

1Y 차압식 Venturi-cone 유량계에 대한 유동해석

Numerical Analysis of the Differential Pressure Venturi-cone Flowmeter

윤준용¹⁾, 맹주성²⁾, O이정원³⁾

J. Y. Yoon, J. S. Maeng, J. W. Lee

Differential pressure Venturi cone flowmeter is an advanced flowmeter which has many advantages such as wide range of measurement, high accuracy, excellent flow turndown ratio, low headloss, and short installation pipe length requirement, etc. Like other differential pressure flowmeter, Venturi cone flowmeter uses the law of energy conservation, but its shape and position make it perform better than others. The cone acts as its own flow conditioner and mixer, fully conditioning and mixing the flow prior to measurement. For the analysis, we use Reynolds-averaged Navier-Stokes equations and $k-\omega$ turbulence model. The equations are fully transformed in the computational coordinates, the pressure-velocity coupling is made through SIMPLER algorithm, and the equations are discretized using analytic solutions of the linearized equations(Finite Analytic Method). At the end of the paper, using the result of analysis, We propose a new shape of cone with the hope of drag reduction and high performance.

1. 서론

1980년대 말 소개된 차압식 Venturi cone 유량계는 최근 빠른 속도로 기존 오리피스판 유량계를 대체해 나가고 있다. Venturi cone 유량계는 기존 오리피스판 유량계 등과 같이 에너지 보존

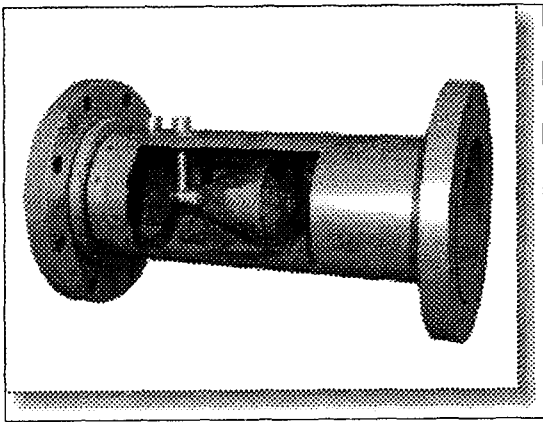


Fig. 1 Venturi cone flowmeter

법칙을 이용하는 차압식 유량계다.(Fig. 1) 이 유량계의 장점으로는 먼저 넓은 범위의 레이놀즈수에서 사용이 가능하다는 것이다. 즉 기존의 차압식 유량계의 경우 레이놀즈수가 큰 난류영역에서만 사용가능했으나 Venturi cone 유량계의 경우 층류, 천이, 난류영역의 아주 넓은범위에서 사용할 수 있다. 다음으로 유량계 전후에 걸쳐 요구되는 직관의 길이가 유량계의 상류측인 경우 원관 지름에 대해 1~2배, 하류측인 경우 3~5배 정도로 기존의 유량계에 비해 아주 짧으므로 거의 모든경우에 대해 유량계의 장착이 가능하며 이는 유량계 설치시 단가의 절감 등의 이점을 준다.[1]

이 밖에도 전자기식 유량계에 버금가는 정확도(0.5%)를 가지며 Turndown비가 크고 내구성이 우수하며 압력 손실이 적을 뿐 아니라 유지비가 싸다는 등의 장점이 있다. 이러한 유량계의 장점들은 콘의 형태와 장착 위치에 기인한 것으로 콘이 파이프 중앙부에 위치하여 이를 지나는 유동의 형태를 고르게 만들어주는 유동 조절장치의

- 1) 한양 대학교 기계공학과(425-791 경기도 안산시 사1동 1271번지 Tel: 0345-400-5282)
- 2) 한양 대학교 기계공학과(133-791 서울시 성동구 행당동 17번지 Tel: 02-281-8201)
- 3) 한양 대학교 대학원 (Tel: 02- 290-0439)

역할을 하며 유체를 잘 혼합하여줌으로써 유량계 전반부의 교란에 대하여도 비교적 잘 작동하고 상,하류측의 직관부를 줄일 수 있는 등의 장점들을 제공한다.

