

## 판토히래프 가혹공력하중에 대한 연구

황재호\* · 이동호\*\* · 정경렬\*\*\*

### Investigation on Severe Aerodynamic Load Condition about Pantograph

Jaeho Hwang, Dong-Ho Lee and Kyung-Ryul Chung

**Key Words:** High Speed Train(고속전철), Pantograph(판토히래프), Aerodynamic Load(공력하중), Side Wind(측풍), Train/Tunnel Interaction(열차/터널 상호작용), Train/Train Interaction(열차/열차 상호작용), Wind Tunnel Test(풍동시험)

#### Abstract

The present study describes a practical estimation procedure about the pantograph under several severe aerodynamic load conditions. As the operating speed of the Korean Train Express(KTX) reaches 350km/h, structural safety at various conditions should be examined at the design stage. In the present study, a compact and reliable procedure is developed to get aerodynamic loads on each part of the pantograph regarding the typhoon condition, the train/tunnel interaction, the train/train interaction and the side wind condition. In the estimation procedure, 3-dimensional steady and unsteady CFD simulation around the high speed train facilitates assigning the external local flow condition around the pantograph. The procedure is verified using the results of the low speed wind tunnel test at JARI and applied to 7 flow conditions and 4 operation configurations.

기호설명

**English Symbols**

- $C_{AL}^k$  Aerodynamic load coefficient
- $C_d^k$  Drag coefficient of given section
- $S^k$  Reference length of given section
- $L^k$  Spanwise length of given body
- $\vec{F}^k$  Aerodynamic force
- $\vec{F}_p^k$  Force by pressure step
- $\vec{F}^{k*}$  Weighted aerodynamic force
- $\vec{V}$  Local velocity at given condition
- $\vec{V}_n^k$  Normal velocity component

- $\vec{x}^k$  Position vector of given body
- $W_a^k$  Amplification correction factor
- $W_b^k$  Boundary layer correction factor
- $W_i^k$  Interference correction factor

**Superscripts**

- $k$  k th component
- $*$  Weighted value

#### 1. 서론

사회적 요구와 기술의 발전에 의해 세계 10여 개국 이상의 국가가 정상주행속도 300km/h 이상 급의 고속전철을 개발중이거나 준비중이며<sup>(1)</sup>, 국내에서도 1996년부터 현재까지 주행속도 350km/h 급의 한국형 고속전철(KTX) 개발을 추진중이다.<sup>(2)</sup> 이러한 열차의 속도의 증가와 함께 공기역학의 열차개발의 다양한 분야에서 주도적인 역할을 하게 되는데, 이는 공기역학적 조건이 열차의 모터, 현가장치, 운행비용, 안전성, 안락성, 환경적 요소를 결정짓는 요소이기 때문이다.<sup>(3)</sup>

특히, 가선계(catenary system)로부터 동력차량에

\* 서울대학교 대학원 항공우주공학과  
 \*\* 서울대학교 기계항공공학부  
 \*\*\* 한국생산기술연구원 수송기기연구팀

전력을 공급하여 주는 판토크래프는, 차량으로부터 뿜출된 복잡한 형상을 가지게 되어 전체차량 편성시 열차에 작용하는 총저항의 4-5%의 저항을 작용하기도 하며<sup>(3)</sup>, 특정톤의 강한 공력소음의 원인으로 지적된다.<sup>(2)</sup> 판토크래프의 전체 저항과 소음특성 대하여는 실험적, 수치적으로 많은 연구가 진행된 바 있으나, 설계단계에서 구조적 안정성 검증해석을 위한 공력해석 연구는 보고된 바 없다.

