

유한차분 도식에 따른 건물 계단통에서의 3차원 부력 난류유동 수치해석

Numerical analysis of 3-dimensional buoyant turbulent flow in a stairwell model with three different finite differencing schemes

명 현 국*
H. K. Myong

Key words : Natural convection(자연대류), Buoyancy(부력), Stairwell(계단 통로), Turbulent flow(난류유동), Finite differencing scheme(유한차분도식), Numerical analysis(수치해석)

Abstract

This paper describes a numerical study of three-dimensional buoyant turbulent flow in a stairwell model with three convective differencing schemes, which include the upwind differencing scheme, the hybrid scheme and QUICK scheme. The Reynolds-averaged Navier-Stokes and energy equations are solved with a two-equation turbulence model. The Boussinesq approximation is used to model buoyancy terms in the governing equations. Three-dimensional predictions of the velocity and temperature fields are presented and are compared with experimental data. Three-dimensional simulations with each scheme have predicted the overall features of the flow fairly satisfactorily. A better agreement with experimental is achieved with QUICK scheme.

1. 서 론

1970년대 에너지 위기를 겪은 후 건물의 단열화 및 밀폐화가 상당히 이루어짐에 따라 건물내의 유동 형태도 강제대류로부터 자연대류 또는 혼합대류 형태로 바뀌게 되어 부력이 실내 공기유동에서 중요한 요소로 대두되었다. 그러나 부력에 의한 난류 열유동 해석기술은 아직까지 만족스러운 수준까지 확립되어 있지 않은 실정이다.

특히, 건물 계단통(또는 계단실)에서의 공기 유동에 관한 연구는 최근 건축분야에서 크게 관심을 가

지고 연구되고 있는 서로 다른 공간(영역) 사이에서의 에너지 및 물질 전달에 대한 적절한 예로서, 건물 계단통에서의 순수한 부력에 의한 공기유동 및 이에 관련된 에너지 전달에 대한 정확한 이해는 에너지 절약, 공조시스템 설계 및 화재 발생시의 안전대책 면에서 건축물을 설계할 때에 매우 중요하다. 그러나, 현재까지 건물 실내와 같은 단순한 형상에서의 공기 거동에 대해서는 많은 연구가 진행되어 왔으나, 건물 계단통에서의 열유동에 관해서는 국내외적으로 극소수의 연구^(1~5)가 수행된 정도로 아직 본격적인 연구가 진행되지 않고 있다.

영국 Brunel 대학 그룹인 Zoharabian et al.^(1,2) 및 Zoharabian⁽³⁾은 두 가지 계단형태의 1/2 스케일

* 정회원, 국민대학교 기계자동차공학부

계단통 모델에 대한 실험적 연구를 수행하여 유동장 내의 속도 및 온도분포를 얻었으며, 또한 2차원적으로 수치해석적 연구를 하였다. Ergin-Ozkan 등⁽⁴⁾은 상용코드 CFD5-FLOW3D를 이용하여 계단통 모델에 대해 수치해석적으로 2차원 및 3차원 예측결과를 제시하고, 건물 계단통에서의 공기 유동은 3차원 유동으로 해석의 편의상 2차원으로 가정하는 것은 적절하지 않다고 보고하였다. 그러나, 이들은 예측성능면에서는 아직 만족할만한 수준에까지 도달하지 못하였다. 최근 명등⁽⁵⁾은 Ergin-Ozkan 등이 대상으로 한 건물 계단통 모델에 대해 CFD 코드를 자체 개발하고 지배 방정식에 나타나는 부력에 대해서 Boussinesq 근사 및 밀도구배 형태의 모델을 사용하여 2차원 및 3차원 부력난류 열유동장을 수치해석하였다. 이들은 수치예측 결과를 실험결과와도 상세히 비교분석하고, 2차원 및 3차원 해석결과가 모두 유동장의 전반적인 양상을 재현하고 있으나, 3차원 해석결과가 Ergin-Ozkan 등이 보고한 바와 같이 실험결과와 더욱 일치하는 것을 확인하였다. 또한, 2차원으로 가정한 경우 온도장 예측면에서 실험값과 상당한 차이를 나타내고 있음을 확인하였다.

