

대형공간의 항온설비 설계

- CPCS (Ceiling Plenum Chamber Air-Conditioning System) 기법을 사례로 -
HVAC System for Constant Temperature in Large Space
- Example for CPCS -



- 1959년생
- 크린룸 및 공장공조 분야의 설비 시스템과 환경 분야에 관심을 가지고 있다.

지 용 섭
Y. S. Jee

(주)신성엔지니어링 기술부

1. 서 론

일본, 미국을 비롯해서 우리나라에서도 공장의 항온화 설비 도입이 정밀기계 가공을 비롯한 첨단 기기제조업체에서 증가되고 있다.

70년대부터 수치제어 공작기계에 의한 기계 가공의 정밀화가 시작되어 왔으나 수년전부터 CAD/CAM 시스템과 FMS (flexible manufacture system), 그리고 CIM(computer integrated manufacture)의 도입에 의한 공장의 생산라인의 성능보증을 위하여 공장 실내환경관리가 보다 중요한 관건으로 대두되고 있다.

예를 들면, IC의 리드프레임(lead frame)과 컨넥터(connector) 등의 전자부품 하나를 얻는데도 필히 금형이 필요하게 되고, 금형의 제조에는 정밀공작기계가 필요하게 된다. 공작기계는 온도가 1℃ 변화하면, 길이 1m에 대해서 1/100 mm 신축하게 된다.

특히 경박단소(輕薄短小)의 시대에 있어서 기계, 전자부품 등에는 보다 정밀한 것이 요구되므로 지금까지는 허용되어 왔던 오차의 부품이 불량품으로 판정되어 버리는 현실이므로, 공장의 항온화는 반도체, 전자기기, 화인

세라믹 등의 분야에서 더욱 급속히 확장되어 갔다.

종래 항온공장의 공조는 일반의 공조설비를 기본으로 한 송풍량을 쉘과 재열히터로 제어하고 그 위에 정밀한 자동제어 설비를 부가해 대응하여 왔다. 그러나, 사용자들의 요구는 이 방법에 만족하지 않고 송풍량으로 재열없이, 가능한 한 외기냉방 등을 도입하여 투자비 및 운전비 절약을 할 수 있는 시스템을 원하고 있다. 이에, 초대형 항온공간의 설계 방법 중 일본에서 개발, 실용화되고 있으며, 국내에서도 시공 중에 있는 다공판 천장 공기 취출 항온설비(CPCS; ceiling plenum chamber system)의 설계법을 소개해서 최근의 산업용 공조에 새롭게 대응하고자 한다.

2. 설계사례

2.1 공사개요

사례로 든 공장은 ○○시에 위치하고 있고, 주로 MC 공작기계를 제조하기 위해 착공되었다.

여기서는 정밀가공실, 연마실, 정밀조립실,

측정실 등 약 1,800m²의 항온설비를 가지고 있으며, 이 공장의 연면적은 27,200m²이다.

2.1.1 건물제원

- 건물주용도 : 공작기계가공, 연마, 조립, 측정.
- 건물연면적 : 27,200m²
- 층 수 : 지상 3층
- 실의 구성 :
가공연마실(60m×17m×6h)
측 정 실(10m×17m×2.5h, 20m×17m×5h)
조 립 실(40m×8.5m×4.5h)

2.1.2 공장의 특성

- 1) 온도조건은 정밀공작기계와 계측장비의 정도(精度) 상한치에 두고, 공장의 목표관리 에 만족하도록 공간의 평면 및 상하 편차를 줄여야 한다.
- 2) 내부 기기발열이 많으므로 (220Kcal/h·m²) 또한 변동폭도 대단히 크다.
- 3) 천정밀에 크레인(crane)이 운전되므로 덕트 혹은 취출구의 배치에 제약을 받는다.
- 4) 24시간 가동되기 때문에 에너지절감을 고려해야 한다.

