

파노라마-PIV를 이용한 실내기류 해석

황 태 규, 도 덕 희[†]

한국해양대학교 대학원, *한국해양대학교 기계정보공학부

Analysis of Airflows in a Room with Panoramic PIV

Tae-Gyu Hwang, Deog-Hee Doh[†]

Graduate School, Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea

*Division of Mechanical and Information Engineering, Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea

(Received July 21, 2005; revision received October 26, 2005)

ABSTRACT: A panoramic-PIV system has been constructed for the analysis of the airflows in a room. Smoke is used as seeding particles and are visualized by a pulsed laser (Nd-Yag, 120 mJ). Panoramic images have been obtained by an image composition process using the two images obtained by the two cameras (1k×1k) that are viewing the wide measurement areas. Velocity vector fields have been obtained by the grey-level cross-correlation PIV method. Three room models (L×W×H [mm³], 500×500×250, 350×350×175, 250×250×125) have been tested. The experimental results have proven that the constructed panoramic-PIV system can be used as a useful tool for analyzing the airflow characteristics in the room models.

Key words: Panoramic PIV(파노라마 PIV), Smoke visualization(스모크 가시화), Airflow analysis (기류해석)

기 호 설 명

- A_D : 흡입구 면적 [m²]
- D : 흡입구의 직경 [m]
- D_I : 흡입구의 대표길이(=√ A_D) [m]
- U_I : 흡입구의 면속도 [m/s]

그 리 스 문 자

- ν : 동점성계수 [m²/s]

1. 서 론

실내기류에 대한 예측기술은 실내에 거주하는 사람의 쾌적 환경조성, 반도체공정에 필요한 클린룸 내부의 기류설계, 냉난방시스템에서의 에너지절약형 공조설계에 매우 중요한 역할을 한다.

실내기류 예측을 위한 기술에는 수치모사(numerical simulation)법과 실험측정법이 있다. 실내기류 예측을 위한 수치모사법은 일반적으로 대규모 계산을 수행하여야 하는 관계로 계산비용이 많이 들게 되는 점, 계산을 통하여 얻어낸 결과도 실내의 형상이 복잡하거나 실내공간이 대규모일 경우에는 결과물의 공간해상도가 그다지 높지 않다는 점 등의 문제점이 있어 왔는데 이를 극복하기 위한 다양한 계산모델이 개발되어 왔다.^(1,2) 그럼에도 불구하고 계산 대상 규모의 대형화 및 실

[†] Corresponding author

Tel.: +82-51-410-4364; fax: +82-51-405-5991

E-mail address: doh@mail.hhu.ac.kr

내기류의 첨단화 등에 따라 기류에 대한 보다 정확한 계산을 추구하고자 하는 요구가 날로 증가 추세에 있는 관계로 수치계산결과에 대한 실험측정을 통한 정확성 검증과정은 필요사항으로 여겨지고 있다.

Moon and Sohn⁽³⁾은 실내기류에 대한 축소모형 실험에서의 축소스케일 결정법에 관한 내용을 보고하였는데, 정성적인 스모크 가시화 기법과 다점열선유속계에 의거한 실험적 검증법을 다루고 있다. 그러나 다점열선유속계에 의한 측정을 위해서는 매 측정마다 실험조건의 재현성을 유지하여야 하는 관계로 축소모델의 정성적 가시화에 의한 유동패턴과 속도측정결과에 의한 결과로부터 상사성 확인작업에는 상당한 시간이 소요되는 문제점을 안고 있다. 이러한 문제점이 있어 왔던 관계로 실내기류 혹은 대규모 기류에 대한 모델실험에 관한 연구보고가 거의 전무한 실정이다. 일례로 Shu et al.⁽⁴⁾은 실내에 있는 인간의 호흡에 의한 기류의 특성을 조사한 바가 있는데, 원래 이들 연구의 최종목표는 실내에 있는 인간을 포함한 각종 열원, 기류의 흡·토출구 등을 총망라한 상황에서 실내기류 전체에 대하여 PIV(particle image velocimetry) 기법⁽⁵⁾에 의한 속도장을 얻어 내는 것이었으나 실내 전체를 축소모델화한 상사모델실험이 어려웠던 관계로 실제 크기모델에서의 인간의 호흡기 근처에서만 PIV에 의한 속도장 결과를 수치계산의 경계조건으로 활용한다. 다음 실내 전체에 대한 기류해석은 수치계산에

의존하였다.

