

바닥취출공조와 수동형 냉방빔을 적용한 냉방 시스템 적용 사례

(Cooling with less air using underfloor air distribution
and chilled beams)

출처 : ASHRAE Journal, December 2009, pp.34-40.

저자 : Steve Weidner (P.E.), Jerome Doerger (P.E.), Michael Walsh (P.E.)

번역 : 박 창 용 / 편집이사

서울산업대학교 기계설계자동화 공학부(cypark@snut.ac.kr)

서론

미국 Kentucky 주에 소재하는 한 콜센터(call center : 고객의 전화 통화를 조직적으로 처리하는 컴퓨터 자동화가 되어 있는 중추적인 장소)를 위한 설계팀은 최적의 HVAC 방법으로 자연냉각방식이 결합된 바닥취출공조(underfloor air-distribution (UFAD)) 시스템을 결정하였다. 몇 가지 선택 가능한 방법 중 설계팀은 수동형 냉방빔(passive chilled beams)이 결합된 바닥취출공조 방식을 최종 선정하였다. 이를 통해 전력소모와 천연가스 소비량을 각각 41%와 24% 절감하였으며, 처음에 고려되었던 프로젝트에 대해 혁신적인 방법으로 접근할 수 있었다.

Kentucky 프로젝트를 위한 종합계획은 현재 있는 대학 캠퍼스 내에 2,200명의 직원에게 공간을 제공할 수 있는 34,932 m²의 면적을 가진 건물을 건설할 것을 요구하였다. 설계 요소는 LEED (the Leadership in Design and Environmental Design, 미국 녹색건축협회(USGBC)에서 지정한 녹색건축물 등급 판정 시스템) 인증과 직원과 기능적 공간을 위한 최적화된 유연성을 포함하였다. 또한 새 설비는 모든 사무실에 컴퓨터나 통신 장비의 케이

블을 위해 원래의 바닥위에 일정 높이의 공간을 두어 바닥을 하나 더 만든 액세스 플로어와 바닥 취출공조를 요구하여 미래에 있을 직원의 사무공간 배열을 수용할 수 있는 유연성을 제공하도록 하였다.

설계팀은 제안된 설비를 위해 냉방 및 난방 부하 계산을 실행하였다. 계산에 관련되는 모든 건물과 거주할 사람에 관한 특성이 고려되었고, 부하계산을 위해 표준화된 컴퓨터 모델링 프로그램이 사용되었다. 처음 이 설계가 실행단계에 있었던 2006년 초반에는 바닥취출공조 방식을 위한 검증된 컴퓨터 모델이 존재하지 않았고, 또한 냉방빔(chilled beam)이 설치된 경우에 대한 모델역시 없었다. 안전도 높은 공학적 판단을 통해, 설계팀은 열부하 계산을 거주 지역(거주자, 컴퓨터, 그리고 외벽/창을 통한 투과량/바닥에서 그 위의 2 m 부분까지 영향을 주는 태양 에너지 부하)과 비거주 지역(조명과 외벽/창을 통한 투과량/2 m 이상 3 m 천장까지의 태양 에너지 부하)으로 나누어 고려하는 방법을 사용하였다. 이 데이터는 중앙 냉각 플랜트와 보일러의 크기를 결정하는데 이용되었다. 플랜트의 설계에는 냉각수 및 온수를 위한(N+1)의 여유용량이 고려되었다.

효율 향상과 공간의 최대화

건물의 부하와 중앙 설비 용량이 결정된 후, 설계팀은 공기조화 장치의 선택과 크기 결정에 접근하였다. 공간 요구사항과 전체 설비 설계 사항은 주 공기조화 장치가 건물의 옥상에 위치해 있어야 하며 흡기 및 배기 덕트와 파이프를 위해 수직으로 위치해 있어야 한다는 것을 요구하였다. 설계팀은 가능한 시스템 해결방법을 브레인스토밍 하였고, 이를 통해 수직방향의 공기 유동을 위한 바닥 공간을 최소화하고 사용 가능한 바닥 면적을 최대화 하는 방법을 생각하였다.

