

論文

지면 운동에 따른 정사각주 후류의 와류 유동장 수치 해석

Part I. 고정 지면과 이동 지면 비교

김태윤*, 이보성**, 이동호*, Y. Kohama***

Numerical Analysis of the Vortex Shedding past a Square Cylinder with Moving Ground

Tae-yoon Kim*, Bo-sung Lee**, Dong-ho Lee* and Y. Kohama***

ABSTRACT

Incompressible Reynolds-averaged Navier-Stokes equations with ϵ -SST turbulence model are adopted for the investigation of the flow fields between the square cylinder and the ground. When the grounds moves, the diminish of the shear layer intensity on the ground promotes the interaction between the lower and the upper separated shear layer of the cylinder. Hence vortex shedding occurs at the lower gap height than stationary ground. In the moving ground, the secondary shedding frequency disappears due to the absence of the separation bubble on the ground which exists in the stationary ground. In addition, the shedding frequency and aerodynamic coefficients in the moving ground become higher than those of the stationary ground.

초 록

비압축성 평균 Navier-Stokes 방정식에 ϵ -SST 난류 모델을 적용하여 정사각주 주위 유동과 지면의 간극 유동을 해석하였다. 지면이 운동할 경우에는 지면의 박리 전단층의 강도가 약화되어 사각주 상/하부의 박리 전단층 상호 작용을 촉진시키므로 고정 지면에 비하여 더 낮은 간극에서도 와류 배출이 발생한다. 지면 효과를 고려할 경우 고정 지면의 경우와는 달리 지면의 박리 거품이 존재하지 않게 되고, 이로 인하여 2차 박리 주파수는 나타나지 않는다. 이와 더불어 지면이 운동할 경우 고정 지면에 비해 더 높은 와류 배출 주파수와 공력 계수가 나타남을 확인하였다.

Key Words : Ground Effect(지면 효과), Moving Ground(이동 지면), Stationary Ground(고정 지면), Separated shear layer(박리 전단층), Vortex shedding(와류 배출)

I. 서 론

자유류 상태의 사각주 주위 유동과 달리, 지면

근처에 놓인 사각주는 종횡비와 지면과의 간극에 따라 후면의 와류 배출이 억제된다[1]. 특히, 이러한 사각주 후면의 와류 진동은 지면과 일정한 간격을 두고 설치된 교량 및 지상 구조물, 그리고 대형 트럭 등의 동안정성에 심각한 영향을 미치게 된다. 고정 지면의 경우 지면에서는 박리 전단층과 함께 시계방향의 와도가 생성되는데 이는 사각주 하부에 발생하는 반시계 방향의 와도를 약화시켜 사각주 후면의 와류 배출을 억제하

† 2005년 3월 4일 접수 ~ 2005년 5월 10일 심사완료

* 정희원, 서울대학교 기계항공공학부
연락처자, E-mail : donghlee@snu.ac.kr
서울시 관악구 신림동 산 56-1

** 정희원, 한국과학기술정보연구원

*** 일본 동북대학교 유체과학연구소

게 되고 이로 인해 사각주 후면에서 압력 회복이 빨라진다[2]. 그러나, 고정 지면의 경우 지면과 운동체간의 상대 운동을 정확하게 모사하지 못하므로 전혀 다른 유동 현상이 나타날 수 있다. 이로 인하여 효과적인 지면 재현을 위해서는 특수한 풍동 실험 장비들이 필요하며, 수치해석의 경우에도 적절한 경계조건을 적용하여야만 보다 정확한 유동 해석 결과를 얻을 수 있다. 이러한 관점에서 Kumarasamy와 Barlow[3]는 움직이는 지면 근처에 놓인 반구의 유동을 해석하여, 와류 강도는 지면의 운동에 영향을 받으나, 스트로할 수 및 공력 계수들은 큰 영향이 없다고 하였다. Jones 와 Smith[4]는 차량의 하부와 지면의 상대적인 운동을 고려하여 간극의 유동장을 연구하였다. Bhattacharyya와 Maiti[5]는 움직이는 벽면 근처에 놓인 사각주를 $Re=1000$ 으로 수치 해석하여 고정지면과는 달리 임계 간극 이하에서도 주기적인 와류 배출이 발생함을 확인하였고, 간극에서 속도도 증가한다고 하였다.

