지면효과를 받는 2차원 원통 후류 연구

Wake Analysis of an 2D Circular Cylinder in Ground Effect

정재윤*, 장조원(한국항공대학교), 정윤식(아시아나항공)

1. 서론

물체 주위에 위치한 벽면의 존재는 유동의 외부교란(external influence) 역할을 수행한다. 이러한 외부교란은 자유흐름 상태에 놓인 물체의 유동과는 다른 유동장을 유발하며, 결국은 물체에 미치는 공기역학적 힘(aerodynamic force)에 영향을 준다.

이와 같은 지면효과를 받는 물체에 대한 연구는 공력의 변화 또는 와유동(vortex flow)에 대한 연구가 이루어져 왔다.

Lim[1]은 벽면 위에 위치한 익형(airfoil)에 대한 수치 해석적 연구에서 동일 레이놀즈수일 때 벽면과 에어포일의 간격비(gap ratio)에 따른 양력 및 항력의 변화를 언급하였다. 특히 벽면 방향으로 위치한 면에서 압력변화에 의한 공력 변화가 두드려 짐을 보였다. 또한 Kim. et. al.[2]은 지면효과 영향을 받는 사각 실린더에 대한 수치 해석적 연구로 스트롤수의 변화 및 와유동의 변화에 대해 언급했다. 특히 스트롤수의 변화는 지면효과를 받을 때 전체 유동장의 주기가 더욱 짧아짐을 의미하고 Jung and Chang[3], Bhattacharyya & Maiti[4]의 연구에서도 같은 경향을 나타내었다. 또한 Jung and Chang[3]은 이러한 와유동장 변화가 일으키는 와유동의 비대칭(asymmetry)에 대한 설명에서 벽면 방향 와유동과 벽면의 존재가 유발하는 벤투리 효과(venturi effect)에 의해 아랫면과 윗면의 속도 변동이 달라짐에 의해 유동장 발달이 비대칭적으로 일어난다고 설명하였다. 이러한 비대칭성으로 인해 공력 주기의 변화 및 크기의 변화가 유발되고 결국은 Kang et al.[5]이 언급하였던 높은 압력구배에 의한 와류 roll-up의 증가로 기저압력(back pressure) 감소에 따른 항력 증가 유발을 확인 할 수 있었다. Braza et al.[6]은 주기적인 Karman 와류 생성은 분리 전단층(separated shear-layer)과 생성되기 시작하는 와류 사이의 유동 흡입에 의해 생성된다고 하였다. 이외에도 Jung and Chang[3]은 외부 교란에 의한 유동장 변화는 먼저 분리 전단층에서 시작되며, 특히 벽면 방향 영역의 속도 파동의 증가와 함께 전단층으로의 유동 흡입량의 증가에 의해 분리 전단층의 비대칭 발달이 전체 와유동장의 발달에 큰 영향을 준다고 하였다.

본 논문에서는 지면효과가 유발하는 공력 변화의 원인 파악을 위해 와유동장 및 공력 변화에 대한 비정상 전산 연구를 수행하였다.

2. 수치해법 및 계산 조건

2.1 수치해법

본 연구에서 유동 모사는 점성, 비압축성 Navier-Stokes 방정식을 풀어 계산을 하였으며, 난류 모델로는 Spalart-Allmaras 1 eq. 모델을 사용하였다. 이러한 모델은 2 eq. 모델에 비해 비교적 짧은 계산시간과 높은 효율성을 지닌 장점이 있다. 압력은 2nd order, 모멘텀 및 난류 점성계수 항은 2nd order upwind scheme을 사용하여서 공간에 대한 2차의 정확도를 가지도록 하였다. 또한 전체 계산 영역에 대해서 SIMPLE 방법으로 풀었다.

