

산업용 대공간에 대한 공조계획

Air-conditioning design for industrial large space

윤 원 석
W. S. Yoon
(주)남진설비



- 1950년생
- 건축물의 대공간 공조계획 및 에너지 절약에 관심을 가지고 있다.

1. 머리말

최근 고도의 경제성장과 함께 유통구조의 선진화로 대형화, 하역 및 적재, 운반기계의 자동화를 도입함으로써 생산 또는 보관제품의 품질 보존, 작업 인원의 최소화 및 교통체증에 대한 적절한 대응으로 고품격의 물류 서비스를 할 수 있게 되었다. 특히, 생산 또는 보관제품의 품질 보존을 위해서는 물류 창고 내의 물류 특성에 따른 실내 공조환경 즉, 적정한 온·습도 및 기류를 유지하도록 공조설비를 계획하여야 하는데 층고가 높고 바닥적이 넓은 대형 물류센터 즉, 산업용 대공간에 대한 공조설비는 층고 높이로 적재된 장애물을 극복하고 취출되는 기류가 실내 전체에 골고루 확산 및 순환 될 수 있도록 적절한 공조방식을 선정하여야 한다. 따라서 본 계획에서는 주로 N-스포츠사의 이천 물류센터 공조방식의 설계 사례를 들어 산업용 대공간에 대한 공조계획 개선 방안을 소개하고자 한다.

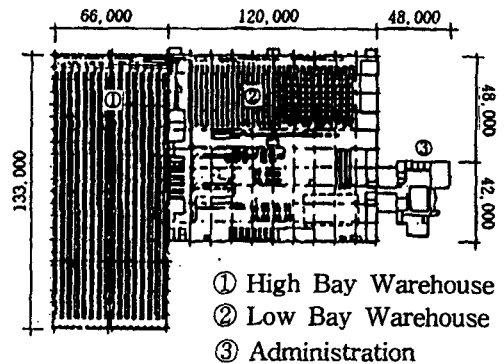


그림 1 건물 레이아웃

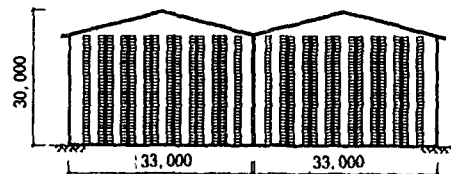


그림 2 High Bay 단면도

2. 설계 개요

2.1 건물 레이아웃(Building Layout)

2.2. 면적 및 층고

(단위: 면적:m²/층고:m)

구분	HIGH BAY		LOW BAY		ADMIN.		비고
	면적	층고	면적	층고	면적	층고	
1층	8,778	30	10,800	7.7	2,295	4.5	
2층	-	-	10,800	5.6	2,295	4.5	
소계	8,788		21,600		4,590		

2.3 기계설비 개요

• 실내외 온·습도

구분	외기 온도(℃)		실내온도(℃)		실내습도(RH%)	
	동계	하계	동계	하계	동계	하계
LOW BAY	-12.8	30.3	19±2	26±2	-	-
HIGH BAY	-12.8	30.3	10±1	환기	-	-
ADMIN.	-12.8	30.3	21±2	24±2	50±5	50±5

• 열원설비

장비명	수량	용도 및 사양
흡수식 냉동기	2	450 USRT
증기 보일러	2	4500kg/h
온수열 교환기	1	High Bay 난방
	1	Low Bay 난방
	1	ADMIN. 난방
급탕 가열기	1	주방 및 화장실

• 공조설비

용도	공조방식
LOW BAY	Air Turnover System에 의한 공조
HIGH BAY	Unit Heater에 의한 난방 및 환기
ADMIN	AHU에 의한 공조

• 위생설비

구분	급수 설비	급탕 설비
방식	Booster Pump에 의한 상향 공급	증기간접 열교환에 의한 저탕식
용량	저수조: 350m ³	3,500 lit
수원	지하수+시수	-

