

## 터널층류방식 청정실에서의 난류운동과 열전달에 관한 수치해석(1)

정 한 식\* · 정 효 민\*

Numerical Analysis on the Turbulent Flow and Heat Transfer in the Tunnel  
Laminar Flow Type Clean Room(1)

H. S. Chung · H. M. Jeong

**Key words** : Turbulent flow(난류운동), Heat transfer(열전달), Tunnel laminar flow type(터널층류방식), Clean room(청정실)

### Abstract

The turbulent flow and heat transfer in the tunnel laminar flow type clean room is investigated by a numerical simulation. The model clean room is assumed to be a rectangular 5m × 3m, in which a worktable of 0.75m high, and 1.5m or 3.0m long at the floor. Major parameters are the inlet flow velocity, inlet hole size and worktable surface distance. The mean Nusselt number is increased by increasing Reynolds number and can be expressed by the correlation equation.

### 기호설명

H : 유출구의 크기  
L : 유입구의 크기  
Nu : Nusselt수  
Re : Reynolds수  
T : 온도  
U : 시간평균속도  
 $\mu$  : 점성계수  
 $\delta_{ij}$  : Kronecker delta  
 $\epsilon$  : 난류에너지 소산율

$\sigma_k, \sigma_\epsilon, \sigma_T, C_1, C_2$  : 모델정수

i, j : 직교좌표계의 방향

u : 변동속도

$\rho$  : 밀도

k : 난류에너지

### 1. 서 론

청정실은 반도체등의 전자공업, 정밀기계 공업, 생명공학, 신소재 등 첨단산업에 필수적으로 요구되는 청정한 생산환경을 제공하는 특수한 시설이

\* 정회원, 경상대학교

다. 최근에는 산업의 급격한 발달에 따라 제품의 미소화, 정밀화, 고품질화 그리고 고신뢰도가 더욱 요구되어 청정실의 수요는 급격히 확대되고 있다.

청정실의 설계에 있어서 고려하여야 할 사항은 실내로 먼지를 유입시키지 않기 위한 적절한 필터의 채용, 실내의 먼지 발생 요인을 차단하기 위한 청정외와 작업대의 청정도 유지, 발생한 먼지의 배출을 위한 적절한 배기 시스템 그리고 먼지의 특정 부위의 적체 해소를 위한 적절한 공간 설계 등이 요구되고 있다. 이러한 요구사항을 해결하기 위한 방법으로서 유입공기용 필터로는 HEPA필터와 ULPA필터 등의 연구 개발이 활발히 진행되고 있으며, 그 외의 부분에 대하여서는 유동과 작업공간의 열전달 문제를 해석하여야 가능함을 알 수 있다. 그러나 청정실내의 유동과 같은 재순환 유동이 있는 유동장의 공기 유동을 예측하기 위한 모델링 실험 결과로는 실제 유동장에 확장 적용할 수 없으므로 실제 청정실의 유동장 해석은 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 수치해석이 광범위하게 사용된다.

이재현 등<sup>1)2)</sup>은 수직층류 청정실 내부에서의 유동특성 또는 청정실 내부에 하나의 작업대가 유동을 방해하고 있을 때 유동 등을 수치해석으로 연구하였다. 2차원 층류 유동을 해석하여 실내유동의 일반적인 특성, 작업대 위치 변동에 따른 유량비의 변화, 유입구와 유출구의 평균압력 변화의 특성에 대하여 보고 하였다. S. Murakami 등<sup>3)</sup>은 층류 유동 방식 청정실에서의 공기 유동에 관한 난류 모델을 개발하여 그의 타당성을 보고 하였다. 이춘식<sup>4)5)</sup>은 청정실의 종류, 선택방법 그리고 청정실의 순환 공기 취급방법을 소개하고 현재 반도체 산업에서 주로 사용하는 청정실로는 전면수직 층류방식, open bay 방식, 클린터널 모듈방식, 팬필터 유니트 방식 등이 있음을 소개하였다. 박명식 등<sup>6)</sup>은 수직층류형 청정실에서 필터교체에 따라 변화되는 실내기류의 유동특성을 3차원 이론해석 방법으로 연구하여 압력분포를 보고하였다.

