

이동 벽면에 의한 원형 실린더의 비대칭적 공력 발달에 관한 전산연구

정재윤¹, 장조원^{*2}A COMPUTATIONAL STUDY ABOUT THE ASYMMETRIC AERODYNAMIC EVOLUTION
AROUND A CIRCULAR CYLINDER CAUSED BY A MOVING WALLJ.Y. Jung¹ and J.W. Chang^{*2}

A Computational study was carried out in order to investigate the moving wall effect of a circular cylinder at a Reynolds number of 2.0×10^4 . The viscous-incompressible Navier-Stokes equations and Spalart-Almaras turbulent model of the commercial CFD code were adopted for this numerical analysis. The moving wall was set parallel with the freestream, and moving speed was equal to the freestream velocity. The gap ratio is defined as the distance ratio between the circular cylinder diameter and the height from the moving wall. The results show that there is vortex shedding over the critical gap ratio and aerodynamic loads including amplitude and the Strouhal number change according to the gap ratio.

Key Words: 원형 실린더(Circular Cylinder), 지면효과(Ground Effect), 이동 벽면(Moving Wall), 임계 간격비(Critical Gap-ratio), 흘림 주파수(Shedding Frequency)

1. 서 론

물체 주위에 위치한 벽면에 의해 유동장(flow field) 및 공력의 변화를 초래하는 현상을 지면효과(ground effect)라고 한다. 이러한 지면효과는 고속으로 해면 위를 비행하는 WIG(Wing-in-Ground effect)선이나 지면부상 열차, 기타 지상위에서 운행하는 차량 및 항공기 이·착륙에 작용하여 성능에 큰 영향을 미친다. 이러한 지면효과에 대한 연구는 실험을 통해 수행하기가 어렵다. 그것은 가장 중요한 경계 조건이 되는 지면의 운동 상태에 대한 정확한 적용이 실험에서는 이루어지기 힘들기 때문이다. 또한 움직이는 지면에 대한 실험 장치인 Endless Moving Belt System의 경우 모터 고유의 진동 및 벨트의 탄성에 의한 벽면 근처의 난류 강도 증가 및 전단층의 발달로 인해 정확한 이동 벽면에 대한 표현이 어렵다[1]. 따라서 그동안 지면효과에 대한 연구는 대부분 실험보다는 수치

해석을 이용하여 유동 모사(simulation)를 수행하였다.

Bhayacharyya & Maiti[2]는 $Re = 1,000$ 이하의 영역에서 움직이는 벽면에 의한 지면효과를 받는 사각 실린더에 대한 연구를 수치해석적으로 수행하였다. 지면효과를 받는 유동장의 스트루할(Strouhal number)이 지면효과를 받지 않는 경우보다 증가하며, 이것은 벽면에서 생성되는 전단층의 헤어핀 와류(hair-pin vortex)가 유동장에 영향을 미치기 때문이라 설명하였다. 또한 임예훈[3]은 지면효과를 받는 에어포일에 대한 수치해석을 통해 공력계수가 간격비(gap ratio)가 변화함에 따라 바뀌고, 에어포일 형상의 변화에 따라 공력계수 변화의 경향이 바뀐다는 것을 보였다.

지면효과는 물체의 특성길이와 지면에서 물체까지의 높이의 비로 나타내는 간격비에 의해 지배적인 영향을 받는다. 일정한 간격비 이하의 임계 간격비(critical gap ratio)가 되면 후류에서 주기적으로 형성되는 와류 흘림(vortex shedding)이 사라진다. 이러한 간격비에 대한 공력 특성 변화에 대한 경향에 대해 김태운 등[4]이 연구한 $Re = 20,000$ 에서 사각 실린더의 지면효과 연구에서 뚜렷한 임계 간격비가 있음을 보였고, 약 0.35 이하의 값이라고 설명하였다. 이와 같은 임계 간격비에 대한 연구는 지면이 움직이지 않는 경우에 대해서도 수행이

접수일: 2006년 8월 29일, 심사완료일: 2006년 9월 20일.

1 학생회원, 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과

2 정회원, 한국항공대학교 항공운항학과

* Corresponding author E-mail: jwchang@hau.ac.kr

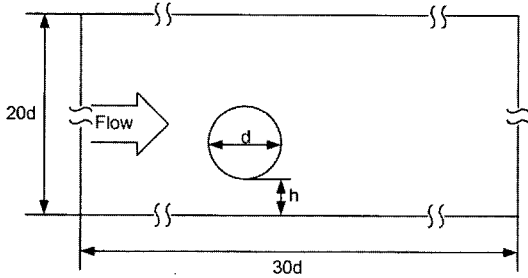
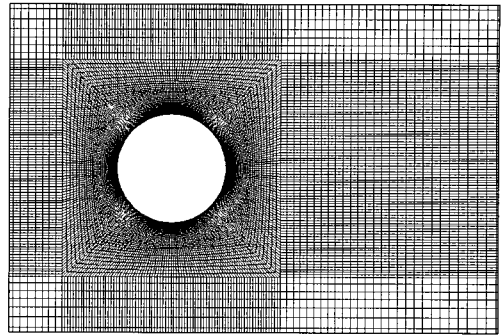
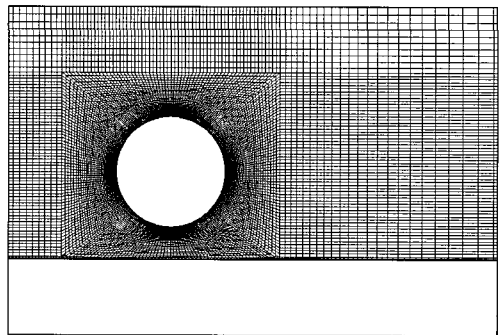


