

유해물질 제거를 위한 국소배기장치 후드의 흡입력 증가에 관한 연구

양호동[†] · 김영선* · 오을권**

A Study on Inhalation Force Improvements of Ventilation Hood For Removed a Pollution Source

Ho-Dong Yang, Young-Sun Kim and Yool-Kwon Oh

Key Words: Local Ventilation System(국소배기장치), Gas-Guidance-Device(가스유도장치),
Pollution Source(유해물질), Hood(후드)

Abstract

This study investigates on the inhalation force improvements of hood consisted one of the local ventilation systems attached the new device named as gas-guidance-device for removed a pollution source. The numerical method applying finite element method is calculated the velocity and pressure distributions of a moving fluid at the beginning and the inside of a hood with and without the gas-guidance-device in hood. And, the experimental study is measured the wind velocity using the anemometer at the same condition of numerical study. Also, the optimum shape of gas-guidance-device which is suitable for hood shape derived from the numerical and experimental results. The results of this study is supplied the important data to an industrial field for control of a pollution source in the engineering aspect. Moreover, the introduced technique of hood attached the gas-guidance-device is very useful to remove the harmful materials such as dust and waste happened in the manufacturing factory.

1. 서 론

기호설명

μ_t : 난류점성계수
 K : 난류에너지
 ϵ : 난류 소산률
 E : 조도계수
 Re : 레이놀즈수
 V : 입구속도
 D : 관경 또는 길이
 v : 동점성계수

생산현장, 지하 공간, 터널 등 상당히 많은 응용분야를 갖는 환기(Ventilation)는 외부가 아닌 곳에서 발생하는 공기오염물질, 열 또는 수분을 공학적인 방법으로 인간 및 제반 설비에 피해를 일으키지 않도록 제어해주는 역할을 하는데, 그러한 중요성에도 불구하고 공기오염물질에 대한 사람들의 인식은 그다지 높지 않았다. 산업화 초기에는 외국으로부터 생산시설을 구입할 때 필요한 산업 환기설비를 함께 들여왔지만, 그 후 상당부분을 자체 제작하여 사용 하였다¹⁾. 또한 시설물들이 형식적으로 설치된 것이 많았고, 이에 대한 유지 및 보수가 잘 되지 않았다. 산업 환기의 중요성이 부각된 시점은 노동자의 직업병에 대한 문제가 사회문제로 대두되고 난 후 부터이다. 사회적인 이슈가 되었던 사건으로는 원진레이온 이

† 조선대학교 대학원
E-mail : hodongy@yahoo.co.kr
TEL : (062)230-7010 FAX : (062)230-6596

* 조선대학교 대학원

** 조선대학교 메카트로닉스공학과

황화탄소 중독, 형광등 제조공장 수은중독, LG 전자부품 유기용제 중독에 의한 생식능력 장애등이 있다. 이렇듯 이러한 사건이 터질 때마다 직업병 진단, 작업환경측정 등에만 관심을 보여왔을 뿐이며, 공학적인 제어방법으로 환기효율을 개선할 방안에 대해서는 많은 관심을 기울이지 못한 것도 사실이다. 특히 그 중요성에도 불구하고 제반 여건으로 인하여 이 분야에 대한 기술공급이 원활히 이루어지지 않고 있다. 또한 작업 현장에서 오염물질과 열을 배출하기 위하여 환기시스템이 사용되고 있으나 근로자 중 그 효과에 대한 의문을 갖는 경우가 많고, 그리하여 작업도중 행동이 불편하다 하여 배기장치의 형태를 변형하는 경우도 생겨나게 되었다.

따라서 본 연구에서는 산업현장에서 쓰이고 있는 후드에 가스유도장치(Gas-Guide-Device)를 설치하여 흡입으로 인한 후드 주변에 발생한 유동을 시뮬레이션 해보고 가스유도장치의 최적 형상과 위치를 도출하고자 한다.

2. 이론해석

비압축성 유동과 정상상태라는 가정 하에서 난류 유동에 대한 일반적인 지배방정식은 다음과 같다.

