

두 개의 분지관을 가진 직사각형 덕트 내의 유량분배에 관한 실험 및 수치계산 연구

윤영환[†], 배택희^{*}, 박원구
창원대학교 기계공학과, ^{*}창신대학 건축설비과

Experimental and Computational Studies for Flow Distribution in a Rectangular Duct System with Two Branches

Young Hwan Yoon, Taeg Hee Bae^{*}, Won Gu Park

Department of Mechanical Engineering, Changwon National University, Changwon 641-773, Korea

^{*}Department of Architectural Equipment, Changshin College, Masan 630-764, Korea

(Received May 13, 2002; revision received August 19, 2002)

ABSTRACT: Flow distributions in a rectangular duct with two branch ducts are measured by 5 W laser doppler velocity meter. The fluid flows are also computed by commercial software of STAR-CD for comparison between them. The Reynolds numbers in the main duct are from 4,226 to 17,491. The ratios distributed into two branches from the main duct are invariant to Reynolds numbers according to both of numerical and experimental results. However, computed velocity profiles at exit of each branch are somewhat different from measured profiles at the same location.

Key words: Rectangular duct(사각덕트), Two branches(두 개의 가지관), Laser doppler velocity meter(레이저 도플러 유속계), 3-D numerical computation(삼차원 수치계산)

기 호 설 명

g : 중력가속도
 k : 난류 운동에너지
 l : 난류 혼합길이
 P : 압력
 U_i : i 방향 평균 유속성분
 u'_i, u'_j : i, j 방향 난류성분
 U, V, W : x, y, z 방향 평균 유속
 u', v', w' : x, y, z 방향 난류성분

그 리 스 문 자

ε : 난류 소산에너지
 μ : 층류 점성계수
 μ_t : 난류 점성계수
 ρ : 밀도

상첨자

- : 평균 성분

1. 서 론

일반 공기조화용 덕트 내의 유량분배를 설계자의 의도대로 제작 설치된다면 나중에 T.A.B를 최소화하여 공기통로 내의 압력강하를 낮추어 연

[†] Corresponding author

Tel.: +82-55-279-7501; fax: +82-55-275-0101

E-mail address: yhyoon@sarim.changwon.ac.kr

간 운전비를 절감할 수 있을 것이다. 특히 자동차용 HVAC에서는 승객실로 들어가는 유량분배를 적절히 하여 쾌적한 실내 온도분포를 유지할 수 있다. 좀더 구체적인 예를 들면 자동차용 공조덕트에서 제습(demist)덕트와 제상(defrost)덕트 사이의 공기 유량분배가 적절해야 하며 또한 승용차의 앞좌석과 뒷좌석 사이의 유량분배도 적절히 이루어져야 한다.

공조용 덕트에 대한 전산유체역학(CFD)은 Shao and Riffat⁽¹⁾ 및 Lee and Kwon⁽²⁾에서와 같이 단순히 덕트 내의 압력강하를 계산하는 프로그램으로부터 Hinchcliffe and Haidar⁽³⁾는 자동차 공조용 덕트 시스템에서 상업용 프로그램을 사용하여 각종 유량분배를 계산했으나 실험결과와 비교치가 없고 Lin et al.⁽⁴⁾은 단순화한 자동차용 공조덕트 내의 흐름을 실험과 수치계산을 병행하였는데 자체개발한 수치해석기법을 사용하고 있다. 그리고 Shiroyama et al.⁽⁵⁾은 CFD를 이용하여 자동차용 공기조화 시스템을 설계했으나 실험 혹은 성능시험결과와 비교가 없다. 또한 Cho and Kim⁽⁶⁾도 자동차용 HVAC model 전체에 대해서 상업용 프로그램을 사용하여 수치계산하였으나 실험결과와의 비교가 없다.

또한 근래에 여러 가지 상업용 소프트웨어(software)가 출시되어 각종 계산에 많이 사용되고 있으나 이들 해의 정확성을 입증한 논문은 그리 많지 않다. 따라서 본 논문에서는 2개의 분지관을 가진 직사각형 덕트 내의 유동분포 및 유량분배를 상업용 소프트웨어인 STAR-CD로 계산하고 레이저 도플러 유속계로 유속을 측정하여 계산값과 실험값을 상호 비교함으로써 상업용 소프트웨

어의 유용성(validity)을 확인하고 유동특성을 파악하여 설계의 기초자료가 되고자 한다.

