

지면효과를 받는 원주의 와류동장에 대한 전산 가시화

Numerical Visualization of the Vortex Flow of the Circular Cylinder in Ground Effect

정재윤*, 장조원(한국항공대학교)

1. 서 론

자유흐름과 같은 속도성분을 가지는 벽면 근처에 위치하는 원형 실린더는 고정된 벽면 위를 일정 속도로 이동하는 것과 같은 유동 패턴을 가진다. 전체 유동 및 원형 실린더에 작용하는 공력 변화는지면효과(ground effect)의 영향을 받는다. 지면효과를 받을 경우 지면으로부터 물체까지의 거리와 물체의 특성길이와의 비로 나눈 값인 간격비(gap ratio)가 유동장 변화에 지대한 영향을 미치는데 이런 거리와의 상관관계는 원형 실린더 유동장의 와류 흘림(vortex shedding)과 밀접한 관계를 가지며 임계 간격비(critical gap ratio)라 부르는 일정 간격비 이하에서는 와류 흘림이 없는 영역이 존재한다.

김태윤 등[1]의 전산 연구에서 $Re = 20,000$ 일 때, 사각실린더의 임계 간격비가 약 0.3 근처이고 임계 간격비 이상에서는 스트로울수(Strouhal number)가 급격히 증가하는 구간이 있음을 보였다. 또한 Nishino et al.[2, 3]의 원형 실린더에 대한 전산 및 실험을 통한 연구에서 $Re = 40,000, 10,000$ 일 때 약 0.35의 임계 간격비를 가진다고 하였으며 그것 이후의 간격비에서 항력의 급격한 증가를 보고 하였다. 또한 이들의 연구에서는 지면효과를 받는 유동장은 간격비에 대해 전통적으로 임계 간격비를 기준으로 하여 두 개의 영역으로 나누었으나 그들은 임계 간격비 이하의 작은 간격비(small gap ratio), 항력이 급격히 증가하는 중간 간격비(intermediate gap ratio)와 그 이상의 큰 간격비(large gap ratio)로 세분화 하였다. 간격비의 변화는 유동장 발달에 영향을 끼쳐 공력 발달에 영향을 미친다[4].

본 논문에서는 선행 연구에서 더 발전하여

약 4단계의 간격비를 구분하고 각 간격비 영역에서의 후류 발달의 특징에 대해 살펴 볼 것이다.

2. 수치 해석 기법

2.1 수치 기법 및 격자 구성

본 연구에서는 유한 체적법(finite-volume method)을 사용하는 범용 CFD코드인 FLUENT를 사용하여 원형 실린더의 지면효과에 대한 유동 모사를 수행하였다. 유동장은 점성, 비압축성 Navier-Stokes 방정식을 이용하였으며 난류 성분의 모사를 위해 난류 점성 계수를 전달방정식으로 사용하는 Spalart - Allmaras 1 equation 난류 모델을 사용하였다. 시간에 대해 2nd order implicit, 모멘텀(momentum) 및 수정 난류 점성 계수(modified turbulent viscosity coefficient) 항에 대해서는 2nd order upwind, 압력항(pressure)에 대해서는 2nd order 방법을 사용하여 시간 및 공간에 대해 2차의 정확도를 확보 하였다.

그림 1은 전체 계산 영역에 대해 나타내었다. 전체 영역은 자유흐름에 평행하게 $30d$, 자유흐름에 수직하게 $20d$ 의 길이를 가진다. 간격비는 원형 실린더의 직경과 지면에서부터의 최소 길이의 비(h/d)로 나타내었다.

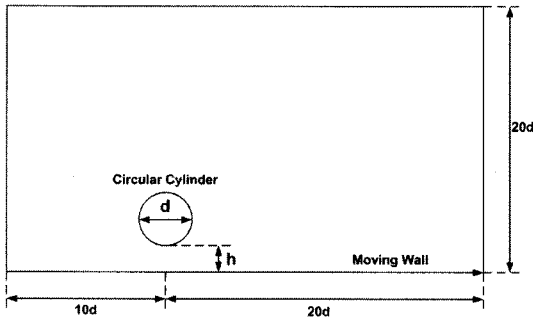


그림 1 계산 영역

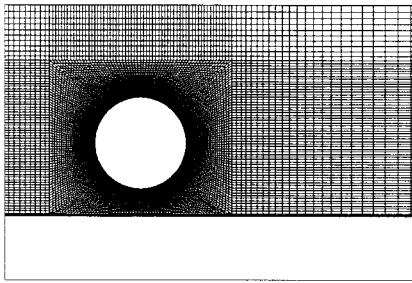


그림 2 간격비(h/d = 0.3)의 격자계

그림 2는 간격비 0.3일 경우의 격자를 나타낸 것이다. 격자의 크기는 240X130의 크기를 가지며 각 벽면으로부터 수직방향에 위치한 첫 번째 격자의 높이는 $\Delta x_i/d$ 가 0.00075로 설정하였다. 아래에 위치한 벽면은 자유흐름과 같은 속도를 주어 경계층의 생성되지 않도록 하였다.

