

# 판토그래프 주변의 유동 및 소음 특성에 관한 연구

## A Study on Aerodynamic and Aeroacoustic Characteristics around Pantograph

유승원\* 민옥기\*\* 박춘수\*\*\* 정흥채\*\*\*\*

Yoo Seungwon, Min Oak-key, Park Choonsoo, Chung Heungchai

---

### ABSTRACT

This paper describes the analysis of aerodynamics and the prediction of airflow induced noise around simplified pantograph. First, computational fluid dynamics (CFD) is conducted for several model to evaluate linear/nonlinear flow field characteristics due to high speed flow and the CFD results support the computational aeroacoustics. The accurate prediction of the aeroacoustic analysis is necessary for designers to control and reduce the airflow induced noise. We adopt the acoustic analogy based on Ffowcs Williams-Hawkings (FW-H) equation and predict aeroacoustic noise.

---

#### 1. 서론

판토그래프(pantograph)는 고속 전철에 있어서 동력원으로부터 에너지를 공급받는 중요한 시스템으로 고속으로 주행할 때에도 전차선과 판토그래프 사이에 지속적인 접촉을 확보하고 안정된 전력을 공급해야만 한다. 그러나, 대부분의 판토그래프는 링크와 스프링의 복잡한 계로 이루어져 있고, 지붕 위에 돌출되어 있기 때문에 고속 주행에 따른 공기 유동에 의해 문제점을 일으키고 있다. 즉, 주행 저항을 크게 하고, 소음의 주요한 원인이 된다. 따라서, 이를 해결하기 위해서는 공기 저항을 최소화시키는 형상 설계가 필수적이며, 소음 감소를 위한 연구가 필요하다. 판토그래프 주변에서 발생하는 소음은 유동 자체에 바탕을 둔 힘, 또는 운동에 의해서 발생하는 소음으로 공력소음(aeroacoustics)으로 분류된다. 공력소음은 항공분야에서 많이 다루어 지지만, 기계나 원자력 분야에서도 그 중요성이 강조되고 있다. 고속 유동에 의한 난류 및 층

---

\* 연세대학교 박사과정  
\*\* 연세대학교 기계설계학과 교수  
\*\*\* 한국철도기술연구원 선임연구원  
\*\*\*\* 한국철도기술연구원 책임연구원

격과 등이 공력소음에 매우 중요한 요소로 이해되며, 난류의 고려정도에 따라 여러 소음이론[1]들이 개발되었다.

본 논문에서는 판토그래프 주변의 유동특성 및 소음 감소를 위해 판토그래프 주위에 카바를 설치 경우와 흡이 파인 경우에 대해 이차원적으로 모델링하여 판토그래프 주변의 유동해석을 수행하였고, 유동해석을 통해 나온 데이터를 음향근사(Acoustic analogy)기법인 FW-H (Ffowcs Williams-Hawkings) equation의 입력자료로 이용하여 공력소음해석을 수행하였다.

## 2. 유동해석

판토그래프 카바의 유무와 형상에 관한 검토를 위해 Spectrum[2] 수치해석 패키지를 이용하여 유동해석을 수행하였다. 본 장에서는 Spectrum을 이용하여 카바의 유무 및 주변 경계조건을 변화시키면서 유동해석을 실시하여, 카바의 유무 및 형상이 유동에 미치는 영향에 대해 살펴보고자 한다. 해석은 비압축성 점성유동으로 가정하였고, 시간평균한 연속방정식과 운동량 방정식은 다음과 같다.

$$\bar{u}_{i,j} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \bar{u}_{i,j} + \rho [\bar{u}_i \bar{u}_j + (\frac{\bar{p}}{\rho} + \frac{2}{3}k)\delta_{ij}]_{,j} = [(\mu + \mu_t)S_{ij}(\bar{u})]_{,j} + \rho b_i \quad (2)$$

$$\text{where } k = \frac{1}{2}(\overline{u_i u_i}), \quad S_{ij}(\bar{u}) = \bar{u}_{i,j} + \bar{u}_{j,i}$$