그리고 유동계산의 입구 경계조건은 일반적으로 Kim and Kim⁽⁷⁾ 및 Choi et al.⁽⁸⁾과 같이 균일한 유속분포로 계산하고 있다. 난류 모델은 표준 $k-\epsilon$ 모델을 많이 쓰고 있으며 이 모델의 난류운동에너지 k 의 입구 경계조건으로 난류강도를 입구유속의 1~10% 정도 취하며 계산하고 난류소산에너지 ϵ 는 난류혼합길이(mixing length) 관계식을 이용하여 입구조건으로 정한다. 그러나 본 실험에서는 덕트의 각 단면에서 평균 유속과 그 난류성분의 측정이 가능하므로 입구 경계조건으로 실험에서 구한 평균 유속분포와 난류성분으로부터 계산한 k 와 ϵ 의 값을 구할 수 있다.

따라서 본 논문에서는 입구에서 균일한 유속분포와 실제 유속분포의 두 가지 입구 경계조건들에 대해 계산하여 서로 비교하였다.

2. 실험장치 및 방법

본 실험장치는 Fig. 1과 같이 송풍팬에 의해 공기가 송풍되며 송풍팬의 모터는 인버터에 의해 회전수를 제어하여 풍량을 변경할 수 있다. 송풍된 공기는 수축부를 지나 상하 2곳에 가슴기에 의해 입자가 공급된다. 공기와 수분무의 혼합체가 덕트 입구를 지나 2개의 가지관으로 배출된다. 측정부는 레이저 유속계의 레이저 빔(beam)의 투과를 위해 유리판으로 제작되었다. 이때 공기 중의 수분무 입자가 레이저 광선을 산란시켜 유속을 측정한다. 그리고 실험에 사용된 배관의

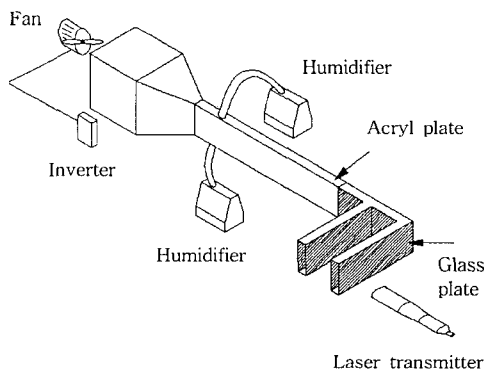


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus.

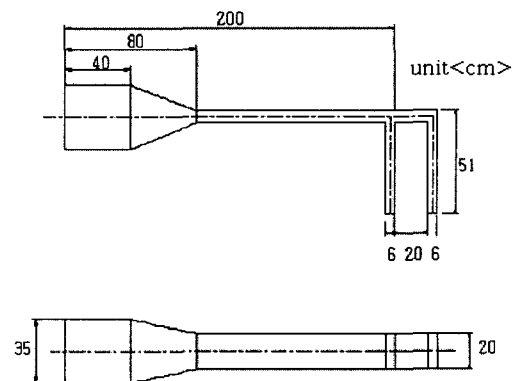


Fig. 2 Dimension of experimental apparatus.

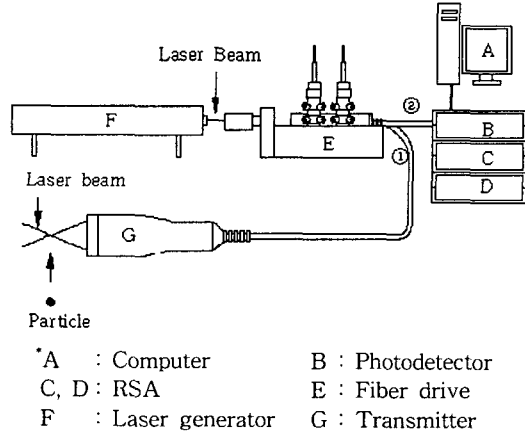


Fig. 3 Schematic diagram of LDV system.

치수는 Fig. 2와 같다.

