

# 고속철도차량용 팬터그래프의 공력특성 평가를 위한 실모형 풍동시험

## A Real-scale Wind Tunnel Testing on a Pantograph for High-speed Train to Assess the Aerodynamic Characteristics

권역빈<sup>†</sup> · 조용현\* · 이기원\*\* · 김기남\*\*\*

Hyeok-bin Kwon · Young-Hyeon Cho · Kiwon Lee · Ki-Nam Kim

**Abstract** Wind tunnel testing on the real-scale pantograph for high-speed train has been conducted to investigate the aerodynamic characteristic of the pantograph at high-speed. The mid-scale subsonic wind tunnel of Korea Airforce Academy with 3.5m width, 2.45m height, and 8.8m length test section has been employed. The test model has been supported above 50cm height from the bottom of test section using vertical strut to eliminate the boundary layer generated from the bottom of the test section. The height of the pantograph has been varied in three cases, in both of the normal running and reverse running modes. The resultant lift forces of the pantograph to catenary system in all the cases have been measured and the relation between the test conditions and the lift forces have been extensively analyzed.

**Keywords** : Wind Tunnel Testing, Pantograph, High-speed Train, Aerodynamics

요 지 본 연구에서는 고속주행 시 팬터그래프에 가해지는 공기역학적 특성을 평가하기 위하여 고속철도차량용 실모형 팬터그래프에 대한 풍동시험을 수행하였다. 시험에 사용된 풍동은 공군사관학교의 중형아음속풍동으로서 폭 3.5m × 높이 2.45m × 길이 8.8m의 시험부를 가지며, 시험 모형은 하단의 차체부착용 브라켓에서 50cm의 수직 스트럿을 통해 풍동 바닥면에 지지되어 자유류가 시험부 바닥을 지나면서 성장하는 경계층의 영향을 제거하였다. 시험모형은 표준높이와 최소높이 및 풍동의 시험부를 고려한 최대높이에 대하여 정상 주행방향 및 역방향 시의 조건을 바꾸어가며 수행되었다. 각각의 조건에 대해서 팬터그래프가 가선에 미치는 압상력을 측정하였으며, 시험 조건에 따른 압상력의 변화에 대하여 분석하였다.

주 요 어 : 풍동시험, 팬터그래프, 고속열차, 공기역학

### 1. 서 론

팬터그래프는 가선으로부터 전력을 수집하여 차량에 전달하는 장치로서 전동차의 전력공급시스템의 중요한 구성요소이다. 특히, 고속전철의 경우에는 고속주행으로 인해 나타나는 이선 현상으로 인하여 안정적이고 연속적인 전력의 공급이 지장을 받는 문제가 발생할 수 있으므로 주행 중 발생하는 제반 운용조건에 대하여 일정한 압상력을 유지하여

이선현상을 방지하는 것이 팬터그래프의 주요한 기능요건 중의 하나라고 볼 수 있다.

팬터그래프는 일정한 압상력을 유지하기 위하여 여러 부재들이 기구학적인 고려를 바탕으로 조합되어 설계되며, 외란에 대하여 동적인 강건함을 갖도록 설계된다. 팬터그래프 외란의 주된 요소로는 가선의 불균일성, 차량의 진동 등 가선과 차량으로부터 발생하는 진동이나, 고속주행 시에는 팬터그래프에 가해지는 체감유속의 증가로 인하여 공기역학적인 외란이 급격히 증가하게 된다.

