

중첩격자계를 사용한 2차원 복수 물체주위 유동장의 수치 계산

A Numerical Calculation on Flow Fields around Two-Dimensional Multiple Bodies
In Overlapped Grid System

정세민^{#1}, 이영길², 이승희²

Se-Min Jeong, Young-Gill Lee and Seung-Hee Lee

Abstract

In the present paper, flow fields around two dimensional single and two circular cylinders are analysed by a finite difference method. Navier-Stokes and the continuity equations are solved to simulate the flow fields. A overlapped grid system(the composite of a body boundary-fitted grid system near the body and a rectangular grid system for other flow fields) is used for this calculation. In the use of overlapped grid system, it is most significant thing to exchange the physical quantities from one grid system to the other one continuously. In this research, the linear interpolations of physical quantities are done for this purpose in the overlapped region.

The numerical calculations are carried out for the flows around a circular cylinder and two cylinders to verify the accuracy of present method. The flow fields around two cylinders facing the flow with side by side and tandem arrangement are analysed. The results are compared to other experimental and computational ones done in other single grid system.

1. 서 언

유한차분법(FDM: Finite Difference Method)에 의한 수치계산에 있어서, 해석하고자 하는 유동의 특성에 맞는 격자계의 생성과 선택은 매우 중요하다고 할 수 있다. 기존의 수치계산들은 주로 직사각형격자계나 물체적합격자계 등의 단일격자계에서 수행되어져 왔다. 직사각형격자계를 사용할 경우, 쉽게 복잡한 형상을 갖는 물체주위의 격자를 생성할 수 있는 장점이 있으나, 격자의 낭비가 심하며 계산의 정도가 물체 주위의 계산에 있어서는 물체적합좌표계에 비해서 떨어지는 경향이 있다. 반면, 물체적합좌표계만을 사용하는 경우, 복잡한 형상의 물체에 있어서는 격자생성에 어려움이 있으며, 또한 자유수면을 포함하는 경우에는 매 계산단계에서 자유수면경계에 맞게 격자를 재생성해야 하는 단점이 있다. 이러한 단점들을 해결하기 위하여, 두 격자계의 장점만을 취하려는 연구가 여러 연구자를 통하여 계속되어져 왔다. Ikegawa and Kaiho[1]등은 유한차분법과 유한요소법(Finite Element Method)을 조합한 중첩격자계를 사용하여 원주주위의 유동장을, Obata and Satofuka[2]등은 유한차분법을 이용하여 날개 주위의 임계음역 흐름(Transonic Flow)에 대하여 해석하였다. 또한, Malmlden[3]은 중첩격자계를 사용하여 3차원 선체주위의 유동을 해석하고자 하였다.

본 연구에서는 FDM을 사용하여, 무한유동장 중을 전진하는 한 개 혹은 직렬, 병렬로 배치된 2개의 2차원 원주주위의 유동을 해석하였다. 물체주위에는 물체적합격자계를, 이외의 유동장에서는 직사각형격자계를 기본으로 하는 중첩격자계(overlapped grid system)를 사용하였으며, 중첩된 부분에서는 각 물리량을 선형적으로 내삽함으로써, 물리량의 상호전달이 가능하도록 하였다.

본 연구의 목적은 중첩격자계 사용을 통한 수치계산의 가능성을 제시하고, 계산 결과들을 다른 단일격자계에서 계산된 계산 및 실험결과들과 비교, 검토함으로써 본 계산조직의 정도를 확인하는 데 있다.

2. 수치해석 방법

2.1 지배방정식

본 연구에서는 2차원, 비압축성의 점성유동을 계산하기 위하여, 유체가 일정한 밀도를 가지고, 비압축성이며 연속적이라고 가정하고, 지배방정식들로서 Navier-Stokes 방정식과 연속방정

1. 인하대학교 대학원 선박공학과 (402-751, 인천시 남구 용현동 253, Tel:032-875-9608)

2. 인하대학교 선박해양공학과 (402-751, 인천시 남구 용현동 253, Tel:032-860-7340,7337)

식을 사용하였다.

