

## 천장형 실내기의 기류 가시화를 통한 최적 제어 설계

성재용\* · 안광협\* · 이기섭\* · 최호선\* · 박승철\*\* · 이인섭†

### Design of Optimal Vane Control for Ceiling Type Indoor Unit by PIV measurements

Jaeyong Sung\*, Kwang Hyup An\*, Gi Seop Lee\*, Ho Seon Choi\*,  
Seung-Chul Park\*\* and In-Seop Lee†

**Keywords :** Ceiling Type Indoor Unit (천장형 실내기), PIV (입자영상속도계), Thermal Comfort (온열 쾌적감), Vane Control (베인 제어)

#### Abstract

A heating flow discharged from a 4-way ceiling type indoor unit has been investigated using a PIV (particle image velocimetry) system. For the PIV measurements, an experimental model of 1/10 scale with a transparent room was devised by satisfying the Archimedes number, which is generally used in case that the forced convection has the similar magnitude as the natural convection. To optimize the heating flow, several vane angles and vane control algorithms of cross and right angle controls were considered. Regarding the vane angle, the experimental results show that it should be less than 30° to avoid re-suction flows which decrease the performance of the air-conditioner. At the vane angle of 30°, applying open/close control gives rise to more uniform distribution of the heating flow than without control. Especially, the cross-control seems to be satisfactory for the thermal comfort.

#### 기호설명

- $A$  : 면적  
 $Ar$  : Archimedes 수  
 $Gr$  : Grasshof 수  
 $L$  : 특성 길이  
 $Q$  : 유량  
 $Re$  : Reynolds 수  
 $t$  : 베인의 Open/Close 주기  
 $V$  : 토출 속도  
 $\Delta T$  : 토출 유동과 실내 공간의 온도 차  
 $\theta$  : 베인 각도

#### 1. 서론

산업이 발전하고 생활수준이 향상되면서 실내 공조 환경에 대한 소비자의 요구수준은 계속해서 증가하고 있다. 이러한 요구에 부응하여 인간의 쾌적감을 증대시키기 위해서는 단순한 온도 조절이 아니라 온도, 습도, 기류, 방사열 등이 종합적으로 조절된 환경을 만들 필요가 있다. 또한 최근 들어서 냉, 난방 시스템이 대량으로 보급되고 그로 인한 에너지 소비

가 늘면서 새로운 환경 문제가 대두되고 있다. 이러한 산업환경에서 고효율, 쾌적설계된 공조기기의 개발은 매우 시급한 과제이다.

쾌적 영역의 증대를 통한 에너지 절약형 공조 기법의 개발은 토출 기류의 방향과 속도를 제어하여 보다 효과적으로 실내의 공기를 냉, 난방하는 기법을 개발하는 것이다. 이와 관련하여 지금까지 많은 연구들이 진행되어 왔으며, Memarzadeh와 Manning[1]은 CFD 해석을 통하여 병원 입원실의 온열 쾌적감에 대해 고찰하였다. Kameel과 Khalil[2]은 회의실과 수술실의 흡배기 조건의 변경에 따른 실내 열유동장 분포를 수치해석 기법을 이용하여 분석하고, 최적 조건을 제시하였다. 또한 실험적인 방법에 의해 공조기로부터 토출되는 기류를 측정, 분석한 연구들도 있었다. Takahashi 등[3]은 Ar수에 따른 난방 기류 특성을 스모크 가시화와 PIV 기법을 적용하여 연구하였고 An 등[4, 5]은 Ar수와 Re수에 따른 토출 기류의 특성과 온도분포를 LIF기법으로 측정하였다. Koshima 등[6]은 기류제어에 의해 와류의 생성을 레이저 슈트법을 이용하여 가시화하였고, 안광협 등[7]은 최근에 정량적 유동 가시화 기법으로 널리 사용되고 있는 PIV 계측 기법을 에어컨 토출 유동 가시화에 적용하였다. 한편, 성재용 등[8]은 본 연구의 대상인 사방 토출식 천장형 실내기의 냉기 토출 각도에 따른 유동장을 PIV를 이용하여 계측하였다.

