

냉난방 온도감지 디퓨저의 간극변화에 따른 기류분포 특성

한 화 택[†], 신 민 우^{*}, 엄 철 민^{*}, 최 선 호^{*}

국민대학교 기계자동차공학부, *국민대학교 대학원

Air Distribution Performance According to the Gap Opening of a Temperature Controlled Diffuser

Hwataik Han[†], Min-Woo Shin^{*}, Chol-Min Yom^{*}, Sun-Ho Choi^{*}

School of Mechanical and Automotive Engineering, Kookmin University, Seoul 136-702, Korea

^{*}Graduate School of Mechanical Engineering, Kookmin University, Seoul 136-702, Korea

(Received December 6, 2005; revision received January 13, 2006)

ABSTRACT: This study has been conducted in order to develop a temperature-controlled round pan diffuser with variable-openings. Flow visualization was performed to investigate the airflow patterns according to gap openings. The velocity profiles were measured using an omni-directional anemometer for two cases, i.e. a horizontal and a vertical discharge conditions. Numerical simulation also confirms there is a narrow range of gap openings where a horizontal discharge shifts to a vertical discharge. The air distribution performance index increases abruptly when the air discharge shifts from vertical to horizontal direction.

Key words: Air distribution performance index(ADPI, 기류분포 성능지표), Effective draft temperature(EDT, 유효 드래프트 온도), Diffuser(디퓨저), Opening(간극)

기 호 설 명

- A : 디퓨저 목 단면적 [m^2]
- EDT : 유효 드래프트 온도 [K]
- h : 간극 [mm]
- K : 압력 손실계수
- P : 압력 [Pa]
- Q : 풍량 [m^3/s]
- t_c : 설정온도 또는 실평균 온도 [$^{\circ}C$]
- t_x : 실내 임의지점에서의 온도 [$^{\circ}C$]
- V_x : 실내 임의지점에서의 속도 [m/s]
- x : 수평방향 좌표 [m]

y : 수직방향 좌표 [m]

1. 서 론

공기분배 시스템 중에서 최말단 기구인 디퓨저는 실내에 분산되어 있는 냉난방부하와 오염부하를 처리하기 위하여 급기를 실내공간에 효과적으로 분배시키는 역할을 한다. 그러나, 고정된 형상을 갖는 디퓨저로는 급기온도와 풍량조건의 변화에 따라 적절히 대응하지 못하여 비효율적인 공기분배가 이루어지는 경우가 많이 있다. 냉방운전시 급기되는 차가운 공기는 실내 전체로 분배되지 못하고, 하강하는 기류를 발생시킴으로써 콜드드래프트를 발생시킬 수 있다. 반면, 난방운전시의 따뜻한 급기는 거주영역에 미치지 못하고 부력효과에 의해 상승하여 배기됨으로써 난방에

[†] Corresponding author

Tel.: +82-2-910-4687; fax: +82-2-910-4839

E-mail address: hhan@kookmin.ac.kr

너지의 손실이 발생할 수 있다.

따라서 기류의 확산각도를 조절함으로써 열적 쾌적성과 에너지절약에 기여할 수 있다. 이에 따라 냉난방시 급기온도에 따라서 급기방향을 변화시킬 수 있는 가변형 디퓨저에 관한 연구가 필요하다. Engel and Kirkpatrick⁽¹⁾은 원형 디퓨저의 유효면적을 변화시키면서 디퓨저의 성능을 특정시킬 수 있는 속도감쇠계수와 가상점을 실험적으로 결정하였다. Kirkpatrick and Knappmiller⁽²⁾은 냉방조건에 따라 수치해석적으로 디퓨저에 의한 기류분포 성능지표인 ADPI를 계산하였다. Kashi-rajima et al.⁽³⁾은 다양한 디퓨저를 가지고 ADPI를 비교하여 급기의 토출 방향에 따른 온열환경을 평가하였다.