Fig. 1 계산영역



(a) 자유흐름에 놓인 원형 실린더



(b) 지면효과를 받는 원형 실린더($h/d = 0.3$)

Fig. 2 원형 실린더 주위에서의 격자

되었는데 Choi & Lee[5]는 $Re = 14,000$ 에서 난류 경계층을 갖는 지면위에 위치한 원형 실린더에 대한 실험적 연구에서 간격비 0.2~0.3사이에서 스트로울수 변화를 관찰하였다.

Bhayaacharyya & Maiti[2], 김태윤 등[4]의 연구는 경계층 분리점(separation point)이 앞전근처에 고정되어 있는 사각 실린더의 경우이다. 하지만 사각 실린더의 경우는 실제 공력을 발생시키기 위해 사용되는 에어포일과 같은 유선형 물체에서의 유동과는 달리 분리점의 변화가 있을 수 없고 표면에 대하여 비교적 큰 압력구배가 존재한다.

레이놀즈수 $Re = 20,000$ 의 영역은 자유흐름 상태에 놓인 원형 실린더의 후류가 층류에서 난류로 발달되는 sub-critical regime 이다. 또한 이 레이놀즈수 영역에서 경계층의 층류 분리 이후 발생하는 분리 전단층(separated shear layer)은 높은 흘림 주파수(shedding frequency)를 갖는 일정한 구조(coherent structure)를 형성하면서 뒷전 부근에서 생성되는 Karman 와류를 형성하게 된다[6].

따라서 본 연구는 수치해석을 이용하여 원형 실린더의 지면효과에 대한 유동 모사를 수행하였다. $Re = 20,000$ 에서 원형 실린더가 이동지면 위에 존재할 경우 유동장에 작용하는 지면효과가 유동 변화에 어떤 영향을 주는지 조사하였다. 또한 이러한 유동장 변화가 공력계수 변화에 어떠한 영향을 주는지 알아보았으며, 와류 흘림이 사라지는 임계 간격비에 대해 조사하였다.

2. 수치 해석 기법

2.1 수치해석 조건

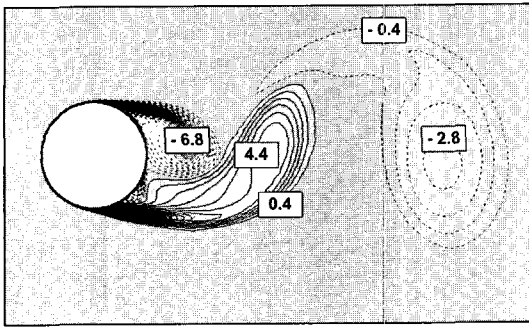
본 연구는 $Re = 20,000$ 에서 유한 체적법(finite-volume method)을 사용하는 범용 CFD코드인 FLUENT를 사용하여 원형 실린더의 지면효과에 대한 유동 모사를 수행하였다. 본 연구는 전체 유동장은 점성, 비압축성 Navier-Stokes 방정식을 이용하여 풀고 유동의 난류모사를 위해 Spalart - Almaras 1 equation 난류 모델을 사용하였다. 비정상 유동장 계산을 위하여 시간에 대해 2nd order implicit 방법을 적용하였으며, 모멘

텀(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.

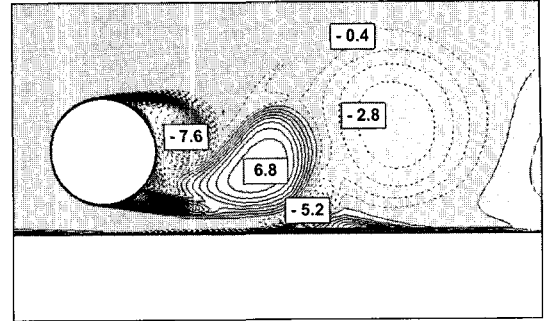
2.2 격자계의 선택

Fig. 1은 본 수치해석에 적용된 계산 영역(computational domain)을 나타낸 것이다. 유동 흐름 방향으로 원형 실린더 직경의 30배, 유동의 수직 방향으로 원형 실린더 직경의 20배의 계산영역을 설정하였고, 원형 실린더의 직경 d 와 이동 지면에서부터의 거리 h 를 사용하여 간격비(h/d)를 설정하였다. 이러한 간격비는 $h/d=0.2, 0.3, 0.35, 0.45, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 1.0$ 일 때와 자유흐름 상태일 때를 조사하여 비교하였다. 또한 벽면은 자유흐름의 속도 (U_{∞})를 주어 이동 벽면 조건을 주었다. 그리고 모든 벽은 no-slip 조건을 두었으며, 자유흐름의 난류 강도는 0.2%로 설정하였다.

