

# 저속풍동실험 및 유동해석을 통한 고속전철 판토틀라프의 유동소음 예측

## Prediction of Aeroacoustics Noise of Pantograph via Low Speed Wind Tunnel Test and Flow Simulation

조운기\* · 이종수\*\*  
Woonki Cho, Jongsoo Lee

**Key Words :** High-Speed Railway(고속전철), Pantograph(판토틀라프), Low Speed Wind-Tunnel Test(저속풍동실험), Aerodynamics(공력학), Aeroacoustics(공력소음학)

### ABSTRACT

The paper deals with the computational approach in analysis and design of pantograph panhead strips of high-speed railway in aerodynamic and aeroacoustic concerns. Pantograph is an equipment such that the electric power is supplied from catenary system to train. Due to the nature of complexity in high-speed fluid flow, turbulence and downstream vortices result in the instability in the aerodynamic contact between panhead strips and catenary system, and consequently generate the considerable levels of flow-induced sound. In this paper, based on the preceding low speed wind-tunnel test and simulations, the aerodynamic and aeroacoustic characteristics in low speed are analyzed.

———— 기호설명 ————		o	ambient conditions
		ret	retarded time
$\rho$	density		
$P$	pressure	<i>superscript</i>	
$\mu$	viscosity	'	disturbance quantity
$\rho' = \rho - \rho_o$	density disturbance	^	unit vector
$p' = p - p_o$	pressure disturbance	.	first derivative
$u_i$	fluid perturbation velocity		
$\rho g_i$	gravitational body force		
$F_i$	external body force		
$p_{ij}$	fluid compressive stress tensor		
$T_{ij}$	Lighthill stress tensor		
$H(x)$	Heaviside Step function		
$r$	distance from sound source to observer		
$c$	speed of sound		
$L_i$	intensity component of force		
$U_i$	revised velocity component		
$M$	Mach number		
$APC$	Aerodynamic Pressure Coefficient		
<i>subscript</i>			
n	surface normal direction		
r	radiation direction		

### 1. 서론

산업의 발달과 더불어 운송수단의 고속화에 대한 수요는 고속전철을 도입하게 되었고, 고속화에 따른 다양한 문제에 대한 연구 및 실험이 행해져 오고 있다. 운행속도가 증가함에 따른 공기저항의 증가 및 난류발생으로 인한 유동 유기 소음(flow induced noise)은 고속화에 따른 필연적인 문제로 안전운행 및 운행지역의 환경적인 영향을 고려할 때 반드시 설계에 반영되어야 할 사항이다. 판토틀라프(Pantograph)는 고속전철 동력차량의 지붕 위에 설치되어 전력계(catenary system)로부터 전력을 공급 받는 장치로써, 전력공급은 전력선과의 직접 접촉을 통해 수급이 이루어지며, 지붕 위 돌출되어 있는 형상으로 인해 주행속도에 해당하는 유동장내에 위치되어 있는 조건에 따른 유동영향을 받게 된다[1]. 유동이 가속화됨에 따라 이러한 공기역학적 영향은 가선에서 분리되는 이선현상을 유발하고, 공력소음 또한 고속전철 전체 소음을 주도할 정도의 소음크기를 갖게 된다. 본 논문에서는 이러한 판토틀라프의 유동해석을 통해 공력 특성을 살펴보고, 유동해석 결과를 이용하여 공력소음을 예측해 보고자 한다. 선행된 저속풍동실험

\* 연세대학교 대학원 기계공학과

\*\* 연세대학교 기계전자공학부

E-mail : jleej@yonsei.ac.kr

Tel : (02) 2123-4474, Fax : (02) 362-2736

을 통해 추가적인 양력 생성 장치(lift generator)를 부착함으로써 접촉률과 관련한 이선률을 줄일 수 있는 가능성을 발견하였고, 이를 공력특성의 개선 측면에서 단면형상을 변화시킨 모델을 생성하고 유동해석을 실시하였다. 공력해석의 주 목적은 유동 시뮬레이션을 통해 공력특성을 해석하고 이를 설계에 재반영 하여 다양한 주행속도에서의 가선과의 접촉률을 일정하게 유지하는 데 중점을 두고 있다. 유동해석은 판토품모형 모델을 2차원으로 이상화 시키고, 공력특성 개선 측면에서 단면형상을 변화시킨 6가지 모델에 대해 수행되었고, 해석 도구로는 유한체적법을 기반으로 한 상용 유동해석 코드인 FLUENT 5.4 solver를 사용하였다[2].