그동안 Venturi cone 유량계의 유동장 해석은 보통 실험에 의해 이루어져 왔으며 수치적 해석에 의한 경우는 찾아볼 수 없었다. 이는 실험을 보조해줄 수 있는 충분한 수치적 정확성의 결여에 기인하며 본 연구도 궁극적으로 복잡한 유동장을 이해하기 위한 실험의 보조적인 자료를 제공하고 또한 수치해석을 이용한 계산의 시간적, 경제적 이점을 이용하여 유동장에 영향을 끼치는 변수들 간의 상호관계를 제공하여 새로운 형태의 유량계 개발을 위한 기초적인 자료를 확보하기 위함이다. 이를 위해 본 연구에서는 유동장 해석을 위해 $k-\omega$ 난류모형을 사용하였고 Reynolds-averaged Navier-Stokes 방정식을 일반적인 비직교 좌표계로 수학적 완전변환하였으며 운동량 방정식과 난류 물성치들의 수송방정식 등은 유한 해석법(Finite Analytic Method)을 이용하여 이산화 하였고 속도장 보정을 위하여 SIMPLER 기법을 사용하였다.

2. 본 론

2-1 난류모형

비압축성 유동에 대한 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{1}{Re} \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial \overline{u_i' u_j'}}{\partial x_j} \quad (2)$$

식(1)과 식(2)는 각각 연속방정식과 운동량방정식을 시간 평균하여 관지름과 평균속도로 무차원화한 식들이다. 식(2)의 레이놀즈 응력 $\overline{u_i' u_j'}$ 을 계산하기 위하여 이를 등방성의 와점성계수 ν_t 와 평균 변형률 사이의 관계로 나타낼 수 있다. (Boussinesq 가정)

$$-\overline{u_i' u_j'} = \nu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \quad (3)$$

본 연구에서는 Wall bounded flow에서 예측성이 뛰어난 것으로 알려진 Wilcox[2,3]가 제안한 $k-\omega$ 난류모형을 사용하였다. 이는 벽에서 전단력의 정확한 예측을 가능하게 하여 마찰에 기인한 항력을 예측하기 위함이다.

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{1}{Re} + \sigma^* \nu_t \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] - \overline{u_i' u_j'} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \beta^* \omega k \quad (4)$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + u_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{1}{Re} + \sigma \nu_t \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] - \frac{\gamma \omega}{k} \overline{u_i' u_j'} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \beta \omega^2 \quad (5)$$

$$\nu_t = \gamma^* \frac{k}{\omega} \quad (6)$$

식(4) ~ (6) 에서 사용되어진 상수들은 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Coefficients of the $k-\omega$ model

σ	σ^*	β	β^*	γ	γ^*
0.5	0.5	3/40	0.09	5/9	1

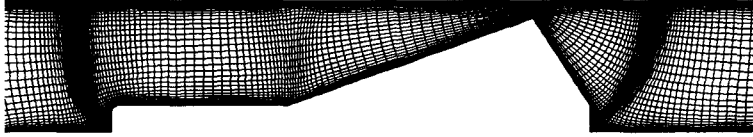


Fig. 2 Grid system ($\beta = 0.5$)

2-2 격자생성 및 경계조건

먼저 Fig. 2는 Fig. 1에서 볼 수 있는 콘 형상의 대칭성을 이용하여 2차원으로 계산영역을 단순화하여 포아송 방정식을 풀어 만든 격자계를 나타낸다.[4,5] Fig. 2의 격자계는 β 값이 0.5일 때의 결과로 β 는 오리피스판 유량계 등에서 사용되는 값과 같은 면적비를 가진다. 이때 계산 영역은 콘으로부터 입구는 관지름의 3배 출구는 30배로 정하였다. 입구에서의 조건은 완전 발달된 원관 내 유동조건을 주었으며 출구조건은 콘으로부터 충분한 거리를 두었으므로 구배가 거의 없다는 가정에 의해 Neumann조건을 사용하였다.

