전산해석을 통한 고속철도용 저소음 저저항 팬터그래프 형상설계 연구

정 성 민,[1] 이 상 아,[1] 노 주 현,[2] 김 규 홍*[3]
[1]서울대학교 기계항공공학부
[2]현대로템 고속차량개발팀
[3]서울대학교 기계항공공학부 항공우주신기술연구소

RESEARCH OF HIGH-SPEED TRAIN PANTOGRAPH SHAPE DESIGN FOR NOISE AND DRAG REDUCTION THROUGH COMPUTATIONAL ANALYSIS

S.M. Jeong,[1] S.A. Lee,[1] J.H. Rho[2] and K.H. Kim*[3]
[1]Dept. of Mechanical & Aerospace Engineering, Seoul Nat. Univ.
[2]High Speed Train Development Team, R&D center, Hyundai Rotem Company
[3]Dept. of Mechanical & Aerospace Engineering/Institute of Advanced Aerospace Technology, Seoul Nat. Univ.

In this paper, study of high speed train pantograph arm shape and panhead cross-section for aerodynamic drag and noise reduction is performed. In previous research, it is known that knee of pantograph arm and panhead of pantogpraph are main sources of noise from high speed train pantograph. By numerical simulation using full scale pantograph model, pantograph arm and panhead optimization are performed. As a result, drag and noise are reduced at both studies about high speed pantograph.

Key Words : 팬터그래프(Pantograph), 공력소음(Aero-Acoustics), 고속열차(High Speed Train)

1. 서 론

온실가스효과에 의한 지구온난화가 가속화됨에 따라 국제적으로 CO_2저감은 교통수단의 연구에 있어 큰 화두가 되고 있다. 그 중 고속열차는 친환경적이고 효율적인 운송수단으로 유럽, 중국, 일본 등에서 연구가 활발하게 진행되고 있는 편이다. 국내에서도 2004년에 운행을 시작한 KTX를 시작으로 현재까지 지속적으로 고속열차 분야가 발전해 왔으며 현재 상용화 예정중인 차세대 고속열차(HEMU-430X)은 최고속도 430 km/h, 운행속도 350 km/h를 목표로 개발 중이며 최근 시험에서 최고속도에 근접한 421 km/h의 속도를 달성하였다.

이렇게 열차의 주행속도가 증가할수록 다양한 요인들이 증속을 방해하게 되는데 그 중에서도 열차속도의 제곱에 비례하는 양력과 항력, 그리고 6 ~ 8승에 비례하는 공력소음은 열차의 주행속도가 300 km/h 이상이 되면서부터 전체 열차 성능에 지배적인 영향을 끼치게 된다[1].

특히나 고속열차의 전력공급에 사용되는 상단부의 팬터그래프는 유선형의 고속열차형상으로부터 돌출된 형상이기 때문에 주요소음원이자 열차 주행저항의 주요 요소가 되어 연구필요성이 높아지고 있다. Cho et al.[2]의 연구에서는 팬터그래프 축소모델 실험을 통해서 팬터그래프의 주요 소음원이 암연결부와 팬헤드임을 알았으며 Ikeda and Takaishi[3]와 Kurita et al.[4]은 팬터그래프의 소음저감을 위한 형상개발에 대한 연구를 수행하였다. Holmes et al.[5]은 소음저감을 위한 커버형상에 관한 연구를 하였으며 Lee et al.[6,7]과 Kang et al.[8,9]은 팬터그래프의 소음특성 및 커버 시스템에 대한 풍동시험을 수행하였다.

