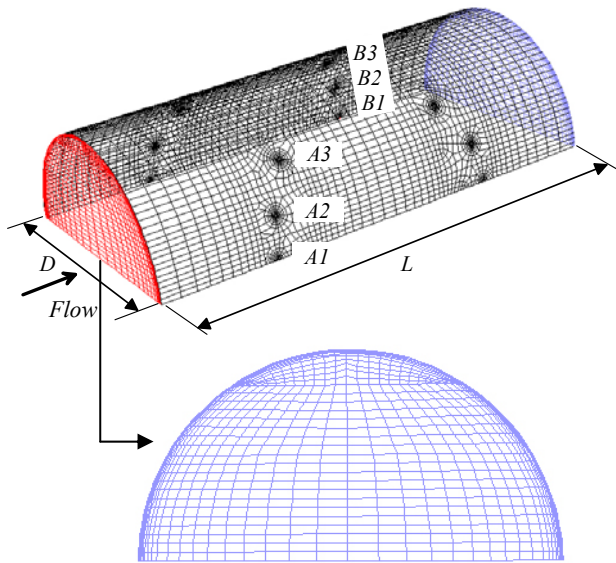


Fig. 2 Computational domain and structured grid system

Fig. 2 는 본 연구에 적용된 초음파 유량계의 계산 영역 및 격자계를 나타낸다. 관의 직경(D)는 0.1566m 이며, 관의 길이(L)는 4D 이다. 관의 상류에 설치한 초음파 센서는 A1, A2 및 A3 로, 하류의 초음파 센서는 B1, B2 및 B3 로 명명한다. 서로 매칭이 되는 센서들은 관의 대칭면에 대하여, $\phi = 45^\circ$ 로 위치한다. 이때 chord 1, 2 및 3 은 각각 A1 과 B1, A2 와 B2 그리고 A3 와 B3 의 직선경로를 의미한다. 한편 초음파 센서 A1, A2 및 A3, 그

리고 B1, B2 및 B3 의 위치는 Fig. 3 에 나타냈었다. A1 및 B1 은 대칭면 상에 위치하며, A2 및 B2, A3 및 B3 는 대칭면에서 각각 0.026, 0.052m 의 수직한 높이에 위치한다.

본 수치계산에 적용된 경계조건으로는 관의 입구부분에 velocity inlet 조건으로 유속(U)은 1 및 3m/s 로 변화시켰으며, 관 출구에는 pressure outlet 조건을 적용하였다. 관 벽은 단열 no-slip 벽조건을 적용하였으며, 관의 상류 및 하류의 초음파 센서 위치에서는 관을 횡단하는 초음파의 조사를 모사하기 위하여, pressure outlet 조건을 적용하였다.

본 연구에서는 입구 유속 U 를 적용한 정상 유동해를 구한 후, 단계적으로 A1~A3 및 B1~B3 에서의 압력을 여기시켜, 비정상해를 구하였다. 정상계산에서 입구 유속 U 는 균일 유동으로 가정하였다. 비정상 계산에서 압력변동은 sin 주기함수로 주었으며, 진폭은 하류 배압의 0.099%, 주파수는 20kHz 로 가정하였다. 본 수치계산에서는 time step 을 1×10^{-6} s 로 적용하였으며, 각각의 초음파 센서 취부 위치에서의 시간변동 압력을 구하여, 초음파 유량계의 유동장을 조사하였다.

본 연구에 사용된 격자수는 대략 8 만개 정도이며, 관 입구 부분의 격자형상은 Fig. 2 의 아래 그림에 상세하게 나타내었다. 격자는 관의 벽면과 초음파 센서 근처에 집중하였다.

