

論文

이동벽면에 의한 원형 실린더의 지면효과에 관한 전산연구

정재윤*, 장조원**

A Numerical Study on the Ground Effect of a Circular Cylinder
in the Presence of a Moving Wall

Jae-Yoon Jung*, Jo-Won Chang**

ABSTRACT

A computational study was carried out in order to investigate the ground effect of a circular cylinder in the presence of a moving wall at a Reynolds number of 2.0×10^4 . The viscous-incompressible Navier-Stokes equations and Spalart-Allmaras turbulent model of the commercial CFD code were adopted for this numerical analysis. The moving wall was set parallel with the freestream, and the speed of motion 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 numerical results show that there are the differences among the each of the stages in evidence of the vorticity contours and the polar diagrams of C_l vs. C_d . The 4 stages of the gap ratio are defined according to the flow features, whose stages are divided into small, intermediate, large and convergence gap ratios, respectively.

Key Words : Circular Cylinder(원형 실린더), Moving Wall(이동 벽면), Ground Effect(지면효과), vorticity(와도), Shedding Frequency(홀림 주파수)

1. 서 론

지면효과(ground effect)에 대한 연구는 지면위를 이동하는 물체의 공력 현상을 이해하는데 아주 중요하다. 특히 벽면이 자유흐름 속도와 같은 속도를 가지는 조건(이동벽면)은 고정된 지면위를 달리는 자동차, 고속 열차, WIG(Wing-in-Ground effect)선 및 항공기의 이·착륙등에서 발생하는 진동, 공력 변화 및 Air-Cushion 효과를 이해하는데 필요하다.

지면효과에 의한 공력 변화는 물체의 특성 길이와 지면에서부터의 거리의 비인 임계 간격비(critical gap ratio)를 기준으로 극명한 차이를 보여준다고 많은 선행연구들에 의해 보고되었다 [1-4]. Nishino et al.[1]이 수행한 $Re=40,000, 100,000$ 에서의 실험 연구에 따르면 약 0.35의 임계 간격비 이후의 간격비에 대해서 원형 실린더의 항력계수 C_d 가 급격한 증가를 보였으나 양력계수 C_l 의 경우는 급격한 감소를 보였다. 김태윤 등[2]의 사각 실린더에 대한 $Re=20,000$ 영역에서의 연구에 따르면, 간격비 0.3 근처에서 스트루할수(Strouhal number)의 급격한 증가를 보고 하였다. 정재윤, 장조원[3]은 상기와 같은 원형 실린더의 비정상(unsteady) 공력 변화 조사를 통해 원형 실린더에 작용하는 지면효과가 공력 계수의 주기성의 대칭성에 영향을 준다고 보고 하였으며, 이러한 영향은 원형 실린더의 유동장이 유동

2006년 10월 30일 접수 ~ 2006년 11월 13일 심사완료

* 한국항공대학교 대학원 항공우주 및 기계공학과

** 정희원, 한국항공대학교 항공우항학과
연락처, E-mail : jwchang@hau.ac.kr
경기도 고양시 덕양구 화전동 200-1

방향에 대해 비대칭적으로 발달하기 때문이라고 예측하였다. 또한 Nishimo et al.[4]은 2차원 유동모사와 3차원 유동모사와의 차이점에 대해 언급을 하였다. 그들은 지면효과에 대한 유동모사(flow simulation)가 2차원이 될 경우, 3차원 유동모사에 비해 임계 간격비의 축소가 유발된다고 하였으나 임계 간격비를 제외한 기본적인 유동의 경향 자체는 바뀌지 않았다. 또한 그들의 연구[1, 4]에 따르면 지면효과가 가지는 임계 간격비 이후에 항력이 급격히 증가하는 제 3의 간격비인 중간 간격(intermediate gap)에 대해 설명을 하였다. 이 중간 간격의 경우 간격비가 높아지면서 C_d 의 급격한 증가를 보이고, 중간 간격 이후 비교적 일정하거나 감소하는 경향을 갖는다.

이와 같이 지면효과를 받는 공력 연구는 다양한 실험 및 전산유체역학 방법을 통해 수행되었으며, 임계 간격비 근처의 공력 변화를 조사할 수 있었다. 원형 실린더에 근접한 유동의 발달이 벽면에 작용하는 정압 분포에 변화를 주어 공력 형성에 상당한 영향을 끼친다. 특히 공력 물체 근처에 벽면이 위치하는 경우 벽면에 의해 생성되는 벤추리 효과(venturi effect) 및 벽면 속도의 영향으로 공력 발달에 영향을 미칠 것이라 예상된다. 따라서 본 연구에서는 $Re=20,000$ 에서 이동 벽면에 의해 변화하는 원형 실린더의 와류유동장(vortex flow field) 연구를 통해 지면효과가 유발하는 유동장 변화에 대해 알고자 한다.

II. 수치해석 기법

2.1 수치 기법 및 격자 구성

Ahmed et al.[5]의 연구에 따르면 이동벽면 모사를 위한 실험 장치는 벽면 경계층의 완벽한 제거가 힘들고 벨트의 탄성 및 구동장치의 진동에 의해 난류 강도의 증가한다고 하였다. 그러므로 본 연구는 실험장치에서 유발되는 유동 교란의 영향을 제거하기 위하여 수치해석을 수행하였으며 유한 체적법(finite-volume method)을 사용하는 상용 CFD코드인 FLUENT를 사용하였다. 전체 유동에 대한 계산은 점성, 비압축성 유동에 대해 Navier-Stokes 방정식을 풀었으며, 유동장 내에서 형성되는 난류 유동의 모사(simulation)를 위하여 Spalart-Allmaras 1 eq. 모델을 사용하였다. Spalart-Allmaras 모델의 경우 난류 점성계수에 대한 전달방정식(transport equation)을 가지고 있으며 2차원 경계층, 후류 및 혼합층에 대한