본 연구에서는 파노라마-PIV 기술개발을 통하여 열선유속계의 반복실험에 따른 실험재현성 문제를 극복함과 동시에 축소모델 내부에 대한 국소적 측정이 아닌 모델 전체에 대한 실험적 기류해석이 가능한 PIV 해석법의 완성을 연구의 목적으로 삼고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치 및 방법

일반적으로 실내기류에 대한 상사실험을 하기 위해서는 가능하면 축소스케일비가 작은 것이 좋은 것으로 알려져 있는데,⁽⁴⁾ 그렇게 되면 모델이 커지게 된다. 본 연구에서는 이를 고려하여 축소모델 전체에 대한 유동장 측정이 가능한 파노라마 PIV 기술을 구축하였다. Fig.1은 파노라마 PIV 측정실험장치의 개요도를 나타낸다. 그림에서와 같이 두 대의 카메라영상이 축소모델 전체를 관측할 수 있도록 설치를 하였다. 모델 입구부에 설치된 볼텍스 블로워(HITACHI, VB-007-E2)와 인버터(MITSUBISHI, FREQROL-S500)를 사용하여 정밀한 유량을 제어하였으며, 정밀 유량계(SMC, DIGITAL FLOW SWITCH, PF2A703H-10-28, PF2A551-04-1)를 사용하여 유량을 계측하였다. 또한 가시화를 위하여 블로워 입구에 스모크 발생기를 설치하였다. Fig.2는 실제 축소모델과 유량계가 설치된 파노라마 PIV 실험 전경을 나타낸다.

본 실험에서는 3가지 모델시험이 수행되었으며

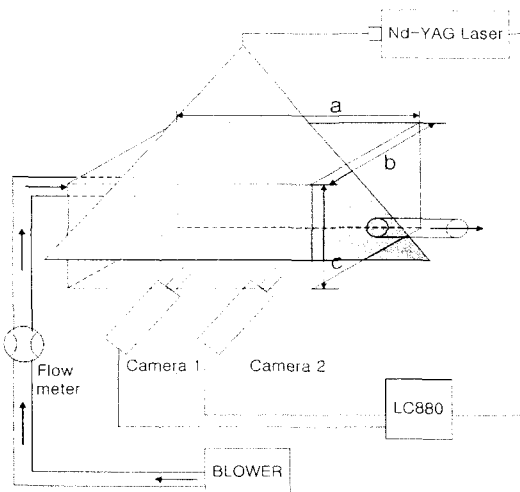


Fig. 1 Experimental setup.

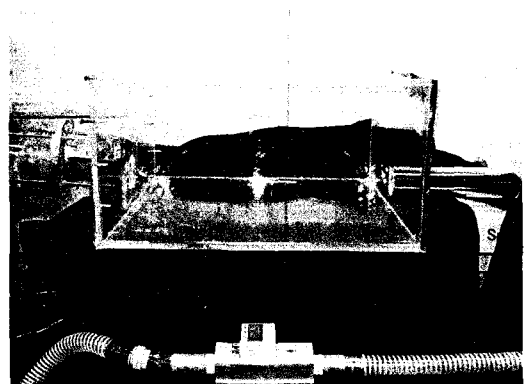


Fig. 2 Experimental setup views.

