

선회로 인한 오리피스 유량계의 계량오차 예측을 위한 삼차원 유동해석

김 흥 민*, 김 광 용**, 허 재 영, 하 영 철***

Three-Dimensional Flow Analysis for Estimation of Measuring Error of Orifice Flowmeter due to Swirling Flow

Hong-Min Kim*, Kwang-Yong Kim**, Jae-Young Her, Young-Chul Ha***

Keywords : 오리피스 유량계(Orifice flowmeter), 선회강도(Swirl intensity), 선회각(Swirl angle), 직경비(Diameter ratio)

Abstract

Three-dimensional pipe flows with elbows and tees for four different pipe fittings are calculated to estimate the effect of swirling flow on measuring accuracy of orifice flow meter. It is evaluated how the pressure difference across the orifice is dependent on the length of upstream straight pipe in a branch and how swirl intensity, swirl angle and axial velocity distribution affect the measuring error of orifice flowmeter. From the results, it is found that, regardless of flow rate specified in this calculation, the effect of the straight pipe length can be neglected for the lengths larger than thirty diameters although there still remain significant swirl at the orifice

1. 서론

복잡한 배관구조로 인한 상류의 불균일 유동은 배관 내에 설치된 유량계의 계량성능을 저하시키는 주요한 원인이며, 최근 급격히 증가하고 있는 천연가스의 수요증가로 볼 때 이는 상당한 경제적 손실을 야기할 수 있다. 이러한 이유로, 가스를 수송하는 배관 내에 설치된 유량계에 대해 상류의 유동형태와 직관부의 길이에 따른 측정오차를 분석할 필요가 있다.

부착물로 인한 원관(pipe)내 유동의 교란에 관한 연구로 Morrison[1]은 상용 소프트웨어를 이용하여 두 엘보우(elbow) 사이의 직관부가 원관 직경의 0, 5, 10, 15 그리고 20 배인 경우에 대해 상류의 유동이 하류에 미치는 영향을 계산하였고, Silva 등[2]은 굴곡관에 대한 수치해석을 수행하여 벽면을 따른 압력의 변화를 상세히 제시하였다. Langsholt와 Thomassen[3]은 난류의 영향과 교란된 유동이 하류로 전이되며 소멸해가는 과정에 관한 수치해석결과를 보고하였다. 유동의 교란이 유량계의 측정오차에 미치는 영향을 탐구하기 위해 Brennan 등[4]은 선회류가 오리피스 유량계와 터빈 유량계의 성능에 미치는 영향을 실험하여, 계량오차를 선회류의 크기와 오리피스 직경비의 함수로 나타내었다. McBrien[5]은 유동교란이 오리피스 유량계의 성능에 미치는 영향을 실험적으로

연구하였다.

이 외에도 Morrow[6], Harbrink[7], Studzinski와 Karnik[8], Morrison 등[9]에 의한 다양한 실험적 연구가 수행된 바 있다. 이와 같이 원관 유동에 관한 다양한 실험 및 수치해석적 연구가 수행되었으나, 대부분 유동의 교란이나 선회의 감쇠에만 제한되어 연구결과가 제시되었다.

본 연구에서는 서로 다른 네 가지 형상의 실제 삼차원 배관구조에 대한 유동해석을 통해 상류 직관길이에 따른 오리피스 유량계의 압력차를 비교하여 티(tee)나 엘보우(elbow)로 인한 선회가 오리피스 유량계의 계량오차에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 유동해석

2.1 유동해석방법

본 연구에서는 유동해석을 위해 상용 소프트웨어인 영국 AEA Technology사의 CFX-4.3을 사용하였다. 지배방정식으로는 정상상태, 비압축성유동에 대한 연속방정식, Reynolds-averaged Navier-Stokes 방정식을 사용하였고, 난류모델로는 표준 k-ε모델을 이용하였으며, 지배방정식의 이산화방법으로는 유한체적법을 사용하였다.

