

건물 계단통에서의 부력에 의한 난류유동 해석

Simulation of buoyant turbulent flow in a stairwell

명 현 국*, 진 은 주*
H. K. Myong, E. Jin

Key words : Natural convection(자연대류), Buoyancy(부력), Stairwell(계단통), Turbulent flow(난류유동), Simulation(수치해석)

Abstract

A numerical study has been carried out for two- and three-dimensional buoyant turbulent flow in a stairwell model. The Reynolds-averaged Navier-Stokes and energy equations are solved with the authors' own computer program. Two models by the Boussinesq approximation and the density-gradient form are used for buoyancy terms in the governing equations. Two- and three-dimensional predictions of the velocity and temperature fields are presented and the results are compared with experimental data. Comparisons have also been made in detail with two-dimensional predictions. Two-dimensional and three-dimensional simulations have predicted the overall features of the flow satisfactorily. A better agreement with experiment is achieved with three-dimensional simulations.

1. 서 론

최근 도심지의 아트리움, 태양열 주택, 쇼핑센터와 같은 건축물이 급증함에 따라 각종 온열환경에 대한 실내 온도 및 기류 분포 예측은 최적의 실내 환경과 안전을 위해 건축설계와 환경 유지면에서 중요하게 인식되고 있다. 그러나, 최근까지도 건물 내부의 공기 유동과 온도, 압력 분포 예측은 주로 직접 실험하거나 풍동내에서 모델을 이용하여 얻는 방법으로 행하여졌다. 이에 반해, 최근 급속히 확대되고 있는 컴퓨터를 이용한 수치해석적 방법은

이러한 문제로부터 벗어날 수 있어 이에 대한 관심이 최근 고조되고 있다.

한편, 1970년대 에너지 위기를 겪고 나서 건물의 단열화가 상당히 이루어져, 건물의 공조부하와 함께 요구되는 환기율도 감소하게 되었다. 그 결과, 건물내의 유동형태도 강제대류로부터 자연대류 또는 혼합대류 형태로 바뀌게 되어, 부력이 실내 공기 유동에서 중요한 요소로 대두되었다. 그러나 부력에 의한 난류 열유동 해석기술은 아직까지 만족스러운 수준까지 확립되어 있지 않은 실정이다.

또한, 최근에는 건물의 서로 다른 공간(영역)사이에서의 물질 및 에너지 전달에 대한 연구가 활발히 수행되고 있다. 건물 계단통(또는 계단실)에

* 국민대학교 기계자동차공학부

서의 공기유동에 관한 연구는 이러한 면에서 불 적절한 예로서, 건물계단통에서의 부력에 의한 공기유동 및 이에 관련된 에너지 전달에 대한 정확한 이해는 에너지 절약, 열적 쾌적성, 공조 시스템 설계 및 화재 발생시의 안전대책면에서 건축물을 설계할 때에 매우 중요하다고 할 수 있다.

그러나, 현재까지 건물 계단통에서의 유동에 관해서는 Reynolds⁽¹⁾, Zoharabian et al.^(2,3), Zoharabian⁽³⁾ 등 영국 Brunel 대학 그룹에 의해 실험적으로는 상당히 연구되어졌으나, 수치해석적으로는 2차원 수준에 머물고 있었다. 즉, Reynolds⁽¹⁾는 1/10 스케일 계단통 모델에 대한 실험데이터를 사용하여 계단통에서의 유동에 대한 단순한 해석적 모델을 차원해석을 통해 개발하였으며, Zoharabian et al.^(2,3)은 두 가지 계단형태의 1/2 스케일 계단통 모델에 대한 실험적 연구를 수행하여 유동장 내의 속도 및 온도분포를 얻었다. Zoharabian⁽⁴⁾는 1/2 스케일 계단통 모델에 대한 실험적 연구와 함께 2차원적으로 수치해석적 연구를 수행하였다. 최근 Ergin-Ozkan et al.⁽⁵⁾는 상용코드 CFD-FLOW3D를 이용하여 수치해석적으로는 속도 및 온도장에 대한 2차원 및 3차원 예측결과를 제시하고 있으나, 예측성능면에서 아직 만족할만한 수준에 도달하지 못하고 있다. 이와 같이 건물 계단통에서의 유동에 관해서는 아직 국내외적으로 본격적인 연구가 진행되지 않고 있다.

본 연구에서는 이러한 배경하에 부력에 의한 난류 열유동장 해석기술을 확립하기 위한 일환으로 부력에 의한 난류 열유동 해석용 코드를 개발하고, 이 코드를 사용해서 건물 계단통에서의 부력에 의한 난류 열유동장을 2차원 및 3차원적으로 수치시뮬레이션하여 유동특성을 파악하고자 한다. 또한, 계단 목(throat area)에서의 속도분포와 온도분포를 실험값과 비교 분석하여 코드의 적합성을 확인하고자 한다.