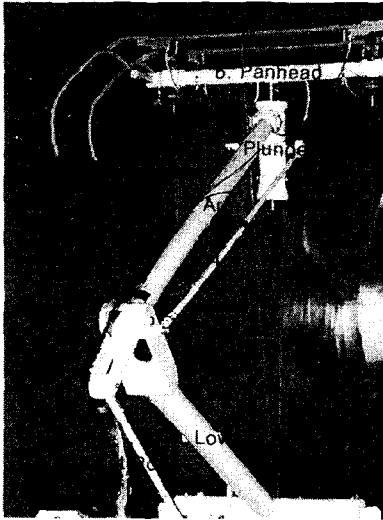


Fig. 1 Pantograph and main parts

Table. 1 판토크래프 운행형상조건

Theta(deg)	형상조건
5.5	접은 위치(housed position)
23	최저 집전높이
27	평균 집전높이
31	최고 집전높이

본 연구는 판토크래프 설계단계의 구조안정성 검증을 위하여 <Table. 1>과 같은 4가지 형상조건에 대하여, <Table. 2>에 주어진 바와 같이 다양한 가혹하중조건에서의 공력하중을 예측, 제공하는 것을 목적으로 한다.

Table. 2 정상 및 가혹환경 예측조건과 풍환경

예측조건	풍환경
1-3. 정상주행조건	250km/h, 350km/h, 385km/h
4. 태풍조건	350km/h, 50m/s 역풍
5. 터널 전·출입 조건	350km/h 터널 전·출입
6. 터널 내·외부 교행조건	350km/h 내·외부 교행
7. 측풍조건	350km/h, 50m/s 측풍

## 2. 예측기법

<Table. 2>의 5번과 6번과 같은 가혹환경에서의 공력하중의 예측은 실험적인 방법을 이용하여 직

접적인 구현이 불가능하며, 3차원 수치해석적인 방법으로 판토크래프를 모델링하여 해석하는 것도 시간과 비용을 고려할 때 현실적으로 불가능한 방법이다. 더하여, <Table. 1> 과 <Table. 2>를 조합하면, 28가지의 예측조합이 생성되므로 실험적, 수치적 방법을 이용하여 가혹하중을 예측하는 방법은 실효성이 없는 것으로 판단하였다. 구조안정성 해석을 수행하기 위해서는 판토크래프를 구성하는 주요부품에 대하여 각각 공기역학적 하중을 제공하여야 하므로 본연구에서는 고속전철 판토크래프를 <Table. 3>과 같이 주요한 6개의 부품으로 분류하고 이에 대하여 각각 공기력을 예측하였다.

Table. 3 공력 예측 대상 부재의 형상 조건

연번	명칭	형상 조건
1	Lower Arm	L 1548mm, $\Phi$ 76.3mm
2	Thrust Rod	L 1190mm, $\Phi$ 25mm
3	Upper Arm	L 1607mm, $\Phi$ 62mm
4	Balance Rod	L 1630mm, $\Phi$ 16mm
5	Plunger	L 309.2mm, $\Phi$ 84mm
6	Panhead	
6-1	- Cross Bar	L 818mm, $\Phi$ 48.6mm
6-2	- Contact Strips	L 987mm, H 32mm, W 50mm
6-3	- Horns	L 580mm(curved), $\Phi$ 15mm
6-4	- Couplers	Contact strip coupler : L 298mm, H 50mm, W 20mm Horn coupler : L 399mm, H 23.5mm, W 25mm

판토크래프의 구성은 단면형태가 단순하고 세장비가 긴 막대기들의 조합으로 이상화될 수 있으므로 다음과 같은 3가지 가정을 통해 연구를 진행하였다.

- 1) 판토크래프 각 부품에 작용하는 공력하중은 단면형상과 위치형태 그리고 외부유동의 크기와 방향으로부터 예측가능하다.
- 2) 각각의 가혹조건에 부여는 적절한 가정, 3차원 수치해석을 이용하여 외부유동의 크기와 방향을 부여하여도 적절한 정확도로 예측가능하다.
- 3) 점성에 의한 표면마찰력은 계산에 고려하지 않는다. 즉, 각 부재별로 유동의 방향에 접선방향의 공기력은 작용하지 않는다.

