

第 96 回 碩士學位論文  
指導教授 李 彥 求

CFD를 이용한 실내 열환경 예측 및 평가  
프로그램의 개발에 관한 연구

The Development of a Program for the Prediction and  
Evaluation of Indoor Thermal Environment using CFD

中央大學教 大學院  
建築工學科 建築計劃 및 環境專攻  
尹 根 榮  
2001年 12月

CFD를 이용한 실내 열환경 예측 및 평가  
프로그램의 개발에 관한 연구

The Development of a Program for the Prediction and  
Evaluation of Indoor Thermal Environment using CFD

이 論文을 碩士學位論文으로 提出함

2001年 12月

中央大學教 大學院  
建築工學科 建築計劃 및 環境專攻  
尹 根 榮

尹 根 榮의 碩士學位 論文을 認定함.

審査委員長 \_\_\_\_\_ 印

審査委員 \_\_\_\_\_ 印

審査委員 \_\_\_\_\_ 印

中央大學敎 大學院  
建築工學科 建築計劃 및 環境專攻  
尹 根 榮  
2001年 12月

# 제 목 차 례

제 목 차 례.....	i
표 차 례.....	iii
그 립 차 례.....	iv
제 1 장 서론.....	1
1.1 연구의 배경 및 목적.....	1
1.2 연구의 내용 및 방법.....	2
제 2 장 실내 기류 해석 및 열쾌적에 대한 이론 고찰.....	5
2.1 실내 기류의 해석.....	5
2.1.1 유동장의 지배 방정식.....	5
2.1.2 실내기류분포 해석을 위한 난류 유동의 계산 및 벽법칙.....	7
2.1.3 유한체적법을 이용한 이산화 방법.....	12
2.1.4 제어체적의 좌표처리.....	16
2.1.5 이산화 방정식의 해법.....	19
2.1.6 유동장의 해법.....	21
2.2 열쾌적 평가.....	27
2.2.1 인체의 열평형.....	27
2.2.2 열쾌적 지표.....	30

제 3 장 실내 기류 분포 및 열쾌적 평가를 위한 프로그램 개발.....	34
3.1 프로그램의 특징 및 구성.....	34
3.2 실내 기류 및 열쾌적 해석.....	36
제 4 장 프로그램의 검증.....	40
4.1 개요.....	40
4.2 강제 대류.....	41
4.3 복합 대류.....	55
4.4 소결.....	49
제 5 장 프로그램의 적용.....	51
5.1 실내 기류 분포 및 열쾌적에 영향을 미치는 변수의 선정.....	52
5.2 취출구의 위치 변화에 따른 영향.....	54
5.3 취출 온도 변화에 따른 영향.....	57
5.4 취출 속도 변화에 따른 영향.....	62
5.5 소결.....	67
제 6 장 결론.....	68
참고 문헌.....	70
부록.....	73
국문 초록.....	84
ABSTRACT.....	87

## 표 차례

<표 2.1> 일반형 방정식 .....	10
<표 2.2> Lump의 값 .....	18
<표 3.1> 개발된 프로그램과 상용 CFD 프로그램과의 비교.....	35
<표 3.2> 각 함수의 설명.....	37
<표 5.1> 각 시뮬레이션에 적용된 변수의 분류 .....	53
<표 5.2> 취출구 위치 변화에 따른 PD 값 (%) .....	56

## 그림 차례

(그림 1.1) 연구의 흐름도 .....	4
(그림 2.1) 제어 체적의 구성.....	14
(그림 2.2) 제어체적의 좌표 처리의 예.....	17
(그림 2.3) 엇갈림 격자망.....	22
(그림 2.4) SIMPLE 알고리즘 .....	26
(그림 3.1) 프로그램의 구성.....	35
(그림 3.2) 프로그램의 구조도.....	36
(그림 4.1) 강제대류의 검증을 위한 모형도 .....	41
(그림 4.2) PHOENICS를 이용한 결과 .....	42
(그림 4.3) 개발된 프로그램을 이용한 결과 .....	42
(그림 4.4) $x/H=1$ 지점의 $U/U_{in}$ 의 분포 .....	43
(그림 4.5) $x/H=2$ 지점의 $U/U_{in}$ 의 분포 .....	43
(그림 4.6) $y/H=0.028$ 지점의 $U/U_{in}$ 의 분포 .....	44
(그림 4.7) $y/H=0.975$ 지점의 $U/U_{in}$ 의 분포 .....	44
(그림 4.8) Blay et al 의 실험 모형도 .....	45
(그림 4.9) 기류 속도 분포의 패턴 .....	46
(그림 4.10) $x/L=0.5$ 지점의 $x$ 방향 속도 분포 .....	47
(그림 4.11) $y/L=0.5$ 지점의 $y$ 방향 속도 분포 .....	47
(그림 4.12) $x/L=0.5$ 지점의 수직 온도 분포 .....	48
(그림 4.13) $y/L=0.5$ 지점의 수평 온도 분포 .....	48
(그림 5.1) Case Floor의 대상 모델 .....	52
(그림 5.2) Case Wall의 대상 모델.....	52
(그림 5.3) FL1925의 결과의 가시화.....	55
(그림 5.4) WA1925 결과의 가시화.....	55
(그림 5.5) WA1820 결과의 가시화.....	58
(그림 5.6) WA2020 결과의 가시화 .....	58
(그림 5.7) $y=0.1$ 일 때 FL $\circ\circ$ 20의 결과.....	59
(그림 5.8) $y=0.1$ 일 때 WA $\circ\circ$ 20의 결과.....	59
(그림 5.9) $y=1.1$ 일 때 FL $\circ\circ$ 20의 결과.....	61
(그림 5.10) $y=1.1$ 일 때 WA $\circ\circ$ 20의 결과.....	61
(그림 5.11) FL1915 결과의 가시화 .....	63
(그림 5.12) FL1925 결과의 가시화 .....	63

(그림 5.13) $y=0.1$ 일 때 FL19○○ 결과.....	64
(그림 5.14) $y=0.1$ 일 때 WA19○○ 결과.....	64
(그림 5.15) $y=1.1$ 일 때 FL19○○ 결과 .....	66
(그림 5.16) $y=1.1$ 일 때 WA19○○ 결과 .....	66



# 제 1 장 서 론

## 1.1 연구의 배경 및 목적

현대인은 약 90% 이상의 시간을 실내에서 생활하고 있으며, 이에 따라 재실자들의 쾌적한 실내환경에 대한 요구는 증가하고 있다. 일반적으로 열적 쾌적이란 열환경에 만족을 표현하는 마음의 상태를 나타내며, 이에 영향을 미치는 요소로는 기류 속도, 온도 및 난류 강도 등이 있다<sup>1)</sup>. 이러한 요소들은 열쾌적에 복합적으로 작용하므로 쾌적한 실내 열환경을 계획하기 위해서는 기온 뿐 아니라 기류도 동시에 고려해야 한다. 특히 정확한 실내 기류 분포의 예측은 적절한 공조 시스템의 설계 및 재실자의 열쾌적을 위해서 필수적이다<sup>2)</sup>.

실내 기류 분포의 평가방법은 현장 실측에 의한 방법과 전산유체역학을 이용한 방법이 있다. 현장 실측 방법은 전산유체역학이 발전하기 전에 많이 사용되었으며, 현재는 주로 수치해석의 결과에 대한 검증이나 기준으로 사용된다. 그러나 현장 실측은 기자재의 운영이나 측정시의 오차등 많은 어려움이 따르며, 특히 난류 강도가 10% 이상이고 기류속도가 0.1m/s 이하인 경우에는 정확한 실측 결과를 얻기 힘든 단점이 있다. 이에 반해, 전산유체역학은 다양한 조건에 대해서 실내의 기류 분포 예측을 가능하게 하며, 현장 실측에 비해 적은 비용이 드는 장점이 있다<sup>3)</sup>. 컴퓨터 발전으로 인해서 전산유체역학의 이용 분야는 더욱 증가하고 있으며, 전산유체역학은 실내기류 분포의 해석을 위한 중요한 도구가 되고 있다.

그러나 상용되고 있는 CFD 프로그램은 기류속도 분포, 온도 분포 및 난류 특성까지 시뮬레이션할 수 있으나 설계 실무자가 실제로 사용하기에는 프로그램의

- 
- 1) Fanger,P.O., A.K.Melikov, H.Hanzawa, and J. Ring. Air turbulence and sensation of draught, Energy and buildings, Vol. 12, pp.21-39, 1987.
  - 2) Gan,G., Evaluation of room air distribution systems using computational fluid dynamics, Energy and Buildings, Vol 23, pp. 83-93, 1995.
  - 3) Addington, D.M., Boundary layer control of heat transfer in buildings, Ph.D. Thesis, Harvard University, pp.45-99, 1997.

운영에 많은 전문지식이 요구되고 있어 활용이 어렵다. 또한 재실자가 실제로 느끼는 기류와 온도의 복합적인 반응을 평가하는데도 복잡한 수치결과를 각각 비교, 분석해야하는 난점이 있다.

따라서 본 연구에서는 설계 초기단계에서 설계자가 정확한 실내기류분포의 평가 및 재실자의 열쾌적성을 손쉽게 판단할 수 있는 프로그램을 개발하고, 이 프로그램을 이용하여 설계 초기 단계의 설계 변수가 실내 기류 분포 및 재실자의 열쾌적에 미치는 영향에 대해 분석하는 것을 목적으로 한다.

## 1.2 연구의 내용 및 방법

본 연구에서는 설계 초기 단계에서 설계자가 전산유체역학(CFD)에 대한 전문적인 지식이 없이도 정확한 실내기류분포의 예측 및 재실자의 열쾌적성을 쉽게 평가할 수 있는 프로그램을 개발하고, 이 프로그램에 대한 검증을 실시한 후, 취출구의 위치, 취출 속도 및 취출 온도를 변수로 하여 각 변수가 실내 기류 분포 및 실내 열쾌적에 미치는 영향에 대해 분석해 보았다. 본 연구의 내용 및 방법은 다음과 같다.

### 1) 실내 기류 해석 및 열쾌적 지표에 대한 이론 고찰

공간의 실내 기류 분포의 해석시 사용되는 전산유체역학에 대한 이론과 재실자의 열환경에 대한 반응을 평가하기 위해서 사용되는 열쾌적 지표에 대한 이론을 고찰했다.

### 2) 프로그램의 개발

컴퓨터 언어 C++과 Visual C++을 사용하여 실내 기류 분포의 예측 및 실내 열쾌적 평가 프로그램을 개발했다. 본 프로그램은 실내 기류 분포의 해석을 위해서 유한체적법, SIMPLE 알고리즘과 k- $\epsilon$  난류 모델을 이용하였으며, 공간의 열쾌적 평가를 위해서 종합적 열쾌적 지표인 PD를 적용했다.

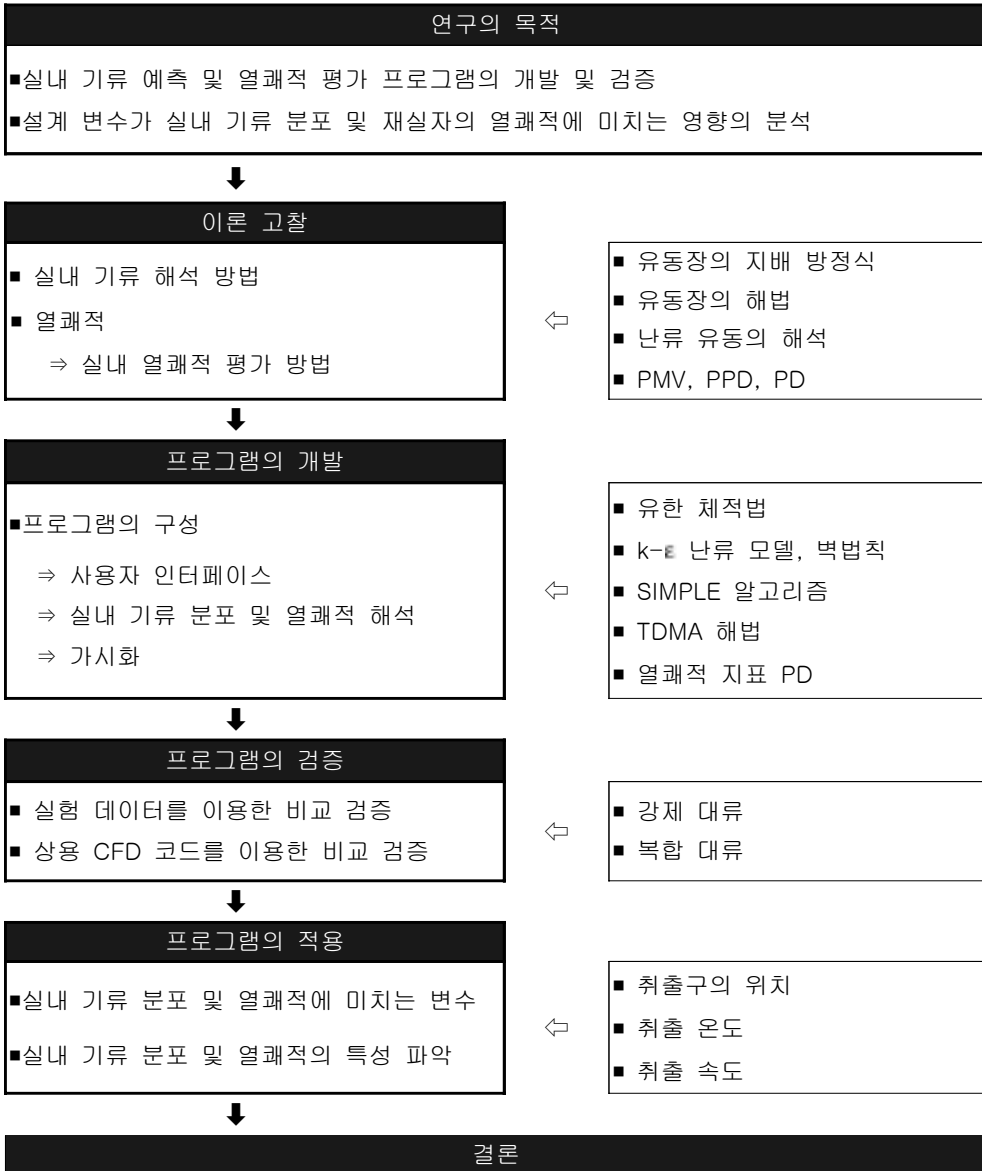
### 3) 프로그램의 검증

개발된 프로그램의 검증을 위해 기존 문헌의 실험 데이터와 건축을 포함한 모든 공학 분야에서 널리 사용되고 있는 상용 CFD 코드인 PHOENICS를 이용하여 강제 대류와 복합 대류의 경우에 대하여 프로그램의 결과를 비교 검토했다.

### 4) 프로그램의 적용

실내기류 분포 및 열쾌적에 영향을 미치는 다양한 변수 중에서 설계 단계에서 변경 가능한 변수인 취출구의 위치, 취출 온도와 취출 속도를 설계 변수로 선정한 후, 각 변수의 변화가 실내 기류 분포 및 열쾌적에 미치는 영향을 정량적으로 분석했다.

이상의 연구의 내용 및 방법을 흐름도로 나타내면 그림 1.1과 같다.



(그림 1.1) 연구의 흐름도

## 제 2 장 실내 기류 해석 및 열쾌적에 대한 이론 고찰

### 2.1 실내 기류의 해석

전산유체역학을 이용한 실내기류 분포의 해석을 위해서는 일련의 비선형 편미분방정식의 해법이 필요하다. 이 편미분방정식들은 질량보존의 법칙, 운동량 보존의 법칙과 에너지 방정식등과 같은 유동장을 지배하는 지배방정식들이다. 편미분방정식을 풀기 위해서는 이 방정식들에 대해 이산화와 선형화를 실시하여야 한다. 이 과정에서 얻어진 대수방정식들은 각 이산화된 점에서의 압력, 속도 및 온도의 분포를 예측하기 위해서 반복적으로 계산된다.

#### 2.1.1 유동장의 지배 방정식

##### 1) 질량 보존의 법칙

질량 보존의 법칙은 제어체적에서의 질량의 증가는 제어체적을 통해 들어오는 질량의 양과 같다는 것을 의미한다<sup>4)</sup>. 여기서 제어체적의 질량의 증가는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\delta x \delta y \delta z \rho) = \frac{\partial \rho}{\partial t} \delta x \delta y \delta z \quad (2.1)$$

제어체적을 통해 들어오는 질량의 양은 밀도와 면적 그리고, 제어체적의 면에 수직인 속도 성분을 이용해서 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\left(\rho u - \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x\right) \delta y \delta z - \left(\rho u + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x\right) \delta y \delta z$$

---

4) Versteeg, H.K., and Malalasekera, W., An introduction to computational fluid dynamics : The finite volume method, Longman, pp.10-39, 1995.

$$\begin{aligned}
& + \left( \rho v - \frac{\partial(\rho v)}{\rho y} \frac{1}{2} \delta y \right) \delta x \delta z - \left( \rho v + \frac{\partial(\rho v)}{\rho y} \frac{1}{2} \delta y \right) \delta x \delta z \\
& + \left( \rho w - \frac{\partial(\rho w)}{\rho z} \frac{1}{2} \delta z \right) \delta x \delta y - \left( \rho w + \frac{\partial(\rho w)}{\rho z} \frac{1}{2} \delta z \right) \delta x \delta y \quad (2.2)
\end{aligned}$$

여기서, 식 (2.1) 과 식 (2.2)를 같다고 놓으면 질량 보존의 법칙은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (2.3)$$

식 (2.3) 다음과 같이 간단히 표현할 수 있다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \Delta(\rho u_i) = 0 \quad (2.4)$$

## 2) 운동량 방정식

뉴턴의 제2법칙은 제어체적에 작용하는 힘의 합은 제어체적의 운동량의 변화와 같다는 것으로 다음 식으로 표현된다<sup>5)</sup>.

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = \\
& - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) + \left( \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \rho g_i \quad (2.5)
\end{aligned}$$

좌변의 첫 번째항은 시간에 대한 운동량의 변화를 나타내는 것으로, 제어체적 내의 운동량의 증가량을 의미한다. 두 번째 항은 제어체적의 각 방향에 수직으로 유출되는 운동량을 나타낸다. 이 식은 제어체적의 유출량과 유입량의 차이, 즉

---

5) Ian, B., The adaptive coupling of heat and air flow modelling within dynamic whole-building simulation, Ph.D ,Thesis, University of Strathclyde, pp.10-35, 2000.

운동량의 유효 유출량을 제어체적의 체적으로 나눔으로써 얻어진다. 우변의 첫 번째 항은 제어체적에 작용하는 압력을 나타내며, 두 번째 항은 표면력으로써 제어체적에 작용하는 점성력을 나타낸다. 이 항은 제어체적의 표면에서 분자의 불규칙한 분자운동으로 인한 운동량 즉, 확산을 나타낸다. 마지막 식은 밀도의 차이로 인한 중력을 나타낸다. 운동량 방정식에서 표면력에 의한 효과는 독립된 항으로 나타내고, 체적력은 생성항으로 처리하는 것이 일반적이다.

### 3) 에너지 방정식

에너지 방정식은 제어체적의 에너지 변화율은 제어체적에 가해진 일과 열의 변화율의 합과 같다는 열역학 제 1 법칙으로부터 얻어진다. 에너지 방정식은 다음 식을 표현할 수 있다. 에너지 방정식은 다음 식으로 표현된다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho h u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ -\frac{k}{c_p} \frac{\partial h}{\partial x_i} \right] + S_h \quad (2.6)$$

에너지 방정식은 열전달 현상과 온도 분포를 예측하기 위해서 사용된다. 여기서 실내에서의 공기와 같이 비압축성이고 열용량이 일정한 경우에는  $dh = c_p dT$  인 관계가 성립하므로, 에너지 방정식에서의 종속 변수는 온도  $T$ 가 된다.

## 2.1.2 실내기류분포 해석을 위한 난류 유동의 계산 및 벽법칙

난류 유동의 계산을 위해서 사용되는 방법에는 직접수치해법, LES 방법 과 난류 모델에 의한 방법이 있다.

### 1) 직접수치해법(Direct Numerical Simulation)

직접 수치해법(DNS)은 Navier-Stokes 방정식을 아무런 가정없이 직접 계산함으로써 난류의 유동을 규명한다. 이 방법으로 인한 난류의 예측 결과는 수치적으로 매우 정확한 결과이다. 따라서 직접 수치해법에 의한 방법은 새로운 난류 예

측 방법을 검증하는데 사용되며, 실험과정에서의 오차가 없는 실험 데이터로 간주되기도 한다. 그러나 직접 수치해법을 이용하기 위해서는 Kolmogorov의 길이 스케일에 따라 결정되는 가장 작은 와동을 풀어야 하므로, 그리드의 간격이 매우 조밀해야 한다. 또한 시간 간격도 Kolmogorov의 시간 스케일과 같아야 하므로 실제로 실내공간의 난류 유동을 계산하기 위해서 사용하기에는 어렵다<sup>6)</sup>. 그러나 최근 컴퓨터의 발전으로 직접수치해법의 이용 범위가 증가하고 있으며, 작은 Reynolds 수에 대한 직접 수치해법의 데이터들이 발표되고 있다.

## 2) Large Eddy Simulation 방법

Large Eddy Simulation 방법은 난류 유동은 큰 와동과 작은 와동으로 분리될 수 있으며, 큰 와동(Large Eddy)이 난류 유동에 대부분의 영향을 미치는 요소라는 가정에서 출발한다<sup>7)</sup>. 즉, 큰 와동은 경계조건에 커다란 영향을 받으므로 필터링된 지배방정식을 이용하여 계산되어야 하지만, 작은 와동은 경계조건에 커다란 영향을 받지 않으므로 난류 모델을 이용하여 구할 수 있다는 것이다. 또한 LES 방법은 작은 와동의 경우에는 난류 모델을 이용하므로, 가장 작은 그리드의 크기는 Kolmogorov 길이 스케일보다 훨씬 크게 설정할 수 있고 시간 간격도 크게 할 수 있다. 그러나 여전히 정확한 난류 유동의 해석을 위해서는 세밀한 그리드 간격과 작은 시간 간격이 요구되므로 시뮬레이션하는데 많은 시간이 요구된다.

## 3) 난류 모델( Turbulence transport model)

실내 기류의 해석을 위해서는 난류 유동의 시간의 변화에 따른 상세한 변이는 필요하지 않으므로, 난류 유동에 대한 시간 스케일보다 더 큰 시간 스케일에 대해서 평균된 지배방정식을 이용하는 것이 가능하다. 이와 같은 시간 평균화된 Navier-Stokes 방정식에는 레이놀즈 항으로 알려진 두 개의 미지의 항 즉,  $-\rho u'_i u'_j$  와  $-\rho u'_i \zeta'$ 이 포함된다. 여기서 첫 번째 항은 레이놀즈 응력이고,

6) Wilcox, David C., Turbulence Modeling for CFD, DCW Industries, Inc., pp.381-386, 1998.

7) Wei, Zhang, Chen, Qingyan, Large eddy simulation of indoor airflow with a filtered dynamic subgrid scale model, International journal of heat and mass transfer Vol. 43, pp.3219-3231, 2000.



두 번째 항은 난류 확산항이다. 대부분의 난류 모델들은 레이놀즈 응력과 난류 확산항이 평균 속도 구배와 비례한다는 Boussinesq의 가정을 이용한다.

$$\tau_{ij} = -\rho u'_i u'_j = \mu_t \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \rho k \quad (2.7)$$

$$-\rho u'_j \zeta'_i = \Gamma_t \frac{\partial Z}{\partial x_j} \quad (2.8)$$

여기서  $\mu_t$ 는 난류 점성,  $\Gamma_t$ 는 난류 확산계수,  $\zeta_{ij}$ 는 Kronecker  $\delta$ ,  $k$ 는 난류 운동에너지의 각각 나타낸다. 식 2.7의 마지막 항은 값이 매우 작기 때문에 생략할 수 있다<sup>8)</sup>. 일반적으로 레이놀즈 응력의 수송방정식을 만족시키는 난류모형은 Boussinesq의 가정을 적용하였는가의 여부에 따라 두 가지 모델 형태로 분류할 수 있다. 먼저 Boussinesq의 가정을 적용한 난류 모델을 난류 점성모델(turbulent viscosity model)이라고 하며, 현재 공학적으로 사용되고 있는 대부분의 모형은 이 유형에 속한다. 반면, 난류 점성에 대한 가정없이 Reynolds 응력방정식을 성립시키는 유형의 모델을 Reynolds 응력 방정식 모델(Reynolds stress equation model)이라고 한다. 난류 점성 모델에는 혼합거리 모델, 1-방정식 모델 및 2 - 방정식 모델로 다시 세분할 수 있다<sup>9)</sup>. 이 중에서 건물내에서의 기류 및 온도의 분포의 예측을 위해서 가장 많이 사용되는 모델은 2 방정식 모델 중의 하나인  $k-\epsilon$  모델이다.

#### 4) $k - \epsilon$ 모델

일반적인  $k-\epsilon$ 은 난류 점성 ( $\mu_t$ )을 다음 식으로부터 구한다.

