

## 주덕트의 단면적 변화가 분지덕트의 유량분배에 미치는 영향

이 재 호<sup>†</sup>, 김 범 준, 조 대 진, 윤 석 주<sup>\*</sup>

전북대학교 기계공학과 대학원, <sup>\*</sup>전북대학교 기계공학과 자동차 신기술연구소

### Effect of a Variation of a Main Duct Area on Flow Distribution of Each Branch

Jai-Ho Lee<sup>†</sup>, Beom-Jun Kim, Dae-Jin Cho, Suck-Ju Yoon<sup>\*</sup>

Graduate School of Mech. Eng., Chonbuk National Univ., Jeonju 664-14, Korea

<sup>\*</sup>Dept. of Mech. Eng., Automobile Hi-Technology Research Center, Chonbuk National Univ., Jeonju 664-14, Korea

(Received January 6, 2005; revision received April 6, 2005)

**ABSTRACT:** With the development of a living standard, the importance of indoor air conditioning system in all kinds of buildings and vehicles has increased. A lot of researches on energy losses in a duct and various kinds of flow pattern in branches or junctions have been carried out over many years, because the primary object of a duct system used in HVAC is to provide equal flow rate in the interior of each room by minimizing pressure drop. In this study, to get equal flow distribution in each branch, a blockage is applied to the rectangular duct system. The flow analysis for flow distribution of a rectangular duct with two branches was performed by CFD. By using SIMPLE algorithm and finite volume method, flow analysis is performed in the case of 3-D, incompressible, turbulent flow. Also, the standard  $k-\epsilon$  model and wall function method were used for analysis of turbulent fluid flow. The distribution diagrams of static pressure, velocity vector, turbulent energy and kinetic energy in accordance with variation of Reynolds number and blockages location in a rectangular duct show that flow distribution at duct outlets is improved by a blockage. In this rectangular duct system, mean velocity and flow rate distribution in two branch outlets are nearly constant regardless of variation of Reynolds number, and a flow pattern of the internal duct has a same tendency as well.

**Key words:** Rectangular duct(사각덕트), Flow distribution(유량분배), Aspect ratio(종횡비), Blockage ratio(봉쇄율), Separated flow(박리유동)

#### 기 호 설 명

$H$  : 블록의 높이 [cm]  
 $h$  : 주덕트의 높이 [cm]

$k$  : 난류 운동에너지 [ $m^2/s^2$ ]  
 $L$  : 블록의 길이 [cm]  
 $l$  : 난류 혼합 길이  
 $Pm$  : 평균 압력,  $\sum(p \cdot \Delta A) / \sum \Delta A$  [Pa]  
 $Re$  : Reynolds 수,  $UL/\nu$   
 $u, v, w$  :  $x, y$  및  $z$ 축 방향 속도 성분 [m/s]  
 $x, y, z$  : 직교 좌표계에서 각 방향의 좌표  
 $X_R$  : 재부착 길이 [cm]

<sup>†</sup> Corresponding author

Tel.: +82-63-270-2324; fax: +82-63-270-2315

E-mail address: 2755590@daum.net

## 그리스 문자

$\varepsilon$	: 난류 소산에너지 [ $\text{m}^2/\text{s}^3$ ]
$\mu$	: 층류 점성계수 [ $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ]
$\mu_t$	: 난류 점성계수 [ $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ]
$\rho$	: 밀도 [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

## 상첨자

-	: 평균 성분
---	---------

## 1. 서 론

일반 공기조화 덕트시스템은 배기용 덕트에서와 같이 다수의 유입구와 한 개의 토출구를 가지는 시스템과 급기용 덕트에서와 같이 한 개의 유입구와 다수의 토출구를 가지는 시스템으로 대별할 수 있다.

일반 공기조화 덕트시스템은 압력강하를 최소화하고 각 실내에 균일한 유량을 공급하는 것이 목적이며, 따라서 덕트 내의 손실 및 여러 형태의 분지덕트 유동 등에 관한 연구가 이루어져 왔다.

분기관 내 유동특성에 대한 연구방법으로는 이론적, 실험적 및 해석적 연구 등으로 분류할 수 있지만 덕트 내의 유동특성을 정확하게 해석하여 알아내는 것은 매우 어려운 일이다. 왜냐하면 이러한 현상들을 지배하는 방정식들이 비선형 2차 편미분방정식들로 주어지므로 이 식들을 복잡한 경계조건에서 푸는 것은 쉬운 일이 아니기 때문이다. 따라서 분기관 내 정상 및 비정상 유동을 수치적으로 해석하여 유동속도, 압력분포, 전단응력분포 등을 구하기 위한 기존의 연구가 다양한 방법으로 수행되고 있으며, 실험적 연구에서는 주로 관 내 압력손실 및 속도분포를 측정하여 분기관 내의 유동현상을 이해하고 있다.<sup>(1-4)</sup>

최적유량공급을 위한 공기분배시스템에 대한 기존의 연구들은 최소의 압력손실로서 적정공간에 적정유량을 유출할 수 있는 덕트 설계방법에 관한 연구와 분지덕트와 같이 국부적인 압력손실이 일어나는 부분에서 마찰계수를 예측하기 위한 연구들이 주를 이루고 있다.<sup>(5-8)</sup>

특히 차량에서는 차체의 유선화 설계 경향으로 태양열의 복사강도가 증가하여 공기조화(Air-Conditioning, A/C) 최적설계의 중요성이 높아지고 있