Fig. 2는 간격비 변화에 따른 원형 실린더 주변의 다중 블록 격자 변화를 나타낸 것이다. 본 연구는 실린더와 이동벽면 사이의 간격비가 변화하므로 각 경우별로 격자를 형성 하였다. Fig. 2(a)는 간격비가 무한대인 자유흐름 상태에 놓인 격



(a) 자유흐름에 놓인 원형 실린더



(b) 지면효과를 받는 원형 실린더(h/d = 0.3)

Fig. 3 원형실린더 주위의 와류형태($-10 \leq \omega_z d / U_\infty \leq 10$, 21 steps)

3. 수치해석 결과

Fig. 3은 지면효과 유무에 따른 원형 실린더 주위의 와류동(vortex flow)을 나타낸 것으로 각 그림은 최대 양력을 갖는 순간의 와도를 보여준다. 와도는 실린더 직경과 자유흐름 속도에 의해 무차원화 하여 나타내었다. Fig. 3(a)는 원형실린더가 자유흐름상태에 놓인 경우이고, Fig. 3(b)는 원형실린더가 지면효과를 받는 경우로 Fig. 2(b)에 제시된 격자가 사용된 $h/d=0.3$ 인 경우이다.

지면효과를 받는 Fig. 3(b)의 경우, 자유흐름 상태에 있는 Fig. 3(a)의 경우와는 확연히 다른 와류동을 가진다. 전체적으로 와류의 와도가 지면효과를 받는 경우 더욱 강해진다. 또한 원형 실린더 뒷전 부근에서 생성되는 전단층의 말림(roll-up)이 지면효과를 받는 경우 더욱 강화 되고, 이것은 말림 이후 생성되는 Karman 와류의 형태의 변형을 가져온다. 특히 이미 떨어져 나간 음(-)의 값을 갖는 와류의 중심이 양(+)의 와류와 매우 근접하게 위치한 것을 볼 수 있다. 또한 Bhayyacharyya & Maiti[2]가 언급 했던 헤어핀 와류(hair-pin vortex)의 존재가 와류쌍에 영향을 주고 있는 것을 알 수 있다. 이와 같이 변형된 와류동에 대해 Bhayyacharyya & Maiti[2]는 지면에서 생성되는 헤어핀 와류가 와류쌍 사이에 위치하면서 와류동 자체에 영향을 미치기 때문이라고 설명하였다. 정재윤 등[8]은 원

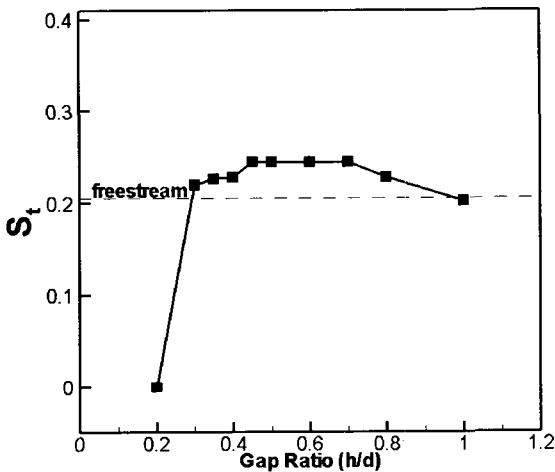


Fig. 4 간격비에 따른 스트로울수 변화

자에 대한 그림이다. 반면에 간격비가 있는 경우의 격자는 Fig. 2(b)에서 보듯이 다중 블록으로 구성된 전체 격자 중 벽면위치 격자의 제거 및 수정을 통해 구성하였다.

본 연구에서 전체 격자는 240X130의 크기를 가지며, 이 조건 하의 자유흐름 속에 있는 원형 실린더의 항력계수 C_d 는 1.201, 스트로울수 S_t 는 0.21로 실험값인 $C_d=1.2$, 스트로울수 0.2[7]와는 큰 차이를 보이지 않았으나 스트로울 수의 경우 5%이내의 초과 검출 되는 값을 가지고 있다. 본 연구는 원형 실린더 및 이동 벽면에서 발생하는 경계층과 같은 전단의 영향에 대한 모사를 위해 벽면 근처의 격자의 첫 번째 위치인 $\Delta x/d$ 가 0.00075가 되도록 하였으며, 이 값은 $y+ = 5$ 인 지점 이하에 위치한다. 각 격자 크기 및 비정상 계산을 위한 무차원 타임스텝($\Delta t^* = (U_\infty \Delta t) / d$)에 따른 공력 특성 비교는 Table. 1과 같다. 본 연구에서는 case 5과 case 6이 실험결과[7]와 가장 비슷하고 두 결과 사이에 큰 차이가 없기 때문에 계산시간을 고려하여 본 연구에서는 case 5의 조건을 사용하였다.