또한, 350km/h의 고속으로 움직이는 열차의 판토그래프 주위의 난류의 영향을 고려하기 위한 난류모델로는 One-equation 모델인 Spalart-Allmaras 모델[3]을 선정하여 해석하였다. Spalart-Allmaras 모델은 공기동력학적(aerodynamic) 문제에 최적화 시킨 난류모델로서 비교적 큰 격자간격으로도 좋은 난류 묘사능력을 제공해 주므로[4], 계산시간의 절감 등의 이점이 있다.

### 2.1 유동해석모델

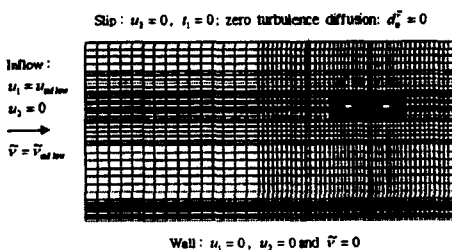


그림 1. 모델 1의 격자구성

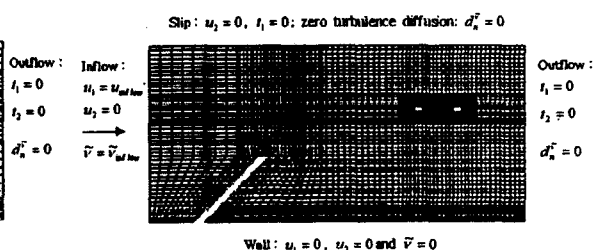


그림 2. 모델 2의 격자구성

Slip:  $u_2 = 0, t_1 = 0$ ; zero turbulence diffusion:  $d_n^{\tilde{v}} = 0$

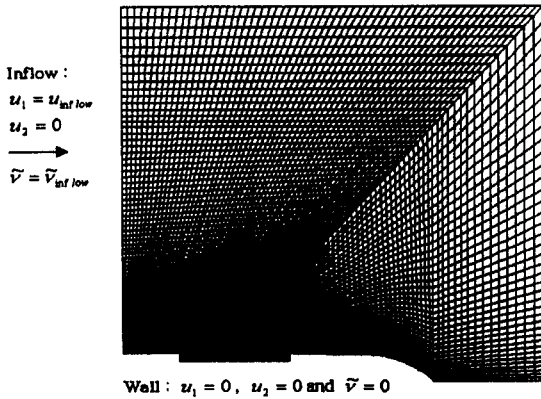


그림 3. 모델 3의 격자구성

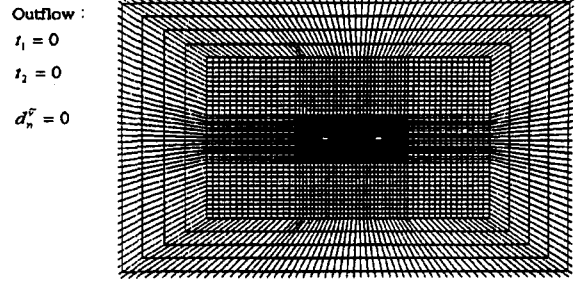


그림 4. 모델 3의 판토그래프 주변경자

해석모델은 그림 1 - 그림 3에서 보인 바와 같이 세가지 모델을 선정하였다. 여기서  $u_i$ 와  $t_i$ 는 각각 속도성분 및 traction 성분이고,  $\tilde{v}$ 는 One-equation 모델의 turbulence 변수이고  $d_n^{\tilde{v}}$ 는 diffusion flux 를 나타낸다. 판토그래프에 해당하는 부분에도 열차의 지붕에 해당하는 부분(Wall)과 마찬가지로 점착조건(no-slip condition)을 부여하였다. 해석은 Spectrum 을 이용하였으며, 시간적분 기법으로는 Hilver-Hughes-Taylor(HHT) algorithm 을 이용하여 시간에 대해 2 차의 정확도를 갖도록 변수들을 적용하였다. 시간중분은 0.1 msec 로 하여 해석을 수행하였다.

