

Dry Room내 기류 및 수분오염에 관한 수치적 연구

이관수* · 임광옥* · 정영식**

Numerical analysis on the flow field and moisture contamination in a dry room

Kwan-Soo Lee, Kwang-Ok Lim and Young-Sick Jung

Key Words: dry room(저습공조실), Lithium ion battery(리튬이온전지), Scale of ventilation efficiency(환기효율지수), Moisture contamination(수분오염)

Abstract

The flow and the moisture contamination of the dry room in the manufacturing process of lithium ion battery are analyzed numerically by finite volume method. Standard $k-\epsilon$ turbulent model widely applied in predicting turbulent flow is adopted in this study. Moisture contamination and distribution are studied by assumption of two cases; one-point generation and uniform generation throughout the room. To evaluate ventilation efficiency on moisture contamination, scales of ventilation efficiency are introduced. From these analyses, moisture contamination is strongly dependent on the flow field and the radius of moisture contamination can be reduced by closing a part of outlets in a dry room.

1. 서론

리튬이온 전지와 같은 습도에 민감한 제품을 생산하거나 혹은 제약산업과 같이 흡습성 제품의 생산에 있어서 기존에는 불활성 가스실 등을 활용하여 왔다. 그러나 최근에는 저습공기를 강제 순환시켜 상대습도가 3% 미만으로 유지되는 dry room에서 제조하는 것이 보다 생산성이 높으므로 이의 활용이 점차 증가하는 추세이다. 이처럼 습도관리가 매우 중요한 제품의 품질향상과 생산성 증대를 위하여 제조공정을 저습·항온 기류조건으로 유지하여야 한다. 그러나 저습·항온용 공조설비는 일반 공조설비에 비하여 초기 설비비 및 운전비용이 상승하는 문제점을 안고 있다. 따라서 저비용과 제조공정의 열적 부하 및 습도오염 등에 능동적으로 대처가 가능한 공조실의 설계 및 유지관리에 관한 연구의 필요성이 증대되

고 있다.

기류 및 수분확산에 관한 연구로 Kiranoudis 등 [1]은 산업용 일괄식 건조로(batch dryer)에서 과일의 제습과정을 수치해석 기법을 이용하여 건조로 내부의 균일유동 및 형상의 중요성을 강조하였고, Theologos 등[2]은 유동층 건조로에서 열분포 및 수분확산에 대해 연구하였다. 그러나 이상의 연구들은 건조로내 수분의 개략적인 분포에 초점을 두었다.

본 연구에서는 저습·항온의 기류조건을 필요로 하는 리튬이온 전지의 제조공정용 dry room에서 제품의 품질문제 및 환경안전에 중요한 변수가 되는 수분오염 거동을 분석하였다. 대공간 3차원 기류유동 및 수분오염 확산에 대한 수치적 연구와 환기효율 지수평가[3]를 통하여 수분의 효율적인 환기제어를 연구하였다.

2. 이론적 연구

2.1 해석모델

해석모델은 Fig. 1 및 Table 1에서 처럼 대공간

* 한양대학교 기계공학부

** 한양대학교 대학원

의 dry room으로 천정에 설치된 다수의 다공판 (punching plate)으로부터 저습·항온의 공기가 유입되고, 양 측벽에 설치된 12개의 강제순환용 배기구로 공기가 배기된다. 기본유동을 분석하기 위하여 공정용 설비와 같은 유동장애물과 공정 발생열은 본 연구의 목적이 기본유동 분석에 있으므로 해석의 편의를 위하여 배제하였다.

실내수분오염 발생은 발생위치 측면에서 두 가지 방법에 의해 고려되었다. 첫째는 공정용 설비로부터 혹은 작업자에 의하여 수분오염이 발생할 가능성이 높으므로 바닥으로부터 높이가 1 m인 평면상에서 국소적 발생으로 인한 환기효율을 분석하였고 오염 발생위치는 Fig. 2와 같이 폭발향 중앙부(A~E)와 배기구 근처(F~J)로 구분하였다. 둘째는 실내 전체에서 균일하게 수분오염이 발생하여 상대적으로 수분농도가 높은 지역을 조사하였다.

2.2 지배방정식

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

- (1) 비압축성 정상상태 3차원 난류유동이다.
- (2) 유동장내 온도는 상온으로 가정하여 부력효과는 무시한다.

