

기류유인팬을 이용한 새 국립중앙박물관 로툰다에서의 열환경 평가

이 승 철[†]

동해대학교 자동차공학과

Evaluation on Thermal Environment Installed Ventilating Fans in the Rotunda at New National Museum of Korea

Seung-Chul Lee[†]

Department of Automotive Engineering, Donghae University, Donghae, Gangwon-do 240-713, Korea

(Received January 19, 2004; revision received March 12, 2004)

ABSTRACT: In order to improve thermal comfort in the Rotunda, which is high and wide visiting space of the new national museum of Korea, eight ventilating fans were installed near the ceiling of Rotunda. It has been analyzed thermal comfort of Rotunda with/without ventilating fans by numerical simulation. To evaluate thermal comfort of the Rotunda, well-known indices, PMV and PPD were introduced. The results of present investigation show that temperature distribution of the case with fans is closer to target temperature than the case without fans at the breathing zone. In the case without fans, thermal stratification with 16°C of temperature difference occurs along the height of the Rotunda which makes the thermal environment worse and the PPD values reach up to 50% in the 6th floor connection passage. In the case with fans, however, the vertical temperature difference were reduced to 9°C and the PPD values were lower below 20%. Consequently, the ventilating fans adopted on this study are effectively used for improving the thermal comfort in large space structure with thermal stratification.

Key words: Thermal comfort(온열쾌적도), Predicted mean vote(PMV, 예상온열감), Predicted percentage of dissatisfied(PPD, 예상불만족률), Thermal stratification(열성층화)

1. 서 론

최근 들어 생활수준의 향상과 건축기술의 발달에 따라 대공간 형태의 건축물 건립이 증가되고 있다. 대공간 건축물에는 실내경기장 및 공연장, 대합실, 아트리움, 그리고 대규모 회의장 등이 있

으며 대부분 높은 천장과 넓게 띄어진 공간형태를 가지고 있다. 이러한 대공간 건축물에는 일반적으로 미관향상 및 에너지절약을 위해 지붕이나 벽체재료로서 유리가 많이 사용되고 있다. 유리와 같은 광 투과성 외벽재료는 환경친화적인 옥외분위기를 연출하고 자연주광을 도입함으로써 공간적 특성에 따른 문화적, 경제적, 기능적 이익을 부여할 뿐만 아니라 시각적인 감동과 신선함을 제공하는 장점이 있다. 그러나 태양복사열이나 외기 조건에 의한 실내 열환경이 급격하게 악화되는 등

[†] Corresponding author

Tel.: +82-33-520-9317; fax: +82-33-521-9407

E-mail address: sclee@donghae.ac.kr

외부환경의 변화에 대한 저항력을 약화시키는 단점도 있다. 또한 열부력(thermal buoyancy)이 실내 공기 유동에 큰 영향을 미치고 거주영역이 전체 공간에 비해 작아지는 등 비효율성도 가질 수 있다. 특히 대공간에서는 하절기의 경우 지붕 또는 측벽으로부터의 복사열 및 실내열성층화(thermal stratification) 등으로 인하여 재실자에게 열적 불쾌감을 유발시킬 수 있다. 따라서 대공간 등에서 발생 가능한 기류 및 온도분포에 관한 특이점을 미리 예측하고, 이를 예방 또는 해결할 수 있는 공조방법 및 열환경에 대한 세밀한 연구가 이루어져야 한다.

현재 건축중인 새 국립중앙박물관의 로비부분인 로툰다는 대공간 구조로서 다른 공간으로의 동선 유도 및 휴식공간 및 만남의 장소, 전시공간의 전이공간 역할을 하며 관람자들에게 환경친화적인 옥외 환경분위기를 연출하고 자연 주광 도입을 위해 구조물의 상단부분이 유리벽으로 시공되고 있다. 특히 여름철에는 외부 일사에 의한 복사부하가 유리벽을 통해 유입되므로 로툰다 내부의 열환경을 미리 예측할 필요성이 있다. 이를 위하여 현재 설계안으로 환기설비가 장치되었을 경우에 대한 로툰다 내부의 열환경 평가를 실시하였으며 천장 부근의 열성층화 현상을 해소하기 위한 방안이 마련되어야 함을 제시한 바 있다.⁽¹⁾

따라서 본 연구는 열성층화 현상을 제거하기 위한 방안으로 설치된 기류유인팬의 적절성을 살펴보기 위해 전산유체역학 기법을 도입하여 새 국립중앙박물관 로툰다의 여름철 열환경을 분석하였다.

