

엘보우, T자관, 밸브가 달린 배관에서의 유동특성

유성연* · 이상윤** · 박경암***

Flow Characteristics in a Pipe with Elbow, Tee or Valve

S. Y. Yoo,* S. Y. Lee**, K. A. Park***

ABSTRACT

유량을 정밀하게 측정하기 위해서는 유량계의 위치 선정이 매우 중요하다. 일반적으로 유량계가 설치되는 배관에는 확대관, 축소관, 엘보우, T자관, 밸브 등이 설치된다. 이러한 배관 연결기구는 매우 복잡한 유동현상을 야기하기 때문에 유량 측정에 지대한 영향을 미친다. 따라서 이러한 배관 연결기구가 설치되었을 때, 관 내부의 유동현상을 이해하는 것이 유량을 정밀하게 측정할 수 있는 중요한 요소이다. 본 연구에서는 배관에 엘보우, T자관, 밸브 등이 설치된 경우에 관내의 유동 특성을 상용코드인 FLUENT를 사용하여 전산해석 하였다. 축방향 속도, 2차유동, 압력장 등을 계산하여 고찰하였으며, 또한 완전히 발달된 형태의 유동이 얻어질 때까지의 유동장의 변화를 검토하였다.

1. 서 론

산업이 발전함에 따라 현장에서 정밀측정의 필요성이 증대되고 있는 가운데, 그 중에서 정확한 공정제어와 물류 추정을 위하여 관 내 평균유속을 정확히 측정하기 위한 연구도 산업발전과 더불어 증가하고 있다. 정확한 평균유속을 측정하기 위한 방법으로 다수의 초음파 센서를 부착하여 Multi-path로 유속을 측정하는 방법도 이용되고 있으나, 배관 형상에 기인한 와류, 비대칭 유속분포, 이물질 혼입 등의 영향으로 측정오차가 매우 커질 수 있다. 때문에 최근에는 유량측정의 문제가 되는 유동장의 복잡한 현상을 안정시키기 위하여 유동 안정화 장치를 부수적으로 설치하는 경우가 증가하고 있다.

유동안정화장치는 안정시키고자 하는 유동 성분에 따라 여러 가지가 개발되고 있다. 그러나 여기에도 부가적 비용이나 설치 상의 난점 등이 여전히 존재하며, 이러한 유동안정화장치를 사용한다고 해서 이러한 복잡한 유동성분이 완전히 소멸되는 것은 아니다. 실제로 배관이 되어 있는 현장에서는 단일 직관으로 배관계가 이루어진 경우는 매우 드문 실정이며, 일반적으로 확대 및 축소, 이음, 곡관, 밸브 등의 복잡한 연결로 이루어져 있다. 이렇게 복잡한 배관계 내부의 유동은 우리가 측정하고자 하는 축 방향, 즉 관로 방향의 성분만을 갖고 있는 것이 아니라 반경방향이나 접선방향의 속도 성분을 포함하게 되어 1차원 유동이 아닌 2차원이나 3차원 유동을 형성하게 된다. 따라서 본 연구에서는 유량계 상류의 유동 교란이 유량 측정의 정확도에 미치는 영향을 분석하기 위해서 배관 형상에 따른 관 내부의 유속분포를 수치적으로 계산하였다.

* 충남대학교 공과대학 기계설계공학과

** 대덕대학교 산업응용계열 컴퓨터응용설계과

*** 표준과학연구원 유체유동그룹

2. 전산해석 모델 및 전산해석기법

2.1 전산해석 모델 및 지배방정식

일반적으로 유량계가 설치되는 배관에는 확대관, 축소관, 엘보우, T자관(tee), 밸브 등이 설치된다. 본 연구에서는 배관의 입구에 Fig. 1과 같이 세가지 형상의 엘보우와 T자관, 밸브가 달려 있는 경우에 대하여 유동현상을 전산해석하였다.

배관에서 유동현상을 해석하기 위한 연속방정식과 운동량 방정식은 다음과 같이 표현된다.