2.2 지배방정식의 차분화

지배방정식의 차분화에 있어서는, 시간에 대하여 전진차분법 또는 Adams-Bashforth법을, 그리고 공간에 대해서는 2차중심차분법, 3차상류차분법등을 사용하였다. 대류항의 차분에 있어서는, 물체에 가장 인접한 부분에서는 1차상류차분을, 물체경계나 계산의 외부영역 근처에서는 hybrid법을 사용하였으며, 그 외의 부분에서는 3차상류차분법을 이용하였다. 그리고, 확산항(diffusive term)들은 모두 중심차분법으로 계산하였다. 각 시간단계에서 압력에 대한 Poisson방정식은 수렴될 때까지 SOR법으로 반복계산하였다.

2.3 격자계 및 경계조건

물체주위에서는 물체적합격자계를, 이외의 유장에서는 직사각형격자계를 사용한 중첩격자계를 사용하였다. 물체적합격자계는 O형의 비교차(non-staggered)격자계를 사용하였다. 계산의 정도를 높이기 위하여 원주의 표면주위에 격자를 집중시켰으며, 전 유동장에 대하여는 직사각형 가변교차격자계를 사용하였다. Fig.1에서는 본 연구를 위하여 각각의 경우에 대한 계산영역과 좌표계를, Fig.2는 생성된 격자계를 보이고 있다.

물체표면 경계조건으로는 no-slip 조건을 주었으며, 속도에 대한 경계조건들은 유입경계에서는 Dirichlet조건, 그 외의 경계에서는 Neumann조건으로 주어진다. 그리고, 압력의 경우에는 유입, 유출조건으로 Neumann조건을, 윗면과 아래면의 경계에는 Dirichlet조건을 사용하였다. Table 1에서는 각각의 계산조건을 보이고 있다.

2.4 물리량의 내삽

중첩격자계의 사용에 있어서, 중첩된 구간에 있어서의 물리량의 연속적 전달은 가장 중요한 조건이다. Fig.3은 중첩격자계에서의 물리량의 내삽을 간략하게 보이고 있다. 그림에서 점선은 직사각형격자계를, 실선은 물체적합좌표계를 나타낸다. '■'로 표시된 부분은 직사각형격자계에서의 격자점들중 계산에서 제외되는 점들이며, 그 외곽의 '□'로 표시된 부분으로 물체적합좌표계로부터의 물리량들이 내삽되어져 경계값으로 주어지게 된다. 또한, 물체적합좌표계의 가장바깥에 있는 '○' 격자점에는 그 격자점을 포함하고 있는 직사각형격자들로부터의 물리량이 내삽되어진다. 다시 말해 '○'에서 '□'까지가 중첩되는 영역이며, 이 구간에서의 내삽은 다음과 같은 2차원에서의 선형내삽을 통한다.

$$Q = (1-X)(1-Y)Q_A + X(1-Y)Q_B + XYQ_C + (1-X)YQ_D \quad (1)$$

이때, Q는 내삽되어지는 물리량(속도, 압력)이며, X, Y는 다음식을 통하여 구하여진다.

$$\begin{aligned} x &= (1-X)(1-Y)x_A + X(1-Y)x_B + XYx_C + (1-X)Yx_D \\ y &= (1-X)(1-Y)y_A + X(1-Y)y_B + XYy_C + (1-X)Yy_D \end{aligned} \quad (2)$$

윗 식을 풀기 위해서 본 연구에서는 Newton-Raphson법을 이용하였으며, 첨자 A, B, C, D는 Fig.4에서 표시하는 것과 같다.

3. 계산 결과 및 고찰

3.1 단일 원주의 경우

먼저 Reynolds수 8×10^3 인 경우의 단일원주 주위의 유동을 해석하였다. Fig.5에서는 무차원시간 40일 때의 압력장의 분포를 보이고 있다. 원주 밖의 외곽선은 물체적합격자계의 경계를 나타내며, 격자가 중첩된 구간에서도 물리량이 원활히 전달됨을 알 수 있다. Fig.6에서는 무차원시간 40에서 43사이의 와도(vorticity)의 분포를 보이고 있다. Fig.7에서는 양력계수와 항력계수의 시간에 따른 변화를 보이고 있다. 양력, 항력계수 모두 와동의 주기적인 방출에 의하여 주기적으로 변화함을 알 수 있다. 양력계수는 시간에 대한 평균값이 -0.17이며, 항력계수의 경우 비

