

## 대공간 열환경 검토 사례

실내 열환경 평가/개선방안에 관한 연구가운데에서 대규모 실내경기장과 공항대합실의 열환경을 수치해석적인 방법을 이용하여 평가하고 개선안을 제시한 연구사례를 들어 보았다.

김두성, 조영진, 김경환, 이재현

국내에서도 생활수준의 향상과 더불어 쾌적한 실내환경에 대한 관심이 증가되고 있다. 이에 따라서 건축물을 설계할 때 건축물의 미적인 측면과 기능적인 측면뿐만 아니라 열환경 측면도 고려되어야 할 요소로 대두되고 있다.

일반적인 사무소 건물에 대한 환기설비 및 장비의 배치에 대한 연구는 오래 전부터 이루어져 오고 있으며, 이에 따라서 어느 정도 권장되는 방식들이 제안되고 있다.

이에 비하여 최근에 들어 많이 건축되기 시작하는 대공간에 대한 열환경에 대하여서는 기존의 설계방식을 적용하고 있으나 지금까지는 용도와 형상이 다양하므로 해당공간의 특성상 많은 고려가 필요하다.

대공간 건물에는 실내경기장 및 공연장, 대합실, 아트리움, 그리고 대규모 회의장 등이 있다. 이와 같은 대공간 건축물은 일반사무소 건물과 달리 일반적으로 실내공간이 거대하며 천정이 높으며, 대공간의 사용 목적별로 내부형상이 상이하다는 특징이 있다. 따라서 이와 같은 공간의 열환경을 사용자가 쾌적하게 느낄 수 있도록 유지하기 위해서는 해당 대공간의 열환경을 예측하여 개선할 수 있는 방안을 마련하도록 해야 할 것이다. 이를 예측하

기 위한 방법에는 수치해석을 통한 방법과 실험을 통한 방법이 있다.

실험적인 방법으로 대공간의 열환경을 예측하기 위해서는 많은 시간과 비용 그리고 측정기술을 필요로 한다. 이에 비하여 수치해석을 통한 방법은 최근 컴퓨터의 발달과 유체유동에 관한 해석이론의 개발로 인해 엔지니어링 측면에서 실내 열환경의 예측에 사용 가능하므로 시간과 비용측면에서 수치해석을 통한 방법이 주로 많이 사용되고 있다. 국내에서도 근래에 들어서서 거대 실내공간을 갖는 대형구조물의 건축이 점차 증가되고 수치해석적인 방법을 이용하여 이에 대한 실내 열환경을 예측하고 이를 개선하기 위한 방안을 도출하는 많은 연구가 수행되고 있다. 아래에는 본 연구실에서 수행되었던 많은 실내 열환경 평가/개선방안에 관한 연구가운데에서 대규모 실내경기장과 공항대합실의 열환경을 수치해석적인 방법을 이용하여 평가하고 개선안을 제시한 연구사례를 들어 보았다.

### 열환경 평가 인자

대부분의 경우 재실자가 존재하는 실내 공간의

김 두 성 한미설비(주) dskim@hanmitab.co.kr

조 영 진 한양대학교 대학원 chyji@hvac3.hanyang.ac.kr

김 경 환 한양대학교 대학원

이 재 현 한양대학교 기계공학부 jhlee@hanyang.ac.kr



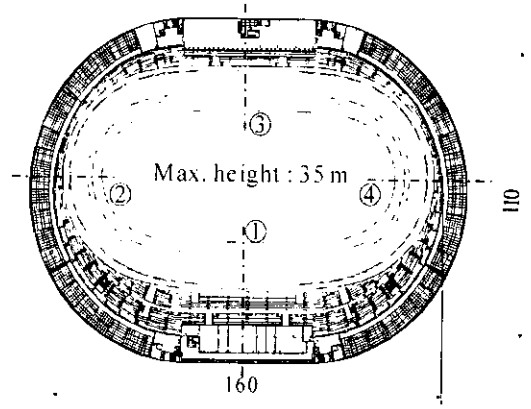
재실환경을 평가하기 위하여 단순히 기류분포 및 온도분포만을 논의한다. 그러나 실질적으로 재실자가 주어진 환경에 대하여 쾌적하게 느낀다는 것은 재실자의 심리상태와도 연관이 있는 것으로 이를 단지 온도 및 기류에 관한 개별적 결과만으로 판단하기에는 상당히 어렵다. 특히 층고가 높은 단일 실내 건물의 경우에 충분한 환기가 이루어지지 않는다면 상층부에 열성층화 현상이 발생할 수 있으며, 이로 인한 재실자의 불쾌감이 유발될 수 있다. 이러한 경우에 대한 상세한 열환경에 관한 논의는 일반적인 기류분포 및 온도분포만이 아닌 좀더 많은 인자가 고려하된 열적 쾌적지표를 많이 사용한다.