본 논문에서는 지면 근처에 놓인 $Re=20,000$ 인 정사각주에 대해 지면의 간극에 따른 특성을 지면의 운동을 고려하여 수치 해석하여, 지면의 운동이 스트로할수와 간극 유동장 특성 및 공력 계수의 변화에 어떠한 영향을 미치는 지에 대해서 고정지면과 비교하여 고찰하고자 한다.

II. 수치 기법

2.1. 지배방정식 및 수치기법

본 연구에서는 식(1), 식(2)와 같이 2차원 비압축성 평균 Navier-Stokes 방정식에 인공 압축성(pseudo-compressibility)을 도입하여 해석을 수행하였다. 그리고, 물리적 시간인 t 에 대해서 2차의 후향 차분법을 적용하여 소스항으로 처리하면서 pseudo time항인 τ 를 도입하는 dual time step 방법을 적용하여 비정상 유동장을 해석하였다[6]. 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial p}{\partial \tau} = -\beta \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial \tau} + \frac{\partial u_i u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} [(v + v_j)(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i})] - \frac{\partial u_i}{\partial t} \quad (2)$$

식(2)에서 와점성계수 v_j 는 대규모 박리 유동장에 적합하게 제안된 ε -SST 난류 모델[1,2]을 사용하여 구하게 된다.

비점성항의 공간차분에는 3차의 상류 차분법을 사용하였으며 점성항의 차분에는 중심 차분법을 적용하였다. 시간적분방법에는 병렬처리에 적합한 DP-SGS 알고리즘[7]을 사용해 영역분할기법을 통해 병렬해석을 수행하였다.

2.2 계산격자구성 및 경계조건

Fig. 1은 계산에 사용된 격자계를 보여주고 있다. 계산 격자는 H-Type의 단일구역 격자계이며, 사각주의 두께는 D , 폭은 B , 지면과의 간극은 G 로 나타낸다. 본 연구에서는 사각주의 종횡비 (B/D)는 1.0으로 고정하고, 지면과의 간극(G/D)은 0.2~0.6까지는 0.05씩, 0.6~1.0까지는 0.1씩 변화시키면서 사각주 후면에서의 와류 유동장을 고찰하였다. 격자계가 수치해에 미치는 영향을 고찰하기 위해 $G/D=1.0$ 인 경우에 대하여 격자계 크기를 98×73 , 198×148 , 398×298 , 벽면에서의 첫 번째 격자의 간격($\Delta x_i/D$)은 0.0025, 0.005, 0.01로 변화시키면서 비교하였다. 해의 비정상성에 영향이 있는 물리적 시간 간격은 $t=0.025$, 0.05, 0.1로 적용하였다. 표1과 같이 198×148 , $t=0.05$ 로 해석을 수행한 결과가 398×298 , $t=0.05$ 결과 및 198×148 , $t=0.025$ 와 공력 계수 및 스트로할수에서 큰 차이가 없기 때문에 본 연구에서는 198×148 , $t=0.05$ 로 해석을 수행하였다.

표 1. 다양한 격자수에 따른 공력 특성 비교

격자크기	Δt	$\Delta x_i/D$	Cl	Cd	St
98 X 73	0.05	0.01	-1.68~2.10	1.61~1.98	0.126
198 X 148	0.1	0.005	-1.98~1.93	1.80~2.07	0.149
198 X 148	0.05	0.005	-2.02~1.97	1.78~2.25	0.153
198 X 148	0.025	0.005	-2.04~1.99	1.77~2.27	0.154
398 X 298	0.05	0.0025	-2.10~2.06	1.83~2.32	0.152

