

## 복합 덕트시스템의 유량분배에 관한 1차원 해석의 적합성

### Adaptability of one-dimensional analysis for the flow distribution of a complex duct system

이 승 철\*, 이 재 현\*\*  
Seung-Chul Lee, Jae-Heon Lee

**Key words:** Flow distribution(유량분배), Extended T-method(확장 T-method), Loop duct(환상 덕트), Complex duct system(복합 덕트시스템)

#### ABSTRACT

The flow distribution characteristics in a complex duct system have been investigated in this paper by three means, namely experimental measurement, numerical simulation and the Extended T-method analysis. While the exit flow rates predicted by the three-dimensional CFD calculation and those given by the experiment show a close agreement, the results from the one-dimensional Extended T-method are found to differ from the experiment by -22.2% to 26.3% for the various exits. These discrepancies may be attributed to the underlying limitation concerning the fitting loss coefficients, which assume that the flow in front of the fittings is fully developed. It is proposed that, in order to analyse the three-dimensional flow distributions in a complex duct system by one-dimensional analysis such as the Extended T-method, further improvements to the fitting loss coefficients should be made.

#### 기 호 설 명

$A$  : 출구면적 [ $m^2$ ]  
 $C$  : 피팅 손실계수  
 $C_1, C_2, C_\mu$  : 난류 상수  
 $G$  : 난류 생성항  
 $I$  : 난류강도  
 $k$  : 난류운동에너지 [ $m^2/s^2$ ]  
 $l$  : 혼합거리 [m]  
 $p$  : 압력 [Pa]  
 $Q$  : 유량 [ $m^3/h$ ]

$u, v, w$  : x, y, z방향 공기속도 [m/s]  
 $x, y, z$  : x, y, z방향 좌표값

#### 그리스 문자

$\epsilon$  : 난류운동에너지 소산율 [ $m^2/s^3$ ]  
 또는 오차 [%]  
 $\rho$  : 밀도 [ $kg/m^3$ ]  
 $\sigma_k, \sigma_\epsilon$  : 난류상수  
 $\mu_t$  : 난류 점성계수 [ $kg/(m \cdot s)$ ]  
 $\tau_{ij}$  : 전단응력 [ $kg/(m \cdot s^2)$ ]

\* 정회원, 한양대학교 대학원  
 \*\* 정회원, 한양대학교 기계공학부

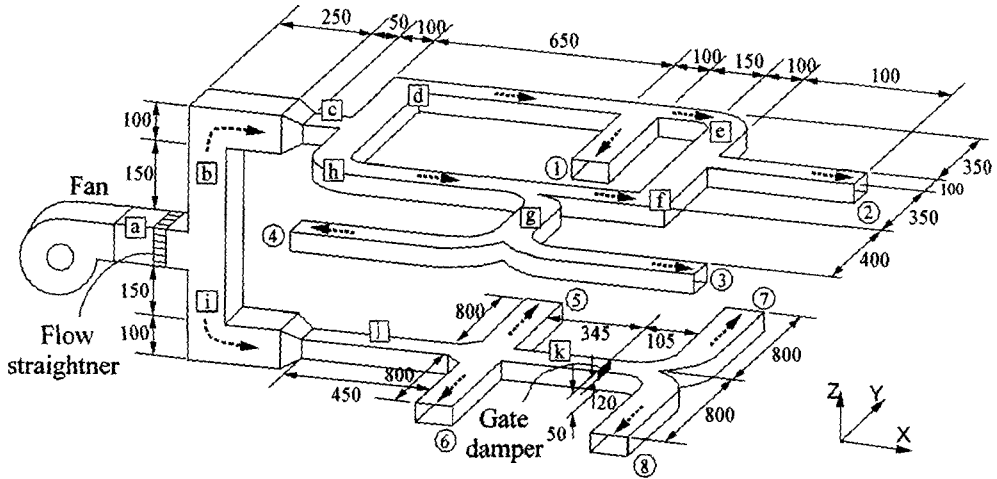


Fig. 1 Schematic of the model duct system in present investigation. (unit:mm)

CFD	: 전산유체역학
d	: dynamic
ET	: 확장 T-method
exp	: 실험
in	: 유입

## 1. 서 론

덕트시스템은 건물내부에 냉·난방 및 환기를 필요로 하는 모든 장소에 그물망처럼 연결되어 하나의 공급원 또는 다수의 공급원으로부터 필요로 하는 장소에 적정량의 공기를 공급 또는 유출시킨다.

덕트설계의 초기과정에서는 대부분 등마찰법에 근거하여 개략적인 덕트시스템을 형성시킨다. 그러나 실제 덕트시스템에서 원하는 장소에 필요한 만큼의 유량을 공급시키는 것은 환상 덕트계의 존재 등 덕트시스템의 다양화에 따른 복잡한 유동특성과 압력분포의 불균일로 인하여 아주 어려운 문제이다. 더구나 건물 시공시 잦은 설계변경 등으로 실제 설계도면과 상이한 덕트시스템이 시공되는 경우도 종종 나타난다.

