

# 열원이 존재하는 작업장내 기류 및 온도장 예측

정유진<sup>†</sup> · 하현철 · 김태형 · 유근중<sup>1)</sup>

창원대학교 환경공학과, 창원대학교 기계설계공학과<sup>1)</sup>

## Prediction of Airflow and Temperature Field in a Room With Convective Heat Source

Yu-Jin Jung<sup>†</sup> · Hyun-Chul Ha · Tae-Hyeung Kim · Guen-Jong Yoo<sup>1)</sup>

Department of Environmental Engineering, Department of Mechanical Design and Manufacturing<sup>1)</sup>  
Changwon National University

A CFD simulation of airflow and temperature field in a heated room has been described in this paper. The thermal wall jet created by a radiator greatly influences the airflow pattern, temperature distribution. The area close to a heat source has a higher risk of air-borne contamination and imposes a harmful effect on occupants in that area. The predicted flow field, temperature results show good agreement with the measured data. As the results were compared with experimental data, the applicability of CFD

was satisfactorily verified. Also, the CFD simulation can capture the natural convective flow features. If a CFD simulation is applied ventilation design with a heat source, An effective design will be attained. Further study is required to improve the accuracy of CFD simulation.

**Key Words** : Computational Fluid Dynamics, Ventilation, Numerical simulation, k- $\epsilon$  turbulence model

### Nomenclature

|                                 |                                |   |
|---------------------------------|--------------------------------|---|
| f : function                    | T : 온도(K)                      | w : Z방향 속도 성분                               |
| $C_k$ : 난류 생성항                  | $T_w$ : 벽면 온도(K)               | $\beta$ : 열팽창 계수                            |
| $G_B$ : 부력항                     | U : 열투과율( $W K^{-1} m^{-2}$ )  | $\Gamma_\phi$ : 열확산 계수                      |
| g : 중력 가속도                      | $P_{ref}$ : Reference pressure | $\lambda$ : 유체 열전도도(W/mK)                   |
| H : enthalpy(J/kg)              | $u^+$ : 벽면에 평행한 무차원 속도         | $\mu$ : 유체 점성 계수(dynamic viscosity)         |
| k : 난류 운동 에너지                   | $y^+$ : 벽면까지의 무차원 거리           | $\mu_t$ : 난류 점성 계수(turbulent viscosity)     |
| $\epsilon$ : 난류 운동 에너지 소산율      | i, j, k : 단위 벡터                | $\mu_{eff}$ : 유효 점성 계수(effective viscosity) |
| Pr : Prandtl number             | p : 압력                         | $\nu$ : 동점성 계수(kinetic viscosity)           |
| Q : 열 전달량, heat flux( $W/m^2$ ) | u : X방향 속도 성분                  | $\rho$ : 밀도                                 |
| $S_{\phi i}$ : source term      | v : Y방향 속도 성분                  | $\tau_{ij}$ : 전단 응력                         |
|                                 |                                | $\phi_i$ : 지배 방정식의 의존 변수                    |

접수일 : 2000년 8월 14일, 채택일 : 2001년 2월 5일

<sup>†</sup> 교신저자 : 정유진(경남 창원시 사림동 창원대학교 환경공학과

Tel : 055-279-7945, Fax : 055-281-3011, E-mail : push-up@hanmail.net)

## I. 서론

열원이 존재할 때 대류형태는 크게 3가지로 구분할 수 있다. 온도차에 의한 부력이 기류흐름의 원동력이 되는 자연대류(natural convection), 환기시스템과 같은 기계적인 장치에 의한 강제대류(forced convection)와 이 두가지의 복합형태인 복합 대류(mixed convection)가 있다.(이재현 : 열전달 및 유체 유동 수치해석, 1997) 자연대류는 흔히 겨울철에 난방형태에서 많이 볼 수가 있다. 전형적인 겨울철 난방 형태로는 Figure 1과 같이 차가운 표면(창문)이 뜨거운 표면(라디에이터) 위에 위치한 형태이다. 이는 상·하 강한 온도차에 의해 강한 상승기류를 형성시켜 방안을 전체적으로 순환시키는 난방 효과를 고려한 것이다.

그러나, 만약 라디에이터 근처에 오염원이 존재하게 되면 오염물질을 함유하는 열기둥(hot plume)이 작업장 전체를 순환하게 되는 문제점이 있을 수 있다(Lu et al., 1997). 이러한 자연 대류적 기류흐름은 매우 불안정하고, 작업장내 표면 상태(condition of room surface), 열원(heat source)의 세기(strength), 크기(size)등의 여러 인자에 의존하게 된다. 또한 측정장비 정확도의 한계와 실험에 있어서의 속도와 온도에 대한 의존 변수를 다루는 데 있어서의 어려움 때문에 정확한 속도와 온도를 측정하는 것이 어렵다.