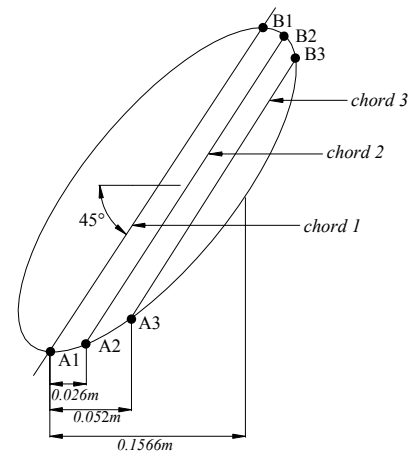


Fig. 3 Details of ultrasonic chords

4. 결과 및 고찰

본 수치계산에서는 정상계산을 수행하여 관내 유동장을 얻은 후, 각각의 초음파 센서 위치에 압력변동을 적용하여, 초음파 유동장을 모사하기 위한 비정상 계산을 수행하였다. 비정상 계산시 사용된 압력변동의 입력신호를 Fig. 4 에 나타내었다. 종축은 압력 p 와 평균압력 p_{av} 의 차를 평균압력으로 무차원 값이며, 횡축은 시간을 의미한다. 여기

에서 평균압력은 정상계산에서 각 센서위치에서 얻어진 압력을 의미한다.

초음파 유량계 유동을 모사하기 위한 본 수치 계산법의 검증 결과를 Fig. 5 에 나타내었다. 여기에서 관내의 유속은 없으며, 각 실선은 chord 3 에서 수신한 압력신호를 의미한다. 그림에서 A 는 관의 상류에서 초음파를 조사하였을 경우, 하류에서 수신한 압력신호를, B 는 관의 하류에서 초음파를 조사하였을 경우, 상류에서 수신한 압력신호를 의미한다. 이론적으로 유속이 없는 경우, D 와 U 는 동일한 신호로 수신되어야 하며, 본 수치계산 결과 역시 동일하게 나타난다.