대칭적인 현상을 보이고 있으나, 평균값은 약 1.40로, 비록 기존의 실험 및 계산결과들과 [4,5,7]와 큰 차이가 없음을 알 수 있다. Fig.8에서는 시간의 변화에 따른 기저압력(Base Pressure: 정체점으로부터 180° 에 위치한 점의 압력)의 변화를 보이고 있다. 기저압력계수의 평균은 약 1.65도를 보이고 있다. Fig.9에서는 물체표면에서의 압력계수의 분포를 보이며, 이는 시간이에 대하여 평균한 값이다. 압력계수는 실험치보다는 적은 값을 보이고 있으나, 같은 Reynolds수에서의 계산결과와는 유사한 값을 보이고 있다.

3.2 병렬로 배치된 원주들의 경우

두 개의 원주가 유동의 흐름에 연직하게 병렬로 배치되어 있는 경우에 대한 계산을 수행하였다. Fig.10에는 무차원 시간 24-36사이의 와동장을 보이고 있다. 두 원주주위에서의 유동은 원주들간의 상호간섭효과가 그리 크지 않아서 대칭적인 분포를 보이고 있다. 이는 Fig.11에 보이고 있는 양력계수 및 항력계수의 변화를 통하여도 알 수 있다. 이 때 왼쪽에 있는 것이 위쪽에 위치한 원주이다. 양력계수의 경우 두 원주가 반대의 위상을 가지고, 거의 같은 주기로 변화하고 있으며, 항력계수의 경우 진폭의 변화는 보이지만, 두 원주의 항력계수가 거의 같음을 보인다. 이를 통하여, 두 원주주위의 유동이 거의 독립적임을 알 수 있다. 계산되어진 항력계수는 약 1.5으로서 기존의 실험치[4,6,7,9,10]와 큰 차이가 없음을 보인다. Fig.12에서는 기저압력계수의 시간적 변화를 나타내고 있으며, Fig.13에서는 원주표면에서의 압력계수값을 각각 보여주고 있다. 기저압력의 경우, 실험치[6]에 비하여 적게 나오고 있다.

3.3 직렬로 배치된 원주들의 경우

두 개의 원주가 유동의 흐름에 나란하게 배치되어 있고, 원주사이의 간격(g)이 1인 경우에 대하여 수치계산을 수행하였다. Fig.14에서는 무차원 시간 24-36사이의 와동장을 보이고 있다. 상류의 원주에서 발생한 와동이 하류의 원주에 재부착(reattach)되어, 하류에 있는 원주에서만 와동이 방출되고 있음을 알 수 있다. 이는 기존의 실험[7] 등에 의하여 이미 확인된 사실이며, 본 계산이 유동장을 제대로 시뮬레이션하였음을 알 수 있다. Fig.15에서는 시간에 따른 양력계수와 항력계수의 변화를 보이고 있는데, 상류에 위치한 원주의 경우는 각각 약 -0.05와 0.87을 보이고 있으며, 하류에 있는 원주의 경우 와동의 방출로 인하여 양력계수가 주기적으로 변화하고 있고, 항력계수 또한 와동 방출의 영향으로 약 -0.30정도의 평균값을 중심으로 진동하고 있다. 본 연구에서 계산된 양, 항력계수는 기존의 실험치들과 좋은 일치율을 보이고 있다[6,7,9]. Fig.16과 Fig.17에서는 기저압력계수와 표면압력계수를 보이고 있다. 기저압력계수의 경우, 상, 하류 원주 모두 -0.6 - -0.4사이에 위치하여, 실험치[8]에 비하여 낮은 값을 보이고 있다. 표면압력계수의 경우에는 기저점을 중심으로한 유동의 하류부분을 제외하고, 실험치와 잘 일치함을 알 수 있다[7].