2. 열환경 평가방법

실내에서 열적인 쾌적 혹은 불쾌적이란 거주자가 느끼는 열적 환경에 대하여 만족하는 심리상태에 관한 것으로서 열적 쾌적을 평가하기 위한 정형화된 방법이 다수 제안되어 있다. 본 연구에서는 PMV(Predicted mean vote) 및 PPD(Predicted

percentage of dissatisfied) 지표산정방법으로 열적 쾌적을 평가하였다. 이 지표를 산정하기 위한 상세사항은 ASHRAE Handbook⁽²⁾을 참조하여 산정되었다. 본 연구에서 냉방시 PMV 산정에 필요한 정보 중 기류, 온도 및 평균 복사온도 이외의 사항들은 Table 1과 같이 선정하였으며 이는 여름철 박물관 관람조건을 고려한 것이다.

3. 연구모델

본 연구에서 살펴보고자 하는 로툰다의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 로툰다는 최대지름 48m, 최대높이 38m인 원뿔대 형상이다. 그림에서 보는 바와 같이 로툰다는 바닥(floor), 유리 측벽(glass sidewall), 천장(inner roof) 및 차양지붕(sunshade roof)으로 구성되어 있으며, 인접 전시실로는 이동통로(passage)로 연결되어 있다.

여름철 실내공조를 위해서 로툰다 가장자리를 따라 21개의 급기노즐(supply nozzle)이 설치되어 있으며 남쪽 및 서쪽에 배기구(exhaust) 2개가 설치되어 있다. 상세한 내부구조 및 환기설비에 대한 내용은 각각 이전의 연구⁽¹⁾와 동일하다.

본 연구모델에 대한 여름철 냉방부하의 상세를 Table 2에 나타내었다. 유리 측벽을 통하여서는 태양열 복사에 의하여 전체 냉방부하 167.33 kW의 약 54.5%인 91.14 kW를 받는다. 이러한 복사에 의한 냉방부하의 30%는 유리 측벽에 가해지고, 나머지 70%는 유리벽을 투과하여 바닥면에 가해진다고 간주한다. 로툰다의 유리지붕 근처에

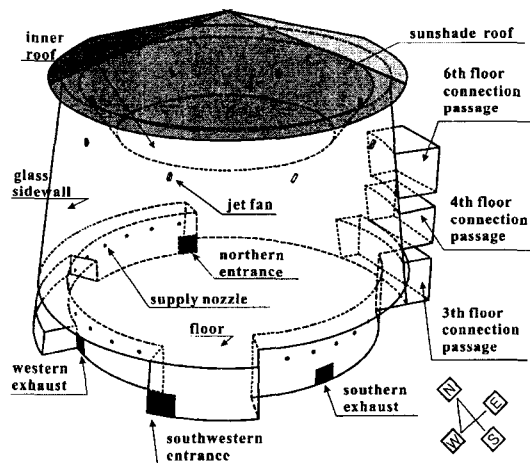


Fig. 1 Schematic diagram of the Rotunda.

Table 1 Engineering data to estimate PMV

Parameter	Values
Metabolic rate	1.2 met
Clothing value	0.5 clo
Relative humidity	50%

Table 2 Cooling load in the rotunda (unit: kW)

Location	Cooling loads
Inner roof	7.07
Glass sidewall (by conduction)	17.33
Glass sidewall (by radiation)	91.14
Floor	8.79
Lighting equipments	34.38
Sensible heat gain by the gallery	8.62
Total	167.33

설치된 조명기기의 부하 34.38 kW는 모두 유리지붕 하부면에서 발생되는 것으로 간주하였다. 한편 실내 관람객에 의한 총 8.62 kW의 현열은 로툰다 바닥에 가해진다고 간주한다. 잠열부하는 증발로 인하여 내부에 증가되는 수분의 증발에너지이므로, 내부의 습도만을 증가시킬 뿐 내부온도를 상승시키지는 않는다. 따라서 본 연구에서는 공조기가 잠열부하를 담당하는 것으로 간주하여 냉방부하에 포함하지 않았다.

