

측풍영향을 고려한 고속전철 주위의 비압축성 점성 유동 해석

Incompressible Viscous Flow Analysis around a High-Speed Train Including Cross-Wind Effects

정영래*1, 박원규2, 김홍원3, 하성도4

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

The flow field around a high-speed train including cross-wind effects has been simulated. This study solves 3-D unsteady incompressible Navier-Stokes equations in the inertial frame using the iterative time marching scheme. The governing equations are differenced with 1st-order accurate backward difference scheme for the time derivatives, 3th-order accurate QUICK scheme for the convective terms and 2nd-order accurate central difference scheme for the viscous terms. The Marker-and-Cell concept was applied to efficiently solve continuity equation, which is differenced with 2nd-order accurate central difference scheme. The 4th-order artificial damping is added to the continuity equation for numerical stability. A C-H type of elliptic grid system is generated around a high-speed train including ground. The Baldwin-Lomax turbulent model was implemented to simulate the turbulent flows. To validate the present procedure, the flow around a high speed train at constant yaw angle of 45° and 90° has been simulated. The simulation shows 3-D vortex generation in the lee corner. The flow separation is also observed around the rear of the train. It has concluded that the results of present study properly agree with physical flow phenomena.

1. 서 론

고속전철은 항공기에 버금가는 복합 과학기술을 필요로하는 분야로서 공기역학, 구조역학, 진동, 소음, 전기, 전자, 제어, 통신 등 다양한 기술을 필요로 한다. 특히 공기역학은 고속전철 주위의 공기 유동을 해석함으로써 추진력을 결정케하고 구조 설계에 필요한 외력을 제공하며, 진동 소음에는 기진력을 제공하는 등 최우선적으로 행해져야 할 분야이다. 그리고 고속전철이 터널을 지날 때는 작은 공간에 빠른 속도로 주행함으로써 blockage효과 등으로 인한 충격파가 발생하는데 이것은 차체의 안정성과 특히 터널의 수명에 심각한 손상을 초래하고 극심한 소음을 발생시킨다. 이러한 충격파를 줄이기 위해서는 터널 내부에서의 유동 해석이 완전히 이루어져야 하며, 특히 최근에는 재료 과학의 급속한 발달에 힘입어 열차는 더욱 경량화의 경향을 보이고 있다. 경량화된 차량은 동력소모의 감소를 가져왔지만 측풍에 의한 전복 가능성을 증대시켰다. 고속전철의 고속화와 차량 경량화는 더욱 가속될 전망이어서 측풍에 대한 정확한 해석이 절실히 요구된다.

1. 부산대학교 대학원 기계공학과 전산유체역학실험실 (609-735, 부산광역시 금정구 장전동 산 30번지 Tel: 051-510-3064)
2. 부산대학교 기계공학과 (609-735, 부산광역시 금정구 장전동 산 30번지, Tel:051-510-2457)
3. 부산대학교 대학원 기계공학과 전산유체역학실험실
4. 한국기계연구원 신교통기술연구부 (305-600, 대전광역시 유성우체국 사서함 101호, Tel: 042-868-7844)

고속전철의 유동과 관련한 선행연구 중에서 측풍과 관련된 연구를 살펴보면, W. A. Mair 등[1]과 J. M. Copley[2]는 작은 편향각(yaw angle)의 측풍을 받는 열차를 벽면 부근의 비스듬한 실린더로 취급하였고, T. W. Chiu[3]는 실험과 수치적 모델링의 두 분야에서 60° ~ 90° 의 큰 편향각일 때 열차의 공기역학적 거동을 연구하여 단면에서의 압력 분포는 선두부에서의 거리나 편향각에 큰 영향을 받지 않는다고 결론 내렸다. J. P. Howell[4]는 축소된 모형 자기 부상 열차를 이용하여 측풍속을 고속으로 주행할 때 받는 측력을 측정하여 풍동 실험에서의 결과와 비교함으로써 두 결과가 서로 일치함을 보였고, 특히 R. K. Cooper[5]는 풍동 실험과 축소 모델의 주행 실험을 병행하여 열차 전복을 야기시키는 측풍의 속도를 조사하였다. 풍동실험에서 얻어진 힘과 모멘트가 주행실험에서 얻어진 힘과 모멘트보다 더 크게 나타났는데, Cooper는 이에 대한 이유로 모델과 지면의 상대운동, 난류모델, 그리고 레일과 제방의 모델링에서의 오차를 들었다. 측풍과 관련한 연구중 실험적인 연구외에 수치해석적인 접근이 있었다. S. V. Ramakrishnam 등[6]에 의해 지면효과를 고려한 원형실린더 주위의 저속유동을 UNIS flow solver를 이용하여 계산한 연구가 있었고, T. B. Morrow[7]에 의한 열차 주변 유동해석에 포텐셜 유동을 적용한 연구가 있었다. Morrow에 의한 연구는 특히 개활지를 작은 편향각에서 주행할 때와 마주오는 기차 동체의 중간에 다른 기차의 선두부가 지날 때, 마주오는 기차의 선두부가 서로 교차할 때, 간단한 모델의 역주변을 기차가 지날 때 등의 4가지 경우에 대해 각각 유동해석을 하였다.