• 자동제어 설비

구분	세부사항
C P U	기계, 전기 통합 운영
제어방식	DDC(Direct Digital Control)
관제점	총 316 Points

• 소화설비

구분	세부사항
기준	국내소방법 및 FMI(Factory Mutual International)
설비	스프링클러, 옥내/옥외소화전, 디젤소방 펌프 등

3. 용도별 공조방식에 대한 고찰

3.1 Low Bay Warehouse 공조방식

종래의 산업용 대공간에 대한 공조, 특히 난방은 주로 유니트 히터, 코일 내장형 환기 유니트 또는 고속 노즐에 의한 기류 유도 방법에 의존해 왔다. 이러한 방식들은 천정 상층부의 더운 공기를 재가열하여 토출하므로써 층고가 높은 건물에서는 거주영역의 기준온도 보다 2~3배 이상의 수직 온도 분포차로 고온성층화 현상에 의한 에너지 손실과 쾌적하지 못한 작업 환경이 조성되어 왔다.

본 N-스포츠사의 물류센터에서는 수직 온도 구배를 최소화하고 쾌적한 작업환경을 유지할 수 있도록 하여 만족할 만한 대성과를 거두었다.

• 개선 공조방식

그림 3의 공조개념도에서 보여주듯이 비거주영역에 정체된 공조 기류를 거주영역으로 유인하여 작업장내에 균일한 온도분포를 유지하므로써 작업자

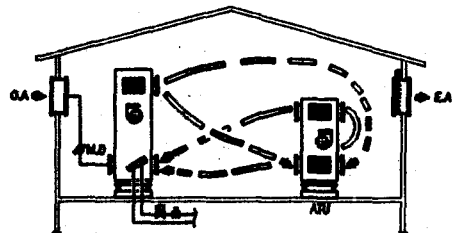


그림 3 Low Bay Warehouse 공조개념도

에게 쾌적한 실내환경을 제공하고 에너지 손실을 절감하도록 한다. 여기에 적용된 자립식 대형 공조기에 의한 공기순환방식(Air Turnover System)이란 냉·난방이 요구되는 동안 이 장비는 지속 취출, 대풍량으로 연속해서 실내 공기를 순환시켜 균일한 온도 분포를 유지한다.

난방시 자립식 대형 공조기는 하부에 존재하는 비교적 무겁고 냉각된 공기를 흡입 재가열 하여, 상부의 취출구를 통해 기류가 거주영역으로 쉽게 이동되도록 하고, 이러한 지속적인 기류 순환은 수직 온도 편차를 2℃~3℃ 이내로 줄어든다.

공기순환방식의 실내온도 제어 개념은 실내 온도 상태에 따라 냉수 또는 온수 유량을 비례 제어시키는 동시에 공조기용 송풍기는 지속적으로 운전되어 항상 실내기류의 유동을 일정하게 유지시킨다. 또한, 중간기 전외기 난방이 가능하도록 외기도입 덕트를 공조기에 연결 설치하고 도피 배기(Relief Air)용 배기량은 실내의 공기 압력차에 따라 제어될 수 있도록 건물 외벽면에 모터 뎀퍼 부착 배기 루버를 설치하여 일반 공조기의 개념을 그대로 도입하여 개선하였다.

3.2 High Bay Warehouse 공조방식

• 건물 특성

그림 4와 같이 단층, 층고 30m 높이의 물류 창고로서 물류(스포츠 의류, 신발류 등)가 적재되는 선반이 34개 층 14열과 7개의 작업 통로를 갖춘 장 방향 133m, 폭 방향 33m를 그림 2과 같이 2개 동이 접속된 락크식 창고로서 콘베이어에 의한 자동 적재 및 반출 할 수 있도록 되어 있다.

• 공조계획상 고려사항

공조 공간의 층고가 30m이고 길이 방향으로 긴 작업 통로를 갖춘 건축 환경을 잘 이해하고 기류 특성과 공간 온도 분포에 따른 열적 특징을 충분히 고려하여 공조 방식을 선정하여야 한다.

