

# 고속열차의 선두부 형상에 따른 공력특성 변화

## Aerodynamic Characteristics for various front shapes of High Speed Train

이승철<sup>1</sup>, 김사량<sup>1</sup>, 허남진<sup>1</sup>  
S. C. Lee, S. L. Kim and N. Hur

A numerical analysis on the effect of the front shape on the aerodynamic characteristics of HST model is made, using FVM based general purpose 3D Navier-Stokes eq. solver, TURBO-3D program. Numerical solutions are compared with each case of different front shape for HST model. The result shows a good quantitative aerodynamic characteristic tendencies for variation of front shape of HST. Thus it may be used as a basis in the design of the shape of real HST.

### 1. 서론

20<sup>0</sup> 이후, 각종 교통기관의 급속한 발달로 인해 인류는 쾌속하고 안락하게 여행을 하고자하는 오랜 숙원이 가속화 되었고, 이에따른 기술개발 또한 가속화되어, 이미 선진국에서는 대량교통수요를 충족시키고 승차감을 향상시킬수 있는 고속 교통수단으로서 고속전철이 개발되어 실용화되었다. 이미 선진국에서는 고속전철에 대한 실험 및 수치해석을 통해 많은 고속전철의 최적설계를 위해 활발한 연구활동이 이루어지고 있다.[1-3]

국내에서도 선진국의 고속열차 도입을 결정하고 선로 및 역사를 건설중에 있다. 이에따라 국내에서도 고속전철에 대한 연구가 활발히 진행중에 있다. 양시영[4]은 고속운송체 주위의 3차원 유동구조 및 공력특성에 대해 연구하였고, 허남진등[5]은 고속전철이 천안역사를 통과할때 발생하는 풍압이 지붕등 역사에 미치는 영향에 대하여 수치해석 및 모델실험을 통하여 수행한 바 있다.

본 연구에서는 본 연구실에서 개발한 TURBO-3D프로그램을 이용하여, 고속열차의 선두부 형상을 변화에 따른 공력특성을 해석하였고, 이에따른 결과로부터 고속열차의 선두부 형상의 설계시 기초 형상설계에 응용 가능성을 보이고자 한다.

### 2. 모델 선정

본 연구에서 사용한 고속열차의 모델은 "Superellipses"의 함수로 이루어져 있다. 이 함수는 곡률이 연속적으로 이루어져 있어, 열차 앞부분에서 열차 몸통부분까지 표면 곡률이 불연속이 없이 연결되어 있다. 이런 방법은 독일의 ICE를 개발할 때 사용되었다.[6]

모델의 크기는 실제 고속열차의 약 1/40 정도이고, 열차 앞부분과 몸통부분, 그리고 열차 뒷부분으로 이루어져 있다. 열차 모델의 앞부분과 뒷부분은 같은 모양이며, 열차 몸통부분 단면이 일정한 실린더 모양으로 이루어져 있다. 열차의 전체 길이, 열차의 몸통, 열차의 앞부분 및 뒷부분은 각각 806mm, 194mm, 306mm 및 306mm이다. 그리고 열차 모델들은 지면으로부터 5mm 떨어져 있다. Fig.1의 (a), (b) 및 (c)는 각각 열차 앞부분의 수평 단면, 열차 몸통의 수직 단면 및 열차 앞부분의 수직 단면을 도시한 것이다. 이 그림들을 함수로 표현한 식은 다음과 같다.

열차 몸통 수직단면 곡선방정식;

$$\left(\frac{y_b}{b}\right)^4 + (z-d)^4 = 1, \text{ for } 0 \leq z \leq d$$

$$y_b = b, \text{ for } d \leq z \leq (H-d)$$

$$\left(\frac{y_b}{b}\right)^4 + \left(\frac{z-(H-d)}{d}\right)^4 = 1, \text{ for } (H-d) \leq z \leq H \tag{1}$$

열차 앞부분 수직단면 곡선방정식;

$$\left(1 - \frac{x}{l_k}\right)^4 + \left(1 - \frac{x}{l_k}\right)^2 \left(\frac{z/H-1/4}{3/4}\right)^2 + \left(\frac{z/H-1/4}{3/4}\right)^4 = 1 \tag{2}$$