1)번의 가정을 이용하여, 해당부재 단면의 항력계수와 해당부재의 형상정보(단면 높이와 부재길이)로 해당부재의 공력계수를 표현하면 다음과 같다.

$$C_{ML} [kgf / (km/h)^2] = 0.00484 C_D S^2 [m] L^2 [m] \quad (1)$$

이때 계수 0.00484는 단위환산계수로 이후 모든 계산에서 무차원화된 변수를 제외하고는 철도 공기역학 계산의 관례에 따라, 힘의 단위로는 [kgf]를 사용하였으며, 속도의 단위는 [km/h], 길

이의 단위로는 [m]를 사용하였다. 식 (1)에 주어진 바를 이용하면 각 부재에 작용하는 공기력은 다음과 같이 표현된다.

$$\vec{F}^k = C_{AL}^k \left| \vec{V}_n^k \right| \vec{V}_n^k \quad (2)$$

여기서, 각 부재에 수직인 속도성분은 부재의 위치벡터와 유도속도를 이용하여 다음과 같이 계산한다.

$$\vec{V}_n^k = \vec{V} - \frac{\vec{x}^k}{|\vec{x}^k|} (\vec{x}^k \cdot \vec{V}) \quad (3)$$

실제 판토크래프 각 부재에 작용하는 공기력은 각부재간의 유동장 상호작용에 의한 증폭효과(amplification), 부재간의 상호연결에 의한 간섭효과(interference)와 열차에 형성되는 경계층 형성에 의한 경계층보정(boundary layer correction)을 고려하여, 각 항목에 해당하는 보정하중배수(correction weighting factor)와 가속환경시의 존재하는 압력스텝(pressure step)에 의한 힘을 고려하여 식 (4)와 같은 형태로 계산되며, 전체 판토크래프에 작용하는 공력의 합은 식 (5)를 이용하여 계산한다.

$$\vec{F}^k = W_a^k W_b^k W_c^k \vec{F}^k + \vec{F}_p^k \quad (4)$$

$$\vec{F} = \sum_k \vec{F}^k \quad (5)$$

따라서, 판토크래프의 가속공력하중을 예측하는 과정은 다음과 같은 과정으로 치환될수 있다.

- 1) 판토크래프 각 부재의 형상정보의 분석
- 2) 상정보에 따른 적절한 항력계수의 선정
- 3) 형상조건과 운행조건을 고려한 적절한 보정하중배수(correction weighting factor)의 선택
- 4) 가속환경(severe condition)에 대한 외부유동의 속도벡터를 예측하고 압력스텝을 구하는 과정
- 5) 실험치를 이용한 유동방향에 수직인 성분(양력)의 보정

### 3. 해석기법

가속조건(severe condition)에 대한 외부유동의 속도벡터를 예측하기 위하여, 고속전철주변의 3차원 정상해석과 열차/터널 시스템에서의 터널진·출입 및 터널 내·외부 교행 비정상 해석을 수행하였다. 본 장에서는 이의 해석기법에 대하여 개괄한다.

#### 3.1 정상유동해석기법

열차의 정상주행조건 및 측풍조건을 수치적으로 해석하기 위하여, 지배방정식으로는 압축성 Navier-Stokes 방정식을 사용하였으며, 3차원 x, y, z 직교 좌표계에서 무차원화된 보존형(conservative form) 벡터 형식으로 쓰면 다음과 같다.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial E}{\partial x} + \frac{\partial F}{\partial y} + \frac{\partial G}{\partial z} = \frac{1}{Re} \left( \frac{\partial E_v}{\partial x} + \frac{\partial F_v}{\partial y} + \frac{\partial G_v}{\partial z} \right) \quad (6)$$

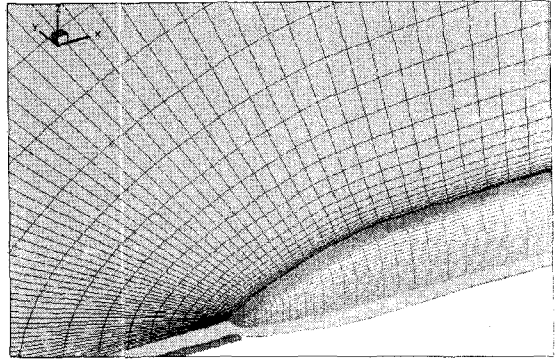


Fig. 2 5 Multi-block grid system(Grid # = 249,186)

열차 주변의 격자 형성은 설계된 솔리드모델 파일(STL 포맷)로부터 자동 변환하여 <그림 2>와 같이 대칭면 반쪽에 대하여 5개의 분할영역에 대하여 다중블럭격자계(multi-block grid system)로 구성하였으며, 측풍해석을 위해서는 전체영역을 10개의 분할영역으로 분할하여 계산하였다. 수치적 방법과 관련된 자세한 내용은 참고문헌(5)를 참고하기 바란다.

