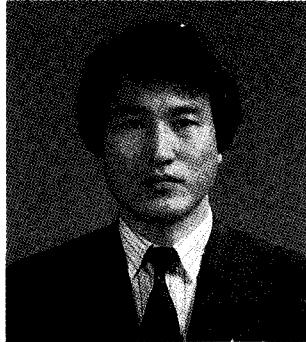


室內空間에서의 汚染物質 舉動에 關한 研究

(A Study on the Pollutant Behaviour in a Room Space)



성열구 / (주)대청엔지니어링 대표

本稿는 필자가 지난 8월 대전산업대학원 석사 논문으로 제출한 것으로 필자는 대전지역 회원사인 (주)대청엔지니어링대표이다.

대청엔지니어링은 지난 89년에 설립된 이래 빠른 성장을 거듭하여 93년부터 지난해까지 대전지역 도급순위 1위를 고수하고 있다. 또한 지난 9월에는 시공의 품질을 확보하기 위해 ISO 9002 인증을 획득하므로써 대전·충남지역 설비공사업계의 선도적인 역할을 하고 있다.[편집자 주]

1. 서 론

실내공간에서 발생되는 오염물질은 연소기구 사용에 따른 CO, CO₂, NOx와 거주자의 활동에서 야기되는 분진, 흡연에 의하여 발생되는 CO, NO, 건축재료로부터 발생되는 타돈, 포름알데히드 및 가스누설 등에 의한 프로판가스, 도시가스 등으로 매우 다양하다. 따라서 거주공간의 폐적

도를 지배하는 여러가지 인자인 온도, 습도, 실내 공기유속, 평균복사온도 등 종래의 공조개념 이외에 재실자의 건강을 고려한 공기의 질이 새로운 인자로써 취급받게 되었으며 특히 환기량이 부족한 에너지 절약형 건물에서는 인체의 건강과 관련하여 더욱 중요한 인자로 인식되고 있다. 실내오염의 문제는 일반적으로 오염물질의 순간 확산농도가 허용치를 넘지 않도록 하고 있으나 실제적으로는 실내에서 형성되는 유동형태와 난류상황에 따라서 공기와 완전한 혼합이 이루어지지 않아서 농도분포의 불균일을 초래하여 허용농도 이상의 영역이 존재하게 되고 유해가스의 분포가 장소와 시간에 따라 크게 변화한다. 따라서 적절한 환기계획을 수립하기 위하여는 발생가스의 공간분포와 시간적인 변동을 파악하는 것이 중요하다. 이와같이 건물의 보온성과 기밀성의 향상으로 인하여 열에너지의 절감효과가 있는 반면 환기를 위한 힘을 구동시키는데 필요한 에너지가 소요되므로 건물 전체적으로 소모되는 에너지를 최소화시키기 위하여 보다 효율

적인 환기가 이루어져야 할것이다. 이를 위하여 서는 오염물질을 효과적으로 제어할 수 있는 방법을 확립하는 것이 설비기술자들에게는 최대의 관심사가 되고 있다.

따라서 궤적한 실내공기조건과 오염물질의 환기제어를 위하여는 실내기류의 유동특성과 오염물질의 농도분포를 해석하고 기류거동과 오염물질의 이동 및 환기특성을 분석하고자 한다.

2. 실내공간의 기류유동해석

2.1 지배방정식

연구에 사용된 실내공간의 모델은 Fig.2.1에서 보여주는 바와같이 일정하게 발생되는 오염물질이 환기에 의하여 강제 배출되는 일반사무실, 실험실 등을 단순화 시킨 1m(L)×1m(H)×1m(W)의 크기를 갖는 축소된 실내공간모델을 대상으로 하였다. 이론해석은 급 배기구의 형상에 따른 실내기류분포와 농도분포 등을 3차원 지배방정식을 수치적으로 해석하였다. 급기구와 배기구는 같은 단면적을 갖고 있으며 급기구는 가로세로비가 1:1, 4:1의 2가지 형상이고 배기구는 가로세로비가 1:1, 1:4 및 4:1인 3가지 형상을 대상으로 하였으며 오염물질은 <그림 2.2>에서 보여준 바와 같이 6개소에서 발생시켰다.

혼합대류 난류유동현상은 비압축성 정상상태 유동이며 복사효과를 무시한다고 가정하여 실내 기류분포와 농도분포 등에 미치는 영향들을 3차원적으로 해석하였다.

건물 실내의 혼합대류 유동현상 및 오염물질의 분포를 해석하기 위하여 직교좌표계에서 3차원 난류유동의 지배방정식을 나타내면 다음과 같다.

(1) 연속 방정식

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w) = 0 \quad (2-1)$$

(2) 운동량 방정식

x 방향 :

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho uu) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho uv) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho uw) \\ = -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu \frac{\partial u}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu \frac{\partial u}{\partial y}\right) \\ + \frac{\partial}{\partial z}\left(\mu \frac{\partial u}{\partial z}\right) + \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu \frac{\partial u}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu \frac{\partial v}{\partial x}\right) \\ + \frac{\partial}{\partial z}\left(\mu \frac{\partial w}{\partial x}\right) + \Delta \rho g_x \end{aligned} \quad (2-2)$$

y 방향 :

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho uv) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho vv) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho vw) \\ = -\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu \frac{\partial v}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu \frac{\partial v}{\partial y}\right) \\ + \frac{\partial}{\partial z}\left(\mu \frac{\partial v}{\partial z}\right) + \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu \frac{\partial u}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu \frac{\partial v}{\partial y}\right) \\ + \frac{\partial}{\partial z}\left(\mu \frac{\partial w}{\partial y}\right) + \Delta \rho g_y \end{aligned} \quad (2-3)$$

z 방향 :

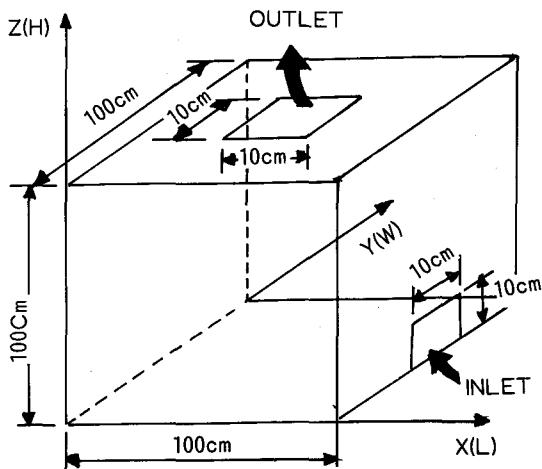
$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho w) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho uw) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho vw) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho ww) \\ = -\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu \frac{\partial w}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu \frac{\partial w}{\partial y}\right) \\ + \frac{\partial}{\partial z}\left(\mu \frac{\partial w}{\partial z}\right) + \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu \frac{\partial u}{\partial z}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu \frac{\partial v}{\partial z}\right) \\ + \frac{\partial}{\partial z}\left(\mu \frac{\partial w}{\partial z}\right) + \Delta \rho g_z \end{aligned} \quad (2-4)$$

