

Hydrodynamic movement of two rigid bodies in varied distance

정 유 석(Jeong Yoo Seok)¹, 김 현 규(Kim Hyeon Gyu)²

교신저자 : 서울과학기술대학교 교사 이경미

¹서울과학기술대학교

²서울과학기술대학교

Fishes usually form a group in water to minimize drag coefficient and this fish schooling is one of representative problems in computational fluid dynamics. In this research, we simulated two fishes as a rectangle. We arranged rectangle horizontal and vertical, then we changed distance between two rectangles and simulated pressure of fluid and drag coefficient. We could find the best distance and position of two fishes that makes minimum drag coefficient.

Key Words : Fish schooling, CFD

1. 서 론

Fish schooling 은 수중 유동에 관하여 대표적으로 제시되는 문제이며, 이는 유체 속의 강체 사이의 거리를 변화시킬 때 이동하면서 나타나는 저항력의 일반적인 개형에 대한 이론이다. 이번 연구는 이를 달린 2D 계 모형으로 나타내어 두 물체가 앞, 뒤로 나란히 놓여 있을 때의 유동과, 좌, 우로 나란히 놓여 있을 때의 유동을 보기 위한 연구이다.

본 연구는 강체의 유체 내 저항력의 변화를 알아내어 에너지 효율적으로 분석할 수 있을 것이다. 또한, 이 변화는 다양한 분야에서 응용할 수 있다. 이 연구는 우선적으로 수중, 혹은 대기중 이동수단에 필요하다. 이동수단에는 여러 이유로 돌출물이 있는데, 유체와의 저항력을 감소시키는 것은 이동에서 매우 중요하다. 또한, 수중 구조물 간의 거리와 관련하여 이 사이에서 발생하는 유체의 유동을 파악하는 것은, 구조물의 안정성 역시 높일 수 있다는 점에서 연구의 필요성을 확인할 수 있다.

2. 연구 방법

본 연구에서 활용한 소프트웨어는 “2D_YUIBM_1”으로 유한 차분법 기반의 임의형상 물체 주위 유동 해석자이다. 이 해석자의 지배 방정식은 Navier-Stokes 방정식으로 비점성 stokes 유동에서 층류유동까지 해석이 가능하다. 유입/유출시 경계조건, 벽면 경계조건등을 제공하여 다양한 유동 문제 해

석을 수행가능하다. 또한 본 해석자에서는 가상 경계기법을 제공하여 층류 운동과 stokes 유동에서 높은 정확도로 점착조건을 만족시킨다.

해석자에서 입력하는 값의 유동 조건들은 무차원화 된 값으로, 유동의 속도, 압력, 점성력 등은 레이놀즈 수로 변환하여 입력하였다. 본 연구에 해당하는 속도와 압력등은 Sfakiotakis, M.. Lane[1]의 연구에서 사용된 값을 그대로 사용하여 다음과 같은 정의

$$Re_{\infty} = \frac{\rho_{\infty} u_{\infty} l}{\mu_{\infty}}$$

를 이용하여 계산하였다.

다른 변수인 CFL수는 기본값인 1.0을 사용하였고 최대 반복 계산값은 100회로 하여 잔여 오차(error residual)이 일정한 값으로 수렴하는 지점까지 계산하도록 하였다. 기타 수렴오차에 대해서는 소프트웨어에 설정된 기본 값으로 진행하였고 시물 레이시에 걸리는 시간을 고려하여 중간 계산 결과는 출력하지 않았다.

입력 파일은 총 3가지로 격자, 경계조건, 물체 3개의 파일로 이루어져 있다. 가로와 세로 모두 200개로 나누어 간격이 같은 총 40,000개의 cell을 grid로 사용하였다. 가로, 세로 200개의 간격은 등간격으로 설정하였다. 경계조건은 x=0에서 아음속 유입 조건(subsonic inlet), x=10에서 아음속 유출 조건(subsonic outlet)을 사용하여 좌측에서 유체가 유입되도록 경계조건을 설정하였다. y=0, y=10에서 점성 벽면 조건(viscous adiabatic wall)을 설정하여 유체가 좌에서 우로 흐르도록 강제하였다. 물체는 3x1크기의 동일한 물체를 각각 상하, 좌우로

배치한 후 간격의 크기를 0.5에서 2.0까지 0.1단위로 증가시키며 각각 시뮬레이션을 진행하였다.

