

# 판토크래프 펜헤드 형상 변화에 따른 소음저감효과 분석

## The effects of noise reduction by the change of penhead shape in pantograph

한재현\* · 김태민\* · 김정태\*\*

Jae Hyun Han, Tae Min Kim and Jeung Tae Kim

**Key Words** : Pantograph(판토크래프), Aerodynamic noise(공력 소음), Turbulence(난류), Vorticity(와도)

### ABSTRACT

Nowadays, high speed train has settled down as a fast and convenient environment-friendly transportation and it's need is gradually increasing. However increased train speed leads to increased aerodynamic noise, which causes critically affects comfortability of passengers. Especially, the pantograph of high speed train is protruded out of train body, which is the main factor for increased aerodynamic noise. In this research, to reduce aerodynamic noise pantograph, panhead's shape changed to aerodynamical shape. aerodynamic noise of pantograph is predicted by CFD (Computational Fluid Dynamic) and FW-H (Ffowcs Williams-Hawkings) equation. Also, the sound pressure level of aerodynamic noise of base and modified models are predicted. And the reduction effects of the sound pressure level is analyzed.

### 1. 서 론

고속철도 차량은 빠르고 편리한 친환경 교통수단으로 자리 잡고 있으며, 그 수요가 점차 증가하고 있다. 하지만 주행 시 발생 되는 공력소음은 주행속도가 300 km/h에 이르게 되면 난류의 박리와 와류발산 등의 영향이 커져 공력소음이 급격하게 증가하게 되며 이는 탑승자의 편의성에 악영향을 미치게 된다. 이러한 고속철도의 공력소음을 유발하는 대표적인 요소로는 판토크래프(집전장치)와 차간공간을 들 수 있다. 특히, 고속철도의 판토크래프는 철도차량 운행 시 필요한 전기를 공급하는 장치로 구조물이 차량의 외부로 돌출되어 있어 공력소음의 주요 원인이 되고 있다. 더불어 공력소음은 차량의 주행속도에 따라 4 ~ 6승에 비례하여 증가하기 때문에

고속철도 차량이 고속으로 주행할 경우 판토크래프의 영향은 더 커지게 된다. 따라서 이를 저감시키기 위해 많은 연구가 이루어지고 있다.<sup>(1)</sup> 일본의 경우에는 판토크래프의 소음 저감을 위해 부영이의 저소음 비행원리를 응용한 설계를 통해 신칸센 고속열차에 적용하여 펜더그래프에서 발생하는 소음을 저감시키거나 판토크래프 및 열차 방음판에 대하여 설계를 수행하여 FASTECH 360S 열차에 적용하는 등의 연구를 수행하였다.<sup>(2)</sup> 본 연구에서는 판토크래프의 공력소음 저감을 위해 펜헤드의 구조 형상을 공기역학적으로 유리하도록 변경하였다. 공력소음 예측을 위해 전산유체해석 (Computational Fluid Dynamic, CFD)을 통해 판토크래프의 주변 유동해석을 수행한 후, 음향근사기법(Acoustic Analogy)인 Ffowcs Williams-Hawkings (FW-H) equation을 적용하여 공력소음을 예측하였다. 구조 변경한 모델과 기본모델에서 발생하는 공력소음을 예측하였으며, 소음도를 비교하여 소음저감효과를 파악하였다.

