

지면에 근접한 정사각주 주변의 유동장 연구

황재호* · 박영희* · 김태윤* · 이동호**

Investigation on the Flowfield Around a Square Cylinder near a Wall

Jaeho Hwang, Youngwhe Park, Taeyun Kim and Dong-Ho Lee

Key Words : Square Cylinder(정사각주), Ground Effect(지면효과), Incompressible(비압축성), Strouhal Number(스트로할수), Critical Gap Height(임계간극), Transition(전이).

Abstract

This paper presents unsteady computational investigations and wind tunnel tests on the flow field around a square cylinder with a gap between the body and the ground plane. Two-dimensional unsteady, incompressible Navier-Stokes codes are developed for the computation of the viscous turbulent flows. By computing the flow around a square cylinder without ground effect, three two-equation turbulence models are evaluated and the developed code is validated. The results show a good agreement with experimental values and other computational results. Critical gap height at which the formation of Kärman vortex streets is interrupted, is demonstrated and another transition regime is pointed out

기호설명

D	원주 직경, cm.
G	간극.
G/D	무차원화된 간극.
Re	레이놀즈수.
St	스트로할수.
U	평균 속도, m/s.
$U_{ref}(U_0)$	자유류 속도, m/s.
U_{rms}	시간평균속도, m/s.
δ	경계층두께.

1. 서론

거대 토목구조물부터 작은 고속의 전기장치를 구조적으로 안전하게 설계하려면, 비정상(unsteady) 풍하중에 의한 동특성에 대한 검토가 필수적이며, 각종 공조, 연소기기에서의 후류에서의 혼합특성(mixing characteristics)을 파악하는 것도 설계, 시험 단계에서 검토되어야 하는 조건이다. 토목구조물

이나, 전기장비, 연소기내부뿐만 아니라 현실세계에서 대부분의 형상은 뚱뚱한 형상을 가지고 있기 때문에 유동은 박리, 재부착의 과정을 거치며 후류영역에서 비정상 상태의 와류장(vortex street)을 형성하며 복잡한 유동형태를 보인다. 열차나 자동차 같은 지상운송체나, 대부분의 토목구조물에서와 같이 지면에 근접할 때 더욱더 복잡한 형태를 보이게 된다.

본 연구는 강한 난류특성을 특징으로 하는 상기 형태의 유동장에 대한 공력하중과 후류패턴의 전이특성에 대하여 연구하기 위하여, 지면에 근접한 정사각주에 대하여 각 연구방법론이 가지는 장점을 수용하여 수치해석연구와 풍동실험연구를 수행하였다.

2. 수치해석개략

2.1 지배방정식 및 난류모델

토목구조물등 뚱뚱한 형상이 노출되는 유동장은 마하수 0.1 이하이고, 레이놀즈수는 10,000 ~ 100,000 사이가 되므로 효율적인 계산을 위하여 비압축성 Navier-Stokes 방정식을 지배방정식으로 해석코드를 개발하였다. 2차원 지배방정식을 텐서

* 서울대학교 대학원 항공우주공학과

** 서울대학교 기계항공우주공학과

형태로 기술하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial u_k}{\partial x_k} = 0$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\mu_i \mu_j) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \mu_i) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (1)$$

난류유동장을 정확하게 계산하기 위하여, 현재까지 대수적 모델, 1방정식 모델, 2방정식 모델 등의 난류모델이 개발되었지만, 현실적인 공학문제들에 대한 정확한 계산에 있어서 아직까지 완전한 모델을 존재하지 않는다. 또한, 공학적 관점에서 보면, 난류직접모사(DNS)나 대와류모사(LES)의 접근방법은 실용적이지 못하므로 본 연구에서는 공학적으로 유용성이 검증된 3가지 2방정식 모델 - Wilcox^{(1),(2)}의 original $k-\omega$ model, 벽면함수를 사용하지 않는 $k-\varepsilon$ model, Menter의 $k-\omega$ SST model^{(3),(4)} 을 적용하여, 뚫힌 물체 주변의 점성, 난류유동장의 응용성을 파악하였다.