한편, 위에 기술한 건물 계단통에서의 공기유동에 관한 수치해석적 연구⁽²⁻⁵⁾는 모두 해석의 편의상 대류항에 대한 차분도식으로 상류차분도식만을 사용하고 있다. 그러나, 큰 대류항을 만들어내는 고레이놀즈수 유동에 있어서 계산기의 능력을 보완하기 위해 사용하는 상류차분도식은 인공점성 및 오류확산을 초래하여 예측성능이 떨어진다. 특히 확산항의 영향이 적은 페클레트가 큰 유동에서 오류확산의 영향이 커지며 격자계와 45도로 유입되는 유동에서 그 크기가 최대값을 가진다. 이러한 문제를 해결하기 위해 고차의 유한차분도식을 사용하게 되는데 그 중 QUICK 도식은 수치확산이 작아지고 3차 정확도를 가지므로 복잡한 난류유동장 해석시 다른 유한차분도식에 비하여 보다 정확한 예측이 가능하다고 알려져 있다.^(6,7)

이러한 배경하에서 본 연구에서는 부력에 의한 난류 열유동장 해석기술을 확립하기 위한 일환으로, 본 연구실에서 개발된 난류 열유동 해석용 코드를 사용해서 건물 계단통에서의 부력에 의한 난류 열유동장을 대류항 미분법을 상류차분도식, 하이브리드

도식 및 3차 상류차분도식(이하 QUICK 도식)을 사용하여 3차원 수치 시뮬레이션을 수행하고, 계단 목(throat)에서의 유동 속도분포와 온도분포를 실험값과 비교하여 각 차분도식에 따른 예측성능을 검토하고자 한다.

2. 해석 모델

본 연구에 사용한 건물 계단통에 대한 해석모델 및 좌표계를 Fig.1에 나타낸다. 해석모델은 이전 연구⁽⁶⁾에서와 같이 상부와 하부의 공간을 계단통로로 연결하는 폐쇄 구간으로 단순화되어 있으며, 화재에 따른 계단통로로의 열유입은 그림에서와 같이 히터로 대체되어 있다. 따라서, 이 폐쇄 공간에 대한 열유동 문제는 히터로부터 방출되는 열에 의한 계단통 공간 내에서의 온도차에 따른 부력에 의해 공기가 순환하게 되는 순수한 자연대류 문제로 귀착된다. 또한, 히터를 그림에서 보는 바와 같이 실제 히터와 같은 치수를 가지는 매끄럽고 평평한 면을 가지는 얇은 박스로 모델화시켰다.

열적 경계조건은 실험조건^(2,4)과 일치하도록 Fig. 1 및 Table 1과 같이 히터를 제외한 나머지 벽면에 대해서는 각각의 위치에 따라 온도를 고정하였으며, 히터를 양면에 열유속 조건을 주고 나머지 모서리는 단열조건으로 처리하였다. 참고로 실제 실험⁽²⁾에서는 히터로부터 방출되는 총열량은 300W이나, 이 중 약

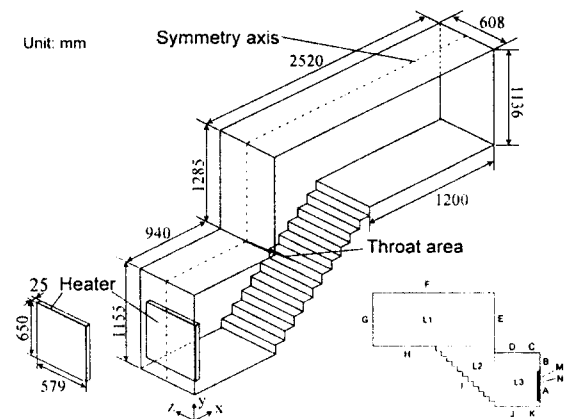


Fig.1 The schematic diagram of the stairwell and thermal boundary conditions

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

63%정도가 대류에 의해 전달되고, 나머지는 공기와 주위 표면으로 복사에 의해 전달되나, 본 연구에서는 복사를 고려하지 않으므로 Ergin-Ozkan 등⁽⁴⁾이 한 것과 마찬가지로 Table 2에 나타난 열량은 그 중 대류에 의한 열량만을 산출하여 나타낸 것이다.