2. 해석 모델

본 연구에 사용한 건물 계단통에 대한 해석 모델 및 좌표계를 Fig.1에 나타낸다. 계단통은 계단을 매개로 하여 건물의 두 층에 연결되어 있는 폐쇄공

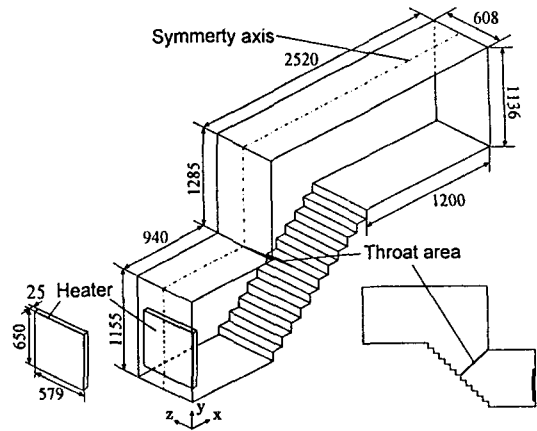


Fig.1 The schematic diagram of the stairwell (Dimensions are in mm)

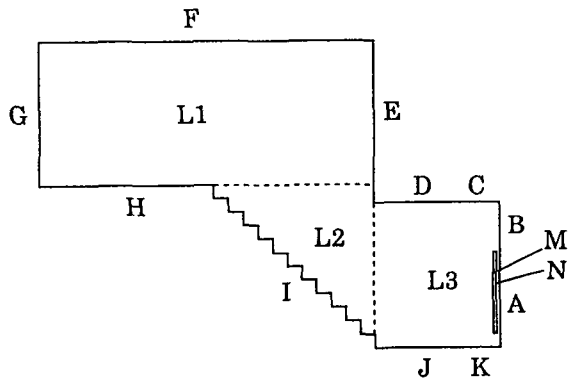


Fig.2 Thermal boundary conditions

간으로 단순화되어 있다. 따라서, 계단통은 외부로의 공기유출입이 없어 계단통내 공기유동은 아래 공간 측벽 근방에 설치된 히터로부터 공기로의 열 전달에 의해 야기되는 순수한 자연대류 문제로 귀착된다. 또한 히터는 실제 히터와 같은 치수를 가지는 매끄럽고 평편한 면을 가지는 얇은 박스로 모델화시켰다.

열적 경계조건은 실험조건^(3,5)과 일치하도록 Fig.2 및 Table 1과 같이 히터를 제외한 나머지 벽면에 대해서는 온도를 각각의 위치에 따라 주었으며, 히터는 양면에 열유속 조건을 주고 나머지 모서리는 단열로 처리하였다. 실제 실험⁽³⁾에서는 히터로부터 방출되는 총열량은 300W이다. 이 중 약 63% 정

Table 1 Thermal boundary conditions

Surface	A	B	C	D
Temperature(°C)	50.9	38.4	37.8	36.4
Surface	E	F	G	H
Temperature(°C)	31.6	32.0	31.0	31.1
Surface	I	J	K	L1
Temperature(°C)	32.9	33.8	37.4	31.3
Surface	L2	L3	M	N
Temperature(°C)	32.0	33.7	-	-
Heat Flux(W/m ²)	-	-	213.0	295.0

도가 대류에 의해 전달되고, 나머지는 공기와 주위 표면으로 복사에 의해 전달된다.⁽⁵⁾ 본 연구에서는 복사를 고려하지 않으므로 Table 1에서의 열량은 참고문헌⁽⁵⁾에 제시한 대로 그 중 대류에 의한 열량만을 나타낸 것이다. 참고로 이 값들은 다음과 같은 방법으로 구해졌다고 보고⁽⁵⁾되어 있다. 먼저, 히터의 양쪽면으로부터 동등한 열량이 방출된다고 가정하고, 또한 복사는 계단통내 표면들 사이에서만 이루어진다고 가정하여 표면들 사이에서의 복사 교환량을 계산한다. 그런 다음 총열량으로부터 전체 복사 열전달량을 제외시킴으로써 요구된 대류 열전달 경계조건이 얻어진다.

3. 지배 방정식

정상상태의 부력에 의한 난류 열유동장을 지배하는 지배방정식을 정리하여 Table 2에 나타냈다. 본 연구에서는 난류유동을 표현하기 위해 Reynolds 시간 평균 개념을 도입하고, 난류 모델로는 기본적으로 표준 k-ε 난류 모델을 사용하였다. 그리고 운동량 방정식, 난류에너지 및 난류에너지 소산을 방정식에 나타나는 온도변화에 의한 밀도차 효과에 대한 항에 대해서 현재 여러 가지 모델형태가 제안되어 사용되고 있으나, 본 연구에서는 Table 2에 나타낸 바와 같이 상용코드에서 널리 사용되고 있는 Boussinesq 근사 및 밀도구배 형태(density-gradient form)의 두 가지 형태를 모두 채택하였다. 참고로, 이 두 형태는 모두 온도변화에 의한 밀도차 효과가 부력에에만 작용한다고 가정하는 것

Table 2 Governing equations and model coefficients

Continuity equation ;

$$\frac{\partial}{\partial x_j} [\rho u_j] = 0$$

Momentum equation ;

$$\frac{\partial}{\partial x_j} [\rho u \mu_i - \tau_{ij}] = \frac{\partial P}{\partial x_i} + B_i$$

where g_i : gravitational acceleration

$$\tau_{ij} = 2\mu S_{ij} - \overline{\rho u'_i u'_j}$$

$$-\overline{\rho u'_i u'_j} = 2\mu_i S_{ij} = \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij}$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

$$\mu_i = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$$

B_i : buoyant forces

(a) $B_i = -\rho g_i \beta (T - T_0)$: Boussinesq approximation

(b) $B_i = \rho g_i$: Density-gradient form

$$\text{where } \rho = \frac{\rho_0}{1 + \beta(T - T_0)}$$

Turbulent kinetic energy ;