† 교신저자; 학생회원, 홍익대학교 대학원 기계공학과  
E-mail : wd2007@naver.com

Tel : 02) 320-1113, Fax : 02) 320-1438

\* 홍익대학교 대학원 기계공학과

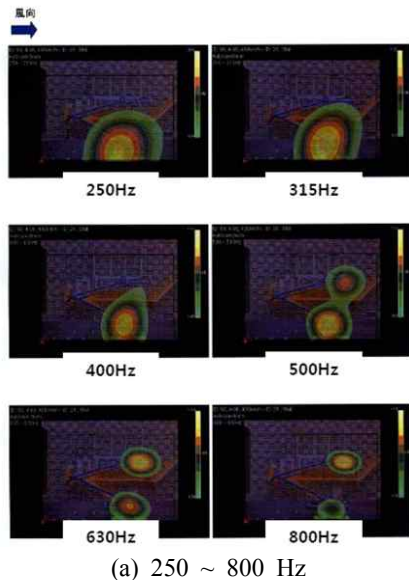
\*\* 홍익대학교 기계시스템디자인공학과

## 2. 판토크래프 공력소음 구조 변경

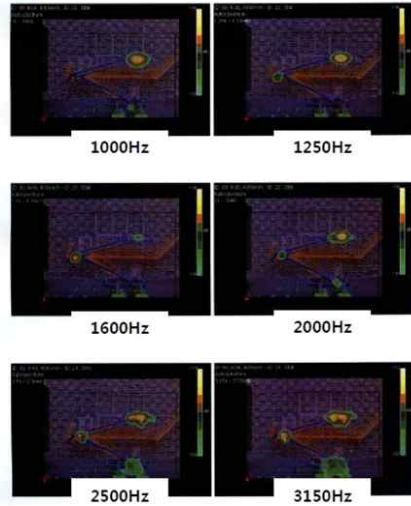
### 2.1 판토크래프 공력소음 발생 특성

#### (1) 공력소음 발생 특성

판토크래프 공력소음의 발생특성을 파악하기 위해 일본 철도기술연구소에서 수행되었던 풍동실험 결과를 참고하였다. Figure 1은 판토크래프 풍동 실험을 통한 각 주파수별 공력 소음 음압 분포를 나타낸다. 그림에서 볼 수 있듯이, 풍동실험을 통한 판토크래프 공력 소음의 가장 큰 특징은 소음을 발생시키는 구조를 크게 두 가지로 분리 할 수 있다는 것이다. 첫째로, 기초 하부 구조물이 있으며, 이 구조물은 주로 800 Hz 이하 영역 내에서 지배적으로 나타난다. 하지만 실제 고속철도 차량의 경우 판토크래프 하우징이 존재하기 때문에 이 영향은 크게 줄어든다. 두 번째로 판토크래프의 니(knee)와 펜헤드(pen head)가 있으며, 이는 500 Hz 이후 대역에서 지배적으로 나타난다. 하지만 knee의 구조는 펜헤드 구조에 비해 비교적 적은 음압분포를 가지는 것을 확인할 수 있다. 따라서 펜헤드 형상이 판토크래프 공력소음의 가장 지배적인 구조라 할 수 있다.



(a) 250 ~ 800 Hz



(b) 1000 ~ 3150 Hz

Figure 1 Sound pressure distribution of each frequency

### 2.2 펜헤드 집전판 구조 변경

#### (1) 소음 저감을 위한 펜헤드 집전판 구조 변경

펜헤드의 형상을 소음발생 특성과 주행 조건 등을 고려하여 연구를 수행하였다. Figure 2는 판토크래프의 구조 및 각 부의 명칭을 나타낸다. 판토크래프의 펜헤드는 집전판, 크로스바, 커넥팅 바, 가이드 혼 등으로 구성되어있다. 일반적인 펜헤드 형상은 사각주와 같은 뿔뿔한 형상을 가지고 있으며, 이러한 물체 뒤에서는 유체 박리와 난류의 발달로 와류동이 형성되게 된다. 이러한 복잡한 유동현상은 펜헤드의 진동을 유발하게 되며 펜헤드와 가선의 전력 공급과 불안정, 스파크 발생 등으로 펜헤드에 손상을 가져온다. 또한 소음측면에서는 유체의 큰 압력 변동을 가져오며, 이는 큰 공력소음을 야기하게 된다.

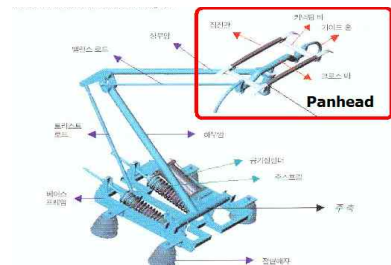

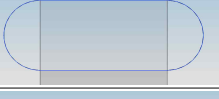
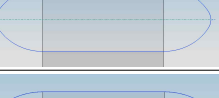
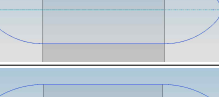
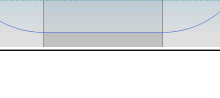


