

물 밑에 잠긴 구 주위의 층류 유동장 해석 곽승현†

(원고접수일 : 2010년 8월 17일, 원고수정일 : 2010년 9월 16일, 심사완료일 : 2010년 10월 14일)

Analysis of Laminar Flows around Submerged Spheres

Seung-Hyun Kwag†

요약 : 수중에 있는 구 주위의 3차원 층류유동을 수치 해석하였다. 유한체적법을 기반으로 나비에 스토크스 방정식을 비구조격자로 풀어 물체주위의 동역학 현상을 규명하였다. 보티시티, 속도, 동압, 레지듀얼, 항력계수 등의 데이터를 가지고 분석하였다. 레이놀드 수는 425, 300, 250, 100 이다. 구 사이의 거리가 작은 경우가 구 한 개의 후류 유동보다 안정됨을 보였고 구 사이의 간격이 커짐에 따라 유동현상은 불안정하게 나타났다. 후방의 구는 정체압력의 감소를 보였고 이로 인해 저항이 줄어들게 됨을 알 수 있었다. 항력계수의 비교는 본 수치계산이 타당함을 입증하였다.

주제어 : 층류유동, 수중물체, 유한체적법, 나비에스톡스

Abstract: Three dimensional laminar flows are numerically simulated around the submerged spheres. The finite volume based Navier-Stokes equations with unstructured grids are solved to make clear the hydrodynamic phenomena near and far away from the body. Reviews are made on with the vorticity, velocity, dynamic pressure, residuals, drags, etc. The Reynolds numbers under consideration are 425, 300, 250 and 100. In case of small spacing between spheres, the flow is more stable than that past a single sphere. According to the analysis, the flow past two spheres is found to be unstable as the spacing becomes larger. The rear sphere shows the deduction of stagnation pressure, which results in the decrease of the resistance. The predicted drag coefficients verify that the present numerical calculation is reasonable.

Key words: Laminar flows, Submerged bodies, Finite volume method, Navier-Stokes

1. 서 론

선박 및 마린엔지니어링 분야에서 낮은 레이놀드 수 유체유동은 해양분야에서 해결해야 할 중요한 과제이다. 뭉툭한 물체인 구 주위의 유동, 3차원 격자생성, 그리고 후류에 발생하는 보텍스쉐딩의 메커니즘은 오랫동안 연구의 대상이었다. 한 개에 구에 대한 선행연구로는[1-3]이 있고, 두 개 이상의 구에 대한 연구는 [4-6]이 있다. 등이 두 개의 구에 대한 유동은 구 사이의 거리, 레이놀드 수 등이 주요 함수임을 알 수 있고 낮은 레이놀드수의

유동에서는 보텍스 쉐딩이 나타나지 않음을 알 수 있다. 선행연구에 의하면 구가 평행하게 배치되면 항력이 감소함을 알 수 있고 수직의 경우에는 오히려 증가한다. 3차원 구의 후류는 그 특성이 매우 어렵고 복잡하여 유동현상을 이해하고 규명하는 것은 해양유체 연구과제로서 가치가 매우 높다고 할 수 있다[7-9]. 최근 계산유체역학(CFD)에서는 모델링 요구의 다양한 범위에 부합하도록 폭넓은 선택이 가능하게 되었다[10-12].

본 연구에서는 한 개 및 두 개의 구를 주 유동

† 교신저자(한라대학교 컴퓨터응용설계학과, E-mail: shkwag@halla.ac.kr, Tel: 033-760-1233)

방향으로 나열하여 층류유동을 가정하여 유동현상을 고찰하고자 한다. 특히 구 사이의 거리에 따른 3차원 보텍스, 속도, 동압, 레지듀얼, 항력 등의 데이터를 가지고 분석하였다. 본 연구에서는 위의 현상들을 확인하기 위하여 수치코드를 사용하여 구 형상을 대상으로 해석을 수행하였다. 이와 관련한 다차원 층류 및 난류에 대한 검토는[13]에 있고, [14]는 직렬로 배열된 두 개의 구를 지나는 낮은 레이놀드 수에서 층류유동을 해석하였다. 그에 의하면 보텍스 shedding이 발생하는 비정상 유동에서는 앞에 놓인 구에 비해 뒤에 놓인 구에 작용하는 양력의 섭동량이 보다 큰 것을 알 수 있다.

