

실내 오염물질의 희석환기에 관한 모델링

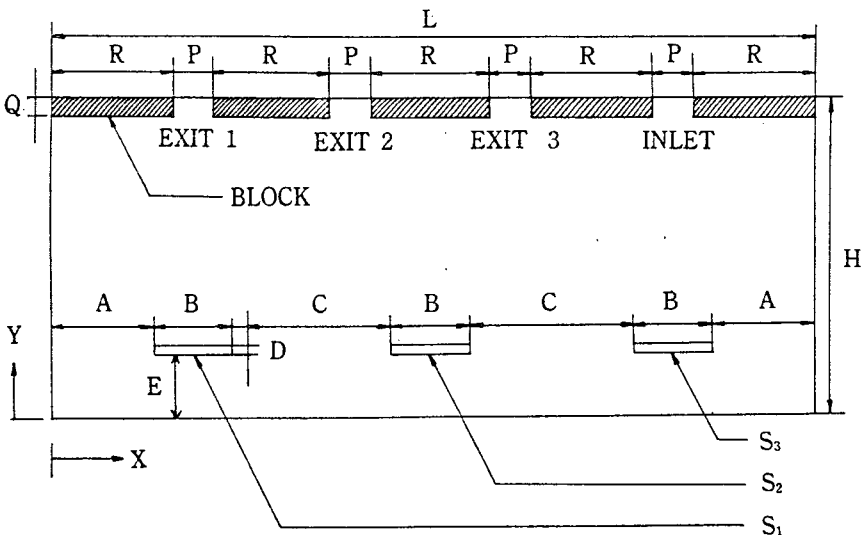
심성훈, 조상준, 김광영 / 한국기계연구소
공기조화연구실

1. 서 론

급진적인 공업화과정에서 대두되고 있는 직업성 질병의 대부분이 유해한 오염물질이 발생하는 작업환경에 기인한다. 작업환경의 개선은 근로자보호 측면과 노동생산성향상 뿐 아니라 복지후생측면에서도 필요불가결한 당면과제이다.

유해작업환경은 대개 소음, 진동, 방사선 등의 물리적환경과 유해가스, 분진등의 유해물질환경으로 대별되는데, 본 연구에서 다루고자하는 분야는 유해물질환경이다. 유해가스나 분진의 발생은 작업공정등의 개선에 의한 방법등으로 근원적인 차단이 불가능한 경우에는 환기시스템을 도입할 수 밖

에 없다. 환기시스템은 희석환기와 국소배기로 나눌 수있는데 작업장내에 소규모 오염원이 산재해 있고 오염물질의 발생율이 일정할 경우에는 희석환기법이 사용된다. 또 이 방법은 급배기 방식에 따라 자연환기 및 강제환기로 나눌 수 있는데 자연환기법은 풍압, 실내의 온도차등의 기상조건과 건물구조등에 따라 환기량의 변동이 크기 때문에 유지할 수가 없다. 본 연구에서는 강제급기방식의 희석환기시스템에 대해 모델을 설정하고 수치계산 및 실험을 통하여 그 결과를 비교분석하여 실제의 환기시스템에 적용시킬 수 있도록 기초자료를 제공하고자 한다.



2. 수치 계산

2.1 계산모델의 설정

실제의 작업실내의 유동은 3차원, 비등온장, 압축성 등의 특성을 가질 수 있으나 본 연구에서는 Fig. 2.1과 같은 계산모델을 채택하여 2차원 유동장, 등온장, 비압축성 유동으로 간주하였다. 유입구에서는 300K의 공기가 온도변화없이 유입단면에 수직하게 균일속도로 유입되고 있으며 3개의 출구에는 모두 0Pa의 정압이 각 출구단면에 균일하게 유지된다. 모델의 바닥에서 0.1m위처에 0.12m×0.12m크기의 오염원 S₁, S₂, S₃가 위치하고 있으며 각 오염원은 단위시간당 일정한 질량의 오염물을 발생시킨다.

난류의 계산을 위해서는 난류운동 에너지(k)와 난류에너지 소산율(ω)에 관한 방정식을 풀어 난류점성계수를 결정하는 k-ω모델을 채택하여 유동장의 특성을 해석하였다. 이러한 k-ω모델은 난류 Reynolds수가 낮은 벽면근처의 난류경계층내의 유동에서 유체점성의 증가와 난류성분의 감소로 인해 모델자체의 타당성을 잃게되므로 이를 고려하기 위하여 Wall Function Method나 Low Reynolds Number Turbulent Model은 복잡한 형상의 유동 해석과 프로그램의 변환성에서 유리한 면을 갖고 있다. 그러므로 본 연구에서는 작업실의 실제 모습과 유사한 비교적 복잡한 형상의 모델을 채택하였고, 벽면에서 k와 ω의 경계값을 0으로 줄 수 있는 프로그램상의 잇점도 있기때문에 Low Reynolds Number Turbulent Model을 채택하여 평균유동을 계산하였다.

2.2 지배방정식 및 경계조건

채택한 모델에 대해 다음과 같이 가정하였다.

- 1) 실내유동은 정상상태 2차원 난류유동이다.
- 2) 실내의 유동은 열전달이 없는 등온장으로 간주한다.
- 3) 실내의 유동은 일정한 밀도 및 점성계수를 가지는 비압축성 유동이다.
- 4) 오염원에서는 단위시간당 일정한 양의 오염입자(Kgc/s)를 배출한다.

위의 가정에 따른 지배방정식은 다음과 같다.