1. 한국과학기술연구원 터보기계연구팀 (136-791, 서울 성북구 하월곡동 39-1, Tel: 02-958-5686)

열차 앞부분 수평단면 곡선방정식;

$$\left(1 - \frac{x}{l_k}\right)^4 + \left(\frac{y}{y_b}\right)^4 = 1 \quad (3)$$

윗식에서 사용된 변수  $H, b, d, x, y_b, y, z$  및  $l_k$ 는 각각 열차의 높이, 열차 몸통의 1/2, 열차 높이의 1/4,  $x$ 방향 좌표, 열차 몸통 수직단면에서  $y$ 방향 좌표, 열차 앞부분 수평단면에서  $y$ 방향 좌표,  $z$ 방향 좌표 및 열차 앞부분 수직단면에서 열차 맨 앞에서부터  $x$ 방향 좌표까지의 거리이다. 윗식을 기본으로 하여 변수  $l_k$ 와  $d$ 를 각각 바꾸어, 열차 앞부분의 형상을 변화시켰다. 형상변화에 사용된 각 변수의 값을 Table 1에 나타내었다. Fig. 2는 변수  $l_k$ 와  $d$ 를 바꾸었을때 고속열차 선두부형상을 3차원으로 나타낸 그림이다. 본 연구에서는 이와같은 5가지의 경우에 대해 형상 변화에 따른 공력특성을 비교하였다.

### 3. 지배방정식

본 연구에서 사용된 지배방정식은 비압축성 유체에 대한 정상상태의 Navier-Stokes 방정식으로 이 방정식들을 텐서형태로 나타내면 다음과 같다.

연속방정식;

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (4)$$

운동량 방정식;

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right) - \rho \overline{u_i' u_j'} \right] \quad (5)$$

난류운동에너지 방정식;

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G - \rho \epsilon \quad (6)$$

난류운동에너지 소산률 방정식;

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right] + (C_1 G - C_2 \rho \epsilon) \frac{\epsilon}{k} \quad (7)$$

상기방정식에서 생성항  $G$ 와 난류 동점성계수  $\mu_t$ 는 다음과 같다.

$$G = \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right), \quad \mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\epsilon} \quad (8)$$

표준  $k-\epsilon$  난류모델을 사용한 경우 다음과 같은 난류계수들을 사용하였다.

$$C_\mu=0.09, \sigma_k=1.0, \sigma_\epsilon=1.2, C_1=1.44, C_2=1.92 \quad (9)$$

RNG  $k-\epsilon$  난류모델을 사용한 경우 다음과 같은 난류계수들을 사용하였다.[7]

$$C_\mu=0.0845, \sigma_k=0.7179, \sigma_\epsilon=0.7179, C_1=1.42, C_2 = \left[ 1.68 - \frac{C_\mu \eta^3 (1 - \eta/\eta_0)}{1 + \beta \eta^3} \right] \quad (10)$$

난류상수  $C_2$ 에 나타나는 계수들은 아래와 같다.

$$\eta_0=4.38, \beta=0.012, \eta = S \cdot k/\epsilon, S = (2S_{ij}S_{ij})^{1/2}, S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (11)$$

본 연구에서 사용된 경계조건은 열차의 앞쪽면은 입구, 열차의 뒤쪽면은 출구, 열차의 상, 좌, 우측면은 대칭면 그리고 열차의 아랫쪽면은 벽면 경계조건이 각각 사용되었다. 입구면의 유입속도는 25m/s로 균일하게 주었고, 난류강도는 유속의 1%로 간주하였다. 또한 벽면에서는 벽합수를 사용하였다.