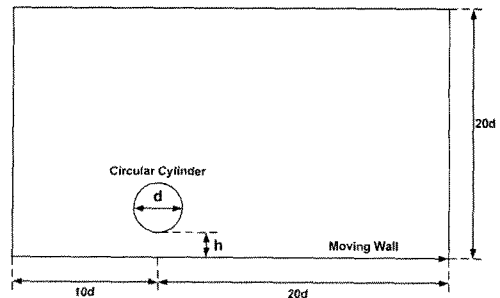


Fig. 1 계산 영역

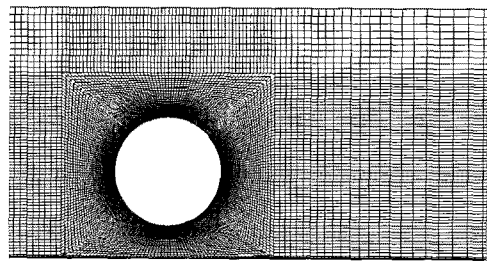


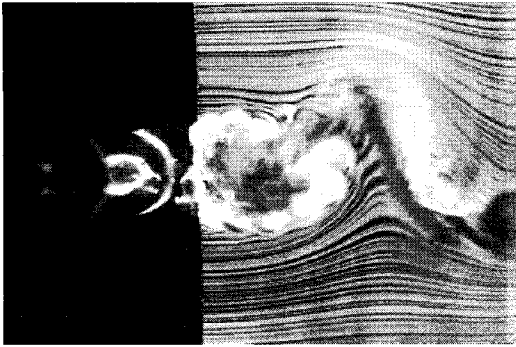
Fig. 2 간격비($h/d=0.3$)의 격자계

정확한 예측이 가능하나 제트유동의 예측에서는 큰 오차를 유발하는 것으로 알려져 있다.

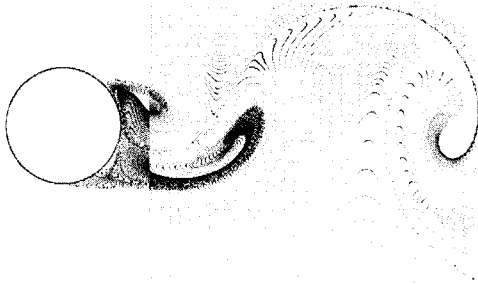
<Fig. 1>은 본 수치해석에 적용된 계산 영역(computational domain)을 나타낸 것이다. 유동 흐름 방향으로 $30d$, 유동의 수직 방향으로 $20d$ 의 계산영역을 가진다. 원형 실린더의 직경 d 와 이동 지면에서 부터의 거리 h 를 사용하여 간격비(h/d)를 설정하였다. <Fig. 2>는 간격비 변화에 따른 원형 실린더 주변의 다중 블록 격자계를 나타낸 것이며, 격자는 240×130 의 크기를 가진다. 본 연구에서 사용한 수치해석 및 격자에 대한 자세한 내용은 참고문헌 [3]에 제시되어 있다.

2.2 수치 기법의 검증

<Fig. 3 (a)>는 $Re=10,000$ 에서의 연선기법(smoke-wire technique)을 이용한 유동 가시화 사진이다. <Fig. 3 (b)>는 수치해석에 적용된 $Re=20,000$ 영역의 유맥선(streakline)이다. 수치해석에 적용된 $Re=20,000$ 영역과 가시화 실험에 적용된 $Re=10,000$ 영역은 유동장의 아임계 영역(sub-critical regime)에 포함되며, 유사한 유



(a) 연선기법에 의한 유동 가시화



(b) 수치해석에 의한 유동 가시화

Fig. 3 근접 후류 유동 비교

동특성을 가진다. 이러한 아임계 영역에서는 후류의 난류로의 천이(transition)가 발생하며 뒷전에서는 응집구조(coherent structure)가 나타난다. 이처럼 근접 후류에서 나타나는 약하고 높은 유동 주파수를 가지는 와류는 <Fig. 3(a)>의 유동 가시화 사진에서 명확히 확인할 수 있다. 그러나 전산해석 결과를 나타낸 <Fig. 3 (b)>의 유맥선에서는 자세히 나타나지 않고 유동의 주기적인 와류 흘림(vortex shedding)에 대한 모사만 가능하다. 그러나 원형 실린더 뒷전의 전체적인 와류 유동은 상당히 유사한 것을 관찰할 수 있다.

III. 계산 결과 및 토론

3.1 간격비에 따른 스트롤수 변화

지면효과가 가지는 스트롤수(Strouhal number) 변화는 선행 연구에서 밝혔듯이 간격비와 큰 연관성을 가진다. 김태윤 등[2]과 정재윤, 장조원[4]

은 간격비에 따른 와류 흘림에 대한 연구를 통해 유동장에서 생성되는 와류 흘림의 유무에 따라 임계 간격비를 설정하여 전체 간격비를 두 개의 구간으로 나누었다. 반면에 Nishino et al.[1, 4]은 간격비에 따른 C_d 의 변화를 통해 간격비를 3개의 구간으로 나누었으며, 이것은 이미 앞에서 언급 했듯이 임계 간격비를 기준으로 임계 간격비 이하의 와류 흘림이 일어나지 않는 작은 간격비(small gap ratio)와 와류 흘림이 일어나기 시작하는 중간 간격비(intermediate gap ratio) 및 큰 간격비(large gap ratio)로 나뉜다.