설계자는 상기 여러 가지 영향을 고려한 후 적정 덕트시스템을 확정하여 각 토출구에 유출되는 실제유량과 설계유량을 일치시키도록 노력한다. 따라서 실제 시공을 위하여 확정된 덕트시스템에서의 유량분배 예측을 위한 정확하고 간편한 해석도구가 요구되고 있다.

덕트시스템의 유량분배를 해석하기 위해서는 실험을 통해 직접 각 덕트구간의 유량을 측정하는 방법, 전산유체역학(CFD, Computational Fluid Dynamics) 기법을 도입하여 3차원 Navier-Stokes 방정식을 푸는 방법, 그리고 1차원 Darcy-Weisbach 방정식을 이용한 T-method 시뮬레이션<sup>(1)</sup> 등이 있다. 실험에 의한 방법은 실제값을 얻을 수 있어 가장 신뢰할 수 있지만 많은 시간과 비용을 필요로 한다. 3차원 CFD에 의한 방법은 실험보다 적은 시간과 비용으로 상세한 정보를 예측할 수 있다는 장점을 가지고 있으나 실용적인 덕트시스템에 응용하기 위해서는 이 방법 또한 많은 노고를 필요로 한다.

이에 비하여 확장 T-method는 복잡한 덕트시스템을 간단하게 해석하기 위한 1차원 도구로서, 실험 및 3차원 CFD 보다 훨씬 적은 노력으로 각 출구의 유량을 예측할 수 있다는 장점을 가지고 있으므로 실용설계에 널리 이용되고 있다.

Shao와 Riffat<sup>(2)</sup> 그리고 Riffat와 Gan<sup>(3)</sup>은 상용 CFD 코드인 Fluent를 이용하여 여러가지 덕트 피팅(fitting)에서의 부차손실계수를 예측하고 CIBSE (The Chartered Institution of Building Services Engineers)와 ASHRAE(American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers)에서 제시한 실험값과 비교하였다. Smith 등<sup>(4)</sup>은 실험과 수치해석을 통해 두 개의 덕트피팅이 연계되어있는 경우 각각의 피팅 손실계수의 합과 하나로 연계된 피팅 손실계수가 다름을 확인하였다. 또한 이재현<sup>(5)</sup> 등은 단순 T-

method<sup>(6,7)</sup>를 확장시켜 환상 덕트시스템(loop duct system)에 적용 가능한 확장 T-method (Extended T-method)를 제안하고 실제 건물에 적용한 바 있다.

본 연구에서는 최근 에너지 절약을 위하여 VAV(Variable Air Volume) 공조방식에서 많이 사용되고 있는 환상 덕트와 단순 덕트가 조합된 복합 덕트시스템 모델에 대해 각 덕트구간에서의 유량분배 특성을 실험적 방법, 3차원 CFD 방법 및 1차원 확장 T-method 방법으로 해석하고 이 결과들을 비교 분석하여 1차원 해석의 적합성을 살펴보고자 한다.

## 2. 모델 덕트시스템

본 연구에서 선정한 모델 덕트시스템에 대한 치수와 함께 개략도를 Fig. 1에 나타내었다.

좌표계는 z방향을 수직방향 그리고 x, y방향을 수평면에서의 방향으로 선정하였다. 모델 덕트시스템에 사용된 피팅은 엘보(elbow) 6개, 와이(wye) 3개, 티(tee) 4개, 크로스(cross) 1개 및 수축부(transition) 2개로서 모두 16개이다. 또한 송풍기 출구를 지나 덕트시스템 유입부분에 균일한 유동을 얻기 위해서 유동균일화장치(flow straightener)를 배치하였으며 하층부 취출구의 유출유량 균형을 위하여 크로스 피팅으로부터 유동방향으로 345 mm 지점에 게이트 댐퍼(gate damper)를 설치하여 유로면적을 60%로 감소시켰다. 복합 덕트시스템 유입구에서 환상 덕트 및 단순 덕트의 각 수축부 이전까지의 덕트 단면적은 150 mm×100 mm로 동일하며, 각 수축부를 지난 이후의 환상 덕트와 단순 덕트의 단면적은 100 mm×50 mm로 동일하다. 그림에서 [A]~[E] 및 ①~⑧은 각각 덕트구간 및 취출구 번호를 의미하고 점선 화살표는 공기 유동방향을 가리킨다. 3차원 CFD 방법 및 1차원 확장 T-method에 의한 계산에서 유입구는 Fig. 1의 유동균일화장치의 출구위치로 정하였고 유출구는 8개의 취출구로 정하였다.