제시된 방법은 거주 공간을 위해 수동형 냉방 장치가 연결된 바닥취출공조 방식을 사용하는 것이었다. 이 방법을 사용하게 되면 냉방 모드의 경우 중앙 설비로부터 공기의 공급이 불필요하게 된다. 설계팀은 최적의 수동형 냉방 장치를 결정하기 위해 혁신적이고 높은 에너지 효율에 특히 중점을 두어 많은 기술에 대한 검토를 실시하였다. 검토결과 바닥취출공조 방식과 결합될 수 있는 방법으로 천장복사냉방(radiant cooled ceiling)과 냉방빔(chilled beams)이 제시되었다.

냉방빔을 선택하는 경우 능동형과 수동형이 고려될 수 있었다. 하지만 능동형 냉방빔은 고려 대상에서 제외되었는데, 그 이유는 냉방시스템에서 제거하기로 하였던 중앙공조 장치와의 연계와 덕트 작업을 요구하기 때문이었다. 또한 능동형 냉방빔은 공기가 섞이는 특성이 있어 거주 공간에 신선한 공기를 직접 공급하는 장점을 상쇄 시킨다.

천장복사냉방과 수동형 냉방빔의 비교

천장복사냉방 시스템은 냉방패널을 천장에 설치하여 거주 공간에 현열냉방을 제공하는 방법이다. 패널은 설치된 천장과 잘 어울리는 앞면과 냉각수 관으로 된 회로에 의해 냉각이 이루어지는 뒷면으로 이루어져 있다⁽¹⁾. 냉각수 관은 천장의 윗면에 위치하고 있으며 거주 공간으로 노출된 표면은 약 15.6℃에서 18.3℃ 사이의 온도를 유지하고 있다. 거주 공간을 위한 냉각 표면은 어떠한 경우에도 천장에서의 응축 현상을 방지하기 위해, 표면의 온도

가 이슬점 이하로 내려가서는 안된다.

습공기 선도에서 본 설계 조건을 생각해 보면 이슬점 이하의 패널 냉각을 피해야 한다는 사실은 간단하게 보일수도 있다. 거주공간에 대해 건구온도 22℃, 상대습도 50%인 조건에서 이슬점 온도는 11.3℃이다. 하지만 환기가 잘 되는 거주 공간에서의 실제 이슬점은 쉽게 이론적인 이슬점 온도보다 높게 위치할 수 있으며, 설계 조건을 만족하기 위해 상대 습도를 실시간으로 측정하지 않는 경우에는 더욱 그러하다.

천장복사냉방의 두드러진 장점으로는 보조적인 냉방장치(덕트와 관련 공간 및 장치)가 불필요하며 시스템의 효율이 비교적 우수하다는 것이다. 일반적으로 단위 면적당의 냉방 용량이 95 W/m² 정도로 낮은 경우 천장의 대부분이 복사냉방패널로 사용되어야 한다. 초기비용과 외관이 좋지 않다는 점은 천장복사냉방 적용의 가장 큰 걸림돌이라 볼 수 있다.

수동형 냉방빔은 코일과 비슷한 형태의 냉각수관 회로를 사용하며 천장에 매달리거나, 천장 아래의 공간부에 위치하는 냉각장치이다. 수동형 냉방빔의 기능은 환-튜브 방식의 대류식 난방기와 매우 유사하다. 하지만 두 장치에는 큰 차이점이 존재하는데, 냉방빔의 경우 공간내부에 존재하는 공기보다 높은 밀도를 가진 공기를 만들어 그 공기에 기초하여 작동하는 반면, 대류식 난방기는 주변 공기보다 가벼운 가열된 공기에 의해 작동된다는 것이다. 주변의 공기는 냉방빔에 의해 냉각되고 밀도가 증가하여 냉방하려는 공간의 바닥 부분으로 내려오며 상대적으로 고온인 공기를 대치하면서 대류 유동을 발생시킨다⁽²⁾.