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left[\rho u_j k - \left(\mu + \frac{\mu_i}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] = (G + G_B) - \rho \epsilon$$

Dissipation rate equation of turbulent kinetic energy ;

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\rho u_j \epsilon - \left(\mu + \frac{\mu_i}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] \\ = \frac{\epsilon}{k} (C_{\epsilon 1} G + C_{\epsilon 3} G_B) - C_{\epsilon 2} \frac{\epsilon^2}{k} \end{aligned}$$

where $G = 2\mu_i S_{ij} S_{ij}$

(a) $G_B = g_i \beta \frac{\mu_i}{Pr_i} \frac{\partial T}{\partial x_i}$: Boussinesq approximation

(b) $G_B = -g_i \frac{\mu_i}{Pr_i} \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x_i}$: Density-gradient form

$$C_\mu = 0.09, C_{\epsilon 1} = 1.44, C_{\epsilon 2} = 1.92$$

$$C_{\epsilon 3} = 1.44 \text{ for } G_B > 0 \text{ and is zero otherwise}$$

$$\sigma_k = 1.0, \sigma_\epsilon = 1.3$$

Energy equation ;

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left[\rho u_j T - \left(\mu + \frac{\mu_i}{Pr_i} \right) \frac{\partial T}{\partial x_j} \right] = S_\tau$$

where $Pr_i = 0.9, S_\tau = 0$

으로, Boussinesq 근사와 밀도구배 형태는 상용코드 CFDS-FLOW3D와 STAR-CD에 각각 채용되어 사용되고 있다. 또한, 부력의 변동에 의한 난류 에너지 소산을 ϵ 의 생성/감소에 대해서도 여러 가지 모델형태가 제안되고 있으나, 본 연구에서는 Viollet의 제안⁽⁶⁾에 따라 모델화하였다. 즉, 난류 에너지 λ 의 부력 생성항 G_B 가 양의 값을 가질 때, 즉 불안정한 유동이 되면 G_B 의 상수 $C_{\epsilon 3}$ 는 평균 전단 생성항 G 의 상수 값과 동일한 값을 가지며, 이와 반대로 G_B 가 음의 값이 되어 유동이 안정되면 $C_{\epsilon 3}$ 는 0이 된다. 향후 부력에 의한 난류 열유동장 해석기술을 확립하기 위해서는 여러 가지 난류 모델 및 부력항에 대한 모델 형태에 따른 예측성능에 대한 분석적 연구가 행하여져야 될 것으로 사료된다.

4. 수치해석방법

Table 2에 나타낸 지배방정식을 풀기 위해 본 연구실에서 최근 개발된 3차원 유동해석 프로그램인 MOSA-3D⁽⁷⁾를 사용하였다. 이 프로그램은 일반좌표계를 사용하고, 유한체적법에 기초하여 벡터와 스칼라 값을 모두 제어체적의 중심점에 위치시키는 집중격자계를 사용하고 있으며, 미소 체적 중심에서의 직교좌표 성분의 속도, 압력 및 스칼라 성분을 주요 종속변수로 채택하고 있다. 또한 운동량 방정식의 압력항 처리를 위해서는 SIMPLE 알고리즘을 사용하고 있다. 보다 자세한 사항은 참고 문헌⁽⁷⁾에 기술되어 있다. 본 연구에서는 부력에 의한 난류 열유동장까지 해석할 수 있도록 이 프로그램에 Boussinesq 근사 및 밀도구배 형태를 선택적으로 사용할 수 있도록 확장하였다.

계산에 사용된 격자는 2차원인 경우 83×68 , 3차원인 경우 $83 \times 68 \times 10$ 의 격자를 사용하였으며, 관심영역인 계단주위에 격자를 집중시키는 비균일 격자계를 채택하였다. 또한, 3차원 계산은 계산시간과 기억용량을 줄이기 위하여 계단통 중앙단면의 대칭조건을 이용하여 유동장의 반만을 계산영역으로 잡아 계산하였다.

본 연구에서는 유동장에 대한 대류항 처리는 상류차분도식을 사용하고, 벽 근처에서의 급격한 속

도 및 온도구배를 예측하기 위해서 벽면에 인접한 제어체적에 대해서는 벽법칙을 이용하여 속도, 온도 및 난류에 관계된 값들을 계산하였다.

계산은 IRIS Workstation R10000을 사용하였으며, 수렴 판정조건은 전체 내부 격자에서의 질량 잉여량과 벡터 및 스칼라량에 대한 운동량 잉여량이 처음 10번 반복 계산하는 동안에 나타나는 각각의 잉여량 평균값의 0.01% 이하가 되면 수렴한 것으로 간주하였다. 참고로 3차원 유동인 경우 수렴까지 약 2000번의 반복 계산이 요구되었으며, 완화계수를 처음에 크게 하였다가 점차 작게할 때 빠른 수렴이 얻어졌다.

5. 결과 및 고찰

본 연구에서는 Boussinesq 근사 및 밀도구배 형태(density-gradient form)의 두 가지 형태를 사용하여 수치해석을 수행하였으나, 3차원 해석인 경우 전체적인 유동 및 온도분포에 대한 예측결과가 거의 일치하는 것이 확인되었으므로, 여기서는 Boussinesq 근사에 의한 예측결과만을 제시하고, 뒤에서 실험결과와의 정량적인 비교시 이 두 가지 형태의 차이점을 기술하기로 한다.

