

## 사각덕트내 직각엘보우를 지난 유체유동에 관한 연구

윤영환\* · 배택희\*\* · 박원구\*

### Study on Fluid Flow in Rectangular Duct past 90° Mitered Elbow

Y-H Yoon\* · T-H Bae\*\* · W-G Park\*

**Key words** : Fluid flow(유체의 흐름), Rectangular duct(사각 덕트), 90° mitered elbow(직각 엘보우), Laser doppler velocity meter(레이저 도플러 유속계), Three dimensional numerical computation(삼차원 수치계산)

#### Abstract

Fluid flow in a rectangular duct with 90° mitered elbow is measured by 5W laser doppler velocity meter. The fluid flow is also computed by commercial software of STAR-CD for comparison between measured and computed velocity profiles in the duct. Reynolds numbers for the comparison are 1,608 and 11,751 based on mean velocity and hydraulic diameter of the duct. First, the fluid flow of Reynolds number equal to 1,608 is predicted by assumptions of both laminar and turbulent models. But, even though the Reynolds number is less than 2,300 - 3,000, the computation by turbulent model is closed to the experimental data than that by laminar model. Second, the computation for Reynolds number of 11,751 by turbulent model also predicted the experimental data satisfactorily.

기 호 설 명		그리스 문자	
$g$	: 중력가속도	$\varepsilon$	: 난류 소산에너지
$K$	: 난류 운동에너지	$\mu$	: 층류 점성계수
$l$	: 난류 혼합길이	$\mu_t$	: 난류 점성계수
$U_i$	: $i$ 방향 평균유속성분	$\rho$	: 밀도
$u_i', u_j'$	: $i, j$ 방향 난류성분	상 첨 자	
$U, V, W$	: $x, y, z$ 방향 평균유속	-	: 평균성분
$u', v', w'$	: $x, y, z$ 방향 난류성분		

\* 창원대학교 기계공학과

\*\* 창원대학 건축설비과

## 1. 서 론

유체 장치내의 유동현상에 대한 해석은 공기조화설비, 열교환기, 유체수송시스템 등의 유체유동에 대한 응용등 많은 분야에 걸쳐 매우 중요한 부분을 차지하고 있다. 유체의 유동에 영향을 주는 요인으로서 유체 자체의 물성치와 더불어 유체가 통과하는 형상 특히 부속품이나 곡관부의 형상이 매우 중요한 부분을 차지하고 있으며 곡관부내에서의 유동변화는 전체 시스템에 미치는 영향이 매우 크다. 이러한 곡관내의 유동에서 대한 연구로는 엔진의 연료분사 배관에서 연소입자들의 거동에 관한 분체<sup>1)</sup>, 공기조화설비의 덕트내에서 압력강하<sup>2)</sup> 등이 있다.

직관과 직관을 연결하는 곡관부는 직관부에서의 유동특성을 최대한 유지하며 에너지 소비와 직접적인 연관이 있는 압력손실을 최소화하기 위하여 일정한 곡률반경을 갖는 덕트로 연결되어 있다. 그러나 덕트의 설계구조상 곡관 덕트를 사용하지 못하고 90° 직각 덕트를 사용해야 하는 경우도 있다.

본 논문에서는 실험 장치 제작상의 문제와 곡관 덕트에 대한 기준을 위해서 90° 직각 덕트내의 3차원 유동에 대해 Laser Doppler 유속계로 측정된 실험 결과와 상용 software인 STAR-CD를 이용하여 계산 결과와 비교하여 수치해석의 정확성을 평가하고자 한다.

실험과 계산은 덕트의 수력적경과 평균 유속으로 정의된 Reynolds수가 1,608 및 11,751의 두 가

지에 대해 수행하였다. Reynolds수가 2,300 ~ 3,000보다 적으면 통상 층류라고 간주하고 계산한다. 그 예로 Lee<sup>3)</sup> 등은 환기용 열교환기내의 유동을 계산할 때 층류 유동으로 가정하여 계산하였으며, Yeo<sup>4)</sup>는 90° 곡관내의 흐름을 3차원 층류로 해석하였다. 그러나 본 논문에서는 비록 Reynolds수가 낮더라도 층류 및 난류 모두 가정하여 비교하였다.

