

# 공기순환 시스템이 설치된 경기장 공간의 열성능 평가

김경환\*·임윤철\*\*·이재현\*\*\*·오명도†·박명식††·이대우††·박영우††

## Evaluation of Thermal Performance in a Stadium with Air Circulation System

Kyung-Hwan Kim, Yoon-Chul Im, Jae-Heon Lee, Myung-Do Oh, Myung-Sig Park,  
Dae-Woo Lee and Young-Woo Park

**Key Words:** Circulation Fan(순환류팬), Air Circulation(공기순환), Thermal Environment(열환경), Predicted Mean Vote(예상온열감), Predicted Percentage of Dissatisfied(예상불만족율)

### Abstract

In this paper, CFD technique has been used at design stage to predict space air distribution in a cycle stadium with air circulation system. An air circulation flow of 0.67 rev./min was observed at computed results in the stadium space with and without air circulation system. Comparing the thermal comfort of the two models with or without air circulation system showed that the thermal environment in the former was superior in the latter. Energy savings could be achieved for the model with air circulation due to its lower air inflow temperature.

### 1. 서론

공기순환 시스템<sup>(1-2)</sup>은 선화하는 공기의 흐름(이후 순환류라 칭함)에 의해서 거주역의 풍속이 다소 빨라지며, 냉/난방시 실내온도를 설계온도보다 다소 높게/낮게 설정하여도 설계온도에서와 같은 체감을 얻을 수 있다는데에서 착안되었다. 이 시스템은 열적쾌적성(thermal comfort)에 근거한 쾌적한 기류인 감성기류를 발생시키는 것을 목적으로 하며, 감성기류<sup>(3)</sup>로부터 쾌적성, 온열감 향상 및 에너지절감을 유도시킬 수 것으로 알려져 있다.

세계적으로 공기순환 시스템을 최초로 사용한

곳은 스페인의 바르셀로나 스포츠홀로 알려져 있으며 이 홀에서는 순환류팬을 환기기와 병행하여 관람객에게 감성기류를 얻는 것을 목적으로 하였다. 일본 후쿠오카돔에서도 거주역 공조를 행하면서 동시에 감성기류를 발생시키는 공기순환 시스템을 도입하였다.

국내에서도 관람수준의 향상과 더불어 쾌적한 경기장 환경에 대한 관심이 증가되고 있다. 경기장과 같은 대공간 건축물은 일반사무소 건물과 달리 일반적으로 실내공간이 거대하며 천장이 높으며, 그 사용 목적별로 내부형상이 상이하다는 특징이 있다. 따라서 사용자가 쾌적하게 느낄 수 있도록 대공간 열환경을 유지하기 위해서는 이를 예측하여 개선할 수 있는 방안이 요구된다. 이의 예측에는 이론예측을 통한 방법과 모델 실험을 통한 방법이 있다. 모델 실험 방법에서는 많은 시간과 비용이 소요되므로 이론예측을 통한 방법이 많이 이용된다. 이론예측 방법은 최근 컴퓨터의 발달과 유체유동에 관한 해석이론의 개발에 따라 그 수준이 높아졌으며 특히 설계시 실내 열

\* 한양대학교 대학원 기계공학과

\*\* (주) 명진에어테크

\*\*\* 한양대학교 기계공부

† 서울시립대학교 기계정보공학과

†† (주) 현대건설 기술연구소

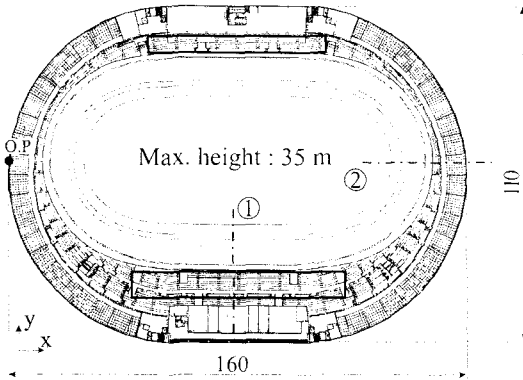


Fig. 1 Schematic diagram of cycle stadium.

성능 예측에 사용 가능하므로 시간과 비용측면에서 많은 장점을 가진다.

본 연구에서는 공기순환 시스템이 부착된 경륜 경기장에 대하여 이론적인 방법으로 실내 기류 특성을 예측하였으며 아울러 이 예측이 실제 설계에 응용되어 시공된 경기장에서의 열성능을 실험적 방법으로 검토하였다.