#### 3.2 비정상유동해석기법

열차의 터널진·출입과 같은 열차/터널 상호작용(train/tunnel interaction)이나 교행과 같은 열차/열차 상호작용(train/train interaction)과 같이 상대운동이 있는 경우의 유동장 해석을 위하여, 영역분할기법(domain decomposition technique)을 이용하여 상대적 운동을 모사하였다. 터널을 포함한 격자계를 5개의 분할영역에 대하여 <Fig. 3>과 같이 구성하였다. 보다 자세한 내용은 참고문헌(6)을 참고하기 바란다.

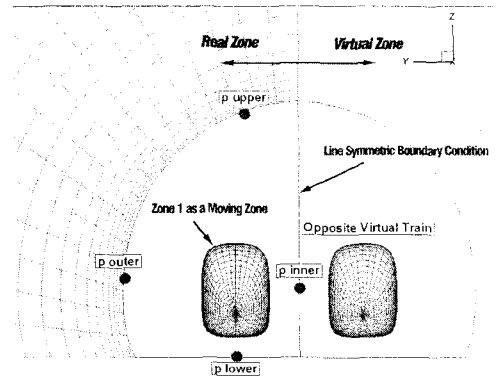


Fig. 3 Schematic diagram of Moving grid system

#### 4. 가혹유동조건

##### 4.1 정상주행조건 및 태풍조건

<Fig. 4>는 시속 350km/h(Mach수 0.283)로 정상 상태로 주행하는 열차주변의 압력장과 유선분포를 보이고 있다. 열차모델의 2량길이의 모델이지만 계산결과로부터, 전두부와 후미부와 달리 형상변화가 없는 중간부-동력객차와 객차부-에서는 유동구배가 없을 것으로 예상할 수 있다.

따라서, 정상주행조건 및 태풍(역풍조건)조건은 균일한 자유류속도와 동일한 속도를 그대로 가혹 유동조건으로 사용하였다.

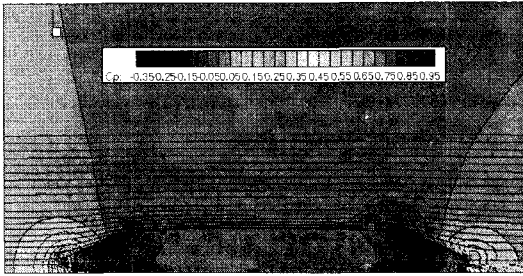


Fig. 4 Steady state flowfield(350km/h)