본 연구에서는 급기온도의 변화에 따라서 외부 동력 없이 온도를 감지해 자동으로 급기각도를 조절할 수 있는 디퓨저 개발을 위한 기초 데이터를 제공하고자 한다. 원형 팬 디퓨저의 형상과 간극변화에 따른 디퓨저의 급기성능을 파악하기 위하여 실내의 기류분포 특성과 기류분포 성능, 그리고 압력손실 특성 등을 실험적 방법과 수치해석적 방법으로 고찰하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

본 디퓨저 실험에 사용된 실험 챔버의 크기는 가로 8.8 m, 세로 5.8 m, 높이 3.0 m이다.⁽⁴⁾ Fig. 1에 전체적인 실험장치의 구성을 보여주고 있다. 천정면 중앙에 원형 팬 디퓨저(round pan diffuser)가 설치되어 있으며, 실의 모서리 부근 천정에 4개의 배기구가 설치되어 있다. Fig. 2는 디퓨저의

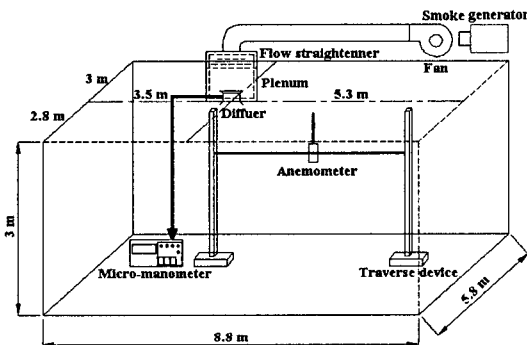


Fig. 1 Overall schematic diagram of the experimental setup.

Table 1 Experimental conditions

Flow rate		658.5 CMH
Diffuser opening	Case I	49.2 mm
	Case II	39.4 mm

단면을 보이며, 디퓨저의 목(neck) 지름은 240 mm이다.

덕트를 통해 공급되는 공기는 기류를 균일화하기 위해 정류기(straightener)가 설치된 플레넘(plenum)을 지나 디퓨저를 통해 급기되도록 하였다. 송풍량은 덕트 내에 있는 댐퍼를 이용하였다.

디퓨저에 설치된 벨로즈 센서는 온도변화에 따라 팽창 수축함으로써 디퓨저 간극을 변화시키도록 설치되어 있다. 급기온도를 16℃에서 30℃로 변화시킬 때, 포텐쇼미터(potentiometer)를 이용해 측정된 길이변화는 최대 11 mm로 나타났다. 실제 디퓨저 실험에서는 디퓨저 간극(opening) 변화에 따른 기류분포성능을 알아보기 위해 팬(pan)의 위치를 이 범위 내에서 수동으로 조절하면서 실험을 수행하였다.

디퓨저 팬의 간극은 급기가 통과하는 유효면적이 제로가 되는 완전히 밀폐된 상태를 기준으로 하여, 팬의 위치를 하향으로 조절하면서 실험조건을 구성하였다. 실험에 적용된 실험조건이 Table 1에 나타나 있다.

디퓨저로부터 급기되는 풍량은 후드풍량계(SWF-125)를 이용하여 측정하였다. 또한, 디퓨저 팬의 간극변화에 따른 정압을 측정하기 위해 토출 직전 덕트에 압력 측정구를 설치하여 마이크로 마노미터로 정압을 측정하였다.

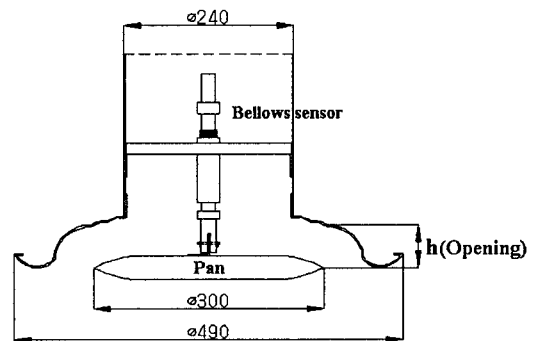


Fig. 2 Cross-section of the round pan diffuser used for the present study.

급기된 기류속도분포는 팬의 간극변화에 따른 각 케이스별로 측정하였다. 수평급기의 경우 디퓨저의 토출 말단으로부터 천정면을 따라 수평 이동한 측정점마다 속도분포를 측정하였다. 수직급기의 경우 디퓨저로부터 일정한 거리를 수직 이동한 각 측정 높이에서의 속도분포를 측정하였다. 기류속도분포 측정에 사용된 센서는 0.1~30 m/s의 측정범위와 $\pm 3\%$ 의 정확도를 갖는 무방향성 풍속계이다.

또한, 실내로 급기되는 기류분포를 정성적으로 관찰하기 위하여 송풍기 흡입구에 연발생기(smoke generator)를 설치하여 가시화 실험을 수행하였다. 가시화 실험에 사용된 연발생기는 시간당 2.5 L로 일정한 분무량을 가지며, 분무되는 입자의 크기는 0.25~60 μm 의 범위이다.

