

## 論文

## 지면 운동에 따른 정사각주 후류의 와류 유동장 수치 해석

## Part II. 수동 제어 기법 연구

김태윤\*, 이보성\*\*, 이동호\*, Y. Kohama\*\*\*

## Passive Control of the Vortex Shedding past a Square Cylinder with Moving Ground Part II Study of Passive Control Technique

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

## ABSTRACT

Understanding of the flow past a bluff body close to a moving ground is very important in automobile and aeronautical fields because of aerodynamic characteristic and instability induced by unsteady vortex shedding. The passive control method that mounted the vertical and horizontal plates at the lower surface of the cylinder is studied to suppress the unsteady oscillation motion. When the grounds moves, the diminish of the shear layer on the ground promotes the interaction between the lower and the upper separated shear layers of the cylinder, hence vortex shedding occurs at the lower gap height than the stationary ground.

## 초 록

지면 근처에 존재하는 뾰족한 물체의 유동장 이해는 자동차 및 항공 업계에 매우 중요한 분야이다. 이를 위해 비압축성 평균 Navier-Stokes 방정식에  $\epsilon$ -SST 난류 모델을 적용하여 정사각주와 이동 지면의 간극 유동을 해석하였다. 비정상 진동을 억제하기 위하여 사각주 하부에 수직/수평의 펜스 설치 효과를 연구하였다. 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.

**Key Words** : Moving Ground(이동 지면), Passive Control(수동 제어), Separated shear layer(박리 전단층), Vortex shedding(와류 배출)

## 1. 서 론

일상에서 많이 볼 수 있는 뾰족한 물체에 대한 유동 해석은 예전부터 많은 연구자들의 관심사였다. 특히 벽면 근처에 존재하는 사각주는 교

량, 파이프 라인, 빌딩, 컨테이너 트럭과 같은 대형 구조물로부터 하드 디스크, 열 교환기 등의 작은 형태까지 매우 다양하다. 특히 이러한 사각주 후면의 와류 진동은 지면과 일정한 간격을 두고 설치된 교량 및 지상 구조물, 그리고 대형 트럭 등의 동안정성에 심각한 영향을 미치게 된다 [1]. 그러나 벽면에 근접한 사각주는 벽면과 사각주 하부와의 상호 간섭 때문에 주기적인 와류 배출이 억제되고, 특히 지상 운송체와 같이 지면과의 상대적인 운동을 하는 경우에는 그 유동 특성이 매우 달라짐으로 적절한 경계 조건을 부여한 수치 해석이나 지면 재현 장치를 구비한 풍동 실험

\* 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

힘이 필요하다.

사각주 형태의 구조물과 지상 운송체의 공력 저항은 많은 부분 후류에서 발생하는 와류 배출에 기인하기 때문에 공력 저항 감소를 위해서는 후면에서의 압력 회복 손실과 와류 배출을 억제해야 한다. 항력을 감소시키는 방법에는 와류 영역에 저항 저감 기구를 설치 방법, 끝단의 형상 변화(Boattail) 방법 등의 수동적 제어 방법과, 유동 분출, 흡입, 환기 방법, 유과 가진 등의 능동적 제어 방법 등이 있다. Khalighi[3] 등은 후류 영역에 수평 판을 설치함으로써, 난류 강도를 억제하여 항력을 감소시켰다. Duell[4] 등은 몽뚝한 물체 후미에 공동을 만들어 재순환 영역을 증가 시킴으로써 후미의 압력을 11% 상승시켰다. Y. Delaunay[5] 등은 흡입 및 분출 기법을 사용한 수치 해석 결과를 통해 흡입 기법은 항력을 증가시키고 분출은 항력을 감소시킨다고 하였다. 또한 이보성[6,7] 등은 사각주 하부에 수직 및 수평의 팬스를 설치한 결과, 후류에서 발생하는 비정상 와류 배출을 억제하였으며, 또한 항력 감소효과도 얻을 수 있었다.