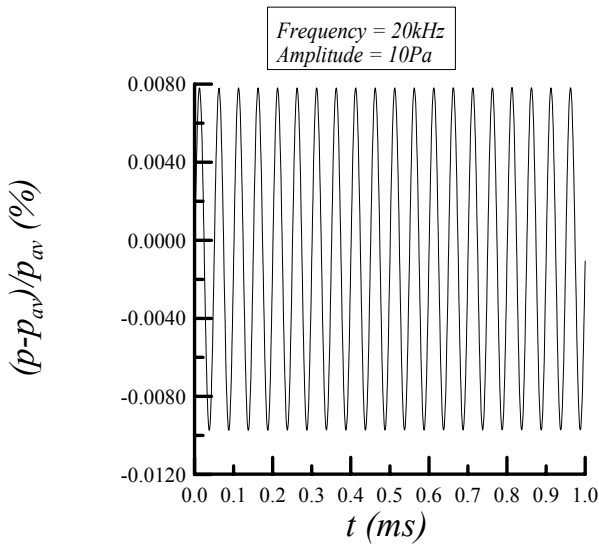


Fig. 4 Input pressure signal

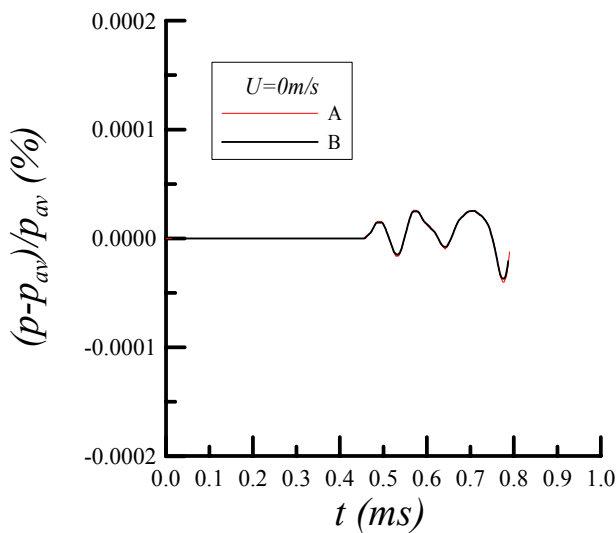


Fig. 5 Verification of CFD method

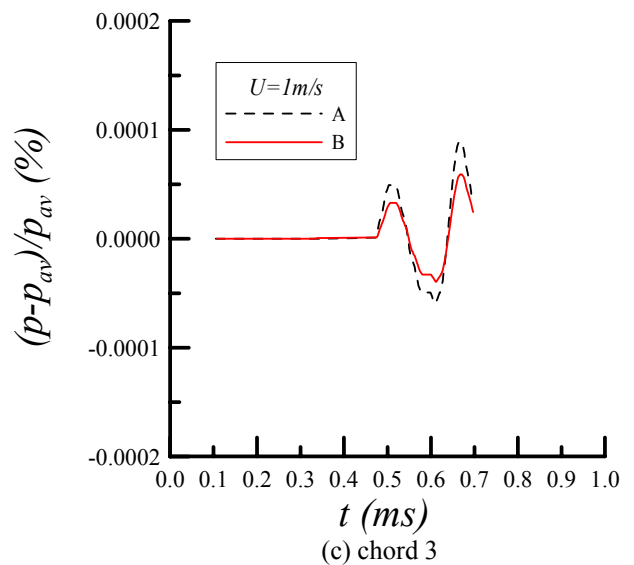
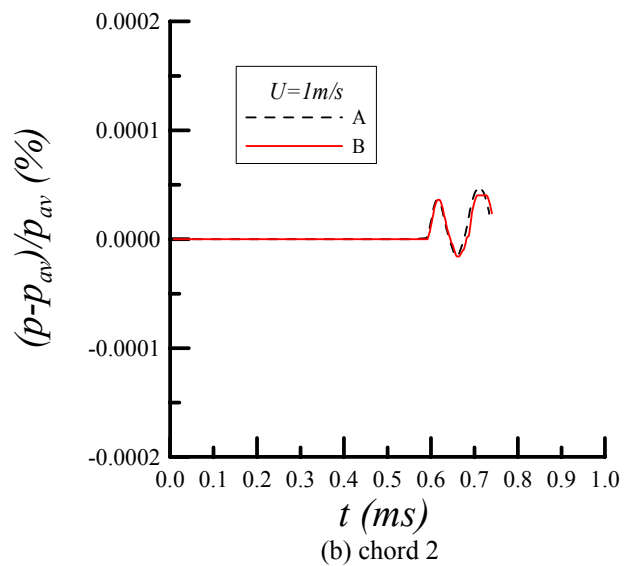
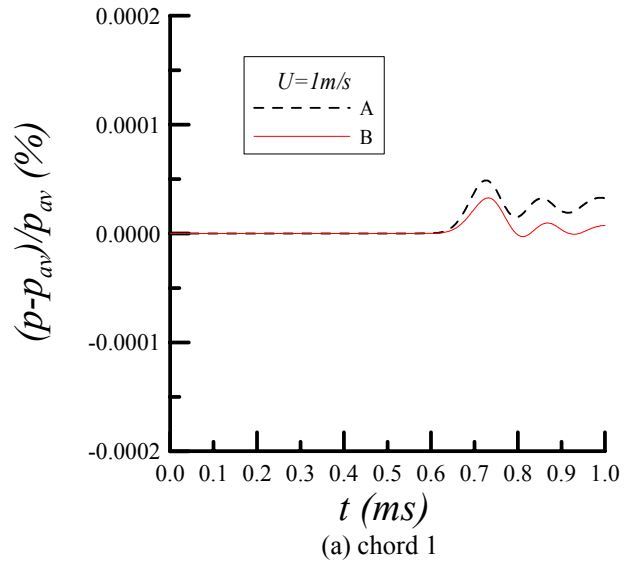
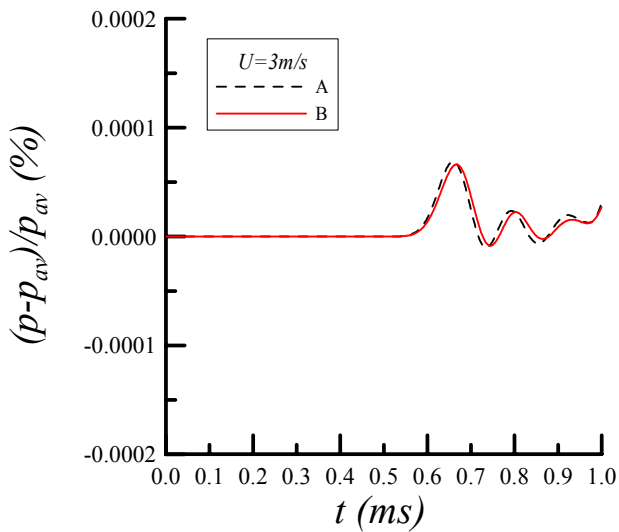
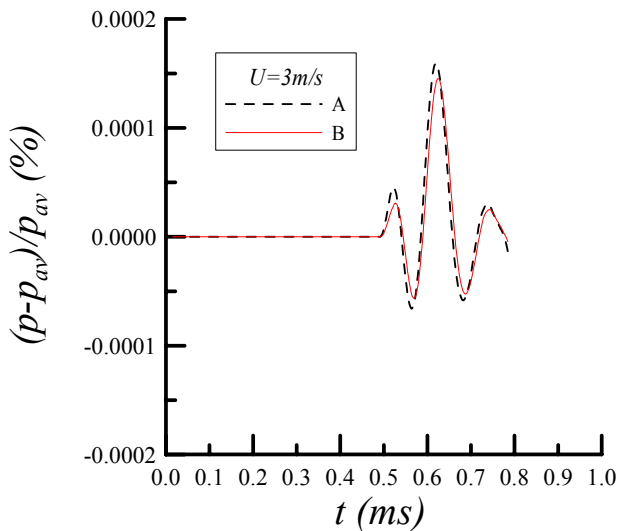