3. 수치해석

수치해석은 실험 챔버를 모사하여 모델링하였으며, 급기 디퓨저의 모델링은 CAD 도면의 좌표를 통해 사실적으로 모델링하였다. Fig. 3에 디퓨저 부근의 상세 격자그림을 나타내었다. 해석은 등온(isothermal)조건과 냉방(cooling)조건에 대하여 수행하였다. 등온조건인 경우 수평 및 수직 급기에 대한 실험결과를 모사하고 수치해석방법을 검증하기 위해 수행하였다. 디퓨저의 ADPI를 구하기 위한 냉방조건인 경우 급기의 온도는 16°C로 설정하였으며, 실내로 유입되는 냉방부하인 실내 측벽 모두에 대하여 단위면적당 25 W/m²의 열량으로 설정하였다. 천장과 바닥면은 단열조건으로

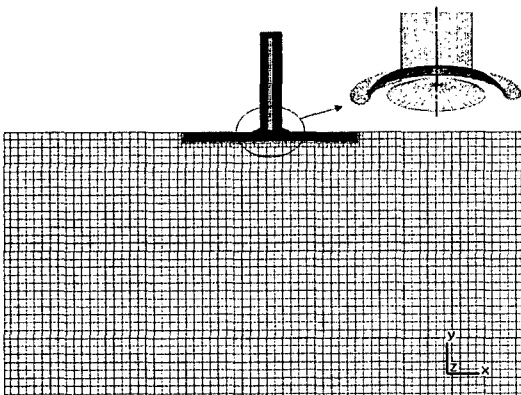


Fig. 3 Numerical grid.

Table 2 Numerical simulation conditions

Flow rate		658.5 CMH
Supply air temperature		16°C
Side wall condition		Heat flux 25 W/m ²
Diffuser opening	Case I	49.2 mm
	Case II	39.4 mm

로 설정하였다. 압력보정 알고리즘으로는 SIMPLE 알고리즘을 사용하였으며, 난류계산을 위하여 표준 $k-\epsilon$ 모델을 사용하였다. Table 2에 수치해석을 위한 경계조건과 팬의 간극변화에 따른 해석조건이 나타나 있다.

수치해석 결과로부터 식(1)에 따라 실내의 유효 드래프트 온도(EDT) 분포를 계산하였다.

$$EDT = (t_x - t_c) - 8(V_x - 0.15) \quad (1)$$

여기서, t_x 는 실내 임의지점에서의 온도, t_c 는 실내의 평균 온도 또는 설정온도를 나타내며, V_x 는 실내지점에서의 기류속도이다. EDT의 값이 -1.5 ~ +1.0 K의 범위이고, 이 범위 내의 기류속도의 값이 0.75 m/s 이하인 영역에 대해서는 거주자가 쾌적하다고 판단된다. 기류분포 성능지표(ADPI)^(4,5)는 실내 재실영역에 대하여 위의 쾌적조건을 만족하는 영역의 비율로 정의된다.

4. 결과 및 고찰

4.1 디퓨저 압력손실 특성

디퓨저 팬의 간극을 고정시키고 풍량변화에 따른 압력손실 특성을 측정하였다. 최소제곱법을 써서 각각의 간극에 대한 압력손실계수(K)를 계산하였다.

$$P_t = KP_d = K \frac{1}{2} \rho \left(\frac{Q}{A} \right)^2 \quad (2)$$

여기서, P_t 는 전압, P_d 는 동압, Q 는 풍량, A 는 목의 단면적, ρ 는 공기의 밀도이다.

Fig. 4는 간극변화에 따른 결과를 보인다. 디퓨저 간극 증가에 따라서 K 값은 감소하며 따라서 디퓨저의 압력손실도 감소한다.

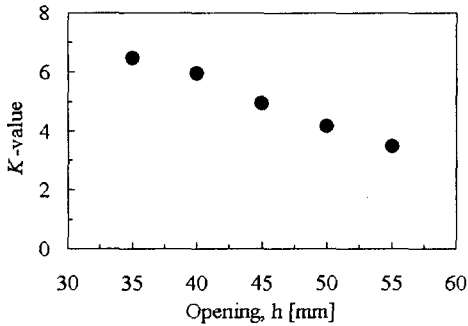


Fig. 4 *K*-value with respect to diffuser opening.

