

천정형 에어컨 온도센서의 최적 위치 결정을 위한 교실의 CFD 열환경 분석

Thermal Environment Analysis of a Classroom by CFD Simulation to Determine Optimal Temperature Sensor Position in Ceiling Type Air-Conditioning System

이미화·정석권·김동규·김종수

M. H. LI, S. K. Jeong, D. G. Kim and J. S. Kum

Key Words : Ceiling Type Air-conditioner(천정형 에어컨), CFD(전산유체해석), Thermal Environment(열환경),
Class room(교실), Temperature Sensor for Control(제어용 온도센서)

Abstract : Nowadays, the thermal environments of classrooms are usually adjusted by the ceiling type air-conditioning system with a temperature sensor installed on inlet of an air-conditioner. However, it is not clear that the conventional temperature sensor position is proper to satisfy both thermal comfort and energy saving in summer especially. Therefore, this study is aimed at finding out the best position of the temperature sensor on the purpose of the comfort thermal environment and energy saving. The different 5 positions for the temperature sensor are supposed in this paper to analyze thermal environment by CFD . From the analysis through the CFD simulations, the best position of the temperature sensor satisfying for both comfort thermal environment and energy saving is obtained.

기호 설명

- χ : Dimensionless axial coordinate
- u : Horizontal velocity component(m/s)
- C : Constants for the reynoles number in k- ϵ model
- t : Time(s)
- p : Pressure of fluid(N/m²)
- ϵ : Turbulence dissipation(m²/s²)
- k : Turbulent energy(m²/s²)
- μ : Dynamic viscosity(kg/m · s)
- σ : The bias value
- i, j : Component($i, j = 1\sim 3$)

1. 서 론

최근, 학교 교실의 냉·난방을 위해 천정형 에어컨

이용이 급증하고 있으며 이로 인한 여름철 피크 전력 발생으로 여유전력 부족현상을 유발하는 중요한 요인이 되고 있다. 에어컨은 기본적으로 실내의 열과 공기 환경을 양호하게 유지함으로써 재실자에 대한 열적 쾌적감을 향상시켜 학습 능력 향상을 도모하는 데 그 설치 목적이 있다. 한국교육개발원이 초·중·고등학생들을 대상으로 실시한 설문조사에 의하면, '교실의 냉·난방 상태 부적절'이 학교생활에서 가장 불편한 점으로 지목되었다. 또한 교사들을 대상으로 한 설문조사에서도 '교실의 냉·난방 설비'가 환경개선을 위한 1순위 요구사항으로 나타났다¹⁾. 또한 교육개혁부산시민연대에서 1996년 부산시내에 재학 중인 초·중등 학생을 대상으로 한 설문조사 결과 전체 학생의 72.9%가 '학교에서 가장 먼저 해결되어야 할 사항'으로 교실 온도 문제를 지목하였다. 뿐만 아니라 '교실 온도가 학생들의 학습에 미치는 영향'에 대한 설문에서도 85.6%의 학생이 교실 온도가 학습 능력에 영향을 미친다고 응답하였다²⁾.

이처럼 교실의 온열환경 개선에 대한 요구는 증가하고 있으나 실제 온열환경은 경제성장에 따른

접수일 : 2006년 7월 3일, 채택확정 : 2006년 10월 12일
정석권(책임저자) : 부경대학교 기계공학부
E-mail : skjeong@pknu.ac.kr, Tel : 051-620-1507
이미화, 김동규, 김종수 : 부경대학교 기계공학부

생활수준 향상과 높은 교육열에 비해 아직까지 매우 열악한 실정이다.

Jin Ishii는 학교 교실 환경에 중요한 영향을 미치는 온열환경에 대한 현황과 문제점을 분석하고 개선방안을 제시하기 위해 고등학교 보통 교실을 대상으로 1년간에 걸쳐 물리적·심리적 측면에서 온열환경 측정 및 평가를 실시한 바 있다³⁾. 최정민은 ‘교실 규모에 따른 난방 공조 환경 평가에 관한 연구’에서 천정형 냉·난방기의 취출온도를 중심으로 CFD(Computational Fluid Dynamics) 해석을 통해 실내 열환경을 분석하였고⁴⁾, Koyama Haruka는 천정 높이에 따른 교실의 온열환경을 실측하였으며⁵⁾, 都根永은 교사의 평가에 기초하여 온난지역 초등학교 교실의 동절기 물리환경에 관한 연구를 수행한 바 있다⁶⁾.