일반적으로 계산결과와 실험결과를 비교할 때 다른 사람의 실험결과와 비교함으로써 유동 입구 경계조건에 대한 명확한 자료를 제시 못하고 있다. Kim and Kim<sup>5)</sup>은 풍동내의 3차원 유동해석과 다른 논문의 실험결과와 비교하였는데 입구 유속 분포를 단순히 균일한 값으로 주었다. Choi<sup>6)</sup>등도 전자 장비의 냉각 채널속의 열유동을 해석하면서 입구 경계조건을 역시 균일한 값을 주고 있다. 그러나 본 논문에서는 입구 유속 분포 경계조건을 실험 결과에서 얻은 유속 분포를 입력하여 계산함으로써 해의 정확성을 기하였다.

## 2. 실험장치 및 실험방법

### 2.1 실험장치

본 실험장치는 Fig. 1과 같이 송풍팬에 의해 공기가 송풍되며 모터는 인버터에 의해 회전수가 변경되어 풍량은 제어할 수 있다. 송풍된 공기는 수축부를 지나서 상하 2곳에 가슴기에 의해 수분무입자가 공급된다. 공기와 수분부의 혼합기체가 측정부인 L자형 사각 덕트를 지나 배출된다. 측정부 이전의 배관은 아크릴 판으로 구성했으며 측정부는 레이저 유속계의 레이저 빔(beam)의 투과를 위해 유리판으로 제작되었다. 이때 공기중의 수분무입자가 레이저 광선을 산란시켜 유속을 측정한다. 그리고 배관의 치수는 Fig. 2에 나타나 있다.

#### 2.1.1 레이저 유속계

레이저 유속계는 유동중의 조그만 입자에 의해 산란된 빛의 도플러 편이를 이용하는 것으로 레이저 광선을 이용하기 때문에 유체의 흐름을 방해하지 않고 속도 보정이 필요없으며 역 방향 유속

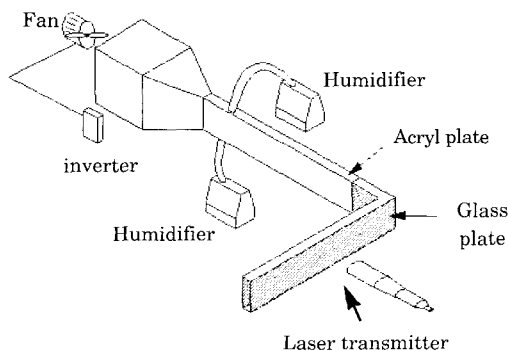


Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus.

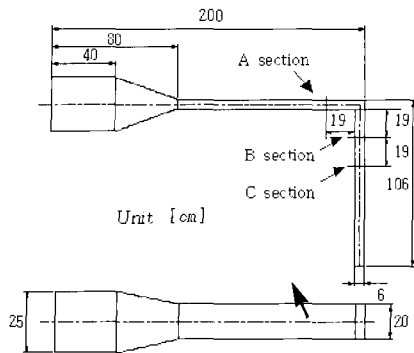


Fig. 2 Dimension of experimental apparatus.

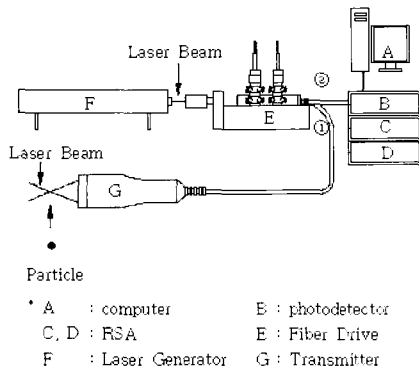


Fig. 3 Schematic diagram of LDV system.

을 측정할 수 있다.

