

< 논문 >

# 비정렬격자계를 사용하는 3차원 유동해석코드 개발 (II) - 코드성능평가 -

명현국<sup>†</sup> · 김종태\* · 김정은\*\*  
(2005년 5월 18일 접수, 2005년 8월 22일 심사완료)

## Development of 3-D Flow Analysis Code Using Unstructured Grid System (II) - Code's Performance Evaluation -

Hyon Kook Myong, Jongtae Kim and Jong Eun Kim

**Key Words:** Flow Analysis Code(유동해석코드), Benchmark Solution(검증용 해), Performance Evaluation(성능평가), Unstructured Grid System(비정렬격자계), Cell-Centered Method(셀 중심법), Finite Volume Method(유한체적방법)

### Abstract

A conservative finite-volume numerical method using unstructured meshes, which is developed by the authors, is evaluated for its application to several 2-D benchmark problems using a variety of quadrilateral, triangular and hybrid meshes. The present pressure-based numerical method for unstructured mesh clearly demonstrates the same accuracy and robustness as that for typical structured mesh.

### 1. 서 론

지난 십수년에 걸쳐 비정렬격자(unstructured grid)를 사용하는 유한체적법(FVM)이 CFD(전산유체역학) 연구분야에서 주목을 받아왔다.<sup>(1-8)</sup> 이것은 그동안 CFD 분야에서 널리 사용되고 있던 치명적인 두 가지 단점, 즉 정렬격자(structured grid)계가 가지고 있는 복잡하고 실제적인 형상에 대한 격자생성의 어려움과 관심 있는 영역에 격자를 능동적으로 적응시키기 어려운 점을 비정렬격자계가 해결하였기 때문이다. 따라서 현재는 비정렬격자계만이 공학적으로 중요한 복잡한 3차원 형상을 정확하고 적절하게 기술할 수 있다고 일반적으로 인식되고 있다.

또한, 최근 비정렬격자계를 사용하는 유한체적

법 중에서 수치해를 정렬 경계적합 격자계와 같이 격자생성으로 만들어진 기본 셀(또는 제어체적)의 중심에 저장하는 셀 중심법(cell-centered method)이 나타나기 시작하였다.<sup>(1-5)</sup> 이 셀 중심법은 기하학적으로 매우 단순하고, 해석영역의 경계가 면으로 구성되므로 특이점이 존재하지 않으며, 임의의 셀에 대해 특별한 보간법을 사용하지 않고 보존법칙을 만족할 수 있는 장점을 가지고 있다.

최근 저자들은 기존의 연구<sup>(1-5)</sup>와 유사하게 비정렬격자계를 사용하고 압력수정방법에 기반을 두면서 불규칙적이고 여러 가지 형상을 가지는 격자에서도 2차 정확도를 가지면서도 용이하게 코드에 접목시켜 사용할 수 있는 새로운 확산플럭스 근사방법을 채택한 3차원 유동해석코드(PowerCFD 코드)를 개발하고, 여러 가지 유동형태에 대한 검증용 해(benchmark solution)와 이 코드의 수치해를 비교분석하고 코드의 적합성 및 정확도를 검토하였다. 전편<sup>(6)</sup>에서는 이 코드에 사용된 수치해석방법을 기존의 방법과 비교하며 특징을 중심으로 기술하였고, 본 논문에는 이 코드를 사용하여 복잡한 형상을 가지는 2차원 열 및 유체유동 문제에 대해 예측된 수치결과를 검증용