3. 지배 방정식

본 연구에서 사용된 정상상태의 난류 열유동장을 지배하는 지배방정식을 정리하여 Table 2에 나타냈다. 본 연구에서는 건물 계단통에서의 난류유동을 표현하기 위해 Reynolds 시간 평균 개념을 도입하고, 난류모델로는 기본적으로 표준 $k-\epsilon$ 난류모델을 사용하였다. 또한, 부력항의 처리는 유속이 느리기 때문에 밀도가 일정한 비압축성 유체로 가정하고, 이전 연구결과⁽⁵⁾를 참고하여 온도 변화에 의한 밀도차 효과가 부력항에만 작용한다고 생각하는 Boussinesq 근사를 사용하였다. 즉, 운동량 방정식에서의 압력 p 를 유체가 받는 중력에 의한 압력의 부분과 그 외의 운동 등에 의해 발생하는 압력 p' 를 분리하여 체적 열팽창 계수를 도입하여 나타내었다.

또한, 부력의 변동에 의한 난류에너지 소산률 ϵ 의 생성/감소는 Viollet의 제안⁽⁸⁾에 따라 모델화하였다. 즉, 난류에너지 k 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 상수값과 동일한 값을 가지며, 이와 반대로 G_B 가 음의 값이 되어 유동이 안정되면 $C_{\epsilon 3}$ 는 0이 된다.

Table 2 Governing equations and model coefficients

Continuity equation;
$\frac{\partial}{\partial x_j} [\rho u_j] = 0$
Momentum equation;
$\frac{\partial}{\partial x_j} [\rho u_i u_j - \tau_{ij}] = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + B_i$
where g_i : gravitational acceleration
$\tau_{ij} = 2\mu S_{ij} - \rho \overline{u_i u_j}$
$-\rho \overline{u_i u_j} = 2\mu_t S_{ij} - \frac{2}{3} k \delta_{ij}$
$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$
$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$
B_i : buoyant forces
$B_i = -\rho g_i \beta (T - T_0)$: Boussinesq approximation
Turbulent kinetic energy;
$\frac{\partial}{\partial x_j} \left[\rho u_j k - \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] = (G + G_B) - \rho \epsilon$
Dissipation rate equation of turbulent kinetic energy;
$\frac{\partial}{\partial x_j} \left[\rho u_j \epsilon - \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right]$
$= \frac{\epsilon}{k} (C_{\epsilon 1} G + C_{\epsilon 3} G_B) - C_{\epsilon 2} \frac{\epsilon^2}{k}$
where $G = 2\mu_t S_{ij} S_{ij}$
$G_B = g_i \beta \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial T}{\partial x_i}$: Boussinesq approximation
$C_\mu = 0.09, C_{\epsilon 1} = 1.44, C_{\epsilon 2} = 1.92$
$C_{\epsilon 3} = 1.44$ for $G_B > 0$ and is zero otherwise
$\sigma_k = 1.0, \sigma_\epsilon = 1.3$
Energy equation;
$\frac{\partial}{\partial x_j} \left[\rho u_j T - \left(\mu + \frac{\mu_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial T}{\partial x_j} \right] = S_T$
where $Pr_t = 0.9, S_T = 0$

4. 수치해석방법

본 연구에서는 Table 2에 나타난 지배방정식을 풀기 위해 본 연구실에서 최근 개발한 3차원 유동해석 프로그램인 MOSA-3D⁽⁷⁾를 부력에 의한 난류 열 유동장까지 해석할 수 있도록 확장하여 사용하였다. 이 프로그램은 일반좌표계를 사용하고, 유한체적법에 기초하여 벡터와 스칼라 값을 모두 제어체적의 중심점에 위치시키는 집중 격자계를 사용하고 있으며, 미소 체적 중심에서의 직교좌표 성분의 속도, 압력 및 스칼라 성분을 주요 종속변수로 채택하고 있다. 또한 속도장에 대해서는 운동량 보간법을 사용하고 스칼라장에 대해서는 선형 보간법을 사용하는 Rie-Chow 방법을 채택하고 운동량 방정식의 압력항 처리를 위해서는 SIMPLE 알고리즘을 사용하고 있다.

본 연구에서는 대류항 차분도식에 따른 유동장 및 온도장의 예측정도를 비교하기 위해, 대류항에 대해서 상류차분도식, 하이브리드도식 및 3차원상류차분도식(QUICK) 세가지 도식을 적용시키고, 벽 근처에서의 급격한 속도 및 온도구배를 예측하기 위해 이들 양에 대해서는 벽법칙을 사용하였다.