· 연속 방정식

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_k} = 0 \quad (1)$$

· 운동량 방정식

$$U_k \frac{\partial U_i}{\partial x_k} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\nu \frac{\partial U_i}{\partial x_k} - u_i u_k \right) \quad (2)$$

난류모델은 $k - \epsilon$ 모델을 사용하였으며 난류 운동에너지 k 와 난류 운동에너지 소멸율 ϵ 에 대한 방정식은 다음과 같다.

$$U_k \frac{\partial k}{\partial x_k} = \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_k} \right] + P + G - \epsilon \quad (3)$$

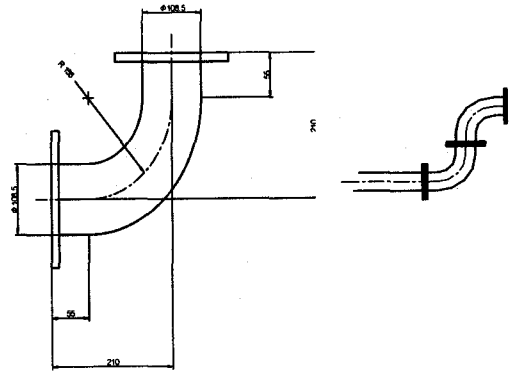
$$U_k \frac{\partial \epsilon}{\partial x_k} = \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_k} \right] + \frac{\epsilon}{k} (C_1(P+G) - C_2\epsilon) \quad (4)$$

일괄적인 고찰을 위하여 입구에서의 속도가 10 m/s로 일정하다고 가정하고 난류성분들에 대해서는 다음과 같은 식들을 사용하였다.

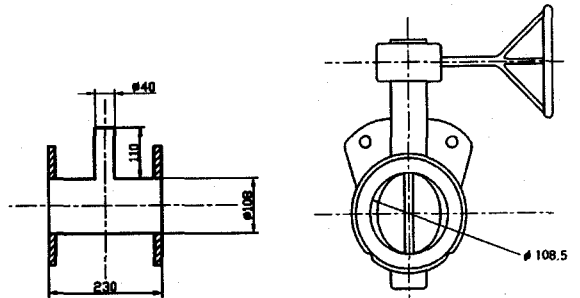
$$k_I = 0.01 U_I^2 \quad (5)$$

$$\epsilon_I = C_D k_I^{3/2} / 0.01 D \quad (6)$$

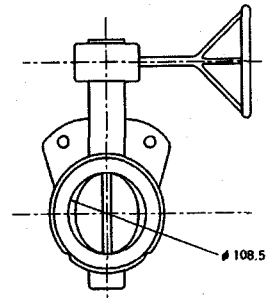
출구에서는 완전히 발달된 유동으로 생각하여 흐름에 수직인 방향의 모든 변수에 대한 구배가 영이라고



(a) elbow



(b) Tee



(c) Valve

Fig.1 Various pipe fitting used in this study

하였다. 벽면에서의 속도성분은 영이고, 벽면근방의 속도성분과 난류성분들은 벽면함수를 사용하여 계산하였다.

2.2 전산해석기법

지배방정식과 난류방정식을 일반형으로 표시하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x_k} (\rho U_k \phi) = \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_k} \right) + S_\phi \quad (7)$$

여기서 좌변 항은 대류항이고, 우변의 첫 번째 항은 확산항이며, S_ϕ 는 생성항이다. $\phi=1$ 인 경우는 연속방정식을 나타내고, $\phi=U_i$ 인 경우는 운동량 방정식,

$\phi=k$ 와 ϵ 인 경우는 난류방정식을 나타낸다. 생성항 S_ϕ 는 각각의 지배방정식에 대해서 다른 형태로 표시된다. 유한체적법(FVM : Finite Volume Method)을 사용하여 검사체적에 대한 지배방정식 (7)의 차분방정식을 구하면 다음과 같다.

$$\phi_p \sum_i (A_i - S_p) = \sum_i (A_i \phi_i) + S_c \quad (8)$$

식 (8)에서 ϕ_p 는 계산 격자점 중앙에서의 독립변수, ϕ_i 는 계산 격자점 x, y, z 에서의 독립변수, A_i 는 이산화 방정식의 계수를 나타낸다. 본 연구에서는 열유체 해석 프로그램인 FLUENT를 사용하여 차분방정식 (8)의 해를 구하였으며, 수렴판정은 식 (9)의 전 영역 잔류항의 총합이 10^{-6} 이하가 되는 점이다.

