

가상 압축성 기법을 이용한 삼차원 비압축성 유동해석 코드 개발

정문승* · 권오준**

Development of a 3-D Incompressible Flow Solver Based on an Artificial Compressibility Method

Mun Seung Jung* and Oh Joon Kwon**

Key Words : *Incompressible Flows(비압축성 유동), Artificial Compressibility Method(가상 압축성 기법), Unstructured Hybrid Meshes(비정렬 혼합격자), Steady/Unsteady Flows(정상/비정상 유동)*

Abstract

An unstructured hybrid mesh flow solver has been developed for the simulations of three dimensional steady and unsteady incompressible flow fields. The incompressible Navier-Stokes equations with an artificial compressibility method were discretized by using a node-based finite-volume method. For the unsteady time-accurate computation, a dual-time stepping method was adopted to satisfy a divergence free flow field at each physical time step. The one equation Spalart-Allmaras turbulence model has been adopted to solve the high-Reynolds number flow fields. This method has been applied to calculate the steady flow fields around submarine configurations and unsteady flow fields around a 3-D infinite cylinder.

1. 서론

일반적으로 유체에 잠겨있는 물체주변의 유동장을 해석하는 방법은 밀도의 변화를 무시할 수 있는 저 마하수 영역에서의 비압축성 유동해석과 압축성 효과를 고려해야 하는 대략 0.3이상의 마하수 영역에서의 압축성 유동해석으로 크게 나누어 질 수 있다. 비압축성 유동해석은 초소형 무인항공기나 자동차의 형상 설계에 요구되는 저속에서의 공기역학과 선박과 잠수함 등의 수력학은 물론 혈관유동과 같은 생체유동 등의 그 적용범위가 매우 넓기 때문에, 압축성 유동에 대한 연구를 수행하는 연구자들에게도 비압축성 유동해석은 해석능력을 증대시키기 위한 큰 관심의 대상이다. 본 연구에서는 기 개발된 삼차원 압축성 유동해석코드에 비압축성 유동해석능력을 추가하기 위한 연구가 수행되었다. 본 연구의 수치해석 대상은 주로 수중에서 기동하는 수중운동체 주위의 정상 및 비정상 유동으로, 비압축성 유동을 해석하는 여러 방법 중 Chorin[1]에 의해 제안된 가상 압축성 기법을 사용하여 유동해석 코드를 개발하였다. 가상 압축성 기법은 연속방정식에 압력에 대한 가상시간의 미분항을 추가하여 연속방정식을 hyperbolic 형태로 변형시키기 때문에, flux splitting과 같이 hyperbolic 형태의 방정식을 해석하기 위해 개발된 여러 수치기법들을 그대로 적용할 수 있으며, 온도장의 변화를 무시할 수 있는 비압축성 유동에 대해서는 예조건화 기법에 비해 계산량이 줄어든다는 장점을 가지고 있다. 계산영역은 비정렬 격자계 혼합격자를 사용하여 구성하였다. 비정렬 혼합격자기법은 점성 경계층에서 격자의 큰 종횡비를 허용하고, 동시에 물체 표면의 삼각형으로 형상표현에 대해 유연성

을 가지기 때문에, 격자의 모양에 상관없이 적용이 가능한 격자점 중심의 유한 체적법과 연계되어, 복잡한 형상을 포함하는 높은 레이놀즈 수의 점성 유동을 해석하는 효과적으로 적용될 수 있다.

