

# 사각 덕트 계통에서 유동과 열전달의 수치계산과 실험의 비교

윤영환<sup>1\*</sup>, 김경환<sup>2</sup>

## COMPARISONS BETWEEN MEASURED AND COMPUTED FLUID FLOWS AND HEAT TRANSFER IN RECTANGULAR DUCT SYSTEM

Y.H. Yoon and K.H. Kim

*Fluid flow and heat transfer in rectangular duct system are measured and computed by commercial software of Star-CD for comparison between them. Three rectangular systems are investigated in this study. Those are a rectangular duct with 90 degree bended elbow, a rectangular duct with two branches, and a circular cylinder in a rectangular duct. But heat transfer is studied only for last system. These investigations show us that the numerical solutions predict satisfactorily design factors (K-factor for the elbowed duct, distributions of flow rates into each branch from a duct, and Nusselt number around circular cylinder) even though there are some disagreements in velocity profiles and turbulent kinetic energy.*

**Key Words:** 곡면 엘보우 덕트(90° bend elbow duct), 분지관 덕트(branch duct), 원형 실린더(circular cylinder), 열전달(heat transfer), 난류 운동에너지(turbulent kinetic energy), 수치계산(numerical computation), 실험 측정(experimental measurement)

### 기 호 설 명

k	: 난류 운동에너지[m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]
P	: 유체압력[Pa]
Re	: Reynolds 수
U <sub>i</sub>	: i 방향 평균유속성분[m/s]
U, V, W	: x, y, z 방향 평균유속[m/s]
u', v', w'	: x, y, z 방향 난류성분[m/s]
T	: 온도[K]

### 1. 서 론

최근 열유체계산에 대한 상업용 소프트웨어들이 많이 출시되어 열유체 장치의 설계계산에 이용되고 있다. 대개 이들은 수학적 해가 존재하는 간단한 유체역학적 형상에서 수치해석

적 해의 정확성을 검증하고 있다.

그러나 실제 문제에서는 어느 정도 해가 정확한지 검증하는 경우는 거의 없다. 본 논문에서는 레이저 도플러 유속계로 사각 덕트 장치들에 대한 유속 분포를 측정하고 상업용 소프트웨어를 계산한 결과들을 비교하여 그 결과들을 분석하고자 한다. 우선 실제 문제 계산에서는 입구 경계조건을 잘 모르므로 Kim<sup>(1)</sup> 및 Kim and Kim<sup>(2)</sup> 과 같이 각각 배관과 풍동 내의 3차원 유동 해석을 하면서 다른 논문에서 수행한 실험 결과와 비교 하였는데 입구 경계조건에 대한 언급이 없거나 일정한 값을 주고 있다. 더욱 난류유동계산에서 K-ε 난류 모형을 주로 쓰고 있는데 K와 ε의 입구 경계조건에 대해 전혀 언급이 없거나 Choi et al.<sup>(3)</sup>에서는 입구 속도의 0.3을 주고 있다.

본 논문은 Yoon and Park<sup>(4)</sup>의 곡면 엘보를 가진 사각덕트 내의 유속측정 및 수치계산, Yoon and at al.<sup>(5)</sup>의 두 개의 분지관을 가진 직사각형 덕트내의 유량분배에 관한 실험 및 수치계산, Kim and Yoon<sup>(6)</sup>의 사각덕트 내에서 원형 실린더를 지나는 유체유동의 측정 및 수치해석, 그리고 Kim and Yoon<sup>(7)</sup>의 사각덕트내에서 원형실린더 주위의 강제대류 열전달에 대한 실험과 수치계산을 통하여 경계조건들을 통한 해의 정확

1. 창원대학교, 기계공학과

2. 창원대학교 시설과

\* Corresponding Author E-mail: yhyoon@changwon.ac.kr

성을 검증하고, 수치계산의 종속 변수들인 속도성분 및 난류 성분에 대한 실험치와 계산치를 비교하여 그 차이를 논하고 계산 결과들로부터 얻은 설계 인자들의 공통성을 제시하고자 한다.

### 2. 실험장치 및 방법

본 논문에는 세 가지 덕트에 대한 실험이 소개되어 있는데 첫 번째는 Fig. 1과 같이 곡면 엘보우를 사각덕트에 대한 실험으로 그림에서 보면 송풍팬에 의해 공기가 송풍되며 모터는 인버터에 의해 회전수를 제어하여 풍량을 조절할 수 있다. 송풍된 공기는 수축부를 지나 상하 그곳에 가습기에 의해 수분무 입자가 공급된다. 공기와 수분무의 혼합기체는 곡면 엘보우를 지나 배출된다. 측정부 이전의 배관은 아크릴 판으로 구성 했으며 측정부는 유리판으로 제작하여 레이저 유속계의 레이저 빔(Beam)의 투과로 유속을 측정할 수 있다.