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

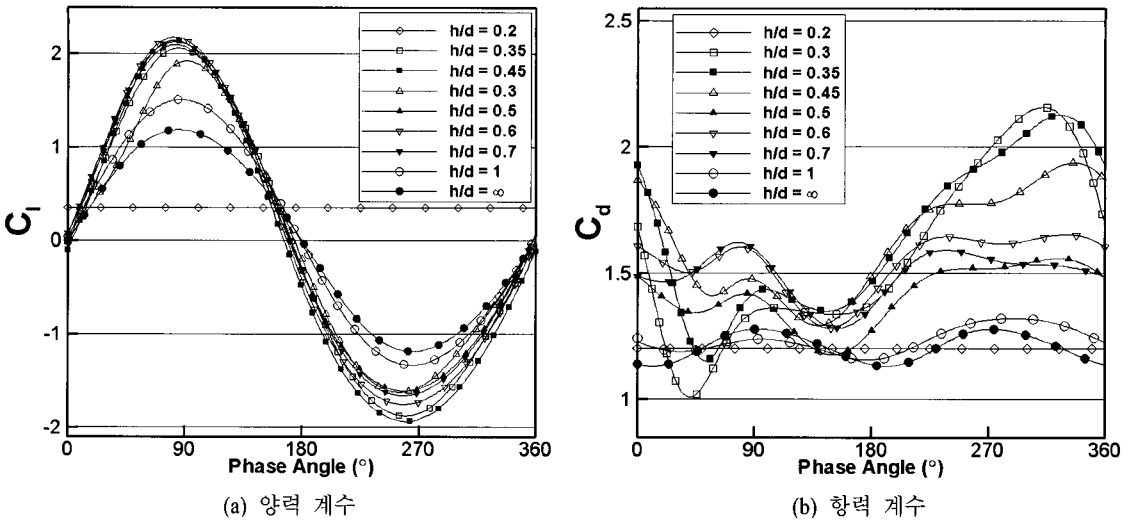


Fig. 5 위상에 따른 공력계수 변화

형 실린더 상하면에서의 발달하는 Karman 와류의 생성이 윗면과 아랫면에서 각각 다른 와도 및 시간을 가지며 비대칭적으로 발달하기 때문이라고 하였다. 또한 이것은 간격의 존재로 인한 원형 실린더 상하면에서의 속도 분포가 서로 대칭을 이루지 못하고 있기 때문이라고 하였다. Fig. 3에서와 같은 와류 생성의 변형은 원형 실린더 주위의 속도 분포의 변화를 가져오고 결과적으로 표면의 압력 분포를 변화 시킨다. 이것은 공력 발달의 변화를 의미하는데 Bhayyacharya & Maiti[2], 김태운 등[4], 정재운 등[8]의 지면효과에 대한 연구에서 공력 값의 변화 및 스트로울수의 증가를 보였다.

Fig. 4는 지면효과를 받는 원형 실린더의 양력에 대한 스트로울수(Strouhal Number)의 변화를 간격비에 대해 나타낸 것이다. 김태운 등[4]의 연구에서는 사각 실린더의 스트로울수가 임계 간격비 이상의 일정 간격비에서 자유흐름에서의 스트로울수보다 높은 값을 가지며, 간격비가 커질수록 스트로울수는 자유흐름 상태와 비슷해지는 경향을 가졌다. 본 연구에서도 마찬가지로 스트로울수는 간격비 0.3일 경우 급격히 증가하며, 간격비가 0.45에서 0.7까지 비교적 비슷한 스트로울수들의 영역을 갖는다. 간격비 $h/d=0.7$ 이후, 스트로울수는 감소하여 자유흐름에서의 스트로울수와 비슷한 값으로 수렴한다.

전통적으로 임계 간격비(critical gap ratio)는 유동장에서 와류흐름이 생성되지 않기 시작하는 간격비를 뜻한다. 본 연구에서는 간격비 0.2에서는 Fig. 4에서 보듯이 스트로울수가 0이 되며 이것은 와류 흐름이 발생하지 않는 것을 의미한다. 반면에 간격비 0.3의 경우 스트로울수는 급격히 증가하며, 이 값은 자유흐름일 때의 값보다 크다. 이때의 와류 흐름은 자유흐름일 때 보다 빠르게 일어난다. 따라서 레이놀즈수 20,000일 때,

이동지면효과를 받는 원형 실린더의 임계 간격비는 $h/d=0.2 \sim 0.3$ 사이임을 알 수 있으며, 김태운 등[4]의 연구에서는 0.35 이하라고 언급 하였다. 양력을 이용한 스트로울수의 측정은 뒷전의 와류 생성과 같은 주기를 가진다. Fig. 4에서와 같이 간격비 0.3~1.0사이에서 자유흐름에서의 값보다 높은 스트로울수를 갖는 것은 뒷전에서 생성되는 와류의 주파수가 높다는 것을 의미한다. 이것은 자유흐름 속도에 비해 국부적으로 높은 속도를 갖는 것을 예측 할 수 있으며, 이것으로 미루어 볼 때 이 구간은 평균 항력이 증가 할 것이라고 예측 된다.