공력소음 해석방법으로는 유체역학의 연속방정식과 운동방정식을 이용한 파동방정식 형태로 소음장을 해석하는 음향상사기법과 유도과정에서의 선형화를 통해서 원방해 계산에 주로 사용되는 Kirchhoff 방법, 유동해석과 소음해석을 동시에 구현하는 CAA(Computational AeroAcoustics)가 있다. 이중 판토품모형 단면형상에서 발생하는 소음해석 방법으로는 음향상사기법 중 유동장 내에 물체가 존재할 경우에 대해 발전된 지배식인 Ffowcs Williams-Hawkins(FWH) 방정식을 이용하였다[8]. FWH 방정식 중 사극자소음항은 천음속(transonic)에 미치지 못하는 유동장에서의 효과가 적음을 고려하여 계산에 포함시키지 않았으며[3], 음압을 예측하고 주파수 해석을 실시하였다.

## 2. 유동 해석

### 2.1 판토품모형 모델링

유동해석을 위한 모델로는 판토품모형 전체 부품 중 가선계와 접촉하는 부분에 유동적 영향을 있는 상부(upper)부품만을 고려하고, 측면방향으로의 단면변화가 적은 점을 감안하여 Figure. 1 과 같이 2 차원으로 이상화하였다[5].

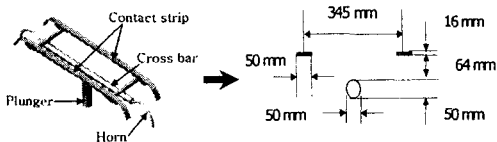


Figure. 1 Model simplification of upper part of pantograph panhead sections

2 차원 이상화에서 고려된 단면으로는 유동 전후로 직렬 배열되어 있으며 가선과 직접 접촉하는 직사각단면의 콘택트 스트립(Contact strip)과, 두 개의 스트립 중앙 하부에 위치해 있어 스트립에

유동적 영향을 미칠 수 있는 원형실린더 단면의 크로스 바(Cross bar)를 선정하였다.

### 2.2 유동해석 코드 검증

판토품모형 단면모델에 대한 유동해석 이전에 유동해석 코드에 대한 검증을 수행하였다. 검증은 가장 널리 알려져 있는 2 차원 단면 모델인 원형실린더 및 정사각 단면을 선정하였으며, 참고문헌 [4]과의 비교결과는 Table. 1 과 같다.

Table. 1 Code verification

section	reference		simulation	
	CD	St	CD	St
circular	1.1	0.2	1.069	0.192
square	2.2	0.12	1.806	1.106

### 2.3 선행 유동해석 결과

Figure. 1 의 모델에 대한 유동속도 120km/h, 150km/h, 180km/h, 350km/h 에 대한 공력특성이 예측되었고, 120km/h, 180km/h 인 경우에 대해서는 풍동실험이 실시되었다[5]. 유동해석 및 풍동실험의 공통적인 결과는 해석중인 판토품모형 모델은 팬헤드로부터 운행에 부적합한 공력특성인 음의 양력값이 측정된다는 것이다[5,6]. 직렬 배열되어 있는 직사각 단면의 경우 양력계수가 평균 0 임을 고려해 볼 때, 위와 같은 결과는 하부에 위치한 크로스 바의 단면형상의 개선이 필요함을 입증해 준다고 할 수 있다. 공력특성 인자로는 양력[N]을 유동속도[km/h]의 제곱으로 나누어 준 공력압상계(Aerodynamic Pressure Coefficient)를 사용하였다. 본 연구에서 기준으로 삼은 압상력 구간은, 일본에서 개발되었던 판토품모형에서 요구되었던 유동속도 300km/h 에서 20~25N 이며, 이를 공력압상계수로 환산하면 약  $2.22 \times 10^{-4} \sim 2.78 \times 10^{-4}$  이다[6].