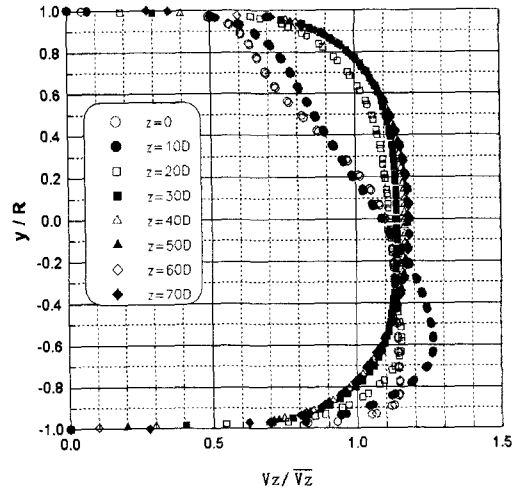
$$\bar{R} = \frac{\sum_{nodesP} [A_E \phi_E + A_W \phi_W + A_N \phi_N + A_S \phi_S + S_C - A_P \phi_P]}{|\sum_{nodesP} (A_P \phi_P)|} \leq 10^{-6} \quad (9)$$

3. 해석 결과 및 고찰

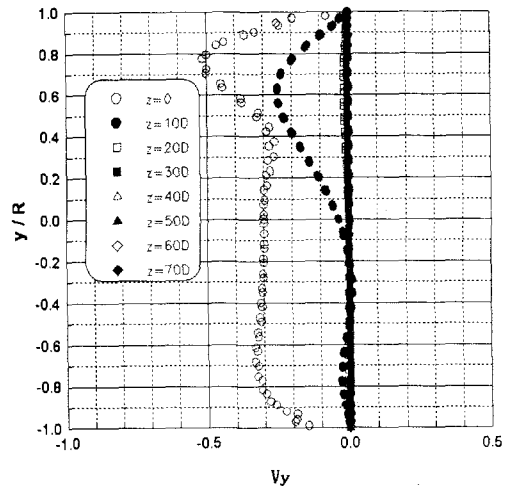
3.1 엘보우(elbow)

3가지 형상의 엘보우가 관 입구에 설치된 경우에 대해서 해석을 수행하였다. 2개의 90도 엘보우가 동일 평면에서 서로 반대방향으로 연결된 180도 엘보우를 elbow 1, 같은 방향으로 연결된 경우를 elbow 2, 수직 한 두 평면상에서 연결된 경우를 elbow 3라 명명하였다. 좌표축은 주유동 방향을 z , 주유동에 수직한 상하 방향을 y , 주유동에 수직한 좌우방향을 x 로 표시하였으며, z 축의 시작점은 엘보우의 출구(배관의 입구)로 잡았다.

Fig. 2, Fig. 3는 y 축($x=0, z=\text{일정}$)을 따라 y 방향 속도(V_y)의 변화를 나타낸 것이다. Fig. 3에 보인 elbow 1의 경우는 유동축을 따라 진행하면서 원심력 때문에 생긴 아래쪽에서의 최대속도는 감소하고 위쪽에서의 속도는 증가하여 축대칭 유동에 접근해 가는 것을 볼 수 있다. $z=30D$ 이상에서 완전히 발달된 유동이 얻어지며, 이 영역에서부터 2차유동도 거의 소멸되는 것을 알 수 있다. Fig. 3에 나타낸 elbow 3의 경우는 최대속