- ① 물류 포장 상자의 재질이 판지이기 때문에 Low Bay와 High Bay Warehouse 내의 온·습도 차에 따른 내부 결로 발생이 없어야 한다.
- ② 공조장치의 취출 기류로 인한 자동 적재 및 반출 작업에 영향이 없어야 한다.

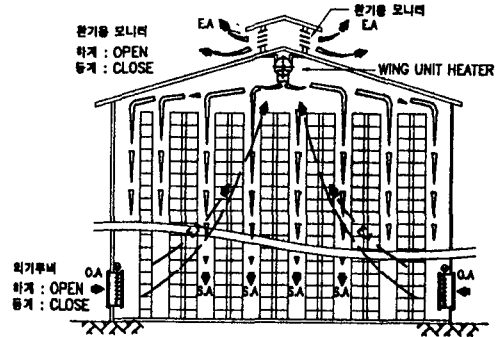


그림 4 High Bay Warehouse 공조개념도

- ③ 적재선반에 상자가 완전히 채워졌을 경우는 각각의 칸막이벽과(Partition) 같은 역할을 하므로 취출된 공조기류 순환이 적재선반에 의한 영향을 받지 않도록 공조장치의 위치를 잘 선정하여야 한다.

• 개선공조방식

그림 4와 같이 하계 실내 환기를 위해 건물 최상부에 길이 방향으로 적정 수량의 환기용 모니터를 설치하고 건물 하부 외벽에는 실내 온도에 따라 조절될 수 있는 모터 뎀퍼 부착형 외기 도입 루버를 설치하였으며, 동계 난방은 물류의 품질 보존 및 설비물의 동파방지를 목적으로 10℃ 정도 유지하도록 한다.

특히 층고가 30m 정도 이므로 취출 기류의 온도가 높은 경우는 고온 성층화 현상으로 인한 수직 온도 분포차가 심화될 수 있고, 또한 기류 취출 속도를 너무 저속으로 하면 거주영역까지 도달할 수 없는 기류 특성을 감안하여 난방장치를 선정하도록 한다. 본 High Bay Warehouse에 설치된 난방장치는 취출기류 유도날개 부착형 유니트 히터(Wing Unit Heater)를 길이 방향 133m 내에 3대 설치하고 3-WAY 밸브에 의한 정유량 제어되도록 하였다.(그림 12 냉온열원 흐름도 참조)

그리고, 환기용 상부 모니터는 Chain에 의해 수동 조작할 수 있도록 고안된 뎀퍼를 Close하여 연돌 현상을 차단시킨다.

특히 취출 기류 도달거리가 매우 길고 적재선반에 물류 상자가 전부 채워졌을 때 우려되는 실내 열 환경 평가를 컴퓨터 시뮬레이션으로 분석하여

설계에 반영하였다.

3.3 High Bay Warehouse 열환경 평가를 위한 수치 시뮬레이션

• 평가방법

High Bay Warehouse 내 취출기류 유도날개 부착형 유니트 히터에 의한 기류상태 및 공간 온도 분포를 평가하기 위해 유한체적법(Finite Volume Method)을 이용한 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다.

Warehouse내 기류특성과 공간 온도분포를 3차원 난류유동, 강제대류 열 유동 문제로 수치모사 하였으며 공간 온도 분포를 계산하기 위한 벽면과 천장의 온도는 열부하 계산 자료에 근거하여 8.94°C, 유니트 히터에서 토출되는 기류의 온도와 속도는 각각 27.8°C와 16.16m/s로 한다.

• 시뮬레이션 경계 및 계산 조건

본 평가에서는 High Bay Warehouse 내 3차원 유동장을 그림 5와 같이 40×144×20인 직교 좌표계로 분할하고 기류상태 및 공간 온도 분포를 구하기 위한 유동변수인 속도 벡터와 온도를 구하기 위한 시간 평균화된 연속방정식과 Navier-Stokes 방정식, 에너지 방정식을 텐서형으로 나타내면 각각 식 (1)과 식 (2) 그리고 식 (3)과 같다.