### 4. 수치해석 방법

본 논문에서는 대류항의 계산에 있어, 현재 가장 널리 쓰이고 있으며 안전성이 뛰어난 상류 차분법

(upwind differencing scheme)을 사용하였다. 압력장을 풀기 위해서는 연속방정식으로부터 압력을 계산할 수 있는 방정식을 유도하여 속도와 압력을 연관시켜 계산하는 Algorithm이 필요하며, 본 연구에서는 그 형태가 간단하고 가장 많이 사용되는 SIMPLE Algorithm[8]을 사용하였다. 또한 비엇물림격자(Non-staggered mesh)사용시 발생하는 압력의 decoupling 방지를 위하여 Rhie & Chow의 운동량 보간법[9]을 사용하였다. 최종적인 이산화방정식의 해를 구하기 위한 solver로는 속도 및 스칼라량 계산에는 SIP(Strongly Implicit Procedure)[10]를 사용하였고, 압력 계산에는 MCGM(Modified Conjugate Gradient Method)[11]을 사용하였다. 수치해석에 대한 상세한 내용은 참고문헌[12]을 참조하기 바란다.

## 5. 결과 및 검토

본 연구실에서 개발하고 있는 TURBO-3D를 이용하여 고속열차의 선두부 형상변화에 따른 공력특성에 대한 수치계산을 수행하였다. Fig. 5는 본 논문에서 사용한 계산격자중 standard case에 대해 나타낸 그림이다. 격자의 갯수는 각 방향에 대해서 158 x 49 x 35 이고 총 270970개의 격자를 사용하였다. 각각의 case에 대한 격자수 및 계산영역은 동일하다. 그리고 계산영역에서 열차의 앞부분, 열차의 뒷부분, 열차의 윗부분 및 열차의 옆부분은 각각 열차 길이에 1배, 2.5배, 열차 높이에 3.5배 및 열차폭의 5배로 하였으며, Fig. 5에서 보듯이 고속열차 주위와 벽근처에 격자를 밀집시켰다.

계산은 본 연구실에서 보유하고 있는 IRIS INDIGO2 Workstation(Main memory 96MByte)을 사용하였다. 계산시간은 매 iteration마다 2분이 소요되었고, 수렴판정조건으로는 입구에서의 운동량으로 정규화한 각 cell에서의 운동량 유수의 합과 연속방정식에서의 유수의 합이 모두  $10^{-3}$ 보다 작아질때로 정하였다.

### 5.1 선두부 형상에 따른 항력 계수 변화

Table 2는 고속열차의 선두부 형상과 난류모델을 변화시켰을때 각각의 항력계수를 나타낸 것이다. 첫째, 고속열차의 선두부형상을 변화시켰을때, 항력계수를 비교해보면 다음과 같다. case1의 경우, standard case비해 주방향 곡률이 커짐으로 인해 압력에 의한 항력계수는 16.7% 커졌지만, 열차의 표면적 감소로 인해 전단력에 의한 항력계수는 16.3% 감소함을 알 수 있다. case2의 경우는 standard case 비해 주방향 곡률이 완만하므로 압력에 의한 항력계수는 37.3%로 크게 작아진 반면, 열차의 표면적 증가로 전단력에 의한 항력계수는 5.2% 크게 나타남을 알 수 있다. case3과 case4의 경우는 standard case 비해 압력에 의한 항력계수는 4%미만, 전단력에 대한 항력계수는 3% 미만으로 그다지 큰차이를 보여주고 있지는 않다. 그러므로 Table 1에서와 같은 조건에 있어서, case1, case2와 같은 열차 선두부의 길이의 변화가 case3, case4와 같이 열차의 길이방향 수직단면 변화보다 항력계수에 있어서 더 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 둘째, standard case에 대해 서로 다른 난류모델을 사용하여 계산한 결과를 비교하면 다음과 같다. 표준  $k-\epsilon$ 난류모델을 사용했을때보다 RNG  $k-\epsilon$ 난류모델을 사용하였을때가 압력에 의한 항력계수 9.8%, 전단력에 의한 항력계수 3.0% 적게 나타남을 알 수 있다. 두 난류모델을 사용하였을때, 항력계수가 각각 차이가 나므로, 고속열차의 공력해석에 대한 수치계산시에는 고속열차의 공력해석에 적합한 난류모델을 사용하는 것이 타당하다고 사료된다. 또한 상용 CFD code인 STAR-CD를 사용한 결과 본 연구실에서 개발한 TURBO-3D의 계산결과 보다 압력에 의한 항력계수 6.2%, 전단력에 의한 항력계수 2.2%로 다소 크게 나타남을 알 수 있다.