2.1 연속방정식

일반적으로 유체의 유동은 변수인 속도, 압력, 밀도, 온도와 이들의 공간적·시간적 미분형태로 표현할 수 있다. 유체의 밀도는 에너지, 온도 등에 의해 관계되며, 국소 압력구배는 유체운동으로 작용하나, 이 유체운동은 질량보존의 법칙, 즉 연속성의 법칙에 의하여 제약을 받는다. 질량보존의 법칙은 한 물질의 질량은 생성되거나 소멸함이 없이 보존된다는 법칙으로 질량보존방정식(연속방정식)은^{2,3)} 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x_f}(\rho U_j) = 0 \quad (1)$$

2.2 난류 운동량 방정식

난류 모델은 난류 점성 계수(μ_t)를 취급하는 방법에 따라 여러 가지로 나눌 수 있는데 본 연

구에서는 난류를 풀기 위해서 k- ϵ 난류모델을 썼으며 k- ϵ 모델에서는 난류에너지 k로부터 특성속도를 구하고 점성수산율의 크기 ϵ 으로부터 간접적으로 특성길이를 구하는 모델이다⁴⁾.

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_i U_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \mu_{eff} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right\} - \frac{\partial P}{\partial x_i} \quad (2)$$

여기서,

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t = \mu + C_\mu \frac{\rho K^2}{\epsilon} \quad (3)$$

난류 점성 계수를 구하기 위해서 필요한 난류 에너지(K)와 소산률(ϵ)은 다음과 같이 구한다.

난류 에너지(K) 방정식

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho U_i K) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_{eff}}{\sigma_k} \frac{\sigma K}{\sigma x_i} \right) + G - \rho \epsilon \quad (4)$$

소산률 (ϵ) 방정식

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho U_i \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_{eff}}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right) - C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{K} G - C_{\epsilon 2} \frac{\epsilon^2}{K} \quad (5)$$

여기서 G는 난류 생성항으로써 다음 식과 같이 표시된다.

$$G = \mu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \quad (6)$$

난류 운동에너지를 풀기 위해 사용되는 실험상수는 Table 1과 같다.

Table 1 Value of the constants in the k- ϵ model

C_μ	$C_{\epsilon 1}$	$C_{\epsilon 2}$	σ_k	σ_ϵ
0.09	1.44	1.92	1.0	1.3

2.3 나비에 스톡스(Navier-Stokes Equation))

나비에 스톡스 방정식은 후드 및 덕트 주위로 흐르는 공기 같은 유체와 기체의 흐름을 수학적으로 기술한 것을 말한다. 국소배기장치 모델링을 수치해석 하기위해 COMSOL Multiphysics™ 프

로그를 사용하는데 본 프로그램에서 유동해석 시 나비에 스톱스 방정식을 사용한다.

2.3.1 유체 흐름의 운동량 관계식 모형

유체 운동량의 적분형 관계식은 다음과 같이 유도될 수 있다.

$$\sum \vec{F} = \int_s \rho \vec{v} (\vec{v} \cdot \vec{n}) dA + \frac{\partial}{\partial t} \int_v \rho \vec{v} dV \quad (7)$$

식의 개념을 간략하게 설명하자면 대상 부피에 작용하는 외부 힘의 합은 선운동량의 순 유출 속도와 대상 부피 내의 선 운동량 변화 속도를 합한 것과 같다.

2.3.2 Navier-Stokes 방정식

$$\begin{cases} \rho \frac{DV_x}{Dt} = -\frac{\partial P}{\partial x} - \left(\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \right) + \rho g_x \\ \rho \frac{DV_y}{Dt} = -\frac{\partial P}{\partial y} - \left(\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} \right) + \rho g_y \\ \rho \frac{DV_z}{Dt} = -\frac{\partial P}{\partial z} - \left(\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} \right) + \rho g_z \end{cases} \quad (8)$$

2.3.3 ρ 와 μ 가 일정한 비압축성 흐름에서의 Navier-Stokes 방정식

비압축성 흐름의 경우는 $\nabla \cdot \vec{V} = 0$ 이므로, 이 경우에는 다음과 같이 전 좌표의 상황을 하나의 식으로 표현할 수 있다.

$$\rho \frac{D\vec{V}}{Dt} = -\nabla P + \mu \nabla^2 \vec{V} + \rho \vec{g} \quad (9)$$

특히 더욱 특수한 경우로서 비점성인 경우 즉, 점도가 '0'인 경우의 식을 Euler 식이라고 불리며, 다음과 같이 나타낸다.