팬터그래프의 압상력에 영향을 주는 공기역학적인 외란은 크게 정적 요소와 동적 요소로 나눌 수 있다. 정적인 요소로는 공기유동 중에 노출된 팬터그래프의 각 부재에 가해지는 수직력의 조합에 의한 공기역학적인 압상력을 들

<sup>†</sup> 책임저자 : 정회원, 한국철도기술연구원 초고속열차연구실 선임연구원  
E-mail : hbkwon@krrri.re.kr

TEL : (031)460-5346 FAX : (031)460-5023

\* 정회원, 한국철도기술연구원 집전전력연구실 책임연구원

\*\* 정회원, 한국철도기술연구원 집전전력연구실 선임연구원

\*\*\* 정회원, 유진기공산업주식회사 기술연구소 차장

수 있으며, 동적인 요인으로는 터널 진출입, 교행, 폭풍 및 돌풍 시 비정상 공기력(Unsteady aerodynamic force)의 발생에 의한 압상력의 순간적인 변화를 들 수 있을 것이다. 고속 주행시에는 공기역학적인 하중이 속도에 비례하여 증가하므로 팬터그래프 압상력에 대한 공기역학적 기여가 급격히 증가하게 된다. 따라서, 고속철도차량용 팬터그래프의 집전능력의 평가를 위해서는 팬터그래프에 가해지는 공기역학적 압상력의 정확한 평가가 필수적으로 요구된다.

팬터그래프는 암과 로드 등 강한 난류를 발생시키는 부재들로 구성되어 있고, 각 부재 간의 거리가 짧아 부재들 간의 공기역학적 간섭효과가 강하므로 공기역학적 특성의 파악이 쉽지 않다. 따라서 전체 시스템의 공력특성이 종합적으로 평가되어야 하며, 운용조건에 따른 공력특성의 변화도 고려되어야 한다.

팬터그래프의 공기역학적 특성을 파악하기 위해서는 실차의 주행시험을 통한 현장계측이 가장 현실에 가까운 결과를 제공하여 주지만, 시간과 비용이 크게 소모되며, 다양한 조건에서의 반복시험이 힘들다는 단점이 있으므로, 주로 실제 운용조건에서의 최종 검증 단계에서 활용되고 있다. 실모형 혹은 축소모형을 이용한 풍동시험은 다양한 조건 하에서 팬터그래프의 공기역학적 특성을 상세히 조사할 수 있다는 장점 때문에 압상력이나 공력소음의 실험 평가 및 성능개선과 형상 디자인개선을 위한 연구에 널리 쓰이고 있다. 최근에는 전산유체역학의 발달로 인하여 팬터그래프 주위 유동장에 대한 수치적인 연구도 활발히 진행되고 있지만, 각 부재를 지난 후 발생하는 강한 난류의 적절한 모델링과 공력소음 계산을 위한 고차원의 공간차분기법의 정확도 증가가 해결되어야 할 문제로 남아 있다.

Holmes[1] 등은 LES(Large Eddy Simulation) 기법에 기반한 전산유체해석과 소음전파 계산법을 이용하여 신칸센 열차의 팬터그래프 커버에서 발생하는 소음을 예측하였으며, 이를 풍동시험 결과와 비교 검증하였다.

국내에서는 정경렬 등[2]이 팬터그래프의 구조적 건전성을 평가하기 위하여 실모형 팬터그래프에 대한 풍동시험을 수행한 바 있으며, 노주현 등[3]은 전산유체역학 해석과 최적화 기법을 이용하여 팬터그래프의 팬헤드 단면 형상에 대한 강건 최적 설계를 수행한 바 있다.

본 연구에서는 고속용 팬터그래프의 공기역학적 특성을 파악하기 위하여 실대형 팬터그래프를 풍동 내에 장착한 후 실제 가선에 가해지는 압상력을 계측하였으며, 주행 방향, 집전 높이, 날개 형상 등 다양한 운용조건에 대하여 시험을 수행하였다.