1) 연속방정식

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0 \dots\dots\dots (1)$$

2) 운동량방정식

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} = & -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} [(\mu + \mu_t) \\ & \frac{\partial u}{\partial x}] + \frac{\partial}{\partial y} [(\mu + \mu_t) \frac{\partial u}{\partial y}] + \frac{\partial}{\partial y} [\mu_t \frac{\partial v}{\partial x}] \\ & + \frac{5}{3} \frac{\partial}{\partial x} [\mu_t \frac{\partial u}{\partial x}] + \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial x} [\mu_t \frac{\partial v}{\partial y}] - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial x} [\rho k] \\ & \dots\dots\dots (2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v^2)}{\partial y} = & -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} [(\mu + \mu_t) \\ & \frac{\partial v}{\partial x}] + \frac{\partial}{\partial y} [(\mu + \mu_t) \frac{\partial v}{\partial y}] + \frac{\partial}{\partial x} [\mu_t \frac{\partial u}{\partial y}] + \frac{5}{3} \frac{\partial}{\partial y} \\ & [\mu_t \frac{\partial v}{\partial y}] + \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial y} [\mu_t \frac{\partial u}{\partial x}] - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial y} [\rho k] \dots (3) \end{aligned}$$

3) 난류운동에너지(k) 방정식

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho uk)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vk)}{\partial y} = & \frac{\partial}{\partial x} [(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}) \frac{\partial k}{\partial x}] + \frac{\partial}{\partial y} \\ & [(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}) \frac{\partial k}{\partial y}] + G - \rho \epsilon - D \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

4) 난류에너지 소산율(ε) 방정식

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho u \epsilon)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v \epsilon)}{\partial y} = & \frac{\partial}{\partial x} [(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon}) \frac{\partial \epsilon}{\partial x}] \\ & + \frac{\partial}{\partial y} [(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon}) \frac{\partial \epsilon}{\partial y}] + \frac{\epsilon}{k} (C_1 G - C_2 \rho \epsilon) + E \\ & \dots\dots\dots (5) \end{aligned}$$

여기서

$$G = \mu_t [2 (\frac{\partial u}{\partial x})^2 + (\frac{\partial v}{\partial y})^2 + (\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x})^2]$$

5) 농도(c) 방정식

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho uc)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vc)}{\partial y} = & \frac{\partial}{\partial x} [(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_c}) \frac{\partial c}{\partial x}] \\ & + \frac{\partial}{\partial y} [(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_c}) \frac{\partial c}{\partial y}] + C_{si} \dots\dots\dots (6) \end{aligned}$$

여기서 오염원이 있는 곳을 제외하고는 $C_{in}=0$ 이다.

6) 난류점성 계수

$$\mu = C_{\mu} \frac{\rho k^2}{\epsilon} \dots\dots\dots (7)$$

위의 방정식들에서 Low Reynolds Number Turbulent Model의 정의식 및 실험상수의 값들은 Launder-Sharma가 제안한 값들을 사용했으며 다음의 표2.1에 그리고 경계조건은 표2.2에 나타내

2.3 수치해석

본 연구에서는 전체 계산영역을 많은 작은 제어 체적으로 분할하여 staggered grid방법과 control volume formulation에 의하여 얻어지는 이산화방정식을 SIMPLER algorithm으로 계산하는 기존의 수치해석 방법에 하나의 경계면에 속도경계조건 혹은 압력경계조건이 모두 부여될 수 있는 범용수치 해석방법을 사용하였다. 계산을 위한 grid선정은 Fig. 2. 2와 같다.