도표 1. 유한요소 모델 1, 2, 3에 대한 정보

	Model 1	Model 2	Model 3
Number of Nodes	6034	8654	29656
Element type	Brick Element	Brick Element	Brick Element
Number of Elements	2880	4148	14585

## 2.2 유동해석 결과

유동해석을 통해 판토그래프 주위의 유동 특성을 살펴볼 수 있었고, 판토그래프에 작용하는 양력과 항력의 변동도 얻을 수 있었다. 유동해석결과 얻어진 판토그래프에 작용하는 양력 및 항력의 변동과 판토그래프 주변 유동속도의 분포를 다음의 그림 4 - 그림 9에 제시하였다.

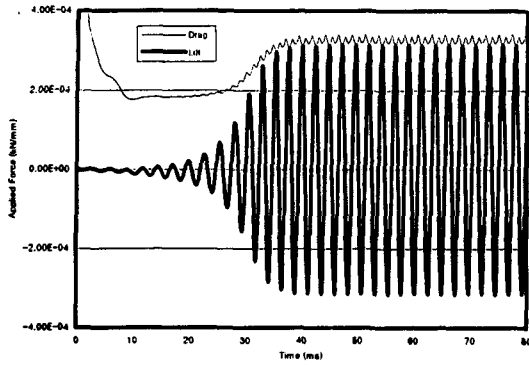


그림 4 모델 1에 작용하는 항력 및 양력의 변화



그림 5. 판토히아프 주변의 유동속도(모델 1)

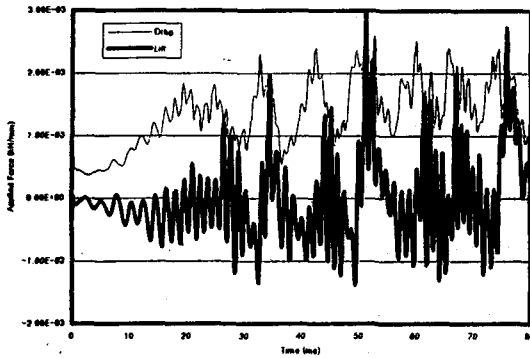


그림 6 모델 2에 작용하는 항력 및 양력의 변화



그림 7. 판토히아프 주변의 유동속도(모델 2)

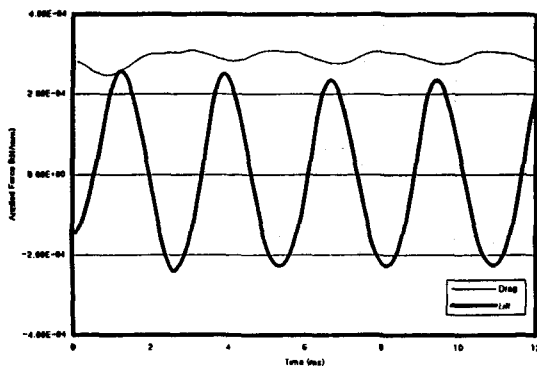


그림 8 모델 2에 작용하는 항력 및 양력의 변화

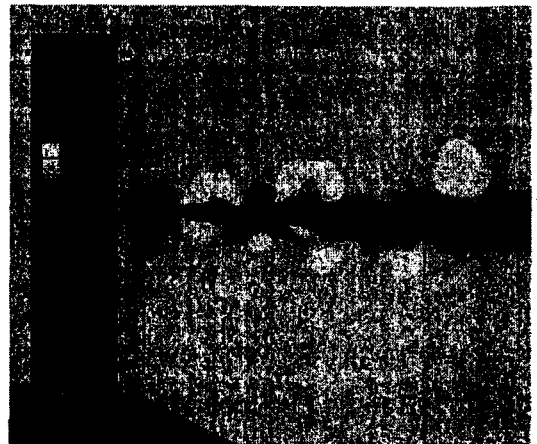


그림 9. 판토히아프 주변의 유동속도(모델 3)

모델 1의 경우, 판토히아프 주변에 vortex가 주기성을 가지고 나타나며 판토히아프에 걸리는 항력이나 양력도 규칙성을 가지고 나타나는 것을 확인할 수 있다.