시뮬레이션의 결과 데이터는 상용 데이터 처리 프로그램인 tecplot을 사용하여 위치에 따라 압력을 측정하였고 유체의 흐름을 시각적으로 표현하였다. 또한 두 물체의 항력계수는 엑셀을 사용하여 처리하였다.

3. 이 론

입자의 형상은 직사각형으로 가정하고 입자 주위의 유동은 비압축성 유동, 유체는 연속체로 가정하여 Incompressible Navier-Stokes Equation을 통하여 실린더 형태의 입자 주위의 유동을 계산하였다. Incompressible Navier-Stokes Equation은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + (u \cdot \nabla)u = -\nabla p + \frac{1}{Re} \nabla^2 u + f$$

$$\nabla \cdot u = 0$$

Kim et al.[2]의 완전음해분리법을 이용하여 Crank-Nicolson 기법을 이용하여 시간을 적분하고 공간적으로 중심차분법을 사용하여 2차 정확도를 갖도록 차분하였다. 비선형 대류 항은 시간적으로 2차 정확도를 가지도록 선형화 되었다.

본 해석자에서는 무차원화를 통해 유동 변수를 적절한 특성값으로 나누어 유동 변수 값의 크기 차이로 발생하는 수치 오차를 최소화했다. 무차원화 유동 변수는 아래의 식

$$p = p_{\infty} u_{\infty}^2 p^*, \quad u = u_{\infty} u^*, \quad v = u_{\infty} v^*,$$

$$t = \frac{l}{u_{\infty}} t^* = \frac{t^*}{u_{\infty}}, \quad x = lx^* = x^*$$

$$Re = \frac{\rho_{\infty} u_{\infty} l}{\mu}, \quad l=1, \quad \rho_{\infty}=1$$

을 통해 변환 할 수 있다. ∞ 은 자유류(freestream), *은 무차원화 변수, l 은 특성길이(characteristic length), γ 는 비열비, R 은 기체상수를 의미한다. 항력계수와 무차원화 시간과 같은 특성길이를 포함하는 값을 차원화 할 경우에는 특성길이를 잘 고려해야 한다.

비정상 유동은 시간에 따라 변하는 유동을 말하며 이를 해석하는 전진 기법은 Crank-Nicolson 기법을 제공한다. Crank-Nicolson 기법은 CFL수에 따라서 일정한 시간간격을 따라서 반복 계산하는 방법이다. 그러나 Crank-Nicolson 기법은 대류항의 선형화 과정으로 인해 CFL수로 표현되는 시간간격의 제한이 있다. 최대 허용 CFL수는 1로 본 연구에서 사용한 CFL 수도 1이다.

4. 결 과

1. 두 물체의 Y축 배열(수직 배열)

두 물체가 Y축 기준으로 나열되어 있을 때, 사이 거리가 $d(0.5 < d < 2.0)$ 을 0.1 간격으로 관찰하고, 그 중 4개 ($d=0.5, 1.0, 1.5, 2.0$)에 대하여 격자 상의 압력값의 분포를 보았다. 또한, 압력 분포를 통하여 유체 유동 역시 관찰하였다.