공기 중 수분의 응축현상이 천장복사냉방의 설치와 냉각수 온도를 결정하는데 중요한 요인이었던 것과 마찬가지로, 냉방빔에도 동일한 제한조건이 존재한다. 하지만 비교적 간단한 구조와 우수한 냉방성능(단위 길이 1 m 당 173 W의 용량) 그리고 천장복사냉방 보다 저렴한 비용이라는 장점을 가진 수동형 냉방빔이 더 나은 선택사항으로 등장하였다.

최적의 HVAC 시스템

HVAC 시스템의 평가는 공급되는 공기의 양, 총 모

터의 용량, 바닥 공기 확산장치의 용량, 미래 요구에 대한 시스템의 유연성, 그리고 초기 설치비용 등이 모두 고려되어 진행되어야 한다. 설계팀은 본 프로젝트를 위해 세 가지의 시스템에 대해 고려하였다.

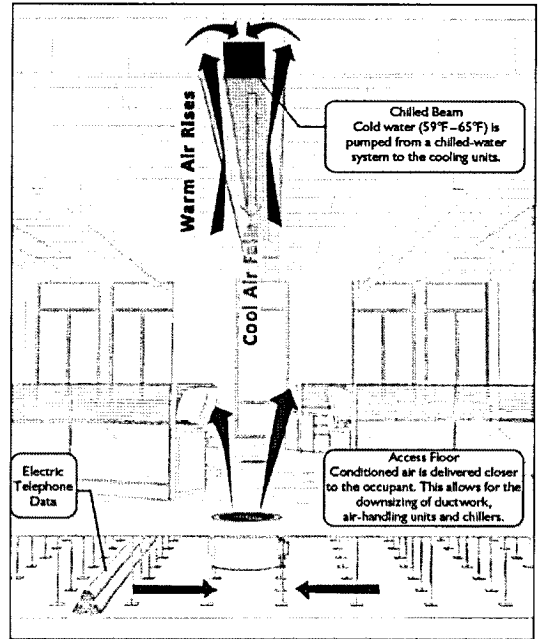
① 바닥취출공조만 적용한 시스템. 비교를 위한 기준이 되는 시스템

② 바닥취출공조와 천장복사냉방을 결합한 시스템

③ 바닥취출공조와 수동형 냉방빔을 결합한 시스템

비교결과는 표 1에 요약되어있다. 천장복사냉방을 결합한 바닥취출공조 방식에서 제시된 공기 공급량은 모든 천장에 동일한 형태의 복사냉방패널을 설치한 경우를 가정하여 결정되었다. 수동형 냉방빔을 결합한 바닥취출공조 방식에서 제시된 공기 공급량은 외기의 공기가 혼합된 공기가 바닥에서 취출되는 경우에 대한 냉방용량을 기준으로 하여 계산되었다. 냉방용량과 냉방부하가 차이가 생기는 경우 수동형 냉방빔에 의해 초과된 냉방부하가 처리될 수 있다. 최종적인 계산 결과는 공기를 처리하는 장치, 팬의 용량, 덕트 설치를 위한 작업, 바닥에 설치된 공기 확산장치의 수량, 수동형 냉방빔의 수량을 고려할 때 약 40% 외기의 유입이 가장 적절하다는 것을 보여주었다. 사용 가능한 냉방빔은 건물의 외벽에 대해 수직으로 설치되어야 하며, 거주자의 작업 공간보다 위에 위치해야 할 것을 요구하였다. 이러한 요구 사항은 건물의 천장높이가 충분히 높았기 때문에 수용이 가능한 것으로 생각되었다.

