

PISO 알고리즘을 이용한 밀폐공간내에서의 유동 및 혼합대류에 관한 연구

A Numerical Study of Initial Unsteady Flow and Mixed Convection in an Enclosed Cavity Using the PISO Algorithm

최 영 기* 정 진 영**
Y. G. Choi, J. Y. Chung

ABSTRACT

A numerical analysis of initial unsteady state flow and heat transfer in an enclosed cavity has been performed by the Modified QUICK Scheme.

The stable QUICK Scheme which modified the coefficient always to be positive is included in this numerical analysis. The implicit method is applied to solve the unsteady state flow; between iterations the PISO (Pressure - Implicit with Splitting of Operators) algorithm is employed to correct and update the velocity and pressure fields on a staggered grid.

The accuracy of the Modified QUICK Scheme is proved by applying fewer grid systems than those which Ghia et al. and Davis applied. The initial unsteady mixed convection in an enclosed cavity is analyzed using the above numerical procedure. This study focuses on the development of the large main vortex and secondary vortex in forced convection, the effects of the Rayleigh Number in natural convection and the relative direction of the forced and natural convection.

기 호 설 명

a : 차분식의 계수
 b : 차분식의 생성항계수
 d : 차분식의 압력항계수
 g : 중력 가속도(m/sec^2)
 Gr : Grashof 수
 H : 정사각 밀폐공간의 길이(m)
 p : 압력(Pa)
 P : 무차원된 압력
 Pr : Prandtl 수
 Ra : Rayleigh 수

T : 온도($^{\circ}C$)
 T_0 : 기준 온도($^{\circ}C$)
 T_H : 고온쪽 벽면온도($^{\circ}C$)
 ΔT : 좌우양면의 온도차
 u, v : 가로방향 및 세로방향 속도성분
 (m/sec)
 U, V : 무차원 속도 성분
 x, y : 가로, 세로의 좌표(m)
 X, Y : 가로 및 세로 방향의 무차원 좌표
 α : 열 확산 계수(m^2/sec)
 β : 유체의 체적 팽창 계수($1/K$)
 ν : 동점성 계수(m^2/sec)

* 중앙대학교 공과대학 기계공학과

** 중앙대학교 대학원

- ρ : 유체의 밀도(kg/m³)
- ρ_0 : 기준 온도에서의 유체의 밀도(kg/m³)
- ∇^2 : Laplacian
- τ : 무차원 시간
- θ : 무차원 온도
- 〈상첨자〉
- n : 직전 시간 Step에서의 값
- * : Predictor Step에서의 값
- ** : Corrector Step에서의 값
- *** : 최종 Step에서의 값
- 〈하첨자〉
- nb, e : 이웃하는 검사면에서의 값
- P, E : 이웃하는 격자점에서의 값

1. 서 론

내부 대류 문제는 핵 발전기에서 열교환기 내부의 유동, 실내를 환기시킬 때의 실내 공기 유동, 전자 장비를 냉각할 때의 냉각제의 유동 문제 등 여러 분야에서 나타난다. 정 4 각형 밀폐공간내에서의 대류 문제는 그러한 문제들을 해석하기 위한 기본적인 문제로서 많은 연구가 이루어져 왔다.

또한 이 문제는 경계 조건이 단순하여 유한 차분법, 유한 요소법의 테스트로 자주 적용되어 온 기초적인 중요한 문제로서 많은 관심을 끌어 왔다.

이중 De Vahl Davis¹⁾는 밀폐 공간내에서의 자연 대류 현상에 대한 그 동안의 수치 해석 결과들을 종합하여 비교 정리하였고 또한 Bench Mark 해를 제시하였다.²⁾

그동안 대부분의 연구들은 정상 상태에서의 유동 및 열전달 현상에 대해 해석하였으나 최근에 들어와서 Kauh³⁾, Patterson과 Imberger⁴⁾ 등은 유동의 발달 과정 해설을 위해 초기 비정상 자연 대류 현상에 대해 관심을 갖고 수치 해석 및 실험 결과를 발표하였다.

유한 차분법을 사용하여 이 문제들을 수치 해석할 때 대류항을 처리하는 방법은 여러 가지가 있으며 이중 QUICK Scheme이 Leonard⁵⁾에 의해 발표된 후 QUICK Scheme, Hybrid Scheme, Power Law Scheme, Skew

Upwind Scheme 등을 비교하는 연구가 Huang, Launder와 Leschziner⁶⁾, Han과 Humphrey⁷⁾ 등에 의해 이루어졌다. 이러한 비교 연구에 의해 QUICK Scheme과 Skew Upwind Scheme이 가장 정확한 결과를 얻을 수 있는 방법이라는 것이 입증되었다.

그러나 이 방법은 경우에 따라 발산하여 제한적으로 사용되어 오다가 최근에 들어와서 Pollard⁸⁾, Freitas⁹⁾, Kauh⁸⁾ 등이 이 방법을 약간 변형하여 수렴 문제를 보완하였다.

본 연구에서는 밀폐된 공간내에서 초기 비정상 유동, 자연 대류 및 혼합 대류에 대해서 위에서 언급한 변형된 QUICK Scheme을 사용하여 수치 해석하고자 한다.

이 변형된 QUICK 방법의 정확도를 검증하기 위해 정 4각형 밀폐 공간에서의 정상 상태 유동, 자연 대류 및 혼합 대류의 정상 상태 유동과 열전달 현상에 대해서 Ghia 등¹⁰⁾, De Vahl Davis²⁾ 그리고 Fusegi와 Farouk¹¹⁾의 연구 결과와 비교하였다.

