

배관구조에 따른 속도분포 변형과 선회가 오리피스 유량계의 압력차에 미치는 영향에 대한 수치적 연구

김흥민* · 김광용† · 허재영**

(2003년 4월 28일 접수, 2003년 8월 6일 심사완료)

Numerical Study on the Effects of Velocity Profile Distortion and Swirl on Pressure Difference of Orifice Flowmeter Due to Pipe structure

Hong-Min Kim, Kwang-Yong Kim and Jae-Young Her

Key Words : Orifice Flowmeter(오리피스 유량계), Swirl Intensity(선회강도), Swirl Angle(선회각), Asymmetry of Axial Velocity Profile(축방향 속도분포의 비대칭도)

Abstract

Three-dimensional pipe flows with elbows, tees and headers in three different pipe systems are calculated to estimate the effect of asymmetry of axial velocity profile and swirl on measuring accuracy of an orifice flowmeter. It is evaluated how the pressure difference across the orifice is dependent on the upstream straight pipe length and how swirl intensity, swirl angle, and axial velocity distribution affect the measuring error of the orifice flowmeter. From the results, it is found that variation of the pressure difference across the orifice is negligible in case that maximum swirl angle is less than 2°, and also that the pressure difference across the orifice is more sensitive to the asymmetry of axial velocity profile rather than the swirl intensity.

기호설명

A : 관의 단면적
 d : 오리피스 직경
 D : 관 직경
 r : 관의 중심으로부터 반경방향거리
 R : 관 반지름
 S : 선회강도
 S_0 : 직관이 시작되는 단면에서의 선회강도
 U_{ave} : 직관의 각 단면에서의 평균속도
 U_{max} : 직관의 각 단면에서의 최대속도
 V : 입구속도
 u, u' : 관의 중심에 대해 서로 대칭인 두 지점에서의 축방향 속도성분

v : 반경방향 속도성분
 w : 접선방향 속도성분
 x : 직관이 시작되는 단면으로부터의 거리
 Δp : 오리피스 전후의 압력차(Pa)
 β : 오리피스 직경비(= d/D)
 γ : 축방향 속도의 비대칭도
 ρ : 밀도(kg/m^3)

1. 서론

복잡한 배관구조로 인한 상류의 불균일 유동은 배관 내에 설치된 오리피스 유량계의 계량성능을 저하시키는 주요한 원인이며, 최근 급격히 증가하고 있는 천연가스의 수요증가로 볼 때 이는 상당한 경제적 손실을 야기할 수 있다. 이러한 이유로, 천연가스를 수송하는 배관 내에 설치된 오리피스 유량계에 대해 상류의 유동형태와 직관부의 길이에 따른 측정오차를 분석할 필요가 있다. 오리피스 유량계의 정확한 유량측정을 위해 ANSI 2530⁽¹⁾에 설치기준안이 제시되어 있으나 Morrow와 Park⁽²⁾은 규정대로 오리피스 유량계를 설치하

* 회원, 인하대학교 대학원 기계공학과

† 책임저자, 회원, 인하대학교 기계공학과

E-mail : kykim@inha.ac.kr

TEL : (032)860-7317 FAX : (032)868-1716

** 한국가스공사 연구개발원

더라도 0.5% 이상의 유량측정오차가 발생하며, 이러한 오차는 상류에 설치된 엘보우(elbow), T-자관(tee) 또는 헤더(header)로 인해 발생하는 선회 및 축방향 속도의 비대칭 등 오리피스 주위의 유동형태를 변화시키는 상류의 유동교란에 기인한다고 보고한 바 있다.

