

차압식 벤투리콘 유량계에 대한 유동해석

Numerical analysis of the differential pressure venturi-cone flowmeter

윤 준 용*, 맹 주 성*, 이 정 원**
J. Y. Yoon, J. S. Maeng, J. W. Lee

Key words : Differential pressure venturi-cone flowmeter(벤투리콘 차압식 유량계), $k-\omega$ turbulence model($k-\omega$ 난류 모형), Finite analytic method(유한 해석법), Control of separation

Abstract

The differential pressure venturi-cone flowmeter is an advanced flowmeter which has many advantages such as wide range of measurement, high accuracy, excellent flow turn-down ratio, low headloss, short installation pipe length requirement, and etc. Like other differential pressure flowmeters, the 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 used Reynolds-averaged Navier-Stokes equations and $k-\omega$ turbulence model. The equations were fully transformed into the computational domain, the pressure-velocity coupling was made through SIMPLER algorithm, and the equations were discretized using finite analytic solutions of the linearized equations(Finite Analytic Method). To control the separation phenomenon on the cone surface, we proposed a new shape of cone, and analyzed the flowfield in the new flowmeter system, and found the improvement on the performance of the new cone flowmeter.

1. 서 론

1980년대 말에 소개된 차압식 venturi-cone 유량계는 최근 빠른 속도로 기존 오리피스판 유량계를 대체해 나가고 있다. Venturi-cone 유량계는 기존 오리피스판 유량계 등과 같이 에너지 보존법칙을 이

용하는 차압식 유량계다.(Fig.1) 이 유량계의 장점은 먼저 넓은 범위의 레이놀즈수에서 사용이 가능하다는 것이다. 즉 기존의 차압식 유량계의 경우 레이놀즈수가 큰 난류영역에서만 사용 가능했으나 venturi-cone 유량계의 경우 층류, 천이, 난류영역의 아주 넓은 범위에서 사용할 수 있다. 다음으로 유량계 전후에 걸쳐 요구되는 직관의 길이가 제작사의 주장에 의하면 유량계의 상류측인 경우 원관 지름에 대해 1~2배, 하류측인 경우 3~5배 정도로 기존의 유

* 정회원, 한양대학교 기계공학과
** 한양대학교 대학원

량계에 비해 아주 짧으므로 유량계의 장착조건이 확대되어졌으며 이는 유량계 설치시 단가 절감 등의 이점을 준다고 보고되고 있다.^(1,2) 이밖에도 전자기식 유량계에 버금가는 정확도(0.5%)를 가지며 turn-down비가 크고 압력 손실이 적을 뿐 아니라 유지비가 싸다는 등의 장점이 있다. 이러한 유량계의 장점들은 cone의 형태와 장착 위치에 기인한 것으로 cone이 파이프 중앙부에 위치하여 이를 지나는 유동의 형태를 고르게 만들어주는 유동 조절장치의 역할을 하며 유체를 잘 혼합하여 좁으므로 유량계 전반부의 교란에 대하여도 비교적 잘 작동하고 상·하류측의 직관부를 줄일 수 있게 한다.

Venturi-cone 차압식 유량계의 구조는 Fig.1에서 볼 수 있듯이 일반적인 차압식 유량계와는 달리 파이프의 중앙부에 cone이 위치하고 있어 차압을 발생시키며 이는 파이프에 용접되어져 있다. 그러므로 파이프 직경이 큰 경우 유속의 증가에 따라 cone부에 유동하중이 크게 작용하므로 venturi-cone을 파이프 내부에서 지지하고 있는 용접 부위에 과도한 굽힘 모멘트가 작용하게 된다. 따라서 이러한 경우 내구성이 중요한 문제점으로 대두되므로 이를 개선하기 위하여 기존의 형태보다 유동저항이 적은 새로운 형태의 cone의 설계가 요구된다.