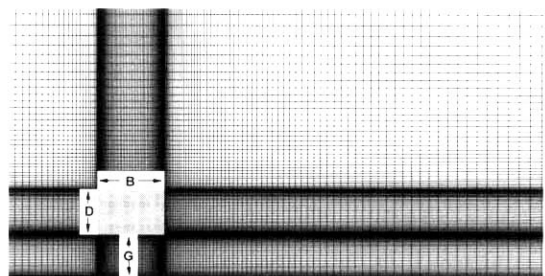


Fig. 1. Computational Grid of Rectangular Cylinder Near a Wall

사각주의 두께 D 와 자유류 속도 U_∞ 를 기준으로 레이놀즈수 ($Re = U_\infty D / \nu$)는 20,000으로 고정시켰고, 유입류는 사각주의 전면으로부터 $6.7D$ 지점에서 $1/7$ 승 법칙을 적용하여 경계층 두께 (δ/D)가 4가 되도록 적용하였다. 사각주 벽면에서는 no-slip 조건을, 계산 영역의 윗면에서는 내칭 경계조건, 출구에서는 외삽 경계조건을 적용하였으며, 고정 지면의 경우에는 no-slip 경계조건을, 이동 지면의 경우에는 자유류와 같은 속도 (U_∞)로 조건을 부여하고 해석을 수행하였다.

III. G/D에 따른 유동장 해석

Fig. 2는 G/D에 따른 와류 유동의 무차원 진동수인 스트로할수를 나타내고 있다. 고정지면의 경우 Kenjo의 실험치와 임계 간극에서는 차이를 보이고 있으나, 그 이후의 경향은 거의 일치한다. 고정 지면(Stationary Ground)의 경우는 임계간극이 0.55 근처에 존재하나, 이동 지면 (Moving Ground)의 경우는 이보다 작은 0.35 근처에서도 주기적인 와류 배출이 확인되고 있다. 따라서 대형 컨테이너 차량, RV 같이 뭉툭한 형상을 가지면서 지면으로부터 간극을 갖는 지상 운송체의

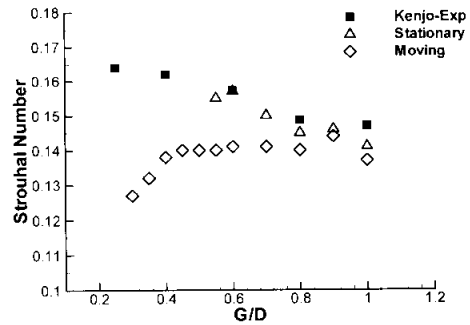


Fig. 2. Strouhal numbers according to G/D

경우는 후류에서 와류 발생의 가능성이 고정지면에 비해서 더 커진다고 할 수 있다. 또한 고정 지면의 경우는 간극이 커짐에 따라 서서히 스트로할수가 작아져서 자유류 상태의 값인 0.133으로 수렴하고 있으나, 이동 지면의 경우는 G/D=0.5 경우까지 급격한 스트로할수 증가를 보이다가, 그 이후에는 일정한 값을 보이고 있다.

이는 이동 지면의 경우 지면에 경계층이 거의 존재하지 않기 때문에, 고정 지면의 경우와는 달리 사각주 상/하부의 전단층에 영향을 미치지 않게 되어 간극의 변화가 와류 유동장에 영향을 미치지 않기 때문이다.