보조 냉방 시스템의 적용은 공기를 공급하고 되돌리는데 필요한 팬의 용량감소와 바닥의 공기 확산장치의 수량을 줄이는 것을 가능하도록 하였다. 이는 상당한 설치비용의 감소를 의미하며, 특히 거주자의 안락함을 위해 고가의 자동, 저소음 공기 확산장치를 사용하기로 한 본 프로젝트에서는 비



[그림 1] 바닥취출공조와 수동형 냉방빔을 결합한 시스템의 단면도

<표 1> 보조적인 냉방 시스템을 설치한 경우와 그렇지 않은 경우의 바닥취출공조 방식 비교

	UFAD Alone	UFAD With Radiant Cooled Ceilings	UFAD With Passive Chilled Beams
Supply Air Quantity(cfm)	560,000	240,000	240,000
Supply Fan Power(hp)	600	280	280
Return Fan Power(hp)	280	120	120
Total Swirl Diffusers* Required	5,600	2,400	2,400
Weighted Airflow(cfm/ft ²)	1.6	0.7	0.7
Qualitative Flexibility	Good	Fair	Good
First Cost(\$)	Reference	+4,250,000	+100,000
Operating Cost Payback	N/A	>50 years	< 2 Years

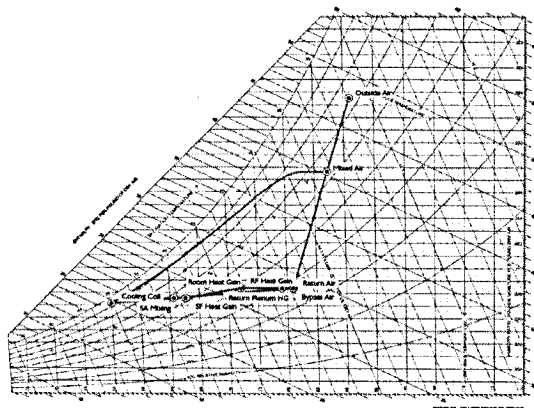
* Swirl diffusers are floor-mounted air devices for supply air delivery into the occupied space.

용 감소가 더욱 두드러졌다.

설계팀은 미적 요구사항과 장치의 설치, 공조 시스템의 에너지 효율을 최대화 하는 기능적 요구사항을 모두 만족하기 위해 지속적으로 노력하였다. 기계설비관련 설계팀과 건축 설계팀은 냉방빔과 기둥의 위치, 공간에서 조명 설치 등을 결정하기 위해 매우 유기적으로 협업하였다. 그림 1은 바닥취출공조와 수동형 냉방빔을 결합한 시스템의 단면도를 보여주고 있다.

에너지 절약의 최대화

에너지 절약을 최대화하기 위해 설계팀은 에너지 재생장치의 한 종류인 heat wheel(공간으로 유입되는 공기의 열적 조건을 공간 내부에 존재하는 공기와 유사한 열적 조건이 되도록 만드는 장치) 사용을 고려하였으나, 설치비용과 설치공간의 제한 조건으로 인해 적용하지 않기로 하였다. 거주 공간에 활동하는 사람의 밀도는 환기를 위한 외기 공기의 유입을 요구하며, 이러한 유입 공기를 원하는 조건으로 만드는 장비는 매우 중요하다. 바닥취출공조 방식에서 실내에 공급되는 공기의 건구온도는 일반적으로 16.7℃로 덕트를 사용하는 시스템에서 공급하는 통상적인 공기의 건구온도인 12.8℃보다 높다. 또한 본 프로젝트에서 요구하는 제습효과를 만족하기 위해서는 실내 조건보다 약 0.003

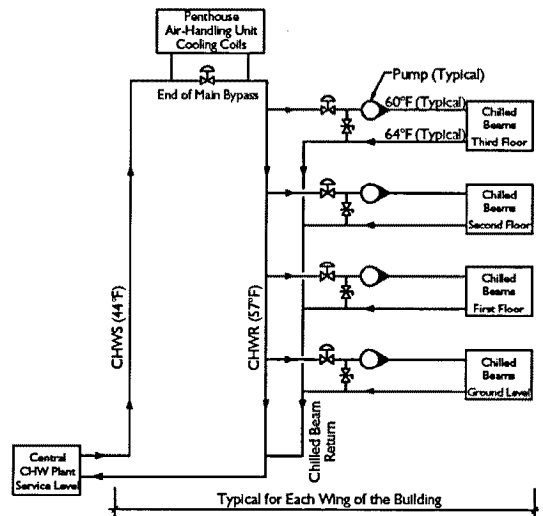


[그림 2] 습공기 선도에 표현된 바닥취출공조 냉방 사이클

kgw/kga 정도 낮은 상대습도를 갖는 공기를 공급해야 했다. 결과적으로 공급공기를 재가열 하는 방법이 필요하였다.

