

# 차량 단면 형상에 따른 측풍 안정성 해석

## Analysis of Sidewind Stability for Different Car Section Shape.

김재훈\*\*                      이보성\*\*                      이동호\*  
Kim, Jae-Hoon    Lee, Bo-Sung    Lee, Dong-Ho

### ABSTRACT

When high speed train meets sidewind, flowfields around the train is very complex. In this case, the force by sidewind has a bad effect on stability of train. We can observe that the flow separates, reattaches, and forms an unsteady vortex in the wake region behind the structure. Such flowfield can be analyzed by  $k-w$  SST model, and we investigate the effect for various section shape of high speed train. So we acquire the result that as the corner of train section is rounder, stability of train is better.

#### 1. 서론

현재 개발중인 고속전철은 기존의 철도차량과는 달리 주행속도가 최고 시속 350 km(음속의 약 28.3%)정도에 달하며, 이와 같은 고속주행시 차량에 작용하는 총 주행저항의 약 80%이상을 공기 저항이 차지하게 된다. 따라서, 고속전철에 대한 공기역학적인 연구가 많이 수행되고 있다.

하지만, 고속전철 공기역학 연구는 전두부 형상에 따른 주행저항의 최소화, 터널공력문제의 최소화, 공력 소음의 최소화, 주행시의 동적안정성 유지 등에 대해 주로 수행되었고, 정차 및 주행시의 안정성이 강조되는 단면 형상에 따른 측풍 안정성에 대해서는 체계적인 연구가 수행된 적이 없다.

본 연구에서는 열차의 실제 단면 형상에 따른 유동 현상을 파악하고, 측력(Side Force) 및 부력(Lift Force)을 구함으로써 각 단면 형상의 측풍에 대한 안정성을 파악하는 것을 목적으로 한다.

#### 2. 수치해석기법

##### 2.1. 지배방정식 및 변환

지배방정식으로 완전기체에 대한 비정상 비압축성 Navier-Stokes 방정식을 사용하여 해석을 수행하였다. 2차원 비압축성 Navier-Stokes 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0$$

---

\* 서울대학교 교수

\*\* 서울대학교 대학원 과정

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{Re} \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad (1)$$

비압축성 유동장을 해석하기 위해 Pseudo-compressibility 방법을 사용하였으며, 난류 유동장 해석에는 식 (1)의 유동장 지배방정식과 함께  $k-w$  SST 2방정식 모델이 사용되었다.

Pseudo-compressibility 방법을 적용하여 지배방정식을 변환하여 일반 곡선 좌표계에서 표시하면 식 (2)와 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q}{\partial \tau} &= -\frac{\partial}{\partial \xi}(E - E_v) - \frac{\partial}{\partial \eta}(F - F_v) - \frac{\partial Q}{\partial t} \\ Q &= \frac{1}{J} \begin{pmatrix} p \\ u \\ v \end{pmatrix}, \quad E = \frac{1}{J} \begin{pmatrix} \beta U \\ uU + \xi_x p \\ vU + \xi_y p \end{pmatrix}, \quad F = \frac{1}{J} \begin{pmatrix} \beta V \\ uV + \eta_x p \\ vV + \eta_y p \end{pmatrix} \\ E_v &= \frac{1}{Re} \frac{1}{J} \begin{pmatrix} 0 \\ (\xi_x^2 + \xi_y^2)u_\xi + (\xi_x \eta_x + \xi_y \eta_y)u_\eta \\ (\xi_x^2 + \xi_y^2)v_\xi + (\xi_x \eta_x + \xi_y \eta_y)v_\eta \end{pmatrix} \\ F_v &= \frac{1}{Re} \frac{1}{J} \begin{pmatrix} 0 \\ (\xi_x \eta_x + \xi_y \eta_y)u_\xi + (\eta_x^2 + \eta_y^2)u_\eta \\ (\xi_x \eta_x + \xi_y \eta_y)v_\xi + (\eta_x^2 + \eta_y^2)v_\eta \end{pmatrix} \\ U &= \xi_x u + \xi_y v, \quad V = \eta_x u + \eta_y v \end{aligned} \quad (2)$$