Table 1 Specifications of three models

Actual model W/D/H/Vent [mm]	5000/5000/2500/500		
Similarity ratio	10 : 10 : 5 : 1		
Scale model W/D/H/Vent [mm]	Model A	Model B	Model C
	500/500/250/50	350/350/175/35	250/250/125/25
Scale ratio	1/10	1/14.29	1/20

Table 2 Experimental conditions for models

Exp. conditions		Model A	Model B	Model C
		Flow rate [L/min]	Flow rate [L/min]	Flow rate [L/min]
		Re number	Re number	Re number
Constant inlet velocity [m/sec]	5.5	647.9 16237	317.5 11366	162 8118
	3.5	412.3 10332	202④ 7233	103.1 5166
Constant Re number (velocity)		206.1 5166① (1.75)	144.3 5166② (2.50)	103.1 5166③ (3.50)

이들 모델에 대한 크기사양이 Table 1에 나타나 있다. Fig. 1과 같이 환기용 취출구가 설치된 실제모델에 대한 축소모델의 축소스케일은 Table 1에 표시되어 있는 바와 같이 1/10, 1/14.29, 그리고 1/20이다.

Table 2는 실험조건을 나타낸다. 세 가지 축소모델에 대하여 기류의 흡입구를 통하여 흡입되는 속도를 변경하였을 경우(즉, 유량 혹은 레이놀즈수를 변경시켰을 때)와 레이놀즈수를 일정하게 하였을 경우에 축소모델 내부의 유동특성을 살펴보았다. 이때 사용되는 유속은 실제모델에서의 면풍속 5.5 m/s와 3.5 m/s를 축소모델에 그대로 사용하였다. 실험은 상기 제시된 블로워를 이용하여 급기측에 일정한 면풍속을 유지하도록 제시된 Table 2와 같이 축소모델별 유량을 공급하였다. 기류의 속도조절(유량조절)은 블로워에 부착된 인버터에 의하였다. Re 수는 아래 식(1)에 의해서 구하여지며, 공기의 동점성계수(ν)는 20°C 상온일 때의 약 $1.501 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ 를 사용하였다. 이때 사용되는 속도와 대표길이는 각각 흡입구에서의 면속도와 흡입구의 면적에 대한 근의 값을 사용하는데 주의하여야 한다.

$$Re = \frac{U_I \cdot D_I}{\nu} = \frac{U_I \cdot D/2 \cdot \sqrt{\pi}}{\nu} \quad (1)$$

Fig. 2는 실내기류측정 실험의 전경을 나타낸다. 파노라마 PIV 측정장치는 레이저 광원(Nd-Yag, 120 mJ), 두 대의 고해상 카메라(Kodak ES1.0, 1k × 1k)와 이들을 동기시키기 위한 동기장치(LC880)로 구성되어 있다.

가시화 측정실험은 다음과 같은 절차로 진행된다. 블로워를 구동하여 정상적 실험조건에 달하면 스모크(파라핀유)를 공급한다. 다음으로 2차원 레이저 광원을 모델의 중앙단면(흡입구 중심선) 상에 조사(照査)하고 가시화된 단면을 향하여 설치된 두 대의 카메라 영상을 획득한다. 마지막으로 획득한 영상을 파노라마 영상으로 구성한 뒤 이 영상에 대하여 계조치상호상관법을 적용하여 속도장을 얻는다. 이때, 파노라마 영상으로 구성하기 위해서는 카메라 영상에 나타난 측정위치의 물리적 위치에 대한 교정을 하여야 하는데 실험을 개시하기 전에 교정작업을 완료하여야 한다.

2.2 파노라마 PIV 시스템

파노라마 PIV 측정이란 두 대의 독립된 카메라 영상을 조합하여 얻어지게 되는 광역의 영상 두 시각분에 대하여 계조치상호상관법을 적용함으로써 넓은 영역에 걸친 속도장을 얻어낼 수 있는 것을 의미한다. 계조치상호상관법⁽⁶⁾은 시각차

를 가진 두 영상 밝기를 나타내는 함수를 각각 f 와 g 로 하여 아래 식(2)로 표시되는 상호상관함수를 계산한 결과가 최대치가 되는 점을 입자이동의 위치(속도벡터의 종점)로 하였다.

$$c_{fg} = \frac{\sum_{i=1}^{n^2} (f_i - \bar{f}_i)(g_i - \bar{g}_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n^2} (f_i - \bar{f}_i)^2 \sum_{i=1}^{n^2} (g_i - \bar{g}_i)^2}} \quad (2)$$

여기서, n 은 상관영역의 크기이고 본 연구에서는 32×32 픽셀 크기로 설정하였다. 수식 내의 \bar{f}_i 와 \bar{g}_i 는 평균값을 의미한다.