본 연구에서는 학교 교실과 같은 큰 실내 공간에서 난방용으로 사용되는 천장형 실내기로부터 토출된 기류를 PIV로 가시화하여 그 특성을 파악하고자 한다. 또한 토출 베인의 제어 알고리즘에 따른 최적 조건을 찾고자 한다. PIV 계측을 위하

\* LG전자, 디지털어플라이언스(연), jysung70@lge.com

\*\* 한국산업기술대학교, 기계공학과, psc@kpu.ac.kr

† LG전자, 디지털어플라이언스(연), islec@lge.com

여 실제 크기의 1/10 인 축소 모델을 제작하였으며, 차원 해석을 통하여 강제 대류와 자연 대류가 동시에 고려되도록 Ar 수를 일치시켰다. 이러한 연구는 공조 특성 개선에 의한 천장형 실내기의 고효율 설계 및 최적 제어 알고리즘 개발에 있어 매우 중요한 역할을 한다.

## 2. 연구방법

### 2.1 가시화 모델

실내기의 토출 기류를 가시화하기 위해 실제의 실내기가 장착되는 학교 교실(7000×9000×2700 mm<sup>3</sup>)을 Fig. 1 과 같이 1/10로 축소 제작(700×900×270 mm<sup>3</sup>, 투명아크릴)하여 가시화하였다. 마찬가지로 실내기 모델도 실제 실내기를 1/10으로 축소하여 제작하였고, 흡입과 토출이 동시에 작동되도록 중앙에 흡입구와 이를 둘러싼 네 개의 토출 베인으로 이루어져 있다. 네 개의 베인은 스테핑 모터를 이용하여 구동하였다. 실내기 토출 부분에는 하니콤(honey comb)과 메쉬(mesh)를 설치하여 유동이 안정될 수 있도록 하였고, 방내부로 들어간 유동이 실내기 흡입부를 통하여 나오도록 하였다.

축소 모델은 기하학적 상사성을 만족시키고 실제 실내기의 기류를 정확하게 묘사하기 위해서 Re, Ar, Gr 무차원수의 상사가 필요하다. Re 수는 강제대류가 지배적인 영역에서, Gr 수는 자연대류가 지배적인 영역에서 그리고 Ar 수는 자연대류와 강제 대류의 크기가 비슷한 영역에서 만족시켜야 하는 무차원수로 이 세 개의 무차원수를 동시에 만족 시키는 것은 불가능하다. 본 실험의 경우, 자연 대류와 강제 대류가 공존하며 그 크기가 비슷하기 때문에 Gr 수와 Re<sup>2</sup>의 비인 Ar 수(1) 상사를 이용하였다. 모델과 실제 실내기의 Ar 수는 상사 법칙으로부터 식 (2)와 같이 나타내어진다.

$$Ar = \frac{\beta \Delta T g L}{V^2} = \frac{Gr}{Re^2} \quad (1)$$

$$Ar_a \left( \equiv \frac{\beta \Delta T g L}{V^2} \right) = Ar_m \left( \equiv \frac{\beta \Delta T g L}{V^2} \right) \quad (2)$$

여기서 하첨자 *a*는 실물(actual)을 의미하며, 하첨자 *m*은 모델

Table 1 Thermal and flow conditions in the actual and model cases

	Actual case	Model case
$Q$ (CMM)	28	0.089
$V$ (m/s)	4.7	1.47
$\Delta T$ (°C)	20	20
$t$ (s)	60	19

(model)을 의미한다. 또한  $\beta$ 는 열팽창계수,  $\Delta T$ 는 실내 공간과 실내기 토출 기류의 온도차,  $g$ 는 중력가속도,  $L$ 은 특성 길이 그리고  $V$ 는 토출 속도를 나타낸다. 본 가시화 실험에서 사용된 작동 유체는 공기이고 실내기에서 토출되는 기류와 실내와의 온도차는 실제 실내기의 온도차인 20°C로 하였다. 즉,

$$\Delta T_m = \Delta T_a, \quad L_a = 10L_m \quad (3)$$

로 나타낼 수 있고, 식 (2)를 이용하면 모델의 토출 유량을 식 (4)로 나타낼 수 있다.

$$Q_m = \frac{V_a}{\sqrt{10}} A_m = \frac{V_a}{\sqrt{10}} \frac{A_a}{100} = \frac{Q_a}{100\sqrt{10}} \quad (4)$$

모델의 토출 유량을 근거로 한 모델의 토출 속도 및 Re 수는 실제 실내기 기류에 대하여 다음과 같은 관계를 가진다.

$$V_m = \frac{V_a}{\sqrt{10}}, \quad Re_m = \frac{Re_a}{10\sqrt{10}} \quad (5)$$

또한, 실내기 토출부에 장착된 베인의 스윙운동을 상사시키기 위해 베인의 Close/Open 제어 주기  $t$ 를 다음과 같이 계산하였다.