열성증화 현상을 제거하기 위한 기류유인팬은 천장에 등각으로 8대가 위치되어 있다. 수평으로는 시계방향으로 인접한 팬을 향하고 있으며 수직으로는 하향 25°로 기울어져 설치되어 있다. 각 팬의 토출풍속과 풍량은 각각 최대 17.5 m/s 및 3,000 CMH이다.

4. 수치해석방법

본 연구에서 선택한 로툰다에서의 기류 및 온도특성을 기술하는 정상상태의 지배방정식은 연

Table 3 Boundary conditions for present study

Location	Conditions
Roof	$u=v=w=0, q=30.9 \text{ W/m}^2$
Glass sidewall	$u=v=w=0, q=11.0 \text{ W/m}^2$
Floor	$u=v=w=0, q=59.6 \text{ W/m}^2$
Passages	$\frac{\partial u}{\partial n} = \frac{\partial v}{\partial n} = \frac{\partial w}{\partial n} = 0, \frac{\partial T}{\partial n} = 0$
Supply nozzle	$V_n=6.6 \text{ m/s}, T=18^\circ\text{C}$
Ventilating fan	$V_{out}=17.5 \text{ m/s (3000 CMH)}$
Southern exhaust	$V_n=-1.62 \text{ m/s}, T=26^\circ\text{C}$
Western exhaust	$V_n=-1.875 \text{ m/s}, T=26^\circ\text{C}$
Entrance	$u=v=w=0, q=0$

속방정식, 운동량방정식, 난류운동에너지방정식, 난류운동에너지소산율방정식, 그리고 에너지방정식이며 상세사항은 참고문헌⁽¹⁾과 동일하다.

본 연구에서는 전술한 지배방정식을 해석하기 위하여 상용 CFD 코드인 FLUENT를 사용하였다.⁽³⁾ 속도 및 온도장의 해석을 위해 비엇갈림격자계를 사용하였으며, 벽면을 통한 부하로 인하여 벽면 근처에서 발생하는 압력값의 급격한 변동을 적절히 예측하기 위해서는 엇갈림격자계를 도입하였다.⁽⁴⁾

전술한 지배방정식과 함께 정의되는 경계조건의 상세는 Table 3과 같다.

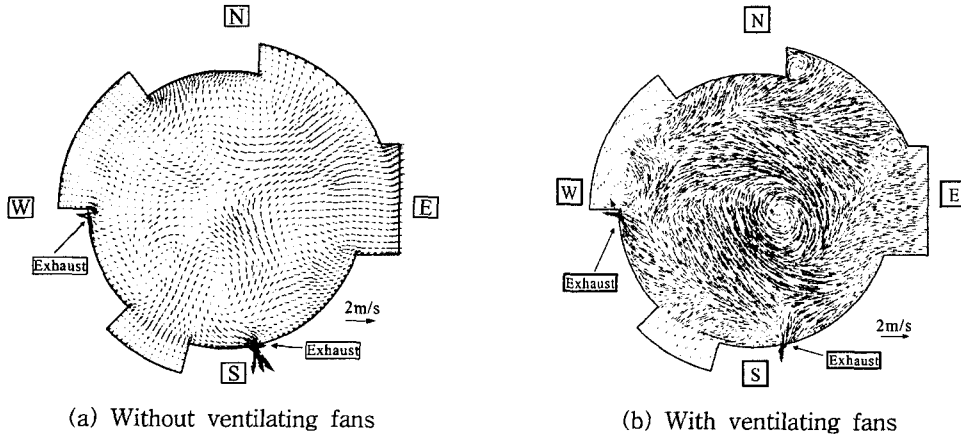
5. 결과 및 고찰

기존의 환기장치만이 설치된 로툰다 내부의 열환경에 대한 이전의 연구를 통하여 로툰다 상부에 발생하는 기류정체영역이 4층과 6층의 연결통로 부근의 열환경을 매우 악화시킴을 볼 수 있었다. 이를 개선하고자 기류를 실내공간 전체에 고르게 혼합시켜 줄 기류유인팬을 설치하고 이로 인한 효과를 살펴보았다. 이를 위하여 호흡선 높이(바닥으로부터 1.5 m)의 수평단면과 중앙수직단면을 점검단면으로 설정하였다. 이 점검단면에서의 기류분포, 온도분포, 그리고 PMV와 PPD 분포를 살펴보았다.

