

## Dry Room에서 종횡비와 배기구 위치가 환기성능에 미치는 영향

이 관 수<sup>†</sup>, 임 광 옥, 최 석 호<sup>\*</sup>  
한양대학교 기계공학부, \*한양대학교 대학원

### Effect of Aspect Ratio and Location of Outlets on Ventilation Performance in a Dry Room

Kwan-Soo Lee<sup>†</sup>, Kwang-Ok Lim, Seok-Ho Choi<sup>\*</sup>

*School of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea*

*\*Graduate School, Department of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea*

(Received July 19, 2001; revision received March 16, 2002)

**ABSTRACT:** The characteristics of moisture ventilation in a dry room are studied numerically. The behaviors of moisture ventilation are analyzed by varying the aspect ratio of the horizontal plane and for various positions of the outlets in the room. Three different ventilation efficiencies have been used to examine the effect of the longitudinal arrangement of outlets and transverse arrangement of outlets for each aspect ratio on ventilation inside the room. It is shown that the ventilation efficiency in the dry room can be improved by arranging the outlets transversely in the cases that the aspect ratio is less than three and longitudinally in the cases that it is greater than four.

**Key words:** Dry room(극저습 공조실), Aspect ratio(종횡비), Scale of ventilation efficiency(환기효율 지수), Moisture contamination(수분오염)

기 호 설 명	
$C$ : 수분 농도 [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ] $\bar{C}$ : 임의의 시간에서 실내 평균 농도 [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ] $C_e$ : 배기구 평균 농도 [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ] $C_i$ : 초기 평균 농도 [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ] $C_s$ : 실내 수분 발생량 [ $\text{kg}/\text{s}$ ] $C_0$ : 실내 수분 잔류량 [ $\text{kg}$ ] $C_1, C_2, C_\mu$ : standard $k-\epsilon$ 모델의 실험 상수	$D$ : 수분 확산계수 [ $\text{m}^2/\text{s}$ ] $D_h$ : 급기구의 수력학적 지름 [ $\text{m}$ ] $k$ : 난류 운동에너지 $L, H, W$ : 길이, 높이 및 폭 [ $\text{m}$ ] $N$ : 환기율, $V/V_0$ [No./min] $Re$ : Reynolds 수, $D_h w_{in} /\nu$ $u, v, w$ : $x, y$ 및 $z$ 의 속도성분 [ $\text{m}/\text{s}$ ] $V$ : 유량 [ $\text{m}^3/\text{min}$ ] $V_0$ : dry room의 전체 체적 [ $\text{m}^3$ ] $v_{out}, w_{in}$ : 배기구 및 급기구 평균 유속 [ $\text{m}/\text{s}$ ] $X$ : 위치 $X_i$ : 수분분포의 농도 중심 [ $\text{m}$ ] $x, y, z$ : 길이, 폭 및 높이 방향 좌표

<sup>†</sup> Corresponding author

Tel.: +82-2-2290-0426; fax: +82-2-2295-9021

E-mail address: ksleehy@hanyang.ac.kr

그리스 문자

- $\beta$  : 종횡비,  $L/W$
- $\rho$  : 밀도 [ $\text{kg/m}^3$ ]
- $\nu$  : 층류 동점성 계수 [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]
- $\nu_t$  : 난류 동점성 계수 [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]
- $\varepsilon$  : 난류 소산에너지
- $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  :  $k, \varepsilon, C$ 의 난류 Prandtl/Schmidt 수

하첨자

- $i, j$  : 텐서 인덱스
- $in, out$  : 급기구 및 배기구

1. 서론

최근 첨단기술 산업분야에 있어서 제품제조시 품질향상을 목적으로 제조공정을 저습 공기조건으로 유지하는 생산공장이 증가하고 있다. 이러한 제조환경에 부합하는 생산공조실로 저습공기를 강제 순환시켜 생산공정을 저습·항온 상태로 유지시키는 극저습 공조실(dry room)이 최근 각광을 받고 있다. 그러나 이러한 극저습 공조실은 일반 공조설비에 비해 설비비 및 운전비용이 상승하므로 실용화를 위해서는 적절한 사전연구가 요구된다.