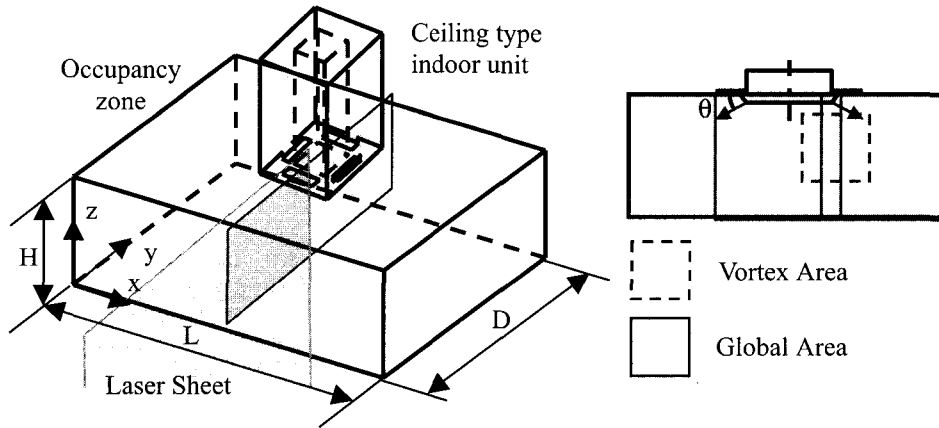


Fig. 1 Schematic model for the flow visualization in a ceiling type indoor unit and the fields of view

$$\frac{t_m}{t_a} = \frac{L_m/V_m}{L_a/V_a}, \quad t_m = \frac{t_a}{\sqrt{10}} \quad (6)$$

이상의 식으로부터 얻은 실제와 모델에서의 열유동 조건을 Table 1에 표시하였다.

### 2.2 PIV 계측 및 실험장치

토출 기류의 실험 장치는 Fig. 2에서 볼 수 있듯이 PIV 계측을 위한 장비와 온도 조절 장치, 유량 조절 장치로 구분된다. PIV 계측 장비는 크게 광원인 레이저, 화상을 취득하는 카메라 그리고 레이저와 카메라를 동기시키는 동기화 장치(synchronizer)로 구성된다. 레이저는 두 대의 300mJ/pulse Nd-YAG를 사용하였고, 첫번째와 두번째 펄스(Pulse)는 Q-switch delay를 이용하여 발생된다. 펄스 간격은 2000 μs로 하였다. 화상 취득은 1K×1K 카메라 2대를 10 mm만큼의 화상이 겹치도록 좌우로 설치하여 더 넓은 영역을 취득할 수 있도록 하였다. 유동장에 주입된 입자로는 압축기 유회유가 사용되었고 이를 미세한 입자 형태로 만들어 주기 위하여 분무기(Atomizer)가 사용되었다. 분무기에는 입자의 공급량을 조절하기 위한 레귤레이터(regulator)가 부착되어 있다.

토출 유량은 2 개의 레귤레이터(regulator)와 댐퍼를 이용하여 조절하였고 분무기에 의해 분사된 입자와 댐퍼에서 혼합된 후 온도 조절 장치를 거쳐 실내기 토출부로 전달된다. 유량 측정 장치는 LFE(laminar flow element)를 이용하였다. 이 장치는 내부에 하니콕이 장착되어 층류 압력저감식을 이용하여 유량을 측정하는 장치로 LFE 양단의 차압을 마노미터(manometer)를 이용하여 측정하고 Hagen-Poiseuille 식으로부터 유량을 계산한다. 온도 조절은 배관 속에 1 kW 용량의 니크롬 선을 설치하여 공급되는 공기의 온도를 상승시킨다. 니크롬선에 공급되는 전압을 조절하여 온도가 일정하게 유지되도록 하였으며, 토출 부위에 열전대를 장착하여 토출 온도를 측정하였다. 이상의 기법으로 실내기를 통하여 챔버(실내)에 공급되는 기류의 온도 및 유량을 제어하였으며, 챔버로 공급된 공기

는 진공펌프를 이용하여 외부로 배출시켰다. 배출되는 공기의 유량은 공급되는 공기 유량과 동일하게 유지하였다.