2.2 수치기법 및 격자기법

수치해석을 위해 유한체적법을 이용하였으며, 의사압축성기법(pseudo-compressibility)과 이중시간 전진법(dual-time stepping)을 이용한 비압축성 코드에서는, 대류항은 Roe의 Flux Difference Splitting (FDS)⁽⁵⁾ 을 이용하여 풍상차분하였으며, 시간적분은 윤석환의 LU-SGS⁽⁶⁾을 이용하였다. 격자는 Δt_1 가 1의 크기를 가지도록 표면에 밀집하였으며, 벽면경계는 외재적으로 점착조건(no slip condition)을 부여하였다.

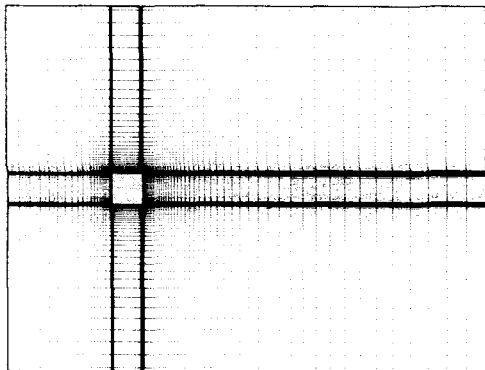


Fig. 1 H-type Grid System

각진 모서리를 가지는 정사각주 주변에 격자계를 효율적으로 구성하기 위하여는 다중블럭격자계(multi-block grid system)를 이용하거나, 비구조화격자계(unstructured grid system) 격자계를 이용할 수 있으나 본 연구에서는 병렬처리(parallel processing)에서의 로드밸런싱문제를 고려하여, <Fig. 1>과 같

이 H형의 단일격자계를 구성하였다.

이러한 형태의 단일 격자계를 구성하기 위해서는 정사각주가 위치하는 부분의 격자점들을 계산에서 제외하고 고체처럼 처리하는 기술이 필요하며, Chimera⁽⁹⁾ 격자기법에서와 같이 IB를 이용하여 처리하였다. 이때, LU-SGS 기법은 ΔQ 의 변화량을 0으로 하도록 식 (2)와 같이 간단한 형태로 치환되게 된다.

$$(LD^{-1}U)\Delta Q^n = -\Delta \tau R(Q^n)$$

$$Q' = -\Delta \tau L^{-1}R(Q^n) \mathbf{IB} \quad (2)$$

$$Q'' = DQ' \mathbf{IB}$$

$$\Delta Q = U^{-1}Q''$$

3. 실험장치개략

풍동실험은 서울대학교에 설치된 개방송풍형 저속풍동에서 수행되었으며, 측정부의 크기는 0.3m (height) x 0.2m (width) x 1.05m (length)이다. 난류강도 1%이하에서 최대풍속은 30m/s 이다.

정사각주는 1축 자동이송장치에 연결되어 있으며 26mm의 지름을 가진다. 따라서, 정사각주의 세장비는 7.7이며 차폐율은 11.5%이다. <Fig. 2>에 보여진 바와 같이 동작부는 측정부 하부에 위치한 1m 길이에 10mm 두께의 수평분할판에 의해 나누어져 있으며 초입계형상의 앞전으로 유동교란을 최소화 하였다. 경계층의 두께를 제어하기 위하여

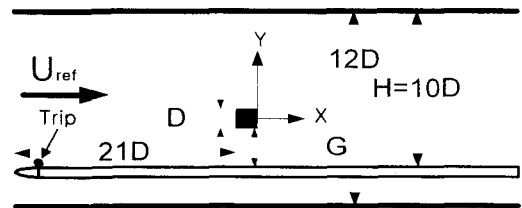


Fig. 2 Description of experimental set up

앞전 부분에 3가지 크기의 트립을 설치하였으며 그 결과는 <Table. 1>에 주어진 바와 같다.

Table 1. The characteristics of on-coming boundary layer for various trip height

Trip diameter (mm)	0	3.04	5.5
δ (mm)	13	32	44
δ/D (D : 26mm)	0.5	1.23	1.69
δ^* (mm)	1.63	2.32	2.76
θ (mm)	1.18	1.77	2.22
Shape factor	1.39	1.31	1.24

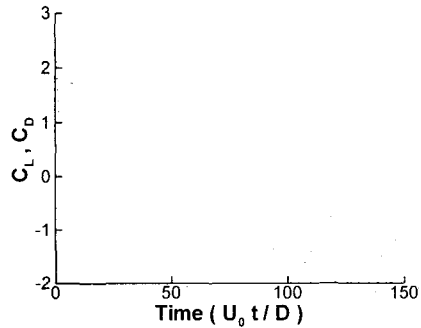
3축 자동이송장치로 조정되는 Dantec 55P05 핫 와이어 검침기를 사용하여, 후류영역에서 스트로

윌수(St)를 계측하고, 사각주와 지면사이의 간극부
 분에서 속도장을 측정하였다. 실험에서의 평균유
 속은 10.3m/s로 기준 레이놀즈수는 18,000 이다.
 표면유동가시화를 위하여 표면유막기법을 이용하
 여 바닥면에서의 유동형태를 파악하였다.