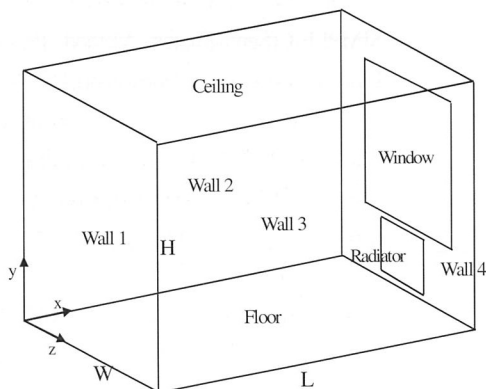


Figure 2. Geometrical configuration

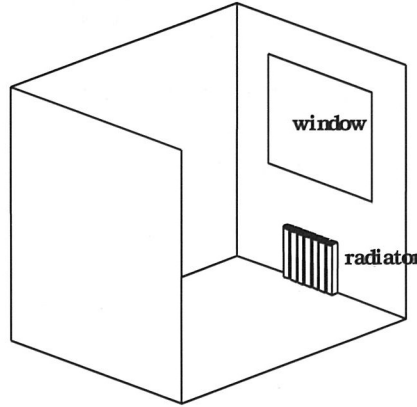


Figure 1. A typical winter heating case

CFD(Computational Fluid Dynamics)는 건물 내 유동장(flow field)을 예측하는데 아주 경제적이고도 효과적인 방법을 제공한다. 다시 말해, 실험을 하지 않고서도 건물 내의 기류 특성을 이해하는데 매우 효과적인 방법이라 할 수 있다. 그리고 현재 CFD를 적용시키는 연구가 활발히 진행되고 있다.(Dunnett, 1994 ; Robinson et al., 1996 ; Riffat et al., 1997 ; Varley et al., 1997 ; Kulmala, 1997)

본 연구에서는 CFD를 이용하여 자연대류가 지배적인 작업에 대해 기류 및 온도 분포를 예측하였고 실험치(Lu et al., 1997)와 비교함으로써 대류적인 기류(convective flow) 특징에 대한 CFD 예측 성능을 평가하였다.

## II. 실험 및 수치 해석 방법

### 1. 실험 방법

본 연구에서는 Figure 2의 작업장에 대해 전산유체역학 상용 코드인 CFD-ACE (CFD Research Co., 2000)를 이용하여 수치해석을 실시하였고, Lu et al.(1997)에 의해 수행된 실험 및 수치해석 결과치와 비교 분석하였다.

Lu의 실험은 건물 내에 Figure 2의 작업장이 있다고 가정해서, Figure 3의 Chamber내에 Figure 2의 작업장을 두고 수행되었다. 작업장의 규모는  $L \times H \times W = 4.74 \times 2.7 \times 3.45 \text{ (m}^3\text{)}$ 이다. 라디에이터의 열 발생량(heat flux)은  $440 \text{ W/m}^2$ 로 하여 실험이 수행되었다. Wall 4가 직접 노출되어 있는 외기의 온도  $t$ 는  $-3^\circ\text{C}$ 이고, 작업장내 평균 온도  $t_{\text{air}}$ 는  $22^\circ\text{C}$ 로 내·외부 온도차  $\Delta t$ 는  $25^\circ\text{C}$ 이다. 라디에이터가 창문 밑에 위치해 있고 라디에이터와 창문이 있는 Wall 4는 외기에 직접 노출되어 있는 외부 벽(external wall)이다. 따라서 Wall 4와 창문은 외기 온도  $-3^\circ\text{C}$ 와 접해 있다. 나머지 천장, 바닥, Wall 1·2·3은 Chamber내에 있는 것으로, 건물 내부에 있는 벽(internal wall)이 되겠다. Chamber 내부의 온도는  $18^\circ\text{C}$ 이고 천장, 바닥, Wall 1·2·3은 Chamber 내부의 온도인  $18^\circ\text{C}$ 와 접해

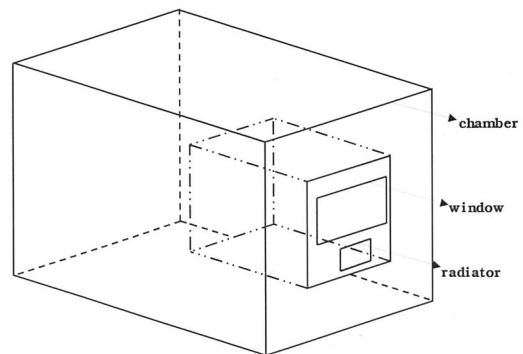


Figure 3. The experimental room in chamber

있다. Table 1에 Lu의 실험에 이용된 온도 조건을 요약하여 나타내었다.