여기서  $\beta$ 는 pseudo-compressibility factor이고  $\tau$ 는 pseudo-time을 의미한다. Physical time  $t$ 항은 우변에서 소스항으로 처리하여 비정상 유동을 해석할 수 있다. (2) 식에 내재적 시간적분법을 적용하면 식 (3)과 같이 간략히 나타낼 수 있으며 여러 가지 시간전진기법을 적용하여 이를 해석하게 된다.

$$LHS(\Delta Q^m) = -\Delta \tau RHS(Q^m) \quad (3)$$

$\Delta Q^m$ 은  $Q^{m+1} - Q^m$ 이며  $\Delta \tau$ 는 시간간격을 뜻한다.

## 2.2. 시간 적분법

식 (3)을 내재적으로 해석할 경우 각 격자점 (i,j)에서 식 (4)와 같은 block penta-diagonal 형태의 연립방정식이 구성된다. 여기서 각각의  $C_i$ 는 행렬형태를 나타내게 되는데 수치해법에 따라서 형태가 달라지게 된다.

$$C_1 \Delta Q_{i,j}^m + C_2 \Delta Q_{i-1,j}^m + C_3 \Delta Q_{i,j-1}^m + C_4 \Delta Q_{i+1,j}^m + C_5 \Delta Q_{i,j+1}^m = -RHS_{i,j}^m \quad (4)$$

본 논문에서는 많은 수의 프로세서로 이루어진 MPP에서 수렴성을 유지하기 위해 DP-SGS(Data Parallel Symmetric Gauss-Seidel) 알고리즘을 적용하였다. DP-SGS 알고리즘에서는 부영역 내부에서는 Pointwise Symmetric Gauss-Seidel 알고리즘을 사용하고 부영역 경계에서는 Candler와 Wright 등이 제안한 DP-LUR (Data Parallel Lower-Upper Relaxation) 알고리즘을 채택한다.

DP-SGS에서는 식 (4)를 LU 분할할 때 위의 알고리즘에서 강조된 항들을 무시하지 않고 포함함으로써 sweep 횟수가 증가함에 따라서 수렴성이 현저히 향상되게 된다. 따라서 부영역의 수가 늘어남에 따라서 수렴성을 유지하기 위해서는 sweep 횟수가 늘어나야만 하는데, 이 때 DP-SGS 알고리즘에서는 sweep 횟수의 증가에 따라서 수렴성이 계속 향상되므로 수렴해를 얻는데 요구되는 전체적인 계산시간은 DP-LUR이나 hybrid 알고리즘에 비하여 현저히 감소하게 되는 것이다.

본 연구에서는 DP-SGS 알고리즘의 sweep 횟수를 3으로 고정하였다.

## 2.3. 난류 모델

본 연구에서는 2방정식 모델로서  $k-\omega$  모델과  $k-\epsilon$  모델의 장점을 결합한  $k-\omega$  SST 모델을 사용하였다. 지배 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(ku_j) = \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \beta^* k\omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\nu + \sigma_k \nu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right]$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\omega u_j) = \frac{\gamma}{\nu_t} \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \beta \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\nu + \sigma_\omega \nu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + 2(1 - F_1) \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}$$

여기서,  $\tau_{ij} = \nu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij}$

이며  $F_1$ 은 다음과 같이 정의된다.

$$F_1 = \tanh(\arg_1^4) \quad \arg_1 = \min \left[ \max \left( \frac{\sqrt{k}}{0.09\omega y}, \frac{500\nu}{y^2\omega} \right), \frac{4\rho\sigma_{\omega 2}k}{CD_{k\omega}y^2} \right]$$

윗 식에서  $y$ 는 가장 가까운 벽면까지의 거리이며  $CD_{k\omega}$ 는 교차 확산항(cross diffusion term)의 양수값을 취하게 된다. 즉 다음과 같이 계산된다.

$$CD_{k\omega} = \max \left( 2\sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}, 10^{-20} \right)$$

그리고 각각의 상수값들은  $F_1$ 을 이용하여 다음과 같이 계산된다.

$$\phi = F_1 \phi_1 + (1 - F_1) \phi_2$$

여기서  $\phi_1$ 에 해당되는 상수값들은 다음과 같다.