이러한 열적 쾌적을 평가하기 위하여 정형화된 방법이 다수 제안되어 있으며 근래에는 국소위치에서 인간이 느끼는 온열감을 예측할 수 있는 평가지표인 예상온열감(predicted mean vote, 이하 PMV로 칭함)과 주어진 환경에 만족하지 않는 사람의 예상비율을 나타내는 예상불만족율(predicted percentage of dissatisfied, 이하 PPD로 칭함)이 많이 사용된다.

PMV지표는 인체의 환경에 대한 감각을 정량화 한 것으로, 1970년 Fanger에 의하여 제안되었다. 이는 ASHRAE의 7단계 열감 척도를 기준으로 설정되었으며, -3에서 +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. PMV를 산정하기 위해서는 건구 온도, 평균복사온도(mean radiant temperature, 이하 MRT로 칭함), 상대습도, 기류속도, 재실자의 활동 정도 및 착의량에 대한 정보가 필요하다.

PPD는 주어진 열환경에 대하여 불만족을 느끼는 재실자의 예상 비율을 의미하며, 일반적으로 주어진 열환경에 대하여 그 값이 10% 이하이면 '쾌적하다'라고 평가할 수 있다.

그러므로 본 연구사례에서도 실내 대공간의 열환경을 기류속도와 온도 그리고 PPD 분포를 이용하여 평가하였다.



[그림 1] 경기장의 평면도

## 해석 사례

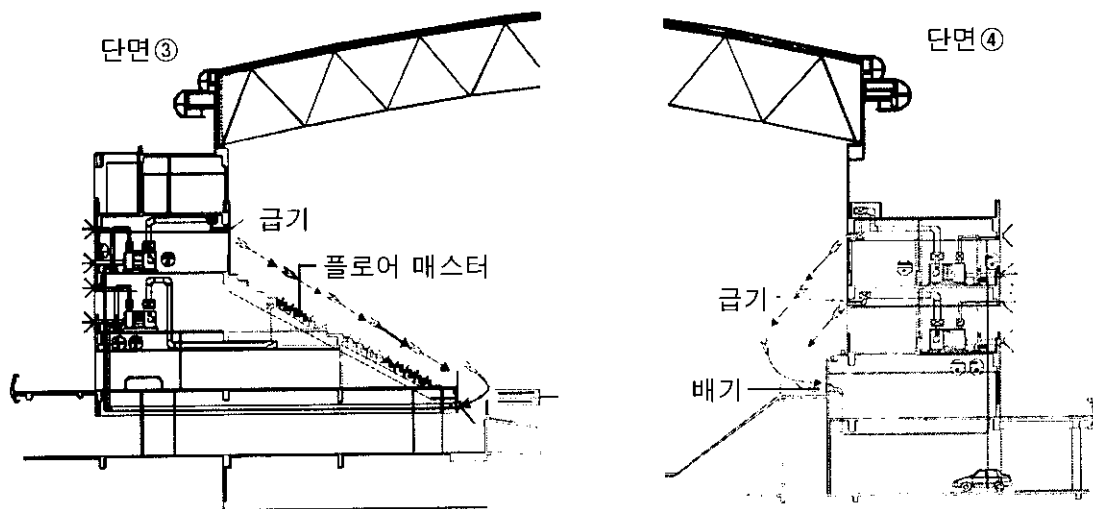
### 실내경기장

본 연구사례는 C시의 경륜 경기장이다. 대상 실내 경기장은 층고가 높아 기존 건물에 일반적으로 적용되는 공조방식을 적용할 경우 열성층화나 기류의 단락 등이 발생할 수 있다. 이와 같은 열성층화나 기류의 단락은 여름철이나 겨울철에 과도한 냉난방 에너지를 요구할 뿐만 아니라 재실자의 불쾌감도 유발시킨다. 따라서 본 연구에서는 기존 설비 설계와 이를 향상시키기 위해 제시된 설계에 따른 내부의 기류분포를 검토한 것이다.