Table 2에 각 벽면과 창문에서의 내·외부 온도차에 의한 열 손실량을 구하기 위한 물성치를 정리하였다.  $U(Wm^{-2}K^{-1})$ 는 각 벽면과 창문의 열투과율(thermal transmittance)이다.

## 2. 수치해석 모델

### (1) 기초 방정식

유체의 유동에 대한 물리적인 특성을 나타내는 기본적인 법칙이 있다. 예를 들어, mass, momentum, energy conservation과 같은 법칙들이다. 정상 상태, 비압축성 기체라 가정할 때 일반적인 물리량의 수송방정식을 다음과 같은 형태로 나타낼 수 있다(명현국, 수치유체공학, 1997).

$$\text{div}(\rho V \Phi_i - \Gamma \Phi_i \text{grad} \Phi_i) = S_{\Phi_i} + S_{\text{buoyancy}} \quad (1)$$

$S_{\Phi_i}$ 는 부력항( $S_{\text{buoyancy}}$ )을 제외한 비정상항, 압력구배등을 포함한 모든 source term을 나타낸다.

다음 식은 난류 운동 에너지 방정식의 난류 생성항을 나타낸다(명현국, 수치유체공학, 1997).

$$\mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_t, \quad \mu_t = \frac{C_\mu C_D k^2}{\varepsilon} \quad (2)$$

$$G_k = \mu_t \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right) \quad (3)$$

난류모델에는 난류점성계수를 취급하는 방법에 따라 여러 가지 모델이 있다. 본 연구에서는 Launder와 Spalding에 의해 제시된 표준  $k-\varepsilon$  난류 모델을 사용하였다.

운동량 방정식에서  $y$  방향의 운동량에 체적력(= 중력)을 추가함으로써 다음과 같은 부력항을 나타낼 수 있다(명현국, 수치유체공학, 1997).

$$-\rho \beta g \theta = -\rho \beta g(T - T_0) \quad (4)$$

자연대류의 유동은 유속이 느리기 때문에 밀도가 일정한 비압축성 유동으로 가정하고 온도변화에 의한 밀도차 효과는 부력항에만 작용한다는 Boussinesq 근사법을 적용하면 부력에 의한 일반항  $G_B$ 는,

$$G_B = -\beta g \frac{\mu_t}{\sigma_H} \frac{\partial \theta}{\partial y} \quad (5)$$

로 나타내어진다.

부력항에 작용하는 온도변화에 의한 밀도차 효과는 이상기체 상태 방정식을 이용하여 계산하였다.

$$\rho = \frac{(p + P_{\text{ref}})M}{RT} \quad (6)$$

### 2) 수치해석 방법

본 연구에 사용된 상용 소프트웨어인 CFD-ACE에서는 이산화 방법으로 유한체적법(finite-volume method)을 사용하고 있다. 유한 체적법은 적분 후에 이산화하기 때문에 항상 그 미소 영역내의 운동량 등의 출입을 고려하게 되어 보존 법칙을 확실하게 만족시키는 이산식을 얻을 수 있는 장점이 있다(Patankar, 1980). 모든 수치 해석은 상류 차분 도식(upwind differencing scheme)과 엇갈림 격자계(staggered grids)를 이용하여 수행하였다. 중심 차분 도식(central differencing scheme)은 대류항의 변수값이 확산항의 변수값보다 더 크게 예측될 경우 불합리한 해를 가져 오게 되고, 반복 계산을 하게 되는 경우에는 해가 발산하는 원인이 된다(Patankar, 1980). 이에 반해 상류 차분 도식(upwind differencing scheme)은 대류항에 대해 인공적인 확산을 새롭게 부가시킨 것, 즉 수치확산(numerical diffusion)을 도입한 것으로 안정된 해를 구할 수 있다(Patankar, 1980).

압력장을 구하기 위해 연속 방정식과 운동량 방정식을 조합시키는 방법으로 SIMPLE-C(Semi-Implicit Method Pressure-Linked Equations Consistent)알고리즘을 사용한다. 이 알고리즘은 Patankar (Patankar, 1980)에 의해 제안된 SIMPLE 알고리즘에 압력보정식(Pressure-Correction equation)을 일부 수정한 알고리즘이다. 벽면과 고체 표면에서의 전단 응력은 벽함수(wall function)를 이용하여 구하였다.