기류 및 습도분포에 대한 기존연구로 Kiranoudis et al.<sup>(1)</sup>은 산업용 일괄식 건조로에서 건조로 내부의 균일유동 및 건조로 형상의 중요성을 강조하였다. Murakami et al.<sup>(2)</sup>은 청정실(clean room)에 있어 급기구와 배기구의 배치변화가 유동장 및 농도장에 미치는 영향을 수치해석기법으로 조사하였다. Kato et al.<sup>(3)</sup>은 급기구와 배기구가 모두 천장에 배치된 경우에 대해 측벽 하단부에 배기구가 배치된 경우와 비교하여 연구하였다. Peng et al.<sup>(4)</sup>과 Kato et al.<sup>(5)</sup>은 청정실 내의 환기효율을 평가하기 위해 새로운 환기변수를 정의하여 환기의 효율성을 평가하였다.

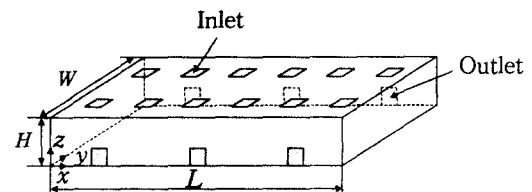
기존의 연구에 따르면 극저습 공조실의 형상 및 급·배기구의 배치가 환기에 큰 영향을 미친다는 것을 알 수 있다. 실제 대부분의 제조공장은 수평 단면이 공정특성상 직사각형 수평 단면을 가진 것이 많으므로 정사각형 수평 단면을 주

로 고려한 기존의 연구들은 실제 극저습 공조실에 적용되기에는 미흡한 면이 있다. 따라서 본 연구에서는 수평 단면이 직사각형인 dry room에서 여러 가지 종횡비(aspect ratio)에 대한 환기성능을 분석하고자 한다. 이때 수평 단면이 직사각형이므로 배기구를 폭방향 측벽에 배치할 것인지, 길이 방향 측벽에 배치할 것인지가 실내 환기에 큰 영향을 미칠 것으로 보고 이에 대해 각각의 환기성능을 조사한다.

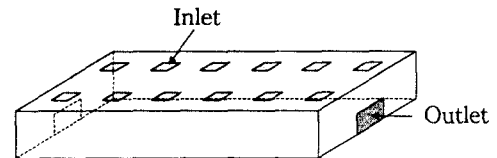
2. 이론해석

2.1 해석모델

해석모델은 Fig. 1에 나타난 것과 같이 대공간의 공조실로 천장에 설치된 12개의 급기구를 통해 저온·저습의 공기가 유입되고 측벽에 배치된 배기구를 통해 배출된다. Type 1에서는 길이방향 양쪽 측벽에 설치된 6개의 배기구에 의해 배출되고, Type 2에서는 폭방향 측벽에 설치된 2개의 배기구에 의해 배출된다. 수평 단면의 종횡비에 따른 실내 환기특성을 분석하기 위해 각 경우에 대한 실내 크기를 Table 1에 나타내었다. 이때 모든 경우에 대하여 실내 체적을 일정하게 유지한다. 각각의 종횡비에서 Type 1과 Type 2에 대해 해석하게 되므로 모두 8개의 모델을 비교 해석하게 된다. 유량은 모든 경우에 대해 일정하며 급·배기구에 대한 세부사항은 Table 2에 나타내었다.



(a) Longitudinal arrangement of outlets (Type 1)



(b) Transverse arrangement of outlets (Type 2)

Fig. 1 Schematic diagram of a dry room.