8) Negrao, Cezar O.R., Conflation of computational fluid dynamics and building thermal simulation, Ph.D. Thesis, University of Strathclyde, Glasgow, UK, pp 168-172,1995.

9) 명현국, 전산열유체공학, 문운당, pp 338-355, 1999.

$$\mu_t = C_D \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2.9)$$

여기서  $\varepsilon$  는 난류운동에너지 소산율을 나타내며  $C_D$ 는 경험 상수로써 0.09이다. 이처럼 난류 점성을 계산하기 위해서는  $k$  와  $\varepsilon$  의 값이 필요하므로 이에 대한 두 개의 방정식이 추가된다.

식 2.7과 2.8을 식 2.5와 2.6에 대입하면 질량 보존의 법칙, 운동량보존의 법칙, 에너지 방정식, 난류운동에너지 방정식 및 난류운동에너지 소산율 방정식을 나타내는 일반형 방정식을 얻을 수 있는데 일반형 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \phi_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ u_j \phi - \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right] = S \quad (2.10)$$

여기서 좌변의 첫 번째 항은 비정상항, 두 번째 항은 대류항, 세 번째 항은 확산항이며, 우변의 첫 번째 항은 생성항이다.

일반형 방정식에 대한 자세한 사항은 <표 2.1>에 나타나 있다.

<표 2.1> 일반형 방정식

Equation	$\Phi$	$\Gamma$	S
Continuity	1	-	0
Momentum	$u_i$	$\nu + \nu_t$	$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + g_i \beta (T - T_{ref}) + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ (\nu + \nu_t) \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right]$
Energy	T	$\frac{\nu}{Pr} + \frac{\nu_t}{\sigma_T}$	0
k-transport	k	$\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k}$	$P + G - \varepsilon$
e-transport	E	$\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon}$	$(c_1(P + G) - c_2\varepsilon) \frac{\varepsilon}{k}$

$$P = \nu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad G = g_j \beta \frac{\nu_t}{\sigma_T} \frac{\partial T}{\partial x_j} \quad \nu_t = C_D \frac{k^2}{\varepsilon}$$

$$C_D = 0.09 \quad c_1 = 1.44 \quad c_2 = 1.92 \quad \sigma_T = 0.90 \quad \sigma_k = 1.00 \quad \sigma_\varepsilon = 1.30 \quad E = 9.793 \quad k = 0.4187$$

위의 표에서 P는 소산항, G는 부력에 의한 생성물,  $\nu_t$ 는 난류 동점성 계수를 나타낸다.

### 5) 벽법칙

벽 근처에서는 난류의 영향이 거의 무시되고 점성에 의한 전단력의 효과가 매우 큰 점성 저층 영역과 난류에 의한 에너지의 생성과 소산이 균형을 이루는 완전 난류 영역으로 나눌 수 있다.  $k-\epsilon$  모델에서는 격자의 수와 수치해석에 필요한 시간을 단축하기 위해서 첫 번째 격자를 완전 난류 영역에 배치하고 벽법칙을 적용한다<sup>10)</sup>. 이때 점성 저층영역과 완전 난류 영역의 구분의 기준으로  $y^+$  값을 사용하는데  $y^+$ 는 다음과 같다.

$$y^+ = \frac{C \mu^{1/4} k^{1/2}}{\nu} \quad (2.11)$$

경계와 평행한 속도 성분과 경계에서의 열전달을 구하기 위한 벽법칙은  $y^+$ 의 값이 11.63 보다 작은 지역과 큰 지역에서 다른 형태를 취하는데 벽면전단응력  $\tau_w$  과 표면으로부터의 열전달  $q_f$  를 구하는 식은 각각 다음과 같다.

$y^+ \leq 11.63$  인 경우

$$\frac{\tau_f}{\rho} = \nu \frac{u_P}{y_P} \quad (2.12)$$

$$\frac{q_f}{\rho c_p} = \nu \frac{(T_b - T_f)}{\text{Pr } y_P} \quad (2.13)$$

$y^+ > 11.63$  인 완전 난류 지역인 경우

10) Nakayama Akira, PC- aided numerical heat transfer and convective flow, CRC Press, pp 73-101, 1995.

$$\frac{\tau_f}{\rho} = \frac{k C_D^{1/4} k_p^{1/2}}{\ln(E y^+)} u_P \quad (2.14)$$

$$\frac{q_f}{\rho c_P} = \frac{C_D^{1/4} k^{1/2} (T_P - T_f)}{\sigma_T \left[ \frac{1}{k} \ln(E y^+) + f\left(\frac{Pr}{\sigma_T}\right) \right]} \quad (2.15)$$

식 2.15에서

$$f(x) = 9.24 (x^{0.75} - 1) [1 + 0.28 \exp(-0.007x)] \quad (2.16)$$

을 나타낸다.

정확한 기류의 해석을 위해서 운동량 방정식 및 에너지 방정식 뿐만 아니라 고체 경계에서의  $k$  와  $\epsilon$  에 대한 방정식에도 벽법칙의 경계 조건이 적용되어야 한다<sup>11)</sup>. 난류운동에너지의 생성률  $S_k$ 과 소산율  $S_\epsilon$ 은 각 방정식의 생성항에서 다음과 같은 형태로 선형 처리한다.

$$S_k = \frac{\tau_f}{\rho} \frac{u_P}{y_P} - C_D^{3/4} k_P^{3/2} \frac{u^+}{y_P} \quad (2.17)$$

$$S_\epsilon = 10^{30} \frac{C_D^{3/4} k_P^{3/2}}{k y_P} - 10^{30} \quad (2.18)$$

### 2.1.3 유한체적법을 이용한 이산화 방법

#### 1) 이산화의 개념

미분방정식의 수치해는 수치의 집합으로, 이것으로 종속변수  $\phi$ 의 분포가 구성될 수 있다. 수치적 방법은 계산 영역 내의 유한한 개수의 위치 즉, 격자점에서 종속 변수의 값을 기본적인 미지수로 취급한다. 격자점에서의 값에 관심을 가진

11) 김찬중, 길잡이 전산유체역학, 문운당, pp.319-338, 1998.

다는 것은, 미분방정식의 엄밀해에 포함된 연속적인 정보에 관한 관심을 이산화 된 위치에서의 값에 관한 것으로 대치시킨다는 것이다. 선택된 격자점에 관한  $\phi$ 의 미지값을 포함하는 대수방정식을 이산화 방정식이라고 하며, 이것은  $\phi$ 를 지배하는 미분방정식으로부터 이산화 과정을 거쳐 유도해 낸 것이다. 이 유도 과정에서,  $\phi$ 가 격자점 사이에서 어떻게 변하는가에 관한 약간의 가정이 수반되어야 한다. 또한 격자점의  $\phi$ 값은 바로 옆의  $\phi$ 분포에만 영향을 준다. 격자점의 수가 많아짐에 따라 이산화방정식의 해는 이에 상응하는 미분방정식의 엄밀해에 접근된다고 예상할 수 있다. 이러한 예상은 격자점이 근접하게 됨으로써 인접한 격자점 사이에서  $\phi$ 값의 변화가 작게 되며, 이에 따라  $\phi$ 의 분포 형태 가정의 상세함이 중요하지 않게 된다는 논리에서 나온 것이다. 주어진 하나의 미분방정식에서 유도될 수 있는 이산화방정식은 유일하지 않다. 즉, 여러 가지 분포 형태의 가정 및 유도 방법의 차이로부터 다른 이산화 방정식이 나타날 수 있다<sup>12)</sup>.

## 2) 유한 체적법

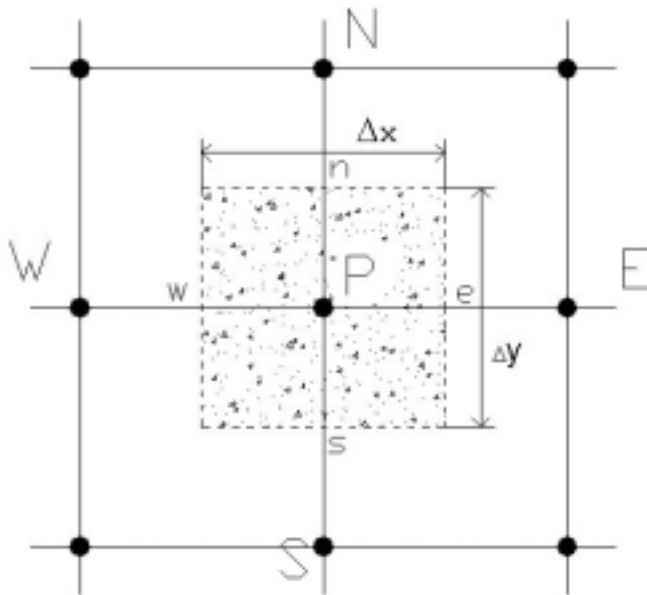
유한 체적법은 미분방정식으로부터 이산화 방정식을 유도하는 이산화 방법의 하나로써 물리적 의미를 직접적으로 나타낸다. 계산 영역은 상호 중복되지 않는 많은 제어체적으로 분할되며, 각 격자점을 하나의 제어체적이 감싸고 있다. 미분방정식은 각 제어체적에 걸쳐서 적분되며, 이 때 요구되는 적분을 수행하기 위하여 격자점 사이의  $\phi$ 의 변화를 표시하는 부분 분포 형태가 사용된다. 그 결과가 격자점에서의  $\phi$ 값을 포함하는 이산화 방정식이다. 유한 체적법의 가장 두드러진 특징은 그 결과로 얻어진 해가 질량, 운동량, 에너지와 같은 양들의 완전한 보존이 모든 제어체적군, 그리고 전 계산 영역에 대하여 엄밀하게 만족됨을 의미한다는 점이다.

## 3) 이산화 과정

일반형 수송방정식을 이산화 할 때 확산은 항상 대류와 같이 일어나므로 하나의 묶음으로 다루어야 한다. 또한 질량 보존의 법칙, 운동량보존의 법칙, 에너지

12) 이재현 역, 열유동 및 유체유동 수치해법, 대한 교과서 주식회사, pp27-45, 1988.

방정식, 난류운동에너지 방정식 및 난류운동에너지 소산을 방정식을 식 2.10과 같이 하나의 일반형 수송 방정식의 형태로 나타낼 수 있으므로, 이 일반형 수송 방정식을 제어체적에 대하여 이산화 하면 필요한 이산화 방정식들을 얻을 수 있다. 이산화 과정을 살펴보기 위해서 다음 그림 2.1 과 같이 제어체적의 크기가  $\Delta x \Delta y$ 이고 중앙에 격자점 P가 위치해있는 제어체적을 고려해 보자. 여기서 E,W,S와 N는 격자점 P와 이웃해 있는 격자점이며, e,w,s 및 n 은 제어체적의 4 면을 나타낸다.



(그림 2.1) 제어체적의 구성

정상상태를 가정하면 일반형 수송방정식<sup>13)</sup> 2.10은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left[ u_j \psi - \Gamma \frac{\partial \psi}{\partial x_j} \right] = S \quad (2.19)$$

13) Spalding, D.B., CHAM/TR100 A guide to the PHOENICS input language, CHAM, p.2.1-2.21, 1992.

이산화 방정식은 식 2.19를 제어체적  $\Delta x \Delta y$ 에 대하여 다음 식 2.20과 같이 적분을 하면 얻을 수 있다.

$$\int_s^n \int_w^e \left( \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ u_j \phi - \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right] \right) dx dy = \int_s^n \int_w^e S dx dy \quad (2.20)$$

식 2.20에서 좌변의 첫 번째 항은 대류 유속 (Convection Flux)을, 두 번째 항은 확산 유속(Diffusion Flux)를, 우변의 항은 제어체적 내에서 물리량  $\phi$ 의 생성과 소멸을 나타낸다. 여기서 우변의 생성항은  $S_c - S_p \phi_p$  처럼 음의 기울기가 성립하도록 선형화한다. 대류와 확산이 결합된 경우의 가장 큰 문제점은 확산 현상이 물리량  $\phi$ 의 모든 방향에 영향을 미치는 반면, 대류 현상은 단지 유동 방향에 만 영향을 미친다는 점이다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위해서 상류 도식, 하이브리드 도식, 지수도식 및 먹송 도식등 다양한 방법이 존재하는데 여기서는 이 논문에서 채택한 하이브리드 도식<sup>14)</sup>에 대하여 살펴 본다.

식 2.20을 행렬형으로 표현하면 다음과 같다.

$$a_P \phi_P = a_E \phi_E + a_W \phi_W + a_N \phi_N + a_S \phi_S + b_P \quad (2.21)$$

$$a_E = D_e A(|P_e|) + \max[0, -F_e], \quad P_e = \frac{F_e}{D_e}$$

$$a_W = D_w A(|P_w|) + \max[0, -F_w], \quad P_w = \frac{F_w}{D_w}$$

$$a_N = D_n A(|P_n|) + \max[0, -F_n], \quad P_n = \frac{F_n}{D_n}$$

$$a_S = D_s A(|P_s|) + \max[0, -F_s], \quad P_s = \frac{F_s}{D_s}$$

$$a_P = S_P + a_E + a_W + a_N + a_S$$

14) 이재현, 이승갑, 윤정인 공역, 컴퓨터로 풀이한 열유체공학, 태훈 출판사, pp.258-279, 1998.

$$F = (\delta A) \rho u, D = \Gamma \frac{(\delta A)(\delta A)}{(\delta V)}$$

여기서,  $F$ ,  $D$  및  $P$ 는 각각 대류의 세기를 나타내는 질량유량, 확산 콘덕턴스 와 Peclet 수에 해당하는 것이며, 함수  $A(|P|)$ 는 각 도식에 따라 결정된다.

하이브리드 도식은 중앙도식과 상류도식을 결합한 것으로 Peclet 수가  $-2 \leq P \leq 2$ 로 대류가 확산에 비해 작은 경우에는 중앙도식에 의한 값을 취하고, Peclet 수가  $2 > P, -2 < P$  처럼 대류성분이 큰 경우에는 확산을 0으로 한 상류도식에 의한 값을 취한다. 다시 말하면,  $P < -2$  인 경우에는  $\frac{a}{D} = -P$ ,

$-2 \leq P \leq 2$  인 경우에는  $\frac{a}{D} = 1 - \frac{P}{2}$ ,  $P > 2$ 인 경우에는  $\frac{a}{D} = 0$ 이 각각 된다.

위의 관계를 이용하여 하이브리드 도식의 경우 함수  $A(|P|)$ 를 나타내면 다음과 같다. 따라서, 계수  $a_i$ 는 함수  $A(|P|)$ 를 이용하여 다음과 같이 간단히 나타낼 수 있다.

$$A(|P|) = \max \left[ -P, 1 - \frac{P}{2}, 0 \right] \quad (2.22)$$

하이브리드 도식은 Peclet 수가 높은 곳에서는 중앙도식이 부정확한 결과를 가져 오므로 중앙도식 대신 상류도식을 사용한다. 따라서 이 도식은 물리적으로 정확 하며, 다른 도식에 비해서 매우 안정적이다. 또한 이 도식은 전산유체역학을 이 용한 수치해석에서 널리 사용되고 있다.

#### 2.1.4 제어체적의 좌표 처리

범용 컴퓨터 프로그램은 다양한 경계 조건을 처리할 수 있어야 한다. 그러나, 다양한 경계 조건을 처리하기 위해서는 복잡한 입력 과정이 필요하다. 상업용 프 로그램을 사용한다고 할지라도 장시간 동안 복잡한 데이터를 입력하는 것은 일 반적인 일이다. 다양한 경계 조건과 간편한 입력을 만족시키기 위해서 본 프로그 램에서는 known and unknown velocity boundary 라는 개념을 도입하기로 한다.



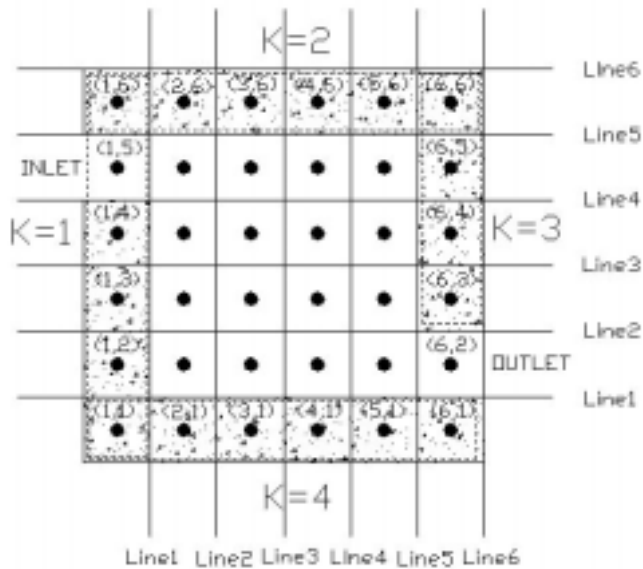
경계 조건을 분류하기 위해서 경계에서의 속도 벡터의 값이 알려져 있는지 알려지지 않았는지에 따라서 경계 조건을 분류하면 다음과 같다.

Known-velocity boundary(알려진 경계) : 압력을 제외한 속도 벡터와 다른 변수들의 값이 알려진 경계

Unknown-velocity boundary(미지의 경계) : 속도 벡터의 값이 알려지지 않은 경계 즉,

$x$ 방향의 경계의 경우  $v=0, \frac{\partial u}{\partial x}=0$ ,  $y$ 방향의 경계의 경우  $u=0, \frac{\partial v}{\partial y}=0$  를 각각 만족시키는 경계를 말한다. 알려진 경계는 동,서,남,북의 경계는 물론 경계 내부에도 위치시킬 수 있다. 실제로 대부분의 경계조건은 단지 어떤 경계가 알려진 경계에 속하는가를 구분해주는 것만으로 결정된다.<sup>15)</sup>

그림 2.2 과 같은 경우를 생각해 보자.



(그림 2.2) 제어체적의 좌표 처리의 예

15) Nakayama Akira, pp. 201-205.

유체가 서쪽의 윗 방향으로 들어와서 동쪽의 하단부로 빠져나간다. (I,J) 는 각 격자점을 나타내며, 범위  $1 \leq I \leq NI, 1 \leq J \leq NJ$  라고 하자. 여기서  $NI$ 와  $NJ$ 는 각각 수평선 및 수직선의 개수를 나타낸다. 프로그램에서 필요한 격자의 개수는  $NI \times NJ$  필요한데 그 이유는 경계 주위에도 격자를 배치하기 때문이다. 그림 2.2의 경우  $NI = 6$  이고,  $NJ = 6$ 에 해당되며, 실제 수치해석 과정을 통해 구하고자 하는 제어체적은 점선으로 표시되지 않은 부분이다. 알려진 경계를 설정하기 위해서 알려진 경계를 각각의 군으로 나누고 이 나뉘어진 군을 나타내는 LUMP를 도입한다. 한 개의 LUMP 군은 LUMPN, LUMPS, LUMPE 와 LUMPW 로 구성되는데, 이들은 각각 주어진 LUMP군내에서 최대 x 방향 좌표값, 최소 x 방향 좌표값과 최대 y 방향 좌표값, 최소 y 방향 좌표값을 각각 나타낸다. 따라서 LUMP의 범위는  $LUMPW(K) \leq I \leq LUMPE(K), LUMPS(K) \leq J \leq LUMPN(K)$  이며, 여기서 K는 각각의 LUMP에 주어진 정수이다. 그림 2.2의 경우에는 4개의 LUMP가 필요하다. LUMP를 구분하고 정수의 값을 부여하는 것은 특별한 방법이나 제한이 없으며 다만 알려진 경계의 격자점의 값이 단지 LUMP안에서 적어도 한번만 포함이 되면 된다. 또한 유입구 경계와 벽 경계는 모두 알려진 경계에 해당한다. <표 2.2>는 그림 2.2에 대한 LUMP의 값을 나타낸다.

<표 2.2> LUMP의 값

K	LUMPW(K)	LUMPE(K)	LUMPS(K)	LUMPN(K)
1	1	1	1	6
2	1	6	6	6
3	6	6	3	6
4	1	6	1	1

### 2.1.5 이산화 방정식의 해법

일반적으로 선형대수방정식을 위한 해법에는 직접해법과 반복해법이 있다<sup>16)</sup>. 직접 해법의 대표적인 것으로는 가우스 소거법이 있으며, 반복법으로는 Gauss-Seidel 점순법이 있다. 반복해법은 여러 번의 반복계산을 통해 점차적으로 수렴을 하게 되는 상대적으로 단순한 알고리즘에 기반을 두고 있다. 반복해법의 주요 장점은 단지 0이 아닌 방정식의 계수만이 메모리에 저장된다는 점이다. Gauss-Seidel 반복해법은 컴퓨터에 적용하기가 간단한 반면, 풀어야 할 방정식의 개수가 증가하면 수렴이 늦어지는 단점이 있다. 이에 반해 TDMA(tri-diagonal matrix algorithm) 법은 수렴이 빠른 장점이 있다. TDMA 법은 컴퓨터의 용량을 적게 차지하며 또한 저장용량이 최소화되는 장점이 있다.

#### 1) TDMA 해법

이 알고리즘을 설명하기 위해 격자점의 번호를 1,2,3, . . . ,N 으로 표시하고, 1 과 N은 경계점이라고 생각하자. 이산화방정식은 1,2,3, . . . ,N에 대해 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$a_i \phi_i = b_i \phi_{i+1} + c_i \phi_{i-1} + d_i \quad (2.23)$$

따라서,  $\phi_i$ 는 이웃한 격자점에서의 값  $\phi_{i+1}$ 과  $\phi_{i-1}$ 에 연관된다. 경계점에 관한 이산화방정식은 특별한 형태를 가지므로  $c_1=0$  과  $b_N=0$ 을 이라고 한다. 따라서,  $\phi_0$  과  $\phi_{N+1}$ 은 아무런 의미가 없으며, 만약 경계에서의 값이 주어지면 경계점에 대한 방정식은 더 간단해진다. 예를 들어,  $\phi_1$ 이 주어지면,  $a_1=1, b_1=0, c_1=0, d_1=\phi_1$ 이 된다. 이러한 조건들은  $\phi_1$ 이  $\phi_2$ 의 항으로 알려짐을 의미한다.  $i=2$ 에 관한 방정식은  $\phi_1, \phi_2, \phi_3$  사이의 관계를 나타내지만  $\phi_1$ 이  $\phi_2$ 의 항으로 나타낼 수 있으므로, 이 관계는  $\phi_2$ 와  $\phi_3$ 관계로 압축된다. 이러한 대입 과정은  $\phi_N$ 이  $\phi_{N+1}$ 으로 표시될 때까지 계속된다. 그러나

---

16) Versteeg, H.K., and Malalasekera,W., pp. 156-179.