Figure 2 Structure and name of each part of pantograph

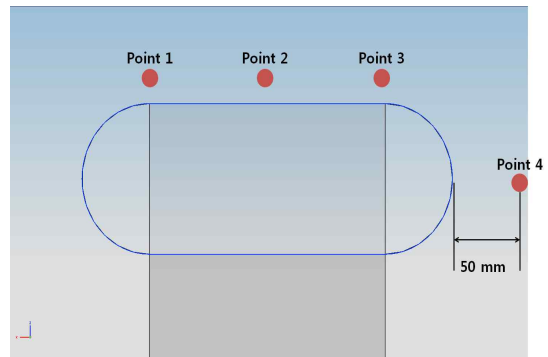
벤헤드의 구조 중 공력소음 발생에 큰 영향을 미치는 집전판의 형상을 공기역학적으로 유리한 유선형 형상으로 변경하여 판토크래프의 공력소음을 저감하고자 한다. 기존 사각주 형상을 갖는 벤헤드의 집전판을 변경하기 위해 고려되어지는 변수는 집전계의 두께, 넓이, 앞/뒤 곡률로 나타낼 수 있다. 본 연구에서는 설계 변경이 제한된 두께와 넓이를 기존 집전판의 길이와 같도록 고정하였으며, 집전판에 발생하는 양력의 영향이 적도록 상하대칭 형상을 선정하였다. 판토크래프는 고정된 상태에서 왕복 주행을 하게 된다. 따라서 소음 특성에 가장 지배적인 집전계의 앞과 뒤 형상이 틀러지게 되면 왕복 주행 시 발생하는 판토크래프의 공력 소음 특성이 크게 달라진다. 이를 위하여 집전계의 앞과 뒷 형상을 대칭으로 설계하고자 하였으며 설계 변경이 용이한 두께 방향의 곡률 반경을 변수로 설정하여 변경하고자 한다.<sup>(3)</sup> 따라서 형상을 변경하기 위한 제어 변수로 집전판의 앞뒤곡률을 4개의 case를 선정하여 연구를 수행하였다. Table 1는 각 case 별 제어변수의 수준과 형상을 나타낸다.

**Table 1** Control Factors and shape

Case	앞/뒤 곡률	형상
original	-	
1	10	
2	15	
3	20	
4	25	

형상이 좌우대칭 조건에 유동이 들어오는 방향을 기준으로 앞쪽과 뒤쪽의 곡률은 같게 되며, 이는 곡률에 따라 앞쪽과 뒤쪽의 발생시키는 와류량이 달라진다. 앞쪽에서는 유선형의 곡률에 따라 유입되는

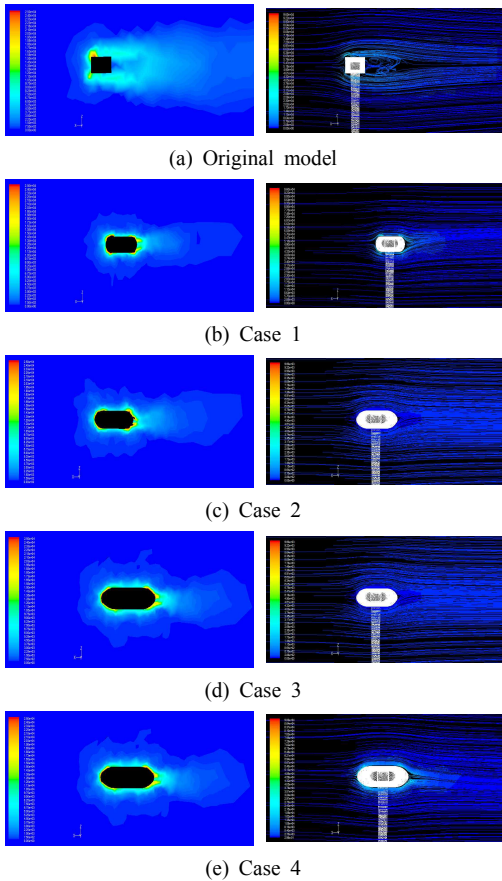
유체의 흐름이 달라지며, 앞쪽에서 공기저항과 와류 발생량이 달라진다. 마찬가지로 유동방향으로 집전판의 뒤쪽에서도 유선형 곡률의 크기에 따라 유체의 박리되는 지점이 달라지기 때문에 와류회流的 정도가 달라진다. 이를 해석하여 최적화된 형상의 곡률을 찾기 위해 유동해석을 수행하였다. 해석 방법으로는 전산유체역학 상용 프로그램인 FLUENT를 이용하여 유동특성과 와류발생량을 파악하였다. 각 형상의 Figure 3과 같이 앞쪽에서 유체가 집전판 쪽으로 들어오는 Point 1지점과 집전판의 중앙부분인 Point 2 지점, 유체가 집전판 끝단에서 뒤쪽 곡률 현상으로 유입되는 부분을 Point 3 지점, 뒤쪽 곡률 형상의 끝단에서 50 mm 떨어진 지점에 Point 4 지점을 두어 각 Point의 와류 발생량을 파악하였다.



