

클린라인 유닛

(Clean Line Unit)

— 목 차 —

- I. 서론
- II 공기유동의 이론적 예측
- III. 시제품의 공기유동 해석
- IV. 다위치 제어

한국기계연구소
(공기 조화 연구실)

선임연구원 조상준

(주)신영산업플랜트

전 무 허 만 승

I. 서론

반도체를 정점으로 하는 현대의 첨단 정밀산업은 온도, 습도, 청정도 등의 조건을 요구되는 수준으로 유지할 수 있는 초청정 공간을 필수불가결한 기본설비로서 요구하고 있다.

종래의 클린룸은 중앙집중식으로 공기조화 시스템(Air conditioning System)에서 미리 조절된 온도, 습도를 가진 공기를 덕트를 통해 천정이나 벽에 설치된 고성능 필터에 공급하여 클린룸 공간을 흐르게 하고 이것을 다시 회수하는 방법이었다. 이러한 중앙집중식은 층류방식(수평, 수직)과 난류방식으로 대별할 수 있으며, 층류방식으로 Class 100이하, 난류방식으로는 그 이상의 클린룸에 적용되었다. Class 1000—Class 100,000 정도의 클린룸은 레이저 공업, 광학기계, 시계, 정밀기기, 전자계산기, 전자 계측기, 의학, 병원 및 식품가공 등 많은 정밀분야에서 이용되고 있으며, 현대에 이르러서는 정밀 제조라인에서 더 나은 청정도를 요구하는 분야가 늘어나고 있다고 할 수 있다. 그러나 이러한 중앙집중식은 시설비와 운전비가 비싸기 때문에 공기조화 시스템과 고성능 필터만을 결합시킨 적정 공간내에서 Class 10,000정도를 유지할 수 있는 패키지형 클린라인 유닛(Clean Line Unit)에 대한 요구가 있어서, 국내에

서는 처음으로 한국기계연구소와 (주) 신영산업플랜트가 공동으로 연구 개발하게 되었으며, 여기에 간단히 소개하고자 한다.

1. 클린라인 유닛의 개요

클린라인 유닛은 온도 습도 및 청정도를 하나의 유닛으로 - 향온향습기와 고성능 필터를 - 결합시킨 형태로, 클린룸에서 발생하는 오염물질의 효과적인 제거를 위해서 타공의 철판(Perforated Plate)으로 된 공기분배기(Distributor)를 가진 것이 특징이다. 클린라인 유닛의 장점은 기존의 건물에 구조적인 변경이 없이 설치할 수 있어서 별도의 시설비가 없이 유닛의 구입과 설치만이 소요되며 (조건에 따라서 별도의 공사가 필요할 수도 있음), 특히나 공장설비의 배치에 큰 제약을 받지 않는다는 장점이 있다.

2. 구조

클린라인 유닛은 고성능 필터, 전열기, 송풍기, 가습기, 증발기(냉동 시스템), 프리 필터, 공기분배기 및 프리챔버로 구성되어 있으며, 그림 1에 그 개략도를 보였다.

1) 고성능 필터

고성능 필터는 정격풍량에서 25.4mmAq 이하의 차압과, 직경 0.3 μ m 분진에 대한 여과효율이 99.97% 이상인 필터로서(IES-RP-CC-001-83-T의 분류에 의한 A등급) 크기는 915×462×292(mm), 정격풍량은 30CMM인 것을 사용하였다.

2) 전열기(Electric Heater)

전열기는 SUS 27종의 재질을 가진 Tube에 전열면적을 증대시키기 위하여 나선형의 아연도금된 철판을 부착시키고 내부에는 니켈 전열선을 내장시키고 외부에 절연시켜 안전하게 하였다.

3) 송풍기(Blower)

송풍기는 소음발생의 주인이므로 클린라인 유닛을 실내에 설치할 경우에는 소음 및 진동을 최소화 하기 위하여 진동을 흡수할 수 있는 방진제를 사용하여야만 하며, 소정의 정압과 풍량을 송풍해야 한다.

4) 가습기(Humidifier)

가습기의 외부 Casing은 SUS 304 판을 사용하며, 가열코일의 절연저항은 100M Ω 로 한다. 수도물은 스트레이너(Strainer)를 거쳐 깨끗하게 정수하여 사용하도록 하고, 쉽게 수리할 수 있는 위치에 부착하였다.

5) 증발기(Evaporator)

증발기는 직접 팽창식(Direct Expansion) 다통로식 코일로서 Al Fin과 CU Tube를 사용하여 만든다. Condenser, Compressor는 소음과 외기와의 열교환을 위하여 실외부에 Condensing Unit로 조립하여 설치하고 Evaporator만을 CLU 내부에 설치하였다.

6) 프리필터(Pre-Filter)

프리필터는 NBS 85% 이상의 집진효율을 가지며 수시로 교체가 가능한 구조로 한다.

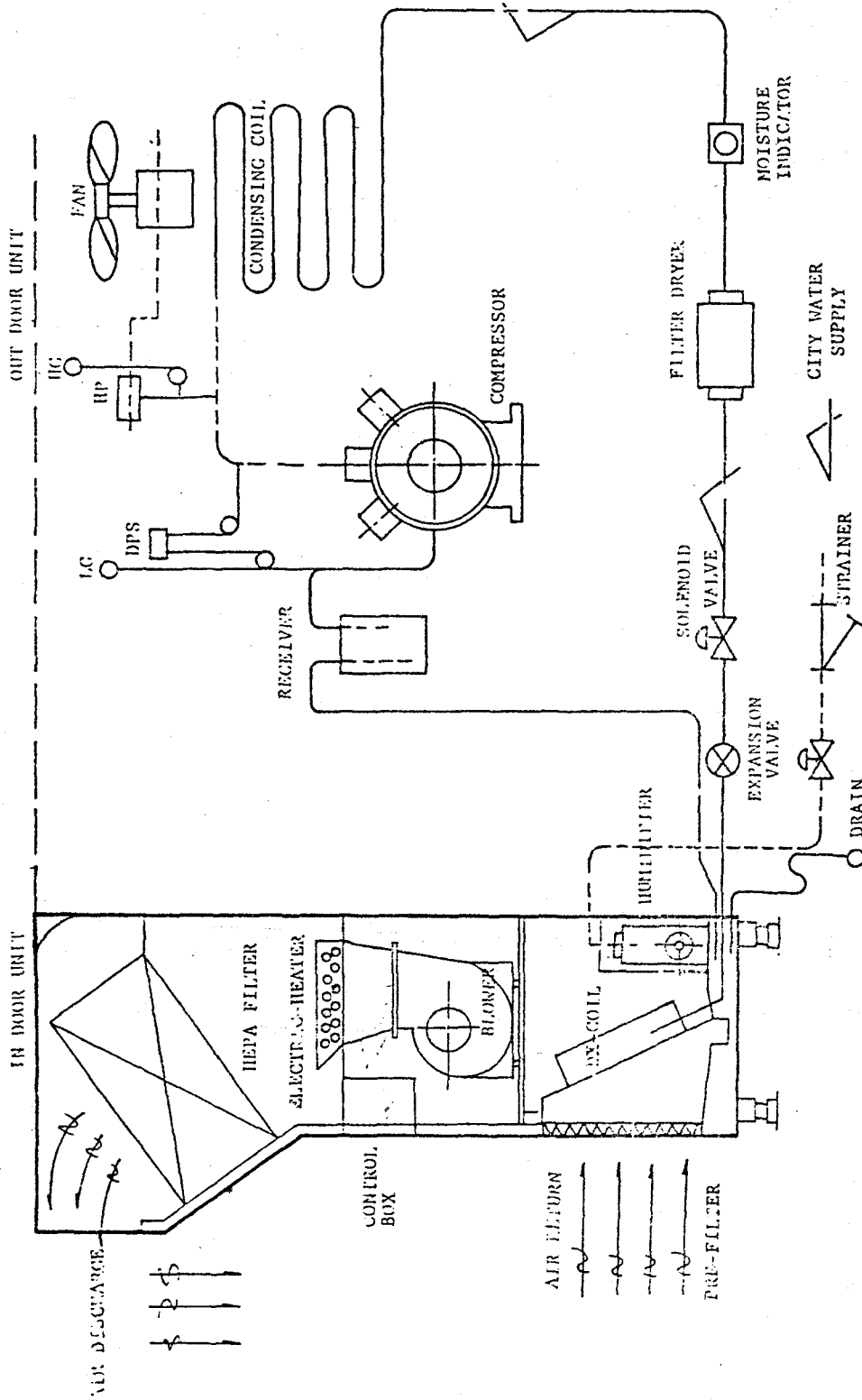


그림 1. Schematic diagram of clean line unit

7) 공기분배기 및 프리챔버
(Pre-Chamber)

공기분배기(Distributor-Punching Plate)의 유출구 면적은 전체 표면적의 1-3%로 하고 10-40 Pa 정도의 압력을 가지도록 한다. 공기분배기와 프리챔버 내에서의 공기유속과 압력 및 흐름의 상태가 실내공기의 유동에 영향이 미치므로 본 연구에서 중점적으로 다루었다.

II. 공기유동의 이론적 예측

1. 개요

클린라인 유닛의 공기분배기에서의 수직 층류분포가 균일한 것이 실내의 온도, 습도 및 청정도 유지에 유리한 조건이 되므로, 이를 위해서 클린라인 유닛의 여러가지 변수를 프리챔버내의 안내깃, 공기분배기의 크기(높이), 타공을 및 고성능 필터의 공기 유입각도 등에 대한 적절한 방안을 제시하고자 하였다.