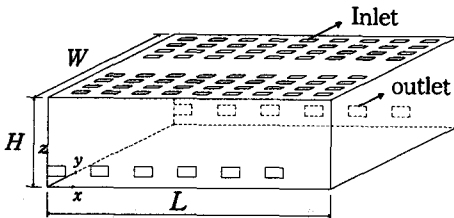
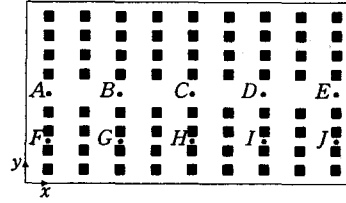


Fig. 1 Schematic diagram of the present dry room model

Table 1 Specification of room model

| contents | unit | dimension |
|------------------------------------|-----------|--------------------------------|
| Geometry ($L \times W \times H$) | m | $51.5 \times 27.63 \times 2.4$ |
| 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 |



(A) $x=3.65, y=y_2$ (B) $x=15.25, y=y_2$ (C) $x=26.85, y=y_2$
 (D) $x=38.45, y=y_2$ (E) $x=50.05, y=y_2$ (F) $x=3.65, y=y_1$
 (G) $x=15.25, y=y_1$ (H) $x=26.85, y=y_1$ (I) $x=38.45, y=y_1$
 (J) $x=50.05, y=y_1$; [$y_1=6.62, y_2=13.82$]

Fig. 2 points of moisture generation in the z-plane ($z=1$ m)

- (3) 수분의 벽면흡착을 무시하고, 수분 발생율은 일정하다.

본 수치계산에서는 난류모델로서 표준 $k-\epsilon$ 난류 모델을 도입하였으며, 지배방정식으로 연속 방정식, 운동량 방정식, 운동에너지, 운동에너지소산 방정식 및 오염농도 방정식은 다음과 같다.

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

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

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

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

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

여기서, $\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$, $S = \left\{ \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right\} \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$,

$\sigma_1 = 1.0, \sigma_2 = 1.3, \sigma_3 = 0.9, C_\mu = 0.09, C_1 = 1.44$

$C_2 = 1.92$ 이다. 식 (5)에서 수분확산계수 ν_t/σ_3 는 Kiranoudis 등[1]의 연구에서 사용된 값을 사용하였다.

2.3 경계조건

지배방정식의 수치해석에 적용되는 각종 경계 조건은 급·배기구 및 벽면에서 Table 2와 같이 정의된다.

Table 2 Boundary conditions for numerical simulation

| | |
|--------|---|
| Inlet | $u_t = 0 \text{ m/s}, u_n = 0.25 \text{ m/s}, k = 0.005u_n^2$ $\epsilon = C_\mu k^{1.5} / (0.5D_h), C = 0$ |
| Outlet | $u_t = 0 \text{ m/s}, u_n = 1.2 \text{ m/s}, \frac{\partial k}{\partial Z} = 0,$ $\frac{\partial \epsilon}{\partial Z} = 0, \frac{\partial C}{\partial Z} = 0$ |
| Wall | $u_t, u_n = 0 \text{ m/s}, \frac{\partial k}{\partial Z} = 0, \frac{\partial C}{\partial Z} = 0$ |

* suffix : *t*, *n* - tangential, normal component

2.4 환기효율

dry room에서 환기목적은 저습·항온의 공기를 급기하여 실내에서 발생하는 열과 수분오염을 가능한 한 빨리 배출시키는데 있다. 따라서 이러한 환기성능의 평가를 위해 본 연구에서는 세 가지의 환기효율지수를 도입하였고 수분농도 분포를 기초로하여 각각 계산하였다.

(1) SVE1 (the 1st Scale of Ventilation Efficiency)

국소 수분오염 발생 시에 공간내 오염 잔류량으로써 출구의 평균농도 값에 의해 무차원화 된다. 즉 이 값은 오염배기량에 대한 실내에 잔류하는 수분의 양을 나타내는 것으로써 수분발생과 배출이 일정한 정상상태에서 오염 잔류량이 많아질수록 오염 정체시간이 길어짐을 의미한다. 따라서 수분발생위치 x_s 에서의 무차원 환기효율 SVE1은 다음식에 의해 표현된다.

$$SVE1 = \frac{C_0}{C_s V_0} \quad (8)$$

여기서 $C_0 = \int_V C(x) dV$, $C_s =$ 특성 농도 (출구에서의 평균농도)이다.