측풍의 영향을 고려하지 않았던 연구로는 개활지에서 직선 운행하는 고속전철 주위 유동해석이 있었으며 국내의 노오현 등[8]과 맹주성 등[9] 그리고 박원규 등[10]에 의한 수치해석적인 접근과 이상준 등[11]에 의한 실험적인 접근이 있었다. 노오현 등[8]에 의한 연구는 비압축성, 비회전성 유동으로 가정한 패널 방법을 이용한 압력 분포 계산이었고, 맹주성 등[9]에 의한 연구는 k-ε 난류모델과 레이놀즈 평균기법을 이용한 나비에-스톡스방정식을 지배방정식으로 하는 수치해석이었으며, 박원규 등[10]에 의한 연구는 층류로 가정한 3차원 비정상상태 비압축성 나비에-스톡스 방정식을 지배방정식으로 하여 지면효과가 있는 고속전철 주위 유동장을 해석하였다. 마지막으로 이상준 등[11]에 의한 실험은 자기 부상 열차의 부상높이의 변화에 따른 공력특성 해석에 관한 실험이었다. 노오현 등[8]에 의한 연구는 열차에서 유동바리, 와류 등의 점성에 의한 영향과 유체회전성에 의한 영향을 배제시킨 완전이상유체의 유동으로 가정하여 패널방법을 이용하였으며, 맹주성 등[9]에 의한 연구는 k-ε 난류모델과 레이놀즈 평균기법을 이용한 나비에-스톡스방정식을 지배방정식으로 하여 점성에 의한 영향을 포함시켰으나 지면효과를 고려하지 않은 수치해석이었다.

공기역학적 관점에서 익형의 유동을 보면 실속(stall)이 발생한 단면에서는 양력과 피칭모멘트가 작게 나타난다. 이것을 고속전철의 형상에 적용하여 고속전철 선두부에서의 모서리 부분을 각(角)지게 한다면 항력은 다소 증가되지만 측력이나 요잉모멘트(yawing moment)는 감소될 것이므로 측풍에 대해 더욱 안전할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 지면과 고속전철의 상대운동이 포함될 수 있도록 관성좌표계(inertial frame)상에서 평면모서리가 각(角)진 형상의 고속전철을 주행시켜 편향각이 45° 와 90° 인 강풍하의 고속전철 주위 유동을 수치적으로 해석함을 목적으로 한다. 지배방정식은 3차원 비정상상태 비압축성 나비에-스톡스 방정식이고 난류모델은 Baldwin-Lomax모델[14]을 사용한다.

2. 지배방정식 및 수치해석 방법

3차원 비정상 상태의 비압축성 점성유동의 지배방정식은 나비에-스톡스방정식으로서, 이를 무차원화 한 후 일반화된 곡선좌표계로 나타내면 다음과 같다.

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

여기서 q 는 p, u, v, w 를 포함하는 유동벡터이며, E, F, G 는 곡선좌표계에서의 대류항이며 E_v, F_v, G_v 는 점성항이다.

식(1)의 지배방정식을 수치해석으로 해를 구하기 위해 우선 먼저 모멘텀 방정식을 유한차분화 시키는

과정을 보면 다음과 같다. 모멘텀방정식은 시간에 대해 포물선형태(parabolic type)의 편미분방정식이므로 시간행진(time marching) 방법을 이용하여 유한차분화시키고 여기에 뉴턴 반복법을 적용시키면,

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

여기서 윗첨자 n+1, n은 시간 level을 의미하며 k+1은 반복 level을 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 완화계수(relaxtion factor)이며 A, B, C 는 다음과 같이 정의되는 Jacobian 행렬이다.