2.2 기하학적 형상

Fig. 1-4는 삼차원 유동해석을 위해 본 연구에 사용된 서로 다른 네 가지 배관구조의 기하학적 형상을 보여주고 있다. Fig. 1은 20인치 상류 헤더에 12인치관 두 개와 8인치관 한 개가 연결되어 있으며, 오리피스 상류의 직관부 길이는 각각 65D와 90D이고 직경비는 각각 0.59,

* 인하대학교 대학원 기계공학과

g1991001@inhavision.inha.ac.kr

** 인하대학교 기계공학부 kykim@inha.ac.kr

*** 한국가스공사 연구개발원 fractals@kogas.re.kr
jyher@kogas.re.kr

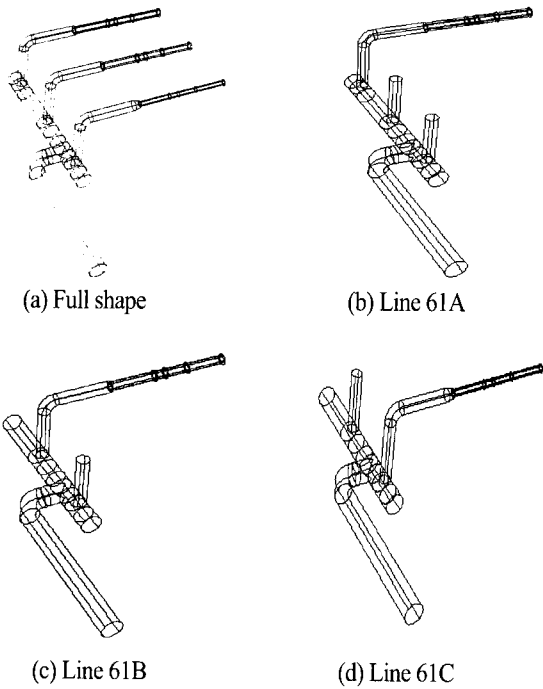


Fig. 1 Geometric structures of pipe system for case 1

0.54, 및 0.57 이다. 계산시간의 절감을 위해 Fig. 1 (b)-(d)와 같이 각각의 배관을 따로 계산하였으며 이로 인한 계산상의 차이는 없음을 확인하였다. Fig. 2 는 동일 평면상에 12 인치 직경을 갖는 2 개의 입구배관과 3 개의 출구배관으로 구성된 배관구조이며, 유동해석라인의 직관길이는 22D 이고 직경비는 0.55 이다. Fig. 3 과 4 는 동일 평면상에 있지 않은 배관구조를 나타내고 있다. 유동해석라인의 직경은 12 인치와 15 인치이고, 오리피스 상류의 직관길이는 각각 53D 와 62D 이며, 직경비는 0.6 이다.

Table 1 Pressure differences according to straight pipe lengths for case 1

Re	Line	Straight pipe Length	dp_exp	dp_cal
3.7×10^6	61A	10D	181	199
		30D		201
		65D		201
		100D		201
4.8×10^6	61A	10D	306	335
		30D		338
		65D		338
		100D		338
5.5×10^6	61A	10D	454	492
		30D		496
		65D		496
		100D		497