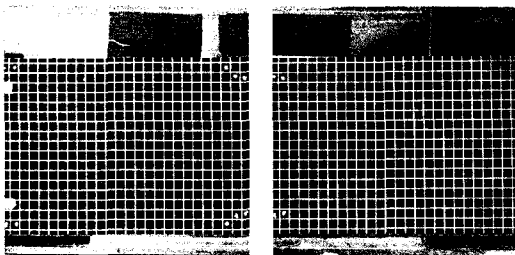
두 대의 카메라 영상으로부터 하나의 파노라마 영상을 만들기 위해서는 두 영상에 나타난 입의 물체의 위치가 물리좌표계상에서 일치시켜야 한다. 이를 위하여 두 대의 카메라는 교정(calibration) 작업이 필요하며, 이때 사용되는 교정기는 10mm 거리간격의 격자판을 사용하였다.

Fig. 3은 두 대의 카메라에서 각각 획득되어진 실험대상의 교정용 격자판의 영상을 나타낸 것이다. 또한 사용되는 교정기의 격자크기는 실험대상의 크기를 고려하여 제작하여 사용한다. 이때, 격자판은 실험에서의 실제 측정단면상에 설치하

여야 한다. Fig. 3과 같이 각각의 카메라에서 교정기의 영상은 카메라 및 렌즈의 특성상 왜곡을 갖게 되며, 이 영상을 Fig. 4와 같이 하나의 영상으로 합성하기 위해서는 먼저 식(3)과 같은 선형 변환식을 사용하여 Fig. 3의 왜곡된 교정기 영상들을 어떤변환을 시켜 왜곡된 영상을 바로잡아야 한다. 여기서 (x, y) 는 카메라 영상좌표, (X, Y) 는 물리좌표이며, 미지수 7개에 해당하는 a_{ij} 는 상기 격자판의 교점을 기준점으로 하여 반복계산을 수행함으로써 구할 수 있다. 이와 같이 격자판의 교점을 이용하여 a_{ij} 와 같은 미지수를 구하는 방법을 다변수회귀계산법이라고 한다. 식(3)에 의해서 정렬된 각각의 격자점 영상에서 미리 표시한 기준점을 일치시키는 작업을 식(3)을 재차 사용하여 수행하면 Fig. 4와 두 영상 간의 좌표를 물리좌표계상으로 변환하여 조합한 파노라마 영상을 만들 수 있다.

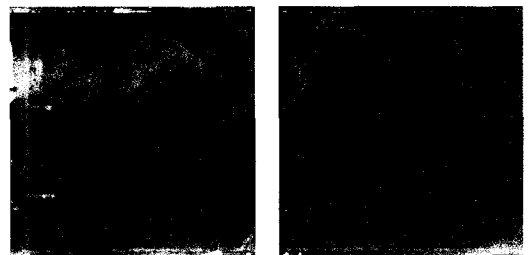
$$\begin{aligned} \frac{a_{11}x + a_{12}y + a_{13}}{a_{31}x + a_{32}y + 1} &= X \\ \frac{a_{21}x + a_{22}y + a_{23}}{a_{31}x + a_{32}y + 1} &= Y \end{aligned} \quad (3)$$

Fig. 5는 각 카메라의 실제 실험영상을, Fig. 6은



(a) Camera 1 (b) Camera 2

Fig. 3 Calibrator images.



(a) Camera 1 (b) Camera 2

Fig. 5 Experimental images.