계단통의 대표적인 세 단면에서 예측된 속도벡터를 Fig.3(a-d)에 나타냈다. 계단통 중앙부근 단면인 Fig.3(a) 및 중앙과 측벽의 중간 부근 단면인 Fig.3(b)에서 보는 바와 같이 가열된 공기는 히터의 양쪽면을 따라 상승하여, 아래 공간의 천장을 타고 흐른 후, 위 공간으로 들어가 두 개의 커다란 재순환영역을 형성한다. 이 공기는 위 공간에서 에너지 일부를 잃어버린 후에, 계단을 따라 하강하여 아래 공간으로 들어간다. 따라서, 계단 영역에서는 뜨거운 공기와 찬 공기가 서로 반대방향으로 움직이는 것을 알 수 있다. 반면, 측벽에 가까운 영역에서는 Fig.3(c)에서 보는 바와 같이 위쪽 공간 중심 부근에서는 상승하는 뜨거운 공기의 영향이 강하나, 그 외 영역에서는 측벽으로의 열손실에 의해 공기가 측벽을 타고 하강하고 있어, 위쪽 공간에서의 두 개의 작은 재순환 영역을 형성하고 있다. 또한, Fig.3의 결과는 중앙에서 측벽으로 갈수록 측벽에 의한 열손실로 인해 위쪽 공간으로부터 계단

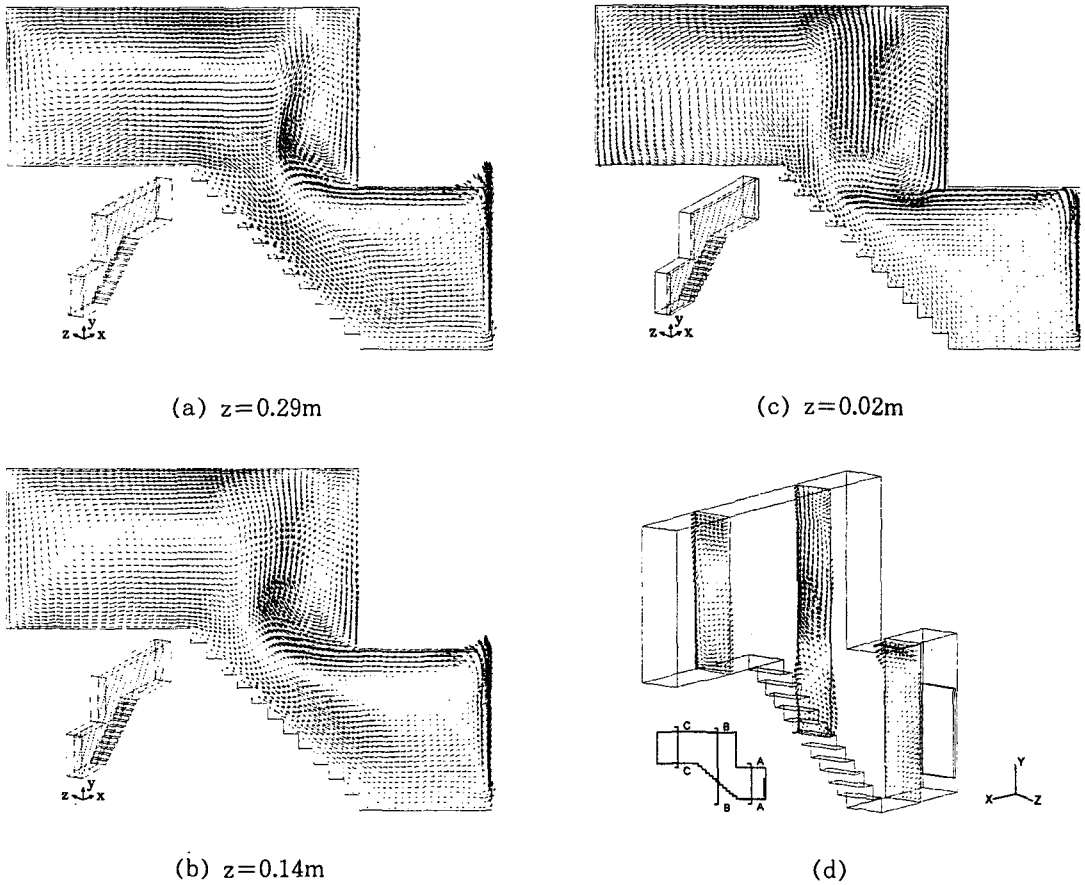
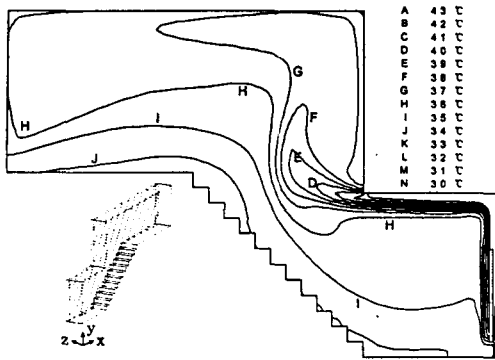