두 번째는 Fig. 2와 같이 공기와 수분무의 혼합 기체가 덕트의 입구를 지나 2개의 가지관으로 배출되며 덕트의 입구와 두개의 가지관 출구의 유속을 레이저 유속계로 측정한다. 마지막으로 Fig. 3은 송풍된 공기가 정류기(Honeycomb)를 통해 균일한 유동이 된 후 덕트 내부 중앙에 설치된 원형봉을 지나 흐른다. 이때 유속측정은 원형봉의 측면, 단면, 전방단면 및 후방 단면에 각각 레이저 유속계로 측정한다.

### 3. 수치해석

#### 3.1 지배방정식

지배방정식은 식 (1) - 식 (2)와 같으며, 3차원 정상상태, 비압축성 난류유동이고 모든 상태량은 일정하다.

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

$$U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \nu \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \overline{u'_i u'_j} \right) \tag{2}$$

$$U_j \frac{\partial T}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \alpha \frac{\partial T}{\partial x_j} - \overline{Tu'_j} \right) \tag{3}$$

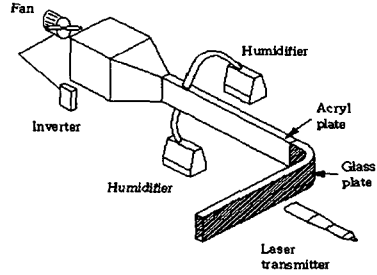


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus for 90° bend elbow duct.

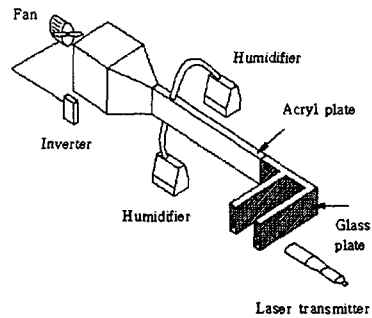


Fig. 2 Schematic diagram of a duct with two branch ducts.

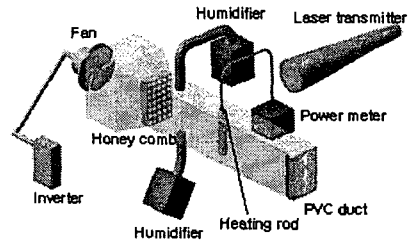


Fig. 3 Schematic diagram of experimental apparatus for a cylinder in a duct.

위의 운동방정식 중  $\overline{u'_i u'_j}$  항을 정해주기 위해 다음과 같이 정의 한다.

$$-\overline{u'_i u'_j} = \frac{\mu_t}{\rho} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} k \tag{4}$$

식 (4)의  $\mu_t$ 는 난류 점성계수이고 높은 Reynolds 수 유동에 대한 무차원 해석에 의해 추론될 수 있다. 난류 에너지의 생성율과 소멸율이 거의 평형을 이룬다고 가정할 경우에  $\mu_t$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\mu_t = f_u C_u \rho \frac{k^2}{\epsilon} \quad (5)$$

위 식의  $f_u$ 는 난류모델에 의해 정해지는 계수이고,  $K$ 와  $\epsilon$ 은 각각 난류 운동 에너지와 난류 소산 에너지로서 사용 난류 모델은 표준 K- $\epsilon$ 모델, RNG K- $\epsilon$ 모델 및 Chen K- $\epsilon$ 모델 등이다.

### 3.2 경계조건

본 논문은 3차원 정상상태, 난류 유동계산이므로 직교좌표  $x, y$  및  $z$ 축에 대한 평균 유속성분인  $U, V, W$ 와  $k, \epsilon$ 의 5개 변수에 대한 경계조건이 필요하다. 본 논문의 특징은 입구 경계조건을 레이저 도플러 유속계에 의해 실험에서 구한 값들을 사용한 것이다. 본 실험장치들에서 유속  $U$ 가 주 흐름 방향으로 가장 크고 그 다음이  $z$  방향의 유속  $W$ 이며,  $y$  방향의 유속  $V$ 는 가장 적다. 입구 단면에서 2차원 레이저 도플러 유속계로  $U$ 와  $W$ 의 유속 분포를 총 77개 지점들을 측정하여 경계조건으로 했다.

