

측풍영향을 고려한 고속전철 주위의 3차원 난류유동 해석

정영래*¹, 박원규*², 하성도*³

Numerical Analysis of 3-D Turbulent Flows Around a High Speed Train Including Cross-Wind Effects

Y. R. Jung, W. G. Park, and S. D. Ha

An iterative time marching procedure for solving incompressible turbulent flow has been applied to the flows around a high speed train including cross-wind effects. This procedure solves three-dimensional unsteady incompressible Reynolds-averaged Navier-Stokes equations on a non-orthogonal curvilinear coordinate system using first-order accurate schemes for the time derivatives and third/second-order accurate schemes for the spatial derivatives. Turbulent flows have been modeled by Baldwin-Lomax turbulent model. To validate present procedure, the flow around a high speed train at zero yaw angle was simulated and compared with experimental data. Generally good agreement with experiments was achieved. The flow fields around the high speed train at 9.2°, 16.7°, and 45° of yaw angle were also simulated.

Key Words : 고속전철 주위 유동 해석(Analysis of Flow Around a High Speed Train), 측풍영향(Effects of Cross-wind), 시간 진행 반복 기법(Iterative Time Marching Scheme), 비직교 곡선좌표계(Non-Orthogonal Curvilinear Coordinate System), 비압축성 나비에-스톡스방정식(Incompressible Navier-Stokes Equation), Baldwin-Lomax 난류모델(Baldwin-Lomax Turbulent Model)

1. 서 론

고속전철은 포화상태인 도로 교통에 비하여 보다 빠르고 안락한 교통 수단의 필요성에 의해 몇몇 선진국 사이에서 개발되어, 상업 운행 중에 있다. 고속전철의 주행 속력은 점점 고속화 추세를 보여 현재는 약 300(km/hr)로서, 이는 마하수 0.24에 해당되며 주행 성능, 공력소음, 공력부하 등을 정확하게 예측하기 위해서 비압

축성 점성 유동 해법을 적용한 고속전철 주위 유동 해석이 필요하게 되며 차량의 경량화와 고속화로 인해 측풍에 대한 안정성 해석을 추가하여야 할 것이다.

고속전철에 관한 연구는 주로 실험적 방법에 의존하여 왔으나[1~6, 11], 최근 수치적 기법의 개발과 컴퓨터의 급속한 발달로 인해 수치적 해석의 영역이 점차 확대되어져 오고 있다. 여기에는 포텐셜 유동부터 나비에-스톡스 수치 해석까지 다양하게 분포되어 있는데, Morrow[6]과 노오현 등[7]은 열차 주위 유동을 포텐셜 유동으로 가정하여 해석하였으며, Ramakrishnam 등[8]은 지면 효과를 고려한 원형 실린더 주위

*¹ 학생 회원, 부산대학교 대학원 기계공학과

*² 정회원, 부산대학교 기계공학과

*³ 정회원, 한국기계연구원 신교통기술연구부

의 저속 유동을 압축성 나비에-스톡스방정식을 이용한 UNIS 코드를 이용하여 계산하였다. 맹주성 등[9]에 의한 연구는 k-ε 난류모델과 레이놀즈 평균한 압축성 나비에-스톡스방정식을 지배 방정식으로 하여 축풍영향을 배제한 열차 주위 유동을 해석하였으나, 지면 효과가 고려되지 않았다. 박원규 등[10]에 의한 연구는 3차원 비정상 상태 비압축성 나비에-스톡스 방정식을 지배 방정식으로 하여 지면 효과가 있는 고속전철 주위 유동장을 축풍의 영향을 역시 배제하여 해석하였다.

본 연구의 목적은 고속전철 주위의 축풍영향을 고려한 3차원 점성유동장 해석을 위한 코드 개발에 있으며 코드의 검증을 위해 정풍이 불어올 때의 결과를 실험 결과[11]와 비교하였다. 코드검정후, 편향각이 9.2°, 16.7°, 45° 인 축풍이 불어올 때 고속전철 주위 유동을 해석하였다. 지배 방정식은 3차원 비정상 상태 비압축성 나비에-스톡스 방정식으로 하고 난류 유동 해석을 위해 Baldwin-Lomax 난류모델[12]를 첨가하였다.

2. 지배방정식 및 수치해석 방법

3차원 비정상 상태 비압축성 점성 유동의 지배 방정식은 나비에-스톡스방정식으로서, 이를 무차원화한후 일반화된 곡선좌표계로 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{\partial \hat{q}}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial \xi} (\hat{E} - \hat{E}_v) + \frac{\partial}{\partial \eta} (\hat{F} - \hat{F}_v) + \frac{\partial}{\partial \zeta} (\hat{G} - \hat{G}_v) = 0 \quad (1)$$

$$\text{여기서 } \hat{q} = \frac{1}{J} \begin{bmatrix} 0 \\ u \\ v \\ w \end{bmatrix};$$

이고, 대류항은

$$\hat{E} = \frac{1}{J} \begin{bmatrix} U - \xi_t \\ uU + p\xi_x \\ vU + p\xi_y \\ wU + p\xi_z \end{bmatrix}; \quad \hat{F} = \frac{1}{J} \begin{bmatrix} V - \eta_t \\ uV + p\eta_x \\ vV + p\eta_y \\ wV + p\eta_z \end{bmatrix};$$

$$\hat{G} = \frac{1}{J} \begin{bmatrix} W - \zeta_t \\ uW + p\zeta_x \\ vW + p\zeta_y \\ wW + p\zeta_z \end{bmatrix}$$

