

비정렬 셀 중심 방법에 의한 정사각형 단면을 갖는 90° 곡관 층류유동의 수치해석

명 현 국¹, 김 종 은²

NUMERICAL SIMULATION OF INCOMPRESSIBLE LAMINAR ENTRY FLOWS IN A SQUARE DUCT OF 90° BEND BY UNSTRUCTURED CELL-CENTERED METHOD

H. K. Myong and J. E. Kim

Three-dimensional steady incompressible laminar entry flows in a square duct of 90° bend are numerically simulated by a new solution code(PowerCFD) using unstructured cell-centered method. Solutions are obtained with three unstructured grid types of hexahedron, prism and hybrid at a Reynolds number, based on the hydraulic diameter and bulk velocity, of 790. Interesting features of the flow are presented in detail. Detailed comparisons between the computed solutions and the available experimental data are given mainly for the velocity distributions at cross-sections in a 90° bend of a square duct with fully-developed entry flows. It is found that the code is capable of producing the nature of laminar flow in curved square duct with no grid type dependency.

Key Words: 수치해석(Numerical Simulation), 비정렬 셀 중심 방법(Unstructured Cell-Centered Method), 입구유동(Entry Flow), 정사각형 단면을 가지는 곡관(Curved Square Duct), 전산유체역학(CFD), 층류 유동(Laminar Flow)

1. 서 론

유동방향으로 곡률을 가지는 곡관(다트)내에서의 유동은 블레이드 통로, 원심압축기, 원심펌프, 터빈장치의 흡입구나 통풍관, 공장들의 파이프 시스템, 열교환기나 생체순환기의 냉각코일등과 같은 전형적인 기계공학응용 분야와 선박유체역학 분야에서 광범위하게 널리 활용되고 있다. 또한, 이와 같은 3차원 곡관내 유동은 굽을 면을 따라 흐르는 유동에 의해 생성되는 원심력의 존재와 반경방향 압력구배의 불균형으로 인하여, 주유동 방향 속도와 압력의 손실이 공간적으로 재분배되어 다트 내부면에는 나선형의 복잡한 대칭형 2차 유동이 발생되어진다[1]. 따라서 곡관 유동은 지난 수 십 년간 많은 연구와 관심의 대상이 되어 왔다[1-8].

특히, 정사각형 단면을 가지는 90° 다트 유동은 여러 가지 형태의 굽은 곡면을 가지는 다트 유동 중에서 3차원 굽

은 곡면을 가지는 곡관내에서 일어나는 복합유동의 현상을 이해하기 위한 가장 적절하고 단순한 유체역학장치로 인식된다. 따라서 공학적인 관점에서 정사각형 단면을 가지는 90° 다트 유동장 내에서 발생하는 유동의 형태를 정확하고 올바르게 이해하는 것은 매우 중요하다.

정사각형 단면을 가지는 90° 다트 유동 해석을 위한 현재까지의 연구를 살펴보면, Ward Smith[2]는 반경비가 각각 다른 90° 곡관에서 벽면 압력 및 출구에서의 총 압력을 측정하여 곡관 설계에서 기초가 되는 자료를 제시하였고, Humphrey 등[3]은 정사각 단면을 가지는 90° 곡관내의 유동현상을 실험 및 수치해석적으로 연구하였다. Taylor 등[4]은 강한 2차 유동이 발생하는 정사각 단면의 90° 곡관내의 층류 및 난류유동을 서로 비교 고찰하는 실험을 하였다. Yeo 등[5]은 정사각 단면의 90° 곡관내의 층류유동에 대하여 고차 상류차분도식과 QUICK도식을 이용하여 수치해석 한 결과를 Humphrey 등[3]의 실험결과와 비교하였으며, Sotiropoulos 등[6]은 위에서 언급한 두 가지 실험결과[3-4]를 유한해석법(FAM)과 유한차분법(FDM)을 각각 사용한 수치해석 결과와 비교 고찰하였다. 국내에서도 Shin 등[7]은 MAC 방법을 향상시킨

1 정회원, 국민대학교 기계자동차공학부

2 학생회원, 국민대학교 대학원 기계공학과

* Corresponding Author E-mail: myong@kookmin.ac.kr

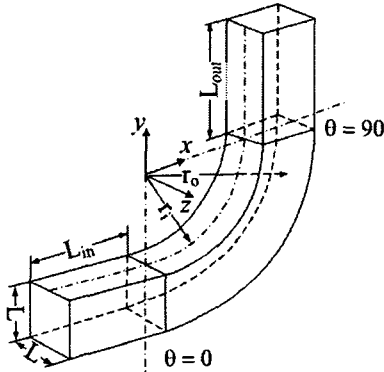


Fig. 1 Computational geometry.