$V$  유속 성분은 측정치 않았으나  $W$  유속 성분이 거의 영에 가까우므로  $V$  유속 성분은 영으로 가정했는데 식으로 표시하면 다음과 같다.

$$U_{in} = U_{exp}, V_{in} = 0, W_{in} = W_{exp} \quad (6)$$

위 식에서 아래첨자 in은 입구단면이며 exp는 실험값을 뜻한다.

난류 운동에너지  $K$ 는 다음 식으로 표시된다.

$$k = \frac{1}{2}(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}) \quad (7)$$

위 식(7)에서  $\overline{u'^2}$ 와  $\overline{w'^2}$ 은 레이저 도플러 유속계로 측정하였으며,  $\overline{v'^2}$ 성분에 대해서는 측정하지 않았으나  $\overline{v'^2}$ 도  $\overline{w'^2}$ 값과 거의 같다고 가정하여 아래 식과 같이  $k$ 의 입구 경계조건을 취하였다.

$$k = \frac{1}{2}(\overline{u'^2} + 2 \cdot \overline{w'^2}) \quad (8)$$

그리고 입구에서 난류소산에너지  $\epsilon$ 은 식 (8)의  $K$ 값과 난류 혼합길이(mixing length)  $l$ 을 이용하여 다음 식과 같이 계산하였다.

$$\epsilon = C_\mu^{0.75} \times \frac{k^{1.5}}{l} \quad (9)$$

위 식에서 난류 혼합길이  $l$ 은 실험장치의 최소 유동 폭의 10%로 하였고, 난류상수  $C_\mu$ 는 표준 K- $\epsilon$ 모델과 Chen K- $\epsilon$ 모델에서 0.09이고 RNG K- $\epsilon$ 모델은 0.085이다. 그리고 모든 벽면에서 유속 성분은 0인 조건 (non-slip condition)으로 하였다.

$$U_{wall} = V_{wall} = W_{wall} = 0 \quad (10)$$

마지막으로 출구 경계조건은 Neumann 조건으로 하거나 식 (11)과 같이 대기압 조건으로 하였다.

$$P = 0 \quad (11)$$

## 4. 결과 및 고찰

### 4.1 곡면 엘보우를 지나는 사각덕트

곡면 엘보우에 대해 Fig. 4의 (a)에 3차원 계산결과와 예를 도시하였고 같은 그림의 (b)에는 입구, 중간 및 출구 단면들의 위치와 그 좌표를 나타내고 있다. 즉 곡관에 의해 흐름의 방향이 바뀌더라도 각 단면에서 주속도 방향을  $x, y, z$  변을  $y$  및  $z$  변을  $z$  축으로 정하여 실험결과와 계산결과를 나타내고자 한다.

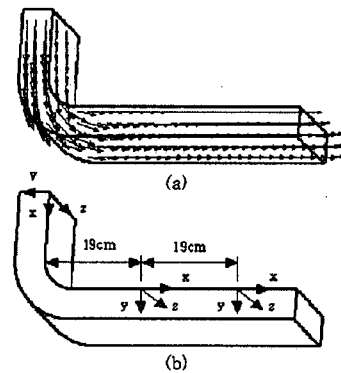


Fig. 4 Computation result of velocities in 3 dimension and axis representations for distributions of fluid flow at each cross-section.

먼저 Fig. 5은 주유속 성분인  $U$ 에 대한 실험 결과와 계산 결과를 비교한 것으로 그림 (a), (b), 및 (c)는 각각 입구단면, 곡관을 지나서 19cm 하류 지점 단면 및 출구단면을 각각 나타내며,  $z = 5, 10, 15$ cm는  $z$ -방향의 상부, 중부 및 하부 선분들을 나타낸다. 따라서 그림 (a)는 입구 단면에서 유속분포인데 모두 측정값들이며 이들은 수치해석의 입구 경계조건으로 사용되었다. 그림 (b)는 엘보우를 지나 19cm 하류 단면으로 곡관의 안쪽( $y=0$ cm)으로 갈 수 있도록 유속이 느려지고 곡관

의 바깥쪽(y=6cm)으로 갈수록 유속이 빨라지는 경향을 보이고 그림 (c)의 출구 단면에서는 다시 유속이 평균화될려고 하는 경향을 보이고 있다. 여기서 실험결과와 계산결과는 다소 차이가 있으나 계산결과가 실험값을 비교적 잘 모사하고 있으며 z=1, 3, 및 5cm에서 실험결과에 대한 계산결과의 오차를 계산하면 0.51~19.17%이고 평균오차는 7.71%이다.