모델 2의 경우, 판토그래프 앞에 위치한 카바의 영향으로 복잡한 형태의 유동이 발생하면서 카바의 형태에 기인한 저주파의 유동특성이 추가적으로 발생하는 것을 알 수 있다. 특히 카바의 형상이 부적절하게 가정되어 카바를 지난 빠른 속도의 유동이 판토그래프를 지나가면서 판토그래프에 걸리는 양력/항력의 변동이 카바가 없는 모델 1에 비해 상당히 커지는 것을 확인할 수 있다.

모델 3의 경우, 판토그래프 주위의 유동이 규칙성을 나타내는 것을 모델 1과 유사하였고, 판토그래프가 위치한 아랫쪽에 흡이 파인형상으로 인해 판토그래프에 걸리는 양력의 변동이 대략 20 퍼센트 정도 줄어든 결과를 나타낸다.

### 3. 소음예측

#### 3.1 공력소음해석을 위한 이론적 방법

공력 소음의 예측을 위해 FW-H 방법을 선택하였다. 이 방법은 kirchhoff formulation 을 움직이는 표면에 대해서 확장, 발전시킨 것으로 continuity equation 과 Navier-Stokes equation 을 파동 방정식의 형태로 발전시킨 것이기 때문에 유체문제에 있어서는 더욱 유용하다고 할 수 있다.

FW-H 방법은 기존의 kirchhoff 방법에 비해서 몇 가지 장점들을 가지고 있는데, 소음의 발생 원인별로 표현된다는 것이다. FW-H equation 은 두 개의 surface source(monopole and dipole)와 하나의 volume source(quadrupole)를 포함하고 있고, 소음항은 다음과 같이 세 개의 항으로 이루어져 있다.

$$p'(x,t) = p'_T(x,t) + p'_L(x,t) + p'_Q(x,t) \quad (3)$$

각각의 항은 물체의 모양과 운동학적 조건에 의존하는 thickness noise(monopole:  $p'_T$ ) 와 물체와 유체의 마찰로 인해 발생하는 loading noise(dipole:  $p'_L$ ) 및 유동장에서 나타나는 비선형 파동의 전파, 충격파, 난류등의 현상으로 발생하는 quadrupole noise( $p'_Q$ )로 구성된다. 이렇게 각각의 발생 원인별로 독립적으로 표현되기 때문에 소음의 원인을 쉽게 판단할 수 있다. 이 중에서 thickness noise 와 loading noise 는 면적분(surface integration)을 통하여 구할 수 있으며, quadrupole noise 의 경우 체적적분을 필요로하게 되어 계산의 어려움을 수반한다. 본 연구에서는 판토그래프 주위의 임의의 해석영역을 취하여 면적분을 통해 thickness noise 와 loading noise 만을 고려하여 소음해석을 실시하였다. Thickness noise 와 loading noise 는 각각 다음과 같이 표현된다[5].

$$4\pi p'_r(x,t) = \int_{f=0} [\frac{\rho_o(\dot{U}_n + U_{in})}{r(1-M_r)^2}]_{rel} dS + \int_{f=0} [\frac{\rho_o U_n (r\dot{M}_r + c(M_r - M^2))}{r^2(1-M_r)^3}]_{rel} dS \quad (4)$$

$$4\pi p'_L(x,t) = \frac{1}{c} \int_{f=0} [\frac{\dot{L}_r}{r(1-M_r)^2}]_{rel} dS + \int_{f=0} [\frac{L_r - L_M}{r^2(1-M_r)^2}]_{rel} dS + \frac{1}{c} \int_{f=0} [\frac{L_r(r\dot{M}_r + c(M_r - M^2))}{r^2(1-M_r)^3}]_{rel} dS \quad (5)$$

소음해석에 필요한 입력값으로는 CFD 해석결과로부터 얻어지는 각 절점에서의 속도, 가속도, 압력값을 이용하였다.