$$\rho \frac{D\vec{V}}{Dt} = -\nabla P + \rho \vec{g} \quad (10)$$

3. 수치해석

3.1 수치해석 프로그램

COMSOL Multiphysics™는 편미분방정식(PDE)

으로 구현된 물리현상을 시뮬레이션 할 수 있는 모델링 패키지 소프트웨어로, 이공학 분야의 실제 현상에서 일어나는 복잡한 문제를 빠르고 신속하게 풀 수 있는 최고의 솔버기능을 제공하며, 사용자 편의를 도모하도록 쉽고 간편하게 되어 있다. 탁월한 유연성을 갖는 COMSOL Multiphysics™의 모듈은 Equation으로 구분된 집합체이며, 각각의 모듈에 들어있는 Equation간의 어떠한 조합도 가능하다. 이를 통해 사용자는 모델 구성 시 능동적으로 물리 영역간의 조합을 구성할 수 있다. 또한, 상용패키지로는 유일하게, GUI환경 안에서 Built-In 지배방정식을 원하는 대로 수정할 수 있으며, 제공되는 PDE품을 이용하여 새로운 지배방정식을 설정할 수도 있다.⁵⁾

3.2 경계조건 및 수렴조건

먼저 경계조건으로는 후드 출구면(덕트 연결부)에서는 Outflow Velocity Boundary Condition으로 설정하였고, Free Surface는 Air(1atm)으로 설정하였다. 또한 Wall에서는 유체유동이 발생하지 않으므로 No Slip B.C.으로 설정 하였고, 뒷면, 즉 후드 부 입구 뒷면은 계산영역에서 제외하였다. 또한 후드 및 주위 Surface의 총 격자수를 약 14,000개로 형성하였고, 프로그램의 Cell Reynolds Number를 최소화하여 수치해석의 신뢰성을 높였다.

3.3 수치해석 방법

본 연구에서는 후드 입구에서 포착속도를 개선하고자 제작된 가스유도장치의 성능 평가를 위하여 COMSOL Multiphysics™를 사용하였다. 우선 현장에서 사용 중인 후드를 대상으로 유동 시뮬레이션을 통하여 직경이 400mm인 원형 덕트를 통해 6.85m/sec의 유속으로 흡입되고 있는 경우, 가스유도장치가 장착되지 않은 경우와 장착된 경우에 있어서 후드내의 속도분포 결과를 알아보았다. 또한 가스유도장치의 최적 형상을 도출하여 상용화가 가능한 고효율 후드를 제작·설계하고자 여러 가지 형상의 가스유도장치를 모델링 한 후 각각의 경우에서 얻은 수치해석 결과를 비교·분석하여 보았다. 가스유도장치의 형상은 시제품으로 제작할 덕트 및 후드의 크기를 고려하여 Fig.1과 같이 폭(b)과 변(X:윗변, Y:아래 변)으로 나누어 형상을 결정하고 유동 시뮬레이션을 수행하였다.

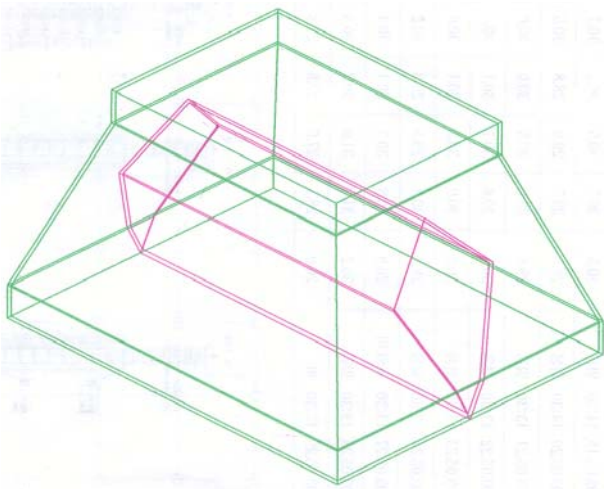


Fig. 1 Shape of Gas-Guide-Device

Table 2 Experimental stipulation for shape decision
[단위 : mm]

case	case I (b=125)		case II (b=150)		case III (b=175)	
	X	Y	X	Y	X	Y
Gb-rate	X	Y	X	Y	X	Y
Gb-5 : 5	177	177	177	177	177	177
Gb-4.5 : 5.5	160	195	160	195	160	195
Gb-4 : 6	142	213	142	213	142	213
Gb-3.5 : 6.5	124	230	124	230	124	230
Gb-3 : 7	106	248	106	248	106	248