Table 1 Geometry of a dry room ( $H=2.5$  m)

Aspect ratio, $\beta$	$W \times L$ (m)
2	11.00 × 22.00
3	8.98 × 26.94
4	7.78 × 31.12
5	6.96 × 34.80

Table 2 Design specifications of a dry room

Contents	Dimension	
Inlet	1.0 × 1.0 m (12 EA)	
Outlet	Type 1	1.0 × 1.0 m (6 EA)
	Type 2	3.0 × 1.0 m (2 EA)
Air flow rate	302.5 (m <sup>3</sup> /min)	
Ventilation rate	0.5 (No./min)	

Table 3 Locations of local moisture generation in the reference plane

Aspect ratio, $\beta$		A	B	C
2	x	1.85	5.51	11.0
	y	5.65	5.65	5.65
3	x	2.25	6.75	13.47
	y	4.35	4.35	4.35
4	x	2.60	7.80	15.56
	y	3.75	3.75	3.75
5	x	2.90	8.74	17.40
	y	3.34	3.34	3.34

수분오염은 Table 3에 나타난 실내 3곳(A, B, C)에 대해 국소수분오염 발생에 대하여 조사하였다. 실내의 수분은 작업자나 공정설비에 의해 발생할 가능성이 크므로 바닥에서부터 1 m 높이에서 발생한다고 가정하고, 높이 1 m인 수평면을 기준면(reference plane)으로 하여 수분환기에 대하여 조사한다. 또한 실내 전체에 대하여 균일한 수분 발생을 고려하여 오염농도가 높은 지역, 즉 정체 영역을 조사한다.

## 2.2 지배방정식

급기구의 유속과 수력 반지름을 각각 특성속도와 특성길이로 한 Reynolds 수가  $10^4$  정도 이상 이므로 완전 발달된 난류유동으로 생각하여 물리현상의 이론적 모델링을 위하여 다음과 같은 가

정을 한다.

- (1) 비압축성 정상상태 3차원 난류유동이다.
- (2) 수분의 부력 효과 및 벽면에서의 흡착은 무시한다.
- (3) 유동장내 온도는 상온이고, 수분 발생률은 일정하다.

Dry room 내 기류 및 수분확산을 해석하기 위해 standard  $k-\epsilon$  난류 모델을 도입하였고, 지배방정식은 다음과 같다.

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

$$\frac{\partial u_j u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{P}{\rho} + \frac{2}{3} k \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \nu_t \left\{ \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right\} \right] \quad (2)$$

$$\frac{\partial k u_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \frac{\nu_t}{\sigma_1} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right\} + \nu_t S - \epsilon \quad (3)$$

$$\frac{\partial \epsilon u_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \frac{\nu_t}{\sigma_2} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right\} + C_1 \frac{\epsilon}{k} \nu_t S - C_2 \frac{\epsilon^2}{k} \quad (4)$$

$$\frac{\partial C u_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \left( D + \frac{\nu_t}{\sigma_3} \right) \frac{\partial C}{\partial x_j} \right\} + \dot{m} \quad (5)$$

여기서,  $\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$ ,  $S = \left\{ \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right\} \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$ ,  $\sigma_1 = 1.0$ ,  $\sigma_2 = 1.3$ ,  $\sigma_3 = 1.0$ ,  $C_1 = 1.44$ ,  $C_2 = 1.92$ ,  $C_\mu = 0.09$ 이다. 식(5)에서 수분확산계수  $\nu_t/\sigma_3$ 는 Kira-noudis et al.<sup>(1)</sup>의 연구에서 사용된 값을 이용한다.

## 2.3 경계조건

지배방정식의 수치해석에 적용되는 각종 경계조건을 Table 4에 나타내었다. 모든 경우에 대해 급·배기구에서 유속은 일정하고, 난류 운동에너지

Table 4 Boundary conditions

Inlet	$w_{in} = -0.42$ m/s, $k = 0.005 w^2$ , $\epsilon = C_\mu k^{1.5} / (0.5 D_h)$ , $C = 0$ $v_{out} = \pm 0.84$ m/s,
Outlet	$\frac{\partial k}{\partial z} = 0$ , $\frac{\partial \epsilon}{\partial z} = 0$ , $\frac{\partial C}{\partial z} = 0$
Wall	$u, v, w = 0$ m/s, $\frac{\partial k}{\partial z} = 0$ , $\frac{\partial C}{\partial z} = 0$

지 및 운동에너지 소산은 Kiranoudis et al.<sup>(1)</sup>의 연구에서 사용된 조건을 이용한다. 벽면에서는 no-slip 경계조건과 0 구배조건이 사용된다.

