

## 고속전철 판토틀라프의 팬헤드 단면모델에 대한 공력특성 해석

조운기\* · 이종수\*\*

Aerodynamic Characteristics of Pantograph Panhead Sections  
in High Speed Railway

Woonki Cho\*, Jongsoo Lee\*\*

**Key Words :** Pantograph(판토틀라프), Panhead Section(팬헤드 단면), Thin Plate(박판), Aerodynamic Coefficients(공력계수), CFD Simulation(전산유체 수치해석)

## Abstract

The paper presents an improved way of aerodynamic quality in Korean Very High Speed Railway. The pantograph model being under development dissatisfies the required grade of aerodynamic lift force. So the present work proposes modified configurations of panheads to maintain consistent aerodynamic characteristics. Analysis has been performed using commercial CFD program. Simulation based analysis has been conducted with two different models. One is to attach the thin plate on the crossbar and the other is the use of trapezoidal cross section in contact strip. Various length of thin plate is simulated for flow velocity and acceptable value of plate length is selected which satisfy the necessary average lift force. Aerodynamic variation on the panheads strip is studied.

## 1. 서론

판토틀라프(Pantograph)는 고속전철 동력차량의 지붕위에 설치되어 주행에너지를 공급하는 중요한 역할을 담당하고 있다. 전력인입은 전력선과의 접촉을 통해 이루어지며, 이를 위해 일정한 압상력(aerodynamic lift force)을 가해준 상태에서부터 주행을 시작하여, 고속주행시에는 일정한 수준의 공기역학적 하중이 전체 압상력에 기여하게 된다<sup>(1)</sup>. 따라서 유동상태에 따른 공력하중이 중요한 변수로 접촉상태에 영향을 미치게 되므로, 지속적인 전력 확보와 주행 측면에서 공기역학적 안정성이 확보되어야 한다. 현재 개발중인 한국형 고속전철의 경우, 수행되어온 연구결과에 의하면 가선과의 접촉부분인 panhead strip의 고속주행시 발생하는 압상력이 음의 값이 나오는 결과를 보여주고 있다<sup>(2)</sup>. 이는 panhead sections 주요 단면들의 배열위치 및

형상에 기인한 것이며<sup>(3)</sup> 본 논문에서는 새로운 단면형상을 제안, 해석함으로써 공력특성을 개선해 보고자 한다. 기존의 연구결과에 의하면 전력선 부근 주요 단면형상에 대한 2차원 수치해석 방법이 연구 중 수행된 풍동시험 결과에 비추어 해석하는데 별 무리가 없는 것으로 판단되었다<sup>(3)</sup>. 본 연구에서는 상용 유동해석 프로그램인 Fluent solver<sup>(4)</sup>를 이용하여 양력발생이라는 공력학적 매커니즘을 구현하기 위해 기존 유동시험에서의 결과를 바탕으로 박판을 추가한 경우에 대해 박판의 길이변화에 대한 유동변화를 살펴보고, 가선과의 접촉부인 strip의 단면변화를 통한 개선효과도 한 고려하였다.

판토틀라프의 안정적 전력인입이라는 목적에 부합하기 위해서는 유동속도변화에 무관하여 일정한 압상력을 유지하고, 배열되어 있는 strip의 형상이 고속전철의 주행조건상 전후 대칭이어야 하며 각 strip의 압상력이 유사한 수준을 지녀야 한다. 이러한 전제를 바탕으로 우선 strip 평균 공력특성에 대한 해석 후 각 strip 주변에서의 유동변화에 대해 고찰해 보았다.

\* 연세대학교 대학원 기계공학과

\*\* 연세대학교 기계전자 공학부

TEL) 2123-4474, EMAIL) jleej@yonsei.ac.kr

## 2. 판토히라프 유동해석

### 2.1 이상화된 판토히라프 모델

주행시 가선과의 접촉상태에 유동적 영향을 미치는 주요 부품으로 판토히라프 상부에 위치한 panhead strip, crossbar 를 주 고려대상으로 삼았다. Strip 은 전력선과 직접 접촉하는 직사각단면 형상의 부품으로 유동방향에 전후로 직렬 배치되어 있으며, strip 사이 아래부분에 원형단면의 crossbar 가 위치되어 있다.