2. 수치시뮬레이션

2.1 기본 방정식과 수치조건

방정식은 Navier-Stokes 방정식이며 유한체적법(FVM)으로 이산화하여 혼합격자를 만들어 수치해석을 수행하였다. Navier-Stokes 방정식을 이산화하여 계산을 수행하였다.

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \phi dV + \oint_A \rho \phi V dA = \oint_A \Gamma \nabla \phi dA + \int_V S_\phi dV \quad (1)$$

수송방정식 (1)에서 첫 번째 항은 Unsteady 항, 두 번째는 컨벡션항, 세 번째는 디퓨전항, 네 번째는 생성 항이다.

Transport방정식	variable of ϕ
연속방정식	1
x 모멘텀	속도 (u)
y 모멘텀	속도 (v)
z 모멘텀	속도 (w)

압력 및 속도는 coupled, 셀 기반 구배조건을 적용했고 계산은 음해법의 수치기법을 사용했다.

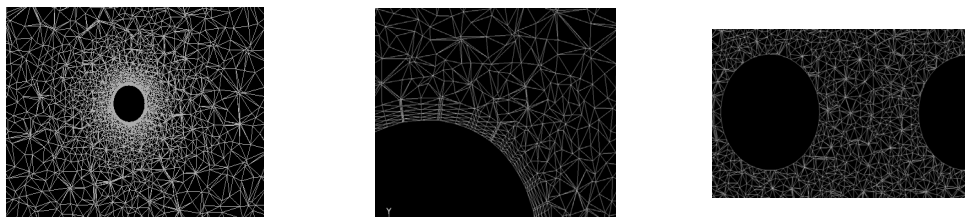
2.2 격자생성, 경계조건 및 계산영역

격자는 비구조 사면체 형상으로 생성하였다. 경계조건은 입구면, 출구면, 벽에 각각 속도, 압력 조건을 부여하였고 공간내부에는 연속체 조건을 주었다. 입구면에는 단위속도인 1m/sec, 출구면에는 제로구배 압력조건을 주었다. 구 한개 유동의 경우 사면체 셀 수는 696,613개, 노드 수는 127,988개 이고, 계산영역은 구의 직경을 1로 했을 때 상류방향으로 1.5 이다. 구 사이의 간격은 각각 0.5, 1.0, 3.0으로 하였고, 하류방향으로는 8.0까지 영역을 만들었다.

3. 수치해석 및 토의

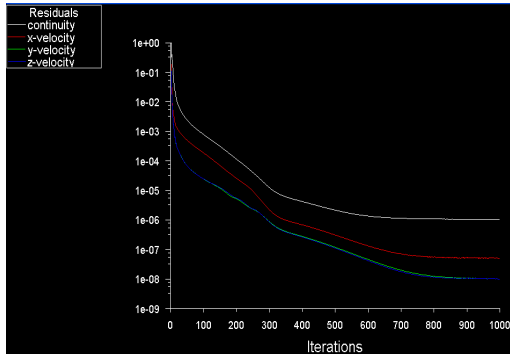
3.1 수치해석 결과

Figure 1은 격자생성을 보여주고 있다. 격자는 Tet Primitive Volume Meshing Scheme 을 적용하여 만들었다. 한 개 및 주유동으로 나열된 두 개의 물체 주위의 격자형상을 그림에서 볼 수 있다. Figure 2는 수렴되었는지 여부를 조사하기 위한 잔류 값을 그림으로 나타낸 것이다. 구 사이의 거리가 가까워질수록 수렴하기 위한 시간이 더 걸림을 알 수 있다. 1/d가 3인 경우는 반복계산수가 400인데 반해서 1/d가 0.5인 경우는 반복계산수가 800 에서 수렴에 도달함을 보이고 있다. Figure 3은 레이놀드수 100에서의 속도벡터를 보여준다. 1/d=0.5 에서 물체사이의 유동은 역류현상을 강하게 보이고 있다. 반면에 1/d=3.0에서는 역류현상이 거의 나타나지 않는데 이는 구

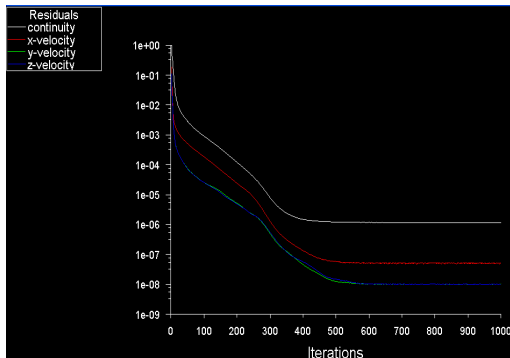


(a) Grid generation (single sphere) (b) Perspective grid view (c) Grid generation (1/d=1)