따라서 유속 측정범위가 매우 넓고 정확한 속도의 측정이 가능하다. 본 실험에 사용된 유속계는 2차원 측정용으로 Fig. 3과 같이 5W용 Ar-Ion laser generator에서 발생된 레이저 광선이 5fiber drive내의 브래그 셀(bragg cell)에 의해 같은 강도를 가진 두 개의 광선(beam)으로 나누어지고 이중 한 광선은 역 방향 속도 성분 측정을 위해 40MHz 만큼 주파수를 편이시킨다. 이 두 개의 광선은 다시 편광기에 의해 두 개의 녹색 광선과 두 개의 청색 광선으로 만들어진다. 이중 녹색 광선들을 transmitter에서 두 개의 녹색광선이 교차하도록 방사되며 유체 중의 입자가 두 광선의 교차 지점을 통과하면 산란광이 발산하여 1개의 속도 성분이 측정하는데 이를 channel 1 이라고 하며 이와 90° 편이 된 두 개의 청색광도 transmitter를 통하여 같은 지점을 교차하여 전과 직교되는 속도성분을 측정하며 이를 channel 2 라고 한다. 광선의

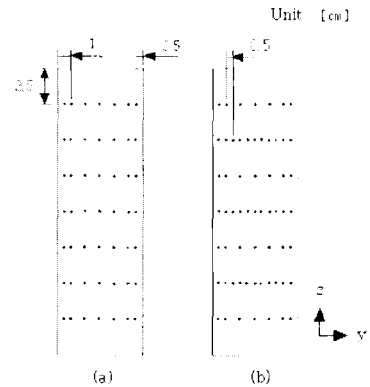


Fig. 4 Velocity measurement points at inlet, middle and exit cross-sections.

교점에서 유체 입자에 의해 산란된 광선은 다시 후방산란(back scattering)방식으로 transmitter에서 감지하여 도플러 신호 분석기인 RSA(Real-time Signal Analyzer)로 보내어 신호 처리하여 최종적으로 컴퓨터에 각 성분의 유속이 기록된다.

## 2.2 실험 방법

유속의 측정위치는 Fig. 2의 A, B, 및 C 단면(section)에서 측정되었는데 앞으로 편의상 A, B, 및 C 단면을 입구단면(Inlet), 중간단면(Middle section) 및 출구단면(Exit)이라 부르기로 하자. 각 단면들의 크기는 (6cm×20cm)로서 입구단면에서는 Fig. 4의 (a)와 같이 총 49개 지점으로 측정하였으며 중간단면과 출구단면에서는 동 그림의 (b)와 같이 20 cm 변을 4등분하여 단면의 상부, 중부 및 하부의 y 방향 세 선분들에서 각각 11개 지점에서 측정하였다. 그리고 각 지점들에서 유속을 세 번 측정하여 평균하였다.

## 3. 수치 해석

### 3.1 지배방정식

본 계산은 상업용 프로그램인 STAR-CD를 사용하여 계산하였으며 Reynolds수가 낮은 경우는 먼저 층류로 가정하여 계산하였고 다음 난류로 가정하여 계산하였는데 난류에 관한 식들은 다음과 같고 층류는 식 (1)과 식 (2)중에서 난류항이 없는 경

우이다.<sup>[7]</sup>

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

$$\frac{DU_i}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_i \partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_i} (u_i' u_j') \quad (2)$$

위의 운동 방정식 중  $u_i' u_j'$  항을 정해주기 위해 다음과 같이 정의한다.

$$-u_i' u_j' = \frac{2}{3} \delta_{ij} K + \frac{\mu_t}{\rho} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (3)$$

식 (3)의  $\mu_t$ 는 난류 점성계수로서  $K-\epsilon$ 난류 모델에서 다음과 같이 가정한다.

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{K^2}{\epsilon} \quad (4)$$

위 식의  $K$ 와  $\epsilon$ 은 각각 난류 운동 에너지와 난류 소산 에너지로서 표준 난류모델에 의해 풀이 하였다.

### 3.2 격자

유체는 공기로서 Fig. 5에서 abcd단면으로 들어가서 ijkl단면으로 나오며 그 이외의 표면들은 모두 벽면들이다. 입출구 단면은 (6×20)cm로서 (14

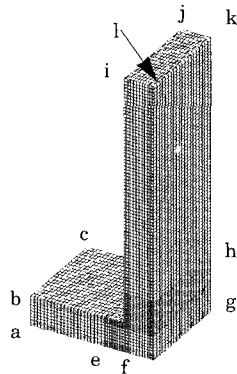


Fig. 5 Representation of cells in three - dimensional computation.