## 2. 시험 설비

### 2.1 중형 아음속 풍동

공군사관학교(AFA) 중형아음속풍동(Fig. 1)은 단일 폐쇄회로식으로 시험부 교환형으로 설계되었다. 본 시험에서 사용된 시험부는 폭 3.5m, 높이 2.45m의 표준 시험부이고, 시험부에서 얻을 수 있는 유속은 최대 92m/s 이다. 본 시험에서는 모델과 지지부의 구조적인 강도를 고려하여 최대 50m/s의 유속으로 시험을 수행하였다. 풍동의 main fan은 2,100kW 모터를 사용하고 있으며 20개의 블레이드와 7개의 흐름안정지지부로 구성되어 있으며, 최대 회전수는 365 rpm 이다. 시험부 길이는 8.7m이며, 시험부 중심에 직경 2.7m 회전판이 장착되어 있다.  $\Delta q/q_0$ 는  $\pm 0.18\%$ ,  $u'/V_\infty$ 와  $v', w'/V_\infty$ 는 각각 0.04%와 0.09% 이내인 것으로 나타났다.

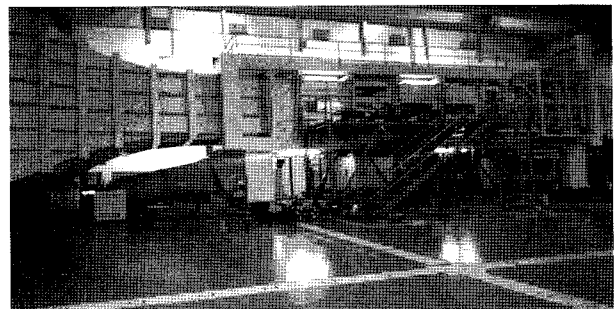


Fig. 1. Mid-scale Subsonic Wind Tunnel of AFA

### 2.2 데이터 취득

본 시험에서 데이터 취득을 위해 사용된 장비는 여러 가지 계측에 대응한 입력최대 16채널의 대형 칼라 표시기용 데이터 수록장치이다. 앰프 유니트(unit)에는, 2CH/unit 구성의 DC 앰프, FFT용 앰프, 온도앰프, 스트레인(strain)앰프 진동 등 다양한 종류를 준비하고 있다. 샘플속도 최고 1MHz, 최대 분해능 16비트의 A/D변환이 가능하며, 하나의 유니트에 2CH 앰프에 의한 16 채널의 계측이 가능하고, 고속DC 앰프에 의해, 16 채널 동시의 1ms 샘플링이 가능하다.

### 2.3 로드셀

본 시험에서 압상력의 측정을 위하여 사용된 로드셀은 정격용량 50kg의 로드셀로써 콤팩트하며 고정밀도(1/3000 이상)의 장점으로 옥내에 설치되는 호퍼스케일 및 시험기에 폭넓게 사용된다. 고강도 합금강과 무전해 니켈도금을 하였고 방습재 풋팅 처리를 하였다. 로드셀의 형상 및 사양은 Fig. 2와 Table 1에 각각 나타나 있다.



Fig. 2. Load Cell

Table 1. Specification of the Load cell

모델	DBBP
정격용량(R.C.)	50kg
정격출력(R.O.)	3.0mV/V - 0.5%
비선형성	≤ 0.03% R.O.
히스테리시스	≤ 0.03% R.O.
반복성	≤ 0.02% R.O.
크리이프	≤ 0.03% in 20min
인가전압	10V(Recommended), 15V(Maximum)
연결케이블	5mm × 3m (22AWG × 4C)

### 3. 시험 모델

#### 3.1 팬터그래프 모델

시험에 사용된 모델은 실제로 동작하는 실물모형으로서 (Fig. 3) 로어암이 U자형 부재와 I자형 부재가 결합된 형태이고 어퍼암은 두 개의 메인 암이 사다리꼴 형상을 나타내고 있다. 완전히 접었을 경우 애자 지지부 하단과 팬헤드 상면의 수직 거리는 210mm로 측정되었다. 양력계수의 계

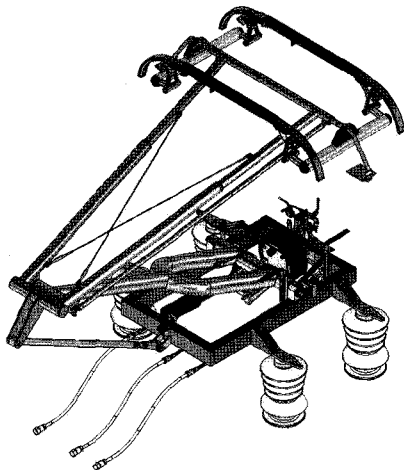


Fig. 3. Pantograph model

산을 위한 모델의 기준 폭은 집전판 폭을 감안하여 1260 mm로 설정하였으며, 모델의 높이는 표준 높이에 맞추어 1010mm로 설정하였다.