$\phi_{N+1}$ 은 의미를 가지지 않는 값이므로, 실제적으로 이 단계에서  $\phi_N$ 의 값을 얻게된다. 따라서, 역 대입 과정이 가능하게 된다. 역 대입 과정을 반복하게 되면,  $\phi_2$ 는  $\phi_3$ 에서,  $\phi_1$ 은  $\phi_2$ 에서 얻어지는데 이것이 TDMA의 본질이다. 전진 대입 과정에서 다음과 같은 식을 생각해 보자.

$$\phi_i = P_i \phi_{i+1} + Q_i \quad (2.24)$$

식 2.24부터 다음과 같은 식을 쓸 수 있다.

$$\phi_{i-1} = P_{i-1} \phi_i + Q_{i-1} \quad (2.25)$$

식 2.25를 식 2.23에 대입하면 다음 식이 얻어진다.

$$a_i \phi_i = b_i \phi_{i+1} + c_i (P_{i-1} \phi_i + Q_{i-1}) + d_i \quad (2.26)$$

이식은 식 2.24와 같은 형태로 정리될 수 있으며, 계수  $P_i$ 와  $Q_i$ 는 다음과 같이 표시된다.

$$P_i = \frac{b_i}{a_i - c_i P_{i-1}}, \quad Q_i = \frac{d_i + c_i Q_{i-1}}{a_i - c_i P_{i-1}} \quad (2.27)$$

이 식들은 순환 관계식이며, 특히  $P_1$ 과  $Q_1$ 는 다음 식으로 주어진다.

$$P_1 = \frac{b_1}{a_1}, \quad Q_1 = \frac{d_1}{a_1} \quad (2.28)$$

여기서,  $b_N=0$ 이므로  $P_N=0$ 이다. 따라서, 식 2.24부터 다음의 관계를 얻을 수 있다.

$$T_N = Q_N \quad (2.29)$$

이제,  $i=N-1, N-2, \dots, 3, 2, 1$ 에서 식 3.23을 이용하여  $\phi_{N-1}, \phi_{N-2}, \dots, \phi_3, \phi_2, \phi_1$  을 구한다. 일반적인 행렬식과는 달리, 이 TDMA에서는  $N^2$ 이 나  $N^3$ 이 아니라 단지  $N$ 에 비례하는 기억 장소와 계산 시간을 필요하는 아주 강력하고 편리한 방정식 해법이다.<sup>17)</sup>

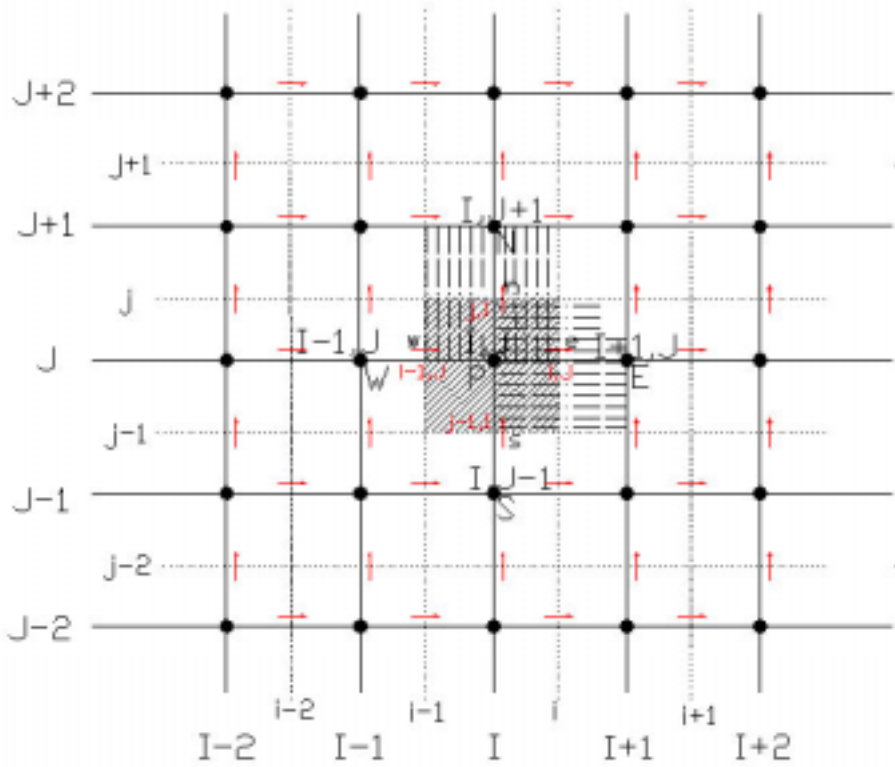
## 2.1.6 유동장의 해법

### 1) 엇갈림 격자망<sup>18)</sup>

유동장의 계산은 운동량 방정식에 압력을 나타내는 생성항이 포함되어 있어서 그리 간단하지 않다. 유한체적법에서 유동장의 계산을 위한 첫 번째 단계는 일반형 수송방정식을 이산화하는 것으로부터 시작된다. 각각의 방정식을 이산화 한 뒤 결정해야 할 것은 속도 벡터를 격자점의 어느 곳에 위치시키는가 하는 점이다. 만약, 속도 벡터를 압력이나 온도등과 같은 스칼라 변수와 같은 곳에 위치시킨다면 압력이 변화가 심한 불균일한 압력장(Checker-board Pressure field)을 균일 압력장과 같이 취급하게된다. 이러한 불균일한 압력장이 반복해를 얻는 과정 중에 생기게 되면, 운동량 방정식에서는 수렴해를 얻을 때까지 압력에 의한 영향을 고려하지 않게 되며, 이러한 현상을 막을 도리가 없다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 고안된 것이 엇갈림 격자망(staggered grid)이다. 엇갈림 격자망은 압력, 밀도 및 온도 등과 같은 스칼라 변수들은 일반적인 격자점에 위치시키며, 속도 벡터의 계산을 위해서 속도 벡터를 제어체적면의 주위에 배치한다. 그림 2.3는 엇갈림 격자망을 배치를 보여주고 있다.

17) 이재현 역, pp.59-70.

18) John C. T., Dale A. A., Richard H.P., Computational fluid mechanics and heat transfer, Taylor & Francis, pp.584-608, 1997.



(그림 2.3) 엇갈림 격자망

스칼라 변수들은 격자점에서 ●로 표시 된다. 속도 벡터는 각 격자점 사이의 제어체적 표면에서 정의되며 화살표로 나타낸다. 수평 화살표는 u방향 운동량 방정식에 대한 위치를, 수직 화살표는 v방향 운동량 방정식에 대한 위치를 각각 나타낸다. u방향 속도 벡터는 스칼라 제어체적 면 e 와 w 에 저장되며, v 방향 속도 벡터는 제어체적 면 n 과 s 에 저장된다. 또한 P,N,E,S 및 W는 각각 격자점을 나타낸다. 그림 2.3에서 알 수 있는 것처럼 스칼라 제어체적, u 방향 벡터 제어체적 및 v 방향 벡터 제어 체적의 위치는 각각 다르다. 이 그림에서 스칼라 격자점은 두 개의 격자선의 만나는 곳에 위치하게 되며 대문자로 표시된다. 즉, P 는 (I,J)로 나타내어 진다. 반면, u 방향 속도 벡터는 스칼라 제어체적의 e 와 w 면

에 위치한다.  $u$  방향 속도 벡터는 격자선과 제어체적면의 경계를 나타내는 선과의 교점에 위치하므로 격자점  $P$ 의  $w$  방향의 속도 벡터는 대문자와 소문자를 이용하여  $(i,j)$ 로 나타낼 수 있다. 엇갈림 격자에서 운동량 방정식은 다음과 같다.

$$a_{i,j} u_{i,j} = \sum a_{nb} u_{nb} + (p_{I-1,J} - p_{I,J}) A_{i,j} + b_{i,j} \quad (2.30)$$

$$a_{I,j} v_{I,j} = \sum a_{nb} v_{nb} + (p_{I,J-1} - p_{I,J}) A_{I,j} + b_{I,j} \quad (2.31)$$

여기서 인접 계수  $a_{nb}$  는 제어체적면에서 대류-확산의 복합된 영향을 나타내며, 하이브리드 도식을 이용하여 구한다. 항  $b$ 는 생성항을 나타낸다. 일반적으로 압력 구배는 생성항을 구성하는  $b$ 에 포함되지 않고 독립적으로 표시한다. 압력장 역시 결국에는 계산해야 하므로, 운동량방정식에서 압력을 생성항에 포함시키는 것은 편리하지 않기 때문이다. 항  $(p_{I,J-1} - p_{I,J}) A_{I,j}$  및  $(p_{I-1,J} - p_{I,J}) A_{i,j}$  는 제어체적에 작용하는 압력 힘이다.

## 2) SIMPLE 알고리즘<sup>19)</sup>

유동장의 계산을 위한 SIMPLE 알고리즘에서는 우선 압력  $p^*$ 를 예측한다. 예측된 압력장  $p^*$ 에 의해 계산된 불완전한 속도장을  $u^*$ 과  $v^*$ 이라고 하면 이산화된 운동량 방정식 2.30과 2.31은 다음과 같이 표현된다.

$$a_{i,j} u^*_{i,j} = \sum a_{nb} u^*_{nb} + (p^*_{I-1,J} - p^*_{I,J}) A_{i,j} + b_{i,j} \quad (2.32)$$

$$a_{I,j} v^*_{I,j} = \sum a_{nb} v^*_{nb} + (p^*_{I,J-1} - p^*_{I,J}) A_{I,j} + b_{I,j} \quad (2.33)$$

$p^*$ 로부터 얻은  $u^*$ 과  $v^*$ 이 점차적으로 연속방정식을 만족시키도록 추측된 압력  $p^*$ 의 개선 방법을 찾기 위해 압력수정  $p'$ 을 가정해 보자. 정확한 압력  $p$ 는 다음 식으로 얻어진다.

---

19) Ibid. pp.654-671.

$$p = p^* + p' \quad (2.34)$$

압력수정에 상응하는 속도 수정은 유사한 방법으로 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$u = u^* + u', v = v^* + v' \quad (2.35)$$

식 2.35를 식 2.32와 2.33에 각각 대입하면 다음과 같다.

$$a_{i,j} u'_{i,j} = \sum a_{nb} u'_{nb} + (p'_{I-1,J} - p'_{I,J}) A_{i,j} \quad (2.36)$$

$$a_{I,j} v'_{I,j} = \sum a_{nb} v'_{nb} + (p'_{I,J-1} - p'_{I,J}) A_{I,j} \quad (2.37)$$

여기서  $\sum a_{nb} u'_{nb}$ ,  $\sum a_{nb} v'_{nb}$  항을 식 2.36과 2.37에서 생략하기로 한다. 이것이 SIMPLE 알고리즘의 가장 중요한 가정이 된다. 이 결과 식 2.36와 2.37은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$u'_{i,j} = d_{i,j} (p'_{I-1,J} - p'_{I,J}) \quad (2.38)$$

$$v'_{I,j} = d_{I,j} (p'_{I,J-1} - p'_{I,J}) \quad (2.39)$$

여기서  $d_{i,j} = \frac{A_{i,j}}{a_{i,j}}$ ,  $d_{I,j} = \frac{A_{I,j}}{a_{I,j}}$  이다.

지금까지는 운동량 방정식에 대하여서만 살펴보았지만, 유동장의 계산을 위해서는 속도장은 연속방정식도 만족시켜야 한다. 압력수정을 위하여 필요한 식으로 전환된 연속방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} a_{I,J} p'_{I,J} &= a_{I+1,J} p'_{I+1,J} + a_{I-1,J} p'_{I-1,J} + a_{I,J} p'_{I,J+1} \\ &+ a_{I,J-1} p'_{I,J-1} + b'_{I,J} \end{aligned} \quad (2.40)$$



이 식은 압력 수정식이라고 불리며 여기서 생성항  $b$ 는 부정확한 속도장으로부터 기인하는 질량 생성을 나타내며, 연속방정식을 만족시키게 되면 그 값은 0이 된다. 식 2.33으로부터 각 점에서의 압력 수정값  $p'$ 의 값을 얻게 된다. 일단 압력 수정값을 알게 되면, 식 2.38, 2.39 와 2.40을 이용하여 속도 벡터를 구할 수 있다.  $\sum a_{nb} u'_{nb}$  와  $\sum a_{nb} v'_{nb}$ 의 생략은 최종 결과에는 영향을 미치지 않게 되는데, 그 이유는  $p', u', v'$ 은 수렴된 해에서는 0이 되기 때문이다. 일반적으로 압력수정방정식은 반복계산의 과정에서 완화계수를 적용할 때 수렴하는 경향이 있다. 이 때 완화계수를 적용한 새로운 압력값  $p^{new}$ 는 다음 식으로 주어진다.

$$p^{new} = p^* + \alpha p' \quad (2.41)$$

이때  $\alpha$ 는 완화계수를 나타내며, 0에서 1까지의 값을 갖는다. 속도에 대한 완화계수의 적용식은 다음과 같다.

$$u^{new} = \alpha u + (1 - \alpha) u^{(n-1)} \quad (2.42)$$

$$v^{new} = \alpha v + (1 - \alpha) v^{(n-1)} \quad (2.43)$$

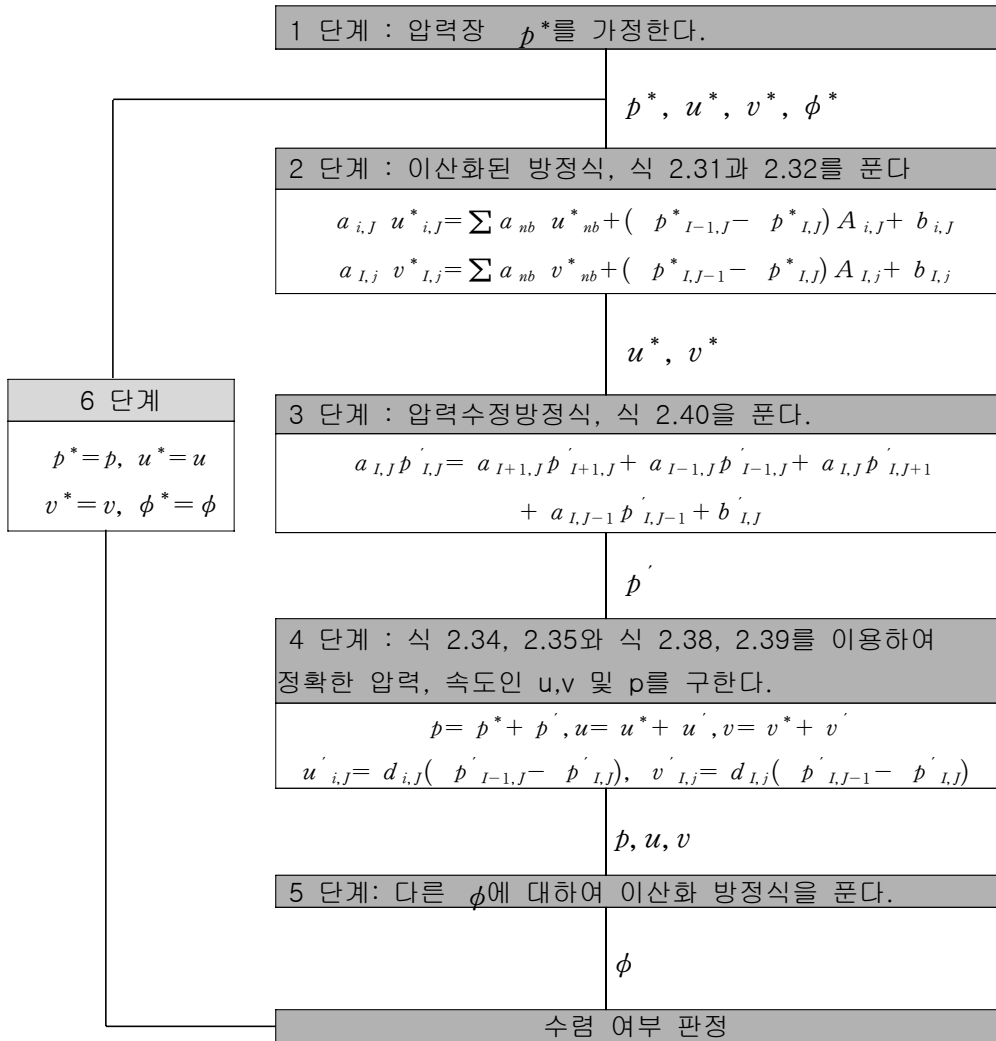
여기서  $u^{(n-1)}, v^{(n-1)}$ 은 각각 바로 직전의 반복계산을 통해 얻어진 값을 의미한다.

지금까지, 속도 성분과 압력을 얻기 위하여 필요한 모든 방정식에 대하여 살펴 보았다. 이제까지 얻어진 방정식을 이용하여 SIMPLE 알고리즘을 적용하는 순서는 다음과 같다.

- 1 단계 : 압력장  $p^*$ 를 가정한다.
- 2 단계 : 이산화된 운동량방정식, 식 2.31 과 2.32을 푼다.
- 3 단계 : 압력수정방정식, 식 2.40를 푼다.
- 4 단계 : 식 2.34, 2.35와 식 2.38, 2.39를 이용하여 정확한 압력, 속도인  $u, v$  및  $p$ 를 구한다.

- 5 단계 : 다른,  $\phi$ 에 대하여 이산화 방정식을 푼다.
- 6 단계 : 수정된 압력  $p$ 를 다시 새로운 예측값  $p^*$ 로 보고, 2 단계로 돌아가서 수렴해를 얻을 수 있을 때 까지 전체 과정을 반복한다.

이 과정은 그림 2.4 에 나타나 있다.



(그림 2.4) SIMPLE 알고리즘

## 2.2 열쾌적 평가

### 2.2.1 인체의 열평형

#### 1) 인체와 주위환경과의 열교환

인체와 주위 환경과의 열평형을 유지하는 것은 건강과 쾌적을 유지하는 가장 기본적인 조건이다. 인체의 열평형에 영향을 주는 요소로는 개인의 주관적인 요소인, 활동량, 기후의 적응도, 착의량 및 성별과 물리적인 요소인 온도, 평균복사 온도, 습도와 기류 속도 등이 있다. 인체는 활동량에 따라 인체 대사의 과정의 결과로써 에너지를 생산하는데, 이중 대부분은 기계적인 일을 하는데 소비되는 것이 아니라, 열을 생산하는데 사용된다. 이러한 인체의 열 생산량은 주위의 환경과 열교환을 통해서 일정하게 유지되어야 한다<sup>20)</sup>. 인체와 주위와의 열교환은 주위의 공기와 물체의 표면을 통한 대류와 복사의 과정을 통해서 일어나며, 또한 인체는 피부와 폐를 통한 증발로써 열을 방출한다.

인체와 주위 환경과의 열교환은 다음 식으로 나타낼 수 있다<sup>21)</sup>.

$$S = M - W_k - E_{sk} - E_r - C - R - C_k \quad (2.44)$$

여기서

$S$  : 신체의 에너지 균형,  $M$  : 신체의 대사량 즉 신체의 내부 발열량,

$W_k$  : 일  $E_{sk}$  : 피부에서 증발로 인한 열손실,  $E_r$  : 호흡으로 인한 열손실,

$C$  : 대류로 인한 열손실,  $R$  : 복사로 인한 열손실  $C_k$  : 전도로 인한 열손실

을 각각 나타낸다.

$S < 0$  일 때는 신체는 열을 생산하는 것보다 더 많은 에너지를 방출하며, 신체의 온도는 감소하기 시작한다. 이에 대한 반응으로 신체 대사의 조절 작용은 피부의

---

20) Givoni, B., Man, climate and architecture, Van nostrand reinhold company, pp. 19-27, 1976.

21) Butera. Federico M., Chapter 3 - Principles of thermal comfort, Renewable & sustainable Energy Reviews, Vol 2. pp.38-66, 1998.

열에 대한 단열효과를 증가시키고, 더 많은 에너지를 생산하게 된다.  $S > 0$  일 때는 신체의 온도는 증가하며, 피부의 열에 대한 단열 효과가 감소하기 시작한다. 신체 대사량은 활동량에 따라 달라지며 met ( 1 met = 50 kcal/hm<sup>2</sup>)의 단위를 사용하여 측정한다. 일의 효율  $\eta$  은 외부의 일에 대한 신체의 대사량 ( $W_k/M$ )으로 정의 되며 0 - 0.2 범위의 값을 갖는다. 증발에 의한 열손실  $E_{sk}$  은 피부로부터 분비되는 땀의 조절에 의한 것으로, 상대습도, 온도, 기류 속도, 피부온도, 착의량과 피부의 건조도 등에 좌우된다. 호흡에 의한 열손실  $E_r$  은 호흡의 과정 중 신체 내부의 온도에서 수증기가 포화될 때, 폐로부터 증발 잠열에 해당하는 열을 빼앗는 과정에서 발생한다. 또한 들숨 과 날숨의 온도차로부터 열손실이 발생한다. 대류 열전달  $C$  는 다음 식으로 주어진다.

$$C = f_{cl} h_c A_{DU} (t_{cl} - t_a) \quad (2.45)$$

여기서

$f_{cl}$  : 신체의 옷을 입을 면적에 대한 옷을 입지 않은 면적의 비,  $h_c$  : 대류 열 전달율,

$t_{cl}$  : 옷의 표면 온도,  $t_a$  : 공기의 온도,  $A_{DU}$  : 신체의 표면적

을 각각 나타낸다. 신체와 주위 환경과의 복사에 의한 열교환율  $R$  은 다음 식으로 표현된다.

$$R = 3.96 \times 10^{-8} f_{cl} A_{DU} [ (t_{cl} + 273)^4 - (t_{mrt} + 273)^4 ] \quad (2.46)$$

여기서  $t_{mrt}$  은 평균 복사 온도로서 다음 식으로 결정된다.

$$t_{mrt} = \sum t_i F_{p,i} \quad (2.47)$$

여기서

$F_{p,i}$  : 대상물체 p 와 표면 i 간의 각율  $t_i$  : 표면 온도

로 정의된다.  $R$  은 옷을 입은 신체의 표면온도, 평균 복사 온도 및 옷의 종류에 따라 결정된다. 전도로 인한 전도열 손실  $C_k$  는 착석시에는 의자와 신체간의 열교환, 서있을 때는 발과 바닥과의 열교환에 의해 발생하는데, 이는 주로 옷의 열저항의 산정시 포함된다. 옷을 통한 열교환은 공기층을 통한 열전달, 고체 물질을 통한 전도현상 및 각 층간의 복사열전달을 포함하는 등 상당히 복잡하다. 이러한 여러 변수들을 고려하여 열전달량을 계산하는 것은 사실상 불가능하기 때문에 clo 라는 새로운 단위가 도입되었다. clo 는 신체의 피부로부터 의복의 외표면까지 측정된 의복의 열저항을 나타내며 1 clo 는  $0.155 \text{ m}^2\text{C}^\circ\text{W}^{-1}$  에 해당한다.

## 2) Humphreys 의 적응 모델

Humphrey<sup>22)</sup> 는 사람들이 열적 균형을 느끼는 온도로 정의되는 인체의 열적 중성온도에 대하여 조사하였는데, 그는 각기 다른 기후대에 사는 사람들이 같은 열환경에 노출되었을 때 사람들의 열환경에 대한 반응에는 커다란 차이는 존재하지 않지만 건물 재실자의 열적 중성온도에는 많은 차이가 있음을 발견했다. 이는 물리적 요소의 변화에 의한 것이 아니라 사람들의 기대감의 차이에 기인하는 것으로 Humphreys의 연구는 열적 중성온도가 외부 평균 온도의 변화  $t_m$  와 연관되어 있음을 보여주고 있다. 즉, 사람들은 외부 기후에 영향을 받아서 자신의 열적 감각의 변화를 일으키는 적응 과정을 겪는다는 것이다. 기계적 공조시설이 없는 건물의 경우, 열적 중성 온도는 다음과 같은 식으로 계산할 수 있다.

$$T_n = 11.9 + 0.534 T_m \quad (2.48)$$

이 식은  $10 \leq T_m \leq 34^\circ\text{C}$  인 경우에 유효하다. 기계적 공조시설을 갖춘 건물의 경우는 다음 식에 의해서 열적 중성 온도를 구할 수 있다<sup>23)</sup>.

---

22) Humphreys, MA., Outdoor temperature and comfort indoor , Building research and practice 6(2), pp. 92-105, 1978.

23) Ibid. pp.92-105.

$$T_n = 0.065 T_m^2 + 0.32 T_h + 12.4 \quad (2.49)$$

여기서  $T_h$  는 일년 중 가장 더운 달의 하루 중 최고 온도의 평균으로 정의된다. 이 식은  $-24 \leq T_m \leq 23^\circ\text{C}$  이고  $18 \leq T_h < 30^\circ\text{C}$ 인 경우에 유효하다. 또한 Humphreys는 재실자가 자신의 열환경을 조절할 수 있을 때 열적 쾌적을 가장 확실히 얻을 수 있을 수 있다고 결론내렸다. 이러한 방법을 통해서 사람들은 이론적으로 결정된 쾌적 온도에 실의 온도를 맞추는 것이 아니라, 각 개인의 특정한 요구조건에 맞게 열환경을 조절할 수 있다.

## 2.2.2 열쾌적 지표

### 1) PMV

실내의 열환경을 평가하기 위한 여러 가지 열쾌적 지표가 제시되었지만, 가장 대표적이며 널리 쓰이는 것은 Fanger에 의해 제안된 PMV와 PPD이다. PMV란 주어진 환경에 대한 예상평균 온열감으로써 -3 (매우 춥다)부터 +3 (매우 덥다)까지의 7 단계의 척도를 가지고 있다<sup>24)</sup>. Fanger 는 온열감을 예측하기 위해서 착의량 및 활동량과 물리적인 지표인 온도, 습도, 기류 및 복사에 대한 정상 상태를 가정한 실험의 결과와 열평형 방정식을 이용하여 PMV 지표를 만들었으며, PMV 는 다음의 식으로 표현된다.

$$\begin{aligned} PMV = & (0.352 e^{-0.042(M/A_{DU})}) [(M/A_{DU})(1-\eta)] \\ & - 0.35[43 - 0.061(M/A_{DU})(1-\eta) - P_a] - 0.42[(M/A_{DU})(1-\eta) - 50] \\ & - 0.023(M/A_{DU})(44 - P_a) - 0.0014(M/A_{DU})(34 - t_a) - 3.4 \times 10^{-8} \\ & f_{cl} [ (t_{cl} + 273)^4 - (t_{mrt} + 273)^4 ] + f_{cl} h_c (t_{cl} - t_a) \quad (2.50) \end{aligned}$$

24) Sayigh, A., Hamid, A., Chapter 1 - Thermal comfort and the development of bioclimatic concept in building design, Renewable & Sustainable Energy Reviews, Vol 2. pp.3-24, 1998.

여기서

$$t_{cl} = 35.7 - 0.028(M - W) - (t_{mrt} + 273)^4 + f_{cl} h_c (t_{cl} - t_a) \} \\ - I_{cl} \{ 3.96 \times 10^{-8} f_{cl} [ (t_{cl} + 273)^4$$

$$h_c = 2.38 \times (t_{cl} - t_a)^{0.25} \quad \text{단, } 2.38 \times (t_{cl} - t_a)^{0.25} \geq 12.1 \times (v_{ar})^{0.5}$$

$$h_c = 12.1 \times (v_{ar})^{0.5} \quad \text{단, } 2.38 \times (t_{cl} - t_a)^{0.25} \leq 12.1 \times (v_{ar})^{0.5}$$

$v_{ar} = v_a + 0.005(M/A_{DU} - 58.15)$ ,  $\eta = W/M$ ,  $P_a =$  수증기압을 각각 나타낸다.

