

학교건물에서 냉방부하에 따른 열적 쾌적성 평가지표 비교 연구

노광철[†]·오명도^{*}

A Study on the Comparison of Thermal Comfort Performance Indices for Cooling Loads in the Classroom

Kwang-Chul Noh and Myung-Do Oh

Key Words: Air Diffusion Performance Index(기류분포성능지표), Predicted Mean Vote(온열쾌적지표), 4-way Cassette Air-conditioner(4way에어컨), Thermal Comfort(열쾌적성)

Abstract

We performed the numerical study on the comparison of thermal comfort performance indices for cooling loads in the classroom when the 4-way cassette air-conditioner is mounted on the ceiling. We investigated the velocity and the temperature distribution of the classroom as with respect to the variation of the air diffusion angle of the air-conditioner. Air diffusion performance index and Predicted mean vote were used for analyzing the characteristics of the thermal comfort in the classroom and comparing their values each other. From the numerical results, we knew that the thermal comfort is largely affected by the air diffusion angle and velocity of the air-conditioner. And we also found out that the qualitative tendency of the distribution between Air diffusion performance index and Predicted mean vote is very similar in all occupied zone.

1. 서론

기존의 학교 시설들은 에너지 절약을 위하여 밀폐공간의 개념으로 설계되고 사용되어 왔다. 그러나 학교시설의 현대화 계획과 2004년 5월부터 적용되는 “다중이용시설등의 실내공기질관리법”⁽¹⁾에 따라 에너지의 효율적 이용과 쾌적한 교실 환경을 구축하기 위한 노력이 진행되고 있다. 이에 따라 기존의 교실에 설치하여 열적 쾌적성과 환기를 이용한 환경 쾌적성을 동시에 추구할 수 있는 방법으로 4way 에어컨과 배기구를 천정에 설치하여 해결하는 방법들이 연구되고 있

다.⁽²⁻⁴⁾

최정민 등⁽²⁾은 천장형 냉난방기의 취출온도와 3가지의 다른 교실규모에 대해 기류분포와 온도 분포로서 난방공조환경에 대한 평가를 수행하였고 권용일 등⁽³⁾은 4way 히트펌프의 난방시 급기효율과 열적 쾌적성에 대한 평가를 환기효율(ventilation efficiency)과 기류분포성능지표(air diffusion performance index, 이하 ADPI라 칭함)를 이용하여 수치적인 방법으로 연구를 수행하였다. 김경환 등⁽⁴⁾도 에어컨과 환기시스템을 적용한 실내 온열 및 환기특성을 토출풍량 및 냉방기류, 온도분포, 국소급기지수 등을 통하여 실험 및 수치적인 방법으로 분석을 수행하였다. 그리고 열적 쾌적성 평가지표에 관해서는 조영진⁽⁵⁾이 측벽 부하가 있는 존재하는 실내에서 디퓨저의 형상에 따른 ADPI의 특성에 관한 연구를 수행하였으며 김세현⁽⁶⁾ 등은 실내에 복사부하가 고려된 경우에 평균복사온도가 온열쾌적지표(predicted mean vote, 이하 PMV라 칭함)에 미치는 영향에 대한 연구를 수행하였다.

† 서울시립대학교 대학원 기계정보공학과

E-mail : mdoh@uos.ac.kr

TEL : (02)2210-2547 FAX : (02)2248-5110

* 서울시립대학교 기계정보공학과

본 연구에서는 환기가 고려된 학교 교실에서, 냉방부하를 제거하기 위해 4way 에어컨이 설치된 경우 냉기 토출각도에 따른 기류분포성능지표(ADPI)와 온열쾌적지표(PMV)을 조사하여 재실자가 느끼는 열적 쾌적성을 분석하였고 이 두 가지 지표에 대한 비교, 평가를 수행하였다.