## 3. 단면형상 개선

### 3.1 Lift generator( thin plate )

풍동실험 중 팬헤드에서 발생하는 음의 양력을 개선시키기 위한 일환으로 크로스 바 상부에 얇은 평판(thin plate)을 부착한 실험이 추가되었고, 양의 양력값이 포착되었다[5]. 이는 단면형상의 개선을 통해 공력특성 개선의 여지가 있음을 입증해 주는 것으로, 본 연구에서는 이러한 근거를 바탕으로 유동 전 후 방향으로 배열된 팬헤드 스트립 사이의 거리를 구간으로 나누어 6 가지 모델을 생성하였고, 이에 대한 유동해석을 실시하였다. Figure. 1

은 풍동실험과 동일한 조건에 대한 시뮬레이션 결과로, 수정된 단면모델에 대한 시뮬레이션의 정성적인 타당성을 제공하고 있다.

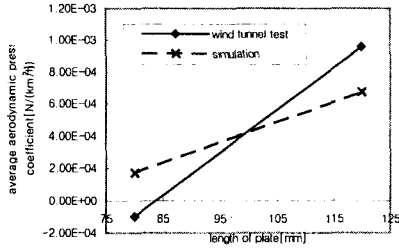


Figure 1. Comparison wind tunnel test and simulation at 120 km/h

박판의 길이는 crossbar 중심과 strip 간의 거리를 6 가지로 나누고, 박판을 부착하지 않은 경우를 추가하여 Figure. 2 와 같이 생성하였다. 여기서  $L_p$  는 thin plate 의 길이,  $D$  는 crossbar 의 직경,  $L$  은 panhead strip 간의 거리를 의미한다.

Case 1	Case 4
Case 2	Case 5
Case 3	Case 6

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

Figure. 2 Cases of various thin plate

#### 4. 공력특성 해석

##### 4.1 유동장 설정

유동장은 점성, 비압축성, 비정상으로, 난류모델로는 2 equation 방법 중 하나인 standard k-epsilon 으로 모델링하여 시뮬레이션을 수행하였다[2].

Time step 은 나이퀴스트(Nyquist)의 샘플링 이론을 근거로 하여, 최대 가청주파수인 20KHz 를 얻을 수 있도록  $\Delta t = 0.025$  ms 로 설정하였다. 실제 유동 조건에서의 3 차원 효과를 고려하여 박판과 크로스바의 연결부를 제거한 형태로 가정하였고, 본 연구에서는 단면형상에 의한 유동변화에 주안을 두고 있으므로 공기-단면형상 간의 연성효과는 고려하지 않았다. 수치적 해석을 위한 유동장 격자 구조 및 경계조건은 Figure. 3 과 같다. 해석의 경계는 원방 경계면 제한에 의한 부정확성 및 계산 시간에 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.

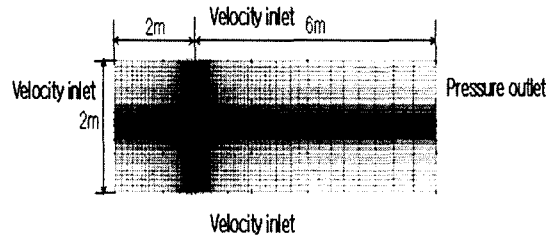


Figure. 3 Computational grid and boundary conditions

##### 4.2 유동 시뮬레이션 결과

Figure. 4 의 Uplift region 은 앞서 언급했던 기준으로 삼은 요구되는 공력압상계수 구간으로, 평판의 길이가 약 73mm 및 275mm 부근에서 만족하는 결과를 보이고 있다. 만일 유동에 의한 평판의 진동과 같은 연성효과를 고려한다면, 275mm 의 평판 길이는 실제 설계에 반영되기 어려운 것으로 판단된다.

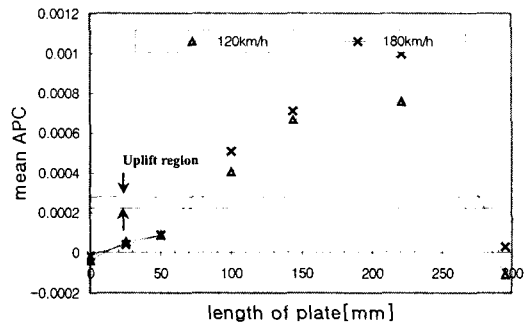


Figure. 4 Aerodynamic Characteristics for the length of thin plate

이러한 결과는 cross bar 상부에 박판이 위치함으로써 주변 기류에 속도와 압력변화를 발생시키고 이는 곧 주위 공기흐름에 압력요란을 일으키게 되어, 아음속일 경우 음속으로 전파되는 압력요란에 의해 전후로 배열된 strip 에 영향을 주는 것으로 예측된다.