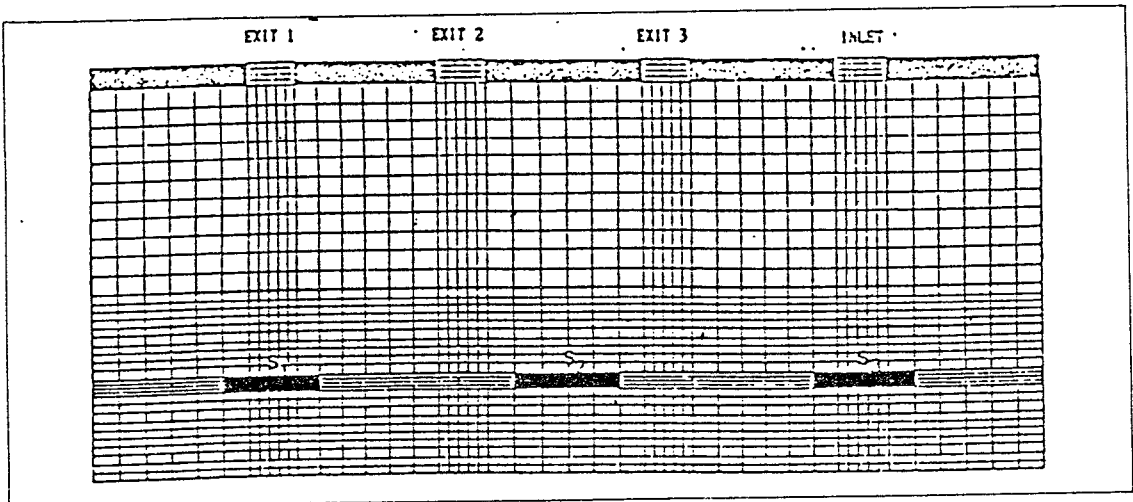


Fig. 2.2) Grid illustration

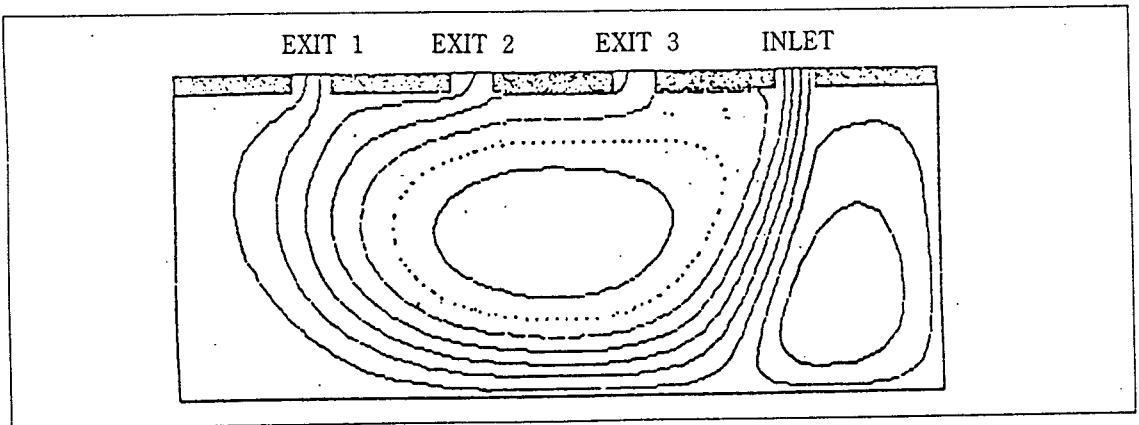


Fig. 2.3) Streamline : $V_{in}=0.2m/s$

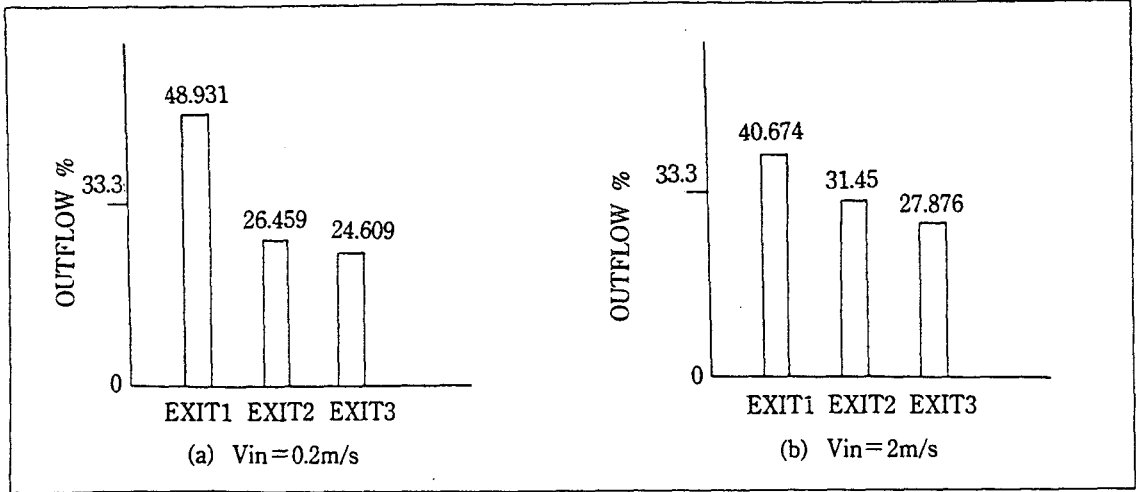


Fig. 2.4) Outflows of each exit

표 2.1) Formulation of low Reynolds number turbulent model

Term	EXPRESSION
R_t	$\frac{\rho k^2}{\mu \epsilon}$
D	$2\mu \left[\left(\frac{\partial k^{1/2}}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial k^{1/2}}{\partial y} \right)^2 \right]$
E	$\frac{2\mu}{\rho} \left[\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x \partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right)^2 \right]$
C_μ	$0.09 \text{ EXP} \left[\frac{-3.4}{(1+R_t/50)^2} \right]$
C_2	$1.92[1-0.3 \text{ EXP}(-R_t^2)]$
C_1	1.44
σ_k	1.0
σ_ϵ	1.3
σ_c	100.0

2.3 수치계산 결과 및 고찰

Fig 2.3은 유입속도가 0.2m/s일때의 유선분포를 나타낸다. 유입속도 2m/s일때의 유선분포도 거의 유사하며 다만 유출구에 거의 평행한 유선이 형성된다. 다음 Fig. 2.4는 각 유출구로의 유출유량의 비교이다. 속도가 작을 때에는 Exit 1.의 유출유량

이 현저히 많으나 유입속도가 증가함에 따라 Fig. 2.4(b)에서와 같이 Exit 2,3의 유량이 증가하여 세 출구가 거의 비슷한 양을 유출시킴을 알 수 있다.