상층부의 환상 덕트에서는 주덕트가 폐회로로 형성되어 있으므로 각 덕트구간의 유동방향이 일률적으로 정해지지 않으며, 특히 취출구③, ④의 상류영역에서는 복잡한 3차원 유동으로 인해 특이한 유량분배특성이 예상된다. 하층부의 단순 덕트에서는 크로스 피팅과 티(tee) 피팅 사이에

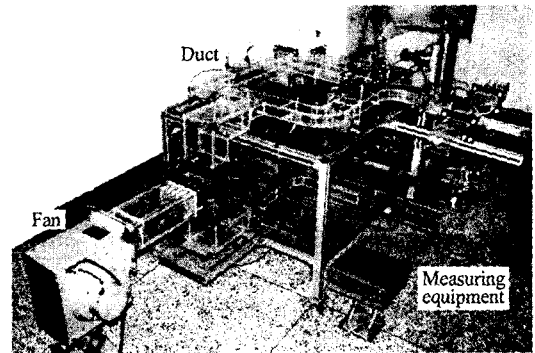


Fig. 2 Photograph of the experimental device for the model duct system.

유동 저항체 역할을 하는 게이트 댐퍼가 설치되어 있어, 이로 인해 각 취출구 마다 상이한 유량 분배특성을 보일것으로 예측된다.

본 연구에서는 이러한 특성들을 가지는 환상 덕트 및 단순 덕트가 복합된 덕트시스템의 유량 분배특성을 알아보고자 상기 두덕트가 하나의 송풍기에 연결되어 있는 모델 덕트시스템을 해석 모델로 선정하였다. 덕트시스템의 시작부에는 정격 정압 20 mmAq, 정격 유량 20 m<sup>3</sup>/min인 다익형 송풍기가 설치되어 있으며 20℃의 공기가 송풍기 출구에서 분리되어 상층부의 환상 덕트와 하층부의 단순 덕트를 따라 유동하여 8개의 취출구를 통하여 유출된다.

## 3. 실험적 방법

모델 덕트시스템과 동일하게 제작한 실험장치의 사진을 Fig. 2에 나타내었다. 실험장치는 덕트 내부에 공기를 공급하는 송풍기, 공기의 유동로인 덕트 및 유량측정부로 각각 구성되어 있다.

각 취출구에서의 유량측정 방법은 ANSI/ASHRAE Standard 111-1988<sup>(8)</sup>에 의거하였으며 실내온도를 20℃로 유지한 상태에서 정상상태의 유동을 얻기 위해 송풍기를 30분 가동시킨 후 수행하였다. 유량은 피토크관을 3차원 자동 이송장치에 장착하여 하나의 출구단면에 대해 25개 위치의 동압(dynamic pressure)을 각각 측정된 후 다음 식을 이용하여 구하였다.

$$Q = \frac{A}{25} \sum_{i=1}^{25} \sqrt{\frac{2 \cdot p_d}{\rho}} \quad (1)$$

윗식에서  $Q$ ,  $p_d$ ,  $\rho$  및  $A$ 는 각각 공기의 유량, 동압, 밀도 및 덕트 단면적이다.

#### 4. 3차원 CFD 방법

##### 4.1 지배방정식 및 경계조건

복합 덕트시스템의 유동은 3차원 난류 정상상태 비압축성 유동으로 가정하였으며 이에 대한 지배방정식은 다음과 같다.

연속 방정식 ;

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (2)$$

운동량 방정식 ;

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_i) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (3)$$

난류 운동에너지 방정식 ;

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}) \frac{\partial k}{\partial x_j} + G - \rho \epsilon \quad (4)$$

난류 운동에너지 소산율 방정식 ;

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon}) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} + \frac{\epsilon}{k} (C_1 G - C_2 \rho \epsilon) \quad (5)$$

여기서  $u$ ,  $p$ ,  $\rho$ ,  $\mu$ ,  $k$  및  $\epsilon$ 은 각각 공기의 속도, 압력, 밀도, 층류 점성계수, 난류 운동에너지 및 난류운동에너지 소산율이며 전단응력  $\tau_{ij}$ 는 다음과 같다.

$$\tau_{ij} = -(\mu + \mu_t) \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (6)$$

상기식 (4)와 (5)는 난류를 해석하기 위한 표준  $k-\epsilon$  방정식<sup>(9)</sup>으로 이식들에 포함된 난류점성계

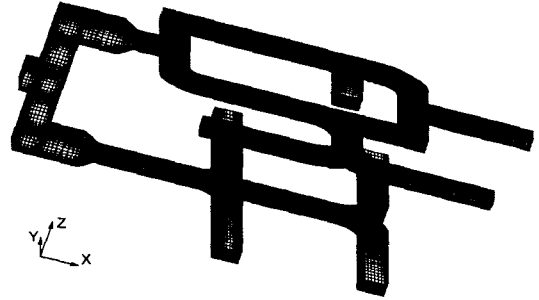


Fig. 3 Computational mesh for three-dimensional CFD calculation of the model duct system.

수  $\mu_t$ , 난류 생성항  $G$  및 난류상수값들( $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_\mu$ ,  $\sigma_k$ ,  $\sigma_\epsilon$ )은 각각 다음과 같다.