아울러, 수렴성을 좋게 하기 위해 하향이완법(under-relaxation)을 사용하였다(Patankar, 1980). 대수방정식의 반복해를 얻는 과정에서 반복과 반복 사이에 종속변수값의 변화를 느리게 하거나, 빠르게 하

Table 1. Thermal conditions of experimental chamber

| Item                                  | Temperature(°C) | Heat flux(W/m <sup>2</sup> ) |
|---------------------------------------|-----------------|------------------------------|
| Mean temperature in the chamber       | 18°C            | -                            |
| Mean temperature in the room          | 22°C            | -                            |
| Outside temperature (winter)          | -3°C            | -                            |
| Temperature difference ( $\Delta t$ ) | 25°C            | -                            |
| Radiator                              | -               | 440                          |

Table 2. Properties of the test chamber

| Item    | Area(m <sup>2</sup> ) | U value(Wm <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> ) | Condition      |
|---------|-----------------------|--|----------------|
| Ceiling | 16.35                 | 0.87                                       | Internal wall  |
| Floor   | 16.35                 | 0.55                                       | Internal wall  |
| Wall 1  | 9.32                  | 0.71                                       | Internal wall  |
| Wall 2  | 12.8                  | 0.35                                       | Internal wall  |
| Wall 3  | 12.8                  | 0.35                                       | Internal wall  |
| Wall 4  | 5.8                   | 0.78                                       | External wall  |
| Window  | 3.52                  | 2.54                                       | Double glazing |

는 것이 필요한 경우가 있다. 변수들의 변화를 느리게 할 경우를 하향이완(under-relaxation)이라 한다. 이 방법은 비선형성이 강한 문제를 반복 계산에 의하여 푸는 경우 발산을 막기 위하여 종종 사용된다(Patankar, 1980).

Figure 4와 Figure 5는,  $33 \times 20 \times 23$  cell을 이용하여 Flow domain을 만들기 위한 Mesh scheme으로 Figure 4는 Lu의 Mesh scheme이고 Figure 5는 본 연구에서 사용한 CFD-ACE의 Mesh scheme이다. 두 Scheme 모두 라디에이터 부근에 좀 더 정확한 계산을 하기 위해 Power law를 적용하여 라디에이터 부근에 격자점을 집중시킨 것을 볼 수 있다. 그리고 Figure 4와 본 연구에서 사용한 CFD-ACE의 Scheme (Figure 5)에 각각 다른 Power law를 적용함으로써 라디에이터 부근에 격자 분포가 약간 다른 것을 볼 수 있다.

Figure 4. Mesh scheme(CFDS-Flow 3D)

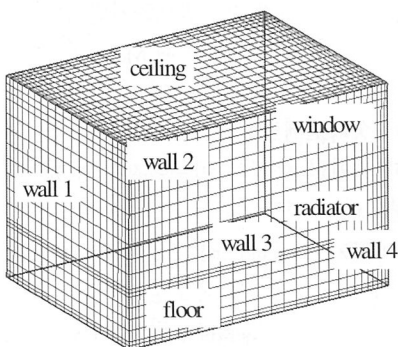


Figure 5. Mesh scheme(CFD-ACE)

### 3. 경계 조건(Boundary Condition)

#### 1) 속도 경계 조건

벽면에서의 속도에 대한 일반적인 공식은 다음과 같다(Lu et al., 1997).

$$A_i U_i + B_i \tau_{wi} = C_i, \quad i = 1, 2, 3$$

여기서

$$\tau_{wi} = \left( \mu \frac{\partial U_i}{\partial y} \right)_w \dots \dots \dots (7)$$

는 벽면 전단 응력(wall shear stress)이다.

라디에이터 표면을 포함한 모든 고체 표면의 점착 조건(no-slip condition)이 속도에 적용되면,

$$A_i = 1, \quad B_i = C_i = 0, \quad U_w = V_w = W_w = 0$$

#### 2) 온도 경계 조건

Lu 연구의 작업장은 단열이 잘 되는 것이 아니라, 실내 · 외 온도차에 의한 열손실이 일어난다. 따라서 벽면에서의 열손실량이 계산되어야 한다. 벽면에서의 열전달 경계 조건은 다음과 같은 일반적인 형태로 나타내어진다(Patankar, 1997).

$$A_w T_w + B_w Q_w = C_w,$$

$$Q_w = \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial n} \right)_w \dots \dots \dots (8)$$

데이터를 Figure 6과 같이 세 개의 수직면으로 나누어 수치 기류 형태 및 온도 분포를 Lu의 측정치 및 수치해석 결과치와 비교하였다.

### 1. 대류 유동장(Convective flow field)

Figure 7은 기류 가시화 기법을 이용하여 얻은 실내 기류 형태이고, Figure 8은 CFD-ACE의 수치해석 결과치이다. 측정치와 수치해석 결과를 비교해 보면, 중심면에서 라디에이터 위로 창문면을 따라 부력에 의한 강한 상승기류(thermal wall jet)가 형성된 것을 알 수가 있다. 그리고 제트기류는 주위 공기를 끌고가는 특성을 가지고 있다. 이러한 특성 때문에 라디에이터와 창문이 있는 벽면에서 형성된 제트기류가 주위의 찬공기를 끌고 올라가 천장 부근에서 혼합되면서 작은 재순환 영역(recirculation region)이 형성되는 것을 알 수가 있다.