**Figure 3** Vorticity measuring point

경계조건으로는 고속철도가 370 KPH의 속도로 주행할 경우를 기준으로 해석을 수행하였다. 3차원 정상상태로 해석을 수행하였다. 지배방정식으로는 Navier-Stokes 방정식을 이용하여 해석을 수행하였고 난류 모델은 상용 유동해석 소프트웨어인 FLUENT에서 제공하는 Standard k-epsilon 2 equation 모델을 사용하였으며, 압력장을 풀기 위해서 연속방정식으로부터 압력을 계산할 수 있는 방정식을 유도하여 속도와 압력을 연관시켜 계산하는 "Semi Implicit Method for Pressure-Linked Equation algorithm"을 사용하였는데, 그 형태가 간단하고 가장 많이 사용되는 algorithm 중 하나이다.

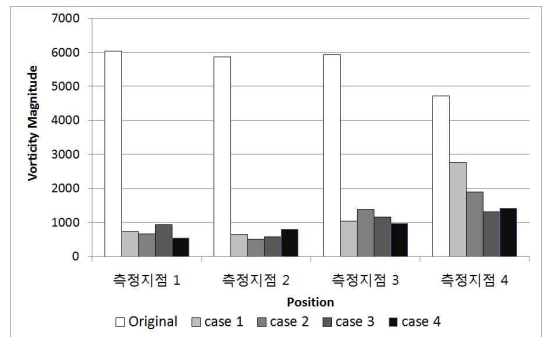
각 case별 유동특성과 각 측정지점의 와류량을 비교해 보았다. Figure 4는 각 case별 와류의 크기 contour와 유선의 흐름을 나타낸다.



**Figure 4** Flow characteristics in each case (Left : Vorticity magnitude, Right : Pathline)

유동해석 결과에서 기존 모델인 사각주 모델에서는 집전판 앞단에서 유체가 부딪히면서 와류가 크게 발생되며, 모델 뒤쪽에서도 비정상 와류가 많이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 하지만 곡률이 적용된 모델은 기존 모델에 비해 와류발생량이 적고 유선의 흐름도 매끄러운 것을 확인할 수 있다. Figure 5는 각 측정지점에서의 평균 와류의 크기를 도시한 그래프이다. 그림에서 볼 수 있듯이 기존 모델과 유선형 case별 각 모델들과의 와류량 크기를 비교 했을 때 곡률이 있는 모델이 와류량이 크게 감소하는 것을 확인 할 수 있다. 유선형이 적용된 case 1 ~ 4의 결과를 비교해보면 측정지점 1의 와류량은 앞쪽 곡률에 의해 영향을 많이 받으며, 측정지점 4의 와류량은 뒤쪽 곡률에 의해 영향 많이 받게 된다. 해석 결과 유선형 곡률이 25 mm인 경우 앞단에서 발생 되는 와류의 크기와 후류에서 발생하는 곡률이 가장

적은 것을 확인할 수 있다.