계산에 사용된 격자는 $83 \times 68 \times 10$ 의 3차원 직각 격자를 사용하였으며, 관심여역인 계단 주위에 격자를 집중시키는 비균일 격자계를 채택하였다. 또한 계산시간과 기억용량을 줄이기 위하여 계단통로 중간 단면의 대칭조건을 이용하여 유동장의 반만을 계산영역으로 잡아 계산하였다. 참고로 본 연구에서 사용된 유동해석 프로그램 MOSA-3D 및 수치해석방법에 관한 보다 상세한 사항은 이전 연구^(5,7)에 기술되어 있다.

5. 결과 및 고찰

먼저 정량적인 분석을 위해 Fig.2에 유한차분 도식에 따른 계단 목에서의 예측결과를 실험결과^(2,3)와 함께 나타냈다. 위아래 계단통이 만나는 부근(그림 상에서 윗부분)의 실험결과는 좁은 영역에서의 빠른 속도 및 온도변화로 인해 실험값에 상당한 오차가 포함되어 있음을 감안하여 예측결과를 보면, 상류차분도식의 경우, 계단에 가까운 부근의 속도를 다소 낮게 예측하고 있으며, 특히 온도 예측면에서는 계

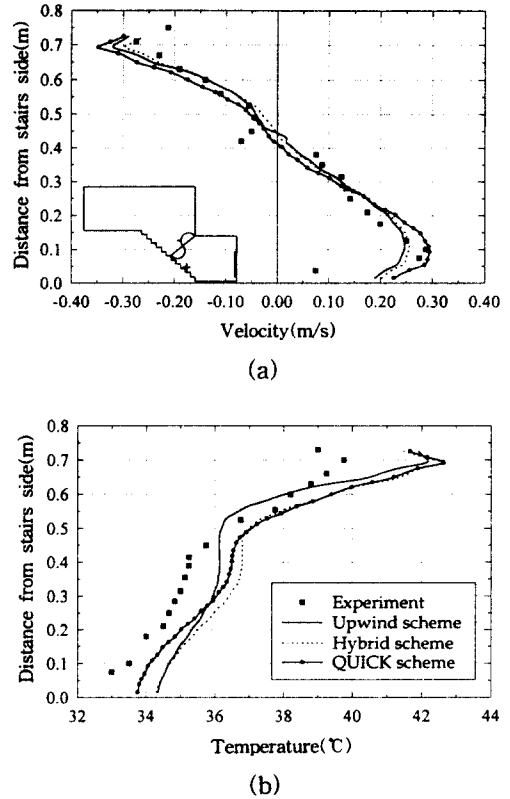


Fig.2 Velocity and temperature profiles at symmetric plane at a throat

단통 중간 영역에서는 실험값보다 낮게 그 외의 영역에서는 높게 예측하고 있어, 정성적으로 실험결과와 상당히 다른 양상을 나타내고 있다. 상류차분도식과 중심차분 도식을 혼합시킨 하이브리드도식은 속도 예측에서는 상류차분도식보다 다소 실험결과에 근사하나 크게 개선되지 않고 있으며, 온도 예측에서는 정성적으로 다소 개선된 경향을 나타내나 전영역에 걸쳐 실험값보다 높은 결과를 보여주고 있다. 반면, QUICK 도식을 사용한 경우는 계단에 가까운 부근을 포함한 계단 목 전영역에서의 속도를 비교적 잘 예측하고 있다. 또한 온도예측에 있어서도 전영역에 걸쳐 정성적으로 실험결과와 비슷한 양상을 나타내며, 계단에 가까운 영역에서의 온도를 상류차분도식이나 하이브리드도식에 비해 낮게 예측하여 정량적으로도 좀 더 실험결과에 근접하는 것을 알 수 있다. 다만 온도분포를 실험값보다 전반적으로 높게