Fig.3 Three-dimensional predictions of velocity

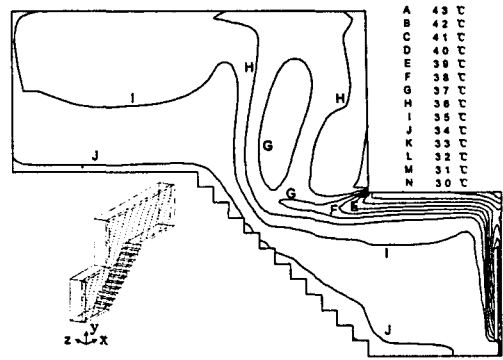
을 따라 하강하는 기류의 영역이 좁아지고 있음을 보여주고 있다. 따라서, Fig.3(a-c)의 결과는 유동에 대한 3차원적 거동을 명확히 나타내고는 있으나, 측벽에 가까운 영역(Fig.3(c))을 제외하고는 전체적으로 3차원성이 그다지 크지 않음을 보여주고 있다. 이상 기술한 유동에 대한 거동은 Fig.3(d)의 y-z단면에서의 속도장 결과로부터도 확인할 수 있다. 즉, 그림상의 왼쪽인 측벽 부근에서는 속도변화가 비교적 크나, 전체적으로는 x-y단면에서의 유동이 지배적임을 알 수 있다. 그러나, 측벽에 의한 열손실로 인해 크기는 상대적으로 작으나 C-C단면 및 A-A단면에서 보는 바와 같이 아래 공간 및 위 공간에서는 y-z단면상에 2차적인 재순환 영역을 형성하고 있으며, 또한 속도변화가 심한 B-B단면에서는 y-z단면상으로 속도 분포가 상당히

복잡하게 나타남을 명확히 보여주고 있어, 2차원적 가정이 타당하지 않음을 알 수 있다. 이러한 y-z 단면상의 유동은 y-z단면상으로는 온도확산을 촉진시킬 것으로 사료되어, 후에 기술하는 바와 같이 2차원으로 가정할 경우와 차이를 나타낼 것으로 예상된다.

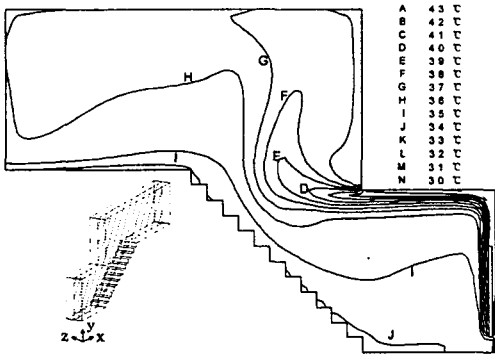
Fig.4는 Fig.3의 속도벡터를 나타낸 세 단면에서 예측된 온도분포를 보여주고 있다. 계단통의 중앙에 가까운 Fig.4(a) 및 4(b)의 예측결과를 보면, 아래 공간의 천장을 타고 흐르는 뜨거운 공기는 계단 영역 및 위 공간 입구로 들어가면서 hot plume을 형성하고 있으며, 이것의 온도는 위 공간에서 약 1°C 떨어지면서 뜨거운 공기 영역이 위쪽 부분에 넓게 형성되고 있음을 알 수 있다. 이에 비해 위 공간의 아래 부분은 상대적으로 약 1°C 낮은



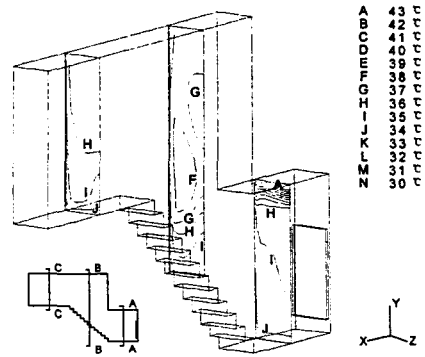
(a) $z=0.29m$



(c) $z=0.02m$



(b) $z=0.14m$



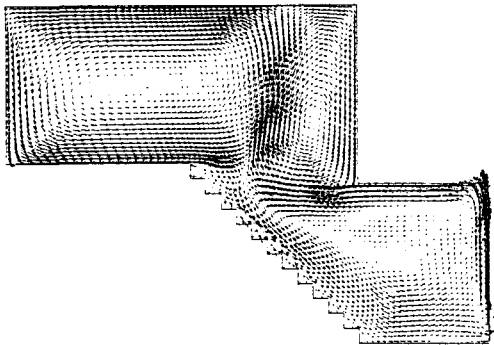
(d)

Fig.4 Three-dimensional predictions of temperature

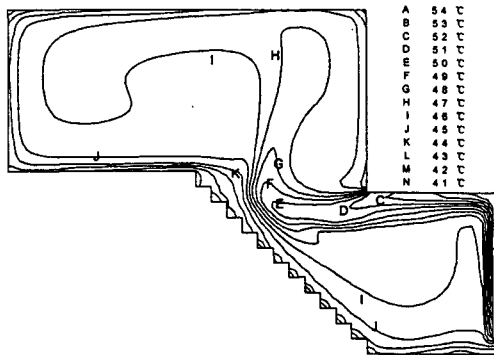
찬 공기 영역을 형성하고 있으며, 이 찬 기류가 계단의 중심부에서는 계단을 타고 아래쪽으로 흐르고 있으며, 이 영역은 중앙부에서 측벽쪽으로 갈수록 좁아짐을 Fig.4(a) 및 Fig.4(b)는 명확히 보여주고 있다. 한편 계단영역 및 위 공간 입구로 들어가면서 상승되는 뜨거운 공기의 영향은 Fig.4(c)에서도 보여지나, 뜨거운 영역이 계단 중앙부분 위쪽에 한정되고, 대부분의 영역이 찬 공기 영역을 형성하고 있음을 알 수 있다. 이것은 측벽에 의한 열손실로 인해 측벽 부근에서는 hot plume이 형성되기 어렵기 때문으로 사료된다. 따라서, Fig.4(a-c)의 결과는 온도장도 측벽에 가까운 영역(Fig.4(c))을 제외하고는 전반적으로 3차원성이 그다지 크지 않음을 보여주고 있다. 그러나, Fig.3(d)에 보인 y-z단면상에서의 온도장 결과를 보면 전체적