### 5.2 선두부 형상에 따른 유동 특성

Fig. 6은 열차 뒷쪽(즉 열차후미로부터 열차길이의 1/2되는 지점)에 나타나는 후류에서 주유동방향의 와동들을 나타낸 그림이다. 그림에서 알 수 있듯이 열차의 윗면 및 측면에서 공기가 더욱 가속되며, 이와같이 가속된 공기는 물체의 중심부를 지나면서 점성으로 인한 경계층 형성 및 열차 후미부에서 축방향 곡률변화로 인하여 운동에너지가 다소 감소하기는 하나 열차 밑면에서 유출되는 공기의 운동에너지 보다는 매우 큰 상태를 유지하게 된다. 따라서 후미부 경사면이 시작되는 위치에서 열차 측면 및 윗면을 지나는 공기는 물체의 중심선을 향해 모여들게 되고 반면에 열차의 밑면과 바닥면사이를 지나면서 운동에너지가 감소되어 저위의 운동에너지를 갖는 공기 입자들은 열차후미 근처의 공기와 만나 열차 밑면을 따라 측면으로 유출된다. 이러한 유동형태는 후류로 갈수록 발달되어 결국, 열차 윗면 및 측면에서는 중심선을 향해 공기가 몰려들게 되고 이와같이 모여든 공기는 바닥면을 따라 측면으로 흐르게 된다. 그리고 바닥면 위를 지나 열차측면으로 흘러나온 공기는 열차측면 윗쪽으로 부터 유입된 공기와 만나 바닥면 아래로 흐르면서 커다란 와동형태를 띠게 된다. 그림에서 보듯이 case1의 경우 standard case에 비해 주방향 곡률이 크게 변하므로 그림에서와 같이 그 세기가 크게 나타남을 알 수 있고 case2의 경

우는 그 반대현상을 보여주고 있다. case3, case4는 standard case와 비교하여 볼때 주방향 곡률 변화가 적으므로 큰 차이가 없음을 보여주고 있다. Fig. 7은 열차후미로부터 열차길이의 1배되는 지점에서의 주방향 와동들을 나타낸 그림이다. 이 그림은 Fig. 6과 유사한 경향을 보여주고 있으며, 그 크기가 다소 감소됨을 알 수 있다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 KIST의 TURBO-3D 프로그램을 이용하여 고속열차의 선두부 형상변화에 따른 공력특성에 대한 수치계산을 수행하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. TURBO-3D 프로그램이 고속전철의 공력해석에 대한 수치계산이 가능함을 알 수 있었고, 고속열차의 선두부 형상변화에 따라 공력특성을 정량적으로 잘 해석하고 있음을 알 수 있었다.
2. 본 연구에서 사용한 고속열차의 선두부 형상 모델에 있어서, 열차 길이 방향에 대한 선두부 형상 변화가 열차 몸통의 수직단면 형상 변화보다 항력계수에 미치는 영향이 더 큼을 알 수 있었다.
3. 본 연구에서는 두가지 난류모델을 이용하여 계산을 수행하였다. 그 결과 서로 다른 결과를 보여주고 있다. 난류모델의 영향에 대한 지속적인 연구가 필요하다고 사료된다.

## 후 기

본 연구는 고속전철 국책연구개발사업의 일환인 고속전철 차량시스템의 기계기술개발의 하나로 고속전철 공력해석 S/W 개발과제의 일부로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분들께 사의를 표한다.