4. 결 언

- (1) 중첩격자계를 사용할 때 가장 중요하다고 할 수 있는 격자계 사이의 물리량의 상호전달이 본 계산조직에서는 잘 이루어지고 있음을 확인하였다.
- (2) 물체적합격자계와 직사각형격자계를 혼합한 중첩격자계를 사용하여 한 개 혹은 2개의 원주주위 유동장을 해석할 수 있었으며, 그 결과는 다른 실험 및 계산결과들과 좋은 일치를 보였다.
- (3) 중첩격자계를 사용한 본 계산조직은, 앞으로 자유수면을 포함한 복잡한 형상을 가지는 물체주위의 유동을 보다 정도 높고 효율적으로 해석할 수 있을 것이다.
- (4) 난류유동의 특성을 해석할 수 있도록, 두 격자계사이에 공통된 난류모델이 추가된다면, 난류영역에서의 유동해석도 가능하게 될 것이다.

참고 문헌

- [1] Ikegawa, M et al., "FEM/FDM", J. of Naval Arch. of Japan, 1995, pp. 43-442.
- [2] Obata, M. and Satofuka, N., J. of Naval Archi.of Japan, 1995, pp. 60-64.

- [3] John F. Malmlden, Royal Institute of Technology, Sweden, 1994.
 [4] Lee, Y.G., Shin, M.S. and Kang, K.J., the 4th ICCCB, Tokyo in Japan, 1991.
 [5] 이영길, 강국진, 대한조선학회 1992년도 춘계 연구발표회 발표논문, 1992.
 [6] Hori, E., "Experiments on Flow around a Pair of Parallel Circular Cylinders", Proc. 9th Japan National Congress for Applied Mech., Tokyo, 1959, pp.231-234.
 [7] Zdravkovich, M.M., "... in Various Arrangements," J. Fluid. Mech., 1977, pp.618-633.
 [8] Ishigai, s., Nishikawa, E., Nishimura K., and Cho, K., "Experimental Study on", Bulletin of the Japan Society Mechanical Engineers, Vol.15, No.86, 1972, pp.949-956.
 [9] Bearman, P.J. and Wadcock, A.J., J. Fluid Mech., Vol.61, Part3, 1973, pp.499-511.
 [10] Kim, H.J. and Durbin, P.A., J. Fluid. Mech., Vol.196, 1988, pp.431-448.

Table 1 Condition for calculations

대상물체	한 개의 원주	두 개의 원주	
		평행 배치	직렬 배치
대상물체 폭(d)		1.0	
원주사이의 거리 (각각의 중심으로부터 부머의 거리: d기준)		1.0	1.0
Reynolds수	8000	8000	8000
격자의 갯수	직사각형격 자계(x,y)	17365(151×115)	27125(175×155)
	물체적합격 자계(x,n)	4890(163×30)	2×2525(101×25)
	총격자갯수	22255	32175
			30075
시간증분 (무차원)		0.002	
가속중요도	시간	2.0	
총계산시간 (d기준)	40.00	40.00	40.00