Fig. 2.5는 유입속도가 0.2m/s, 2m/s일때 오염원의 상부표면인 y=0.12m 높이에서 x방향에 따른 농도 분포의 그림이다. Fig. 2.5에서 속도가 작을때

표 2.2) Boundary condition

	\dot{u} [m/s]	v [m/s]	k [m ² /s ²]	ϵ [m ² /s ³]	c [kg/kg]	p [pa]
EXIT 1	$\frac{\partial u}{\partial y} = 0$	nn	$\frac{\partial k}{\partial y} = 0$	$\frac{\partial \epsilon}{\partial y} = 0$	$\frac{\partial c}{\partial y} = 0$	0
EXIT 2	$\frac{\partial u}{\partial y} = 0$	nn	$\frac{\partial k}{\partial y} = 0$	$\frac{\partial \epsilon}{\partial y} = 0$	$\frac{\partial c}{\partial y} = 0$	0
EXIT 3	$\frac{\partial u}{\partial y} = 0$	nn	$\frac{\partial k}{\partial y} = 0$	$\frac{\partial \epsilon}{\partial y} = 0$	$\frac{\partial c}{\partial y} = 0$	0
INLET	0	0.2	0.0002	0.28×10^{-2}	0	nn
		2	0.02	0.2828×10^{-1}		
X=1.44 m	0	0	0	0	$\frac{\partial c}{\partial x} = 0$	nn
Y=0 m	0	0	0	0	$\frac{\partial c}{\partial y} = 0$	nn
X=0 m	0	0	0		$\frac{\partial c}{\partial x} = 0$	nn
BLOCK	0	0	0	0	0	nn

※nn : not needed

더 큰 값의 농도분포를 이루고 있으며 속도가 10배 감소할때 이 위치에서의 농도는 평균적으로 약8.9 배 증가한다. 이 그림에서 3개의 극점들은 오염원이 위치한 곳이며 오염원 S₃의 농도가 최대농도값으로 나타나고 있는데 이는 재순환 유동에 의한 오염물질의 정체로 인한것으로 사료된다. 다음 Fig. 2.6은 오염원의 갯수가 1~3개 일때 같은 위치에서의 농도분포를 보여주고 있다. 오염원의 갯수가 증가할수록 농도분포는 당연히커지고 있으며 오염원이 위치한 곳과 수평방향으로 오염원이 없는 곳들과는 농도분포가 큰차이를 보이고 있다. 이는 수평방향의 확산은 잘 일어나지 않기 때문인 것으로 생각된다.

Fig. 2.7은 오염원의 세기가 1×10^{-5} (kgc/s)과 1×10^{-3} (kgc/s)일 때 역시 같은 위치에 따른 농도분포이다. 여기에서보면 오염원의 세기가 10배 증가할때 이 위치에서의 농도 역시 10배 증가한다. 이상의 수치계산 결과를 정리해보면 다음과 같다.

- 1) 유입속도가 증가할수록 각 출구로 유출되는 유량이 고르게 분배된다.
- 2) 오염원이 유입구의 직하방에 있으면 유동의 재순환으로 인해 벽쪽으로 고농도지역을 형성하므로 환기에 좋지 않다.

- 3) 오염원의 갯수와 세기가 일정할 때 유입속도가 10배 증가하면 오염원의 상부표면인 y=0.12m에서의 농도는 약 0.112배 감소한다.

3. 모델실험

3.1 모델내 유동가시화

모델내 오염물질의 유동상태를 관찰하기 위하여 수치계산에 사용되었던 모델을 기초로 Fig. 3.1과

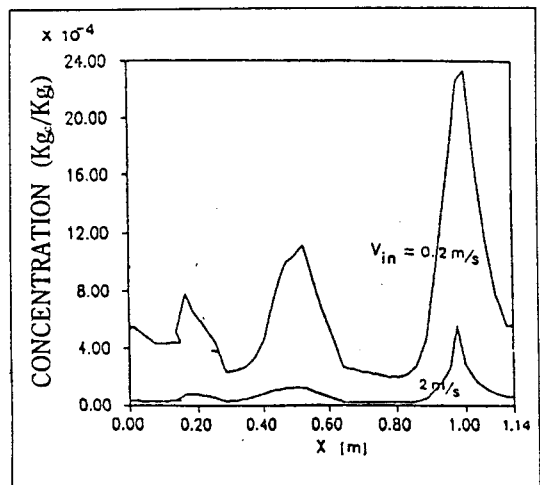


Fig. 2.5) Variation of concentration with inlet velocity
Si : S1, S2, S3 Csr : 1×10^{-5} Kgc/s