#### 3.2 시험 조건

본 시험에서는 판토히그래프의 높이, 윈의 방향 및 열차진 행방향에 따른 유동의 상대적인 방향을 고려하여 시험조건을 설정하였다.

먼저 Fig. 4에서는 풍동 내에서의 모델과 유동 방향을 나타내고 있다. 정상적인 상황에서는 후방의 동력차에 부착된 팬터그래프가 작동하게 되며, 이 때 판토히그래프의 접힌 쪽 전방에서 후방으로 바람이 불게 된다. 비상시의 상황에서는 전방 동력차에 부착된 팬터그래프가 작동하게 되는데, 이 때는 바람의 방향이 반대로 접힌 쪽 반대 방향에서 불어오게 된다. 본 시험에서는 바람의 방향에 대한 양력의 영향을 살펴보기 위하여 모델의 방향을 정방향 상태와 이를 180° 회전한 역방향 상태에서 시험을 수행하였다.

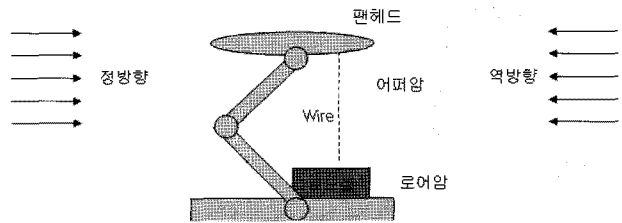


Fig. 4. Direction of freestream velocity

다음으로 모델의 높이를 바꾸어 시험을 수행하였다. 모델의 높이는 펼쳐지는 높이를 기준으로 최소 높이는 300 mm, 표준 높이는 800mm, 그리고, 최대 높이는 풍동의 높이를 고려하여 1500mm로 설정하였으며, 이를 적용한 모델의 지지부 끝단에서 집전판 상면까지의 높이는 Table 2에 나타나 있다. Fig. 5, Fig. 6 그리고 Fig. 7에는 각각 최소, 표준 및 최대 높이로 설정된 모델의 풍동 내 장착 모습을 보여주고 있다.

Table 2. Height of Pantograph

model type	Initial	Min.	Std.	Max.
Height of pantograph (mm)	210	510	1010	1710
misc.	height of contact strip upper surface from main frame upper surface, mm			