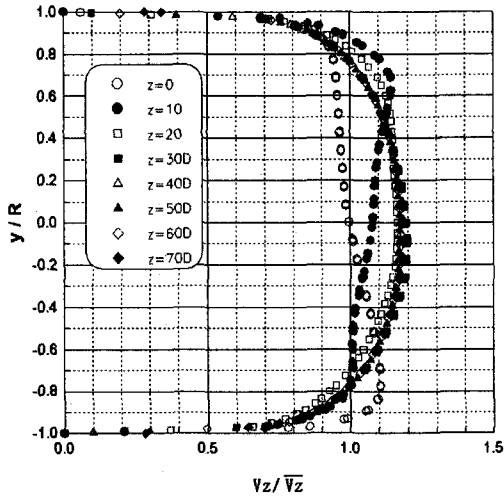
(a) streamwise velocity



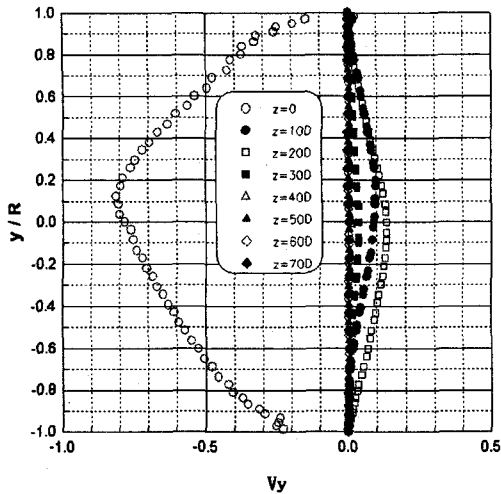
(b) spanwise velocity

Fig. 2 Variation of streamwise and spanwise velocity profile for elbow1

도의 위치가 관 아래쪽($z=0$ 의 경우)에서 위쪽($z=10D$ 의 경우)으로 바뀌고 있다. 그 이유는 관 위쪽에서 형성된 강한 Swirl의 영향으로 유동축에서 아래쪽으로 약간 경사진 주유동이 형성되고 이것이 아래쪽 벽면에서 반사되어 위로 향하는 유동이 되기 때문으로 생각된다. Fig. 3(b)의 y 방향 속도를 보면, 관 전체에 걸친 하나의 Swirl 유동임에도 $z=0$ 에서 모두 음의 속도를 보이



(a) streamwise velocity



(b) spanwise velocity

Fig. 3 Variation of streamwise and spanwise velocity profile for elbow3

고 있다. 그 이유는 Swirl의 중심이 관 중심에서 약간 오른쪽에 위치하여 중심축을 따라서는 상·하 모두 아래쪽으로 향하는 속도벡터를 갖기 때문이다. 그러나 $z=10D$, $z=20D$ 에서는 Swirl의 중심이 왼쪽으로 이동하여 양의 y 방향 속도를 관찰할 수 있다. elbow 3의 경

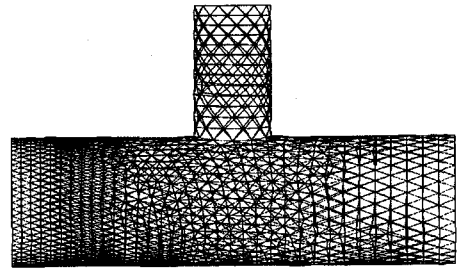


Fig. 4 Grid for Tee

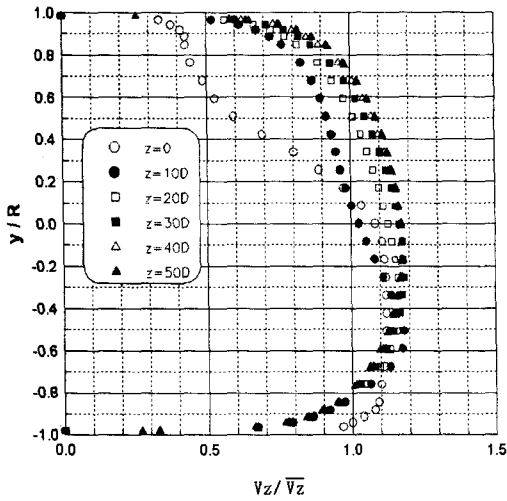
우도 elbow 1과 비슷하게 $z=30D$ 이상에서 2차유동이 소멸되고 완전히 발달된 유동의 형태를 보이고 있다.