### 3.2 공력소음해석 결과

실제 소음해석은 3 차원을 대상으로 수행하여야 하나, 유동해석의 어려움으로 2 차원 모델에 대해 유동해석을 실시하였다. 따라서 2 차원 유동해석 결과를 소음해석에 이용함에 있어, 유동 해석 영역의 면의방향으로 폭 2 미터의 균일한 유동을 갖는 3 차원유동으로 가정하여 소음해석을 수행하였다. 소음값은 열차의 측면으로 부터 100 미터 떨어진 위치에서 계산하였다. 앞서 설명한 바와 같이 소음해석에 필요한 데이터는 유동해석 결과로부터 얻은 값이고, 매 시간간격에 대해 모든 데이터를 이용해 소음해석을 한다는 것은 데이터의 용량이 너무 커지는 관계로 규칙성을 나타내는 임의의 시간동안의 데이터를 이용하여 소음해석을 실시하였다

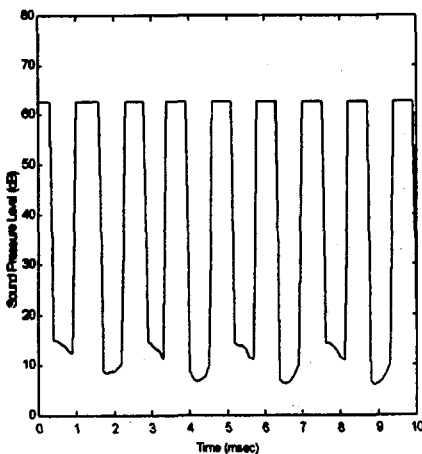


그림 10. 모델 1의 소음계산값

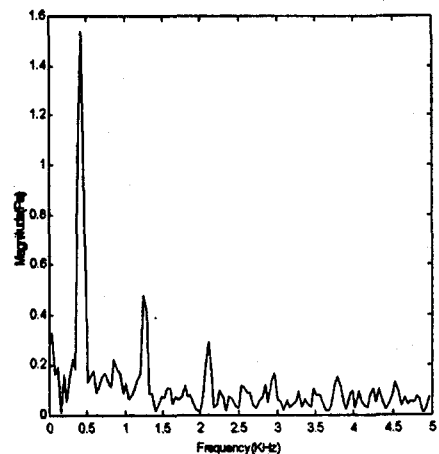


그림 11. 모델 1 소음값의 FFT 결과

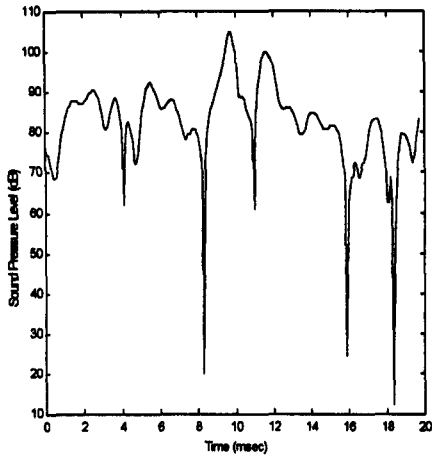


그림 12. 모델 2의 소음계산값

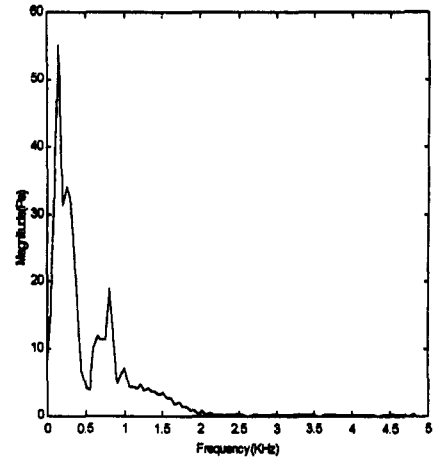


그림 13. 모델 2 소음값의 FFT 결과

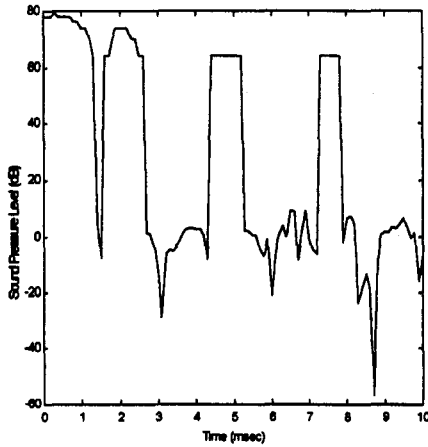


그림 14. 모델 3의 소음계산값

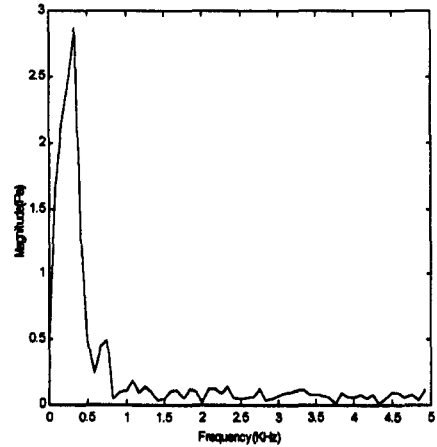


그림 15. 모델 3 소음값의 FFT 결과

소음해석 결과를 살펴보면, 모델 1이나 모델 3에 비해 모델 2의 소음 예측값이 크게 나왔으며 FFT 결과도 카바의 영향으로 인한 저주파의 소음이 크게 나오는 것을 확인할 수 있다. 모델 3의 경우도 모델 1과 비교하여 고주파의 소음들이 줄어들고 저주파의 소음이 강하게 작용하는 것으로 예측되었다.