2. 해석 모델

Fig. 1은 천정설치형 4way 에어컨을 설치한 대상 교실의 모델이다. 대상이 되는 교실의 규격은 11.4m(L)×7.2m(W)×2.7m(H)이고 체적은 222m³이다. 천정에 설치된 4way 에어컨의 중심은 x축 방향으로 3.6m에 위치하고 z축 방향으로는 유리창을 통한 외기부하 및 일사부하를 제어하기 위하여 유리창쪽으로 약간 치우친 4.8m 위치에 부착되어 있다. 배기구는 그림에서 보는 위치에 4개가 설치되어 있다. 본 연구에서 냉방을 위해 사용된 4way 에어컨은 직결형(series)으로서 외기도입부를 에어컨과 직접 연결하여 공급하는 방식으로 Fig. 2와 같은 형태로 규격은 0.95m(L)×0.95m(W)이다.

대상 교실의 냉방부하와 대표적인 실내 오염물질인 CO₂를 제어하기 위하여 에어컨에서 토출되는 풍량은 41CMM이다. 이 중에서 다시 에너지 절약을 위해 에어컨으로 재유입되는 유량은 29CMM이고 환기를 위한 신선외기의 도입량은 교실에 35인이 거주하는 것으로 가정하여 12CMM(0.33CMM/인)으로 하였고 이때 환기횟수는 3.15회/h이다.

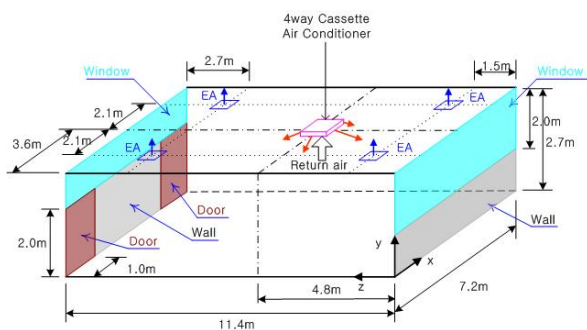


Fig. 1 Schematic design of the classroom

Table 1 The PMV index

PMV index	-3	-2	-1	0	1	2	3
	cold	cool	slightly cool	neutral	slightly warm	warm	hot

3. 열적 쾌적성 평가지표

3.1 기류분포성능지표(ADPI)

ADPI는 재실영역에서의 지역적인 기류와 온도의 상태가 쾌적범위에 포함되는 비율을 나타내는 것으로서 재실자의 열적 쾌적성과 관련된 지표이다. 이는 각각의 측정점에서 식(1)에 의해 유효드래프트(effective draft temperature, ϕ)를 산정하고 측정된 값이 $-1.7^{\circ}\text{C} < \phi < 1.1^{\circ}\text{C}$ 의 범위에 존재하는 비율로서 계산된다.

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

여기서 t_x 는 임의의 지점에서의 건구온도이고, t_c 는 실내 설정온도이며 본 연구에서는 실내 설정온도를 여름철 쾌적범위인 27°C로 정의하였다. V_x 는 임의의 지점에서의 속도로서 0.35m/s보다 작아야 한다.

3.2 온열쾌적도(PMV)

PMV는 인간의 온열환경에 대한 반응을 정량화시킨 것으로 인체의 대사율, 의복의 열저항치 등과 건구온도, 평균복사온도, 기류, 습도 등을 종합적으로 고려하여 인체가 느끼는 온열쾌적도를 이론적으로 나타낸 것이다. 온열쾌적도를 평가하

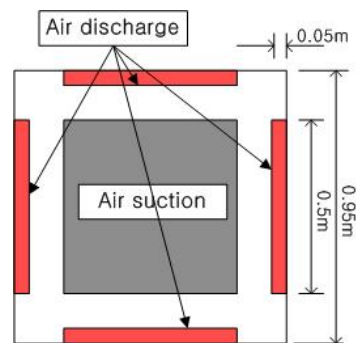


Fig. 2 Schematic view of the 4way air-conditioner

Table 2 Governing equations and model coefficients

Continuity equation:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0$$

Momentum equation:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ (\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \right\} + S_i$$