이와 같은 기존의 연구들은 교실 내 재실자들의 인체 발열을 고려하지 않아 실내 비정상 현상들을 제대로 구현하지 못하였다. 반면에 일본의 Koji SAKAI는 실내 냉·난방 부하의 시간적 변동을 비정상 현상으로 취급하여 취출온도가 시간적 변동을 하는 문제를 대상으로 CFD 해석을 통해 실내 온열환경을 정확히 예측할 수 있음을 보여주었다⁷⁾. 그러나 이 연구의 대상은 학교 교실과 같이 재실자가 있는 경우를 가정한 거주공간이 아니었으며, 열부하도 외기조건만을 고려하였으므로 재실자가 발열원으로 존재하는 교실환경의 열환경 해석과는 거리가 멀었다.

따라서 본 연구에서는 여름철 재실자가 밀집된 교실을 대상으로 쾌적한 열환경 구현과 피크전력 유발요인이 되는 공조기의 에너지 절약을 가능한 방안을 CFD 해석을 통해 모색하고자 한다. 특히 기존의 천정형 에어컨에 사용된 제어용 온도센서가 에어컨의 흡입구에 설치되어 있어 온도 성층화현상이 있는 교실과 같은 거주 공간의 온열환경을 제대로 반영하기 어려운 점들이 많다는 사실에 주목하였다. 이 점에 착안하여 본 연구에서는 쾌적한 열환경과 에너지 절약을 동시에 달성할 수 있는 천정형 에어컨 온도센서의 최적 설치 위치를 검토하고자 한다.

2. 수치 시뮬레이션 모델 및 경계조건

2.1 모델 형상 및 격자계 구성

본 연구에서는 교실 내의 천정형 에어컨 온도센서 위치에 따른 열환경 특성을 해석하기 위하여 상

용 CFD 프로그램인 STAR-CD를 사용하였다. 수치해석에서는 비압축성(incompressible) 난류유동(turbulent flow), 비정상상태(unsteady state) 해석을 하였으며 이에 따른 속도장과 온도장을 정확하게 얻기 위하여 PISO(the Pressure Implicit with Splitting of Operators) 알고리즘을 사용하였다. 해석 대상 공간은 기존의 표준 교실 규격인 9.0×7.8×2.7m로 선정하였다^{8),9)}.

교실 내의 3차원 열환경 해석을 위해 건축도면을 기초로 형상을 모델링하고, 천정형 에어컨의 온도센서 위치를 5가지 경우로 가정하여 Fig. 1과 같이 설정하였고, 각 경우별 세부 위치는 Table 1에 표시하였다.

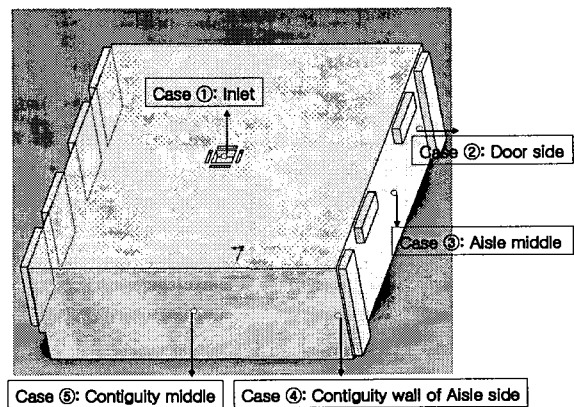


Fig. 1 A numerical simulation model

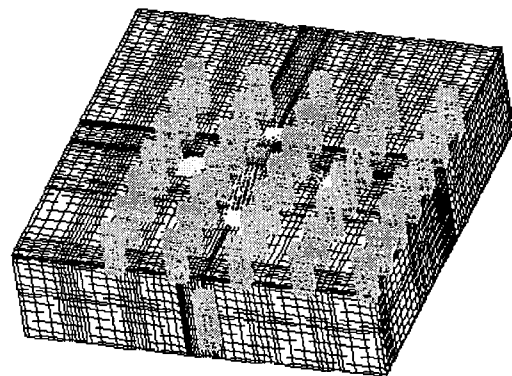


Fig. 2 Mesh in the numerical simulation

Table 1 Cases according to sensor position

Case	Sensor position
Case 1	Inlet
Case 2	Door side
Case 3	Aisle middle
Case 4	Contiguity wall of aisle side
Case 5	Contiguity middle

우선, Case 1은 현재 대부분의 천정형 에어컨에서 취하고 있는 방식으로서 온도센서가 에어컨의 흡입구에 위치하고 있다. Fig. 1에서 Case 2는 출입구, Case 3은 복도의 벽 중간, Case 4는 인접한 벽 복도, Case 5는 인접된 벽 중간에 온도센서가 각각 위치한 것으로 가정하였다.