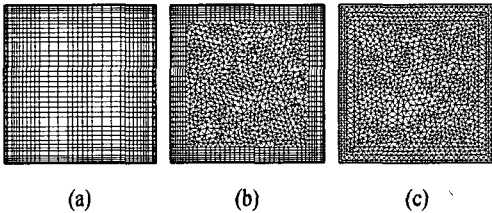


Fig. 2 Computational cross-section mesh for 90° curved duct, (a)hexahedron, (b)hybrid type, (c)prismatic mesh.

SMAC(Simplified MAC) 음해법으로 수치해석 한 결과를 실험 결과와 비교하고 3차원 유동해석 코드의 유효성을 검토하였으며, Kim 등[8]은 FA-FD 하이브리드 이산화 기법을 사용하여 수치계산하고 실험결과와 비교 검토하였다.

이상 살펴 본 수치해석적 연구들은 모두 그동안 CFD 분야에서 널리 사용되고 있던 정렬격자(structured grid)계를 사용하여 수치계산을 수행하였다. 그러나 정렬격자계는 복잡하고 실제적인 형상에 대해 격자생성이 어렵고 관심 있는 영역에 격자를 능동적으로 적합 시키기 어려운 두 가지 치명적인 단점을 가지고 있어, 현재는 이 문제를 해결한 비정렬격자계만이 공학적으로 중요한 복잡한 3차원 형상을 정확하게 기술할 수 있다고 일반적으로 인식되고 있다.

본 연구에서는 정사각형 단면을 가지는 90° 닥트 층류유동을 대상으로 하여, 비정렬 셀 중심방법(unstructured cell-centered method)을 채택하고 있는 3차원 유동해석코드(PowerCFD 코드)[9]를 사용하여 해석하고, 기존의 연구[3-8]에서와 같이 곡관부 입구에서 충분히 발달한 유동이 유입될 경우에 이것이 곡관부 내부의 유동에 미치는 영향을 각각 중요 지점에서 발생하는 유동장의 형태에 대하여 분석함으로써 급격히 굽은 닥트 내에서의 복합유동현상을 이해한다. 또한 본 연구에서 사용하는 3차원 유동해석코드가 매우 복잡한 유동장을 가지는 터빈장치의 통로유동문제를 풀기 위한 효율적인

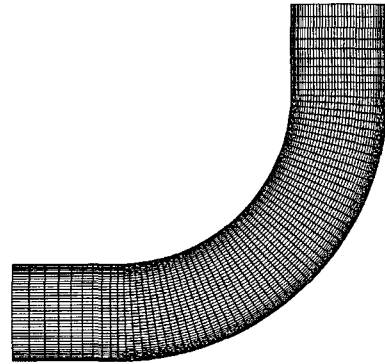


Fig. 3 Computational grid near the bend region.

코드 중의 하나임을 검증하기 위해, 다양한 격자계 즉 비정렬 육각형, 비정렬 프리즘(prism)형 및 비정렬 하이브리드(육각형+프리즘) 격자계를 사용하여 수치해석을 수행하고, 기존의 연구결과와 함께 상호 비교 검토함으로써 격자계 형태에 대한 코드의 유연성을 검증한다.

2. 수치해석

본 연구에서 대상으로 하는 유동은 정사각형 단면을 가지는 90° 닥트 층류유동으로, 이 유동을 수치해석하기 위해 사용한 기하학적 형상, 좌표계와 기호는 Fig. 1과 같다. Humphrey 등[3]의 실험조건과 같이 닥트의 수력직경과 입구 단면에서의 평균유속을 기준으로 정의된 Reynolds수는 790이며, 정사각형 단면의 폭으로 무차원한 굽은 곡면부분의 내부 반지름 $r/L = 1.8$ 이다.