지배방정식

정상상태 2차원 층류유동에 대해서 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} = 0 \dots\dots\dots (1)$$

$$U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} = - \frac{\partial P}{\partial X} + \frac{\partial}{\partial X} (\mu \frac{\partial U}{\partial X}) + \frac{\partial}{\partial Y} (\mu \frac{\partial U}{\partial Y}) \dots (2)$$

$$U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} = - \frac{\partial P}{\partial Y} + \frac{\partial}{\partial X} (\mu \frac{\partial V}{\partial X}) + \frac{\partial}{\partial Y} (\mu \frac{\partial V}{\partial Y}) \dots (3)$$

수치해석 방법

지배방정식 (1)-(3)은 Control Volume Formulation에 의하여 선형차분방정식으로 변환되며, Tri-Diagonal Matrix Algorithm에 의하여 해결 될 수 있다. 전체 계산영역은 모델에 따라 X, Y방향으로 임의의 갯수의 제어 체적으로 나누어 지며, 격자의 배치는 Staggered Grid System을 사용하였다. 각 격자사이의 물리량 환산은 Power Law Scheme에 의하였으며, 운동량 방정식에 나타나는 압력항의 처리를 위하여서는 Semi-Implicit Method for Pressure linked Equation-Revised 방법을 사용하였다.

유출구에서 임의의 속도경계조건을 주고 이에 따라 결정되어지는 유출구에서의 압력이 주어진 값과 일치할 때 까지 속도 경계조건을 반복적으로 개선 수정해 나가는 방법을 택하였다. 또한 경계면에 인접한 또 하나의 작은 제어 체적을 추가로 선정하여 경계면과 이 경계면에 인접한 압력값을 사실상 동일하게 부여함으로써 경계면에서의 압력조건이 경계면에 인접한 속도제어체적에서 적분되는 운동량 방정식에 영향을 줄 수 있도록 하였다.

입구 경계조건은 4가지의 모델 연구에서 각각 주어지며 출구 경계조건은 압력 조건, 유출조건 두가지로 선정될 수 있다. 즉, 압력조건은 출구 단면에서 압력이 동일하다는 것이며; 두번째의 외부 유출조건은 출구 단면의 수직방향 속도 성분의 변화가 없다는 것이다.

2. 모델 연구

1) 모델(I) : 압력 경계조건을 가진 사각형공간 내부의 유동 특성

그림2와 같은 모델에 대해 공기 유동 특성을 계산한다.

식 (1)~(3)을 지배방정식으로 하며, 경계조건은 다음과 같다.

$$U=V=0 \text{ at all walls} \dots\dots\dots (4)$$

$$U=U_g \text{ at inlet} \dots\dots\dots (5)$$

$$P=P_g \text{ at sections of all exits} (6)$$

여기서 $U=U_g^*/U_m^*=6(L_r^*-Y^*)^2L$

$$P_g=P_g/(\rho U_m^{*2})=C$$

* : 유차원 량

ρ : 밀도

C : 상수

계산은 50×21개로 분할된 제어체적에 대해서 수행되었다.

결과 및 고찰

0.1L ≤ l ≤ 0.5L이며, 1.36 × 10³ ≤ Re ≤ 6.80 × 10³인 모델 연구의 범위에서 유선 분포는 그림 3으로 대표될 수 있는데, 유입구에서 시작된 모든 유선이 비록 l에 따라 정확

한 위치는 다르겠지만 상기의 레이놀즈수 범위에서는 거의 동일하다.

그림 4에는 l = 0.1L인 경우를 택하여 레이놀즈수가 세가지로 변화될 때 각 유출구에서 유출각도와 유량을 보여준다. 첫번째 및 두번째 유출구에서 유출각도는 레이놀즈수의 증가에 따라 점점 작아진다. 즉, 레이놀즈수의 증가는 유입속도의 증가를 뜻하므로 수평방향 성분만을 가진 유입속도의 영향을 더 많이 받는다. 세번째, 네번째 및 다섯번째 유출구에서의 유출각도는 레이놀즈수의 증가에 따라 영향을 받지 않는다. 마지막 다섯번째의 유출구에서의 유출각도는 여타의 유출구에서의 유출각도에 비하여 약간 커진다. 이는 오른쪽 수직벽에 인접한 2차 유동영역에서 보이는 비교적 높은 압력으로 인하여 유출구쪽으로 하향하는 유동성분이 커진 결과이다.

각 유출구에서 유출되는 유량은 레이놀즈수 보다도 l의 크기에 따라 크게 다르다. 그림 5에는 첫번째, 세번째 및 다섯번째 유출구에서의 유량분율(Flow Fraction)을 3가지 l의 경우에 레이놀즈수에 따라 표시하였다. 종축의 “%”는 전유출량에 대한 백분율이다. 3가지 l의 경우 모두 레이놀즈수에 관계없이 첫번째 유출구에서의 유량분율이 가장 적다. l = 0.1L이며, Re ≤ 4.08 × 10³인 경우를 제외하고는 다섯번째 유출구에서의 유량분율이 가장 크게 나타

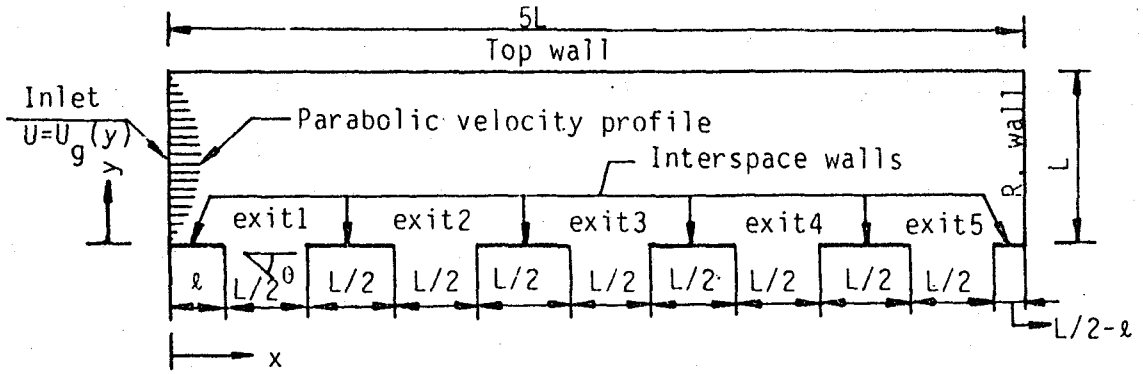


그림 2. Schematic diagram of present investigation

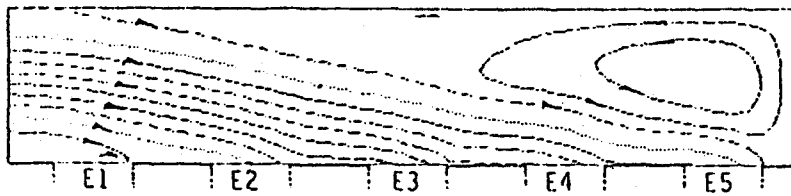


그림 3. Streamlines in solution domain, $\ell = 0.3L$, $Re = 6800$, (E ; exit)

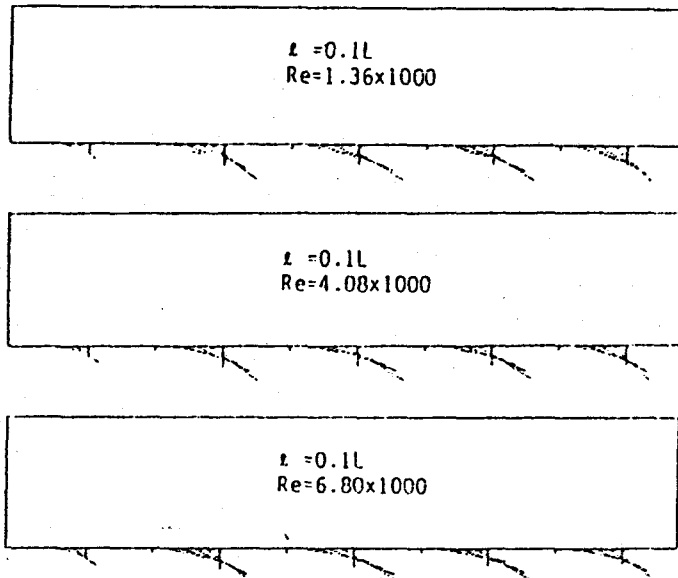


그림 4. Distribution of velocity vectors at exits

났다. 이는 $l = 0.3L$ 및 $l = 0.5L$ 인 경우의 다섯번째 유출구는 $l = 0.1L$ 인 경우보다 더욱 오른쪽 벽면에 가깝기 때문에 이 유출구 왼쪽에 존재하는 2차 유동 영역의 영향을 좀더 많이 받기 때문이라 판단된다.

2) 모델(II) : 프리챔버에서의 유동특성

클린라인 유닛의 공기분배기로 부터 실내로의 공기 유출특성은 분배기의 형태에 영향을 받을뿐 아니라 분배기로 공기가 유입될때의 입구조건에도 영향을 받는다.

본 모델연구는 공기분배기의 수직높이가 여러가지로 선정될 경우 클린라인 유닛의 필터로 부터 송출되는 공기가 프리챔버를 통과하여 어떠한 유동특성을 가지고 공기분배기로 유입될 것인지를 수치적으로 해석한다.

