대한조선학회논문집
Journal of the Society of Naval Architects of Korea
pISSN:1225-1143, Vol. 56, No. 6, pp. 507-514, December 2019
eISSN:2287-7355, https://doi.org/10.3744/SNAK.2019.56.6.507

유입 유동의 가속도가 2D 원형실린더의 항력 및 후류에 미치는 영향

손현아[1]·이승수[2,†]·조성락[3]
충북대학교 토목시스템공학과[1]
충북대학교 토목공학부[2]
한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소[3]

Effects of Flow Acceleration on Drag Force and Wake Field of 2D Circular Cylinder

Hyun A Son[1]·Sungsu Lee[2,†]·Seong Rak Cho[3]
Department of Structural Systems & CAE, Chungbuk National University[1]
School of Civil Engineering, Chungbuk National University[2]
Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering[3]

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Computational studies of accelerating flow around 2D Circular Cylinder was performed to investigate characteristics of wake field and drag forces. Previous studies had revealed that drag on the cylindrical body in accelerating flow is much greater than that in the flow with constant velocity; however, the underlying physics on the drag increase has not been clearly investigated. In order to investigate the drag increase and its relationship with wake development, this study employed a finite-volume based CFD code, Fluent 13.0 with $k-\omega$ SST model for turbulence effects. Inflows are modeled with varied accelerations from 0.4905 to $9.81 m/s^2$. The drag computed in the present study is in good agreement with previous studies, and clearly shows the increase compared to the drag on the body in the flow with constant velocity. The results also show that drag crisis observed at high Reynolds number in the case of the flow with constant velocity is also found in the case of accelerating flow. The analysis for wake and recirculation length shows that conventional vortex shedding does not occur even at high Reynolds number and the drag increase is larger at higher acceleration.

Keywords : Accelerating flow(가속 유동), Recirculation(재순환 영역), Bluff body(블러프 바디), Added mass(부가질량)

1. 서 론

심해 해양자원 채취 또는 심층수 취수를 위한 해양 라이저에서부터 전 세계 인터넷 네트워크를 위한 해저 광케이블, 수중 탐사 및 군사 목적으로 이용되는 수중 케이블에 이르기까지 해양 산업에서 주상체 형상의 세장체의 이용은 지속되어 왔다. 이러한 심해 라이저 또는 수중 케이블은 해류와 파랑 등의 반복적인 외부 하중에 지속적인 노출로 인한 피로에 의해 파괴의 문제가 있으며 이와 같은 외부 환경에서 잘 견딜 수 있는 설계가 요구되고 있다. 일반적인 피로파괴의 원인으로 와류유기진동(vortex-induced vibration, VIV)과 공진이 지속되는 Lock-in 현상이 잘 알려져 있으며, 수중에서 발생하는 라이저 및 케이블의 진동특성을 파악하기 위해서는 비정상 유동에 의해 구조물에 가해지는 하중을 얻어내는 것이 필수적이다.

한 편, 유체가 블러프 바디(bluff body)에 가하는 힘을 계산하기 위해 수 십 년 동안 단순한 정적 상태에서 복잡한 가속 상태에 이르기까지의 매우 다양한 실험 및 해석이 수행되어왔다(Tritton, 1959; Coutanceau & Bourad, 1977; Finaish et al., 1987; Lee et al., 2011).

먼저 정적 상태에 해당하는 정상류(steady flow) 속에서 대

Received : 17 July 2019 | Revised : 3 September 2019 | Accepted : 19 September 2019
† Corresponding author : Sungsu Lee, sungsulee@chungbuk.ac.kr

부분의 각이 진 형태의 물체는 레이놀즈 수 $Re=1\times10^4$ 이상이 되면 흐름 양상이 변하지 않아 물체 풍상면과 풍하면의 압력차가 일정하게 유지되며 이러한 성질 때문에 큰 Re 값에서도 일정한 C_d 값이 나타나는 특성을 갖는다(Roberson & Crowe, 1997). 반면 원형실린더의 경우에는 $Re=1\times10^5$ 내지 $Re=5\times10^5$으로 증가함에 따라 C_d 값이 현저히 감소하는 drag crisis 현상이 나타난다(Jones, 1968). Re가 커질수록 실린더 표면 위의 경계층은 층류영역에서 난류로 변화하고 박리점은 실린더의 표면에 따라 더욱 하류 방향으로 이동하며 이러한 흐름 유형은 C_d 값의 감소를 가져온다.

이러한 물체 주변의 유동이 시간에 무관한 정상류 또는 일정한 상대 운동에 의한 준정상류일 경우에는 물체와 유체 사이의 상호작용이 비교적 간단하지만 물체와 유체가 따로 또는 동시에 가감속 운동할 경우 둘 사이의 상호작용은 매우 복잡해진다. 유체로 둘러싸인 물체 또는 물체 주변의 유체가 가감속 운동을 할 때에는 정상류일 경우에 발생하는 유체력에 추가적으로 부가 질량(Added Mass)에 해당하는 유체력이 발생하기 때문이다(Newman, 1977).

유체가 가속 운동을 할 때 Re도 시간의 흐름에 따라 증가하며 이때 후류는 동일한 Re에 상응하는 정상류의 경우와 다른 특성을 보일 것으로 예측할 수 있다. 이는 정상류에서의 흐름은 일정한 속도 안에서 완전히 발달된 흐름이지만 가속도 운동은 그 순간 속도에 지나지 않기 때문이기도 하며, 그 차이에 의해 부가 질량으로 표현되는 유체력의 변화가 발생한다고 할 수 있다.