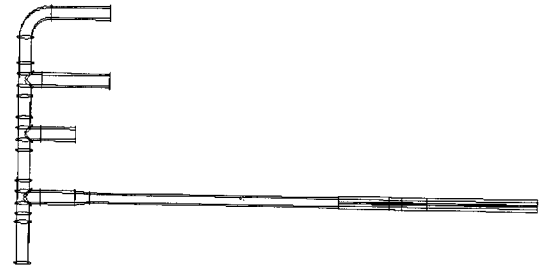


Fig. 2 Geometric structures of pipe system for case 2

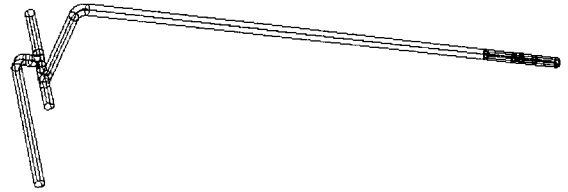


Fig. 3 Geometric structures of pipe system for case 3

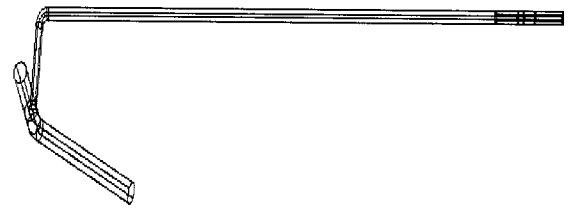


Fig. 4 Geometric structures of pipe system for case 4

2.3 경계조건

입구조건으로는 유입되는 천연가스의 속도가 일정하다고 가정한 균일속도분포를 사용하였다. 출구조건으로는 축방향의 모든 물리량의 구배가 0 이 된다는 조건을 사용하였으며, 벽조건으로는 점착조건(no slip)을 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 직관길이에 따른 차압

Case 1의 61A 라인에 대해 오리피스 전단의 직관길이에 유량을 변화시켜가며 계산된 차압을 Table 1에 나타내었다. 표에서 볼 수 있듯이 직관길이가 30D 이상에서는 차압의 변화가 없었는데 이는 상류의 티와 엘보우로 인해 형성된 선회가 오리피스 유량계의 차압에 영향을 미치지 않을 정도로 감소하기 때문이다. Table 2에는 case 2-4에 대해 오리피스 전단의 직관길이를 현재길이에 충분히 긴 100D에 대해 계산된 차압을 나타내었다. 모든 경우에 대해 직관길이에 따른 차압은 2%이내의 변화를 보였으며, 이는 계산된 유량범위 내에서는 상류의 불균일 유동으로 인한 선회가

Table 2 Pressure differences according to straight pipe lengths for case 2-4

Case	dp_exp	dp_cal		
		Present length	100D	Difference (%)
2	156.7	(22D) 148.0	148.5	0.3
3	320.9	(53D) 316.6	311.3	1.7
4	213.1	(62D) 212.1	211.4	0.3

오리피스 유량계의 전단에서 충분히 감쇠되어 차압에 영향을 미치지 않음을 의미한다. 특히, 직관길이가 22D 인 case 2 의 경우도 차압의 변화를 보이지 않았는데, 이를 통해 오리피스 전·후의 차압이 작을수록(유량이 적을수록) 정확한 차압측정을 위한 오리피스 전단의 직관길이도 감소함을 알 수 있다. 또한 모든 경우에 대해 계산결과는 실험치와 잘 일치하고 있는데, 이는 실험이 불가능한 복잡한 형상의 배관구조에 대해 전산유체역학이 효율적인 대안으로 활용될 수 있음을 보여준다.

3.2 선회강도의 영향

상류로부터 교란된 유동이 하류에 미치는 영향을 파악하기 위해 식 (1)과 같이 선회강도(swirl intensity)를 정의하여 사용하였다.

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

일반적으로, 선회강도는 식 (2)와 같은 지수함수의 형태로 감소하는 것으로 알려져 있다[10].

$$\frac{S}{S_0} = \exp(-\alpha z) \quad (2)$$

여기서 α 는 선회의 감소율을 결정하는 기울기이다.

Fig. 5 는 case 1 에 대해 직관길이가 65D 인 경우 61A 라인과 61B 라인에서 서로 다른 세가지 유량값에 대한 선회강도의 감쇠를 나타내고 있다. 상류의 불균일 유동으로 인한 선회강도의 감쇠는 하류로 갈수록 식 (2)에 제시된 바와 같이 지수함수의 형태로 감쇠됨을 알 수 있으며, 이에 따른 선회감소 기울기를 Table 3 에 나타내었다. 선회감소 기울기는 계산된 유량범위 내에서는 큰 차이를 보이지 않았으며, 이러한 결과로 판단해 볼 때, 오리피스가 설치된

Table 3 Swirl decay parameters

Re	Line	α
3.7×10^6	61A	0.023
	61B	0.017
4.8×10^6	61A	0.026
	61B	0.016
5.5×10^6	61A	0.024
	61B	0.016