위 비교 검증후 정 4각형 밀폐 공간내에서 비정상 상태의 혼합 대류에 대해서 강제 대류가 지배적일 경우와 자연 대류가 지배적일 경우에 대해서 해석하였다. 또한 각각의 경우에 대해 강제 대류와 자연 대류가 대립하는 경우와 조력하는 경우에 대해서 해석하였다.

2. 이 론

2.1 지배 방정식

2차원 비압축성 유체 유동에 대해 Boussinesq 근사를 적용하면 연속 방정식, 운동량 방정식, 에너지 방정식은 다음과 같다.

연속방정식

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \dots\dots\dots (1)$$

운동량 방정식

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \nu \nabla^2 u \dots (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial y} + \nu \nabla^2 v +$$

$$g \beta (T - T_0) \dots\dots\dots (3)$$

에너지 방정식

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha \nabla^2 T \dots\dots\dots (4)$$

여기서, ρ_0 , ν , g , β 와 α 는 각각 기준 밀도, 동 점성계수, 중력 가속도, 열팽창계수 및 열 확산계수이다.

위의 지배 방정식을 무차원화하기 위하여 다음과 같은 무차원화 변수를 도입한다.

$$U = \frac{uH}{\alpha} \quad V = \frac{vH}{\alpha} \quad P = \frac{\rho_0 H^3}{\rho_0 \alpha^2}$$

$$\tau = \frac{\alpha t}{H^2} \quad X = \frac{x}{H} \quad Y = \frac{y}{H}$$

$$\theta = \frac{T - T_0}{T_H - T_0} \quad Ra = \frac{g \beta \Delta T H^3}{\alpha \nu}$$

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} \dots\dots\dots (5)$$

(5)를 식 (1)~식 (4)에 대입하면 다음과 같은 무차원 지배 방정식을 얻는다.

$$\frac{\partial U}{\partial \tau} + \frac{\partial V}{\partial Y} = 0 \dots\dots\dots (6)$$

$$\frac{\partial U}{\partial \tau} + U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial X} + Pr \nabla^2 U \quad (7)$$

$$\frac{\partial V}{\partial \tau} + U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial Y} + Pr \nabla^2 V +$$

$$Ra Pr \theta \dots\dots\dots (8)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = U \frac{\partial \theta}{\partial X} + V \frac{\partial \theta}{\partial Y} = \nabla^2 \theta \dots\dots\dots (9)$$

2.2 개선된 QUICK Scheme

대류항 $\rho u \phi$ 및 $\rho v \phi$ 를 선징하는 방법은 QUICK Scheme, 중심 차분법(Central Difference Scheme), Upwind Scheme, Exponential Scheme, Hybrid Scheme, Power Law Scheme 등 여러가지가 있다. 이 중 QUICK Scheme은 그 계산의 정확성에도 불구하고 수치 계산의 불안정성으로 인해 제한적으로 사용되었다.

최근에 Pollard 등⁹⁾은 이 방법을 약간 변형하여 균일 격자계에 대해 각 계수가 양이 되도록 한 QUICKER Scheme을 개발하여 수렴 문제를 보완하였고 Freitas 등¹⁰⁾은 비균일

격자계의 TEACH Code에 이 방법을 적용하였으나 경계 조건 적용에 중심 차분법 적용으로 계산상 문제점이 발견되어 본 논문에서는 변형된 QUICK Scheme을 비균일 격자계에 적용하는 과정에서 일관성을 유지하도록 경계면을 포함한 전 영역에 이 방법을 적용하였고 유한 차분 방정식의 대류항의 계수가 항상 양의 되도록 변형시켜 안정성을 높였다.

3. 수치 해석

3.1 계산 방법

계산에 사용된 격자계는 (32×32)의 균일 격자계와 (22×22), (42×42), (52×52)의 비균일 격자계이다.

본 연구에 사용된 프로그램은 Hybrid Scheme을 사용하고 있는 TEACH 프로그램을 개선하여 Modified QUICK Scheme을 적용하였고 원래의 TEACH 프로그램에서 비균일 격자 체계에서 문제가 되었던 평면을 이용한 계수 계산방법을 내분을 이용한 계수 계산방법으로 개선하여 비균일 격자 체계에 대해 계산의 정확도를 기하였다.

유동장을 계산하기 위해 일반적으로 많이 사용되고 있는 SIMPLE 알고리즘 대신에 최근에 발표되어 그 정확도 및 수렴 속도가 빠른 PISO(Pressure-Implicit with Splitting of Operators) 알고리즘¹²⁻¹³⁾을 적용하여 속도장, 압력장 및 온도장을 구하였다.

이 알고리즘은 Predictor-Corrector 방법을 시간 증분(time step)에 적용하여 시간에 대한 오차를 second order로 줄임으로써 특히 초기 비정상 유동장 및 온도장을 계산하는데 적합하다.

PISO 알고리즘¹²⁻¹⁴⁾의 순서를 정리하면 다음과 같다.

<Predictor 과정>

1. 전 시간 단계에서 계산된 속도와 압력 U^n, V^n, P^n 을 이용하여 운동량 방정식의 계수를 계산하고, 운동량 방정식을 계산하여 속도 U_e^* 를 구한다.

$$a_e U_e^* = \sum a_{nb} U_{nb}^* + d_e (P_P^n - P_E^n) + b^n$$

2. 위에서 계산된 속도를 이용하여 압력 방정식의 계수를 계산하고 압력장 P^* 을 구한다.

$$a_P P_P^* = \sum a_{nb} P_{nb}^* + b^P$$

3. 계산된 압력장 P^* 를 이용하여 보정된 속도 U^{**}, V^{**} 를 구한다.

$$U_e^{**} = \hat{U}_e + d_e (P_P^* - P_E^*)$$

$$\text{여기서 } \hat{U}_e = U_e^* - d_e (P_P^n - P_E^n)$$

< Corrector 과정 >

4. 보정된 속도 U^{**}, V^{**} 를 이용하여 압력 방정식의 계수를 계산하고 최종 압력장 P^{**} 를 계산한다.