본 연구에서는 먼저 수치 해석의 시간적·경제적 이점을 이용하여 기존 venturi-cone 유량계의 복잡한 유동장을 이해하고 유동장에 미치는 변수의 영향을 파악하여 새로운 형태의 유량계 개발을 위한 기초 자료를 확보하고자 한다. 또한 위의 해석

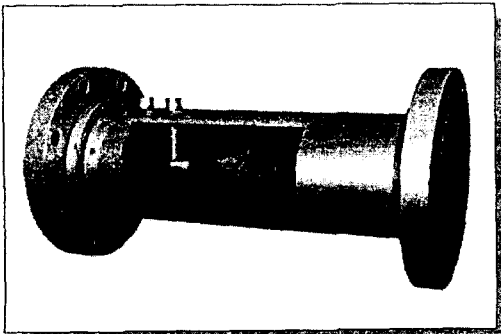


Fig.1 Venturi-cone Flowmeter

결과를 이용하여 cone의 형상에 의해 발생하는 박리현상을 제어하여 유동저항이 적은 새로운 형상의 cone을 제안하였으며 새로 제안된 cone에 대한 유동해석을 수행하여 내구성의 개선 여부를 검토하였다. 이를 위해 본 연구에서는 $k-\omega$ 난류모형을 사용하였고 Reynolds-averaged Navier-Stokes 방정식들을 일반적인 비 직교 곡선 좌표계로 수학적 완전 변환하였으며 운동량 방정식과 난류 물성치들의 수송 방정식 등은 유한 해석법(finite analytic method)을 이용하여 이산화하였고 압력장 계산과 속도장 보정을 위하여 SIMPLER(SIMPLE Revised)기법을 사용하였다.

2. 본 론

2.1 난류모형

비 압축성 유동에 대한 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

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

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

$$-\overline{u_i' v'} = \nu_t \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \tag{3}$$

본 연구에서는 식(3)에서 와점성계수 ν_t 를 구하기 위하여 $k-\omega$ 모형을 사용하였다.⁽³⁻⁵⁾ 이는 cone 주위의 복잡한 형상을 고려하기 위한 것으로 벽면을 포함한 유동에서 예측성이 뛰어난 것으로 알려진 Wilcox가 제안한 $k-\omega$ 모형의 지배방정식은 다음과 같다.

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

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

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

식(4)~(6)에서 사용되어진 상수들은 Table 1에 나타내었다.

2.2 격자생성 및 경계조건

유동장의 형상이 복잡한 경우 일반적인 직교 좌표계나 원통 좌표계와 같은 기본 좌표계를 이용한 격자를 사용할 경우 경계 보간의 문제에 의해 정확한 수치해를 기대하기 어렵다. 따라서 본 연구에서는 Richmond⁽⁶⁾와 Knight⁽⁷⁾의 기법을 이용하여 좌표 생성식인 포아송 방정식을 수치적으로 풀어 얻은 경계 고정 좌표계(body fitted coordinate)를 사용하였다. Fig.2는 β 값이 0.5일 때 생성된 격자계로 β 는 오리피스판 유량계에서 사용되어지는 값과 같이 파이프의 단면적에 대한 유동의 최소 단면적의 비를 나타낸다. 이때 계산 영역은 입구와 출구는 각각 cone으로부터 3배와 30배로 정하였다. 입구에서의 경계 조건은 완전 발달된 원관에서의 유동을 사용하였고 출구의 경우 cone으로부터 충분한 거리를 두었으므로 완전 발달 조건을 사용하였다. 또한 파이프의 벽면과 cone의 벽면은 매끄러운 벽면 조건과 점착 조건을 사용하였다. 또한 수렴해의 격자 의존성을 검증하기 위하여 300×80 , 300×60 , 250×60 의 세 가지의 격자계에 대한 수치해를 얻어 비교

Table 1 Coefficients of the k - ω model

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



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

하였다. 그 결과 세 종류의 격자계가 모두 충분한 수의 격자를 사용하였고 또한 격자를 벽면으로 충분히 밀집시켰기 때문에 각각의 수렴해가 거의 정확히 일치함을 볼 수 있었다.