(3) 농도 방정식

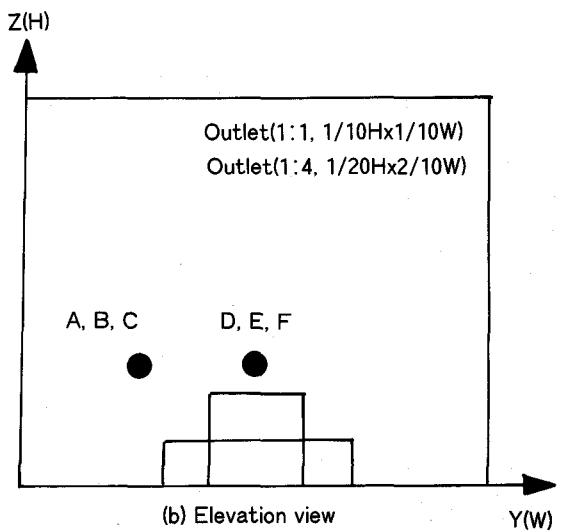
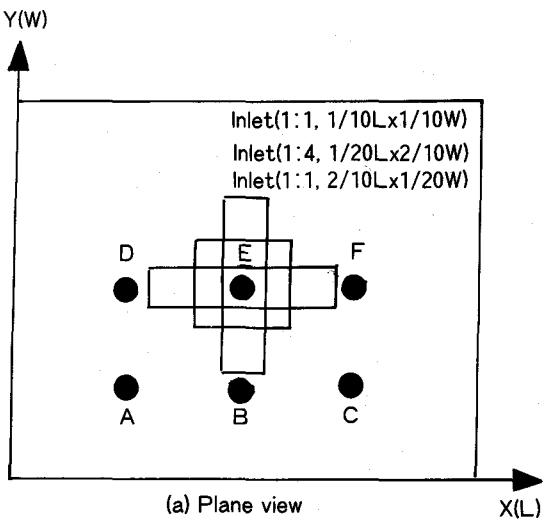
$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho C)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho uC) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho vC) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho wC) \\ = \frac{\partial}{\partial x}\left(\rho D \frac{\partial C}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\rho D \frac{\partial C}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\rho D \frac{\partial C}{\partial z}\right) + C_s \end{aligned} \quad (2-5)$$

(4) 에너지 방정식

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho uT) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho vT) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho wT) \\ = \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\mu}{Pr} \frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\mu}{Pr} \frac{\partial T}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{\mu}{Pr} \frac{\partial T}{\partial z}\right) \end{aligned} \quad (2-6)$$



<그림 2.1> Geometry and coordinate of model room space.



<그림 2.2> Shapes of inlet and outlet and polluted generation position.

2.2 수치해석 방법

지배방정식인 2차 편미분방정식의 해가 시간과 공간에 대한 연속적인 정보를 제공하는 가장 정확한 값이라면 실험이나 수치해석적 방법은 연속적인 정보가 아닌 일부 선택된 이산점들에서 원하는 값을 구하는 방법이라 할 수 있다. 즉 종속변수 ϕ 에 대해 유한한 공간상의 점들인 격자점에서 상호 관련된 값을 구하는 것으로 이런 수치해석 방법을 이산화방법이라 부른다. 이산화방정식은 편미분방정식을 대수방정식으로 변형시킨 것으로서 계산영역의 각 격자점에서 종속변수값을 서로 연결시켜주는 역할을 한다. 이러한 이산화방정식은 검사체적에 대해서 각기 물리적인 보존법칙을 만족하도록 하는 유한체적법을 이용하였다.

본 연구에서 사용한 3차원 직교좌표에 대하여는 $26 \times 26 \times 24$ 의 격자점을 갖도록 하였으며 검사체적과 격자점을 <그림 2.3>에 제시하였다.

2.3 수치해석 및 계산방법

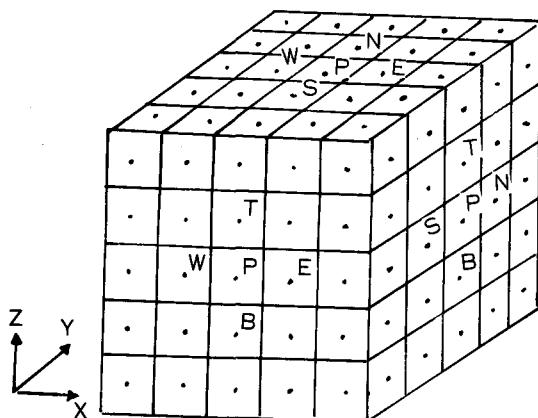
일반적인 2차 편미분방정식의 해를 얻기 위한

3차원 알고리즘은 유한체적법을 도입하여 선형적인 이산화방정식을 유도하였다. 또한 운동량방정식에서 나타나는 압력과 속도의 상호 연결방법은 SIMPLER 알고리즘을 이용하였고 격자점 사이에서 임의의 함수값 보정은 Power-law scheme에 의하여 실행하였다. 연구에 사용된 격

자체의 크기는 $26 \times 26 \times 24$ 이며 이보다 더 큰 격자계는 컴퓨터 용량과 계산시간의 제약 때문에 수행되지 않았다. 한편 프로그램에서 사용한 이산화방정식은 비선형 편미분방정식을 선형방정식으로 변환한 것이므로 반복계산 과정에서 발산을 방지하고 수렴성능을 극대화하기 위한 하향이완계수 α 를 $0.05 \sim 0.3$ 범위에서 사용하였다. 이러한 이완계수의 적절한 설정은 수렴성능 및 계산의 안정성에 민감하게 작용한다.

$$\phi = \alpha\phi^* + (1-\alpha)\phi_{old} \quad (2-7)$$

본 계산에서 해의 수렴조건은 일회 반복마다 각 검사체적에서 계산한 residual mass source의 최대값의 절대치가 10^{-8} 이하이고 일정한 지점에서 속도와 같은 주요 변수들의 반복계산결과가 반복회수에 따라 거의 변화하지 않을 때를 수렴한 것으로 판정하였다. 이러한 계산은 486급 PC를 사용하여 2000~6000회 반복계산을 수행한 결과이며, CPU 시간은 약 15~40시간이 소요되었다.



〈그림 2.3〉 Schematic diagram of the grid layout.

2.4 경계조건

위의 지배방정식을 해석하기 위하여 속도, 난류 운동에너지, 난류에너지소산율, 온도 및 농도

방정식에 대한 경계조건을 다음과 같이 주었다.

(1) 실내공간 입구

수직한 벽면의 아래부분에 있는 급기구를 통하여 실내로 유입되는 유동의 입구조건은 수직방향 속도 $W = W_{in} = 1 \text{ m/s}$, 수평방향속도 $U = V = 0$, 오염농도 $C = 0$ 으로 하였고, k 와 ϵ 의 조건은 Murakami 등⁹⁾이 실험을 통하여 제안한 $k = 0.005 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 과 $l = 0.3 \text{ m}$ 로 하여 계산 하였다. 실내공조를 위하여 공급되는 공기조화용 공기의 입구온도조건은 외기의 온도와 같다고 가정한 수직면과 $\pm 15^\circ\text{C}$ 의 온도차를 갖는 것으로 가정하였다.