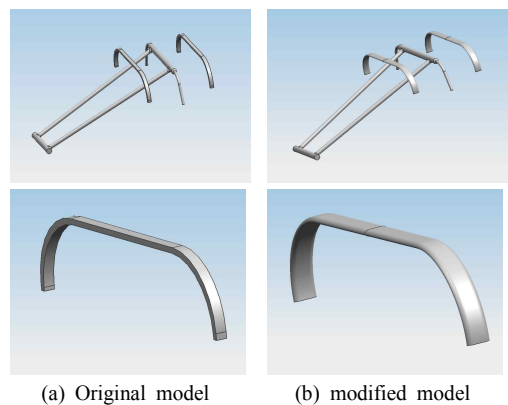


**Figure 5** Average vorticity magnitude at each measuring point

### 2.3 펜헤드 형상 변경에 따른 소음저감효과 분석

#### (1) 소음해석을 위한 모델링

펜헤드 집전판 구조 변경에 따른 소음 저감 효과를 분석하기 위해 고속철도 차량 판토품그래프를 모델링하였다. 효율적인 해석을 위해 판토품그래프 형상을 단순화하였으며, 이 모델을 이용한 소음해석은 선행 연구에서 실제 판토품그래프 풍동실험 결과와 비교분석하여 신뢰성을 검증한 모델이다.<sup>(4)</sup> 또한 이 모델을 이용하여 와류량 비교를 통해 최적의 형상인 유선형 곡률이 25 mm인 형상을 모델링하였다. Figure 6은 모델링한 결과이며, 두 모델을 동일한 조건으로 소음해석한 후 소음저감 효과를 살펴보고자 한다.



**Figure 6** Pantograph model

공력 소음 해석을 위해서는 일반적인 유동해석과는 달리 비정상현상이 지배적이고 소음원이 각 주파수에 따른 소음 수준을 가짐으로 비정상해석이 수행

되어야 된다. 본 연구에서는 전산유체해석 상용프로그램인 FLUENT를 활용하여 3차원 비압축성 유동에 대한 비정상(unsteady)유동해석을 수행하였으며, 효율적인 해석을 위해  $k-\epsilon$  2 equation 난류 모델을 사용하여 정상상태 유동해석을 먼저 수행하고, 그 결과를 비정상상태 해석의 초기조건으로 사용함으로써 수립하는 시간을 단축하였다. 비정상상태의 정확한 난류 유동장을 파악하기 위해 대와류모사법(Large-Eddy Simulation; LES) 난류모델을 선정하였으며, 아격자 난류점성을 계산하기 위해 Smagorinski-Lilly 모델을 사용하였다. 판도그래프의 소음해석을 위하여 약 60 만개의 3D격자인 Tetrahedral mesh 를 사용하여 격자를 생성하였으며, 판도그래프의 펜헤드와 knee의 주변에는 fine한 격자를 형성하였다. Figure 7에서 볼 수 있듯이 격자의 수를 최대한 줄이고 계산 효율을 증대시키기 위해 판도그래프의 대칭적인 특징을 이용하여 대칭되는 면에 Symmetric 조건을 설정하여 전체 형상의 절반만을 사용하여 효율적인 해석을 수행할 수 있도록 모델링하였다. 정확한 해석이 이루어질 수 있도록 타임스텝을 4000 Hz의 주기보다 작도록 0.00005 s로 선정하였다. 또한 flow time은 저주파수인 100 Hz의 주기의 시간보다 길도록 0.1 s로 선정하여 해석을 수행하였다.

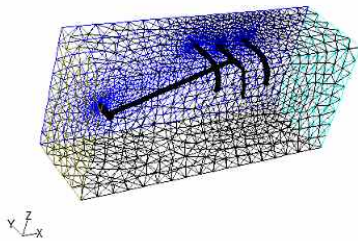


Figure 7 Flow field model around pantograph

## (2) 경계조건 및 지배방정식

경계조건으로는 입구에서 유입되는 공기의 속도를 370 KPH로 균일하게 설정하였다. 공력소음이 지배적인 고 레이놀즈 수 유동은 고주파수 영역의 미소 스케일과 난류 특성을 가지는 간헐적인 운동이 서로 유동에너지 전달을 유발시킨다. 이를 해석하기 위해 난류의 와류를 표현하는 최소 스케일인 Kolmogorov 스케일을 포함하는 DNS (Direct

Numerical Simulation)해석을 이용하는 것은 비용이나 시간적 측면에서 비현실적이다. 따라서 어느 정도 규모의 비정상 유동을 모사할 수 있는 대와류모사법 (Large-Eddy Simulation; LES)을 사용하는 것이 바람직하다.