2.3 수치계산

유동량 방정식과 난류 수송식들을 2-2절에서 얻은 일반적인 비 직교 곡선 좌표계에서 사용하기 위해 주어진 좌표계에 합당하도록 지배방정식을 변환시켜야 한다. 본 연구에서는 해석하고자 하는 유동장의 그 형상이 복잡하고 이로 인해 박리와 재순환 등의 복잡한 유동 형태를 나타내기 때문에 normalized contravariant velocity component를 이용하여 지배방정식을 완전변환(full transformation)하였다.^(6,8,9) 완전 변환된 지배방정식을 이산화하기 위하여 Chen 등에 의해 개발된 유한 해석법을 이용하였다.^(10,11) 유한 해석법은 미분 방정식의 해를 구하는 수치 계산기법중의 하나로서 방정식이 지배하는 전체 영역을 비교적 간단한 형상의 미소 영역들로 분할하고 그 미소 영역내에서 가정된 경계조건을 만족하는 국소 해석해를 변수 분리법을 이용하여 구하여 이들의 조합으로 전체 영역에서의 해를 구하는 수치 계산법이다. 여기서는 Richmond⁽⁶⁾와 Yoon⁽¹²⁾에 의해 개선되어진 방법을 사용하였다.

압력장 계산과 속도의 보정을 위해 Patankar⁽¹³⁾에 의해 제안된 SIMPLER기법을 사용하였다. 이를 위해 엇갈린 격자계(staggered grid system)를 사용하였고 특히 압력 방정식에서 Chen and Patel⁽¹⁴⁾에 의해 제안된 수정 가상 속도(modified pseudo-velocity)를 사용하였다. 이는 가상 속도항에 좌표계의 비 직교성에서 기인하는 압력 구배항을 포함 시킴으로써 압력방정식에서 발생하는 복잡한 계산을 단순화시킨 방법이다.

여기에서 속도 성분 및 난류량은 상류에서 하류로 진행하고 압력은 하류에서 상류로 전파되어 하류의 영향이 직접 상류로 전파되는 전체적 압력 반복법(global pressure iteration)을 사용하였다.

2.4 유동조건

본 연구에서 사용되어진 cone주위의 유동은 완전 난류유동을 가정하였다. 레이놀즈수가 충분히 큰 난

류 유동의 경우 레이놀즈수는 유동장의 형태에 큰 영향을 미치지 않을 것으로 고려되므로 cone의 형상만을 변수로 하여 유동장을 해석하였다. Cone의 형상은 형태 계수인 β 값을 이용하였으며, 이때 β 값이 0.4와 0.7의 범위 내에서 유동장을 해석하였다.

유량 측정 유체는 15°C 표준 상태의 공기를 사용하였고, 관 지름 $D=0.1068\text{m}$ 이며 기준 속도는 평균 속도 $U_o=51.6\text{m/sec}$ 이고 관 지름에 대한 레이놀즈수는 $Re_D=3.7 \times 10^5$ 이다.

3. 결과 및 고찰

3.1 유동장 해석

Fig.3은 cone주위의 속도 벡터를 Fig.4는 유선의 분포를 나타내었다. cone의 앞부분 즉 A부분에서 유동 정체현상(flow stagnation)이 나타나고 이후 가속되어진 유체가 벽쪽으로 흐르며 B부분에서 작은 박리가 발생한다. C지점 이전에 cone부에 재 부착한 유체는 단면적의 감소에 따라 속도가 증가하게 되며 D점에서 유체는 cone으로부터 떨어져 나가게 되어 이로 인해 cone의 뒷부분에는 커다란 재순환 영역이 발생한다. D점에서 박리된 유체가 그 이후 관벽쪽으로 흐르면서 유동의 실제 단면적은 더 작아지게 되고 이 지점에서 유체는 최대속도를 가지며 이는 압력강화로 나타나게 된다. Fig.5에는 cone 표면에서 압력의 분포를 나타내었다. 이때 사용되어진 압력은 동압 $\left(\frac{1}{2} \rho U^2\right)$ 으로 무차원화된 값을 나타낸다. Fig.4에는 cone의 후미부에서 생기는



Fig.3 Velocity vectors around the Venturi-cone



Fig.4 Streamlines around the Venturi-cone

는 재순환 영역이 잘 나타나 있다. 이러한 재순환 영역은 β 의 값에 따라 외관 지름의 3~6배 길이가 지 계속되어지며 이후 압력의 회복이 거의 이루어져 유동의 형태는 점점 완전 발달된 원관에서의 유동 형태로 진행된다. 이와 같은 결과로부터 유추하건데 하류측에 요구되는 직관의 길이는 제작사의 기준인 관 지름의 3~5배는 조금 짧은 것으로 생각되고 최소한 6배정도의 직관부는 확보해야될 것으로 사료된다.

