

바닥급기 공조시 에어배리어형 페리미터레스 공조시스템의 실내 열환경 평가

김 용 경[†], 이 정 제^{*}
동아대학교 대학원, ^{*}동아대학교 건축학부

Evaluation of Thermal Environment on Air-barrier Type Perimeter-less System with Underfloor Air Conditioning System

Yong-Kyoung Kim[†], Jurng-Jae Yee^{*}

Graduate School, Dong-A University, Busan 604-714, Korea

^{*}Faculty of Architectural Design & Engineering, Dong-A University, Busan 604-714, Korea

(Received February 21, 2003; revision received March 20, 2003)

ABSTRACT: This paper aims at suggesting design guidelines for a perimeter-less HVAC system that contributes energy savings. Perimeter-less HVAC system is one that relieves difficulties such as handling mixing loss, uneven radiative environment, and maintenance and repair. It prevents heat load gained through window and outdoor wall without modifying a previously equipped building skin system. In this paper, we performed several kinds of CFD (computational fluid dynamics) cases through numerical simulation to obtain an optimized perimeter-less design, and then we conducted a large-scale model experiment to see how the push-pull air flow would handle indoor heat to obtain an optimized perimeter-less design.

Key words: Perimeter-less(페리미터레스), Mixing loss(혼합손실), CFD(전산유체역학), Energy saving(에너지절약)

기 호 설 명

그리스 문자

A_{ot} : 배기구면적 [m^2]

η : 포집률 [-]

A_w : 벽면(창면)면적 [m^2]

h_c : 대류 열전달계수 [$kcal/m^2h^{\circ}C$]

t_i : 실내온도 [$^{\circ}C$]

t_{ot} : 배기온도 [$^{\circ}C$]

t_w : 내벽면(창면)온도 [$^{\circ}C$]

v : 배기풍속 [m/s]

1. 서 론

최근 건물 구조체의 경량화와 함께 외벽 특히 유리창 면적의 증가로 인한 단열성능 및 축열성능 저하로 인해 외피부위의 에너지 계획이 전체 건물의 에너지 사용량을 크게 좌우하게 되었다. 또한 건물의 인텔리전트화에 따른 내부 발열부하의 증가로 인해 겨울철 인테리어존과 페리미터존의 혼합손실이 발생하고, 열적으로 취약한 외벽체 및 유리창의 복사열을 효과적으로 제거하지 못할 경우 페리미터존의 열환경 악화가 발생할

[†] Corresponding author

Tel.: +82-51-200-5728; fax: +82-51-200-5728

E-mail address: yongs25@donga.ac.kr

수 있다. 이것을 방지하기 위한 에너지 절약과 복사열 환경 개선의 양면을 고려한 새로운 개념의 공조시스템 개발이 필요하게 되었다. 이에 perimeter-less 공조시스템이 제안되었으며, 본 시스템은 perimeter-less화에 의한 완충공간을 건축적, 설비적 수법을 조합하여 만든 공조방식으로 페리미터존과 인테리어존의 공조계통을 분할하여 독립된 공조운전제어가 가능하도록 창 주위에 열원을 갖지 않는 간단한 공조시스템이다.

본 연구에서는 CFD 수치시물레이션을 실시하여 바닥급기 공조시 air-barrier형 perimeter-less 공조시스템을 정량적으로 평가하고, 실험을 통해 시스템의 효율성을 검토하고자 한다.

2. Perimeter-less 공조시스템의 개요

기존의 FCU 공조방식 적용시 발생하는 혼합손실문제, 실내에 수배관이 설치에 따른 누수, 결로문제, 실내공기질의 악화 등의 문제점을 해결하기 위하여 Fig. 1과 같이 기존의 외피구조를 거의 변형하지 않고 FCU 대신에 저속덕트를 포함한 Perimeter Fan Unit(이하, PFU) 시스템을 사용함으로써 창으로부터 유출(또는 유입)되는 열손실(또는 열획득)을 대부분 PFU와 상부 배기덕트를 이용하여 제거시킬 수 있는 시스템이다.

페리미터레스 공조시스템은 전공기 방식을 채용하여 PFU에서 급기된 공기가 천장 및 유리면을 따라 상승하면서 air-barrier를 형성하여 배기구를 통해 냉기(또는 온기)가 실내로 확산되기 전에 배기하는 페리미터존의 열처리방식이 사용되고 있다.