2.2 코드의 검증

코드의 검증을 위해 본 연구에서는 격자 및 무차원 타임스텝($\Delta t^* = (U_\infty \Delta t)/d$)를 변화 시켰다. 자유흐름일 경우, Table 1에서와 같이 각 변수에 따른 공력 특성은 case 5와 case 6이 실험 결과[5]인 $C_d=1.2$, $S_t=0.2$ 와 가장 잘 맞는다. 계산 시간의 절약을 위해 case 5를 사용하였으며 자세한 비교는 Table 1을 참고하길 바란다.

Table 1 변수에 따른 공력 특성 비교

| | Grid size | Δt^* | C_d | S_t |
|--------|-----------|--------------|-------|-------|
| case 1 | 120 X 90 | 0.15 | 0.89 | 0.236 |
| case 2 | 120 X 90 | 0.03 | 0.95 | 0.225 |
| case 3 | 120 X 90 | 0.015 | 1.12 | 0.22 |
| case 4 | 240 X 130 | 0.03 | 0.98 | 0.225 |
| case 5 | 240 X 130 | 0.015 | 1.201 | 0.21 |
| case 6 | 340 X 220 | 0.015 | 1.198 | 0.215 |

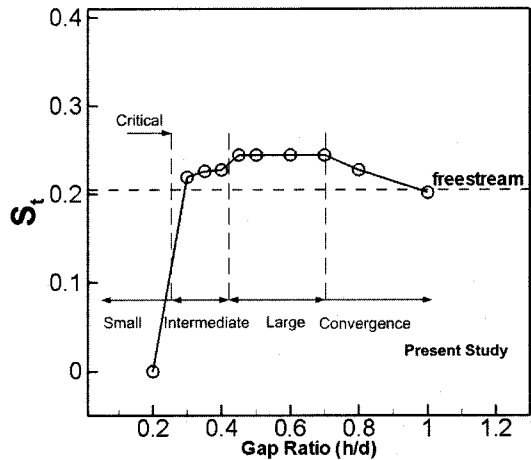
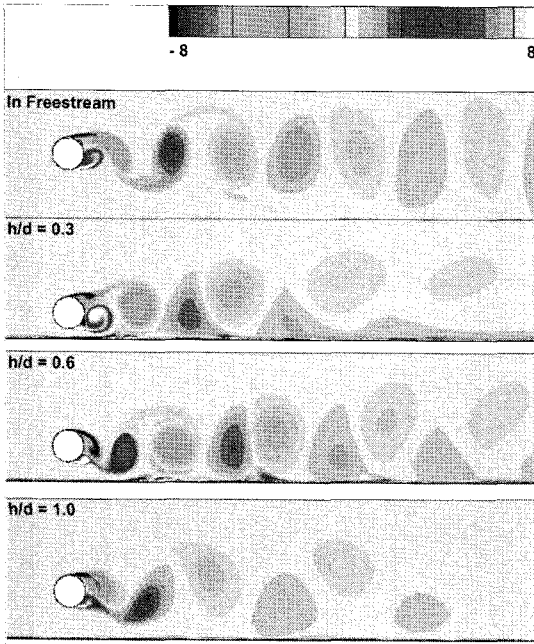