본 연구에서는 수치계산을 위하여 Fig. 2와 Fig. 3에 나타난 바와 같이 계산영역에 세 가지 다른 형태의 격자계를 사용하였다. 즉, 전형적인 정렬격자 형태로 인식되고 있는 168,100개(41 × 41 × 100)의 육면체 셀로 구성된 비정렬격자계, 곡관 입구에서 벽면 근처의 얇은 부분은 사각형 셀로 그 중심부분은 삼각형 셀로 구성된 2차원 격자를 닥트의 중심축을 따라 적용한 각각 95,200개의 육면체 셀과 149,800개

Table. 1 The Entrance and Exit Boundary Locations and Mesh Types.

	L_{in}/L	L_{out}/L	Number of cells	Mesh type
Case I	5	7.5	168,100	hexahedron
Case II	5	7.5	245,000	hybrid
Case III	5	7.5	262,800	prismatic

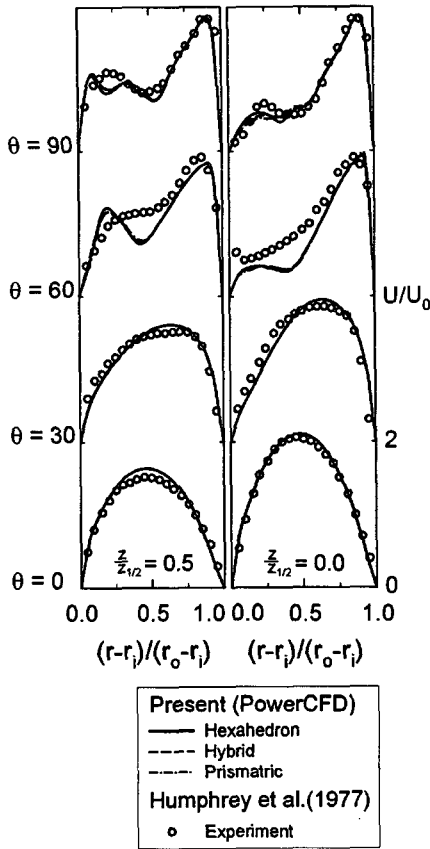


Fig. 4 Streamwise velocity profiles at $z/z_{1/2}=0.5$ and $z/z_{1/2}=0.0$ plane for each cases.

의 프리즘 셀로 구성된 총 245,000개의 하이브리드 셀로 구성된 비정렬격자계, 그리고 곡관 입구에서 삼각형 셀로 구성된 2차원 격자를 닥트의 중심축을 따라 적층한 총 262,800개의 프리즘 셀로만 구성된 비정렬격자계를 사용한다. 유동장의 수치해석을 위한 입출구 위치와 사용된 격자수는 Table. 1에 보여 지는 것과 같으며, Fig. 1 과 Table. 1에서 L_i/L_o 과 L_o/L_o 은 굽은 곡선부분으로부터 입구 및 출구까지의 거리를 정사각형 단면의 폭으로 무차원한 값을 각각 나타낸다. 모든 경우에 대해서, 굽은 곡선영역에서의 유선방향 격자간격은 1.8도이다. 즉, 유선속도 방향으로 50등분의 격자를 배치시켰다.

본 연구에서 계산에 사용된 지배방정식은 무차원화된 Navier-Stokes 방정식이다. 이 식을 풀기 위해 본 연구에서는 비정렬 셀 중심방법을 채택한 3차원 유동해석코드인 PowerCFD 코드[9]를 사용하였다. 이에 사용된 수치해석방법 및 2차원 유동에 대한 성능평가는 참고문헌[9,10]에 자세히 기술되어 있다. 또한, 대류항 계산은 해의 정확도를 위해 2차 정확도를 가지는 중심차분도식을 사용하였다.

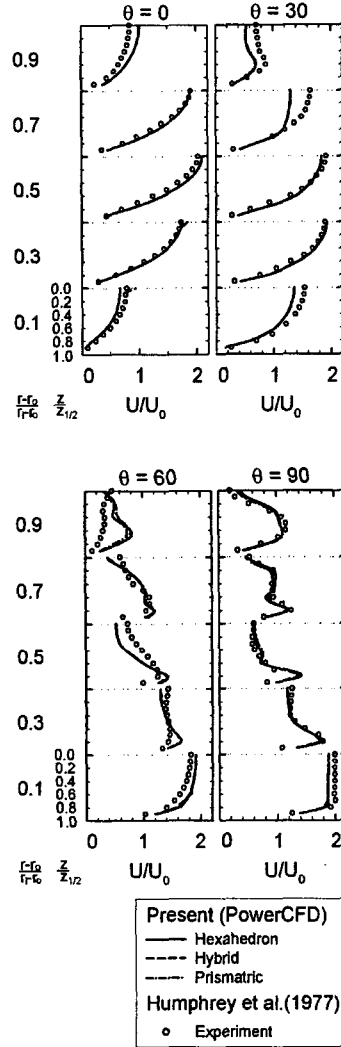


Fig. 5 Streamwise velocity profiles along the longitudinal direction.