입구 자유흐름의 난류 강도는 0.2% 이며 비정상 계산을 위한 무차원 시간 간격은 0.015이다. 계산의 정확도 비교를 위해 자유흐름 상태의 2차원 원통 유동을 모사한 수치해석 결과의 $\overline{C_l}$의 r,m.s.값인 0.518과 $\overline{C_d}$값인 1.208을 실험값과 비교를 하였으며 Noberg의 논문[7]에서 언급 된 $\overline{C_l}$의 r,m.s.값의 범위인 0.4~0.6 사이에 있고 $\overline{C_d}$ 역시 실험결과와 잘 일치하였다.

2.2 격자계

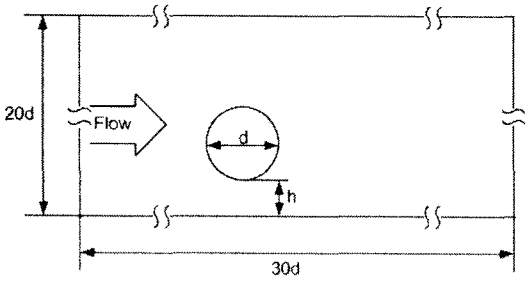


Fig. 1 Computational Domain

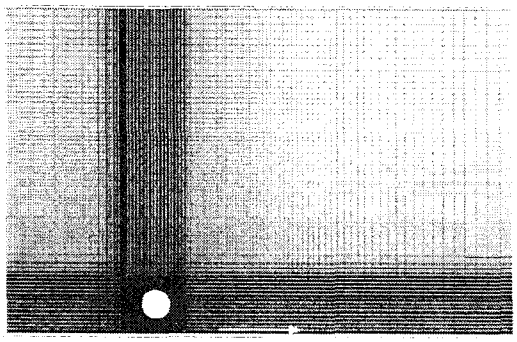


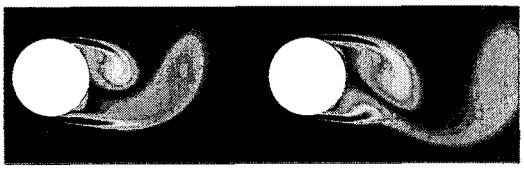
Fig. 2 Grid near the Circular Cylinder

Fig. 1은 전체 계산 도메인을 나타낸 것이다. 자유흐름 방향으로 원통 직경의 30배, 자유흐름에 수직하게 20배의 계산 영역을 설정하였으며 간격비(h/d)는 벽면에서 원통까지 최단거리와 직경의 비로 나타내었다. Fig. 2는 원통 근처의 격자에 대한 그림을 나타낸 것이다. 격자는 240X130의 크기를 가지며 전체 격자 개수는 50,720개이다. 또한 벽면에서 수직한 방향으로 첫 번째 격자까지의 무차원 거리 $\triangle x_i/d$ =0.00075로 두었으며 전체 벽면 조건은 no slip 조건을 주었다. 또한 이동 지면에 의한 지면효과 모사를 위해 벽면의 속도를 자유흐름과 같은 속도로 두어 경계층의 생성을 막았다.

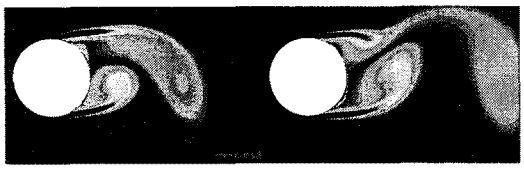
지면효과를 받지 않는 경우 역시 같은 격자계 조건을 두었으며 원통 직경에 대한 레이놀즈수는 20,000으로 두었다. Prasad & Wiliilamson[8]의 실험 연구에 의하면 레이놀즈수 10,000이상의 영역은 분리 전단층의 불안정성이 크게 증가하고 원통의 재순환 영역(recirculation zone)이 축소된다. 또한 레이놀즈수 10,000영역을 기점으로 다른 양상의 분리 전단층 발달을 언급하였으므로 본 연구에서는 원통 근방에 위치한 벽면은 후류 형성의 초기 조건이 되는 분리 전단층의 불안정성에 미치는 영향을 조사하기 위해 레이놀즈수를 20,000으로 설정하였다.