이를 위해 페리미터존의 급기구와 배기구의 위치, 형태 및 적정풍량을 검토해야 하며, 따라서 CFD에 근거한 수치 시물레이션에 의해 그 효율을 포집률의 개념으로 검토하였다.

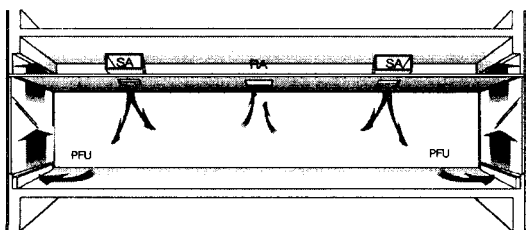


Fig. 1 Concept of perimeter-less HVAC system.

3. CFD 해석 및 실험에 의한 정량적 평가

3.1 CFD 해석조건 및 개요

3.1.1 해석대상공간

해석대상공간은 Fig. 2에서 나타낸 것처럼 사무소건물 중간층의 페리미터존으로 모의하고, 창에 면한 부분만이 외기로부터 영향을 받으며, 나머지 세 면(천장, 바닥, 경계면)은 전열이 발생하지 않는 것으로 가정했다.

3.1.2 수치해석의 개요

계산 case는 PFU 시스템에 의해 실내공기를 유인시켜 급기함으로 온도는 실온으로 고정하고, 속도를 변수로 하여 Table 1과 같이 한 조건당 7 case씩 총 14 case를 계산하였으며, 벽면 경계조건은 Table 2와 같이 설정하였다.

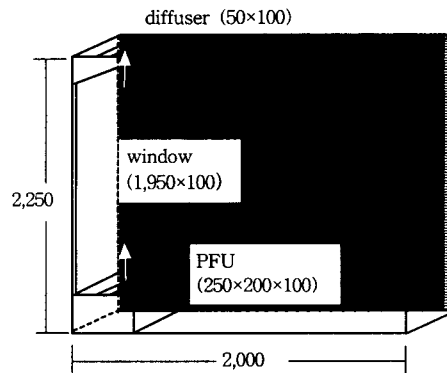


Fig. 2 Schematic diagram of domain & mesh (mm).

Table 1 Simulation case for calculation

Case	Velocity (m/s)
Summer	0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8
Winter	

Table 2 Boundary conditions for calculation

Temperature (°C)	Summer (ETD)	Winter
Outdoor	33 (39)	-5
Indoor	26	22
Indoor surface	Window	31 (38)
	Wall	27
Inlet air	26	22

Mesh 분할은 Fig. 2에 나타난 $60 \times 50 = 3000$ mesh 분할을 이용하였고, 계산은 PHOENICS 3.2 code에 의하여 실시하였으며, 수치계산에 사용된 난류모델은 표준 $k-\epsilon$ 모델을 사용하였으며, 수치해 수렴의 판단기준으로는 각 종속변수값들이 각 반복 계산마다 연속해서 10^{-4} 이내일 때로 선정하였다.

3.1.3 포집률의 개요

포집률은 PFU의 급기에 의해 천장 및 유리면을 따라 형성된 air-barrier에 의한 열손실(또는 취득)의 제거율을 말하며, 배기열량(q_{ot})⁽¹⁾을 벽면대류열량(q_{cv})⁽²⁾으로 나눈 것으로 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\eta = \frac{q_{ot}}{q_{cv}} = \frac{0.29 \cdot v \cdot A_{ot}(t_i - t_{ot})}{h_c \cdot A_w(t_i - t_w)} \quad (1)$$

배기열량은 실내 평균온도와 배기온도와의 관계에서, 대류열량은 실내 평균온도와 벽(또는 창) 표면온도와의 관계에서 계산하였다.

한편, 계산에 사용된 대류열전달계수 h_c 는 벽면제 1 셀의 점성저층의 영향을 고려하여 각 셀의 값을 계산하여야 하지만, 본 연구에서는 계산의 편의를 위해 村上周三 등에 의해 발표된 난류수치해석에 의한 실내 대류열전달에 관한 연구에서 제안된 실험치인 창 : $7 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$, 벽 : $4 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$ 를 사용하였다.⁽²⁾

3.2 실험장치의 구성 및 개요

3.2.1 실험장치

Fig. 3은 실험에 사용된 인공기후실험실의 평면, 단면과 PFU의 디테일을 나타내고 있다. 실험실 외부에 설치된 공조기에 의해 온도조정한 각 실험조건의 공기량을 실외측과 실내측으로 구분하여 각각 공조하고 있다.