5. 위에서 계산된 최종 압력장을 이용하여 보정 속도 U^{***}, V^{***} 를 계산한다.

$$U_e^{***} = \hat{U}_e + d_e (P_P^{**} - P_E^{**})$$

$$\text{여기서 } \hat{U}_e = U_e^{**} + [\sum a_{nb} (U_{nb}^{**} - U_{nb}^*)] / a_e - d_e (P_P^* - P_E^*)$$

6. 다음 시간 단계로 넘어간다.

3.2 계산 결과

3.2.1 정 4각형 밀폐 공간내에서의 유체 유동에 대한 계산 결과

변형된 QUICK Scheme을 검증하기 위해 $Re=3,200$ 일 경우, 정상 상태 정 4각형 밀폐 공간에서 윗 벽면이 일정 속도로 움직일 때의 유동장을 계산하였다. 계산된 중앙면 속도 분포를 Coupled Strongly-Implicit Multi-Grid Method에 의해 구한 Ghia et al.^{10)의 결과와 비교하였다.}

변형된 QUICK Scheme에 사용된 격자가 (52×52) 비균일 격자임에도 불구하고 그 결과는 Ghia et al.^{10)가 사용한 (129×129) 균일 격자계로 구한 결과와 좋은 일치를 보이고 있다.}

한편 $Re=3,200$ 일 경우의 비정상 상태 정 4각형 밀폐 공간의 유동에 대해서는 (42×42)의 비균일 격자계를 적용하여 계산하였다. 시간 단계에 따른 유동 함수의 그림이 Fig. 2에 있다.

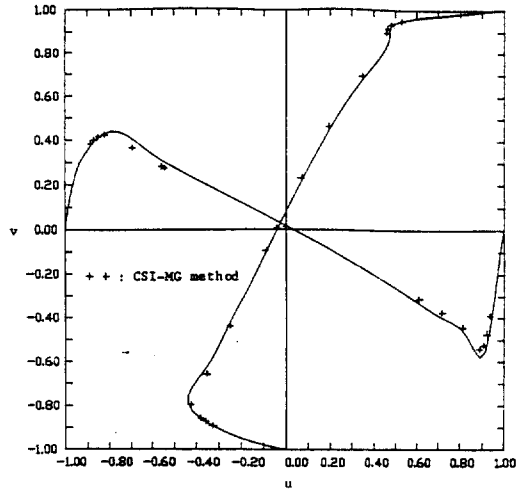


Fig.1 Comparison between the Modified QUICK Scheme and the CSI-MG method for u and v midplane velocity profiles. at $Re=3,200$

처음에 밀폐 공간내의 오른쪽 상단 부근에 발생된 와류는 그 크기가 점점 커져서 아래로 내려오며 그 중심은 대략 밀폐 공간의 중심 부근에 위치하게 된다. $\tau=9 \times 10^{-4}$ 일때 밀폐 공간의 오른쪽 벽면에서 점성력의 영향으로 첫 번째의 2차 와류가 발생 되는데 이 와류는 시간이 지나감에 따라 점점 커지면서 오른쪽 하단 부근으로 이동하여 계속 발달하게 된다. 두 번째의 2차 와류는 약 $\tau=3.7 \times 10^{-3}$ 일 때 왼쪽 하단부에서 발생되어 시간이 흐름에 따라 자리를 이동하지 않고 점점 발달한다.

또한 시간이 지나감에 따라 좌측 상단에서도 세 번째 2차 와류가 발생하여 정상 상태에서는 주 와류외에도 세개의 2차 와류가 존재한다.

이러한 2차 유동 영역은 Ghia et al.^{10)의 수치 해석 결과에서 나타난 유동과 좋은 일치를 보이고 있다.}

3.2.2 정 4각형 밀폐 공간내에서 자연 대류에 대한 계산 결과

1) 정상 상태 자연 대류에 대한 결과

정상 상태 자연 대류에서 De Vahl Davis²⁾는 $Ra=10^4, 10^5$ 및 10^6 에 대하여 각각 (81×81)의 균일 격자계를 적용하였으며 그보다

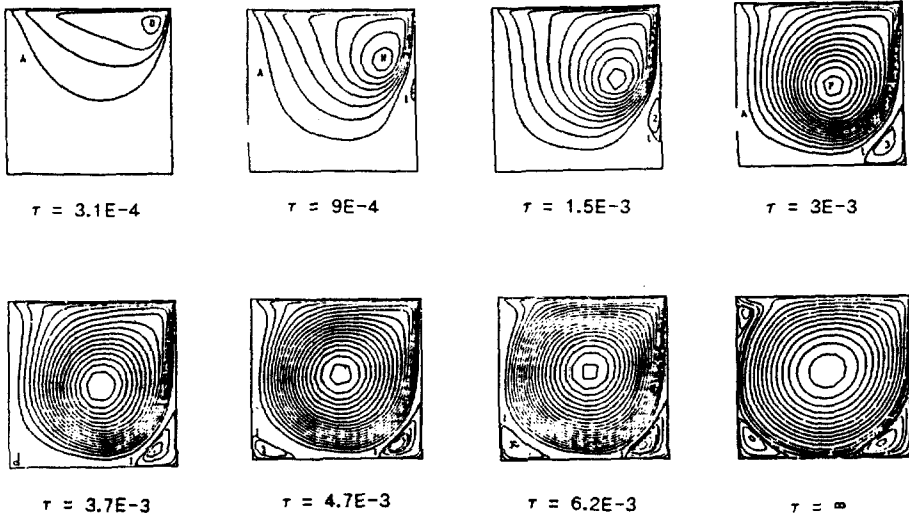


Fig.2 Time sequence of streamlines at $Re = 3,200$

더 성긴 격자인 (22×22) 의 비균일 격자계를 적용하여 그 정확성을 살펴보았다.