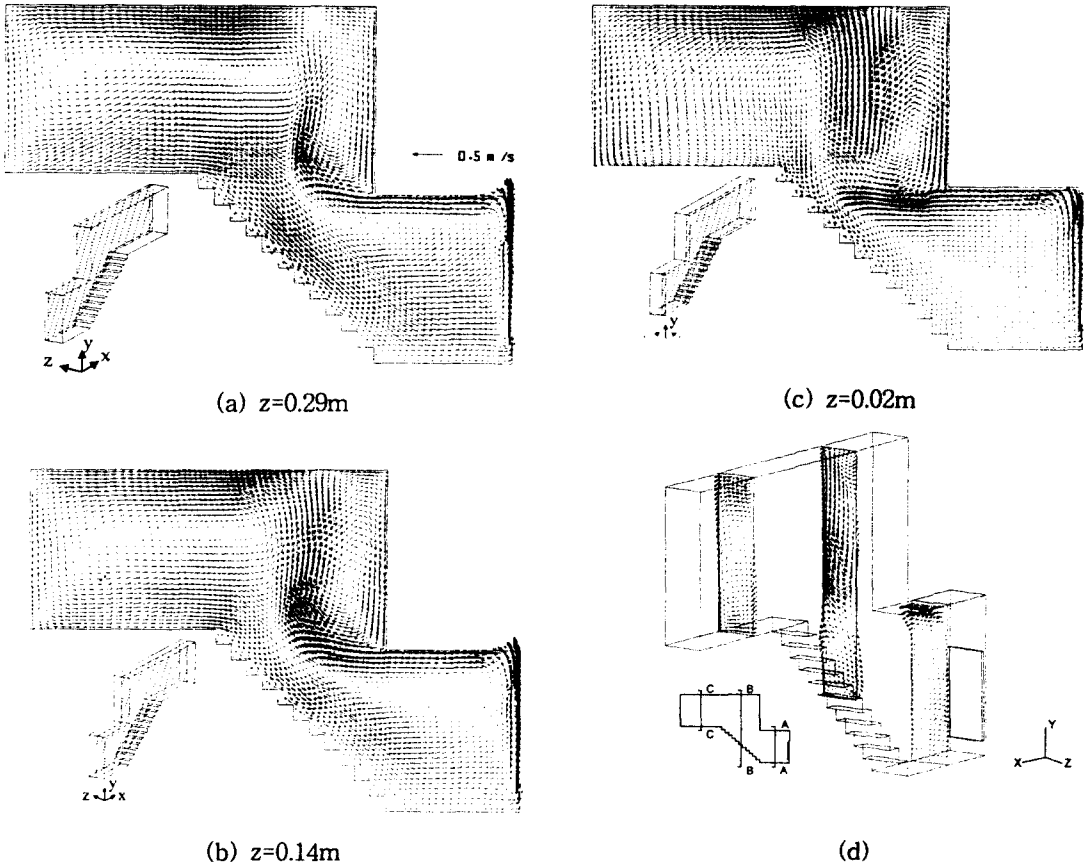


Fig.3 Three-dimensional predictions of velocity with the upwind differencing scheme

예측하고 있는 한 원인으로는 본 연구에서 온도에 대한 난류프란틀 수 Pr_t 를 경계층 유동에 사용하는 값으로 설정한 데 있다고 판단되며, 향후 이에 대한 연구가 수행되어야 할 것으로 사료된다.

여기서부터는 대류향으로 상류차분도식 및 QUICK 도식을 사용하여 계산된 계단통의 계산결과에 대해서만 상호 살펴보기로 한다. 또한 전체 유동장에 대한 실험결과가 없으므로, QUICK 도식의 결과를 기본으로 하여 상류차분도식의 결과를 비교검토하기로 한다.

먼저 대류향으로서 상류차분도식 및 QUICK 도식을 사용하여 계산된 계단통의 대표적인 세 단면에서의 속도 벡터를 Fig.3(a-d) 및 Fig.4(a-d)에 각각 나타냈다.

계단통 중앙부근 단면인 Fig.3(a) 및 Fig.4(a)와

중앙과 측벽의 중간부분 단면인 Fig.3(b) 및 Fig.4(b)에서 보는 바와 같이 도식에 관계없이 가열된 공기는 히터의 양쪽면을 따라 상승하여, 아래 공간의 첫 앙을 타고 흐른 후, 위 공간으로 들어가 두 개의 커다란 재순환 영역을 형성한다. 이 공기는 위 공간에서 에너지 일부를 잃어버린 후에, 계단을 따라 하강하여 아래 공간으로 들어간다. 따라서, 계단 영역에서는 뜨거운 공기와 찬 공기가 서로 반대 방향으로 약 45도의 각도를 이루며 움직이는 것을 알 수 있다. 반면 측벽에 가까운 영역에서는 Fig.3(c) 및 Fig.4(c)에서 보는 바와 같이 위쪽 공간 중심 부근에서는 상승하여 뜨거운 공기의 영향이 상당히 강하나, 그 외 영역에서는 벽을 통한 열손실로 인하여 가열된 공기는 위 공간으로 이동하지 못하고 측벽을 타고 다시 하강하여 아래 공간으로 순환하는 유동을 볼 수 있