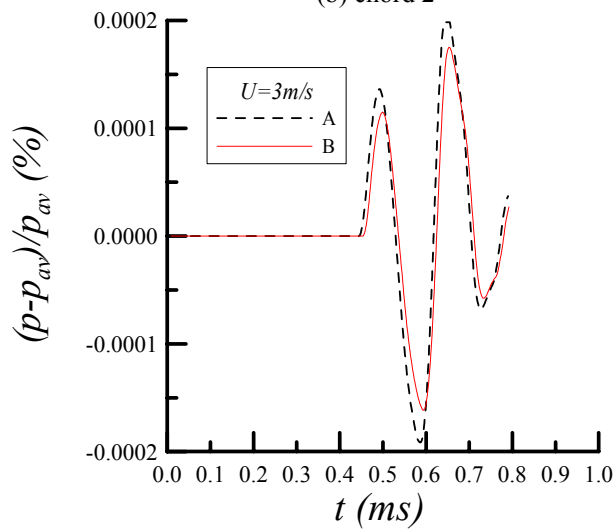
Fig. 6 Received pressure signals at U = 1 m/s



(a) chord 1



(b) chord 2



(c) chord 3

Fig. 7 Received pressure signals at $U = 3\text{m/s}$

Fig. 6는 유입 유속이 1m/s 인 경우, 각 초음파 센서에서 수신한 압력변동 신호를 나타낸다. Fig. 6(a)는 1번 회선에서의 압력변동을 나타낸다. 본 연구에서는 상류에 설치한 초음파 센서 A1, A2 및 A3, 그리고 하류의 B1, B2, 및 B3에서 수신한 압력변동의 신호들로부터 초음파가 전파하는 시간차를 구하기 위하여, 시간 t_1 과 t_2 는 수신파의 첫 번째 주기의 최대값이 나타나는 시간을 이용하였다. 이때 얻어진 평균 유속은 1.03m/s 이다. (b)와 (c)는 2회선과 3회선에서의 압력신호이며, (a)에서와 동일한 방법으로 산출한 평균 유속은 각각 1.025 와 0.98m/s 이다. 또, 수신파의 진폭은 Fig. 4의 가진 함수의 진폭에 비하여, 약 10%이내로 나타나고 있으며, 초음파 회선이 관의 대칭면에서 벗어날수록 초음파의 감쇠가 줄어들고 있다.

Fig. 7은 유입 유속이 3m/s 인 경우, 각각의 회선에서 수신한 압력변동 신호를 나타낸다. Fig. 6의 경우와 동일한 방법으로 평균 유속을 산출한 결과, 각 회선에서 3.05 , 3.0 및 2.867m/s 의 평균 유속이 나타난다. 유속이 1m/s 인 Fig. 6와 비교할 때, 유속이 빨라짐에 따라 각 회선에서의 수신 주기 차이는 다소 늘어나며, 진폭도 크게 나타난다.