2.4 수치해석

본 연구에서는 유동 및 수분확산에 대한 수치 해석을 위하여 지배방정식을 유한체적법을 이용하여 이산화하였다. 또한, 대류항과 압력항을 계산하기 위해 SIMPLER 알고리즘<sup>(6)</sup>을 사용하였다. 수치적 검증을 위해 Kato et al.<sup>(3)</sup>에 의해 연구된 국소 및 균일오염 발생 모델에 대해 환기효율지수(SVE 1, 2)를 검증한 결과 3% 이내의 상대오차를 보였다. 수렴판정조건으로 연속된 반복계산에서 속도 및 수분농도의 최대 상대오차가 10<sup>-5</sup>보다 작은 경우 수렴된 것으로 판정한다.

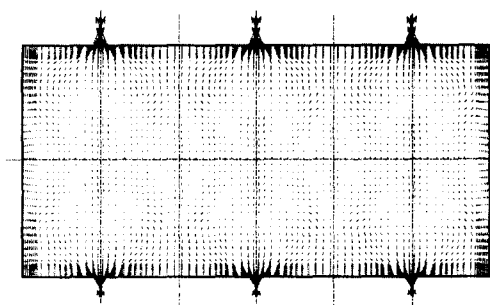
2.5 환기효율

본 연구에서는 환기성능의 평가를 위해 다음의 세 가지의 환기효율지수를 도입한다.

(1) SVE 0(zero scale of ventilation efficiency)

SVE 0는 임의의 위치에서 수분오염농도를 배기구 평균 농도로 나눈 무차원 농도이다. 따라서 이 지수는 국소 수분발생시에는 발생위치에 따른 정성적인 오염분포를 나타낸다. 균일 수분발생시 SVE 0는 재순환 영역 및 급기구 건조공기의 도달시간이 긴 영역에서 큰 값을 나타내므로 오염 가능성이 높은 영역 및 오염 정체영역의 판단을 위해 유용한 평가지수이다. 관련 상관식은 다음과 같다.

$$SVE 0 = \frac{C(X)}{C_e} \tag{6}$$



(a) Type 1

(2) SVE 1(1st scale of ventilation efficiency)

국소 수분오염발생시 공간 내 오염잔류량으로써 배기구 평균 농도에 의해 무차원화된다. 즉, 이 값은 배기구 평균 농도에 대한 실내에 잔류하는 수분량에 비례하고, 오염이 얼마나 빠른 시간 내에 유동에 의해 해소되는지를 간접적으로 나타낸다. 임의의 수분 발생위치에서 SVE 1은 다음과 같다.

$$SVE 1 = \frac{C_0}{C_e} \tag{7}$$

여기서,  $C_0 = \frac{\int_V C(X)dV}{V_0}$

(3) SVE 2(2nd scale of ventilation efficiency)

SVE 2는 국소 수분발생시 수분발생위치에서 평균 오염 반지름으로써 다음과 같이 표현된다.

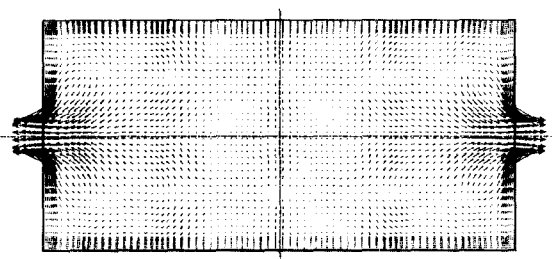
$$SVE 2 = \sqrt{\frac{\int_V (X - X_i)^2 C(X)dV}{C_0}} \tag{8}$$

여기서,  $X_i = \frac{\int_V XC(X)dV}{C_0}$

3. 결과 및 고찰

3.1 유동형태

Dry room 내의 유동형태는 종횡비에 따라서는 큰 차이가 없고, 배기구 배치에 따라서 큰 영향을 받는다. Fig. 2는 종횡비가 2일 때의 Type 1



(b) Type 2

Fig. 2 Velocity vectors in the reference plane ( $\beta=2, z=1.0$ m).