×20)개의 셀을 사용하였고 그 중 좁은 변(6cm)은 14개의 셀로 나누었는데 양쪽 벽면으로부터 4개 셀씩 합계 8개 셀은 나머지 6개 셀 간격의 1/2 이다. 그런데 STAR-CD User Guide<sup>[8]</sup>에서는 벽면에서 첫 번째 셀의 중심까지 거리  $y$ 는  $30 < y^* < 150$  으로 추천하며 이를 다시 환산하면  $0.3\text{mm} < y < 1.6\text{mm}$ 이다. 본 격자에서  $y$ 값이 1.5mm이므로 이 범위에 포함이 된다.

a-f구간은 입구 덕트로서 그 길이가 19cm이며 그 사이를 34개의 간격으로 나누었고 곡관으로 유체가 들어가기 직전인 e-f구간의 12개는 그 전방 간격의 1/2으로서, 이는 유체가 곡관으로 들어갈 때 유속 변화가 클 것으로 예상한 때문이다. 그리고 g-k구간 출구 덕트로서 길이가 50cm로서 그 구간을 84개의 간격으로 나누었으며 곡관에서 바로 나오는 g-h구간은 18개의 간격으로 그 후방 셀들의 1/2 간격인데 그 이유는 전과 같다.

그리하여 동 덕트에 사용된 총 셀수는 51320개이며 질점은 199194개이다.

### 3.3 경계조건

본 논문은 3차원 유동계산으로서 층류인 경우 5 직교좌표  $x, y$  및  $z$ 축에 대한 평균 유속 성분  $U, V$  및  $W$ 에 대한 계산이 필요하며 난류인 경우는 위의 세 성분과 더불어 난류 모델에서 사용되는  $K$ 와  $\epsilon$  등 모두 5개의 변수에 대한 경계조건이 필요하다. 본 논문의 특징은 입구 경계조건을 LDV에 의해 실험에서 구한 값들을 사용한 것이다. Fig. 5에서 보면  $x(ae)$  방향 유속  $U$ 가 주 흐름 방향으로 가장 크고 그 다음이  $z(bc)$  방향 유속  $W$ 일 것이고,  $y(ab)$  방향 유속  $V$ 는 가장 적을 것이다. 본 논문에서는 2차원 LDV유속 장치로 측정하여  $U$ 와  $W$ 의 유속 분포를 입구 단면을 등 간격으로 나누어 총 35개 지점의 유속들을 측정하여 경계조건으로 했다.

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

$$U_{in} = U_{exp}, V_{in} = 0, W_{in} = W_{exp} \quad (5)$$

위 식에서 첨자 in은 입구단면이며 exp는 실험

값을 뜻한다.

다음 난류 운동에너지  $K$ 는 다음 식으로 표시된다.

$$K = \frac{1}{2} (\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}) \quad (6)$$

위 식(6)에서  $\overline{u'}$ 는 LDV 유속계에서 측정된  $x$ 방향 유속  $U$ 의 표준편차인  $U_{RMS}$ 값을 취하였으며  $\overline{w'}$ 도  $z$  방향유속  $w$ 의 표준편차인  $W_{RMS}$ 로 하였다 그리고  $\overline{v'}$ 성분에 대해서는 측정하지 않았으나 측정결과를 보면  $U$ 와  $W$ 는 그 크기가 크게 차이가 나지만 난류 성분인  $U_{RMS}$ 와  $W_{RMS}$ 는 측정결과 거의 같았으므로  $\overline{v'}$ 도  $W_{RMS}$ 값과 거의 같다고 가정하여 아래 식과 같이 입구 경계조건을 취하였다.

$$K = \frac{1}{2} [(U_{RMS})^2 + 2(W_{RMS})^2] \quad (7)$$

그리고 난류소산에너지  $\varepsilon$ 은 식 (7)의  $K$ 값과 난류 혼합길이(mixing length)  $l$ 을 이용하여 다음 식과 같이 계산하였다.

$$\varepsilon = C_\mu^{0.75} \times \frac{K^{1.5}}{l} \quad (8)$$

위 식에서 난류 상수  $C_\mu$ 는 0.09이고, 난류 혼합길이  $l$ 은 실험장치의 유동 폭의 10%인 0.6cm로 하였다.

그리고 모든 벽면에서 유속 성분은 0인 조건(non-slip condition)으로 하였다.

$$U_{wall} = V_{wall} = W_{wall} = 0 \quad (9)$$

또한 벽면에서 난류 경계조건은 STAR-CD프로그램에서 two-layer model과 wall function model 중에서 선택할 수 있는데 본 계산에서는 wall function model을 사용하였다.