으며 쾌적한 실내온도 분포를 유지할 수 있도록 각각의 분지덕트 출구의 유량분배를 균일하게 하려는 연구<sup>(7,9)</sup>가 진행되고 있다. 최근의 연구로 Kim et al.<sup>(10)</sup>는 중형버스에 사용되어지는 덕트 출구에서 균일한 유량을 얻을 수 있도록 덕트 내부에 블록을 설치하고 유량분배의 최적화를 위하여 실험과 수치적인 계산을 하였다. Jeong et al.<sup>(12)</sup>은 분지덕트가 두 개 있는 HVAC 덕트 내 3차원 난류 유동에서 난류모델을 변화시켜 실험과 압력분포를 비교하였다. Yoon et al.<sup>(13)</sup>은 두 개의 분지덕트를 가지는 직사각형 덕트 내의 유량분배라는 관점에서 주관 입구의 속도를 실제 유속분포와 균일한 유속분포의 두 조건에서 수치해석하여 분지덕트 출구에서의 유량을 LDV를 이용한 실험값과 비교하였다. 차량의 냉·난방을 위한 덕트계는 유동 단면적 변화, 내부표면 상태, 통과유속 등에 의하여 유동손실을 수반하며 압력분포의 불균일로 인하여 덕트계에서 공기분배의 균형에 나쁜 영향을 주게 되어 설계단계에서 고려해야 한다. 그러나 차량에 적용되는 공기분배용 덕트와 같이 비교적 길이가 짧고 다수의 유출구를 가진 덕트에 관한 연구는 아직 미흡한 실정이다. 또한 덕트 내의 단면적이 급격하게 확대 및 축소되는 경우의 유동은 매우 복잡한 양상을 가지며 유동박리 등에 의한 부차적 손실을 유발하게 되므로 이에 대한 유동특성을 규명할 필요가 있다.

본 연구에서는 두 개의 수직 분지덕트가 있는 직사각형 덕트 시스템 내의 유동 단면적을 변화시키기 위하여 블록을 설치하였으며, 덕트 높이에 대한 블록 높이의 비인 봉쇄율(blockage ratio =  $H/h$ )과 블록 높이에 대한 길이의 비인 종횡비(aspect ratio =  $L/H$ )를 변화시키고 블록의 형상과 위치를 변화 시켰을 때 그에 따른 덕트 내부의 유동분포와 압력분포 및 출구에서의 유량분배를 수치적으로 계산하여 덕트 출구에서의 유량분배를 향상시킬 수 있는 기초자료로 사용하고자 한다.

## 2. 수치해석

## 2.1 지배방정식

덕트 내부의 유동장을 계산하기 위하여 상용 프로그램인 STAR-CD를 사용하였으며, 사용되어

진 3차원 비압축성 연속방정식 및 운동방정식은 다음과 같다.<sup>(11)</sup>

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

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

본 연구에서는 난류유동을 계산하기 위해 표준  $k-\epsilon$  모델을 난류 해석모델로 선택하였다. 이 모델은 난류 운동에너지  $k$ 로부터 특성속도를 구하고, 점성 소산율의 크기  $\epsilon$ 을 이용하여 간접적으로 특성길이를 구하는 모델로써 지금까지의 연구에서 덕트 출구에서의 유량분배는 표준  $k-\epsilon$  모델이 오차범위 2% 이내로 가장 정확한 해석값을 예측하고 있다.<sup>(12)</sup>

난류 운동에너지 수송방정식

$$\rho U_i \frac{\partial k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) - \rho \overline{u_i u_j} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \rho \epsilon \tag{3}$$

난류 운동에너지 소산율방정식

$$\rho U_i \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right) - C_{\epsilon_1} \rho u_i u_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - C_{\epsilon_2} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \tag{4}$$

여기서, 속도 스케일은  $\sqrt{k}$ 이고, 길이 스케일은  $\{C_\mu^{(3/4)} k^{(3/2)}\} / \epsilon$ 이다. 그리고 각 상수들은 실험으로 결정된다.

**2.2 경계조건**

덕트 입구에서의 난류 강도와 혼합거리는 각각 입구 평균 유속의 5%와 덕트 입구폭의 10%를 사용하였다.

$$k = 1.5 \times (U \times I)^2 \tag{5}$$

$$\epsilon = C_\mu^{0.75} \times \frac{k^{1.5}}{l} \tag{6}$$

여기에서  $U$ 는 유입공기의 평균 속도이며  $I$ 는 난류강도를 의미한다. 또한  $C_\mu$ 는 난류모델에 있어서 실험계수로서 0.09이고  $k$ 는 난류에너지를  $l$ 은 난류 혼합 길이(turbulent mixing length)를 나타낸다. 작동유체는 공기로서 밀도는  $1.205(\text{kg/m}^3)$ , 점성계수는  $1.81 \times 10^{-5}(\text{Pa} \cdot \text{s})$ 를 사용하였고 수렴성을 좋게 하기 위해서 계산값들은 하향 이완하였다.

덕트 벽면에서는 일반적으로 많이 사용되는 점착조건(no-slip condition)을 적용하여 벽면에서의 속도를 0이 되게 하였으며, 난류 경계조건으로 벽함수모델(wall function model)을 적용하였고, 표면거칠기조건(Roughness condition)은 실험상수값(smooth wall : 9.0)을 적용하였다.

출구에서는 대기압 상태인 압력경계조건을 적용하였으며, 기타 변수들은 Neumann 조건으로 하였다.

**2.3 수치계산**

비압축성, 정상상태 조건에서 계산을 수행하였으며 압력 수정기법으로는 SIMPLE 알고리즘을 사용하였다. 입구에서는 레이놀즈수 4,000 이상의 4개의 조건에서 균일속도 분포를 가정하여 인가하였는데, 이 조건은 Yoon et al.<sup>(13)</sup>이 LDV를 이용하여 측정한 실험결과와 비교하기 위해서 동일한 조건(레이놀즈수 4,229, 8,920, 12,532, 17,491)으로 하였다.