Table 2는 가스유도장치의 최적형상을 도출하기 위한 실험조건을 보여주는 것으로, 가스유도장치의 성능을 확인하기 위하여 실제 산업현장에 설치되어 있는 후드를 고려하여 가스유도장치의 크기를 결정하였고 시뮬레이션을 통해 각각의 경우에 있어서 유속을 측정하였으며, 최적의 형상 도출을 시도하였다. 본 연구에서 실험조건으로 채택한 가스유도장치의 형상들은 여러 가지 모의 실험을 통해 얻은 결과를 바탕으로, 가스유도장치의 X, Y의 길이 비가 약 50~65% 범위에 가까이 접해 있을 때 후드의 제어속도나 풍량(평균유속)의 결과가 만족할 만한 결과를 가져왔기 때문에 실험조건을 Table 2와 같이 정리하여 연구를 수행한 것이다. 그리고 Table 2의 실험조건들을 통해 수치해석을 수행하고 얻어진 결과를 비교·분석하여 가스유도장치의 최적의 형상을 도출해 내고자 하였다.

4. 수치해석 결과

4.1 가스유도장치 성능평가

가스유도장치를 후드 내에 장착하기 위해 어떠한 형상으로 제작·설계하는 것이 가장 효과적인지 알아보기 위하여 우선, 첫 번째 후드의 입구에 6.85 m/s의 유속으로 강제 배기시켜 후드 및 컨베이어 상부 반제품 고무에서의 공기 유동을 2차원 정상상태로 해석하였다. 기본적으로 유체의 흐름을 비압축성이라 가정하면 후드 내의 레이놀즈수(Re)는 다음과 같이 결정된다.

$$Re = \frac{V \cdot D}{\nu}$$

여기서, V 는 입구속도, D 는 관경 또는 길이, ν 는 동점성계수

결국, 레이놀즈수가 4000 이상이므로 난류유동 해석을 하였다. 또한 20°C, 1기압의 공기를 기준으로 후드 주위의 유동을 해석하였다.

Fig. 2는 시뮬레이션을 통한 유속 측정을 위하여 가스유도장치가 장착된 후드 내에서 Probe의 위치를 개략도로 보여주고 있다. 본 실험에서는 가스유도장치의 최적 형상 도출을 위해 5개의 point에서 유속을 측정하였으며, 각각의 Point에서 유속을 측정함으로써 그 결과를 확인해 볼 수 있었다.