2. 수치해석 기법

유동의 지배방정식은 가상 압축항을 포함한 비정상 비압축성 Navier-Stokes 방정식을 사용하였다. 지배방정식을 이산화하기 위해 격자점 중심의 유한체적법을 사용하였으며, 제어체적을 구성하기 위해 메디안 듀얼을 사용하였다. 비점성 및 점성 플럭스는 모서리 정보구조를 사용하여 계산하였다. 비점성 플럭스는 Taylor 전개를 이용해 재구성된 이차정확도의 Roe의 FDS를 사용하였으며, 점성 플럭스는 중심 차분법을 이용하여 계산하였다. 가상 시간의 시간전진은 Gauss-Seidel 방법을 이용하여 내재적으로 계산하였으며, 비정상 유동의 실제 시간에 대한 시간 전진은 이중시간 적분 기법을 적용하였다. 난류 유동장에 대한 해석은 Spalart-Allmaras의 1-방정식 난류 모형을 사용하여 계산하였다. 경계조건은 원방경계에서 1차원적 유동에 대한 특성치 조건을 사용하였으며, 유동의 후류영역은 주위에 위치한 격자점의 유동 정보로부터 외삽하였다. 물체 경계면에서는 유동 점착 조건을 사용하였다. 계산시간의 절감과 메모리의 한계를 극복하기 위해 유동 해석 코드를 병렬화하였다. 혼합격자로 이루어진 계산영역을 격자점을 기준으로 하는 그래프로 변환한 후 이를 MeTiS library를 사용하여 분할하고, 나누어진 계산영역의 유동변수는 MPI library를 사용하여 통신이 가능하도록 하였다. 본 연구의 모든 계산은 리눅스 기반으로 구축된 PC 클러스터를 이용하여 수행되었다.

* KAIST 항공우주공학과 대학원

** KAIST 항공우주공학과 ojkwon@kaist.ac.kr

3. 결과 및 토론

3.1 정상 유동 해석

정상 유동 해석에 적용된 형상은 잠수함 형상에 근접한 6:1의 비를 가지는 회전타원체와 Suboff[2] 형상으로, 형상 표면의 압력계수와 마찰계수를 실험치와 비교하였다.

6:1 회전타원체에 대한 정상 유동 해석은 레이놀즈 수 4.2×10^6 , 받음각 10, 20도의 난류 영역에 대해 수행되었다. 실제 실험에서는 층류가 흘러들어와 $x/L = 0.2$ 인 지점에서 천이되어 난류 유동이 되나 본 해석에서는 유동 천이를 고려하지 않는 전난류유동으로 계산을 수행하였다. 그림 1에서 계산에 사용된 점성 격자를 나타내었으며, 점성 경계층에 적용된 프리즘 격자와 나머지 영역에 분포된 사면체 격자를 확인할 수 있다. 회전타원체 주위의 점성 격자는 612,693개의 격자점과 811,020개의 프리즘 격자요소, 1,159,169개의 사면체 격자요소로 구성되었다. 물체 벽면에서 초기 격자 두께는 회전타원체 전장길이의 9×10^{-6} 이며, 이는 받음각 10도에 대하여 $y^+ \approx 1.1$, 받음각 20도에 대하여 $y^+ \approx 1.5$ 의 값을 가진다. 점성 경계층은 30개의 프리즘 격자를 1.2의 증가비를 가지고 록 적용하였다.

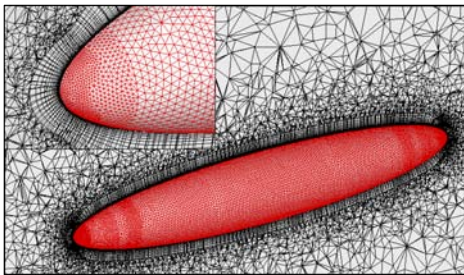


Fig.1 Computational viscous meshes around the 6:1 prolate spheroid

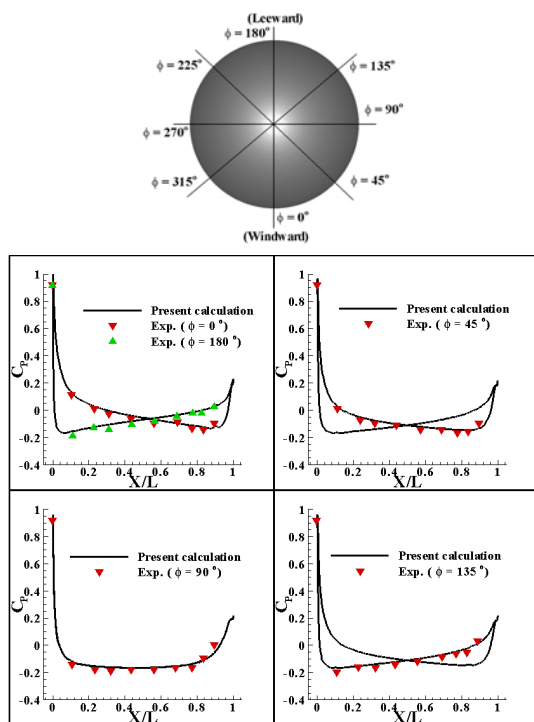


Fig.2 Surface pressure distribution on the spheroid along the streamwise direction at 10°