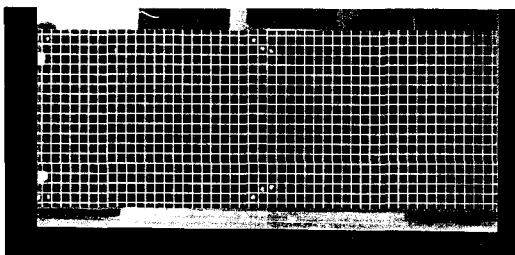


Fig. 4 Panoramic image of the calibrator.

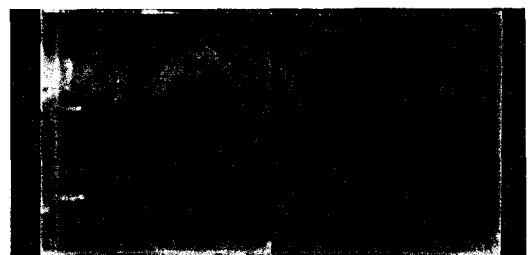


Fig. 6 Experimental panoramic image.

식(3)에 의해 Fig. 5의 두 카메라 영상을 조합한 파노라마 영상을 나타낸다. 이 파노라마 영상의 두 시각의 영상으로부터 전술의 계조치상호상관법으로 속도장을 구하였다.

3. 실험결과

Fig. 7은 Fig. 6의 파노라마 영상으로부터 구한 파노라마 PIV 측정결과를 나타낸다. 그림에서 (a), (b) 및 (c)는 Table 1과 Table 2에 나타나 있듯이 세 가지 모델에 대하여 동일한 레이놀즈수일 때의 평균 유속분포를 나타낸다. 그림에서 (a)와

(b)의 유동형태는 서로 다르며, (b)와 (c)의 유동 형태는 서로 유사함을 알 수 있다. Fig. 8의 난류 운동에너지($(1/2) \cdot \sqrt{u'^2 + v'^2} / U_o$) 분포를 살펴보면, 전반적으로 (b)와 (c), 국소적으로 (a)와 (c)가 유사함을 나타내는데 이들 그림으로부터 요약될 수 있는 것은 Table 2의 ①, ②, ③의 실험조건에서 알 수 있듯이 실내기류의 상사성은 레이놀즈수에 의하기보다는 유량에 관계함을 알 수 있다. 이는 Table 2의 ①, ④의 실험조건(서로 다른 레이놀즈수이지만 유사한 유량)일 때, 유사한 속도분포 및 난류운동에너지분포를 보이게 되는 Fig. 9 및 Fig. 10으로부터도 재차 확인될 수

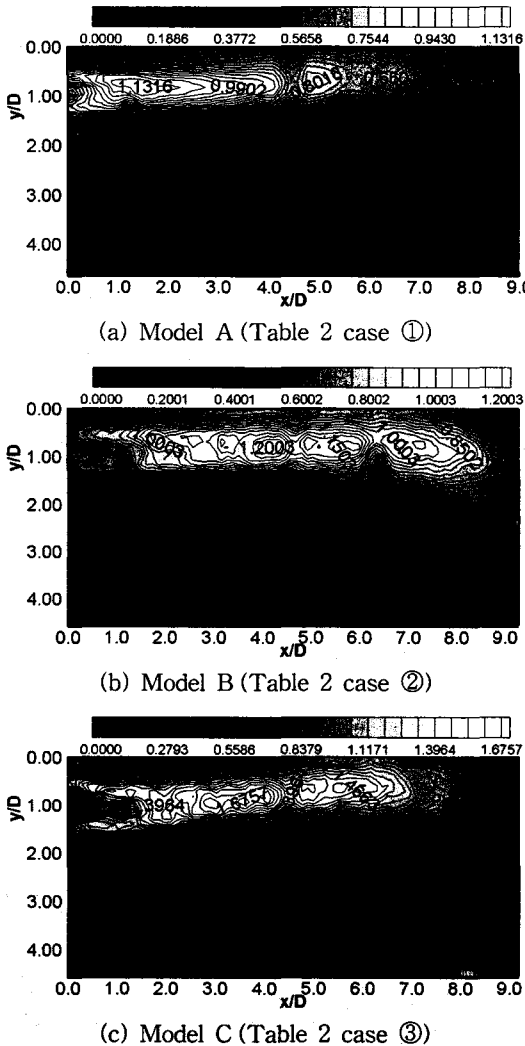


Fig. 7 Mean velocity vector distributions.