(2) SVE2 (the 2nd Scale of Ventilation Efficiency)

국소 수분오염 발생 시에 오염지역의 평균반지름으로써 수분발생위치 x_s 에서의 수분확산 반지름은 다음과 같다.

$$SVE2^2 = \frac{\int_V \{x_i - x_{si}\}^2 C(x) dV}{C_0} \quad (i = 1, 2, 3) \quad (9)$$

여기서 $x_{si} = \int_V x \cdot C(x) dV / C_0$ 로 수분농도의 중심좌표를 의미한다.

(3) SVE3 (the 3rd Scale of Ventilation Efficiency)

실내의 전체영역에서 균일한 수분오염 발생 시 임의 위치의 수분오염 농도를 배기구 평균수분농도로 나눈 무차원 지수로 재순환 영역에서 가장 큰 값이 나타나게 된다. 이는 급기구에서 유입된 저습공기가 도달하기까지의 시간이 긴 영역에서 크게 나타내고, 그 상관식은 다음과 같이 표현된다.

$$SVE3(x) = \frac{C(x)}{C_s} \quad (10)$$

여기서 $C(x) =$ 균일 수분오염 발생 시에 임의 위치에서의 수분농도이다.

2.5 수치해석 및 검증

본 연구에서는 유동 및 수분확산에 대한 수치해석을 위하여 지배방정식을 유한체적법을 이용하여 이산화하였고, 엇갈린 격자계를 이용하였다. 대류항의 계산을 위해 멱승도식(power-law scheme)을 사용하였고, 운동량 방정식의 압력항을 처리하기 위해 SIMPLER[4] 알고리즘을 이용하였다. 계산 내부영역은 $105 \times 61 \times 20$ 개의 비균일 제어체적을 이용하였고 격자의존성을 조사하여 수치적 타당성을 검증하였다.

3. 결과분석 및 고찰

본 연구에서 수분오염 발생위치에 상관없이 수분농도 분포는 기류 유동특성과 밀접하게 연관되는 특성을 보여주었다. 따라서 기류 유동장에 대한 결과분석이 수분 오염확산의 이해를 위해서는 필수적이다.

3.1 dry room의 기본유동 형태

실내유동은 천정에 설치된 다수의 급기구로 인해 복잡한 유동셀을 형성한다. 하지만 실내 폭방향 중앙부 영역과 배기구 위치의 편중으로 인하여 길이 방향으로 편향되는 유동특성이 나타났다. 이러한 특성은 몇 군데 단면에서의 유속분포를 통해 이해할 수 있다. Fig. 3에서 처럼 $x = 26.845 \text{ m}$ 인 x -단면, $y = 13.815 \text{ m}$ 인 y -단면의 두 개의 수직단면과, 바닥으로부터 1 m 떨어진 $z = 1 \text{ m}$ 인 z -단면의 수평단면에서의 속도분포로부터 dry room의 기본적인 기류분포를 이해할

수 있다. y -수직단면은 대칭단면으로 천정의 비급기 지역이 실내 유동에 미치는 영향의 예측을 위해 선정되었다. 수평단면은 작업자의 호흡선 및 생산설비를 고려하여 바닥으로부터 1 m 떨어진 수평단면을 선정하였다.

실내 기류특성을 파악하기 위해 수직단면의 속도분포를 Fig. 3(a)와 (b)에, 수평단면은 Fig. 3(c)에 나타내었고 유동편향의 이해를 돕기 위해 해당속도분포에 대한 압력분포를 함께 나타내었다. 먼저, 수직단면에서의 속도분포를 살펴보면 Fig. 3(a)의 폭방향 중앙부 지역을 중심으로 양쪽으로 두 개의 커다란 재순환 유동이 발생하게 된다. 이로 인해 Fig. 3(b)에서와 같이 대칭단면에서 강한 상승기류가 발생하게 되고 배기구 위치의 편중배치로 인해 유동이 전체적으로 배기구가 편중된 방향으로 편향되는 현상을 볼 수가 있다. Fig. 3(c)의 수평단면에서 속도분포를 보면 폭방향 중앙부 지역에서 뚜렷한 유동편향 현상을 관찰할 수 있고, 배기구 근처의 유동은 가장 인접한 배기구를 향해 배출되게 된다. 이러한 재순환 유동 및 유동의 편향현상은 압력분포를 통해 쉽게 이해가 가능하다.