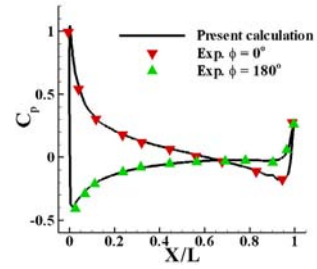


Fig. 3 Pressure distribution along windward and leeward surface for angle of attack of 20°

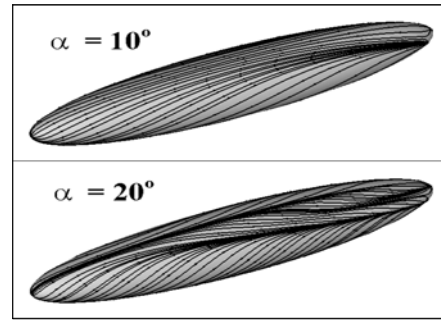


Fig.4 Streamlines on the spheroid surface

그림 2와 3에서 받음각 10도와 20도에 대해 계산을 수행하여 얻은 회전타원체 표면에서의 유동방향의 압력분포를 실험치[3]와 비교하였다. 그림에서 확인할 수 있는 바와 같이 모든 위치에서 계산을 통해 얻은 결과가 실험값과 잘 일치함을 알 수 있다. 그림 4는 회전타원체 표면에서의 유선을 나타낸다. 받음각 20도에서는 10도와는 달리 $x/L \approx 0.35$ 인 지점부터 유선이 일정지점을 따라 수렴하는 삼차원 형태의 crossflow separation이 발생하는 것을 확인할 수 있다.

Suboff 형상은 간단한 함수 형태로 이루어져 있으며, CFD로 잠수함을 해석하는 연구자들에게 공통된 형상을 제공하기 위해 제안되었다. 본 연구에서는 참고문헌[2]에서 제안된 형상 중 동체만을 사용한 Bare-hull 형상과, 사령탑과 선미 부가물이 있는 형상에 대한 해석을 수행하였다. 그림 5에 계산에 사용된 형상과 격자를 보였다. 그림 5(a)의 Bare-hull 형상은 1,109,963개의 격자점과 1,381,785개의 프리즘, 2,376,211개의 사면체, 871개의 피라미드로 구성되어 있다. 그림 5(b)의 형상은 984,344개의 격자점과 1,624,854개의 프리즘, 921,168개의 사면체, 1,330개의 피라미드로 구성되었다. 두 경우 모두 점성 경계층의 초기 격자 두께는 형상 전장길이의 3×10^{-6} 을 사용하였으며, 프리즘 격자는 1.2의 증가비를 가지고 적용되었다. 유동조건은 레이놀즈 수 1.2×10^7 의 난류 유동이며, 유동해석은 받음각 0도에서 수행되었다. 계산된 y^+ 의 값은 각각 1.1, 1.05이다. 그림 6에서 두 경우에 대해 계산된 압력분포도와 유선을 나타내었다. 사령탑과 선미 부가물 부근을 제외하고 큰 차이는 없음을 알 수 있다.

그림 7에서 Bare-hull 형상의 축방향의 표면 압력 및 마찰계수의 분포를 실험값[4]과 비교하였다. 계산된 표면 압력 분포 및 마찰 계수는 실험값과 매우 잘 일치하는 것을 확인할 수 있으며, 형상의 앞부분에서 실험값과의 차이는 유동 천이에 의한 차이로 판단된다. 그림 8과 9에서 사령탑과 선미 부가물 형상에 대해 표면 압력 분포를 실험값과 비교하였으며 해석결과는 실험값과 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다.