Turbulent kinetic energy equation:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ \left(\mu + \mu_t \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right\} + G_k - \rho \epsilon$$

Dissipation rate equation of Turbulent kinetic energy:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ \left(\mu + \mu_t \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right\} + G_k C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k}$$

Energy equation:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i T) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ \left(\frac{\mu}{\sigma_t} + \frac{\mu_t}{\sigma_t} \right) \frac{\partial T}{\partial x_i} \right\} + S_T$$

where,

$$C_\mu = 0.09, C_{1\epsilon} = 1.44, C_{2\epsilon} = 1.92, \mu_t = \frac{c_\mu \rho k^2}{\epsilon}, G_k = \mu_t \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \frac{\partial u_j}{\partial x_i}$$

$$\sigma_k = 1.0, \sigma_\epsilon = 0.9, \sigma_t = 1.0, \sigma_t = 1.0$$

기 위하여 ISO Standard 7330에서 규정하고 있는 PMV계산법을 사용하였다.⁽⁸⁾ PMV지표는 식(2)를 이용하여 계산하고 Table 1에서와 같이 7단계로 온열쾌적도를 구분하고 쾌적범위는 -0.5~0.5로 규정하고 있다.

$$PMV = \frac{(0.303e^{-0.0036M} + 0.28) \times [(M - W) - H - E_c - C_{res} - E_{res}]}{1} \quad (2)$$

여기서, *M*은 인체의 신진대사율을 나타내고, *W*는 외부로 행하는 일을 나타내며, *H*는 현열을 통한 열손실, *E_c*는 피부를 통한 증발 열전달, *C_{res}*는 호흡을 통한 대류 열전달, *E_{res}*는 호흡을 통한 증발 열전달을 각각 나타낸다. 각각의 변수들에 대한 계산식은 설명을 생략한다. 계산시 사용된 인체의 신진대사량은 일반적인 정좌 상태인 1.0met(50W/m²)을 적용하였고 착의 상태는 여름철 평상복 차림으로 가정하여 0.38clo(0.059m²°C/W)를 사용하였다.

4. 수치해석방법

교실에서의 유동특성을 기술하는 비정상상태의

지배방정식은 연속방정식, 운동량방정식, 난류운동에너지방정식, 난류운동에너지 소산율방정식이며 이러한 방정식을 수식으로 표현하면 Table 2와 같다. 본 연구에서는 실내 유동해석에서 많이 사용되는 standard *k-ε* 난류모델을 사용하였으며, 온도차에 의한 부력효과를 운동량방정식의 소스항으로 포함시켰다. Table 2에 나열된 지배방정식을 풀기 위하여 상용 CFD코드인 STAR-CD를 사용하였다. 정상상태의 속도장, 온도장을 얻기 위하여 SIMPLE 알고리즘을 사용하였고 계산시 수렴판정 조건으로는 운동량으로 정규화한 각 셀 (cell)에서의 운동량, 연속방정식, 에서 유수의 합이 모두 10⁻³이하일 때로 정하였다.

Table 3 Boundary condition

Category	Input data
Outdoor temperature	33°
Thermal conduction rate	Exterior wall : 0.57W/m ² °C Indoor wall : 3.29W/m ² °C Window : 3.26W/m ² °C Door : 5.93W/m ² °C
Air inlet velocity	7m/s

본 연구에서는 에어컨에서의 냉기 토출각도에 따른 영향을 관찰하기 위하여 토출각 30°, 45°, 60°에 대하여 계산을 수행하였으며 토출온도는 토출각이 30°인 경우 22℃, 토출각이 45°, 60°인 경우 24℃로 하여 계산을 수행하였다. 여름철 일사부하의 고려를 위하여 태양이 조사되는 영향을 태양의 고도각이 70°인 경우로 가정하였고 실내로 조사되는 바닥에서 45W/m² 부하가 생성되는 것으로 처리하였다.⁽⁸⁾ 그 외의 경계조건은 Table 3에 자세히 나와 있다.

