

## CFD를 이용한 오리피스 유량계의 차압계산

김홍민\* · 김광용\*\* · 허재영\*\*\* · 하영철\*\*\*

### Calculations of Pressure Difference in Orifice Flowmeter using CFD

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

*Key words* : Orifice Flowmeter(오리피스 유량계), Diameter Ratio(직경비), Numerical Scheme(수치해석방법), Turbulence Model(난류모델)

#### ABSTRACT

In this study, commercial CFD code, i.e. CFX-4.3 is used to analyze the flow field and to calculate pressure differences in an orifice flowmeter. Four numerical schemes and five turbulence models are tested. Hybrid scheme and Reynolds stress model show the best performance. Chosen scheme and turbulence model are applied to predict pressure differences through the orifice for the diameter ratios, 0.3, 0.5, and 0.7. And, the results are compared with the experimental data. The results show that the calculation error is inversely proportional to the diameter ratio, and is proportional to the mass flow rate.

#### 1. 서론

천연가스 공급초기에는 도시가스에 대한 수요가 크지 않았기 때문에 계량설비가 1열로 설계되었고, 오리피스 유량계 설치사양에 부합하는 충분한 직관부를 포함한 설비가 가능하였다. 그러나 도시가스에 대한 폭발적인 수요의 증가로 90년 초반부터 계량설비를 다열화하고 계량배관의 관경을 증가시키는 것이 불가피하게 되었다. 또한 설치조건의 제약으로 배관구조가 복잡·다양해지고 있어 이로 인한 유동의 불안정성이 오리피스 유량계의 유량측정에 미치는 영향에 관한 연구

의 필요성이 대두되었다<sup>(1)</sup>. 그러나 설치조건에 따라 각각 다른 형상을 갖는 모든 배관형상에 대해 실험적으로 계량오차를 측정한다는 것은 소요비용과 기간상의 문제로 인해 현실적으로 불가능한 실정이다.

최근 컴퓨터 성능의 증가와 함께 비약적인 발전을 보인 전산유체역학(CFD : Computational Fluid Dynamics)은 터빈, 압축기 등의 유체기계에서 항공기 및 선박의 설계에 이르기까지 관련된 열·유체문제를 해석하는데 있어 그 효용가치가 검증됨으로써 실험에서 제기되는 시간과 비용상의 문제점을 해결할 수 있는 대안으로 부각되고 있다.

본 연구에서는 영국 AEA Technology사에서 개발된 CFX-4.3을 이용하여 직관부에 설치된 3가지 오리피스 유량계의 형상에 대해 4가지의 수치해석방법과 5가지의 난류모델을 이용하여 유동해석을 수행한 후, 오리피스 전단과 후단의 압력차를 실험치와 비교함으로써 그 정확성을 비교·검토하였다.

\* 인하대학교 기계공학과 대학원

\*\* 인하대학교 기계공학부

\*\*\* 한국가스공사 연구개발원 유체계량연구실

## 2. 유동해석 및 방법

### 2.1 유동해석

본 연구에서는 유동해석을 위해 상용 소프트웨어인 영국 AEA Technology사의 CFX-4.3을 사용하였다. 정상상태, 비압축성, 축대칭, 난류유동에 대한 지배방정식으로 연속방정식, Reynolds-averaged Navier-Stokes 방정식을 계산하였으며, 지배방정식의 이산화방법으로는 유한체적법(finite volume method)을 사용하였다.

### 2.2 기하학적 형상 및 격자제

본 연구에서 사용된 오리피스 유량계가 설치된 직관부의 형상은 Fig. 1에서 보는 바와 같고 관직경비( $\beta$  = 오리피스 직경/관직경)가 0.3, 0.5, 그리고 0.7에 대한 오리피스 판의 높이 및 각 부분의 길이는 Table 1에 나타나 있다. 축대칭임을 고려해 원주방향으로는  $5.7^\circ$  영역만을 계산하였다.

격자생성방식으로는 다중블록 (multi-block)방식을 사용하였고, 격자테스트를 통하여 고레이놀즈수 난류모델의 경우  $300 \times 45$ 개, 저레이놀즈수 난류모델의 경우  $300 \times 85$ 개의 격자를 사용하였다.