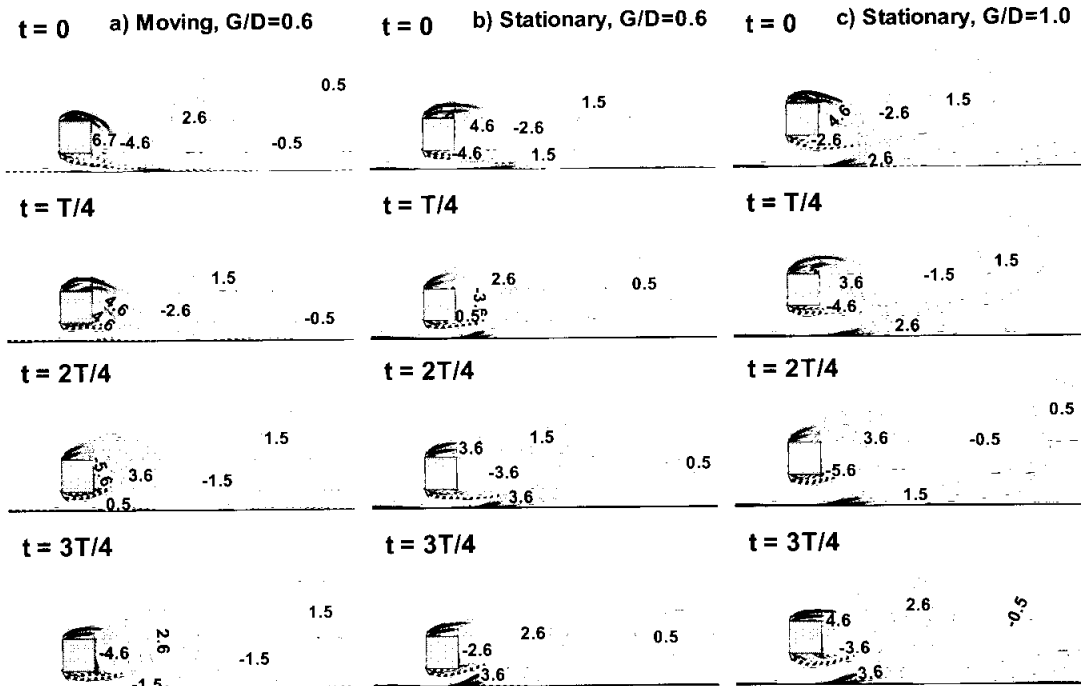


Fig. 3. Vorticity Contours ; a) Moving, G/D=0.6, b) Stationary, G/D=0.6, c) Stationary, G/D=1.0

3.1 사각주 후면의 와류 유동장 특징

Fig. 3은 이동 지면과 고정 지면의 경우를 $G/D=0.6, 1.0$ 에서 한주기 동안 와류가 형성되는 과정을 비교한 그림이다.

사각주가 지면 근처에 위치하게 되면 실린더 상부 및 지면에는 시계방향의 전단층이, 실린더 하부에는 시계반대방향의 전단층이 각각 생성된다. 고정 지면의 경우 사각주 하부의 박리 전단층은 벽면에서 발생한 반대방향의 박리 전단층의 간섭 작용에 의하여 그 강도가 약화되며, 사각주 후류에 발생하는 주기적인 와류 배출은 이러한 전단층 상호 작용에 영향을 받는다. 그림 3의 $t=0\sim T/4$ 시점에서 상부와 벽면에서 생성된 시계방향의 박리 전단층이 사각주 하부의 시계반대방향의 박리 전단층에 의하여 분리되면서 후류로 배출된다. $t=2T/4\sim 3T/4$, 상부와 벽면에서 박리된 시계방향의 전단층이 서로 혼합하면서 벽면에서 직접 와류가 배출되고, 또한 벽면에 박리 거품이 생성된다. 이러한 벽면의 박리 거품은 실린더 후류에 2차 박리 주파수를 야기 시킨다.

이동 지면에서는 고정 지면과 비교하여 벽면에서 전단층이 거의 발생하지 않기 때문에, 하부의 시계반대방향의 전단층의 강도는 강해지고, 상부의 시계방향 전단층의 강도 역시 강해지는 것을 확인할 수 있다. 또한 이동 지면의 경우 실린더 상부와 하부 박리 전단층이 강하게 상호 작용하여, 실린더 후류에서 시계반대방향의 강한 와류도 벽면을 따라서 배출된다. 그러나 고정 지면의 경우 벽면의 영향으로 시계 방향의 와류는 약간 위쪽으로 치우쳐서 배출되며, 또한 시계반대방향의 와류는 이동 지면에 비해 빨리 소멸되는 것을 확인할 수 있다. 이동 지면의 $G/D=0.6$ 과 고정 지면 $G/D=1.0$ 에서의 와류 강도를 비교하면, 와류 강도는 거의 비슷한 값을 보이나, 고정 지면에서는 지면에 발생한 박리 전단층의 영향으로 후류에 발생하는 와류 형태는 약간 변형되는 것을 확인할 수 있다. 이는 고정 지면에서 간극이 증가하는 것과 같은 효과를 이동 지면이 보인다는 것을 의미하며 따라서 이동 지면의 경우 임계 간극이 고정 지면보다 작아지게 된다.