표 1. 외기 온·습도 조건

	건구온도 (°CDB)	습구온도 (°CWB)	상대습도 (%RH)	절대습도 (KG/KG)
여름	33	-9.3	63.1	0.0225
겨울	-8.3	-9.3	63.1	0.00115

표 2. 실내조건

	○ ○ 측 정 실	○ ○ ○ 측 정 실	조 립 실	정밀기계 가 공 실	정밀기계 연 마 실
온 도 (°C)	20±1	20±2	20±2	20±2	20±2
습 도 (%)	50±5	50±10	50±10	50±10	50±10
소 음	50dB	50 dB	50 dB	-	-
청정도(0.5µm)	100,000 이내	100,000 이내	100,000 이내	-	-
진동 & 진폭	0.25 µm 이내 200Hz 이내	0.25 µm 이내 200Hz 이내	0.25 µm 이내 200 dB 이내	-	-

2.1.3 설계의 기본방향

상기의 공장 특성을 고려해서,

- 1) 전지역의 균일한 온도분포를 유지하여 각 요소에 설치되어 있는 공작기계 및 정밀기기, 측정장비에 품질의 정밀도를 높여 제품의 수율을 높이도록 하며, 고속취출로 인한 장비의 드래프트 현상을 억제한다.
- 2) 공기의 반송동력비를 절감하여 운전비를 줄이며, 연중무휴의 특성을 고려하여 조운닝을 구분하고, 부분 부하운전을 고려하여 에너지를 절약한다.
- 3) 항온공장을 유지키 위한 최소 공조풍량을 채택하여 덕트공간을 최소화시킴으로써 신축건물에서는 건물의 층고를 낮추어 건축투자비 및 설비투자비를 줄인다.
- 4) 청정도 100,000을 유지하여 정밀기기 제작의 수율을 높이며, 계측환경을 교정검사기관의 환경조건 기준에 만족하도록 한다.

2.1.4 공조설비 설계조건

외기조건, 실내조건 및 열관류율은 각각 표 1, 2, 3에 나타낸 바와 같다.

표 3. 열관류율

	열관류율 (Kcal/m ² ·h·°C)	단열재두께 (mm)	단열재종류
외 벽	0.3	75	스티로폼
내 벽	0.57	50	스티로폼
지 붕	0.3	75	스티로폼
바 닥	0.8	-	-
창	2.7	3-6-3	PAIR GLASS

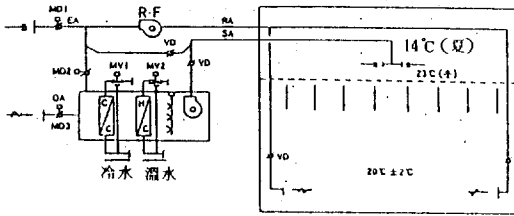


그림 1. System 계통도

2.1.5 설계결과

1) 열원설비

1 온열원 : 관류형 온수 보일러, 500,000

Kcal/HR × 1대

2 냉열원 : dry cooler (glycol 40%),

120HP × 2대, 100HP × 1대, 50HP × 1대

2) 공조설비

공조설비는 그림 1과 같이 각실을 정풍량 단일덕트방식으로, 취출은 천정다공판을 채택하고, 일부는 패키지 방식도 도입하며, 에너지절약을 고려해 냉·온수 4관식 시스템에 외기 냉방을 가능하도록 한다. 공조계통은 5개 구역으로 분류하여 설비하고 각 계통 공히 1대의 향온흡습기는 예비용으로 설비하였다.

[계통 - 1: 8대, 계통 - 2: 6대, 계통 - 3: 2대, 계통 - 4: 4대, 계통 - 5: 4대], 실내정압은 인접실과 각각 0.5mmAq 정도의 부압을 유지하도록 계획하며, 실내를 향온하기 위해 천정내에 하계는 14°C, 동계는 23°C에서 취출하고 천정다공판을 이용하여, 실내에 취출공기를 균등히 한다.