부가질량을 수학적으로 풀기 위한 연구로 Garrison(1962)과 Sarpkaya and Garrison(1963)은 일정한 가속도를 가진 흐름에 잠긴 원형실린더 뒤의 와류의 강도, 성장 및 움직임을 분석하였으며, 포텐셜 흐름 이론을 이용하여 계측된 힘으로부터 항력 계수와 부가 질량 계수를 분리하였고, Fackrell(2011)은 정지상태가 아닌 초기 정상상태의 상대 속도로부터의 일정한 상대 가속의 경우 Sarpkaya and Garrison(1963)의 연구를 기초로 2D 실린더의 부가 질량에 대한 연구를 진행한 바 있다.

또한 유체의 가속운동에 의한 부가질량이 포함된 전체 유체력의 특성을 분석하기 위해 Rho et al.(2008)은 가속도를 갖는 비정상 가속 유동 실험을 수행하여 원형실린더의 항력 성분 분석을 통하여 공기 역학적 특성을 비교하였으며, Lee et al.(2009)은 그에 대한 후속 연구로 사각실린더를 추가하여 마찬가지로 등속유동과 가속유동의 항력변화를 비교 분석하였다. Mason and Yang(2016) 또한 사각 실린더에 가속 흐름을 가하여 항력의 진폭 및 진동수를 같은 Re의 등속유동 결과와 비교했고, Liu et al.(2018)은 저 레이놀즈 수 구간에서 구체를 가속 및 감속하여 등속유동과 항력을 비교한 바 있다. 그러나 이상의 연구들에서 계측 또는 계산된 항력 변화의 원인에 대한 분석은 제시되고 있지 않다.

일반적으로 원형실린더와 같은 블러프 바디에 작용하는 유체력은 압력에 의한 영향이 지배적이며, 이 영향을 분석하기 위해서는 후류의 특성을 파악하는 것이 매우 중요하다. 이에 본 연구는 고정된 2D 실린더에 유입되는 유체를 가속시켜 유체에 의해 가해지는 힘을 전산 해석함으로써 유체력과 후류의 관계를 파악하는 것을 목적으로 수행되었다.

이를 위하여 먼저 Sarpkaya and Garrison(1963)의 실험결과와 Fackrell(2011)의 해석 결과와의 비교를 통해 해석 방법을 검증하였다. 또한 가속에 의해 변화하는 Re에 상응하는 정상류 후류와의 비교를 통하여 유동의 가속도가 후류에 미치는 영향과 항력에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 전산해석 방법

2.1 지배 방정식 및 전산해석 기법

본 연구의 지배 방정식은 식 (1)과 (2)에 주어진 질량 보존의 방정식과 운동량 보존 방정식이다.

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j}=0 \tag{1}$$

$$\rho\left(\frac{\partial u_i}{\partial t}+u_j\frac{\partial u_i}{\partial x_j}\right)=-\frac{\partial p}{\partial x_i}+\frac{\partial}{\partial x_j}\mu\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) \tag{2}$$

이때 u_j는 j=1, 2, 3에 따라 x, y, z 방향의 유속을 나타낸다. 본 연구에서는 x, y는 수평면의 좌표를, z는 중력과 반대방향의 수직 좌표를 나타낸다. 또한 ρ, p, μ는 각각 유체의 밀도, 압력 및 동점성계수를 나타낸다. 한편 본 논문에서 사용되는 레이놀즈 수는 $Re=\frac{\rho v d}{\mu}$로 정의하였는데, d는 원형실린더의 직경, v는 유입 유동 속도를 나타낸다.

수치해석을 위해 상용프로그램 Fluent 19.0이 사용되었으며 압력-속도 커플링 알고리즘으로 일시적 흐름에 대해 가장 권장되는 PISO 알고리즘을 사용하였다. 또한 난류 모델로는 박리의 시작과 크기를 정확하게 예측하는 $k-\omega$ SST 모델을 채택하였다.

2.2 전산모델링 및 경계 조건

해석대상의 모델은 Fig. 1에 나타낸 바와 같다. 전체 해석영역에 대하여 초기에 일정 유속의 정상류가 발달하도록 유동 해석을 수행한 후 특정한 가속도를 갖는 등가속도 유동이 유입되도록 설정하였다. 이때 초기 정상류에 해당하는 Re는 40으로 선행연구(Fackrell, 2011)의 경우를 참고하여 설정하였다.

Fig. 1에서 볼 수 있듯이 물체의 앞 영역의 거리는 속도장에 경계가 미치는 영향을 줄이기 위해 $20d$로 설정하였다. 또한 $60d$의 하류 영역 길이는 실린더에 의해 야기되는 정상 유동 후류 효과를 포함하기에 적절하다고 판단된다. 또한 실린더의 중심으로부터 벽까지의 거리는 직경의 12배로서 벽의 영향을 피하기에 충분한 것으로 판단된다.

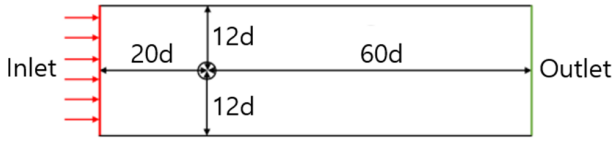


Fig. 1 Computational domain and boundary conditions

시간 간격 $\triangle t$는 초기에 $0.0001s$로 설정되었으며, 매 시간 간격에서 유체 입자가 하나 이상의 격자 경계를 통과하지 않도록 하였다.

또한 원형실리더와 같은 블러프 바디 주변 유동은 실린더 벽면에서 발달하는 경계층 유동으로 인해 실린더 주변 격자의 구성이 매우 중요하다. 특히 벽 근처 영역의 격자는 y^+ 값이 1 이내의 격자로 구성되어야 하므로, 실린더 표면의 첫 번째 격자 높이를 $y^+=1$ 에 해당하는 $2.9\times10^{-6}m$ 이하가 되도록 하였다.