3. 계산 결과 및 검토

3.1 와유동

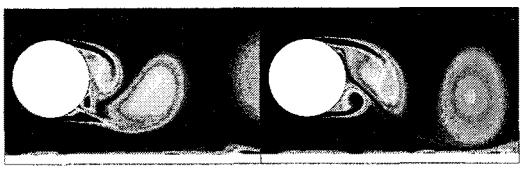


(a) 90° (b) 180°

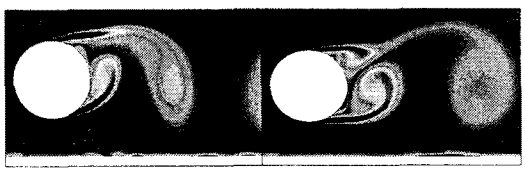


(c) 270° (d) 360°

Fig. 3 Vorticity Contour (I.G.E.)



(a) 90° (b) 180°



(c) 270° (d) 360°

Fig. 4 Vorticity Contour (O.G.E.)

Fig.3 과 fig. 4는 지면효과의 영향을 받지 않는 O.G.E.(out of ground effect)상태와 지면효과의 영향을 받는 I.G.E.(in ground effect)상태의 각 주기의 위상 순서로 나타낸 와도 등고선도(vorticity contour)를 나타낸 것이다. 와도, $|w| \leq 300$이며 20단계로 나누어 나타내었다.

Jung & Chang [3]은 지면효과를 받는 와유동의 가장 큰 특징은 I.G.E.인 경우와 달리 원통 상하면에서 교차되어 발달하는 Karman Vortex의 비대칭성이라고 하였다. Fig. 3(a)와 Fig. 3(c)가 상·하면에서 발달하는 Karman 와

류가 굉장히 대칭적으로 발달하는 것에 반해 Fig. 4(a)와 Fig. 4(c)에서 볼 수 있는 Karman 와류의 발달은 강도 및 형태가 크게 다름을 알 수 있다.

분리 전단층의 roll-up은 O.G.E.인 경우보다 I.G.E.인 경우가 더 강해 원통 뒷전에서 발달하기 시작하는 와류가 실린더 표면으로 더욱 붙은 것을 알 수 있다. 이러한 roll-up에 대하여 Kang et al.[4]은 벽면의 존재에 의한 순압력구배 및 역압력구배의 증가로 인해 발생한다고 하였고, Jung and Chang[3]은 원통과 벽면 사이를 지나는 유동의 분리 전단층과 Karman 와류 사이로 흘러들어가는 유량 증가에 따른 전단층 발달 변화에 기인한다고 설명 하였다. 분리 전단층의 roll-up 강화는 와도의 증가역시 가져온다. 윗면보다 아랫면에서 발달하는 와류의 와도다 더 큰 것을 알 수 있는데 이것은 벤투리 효과(venturi effect)에 의해 국부적으로 높아진 속도의 영향이다.

Fig. 4(a), (b)와 Fig. 4(c), (d)를 Fig. 3과 비교하면 벽면 방향에서 발생하는 와류의 발달의 차이를 확인 할 수 있다. Fig. 4(c),(d)의 경우 와류의 발달이 지면효과를 받지 않는 Fig. 3 (c),(d)와 비교적 유사하나 벽면 방향에서 생성된 와류의 발달을 나타내는 Fig. 4(a),(b)의 경우 Fig. 3 (a),(b)와 매우 다르다는 것을 알 수 있다. 이러한 차이는 후류의 와류 생성의 초기 조건이 되는 분리 전단층의 발달이 다르게 일어나기 때문이다. Fig. 4(a)에서 보이는 분리 전단층은 두껍고 짧으며 높은 와도를 내포하고 있다. 반면에 Fig. 3(a)에서 보이는 분리 전단층의 경우 얇고 긴 형태를 가진다. Prasad & Willamson[8]이 수행한 실험 연구에서 분리 전단층은 속도가 증가 하면서 길이는 짧아지고 두꺼워 지는 것을 보였다. 따라서 아랫면에서 생성되는 분리 전단층이 윗면에서 생성되는 분리 전단층보다 더욱 발달하고 불안정성이 크다고 생각되며, 이것은 각각의 분리 전단층에서 생성되어 발달하는 후류에도 영향을 줄 것이라 예상된다.