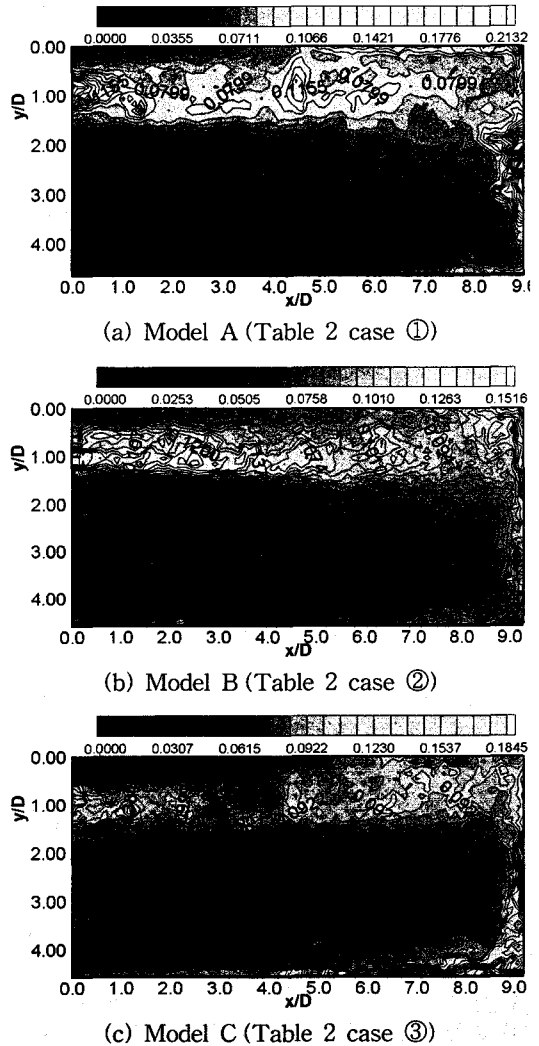
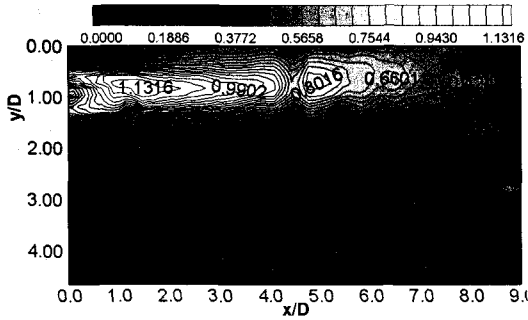
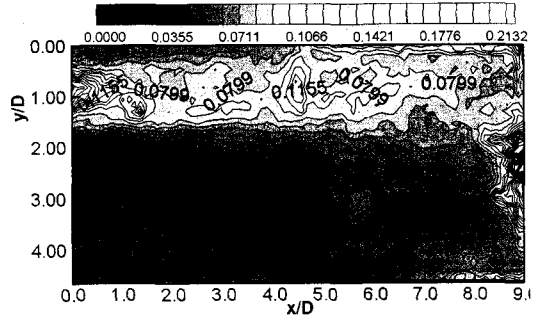


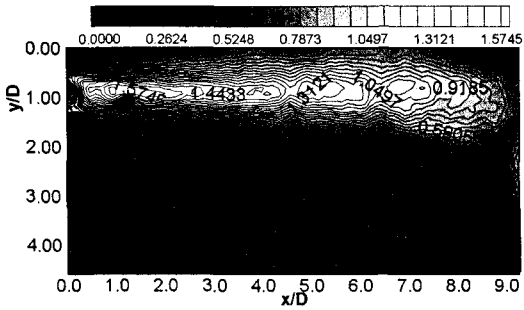
Fig. 8 Turbulence kinetic energy distributions.



