

# 한국형 고속전철용 판토티그래프의 풍동소음시험

## High Speed Wind Tunnel Test of KHST Pantograph

정경렬\* · °김상헌\*\* · 박수홍\*\* · 김휘준\*\*\*

KyoungRyul Chung, SangHun Kim, SooHong Park, and HwiJun Kim

**Key Words** : Noise Measurement(소음측정), Pantograph(판토티그래프), Wind Tunnel Test(풍동시험)

### ABSTRACT

Wind tunnel test of a new pantograph, that is developed through the KHST project, was performed in RTRI wind tunnel test center of Japan end of last June. This paper introduces the measurement results and analysis of noise measurement part that is achieved during the wind tunnel test. The maximum measured sound pressure level at 5m shows 102.3dB(A) at 350km/h and it leads to 88.3dB(A) of predicted sound pressure at 25m that satisfy 91dB(A) of evaluation criteria. Major noise sources of the pantograph was identified as a link between upper and lower arm, panhead contact strips and shunt wires.

### 1. 서론

G7 고속전철기술개발사업의 일환으로 진행되어온 한국형 고속전철용 판토티그래프의 개발은 4년간의 노력으로 시작품의 결실을 보게 되었다. 지난 4년동안 판토티그래프 개발과제에서는 선진국 판토티그래프 모델의 장단점을 비교, 분석하여 한국형 고속전철에 가장 적합한 형태의 판토티그래프를 개발하고자 하였으며 설계 및 해석등의 엔지니어링 기술을 발판으로 3차에 걸친 시작품을 개발, 제작하게 되었고 금년 5차년도에 최종 납품에 필요한 한국형 판토티그래프를 개발하고 일본의 RTRI 풍동센터에서 성능시험을 수행하였다.

대형 저소음 고속풍동시험에서는 소음, 양력 및 가시화 시험을 수행하였으며 본 논문에서는 한국형 판토티그래프의 소음측정과정과 그 결과를 발표하고자 한다.

본 시험을 통하여 얻어진 결과데이터는 실제 주행 속

도인 350km/h의 고속주행에 대한 simulation test로서 시험품의 소음 측정 및 특성 분석을 통하여 한국형 판토티그래프 모델의 설계 개선에 활용될 것이다. 또한 고속 풍동 소음 측정결과 데이터를 본 논문을 통하여 발표함으로써 관련 과제 및 연구분야에서의 기초 데이터로 활용될 수 있기를 기대한다.

### 2. 풍동 소음의 측정

#### 2.1 시험개요

본 시험은 한국형 고속전철용 판토티그래프의 성능시험 중 소음측정 부분이며 일본의 RTRI 풍동센터에서 보유하고 있는 고속풍동에서 수행하였다. 시험대상품은 한국형 판토티그래프의 납품용 개발품을 대상으로 하였다.

#### 2.2 측정방법

본 시험에서는 판토티그래프로부터 5m 거리에서의 소음을 측정하여 25m 거리에서의 소음을 예측하는 방법을 사용하였다. 측정 마이크로폰은 집전판에서 5m 거리에 집전판 보다 80cm 낮은 높이에 무지향성 마이크로폰을 설치하여 측정하였다. 이것은 주행하는 차량의 소음 측정 기준인 25m 거리의 1.5m 높이의 점과 실제 차량의 판토티

\* 한국생산기술연구원

E-mail : chungkr@kitech.re.kr

Tel : (041) 589-8250, Fax : (041) 589-8230

\*\* 산업기술시험원

\*\*\* 한국생산기술연구원

그래프의 집전판을 잇는 선상에 위치한 점으로 측정점에서의 측정소음도는 자유음장에서의 음의 거리감쇠율에 따라 25m 측정소음을 쉽게 예측할 수 있는 지점이다.

측정신호는 20Hz~20kHz의 대역필터를 사용하고 Hanning window 및 A특성의 청감보정합수를 사용하였다. 측정된 신호는 25Hz~20kHz 밴드의 1/3 옥타브 밴드 분석을 수행하였다. 측정신호의 시간이력곡선 및 Narrow Band 주파수 특성을 관찰하기 위하여는 사용 채널당 40kHz의 고속 샘플링을 수행하였으며 청감보정합수는 Flat으로 하여 주파수 분석을 수행 하였다.