Fig. 2는 물리적 거동을 고려한 격자계 구성을 나타낸 것이다. 실내 열환경 계산을 위해 격자는 Fig. 2에서와 같이 비균일로 구성하였으며, 재실자의 인체 주위와 에어컨 주변의 격자를 다른 곳보다 조밀하게 배치하였다.

2.2 경계조건

수치 시뮬레이션에 사용된 천정형 에어컨은 학교의 표준 교실 크기인 18평형용으로 냉방능력은 7200W이다. 모델의 경계조건을 Table 2, Table 3에 각각 상세하게 나타내었다.

Table 2 Boundary conditions

Persons Model	Student: 0.36m x 0.34m x 1.446m Professor: 0.36m x 0.34m x 1.70m
Volume	
Ceiling type	Flow rate: 1680CMH
Air-conditioner system	$Q_{total} = C_p \times \gamma \times V \times (T_{ave} - T_{in})$ T_{in} : Outlet temperature T_{ave} : Inlet temperature
	Control range: 23°C ~ 26°C
Persons Heat Production	61kcal/h·person
Temperature	Initial temperature: 30°C Outer temperature: 32°C Aisle temperature: 31°C
Time	Total time: 30min, time step: 0.5sec

Table 3 Dimensions and coefficients of a classroom

Classification	Contents	
Dimensions	7.5m × 9.0m = 67.5m ²	
Ceiling height	2.7m	
Window (Double window)	1.5m × 2.0m × 4EA	
Aisle	Door	0.9m × 2.0m × 2EA
	Window	1.5m × 2.0m × 2EA
Coefficient of heat transmission	Outer wall : 0.5 W/m ² h°C	
	Roof	: 0.35 W/m ² h°C
	Window	: 2.9 W/m ² h°C

교실의 열환경 특성을 기술하는 비정상상태의 지배방정식은 연속방정식, 운동량방정식, $k - \epsilon$ 난류 방정식으로서 식 (1) ~ (4)과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j) = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial(\rho u_j)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_j} + \left\{ (\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_j} \right) + F_j \right\} \tag{2}$$

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j k)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right\} + G - G_B - \rho \epsilon \tag{3}$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j \epsilon)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right\} + C_1 \frac{\epsilon}{k} (G - G_B) - C_2 \rho \frac{\epsilon^2}{k} \tag{4}$$

여기서 $C_D = 1.44$, $C_1 = 1.92$, $C_2 = 0.09$, $\sigma_\epsilon = 1.0$, $\sigma_k = 1.3$, $\sigma_f = 0.7$ 이며, 이 값들은 모두 $k - \epsilon$ 방정식 모델의 경험 정수를 이용하였고 Launder, Spalding에 의해 추천된 값들이다.

3. 해석 결과 및 고찰

천정형 에어컨의 온도센서 위치에 따른 교실 내의 열환경은 호흡선 높이인 바닥으로부터 1.1m의 수평면 온도 분포와 기류 분포, 발목 높이에 해당하는 0.1m 높이에서의 수평면 온도 분포 데이터로부터 분석하였다.

특히 재실자의 쾌적감 향상과 에어컨의 소요 동력을 최소로 하는 적정 온도센서 위치에 대해 중점적으로 검토하고자 한다.

1) 실내 공간의 온도 및 기류 분포

에어컨을 이용한 교실의 온도제어는 에어컨 흡입구에 부착된 온도센서 정보를 피드백하여 행해진다. 기존의 천정형 에어컨 경우에는 흡입구의 온도가 On/Off의 기준으로 되기 때문에 재실자의 쾌적감을 충분히 반영한 것으로 보기 어렵다. 따라서 본 연구에서는 우선 제어용 온도센서 위치를 재실자의 호흡선 높이에 맞추어 설정한 Fig. 1의 4가지 경우를 각각 고려하였다.

CFD 시뮬레이션에서는 온도와 기류 변화 및 발목 높이에서의 온도 변화를 각각 구하였으며, 그 결과를 Fig. 3, Fig. 5, Fig. 6에 각각 나타내었다.

Fig. 3은 호흡선 높이에서의 온도 변화를 나타낸 것으로 모든 Case에서 유사한 시간대에 쾌적 온도 범위인 23 ~ 26°C에 도달함을 보여주고 있다.