다음 Fig. 6는 난류 운동에너지(Turbulent kinetic energy)의 계산결과와 식 (7)로 구한 실험값을 서로 비교한 것이다. 먼저 그림 (a)는 입구단면의 실험값으로 수치계산의 입구 경계 조건으로 사용한 값들이고 그림 (b)는 엘보우를 지난 중간단면으로 곡관 안쪽(y 값이 적을수록)에서 난류도가 크게 나타나고 곡관 바깥쪽으로 갈수록 적어짐을 볼 수 있으나 계산값들은 이와 반대 현상을 보이고 있다. 실험값에서는 유체가 엘보우를 지나면서 곡관 안쪽에 와류가 생성되어 이와 같은 현상을 보이는 것으로 추정되나 계산값은 이를 제대로 모사하고 있지 않다. 그러나 Reynolds수가 증가할수록 난류도가 증가한다든지 출구단면에서 난류도가 평균화 혹은 그 크기가 감소되는 현상은 실험값과 계산값이 같은 경향을 보이고 있다. 참고로 전과 같은 방법으로 오차의 범범위는 0.12~81.78%이며 평균 오차 33.74%이다.

다음 수치계산 결과로부터 식(12)에 의해 엘보우의 K-factor를 구하고 본 논문의 엘보우와 같은 단면비 및 곡률비를 가진 엘보우에 대한 Wirt<sup>(8)</sup>의 시험결과와 ASHRAE<sup>(9)</sup>의 설계자료를 비교하여 Fig. 7에 나타내었다. 그림에서 보면 본 수치계산값은 Wirt의 측정값과 ASHRAE의 설계자료값 사이에 위치함을 볼 수 있다.

$$K = \frac{\Delta P \cdot 2}{V_m^2 \cdot \rho} \quad (12)$$

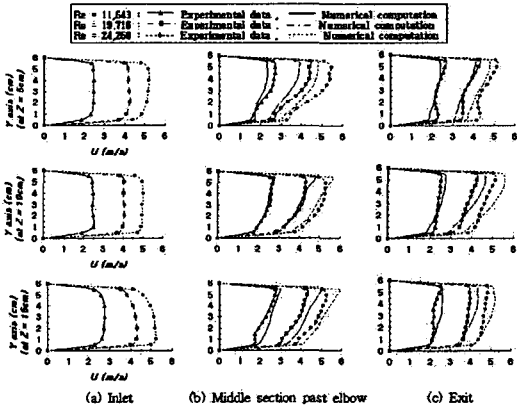


Fig. 5 Comparison of x-direction velocity (U) between experimental data and 3-D computation data.

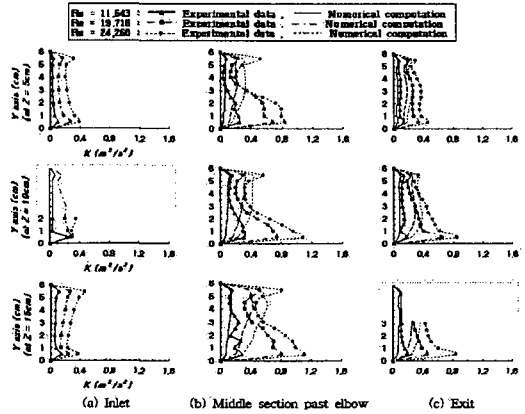


Fig. 6 Distribution of turbulent kinetic energy K

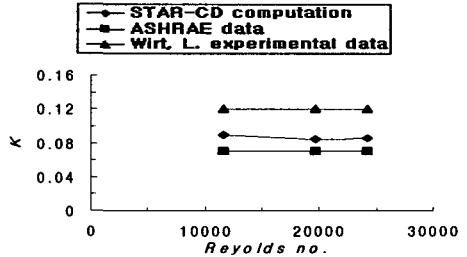


Fig. 7 Friction factor for 90° bend duct

#### 4.2 두 개의 분지관을 가진 사각덕트

본 실험과 계산을 수행한 Reynolds 수는 4,226, 8,920, 12,532 및 17,491로서 출구 경계조건으로 대기압 조건인 식 (11)를 사용하여 그 계산 예가 Fig. 8과 같이 입구 배관의 공기가 두 개의 분지관 덕트들로 나누어진다. 그림에서 입구와 가까운 배관을 제1분지관(Branch 1) 및 그 다음 배관을 제2분지관(Branch 2)이라고 부르겠다. 그림에서 Computation(1)은 입구경계조건을 실험에서 구한 실제 유속분포를 대입하여 계산한 것이고 Computation(2)는 입구에서 같은 유량의 균일한 유속분포를 갖는다고 가정하여 계산한 값들이다.