그러나 지상 운송체는 지면과 상대적인 운동을 하기 때문에 유동 특성이 고정 지면과 많은 차이가 있다. Bhattacharyya와 Maiti[8]는 움직이는 벽면 근처에 놓인 사각주를 Re=1000으로 수치 해석한 결과, 고정지면과는 달리 임계 간극 이하에서도 주기적인 와류 배출이 발생함을 확인하였다. 김태운[8] 등은 이동 지면의 사각주 주위 유동을 Re=20,000에서 해석한 결과, G/D<0.3에서는 고정 지면과 이동 지면의 차이가 없으나, 0.3<G/D<0.7에서는 이동 지면이 고정 지면보다 약 30% 높은 항력을 갖는다고 하였다.

본 논문에서는 고정 지면에서 사각주 후류에서 와류 배출 억제에 효과가 있는 수직 및 수평 팬스가 이동 지면에서도 같은 효과를 나타내는지를 확인할 것이다. 나아가 지면과 상대적인 운동을 하는 대형 지상 운송체의 공력 특성 향상에 적용이 가능한지에 대해서도 고찰해 볼 것이다.

## II. 수치 기법

본 연구에서는 식(1), 식(2)와 같이 2차원 비정상 비압축성 평균 Navier-Stokes 방정식에 인공 압축성(pseudo-compressibility)을 도입하여 dual time step 방법을 적용하여 해석을 수행하였다.

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

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

식(2)에서 와점성계수  $\nu_t$ 는 대규모 박리 유동장에 적합하게 제안된  $\epsilon$ -SST 난류 모델[1]을 사용하여 구하게 된다. 비점성항의 공간차분에는 3차의 상류 차분법을, 점성항은 중심 차분법을 적용하였다. 시간적분방법은 병렬처리용 DP-SGS 알고리즘[2]을 사용해 영역분할기법을 통해 병렬해석을 수행하였다.

Fig. 1은 계산에 사용된 격자계를 보여주고 있다. 계산 격자는 H-Type의 단일구역 격자계이며, 본 연구에서는 사각주의 종횡비(B/D)는 1.0으로 고정하고, 지면과의 간극(G/D)은 0.25~0.6까지는 0.05씩, 0.6~1.0까지는 0.1씩 변화시키면서 사각주 후면에서의 와류 유동장을 해석하였다. 또한 사각주 하부에 두께 0.07D, 길이 0.1D인 수평 및 수직 팬스를 설치하였다. 격자계 수립 테스트를 수행한 결과, 공력 계수 및 스트로할수에서 큰 차이가 없어서 본 연구에서는 198 X 148, t=0.05로 해석하였다[7]. 사각주 높이 D와 자유류 속도  $u_\infty$ 를 기준으로 하여 레이놀즈수는 20,000으로 고정시켰고, 유입류는 사각주의 전면으로부터 6.7D 지점에서 1/7승 법칙을 적용하여 경계층 두께( $\delta/D$ )가 4가 되도록 적용하였다. 사각주 벽면에서는 no-slip 조건을, 계산 영역의 윗면에서는 대칭경계조건, 출구에서는 외삽 경계조건을 적용하였으며, 고정 지면의 경우에는 no-slip 경계조건, 이동 지면에는 자유류와 같은 속도( $u_\infty$ )로

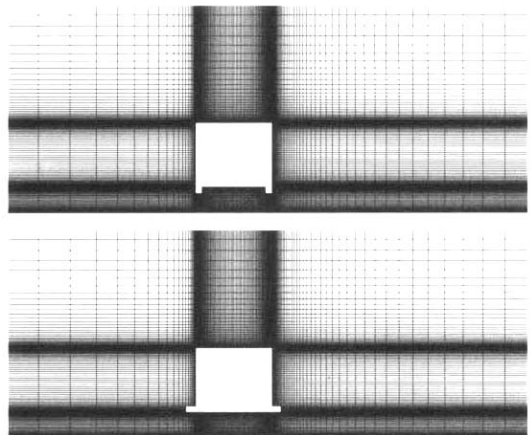


Fig. 1. Computational Grid of Cylinder Near a Wall

조건을 부여하여 지면의 경계층을 제거하고 해석을 수행하였다.