2-3 수치계산

식(1),(2)의 종속변수와 독립변수를 모두 일반적인 비직교 좌표계로 완전 변환하고 2-2절에서 구한 일반적인 비직교 좌표계로 지배방정식을 변환시켜 유한 해석법[6]을 이용하여 이산화 하였다. 엇갈린 격자계를 사용하고 SIMPLER기법[7]을 이용하여 속도보정을 수행하였다. 속도성분 및 난류량은 상류에서 하류로 진행하여 하류의 영향이 직접 상류로 전파되는 전체적 압력 반복법(global pressure iteration)을 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3-1 유동장 해석

Fig. 3은 콘주위의 속도 벡터를 Fig. 4는 유선의 분포를 나타내었다. 콘의 앞부분 즉 A부분에서 유동 정체현상(flow stagnation)이 나타나고 이후 가속되어진 유체가 벽쪽으로 흐르며 B부분에서 작은 박리가 발생한다. C지점 이전에 콘부에 재부착한 유체는 단면적의 감소에 따라 유속이 증가하게 되며 D점에서 유체는 콘으로부터 떨어져 나가게 되어 이로 인해 콘의 뒷부분에는 커다란 재순환 영역이 발생한다. D점에서 박리된 유체가 그 이후 관벽쪽으로 흐르면서 유동의 실제 단면적은 더 작아지게 되고 이 지점에서 유체는 최대속도를 가지며 이는 압력강하로 나타난다. Fig. 5에는 콘표면의 압력 분포를 나타내었다. Fig. 4에는 콘의 후미부에서 생기는 재순환 영역이 잘 나타나있다. 이러한 재순환 영역은 β 의 값에 따라 외관 지름의 3~6배 길이까지 계속되어지며 이후 압력의 회복이 거의 이루어져 유동의 형태는 점점 완전 발달된 원관에서의 유동형태로 진행된다.

3-2 항력

유체유동이 콘에 미치는 힘에 대하여 살펴보았다. F 는 마찰과 압력에 의한 항력으로 아래의 식과 같이 나타낼 수 있다.

더 짧은 거리에서 이루어짐을 의미하며 유량계 하류에 요구되는 직관부를 줄일 수 있을 것으로 기대된다.

4. 결론

본 연구에서는 $k-\omega$ 난류모델과 유한 해석법(Finite analytic method)을 사용하여 복잡한 차압식 Venturi cone내의 유동장을 해석하였다. 유동장 해석결과 3장에서 살펴본 바와 같이 콘 주위에서의 박리-재순환-경계층 발달 등을 포함한 복잡한 유동현상을 관찰할 수 있었다.

다음으로 유동장 해석결과를 이용하여 유체가 콘에 가하는 힘을 계산하였다. 그 결과 β 값이 커짐에 따른 항력의 급격한 증가를 관찰할 수 있었다. 또한 콘의 형상을 사인곡선으로 변경시켰을 때 항력의 감소를 살펴보았다.

지금까지 살펴본 결과들은 정성적인 결과치이며 수치해석에 의한 오차를 포함하고 있으므로 앞으로 Venturi cone 차압식 유량계내의 정확한 유동장 해석을 위해서는 실험을 통한 결과와 본 연구에서 얻은 결과들의 정량적인 비교가 요구된다. 또한 변경된 형상의 콘에 대한 유량계수와 유량계 전후에서 요구되는 직관의 길이 등의 데이터들이 실험적으로 구해져야 하며 그 결과는 기존

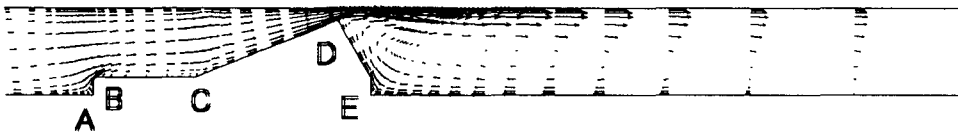


Fig. 3 Velocity vectors around the V-cone.