5.1 기류환경평가

여름철 냉방시 로툰다에 설치된 기류유인팬이 실내열환경에 미치는 효과를 살펴보기 위하여 기류유인팬의 설치유무에 따른 관람객 호흡선 높이에서의 수평단면 기류분포를 각각 Fig. 2의 (a)와 (b)에 나타내었다.

기류해석 결과 호흡선 높이에서는 기류유인팬이 설치된 경우, 설치되지 않은 경우에 비하여 평균풍속이 약 0.2 m/s 정도 증가되어 관람객 영역의 속도는 0.2~0.6 m/s로 나타났으며, Fig. 2의 (b)에서 보이는 바와 같이 기류정체영역도 거의 없는 것으로 나타난다. 다만 기류유인팬의 설치방향에 의해 로툰다의 중앙지점을 중심으로 시계방향으로 선회하는 기류특성을 보여준다. 선회류는 북측과 남측에서는 더 활발하게 형성되며 3층 연결통로부분과 배기구 근처에서는 다소 약하게 형성됨을 볼 수 있다. 다만 선회류의 중심부분의



(a) Without ventilating fans (b) With ventilating fans
 Fig. 2 Distributions of velocity vectors at breathing zone of the Rotunda.

경우 정체영역의 발생으로 인해 급기구에서 공급된 냉각공기가 적절히 도달되지 못하여 약간의 온도상승이 우려된다. 전반적인 기류환경 측면에서 관람객에게 양호한 관람환경을 제공할 수 있을 것으로 사료된다.

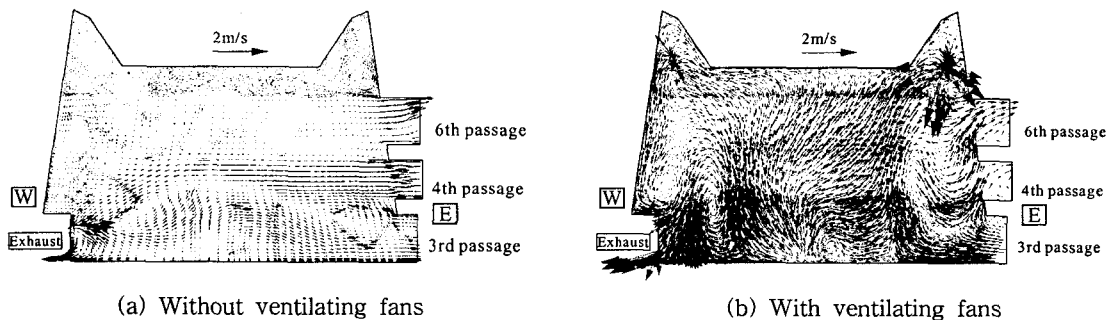
Fig. 3에 기류유인팬의 설치 유무에 따른 중앙 수직단면 기류분포를 나타내었다. 기류유인팬이 없는 경우 4층 연결통로 이상의 높이에서는 대부분의 기류가 정체되어 있다. 반면 기류유인팬이 설치되어 있는 경우에는 실내공기가 로툰다 전체 영역에서 상승 또는 하강을 하며 원활히 순환됨을 알 수 있다. 로툰다 내부의 공기가 이처럼 원활한 상승과 하강을 하는 것은 천장부에 설치된 기류유인팬의 기류유인효과로 인한 것이다. 이러한 기류유인효과로 인하여 층고가 높은 대공간의 경우 상하의 기류분포가 적절히 형성되지 못하여 유발될 수 있는 성층화 현상은 감소되리라 예상된다.

5.2 온도환경평가

로툰다 내부의 온도분포특성을 살펴보기 위하여 기류분포를 살펴본 동일한 단면들에 대한 온도분포를 각각 Fig. 4의 (a)와 (b)에 나타내었다.

Fig. 4(a)에 보이듯이 기류유인팬이 없는 경우, 호흡선 높이의 온도분포는 동북측과 서북측 벽면 근처에서 26℃의 온도영역을 나타내며 나머지 영역에서는 실내냉방 설정온도인 26℃보다 다소 낮은 약 24~25℃의 범위이다. 이는 냉방부하를 제거하기 위해 공급된 공조공기가 공간 전체로 순환되지 못하고 하층부(4층 연결통로 높이 이하)에만 도달되기 때문이다.