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

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

$$\begin{aligned} \bar{R}^{n+1,k} = \frac{1}{\Delta \tau} (\bar{q}^{n+1,k} - \bar{q}^n) - (\delta_{\xi} \bar{E}^{n+1,k} + \delta_{\eta} \bar{F}^{n+1,k} + \delta_{\zeta} \bar{G}^{n+1,k}) \\ + (\delta_{\xi} \bar{E}_v^{n+1,k} + \delta_{\eta} \bar{F}_v^{n+1,k} + \delta_{\zeta} \bar{G}_v^{n+1,k}) \end{aligned} \quad (4)$$

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

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

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

여기서 β 는 완화계수이다. 식(3)과 (4)을 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 $\{ R \}$ 가 'n+1' 시간과 'k'반복 level에서 비정상 나비에-스톡스 방정식이므로 Δq 가 영(zero)으로 간다면, 본 알고리즘이 'n+1' 시간에 대해 정확히 지배방정식을 만족시킴을 알 수 있다.

본 연구에서 대류항은 QUICK (Quadratic Upstream Interpolation For Convection Kinematics) 방법[14]을 이용하여 유한 차분화 시켰으며, 점성항은 공간적 중앙 차분화를 이용하였다. 그리고 연속 방정식은 중앙차분을 이용하였으며, 본 알고리즘의 안정화를 위해 4차의 인공감쇠항을 첨가하였다. 난류 유동 모델을 위해서는 Baldwin - Lomax모델[12]이 사용되었다.

3. 초기조건 및 경계조건

본 연구에서는 지배방정식과 알고리즘이 일반 관성좌표계(inertial frame)상에서 유도되고 있고 또한, 문제를 풀고 있다. 이러한 관성좌표계를 사용함으로써 지배방정식에 코리올리힘이나 원심력 등에 의한 항들이 표현적으로 나타나지 않으므로 문제를 간단화할 수 있고 또한 지표면 효과도 충분히 반영

할 수 있게 된다. 초기조건으로는 측풍의 유속을 이용하며, 격자의 외부경계가 고속전철로부터 충분히 먼 거리에 있으므로 원거리 유입경계조건으로 또한 측풍의 유속을 사용한다. 한편 유출경계조건은 속도의 외삽과 $p = p_{\infty}$ 로부터 구하며, 고속전철표면과 지표면에서는 미끄럼 없는(no Slip) 조건과 표면의 법선압력구배가 영(zero)이라는 조건을 이용한다. 격자는 C-H 격자(99×63×35)를 타원형 격자생성법(elliptic method)[17]으로 생성하였다. 측풍은 25m/s의 강풍이 고속전철 진행 방향에 대해 편향각 45°와 90°로 불어온다고 가정하여 고속전철 주행속도의 약 1/3로 놓고 계산하였다.

4. 결과 및 고찰

본 연구는 300 km/hr의 속도로 주행하는 고속전철에 25 m/s의 강풍이 45°와 90°의 편향각을 이루고 불어올 때 고속전철 주위의 유동을 계산하여 편향각의 변화에 따른 고속전철의 안정성을 조사하였다. 레이놀즈수는 고속전철 길이(L)에 근거하여 1.26×10^8 이다. Fig.1은 고속전철 주위에 형성시킨 격자로서 C격자계와 H격자계의 복합을 사용하였다. 특히 지면 효과와 Baldwin-Lomax 난류모델에 적합한 격자생성을 위해 타원형 격자생성법을 이용하였다.

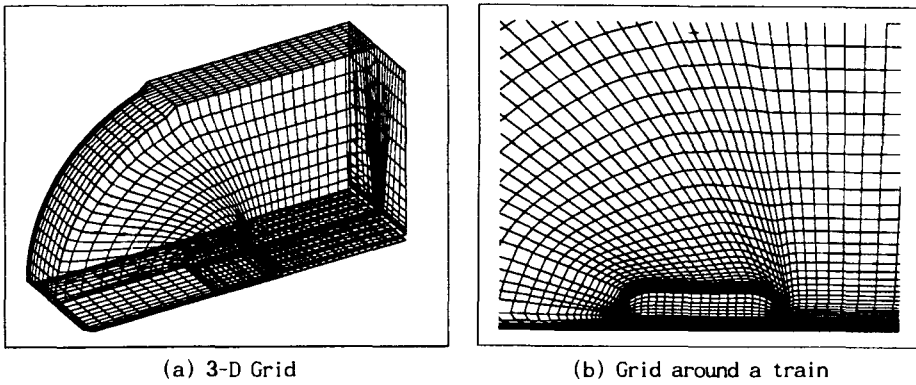
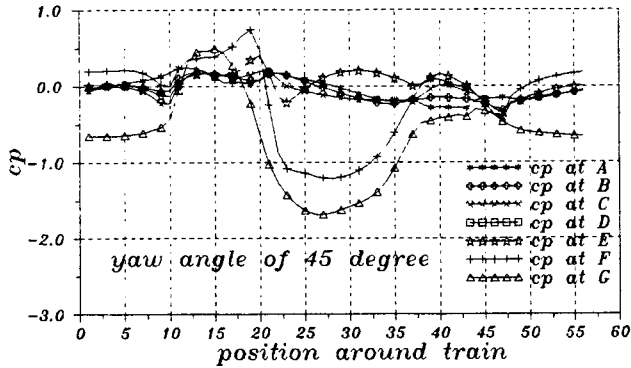


