

이동 벽면에 놓인 2차원 원통의 후류 해석

Wake Analysis of a 2-Dimensional Circular Cylinder in Presence of a Moving Wall

정재윤*, 장조원 (한국항공대학교)

1. 서론

어떤 물체가 벽면근처에서 벽면에 의한 유동의 간섭은 자유흐름 속의 유동과는 다른 형태의 유동을 만들어 낸다. 자유흐름이 없는 상태에서 일정한 속도로 벽면 위를 움직이는 현상은 자동차, 기차 또는 항공기의 이착륙처럼 실생활에서 쉽게 찾아볼 수 있다. 이러한 현상은 단순히 물체에서 생성된 후류가 지면과의 상호 간섭에 의해 후류형상 및 물체에 작용하는 힘의 변화에 영향을 준다. 이러한 벽면과의 지면효과(ground effect)는 몇 가지 특징적인 현상을 유발하는데, 그 중 하나가 후류의 벽면 부착 현상이다. 지면 효과에 영향을 주는 변수로는 지면과 물체와의 거리인 틈새비(gap ratio)가 있는데, 이러한 틈새비가 작아짐에 따라 일정 임계값 이하가 되는 경우 후류의 벽면 부착 현상이 발생하게 된다.

Zhang & Zerihan[1]은 Tyrrel-026 익형에 대해 정상상태에서 틈새비에 따른 후류 형상에 대해 조사를 하였는데, 임계 값을 기준으로 후류 형상이 확연히 차이가 났고 벽면 부근 후류 지점의 결손속도 역시 크게 증가함을 볼 수 있었다. 이런 후류의 벽면 부착은 지면효과에 의한 올려흐름(upwash)과 내리흐름(downwash)의 생성에도 영향을 준다. 이러한 현상은 대칭형 익형이나 원통의 지면효과에 대해 확연히 확인할 수가 있는데, Turner[2]나 Stewart[3]에 따르면 지면효과에 의한 익형의 올려흐름과 내리흐름은 벽면 경계층의 유무에 의해 현상의 차이를 보인다. 두 흐름과 벽면 사이에서 생성된 와류는 유동의 압력을 증가시켜 양력의 증가(air cushion effect)를 가져오지만, 국부적으로

생성된 와류일 경우 피칭모멘트를 발생시킨다. Graves[4]는 이처럼 지면효과에 의한 공력계수 변화에 대해 삼각날개에 대해 정상, 비정상 상태에서 조사를 하였으며, Bhattacharyya & Maiti[5]는 자유흐름과 같은 속도로 움직이는 벽면 위 사각기둥의 와류홀림뿐만 아니라 스트루할수(Strouhal number)의 지면 효과에 따른 증가와 후류에 대해 조사를 하였다.

지면효과를 받는 유동현상에 대한 조사는 아직 미흡하며, 최근에서야 원론적인 연구가 진행되고 있다. 따라서 본 논문에서는 자유흐름이 없는 벽면 위를 움직이는 원통에 대해 수치해석적 방법으로 지면효과가 후류에 미치는 영향에 대해 조사하였으며, 이러한 결과는 지면효과에 관한 연구의 기초 자료로 활용할 수 있을 것이다.

2. 수치해법 및 계산조건

2.1 Detached-Eddy Simulation

수치해석으로 Detached-Eddy Simulation (DES)을 이용하였다. DES는 기본적으로 고체형상 벽면에서의 Subgrid와 RANS formulation을 줄인 Spalart-Almaras RANS 모델에 그 기본을 두고 있다[6].

본 연구에서 이용한 DES 코드에 적용되는 Spalart -Almaras RANS 모델의 기본적인 식은 다음과 같다.

$$\frac{D\tilde{\nu}}{Dt} = c_{b1}\tilde{S}\tilde{\nu} + \frac{1}{\sigma} [\nabla \cdot ((\nu + \tilde{\nu})\nabla\tilde{\nu}) + c_{b2}(\nabla\tilde{\nu})^2] - c_{w1}f_w \left[\frac{\tilde{\nu}}{d}\right]^2$$

$$\tilde{S} \equiv S + (\tilde{\nu}/\kappa^2 d^2) f_{v2}$$

$$f_{v2} = 1 - \chi / (1 + \chi f_{v1})$$

여기서 $\tilde{\nu}$ 가 계산 변수이고 \tilde{S} 는 와류장도의 크기를 나타낸다. 와류 점성 계수 ν_t 는 다음 식에 의해 구해진다.