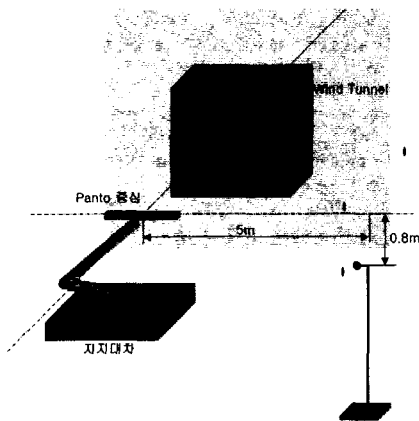


Fig.1 Measuring point

### 2.3 측정조건

본 시험에서는 많은 조건에 따른 특성을 분석하고자 하였으나 일본 풍동센터의 시험일정상 주어진 2일간의 제한시간으로 인하여 설치방향, wing의 부착형태,

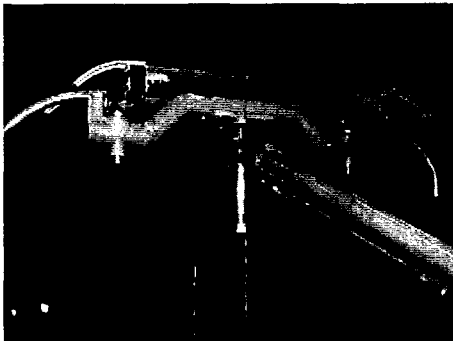
panhead의 형태, 풍속조건 및 설치높이 등을 조합하여 측정조건을 결정하였다.

Table1 Measurement Conditions

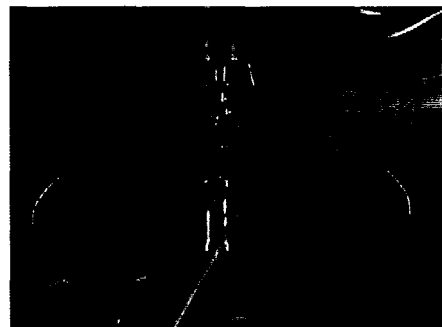
조건	방향	Wing type	Panhead	풍속 [km/h]	바닥 높이	차량 높이
1	진행 방향	없음	curved	150, 200, 250, 300, 350	표준	1500
2		type1				
4		type3				
3		type2				1350
13						
12						
5	없음	straight				
7	type2					
23	반대 방향	없음	없음	1500		
23'		없음				
9		type2	straight			
10			curved			
19						
17	type2	straight	1650			
15				진행 방향		

측정초반에는 3가지 type의 wing type에 대하여 비교 시험을 수행하였으나 type 2의 경우에 가장 좋은 양력 특성을 보여 시험조건 13에서부터는 wing type을 type2로 고정하여 시험을 수행하였다.

straight type과 curved type의 panhead 형상은 Fig.2에서 보여주고 있다.



(a) Curved type panhead



(b) Straight type panhead

Fig.2 Test specimens of panhead

### 3. 측정결과

#### 3.1 5m 측정소음도 및 25m 예상소음레벨

저소음 고속풍동의 측정실에서의 암소음도는 Table 2에 나타내었다. 측정실에서의 암소음도는 측정소음의 레벨에 비하여 충분히 작기 때문에 소음 측정에는 문제가 되지 않았다.

본 시험에서 측정된 5m 거리에서의 측정소음도는 Table 3 및 Fig.3에 나타내었다. Table 3에서는 각 측정조건별로 시험속도에서의 overall 소음도를 나타내고 있다.