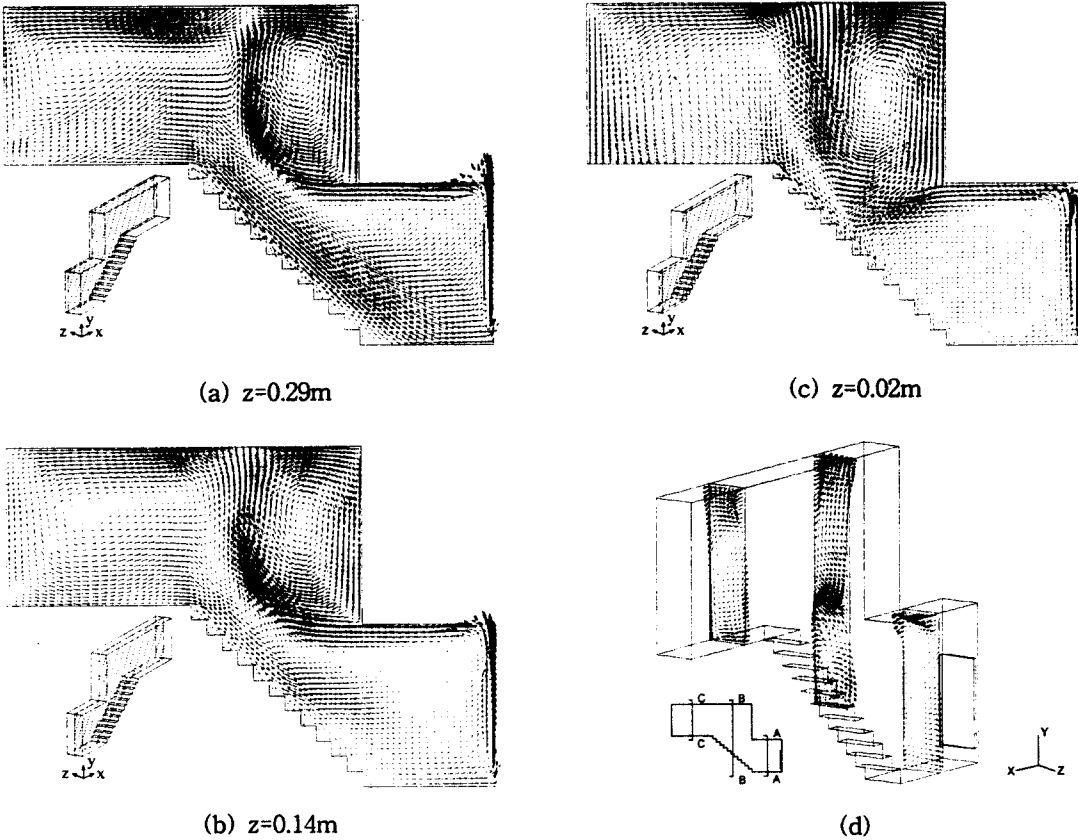


Fig.4 Three-dimensional predictions of velocity with QUICK scheme

다. Fig.3(d) 및 Fig.4(d)의 $y-z$ 단면에서의 속도장 결과와 함께 전체적인 속도 예측결과를 살펴보면 유동에 대한 3차원적 거동을 명확히 보여주고는 있으나, $x-y$ 면에서의 유동이 지배적임을 알 수 있다.

그러나, 유한차분 도식으로 QUICK 도식을 사용하는 경우가 상류차분도식을 사용하는 경우보다 히터에서 가열된 공기가 계단통을 통해 상부로 더욱 강하게 이동하면서 계단통의 하강기류를 다시 끌고 올라가기 때문에 상부에서 커다란 두 개의 순환 영역을 이루며, 3차원성도 더욱 커지는 것을 볼 수 있다. 이와 같은 차분도식에 따른 속도 비교는 Fig.2(a)에서도 확인할 수 있다.