$$\nu_t = \tilde{\nu} f_{v1}, f_{v1} = \chi^3 / (\chi^3 + c_{v1}^3), \chi \equiv \tilde{\nu} / \nu$$

여기서 ν 는 분자 점성 계수이고 f_u 에 관한 식은 다음 식에서 구할 수 있다.

$$f_w = g \left[\frac{1 + c_{w3}^6}{g^6 + c_{w3}^6} \right]^{1/6}, g = r + c_{w2} (r^6 - r)$$

$$r \equiv \frac{\tilde{\nu}}{\tilde{S} \kappa^2 d^2}$$

DES 계산 시, 가장 가까운 표면까지의 거리 d 는 \tilde{d} 로 대체 되고 \tilde{d} 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tilde{d} \equiv \min(d, C_{DES} \Delta)$$

$$\Delta \equiv \max(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$$

여기서, 등방성 난류의 경우 $C_{DES} = 0.65$ 의 값을 가진다. Constantinescu[7]의 연구에 따르면 기존의 수치해석 코드보다 비교적 DES가 전체적으로 실제 유동에 근접하고, 특히 속도구배가 빠른 경계층 및 분리가 발생하는 곳에서의 계산이 정확하다. Table 1은 본 수치계산에서 사용된 상수값이다. 본 연구에서 계산은 FLUENT를 이용하였으며, Simple 및 중앙차분(Central Differencing)법을 이용하였다.

Table 1 계산에 사용된 상수값

벽면 경계 조건	$\tilde{\nu} = 0$
c_{b1}	0.1355
σ	2/3
c_{b2}	0.622
κ	0.41
c_{w1}	$c_{b1}/\kappa^2 + (1 + c_{b2})/\sigma$
c_{w2}	0.3
c_{w3}	2
c_{v1}	7.1

2.2 계산조건

Fig. 1은 본 수치계산에서 사용한 격자계를 나타낸 것이다. 총 25,378개의 격자를 사용하였고, 원통 표면의 y+값은 고려하지 않았다. 원통은 고정된 좌표에 위치시키고, 원통아래에 위치한 벽면은 자유흐름과 같은 속도로 움직이게 하여 경계층의 생성되지 않게 하였다. 이것은 자유흐름이 없을 때 자유흐름속도로 움직이는 원통과 같은 유동을 나타낸다.

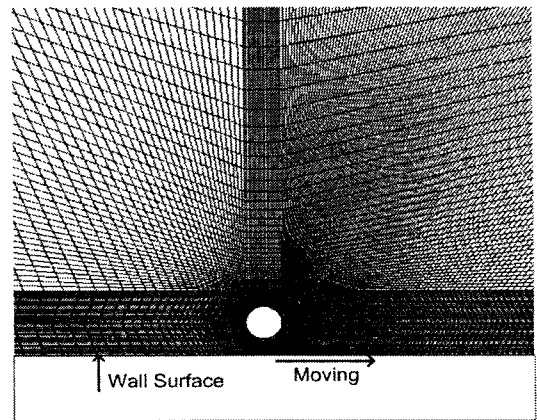


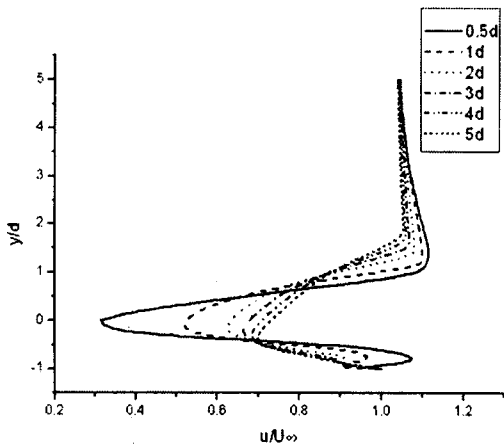
Fig. 1 격자계

본 연구에서는 Bhattacharyya & Maiti[5]가 조사한 $Re=500 \sim 1000$ 범위에서 비교를 하기 위하여 원통 직경에 대해 $Re=520$ 과 $Re=670$ 두 경우에 대해 조사를 하였다. 자유흐름의 난류강도는 0.4% 이고, 벽면의 거칠기는 1×10^{-6} 이고 거칠기 계수는 0.5이다. 지면에서부터의 거리와 원통직경의 비(y/d)는 Lee[8]등이 언급한 임계 틸새비(y/d=0.2~0.3)를 피하기 위해서 0.5로 두었다.