주위의 반사면 및 반사체가 없는 옥외 또는 무향실내에 측정하는 방법으로, 음원기기의 중심에서 r(m) 떨어진 거리에서 구면 또는 반구면위에 측정기구를 놓고 음압레벨의 평균치를 산출하여 음원의 파워레벨을 구한다. 또한 음원의 출력을 power level (PWL)로 표시할 때, 자유음장에서 거리 r에서의 음의 강도(SPL)은 다음 식을 이용하여 근사적으로 구할 수 있다.

$$SPL = PWL - 10 \log_{10} r^2 - 10 \log_{10} 4\pi$$

$$= PWL - 20 \log_{10} r - 11 \quad (dB)$$

위의 식을 사용하여 25m 소음을 예측한 결과를 Fig.4에서 보여주고 있다. 본 계산결과를 볼 때, 한국형 판토그래프의 발생소음은 평가기준인 91dB(A)를 만족할 수 있는 것으로 나타났다.

#### 3.2 측정소음의 주파수 특성

판토그래프로부터 발생된 소음의 주파수 특성을 분석하기 위하여 가중합수를 Flat으로 하여 측정하고 Narrow band 분석을 수행하였다.

측정된 판토그래프의 소음은 거의 일정한 주파수 특성을 보이고 있었으며 단지 바람의 속도에 따라 피크주파수가 비례하여 고주파쪽으로 이동하는 것을 볼 수 있었다. 본 연구에서는 소음이 가장 크게 발생하는 350km/h의 속도에 대하여 분석하였다.

Fig.5에 나타난 바와 같이 G7 고속전철용 판토그래프의 소음특성은 다음과 같이 크게 3가지 특성을 보이고 있는 것으로 나타났다.

- ① 40Hz의 저주파영역에서의 주파수 피크
- ② 350Hz 근방의 주파수 피크
- ③ 16000Hz 근방에서의 주파수 특성

Table2 Background noise level in wind tunnel

풍속 [km/h]	150	200	250	300	350
암소음도 [dB(A)]	54	65	71	77	81

Table3 Measured sound pressure levels [dB(A)]

측정 조건	150 km/h	200 km/h	250 km/h	300 km/h	350 km/h
No.1	76.5	84.9	91.8	97	101.6
No.2	76.3	84.8	91.4	96.5	100.8
No.4	76.3	84.8	91.7	97.2	101.7
No.3	76.3	84.8	91.5	96.6	101.1
No.13	76.4	84.9	91.5	96.7	101
No.12	76.2	84.7	91.5	97.3	101.1
No.5	75.7	84.4	91.7	96.4	100.6
No.7	75.5	84	90.9	96.2	100.8
No.23	72.4	81.1	87.5	92.2	95.8
No.9	76.5	85.1	93	98.5	102.1
No.10	76.8	85.1	92.2	97.5	102.1
No.19	76.8	85.2	92.4	97.8	102.3
No.17	76.3	85.2	92.8	97.5	101.4
No.15	75.5	83.8	90.7	95.9	99.6

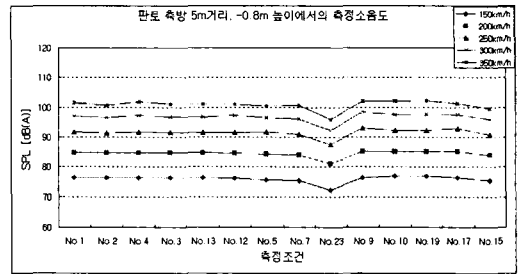


Fig.3 Measured sound pressure at 5m

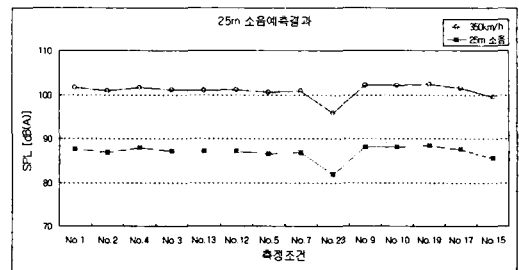


Fig.4 Predicted sound pressure level at 25m

40Hz 부근의 낮은 주파수에서 나타나는 피크는 경험상 Upper Arm 과 Lower Arm 사이의 관절부에서의 형상에 의해 발생하는 소음으로 판단되었다. 그러나 현재까지는 형상에 따른 발생소음의 특성 변화에 대해서는 분석하고 있지 못한 실정이다.