상류의 유동교란이 오리피스 유량계의 측정 오차에 미치는 영향을 파악하기 위해 많은 실험이 수행되어 왔다. Shen^(3,4)은 다양한 오리피스 직경에 대해 동일한 유량에서 선회발생기의 각도를 -30° ~ 30°까지 변화시켜가며 오리피스 유량계의 유량 측정오차를 분석하여 최대 선회각에서 약 8%의 유량측정오차가 발생함을 밝혔고, 직경비가 클수록 선회로 인한 오차는 감소한다고 보고하였다. Mattingly와 Yeh⁽⁵⁾는 관의 직경에 대한 오리피스의 직경비가 0.5 인 오리피스 유량계에 대해 오리피스 상류의 직관길이에 따른 선회의 변화를 실험하여, 상류의 복잡한 삼차원 배관 구조로 인해 발생한 선회는 직관의 하류로 갈수록 지수함수의 형태로 감소하며, 직관의 하류방향으로 90D 이후에서 유출계수(discharge coefficient)의 변화가 사라짐을 밝혔다. Prabu 등⁽⁶⁾은 레이놀즈수가 30,000 ~ 494,000의 범위에서 상류에 교란이 있는 경우와 교란이 없는 경우의 유출 계수를 비교하여 교란이 있는 경우 유량측정 오차가 커짐을 확인하였으며, 교란으로 인한 오차는 레이놀즈수가 작을수록 커짐을 밝혔다. 또한 동일평면상의 90° 엘보우와 동일 평면상에 있지 않은 연결된 2 개의 90° 엘보우에서 유출 계수를 비교하여, 동일평면상의 엘보우인 경우 22D, 동일 평면상에 있지 않은 엘보우의 경우 최소 48D 이상의 오리피스 상류 직관길이가 필요하다고 제시하였다. Morrison 등⁽⁷⁾은 관의 직경에 대한 오리피스의 직경비를 0.43에서 0.75까지 변화시켜가며 수행한 실험을 통하여 선회각이 증가할수록 축방향 운동량이 관의 벽쪽으로 분배되어 오리피스 유량계의 오차를 유발함을 밝혔으며, 오리피스 유량계의 측정오차는 상류의 선회뿐 아니라 축방향 속도의 분포에도 상당한 영향을 받는다고 주장하였다. Brennan 등⁽⁸⁾은 선회가 오리피스 유량계와 터빈 유량계의 성능에 미치는 영향에 대한 실험을 통해, 오리피스 유량계의 측정오차를 선회의 크기와 직경비의 함수로 나타내었다.

수치해석에 있어서는 직접적으로 오리피스 유량계의 측정오차에 관한 연구는 없으나, 원관 내에서의 유동교란에 관한 연구는 다양하게 수행되었다. Morrison⁽⁹⁾은 상용 소프트웨어를 이용하여 두 엘보우 사이의 직관길이가 관 직경의 0, 5, 10, 15 그리고 20 배인 경우에 대해 유동형태의 변화를 계산하였고, Silva 등⁽¹⁰⁾은 서로 다른 곡률을 갖는 두 가지 형상의 엘보우에 대한 수치해석을

수행하여 곡률의 변화가 압력과 속도분포에 미치는 영향을 분석하였다.

Langsholt와 Thomassen⁽¹¹⁾은 동일평면상의 90° 엘보우와 동일 평면상에 있지 않은 연결된 2 개의 90° 엘보우, 그리고 헤더(header)에 대한 수치해석 및 실험을 통해 선회각과 축방향 속도분포를 비교하였다.

위에서 알아본 바와 같이 오리피스가 설치된 관의 내부유동에 대한 다양한 연구가 수행되었으나, 대부분 상류에 선회발생기를 설치하여 인공적인 균일한 유동교란을 발생시키거나, 엘보우나 T-자관, 헤더 등의 단일 구조에 대한 유동해석이 수행되어 왔을 뿐 이러한 구조들을 모두 포함하는 복잡한 실제 배관형상을 대상으로 한 수치해석결과는 찾기 어렵다.

본 연구에서는 엘보우와 T-자관, 헤더를 포함하는 실제 삼차원 배관에 대한 유동해석을 통해 오리피스 상류의 직관길이에 따른 선회각, 선회강도 및 축방향 속도의 비대칭성 등이 오리피스 유량계의 측정오차에 미치는 영향을 연구하였다.