## 5. 유동소음 해석

### 5.1 FWH equation

음향상사이론(Acoustic Analogy Theory)을 기반으로 한 Lighthill equation 을 유동장 내에 제어면(Control surface)이 존재할 경우에 대해 확장할 경우 식 (1)과 같은 FWH 방정식을 얻을 수 있다[3].

$$\left(\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \nabla^2\right) P'(x, t) = \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} [T_{ij} H(f)] - \frac{\partial}{\partial x_i} [L_i \delta(f)] + \frac{\partial}{\partial t} [\rho_o U_n \delta(f)] \quad (1)$$

where,  $H(x) = 1$  for  $x > 0$

$H(x) = 0$  for  $x < 0$

$$U_i = \left[1 - \frac{\rho}{\rho_o}\right] v_i + \frac{\rho u_i}{\rho_o}$$

$$L_i = P_{ij} \hat{n}_j + \rho u_i (u_n - v_n)$$

식(1)의 해는 식(2)와 같이 물리적 의미를 지니고 있는 세가지 항으로 구성되어 있는데, 본 연구에 사용된 두 개의 항은 식(3), (4)에 각각 나타내었다.

$$P'(x, t) = P'_T(x, t) + P'_L(x, t) + P'_Q(x, t) \quad (2)$$

$$4\pi P'_T(x, t) = \int_{f=0}^{\infty} \left[ \frac{\rho_o (\dot{U}_n + U_{\dot{n}})}{r(1-M_r)^2} \right]_{ret} dS + \int_{f=0}^{\infty} \left[ \frac{\rho_o U_n (r\dot{M}_r + c(M_r - M^2))}{r^2(1-M_r)^3} \right]_{ret} dS \quad (3)$$

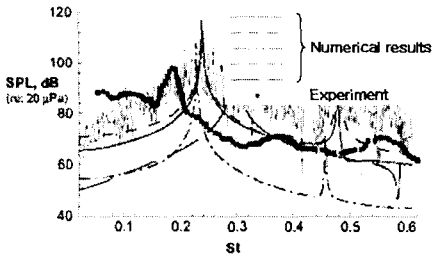
$$4\pi P'_L(x, t) = \frac{1}{c} \int_{f=0}^{\infty} \left[ \frac{\dot{L}_r}{r(1-M_r)^2} \right]_{ret} dS + \int_{f=0}^{\infty} \left[ \frac{L_r - L_M}{r^2(1-M_r)^2} \right]_{ret} dS + \frac{1}{c} \int_{f=0}^{\infty} \left[ \frac{L_r (r\dot{M}_r + c(M_r - M^2))}{r^2(1-M_r)^3} \right]_{ret} dS \quad (4)$$

식(3)은 유동장 내의 경계가 이동 또는 확장함으로써 발생하는 체적변화에 기인하는 홀극(monopole) 음원으로 일명 두께소음(thickness noise)이라고 한다. 두께소음과 달리 유동장 내의 경계에 의하여 가해진 비정상적인 힘 또는 모멘텀의 요동적인 변화에 의해 발생하는 소음은 이중극(dipole)의 특성을 보이는 하중소음(loading noise)으로서 식(4)와 같이 표현될 수 있다. 두께 및 하중소음은 식(3), (4)에서 확인할 수 있듯이 제어면에 대해 표면적분을 취하여 계산될 수 있는 반면, 식(2)의 마지막 항은 난류발생에 기인한 레이놀즈 응력의 섭동에 의한 사극자(quadrupole) 소음항으로 체적적분을 통해 계산될 수 있다[10,11].