(2) 실내공간 출구

천정의 중앙부분에 있는 배기구를 통하여 유출되는 출구단면에 대하여 속도 경계조건을 주는 대신 물리적으로 보다 타당성이 있는 압력경계조건을 사용하여 상대압력을 대기압으로 주었고 출구단면에 수직한 방향으로 모든 스칼라량의 변수는 구배가 0인 Neumann 조건을 주었다.

(3) 실내벽면

천정과 바닥 및 벽면에서의 속도는 점착조건을 적용하였고 나머지 변수에 대하여는 법선방향구배를 0으로 주었다. 그리고 온도조건에 대하여는 천정과 바닥면은 단열상태로 하였고 벽은 외기온과 같다고 가정한 등온조건을 주었다. 벽부근에서는 유체의 점성이 증가하여 난류성분이 감소하므로 유동특성의 급격한 변화로 인한 격자의 밀집과 낮은 레이놀즈수의 효과로 인한 난류모델의 부정확성을 피하기 위하여 전단력은 일정하고 난류 운동에너지와 소산율이 균형을 이룬다고 가정하여 벽면효과를 고려한 벽함수를 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

오염물질이 발생하고 있는 실내공간에 급기구로부터 신선한 공기가 1 m/s 의 속도로 유입되고

배기구를 통하여 배출될 경우, 급 배기구의 형상에 따른 유동특성과 농도분포특성에 미치는 영향을 해석하였다.

〈표 3.1〉은 연구에 적용한 급 배기구의 형상이다.

〈표 3.1〉 Shapes and dimensions of inlet and outlet

Shape	Aspect ratio	Dimension
Inlet	1:1	0.1m(L) × 0.1m(W)
	4:1	0.2m(L) × 0.05m(W)
Outlet	1:1	0.1m(L) × 0.1m(W)
	1:4	0.05m(L) × 0.2m(W)
	4:1	0.2m(L) × 0.05m(W)

급기구는 가로세로비가 1:1, 4:1의 2가지 형상이고, 배기구는 1:1, 1:4, 4:1의 3가지 형상에 대하여 연구하였으며 Fig.3.1은 급기구와 배기구의 형상과 주요 치수를 도시한 것이다. 이 때 급기구 및 배기구의 가로세로비는 다르나 면적은 같도록 하였다. 오염원의 위치는 〈그림 2.2〉에서 보여주는 바와같이 6개소로 하였으며 각각의 발생 위치는 격자점으로 나타내었다.

3.1 급·배기구 형상에 따른 유동특성

〈그림 3.2〉~〈그림 3.7〉은 급기구와 배기구가 동일한 단면적일 때, 급 배기구의 형상에 따른 실내기류의 유동분포를 나타낸 것이다.

〈그림 3.2〉는 급기구와 배기구가 1:1의 가로세로비를 갖는 경우에 대한 유동특성으로 벽에 인접한 평면, 급기구와 수직벽 사이의 중간단면, 배기구를 포함하는 수직한 중앙단면 그리고 바닥부근에서의 속도벡터를 나타내주고 있다. (a)~(c)는 X축과 수직한 단면(Y-Z 평면), (d)~(f)는 Z축과 수직한 단면(X-Y 평면), (g)는 Y축과 수직한 단면(X-Z 평면)들 가운데 대표적인 단면에서의 속도분포를 나타내고 있다.

(a)는 X축에 수직한 Y-Z 평면 중 벽 부근의 속도분포로서 대부분의 유동은 벽을 따라 상승하고 있으며 천정에 도달한 상승기류는 천정면

을 따라 유동하다가 천정에서 약 1/10H 떨어진 지점에서는 벽면의 상승기류가 중앙과 좌우측에서 소규모의 와류(vortex)를 형성하고 있다.

(b)는 배기구를 포함하는 중앙단면으로서 유동분포는 배기구를 중심으로 좌우측벽면을 따라 유동하여 천정으로 나가고 천정에서 약 2/10H 부근에서는 양벽면을 따라 유동하던 상승기류가 서로 만나 와류(vortex)를 형성하여 하강하고 있음을 알 수 있다.

(c)는 급기구가 있는 수직벽 부근의 유동분포로서 벽면을 따라 상승하고 있음을 나타내주고 있다.

(d)는 Z축에 수직한 X-Y 평면 중 바닥면의 유동분포로서 급기구에서 나온 기류가 벽면에 충돌하여 방사선 모양으로 사방으로 고르게 퍼져나가고 있다.

(e)는 Z축에 수직한 X-Y 평면 중 중앙부분의 유동분포로서 유동은 좌우측으로 분리되어 벽면을 따라 상승하여 와류(vortex)를 형성하고 있다.

(f)는 Z축에 수직한 X-Y 평면 중 배기구 근방의 유동분포로서 천정의 중앙부분에 있는 배기구를 향하고 있음을 알 수 있다.

(g)는 급 배기구를 포함하는 중앙단면에서의 유동분포로서 급기구를 중심으로 한 우측영역에서의 유동은 천정으로부터 약 1/10H 지점에서는 벽면을 따라 하강하여 와류(vortex)를 형성하고 있다.

〈그림 3.3〉은 급기구의 가로세로비가 1:1이고 배기구의 가로세로비가 1:4,

〈그림 3.4〉는 급기구의 가로세로비가 1:1이고 배기구의 가로세로비가 4:1,

〈그림 3.5〉는 급기구의 가로세로비가 4:1이고 배기구의 가로세로비가 1:1,

〈그림 3.6〉은 급기구의 가로세로비가 4:1이고 배기구의 가로세로비가 1:4,

〈그림 3.7〉은 급기구의 가로세로비가 4:1이고

배기구의 가로세로비가 4:1,

X축과 수직한 중앙단면(a)과 Y축과 수직한 중앙단면(b)에서의 속도벡터를 나타낸 것이다.

〈그림 3.3〉에 나타낸 와류의 생성위치 및 크기 등 전체적인 유동분포를 〈그림 3.2〉(b), (g)와 비교하여 보면 출구영역을 제외하고는 거의 같은 유동분포를 나타내주고 있다. 또한 〈그림 3.4〉~〈그림 3.7〉의 그림에 나타낸 바와 같이 다른 형상의 급기구를 갖는 경우에 대하여서도 출구의 형상에 따라 결과가 같은 경향으로 나타나고 있어 배기구의 형상이 유동에 큰 영향을 주지 못하고 있음을 알 수 있다.

3.2 급·배기구 형상에 따른 농도분포

〈그림 3.8〉~〈그림 3.10〉은 오염물질이 배기구 바로 아래에 있는 바닥으로부터 실내공간높이의 약 1/5H 정도 떨어진 지점(〈그림 2.2〉의 E)에서 오염물질의 발생량이 $q=0.00001 \text{ kg/s}$ 인 경우의 농도분포를 나타낸 것이다.

오염물의 농도는 오염원에서부터 발생한 오염물이 전체 실내공간에 순식간에 확산되어 균일하게 분포되었다고 가정하였을 경우의 평균값 ($\text{Co} = q/\rho W_{in} A_{in}$)으로 무차원화시킨 값이다. 여기서 W_{in} 은 유입공기의 속도이고 A_{in} 은 유입구의 단면적을 나타낸다.