<Fig. 4>는 참고문헌 [3]에서 인용한 스트롤수에 대한 간격비 그래프를 본 연구에서 제안하는 4단계로 구분하여 나타낸 것이다. 지면효과를 받을 경우 전반적으로 스트롤수의 증가를 유발하는데, 간격비 0.2~0.3사이에서 스트롤수의 급격한 변화가 있음을 알 수 있다. 이것은 임계 간격비를 뜻하는 것으로 임계 간격비 이하인 간격비 0.2 일 경우 와류 흘림은 일어나지 않는다. 반면에 임계 간격비 이상의 간격비 0.3의 경우 유동장의 와류 흘림이 생성되며, 스트롤수는 자유흐름 일 때의 값보다 더 큰 값을 가지게 된다. 스트롤수는 간격비 0.3~0.4 구간에서 완만하게 증가하지만, 간격비 0.45에서 스트롤수는 급격한 증가와 함께 간격비 0.7까지의 구간에서는 거의 일정한 스트롤수를 가진다. 이후부터 스트롤수는 감소하여 간격비 1.0일 경우 자유흐름과 비슷한 값을 나타낸다. 즉 원형 실린더 지면효과는 스트롤수의 변화를 통해 0.2~0.3 사이의 임계 간격비를 기준으로 임계 간격비 이하의 작은 간격비와 0.3~0.4까지의 중간 간격비, 그리고 급격한 스트롤수의 증가 이후의 비교적 일정한 스트롤수를 가지는 큰 간격비인 0.45~0.7의 영역과 자유흐름과 비슷한 값으로 수렴해 가는 수렴 간격비인 0.7 이후의 영역 등 4단계의 간격비 영역으로 구분될 수 있다. 본 연구에서 도출한 임계 간격비와 중간 간격비의 영역은 Nishino et al.[1, 4]의 실험값 및 3차원 유동 수치해석 결과와는 다소 차이를 보인다. 이것은 3차원 유동이 활발히 일어나는 레이놀즈수 범위에서 2차원 유동모사를 통해 결과를 도출하였기 때문이라 생각된다.

<Fig. 5>는 간격비 변화에 따른 양력계수 C_l 의 변화를 1주기에 대해 참고문헌 [3]에서 인용하여 나타낸 것이다. 여기서 제시된 기호 A, B, C, D는 C_l 의 변화에 따른 유동현상을 관찰하기 위하여 <Fig. 6>과 <Fig. 7>에 와도선도(vorticity contour)를 나타낸 위상각(phase angle)을 표시한

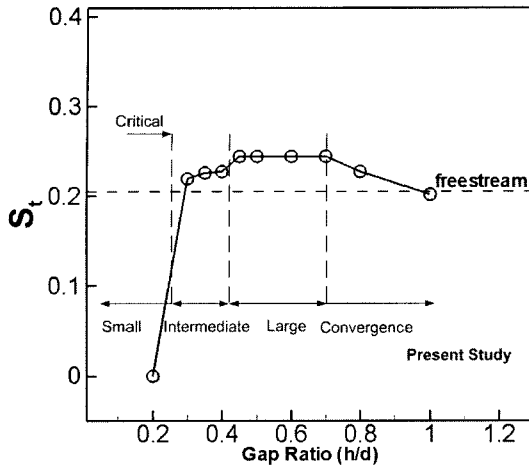


Fig. 4 스톨수 변화에 따른 간격비 구분[3]

것이다. 유동의 대칭성을 가지는 자유흐름($h/d = \infty$)의 경우 C_f 곡선은 위상각 180° 에서 평균값($C_f = 0$)을 지나면서 한 주기에서 평균값을 기준으로 대칭을 이루는 Sine 파형을 이룬다. 반면에 C_f 곡선은 임계 간격비 이하의 작은 간격비 영역에 들어가는 0.2의 경우 위상에 따른 변화가 없는 것을 알 수 있다. 이것은 앞서 언급하였듯이 와류의 홀림이 존재 하지 않기 때문에 원형 실린더 근처의 압력장 변화가 없기 때문이다. 그러나 임계 간격비 이후인 간격비 0.3, 0.6, 1.0의 경우, C_f 곡선의 진동(oscillation)이 존재한다. 이러한 진동의 진폭(amplitude)의 크기는 자유흐름일 때의 값 보다 더 크다. 더 커진 곡선의 진폭은 지면이 유동장을 교란시켜 생성되며 위상각 $0^\circ \sim 180^\circ$ 영역의 양(+) C_f 변화와 $180^\circ \sim 360^\circ$ 영역의 음(-)의 C_f 변화가 대칭을 이루지 않고 있다. 이것으로 미루어 볼 때, 원형 실린더 뒷전에서 발달하는 주기적인 와류의 배출이 상·하면에서 대칭적으로 발생하지 않음을 예측할 수 있다. 이와 같이 움직이는 벽면에 의한 원형 실린더의 비대칭 공력 발달에 대한 연구는 참고문헌 [3]에 자세히 나타내었다.

3.2 간격비에 따른 와유동 변화

<Fig. 6>은 지면효과가 없는 자유흐름상태에서의 와도선도(vorticity contour)이고 <Fig. 7>은 지면효과를 받은 경우 중 간격비 0.2, 0.3, 0.6, 1.0의 경우에 대한 와도선도이다. 여기서 와도는 자유흐름과 직경에 대해 무차원화 하였으며, 다

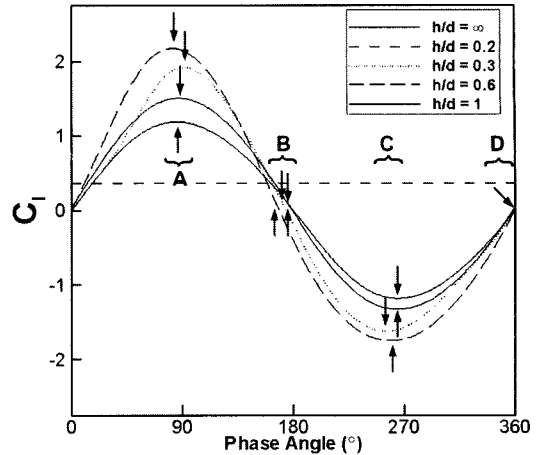


Fig. 5 위상에 따른 C_f 곡선 변화[3]

음과 같이 표현할 수 있다.

$$w_z = \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) \frac{d}{U_\infty} \quad (1)$$

각 경우에 대해 <Fig. 5>에서 표시한 것과 같이 최대 C_f 값을 가지는 경우, 그 이후의 평균값, 그리고 최저값 및 두 번째 평균값을 가지는 경우에 대해 A, B, C, D 및 각 위상각을 표시하였다. <Fig. 6>에서와 같이 지면효과를 받지 않는 경우 원형 실린더의 뒷전에서 생성되는 음(-)의 값을 가지는 와도(점선)와 양(+) C_f 값을 가지는 와도(실선)가 상호 대칭적으로 발달하게 된다. 이러한 대칭적인 발달은 반대 위상인 A, C와 B, D의 와도 선도를 비교하여 확인할 수 있다.