Fig. 4는 $G/D=0.6, 1.0$ 일 때의 시간에 따른 양력 변화율 곡선으로, 고정 지면의 경우에는 이동 지면의 경우와는 달리 지면의 박리 전단층의 영향으로 인하여 1차 박리 주파수뿐 아니라 2차 박리 주파수의 존재도 확인할 수 있다. Fig. 5는 FFT를 통한 주파수 스펙트럼을 나타낸 그림이다. 고정 지면 $G/D=0.6$ 일 때 2개의 박리 주파수가

존재하고, 그 크기도 이동 지면이나, 고정 지면의 $G/D=1.0$ 보다 작다. 이런 고정 지면 특성은 간극이 증가하여 지면의 영향이 약화되면 이동 지면과 같이 2차 박리 주파수는 사라지게 된다. Fig. 3

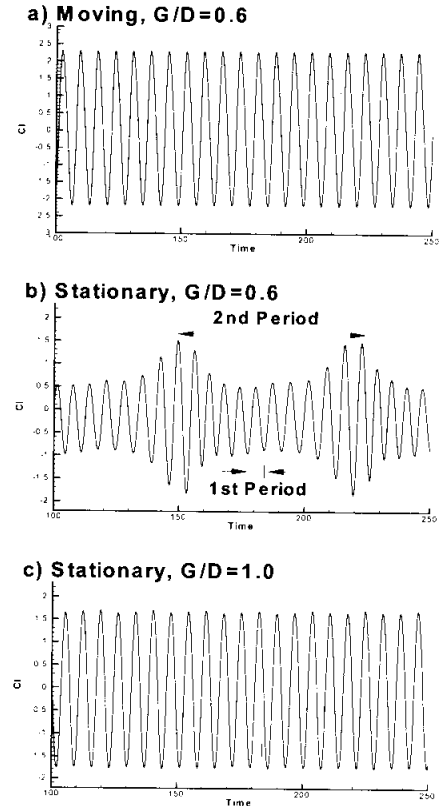


Fig. 4. Lift histories a) Moving, $G/D=0.6$ b) Stationary, $G/D=0.6$, c) Stationary, $G/D=1.0$

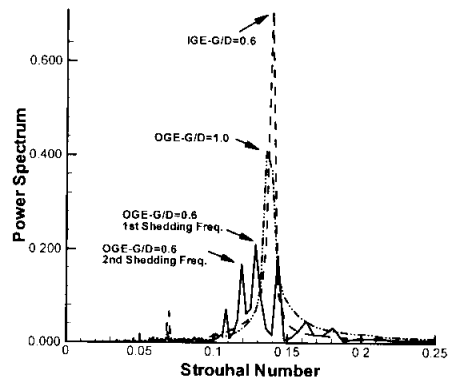


Fig. 5. Power Spectrum by FFT

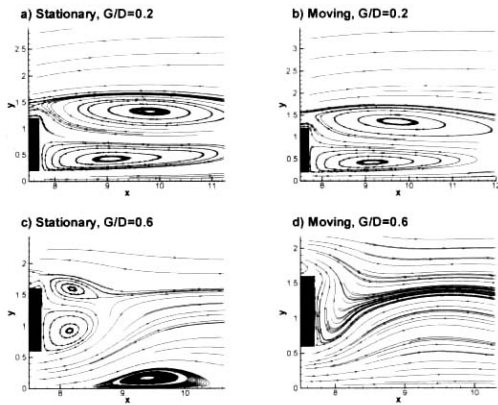


Fig. 6. Mean Streamline past cylinder at $G/D=0.2, 0.6$

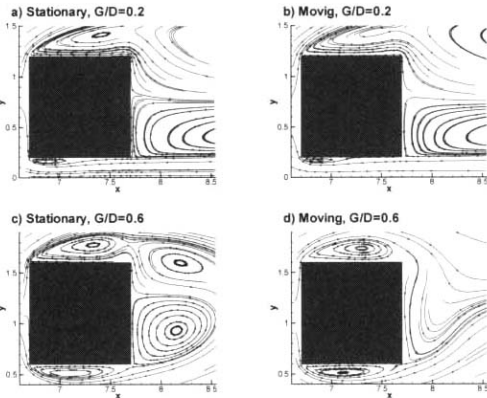


Fig. 7. Separation bubble on the surface of the cylinder at $G/D=0.2, 0.6$

의 결과처럼 이동 지면 $G/D=0.6$ 과 고정 지면에서 $G/D=1.0$ 의 그래프를 비교하면, 이동지면일 때가 더 큰 진폭을 갖으나, 주기는 거의 비슷함을 알 수 있다. 이는 이동 지면 영향이 간극을 증가시키는 것과 유사한 특성을 갖는다는 것을 의미한다.