두 도식을 사용하여 계산된 계단통의 대표적인 3단면에서의 온도분포를 Fig.5(a-d) 및 Fig.6(a-d)에 각각 나타냈다. 예측결과를 보면, 도식에 관계없이 아래 공간의 찬장을 타고 흐르는 뜨거운 공기는 계단 영

역 및 위 공간 입구로 들어가면서 열플럼(hot plume)을 형성하고 있으며, 이것에 의해 뜨거운 공기 영역이 온도는 약 $1\sim 2^{\circ}\text{C}$ 떨어지나 위 공간의 위쪽 부분에 넓게 형성되고 있다. 이 상승되는 뜨거운 공기의 영향은 측벽에 가까운 Fig.5(c) 및 Fig.6(c)에서도 보여지나, 뜨거운 영역이 계단 중앙부분 위쪽에 한정되고 있음을 알 수 있다. 이에 비해 위 공간의 아래 부분은 상대적으로 약 2°C 낮은 찬 공기 영역을 형성하고 있으며, 이 찬 기류가 계단의 중심부에서는 계단을 타고 아래쪽으로 흐르고 있음을 Fig.5(a) 및 Fig.6(a)는 명확히 보여주고 있다. 이와 함께 속도장 예측결과에서와 마찬가지로 측벽에 가까운 영역(Fig.5(c) 및 Fig.6(c))에서는 중심부와 다른 분포를 나타내어 열유동 상태가 3차원적임을 나타내고 있다. 이러한 거동은 Fig.5(d) 및 Fig.6(d)의 $y-z$ 단면에서의 온도장 결과로부터도 확인할 수 있으며,

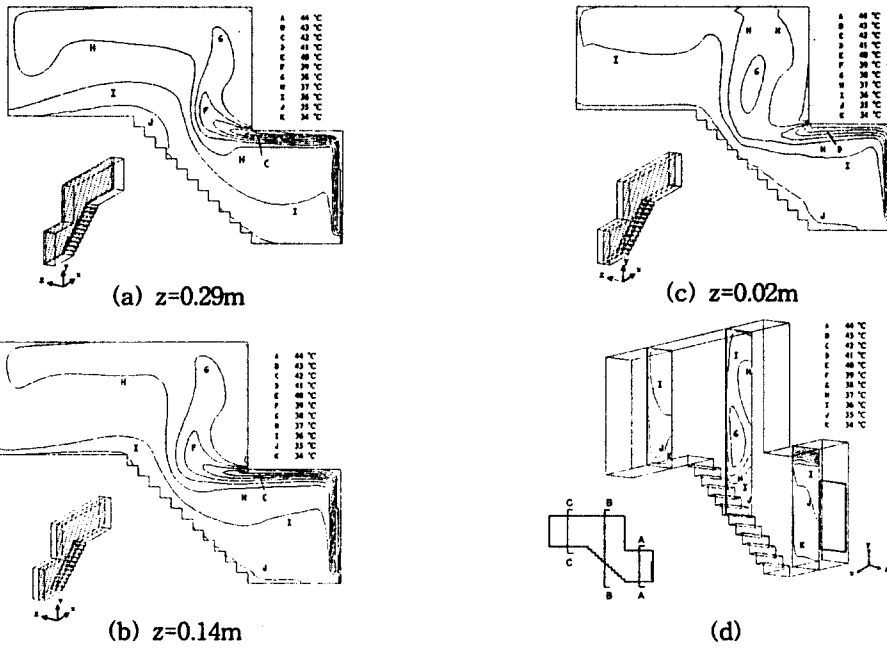


Fig.5 Three-dimensional predictions of temperature with the upwind differencing scheme