비교 결과, 예측치와 실험치의 기류 형태가 매우 잘 흡사함을 알 수가 있다. CFD 시뮬레이션 기법이 이러한 자연 대류적인 기류의 중요한 특징을 잘 나타내 줌으로써 만족스러운 결과를 얻을 수 있었다.

### 2. 온도장(Temperature field)

Figure 9에서 Figure 11까지 작업공간내에서의 온도분포를 나타내었다. 중심면( $z=1.725$  m)에서의 분포는 비슷하나, 양

## III. 결과 및 고찰

전산 유체 역학 상용 코드인 CFD-ACE를 이용하여 수치해석한 결과에 대해 라

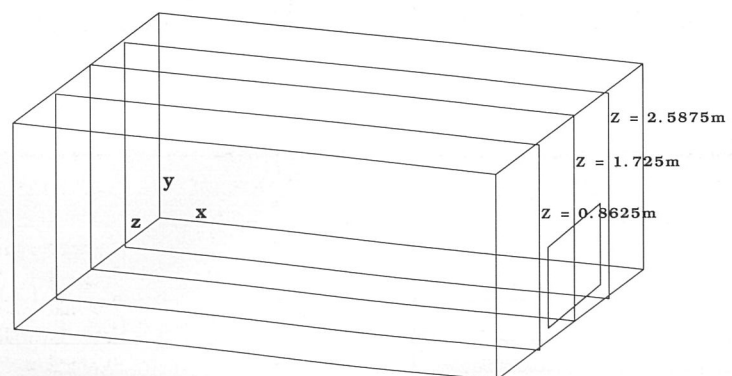


Figure 6. Typical planes in the room



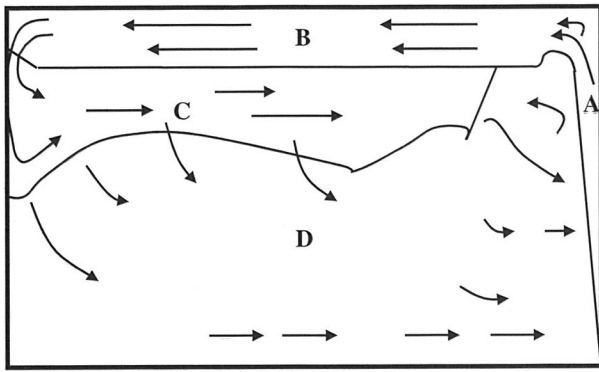


Figure 7. Observed airflow pattern in centerline plane

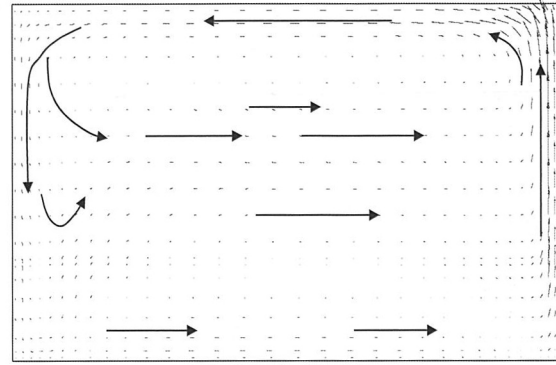


Figure 8. Airflow pattern in centerline plane predicted by using CFD-ACE

측면( $z=0.8625, 2.5875$  m)에서의 분포는 약간의 차이를 보였다. 이는 서로 다른 CFD 상용 코드(CFDS-FLOW3D / CFD-ACE)를 이용하면서, 각 코드 해의 수렴성 차이와 그 차이로 인해 저마다 최적의 이완 계수를 사용하였을 것이고, 운동량 방정식과 연속 방정식을 조합시키는 알고리즘의 차이같은, 이러한 여러 인자에 의