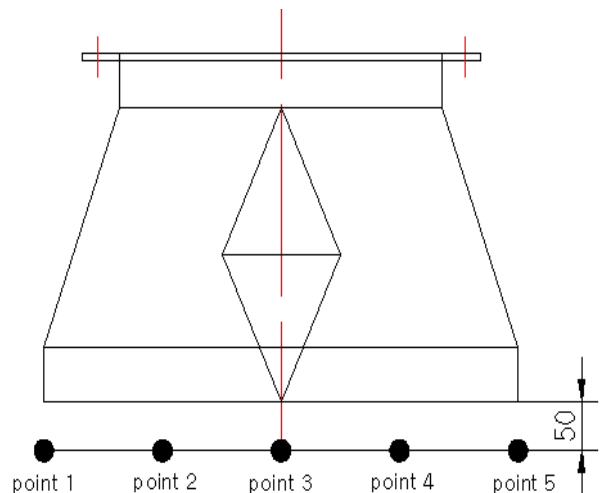


Fig. 2 Probe Position on velocity measurement

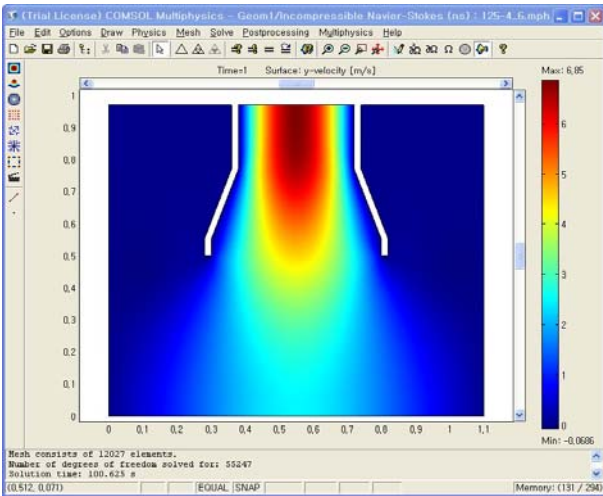


Fig. 3 Case have no Gas-Guide-Device

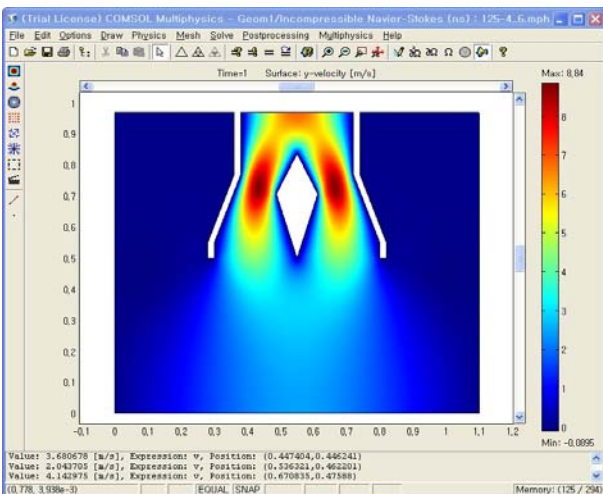


Fig. 4 Case have Gas-Guide-Device

4.2 가스유도장치 최적형상 결정

Figure 3,4를 살펴보면 가스유도장치를 장착하지 않았을 경우 확인할 수 없었던 와류가 장착하였을 경우 형성되는 결과를 확인하였으나, 여기서 형성되는 와류는 본 연구에서 추구하고자 하는 후드 입구 양쪽 끝단에서 분진의 흡입능력을 향상시키고 고효율 후드를 개발하는데 있어서 참고문헌 및 실무자들의 자문을 통해, 크게 영향을 미치는 인자는 아니라고 전제를 하였다. 하지만 되도록 와류의 형성이 적게 일어나는 가스유도장치의 최적 형상을 도출하기 위해 각 경우에 있어서 와류의 발생형태를 비교·분석하였고, 가스유도장치의 형상을 바꾸면서 후드 입구에서의 유속을 측정된 결과를 종합하여 Table 3에 나타내었다.

Table 3 Velocity distribution of measurement point on experimental stipulation

[m/s]

구분 \ 지점	point 1	point 2	point 3	point 4	point 5
G125-5:5	1.208	1.379	1.208	1.380	1.207
G125-4.5:5.5	1.207	1.391	1.269	1.394	1.209
G125-4:6	1.213	1.396	1.275	1.399	1.212
G125-3.5:6.5	1.207	1.392	1.271	1.390	1.206
G125-3:7	1.205	1.406	1.321	1.403	1.204
G125-5:5	1.208	1.356	1.209	1.355	1.207
G125-4.5:5.5	1.207	1.368	1.235	1.368	1.208
G125-4:6	1.211	1.389	1.253	1.377	1.210
G125-3.5:6.5	1.207	1.384	1.260	1.383	1.207
G125-3:7	1.207	1.396	1.281	1.396	1.208
G125-5:5	1.209	1.330	1.173	1.299	1.208
G125-4.5:5.5	1.205	1.342	1.193	1.340	1.205
G125-4:6	1.213	1.363	1.216	1.361	1.211
G125-3.5:6.5	1.206	1.366	1.237	1.367	1.205
G125-3:7	1.206	1.338	1.255	1.336	1.214