<sup>†</sup> 책임저자, 회원, 국민대학교 기계자동차공학부

E-mail : myong@kookmin.ac.kr

TEL : (02)910-4714 FAX : (02)910-4839

\* 한국원자력연구소

\*\*국민대학교 대학원 기계공학과

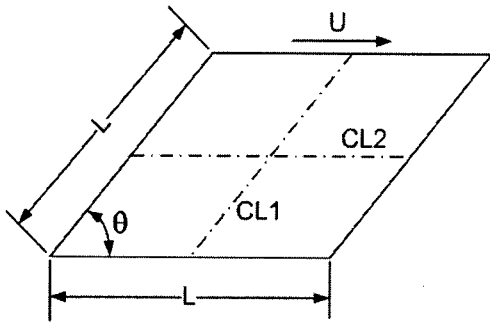


Fig. 1 Schematic diagram of skewed cavity

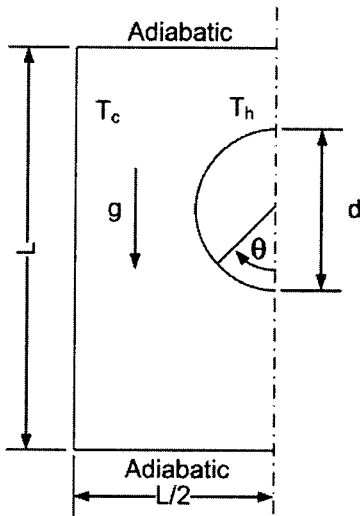


Fig. 2 Schematic diagram of natural convection in a cavity

해와 비교분석한 결과를 제시한다. 비교할 검증용 해로는 Demirdzic 등<sup>(9)</sup>이 선택한 Fig. 1과 같이 바닥벽면에 대해 기울어진 측벽을 가지는 이차원 캐비티 내의 판구동(lid-driven) 및 부력구동(buoyancy-driven) 층류유동과 Fig. 2에 나타난 것과 같은 이차원 사각형 닥트 내에 놓여있는 실린더 주위의 층류 자연대류 유동이다. Demirdzic 등<sup>(9)</sup>은 이들 유동을 비직교격자(nonorthogonal grid)를 사용하는 경우의 계산정확도를 평가하기 위한 검증용으로 선택하고, 이차원 정렬격자계를 사용하는 수치해석방법을 사용해서 해석하고 검증용 해를 제시하였다. 또한, 최근 이들 유동 일부에 대해 Mathur- Murthy<sup>(4)</sup>는 자신들이 개발한 비정렬격

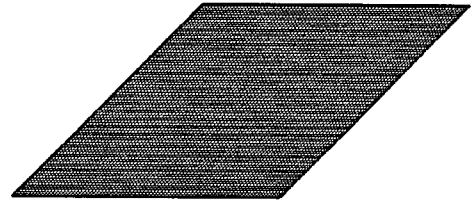


Fig. 3 Segments of grid used for flow in a skewed lid-driven cavity, (80 x 80 CV,  $\theta = 45^\circ$ )

자를 사용하는 수치해석방법으로 해석하고 결과를 비교하였다. 따라서 이들 유동은 비정렬격자계를 사용하는 수치해석방법을 평가하는데 적절하다고 사료된다.

## 2. 해석코드 PowerCFD

전편<sup>(8)</sup>에 기술한 바와 같이 저자들이 개발한 비정렬격자계를 사용하고 압력수정방법을 기반으로 한 3차원 유동해석코드인 PowerCFD 코드에 사용된 수치해석방법의 주된 특징을 간략히 기술하면 다음과 같다.

먼저 2차원에서는 삼각형 및 사각형 셀, 3차원에서는 사면체, 프리즘, 육면체 셀 등 격자생성 방법에 따라 여러 가지 모양의 셀이 사용될 수 있도록 하였다. 다음으로, 압력과 속도성분을 모두 셀의 중심에 저장하므로 격자자로 저장에 효율적인 셀 중심 집중저장방법을 채택하고, 일반성을 위해 셀에 특수한 형상 함수를 사용하는 것은 피하였다. 또한, 대류 및 확산항에 대한 이산화 조작성 가능한 한 잘 알려진 경계적합 정렬격자계의 형태로 공식화하였다. 특히, 본 코드에서는 불규칙적이고 여러 가지 형상을 가지는 격자에서도 2차 정확도를 가지면서도 용이하게 코드에 접목시켜 사용할 수 있는 새로운 확산플럭스 근사방법<sup>(10)</sup>을 채택하였다. 이와 함께, 운동량방정식의 압력항 처리를 위하여 연속방정식의 속도와 연관시킨 SIMPLE 계통 알고리즘을 비정렬격자계에 적용시켜 압력수정방정식을 얻는 방법을 확립시켰다. 마지막으로 선형화된 방정식의 해를 얻기 위해 CG(Conjugate Gradient) 방법 계통의 대수 솔버를 사용하였다.

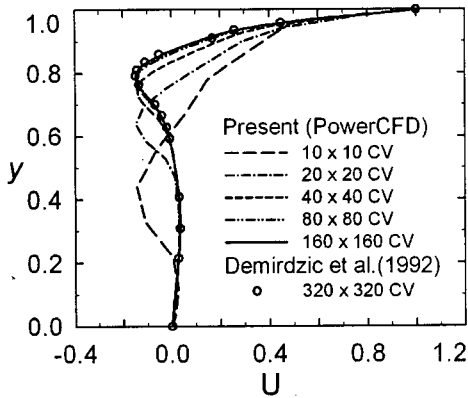


Fig. 4 Variation of the centerline U-velocity profiles on CL1 in a skewed lid-driven cavity flow at  $Re = 1000$  as a function of grid fineness (quadrilateral mesh,  $\Theta = 45^\circ$ )

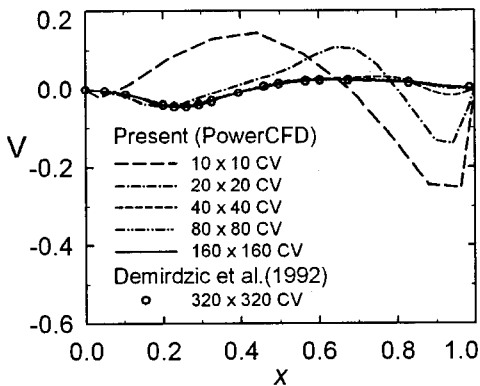


Fig. 5 Variation of the centerline V-velocity profiles on CL2 in a skewed lid-driven cavity flow at  $Re = 1000$  as a function of grid fineness (quadrilateral mesh,  $\Theta = 45^\circ$ )