그림 6에는 필터로 부터 송출되는 공기가 프리챔버에서 90° 방향 전환되어서 공기분배기로 유입되는 클린라인 유닛의 일부를 보여준다. 프리챔버 출구의 높이 H를 0.45m-0.9m로 변화시키면서 프리챔버 입구에서의 압력차와 출구에서의 속도분포의 변동을 연구하였다. 프리챔버의 속도분포의 중요성은 이 속도 분포가 곧 공기분배기의 입구 속도 조건이 되며, 이 조건은 공기분배기에서 클린룸에 유입되는 공기유량분포에 영향을 주는 이유에 있다. 그림 7은 계산 영역을 보여준다. 계산 영역의 유동형상을 기술하는 지배방정식은 식 (1)-(3)과

동일하고 $X=0$ 인 입구에서의 속도 경계조건은 다음과 같다.

$$\frac{U}{U_{max}} = 2 - \cosh \left(\left| \frac{\frac{L}{2} - Y}{L} \right| \right) : \text{at } 0.025L \leq Y \leq 0.975L \dots\dots\dots (9)$$

$$\frac{U}{U_{max}} = \frac{U}{U_{max}} \Big|_{y=0.025L} \times \frac{Y}{0.025L} : \text{at } 0 \leq Y \leq 0.025L \dots\dots\dots (10)$$

$$\frac{U}{U_{max}} = \frac{U}{U_{max}} \Big|_{y=0.975L} \times \frac{L-Y}{0.025L} : \text{at } 0.975 \leq Y \leq L \dots\dots\dots (11)$$

상기 입구 속도경계조건으로는 사각형 덕트에서 완전 발달된(fully developed) 속도 분포를 측정 한 Nikuradse 결과를 이용하였다.

$Y=0$ 인 출구에서의 경계조건은 다음과 같다.

유출조건 : $P = \text{Const. at } (W - H)$

$$\langle X \rangle < W \dots\dots\dots (12)$$

수치계산에서 전체영역은 40×20개의 제어체적으로 나누어진다.

결과 및 고찰

본 모델연구에서는 레이놀즈수의 유동형태에 대한 영향을 알아보기 위해 $H=0.5L$ 일때 U_{max} 가 각각 1m/s, 5m/s 및 10m/s이며, 이에 따른 Re수가 각각 4.09×10^4 , 2.04×10^5 및 4.09×10^5 인 경우의 유동형태를 속도 50m/s, $Re=2.04 \times 10^6$ 인 경우의 결과와 비교해 보았으나 프리챔버 즉 계산 영역내의 유동형태에 상이점은 거의 찾아볼 수

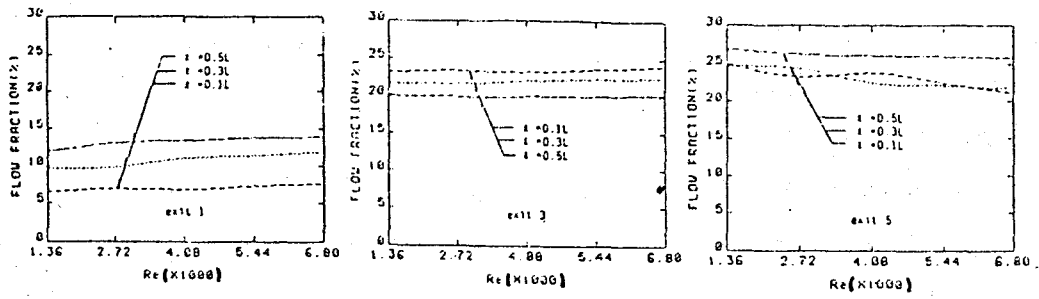


그림 5. Flow fraction of various cases

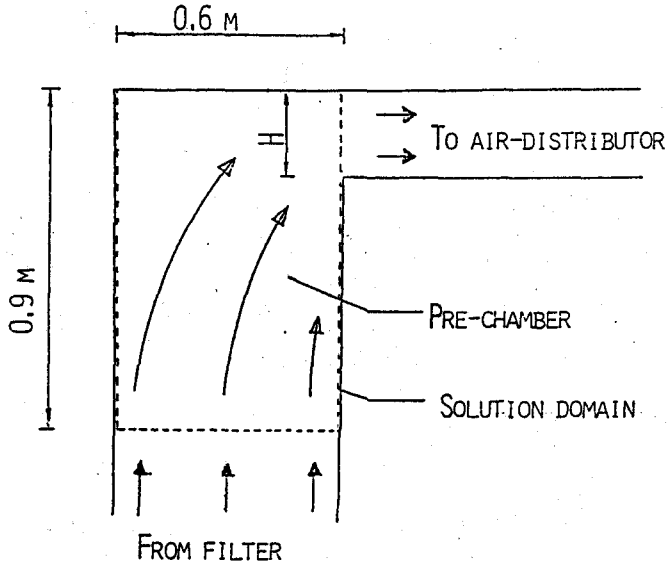


그림 6. Configuration of the pre-chamber portion between filter to air-distributor

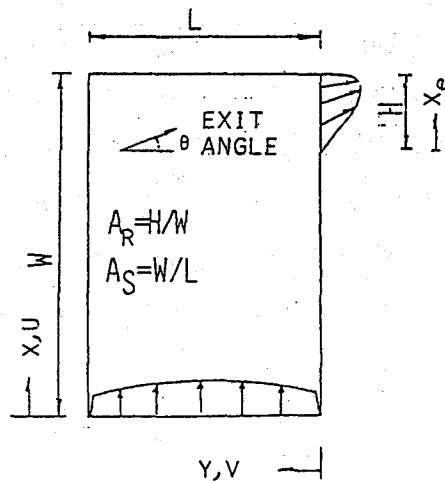


그림 7. Solution domain

없었다. 다만 속도의 크기가 레이놀즈수에 따라 선형적으로 변화할뿐이다. 따라서 결과의 논의를 $U_{max}=50\text{m/s}$ ($Re=2.04 \times 10^6$)인 경우에 한한다.

출구내에서의 유출각도(θ)는 공기분배기를 통하여 클린룸내로 유입되는 유량의 분포에 큰 영향을 미치므로 클린룸내의 기류 분포 예측을 위하여서는 미리 결정되어야 할 사항이다.

그림 8은 프리챔버의 중횡비가 1.5이며 최대공기 유입속도(U_{max})가 50m/s로서 폭(L)을 특성길이로 하는 레이놀즈수가 2.04×10^6 인 경우에, 유출입 면적비(A_R)가 0.5 ~ 0.1 범위로 변화될 때 출구에서 공기유출 특성을 보여준다.

A_R 의 감소에 따라, 즉 출구 면적의 감소에 따라 $X_e=0.1$ 위치에서의 유출각도는 감소된다. $A_R=0.5$ 인 경우 $X_e=0.1$ 인 위치에서의 유출각도는 약 65° 이나 $A_R=0.1$ 인 경우 $X_e=0.1$ 인 위치에서의 유출각도는 약 30° 이다.

물리적인 유추에 의하면 공기분배기로 공기가 유입될 때 유입되는 속도 벡터의 방향이 공기분배기의 윗면 쪽으로 많이 편기될수록 공기분배기에서 실내로 유입되는 공기량의 불균일성이 커진다.

3) 모델 연구(Ⅲ): 공기분배기의 공기 유입방향에 따른 클린룸의 유동특성

본 모델연구에서는 모델 연구(Ⅱ)에 의

하여 밝혀진 상향 유동의 존재가 클린 룸 실내 공기유동에 어떤 영향을 주는가를 이론적으로 예측하였다.

그림 9에는 본 연구에 이용된 2차원 공간의 상세한 칫수를 보여준다. 계산기의 제한된 규모에 적합하도록 단순한 모델을 설정하고 유출구를 통과하여 실내로 유출되는 유동특성에 대한 공기분배기로 유입되는 공기방향의 영향을 토의하고자 한다.

기 설명된 비압축성 2차원 운동방정식이 지배방정식이며 공기분배기의 입구에서 경계조건은 아래와 같다.

$$U=6 U_m(hy^*-y^2)/h \text{ at inlet} \dots\dots (16)$$

$$V=U \cdot \tan\theta \text{ at inlet} \dots\dots\dots (17)$$

여기서 $y^*=H-Y$, $h=0.1 H$

$$U=0 \text{ and } V=0 \text{ at all wall} \dots\dots (18)$$

$$P=\text{constant at } y=0 \dots\dots\dots (19)$$

수치해석방법은 이전의 모델연구와 동일하며 계산영역에 포함되는 제어체적은 X방향, y방향으로 각각 52개 31개이다.

유입되는 공기의 평균속도, U_m 은 10m/s로 설정하였다.

결과 및 고찰

공기분배기로 유입되는 공기의 유입각도, θ 는 실제 응용면에서는 유입단면 전체에서 균일하지 않다. 즉 유입단면의 아랫쪽에서는 윗쪽보다도 θ 가 상당히 크게 나타남을 모델 연구 Ⅱ에서 알 수 있었다.