#### • 기존 설비 개요

그림 1에 경륜 경기장의 평면도를 나타내었다. 대상 공간은 그림에서와 같이 대상공간 내부에 매우 큰 내부 공간을 포함하고 있다. 경기장은 장방형이며, 길이는 각각 160m, 100m이다. 지붕은 가운데가 볼록한 형상이며, 바닥으로부터 최대높이는 43m이다.

그림 2에 적용대상공간에 장치된 공조 설비 배치도를 1단면과 4단면에 대하여 대표적으로 나타내었다. 관중석 위쪽에는 취출덕트가 있고 경기장 트



[그림 2] 공조장치 설비도

랙 외곽에는 흡기덕트가 있다. 또한 관중석영역에서는 바닥공조가 이루어지고 있다. 경기장 내부에는 그림에 나타난 바와 같이 단면에 따라 다른 좌석의 특징을 갖고 있으나 기본적으로는 관중을 위한 직접적인 공조가 이루어지고 있음을 알 수 있다. 이와 같은 체육시설은 전체공간의 크기에 비하여 관중이 차지하는 체적은 상대적으로 매우 작다. 따라서 겨울철의 공조를 위하여 급기된 난방공기는 관중이 거주하는 영역에 채 미치지 못하고 대공간의 천장에 축적된다. 즉 값비싸게 들인 난방공기가 제 역할을 못하게 됨에 따라 에너지의 낭비가 커지게 된다.

• 개선 방안

이와 같은 기류의 정체를 개선할 수 있도록 대공간에 순환기류를 형성시킬 수 있는 장치를 도입하는 방안을 제시 하였으며, 내부기류분포를 검토하여 효과적인 장비 설치안을 제안하였다. 개선을 위해 제안된 방안은 대공간 환기팬을 장착하는 것이며 이를 그림 3에 나타내었다. 개선방안에 따른 설비

는 관중석을 위한 환기설비는 기존과 동일하며 다만 대공간에 기류 정체를 해소시키기 위하여 대공간 환기팬만을 장착한 것이다.

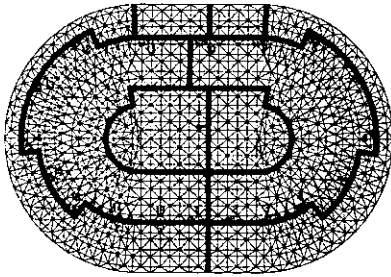
개선안에서는 대공간환기팬의 토출각도에 대하여 여러 가지 경우를 검토하였으며 우수한 방안으로 예상되는 상기방안을 제시한 것이다.

• 기존안 내부 기류분포 검토

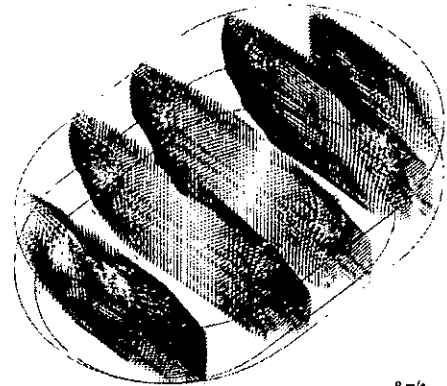
기존 설계안에 따른 내부의 기류분포를 그림 4에 나타내었다. 직접적인 환기가 이루어지는 지역을 제외한 대부분의 영역에서는 0.1m/s이하로 거의 기류가 존재하지 않는 정체영역이 형성되는 것을 볼 수 있다. 따라서 관중이나 일부 한정된 공간만을 환기 대상으로 하는 기존의 환기 시설로 외기와 온도편차가 심한 여름철이나 겨울철에 대상 실내 공간의 환기가 이루어진다면, 경기장내에 관람하는 관중들의 대부분은 불쾌감을 느낄 것으로 여겨진다. 또한 많은 에너지 낭비를 초래할 수도 있다.