또 환기덕트를 바닥면에 가까운 곳에 다수 설치하고, 일정한 수직기류 분포를 얻기 위해서 각 환기덕트에서 풍량조절 밸브를 설치하여, 마찰손실에 의한 풍량의 불균형을 피한다. 또 중간의 외기난방을 얻기 위해서 RA와 OA의 온도차를 점검해서 MD¹, MD², MD³을 개폐한다.

부분부하에 대해서는 RA의 온도를 감지해 MV₁, MV₂에 의해 3방면 제어를 행한다.

3) 크린룸 설비

크린룸 계획은 실내에서 발생하는 분진 및 외부침입 분진을 제거하는 단순한 공기정화 계획뿐 아니라, 평면계획, 마감재, 각종설비,

유지관리, 물품의 반품의 반입·반출, 사람의 출입 등 종합적인 면에서 오염방지 계획을 세워야 한다. 청정도 100,000인 점을 고려하여 장비에 HEPA 필터(0.3 μm @ 99.97%)를 내장하고, 대인·대물을 에어사워, 불품 출입용 페스박스를 설치한다. 내부는 샌드위치 판넬 75t로 마감하고 바닥은 에폭시 코팅처리를 한다.

4) 방음·방진설비

측정실과 조립실의 소음 규제(50dB 이하) 유지를 위해 흡입벽 및 덕트 소음기를 설치하고, 진동 및 진폭(0.25 μm이내, 200Hz 이내)은 각 주요장비별 독립기초 설비를 한다.

5) 자동제어 설비

모든 설비의 운전통제, 상태감시, 경보감시 및 각종 온도, 습도, 압력 등의 데이터를 중앙감시 장치로 집중감시하는 한편 현장처리장치(digital system controller)를 병행하여 합리적이고 효율적인 운용을 통해 에너지절감과 장비 운영면에서 효율을 극대화 시킨다.

2.1.6 다공판 천정 설비

1) 다공판 취출법

종래에서 향온유지를 위한 대량의 공기를 천정속의 취출구(diffuser, register) 등을 통해서 고속으로 실내에 취출하고, 경우에 따라서는 실내에 송풍기와 노즐에 의해 순환시키는 방법이 행해졌다.

다공판 취출방식은 필요한 최소의 공기를 천정전면에 펀칭판(punching plate)을 통해 미풍속으로 송풍하는 방법으로 실 전체에 눈이 내리는 듯한 분위기의 취출로 수직·수평 어느 위치에도 쾌적한 온도 환경을 얻을 수 있는 시스템이다.

원리는 천정에 작은구멍(직경 약 4.5mm~8mm)이 있는 통기판을 설치해, 천정내와 실내의 정압력차를 이용해서 샤워 같은 기류를 분무하는 방식이다.

2) 다공판 취출법의 특징

- 천정내 덕트의 감소로 덕트설비비 및 공기운송 동력비를 절감할 수 있다.

- 공조풍량의 감소로 송풍기 동력비를 절감할 수 있다.

- 외기냉방시 실내온도 편차가 작아 실내온도 유지에 유리하다.
- 기류속도가 균일하게 유지된다.
- 전지역에 걸쳐(수직·수평) 온도편차가 작다.
- 취출공기차를 작게 할 수 있으므로 드라프트가 없다.
- 국소취출이 필요 없으므로 천정의 오염 문제가 없어 미관이 유지된다.
- 천정내의 덕트 공간의 감소로 신축건물의 층고를 줄일 수 있어 건축공사비 절감 효과를 기대할 수 있다.

3) 다공판 토출구 설계 이론 및 실험 DATA

그림 2에 나타난 다공판 천정에 의한 토출 방법은 토출량이 큰 실내에 적당하다. 천정의 내부를 공기챔버로 하고, 여기에 도입한 공기는 천정에 설치한 다수의 소구멍을 통하여 하부 실내로 토출한다. 천정은 철판 혹은 알루미늄판, 텍스류 등 어느 것이라도 좋다.