PMV 지표는 6개의 변수가 다음 값의 범위에 있을 때, -2에서 +2 사이의 값에 대해서 유효한 것으로 알려져 있다.

$$M = 46 - 232 W m^{-2} (0.8 - 4met), \quad I_{cl} = 0 - 0.31 m^2 \text{ } ^\circ\text{C} W^{-1} (0 - 2clo),$$

$$t_a = 10 - 30^\circ\text{C},$$

$$t_{mrt} = 10 - 40^\circ\text{C}, \quad v_{ar} = 0 - 1 m s^{-1}, \quad P_a = 0 - 2700 Pa$$

## 2) PPD

PPD는 다양한 열환경에 대해서 열적인 불쾌감을 나타내는 사람들의 백분율을 구하기 위해서 도입되었다. 여기서 열적인 불쾌감을 나타내는 사람들은 PMV 지표의 -1,0,1에 해당하지 않는 사람들을 의미한다. 일단 PMV의 값이 결정되면 PPD의 값은 다음 식으로 계산이 가능하다.

$$PPD = 100 - 95 \exp[-(0.03353 PM V^4 + 0.2179 PM V^2)] \quad (2.51)$$

실내의 모든 재실자가 열적 쾌적감을 느끼도록 계획하는 것은 사실상 거의 불

가능하다. 왜냐하면, 각 개인들은 각각 다른 착의량, 활동량 및 신체 대사량을 가지고 있기 때문이다. 따라서 합리적인 열환경 계획은 재실자 대부분의 사람이 열적 쾌적감을 느끼도록 계획하는 것이며, 이때 제안되는 PMV 및 PPD의 지표의 값은  $-0.5 < PMV < +0.5$  및  $PPD < 10\%$  이다.

### 3) PD

기류 속도는 속도의 크기와 방향으로 표시되는 벡터량이다. 대부분의 건물의 열환경에 대한 연구에서 공기의 속도는 시간에 대한 평균값이 사용된다. 그러나 건물의 열쾌적의 평가를 위해서는 순간 속도와 평균 속도가 모두 요구된다. 특히, 난류 지역에서 기류 속도의 변이는 열쾌적에 영향을 미치는 중요한 요소가 된다<sup>25)</sup>. 이 기류 속도의 변이를 고려하기 위해서 속도의 변화를 평균속도로 나눈 값으로 정의되는 난류강도라는 개념이 사용된다. 난류 강도는 다음 식으로 표현된다.

$$I = 100 \frac{V_{sd}}{V} = 100 \frac{(2k)^{0.5}}{V} \quad (2.52)$$

여기서

$V_{sd}$  : 속도의 평균 변이,  $k$  : 난류운동에너지

를 각각 나타낸다.

Fanger는 난류강도가 국부적 불쾌감에 영향을 미치는 것을 조사하고, 난류강도를 포함하는 열환경 평가 지표인 PD를 개발했다. 이 모델은 재실자가 표준적 착의 상태에서 경작업시, 평균 기류 속도, 난류강도 및 온도를 이용하여 드래프트로 인한 불쾌적도를 평가한다.

PD는 다음 식으로 계산된다.

---

25) Koskela, H., Heikkinen, J., Niemela, R., Hautalampi, T., Turbulence correction for thermal comfort calculation, Building and Environment Vol. 36, pp. 247-255, 2001.



$$PD = (3.143 + 0.3696 VI)(34 - T_a)(V - 0.05)^{0.6223} \quad (2.53)$$

여기서  $V < 0.05$  m/s일 때  $V = 0.05$  m/s가,  $PD > 100\%$  일 때는  $PD = 100\%$ 이 각각 사용된다. PD는 드래프트로 인해서 불쾌적을 느끼는 사람들의 백분율이므로 이 값이 작을수록 공간의 열환경은 우수하다고 할 수 있다. 일반적으로 PD의 값이 15%이하이면 적합한 것으로 판단한다. 위 식에서 기류 속도, 공기의 온도 및 난류 운동에너지는 일반적인 CFD 프로그램을 이용하여 얻을 수 있다.

## 제 3 장 실내 기류 분포 및 열쾌적 평가를 위한 프로그램 개발

본 프로그램은 설계 초기 단계에서 설계자가 전산유체역학(CFD)에 대한 전문적인 지식이 없이도 정확한 실내기류분포의 평가 및 재실자의 열쾌적성을 손쉽게 판단할 수 있는 프로그램이다.

또한 실의 기류 분포 및 열쾌적 지표의 예측 결과를 가시화하여 사용자에게 보여주므로, 프로그램 사용자는 실내 열환경의 평가를 바탕으로 열쾌적성을 향상시킬 수 있는 대안의 도출이 가능하다.

실내 기류의 해석을 위해서는 전산유체역학을 이용하였으며, 프로그램의 개발 도구는 기류 해석 및 열쾌적 평가 부분에서는 C++을 사용하였고, 사용자 인터페이스 부분과 가시화 부분을 위해서는 Visual C++을 이용했다.

### 3.1 프로그램의 특징 및 구성

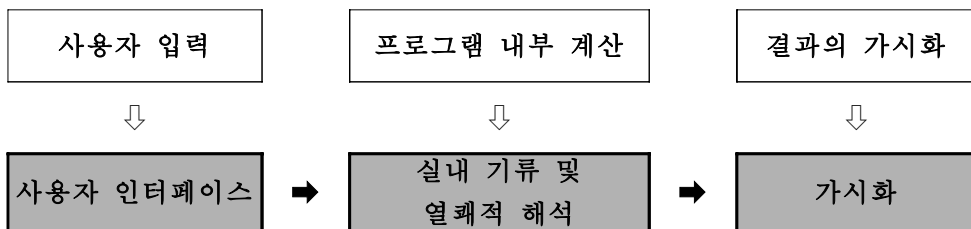
본 연구의 목적은 설계자가 설계의 초기 단계에서 전산유체역학에 대한 전문적인 지식이 없이도, 실내 기류 분포 및 재실자의 열쾌적성을 동시에 고려하여 손쉽게 최적의 설계 대안을 도출할 수 있는 프로그램의 개발이다. 따라서 본 프로그램은 사용의 편의성과 기류 분포 및 열쾌적성 평가의 정확성을 그 특징으로 한다.

본 프로그램의 특징을 기존의 상용 CFD 프로그램과 비교해 보면 표 3.1 과 같다.

	상용 CFD 프로그램	본 프로그램
목적	<ul style="list-style-type: none"> <li>범용으로 프로그램으로써 모든 공학 분야에서의 열전달, 유체 유동, 화학반응 등을 해석</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>건축 설계의 초기 단계에서 기류 분포 및 열쾌적성의 평가</li> </ul>
결과의 정확도	<ul style="list-style-type: none"> <li>정확함</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>건축공간의 기류 해석 및 열쾌적성의 평가를 위한 충분한 신뢰도 확보</li> </ul>
사용의 편의성	<ul style="list-style-type: none"> <li>수치해석과 관련된 자세한 사항의 입력이 요구되므로 전산유체역학에 대한 기본적인 지식이 요구됨</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>사용자의 입력이 간단하며 편리함</li> </ul>
열쾌적성 평가	<ul style="list-style-type: none"> <li>대부분 불가능</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>열쾌적 지표 PD를 이용하여 공간의 열쾌적성을 평가</li> </ul>

<표 3.1> 개발된 프로그램과 상용 CFD 프로그램과의 비교

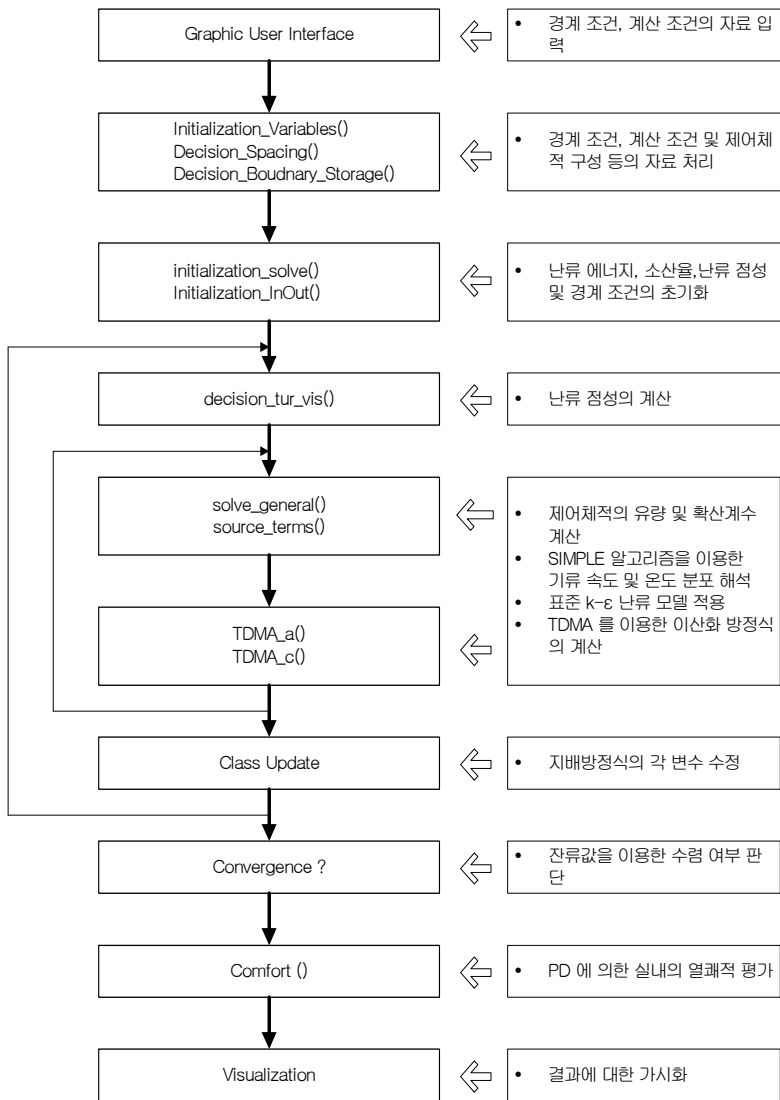
본 프로그램은 크게 사용자 인터페이스, 실내 기류 및 열쾌적 해석, 가시화의 세 부분으로 나눌 수 있다. 그림 3.1은 프로그램의 구성을 나타낸다.



(그림 3.1) 프로그램의 구성

### 3.2 실내 기류 및 열쾌적 해석

그림 3.2는 이론 고찰을 통해서 살펴본 전산유체역학을 이용한 실내기류 분포 해석과 열쾌적 지표 PD가 본 프로그램에 적용된 사항을 보여 주는 프로그램의 구조도이다. 구조도의 왼쪽에서는 프로그램에서 사용된 클래스 명과 함수명을 이용하여 프로그램의 구조를 설명하고 있으며, 구조도의 오른쪽에서는 각 클래스 명과 함수명이 담당하는 역할에 대한 설명이 나타나 있다.



(그림 3.2) 프로그램의 구조도

표3.2는 본 프로그램에서 사용된 함수와 각 함수의 역할을 실내 기류 및 열쾌적의 해석 단계별로 나타내고 있다.

<표 3.2> 각 함수의 설명

함수명	역할
<b>1 단계</b>	
Initialization_Variables()	<ul style="list-style-type: none"> <li>각 함수에서 사용된 변수의 초기화를 실시한다.</li> </ul>
Decision_Spacing()	<ul style="list-style-type: none"> <li>사용자로부터 입력받은 그리드의 개수와 그리드 사이의 간격을 바탕으로 스칼라 변수와 벡터 변수를 구분하여 제어체적의 중심점 및 너비를 구한다.</li> </ul>
Decision_Boundary_Storage()	<ul style="list-style-type: none"> <li>사용자로부터 입력받은 실의 형상에 대한 정보를 이용하여 해석 대상 공간의 벽체와 내부 장애물에 대한 정의를 한다.</li> </ul>
Initialization_solve()	<ul style="list-style-type: none"> <li>각 이산화점에서의 속도, 온도, 압력, 온도, 난류 운동에너지, 소산율을 초기화한다.</li> </ul>
<b>제 2 단계</b>	
decision_tur_vis()	<ul style="list-style-type: none"> <li>난류 동점성을 고체 경계에 인접한 경우와 일반적인 경우로 구분하여 구한다.</li> </ul>
decision_vol()	<ul style="list-style-type: none"> <li>스칼라 변수와 벡터 변수를 구분하여 제어체적의 체적을 구한다.</li> </ul>
decision_diff()	<ul style="list-style-type: none"> <li>이산화된 방정식의 각 계수를 구하기 위하여 난류를 고려한 확산계수를 구한다.</li> </ul>
solve_general()	<ul style="list-style-type: none"> <li>이산화된 각 지배 방정식의 계수를 하이브리드 도식이나 중앙차분 도식을 이용하여 구한다.</li> </ul>
source_terms()	<ul style="list-style-type: none"> <li>각 지배 방정식에서의 생성항의 값을 구하며, 고체 경계와 인접한 이산화점에서는 벽법칙을 적용한다.</li> </ul>

<표 3.2> 각 함수의 설명 (계속)

함수명	역할
<b>제 3 단계</b>	
TDMA_a()	<ul style="list-style-type: none"> <li>solve_general()과 source_terms()에서 구한 계수를 바탕으로 이산화된 지배 방정식을 구성한다. 반복 계산시 각 방정식 별로 완화계수를 적용한다.</li> </ul>
TDMA_c()	<ul style="list-style-type: none"> <li>TDMA_a()에서 구성된 지배 방정식을 푼다.</li> </ul>
Update_pre_cor()	<ul style="list-style-type: none"> <li>반복 계산시 이용된 가정된 각 방정식의 값을 수정한다.</li> </ul>
TDMA_CVG()	<ul style="list-style-type: none"> <li>이산화된 지배 방정식의 결과가 수렴되었는지의 여부를 판단한다.</li> </ul>
<b>제 4 단계</b>	
Update_all()	<ul style="list-style-type: none"> <li>유입구 및 유출구에서의 각 변수별 경계처리를 실시한다.</li> </ul>
Initialization_InOut()	<ul style="list-style-type: none"> <li>입력 단계에서 정해진 경계 조건의 값을 저장한다.</li> </ul>

본 프로그램에서 적용된 실내 기류 및 열쾌적의 해석 과정은 크게 4 단계로 나눌 수 있다.

실내 기류 및 열쾌적의 해석 1 단계에서는 프로그램의 실행을 위한 예비 단계로써, 프로그램에 사용된 각 변수들을 초기화 한다. 이 후 사용자 인터페이스로부터 얻은 데이터를 바탕으로 SIMPLE 알고리즘의 적용이 가능하도록 제어체적에 대한 사항과 해석 대상 공간에 대한 정의를 한 후, 속도, 온도, 압력, 온도, 난류 운동에너지, 소산율을 초기화한다.

제 2 단계에서는 이산화된 지배 방정식의 각 계수를 구하는 단계이다. 난류 동점성의 값을 계산한 후, 이를 이용하여 각 방정식별로 확산 계수와 확산항을 구한다. 이때 고체 경계와 인접한 제어체적에서는 벽법칙을 이용하며, 이것의 결과는 생성항으로 처리된다.

제 3 단계에서는 2 단계에서 구해진 운동량 방정식, 수정 압력 방정식, 에너지 방정식,  $k$  방정식 및  $\epsilon$  방정식의 각 계수를 이용하여 각 이산화 방정식을 완성하여서 해를 구하는 단계이다. 이때 TDMA\_c() 단계에서 각 이산화 방정식의 해를 구하기 위한 반복 계산이 이루어지는데, 이는 3 단계 내부의 반복 계산에 해당한다. 내부의 반복 계산이 끝나면, SIMPLE 알고리즘 내부에서 가정된 각 변수의 값을 수정한다. 수정된 변수의 값을 기준으로 수렴여부를 판단하며, 수렴이 되면 실내 기류 해석은 3 단계에서 끝나게 되며, 이 때 얻어진 기류 해석의 결과를 이용하여 열쾌적 지표 PD의 값을 각 이산화점에서 구한다. 만약 수렴이 되지 않으면 프로그램은 4 단계로 이어진다.

제 4 단계에서는 SIMPLE 알고리즘의 반복계산을 위한 단계로, 3 단계에서 얻어진 변수는 새롭게 가정된 변수로 간주된다. 또한 입력 단계에서 정해진 경계조건이 다시 부여되며, 프로그램은 다시 제 2 단계로 돌아가서 유동장이 수렴에 이를 때까지 계산이 진행된다.

## 제 4 장 프로그램의 검증

### 4.1 개요

프로그램의 검증은 새로운 프로그램의 개발에 있어서 매우 중요하며, 확실한 프로그램의 검증을 통해서 새로운 프로그램의 결과에 대한 확신과 사용 가능성이 보장된다. 그런데, 프로그램의 정확한 결과는 단순히 프로그램 자체의 정확성 뿐만 아니라 프로그램의 외적 요인에 의해서도 영향을 받는다<sup>26)</sup>. 프로그램의 외적 요인으로는 프로그램 사용자의 잘못된 입력, 실제 건물의 정보와 사용자가 입력한 건물의 정보의 차이등이 있다. 프로그램의 내적 요인으로는 물리적 현상의 잘못된 수학적 모델의 적용, 수학적 모델의 부정확한 컴퓨터 언어로의 변환과 프로그램의 코드 작성상의 실수 등이 있다. 프로그램의 외적 요인은 프로그램 사용자와 관련된 요소이므로, 새로운 프로그램의 작성 단계에서 방지할 수 있는 방법은 없다. 다만, 사용자 인터페이스 등을 좀 더 편리하게 만듦으로써 프로그램의 외적 요인에 의한 잘못을 상당 부분 감소시킬 수 있다. 프로그램의 검증 방법으로는 다음과 같은 것이 있다<sup>27)</sup>.

- 적용된 이론의 검증
- 프로그램 원본 코드의 검증
- 수학적 정밀해를 이용한 검증
- 다른 프로그램과의 비교 검증
- 실험치를 이용한 비교 검증
- 민감도 분석 및 통계적 분석

프로그램의 검증은 그것 자체가 매우 복잡하며, 건물의 물리적 복잡성과 거의

---

26) Ian B.M., The adaptive coupling of heat and air flow modelling within dynamic whole-building simulation, Ph.D. Thesis, University of Strathclyde, Glasgow, UK, pp.153-184, 2000.

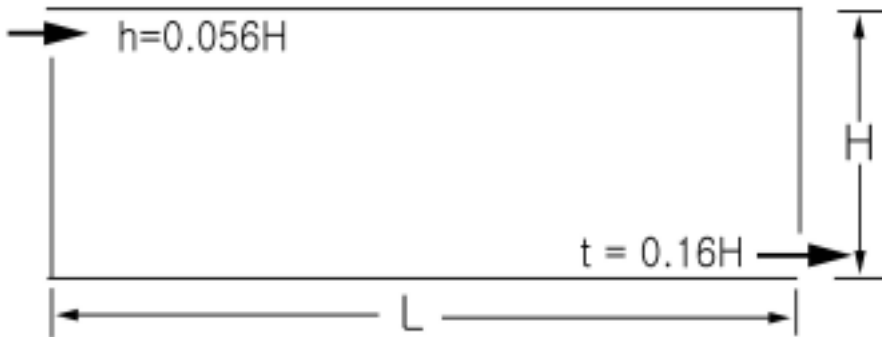
27) Hen, Jan L.M., On the thermal interaction of building structure and heating and ventilating system, Ph.D.Thesis, University of Eindhoven, p.6.1-6.14, 1991.



무한대의 입력 조건의 결합 가능성으로 인해서 위에서 언급한 모든 프로그램의 검증 방법을 이용하는 것은 거의 불가능하다. 따라서, 본 연구에서는 다른 프로그램과의 비교 검증에 의한 방법과 실험치를 이용한 비교 검증을 프로그램의 검증 방법으로 채택했다. 다른 프로그램과의 비교 검증을 위해서는 널리 사용되고 있는 CFD 프로그램인 PHOENICS를 선택했다. 또한, 실험치를 이용한 비교 검증의 방법은 실험의 계획 및 측정이 복잡하고 비용이 많이 들므로 주로 한정된 경우에만 사용되고 있다. 따라서 본 연구에서는 직접 실험을 실시하지 않고, 기존 문헌에서 제시된 실험 데이터를 이용하여 검증을 실시했다. 본 장에서는 강제대류와 복합대류의 경우에 대하여 개발된 프로그램의 검증 결과를 제시했다.

## 4.2 강제 대류

강제 대류의 경우에 대한 프로그램의 검증을 위해서 사용된 실측 데이터는 Chen and Xu<sup>28)</sup>이 난류 모델의 검증을 위해서 사용한 데이터를 사용했다.

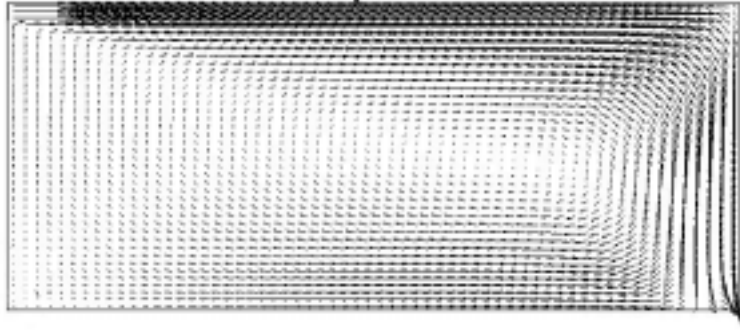


(그림 4.1) 강제 대류의 검증을 위한 모형도

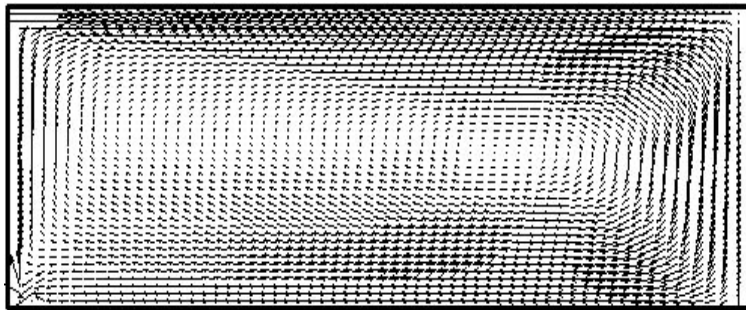
실측은 두 개의 개부구를 가진 축소된 실험실에서 이루어졌다. 실의 크기는 길이  $L$ 이  $3.0H$ , 유입구의 높이  $h$ 는  $0.056H$ 이고 유출구의 높이  $t$ 는  $0.16H$ 이다. 문헌을 통하여 실내의 각 지점에서의 속도를 유입구에서의 속도로 나눈 실측 데이터를

28) Chen, Q., Xu, W., A zero-equation turbulence model for indoor airflow simulation, Energy and Buildings Vol.28, pp.137-144, 1998.

를 얻을 수 있다.



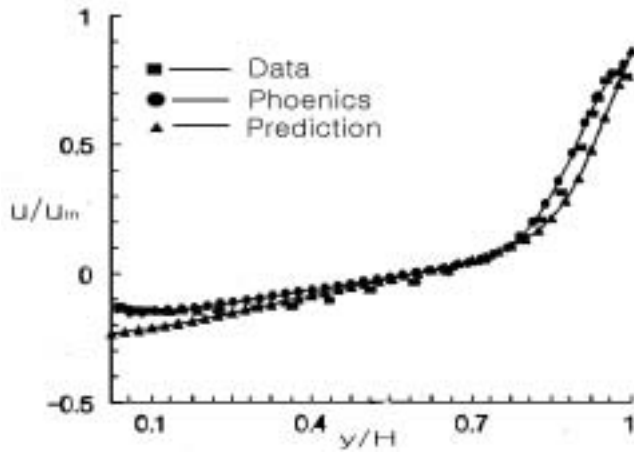
(그림 4.2) PHOENICS를 이용한 결과



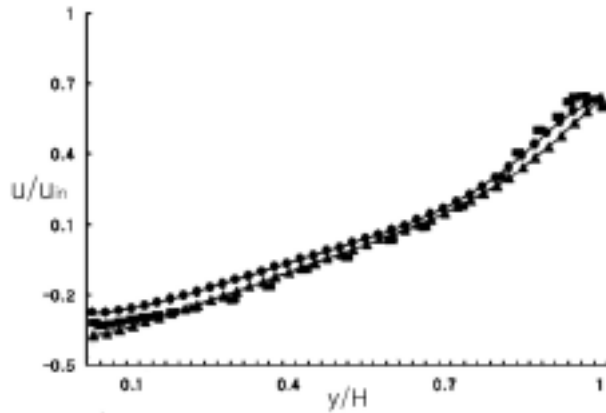
(그림 4.3) 개발된 프로그램을 이용한 결과

그림 4.2와 4.3 은 상용코드 PHOENICS를 이용하여 얻은 기류 속도의 패턴과 개발된 프로그램을 이용하여 얻은 기류 속도의 패턴으로써, 두 기류 패턴은 매우 유사함을 알 수 있다. 즉, 실 중앙 높이 부분에서 기류 속도가 매우 낮은 정체역이 동일하게 나타나고 있으며, 취출기류가 유입구에서 나온 후 천정을 따라 이동하다 벽체를 만나 하강하며, 다시 바닥에 이르러 바닥과 평행하게 이동하고 있다.