350Hz와 16000Hz 부근에서의 소음특성은 앞에서 설명한 바와 같이 공력소음의 영향으로 판단되며 바람에 의한 저항계수와 Strouhal number를 이용하여 소음특성을 규명할 수 있다.

판토그래프의 부재는 모두 봉(circular cylinder) 형태와 wire로 구성되어 있다. 이와 같이 유체의 흐름이 봉등을 통과하는 경우, 봉의 뒤에서는 칼만와류라고 하는 규칙적인 소용돌이가 발생한다. 이와 같이 2차원으로 흐름이 물체에 부딪히는 경우에는 물체 뒤에서 고유 주기를 갖는 강한 소용돌이가 발생하며, 그 소용돌이에 의하여 특정 주파수 대역의 소음레벨이 높게 나타나는 협대역 소음이 발생하게 된다.

Fig.6에 나타낸 바와 같이 봉 뒤에서 발생하는 소용돌이에 있어서,  $b/a=0.2806$ 인 중립의 안정한 상태의 소용돌이를 칼만 소용돌이라 한다. 이 칼만소용돌이는 임의의

한정된 레이놀즈 수의 범위에서 2차원성이 강한 경우에 발생한다.

칼만 소용돌이의 주파수  $f$ 는 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$f = S_t \times \frac{U}{D}$$

여기에서,  $S_t$ 는 Strouhal number,  $U$ 는 유속,  $D$ 는 봉의 직경을 나타낸다.

Fig.7에서는 2차원 계수의 저항계수와 Strouhal number의 관계를 보여준다.

주행중 판토그래프의 소음에 가장 큰 영향을 미치는 부분중 하나가 Panhead의 Contact strip 부분이다. 이 부분의 단면형상은 사각형 형상이며 이 경우 저항계수  $C_D$ 는 약 2.0 정도이며 따라서 Strouhal number는 0.14정도로 예측할 수 있다. G7 판토그래프의 경우 panhead의 높이는 약 40mm 이므로, 이 값을 칼만 소용돌이의 주파수 공식에 대입하면

$$f = 0.14 \times \frac{350/3.6}{0.04} \approx 340.3 \quad [Hz]$$

가 된다. 즉, Fig.5의 주파수와 일치하는 것을 알 수 있다.

Fig.5에서 16000Hz 부근에서 발생하는 소음특성은 상대적으로 광대역소음의 특성을 보이는 것으로 보아 강체라기 보다는 현으로 예측할 수 있었다. 시험중 현이 사용되는 곳은 양력측정을 위한 load cell 고정 wire 가 사용되었으며 wire에 의한