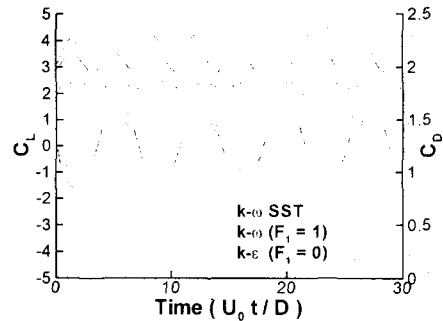
4. 결과 및 논의

4.1 수치기법 검증 및 난류모델선정

개발된 해석코드 및 격자기법을 검증하기 위하
 여 기존에 실험적, 수치적으로 많은 연구가 수행
 되어진 지면효과가 없는 정사각주에 대한 해석을
 수행하였다. 이때 $Re = 22,000$ 이며, < Fig. 1>에 보
 인 129x117의 H형 격자계를 이용하였다. 3 가지
 난류모델과 2 가지 시간간격으로 <Table. 2>의 case
 1 부터 case 4의 4 가지 경우에 대하여 계산을 수
 행하였다. < Fig. 3-a>에서 보이듯이 초기계산시작
 후 5-6 주기후에 공기력의 주기성을 확인할 수 있
 으며 이러한 주기적인 공기력특성은 표면에서의 주
 기적인 와도(vortex)의 생성과 배출로 특징 지워지
 는 Karman vortex street의 형성을 의미한다. < Fig.
 3-b>에서는 case 1,2,4에 대하여, 즉 3 가지 난류모
 델의 해석특성을 보이고 있는데, 3 가지 모두 주파
 수특성(St)에는 차이를 보이지 않는 것을 확인할
 수 있으나 작용 공기력의 크기는 차이를 보이고
 있다. <Table. 3>은 본 연구의 결과와 Lee⁽¹²⁾와
 Murakami⁽¹³⁾의 결과를 테이블로 정리하여 비교하
 고 있다. Case 1의 경우에는 공기력의 예측이 적절치
 않을뿐만 아니라 시간적분시 적절한 수렴조건을
 만족하기 위해 더 많은 반복계산을 요구하였다.



a) $k-\omega$ SST(case 4)



b) Comparison between the T/B Models(case 1,2,4)

Fig. 3 History of force coefficients

이는 매우 큰 세장비의 격자를 갖는
 원방후류영역에서의 cross diffusion term에서의
 수치적 불안정성에 의한 것으로 판단된다. 수치적
 안정성과 풍동실험결과와 LES에 의한 결과에의
 근접성, 시간간격에의 비의존성(case 3과 case
 4)등의 장점과 벽면의 효과를 고려하여야 하는
 벽면조건적용에서의 용이성을 고려하여 지면에
 근접한 정사각주 주변의 유동연구에서는
 $k-\omega$ SST 모델을 이용하였다.

Table. 3 Force coefficients with various turbulence models

Case, T/B Model	Δt	Δx	C_L	C_D	St
1. $k-\epsilon$	0.025	0.005	0.99	1.83+0.04	0.137
2. $k-\omega$	0.025	0.005	1.96	2.12+0.18	0.138
3. $k-\omega$ SST	0.05	0.005	1.68	2.04+0.09	0.136
4. $k-\omega$ SST	0.025	0.005	1.69	2.06+0.10	0.138
5. $k-\epsilon^{12}$	0.02	0.035	0.56	1.75+0.004	0.138
6. RNG $k-\epsilon^{12}$	0.02	0.035	2.08	2.12+0.23	0.133
7. Low Re $k-\epsilon^{12}$	0.05	0.015	1.13	2.01+0.018	0.138
8. Low Re $k-\epsilon^{12}$	0.02	0.0025	1.55	2.08+0.036	0.134
9. Low Re $k-\epsilon^{12}$	0.02	0.0012	1.61	2.10+0.04	0.134
10. LES ¹³	0.001	0.022	1.6	2.09+0.13	0.132
11. Exp. ¹²				2.14+0.09	0.134