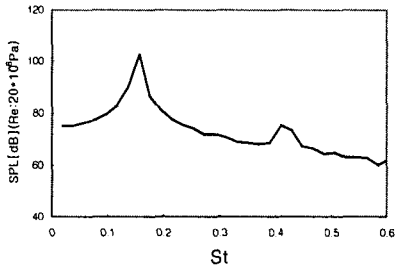
FWH 방정식은 여러가지 장점을 지니고 있다. 유동장 주변의 근거리 유동해석 데이터를 이용하여 원거리 소음을 예측할 수 있으며, 소음장에 미치는 영향에 따라 세 가지 음원항을 계산할 수 있으므로 수치적인 이득을 얻을 수 있다. 하지만, 천음속 영역 이상에 해당하는 경계의 속도가 있는 경우에는 사극자소음항의 영향을 무시할 수 없으므로, 체적적분의 어려움 및 계산시간의 증대와 같은 어려움이 있는 단점이 있다[8]. 본 연구에 있어서는 마하수  $Ma = 0.097 \sim 0.145$  에 해당하는 저속 영역이므로 사극자소음항을 무시하고, 두께 및 하중소음에 대한 계산만을 수행하여 소음해석을 실시하였다.

### 5.2 소음 예측코드 검증

사극자소음항을 고려하지 않은 FWH 방정식에 대한 수치해석 코드를 구성하였고, 이에 대한 검증으로 원형실린더에 대해 Cox[7]등이 수행한 실험결과와 비교하였다. 원형실린더의 지름은  $D=19\text{mm}$ ,  $Re = 90,000$  이며 유동방향에  $90^\circ$  방향으로  $128D$  에 해당하는 거리에 위치한 마이크로폰으로부터 소음이 측정되었다. 비교는 주파수분석 결과에 대해 수행되었으며, Figure. 5 의 (a)는 Cox 등에 의한 실험 및 수치해석 결과이고 그래프의 굵은 실선이 실험결과에 해당된다. Figure (a) 에서 Strouhal number 가 약 0.2, 0.4 부근에서 첫번째 및 두번째 하모닉(harmonic)이 발생하고 있음을 확인할 수 있다. 2 차원 해석결과를 바탕으로 한 (b)의 본 연구결과를 (a)와 비교해 볼 때 하모닉 발생 St 수나 소음 레벨에 있어 비교적 유사한 결과를 보이고 있다.



(a) measured results( ref. [7] )



(b) simulation result

Figure. 5 Frequency domain comparison test and calculation

### 5.3 팬헤드 단면 소음예측

유동장 내에 3 개의 단면이 산재되어 있으므로, 적분표면의 선택은 단면간의 간섭에 의한 효과를 포함할 수 있도록 Figure 6.과 같이 선정하였다.