$$\sigma_{k1} = 0.85, \quad \sigma_{\omega 1} = 0.5, \quad \beta_1 = 0.0750, \quad a_1 = 0.31 \quad \beta^* = 0.09, \quad x = 0.41, \quad \gamma_1 = \beta_1 / \beta^* - \sigma_{\omega 1} x^2 / \sqrt{\beta^*}$$

그리고  $\phi_2$ 에 해당되는 상수값들은 다음과 같다.

$$\sigma_{k2} = 1.0, \quad \sigma_{\omega 2} = 0.856, \quad \beta_2 = 0.0828 \quad \beta^* = 0.09, \quad x = 0.41, \quad \gamma_2 = \beta_2 / \beta^* - \sigma_{\omega 2} x^2 \sqrt{\beta^*}$$

그리고 와점성계수  $\nu_t$ 는 아래와 같이 계산된다.

$$\nu_t = \frac{a_1 k}{\max(a_1 \omega, \Omega F_2)}$$

여기서  $\Omega$ 는 와도(vorticity)의 절대값이며  $F_2$ 는 다음과 같다.

$$F_2 = \tanh(\arg_2^2) \quad \arg_2 = \max \left( \frac{2\sqrt{k}}{0.09\omega y}, \frac{500\nu}{y^2\omega} \right)$$

## 2.4. 단면 주위의 2차원 격자 형성

축풍이 불어올 때 고속전철 주위의 유동을 해석하기 위해서는 단면 주위의 계산 격자계의 형성이 매우 중요한데, 단면의 좌우에 있는 홈을 고려하면 격자의 형성 자체가 어려워지게 된다. 본 연구의 목적은 열차의 실제 단면 형상(주로 단면 상단부 형상)에 따른 유동 계수를 구하여 최적의 단면 형상을 결정하는데 있으므로, 단면 좌우의 홈을 최대한 단순화하여 격자를 형성하였다. 또한, 단면과 지면 사이에 매우 복잡한 유동현상이 일어날 가능성이 많으므로 단면을 지면으로부터 떨어뜨린 상태에서 격자를 형성할 필요가 있는데, 이를 위해서 다중 블록 격자(Multi-block Grid System)를 사용할 수도 있으나 다중 블록 격자를 사용할 경우 병렬처리 프로그램의 전면적인 수정이 필요할 뿐만 아니라 격자 형성에도 문제가 발생하기 때문에, 좀 더 쉬운 격자 형성을 위해 계산 영역에 직사각형의 격자를 형성한 뒤 단면 형상의 내부를 벽면으로 처리하는 방식을 도입하였다.

그림 1 에 단면 주위의 단일 블록 격자계를 보였다. 그림 중앙의 흰 부분이 단면이 위치하는

부분이며, 실제 격자는 단면 안에도 존재하지만 벽면으로 처리함으로써 그림상에서 투명하게 나타나도록 하였다.

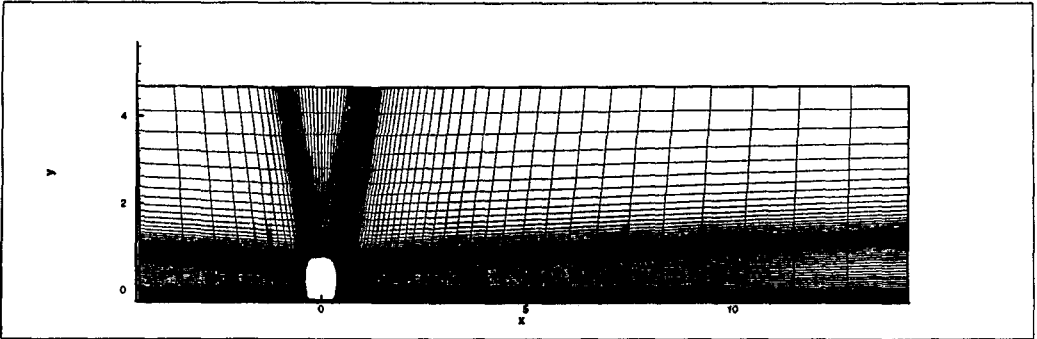


그림 1 단면 주위의 단일 블록 격자계

### 3. 결과 및 분석

2차원 비압축성 Navier-Stokes 수치해석 기법을 이용하여 고속전철 단면의 2차원 수치해석을 수행하였다. 난류 해석을 위해서  $k-\omega$  SST 난류 모델을 도입하였다. 각 단면의 모양은 그림 2부터 그림 5와 같다.