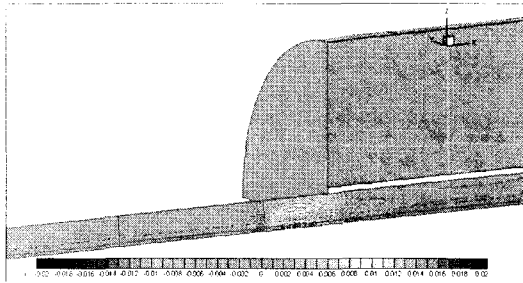


Fig. 5 터널 진입시 열차주변의 유도속도장

##### 4.2 터널 진 · 출입조건

터널 진 · 출입 및 터널내 정상주행시에는 유도속도와 압력의 변동량-압력의 변동은 실제로 연속적으로 일어나지만, 스텝으로 가정을 고려한다. 터널 진 · 출입시 또는 열차의 터널내부 정상주행시에는 압력의 변동뿐만 아니라 열차속도의 5-10%에 해당되는 유도속도가 발생하는데, 이때 이 유도속도는 터널 진입시와 진출시에는 반대방향이 되며 열차가 터널 내부를 주행시에는 병목 현상에 의해 가속되는 유속을 의미한다. 이때 사용하는 유도속도는 <Fig. 5>와 같이 3차원 계산 결과로부터 측정하였다. 최대 유도속도는  $U = 0.010$ ,  $V = -0.003$ ,  $W = 0.006$  인데, 비점성 계산인 것을 고려하여 200%의 안전계수를 사용하여  $U = 0.020$ ,  $V = -0.006$ ,  $W = 0.012$ 를 유도속도로 사용하였다. x 방향 압력의 구배는 연속적인 압력분포를 고려하여 압력 하중계산시 1000Pa의 값을 사용하였다.

##### 4.3 터널 내 · 외부 교행조건

교행시의 경우에는 교행시 의해 유도되는 최대 유도속도의 성분을 고려한다. 이때 계산에 사용하는 유도속도는 터널 내 · 외부에서 열차의 교행에 대한 3차원 해석결과를 이용한다. 터널 외부에서 교행시의 유도속도는 터널 내부에서의 유도속도 - x 방향이 주도적인데, 터널 외부에서 교행할시에는 y 방향의 유도속도는 거의 유사하나 x 방향유도속도는 1 order가 작다. - 보다 크게 작으므로 터널내부에서의 교행시 유도속도만을 고려하였다.

수치해석결과와 유도속도는  $U = 0.025$ ,  $V = -0.002$ ,  $W = 0.002$  인데, 비점성 계산인 것을 고려하여 200%의 안전계수를 사용하여  $U = 0.05$ ,  $V = -0.004$ ,  $W = 0.004$ 를 사용하였다.

y 방향의 압력의 차이(열차의 안쪽과 바깥쪽)는 열차표면에서의 경우 약 300Pa로 보고되었으며<sup>(6)</sup>, 열차상부의 경우 이보다 훨씬 작은 압력차가 예측되므로 +300Pa의 값을 그대로 사용하였으며, x 방향의 압력구배는 2000Pa를 사용하였다.

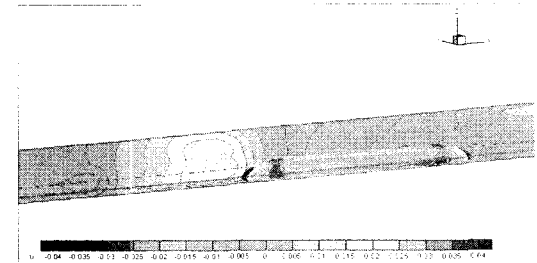


Fig. 6 터널내 교행시 열차주변의 유도속도장

##### 4.4 측풍조건

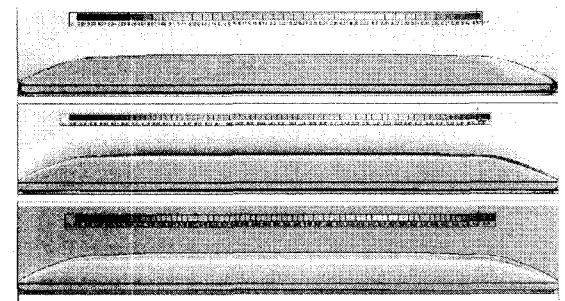


Fig. 7 측풍작용시의 열차주변의 유도속도장

측풍의 경우에는 최대 측풍의 유속과 3차원 측풍해석결과에서의 유도유속을 비교하여 큰 값을 취하도록 하였다. 3차원 점성 측풍해석결과 유도속도는  $U = 0.288$ ,  $V = 0.250$ ,  $W = -0.003$  인데, V의 경우 m/s로 환산하면 계산이 사용된 55m/s보다 30m/s큰 85m/s이다. 실제 열차 상부의 경우

급격한 유동의 팽창으로 인해 가속될 것으로 예상되므로, 실제 유동 속도에 30m/s의 속도를 더하여 50m/s의 측풍시 판토티그래프부에는 80m/s의 측풍이 작용하는 것으로 계산하였다.