본 연구에 사용된 격자는 Fig. 2와 같으며 전산해석 소요시간을 고려하여 실린더 주변 격자는 사각 격자로 조밀하게, 그 외 영역은 삼각 격자로 성기게 설정하였다.

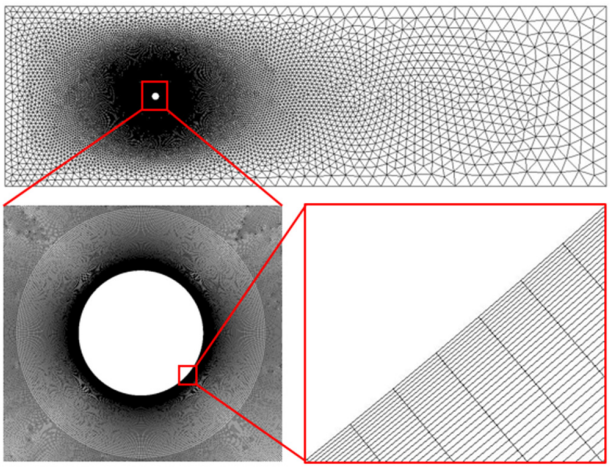


Fig. 2 Grid distribution in computational domain

2.3 수치기법 검증

2.3.1 난류모델 검증

블러프 바디가 일정한 가속도를 가지는 흐름에 잠겨있는 경우 그 주변 유동은 가속도가 증가함에 따라 층류 영역에서 난류 영역에 들어가게 된다. 이때 비정상성의 난류 모사 방법은 해석 정확도에 매우 중요한 영향을 미치며, 본 연구에서는 해석결과의 신뢰도가 비교적 높고, 계산 비용을 절감할 수 있는 RANS(Reynolds-averaged Navier-Stokes) 기반 모형의 two-equation 모델 중 $k-\epsilon$ 모델, standard $k-\omega$ 모델, SST $k-\omega$ 모델을 고려하였으며, 초기 층류 영역을 고려하기 위하여 Laminar 모델에 대한 비교를 수행하였다.

이때 주어진 가속도는 $9.81m/s^2$이며, 항력계수는 선행연구와 마찬가지로 식 (3)과 같이 정의하였다.

$$C_d^*=\frac{F}{a\rho A} \tag{3}$$

이때 F는 항력, A는 실린더의 면적을 의미한다.

난류모델 해석 결과를 Fig. 3에 나타내었으며 Shapkaya and Garrison(1963)의 실험 결과와 비교했다. Standard $k-\epsilon$의 경우 이동거리 초반 실험치보다 높은 C_d^* 값을 나타내며 $s/d>8$에서 vortex shedding으로 인한 fluctuation을 보이고 있다. 또한 Standard $k-\omega$ 모델과 층류의 경우에는 이동거리 초반인 층류 영역에서 실험치와 잘 일치하는 것을 알 수 있지만 Standard $k-\omega$ 모델과 마찬가지로 $s/d>8$에서 vortex shedding으로 인한 fluctuation을 보이고 있다. Shapkaya and Garrison(1963)의 실험에서는 $s/d>30$ 범위에서 vortex shedding 또는 C_d^* 값의 fluctuation이 나타나지 않았으므로 층류 및 Standard $k-\epsilon$, Standard $k-\omega$ 모델은 모두 부적절한 것으로 판단하였다. 반면에 SST $k-\omega$모델의 경우 초기 층류 영역과 난류 영역 모두에서 실험값과 잘 일치하며 가속흐름에 노출된 블러프 바디 주변의 유동해석에 적합한 것으로 판단되었다.

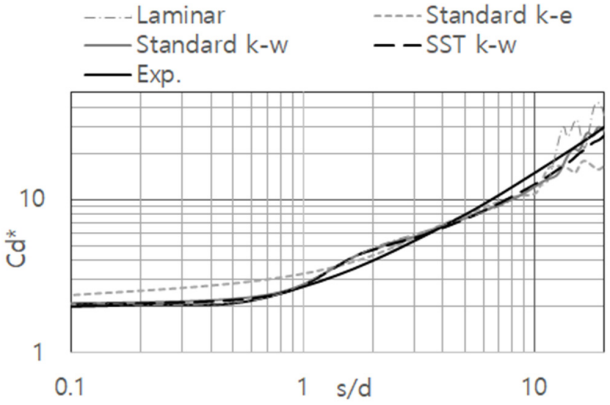


Fig. 3 Effects of turbulence models on drag coefficient C_d^*

2.3.2 격자 수렴성

적합한 격자 크기 및 분포를 결정하기 위하여 Table 1에 나타낸 바와 같이 3가지 경우의 격자 구성을 이용하여 해석을 수행하였다. 특히 벽면 부근 y^+의 중요성을 고려하여 Mesh 2는 실린더 표면에서 y^+ 값이 1에 해당하는 경우이며 Mesh 1과 3은 각각 y^+ 값이 1보다 작거나 큰 경우에 해당한다. 이때 Mesh 3은 전체 격자수 및 실린더 둘레 원주방향 격자수를 Mesh 2보다 더 많게 설정하여 첫 번째 격자 크기의 영향을 알아보고자 했다.

Table 1 Mesh information for grid convergence

	First grid height	Total No. of grids	Number of grids around the cylinder
Mesh 1	1.9×10^{-6}	454,012	940
Mesh 2	2.9×10^{-6}	229,211	800
Mesh 3	5.9×10^{-6}	376,680	1,600

Fig. 4는 Shapkaya and Garrison(1963)의 실험 결과와 세 가지 격자의 이동거리에 따른 C_d^* 값을 나타낸다. Mesh 1과 Mesh 2의 결과에 차이는 없었으며, Mesh 3은 첫 번째 격자 높이만 늘어났을 뿐 전체 격자수와 실린더 둘레 격자수가 Mesh 2보다 많음에도 불구하고 $s/d=10$ 이후 C_d^* 값이 Mesh 1 및 2보다 줄어들며 실험 결과 값에서 멀어지는 것을 볼 수 있다. 이는 첫 번째 격자 높이가 수렴성에 큰 영향을 미침을 확인할 수 있다.