그림 4.4와 4.5는 각각  $x/H$  가 1인 지점과  $x/H$ 가 2인 지점에서의 수평 단면의 속도 분포로 각 지점의 속도를 유입구 속도로 나눈 값을 보여주고 있다. 그림 4.4와 4.5와는 실측 데이터, PHOENICS를 이용한 시뮬레이션 결과와 본 프로그램을 이용하여 얻은 속도 분포의 예측치를 나타내고 있다.



(그림 4.4)  $x/H = 1$  지점의  $U/U_{in}$  의 분포

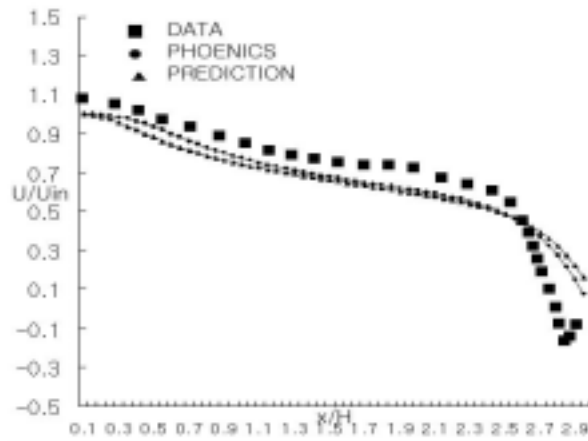


(그림 4.5)  $x/H=2$  지점의  $U/U_{in}$  의 분포

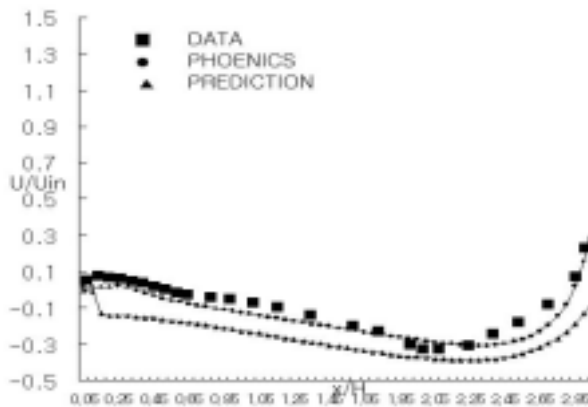
그림 4.4로부터 본 프로그램의 결과와 실측데이터 및 PHOENICS의 해석 결과는 모두 서로 유사함을 알 수 있다. 또한, 일반적으로 수치해석상 오차가 크게 발생하는 지점인 고체 벽과 경계를 이루는 바닥 부근과 천장 부근에서도 본 프로그램의 결과는 PHOENICS의 해석 결과 및 실측 데이터와 유사했다. 그림 4.5에서도 본 프로그램의 기류 속도의 예측 결과는 매우 정확함을 알 수 있다.  $x/H=1$ 인 지점과 마찬가지로  $x/H=2$ 인 지점에서 고체 벽과 경계를 이루는 부근에서 본 프로그램과 실측 데이터와의 값의 차이는 매우 작음을 알 수 있다. 또

한,  $x/H$  가 2인 한정된 지점에 대해서는 PHOENICS의 시뮬레이션 결과는 실측 데이터의 값보다 더 큰 값을 전반적으로 보여주고 있으며, 이에 반하여 본 프로그램에 의한 예측값이 실측 데이터의 값과 더 일치함을 알 수 있다.

그림 4.6과 4.7은 각각  $y/H$  가 0.028인 지점과  $y/H$ 가 0.975 인 지점을 기준으로 한 수평 단면의 속도 분포로 각 지점의 속도를 유입구 속도로 나눈 값을 보여주고 있다. 이 수평 단면은 각각 유입구와 유출구의 중심부 높이에서의 속도 분포이다.



(그림 4.6)  $y/H=0.028$  지점의  $U/U_{in}$  의 분포

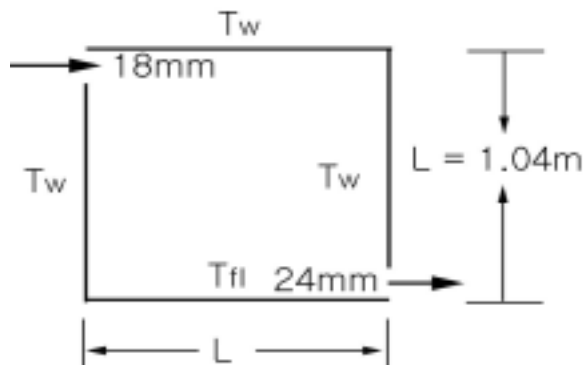


(그림 4.7)  $y/H=0.975$  지점의  $U/U_{in}$  의 분포

유입구 높이에서의 수평면 속도 분포(그림 4.7)를 살펴보면 본 프로그램에 의한 속도 예측 결과는 전반적으로 실측 데이터의 값보다 조금 작지만 유사한 값을 보이고 있다. 또한 유출구 높이에서의 수평면의 속도 분포(그림 4.6)에서 알수 있는 것처럼, 본 프로그램의 예측 결과는 PHOENICS의 해석 결과와 전 부분에 걸쳐 유사함을 알 수 있다. 실내의 다양한 지점에서 본 프로그램을 예측치를 비교하여 본 결과, 기존 문헌에서 제시된 실측치와의 오차는 0.2%-11%로써 설계 초기 단계에서 실내 기류 패턴 및 속도 분포를 예측할 수 있는 프로그램의 신뢰도를 확보할 수 있었다.

### 4.3 복합 대류

부력의 영향이 큰 경우에 대한 프로그램의 검증을 위해서 본 연구에서는 Blay et al.<sup>29)</sup>의 실측치를 이용했다.

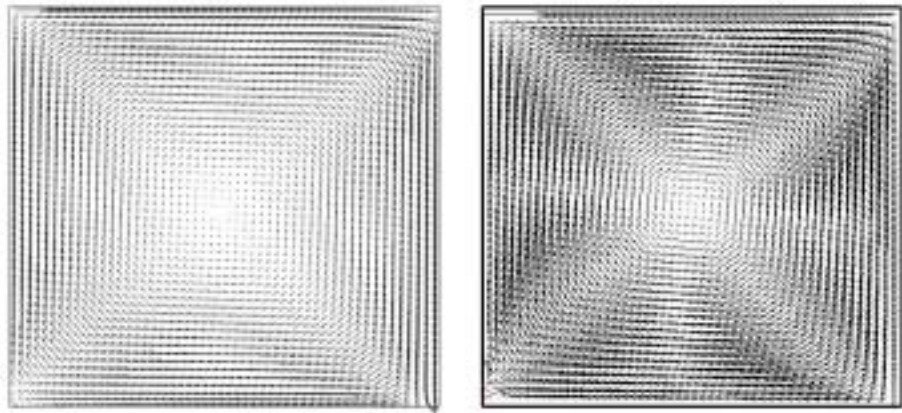


(그림 4.8) Blay et al 의 실험 모형도

실측의 환경은 실제 실이 아니라 실험실에서 실시된 제작 모델이다. 그러나, 실내 기류는 혼합 대류이며, 실제 실에서 보여지는 기류의 특성을 보여 주고 있다. 실험에서 두 수직벽 및 천정( $T_w$ )은  $15^{\circ}\text{C}$ 로, 바닥 온도( $T_{fl}$ )는  $35.5^{\circ}\text{C}$ 로 유지되었으며, 유입구에서는  $15^{\circ}\text{C}$ 의 공기가  $0.57\text{m/s}$ 로 수평방향으로 공급되었다. 또한 유

29)Blay,D.,Mergui,S.,Niculae,C., Confined turbulent mixed convection in the presence of a horizontal buoyant wall jet, fundamentals of mixed convection HTD 213, pp 65-72, 1992.

입구의 높이는 18mm, 유출구의 높이는 24mm이며, 실의 높이 및 너비는 1.04m였다. 그림 4.9는 Blay의 실험과 동일한 조건에 대해 PHOENICS와 개발된 프로그램을 이용한 시뮬레이션의 결과를 비교하여 보여주는데 두 프로그램의 기류 속도 패턴이 매우 유사함을 알 수 있다. 즉, 실의 중앙부에 나타나는 기류 속도가 매우 낮은 정체역이 동일하게 나타나며, 유입구에서 나온 취출 기류가 벽체를 따라 순환하고 있는 기류 패턴이 같음을 알 수 있다.

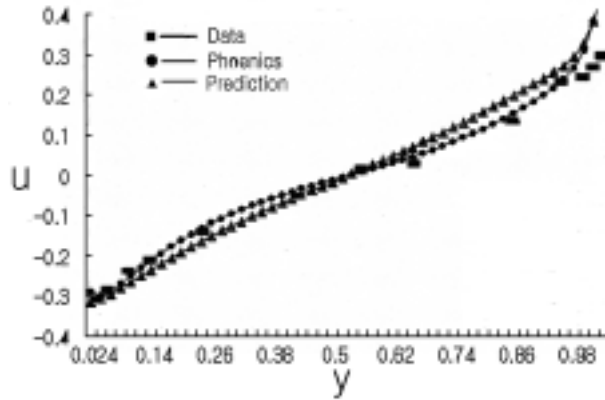


(a) PHOENICS

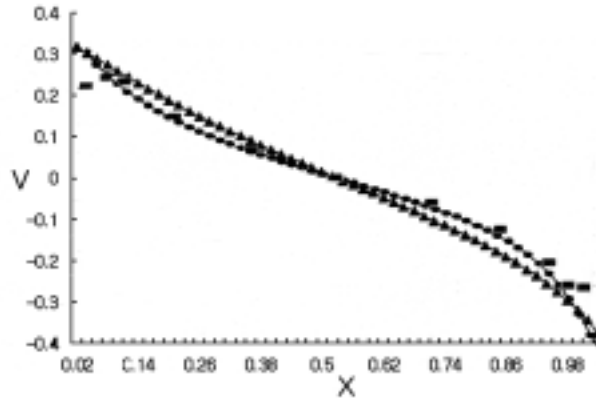
(b) 개발된 프로그램

(그림 4.9) 기류 속도 분포의 패턴

그림 4.10 과 그림 4.11은 각각  $x/L$  가 0.5인 지점에서의 수직면에 대한 기류 속도와  $y/L$ 가 0.5인 지점에서의 수평면에 대한 기류 속도에 대해 실측치 및 PHOENICS의 시뮬레이션 결과와 본 논문에서 개발된 프로그램의 결과를 비교하고 있다.



(그림 4.10)  $x/L=0.5$  지점의  $x$  방향 속도 분포

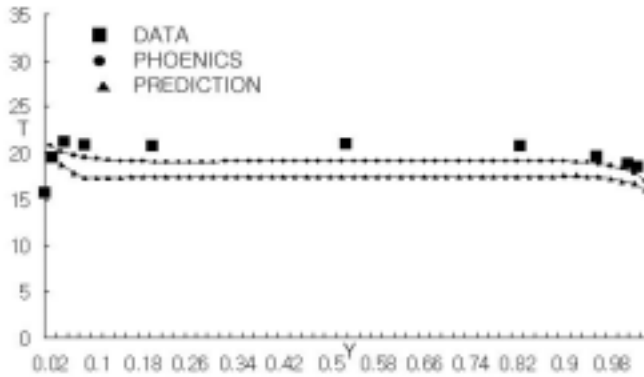


(그림 4.11)  $y/L=0.5$  지점의  $y$  방향 속도 분포

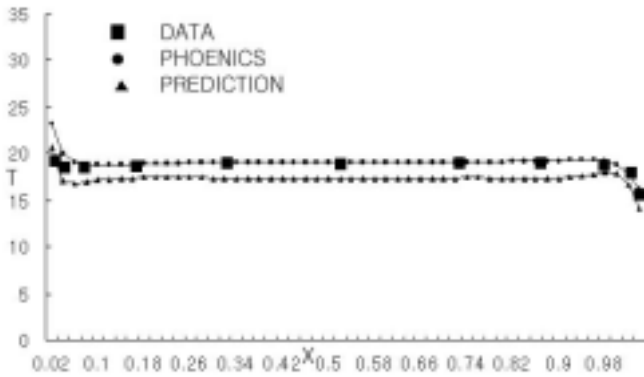
그림 4.10의 경우 천장 근처에서는 실측 데이터 보다 다소 높은 속도 분포를 보이지만, PHOENICS의 시뮬레이션 결과와는 거의 일치하고 있다. 이외의 부근에서는 각 값들은 매우 근소한 차이를 보이고 있다. 그림 4.11의 경우 유입구 부근에서는 실측치보다 다소 높고 유출구 부근에서는 다소 낮은 값을 나타내고 있지만, 그림 4.10의 경우와 마찬가지로 이들 부근에서의 PHOENICS의 시뮬레이션 결과와는 거의 일치하고 있다. 고체 벽의 경계 부근을 제외한 곳에서는 개발된 프로그램의 속도 분포는 실측 데이터 및 PHOENICS의 시뮬레이션 결과와 매우 유사함을 알 수 있다.

그림 4.12와 그림 4.13은  $y/L$  및  $x/L$  이 0.5 인 지점에서의 수평면과 수직면에

대한 온도 분포를 보여주고 있다.



(그림 4.12)  $x/L=0.5$  지점의 수직 온도 분포



(그림 4.13)  $y/L=0.5$  지점의 수평 온도 분포

그림 4.12와 4.13은 개발된 프로그램의 온도 분포가 실측치와 최대 2°C 정도 차이가 나는 것을 보여주고 있다. 그러나 상용 CFD 프로그램 PHOENICS와는 온도의 차이가 1°C 이었다. 이러한 온도의 차이는 부력의 영향에 대한 지배방정식의 적용상의 차이에서 기인한 것으로 판단된다.

난류의 계산을 위해서 사용한 표준 k-ε 모델에서는 고체 벽 근처에서의 수치 해석을 위해서 벽법칙을 사용하고 있다. 이 때 사용되는 계수 중, 경험 상수 E는 벽체의 거칠기에 따라 결정되는 상수로 9.0에서 9.87까지의 값을 갖는다. 실험 시 사용된 벽체의 거칠기와 정확히 일치하는 경험 상수 E를 적용시키는 것은 불



가능 했다. 또한, 부력의 효과를 운동량 방정식 및 에너지 방정식 뿐만 아니라 난류의 계산을 위한  $k$  및  $\epsilon$  방정식에서 고려하느냐의 여부에 따라서도 값의 차이가 발생 할 수 있다.

복합대류의 경우, 본 프로그램의 기류 속도의 예측 결과는 실내의 각 지점에서 매우 정확한 것으로 판단된다. 다만 벽체의 온도가 실내 온도에 비해 매우 큰 경우에는 본 프로그램의 온도 예측 결과는 실험 데이터와는 약간의 차이가 있으나 그 차이는 최대 10% 이내이므로 본 프로그램은 일반적인 공기식 냉난방을 채택하고 있는 공간의 경우, 자연대류와 강제 대류를 고려한 비교적 정확한 기류 속도 및 온도의 예측이 가능한 신뢰도를 지니고 있는 것으로 판단된다.

#### 4.4 소결

본 장에서는 설계 초기 단계에서 손쉽게 실내 기류 및 온도 분포의 평가와 동시에 실내 열쾌적도를 평가하기 위해 개발된 프로그램에 대해 검증을 실시했다. 프로그램의 검증 방법으로는 실험데이터를 이용한 비교 검증과 다른 프로그램과의 비교 검증을 선택했다. 실험 데이터는 기존 문헌에 제시된 자료를 이용하였으며, 비교 대상 프로그램은 신뢰성이 입증된 상용 CFD 프로그램 PHOENICS를 선정했다.

프로그램의 검증 결과, 강제 대류의 경우는 기류 패턴 및 기류 속도에 대하여 실험데이터 및 상용 CFD 코드의 예측 결과와 매우 유사했다. 복합대류의 경우, 본 프로그램의 기류 속도의 예측 결과는 실내의 각 지점에서 매우 정확한 것으로 판단된다. 다만 벽체의 온도가 실내 온도에 비해 매우 높은 경우에는 본 프로그램의 온도 예측 결과는 실험 데이터와는 약간의 차이가 발생하는데 이는 부력의 영향에 대한 지배방정식의 적용상의 차이에 기인하는 것으로 판단된다. 이와 같은 문제를 해결하기 위해, 최근에는 본 프로그램에서 이용한 난류 모델 및 벽 법칙 대신, 더 정확한 계산이 가능한 LES( Large Eddy Simulation) 방법 등을 이용한 연구가 진행 중이다<sup>30)</sup>. 그러나 이와 같은 방법은 큰 용량의 컴퓨터 및 많

---

30) David C. Wilcox, pp.273-331.

은 계산 시간이 요구되므로 실제 적용에는 어려움이 따른다.

본 프로그램의 개발은 사용의 편리함과 정확한 기류 해석을 도출하는데 있으므로 실내 공간의 기류 해석을 위해서 실제 적용상의 효율성과 정확성을 감안한다면, 벽법칙의 사용은 적절한 것으로 판단되며, 이상의 검증결과로부터 벽법칙을 고려한 본 프로그램의 신뢰도를 확보할 수 있었다.

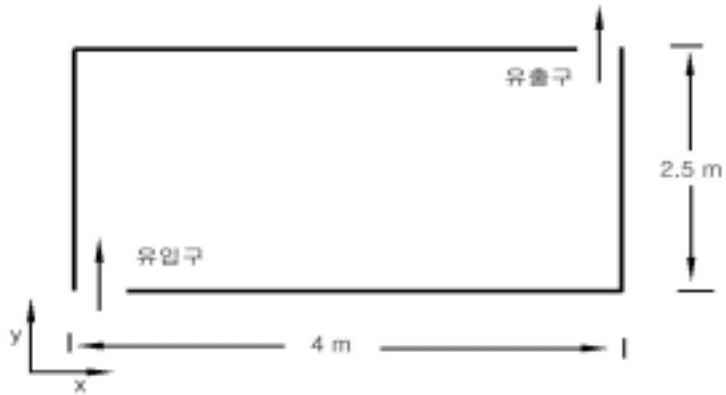
프로그램의 검증 결과를 종합적으로 평가해 보면, 본 프로그램은 설계의 초기 단계에서 일반적인 공기식 냉난방을 채택하고 있는 공간의 경우, 자연대류와 강제 대류를 동시에 고려한 비교적 정확한 기류 속도 및 온도의 예측이 가능한 신뢰도를 지니고 있는 것으로 판단된다.

## 제 5 장 프로그램의 적용

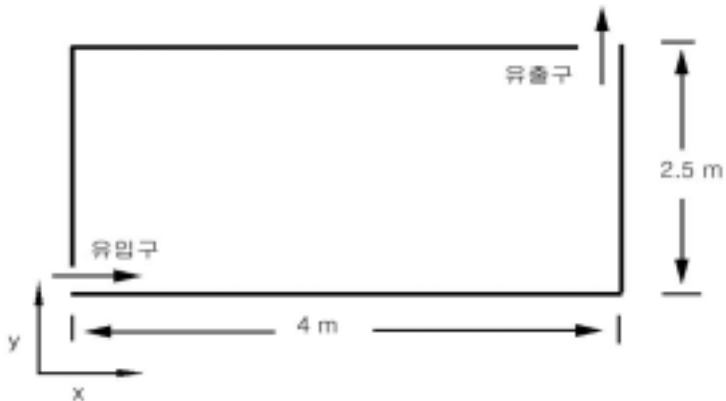
실내 기류 분포의 특성을 이해하는 것은 환기 시스템의 설계 및 쾌적한 열 환경조절을 위해서 매우 중요하다. 왜냐하면 재실자의 열적 쾌적은 실내 기류 분포에 직접적으로 영향을 받기 때문이다. 또한 부적절한 실내 기류의 분포는 재실자의 열적 불쾌감을 증가시키며 실내 공기의 질도 저하시킨다. 따라서 적절한 실내 열환경의 조절 및 설계를 위해서는 거주역에서의 정확한 기류 분포의 예측이 요구된다.

본 연구에서는 설계 초기 단계에서의 설계 변수인 취출구의 위치, 취출 온도 그리고 취출 속도의 변화가 실내 기류 분포 및 열쾌적에 미치는 영향을 개발된 프로그램을 이용하여 평가했다.

대상 모델은 취출구의 위치에 따라 취출구가 바닥에 위치하는 경우(Case Floor)와 취출구가 벽의 하단부에 위치하는 경우(Case Wall)로 구분된다. 실의 크기는 길이 4m, 높이 2.5m 규모의 2차원 모델이며, 유입구 및 유출구의 크기는 0.3m이다. Case Floor의 유입구는 실의 좌측 바닥에 위치하며, Case Wall의 경우 유입구는 실의 좌측벽 하단에 위치하며, 유출구는 Case Floor 와 Case Wall 모두 천정의 우측 부분에 위치한다.



(그림 5.1) Case Floor의 대상 모델



(그림 5.2) Case Wall의 대상 모델

## 5.1 실내 기류 분포 및 열쾌적에 영향을 미치는 변수의 선정

실내 기류 분포에 영향을 미치는 요소에는 유입구의 크기, 형태 및 위치, 유출구의 위치, 취출기류의 온도 및 속도, 실의 형상, 벽체의 온도 그리고, 내부 발열체 등 매우 다양하다. 이 변수들의 다양한 변화와 그 조합을 모두 포함하는 시뮬레이션을 실시하는 것은 거의 불가능하다<sup>31)</sup>. 따라서 본 연구에서는 실내 기류분

<sup>31)</sup>Chen, Q., Moser, A., Suter, P., A numerical study of indoor air quality and thermal comfort under six kinds of air diffusion, ASHRAE Transactions, Vol

포에 영향을 미치는 요소 중에서 설계자가 설계 단계에서 변경 가능한 설계 변수 중 그 영향의 정도가 큰 취출구의 위치, 취출 속도와 취출 온도를 변수로 선정하였으며, 각 변수의 변화를 조합하여 시뮬레이션을 실시했다. 이 때 각 벽체의 온도는 24℃로 가정했다. 시뮬레이션에 대한 구분을 위하여 각 시뮬레이션마다 2자리의 문자와 4자리의 고유번호를 부여했다. 첫 번째 두 문자는 취출구의 위치를 나타낸다. 취출구 위치의 구분을 위해서 취출구가 바닥에 위치하는 Case Floor는 FL로, 취출구가 바닥근처의 벽에 위치하는 Case Wall는 WA로 표시한다. 다음 두자리는 취출 온도, 마지막 두자리는 취출 속도를 각각 나타낸다. 예를 들어 FL1920은 취출구가 바닥에 위치하며, 취출구에서의 취출 온도는 19℃, 취출 속도는 0.20m/s를 각각 의미한다. 표 5.1은 각 변수에 대한 분류를 나타낸다.

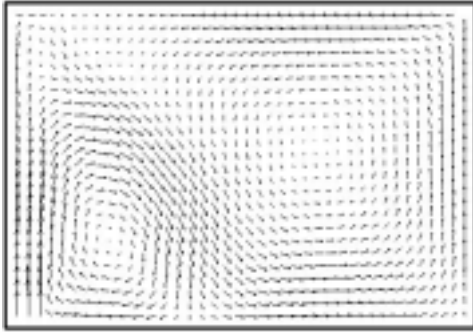
<표 5.1> 각 시뮬레이션에 적용된 변수의 분류

Sim.No.	취출구 위치	취출 온도(℃)	취출 속도(m/s)	벽체 온도(℃)
FL1815	바닥	18	0.15	24
FL1820	바닥	18	0.20	24
FL1825	바닥	18	0.25	24
FL1915	바닥	19	0.15	24
FL1920	바닥	19	0.20	24
FL1925	바닥	19	0.25	24
FL2015	바닥	20	0.15	24
FL2020	바닥	20	0.20	24
FL2025	바닥	20	0.25	24
WA1815	벽 하단부	18	0.15	24
WA1820	벽 하단부	18	0.20	24
WA1825	벽 하단부	18	0.25	24
WA1915	벽 하단부	19	0.15	24
WA1920	벽 하단부	19	0.20	24
WA1925	벽 하단부	19	0.25	24
WA2015	벽 하단부	20	0.15	24
WA2020	벽 하단부	20	0.20	24
WA2025	벽 하단부	20	0.25	24

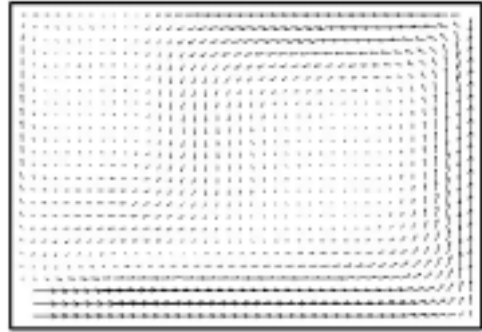
98(1), pp.203-217, 1992.