## 2. 열성능 평가법

열성능 평가 수행시 국소 위치에서의 열적쾌적도를 평가하기 위한 정형화된 방법이 다수 제안되어 있다. 근래에는 인간이 느끼는 온열감을 예측할 수 있는 평가지표인 예상온열감(Predicted Mean Vote, PMV)<sup>(4-6)</sup>과 주어진 환경에 만족하지 않는 사람의 예상비율을 나타내는 예상불만족율(Predicted Percentage of Dissatisfied, PPD)<sup>(4-6)</sup>이 많이 사용된다. PMV는 ASHRAE<sup>(6)</sup>의 7단계 열감 척도를 기준으로 설정되었으며, -3 ~ +3의 범위를 갖는다. 여기서 -3은 추운 경우, +3은 더운 경우를 나타내고 0은 열적으로 쾌적한 상태를 나타낸다. 일반적으로 사람이 열적으로 최적함을 느끼는 PMV의 범위는 -0.5 ~ +0.5이다. PPD는 PMV로부터 산정되며 5~100%의 범위를 갖는다. 일반적으로 주어진 열성능에 대하여 그 값이 10% 이하이면 '쾌적하다'라고 할 수 있다.

## 3. 연구모델

최근 C시에 건설된 경륜 경기장은 기본설계시 층고가 높은 대공간임에도 불구하고 기존 건물에

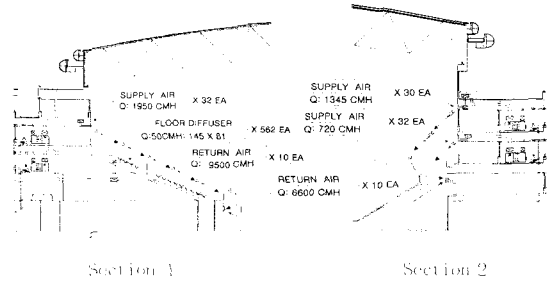


Fig. 2 Detail of HVAC facilities in the sections of stadium.

적용되는 급·배기 공조방식이 그대로 적용되었다. 이러한 공조방식은 냉·난방시 열성충화나 기류 정체 등이 발생시켜 과도한 에너지 소비를 요구할 뿐만 아니라 재실자의 불쾌감도 유발시킬 우려가 있었다. 이에 따라 실시설계에서는 순환류팬을 이용한 공기순환 시스템이 추가되었다.

경륜 경기장의 길이, 폭 및 높이는 각각 160 m, 100 m 및 35 m으로서 그 개략적인 형상을 Fig. 1에 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 관람석은 경기장의 벽면을 따라 배치되어 있고 중앙에 대공간이 존재한다. 본 연구에서는 그림의 O.P를 원점으로 길이방향을 x 방향, 폭방향을 y 방향 그리고 높이방향을 z 방향으로 정하였다.

경기장의 관람석, 공조설비의 위치, 그리고 냉/난방 기류의 유동을 보기 위하여 Fig. 1에 나타난 ①단면과 ②단면 상세도를 Fig. 2에 나타내었다. 경기장 공조설비는 그림에 나타난 바와 같이 단면에 따라 약간씩 다른 좌석배치의 특징을 갖고 있으나 기본적으로는 관람자만을 위한 영역공조(zone air conditioning)가 이루어지고 있다. 그림에 보이는 바와 같이 상층 관람석 바닥에서 3 m 높이에 총 188개의 급기구가 설치되었으며 경기장 트랙 외곽에 총 40개의 배기구가 설치되었다. 이러한 급배기구의 배치에 따라 상층 관람석 위쪽에서 공급된 공기가 중하층 관중석을 지나 트랙 아래쪽으로 배출된다. 또한 전체 관람석 중 Fig. 1의 사각형으로 표시된 영역의 좌석 아래에는 562개의 바닥급기구가 설치되어 있다. 경기장의 냉·난방을 위해 공급되는 총 급기량은 279,680 CMH이다.

이상에서 설명한 바와 같은 급·배기구만에 의한 공조설비는 하절기 천장부 축열로 인한 복사열 증가 혹은 동절기 난방기류의 상승으로 인한

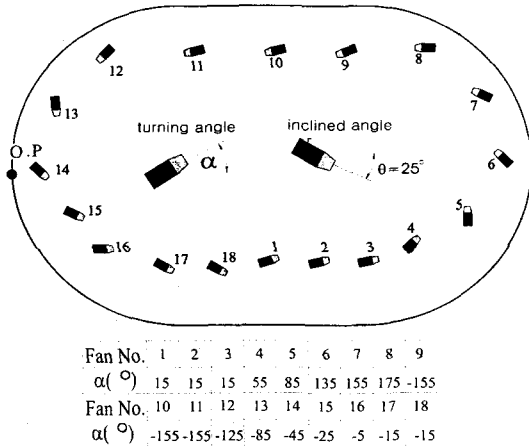


Fig. 3 Location of jet fan.