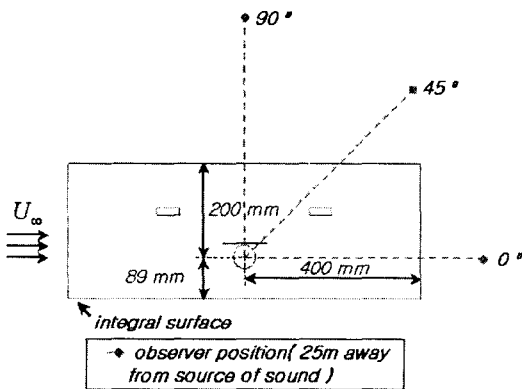


Figure. 6 Integral surface around Pantograph and observer position

고속전철에서 발생하는 소음의 측정은 원거리인 경우 소음원으로부터 25m 의 거리에서 측정하

게 되므로, 본 연구에서는 Figure. 6 과 같이 유동 방향으로  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  의 위치에 관찰자가 위치한 것으로 가정하여 지연된 시간(retarded time)에서 소음을 계산하였다. 소음계산을 위해 선정된 적분면으로부터 512 개의 time step 에서의 압력, 밀도, 속도 등의 값을 획득하였다. 소음은 3 차원 현상이므로 본 연구의 2 차원 해석결과를 적용하기 위하여 측면방향으로 동일한 유동결과를 갖는다는 가정이 전제되었으며, 측면방향의 가상의 길이는 1m 로 설정하였다. 우선 음압예측 결과를 살펴보면 Figure. 7 과 같다. Figure. 7 은 유동속도 180km/, 관찰자가  $0^\circ$  의 위치에서 계산된 경우이며, CASE 1 부터 6 의 경우까지 판이 없는 CASE 0 과 비교하기 위해 (a), (b), (c)와 같이 도시하였다. 공통적인 결과는 판이 없는 경우에 가장 큰 음압요동을 보이고 있으며, 판의 길이가 변화함에 따라 음압요동량의 크기에 구배가 존재함을 확인할 수 있다. 또한 음압의 주기에 있어 CASE 0 에서 4 의 경우까지는 큰 차이가 없는데 반해, CASE 5, 6 의 경우에는 주기가 크게 줄어들고 있다. 이러한 결과를 3.1 장 의 Figure. 2 에서 살펴보면, 판의 끝부분과 두 개의 팬헤드 스트립 간격과의 영역이 협소하여 각 경계에서 발생하는 압력 및 밀도의 요동이 상호 큰 영향을 주는 것으로 예측된다. 즉, 스트립 하부와 판의 상부 사이를 통과하는 유동장에서의 교란이 음압의 요동을 크게 하는 것으로 판단된다. 음압데이터를 이용하여 FFT(Fast Fourier Transform) 을 실시하였고, Figure. 8 에서 확인할 수 있다. 우선 전체적인 결과는 판토히도그래프에서 발생하는 소음은 저주파수 소음이 주요한 성분이며, 높은 주파수에서는 광대역 소음(broad band noise)형태라는 것이다. 첫번째 하모닉(first harmonic) 발생 주파수는 CASE 5, 6 은 약 1400 Hz 에서, 나머지 CASE 들은 약 150Hz 에서 발생하고 있으며, 고주파수 영역에서는 거의 비슷한 소음레벨을 보이고 있다. 음압에서 가장 큰 요동을 보였던 CASE 1 의 경우보다 5 의 경우의 소음레벨이 큰 이유는 본 연구에서는 A 보정(A-weighting)을 이용하여 소음레벨을 표현하는 것에 기인하고 있다. 유동속도 및 CASE 에 따른 SPL 을 Figure. 9 에서 확인할 수 있다. 박판의 길이 변화에 대한 소음레벨은 CASE 4 의 경우까지는 평판의 길이가 증가할수록 소음은 줄어들고 있지만, CASE 5 의 경우에 이르러 가장 큰 소음값을 보이며 6 의 경우는 다시 줄어드는 경향을 보이고 있다. 120km/h 에 비해 180km/h 일 경우 평균 13 dB(A) 증가하는 결과를 보였다.

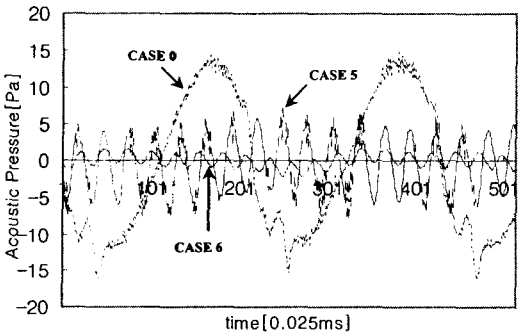
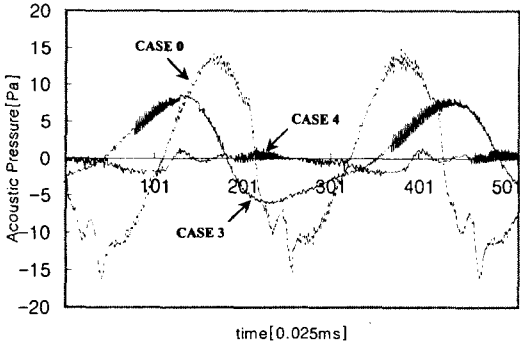
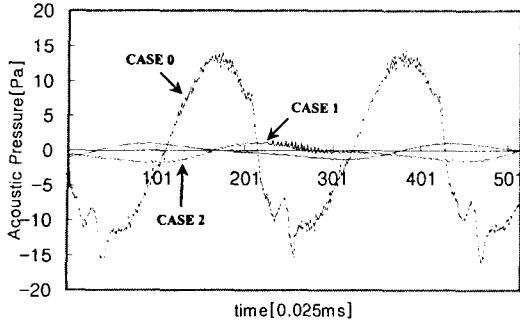