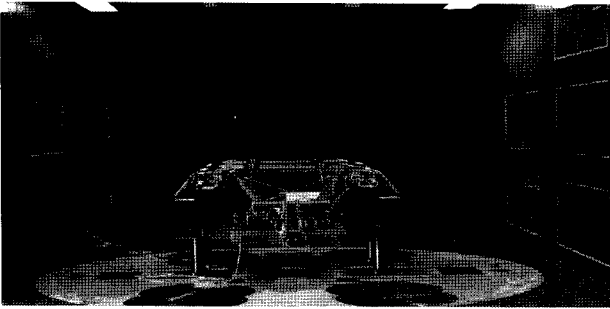


Fig. 5. Min. Height

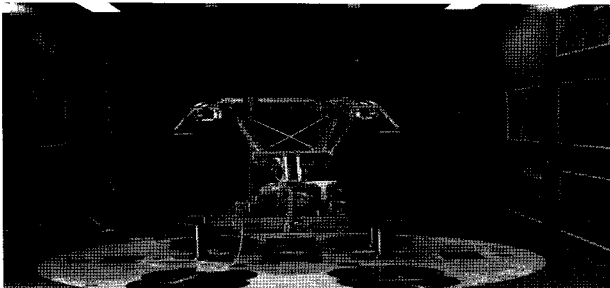


Fig. 6. Std. Height

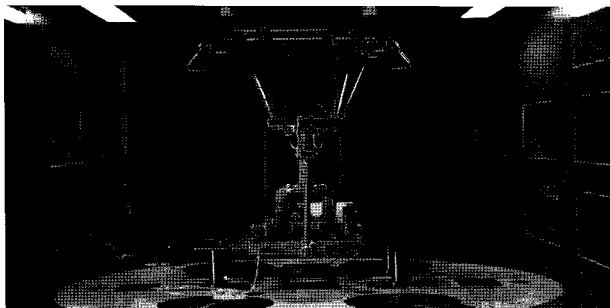


Fig. 7. Max. Height

마지막으로 모델 양단에 놓인 날개에 따라 세 가지의 조건을 바꾸어 시험을 수행하였다. 본 모델에 부착된 Wing은 원호와 직선으로 이루어진 ARC 형상을 갖는 2차원 날개로서 코드 길이는 100mm, 최대 두께는 13mm이며, 날개 폭은 116mm이다. 정상 주행 시 부착 방향은 팽창면이 아래로 향하도록 되어 있어 압상력을 감소시키는 역할을 하도록 하고 있으며, 반대 방향으로 부착할 경우 압상력을 증가시키게 된다. 본 시험에서는 날개의 부착방향을 평면 기준(상) 방향과 (하) 방향으로 바꾸어서 시험을 수행하였으며, 표준 높이에서는 날개를 부착하지 않은 경우에 대해서도 시험을 수행하였다.

이상의 모델 형상변화에 따른 모델 상태의 조합 및 시험 수행 번호를 아래 Table 3에 나타내었다. 일부 조건을 제외하고는 측정값의 신뢰도를 확보하기 위하여 2회의 반복시험을 실시하였다.

시험은 자유류 풍속을 점차적으로 증가시키다가 30m/s,

40m/s 및 50m/s의 속도에 도달했을 때 유동의 안정화를 확인한 후 측정하였다.

베이스 프레임의 4 지점에서 집전판과 로드셀을 와이어로 연결하였으며, 집전판의 위치에 따라 와이어를 조작하여 높이를 조정하고 수평을 유지하였다. 시험 측정 전 model에 가해지는 기계적인 압상력을 발생을 위하여 공기압을 주입하였고 로드셀에 측정된 초기값을 기반으로 풍속에 따른 각 시험조건에서의 압상력 변화를 측정하였다.

Table 3. Test condition

model	direction	wing	height		
			Min.	Std.	Max.
model A	정방향 (0°)	상	run06/19	run05/23	run01/24
		하	run07/20	run03/21	run02/25
		없음		run04/22	
	역방향 (180°)	상	run17/18	run13	run12
		하	run08/16	run15	run09/10/11
		없음		run14	

## 4. 시험 결과

### 4.1 압상력 계수

팬터그래프는 주행 중 고속의 공기에 노출되면 로어암, 어퍼암, 팬헤드 및 날개에 각각 수직 방향의 공기력이 가해지며, 각 부재들 간의 간섭효과가 더해져 가선과 팬헤드 간에 공기역학적인 압상력이 발생한다. 일반적으로 공기역학적인 하중은 형상이 동일할 경우 공기 밀도와 속도의 제곱 및 모델의 크기에 비례하여 증가하는 것으로 알려져 있다. 따라서, 공기력에 의한 하중을 평가할 경우에는 힘을 무차원화한 공력계수를 이용하고 있다.