선행연구들에서 팬터그래프의 주요 소음원이 팬헤드와 암연결부임을 확인한 뒤 본 연구에서는 이 주요 소음원들의 소음저감을 위한 형상설계 연구를 수행하였다. 우선 암 연결부의 경우 유선형 커버를 설치한 모델의 전산해석을 수행하여

Received: May 26, 2015, Revised: June 17, 2015,
Accepted: June 17, 2015.
* Corresponding author, E-mail: aerocfd1@snu.ac.kr
DOI http://dx.doi.org/10.6112/kscfe.2015.20.2.067
ⓒ KSCFE 2015

Fig. 1 CX pantograph

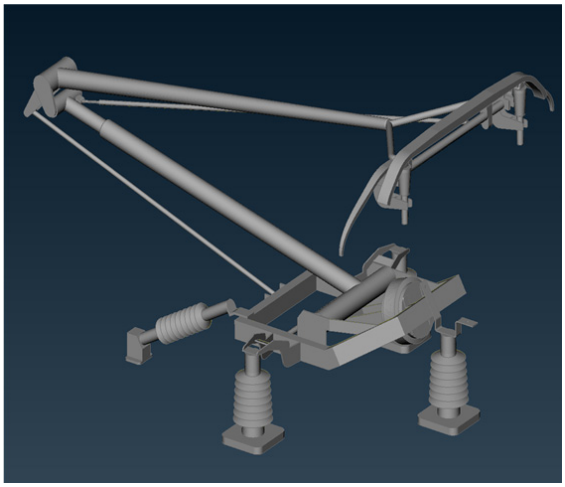


Fig. 2 Pantograph 3D CAD model

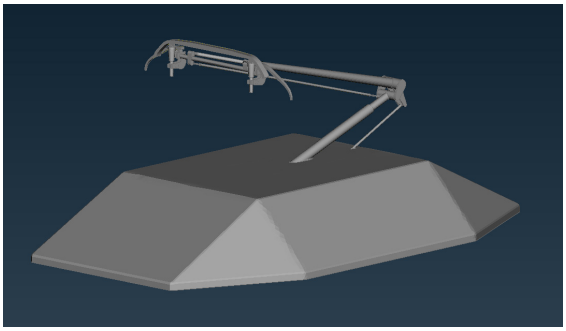


Fig. 3 Pantograph 3D CAD model with cover

소음 및 저항이 저감됨을 확인한 뒤 팬터그래프 암의 단면형상에 대한 최적설계를 수행하고 최적단면을 선정하여 전산해석을 통해 공력 소음과 저항이 저감됨을 확인하였다. 추가로 팬헤드 단면형상의 최적설계를 수행하여 소음 및 항력이 줄어든 것을 확인하였다.

2. 본 론

2.1 수치해석 기법

2.1.1 격자 및 모델

본 연구에서 해석에 사용된 팬터그래프 모델은 Fig. 1의 KTX-산천에서 사용되는 싱글암 싱글헤드인 Faiveley의 CX 팬터그래프이다. 실제 모델을 바탕으로 Fig. 2와 같이 3D CAD 모델을 제작하였다. 실제 팬터그래프가 설치될 때에는 하부형상이 커버에 의해서 가려지므로 팬헤드와 팬터그래프 암만 외부유동에 노출된다. 따라서 Fig. 3와 같이 하부 커버를 통해서 팬헤드와 팬터그래프 암에 대해서만 연구를 진행하였다. Fig. 3와 같이 완성한 3D CAD 데이터를 격자생성 프로그램인 Gambit과 ANSA를 이용해 표면격자를 완성하고 Tgrid를 이용하여 공간격자를 생성하였다. 난류모델의 정확성을 위해 경계층 내에 20층 이상의 격자가 쌓이도록 Prism을 만든 후 격자를 생성하였다. 완성한 수치해석용 격자수는 약 2200만개이다.

2.1.2 유동

본 연구에서는 유동해석용 상용코드인 FLUENT를 이용하여 해석을 수행하였다. 정상 상태 유동 해석을 통해 유동을 어느 정도 수렴시킨 이후 LES난류모델을 이용해 비정상 상태 유동에 대한 해석을 0.0001초씩 0.4초까지 수행하였다. LES 난류모델은 큰 스케일의 와류에 대해서는 직접 계산을 하고, 작은 스케일의 와류에 대해서는 난류 점성 모델을 사용하여 계산을 수행하기 때문에 박리 및 와류 예측에 뛰어나며 정확한 소음측정을 위한 모델로 적합하다. 본 연구에서는 Smagorinsky-Lilly 모델을 적용하여 작은 스케일의 난류점성 계산이 용이하도록 하였다.

$$\mu_\tau = \rho L_s^2 |\vec{S}|$$
$$L_s = \min(\kappa d, C_s, V^{-\frac{1}{3}}) \quad (1)$$

여기에서 L_s, κ, d, C_s, V는 혼합길이, von Karman 상수, 가장 가까운 벽면거리, Smagorisky 상수, 그리고 격자 체적을 나타낸다. Smagorinsky 상수는 Lilly가 제안한 상수값 0.1을 적용하였다.