Fig. 8과 9은 유입 유속이 각각 1 , 3m/s 일 경우, 속도 분포와 등속도분포를 나타낸다. 그림의 종축(V_x)은 축방향 속도성분을 나타내며, 횡축은 반경 방향의 거리 y 를 관의 직경 D 로 무차원 값이다. 본 수치계산에서 얻어진 실제 속도분포 곡선은 $x = 1D$ 의 위치에서의 값이다. 먼저 Fig. 7의 경우, 초음파 유량계의 계측 원리를 이용하여, 각 회선에서 얻어진 평균 유속값은 동일한 y/D 에서 실제 유속보다 다소 낮게 예측한다. 또, 회선의 길이(l)가 짧아질수록, 실제 유속과 초음파에 의해서 얻어진 평균 유속과의 차이는 점차 증가한다. 이러한 경향은 Fig. 9에서도 동일하게 나타난다. 초음파 경로가 관의 대칭면에서부터 멀어지면, 초음파가 이동하는 전체 경로에 대한 경계층의 영역이 차지하는 비율이 증가하게 되어, 실제 유속값에 비하여 낮은 평균유속을 값을 나타내는 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 초음파 다회선 유량계의 유동장을 모사하기 위하여, 3차원, 비정상, 압축성 Navier-Stokes 방정식에 유한 체적법을 적용한 수치계산을 수행하였다. 유동장의 상류 및 하류에 각 세 위치에 초음파 센서를 설치하여, 압력변동의 신호를 수신하도록 하였다. 본 연구에서 압력변동은 주파수가 20kHz 이며, 진폭이 10Pa 인 sin 함수를 가정하였다. 또, 상류에 설치한 초음파 센서와 하류에 설치한 초음파 센서는 관 대칭면에 대하여, 45° 각도를 이루도록 하였다. 본 수치계산

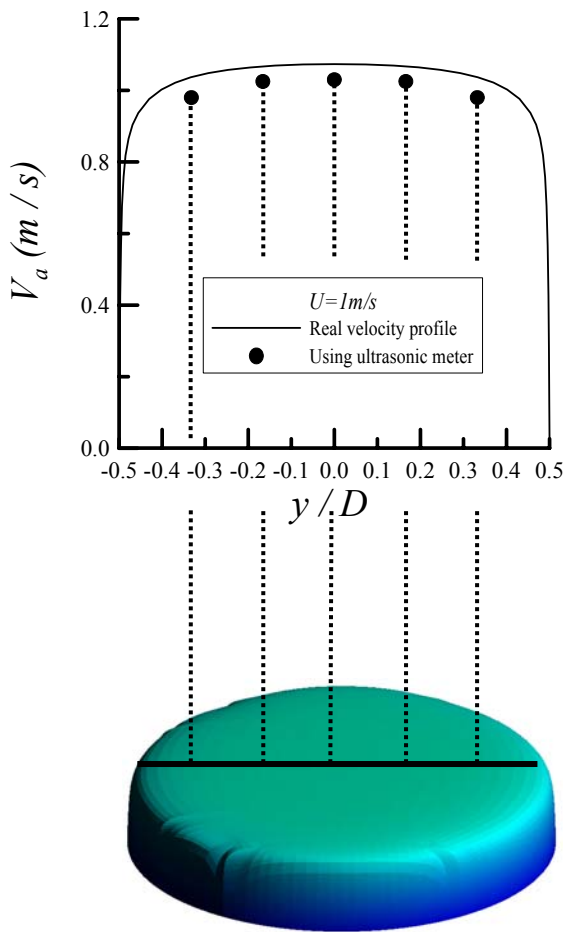


Fig. 8 Axial velocity profile and contour (U=1m/s)