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

$$\rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[u_e \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{2}{3} k \delta_{ij} + B_j \quad (2)$$

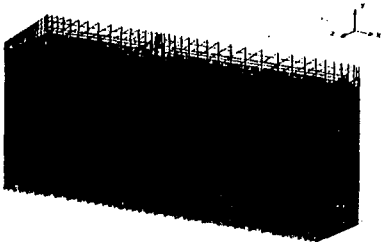


그림 5 컴퓨터 시뮬레이션에 적용된 3차원 격자계

$$\rho u_j \frac{\partial H}{\partial x_j} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x_i^2} \quad (3)$$

여기서, u_i 는 속도벡터이고, ρ 는 밀도(Density), u_e 는 유효점성계수(Effective Viscosity)이며, ρ 와 k 는 각각 정압과 난류운동에너지(Turbulent Kinetic Energy)를 나타낸다. 그리고 H 와 λ 는 각각 전엔탈피(Total Enthalpy)와 열전도계수(Thermal Conductivity)를 나타낸다. 여기서 전엔탈피는 식 (4)와 같은 엔탈피, h 의 항으로 표현할 수 있다.

$$H = h + \frac{1}{2} u_j^2 \quad (4)$$

또한, 식 (2)의 B 는 체적력으로 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$B = \rho g_j \quad (5)$$

이때 g 는 중력가속도이고, ρ 는 밀도로써 식 (6)과 같이 계산된다.

$$\rho = \rho_0 (1 - B (T - T_0)) \quad (6)$$

여기서, ρ_0 , T_0 , B 는 각각 평균밀도, 기준 온도 및 열팽창계수를 의미한다.

취출기류 유도날개 부착형 유니트 히터(Wing Unit Heater)에 의한 기류상태 및 공간 온도 분포에 관한 지배방정식을 해석하기 위하여 유한체적법을 이용하여 비엇물림격자계(Non-Staggered System)에 대한 이산화방정식을 구한다. 운동량 방정식의 유효점성계수를 계산하기 위해서 $k-\epsilon$ 모델을 적용하며, 지배방정식의 대류항은 HYBRID 방법을 적용하여 압력수정에 관한 근사 이산화방정식을 압력과 속도의 상관 관계를 고려한 연속방정식의 이산화방정식으로부터 구한다.

가. 기류상태

취출기류 유도날개 부착형 유니트 히터에 의한 기류상태를 해석하기 위하여 수치해석적인 방법(Numerical Analysis)으로 속도분포를 구한다. 윙유닛 히터의 취출 기류 속도 16.16m/s, 수직면에 30° 경사지게 취출시켜서 실내 유동 특성을 구한다. 윙유닛 히터로부터 취출되는 기류는 실

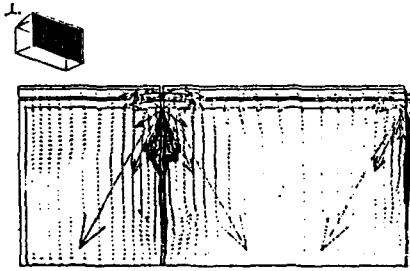


그림 6 Unit Heater 부근 X-Y 단면에서의 기류상태(z=1m)

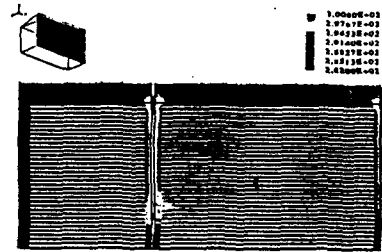


그림 10 Unit Heater x-y 단면에서의 공간 온도분포(z=1m)