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\epsilon} \quad (7)$$

$$G = \mu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (8)$$

$$C_1 = 1.44, \quad C_2 = 1.92, \quad C_\mu = 0.09, \\ \sigma_k = 1.0, \quad \sigma_\epsilon = 1.22 \quad (9)$$

덕트시스템 유입구의 입구조건으로서는 덕트 단면에 수직한 균일 유입속도( $u_{in}$ )로서 실험에 의해 측정된 10.6 m/s를 부여하였다. 또한 입구에서의 유입 난류운동에너지  $k_{in}$ 와 난류운동에너지 소산율  $\epsilon_{in}$ <sup>(10)</sup>에 대해서는 다음과 같은 식을 사용하였다.

$$k_{in} = \frac{3}{2} (u_{in} \cdot I)^2 \quad (10)$$

$$\epsilon_{in} = C_\mu \frac{3}{4} k \frac{3}{2} / l \quad (11)$$

여기서  $I$ 는 난류강도로서 5%로 간주하였으며,  $l$ 은 혼합길이로서 입구 수력지름(0.067 m)의 10%로 선정하였다.

8개의 유출구에서는 모두 압력경계조건을 사용하였으며 압력값으로는 대기압을 부여하였다. 벽면에서는 점착조건(no-slip condition)을 사용하였으

며, 벽면에 인접한 난류량의 처리를 위해서는 벽 함수(wall function)를 사용하였다.

#### 4.2 수치해석 방법

본 연구에서는 복합 덕트시스템의 유량분배를 해석하기 위하여 상용 CFD 코드인 STAR-CD<sup>(10)</sup>를 사용하였다. 대류항을 계산하기 위해서 상류 차분법(upwind differencing scheme)을 사용하였고 속도장을 얻기 위하여 SIMPLE(Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equation) 알고리즘을 사용하였다. 수렴판정 조건으로는 입구에서의 운동량으로 정규화한 각 cell에서의 운동량 유수의 합과 연속방정식에서 유수의 합이 모두  $10^{-4}$  이하일 때로 정하였다. 계산에 사용한 제어체적의 수는 유동방향을 따라 770개, 유동에 수직방향으로  $10 \times 10$ 개로 하여 모두 77,000개이다. Fig. 3에 본 수치계산에서 채용된 복합 덕트시스템의 격자계를 나타내었다. 계산격자는 Fig. 3에서 보이는 바와 같이 비균일격자를 사용하였으며, 각 피팅과 벽면근처에 조밀하게 배치되었다.

### 5. 1차원 확장 T-method

1차원 확장 T-method는 유동방향이 일률적으로 정해지지 않는 환상식 덕트시스템이 포함된 덕트시스템에서 각 덕트구간에서의 유량 및 압력강하량을 예측하는 방법으로서 다음 세가지 기본 원리를 이용한다.

- 1) 덕트 내의 각 분기점에서 유입유량과 유출유량은 같다.
- 2) 유입구와 유출구를 잇는 가능한 모든 경로에서 압력강하량은 송풍기에 의한 압력상승과 동일하다.
- 3) 송풍기로부터의 유량과 정압상승은 송풍기 성능곡선을 따라 결정되며, 이 곡선과 덕트시스템 저항곡선이 일치되는 상태점에서 송풍기가 운전된다.

1차원 확장 T-method의 상세 이론 및 계산순서는 참고문헌<sup>(5)</sup>에 기술된 바와 같다.

1차원 확장 T-method에 사용된 경계조건은 3차원 CFD 방법과 동일하다.

### 6. 결과 및 토의

#### 6.1 실험 결과

복합 덕트의 유량분배에 대한 실험에 의하면 덕트시스템으로 유입된 공기는 총  $572.2 \text{ m}^3/\text{h}$ 이며, 상층부의 환상 덕트와 하층부의 단순 덕트로 각각  $262.4 \text{ m}^3/\text{h}$ (총 유입유량의 46%) 및  $309.8 \text{ m}^3/\text{h}$ (총 유입유량의 54%)로 분배된다. 상층부의 환상 덕트에는 하층부의 단순 덕트보다 복잡한 유로가 형성되어 큰 압력손실이 존재하므로 적은 유량이 흐르게 된다. 상층부의 환상 덕트로 유입된 공기는 덕트구간[C]를 지나 분기된 후, 덕트구간[D]를 통해  $106.6 \text{ m}^3/\text{h}$ (C의 41%) 그리고 덕트구간[H]를 통해  $155.8 \text{ m}^3/\text{h}$ (C의 59%)로 분배된다.

덕트구간[H]에서의 공기는 취출구①로  $44.8 \text{ m}^3/\text{h}$ (H의 42%)가 유출되고 나머지 유량  $61.8 \text{ m}^3/\text{h}$ (H의 58%)는 덕트구간[G]를 따라 유동하여 취출구②를 통해 유출된다. 한편 덕트구간[H]에서의 유량은 덕트구간[I]를 통하여 취출구③과 ④로 각각  $83.2 \text{ m}^3/\text{h}$ (I의 53%)와  $55.8 \text{ m}^3/\text{h}$ (I의 36%)로 분배되고 나머지 유량  $16.8 \text{ m}^3/\text{h}$ 은 덕트구간[F]를 따라 유동하여 취출구②를 통해 유출된다. 따라서 취출구②를 통해서는 총  $78.6 \text{ m}^3/\text{h}$ (C의 30%)가 유출된다.