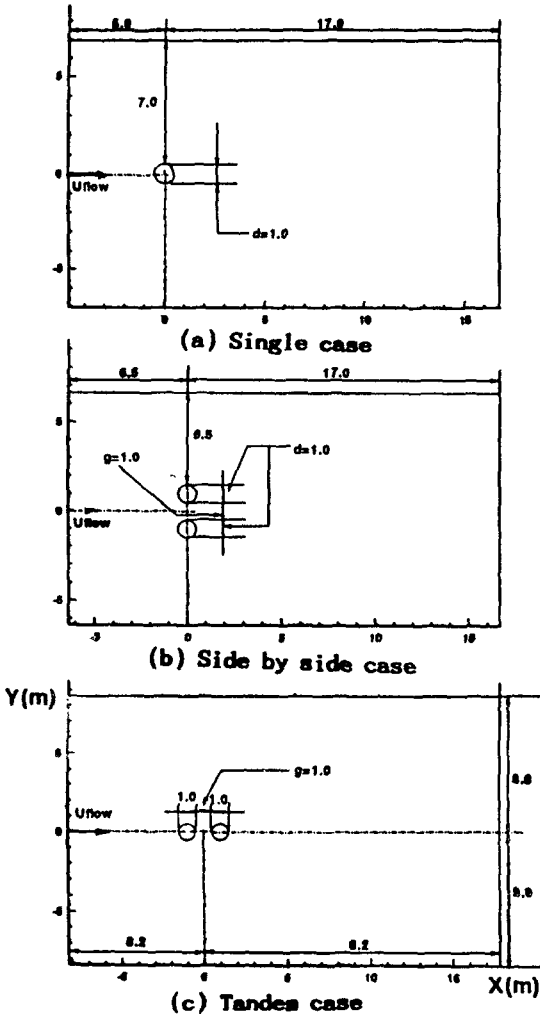


Fig.1 Computational domain

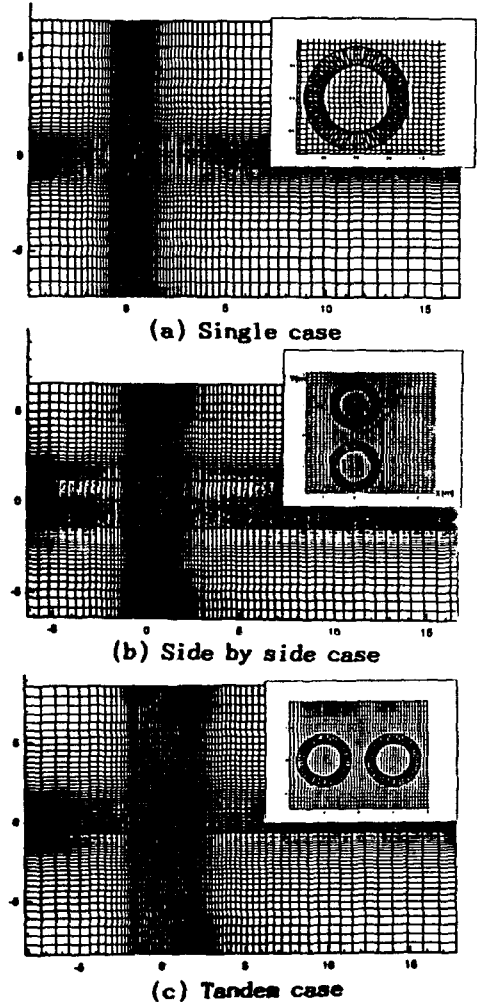


Fig.2 Grid system for Computation

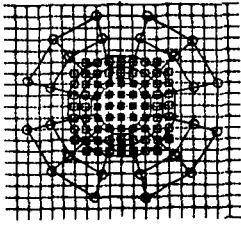


Fig. 3 Overlapped region

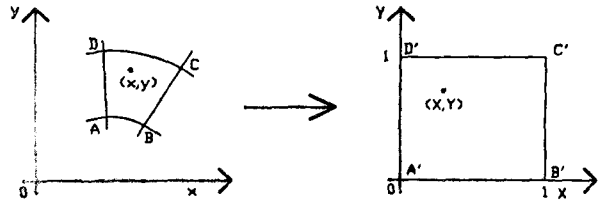


Fig. 4 Transformation of coordinate for interpolation

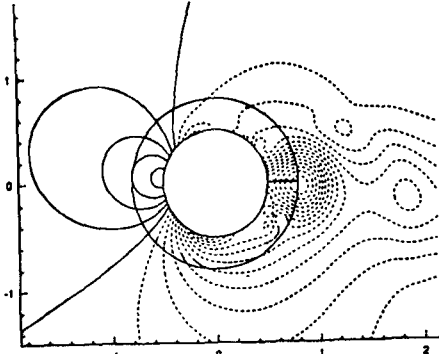


Fig. 5 Pressure contours (T=40)