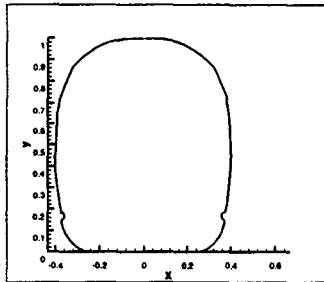


그림 2 Basic Section

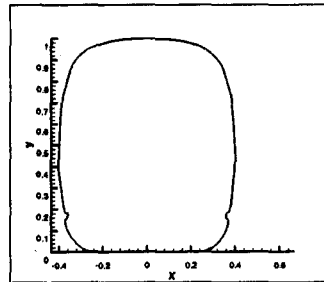


그림 3 R-800 Section

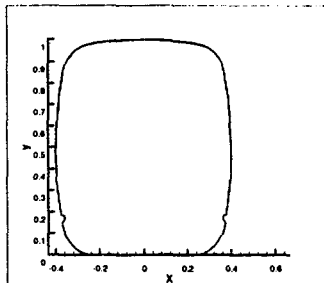


그림 4 R-500 Section

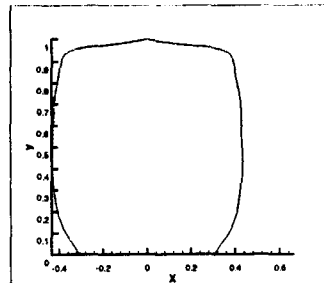


그림 5 K-TGV Section

이해를 돕기 위하여, 그림 6에 각 단면을 비교해 놓았다. 여기서 모든 단면들은 높이로 무차원화된 것이며, 실제 계산에도 높이로 무차원화된 단면을 사용하였다. 또, 그림 6은 단면 좌우의 흡을 단순화한 형태를 보인다.

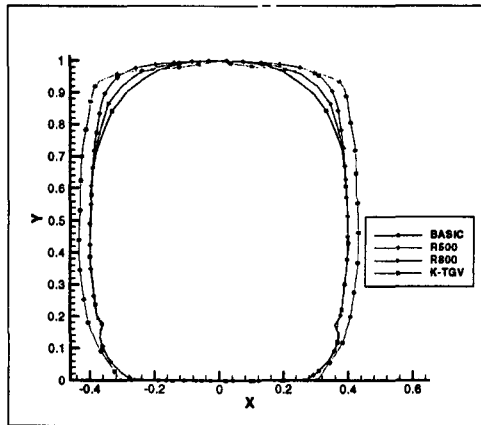


그림 6 단면 형상의 비교

그림 7에서 그림 10까지는 R-500 단면에 대해 유동장에서의 압력 분포와 유선을 그린 것이다. 그림의 왼쪽으로부터 측풍이 불어오고 있으며, 유입류의 속도는 50m/s이다. 유동이 유입되면서 단면 뒤쪽에 강력한 후류 영역이 형성되어 가는 과정을 살펴볼 수가 있다. 시간  $t=20$  일 때, 이미 단면 뒤쪽에 후류가 형성되어 있으며 시간이 지남에 따라 후류가 떨어져 나가고( $t=40$ ), 새로운 후류 영역이 형성되다가( $t=60$ ) 이미 형성된 후류와 다시 합쳐지는 과정( $t=80, t=100$ )을 거쳐서,  $t=120$  이후에는 거의 비슷한 형태의 유동장을 형성한다. 이는 단면 주위의 유동이 어느 정도 정상유동의 특징을 나타냄을 보여 준다고 할 수도 있겠지만, 열차와 지면 사이의 공간을 통해 빠져나가는 유동 때문에 후류 영역이 고정되지 못하고 조금씩 진동을 해 나간다는 면에서 비정상 유동으로 해석하는 것이 더욱 설득력을 가질 수 있을 것이다. 어느 정도의 시간이 지난 후에 유동장의 형태가 거의 고정되고 미세한 진동만을 한다는 사실은 첨부한 부력 계수와 측력 계수로부터도 확인할 수 있다.