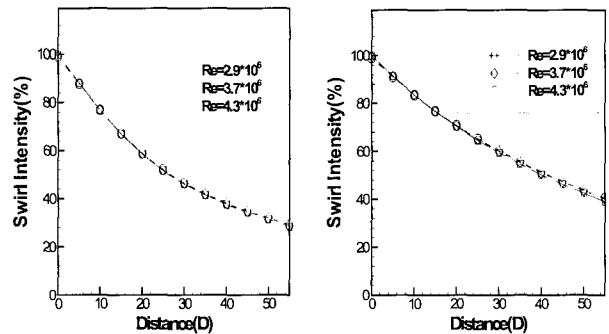


Fig. 5 Decay of swirl intensity

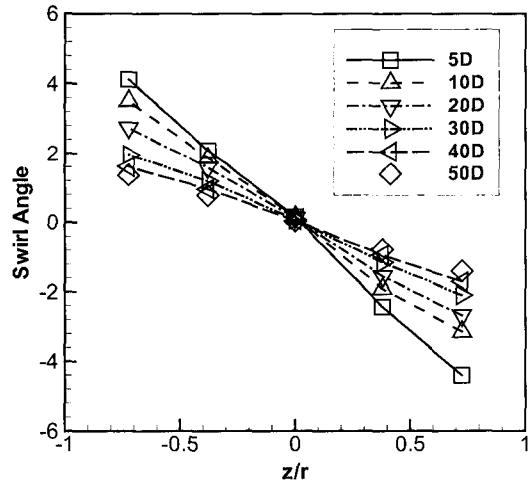


Fig. 6 Variation of swirl angle along the downstream (case 1, 61A line)

위치에 상류의 불균일 유동으로 인해 상당한 선회가 남아 있더라도, 그 강도가 0.5 이하인 경우에는 오리피스 유량계의 계량오차에 큰 영향을 미치지 않는다고 사료된다

3.3 선회각과 축방향 속도의 영향

오리피스 유량계가 설치된 직관의 하류방향 위치에서 반경방향으로 스윙각의 변화를 Fig. 6 에 나타내었다. ISO 5167 은 오리피스 유량계의 계량오차를 유발하지 않는 스윙각을 2°이내로 규정하고 있다[11]. Fig. 6 에서 볼 수 있듯이 30D 이후에서는 스윙각이 2°이내의 값을 가지고 있으며, 이는 Table 1 에서 언급된 바와 같이, 30D 이상의 직관길이를 갖는 경우 압력차가 생기지 않는 이유를 잘

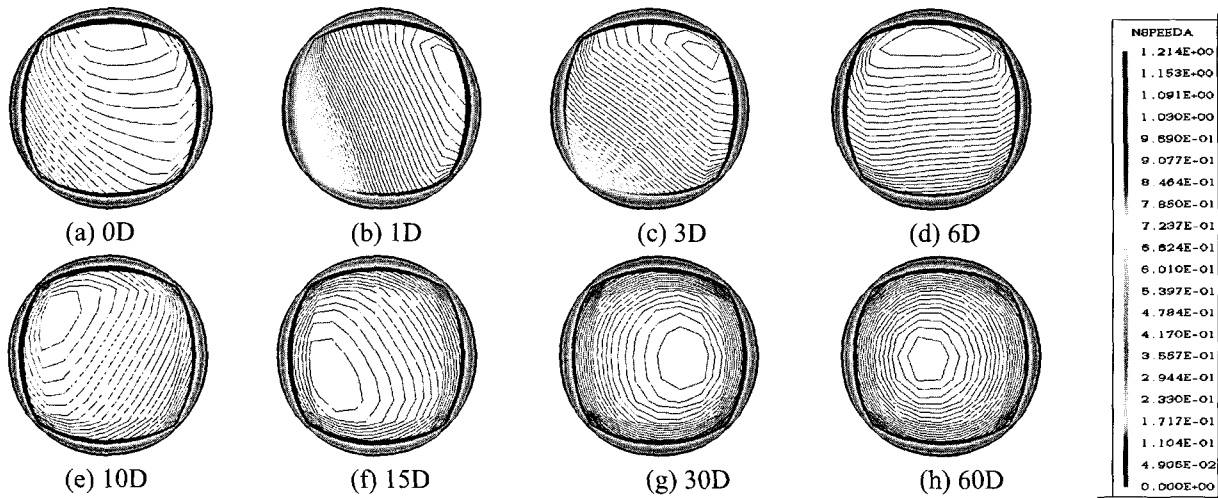


Fig. 7 Normalized axial velocity contours for case 1, 61A line

설명해준다.