그러나 본 연구에서는 수직층류 클린룸

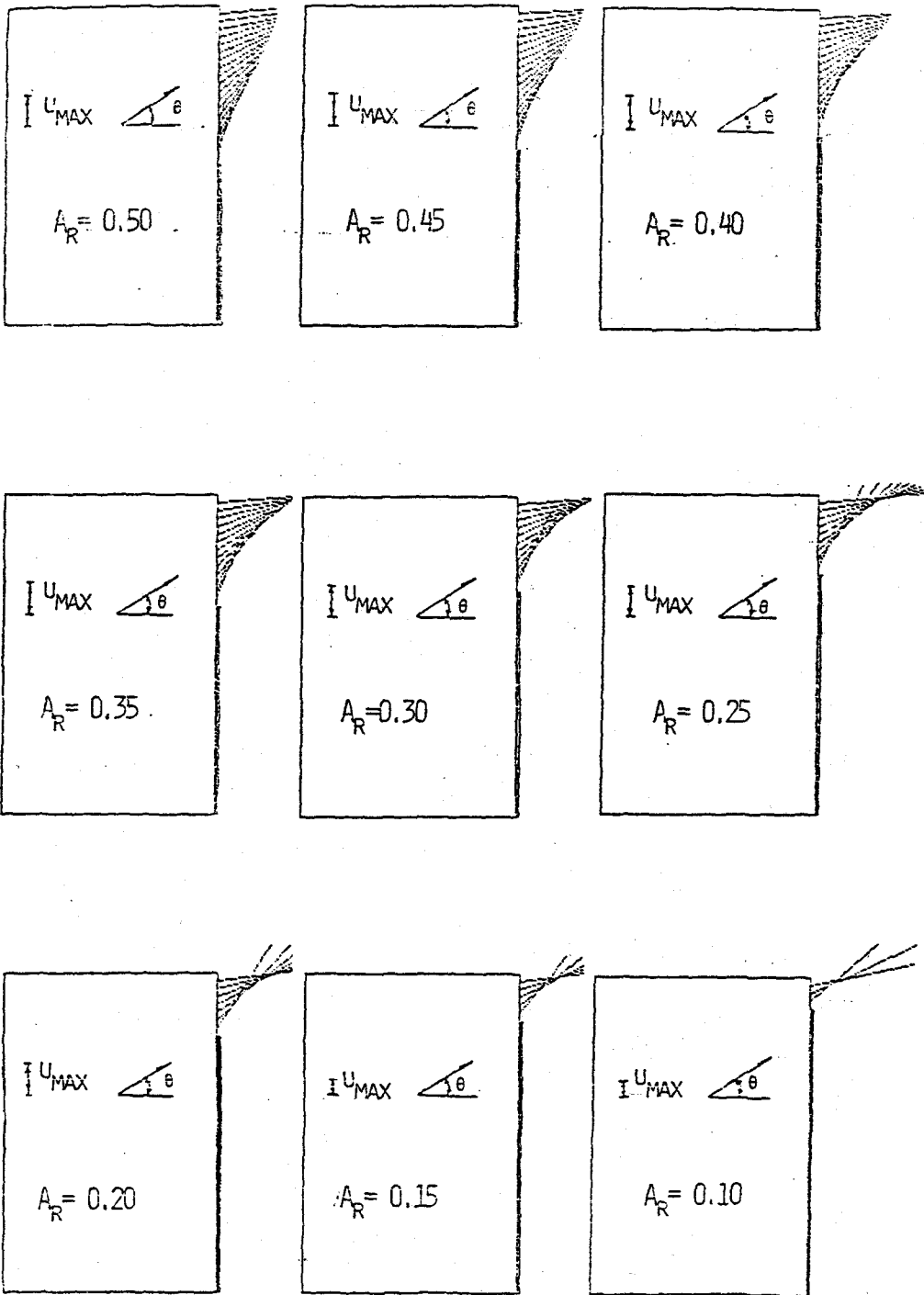


그림 8. Distribution of velocity vectors at various exits

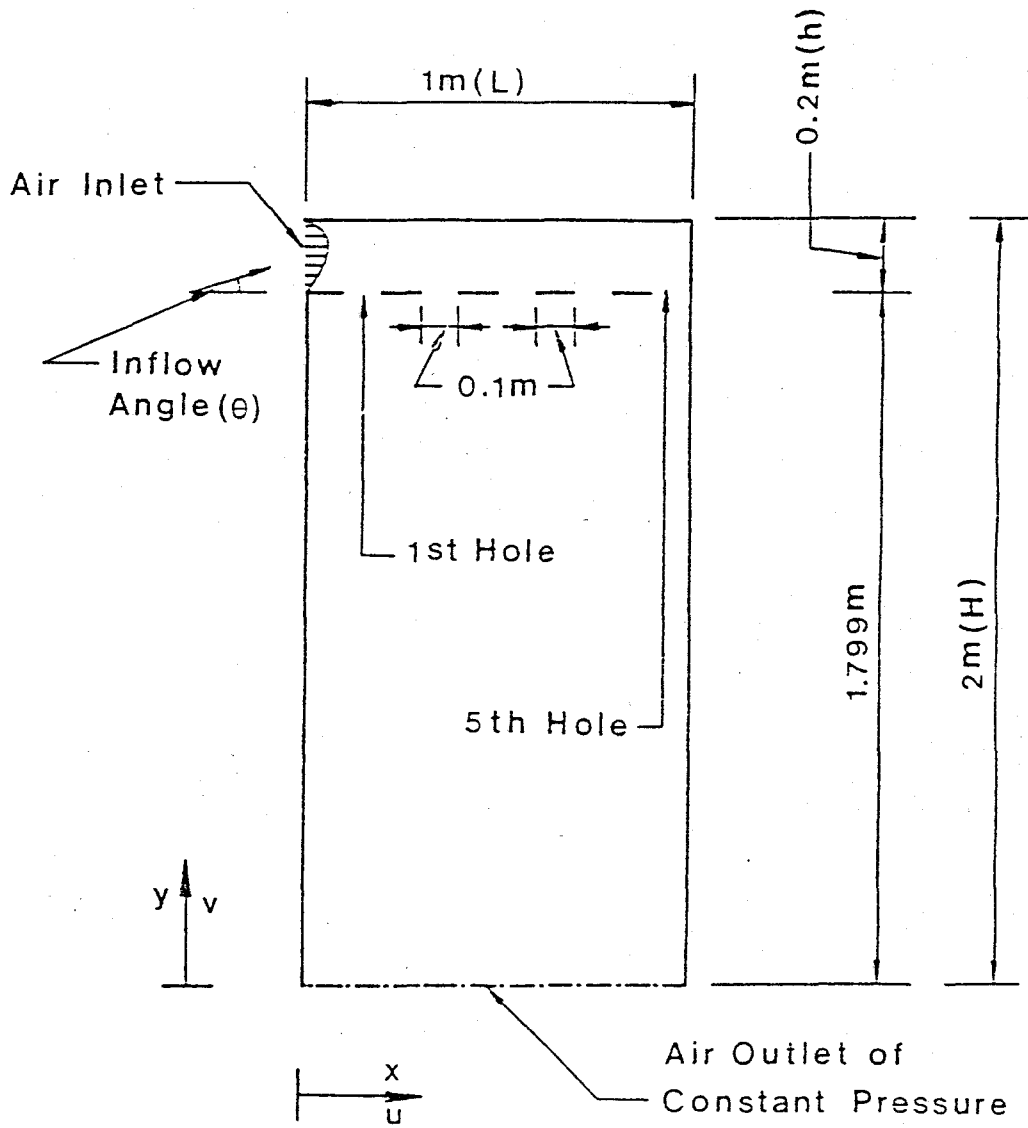


그림 9. Geometry of present investigation

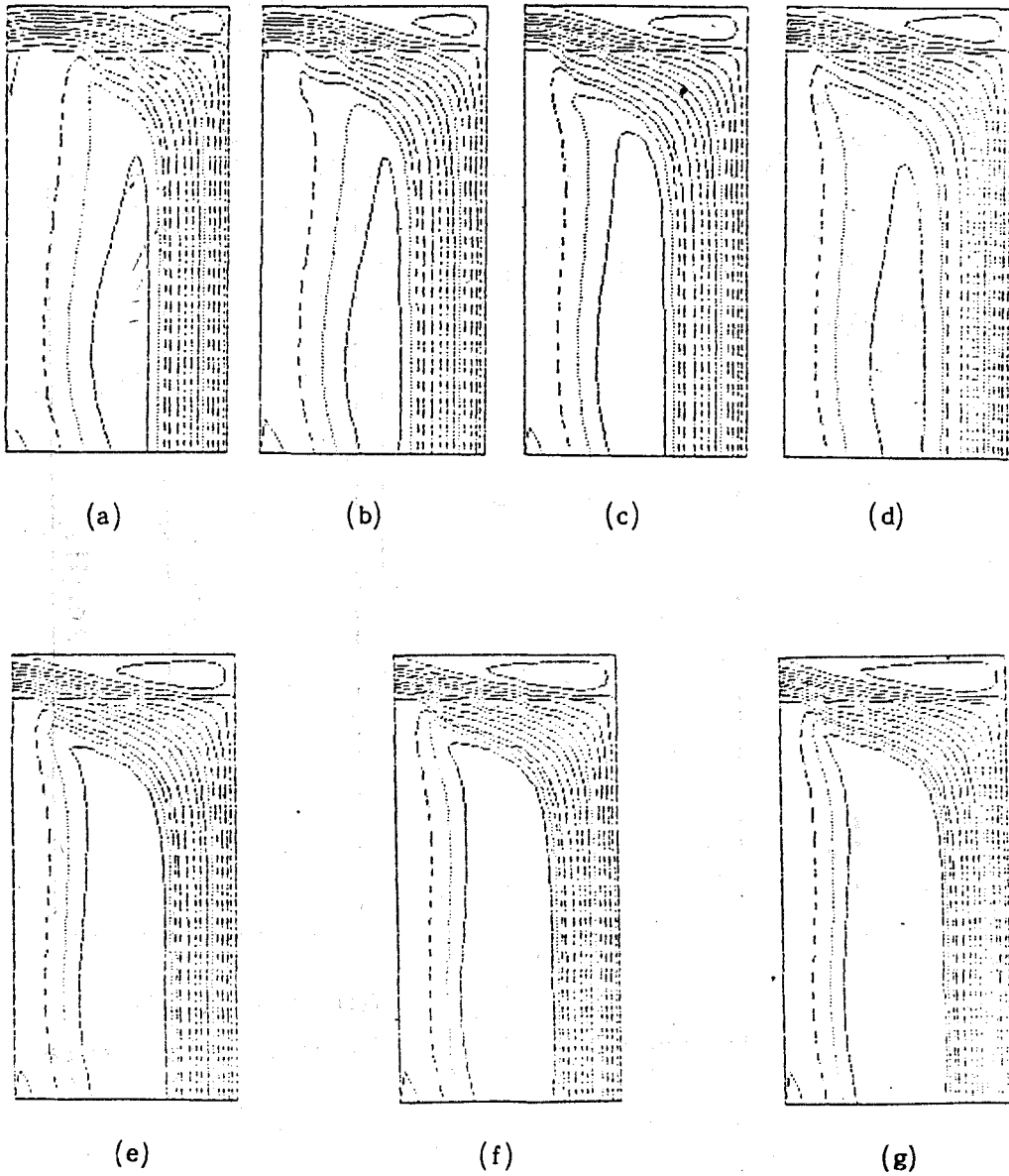


그림 10. Distribution of streamlines :

(a) $\theta = 15$: (b) $\theta = 10$: (c) $\theta = 5$: (d) $\theta = 0$:
(e) $\theta = -5$: (f) $\theta = -10$: (g) $\theta = -15$

에 요구되는 유동단면 위치에 따라 유량이 균일한 수직유동이 공기 분배기 유입각도 변화에 의하여 가능한가에 대해 관심을 가지므로 유입단면 전체에서 θ 는 일정하다고 가정한다.