3. 결과 및 고찰

Fig. 4는 곡관 여러 가지 위치에서 x-y 대칭평면으로 인식되는 $z/z_{1/2}=0.5$ 과 $z/z_{1/2}=0.0$ 인 면에서의 각 Case에 대해 예측된 주유동방향 속도분포를 실험결과[3] 비교하여 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 세 가지 형태의 격자를 사용하여 계산한 예측결과는 그 차이를 눈으로 확인할 수 없을 정도로 일치하는 것을 알 수 있다. 또한, 본 결과는 주유동속도가 최대가 되는 위치가 곡관을 통과하면서 점차 바깥쪽 벽면으로 이동하며, 90°단에서 내부벽면으로부터 85% 근처에 위치한다는 실험적 사실[3]을 잘 예측하고 있다. 다만, 60°단

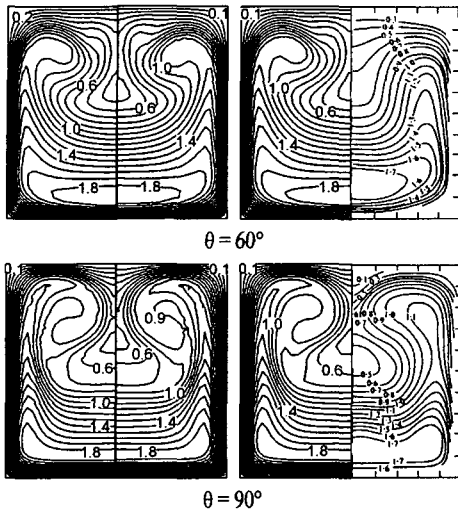


Fig. 6 Comparison of streamwise velocity contours. (from left side, hybrid type mesh, prism mesh, hexahedron mesh and measured)

부근에서 속도분포에 대한 예측결과가 다소 실험결과와 차이를 나타내고 있으나, Humphrey 등[3]을 포함해 기존의 수치해석 결과[7, 8]에서도 유사한 결과를 제시하고 있다.

Fig. 5에는 $\theta = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ 및 90° 단면에서 5가지 반경방향 위치에서의 y축을 따른 주유동방향 속도분포를 실험결과[3]와 비교하여 나타내었다. 수치계산을 통한 예측 값들과 실험값들은 대부분의 영역에서 일치하지만, 굽은 곡면 안쪽 내부벽면 근처, 특히 60° 단 평면에서 예외적으로 그 차이가 눈에 두드러짐을 확인할 수 있다. 이는 이미 다른 여러 연구들[5-8]에서도 언급된 사실로, 본 연구를 통한 수치해석 결과들 중 60° 단 평면에 이르기 전인 상류영역에서 발생한 유선속도값들 중에 실제실험을 통하여 얻은 속도값들 보다 굽은 영역을 통해 얻어지는 2차 유동 속도값들 중 최대값이 굽은 곡선부분의 뒷부분에서 발생하는 것이 그 차이의 원인이라고 사료된다. 그러나 한편으로 바깥 외부면 근처에서 최고 속도값은 매우 잘 예측되어지고 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 6은 각각의 다른 격자계를 사용하여 수치해석한 주유동 방향 속도분포 결과값을 실험값[3]과 비교하여 나타낸 등속선도이다. 결과를 보면 격자계에 상관없이 수치해석 결과는 서로 잘 일치하고 있으며, 실험결과와도 전반적으로 잘 맞는 것으로 볼 수 있으나 국부적으로는 다소 차이를 보여주고 있다.