이며, 점성항은

$$\hat{E}_v = \frac{1}{JRe} \begin{bmatrix} 0 \\ (\nabla \xi \cdot \nabla \xi)u_\xi + (\nabla \xi \cdot \nabla \eta)u_\eta + (\nabla \xi \cdot \nabla \zeta)u_\zeta \\ (\nabla \xi \cdot \nabla \xi)v_\xi + (\nabla \xi \cdot \nabla \eta)v_\eta + (\nabla \xi \cdot \nabla \zeta)v_\zeta \\ (\nabla \xi \cdot \nabla \xi)w_\xi + (\nabla \xi \cdot \nabla \eta)w_\eta + (\nabla \xi \cdot \nabla \zeta)w_\zeta \end{bmatrix}$$

$$\hat{F}_v = \frac{1}{JRe} \begin{bmatrix} 0 \\ (\nabla \eta \cdot \nabla \xi)u_\xi + (\nabla \eta \cdot \nabla \eta)u_\eta + (\nabla \eta \cdot \nabla \zeta)u_\zeta \\ (\nabla \eta \cdot \nabla \xi)v_\xi + (\nabla \eta \cdot \nabla \eta)v_\eta + (\nabla \eta \cdot \nabla \zeta)v_\zeta \\ (\nabla \eta \cdot \nabla \xi)w_\xi + (\nabla \eta \cdot \nabla \eta)w_\eta + (\nabla \eta \cdot \nabla \zeta)w_\zeta \end{bmatrix}$$

$$\hat{G}_v = \frac{1}{JRe} \begin{bmatrix} 0 \\ (\nabla \zeta \cdot \nabla \xi)u_\xi + (\nabla \zeta \cdot \nabla \eta)u_\eta + (\nabla \zeta \cdot \nabla \zeta)u_\zeta \\ (\nabla \zeta \cdot \nabla \xi)v_\xi + (\nabla \zeta \cdot \nabla \eta)v_\eta + (\nabla \zeta \cdot \nabla \zeta)v_\zeta \\ (\nabla \zeta \cdot \nabla \xi)w_\xi + (\nabla \zeta \cdot \nabla \eta)w_\eta + (\nabla \zeta \cdot \nabla \zeta)w_\zeta \end{bmatrix}$$

식(1)의 지배 방정식을 수치 해석으로 해를 구하기 위해, 먼저 운동량 방정식을 유한차분화 하는데, 운동량 방정식은 시간에 대해 포물선 형태(parabolic type)의 편미분방정식이므로 시간 행진(time marching) 방법을 이용하여 유한차분화시키고 여기에 뉴턴 반복법을 적용시키면,

$$\frac{1}{\Delta \tau} (\bar{q}^{n+1,k+1} - \bar{q}^n) + \delta_\xi \bar{E}^{n+1,k+1} + \delta_\eta \bar{F}^{n+1,k+1} + \delta_\zeta \bar{G}^{n+1,k+1} = \delta_\xi \bar{E}_v^{n+1,k+1} + \delta_\eta \bar{F}_v^{n+1,k+1} + \delta_\zeta \bar{G}_v^{n+1,k+1} \quad (2)$$

여기서 윗첨자 n+1, n은 시간 단계(level)를 의미하며 k+1은 반복 단계(level)를 의미한다. 그리고 윗식의 $\bar{E}, \bar{F}, \bar{G}, \bar{E}_v, \bar{F}_v, \bar{G}_v$ 를 'n+1' 시간과 'k' 반복 횟수에 대해 부분적으로 선형화를 시키면

$$\left(\frac{1}{\Delta \tau} + \frac{\partial}{\partial \xi} \bar{A} + \frac{\partial}{\partial \eta} \bar{B} + \frac{\partial}{\partial \zeta} \bar{C} \right) \Delta \bar{q} = \omega \bar{R}^{n+1,k} \quad (3)$$

를 얻는다. 여기서 $\Delta \bar{q} = \bar{q}^{n+1,k+1} - \bar{q}^{n+1,k}$ 를 의미하고, ω 는 완화 계수(relaxation factor)이며 A, B, C는 다음과 같이 정의되는 Jacobian 행렬이다.

$$\bar{A} = \frac{\partial}{\partial q} (\bar{E} - \bar{E}_v), \quad \bar{B} = \frac{\partial}{\partial q} (\bar{F} - \bar{F}_v),$$

$$\bar{C} = \frac{\partial}{\partial q} (\bar{G} - \bar{G}_v)$$

그리고 $\bar{R}^{n+1,k}$ 는 잔류벡터로 불려지며 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} \bar{R}^{n+1,k} = & \frac{1}{\Delta\tau} (\bar{q}^{n+1,k} - \bar{q}^n) \\ & - (\delta_x \bar{E}^{n+1,k} + \delta_y \bar{F}^{n+1,k} + \delta_z \bar{G}^{n+1,k}) \\ & + (\delta_x \bar{E}_v^{n+1,k} + \delta_y \bar{F}_v^{n+1,k} + \delta_z \bar{E}_v^{n+1,k}) \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 만약 $\Delta\bar{q}$ 가 영(zero)으로 간다면 잔류벡터, $\bar{R}^{n+1,k}$, 즉 비정상 운동량 방정식이 정확하게 만족됨을 알 수 있고, 그 해는 ω 와 A, B, C 에 독립적임을 알 수 있다.

연속방정식은 비압축성 유동 해석을 효율적으로 수행하기 위해 Marker-and-Cell(MAC)의 개념[13]을 다음과 같이 이용하였다.

$$p^{n+1,k+1} - p^{n+1,k} \equiv \Delta p = -\beta(\nabla \cdot V) \quad (5)$$

여기서 β 는 완화계수를 의미하고, 만약 Δp 가 영(zero)으로 접근한다면 연속방정식이 비정상 상태에서도 정확히 만족함을 알 수 있다.

식(5)의 물리적 의미는 만약 어떤 cell이 반복 과정에서 질량을 축적하고 있으면, 식(5)에 의해 다음 반복에서의 압력이 주위 cell 보다 상승하여 유체를 cell로부터 몰아내고, 반대로 cell이 질량을 잃으면, 압력이 감소하여 유체가 cell로 다시 들어오게 한다. 이런 과정을 반복 수행하여 연속방정식이 전 영역에 대해 완전히 만족할 때까지 반복 계산한다. 식(3)과 (4)를 서로 연결시켜 $\Delta q = (\Delta p, \Delta u, \Delta v, \Delta w)$ 에 대해 다시 쓰면, 다음과 같은 행렬식을 얻을 수 있다.

$$[M] \{ \Delta q \} = \{ R \} \quad (6)$$

여기서 $\{ R \}$ 이 'n+1'시간과 'k'반복 단계(level)에서 비정상 나비에-스톡스 방정식이므로 Δq 가 영(zero)으로 간다면, 본 알고리즘이 'n+1'시간에 대해 정확히 지배 방정식을 만족시킴을 알 수 있다.