Fig. 6은 실린더 주위의 시간 평균 유선을 나타낸 것으로, 와류 배출이 억제된 $G/D=0.2$ 인 경우에는 이동 및 고정 지면 모두 후류에 대규모 박리 유동장이 형성되나, $G/D=0.6$ 의 경우에는 후류에 한 쌍의 와류가 형성된 것을 확인할 수 있으며, 특히 고정 지면에서는 약간 비대칭적인 와류장이 형성되고, 또한 지면에 박리 거품이 존재하는데 이로 인하여 후류에서의 2차 박리 주파수가 형성된다. 이동 지면의 경우에는 사각주 하부의 와류장이 약하게 형성되기 때문에 상부의 평균 유선이 지배적으로 나타나고 있다.

Fig. 7은 사각주의 상/하부의 평균 유선을 나타낸 그림이다. 후류의 와류 배출이 억제되는 간극 ($G/D=0.2$)에서는 이동 지면과 고정 지면 모두 사각주 하부의 앞전에서 박리된 유동장이 다시 재부착이 되는 것을 확인할 수 있으며, 와류가 배출되는 경우($G/D=0.6$)에는 앞전에 박리된 유동장이 재부착 되지 않고, 바로 후류에서 상부의 박리 전단층과 상호 작용을 하게 된다.

Fig. 8은 사각주 표면에서의 평균 압력 분포를 나타낸 그림이다. 사각주 정면에 정체 영역이 존재하고, 이는 지면 효과나 간극에 큰 영향을 받지 않는다. B 지점의 앞전 부분에 suction peak가 존재하며, $G/D=0.2$ 경우에는 높은 속도를 갖는 이동 지면에서 더 낮은 압력 분포를 보이나, $G/D=0.6$ 에서는 이동 지면과 고정 지면의 차이가 거의 없다. B-C 구간에서는 전 영역에 대하여 역압력구배를 가지며, 이것은 간극이 커짐에 따라 그 영향은 작아진다는 Martinuzzi et al. 결과[9]와 일치한다.

또한 C-D, D-A 구간에서는 평균 압력 분포가 거의 변화가 없으며, C-D 구간에서 이동 지면의 압력 회복이 고정 지면에 비하여 상대적으로 작고, 이것이 항력 증가의 원인이 된다.

Fig. 9, 10은 간극 높이의 변화에 따른 정사각주 하부의 출구부분의 평균 유속이다. G/D 가 증가할수록 평균 유속의 최대값(u/u_{∞})이 증가하고, 최대값 위치인 y/G 는 사각주 하부로 이동한다. 간극에서의 속도 분포를 통해서도 이동 지면에 발생한 전단층의 존재를 확인할 수 있으며, 지면과의 간극 높이의 증가는 지면에 존재하는 전단층의 상대적인 크기를 약화시키는 역할을 한