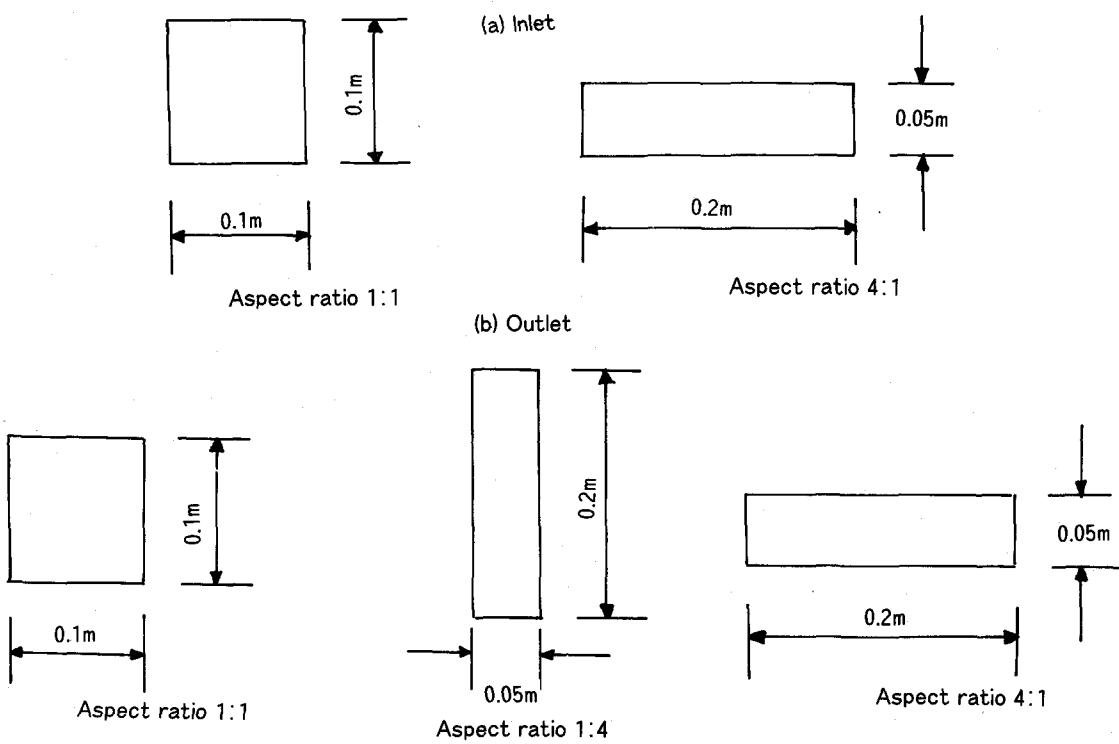
〈그림 3.8〉~〈그림 3.10〉은 급기구의 가로세로비가 각각 1:1, 1:1, 4:1의 형상이며 배기구가 각각 1:1, 4:1, 4:1의 가로세로비를 갖는 경우 급기구를 통하여 신선한 공기가 유입될 때 각각의 형상에 대한 농도분포를 X축과 Y축에 수직한 중앙단면에 대하여 등농도선으로 나타낸 것이다.

X축과 수직한 중앙단면에서의 농도분포를 보면 배기구 가로세로비가 4:1인 경우인 〈그림 3.10〉은 오염원이 있는 아래부근에만 국부적으로 고농도 영역이 존재하고 있는데 비하여 〈그림 3.8〉과 〈그림 3.9〉의 경우는 무차원 농도가 1.0 이

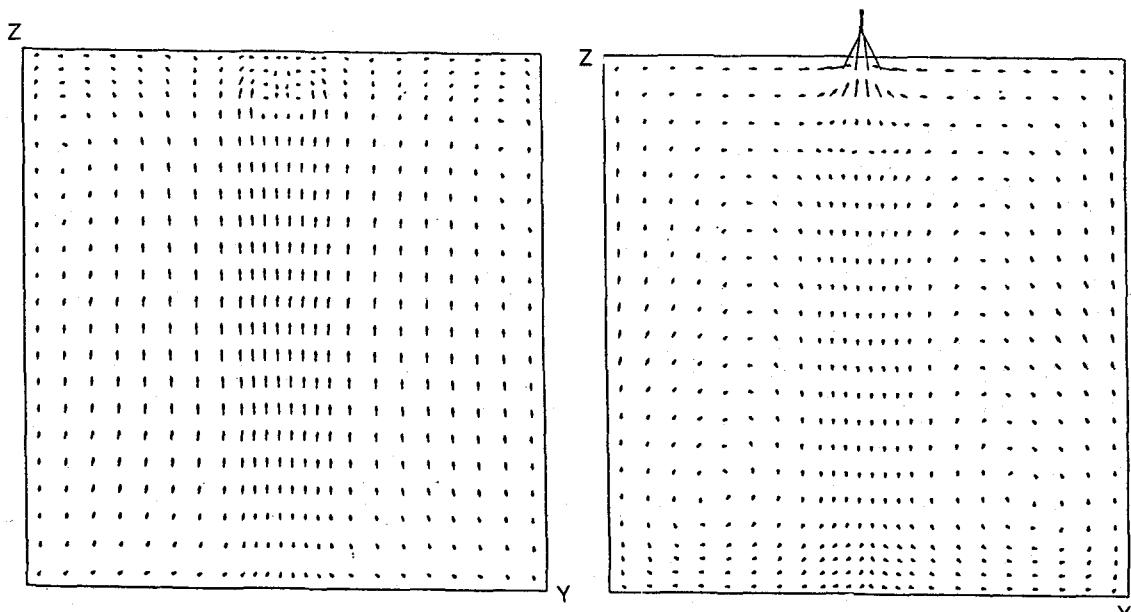
상인 오염된 영역이 오염원이 있는 아래부분의 바닥면과 천정면부터 실내공간중앙까지 넓게 존재하고 있다. 또한 Y축과 수직한 중앙단면의 농도분포에 대하여 보면 무차원 농도가 1.0 이상인 오염된 영역은 배기구를 중심으로 좌측영역에 분포되어 있고 바닥면과 벽면을 따라 고농도 영역이 존재하고 있으며 벽부근에서의 상승기류 영향이 전반적으로 잘 나타나고 있다. 그리고 급기구의 형상이 1:1의 가로세로비를 가질 경우가 4:1의 가로세로비를 갖는 경우보다 1.0 이상의 오염된 영역이 더 넓게 분포하고 있다. 배기구를 중심으로 우측영역은 모든 경우가 무차원 농도 값이 1.0 이하로 양호하게 나타나고 있으며 X축과 수직한 중앙단면과 마찬가지로 가로세로비가 4:1인 급기구의 형상이 역시 낮은 오염도를 보여주고 있다. 또한 오염물질이 배기구 바로 밑의 바닥으로부터 약간 떨어진 곳에서 발생할 경우, 실내공간의 공기질은 급기구의 가로세로비가 4:1인 경우가 가장 양호하게 나타났다.