3.2 공력 변화

Fig. 5는 시간에 대한 양력계수 C_l 의 변화를 한 주기에 대해 20개의 곡선을 이용하여 위상 평균하여 나타낸 것이다. O.G.E. 상태의 $\overline{C_l}$은 0의 값을 가지며, 일정한 형태의 Sin 파형을 그린다.

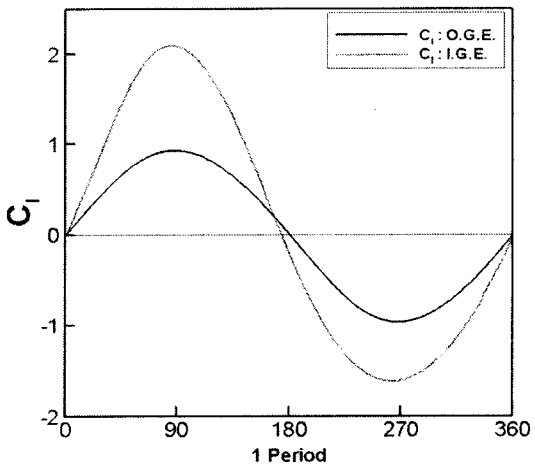


Fig. 5 One Period of C_l

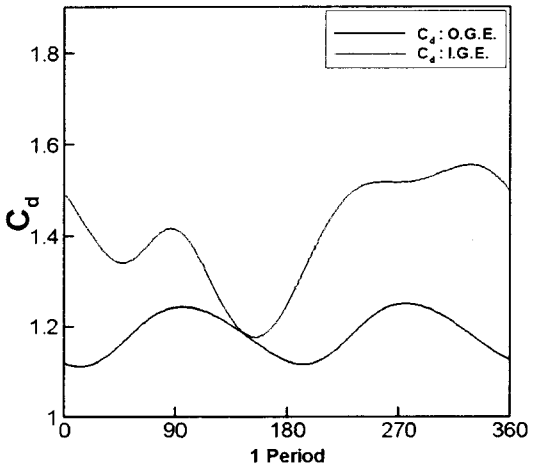


Fig. 6 One Period of C_d

Kim et. al.[2]은 레이놀즈수가 20,000 이고, 간격비가 0.5인 사각실린더의 경우 $\overline{C_l}$은 0에 가까운 음의 값을 가진다고 하였는데, 본 연구에서는 I,G.E. 상태일 때는 $\overline{C_l}$ = 0.06614의 값을 가진다. 또한 1/2 주기인 위상 180.5° 일 경우 O.G.E.상태에서는 C_l ≒0의 값을 가지지만 I.G.E.의 경우 C_l =0 이 되는 지점이 약 173.8°에 위치하였다. 이것은 전체적인 주기에서 $C_l<0$ 에 속하는 시간이 늘어남을 의미한다. 그러나 C_l 의 최대점 의 크기가 최저점의 크기보다 크기 때문에 $\overline{C_l}$ 은 0보다 큰 값

을 가지게 된다. 또한 C_l 의 진폭(amplitude)가 I.G.E.인 경우 더 커졌는데 C_l 의 r.m.s.값은 1.3088로 O.G.E.의 경우보다 약 0.518에서 약 2.5배 증가 하였다.

Jung and Chang[3]은 이러한 진폭의 증가는 서로 교차하며 발달하는 Karman 와류가 비대칭적으로 발달하면서 아랫면에서 발달하는 와류가 유동 속도의 크기 변화를 크게 해서 결국 원통 근처의 압력 변화를 크게 하기 때문이라고 설명하였다.