으로는 x-y단면에서의 유동이 지배적이거나, 측벽에 의한 열손실로 인해 그림상의 왼쪽인 측벽 부근에서는 온도변화가 비교적 크며, 또한 이 영역을 제외하고서는 무시할 수 없을 정도의 온도변화가 z축상으로 나타나고 있어, 2차원적 가정이 타당하지 않음을 예상할 수 있다.

Fig.5는 2차원으로 가정하고 Boussinesq 근사모델을 사용하여 계산한 속도 및 온도분포에 대한 결과를 보여준다. 속도분포에 대한 Fig.5(a)의 결과를 계단통의 중심단면에서의 3차원 예측 결과(Fig.3(a))와 비교하여 보면, 전반적으로 유사한 유동형태를 보이고 있어, 2차원 가정이 비교적 타당한 것 같이 보인다. 그러나, 2차원으로 가정할 경우 3차원 예측결과에 비해 아래 공간 및 위 공간에서 더욱 커다란 재순환영역을 형성하고 있으며,

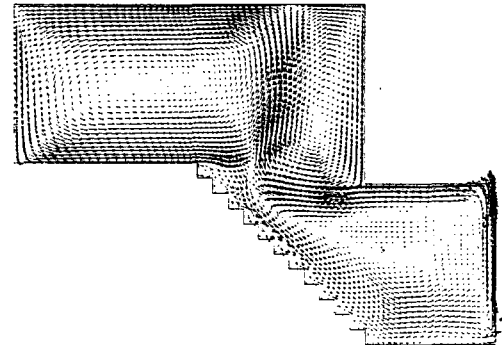


(a) Velocity

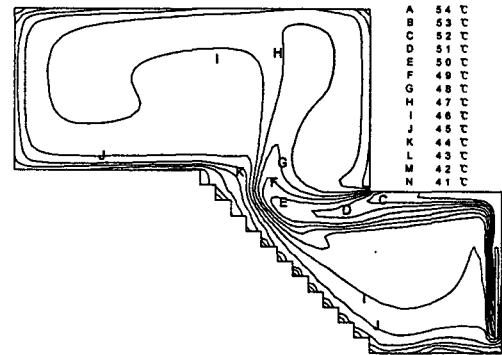


(b) Temperature

Fig.5 Two-dimensional predictions of velocity and temperature (Boussinesq approximation)



(a) Velocity



(b) Temperature

Fig.6 Two-dimensional predictions of velocity and temperature (Density-gradient form)

이 재순환영역이 아래 공간으로부터 상승하는 공기 유동을 방해하여 계단목에서 위 공간과 아래 공간 사이로의 공기순환량이 상대적으로 작음을 알 수 있다. 이와 같이 2차원으로 가정한 경우 재순환영역이 상대적으로 커지는 것은 앞에서 기술한 y-z 단면상에서의 2차적인 공기유동이 2차원인 경우 생길 수 없기 때문에 이것의 효과가 x-y 단면상으로 복합되어 나타내어지기 때문으로 사료된다.

마찬가지로, 온도분포에 대한 Fig.5(b)의 결과를 3차원 예측결과(Fig.4(a))와 비교하여 보면 전반적으로 경향은 일치하고 있으나, 2차원인 경우가 3차원인 경우보다 전 영역에 걸쳐 상당히 높게 온도를 예측하고 있으며, 또한 천장, 바닥, 계단 및 옆 벽면 근방에서의 온도구배도 큰 것을 알 수 있다. 이러한 원인은 2차원인 경우 측벽으로의 열손

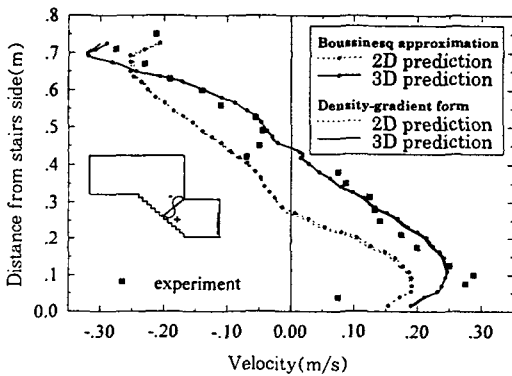
실이 없다고 가정하기 때문으로, 측벽으로 손실될 열이 천장, 바닥, 계단 및 옆 벽으로 손실되기 때문이다. 또한, 전술한 바와 같이 2차원으로 가정한 경우 아래 공간 및 위 공간에서 상대적으로 더욱 커다란 재순환 영역을 형성하고 있으며, 이 재순환 영역이 아래 공간으로부터 상승하는 공기유동을 방해하기 때문에, 결과적으로 hot plume이 위 공간에 형성되지 않고 계단 목 부근에 형성되고 있음을 알 수 있다.