4.2 간극 영향(Gap Effect)

지면에 근접한 2차원 정사각주 주변의 유동장은 지면이 존재하지 않을 경우와 크게 다른 유동 특성을 보이게 된다. 정사각주 후방의 후류영역이 간극의 크기(G/D)에 따라 주기적 특성이 없어지고, 완전히 임의적이거나 정상상태의 유동으로 천이하게 된다. 이러한 주기적 특성의 해체로의 천이(transition)는 특정한 간극간격(G/D) 이하에서 보여지며, 이를 임계간극(critical gap height)이라고 한다.

임계간극(critical gap height)이상에서 와도의 주기적 생성과 배출이 발생하게 되며, 레이놀즈수, 단면중형비, 차폐율(blockage ratio), 유입류 난류강도 및 벽면경계층두께등이 임계간극에 영향을 주는 인자들이라고 알려져 있다.

원주의 경우, Bearman과 Zdravkovich⁽¹⁵⁾는 정규적 와도의 배출이 $0.3D$ 이하에서 억제된다고 보고했으며, Taniguchi⁽¹⁶⁾등은 임계간극과 경계층두께의 관계를 제시하여 임계간극은 경계층두께에 따라 $0.3D$ ($\delta/D < 0.4$)~ $0.8D$ ($\delta/D \approx 1$)의 범위를 가짐을 보였다.

정사각주에 대해서는 몇몇 연구만이 보고되었는데, Kenjo⁽¹⁴⁾ 등은 2성분 LDV를 이용하여 $Re = 23,000$ 과 $\delta/D = 1.5$ 에서 간극을 조정하며 실험을 하였다. 그들의 결과에 의하면, 와도의 배출은 $G/D = 0.25$ 에서 억제되며, St (Strouhal number)는 자유류조건에서의 0.133 부터 $G/D = 0.30$ 일때의 0.164 까지 간극을 감소시킴에 따라 증가한다고 보고하였다. Duroo등은⁽¹⁷⁾ $G/D < 0.35$ 에서 와도배출이 소멸하는 것으로 보고하였다. Bosch등은⁽¹⁸⁾ $Re = 22,000$ 과 $\delta/D = 0.8$ 의 조건에서 임계간극이 $G/D = 0.25$ 임을 보였으며, 완전히 주기적인 와도의 배출(shedding)은 $G/D = 0.5$ 이상에서 일어남을 보였다. 몇몇 연구자들에게 의한 연구결과에 따라 임계간극은 $G/D = 0.35 \sim 0.5$ 라고 보고되었으며, 완전히주기적인 유동으로부터 완전히 비주기적인 유동으로의 급격한 유동의 천이는 특정한 한점(critical point)에서 발생하지 않는 것으로 보고되었다.

4.2.1 수치적 연구

이러한 임계간극의 존재특성-공력이력 및 St 에서의 분석-을 2방정식 난류모델을 이용하여 수치적으로 모사하기 위하여 본 연구에서는 6개의 간극($G/D = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 1.0$). 레이놀즈수는 수치적 검증문제와 동일하게 $Re = 22,000$ 설정하였으며, $k-\omega$ SST 모델을 사용하였다. 시간간격은 충분한 후반복계산을 포함하여 $\Delta t = 0.02$ 로 설정하였으며, 벽면격자를 $\Delta x = 0.005$ 까지 밀집하여 < Fig. 4>와 같이 격자계를

형성하였다.

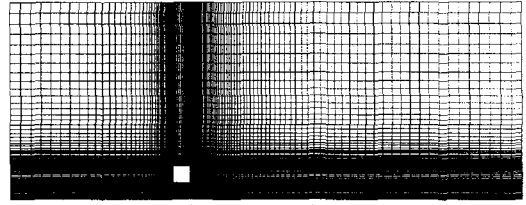


Fig. 4 H-type Grid System($G/D = 1.0, 178 \times 113$)

< Fig. 5>에서는 $G/D = 0.3, 0.4, 1.0$ 에 대한 양향력의 변화를 보이고 있는데, $G/D = 0.4, 1.0$ 에서는 < Fig. 3-b>에서와 같이 주기성을 확인할 수 있으나, G/D 는 0.3 에서 주기성을 관찰할 수 있다. 이러한 수치적 결과로부터 예측된 임계간극은 $0.3 \sim 0.4$ 에 존재하며 이는 다른 실험연구의 결과범위^{14,17,18}에 포함된다.