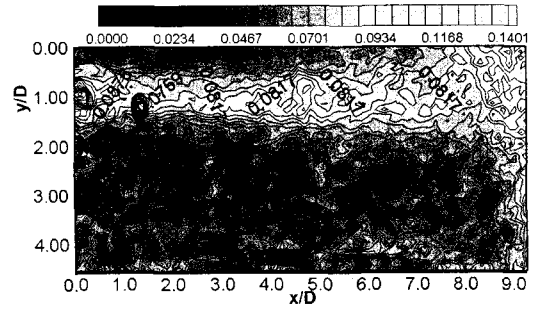
(a) Model A (Table 2 case ①)



(a) Model A (Table 2 case ①)



(b) Model B (Table 2 case ④)



(b) Model B (Table 2 case ④)

Fig. 9 Mean velocity vector distributions.

Fig. 10 Turbulence kinetic energy distributions.

있는 특성이다. 즉, 유량이 유사하면 유사한 유동 패턴을 보임을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 Moon and Sohn⁽³⁾의 연구성과에서도 확인된 바가 있는데 그들의 보고에 의하면 실내기류의 유동의 상사성은 레이놀즈수가 1,000 이상이면 레이놀즈수에 의하지 않는다고 한 성과와 잘 일치하고 있음을 보여준다. 본 연구는 축소모델에 대한 유동가시화 영상으로부터 실내기류 특성을 단번에 확인할 수 있다는 점에서 기존의 성과보다 의의가 있는 것으로 사료된다.

한편, 취출구 유동에서의 전단층은 유체유동해석 분야에서 가장 많이 이용되고 있는 backward-facing step(후향단) 유동장의 전단층과 매우 유사한 관계로, 본 연구에서는 후향단 유동의 전단층에서의 난류특징량을 검출하는 위치와 유사한 지점에서의 난류특징량을 검출 비교하였다. 좀더 정확한 지점을 선정하기 위하여 Table 2상의 타원표시 중 모델 B에 대한 y/D 위치에 따른 난류운동에너지 분포를 x/D 의 위치별로 Fig. 11과 같이 나타낸 결과, $y/D=1.0$ 인 흡입구의 중심부에서 난류운동에너지($TKE = (1/2) \cdot \sqrt{u'^2 + v'^2}/U_o$)

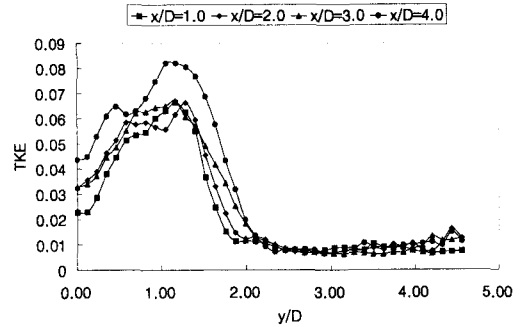
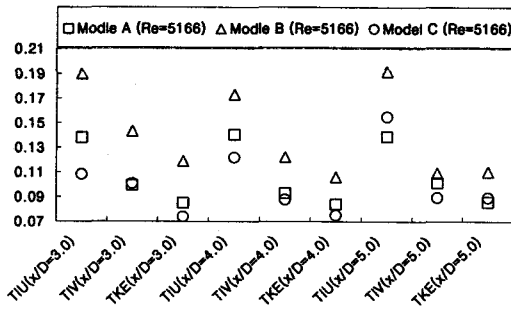


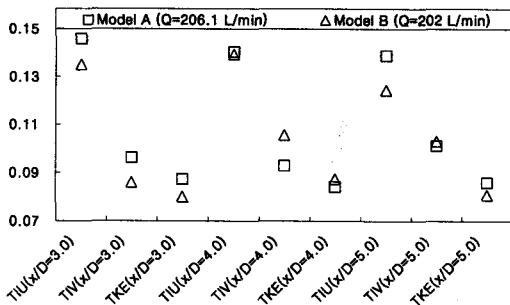
Fig. 11 Turbulence kinetic energy distributions at x/D section (Model B, 5.5 m/s).