수치적 예측에 선정된 θ 는 $\pm 15^\circ$, $\pm 5^\circ$, $\pm 10^\circ$, 0° 이며 각각의 유입각도 경우에 공기분배기내의 유동 및 유출구를 통과하는 유량, 실내유동을 검토할 것이다.

그림 10에서는 상기 7개 유입각도의 순서대로 계산영역내의 유선의 분포를 보여준다. 그림 10에서는 전반적인 공기의 유동양상을 파악할 수 있다.

그림 10에서 θ 가 -15° 로 변화됨에 따라 유입공기가 공기분배기의 윗벽면에서 박리(Seperation)되는 위치는 유입구에 가까와져서 클린룸 전체 유동에 영향을 주지 않는 불필요한 공간(재순환영역)이 증가되는 것을 알 수 있다.

$\theta=15^\circ$ 일때 첫 번째 유출구에서는 유체가 실내로 유출되지 않고 오히려 역류함을 볼 수 있으며 클린룸 목적으로 볼 때 이 유출구는 없는 것이 오히려 좋을 것이다.

표. 1은 각 유출구를 통과하는 유량을 전체 유량에 대한 백분율로 환산하여 표시하였다. 유입각도에 따른 유량의 변화가 가장

표 Percentage of flow rate through each punched hold

θ (degree)	1st	2nd	3rd	4th	5th
15	-3.8	15.5	34.4	31.7	22.2
10	11.4	30.9	28.1	18.2	11.4
5	21.4	30.6	24.4	14.4	9.2
0	25.8	29.9	22.9	13.0	8.4
- 5	29.2	29.3	21.9	11.7	7.9
-10	31.9	28.8	21.2	10.7	7.6
-15	33.9	28.2	20.6	9.9	7.4

큰 유출구는 첫번째 유출구이며 $\theta=15^\circ$ 에 비하여 $\theta=-15^\circ$ 때의 유량은 약 38%가량 증가된다.

$\theta \leq 10^\circ$ 일 때, θ 가 감소함에 따라 첫번째 유출구에서만 유량이 증가되며 나머지 유출구에서는 유량이 감소된다.

$\theta \leq 10^\circ$ 일때 유량의 크기는 마지막 다섯 번째 유출구에서 가장 크다. 실내에서는 어느 유입각도에서나 순환유동이 존재하며, 수직 클린룸의 원래 목적과 같이 모든 X위치에서 하향유동은 되지 않는다.

세번째 유출구의 X위치보다 큰 X위치에

서는 거의 정체 상태이거나 상향유동이 보인다. 따라서 본 모델연구에서 선택된 모델과 같은 클린룸에서는 약 절반의 공간이 진정한 클린룸 기능을 수행할 수 없다고 판단 된다.

그 이유는 공기분배기로 유입되는 공기의 X방향 운동량성분이 분배기내에서 충분히 감쇄되지 못하고 실내로 유입되기 때문이다.

4) 모델 연구(IV) : 프리챔버 구조 개선에 의한 공기분배기 입구 유동방향 변화

실내유동특성은 공기분배기와 프리챔버 모두에 영향을 받으므로 이제까지의 모델 연구는 공기분배기-프리챔버-공기분배기의 순서로 시행되었다.

지금까지 연구에서 프리챔버를 통과하는 공기의 유동이 다시금 개선되어야만 한다는 결론을 얻은 바 있다. 따라서 이번에는 프리챔버의 유출구 즉 공기분배기의 입구에 2개와 4개의 공기 안내깃(Guide Vane)을 설치하도록 하고 또한, 클린 라인 유닛의 크기를 줄이기 위해 고성능 필터를 경사시켰다.

프리챔버 두 가지의 개선 형상, 그림 11, 그림12에 대하여 비압축성 정상 2차원 층류유동을 기술하는 지배방정식을 수치적으로 해석하였다. 필터를 통과하는 공기의 흐름은 필터벽면에 평행하며 5m/s의 균일한 속도를 유지한다고 가정하였다.

전체 프리챔버는 50×31개의 작은 구역으로 나누어졌다.

경계조건은 다음과 같다.

$$U=V=0 \text{ at all walls and the region of fluid body } \dots\dots (20)$$

$$P=P_0 \text{ at } y=0 \text{ except fixed body } \dots\dots\dots (21)$$

$$U=U_m \text{ COS}\theta \text{ at the region of filter exit } \dots\dots\dots (22)$$

$$V=U_m \text{ SIN}\theta \text{ at the region of filter exit } \dots\dots\dots (23)$$

수치 계산에서 압력경계조건의 원활한 처리를 위하여 Patankar가 제안한 SIMPL-ER방법을 이용하였다.

결과 및 검토

이론계산은 1. 프리챔버 A : 가장 단순한 기존형상, 2. 프리챔버 B : 필터박스만 수평에서 23.5° 경사되었을 경우, 3. 프리챔버 C : 안내깃 2개만 설치되었을 경우, 4. 프리챔버 D : 안내깃 4개만 설치되었을 경우, 5. 프리챔버 E : 필터박스가 23.5° 경사되고 안내깃도 2개 설치되었을 경우 그리고 6. 프리챔버 F : 필터박스가 20.5° 경사되고 안내깃도 4개 설치되었을 경우 등 6가지 경우에 대하여 수행되었다. 이 6가지의 경우에서의 프리챔버 출구유동을 검토하는 것이 필터박스의 경사 효과, 안내깃 설치효과 각각이 두가지의 복합효과를 알 수 있도록 한다.

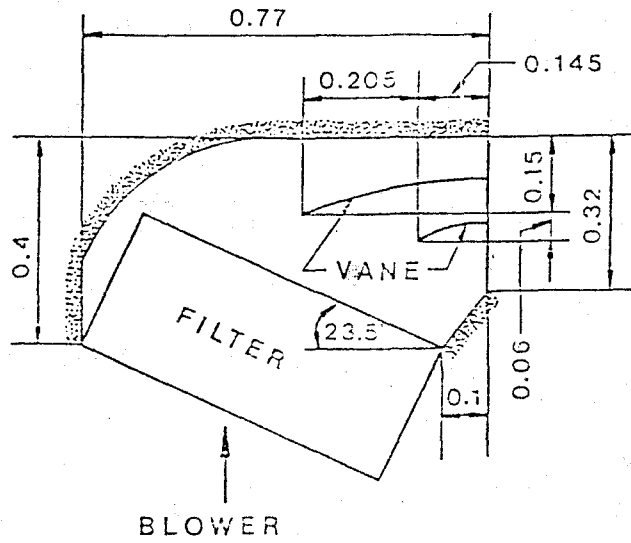


그림 11. Schematic of revised plenum with two guide vanes.

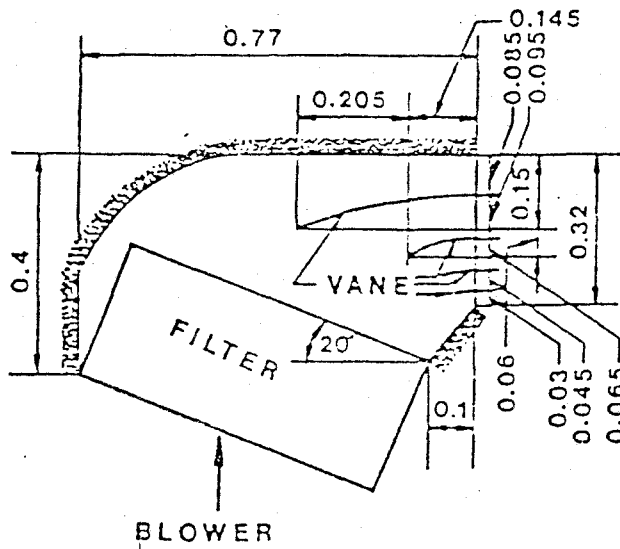


그림 12. Schematic of revised plenum four guide vanes.

본 모델연구의 중요관심은 프리챔버 유출구 단면을 지나는 유동에 상향속도 성분이 얼마나 남아 있는가이다. 그림 13과 그림 14에는 각각 프리챔버 유출구에서 유동의 유출각도, θ 를 나타내었다.

그림의 종축은 유출구의 국소위치를 표시하며 횡축은 유출각도를 90°로부터 감소

되도록 표시한다. 청정실의 전체적인 효율을 위하여서는 모든 유출구 단면에서 유출각도가 0°인 것이 바람직하며, 0°인 출구영역이 넓은 프리챔버가 개선된 형태라고 할 수 있다.