4. 결 론

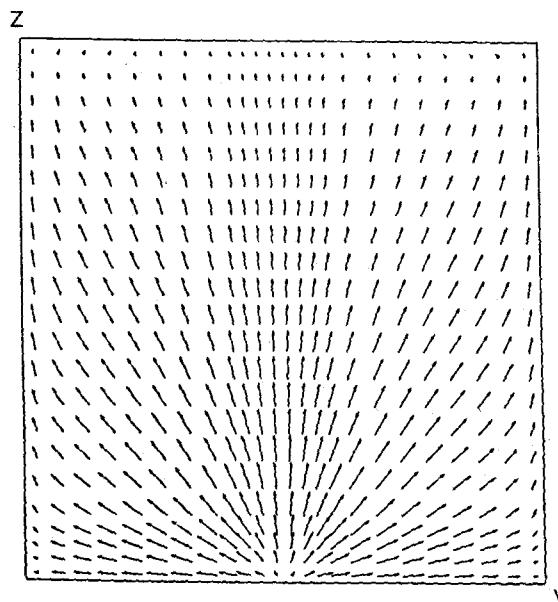
쾌적한 주거환경계획을 세우기 위하여 실내기류 유동특성과 오염물질의 농도분포특성을 예측하였다. 신선한 공기가 수직한 벽면의 아래부분에 있는 급기구로부터 1m/s의 속도로 실내로 유입되고 오염된 공기가 천정면 중앙에 있는 배기구를 통하여 배출될 때 동일한 단면적을 갖는 경우, 급 배기구의 형상에 따른 유동특성과 농도분포특성을 연구하였으며 그 연구결과는 급 배기구가 동일한 단면적을 가지고 있을 때 급기구의 형상은 실내기류의 유동특성과 농도분포에 영향을 미치나 배기구 형상은 거의 영향을 미치지 않으며, 급기구형상의 가로세로비가 4:1인 경우가 실내공간의 공기질이 가장 양호하게 나타났다.



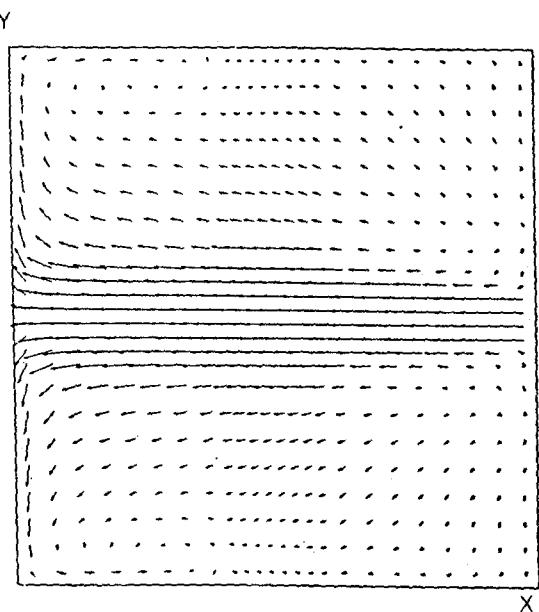
〈그림 3.1〉 Shapes and dimensions of inlet and outlet.



〈그림 3.2〉 Velocity profile (inlet 1:1, outlet 1:1)

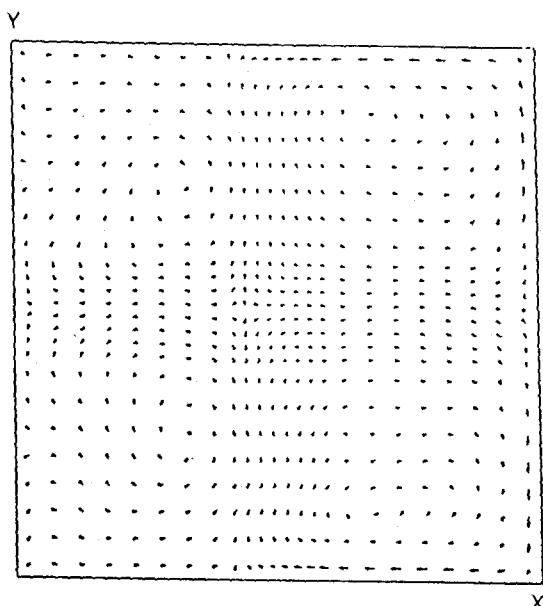


(c) velocity vector of Y-Z plane ($X=39/40L$)

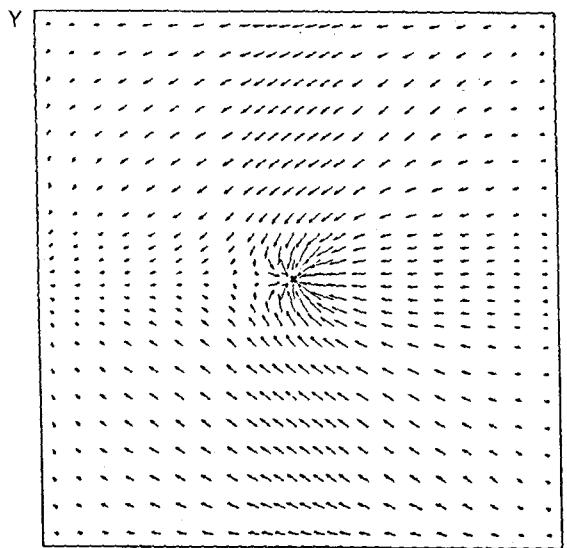


(d) velocity vector of X-Y plane ($Z=1/40H$)

〈그림 3.2〉 Velocity profile (inlet 1:1, outlet 1:1)

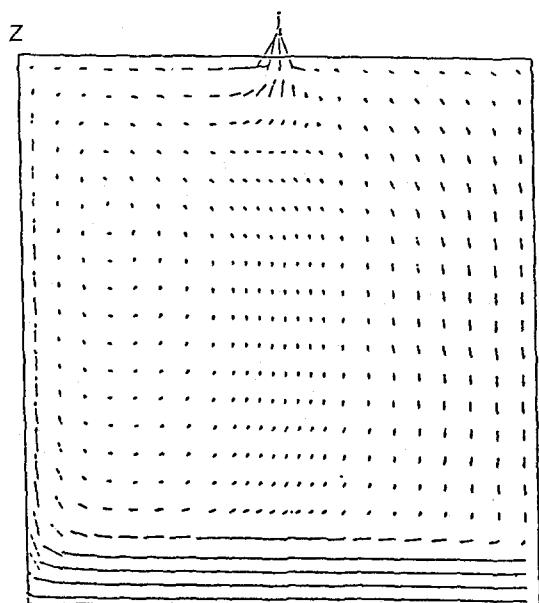


(e) velocity vector of X-Y plane ($X=1/2H$)



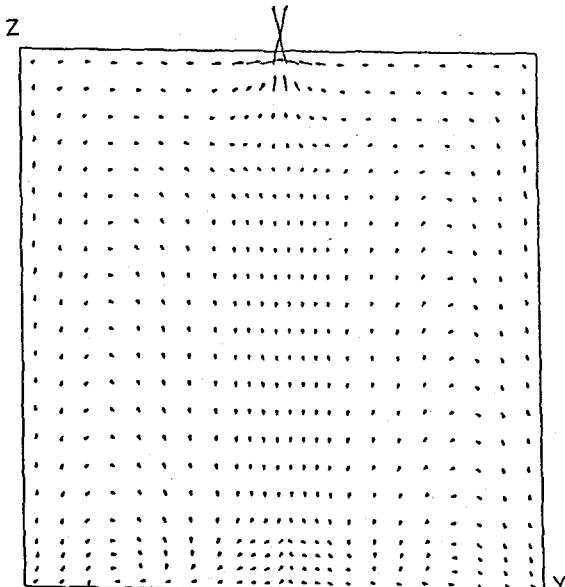
(f) velocity vector of X-Y plane ($Z=37/40H$)