Figure 7. Acoustic pressure of 6 CASEs for time at 180km/h

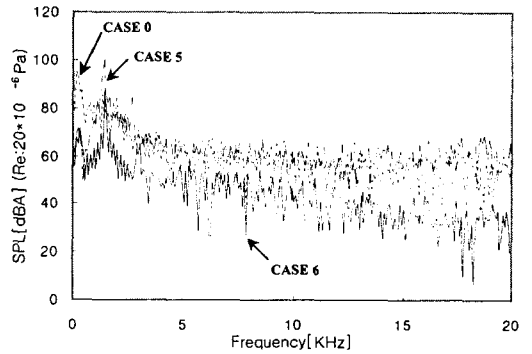
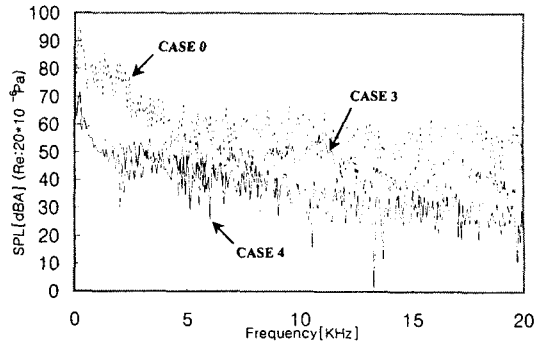


Figure 8 SPL spectra of 6 CASEs at 180km/h

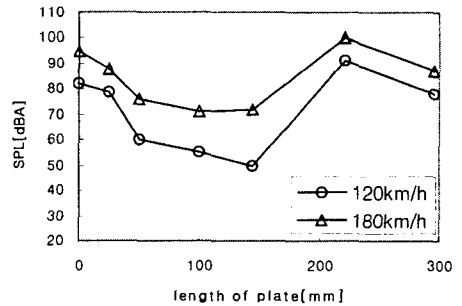
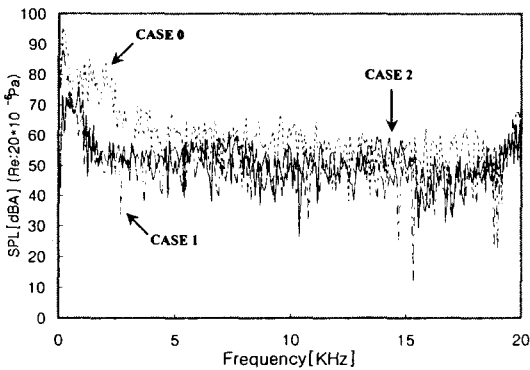


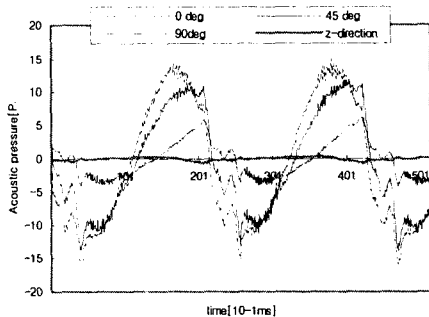
Figure 9 First harmonic SPL at 120km/h & 180km/h



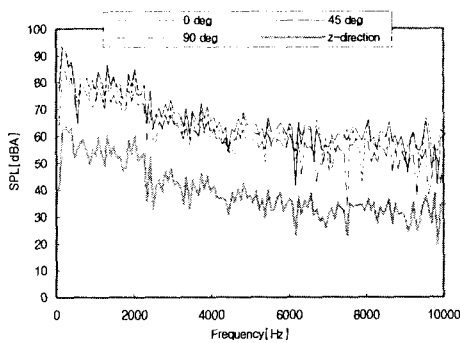
관찰자의 위치에 따른 소음예측은 유동속도 180km/h 에서 CASE 0 인 경우에 대해 실시되었고, 결과는 Figure. 10 에서 확인할 수 있다. 관찰자 위치는 유동후방을 0°, 전방을 180° 를 기준으로 하여 0°, 45°, 90°, 측방에 있다고 가정하여 계산하였다. 소음레벨의 크기는 측방, 90°, 45°, 0° 의 순으로 커지는 것을 확인할 수 있다. 이는 주도적인 소음성분이 유체에 작용하는 비정상적인

힘 또는 모멘텀에 의한 하중소음이며, 양력에 비해 항력성분이 더 우세함을 보여주고 있다. 또한 측면에서의 소음레벨이 급격히 줄어드는 이유 또한 하중소음의 방향성이 있음을 입증해 주는 결과라고 할 수 있다. 그림 (b)의 주파수 분석결과에서는 관찰자 위치에 관계없이 주파수분포는 일정함을 확인하였다.