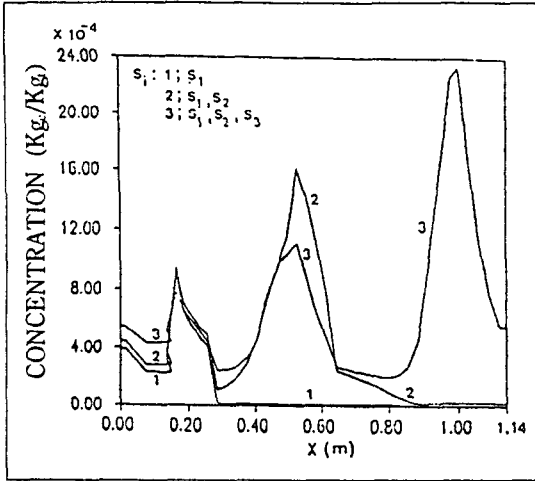


Fig. 2.6) Variation of concentration with contamination number source

$V_{in} = 0.2m/s$ $C_{sr} = 1 \times 10^{-5} Kg/s$

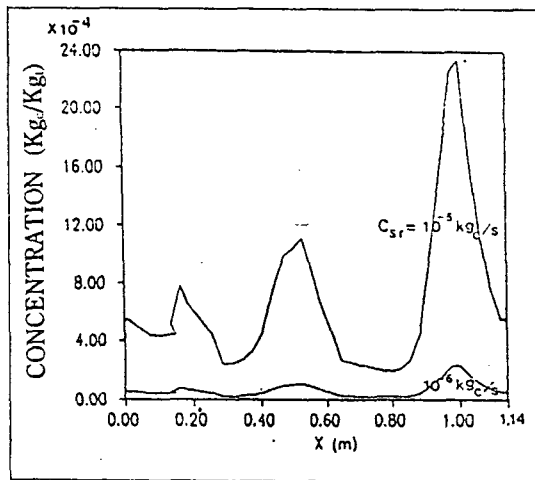


Fig. 2.7) Variation of concentration with contamination source strength

$V_{in} = 0.2m/s$ $S_i : S1, S2, S3$

같이 아크릴로 300mm의 실험모델을 제작하였다. 가시화매체로는 유동파라핀을 유리섬유에 흡수시켜 태움으로써 발생하는 연기를 사용하였다. 연기는 모델내에 설치되어 있는 3개의 오염원에서 동일한 양이 발생하도록 분배하였으며 오염원 내부에 동관을 설치하여 연기가 아래쪽으로 유동하게 한 후 다시 윗쪽으로 스크린을 통해 배출시킴으로서 균일 flux가 발생하도록 하였다. 파라핀 연기의 공급유량은 $4l/min$ 으로 하였으며 환기용 급기의속도

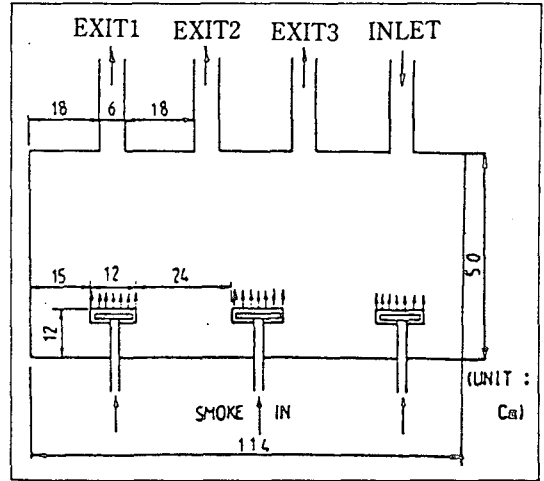


Fig. 3.1) Model for experiment

는 $0.27m/s$ 로 하였다. 촬영을 위한 광원은 폭 5mm의 slit광원 (Halogen lamp)을 사용하여 오염원의 중앙단면을 촬영하였다.

사진 3.1의 가시화사진에서 보는 바와 같이 유입구 우측으로 재순환영역이 형성되는 것을 알 수 있으며 이 부분의 오염물질의 배출이 곤란하다는 것을 알 수 있다, 그러나 수치계산결과에서와 같이 재순환영역이 최고농도를 나타내는 것 같지는 않다. 이는 수치계산에서 사용했던 공기의 물성치와 파라핀연기의 물성치가 다르며 오염원 상부의 압력 조건이 수치계산과 일치하지않는데 기인한 것으로 보인다. 이는 농도측정결과와 비교해 보면 보다 명확히 알 수 있을것이다. 또 여기서 급기의 영향이 미치는 영역이배기의 영향이 미치는 영역보다 상대적으로 훨씬 멀다는 것을 알 수 있다.

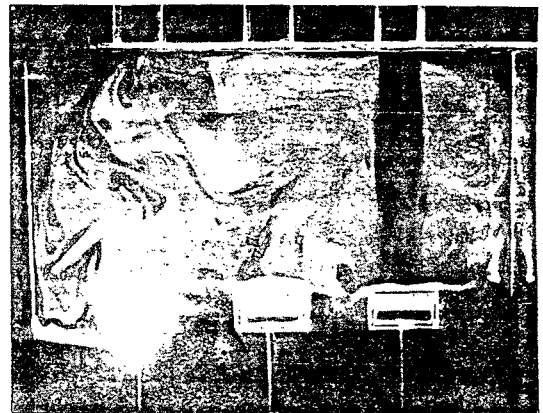


사진 3.1) Folw visualization($V_{in} = 0.27m/s$)

3.2 모델내 입자농도분포의 측정

가시화에서 사용했던 모델을 청소하여 6 jetatomezer (TSI model 9306)를 사용하여 순도99.5%의 NaCl을 증류수에 중량비 3%로 녹여 aerosol을 발생시켜 오염원을 통해 공급하였다. 이때 발생하는 입자는 filtering된 공기로 희석시켜 공급하였다. 환기를 위한 급기유속은 0.09, 0.27m/s로 하였고 입자농도의 측정은 filtering

counter (Hiac/Royco model 5000)로 하였다. 샘플링시간은 1분으로 하였으며 그 유량은 1.0ℓ/min로 하였다. 측정입자의 크기는 3.0, 5.0 μm 로 구분 측정하였으며 주위의 오염된 공기의 영향을 배제하기 위하여 1차 pre-filter를 사용하였다. Fig. 3.2는 배치도이며 측정점은 Fig. 3.3에 나타내었다. Fig. 3.4에서 Fig. 3.7에 그 결과를 나타내었다. Fig. 3.4, 3.5는 입자크기 3.0 μm , 3.6, 3.7은 5.0 μm 에대한 것