• 개선안 내부 기류분포 검토

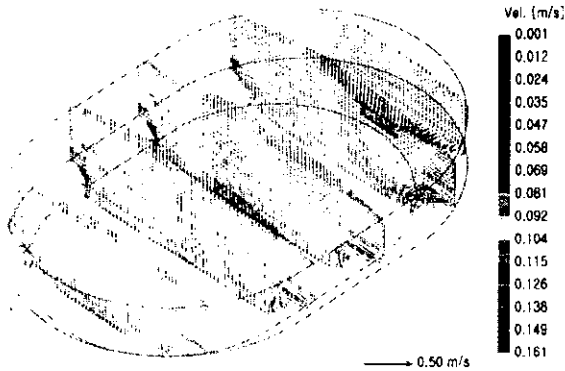
개선안 설계에 대하여 내부 수직단면과 트랙부근



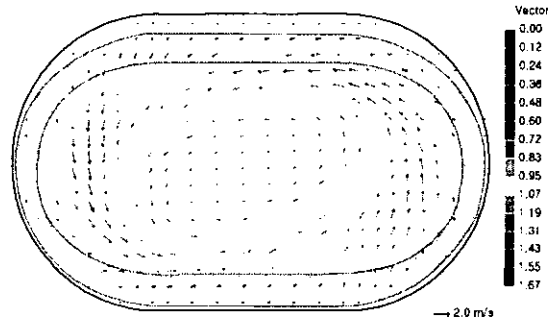
[그림 3] 개선안 (대공간 환기팬 설치)



[그림 5] 내부의 기류분포(개선안)



[그림 4] 내부의 기류분포(기존안)



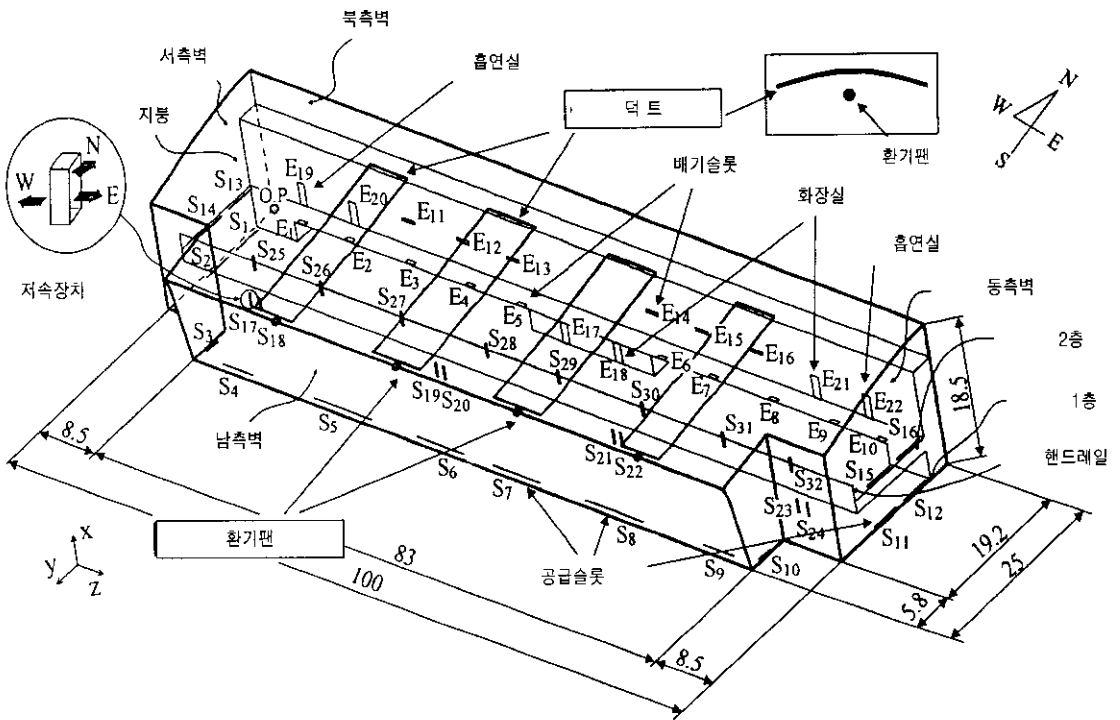
[그림 6] 트랙에서의 기류분포 (1.38m)