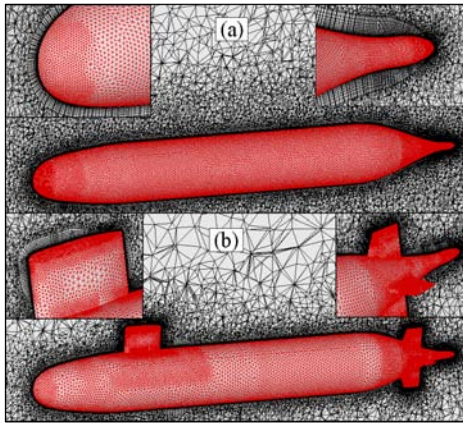


Fig. 5 Viscous meshes around (a) Bare-hull, (b) hull with sail and stern appendage

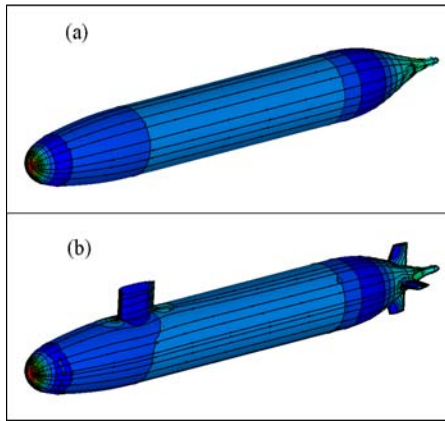


Fig.6 Pressure contours and streamlines

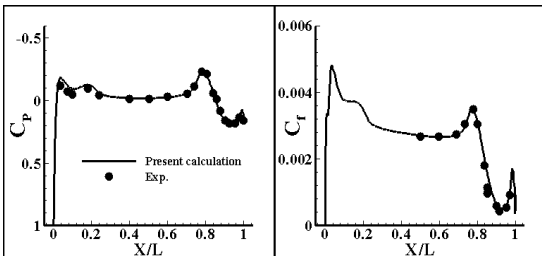


Fig.7 Streamwise distributions of pressure and skin friction coefficient on the Bare-hull surface

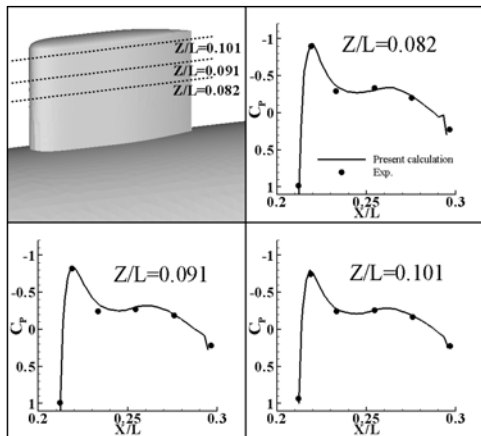


Fig. 8 Surface pressure distributions on the sail surface of Suboff configuration

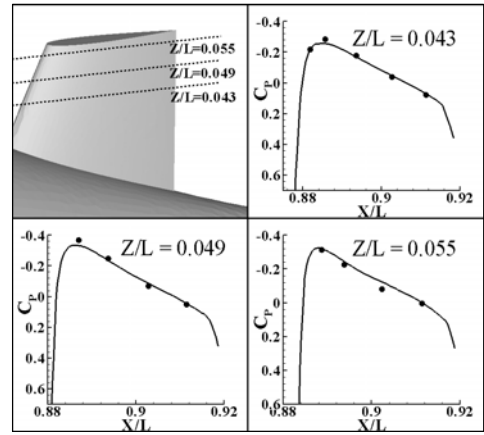


Fig. 9 Surface pressure distributions on the stern appendage surface of Suboff configuration