### III. 수동 제어 기법 적용

Fig. 2는 지면 근처 사각주에 수평 및 수직 펜스를 설치하여 후류에 발생하는 주기적인 와류를 억제하는 수동 제어 기법의 개념도이다. 기존의 고정 지면에서 적용한 수동 제어 연구 결과[7,8]를 상기하면, 임계 간극 이상의 높이에 놓인 사각주는 Fig. 2b)와 같이 사각주 하부에 수평 펜스를 설치하면 사각주 세장비를 증가시키는 효과를 발생시켜서, 상·하부의 박리 전단층의 상호 작용을 억제할 수 있다.

또한 Fig. 2c)와 같이 사각주 하부에 수직 펜스를 설치하면 간극에서 후류로 공급되는 운동량을 감소시켜서, 주기적인 와류를 억제할 수 있다.

Fig. 3은 고정 지면과 이동 지면에서 기본형, 수평, 수직 펜스가 설치된 사각주 후류에서의 스트로할수를 간극에 따라 나타낸 것이다. Fig. 3a)는 고정 지면 기본형의 임계 간극이  $G/D=0.55$  근처에 존재하나, 수직 및 수평 펜스가 설치된 경우에는  $G/D=0.6$ 으로 이동하였다. 그러나 Fig. 3b)의 이동 지면에서는 기본형과 수평 펜스의 경우는 임계 간극이  $G/D=0.3$ , 수직 펜스의 경우는

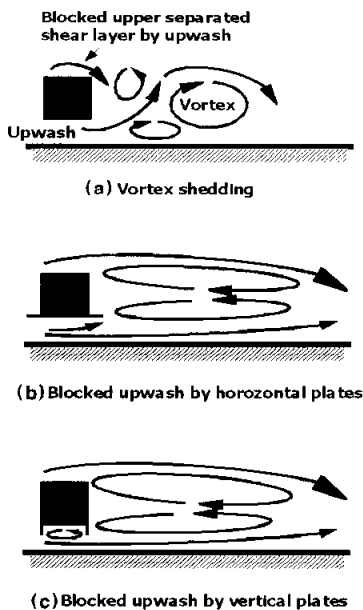


Fig. 2. Schematic of Vortex shedding mechanism

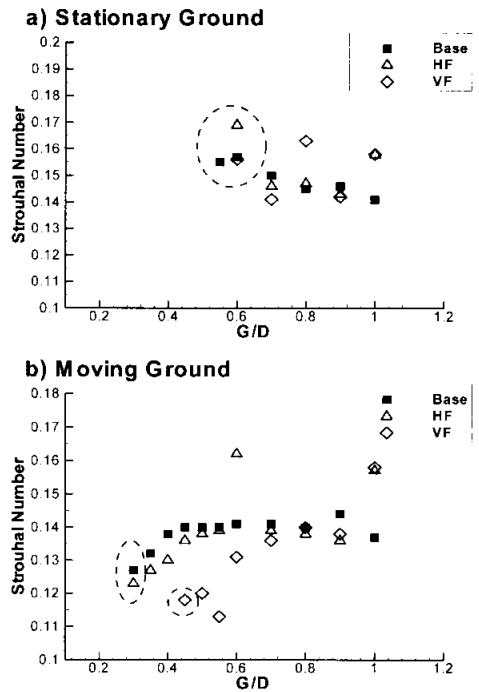


Fig. 3. Strouhal number ; a) Stationary Ground, b) Moving Ground

$G/D=0.45$ 로 더 낮은 간극에서도 와류 배출이 발생하였다. 이동 지면의 경우에는 지면의 전단층이 사각주 하부의 박리 전단층의 크기를 충분히 약화시키지 못하기 때문에, 고정 지면보다 더 낮은 간극에서도 주기적인 와류 배출이 발생하는 것이다[9]. 또한 고정 지면에서는 간극이 증가함에 따라 스트로할수가 작아져서 자유류 상태의 값으로 수렴하나, 이동 지면에서는 반대로 간극의 증가함과 같이 스트로할수가 증가한다.