5. 결과 및 고찰

5.1 기류분포

실내에서의 유속은 거주자의 열쾌적성에 상당한 영향을 미친다. 이에 따라 ASHRAE standard 55-92는 냉방시 거주자가 쾌적감을 느끼는 최대 공기유속을 0.25m/s이하로 규정하고 있다. Fig. 3은 모델로 선정된 교실의 x=3.6m인 수직단면에서의 유속분포를 보여준다. 토출각도가 30°인 경우에는 쿠완다 효과(Coanda effect)에 의하여 에어컨 디퓨저에서 토출된 찬 공기가 천정벽으로 붙어서 이동하고 이후 창측에 충돌하여 교실 거주공간으로 흐르는 유동현상을 관찰할 수 있었다. 그리고 거주공간에서의 유속은 대부분 0.2m/s이하로 나타나서 ASHRAE standard⁽⁷⁾를 잘 만족하는 것으로 나타났다. 토출각도가 45°인 경우에는 거주공간에서 상당히 넓은 영역에 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었다. 거주공간에서 토출속도의 영향을 직접적으로 받는 부분은 유속이 약 0.5m/s까지 계산되었으며 이 값은 ASHRAE standard의 허용치⁽⁷⁾를 초과하였다. 따라서 이 부분에서는 열쾌적성 지표들이 쾌적범위를 초과하여 매우 낮게 나타날 것으로 예상된다. 토출각도가 60°인 경우에는 대부분의 거주공간에서의 유속이 0.25m/s를 유지하는 것으로 나타났으나 에어컨 하방으로 토출된 냉기의 유속이 0.8m/s로 매우 커서 거주자에게 불쾌감을 줄 것으로 판단된다.

5.2 온도분포

Fig. 4는 여름철에 태양일사의 영향을 고려한 경우, 에어컨의 냉기 토출각도에 따른 온도분포를 보여준다. 토출각도가 30°인 경우에는 교실 천정면보다 채실영역에서 온도가 균일하게 분포하

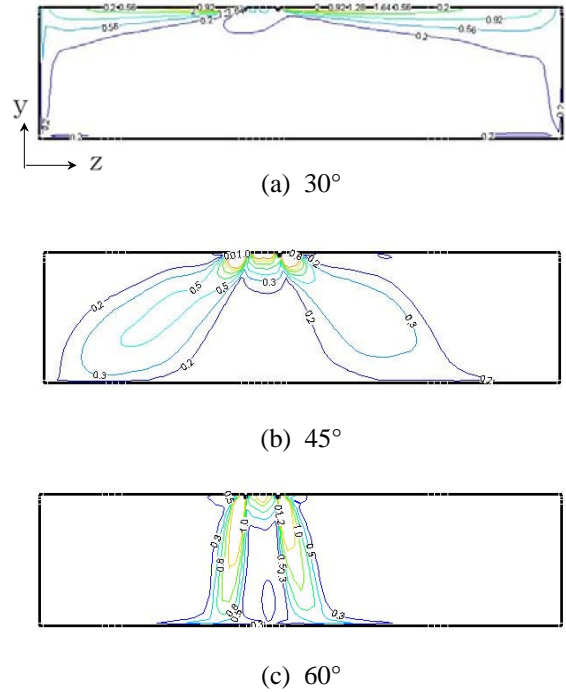


Fig. 3 Velocity distribution of the z-y plane at x=3.6m for the air discharge angle.