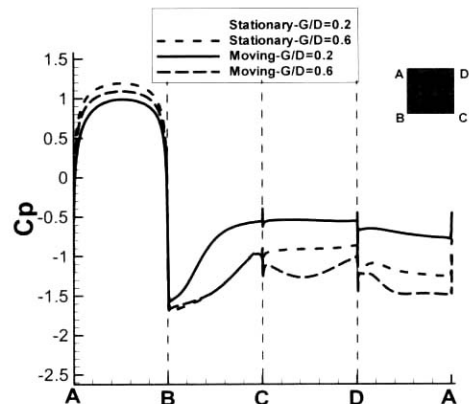


Fig. 8. Time-average Pressure Coefficient over the Cylinder at $G/D=0.2, 0.6$

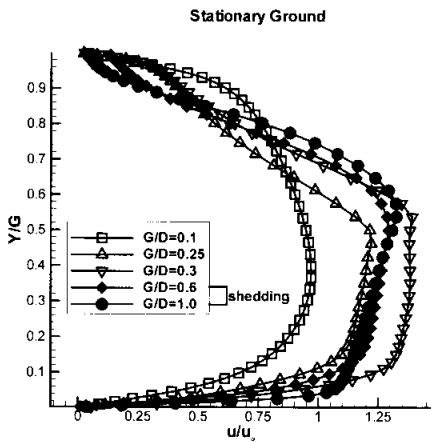


Fig. 9. Mean velocity profile for various G/D with Stationary Ground

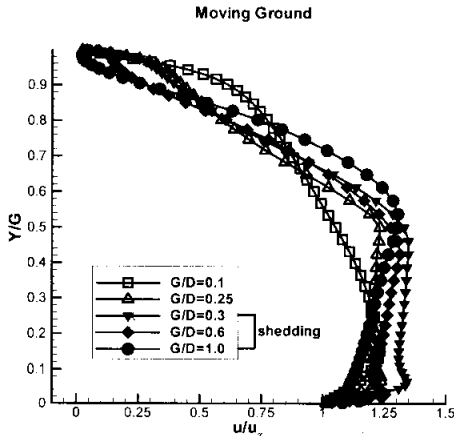


Fig. 10. Mean velocity profile for various G/D with Moving Ground

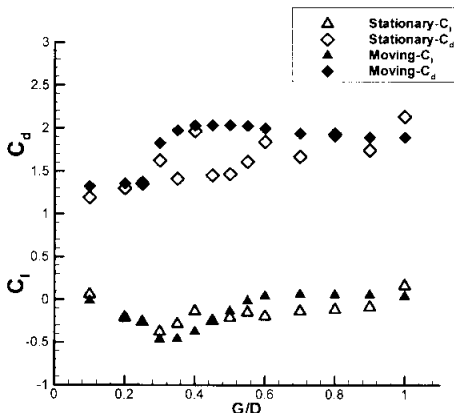


Fig. 11. Time-Average Aerodynamic Coefficient for various G/D

다. 또한 이동 지면은 고정 지면에 비하여 지면에서 발생하는 전단층의 약화로 인해 간극으로부터 후류로 높은 운동량을 공급하고, 고정 지면보다 더 낮은 간극에서도 주기적인 박리 현상이 발생한다. 따라서 이러한 간극에서의 높은 운동량 공급은 사각주 후류에서 압력 회복을 방해하고, 주기적인 와류 배출의 에너지를 지속적으로 공급한다. 따라서 실제 벽면과의 상대적인 운동을 하는 지상 운송체에서는 고정 지면에 비하여 항력 및 양력이 높아지고, 이런 공력 특성을 정확히 파악하기 위해서는 무빙 벨트, 분출 및 흡입 장치, 고정 지면 등의 지면 재현 장치를 동반한 풍동 실험[10] 또는 적절한 경계 조건을 적용한 수치 해석이 필수적이다.

Fig. 11은 항력과 양력 계수의 한주기 평균값을 표시한 것이다. 임계 간극이하인, $G/D < 0.3$ 에서는 고정 지면과 이동 지면의 큰 차이가 없으나, $0.3 < G/D < 0.7$ 인 경우에는 이동 지면이 30% 이상 높다. 이것은 간극에서 후류로 유입되는 운동량의 증가로 인하여 압력 회복이 더 작기 때문이다. 또한 평균 항력 증가뿐만 아니라 후류에서 발생하는 주기적인 와류 배출로 인한 동안정성 문제가 발생한다. 이러한 이동 지면과 고정 지면의 차이는 간극이 증가함에 따라 벽면의 영향이 작아지기 때문에 점점 작아진다.