이에 비해 기류유인팬이 설치된 경우는 Fig. 4(b)에 보이듯이 대부분의 영역에서는 실내냉방 설정온도인 약 26℃의 온도분포를 보인다. 이는 기류유인팬에 의해 로툰다 내부의 기류혼합이 원활해졌기 때문으로 사료된다. 남측 출입구와 서



(a) Without ventilating fans (b) With ventilating fans
 Fig. 3 Distributions of velocity vectors at vertical plane of the Rotunda.

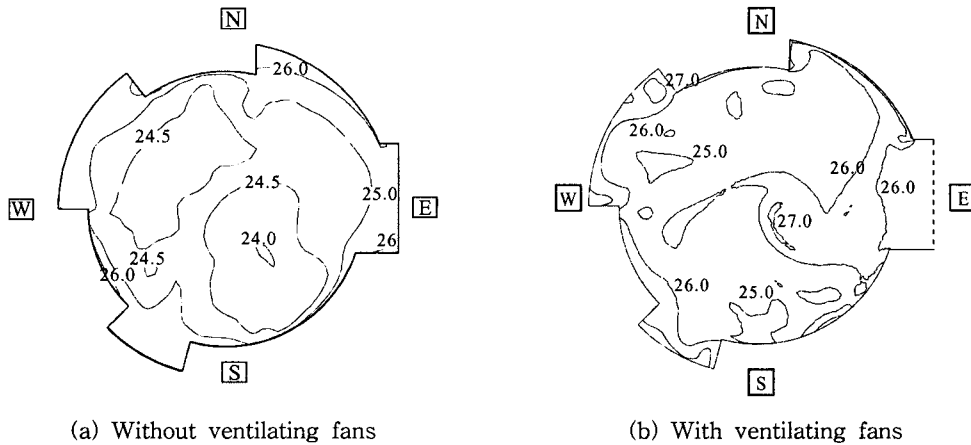


Fig. 4 Distributions of temperature at breathing zone of the Rotunda (unit: °C).

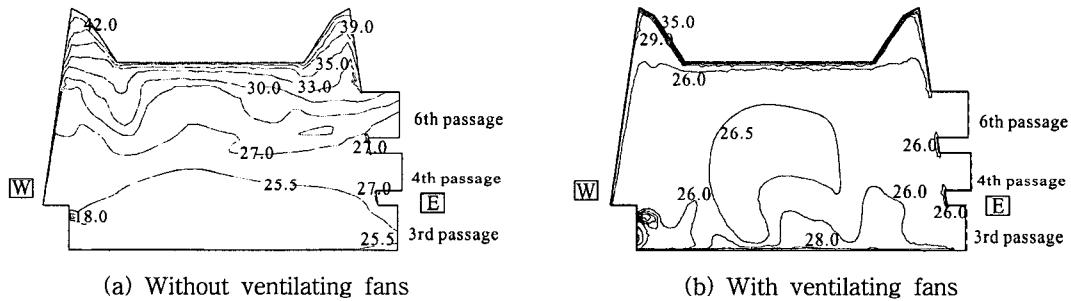


Fig. 5 Distributions of temperature at vertical plane of the Rotunda (unit: °C).

북측 벽면 근처에서 27°C의 온도영역을 나타내는 것은 벽면에서 취출된 공기가 대부분 선회기류를 형성하며 이동하기는 하지만 남측 출입구와 서북측 벽면 근처에서는 소규모의 기류재순환이 발생되기 때문이다. 이러한 기류재순환 현상은 로툰다의 중심부에서도 발생하며 이로 인해 27°C의 온도분포를 보인다.

기류유인팬에 의한 로툰다 상층부 열성층화 현상의 개선 정도를 살펴보기 위하여 기류유인팬의 설치 유무에 따른 로툰다 중앙 수직단면에서의 온도분포를 Fig. 5의 (a)와 (b)에 나타내었다.

Fig. 5의 (a)에서 보이듯이 순환기류가 존재하는 로툰다 하부영역에서는 약 25°C 정도로 여름철 관람환경으로는 적합할 것으로 사료되나, 기류가 정체되어 있는 상부 지붕 근처에서는 최대 42°C로서 높이에 따른 상하 온도차가 약 16°C 정도로 높게 나타난다. 이는 여름철 유리지붕을 통한 복사열로 인한 로툰다 실내공기의 가열에 기인된 것으로 판단된다. 이와 같은 온도분포는 기

류혼합 등의 도입되지 않은 고층 대공간의 일반적인 열적 특성이다.