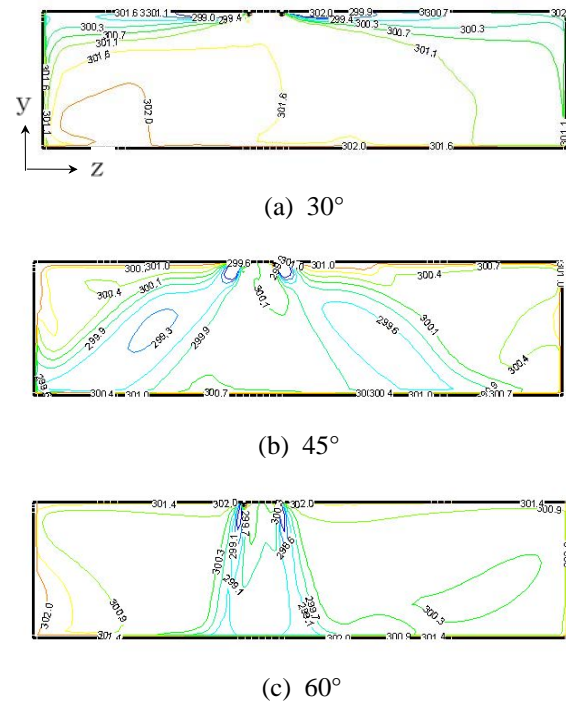


Fig. 4 Temperature distribution of the z-y plane at x=3.6m for the air discharge angle when the radiation load is considered.

는 것을 볼 수 있다. 그러나 태양이 조사되는 부분에서는 일사부하의 영향으로 인하여 국부적으로 온도가 높게 나타나는 것을 확인할 수 있었고 이로 인하여 재실영역에서 여름철 실내 적정온도인 26°C~28°C보다 약간 높게 유지되는 것으로 나타났다. 토출각도가 45°인 경우에는 재실영역에서 토출각이 30°인 경우보다 온도분포는 적절하게 유지되는 것으로 나타났으나 토출기류의 영향으로 온도균일도는 떨어지는 것으로 나타났다. 또한 토출기류에 의하여 일사부하에 대한 영향이 많이 감소되는 것을 확인할 수 있었다. 토출각도

가 60°인 경우에는 에어컨 하방으로 토출되는 냉기와 일사부하에 대한 영향으로 인하여 재실영역의 온도균일도는 상대적으로 낮게 나타났다.

5.3 ADPI와 PMV 비교

Fig. 5는 z-x평면의 높이 y=1.1m인 위치에서 토출각도에 따른 ADPI의 분포를 보여주고 있다. 토출각도가 30°인 경우에는 교실중앙부와 x=3.6m 부근에서 ADPI 쾌적범위보다 높은 값을 나타내고 있다. 이는 5.1절에서 논의한 바와 같이 쿠완다 효과에 의하여 토출기류의 많은 양이 천정면