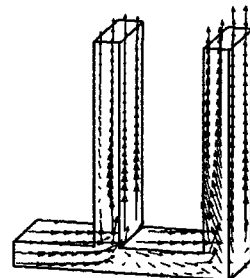


Fig. 8 Computational result in duct with two branches.

위의 경우 실제 유속분포를 입구경계조건으로 한 경우 실험값에 비해 0.81~12.06%의 오차가 있고 균일한 유속분포를 입구경계조건으로 한 경우는 2.14~8.11%의 오차가 있다.

그러나 배관의 입구유량이 100%인 경우 제1 분지관과 제2 분지관으로 분배되는 백분율은 Fig. 9에 나타나 있으며 실제 유속분포의 입구 경계 조건인 경우 0.3~4.77%의 오차가 있고 균일한 유속분포는 1.2~3.14%가 오차가 있으며, 제1 분지관으로 입구 유량의 평균 37.65%가 흐르고 제2 분지관으로 평균 62.23%가 흐르고 있음을 볼 수 있다. 이는 Reynolds 수가 변하더라도 제1 분지관과 제2 분지관으로 유량이 분배되는 비율이 거의 일정함을 실험 및 계산결과들에서 보여주고 있다.

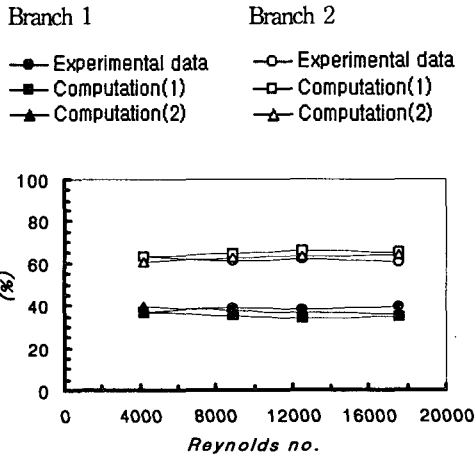


Fig. 9 Percentage of flow rates at each branch of the duct system.

다음 Fig. 10은 Reynolds 수가 12,532일 때 입구 단면과 제1 분지관과 제2 분지관 출구 단면들에서 유속분포를 등고선으로 나타낸 것으로 그림에서 Experiments는 실험결과이며, Computation(1)과 Computation(2)는 입구경계조건을 각각 실제 유속분포와 같은 유량의 균일한 유속분포로 수치해석한 계산 결과들이다. 두 계산 모두 각 분지관에서 유속의 등고선 모양은 실험결과와 다소 차이가 있다.

### 4.3 사각덕트내에서 원형 실린더를 지나는 유동

실험과 계산에 사용된 Reynolds 수는 원형실린더 직경과 덕트 단면적의 평균유속을 기준으로 한 4,457이다. Fig. 11는 덕트내의 주속도 성분 U에 대한 실험결과와 수치 계산결과들을 나타낸다. 먼저 본 그림의 (a)는 입구단면에 대한 유속분포로서 총 77개 지점의 유속을 측정하였으나 중간 및 출구 단면과 비교를 위해 이들과 같은 위치인 z = 4, 10, 16 cm 지

점의 값들만 도시하였다. 또한 입구단면의 유속을 평균한 값이 1.698 m/s로서 그림에서 (Δ) 및 점선 선분을 나타낸다. (b)는 중간단면에서 실험결과와 3차원 수치결과들을 비교한 것으로, 실험값과 표준 K-ε모델, RNG K-ε모델 및 Chen K-ε모델 등으로 계산한 값들과 서로 비교하였다. 그림에서 Average U 모델은 다른 논문에서 입구경계조건으로 대개 균일한 유속분포로 계산하므로 그림(a)의 균일한 유속을 입구경계조건으로 하고 표준 K-ε모델로 계산한 것이다.

중간 단면인 그림(b)에서 x축의 4에서8이 실린더 직경에 해당하고 실린더 직경과 덕트 벽면 사이에서 유속분포를 나타낸다. 이 지역은 유체가 수축하여 통과하는 지역으로서 실험치와 각종 계산치가 비교적 잘 일치한다.

그러나 그림(c)는 유체가 실린더를 지나 실린더 후류지역으로서 실린더의 바로 후방(x=6)에서 실험치와 각종 계산치들 사이에 차이가 있음을 보여 준다.