3.2 수분오염의 농도분포

3.2.1 국소 수분오염 발생

Fig. 4는 Fig. 2에서 정의한 국소 수분오염 발생 위치별 무차원 농도분포를 수평단면에 나타낸 것이다. 여기서 무차원 수분농도는 12개의 배기구에서의 평균농도에 의해 무차원화 된 값을 의미한다. 유동의 편향현상으로 수분확산이 전반적으로 배기구가 편중된 좌측 벽면을 향해 치우치는 현상을 볼 수 있다. 특히, 수분오염이 우측 벽면

에서 발생할수록 이러한 편향현상은 더욱 강해져서 Fig. 4(c)에서는 실내 공간의 50%이상이 오염되는 것을 확인할 수 있다. 이러한 현상은 오염 발생 시에 가장 인접한 배기구를 향해 비교적 작은 확산반지름을 가지며 신속히 오염이 배출되는 것이 이상적이라고 판단할 때 환기측면에서 바람직하지 못한 특성이라고 할 수가 있다.

Fig. 4(d)~(f)에서 처럼 국소 오염발생이 배기구 근처에서 발생한다면, 약간의 편향현상은 있지만 가장 인접한 배기구를 향해 오염이 배출되어 이상적으로 오염환기가 일어남을 알 수가 있다. 환기효율 지수 측면에서도 SVE1과 SVE2가 발생위치 A~E의 경우보다 상당히 낮게 나타난다.

결과적으로 폭방향 중앙부 영역에서 수분오염 발생은 배기구 편중 배치로 인한 유동 편향현상으로 매우 큰 오염확산 반지름을 가지게 되어 일부 영역에서는 비효율적인 환기특성을 가지게 된다. 따라서 적절한 유동 편향현상의 감소를 유도함으로써 환기효율을 개선시킬 수 있다.

3.2.2 균일한 수분오염 발생

Fig. 5는 실내 전체에서 수분오염 발생시 무차원 오염농도 분포, 즉 SVE3를 수평단면을 통해 나타낸 것이다. Fig. 5(a)에서 보면, 바닥부근의 폭방향 중앙부가 완전히 오염되는 현상을 보여준다. 이는 천정에서의 비급기 영역으로 인해 재순환유동이 형성되기 때문이다. 천정영역은 Fig. 5(b)와 같이 영역전체가 완전한 오염지역이 된다. 이것은 급기구 건조공기의 도달시간이 다른 영역에 비해 크므로 오염농도가 높아지기 때문이다. 따라서 dry room내 오염 위험지역은 크게 두 개의

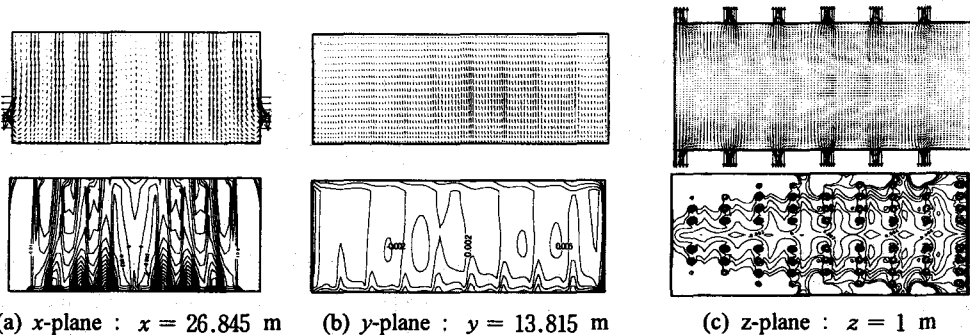


Fig. 3 Distribution of velocity vectors and pressure at the vertical and horizontal planes