수치계산의 최대허용치(maximum residual tolerance)는 0.0005를 사용하였으며, 각 계산에서의 최대반복회수는 300번을 넘지 않았다. 입구 및 출구 단면에서의 계산된 속도값들을 3차원 인터플레이팅 함수로 적분하여 유량을 계산하였다.

Fig. 1은 계산에 사용된 모델을 나타낸 것으로서 입·출구 단면의 치수는  $6 \times 20 \text{ cm}$ 이고, 주덕트의 길이와 각 분지덕트의 길이는  $51 \text{ cm}$ 이다. 주덕트 입구에서부터 제1분지덕트 사이의 길이는  $19 \text{ cm}$ , 각 분지덕트 사이의 길이는  $20 \text{ cm}$ 로 구성하였다. 블록의 종횡비(Aspect Ratio)는 블록의 길이( $L$ )를 블록의 높이( $H$ )로 나누어 무차원화시

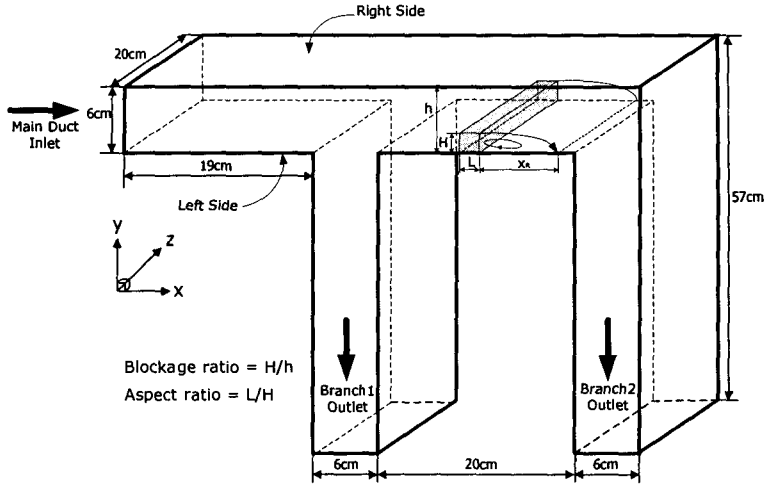


Fig. 1 Computational domain and nomenclature.

킨 값이고, 블록의 봉쇄율(Blockage Ratio)은 블록의 높이( $H$ )를 주덕트의 높이( $h$ )로 나누어서 무차원화시켰다. 주덕트의 입구를 통하여 유입된 공기는 두 개의 출구로 빠져나가게 되는데 주덕트의 내부에 설치된 블록으로 인하여 제1분지덕트를 지난 공기는 박리되었다가 다시 주덕트의 벽면에 재부착하게 된다. 이때 재부착 거리( $X_R$ )는 블록 끝단에서 주덕트의 벽면에 재부착되는 지점까지의  $x$ 축 방향 거리이다.

Fig. 2는 입구의 속도가 0.704 m/s일 때 제1분지덕트 출구에서의 평균 속도를 격자수의 변화에 따라 계산한 값이다. 격자수가 약 80,000개 이상이 되면 출구에서의 속도값이 일정하게 안정되었으며 따라서 본 연구의 덕트 시스템 모델에 적용한 총 격자수는 81,000~90,000개로 하였다.

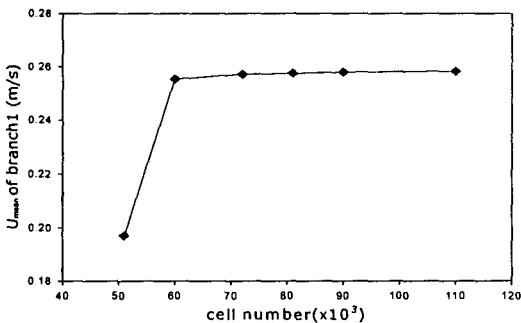


Fig. 2 Mean velocity of branch1 outlet with cell numbers.

### 3. 해석결과 및 고찰

#### 3.1 블록의 위치변화에 따른 유동특성

실험에 의해 측정된 값과 비교하기 위하여 블록을 설치하지 않은 단순 직사각형 덕트 시스템 내부의 속도분포, 각 분지덕트 출구에서의 평균 속도와 유량분배를 계산하였는데 각 분지덕트 내의 속도분포는 레이놀즈수의 증가에 관계없이 거의 일정하였다.

Fig. 3은 본 연구의 계산과 동일한 조건에서 수행된 실험에 의해 측정된 값<sup>(13)</sup>으로서 레이놀즈수의 변화에 관계없이 오차범위 약 10% 이내에서

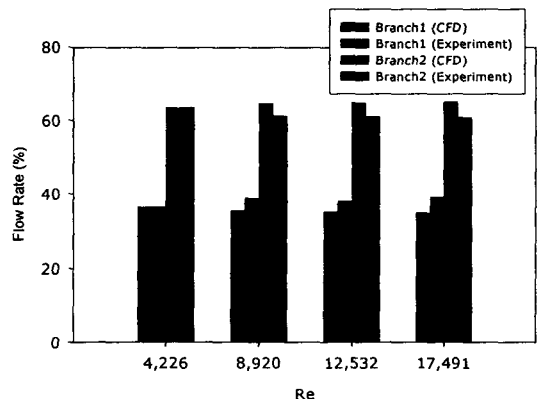


Fig. 3 Flow rate in each branch for different Reynolds number.

Table 1 Computed and experimented flow rate at each branch (Unit: m<sup>3</sup>/h)

Re No. at inlet	CFD		Experiment (ref. 12)	
	Branch 1	Branch 2	Branch 1	Branch 2
4,226	11.1	19.3	11.4	19.9
8,920	22.7	41.4	25.7	40.6
12,532	31.3	57.7	35.1	57.1
17,491	47.6	81.8	51.4	79.5

계산결과와 잘 일치하고 있음을 보여준다. 제1분지덕트로 입구유량의 37.7%, 제2분지덕트로 62.3%가 평균적으로 흐르고 있음을 알 수 있다. 또한 레이놀즈수가 변하더라도 각 분지덕트로 분배되는 유량비율이 거의 일정하다.