안내깃이 2개인 경우에 $h_1 \leq X \leq h_2$ 사이의 유동에 상향속도 성분이 남아 있고, 안내깃

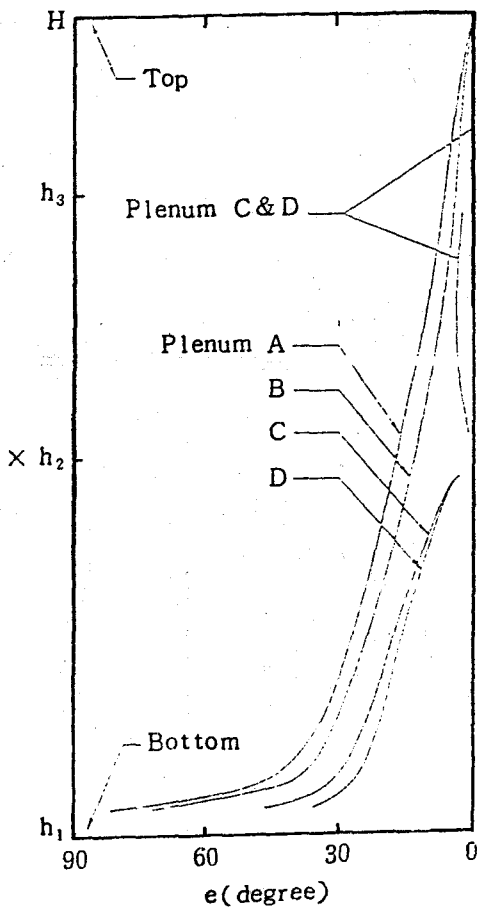


그림 13. Outflow angle at outlet of every plenum

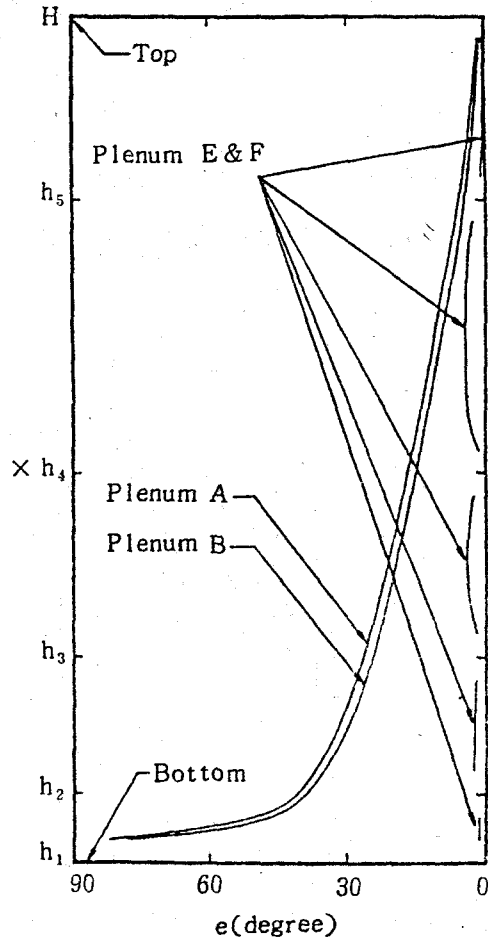


그림 14. Outflow angle at outlet of every plenum

이 4개인 경우에는 경사에 관계없이 상향 속도 성분이 거의 없어졌다.

3. 결론

수직층류형 클린룸의 실내유동은 프리챔버 유출구의 공기유동방향에 큰 영향을 받으므로 4개의 안내깃을 프리챔버에 설치하여 개선된 프리챔버 F를 클린라인유닛 시제품이 가지도록 해야 한다. 개선된 프리챔버 F의 출구유동에서는 상향 유동성분이 현저히 줄어들었으며 이 효과는 주로 안내깃의 설치에 기인되며 필터박스의 경사는 상향속도 성분제거에 불리한 점이 없으므로 외형상의 이유때문에 경사시키는 것도 공기유동에는 나쁜 영향이 없다.

III. 시제품의 공기유동해석

1. 계산

모델연구 4)의 연구결과를 참고하여 최종 시제품의 프리챔버 설계는 4개의 안내깃을 가지도록 하여 시제품의 공기유동해석시 입구에서의 공기유입각도를 0°로 간주할 수 있게 하고 유입공기의 분포는 난류형을 가진다.

유출구 경계조건은 압력경계조건을 이용하였으며, 계산영역은 폭방향으로 수평부분은 0.6m로, 공기분배기 두께 0.239m, 공기분배기 판두께 0.0012m, 실내공간 0.36m³로 구성되며, 수평방향으로는 4.8m이다. 시제품은 모델연구 II의 A_R비가 0.6으로 과도

한 압력손실이 발생하지 않음을 알 수 있다.

전체영역은 495×31개의 제어체적으로 분할되며, 유출구는 25mm 간격에 지름 4mm의 구멍으로 되어 있다.

최대 속도(U)는 2.6m/s이며, $Re=1.06267 \times 10^5$ 에 해당한다. 최대속도는 실제 시제품에 대해 실험적으로 구한 값이다.

2. 결과 및 고찰

시제품에 대한 유동해석에서 주요관심은 클린룸내의 유동특성과 각 유출구에서 유동특성 및 유량분포에 있다.

유동특성을 설명하기 위해 유선과 속도벡터가 그림 15와 그림 16에 가시화되었다.

그림15에서는 실내에서 공기의 유동양상을, 그림 16에서는 각 위치에서의 유동의 세기와 방향을 알 수 있다. 실내에는 순환운동이 존재하고, 공기분배기의 말단부에서는 수직하향운동이 일어나며 대체로 공기는 분배기의 유출구에서 클린라인 유닛의 반대측 벽면으로 향해 흐른다. 클린룸의 상당한 공간에서 진정한 수직층류 흐름은 일어나지 않고 있다.

이상과 같은 연구결과는 현재 연구모델과 같은 클린라인 유닛의 형상으로 얻을 수 있는 클린룸의 등급(Class)의 한계를 추측할 수 있게 한다. 즉 수직층류흐름의 경우에 얻을 수 있는 등급, Class 100이하는 얻지 못한다.

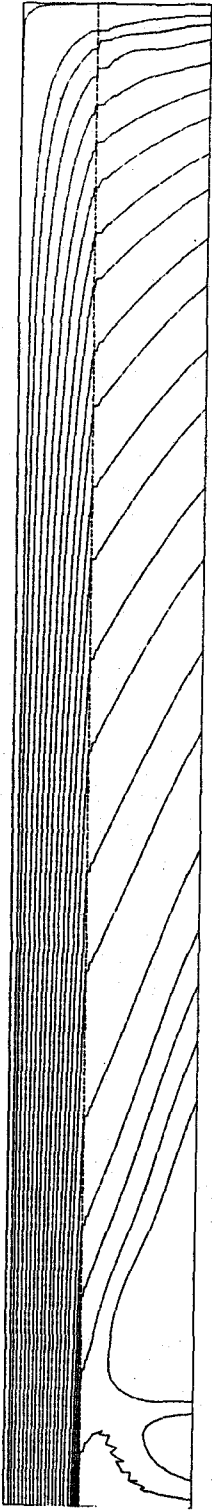


그림 15. Streamlines in solution domain

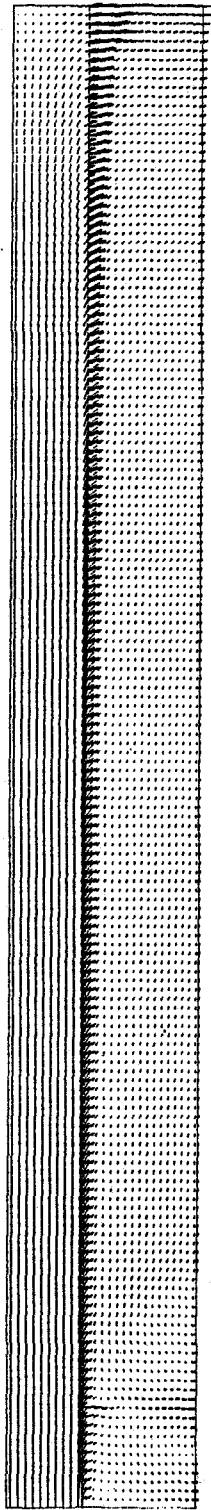


그림 16. Velocity vectors in solution domain

IV. 다위치 제어

1. 개요

온도, 습도 등의 제어에는 2 위치(on-off) 제어, 비례제어(P), 비례적분제어(PI), 비례적분미분제어(PID)의 방법이 있다. 본 연구에서는 우선적으로 2 위치제어의 결점을 보완한 다위치 제어를 채택하였다. 2위치 동작에서는 편차,가 동작틈새를 조금 벗어나더라도 최대의 조작량이 작동되기 때문에 제어량이 주기적으로 크게 변화하고 만다. 이 때문에 조작량을 3단 또는 그 이상으로 분할하여 부하(또는 편차)에 대응하는 적당한 조작량을 주고, 조작량을 보내는 기회(횟수)를 늘려 제어량의 변동을 억제하도록 하는 제어가 다위치 제어이다.

그림 17은 3위치 제어계의 제어량과 조작량의 관계를 보여준다. 목표치는 제1단

스위치의 OFF 위치에 있고, 제1단, 제2단 각각의 동작틈은 0.5°C , 스위치간의 동작틈새(ON-OFF)는 가변인데 1°C 로 조정한 것으로 한다. 따라서 목표치보다 실온이 0.5°C 내려가면 제1단 히타가, 이곳에서 다시 1°C 내려가면 제2단 히타가 ON되게 된다.

2. 다위치 제어기의 회로 설계

본 연구과제에서 개발하고자 하는 다위치 제어기는 구성요소로 4개의 Heater, 2개의 냉동기 그리고 1개 가습기를 가진 클린라인 유닛에 대해 온도, 습도를 제어할 수 있어야 한다. 따라서 Heater에 대해서는 5 위치제어, 냉동기에 대해서는 3 위치제어 그리고 가습기에 대해서는 2위치 제어를 하는 제어기 회로가 구성되어야 한다.