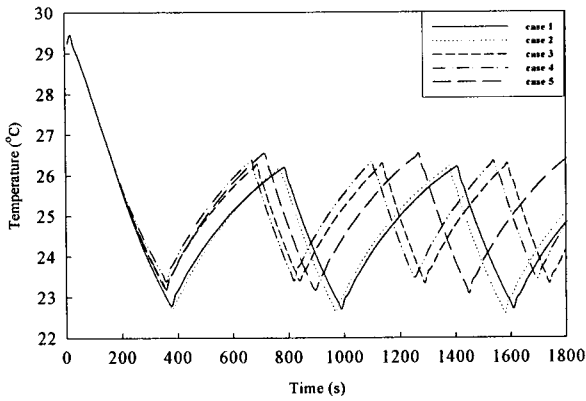


Fig. 3 The average temperature of F.L+1.1m

Case별 최고 및 최저 온도는 Fig. 4에서와 같이 나타났으며, Case 1과 Case 2는 설정온도보다 낮아지는 경향을 보였다. 최고온도와 최저온도를 비교한 결과, Case 3이 3°C이하로 가장 적은 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 Case 3이 다른 Case에 비해 외기 상태나 에어컨의 취출온도 영향을 가장 민감하게 받는 위치이기 때문인 것으로 생각된다.

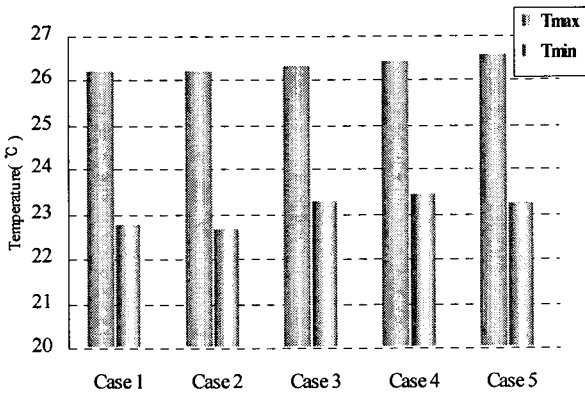


Fig. 4 The maximum and minimum temperature of F.L+1.1m

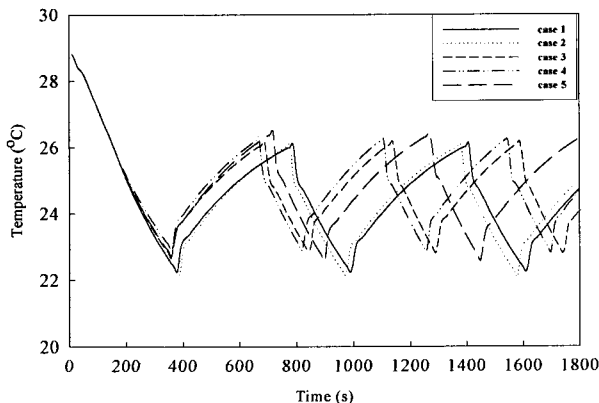


Fig. 5 The average temperature of F.L+0.1m

Fig. 5는 발목 높이의 온도 변화를 나타낸 것으로 모든 Case에서 쾌적 온도 범위인 23~26°C를 유지하는 것으로 나타났다. 호흡선 높이 온도와의 비교에서도 편차가 3°C 이상을 초과하지 않았다. Fig. 6은 실내 기류 변화를 나타낸 것이다. 천정형 에어컨의 압축기가 On/Off되더라도 송풍기의 제어는 영향을 받지 않으므로 풍량이 거의 일정하게 유지되어 모든 Case에서 시간에 따른 풍속의 큰 변화는 보이지 않았고, 각 Case에서 유사한 기류 패턴을 나타내었다.