해결 방법은 되돌아오는 공기의 일부를 냉각코일 주변으로 우회시켜 냉각코일을 지나는 공기와 섞은 후 하류의 급기 팬으로 보내는 것이다. 환기를 위한 외부 공기는 냉각수 냉방코일을 통과한 후 되돌아오는 공기의 일부와 섞이게 된다. 냉각코일은 유입되는 건구온도 30.6℃, 습구온도 25.0℃의 공기를 건구온도 10℃, 습구온도 9.4℃의 공기로 만들어 준다. 이 공기는 건구온도 27.2℃, 습구온도 17.2℃(실내의 건구온도는 26.1℃이며 팬에 의한 온도 상승이 1.1℃라 계산) 인 되돌아오는 공기의 일부와 섞이게 되며, 이때 섞이는 비율은 냉방코일에서 나오는 공기가 66%, 되돌아오는 공기가 34%이다. 팬에 의한 공기온도 변화와 덕트를 지나면서 열침투가 발생하여 실제 실내에 공급되는 공기는 건구온도 16.1℃, 습구온도 12.2℃를 갖는다. 위에서 설명한 과정을 습공기 선도에 나타내면 그림 2와 같다.

중앙공조 시스템은 모든 건물 실내의 모든 환기와 잠열부하, 그리고 현열부하의 약 52%를 해결해 준다. 나머지 현열부하의 48%는 냉방빔 시스템에 의해 제공된다. 시스템은 또한 거주공간에 설치된 이산화탄소 모니터링 장치와 연동되어 작동되며,



[그림 3] 냉방빔과 관련된 배관 시스템의 개략도

이를 통해 외부 공기의 유입량을 결정하여 에너지 소모를 최소화 하고, 환기와 관련된 요구사항을 만족하게 된다.

냉방범은 천장 부근에 건물의 외벽과 수직 방향으로 일렬로 배열된 형태로 위치하고 단위길이 1 m 당 약 173 W의 현열냉방 용량을 갖는다. 냉방범 시스템은 중앙공조 시스템을 위해 건물의 옥상에 설치된 냉방코일을 통과한 후 되돌아가는 냉수를 이용하도록 되어있으며, 이는 그림 3에 나타나 있다. 냉방코일을 통과한 냉수의 온도는 약 13.9℃이며, 각 공간에 설치된 냉방범으로 펌프를 이용하여 공급되게 된다. 냉방범으로 공급되는 물의 온도는 15.6℃, 냉방범을 통과한 물의 온도는 17.8℃이며, 되돌아가는 냉수는 2차 냉수회로 시스템과 연결되어 냉방범의 표면 온도가 실내의 이슬점 온도보다 아래로 내려가는 것을 방지해 준다.

자동 온도조절 시스템은 실내의 건구 및 습구 온도를 측정하고, 이슬점 온도를 계산하여 냉방범을 위한 2차 냉수회로 시스템에 설치된 2방 조절밸브를 조절하게 된다. 이를 통해 냉방범으로 공급되는 물의 온도가 실내의 이슬점 온도보다 적어도 1.7℃ 이상이 되도록 한다. 냉방범을 통과한 물의 온도는 약 17.8℃이며, 건물의 지하에 설치된 기계실로 이동한다. 기계실에서 냉방범을 통과한 물과 공조기를 통과한 약 13.9℃의 온도를 가진 물이 섞여 냉동기(chiller)로 이동하게 되는데 이때 냉동기로 공급되는 물의 온도는 약 14.4℃이다. 냉동기로 공급되는 물의 온도가 냉방범에 사용된 냉수로 인해 약 0.5℃가 상승하여 냉동기가 냉각해야 할 물의 온도가 3.7℃에서 7.2℃로 증가하여 냉동기의 효율을 감소시키는 요인으로 작용한다. 하지만 냉방범의 사용으로 최대 부하시 요구되는 냉수의 유량이 감소하여 펌프의 소요 동력을 약 11% 감소시키는 효과가 있다.