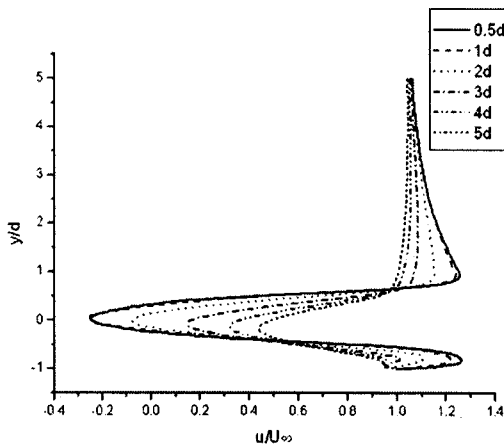
3. 결과 및 검토

Fig. 2는 각각의 경우에 대해 후류의 시간평균속도분포(time averaged velocity distribution)를 나타낸다. 지면에서 높이에 따른 거리를 실린더 직경에 대해 무차원화 하였고 속도를 자유흐름속도에 대해 무차원화 하였다.

원통은 $(x,y) = (0,0)$ 지점에 중심이 위치하고, 후류 속도는 원통 중심으로부터 0.5d에서 5d까지 측정하였다. 두 경우 모두 0.5d의 경우 원통의 x축 방향 중심에 후류의 최대 속도결손 위치가 존재하지만, 점점 후류로 갈수록 최대 결손 속도 지점은 벽면으로 향함을 알 수 있다. 특히 $Re=520$ 인 경우 $Re=670$ 일 때보다 후류 중심의 벽면 부착의 정도가 더 심하며, 속도의 결손 역시 확연히 증가됨을 알 수 있다.



(a) $Re = 520$



(b) $Re = 670$

Fig. 2 $Re = 520, 670$ 에서 후류속도분포

이것은 Zhang & Zerihan[1]의 연구와 비슷한 결과를 나타내며 Turner[2]가 언급했듯 내리흐름 역시 관찰 할 수가 있어 원통 아랫면에 와

류의 생성 역시 짐작 해 볼 수 있다. 두 경우 뒷전에 가장 근접한 0.5d 지점은 비슷한 후류의 폭을 나타내지만 후류로 내려 갈수록 후류 폭의 차이를 볼 수 있다. $Re=520$ 인 경우 후류의 결손속도의 회복과 함께 폭이 넓어지는데 반해 $Re=670$ 의 경우 결손속도는 회복하지만 후류 폭의 큰 변화는 없다. 이러한 확연한 차이는 후류에 영향을 주는 임계 레이놀즈수가 틈새비가 0.5 일 때 $Re=500\sim 700$ 사이에 위치하기 때문이라고 추측된다.

이와 같이 지면효과를 받은 후류는 와류홀림(vortex shedding)에도 영향을 주는데 지면효과를 받는 경우 자유흐름에서보다 스트로울수가 더 큰 값을 나타낸다. Bhattacharyya & Maiti[5] 등은 지면효과를 받는 사각기둥에 대해 $Re=100\sim 1000$ 까지 스트로울수에서 자유흐름과의 스트로울수 차이가 $Re=500\sim 600$ 사이에서 가장 크게 나타난다고 하였다. Fig. 3은 $Re=670$ 일 때 지면효과를 받은 후류의 파워 스펙트럼을 나타낸 것이다. 저레이놀즈수 영역의 후류이므로 후류가 하류로 진행하지만 파워스펙트럼의 최고점(peak point)의 변화는 없다. 이것은 뒷전에서 형성된 후류가 난류로 발달하지 못한 전체 유동장에 지배적인 영향을 미치는 것으로 해석 할 수 있으며, 저 레이놀즈수 영역에서 주로 일어나는 현상이다.