4.2 가시화 실험결과

간극변화에 따라 급기되는 기류의 특성을 정성적으로 파악하기 위해서 가시화 실험을 수행하였다. 디퓨저 팬의 간극을 34.4~64.0 mm 범위에서 5 mm 간격으로 변화시키면서 수행한 결과 수직급기(34.4~39.4 mm)와 수평급기(44.3~63.0 mm)가 분명하게 구분되었다. 간극이 41.8 mm일 때는 수직과 수평급기를 구분하기가 어려운 불안정한 천이영역의 형태를 보였다. 등온조건의 경우 디퓨저 팬의 간극이 49.2 mm(Case I)와 39.4 mm(Case II)인 조건에 대한 가시화 실험결과가 Fig. 5에 나타나 있다.

디퓨저 간극이 상대적으로 큰 Case I의 경우 급기된 기류가 천정면을 따라 수평하게 확산되는 것을 볼 수 있다. 디퓨저 목을 통과한 급기는 팬에 충돌하여 팬의 윗면 방향으로 흘러간다. 이때 팬이 상대적으로 하향 조절되었기 때문에 윗면에 반발된 유동은 주변의 쉬라우드(shroud)와 충돌하지 않고 수평방향으로 나아간다.

반면, Case II의 경우 급기가 수평방향으로 확산되지 않고 수직방향으로 확산되는 것을 볼 수 있다. 이 경우에는 팬이 상향 조절되었기 때문에 반발된 공기유동이 쉬라우드에 의하여 아래쪽으로 방향이 다시 전환되기 때문이다.

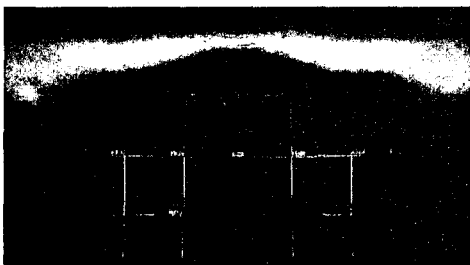
4.3 기류속도분포

디퓨저로부터의 거리에 따른 속도분포를 측정하기 앞서 정류장치와 플레넘을 지나 급기 디퓨저에서 토출되는 기류의 원주방향으로 각도에 따른 균일도를 확인하였다.

등온조건에 대한 수평급기시 기류속도분포에 대한 실험 및 수치해석 결과가 Fig. 6에 나타나 있다. 최대속도는 벽면 아주 가까운 곳에서 나타나며 천정에서 멀어질수록 감소되었다. 실험 및 수치해석 조건은 가시화 실험과 동일하다(Case I). 디퓨저 토출 말단 부근에서는 전형적인 원형 벽면 제트 유동의 형태를 보이고 있으며, 천정면을 따라 거리가 멀어질수록 중심속도의 분포가 점차 감소하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 7에 디퓨저 토출 말단으로부터 수평 이동 거리에 따른 최대속도의 감소곡선이 나타나 있다. 실험 및 수치해석 결과를 비교하여 볼 때 속도의 절대값에는 다소 차이가 있으나, 두 가지 경우 모두 거리의 이동에 따라 지수적 감쇠곡선을 나타내는 것을 볼 수 있다.

Fig. 8은 가시화 실험(Case II)조건과 동일한 등온 수직급기시의 기류속도분포에 대한 실험결과와 수치해석 결과를 비교하여 보이고 있다. 그림의 윗부분은 토출면에 가까운 2.84 m 레벨에서 중심축으로부터의 수평위치에 따른 속도 크기, *V*의 분포를 보이고 있다. 디퓨저 개구부에 해당하



(a) Case I ($h=49.2$ mm)



(b) Case II ($h=39.4$ mm)

Fig. 5 Flow visualization results showing horizontal and vertical discharges.

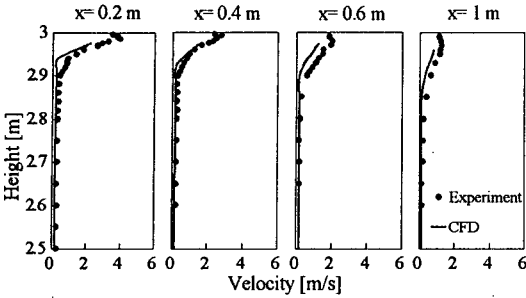


Fig. 6 Velocity profiles for Case I.