Fig. 5는 한 주기 동안 지면효과를 받는 원형 실린더의 비정상 공력계수의 변화를 나타낸다. 가로 축은 위상각(phase angle)을 나타내고 세로축은 공력계수 값을 나타낸다. 지면효과를 받는 경우 흐름형태 및 공력계수의 스트로울수는 시간에 따라 변하므로 각각의 경우에 대한 한 주기변화에 대해 비교를 하여야 정확한 공력계수의 변화를 파악할 수 있다. 본 논문에서는 양력 계수의 양(+)의 평균값이 증가하는 시점을 위상각 0°(즉 360°)로 두었다.

Fig. 5(a)는 양력계수 1주기에 대하여 간격비에 따른 양력계수 변화를 나타낸 것이다. 원형실린더가 자유흐름 상태에 놓여있는 경우($h/d = \infty$), 양력 계수 변화는 Sine파형을 이루면서 위상 0°~180°구간과 180°~360° 구간이 대칭을 이룬다. 이것은 원형 실린더의 공력계수에 영향을 미치는 주위 유동장이 대칭적으로 발달하는 것을 의미한다. 또한 Fig. 4에서 원형실린더가 자유흐름 상태에 놓여있는 경우 하나의 주기에 두 개의 대칭의 Sine파형을 갖는 항력계수 곡선을 보여주고 있다. 이것은 1주기 동안 원형 실린더 뒷전에서 분리 전단층의 말림(roll-up)에 의해 발생하는 와류(vortex)가 원형 실린더

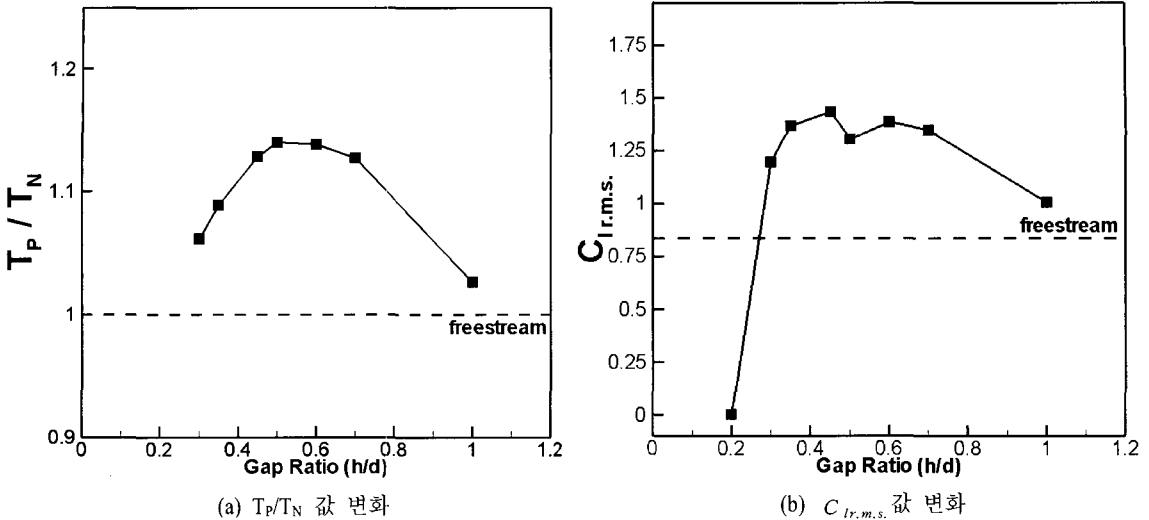


Fig. 6 간격비에 따른 T_P/T_N 및 $C_{l,r.m.s.}$ 변화

상면과 하면에서 각각 1번씩 번갈아 가면서 발생하기 때문이다. 반면에 간격비가 0.2인 경우는 다른 경우와 달리 공력계수의 위상에 따른 변화가 전혀 일어나지 않는다. 이것은 원형 실린더의 유동장에서 와류 홀림이 전혀 일어나지 않는다는 것을 의미한다. 즉 와류 홀림에 의해 발달하는 와류는 아랫면에서 발달할 때 양력곡선의 증가를 유발하고 윗면에서 발달할 때 양력곡선의 감소를 유발한다. 따라서 공력계수의 진동이 없으므로 간격비 $h/d=0.2$ 인 경우, 원형 실린더 근처의 유동은 와류 홀림이 없이 Jet 와 비슷한 유동이 형성될 것이라 예상된다. 그러나 간격비가 0.3 이상인 경우는 유동장에서 와류 홀림이 생성되는 것을 공력 계수의 진동의 유무에 따라 확인 할 수 있다. 따라서 레이놀즈수 20,000에서 원형 실린더의 지면효과에 대한 임계 간격비(critical gap ratio)는 약 0.2~0.3 사이가 됨을 알 수 있다.