이에 비해 기류유인팬이 설치된 경우, Fig. 5의 (b)에서 보이듯이 공간 전체에 원활한 순환기류가 형성됨에 따라 하층부뿐만 아니라 상층부에서도 약 26°C 내외의 온도분포를 나타내고 있다. 일부구역에서 30°C 이상의 온도가 나타나기도 하지만 그 영역이 매우 작다. 이는 기류유인팬에 의하여 내부의 공기가 적절히 혼합되기 때문이다.

5.3 쾌적지수평가

로툰다 내부의 환경이 관람객에게 주는 쾌적감을 평가하기 위하여 쾌적환경평가에 일반적으로 많이 이용되고 있는 PMV 및 PPD 분포를 살펴 보았다.

기류유인팬에 의한 로툰다 상층부 열성층화 현상의 해소를 통한 실내열환경 개선 정도를 살펴보기 위하여 기류유인팬의 설치 유무에 따른 로툰

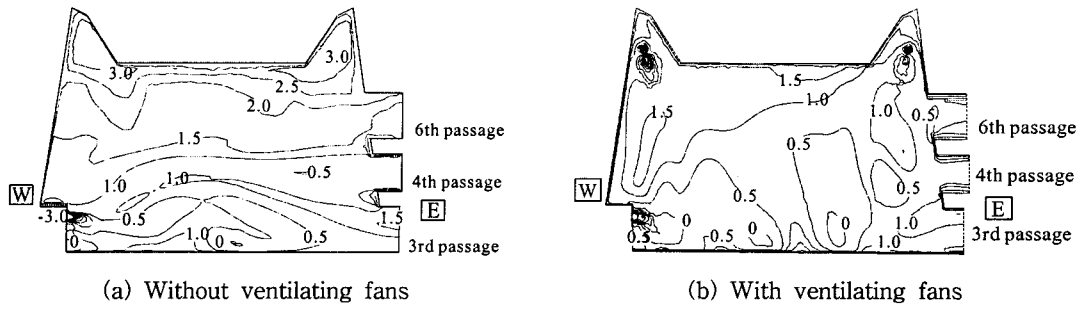


Fig. 6 Distributions of PMV at vertical plane of the Rotunda.

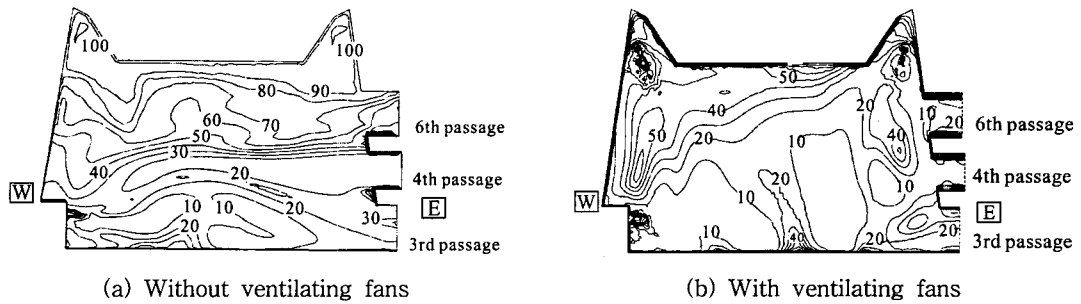


Fig. 7 Distributions of PPD value at vertical plane of the Rotunda (unit: %).

다 중앙 수직단면의 PMV 및 PPD 분포를 각각 Fig. 6의 (a)와 (b), 그리고 Fig. 7의 (a)와 (b)에 나타내었다.

Fig. 6의 (a)에 나타난 바와 같이 기류유인팬이 없는 경우, 로툰다 하부 재실공간과 3층의 로툰다와 역사의 가로 연결통로에서의 PMV 지표는 0~0.5의 범위를 나타내고 있어 열적으로 쾌적한 것으로 평가된다. 4층 관람영역 연결통로 역시 PMV 지표 최대 1 정도로서 비교적 관람에 적합한 환경이라고 사료되나, 6층 관람영역 연결통로 부분은 1.5 이상의 PMV 지표를 나타내고 있어 재실자가 덥다고 불만족스럽게 느끼는 관람 환경으로 평가된다.