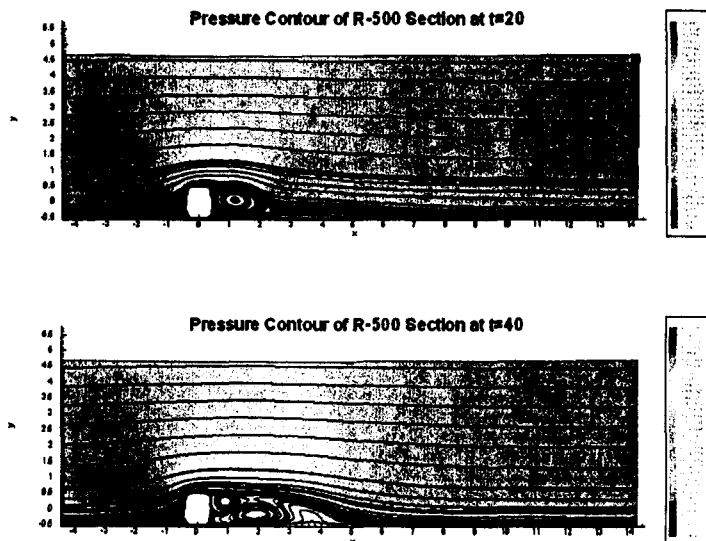


그림 7 R-500 단면 주위의 유동 (1)

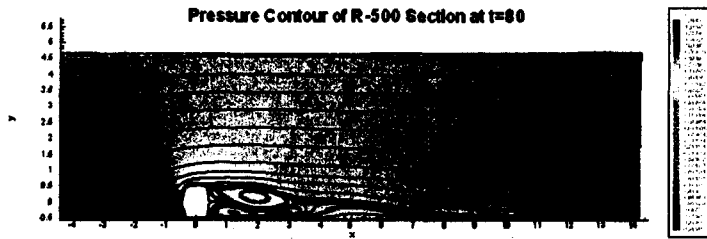
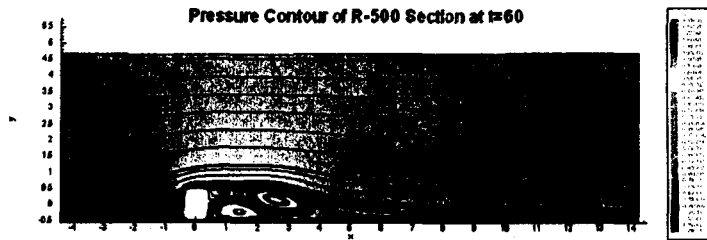


그림 8 R-500 단면 주위의 유동 (2)

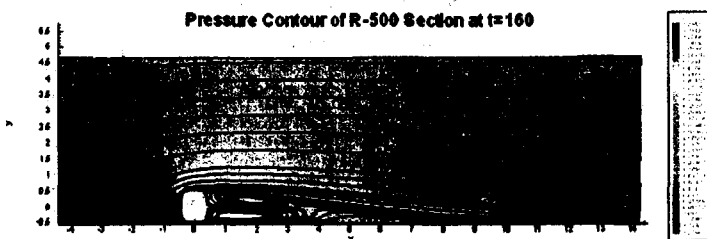
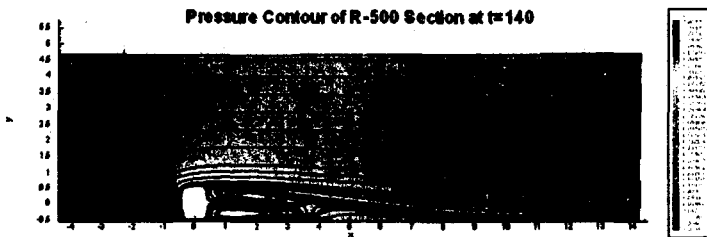


그림 9 R-500 단면 주위의 유동 (3)

R-500외에, 우리의 주 관심대상이 되는 R-800 에 대해서는 유동의 특성이 R-500의 경우와 대체로 비슷하기 때문에 pressure contour를 따로 첨부하지 않았다. BASIC section의 경우는 진동을 계속하는데, 그 진폭이 점차 작아지면서 역시 R-500, R-800과 같은 거동을 보인다.