3.2 비정상 유동 해석

비정상 유동해석은 삼차원 무한 실린더 주위의 층류 유동을 해석하여, 본 연구에서 적용된 이중시간 적분기법을 사용한 시간전진 기법의 타당성을 검토하였다. 계산에 사용된 유동조건은 레이놀즈 수 200의 층류 유동이다. 실린더는 지름의 길이만큼 두께를 가지고 있으며, 양 끝단을 반사 경계면으로 설정하여 무한 실린더로 계산이 수행되도록 하였다. 계산 격자는 821,587개의 격자점과 1,058,200개의 프리즘 격자요소, 1,478,822개의 사면체 격자요소로 구성되어 있으며, 실린더의 뒷부분에서 발생하는 와류의 해상도를 높이기 위해 후류부분에 격자를 조밀하게 분포시켰다. 점성 경계층은 초기 격자 두께를 실린더 지름의 0.001을 사용하고, 1.2의 증가비를 사용하여 20개의 프리즘 격자를 적용하여 구성하였다. 그림 10에서 계산에 사용된 격자를 나타내었다. 계산에 사용된 실제 시간 간격은 무차원 시간 0.025이며, 가상 시간을 구하기 위해 사용된 CFL수는 50이다. 계산은 무차원 시간 200까지 수행되었으며, 정상해의 수렴이 없이 처음부터 비정상 유동으로 계산을 수행하였기 때문에 무차원 시간 10까지는 가상시간에 대해 100번의 반복계산을 수행하고, 그 이후에는 30번을 수행하였다.

그림 11에 한 순간(instantaneous)에 대한 와도(vorticity)분포와 압력분포를 나타내었다. 실린더의 후류영역에서 주기적인 쌍(pair)으로 나타나는 Karman 와류가 잘 나타남을 확인할 수 있다. 그림 12에서 시간에 대한 항력계수와 양력계수의 변화를 나타내었다. 실린더에서 떨어져 나가는 와류의 영향으로 항력 및 양력은 주기적인 특성을 보인다. 표 1에서 계산에서 얻어진 항력계수, 양력계수, Strouhal 수를 실험치 및 다른 연구자의 결과 [5, 6]와 비교하였다. 약간의 오차는 있으나 실험치에 매우 근접한 결과를 보이고 있다.