3.2 항 력

유체유동이 cone에 미치는 힘에 대하여 살펴보자. 먼저 본 연구의 결과를 검증하기 위하여 venturi-cone 제작사에서 실험한 결과와 본 연구의 해석

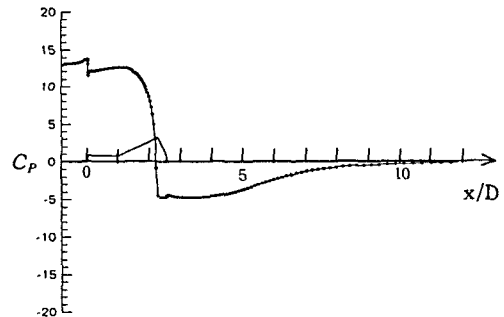


Fig.5 Pressure distribution around the Venturi-cone

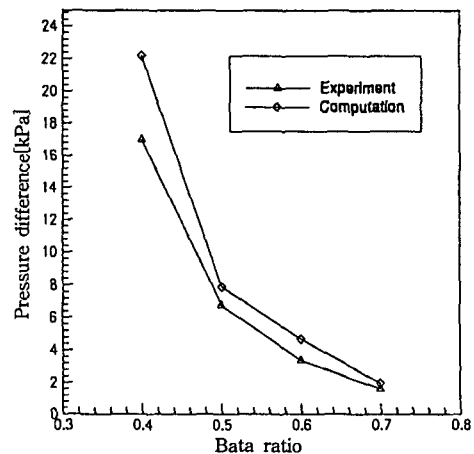


Fig.6 Comparison of experiment and computation

결과를 비교하였다. Fig.6에는 두 압력탭에서 측정 한 압력차와 본 연구의 결과를 그래프로 비교하였다. β 에 따라 약 10~30%의 오차를 보였으나 전체적인 해석 결과는 정성적으로 타당한 경향을 나타 내는 것으로 보여진다.

항력 F 는 마찰과 압력에 의한 항력으로 아래의 식 과 같이 나타낼 수 있다.

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

여기서 \vec{n} , \vec{i} 는 각각 면적에 수직인 단위 법선 벡 터와 평행한 단위 접선벡터를 나타낸다. 그리고 항 력계수(drag coefficient)는 다음과 같다.

$$C_D = \frac{F}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2 A} \quad (8)$$

이때 A 는 유동방향에 대한 cone의 투영면적이다.

Table 2에 cone 표면 주위에서의 압력과 속도를 이 용하여 식(7, 8)을 사다리꼴 공식(Trapezoidal rule) 으로 수치 적분한 결과가 나와있다. 이때 마찰 항력 은 형상항력에 비하여 3% 이하의 작은 값을 가지며 β 가 증가할수록 항력이 급격하게 커질 것을 알 수 있다.

3.3 새로운 cone 형상의 제안

유량 측정 장치에서 압력 손실은 매우 중요한 요 소이며 이러한 압력 손실은 유체에 의한 항력과 연 관되어진다. 또한 유체가 가하는 항력은 cone 시스 템의 용접부에 가해지는 굽힘 모멘트를 결정하므로 시스템의 내구성과도 밀접한 관련이 있다. 3.2절에 서 여러 가지 β 값에 대한 항력을 구하였다. 위의 해석 결과를 바탕으로 항력을 줄이기 위한 새로운

cone의 형상을 제안하고자 한다.

본 연구에서 해석한 유동장의 특성은 중앙부에 cone이 존재하는 내부유동(internal flow)으로 cone 의 후미부에 존재하는 형상의 급격한 변화에 따른 박리 현상이 유동장을 지배한다. 그러므로 cone의 형태를 적절히 변경시켜 cone 후미부에서의 박리 현 상을 제어함으로써 더 좋은 성능의 유량계를 얻을 수 있을 것으로 사료된다.⁽¹⁵⁾ 먼저 원래 형상의 cone 의 경우 Fig.3과 Fig.4에서 살펴본 바와 같이 cone 부에서의 박리후 유동이 관 벽 방향으로 향하며 실 제 유동 면적의 감소에 의한 속도 증가와 이로 인 한 압력 강하로 큰 항력이 발생되는 것으로 보여진 다. 따라서 박리점 부근의 형상을 변경하여 박리후 관 벽쪽으로 향하는 유동의 형태를 바꾸기 위해 cone부의 CD직선부(Fig.3)를 사인곡선(sine curve) 으로 변경시켰다. Fig.7과 Fig.8에는 각각 새로 제 안된 형태의 cone 주위의 유동 해석 결과를 나타내 었다.