본 실험에 사용된 유속계는 유동중의 조그만 입자에 의해 레이저 광선에서 산란된 빛의 도플러 편이를 이용하기 때문에 유체의 흐름을 방해하지 않고 속도보정이 필요 없으며 역방향 유속을 측정할 수 있다. 본 실험에 사용된 유속계는 Fig. 3과 같이 2차원 측정용으로 5W용 Ar-Ion laser 유속계이며 구체적인 실험방법은 Yoon et al.⁽⁹⁾에 자세히 기술되어 있다.

배관 계통에서 유속의 측정 단면들은 Fig. 2에서와 같이 입구 단면과 2개의 분지관들의 출구 단면들에서 Fig. 3과 같이 (5×7)인 35개 지점들에서 측정하였다.

유속계에 의한 측정항목은 주속도 성분으로 Fig. 4에서 측정단면과 직교하는 x 방향의 평균 유속 U와 z 방향 유속 W를 각각 측정하며 또한 이들 평균 유속의 난류성분들인 |u'| 및 |w'|을

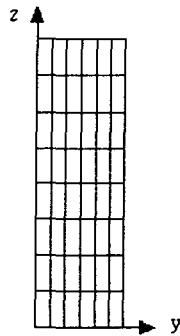


Fig. 4 Velocity measurement points at cross sections.

측정한다. 실험은 입구 단면의 평균 유속과 수력 직경을 기준으로 한 Reynolds 수 4,226, 8,920, 12,532 및 17,491 등 4가지를 수행하였다.

3. 수치해석

3.1 지배방정식

본 계산은 상업용 프로그램인 STAR-CD를 사용하여 계산하였으며 먼저 시간 평균값에 대한 연속방정식과 운동방정식은 다음과 같다.

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

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

위의 운동방정식 중 $\overline{u_i' u_j'}$ 항을 정해 주기 위해 다음과 같이 정의한다.

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

식(3)의 μ_t 는 난류점성계수로서 $k - \epsilon$ 난류모델에서 다음과 같이 가정한다.

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\epsilon} \tag{4}$$

위 식의 k 와 ϵ 은 각각 난류운동에너지와 난류소산에너지로서 다음과 같다.

$$k = \frac{1}{2} \overline{u_i' u_i'} \tag{5}$$

$$\epsilon = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \tag{6}$$

이상의 k 와 ϵ 의 계산을 위해 $k - \epsilon$ 표준난류모델을 선정하여 계산하였다.

3.2 격자

공기가 Fig. 5에서 (abcd)단면으로 들어가서 2개의 분지관으로 나누어져 (nopq)단면 및 (rstu)

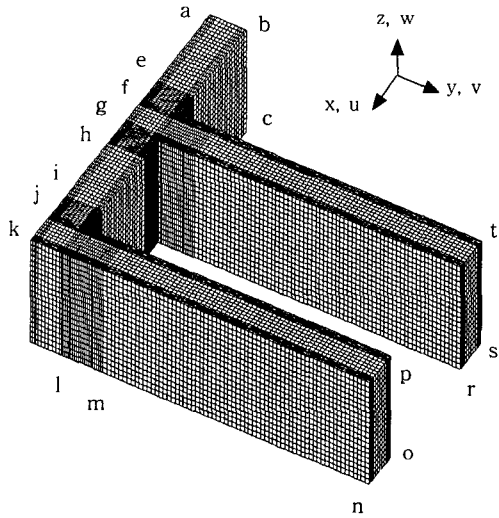


Fig. 5 Representation of cells for two branch ducts system in three-dimensional computation.

단면으로 나오며 그 이외의 표면들은 모두 벽면들이다. 입출구 단면들의 치수는 모두 6×20 cm로서 14×20개의 셀을 사용하였고 그중 좁은 변(6 cm)은 14개의 셀로 나누었는데 양쪽 벽면으로부터 4개 셀씩 합계 8개 셀은 가운데 6개 셀 간격의 1/2로 작게 하였다. 또한 유체가 분지관의 입구 전후, 즉 e-f, g-h 및 i-j 구간은 다른 간격의 1/2로 좁게 하였으며 그 구간의 길이는 해가 더 이상 변하지 않을 때까지 격자간격을 좁혔다.