이상의 해석 결과를 종합하여 수렴성이 우수하고 전체 격자수가 적어 계산 비용을 줄일 수 있는 Mesh 2로 연구를 수행하였다.

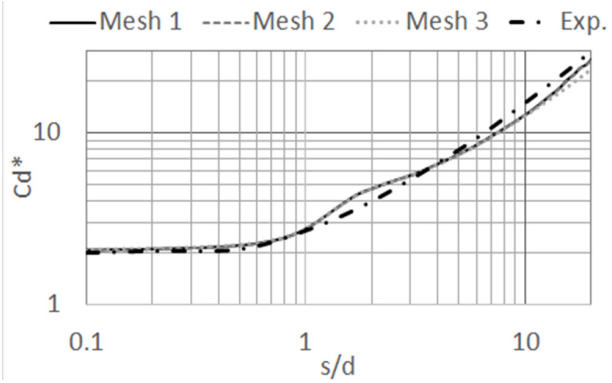


Fig. 4 Comparison of different grid configurations

2.4 해석 범위

유입 유동에 주어진 가속도는 Table 2에 주어진 바와 같이 가속도 $a=9.81\sim0.4905\,m/s^2$의 범위로 연구를 수행하였다. 이때 g는 중력가속도로서 $9.81\,m/s^2$이다.

Table 2 Computational cases

a/g	a $[m/s^2]$
1	9.81
0.1	0.981
0.05	0.4905

Keulegan and Carpenter(1956)는 포텐셜 이론에 의한 등가속 유동에서의 항력계수는 시간이나 Re의 함수가 아닌 상대이동거리와 상관관계가 있음을 보였으며, 이를 근거로 Sarpkaya and Garrison(1963)은 등가속도 상대운동을 하는 경우 물체의 상대 이동 거리, 즉 $s=\frac{1}{2}at^2$을 이용한 분석을 제안한 바 있다.

이때 t는 시간이며, 본 연구에서도 상대 이동거리를 이용한 분석을 수행하였다.

참고로 Fig. 5는 Table 2에 주어진 각 경우에 이동거리와 Re의 관계를 나타낸다.

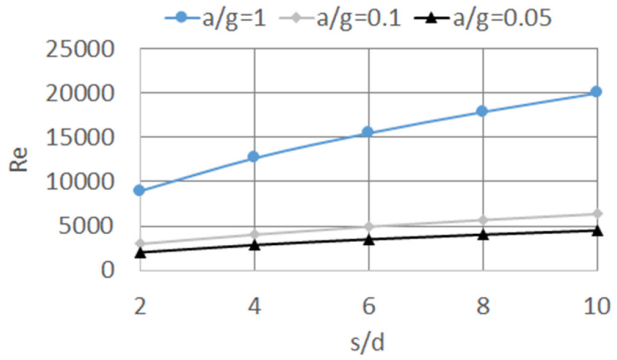


Fig. 5 Re versus non-dimensional displacements, s/d

3. 선행연구와의 비교

이상의 해석 방법을 종합하여 해석 방법 검증을 위하여 Fig. 6에 Sarpkaya and Garrison(1963) 및 Fackrell(2011)의 항력계수를 본 연구의 결과와 비교하였다.

비교 결과, 본 연구의 해석 방법에 의한 결과와 선행연구의 결과는 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

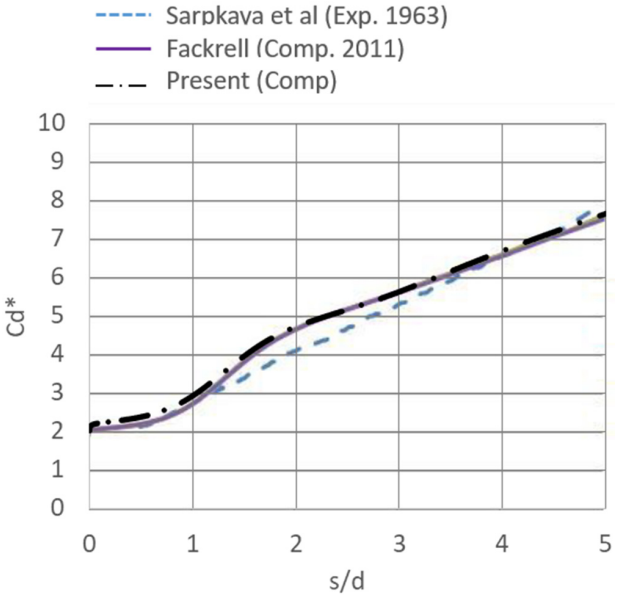


Fig. 6 Comparison of drag coefficient C_d^* between present and previous studies for $a/g=1$

4. 등속유동 및 가속유동의 항력계수 비교

정상류 속 원형실린더의 후류에서 발생하는 특징 중 하나는 실린더 표면을 따라 형성되는 경계층 유동이 층류영역에서 난류영역으로 넘어가며 천이구간이라는 아주 복잡한 흐름이 발생한다는 것에 있다. 이러한 유동영역과 항력의 관계는 Achenbach(1968)에 의하여 도식화된 Fig. 7의 다이어그램으로 설명된다.