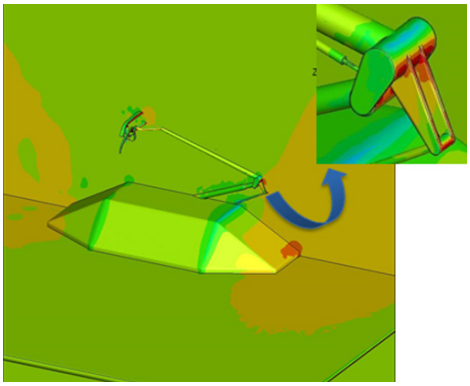


Fig. 4 CX pantograph pressure contour

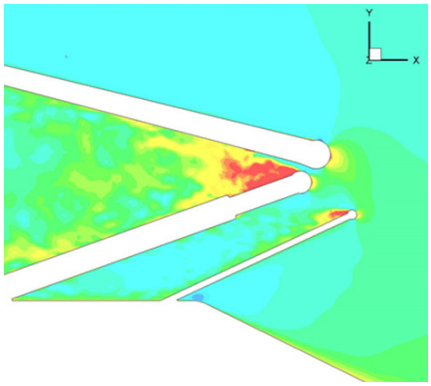


Fig. 5 CX pantograph velocity contour

2.1.3 소음

본 연구에서는 Ffowcs Williams와 Hawkings에 의해 제안된 FW-H 모델을 이용하여 공력소음 해석을 수행하였다. 질량 및 운동방정식은 다음과 같다[10].

$$\frac{1}{a_0^2}\frac{\partial p'}{\partial t^2}-\nabla^2 p' = \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j}\{T_{i,j}H(f)\} - \frac{\partial}{\partial x_i}\{[P_{i,j}n_j+\rho(u_n-v_n)]\delta(f)\} + \frac{\partial}{\partial t}\{[\rho_0 v_n+\rho(u_n-v_n)]\delta(f)\} \quad (2)$$

$$T_{ij}=\rho u_i u_j + P_{ij} - a_0^2(\rho-\rho_0)\delta_{ij}$$

$$P_{ij}=p\delta_{ij}-\mu[\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}+\frac{2}{3}\frac{\partial u_k}{\partial x_k}\delta ij]$$

$p'=$ 원방에서의 음압 $(p'=p-p_0)$
$a_0=$ 원방에서의 음속
$u_i=$ 물체 표면에서 x_i 방향 유체 속도
$u_n=$ 물체 표면에서 수직 방향 유체 속도
$v_i=$ 물체 표면의 x_i 방향 속도
$v_n=$ 물체 표면의 수직방향 속도
$\delta(f)=$ Dirac delta function
$H(f)=$ Heaviside function
$T_{ij}=$ Lighthill's stress tensor
$P_{ij}=$ compressive stress tensor

이때 Nyquist frequency는 비정상 유동 해석의 시간간격에 의해 결정되며 식 (3)과 같다.

$$f_{\max}=\frac{1}{2\triangle t} \quad (3)$$

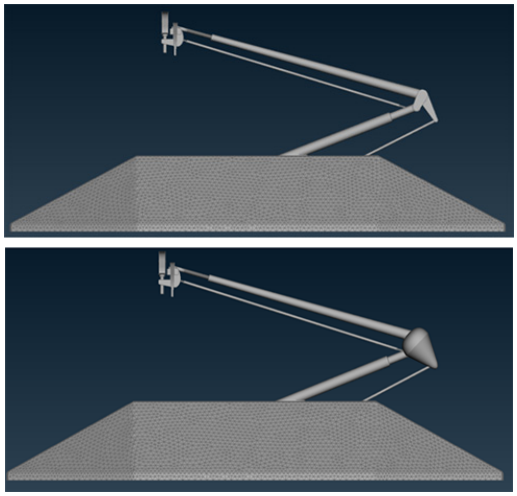


Fig. 6 CX pantograph(top) and Pantograph model with streamlined cover(bottom)

선행연구[11]의 결과에 의하면 팬터그래프의 소음은 5000 Hz이하에서 주요하게 나타나므로 계산 효율을 위해 5000 Hz까지 분석이 가능한 10^{-4} s를 Time step으로 선정하였다.