본 연구에서 대류항은 QUICK(Quadratic Upstream Interpolation For Convection Kinematics)방법[13]를 이용하여 유한 차분화시켰으며, 점성항은 공간적 중앙 차분화를 이용

하였다. 그리고 연속 방정식은 중앙차분을 이용하였으며, 본 알고리즘의 안정화를 위해 4차의 인공감쇠항(artificial damping)을 첨가하였다. 난류유동 해석을 위해서는 Baldwin - Lomax 모델[12]가 사용되었다.

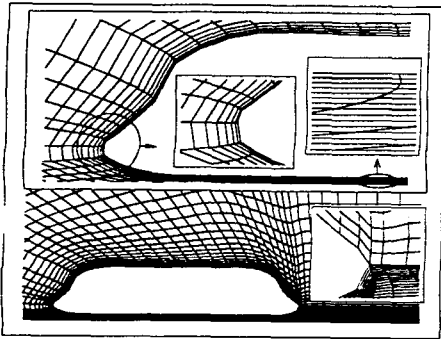
3. 초기조건 및 경계조건

본 연구에서 초기 조건으로는 자유 유동 조건을 이용하며, 격자의 외부 경계가 고속전철로부터 충분히 먼 거리에 있다고 하여 원거리 유입 경계 조건으로 또한 자유 유동 조건을 사용한다. 한편 유출 경계 조건은 속도의 외삽과 $p = p_\infty$ 로부터 구하며, 고속전철표면과 지표면에서는 미끄럼 없는(no slip) 조건과 표면의 법선 압력구배가 영(zero)이라는 조건을 이용한다. 격자는 C-H 격자(99×63×35)를 타원형 격자생성법(elliptic grid generation method)로 생성하였다. 편향각 0°에서는 대칭 조건을 사용하여 고속전철의 반평면(half-plane)에 대해서만 계산하였고, 편향각이 9.2°, 16.7°, 45°의 경우에는 전 유동장에 대하여 계산을 수행하였다.

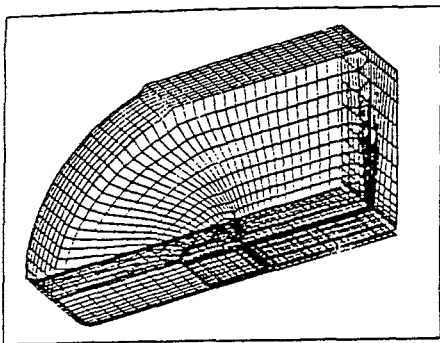
4. 결과 및 고찰

본 연구에서는 고속전철 주위에 정풍이 불어오는 조건으로 계산한 결과를 실험[11]과 비교하여 코드의 타당성을 입증하고, 편향각이 9.2°, 16.7°, 45°인 측풍이 불어올 때 고속전철 주위 유동을 계산하였다. 레이놀즈수는 고속전철 길이(L)에 근거하여 1.26×10^8 이다. Fig.1은 고속전철 주위에 형성시킨 격자로써 C격자계와 H격자계의 복합을 사용하였다.

Fig.2는 각 측풍방향에서의 고속전철 대칭 단면의 상면과 하면에서의 표면압력계수(Cp)를 나타내는 그림으로, Fig.2 (a)에서는 정풍하에서의 계산에 의한 상면의 압력계수와 실험[11]에서 얻어진 상면의 압력계수를 비교하였고, Fig.2 (b)에서는 하면에서의 압력계수를 비교하였다. 상면과 하면의 압력계수가 고속전철 전체에 걸쳐 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 상면의 후미부에서는 본 계산에 의한 최소 압력값의 위치가 고속전철 선두부로부터 길이 x를 전체길이 L로 나눈 x/L=0.9에 있는데 실험에서는 x/L=0.75 정도로 계산에 의한 최소 압력 위치가 실험에 비해 약간 후미 쪽으로 이



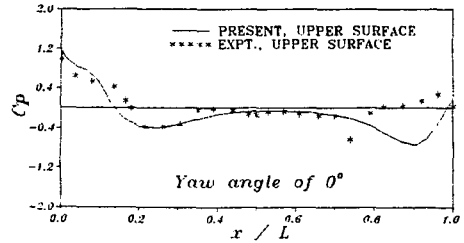
(a) Configuration of the high speed train



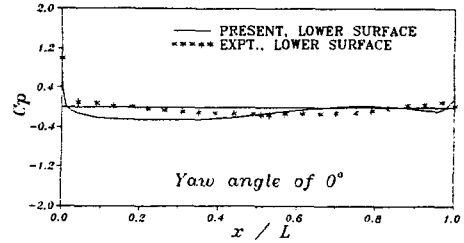
(b) An isometric view of C-H grid system
Fig.1 C-H type grid system

동되어 있지만 그 압력계수의 값은 약 -0.5 정도로 일치하는데, 이것은 계산모델과 실험모델의 전체적인 치수는 일치하지만 선두부와 후미부의 위치와 곡률이 다소 차이가 나기 때문으로 여겨진다. Fig.2 (c), Fig.2 (d), Fig.2(e)는 각각 편향각 9.2°, 16.7°, 45°에서의 계산되어진 압력계수를 나타낸 것으로, 실선은 상면의 차체 중앙선을 따르는 압력계수이고 점선은 하면의 차체 중앙선을 따르는 압력계수를 나타낸다. 편향각이 커질수록 선두부보다는 후미부에서의 변화가 크다는 것을 알 수 있다.