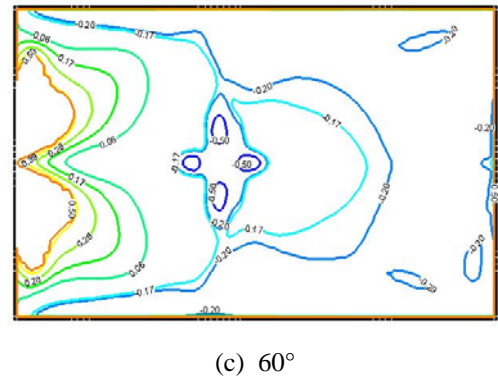
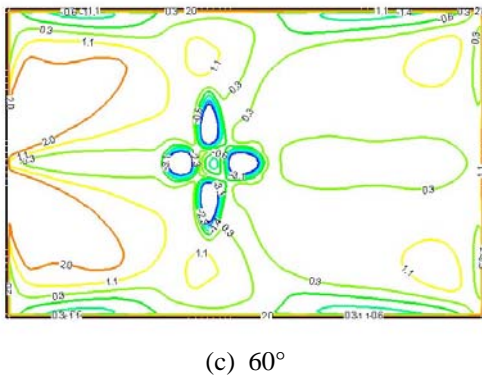
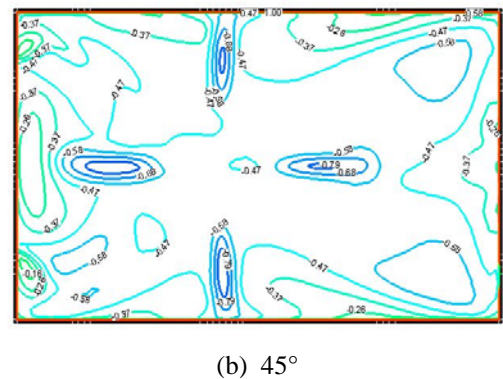
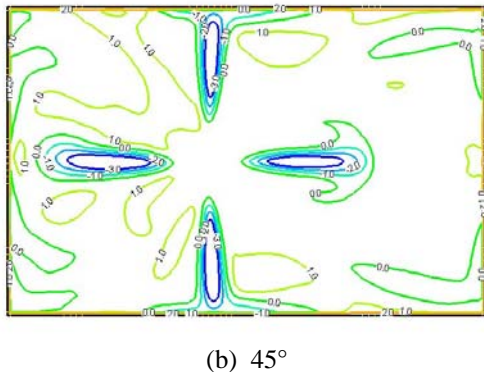
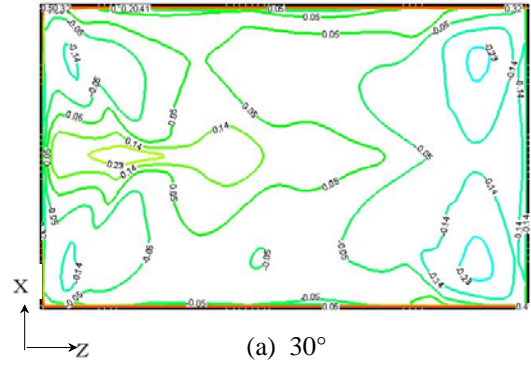
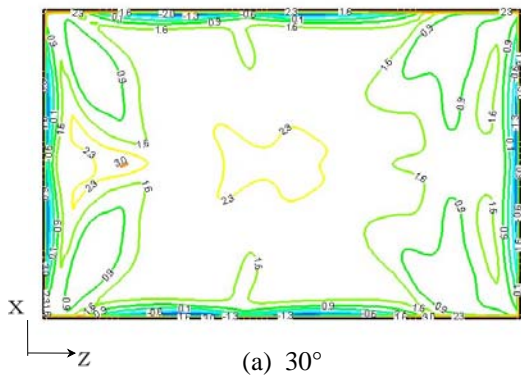


Fig. 5 ADPI distribution of the z-x plane at y=1.1m for the air discharge angle.

Fig. 6 PMV distribution of the z-x plane at y=1.1m for the air discharge angle.

을 따라 흐르면서 천정의 냉방부하에 의해 재실 영역의 온도가 상승하기 때문인 것으로 판단된다. 토출각도가 45°인 경우에는 토출기류가 0.25m/s 이상인 영역에서 매우 낮은 ADPI값을 나타냈으며 그 외의 지역에서는 쾌적도가 적절하게 유지되는 것으로 나타났다. 토출각도가 60°인 경우에는 5.2절에서 논의한 바와 같이 에어컨 하방으로 토출되는 냉기와 일사부하에 대한 영향으로 ADPI의 편차가 크게 나타났으며 국부적으로 쾌적범위를 초과하는 것으로 나타났다.