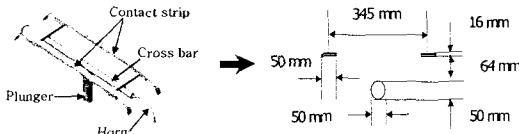


Fig. 1 Model simplification of upper part of pantograph panhead sections

이와 같은 단면형상의 배열은 고속주행시 난류발생으로 인한 복잡한 3 차원 유동을 발생시키게 되지만, span 방향으로의 형상변화가 없고 주변물체의 유동영향이 적은점을 감안하여 2 차원 수치해석을 수행하였다<sup>(3)</sup>.

### 2.2 유동장 해석 및 결과

판토히라프는 차량 최상부에 위치하므로 주행시 열차의 주행속도에 해당하는 공기흐름 내에 존재하게 된다. 유동장의 해석은 단면이 횡방향으로 2 차원 비정상 유동장에 놓인 경우에 대해 이루어졌다. 해석도구로는 유한체적법(Finite Volume Method)을 기반으로 하는 상용프로그램을 이용하였으며 2 차원, 점성(viscous), 압축성(compressible), 비정상(unsteady), 난류모델로는 2 equation 방법 중 하나인 standard k-ε model, 단면에는 벽면 점착 조건(non-slip condition), 목표 주행속도 350km/h 에 중점을 두고 해석을 수행하였으며, 유동을 지배하는 식 (1)의 질량보존(mass conservation) 및 식 (2)의 운동량보존(momentum conservation) 방정식을 기반으로 식 (3)의 연성된(coupled) 수치기법을 이용하여 계산하였다<sup>(4)</sup>.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

$\rho$  = density

$u_i$  = velocity in the i-direction

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i + F_i$$

(2)

$p$  = static pressure

$$\tau_{ij} = \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right]; \text{ stress tensor}$$

$\rho g_i$  = gravitational body force

$F_i$  = external body force

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V W dV + \oint_V [F - G] \cdot dA = \int_V H dV \quad (3)$$

where,

$$W = \begin{Bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho w \\ \rho E \end{Bmatrix}, F = \begin{Bmatrix} \rho v \\ \rho v u + p \hat{i} \\ \rho v v + p \hat{j} \\ \rho v w + p \hat{k} \\ \rho v E + p v \end{Bmatrix}, G = \begin{Bmatrix} 0 \\ \tau_{xi} \\ \tau_{yi} \\ \tau_{zi} \\ \tau_{ij} v_j + q \end{Bmatrix}$$

시뮬레이션 결과 중 저속유동일 경우에 대해 실제 모델을 이용한 저속풍동시험과 비교하였으며 Table.1 에서 모델설정 및 해석결과가 실제환경을 비교적 잘 모사했음을 확인할 수 있다<sup>(2)</sup>. 해석 및 시험의 주된 관심은 전력선과의 접촉률과 관련된 strip 의 공력특성이며, 고려 인자로는 양력 및 항력계수, 양력[N]을 유동속도[km/h] 제곱으로 나누어준 공력압상계수(Aerodynamic Pressure Coefficient, APC [N/(km/h)<sup>2</sup>])를 사용하였다<sup>(5)</sup>.

Table. 1 Results comparison between wind tunnel & computer simulation

U [Km/h]	Angle of attack [degrec]	Wind tunnel test [kgf]	Simulation [kgf]
120	0	-0.961	-0.659
	0	-0.754	
	0	-0.791	
	+3	-0.076	0.068
	+3	0.060	
150	0	-1.480	-1.067
	0	-1.134	
	0	-1.124	
	+3	-0.136	0.983
	+3	0.180	
180	0	-2.129	0.068
	0	-1.788	
	0	-1.750	
	+3	-0.249	-0.825
	+3	0.135	