본 연구의 대상은 터널층류방식 청정실이다. 이 방식은 이동성과 확장성을 향상시킨 수직 층류방식의 축소형으로서 청정실을 완성하는데 소요되는 시간이 짧으며, 생산공정에도 피해를 거의 주지 않고 시스템을 이동하거나 재배치시킬 수 있으며

또한 이중 바닥을 사용하지 않고도 운전할 수 있는 등 이유로 많이 사용되고 있다.

청정실에 관한 전체적인 연구는 3차원 압축성에 관한 연구로서 실내 압력분포, 오염물질의 거동, 유동분포, 실험 등을 거쳐야겠지만 작업공간으로서의 발열을 고려하여 일차적으로 2차원, 비압축성, 난류 유동장으로 가정하여 해석한다. 공기유입 속도, 유출구의 크기, 작업공간의 크기 그리고 작업공간의 발열 등을 고려한 공간내의 유동현상과 열전달 특성에 대하여 연구 하였다.

## 2. 지배방정식

청정실 공간에 대한 유동은 정상상태이며 비압축성을 가정한 2차원 난류유동이며 이에 대한 지배방정식은 다음과 같다.

연속방정식

$$\frac{\partial U_i}{\partial X_i} = 0 \tag{1}$$

운동량 방정식

$$\frac{\partial(\rho U_i U_j)}{\partial X_j} = -\frac{\partial P}{\partial X_i} + \frac{\partial}{\partial X_i} \left[ \mu \left( \frac{\partial U_i}{\partial X_j} + \frac{\partial U_j}{\partial X_i} \right) \right] - \frac{\partial}{\partial X_j} [\overline{\rho u_i u_j}] \tag{2}$$

윗 식의 운동량 방정식에서  $-\overline{\rho u_i u_j}$ 는 레이놀즈 응력으로서 평균속도 기울기의 함수로 가정한다. 즉, Boussinesq의 와점성의 가정을 채택하여, 다음과 같이 레이놀즈 응력을 모델링 한다.

$$-\overline{\rho u_i u_j} = \mu_t \left( \frac{\partial U_i}{\partial X_j} + \frac{\partial U_j}{\partial X_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \tag{3}$$

여기서, 대문자  $U$ 는 평균속도, 소문자  $u$ 는 변동속도 성분을 나타낸다. 또한,  $\mu_t$ 는 와점성 계수로서 다음식과 같이 모델링 한다.

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\epsilon} \tag{4}$$

이 와점성계수는 다음식 2개의  $k-\epsilon$  수송 방정식으로부터 구해진다.

난류에너지방정식

$$\frac{\partial(\rho U_j k)}{\partial X_j} = \frac{\partial}{\partial X_j} \left[ \left( \frac{\mu_t}{\sigma_k} + \mu \right) \frac{\partial k}{\partial X_j} \right] + G - \rho \epsilon \quad (5)$$

난류에너지 소산 방정식

$$\frac{\partial(\rho U_j \epsilon)}{\partial X_j} = \frac{\partial}{\partial X_j} \left[ \left( \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} + \mu \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial X_j} \right] + G_1 \frac{\epsilon}{k} G - C_2 \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (6)$$

여기서 난류생성항  $G$ 는 다음과 같다.

$$G = \mu_t \left( \frac{\partial U_i}{\partial X_j} + \frac{\partial U_j}{\partial X_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial X_j} \quad (7)$$

이상에서 난류의 유동장이 구해지면 다음의 에너지 방정식을 이용하여 유동장에 대한 온도 분포를 계산할 수 있다. 여기서는 온도차에 의한 부력의 효과를 무시하는 강제대류에 의한 열전달이 지배적이라 가정하였다.