Fig.1 Grid system

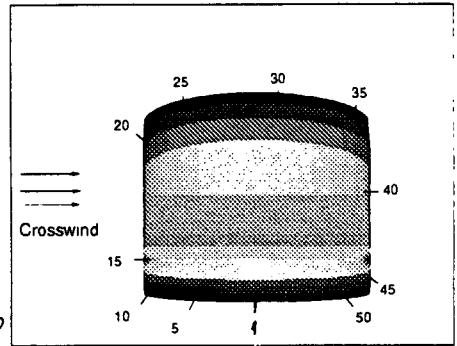
Fig.2는 각 단면에서의 원주방향의 CP값으로, 고속전철에서의 위치는 Fig.2(d)에 표시하였고 각 단면에서의 CP값의 위치는 Fig.2(c)에 나타나 있듯이 하면 중앙에서 시작하여 시계방향으로 고속전철 단면을 회전하여 다시 하면 중앙에서 끝난다. 편향각 45° 일 때 CP는 후미부 E, F, G 위치를 제외하고는 원주방향 각 위치에서 대체로 일정한 값을 보이는데 이것은 측풍보다는 3배나 빠른 주행속도의 영향으로 원주방향 각 위치에서 속도가 고속전철의 주행속도로 일정한 값을 가지기 때문이다. 그러나 후미부에서의 속도는 주행속도가 완전히 감소되는 반면 측풍의 영향은 그대로 유지되기 때문에 원주방향의 위치에 따라 CP값의 차이를 보인다. F, G 단면에서는 상면과 하면에서 다같이 가속이 이루어짐에 따라 음의 CP값을 보이지만 상면과 하면의 압력차이에 의한 양력이 발생됨을 알 수 있다. 한편 편향각 90° 일 때는 45° 일 때보다 측풍의 영향이 커져서 선두부 A, B, C 및 중간부 D에서도 CP값이 원주방향 위치에 따라 다소 변화를 보여, 상면에서부터 바람반대쪽 측면에 걸쳐 음의 CP값을 보이고 바람반대쪽의 하면 모서리 부분에서 압력의 최소값을 가진다. E지점에서는 바람쪽의 상면 모서리에서 압력의 변화량이 컸으며, 압력의 최대값은 F지점에서 바람쪽 측면 높이의 2/3에 해당되는 위치이고 바람반대쪽 압력의 최소지점은 하면과의 모서리부분이므로, 바람쪽 2/3지점과 바람반대쪽 하면 모서리간의 압력차가 큰 요잉모멘트를 발생시키고 더불어 상면과 하면과의 압력차에 의한 양력이 합하여져서 전복의 위험이 가장 크다. 편향각 45° 일 때와 비교하여 편향각 90° 일 때는 후미부에서의 측력이 크게 발생됨을 알 수 있다.

Fig.3(a)는 편향각 45° 일 때의 속도벡터로서 고속전철이 주행중임을 알 수 있고, 고속전철의 주행속도로 밀려나간 공기는 앞쪽의 유동에 밀려 곧바로 흐름방향이 바뀔 수 있다. 그리고 후미부에서는

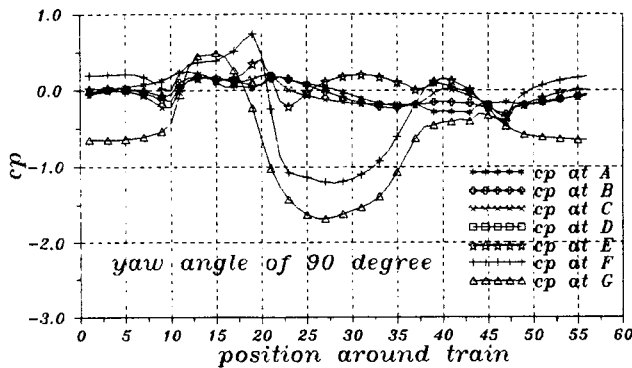
고속전철의 주행이 이루어진 부분에 공기가 몰려드는 유동형태를 보이는데, 이것은 물리적으로 타당한 결과로 보여진다. Fig.3(b)는 편향각 90° 일 때의 속도벡터로서 45° 일 때에 비해 주행속도의 유지 구간이 길며 측풍이 90° 인 이유로 주행방향으로의 하면유동과 자유유동은 거의 나타나지 않는다.