Fig. 12은 실험에서 구한  $\sqrt{u'^2}$ 와  $\sqrt{w'^2}$ 로부터 식 (7)에서 계산한 난류 운동에너지 K값과 수치해석 계산에서 구한 K값을 상호 비교한 것이다. 그림에서 입구단면 (a)는 실험값으로부터 수치계산의 입구 경계조건으로 대입한 값들이고 전체적으로 비슷한 유형을 보이고 중앙부분보다 벽면 근처에서 K값이 약간 높아진다. 이러한 현상은 사각덕트 중앙부분보다 벽면 부근에서 점성의 영향이 더 작용한 것으로 보이며 Koh et al.<sup>(10)</sup>의 실험에서도 이러한 결과를 입증했다. 또한 그림에서 (Δ)표는 입구에서 K의 평균값으로 Fig. 11에서 Average U 계산의 입구 경계조건으로 사용한 값이다. 중간단면 (b)에서 보면 대체적으로 수치해석 결과들이 실험결과보다 높은 값을 나타낸다. 특히 계산결과에서는 원형실린더 쪽(y = 4 및 8 cm)에 K값이 크게 상승하나 실험결과는 그렇지 않다. 그러나 출구단면 (c)에서는 중간단면과는 반대로 실험값이 계산값들보다 높게 나타나며 중앙쪽에서 K가 크게 분포하는 데, 이는 원형실린더 후류의 난류 발생 때문인 것으로 추정된다.

Fig. 13은 원형 실린더를 전열선으로 발열하고 그 표면의 열전달에 대해 레이놀즈 수의 변화에 따른 평균 누셀트 수의 실험결과와 3차원 수치계산결과를 비교한 그림이다. 범례에서 Avg. Inlet U는 실험으로 측정된 유속분포를 평균한 값을 입구경계조건으로 사용하고,  $q_w = \text{constant}$ 는 원형실린더의 표면온도 대신에 봉에 공급된 열유속을 열경계조건으로 한다. 동 그림에서 실험결과와 수치모델들의 오차범위를 비교하면,  $Re_D = 2,337$ 에서 수치모델들과 실험결과의 상대오차는 23.9% ~ 24.1%로 비교적 오차가 크다. 그러나 앞에서 언급한  $Re_D = 2,337$ 에서 상관관계식으로 구한 평균 누셀트 수와 실험결과는 상대오차가 1.1% ~ 9.3%로 수치계산보다 적다.  $4,598 \leq Re_D \leq 7,944$ 에서는 표준 k-ε 모델(Avg. Inlet U)

(Unit: m/s)