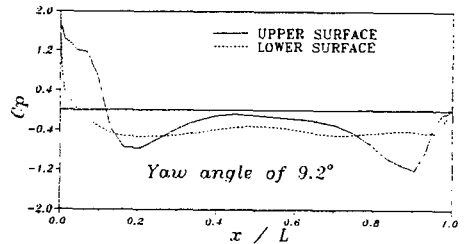
Fig.3은 각 차량단면에서의 상면과 하면의 압력계수를 나타낸 것으로, 상면의 압력계수는 실선으로 하면의 압력계수는 점선으로 나타내었다. 각 그림은 고속전철의 상면과 하면을 각각 바람부는쪽 벽면 중심에서 바람반대쪽 벽면 중심까지 1 ~ 30의 위치를 정하고 해당위치에서의 압력계수를 도시한 것이다. 고속전철에서 각 단면의 위치는 Fig.3 (f)에 표시하였고, 각 단면에서는 좌로부터 9.2°, 16.7°, 45° 일 때의 압력



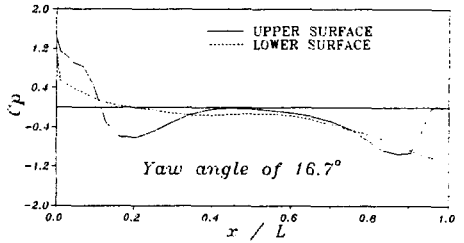
(a) Upper surface pressure at yaw angle of 0°



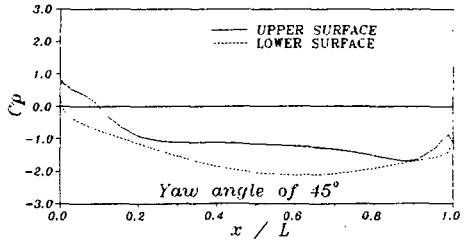
(b) Lower surface pressure at yaw angle of 0°



(c) Surface pressure at yaw angle of 9.2°



(d) Surface pressure at yaw angle of 16.7°



(e) Surface pressure at yaw angle of 45°

Fig.2 Surface pressure distribution in the symmetry plane at each yaw angle

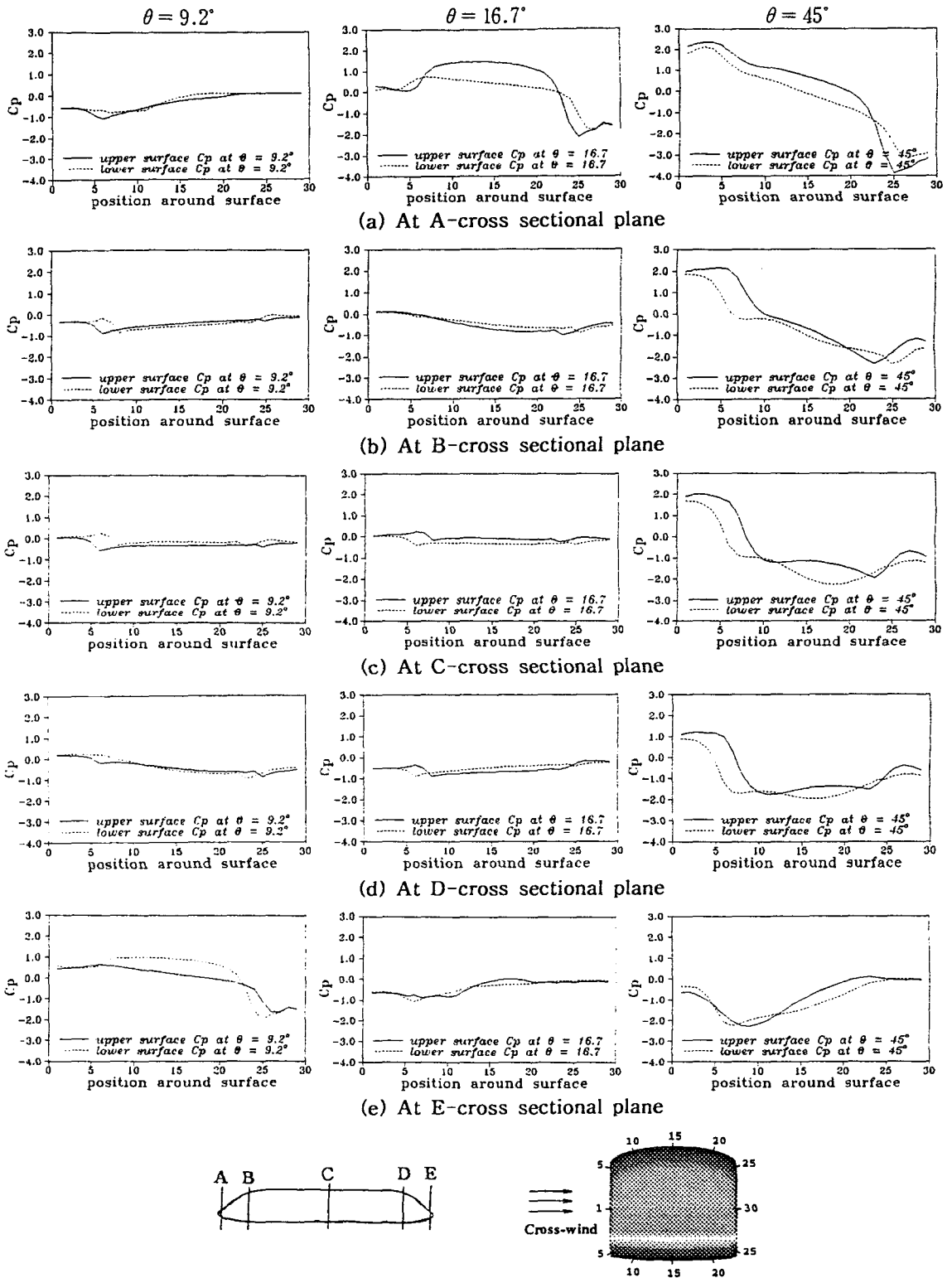
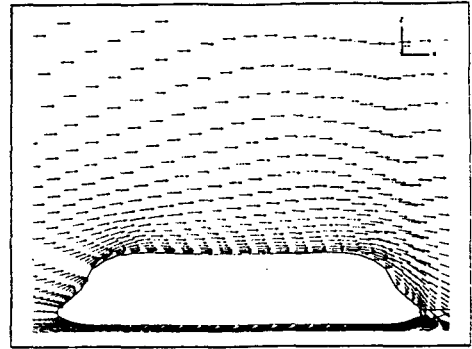