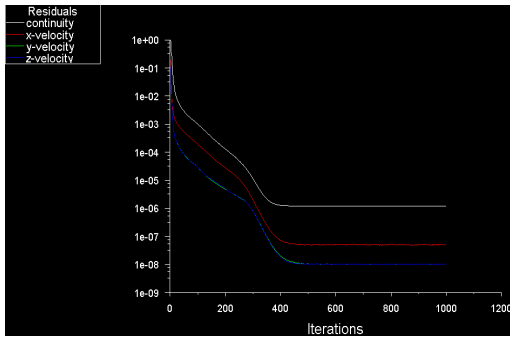
Figure 1: Grid generation view



(a) $l/d=0.5$



(b) $l/d=1.0$



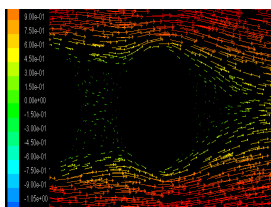
(c) $l/d=3.0$

Figure 2: Residuals for convergence test, $Re=300$

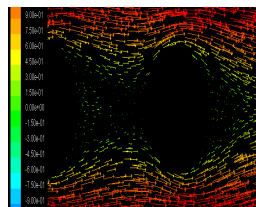
의 상호작용이 미치지 못함을 의미한다. Figure 4는 3차원 유동을 강조하기 위하여 동압을 각 단면에서 보여준다. 레이놀드수가 커짐에 따라 압력 구배가 완만함을 알 수 있고 특히 레이놀드수가 425의 경우는 확연히 그 현상을 볼 수 있다. Figure 5와 Figure 6은 각각 레이놀드수 100과 425에서의 동압을 주유동 방향으로 보여준다. 높은 레이놀드수는 전반적으로 후류에서 압력구배가 강함을 알 수 있고 $l/d=3$ 인 경우를 보면 $l/d=1$ 의 경우와 비교할 때 차이가 있음을 알 수 있다. 즉, 레이놀드수 425는 100 보다 압력구배가 강하며 구 사이의 거리가 커짐에 따라 앞의 구가 미치는 영향이 작아짐을 알 수 있다. Figure 7과 Figure 8은 보텍스 형상을 보여준다. Figure 7은 레이놀드수 100에서 구의 간격에 따른 변화를 보여주고 있다. 단일 구의 경우는 주유동 방향으로 대칭의 보텍스가 형성되어 있지만 3.0 거리의 경우에는 앞의 구에 의한 영향은 점진적으로 사라졌다가 다시 후류의 보텍스가 형성됨을 볼 수 있다. 0.5 간격의 경우보다는 앞의 구의 보텍스 shedding이 뒤의 구에 영향이 있음을 알 수 있다. Figure 8은 레이놀드수 425에서 구의 간격에 따른 변화를 보여주고 있다. 레이놀드수 100과 비교하면 단일 구와 0.5 거리에 있어서 후류의 형상에서 확연한 차이를 보인다. 앞의 구에서 생기는 보텍스의 세기가 강하여 뒤의 구에 영향이 있음을 알 수 있다. 구간의 거리가 3.0의 경우에도 레이놀드수 100과 비교했을 때 보텍스의 영향이 더 미침을 알 수 있다.

3.2 항력계수 결과

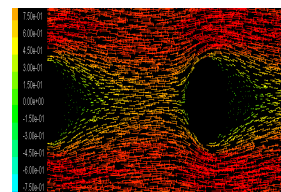
$Re=100$ 의 경우 [7]은 1.085이고 본 계산은 1.087 이다. $Re=250$ 과 300의 경우 [1]의 경우