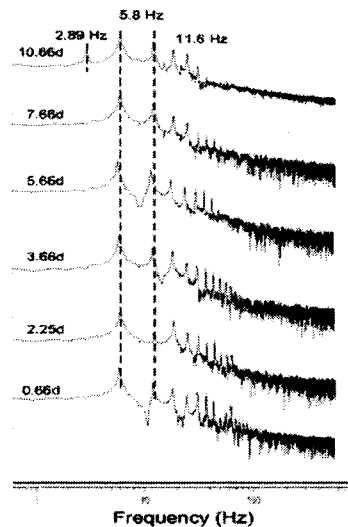


Fig. 3 $Re = 670$ 후류 파워스펙트럼

Table 2는 자유흐름 및 지면효과를 받을 때의 각각의 스트롤수(Strouhal number)를 비교한 것이다. Table 2에서 보이는 지면효과에 의한 후류의 와류홀림 주파수의 증가는 양력의 주파수에도 영향을 미치는데 이것은 Bhattacharyya & Maiti[5]에서 보여 준 양력 그래프에서 확인 할 수 있다. 이러한 와류 홀림 주파수의 변화는 원통 경계층이 벽면으로부터의 교란에 의한 경계층의 변화와 지면에서 형성된 Haripin 와류와 뒷전에서 생성된 와류와 간섭에 의한 변화라고 생각한다.

Table 2 각 조건별 스트롤수

	Re=520	Re=670
Ground effect	0.233	0.232
Freestream[9]	0.207	0.21
square cylinder[5]	0.188	0.183
freestream[5]	0.122	0.199

4. 결론

본 연구에서는 자유흐름이 없는 벽면 위를 움직이는 원통의 지면효과에 대해 조사하였다. Re=520, Re=670 그리고 틸트비가 0.5인 경우 후류의 평균 속도결손이 레이놀즈수가 증가함에 따라 급격히 늘어났고, Re=520일 때는 후류의 폭이 유동이 진행됨에 따라 늘어났으나 Re=670의 경우 유동이 진행되어도 큰 변화가 없었다. 두 경우 후류의 벽면 부착을 확인 할 수 있었는데, Re=520인 경우가 더 급격히 부착되었다. 이와 같은 지면효과는 후류의 와류홀림에도 영향을 주어 스트롤수를 증가시키는데, Bhattacharyya & Maiti[5]는 이러한 스트롤수 증가는 양력곡선에 직접적인 변화를 가져온다고 하였다. 이것으로 미루어 Re=500~700사이에서 임계값이 있음을 예측 할 수 있다.

향후 원통 표면 및 벽면에서의 유동변화에 따른 전체 유동장 변화의 상관관계에 대한 연구를 수행할 예정이다.

참고문헌

- 1) Zhang, X., Zerihan, J., "Unsteady Turbulent Wake Behind a Single-Element Wing in Ground Effect" *The 10th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics*, Lisbon, Portugal, 2000
- 2) Tunner, T. R., "Endless-Belt Technique for Ground Simulation" NASA SP-116, April 1966, pp.435~446
- 3) Stewart, V. R., "The Characteristics of the Ground Vortex and Its Effect on the Aerodynamics of the STOL Configuration" *Ground Vortex Workshop*, Feb 1, 1988, pp. 1~38
- 4) Graves, S. S., "Investigation of a Technique for Measuring Dynamic Ground Effect in a Subsonic Wind Tunnel" NASA/CR-1999-209544, 1999
- 5) Bhattacharyya, S. & Maiti, D. K., "Vortex Shedding from a Square Cylinder in Presence of a Moving Wall" *International Journal for Numerical Method in Fluids*, Vol. 48, 2005, pp985~1000
- 6) Shur, M. L., Spalart, P. R. and Strelets, M. K. "Detached-Eddy Simulation of an Airfoil at High Angle of Attack" *Proceedings of the 4th International Symposium on Engineering Turbulence Modeling and Measurements*, Elsevier, Amsterdam, 1999, pp. 669-678
- 7) Constantinescu, G., Chapelet, M. and Squires K. "Turbulence Modeling Applied to Flow over a Sphere", *AIAA Journal*, Vol. 41, No. 9, 2003
- 8) Choi, J. H., Lee, S. J., "Ground Effect of Flow Around an Elliptic Cylinder in a Turbulent Boundary Layer" *Journal of Fluids and Structures*, Vol. 14, 2000, pp. 697-709
- 9) Schlichting, H., "Boundary Layer Theory" *Mc-Graw Hill*, 1976