마지막으로 출구경계조건은 Neumann 조건으로 다음과 같다.

$$\frac{\partial U}{\partial y} = \frac{\partial V}{\partial y} = \frac{\partial W}{\partial y} = \frac{\partial K}{\partial y} = \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} = 0 \quad (10)$$

### 3.4 수치 계산

본 계산에 사용된 STAR-CD 상업용 프로그램은 유한 체적법(Finite Volume Method)을 사용하고 있으며, 계산조건은 정상상태 및 비압축성 유동이며, 공기의 열역학적 특성치는 공기온도 22.5°C를 기준으로 밀도  $\rho = 1.19425 \text{ kg/m}^3$  및 점성계수  $\mu = 0.1829 \times 10^{-4} \text{ kg/m}\cdot\text{s}$ 를 입력하였다.

## 4. 실험결과 및 계산결과

Fig. 6의 (a)는 삼차원 계산결과와 예가 도시되어 있고 같은 그림의 (b)에는 입구, 중간 및 출구 단면들의 위치와 그 좌표를 나타내고 있다. 즉 곡관에 의해 흐름의 방향이 바뀌더라도 각 단면에서 주속도 방향을  $x$ , 6cm 변을  $y$  및 20cm 변을  $z$  축으로 정하여 실험결과와 계산결과를 나타내고자 한다.

Fig. 7은 Reynolds수 1,608에 대한 덕트내의 주속도 성분  $U$ 에 대한 실험결과와 계산결과들을 나타낸다. 먼저 본 그림의 (a)는 입구단면에 대한 유속분포로서 총 49개 지점의 유속을 측정하였으나 중간 및 출구 단면과 비교를 위해 이들과 같은 위치인  $z = 5, 10, 15\text{cm}$ 지점의 값들만 도시하였다. 그림에서 보면 세 부위의 유속 분포가 유사해 보이

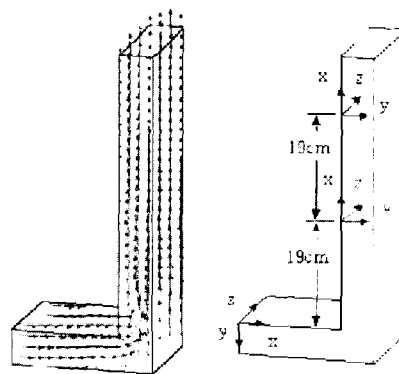


Fig. 6 Computation result of velocities in 3 dimension and axis representations for distributions of fluid flow at each cross-section.

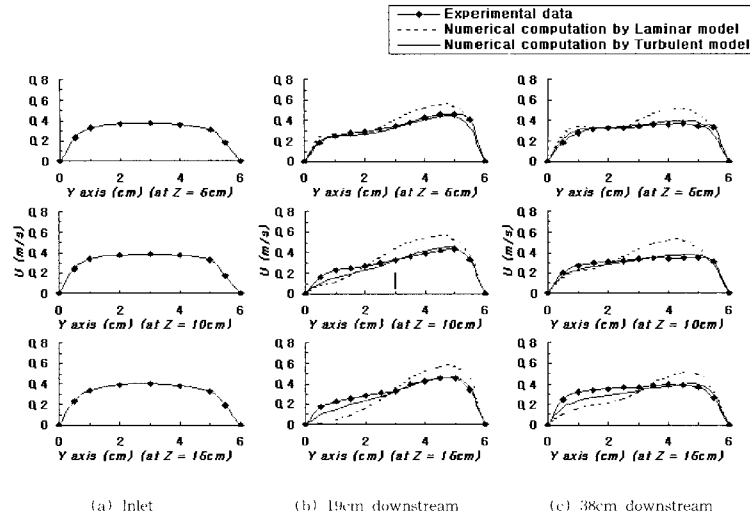


Fig. 7 Comparison of X-direction velocity between experimental data and 3-D computation data ( Re = 1,608 )