## 5.2 취출구의 위치 변화에 따른 영향

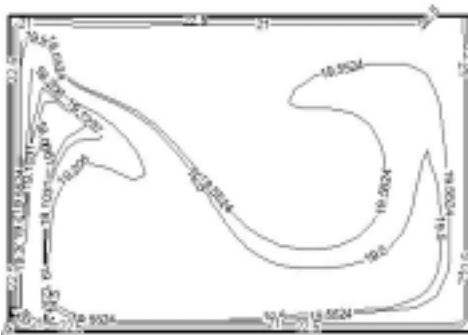
취출구의 위치 변화가 실내 기류분포 및 열쾌적에 미치는 영향을 알아보기 위하여 취출구가 바닥에 위치하는 Case Floor의 경우와 바닥 근처의 벽에 위치하는 Case Wall의 경우에 대하여, 취출 온도가 19℃이며, 취출 속도가 0.25m/s인 경우에 대하여 시뮬레이션의 결과를 비교했다.



(a) 기류 속도 분포



(a) 기류 속도 분포



(b) 온도 분포

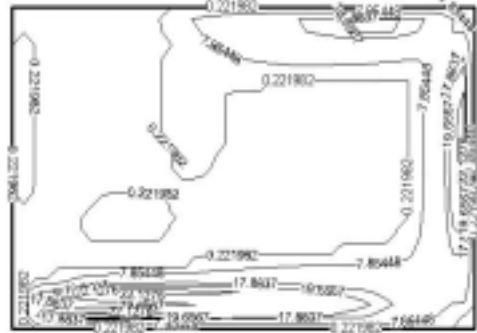


(b) 온도 분포



(c) PD 분포

(그림 5.3) FL1925 결과의 가시화



(c) PD 분포

(그림 5.4) WA1925 결과의 가시화

Case Floor의 기류 분포 패턴은 유입구에서 나온 취출 기류가 벽체를 따라 상승하다가 상승 모멘텀을 상실하여 하강하기 시작하며, 바닥에 도달한 후 다시 상승하여 상부에 위치한 유출구로 빠져 나간다. PD는 기류 분포 패턴과 유사한 분포를 보이는데, 즉 유입구 부근에서는 강한 상승 기류로 인하여 가장 높게 나타나며, 하강 기류가 발생하는 부근에서 역시 높게 나타남을 알 수 있다. 이에 반해 온도 분포는 실 전반에 걸쳐 거의 일정함을 알 수 있다.

Case Wall의 기류 분포 패턴은 취출 기류가 바닥과 평행하게 이동하다가 우측의 벽체를 만나 상승하여 천정에 위치한 유출구로 빠져 나간다. 이 과정에서 일부의 기류는 유출구로 빠져 나가지 않고 천정을 따라 수평으로 이동하다가 실의 중앙부에서 하강하고 있다. PD는 기류 분포 패턴과 밀접한 관계를 보이고 있는데, 강한 기류 속도가 발생하는 바닥 부근에 가장 높은 값을 나타내며, 다시 우측 벽과 유출구 부근에서 높은 값을 보이고 있다. Case Floor와 마찬가지로 온도 분포는 실전반에 걸쳐 일정하게 나타난다.

이처럼 기류 속도, 온도 및 PD 분포에 대한 시뮬레이션의 결과를 상호 비교함으로써 설계자는 본 프로그램을 이용하여 취출구 위치 변화의 영향을 고려한 최적의 설계안을 도출 할 수 있을 것으로 판단된다.

취출구의 위치 변화가 실의 기류 속도, 온도 및 PD 분포에 미치는 영향을 정량적으로 분석하기 위해서 y=1.1 지점의 호흡선의 높이와 y=0.1 지점의 발바닥 높이에서의 수평 단면에 대해서 PD의 값을 비교해 보았다. 표 5.2는 취출구 위치 변화에 따른 PD의 값이다. 표5.2에서 PD의 최대값 및 평균값은 0.1m 간격마다의 x의 값을 기준으로 하여 산정했다.

<표 5.2> 취출구 위치 변화에 따른 PD 값 (%)

Case Floor													
x	0	0.4	0.8	1.2	1.6	2.0	2.4	2.8	3.2	3.6	4.0	최대	평균
y=0.1	0	17.36	13.47	11.47	0	9.46	13.66	14.21	12.27	7.74	0	17.36	9.90
y=1.1	0	19.43	7.85	16.90	15.68	8.23	2.17	0	1.84	7.63	0	19.43	9.59

Case Wall													
x	0	0.4	0.8	1.2	1.6	2.0	2.4	2.8	3.2	3.6	4.0	최대	평균
y=0.1	0	23.27	24.66	23.73	22.49	21.45	20.58	19.56	16.64	12.27	0	24.66	19.76
y=1.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5.95	21.98	21.98	1.95

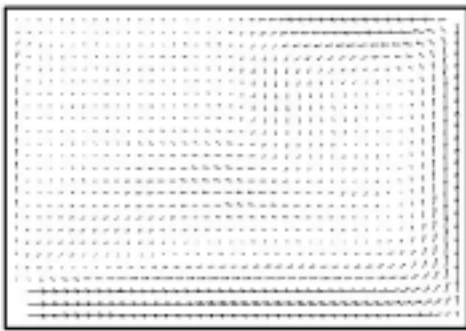
y=1.1 지점의 호흡선 높이와 y=0.1 지점의 발바닥 높이에서의 수평 단면에 대해서 PD의 값을 비교해 보면, Case Wall은 발바닥의 위치에서는 평균 19.76%로 높게 나타나지만 호흡선 높이 지점에서는 평균 1.95%로 Case Floor에 비해서 양호함을 알 수 있다. 이에 반해 Case Floor는 발바닥 높이와 호흡선 높이에서 PD 값의 평균이 모두 10%이하로 양호함을 알 수 있다.

취출구의 위치 변화가 실내 기류 분포 및 열쾌적에 미치는 영향을 살펴보기 위해서 개발된 프로그램을 이용하여 시뮬레이션을 실시했다. 시뮬레이션의 결과, 취출구의 위치의 변화는 실내 기류 분포의 패턴 및 열쾌적 분포에 큰 영향을 미쳤으나, 그 영향은 실내의 각 지점에 대해서 서로 상이함을 쉽게 확인 할 수 있었다. 따라서, 설계자는 설계의 단계에서 실내의 열적 쾌적도를 향상시킬 수 있는 적절한 취출구의 위치를 선택하기 위한 시뮬레이션의 실시가 요구된다.

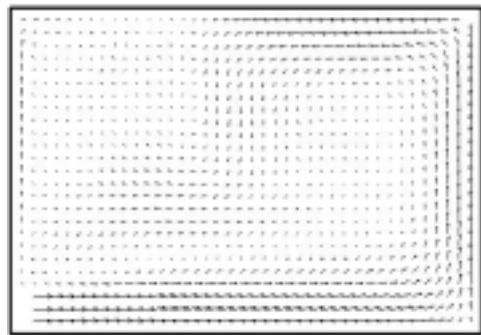


### 5.3 취출 온도 변화에 따른 영향

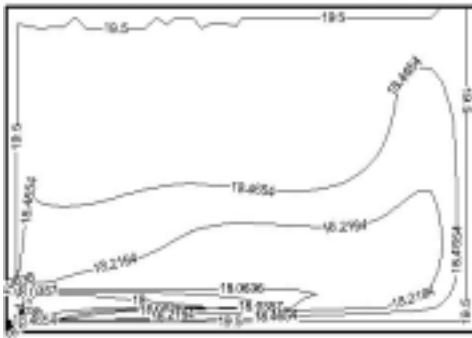
유입구에서의 온도 변화가 실내 기류 분포 및 열쾌적에 미치는 영향을 알아보기 위하여 취출 온도를 18℃에서 20℃까지 1℃ 간격으로 변화시키면서 시뮬레이션을 실시했다. 그림 5.5와 그림 5.6은 취출 조건이 18℃, 0.20m/s 인 경우와 취출 조건이 20℃, 0.20m/s 인 경우에 대하여 취출구가 벽 하단부에 위치하는 Case Wall에 대한 시뮬레이션 결과이다.



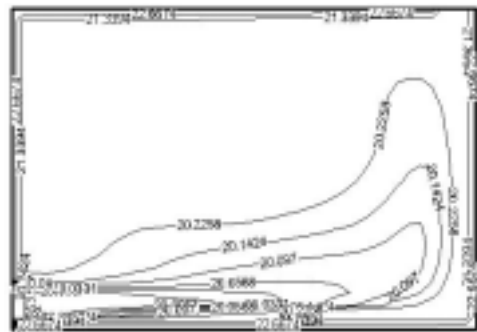
(a) 기류 속도 분포



(a) 기류 속도 분포



(b) 온도 분포

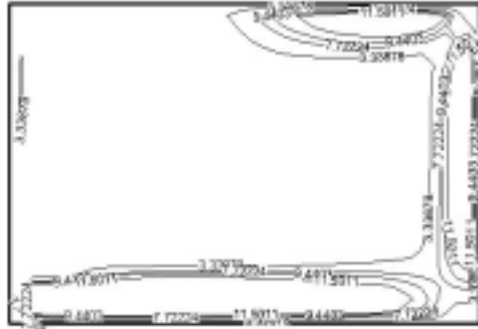


(b) 온도 분포



(c) PD 분포

(그림 5.5) WA1820 결과의 가시화



(c) PD 분포

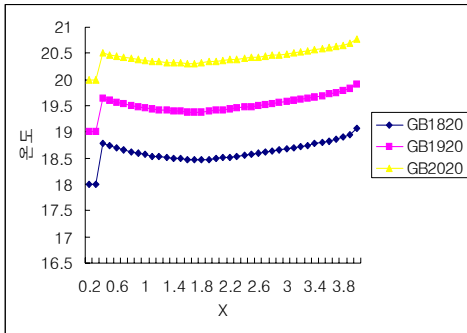
(그림 5.6) WA2020 결과의 가시화

취출구에서의 온도가 증가함에 따라 기류 분포의 패턴은 거의 영향을 받지 않았지만, 실의 온도와 PD는 큰 영향을 받을 수 있다. 즉, 취출 온도가 18℃일 때는 벽 근처를 제외한 실의 대부분의 지역에서 실의 온도가 약 18℃임을 알 수 있다. 이에 반해, 취출 온도가 20℃일 때는 대부분의 지역에서 실의 온도가 약 20℃였다. 따라서 취출기류의 온도 증가에 비례하여 실의 온도가 증가하고, 특히 PD의 경우 취출 온도가 18℃일 때 보다 20℃일 때 대상실의 각 지점에서 PD의 값이 작아지므로, 드래프트로 인한 실의 불쾌적도는 취출 온도가 20℃일 때 훨씬 양호함을 알 수 있다.

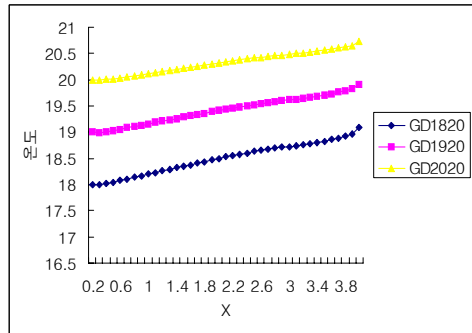
본 프로그램을 이용하여 취출 온도의 변화에 따른 실의 기류 속도, 온도 및 PD의 분포 변화를 쉽게 알 수 있었다. 따라서, 본 프로그램은 설계자가 설계 초기 단계에서 효과적인 열환경의 설계 및 조절의 계획시 유용하다고 판단된다.

유입구에서의 온도 변화에 따른 영향을 정량적으로 분석하기 위해서 유입구에서의 취출 속도 및 온도 조건이 각각 18℃, 0.20m/s 인 경우, 19℃, 0.20m/s 인 경우, 20℃, 0.20m/s인 경우에 대하여 유입구의 위치가 바닥에 있는 경우와 벽의 하단부에 있는 경우에 대해 취출 온도 변화에 따른 시뮬레이션의 결과를 평가해 보았다.

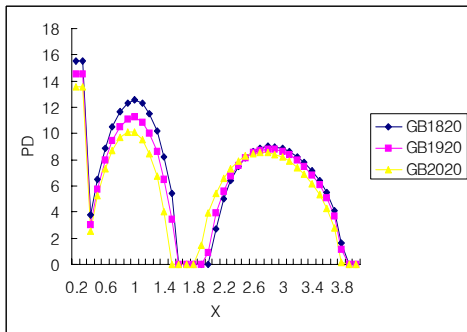
그림 5.7 과 그림 5.8은 각 각 FL1820, FL1920, FL20205 시뮬레이션과 WA1820, WA1920, WA2020 시뮬레이션에 대한 결과로써, y 가 0.1m 높이에서 수평면의 온도와 PD 분포를 보여 준다.



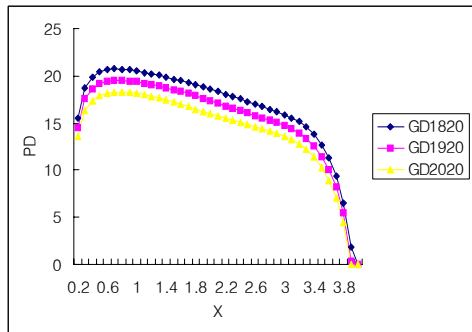
(a) y=0.1 지점의 온도 분포



(a) y=0.1 지점의 온도 분포



(b) y=0.1 지점의 PD 분포



(b) y=0.1 지점의 PD 분포

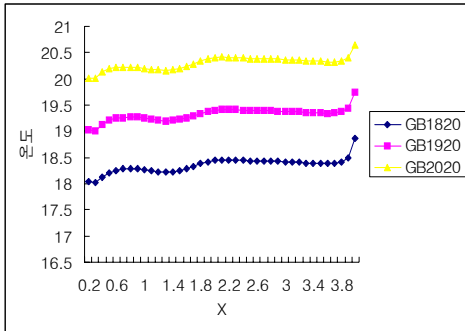
(그림 5.7) y=0.1일때 FL○○20의 결과 (그림 5.8)y=0.1일때 WA○○20의 결과

y=0.1 지점의 수평면에 대해서 취출 온도가 18℃에서 20℃로 증가함에 따라 FL○○20의 경우와 WA○○20의 경우 모두 실의 온도는 선형적으로 증가하였으며,

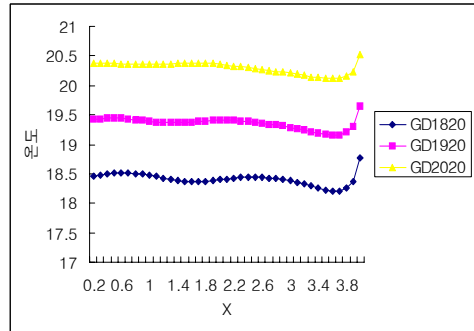
각각 최대 2℃, 2℃ , 평균 1.81℃, 1.83℃ 증가했다. 이와 같은 온도의 증가는 PD 값의 감소로 이어졌으며, 취출구가 바닥에 있는 경우와 취출구가 벽 하단부에 위치하는 경우, 각각 최대 2.60%, 2.60%, 평균 2.32%, 2.30% 감소했다.

취출 온도의 증가가  $y=0.1$  인 수평단면의 지점에서 실내 기류 분포에 미치는 영향은 실내 온도의 선형적인 증가를 가져왔으며, 그 결과 PD의 값이 감소함에 따라 드래프트로 인한 실내의 열적 불쾌적도가 감소했다. 따라서, 취출 온도의 증가는 실내의 열적 쾌적도를 증가시킬 수 있는 설계 기법으로 판단된다.

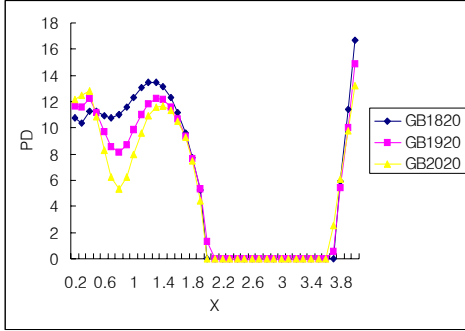
그림 5.9 와 그림 5.10은 각각 FL1820, FL1920, FL2020 시뮬레이션과 WA1820, WA1920, WA2020 시뮬레이션에 대한 결과로써,  $y$  가 1.1m 높이에서 수평면의 온도와 PD 분포를 보여 준다.



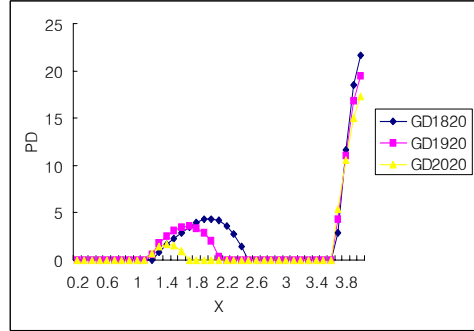
(a)  $y=1.1$  지점의 온도 분포



(a)  $y=1.1$  지점의 온도 분포



(b)  $y=1.1$  지점의 PD 분포  
(그림 5.9)  $y=1.1$ 일때 FL $\circ\circ$ 20의 결과



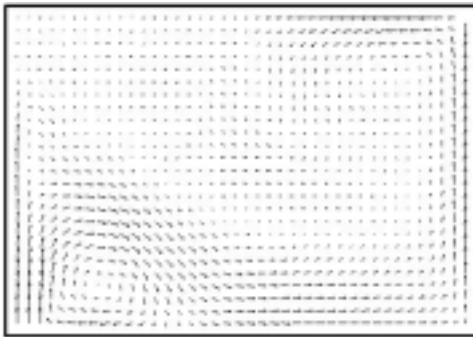
(b)  $y=1.1$  지점의 PD 분포  
(그림 5.10)  $y=1.1$ 일때 WA $\circ\circ$ 20의 결과

취출 온도가 18℃에서 20℃로 증가함에 따라  $y=1.1$  지점의 수평면에 대해서 FL $\circ\circ$ 20의 경우와 WA $\circ\circ$ 20의 경우, 실의 온도가 각각 최대 2.01℃, 2.01℃, 평균 1.95℃, 1.90℃ 증가하여, 취출 온도 변화에 따라 실의 온도가 선형적으로 증가했다. 취출 온도의 증가에 따라 PD의 값은 FL $\circ\circ$ 20의 경우에는 최대 14.70%, 평균 5.15% 감소했으며, WA $\circ\circ$ 20의 경우에는 최대 4.35%, 평균 0.92% 감소했다. 벽 하단부에 취출구가 위치하는 경우, 취출구가 바닥에 위치하는 경우에 비해서 PD의 감소율이 더 작는데, 그 이유는 벽 하단부에 취출구가 위치하는 경우에는 호흡선 높이인  $y=1.1$  지점에서의 기류 속도가 매우 작아서, 취출 온도가 18℃일 때 이미 대부분의 지점에서 PD의 값이 0%이기 때문으로 판단된다.

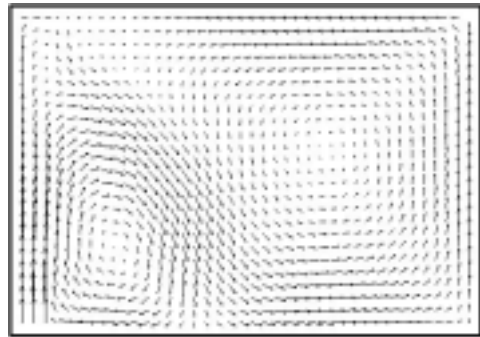
$y=1.1$  인 수평단면의 지점에서 취출 온도의 증가는 실내 온도의 선형적인 증가를 가져왔으며 PD의 값 또한 감소했다. 이와 같은 실내 온도의 증가는 실내의 열적 불쾌적도를 감소시키는 효과를 가져왔다. 따라서, 취출 온도의 증가는 실내의 열적 쾌적도를 증가시킬 수 있는 효율적인 설계 기법으로 판단된다.

## 5.4 취출 속도 변화에 따른 영향

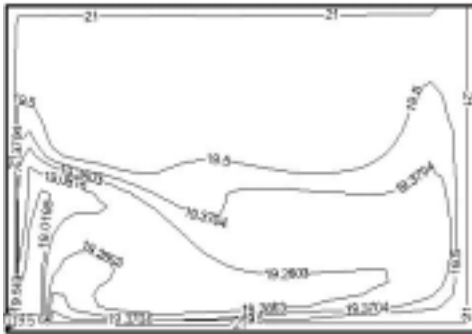
유입구에서의 속도 변화가 실내 기류분포 및 열쾌적에 미치는 영향을 알아보기 위하여 취출 속도를 0.15m/s에서 0.25m/s까지 0.5m/s 간격으로 변화시키면서 시뮬레이션을 실시했다. 그림 5.11 과 그림 5.12는 취출 조건이 19℃, 0.15m/s 인 경우와 취출 조건이 19℃, 0.25m/s 인 경우에 대하여 취출구가 바닥에 위치하는 Case Floor에 대한 시뮬레이션 결과이다.



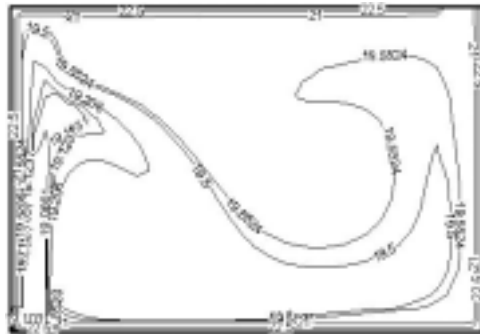
(a) 기류 속도 분포



(a) 기류 속도 분포



(b) 온도 분포

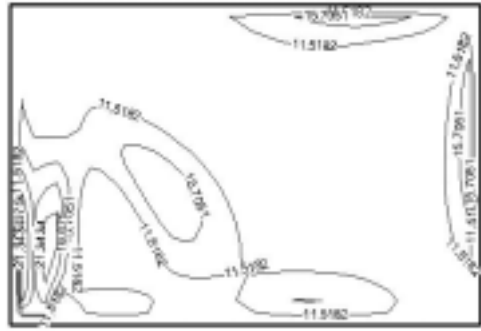


(b) 온도 분포



(c) PD 분포

(그림 5.11) FL1915 결과의 가시화



(c) PD 분포

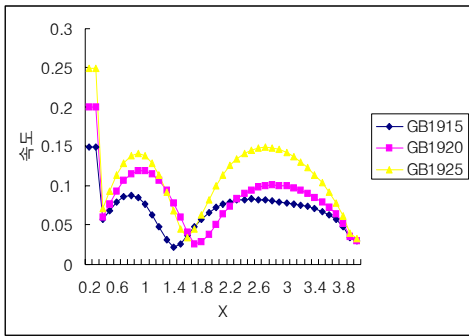
(그림 5.12) FL1925 결과의 가시화

취출 속도의 증가는 실의 온도 분포에는 거의 영향을 미치지 않았다. 그러나 실의 기류 속도 분포에는 직접적인 영향을 미쳤다. 즉 유출 속도가 0.15m/s인 경우에는 유출구에서 나온 기류의 상승 높이는 낮았지만, 취출 속도가 0.25m/s인 경우에는 취출 기류의 상승 모멘텀이 커서 유입구에서 나온 취출 기류가 천정 근처에까지 도달하고 있다. 취출 속도가 0.15m/s에서 0.25m/s로 증가함에 따라 PD 값의 증가율이 실의 각 지점에서 크게 나타나고 있으며, 특히 기류 속도가 큰 부분에서 이러한 경향이 잘 나타나고 있다. 따라서 취출 속도가 높아짐에 따라 실의 기류 속도와 PD의 값은 선형적으로 증가하며, 실의 드래프트로 인한 불쾌적도가 높아지는 것으로 판단된다.

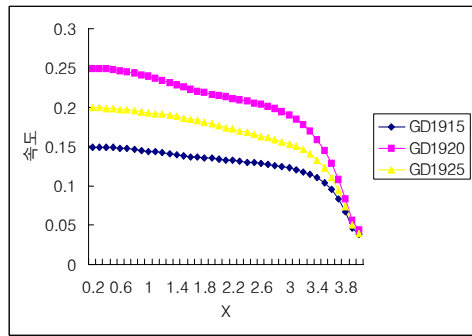
취출구에서의 취출 속도를 변화시키면서 시뮬레이션을 실시해본 결과, 취출 속도의 증가가 실내 기류 분포 및 재실자의 열쾌적에 미치는 영향을 쉽게 판단할 수 있었다. 따라서 본 프로그램은 설계자가 설계 초기 단계에서 실내 열환경의 계획시 유용한 도구임을 알 수 있다.