임계 간격비(critical gap ratio) 이하인 작은 간격비 영역에 속하는 간격비 0.2의 경우를 나타내는 <Fig. 7 (a)>에서 주기적으로 생성되는 와류가 없음을 알 수 있다. 뒷전에서 분리후 전단층(separated shear layer)이 roll-up 없이 넓고 길게 존재 하고 있다. Nishino et al.[4]은 이러한 작은 간격비 영역일 경우, 자유흐름일 경우 뒷전에서 존재하는 역류(back flow)가 생기지 않고 유동 속도가 거의 없는 dead region이 형성됨을 보였다.

<Fig. 7 (b)>는 임계 간격비보다 큰 경우이며 중간 간격비에 속하는 간격비 0.3 인 경우이다. 임계 간격비 이상인 이 경우 주기적으로 와류가 생성되는 것을 알 수 있다. 그러나 <Fig. 6>의 자유흐름 상태에 있을 때와 비교해 봤을 때, 뒷

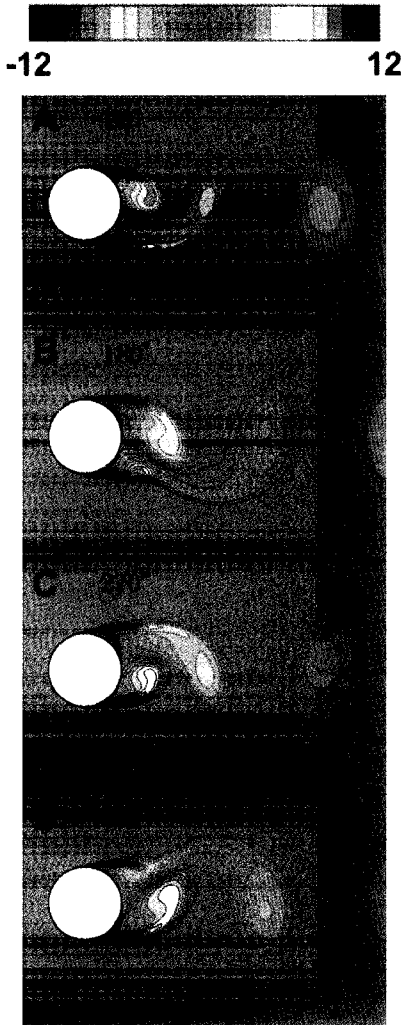


Fig. 6 자유흐름 상태의 와도 선도

전에서 생성되는 와류의 강도가 더욱 강해진다. 이것은 벽면과 원형 실린더의 곡률에 의한 벤추리 효과(Venturi effect)가 원형 실린더 주위 유동장을 속도를 증가시키기 때문이다. 더욱 빨라진 속도장은 분리 후 전단층의 roll-up을 강화시키고 결과적으로 강한 와도의 생성과 국부적인 속도 증가에 의한 원형 실린더 기저압력의 저하를 유발하여 항력을 증가시킨다[6]. 생성된 와류 강도의 증가는 중간 간격비에 속하는 간격비 0.6인 <Fig. 7 (c)>에서도 확인 할 수 있다. 다만 수렴 간격비에 속하는 간격비 1.0인 경우인 <Fig. 7 (d)>의 경우, 뒷전에서 발생하기 시작하

는 와류의 강도는 급격히 약해졌으며, 이것은 자유흐름일 경우보다 와류 강도가 약해진다.

이러한 벤추리 효과는 원형 실린더 경계층에서 발달하여 후류의 와류를 형성하는 분리 후 전단층의 진동(oscillation)에 의해서 더욱 심화된다. 매끄러운 표면을 가진 원형 실린더의 비정상 유동인 경우 정체점(stagnation point) 및 경계층의 분리점(separation point)의 주기적인 위치 변화와 더불어 분리 후 전단층 역시 진동한다. 아랫면에 위치한 분리후 전단층의 진동은 순간적으로 벽면에 근접하여 유동의 유로를 더욱 좁게 만든다. 생성되는 와류의 roll-up과 발달 후의 분리에 의해 진동하게 되는 분리 후 전단층의 경우, 유체 입자가 직접적으로 가로 지를 수 없다. 따라서 분리 후 전단층은 벽면 방향으로 근접하게 위치하고 벤추리 효과를 유발하게 되어 국부적으로 속도가 증가하게 된다. 이럴 경우 속도는 전단층 부근에서 빠른 속도를 가지게 되고, 뒷전 와류형성에 직접적인 영향을 주어 와류의 회전은 더욱 강해지게 된다. 이러한 현상은 <Fig. 7 (b), (c)>와 같이 원형 실린더가 지면과 가까울수록 잘 확인된다.

간격비가 0.3인 경우의 와도선도는 자유흐름일 때와 비교했을 때 뒷전에서 생성되는 순간 강한 와도를 가지는 와류를 나타내지만 와류강도는 하류로 진행되면서 자유흐름일 때인 <Fig. 6>의 경우보다 급격히 감소한다. 와류 강도의 감소는 벽면의 속도 성분에 의한 것이다. 운동량 전달은 유체가 차지하는 공간에 대해 연속적인 분포를 보이지만 일정 속도를 가진 이동 벽면이 존재하는 경우 벽면 속도의 영향을 받아 급격히 변하게 된다. 지면효과를 받을 경우, 벽면 근처에서 시계 반대방향의 회전을 하는 양(+)의 와류가 발달하게 될 때, 와류 회전에 의해 와류와 벽면 사이의 국부적인 유동장의 속도는 자유흐름 및 벽면의 이동속도 보다 커지게 된다. 하지만 벽면의 고정된 이동 속도와 유체의 점성은 와류의 회전에 영향을 주는데, 상대적으로 유동 회전에 의한 속도 성분은 벽면의 속도 성분으로 인해 감소하게 되고 결국은 유체 회전을 저하시켜 와도의 감소를 가져오게 된다. 이것은 간격비 0.6인 경우도 정도의 차이를 나타내지만 동일한 경향을 가진다. 그러나 수렴 간격비에 속하는 간격비 1.0인 경우, 앞선 두 경우의 와류동과는 약간 다른 경향을 가진다. 뒷전에서 주기적으로 발생하는 와류는 자유흐름 및 간격비 0.3, 0.6의 경우보다