간격비 $h/d=0.3$ 이상에서 지면효과를 받는 경우 주기를 갖는 양력계수의 진폭은 더욱 커지고, 자유흐름 상태일 경우와는 달리 최대값 및 최저값의 위상이 조금씩 달라져 있는 것을 알 수 있다. 또한 위상 180°에서 갖는 평균값 위치 역시 위상이 변화함을 알 수 있는데, 이것은 지면효과를 받는 경우 원형 실린더 상·하면에서 발생하는 와류의 생성이 비대칭적으로 발달하기 때문이다. 정재윤 등[8]의 연구에 따르면 이러한 비대칭적 와류는 지면과 원형 실린더 사이의 틈새 유동의 가속화 및 정체를 유발하게 되고, 결국은 아랫면과 윗면의 유동 속도에 영향을 미치게 되어 원형 실린더 표면 압력에 영향을 준다고 하였다.

Fig. 5(b)는 위상에 따른 항력계수의 변화를 보여주는 그래프이다. 원형실린더가 자유흐름 상태에 놓여있는 경우, 항력

은 두 개의 주기를 갖는 Sine파형을 그리고 있으며 이것은 상·하면에서 발생하는 와류의 생성과 관계있다. 반면에 지면효과를 받는 경우, 간격비 0.2 일 때, 항력계수 그래프는 변화가 없었다. 이것은 앞서 말했듯이 전체 유동장의 와류 홀림이 생성되지 않기 때문에 상·하면에서 와류의 발생이 없기 때문이다. 반면에 임계 간격비 이후인 0.3 이상에서는 항력 곡선의 변화가 자유 흐름일 때와 비교해서 심해지는 것을 알 수 있다. 지면효과는 양력곡선과 마찬가지로 항력곡선의 최고점 변화를 가져온다. 자유흐름 상태의 값에서는 위상 90°, 180°에서 최고점을 갖는 그래프를 그리지만, 지면효과를 받을 경우 이러한 최고점의 위치가 조금씩 바뀌고 있다. 특히 간격비 $h/d=0.3, 0.35$ 일 경우 전체적으로 두 개의 최고점을 나타내고 있지만 0.45, 0.5, 0.6, 0.7의 경우는 위상 270° 근처에서 두 개의 최고점을 생성하며 전체적으로 세 개의 최고점을 가진다. 그리고 다시 간격비가 1.0일 경우 자유흐름일 때의 값과 비슷한 경향을 갖는 곡선을 그린다.

Fig. 6은 지면효과를 받을 때 양력곡선의 위상변화 및 양력 계수의 r.m.s. 값을 나타낸 것이다. Fig. 6(a)는 지면효과를 받을 때 양력곡선의 위상변화에서 TN은 위상 0°(양력곡선의 평균값을 갖는 위상각)에서 다음 평균값을 갖는 위상각을 의미하고 TP는 그 이후부터 위상 360°까지의 위상각을 의미한다. TN은 음의 와도(negative vorticity)를 갖는 와류의 발달이 원형 실린더 공력계수 형성에 영향을 미치는 위상각을 의미하고, TP는 양의 와도(positive vorticity)를 갖는 와류의 발달이 원형 실린더 공력 발달에 영향을 미치는 위상각을 의미한다. 자유흐름 상태일 경우 T_P/T_N 는 1.0의 값을 나타내며, 이것은 위상각의 비가 일정하며 뒷면에서 와류 생성의 대칭성을 의