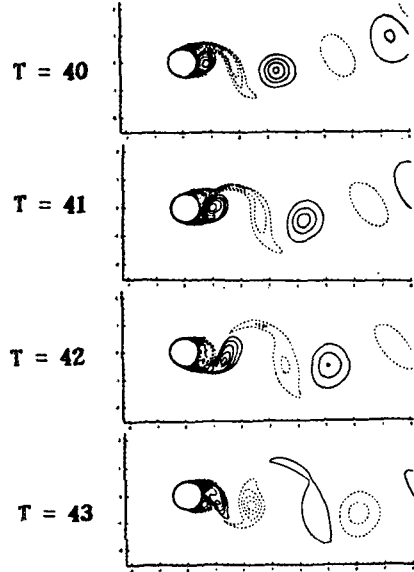


Fig. 6 Vorticity contours

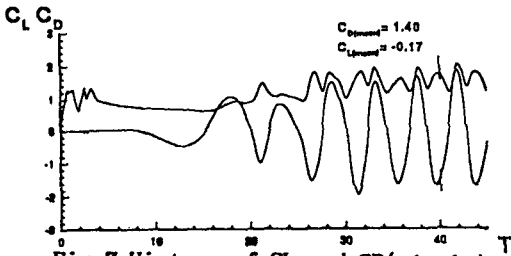


Fig. 7 History of CL and CD (single)

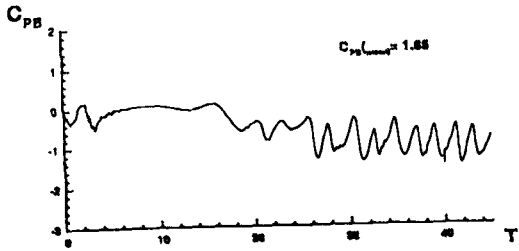


Fig. 8 History of base pressure (single)

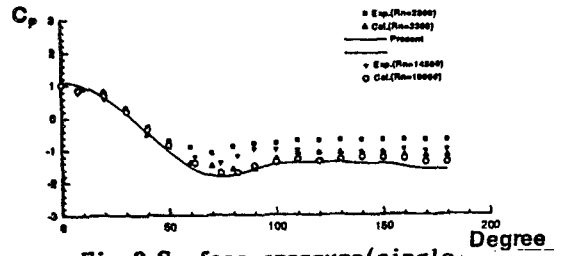


Fig. 9 Surface pressure (single)

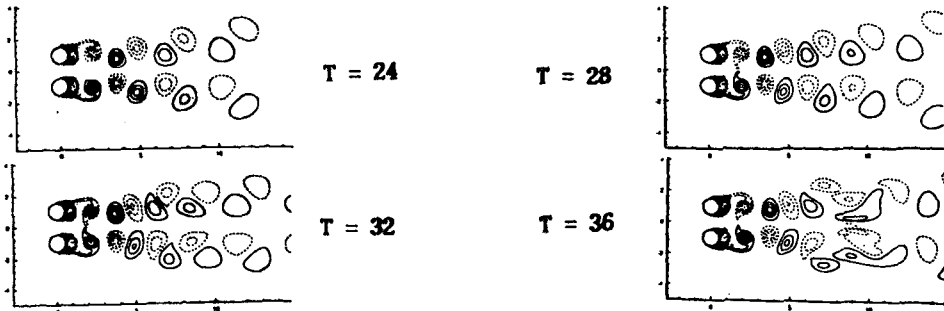


Fig. 10 Vorticity contours (side by side case)

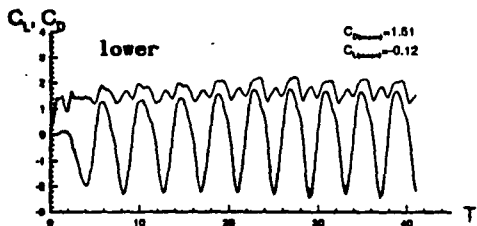


Fig. 11 History of CL and CD (side by side case)

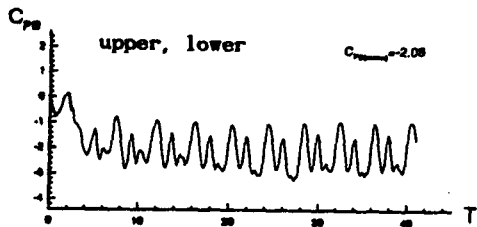
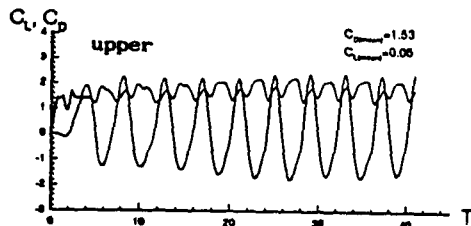