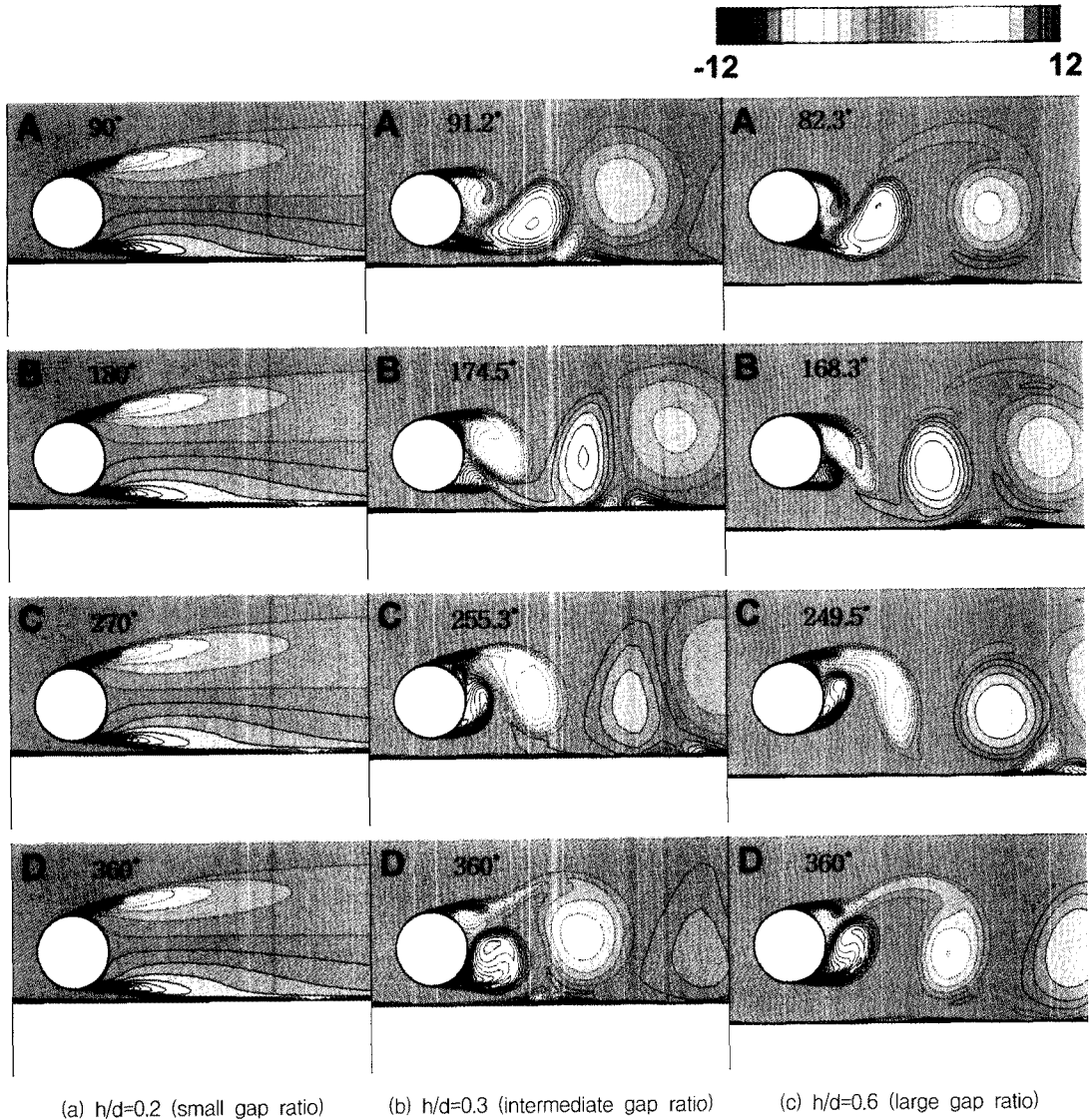
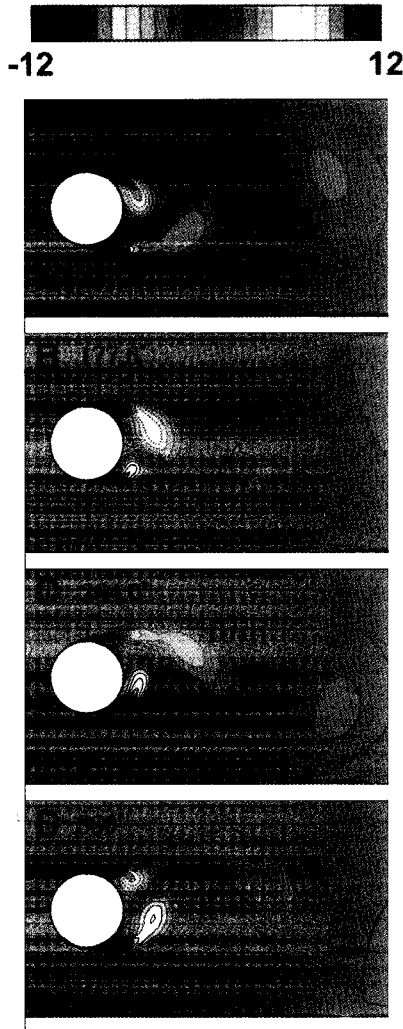


Fig. 7 지면효과를 받을 경우의 와도선도

약한 와류 강도를 가지고 생성되며, 와류 강도의 감소가 간격비 0.3, 0.6의 경우보다 덜하다. 간격비 1.0에서 와류 강도의 감소가 앞의 세 경우보다 작은 것은 이동 벽면과의 거리가 더 크기 때문에 벽면 속도의 영향이 와류의 회전에 영향을 덜 미치기 때문이다.