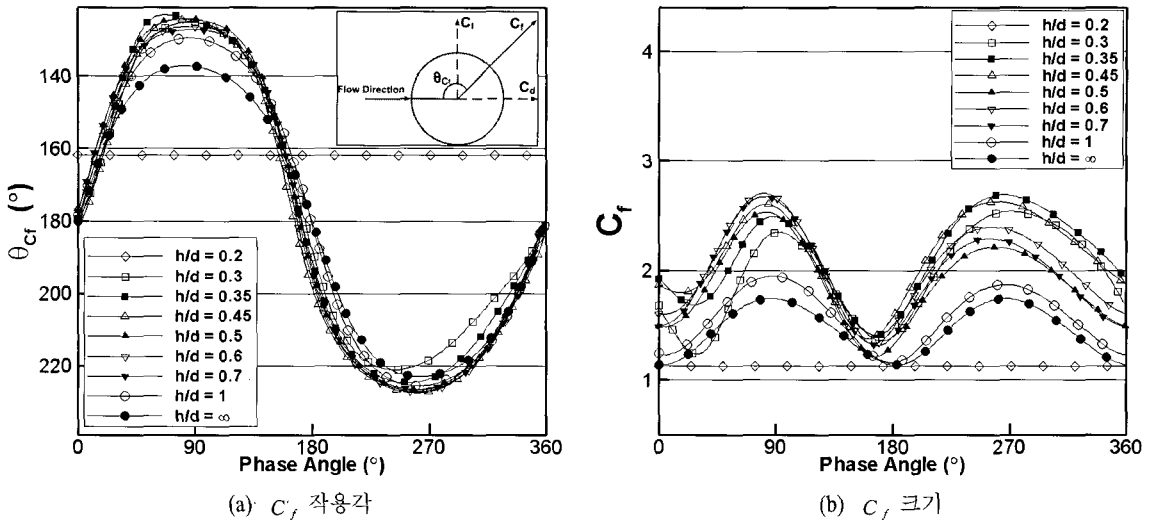


Fig. 7 위상에 따른 C_f 작용각 및 크기 변화

미한다. 반면에 임계 간격비 이후인 0.3 이상의 값에서는 1.0 보다 높은 값을 나타내고 있다. 특히TP/TN는 간격비 0.5 인 경우까지 증가 하고 감소를 하며, 지면효과를 받는 임계 간격비 이상에서 1.0보다 높은 값을 나타낸다. Fig. 6 (a)에서처럼 지면효과에 의해 T_p/T_N 가 1.0보다 크다는 것은 음(-)의 와도를 갖는 와류 보다 양(+)의 와도를 갖는 와류가 더 오랜 시간동안 발달하여 원형 실린더 공력 발달에 영향을 주는 것으로 볼 수 있다. 이것은 전반적으로 비대칭적으로 뒷전 와류가 발달하는 것을 의미 한다.

또 다른 지면효과에 의한 공력계수 변화는 진폭의 증가를 가져온다. Fig. 6 (b)는 원형 실린더가 자유흐름에 놓였을 경우와 지면효과를 받는 경우에 대하여 양력 계수의 r.m.s.값을 나타낸다. 자유흐름 일 때의 양력의 r.m.s.값은 본 연구에서는 약 0.83으로 Noberg[9]이 제시 했던 경험식에 의한 값인 0.473 보다는 비교적 큰 값을 나타내었다. 그러나 그들의 논문에서 제시되었던 다른 실험들 역시 결과 값의 편차가 크고, 스펙 방향 유동이 없는 2차원에서의 공력 계수가 3차원에서 보다 더 크게 나온다는 Persillon & Braza[10]의 연구결과를 참고할 때 전체 결과 값에 영향을 줄 정도는 아니다. Fig. 6 (b)에서는 임계 간격비 이후 양력의 r.m.s.값이 자유흐름일 때의 값보다 전체적으로 큼을 알 수 있다. 간격비 0.3에서부터 증가하여 지면효과를 받는 간격비 0.7 까지 비교적 높은 값을 가짐을 알 수 있고, 간격비 1.0에서는 자유흐름일 때의 값에 근접하고 있다. 이러한 결과는 Fig. 5 (a)에서도 잘 나타나고 있다. 간격비가 커질수록 자유흐름일 때의 곡선에 비해서 1주기의 양력곡선의 진폭이 상당히 커짐을 알 수가 있는데, 이것은 실제 지면효과를 받는 유동장에서 발생할 수 있는 와류에 의해

발생되는 진동(vortex induced vibration)의 증가를 의미한다. 다만 간격비 0.5인 경우, 양력계수의 r.m.s.값은 주위 값보다 낮은 값을 가지고 있는데, 이것은 Fig. 5(a)에서 위상 180° 이후의 영역의 양력계수가 비교적 높은 값을 가지기 때문이다. 이러한 진동의 증가는 Fig. 5의 항력 곡선에서도 잘 나타나는데 임계 간격비 이후의 값에서 증가된 진폭을 나타내고 있다. 이러한 진폭의 증가는 간격비 0.3일때 가장 큰 값을 나타내고 있으며, 반면에 간격비 1.0일 때는 자유흐름과 비슷한 나타나고 있다.

Fig. 7은 원형 실린더의 전체 공기력 계수(total aerodynamic force coefficient) C_f 의 작용 방향 및 크기의 변화를 보여준다. 여기서 C_f 는 몸체에 작용하는 실질적인 힘으로 양력과 항력의 합력을 계수화하여 나타낸 것이다. Fig. 7(a)에서 θ_{Cf} 은 1주기에 따라 변하는 공기력 작용 방향을 각 간격비에 대해 나타낸 것이다. 자유흐름 상태에 있을 경우 원형 실린더에 작용하는 공력은 1주기의 Sine파형을 갖는 양력과 2주기의 Sine파형을 갖는 항력이 동시에 작용하여 Fig. 7(a)에서와 같은 1주기의 Sine파형을 나타낸다. 반면에 임계 간격비 이하인 간격비 0.2의 경우에 앞에서 언급하였듯이 와류 흘림이 일어나지 않음으로 인해 양력 및 항력의 변화가 없으므로 공력 작용 방향이 일정하게 나타났다. 임계 간격비 이후인 0.3 이상에서는 자유흐름에서와 비슷한 Sine 파형을 나타내고 있다. 그러나 자유흐름 상태일 때의 값과 비교해 보았을 때, 위상 90°를 전후한 값의 증가가 위상 270°전후의 증가한 값보다 더 커짐을 알 수 있다. 이것은 Fig. 5(a) 및 (b)에서도 제시되었듯이 위상 90° 전후의 영역이 270° 전후의 영역에 비해 더 큰

양력과 작아진 항력이 생성되기 때문이다.