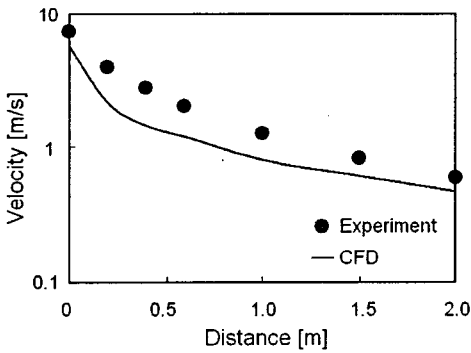


Fig. 7 Maximum velocity with respect to distance from a diffuser for horizontal discharge.

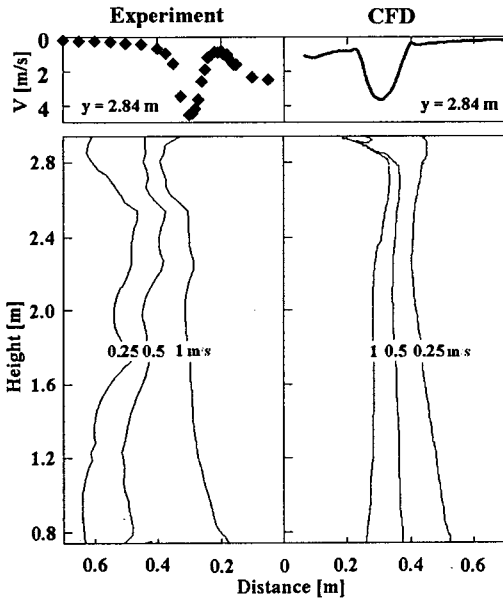


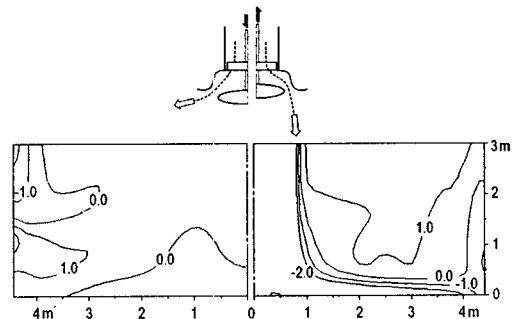
Fig. 8 Velocity profiles for Case II.

는 $x=0.3\text{m}$ 부근에서 최대값을 보이며 실험적으로 측정된 기류분포 결과와 수치해석 결과가 유사한 경향을 보이고 있다. 또한 그림의 아래부분은 천정면 하부에서 수직 중앙단면을 따라 2차원 등속도선 분포를 나타낸 것으로 실험 및 수치해석 결과가 비교적 잘 일치하고 있다.

4.4 실내기류분포 성능평가

Fig. 9는 냉방조건시 Case I 과 Case II에 대한 디퓨저 중심단면 거주역의 EDT 분포를 보여주고 있다. 중심선을 기준으로 좌우대칭이므로 수평과 수직취출 결과의 비교를 용이하게 하기 위하여 Case I은 대칭선의 좌측면, Case II는 우측면만을 표시하였다.

수평급기인 Case I의 경우 실내로 공급되는 냉각된 공기가 실 전체로 고르게 분배되어 전체적으로 유효 드래프트 온도의 폐적범위인 $-1.5\sim +1.0\text{K}$ 를 만족하고 있는 것을 알 수 있다. 수직급기인 Case II의 경우 실내로 공급되는 냉각된 공기가 재실영역을 향해 수직으로 공급된다. 이는 재실자들에게 차가운 기류에 의한 콜드드래프트를 야기시킬 수 있으며, 실내로 분배되지 못한 공기로 인해 벽면으로부터 유입되는 냉방부하에 의해 국부적인 온도 불균형이 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. 이러한 결과에 의해 Case II의 EDT 분포의 경우 폐적범위의 값을 벗어나는 영역이 많이 나타나며, 이 대부분은 EDT의 값이 -1.5K 이하인 바닥면 부근의 차가운(cold) 영역과 $+1.0\text{K}$ 이상인 벽면 주위의 더운(hot) 영역인 것을 알 수 있다.



(a) Case I ($h=49.2\text{mm}$) (b) Case II ($h=39.4\text{mm}$)

Fig. 9 EDT distribution for in occupant region.