그림 3 스트로수에 따른 간격비 구분

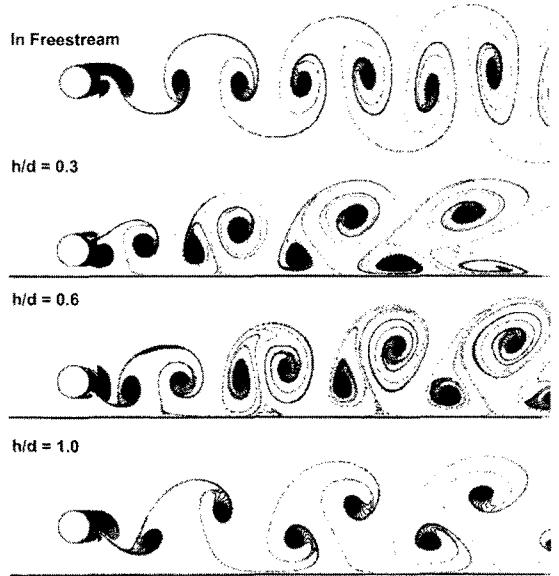
3. 결과 및 분석

그림 3은 원형 실린더에 작용하는 양력에 대한 스트로수의 간격비에 대한 변화를 나타낸 것이다. 스트로수의 변화를 통해 간격비 0.2~0.3사이에 임계 간격비가 있으며 이 영역에서는 와류 홀림이 존재하지 않음을 알 수 있다. Nishino et al.[2, 3]은 항력계수에 대해 간격비를 나누어 3단계인 작은 간격비, 중간 간격비 및 큰 간격비로 나누었으나, 본 연구에서는 스트로수의 변화를 통해 큰 간격비 이후의 수렴 간격비(convergence gap ratio)를 정의 하여 작은 간격비, 중간 간격비, 큰 간격비 및 수렴 간격비로 4단계로 정의 하였다.

본 논문에서 제시한 임계 간격비인 0.2~0.3 구간은 거의 비슷한 레이놀즈수 영역인 $Re = 40,000$ 에서의 결과인 0.35와는 차이를 보이는데 Nishino et al.[2, 3]은 이런 결과가 2차원 수치 해석 달리 실험은 원형 실린더 주위의 유동장



(a) 원형 실린더 후류의 와유동장



(b) 원형 실린더 후류의 입자 추적

그림 4 지면효과를 받는 경우의 순간적인 유동장 가시화

이 3차원 유동을 가지기 때문인 것으로 분석했다.

임계 간격비 이후의 중간 간격비($h/d = 0.3 \sim 0.4$)의 경우 순간적으로 와류 홀림의 생성으로 인한 스트롤수 값의 증가를 볼 수 있는데 이때의 스트롤수 값은 자유흐름 일 때의 값보다 더 큰 값을 가지며 완만히 증가하는 경향을 가진다. 간격비 0.45 일 때 작지만 급작스런 스트롤수의 증가를 보이면서 중간 간격비 이후의 큰 간격비($h/d = 0.45 \sim 0.7$)의 영역으로 들어간다. 이 경우 중간 간격비일 때의 경우보다 더 큰 스트롤수 값을 가지고 전반적으로 일정한 스트롤수 값을 가진다. 간격비가 점점 커지면서 이동 벽면에 의한 지면효과 영향도 작아지게 된다. 이렇게 지면효과 영향이 작아지는 영역이 수렴 간격비($h/d > 0.7$)이다. 수렴 간격비에서는 스트롤수가 자유흐름 일 때의 값에 가까워지고 있는 것을 알 수 있다. 이렇게 일정 간격비 이후에 나타나는 스트롤수 감소는 김태윤 등[1]의 연구에서도 확인 할 수 있으나 Nishino et al.[2, 3]이 제시했던 항력계수 변화에 대해서는 뚜렷한 변화를 확인 할 수 없었다.

그림 4는 와류 홀림이 존재하고, 지면효과를 받는 경우에 대한 어떤 순간에 대한 유동장 가시화 그림이다. 원형 실린더 중심에서 $15d$ 만큼의 후류까지 본 논문에서는 제시하였다. 각 경우는 자유흐름, 중간 간격비, 큰 간격비 및 수렴 간격비의 대표적인 경우인 간격비 0.3, 0.6, 1.0이다.

그림 4 (a)는 유동장의 무차원 와도(non-dimensional vorticity)에 대해 나타낸 것이다. 무차원 와도는 식 (1)과 같이 표시되며 $-8 \sim 8$ 까지 26단계에 걸쳐 나타내었다.

$$w_z = \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) \frac{d}{U_\infty}$$

(1)

그림 4 (a), (b)에서 자유흐름의 경우 원형 실린더에서 주기적으로 생성되는 와열(vortex street)을 볼 수 있다. 이런 와열(vortex street)은 원형 실린더 모양의 대칭성 및 외부 교란의 부재로 인하여 하류로 진행하면서 전형적인 카르만 와열(Karman vortex street)을 나타낸다.