그림 10, 그림 11, 그림 12, 그림 13에 부력 계수(Lift Coefficient), 측력 계수(Side force Coefficient)를 비교한 그림을 실는다. 부력 계수와 측력계수에 대하여 압력 성분과 skin friction 성분까지 고려한 값 사이에는 약 1% 미만의 차이만 있을 정도로 skin friction의 영향은 미미하다고 할 수 있다. 따라서 여기서는 skin friction을 고려한 경우와 그렇지 않은 두 가지 경우를

구분하지 않고 한꺼번에 기술하기로 한다.

우선, 기존의 K-TGV에 비해서 한국형 고속전철의 개발 단면은 BASIC / R-500 / R-800 모두 월등하게 우월한 특성을 보여주고 있음을 그래프로부터 확인할 수 있다. 한가지 흥미로운 것은 K-TGV의 경우 비정상 유동장에서 보이는 주기성이 매우 뚜렷하게 나타나는 것이다. 같은 높이에 대해서, 다른 단면들에 비해 폭이 넓고 상단부의 형상이 돌출되어 있는 형상의 경우 유동 현상이 매우 복잡해 질 수 있음을 보여준다고 하겠다. 또한 이로부터 지면으로부터 약간 떨어져 있는 2차원 단면 형상에 대해 비정상 해석을 하는 것이 타당하다는 것도 증명이 된다. 여기서 일정한 주기로 진동을 하는 단면 모양의 경우에는 그 frequency가 다른 열차 구성 부분과 공진을 일으키는 경우가 생기지 않도록 주의해야 할 것이다.

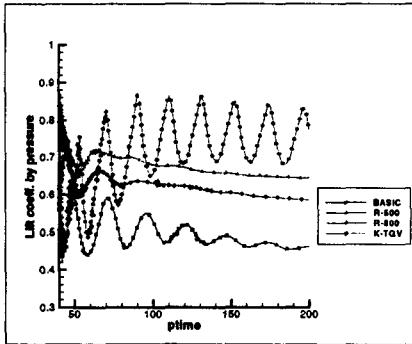


그림 10 Lift Coeff. by Pressure

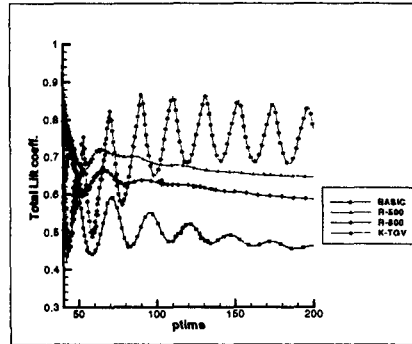


그림 11 Total Lift Coefficient

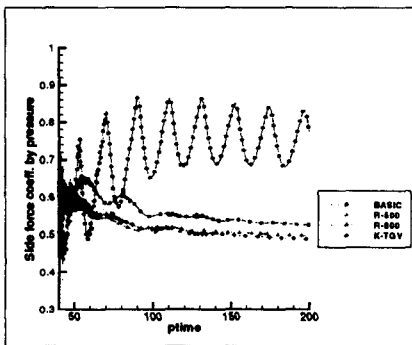


그림12 Side Force Coeff. by pressure

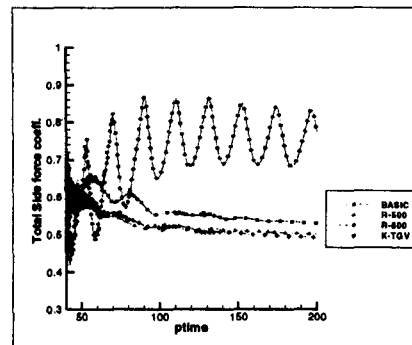


그림 13 Total Side Force Coeff.