### 3. 검증용 해와의 비교

#### 3.1 기울어진 측벽을 가지는 캐비티 내의 판구동(lid-driven) 유동

이차원 비압축성 캐비티 유동은 기하학적 형상이 단순한 반면 일정속도로 움직이는 위쪽 벽면에 의해 1차의 큰 와동이 공동의 중심에 형성되고 모퉁이에서 2차의 와동이 생성되는 복잡한 유동구조를 만들기 때문에 많은 연구자들에 의해 수치기법이나 알고리즘의 검증을 위해 해석되어 왔다. 특히 Demirdzic 등<sup>(9)</sup>은 비직교격자를 사용

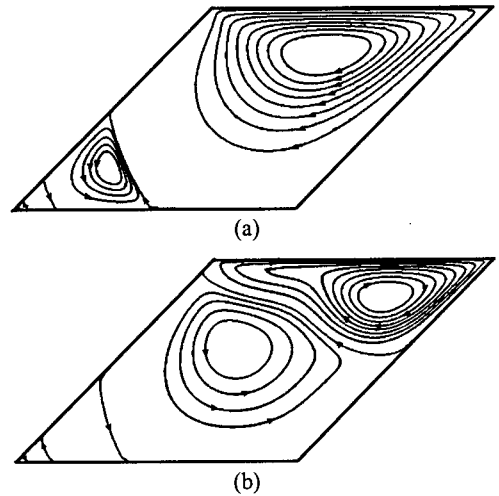


Fig. 6 Predicted streamlines for flow in a skewed lid-driven cavity, (160 x 160 CV, quadrilateral mesh,  $\Theta = 45^\circ$ ): (a)  $Re = 100$  ; (b)  $Re = 1000$

하는 경우의 계산정확도를 평가하기 위하여 Figs. 1 및 3과 같이 바닥면에 대해 45°기울어진 측벽을 가지는 이차원 캐비티 내의 판구동 층류유동을 해석하고 검증용 해를 제시하였다.

Figs. 4 및 5는  $Re=1000$ 에서 Fig. 1에 나타난 것과 같이 캐비티의 중심선(CL1 및 CL2)을 따라서 예측된 U 및 V 속도분포를 격자계의 함수로 각각 나타낸 결과로, 이 결과로부터 해의 격자수렴성을 파악할 수 있다. 참고로 격자계를 비교를 위해 Demirdzic 등<sup>(9)</sup>과 똑같은 사각형 격자계를 채택하였으며, 해의 격자 의존성을 알아보기 위하여 10 x 10, 20 x 20, 40 x 40, 80 x 80, 160 x 160의 셀들을 사용하여 계산하였다 (Fig. 3 참조). 결과를 보면 비정렬격자계를 사용하는 본 코드의 예측결과는 격자계의 변화에 따른 양상을 포함해 정렬격자계를 사용하여 계산한 Demirdzic 등<sup>(9)</sup>의 검증용 해와 매우 잘 일치하고 있다.

Fig. 6은  $Re=100$  및 1000에서의 예측된 유선분포를 나타내고 있다. 그림으로부터  $Re$ 에 따라 유선분포가 현저하게 차이가 나타남을 알 수 있다. 즉,  $Re=100$ 에서는 주와동이 거의 캐비티 전체를 채우고, 이차 및 3차 와동이 코너 안쪽 깊은 곳에 생기고 있으며, 이차와동의 강도는 주와동의 1/1000 정도로 매우 작다. 반면  $Re=1000$ 에서

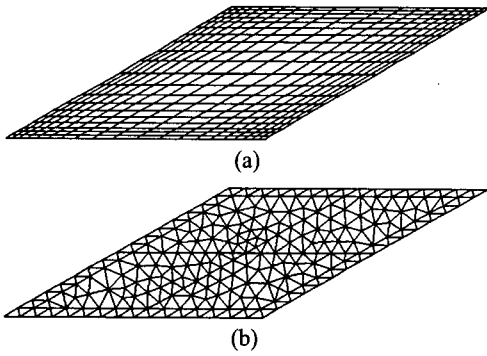


Fig. 7 Segments of grid used for flow in a skewed lid-driven cavity ( $\Theta = 30^\circ$ ). (a) quadrilateral mesh, (b) triangular mesh