2. 유동해석

2.1 지배방정식 및 수치해석방법

본 연구에서는 유동해석을 위해 상용 소프트웨어인 CFX-4.3을 사용하였다. 지배방정식으로는 정상상태, 비압축성유동에 대한 연속 방정식, Reynolds-averaged Navier-Stokes 방정식을 사용 하였고, 난류모델로는 표준 k-ε모델을 이용하였다. 지배방정식의 이산화방법으로는 유한체적법(finite volume method)을 사용하였고, 대류항과 확산항의 계산에는 상류차분법(upwind difference scheme)과 중 심차분법(central difference scheme)을 각각 채택 하였으며, 압력보정방법으로는 SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations) 방법을 이용하였다.

2.2 기하학적 형상

본 연구에서는 천연가스를 수송하는 한국가스공사의 세가지 배관구조를 대상으로 하였으며, Fig 1은 T-자관과 엘보우를 갖는 계산영역의 형상을 나타낸다. 그림에서 볼 수 있듯이 관심의 대상이 되는 배관을 제외한 나머지 배관은 전체 길이 중 일부분을 계산영역으로 선정하였는데, 이는 전체 길이를 계산영역으로 선정할 경우, 격자수의 증가로 인해 계산시간이 현저히 증가하기 때문이며, 이로 인한 결과의 차이를 모든 배관의 전체 길이를 계산한 경우와 Fig. 1과 같이 관심의 대상이 되는 배관의 전체길이만을 계산한 경우에 대해 비교한 결과 오리피스 전후의 압력차에 큰 영향이 없음을 확인하였다.

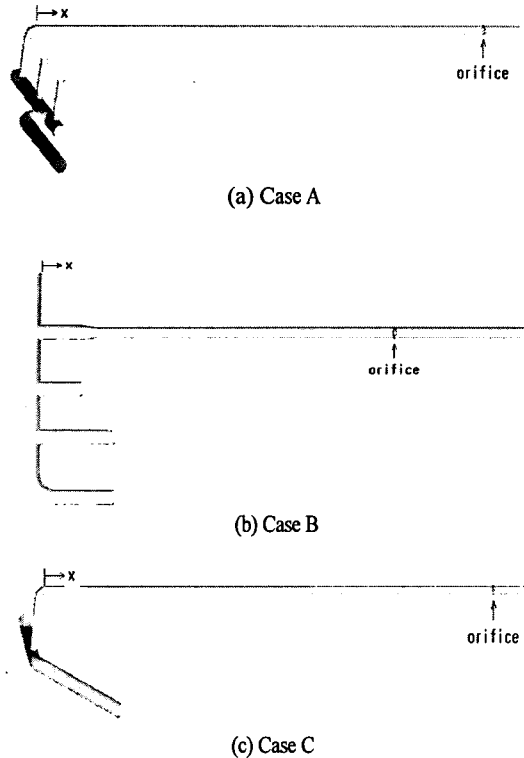


Fig. 1 Geometric structures of pipe system

Fig. 1(a)는 직경 20 인치 상류 헤더에 직경 12 인치 관이 부착된 구조로 오리피스의 직경비는 0.59 이고, 오리피스 상류의 직관길이는 65D 이다. Fig. 1(b)는 동일 평면상에 12 인치 직경을 갖는 2 개의 입구배관과 3 개의 출구배관이 연결된 구조로써, 오리피스 상류의 직관길이는 22D 이며 직경비는 0.55 이고, 그림에서 아래쪽에 부착된 두 배관이 입구배관이다. Fig. 1(c)는 20 인치 헤더에 15 인치 관이 부착된 구조이며, 오리피스 상류의 직관길이는 67D 이고, 직경비는 0.6 이다. 그리고, 오리피스의 두께가 직관의 길이에 비해 무시할 수 있을 정도로 작으므로 오리피스를 얇은 벽으로 처리하였으며 오리피스의 구조를 단순화하여 상하류 모서리의 각도를 90°로 가정하였다

격자분포는 속도구배가 큰 오리피스의 주위에는 조밀격자를 사용하여 수치적 잡음을 최소화 하였으며, 이외의 구역에서는 성긴격자를 사용하여 해석의 정확성을 유지하면서 격자수의 감소를 통한 계산시간의 절감을 도모하였다. 계산에 사용된 격자수는 직관길이에 따라 240,000 ~ 310,000 개의 격자가 사용되었다.