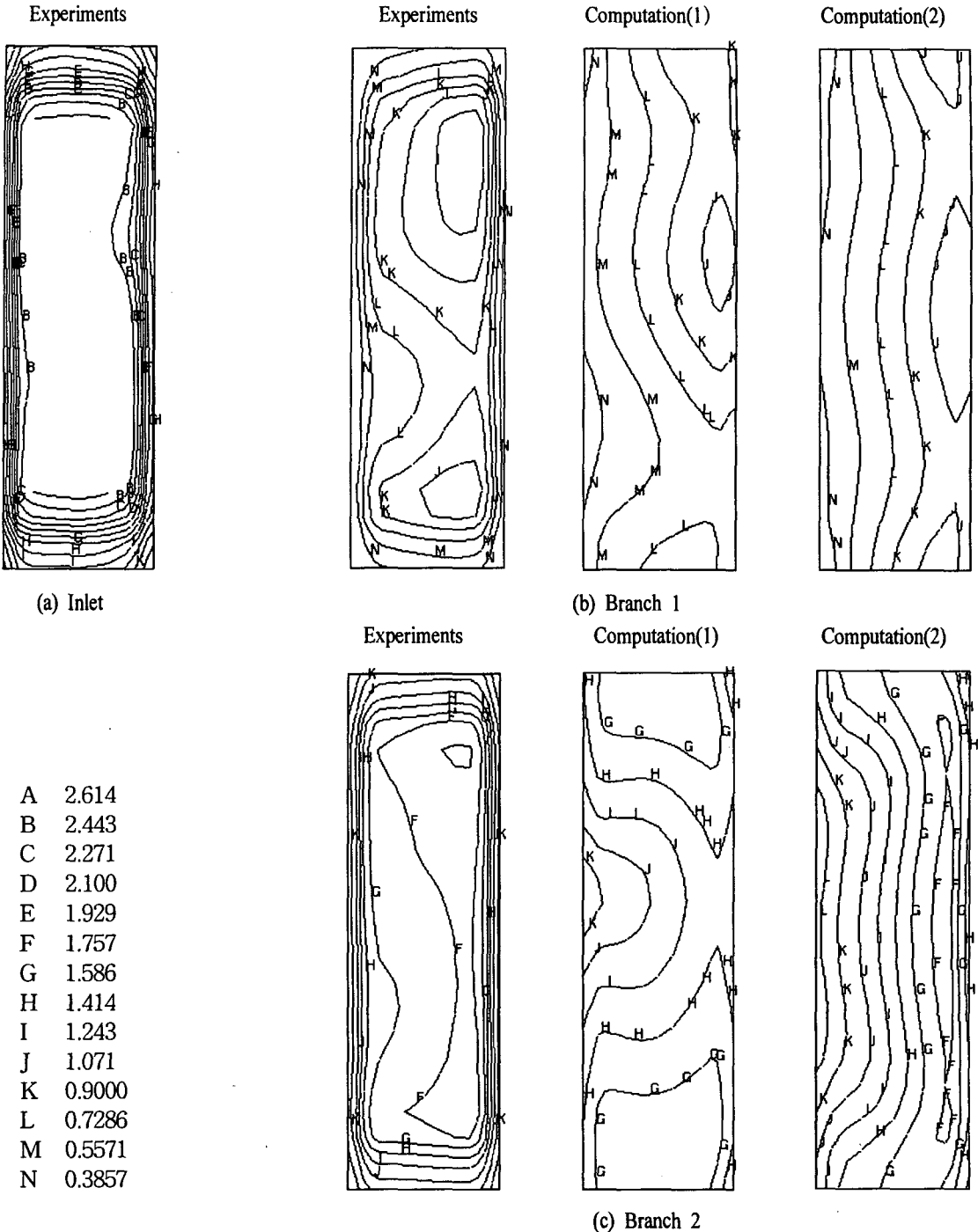
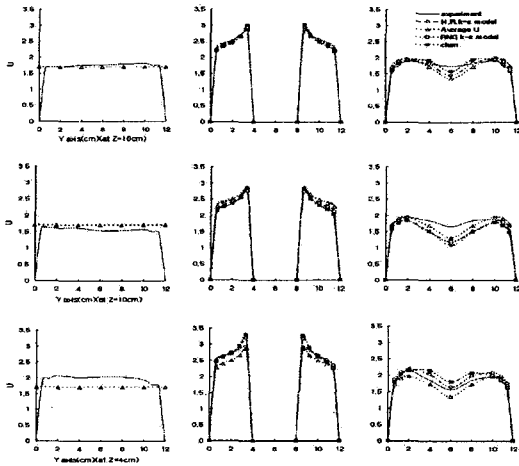


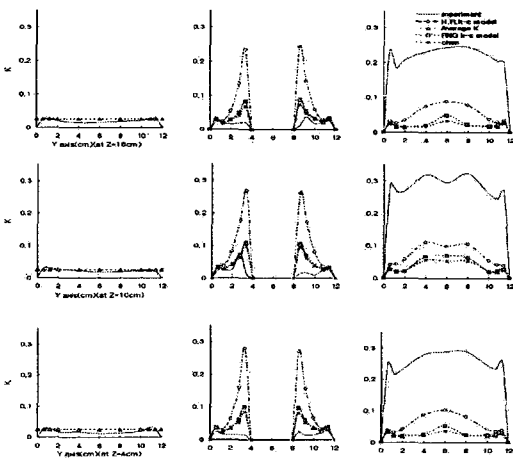
Fig. 10 Contours of experimented and computed velocity profiles at each branch (Re=12,532).  
 Computation(1) : computed with measured inlet velocity profile  
 Computation(2) : computed with uniform inlet velocity profile

은 3.8% ~ 4.0%, 표준 k-ε 모델( $q_w = constant$ )은 2.6% ~ 3.2%, 표준 k-ε 모델(Variable Inlet  $U$ )은 2.6% ~ 3.2%, Chen k-ε 모델(Variable Inlet  $U$ )은 13.0% ~ 15.0%, RNG k-ε 모델(Variable Inlet  $U$ )은 16.4% ~ 18.7%이다.



(a) Inlet section (b) middle section (c) Exit section

Fig. 11 Comparison of x-direction velocity,  $U$ [m/s] between experimental data and 3-D computation data.