유입구에서의 속도 변화에 따른 영향을 정량적으로 분석하기 위해서 유입구에서의 취출 속도 및 온도 조건이 19℃, 0.15m/s 인 경우, 19℃, 0.20m/s 인 경우, 19℃, 0.25m/s 인 경우에 대하여 유입구의 위치가 바닥에 있는 경우와 벽의 하단부에 있는 경우에 대해 취출 속도 변화에 따른 시뮬레이션의 결과를 평가해 보았다.

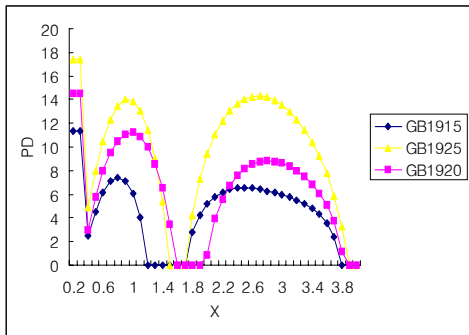
그림 5.13와 그림 5.14은 각각 FL1915, FL1920, FL1925 시뮬레이션과 WA1915, WA1920, WA1925 시뮬레이션에 대한 결과로써, y 가 0.1m 높이에서 수평면의 속도와 PD 분포를 보여 준다.



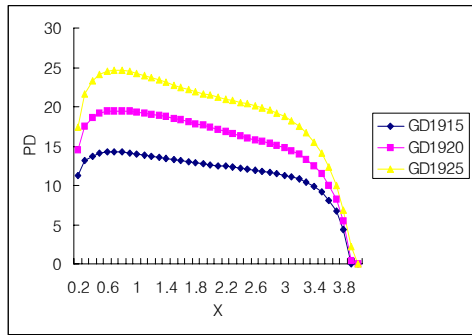
(a) y=0.1 지점의 평균 속도 분포



(a) y=0.1 지점의 평균 속도 분포



(b) y=0.1 지점의 PD 분포



(b) y=0.1 지점의 PD 분포

(그림 5.13) y=0.1일 때 FL19○○ 결과

(그림 5.14) y=0.1일 때 WA19○○ 결과

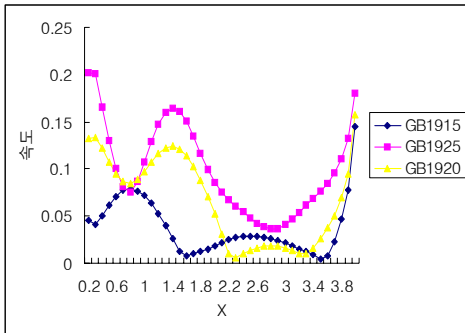
y=0.1 지점의 수평면에 대해서 취출 속도가 0.15m/s에서 0.25m/s로 증가함에 따



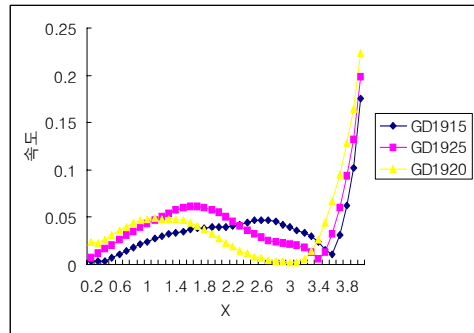
라 FL1900의 경우와 WA1900의 경우 모두 실의 평균 속도는 선형적으로 증가하였으며, 각각 최대 0.1m/s, 0.1m/s , 평균 0.043m/s, 0.073m/s 증가했다. 이와 같은 속도의 증가는 PD 값의 증가로 이어졌으며, 취출구가 바닥에 있는 경우와 취출구가 벽 하단부에 위치하는 경우, 각각 최대 11.47%, 10.47%, 평균 5.26%, 7.84% 증가했다.

취출 속도의 증가가  $y=0.1$  인 수평단면의 지점에서 실내 기류 분포에 미치는 영향은 실내 기류 속도의 선형적인 증가를 가져왔으며, 그 결과 PD의 값이 증가함에 따라 드래프트로 인한 실내의 열적 불쾌적도가 증가했다. 따라서, 실내의 열적 쾌적도를 향상시키기 위해서는 유입구에서의 취출 속도를 감소시켜야 하는 것으로 판단된다.

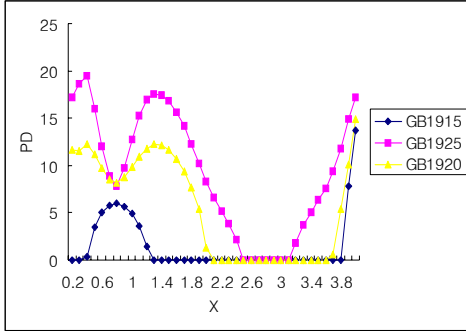
그림 5.15와 그림 5.16은 각각 FL1915, FL1920, FL1925 시뮬레이션과 WA1915, WA1920, WA1925 시뮬레이션에 대한 결과로써,  $y$  가 1.1m 높이에서 수평면의 속도와 PD 분포를 보여 준다.



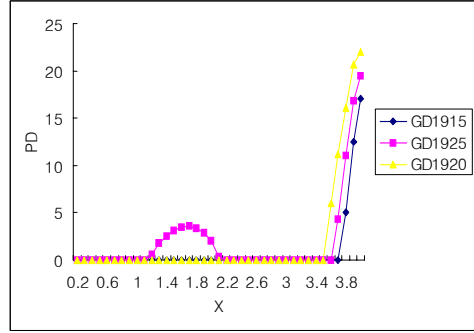
(a)  $y=1.1$  지점의 평균 속도 분포



(a)  $y=1.1$  지점의 평균 속도 분포



(b)  $y=1.1$  지점의 PD 분포  
(그림 5.15)  $y=1.1$ 일 때 FL1900 결과



(b)  $y=1.1$  지점의 PD 분포  
(그림 5.16)  $y=1.1$ 일 때 WA1900 결과

취출 속도가 0.15m/s에서 0.25m/s로 증가함에 따라  $y=1.1$  지점의 수평면에 대해서 FL1900의 경우와 WA1900의 경우, 실의 기류 속도가 각각 최대 0.159m/s, 0.065m/s, 평균 0.063m/s, 0.005m/s 증가하여, 취출 속도의 증가에 따라 실의 기류 속도가 선형적으로 증가했다. 취출 속도의 증가에 따라 PD의 값은 FL1900의 경우에는 최대 19.12%, 평균 7.82% 증가했으며, WA1900의 경우에는 최대 11.23%, 평균 1.06% 증가했다. 벽 하단부에 취출구가 위치하는 경우 Case Wall의 경우 PD의 감소율과 기류 속도의 증가율이 작는데, 그 이유는 벽 하단부에 취출구가 위치하는 경우, 기류 속도가 매우 작은 정체역이 인체의 호흡선 높이인  $y=1.1$  지점에 존재하기 때문으로 판단된다.

$y=1.1$  인 수평단면의 지점에서 취출 속도의 증가는 실내 기류 속도의 선형적인 증가를 가져왔으며 PD의 값 또한 증가했다. 이와 같이, 실내 기류 속도의 증가는 실내의 열적 불쾌적도를 증가시키는 효과를 가져왔다. 따라서, 취출 속도의 감소는 드래프트로 인한 실내의 열적 불쾌적도를 감소시키는 효과적인 설계 기법으로 판단된다.

## 5.5 소결

본 연구에서는 실내 기류 분포에 영향을 미치는 다양한 변수 중에서 설계자가 설계 단계에서 변경 가능한 설계 변수 중 취출구의 위치, 취출 속도 와 취출 온도를 변수로 선정 한 후, 각 변수의 변화가 실내 기류 분포 및 재실자의 열쾌적에 미치는 영향을 분석했다.

본 프로그램을 이용하여 대상 공간의 기류 분포 및 열쾌적성을 평가해 본 결과, 설계 변수의 변화가 대상실에 미치는 영향을 쉽게 판단할 수 있었다. 또한 설계 변수의 변화가 미치는 영향을 고려하여 공간의 열쾌적성을 향상시킬 수 있는 방안을 도출해낼 수 있는 유용한 도구임을 확인했다.

취출구의 위치, 취출 속도 및 취출 온도의 변화가 실내 기류 분포 및 실의 열쾌적에 미치는 영향은 다음과 같다.

취출구의 위치 변화는 실내 기류분포 및 열쾌적에 큰 영향을 미침을 알 수 있었다. 그러나 그 영향은 실내의 각 지점에 대해서 서로 상이하므로, 설계자는 설계의 단계에서 실내의 열적 쾌적도를 향상시킬 수 있는 적절한 취출구의 위치를 선택하기 위한 시뮬레이션의 실시가 요구된다.

취출 속도가 0.15m/s에서 0.25m/s로 증가함에 따라 실내 기류 속도는 선형적으로 증가하였으며, 이에 따라 PD의 값은 증가하여 전체적인 실의 열적 불쾌적도가 증가했다. 취출 온도가 18℃에서 20℃로 증가함에 따라 실의 온도는 선형적으로 증가하였고, 이에 따라 PD의 값은 감소하여 드래프트로 인한 실의 열적 불쾌적도는 감소했다.

따라서 유입구에서의 취출 속도의 감소와 취출 온도의 증가는 드래프트로 인한 실내의 열적 불쾌적도를 감소시키기 위한 효율적인 설계 기법으로 판단된다.

## 제 6 장 결 론

본 연구에서는 설계자가 설계 초기 단계에서 전산유체역학(CFD)에 대한 전문적인 지식이 없이도 정확한 실내 기류 분포의 예측과 동시에 재실자의 열쾌적성을 쉽게 판단할 수 있는 프로그램을 개발하고, 개발된 프로그램의 신뢰성 및 정확성을 검토하기 위해서 프로그램의 검증을 실시했다. 이 후 검증된 프로그램을 이용하여 설계 변수가 실내 기류 분포 및 열쾌적에 미치는 영향을 분석했다.

본 연구에서 도출된 결론은 다음과 같다.

- 1) 실내 기류 분포의 해석을 위해 전산유체역학(CFD)를 이용하고, 재실자의 열쾌적 평가를 위해 난류 강도를 포함하는 종합적 열쾌적 지표 PD를 사용하여, 실의 기류 분포의 예측과 동시에 열쾌적성을 쉽게 판단할 수 있는 프로그램을 개발했다.
- 2) 본 프로그램은 유동장의 지배 방정식의 이산화를 위해 유한 체적법을 이용하였으며, 난류의 계산을 위해  $k-\epsilon$  모델을 사용하였고, 유동장의 해법을 위해 SIMPLE 알고리즘을 사용하여, 정확한 실내 기류 분포의 예측과 동시에 재실자의 열쾌적을 평가할 수 있도록 개발되었다.
- 3) 개발된 프로그램의 검증을 위해 기존 문헌의 실험 데이터와 상용 CFD 코드를 이용하여 강제 대류와 복합 대류의 경우에 대하여 프로그램의 결과를 비교 검토했다.
- 4) 프로그램의 검증 결과는 강제 대류의 경우, 기류 패턴 및 속도에 대하여 실측 데이터 및 상용 CFD 코드의 예측 결과와 매우 유사했다. 복합 대류의 경우, 기류 패턴 및 속도 분포는 유사하였으나, 온도 분포의 경우 실측치와 최대 10%의 오차가 발생했다. 이는 부력의 영향에 대한 지배방정식의 적용상의 차이에 기인

하는 것으로 판단된다. 검증 과정을 통해서 본 프로그램을 이용한 실내 기류 분포의 예측 결과에 대한 신뢰도를 확보할 수 있었다.

5) 설계자가 설계 단계에서 변경 가능한 취출구의 위치, 취출 온도와 취출 속도를 설계 변수로 선정한 후, 검증된 프로그램을 이용하여 각 변수의 변화가 실내 기류 분포 및 열쾌적에 미치는 영향을 분석했다.

6) 본 프로그램을 이용하여 대상 공간의 기류 분포 및 열쾌적성을 평가해 본 결과, 설계 변수의 변화가 대상실에 미치는 영향을 쉽게 판단할 수 있었다. 또한 설계 변수의 변화가 미치는 영향을 고려하여 공간의 열쾌적성을 향상시킬 수 있는 대안을 도출해 낼 수 있는 유용한 도구임을 확인했다.

7) 본 연구에서는 실내 기류 해석과 동시에 재실자의 열적 쾌적성을 판단 할 수 있는 프로그램을 개발한 후 이를 검증 및 실제 적용함으로써 본 프로그램의 타당성과 적용성을 확인할 수 있었다. 따라서 본 프로그램은 설계 초기 단계에서 기류 속도, 온도 분포 및 재실자의 열적 쾌적도를 쉽게 예측하는데 활용될 수 있으리라 판단된다.

본 연구를 바탕으로 실시되어야 할 추후 연구는 다음과 같다.

1) 본 연구에서는 재실자의 열쾌적성에 영향을 미치는 요소인 기류 속도, 난류 강도 및 온도를 복합적으로 평가하기 위해서 열쾌적 지표인 PD만을 사용했다. 그러나 이 지표는 드래프트로 인한 재실자의 국부적 불쾌감을 평가하는 지표이다. 따라서, 추후 연구에는 공간의 열쾌적 평가를 위해서 PD와 더불어 PMV 및 PPD 등의 열쾌적 지표를 병행하여 사용하는 것이 필요하다.

2) 본 프로그램에서는 벽체 및 내부 발열물질로부터의 열전달율을 계산을 위해 대류로 인한 열전달만을 고려했다. 그러나 향후 연구에서는 대류 열전달과 더불어 복사로 인한 열전달의 과정도 프로그램에 포함하는 것이 요구된다.

## 참고 문헌

1. 김용경, 정순성, 권양구, 이정재, 취출공기 온도에 따른 실내기류 및 온도분포의 변화특성, 공기조화 냉동공학회,99하계학술발표회 논문집, 공기조화 냉동공학회, pp619-624, 1999.
2. 김찬중, 길잡이 전산유체역학, 문운당, 1998.
3. 명현국, 전산열유체공학, 문운당, 1999.
4. 명현국, 진은주, 2차원 사각 공간 내에서의 혼합 대류 열전달에 관한 수치해석, 공기조화 냉동공학회 97동계학술발표회 논문집, 공기조화 냉동공학회, pp536-541, 1997.
5. 박선호, 박중수, 안병욱, 유동요소모델을 이용한 비등온 경사 취출 기류의 분포 특성 예측에 관한 연구, 대한건축학회 학술발표대회 논문집, 제 18권, 제 2호, 대한 건축학회, 1998.
6. 서승직, 건축설비, 일진사, 1998.
7. 신정웅, 공기조화설비, 기문당, 1989.
8. 이재현 역, 열유동 및 유체유동 수치해법, 대한 교과서 주식회사, 1988.
9. 이재현, 이승갑, 윤정인 공역, 컴퓨터로 풀이한 열유체 공학, 태훈 출판사, 1998.
10. 이주리, Programming Microsoft Visual C++, 컴피플, 1999.
11. 이언구, 김광우 공역, 건축환경과학, 태림 문화사, 1994.
12. 이언구 외, 건축환경계획론, 태림문화사, 1993.
13. 윤근영, 나수연, 이언구, CFD를 이용한 실내 열쾌적 예측 및 평가 프로그램의 개발에 관한 연구, 대한설비공학회 2001년 동계 학술 발표 대회 논문집, 대한설비공학회, pp. 418-423, 2001.
14. 정광섭, 김광우, 건축공기조화설비, 기문당, 1993.
15. 전금문, C++ Programming, 정일, 2000.
16. 조강래, 신병록, 장근식, 공역, 전산유체역학 - 기초와 응용 -, 대영사, 1993.
17. Addington, D.M., Boundary layer control of heat transfer in buildings, Ph.D., Thesis, Harvard University, 1997.
18. Alfahaid, Ahmed F., Effects of ventilation on human thermal comfort in rooms, Ph.D., Thesis, Old dominion University, 2000.
19. ASHRAE, ASHRAE handbook, fundamentals volume, ASHRAE, 1997.
20. Awbi, H.B., Energy efficient room air distribution, Renewable energy, Vol. 15., pp.293-299, 1998.
21. Awbi, Hazim B, Ventilation, Renewable and sustainable energy reviews 2,

- 1998.
22. Awbi, B., Ventilation of buildings, E & FN SPON, 1991
  23. Blay, D., Mergui, S., Niculae, C., Confined turbulent mixed convection in the presence of a horizontal buoyant wall jet, fundamentals of mixed convection HTD 213, pp 65-72, 1992.
  24. Butera, Federico M., Chapter 3 -Principles of thermal comfort, renewable & sustainable energy reviews, Vol 2. 1998.
  25. Chen, Q., Suter, P., Moser, A., A database of assessing indoor air flow, air quality and draft risk, ASHRAE Transaction, Vol. 92, pp.150-163, 1991.
  26. Chen, Q., Moser, A., Suter, P., A numerical study of indoor air quality and thermal comfort under six kinds of air diffusion, ASHRAE Transactions, Vol. 98(2), pp.203-217, 1992.
  27. Chen, Q., Xu, W., A zero-equation turbulence model for indoor airflow simulation, Energy and Buildings, Vol.28., pp.137-144, 1998.
  28. Cook. J., Passive cooling, MIT Press, 2000.
  29. Faribora Haghghat, Yin Li, Ahmed C. Megri, Development and validation of a zonal model -POMA, Building and environment Vol. 26, pp.1039-1047, 2001.
  30. Fanger, P.O., A.K. Melikov, H.Hanzawa, and J.Ring, Air turbulence and sensation of draught, Energy and buildings, Vol. 12. pp.21-39, 1987.
  31. Gan Guohui, Numerical investigation of local thermal discomfort in offices with displacement ventilation, Energy and buildings, Vol.23, pp.73-81, 1995.
  32. Gan, G. Evaluation of room air distribution systems using computational fluid dynamics, Energy and Buildings, Vol. 23, pp.83-93, 1995.
  33. Givoni, B., Man, climate and architecture, Van nostrand reinhold company, 1976.
  34. Hen, Jan L.M., On the thermal interaction of building structure and heating and ventilating system, Ph.D. Thesis, University of Eindhoven, 1991.
  35. Humphreys, M.A., Outdoor temperature and comfort indoor, Building research and practice 6(2), pp.92-105, 1978.
  36. Ian, B., The adaptive coupling of heat and air flow modelling within dynamic whole-building simulation, Ph.D. Thesis, University of Strathclyde, 2000.
  37. Koskela, H., Heikkien, J., Niemela, R. Hautalampi, T., Turbulence correction for thermal comfort calculation, Building and Environment, Vol. 36, pp.247-255, 2001.
  38. John C. T., Dale A. A., Richard H. P., Computational fluid mechanics and heat transfer, Taylor & Francis, 1997.

39. Loomans, M.G.L.C., The measurement and simulation of indoor air flow, Ph.D. Thesis, Eindhoven university of technology, The netherlands, 1998.
40. McQuiston, F.C., Parker, J.D., and Spitler, J.D., Heating, ventilation, and air conditioning, analysis and design, John wiley & sons, Inc., 2000.
41. Mull, Thomas E., HVAC principles and applications manual, Mcgraw-Hill, 1998.
42. Nakayama Akira, PC-aided numerical heat transfer and convective flow, CRC Press, 1995.
43. Negrao, Cezar O.R., Conflation of computational fluid dynamics and building thermal simulation, Ph.D. Thesis, University of Strathclyde, Glasgow, UK, 1995.
44. Santamouris, M. and Asimakopoulos, D., Passive cooling of buildings, James & James, 1996.
45. Sayigh, A., Hamid, A., Chapter 1- Thermal comfort and the development of bioclimatic concept in building design, Renewable & sustainable energy reviews, Vol 2., pp.3-24, 1996.
46. Shu, C., Xue, H., Mixing characteristics in a ventilated room with non-isothermal ceiling air supply, Building and environment, Vol. 34, pp.245-251, 1999.
47. Sinha, S.L., Arora, R.C., Roy S., Numerical simulation of two-dimensional room air flow with and without buoyancy, Energy and buildings Vol.32., pp.121-129, 2000.
48. Spalding, D.B., CHAM/TR100 A guide to the PHOENICS input language, CHAM, 1992.
49. Srebric, J., Chen, Q., and Glicksman, L.R. A coupled airflow-and- energy simulation program for indoor thermal environment studies, ASHRAE Transactions, Vol. 106,2000, pp.465-476, 2001.
50. Tuomalla, P., Rahola, J., Combined air flow and thermal simulation of buildings, Building and environment, Vol. 30., pp.255-265, 1995.
51. Versteeg, H.K., and Malalasekera, W., An introduction to computational fluid dynamics : The finite volume method, Longman, 1995.
52. Wilcox, David C., Turbulence Modeling for CFD, DCW Industries Inc., 1998.
53. William Bobenhausen, Simplified design of HVAC systems, John wiley & Sons, Inc. 1994.
54. Zhang Wei, Chen Qingyan, Large eddy simulation of indoor airflow with a filtered dynamic subgrid scale model, International journal of heat and mass transfer, Vol. 43, 2000.



## 부록

### CLAY(Computational Load and Airflow simulation of Yoon)

#### 프로그램의 사용 방법

1. CLAY 프로그램의 개요
2. CLAY 프로그램의 구성
3. CLAY 프로그램 이용 방법
  - 3.1 데이터 입력
  - 3.2 결과 파일의 이름 입력 및 프로그램의 실행
  - 3.3 프로그램 결과의 가시화

## 1. 프로그램의 개요

본 프로그램은 설계 초기 단계에서 설계자가 전산유체역학(CFD)에 대한 전문적인 지식이 없이도 정확한 실내기류분포의 평가 및 재실자의 열쾌적성을 손쉽게 판단할 수 있는 프로그램이다.

또한, 실의 기류 분포 및 열쾌적 지표의 예측 결과를 가시화하여 사용자에게 보여주므로, 프로그램 사용자는 실내 열환경의 평가를 바탕으로 열쾌적성을 향상시킬 수 있는 대안의 도출이 가능하다.

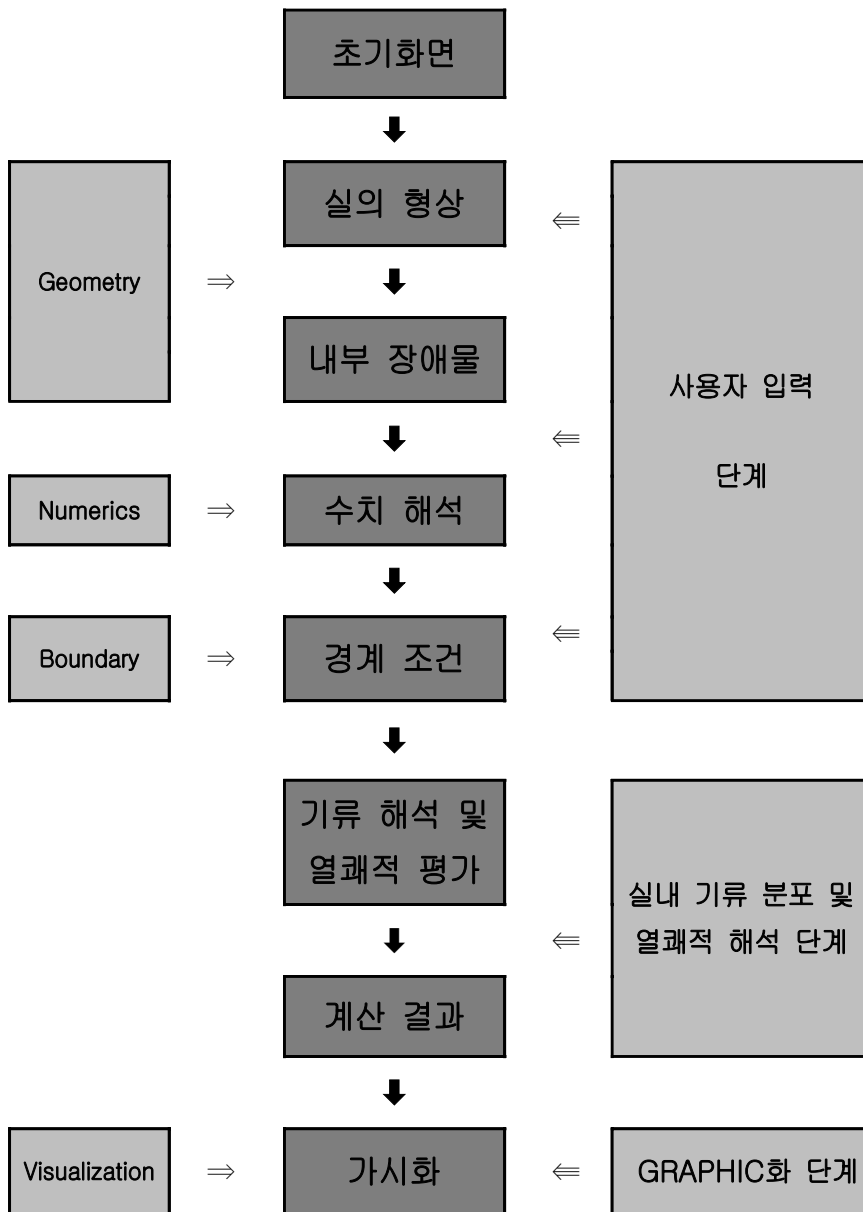
실내 기류의 해석을 위해서는 전산유체역학을 이용하였으며, 열쾌적 지표인 PD를 이용하여 실내 열환경을 평가했다. 프로그램의 개발 도구는 기류 해석 및 열쾌적 평가 부분에서는 C++을 사용하였고, 사용자 인터페이스 부분과 가시화 부분을 위해서는 Visual C++을 이용했다.