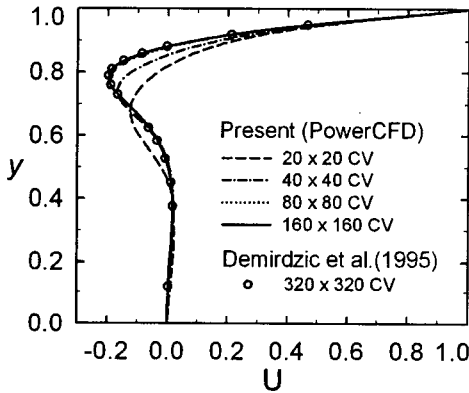


Fig. 8 Variation of the centerline U-velocity profiles on CL1 in a skewed lid-driven cavity flow at  $Re = 1000$  as a function of grid fineness (quadrilateral mesh,  $\Theta = 30^\circ$ )

는 주와동이 캐비티의 1/3 정도만을 채우고, 코너 쪽으로 이차, 3차, 4차 와동이 계속 생기고 있으나, 이차와동의 강도는 주와동 세기의 약 1/5 정도로 상대적으로 크며, 나머지 3차 및 4차는 1/1000 정도로 매우 작다. 이러한 결과는 정성적 및 정량적으로 검증용 해<sup>(9)</sup>와도 매우 잘 일치하고 있다.

다음은 격자의 비직교성이 더욱 큰 경우에 본 연구에서 사용된 코드의 정확성과 격자계 형상이 계산에 미치는 영향을 파악하기 위해 Fig. 7과 같이 바닥 벽면과 30°기울어진 수직 벽을 가지는 이차원 캐비티 내의 판구동 층류유동을 비정렬 사각형 및 삼각형 격자계를 사용하여 계산하고,

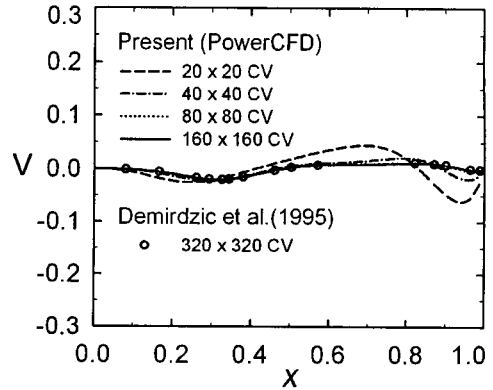


Fig. 9 Variation of the centerline V-velocity profiles on CL2 in a skewed lid-driven cavity flow at  $Re = 1000$  as a function of grid fineness (quadrilateral mesh,  $\Theta = 30^\circ$ )

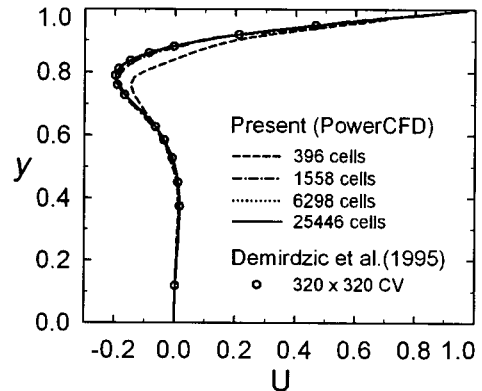


Fig. 10 Variation of the centerline U-velocity profiles on CL1 in a skewed lid-driven cavity flow at  $Re = 1000$  as a function of grid fineness (triangular mesh,  $\Theta = 30^\circ$ )

각각의 격자계에 대해서 해의 수렴성에 대한 격자 비의존성을 알아보고, 두 격자계에 대해 수치 계산의 결과를 검증용 해와 비교 분석하였다. Figs. 7(a)과 7(b)은 각각 본 연구에서 사용된 대표적인 사각형 및 삼각형 격자계로, Fig. 7(a)은 가장 성긴 형태의 격자인 20 x 20 CV인 경우를 나타내고, Fig. 7(b)은 사각형 격자와 비슷한 격자수인 396 CV를 가지는 경우를 나타낸다.

Figs. 8 및 9는 Fig. 7(a)과 같이 비정렬 사각형 격자계를 사용하였을 때의  $Re=1000$ 에서 캐비티의 중심선을 따라서 예측된  $U$  및  $V$  속도분포를

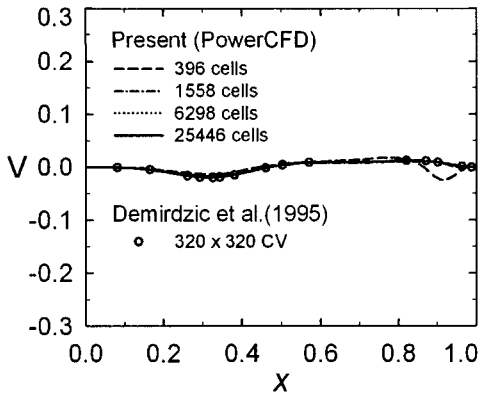


Fig. 11 Variation of the centerline V-velocity profiles on CL2 in a skewed lid-driven cavity flow at  $Re = 1000$  as a function of grid fineness (triangular mesh,  $\Theta = 30^\circ$ )

격자계의 함수로 각각 나타낸 결과로, 이 결과로부터 해의 수렴성을 파악할 수 있다. 참고로 격자계는 Demirdzic 등<sup>(9)</sup>과 똑같은 격자계 형태를 채택하였다. 결과를 보면 본 코드의 예측결과는 격자계의 변화에 따른 양상을 포함해 Demirdzic 등<sup>(9)</sup>의 검증용 해와 매우 잘 일치하고 있다. 그리고 격자 비의존성을 가지는 해는  $80 \times 80$  CV 보다 더 조밀한 격자를 이용하였을 때임을 기존의 검증용 해와 본 연구를 통하여 알 수 있다.