<Fig. 8>은 지면효과를 받는 와류동장을 설명하기 위하여 나타낸 그림으로 벽면의 속도 성분에 의해 특수한 와류를 생성하게 된다. <Fig. 7 (b)>와 <Fig. 7 (c)>의 와류동장에서 지면 근처에

서 양(+)의 값을 가지는 와류와 음(-)의 값을 가지는 와류 사이의 벽면에서 형성되며 인접한 와류와 반대 값을 가지고 쌍을 이루며 나타나는 데 이것을 Bhattacharyya & Maiti[7]는 헤어핀 와류 (hair-pin vortex)라고 설명하였다. 헤어핀 와류는 벽면이 가지는 일정한 속도와 유동장 내의 와류 생성으로 인한 국부적인 속도 분포가 이루는 상대속도에 의해 생성된다. 일정 공간상의 상대속도는 유동의 회전을 유발하게 된다. 벽면의 속도는 자유흐름의 속도로 고정되어 있지만 원형



(d) $h/d=1.0$ (convergence gap ratio)

Fig. 7 (continue)

실린더의 뒷전에서 발달하는 양(+)의 값을 가지는 와류는 회전으로 인해 벽면 근처에서 국부적으로 자유흐름 보다 높은 속도를 가진다. 이러한 작용에 의해 지면 근처에서는 <Fig. 8>과 같이 양(+)의 값을 가지는 와류 아래에 음(-)의 값을 가지는 헤어핀 와류가 생성된다. 같은 작용으로 윗면에서 생성되는 음(-)의 값을 가지는 와류는 지면 근처에서 양(+)의 값을 가지는 헤어핀 와류를 생성시키게 된다. 그러나 지면에서 생성되는 헤어핀 와류는 후류에서 생성되는 각각의 와류 사이에서 생성되지 않고 <Fig. 7 (b), (c)>에서와 같이 음(-)의 와류와 그것 이후에 생성되는 양(+)

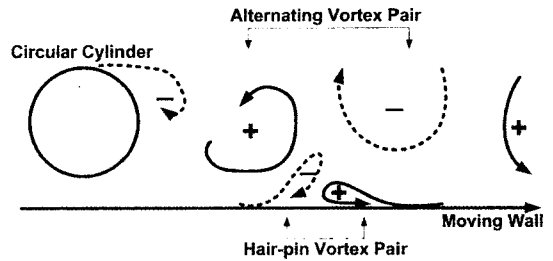


Fig. 8 지면효과를 받는 와류동장

의 와류 사이에서만 존재하는 것을 알 수 있다. 헤어핀 와류는 벽면에 더 인접하고 벤추리 효과에 의해 더욱 강한 회전을 가지는 양의 와류에 의해서 <Fig. 7(b)> A의 경우, 벽면 근처 속도 방향의 변화로 인하여 생성된다. 반면에 <Fig. 7 (b)>의 A 경우와 대칭 위상인 <Fig. 7 (b)>의 C의 경우, 음(-)의 와류가 발생하고 있지만 지면에서의 헤어핀 와류는 생성되지 못한다. 이것은 음(-)의 와류의 와도가 벽면 근처의 헤어핀 와류를 생성할 만큼 충분히 강하지 못하고 인접하지 않기 때문이다.

<Fig. 7 (b)>와 <Fig. 7 (c)>의 경우, 지면에서 발달되는 헤어핀 와류의 발생 위치가 다름을 알 수 있다. 간격비 0.3의 경우 뒷전의 양(+)의 와류가 생성되는 순간인 A 일 때, 헤어핀 와류가 동시에 생성되고 있으나 간격비 0.6의 경우 와류가 하류로 진행 하면서 생성되는 헤어핀 와류를 확인할 수 있다. 그러나 더 큰 간격비를 가지는 수렴 간격비 영역에 속하는 간격비 1.0 인 경우인 <Fig. 7 (d)>에서는 헤어핀 와류를 관찰할 수 없다. 이것은 뒷전에서 생성되는 와류의 강도가 충분히 강하지 못하고, 와류 발생의 위치가 벽면에 떨어져 있어 와류에 의한 벽면 근처의 속도 구배가 헤어핀 와류를 생성할 만큼 충분히 이루어지지 않기 때문이다.

3.3 간격비에 따른 극선도 변화

<Fig. 9>는 참고문헌 [3]에 제시된 원형 실린더에 작용하는 양력계수 C_l 및 항력계수 C_d 를 인용하여 한주기 동안 동시에 나타낸 극선도(polar diagram)이다. <Fig. 9 (a)>의 자유흐름의 경우 뒷전에서 와류쌍(vortex pair)이 생성될 경우 하나의 주기를 가지는 C_l 과 두 번의 주기를 가지는 C_d 곡선이 생성됨을 알 수 있다. 자유흐름 상태일 경우 극선도는 평균값($C_l = 0$)을 기준으로 상·하면이 대칭을 이루고 있다. 유동의 초기 조