Fig. 4 Streamlines around the V-cone

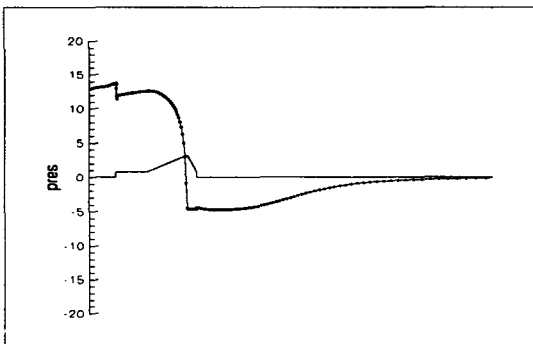


Fig. 5 Pressure distribution around cone

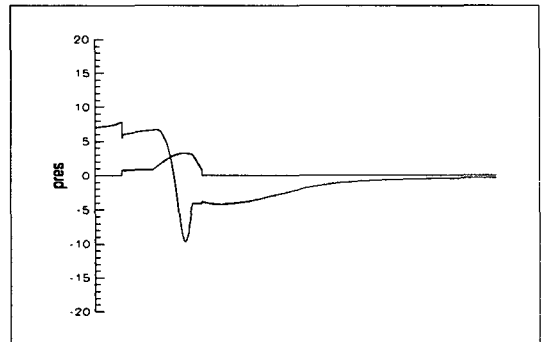


Fig. 6 Pressure distribution around changed cone

$$F = - \int_A P \cdot \vec{n} dA + \int_A \tau_w \cdot \vec{i} dA \quad (7)$$

여기서 \vec{n} , \vec{i} 는 각각 면적에 수직한 단위 법선벡터와 평행한 단위 접선벡터를 나타낸다. Table 2에는 수치적분에 의하여 구해진 결과가 나와있다. 이때 마찰항력은 형상항력에 비하여 아주 작은 값을 가지며 β 가 증가할수록 항력이 급격하게 커짐을 알 수 있다.

Table 2. Drag coefficient, Drag force, Bending moment vs. β

β	Drag coefficient	Drag force(N)	Bending moment(Nm)
0.4	43.88	535.22	28.58
0.5	16.93	185.88	9.93
0.6	7.83	74.14	3.96
0.7	3.52	26.61	1.42

3-3 새로운 콘 형상의 제안

유량측정 장치에서 압력손실은 매우 중요한 요소이며 이러한 압력 손실은 유체에 의한 항력과 연관되어진다. 또한 유체가 가하는 항력은 콘시스템에 가해지는 굽힘 모멘트를 결정하므로 이 시스템의 내구성과도 밀접한 관련이 있다. 3-2절에서 여러 가지 β 값에 대한 항력을 구하였다. 이에 유동장 해석 결과를 바탕으로 항력을 줄이기 위한 새로운 콘의 형상을 제안하고자 한다. 먼저 원형상의 콘의 경우 Fig. 3, Fig. 4에서 살펴본 바와 같이 콘부에서의 박리후 유동이 관벽 방향으로 향하며 실제유동면적의 감소에 의한 속도증가와 이로 인한 압력강화로 큰 항력이 발생하므로 박리점 부근의 형상을 변경하여 박리점 이후 유동을 조절하고자 한다. 여기에서는 콘부의 CD직선부(Fig. 3)를 사인곡선(sine curve)으로 바꾸어 유동장을 해석하였다. Fig. 9와 Fig. 10에는 각각 변경된 형상의 콘주위의 속도 벡터와 유선이 나타나있다. Fig. 7과 Fig. 8에서 볼 수 있듯이 최소 단면적 부분에서 최대속도를 가지는 유체는 그 이후 짧은 확대부를 지나면서 단면적의 증가로 속도의 감소와 압력회복이 일어나며 그 이후 박리점에서 유동의 방향이 관 중앙부로 향하므로 압력 회복이 계속되어진다. Fig. 6에는 콘표면의 압력 분포가 나타나 있으며 이 그림으로부터 이러한 최소단면적 부분 이후의 빠른 압력회복을 볼 수 있다. Table 3에서는 변경된 형상의 콘에 대한 항력등의 수치적분의 결과가 나타나 있다.