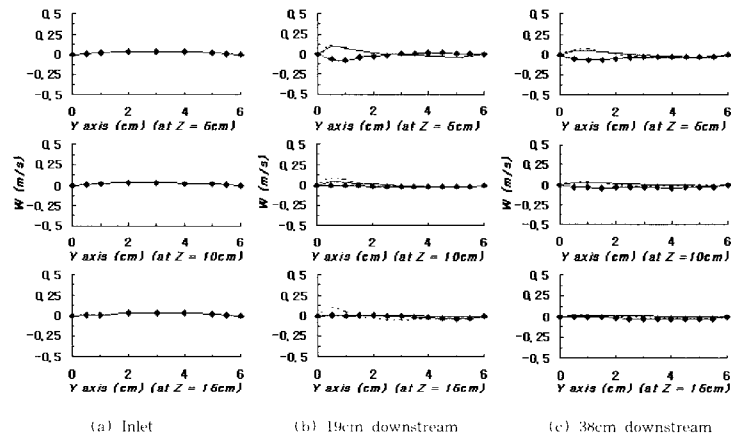


Fig. 8 Comparison of z-direction velocity between experimental data and 3-D computation data ( Re = 1,608 )

며 이들을 Interpolating한 값들을 수치계산의 입구경계조건으로 하였다. 그리고 (b)와 (c)에서는 실험결과(◆)와 층류모델에 의한 수치계산(점선) 및 난류모델에 의한 수치계산(실선)을 비교하였는데, 먼저 실험결과를 보면 (b)의 중간단면은 유체가 90° 회전 후 하류 19cm 지점으로서 회전 바깥쪽으로 갈수록(즉 y가 커질수록) 유속이 빨라지고 회전 안쪽(y가 적을수록) 유속이 감소되는 경향을 보이고 있다. 그러나 (c)의 출구 단면에서 보면 다시 입

구단면의 유속분포로 복원하려는 경향을 보이고 있다. 그러나 계산 결과들을 보면 난류모델에 의한 계산결과(실선)는 실험결과를 비교적 잘 모사하나 층류모델에 의한 계산결과는 상당히 차이가 있고 (c)의 출구단면에서 여전히 회전 바깥쪽의 유속이 높고 회전 안쪽의 유속이 낮게 나타나고 있다.

다음 Fig. 8은 U와 직교방향인 W 유속에 대한 측정값과 계산값들을 Fig. 7과 같은 방법으로 도시한 것이다. 입구단면의 측정값을 보면 거의 영인

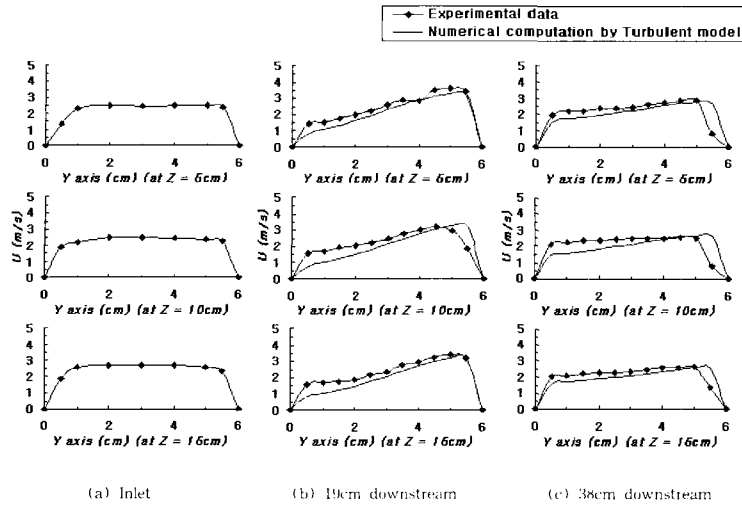


Fig. 9 Comparison of z-direction velocity between experimental data and 3-D computation data (Re = 11,751)

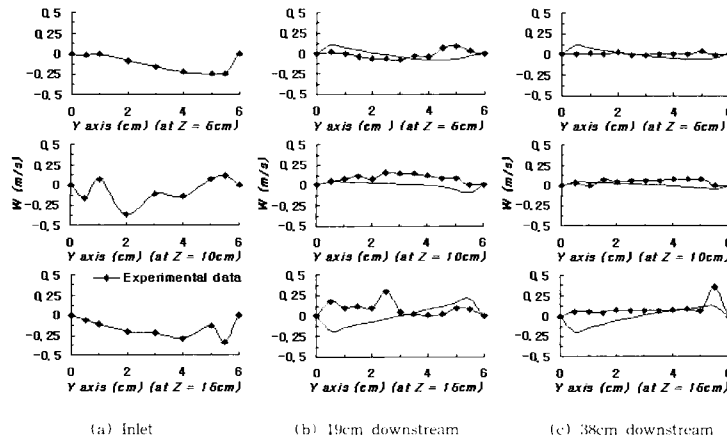


Fig.10 Comparison of z-direction velocity between experimental data and 3-D computation data (Re = 11,751)