Figs. 10과 11은 Fig. 7(b)과 같이 삼각형 격자계를 사용하였을 때의  $Re=1000$ 에서 캐비티의 중심선을 따라서 예측된 중심선에서의 U 및 V를 각각 나타내고 있다. 참고로 격자 형태와의 정확한 상관관계를 비교하기 위하여 삼각형 격자는 사각형 격자계일 때와 마찬가지로 396 CV, 1558 CV, 6298 CV과 25446 CV 등의 비슷한 격자수를 가지는 격자 형태를 사용하였다. 이 결과로부터 해의 수렴성을 확인할 수 있으며, 또한 6298개 이상의 삼각형 격자를 사용하였을 때 비정렬 사각형 격자계와 마찬가지로 격자에 의존하지 않는 수렴된 해를 가짐을 확인할 수 있다. 이는 사각형 격자와 마찬가지로  $80 \times 80$  CV에 해당되는 격자수이다. 이상의 결과로부터 본 연구에서 사용되는 새롭게 개발된 코드의 격자 형태에 대한 비의존성 및 정확도를 확인할 수 있다.

3.2 기울어진 측벽을 가지는 캐비티 내의 부력구동(Buoyancy-Driven) 유동  
이차원 정사각형 캐비티 내에서 두 수직 벽의

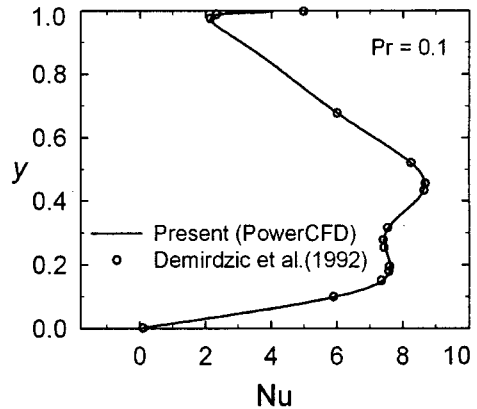


Fig. 12 Local Nusselt number on the cold wall at  $Pr = 0.1$  and  $Ra = 10^6$  for flow in a buoyancy-driven cavity, (224 x 192 CV)

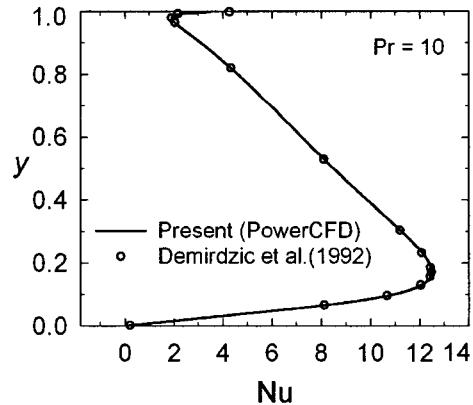


Fig. 13 Local Nusselt number on the cold wall for flow in a buoyancy-driven cavity at  $Pr = 10$  and  $Ra = 10^6$ (224 x 192 CV)

온도 차이에 의한 자연대류는 중요한 검증용 문제로 자주 사용되고 있다. 일례로 Davis<sup>(11)</sup>는 와도-유량함수법을 이용하여 계산하였으며, Hortmann 등<sup>(12)</sup>은 유한체적 SIMPLE 알고리즘을 사용하여 격자수에 무관한 해를 얻었다. 또한 Demirdzic 등<sup>(9)</sup>은 비직교격자를 사용하는 경우 캐비티 내 부력으로 구동되는 열/유체 유동 계산의 정확도를 평가하기 위하여 Fig. 1과 같이 바닥 벽면에 대해 45°기울어진 측벽을 가지는 이차원 캐비티 내의 자연대류 층류유동을 해석하였다. 지면관계상 여기서는  $Ra=10^5$ 에서 Prandtl 수에 따른 유체유동과 열전달 특성을 비교해 본다.