Fig.7과 Fig.8에서 볼 수 있듯이 최소 단면적 부 분에서 최대 속도를 가지는 유체는 그 이후 짧은 확대부를 지나면서 단면적의 증가로 속도의 감소와 압력 회복이 일어나며 그 이후 박리점에서 유동의 방향이 관 중앙부로 향하므로 압력 회복이 계속되 어진다. Fig.9에는 cone 표면의 압력분포가 나타나 있으며 이 그림으로부터 이러한 최소 단면적 부분 이후의 빠른 압력회복을 볼 수 있다. 이때 사용된 압력도 Fig.5와 같이 동압에 의해 무차원화된 값이 다. Table 3에는 변경된 형상의 cone에 대한 항력 등 의 수치 적분된 결과가 나타나 있다.

Table 2와 Table 3을 비교해 보면 변경된 형상



Fig.7 Velocity vectors around the modified cone



Fig.8 Streamlines around the modified cone

Table 2 Drag, drag coefficient, and bending moment vs. β

β	Drag coeff.	Drag(N)	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

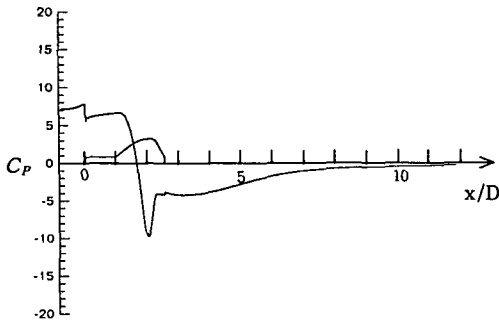


Fig.9 Pressure distribution around the modified cone

Table 3 Drag, drag coefficient, and bending moment vs. β for modified cone

β	Drag coeff.	Drag(N)	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

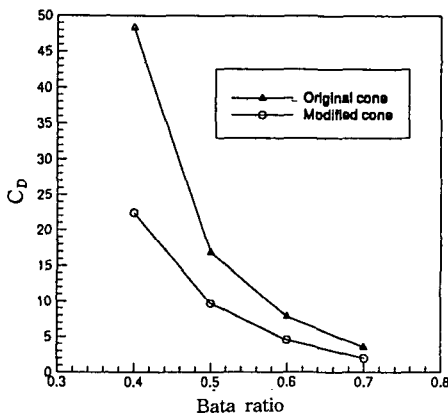


Fig.10 Comparison of drag coefficient

의 cone의 경우 β 의 값에 따라 항력이 42~48% 정도 감소하는 것을 알 수 있으며 이는 과도한 굽힘 모멘트에 의한 내구성의 문제점을 개선할 수 있을 것으로 보인다. Fig.10에서 두 형상에 대한 결과치를 그래프로 비교하였다. 그리고 Fig.8에서 볼 수 있듯이 cone 후미부의 재순환 영역의 길이가 외관

지름의 2.5~4배 정도로 원래 형상의 cone에 비해 많이 줄어들었으며 이는 완전 발달된 유동으로의 전개가 더 짧은 거리에서 이루어짐을 의미하며 유량계 하류에 요구되는 직관부를 줄일 수 있을 것으로 기대된다.