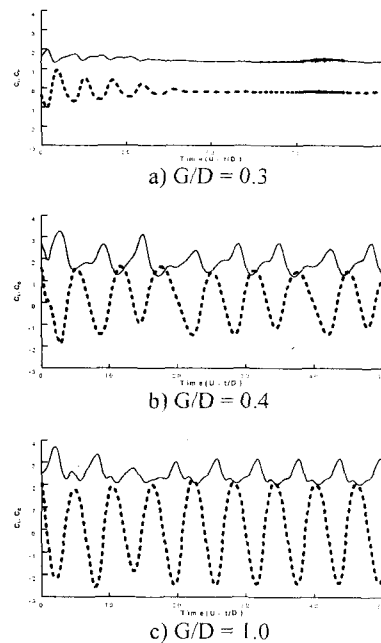


Fig. 5 Aerodynamic Load Histories on various G/D

< Fig. 6-b,c,d>에서 확인할 수 있듯이 지면에 근접한 경우에서도 주기성은 와도의 형성과 배출에 의한 것이며, 임계간극이하에서는 정상상태(steady state)의 유동특성을 보이고 있다.

주기성의 특징은 지면효과와 없을때의 경우 정사각주 압전모서리에서 발생하는 와도의 형성과 상호 배출에 의해서 특징지워지지만, 지면에 근접한 경우에는 지면으로부터 상승류(upwash)에 의해 특징지워진다. 이러한 상승류 또한 $G/D=0.5$ 이상에서는 지면에 형성된 Separation bubble에 의해 특징지워 지므로 다른 하나의

천이영역(transition regime)이 $G/D = 0.5$ 근방에 존재하는 것으로 예상할 수 있다.

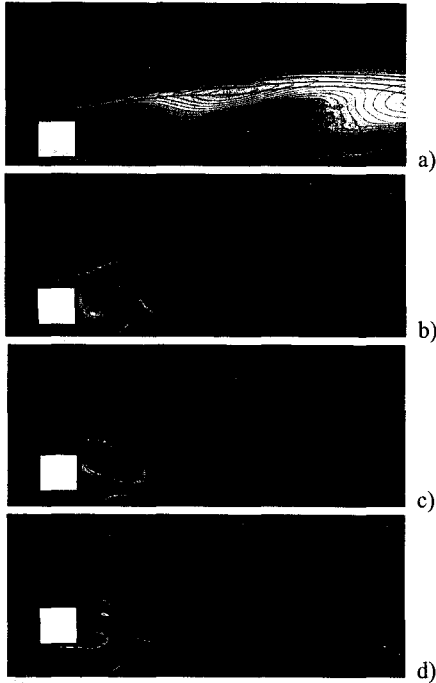


Fig. 6 Instantaneous k -contour on Various G/D ; a) $G/D = 0.3$, b) $G/D = 0.4$, c) $G/D = 0.5$, d) $G/D = 1.0$

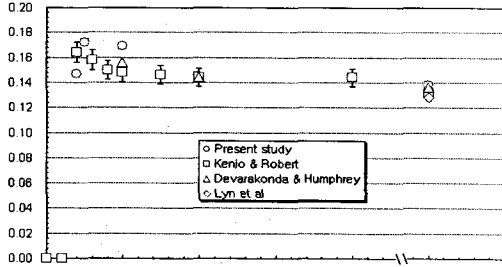


Fig. 7 Shedding frequency(St) as a function of G/D

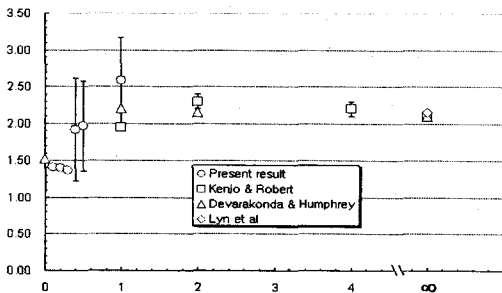


Fig. 8 Drag coefficient(C_D) as a function of G/D

< Fig. 7>과 < Fig. 8>에서는 주파수 특성과 항력계수를 Kenjo 등⁽¹⁴⁾의 실험결과와 정량적으로 비교하였다. 전반적인 경향에서는 일치하나

정량적 값에서는 어느정도의 차이가 나는데, 이는 연구에 적용된 다른 다양한 영향 인자들에 의한 영향으로 파악된다. 주파수 특성(St)만을 살펴보면, $G/D = 0.5$ 근방에 극값을 가지게 되며 이는 앞서 설명한 다른 하나의 천이영역의 존재를 설명한다.