하층부의 단순 덕트로 유입된  $309.8 \text{ m}^3/\text{h}$ 의 공기는 덕트구간[J] 및 [K]를 따라 유동하여 일부가 취출구⑤와 ⑥으로 각각  $79.0 \text{ m}^3/\text{h}$ (J의 26%)와  $81.6 \text{ m}^3/\text{h}$ (J의 26%)로 분배되며, 나머지  $149.2 \text{ m}^3/\text{h}$ (J의 48%)의 유량은 덕트구간[L]를 따라 유동하여 취출구⑦과 ⑧을 통해 각각  $75.9 \text{ m}^3/\text{h}$ (L의 24%)와  $73.3 \text{ m}^3/\text{h}$ (L의 24%)로 분배된다.

1차원적인 T-method 혹은 3차원 CFD 방법에서는 일반적으로 덕트 취출면에서의 압력분포를 균일하게 가정하고 그 값으로는 대기압(0 Pa)을 선정한다. 그러나 취출구의 상류 유동특성에 따라 취출단면에서의 압력분포가 균일하지 않는 경우가 있으므로 본 실험에서는 각 취출면의 정압을 측정하였다. 그 결과 대부분 취출구 단면에서  $-0.2 \sim 0.2 \text{ Pa}$ 의 압력분포가 측정되었으며 그 편차는 상류유동이 평행류가 아닌 경우에 더 크게 나타났다.

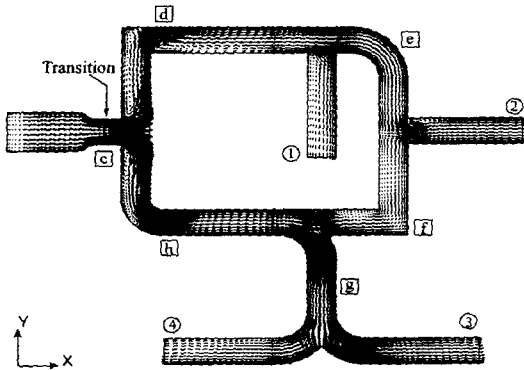


Fig. 4 Velocity vectors at middle plane of the upper loop duct.

### 6.2 3차원 CFD 결과

3차원 CFD 방법에 의한 계산은 IBM Power-server 320 workstation(RAM 40 Mbyte)을 사용하였으며, 수렴조건을 만족하는 해를 얻는 데는 약 52시간의 계산시간이 소요되었다.

3차원 CFD 방법에서 예측된 유량분배는 상층부의 환상 덕트와 하층부의 단순 덕트로 각각  $265.1 \text{ m}^3/\text{h}$ (총 유입유량의 46%) 및  $307.1 \text{ m}^3/\text{h}$ (총 유입유량의 54%)로 나타났다. 상층부 환상 덕트의 유동특성을 관찰하기 위하여 z방향 중간단면 속도벡터분포를 Fig. 4에 나타내었다. 그림에서 보듯이 상층부 환상 덕트의 수축부를 지나면서 빨라진 공기는 티(tee)분지에서 덕트구간 [d]와 [h]로 분기되어 유동한다. 이때 공기는 급격한 유동방향의 변화로 인해 덕트구간 [d]와 [h]의 시작부에 각각 커다란 재순환영역(recirculation zone)을 형성한다.

덕트구간 [d]로 분기된 유동은 직각 엘보(elbow)를 지나면서 급격한 유로의 변화로 인해 또 하나의 재순환 영역을 형성하며 점차 균일유동으로 회복하여 취출구 ①과 ②를 통해 각각  $44.8 \text{ m}^3/\text{h}$ ([d]의 43%) 및  $59.8 \text{ m}^3/\text{h}$ ([d]의 57%)로 유출된다. 또한 취출구 ①의 상류영역에서는 덕트구간 [d]로부터의  $90^\circ$  유로변경으로 인하여 또 하나의 재순환 영역이 관찰된다.

덕트구간 [h]로 유입된 공기는 곡선 엘보를 지나면서 비교적 안정되게 유동하며 취출구 ③과 ④를 통해 각각  $83.5 \text{ m}^3/\text{h}$ ([h]의 61%) 및  $54.4 \text{ m}^3/\text{h}$ ([h]의 39%)의 유량이 유출된다. 나머지 유량은 취출구 ②를 통해 유출되어 결국 취출구 ②를 통해서

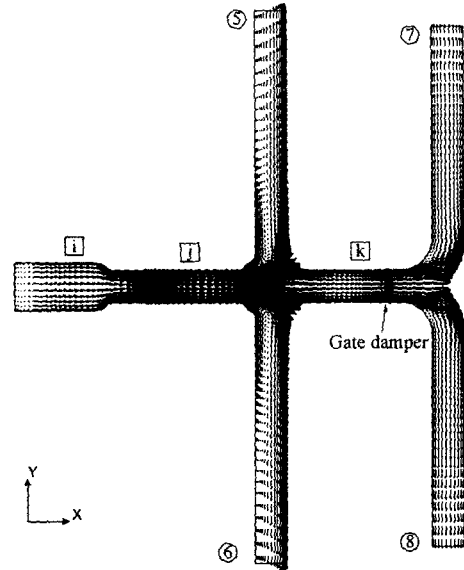


Fig. 5 Velocity vectors at middle plane of the lower simple duct.