2.2 해석 결과

해석은 정상주행상태인 Close knee조건(팬터그래프의 암 연결부방향에서 유동이 불어오는 조건)에서 수행되었으며 30 m/s, 35 m/s, 40 m/s, 45 m/s의 4가지 속도대역에서 해석을 수행하였다.

2.2.1 팬터그래프 암 설계

기존 CX 팬터그래프의 해석결과 Fig 4와 같이 암 연결부 형상이 유동진행방향과 거의 수직으로 만나 표면에서 고압을 형성함을 확인할 수 있는데 이는 팬터그래프 암의 압력저항이 크게 상승하는 요인이 된다. 또한 Fig. 5를 볼 때 연결부

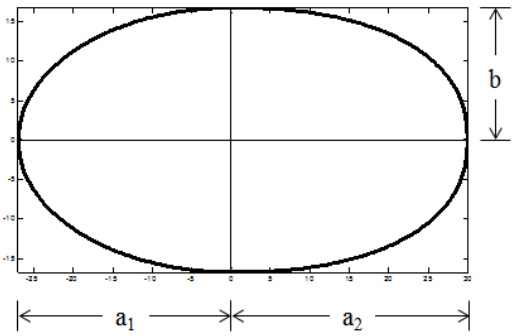


Fig. 7 Desigh variables of pantograph arm Cross-section

틈새로 빠져나간 유동의 교란이 암 연결부 후방으로 크게 퍼져 나가면서 팬터그래프의 주요 소음원이 di-pole source 소음의 원인이 됨을 알 수 있다.

이를 해결하기 위해 Fig. 6와 같이 암연결부에 유선형의 커버를 설치하여 해석을 수행하였다.

해석결과 Table 1과 같이 유선형 커버의 설치 후 팬터그래프 전체 항력이 최대 7.41%, 평균적으로 6.2% 감소함을 확인하였으며 소음도 각 속도대역별로 최대 1.59 dB, 평균 1.54 dB 가량 저감함을 확인 할 수 있다.

암 연결부에 커버를 설치한 뒤 추가로 소음 및 항력을 저감하기 위해서 팬터그래프 암 단면의 최적화를 수행하였다. 최적형상 설계를 위해서 본 연구에서는 설계 목적함수를 C_d 및 $\frac{dC_l}{d\alpha}$의 최소화로 선정하였다. 이를 통하여 공력 소음을 줄임과 동시에 설계의 강건성을 확보하고자 하였다. 본 연구에서는 Fig. 7과 같이 유선형이고 위아래가 대칭인 설계 형상을 선정하였으며, 이 형상을 정의하기 위해 4개의 설계 변수를 선정하였다. 설계 변수들을 고려한 형상 함수는 다음의 식 (4)와 같다.

$$\begin{aligned}(\frac{x}{a_1})^n+(\frac{y}{b})^n=1,\ \ (x<0)\\(\frac{x}{a_2})^m+(\frac{y}{b})^m=1,\ \ (x>0)\end{aligned} \tag{4}$$

Table 1 Drag and noise of CX pantograph and pantograph model with streamlined cover

Inlet condition	30m/s	35m/s	40m/s	45m/s
CX Pantograph Drag(N)	92.19	126.40	165.07	200.61
Pantograph+cover Drag(N)	88.06	118.78	153.84	185.74
Δ(%)	4.48	6.03	6.80	7.41
CX Pantograph Noise(dB)	73.32	77.78	82.22	84.47
Pantograph+cover Noise(dB)	71.79	76.27	80.63	82.95
Δ(dB)	1.53	1.51	1.59	1.52