4.2.2 실험적연구

< Fig. 9>에서는 3장에 설명된 실험 방법에 따라 3 가지 경계층두께에서 측정된 St 를 보이고 있다. 임계간극의 경우 다른 실험연구자들의 결과나 본 수치연구의 결과와 유사한 0.3-0.4 를 보이고 있으며, 경계층의 증가에 따른 각 경우의 영향을 보이고 있다. 이때 경계층의 영향은 $G/D = 0.5$ 근방과 $G/D = 1.0$ 이상의 경우 서로 다른 특성을 보이는 등 명확하지 않다.

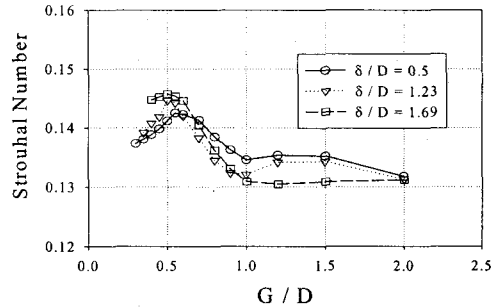


Fig. 9 Strouhal number distribution for different boundary layer thickness

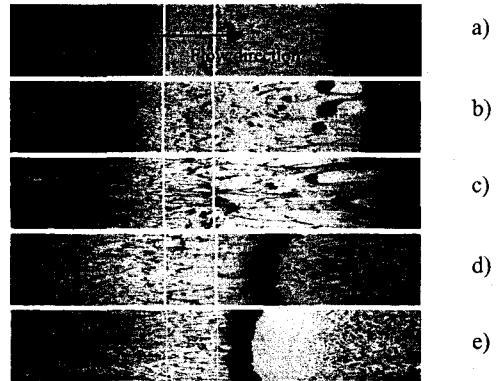


Fig.10 Oil surface visualization over a wall at $\delta/D = 1.23$
a) $G/D = 0.2$, b) 0.3, c) 0.5, d) 6, e) 1.0

이러한 특성 또한 또 다른 천이영역의 존재를 암시하는데, < Fig. 9>에 $G/D = 0.5$ 근방에 존재하는 극값의 존재는 < Fig. 7>의 수치해석결과와 유사한 경향을 보인다. 이러한 천이영역은 간극에서의 유동이 지면에 평행한 Jet 유동특성을 보이는 < Fig. 10-a >에서의 임계간극이하의 유동, 지면에서의 위울림(upwash)에 의해 와도배출유동이 유지되는

< Fig. 10-b, c)>까지의 특성으로부터 지면에 형성된 Separation bubble 의 특성으로의 천이과정으로 설명될 수 있다. (< Fig. 10-d, e)>, < Fig. 11> 참조)

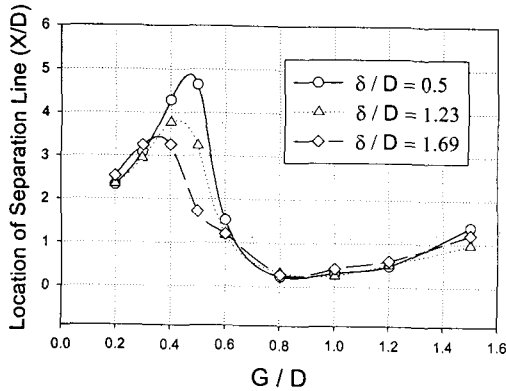


Fig. 11 location of separation line with respect to gap ratio

지면에 근접한 정사각주 주변의 유동장을 두 방법의 장점을 활용하여 수치해석적, 실험적 방법으로 연구하였다. 효율적 수치해석 방법을 개발하고 수치적 방법으로 임계간극을 모사할 수 있음을 확인하였으며, 수치적 실험적 방법으로 임계간극에서의 천이의 메커니즘을 설명할 수 있었다. 연구결과 지면에서의 위올림(upwash)에 의해 진행되는 지면근접장에서의 주기적 와도의 배출특성이 지면에서의 separation bubble 의 생성에 따라 또 다른 천이영역이 존재함을 지적하였다.