모두  $82.4 \text{ m}^3/\text{h}$ ([k]의 31%)의 유량이 유출된다.

덕트구간 [k]에서는 덕트구간 [j]에서의 관성으로 인해 취출구 ③ 방향으로 편향되어 유동하며, 이로 인하여 취출구 ③에서는 취출구 ④에서 보다 더 많은 유량이 유출된다.

한편 하층부 단순 덕트의 유동특성을 관찰하기 위하여 z방향 중간단면 속도벡터분포를 Fig. 5에 나타내었다.

그림에서 보듯이 하층부 단순 덕트로 유입된  $307.1 \text{ m}^3/\text{h}$ 의 공기는 덕트구간 [i], [j]를 따라 유동하여 크로스(cross) 피팅을 지나 취출구 ⑤와 ⑥을 통해 각각  $76.9 \text{ m}^3/\text{h}$ ([j]의 25%)와  $76.8 \text{ m}^3/\text{h}$ ([j]의 25%)로 분배되며 나머지  $153.4 \text{ m}^3/\text{h}$ ([i]의 50%)의 유량은 덕트구간 [k]를 따라 유동한다. 이때 취출구 ⑤와 ⑥의 상류에서는 급격한 유로변경으로 인해 커다란 재순환 영역이 동일하게 형성되며, 각 취출구로 진행하면서 점차 회복됨을 알 수 있다.

덕트구간 [l]로 유입된 공기는 게이트 댐퍼를 지나면서 유동통로의 감소로 인해 가속되어 취출구 ⑦과 ⑧을 통해 각각  $76.7 \text{ m}^3/\text{h}$ ([l]의 50%)와  $76.7 \text{ m}^3/\text{h}$ ([l]의 50%)로 분배된다. 취출구 ⑦과 ⑧의 상류에서의 유동형태는 취출구 ⑤와 ⑥의 상류보다 다소 균일하게 나타나며 각 취출구로 진행되면서 상당히 안정됨을 볼 수 있다. 이것은 취

Table 1 Fitting loss coefficient used the Extended T-method calculation

No.	Position	C	
1	Tee of [a]	to [b]	1.067
		to [i]	1.084
2	Elbow of [b]	1.375	
3	Transition of [b]	0.496	
4	Tee of [c]	to [d]	1.052
		to [h]	1.104
5	Elbow of [d]	1.479	
6	Tee of [d]	to [e]	0.096
		to ①	2.026
7	Elbow of [e]	0.348	
8	Elbow of [f]	1.756	
9	Elbow of [h]	0.282	
10	Wye of [h]	to [f]	0.292
		to [g]	0.309
11	Tee of [e], [f]	to [e]	0.625
		to [f]	0.625
12	Wye of [g]	to ③	0.25
		to ④	0.25
13	Elbow of [i]	1.353	
14	Transition of [i]	0.061	
15	Cross of [j]	to [k]	0.2
		to ⑤	2.52
		to ⑥	2.52
16	Gate damper of [k]	1.6	
17	Wye of [k]	to ⑦	0.25
		to ⑧	0.25

출구⑦과 ⑧의 상류의 티(tee) 피팅이 완만한 곡선형태를 띠기 때문인 것으로 사료된다.

### 6.3 1차원 확장 T-method의 결과

1차원 확장 T-method에 의한 계산은 IBM PC Pentium 100 MHz(32 Mbyte RAM)를 사용하였으며, 수렴조건을 만족하는 해를 얻는데는 약 10초의 계산시간이 소요되었다.

1차원 확장 T-method 계산에 채용된 게이트

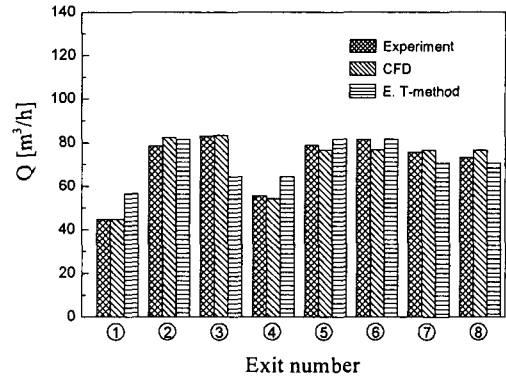


Fig. 6 Comparison of the flow rates from the exits of model duct system between experiment and predictions.

댐퍼와 16개의 피팅 손실계수를 Table 1에 나타내었다. 표에 나타나 있는 피팅의 위치는 Fig. 1의 각 덕트구간 및 취출구 번호를 참조하기 바라며 또한 피팅 손실계수 C는 각각 ASHRAE Duct Fitting Database<sup>(11)</sup>과 참고문헌<sup>(12)</sup>의 값을 인용하였다.