일본에서 개발되었던 판토히라프의 압상력은 유동속도 300km/h 에서 약 20~25N 을 요구하고 있다<sup>(6)</sup>. 이를 공력압상계수로 환산해보면 약  $2.22 \times 10^{-4} \sim 2.78 \times 10^{-4}$  이며, 본 연구에서는 이 값을 요구되는 공력압상력의 기준으로 삼았다. Table.1 에서 수행된 시뮬레이션 및 시험결과<sup>(2)</sup>를 살펴보면, 대부분

의 경우 음의 양력값으로 요구 압상력에 미치지 못하는 결과를 보여주고 있으며, 이는 공력학적 측면에서 단면형상이 부적합함을 보여주고 있다. 상하대칭이며 직렬배열된 단면형상인 경우 양력계수가 거의 0인 결과<sup>(7)</sup>를 고려해 볼 때, 위와 같은 결과는 strip 하부의 crossbar 로 인한 유동장 변화에 기인하는 것으로 판단된다. 즉, strip 과 crossbar 사이의 중간영역이 상대적으로 나머지 유동장에 비해 협소하여 유동이 가속되어 발생하는 결과라고 판단되며<sup>(8)</sup>, 이러한 근거를 바탕으로 풍동시험 중 crossbar 상부에 박판(thin plate)이 존재할 경우에 대한 해석이 추가되었고, 양의 양력값이 발생하는 유동변화가 포착되었다. 풍동시험 중 박판이 부착된 경우와 이를 2 차원 시뮬레이션 한 결과를 Fig. 2 에서 확인할 수 있다. 풍동시험과 시뮬레이션의 공력압상계수값은 어느 정도 차이를 보이고 있으나, 이를 통한 정성적인 판단에는 무리가 없을 것이다.

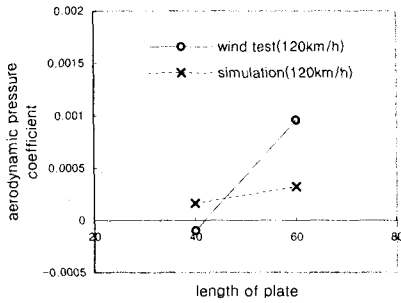


Fig. 2 Wind test results & simulation for U=120km/h

이는 박판과 같은 단면형상 변화에 의해 판토틀라프 공력특성을 개선할 수 있는 여지가 있음을 입증해주는 결과이며, 본 연구에서는 위 결과를 바탕으로 공력압상력의 요구수준에 적합한 유동단면형상을 제안하고자 다음과 같은 두 가지 단면형상을 제고해 보았다. 우선은 풍동시험결과를 근거로 하여 박판의 길이를 strip 간격 내에서 변화시킨 경우이고, 두번째는 직사각단면의 strip 형상을 변화시킨 것이다. 양력 발생을 만족시키기 위해 직사각에서 아래면이 짧은 사다리꼴의 상하 비대칭형상을 선택하였고, 사다리꼴의 상/하변의 길이비를 변화시켜 이 또한 요구수준에 적합한 형상을 탐색하고자 하였다.

### 3. 수정된 단면모델

#### 3.1 박판(thin plate)부착 모델

박판의 길이는 crossbar 중심과 strip 간의 거리를

6 가지로 나누고, 박판을 부착하지 않은 경우를 추가하여 Fig. 3 과 같이 생성하였다. 여기서  $L_p$  는 thin plate 의 길이, D 는 crossbar 의 직경, L 은 panhead strip 간의 거리를 뜻한다.

Case	condition	$L_p$ [mm]
0	No plate	0
1	$L_p < D$	25
2	$L_p = D$	50
3	$D < L_p < L/2$	100
4	$L_p = L/2$	147.5
5	$L/2 < L_p < L$	221.25
6	$L_p = L$	295

Fig. 3 Cases of various thin plate

실제 유동조건에서의 3 차원 효과를 고려하여 박판과 crossbar 의 연결부를 제거한 형태로 가정하였고, 본 연구에서는 단면형상에 의한 유동변화에 주안을 두고 있으므로 공기-단면형상 간의 연성효과는 고려하지 않았다. 수치적 해석을 위한 유동장 격자구조 및 경계조건은 Fig. 4 와 같다. 해석의 경계는 원방 경계면 제한에 의한 부정확성 및 계산시간에 대한 시행착오를 거친 뒤 선택되었으며, 단면부근에는 상세유동을 포착하기 위해 격자를 집중해 주었다. 전체 모델의 평균 노드수는 33560 개, 요소의 수는 33050 개, face 는 65580 개 이다.