Fig. 6의 (b)에 나타난 기류유인팬이 설치되어 있는 경우, 로툰다 하부 재실공간과 3층의 로툰다와 역사의 가로 연결통로에서의 PMV 지표는 0~0.5의 범위를 나타내고 있어 열적으로 쾌적한 것으로 평가된다. 4층과 6층 관람영역 연결통로 역시 PMV 지표 최대 1 정도로서 비교적 관람에 적합한 환경이라고 사료된다.

기류유인팬이 없는 경우, 주어진 열환경에 대한 재실자의 불만족률(PPD) 분포를 나타낸 Fig. 7의 (a)를 살펴보면, 로툰다 하부 재실공간에서의

재실자 불만족률은 10% 정도로서 관람객이 쾌적함을 느낄 것으로 예상됨을 알 수 있다. 3층과 4층의 관람영역 연결통로 역시 불만족률이 20% 정도로서 본 공간이 관람을 위한 박물관임을 고려하면 비교적 적합한 열환경이라 할 수 있다. 그러나 6층의 관람영역 연결통로에서는 약 50%의 불만족률을 나타내고 있다. 이는 관람객 100명 중 50명이 주어진 열환경에 불만을 표시한다는 것을 의미하며, 이와 같은 결과는 로툰다 상층부에 형성된 열성층화의 영향으로 사료된다.

Fig. 7의 (b)에 나타난 기류유인팬이 설치된 경우, 로툰다 하부 재실공간에서의 재실자 불만족률은 10% 정도로서 관람객이 쾌적함을 느낄 것으로 예상됨을 알 수 있다. 3층과 4층 및 6층의 관람영역 연결통로 역시 불만족률이 20% 정도로서 본 공간이 관람을 위한 박물관임을 고려하면 비교적 적합한 열환경이라 할 수 있다.

기류유인팬이 없는 경우 로툰다 상층부에 발생하는 기류정체영역으로 인한 열적 쾌적감의 저하를 기류유인팬을 설치하여 로툰다 전체의 순환 기류를 발생시킴으로써 충분히 해소할 수 있음을 알 수 있다.

6. 결 론

본 연구에서는 여름철 로툰다 상층부에서 발생되는 기류정체영역으로 인한 열환경저하를 방지하기 위하여 기류유인팬을 장착한 경우에 대하여 로툰다 내의 기류 및 온도분포를 상용 CFD 코드인 FLUENT를 이용하여 해석한 후 PMV와 PPD에 의한 열환경 평가를 수행하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 기류유인팬이 없는 경우, 호흡선 높이의 온도분포는 실내냉방 설정온도인 26℃보다 다소 낮은 약 24~25℃로 나타났으며, 기류유인팬이 설치된 경우는 원활한 기류혼합으로 인해 실내냉방 설정온도인 26℃ 내외의 온도분포를 보인다.

(2) 로툰다 중앙 수직단면에서는 기류유인팬이 없는 경우 상하 온도차가 약 16℃ 정도로 높게 나타나지만, 기류유인팬이 설치된 경우에는 공간 전체에 원활한 순환기류가 형성됨에 따라 하층부 뿐만 아니라 상층부에서도 약 26℃ 내외의 온도분포를 나타내고 있다.

(3) 기류유인팬이 없는 경우, 로툰다 상층부에

발생되는 기류정체영역으로 인하여 6층의 관람영역 연결통로에서는 약 50%의 불만족률이 예상되지만, 기류유인팬을 설치된 경우에는 불만족률이 20% 정도로 감소되었다. 따라서 로툰다 전체의 순환기류를 발생시킴으로써 열적 쾌적감 저하를 충분히 해소할 수 있음을 알 수 있다.

참고문헌

1. Lee, S.-C., Cho, Y. J., Kim, D. S., Lee, J.-H. and Kim, H. B., 2003, Analysis on thermal environment in the Rotunda of new national museum of Korea, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 15, No. 1, pp. 32-39.
2. ASHRAE, 2001, ASHRAE Handbook-2001 Fundamentals, ASHRAE, USA, pp. 8.1-8.29.
3. FLUENT Ltd., 2000, FLUENT 6.0 User's Guide, FLUENT Ltd., USA.
4. Patankar, S. V., 1980, Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, McGraw Hill.