1차원 확장 T-method를 이용하여 복합 덕트의 유량분배를 해석한 결과에 의하면 상층부의 환상 덕트와 하층부의 단순 덕트로 각각 267.6 m<sup>3</sup>/h(총 유입유량의 47%) 및 304.6 m<sup>3</sup>/h(총 유입유량의 53%)의 유량이 분배된다. 또한 상층부의 환상 덕트로 유입된 공기는 덕트구간[**d**]로 115.1 m<sup>3</sup>/h([**c**]의 43%)가 분배되며 이것은 취출구①로 56.6 m<sup>3</sup>/h([**d**]의 49%), 그리고 덕트구간[**h**]를 통해 취출구②로 58.5 m<sup>3</sup>/h([**d**]의 51%)이 재분배된다.

한편 덕트구간[**h**]로는 152.5 m<sup>3</sup>/h([**c**]의 57%)의 유량이 통과하여 취출구③과 ④로 동일한 64.7 m<sup>3</sup>/h([**h**]의 42%)의 유량이 각각 분배되고 취출구②를 통해 나머지 23.1 m<sup>3</sup>/h의 유량이 유출된다. 따라서 취출구②를 통해서 총 81.6 m<sup>3</sup>/h([**c**]의 30%)의 유량이 유출된다.

하층부의 단순 덕트로 유입된 공기는 취출구⑤와 ⑥을 통해 동일한 81.7 m<sup>3</sup>/h([**j**]의 27%)의 유량이 각각 분배되며 나머지 유량은 덕트구간[**k**]를 따라 유동하여 취출구⑦과 ⑧을 통해 70.6 m<sup>3</sup>/h([**j**]의 23%)의 유량이 동일하게 분배된다.

### 6.4 각 방법의 결과비교

Table 2 Exit flow rates from three methods and prediction errors based on experiment result

Exit number	Q[m <sup>3</sup> /h]			ε [%]	
	Q <sub>exp</sub>	Q <sub>CFD</sub>	Q <sub>ET</sub>	ε <sub>CFD</sub>	ε <sub>ET</sub>
①	44.8	44.8	56.6	0.0	26.3
②	78.6	82.4	81.6	4.8	3.8
③	83.2	83.5	64.7	0.4	-22.2
④	55.8	54.4	64.7	-2.5	15.9
⑤	79.0	76.9	81.7	-2.7	3.4
⑥	81.6	76.8	81.7	-5.9	0.1
⑦	75.9	76.7	70.6	1.1	-7.0
⑧	73.3	76.7	70.6	4.6	-3.7

각 취출구에서의 실험결과 유량  $Q_{exp}$ , 3차원 CFD 결과 유량  $Q_{CFD}$  및 1차원 확장 T-method 결과에서의 유량  $Q_{ET}$ 를 Fig. 6에 나타내었다. 보다 상세한 비교 분석을 위해 Table 2에는 각 취출구에서 실험치를 기준으로 하여 나머지 두가지 방법에서의 오차를 나타내었다. 표에서 오차는 다음 식과 같이 정의하였다.

$$\varepsilon = \frac{Q - Q_{exp}}{Q_{exp}} \times 100 \quad [\%] \quad (12)$$

윗식에서  $Q$ 는  $Q_{CFD}$  혹은  $Q_{ET}$ 를 뜻한다.

먼저 3차원 CFD에 의한 각 취출구 유량분배 결과를 실험결과와 비교해보면 -5.9 ~ 4.8% 범위의 오차로 잘 일치함을 알 수 있다.

1차원 확장 T-method에 의한 취출구 유량분배 결과를 실험결과와 비교해보면 -22.2 ~ 26.3% 범위의 오차를 보이고 있다. 특히 취출구③과 ④에서 각각 -22.2%와 15.9%의 큰 오차를 보이고 있다. 이것은 덕트구간 $\square$ 를 통과한 공기가 와이(wye)형 분지를 지나 취출구③과 ④로 동일하게 배분된다는 1차원 해석의 오류에 의한 것이다. 일반적으로 이미 알려진 덕트 피팅의 손실계수를 사용할 때에는 피팅과 피팅사이의 덕트길이가 덕트지름의 약 30배 이상이 필요하며 그 이하일 때는 보정계수를 곱하여 사용하여야 한다고 알려져 있다.<sup>(13)</sup> 즉 덕트구간 $\square$ 의 길이가 덕트지름의 3배로 상당히 짧기 때문에 상류에서 유입된 공기는 유동관성으로 인해 취출구③ 방향으로 치우치게