값이고 중간단면과 출구단면에서도 측정값과 계산값들이 모두 거의 영으로 나타난다.

Fig. 9 및 Fig. 10은 Reynolds수가 11,751로서 표기 방법은 전과 같다. 이 경우는 유동이 충분히 난류이므로 난류모델에 의해서만 풀이하였다. 주속도방향 유속 분포를 나타낸 Fig. 9에서 보면 실험결과와 수치해석 결과가 비교적 잘 일치하고 있다. 그러나 주속도 방향과 직교 방향인 유속  $w$ 를 나타낸 Fig. 10에서는 실험결과와 수치해석 결과

가 다소 차이를 보이고 있으나 그 절대값이 적기 때문이기도 하다.

Fig. 11과 Fig. 12는 Reynolds수가 각각 1,608 및 11,751일 때 실험에서 구한  $U_{RMS}$ 와  $W_{RMS}$ 를 식(7)에 대입하여 구한 난류 운동에너지  $K$ 값과 수치계산에서 구한  $K$ 값을 상호 비교한 것이다. 두 그림에서 (a) Inlet은 실험값으로 수치계산의 입구 경계조건으로 대입한 값들이다. 다음 그림 (b)에서 보면 유체가 90회전 후 난류도가 증가하다가 하류

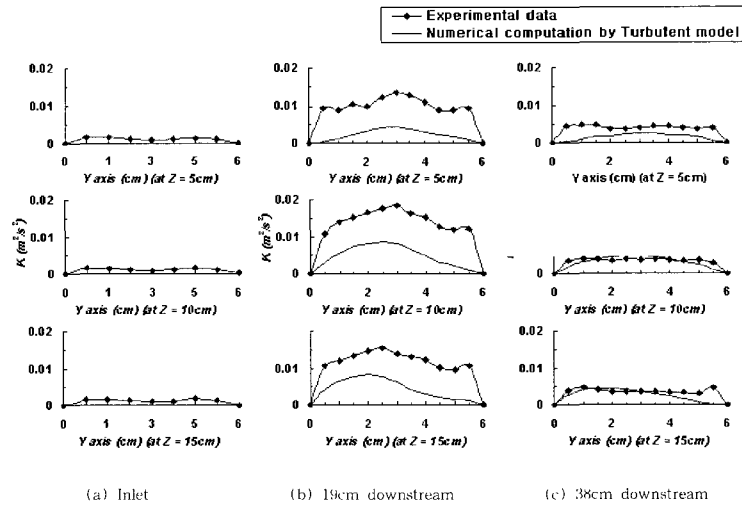


Fig. 11 Distribution of turbulent kinetic energy K ( Re = 1,608 )

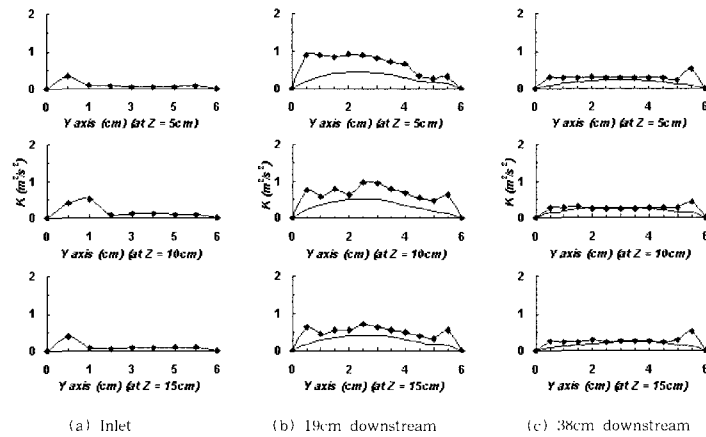


Fig. 12 Distribution of turbulent kinetic energy K ( Re = 11,751 )

에서 다시 소멸하는 현상을 보여 주고 있다. 그러나 그림 (b)에서는 실험값과 계산값의 크기에서 다소 차이를 보이고 있다.