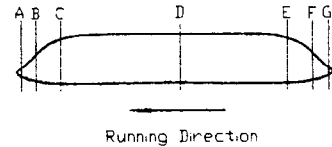
(a) CP for yaw angle of 45°



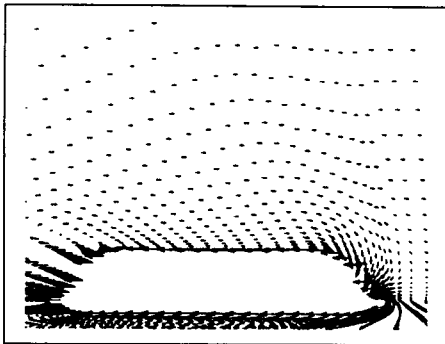
(c) The position of CP



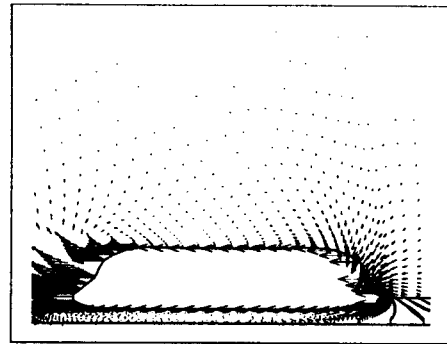
(b) CP for yaw angle of 90°



(d) The position of cross-section



(a) Velocity vectors for yaw angle of 45°



(b) Velocity vectors for yaw angle of 45°

Fig.3 Velocity vectors

Fig.4는 각 편향각에서의 유선을 그린 것으로 편향각 45° 와 90° 일 때 많은 차이를 볼 수 있다. 90° 에서는 선두부 상면과 후미부 상면에서 박리구간이 발생한 것으로 보이지만 유선은 관찰자가 같이 이동하는 유동에서만 의미가 있다. 이것은 정지한 관찰자가 볼 때는 주행하는 고속전철 전방의 유체는 밀려나고, 후미에서의 유체는 당겨지므로 유선이 폐곡선을 이루며 유동은 시간 의존적이기 때문이다. 따라서 일정한 편향각을 가진 평행류를 중첩시켜 시간과 무관한 유동에서의 유선을 관찰하여야 한다.

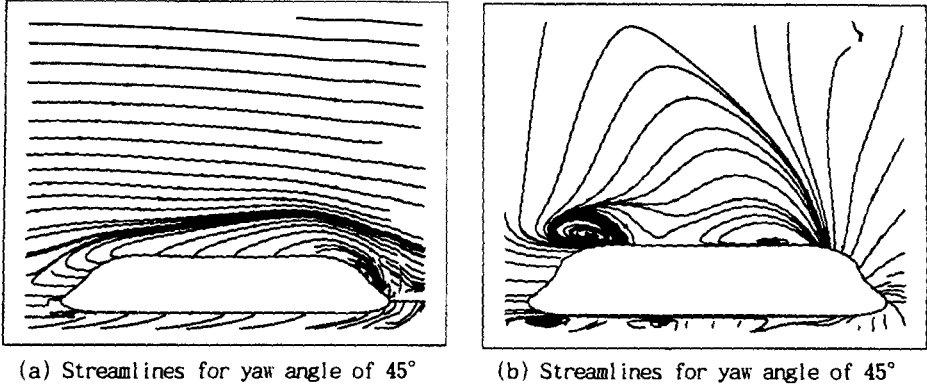


Fig. 4 Streamlines

Fig. 5와 Fig. 6은 고속전철 선단부와 선미부에서의 45° 와 90° 에 대한 측풍방향 속도벡터 및 동압력선도를 나타내고 있다. 먼저 Fig. 5는 고속전철 선단부부분으로 고속전철의 주행으로 인해 공기가 바람방향(windward corner)과 바람반대쪽(lee corner)으로 나누어 밀려나가기 때문에 바람쪽에는 바람과 부딪히는 역류가 발생하고 바람반대쪽에는 밀려나가는 공기와 측풍이 합하여져서 vortex가 발생하였고 하면에서 유동은 벽면을 따라 roll up되면서 다시 떨어져 나가는 vortex가 형성되는 Karman vortex 형태의 유동이 아주 잘 발달되었다. Fig. 5(a)와 Fig. 5(b)를 비교해보면 바람반대쪽(lee corner)에서의 vortex는 90° 일 때가 45° 일 때보다 더욱 잘 발달되어 있음을 알 수 있고, 압력분포도에서도 90° 일 때가 45° 일 때보다 더 큰 압력차를 보여 전복의 위험이 더 크다는 것을 알 수 있었다.