본 시험에서는 4개의 로드셀을 통해 측정된 장력을 합산한 뒤, 아래 식 (1)과 같이 정의된 압상력 계수로 변환하였다.

$$C_L = \frac{\Sigma L_{aero}}{\frac{1}{2} \rho u^2 S} \quad (1)$$

위 식에서  $\Sigma L_{aero}$ 는 팬터그래프에 가해지는 공기역학적인 압상력의 총합이며,  $\rho$ 는 공기밀도,  $u$ 는 풍동 내 자유류의 속도, 그리고  $S$ 는 기준면적으로서 본 시험에서는 모든 경우에 대하여 집전판 폭에 해당하는 1260mm와 모델의 높이인 1010mm의 곱을 이용하였다.

특정 유속에서의 압상력을 계산하기 위해서는 식 (1)에서 구한 압상력 계수에 유속, 공기밀도 및 기준면적을 대입

하면 구할 수 있는데, 유속이 50m/s를 초과하는 경우에는 50m/s에서의 압상력 계수에 해당 풍속을 대입하여 구하였다. 그리고, 밀도의 경우에는 풍동의 가열효과로 인하여 시험 조건별로 약간씩 공기밀도가 변동하였는데, 본 연구에서 압상력을 구할 때에는 1.15km<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>의 공기밀도를 적용하였으며, 이는 해수면 기준 17.5°C의 상태에 해당한다.

Fig. 8에는 기본 조건에 해당하는 정방향 주행, 표준 집전 높이, 정상 날개조건(상)에서의 속도별 압상력을 나타내고 있다. 압상력은 속도가 증가할수록 증가하고 있으며, 2차 다항식 회귀곡선과 잘 일치하고 있다. 자유류 유속 30m/s, 40m/s, 50m/s에서의 압상력 계수(CL)는 각각 0.0283, 0.0285, 0.0290으로 2.5% 이내의 범위에서 일치하는 것으로 나타났다. 그리고, 0.0290의 압상력 계수값을 이용하여 구한 83.3m/s(300km/h)에서의 압상력 외삽값도 2차 다항식 회귀곡선과 잘 일치하는 것을 보여주고 있으며, 이를 통해 본 시험에서 얻은 압상력 계수는 300km/h의 속도 영역까지 적용가능한 것으로 생각할 수 있다.

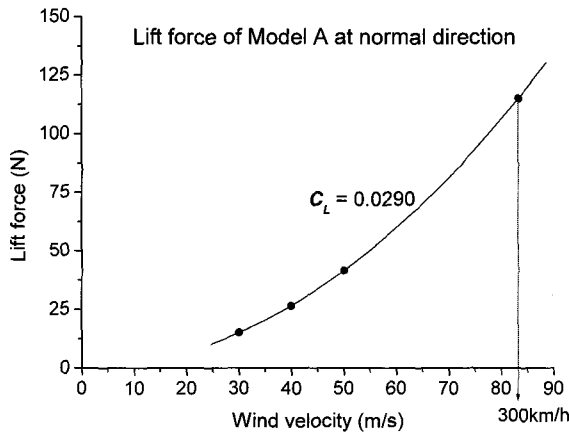


Fig. 8. Lift w.r.t freestraem velocity(straight run)

#### 4.2 주행방향에 따른 압상력 계수

Table 4에는 주행방향에 따른 압상력 계수 및 정방향 대비 역방향 압상력의 비율을 이용하여 비교하였다. 역방향 주행 시 압상력은 정방향 주행 시의 4.9%로 정방향 주행에 비해 압상력이 크게 낮아지는 것으로 나타났다.

Table 4. Life coefficient w.r.t running direction (Std. Height, Normal wing condition)

direction	정방향	역방향
$C_L$	0.0289	0.0014
%	100	4.9

정방향 주행 시 양의 압상력을 갖는 하부암이나 스투스트 로드의 압상력의 분담이 큰 경우에는 역방향 주행 시 압

상력이 낮아지게 되어 정방향/역방향 압상력 차이가 커지게 되며, 정방향 주행 시 음의 압상력을 갖는 상부암이나 발란스 로드의 압상력 분담이 큰 경우에는 역방향 주행 시 압상력이 커지게 되어 방향에 따른 압상력의 차이가 줄어들게 되는 것을 알 수 있다.