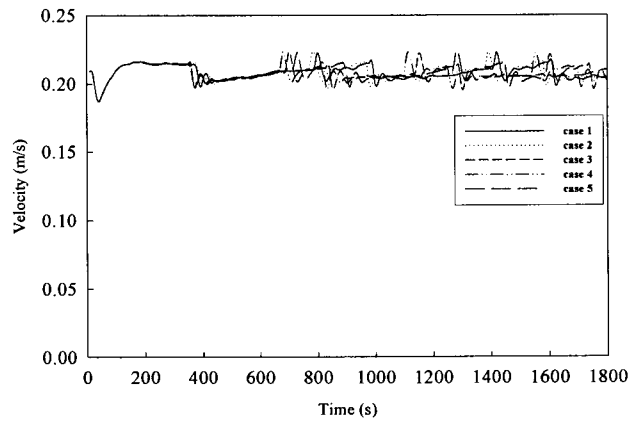


Fig. 6 The average velocity of F.L+1.1m

2) 호흡선 높이에서의 수평면 온도 분포

호흡선 및 발목 높이의 온도에 의해 공간 내부 전체 영역의 쾌적감을 평가하는 것만으로는 각 재실 위치별 쾌적감의 평가는 불가능하므로, 취출온도가 최대 및 최저 온도일 때의 수평면 온도를 분석하였다.

Fig. 7은 센서 위치별 취출온도가 최대, 최저일 때의 각 수평면 온도 분포를 나타낸 것이다.

Fig. 8은 취출온도가 최대 및 최저일 때 쾌적하게 느낄 수 있는 재실자의 수를 나타낸 것이다. 에어컨의 취출온도가 최대인 경우, 각 Case별 쾌적 범위에 포함되는 재실자수는 Case 1, Case 2가 거의 비슷한 수준으로 많았으며 Case 5가 가장 적었다. 에어컨의 취출온도가 최저인 경우, 쾌적 범위의 재실자 수는 Case 3이 가장 많았으며 Case 2가 가장 적었다. 취출온도가 최대 및 최저인 두 가지 경우를 모두 고려할 때, 쾌적 범위에 포함된 재실자 수가 가장 많은 경우는 Case 3인 것으로 나타났다.

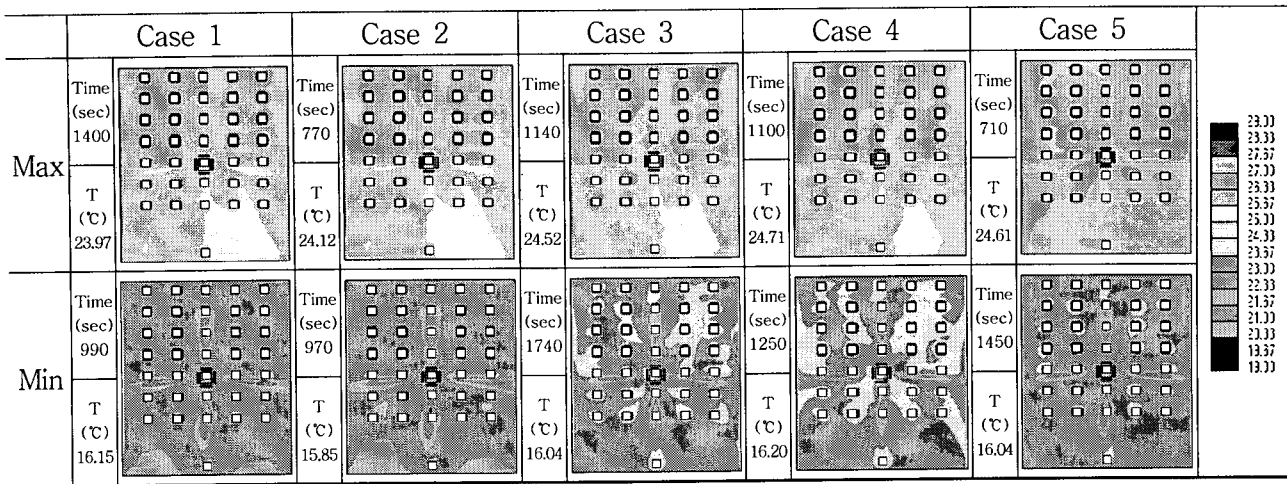


Fig. 7 Horizontal temperature distribution of F.L+1.1m

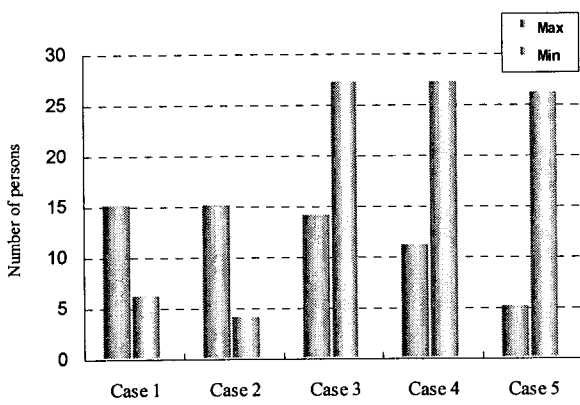


Fig. 8 Number of persons in consumption regions

3) 호흡선 높이에서의 수평면 기류 분포

Fig. 9는 센서 위치별 취출온도가 최대, 최저일 때의 수평면 기류 분포를 나타낸 것이다. 에어컨의 압축기가 On/Off되더라도 송풍기의 풍량은 일정하게 유지되기 때문에 각 Case별 기류 분포는 큰 차이를 보이지 않았다. 그리고 쾌적 기류 범위가