Fig.3 Each surface pressure distribution in several cross-sectional plane

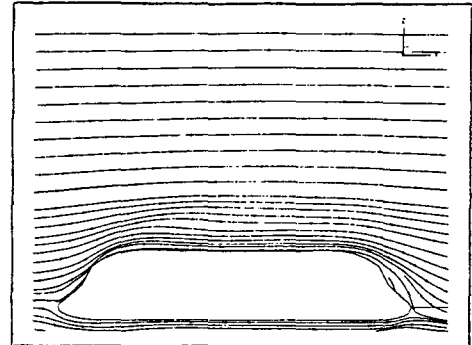
계수를 나타내었다. 1~5와 25~30사이의 압력 차이가 축풍이 차체에 미치는 축력을 나타내는 것으로, 선두부에 해당하는 위치인 (a)와 (b)에서는 편향각이 커질수록 바람부는쪽 벽면과 바람반대쪽 벽면에서의 압력차가 커진다는 것을 알 수 있고, 이는 편향각이 커질수록 선두부에서 큰 축력을 유발하여 열차전복의 원인이 될 수 있다. 한편, 후미부인 (d)와 (e)에서는 벽면에서의 압력차가 선두부나 중앙단면에 비해 줄어들고, 특히 (e)단면에서는 편향각이 45° 일 때 바람부는쪽 벽면보다 오히려 바람반대쪽 벽면에서의 압력이 크기 때문에, 선두부와 달리 바람 반대쪽에서 바람부는쪽으로 다소 약한 축력이 작용된다. 후미에서의 축력은 선두부에서의 축력과 반대방향이 되어 중앙단면과 후미사이를 중심으로한 시계방향의 요잉모멘트(yawing moment)를 야기시킴을 알 수 있다.

Fig.4는 편향각 0° 일 때 대칭 단면에서의 속도벡터와 유선 그리고 고속전철 표면속도벡터, 표면유선(limiting streamline), 표면압력선도를 나타낸 것이다. Fig.4 (c)에서 보면 하면의 공기흐름이 상면으로 치우치는 경향을 볼 수 있는데 이것은 Fig.2 (a) (b)에서 상·하면의 압력을 비교해보면 하면에 비해 상면의 압력이 낮기 때문에 아래쪽에서 위쪽으로 공기흐름이 치우치게 된다. 이러한 상방향 흐름은 궁극적으로 Fig.8 (d)에서처럼 후미에서의 3차원 와류를 생성시키게 된다. Fig.4 (d)는 표면에서의 등압력선도인데, 선두부에서 정체 압력을 보이고 압력이 떨어지다가 중앙 부분에서 거의 대기압으로 회복되고 후미부의 곡률에 의해 대기압 보다 압력이 낮아졌다가 대기압으로 복원됨을 알 수 있다. 정풍이기 때문에 측면에서의 압력은 상당부분이 대기압과 비슷한 압력을 보임을 알 수 있다.

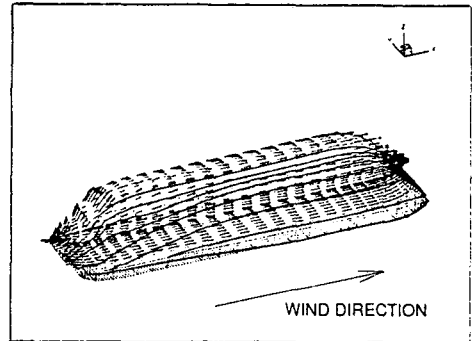
Fig.5는 편향각이 45° 일 때의 대칭 단면에서의 속도벡터와 유선 그리고 고속전철 표면유선과 표면등압력선도이다. Fig.5 (a)와 Fig.5 (b)는 고속전철 차체 중심단면에서 본 속도벡터 분포와 유선을 표현하고 있는데, 후미의 유동을 자세히 나타낸 Fig.6과 함께 보면 박리와 역류가 발생하였음을 알 수 있다. Fig.5 (d)는 표면에서의 등압력선도로서 선두부의 바람부는쪽 모서리에서 아주 높은 정체 압력이 발생하였고 Fig.3에서와 같이 바람부는쪽과 바람 반대쪽에서의 큰 압력차가 발생하는 것을 알 수 있다.



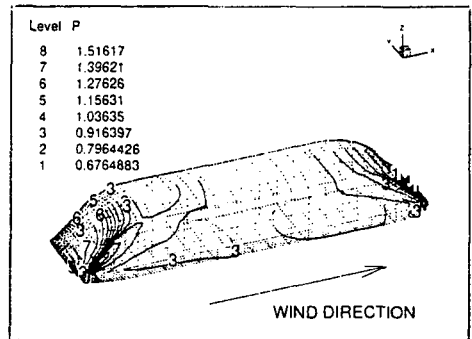
(a) Velocity vectors in the symmetry plane