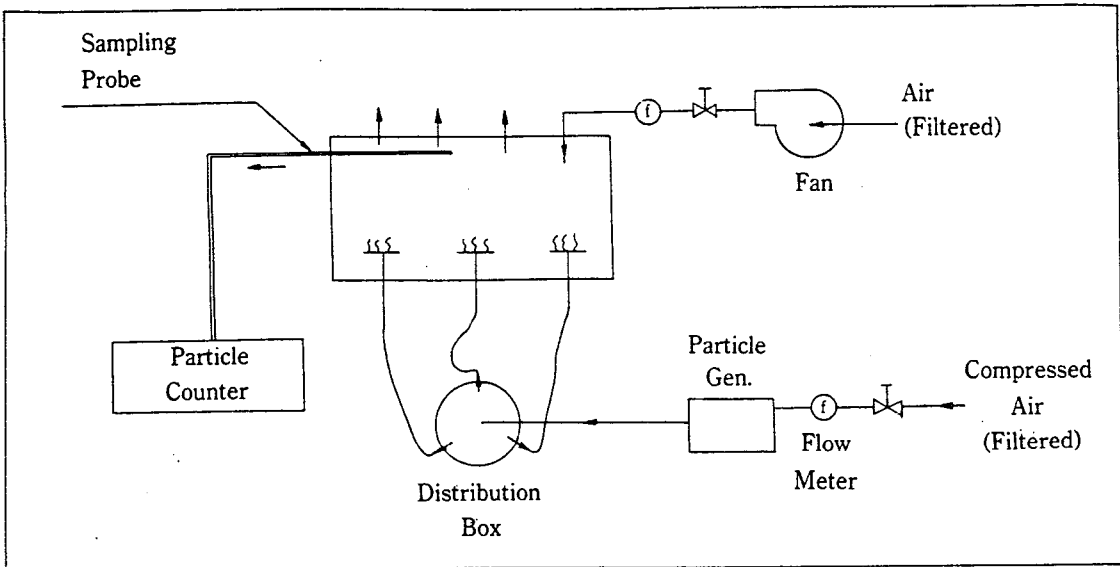


Fig. 3.2) Schematic diagram for measurement of particle concentration

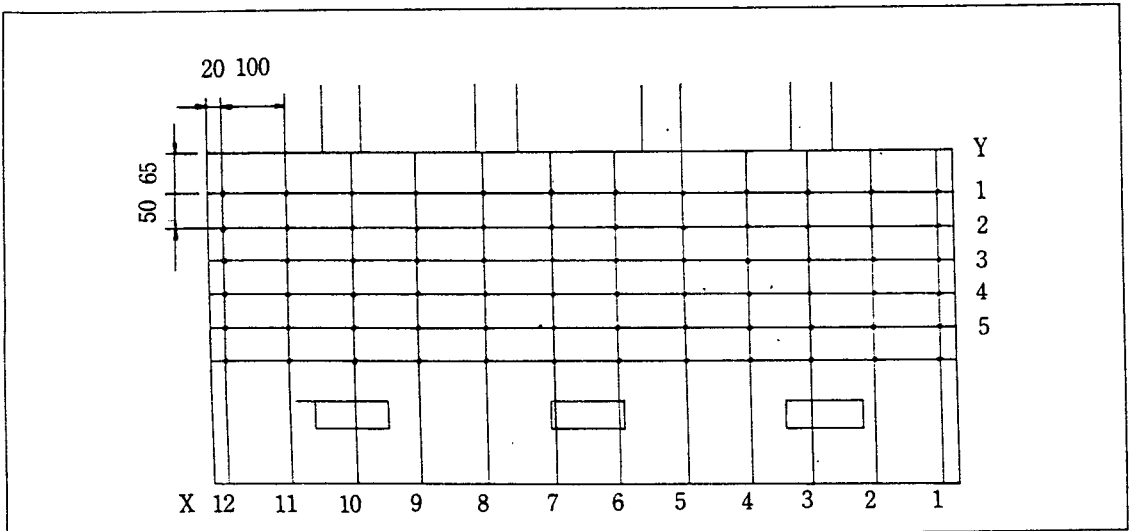


Fig. 3.3) Measuring points

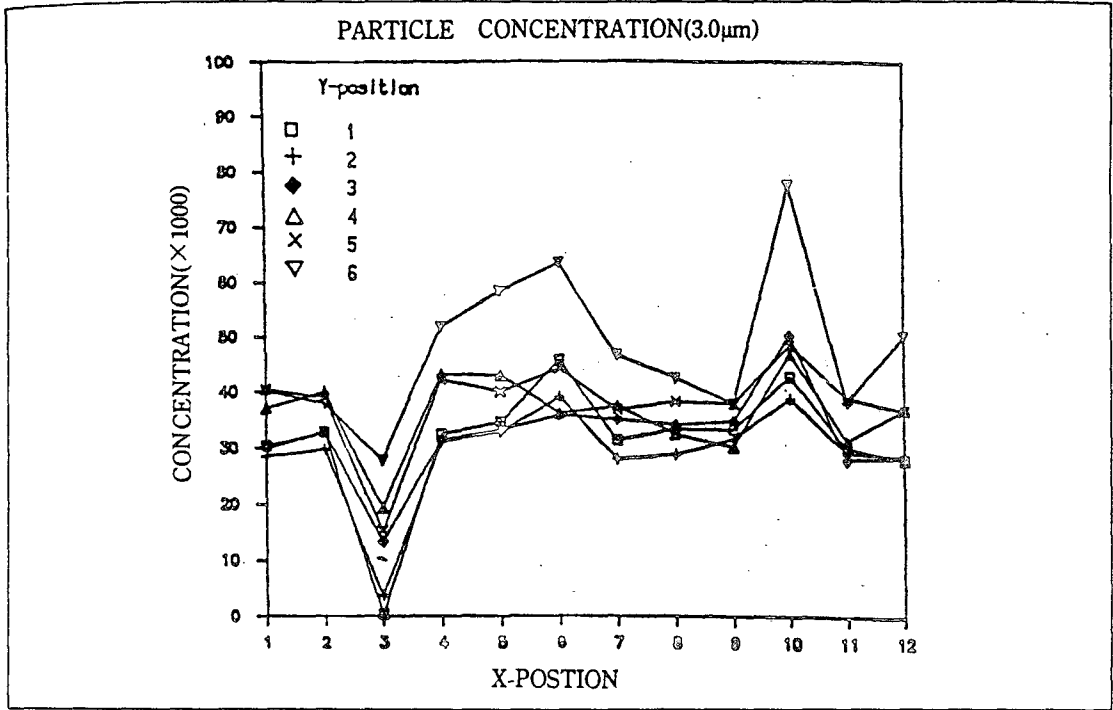