따라서, 주행방향에 따른 압상력의 차이를 줄이기 위해서는 상부암이나 발란스 로드의 압상력 분담을 크게 하고, 하부암이나 스투스트 로드의 압상력 분담을 작게 설계하는 것이 필요할 것으로 보인다.

#### 4.3 집전높이에 따른 압상력 계수

Table 5에는 집전높이에 따른 압상력 계수를 정방향 주행, 정상 날개 조건에 대하여 나타내고 있다. 압상력 계수는 표준 높이일 경우 0.0289로 가장 높게 나타났으며, 최대 높이에서는 0.0270으로 약간 감소하였으나 최소 높이일 때에는 0.0188로 감소량이 큰 것을 알 수 있다. 정방향 주행 시에는 표준 높이에서의 압상력이 다른 높이에 비해 상대적으로 크게 나옴을 알 수 있었다.

Table 5. Lift coefficient w.r.t pantograph height (Straight running, normal wind condition)

height	Min	Std.	Max.
$C_L$	0.0188	0.0289	0.0270
%	65.3	100	93.6

#### 4.4 양력날개의 영향

본 시험 모델에 사용된 양력 날개는 원호와 직선으로 이루어진 익형을 이용하고 있으며, 익형의 직선 부분이 바람에 평행하게 놓여지는 경우 원호의 방향으로 양력이 발생하게 된다. Fig. 9에는 본 시험에서 수행된 날개의 장착 방향과 이에 대한 압상력의 방향을 보여주고 있다.

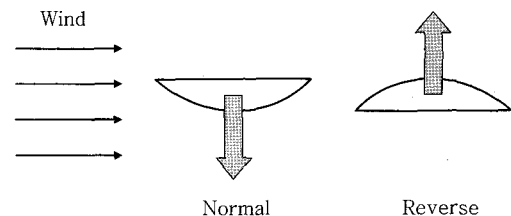


Fig. 9. Wind condition and direction of lift force

날개가 균일한 자유류에 놓여있을 경우에는 Normal 과 Reverse는 각각 방향만 다르고 동일한 크기의 양력이 작용하기 때문에 Normal 대비 Reverse 조건의 압상력 증가량은 Normal 대비 W/O 조건의 압상력 증가량에 비해 정확히 2배가 되어야 한다. 양력날개는 팬티그래프의 각 부재들을 통과한 후류의 영향을 받기 때문에 이러한 이론적 예측을

벗어날 가능성이 있으나, 본 시험과 같은 조건에서는 양력 날개가 팬헤드 끝단에서 측면 하방으로 약간 돌출되어 설치되어 있기 때문에 팬터그래프의 각 부재로부터 받는 영향이 그리 크지 않을 것으로 예상된다.

Table 6에는 날개 조건에 따른 압상력이 나타나 있다. 정상 날개 조건(Normal)에서의 압상력을 0으로 가정했을 때, 날개의 조건이 바뀔 경우 나타나는 압상력의 차이를 각각 날개가 없을 경우(W/O)와 날개를 뒤집어 장착하였을 경우(Reverse)에 대하여 나타내었다.

양 방향에 대하여 정상 조건(Normal) 대비 미부착 조건(W/O)에서의 압상력 증가와 정상 조건(Normal) 대비 역방향 부착 조건(Reverse)에서의 압상력 증가가 각각 17~23 N, 32~47N으로 대략 1:2의 비율을 이루고 있다. 모든 경우의 평균을 구해보면 양력날개의 부착 여부에 따른 압상력 증감량은 20.41N으로 계산되며, 두 개의 날개가 부착된 것을 감안하면, 각각의 날개에서 발생하는 양력은 10N 내외인 것으로 예상된다.