그리고 전체적 치수는 a-k가 51 cm이며, a-f는 19 cm이고, g-j는 20 cm이고 l-n은 50 cm로서 동덕트 시스템에 사용된 총 셀수는 106,729개이며 절점은 420,948개이다.

3.3 경계조건

본 논문은 3차원 유동계산으로서 직교좌표 x , y 및 z 축에 대한 평균 유속성분 U , V 및 W 와 난류모델에서 사용되는 k 와 ϵ 등 모두 5개의 변수에 대한 경계조건이 필요하다. 본 논문의 특징은 입구경계조건을 LDV에 의해 실험에서 구한 값들을 사용한 것이다. 다시 Fig. 5에서 보면 x (ae) 방향유속 U 가 주흐름방향으로 가장 크고 그 다음이 z (bc) 방향유속 W 일 것이고, y (ab) 방향유속 V 가 가장 적을 것이다. 본 논문에서는 2차

원 LDV 유속장치로 측정하여 U 와 W 의 유속분포를 입구 단면을 등 간격으로 나누어 총 35개 지점의 유속들을 측정하여 경계조건으로 했다.

V 유속성분은 측정치 않았으나 W 유속성분이 거의 영에 가까우므로 V 유속성분은 영으로 가정했는데 식으로 표시하면 다음과 같다.

$$U_{in} = U_{exp}, V_{in} = 0, W_{in} = W_{exp} \quad (7)$$

위 식에서 첨자 in은 입구 단면이며 exp는 실험값을 뜻한다.

다음 난류운동에너지 k 는 다음 식으로 표시된다.

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

위 식(8)에서 $\overline{u'}$ 는 LDV 유속계에서 측정한 x -방향 평균 유속 U 의 표준편차인 U_{RMS} 값을 취하였다. 그리고 $\overline{v'}$ 성분은 측정하지 않았으나 측정결과를 보면 U 와 W 는 그 크기가 크게 차이가 있지만 난류성분인 U_{RMS} 와 W_{RMS} 는 측정결과 거의 같았으므로 $\overline{v'}$ 도 W_{RMS} 값과 거의 같다고 가정하여 아래 식과 같이 입구 경계조건을 취하였다.

$$k = \frac{1}{2}[(U_{RMS})^2 + 2 \cdot (W_{RMS})^2] \quad (9)$$

그리고 난류소산에너지 ϵ 은 식(9)의 k 값과 난류혼합길이(mixing length) l 을 이용하여 다음 식과 같이 계산하였다.

$$\epsilon = C_\mu^{0.75} \times \frac{k^{1.5}}{l} \quad (10)$$

위 식에서 난류상수 C_μ 는 0.09이고, 난류혼합길이 l 은 실험장치의 유동폭의 10%인 0.006 m로 하였다.

또한 벽면에서 각종 유속은 non-slip condition과 함께 난류경계조건은 STAR-CD 프로그램에서 two-layer model과 wall function model 중에서 선택할 수 있는데 본 계산에서는 wall func-

Table 1 Thermodynamic properties of air

Reynolds no.	Density (kg/m ³)	Viscosity (kg/ms)
4,226	1.1915	0.1832×10^{-4}
8,920	1.19306	0.183×10^{-4}
12,532	1.205	0.181×10^{-4}
17,491	1.19306	0.183×10^{-4}

tion model을 사용하였다.

마지막으로 출구경계조건은 대기 중에 노출되었으므로 다음과 같다.

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

그리고 기타 변수들은 Neumann 조건이다.

3.4 수치계산

본 계산에 사용된 STAR-CD 상업용 프로그램은 유한체적법(Finite Volume Method)이며, 계산 조건은 정상상태 및 비압축성 유동이다. 계산에 사용된 공기의 열역학 특성치는 실내 공기온도 20°C에서 23.2°C 사이에 대해 Table 1과 같다.

수치계산의 최대허용치(maximum residual tolerance)는 0.0005를 사용하였다. 그리고 수치계산의 cpu 시간은 2,941.20초에서 3415.60초이며 266번에서 325번 사이의 반복계산에서 수렴했다.