에너지 방정식

$$\frac{\partial(TU_j)}{\partial X_j} = \frac{\partial}{\partial X_j} \left[ \left( \frac{\mu}{\sigma} + \frac{\mu_t}{\sigma_T} \right) \frac{\partial T}{\partial X_j} \right] \quad (8)$$

또한, 각 방정식에서 사용된 모델정수는 다음과 같은 값을 사용하였다.

- |                       |                |
|-----------------------|----------------|
| $C_1=1.44$            | $C_2=1.92$     |
| $\sigma_\epsilon=1.3$ | $\sigma_k=1.0$ |
| $C_m=0.09$            | $\sigma_T=1.0$ |

3. 경계조건 및 수치계산

위의 지배방정식을 풀기 위하여 사용된 경계조건은 다음과 같다.

(1) 유입구

입구에서는 일정온도 ( $T_\infty$ )를 가진 속도( $U_{in}$ )로 유입하며,  $U_{in}$ 에 수직인 속도 성분은 0으로 하였다.  $k$ 의 값은 유입류의 평균에너지의 3%( $k_{in} = 0.03U_{in}^2$ )로 하였다. 또한  $\epsilon$ 의 값을  $\epsilon_{in} = k_{in}^{1.5}/(0.005L)$ 로 하였다.

(2) 유출구

출구의 방향과 수직인 모든 변수의 기울기는 항상 0이 되는 Neumann조건으로 하였다. 특히, 온도의 출구 방향에 대한 기울기는 0으로 하였다.

(3) 실내벽면 및 작업대 벽면

벽면에 수직인 속도성분은 0으로 하였으며, 벽면에 평행한 속도성분은 벽함수를 적용시켜 구하였다. 또한, 온도의 경우는 실내 벽면에서는 단열, 작업대에서는 항상 일정한 온도로 가열이 되고 있다고 가정 하였다. 이상에서 주어진 방정식으로부터 각각의 변수를 구하기 위하여 유한체적법(Finite Volume Method)을 채택하였으며, 대류항의 Scheme은 Hybrid법을 사용하였다. 또한 압력항의 계산은 SIMPLE알고리즘을 채택하였고<sup>7)</sup>, 속도와 난류항에 관한 격자는 Staggered Grid를 사용하였다. 또한 온도장의 해석에는 상기 방법으로 이미 구한 속도장을 초기조건으로 하여 계산하였다. 난류유동장 계산에서의 초기조건은 층류로 가정한 계산결과를 이용하였다. Fig. 1은 현재 일반적으로 사용하고 있는 터널충류방식 청정실로서, 유입구의 기류속도는 0.5m/s - 1.0m/s, 청정실의 폭은 3-5m 그리고 천정 양쪽에서 공기가 유입되고 하부 좌우로 각각 유출된다. Fig. 2는 본 연구에 이용된 2차원 공간의 모델링으로서 상세한 치수를 보여 준다. 실내공간(폭5m×높이3m)의 천정 양쪽

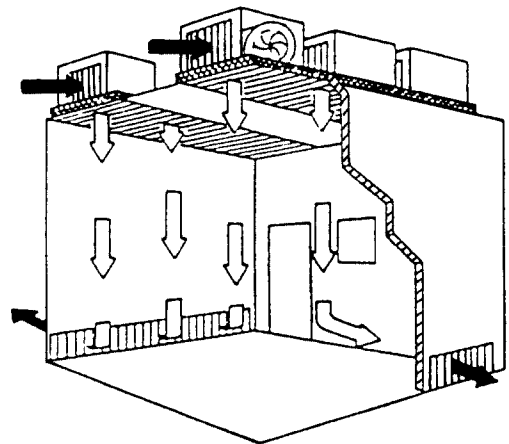


Fig. 1 Tunnel laminar flow type clean room.

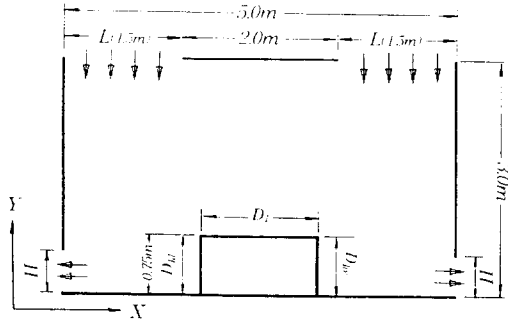


Fig. 2 Geometry of present investigation.