실내기 토출 유동은 주유동이 4 개의 토출구를 통해 분사되며, 본 연구에서는 토출구 중심에 위치한 y-z 평면에서 관찰한 주유동을 측정하였다. 측정 영역은 Fig. 1에 나타난 바와 같이 와류의 발생여부를 판단하기 위한 와류 영역(Vortex Area)와 전반적인 유로 패턴을 파악하기 위한 전체 영역(Global Area)로 나누어 측정하였다.

제어 방법은 제어가 없는 경우와 십자(+) 및 7자 제어, 3가지 경우에 대하여 측정하였다. 제어는 베인을 주기적으로 Open/Close를 반복하는 것으로 십자 제어는 4 개의 베인 중 평행한 두 베인만 개방하고 나머지 두 베인을 닫는 방법이고, 7자 제어는 7자로 걸쳐있는 두 베인을 열고 나머지를 닫는 방법이다.

### 3. 베인의 제어 알고리즘에 따른 유동 특성

본 실험은 실내와 토출 기류의 온도차가 20℃이고 토출 유량이 28 CMM 인 천장형 실내기를 모델로 하였다. 베인이 일정한 각도로 고정된 경우에 대하여는 이전 연구[8]를 통하여 베인 각도가 30° 이하에서 와류에 의한 재흡입(re-suction)이 발생하지 않음을 확인하였으며, 유동 소음 측면에서는 각도가 작을수록 증가하므로 30°를 최적 각도로 제시하였다.

그러나 기류의 토출 방향을 고정시키면 비록 강제 순환 방식이라고 하더라도 국부적으로 기류가 미치지 못하는 영역이 발생한다. 따라서 기류 방향을 변화시키면서 전체적으로 고온 온도분포를 갖도록 하는 것이 바람직하다. 본 연구에서는 크게 두 가지의 제어 방법을 제안하고 그 성능을 비교 평가하고자 한다. Fig. 3에서는 제어가 없이 고정된 베인에 의한 결과와 두 가지 제어를 적용한 경우의 결과를 비교하였다. 이 그림은 절대 속도의 rms 분포를 나타낸다. 그림에 나타나지는 않았지만 평균 유동장에서 제어가 없는 경우 토출 기류 방향

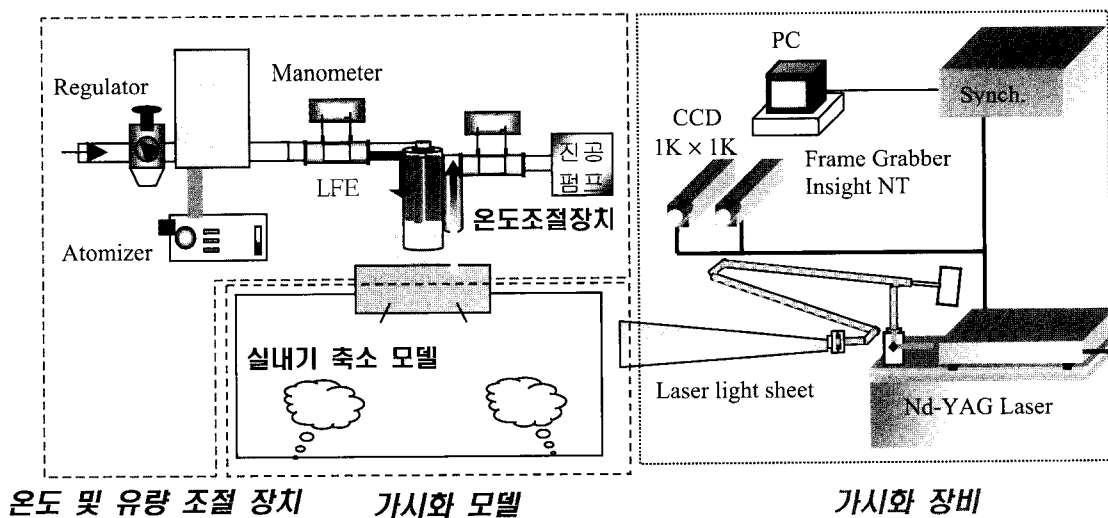
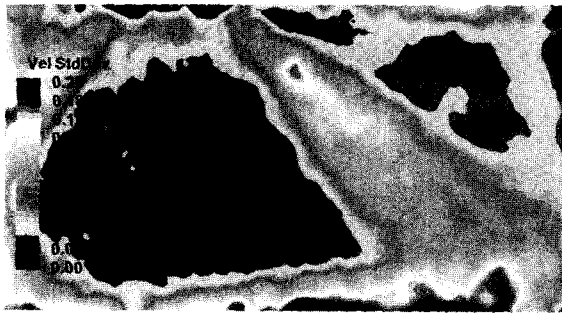


Fig. 2 Experimental set-up for PIV measurements



(a) No control



(b) Cross (+) control



(c) Right angle (∟) control

Fig. 3 Rms distributions of the absolute velocity under periodic control.