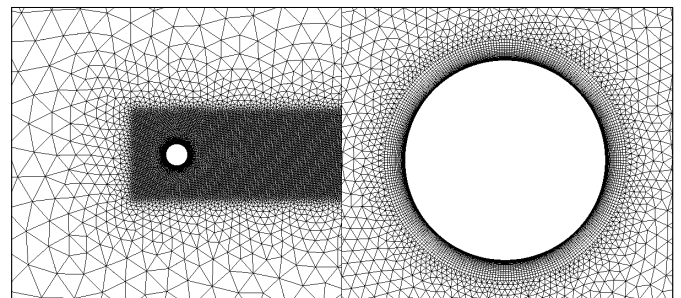


Fig. 10 Computational viscous meshes around cylinder configuration

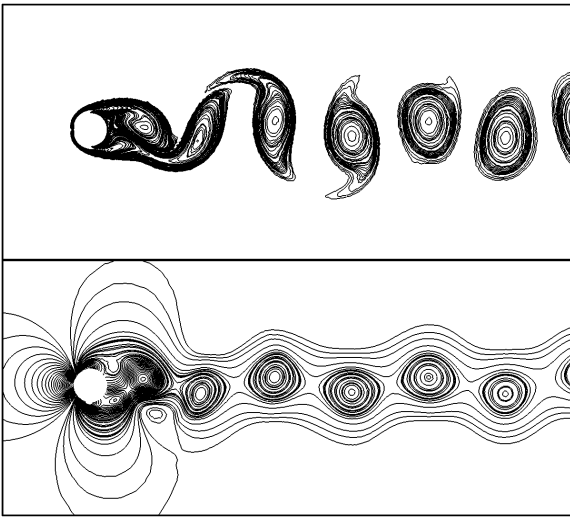


Fig. 11 Instantaneous vorticity and pressure contours over a cylinder

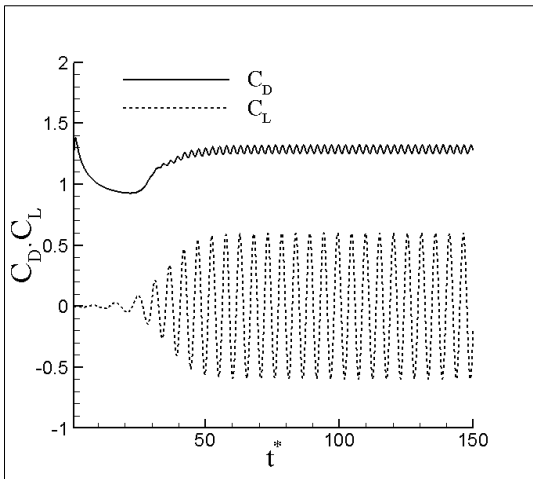


Fig. 12 Time history of drag and lift coefficients

Table 1. Comparisons of drag, lift coefficients and Strouhal number

	C_D	C_L	St
Present	1.285 ± 0.035	± 0.6	0.19
Exp.	1.30	—	0.19
Shin[5]	1.303 ± 0.0357	± 0.621	0.194
Kiris[6]	1.27 ± 0.04	± 0.67	0.184

4. 결론

본 연구를 통해 삼차원 정상/비정상 비압축성 유동을 해석하기 위한 유동 해석 코드가 개발되었다. 유동 해석 코드는 가상 압축성 기법을 기반으로 하였으며, 비정상 유동을 해석하기 위해 이중시간 적분기법을 적용하였다. 개발된 유동 해석 코드를 복잡한 형상을 가지며, 높은 레이놀즈 수를 가지는 난류 유동에 효과적으로 적용하기 위해 점성 경계층에 적합하다고 알려진 비정렬 혼합 격자기법을 사용하였다.

개발된 해석코드를 잠수함과 같은 수중운동체 형상에 적용하기 위해 회전타원체와 Suboff 형상에 적용하여 정상 유동해석을 수행하였으며, 이를 실험값과 비교하여 코드를 검증하였다. 비정상 유동 해석은 삼차원 무한 실린더에 대해 수행되었다. 수치 해석에 의한 결과는 전형적인 Karman 와류를 잘 예측하였으며, 계산된 항력계수, 양력계수, Strouhal 수는 실험값에 매우 근접하는 것을 확인하였다.

본 연구를 통해 개발된 유동 해석 코드는 추후 복잡한 난류 유동장에서 더욱 정확한 해를 예측하기 위해 hybrid RANS/LES 기법을 추가하고, 물체간의 상대운동이 있는 비정상 유동해석을 위해 중첩격자 기법을 추가하여 해석코드의 성능을 향상시킬 예정이다.

후 기

본 연구는 국방과학연구소 수중운동체 기술 특화연구센터의 ‘전산유체역학을 이용한 수중운동체의 선체-제어판 추진기 상호작용연구(SM-21)’ 과제의 지원에 의한 결과의 일부이며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] Chorin, A. J., "A Numerical Method for Solving Incompressible Viscous Flow Problems," *Journal of Computational Physics*, Vol. 2, No. 12 (1967), pp.12-26.
- [2] Groves, N. C., Huang, T. T. and Chang, M. S., "Geometric Characteristics of DAPRA SUBOFF Models (DTRC Model Nos. 5470 and 5471)," DTRC/SHD-1298-01 (1989), David Research Center.
- [3] Chesnakas, C. J. and Simpson, R. L., 1997, "Detailed investigation of the three-dimensional separation about a 6:1 prolate spheroid," *AIAA Journal*, Vol. 35, No. 6, pp. 990-999.
- [4] Huang, T. T, Liu, H. L. Groves, N. C., Forlini, T. J., Blanton, J. N. and Gowing, S., 1992, "Measurement of Flows Over an Axisymmetric Body with Various Appendages," *Nineteenth Symposium on Naval Hydrodynamics*, Seoul, Korea.
- [5] Shin, S., Kim, C. K. and Bai, K. J., 2004, "Numerical Simulation on an Interaction of a Vortex Street with an Elliptic Leading Edge Using an Unstructured Grid," *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol. 44, No. 3, pp. 331-346.
- [6] Kiris, C. and Kwak, D., 2001, "Numerical Solution of Incompressible Navier-Stokes Equations Using a Fractional-step Approach," *Computers & Fluids*, Vol. 30, No. 7-8, pp. 829-851.