Table 1은 레이놀즈수의 변화에 따라 각 분지덕트 출구를 통하여 유출되는 공기의 유량(m<sup>3</sup>/h)을 나타낸 것으로서 유량은 분지덕트 출구에서의 평균 속도에 분지덕트 출구 단면적을 곱하여 구하였다.

Fig. 4는 주덕트 입구에서의 레이놀즈수가 4,226일 때 z=10cm인 x-y 단면에서의 정압분포를 나타낸 것이다. 이때 압력값은 분지덕트 출구에서의 압력을 기준압력 0으로 하여 계산한 상대 압력값이다. 주덕트 내의 정압은 유입구로부터 점차적으로 감소하다가 분기부 영역에서는 큰 압력의 변화를 보이고 있다. 분기부 영역의 Downstream corner에서는 유동의 정체로 인하여 정압이 재취득되며, Upstream corner에서는 주덕트에 평행하게 진행되던 공기의 일부가 덕트 벽면에서 박리되어 분지덕트로 유입되는 현상으로 인하여 역류가 발생하여 압력이 급격히 하강한다. 또한 분기가 이루어지는 영역에서는 급격한 단면적 확대로 인한 디퓨저 효과와 하류 코너에서의 유동의 정체로 인하여 압력이 급격히 상승하게 된다. 분지덕트 입구에서는 분기 영역에서 발생하는 유

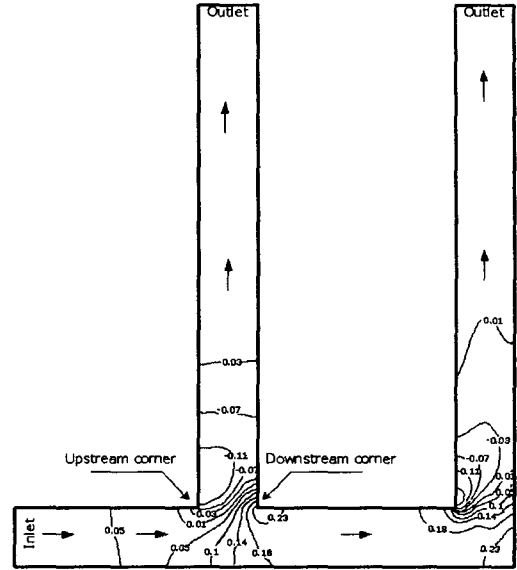
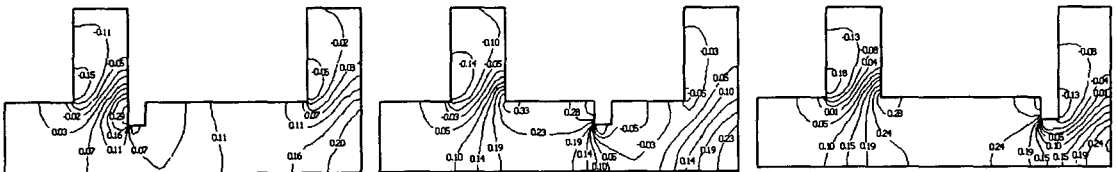


Fig. 4 Distribution of static pressure (Pa) at Reynolds number of 4,226.

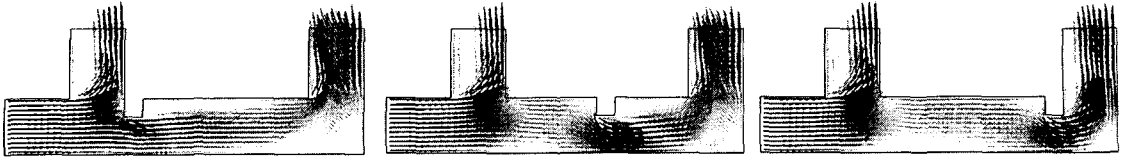
동의 역류로 인하여 압력손실이 크게 발생하지만 출구방향으로 진행하면서 역류가 점차적으로 소실되므로 압력은 점차적으로 회복되어진다.

Fig. 5와 Fig. 6은 덕트 내의 단면적 변화를 주기 위하여 중횡비가 0.5, 봉쇄율이 0.33인 사각블록을 분지덕트쪽 덕트 벽면(left side)에서 위치를 변화하여 레이놀즈수 4,226의 조건에서 계산한 압력분포와 속도벡터를 도시한 것이고, Fig. 9(a)는 Fig. 5와 Fig. 6의 조건변화에 따른 각 분지덕트 출구의 유량분배율의 계산결과를 나타낸 것이다. 사각블록을 지나 유동의 박리가 생성되어 재순환 영역이 존재하며 압력손실이 증가함을 알 수 있다. 세 경우 모두 블록으로 인한 유동간섭 현상이 발생하는데 Case 3의 경우 유동의 간섭이 가장 크게 일어나 제2분지덕트로 유입되는 유량이 적어져 유량분배가 가장 양호하다.



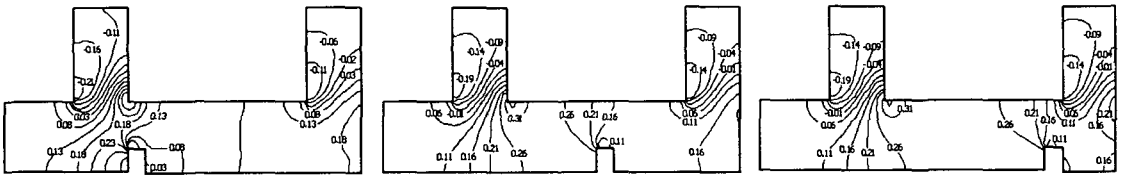
Case 1 : At the back of branch1 Case 2 : Between branch 1 and branch 2 Case 3 : In front of branch 2

Fig. 5 Static pressure (Pa) distribution in a part of the rectangular duct system (left side) [Re=4,226].