된다. 따라서 덕트구간 $\square$ 에서 취출구③과 ④로 분지되는 피팅에서 동일한 손실계수의 적용은 적절하지 못하다. 또한 취출구①을 통해 유출되는 유량도 동일한 이유로서 실험과 비교하여 26.3%의 큰 오차를 보이고 있다. 이를 제외한 나머지 취출구에서의 유출유량은 실험값과 정량적으로 잘 일치함을 알 수 있다. 그러므로 이러한 오차를 줄이기 위해서는 덕트구간 $\square$ 에서 취출구③과 ④로 분지되는 피팅에서 취출구③ 방향으로 적용된 손실계수 0.25보다 작은 값의 피팅 손실계수 적용과 취출구④ 방향으로 적용된 손실계수 0.25보다 큰 값의 적용이 필요하며, 취출구①의 상류에 위치한 피팅에서도 마찬가지로 현재 적용된 손실계수보다 큰 값의 손실계수 적용이 요구됨을 알 수 있다. 즉, ASHRAE Duct Fitting Database<sup>(11)</sup>과 참고문헌<sup>(12)</sup>에 나타난 각종 덕트 피팅의 부차손실계수는 피팅으로 유입되는 유동이 본질적으로 평행유동인 경우에 얻어진 실험값이지만 본 연구에서와 같이 피팅 상류에서의 영향으로 해당 분지에 비평행유동이 유입될 때는 그 값이 실제와 잘 맞지 않는다. 따라서 피팅 상류에서의 영향으로 인하여 비평행 유입유동이 예상되는 피팅에서는 각 방향별 해당분지로의 부차손실계수가 구분되도록 데이터 베이스를 보완하는 것이 필요하다고 판단된다.

향후 이러한 피팅 데이터 베이스가 보완되면 복잡한 덕트시스템의 유량분배에 대한 1차원 방법의 실용적 적용은 유용할 것으로 사료된다.

## 7. 결 론

본 논문에서는 환상식 덕트와 단순 덕트가 복합된 모델 덕트시스템의 유량분배를 실험적 방법, 3차원 CFD 방법 및 1차원 확장 T-method 방법으로 해석하고 이 결과들을 비교 분석함으로써 1차원 해석방법의 적합성을 검토하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 3차원 CFD에 의한 각 취출구의 유량예측시, 각 취출구에서 예측된 유량은 실험값과 -5.9 ~ 4.8%의 오차로 잘 일치함을 알 수 있었다.

(2) 1차원 확장 T-method에 의해 예측된 각 취출구의 유량은 실험값 대비 -22.2 ~ 26.3%의 차이를 보였다. 이것은 확장 T-method가 1차원



적 해석도구로서 여기에 적용된 피팅 데이터가 상류덕트에서의 기류방향에 의한 하류덕트에서의 기류편중과 같은 3차원 물리적 상황을 정확하게 고려하지 못하기 때문이라 판단된다.

(3) 이러한 오차를 줄이기 위해서는 향후 상류 유동의 영향에 의한 비평행 유입유동이 예상되는 피팅에서는 해당분지의 방향에 따라 적합한 피팅 손실계수의 보완이 필요하다. 이러한 피팅 데이터 베이스가 보완되면 1차원 방법의 실용적 적용은 유용할 것으로 사료된다.

## 후 기

본 연구의 일부는 한국과학재단 지정 터보·동력기계 연구센터의 지원으로 수행되었으며, 관계자 여러분께 감사를 드립니다.

## 참 고 문 헌

1. ASHRAE Fundamental, 1997, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. Ch. 32. 21.
2. Shao, L. and Riffat, S. B., 1995, CFD for prediction of k-factors of duct fittings, Int. J. of Energy Research, Vol. 19, pp. 83-93.
3. Riffat, S. B. and Gan, G., 1997, CFD prediction of k-factor of duct elbows, Int. J. of Energy Research, Vol. 21, pp. 657-681.
4. Smith, S. J., Riffat, S. B., Gan, G., and Shao, L., 1996, "K-factor data of interaction duct fittings based on measurement and CFD modelling," Int. J. of Energy Research, Vol. 20, pp. 1129-1136.
5. 이승철, 문종선, 이재현, 1998, 확장 T-method에 의한 환상 덕트시스템 해석, 공기조화·냉동공학 논문집, 제10권, 제4호, pp. 389-397.
6. Tsal, R. J., Behls, H. F. and Mangel, R. 1988, T-method duct design part I: optimization theory, ASHRAE Transactions, Vol. 94, part 2, pp. 90-111.
7. Tsal, R. J., Behls, H. F. and Mangel, R. 1990, T-method duct design part III: simulation, ASHRAE Transactions, Vol. 96, part 2, pp. 3-31.
8. ASHRAE Standard 111-1988, 1988, Practices for Measurement, Testing, Adjusting, and Balancing of Building Heating, Ventilation, Air-Conditioning, and Refrigeration Systems, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.
9. Launder, B. E. and Spalding, D. B., 1974, The Numerical Computation of Turbulent Flow, Comp. Methods Appl. Mech. Eng., Vol. 3, pp. 269-289.
10. STAR-CD Version 2.3 user manual, 1995, Computational Dynamics Ltd.
11. ASHRAE Duct Fitting Database, 1994, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.
12. Idelchik I. E., 1993, Handbook of Hydraulic Resistance, 3rd ed., Begell House, Inc., New York.
13. Miller, D. S., 1990, Internal Flow Systems, 2nd ed., BHRA, Cranfield.