#### 4. 결론

판토그래프 주변에 발생하는 유동과 소음특성에 관해 살펴보기 위해 세가지 모델을 선정하였고, 각각의 모델에 대해 유동해석을 실시하여 유동특성을 살펴보았다. 또한, 유동해석 결과를 이용하여 판토그래프 주위에서 발생하는 공력소음을 예측하였다.

판토그래프 주위에 카바를 설치하거나 홈을 파는 형태를 통하여 판토그래프 주위의 양력/

항력 특성에 변화를 미치는 것을 확인하였고, 판토히라프 주변에서 발생하는 공력소음특성에 영향을 줄 수 있음을 확인하였다. 특히 본 논문에서 설정한 흡이 파인 모델(모델 3)의 경우 양력변동을 줄여주었으며 공력소음 예측도 만족할만한 결과를 나타내는 것으로 판단된다.

## 후기

본 내용은 건설교통부와 산업자원부 및 과학기술부에서 시행한 고속전철기술개발사업의 연구결과임을 밝힌다.

## 참고문헌

1. Goldstein, M. E., *Aeroacoustics*, McGraw-Hill, 1976.
2. *SpectrumTM Solver User Guide*, Centric Engineering Systems, Inc., 1993.
3. Spalart, P. R. and Allmaras, S. R. (1992), A One-Equation Turbulence Model for Aerodynamic Flows, *AIAA Paper 92-439*, Reno, NV
4. Wilcox, D. C. (1998), *Turbulence Modeling for CFD*, the 2nd Edition, DCW Industries.
5. Brentner, K. S., and Farassat, F. (1998), Analytical Comparison of the Acoustic Analogy and Kirchhoff Formulation for Moving Surfaces, *AIAA Journal*, **36**, 1379-1386.