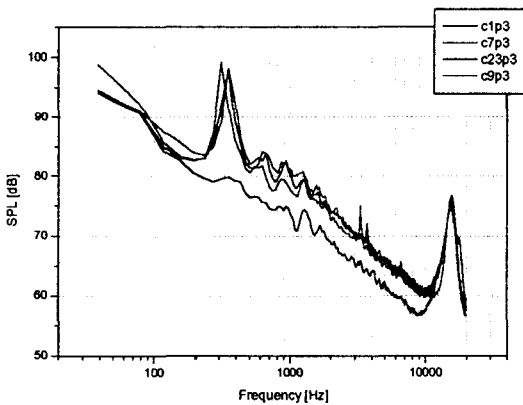


Fig.5 Frequency spectrum curves of panto noise

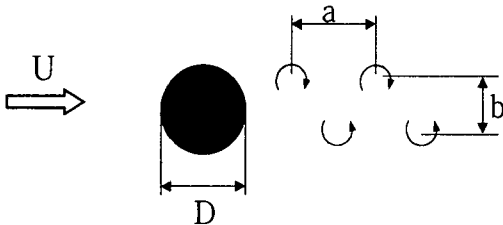


Fig.6 Aerodynamic noise generation

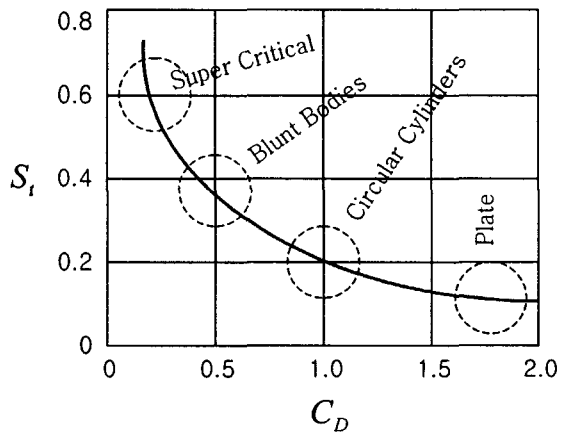


Fig.7 Resistance factor and Strouhal number

발생소음의 주파수는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$f = 0.2 \times \frac{350/3.6}{0.0012} \approx 16,333 \quad [\text{Hz}]$$

시험에 사용된 wire가 강제인 경우 뒤에서 나타나는 소용돌이는 일정하게 발생하여 Panhead의 경우와 같이 순음(puretone) 특성을 보이게 되지만 실제적으로는 wire가 고속으로 흔들리는 경우가 발생하게 되며 이때에는 뒤에서 발생하는 소용돌이가 일정치 않게 작용하게 된다. 이렇게 wire가 흔들리는 경우를 고찰해 보면, 전후방향으로 흔들리는 경우에 상대속도의 변화를 주어 발생소음의 주파수의 폭이 넓어지게 되며, 좌우방향으로 흔들리는 경우에는 작지만 면적의 변화를 초래하여 이 또한 주파수의 폭을 넓게 만드는 요인으로 작용할 수 있다. 또한 기여도는 작을 것으로 예측되지만 장력의 변화도 고려할 필요가 있다. 시험중 load cell 과 Panhead 상단에 묶여있는 wire는 장력의 변화를 가져와 주기적인 흔들림을 유발할 수 있으며 이로 인하여 발생소음의 주파수 특성이 변화될 수 있다. 이와 같은 현상은 구조물에서 발생하는 소음특성에서는 나타나지 않는 특성으로 바람의 와류에 의한 공력소음 특성이므로 좀 더 심도있는 연구가 필요하다. 그러나 실제 주행중에는 이 wire는 사용되지 않기 때문에 고려할 필요는 없는 것으로 판단된다.

Fig.5의 c23p3곡선 및 Fig.8은 Panhead가 없는 경우에 측정된 350km/h에서 판토히도그래프의 소음의 주파수 특성을 보여주고 있다. Panhead가 없는 경우에는 Panhead

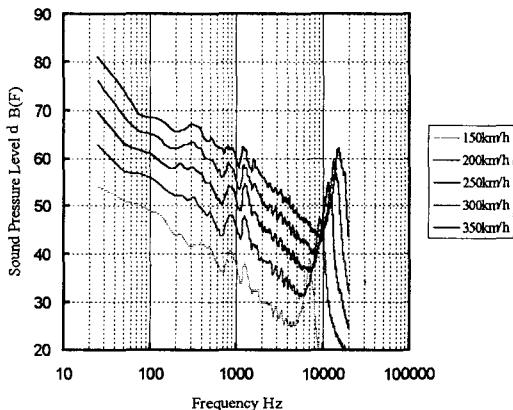


Fig.8 Narrow band spectrum curves of pantograph noise without panhead

의 영향으로 판단되었던 340Hz 주변의 소음이 발생하지 않는 것을 볼 수 있다. 또한 주파수 특성 곡선이 전체적으로 약3~5dB 가량 낮게 나오는 것을 볼 수 있었다.

Fig.5의 c9p3곡선 및 Fig.9는 판토히도그래프를 180° 회전시켜 반대방향에서의 소음 측정 결과를 보여주고 있다.