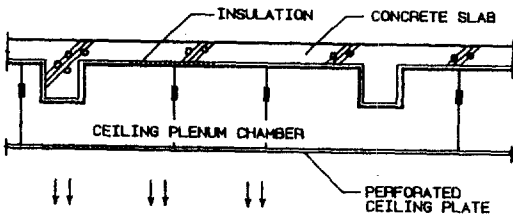


그림 2.

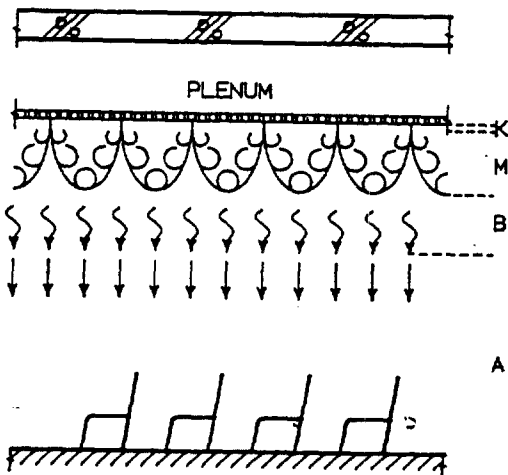


그림 3.

그림 2는 천정의 구조법을 나타낸다. 천정 내부에 토출하는 공기는 작은 방에서는 한개의 토출도 좋지만, 큰방에서는 수개의 토출구를 만들어 내부 전면으로 균일하게 분포하도록 한다. 천정의 작은 구멍의 직경은 대개 4.5mm~8mm 정도로 사용한다.

이 작은 구멍에서의 토출 기류는 그림 3에 나타난 대개 4개의 조운(zone)으로 구분할 수 있다.

K : 핵 조운, 풍속은 일정하고 그 길이는 대개 5d (d는 구멍의 직경)로 된다.

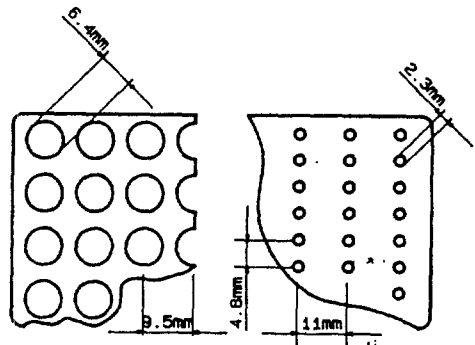
M : 혼합 조운, 토출공기는 인젝타의 작용에 따라 실내의 공기를 유도 혼합한다.

B : 정지 조운 - 각각의 토출기류는 일정하게 되고 대단히 작은 속도로 전체에 움직인다.

A : 거주지역으로 정지 조운의 하부에 있다.

토출구에서 정지 공기중에 토출한 기류는 관성력, 점성력 및 부력 또는 중력에 따라 그 속도가 감소해 간다. 등온 기류의 경우는 부력의 영향은 없고 관성력과 점성력은 레이놀즈수를 사용해서 서로 상관시킬 수 있다. 보통의 토출구에서는 토출 풍속이 크고, 따라서 레이놀즈수도 크기 때문에, 토출기류에 대해서 운동량 보존의 법칙이 성립하는 것을 실험적으로 확인할 수 있다.

그림 4에 나타낸것 같이 다공판 토출구의 작은 구멍에서 토출한 분류(噴流)는 급속히 확산하여 기류단면에서 일정한 저풍속 Q/A의 기류를 만드는 성능을 가지고 있다.