## 참고문헌

- [1] Kazuya, K. and Nobuharu, M., (1993), 일본 토목학회논문집, No. 458/IV-18, pp. 137-145.
- [2] Massbernat, F. et al., (1993) "CFD Aerodynamics of the French High-Speed Train," GEC ALSTHOM Technical Review 11.
- [3] Aita, S. et al., (1992) "CFD Aerodynamics of the French High-Speed Train" SAE Paper, 920343
- [4] 양시영, (1994) "고속 운송체에 대한 3차원 비압축성 유동 및 공력특성에 관한 수치적 연구" 박사학위논문, 한양대학교, 서울.
- [5] 허남건, 외 4인, (1995) "경부 고속철도 천안역사 풍압연구 보고서", 한국과학기술연구원 보고서, 한국과학기술연구원.
- [6] P. A. Mackrodt, J. Steinheuer, G. Stoffers, (1980) "Aerodynamisch optimal Kopfformen fur Triebzuge", DFVLR.
- [7] STAR-CD, Version 2.2 Manual, Computational Dynamics LTD., 1994.
- [8] Patankar S. V., (1980) Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Hemisphere, Washington DC, pp.120-125.
- [9] Rhie, C. M. and Chow, W. L.,(1983) "Numerical Study of the Turbulent Flow past an Airfoil with Trailing Edge Separation," AIAA, vol. 21, pp. 1525-1535.
- [10] Stone, H. L., (1968) "Iterative Solution of Implicitt Approximations of Multidimensional Partial Differential Equations," SIAM J. Numer. Anal. vol. 5, No. 3, pp. 530-558.
- [11] Charn-Jung Kim and Sung Tack Ro, (1995) " An Efficient and Robust Matrix Solver for The Pressure Correction Equations in Two-and Three-Dimensional Fluid Flow Problem", Numer. Heat Tran., Part B, Vol. 27, pp. 355-369.
- [12] 허남건, 조원국, 윤성영, 김광호, (1994) "일반 비직교좌표계를 사용하는 3차원 범용 유동해석 프로그램의 개발", 대한기계학회논문집, 제18권, 제12호, pp. 3345 - 3356.

Table 1. Each variable for front shape variation

(unit=mm)

variable case	H	b	d	$l_k$
stan. case	102	36.25	H/4	3/2 H
case 1	102	36.25	H/4	H
case 2	102	36.25	H/4	2 H
case 3	102	36.25	H/2	3/2 H
case 4	102	36.25	H/8	3/2 H

Table 2. Drag coefficient of front shape variation for high speed train

	turbulent model	$C_{D,p}$	$C_{D,f}$	$C_D$
standard case	stan. $k-\epsilon$	0.276	0.135	0.411
	stan. $k-\epsilon^*$	0.293	0.138	0.431
	RNG $k-\epsilon$	0.249	0.131	0.380
case1	stan. $k-\epsilon$	0.322	0.113	0.435
case2	stan. $k-\epsilon$	0.173	0.142	0.315
case3	stan. $k-\epsilon$	0.279	0.133	0.412
case4	stan. $k-\epsilon$	0.265	0.139	0.404