에 일정 온도( $T_{\infty} = 20^{\circ}\text{C}$ )와 속도( $U_{in} = 0.5, 0.7, 1.0\text{m/s}$ )인 공기가 2개의 유입구( $L = 1.5\text{m}$ )로 유입하여 양 측면 하부의 벽쪽 유출구( $H$ )로 유출한다. 실내에는 바닥으로부터 높이,  $D_h = 0.75\text{m}$ , 길이,  $D_1$ 의 작업대가 발열체로서 일정 온도( $T_D = 40^{\circ}\text{C}$ )로 설치되어 있다.

4. 결과 및 토의

Fig. 3은  $U_{in} = 0.5\text{m/s}$ ,  $D_1 = 1.5\text{m}$ ,  $H = L/6$ 과  $L/2$ 에서 크린룸 내의 속도 벡터와 등온선의 분포이다.

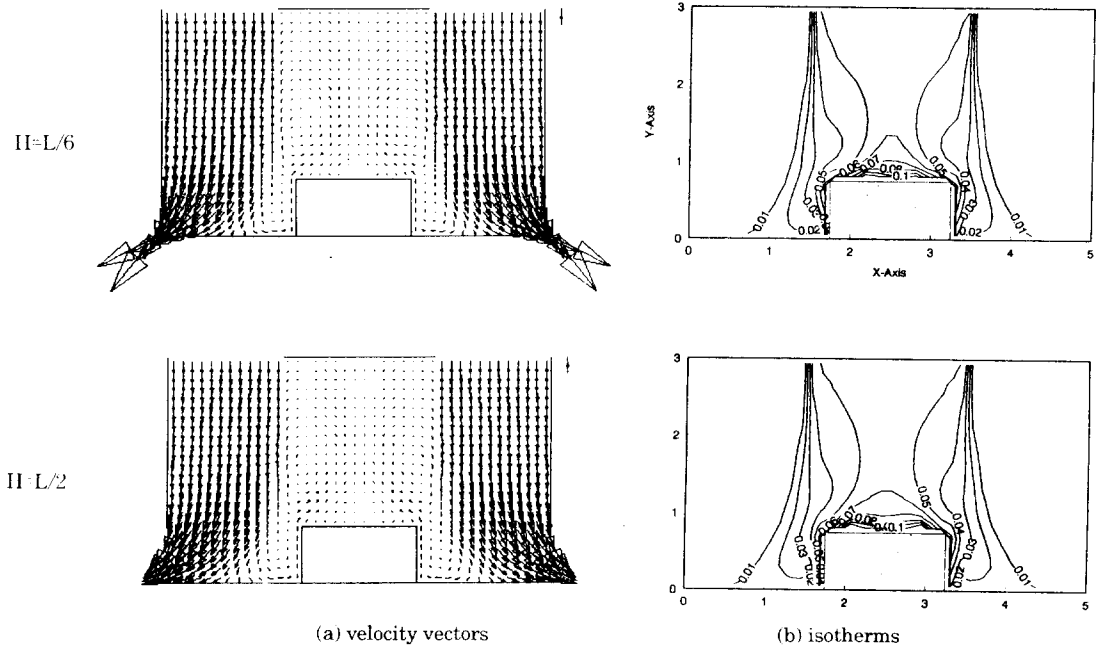


Fig. 3 Velocity vectors and isotherms distribution for various outlet sizes at  $U_{in} = 0.5\text{m/s}$  and  $D_1 = 1.5\text{m}$ .