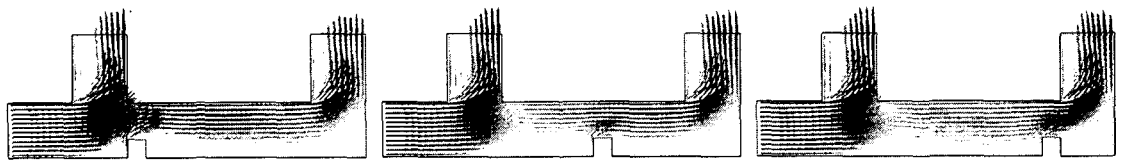
Case 1 : At the back of branch 1 Case 2 : Between branch 1 and branch 2 Case 3 : In front of branch 2

Fig. 6 Velocity vector in a part of the rectangular duct system (left side) [Re=4,226].



Case 1 : At the back of branch 1 Case 2 : Between branch 1 and branch 2 Case 3 : In front of branch 2

Fig. 7 Static pressure (Pa) distribution in a part of the rectangular duct system (right side) [Re=4,226].

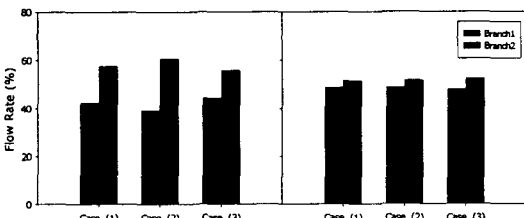


Case 1 : At the back of branch 1 Case 2 : Between branch 1 and branch 2 Case 3 : In front of branch 2

Fig. 8 Velocity vector in a part of the rectangular duct system (right side) [Re=4,226].

Fig. 7과 Fig. 8은 종횡비가 0.5, 봉쇄율이 0.33인 사각블록을 분지덕트 반대쪽의 덕트 벽면(right side)에 설치한 것으로 위치를 변화하여 레이놀즈 수 4,226의 조건에서 계산한 압력분포와 속도벡터를 도시한 것이고, Fig. 9(b)는 Fig. 7과 Fig. 8의 조건에서 블록의 위치변화에 따른 분지덕트 출구의 유량분배율의 계산결과를 나타낸 것이다. 사각블록으로 인해 주덕트 내의 유동이 심한 저항을 받게 되며, 분지덕트쪽의 벽면에 블록을 설치

한 경우보다 재순환 영역이 더 확대되고 제1분지덕트 입구영역에서의 정압이 더 증가함을 알 수 있다. 따라서 블록을 분지덕트 반대쪽의 벽면에 설치할 경우 제1분지덕트로 유입되는 유량이 증가하게 되어 전체적으로 유량분배 효과가 더 양호해진다. 각 분지덕트 출구에서의 유량분배율은 위치에 상관없이 유량분배가 거의 일정한 것으로 보아 동일한 유동 단면적 조건의 흐름에서도 덕트 내 블록의 설치위치에 따라 덕트 내부의 유동 패턴이 변화되어 분지덕트 출구에서의 유량분배 효과가 달라짐을 알 수 있다.



(a) Left side (b) Right side

Fig. 9 Flow distribution for different location of a blockage.

### 3.2 블록의 형상변화에 따른 유동특성

#### 3.2.1 종횡비의 변화

Fig. 10은 블록을 분지덕트쪽 벽면에 설치할 경우 블록의 종횡비(aspect ratio =  $L/H$ ) 변화에 따른 출구에서의 유량분배율을 계산한 것이다. 블록의 높이( $H$ )를 2 cm로 고정시키고 블록의 길이( $L$ )를 0, 1, 2, 3 cm로 변화시켰으며, 블록의 길

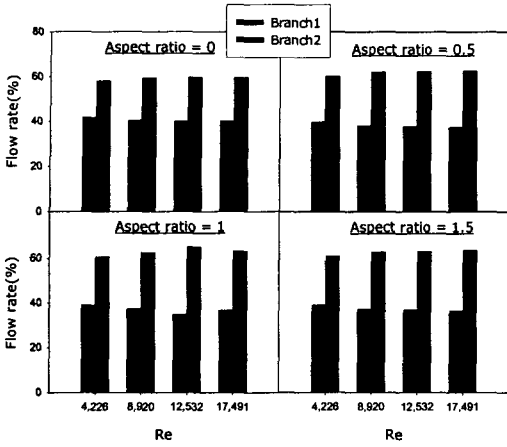


Fig. 10 Flow rate in each branch in accordance with variation of the aspect ratio.

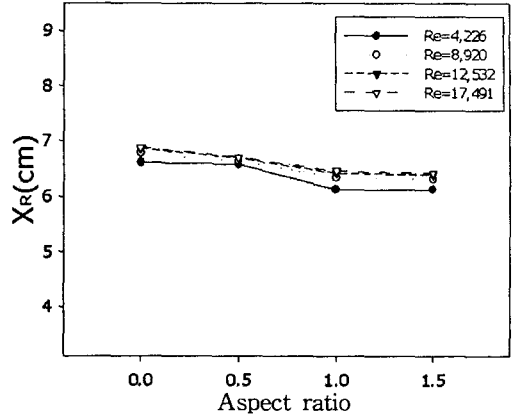


Fig. 12 Reattachment location on increase of the aspect ratio.

이가 0일 때는 배플(zero thickness wall) 조건이다. 각각의 경우 유량분배율은 모두 레이놀즈수의 변화에 무관하였으며 중횡비의 변화에도 무관하게 일정함을 알 수 있다.