## 2. 프로그램의 구성

본 프로그램은 크게 사용자 인터페이스, 실내 기류 분포 및 열쾌적 해석, 가시화 부분으로 구성된다.

사용자 인터페이스 부분은 주 화면의 Main 메뉴의 부 메뉴인 Geometry, Numerics, Boundary로 구성된다.

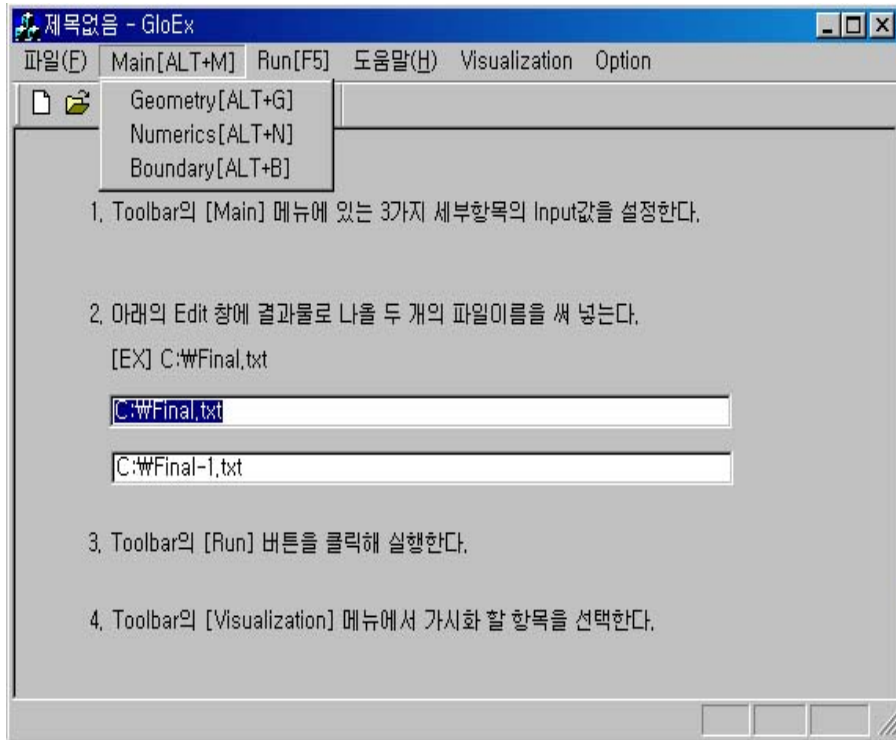
사용자가 기류 해석을 위해서 필요한 자료를 입력하고 나면, 실내 기류 및 열쾌적 해석 단계로 넘어가게 된다. 이 후, 프로그램 내부의 계산이 모두 끝나게 되면, 프로그램 결과의 가시화 작업이 시작된다.



(그림 1) 프로그램의 구조

### 3. 프로그램 이용 방법

(그림 2) 는 프로그램의 실행후 나타나는 첫 화면이다. 이 화면은 프로그램의 실행 단계를 간단히 설명하고 있다. 프로그램의 실행 단계는 크게 4 단계로 나눌 수 있다.



(그림 2) 프로그램의 주화면

첫 번째 단계는 공간의 기류 해석 및 열쾌적적의 평가를 위한 데이터 입력 단계이다. 이는 툴바의 Main 메뉴에서 다루어진다.

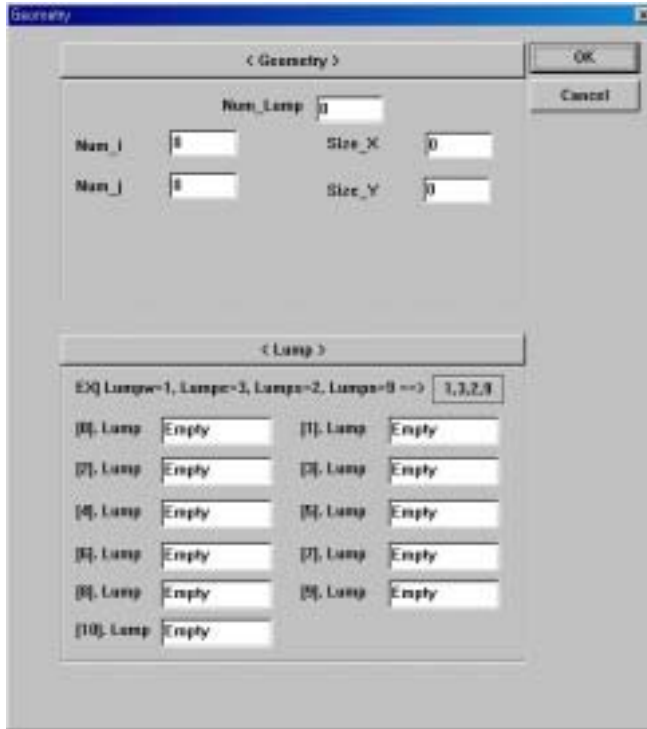
두 번째 단계는 데이터의 입력이 끝난 후, 프로그램의 실행 결과를 저장할 파일의 이름을 지정하는 단계이다.

세 번째 단계는 프로그램의 실행 단계로써, 툴바의 Run 버튼을 클릭한다.

네 번째 단계는 프로그램의 실행 결과를 가시적으로 보기 위한 단계로 실의 온도, 속도, PD등의 분포를 Visualization의 메뉴를 이용하여 볼 수 있다.

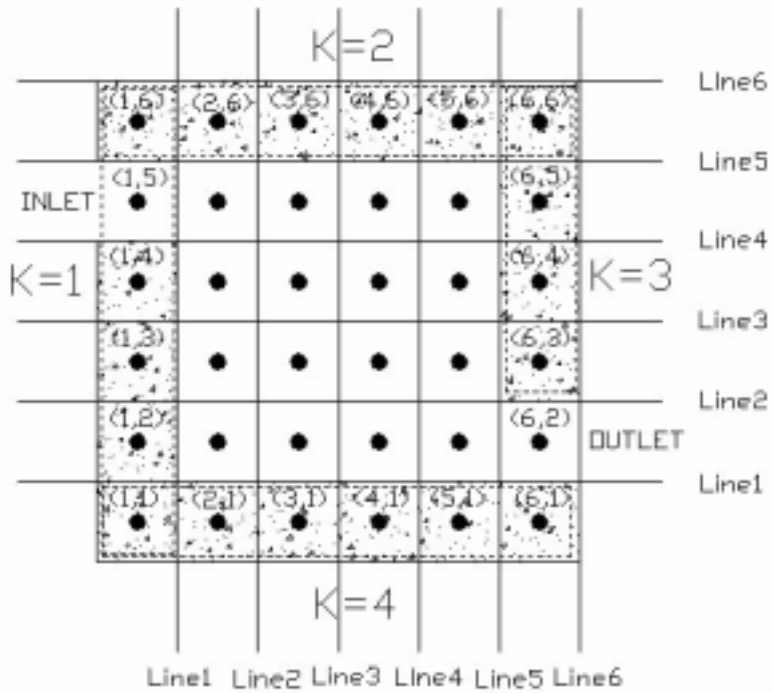
### 3.1 데이터 입력

#### 1) Geometry



(그림 3) 사용자 인터페이스의 Geometry

Geometry 부분에서는 대상실의 기하학적 구조와 내부 장애물등에 대한 사항을 입력한다. 즉, 격자점의 개수와 격자점 사이의 간격, 기준점의 위치, Lump를 이용하여 내부 장애물의 크기 및 위치에 대해서 입력한다. 입력 과정을 본 논문의 제 2 장에 기술된 제어체적의 좌표 처리 부분에 나와 있는 예를 들어서 설명해 본다.



(그림 4) 제어체적의 좌표 처리의 예

유입구 및 유출구는 각각 실의 좌측 상단부 및 우측 하단부에 위치하며, 대상 공간의 크기는 1×1 m 이다.

우선 Geometry 부분에서 Num\_Lump는 내부 장애물이나 외부 경계의 수를 지정하며, Num\_i 및 Num\_j를 이용하여 대상 공간을 나누고 있는 그리드 선의 개수를 입력한다. 또한, Size\_X 및 Size\_Y는 그리드 사이의 간격을 나타낸다. 그림 3과 같은 대상 공간의 경우 각각의 값은 <표 1> 과 같다.

<표 1> Geometry에 사용된 변수의 값과 의미

	값	의미
Num_i	6	x 축 그리드의 개수
Num_j	6	y 축 그리드의 개수
Size_X	0.25(m)	x 축 그리드의 크기
Size_Y	0.25(m)	y 축 그리드의 크기

## 2) Numerics

Main 메뉴의 부 메뉴인 Numerics 부분에서는 수치해석에 필요한 선택 사항을 입력한다. 수치해석과 관련된 상세한 사항을 입력하는 대신, 실내 기류 해석을 위해서 필요한 간단한 사항만을 입력하게 함으로써 프로그램 사용의 편의성을 도모했다.



(그림 4) 사용자 인터페이스의 Numerics

<표 2>에 Numerics 에 사용되는 변수들의 의미를 정리했다.

<표 2> Numerics에 사용된 변수의 의미

	의미	비고
<b>Numerics</b>		
Num_Time	반복횟수	
Scheme	도식의 선택	중앙차분 도식 : 0 하이브리드 도식 : 1
Turbul	난류의 선택	난류 : 0 층류 : 1
Num_Problem	지배 방정식의 수	난류 : 7 층류 : 4
<b>Relaxation</b>		
Relax_Fac[1]	U 운동량 방정식	
Relax_Fac[2]	V 운동량 방정식	
Relax_Fac[3]	압력 수정 방정식	
Relax_Fac[4]	에너지 방정식	
Relax_Fac[5]	K 방정식	
Relax_Fac[6]	ε 방정식	
Relax_Fac[7]	난류 점성	
Relax_Fac[8]	예비	입력할 필요 없음.

Numerics의 입력사항으로는 반복횟수, 중앙차분 도식과 하이브리드 도식의 선택, 난류 및 층류의 선택 여부와 각 방정식에 대한 완화계수등이 있다. Num\_Time은 프로그램이 실내 기류 해석을 할 때 수치해석 알고리즘의 특성상 반복 계산이 요구되는데 이때 반복 횟수를 지정한다. Scheme 은 대류와 확산이 동시에 일어나는 경우, 가정이 필요한 데 본 프로그램에서 채택한 도식은 중앙차분 도식과 하이브리드 도식이다. Scheme 값이 0 이면 하이브리드 도식을, 1 이면 중앙 차분 도식을 나타낸다. Turbul 은 해석하고자 하는 공간이 난류인지, 층류인지 여부를 선택하는 향으로, Turbul의 값이 0 이면 난류, Turbul의 값이 1

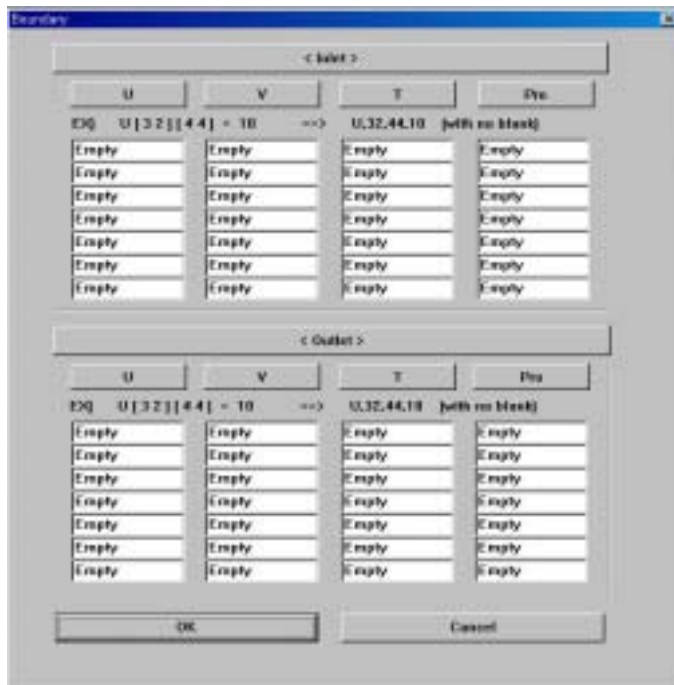


이면 층류를 나타낸다. Num\_Problem 은 풀고자 하는 방정식의 개수를 나타내며, Turbul 항과 관련되는데 해석하고자 하는 공간이 난류이면 k 방정식과  $\epsilon$  방정식 및 난류 점성항을 계산해야 하므로 7을 입력하고 층류이면 4를 입력한다.

Relaxation 부분에서는 반복계산시의 지배방정식의 수렴을 용이하게 위해서 사용되는 완화계수를 입력하는 항이다. 각 지배 방정식마다 0에서 1 까지의 값을 선택할 수 있다.

### 3) Boundary

Boundary 부분은 경계 조건인 유입구 및 유출구에서의 온도 및 속도를 입력하는 항으로 구성되어 있고, 온도 및 속도 이외의 유입구 및 유출구 조건에 대비하여 하나의 변수가 예비적으로 추가되어 있다.



(그림 5) 사용자 인터페이스의 Boundary

Inlet 부분에서는 유입구에 대한 경계조건을 Outlet 부분에서는 유출구에 대한 경계 조건을 입력한다. U 항에서는 x 방향의 속도값을, V 항에서는 y 방향의 속

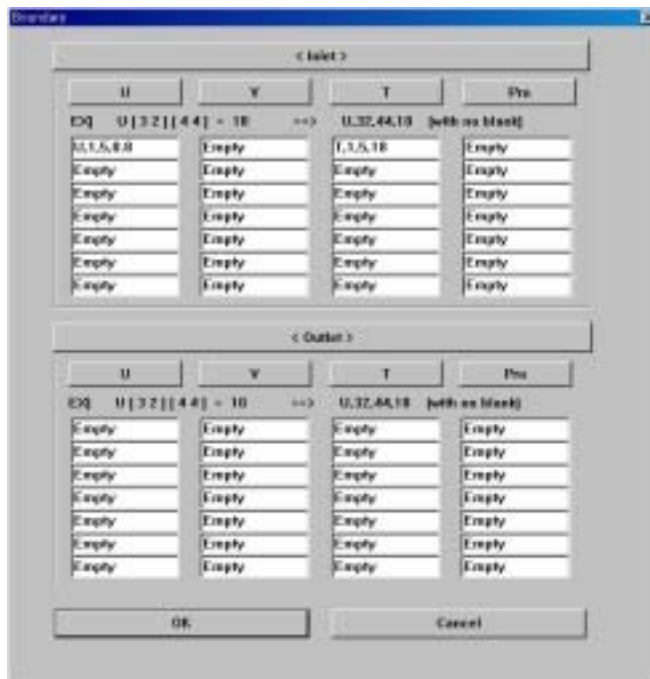
도 값을, T 항에서는 온도값을 입력한다. 특별한 경우가 아니라면, 유출구에서는 속도, 온도에 대한 값의 입력이 불필요하다.

표 3은 Boundary에 사용되는 변수의 의미이다.

<표 3> Boundary에 사용된 변수의 의미

	의미	비고
U	x 방향의 속도	
V	y 방향의 속도	
T	온도	
Pro	예비	입력할 필요 없음

그림 6는 해석하고자 하는 공간이 그림 3과 같은 경우, Boundary 부분에 대한 입력의 예이다. 이 때 유입구에서의 기류 속도 및 온도는 0.8m/s, 20℃이다.



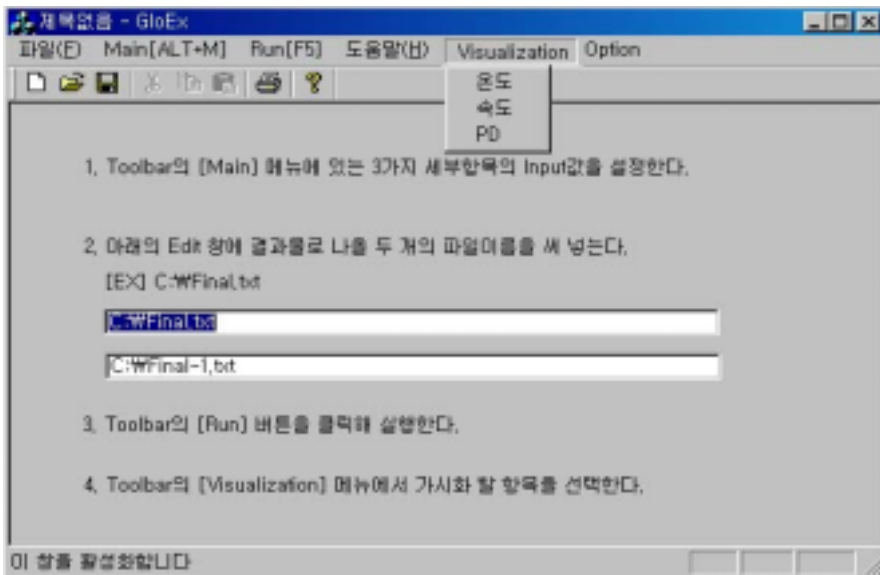
(그림 6) Boundary 입력의 예

### 3.2 결과 파일의 이름 입력 및 프로그램의 실행

Main 메뉴의 세가지 항목에 대한 입력이 모두 끝나면, 프로그램의 다시 주 화면으로 돌아가게 된다. 이 때, 주 화면의 2 번 항에서 프로그램의 계산 결과로 나올 두 개의 파일의 이름을 선택해주고, 툴바의 Run 버튼을 클릭해주면 프로그램은 실행된다.

### 3.3 프로그램 결과의 가시화

실내 기류 분포 및 열쾌적의 해석 단계가 끝나면, 프로그램의 사용자는 결과물을 텍스트 파일의 형태로 볼 수도 있으며, 본 프로그램의 Visualization 메뉴를 이용하면 결과의 가시화도 가능하다.



(그림 7) Visualization 의 부 메뉴

Visualization 의 부 메뉴인 온도, 속도, PD의 값을 이용하여 프로그램의 결과를 가시적으로 볼 수 있다.

## 국 문 초 록

### CFD를 이용한 실내 열환경 예측 및 평가 프로그램의 개발에 관한 연구

중앙대학교 대학원

건축공학과

건축 계획 및 환경 전공

윤 근 영

지도 교수 이 언 구

현대인은 약 90% 이상의 시간을 실내에서 생활하고 있으며, 이에 따라 재실자들의 쾌적한 실내환경에 대한 요구는 증가하고 있다. 열쾌적에 영향을 미치는 물리적 요소인 온도, 습도, 기류 및 평균 복사 온도등은 복합적으로 작용하므로 쾌적한 실내 열환경을 계획하기 위해서는 정확한 실내 기류 분포의 예측이 필수적이다. 그러나 상용되고 있는 전산유체역학(CFD: Computational Fluid Dynamics) 프로그램은 설계 실무자가 실제로 사용하기에는 프로그램의 운영에 많은 전문지식이 요구되며 재실자의 열환경에 대한 반응을 평가하기 위해서는 복잡한 수치결과를 각각 비교, 분석해야하는 난점이 있다.

따라서 본 연구에서는 설계자가 설계 초기 단계에서 전산유체역학(CFD)에 대한 전문적인 지식이 없이도 정확한 실내 기류 분포를 예측할 수 있고, 동시에 재실자의 열쾌적성을 쉽게 판단할 수 있는 프로그램을 개발했다. 이후 개발된 프로그램의 정확성을 검토하기 위해서 프로그램의 검증을 실시하였으며, 검증된 프로그램을 이용하여 설계 변수가 실내 기류 분포 및 열쾌적에 미치는 영향을 정량적으로 분석했다.

본 연구에서 도출된 결론은 다음과 같다.

1) 실내 기류 분포의 해석을 위해 전산유체역학(CFD)를 이용하고, 재실자의 열 쾌적 평가를 위해 난류 강도를 포함하는 종합적 열쾌적 지표 PD를 사용하여, 실내 기류 분포의 예측과 동시에 열쾌적성을 쉽게 판단할 수 있는 프로그램을 개발했다.

2) 본 프로그램은 유동장의 지배 방정식의 이산화를 위해 유한 체적법을 이용하였으며, 난류의 계산을 위해  $k-\epsilon$  모델을 사용하였고, 유동장의 해법을 위해 SIMPLE 알고리즘을 사용하여, 정확한 실내 기류 분포의 예측과 동시에 재실자의 열쾌적성을 평가할 수 있도록 개발되었다.

3) 개발된 프로그램의 검증은 위해 기존 문헌의 실험 데이터와 상용 CFD 코드를 이용하여 강제 대류와 복합 대류의 경우에 대하여 프로그램의 결과를 비교 검토했다.

4) 프로그램의 검증 결과는 강제 대류의 경우, 기류 패턴 및 속도에 대하여 실측 데이터 및 상용 CFD 코드의 예측 결과와 매우 유사했다. 복합 대류의 경우, 기류 패턴 및 속도 분포는 유사하였으나, 온도 분포의 경우 실측치와 최대 10%의 오차가 발생했다. 이는 부력의 영향에 대한 지배방정식의 적용상의 차이에 기인하는 것으로 판단된다. 이와 같은 검증 과정을 통해서 본 프로그램을 이용한 실내 기류 분포의 예측 결과에 대한 신뢰도를 확보할 수 있었다.

5) 설계자가 설계 단계에서 변경 가능한 취출구의 위치, 취출 온도와 취출 속도를 설계 변수로 선정한 후, 검증된 프로그램을 이용하여 각 변수의 변화가 실내 기류 분포 및 열쾌적에 미치는 영향을 정량적으로 분석했다.

6) 본 프로그램을 이용하여 대상 공간의 기류 분포 및 열쾌적성을 평가해 본 결과, 설계 변수의 변화가 대상실에 미치는 영향을 쉽게 판단할 수 있었다. 또한 설계 변수의 변화가 미치는 영향을 고려하여 공간의 열쾌적성을 향상시킬 수 있

는 대안을 도출해 낼 수 있는 유용한 도구임을 확인했다.

7) 본 연구에서는 실내 기류 해석과 동시에 재실자의 열적 쾌적성을 판단 할 수 있는 프로그램을 개발한 후 이를 검증 및 실제 적용함으로써 본 프로그램의 타당성과 적용성을 확인할 수 있었다. 따라서 본 프로그램은 설계 초기 단계에서 기류 속도, 온도 분포 및 재실자의 열적 쾌적도를 쉽게 예측하는데 활용될 수 있으리라 판단된다.

# ABSTRACT

## The development of a program for the prediction and evaluation of indoor thermal environment using CFD

Keun Young, Yoon

Department of Architectural Engineering

The Graduate School of Chung-Ang University

Advised by Prof. Eon-Ku, Rhee

Up to 90% of a typical person's time is spent indoors, and people's needs for comfortable indoor environment become increased. Physical factors such as temperature, humidity, air flow and MRT affect human comfort simultaneously, so the exact prediction of indoor air distribution is essential to the control of indoor thermal conditions and the design of ventilation systems. However, to use commercial computational-fluid-dynamics (CFD) programs, HVAC designers and architects are required to have knowledge of CFD and they need to analyze the complex results of CFD programs for the evaluation of occupant's response to thermal environment.

The purpose of this study is to develop and validate a program that predicts indoor air distribution and evaluates the occupant's thermal comfort with easy. After validating the developed program, the effects of design factors on indoor air distribution and human thermal comfort are investigated.

The results of this study are summarized as follows.

1) A program for the prediction and evaluation of indoor thermal environment is developed. This program uses both CFD to simulate the distribution of indoor airflow and percentage of dissatisfied (PD) index to evaluate thermal comfort in a room.

2) In this program, the discretised equations are obtained by

finite-volume-method (FVM), and SIMPLE algorithm and standard  $k-\epsilon$  model are used to solve the governing equations, therefore the developed program can calculate precisely the distributions of indoor air flow and thermal comfort.

3) In order to validate the developed program, the results of the developed program were compared with the experiment data from the literature and with those of commercial CFD program.

4) The results of the developed program agree reasonably with the experiment data and with those of commercial CFD program. Through the validation of the program, the verification of the program has been achieved.

5) The position of inlet, the supply velocity and temperature at inlet are chosen for design factors, because these factors can be altered in the preliminary design stage by designers. After selecting design factors, the impacts of the change in design factors on the distribution of indoor air flow and thermal comfort are analyzed.

6) The influences of the change in design factors can be easily evaluated using the developed program, so the developed program is proved to be useful tool in the early design stage.

7) In this study, a program, which calculates simultaneously the distributions of indoor air flow and thermal comfort, is developed and validated. HVAC designers and architects can predict easily the distributions of air velocity, temperature, and thermal comfort in the early design stage using this program.