2.3 경계조건 및 유체 물성치

입구조건으로는 유입되는 천연가스의 속도가

Table 1 Comparison of flow rate between experiment and calculation

	Experiment(kg/s)	Calculation(kg/s)
case A	11.46	12.04
case B	6.69	6.70
case C	14.82	14.79

Table 2 Pressure differences for various straight pipe lengths

	Straight pipe length	Pressure difference (Pa)
case A	10D	19900
	30D	20145
	65D	20161
	100D	20174
case B	22D	15720
	100D	15770
case C	10D	20021
	20D	20434
	30D	20563
	40D	20586
	50D	20612
	67D	21114
	100D	21140

일정하다고 가정한 균일속도분포를 사용하였다. 출구조건으로는 축방향의 모든 물리량의 구배가 무시된다는 조건을 사용하였으며, 벽조건으로는 점착조건(no slip)을 사용하였다. 계산에 사용된 유체는 천연가스로서 밀도는 작동압력에 따라 7.15 ~ 7.60 kg/m³ 이고, 점성계수는 1×10⁻⁵ N·s/m² 이다.

3. 결과 및 고찰

3.1 실험과 계산의 유량비교

Table 1 은 오리피스를 통과하는 유량에 대한 계산치와 실험치⁽¹²⁾를 비교한 결과를 나타내며, 유동해석을 통한 유량계산식은 다음과 같다.

$$\dot{m} = C_d A_0 \sqrt{\frac{2\rho\Delta p}{1 - C_c^2 \beta^4}} \tag{1}$$

여기서 A₀ 는 오리피스를 통과하는 단면적이며, C_c 와 C_d 는 각각 수축계수와 유량계수로 0.65 와 0.98 이다.

배관구조가 비교적 복잡한 case A 가 약 5%의 오차를 보이고 있으나, 나머지 두 경우는 0.2% 이내의 오차만을 보임으로써 삼차원 유동해석이 실험치를 비교적 정확하게 예측함을 알 수 있다.

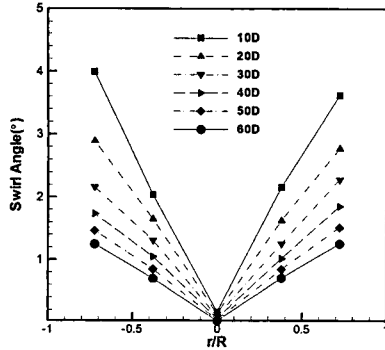


Fig. 2 Variations of swirl angle for case A

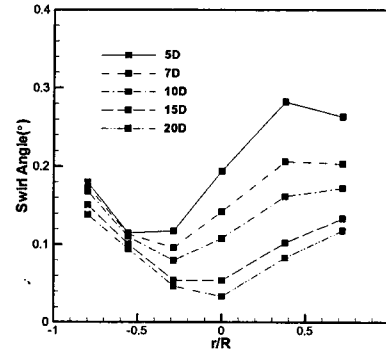


Fig. 3 Variations of swirl angle for case B

3.2 직관길이에 따른 압력차

Table 2 에는 동일 유량조건에서 오리피스 상류의 직관길이를 변화시킨 경우, 오리피스 전후 2.54cm 위치에서 계산된 압력차를 나타내었다. 직관길이 30D 이내의 짧은 직관길이에서는 직관길이에 따라 압력차의 변화가 크게 일어나고 있으나 직관길이가 이보다 길어질 경우 일반적으로 직관길이에 따른 압력차의 변화는 상대적으로 완만해짐을 알 수 있다. case A 에서는 직관길이에 따른 오리피스 전후의 압력차의 변화가 30D 이후에는 0.1%, case B 에서는 22D 이후에 0.3% 이내에 그치고 있으나, case C 는 오리피스 상류의 직관길이에 따른 압력차의 변화가 30D 이후에도 2.7% 에 달해, case C 는 case A 와 B 에 비해 오리피스 상류의 직관 길이가 30D 보다 큰 경우에도 오리피스 전후의 압력차에 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 이는 case C 의 경우 나머지 두 경우에 비해 2 배 이상 큰 유량의 범위에서 작동하기 때문인 것으로 사료된다.