Fig. 4는 고정 지면은  $G/D=0.55$ , 이동 지면은  $G/D=0.35$ 일 때 양력 및 항력 계수를 나타낸 그림이다. 고정 지면에서는  $0.1D$ 의 수평, 수직 펜스가 모두 와류 배출을 억제하였으나, 이동 지면에서는 오직 수직 펜스에서만 억제되었다. 고정 지면에서는 기본형보다 수평, 수직 펜스가 설치된 경우에 양력 및 항력이 감소되었고, 특히 임계 간극 근처에서는 수평 펜스의 경우가 수직 펜스보다 더 높은 효율을 보였다. 그러나 이동 지면에서는 수평 펜스는 와류 진동을 억제시키지 못했으며, 오히려 기본형보다 높은 항력과 양력 진동을 보이고 있다. 즉, 고정 지면에서 임계 간극 근처 적절한 높이의 수평 펜스는 양력 및 항력 감소에 높은 효율을 보이고 있으나, 이동 지면에서는 수평 펜스는 와류 배출 억제에 큰 영향을

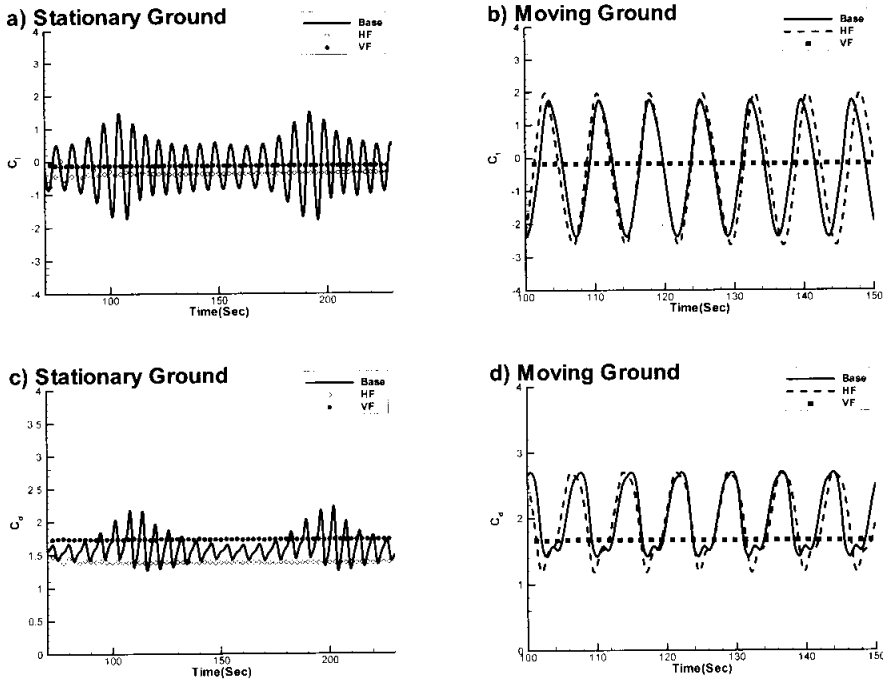


Fig. 4. Lift and Drag Coefficient histories ; a) Stationary Ground  $C_l$  at  $G/D=0.55$ , b) MovingGround  $C_l$ , at  $G/D=0.4$ , c) Stationary  $C_d$ , at  $G/D=0.55$ , d) Moving Ground  $C_d$  at  $G/D=0.35$

보이지 않고 있다. 이는 수직 펜스는 유동의 흐름 방향에 수직으로 놓여져 있기 때문에 항력 및 양력을 증가시키나, 임계 간극에서 보다 높은 간극에서도 와류 배출을 억제시킬 수 있어, 평균 항력 및 양력 측면에서는 기본형보다 좋은 효율을 보이고 있다. 고정 지면의 기본형인 Fig. 4a), 4c)에서는 임계 간극 위의 간헐적인 와류 배출이 존재하는 영역에 1차 박리 주파수 이외에도 2차 박리 주파수가 존재하는데, 이는 벽면에 존재하는 박리 거품이 사각주 후류의 와류 배출에 영향을 주기 때문이다. 그러나 이동 지면에서는 벽면에 박리 거품이 존재하지 않기 때문에 고정 지면과 같은 2차 박리 주파수는 존재하지 않는다. 또한 간극으로부터의 높은 운동량 공급으로 인하여 양력 및 항력 진동이 더 크게 발생하고, 공력 특성 감소 및 동안정성 상실 등이 발생할 수 있다.