III. 결 론

본 논문에서는 지면 근처에 놓인 $Re=20,000$ 인 정사각주에 대해 지면의 간극에 따른 유동장 특성을 지면의 운동을 고려하여 수치 해석하여, 지면의 운동이 스트로할수와 간극 유동장 특성 및 공력 계수의 변화에 어떠한 영향을 미치는 지에 대해서 고정지면과 비교하여 고찰하였다. 지면 근처의 사각주 후류에서는 실린더 상/하부의 박리 전단층의 상호 작용으로 와류가 생성된다. 그런데 고정 지면의 경우 지면에 존재하는 시계 반대 방향의 박리 전단층이 사각주 하부의 시계 방향의 박리 전단층을 간섭함으로써, 와류 배출을 억제한다. 그러나 이동 지면의 경우에는 지면의 전단층이 강하지 않기 때문에 고정 지면보다 더 낮은 간극에서도 주기적인 와류 배출이 발생할 수 있었다. 또한 이동 지면은 지면에 박리 거품이 존재하지 않기 때문에 실린더 후류에서 오직 하나의 와류 박리 주파수만이 존재한다. 실린더 하부 및 후류에서의 평균 압력 분포는 이동 지면의 경우가 더 높으며, 이는 항력의 증가를 가져온다. 사각주의 항력 및 양력 계수는 임

계 간극이하, 즉 $G/D < 0.3$ 에서는 고정과 이동 지면의 차이가 없으나, $0.3 < G/D < 0.7$ 에서는 이동 지면이 고정 지면보다 약 30% 높은 항력을 갖는다. 이는 지상 운송체의 공력 특성을 정확히 파악하기 위해서는 보다 정확한 지면 재현 기법 및 지면 재현 장치가 설치된 풍동에서의 실험이 필수적이라는 것을 의미한다. 향후 이러한 지면 효과를 고려하여 유동장을 제어할 수 있는 기법을 적용하는 연구가 필요할 것으로 보인다[11].

후 기

본 연구는 “서울대 BK21 기계분야 사업단” 및 “KISTI의 제6차 대용량 슈퍼컴퓨팅 전략 과제”의 지원을 받았습니다.

참고문헌

- 1) 이보성, 김태윤, 박영희, 이동호, “ ϵ -SST 난류 모델을 적용한 벽면 근처 정사각주 유동장의 수치해석”, 항공우주학회지 제31권 8호 pp. 1-7.
- 2) 이보성, 김태윤, 이도형, 이동호, “벽면에 근접한 사각주 후면의 와류 유동장 수동제어”, 한국항공우주학회지 제 32권 6호, pp. 16-22.
- 3) Sanjay Kumarasamy, Jewel B. Barlow, "Computational of unsteady flow over a half-cylinder close to a moving wall", J. of Wind Eng. Ind. Aero., 69-71 1997, pp. 239-248.
- 4) Jones MA and Smith FT, "Fluid motion for car undertrays in ground effect", J. Eng.

Maths 45, 2003, pp. 309-334.

- 5) S. Bhattacharyya, D.K. Maiti, "Vortex Shedding for Flow over a Square Cylinder Close to a Moving Ground", IUTAM Symp., 2003, New Jergey, USA.

- 6) Rogers, Kwak, "Upwind differencing scheme for the time-accurate incompressible Navier-Stokes equations", AIAA J. Vol. 28, No. 2 (1990).

- 7) 이보성, 이동호, "MPP에서의 효율적 분산처리를 위한 Data Parallel Symmetric Gauss-Seidel 알고리즘", 한국항공우주학회지 제 26권 2호, pp. 60-72.

- 8) Kenjo C. Q. Wu and Robert J. Martinuzzi, "Experimental Study of the Turbulent Wake Flow behind a Square Cylinder Near a Wall", ASME, FEDSM 97-3151, June, 1997.

- 9) R.J. Martinuzzi, S.C.C Bailey, G.A. Kopp, "Influence of wall proximity on vortex shedding form a square cylinder", Experiments in Fluids 34, 2003, pp. 585-596

- 10) 김태윤, 권혁빈, 이동호, 김문상, "다양한 지면 재현 기술을 적용한 한국형 고속전철의 풍동 실험 연구", 한국항공우주학회 2002 춘계학술대회 논문집, pp. 66-69.

- 11) Bo-sung Lee, Tae-yoon Kim, Dong-ho Lee, "Control of Vortex Shedding behind a Rectangular Cylinder near the Ground", Numerical Heat Transfer Part A, 47, 2005, pp. 787-804.

- 12) Tae-yoon Kim, Bo-sung Lee, Dong-ho Lee, "Study on the Unsteady Wakes Past a Square Cylinder near a Wall", Journal of Mechanical Science and Technology Vol 19, No. 5, pp. 1169-1181.