3.5 유량계산

입구 및 출구 단면들에서 측정된 유속들은 Fig. 3에서와 같이 각 격자의 교점에서 측정되었는데 이들 값들은 STAR-CD에 테이블(Table)로 입력하면 STAR-CD에서 이들을 3차원 인터폴레이팅(Interpolating) 함수를 발생하고 이를 적분하여

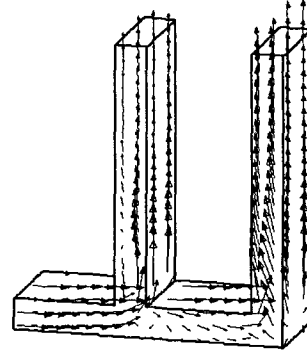


Fig. 6 Computational result in duct with two branches.

유량을 계산한다. 따라서 모든 유속에 대한 유량 계산을 위와 같이 STAR-CD 프로그램에 의해 수행하였다.

또한 계산결과와 유량도 역시 STAR-CD에 내장된 유량계산 프로그램으로 구하였다.

4. 실험 및 계산결과

본 실험과 계산을 수행한 Reynolds 수는 4,226, 8,920, 12,532 및 17,491로서 그 계산 예가 Fig. 6과 같이 입구 배관의 공기가 두 개의 분지관 덕트들로 나누어지며 격자는 3.2절과 같다. 그림에서 입구와 가까운 배관을 제 1 분지관(branch 1) 및 그 다음 배관을 제 2 분지관(branch 2)이라고 부르겠다.

Table 2에서는 각 Reynolds 수에 대해 공기가 덕트 입구로 들어가서 제 1 분지관과 제 2 분지관으로 나누어지는 유체의 각 단면에 대한 평균 유속을 나타내었다. 입구 및 각 분지관들의 단면이 모두 같으므로 평균 유속이 유량의 크기로 대신

Table 2 Experimented and computed mean velocities at each branch (Unit: m/s)

Reynolds no. at inlet	Experimental data		Computation(1)		Computation(2)	
	Branch 1	Branch 2	Branch 1	Branch 2	Branch 1	Branch 2
4,226	0.264915	0.461369	0.267227	0.459405	0.286416	0.438633
8,920	0.595308	0.940548	0.547062	0.99135	0.578648	0.961916
12,532	0.811643	1.32216	0.717827	1.4162	0.78474	1.35171
17,491	1.18861	1.84105	1.04523	1.98753	1.09348	1.93597

* Computation(1) : computed with measured inlet velocity profile

Computation(2) : computed with uniform inlet velocity profile

Table 3 Rates of flow rate at each branch (Unit: %)

Reynolds no. at inlet	Experimental data		Computation(1)		Computation(2)	
	Branch 1	Branch 2	Branch 1	Branch 2	Branch 1	Branch 2
4,226	36.47	63.52	36.77	63.22	39.50	60.49
8,920	38.76	61.23	35.56	64.43	37.56	62.43
12,532	38.03	61.96	33.63	66.36	36.73	63.26
17,491	39.23	60.76	34.46	65.53	36.09	63.90

※ Computation(1) : computed with measured inlet velocity profile
 Computation(2) : computed with uniform inlet velocity profile

할 수 있다. Table 2에서 첫번째 Experimental data는 제 1 분지관과 제 2 분지관으로 나누어지는 평균 유속의 실험결과이며 다음은 수치해석으로 구한 각 덕트들의 유속들로서, computation(1)은 입구경계조건을 실험에서 구한 실제 유속분포를 대입하여 계산한 것이고 computation(2)는 입구에서 같은 유량의 균일한 유속분포를 갖는다고 가정하여 계산한 값들이다. 이는 다른 논문에서 입구경계조건을 실험으로 구하지 않는 한 잘 모르므로 흔히 균일하다고 가정하여 계산하므로 그 정당성을 평가하기 위해 아울러 계산하였다.

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 입구유량을 100%로 하였을 때 제 1 분지관과 제 2 분지관으로 분배되는 백분율은 Table 3과 Fig. 7에 나타나 있으며 실제 유속분포의 입구경계조건인 경우 0.3~4.77%의 오차가 있고 균일한 유속분포는 1.2~3.14%가 오차가 있

으며, 제 1 분지관으로 입구 유량의 평균 37.65%가 흐르고 제 2 분지관으로 평균 62.23%가 흐르고 있음을 볼 수 있다. 이는 Reynolds 수가 변화되더라도 제 1 분지관과 제 2 분지관으로 유량이 분배되는 비율이 거의 일정함을 실험 및 계산결과들에서 보여주고 있다.