Fig. 5는 고정 지면은  $G/D=0.55$ , 이동 지면은  $G/D=0.35$ 일 때의 평균 유선을 나타낸 그림이다.

고정 지면에서는 기본형, 수평, 수직 모두가 와류 배출이 억제되어 후류에 커다란 재순환 영역이 존재하는 것을 확인할 수 있으며, 이는 상부의 박리 거품과 연결이 된다. 그러나 이동 지면에서는 기본형과 수평 펜스에는 후류에 주기적

인 와류가 배출되고, 오직 수직 펜스의 경우에만 와류가 억제되었다. Fig. 5a)의 지면에 생성된 박리 거품의 존재로 Fig. 4a)와 4c)의 2차 박리 주파수의 존재를 확인할 수 있다. 또한 이동 지면에서는 지면에 박리 거품이 존재하지 않고, 또한 2차 주파수가 존재하지 않음을 통해서도 확인할 수 있다.

Fig. 6은  $G/D=0.35$ 일 때 사각주 표면의 압력 분포를 도시한 것이다.  $G/D=0.35$ 에서는 고정 지면에서는 모든 경우에서 와류가 억제되고, 이동 지면에서는 수직 펜스가 설치된 경우에만 와류가 억제된다. 이동 지면에 수직 펜스가 설치된 경우의 압력 분포는 고정 지면과 거의 동일하게 나타나고 있음을 확인할 수 있다. 또한 이동 지면의 경우는 간극 영역에서 더 빠르게 가속되기 때문에 B-C 영역에서 압력 강하가 더 크게 나타난다. 항력에 영향을 주는 A-B 영역과 C-D 영역을 살펴보면, A-B 영역에서는 모든 경우에 큰 차이가 없었고, 다만 수직 펜스가 설치된 경우에 약간 높게 나타났다. 그러나 사각주 후류인 C-D 영역에서 이동 지면의 경우는  $C_p=0.5$  정도이나, 고정 지면에서는  $C_p=-1.3$  정도로 차이가 많이 발생하는데, 이는 후류 영역에서 이동 지면의 경우