Table 6. Lift force w.r.t wind condition (Train speed = 300km/h)

direction	height	wing		
		Normal	W/O	Reverse
정방향	Min	0	N/A	37.81
	Std.	0	17.59	47.81
	Max.	0	N/A	36.56
역방향	Min	0	N/A	47.36
	Std.	0	23.22	43.73
	Max.	0	N/A	43.12
평균		0	20.41	42.73

## 5. 결론

열차의 고속주행 시 팬터그래프에 가해지는 공기역학적 압상력을 평가하기 위하여 실험모델을 이용한 풍동시험을 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 열차의 속도가 증가할수록 팬터그래프에 가해지는 공기역학적인 압상력이 증가하며 실험 영역에서는 일정한 압상력 계수를 갖는 것으로 나타났다.
- 열차가 역방향으로 진행할 때에는 정방향으로 진행할 경우에 비해 압상력이 감소하는 것으로 나타났다.
- 주행방향에 따른 압상력의 차이를 줄이기 위해서는 상부암이나 발란스 로드의 압상력 분담을 크게 하고, 하부암이나 스러스트 로드의 압상력 분담을 작게 설계하는 것이 필요할 것으로 보인다.
- 집전 높이에 따라 압상력의 차이가 발생하는 것으로 나타

났으며, 정방향 주행 시에는 표준 높이에서의 압상력이 다른 높이에 비해 상대적으로 크게 나옴을 알 수 있었다.

- 팬터그래프의 압상력을 조절하기 위한 양력날개의 경우 미부착 시에 비해 20N 내외의 양력 감소 효과를 가지고 있는 것으로 나타났다.
- 본 시험 결과는 자유류 상태에서의 팬터그래프 압상력을 측정하는 것으로서, 실차에 장착 시에는 공동 효과 및 열차 경계층의 효과가 더해지므로 실차실험을 통하여 보다 정확한 압상력을 평가할 필요가 있다.

## 후 기

본 연구는 유진기공산업주식회사가 지원하는 “팬터그래프 공력계수 측정 및 추종특성 분석” 과제의 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 유진기공산업주식회사의 관계자 여러분께 감사드립니다.

아울러 풍동시험을 허락하여 주신 공군사관학교 풍동실장 조환기 중령님과 어려운 실험을 함께하여 주신 공군사관학교 박문현, 박세현, 김광수 주사님께 깊은 감사의 말씀 올립니다.

## 참 고 문 헌

1. Holmes, B. S., Dias, J. B., Jaroux, B. A., Sassa, T. and Ban, Y.(1997), “Predicting the wind noise from the pantograph cover of a train,” International Journal for Numerical Methods in Fluids, Vol. 24, pp.1307-1319.
2. 정경렬, 김휘준, 백진성, 박수홍(2001), “한국형 고속전철용 판토그래프 구조설계 검증 및 설계 최적화,” 한국소음진동공학회 2001년도 추계학술대회 논문집, pp.1229-1234.
3. 노주현, 광민호, 강형민, 정지훈, 정신규, 이동호(2007), “고속열차 팬터그래프 팬헤드 형상의 강건최적설계,” 대한기계학회 추계학술대회 논문집.
4. Bocciolone, M., Resta, F., Rocchi, D., Tosi, A. and Collina, A.(2006), “Pantograph aerodynamic effects on the Pantograph-catenary Interaction,” Vehicle System Dynamics, Vol. 44, Supplement, pp.560-570.
5. Ito, M.(2000), “Improvement to the aerodynamic characteristics of Shinkansen rolling stock,” Proc Instn Mech Engrs Vol. 214, Part F, pp.135-143.
6. Stickland, M. T., Scanlon, T. J., Craighead, I. A. and Fernandez, J.(2003), “An investigation into the mechanical damping characteristics of catenary contact wires and their effect on aerodynamic galloping instability,” Proc Instn Mech Engrs Vol. 217, Part F, pp.63-71.

접수일(2009년 7월 9일), 수정일(2009년 9월 18일),  
 게재확정일(2009년 9월 22일)