Fig. 11은 주덕트 입구에서의 레이놀즈수가 4,226일 때 분지덕트쪽 주덕트(main duct) 벽면에 중횡비가 0.5인 블록을 설치할 경우 블록 이후의 축 방향 속도분포를 나타낸 그래프이다. 블록 이후에 재순환 영역이 존재함을 확인할 수 있으며 재순환 영역의 중간지점에서 최대 역방향 속도가 존재함을 확인할 수 있다. 재부착 지점은 벽면의 아주 가까운 곳에 속도가 0이 되는지의 여부로 정하였다.

Fig. 12는 블록의 중횡비 변화에 따른 재부착 지점을 각 레이놀즈수에 대하여 도시한 것이다. 중횡비가 증가함에 따라 재부착 지점은 6~7cm 사이에서 거의 일정하게 나타났고, 레이놀즈수가 증가함에 따라라도 재부착 지점이 0.5cm 범위 내

에서 일정하게 나타남을 알 수 있다.

### 3.2.2 봉쇄율의 변화

Fig. 13은 분지덕트쪽 벽면의 중앙에 블록을 설치하여 봉쇄율의 변화에 따른 출구에서의 유량분배율을 나타낸 것이다. 블록의 길이를 2cm로 고정시키고 블록의 높이를 1, 2, 3, 4cm로 변화시켰다. 봉쇄율이 0.17인 경우는 블록이 없는 단순덕트와 거의 동일한 결과를 보이고, 봉쇄율이 더 증가하게 되면 제2분지덕트의 유량이 감소하다가 봉쇄율이 0.5일 때 양 분지덕트의 유량분배가 50% 정도로 균일하게 이루어지며 봉쇄율이 0.67이 되면 오히려 제1분지덕트의 유량이 더 증가하게 됨을 알 수 있다.

따라서 본 연구에서는 봉쇄율이 0.5인 경우 유량분배의 효과가 가장 균일하게 나타나고 있다. 봉쇄율이 0.17, 0.33인 경우에는 제2분지덕트로 유입되기 전에 주덕트의 벽면에서 재부착이 이루어

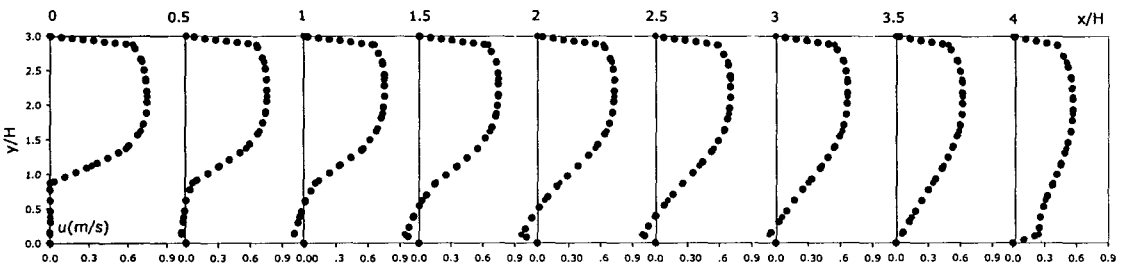


Fig. 11 Streamwise mean velocity profiles at selected locations for block.

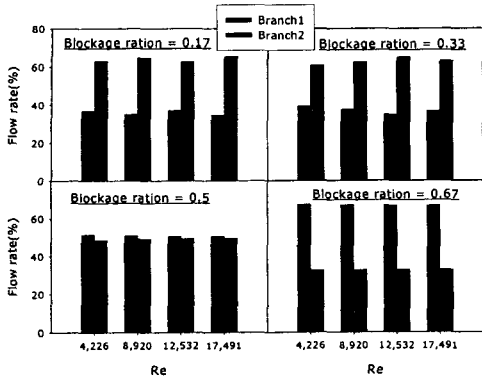


Fig. 13 Flow rate in each branch in accordance with variation of the blockage ratio.

저 제2분지덕트로 많은 유량이 배출되며, 봉쇄율이 0.5, 0.67인 경우에는 재순환 영역이 더 증가하게 되므로 분지덕트의 벽면에서 재부착이 이루어지지 않아 봉쇄율이 0.17, 0.33인 경우보다 제2분지덕트로의 유량분배가 상대적으로 감소하는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 14는 블록을 지난 주덕트 벽면 임의의 지점에서 측 방향 속도를 봉쇄율의 변화와 레이놀즈수에 대하여 도시한 것이다. 이 지점은 봉쇄율이 0.33일 때 재부착 지점이다. 봉쇄율이 0.17인 경우는 재부착 지점을 이미 지났으므로 측 방향 속도가 양의 값을 갖지만 봉쇄율이 0.5인 경우와 0.67인 경우에는 재부착이 이루어지지 않아서 측 방향 속도가 음의 값을 갖는다. 따라서 봉쇄율이 커지게 되면 재순환 영역이 커지게 되어 제2분지덕트로 유입되는 유동에 더 큰 간섭을 일으키게 되고 이로 인하여 제2분지덕트의 유량분배율이 감소하게 된다. 또한 봉쇄율이 0.33보다 작은 경우에는 유동이 재순환 영역 내에 있으므로 측 방향

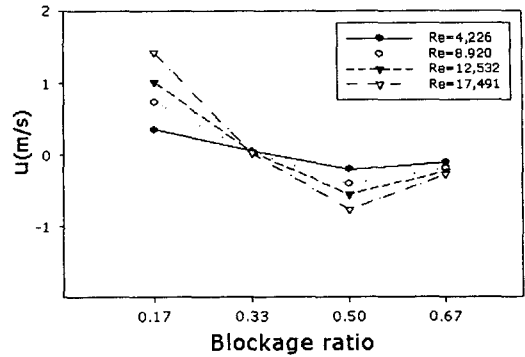


Fig. 14 Mean velocities near the left side wall of main duct for the different blockage ratio.