Fig. 7의 subcritical 영역에 해당하는 낮은 Re에서는 vortex shedding이 규칙적으로 발생한다. 이후 critical 영역은 표면 경계층 유동이 층류에서 난류영역으로 넘어가는 천이가 진행되는 구간으로 vortex shedding이 불규칙적으로 발생하고 이로 인해 항력이 급격히 감소하는 것으로 알려져 있다. 이 영역을 지나 supercritical 영역에 이르면 다시 vortex shedding의 규칙성이 나타나기 시작하며 항력의 증가로 이어진다. 그 후 Re가 더 증가했을 때의 transcritical 영역은 Roshko(1961)에 의하여 명명되었으며 이 때 규칙적이고 강한 vortex shedding이 발생한다 (Clapperton & Bearman, 2018).

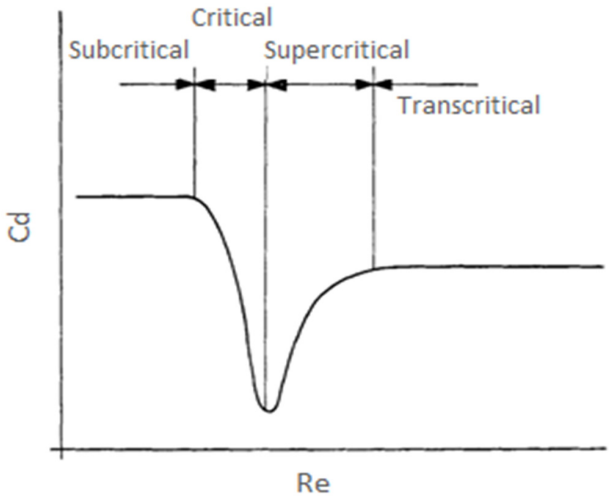


Fig. 7 Diagram outlining the main flow states for a smooth circular cylinder (Achenbach, 1968)

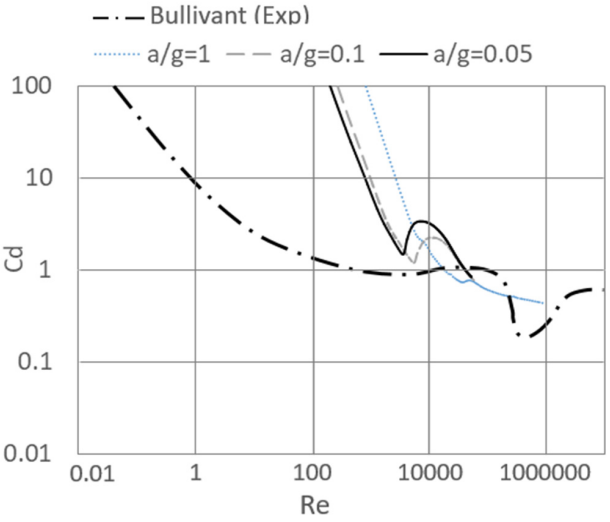


Fig. 8 Comparison of drag coefficient C_d between non-accelerated flow(Bullivant, 1941)and accelerated flow

Fig. 8은 Bullivant(1941)에 의한 등속유동에서의 실험에 의한 항력과 본 연구의 등가속유동 결과를 Re에 따라서 C_d 값을 로그분포로 나타낸 것이다. 여기서 C_d는 식 (4)와 같다.

$$C_d = \frac{F}{\frac{1}{2}\rho v^2 d} \tag{4}$$

특정 Re 범위에서 등속유동인 경우보다 가속유동의 C_d 값이 높게 나타났으며 가속도가 낮을수록 등속유동인 경우의 항력 값과의 차가 줄어들고 있다.

또한 등속유동에서 전형적으로 나타나는 critical 및 supercritical 영역이 가속유동일 경우에는 subcritical 및 critical의 구분 없이 초기에 꾸준히 감소하는 영역이 나타나며, $a/g=0.1$ 및 0.05의 경우 그 후 C_d가 다시 증가하는 supercritical에 해당하는 영역이 각각 $6000 \le Re \le 10000$, $4000 \le Re \le 6000$ 구간에서 나타나고 있는 것을 확인하였다. $a/g=1$의 경우 $30000 \le Re \le 50000$의 영역에서 일정한 C_d 값을 유지하다가 하락하였다.

5. 상대이동거리 및 시간에 따른 항력의 변화

Fig. 6과 8에 의하면 C_d 값은 이동거리 및 Re가 증가할수록 감소하며, C_d^* 값은 이동거리 및 Re가 증가할수록 증가한다. 실제 항력 F는 시간의 흐름에 따라 꾸준히 증가하는데 무차원화 방법이 C_d의 경우 속도의 제곱항, C_d^*의 경우 가속도를 이용하여 무차원화하기 때문이다. 이처럼 무차원화 방법 및 무엇을 기준으로 비교하느냐에 따라 항력계수가 크게 달라지며, 본 논문에서는 필요에 따라 C_d 값 또는 C_d^* 값을 이용하였다.

Fig. 9는 상대이동거리 변화에 따른 항력계수 C_d^*의 변화를 나타낸 것이다. 앞에서 언급한 대로 Sarpkaya and Garrison(1963)에 의하면 항력계수와 무차원화 된 이동거리 (s/d)의 상관관계가 있음을 증명하였으며, Fackrell(2011) 또한 수치해석을 통하여 $a/g=2,1,0.5$에 대하여 가속도와 관계 없이 데이터의 상관관계가 매우 양호함을 보였다. 본 연구에서는 $a/g=1,0.1,0.05$로 가속도의 크기가 매우 작은 정상류에 가까운 가속유동이 포함되었으며, 가속도가 줄어들수록 C_d^* 값은 증가하였다.