수직방향으로의 온도편차 때문에 재실자에게 열적 불쾌감을 유발시킬 수 있다. 이의 해결을 위하여 실시설계에서는 경기장 공간 전체의 공기순환을 위하여 기존 급·배기 공조설비에 추가하여 18개의 순환류팬을 체육관 천장트러스에 설치하도록 하였으며 그 배치를 Fig. 3에 나타내었다. 그림에 보이는 바와 같이 18개의 순환류팬은 경기장 둘레를 따라 거의 등간격으로 배치되어 있으며 경사각도  $\theta$ 는 수평대비 하향 25°이다. 순환류팬의 취출방향은 천장의 공기가 원활히 순환할 수 있도록 결정하였으며 타원형 경기장의 장경 (major axis) 방향 대비 회전각도  $\alpha$ 로는 -155~175° 범위를 가진다. 각 순환류팬에 관한 그 구체적인 값들은 Fig. 3의 아래쪽에 도시하였다. 순환류팬의 설치대수, 배치방법 및 분사각도 등은 설계자의 경험과 이론예측을 통하여 결정하였다. 각 순환류팬은 풍량 6000 CMH, 풍속 17.3 m/s, 최대도달거리 60 m의 사양을 갖는다.

#### 4. 순환류 특성의 이론적 예측

##### 4.1 이론방법

본 연구에서는 경륜 경기장의 순환유동 특성을 예측하기 위하여 유동해석 프로그램인 PHOENICS를 이용하였다. 이 해석에 사용된 지배방정식은 연속방정식, 운동량방정식, 난류운동에너지방정식 및 난류운동에너지소산율방정식 등이다. 난류모델로는 환기분야에 실용적으로 많이 이용되는 표준  $k-\epsilon$  모델을 사용하였다.

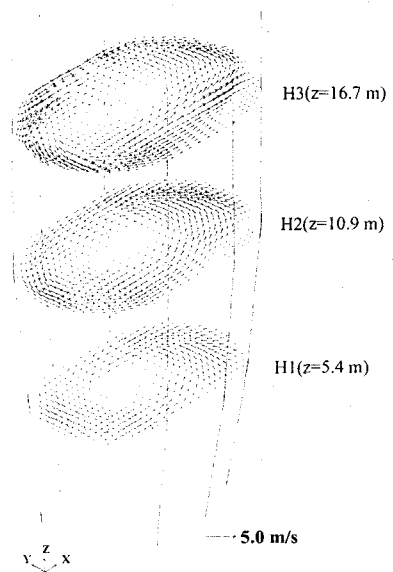


Fig. 4 Distribution of velocity in present study.

공조설비 급기구의 입구조건으로서는 덕트단면에 수직한 유량으로 각각의 급기구 풍량에 따라 부여하였고 배기구에서는 유출경계조건을 부여하였다. 또한 벽면에서는 점착조건(no-slip condition)을 사용하였으며, 벽면에 인접한 난류량의 처리를 위해서는 벽함수(wall function)를 사용하였다.

반복계산시 종속변수들의 수렴정도를 점검하기 위하여 아래의 정의된 잉여치 R값을 조사하였으며, 모든 종속변수에 대하여 잉여치 값이  $10^{-3}$  이하에 도달하면 수렴된 것으로 간주하였다.

$$R = \sum_{\text{all domain}} |\sum a_{nb} + b - a_p \phi_p| \quad (1)$$

여기서  $\phi$ 는 본 연구에서의 종속변수,  $a$ 는 이산화방정식의 계수,  $b$ 는 생성항을 나타낸다. 하첨자  $p$ ,  $nb$ 는 각각 계산제어체적과 인접제어체적의 격자점을 뜻한다.

##### 4.2 순환기류의 검토

공기순환 시스템을 도입한 경륜 경기장의 기류 특성을 살펴보기 위하여 경기장 트랙 바닥에서 5.4 m, 10.9 m 및 16.7 m 떨어진 x-y 단면 3개를 검토단면으로 정하였고 이를 Fig. 4에 나타내었

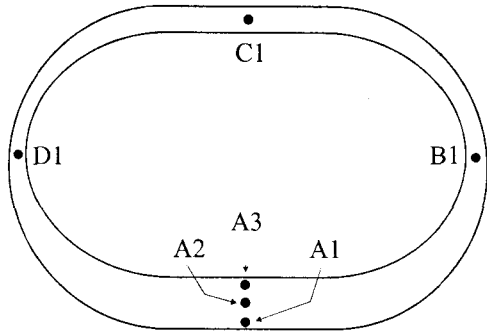


Fig. 5 The location of measuring points for PMV and PPD.