〈그림 3.2〉 Velocity profile (inlet 1:1, outlet 1:1)

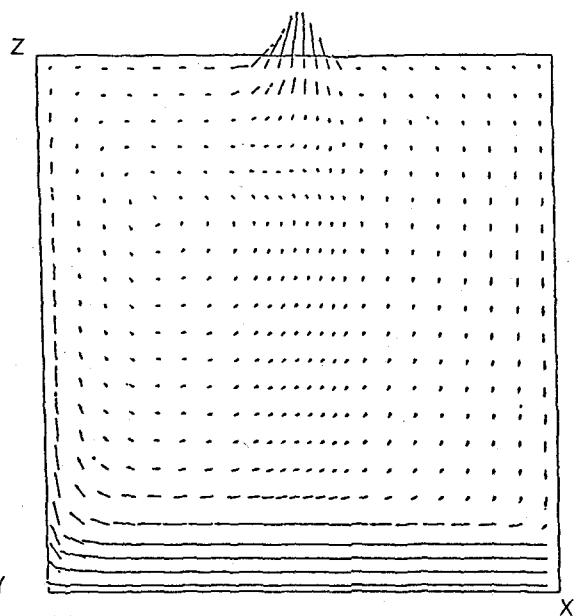


(g) velocity vector of X-Y plane ($Y = 1/2W$)

〈그림 3.2〉 Velocity profile (inlet 1:1, outlet 1:1)



(a) velocity vector of Y-Z plane ($X = 1/2L$)



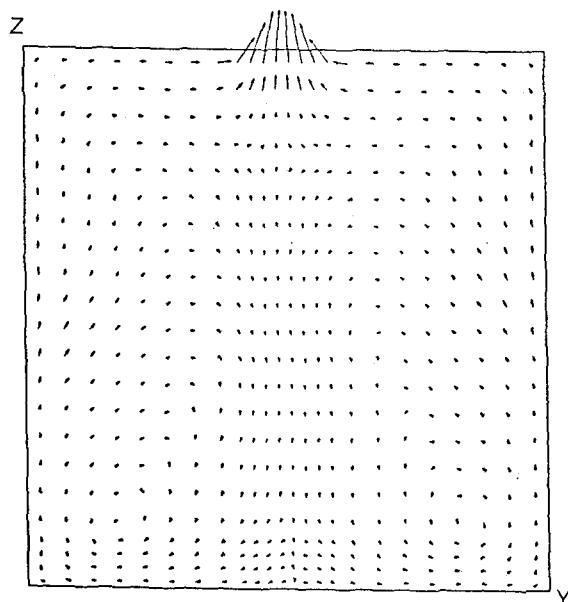
(b) velocity vector of X-Z plane ($Y = 1/2W$)

〈그림 3.3〉 Velocity profile (inlet 1:1, outlet 1:4)

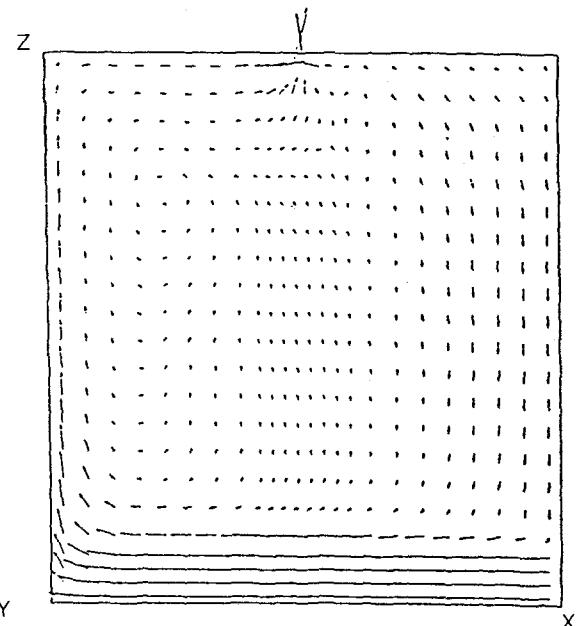
[참고문헌]

1. Nielsen, P.V., Restivo, A. and Whitelaw, J. H., "Buoyancy-Affected Flows in Ventilated Rooms", Numerical Heat Transfer, Vol.2, pp.115~127, 1979
2. Larsson, M., "Prediction of Buoyancy Influenced Flow in Ventilated Industrial Halls", Energy Conservation in Heating, Cooling and Ventilating Buildings, pp.271~281, 1978
3. 小林信行, “室内汚染物質濃度分布と氣流パターン”, 空気調和衛生工學, Vol.54, No.4, pp. 347-353, 1981
4. Haghigiat,F., Jiang,Z., Wang,J.C.Y., "Natural Convection and Air Flow Pattern in a

- Partitioned Room with Turbulent Flow”,
ASHRAE TRANS. Vol.95, Part 2, pp.600~610, 1989
5. 村上周三, 加藤信介, 永野紳一郎, 池田悟, “天井面給排氣による局所流量バランス方式クリーンルームに関する研究(その1)”, 空気調和衛生工學論文集, No.42, pp.1~8, 1990
 6. 村上周三, 加藤信介, 田中幸彦, 永野紳一郎, “天井面給排氣による局所流量バランス方式クリーンルームに関する研究(その2)”, 空気調和衛生工學論文集, No.43, pp.27~38, 1990
 7. 村上周三, 加藤信介, 須山喜美, “コンベンショナルフローモデルクリーンルーム内の氣流性状に関する研究(第2報)”, 空気調和衛生工學論文集, No.37, pp.49~62, 1988
 8. 村上周三, 加藤信介, 須山喜美, “コンベンショナルフローモデルクリーンルーム内の氣流性状に関する研究(第3報)”, 空気調和衛生工學論文集, No.40, pp.65~76, 1988
 9. Murakami,S., Tanaka,T. and Kato,S., “Numerical Simulation of Air Flow and Gas Diffusion in Room Model”, 4th international symposium on the use of computers for environmental engineering related to buildings, pp.90~95, 1983
 10. Patankar,S.V., Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, McGraw-Hill, 1980