온도 검출기는 축온저항체를 이용하며,

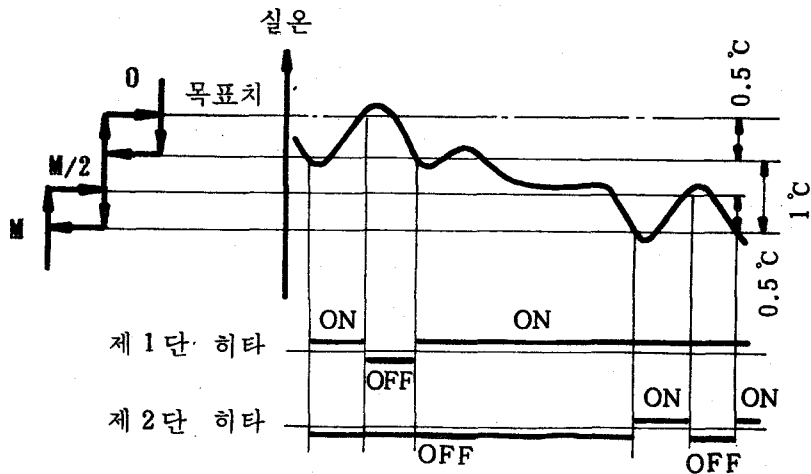


그림 17. 3위치 동작제어계의 제어량과 조작량의 관계

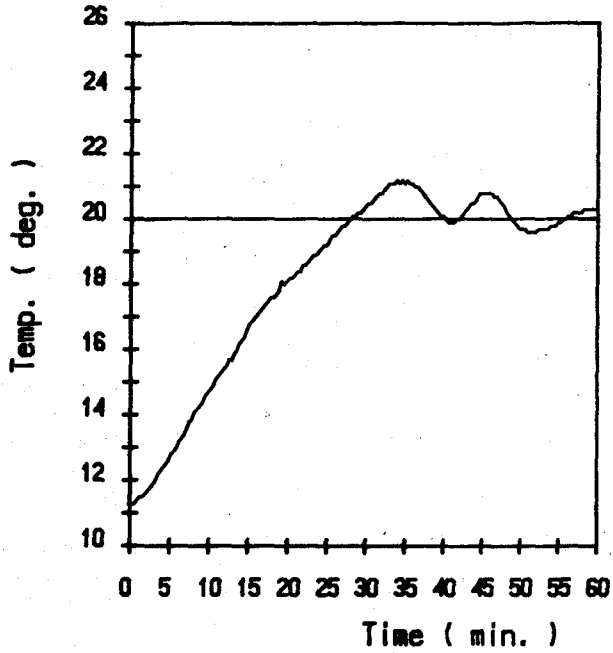


그림 18. 목표값 20°C에 대한 과도특성

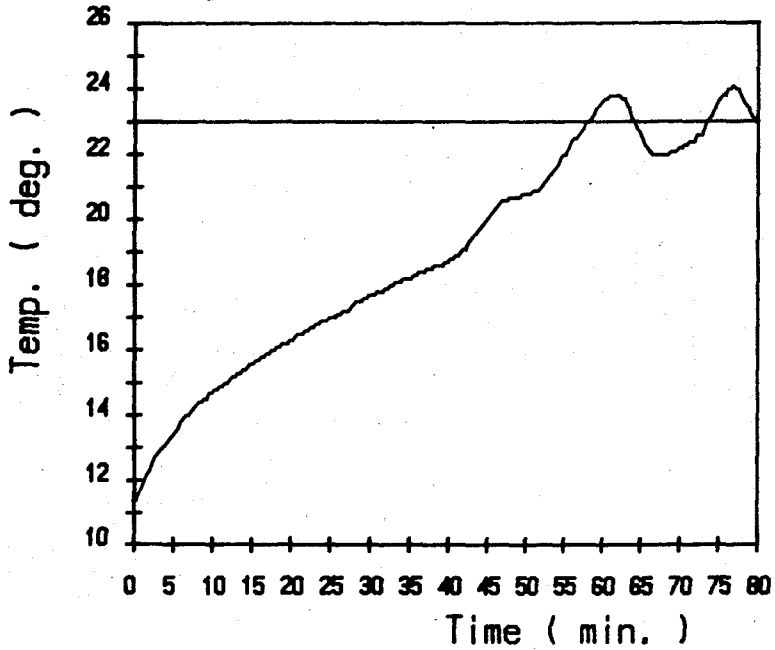


그림 19. 목표값 23°C에 대한 과도특성

그중 재현성이나 안정성이 매우 좋아 가장 널리 이용되는 Pt 100 Ω (0°C에서 100 Ω)을 선택한다. 습도검출부는 상대습도 검출부로서 나일론 비닐을 가진 실내형 습도계를 사용한다. 각각의 구성요소에서 동작특성은 제어정도에 영향을 미치므로 조절할 수 있도록 설계한다.

현재 개발된 회로에서 A/D Converter에서 변환되어 Digital량으로 표시되는 온도는 소숫점 이하값을 나타나지 않게 설계되어 있어, 1°C이하의 범위에서 온도제어는 온도 변화 나타나지 않으므로 불가하며, 보다 나은 정도로 제어하기 위해서는 소숫점 이하까지 표시할 수 있어야 한다.

3. 다위치 제어기의 과도응답 및 정도에 관한 실험

이상과 같이 개발된 다위치제어기의 시제품은 클린 라인유닛에 설치되어 실내공기의 온·습도를 조정하게 된다. 이 절에서는 제어계의 외부로부터의 계단상의 입력에 대한 과도응답과 정상상태에 있을 때 제어계가 가지는 편차 (목표값과 제어량과의 차이)에 관한 실험을 한다.

실험에 이용되는 장비는 Data Logger (Digi-Strip III)이다.

1) 온도에 관한 실험

자동제어계가 동작하여 제어계에 동적 변화가 없어진 상태를 정상상태라고 한다. 제어계가 정상상태에 있을 때 제어량은 목

표값과 완전히 일치하고 있는 상태가 좋다. 더욱 이상적으로는 정상상태에서 목표값이 변화하면 시간적으로 지체없이 같은 꼴로 추종하고 외란이 있는 경우에는 제어량에 그 영향이 나타나기 전에 소거할 수 있는 제어계가 바람직하다.

그러나 일반적인 제어계는 이와같이 이상적인 상태는 거의 얻을 수 없고 오히려 목표 값 변화에는 어떤 초기의 지연을 갖고 추종하거나 외란에 대해서는 그 영향이 제어량에 나타나는 것을 방지할 수 없는 것이 보통이다.

이와같이 제어계의 동작은 외부로부터의 입력에 대해서 여러 가지 반응을 표시하는데 이 표시법으로서 과도응답과 주파수응답이 흔히 사용되고 있으나, 여기서는 제어계의 과도응답에 대해서 조한다.

그림 18과 19는 각각 20°C와 23°C 목표값에 대해서 약 30분과 60분으로 상당히 길다는 것을 알 수 있다.

이와 비슷한 과도특성을 파악하기 위하여 목표값을 25°C에서 20°C로 전환시킨 다음 다시 25°C로 설정하여 제어량의 추이를 관찰하였으며, 그림 20은 그 응답을 보여준다.

낮은 온도 목표값에서 제어계가 더욱 심하게 변화하는데 이는 낮은 온도에서 가열기의 게인(Gain)이 높은 때문이다.