다. 그림에 나타난 H3 검토탄면에서의 속도분포를 살펴보면, 천장에 설치된 순환류팬의 영향으로 경기장내의 기류는 반시계 방향으로 순환하며 중앙부분에서만 일부 정체됨을 알 수 있다. H1 검토탄면과 H2 검토탄면에서의 기류분포에서는 H3 검토탄면의 기류분포보다 낮은 기류속도를 나타내지만 역시 순환류가 형성되고 있음을 알 수 있다. 공기순환 시스템으로 형성된 순환류의 회전속도는 약 0.67 회/min 정도이며 전체적으로 실내의 기류가 원활히 순환한다. 관람석 부근에서의 기류속도는 평균 0.5 m/s 정도로서 관람자가 느끼는 속도로서 적합하게 나타났으며, 트랙의 경기영역(바닥~5 m 높이)에서의 최대 기류속도는 0.8 m/s 정도로서 공기순환으로 인한 경기진행에는 무리가 없는 것으로 판단된다.

## 5. 경기장의 실측

전술한 이론예측을 통하여 그 효용성이 기대된 공기순환 시스템을 적용하여 시공된 경륜 경기장의 난방시 열성능 평가를 수행하였다. 순환류팬의 배치 및 분사각도는 이론예측에서 제시한대로 따랐다.

### 5.1 실험장치 및 실험방법

열성능의 파악을 위해서는 실제 경기장의 내부에 온열감측정시스템(thermal comfort measurement)을 설치하고 PMV 및 PPD를 측정하였다. 온열감측정시스템은 센서를 이용하여 평균복사온도, 습도, 기류속도 및 온도를 측정 후 입력된 활동

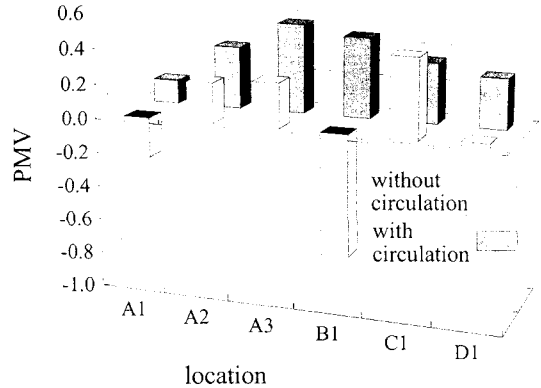


Fig. 6 Comparisons of PMV with and without air circulation system.

량<sup>(7)</sup> 및 착의량에 참고하여 PMV 및 PPD 지수를 나타낸다.

실험은 공기순환 시스템이 가동되지 않거나(무순환 시스템, without circulation) 혹은 가동되는(공기순환 시스템, with circulation) 등 두 가지 상황에서 수행되었다. 측정위치는 Fig. 5에 나타난 바와 같은 6개 지점의 관람객 호흡선 높이이다. 그림에서 측정점 A1, B1 및 D1은 좌석의 바닥급기구가 없는 위치이며 A2, A3 및 C1은 좌석의 바닥급기구가 있는 위치이다. 열성능의 실측은 경기장 내부 공기를 4시간 이상 일정 온도로 유지시킨 후 무순환 시스템의 경우가 수행되었으며 이후 공기순환 시스템의 경우가 수행되었다.

### 5.2 기류 특성 및 열성능

공기순환 시스템이 적용된 경기장에서의 실측 결과에 의하면, 기류속도는 관람석 부근에서 0.3~0.5 m/s이며 그리고 트랙의 경기영역에서 0.6 m/s로서 이론예측의 결과보다 20% 정도 낮게 나타났으나 경기장내에 전반적인 순환기류는 이론예측에서와 유사하게 발생함을 알 수 있었다.

무순환 시스템과 공기순환 시스템이 적용된 경륜 경기장의 PMV 측정 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 그림에서 황축은 Fig. 5에 나타난 측정위치를 나타내며 종축은 PMV 값을 나타낸다.