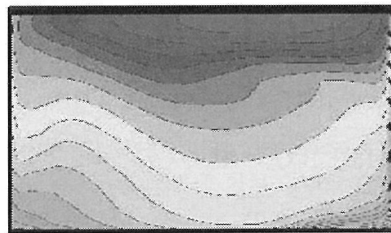
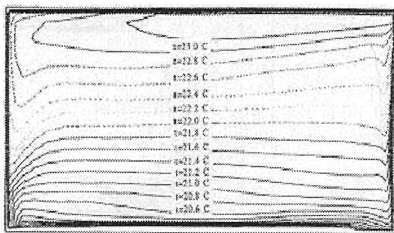
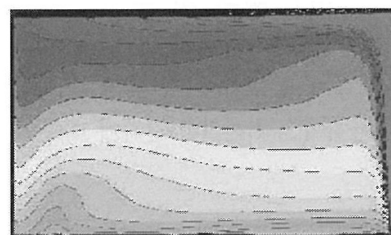
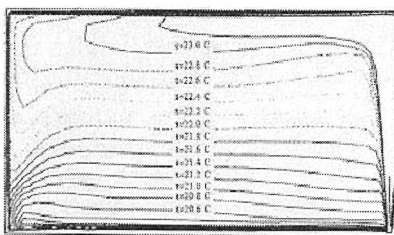
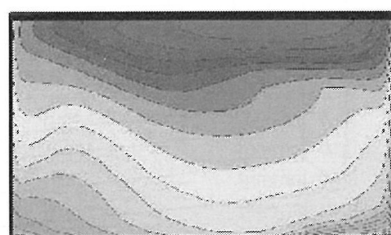
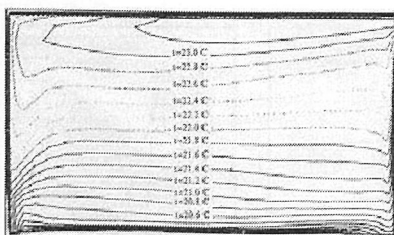
해 나타난 차이로 판단된다. 그리고 각기 다른 Power law를 적용함으로써 격자 분포가 다른 차이도 있을 수 있다. 하지만 작업자를 기준으로, 작업자의 발목( $0.1$  m)에서 머리까지( $1.8$  m)의 온도차이는  $2^{\circ}\text{C}$ 이고, 각 온도층(temperature contour)은  $0.2^{\circ}\text{C}$ 로 나눈 것이므로 각 코드의 결과치가 다소 차이가 나는 것은 무시할 수 있을 것으

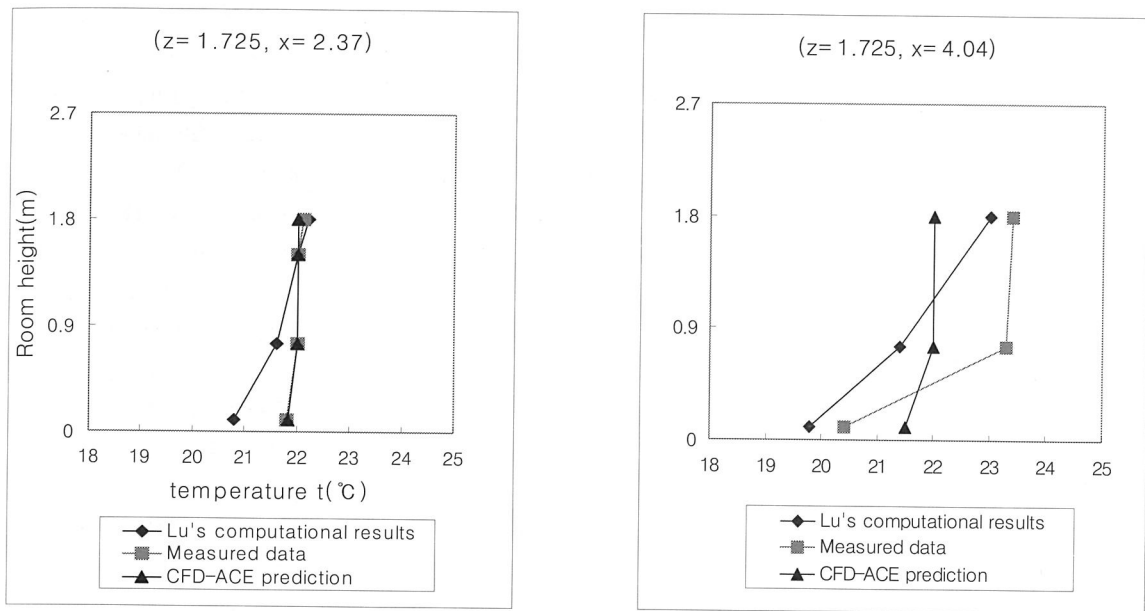
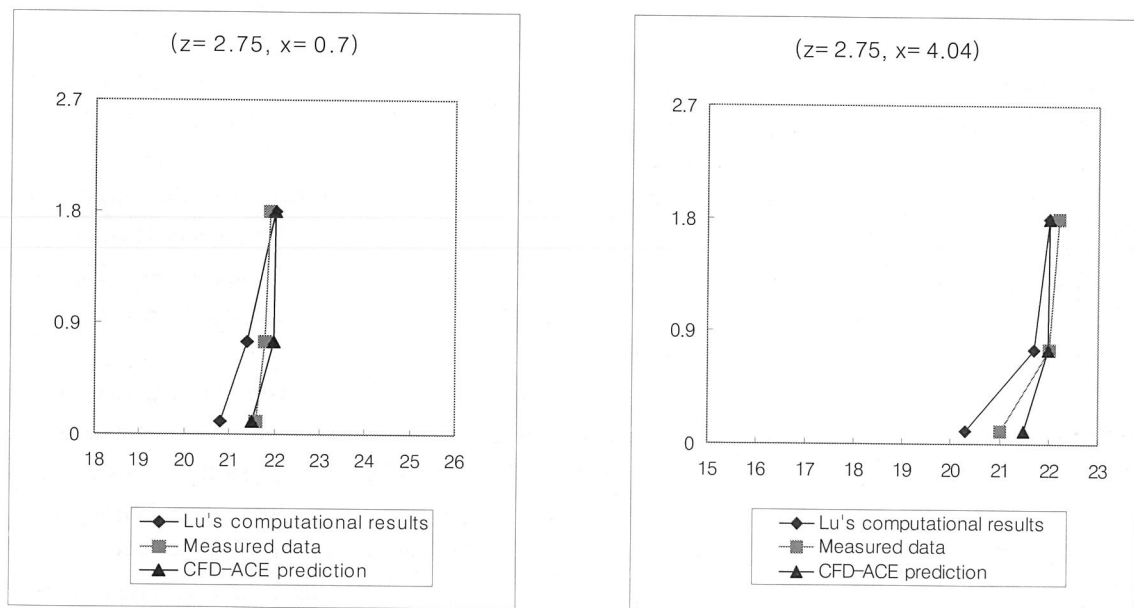
로 판단된다.