0.25m/s임을 고려할 때, 취출 기류의 영향을 받아 드래프트를 유발할 수 있는 위치의 재실자 수는 약 11명으로 나타났다.

4) 호흡선 높이에서의 유효 드래프트 온도

Fig. 10은 센서 위치별 취출온도가 최대, 최저일 때의 유효 드래프트 온도를 나타낸 것이다. 취출구의 직접적인 영향을 받는 영역을 제외한 대부분 위치에서 유효 드래프트 온도가 -1.5~1°C 범위에 있었으며 기류속도도 0.35m/s 이내였기 때문에 재실자 대부분이 쾌적함을 느끼는 것으로 판단된다.

각 Case별 보다 엄밀한 쾌적성을 조사하기 위해 공기성능확산계수를 분석해 보았다.

Fig. 11은 각 Case별 공기확산성능계수를 나타낸 것이다. Fig. 11에서 취출온도가 최대일 때, Case 3의 공기성능확산계수가 91.5%로 크게 나타났으며, 취출온도가 최저일 때도 Case 3의 경우가 89.3%로 가장 크게 나타났다.

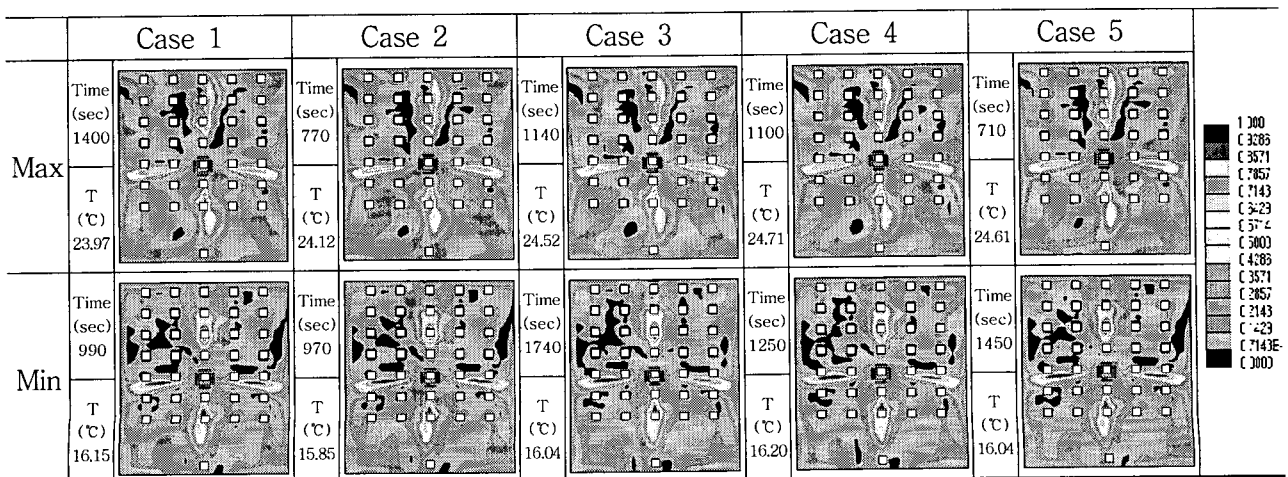