높이 1.38m의 기류속도를 각각 그림5와 그림 6에 나타내었다. 대공간용 환기팬을 부착시킨 경우의 경기장내에 기류가 경기장 전체적으로 형성되어 기존의 환기설비에서 부분적으로 형성되는 정체 영역이 제거됨을 알 수 있다. 이 때 선회류의 회전 속도는 약 0.67 rev./min 정도로 전체적으로 고르게 형성되며, 관중석부근에서의 평균기류속도는 0.5 m/s 정도로 적합하게 나타났다. 수직검토단면에서도 하향기류가 원활히 형성됨을 알 수 있으며, 트랙에서의 기류속도는 1 m/s 이하로서 경기에 지장이 없는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과를 바탕으로 기존안을 개선할 수 있는 방안을 제안하였으며, 실제 시공한 결과 공간 내부의 기류정체역을 제거할 수 있었고, 관중석부근에서의 채실자의 열환경도 양호하게 유지되는 것으로 나타났다.

### 공항 여객터미널

공항의 여객터미널은 출국 및 입국 수속중인 여행객들의 원활한 소통을 위하여 대공간으로 설계된다. 대공간의 설계는 일반 건물과는 달리 외형, 구조, 여행객의 동선, 채광, 실내의 온열과 공기질, 에너지관리 및 방재 등 여러 측면에서 보다 신중히 검토된다.

일반적으로 여객터미널의 지붕 및 벽체 재료로 미관향상을 위하여 유리를 많이 사용한다. 이에 따라 유리를 통해 여객터미널로 들어오는 자연광은 계절별·시각별·기후상태에 따라 변동하며, 그 양과



[그림 7] 공항 여객터미널의 공조설비 개략도(사각형 안 : 개선 설계안)

질이 인간의 시각적·심리적으로 미치는 영향은 다양하게 작용한다. 그러므로 기계설비 관점에서 태양복사열이나 외기조건에 의한 실내 열환경의 악화는 설계시에 고려해야 할 주요 관심 대상이다.

연구사례에서는 실제 설계된 공항 여객터미널의 초기 설계안과 초기설계안에 체트팬과 오픈에어 덕트가 추가된 개선 설계안에 대하여 하계 냉방기류, 온도분포, PMV 및 PPD 분포를 살펴보았다.

• 초기 설계안

공항 여객터미널의 크기는 폭 25m, 높이 18.5m, 그리고 길이 100m이며 그 개략도를 그림 7에 나타내었다. 그림에서 좌표계의 원점을 기준으로 x방향은 천장방향, y방향은 남쪽 출입구 방향, 그리고 z방향은 동쪽벽 방향이다.

로비영역은 1층에 발권/도착로비와 2층 출발대합실로 이루어져 있다. 여객터미널의 지붕은 스테인리스-유리섬유-철판의 복합재료와 유리로 구성되어 있다. 사용된 복합재료의 열관류율은 0.42 kcal/(m<sup>2</sup>h·°C)이며 유리의 열투과계수는 0.83 그리고 열관류율은 5.3 kcal/(m<sup>2</sup>h·°C)이다. 동쪽벽, 서쪽벽 및 남쪽벽은 알루미늄-우레탄발포판의 외벽과 18mm 두께의 유리로 구성되어 있다.

로비영역 내부에는 하계 냉방부하를 제거하기 위하여 그림 8에 나타낸 바와 같이 총 32개의 취출구(S1~S32)와 22개의 배기구(E1~E22)가 설치되어 있다. 취출구로부터는 18°C, 107,000 CMH의 냉각공기가 냉방설계온도 26°C로 설정된 공간으로 유출된다. 그림 8에 표시된 각 취출구 및 배기구에 서의 상세한 크기와 풍량을 표 1에 나열하였다.