Fig. 6은 끝단부근으로 박원규 등[10]의 연구에서 정풍일 때 관찰되었던 후미부에서의 강한 와류가 발달하지 못했는데, 이것은 특히 편향각이 90° 일 때 바람반대쪽에서는 밀려들어오는 공기의 영향보다 측풍의 영향이 더 크게 작용하여 와류가 발달되지 못하고 있다는 것을 알 수 있다. 압력분포는 45° 일 때와 90° 일 때 많은 차이를 보인다. 90° 일 때의 상하면 압력차가 45° 일 때의 상하면 압력차보다 훨씬 큰 값을 가지기 때문에 큰 양력을 갖게 된다. 양력은 추진동력의 절감은 되지만 측풍에 대한 전복의 가능성면에서는 아주 불리한 인자로 작용되기 때문에 후미부에서는 측풍에 의해 야기되는 양력을 줄일 수 있는 형상으로 설계를 해야 할 것이다.

5. 결 론

본 연구에서는 측풍영향을 고려한 고속전철 주위의 유동장 해석을 위해 3차원 비압축성 점성유동의 나비에-스톡스 방정식을 사용하였으며 모멘텀 방정식은 시간 행진 방법을 사용하였고 연속방정식은 Marker-and-Cell의 개념을 사용하는 반복적인 시간 행진 방법을 이용하였다. 시간에 대해서는 1차 정도의 후진차분화(backward difference) 하였고 대류항은 3차의 정도를 가지는 QUICK방법을 이용하여 차분화 하였으며 점성항은 2차 정도를 가지는 공간적 중앙차분을 이용하였다. 그리고 연속방정식은 2차 정도의 중앙차분과 해의 안정화를 위해 4차 정도의 인공감쇠항을 첨가하였다. 300 km/hr의 속도로 주행중인 고속전철에 25 m/s의 측풍이 45° 와 90° 의 편향각을 이루고 불어올 때의 수치해석 결과, 선두부에서는 편향각에 영향을 적게 받지만 후미부에서는 편향각이 큰 경우에 양력증가 및 측풍에 의한 바람반대쪽 와동박리의 생성이 억제되어 일어나는 요잉모멘트(yawing moment) 차이에 의해 전복의 위험이 커지는 것으로 나타났다. 또한 주행중인 고속전철에서의 유동은 정지한 고속전철에 바람이 불어올 때와 완전히 다른 유동을 보였는데, 전방의 공기는 밖으로 밀려나가고 후방에서는 공기가 밀려들어오기 때문에 유선은 폐곡선을 이루었다. 선두부에서는 측풍에 의한 와동박리의 발달이 현저한 반면 후미부에서는 측풍에 의해 와동박리의 생성이 억제되고 편향각이 큰 경우에 바람반대쪽에는 3차원 와류가 전혀 생성되지 않았다. 한편, 제방이나 독을 주행중인 고속전철에 측풍이 불 때는 평지에서보다 가속이 25%정도

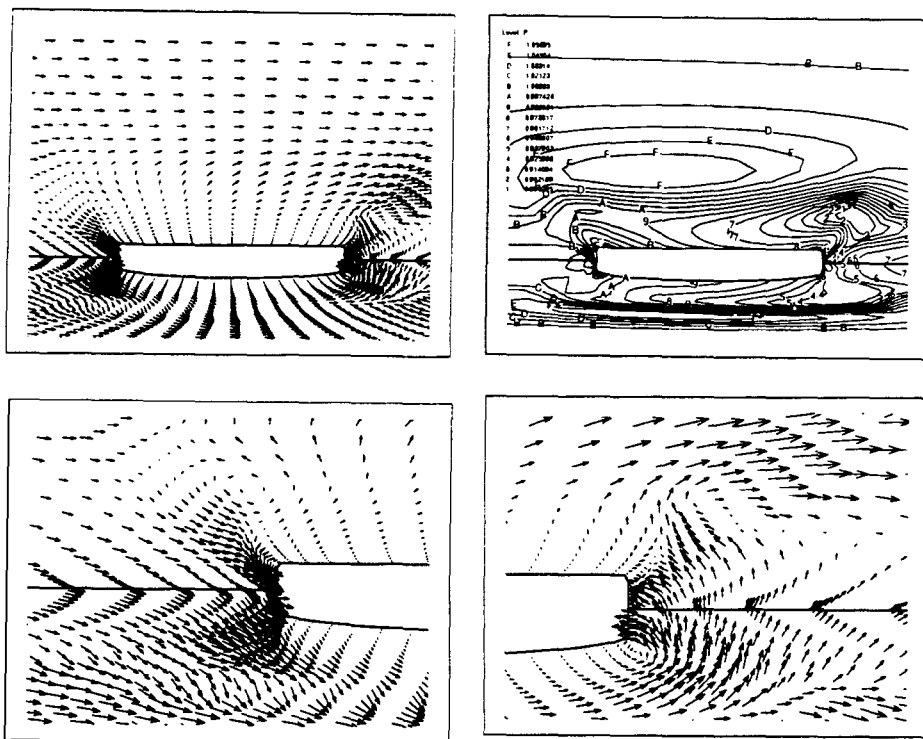
증가되기 때문에 차후에 제방에서 주행중인 고속전철 주위의 측풍효과에 대해서도 연구가 수행되어야 할 것이다.