(a) $d/l=0.5$



(b) $d/l=1.0$



(c) $d/l=3.0$

Figure 3: Velocity vectors, $Re=100$

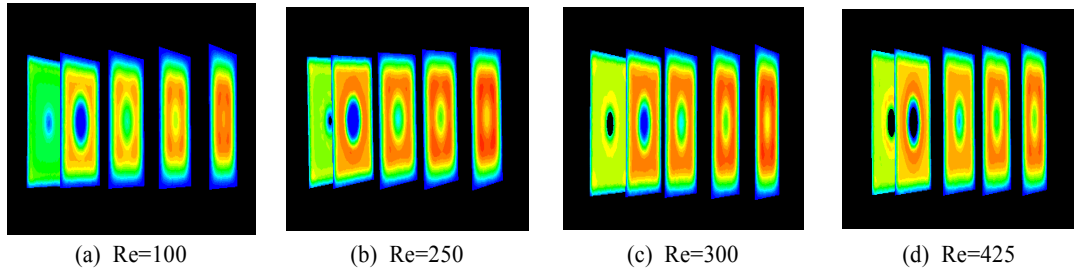


Figure 4: Dynamic pressure, Single sphere

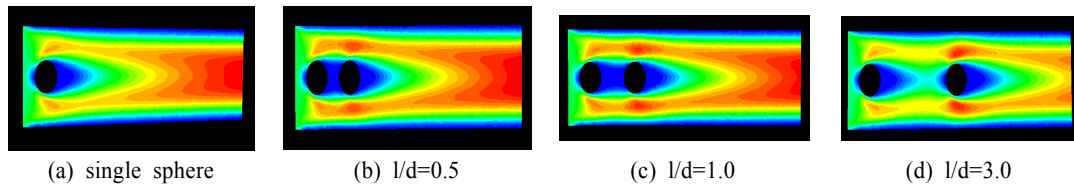


Figure 5: Dynamic pressure, Re=100

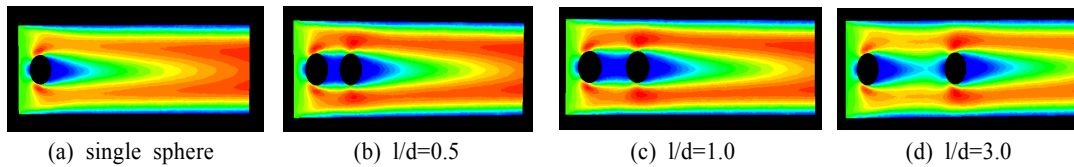


Figure 6: Dynamic pressure, Re=425

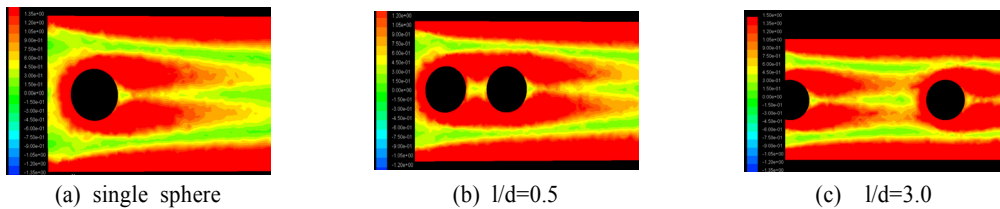


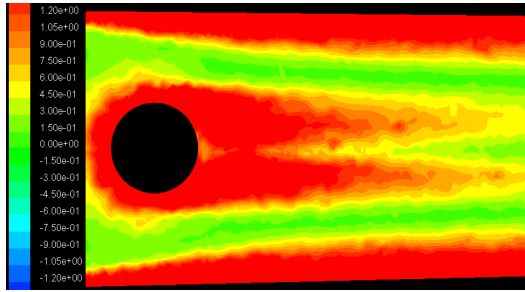
Figure 7: Vorticity contour, Re=100

0.070, 0.656 이나 본 계산은 0.071, 0.657 이다. [8]과 [9]의 경우는 Re=300에서 각각 0.656, 0.671 로 본 계산과 거의 일치하였다. 항력계수의 비교에 의하면 본 수치해석의 타당성은 입증되었다고 판단한다. 항력계수는 밀도, 속도제곱, 단면적으로 무차원한 값이다.

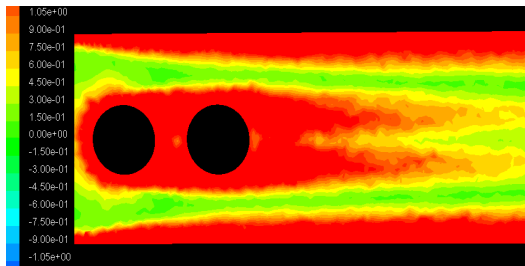
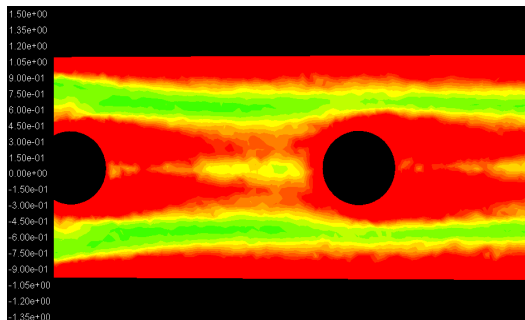
4. 결 론