## 5. 결과 및 논의

### 5.1 계수검토 및 선정

물리적으로 타당하고, 실제적인 공학적 관점에서 의미있는 예측을 위해서는 타당한 공력계수와 보정하중배수의 검토가 매우 중요하다.

#### 1) $C_{AL}$ (Aerodynamic load coefficient)

각 부재의 유동방향에 수직인 공력계수인  $C_{AL}$ 는 단면형상과 Reynolds수에 근거하여 유추할 수 있다. 공학적 관점에서 가능한 최대의 공력계수를 각각 부여하였다. 원형부재의 경우 총류영역의 항력계수인 1.2를 사용하였으며, 직사각부재의 경우 2.05 - 2.23의 실험치<sup>(7)</sup>를 보이므로 귀찮이된 형상을 고려하여  $0.8 \times 2.23$ 의 값을 사용하였다.

#### 2) $W_a$ (Amplification correction factor)

각 부재간의 공기역학적 상호작용에 의한 증폭의 효과는 유속(Reynolds 수)과 부재간의 상대적 위치에 따라 결정되는데, 섭동량의 증폭량에 근거하여 앞부재와 뒷부재의 증폭하중배수는 기존의 문헌조사<sup>(8)</sup>에서 밝혀진 대로 각각 1.3 과 2.0을 사용하였다.

#### 3) $W_b$ (Boundary layer correction factor)

판토티그래프의 위치에서 가능한 최소 경계층 두께는, 평판의 층류가정을 통한 상사해중의 하나인 Blasius 해에 의하면, 20 ~ 40mm로 계산된다. 그러나, 열차 표면상의 미세한 불연속면들(작은 홈, 돌출부등)과 일정한 정도의 표면거칠기에 의해 발생하는 유동교란으로 인해 거시적 관점에서의 실제 경계층 두께는 비약적으로 증가하여, 실제 20량 열차의 후미부에서는 1m 정도의 경계층이 보고된 바 있다. 이에 따라 1번과 2번 부재에 대하여 공력예상치는 경계층 보정으로  $W_b = 0.9$ 를 사용하였다.

#### 4) $W_i$ Interference correction factor

2차원 유동으로 가정된 식 1)과 같은 예측값은 각부재간의 연결에 의한 끝단 간섭조건 - 즉, 3차원 효과에 의해 감소하게 되는데, 판토티그래프의 각 부재들은 세장비가 크므로, 0.95의 값을 사용하였다. 이때, 5번 과 6-1번 부재는 길이가 짧고, Upper Arm 과 Balance Rod 등의 부재와 연결되는 부위의 비중 고려하여  $W_i$ 를 0.8로 설정하였다. 6-1번 부재인 Cross Bar의 경우에도 같은 과정을 거쳐  $W_i = 0.9$ 로 설정하였다.

### 5.2 저속풍동실험에 의한 검증

본 연구의 가혹하중의 예측방법을 검증하기 위해 풍동실험을 수행하고 비교검토하였다. 풍동실험은 유속 120km/h, 150km/h, 180km/h에 대하여 일본자동차연구소(Japan Automobile Research Institute, JARI)에서 수행하였으며, 이에 대한 자세한 내용은 참고문헌 (2)에서 확인할 수 있다. 판토티그래프의 실험은 이선율과 관계된 판토티그래프 헤드의 양력측정을 수행하여 본 연구의 양력 성분 보정에 사용되었으며, <그림 1>과 <표 3>에 표시된 주요 부품인 혼(horns, 6-3), 팬헤드부(6-1, 6-2, 6-4), 플런저(plunger, 5)을 차례로 제거하면서 전체시스템의 항력을 측정하여 그 차이로부터 각 부재의 항력성분을 예측하였으며, 이를 계수화하여 385km/h로 정속주행할 경우에 대하여 본 연구에서 사용된 예측방법에 의한 값과 비교하였다. <그림 8>에 보여진 바와 같이 예측치가 풍동 실험에 의한 값과 큰 차이를 보이지 않으며, 공학적인 관점에서 안전계수화 할 수 있는 정도인 20%가량의 큰 값을 팬헤드부에서 예측하고 있다.