Fig.6은 2차원으로 가정하고 밀도구배 형태 모델을 사용하여 계산한 속도 및 온도분포에 대한 결과를 보여준다. 속도분포 및 온도분포는 Boussinesq 근사 모델을 사용하여 계산한 Fig.5의 결과와 전반적으로는 거의 일치하나, 속도분포에 대한 Fig.6(a)의 결과는 아래 공간에서 위 공간으로 상승하

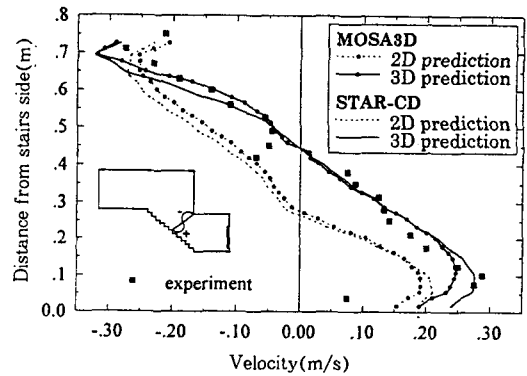
는 공기유동의 방해로 계단 목 부근에서 정체되는 경향이 다소 크게 나타나며, 이로 인해 Fig.6(b)의 온도분포 결과로부터 알 수 있듯이 Boussinesq 근사 모델을 사용한 Fig.5(b)의 결과보다 hot plume 이 위 공간에 형성되지 않고 계단 목 부근에 더욱 깊게 파고드는 형태로 된다.

Fig.7에는 본 연구에서 Boussinesq 근사 및 밀도구배 형태의 두 가지 모델을 사용하여 계산한 계단 목에서의 예측결과를 실험결과^(3,5)와 함께 나타냈다. 그림에서 보는 바와 같이 두 가지 형태의 모델에 의한 속도 및 온도 분포에 대한 3차원 예측 성능에는 정량적으로도 거의 차이를 보이지 않고 있음을 알 수 있다. 또한 본 연구에서 사용한 난류모델, 벽함수 및 대류항에 대한 유한차분도식 등을

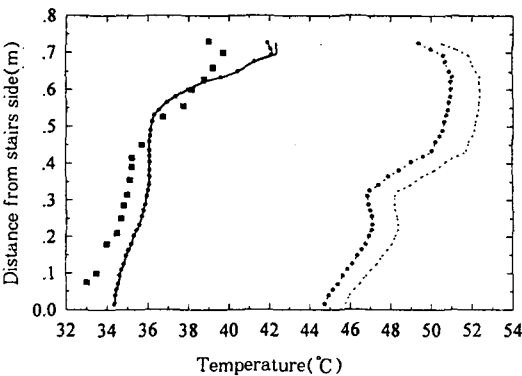
고려하여 볼 때, Fig.7(a)의 속도분포에 대한 3차원 예측결과는 실험결과와 상당히 잘 일치하고 있다고 판단할 수 있다. 반면, 2차원 속도 예측결과는 실험결과와 비슷한 경향을 보여주고는 있으나, 정량적으로 상당한 차이를 나타내고 있어, 2차원으로 가정하는 것이 타당하지 않음을 입증하고 있다. 마찬가지로, Fig.7(b)의 온도 분포는 3차원 예측결과가 실험결과와 전반적으로 잘 일치하고 있는데 비해, 2차원 예측결과는 전술한 바와 같이 실험결과와 경향은 비슷하나, 상당히 높게 예측하고 있어, 2차원으로 가정하는 것이 타당하지 않음을 입증하고 있다. 또한 3차원인 경우 Boussinesq 근사 모델 및 밀도구배 형태 모델이 온도분포 예측 성능에 거의 차이를 나타내지 않는데 비해, 2차원으로



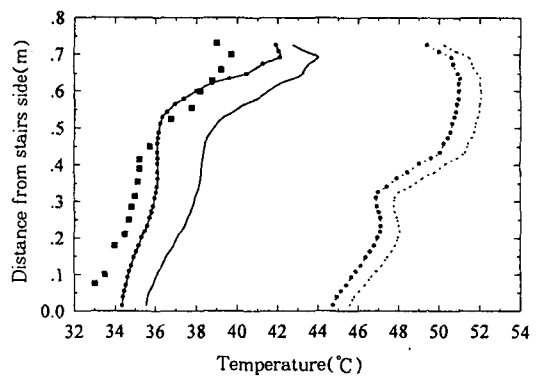
(a) Velocity profiles



(a) Velocity profiles



(b) Temperature profiles



(b) Temperature profiles

Fig.7 Velocity and temperature profiles at symmetric plane at a throat plane

Fig.8 Comparisons of predicted velocity and temperature profiles at symmetric plane at a throat plane

가정하는 경우 Boussinesq 근사 모델이 밀도구배 형태 모델보다 다소 실험값에 가까운 온도분포 예측성능을 보이고 있음을 알 수 있다.