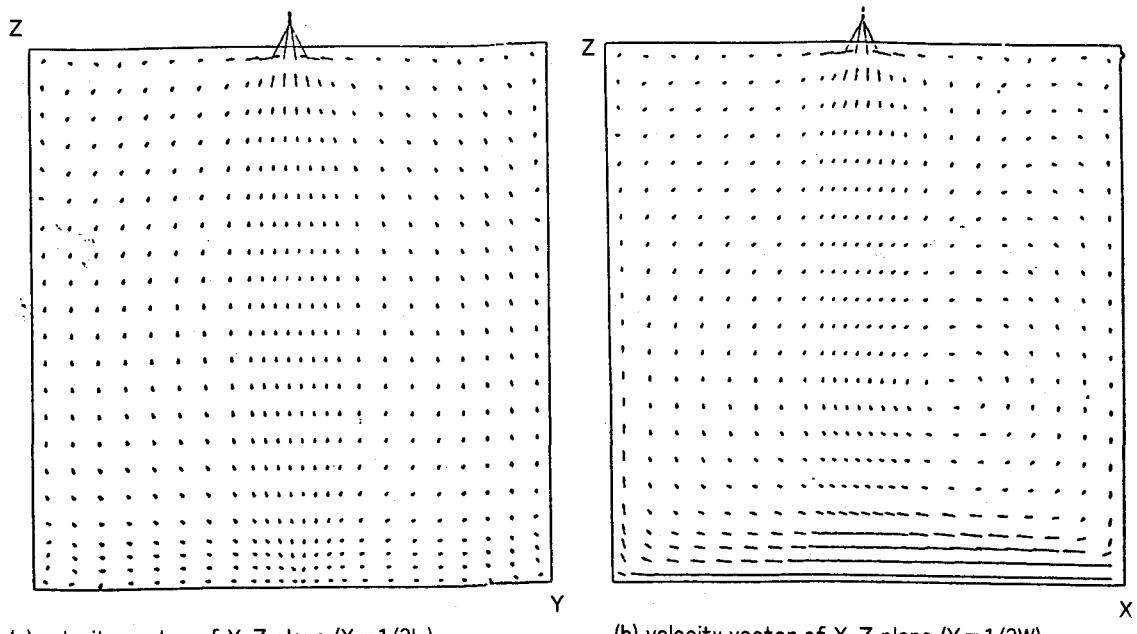


(a) velocity vector of Y-Z plane ($X=1/2L$)

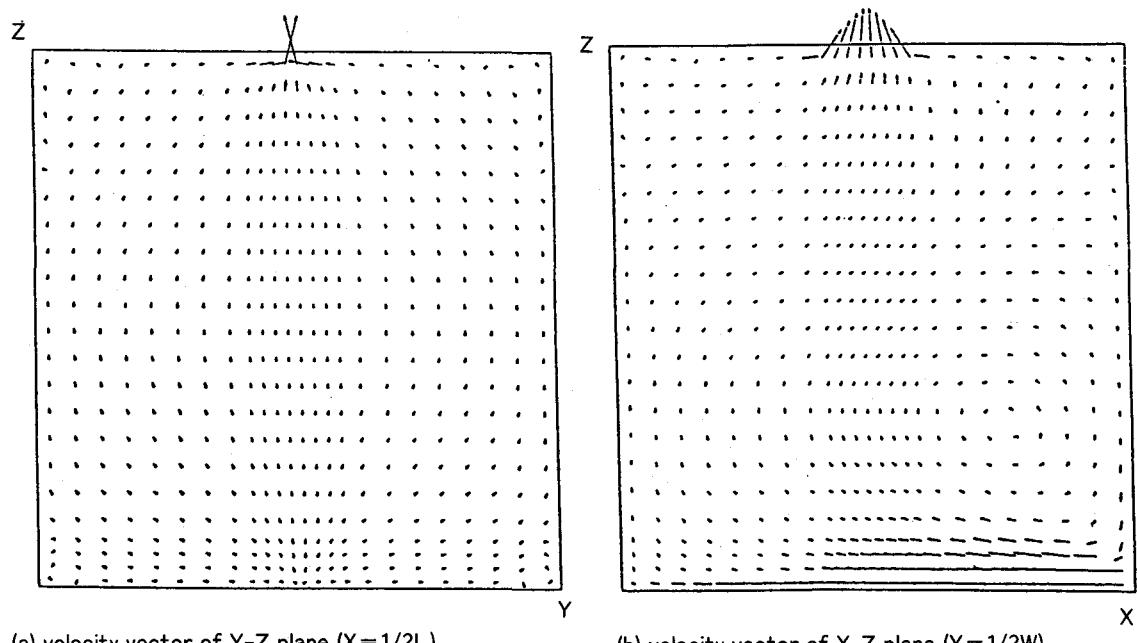


(b) velocity vector of X-Z plane ($Y=1/2W$)

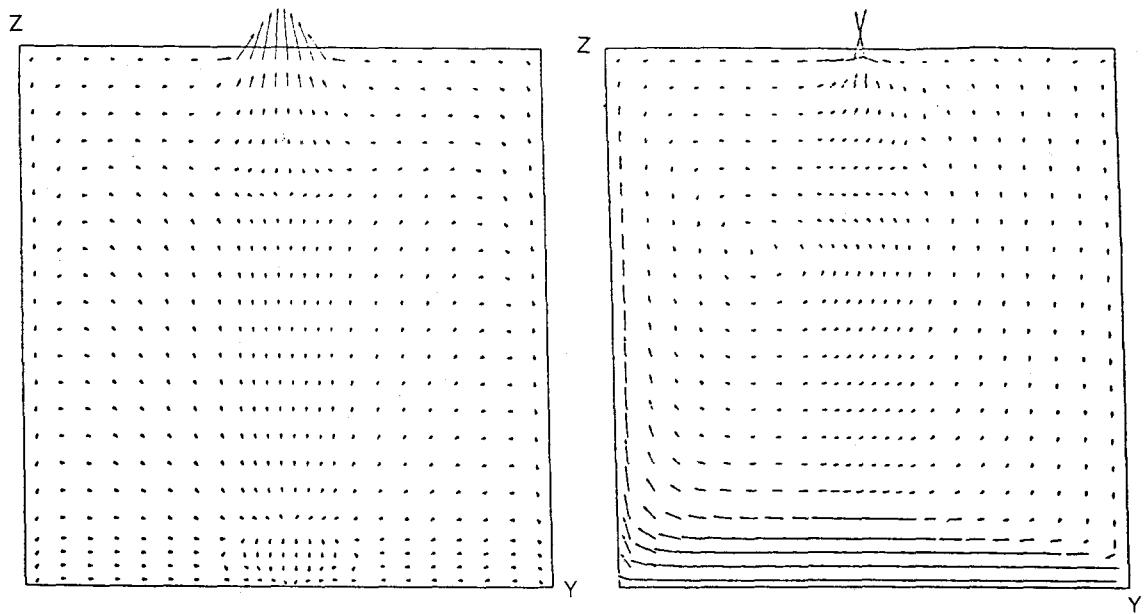
〈그림 3.4〉 Velocity profile (inlet 1:1, outlet 4:1)



〈그림 3.5〉 Velocity profile (inlet 4:1, outlet 1:1)