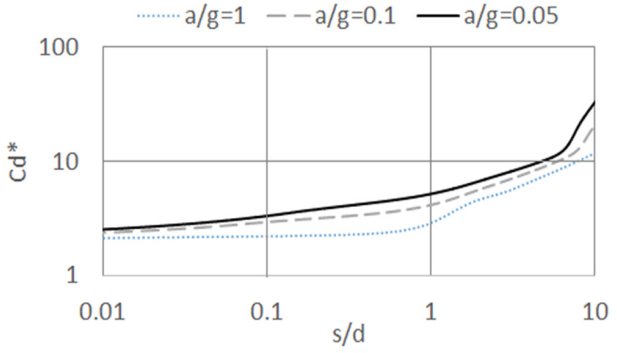


Fig. 9 Spatial variation of drag coefficient C_d^*

Fig. 9에 의하면 동일한 이동거리일 경우 가속도가 작을수록 C_d^* 값이 크게 나타나는데, 같은 이동거리가 되기 위해서는 가속도가 작을수록 더 많은 시간이 소요된다. 예를 들어 $a/g=0.01$의 경우 $a/g=1$ 보다 10배의 시간이 소요된다. 따라서 시간에 따른 C_d^*를 나타낸 Fig. 10에 의하면 같은 시간에서 가속도가 작을수록 C_d^* 값은 작게 나타난다. 또한 가속도에 관계없이 C_d^*는 모두 초반에 서서히 증가하다가 특정 지점에서 기울기가 증가하는 특징을 볼 수 있다.

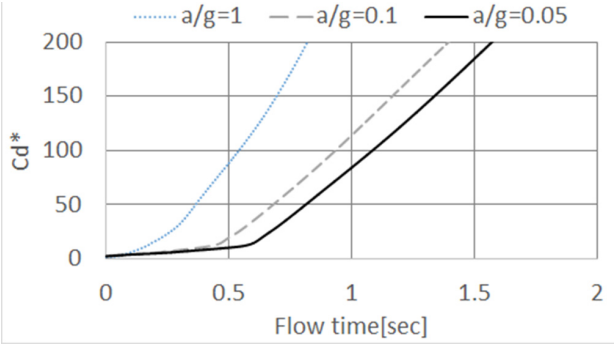
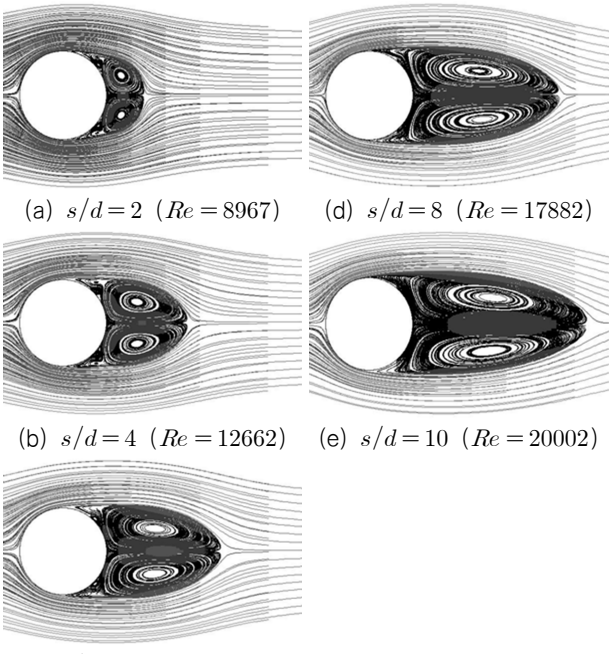


Fig. 10 Temporal variation of drag coefficient C_d^*

6. 후류의 특성

6.1 가속도가 후류 변화에 미치는 영향

Fig. 11~13은 무차원화 된 상대이동거리(s/d)에 따른 후류의 변화를 나타낸다. 일정한 가속도 흐름을 갖는 유동속의 원형 실린더는 Re가 증가할수록 표면 경계층에서 박리된 와류의 크기가

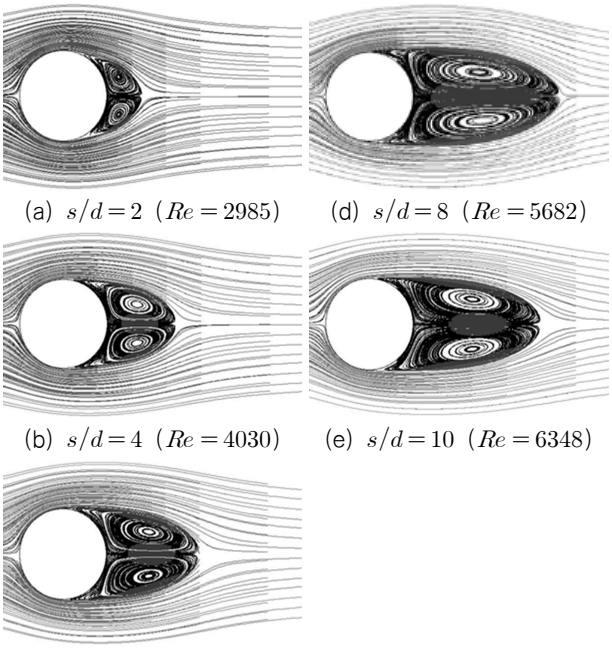


(a) $s/d=2$ ($Re=8967$) (d) $s/d=8$ ($Re=17882$)

(b) $s/d=4$ ($Re=12662$) (e) $s/d=10$ ($Re=20002$)

(c) $s/d=6$ ($Re=15489$)