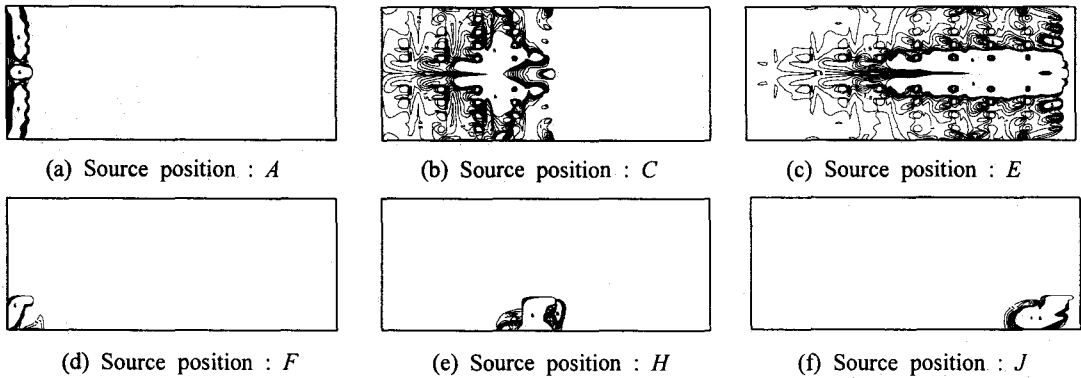


Fig. 4 Distribution of dimensionless moisture concentration at the horizontal $x-y$ planes [$z = 1$ m]

영역, 즉 천정과 폭방향 중앙부 영역으로 가정할 수 있다.

3.3 배기구 운전변경에 따른 개선효과

기준모델에서 발생한 유동 및 수분확산의 편향 현상은 환기효율을 고려할 때 바람직하지 못한 결과를 얻었다. 특히 폭방향 중앙부 부근에서 수분오염 발생 시 상대적으로 큰 오염반지름을 가지게 되므로 리튬이온 전지 생산시 수분확산으로 인한 문제가 많을 것으로 예상된다. 따라서 드러난 문제점에 대한 보완책으로 12개의 배기구 중에서 좌측 벽면에 인접한 배기구 두 개의 가동을 중지하여 유동 편향현상의 감소를 시도하였고, 이 모델을 "수정모델(modified model)"로 정의한다. 이러한 배기구 변경은 운전 개선방안으로써 실제 dry room에서도 쉽게 응용이 가능하다.

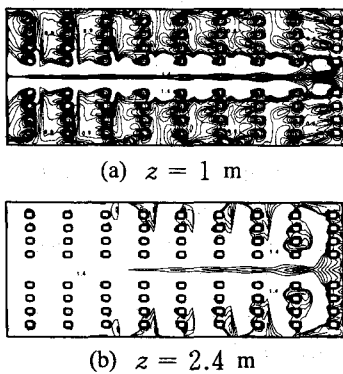


Fig. 5 Distribution of dimensionless moisture concentration when moisture generates throughout the room

수정모델에서 유동현상은 배기구 가동중지로 인해 실내중앙부로 향하게 된다. 따라서 Fig. 6(a)~(c)에서 처럼 폭방향 중앙부에서 수분오염 발생시 중앙부로의 수분확산이 나타난다. 그러나 오염반지름측면에서 발생위치 A를 제외하고는 기준모델에 비해 크게 감소된 경향을 보이고 있다. 오염발생위치가 배기구 근처인 경우에는 Fig. 6(d)~(f)와 같이 기준모델과 거의 유사하게 작은 오염반지름을 가지며 효율적으로 오염이 배출된다.

Fig. 7은 수분발생위치별 환기효율을 기준모델과 비교하여 그래프로 나타내었다. 먼저, Fig. 7(a)의 폭방향 중앙부 영역에서 SVE1은 발생위치 A와 C에서 기준모델보다 큰 값이 나타났다. 이것은 발생위치 A 부근에서의 배기구 가동중지와 발생위치 C에서 사라진 유동편향현상으로 인해 수분배출이 용이하지 않기 때문이다. 그러나 그 외의 영역에서는 기준모델보다 이상적인 오염 환기현상을 보였다. SVE2는 배기구 가동중지로 인한 발생위치 A에서의 오염반지름 증가를 제외하고는 상당히 개선된 환기특성을 나타낸다.

Fig. 7(b)는 발생위치 F~J에서 국소 오염발생에 대한 환기특성을 나타낸 것이다. SVE1과 SVE2는 배기구 가동중지로 인한 발생위치 A에서의 오염반지름의 증가로 기준모델보다 약간 큰 값을 가지는 것을 제외하고는 거의 차이가 없는 환기특성을 가진다.