NO.1 40% FA NO.2 6.3% FA

그림 4. 실험에 사용한 다공판의 예

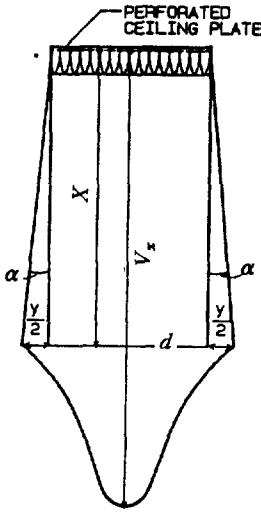


그림 5. 다공판의 취출기류

여기서 Q 는 토출풍량(m^3/m), A 는 토출구 전면적(m^2)이다. 보통의 토출구에서는 일반적으로 토출기류의 4역중 제3역이 문제가 되지만 다공판 토출구에서는 토출구의 가까운 부분의 영역이 깊기 때문에 제3역만으로 안 되고 제1역, 제2역을 고려해야 한다.

토출기류는 토출구가 각형이라도 어느 거리에 도달하면 그 단면은 원형으로 되지만 여기서는 토출구의 모양으로 유지되고 있는 것으로 가정한다. 아래 수식에 나타난 기초의 정의는 다음과 같다.

X : 토출구로부터 속도가 V_x 로 되는 점까지의 거리

V_x : 토출구로부터 거리가 X 로 되는 점까지의 토출기류의 최대 잔류속도

V_0 : 개구부 부분에서의 토출 최대 풍속

A : 토출구 전면적

α : 토출 기류의 확산각

d : 토출구의 상당 직경 $d = \sqrt{\frac{4A}{\pi}}$

K_i : 거리 X 에서의 V_x 와 평균속도의 비

$$K_i = \frac{V_{\text{평균}}}{V_x}$$

f : 토출구 전면적에 대한 면적의 비, 또는 공명비

Cd : 다공판의 유출계수

y : $2 \times \tan \alpha$

A_x : 거리 X 에서의 토출 기류의 원형 면적

$$A_x = \frac{\pi}{4} (d + y)^2$$

운동량 보존의 법칙에 따라 다음 식들이 성립한다.

$$Q_0 \cdot V_0 = Q_x \cdot V_x$$

$$V_0 [V_0 \times Cd \times f \cdot A] = K_i \cdot V_x$$

$$\left[K_i \cdot V_x \cdot (d + y)^2 \cdot \frac{\pi}{4} \right]$$

$$V_0^2 \cdot Cd \cdot f \cdot A = K_i^2 \cdot V_x^2 \cdot \frac{\pi}{4} (d + y)^2$$

$$V_0 \cdot \sqrt{Cd \cdot f \cdot A} = K_i \cdot V_x \cdot \sqrt{\frac{\pi}{4} \cdot (d + y)^2}$$

y, d 를 대입하면

$$V_0 \cdot \sqrt{Cd \cdot f \cdot A} = K_i \cdot V_x \cdot \left(\sqrt{\frac{\pi}{4}} \left(\sqrt{\frac{4\pi}{4}} + 2 \times \tan \alpha \right) \right)$$

$$V_0 \cdot \sqrt{Cd \cdot f} = K_i \cdot V_x \left(1 + 2 \tan \alpha \cdot \sqrt{\frac{\pi}{4}} \cdot \frac{X}{\sqrt{A}} \right)$$

$$\frac{1}{K_i \left(1 + 2 \tan \alpha \cdot \sqrt{\frac{\pi}{4}} \cdot \frac{X}{\sqrt{A}} \right)} = \frac{V_x}{V_0} \cdot \frac{1}{\sqrt{Cd \cdot f}} \quad (1)$$

이 되고,

윗식에서 $\frac{V_x}{V_0} = \frac{\text{상수}}{X}$ 인 관계가 성립함을 알 수 있다.

또, 윗식에서 두개의 무차원수 X/\sqrt{A} , $1/\sqrt{Cd \cdot f}$ 에 의해서 실험결과를 정리할 수 있다.

그림 6, 그림 7은 급속과 섬유판을 이용한 실험결과이다. 실험에 사용된 토출구 상당 직경은 2.3mm~6.4mm이고, 개구율은 3.14%~40.5%, 다공판의 두께는 1~6.5mm이다.