Fig. 9 Horizontal stream distribution of F.L+1.1m

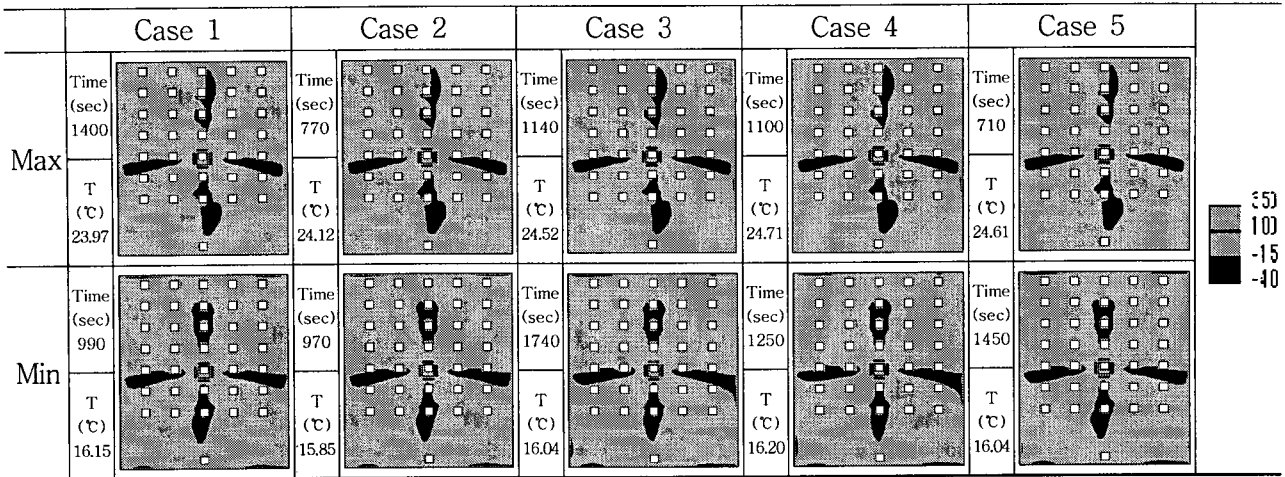


Fig. 10 Vertical stream distribution

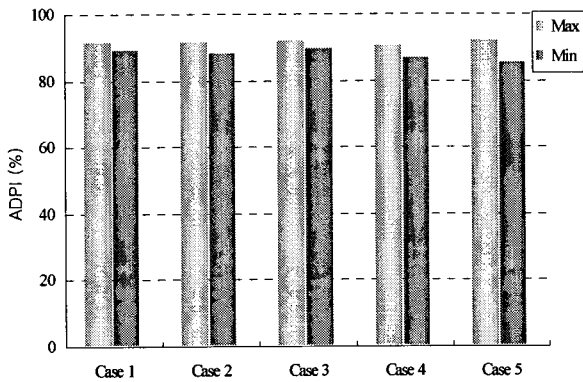


Fig. 11 Air distribution performance index(ADPI)

취출온도가 최대 및 최저일 때의 각 Case별 ADPI는 큰 차이를 보이지 않았지만 Case 3, Case 1, Case 2, Case 4, Case 5의 순으로 작게 나타났다.

5) 발목 높이 0.1m에서의 수평면 온도 분포

Fig. 12는 발목 높이 0.1m에서의 수평면 온도분

포를 나타낸 것이다. Case 3과 Case 4는 Case 1과 Case 2보다 불쾌영역이 10% 더 많았다. Case 5는 전체 영역이 불쾌하게 느껴질 것으로 판단되며, 다른 Case보다 높은 온도를 나타내었다.