3.3 선회각의 영향

오리피스 유량계가 설치된 직관의 각 단면에서 반경방향에 따른 선회각의 변화를 Fig. 2~4 에 나타내었다. 선회각은 관의 축방향과 국소적인 속도 벡터가 이루는 각으로 정의되며⁽¹³⁾ 반시계 방향을 양의 방향으로 정의하였다. 따라서 관의 중심부에서도 선회각이 존재할 수 있다. r 은 관의 중심으로부터의 거리를 나타내며, (+)와 (-) 부호는 각각 관의 상부와 하부를 나타낸다. 선회각은 속도벡터가 축방향과 이루는 각으로 정의됨으로써 선회속도 뿐 아니라 반경방향 속도성분의 영향도 함께 나타내고 있음을 알 수 있다. Shen^(3,4)과 Morrison 등⁽⁷⁾은 선회각이 클수록 오리피스 유량계의 측정오차가 커진다고 보고한 바 있다.

Fig. 2 는 case A 에 대한 선회각의 변화를 나타낸다. 엘보우를 지나면서 발생한 선회각이 하류로 갈수록 감소하는 경향을 볼 수 있는데, 이는 직관

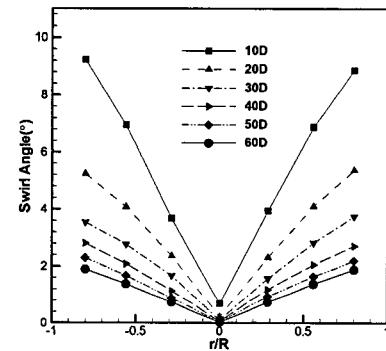


Fig. 4 Variations of swirl angle for case C

의 하류로 갈수록 상류에서 발생한 선회각이 감소하고, 유동이 완전발달된 유동의 형태가 되면서 선회각을 정의하는 반경방향과 접선방향의 속도 성분이 감소하기 때문이다. ISO 5167⁽¹⁴⁾에는 오리피스 전후의 압력차를 유발하지 않는 선회각의 조건(swirl-free condition)을 2° 이내로 규정하고 있는데, 이 경우 30D 이후에서 선회각이 2° 이하로 감소함을 볼 수 있다. 이는 Table 2 에서 case A 의 경우 직관길이 30D 이상에서 오리피스 압력차의 변화가 무시되는 현상을 잘 설명해 준다.

Fig. 3 은 이차원 구조인 case B 에 대해 직관길이에 따른 선회각의 변화를 나타내고 있다. ISO 5167⁽¹⁴⁾에 규정된 선회각과 측정오차와의 관계를 바탕으로 판단할 때, 이 경우의 선회각은 현저하게 작아 다른 두 가지의 삼차원 구조에 비해 선회로 인한 오리피스 유량계의 오차가 상당히 작을 것으로 예측되어, 짧은 직관길이로도 비교적 정확한 측정이 가능함을 알 수 있다. 이 결과는 이차원 배관과 삼차원 배관에서 오리피스 상류의 직관길이에 따른 유출계수를 비교하여 이차원 구조의 경우 삼차원 구조보다 짧은 직관길이로도 정확한 측정이 가능하다고 보고한 Prabu⁽⁶⁾의 결과와 일치하고 있다.