반면에 지면효과를 받는 경우, 전반적인 와도 및 와열의 형태가 자유흐름 일 때와는 다름을 알 수 있다. 간격비 0.3, 0.6의 경우 유동장 내의 와도는 자유흐름 일 때보다 강해지고 벽면에서 헤어핀 와류(hair-pin vortex)가 생성된 것을 알 수 있다. 와류는 하류로 이동하면서 와도가 급격히 감소되는데 와류 구조는 그림 4 (b)의 입자 추적에서 보다 자세히 알 수 있다. 원형 실린더 뒷전에서 막 생겨난 양(+)의 와류는 원형 실린더의 곡률과 지면사이의 거리에 의한 벤추리 효과로 인해 가속된 속도 성분에 힘입어 지면으로부터 거리는 멀어진다. 하류로 이동하면서 자유흐름 일 경우, 비교적 일정한 높이에서 흘러가는 와류가 지면효과를 받을 경우 음(-)의 와류와 양(+)의 와류사이의 x 방향(흐름방향) 간격이 좁아지고 y 방향(흐름 수직방향) 간격이 커지면서 그림 5와 같은 와류쌍(vortex pair)을 형성하게 된다. 특히 간격비 0.3, 0.6의 경우 양(+)의 와류가 하류로 가면서 급격히 와도가 약해지고 와류 중심이 지면 근처로 이동하여 부착하는데, 이것은 와류가 이동 벽면이 가지는 일정한 속도에 영향을 받아 유동장의 회전(circulation)을 감소시키기 때문이며 더 먼 후류에서는 결국 와류의 붕괴를 일으킬 것이라 예상된다.

수렴 간격비 영역에 속하는 간격비 1.0의 경우, 다른 경우와는 다른 와유동장을 가진다. 이 경우 와류의 강도는 자유흐름 일 경우보다 약간 약해지고 벽면 속도 성분에 의해서 하류로 갈수록 와도는 약해진다. 이것은 지면효과를 받는 간격비 0.3, 0.6의 강해진 와류 생성 및 벽면의 헤어핀 와류가 생기지 않는다. 하지만 하류로 가면서 크게 약화되는 와류 발달은 같은 경향을 가진다. 그림 4 (b)에서 간격비 0.3, 0.6일 때, 후류에서 생성되는 와류는 하류로 진행하면서 양(+)의 와류와 음(-)의 와류 사이의 거리 변화가 극심한 반면에 간격비 1.0의 경우 거리 변화가 비교적 일정하며 음(-)의 와류가 후류로 진행하면서 간격비 0.3, 0.6의 경우보다 벽면에서 멀리 떨어져 있는 것을 알 수 있다. 간격비가 커진 경우, 지면 속도로 부터의 영향을 받아 와류 강도의 약화는 가져오지만 비교적 커진 벽면으로부터의 거리로 인하여 와류의 벽면 부착과 같은 현상은 일어나지 않는다.

4. 결 론

본 연구를 통해 이동 벽면에 의한 지면효과를 받는 원형 실린더의 간격비에 대해 4단계의 영역을 정의 하였고 와류 흘림이 일어나는 세 영역(중간, 큰, 수렴 간격비)에 대해 전산 가시화를 수행하였다.

지면효과를 받는 경우($h/d = 0.3, 0.6, 1.0$) 유동장 내에서 생성된 와류가 하류로 이동하면서 벽면 속도의 영향을 받아 와도가 자유흐름 일 경우보다 급격히 약화됨을 알 수 있었다.

하지만 본 논문에서 제시한 4번째 간격비인 수렴 간격비($h/d = 1.0$)의 경우 중간 간격비($h/d = 0.3$)와 큰 간격비($h/d = 0.6$)와는 달리 후류 내에 비교적 약한 와류가 존재하고, 벽면의 헤어핀 와류가 생성되지 않으며 음(-)의 와류의 지면 부착현상이 일어나지 않음을 알 수 있었다.

본 연구를 통해 3가지 간격비에서 발생하는 와유동장의 각기 다른 특징에 대해서 살펴보았으며 앞으로 더 큰 간격비 영역에 대한 연구를 통해 지면효과가 영향을 미치는 간격비를 파악할 것이다.

참 고 문 헌

- 1) 김태운, 이보성, 이동호, T. Kohama, "지면 운동에 따른 정사각주 후류의 와류 유동장 수치해석 (I) 고정 지면과 이동 지면 비교," 한국 항공우주학회지 제 33권 제 6호, 2005, pp. 1~8
- 2) Nishino, T., Roberts, G. T. and Zhang, X., "An Experimental Study of Flow around a Circular Cylinder with and without End Plates in Ground Effect," AIAA 2006-3551, 2006
- 3) Nishino, T., Roberts, G. T. and Zhang, X., "Detached-Eddy Simulation of Flow around a Circular Cylinder in Ground Effect," The 7th International Symposium on Transport Phenomena, 2006
- 4) 정재운, 장조원, "이동 벽면에 의한 원형 실린더의 비대칭 공력발달에 관한 전산연구," 한국전산유체공학학회지, 제 11권 제 3호, 2006, pp. 64~70
- 5) Paul K. Chang, "Separation of Flow," Pergamon Press Inc., 1979, pp. 16, 355