### 2.3 경계조건

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

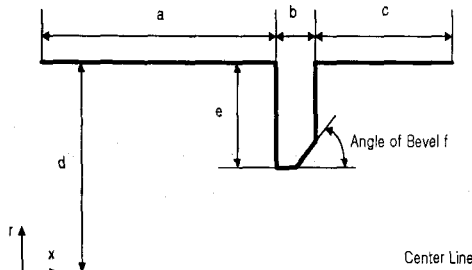


Fig. 1 Geometric structure of orifice flowmeter

### 2.4 유체 물성치

본 연구에서 사용된 유체는 현재 널리 사용되고 있는 천연가스로서 밀도는  $7.387 \text{ kg/m}^3$  점성은  $1.0 \times 10^{-5} (\text{Pa} \cdot \text{s})$ 이다.

### 2.5 난류모델

본 연구에서 사용된 난류모델은 2-방정식 모델로써, 표준  $k-\epsilon$  모델<sup>(2)</sup>, 저레이놀즈수  $k-\epsilon$  모델<sup>(3)</sup>, 그리고 RNG  $k-\epsilon$  모델<sup>(4)</sup>을 사용하였으며, 레이놀즈응력모델로써, 대수응력모델<sup>(5)</sup>과 벽효과를 반영한 Gibson-Lauder 모델(GL)<sup>(6)</sup>을 사용하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 격자테스트

Fig. 2는 오리피스 전단의 압력측정 지점에서 각각 축방향과 반경방향의 격자수에 따른 속도분포를 보여주고 있다. 축방향으로 250, 300 그리고 360개를 사용한 결과 300개와 360개를 사용한 결과가 거의 일치하

Table 1 Dimensions of orifice flowmeter(m)

a	b	c	d	e	f
3	0.006	2	0.127	0.0889	45 °
				0.0635	
				0.0381	

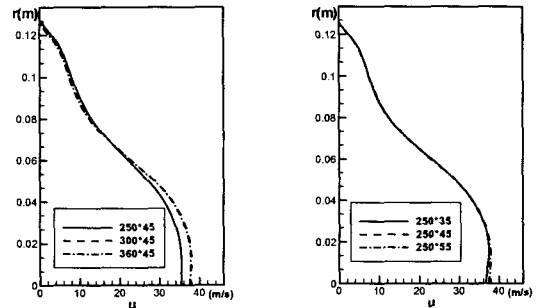


Fig. 2 Grid test for axial and radial directions

Table 2 Comparison of various numerical schemes

Numerical Scheme	dp_exp (hPa)	dp_cal (hPa)	error (%)
Upwind	294.2	262.5	10.3
Hybrid		269.9	8.3
Quick		247.4	15.9
Van Leer		269.3	8.5

Table 3 Comparison of various turbulence models

Turbulence Model	dp_exp (hPa)	dp_cal (hPa)	error (%)
Standard k-ε	294.2	269.9	8.3
Low-Re k-ε		248.4	15.5
RNG k-ε		271.2	7.8
ASM		269.6	8.3
RSM(GL)		271.3	7.7

므로 축방향 격자수는 300개를 선택하였다. 반경방향으로는 35, 45 그리고 55개의 격자수를 사용한 결과 속도변화가 뚜렷하지는 않으나 중심에서의 속도변화로 판단해 볼 때 45개의 격자가 최적임을 알 수 있다. 속도구배가 큰 오리피스 판주위에 격자를 밀집시켰으며, 벽함수를 사용하는 고레이놀즈수 난류모델의 경우 첫 번째 격자의 위치가  $y^+ > 30$ 을 만족하도록 0.0025D에 위치시켰으며, 벽함수를 사용하지 않는 저레이놀즈수 난류모델의 경우는  $y^+ < 1$ 을 만족하도록 0.0002D에 위치시켰다.

### 3.2 수치해석방법 비교

수치해석방법으로는 상류차분도식, 하이브리드 도식, quick 도식, 그리고 Van leer 도식을 비교하였다<sup>(7)</sup>.

Table 2에 나타난 바와 같이 하이브리드 도식이 가장 정확한 예측성능을 보임을 알 수 있다.

여기서 dp는 압력차를 나타내는데 본 계산에서 사용된 압력계산방법은 실험과 동일한 플랜지 태핑방식의 오리피스 유량계에 대해 오리피스 판 전·후단 2.54cm 위치에서의 압력차를 사용하였다. 그리고 오차(error)

Table 4 Pressure differences for various flow conditions

Diameter Ratio(β)	Mass flowrate (kg/h)	dp_exp (hPa)	dp_cal (hPa)	error(%)
0.3	2651.8	49.0	46.0	6.1
	4577.1	147.1	137.2	6.7
	6440.1	294.2	271.3	7.7
0.5	7632.8	49.0	46.8	4.5
	13170.7	147.1	139.7	5.0
	18526.8	294.2	278.0	5.5
0.7	16591.7	49.0	47.5	3.2
	28613.4	147.1	142.0	3.5
	40217.0	294.2	281.4	4.3

는 다음과 같은 방법으로 계산되었다.

$$error(\%) = \left(1 - \frac{dp_{cal}}{dp_{exp}}\right) \times 100 \quad (1)$$

### 3.3 난류모델 비교

CFX-4.3은 다양한 난류모델을 제공하고 있으나 본 연구에서는 널리 사용되고 있는 5가지 난류모델의 결과를 비교하였고, 그 결과를 Table 3에 나타내었다.