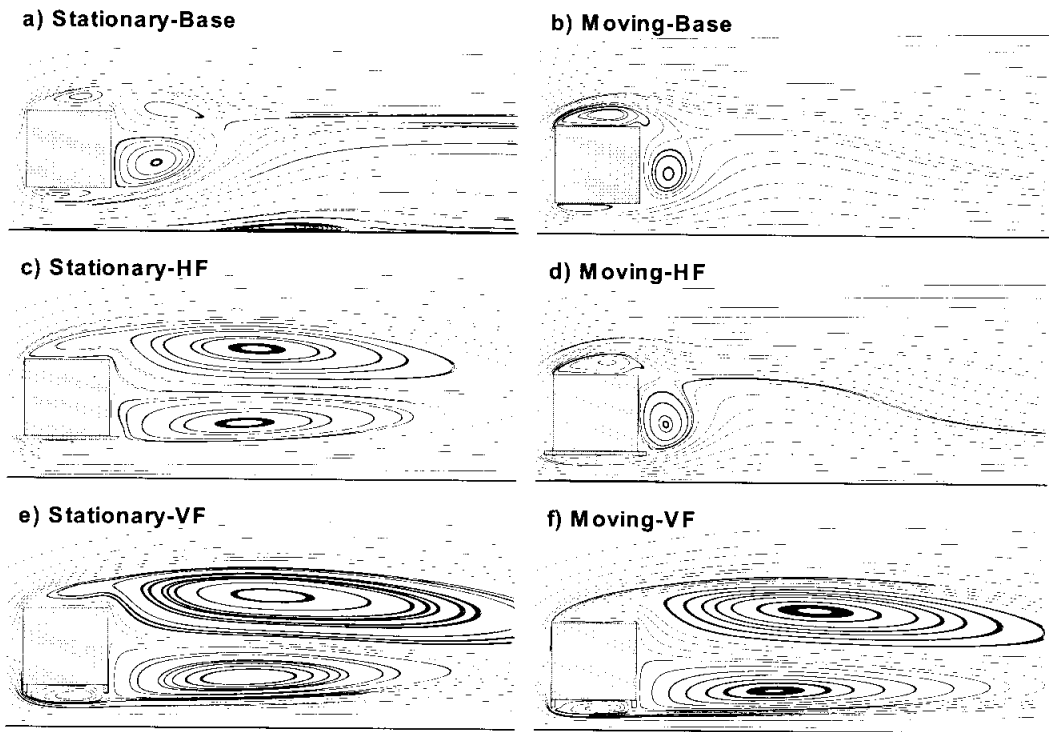


Fig. 5. Mean Streamline, Stationary Ground cases at  $G/D=0.55$  ; Moving Ground cases at  $G/D=0.35$

가 압력 회복이 더 작다는 것을 의미한다. 또한 와류가 억제된 경우에는 표면을 따라 압력이 거의 일정하나, 와류가 배출되면 압력이 변화한다. 따라서 지면과 상대적인 운동은 하는 자동차, 대형 컨테이너, 고속 전철 등의 공력 특성은 와류 배출이 되지 않는 간극에서는 이동 지면과 고정 지면의 큰 차이가 없지만, 임계 간극 이상에서는

큰 차이를 보이게 됨으로 적절한 조건을 부여하여 해석해야 한다.

Fig. 7은 지면과 사각주 하부 간극에서의 평균 속도 분포이다. 이동 지면의 경우에는 지면에 발생한 박리 전단층이 매우 작기 때문에 고정 지면에 비하여 벽면에서 높은 속도를 갖는다. 고정 지면과 이동 지면 모두 수평 펜스는 간극에서의 속도를 감소시키는 것보다는 지면에 생성된 박리 유동장에 의한 사각주 하부 유동장의 간섭 효과를 증가시키는 역할을 한다. 그러나 수직 펜스는 간극에서의 운동량을 감소시켜서, 와류 배출을 억제하는 역할을 한다. 즉, 이동 지면은 고정 지면에서 간극이 증가하는 것과 같은 효과를 보이기 때문에 [9] 운동량을 억제시키지 못하는 수평 펜스는 이동 지면에서는 와류 억제에 큰 영향을 줄 수 없고, 수직 펜스만이 효과가 있는 것이다.

Fig. 8은  $C/D$ 에 따른 항력 및 양력 계수의 한 주기 평균값이다. 이동 지면에서는 간극이 증가함에 따라 항력 및 양력 계수가 증가하는 것을 알 수 있다. 이것은 간극에서 지속적인 운동량 공급으로 전체적인 유동장이 안정되기 때문이다. 고정 지면에서는 수직 펜스가 설치된 경우에는 기본형 및 수평 펜스보다 평균 항력은 더 증가하지