첫째로 $Ra = 10^4$ 일 때 U_{max} , V_{max} , 평균 Nusselt 수는 각각 0.36, 1.19, 0.67%의 오차를 나타내며 둘째로 $Ra = 10^5$ 일 때는 각각 0.23, 0.41, 0.199%의 오차를 나타낸다. 그리고 $Ra = 10^6$ 일 때는 2.785, 2.799, 3.44%의 오차를 나타낸다.

따라서 변형된 QUICK Scheme은 (22×22) 의 성긴 격자에서도 조밀한 격자로 계산한 Bench Mark 수치 해와 $Ra = 10^4$ 일 때와 10^6 일 경우에 2% 이내의 오차로 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

그러나 $Ra = 10^6$ 일 때는 유동 및 온도 분포가 점차적으로 복잡해 지면서 발생하는 작은 와류(eddy)들의 유동으로 인해 오차가 커짐을 알 수 있었다. 따라서 이 경우에는 보다 더 많은 격자계를 적용해야 할 것으로 사료된다. 그러나 전반적으로 (22×22) 의 성긴 격자계임에도 불구하고 많은 격자를 사용한 Bench Mark 수치 해와 비교적 잘 일치하여 이 변형된 QUICK Scheme의 계산이 정확하다는 것을 알 수 있었다.

2) 비 정상 상태 자연 대류에 대한 결과
비정상 상태 자연 대류에 대해 $Ra = 10^4$,

10^5 및 10^6 에 대해 계산하여 유선과 등온선을 그림에 나타내보았다.

a) $Pr = 0.71$, $Ra = 10^4$: Fig.3

유동 형태는 중앙에 하나의 주 와류만이 발생하여 완만하게 발달한다. 온도 분포는 전도의 영향을 많이 받으면서 완만하게 발달하는 양상을 나타낸다.

b) $Pr = 0.71$, $Ra = 10^5$: Fig.4

시간이 경과함에 따라 유동의 변화 방식은 처음에 두 개의 와류가 발생하여 발달하다가 중간에 병합되고 다시 두 개의 와류가 존재하는 양상을 보이며 시간이 지나면서 열 경계층이 발생한다.

c) $Pr = 0.71$, $Ra = 10^6$: Fig.5

시간이 경과함에 따라 밀폐 공간의 구석에 두 개의 와류가 발생되어 서로 독립적으로 커지면서 중앙에 또 다른 와류가 발생하나 시간이 지나감에 따라 이 와류는 밀폐 공간의 구석에서 발생된 와류에 흡수되며 점차 급격한 유동으로 발달하게 된다. 이 경우도 시간이 지나면서 열 경계층이 발생하며 온도 분포는 $Ra = 10^4$ 일 때 보다 급격하게 발달한다.

3.2.3 정 4각형 밀폐 공간내에서 혼합 대류에 대한 계산 결과
밀폐 공간내의 혼합 대류에 대해서는 자연

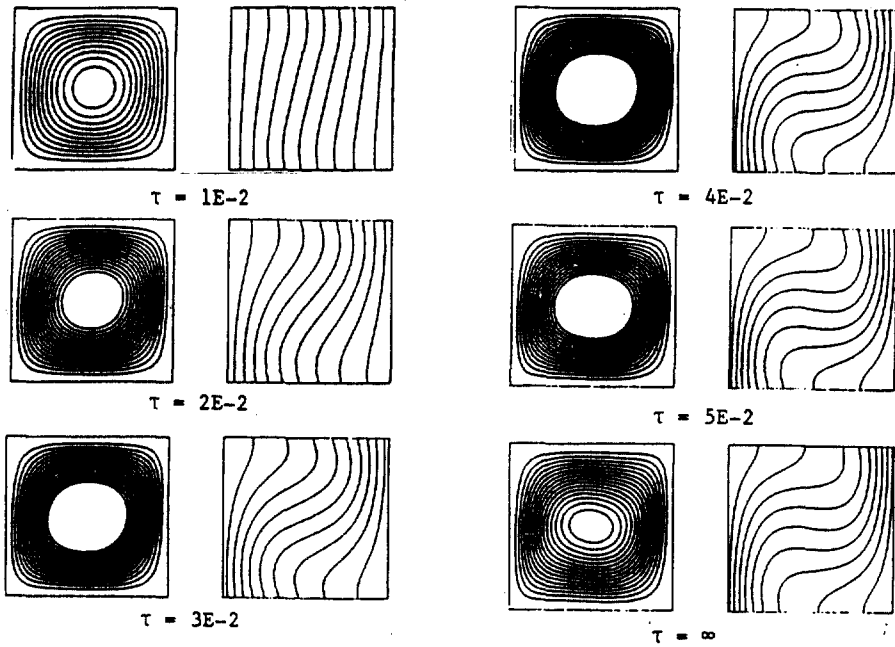


Fig. 3 Time sequence of streams and isotherm lines ($Pr=0.71$, $Ra=10^4$, natural convection)