I.G.E.의 경우 $\overline{C_d}$ =1.409 이지만 $\overline{C_d}$ =1.201인 O.G.E. 경우보다 약 1.17배 증가하였다. $\overline{C_d}$의 증가는 벽면이 위치함으로 인해 강해진 원통 표면의 압력구배의 영향으로 분리 전단층의 roll-up이 강해지기 때문이다. Fig. 4에 제시되어 있듯이 원통 뒷면에서 발달하는 분리 전단층의 roll-up이 Fig. 3보다 더 강해진 것을 알 수 있다. 이처럼 강해진 roll-up은 국부적인 속도 증가에 따른 압력 저하를 가져오고 결국은 기저 압력이 낮아지게 되어 압력항력의 증가에 따른 전체 항력의 증가를 유발한다. 또한 O.G.E.인 경우 1주기에 두 개의 Sin 파형을 가지는 C_d 곡선을 가지는 반면, I.G.E.의 경우 진폭의 증가와 함께 최고점의 변화를 가진다. C_l 곡선 비대칭적 주기 변화와 함께 각 Sin 파형의 너비 변화 및 각 최고점(peak point)의 이동(shift) 역시 관찰할 수 있다. I.G.E.인 경우 C_d 곡선의 최고점은 2개에서 3개로 증가한 것을 알 수 있고, 특히 위상 180° 이후의 곡선이 크게 증가하였다. I.G.E.의 경우 아랫면에서 발달하는 분리 전단층이 이루는 와류의 강도가 강해져 Fig. 3의 그것 보다 원통에 큰 영향을 미친다.

4. 결론

원통(circular cylinder)의 공력특성은 지면효과를 받는 경우 지면효과를 받지 않는 경우에 보다 $\overline{C_l}$과 $\overline{C_d}$의 증가를 유발하였다. 원통 뒷면에서 발생하는 Karman 와류에 의해 생기는 벤투리 효과가 원통 아랫면 유동의 속도 정체에 따른 증가된 속도 크기 변화가 $\overline{C_l}$의 진폭증가를 유발하고, 비대칭적으로 발달되는 유동장은 C_l 주기의 변화를 가져왔다. 이러한 주기변화는 C_d 곡선에서 더 크게 나타나는데 특히 roll-up현상 증가에 따른 항력 증가가 뚜렷하게 나타났다.

향후 지면효과를 받는 원통 주위의 유동장 및 공력 변화의 원인을 정확히 파악하기 위해 유동의 초기 조건인 경계층 및 분리 전단층 발달에 대한 심층적인 연구가 필요하다.

참고문헌

1. 임예훈, "Navier-Stokes 방정식을 이용한 지면효과 날개의 해석," 박사학위논문, 한국과학기술원, 2000
2. 김태윤, 이보성, 이동호, Y. Kohama, "지면운동에 따른 정사각주 후류의 와류 유동장 수치해석(I) 고정 지면과 이동 지면 비교," 한국항공우주학회지, 제 33권, 제6호, 2005, *pp.*1~7
3. 정재윤, 장조원, "이동 벽면에 놓인 2차원 원통 유동장 해석," 한국항공우주학회 춘계학술발표회 논문집, 2006, *pp.* 456~459
4. Bhattacharyya S. and Maiti D. K., "Vortex Shedding from a Square Cylinder in Presence of a Moving Wall," International Journal for Numerical Methods in Fluids, vol. 48, 2005, *pp.*985~1000
5. 강승희, 권오준, 홍승규, "폐쇄형 풍동 시험부 내의 원형 실린더 유동에 대한 비정상 벽면 효과연구," 한국항공우주학회지, 제 33권, 제7호, 2005, pp.1~8
6. Braza, M., Chassaing P. and Minh H. H., "Numerical Study and Physical Analysis of the Pressure and Velocity Fields in the Near Wake of a Circular Cylinder," Journal of Fluid Mechanics, vol. 16, 1986, pp.79~130
7. Noberg. C., "Fluctuating Lift on a Circular Cylinder : Review and New Measurements," Journal of Fluids and Structure, vol. 17, 2003, pp. 57~96
8. Prasad, A. and Williamson, C. H. K., "The Instability of the Shear Layer Separating from a Bluff Body," Journal of Fluid Mechanics, vol. 333, 1997, *pp.* 375~402