(a) Inlet section (b) middle section (c) Exit section

Fig. 12 Distribution of turbulent kinetic energy

--- Standard k-ε model(Avg. Inlet  $U$ )  
 ---◇--- Standard k-ε model( $q_w = constant$ )  
 --- Standard k-ε model(Variable Inlet  $U$ )  
 ---●--- Chen k-ε model(Variable Inlet  $U$ )  
 ---■--- RNG k-ε model(Variable Inlet  $U$ )  
 ---○--- Experiment

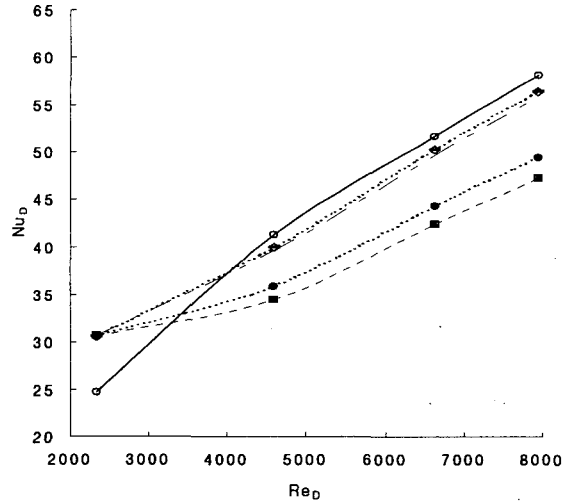


Fig. 13 Comparison of average Nusselt number,  $Nu_D$  between experiment and 3-D numerical computation.

## 5. 결론

곡면 엘보우를 가진 사각단면덕트, 2개의 분지관을 가진 사각덕트 및 사각덕트내의 원기둥 주위의 유체흐름에 대해 상업용 소프트웨어에 의한 계산과 실험으로 측정된 결과를 서로 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 일반적인 수치계산에서 입구조건을 잘 모르므로 대개 입구 유속 분포가 균일하다고 가정하여 계산한다. 따라서 본 논문에서는 입구 유속분포를 측정하여 측정된 유속분포와 균일한 유속분포를 입구경계조건으로 하여 비교한 결과 양자 사이에서 개의 차이점은 별로 없었다.
2. 출구 경계조건으로 Neumann조건과 대기압 조건의 두 가지를 사용할 수 있는데 곡면 엘보우와 원기둥 주위 유체 흐름에서는 두 가지 조건을 주어서 해의 차이는 별로 없었다. 그러나 2개의 분지관 덕트에서는 대기압 조건이 실험 결과와 잘 일치하고 Neumann조건을 많이 다른 결과를 나타내었다.
3. 난류 모델로써 Standard k-ε model, RNG k-ε model 및 Chen's k-ε model를 비교 계산하였다. Standard k-ε model이 실험결과가 비교적 잘 일치했다.
4. 각 계산에서 난류 운동 에너지와 유속 분포는 계산결과가

실험결과와 잘 일치하지 않았으나 이로부터 계산된 설계인자들(예를 들면 곡관 엘보우에서 k-factor, 2개의 분지관에 서 유량 분배, 사각 덕트내의 원기둥으로부터 Nu수)은 비교적 만족하게 모사하고 있다.

### 참고문헌

- [1] Kim, J.T., 1999, Steady and unsteady flows with pressure-based unstructured-grid Navier-Stokes solver PUNS, *Korean Society of Computation Fluids Engineering*, Spring Annual Conference, p.98-105.
- [2] Kim, H.M. and Kim, K.Y., 1998, A study on turbulence models for the analysis of 3- dimensional flow, *Proceedings of the SAREK, Winter Annual Conference (I)*, p.384-389.
- [3] Choi, J.H., Chung, I.K. and Sah, J.Y., 1998, Numerical analysis on heat transfer enhancement of electric modules using a rib turbulator, *Proceedings of the SAREK, Winter Annual Conference (I)*, p.309-314.
- [4] Yoon, Y.H., and Park, W.G., 2003, Study on velocity measurement and numerical computation in a rectangular duct with 90. bend elbow, *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, Vol.15, No. 12, p.910-917.
- [5] Yoon, Y.H., Bae, T.H. and Park, W.G., 2002, Experimental and computational studies for flow distribution in a rectangular duct system with two branches, *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, Vol.14, No. 9, p.766-773.
- [6] Kim, K.H., and Yoon, Y.H., 2003, Study on measurement and numerical analysis for fluid flow past a circular cylinder in Rectangular duct, *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, Vol.15, No. 12, p.1095-1102.
- [7] Yoon, Y.H. and Kim, K.H., 2004, study on the experiment and numerical computation of forced convection heat transfer around Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol.16, No. 5, p.490-498.
- [8] Wirt, L., 1927, General Electric Rev., 30-6 (1927-6), p.286.
- [9] ASHRAE Hand Book, 1977, Fundamentals.
- [10] Koh, Y.H., Park, G.M. and Bong, T.G., 1997, A study on the comparison between experimental and numerical analysis for developing turbulent steady flows in the entrance region of a square duct, *Proceeding of the KOSME*, Vol. 21, No. 3, p.236-245.