Figure 12와 Figure 13에 작업장내 수직 온도 분포에 대한 수치해석 결과치와 측정치를 비교하여 나타내었다.

Figure 12의  $z = 1.725$  m,  $x = 4.04$  m 지점을 제외한 다른 지점에서는 본 연구의 수치해석 결과치와 Lu의 실험치가 거의 일치하고 있고, Lu의 수치해석 결과치와도 상당히 일치함을 알 수 있다. 특히, 작업장  $1.8$  m 높이에서 모든 결과치가 거의 일치하였다.  $0.9$  m 높이에서는 약  $0.3 \sim 0.5^{\circ}\text{C}$  차이를 보였고  $0.1$  m 높이에서는 약  $0.8 \sim 1^{\circ}\text{C}$  정도의 차이를 보였다. 하지만 Figure 12의  $z = 1.725$  m,  $x = 4.04$  m 지점에서는 수직 온도 분포에 대한 수치 해석치가 실험치와 다소 어긋나는 것을 볼 수 있다. 이는 라디에이터 바로 앞 지점으로써 라디에이터에서 발생되는 강한 열로 인해 주위 유동과 온도 변화에 가장 많은 영향을 미치는 지점이라 할 수 있다. 따라서 이 지점에서 다소 차이를 보이는 것은 해석 변수가 급격히 변하는 지점이니만큼 많은 계산 격자점이 필요하지만 컴퓨터의 한계상 시뮬레이션 할 때 Mesh 구성이 충분히 세밀하지 못한 점과 측정시 측정장비 정확도에도 한계가 있기 때문에 충분히 정확한 측정이 이루어지지 못했기 때문이라 판단된다.

CFD(Computational Fluid Dynamics)는 건물 내 속도장 및 온도장, 오염물질 농도 및 분포를 예측하는데 많이 이용되고 있다. 건물내에서의 기류 흐름을 예측하기 위해 CFD를 이용하는 것은 건물내의 기류 특징을 이해하는데 효과적임을 입증하

Figure 9. Comparison of Temperature distribution in the plane of  $z=0.8625$  mFigure 10. Comparison of Temperature distribution in centerline plane( $z=1.725$  m)Figure 11. Comparison of Temperature distribution in the plane of  $z=2.5875$  m

Figure 12. Comparison of temperature in centerline plane ( $z = 1.725$  m)Figure 13. Comparison of temperature in side plane ( $z = 2.75$  m)

는 연구가 활발해지고 있다. 반면에, Full-scale의 시뮬레이션, 3차원 Buoyant flow, 부력 효과에 대한 오염물질 입자 분포 예측과 같은 건물 공학에 CFD를 적용하는데 있어서 한계를 보여주는 연구도 있다.(Mistriotis, 1997 ; Shinsake, 1997)

일반적으로 Standard  $k-\epsilon$  난류 모델은 Buoyant flow에 대한 해석에 있어서 한계를 가지고 있지만, 일반적인 난류 유동 해

석(특히, 고레이놀즈수를 갖는 유동)에 대한 빠르고 우수한 계산능력, 대중성을 인정받아 가장 많이 이용되는 모델이므로 난류 운동 에너지 방정식( $k$ ) - 난류 소산률 방정식( $\epsilon$ )에 부력 생성항(buoyancy production term)을 추가함으로써 Buoyant flow 계산에 적용할 때 얼마나 신빙성을 가지는지를 알아내는 것이 중요하겠다 (Kulmala, 1997b).

본 연구에서는 자연대류가 지배적인 작업장의 기류형태 및 온도분포를 예측하기 위해 CFD를 이용하였고, Lu의 측정치 및 수치해석 결과치와 비교함으로써 CFD의 열유동 예측 성능을 평가하고자 하였으며, 그 결과 측정치와 예측치가 대체적으로 잘 일치함을 알 수가 있었다. 따라서 대류적인 기류(convective flow)의 특성을 잘 묘사해냄으로써 CFD의 열유동 예측

성능의 우수함을 입증하였다.