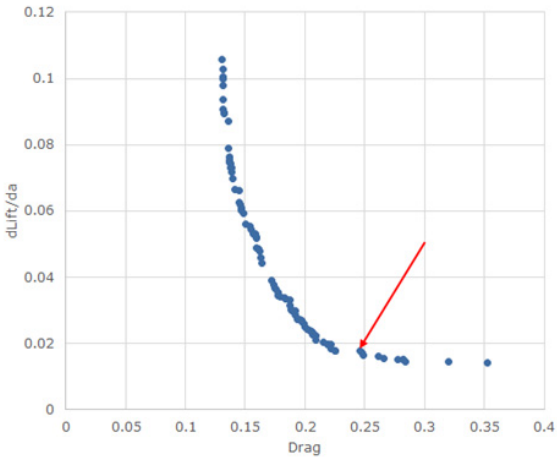


Fig. 8 Pareto solution

Fig. 9 Optimized arm cross-section

이때 각각의 설계 변수의 설계 범위는 식 (5)와 같이 정의하였다. 이때 2b는 25 mm이다.

$$\begin{aligned}&17.5\le a_1\le 50,\ \ 17.5\le a_2\le 50\\&1.5\le n\le 3.5,\ \ 1.5\le m\le 3.5\end{aligned} \tag{5}$$

본 과제에서는 실험계획법(Design of Experiment)으로 Latin Hypercube Sampling을 수행하였고 근사모델로는 kriging 모델을 사용하였으며, GA를 이용한 최적화 작업을 반복 수행하였다. 최적화를 통해 Fig. 8과 같은 파레토를 구하였다.

팬터그래프 암은 외부교란이나 측풍에 대한 강건성이 중요하므로 파레토 솔루션 중 외부교란에 대한 강건성에 비중을 두어 형상을 선정하였고 선정된 단면형상은 Fig. 9과 같다.

암 단면형상을 선정 후 Fig. 10과 같이 단면형상을 적용한 팬터그래프 모델을 만들어 동일한 해석조건에서 해석을 수행하였다. Table 2와 같이 항력의 경우 최적 암단면을 적용하기 전보다 최대 4.28%, 평균 4.0% 저감한 것을 알 수 있으며 소음의 경우에도 이전 결과와 비교할 때 최대 1.68 dB, 평균 1.63 dB 감소함을 알 수 있다. 이는 최초 형상인 기존 CX 팬터그래프와 비교하였을 때 암 형상 최적 설계안을 통하여 소음은 총 3.17 dB, 항력은 10.0% 저감한 것이다.

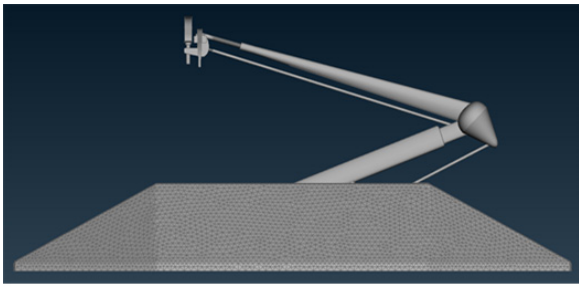


Fig. 10 Pantograph model with optimized arm cross-section and streamlined cover

Fig. 11 Optimized panhead cross-section

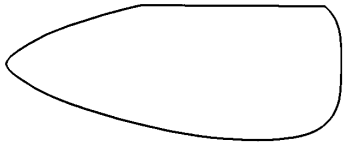


Fig. 12 Modified optimized panhead cross-section

2.2.2 팬터그래그 팬헤드 설계

또 다른 주요 소음원인 팬헤드 단면에 대해서도 최적설계를 수행하였다. 팬헤드 단면의 최적설계 과정은 암 단면과 동일하며 팬헤드의 경우 외란에 대한 강건성과 항력 및 소음저감이 모두 중요하므로 파레토 솔루션 중 2개의 목적함수에 동일한 가중치를 가지는 Fig. 11과 같은 단면형상을 선정하였다. 그리고 팬헤드의 팬터그래프의 기능인 전력공급을 위해서 최소한의 접전 면적이 보장되어야 하므로 Fig. 11의 단면형상을 Fig. 12와 같이 변경 후 Fig. 13과 같이 적용하였다.