Lift Coefficient에 대해서는 BASIC section의 경우가 가장 작은 값을 갖는 것으로 나타났으며, 그 다음으로 R-800 section, R-500 section 순으로 좋은 특성을 보여주는 것을 알 수 있다. 또, Side force Coefficient에 대해서는 R-800 section이 가장 작은 값을 가지며, R-500 section이 그보다 약간 크지만 거의 같은 값을 갖는다. 상대적으로, BASIC section의 경우가 Side force Coefficient면에서 좋지 못한 특성을 보여주고 있다.

그림 14는 축력계수와 부력계수에 대해 어떤 단면이 좋은 특성을 갖는지를 밝혀주고 있는 예이다.

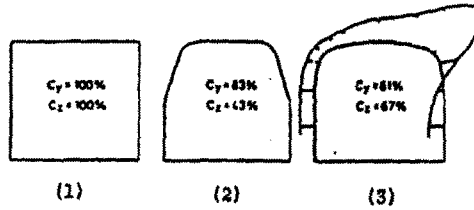


그림 14 측력계수와 부력계수의 감소를 위한  
단면형상최적화 : (2)최소부력,(3)최소측면력 [2]

그림 8을 보면 세 가지 단면 형상 모두 비슷한 모양의 지붕을 가지며, 상단의 양 모서리의 모양에서 형상의 차이가 나타남을 알 수 있다. 상대적으로 곡면으로 처리된 부분을 많이 갖는 BASIC sections의 경우, 다른 단면에 비해 기울어진 정도가 심한 측면벽을 갖는다고 할 수 있다. 이런 점에서 현재 연구의 대상이 되고 있는 세 가지 단면 형상 중에서 (2)에 가장 가까운 것이 BASIC section 이라고 할 수 있으며, BASIC section이 최소의 부력을 갖게 되는 것이다. 마찬가지로 방법으로 R-800 section, R-500 section의 순으로 부력에 대해 좋은 특성을 갖는다. 측력에 대해서는, 역시 세 단면 형상이 비슷한 모양의 지붕을 가졌다고 할 때, 측면벽이 동그랗게 튀어나온 정도가 그 성능을 좌우한다고 할 수 있다. 따라서 단면의 상단부에서 BASIC section에 대해 측면벽이 조금 더 튀어나온 R-500 section과 R-800 section이 측력에 대해 좋은 성능을 갖게 된다.

#### 4. 결론

지면에 가까이 붙어 있는 2차원 단면의 여러 형상이 갖는 부력(Lift)와 측력(Side force)에 대한 특성을 연구하여 정성적인 비교 결과를 얻어낼 수 있었으며, 세 가지 단면(BASIC/R-500/R-800) 중에서 부력에 대해서는 BASIC 단면이, 측력에 대해서는 R-500 단면과 R-800 단면이 좋은 특성을 나타냄을 확인하였다.

#### 5. 후기

본 연구는 G7 고속전철기술개발 2차년도 사업 중 II-1-3 과제 “공력설계, 해석기술 및 전두부 개발” 연구 결과의 일부임을 밝힙니다.

#### 참고문헌

1. 이보성, 이동호 (1998), “MPP에서의 효율적 분산처리를 위한 Data Parallel Symmetric Gauss-Seidel 알고리즘”, 한국항공우주학회지, 제26권 제2호
2. J.L. Peters (1983), “Aerodynamics of very high speed trains and maglev vehicles: State of the art and future potential,” International Journal of Vehicle Design, SP3
3. F.R. Mentor (1994), “Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications,” AIAA Journal, Vol.32, No.1, pp.1598-1605
4. Rogers, S.E., Kwak, D. (1990), “Upwind Differencing Scheme for the Time-Accurate Incompressible Navier-Stokes Equations,” AIAA Journal, Vol.28, No.2, pp.253-262
5. Wissink, A. M., Lyrantzis, A. S., Strawn, R. C. (1996), “Parallelization of a Three-Dimensional Solver for Euler Rotorcraft Aerodynamics Predictions,” AIAA Journal, Vol.34, No.10, 2276-2283