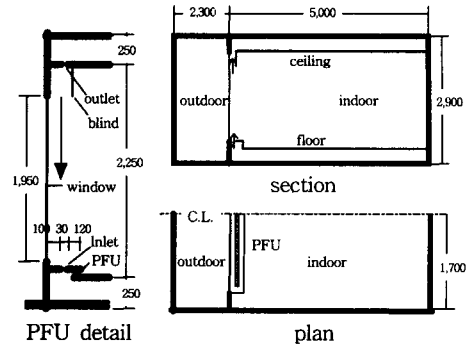


Fig. 3 Diagram of experimental chamber (mm).

3.2.2 실험방법 및 조건

실험조건은 PFU의 형태와 급기구의 폭 및 풍량 등 많은 인자가 관계되기 때문에 기존의 연구 및 예비실험을 통해 얻은 결과를 기초로 단면형상을 결정하였고, 급기풍속은 시스템의 유용성에 중요한 인자가 되기 때문에 앞의 수치해석을 통해 적절한 급기풍속을 검토하였다.

그 결과로 Table 3에 나타난 실험조건을 결정하여, PFU 시스템을 가동하였을 경우와 비가동의 경우를 비교하여 PFU 시스템의 효율성을 검토하고자 하였다. 실험대상의 PFU 시스템은 창 주위에 별도의 열원이 없이 실온과 동일한 온도의 공기를 창 하부에서 급기하여 창 상부의 배기구로 배기하는 push-pull 유동을 형성하는 방식이며, 실내 공조기에 의해 실온을 여름과 겨울철에 각각 $26.0, 22.0^\circ\text{C}$ 로 일정하게 유지하였다.

열전대는 페리미터존을 중심으로 설치하였고, 드래프트의 영향 및 전열특성을 검토하기 위하여 바닥면 기준 0.1 m, 0.6 m, 1.1 m, 1.6 m, 2.2 m에 설치하였다. 또한, 창에서 0.2 m, 1.0 m, 2.0 m의 떨어진 바닥에서 1.1 m 위치에 각 PMV-meter를 설치하여 쾌적감을 측정하였으며, 그 측정항목과 기기는 Table 4와 같다. 한편, 정성적 파악을 위해 직경 $5 \sim 20 \mu\text{m}$, 밀도 $30 \sim 65 \text{ kg/m}^3$ 인 plastic balloon을 이용하여 기류 가시화를 실시하였다.

Table 3 Condition of experiment

Case	Inlet		Temperature ($^\circ\text{C}$)		Humidity (%)	Clo	Met
	Velocity (m/s)	Temperature ($^\circ\text{C}$)	Outdoor	Indoor			
A	-	-	33.0	26.0	60	0.5	1.2
B	0.8 (90 CMH/m)	26.0					
C	-	-	-5.0	22.0	40	1.0	
D	1.2 (130 CMH/m)	22.0					

Table 4 Measuring item and instrument

Item	Instrument	Points
Temp.	Indoor	54
	Surface	t-type thermo-couple
	Diffuser	
Humidity	Electric meter (Vaisala)	1
Velocity	Anemomaster (Kanomax)	3
PMV	PMV meter (Innova)	3

4. 수치 시뮬레이션 결과 분석 및 고찰

4.1 온도 및 기류분포

Figs. 4~5에 여름철과 겨울철 조건의 상향급기에 따라 계산한 기류 및 온도분포를 나타내고 있으며, 배기속도의 증가와 함께 창면을 따라 air-barrier가 형성되어 가는 모습을 보이고 있다.

Fig. 4는 여름철의 계산결과로서 PFU에서의 급기속도 0.8 m/s에서 air-barrier의 형성이 시작되고 있으며, 0.6 m/s에서는 급기속도가 드래프트속도보다 느려서 air-barrier를 형성하지 못하고 실내로 드래프트가 유입되고 있다.