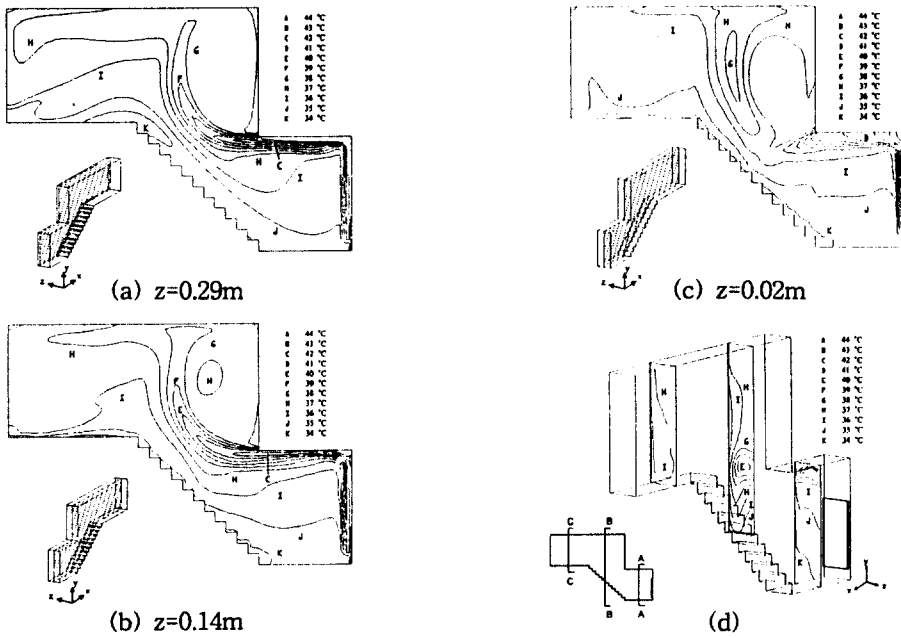


Fig.6 Three-dimensional predictions of temperature with QUICK scheme

온도장인 경우에도 전체적으로는 x-y 면에서의 유동이 지배적임을 알 수 있다.

또한 QUICK 도식을 사용하면 저차의 상류차분 도식을 사용하는 경우보다 상부 공간으로의 열플럼이 더욱 깊게 파고드나, 전체적으로는 공기의 온도가 약간 더 낮아지며, 계단 통로를 통해 하부로 이동하는 공기의 온도도 낮아지고, 또한 3차원성이 더 커지는 것을 알 수 있다. 이것은 앞의 속도장 예측결과에서 본 바와 같이 QUICK 도식을 사용하면 계단목 부근에서의 빠른 뜨거운 공기에 의해 하강하는 찬 공기가 떨어져 올라가기 때문에 전체적으로는 공기의 혼합에 의한 열교환으로 온도가 떨어지게 되는 것으로 판단된다.

6. 결 론

본 연구실에서 개발한 코드를 사용해서 건물 계단 통에서의 부력에 의한 3차원 난류 열유동을 대류항미분법으로 상류차분도식, 하이브리드도식 및 QUICK 도식을 사용하여 수치해석하고, 계산한 속도 벡터 및 온도 분포에 대한 예측결과를 제시하였으며, 실험결과와도 비교하였다.

본 연구결과 각 유한차분도식의 예측결과는 속도 및 온도 분포면에서는 모두 비교적 양호한 예측결과를 보여주고 있으나, QUICK 도식을 사용하는 경우가 속도 및 온도 예측에 있어 상당히 개선되는 것이 확인되었다. 또한 계단통내 공간에 대한 속도 및 온도분포는 QUICK 도식을 사용하는 경우가 3차원성이 더욱 커지는 것으로 나타났다.

향후, 부력에 의한 난류 열유동장에 대한 보다 정확한 예측 기술을 확립하기 위해 난류모델, 벽함수 등의 개량이 행하여져야 될 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 1997년도 한국과학재단 핵심전문연구지원(No. 971-1008-055-2)에 의한 결과임을 밝힌다.

참 고 문 헌

- Zohrabian, A. S., Mokhtarzadeh-Dehghan, M. R. 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.
- 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.
- 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.
- 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 Rool Air Convection and Ventilation Effectiveness, July, 201~206.
- 명현국, 진은주, 1998, "건물 계단통에서의 부력에 의한 난류유동 해석", 공기조화냉동공학회 논문집, 제10권, 제2호, pp. 217~226.
- Han, T., Humphrey, J. A. C. and Launder, B. E., 1981, "A comparison of hybrid and quadratic-upstream differencing in high Reynolds number elliptic flows", Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, pp. 81~95.
- 명현국, 박회경, 진은주, 1996, "Ahmed body 주위의 3차원 난류유동 해석(유한차분도식의 평가)", 대한기계학회논문집(B), 제20권, 제11호, pp. 47~50.
- Viollet, 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.