제어계는 조정시간 이후에는 목표값과

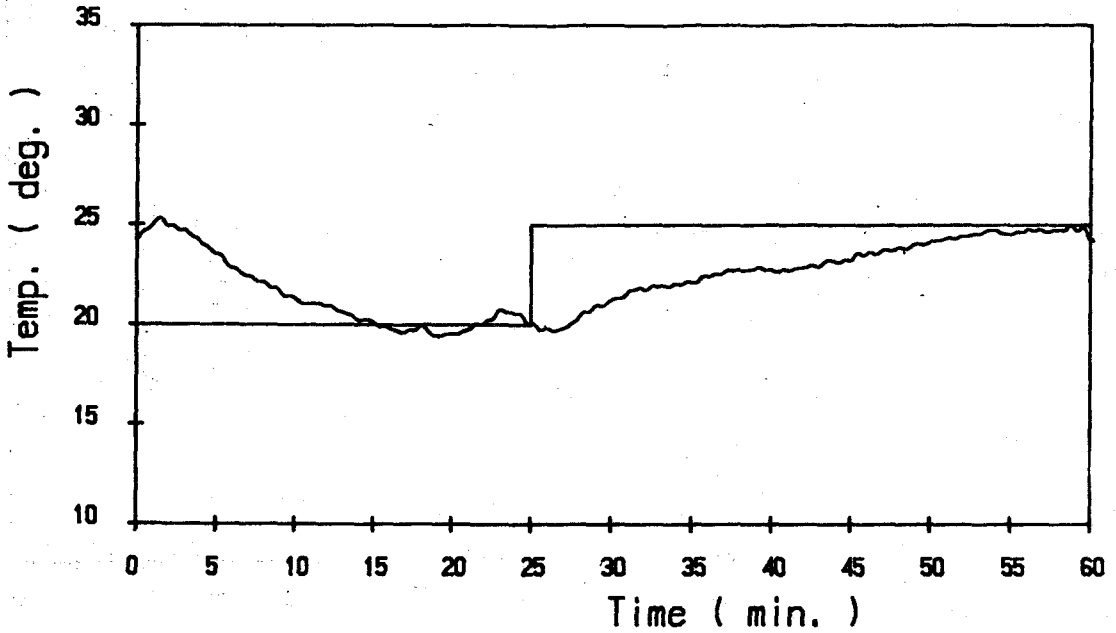


그림 20. 목표값의 계단변화 (25°C⇒20°C⇒25°C)에 대한 과도 특성

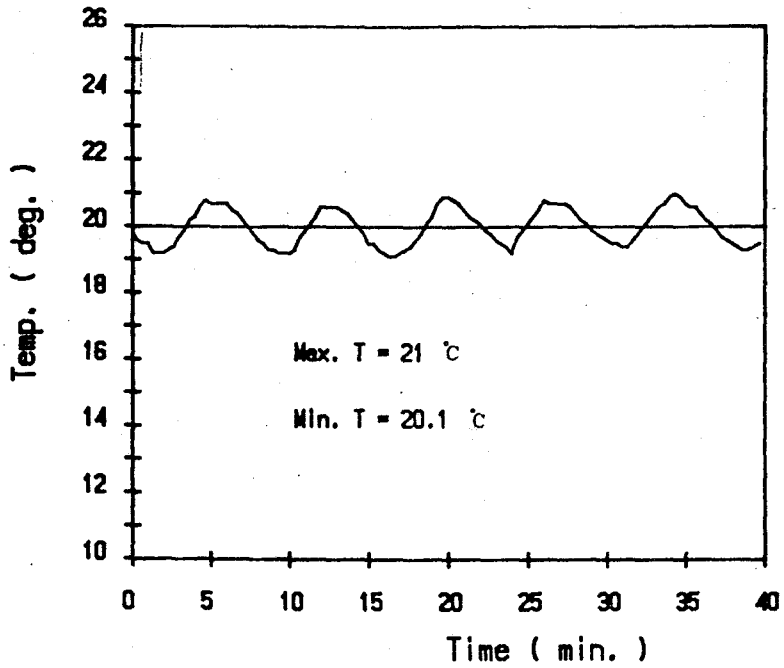


그림 21. 목표값 20°C에 대한 정상상태 제어결과

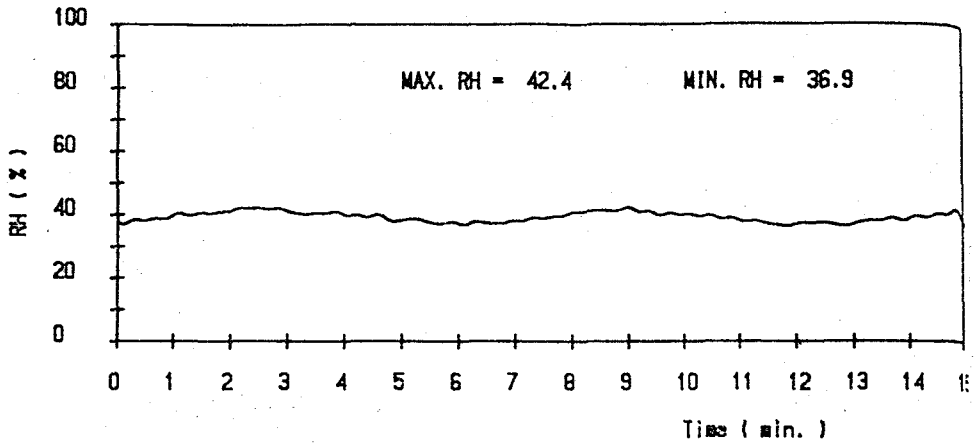


그림 22. 정상상태 습도 제어결과
 가습기=30% RH, 제습기=30% RH, 온도=20°C

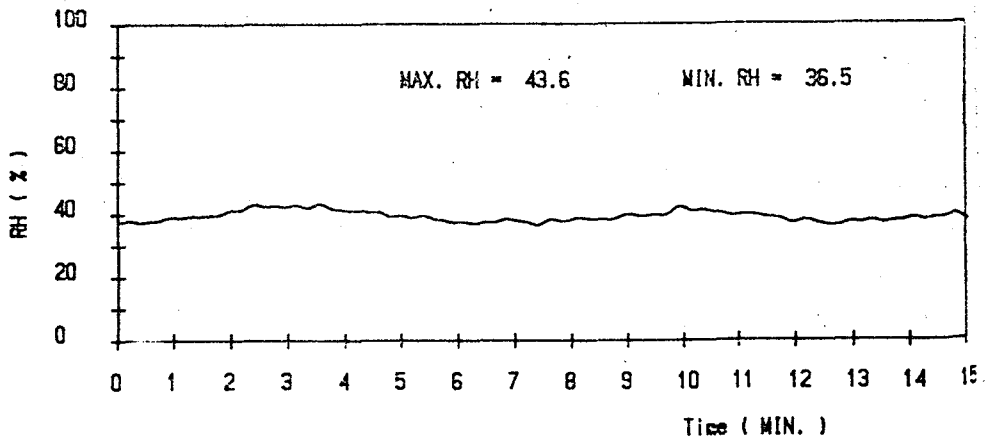


그림 23. 정상상태 습도 제어결과
 가습기=40% RH, 제습기=40% RH, 온도=20°C

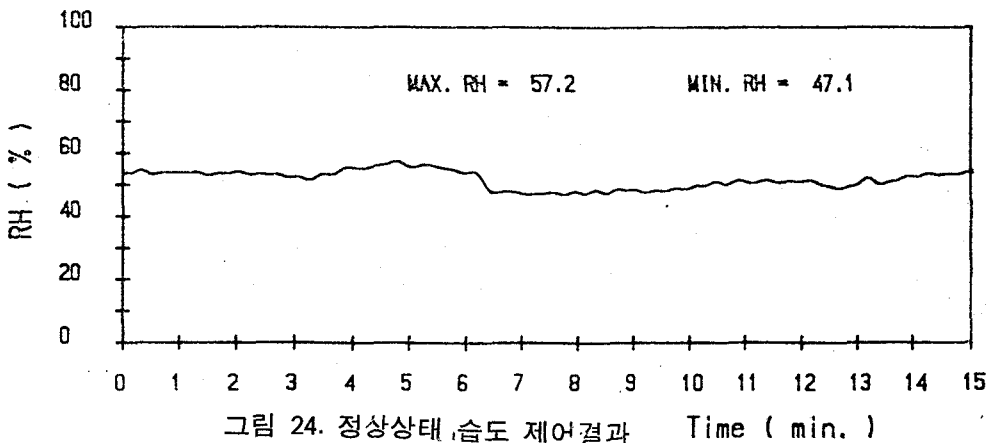


그림 24. 정상상태 습도 제어결과
 가습기=50% RH, 제습기=50% RH, 온도=20°C

제어량간에 통상 정상편차가 나타나게 되는데, 2위치 제어계에서는 제어량이 안정되지 않고 계속적으로 진동하게 된다. 그림 21과 그림 22에서 이러한 특성을 알 수 있고 이들 그림으로부터 제어계가 가지는 제어정도를 알아내게 된다. 제어계는 통상 많이 이용되는 온도인 20[±]0.5 °C의 제어정도를 가진다.

2) 습도에 관한 실험

본 연구에서 개발된 다위치제어기는 상대습도에 대해서는 2위치 동작을 한다.

실내공기의 상대습도가 가습용센서의 설정치 이하가 되면 가습기 히터가 작동하여 가습이 되고 제습용 센서의 설정치 이상이 되면 냉각기가 운전되어 제습을 하게 된다.

실내공기의 건구온도와 습구온도를 열전대(Thermocouple)를 이용하여 측정하고 다음의 식으로 상대습도를 구하였다.

$$RH = 100 \frac{P(T_w) - K_1 P(1 + K_2 T_w)(T_d - T_w)}{P(T_d)}$$

여기서 RH=상대습도, %

T_w = 습구온도, °C

T_d = 건구온도, °C

$P(T_w)$ 와 $P(T_d)$ = 건구온도와 습구온도에 해당하는 포화압력, 다음의 식으로 구한다.

$$P(T_w) = K_3 \cdot e^{-\frac{k_1}{T_w + K_5}}$$

$$P(T_d) = K_3 \cdot e^{-\frac{K_1}{T_d + K_5}}$$

P = 대기압, atm $K_3 = 1.39 \times 10$, atm

$K_1 = 6.606 \times 10$, °C⁻¹ $K_4 = 3.929 \times 10$, °C

$K_2 = 1.151 \times 10$, °C⁻¹ $K_5 = 2.317 \times 10$, °C

그림 22-그림 24는 각각의 설정치에서의 상대습도의 변화를 보여주고 있다.

설정치 30퍼센트 RH에서 정도는 약 10퍼센트로 정도가 나쁜 것으로 나타나고 있으나 이는 상대습도 30퍼센트는 냉동에 의한 제습의 실제적인 한계점으로 제습에 어려움이 따른 때문으로 판정되며, 이 이하의 제습을 위해서는 화학적인 제습 장치가 필요하다.

4. 결론

1) 공기분배기의 높이와 프리챔버의 폭비(A_R)가 0.25 이하에서는 과대한 입력손실이 발생한다.

2) 프리챔버(Pre-chamber)에서 공기분배기로 유입되는 공기의 유입각도는 10°C 이하로 유지되어야 공기분배기 시작부분에서 실내의 공기가 공기분배기로 유입되는 역류현상이 발생하지 않는다.

3) 프리챔버에서 공기분배기로 유입되는 공기분배기로 유입되는 공기의 흐름 방향을 개선하기 위해 설치되는 안내깃(Guided Uane)은 적어도 4개는 설치되어야 한다.

4) 다위치제어기(step controller)의 제어 정도는 상용의 온도범위에서 +1.2°C, -0.9°C오차를 가지며, 상용의 습도범위에서 +9.5%, -5.2%(RH)이었다.