그림은 횡축에 X/A , 종축에 $V_x/V_0 \times 1/\sqrt{Cd \cdot f}$ 를 취하고 있다.

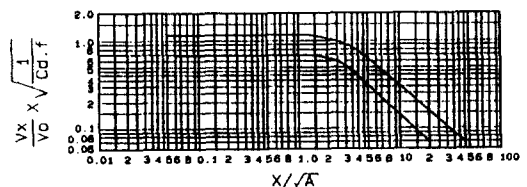


그림 6. 고속의 경우 성능

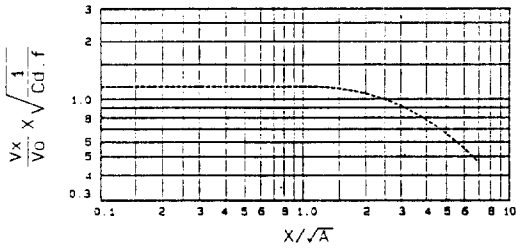


그림 7. 저속의 경우 성능

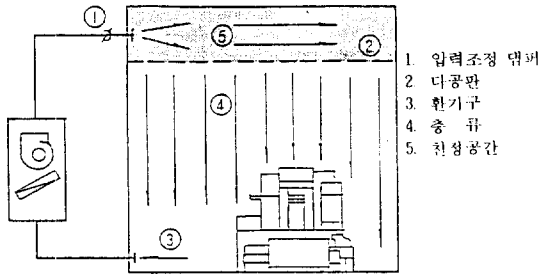


그림 10. 다공판 취출 방식

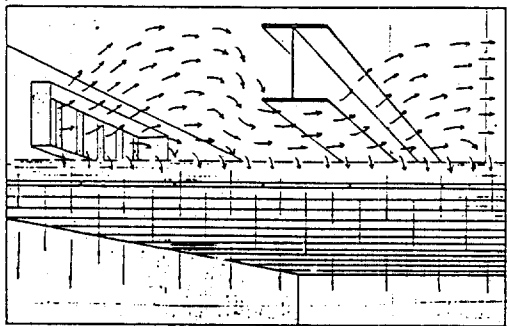


그림 8. 천정구조도

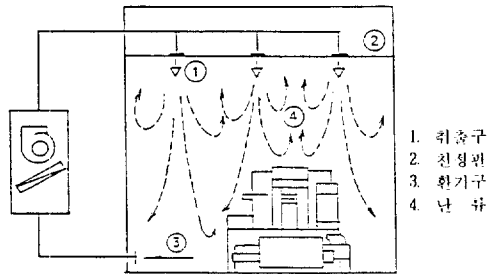


그림 11. 종래 방식

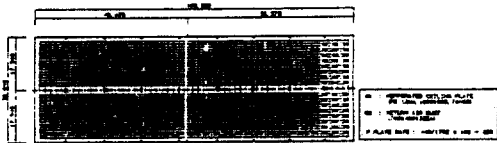


그림 9. 다공판 설치 평면도

4) 다공판 설치

그림 8은 철골구조에 있어서의 천정구조를 나타내고 있고, 그림 9는 다공판을 설치한 평면의 예를 보이고 있다.

2.1.7 실내온도 분포

냉방시 혹은 난방시의 실내온도 분포 현상은 다음과 같다.

1) 공기의 흐름

공기 흐름의 개략도는 그림 10 및 11에 나타난 바와 같다.