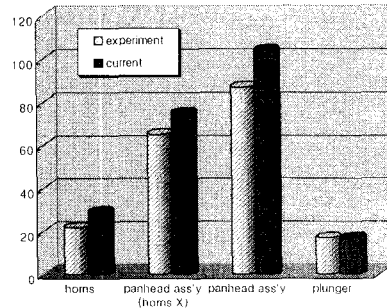


Fig. 8 예측치와 실험치의 비교

### 5.3 가혹조건에서의 공력하중 예측

<Table. 2>에 명시된 7가지 가혹환경조건에 대하여, <Table. 1>에 주어진 4가지 운행조건에서 <Table. 3>의 6개의 각 부재에 작용하는 공력하중을 예측하였다. <Table. 4>에는 평균집전높이인 27도조건에서의 결과를 보이고 있다. 공력은 kgf 단위로 예측하였다. 이때 유속의 열차의 속도와 유도속도성분들의 절대값으로 표시하였다. 판토티그래프 헤드부에서 부재간의 복잡한 상호작용에 발생한다고 예측되는<sup>(2)</sup> 양력의 경우에는 JARI의 저속풍동실험의 결과를 이용하여, 측풍이 없을 경우에는  $-5.924E-5 \text{ kgf}/(\text{km/h})^2$ 의 압상계수를, 측풍이 있을 경우에는 yaw각에 대하여 실험치로부터 외삽하여  $7.5E-4 \text{ kgf}/(\text{km/h})^2$ 의 압상계수를 사용하여 보정하였다. 이와 같이 정리된 형태의 하중데이터는 구조안전성 검증을 위한 구조해석과정에 별다른 변환과정없이 적용될 수 있다.

<Fig. 9>의 결과에서 볼 수 있듯이 속도의 증가와 부착각도의 증가에 따라 작용공력하중이 커지고 있으며, 정상주행속도인 350km/h에 비하여 다양한 가혹조건에서 작용하는 공기력이 2-3배까지 커질수 있음을 보이고 있다. 특히 가혹한 측풍환경에 노출될 경우에는 과도한 측방향 공력과 급격한 양력의 증가를 가져올 수 있으므로, 철도 시스템적인 측면에서 가혹환경에 대한 고려가 필요하다. 제시된 절차와 방법론에 의한 예측방법을 보다 고도화하기 위해서는 잘 계획된 풍동실험을 통하여 검증데이터를 확보하는 것이 필요하다.

Table. 4 각 부재별 공력하중 예측(27 도)

Case		V(km/h)	1	2	3	4	5	6	한계
1. 전차부재	N	350.00	8.74	7.04	7.83	1.05	14.04	86.25	124.96
	S	350.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	L	350.00	17.15	9.90	-18.63	-2.75	0.00	-7.26	-1.58
2. 전차주륜	N	250.00	4.46	3.59	3.99	0.54	7.16	44.01	63.75
	S	250.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	L	250.00	8.75	5.05	-9.59	-1.40	0.00	-3.70	-0.81
3. 전차부대	N	385.00	10.57	8.52	9.47	1.28	16.99	104.36	151.19
	S	385.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	L	385.00	20.75	11.98	-22.54	-3.32	0.00	-8.78	-1.91
4. 대차	N	500.00	20.04	16.14	17.93	2.42	32.20	197.78	286.53
	S	500.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	L	500.00	39.33	22.71	-42.72	-6.30	0.00	-16.64	-3.62
5. 타일전립	N	374.80	15.17	7.22	11.31	1.59	18.20	105.32	158.81
	S	374.80	-1.03	-0.50	-1.06	-0.17	-0.32	-0.03	-3.10
	L	374.80	22.79	12.63	-17.56	-2.54	0.00	-4.38	10.94
6. 바퀴서	N	411.30	19.74	6.53	18.07	2.61	23.62	132.07	202.64
	S	411.30	-3.06	-1.26	-3.88	-0.65	-0.87	-0.77	-10.49
	L	411.30	24.80	14.13	-24.29	-3.56	0.00	-8.59	2.49
7. 90도 측풍	N	455.00	17.78	12.09	19.03	2.74	18.37	87.35	157.38
	S	455.00	71.99	29.89	101.37	17.01	15.92	21.16	256.44
	L	455.00	34.89	17.01	-45.35	-7.15	0.00	154.10	153.51