Fig. 7(b)는 위상에 따른 C_f 크기의 변화를 나타낸다. 자유흐름 상태의 경우, 1주기에 두 개의 주기를 갖는 형태를 나타낸다. 반면에 임계 간격비 이하에서는 앞에서 제시되었던 Fig. 5(a) 및 (b)에서와 마찬가지로 일정한 값을 나타내며, 임계 간격비 이상인 0.3이상의 경우에는 C_f 곡선의 진폭 변화 및 위상 변화를 관찰 할 수 있다. 특히 간격비 0.3, 0.35의 경우는 첫 번째 주기가 두 번째 주기보다 최고값의 크기가 크고 주기가 갖는 위상 역시 줄어드는 경향을 갖는다. 그러나 간격비 0.45 ~ 1.0인 경우에는 첫 번째 주기의 최고값이 두 번째 주기의 값보다 크고, 주기가 갖는 위상이 더 작다. 이것은 Fig. 5(b)에서 보듯이 간격비 0.3, 0.35 일 때의 값이 다른 경우에 비해서 앞 주기와 뒷 주기와 항력계수 값의 크기 및 위상 크기가 더 크게 차이가 나며, 이것은 양력계수보다 항력계수가 C_f 변화에 더 큰 영향을 미치는 것으로 추정된다. 이러한 간격비에 따른 작용하는 힘의 변화는 이미 앞에서 언급한 바와 같이 지면효과에 따른 주위 유동장의 유속증가가 원형 실린더 표면의 정압(static pressure) 감소를 유발하기 때문이다.

4. 결 론

본 연구는 지면효과를 받는 원형 실린더의 간격비에 따른 스트롤수의 변화 및 비대칭적 공기역학적 발달에 대해 조사하였다.

본 연구에서 간격비 변화에 따른 스트롤수의 조사를 통해 와류 흘림(vortex shedding)이 발생하지 않는 임계 간격비가 0.2에서 0.3사이임을 알 수 있었다. 임계 간격비 이상에서는 자유흐름에서의 값보다 더 높은 스트롤수값을 나타내었으며, 증가된 스트롤수는 간격비 $h/d=0.7$ 이후부터 작아지고 간격비 1.0일 때 자유흐름 일 때와 비슷한 값을 갖는다. 지면효과는 스트롤수의 증가 및 공력의 변화를 수반하게 된다. 임계 간격비 이하일 경우 공력의 진동은 존재하지 않았지만, 임계 간격비 이상의 경우에는 진폭의 증가 및 위상의 변화를 가져왔다. 양력곡선을 기준으로 봤을 때 간격비가 커질수록 위상 변화는 줄어들고 진폭은 커지는 경향을 보였으나 간격비 1.0일 때 자유흐름에 근접하는 값을 보였다. 이러한 위상 변화 및 진폭의 변화는 원형 실린더 뒷전에서 발생하는 와류의 비대칭적인 발달에 기인한 것이다. 이와 같은 비대칭성은 공력합의 작용 방향 및 크기에 영향을 주어 크기 및 위상을 변화 시킨다.

이 결과를 토대로 볼 때, 지면효과에 의한 유동장 변화는 표면 압력의 변화, 후류 구조의 변화 및 정체점(stagnation point) 및 분리점(separation point)의 변화를 유발 한다. 따라서 향후 정체점 및 분리점의 조사는 전체 공기력의 작용방향 변화를 설명하는데 도움을 줄 것이다.

참고문헌

- [1] Ahmed, M.R., Sirogane, H. and Kohama, Y., 1999, "Boundary Layer Control with a Moving Belt System for Studies of Wing-in-Ground Effect," *JSME International Journal*, Vol.42, No.4, p.619-625.
- [2] Bhattacharyya S. and Maiti D.K., 2005, "Vortex Shedding from a Square Cylinder in Presence of a Moving Wall," *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol.48, p.985-1000.
- [3] 임예훈, 2000, "Navier-Stokes 방정식을 이용한 지면효과 날개의 해석," 박사학위논문, 한국과학기술원.
- [4] 김태운, 이보성, 이동호, T. Kohama, 2005, "지면 운동에 따른 정사각주 후류의 와류 유동장 수치해석(I) 고정 지면과 이동 지면 비교," *한국 항공우주학회지*, 제33권 제6호, p.1-8.
- [5] Choi J.H., and Lee S.J., 2000, "Ground Effect of Flow Around an Elliptic Cylinder in a Turbulent Boundary Layer," *Journal of Fluid and Structures*, Vol.14, p.697-709.
- [6] Williamson, C.H.K., 1996, "Vortex Dynamics in the Cylinder Wake," *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol.28, p.477-539.
- [7] Paul K. Chang, 1979, "Separation of Flow," *Pergamon Press Inc.*, p.16, 355.
- [8] 정재윤, 장조원, 정윤식, 2006, "지면효과를 받는 2차원 원통 후류 연구," *한국항공우주학회 춘계학술대회 논문집*, p.104-107.
- [9] Noberg, C., 2003, "Fluctuating Lift on a Circular Cylinder : Review and New Measurements," *Journal of Fluids and Structures*, Vol.17, p.57-96.
- [10] Persillon, H. & Braza, M., 1998, "Physical Analysis of the Transition to Turbulence in the Wake of a Circular Cylinder by Three-Dimensional Navier-Stokes Simulation," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.365, p.23-88.