〈표 1〉 공조설비의 크기 및 유량

위 치	크기 [m <sup>2</sup> ]	유량 [CMH]
S1, S2, S11, S12	4.0×0.1	1,930
S3, S10	2.0×0.1	970
S4, S9	4.5×0.1	2,240
S5, S8	8.6×0.1	4,280
S6, S7	7.0×0.1	3,470
S13~S16	4.0×0.1	700
S17~S24	0.14×1.8 0.14×1.8 0.14×1.8	4,120
S25~S32	0.25×1.8 0.14×1.8 0.14×1.8	5,200
E1~E10	1.2×0.5	5,850
E11~E16	1.8×0.4	6,360
E17, E18	1.09×2.7	2,020
E20, E21	1.1×3.0	2,520
E19, E22	1.0×3.0	630

로비영역에 대한 최대 냉방부하는 281,673 W이며 이 중 벽을 통한 냉방부하는 135,041 W이고 나머지는 실내 발생 냉방부하이다.

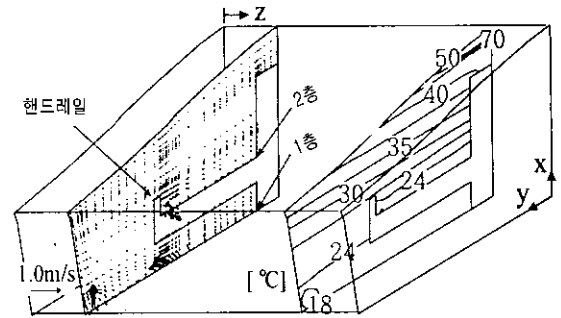
• 개선 설계안

초기 설계안의 경우, 실내 발생열량으로 인한 고온공기는 상승하여 천장의 온도상승이 예상된다. 천장의 온도상승은 재실자에게 복사열에 의한 열적 불쾌감을 유발시킬 수 있으므로 천장부에 고온공기가 정체되지 않도록 제트팬과 오픈에어덕트를 추가한 개선 설계안을 제시하였다.

개선 설계안은 초기 설계안의 공조설비에 그림 7에서 사각형으로 표시된 4개의 제트팬과 4개의 오픈에어덕트를 추가한 방식이다.

• 열환경 예측 및 평가

초기 설계안 및 개선 설계안의 열환경 특성을 파



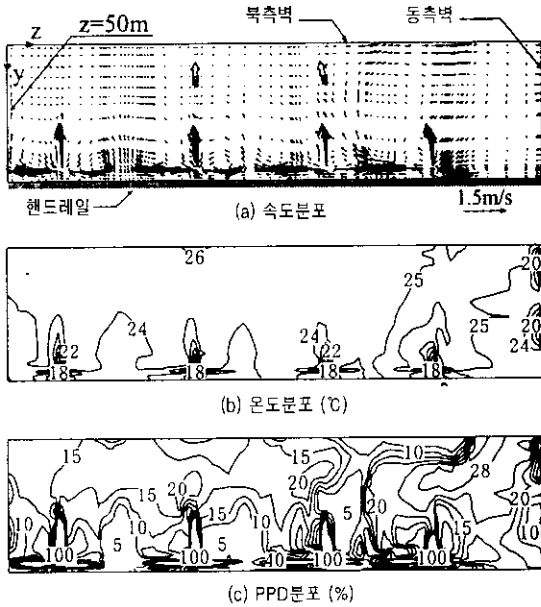
〈그림 8〉 수직검토단면에서의 기류 및 온도분포(초기 설계안)

악하기 위하여 서쪽벽(z=0 m)으로부터 z방향으로 58.5 m 떨어진 x-y 단면을 수직검토단면으로 정하고, 1층 바닥으로부터 7 m 높이의 y-z 단면을 2층 수평검토단면으로 정하였다. 수직검토단면은 제트팬(z=59 m) 설치위치로부터 0.5 m 떨어진 단면이다. 또한 수평검토단면은 재실자의 호흡선 위치를 고려하여 2층 바닥(x=5.5 m)으로부터 1.5 m 높이의 수평단면(2층 수평검토단면)으로 정하였다.