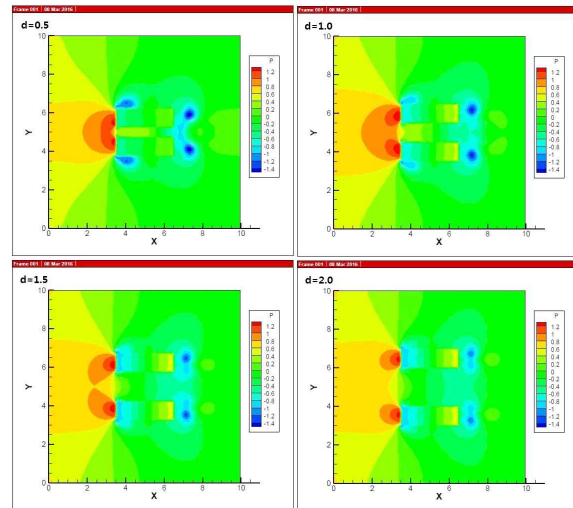


Fig.1 Pressure distribution without line of vertical array

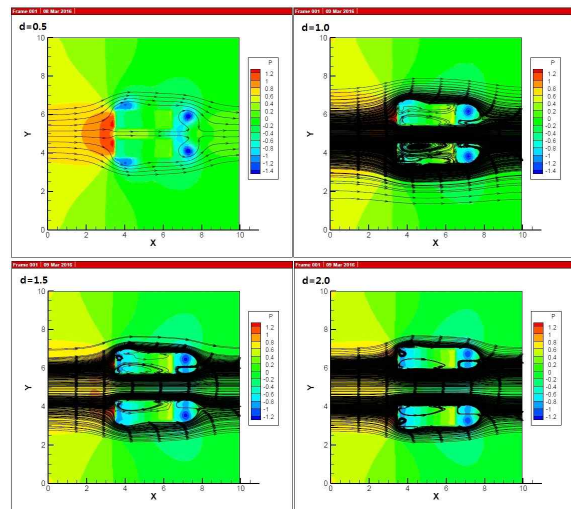


Fig.2 Pressure distribution with line of vertical array

여기서 두 물체의 앞쪽에서 $P=1$ 인 부분의 경계선이 두 개로 분리되는 지점을 우리는 두 물체가 서로에게 영향을 주는 것에 대한 임계점이라 하였다. 이 임계점은 $d=1.5$ 근방에서 분

리가 된다. 즉, 이보다 더 큰 d 값에서의 유동은 서로에게 큰 영향을 주지 못하며, 두 물체가 아니라, 한 물체가 있을 때의 유동과 각각의 유동이 거의 동일하다.

여기서 우리는 d 의 값에 따라 차이가 생기는 유동을 총 4개 정도를 관찰할 수 있었다. 이는 앞쪽에서의 서로에 의한 영향, 앞쪽에서의 가장자리에서의 유동, 틈 사이로의 유동, 물체 뒤쪽에서의 유동이다.

앞쪽에서의 유동은 유동이 앞쪽의 물체에 막혀 압력이 증가하는 현상이다. 이는 사이 간격이 좁아질수록 앞쪽에 모인 유체가 빠져나가기 힘들어지기 때문에 압력이 증가한다. 이는 d 가 커질수록 모인 유체들이 간격 사이로 빠져나가기 때문에 앞쪽 압력 증가 현상은 줄어든다.

가장자리에서의 유동 및 틈 사이로의 유동은 위와 동일하게, d 가 작아질수록 앞쪽에서 모이는 유량이 증가해 P 값이 증가하고, 이에 따라서 옆으로 흐르는 속도는 증가해서 가장자리 옆 부분에서의 압력은 d 가 작아질수록 감소하는 양상을 보인다. 역시 틈 사이로의 유량이 d 에 비해 상대적으로 증가해 틈 사이에서의 압력 역시 d 가 작아질수록 증가한다.

뒤쪽에서는 역시 물체가 막고 있기 때문에 압력이 감소한다. 그러나 이는 d 가 증가함에 따라 압력 감소 값이 증가함을 알 수 있으며, 이 압력 감소 값이 -1.4 근방에서 압력이 낮음에 따라 그 주변을 도는 유동 역시 생긴다.

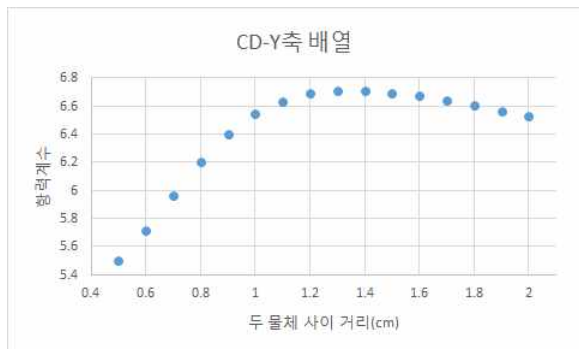


Fig.3 Coefficient of drag of vertical array



Fig.4 Coefficient of lift of vertical array

여기서 양력계수 및 항력계수는 모두 한 물체에 대해서만 측정된 것이다. 이는 실험을 대칭적으로 진행하였기 때문에 반대쪽에도 동일한 양상이 나타날 것이다. 항력계수 즉 저항력은 $d=1.3$ 에서 최대이며, d 가 작을 때, 증가하다가 최고점 이후 감소하는 양상을 보였다. 또한, 양력계수는 $d=0.7-0.8$ 에서 최대를 보이며 d 값이 증가함에 따라서 급격히 감소함을 볼 수 있다.