비교 결과, 레이놀즈응력모델이 다른 난류모델에 비해 정확한 예측성능을 보여주고 있음을 알 수 있다.

### 3.4 직경비와 유량에 따른 차압 계산

위에서 선택한 격자계와, 하이브리드 도식 그리고 레이놀즈응력모델을 사용하여 직관부에 설치된 오리피스 유량계주위의 유동해석을 수행하였다. Table 4는 직경비가 0.3, 0.5 그리고 0.7인 경우, 각각 3가지의 유량에 대한 오리피스 전·후단의 차압을 나타내고 있다.

Fig. 3, Fig. 4, 그리고 Fig. 5는 직경비가 다른 경우 유선분포를 보여주고 있는데, 직경비가 작을수록 박리구역이 증가하는 경향을 볼 수 있다. 이러한 박리구역의 증가는 Table 4에서 보듯 차압계산상의 오차와 밀접한 관련을 보이고 있다. 즉, 박리구역이 증가할수록 계산오차도 커짐을 알 수 있다.



Fig. 3 Streamlines(  $\beta = 0.3$  ,  $\dot{m} = 2651.8(kg/h)$ )



Fig. 4 Streamlines(  $\beta = 0.5$  ,  $\dot{m} = 7632.8(kg/h)$ )

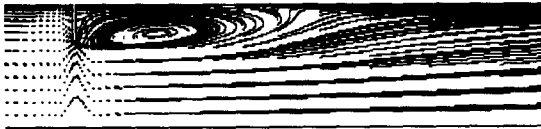


Fig. 5 Streamlines(  $\beta = 0.7$  ,  $\dot{m} = 16591.7(kg/h)$ )

오차는 직경비가 작을수록, 유량이 클수록 증가하는 경향을 보였는데, 이는 이 경우 오리피스 판 주위의 속도구배가 커지고, 박리구역이 증가되면서 벽근처 유동은 심한 비등방성을 갖는 반면, 등방성 가정하에 유도된 벽함수를 사용하는 난류모델은 이러한 경향을 충분히 반영하지 못하기 때문인 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 오리피스가 설치된 직관유동에 대해 상용 소프트웨어인 CFX-4.3을 이용하여 2차원 유동해석을 수행하였다. 오리피스 전·후단의 압력차를 4개

의 수치해석방법과 5개의 난류모델을 사용하여 계산한 후 실험치와 비교한 결과 하이브리드 도식과 레이놀즈 응력모델이 가장 정확한 예측성능을 보임을 알 수 있었다. 계산 오차는 직경비가 감소할수록, 유량이 증가할수록 증가하는 경향을 보였다.

본 연구결과는 복잡한 3차원 배관에 설치된 오리피스 유량계의 유동해석의 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

#### 참고문헌

- (1) 허재영, 안승희, 이강진, 이승준, 2000, "오리피스 유량계와 터빈 유량계의 직관부길이의 유동안정기에 관한 연구," 유체기계 연구개발 발표회 논문집, pp. 265~271
- (2) Jones, W. P. , Launder, B. E., 1972, "The Prediction of Laminarisation with a Two-Equation Model of Turbulence," Int. Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 15, pp. 301~314
- (3) Launder, B. E. and Sharma, B. I., 1974, "Application of the Energy-Dissipation Model of Turbulence to the Calculation of Flow Near a Spinning Disc," Letters in Heat and Mass Transfer, Vol. 1, pp. 131~138
- (4) Yakhot, R., Orszag, S. A., Thangam, S., Gatski, T. B., and Speziale, C. G., 1992, "Development of Turbulence Models for Shear Flows by a Double Expansion Technique," Physics of Fluids A, Vol. 4, No. 7, pp. 1510~1520
- (5) Rodi, W. 1976, "A New Algebraic Relation for Calculating the Reynolds Stresses," ZAMM, Vol. 56, pp. 219~221
- (6) Gibson, M. M. and Launder, B. E., 1978, "Ground Effects on Pressure Fluctuation in the Atmospheric Boundary Layer," Journal of Fluid Mechanics, Vol. 86, pp. 491~511
- (7) CFX-4.2 Solver Manual