다음 Fig. 8은 Reynolds 수가 12,532일 때 입구 단면과 제 1 분지관과 제 2 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 계산결과들이다. 두 계산 모두 각 분지관에서 유속의 등고선 모양은 실험결과와 다소 차이가 있다.

5. 결 론

공기조화용 덕트의 유량 분배관을 두 개의 가지관을 가진 덕트로 단순화하여 덕트내의 유동을 레이저 도플러 유속계로 측정하고 같은 유동에 대해 상업용 프로그램인 STAR-CD를 사용하여 해석하였다.

(1) 실험을 수행한 Reynolds 수는 4,226, 8,920, 12,532 및 17,491으로서 입구와 가까운 제 1 분지관으로 입구유량의 평균 37.65%가 흐르고 제 2 분지관으로는 평균 62.23%가 흐르며 이는 Reynolds 수에 관계없이 거의 같은 비율로 분배되었다. 이는 본 덕트의 형상에서 각 가지관으로 유량배분 비율은 Reynolds 수에 관계없이 거의 일정하다.

(2) 상기 유동들에 대해 수치계산을 수행한 결과 두 개의 가지관으로 유량분배는 실험과 거의 같은 결과를 얻었으며 수치계산의 입구경계조건으로 실제 유속분포와 균일한 유속분포의 두 가

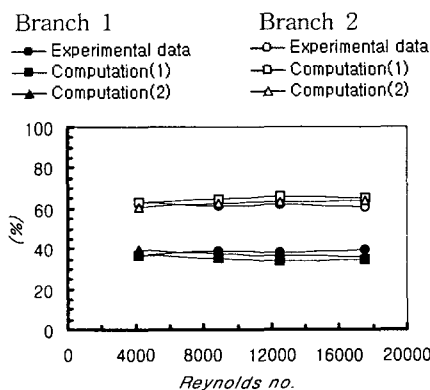


Fig. 7 Percentage of flow rates at each branch of the duct system.