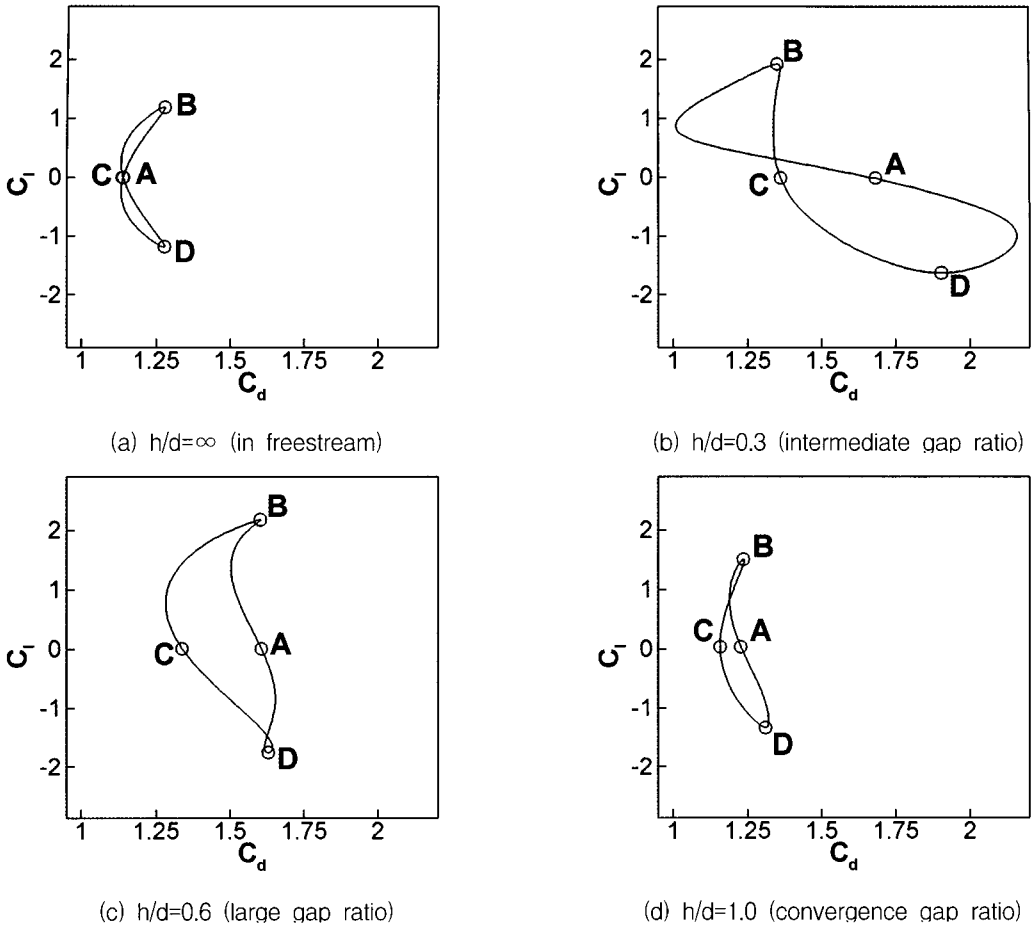


Fig. 9 C_l , C_d 의 극선도(polar diagram)

긴 및 공력 물체 형상의 대칭성으로 인하여 작용하는 공력 역시 대칭을 이루고 있다. 이와 같은 극선도는 유동장 내의 비정상 운동[8]이나 유동장 교란[9]에 의해서 자유흐름과 다른 형태의 극선도를 가진다고 보고되었다. 정영중 등[8]은 진동하는 유동장내에서 진동 주기에 따른 사각 실린더의 극선도 변화를 보였고, Mittal & Raghuvanshi[9]는 원형 실린더 주위에 다른 원형 실린더를 위치시킴으로써 유동장 변화를 피하여 극선도의 변화를 보였다. 본 연구는 일정 속도를 가지는 이동 벽면이라는 외적 교란(external influence) 요소가 원형 실린더의 유동장을 변화시킨다는 것을 <Fig. 6>, <Fig. 7>을 통해 확인할 수 있다. 이러한 유동장의 변화는 다음과 같은 공력 변화를 유발한다.

지면효과를 받는 <Fig. 9 (b), (c), (d)>의 경우 자유흐름 상태에 있는 <Fig. 9 (a)>와는 다른 경향을 나타내고 있다. 각 경우 자유흐름 상태에서 나타났던 대칭성이 사라지고 전반적으로 진폭(amplitude)이 커진 것을 알 수 있다. 진폭의 증가는 중간 간격비 영역인 $h/d=0.3$ 의 경우가 가장 크고, 간격비가 커지면서 작아지는 경향을 가진다. 특히 C_d 의 진폭 변화가 C_l 의 진폭 변화보다 더 크다. 큰 간격비 영역인 $h/d=0.6$ 의 경우, C_l 값의 진폭이 다른 경우에 비해 가장 크며 $h/d=0.3$ 일 경우보다 약간 크다. 아랫면과 윗면에서 이동벽면에 의해 생성되는 상이한 유동 조건은 벤추리 효과와 같은 국부적인 속도 증가에 따른 C_l 값의 진폭을 증가시킨다. 이러한 진폭의 변화는 한 주기 동안 작용하는 힘 크기의 변화가

크다는 것을 의미한다.

한 주기 동안 C_d 의 최대 진폭은 중간 간격비 영역인 $h/d=0.3$ 의 경우에 가장 크다. 기본적으로 뒷전 와류의 강도가 강해지면서 발생하는 국부적인 속도증가로 인해 기저압력(back pressure)은 감소하여 C_d 의 증가를 가져온다. 이것은 간격비 0.3일 경우 뒷전에서 생성되는 와류쌍의 강도 차이가 가장 크다는 것을 의미한다. 자유흐름의 경우인 <Fig. 6>의 뒷전에서 생성되는 와류쌍의 발달은 회전 방향은 반대이지만 강도가 서로 같다. 반면에 지면효과를 받는 <Fig. 7> (b)의 경우 와류 홀림이 생성될 때, 뒷전에서 생성되는 와류쌍은 서로의 강도가 다르며, 대체로 아랫면에서 발생하는 양(+)의 값을 가지는 와류의 강도가 더 크다. 간격비 0.3인 경우 뒷전에서 발생하는 와류 강도의 차이가 가장 크며, 이 경우의 극선도인 <Fig. 9 (b)>에서 가로축으로 가장 큰 진폭을 가지는 것을 알 수 있다. 자유흐름의 경우 B, D 단계에서 가장 큰 C_d 값을 나타내지만, 간격비 0.3의 극선도에서는 D~A 구간에서 가장 큰 C_d 값을 나타내며 지면효과를 받는 $h/d=0.6, 1.0$ 의 경우도 같은 경향을 나타낸다. 이것은 전반적으로 지면효과를 받을 경우 D~A구간의 C_d 증가에 직접적으로 원인이 되는 양(+)의 와류의 강도가 더 크기 때문이다. $h/d=0.3$ 의 경우 A~B구간에서 상당히 작은 C_d 값을 가지고 있고 자유흐름의 경우보다 더 작은 값을 가진다. 본 논문에서는 이러한 구간내의 자세한 유동에 대한 그림은 포함되어 있지 않지만, 이 구간에서의 C_d 값은 원형 실린더에서 양(+)의 와류가 분리되고 비교적 약한 와도를 가지는 음(-)의 와류가 발달하기 때문이라고 예측된다.