Fig. 3.4) Particle concentration($V_{in}=0.09m/s$)

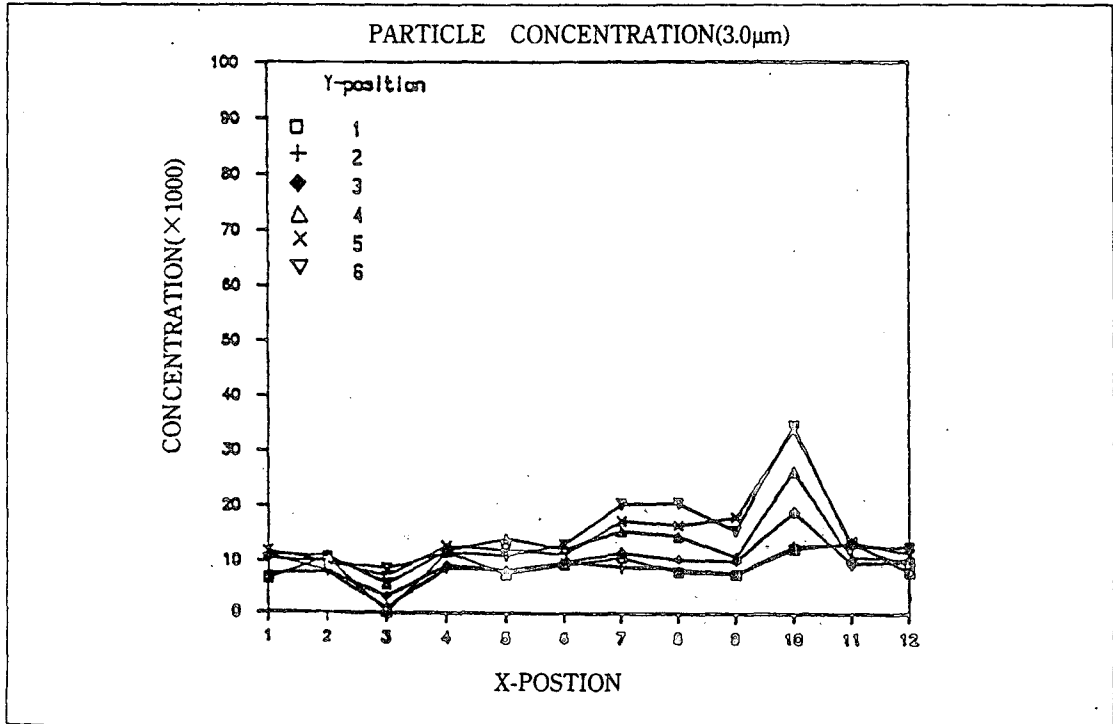


Fig. 3.5) Particle concentration($V_{in}=0.27m/s$)

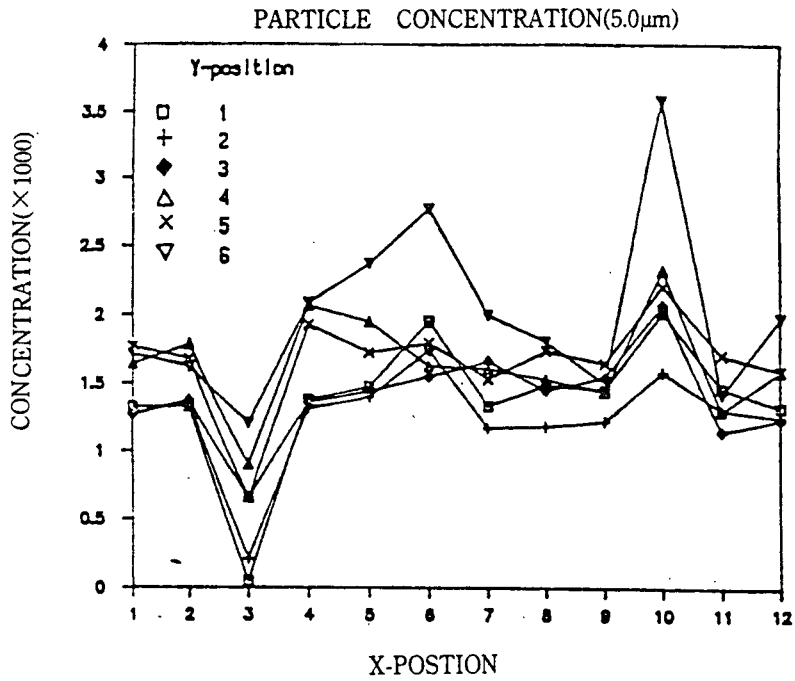


Fig. 3.6) Particle concentration($V_{in}=0.09m/s$)