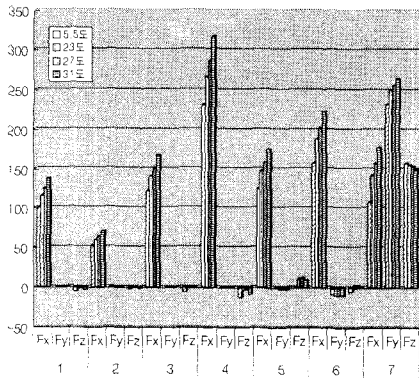


Fig. 9 운행정상조건에 따른 합력비교

## 6. 결론

본 연구에서는 판토품설계단계에서의 구조 안정성 검증을 위하여, 다양한 가혹공력환경에 대하여, 판토품설계를 구성하는 주요부품에 대한 작용공기력을 예측하는 절차와 방법을 제안하고, 이를 이용하여 4가지 운행조건과 7가지 풍환경의

조합으로 주요 6가지 부품에 작용하는 공기력을 계산하였다. 풍동실험결과와의 검증결과, 간결한 예측 계산절차를 가지고도 안전공학적으로 의미 있는 결과를 제공할 수 있었으며, 3차원 정상/비정상 유동해석을 통하여 부여된 가혹 외부유동조건들을 이용하여 다양한 가혹환경에서 구조 안정성 해석을 위한 보다 유용한 결과를 제공할 수 있었다. 작용공기력에 대한 검토결과 가혹조건에서 2-3배의 공기력이 작용할 수 있는 것을 확인하였으며, 특히 측풍조건에서는 과도한 측력과 양력의 발생으로 인해 운행 및 안전성에 보다 신중한 검토가 필요한 것으로 판단된다. 보다 신뢰할 수 있는 예측결과를 얻기 위해서는 잘 계획된 풍동실험을 통하여 검증데이터를 확보하는 것이 필요하다.

## 후기

본 연구는, 고속전철 '공력설계 및 해석기술 개발' 과제하에 수행되었으며, 2000-2001년도 한국생산기술연구원의 '고속전철 판토품설계 개발' 연구과제에서 일부 지원받았습니다.

## 참고문헌

- (1) Jang, K., Baek, N., Kim, K., 1999. "High Speed Railway of the World", Golden Bell
- (2) 2000, "판토품설계개발", "고속전철기술개발사업 2단계 1차년도 연구보고서, 건설교통부, 산업자원부, 과학기술부
- (3) Peters, J.L. 1983, "Aerodynamics of very high speed trains and maglev vehicles: State of the art and future potential." Int. J. of Vehicle Design, Technological Advances in Vehicle Design Series, SP3, Impact of Aerodynamics on Vehicle Design pp 308-341.
- (4) 황재호, 이민섭, 이동호, 김중암, 2000, "실험적, 수치적 방법을 이용한 고속전철 주변의 유동장 연구". 한국항공우주학회지, 28권 7호
- (5) Hwang, J. and Lee, D. 1999, 'Numerical Simulation of Flow field around High Speed Trains Passing by Each Other'. AIAA Paper 99-3156
- (6) Hwang, J., Lee, D.H., 2000, "Unsteady Aerodynamic Loads on High Speed Trains Passing by Each Other". KSME Int. J., Vol. 14, No. 8
- (7) Rodi, W., 1992, "On the Simulation of Turbulent Flow Past Bluff Bodies", CWE92, Tokyo, Japan
- (8) Sun, J., J.L. and B. Roux, 1993, "Flow regimes and frequency selection of a cylinder oscillation in an upstream cylinder wake", Int. J. Numer. Math. Fluids, Vol. 16, pp 915-929