(b) Streamlines in the symmetry plane

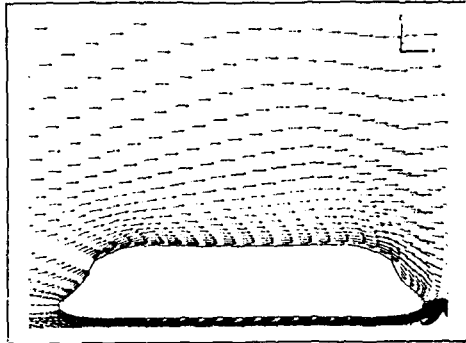


(c) Limiting streamlines and velocity vectors

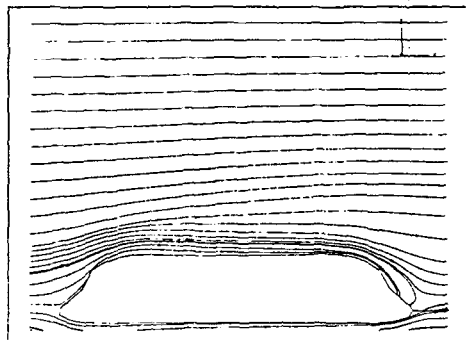


(d) Pressure contours on the body surface

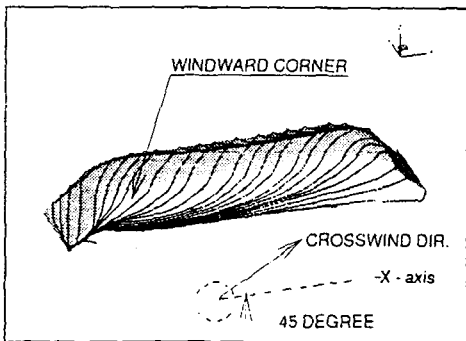
Fig.4 Flow properties at 0° of yaw angle



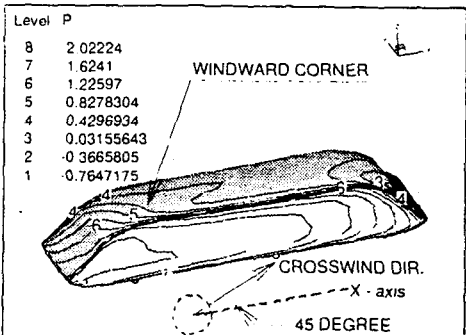
(a) Velocity vectors in the symmetry plane



(b) Streamlines in the symmetry plane



(c) Limiting streamlines on the body surface



(d) Pressure contours on the body surface

Fig.5 Flow properties at 45° of yaw angle

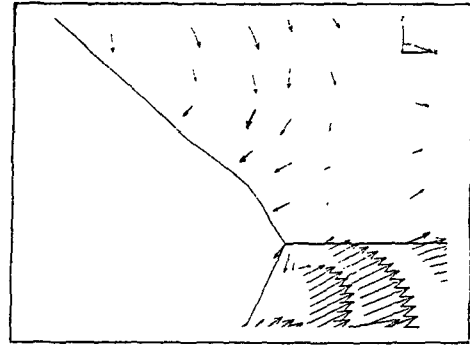


Fig.6 Velocity vectors in the rear region at 45° of yaw angle

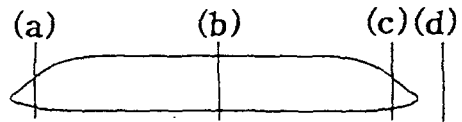


Fig.7 Position of cross-section

Fig.7은 Fig.8부터 Fig.11까지의 각 편향각 ($\theta=0^\circ, 9.2^\circ, 16.7^\circ, 45^\circ$)에 각 단면에서의 속도벡터를 확인하기 위한 각 단면의 위치를 나타내는 것으로 선두부, 중앙 단면, 후미부, 고속전철 후방의 단면위치를 표시하였다. Fig.8은 정풍하에서의 각 단면에서의 속도벡터를 나타내고 있는데, Fig.8 (a)에서는 선두부를 향해 들어온 공기가 고속전철의 벽면을 따라 흘러 나가고 있음을 보여주고 있고, Fig.8 (c)에서는 모서리 부분에서 3차원 와류의 형성이 관찰되며, Fig.8 (d)에서 떨어져 나온 유동은 강한 대칭 와류(vortex-pair)를 만들고 있음을 알 수 있다. Fig.9에서는 9.2° 의 측풍에서의 각 단면에서의 속도벡터분포로서 (b)에서 보듯이 측풍으로 인해 중앙 단면에서 바람 반대쪽 하면 모서리에서 박리가 발생하였음을 알 수 있고, 후미와 고속전철 후방에서 바람반대쪽 와류의 회전유동방향이 측풍의 유동방향과 반대임으로 해서 바람쪽의 와류에 비해 약화된 비대칭인 3차원 와류를 보인다. 편향각 16.7° 와 45° 인 Fig.10과 Fig.11에서 선두부 및 중앙 단면에서는 Fig.9와 거의 비슷한 유동을 보이지만 후미와 고속전철 후방에서는 편향각이 커질수록 바람 반대쪽의 와류의 형성이 억제되어 편향각이 45° 일 때는 바람 반대쪽 와류는 전혀 보이지 않음을 알 수 있다. 특히 편향각이 45° 일 때 중앙단면에서의 속도벡터분포를 나타낸 Fig.11 (b)를 보면 바람반대쪽 벽면에서는 상면에서 현저한 박리가 생성되어 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 측풍영향을 고려한 고속전철 주위의 유동장 해석을 위해 3차원 비압축성 점성 유동의 나비에-스톡스 방정식을 사용하였다. 운동량 방정식은 시간 행진 방법을 사용하였고 연속방정식은 Marker-and-Cell의 개념을 사용하였다. 그리고 대류항은 QUICK방법을 이용하여 차분화 하였으며 점성항은 공간적 중앙차분을 이용하였다. 또한 해의 안정화를 위해 4차의 인공감쇠항을 첨가하였다. 본 연구에서는 고속전철 주위에 정풍이 불어오는 조건으로 계산한 결과를 실험과 비교하여 코드의 타당성을 입증하였고, 편향각이 9.2° , 16.7° , 45° 인 측풍이 불어올 때 고속전철 주위 유동을 해석하였다.