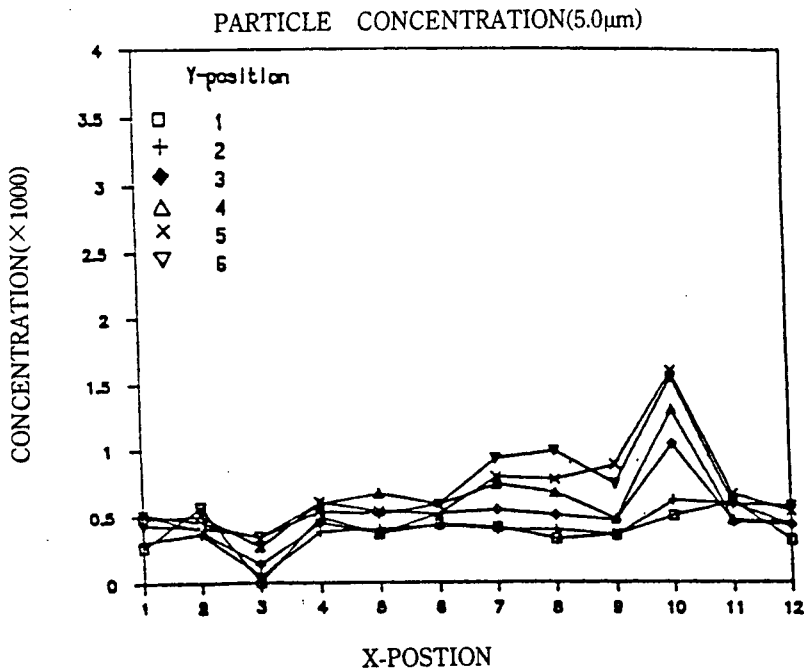


Fig. 3.7) Particle concentration($V_{in}=0.27m/s$)

이다. Fig. 3. 4는 유입속도가 0. 09m/s일때이며, x-위치 3은 급기구 부분이며 3, 6, 10은 오염원이 있는 부분이다. y=6의 위치가 오염원에 제일 근접한 측정점이다. 여기서 살펴보면 오염원직상부의 입자농도는 오염원에 가까워질수록 크게 나타나나 오염원상부로 올라갈수록 고른 분포를 보인다. 오염원의 직상부에서 고농도의 피크치를 보이고 있으나 수치계산 결과에서 처럼 재순환영역에서 최고농도를 나타내지는 않는다. 이는 가시화에서 예측된대로 물성치의 차이와 압력조건의 차이때문인 것으로 사료된다. 즉, 유입압력이 아주 미소하기는 하지만 유입구 직하에있는 오염원과 유출구 부분에 있는 오염원들의 표면에 작용하는 압력이 다소 차이가 있음으로써 유입구 직하의 오염원에서 발생하는 입자량이 다소 적은 것 같다. Fig. 3. 5는 급기유속을 0. 27m/s로 증가시켰을 때의 농도분포이다.

4. 결 론

이상의 회석환기 모델의 수치계산 및 실험결과를 정리해보면 수치계산에 사용된 물성치 및 압력조건의 차이로 수치계산 결과에서 나타났던 재순환영역의 최고농도치를 실험에서는 볼 수없었으나 전체적인 경향은 파악해볼 수 있음을 알 수 있다. 즉 흡입구는 오염원직상방을 되도록피하여 재순환영역으로 인한 오염물의 정체를 피하는 것이 좋으며 자연배기의 경우에는 급기구에서 먼쪽의 유출구로 오염물질이 유인됨을 감안하여 배기구를 설계해야 할 것이며, 급기유량은 가능한 한 증가시켜 오염물질의 빠른 회석과 함께 평균농도의 저하를 꾀해야할 것이다. 그러나, 인체가 0. 5m/s이상의 기류에 장시간 노출되는것은 해로우므로 이에 유의하여야할 것이다. 이상의 기본적인 자료를 바탕으로 앞으로 보다 실제에 근접한 모델링으로 환기시스템에 필요한 제반 인자의 규명과 함께 설계자료의 축적이 병행되어야 할 것이다. *

-기호설명-

C : 농도, $(\frac{\text{오염입자질량}}{\text{혼합유체질량(공기+오염입자)}})$
[kg/kg]

C_{sr} : 오염원 세기(단위 시간당 오염입자발생량)
[kg/s]

C_{si} : 단위체적당 오염입자 발생율(=C_{sr}/오염원의 체적) [kg/m³·s]

k : 난류 운동에너지 [m²/s²]

l : mixing length [m]

S_i : 오염원 갯수 및 위치

S₁ : 오염원1

S₂ : 오염원2

S₃ : 오염원3

V_{in} : Inlet Velocity [m/s]

μ : 점성계수 [kg/m·s]

μ_n : 난류 점성계수 [kg/m·s]

ρ : 밀도 [kg/m³]

ε : 난류에너지 소산율[m²/S³]

첨 자

c : contamination

t : total or turbulent

sr : strength

(이자료는 한국기계연구소에서 작년 12월에 발간한「한국기계연구소 소보」제19권중에서 발췌, 게재한 것이다.)