여객터미널의 열환경 평가를 위한 PMV 및 PPD 산정은 재실자의 활동에 따른 발열량은 1.2 met [69.78 W/m<sup>2</sup>], 착의량은 0.5 clo [0.078 m<sup>2</sup>K/W] 그리고 상대습도는 50%로 가정하고 수행하였다. 또한 평균복사온도는 형태계수를 이용한 산정방법에 의하여 계산되었다.

－ 초기 설계안에서의 열환경

초기 설계안에서 수직검토단면에서의 기류 및 온도분포를 각각 그림 8의 좌우에 나타내었다. 속도분포를 살펴보면, 1층과 2층 모두 취출구 근처에서만 0.2 m/s의 속도를 나타낼 뿐 그 외의 영역에서 0.2 m/s 이하를 나타낸다. 특히 천장부에서의 기류속도는 0.2 m/s 이하로서 거의 정체되어 나타난다. 온도분포를 살펴보면, 1층 및 2층 활동영역에서의 온도분포는 24~25°C로서 설계온도 26°C보다 약간 낮게 나타난다. 그러나, 지붕면에서의 평균온도는 약 40°C로서 활동영역에서 온도보다

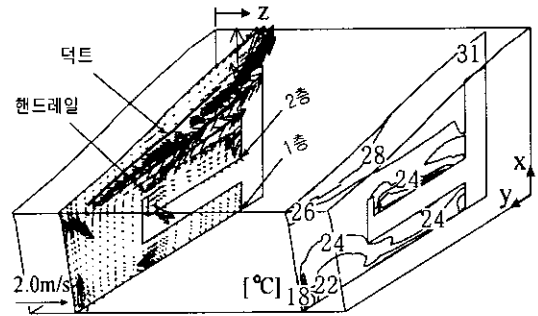


[그림 9] 수평검토단면에서의 속도, 온도 및 PPD 분포(초기 설계안)

높게 나타난다. 특히 국소적으로 70℃의 고온영역이 나타나는데 이는 부력에 의해 상승한 고온공기의 정체와 지붕을 통해 유입되는 열량으로 인하여 열성층화에 따른 열고임 현상 때문으로 거주역과 지붕면과의 이러한 상하 온도편차는 복사열전달을 증대시켜 재실자 위치에서의 열환경에 좋지 않은 영향을 미칠 것으로 예상된다.

여객터미널의 2층 수평검토단면 동측 절반에서의 기류, 온도, 그리고 PPD분포를 그림 9(a), (b) 및 (c)에 각각 나타내었다. 속도분포를 살펴보면, 난간(handrail) 근처의 저속취출구에 의하여 형성된 1.5 m/s 정도의 기류가 저속취출구의 근처에서만 영향을 미칠 뿐 그 외 영역에서의 속도는 0.2 m/s 이하로 나타난다. 동일 단면에서의 온도분포를 살펴보면, 재실자 활동영역에서의 온도범위는 18~26℃ 범위이며 평균온도는 25℃로서 설계온도 26℃보다 낮게 나타난다.

열환경 평가를 위한 PPD분포를 살펴보면, 그림에



[그림 10] 수직검토단면에서의 기류 및 온도 분포(개선 설계안)

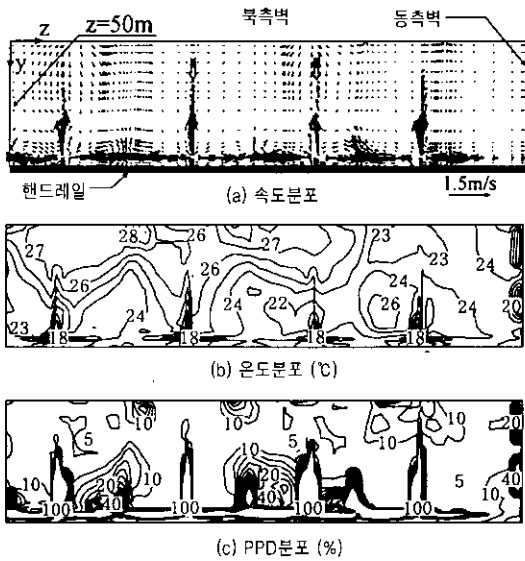
보이는 바와 같이 재실자 호흡선 높이에서의 평균 PPD는 23%이며 활동영역에서의 온도분포가 설계온도보다 낮음에도 불구하고 활동영역에서의 열환경은 그다지 쾌적하지 못한 것으로 나타난다. 이는 활동영역에서의 기류속도가 작을 뿐만 아니라 그림 9의 온도분포에 나타난 바와 같이 천장부에서의 열성층화에 따른 고온 지붕면에서의 복사열로 인하여 재실자가 느끼는 체감 온도는 실제 기류의 온도보다 높기 때문이다.