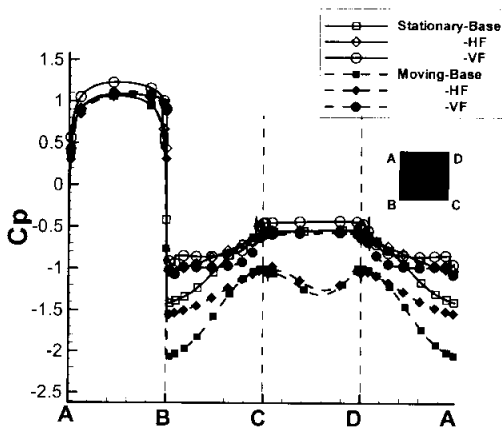


Fig. 6.  $C_p$  Distribution at  $G/D=0.35$

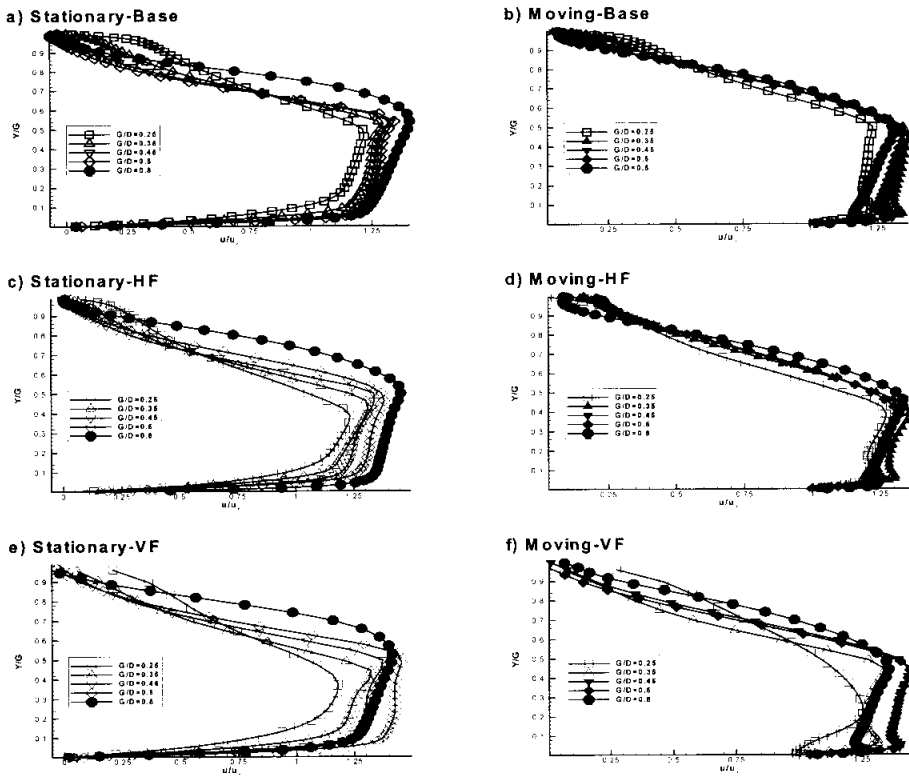


Fig. 7. Velocity profiles in gap region ; Blank : Suppression, Solid : Shedding

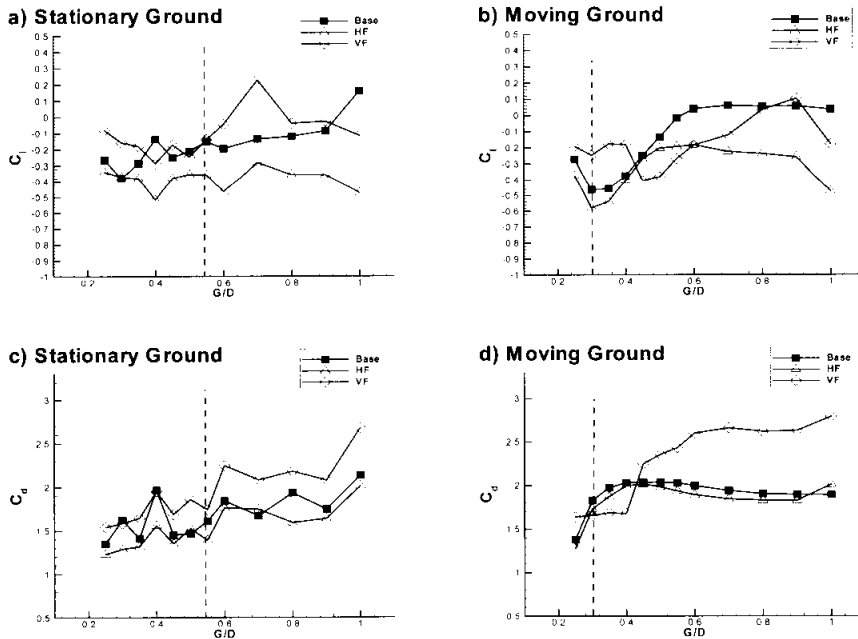


Fig. 8. Averaged Aerodynamic Coefficient a) Stationary Ground  $C_i$ , b) Moving Ground  $C_i$ , c) Stationary Ground  $C_d$ , d) Moving Ground  $C_d$