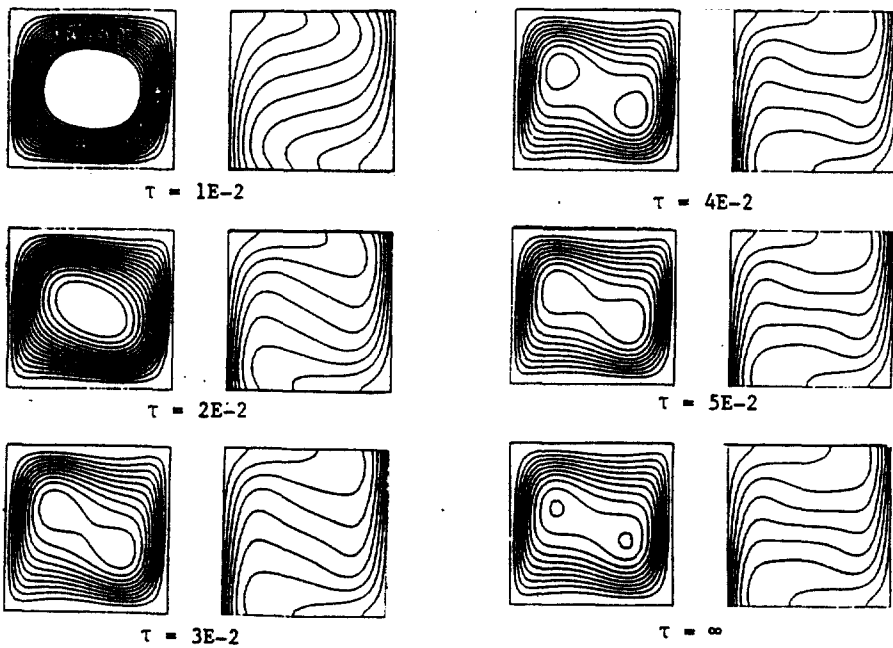


Fig. 4 Time sequence of streams and isotherm lines ($Pr=0.71$, $Ra=10^5$, natural convection)

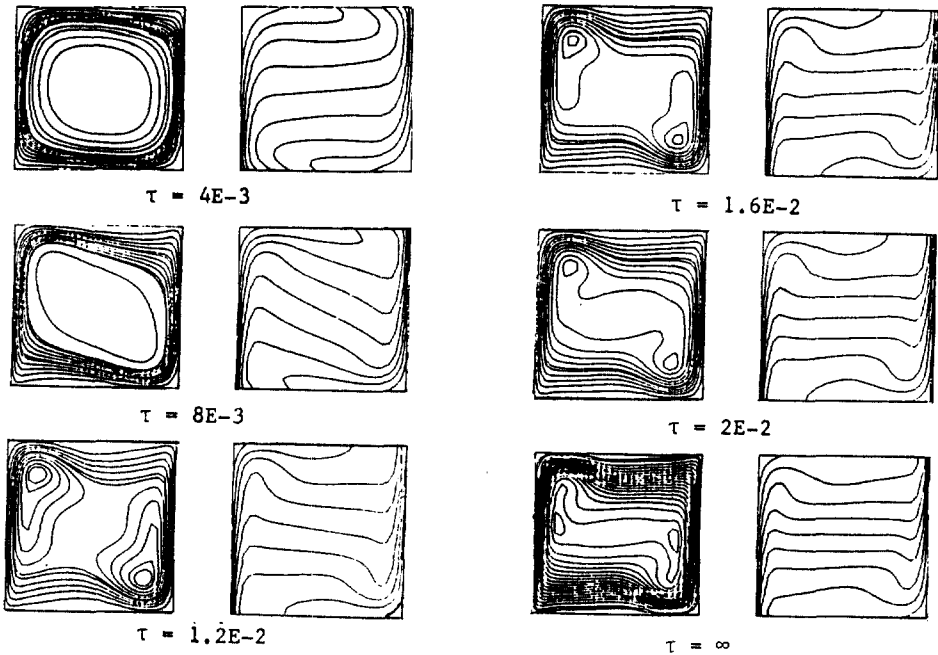


Fig.5 Time sequence of streams and isotherm lines ($Pr=0.71$, $Ra=10^6$, natural convection)

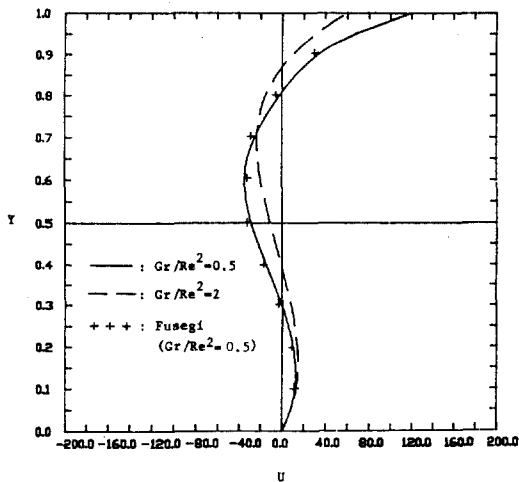


Fig.6 U velocity profiles at vertical midplane (mixed convection)

대류에 의한 유동 방향과 강제 대류에 의한 유동 방향이 같은 경우와 다른 경우의 두 가지 경우에 대해 계산하였다.