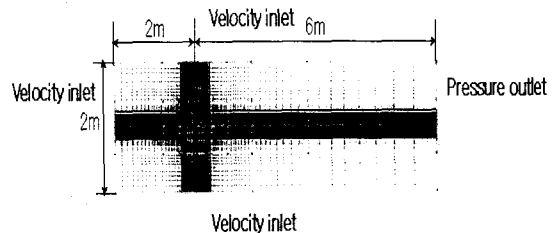


Fig. 4 Computational grid and boundary condition

### 3.2 사다리꼴 Panhead strip 모델

본 모델의 경우에는 공력특성을 변화시키는 인자로 Fig. 5와 같이 단면 상하 길이의 비를 선정하였으며, strip 단면변화의 효과만을 살펴보기 위해 박판이 없는 경우 유동속도 350km/h에 대하여 시뮬레이션을 수행하였다. 단면 상하 길이의 비 및 해석결과는 4.2 절에 언급하였다.

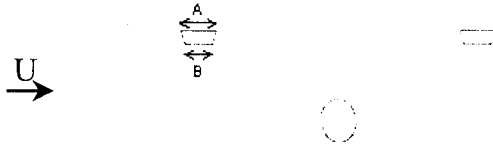


Fig. 5 Trapezoidal sections

## 4. 유동해석결과

### 4.1 박판부착 모델

유동속도변화에 따른 단면주위의 유동특성을 살펴보기 위해  $U = 120\text{km/h}$ ,  $180\text{km/h}$ ,  $300\text{km/h}$ ,  $350\text{km/h}$ 에 따른 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 6은 유속  $300\text{km/h}$ 에서의 case0과 case3의 velocity contour를 보여주고 있다. 레이놀즈수(Reynolds number)는 약  $1.1 \times 10^5 \sim 3.3 \times 10^5$ 이다.

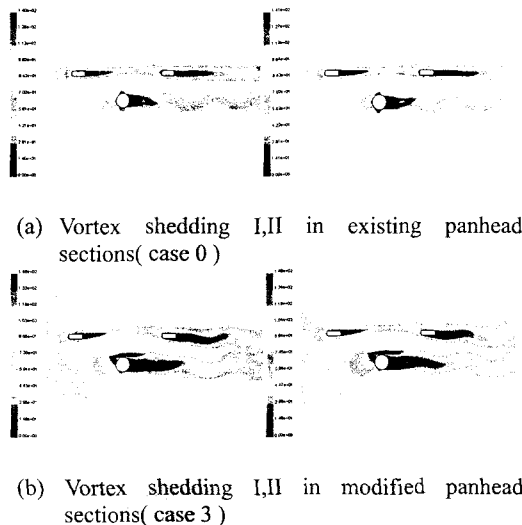


Fig. 6 Velocity contours around the pantograph

(a),(b)를 비교해보면, 난류의 영향으로 단면 후방 지역에서 공통적으로 vortex shedding이 발생하고 있으며, (b)의 경우 박판에 의해 crossbar 후방의 유

속이 (a)에 비해 감소함을 확인할 수 있다. Strip과 crossbar 사이의 중간영역과 유동 후방에 위치한 strip 하류 속도장 변화는 곧 유동압력변화에 의한 공력변화가 발생함을 의미한다고 할 수 있다. 박판에 의한 유동장의 변화는 박판의 길이에 따른 유동해석을 통해 좀더 상세하게 설명될 수 있을 것이다. 박판의 길이 변화에 따른 유동속도별 공력특성을 양력 및 항력 계수를 통해 해석하였고, 공력압상력의 적합수준에 대한 경향을 살펴보기 위해 공력압상계수를 이용하여 해석해 보았다. Fig. 7은  $300\text{km/h}$ 에서의 panheads 부분의 양력 및 항력계수의 변화를 보여주고 있다.