4. 결 론

본 연구에서는 $k-\omega$ 난류 모형과 유한 해석법을 사용하여 복잡한 차압식 venturi-cone 주위의 유동장을 해석하였다. 유동장 해석결과 3장에서 살펴본 바와 같이 cone 주위에서의 박리-재순환-경계층 발달 등을 포함한 복잡한 유동현상을 관찰할 수 있었다. 다음으로 유동장 해석 결과를 이용하여 유체가 cone에 가하는 힘을 계산하였다. 그 결과 β 값이 커짐에 따른 항력의 급격한 증가를 관찰할 수 있었다. 또한 새로 제안한 유량계에서의 유동장의 변화와 항력의 감소 등을 관찰할 수 있었다. 지금까지 살펴본 결과들은 레이놀즈수가 3.7×10^5 일 때의 유동장을 해석한 것으로 이는 앞서 언급한 대로 레이놀즈수가 큰 난류 유동에서는 venturi-cone 유량계 주위의 유동 형태는 레이놀즈수와는 무관하다는 가정에 의한 것으로 일반적인 유동장 해석과 새로운 모델의 개발시 타당할 것으로 사료된다. 그러나 venturi-cone 유량계는 그 유량 측정 범위가 넓으므로 앞으로 다양한 레이놀즈수에 대한 유동 해석을 수행하여 레이놀즈수에 대한 유동 형태의 변화와 압력차와 항력등도 구해져야 할 것이다. 또한 새로 제안된 유량계에 대한 유량계수와 압력차 그리고 항력 등의 데이터들이 실험적으로 구해져야 하며 그 결과는 원래 유량계의 데이터와 비교되어야 할 것이다. 이러한 검토를 통하여 압력 손실이 적고 내구성이 우수한 새로운 venturi-cone 차압식 유량계의 설계가 가능할 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 1996년 교육부 학술연구 조성비(기계공학 : MEE96-B-13)에 의하여 이루어졌으며 이에 감사드리며 설계자료 등을 제공하여 준 하이트 롤(주)에도 사의를 표한다.

참 고 문 헌

1. S. V. Prabu, R. Mascomani, K. Balakrishnan, and M. S. Konnur, 1996, "Effect of upstream pipe fittings on the performance of orifice and conical flowmeters", *Flow Meas. Instrum.* Vol. 7, No. 1, pp. 49~54.
2. S. A. Ifft, 1995, "Installation effects on the V-cone flowmeter", *McCrometer Div. of Ketema*, 3255 West Stone Avenue Hemet.
3. D. C. Wilcox, 1993, *Turbulence Modeling for CFD*, DCW Industries, Inc, pp. 73~165.
4. D. C. Wilcox, 1988, "Reassessment of the scale Determining Equation for advanced Turbulence model", *AIAA Journal*, Vol. 26, No. 11, pp. 1299~1310.
5. M. Hallack, D. S. Henningson, A. V. Johansson, P. H. Alfredsson, 1996, *Turbulence and Transition Modeling; Lecture notes from the ERCOFTAC/IUTAM summerschool held in Stockholm, 12-20, June, 1995*, Kluwer Academic Publishers, pp. 81~154.
6. M. C. Richmond, 1987, "Surface Curvature effects on turbulent flow; An assessment based on numerical solution of Reynolds Equations", Ph.D Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, Univ. of Iowa, Iowa City, pp. 44~48.
7. D. D. Knight, 1982, "Application of Curvilinear coordinate generation Technique to the computation of Internal flow"; *Numerical Grid generation*, Elsevier Science Publishing Company, pp. 357~384.
8. T. Itohagi and B. R. Shin, 1991, "Finite-Difference schemes for steady incompressible Navier-Stokes Equations in General Curvilinear Coordinates", *Computers & Fluids*, Vol. 19, No. 3, pp. 479~488.
9. J. Piquet and P. Queutey, 1992, "Navier-Stokes Computations past a prolate spheroid at incidence-1, Low Incidence Case", *Computers & Fluids*, Vol. 21, No. 4, pp. 599~625.
10. C. J. Chen and others, 1980~1986, *The Finite Analytic Method*, Iowa Institute of Hydraulic Research, Univ. Iowa IHR Report 232 Vol. 1~7.
11. Roger Peyret, 1996, *Handbook of Computational Fluid Mechanics*, Academic Press Inc, pp. 44~53.
12. J. Y. Yoon, 1993, "Numerical Analysis of flows in channels with sand dunes and Ice covers", Ph. D Thesis, Department of Mechanical Engineering, Univ. of Iowa, pp. 177~184.
13. S. V. Patankar, 1980, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, Hemisphere Publishing Co, pp. 113~134.
14. H. C. Chen, V. C. Patel, 1988, "Near-wall Turbulence Models for complex flows including separation", *AIAA Journal*, Vol. 26, pp. 641~648.
15. P. Bradshaw, 1978, *Turbulence; chap. 3 Internal flow*, Springer-Verlag, pp. 109~167.