Table 3은 가스유도장치 형상 결정을 위한 실험조건에서 유동 시뮬레이션 수행한 뒤 측정지점에서 각각의 유속을 측정된 결과를 종합하여 정리한 것이다. 우선 가스유도장치의 폭(125, 150, 175)과 변(X, Y)의 비에 대하여 유속측정 결과를 분석하였다. 가스유도장치의 폭이 125일 경우 후드 양쪽 끝(Point 1, 5)과 가스유도장치 사이(Point 2, 4)에서 측정된 유속을 비교하여 본 결과 X, Y의 비가 4:6일 때 유속이 비교적 높게 나타난 것을 확인할 수 있었다. 또한, 가스유도장치의 폭이 150과 175일 때 측정지점에서의 결과를 비교·분석하여 본 결과 마찬가지로 X, Y의 비가 4:6일 때 전반적으로 유속이 높게 나타나는 것을 확인하였다. 이를 토대로, 가스유도장치의 X, Y의 비가 4:6일 때 후드의 양쪽 끝단에서 흡입효율을 높일 수 있다고 볼 수 있으며, 이는 본 연구에서 추구하고자 후드 입구 양쪽 끝단에서 Gas의 흠어짐을 막고 미처 흡입하지 못하고 이송되는 분진을 보다 효과적으로 포착할 수 있다고 판단된다. 또한 가스유도장치의 폭(b)이 125, 150, 175일 경우에 있어서 X, Y의 비가 4:6일 경우, 가스유도장치의 폭을 얼마로 하였을 때 보다 효과적인지 알아보기 위하여 시뮬레이션을 분석하여 본 결과, 폭(b)이 150이나 175일 경우에도 후드 입구 양쪽 끝단 및 후드와 가스유도장치 사이에서 유속이 비교적 빠르게 나타났지만, 앞에서도 언급하였듯이

후드 내 가스유도장치 상부 끝단에서 형성되는 와류를 고려하여 볼 때, 가스유도장치 폭이 125일 때보다 150, 175일 때 와류의 형성이 비교적 크게 나타나는 점을 고려하여, 본 수치해석 결과를 통해 가스유도장치의 최적형상으로는 가스유도장치 폭이 125이고, X, Y의 비가 4:6인 [G125-4:6] 가스유도장치를 선정하기로 하였다.

5. 결 론

본 연구에서는 국소배기장치 내 후드에서의 흡입효율 증가를 위한 가스유도장치 개발과 관련하여 다중물리해석프로그램을 이용한 연구에서 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 본 연구에서는 COMSOL Multiphysics™ 프로그램을 사용하여 후드 내 가스유도장치의 효율에 대한 시뮬레이션을 실시하였다.

(2) 시뮬레이션 결과를 분석하여 보면 가스유도장치가 없을 경우 발견하지 못했던 와류가 가스유도장치 장착 후 발견 되었다. 이렇게 형성된 와류는 흡입효율저하의 요인이 될 수 있으나, 본 연구에서 중점적으로 개선하고자 하는 후드 입구 양 끝단의 포집효율향상에는 큰 영향을 미치지 않기 때문에 고려하지 않았다.

(3) 수치해석결과 가스유도장치가 없는 후드보다 가스유도장치가 있는 후드의 경우 후드주변의 속도가 증가함을 볼 수 있었다.

(4) 본 수치해석 결과 가스유도장치의 최적의 형상은 폭(b)이 125mm이고, 변(X, Y)의 비율이 4:6일 경우에 흡입효율이 가장 높게 나타남을 알 수 있었다.

(5) 본 연구결과는 환기 시스템을 사용하고 있는 공기오염물질을 발생하는 전반적인 사업장에 유용하게 활용될 수 있으리라 본다.

참고문헌

- (1) Sim, G. J., Lee, D. H., 1999, "A Practical usage of industrial local ventilation facility and energy saving in the industrial ventilation", Vol. 23, No. 6, pp. 433~442.
- (2) Henkes, R.A.W.M., 1992, "Benchmark Computation and Experiment for Turbulent Natural Convection in a Square Cavity", *joint Workshop of Eurotherm & Ercoftac*, pp. 25~27.
- (3) L. Kjaldman, 1992, "Numerical flow simulation of dust deflagrations", *Power Technology*, pp. 163~169.
- (4) Jeong, M. S., Ohm, T. I., 2003, "Analysis of the Flow and Temperature Fields in the Apartment Complex by Wind and Solar Radiation", *Journal of CNIHE*, Vol. 13, pp. 111~126.
- (5) Lee. Y. J., 2006, "SONAR Modeling using the COMSOL Multiphysics", pp. 49~52.