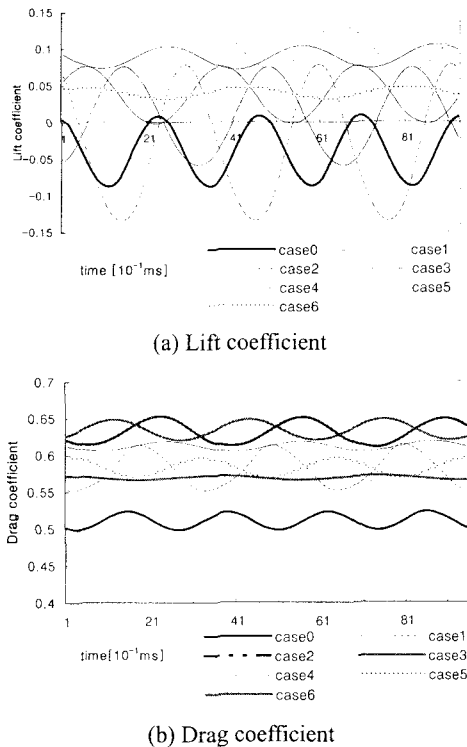


Fig. 7 Variations in Aerodynamic Coefficient for  $U = 300\text{km/h}$

박판의 길이변화에 대한 유동속도별 공력압상계수의 변화는 Fig. 8에서 확인할 수 있다. 박판의 길이에 대한 공력압상계수의 구배가 존재하며, 유동속도별로 비슷한 경향을 보이고 있다. Fig. 9 내의 실선구간의 uplift region은 앞서 기준으로 삼았던 판토히도그래프에서 요구하는 공력압상력 구간으로, 박판의 대칭길이(half length of plate)가 case3과 case4 사이 영역에서 만족시키는 결과를 보여준다. 이는 수치적 해석결과지만 박판 부착으로 인한 공력장변화에 대한 경향을 제공하는 데는 무리가 없다고 판단된다.

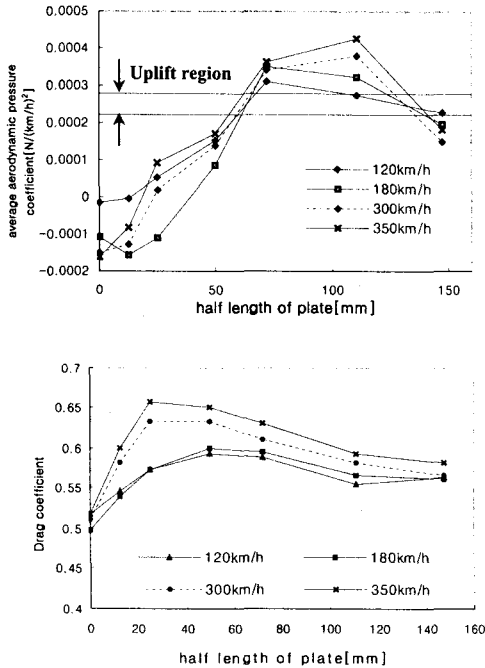


Fig. 8 Aerodynamics characteristics for the length of thinplate(computer simulation)

위 결과를 바탕으로 case3 과 case4 구간을 case3 을 기준하여 5mm 간격으로 세분화하고 유속 250km/h 경우를 추가하여 시뮬레이션을 수행한 결과를 Fig. 9 에 나타내었다.