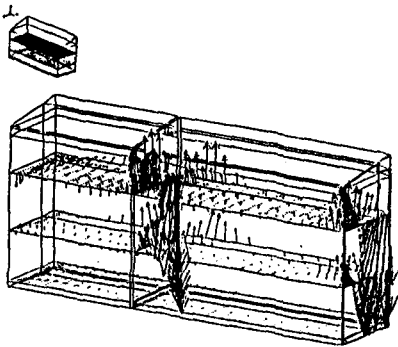


그림 7 대표적인 x-z 평면에서의 기류상태 (y=1m, 10m, 20m)

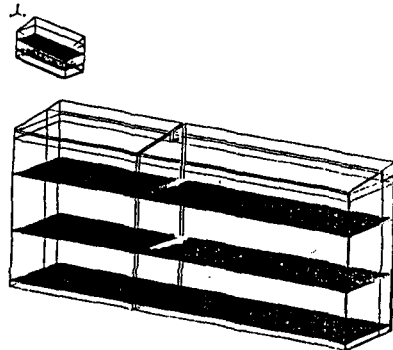


그림 11 대표적인 x-z 평면에서 공간온도분포 (y=1m, 10m, 20m)

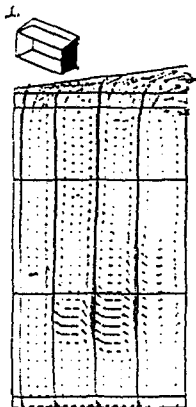


그림 8 y-z 단면에서의 기류상태 (x=64m)

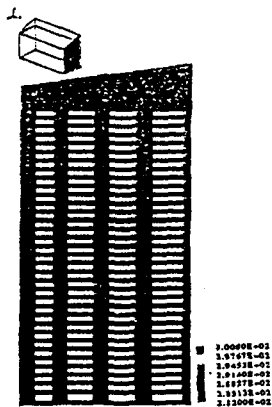


그림 9 y-z 단면에서의 공간온도분포 (x=64m)

내 공간 내 구석진 부분까지 잘 확산됨을 확인할 수 있다. 기류상태(Folw Pattern)에 대한 속도 벡터는 그림 6, 그림 7 및 그림 8과 같다.

나. 공간 온도 분포

취출기류 유도날개 부착형 유니트 히터(Wing Unit Heater)에 의한 공간 온도 분포를 평가하기 위하여 강제 대류를 고려한 열 유동 문제를 수치 해석적인 방법으로 계산한다. 벽면과 천장 그리고 바닥면의 경계조건은 단열조건으로 하였으며 윙 유니트 히터에서 취출되는 기류의 온도를 27.8℃로 하여 공간온도 분포를 구한다. 이때 공간온도 분포는 장소에 관계없이 전반적으로 10℃이상의 온도 분포를 나타냄을 알 수 있고 열 유동이 없을 것으로 예상되었던 High Bay Warehouse의 구석진 부분에서도 10℃ 이상의 온도 분포를 나타내고 있다.

그림 10에서 보는 바와 같이 유니트 히터가 설치된 건물 바로 아래쪽의 공간 온도 분포가 가장 높게 나타나고 있다. 이러한 현상은 기류상태에서도 그랬듯이 부력에 의한 대류현상으로 인하여 건물의 중앙부분의 온도 분포가 높게 나타나고 외기

에 면한 벽면 쪽의 분포는 낮게 나타남을 알 수 있다. 그림 9, 그림 11은 실내 온도 분포를 나타내고 있다.

4. 맺음말

자동화 물류센터의 특징은 컨베이어 벨트(Conveyor Belt), 스프링클러 배관, 조명 케이블 및 Rack 등 아주 복잡한 형태를 지닌다. 여기에 공조를 위한 덕트 또는 배관이 추가될 경우 물류센터의 작업 공간이 제약되거나 층고가 더 높아져야만 할 것이다. 본 고에 소개된 자립형 공기 순환장치(Air Turnover System) 또는 취출기류 유도 날개 부착형 유니트 히터(Wing Unit Heater) 등은 수치해석 결과와 같이 이러한 제약 조건을 완화시키고 동시에 실내열 환경을 향상시킬 수 있는 공조 방식으로 평가되었으며 이미 미국 등 선진국에서는 공장, 물류센터, 비행기 격납고 등 산업용 대공간에 적용하여 사용해 오고 있다.