가 가장 크게 나타나는 것을 확인하였다.

여기서, D 는 흡입구의 직경이다. Fig. 12는 $y/D = 1.0$ 인 지점에서 $x/D=3.0, 4.0$ 과 5.0 일 때의 난류특성량(u' 성분난류강도 $TIU = \sqrt{u'^2}/U_o$, v' 성분난류강도 $TIV = \sqrt{v'^2}/U_o$, 난류운동에너지 $TKE = (1/2) \cdot \sqrt{u'^2 + v'^2}/U_o$)을 (a) 동일한 레이놀즈수(5166)일 때, (b) 유사한 유량일 때에 대해서 각각 나타낸 것이다.



(a) Condition of same Reynolds number (5166)



(b) Condition of similar air flux

Fig. 12 Turbulence properties at points.

전술한 바와 같이 동일한 레이놀즈수(a)의 경우는 Fig. 7의 평균 속도분포에서는 (b)와 (c)가 유사하였으나, 국소적인 난류특성량을 고려해 볼 때는 Fig. 8에서 (a), (c)가 (b), (c)보다 상대적으로 유사함을 확인할 수 있었다. 반면에 유사한 유량 (b)이 공급될 경우(서로 다른 레이놀즈수 및 서로 다른 속도조건)는 축소모델에 관계없이 동일 레이놀즈수에서의 난류특성량보다 상대적으로 유사한 난류특성량을 갖는다는 것을 확인하였다.

즉, 기류의 상사성은 레이놀즈수(a)에 의하기보다는 유량(b)에 영향을 받는다는 것을 국소적인 부분에서의 난류특성량 분포를 통해서도 재차 확인할 수 있었다.

4. 결 론

실내기류 특성조사를 위한 축소모델에 대한 정량적 유동가시화 측정이 가능한 파노라마 PIV 측정시스템의 구축 및 실험을 통하여 PIV를 이용한 실내기류 평가방법을 구현하였다.

실내기류의 상사성은 레이놀즈수에 의하기보다

는 유량에 관계함이 확인되었다. 즉, 레이놀즈수가 서로 다르더라도 유량이 유사하면 유사한 유동패턴을 보일 것으로 예상된다.

실내기류 환기를 위한 흡입구 및 토출구의 크기가 서로 다르더라도 유량이 유사한 수준이면 유사한 유동패턴이 됨을 확인하였다.

축소모델에 공급되는 유량이 서로 유사할 경우 실내기류의 난류특성량의 분포는 유사한 분포를 보였다.

후 기

(주)티엔텍의 조경래 박사님, 편용범 연구원, 조용범 연구원의 기술적 지원에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

1. Katou, S., 2003, State of the art analysis of indoor air quality -Prediction of indoor air quality with Computational Fluid Dynamics (CFD), Proc. of JSAE Symposium, No.02-03 Air Quality in Car Compartments, pp.47-55.
2. Hara, T. and Kato, S., 2004, Numerical simulation of thermal plumes in free space using the standard $k-\epsilon$ model, Fire Safety Journal, Vol. 39, pp.105-129.
3. Moon, J.H. and Sohn, J.Y., 2001, The determination of a reducing scale in a scale-model experiment for air flow, Journal of the Architectural Institute of Korea, Vol.21, No. 1, pp.621-624.
4. Shu, S.W., Hayashi, T.Y., Kato, S. and Murakami, S. 2004, Investigation of flow field in human's respiration area in a calm environment by visualization experiment and numerical analysis, J. Environment Eng., AU, No. 583, pp. 37-42.
5. Adrian, R. J., 1991, Particle-Imaging Techniques for Experimental Fluid Mechanics, Annu. Rev. Fluid Mech., Vol.23, pp.261-304.
6. Utami, T. and Blackwelder, R., 1991, A cross correlation technique for velocity field extraction from particulate visualization, Exp. in Fluids, Vol. 10, pp.213-223.