일반적으로 작업대의 좌·우측 끝 바닥 부분에서 재순환유동이 발생하며, 유출구가 증가하면 유출구의 속도가 급격히 감소하고 등온선의 분포는 작업대 상부 표면에서 다소 조밀하여져 이 부분에서 열전달이 다소 촉진됨을 알 수 있다. 이에 비하여 유입속도,  $U_{in} = 1.0\text{m/s}$ 에서의 결과가 Fig. 4이다. 유입속도가 증가하여도 유동에는 그 영향이 미소하여 속도분포와 등온선의 형상이 유사하게 나타남을 알 수 있다. 그러나 등온선의 분포를 관찰하여 보면 유입속도가 증가함에 따라 상대적으로 열전달이 다소 촉진됨을 알 수 있다.

Fig. 5는  $D_1 = 1.5\text{m}$ ,  $H = L/6$ 에서 여러가지 유입속도에 대한 무차원 작업대 표면의 국소Nusselt수 분포이다. 작업대의 무차원거리가 증가함에 따라 좌측에서는 감소하고 상부 중앙을 기준하여 좌·우측에 각각의 최소값이 나타나며 우측으로는 증가함이 나타난다. 이들은 유입공기가 직접 만나는 부분에서는 열전달이 활발하고 발달한 재순환 유동 영역에서는 상대적으로 열전달이 낮게 나타난 결과로서 좌·우 끝 바닥 부분에서 최대 국소Nusselt수가 나타나고 최소값은 작업대 상부에서 나타난다. 재순환 유동의 상호 작용으로 인하여 작업

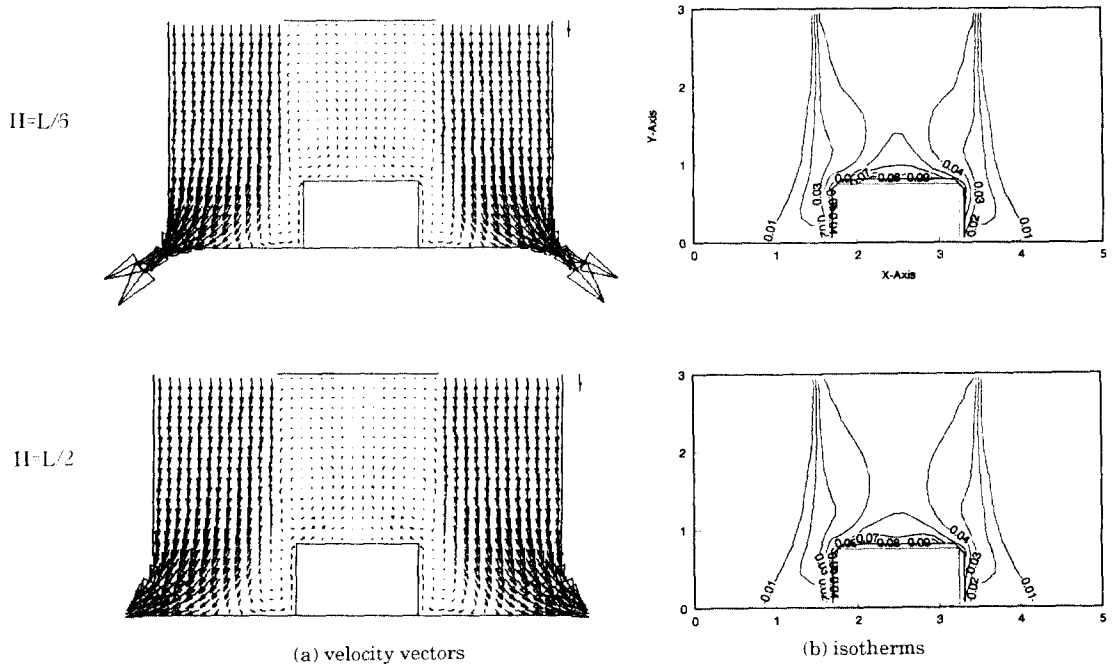


Fig. 4 Velocity vectors and isotherms distributions for various outlet sizes at  $U_{in} = 1.0\text{m/s}$  and  $D_1 = 1.5\text{m}$ .