Fig. 11 Streamlines at different s/d for $a/g=1$

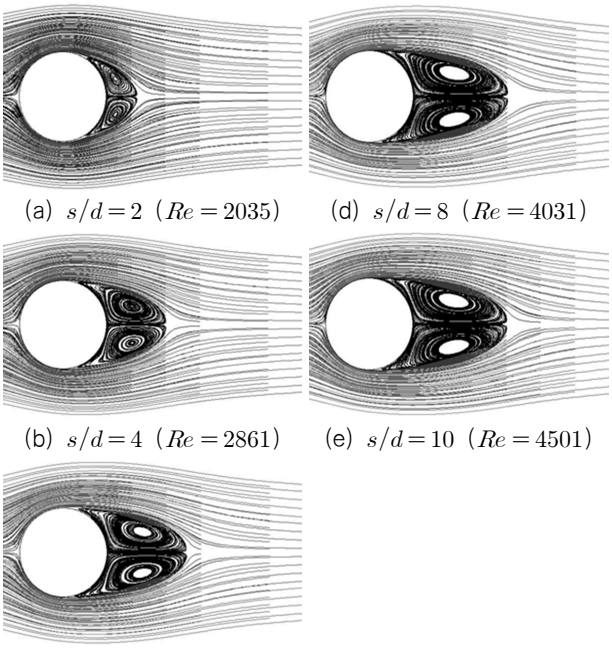


(a) $s/d=2$ ($Re=2985$) (d) $s/d=8$ ($Re=5682$)

(b) $s/d=4$ ($Re=4030$) (e) $s/d=10$ ($Re=6348$)

(c) $s/d=6$ ($Re=4926$)

Fig. 12 Streamlines at different s/d for $a/g=0.1$



(a) $s/d=2$ ($Re=2035$) (d) $s/d=8$ ($Re=4031$)

(b) $s/d=4$ ($Re=2861$) (e) $s/d=10$ ($Re=4501$)

(c) $s/d=6$ ($Re=3496$)

Fig. 13 Streamlines at different s/d for $a/g=0.05$

증가하지만 vortex shedding은 나타나지 않는다. 등속 정상흐름 속의 실린더의 경우 Re가 증가할수록 vortex shedding이 나타나는 것과는 대조적이다. 이러한 특성은 앞서 언급했듯이 Shapkaya and Garrison(1963)의 실험 및 Fackrell(2011)의 실험에서 $s/d>30$ 범위에서 vortex shedding이 발생하지 않는다는 것과 일치한다. 이는 실린더의 후류에 vortex shedding 현상이 나타나는 완전히 발달한 등속 정상흐름의 레이놀즈 수와 가속 흐름 상태에서의 레이놀즈 수가 순간적으로 일치한다고 하

더라도 그 순간의 후류 상황은 완전히 다르다는 것을 보여주고 있다. 이동거리가 증가할수록 와류의 크기가 증가하는 경향을 보이는 것은 가속으로 인한 에너지가 와류의 크기를 키우는 것에 기여하기 때문으로 판단된다.

6.2 재순환 영역 길이

물체 표면에서 박리된 와류에 의해 후류에 형성되는 재순환 영역의 길이(recirculation length)는 와류의 크기를 정량화할 수 있는 기준 중 하나로 항력과 밀접한 관련이 있다. 본 연구에서 재순환 영역의 길이는 Fig. 14에 보는 바와 같이 y'로 정의하였다.

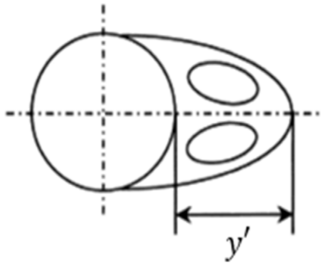


Fig. 14 Definition of recirculation length

저 레이놀즈 수에서의 재순환 영역 길이에 대한 연구는 Acrivos(1968)에 의하여 $20 \leq Re \leq 80$의 범위로 수행된 바 있다. 본 연구에서는 정상유동에서 난류영역에 해당되는 고 레이놀즈 수에서도 vortex shedding이 나타나지 않았다. 각 경우에 상대이동거리에 따른 재순환 영역 길이의 변화를 Fig. 15에 나타내었다. 결과에 의하면 재순환 영역 길이는 가속도가 클수록 큰 값을 갖으며, 이동거리가 증가할수록 길어지고, a/g가 작을수록 증가율이 줄어드는 것을 알 수 있다. 특히 $a/g=1$인 경우에 재순환 영역 길이는 s/d와 거의 선형적으로 비례하여 증가하는데 반해, $a/g=0.05$의 경우는 s/d가 증가함에 따라 재순환 영역 길이의 증가율이 감소하는 것으로 나타났다.

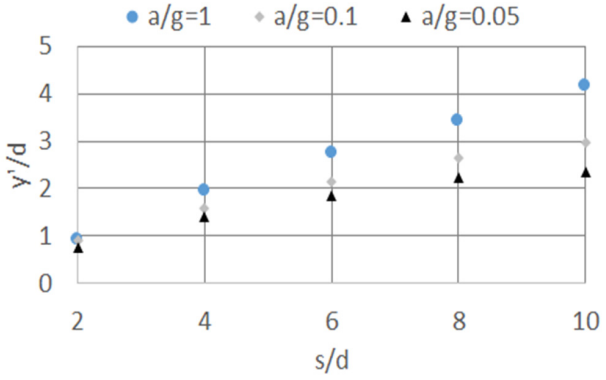


Fig. 15 Recirculation length versus non-dimensional displacements, s/d for various acceleration

이러한 경향은 Fig. 11과 13에서도 뚜렷하게 나타나고 있는데, 이러한 후류의 변화는 Fig. 9에 보인 C_d*의 비교와 직접 관계가 있다고 할 수 있다. 즉, 가속도가 큰 경우 재순환 영역의 증가가 항력의 증가로 나타남을 확인할 수 있다.