#### - 개선 설계안에서의 열환경

수직검토단면 기류 및 온도분포를 각각 그림 10의 좌우에 나타내었다. 속도분포를 살펴보면, 제트팬에서 분사된 제트기류는 오픈에어덕트를 따라 3 m/s 정도의 속도로 진행됨을 알 수 있다. 즉 개선 설계안에서는 초기 설계안에서 나타나는 천장부에서의 기류 정체영역이 사라질 뿐만 아니라 제트기류의 영향으로 인하여 2층 활동영역에서의 기류속도도 0.3~0.4 m/s 정도로서 초기 설계안보다 높게 나타난다.

개선 설계안의 천장부 온도분포는 26~31℃이고 평균온도는 약 30℃로서 초기 설계안의 천장부 평균온도보다 10℃ 정도 낮게 나타난다. 또한 지붕면과 2층 활동영역과의 상하 온도편차가 거의 나타나지 않음을 알 수 있다.

개선 설계안에서 2층 수평검토단면 동측 절반에



[그림 11] 수평검토단면에서의 속도, 온도 및 PPD 분포(개선 설계안)

서의 기류, 온도, 그리고 PPD분포를 그림 11(a), (b) 및 (c)에 나타내었다. 개선 설계안에서의 속도 분포를 초기 설계안에서의 속도분포와 비교해 보면, 저속취출구 근처에서의 기류는 두 설계안에서 유사하게 나타나지만 그 외 영역에서의 기류속도는 0.3~0.4 m/s로서 초기 설계안보다 약간 높게 나타난다.

개선 설계안은 온도분포 측면에서는 활동영역에서 약 25.5°C로서 초기 설계안의 평균온도에 비하여 다소 높게 나타났으나, 재실자 호흡선 높이에서의 평균 PPD분포 측면에서는 8% 정도로써 초기설계

안에 비하여 재실자는 '쾌적하다'고 느끼는 수준으로 향상되었다. 이는 재실자 호흡선 높이에서의 기류속도가 0.4 m/s 정도이고 천장면과 거주역과의 온도차 감소에 따른 복사열전달의 감소 때문이다.

따라서 본 연구사례에서는 내부열환경 검토를 통하여 수직순환기류를 발생시킬 수 있는 환기방식을 추가할 것을 제안하였다.

### 맺음말

최근 들어 재실자의 쾌적감 향상과 에너지 절약을 위하여 실내 대공간의 열환경을 평가하고 이의 개선안을 도출하는 노력이 이루어지고 있다. 본 연구사례에서도 볼 수 있듯이 대공간에 대한 열환경을 예측하고 이의 개선안을 도출하기 위한 수단으로서 수치해석적인 방법이 매우 효과적으로 사용될 수 있음을 알 수 있다. 그러나 수치해석적인 방법은 대상공간을 처리하는 방안이나 입력되는 자료에 따라서 매우 큰 차이를 보이므로, 잘못 선정된 입력자료나 부적절한 모델링을 바탕으로 내부열환경을 해석할 경우 커다란 오류를 초래할 수 있다. 따라서 수치해석적인 방법이 적절히 이용되기 위해서는 수치해석을 위한 대상공간의 적절한 모델링과 정확한 자료, 그리고 수치해석에 관한 전반적인 경험이 필요할 것이라 생각한다. 또한 TAB작업 수행 시 시뮬레이션의 결과를 활용할 수 있도록 하기 위해서는 시뮬레이션의 타당성을 향상시키기 위한 거주 후 평가시험이 필수적으로 이루어져야 한다. ㉔