여러 유선방향의 단면에서 확인할 수 있는 2차 유동 및 주유동방향 속도와의 형태를 이해하기 위하여 예측된 2차 유동 속도벡터와 주유동 방향 등속선도를 Fig. 7과 Fig. 8에 각각 나타냈다. 앞에서도 언급한 것과 같이 본 연구에서 관심을

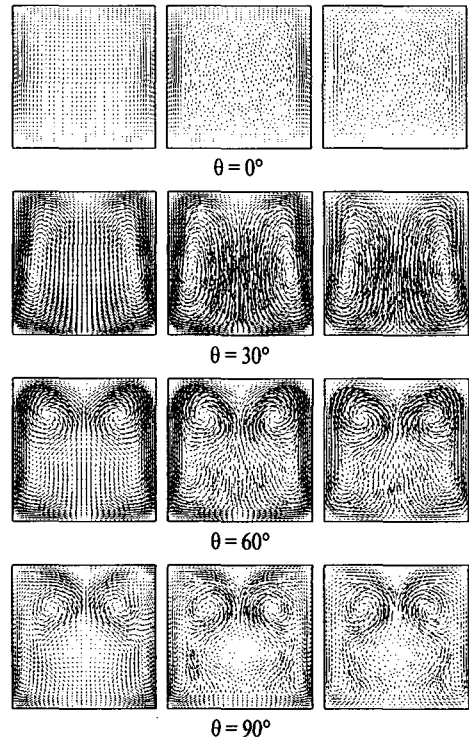


Fig. 7 Predicted results of secondary velocity vectors on the several cross-section plane using hexahedron mesh(left side), hybrid type mesh(middle) and prism mesh(right side).

두고 있는 계산영역에서의 격자계 형태의 의존성을 확인하기 위하여 사용한 세 가지 종류의 격자계(비정렬 육각형 격자계, 비정렬 프리즘(prism)형 격자계 및 비정렬 하이브리드 격자계)를 활용하여 계산한 결과는 Fig. 7과 Fig. 8에 나타난 것과 같이 눈으로 그 차이를 확인할 수 없을 정도로 동일한 결과를 나타내고 있다. 그리고 Fig. 8에서 상대적으로 빠른 흐름을 가지는 유동 중심에서의 속도값들이 닥트의 굽은 곡면에 의해 형성되는 2차유동의 생성으로 인해 그 굽은 곡면의 각이 0° 에서 90° 로 증가하면 할수록 중심에서 바깥쪽 벽을 향해 이동해 가는 것을 확인할 수 있으며, 이는 실험적인 사실[3]과도 잘 일치하고 있다. 특히 굽은 곡면부분이 거의 끝나는 90° 단면부분 근처에서 빠른 유동의 흐름을 가지는 최고 속도값은 바깥쪽 벽면의 좌우 양쪽 측면으로 이동되어지고 2차유동의 최고 속도영역은 안쪽 내부 벽에서 조금 떨어진 곳에서 형성됨을 확인할 수 있다. 이와 함께 Fig. 8의 30° 평면에서도 보는 바와 같이 재순환 영역이 바깥쪽 외부 벽의 좌우 양쪽 모서리에 존재한다.

한편, Fig. 7에 나타낸 것과 같이 2차 유동은 닥트의 중심을 기준으로 각각 양쪽 측면에서 형성되어짐을 확인할 수 있

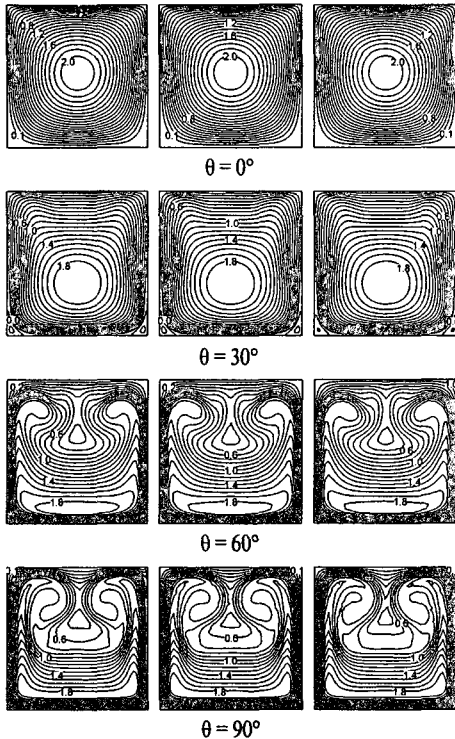


Fig. 8 Predicted results of streamwise velocity contours on the several cross-section plane using hexahedron mesh(left side), hybrid type mesh(middle) and prism mesh (right side).