과 2의 기준면에서의 유동장을 나타낸 것이다. 배기구가 길이 방향 측벽에 배치된 Type 1의 경우 측벽에 배치된 다수의 배기구에 의해 실내에 12개의 유동셀을 형성한다. 이 유동셀 내의 유동은 각각 독립적인 재순환 영역을 가지며, 다른 유동셀과 섞이지 않고 인접 배기구로 배출된다. Type 2의 경우는 폭 방향 중앙을 기준으로 좌·우 대칭적인 유동형태를 나타내며, 중앙에서부터 배기구를 향하는 유동이 발생한다. 재순환 유동은 중앙 영역의 급기구 사이에서만 존재하고 그 외의 영역에서는 존재하지 않는다.

3.2 수분 확산형태

3.2.1 국소 수분오염 발생

Fig. 3에 중형비가 2일 때의 국소 수분발생에 대한 무차원 환기변수 SVE 0의 분포를 나타내었

다. Type 1과 2의 두 경우 모두, 수분 발생위치가 길이 방향 중앙 쪽으로 갈수록 수분 확산 영역이 넓어지는 것을 볼 수 있다. Type 1의 경우 각각의 독립적인 유동셀이 수분 확산을 막아 주는 역할을 한다. Type 2의 경우는 좌·우 출구 부근에서 수분발생시에는 수분 확산이 거의 없이 배기구로 배출되는 이상적인 환기특성을 보이나, 중앙부 수분발생시에는 수분이 실내 전 영역으로 확산되는 특성을 나타낸다.

3.2.2 균일 수분오염 발생

Fig. 4에 중형비가 2일 때의 균일 수분발생에 대한 무차원 환기변수 SVE 0의 분포를 나타내었다. Type 1은 배기구가 배치된 길이 방향 측벽 주위의 영역보다는 중앙부분이 습도가 높은 위험 지역으로 나타나지만 Type 2의 경우는 길이 방향 중앙 영역보다는 길이 방향 측벽이 습도 위험

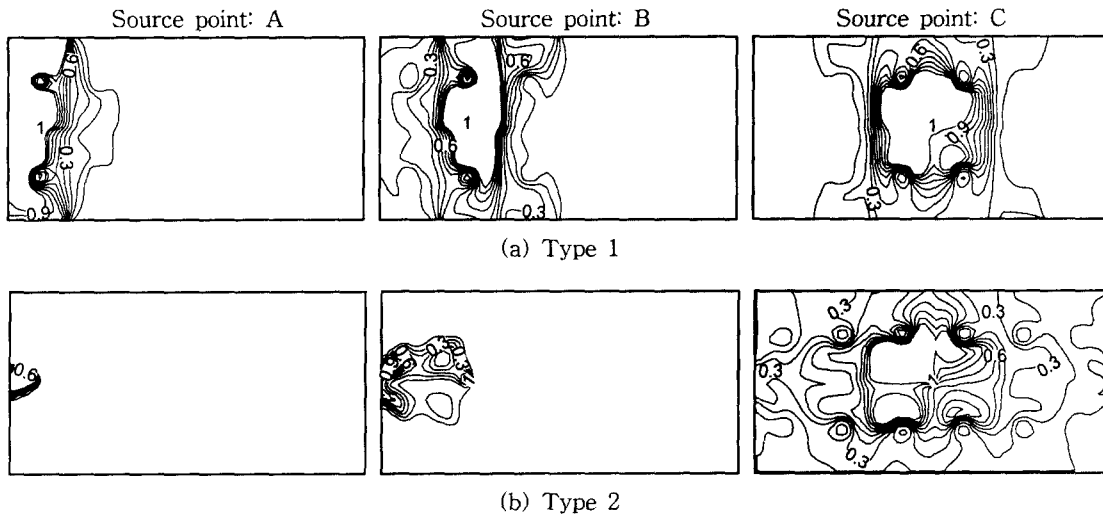


Fig. 3 SVE 0 distributions (source: local moisture generation,  $\beta=2, z=1.0$  m).