마지막으로 Fig.8에는 본 연구실에서 개발한 MOSA3D 코드와 상용코드 STAR-CD(Ver. 2.3)를 사용하여 격자계, 경계조건 및 대류항 도식 등을 똑같은 조건하에 놓고 계산한 계단목에서의 예측결과를 실험결과^(3,5)와 함께 나타냈다. 결과를 보면 2차원 및 3차원 해석에 대해 속도장에 대해서는 거의 비슷한 예측성능을 나타내고 있으나, 온도장에 대해서는 MOSA3D 코드를 사용한 경우가 예측성능면에서 우수한 것을 알 수 있다. 참고로 Fig.8에 나타낸 결과는 MOSA3D는 Boussinesq 근사모델에 의한 결과이고, STAR-CD는 밀도구배 형태의 모델만이 채용되어 있기 때문에 이 모델에 의한 결과를 나타내고 있으나, Fig.7의 밀도구배 형태의 모델 결과와 비교해도 MOSA3D 코드를 사용한 경우가 상용 코드 STAR-CD보다 3차원 해석에 대해 실험결과에 가깝게 예측하고 있다. 온도장에 대한 상용 코드 및 본 연구실에서 개발한 코드 사이의 예측결과상의 차이에 대한 이유는 현재로서는 상용 코드의 프로그램 소스와 비교할 수 없어 명확하게 판단할 수 없으나, 두 코드 사이에서 채택하고 있는 벽함수, 수치 해석적 처리 알고리즘 등의 차이에 기인한다고 사료된다. 또한 본 연구결과는 그림에는 나타나지 않았으나, Boussinesq 근사모델을 채용하고 있는 CFDS-FLOW3D의 결과⁽⁵⁾보다도 예측성능면에서 크게 우수한 것으로 확인되었다. 이상의 결과로부터 부력에 의한 난류유동장 예측에 대한 MOSA3D 코드의 적합성이 확인되었다고 판단할 수 있다.

6. 결 과

부력에 의한 난류 열유동장 해석기술을 확립하기 위한 일환으로, 부력에 의한 난류 열유동 해석용 코드(MOSA3D)를 개발하고, 이 코드를 사용해서 건물 계단통에서의 부력에 의한 난류 열유동장을 2차원 및 3차원적으로 수치 시뮬레이션하여, 유동 특성을 파악하였다.

난류유동을 표현하기 위해 Reynolds 시간 평균

개념을 도입하고, 난류 모델로는 기본적으로 표준 $k-\epsilon$ 난류 모델을 사용하였다. 그리고 운동량 방정식, 난류에너지 및 난류에너지 소산율 방정식에 나타나는 온도 변화에 의한 밀도차 효과에 대한 항에 대해서는 상용 코드에서 널리 사용되고 있는 Boussinesq 근사 및 밀도구배 형태의 두 가지 형태의 모델이 사용되었다. 속도 및 온도장에 대한 2차원 및 3차원 예측결과를 제시하였으며, 실험결과와도 비교하였다. 본 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 2차원 및 3차원 예측결과는 유동장의 전반적인 양상을 재현하고는 있으나, 2차원으로 가정된 경우는 유동의 3차원성 때문에 3차원 결과와는 정성적으로 속도장에서는 다소 차이를 나타내며, 온도장에 대해서는 상당한 차이를 나타냈다.

(2) 계단 목(throat)에서의 유동 속도분포와 온도분포를 정량적으로 실험값과 비교 분석한 결과, 속도분포 및 온도분포에 대한 3차원 해석결과는 실험결과와 잘 일치하고 있는데 비해, 2차원 결과는 속도분포에서 다소의 차이를 나타내며, 온도분포에서는 상당히 높게 예측하고 있는 것으로 나타났다.

(3) 온도변화에 의한 밀도차 효과에 대한 항으로 Boussinesq 근사모델은 3차원 해석에서는 밀도구배 형태의 모델과 거의 비슷한 예측성능을 보이나, 2차원 해석에서는 다소 우수한 예측성능을 나타내는 것으로 확인되었다.

(4) 본 연구에서 개발된 난류 열유동 해석용 코드(MOSA3D)의 부력에 의한 난류유동장 예측에 대한 적합성이 확인되었다.

향후, 부력에 의한 난류 열유동장에 대한 보다 정확한 예측기술을 확립하기 위해 난류모델, 벽함수 및 유한차분도식 등의 개량이 행하여져야 될 것이다.

후 기

본 연구는 1997년도 한국과학재단 핵심전문연구지원(No.970-1008-055-2)에 의한 결과임을 밝힌다.

참 고 문 헌

1. Reynolds, A. J., 1986, "The scaling of flows of energy and mass through stairwells", *Building and Environment*, Vol. 21, No. 314, pp. 149~153.
2. Zohrabian, A. S., Mokhtarzadeh-Dehghan, M. R., Reynolds, A. J. and Reynolds, A. J., 1988, "A numerical study of buoyancy-driven flows of mass and energy in a stairwell, 9th AIVC Conf., Gent, Belgium, pp. 1~21.
3. Zohrabian, A. S., Mokhtarzadeh-Dehghan, M. R., Reynolds, A. J. and Marriott, B. S. T., 1989, "An experimental study of buoyancy-driven flow in a half-scale stairwell model", *Building and Environment*, Vol. 24, No. 2, pp. 141~148.
4. Zohrabian, A. S., 1989, "An experimental and theoretical study of buoyancy-driven air flow in a half-scale stairwell model", Ph.D. Thesis, Brunel University.
5. Ergin-Ozkan, S., Mokhtarzadeh-Dehghan, M. R. and Reynolds, A. J., 1992, "Two- and three-dimensional finite-volume predictions of flow in a stairwell and comparison with experiment, International Symposium on Room Air Convection and Ventilation Effectiveness, July, pp. 201~206.
6. Violette, P. L., 1987, "The modelling of turbulent recirculating flows for the purpose of reactor thermal-hydraulic analysis", *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 99, pp. 365~377.
7. 명현국, 박희경, 진은주, 1996, "Ahmed body 주위의 3차원 난류유동 해석(유한차분도식의 평가)", *대한기계학회논문집(B)*, 제20권, 제11호, pp. 47~50.