후 기

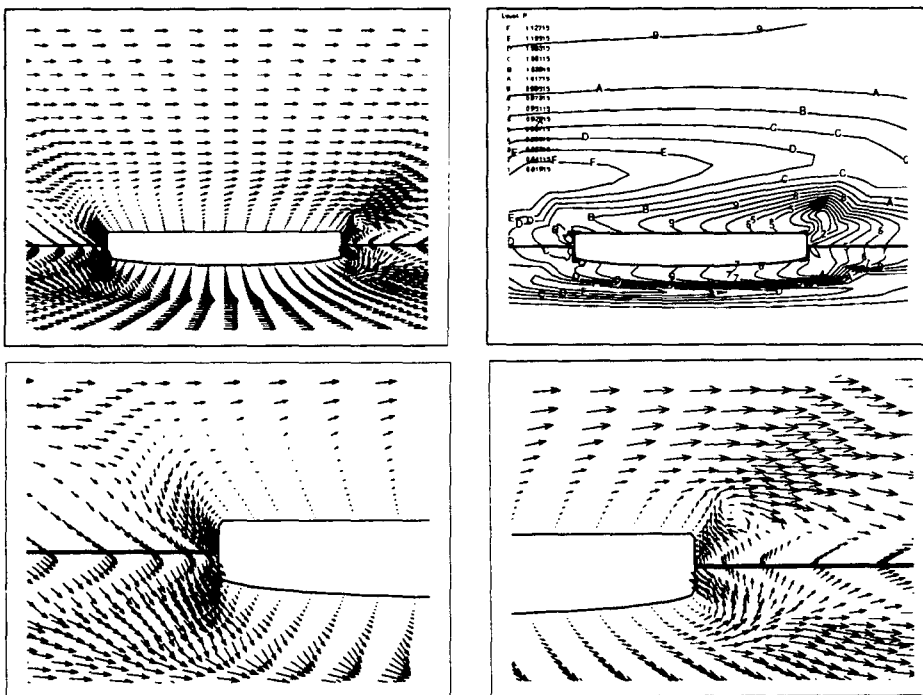
본 연구과제는 한국 학술진흥재단의 신진연구의 일환(과제명 : 측풍영향을 고려한 고속전철 주위의 점성유동 해석용 컴퓨터 프로그램 개발)으로 이루어졌으며 한국 학술진흥재단의 지원에 감사 드립니다.

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] 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,
- [7] 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.
- [8] 류태규, 정유림, 노오현, (1983) "PANEL Method를 이용한 고속전철주위의 압력분포 계산," *한국항공우주학회지*, 제11권 1호, pp 73-78.
- [9] 맹주성, 양시영, (1993) "자기부상열차 형상 주위의 공력학적 특성에 관한 수치해석," *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) "자기부상열차의 실험적 공력특성 해석," *과학기술처 시행 특정연구개발 사업보고서*.
- [12] Baldwin, B. S. and Lomax, H., (1978) "Thin-Layer Approximation and Algebraic Model for Separated Turbulent Flows," *AIAA Paper* 79-257.
- [13] F. H. Harlow and J. E. Welch., (1965) "Numerical Calculation of Time-Dependent Viscous Incompressible Flow with Free Surfaces," *Physics of Fluids*, Vol. 8, No.12, pp 2182-2185.
- [14] 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.
- [15] J. L. Steger and R. L. Sorenson, (1979) "Automatic Mesh-Point Clustering Near a Boundary in Grid Generation With Elliptic Partial Differential Equations," *Journal of Computational Physics* 33, pp 405-410.