Fig. 4 는 case C 에 대한 각 단면에서의 선회각

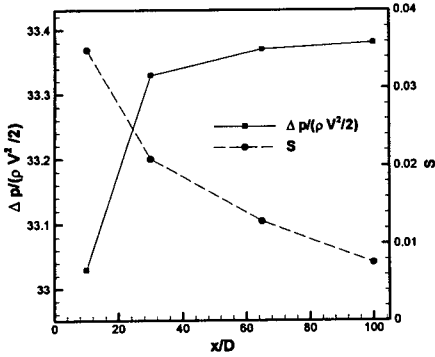


Fig. 5 Effect of swirl intensity on pressure difference for case A

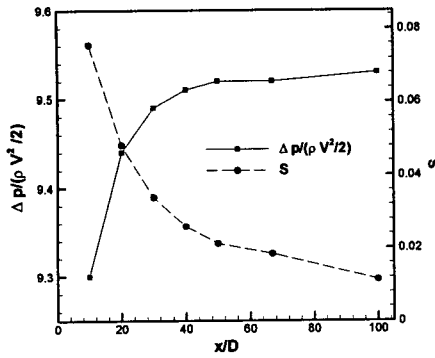


Fig. 6 Effect of swirl intensity on pressure difference for case C

분포를 나타내고 있다. 이 경우 다른 두 가지 구조에 비해 선회각이 현저히 크게 발생하고 있음을 알 수 있는데, 이는 Table 2에 제시된 바와 같이 case C의 경우 오리피스 상류의 직관길이가 20D 보다 큰 경우에도 압력차의 변화가 직관길이에 적지 않은 영향을 받는 원인이 됨을 알 수 있다. 그리고 50D 이후에서 선회각이 2° 이하로 감소하므로, Table 2에서 보는 바와 같이 67D와 100D의 직관길이에서 압력차의 변화가 0.12%로 거의 변화가 없음을 알 수 있다.

3.4 선회각도의 영향

오리피스 상류의 배관구조로 인해 발생한 유동의 선회가 오리피스 유량계의 측정오차에 미치는 영향을 파악하기 위해 다음과 같이 정의되는 선회각도(swirl intensity)가 측정오차에 미치는 영향을 검토하였다.

$$S = \frac{1}{R} \frac{\int_0^R uw r^2 dr}{\int_0^R u^2 r dr} \quad (2)$$

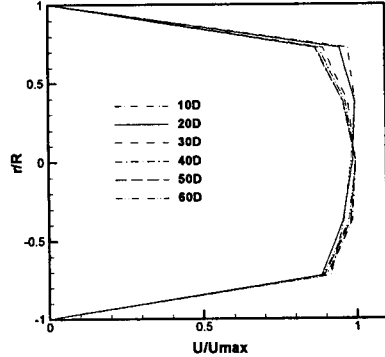


Fig. 7 Axial velocity distribution for case A

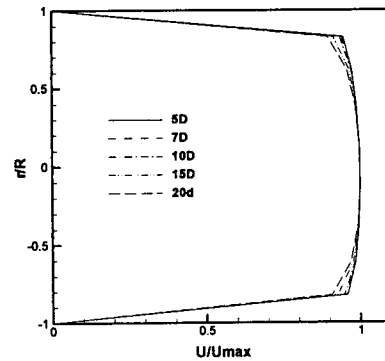


Fig. 8 Axial velocity distribution for case B

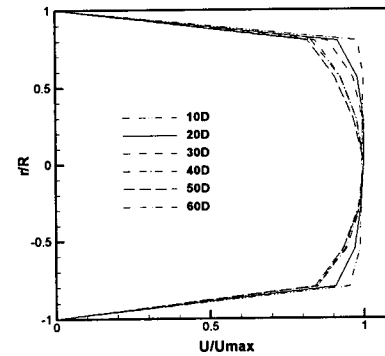


Fig. 9 Axial velocity distribution for case C

여기서 r 과 R 은 각각 반경방향 거리와 관의 반지름을 나타내며, u 와 w 는 각각 축방향 속도와 접선방향 속도를 나타낸다.