본 연구에서는 상용 전산유체해석 프로그램인 FLUENT를 이용하여 비정상상태 수치해석을 수행하였다. 난류모델로는 대와류모사법을 선정하였다. LES 에서는 아격자 모델 (SubGrid-Scale; SGS)을 필요로 한다. 큰 스케일 내의 아격자 스케일의 효과를 나타내는 아격자 난류점성 모델을 사용하였으며, 아격자 난류점성을 계산하기 위해 Smagorinski-Lilly 모델을 선정하여 사용하였다.<sup>(5,6)</sup> 이 모델은 에너지의 순수 소산량이 해석격자에서 아격자 크기로의 에너지 전달량과 같다는 사실을 와류-점도에 의해 반영함으로써 평균적으로 에너지 보존이 만족하도록 제안된 모델이다. 식은 다음과 같다.

$$\mu_t = \rho L_S^2 |\bar{S}|$$

$$L_S = \min(\kappa d, C_S V^{\frac{1}{3}})$$

여기서  $L_S$ 는 혼합길이,  $\kappa$  는 von Kármán 상수,  $d$ 는 가까운 벽면거리,  $C_S$ 는 Smagorinsky 상수, 그리고  $V$ 는 격자의 체적을 나타낸다.

## (3) 소음 예측 기법

공력 소음의 예측을 위해 음향근사(Acoustic analogy)기법인 FW-H(Ffowcs Williams Hawkins) equation을 선택하였다. 이 방법은 continuity equation과 Navier-Stokes equation을 파동 방정식의 형태로 발전시킨 것이기 때문에 유체문제에 있어서 유용하다고 할 수 있다. FW-H equation은 소음의 발생 원인별로 표현되며, 두 개의 surface source(monopole, dipole)과 하나의 volume source(quadrupole)를 포함하고 있고, 소음향은 다음과 같이 세 개의 항으로 이루어져 있다.

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

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, 난류 등의 현상으로 발생하는 quadrupole noise( $p'_Q$ )로 구성된다. 이렇게 각각의 발생 원인으로 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 필요로 하게 되어 계산의 어려움을 수반한다. 또한, quadrupole noise 의 경우 Ma수가 작은 경우 공력소음에 미치는 영향은 작다고 알려져 있으므로 본 연구에서는 quadrupole noise 에 대한 영향은 고려하지 않는다.

팬헤드 중앙에서부터 1 m 떨어진 지점과 팬헤드의 높이에서 선정하여 Figure 8과 같이 소음측정 포인트를 설정하였다. 소음측정 포인트의 압력변동을 확인하여 주기적인 압력변동이 관측되지 않고 불규칙한 압력 패턴을 보이는 0 ~ 0.5 s 의 해석 초기 구간은 소음분석에 사용하지 않고 0.5 ~ 1.0 s의 구간을 소음분석에 사용하여 좀 더 정확한 소음해석 결과를 도출하였다.

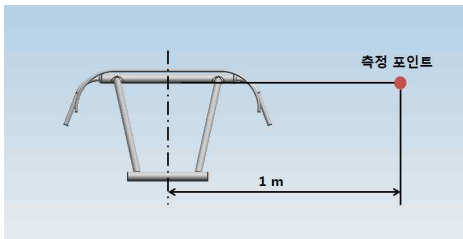


Figure 8 Flow field model around pantograph

#### (4) 소음저감 효과 분석

고속철도 차량의 집전판 형상을 변경하여 공력 소음 저감 효과를 전산해석을 통해 분석하였다. 집전판 형상 변경은 설계 변경이 용이한 집전판 두께의 곡률 반경을 변경 하였다. Figure 9은 두 모델의 소음 발생 특성과 전체소음도를 나타낸다. Figure 9에서 보는바와 같이 판토히그래프의 집전판의 형상이 고주파영역에서는 소음저감효과가 미비한 것을 확인할 수 있다. 저주파영역의 경우 150 ~ 630 Hz에서 소음 저감 효과가 크게 나타나며, 전체 소음도가 약 6 dB 저감되는 것으로 예측되었다.