지면효과를 더 잘 이해하기 위하여 다양한 조건에서의 항력특성 및 주과수 특성에 대한 광범위한 후속연구가 필요하다.

후 기

본 연구는, 고속전철 공력설계 및 해석기술 개발 과제하에 수행되었으며, 생산기술연구소의 고속전철 판토히아프 개발 연구과제와 2001년도 서울대 기계분야 두뇌한국21사업에 의하여 지원받았습니다. 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Wilcox, D. C., 1988, "Reassessment of the Scale-Determining Equation for Advanced Turbulence Models," *AIAA Journal*, Vol. 26, No. 11, pp. 1299-1310.
- (2) Wilcox, D. C., Feb. 1994, "Simulation of Transition with a Two-Equation Turbulence Model," *AIAA Journal*, Vol. 32, No. 2, pp. 247-255.
- (3) Menter, F. R., August 1992, "Influence of

- Freestream Values on the $k-\omega$ Turbulence Model Predictions," *AIAA Journal*, Vol. 30, No. 6, pp. 1651-1659.
- (4) Menter, F. R., August 1994, "Two-Equation Eddy-Viscosity turbulence Models for Engineering Applications," *AIAA Journal*, Vol. 32, No. 8, pp. 1598-1605.
- (5) Roe, P. L., 1983, "Approximate Riemann Solvers, Parameter Vectors and Difference Schemes," *Journal of Computational Physics*, Vol.43, pp.357-372.
- (6) Yoon, S. and Kwak, D., June 1991, "Three-Dimensional Incompressible Navier-Stokes Solver Using Lower-Upper Symmetric-Gauss-Seidel Algorithm," *AIAA Journal*, Vol. 29, pp. 874-875.
- (7) Rogers, S. E. and Kwak, D., February 1990, "Upwind Differencing Scheme for the Time Accurate Incompressible Navier-Stokes Equations," *AIAA Journal*, Vol. 28, No. 2, pp. 253-262.
- (8) Rogers, S. E., Wiltberger, N. L., Kwak, D., Sept-Oct. 1993, "Efficient Simulation of Incompressible Viscous Flow over Single and Multielement Airfoils," *Journal of Aircraft*, Vol.30, No.5, pp736-743.
- (9) Steger, J. L., Doughty, F. C., and Beneck, J. A., 1983, "A Chimera Grid Scheme," *Advances in Grid Generation*, FED, Vol.5, ASME, Edited by Ghia, K. N., New York, pp. 59-69.
- (10) Wright, M. J., Candler, G. V., Prampolini, M., 1996, "Data-Parallel Lower-Upper Relaxation Method for the Navier-Stokes Equations", *AIAA Journal*, Vol. 34, No. 7, pp. 1371~1377
- (11) Lee, B., Lee, D., 1997, "Data Parallel Symmetric Gauss-Seidel Algorithm for Efficient Distributed Computing Using Massively Parallel Supercomputers", *AIAA-97-2138*,
- (12) Sangsan Lee, 1997, "Unsteady aerodynamic force prediction on a square cylinder using turbulence models", *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 67&68, pp.79-90
- (13) S. Murakami, A. Mochida, 1995, "On turbulent vortex shedding flow past 2D square cylinder predicted by CFD", *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 54&55, pp. 191-211
- (14) Kenjo C. Q. Wu and Robert J. Marinuzzi, June, 1997, "Experimental Study of the Turbulent Wake Flow behind a Square Cylinder Near a Wall," *ASME, FEDSM 97-3151*
- (15) Bearman, P. W. and Zdravkovich, M. M., 1978, "Flow around a Circular Cylinder Near a Plane Boundary," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 89, part 1, pp.33-47
- (16) Taniguchi, S. and Miyahoshi, K., 1990, "Fluctuating Fluid Forced Acting on a Circular Cylinder and Interference with a Plane Wall," *Experiments in Fluids*, Vol. 9, pp. 197-204
- (17) Durao, D. E. F., Gouveia, P. S. T. and Pereira, J. C. F., 1991, "Velocity Characteristics of the Flow around a Square Section Cylinder Placed near a Channel Wall," *Experiments in Fluids*, Vol. 11, pp. 341-350
- (18) Bosch, G., Kappler, M. and Rodi, W., 1996, "Experiments on the Flow Past a Square Cylinder Placed near a Wall," *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 13, pp. 292-305