을 따라 큰 속도가 형성되나 나머지 공간에서는 속도가 매우 작게 나타났다. 이는 기류가 특정 부위에 집중됨을 의미하고 실내 전체에 기류 분포가 고르지 못하므로 실내에서 사람이 느끼는 기류에 대한 쾌적감이 떨어진다. 반면, 제어를 적용하여 배인을 주기적으로 여닫는 경우, 보다 넓은 영역에 걸쳐 기류가 고르게 분포됨을 알 수 있다. 제어 방법에 따라서는 평균 유동장의 경우 큰 차이를 보이지 않는다. 그러나 Fig. 3의 rms 분포에서 볼 수 있듯이 십자 제어를 적용함으로써 사람이 거주하는 바닥면 부근에서 속도의 변화량이 큰 영역이 보다 넓게 분포하고 있다. 바닥을 따라 흐르는 기류는 사람의 발부분에 직접 영향을 주므로 온열 쾌적감을 증대시키게 된다. 결론적으로 제어를 가하지 않은 고정된 배인에서는 기류가 특정 위치에 집중되어 난방 효과와 사람이 느끼는 쾌적감이 떨어지는 반면 제어를 가함으로써 실내 전체 걸쳐 기류의 고른

분포를 얻었다. 제어를 가하는 경우에 있어서도 7자 제어에 비해 십자 제어가 효과가 큰 것으로 나타났다.

#### 4. 결론

학교 교실과 같은 큰 공간에서 사용되는 천장형 실내기에 대하여 기류의 흐름을 PIV 속도 계측 기법을 이용하여 가시화하였다. 가시화 실험을 위하여 1/10 크기의 모델을 제작하였으며 실제 유동에 근사시키기 위하여 Ar 수를 일치시켰다. PIV 계측을 통하여 토출 배인의 제어 알고리즘에 따른 유동 특성을 파악하였다. 본 실험에서 사용한 모델의 경우 배인의 각도가 30°로 최적화 되어 있으며, 평행한 두 배인을 교대로 여닫는 십자 제어를 적용하였을 때 제어를 하지 않은 경우 또는 7자 제어를 한 경우에 비하여 기류의 고른 분포를 보였다. 이는 실내에 거주하는 사람이 느끼는 온열 쾌적감이 증가함을 의미한다.

#### 참고문헌

- [1] Memarzadeh, F. and Manning, A., "Thermal Comfort, Uniformity and Ventilation Effectiveness in Patient Rooms," *ASHRAE Annual Meeting*, MN-00-11-3 (2000).
- [2] Kameel, R. and Khalil, E. E., "Numerical Computation of the Fluid Flow and Heat Transfer in Air Conditioned Spaces," *Proc. ASME NHTC '01*, NHTC2001-20084 (2001).
- [3] Takeshi, T. and Hikru, K., "Flow in the Room Affected by the Supply Air from the Air-Conditioner," *VSI*, Vol. 18, No. 2 (1998), pp. 87-88.
- [4] An, K. H. and Lee, I. S., "Temperature Field Measurement Around the Room Air Conditioner Using the LIF Technique," *4<sup>th</sup> JSME-KSME Thermal Eng. Conference*, Vol. 2 (2000), pp. 275-280.
- [5] K. H. An and I.-S. Lee, "Measurement and Control of the Thermal Fluid Flow around the Room Air Conditioner," *Proc. 1st National Congress Fluid Eng.*, (2000), pp. 407-410.
- [6] Koshima, M., "Development of Energy Saving Room Air Conditioners," *Report of Mitsubishi Heavy Industry*, Vol. 33, No. 2, (1996), pp. 78-81.
- [7] K. H. An, I.-S. Lee, H. S. Choi, G. S. Lee and D. Huh, "Visualization of the Air Conditioner Discharge Flow," *Proc. SAREK 2000 Winter Annual Conference*, Vol. 2, (2000), pp. 613-617.
- [8] J. Sung, K. H. An, G. S. Lee, H. S. Choi and I.-S. Lee, "Heat and Flow Visualization for Ceiling Type Indoor Unit and Optimization of Vane Angle," *Proc. KSME 2002 Spring Annual Meeting*, (2002), p. 159.