- 1) 경계조건 A) 자연 대류에 의한 유동이 강제 대류에 의한 유동에 조력하는 경우

계산 조건은 $Pr=0.72$, $Ra=10^4$ 일 때 $Gr/Re^2=0.5$ 인 경우와 $Gr/Re^2=2$ 인 경우에 대해 (32×32) 균일 격자체를 적용하여 계산하였다. 이 경우에 대해 Fig.6에서 $\omega-\varphi$ 식을 이용한 Fusegi와 Farouk¹¹⁾의 (81×81) 격자계 수치해석 결과와 비교한 결과 잘 일치하였다.

a) $Gr/Re^2=0.5$

Fig.7은 비정상 상태의 경우 시간 변화에 따른 유선과 등온선의 변화를 나타낸다. 시간이 경과함에 따라 경계 조건 A)의 영향으로 자연 대류에 의한 유동이 강제 대류에 의한 유동을 조력해주는 하나의 와류 형태가 발달하게 된다.

b) $Gr/Re^2=2$

Fig.8은 비정상 상태의 경우 시간 변화에 따른 유선과 등온선의 변화를 나타낸다. 이번 경우에도 시간이 경과함에 따라 경계조건 A)의 영향으로 자연 대류에 의한 유동이 강제 대류에 의한 유동을 조력해주는 하나의 와류 형태가 발달하게 된다.

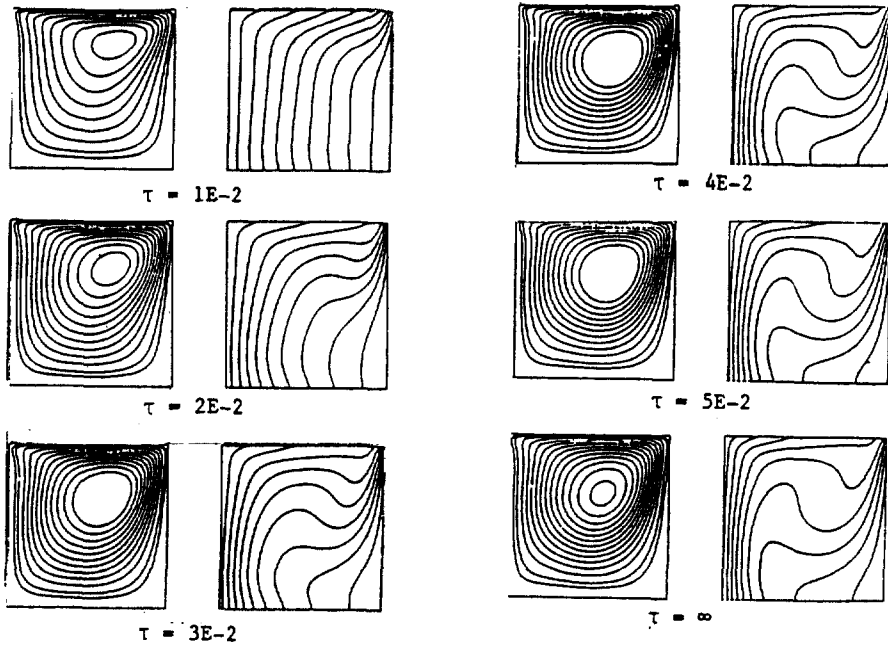


Fig.7 Time sequence of streamlines and isotherm lines ($Pr=0.72$, $Gr/Re^2=0.5$, mixed convection A)

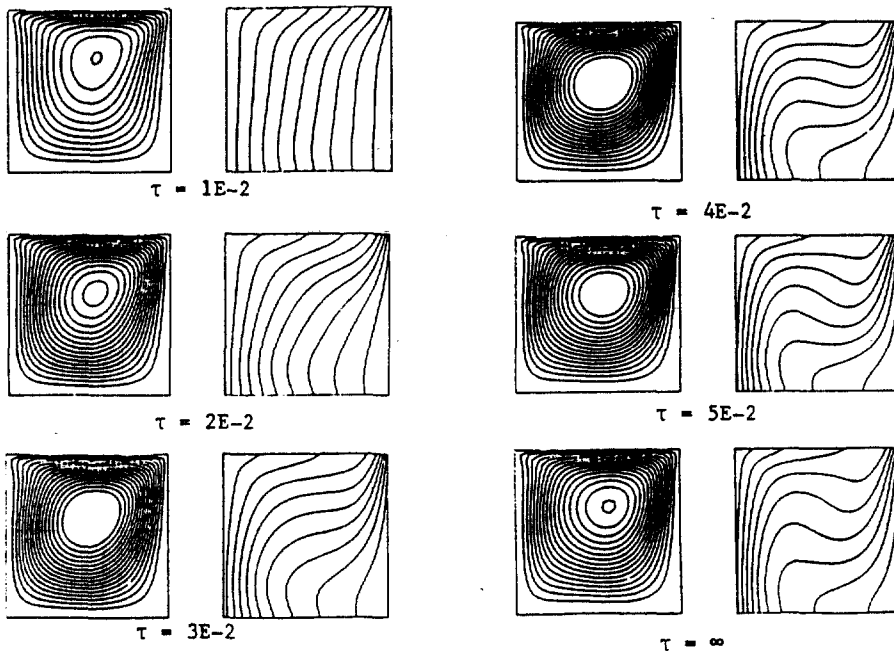


Fig.8 Time sequence of streamlines and isotherm lines ($Pr=0.72$, $Gr/Re^2=2$, mixed convection A)

$Gr/Re^2=2$ 일 때의 밀폐 공간 윗면의 속도가 $Gr/Re^2=0.5$ 일 때의 밀폐 공간 윗면의 속도보다 더 작기 때문에 온도 분포는 $Gr/Re^2=2$ 일 때가 $Gr/Re^2=0.5$ 일 경우보다 더 완만하게 나타난다. 또한 대류가 조력하는 경우에 주 와류의 중심이 자연 대류를 고려하지 않았을 때보다 밀폐 공간의 위쪽에 위치한다.