측풍의 편향각이 커질수록 선두부에서는 바람부는쪽에서 바람반대쪽으로 압력차에 의해 큰 축력이 작용하고, 후미부에서는 바람반대쪽에서 바람부는쪽으로 다소 적은 축력이 작용됨으로 인해 고속전철의 중앙과 후미사이를 축으로하는 시계방향의 요잉모멘트(yawing moment)가 작용하여 임계이상의 각도를 가진 강한 측풍이 불 때, 선로탈선의 위험을 초래할 것으로 예측된다. 후미에서는 더불어 측풍효과에 의해 바람반대 쪽 와류의 형성이 억제됨도 또한 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 1994년도 한국학술진흥재단 신진 연구의 일환(과제명 : 측풍영향을 고려한 고속전철 주위의 점성유동 해석용 컴퓨터 프로그램 개발)으로 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] W. A. Mair and A. J. Stewart, (1985) "The Flow Past Yawed Slender Bodies with and without Ground Effects," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 18, pp 301-328.
- [2] J. M. Copley, (1987) "The Three-Dimensional Flow Around Railway Trains," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 26, pp 21-52.
- [3] T. W. Chiu, (1991) "A Two-Dimensional Second-order Vortex

Panel Method for the Flow in a Cross-Wind over a Train and Other Two-Dimensional Bluff Bodies," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 37, pp 43-64.

[4] J. P. Howell, (1986) "Aerodynamic Response of Maglev Train Models to a Crosswind Gust," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 22, pp 205-213.

[5] R. K. Cooper, (1981) "The Effect of Cross-Winds on Trains," *Trans. ASME, Journal of Fluid Engineering* 103, pp 170-178.

[6] T. B. Morrow, (1979) "Prediction of the Aerodynamic Pressure Distribution for Vehicles Moving near the Ground," *The Joint ASME-CSME Applied Mechanics, Fluids Engineering and Bioengineering Conference*, pp 153-163.

[7] 류태규, 정유립, 노오현, (1983) "PANEL Method를 이용한 고속 전철 주위의 압력 분포 계산," *한국항공우주학회지*, 제11권 1호, pp 73-78.

[8] S. V. Ramakrishnan, D. K. Ota and S. R. Chakravarthy, (1995) "Computation of Turbulent Flow Past a Circular Cylinder in Ground Effect," *AIAA Paper* 95-0534,

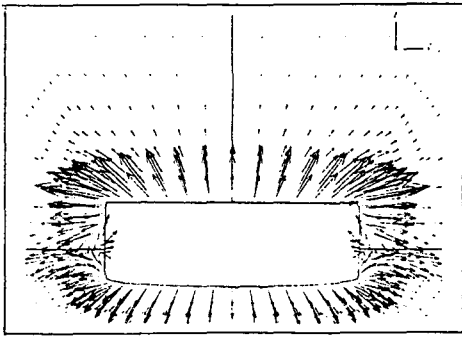
[9] 맹주성, 양시영, (1993) "자기 부상 열차 형상 주위의 공력학적 특성에 관한 수치 해석," *한국항공우주학회지*, 제21권, 제6호, pp 107-122.

[10] 박원규, 정영래, 김홍원, (1995) "고속전철 주위의 유동장 해석," 1995년도 춘계 학술발표회 논문집, pp 353-357.

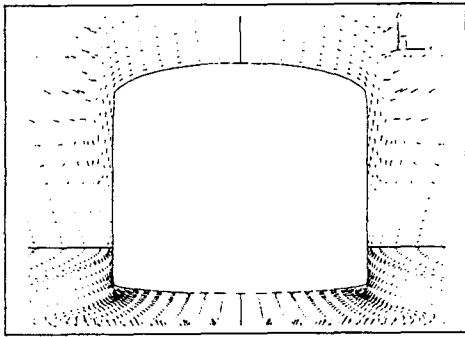
[11] 이상준, 김대훈, (1991) "자기 부상 열차의 실험적 공력특성 해석," *과학기술처 시행 특정연구개발사업보고서*.

[12] Baldwin, B. S. and Lomax, H., (1978) "Thin-Layer Approximation and Algebraic Model for Separated Turbulent Flows," *AIAA Paper* 79-257.

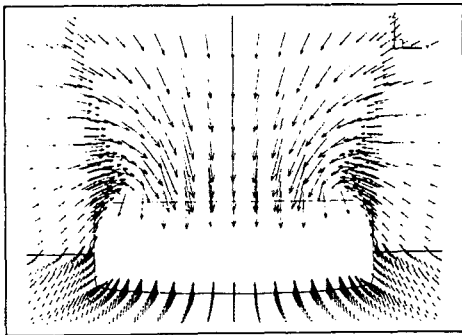
[13] Leonard, B. P., (1979) "A Stable and Accurate Convective Modeling Procedure Based on Quadratic Upstream Interpolation," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 19, pp 59-98.