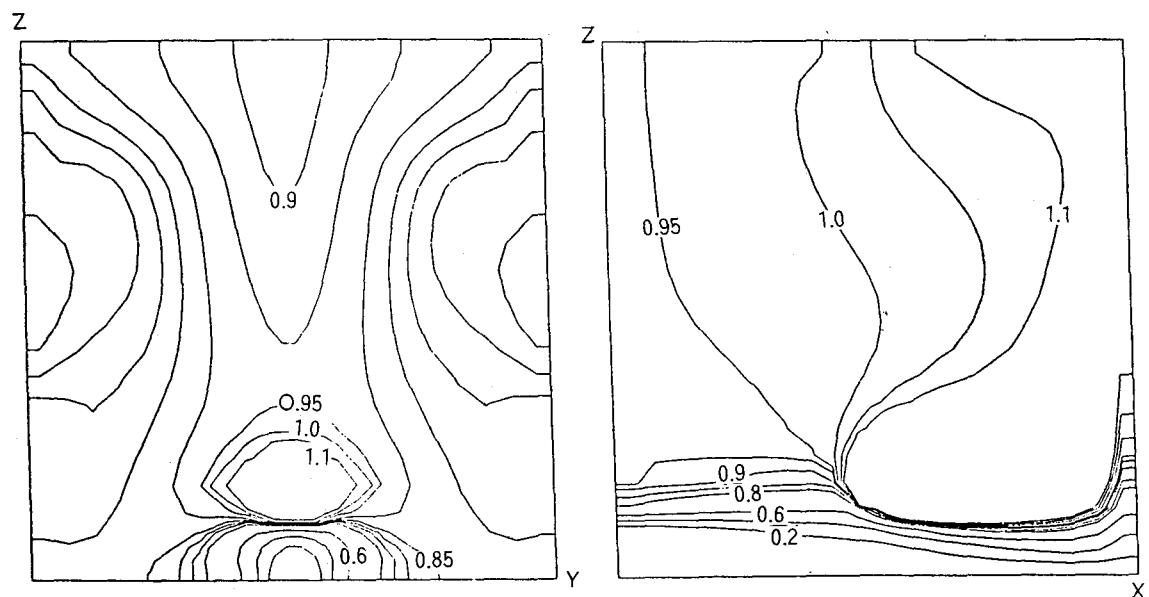


〈그림 3.6〉 Velocity profile (inlet 4:1, outlet 1:4)



(a) iso-concentration contour at Y-Z plane ($X=1/2L$) (b) iso-concentration contour at X-Z plane ($Y=1/2W$)

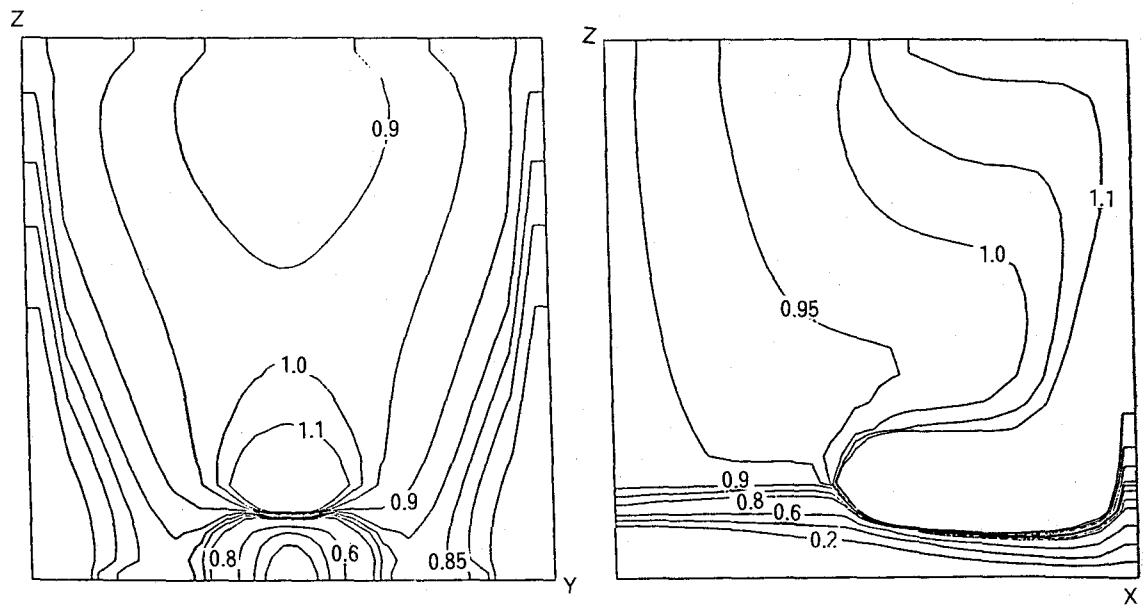
〈그림 3.7〉 Velocity profile (inlet 4:1, outlet 4:1)



(a) iso-concentration contour at Y-Z plane ($X=1/2L$)

(b) iso-concentration contour at X-Z plane ($Y=1/2W$)

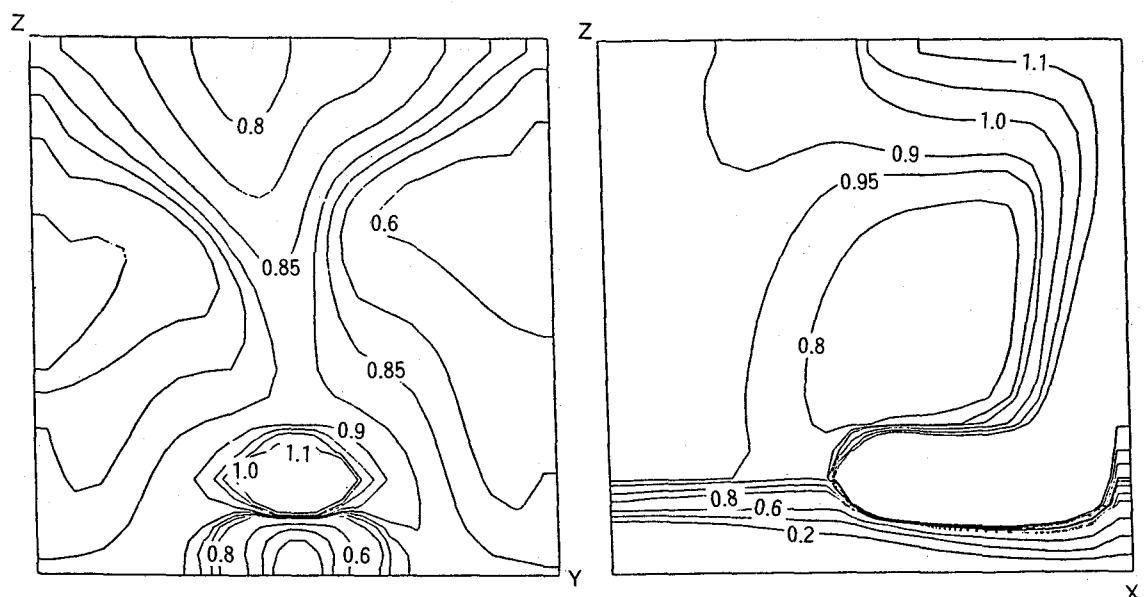
〈그림 3.8〉 Non-dimensional iso-concentration distribution (inlet 1:1, outlet 1:1)



(a) iso-concentration contour at Y-Z plane ($X = 1/2L$)

(b) iso-concentration contour at X-Z plane ($Y = 1/2W$)

〈그림 3.9〉 Non-dimensional iso-concentration distribution (inlet 1:1, outlet 4:1)



(a) iso-concentration contour at Y-Z plane ($X = 1/2L$)

(b) iso-concentration contour at X-Z plane ($Y = 1/2W$)

〈그림 3.10〉 Non-dimensional iso-concentration distribution (inlet 4:1, outlet 4:1)