Fig. 7 은 무차원화된 축방향 속도분포를 보여주고 있다. 직관길이 15D 까지는 비대칭 유동이 심하게 형성되고 있으나, 30D 에서는 이러한 비대칭성이 상당히 감소하고 있음을 볼 수 있다. 이러한 결과로부터 오리피스 전·후의 압력차는 선회각도의 크기보다 축방향 속도의 비대칭성에 더 큰 영향을 받는다는 것을 알 수 있다.

4. 결론

서로 다른 형상을 갖는 네 가지 배관구조에 대한 삼차원 유동해석을 통하여 오리피스 상류의 직관길이 오리피스 유량계의 측정오차에 미치는 영향을 분석하였다. 계산결과, 직관길이 30D 이상인 경우에는 유량에 관계없이 압력차가 거의 일정한 값을 가졌는데, 이는 상류 배관구조로부터 파생된 선회가 오리피스가 설치된 부분까지 남아있더라도, 그 강도가 0.5 이하인 경우는 계산에 사용된 유량범위 내에서 오리피스 유량계의 압력측정에 영향을 미치지 않기 때문으로 사료되며, 오리피스 유량계의 정확도는 선회각도뿐 아니라 선회각과 축방향 속도의 비대칭성에도 상당한 영향을 받음을 알 수 있었다. 또한 계산된 차압은 실험치를 근사하게 예측함으로써 실험이 불가능한 복잡한 형상의 배관구조내의 차압계산에 전산유체역학의 효율적인 적용가능성을 제시하였다

참고문헌

- (1) Gerald L. Morrison, "Flow Field Development Downstream of Two in Plane Elbows," FEDSM97-3021(1997)
- (2) F. Sanchez Silva, J. Hernandez Ruiz, Toledo Velazquez, V. Zurita Ugalde, "Curved Pipe Flow Numerical Simulation for Metrology Purposes Using CFD 2000," FEDSM98-5287(1998)
- (3) M. Langsholt, D. Thomassen, "The Computation of Turbulent Flow through Pipe Fittings and the Decay of the Disturbed Flow in a Downstream Straight Pipe," Flow Meas. Instrum. Vol. 2(1991), pp. 45-55
- (4) J. A. Brennan, S. E. McFaddin, C. F. Sindt, K. M. Kothari, "The Influence of Swirling Flow on Orifice and Turbine Flowmeter Performance," Flow Meas. Instrum. Vol. 1(1989), pp. 5-8
- (5) Robert K. McBrien, "High Pressure Pulsation Effects on Orifice Meters," FEDSM97-3700(1997)
- (6) Conditioners on Orifice Meter installation Errors," FEDSM97-3006
- (7) B. Harbrink, "Header Effects on Gas Flow Profiles," Flow Meas. Instrum. Vol. 2(1991), pp. 34-39
- (8) Wojciech Studzinski, Umesh Karnik, "Installation Effects on Orifice Meter with No Flow Conditioner," FEDSM97-3014(1997)
- (9) G. L. Morrison, R. E. DeOtte, M. Moen, K. R. Hall, J. C. Holste, "Beta Ratio, Swirl and Reynolds Number Dependence of Wall Pressure in Orifice Flowmeters," Flow Meas. Instrum. Vol. 1(1990), pp. 269-277
- (10) Mattingly, G. E., Yeh, T. T., "Flowmeter Installation Effects Due to Several Elbow Configurations," 2nd Int. Symp. Fluid Flow Measurement, June 6-8(1990), Calgary, Alberta, Canada
- (11) ISO 5167, "International Standard", (1991)