Table 2 Drag and noise difference of pantograph model with optimized arm cross-section

Inlet condition	30m/s	35m/s	40m/s	45m/s
Pantograph+cover Drag(N)	88.06	118.78	153.84	185.74
Pantograph+cover+optimized arm cross-section Drag(N)	84.29	113.91	148.04	178.65
Δ(%)	4.28	4.10	3.77	3.82
Pantograph+cover Noise(dB)	71.79	76.27	80.63	82.95
Pantograph+cover+optimized arm cross-section Noise(dB)	70.20	74.61	79.03	81.27
Δ(dB)	1.59	1.66	1.60	1.68

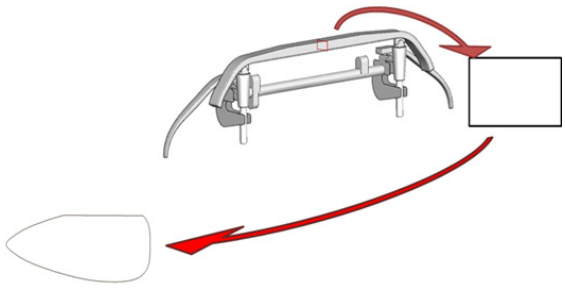
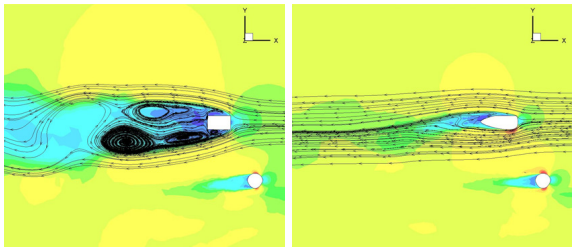


Fig. 13 Panhead cross-section



(a) CX pantograph (b) Optimized panhead

Fig. 14 Streamline and velocitiy contour

팬헤드 단면형상을 적용한 후 동일한 해석조건에서 해석을 수행하였다. Fig. 14을 살펴보면 기존의 사각주형태의 팬터그래프 팬헤드는 유동의 교란이 후방으로 넓게 퍼져 나가며 동시에 팬헤드 바로 뒤에서 와류영역이 크게 형성됨을 확인 할 수 있다. 반면에 최적단면을 적용한 팬헤드 주변의 유동을 살펴보면 유동교란이 기존 팬헤드에 비해서 좁게 전파되며 팬헤드 후방의 와류영역도 기존 팬헤드에 비해서 거의 형성되지 않음을 확인 할 수 있다. 이는 와류에 의한 소음발생이 저감됨을 예측할 수 있으며 전후방 압력차이에 의한 항력이 저감됨도 예측할 수 있다. 이는 Table 3의 항력 및 소음 결과값을 통해서도 알 수 있다. 항력의 경우 최적 팬헤드 단면을 적

Table 3 Drag and noise difference of pantograph model with optimized panhead cross-section

Inlet condition	30m/s	35m/s	40m/s	45m/s
Pantograph+cover+optimized arm cross-section Drag(N)	84.29	113.91	148.04	178.65
Pantograph+cover+optimized arm cross-section+optimized panhead cross-seciton Drag(N)	68.7	96.00	121.44	147.47
Δ(%)	18.50	15.72	17.97	17.45
Pantograph+cover+optimized arm cross-section Noise(dB)	70.20	74.61	79.03	81.27
Pantograph+cover+optimized arm cross-section+optimized panhead cross-seciton Noise(dB)	66.93	71.32	75.65	77.91
Δ(dB)	3.27	3.29	3.38	3.36

있으면 소음의 경우에도 이전 결과와 비교할 때 최대 3.38 dB, 평균 3.33 dB 감소함을 알 수 있다.

이는 최초 형상인 기존 CX 팬터그래프와 비교하였을 때 최적화된 팬터그래프 형상설계를 통하여 소음은 총 6.5 dB, 항력은 25.61% 저감한 것이다.