7. 결 론

본 연구에서는 등가속도를 갖는 유동장에 고정된 2D 실린더 주위 유동을 전산해석하여, 물체에 작용하는 유체력 및 후류가 유체력에 미치는 영향을 분석하였다. 수치해석을 위해 유한체적법 기반의 상용프로그램 Fluent 19.0이 사용되었으며 난류는 $k-\omega$ SST 모델을 이용하였다.

유입 유동의 가속은 $9.81 \sim 0.4905 m/s^2$ 의 범위에 대한 해석이 수행되었으며, 결과는 다음과 같이 요약될 수 있다.

1) 선행연구 결과인 Sarpkaya and Garrison(1963)의 실험결과와 Fackrell(2011)의 해석 결과를 이용하여 본 논문의 해석 방법을 검증하였다.
2) 특정 Re 범위에서 등속유동인 경우보다 가속유동인 경우 C_d가 높게 나타났으며, 가속도가 낮을수록 등속유동인 경우의 C_d와 가까웠다. 또한 supercritical 영역과 같이 C_d가 꾸준히 감소하다가 특정 시점에서 증가하는 영역이 가속유동일 경우에도 나타나고 있는 것을 확인했다.
3) C_d*는 모든 경우에 가속 초기에 서서히 증가하다가 특정 지점에서 기울기가 증가하는 특성이 나타났다.
4) 각 가속도 $a/g=1 \sim 0.05$에 대하여 상대이동거리에 따른 후류와 재순환 영역 길이를 분석했다. 재순환 영역의 길이는 가속도가 클수록, 이동거리가 증가할수록 길어지고, a/g가 작을수록 증가율이 감소하는 것을 알 수 있었다.

이상의 결과로부터 가속하는 유동장에 위치한 주상체에 작용하는 유체력은 동일한 Re의 등속 유동장의 유체력에 비해 큰 차이를 보이며, 이는 주상체 구조물의 하중 평가에 반드시 고려될 필요가 있음을 확인할 수 있다.

후 기

본 연구는 선박해양플랜트연구소 주요사업 “선박의 빙해역 저항성능 고도화 및 위치유지성능 시험평가 기반구축(PES9451)”의 지원과 “2018학년도 충북대학교 연구년제 지원”에 의하여 수행되었음.

References

Achenbach, E., 1968. Distribution of local pressure and skin friction around a circular cylinder in cross-flow up to re = 5 × 106. *Journal of Fluid Mechanics,* 34(4), pp.625-639.

Bullivant, W. K., 1941. Test of the NACA 0025 and 0035 airfoils in the full scale wind tunnel, *NANA Report No NACA-TR-708.*

Clapperton, B. L., & Bearman, P. W., 2018. Control of circular cylinder flow using distributed passive jets. *Journal of Fluid Mechanics*, 848, pp.1127–1178.

Coutanceau, M. & Bourad, R., 1977. Experimental determination of the main features of the viscous flow in the wake of a circular cylinder in uniform translation part 1. steady flow. *Journal of Fluid Mechanics*, 79, pp.231–256.

Fackrell, S., 2011. *Study of the added mass of cylinders and spheres.* Ph.D.: University of Windsor, Ontario, CA, Canada.

Finaish, F., Palmer, M. & Freymuth, P., 1987. A parametric analysis of vortex patterns visualized over airfoils in accelerating flow. *Experiments in Fluids*, 5, pp.284–288.

Garrison, C.J., 1962. Resistance in unsteady flow. M.A.Sc. Thesis: Department of Engineering Mechanics, University of Nebraska, Lincoln, Nebraska.

Jones, G.W., 1968. Aerodynamic forces on stationary and oscillating circular cylinder at high reynolds numbers. *ASME Symposium on Unsteady Flow*, pp.1–30.

Keulegan, G. H., & Carpenter, L. H., 1956. Forces on cylinders and plates in an oscillating fluid. *National Bureau of Standards Report No 4821.*

Lee, J., Rho, K., Kim, K. & Lee, D., 2011. Fundamental studies on free stream acceleration effect on drag force in bluff bodies. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 25, pp.695–701.

Lee, Y., Rho, J., Kim, K., & Lee, D., 2009. Wind tunnel test of the aerodynamic characteristics around a circular and square cylinders in unsteady accelerated flow, *KSAS 2009 Spring Conference*, Republic of Korea, 78–81 February 2009.

Liu, F., Liu, P., Qu, Q., Lin, L. & Hu, T., 2018. Numerical study of flow physics and drag of spheres in unsteady motion, *2018 Fluid Dynamics Conference*, 25–29 June 2018.

Mason, M. S. & Yang, T., 2016. Modulation of vortex induced crosswind forces on a square cylinder during accelerating flow, *20th Australasian Fluid Mechanics Conference Perth,* Australia 5–8 December 2016.

Newman, J. N., 1977. *Marine Hydrodynamics*. Cambridge, Massachusetts: MIT Press.

Rho, J., Lee, Y., Kim, K., Lee, D., & Cho, H.., 2008. Experimental studies on aerodynamic characteristics in unsteady accelerated flow, *KSAS 2008 Spring Conference,* Republic of Korea, 582–585 February 2008.

Roberson, J. A. & Crowe, C. T., 1997. *Engineering Fluid Mechanics (6nd ed.).*

Roshko, A., 1961. Experiments on the flow past a circular cylinder at very high reynolds number. *Journal of Fluid Mechanics,* 10(3), pp.345–356.

Sarpkaya, T. & Garrison, C.J., 1963. Vortex formation and resistance in unsteady flow. *Transactions of the ASME Journal of Applied Mechanics*, pp.16–24.

Tritton, D. J., 1959. Experiments on the flow past a circular cylinder at low Reynolds numbers. J*ournal of Fluid Mechanics*, 6, pp.547–267.

손 현 아

이 승 수

조 성 락