2. 두 물체의 X축 배열(수평 배열)

두 물체가 X축 기준으로 나열되어 있을 때, 사이 거리가 $d(0.5 < d < 2.0)$ 을 0.1 간격으로 관찰하고, 그 중 4개($d=0.5, 1.0, 1.5, 2.0$)에서 앞과 동일하게 관찰하였다.

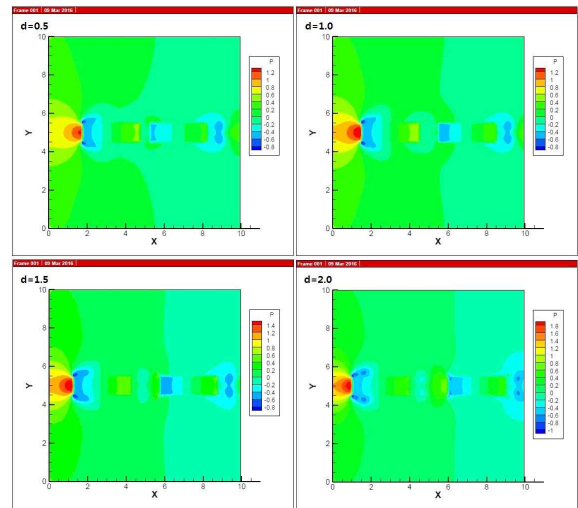


Fig.5 Pressure distribution without line of vertical array

여기서는 물체가 서로 영향을 주는 부분이 앞쪽 물체의 뒷부분을 제외하고는 관찰하기 힘들었다. 이 부분은 d 가 증가함에 따라, 옆면을 타고 흐르는 유동이 들어가는 양이 증가하면서, 압력이 증가하는 양상이 나타났다. $d=0.5$ 일 때에는 뒷부분에 사다리꼴 모양으로 큰 압력 감소가 나타났다.

항력계수 즉 저항력은 d 가 증가함에 따라서 선형에 가깝게 증가함을 볼 수 있다. 양력계수는 $d=1$ 근처에서 최댓값을 가지며, $d=1.4$ 근방에서 0값을 가지는 것을 확인할 수 있었다.



Fig.6 Coefficient of drag of horizontal array

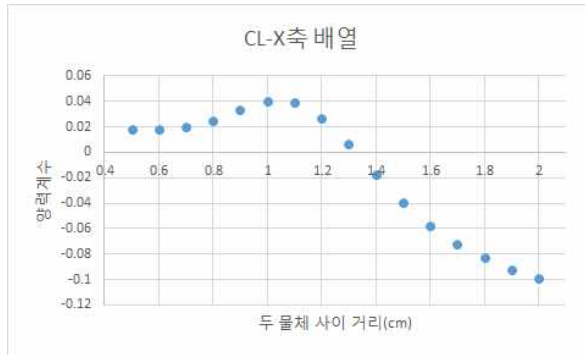


Fig.7 Coefficient of lift of horizontal array

후 기

본 논문은 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단 첨단 사이언스·교육 허브 개발 사업의 지원을 받아 수행된 연구임(No. NRF-2011-0020557)

References

- [1] 1999, Michael Sfakiotakis, David M. Lane, and J. Bruce C. Davies, "Review of Fish Swimming Modes for Aquatic Locomotion" VOL. 24, pp.237
- [2] 2002, Kim, K. and Baek, S, Sung, H.J., "An implicit velocity decoupling procedure for the incompressible Navier-Stokes equations," int. j.numer. Meth. fluids, Vol.38, pp.125
- [3] 2013, Richard H., John C., "Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer, Third Edition", pp.131