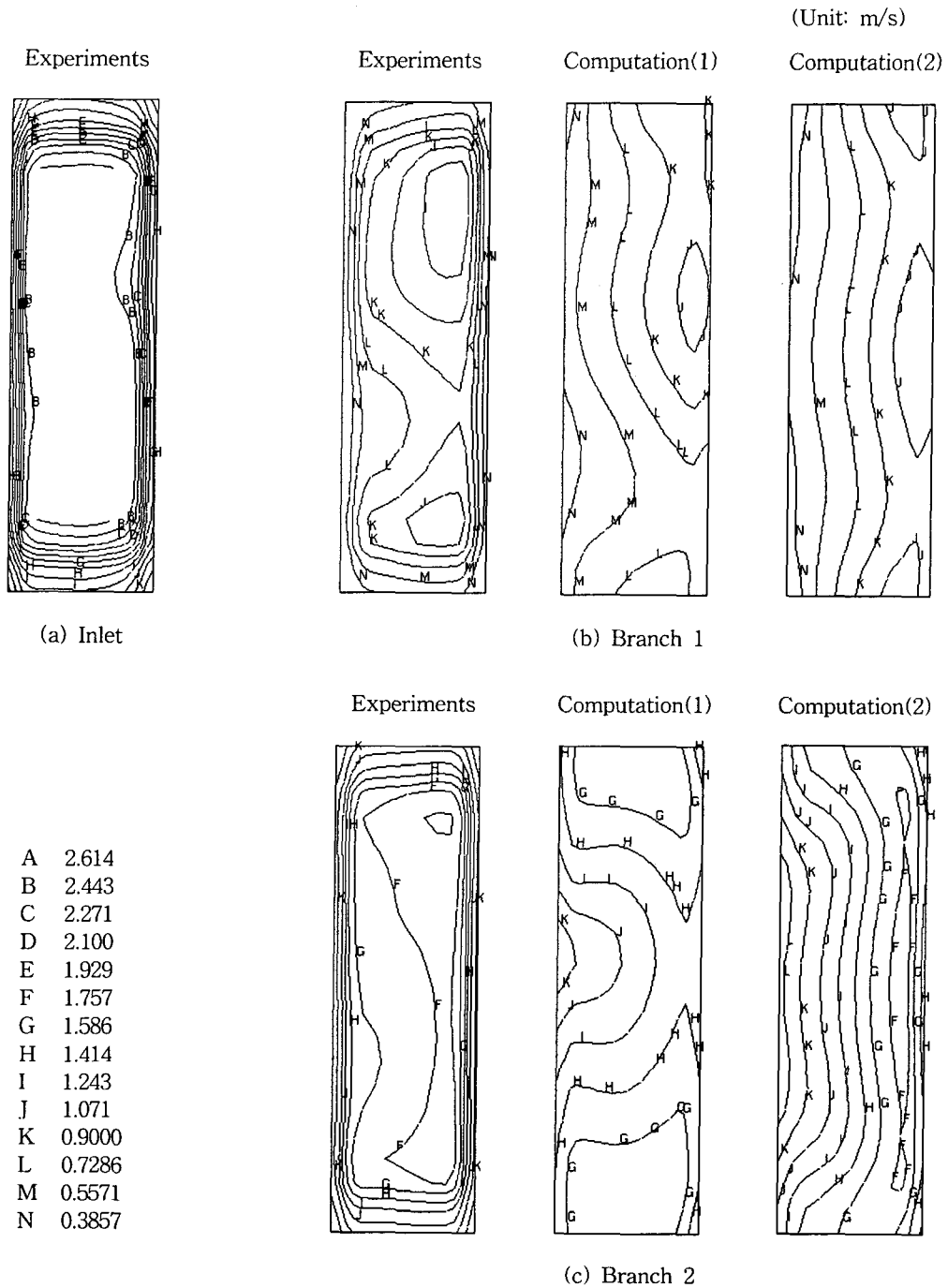


Fig. 8 Contours of experimented and computed velocity profiles at each branch ($Re=12,532$)
 Computation(1) : computed with measured inlet velocity profile
 Computation(2) : computed with uniform inlet velocity profile

지 조건을 각각 계산하였는데 후자의 경우도 분지관의 유량분배에서 실험결과와 거의 같은 값을 얻었으므로 유량 분배계산에서 입구 경계조건을 균일한 유속으로 가정하여도 큰 오차가 없다고 생각된다.

(3) 그러나 각 분지관의 출구 단면들에서 수치 해석에 의한 유속분포들을 조사한 결과 구체적인 유속분포는 실험유속분포와 다소 차이가 있었다.

참고문헌

1. Shao, L. and Riffat, S. B., 1995, Accuracy of CFD for predicting pressure losses in HVAC duct fitting, *Applied Energy*, Vol. 51, No. 3, pp. 233-248.
2. Lee, D. H. and Kwon, Y. P., 1994, Computer program for pressure drop and sound transmission in a duct system, *Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Magazine of SAREK*, Vol. 23, No. 3, pp. 191-203.
3. Hinchcliffe, S. and Haidar, N., 1998, CFD investigation into LD100 HVAC ducting system, *Technical Review*, pp. 145-152.
4. Lin, C. H., Han T. Y. and Sumantran, U., 1994, Experimental and computational studies of flow in a simplified HVAC duct, *Int. J. of Vehicle Design*, Vol. 15, No. 1/2, pp. 147-165.
5. Shiroyama, M., Ijawa, T. and Hasegawa, T., 1998, Development of compact air conditioning for vehicle using CFD, *J. of Mitsubishi Heavy Industry*, Vol. 35, No. 2, pp. 108-111.
6. Cho, N. H. and Kim, M. R., 1998, Numerical investigation of fluid flow in an automotive HVAC module, *Technical Review*, pp. 125-135.
7. 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.
8. 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)*, pp. 309-314.
9. Yoon, Y. H., Bae, T. H. and Park, W. G., 2001, Velocity measurement in a rectangular duct with 90° mitered elbow, *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, Vol. 13, No. 12, pp. 1184-1195.