접선방향 속도성분 없이 반경방향 속도만으로도 선회각이 발생할 수 있는데 반해, 선회각도는 접선방향 운동량의 상대적 크기를 단면 내에서 적분한 값이라는 점에서 선회유동의 영향을 선회각보다 더 직접적으로 나타낼 수 있다. Fig. 5와 6은 각각 case A와 case C에 대해 식 (2)

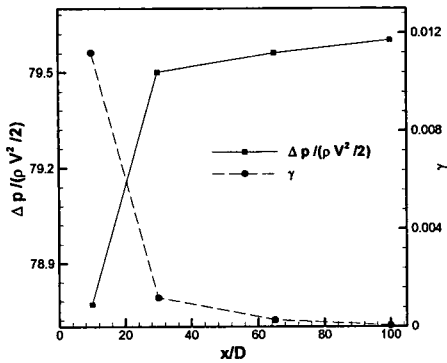


Fig. 10 Effect of asymmetry of axial velocity on pressure difference for case A

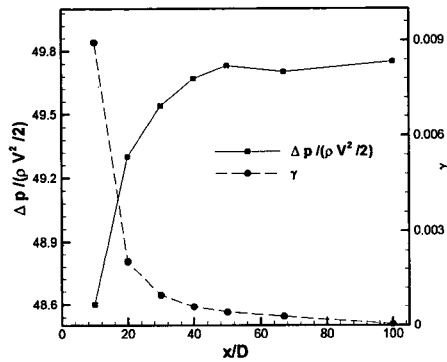


Fig. 11 Effect of asymmetry of axial velocity on pressure difference for case C

에서 정의된 선회강도의 크기가 오리피스 전후의 압력차에 미치는 영향을 나타내고 있다. 가로축은 축방향 거리를 나타내며, 왼쪽과 오른쪽의 세로축은 각각 무차원화된 오리피스 전후의 압력차와 선회강도를 나타낸다. 대체적으로 선회강도가 감소함에 따라 오리피스 압력차의 변화는 축소되고 있으나, 오리피스 압력차의 변화가 case A와 case C에서 각각 직관길이 30D와 50D 이후에서 급격히 감소하는데 반해, 동일한 위치에서 선회강도는 특별한 변화를 나타내지 않고 여전히 상당한 크기를 가지고 있어, 본 연구의 유량범위에서 오리피스 압력차는 선회강도에 의해 영향을 받고 있으나 그다지 민감하지는 않음을 알 수 있다.

3.5 축방향 속도분포 및 비대칭도의 영향

Fig. 7 ~ 9는 계산된 세 경우에 대해 직관길이에 따른 축방향 속도분포의 변화를 보여준다. 속도분포는 case A와 case C의 경우 각각 30D와 50D 이후에서 변화가 거의 사라짐을 볼 수 있으며, 이차원 구조인 case B의 경우 다른 두 가지 구조에 비해 유동의 변화가 크지 않음을 알 수 있다.

Morrison 등⁽⁷⁾은 오리피스 유량계의 압력차는 상류에서 발생된 선회 뿐 아니라 축방향 속도 분포에도 상당한 영향을 받는다고 보고한 바 있으나 속도분포와 관련된 어떠한 변수가 압력차에 민감한 영향을 미치는지는 검토하지 않았다. 이에 따라 본 연구에서는 축방향 속도 분포의 비대칭성이 오리피스 전후의 압력차에 미치는 영향을 파악하기 위해 다음과 같이 축방향 속도분포의 비대칭도를 새롭게 정의하였다.

$$\gamma = \frac{1}{U_{ave}^2 A} \int_A (u - u')^2 dA \quad (3)$$

여기서 U_{ave} 와 A 는 각각 관의 단면에서의 평균 속도와 관의 단면적을 나타내고, u 와 u' 은 관의 중심에 대해 서로 대칭인 두 지점에서의 축방향 속도를 나타낸다.

Fig. 10과 11은 각각 case A와 case C에 대해 식 (3)에서 정의된 축방향 속도의 비대칭도가 오리피스 전후의 압력차에 미치는 영향을 나타내고 있다. 오리피스 압력차의 변화가 사라지는 각각 30D와 50D의 위치에서 축방향속도의 비대칭도의 변화도 급격히 감소함을 알 수 있다. 이러한 결과를 통해 축방향 속도의 비대칭도 역시 오리피스 전후의 압력차에 영향을 미치는 중요한 변수이고 널리 알려진 유동선회의 영향 보다 더 민감한 영향을 미친다는 사실을 알 수 있다.