2) 공조 풍량

그림 10의 다공판 취출방법의 환기횟수: 8~10 회/HR

그림 11의 종래 공조방법의 환기횟수: 30 회/HR

3) 공장내 온도분포(일본의 자료참고치)

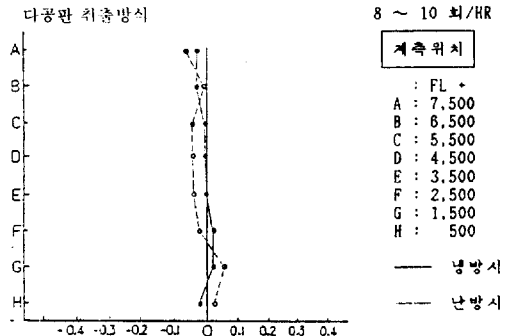


그림 12. 수직방향 온도분포

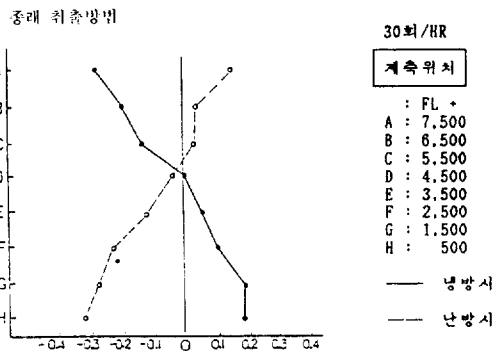
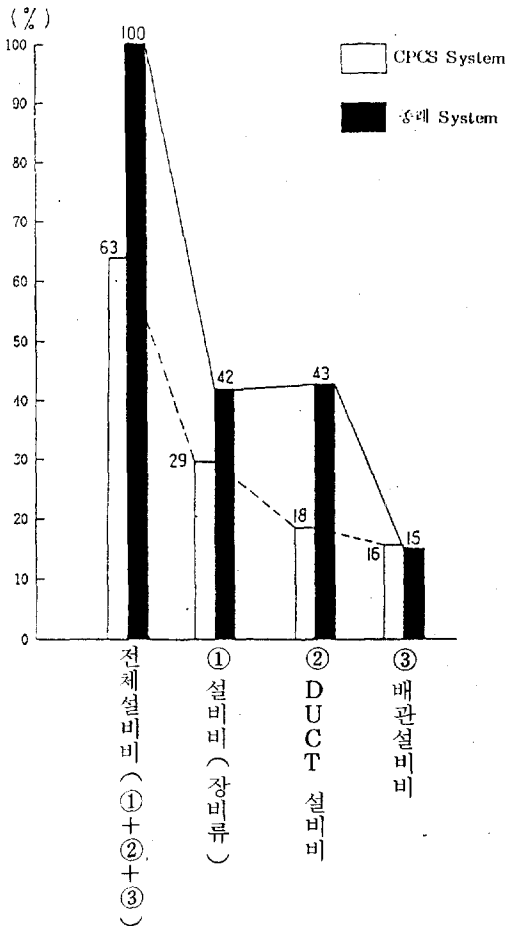


그림 13. 수직방향 온도분포

4) 설비비(일본의 자료 참고)



비의 수요는 증가일로에 있고, 레이저 가공을 비롯한 조정밀도를 요구하는 공작기계 조립, 가공공장은 물론 절삭공장, 금형 치구공장에도 항온공조를 설비하여야만 국·내외에서 경쟁력을 갖춘 제품의 품질을 유지할 수 있게 되었다.

금후, 초대형 공장의 항온설비에 CPCS 공조방식은 산업용 공조의 중요한 분야가 될 것이라고 예상되며, 본 설계가 첫 시도된 방식으로 항온공장의 향후 설계에 참고가 될 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. 早稱田大學 理工學研究, 1989. “千井多孔板 吸出口に關する研究”
2. 新日本工調 技術資料集, 1989년.
3. ASHVE(American Society of Heating and Ventrating Engineers), 1949. Journal Section.

3. 결 론

본 설계사례에서 나타난 CPCS의 장점은 종래의 설계방법에 비하여,

첫째, 설비의 성능면에서 공간의 온도편차가 줄어들어 항온의 유지가 더욱 확실하여졌고,

둘째, 설비의 초기 투자비가 약 30% 절감되었으며,

셋째, 설비의 운전관리비가 절감되었음을 알 수 있다.

최근 설계시공한 대규모 공장의 항온설비의 설계예를 소개하였으나, 공장의 대형공간의 설