이상의 소음예측 결과를 공력특성 해석과 비교해 보면, 요구되는 공력특성에 가장 부합하는 경우는 CASE 3 과 4 사이의 구간이었으며, 두께 및 하중소음만을 고려한 소음예측 결과에서는 이 구간에서의 소음이 가장 적게 예측되었다. 공기날개 후방 끝, 얇은 평판의 날카로운 끝과 같이 얇은 판이 존재하는 유동장의 소음해석에 있어서는 산란소음(scattering noise)과 같은 난류소음이 고려되어야 한다. 본 연구에서는 이러한 난류에 의한 소음은 계산에서 제외하고 있으며, 두께 및 하중소음에 의한 결과만을 제시하고 있다. 만일 사극자소음항 및 산란소음이 계산에 포함된다면 좀 더 정확한 결과를 얻을 수 있을 것이다.



(a) Acoustic pressure distribution



(b) SPL spectrum

Figure. 10 Acoustic characteristics for different observer position

## 6. 결론

고속전철의 전력공급장치인 판토그래프를 2 차원 이상화 시키고 공력특성을 개선하고자 변경된 단면모델에 대해 유동 및 유동소음을 해석하였다. 유동은 저속인 120km/h, 180km/h 인 경우에 대해 양력유발을 위해 부착된 크로스 바 상부의 평판의 길이 변화에 따른 공력압상계수를 CFD 를 통해 계산하였고, 소음은 관찰자가 유동 후방 25m 에 위치한 경우에 대해 SPL 을 예측하였고, FFT 해석을 실시하였다. 기준으로 삼은 공력특성을 만족하는 단면모델은 평판의 길이가 평균 73mm 일 것이며, 평판길이의 변화에 따른 공력압상계수의 구배가 존재함을 확인하였다. 유동소음은 FWH 방정식의 하중 및 두께 소음항 만을 계산하였으며, 180km/h 의 속도에서 평판의 길이가 약 220mm 일 경우 약 100dBA 로 가장 큰 소음값을 보이고 있다. 220mm 부근을 제외한 평판의 길이가 존재하는 거의 모든 구간에서 전체적인 소음레벨은 평판이 부착되지 않은 경우에 비해 낮은 결과를 보였다. 평판 끝 또는 평판과 크로스 바 사이의 좁은 유동장을 고려한 난류소음항에 대한 해석이 뒷받침된다면 좀 더 정확한 결과를 얻을 수 있을 것으로 예상된다.

## 참고문헌

- (1) 판토그래프 개발, 1998, “고속전철기술개발사업 2 차년도 연차보고서”, 건설교통부, 산업자원부, 과학기술부, pp. 33~44.
- (2) FLUENT Solver User Guide, 1998, Fluent Inc., Lebanon, NH, chapter 8, pp. 1~5, chapter 17, pp.1~32.
- (3) Kenneth S. Brentner and F. Farassat, 1997, An analytical comparison of the acoustic analogy and kirchhoff formulation for moving surfaces, American Helicopter Society 53<sup>rd</sup> Annual Forum, pp. 1~10.
- (4) Robert D.Blevins, 1984, Applied Fluid Dynamics Handbook, Van Nostrand Reinhold Company.
- (5) 김우석, 2000, “다량으로 배열된 단면 주위에서 발생하는 공력특성에 관한 수치적 해석”, 연세대학교 대학원 석사학위 논문.
- (6) 조운기, 이종수, 2001, “고속전철 판토그래프의 팬헤드 단면에 대한 공력특성 해석”, 춘계학술대회 논문집 E, 대한기계학회, pp. 367~372.
- (7) Jared S. Cox, Christopher L. Rumsey, Kenneth S. Brentner and Bassam A. Younis, 1997, NASA Technical Memorandum.
- (8) P. DI Francescantonio, 1997, A New Boundary Integral Formulation for the Prediction of Sound Radiation, Journal of Sound and Vibration, 202(4), pp. 491~509.

(9) Anthony R. Pilon, Anastasios S. Lyrintzis, 1998, Development of an Improved Kirchhoff Method for Jet Aeroacoustics, AIAA Journal, Vol. 36, No. 5, pp. 783~790.

(10) Marvin E. Goldstein, 1976, Aeroacoustics, McGraw-Hill Inc., New York.

(11) M. S. HOWE, 1998, Acoustics of Fluid-Structure Interactions, Cambridge University Press, New York.