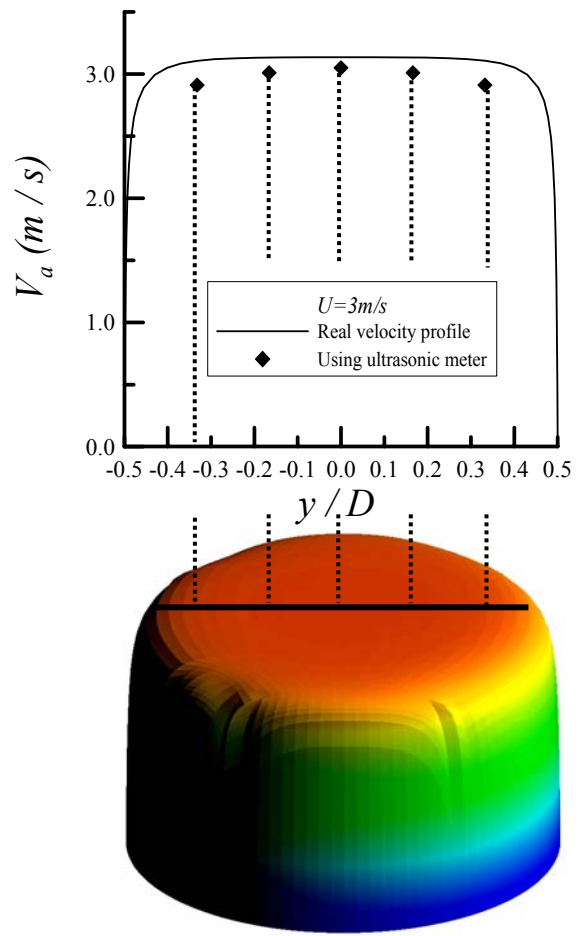


Fig. 9 Axial velocity profile and contour (U=3m/s)

으로부터 각 초음파 센서에서 수신한 신호들을 이용하여, 평균유속을 구하여 수치계산의 정상해와 비교하였다. 그 결과 본 연구에서 사용한 수치계산법으로 초음파 유량계를 충분히 모사할 수 있으며, 각 초음파 경로상의 평균 유속은 유로의 대칭면에서 벗어날수록 실제 유속과의 차이가 점차 커진다는 것을 알았다. 이후의 수치계산법을 이용한 초음파 유량계에 관한 연구로는 수신파의 진폭 및 주파수에 관한 상세한 연구와 더불어 작동 유체가 액체인 경우에 관하여 수행되어야 할 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 (주) 창민테크의 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

(1) Moore, P. I., Brown, G. J. and Stimpson, B. P., 2000, "Ultrasonic Measurement of Asymmetric Flow," FEDSM 2000.
 (2) Franc, S., Helimann, C. and Siekmann, H. E., 1996, "Point-Velocity Methods for Flow-Rate Measurements in Asymmetric Pipe Flow," Flow Measurement and

Instrument, Vol. 7, pp. 201-209
 (3) Schindel, D. W., 1998, "Air-Coupled Generation and Detection of Ultrasonic Bulk-Waves in Metals Using Micromachined Capacitance Transducers," IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, Vol. 45, No. 3, pp. 678-690.
 (4) Tyan, K. S., 1999, "Ultrasonic Multi-Channel Flowrate Measuring Method for a River and System Thereof," Proceeding of 4th International Symposium on Fluid Flow Measurement.
 (5) Calogirou, A., Boekhoven, J. and Henkes, R. A. W. M., 2001, "Effect of Wall Roughness Changes on Ultrasonic Gas Flowmeters," Flow Measurement and Instrumentation, Vol. 12, pp. 219-229.
 (6) Fletcher, S. I., Nicholson, I. G. and Smith, D. J. M., 2000, "An Investigation into the Effects of Installation on the Performance of Insertion Flowmeters," Flow Measurement and Instrumentation, Vol. 11, pp. 19-39.
 (7) Viswanathan, M., Rajesh, R. and Kandaswamy, A., 2003, "Design and Development of Thermal Mass Flowmeters for High Pressure Applications," Flow Measurement and Instrumentation, Vol. 13, pp. 95-102.
 (8) Sharma, D. R., 2003, "Pressure Drop During Measurements in a Liquid Displacement Gas Flowmeter of Improved Design," Vacuum, Vol. 70, pp. 563-573.