6) 센서 위치별 에너지 소비량 비교

Fig. 13은 각 센서 위치에 따른 On/Off의 주기에

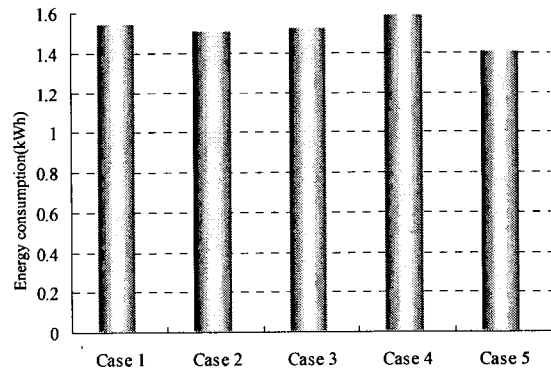


Fig. 13 Energy consumption

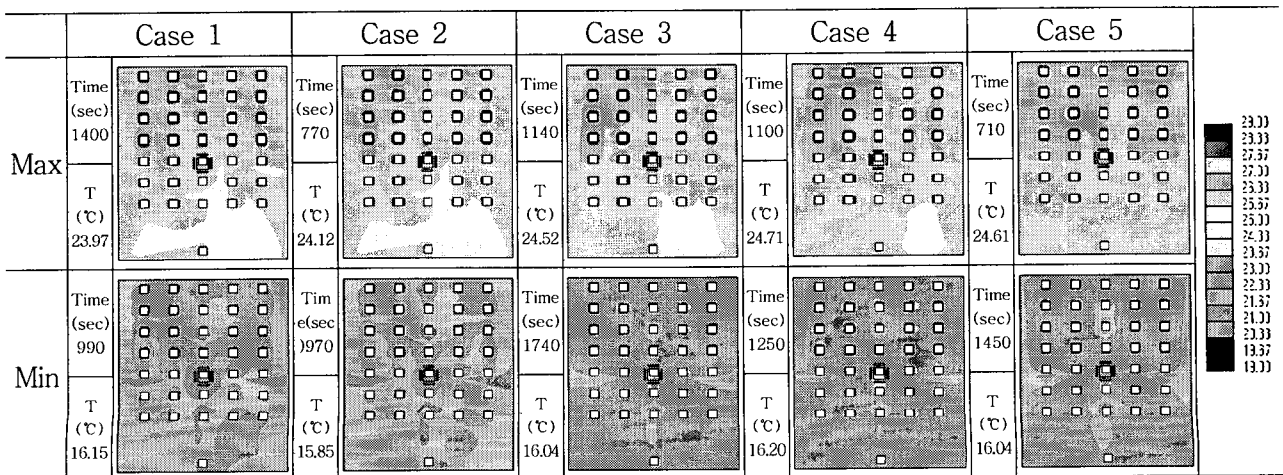


Fig. 12 Horizontal temperature distribution of F.L+0.1m

서 압축기가 On되어 있는 운전시간을 환산하여 에너지 소비량을 나타낸 것이다.

비교 결과 Case 5가 에너지 소비량이 가장 적게 나타났다. 이는 해석 대상 교실의 인접교실의 영향으로 보인다. 그리고 Case 2, Case 3, Case 1, Case 4의 순으로 에너지 소비가 적게 나타났다.

5. 결 론

교실의 온열환경 개선과 에너지 절감을 목적으로 천정형 에어컨의 제어용 온도센서 위치에 따른 열환경과 에너지소비량을 CFD를 이용하여 분석한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) 바닥으로부터 1.1m 호흡선 높이에서 모든 Case의 온도는 쾌적한 온도 범위인 23~26℃를 유지할 수 있는 것으로 나타났으나, Case 3의 최저온도는 쾌적 범위를 유지하면서 최대온도와의 편차도 3℃를 벗어나지 않는 것으로 나타났다.

2) 호흡선 높이에서의 취출온도가 최대 및 최저일 때의 수평면 온도를 분석해 본 결과 쾌적 범위에 들어간 재실자 수가 가장 많은 경우는 Case 3이었다.

3) 에어컨의 전체 운전시간과 그에 따른 에너지 소비량을 비교한 결과, Case 5의 에너지 소비량이 제일 적었고 Case 2, Case3, Case 1, Case 4의 순위로 크게 나타났다.

따라서 쾌적하면서도 에너지 소비량을 줄일 수 있는 최적 온도센서 위치는 기존의 천정형 에어컨에서 채택하고 있는 Case 1보다 Case 3인 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2006년도 누리사업에 의하여 일부 지원되었음

참고 문헌

1. 한국교육개발원, 1998, “교육환경개선사업 평가연구”, 교육부 수탁연구 CR 98-11, pp. 102-121.
2. 김석준, 1996, “교실 냉·난방설비 확보를 위한 사업보고서”, 교육개혁부산시민연대회의, pp. 21-38.
3. Jin Ishii, 2001, “Field survey on thermal environment in classroom”, 25th Symposium

on Human-Environment System, Part 1-4, pp. 11-14.

4. 최정민, 김용이, 박효석, 2003, “교실 규모에 따른 난방 공조환경 평가에 관한 연구-천장형 냉·난방기의 취출온도를 중심으로-”, 설비공학논문집 제 15권 제 12호, pp. 1035-1042.
5. Koyama Haruka, Nagata Akihiro and Iino Yukari, 2004, “天井高の異なる教室の温熱空気環境實測”, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道).
6. 都 根永, 1996, “教師の評価に基づいた温暖地域の小學校教室における冬季の物理環境に関する研究”, 日本建築學會計面系論文報告集 第481号.
7. Koji SAKAI, Masaki MANABE, 2003, “床吹出し空調方式を採用した体育館の氣流解析”, 日本空氣調和・衛生工會學術講演會講演論文集(松江).
8. 한국교육환경연구원, 2004, “서울 장위초등학교 기본계획연구”, pp. 60-61.
9. 한국교육환경연구원, 2003, “부산 양동중학교 기본계획연구”, pp. 30-31.