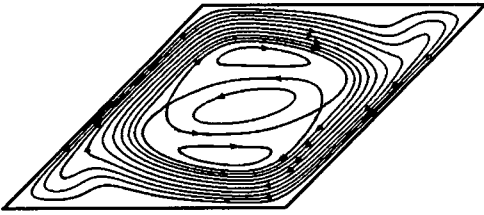


Fig. 14 Predicted streamlines for flow in a buoyancy-driven cavity at  $Pr = 0.1$  and  $Ra = 10^6(224 \times 192 CV)$

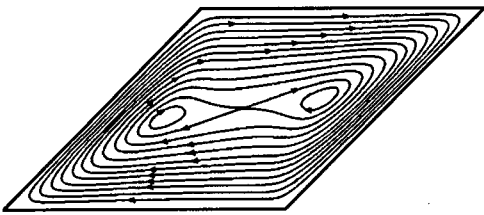


Fig. 15 Predicted streamlines for flow in a buoyancy-driven cavity at  $Pr = 10$  and  $Ra = 10^6(224 \times 192 CV)$

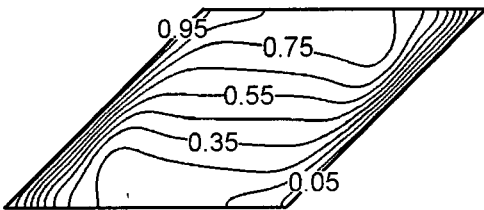


Fig. 16 Predicted isotherms for flow in a buoyancy-driven cavity at  $Pr = 0.1$  and  $Ra = 10^6(224 \times 192 CV)$

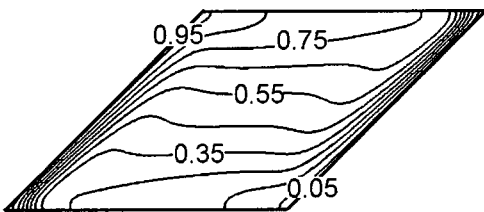


Fig. 17 Predicted isotherms or flow in a buoyancy-driven cavity at  $Pr = 10$  and  $Ra = 10^6(224 \times 192 CV)$

Figs. 12 및 13은 각각  $Pr=0.1$  및 10인 경우 찬

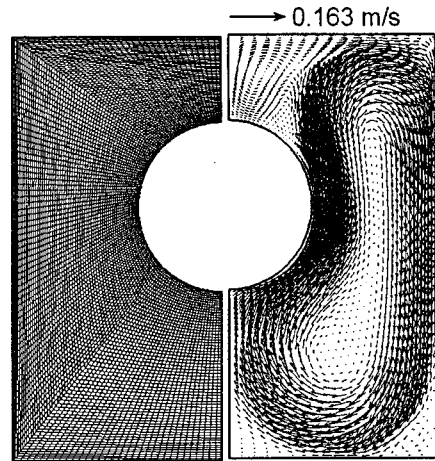


Fig. 18 Left: computational mesh used for natural convection around cylinder in a square duct, right: velocity vector plots at  $Pr = 0.1, Ra = 10^6(64 \times 32 CV)$

벽면(cold wall)에서의 국소 Nusselt 수를 비교한 것이다. 여기서 국소 Nusselt 수는 단위면적당 국소 열플럭스를 캐비티의 전도 열플럭스로 무차원화시킨 값이다. 비정렬격자계를 사용하는 본 코드의 결과는  $Pr$ 수에 관계없이 정렬격자계를 사용하여 계산한 검증용 해<sup>(9)</sup>와 매우 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

Figs. 14 및 15는 각각  $Pr=0.1$  및 10인 경우 예측된 유동분포를, Figs. 16 및 17은 예측된 온도분포를 각각 나타내고 있다. 결과로부터  $Pr$ 수가 유동장 및 온도장에 크게 영향을 미치고 있음을 명확하게 알 수 있다. 즉,  $Pr=10$ 인 경우 유동은 벽면을 따라 흘러 한 개의 롤(roll)을 형성하고, 한 개의 자유 정체점이 중앙에 형성되는데 반해,  $Pr=0.1$ 인 경우는 재순환영역에서의 주된 흐름이 수평벽면으로부터 박리되려는 경향과 함께 천천히 움직이는 유체의 넓은 영역이 중앙에 시계반대방향으로 흐르는 와동과 함께 두 개의 자유 정체점을 포함하면서 캐비티의 중심부에 형성되고 있다. 온도장 분포를 보면 온도구배가 높은 벽면 근처에서 급격하고, 수평 등온과 함께 크게 안정된 성층 중앙 영역이 대류의 영향으로 두  $Pr$ 수에서 나타나고 있음을 알 수 있다. 이 속도 및 온도에 대한 예측결과는 그림 결과로 제시된 Demirdzic 등<sup>(9)</sup>의 검증용 해와 정성적으로도

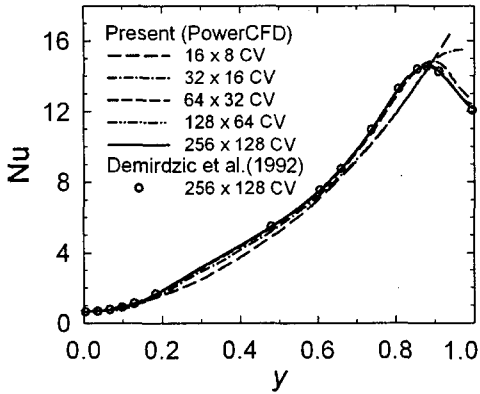


Fig. 19 Comparison of Nusselt number distributions along the vertical wall at  $Pr = 0.1, Ra = 10^6$