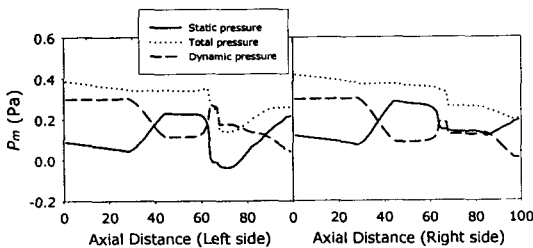
속도가 레이놀즈수에 비례 하지만, 봉쇄율이 0.33 보다 커지면 유동이 재순환 영역을 이미 지났으므로 측 방향 속도가 레이놀즈수에 반비례한다.

### 3.3 압력분포

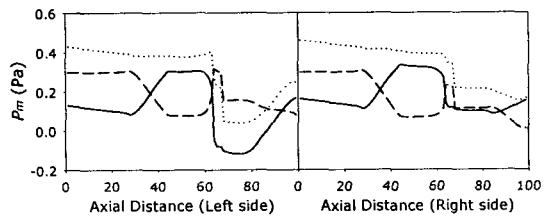
Fig. 15는 분지덕트 사이에 블록을 설치한 경우 주덕트의 측 방향에 따른 평균 압력(전압, 정압, 동압)을 나타낸 것이다. 평균 압력( $P_m$ )은  $y-z$  단면을 구성하고 있는 셀들에 대한 평균값들이며, 계산에 이용된 식은 다음과 같다.

$$P_m = \frac{\sum (p \cdot \Delta A)}{\sum \Delta A} \quad (7)$$

Fig. 15의 측 방향거리는 주덕트의 입구에서부터  $x$ 축 방향에 대한 셀의 순번으로 제1분지덕트는 28~43번째 셀에 위치하고, 블록은 64~67번째 셀에 위치하며, 제2분지덕트는 84~99번째 셀



(a)  $L=2$  cm,  $H=2$  cm



(a)  $L=2$  cm,  $H=3$  cm

Fig. 15 Pressure distribution on the axial distance.



에 위치한다. 전압은 관 마찰손실의 영향으로 점차적으로 감소하다가 블록이 존재하는 영역에서는 동적 손실로 인하여 급격하게 감소하게 된다. 분지덕트가 존재하는 영역에서는 단면이 급확대되고 유동의 방향이 전환되므로 동압은 급격하게 감소하지만 정압은 증가하게 된다. 블록이 존재하는 영역에서는 단면 급축소의 영향으로 동압은 급격하게 증가하지만 정압은 급격하게 감소하게 된다. 만약 각 분지덕트에서 동일한 유량분배를 얻기 위해서 분지덕트 사이에 동일한 형상의 블록을 설치한다면, 분지덕트쪽 벽면(left side)에 블록을 설치한 경우가 더 큰 압력강하를 수반하게 된다. 이것은 제1분지덕트를 지나는 유동의 주흐름이 분지덕트 반대쪽의 벽면(right side)에 있기 때문이다. 또한 블록 전후의 압력 강하량의 1/2만큼의 압력을 제2분지덕트에서 재취득해야 각 분지덕트에서 동일한 유량이 나오게 된다.

3.4 난류 운동에너지

Fig. 16은 주덕트 입구에서의 레이놀즈수가 4,226 일 때 블록의 봉쇄율의 변화에 따른 주덕트와 분지덕트에서의 난류 운동에너지 분포를 나타내고 있다. 난류 운동에너지는  $x-y$  단면의 셀들을  $z$  방향으로 평균하여 구했다. 난류 운동에너지는 유동의 재순환이 발생하는 영역에서 eddy의 생성으로 인하여 대체적으로 큰 값을 가지게 되므로 주덕트보다는 분지덕트에서 더 크게 나타남을 알 수 있다. 또한 난류 운동에너지는 제2분지덕트보다 제1분지덕트에서 더 크게 나타나는데, 이는 입

구로부터 주덕트를 따라 이동하던 공기가 upstream coner에서 역압력 구배에 의하여 박리되고 제1분지덕트로 방향전환을 하면서 발생시키는 재순환 영역이 제2분지덕트에서 발생하는 재순환 영역보다 크기 때문이다. 제1의  $y=0.2$ m인 영역에서 난류 운동에너지는 (a)의 경우  $0.016 \text{ m}^2/\text{s}^2$ , (b)의 경우  $0.017 \text{ m}^2/\text{s}^2$ , (c)의 경우  $0.018 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 로 증가하게 되는데, 이것은 봉쇄율의 증가하면서 재순환 영역이 더 커지기 때문이다. Downstream coner에서 난류 운동에너지는 (a)의 경우  $0.013 \text{ m}^2/\text{s}^2$ , (b)의 경우  $0.015 \text{ m}^2/\text{s}^2$ , (c)의 경우  $0.02 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 로 봉쇄율이 커질수록 커지게 된다. 이것은 봉쇄율이 커짐에 따라 제1분지덕트로 유입되는 공기의 양이 많아지게 되어 coner에 부딪혀 발생하는 eddy가 증가하여 난류 운동에너지가 증가하는 것으로 사료된다. 또한 (a)와 비교해 볼 때 (b), (c)는 블록을 기점으로 난류 운동에너지의 변동이 커지게 되고, 제2분지덕트의 입구부분인  $x=0.41 \text{ mm}$ 인 영역에서 (a)는  $0.005 \text{ m}^2/\text{s}^2$ , (b)는  $0.009 \text{ m}^2/\text{s}^2$ , (c)는  $0.015 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 의 난류 운동에너지를 갖게 된다. (a)와 달리 (b), (c)의 경우에는 블록이 존재하기 때문에 블록의 급축소 영역으로 유입되는 공기는 블록을 통과하면서 덕트의 상하 벽면의 점성력의 영향으로 경계층을 형성하게 된다. 그리고 블록의 모서리에서 역압력 구배로 인하여 박리가 발생하여 블록 이후에 자유 전단층을 형성시킨다. 이때 공기의 일부는 재순환 영역으로 유입되어 더 큰 난류를 형성시키게 되는데 상대적으로 봉쇄율이 가장 큰 (c)의 경우 재순환 영역으로 유입되는 공기량이 많아지므로 난류 운동