Fig. 6은 z-x평면의 높이 y=1.1m인 위치에서 토출각도에 따른 PMV의 분포를 보여주고 있다. 토출각도가 30°인 경우에는 전체 재실영역이 모두 쾌적범위 안에 포함되는 것으로 나타났고 토출각도가 45°, 60°인 경우에도 토출되는 냉기와 일사부하에 대한 영향이 있는 부분을 제외한 대부분의 영역에서 PMV 쾌적범위를 만족하는 것으로 나타났다. Fig. 6의 결과들을 Fig. 5와 비교해 보면 전체적으로 지표의 정성적인 분포 경향은 매우 비슷한 것으로 나타났다. 그러나 재실영역에서의 쾌적범위는 PMV가 ADPI보다 더 넓고 균일하게 분포하는 것으로 나타났다. 특히 토출각도가 30°인 경우에는 PMV값이 재실영역에서 모두 쾌적범위 안에 포함되는 것으로 나타나서 ADPI값과 큰 차이를 나타냈다. 그리고 PMV값이 ADPI의 경우보다 재실영역에서 열적 쾌적도가 약간 서늘한 것으로 예측하고 있는데 이는 PMV의 계산에서 태양일사의 영향에 의한 평균복사온도(mean radiation temperature) 계산을 충분히 고려하지 못했기 때문인 것으로 판단된다.⁽⁶⁾

6. 결 론

4way 에어컨이 설치된 학교교실을 3차원 모델로 하여 기류 및 온도분포, 열적 쾌적성 평가지표에 대한 수치적 연구를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 에어컨에서의 토출각이 30°인 경우에는 쿠완다 효과에 의하여 토출된 냉기가 천정벽으로 붙어서 이동하는 것을 확인하였고 토출각이 45°, 60°인 경우에는 토출속도의 영향을 직접적으로 받는 영역에서 쾌적속도 범위인 0.25m/s를 초과하는 것으로 나타났다.

(2) 토출각도가 30°인 경우에는 재실영역에서의

온도가 비교적 균일하게 분포하였지만 여름철 쾌적온도보다 약간 높게 나타났다. 그리고 토출각도가 커질수록 토출기류의 영향으로 인하여 재실영역에서의 온도균일도는 떨어지는 것으로 나타났다.

(3) ADPI와 PMV의 분포를 비교한 결과 전체 계산영역으로 지표의 정성적인 분포 경향은 매우 비슷한 것으로 나타났다.

(4) PMV값이 ADPI의 경우보다 재실영역에서 열적 쾌적도가 약간 서늘한 것으로 예측하고 있는데 이는 PMV의 계산에서 태양일사의 영향에 의한 평균복사온도 계산을 충분히 고려하지 못했기 때문인 것으로 판단된다.

참고문헌

- (1) Minister of Environment of Korea, 2003, The Act of Indoor Air Qualities for Multiple-Use Facilities, Minister of Law of Korea.
- (2) Choi, J. M., Kim, Y. i., Park, H. S., 2003, A Study on the Evaluation of Heating-Conditioned Environment with the Size of Classroom, Journal of SAREK, Vol. 15, No. 12, pp. 1035-1042.
- (3) Kwon, Y. i., Han, H. T., 2003, A Study on the Evaluation of the Air Change Efficiency of Multi-Air-Conditioner with Outdoor air Intake for Heating Season, Proceedings of the SAREK 2003 Winter Annual Conference, pp. 543-548.
- (4) Kim, K. H. et al., 2003, A Study on the Indoor Thermal and Ventilation Characteristics in Office Building with Air-Conditioning and Ventilation System, Proceedings of the SAREK 2003 Summer Annual Conference, pp. 1111-1116.
- (5) Cho, Y. J., 2001, ADPI Characteristics of Diffuser in a Room with Perimetric Heating Load, Ph.D. Dissertation, Hanyang University.
- (6) Kim, S. H., Noh, K. C., Oh, M. D., 2003, Study on the Evaluation Method of Thermal Comfort in Consideration of the Indoor Radiation Load, Proceedings of the SAREK 2003 Winter Annual Conference, pp. 743-739.
- (7) ASHRAE Standard 55-92, 1991, Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy, ASHRAE, Atlanta, Georgia.