무순환 시스템의 경우, PMV 값은 -0.8에서 0.35로 범위로 광범위하게 나타났다. 관람객은 A1 및 B1 위치에서 비교적 춥다고 느끼는데 이는 좌석에 바닥급기구가 없기 때문이다. 그러나 D1 위치에서의 PMV 값은 0.01로서 좌석의 바닥

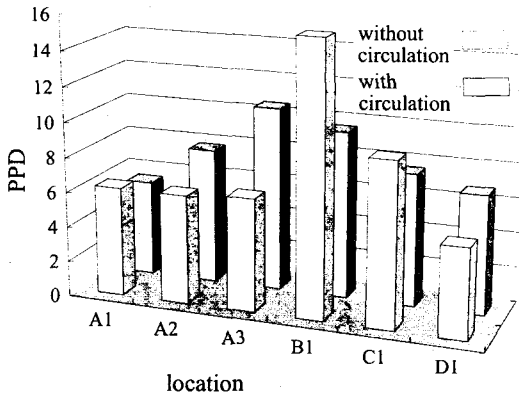


Fig. 7 Comparisons of PPD with and without air circulation system.

급기구가 없음에도 불구하고 관람객은 열적으로 쾌적감을 느끼는데 이는 관람석 상단 급기구에서 유입된 난방기류의 영향으로 사료된다. 한편 좌석에 바닥급기구가 있는 A2, A3 및 C1 위치에서의 관람객은 비교적 따뜻하게 느끼는 것으로 나타났다. 이로부터 무순환 시스템에서는 바닥급기구의 위치에 따라 관람객이 느끼는 온열감은 불균형함을 알 수 있다.

공기순환 시스템이 적용되었을 경우, PMV 값은 0.15~0.55 범위로서 관람객은 측정위치에서 따뜻한 온열감을 느끼며 무순환 시스템에서 나타났던 관람객 위치에 따른 온열감 불균형이 사라졌음을 알 수 있다. 즉 순환류편에 의한 공기순환으로 인하여 바닥급기구에서 급기된 난방공기가 관람석을 따라 순환하여 바닥급기구가 없는 위치까지 영향을 미치는 것으로 사료된다. 한편 공기순환 시스템의 경우에는 PMV 지수가 0이 될 때까지 급기되는 난방공기의 온도를 낮출 수 있으므로 에너지 절약 효과를 기대할 수 있을 것이다.

경륜경기장에서 관람객이 느끼는 PPD를 Fig. 7에 나타내었다. 그림에서 횡축은 Fig. 5에 나타난 측정위치를 나타내며 종축은 PPD 값을 나타낸다. 무순환 시스템과 공기순환 시스템 두 경우 모두 PPD 값은 측정된 대부분의 위치에서 10% 미만을 나타낸다. 그러나 B1 위치에서 무순환 시스템의 PPD 값은 14.5%이며 공기순환을 시키는 경우에는 9%로 낮아진다. 이러한 결과는 PMV 결과와 마찬가지로 공기순환 시스템의 경우에는 바닥급기구에서 급기된 난방공기가 순환류를 따라 원활

히 분배되기 때문이다.

이상의 열성능 실측으로 미루어 볼 때, 공기순환 시스템이 무순환 시스템보다 관람객의 열적 쾌적감 측면에서 우수한 것으로 사료된다.

## 6. 결론

본 연구에서는 공기순환 시스템을 갖춘 경륜경기장에 대하여 이론적인 방법으로 그 시스템의 효율성을 예측하였고, 이 시스템이 적용되어 시공된 경기장의 난방시 PMV 및 PPD로 표시되는 열적 쾌적감을 실측하였으며 아래와 같은 결론을 얻었다.

(1) 공기순환 시스템이 무순환 시스템보다 관람객의 열적 쾌적감 측면에서 우수하며 위치에 따른 온열감의 불균형을 감소시킨다.

(2) 공기순환 시스템이 적용될 경우 급기되는 난방공기의 온도를 낮추어 에너지 절약 효과를 기대할 수 있다.

## 참고문헌

1. Steve Chen, Stanley Demster, 1995, "Variable air volume systems for environmental quality", McGraw Hill, Inc.
2. Jan F. Kreider, Ari Rabl, 1994, "Heating and cooling of buildings", McGraw Hill, Inc.
3. P. O. Fanger, 1982, "Thermal comfort", Robert E. Krieger Publishing company.
4. ISO, 1985, "Moderate thermal environments -determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for the thermal comfort", ISO 7730.
5. Hassaan, V., Miller, P., 1998, "Thermal comfort and cold air distribution", *Trans., Part B, ASHRAE*, pp. 1763-1771.
6. ASHRAE, 1997, "Fundamentals", *ASHRAE Handbook*, Ch. 8.1-8.26.
7. David Etheridge, Mats Sandberg, 1996, "Building ventilation:Theory and measurement", John Wiley & Sons.