결과적으로 수정모델은 기준모델에 비해 전반적으로 개선된 환기효율 특성을 보여준다. 특히, 폭방향 중앙부 영역에서 오염발생은 기준모델에서 문제가 되었던 오염반지름측면에서 상당히 개선된 결과를 얻을 수 있었다.

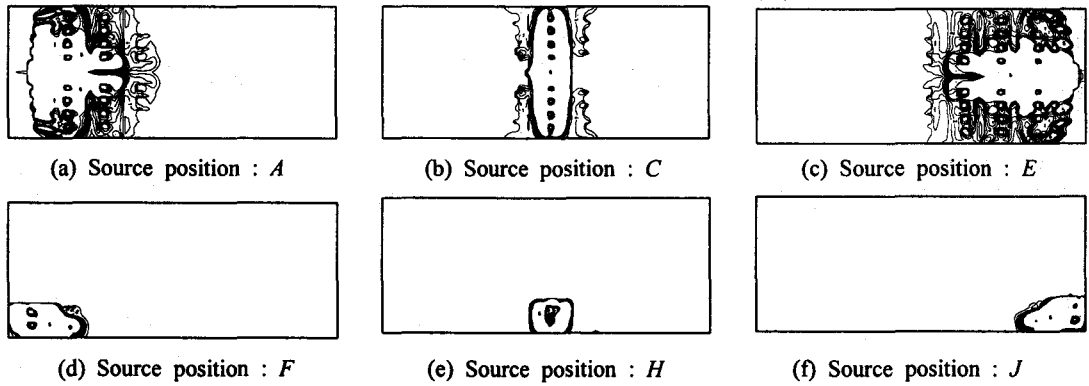


Fig. 6 Distribution of dimensionless moisture concentration in the modified dry room model

4. 결론

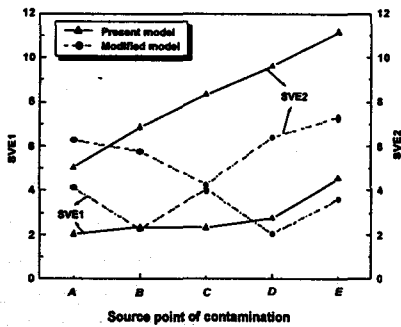
리튬이온 전지의 제조공정용 dry room의 기류 및 수분오염 농도분포를 수치적인 방법으로 해석한 후 환기효율 평가를 수행하고, 수정모델과 환기특성을 비교하여 다음의 결과를 얻었다.

(1) 기준모델은 배기구 편중배치로 인해 유동 편향현상이 현저하게 발생하고, 이러한 기류특성은

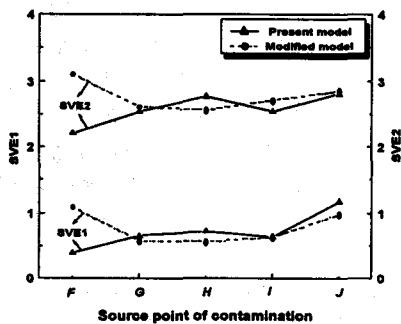
수분오염 분포와 밀접하게 연관된 특성을 보인다.

(2) 폭방향 중앙부에서 수분발생시 유동 편향현상으로 오염반지름이 크게 나타났고, 전체적으로 천정과 폭방향 중앙부가 다른 영역에 비해 높은 수분오염 농도를 갖는다.

(3) 일부 배기구를 가동 중지한 수정모델은 기준 모델에 비해 오염반경 측면에서 상당히 개선된 환기특성을 가진다.



(a)



(b)

Fig. 7 Comparison of Ventilation Efficiency

(a) source position (A~E), (b) source position (F~J)

참고문헌

- (1) Kiranoudis CT, Karathanos VT and Markatos NC., 1999, "Computational Fluid Dynamics of Industrial Batch Dryers of Fruits" *Drying Technology*, Vol. 17 N. 1-2, pp 1~25.
- (2) Theologos KN, Maroulis ZB and Markatos NC., 1997, "Simulation of Transport Dynamics in Fluidized-Bed Dryers" *Drying Technology*, Vol. 15(5), pp 1265~1291
- (3) S. Kato and S. Murakami., 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.
- (4) S. V. Patankar., 1980, "Numerical Heat Transfer," McGraw-Hill.