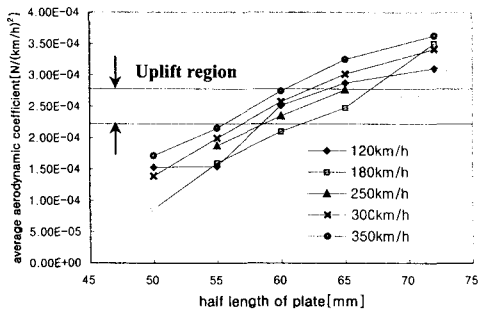


Fig. 9 Simulation result from subdivided section between case3 and case4

시뮬레이션 결과 120km/h 의 유동속도 이상에서는, 박판이 120mm 일 경우 기준으로 삼은 공력압상력 조건에 적합한 양력을 발생하는 것으로 예측되었다. 이러한 결과는 cross bar 상부에 박판이 위치함으로써 주변 기류에 속도와 압력변화를 발생시키고 이는 곧 주위 공기흐름에 압력요란을 일으키게 되어, 아음속일 경우 음속으로 전파되는 압력요란

에 의해 전후로 배열된 strip 에 영향을 주는 것으로 예측된다.

#### 4.2 사다리꼴 panhead strip 모델

주변물체에 의한 기류변화에 의존하지 않고 panhead 단면형상변화를 최소화 시키면서 양력을 유발하기 위한 형상으로 단면 상면(upper part)에서 기류의 속도가 증가할 수 있도록 하면(lower part) 길이를 줄여가며 시뮬레이션을 수행하였다. 기존 형상의 해석결과와 비교하여 strip 아래면의 유속이 감소되는 속도장 변화를 Fig. 10 을 통해 확인할 수 있다.

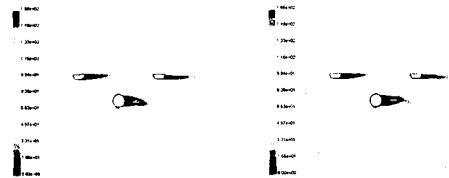


Fig. 10 Vortex shedding I, II in trapezoidal panhead section

Fig. 11 은 panhead 아래면 길이의 증가에 따른 공력압상계수의 변화를 보여주고 있다. 박판모델과 비교하여 공력압상계수가 증가함을 확인할 수 있으며, 이는 박판모델보다 panhead 단면 자체의 변화가 압상력 개선 측면에서 더 효과적인 것으로 예측된다. 본 모델의 경우 case 4 인 아래변 양 끝이 2mm 짧은 사다리꼴의 경우 기준이 되는 공력압상계수의 범위를 만족시키고 있다.

Case	B/A	Average APC
1	0.76	0.000609882
2	0.8	0.00052069
3	0.84	0.000441282
4	0.88	0.000352589
5	0.92	0.000254904

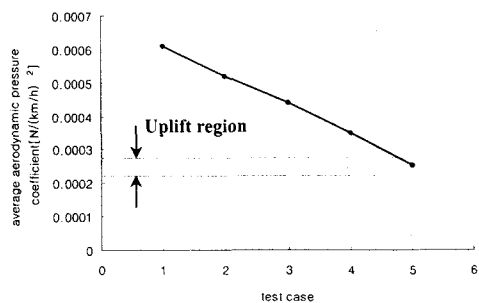


Fig. 11 Trapezoidal panhead section measurement and simulation result

이상에서 살펴본 두가지 단면변화 모델 중 압상력 상승측면에서는 사다리꼴단면 strip의 경우가 효과적인 것으로 예측된다. 하지만 기계적 메커니즘을 이용한 단면형상 변화가 가능하다면 strip 단면형상 변화보다 박판의 길이조절이 보다 용이하며, 받음각이 있는 유동, 터널 진출입, 태풍 등과 같은 가혹환경을 고려해볼 때 박판길이조절을 통하여 공력특성제어가 가능할 것으로 예측된다.

### 5. Strip 각각의 공력특성

앞서 언급했던 바와 같이 공력 압상력은 전후 strip 각각에 대해 고려되어야 한다. Fig.12 에서 박판부착된 모델에서의 유속 350km/h 에서 발생하는 strip 각각의 양력을 살펴보면, 양력상승은 유동 전방에 놓여있는 strip 이 주도적인 역할을 하고 있는 것으로 예측되었다. Case2 이후 판의 길이와 양력 값은 전후 strip 이 서로 반대의 구배를 보이고 있으며, 3 절에서 예측된 60mm 부근의 경우 front strip 은 25N 이상의 양력을, rear strip 은 음의 값을 보이고 있다.