환기 분석

초기 냉방 시스템의 개략도와 크기를 결정한 후, 설계팀은 제안된 시스템에 대한 전산유체역학(CFD) 해석을 실시하였다. 전체적인 전산유체해석은 제시된 설계에서 거주 공간에 대한 공기 섞임

의 완벽성, 공기의 원활한 흐름, 그리고 공기가 유입되어 되돌아가는데 까지 공기가 실내에 머무르는 시간 등을 평가하기 위해 실시되었다. 또한 환기 유효성과 거주자의 만족도 등도 계산에 포함되었다. 환기 분석을 통해 제시된 설계안이 설계 요구조건을 만족한다는 것을 보여주었다. 전산유체역학을 이용한 해석으로부터 몇 가지 설계 개선사항이 제시되었는데 되돌아가는 공기의 유로에 대한 단면적을 약간 더 확대하라는 것과, 바닥 부분에 뜨거운 공기가 모이는 공간을 없애기 위해 몇 개의 공기 확산장치를 추가적으로 설치하라는 것이었다. 이러한 개선사항은 설계에 반영되었고, 이를 통해 시스템의 설계가 마무리되었다.

새로운 냉방 시스템을 위한 입찰과 시공

설계 과정에서 극복해야 할 추가적인 한 가지 문제점은 입찰과 시공 과정이다. 아직 냉방범이 미국에서 널리 사용되지 않기 때문에, 많은 HVAC 시공사들은 냉방범 설치에 대한 요구사항들에 익숙하지 않다. 입찰과 시공 과정에서 불필요한 어려움을 해소하기 위해, 설계팀은 냉방범 시스템의 실물 모형을 제작하여 입찰에 응하는 HVAC 시공사들에게 모형을 보내 실제 시스템을 살펴보고, 그 구조와 설치에 관한 지식을 습득하도록 하였다. 이를 통해, 시공 계약자의 냉방범 시스템에 대한 비판적 시각이나 익숙하지 않다는 것에 기인하는 지나치게 높은 입찰가격을 예방할 수 있었고, 예상에 거의 일치하는 입찰가격을 이끌어낼 수 있었다. 결과적으로 선택된 HVAC 시공회사는 시스템을 계획하였던 예산 이내에서 공기를 맞추어 시공완료 하였다.

운전비용 결과

운전비용 데이터는 2007년 12월 건물에 입주자 시작된 이후부터 지속적으로 얻어지고 있다. 2008년 연간 평균 전기에너지 소비량은 1.89 kWh/ft²였다. 같은 기간 동안 동일한 대학 캠퍼스에 위치한 비슷한 구조와 규모를 갖는 다른 건물(HVAC 시스템으로 전통적인 천장형 변풍량(VAV) 방식을 적용)의 연간 평균 전기에너지 소비량은 3.22

〈표 2〉 수동형 냉방법이 결합된 바닥취출공조 방식 시스템과 전통적인 변풍량 방식(VAV) 시스템의 월간 소요 전기 에너지 비교

	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	June	July	Aug.	Sept.	Oct.	Nov.	Dec.	
Subject Building(375,909 ft ²)													Avg.
Total kWh	603,191	620,557	710,214	792,539	670,842	682,702	757,313	718,749	735,248	721,284	723,278	782,832	709,896
Total kWh/ft ²	1.60	1.65	1.89	2.11	1.78	1.82	2.01	1.91	1.96	1.92	1.92	2.08	1.89
Comparable Building(188,321 ft ²)													Avg.
Total kWh	752,548	629,850	573,740	589,647	576,489	599,758	635,405	566,343	596,489	580,019	561,847	606,702	605,736
Total kWh/ft ²	4.00	3.34	3.05	3.13	3.06	3.18	3.37	3.01	3.17	3.08	2.98	3.22	3.22