Fig. 5는 겨울철의 계산결과로서 PFU에서의 급

기속도 1.2 m/s에서 air-barrier의 형성이 시작되며, 1.0 m/s의 속도에서는 급기되는 기류가 air-barrier를 형성하지 못하고 실내로 드래프트가 유입되고 있다. 온도분포에 주목하면 air-barrier가 형성되면서 실내온도와 균일한 분포를 보이고 있으며, 창면으로부터의 제거(또는 획득)열량으로 인해 배기온도가 변화하는 것을 알 수 있다.

4.2 포집률의 계산결과

각 mesh의 값으로부터 실내평균온도와 배기온도를 구하고, 이것에 의해 배기열량과 포집률을 계산한 결과는 Table 5와 같다.

여름철의 경우 PFU의 급기속도 0.8 m/s에서 air-barrier가 형성되기 시작하며, 이때 포집열량 5.72 kcal/h, 벽면 대류열량 15.89 kcal/h로서 포집률은 0.36으로 나타났다. 겨울철의 경우는 급기속도 1.2 m/s에서 air-barrier가 형성되기 시작하며, 이때 포집률 0.35로 나타났다.

급기속도와 포집률의 관계에서는 일반적으로 급기속도가 빠를수록 포집률이 점차 증가하지만, 에너지 절약적인 측면에서 실온과 배기온도의 차이가 가장 큰 것이 포집효율이 좋은 것이라고 할 수 있다.

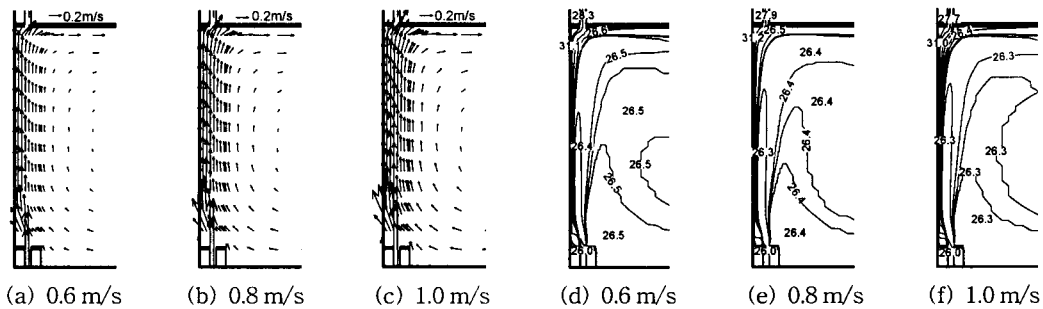


Fig. 4 Computed velocity (m/s) & temperature (°C) distributions in summer.

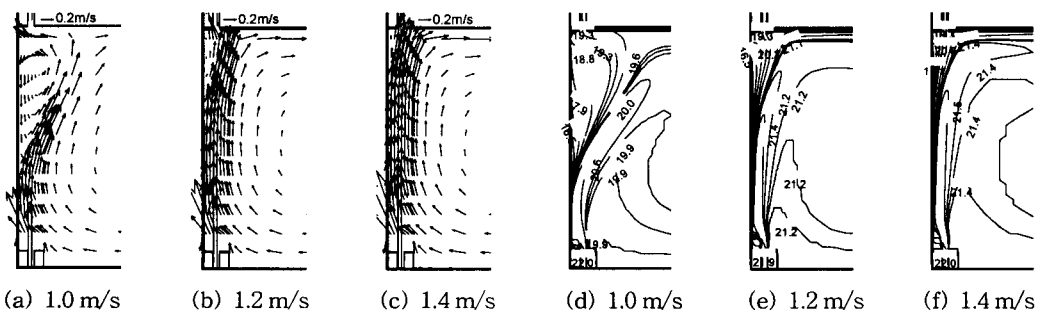


Fig. 5 Computed velocity (m/s) & temperature (°C) distributions in winter.