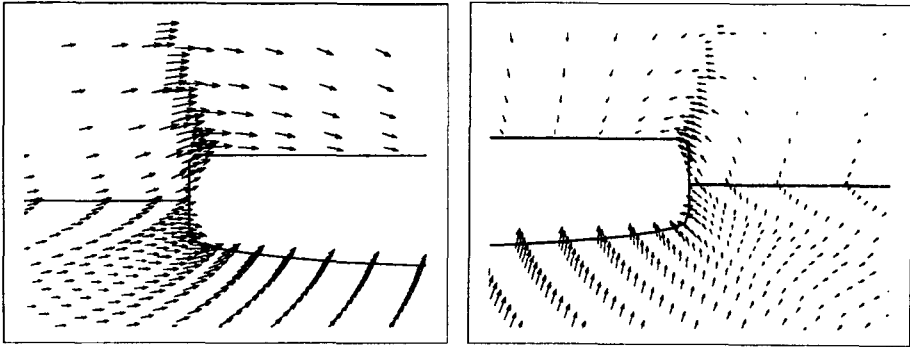
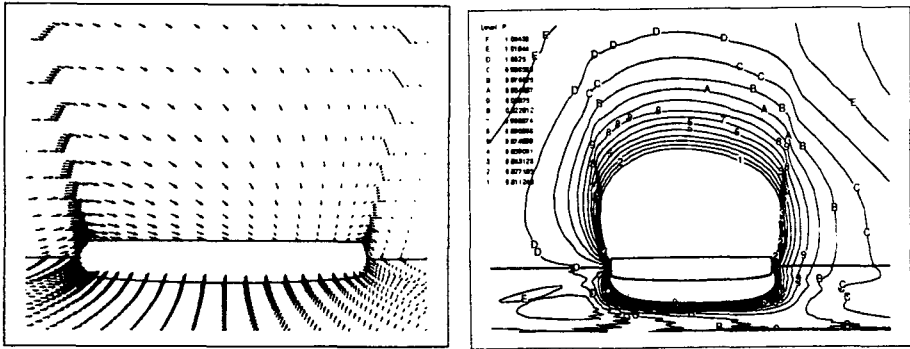


(a) yaw angle of 45°

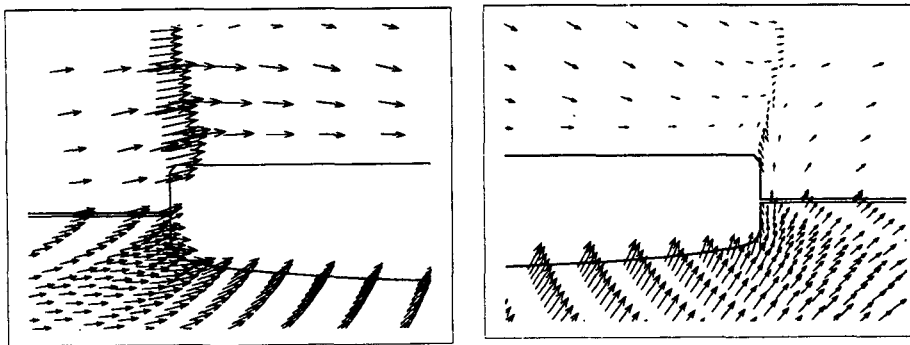
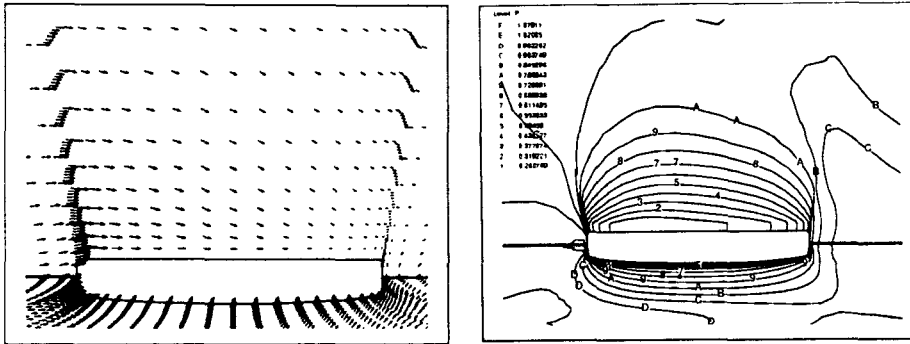


(b) yaw angle of 90°

Fig.5 Velocity vectors and pressure contours at the front edge



(a) yaw angle of 45°



(b) yaw angle of 90°

Fig.6 Velocity vectors and pressure contours at the rear