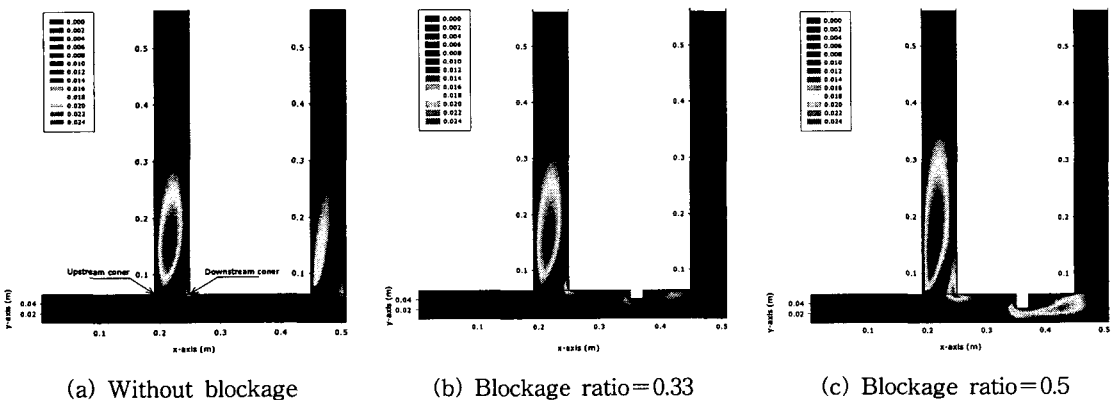


Fig. 16 Mean turbulent kinetic energy distribution (Unit:  $\text{m}^2/\text{s}^2$ ).

에너지가 가장 크게 나오는 것으로 생각된다. 그리고 역방향 속도가 최대가 되는 재순환 영역의 중간 지점에서 난류 운동에너지가 최대로 나오는 것을 확인할 수 있으며 봉쇄율이 가장 큰 (c)에서 난류 운동에너지가 가장 크게 나타남을 확인할 수 있다.

#### 4. 결 론

두 개의 수직 분지덕트가 있는 직사각형 덕트 시스템 내의 유동단면적을 변화시키기 위해서 블록을 설치하고, 블록의 형상변화에 따른 덕트 내부의 유동분포 및 출구에서의 유량분배를 수치적으로 계산한 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 본 연구에서 수행한 조건 하에서는 직사각형 덕트 시스템의 수직 분지덕트 출구에서의 평균 속도 및 유량분배율은 레이놀즈수에 관계없이 거의 일정하였으며, 덕트 내의 유동패턴도 유사한 경향을 가짐을 알 수 있었다.

(2) 덕트 내의 유동단면 변화를 주기 위하여 블록을 설치할 경우에는 덕트 내의 유동패턴을 고려해야 하며, 블록의 설치위치에 따른 유동간섭의 결과가 분지덕트 출구에서의 유량분배율에 지배적인 영향을 주었다.

(3) 블록의 봉쇄율을 변화시켰을 경우, 재순환 영역의 구조가 각 분지덕트로의 유량분배에 지배적인 영향을 주며, 본 연구에 적용된 모델에서는 봉쇄율이 0.5인 경우에 균일한 유량분배를 얻을 수 있었다. 또한 블록의 중형비 변화에 따른 유동구조는 유사한 경향을 나타냈으며, 유량분배에는 큰 영향을 미치지 못하였다.

(4) 본 연구 시스템의 각 분지덕트에서 동일한 유량분배를 얻으려면 블록으로 인한 압력강하의 1/2만큼을 제2분지덕트에서 재취득해야 한다.

#### 참고문헌

- 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.
- Shao, L. and Riffat, S. B., 1997, CFD for prediction of k-factors of duct fitting, *International Journal of Energy Research*, Vol. 19, pp. 675-681.
- Arkin, H. and Shitzer, A., 1979, Computer aided optimal life-cycle design of rectangular air supply duct systems, *ASHRAE Transactions*, Vol. 85, Part 1, pp. 197-213.
- Gan, G. and Riffat, S. B., 2000, Numerical determination of energy losses at duct junctions, *Applied Energy*, Vol. 67, pp. 331-340.
- 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.
- Hinchcliffe, S. and Haidar, N., 1998, CFD investigation into LD100 HVAC ducting system, *Technical Review*, pp. 145-152.
- 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.
- 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.
- Tohru, Komoriya, 1991, Numerical simulation of the flow in a vehicle passenger compartment using finite volume method, *JSAE Review*, Vol. 12, No. 3, pp. 36-41.
- Kim, M. H., Chyun, I. B. and Lee, D. H., 2002, A numerical analysis on the optimum design of a duct with multiple outlets in a medium bus, *KSAE*, Vol. 10, No. 4, pp. 94-107.
- 2004, STAR-CD Users' Manual, Ver. 3.22, Computational Dynamics Ltd.
- Jeong, S. J., Ryu, S. Y. and Kim, T. H., 1996, Numerical analysis of three dimensional turbulent flow in a HVAC duct, *KSAE*, Vol. 4, No. 4, pp. 118-129.
- 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 the SAREK*, Vol. 14, No. 9, pp. 766-773.