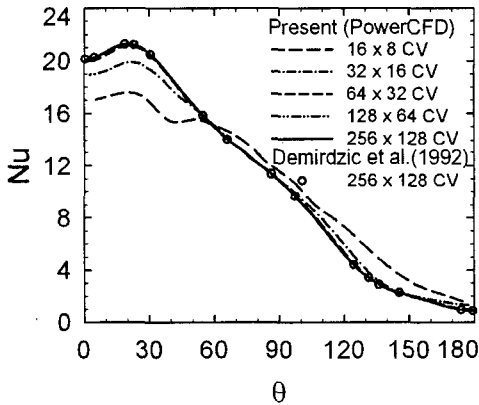


Fig. 20 Comparison of Nusselt number distributions along the surface of circular cylinder at  $Pr = 0.1, Ra = 10^6$

정량적으로도 매우 잘 일치하고 있다.

### 3.3 사각형 덕트 내에 놓여 있는 실린더 주위의 자연대류

Demirdzic 등<sup>(9)</sup>은 앞에서 기술한 이차원 기울어진 측벽을 가지는 캐비티 내 유동보다 더 복잡하고, 비균일하며 비직교격자를 사용하는 경우의 유체유동과 열전달 계산의 정확도를 평가하기 위하여 Fig. 2에 나타낸 것과 같은 2차원 사각형 덕트 내에 놓인 실린더 주위의 자연대류 열전달을 해석하였다. 사각형 용기의 좌측(수직)벽은 온도  $T_c=0$ , 실린더 표면은  $T_h=1$ 로 등온조건을 주고, 상부와 하부의 수평 벽은 각각 단열조건을 사용

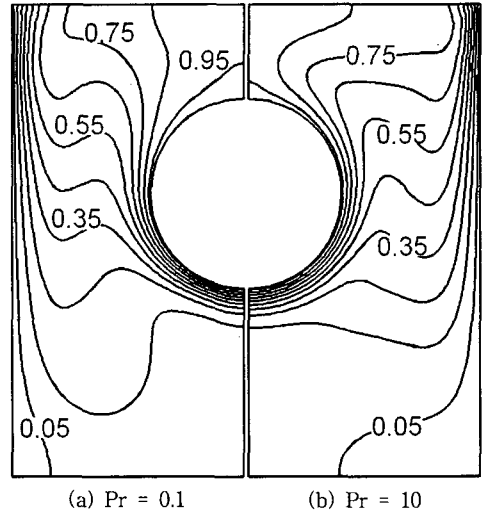


Fig. 21 Predicted isotherms for natural convection around cylinder in a square duct. (256 x 128CV) : (a)  $Pr = 0.1$ , (b)  $Pr = 10$  at  $Ra = 10^6$

하였다. 이때, 두 열원 사이의 온도차이로 인해 부력이 발생하게 되며 이로 인해 내부에는 차연 대류 유동이 발생하게 된다. 이 문제는 기하학적 및 운동학적 좌우대칭을 이루며, 본 연구에서는  $Ra=10^6$ 에서 Prandtl수에 따른 유체유동과 열전달 특성을 비교해 보았다.

Fig. 18의 좌측은 계산에 사용된 격자계의 형태를 나타내고, 우측은  $Pr=0.1$ 인 경우의 자연대류 유동에 대한 예측된 속도벡터를 보여준다. 이 경우 유체는 찬 벽면을 떠나 아래 단열벽까지 도달한 후 뜨거운 실린더 벽 쪽으로 흐르며, 뜨거운 유체는 실린더 벽을 따라 상승하다 위쪽 부분에서 박리되며, 실린더 벽, 대칭면 및 위 단열벽 사이에서 약한 와동이 형성됨을 알 수 있다. 이러한 속도양상은 Demirdzic 등<sup>(9)</sup>의 검증용 해 결과와도 매우 잘 일치하고 있다.

Figs. 19 및 20은 각각  $Pr=0.1$  및  $10$ 인 경우에 대해서 해의 수렴성에 대한 격자 비의존성을 알아보고, 또한 실린더 벽면(hot wall)에서의 국소 Nusselt 수를 검증용 해와 비교한 것이다. 여기서 국소 Nusselt 수는 단위면적당 국소 열플럭스를 캐비티의 전도 열플럭스로 무차원화시킨 값이다. 비정렬격자계를 사용하는 본 코드의 결과는 격자수 64 x 32

CV 이상에서는 Pr 수에 관계없이 정렬격자계를 사용하여 계산한 Demirdzic 등<sup>(9)</sup>의 검증용 해와 매우 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있다. 참고로 검증용 해와 동등한 수치결과를 얻기 위해 Mathur-Murthy<sup>(4)</sup>는 16,113 CV를 사용하여 해석하였다.