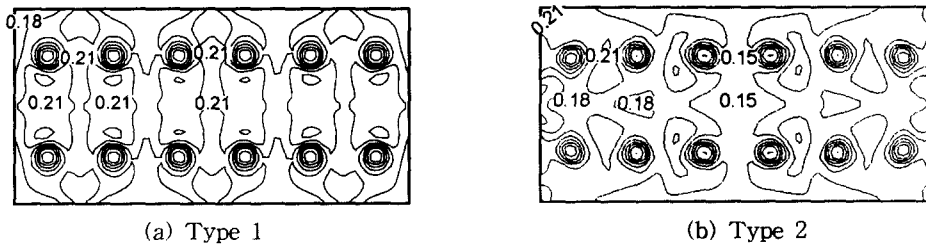


Fig. 4 SVE 0 distributions (source: uniform generation in the whole room,  $\beta=2, z=1.0$  m).

지역으로 나타난다.

3.3 중횡비에 따른 배기구 배치의 영향

중횡비에 따른 SVE 1과 2의 변화를 Fig. 5에 나타내었다. 모든 수분 발생위치에 대해서 중횡비의 증가에 대한 SVE 1값의 변화는 동일한 경향을 갖는다. Type 1의 경우는 중횡비가 커질수록 수분 발생위치와 배기구가 가까워져 실내의 수분배출이 빨라져서 SVE 1값이 감소한다. Type 2의 경우는 중횡비가 커질수록 수분 발생위치와 배기구의 위치가 멀어져 SVE 1값은 증가한다. SVE 2값은 Type 1의 경우는 중횡비가 증가함에 따라 그 변화폭이 크지 않다. 이는 Type 1의 유

동분포 해석에서 살펴보았듯이 중횡비에 따라 유동셀의 모양은 변하지만 유동셀의 크기는 변화하지 않기 때문에 오염의 확산 반지름을 나타내는 SVE 2값의 변화폭은 작다. 그러나 Type 2의 경우는 중횡비가 커질수록 오염 발생위치에서부터 배기구까지의 거리가 멀어짐에 따라 오염 확산영역이 더욱 커져서 SVE 2값은 증가한다. 따라서 Type 2의 경우는 중횡비가 작을수록 실내 환기성능이 더 좋아지는 반면에 Type 1은 중횡비가 클수록 환기성능이 향상된다.

중횡비가 증가할수록 Type 1은 환기성능이 향상되고 Type 2는 나빠짐으로 수평 단면이 직사각형일 경우 Type 1과 2에 대한 임계중횡비(critical aspect ratio)가 존재한다. Fig. 5에서 중횡

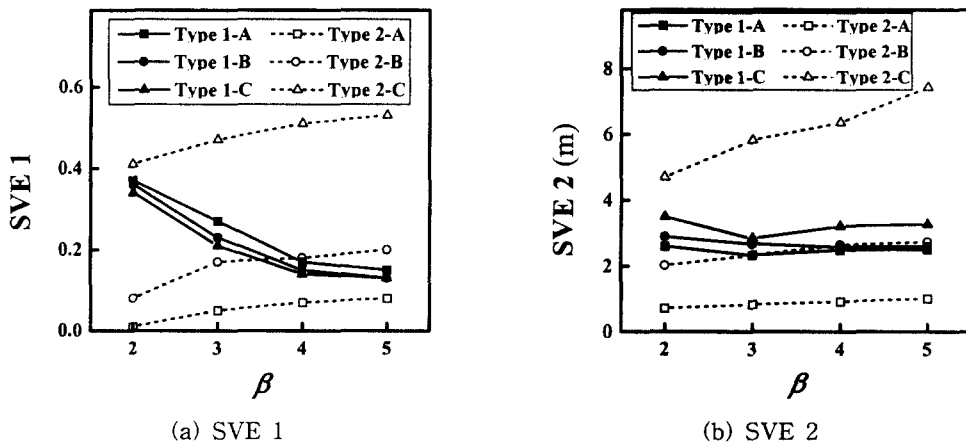


Fig. 5 Scale of ventilation efficiency with aspect ratio.

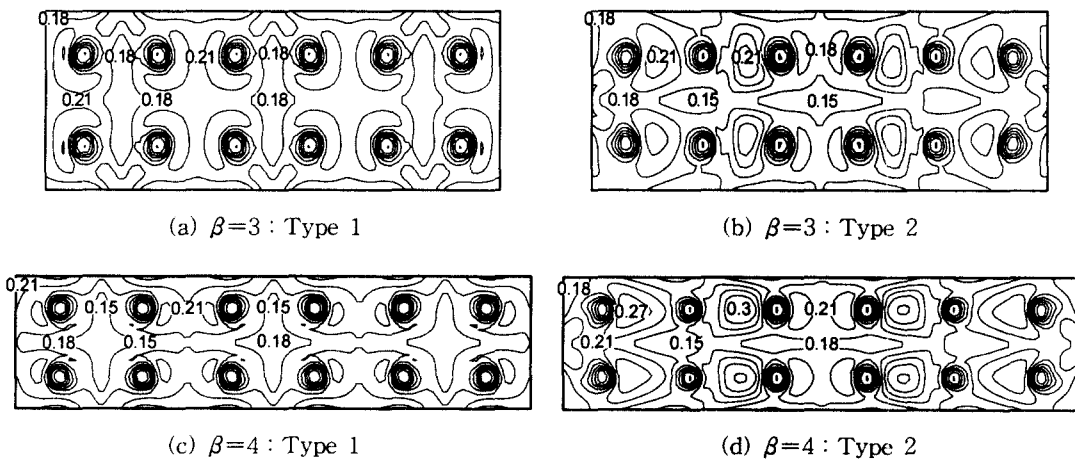


Fig. 6 SVE 0 distributions (source: uniform generation in the whole room,  $z=1.0$  m).

비가 3 이하에서는 수분 발생위치 A, B에서 수분이 발생할 경우 Type 2가 환기가 더 잘되며, 중횡비가 4 이상이 되면 수분 발생위치 B, C에서 수분이 발생할 경우 Type 1의 환기성능이 더 나아진다.

Fig. 6에 균일 수분발생에 대한 중횡비가 3, 4인 경우의 기준면에서의 SVE 0 분포를 나타내었다. 중횡비가 3인 경우는 Type 2가 Type 1보다 나은 환기성능을 갖지만 중횡비 4에서는 Type 2보다는 Type 1이 더 나은 환기성능을 갖는다. Type 2의 경우 중앙지역에서부터 배기구로 향하는 유동특성으로 재순환 영역이 Type 1보다 작게 존재하므로 중횡비가 작을 경우 환기성능이 좋아진다. 그러나 중횡비가 4 이상이 되면 중앙에서부터 배기구까지의 거리가 너무 멀어져 Type 2보다는 Type 1과 같은 배기구 배치가 실내 환기에 더 유리하다. 따라서 중횡비가 3 이하일 경우에는 폭 방향 측벽에 배기구를 배치해야 하며, 중횡비가 4 이상일 경우에는 길이 방향 측벽에 배기구를 배치하는 것이 바람직하다.

### 3.4 환기율의 변화에 따른 환기성능

Fig. 7은 중횡비가 3일 때의 환기율(ventilation rate)의 변화에 따른 SVE 1의 분포를 나타낸 것이다. 실내 전체에 균일 수분발생시, Type 1과 2의 SVE 1은 거의 동일한 값을 가지며, 환기율이 증가함에 따라 감소하는 경향도 비슷하게 나타난다.

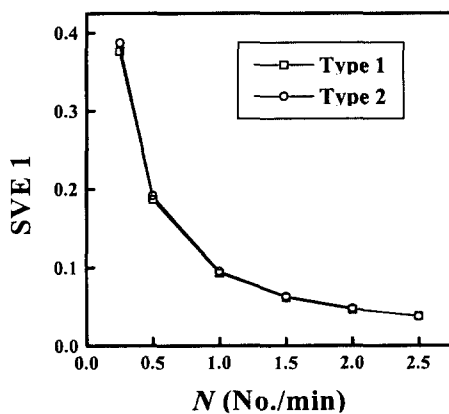


Fig. 7 SVE 1 for various ventilation rates (source: uniform generation in the whole room,  $\beta=3$ ).

다. 기본 환기율(0.5 No./min)에서 유량을 증가시키면, 환기율 1.5 No./min까지는 SVE 1값이 급격히 감소하나 그 이상에서는 감소폭이 점점 줄어 환기율의 증가에 따른 환기 개선효과가 크지 않다. 환기율이 1.5 No./min인 경우 기본 환기율일 때보다 SVE 1값이 67.0% 감소하였으나, 2 No./min인 경우 기본 환기율일 때보다 75.2% 감소함으로써 환기율의 증가에 따른 SVE 1값의 개선이 10% 이하가 된다. 따라서 실내 환기성능을 향상시키기 위한 환기율은 1.5 No./min 이하가 적절한 것으로 생각된다.

### 4. 결 론

본 연구는 극저습 공조실인 dry room에서 중횡비의 변화에 따른 배기구 배치의 영향을 환기 효율지수를 이용해 수치적으로 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 길이 방향 측벽에 배기구가 배치되면 다수의 재순환 영역의 발생으로 수분배출은 어렵지만, 유동셀의 영향으로 오염확산은 방지할 수 있다.
- (2) 폭 방향 측벽에 배기구가 배치되면 재순환 영역의 감소로 수분배출은 용이하지만, 중앙 영역에서 수분발생시 수분확산 영역이 넓어진다.
- (3) 환기성능을 향상시키기 위해서는 중횡비가 3 이하일 경우에는 폭 방향 측벽에 배기구를 배치하고, 중횡비가 4 이상일 경우에는 길이 방향 측벽에 배기구를 배치하여야 한다.
- (4) 실내 환기성능을 향상시키기 위한 급기유량의 증가는 환기율 1.5 No./min까지가 적절하다.

### 후 기

이 논문은 2001년 한양대학교 교내 연구비 지원으로 연구되었음.

### 참고문헌

1. Kiranoudis, C. T., Karathanos, V. T. and Markatos, N. C., 1999, Computational fluid dynamics of industrial batch dryers of fruits, *Drying Technology*, Vol. 17, No. 1-2, pp. 1-25.
2. Murakami, S. and Kato, S., 1988, Numerical

- study on diffusion field as affected by arrangement of supply and exhaust openings in conventional flow type clean room, ASHRAE Transactions, Vol. 95, Part 2, pp. 113-127.
3. Kato, S. and Murakami, S., 1992, Numerical study on diffusion in a room with a locally balanced supply-exhaust airflow rate system, ASHRAE Transactions, Vol. 98, Part 1, pp. 218-238.
  4. Peng, S. H., Holmberg, S. and Davidson, L., 1997, On the assessment of ventilation performance with the aid of numerical simulations, *Building and Environment*, Vol. 32, No. 6, pp. 497-508.
  5. Kato, S. and Murakami, S., 1988, New ventilation efficiency scales based on spatial distribution of contaminant concentration aided by numerical simulation, ASHRAE Transactions, Vol. 94, Part 2, pp. 309-330.
  6. Patankar, S. V., 1980, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, Taylor & Francis.