다. 또한, 이 2차 유동은 굽은 곡면의 각이 0°에서 90°로 증가할수록 더 강하게 형성되고 유동의 형태는 복잡해지면서 안쪽 벽면을 향하여 이동하며, 90°단 평면에서 2차 유동은 세가지의 다른 와동을 가지는 매우 복잡한 유동의 형태로 발전되는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

곡관부 입구에서 충분히 발달된 유동이 유입되는 Reynolds 수가 790인 경우의 정사각형 단면을 가지는 90° 굽은 덕트 층류유동에 대해 비정렬 셀 중심 방법을 채택한 3차원 유동 해석코드(PowerCFD)를 사용하여 계산하고, 유선속도 및 2차 유동의 형태에 대한 실험결과와 비교분석하였다. 또한, 복잡한 3차원 유동해석에 대한 코드의 유효성 및 유연성을 검증하기 위해, 세 가지 형태 즉, 비정렬 육면체 격자계, 비정렬 프리즘 격자계 및 비정렬 하이브리드 격자계를 사용하여 수치해석하고 결과를 상호 비교하였다. 본 연구결과,

(1) 유선속도, 제시된 단면에서의 2차유동의 형태 및 속도에 대한 예측결과는 실험결과와 잘 일치하고 있음이 입증되

었다.

(2) 본 계산에 사용된 3차원 유동해석코드는 격자 형태에 상관없이 동일한 예측결과를 보여주며, 또한 예측결과도 실험값과 잘 일치하였다. 따라서 본 연구에서 사용한 3차원 유동해석코드는 유연성과 함께 수치해석방법을 포함해 굽은 곡선부를 가지는 덕트에서 강한 2차 유동을 포함한 3차원 복합유동의 특성과 현상을 적절하게 예측할 수 있음이 확인되었다.

참고문헌

- [1] Humphrey, J.A.C., Whitelaw, J.H. and Yee, G., 1981, "Turbulent Flow in a Square Duct with Strong Curvature," *J. Fluid. Mech.*, Vol.103, p443-463.
- [2] Ward Smith, A.J., 1971, Pressure Losses in Ducted Flows, *Butterworth & Co.*
- [3] Humphrey, J.A.C., Taylor, A.M.K. and Whitelaw, J.H., 1977, "Laminar Flow in a Square Duct of Strong Curvature," *J. Fluid. Mech.*, Vol.83, p509-527.
- [4] Taylor, A.M.K., Whitelaw, J.H. and Yianneskis, M., 1982, "Curved Duct with Strong Secondary Motion: Velocity Measurements of Developing Laminar and Turbulent Flow," *Transaction of the ASME*, Vol.104, p.350-359.
- [5] Yeo, R.W., Wood, P.E. and Hrymak, A.N., 1991, "A Numerical Study of Laminar 90-Degree Bend Duct Flow with Different Discretization Schemes," *ASME J. Fluid Eng.*, Vol.113, p.563-568.
- [6] Sotirpoulos, F., Kim, W.J. and Patel, W.C., 1994, "A Computational Comparison of Two Incompressible Navier-Stokes Solvers in Three-Dimensional Laminar Flows," *Computers Fluids.*, Vol.23, p.627- 646.
- [7] Shin, B.R., Ikhagi, T., 1996, "Incompressible Laminar Entry Flows in a Square Duct of Strong Curvature Using an Implicit SMAC Scheme," *한국전산유체공학회지*, 제1권, 제1호, p.35-46.
- [8] 김형태, 김정중, 1997, "정사각형 단면을 갖는 90° 곡관의 층류유동 계산," *한국전산유체공학회지*, 제2권, 제1호, p.1-7.
- [9] 명현국, 김종태, 2005, "비정렬격자계를 사용하는 3차원 유동해석코드 개발(제1편, 수치해석방법)," *대한기계학회 논문집*, 제29권, 제9호에 게재 예정.
- [10] 명현국, 김종태, 김종은, 2005, "비정렬격자계를 사용하는 3차원 유동해석코드 개발(제2편, 코드성능평가)," *대한기계학회 논문집*, 제29권, 제9호에 게재 예정.