2) 경계조건 B) 자연 대류에 의한 유동이 강제 대류에 의한 유동에 대립하는 경우

계산 조건은 $Pr=0.72$, $Ra=10^4$ 일때 강제 대류가 자연 대류보다 지배적인 $Gr/Re^2=0.5$ 일때와 자연 대류가 강제 대류보다 지배적인 $Gr/Re^2=2$ 의 경우에 대해 (32×32) 균일 격자계를 적용하여 계산하였다.

a) $Gr/Re^2=0.5$

Fig. 9는 비정상 상태 경우의 시간 변화에 따른 유선과 등온선의 변화를 나타낸다. 자연 대류에 의한 유동이 강제 대류에 의한 유동에

대립하는 경계 조건에 대해 시간 경과에 따른 유동 형태는 자연 대류에 의한 와류와 강제 대류에 의한 와류가 생기게 되는데 $Gr/Re^2=0.5$ 이므로 강제 대류가 더 지배적이어서 강제 대류에 의한 와류가 더 강하게 나타난다. 또한 온도 분포에 있어서도 강제 대류에 의한 영향이 자연 대류에 의한 영향보다 크다는 것을 알 수 있다.

b) $Gr/Re^2=2$

Fig. 10은 비정상 상태의 경우 시간 변화에 따른 유선과 등온선의 변화를 나타낸다. 이번 경우는 자연 대류가 강제 대류보다 더 지배적인 경우로서 시간이 경과함에 따라 자연 대류에 의한 와류와 강제 대류에 의한 와류가 생기며 자연 대류에 의한 와류가 더 강하게 나타난다. 이 경우의 온도 분포는 자연 대류에 의한 영향이 강제 대류에 의한 영향보다 더 크다는 것을 알 수 있다.

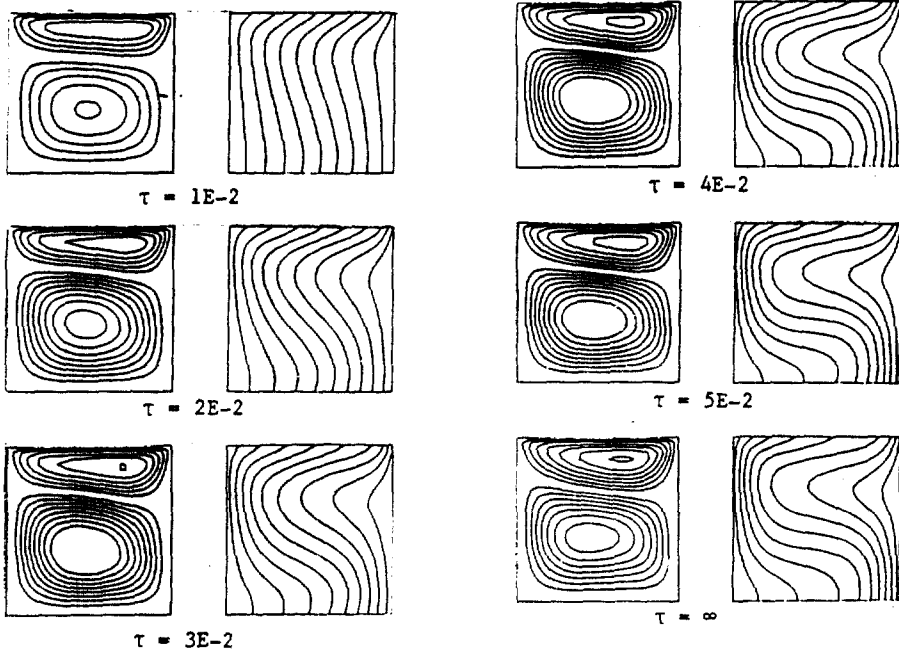


Fig. 9 Time sequence of streamlines and isotherm lines ($Pr=0.72$, $Gr/Re^2=0.5$, mixed convection B)

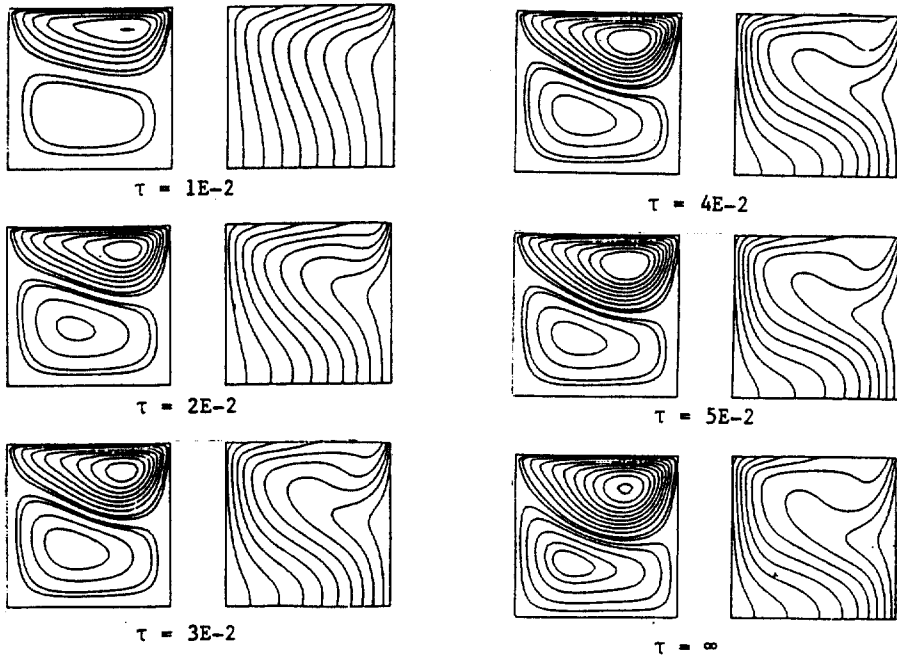


Fig. 10 Time sequence of streamlines and isotherm lines
($Pr=0.72$, $Gr/Re^2=0.5$, mixed convection B)