kWh/ft²였다. 이는 수동형 냉방법이 결합된 바닥취출공조 방식을 통해 41%의 전기소비를 절감할 수 있다는 것을 의미하며 이는 표 2에 제시되었다. 또한 2008년 한 해 동안 소모된 천연가스 소비량도 24% 줄일 수 있었다. 완공된 건물은 기대하였던 현저한 에너지 소모 감소를 달성하였다.

실제 운전을 통한 교훈

본 프로젝트의 설계, 시공 및 운전을 통하여 많은 것을 배울 수 있었다. 설계 단계에서 공기온도의 성층화(공기가 상하로 섞이지 않아 그 온도 차이가 큰 상태)는 냉방법에서 냉각된 공기가 거주 공간으로 하강하면서 생성되는 찬 공기 기둥에 의해 큰 영향을 받지 않을 것으로 예상되었다. 또한 설계팀은 냉방법으로부터 생성된 공기가 바닥에 설치된 공기 확산장치의 공기 공급 유동에 부정적인 영향을 미치지 않을 것이라 추정하였다. 이러한 두 믿음은 전산유체해석을 통해 확인되어 틀림없을 것이라 여겨졌다. 하지만, 실제 운전에서는 기대하였던 온도의 성층화가 일어나지 않았으며, 그 결과, 되돌아오는 공기의 온도는 예상하였던 온도보다 낮았다. 이러한 현상은 제습과 재가열 과정을 어렵게 만드는 요인이 되었다. 이러한 문제를 좀 더 분석해 본 결과, 실내의 공기를 되돌리기 위해 천장에 설치된 개구부 근처에 위치하는 냉방법 근처에서는 공기의 흐름이 예상과 반대 방향으로 일어난다고 있음이 확인되었다. 그 결과 차가운 공기는 아래로 내려오지 않고 되돌아가는 공기에 섞여 그 온도가 예상보다 낮았던 것이었다. 이러한 조건의 냉방법은 유동이 아래 방향으로 막혀 있는 것과 다르

지 않았다. 결론적으로 매우 신중하게 시행하였던 전산유체해석은 언제나 완벽하게 실제 유동을 예상하지 못했으며, 특히 이전에 시도되거나 시험된 적이 없는 혁신적인 방법을 적용하는 경우에는 더욱 그러하였다. 다행스럽게도 적절하게 작동하고 있는 냉방법은 바닥에 설치된 공기 확산장치의 성능에 부정적인 영향을 주지 않은 것으로 보였다. 사실, 거주자가 느끼는 쾌적도는 설계팀에 예상하였던 것 이상이었다. 쾌적도와 관련된 불만 건수는 월당 28건으로 2008년 건물의 거주 인원이 1,700명 인 것을 고려할 때 불만 건수는 매우 작았다.

결론

설계팀이 프로젝트의 목적과 중요한 고려사항을 만족하려 하는 요소가 최종 설계에 포함되어야 한다는 사실을 이해하는 것이 매우 중요하다. 본 프로젝트에 반영된 혁신적인 공기측 시스템은 기존에 존재하는 바닥취출공조, 수동형 냉방법, 수냉식 냉방 시스템, 공조기를 사용한 되돌아오는 공기를 우회시키는 기술을 모두 혼합한 형태로, 건물의 실내 조건을 만족하기 위한 소요 에너지를 현저히 줄여주었으며, 거주자에게 우수한 쾌적도를 제공하였다.

참고문헌

1. Dieckmann, J., K. Roth, J. Brodrick. 2004. "Radiant ceiling cooling," ASHRAE Journal 46(6): pp. 42-43.
2. Roth, K., et al. 2007. "Chilled beam cooling." ASHRAE Journal 49(9): pp. 84-86. ㉔