Fig. 21은 두 가지 경우의 Pr에서 예측된 등온분포를 보여주고 있다. 두 경우 모두 대류의 영향을 받아 Pr=0.1인 경우는 뜨거운 유체가 실린더 벽을 따라 상승하다 위쪽부분에서 박리되는 양상(Fig. 18 참조)을 보이는데 비해, Pr=10인 경우는 찬 벽면을 떠난 유체가 아래 단열벽까지 도달하지 않고 뜨거운 실린더 벽 쪽으로 흐르며, 뜨거운 유체는 실린더 벽을 따라 대칭면까지 상승하는 양상을 나타내고 있으며, 이 온도분포에 대한 예측결과는 그림결과로 제시된 Demirdzic 등<sup>(9)</sup>의 검증용 해와도 정성적 및 정량적으로 매우 잘 일치하고 있다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 최근 저자들이 개발한 비정렬격자계를 사용하고 압력수정방법에 기반을 둔 3차원 유동해석코드(PowerCFD)<sup>(8)</sup>를 사용하여 복잡한 형상을 가지는 2차원 열/유체 유동에 대해 예측된 수치결과를 정렬격자계를 사용하는 수치해석 방법으로 해석한 검증용 해와 비교분석한 결과를 제시하였다. 비교한 검증용 해는 Demirdzic 등<sup>(9)</sup>이 비직교격자를 사용하는 경우의 계산정확도를 평가하기 위하여 선택한 유동으로, 바닥벽면에 대해 기울어진 축(수직) 벽을 가지는 이차원 캐비티 내의 판구동 및 부력구동 층류유동과 이차원 사각형 덕트 내에 놓여있는 실린더 주위의 층류자연대류 유동이다. 연구결과,

(1) 본 해석코드 및 본 코드에서 채용한 수치해석방법은 높은 비직교성을 포함해, 복잡한 형상을 가지는 열 및 유체 유동문제를 해석하는데 적절함이 확인되었다.

(2) 본 해석코드의 정확도는 고려한 4가지 검증용 문제 모두에 대해 정렬격자계를 사용한 검증용 해와 정량적 및 정성적으로 동등한 정도의 예측성능을 나타내고 있음이 확인되었다.

(3) 본 해석코드는 격자의 형상에 의존하지 않는 해석결과를 보여주고 있음이 확인되었다.

#### 참고문헌

(1) Demirdzic, I. and Muzafertija, S., 1995, "Numerical

Method for Coupled Fluid Flow, Heat Transfer and Stress Analysis Using Unstructured Moving Meshes with Cells of Arbitrary Topology," *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, Vol. 125, pp. 235~255.

(2) Jiang, Y. and Przekwas, A.J., 1994, "Implicit, Pressure-Based Incompressible Navier-Stokes Equations Solver for Unstructured Meshes," AIAA-94-0305.

(3) Davison, L., 1996, "A Pressure Correction Method for Unstructured Meshes with Arbitrary Control Volumes," *Int. J. Numer. Methods Fluids*, Vol. 22, pp. 265~281.

(4) Mathur, S.R. and Murthy, J.Y., 1997, "A Pressure-Based Method for Unstructured Meshes," *Numerical Heat Transfer, Part. B*, Vol. 31, pp. 195~215.

(5) Ferziger, J. H. and Peric, M., 1996, *Computational Methods for Fluid Dynamics*, Springer.

(6) Zwart, P.J., Raithby, G.D. and Raw, M.J., 1999, "The Integrated Space-Time Finite Volume Method and its Application to Moving Boundary Problems," *J. Comp. Physics*, Vol. 154, pp. 497~519.

(7) Lien, F.S., 2000, "A Pressure-based Unstructured Grid Method for All-speed Flows," *Int. J. Numer. Meth. Fluids*, Vol. 33, pp. 355~374.

(8) Myong, H. K. and Kim, J., 2005, "Development of 3-D Flow Analysis Code Using Unstructured Grid System (I)," *Trans. of the KSME(B)*, Vol. 29, No. 9, pp. 1049~1056.

(9) Demirdzic, I., Lilek, Z. and Peric, M., 1992, "Fluid Flow and Heat Transfer Test Problems for Non-Orthogonal Grids: Bench-Mark Solutions," *Int. J. Numer. Methods Fluids*, Vol. 15, pp. 329~354.

(10) Myong, H. K., 2005, "A New Numerical Approximation of Diffusion Flux in Unstructured Cell-Centered Methods," *Trans. of the KSME(B)*, submitted.

(11) de Vahl Davis, G., 1983, "Natural Convection of Air in a Square Cavity : A Bench Mark Numerical Solution," *Int. J. Numer. Methods Fluids*, Vol. 3, pp. 249~264.

(12) Hortmann, M., Peric, M. and Scheuerer, G., 1990, "Finite Volume Multigrid Prediction of Laminar Natural Convection: Benchmark Solutions," *Int. J. Numer. Methods Fluids*, Vol. 11, pp. 189~207.