수치해석을 통하여 인접한 구 사이의 유동특성에 대하여 검토하였다. 네 개의 레이놀드 수에 대하여 연구한 결과 구 사이의 떨어진 간격은 유동장의 3 차원 현상을 변화시켰고 간격에 따른 차이를 보여

주었다. 또한 같은 간격에 대해서도 레이놀드 수에 따라 유동장의 현상이 다르게 나타남을 알 수 있었다. 구 사이의 간격이 작을 때 단일 구에 비하여 오히려 안정된 유동현상을 보여 주었다. 항력계수의 결과를 타 연구결과와 비교하였는데 거의 오차가 없었기에 본 계산의 타당성을 입증할 수 있었다. 수치 계산의 수렴을 연속방정식 등을 통하여 확인할 수 있었다. 압력과 속도의 레지듀얼의 값이 10^{-6} 로 수치적으로 충분히 수렴되었다. 동압분포, 보텍스, 속도벡터 등을 가지고 분석한 결과 구 사이의 간격이 커짐에 따라 유동현상은 불안정하게 나타났다.



(a) Single sphere

(b) $l/d=0.5$ (c) $l/d=3.0$ **Figure 8:** Vorticity contour, $Re=425$

참고문헌

- [1] T. A. Johnson and V. C. Patel, "Flow past a sphere up to a Reynolds number of 300", *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 378, pp. 19-70, 1999.
- [2] D. Kim and H. Choi, "Laminar flow past a sphere rotating in the streamwise direction," *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 461, pp. 365-386, 2002.
- [3] R. Mittal, "Planar symmetry in the unsteady wake of a sphere," *AIAA Journal*, vol. 37, pp. 388-390, 1999.
- [4] Y. Tsuji, Y. Morikawa and K. Terashima, "Fluid-dynamics Interaction between two spheres," *Int. Journal Multiphase Flow*, vol. 8, pp. 71-82, 1982.
- [5] C. Zhu, S. C. Liang and L. S. Fan, "Particle wake effects on the drag force of an interactive particle," *Int. Journal Multiphase Flow*, vol. 20, pp. 117-129, 1994.
- [6] S. C. Liang, T. Hong and L. S. Fan, "Effects of particle arrangements on the drag force of a particle in the intermediate flow regime," *Int. Journal Multiphase Flow*, vol. 22, no. 2, pp. 285-306, 1996.
- [7] B. Fornberg, "Steady viscous flow past a sphere at high reynolds numbers", *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 190, pp. 471-489, 1988.
- [8] G. S. Constantinescu, M. Chaplet and K. Squires, "Turbulence modeling applied to flow over a sphere", *AIAA Journal*, vol. 41, no. 9, pp. 1733-1742, 2003.
- [9] A. G. Tomboulides and S. A. Orszag, "Numerical investigation of transitional and weak turbulent flow past a sphere", *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 416, pp. 45-73, 2000.
- [10] D. A. Anderson, J. C. Tannehill and B. H. Pletcher, "Computational fluid mechanics and heat transfer", Hemisphere, New York, 1984.
- [11] S. F. Hoerner, "Fluid dynamics drag" published by the author, Midland Park, New Jersey, 1965.

- [12] H. Schlichting, "Boundary Layer Theory", McGraw-Hill, New York, 1979.
- [13] 박승현, "벌류트 압축기 내의 난류유동 수치해석," 한국마린엔지니어링학회지, 제31권, 제6호, pp. 681-686, 2007.
- [14] 김동주, "직렬로 배열된 두 개의 구를 지나는 층류유동," 대한기계학회 논문집 B권, 제30권, 제5호, pp. 480-488, 2006.

저 자 소 개



박승현(郭承鉉)

1953년7월4일. 1979년 서울대학교 조선공학과 졸업(공학사). 1985 Univ. of Michigan 조선해양공학 (공학석사), 1991 Hiroshima Univ. 조선해양공학 (공학박사), 1980-1995 현대중공업 근무. 1995-현재 한라대학교 공과대학 컴퓨터응용설계학과 교수