4. 결론

T-자관과 엘보우, 헤더를 갖는 서로 다른 세 가지 실제 배관형상에 대한 삼차원 유동해석을 통해 오리피스 상류의 직관길이와 이에 따른 선회와 축방향 속도분포의 비대칭성이 오리피스 유량계의 측정오차에 미치는 영향을 분석하였다. 선회각은 이차원 보다 삼차원 배관구조에서 더 크게 나타났고, 오리피스 전후의 압력차에 미치는 영향이 큼을 알 수 있었다. 특히 ISO 규격에서 규정된대로 단면 내에서 최대선회각의 크기가 2° 이하인 경우 선회각은 오리피스 압력차에 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

선회강도와 축방향 속도의 비대칭도가 오리피스 전후의 압력차에 미치는 영향을 분석한 결과 본 연구에 사용된 유량범위 내에서 선회강도 뿐 아니라 비대칭도가 측정오차의 감소에 중요한 영향을 미치며, 선회강도 보다 비대칭도의 영향이 더 민감함을 알 수 있었다.

참고문헌

- (1) ANSI/API, 1985, Orifice Metering of natural Gas

- and Other Related Hydrocarbon Fluids, 2 Edn. American Gas Association and American Petroleum Institute, Washington, DC
- (2) Morrow, T. B. and Park, J. T., 1992, "Effects of tube bundle location on orifice meter error and velocity profiles," Pipeline Technology, V-A, pp 13~17
- (3) Shen, J. J. S., 1992, "Velocity profile survey in a 16-in custody-transfer orifice meter for natural gas," *SPE Prod. Engng, Vol. 5*, pp. 40~44
- (4) Shen, J. J. S., 1991, "Characterization of swirling flow and its effects on orifice metering," SPE paper 22865 66th Annual Conf. Exhib. Society of Petroleum Engineers, Dallas, TX
- (5) Mattingly, G. E., Yeh, T. T., 1990, "Flowmeter Installation Effects Due to Several Elbow Configurations," 2nd Int. Symp. Fluid Flow Measurement, June 6-8, 1990, Calgary, Alberta, Canada
- (6) Prabu, S. V., Mascomani, R., Balakrishnan, K. and Konnur, M. S., 1996, "Effects of upstream pipe fittings on the performance of orifice and conical flowmeters," *Flow Meas. Instrum., Vol. 7, No. 1*, pp. 49~54
- (7) Morrison, G. L., Hall, K. R., Macek, M. L., Ihfe, L. M., DeOtte, R. E., and Hauglie, J. E., 1994, "Upstream velocity profile effects on orifice flowmeters," *Flow Meas. Instrum. Vol. 5*, pp. 87~91
- (8) Brennan, J. A., McFaddin, S. E., Sindt, C. F., Kothari, K. M., 1989, "The Influence of Swirling Flow on Orifice and Turbine Flowmeter Performance," *Flow Meas. Instrum. Vol. 1*, pp. 5~8
- (9) Morrison, G. L., 1997, Flow Field Development Downstream of Two in Plane Elbows," FEDSM97-3021
- (10) Silva, F. S., Ruiz, J. H., Velazquez, T. and Ugalde, V. Z., 1998, "Curved Pipe Flow Numerical Simulation for Metrology Purposes Using CFD 2000," FEDSM 98-5287
- (11) Langsholt, M., Thomassen, D., 1991, "The Computation of Turbulent Flow through Pipe Fittings and the Decay of the Disturbed Flow in a Downstream Straight Pipe," *J. Flow Meas. Instrum. Vol. 2*, pp. 45~55
- (12) KOGAS Flow Measurement data, 2001
- (13) ISO 4006, 1992, Measurement of fluid flow in closed conduits-Vocabulary and symbols
- (14) ISO 5167, 1991, Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices