

Dry room내 수분환기에 대한 수치적 연구

이 관 수[†], 임 광 옥, 정 영 식^{*}

한양대학교 기계공학부, ^{*}한양대학교 대학원

Numerical Analysis of Moisture Ventilation in the Dry Room

Kwan-Soo Lee[†], Kwang-Ok Lim, Young-Sick Jung^{*}

School of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul 133-070, Korea

^{*}Graduate School, Department of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul 133-070, Korea

(Received June 9, 2000; revision received August 25, 2000)

ABSTRACT: In this paper, the characteristics of moisture ventilation in the lithium ion battery manufacturing dry room are studied numerically using standard $k-\epsilon$ turbulence model. Both the steady-state and the unsteady behaviors of moisture ventilation are analyzed by considering local and uniform moisture generation. In order to evaluate the characteristics of moisture ventilation, three scales of ventilation efficiency and characteristic ventilation time are presented from the numerical results. It was shown that moisture distribution was dependent strongly on the flow field. The characteristics of moisture ventilation were improved by 20% and 40% in terms of the 1st scale of ventilation efficiency (SVE1) and the 2nd scale of ventilation efficiency (SVE2), respectively, through the modifications of design variables such as the addition of inlets, outlets and partition. A significant improvement in the characteristic ventilation time and the moisture exhaust efficiency was also made by these modifications.

Key words: Dry room(저습 공조실), Lithium ion battery(리튬 이온 전지), Scale of ventilation efficiency(환기효율 지수), Moisture contamination(수분오염)

기 호 설 명

C : 수분 농도, [kg/m³]
 \bar{C} : 임의의 시간에서 실내 평균농도 [kg/m³]
 C_0 : 실내 수분 잔류량 [kg]
 C_i : 초기 평균농도 [kg/m³]
 C_s : 배기구 평균농도 [kg/m³]
 C_1, C_2, C_μ : standard $k-\epsilon$ 모델의 실험 상수

D_h : 급기구의 수력학적 지름 [m]
 k : 난류 운동에너지
 L, H, W : 길이, 높이 및 폭 [m]
 P : 압력 [N/m²]
 Re : Reynolds 수, $D_h |w_{in}| / \nu$
 t, t_{90} : 시간, 특성 환기시간 [s]
 u, v, w : x, y 및 z 의 속도 성분 [m/s]
 v_{out}, w_{in} : 배기구 및 급기구 평균유속 [m/s]
 V_0 : dry room의 전체 체적 [m³]
 x, y, z : 길이, 폭 및 높이 방향 좌표
 X : 위치
 X_i : 수분분포의 농도 중심 [m]

[†] Corresponding author

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

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

그리스 문자

- ρ : 밀도 [kg/m^3]
- ν : 층류 동점성계수 [m^2/s]
- ν_t : 난류 동점성계수 [m^2/s]
- ϵ : 난류 소산에너지
- $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$: k, ϵ, C 의 난류 Prandtl/Schmidt 수
- η : 수분 배출효율

하첨자

- i, j : 텐서 인덱스

1. 서 론

과일, 흡습성 약품 및 리튬이온 전지와 같은 습도에 민감한 제품의 제조환경으로 불활성 가스 실 등이 많이 활용되어 왔다. 그러나 최근에는 건조공기를 강제 순환시켜 상대습도가 3% 미만으로 유지되는 dry room내에서 제조하는 것보다 생산성이 높아 이의 활용이 점차 증가하는 추세에 있다. 이처럼 습도관리가 중요한 제품의 품질향상과 생산성 증대를 위해 제조공정을 저습·항온의 기류조건으로 유지시켜야 하지만, 이러한 건조설비는 일반 건조설비에 비하여 초기 설비비 및 운전비용 측면에서 문제점을 안고 있다. 따라서 관련 제반비용과 제조공정의 열적 부하 및 습도오염 등에 능동적으로 대처하기 위한 건조실의 설계와 유지관리에 관한 연구의 필요성이 증대되고 있다

기류 및 수분확산에 관한 연구로 Kiranoudis et al.⁽¹⁾은 산업용 일괄식 건조로(batch dryer)에서 과일의 제습 과정을 수치해석 기법을 이용하여 건조로 내부의 균일 유동 및 건조로 형상의 중요성을 강조하였다. Theologos et al.⁽²⁾은 유동층 건조로에서 2상 유동을 포함한 열 분포 및 수분확산에 대한 수학적 모델을 연구하였다. 그러나 이상의 연구결과들은 건조로 내 수분 분포에 대한 정성적인 분석에 초점을 두었다

본 연구에서는 저습·항온의 기류조건을 필요로 하는 리튬 이온 전지 제조공정용 dry room내에서 제품의 품질문제 및 환경안전에 중요한 변수가 되는 수분오염의 정상 및 비정상 거동을 분

석한다. 대공간 3차원 기류 및 수분오염 확산에 대한 수치적 연구와 환기효율 지수평가를 통하여 수분의 효율적인 환기제어를 연구한다.

2. 이론해석

2.1 해석모델

해석모델은 Fig. 1 및 Table 1에서처럼 대공간의 생산 건조실로 천장에 설치된 다수의 다공판(punching plate)을 통해 저습·항온의 공기가 유입되고, 양 측벽에 설치된 12개의 강제순환용 배기구로 배기된다. 기류특성을 분석하기 위해 공정용 설비와 같은 유동 장애물과 공정 발생 열원은 본 연구의 목적이 기본 유동분석에 있으므로 해석의 편의를 위하여 배제하였다.

수분오염 발생은 발생위치 측면에서 두 가지 방법에 의해 고려되었다. 첫째는 수분이 공정용 설비로부터 혹은 작업자에 의하여 발생할 가능성이 높으므로 바닥으로부터 높이가 1m인 수평면

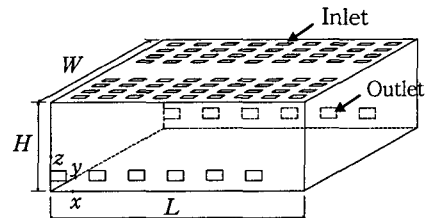


Fig. 1 Schematic diagram of a dry room.

Table 1 Design specifications of a dry room

Contents	Unit	Dimension
Geometry ($L \times H \times W$)	m	51.5 × 27.63 × 2.4
Inlet (1.29 × 1.25 m)	EA	72
Outlet (2.5 × 0.81 m)	EA	12
Air flow rate	m^3/min	1,760
Ventilation number	N/min	0.5

Table 2 The positions of local moisture generation in the reference plane ($z=1\text{m}$)

	A	B	C	D	E
x	3.65	15.25	26.85	38.45	50.05
y	13.82	13.82	13.82	13.82	13.82

을 기준면(reference plane)으로 정의하여 수분환기를 분석하였다. 따라서 국소 수분 발생위치는 Table 2와 같이 기준면의 폭방향 중앙부를 고려하였다. 둘째는 전체에서 균일한 수분발생을 고려하여 상대적으로 오염농도가 높은 지역, 즉 기류 정체영역을 조사하였다.

2.2 지배방정식

급기구의 유속과 수력반지름을 각각 특성속도와 특성길이로 한 Reynolds 수가 10^4 정도 이상이므로 완전 발달된 난류유동이 예상되며 물리현상의 이론적 모델링을 위하여 다음과 같은 가정을 하였다.

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

dry room내 기류 및 수분확산을 해석하기 위해 standard $k-\epsilon$ 난류 모델을 도입하였고, 지배방정식은 다음과 같다.

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

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

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

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

Table 3 Boundary conditions

Inlet	$w_{in} = -0.25 \text{ m/s}, k = 0.005 w^2$ $\epsilon = C_\mu k^{1.5} / (0.5 D_h), C = 0$
Outlet	$v_{out} = \pm 1.2 \text{ m/s}, \frac{\partial k}{\partial z} = 0,$ $\frac{\partial \epsilon}{\partial z} = 0, \frac{\partial C}{\partial z} = 0$
Wall	$u, v, w = 0 \text{ m/s}, \frac{\partial k}{\partial z} = 0, \frac{\partial C}{\partial z} = 0$

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

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 수분의 비정상적인 발생을 고려하여 비정상 항이 추가되었고, 수분 확산계수 ν_t / σ_3 는 Kiranoudis et al.⁽¹⁾의 연구에서 사용된 값을 이용하였다.

2.3 경계조건

지배방정식의 수치해석에 적용되는 각종 경계조건은 Table 3과 같이 정의된다. 급·배기구에서 유속은 일정하고, 난류 운동에너지 및 운동에너지 소산은 Kiranoudis et al.⁽¹⁾의 연구에서 사용된 조건을 이용하였다. 벽면에서는 No-slip 경계조건과 Neumann 경계조건이 사용되었다.

2.4 수치해석 및 검증

본 연구에서는 유동 및 수분확산에 대한 수치해석을 위하여 지배방정식을 유한체적법을 이용하여 이산화하였다. 또한, 대류항과 압력항을 계산하기 위해 SIMPLER 알고리즘⁽³⁾을 사용하였다. 격자의존성의 조사를 위해 비균일한 $79 \times 43 \times 19$, $105 \times 61 \times 20$ 그리고 $121 \times 71 \times 22$ 의 격자계를 이용하여 해석한 결과, 환기효율 지수의 변화가 2% 이내였다. 따라서 계산시간 및 수치적 정확성을 고려하여 $105 \times 61 \times 20$ 개의 엇갈린 제어체적을 이용하였다. 수치적 검증을 위해 Kato and Murakami⁽⁴⁾에 의해 연구된 환기효율 지수를 검증한 결과 5% 이내의 상대오차를 보였다. 수렴 판정조건으로 연속된 반복계산에서 속도 및 수분농도의 상대오차가 10^{-5} 보다 작은 경우 수렴된 것으로 판정하였다.

2.5 환기효율

Dry room내에서 환기목적은 저습·향온의 공기를 실내에 급기하여 발생된 열과 수분오염을 신속히 배출시키는 데 있다. 따라서 본 연구에서

는 이러한 환기성능의 평가를 위해 다음의 세 가지의 환기효율 지수를 도입하였다.

(1) SVE0(zero scale of ventilation efficiency)

SVE0는 임의의 위치에서 수분오염 농도를 배기구 평균농도로 나눈 무차원 농도이다. 따라서 이 지수는 국소 수분발생 시 발생위치에 따른 정상적인 오염분포를 나타낸다. 균일 수분발생시 SVE0는 재순환 영역 및 급기구 건조공기의 도달 시간이 긴 영역에서 큰 값을 나타내므로 오염가능성이 높은 영역 및 오염 정체영역의 판단을 위해 유용한 평가 지수이다. 관련 상관식은 다음과 같다.

$$SVE0 = \frac{C(X)}{C_s} \quad (6)$$

(2) SVE1(1st scale of ventilation efficiency)

국소 수분오염 발생시 공간내 오염 잔류량으로써 배기구 평균농도에 의해 무차원화된다. 즉, 이 값은 오염배출량에 대한 실내에 잔류하는 수분량에 비례하고, 오염이 얼마나 빠른 시간 내에 유동에 의해 해소되는지를 간접적으로 나타낸다. 임의의 수분 발생위치에서 SVE1은 다음과 같다.

$$SVE1 = \frac{C_0}{C_s V_0} \quad (7)$$

여기서, $C_0 = \int_V C(X) dV$

(3) SVE2(2nd scale of ventilation efficiency)

SVE2는 국소 수분발생시 수분 발생위치에서 평균 오염반지름으로써 다음과 같이 표현된다.

$$SVE2 = \sqrt{\frac{\int_V \{X - X_i\}^2 C(X) dV}{C_0}} \quad (8)$$

여기서, $X_i = \int_V X C(X) dV / C_0$

3. 결과 및 고찰

3.1 기본모델 분석

실제 가동중인 제조공정을 기본모델(basic model)로 선정하여 유동 및 수분오염 확산에 대한 분석을 수행하였다.

3.1.1 유동 형태

실내유동은 천정에 설치된 다수의 급기구로 인해 복잡한 유동셀을 형성한다. 또한, 실내 폭방향 중앙부의 넓은 비급기 영역과 배기구 위치의 편중 배치로 인하여 길이방향(-x 방향)으로 편향되는 특성이 나타난다. 이러한 현상은 Fig. 2에 나타난 속도 및 압력분포를 통해 이해할 수 있다.

Fig. 2(a)는 실내에 다수의 재순환 영역이 천장에 설치된 많은 급기구들로 인해 발생됨을 보여

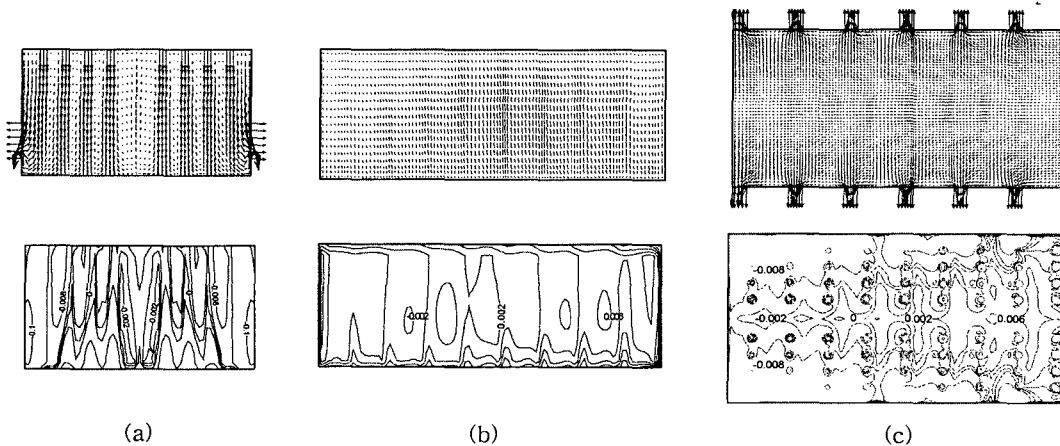


Fig. 2 The velocity vectors and contours of pressure in the vertical and horizontal planes: (a) y-z plane : x=26.845 m; (b) x-z plane : y=13.815 m; (c) x-y plane : z=1 m.

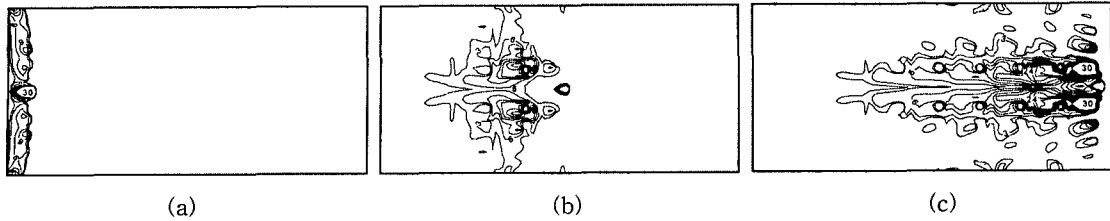


Fig. 3 SVE0 in the reference plane for local moisture generation in the basic model: (a) point A ; (b) point B ; (c) point C.

준다. 또한, Fig. 2(b)와 (c)에서는 전체적으로 배기구가 편중된 방향으로 강한 유동 편향현상을 볼 수 있다. 특히, Fig. 2(c)의 압력분포를 통해 폭방향 중앙부에서도 배기구 비균일 배치로 인해 유동 편향현상이 발생됨을 관찰할 수 있다.

3.1.2 수분오염의 농도분포

(1) 국소 수분오염 발생

Fig. 3은 Table 2의 선정 위치에서 국소 수분 오염 발생시 무차원 농도분포 즉, SVE0를 기준면에 나타낸 것이다. 수분확산은 유동특성에서 나타난 편향현상으로 인해 전반적으로 배기구가 편중된 좌측 벽면을 향해 치우쳐 있다. 따라서 수분확산의 편향현상은 수분오염 발생위치가 우측 벽면에 접근할수록 더욱 강해져서 Fig. 3(c)에서는 실내 공간의 상당한 영역이 오염되는 것을 확인할 수 있다. 이러한 현상은 수분오염이 가장

인접한 배기구를 향해 작은 오염영역을 가지며 신속하게 배출되는 것이 이상적이라고 판단할 때 바람직하지 못한 환기특성이라고 할 수 있다.

본 논문에서 나타내지 않았지만, 수분발생이 배기구 근처에서 발생할 경우에는 수분오염이 인접 배기구를 향해 신속하게 배출된다.

(2) 균일 수분오염 발생

Fig. 4는 실내 전체에서 균일한 수분발생 시 SVE0를 나타낸다. Fig. 4(a)를 통해 기준면의 폭방향 중앙부가 심하게 오염되는 현상을 볼 수 있다. 이는 천정에서의 비급기로 인한 재순환 유동의 형성에 기인한다. Fig. 4(b)의 천장영역에서도 수분배출이 급기구 건조공기의 긴 도달시간과 느린 재순환 유동으로 인해 용이하지 않은 환기특성을 보이고 있다. 따라서 dry room내 오염 위험지역은 천장과 폭방향 중앙부로 판단할 수 있고, 이 영역에 대한 환기특성의 개선이 요구된다.

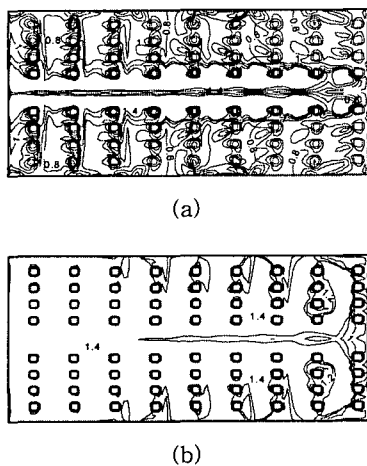


Fig. 4 SVE0 for uniform moisture generation in the basic model: (a) $z=1$ m; (b) $z=2.4$ m.

3.2 설계인자 변경효과

기본모델은 유동 편향현상과 오염 위험지역의 형성으로 바람직하지 못한 환기특성이 나타났다. 따라서 환기특성의 개선을 위해 기본모델과 동일

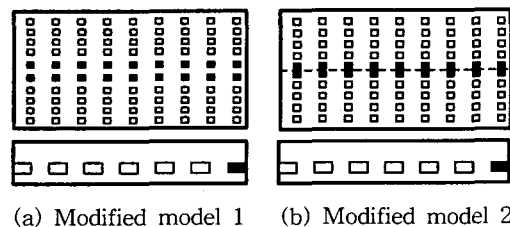


Fig. 5 Modification of design variable: (a) addition of inlets and outlets (solid blocks); (b) addition of inlets, outlets and partition (dashed line).

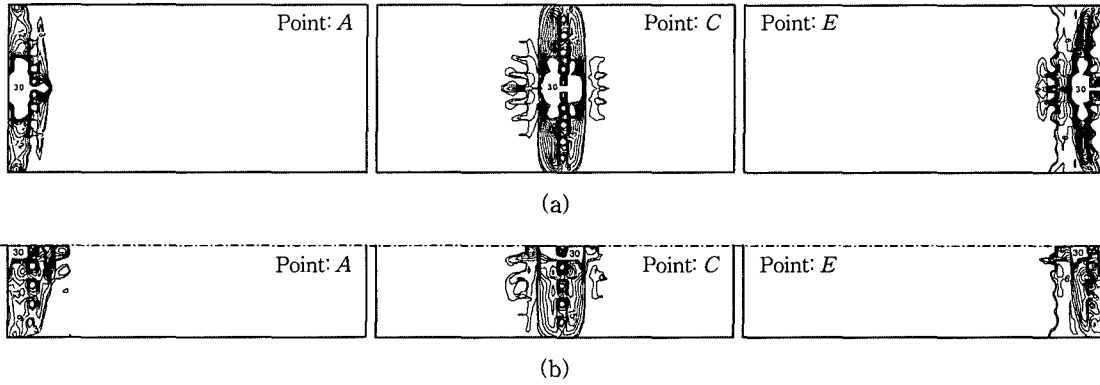


Fig. 6 SVE0 in the reference plane for local moisture generation: (a) modified model 1; (b) modified model 2.

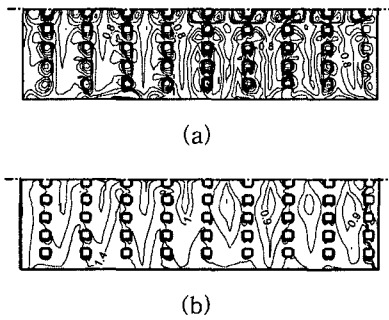


Fig. 7 SVE0 for uniform moisture generation in the modified model 2: (a) $z=1$ m; (b) $z=2.4$ m.

유량 하에서 설계인자 변경을 고려하였다.

Fig. 5는 수정모델들의 설계인자 변경내용을 나타낸 것이다. 유동 편향현상 및 재순환 영역의 감소를 통한 환기특성의 개선을 위해 수정모델 1은 급·배기구 추가를 고려하였고, 수정모델 2는 급·배기구 및 대칭 단면의 분할벽 추가를 동시에 고려하였다. 여기서 수정모델 2는 수치적 해석 영역이 분할벽을 중심으로 완전히 대칭이므로 한쪽 공간만을 해석영역으로 고려하였다.

Fig. 6은 수정모델들의 수분 발생 위치별 SVE0를 나타낸 것이다. 기본모델과 비교할 때 상당히 감소된 유동 편향현상으로 인해 오염영역의 크기 측면에서 개선된 특성을 볼 수 있다. 그러나 수정모델 1은 고농도의 수분이 폭방향 중앙부에 분포한다. 수정모델 2는 분할벽 설치로 인해 용이한 수분배출 특성 및 오염확산의 차단효과를 얻

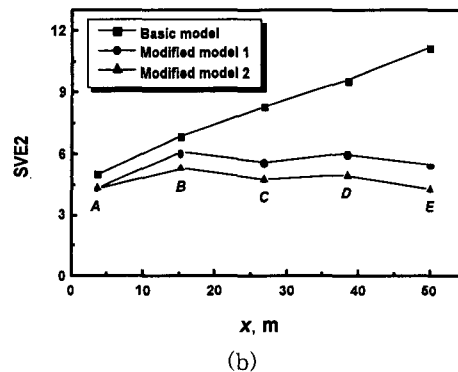
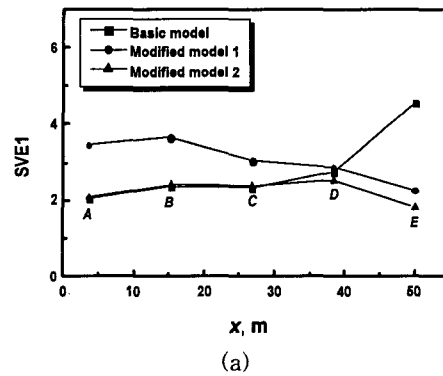


Fig. 8 SVE1 and SVE2 vs. the positions of local moisture generation.

을 수 있다.

Fig. 7은 수정모델 2에서 균일한 수분오염 발생시 SVE0를 나타낸 것이다. 기본모델의 농도분포 절대값과 비교할 때 천장과 폭방향 중앙부가

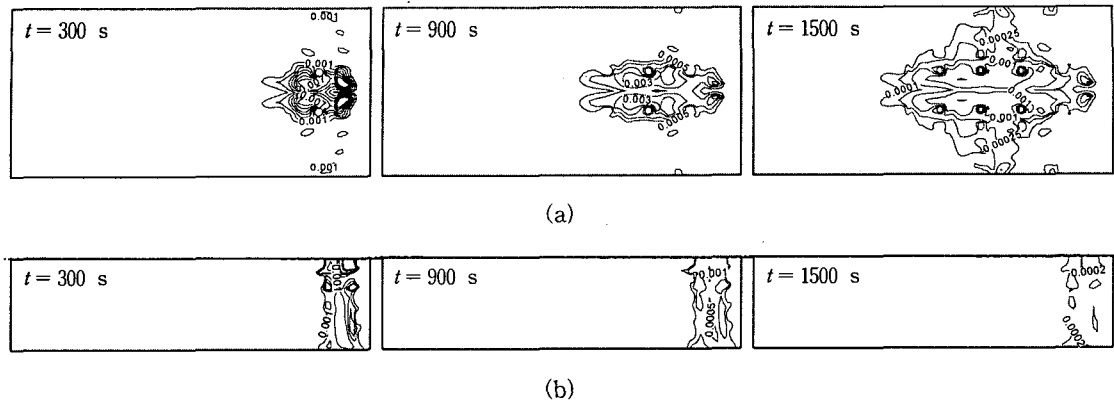


Fig. 9 Moisture concentration in the reference plane for unsteady local moisture generation of point *E*: (a) basic model; (b) modified model 2.

상대적으로 수분농도가 낮아 개선된 환기특성을 나타낸다. 이것은 급기구 건조공기가 실내 공간을 전반적으로 균일하게 환기시켰기 때문이다.

환기특성의 개선을 위해 고려된 수정모델들은 수분오염영역의 크기측면에서 상당히 개선된 결과를 보이고 있다. 따라서 환기효율 지수의 비교를 통해 각 모델의 환기특성을 비교해 보도록 한다.

Fig. 8(a)는 무차원 환기효율지수, SVE1을 모델별로 비교한 것이다. 수정모델 1의 경우, SVE1은 다른 모델에 비해 큰 값을 나타낸다. 이것은 배기구 추가에 따른 배기구 평균유속의 감소 때문이다. 그러나 수정모델 2에서 고려된 분할벽의 추가는 수분배출을 용이하게 한다. 따라서 SVE1은 기본모델과 수정모델 1에 비해 평균 20% 이상 감소되며, 특히 수분 발생위치 *E*에서는 기본모델에 비해 상당히 개선된 결과를 보이고 있다.

Fig. 8(b)는 수분발생 위치별 오염 반지름을 모델별로 비교한 것이다. 수정모델들의 오염반지름은 유동 편향현상의 상당한 감소로 인해 기본모델 보다 평균 40% 이상 감소한다. 특히 수정모델 2의 경우 분할벽 추가에 따른 수분확산의 차단효과로 가장 개선된 결과를 보인다.

3.3 오염확산의 비정상 거동

3.3.1 국소 수분발생

정상상태 수분오염의 발생시 전술한 수정모델들을 통해 개선된 환기특성을 얻을 수 있다. 그러나 실제품 생산시 일정 시간 동안의 수분발생

에 따른 오염확산이 상당히 현실적으로 받아들여진다. 따라서 수분확산의 비정상 거동에 따른 정량적인 분석을 통해 가장 좋은 환기특성을 가지는 것으로 나타난 수정모델 2와 기본모델의 환기특성을 비교 분석해 보도록 한다.

해석을 위해 사용된 수분 발생량은 국소 영역에 1초 동안 1 kg이고, 수분 발생위치는 Table 2의 선정 위치를 고려하였다. 또한, 수분 발생량의 90%가 배출될 때의 시간을 특성 환기시간(t_{90})으로 정의하여 평가지수로 이용하였다.

Fig. 9는 수분 발생위치 *E*에서 시간에 따른 모델별 농도분포를 나타낸 것이다. 그림에서 기본모델의 경우 긴 오염 배출시간이 요구될 뿐만 아니라 수분이 실내의 상당한 영역을 오염시키면서 환기된다. 반면 수정모델 2의 경우 수분이 상대적으로 적은 오염영역을 가지고 신속하게 배출되는 현상을 보인다.

Fig. 10은 수분 발생위치(*A~E*)에 따른 모델별 특성 환기시간을 나타낸 것이다. 기본모델의 특성 환기시간은 수분발생 위치에 따라 $5 \times 10^2 \sim 4 \times 10^3$ 초 정도가 소요되고, 발생위치가 우측벽면에 접근할수록 길어진다. 이것은 그림 9(a)의 결과에서 보듯이 발생된 수분이 유동 편향현상과 폭방향 중앙부의 넓은 재순환 영역의 형성으로 인해 오랫동안 정체하기 때문이다. 그러나 수정모델 2의 경우 특성 환기시간이 오염 발생위치에 관계없이 1,000초 정도로 거의 일정하다. 특히, 수분 발생위치 *E*에서의 특성 환기시간은 기본모델에 비해 70% 정도 감소한다.

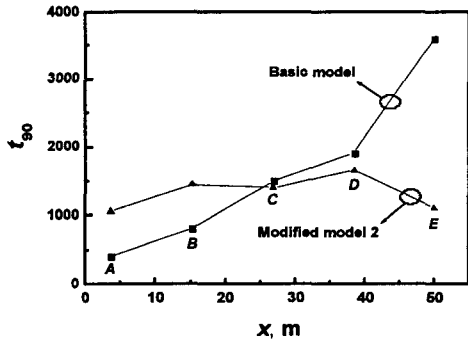


Fig. 10 Characteristic ventilation time vs. the positions of local moisture generation.

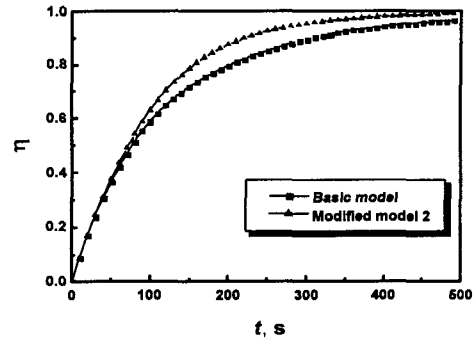


Fig. 11 Moisture exhaust efficiency as a function of time.

3.2.2 균일 오염 분포시 배출특성

생산설비 재가동시 적절한 생산환경 유지를 위해 소요되는 환기시간은 일반 생산 공조실 설계시 주요 관심사항이다. 따라서 실내 전체에서 균일한 오염분포시 오염 배출의 비정상 거동을 분석해 보도록 한다. 오염 배출특성의 평가를 위해 도입된 수분 배출효율⁽⁶⁾은 수분 발생량에 대한 배출량과의 비로써 농도로 표현하면 다음과 같다.

$$\eta = 1 - \frac{\bar{C}}{C_i} \quad (9)$$

Fig. 11은 시간에 따른 모델별 수분 배출효율을 나타낸 것이다. 350초 이내에 수분 발생량의 90% 가량이 배출되는 것을 볼 수 있다. 그러나 그 이후의 시간에서는 수분 배출이 점차 둔화되는 현상을 보인다. 수분 배출효율이 90% 이상일 때의 모델별 특성 환기시간을 비교하면, 수정모델 2는 기본모델 보다 25% 정도 감소된 결과를 나타낸다.

4. 결 론

본 연구는 저습·항온의 기류조건을 필요로 하는 리튬 이온 전지 제조공정용 dry room내의 수분환기 특성을 환기 효율지수를 도입하여 수치적으로 분석하였다. 정상 및 비정상 수분확산 거동이 작업자 및 생산설비로부터의 수분발생을 고려하여 조사되었고, 수정모델들과 환기특성을 비교하여 다음의 결과를 얻었다.

(1) 수분확산은 유동장에 강하게 의존한다.

(2) 기본모델은 유동 편향현상으로 인해 넓은 수분오염 영역이 발생하고, 천장과 폭방향 중앙부가 다른 영역에 비해 심각한 오염 위험지역으로 나타났다.

(3) 수정모델 2는 기본모델에 비해 SVE1과 SVE2에서 각각 20%와 40% 정도 개선된 환기특성을 보였다. 특히 이 모델의 경우, 특성 환기시간이 수분 발생위치와 관계없이 1000초 정도로 거의 일정하고, 생산라인 재가동시 기본모델보다 초기오염의 90%를 배출하는 데 걸리는 시간을 약 25% 줄일 수 있다.

후 기

이 연구는 한국과학재단 지정 한양대학교 최적 연구신킨기술연구센터와 1999년도 두뇌한국21사업의 지원으로 수행되었음.

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. Theologos, K. N., Maroulis, Z. B. and Markatos, N. C., 1997, Simulation of Transport Dynamics in Fluidized-Bed Dryers, Drying Technology, Vol. 15, No. 5, pp. 1265-1291.
3. Patankar, S. V., 1980, Numerical Heat Transfer, McGraw-Hill.

4. 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.
5. Lage, J. L., Bejan, A. and Anderson, R., 1991, Efficiency of Transient Contaminant Removal from a Slot Ventilated Enclosure, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 34, No. 10, pp. 2603-2615.