만, 이동 지면에서는 와류가 억제되는  $G/D < 0.4$  이하에서는 항력이 더 작고, 동안정성 측면에서도 더 좋은 효율을 보인다. 따라서 이 간극이하에서는 수직 펜스가 높은 효율을 보인다. 그러나  $G/D > 0.4$ 에서는 유동 방향에 수직하게 설치된 펜스의 영향으로 항력이 급격히 증가하게 된다. 이 영역에서는 수평 펜스가 "Venturi Effect"에 의한 양력 발생으로 기본형과 수직 펜스에 비하여 항력 및 양력 감소효과를 보이게 된다.

#### IV. 결 론

본 연구에서 이동 지면에서는 간극으로부터 후류로 충분한 운동량 공급으로 인하여 고정 지면에 비해 후류에서 압력 계수가 0.8정도 더 낮아 항력의 증가를 보인다. 또한 고정 지면에서는 간극 변화에 따라 공력 계수가 불규칙적으로 변화하나, 이동 지면에서는 지면의 경계층 제거 및 안정적인 운동량 공급으로 고정 지면에 비하여 후류 유동이 임계 간극 이상에서 거의 일정한 값을 보인다. 이동 지면에서는  $G/D < 0.4$ 에서 수직 펜스가 수평 펜스에 비하여 와류 배출 억제 및 항력 감소 효과가 높았으나,  $G/D > 0.4$ 에서는 와류 배출이 억제되지 않아, 오히려 항력이 기본형과 수평 펜스보다 높아진다. 이 영역에서는 비록 수평 펜스가 와류 배출을 억제하지 못하나, 항력 및 양력 감소에 좋은 효과를 보인다. 따라서 지면과 상대적인 운동을 하는 지상 운송체 경우에 지면과의 간극에 따라 수평 및 수직 펜스의 적절한 설치를 통해서 후류에서 발생하는 비정상 와류 배출을 억제할 수 있고, 또한 항력 및 양력 감소 효과를 얻을 수 있을 것이다.

#### 후 기

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

#### 참고문헌

- 1) 이보성, 김태윤, 박영희, 이동호, " $\epsilon$ -SST 난류 모델을 적용한 벽면 근처 정사각주 유동장의 수치해석", 항공우주학회지 제 31권 8호 pp. 1-7.
- 2) 이보성, 이동호, "MPP에서의 효율적 분산처리를 위한 Data Parallel Symmetric Gauss-Seidel 알고리즘," 한국항공우주학회지 제 26권 2호, pp. 60-72.
- 3) Bahram Khalighi, S.Zhang and C. Korokilas, S.R Balkanyi, et al. "Experimental and Computational Study of Unsteady Wake Flow Behind a Bluff Body with a Drag Reduction Device", 2001, SAE 2001-01-1042.
- 4) Edward G. Duell, A.R. George, "Experimental Study of a Ground Vehicle Body Unsteady Near Wake", 1999, SAE 1999-01-0812.
- 5) Y.Delaunay, L. Kaiktsis, "Active Control of Cylinder Wakes : Use of Base Suction and Blowing", ESAIM Proceedings, Vol. 7, 1999. pp 104-119.
- 6) 이보성, 김태윤, 이도형, 이동호, "벽면에 근접한 사각주 후면의 와류 유동장 수동제어", 한국항공우주학회지 제 32권 제 6호, pp. 16-22.
- 7) Bo-sung Lee, Tae-yoon Kim, Dong-ho Lee, "Control of Vortex Shedding behind a Rectangular Cylinder near the Ground", Nume. Heat Tran. Part A, 47,205, pp. 1-18.
- 8) S. Bhattacharyya, D.K. Maiti, "Vortex Shedding for Flow over a Square Cylinder Close to a Moving Ground", IUTAM Symp., 2003, New Jergey, USA.
- 9) 김태윤, 이보성, 이동호, Y. Kohama, "지면 운동에 따른 정사각주 후류의 와류 유동장 수치해석 Part I 고정 지면과 이동 지면 비교", 한국항공우주학회지 제 33권 제 6호 pp. 1-7