방향이 반대로 바뀐 경우에 주파수 특성은 정방향에서와 거의 같은 특성을 보이고 있다. 특이한 점은 3,300Hz 근방에서 피크 커지는 것을 알 수 있었다. 판토히도그래프의 방향을 반대방향으로 하는 경우에는 바람이 가장 먼저 닫는 부분은 Panhead 부분이다. 따라서 Panhead의 형상이나 부재의 특성이 가장 민감하게 작용한다고 볼 수 있다. 여기서도 Panhead의 shunt wire의 영향이 크게 나타나는 것으로 나타났다. 시험에 사용된 shunt wire의 직경은 약6mm 이며 이 경우 발생소음은

$$f = 0.2 \times \frac{350/3.6}{0.006} \approx 3,267 \quad [\text{Hz}]$$

으로 나타나고 있다.

Shunt wire는 저속인 경우에는 wire로서 굽혀져 있지만 고속으로 가는 경우에 Drag force에 의해 뒤로 밀리며 직선처럼 팽팽해져 소음이 크게 발생하는 것으로 추측된다. 그러나 Shunt wire의 경우에는 상대적으로 두께가 두껍고 길이가 짧기 때문에 loadcell wire와 같이 현과 같은 작용은 발생하지 않으며 특정주파수에서만 dominant한 현상을 보이고 있는 것으로 판단된다.

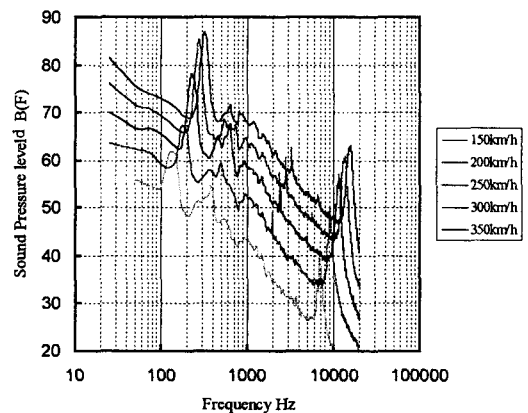


Fig.9 Narrow band spectrum curves on reverse direction.

#### 4. 결론

본 연구에서는 한국형 고속전철용 판토티그래프에 대하여 실제 주행속도인 350km/h의 고속주행에 대한 풍동소음시험을 수행하였다.

본 시험을 통하여 한국형 판토티그래프의 소음은 팬헤드의 Contact strip, 상부암과 하부암의 관절부, 선트와이어 등에 의한 공력소음이 가장 지배적인 것을 알 수 있었다.

팬헤드 및 관절부에서 발생하는 공력소음은 본 연구에서는 아직 접근하지 못하고 있는 실정이며 판토티그래프에서 사용되는 wire의 경우에는 가능한 길이를 짧게하여 발생소음의 에너지를 최소화할 필요가 있다.

시험결과에서 알 수 있듯이 팬헤드의 유무에 따라 발생소음도는 3~5dB 가량 저감되는 것을 볼 수 있었으며 따라서 팬헤드에서의 소음저감 방안이 가장 큰 효과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다. 또한 관절부의 경우에도 국내외적으로 아직 정량적인 분석 데이터를 제시하지 못하고 있는 실정이므로 이에 대한 연구도 함께 병행되어야 할 것으로 판단된다.

#### 후 기

본 연구는 G7 고속전철기술개발사업의 "판토티그래프 개발"과제의 일환으로 수행되었으며, 관계자 여러분의 지원에 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

- (1) 日本流體力學會, 流體力學ハンドブック, 丸善株式會社, ISBN 4-621-04461-3, 10.2절
- (2) 小林敏雄, 1996, 自動車のデザインと空力技術(自動車技術シリーズ), 朝倉書店, 6.3절
- (3) Kiyoshi Nagakura, 1996, "The Method of Analyzing Shinkansen Noise", QR of RTRI, Vol.37, No.4, pp.210-214
- (4) Takeo Morikawa, 1997, "Simulation of Wayside Time-dependent Noise Level on Shinkansen and Analysis of Noise Sources for their Contribution to the Whole Noise Level", QR of RTRI, Vol.38, No.4, pp.212-217
- (5) T.Kitagawa and K.Nagakura, 2000, "Aerodynamic Noise Generated by Shinkansen Cars", Journal of Sound and Vibration(2000), 231(3), pp913-924