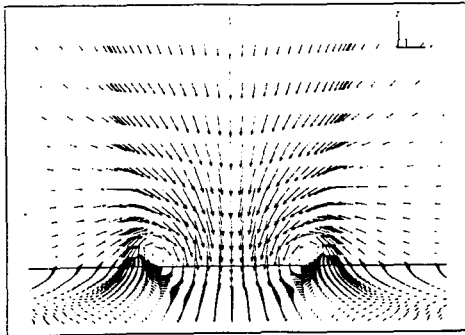
(a) Near nose region



(b) At center-body

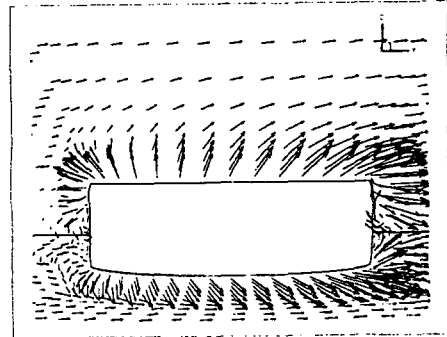


(c) Near rear region

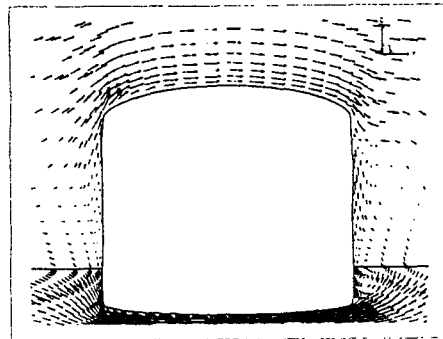


(d) Behind body

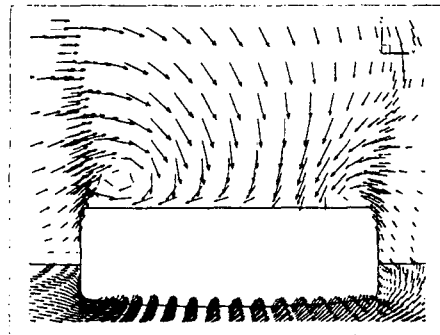
Fig.8 At 0° of yaw angle



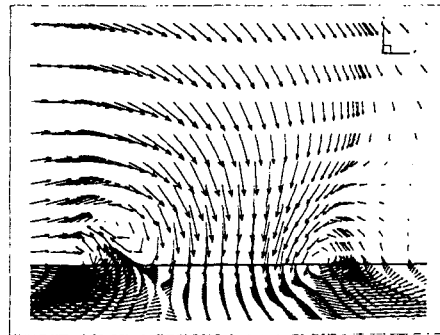
(a) Near nose region



(b) At center-body

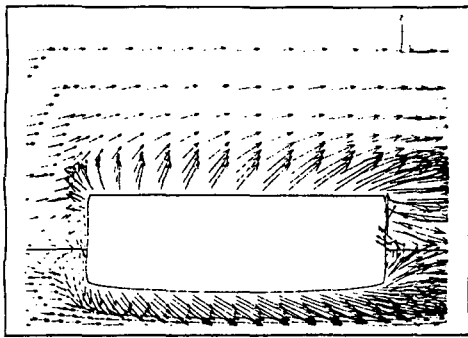


(c) Near rear region

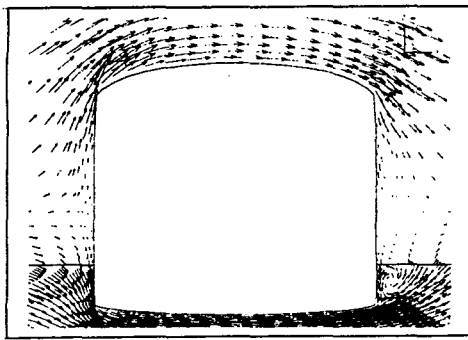


(d) Behind body

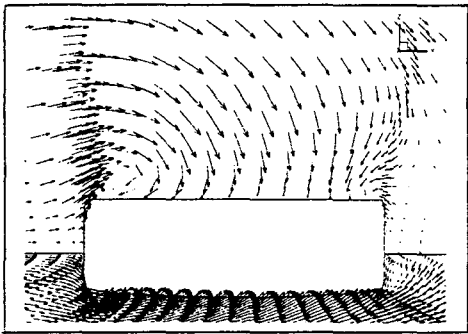
Fig.9 At 9.2° of yaw angle



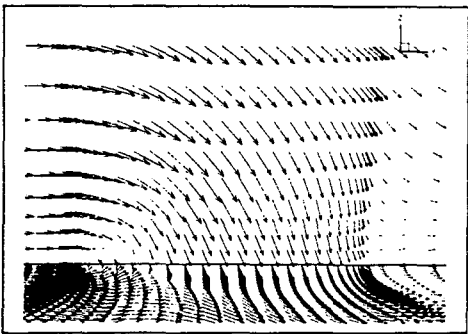
(a) Near nose region



(b) At center-body

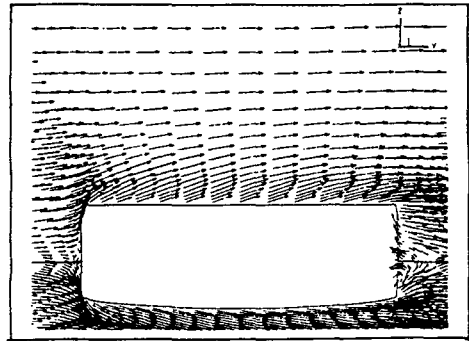


(c) Near rear region

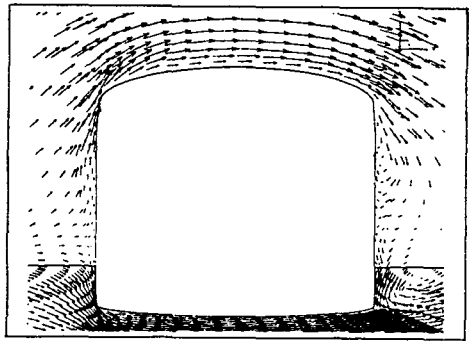


(d) Behind body

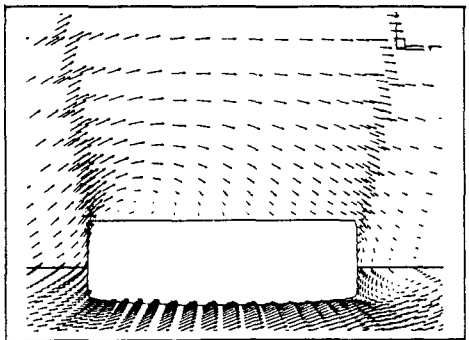
Fig.10 At 16.7° of yaw angle



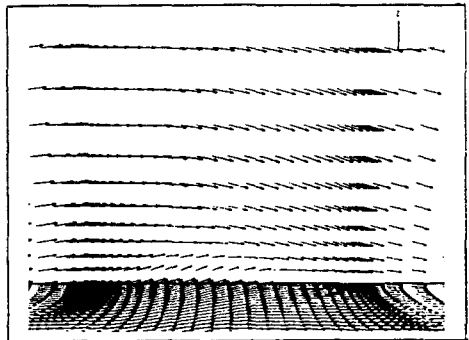
(a) Near nose region



(b) At center-body



(c) Near rear region



(d) Behind body

Fig.11 At 45° of yaw angle