끝으로 초기투자비와 유지관리비를 절감할 목

적으로 국내 최초 설계 반영되었던 이 공조방식은 공사전에 설계도서 TAB와 컴퓨터 시뮬레이션으로 공조 공간 내에서의 기류분포와 온도분포를 예측, 평가하여 설계 목적에 부합될 수 있도록 하였으며, 신공법 도입에 대한 신뢰도를 더 한층 높여 주었다.

참고 문헌

1. NSK TAB 보고서, 1997.6.
2. 숭실대학교 부설 생산기술 연구소, 1997.2, NSK 이천 물류센터 High Bay Warehouse Unit Heater에 의한 기류 상태 및 공간 온도 분포에 관한 연구.
3. F·C.Mcquiston and J·D.Parker, 1988, Heating, Ventilating and Air Conditioning, 3rd Ed., John Wiley & Sons, Inc., New York.
4. 유상신, 배신철, 서상호 1994, 유체역학, 회중당, 서울.

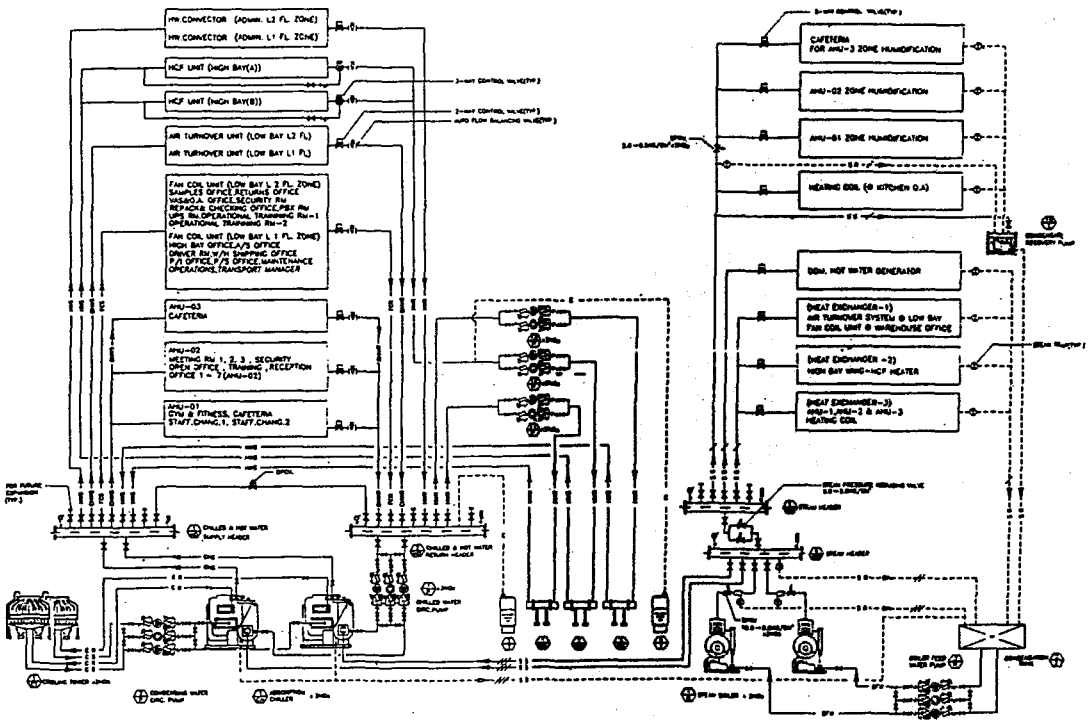


그림 12 냉·난 열원 흐름도