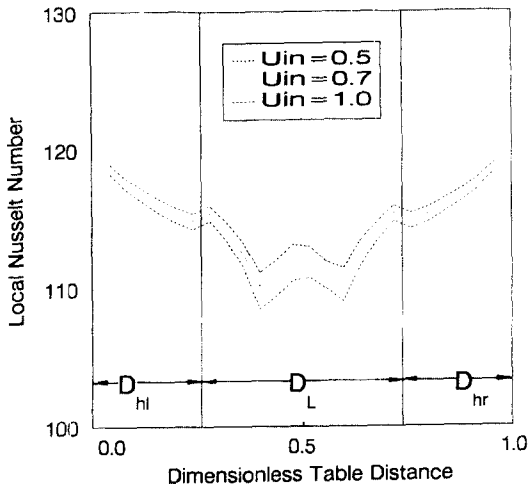


Fig. 5 Local Nusselt number versus dimensionless table distance for various inlet velocities at  $H = L/6$  and  $D_1 = 1.5\text{m}$

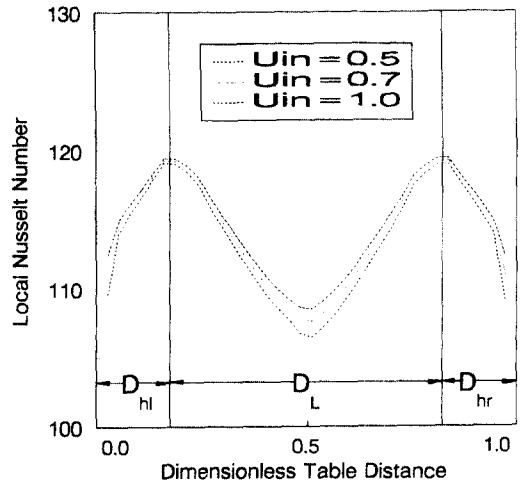


Fig. 6 Local Nusselt number versus dimensionless table distance for various inlet velocities at  $H = L/6$  and  $D_1 = 3.0\text{m}$ .

대 상부 중앙에서는 다소 높은 국소Nusselt수를 나타낸다. 작업대 중앙부분의 국소 Nusselt 수를  $U_{in} = 0.5$ 를 기준으로 하여 상호비교하여 보면  $U_{in} = 0.7$ 은 1.7%,  $U_{in} = 1.0$ 은 2.3% 각각 높은 값을 나타낸다. Fig. 6은  $D_1 = 3.0\text{m}$ ,  $H = L/6$ 에서 여러가지 유입속도에 대한 무차원 작업대 표면의 국소

Nusselt수 분포이다. 유입속도가 증가함에 따라 높은 국소Nusselt수 분포를 나타내며, 최대 국소 Nusselt수는 각 모서리 부분에서 나타나고 최소값은 작업대 중앙 표면에서 나타난다. 즉 작업대의 무차원길이가 증가함으로 인하여 열전달이 활발한 위치가 다르게 나타남을 알 수 있으며 이는 작

업대의 무차원 표면길이가 증가함에 따라 유입유체와 작업대 모서리 부분의 직접 접촉이 발생하며 이로 인하여 모서리 부분에서 최대 국소Nusselt수가 나타난다. 또한 유입된 다량의 유체가 부력의 영향에 의한 유체 유동을 방해하므로 인하여 작업대 무차원길이, 0.5에서 최소의 국소Nusselt수 값이 나타난다.

Fig. 7은  $D_1=1.5m, 3.0m$ 에서 여러가지 유출구의 크기에 대한 Reynolds수와 평균Nusselt수의 관계이다. 일반적으로 Reynolds수가 증가함에 따라 평균Nusselt수가 증가하며 유출구의 크기가 변함에 따라서는 그 변화가 미소하게 나타남을 알 수 있다. Reynolds수의 증가에 대한 국소Nusselt수의 기울기가 작업대의 무차원 표면 길이가 증가함에 따라 감소함을 알 수 있으며 이로써 유입속도가 증가하여도 작업대의 크기가 증가하려는 열전달의 변화가 미소함을 알 수 있다. 이들 결과로부터 Reynolds수와 평균Nusselt수와의 관계는 다음과 같이 지수함수로 표현할 수 있었다.