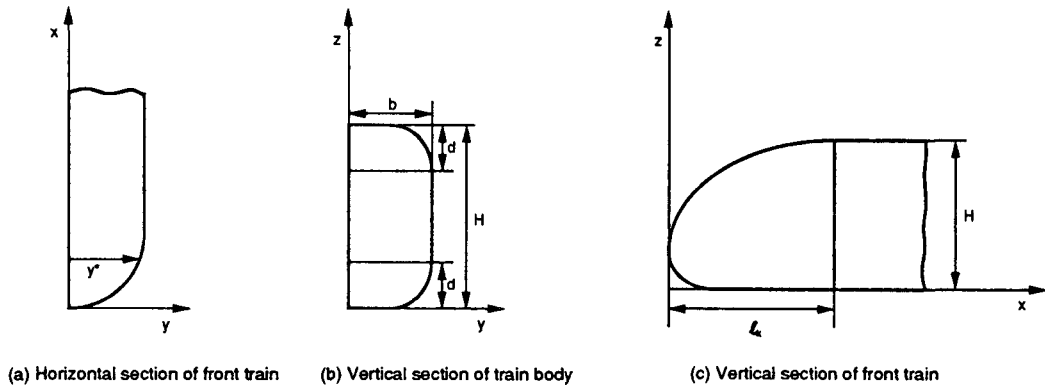


Fig. 1 Schematic diagram of high speed train

\* using STAR-CD

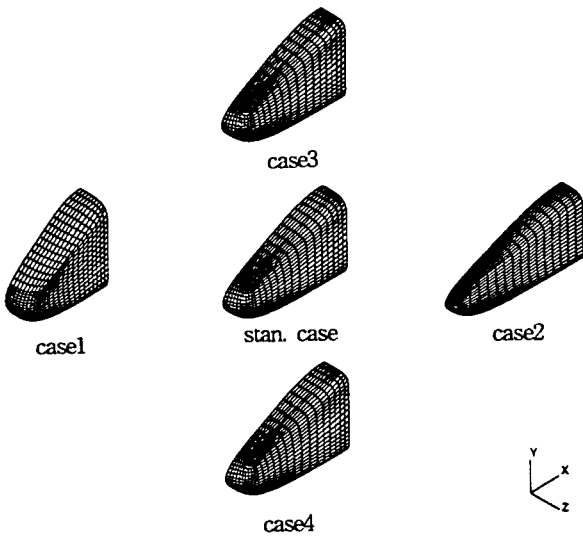


Fig. 2 Front shape of high speed train models

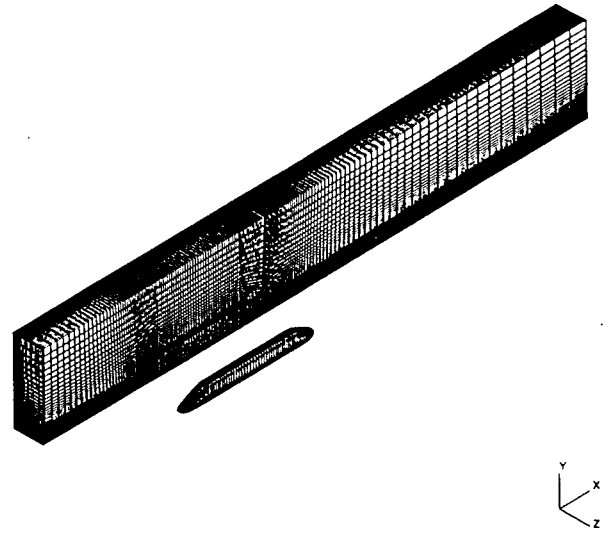


Fig. 3 Computational mesh of standard case

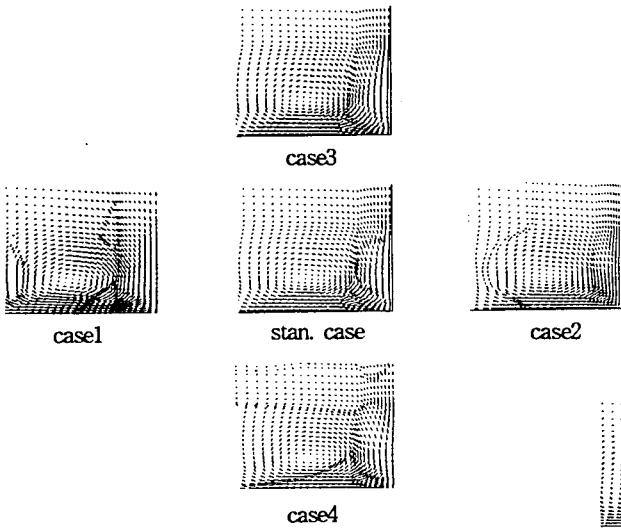


Fig. 4 Trailing vortices behind 50% of high speed train length

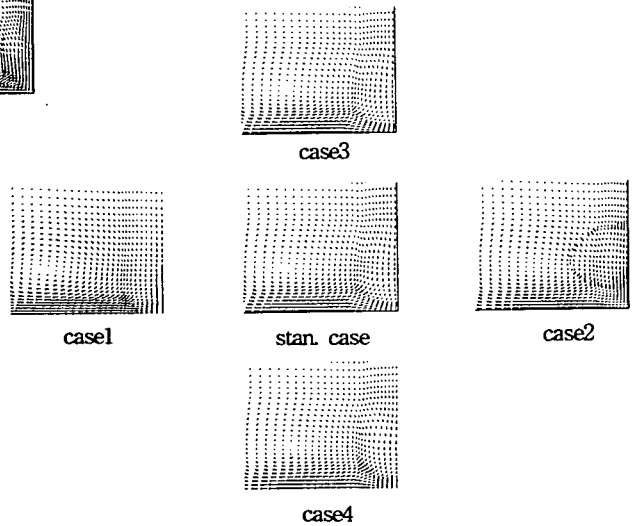


Fig. 5 Trailing vortices behind 100% of high speed train length