### 5. 결 론

L자형 곡관을 지난 유동에 대해 레이저 도플러 유속계로 측정된 실험결과와 수치해석 결과와 비교하기 위해 수치계산의 입구 경계조건에 실험결과들을 대입하고 3차원으로 해석하여 유체가 직각 회전 후 중간단면 및 출구단면에서 유속분포들을

상호 비교하였다. 덕트의 수력직경과 평균유속에 의한 Reynolds수는 1,608과 11,751이다.

a) 먼저 Reynolds수가 낮은 1,608의 경우 대개 층류로 해석하여 문제를 풀이나 본 계산에서는 난류로 해석한 결과가 층류로 해석한 결과보다 실험 결과와 더욱 일치하였다. 이는 비록 Reynolds수가 낮더라도 송풍팬으로부터 상당한 난류 성분을 가지고 유입하기 때문이라고 생각된다. 다음 Reynolds수 11,751인 경우에는 난류모델로 수치 해석하였는데 계산결과는 실험값을 비교적 잘



모사한다고 볼 수 있다.

b) 두 가지 Reynolds수에서 모두 주속도 성분인 U는 유체가 직각 회전 후 회전 안쪽은 유속이 느려지고 바깥쪽은 빨라졌다가 균일해지는 경향의 실험 결과들을 계산 결과들이 비교적 잘 묘사하였다.

c) 본 계산에 사용된 K-ε 표준 난류모델의 난류 운동에너지 K에 대해 실험값과 계산값을 상호 비교한 결과 유체가 직각 회전 후 와류에 의해 난류도가 증가하다가 하류로 흐를수록 난류도가 다시 소멸하는 현상을 실험값과 계산값이 같은 경향을 보였으나 직각 회전 후 난류도가 증가한 경우는 계산값이 실험값보다 낮게 예측하였다.

### 6. 참고 문헌

[1] Nogi, T., Yamauchi, T. and Ohyama, Y., 1984, "A Study on behavior of liquid particles in air flow through pipe", Proceeding the JSME, vol. 1. No. 469, pp. 3074-3078.

[2] Lee, D. H. and Kwon, Y. P., 1994, "Computer program for pressure drop and sound transmission in a duct system", Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering. Vol. 23, No. 3, pp. 191-203.

[3] Lee, C. W., Lee, K. S., Koh, D. Y. and Yeom, H. K., 2001, "Design and test of heat recovery ventilator with total heat exchanger", Proceedings of the SAREK, Summer Annual conference(I), pp. 512-516.

[4] Yeo, R. W., Wood, P. E. and Hrymak, A. N., 1991, "A Numerical study of laminar 90-degree bend duct flow with different discretization schemes", Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME, Vol. 113, pp. 563-568.

[5] 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), pp. 384-389.

[6] Choi, J. H., Chung, I. K. and Sah, J. Y., 1998, "Numerical analysis on heat transfer enhancement of electric modules using a rib-turbulator", Proceeding of the SAREK, Winter Annual Conference(I), pp. 309-314.

[7] Star-CD, 1999, "Methodology v3.10", Computational Dynamic Ltd, p. 1-1, p 2-5, 6.

[8] Star-CD, 1999, "User Guide v3.10", Computational Dynamic Ltd, p. 6-3.

### 저 자 소 개



**윤영환 (尹英煥)**

1946년 9월생. 1974년 고려대학교 기계공학과 졸업(학사). 1983년 University of Iowa 기계공학과 졸업(박사). 현재 창원대학교 기계공학과 교수.



**배백희 (裴澤熙)**

1955년 12월생. 1978년 고려대 기계공학과 졸업. 1992년 비엔나 기계공학과 졸업(석사). 2000년 창원대학교 박사과정 수료. 1996년~현재 창신대학 근무(건축설비과 교수).



**박원구 (朴圓九)**

1973년 5월생. 1999년 경상대학교 선박기계공학과 졸업(학사). 2001년 창원대학교 기계공학과 졸업(석사). 2001년~현재 창원대학교 기계공학과 박사과정.