3.2 T자관(tee)

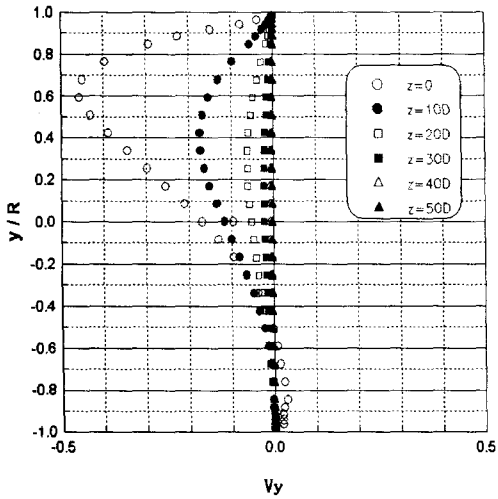
T자관의 경우 관 접합부에서는 배관부와 동일한 격자를 만드는 것이 어렵기 때문에 접합부에서는 Fig. 4와 같이 삼각형 격자(triangular grid)를 생성하고, 배관부에서는 엘보우의 경우와 동일하게 격자를 구성한 혼합격자(hybrid grid)를 사용하여 해석을 수행하였다. 또한 두 입구관에서의 속도의 비율을 알 수 없기 때문에 입구와 출구 모두 압력경계조건을 주어 계산하였다. 따라서 엘보우와 같이 정확하게 평균유속 10 m/s를 맞출 수가 없었으며, 본 해석결과는 평균속도 $\bar{V}_z = 8.13$ m/s의 경우이다. Fig. 5(a)는 유동축을 따라서 유동방향 단면($z=일정$)에서의 축방향 속도와 2차유동의 속도벡터의 변화를 나타낸 것이고, Fig. 5(b)는 y 축($x=0$, $z=일정$)을 따라서 y 방향 속도(V_y)의 변화를 나타낸 것이다. 아래쪽의 최대속도는 10D까지 증가하다가 그 이후로는 감소하는 경향을 보이고 있으며 위쪽의 속도가 낮은 영역은 점진적으로 속도가 회복되는 것을 알 수 있다. 위쪽에서의 강한 2차유동이 점차 약해지면서 $z=30D$ 이상에서는 거의 소멸되어 완전히 발달된 유동을 보이고 있다

3.4 밸브(valve)

본 연구에 사용한 밸브는 Butterfly 밸브이며, 밸브의 개도를 변화시켜가면서 해석을 수행하였다. 밸브가



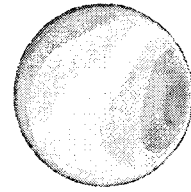
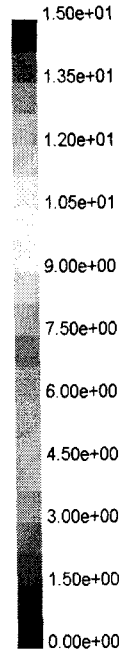
(a) streamwise velocity



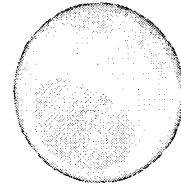
(b) spanwise velocity

Fig. 5 Variation of streamwise and spanwise velocity profile for tee

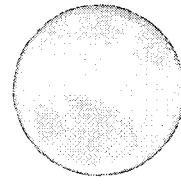
완전히 닫힌 경우의 개도를 0도, 완전히 열린 경우의 개도를 90도 하였다. Fig. 6은 밸브 개도가 30도인 경우 단면($Z=$ 일정)에서의 축방향 속도분포를 나타낸 그림이다. 밸브의 출구($Z=0$)에서는, 밸브가 열린쪽에서의 속도가 닫힌쪽에서는 보다 빠르다는 것을 알 수 있다. Fig. 7(a)는 밸브의 개도($\theta=45^\circ$)에 따른 유동방향 단면($z=$ 일정)에서의 축방향 속도분포를 나타낸 것이다.



(a) 10D



(b) 20D



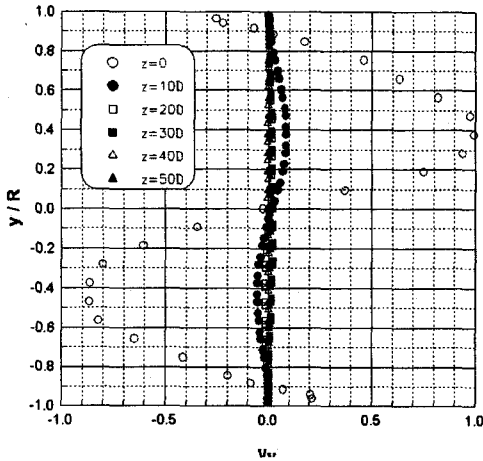
(c) 30D

Fig. 6 Variation of streamwise velocity for valve ($\theta=30^\circ$)