Table 3. Drag coefficient, Drag force, Bending moment vs. β for the changed shape cone

β	Drag coefficient	Drag force(N)	Bending moment(Nm)
0.4	22.43	276.90	14.78
0.5	9.72	106.18	5.67
0.6	4.52	43.41	2.32
0.7	2.01	15.60	0.81

Table 2 와 Table 3을 비교하여보면 변경된 형상의 콘의 경우 β 의 값에 따라 항력이 42~48 % 정도 감소하는 것을 알 수 있다. Fig. 9 에서 두 형상에 대한 결과치를 그래프로 비교하였다. 그리고 Fig. 8에서 볼 수 있듯이 콘 후미부의 재순환영역의 길이가 외관지름의 2.5 ~ 4배 정도로 기존 형상의 콘에 비해 많이 짧아진 것을 확인할 수 있다. 이는 완전 발달된 유동으로의 전개가

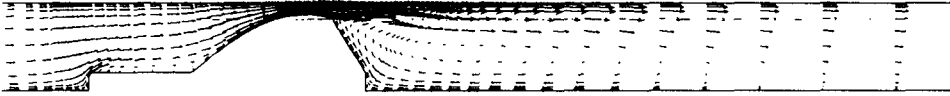


Fig. 7 Velocity vectors around the changed shape cone



Fig. 8 Streamlines around the changed shape cone

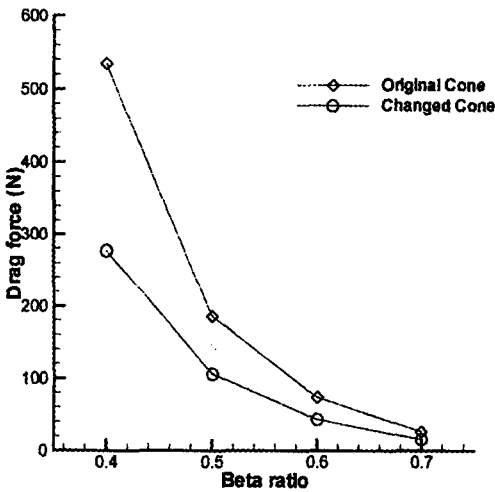


Fig. 9 Drag forces vs. beta ratios

형상의 데이터와 비교되어야 할 것이다. 이러한 검토를 통하여 압력손실이 적고 내구성이 우수한 새로운 형태의 Venturi cone 차압식 유량계의 설계가 가능할 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 1996년도 교육부 학술연구 조성비(기 제공학: ME96-B-13)에 의하여 이루어졌으며, 이에 감사드린다.

참고 문헌

- [1] S. V. Prabu, R. Mascomani, *Flow Meas. Instrum.* Vol.7 No.1 (1996)
- [2] D. C. Wilcox, *Turbulence Modeling for CFD*, DCW Industries, Inc. (1993)
- [3] D. C. Wilcox, *AIAA J*, Vol. 26, No. 11 (1988)
- [4] J. Tyndall, M.S. Thesis, Department of Mechanical Eng., Univ. Iowa, Iowa city (1988)
- [5] D. D. Knight, *Numerical Grid generation*, Elsevier Science Publishing Company (1982)
- [6] C. J. Chen and others, *The Finite Analytic Method*, Iowa Institute of Hydraulic Research, Univ. Iowa IHR Report 232 Vol. 1 ~ 7 (1980 ~ 1986)
- [7] S. V. Patankar, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, Hemisphere Publishing Co. (1980)