3. 결 론

고속열차용 저저항 저소음 팬터그래프의 형상을 설계하기 위해서 전산해석을 수행하였다. 기존 팬터그래프 형상에 대한 해석을 통해서 팬터그래프 암 연결부 형상이 소음과 항력의 주요인임을 확인 후 이를 해결하기 위해서 암 연결부 커버를 설치하여 해석을 수행하였다. 그 결과 소음은 평균 1.54 dB, 항력은 평균 6.2% 저감함을 확인하였다. 그 후 암단면에 대한 최적설계를 수행하여 소음은 평균 1.63 dB, 항력은 평균 4.0% 저감함을 확인하였다. 마지막으로 팬헤드 단면의 최적설계를 수행하여 소음은 평균 3.33 dB, 항력은 평균 17.41% 저감함을 확인하였다. 팬터그래프 암 연결부, 암단면, 그리고 팬헤드 설계를 통해서 최종적으로 기존 모델인 CX 팬터그래프와 비교할 때 소음은 평균 6.5 dB, 항력은 평균 25.61% 저감한 팬터그래프 설계안을 제시하였다.

후 기

본 연구는 국토교통과학기술진흥원 건설교통기술촉진연구사업(과제번호 : 14PRTD-C061723-03)의 지원을 받아 수행 되었습니다

References

[1] 2012, Thompson, D., "Noise from high speed trains," *KRRI International Workshop on High Speed Trains*, Seoul, pp.17-40.

[2] 2013, Cho, T.H., Kim, Y.W. and Kim, C.W., "Wind tunnel test for the pantograph system of high speed train by using 1/2 scaled down model," The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 2013 spring conference, pp.93-96.

[3] 2004, Ikeda, M. and Takaishi, T., "Perforated Pantograph Horn Aeolian Tone Suppression Mechanism," *QR of RTRI*, Vol.45(3), pp.169-174.

[4] 2010, Kurita, T., Hara, M., Yamada, H., Wakabayashi, Y., Mizushima, F. and Satoh, H., "Reduction of Pantograph Noise of High-Speed Trains," *Journal of Mechanical Systems for Transportation and Logistics*, Vol.3, No.1, pp.63-74.

[5] 1997, Holmes, B.S., Dias, J.B., Jaroux, B.A., Sassa, T. and Ban, Y., "Predicting the Wind Noise from the Pantograph Cover of a Train," *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol.24, pp.1307-1319.

[6] 2011, Lee, Y.B., Kwak, M.H., Kim, K.H. and Lee, D.H., "Experimental Analysis on Aerodynamic Drag of HEMU-400X as Variations of Pantograph Cover Configurations," *2011 Fall Conference of the Korean Society for Railway*, pp.88-90.

[7] 2011, Lee, Y.B., Kwak, M.H., Kim, K.H., Lee, D.H., Jeoung, H.S., Jang, Y.I. and Kwon, H.B., "Experimental Studies on Improvement of Aerodynamic Perfomance of Pantograph System for HEMU-400X," *2011 Spring Conference of the Korean Society for Railway*, pp.1-6.

[8] 2011, Kang, H.M., Cho, T.H., Kim, C.W., Yoon, S.H., Kwon, H.B. and Park, C.S., "The Aerodynamic Analysis of Pantograph of the Next Generation High Speed Train," *2011 Spring Conference of the Korean Society for Computational Fluids Engineering*, pp.362-367.

[9] 2011, Kang, H.M., Kim, C.W., Cho, T.H., Kim, D.G. Yoon, S.H. and Kwon, H.B., "The Aero-acoustic Analysis of Pantograph of A High Speed Train," *2011 Fall Conference of the Korean Society for Computational Fluids Engineering*, pp.314-319.

[10] 1969, Ffowcs Williams, J.E. and Hawkings, D.L., "Sound Generated by turbulence and Surfaces in Arbitrary Motion," *Philosophical Transactions for the Royal Society of London, Series A*, Mathematical and Physical Sciences, Vol264, Issue 1151, pp.321-342.

[11] Cho, T.H., Hwang, E.S., Kim, Y.W., Kim, C.W. and Choi, Y.M., "Aeroacoustic test for the high speed train pantograph in the KARI LSWT open jet test section," *The korea society for aeronautical & Space Sciences 2014 spring conference*, pp.175-178.