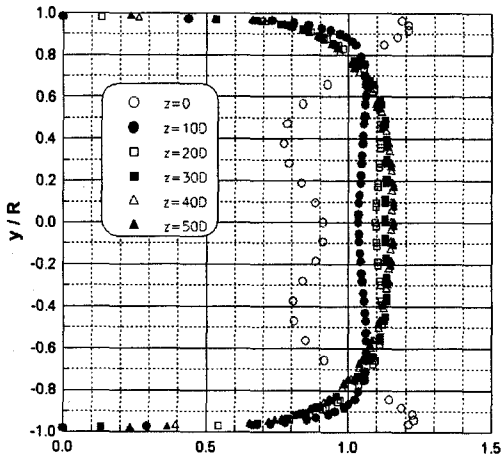
Fig. 7(b)는 y 축을 따라 y 방향 속도(V_y)의 변화를 나타낸 것이다. 밸브의 개도가 45도인 경우는 대칭면($x-z$ 평면)의 상하에 두 개의 최소점이 나타나는 W자 모양의 유동이 축방향으로 진행하면서 완전히 발달된 유동형태로 바뀌어 가는 것을 볼 수 있다. 2차유동은 밸브의 출구에서는 매우 강하지만 $z=10D$ 이상에서는 엘보우나 T자관에 비해서 보다 빠른 속도로 소멸되어 가는 것을 관찰할 수 있다.

4. 결론

엘보우, T자관, 밸브 등의 연결기구가 붙어 있는 배관에서의 유동특성을 전산해석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.



(a) streamwise velocity



(b) spanwise velocity

Fig. 7 Variation of streamwise and spanwise velocity profile for valve

- (1) elbow 1의 경우, 원심력의 작용으로 관 아래쪽에서 최대속도를 가지며, elbow 3의 경우는 원심력의 방향이 90도 바뀌면서 관의 우·하 쪽에 최대속도가 나타난다.
- (2) elbow 1의 2차유동은 좌우 관벽에서 발생하여, 관 벽쪽으로 붙는 대칭형 와류를 형성하고, elbow 3의 경우는 관 전체에 걸쳐 반시계 방향의 Swirl 유동을 관찰할 수 있다.

- (3) T자관의 경우는 관 아래쪽에서 최대속도를 갖고 위로 갈수록 감소하는 경향을 나타내고 있으며, 2차유동의 형태는 관벽을 따라 위로 올라오는 유동이 중앙에서 만나서 아래로 내려가면서 완전한 반원 크기의 와류를 형성하고 있다.
- (4) 밸브의 출구에서 유동형태는 밸브의 개도가 30도인 경우는 중앙부에서 속도가 최소가 되는 역방향 포물선 형태를 가지며, 개도가 45도와 60도인 경우는 대칭면의 상하에 두 개의 최소점이 나타나는 W자 모양의 유동을 나타낸다. 2차유동은 밸브의 출구에서는 매우 강하지만 엘보어나 T자관에 비해서 보다 빠른 속도로 소멸되어 가는 것을 관찰할 수 있다.

참고 문헌

- (1) 백중승, 박경암, 정완섭, "초정밀 측정 및 응용기술개발 사전 연구조사," KRISS-97-007 -IR, 한국표준과학연구원, 1997
- (2) 백중승, 박경암, 송기원, 이광복, 임기원, 최용문, 최혜만, 이덕기, "유체유량," 정밀측정교재, KRISS-91-164-ET, 한국표준과학연구원, 1991.
- (3) R. W. Miller, "Flow Measurement Engineering Handbook," 3rd ed., McGraw-Hill, 1996.
- (4) D. K. Tack and R. F. Lambert, "Influence of Shear Flow on Sound Attenuation in Alined Duct," J. Acoustic Soc. Am. Vol. 38, pp. 655~666, 1965.
- (5) B. E. Launder and D. B. Spalding, "The Numerical Computation of Turbulent Flows," Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, pp. 269-289, 1974.
- (6) FLUENT 5 User's Guide, Fluent Inc., 1998.
- (7) G. E. Mattingly and T. T. Yeh, "Effects of Pipe Elbows and Tube Bundles on Selected Types of Flowmeters", Flow Measurement Instrumentation, Vol. 2, pp. 4~13, 1991.
- (8) B. R. Shin and S. Y. Yoo, "Numerical Investigation of Laminar Flow in Curved Duct of Square Cross-section with 90° Bend," Proc. of 1st Asian CFD Conf., pp. 647~652, 1995.