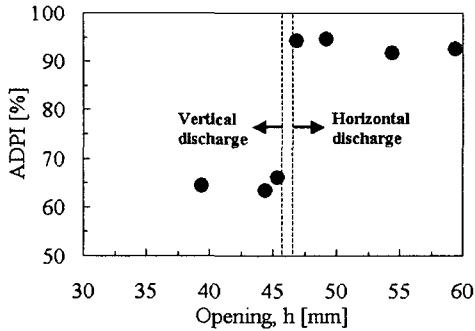


Fig. 10 ADPI with respect to opening of diffuser pan.

Fig. 10은 바닥에서 높이 2m 이내인 거주영역에 대한 디퓨저 팬의 간극과 ADPI와의 관계를 나타낸 그래프이다. 간극이 45.4 mm에서 46.9 mm로 변화할 때 급기방향이 수직에서 수평으로 바뀌게 된다. 46.9 mm 이상의 디퓨저 팬 간극에서는 모든 ADPI 결과값이 90% 이상의 높은 분포를 나타내는 것을 볼 수 있으며, 45.4 mm 이하의 팬 간극에서는 65% 이하 정도의 낮은 ADPI 결과값을 나타낸다. 이는 Fig. 10에 나타나 있는 EDT 분포의 결과와 일치하며, 디퓨저 팬 간극변화를 통해 수평급기를 유도하는 경우 급기시보다 약 30% 정도의 ADPI 상승효과를 가져오는 것을 볼 수 있다.

5. 결 론

온도변화에 따라 팬 간극이 변화하는 디퓨저에 대하여 등온조건에 대한 기류분포 및 가시화 실험을 수행하였다. 또한 간극변화에 따른 디퓨저의 ADPI값을 알아보기 위해 냉방조건에 대한 수치해석 시뮬레이션을 수행하였다. 실험 및 시뮬레이션을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 본 연구에 사용된 디퓨저의 경우 온도감지 밸브의 가변 범위 내(11 mm)에서 팬의 간극에 따라 기류방향이 전환되는 특성을 확인하였다.
- (2) 가시화 실험결과 간극이 39.4 mm 이하일 때는 수직방향으로 급기되고, 49.2 mm 이상에서는 수평방향으로 급기된다.
- (3) 디퓨저로부터 수평으로 급기되는 경우에는 전형적인 원형 제트의 속도분포를 보이며, 점차 거

리가 멀어질수록 중심속도는 지수적으로 감소한다.

(4) 냉방조건에서 수직급기인 경우보다 수평급기일 때 90% 이상 대부분의 거주영역 내에서 유효 드래프트 온도의 쾌적범위를 만족한다.

(5) 냉방조건에서 간극변화를 통해 수평급기를 유도하는 경우가 수직급기시보다 ADPI가 30% 이상 상승한다.

지금까지 수행한 등온조건과 냉방조건에 추가하여 난방조건에 대한 연구가 필요하다. 디퓨저의 성능평가시 디퓨저 압력손실과 간극의 영향을 고려하여, 기류분포성능을 향상시키기 위하여 기류방향을 결정하는 디퓨저 팬의 간극에 관한 최적화가 이루어져야 한다. 앞으로 다양한 디퓨저에 대하여 기류분포성능을 위한 연구가 활발히 이루어져야 할 것이다.

참고문헌

1. Engel, J. A. and Kirkpatrick, A. T., 1993, Experimental determination of the airflow performance of a variable-area radial diffuser, ASHRAE Transactions, Vol. 99, No. 2, pp. 759-769.
2. Kirkpatrick, A. T. and Knappmiller, K. D., 1996, The ADPI of cold air jets in an enclosure, ASHRAE Transactions, Vol. 102, No. 1, pp. 3-9.
3. Kashirajima, Y., Sugiura, T., Takahashi, M., Sugihara, Y. and Ooshima, N., 2002, Experimental study of indoor thermal environmental for cold air distribution systems using various air outlets, ASHRAE transactions, Vol. 108, No. 2, pp. 16-22.
4. ASHRAE, 1991, Method of testing for rating the performance of air outlets and inlets, ANSI/ASHRAE Standard 70-1991.
5. ASHRAE, 2001, ASHRAE Handbook-Fundamentals, Chapter 32, Space Air Diffusion.
6. Oh, Y. J., Jung, D. W. and Shim, J. E., 1998, An experimental study on the energy consumption according to diffuser performance evaluation, SAREK, pp. 441-446.