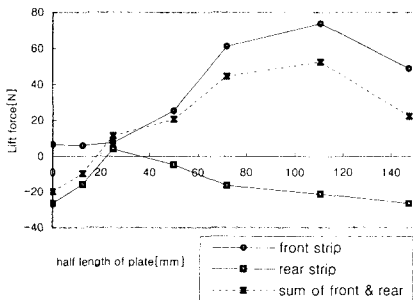


Fig. 12 Lift force of each strip arranged in front and rear

이러한 유동특성은 유동전방으로의 박판길이 증가에 의한 공력장 변화는 front strip 의 양력발생에 도움을 주지만, 후방에서의 길이 증가는 rear strip 에 음의 양력 증가를 일으키는 것을 의미한다. 하지만 이러한 경향은 시뮬레이션에 의한 수치예측 결과 이므로 정량적인 판단에는 무리가 있고, 판토히아프에서의 strip 과 crossbar 사이 연결부위의 stiffness 와 주행시 압상력의 허용오차등을 고려한다면 실제 주행시에는 허용 가능한 주행조건범위를 만족시킬 수 있다. 하지만, 현재로는 이러한 판단에는 성급함이 있으며 앞으로 추가적인 연구가 뒷받침되어야 할 것이다.

### 6. 결론

한국형 고속전철의 정속주행시 판토히아프에서 요구되는 공력압상력에 적합한 단면형상으로 crossbar 상부에 박판을 부착할 경우와 panhead 단면의 아래면이 짧은 역사다리꼴일 경우를 선정하여 수치해석적 결과를 도출하였다. 박판은 60mm 일 경우, 사다리꼴의 경우 아래면 양 끝이 2mm 짧은 경우 주행속도 300km/h 에서 요구하는 20~25N 의 공력압상력에 적합한 수준의 공력특성 값을 갖는 것으로 예측되었다. Panhead strip 각각의 경우에서는 박판모델의 경우 유동 전방의 strip 이 양의 양력값에 주도적인 역할을 한다. 압상력 증가 측면에서는 역사다리꼴 strip 단면이 박판모델에 비해 효과적이지만, 가혹환경등에 대한 능동적 유동장 제어 측면에서는 박판부착모델이 더 실효성이 있을 것으로 예측된다.

### 참고문헌

- (1) 판토히아프 개발, 1998, “고속전철기술개발사업 2 차년도 연차보고서”, pp. 33-44, 건설교통부, 산업자원부, 과학기술부.
- (2) 판토히아프 개발(II-2-1-10), 2000, “일본에서의 성능시험 결과”, 수송기기연구팀, 생산기술연구원, pp. 5-9.
- (3) 김우석, 유정근, 이종수, 정경렬, 2000, “판토히아프 팬헤드 주변에서 발생하는 유동 및 소음특성에 관한 수치적 해석,” 2000년 대한기계학회 동역학 및 제어부문 하계학술대회 논문집.
- (4) FLUENT Solver User Guide, 1998, Fluent Inc., Lebanon, NH, chapter 8, pp. 1-5, chapter 17, pp.1-32.
- (5) Robert D.Blevins, 1984, Applied Fluid Dynamics Handbook, Van Nostrand Reinhold Company.
- (6) Tetsujii Ahshima and Shigeo Suzuki, 1989, “Wind Tunnel Test of Pantograph,” 東洋電機技報 第 73 號, pp. 7-10.
- (7) Jungkeun Yoo and Jongsoo Lee, 2000, “Prediction of aeroacoustic noise generated by viscous flow around rectangular cross sections”, AIAA Paper No. 2000-1487.
- (8) Robert W. Fox and Alan T.McDonald, 1994, Introduction to Fluid Mechanics, fourth edition, John Wiley & Sons, Inc.