이 결과를 바탕으로 고열 부하로 인한 문제가 발생되고 있는 현장에 CFD를 이용하여 배기량에 따른 열배기효율을 예측하여 환기시스템을 설치한다면, 환기시스템 효율을 극대화할 수 있을 것이다.

#### IV. 결 론

본 연구에서는 CFD를 이용하여 라디에이터에 의해 난방이 되는 작업장내 기류 형태 및 온도 분포를 예측하고자 하였고 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

1. 라디에이터에 의해 생성된 강한 상승기류(thermal wall jet)가 기류 형태와 온도 분포에 큰 영향을 미침을 알 수 있었다.
  2. 기류 및 온도 예측 결과가 기존 연구 실험치 및 수치 해석치와 잘 일치하였다.
  3. 열원 근처에 오염원이 위치한다면 오염물질을 함유한 열기둥(hot plume)이 작업장내를 순환하게 되는 문제점을 야기할 수 있다.
- 따라서 CFD를 이용하여 자연 대류가 지배적인 작업장에 대해 기류 및 온도분포를 예측한 결과, 기류 형태와 온도 분포에 있어서 예측 결과와 측정치가 비교적 잘 일치함으로써 자연대류의 특징을 모사하는데 만족스러운 결과를 얻을 수 있었다. 이러한 CFD의 열유동 예측성능을 바탕으로 열원이 존재함으로써 부력이 유동의 주원동력이 되는 작업장내에 환기시설 설치시 CFD를 이용하여 작업장내 기류와 온도분포를 충분히 예측한 후 설치한다면 환기시설의 효율을 극대화시킬 수 있을 것이다. 이 외에도 강제대류의 특징인 급

기 제트의 운동성(supply jet momentum)과 부력(buoyancy)의 상호작용, 복합대류의 특징인 관성력(inertial force)과 부력(buoyancy)의 상호작용에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다(H. Xue et al., 1999). 앞으로 표준  $k-\epsilon$  난류 모델의 박리유동(seperating flow)에 대한 지배 방정식의 약점, 열을 동반한 유동에 대한 벽함수(wall function)의 약점등을 보완할 수 있는 Low Reynolds number 모델, Reynolds-Stress 모델을 적용한 연구가 필요하겠다.

#### REFERENCES

- 명현국. 수치유체공학. 한미출판사; 1997. (124-138쪽).
- 신병록, 장근식, 조강래. 전산유체역학. 대영사; 1997.(264-277쪽)
- 이재현. 열전달 및 유체 유동 수치해석. 대한 교과서; 1997.(46-86쪽)
- 이진호. 최신 열전달. 반조출판사; 1997
- Brohus H. Personal Exposure to Contaminant Sources in Ventilated Rooms. Denmark: Aalborg University; 1997
- CFD-ACE. Theory Manual. CFD Research corporation; 2000
- Dunnett SJ. A Numerical Investigation into the Flow Field around a Worker Positioned by an Exhaust opening. Ann Occup Hyg; 38:663-686
- Kumala I. Advanced Design of Local Ventilation Systems. Finland: VTT Publications; 1997(a)
- Kulmala I. Numerical simulation of a lateral exhaust hood for a hot contaminant source' Finland: VTT Publications; 1997(b)
- Mistriotis A, Picuno P, Bot GPA. Analysis of the Efficiency of Greenhouse Ventilation Using Computational Fluid Dynamics. Agricultural and Forest Meteorology 1997; 85:217-228
- Patankar SV. Numerical Heat Transfer and Fluid Flow. Hemisphere Publishing Corp; 1980
- Robinson M, Ingham DB. Recommendations for the Design of Push-pull Ventilation Systems for Open Surface Tanks. Ann Occup Hyg 1996; 40: 693-704
- Riffat SB, Gan G. CFD Prediction of k-factors of Duct Elbows. International Journal of Energy Research 1997;21: 675-681
- Shinsake K, Shuzo M, Takeo T, Tomochika G. Chained Analysis of Wind Tunnel Test and CFD on Cross Ventilation of Large-scale Market Building, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 67&68:573-587. 1997; 67&68:573-587
- Varley JO : The Effect of Turbulent Structures on Hood Design - A Review of CFD and Flow Visualization Studies. HVAC & R RESEARCH, 1997; 3
- Weizhen Lu, Andrew TH, Alan PJ. Prediction of Airflow and Temperature Field in a Room With Convective Heat Source. Building and Environment 1997; 32:541-550
- Xue H, Shu C. Mixing characteristics in a ventilated room with non-isothermal ceiling air supply Building and Environment 1999