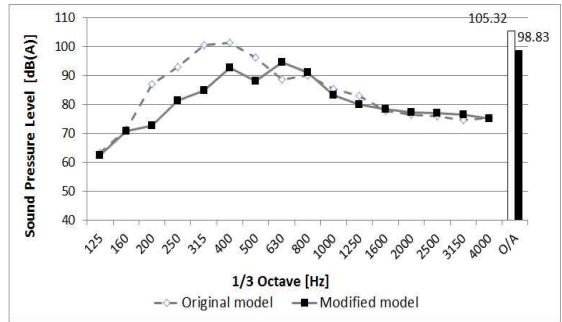


Figure 9 Results of pantograph noise

고속철도 차량 주행 시 판토히그래프 공력 소음의 경우 전체적인 주파수 대역에서 소음이 발생되지만, 저주파 대역의 경우 판토히그래프 하부 구조물의 영향이 상대적으로 크다. 따라서 소음 저감 측면에서 판토히그래프의 집전계 설계 변경이 저주파 대역에서는 큰 이득을 얻기 힘들다. 팬헤드의 공력 소음 기여도가 지배적인 영역은 500 Hz 대역 이후부터이며, 결과적으로 실제 고속철도 차량의 판토히그래프 공력 소음 저감 효과는 약 1.5 dB 일 것으로 예상된다. 판토히그래프 집전계의 간단한 형상 변경을 통하여 효율적인 공력 소음 저감이 이루어 질 수 있을 것으로 예상되며 이는 고속철도 차량의 환경 소음 및 실내 소음을 저감 시킬 수 있을 것으로 예상된다.

### 3. 결 론

본 연구에서는 철도 차량 외부로 돌출되어 있어 공력소음의 발생이 큰 판토히그래프의 공력소음 저감을 위해 팬헤드의 집전판의 형상을 공기역학적으로 유리하도록 변경하였다. 팬헤드 집전판 구조 변경에 따른 소음 저감 효과를 분석하기 위해 판토히그래프를 단순화하여 모델링하였으며, 이 모델은 판토히그래프 풍동실험 결과와 비교분석하여 신뢰성을 검증한 모델이다. 공력소음 예측은 전산유체해석 CFD를 이용하여 판토히그래프의 주변 유동해석을 수행한 후, 음향근사기법(Acoustic Analogy)인 Ffowes Williams-Hawkings (FW-H) equation을 적용하여 공력소음을 예측하였다. 기본 모델과 구조 변경한 모델의 소음도를 비교하여 소음 저감 효과를 파악하였다. 팬헤드의 공력 소음 기여도가 지배적인 영역인 500 Hz 대역 이후의 소음저감 효과는 약 1.5 dB 일 것으로 예상된다. 판토히그래프 집전계의 간단한 형상

변경을 통하여 효율적인 공력 소음 저감이 이루어질 수 있을 것으로 예상되며 이는 고속철도 차량의 환경 소음 및 실내 소음을 저감 시킬 수 있을 것으로 예상된다.

## 후 기

본 연구는 국토해양부 미래철도기술개발사업(과제 번호 07차세대고속철도A01)의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

## 참 고 문 헌

(1) Holmes, B. S., Dias, J., Jaroux, B. A., Sassa, T., Ban, Y., 1997, Predicting the wind noise from the pantograph cover of a train, International Journal for Numerical Methods in Fluid, Vol.24, Issue.12, pp. 1307~1319.

(2) Kurita, T., Hara, M., Yamada, H., Wakabayashi, Yuusuke, 2009, Reduction of Pantograph Noise of High-Speed Trains, Journal of Mechanical systems for Transportation and Logistics, Vol.3, Issue.1, pp. 63~74.

(3) RHO, J, H., Kwak, M, H., KANG, H, M., JEONG, J, H., JEONG, J, K., LEE, D, H., 2007, ROBUST DESIGN OPTIMIZATION OF THE PANTOGRAPH PANHEAD SHAPE ON HIGH SPEED TRAIN, Proceedings of the KSME Annual fall Conference. pp. 1523~1534.

(4) Han, J. H., Kim, T. M., Kim, J. T., Kim, J. S., 2011, Prediction of Aerodynamic noise of Pantograph on a high-speed train using the Acoustic Analogy, Proceedings of the Korea Society for Railway Annual fall Conference, pp. 150~157.

(5) Lilly, D. K., 1992, A Proposed Modification of the Germano Subgrid-Scale closure model, Physics of Fluids, pp. 633~635

(6) Kang, S. M., 2000, On Subgrid-Scale Models for Large-Eddy Simulation of Turbulent Flows, Transactions of the KSME B, Vol. 24, No.11, pp. 1523~1534.