Table 5 Calculation results of collection effectiveness

Case	Velocity (m/s)	Temperature (°C)			Collection heat quantity (q_{ot} , kcal/h)	Convection heat quantity (q_{cv} , kcal/h)	Collection effectiveness (η)
		Indoor (t_i)	Outlet (t_{ot})	$t_i - t_{ot}$			
Summer (26°C)	0.6	26.52	28.18	1.66	5.20	15.69	0.33
	0.8	26.38	27.75	1.37	5.72	15.89	0.36
	1.0	26.32	27.53	1.21	6.32	15.97	0.40
	1.2	26.29	27.40	1.11	6.95	16.01	0.43
	1.4	26.27	27.32	1.05	7.67	16.04	0.48
	1.6	26.26	27.26	1.00	8.35	16.05	0.52
Winter (22°C)	0.6	18.51	18.52	-0.01	0.03	22.44	0.001
	0.8	19.09	19.15	-0.06	0.25	23.25	0.01
	1.0	19.63	19.27	0.36	1.88	24.01	0.08
	1.2	21.14	19.70	1.44	9.02	26.13	0.35
	1.4	21.42	19.84	1.58	11.55	26.52	0.44
	1.6	21.51	20.00	1.51	12.61	26.65	0.47
	1.8	21.55	20.07	1.48	13.91	26.71	0.52

5. 실험결과 분석 및 고찰

5.1 실내 온도분포

Fig. 6은 전술한 Table 3의 조건에 의해 실시한 실험결과로서, case A, B는 여름철, case C, D는 겨울철이며, case B, D는 창 하부의 PFU에 의해 실내공기를 유인·급기하여 창 상부의 배기구로 배기하였을 때(이하 급기)이며, case A, C는 창 하부의 PFU에서 급기를 하지 않을 때(이하 비급기)의 실험결과이다.

여름철 결과인 Fig. 6(a)는 비급기로서 창면 온도가 실온보다 높아 대류에 의해 가열된 공기가 상승하여 천장을 따라 실내로 확산되고 있으며, Fig. 6(b)는 급기시로서 26.0°C로 급기되는 기류가 창면을 따라 상승하면서 창면의 전열을 제거하여

배기온도가 27.3°C로 1.3°C 상승하였다. air-barrier에 의한 전열의 차단으로 실온이 26.4~26.8°C로 비교적 안정됨을 알 수 있다.

한편, 겨울철은 더욱 뚜렷한 결과를 볼 수 있는데, Fig. 6(c)는 비급기로서 창면의 온도가 실온보다 낮아 콜드 드래프트가 형성되어 창과 바닥면으로 하강하여 실내로 유입되면서 실내의 상하 온도차가 상당함을 알 수 있다. Fig. 6(d)는 22.0°C로 급기되는 기류가 창면을 따라 상승하면서 창면의 냉기류를 제거하여 19.6°C로 2.4°C 하강하고, air-barrier에 의한 콜드 드래프트의 차단으로 실온이 비교적 안정됨을 알 수 있다.

따라서 비급기는 드래프트 및 전열에 의해 실온의 상하분포가 크게 나타나지만, PFU에 의한 급기는 기류에 의해 드래프트를 차단하여 실온의 상하분포가 거의 일정함을 알 수 있다.

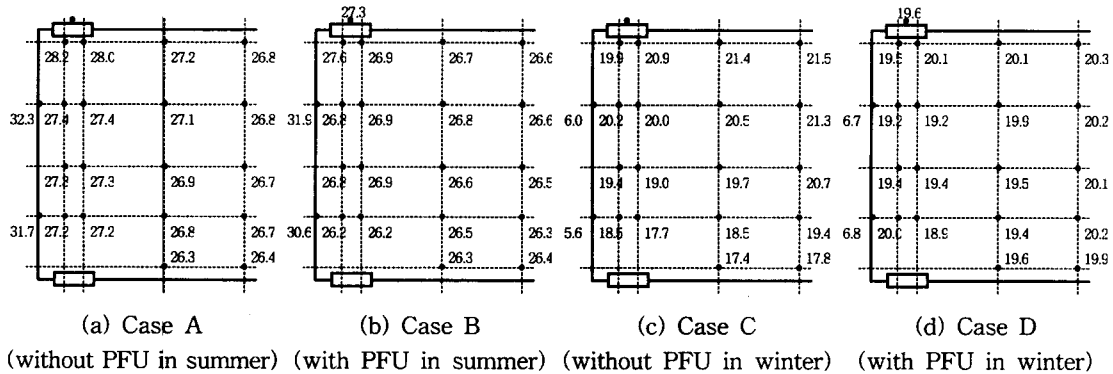


Fig. 6 Temperature distribution in summer & winter (°C).

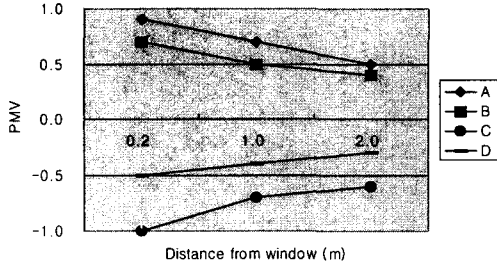


Fig. 7 PMV value at distance from window.