큰 간격비 영역인 $h/d=0.6$ 의 경우 A~B의 구간의 C_d 값은 다른 경우와 달리 구간 전체가 B~C 구간의 C_d 값보다 큰 값을 가진다. 이것은 간격비 0.6의 경우 A~B 구간에서 직접적으로 기저압력에 영향을 미치는 완전히 발달한 음(-)의 와류의 강도와 발달하기 시작하는 양(+)의 와류의 강도가 다른 경우의 강도에 비해 크기 때문이다. 이와 같이 A~B구간의 C_d 값이 부분적으로 B~C구간의 값보다 작아지는 현상은 $h/d=0.3, 1.0$ 의 경우만 보이고 있다. 그러나 간격비 0.6의 D~A 구간의 C_d 값 중 일부만 C~D 구간의 C_d 값보다 작다. 중간 간격비 영역인 0.3일 때의 유동현상은 지면효과와 영향을 많이 받아 상·하면에서 발달하는 와류의 비대칭성에 상당한 영향을 받는다. 비교적 큰 간격비인 $h/d=0.6$ 의 경우 유

동현상은 뒷전 와류의 전반적인 강도 차이가 줄어들며, 수렴 간격비 영역에 속하는 $h/d=1.0$ 일 경우 지면효과와 영역에서 벗어나 자유흐름 상태로 넘어가는 과도기 단계가 된다. 이러한 진폭 변화는 와류에 의해 원형 실린더가 자유 진동(free-oscillation)이 발생하는 경우 지면효과를 받을 때 진동의 경향이 자유흐름 상태일 때와는 다를 것을 예측할 수 있게 한다.

IV. 결 론

본 연구에서는 원형 실린더와 지면과의 간격비에 대한 스트롤수 변화를 토대로 간격비 영역을 4단계로 구분하여 각 영역에 대한 유동현상 및 C_f 과 C_d 극선도의 특징에 대해 조사하였다.

임계 간격비(critical gap ratio)이하의 작은 간격비(small gap ratio) 영역에 속하는 $h/d=0.2$ 인 경우 유동장은 와류 홀림이 존재 하지 않고 전단층이 길고 넓게 존재하며, 공력의 시간에 대한 변화가 없다. 반면에 임계 간격비 이상이며 중간 간격비(intermediate gap ratio) 영역에 속하는 $h/d=0.3$ 인 경우 유동장은 강한 강도를 가지는 양(+)의 와류와 비교적 약한 강도를 가지는 음(-)의 와류가 뒷전에서 생성되며 C_d 값 변화의 편차가 가장 크다. 큰 간격비(large gap ratio) 영역에 속하는 $h/d=0.6$ 인 경우 유동장은 중간 간격비와 비교하여 약해진 양(+)의 와류 강도와 강해진 음(-)의 와류 강도를 가지는 뒷전 와류가 생성되며 지면에서 생성되는 와류인 헤어핀 와류(hair-pin vortex)의 생성위치가 달랐다.

지면효과를 받는 경우의 극선도가 가지는 전반적인 형태는 간격비에 따라 다른 형태를 보이는 데, 이것은 뒷전 와류 강도와 원형 실린더에 미치는 영향이 각 경우마다 다르기 때문이다. 또한 본 연구에서 제시한 수렴 간격비(convergence gap ratio)에 속하는 $h/d=1.0$ 의 경우는 약한 뒷전 와류 강도를 가지며, 이때 약한 와류 강도와 벽면과의 거리가 떨어져 헤어핀 와류는 생성되지 않는다. C_f, C_d 극선도 역시 진폭의 감소를 통해 자유흐름 상태의 값과 비슷한 경향을 보이지만 지면효과와 영향을 받아 비대칭성이 존재한다는 것을 알 수 있다.

참고 문헌

- [1] 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

- [2] 김태윤, 이보성, 이동호, T. Kohama, "지면 운동에 따른 정사각주 후류의 와류 유동장 수치 해석 I ; 고정 지면과 이동 지면 비교," 한국항공우주학회지, 제 33권, 제 6호, pp. 1~8, 2005
- [3] 정재윤, 장조원, "이동 벽면에 의한 원형 실린더의 비대칭 공력발달에 관한 전산연구," 한국전산유체공학학회지, 제 11권, 제 3호, pp. 64~70, 2006
- [4] 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
- [5] Ahmed, M. R., Sirogane, H. and Kohama, Y., "Boundary Layer Control with a Moving Belt System for Studies on Wing-in-Ground-Effect," JSME International Journal, Vol. 42, No. 4, pp. 619~625, 1999[6] 강승희, 권오준, 홍승규, "폐쇄형 풍동 시험부내의 원형 실린더 유동에 대한 비정상 벽면효과 연구," 한국항공우주학회지, 제 33권, 제 7호, pp. 1~8, 2005
- [7] 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, pp. 985~1000, 2005
- [8] 정영종, 조상현, 강신형, 최해천, "층류유동에서 사각실린더 주위의 와류shedding과 공진현상에 관한 수치해석적 연구," 대한기계학회논문집 B권, 제 22권 제 5호, pp. 573~583, 1998
- [9] Mittal, S. and Raghuvanshi, A., "Control of Vortex Shedding behind Circular Cylinder for Flows at Low Reynolds Numbers," International Journal for Numerical Methods in Fluids, Vol. 35, pp. 421~447, 2001