Fig. 12 History of base pressure (side by side case)

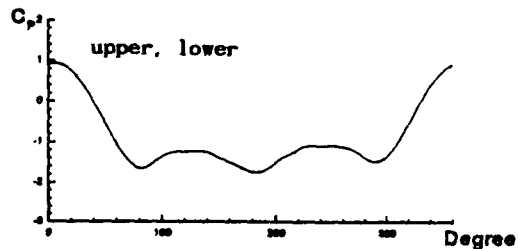


Fig. 13 Surface pressure (side by side case)

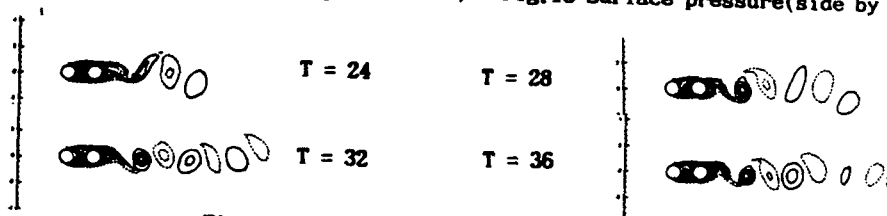


Fig. 14 Vorticity contours (tandem case)

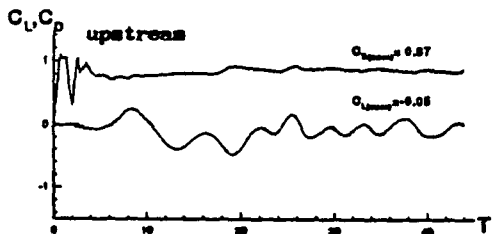


Fig. 15 History of CL and CD (tandem case)

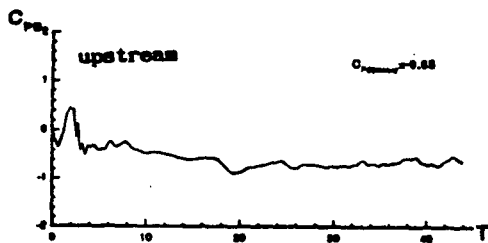
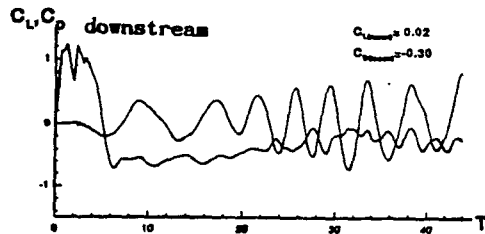


Fig. 16 History of base pressure (tandem case)

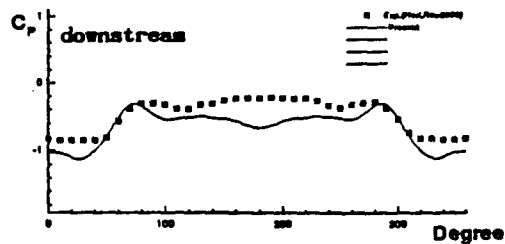
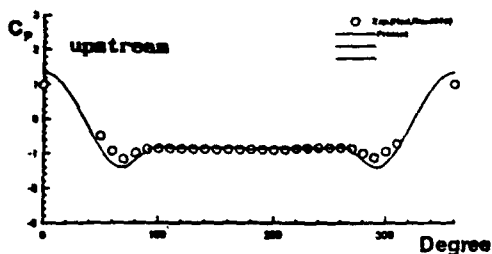
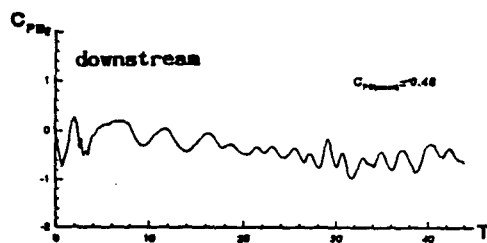


Fig. 17 Surface pressure (tandem case)