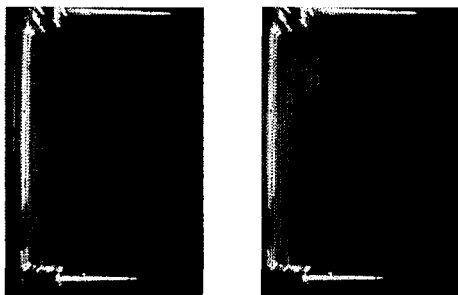
5.2 쾌적감

Fig. 7은 PMV와 PPD를 측정된 결과로서, 창에서 1m 떨어진 위치에서의 측정결과를 보면, 겨울철 비급기인 case C는 콜드 드래프트에 의해 PMV는 -0.75, 상하온도차 3.1℃, 바닥온도 17.0℃로 불쾌감을 느낄 수 있으며, 급기인 case D는 드래프트의 제거로 인해 PMV -0.4, 상하온도차 0.3℃, 바닥온도 19.6℃로 모두 쾌적조건(-0.5 < PMV < 0.5, 상하온도차 < 3℃)을 만족함을 알 수 있다. 또한, 여름철에도 비급기는 PMV 0.7, 상하온도차 0.8℃, 급기는 PMV 0.5, 상하온도차 0.7℃로 급기에 의한 쾌적감의 향상을 확인할 수 있다.

5.3 기류가시화

Fig. 8은 수치 시뮬레이션에서 air-barrier가 형성되는 시점인 여름철 0.8m/s, 겨울철 1.2m/s의 급기풍속을 대상으로 가시화 실험을 실시한 것으로, 수치 시뮬레이션의 결과와 거의 유사하다.

여름철의 경우 PFU에서 상향 급기된 기류는 높은 유리 표면온도에 의해 부력이 더해져 비교적 적은 풍량으로 air-barrier 형성이 가능하지만,



(a) In summer (b) In winter

Fig. 8 Results of PIV experiment.

겨울철은 창 표면에 콜드 드래프트가 발생하여 비교적 많은 풍량을 요구하는 것으로 판단된다.

6. 결론

본 연구에서는 air-barrier형 perimeter-less 공조시스템을 정량적으로 평가하기 위하여 수치 시뮬레이션 및 실험을 통해 시스템의 효율성을 검토하였으며, 연구의 결과는 다음과 같다.

(1) PFU 시스템의 저속덕트를 통해 실내공기를 유인·급기하여 air-barrier를 형성함으로써 창면에서의 열손실(취득)을 효과적으로 제거할 수 있는 것으로 나타났다.

(2) 바닥급기공조시 air-barrier가 형성되기 시작하는 PFU 시스템의 급기속도는 여름철 0.8m/s (90 CMH/m), 겨울철 1.2m/s(130 CMH/m)으로 나타났다.

(3) PMV의 측정결과를 보면, PFU의 급기를 통해 겨울철 PMV -0.4, 상하온도차 0.3℃, 여름철 PMV 0.5, 상하온도차 0.7℃로서 쾌적조건을 만족하며 쾌적영역을 넓힐 수 있어 실내공간 활용이 유리하다.

(4) 가시화에 의해 정성적으로 시뮬레이션과 실험이 거의 같은 형태의 결과임을 확인함으로써 PFU 시스템의 효율을 검증할 수 있었다.

이상의 연구결과에서 급기속도와 포집률은 비례하지만, 에너지 절약적인 측면에서 실온과 배기온도의 차이가 큰 것이 포집효율이 좋으며, 향후 계속적으로 실험을 통해서 적절한 PFU의 형태 및 급기풍량에 대한 검증이 필요하다.

참고문헌

1. Yuichi, T., and Satoshi, T., 1993, Airflow patterns near the windows with an air exhaust system, Proceedings of Hass, pp. 421-424.
2. Shuzo, M., Kato Shinsuke, K., Yasushi, K. and Tomoyuki, C., 1990, Numerical study on convective heat transfer at wall boundary (Part 1. Analysis on wall functions for heat flux at wall), Summaries of Technical Papers of Annual Meeting Architectural Institute of Japan, pp. 479-480.