$$D_1=1.5m; \overline{Nu}=85.226 Re^{0.026} \quad (9)$$

$$D_1=3.0m; \overline{Nu}=96.574 Re^{0.01} \quad (10)$$

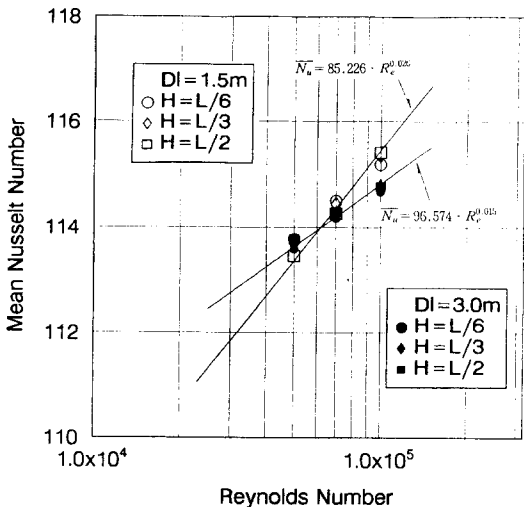


Fig. 7 Mean Nusselt number versus Reynolds number for various outlet sizes at  $D_1=1.5m$  and  $D_1=3.0m$ .

## 5. 결 론

터널충류방식 청정실에서의 난류유동과 열전달을 수치해석으로 연구한 결과는 다음과 같다.

(1) 유동은 작업대의 길이,  $D_1=1.5m$ 일 때는 작업대 좌·우측 끝 바닥 부분에서 재순환유동이 출발되고  $D_1=3.0m$ 일 때는 작업대 상부에서 재순환유동이 발생한다.

(2) 등온선의 분포는 거의 유사한 형태를 가지며 유입속도가 증가함에 따라 열전달이 촉진되며, 작업대가 증가함에 따라 모서리 부분에서 열전달이 활발하였다.

(3) 국소Nusselt수는 상부작업대 중앙을 기준으로 대칭되게 나타나며  $D_1=1.5$ 에서는 작업대 좌·우측 끝 바닥 부분에서,  $D_1=3.0$ 에서는 작업대 좌·우측 모서리 부분에서 각각 최대값을 가진다.

(4) 평균Nusselt수는 Reynolds수가 증가함에 따라 일반적으로 증가하며 작업대의 크기에 따라 다음과 같은 지수함수로 표현할 수 있었다.

$$D_1=1.5m; \overline{Nu}=85.226 Re^{0.026}$$

$$D_1=3.0m; \overline{Nu}=96.574 Re^{0.015}$$

## 참고문헌

- 1) 이재현 · 이진원 · 이상렬, 1986, "작업대가 있는 청정실내의 유동특성에 관한 연구", 대한기계학회 논문집 제10권 제6호, pp. 852 - 860.
- 2) 이재현, 1988, "공기분배기의 유입방향에 따른 청정실의 유동특성", Research Institute of Industrial Sciences in Hanyang Univ., Research Reports vol. 27, pp. 199 - 205.
- 3) S. Murakami, S. Kato, B. E. Launder and H. Suzuki, 1988, "Study on Air Distribution in Laminar Flow Type Clean Room(Part 6)", J. of Institute of Industrial Science, Univ. of Tokyo, vol. 40, no. 1, pp. 67 - 70.
- 4) 이춘식, 1990, "청정실의 공기 순환방식", 공기조화·냉동공학 제19권 제4호, pp. 225 - 232.
- 5) 이춘식, 1994, "우리나라 클린룸 산업 현황과 기술개발 동향", 대한기계학회'94년도 추계학술대회는 논문집, pp. 43 - 52.
- 6) 박명식 · 이재현 · 조성환, 1994, "수직 충류형 청정

실의 3차원 유동 특성”, 한국에너지기술연구소  
Energy R & D vol. 16 No. 2, pp. 9 - 20.

7) S. V. Patankar, 1984, "Numerical Heat Transfer  
and Fluid Flow", Hemisphere Pub. Co.