4. 결 론

본 연구에서는 유한 차분 방정식의 대류항의 계수가 항상 양이 되도록 변형시킨 QUICK Scheme을 사용하여 정 4각형 밀폐 공간 내에서의 초기 비정상 유체 유동 및 열전달 현상을 수치 해석하였다. 특히 계산의 정확도 및 수렴성을 높이기 위해 비정상 상태 계산에 적합한 PISO 알고리즘을 적용하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. $Re=3,200$ 일 때 초기 비정상 상태 및 정상 상태에서의 유체 유동을 수치 해석하였다. 또한 (52×52) 의 비균일 격자계를 사용한 정상 상태에서의 수치 해석 결과를 기존의 (129×129) 의 균일 격자계를 사용하여 얻어진 Ghia et al.¹⁰⁾의 정확한 결과와 비교하여 두 결과가 잘 일치함을 보임으로써 이 변형된 QUICK Scheme의 정확도를 증명하였다.

2. $Pr=0.71$ 이고 Rayleigh수가 각각 10^4 , 10^5 , 10^6 의 초기 비정상 자연 대류 현상에 대

해 수치 해석하였다. 또한 (22×22) 비균일 격자계에 변형된 QUICK Scheme을 사용한 정상 상태에서의 자연 대류 결과를 기존의 (81×81) 의 Bench Mark 해²⁾와 비교한 결과 3% 이내의 오차로 잘 일치하였다.

3. $Pr=0.72$ 이고 Rayleigh수가 10^4 인 혼합 대류에서 자연 대류가 강제 대류에 대립하는 경우와 조력하는 경우에 대해 수치 해석하였다. 대립하는 경우는 강제 대류에 의해 발생하는 와류 밀부분 자연 대류에 의한 두번째 와류가 발생한다. 이 와류의 크기는 Gr/Re^2 의 값에 따라, 그리고 Gr 수가 클수록 커진다. 그러나 자연 대류가 강제 대류를 조력하는 경우에는 하나의 주 와류로 발달한다. 이 경우에는 밀폐 공간 윗 면의 속도가 $Gr/Re^2=0.5$ 일 때가 2일 때 보다 더 크기 때문에 와류의 중심은 $Gr/Re^2=0.5$ 일 때가 2일 때 보다 약간 더 오른쪽에 위치한다. 또한 이 경우에는 자연 대류를 고려하지 않았을 때보다 주 와류의 중심이 더 위쪽에 위치한다.

후 기

이 연구는 한국 과학 재단의 1986년도 신진 연구 지원에 의하여 이루어졌으며 이에 사의를 표한다.

참 고 문 헌

1. De Vahl Davis, G., "Natural Convection in a Square Cavity: A Comparison Exercise", *Int. J. Numerical Methods in Fluids*, vol.3, pp.227-248, 1983.
2. De Vahl Davis, G., "Natural Convection of Air in a Square Cavity: A Bench Mark Solution", *Int. J. Numerical Methods in Fluids*, vol.3, pp.249-264, 1983.
3. 고상근, "정 4각형 밀폐 공간내의 비정상 자연대류에 관한 연구", 서울대학교 대학원 기계공학과 박사학위 논문.
4. Patterson, J. and Imberger, J., "Unsteady Natural Convection in a Rectangular Cavity", *J. Fluid Mechanics*, vol.100, pp.65-86, 1980.
5. Leonard, B.P., "A Stable and Accurate Convective Modelling Procedure Based on Quadratic Upstream Interpolation", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol.19, pp.59-98, 1979.
6. Huang, P.G., Launder, B.E., and Leschzier, M.A., "Discretization of Nonlinear Convection Processes: A Broad-Range Comparison of Four Schemes", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol.48, pp.1-24, 1985.
7. Han, T. and Humphrey, J.A.C., "A Comparison of Hybrid and Quadratic - Upstream Differencing in High Reynolds Number Elliptic Flows", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol.29, pp.81-95, 1981.
8. Pollard, A., "The Calculation of Some Laminar Flows Using Various Discretization Schemes", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 35, pp.293-313, 1982.
9. Freitas, C.J., Street, R.L., Findikakis, A.N. and Koseff, J.R., "Numerical Simulation of Three - Dimensional Flow in a Cavity", *Int. J. Numerical Methods in Fluids*, vol.5, pp.561-575, 1985.
10. Ghia, U., Ghia, K.N. and Shin, C.T., "Solution of Incompressible Navier-Stokes Equations by Coupled Strongly-Implicit Multi-Grid Method", NASA-Ames Research Center, CA, Oct., 21-22.
11. Fusegi, T. and Farouk, B., "Predictions of Fluid Flow and Heat Transfer Problems by the Vorticity-Velocity Formulation of the Navier-Stokes Equations", *J. Computational Physics*, vol.65, pp.227-243, 1986.
12. Issa, R.I. "Solution of the Implicitly Discretised Fluid Flow Equations by Operator-Splitting", *J. Computational Physics*, vol.62, pp.40-65, 1985.
13. Issa, R.I. "The Computation of Compressible and Incompressible Recirculating Flows by a Non-Iterative Implicit Scheme", *J. Computational Physics*, vol.62, pp.66-82, 1986.
14. Jang, D.S., Jetli, R. and Acharya, S. "Comparison of The PISO, SIMPLER, and SIMPLEC Algorithms for the Treatment of the Steady Flow Problems", *Numerical Heat Transfer*, vol.10, pp.209-228, 1986.