

# 생체모방공학을 이용한 고속철도 차간 공간에 적용한 부엉이 깃 형상 크기에 따른 공력소음 저감 연구

## The Effect of Scaling of Owl's Flight Feather on Aerodynamic Noise at Inter-coach Space of High Speed Trains based on Biomimetic Analogy

한재현† · 김태민\* · 김정수\*\*

Jaehyun Han, Taemin Kim and Jungsoo Kim

**Key Words** : aerodynamic noise (공력소음), biomimetics (생체모방공학), computational fluid dynamics (전산유체역학), high speed train (고속철도), inter-coach space(차간 공간), owl feather (부엉이 깃)

### ABSTRACT

An analysis and design method for reducing aerodynamic noise in high-speed trains based on biomimetics of noiseless flight of owl is proposed. Wind tunnel testing and numerical CFD (Computational Fluid Dynamics) simulation for the basic inter-coach spacing model are carried out, and their results compared. To determine the effect of scaling of the owl's flight feather on the noise reduction, a two-fold and a four-fold scaled up model of the feather are constructed, and the numerical simulations are carried out to obtain the aerodynamic noise levels for each scale. Original model is found to reduce the noise level by 10 dB, while two-fold increase in length dimensions reduces the noise by 12 dB. Validation of numerical solution using wind tunnel experimental measurements are presented as well

### 1. 서 론

현재 고속철도 차량은 빠르고 편리한 친환경 교통수단으로 자리 잡고 있으며, 많은 연구를 통해 고속화를 이루고 있다. 하지만 고속화에 따른 소음과 진동의 증가로 승객의 안락함과 환경소음에 악영향을 미치고 있다. 특히 차량의 속도가 300 km/h에 이르게 되면 난류의 박리와 와류발산 등의 영향이 커져 공력소음이 급격하게 증가하게 된다. 이러한 고속철도의 공력소음을 유발하는 대표적인 요소로 차간 공간을 들 수 있다. 차간 공간은 차량을 연결

하는 부분에서 형성되며, 이 공간 때문에 유동이 불안정하게 되어 유동박리<sup>(1)</sup>를 일으키고, 이때 생성되는 와류는 차체표면을 가진하여 객실 내부로 소음을 전달한다. 이러한 차간 공간 소음을 줄이기 위해 차간 공간의 간격을 조절하여 소음을 저감하려는 연구가 이루어지고 있다.<sup>(2)</sup>

생체모방공학은 자연계에 존재하는 생명체의 외형, 구조, 구성물질 및 작동 원리 등을 모방하여 공학적으로 응용하는 것을 말한다. 최근에 이르러 많은 공학 분야에서 기존의 수학적 혹은 물리적 접근 방법을 통해 풀지 못했던 문제들을 생체모방적 접근 방법을 이용하여 해결하기 위한 시도가 급속도로 증가하고 있다. 생체모방공학은 자연계에 존재하는 생명체들이 오랜 시간을 거치면서 진화를 해 왔는데 바탕을 두고 있다. 생명체들은 생존이나 번식을 위해 '자연선택(natural selection)'의 과정을 통해 주어진 환경에 가장 적합하게 변화되어 왔다. 즉, 생

† 교신저자; 학생회원, 홍익대학교 음향진동실험실

E-mail : wd2007@naver.com

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

\* 홍익대학교 기계공학과

\*\* 홍익대학교 기계시스템디자인공학과

명체가 가지고 있는 특징은 오랜 시간 동안 무수히 많은 시행착오를 통해 얻어진 것이기 때문에, 생명체를 모방한다는 것은 방대한 자연의 경험을 바탕으로 얻어진 가장 효율적인 방법을 공학적인 문제에 이용한다는 것을 의미한다. 특히 대부분의 생명체는 공기나 물속에서 존재하고 활동하기 때문에 유동제어 분야에서 생체모방을 이용한 연구는 무한한 가능성을 가지고 있다. 생체모방공학의 한 예로서 거의 소리를 내지 않고 조용히 먹이를 향해 비행하는 부엉이의 날개 깃털에 있는 칼깃이라는 미세한 빗살 구조가 소음저감에 기여하는 것으로 알려져 있다. 또한, 일본에서는 부엉이의 저소음 비행원리를 응용하여 신칸센 고속열차의 판토타블에서 발생하는 소음을 크게 줄였다고 발표하기도 하였다.<sup>(3)</sup>

본 연구는 부엉이의 저소음 비행 현상을 착안해 고속철도 차간 공간에 생체모방공학을 적용하여 공력소음을 저감시키기 위한 연구로 선행연구<sup>(4)</sup>에서 최적화된 깃 형상 모델을 실제 차간 공간에 적용할 수 있도록 확대 설계하고 그 효과를 파악하는 것이 목적이다. 깃 형상 적용을 위한 차간 공간 소음을 파악하기 위해 차간 공간 소음을 구현할 수 있는 모형을 제작하여 풍동실험을 수행하였다. 또한, 전산유체해석 (Computational Fluid Dynamics ; CFD)을 이용하여 유동해석을 수행하였으며, 그 결과를 통해 음향근사 (Acoustic Analogy)기법을 이용하여 차간 공간에서 발생하는 소음도를 예측하였다. 예측 결과의 신뢰성 파악을 위해 두 결과를 Rossiter's equation과 비교 분석하였다. 또한 깃 형상 모델을 형상 비를 유지한 채 확대 적용하여 수치해석적으로 깃 형상의 크기별 소음저감 효과를 파악하였다.

## 2. 차간공간 공력소음 예측

### 2.1 풍동실험

#### (1) 차간 공간 모형 제작

고속철도 차량의 차간공간에 깃 형상을 적용하고 소음저감효과를 파악하기위해 고속철도 차량의 차간 공간 공력소음의 특성을 파악하여야한다. 따라서 실제 차간 공간의 소음특성을 구현할 수 있는 모형을 제작하여 풍동실험을 수행하였다. 차간 공간 모형은 아크릴로 제작되었으며 차간 공간의 거리는 300

mm로 설정하여, 풍동실험 시 실제 차간 공간 조건을 구현하였다. 그림 1은 차간 공간 모형의 형상을 나타낸다.

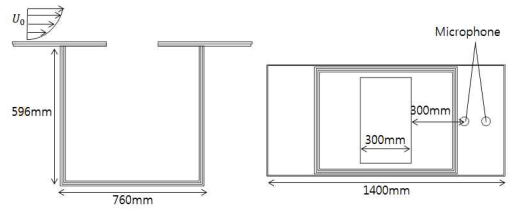


Figure 1 Wind tunnel test setup

#### (2) 풍동실험조건

풍동장치는 중형 아음속 개회로식 흡입식 풍동을 이용하였으며, 풍동의 난류도 0.2 %이내이고, 유속 변화량은 평균유속의 1 %이내이다. 또한 풍동 입구에는 유동손실을 줄이기 위한 흡입노즐(bell mouth)과, 균일한 공기의 유동을 만들어 주기 위한 정류격자(honeycomb), 정류망(screen)이 설치되어있다.

본 연구에서는 185 km/h에서 235 km/h까지 5 단계로 공기 유입속도를 변경하여 측정하였다. 여기서 공기 유입속도는 철도차량의 주행속도와 등가 할 수 있다. 소음 측정에는 DAT recorder와 소음계 NL-20, 교정기, 삼각대를 사용하였으며, 그림 1과 같이 유동방향으로 차간 공간 끝단에서 300 mm 떨어진 지점에 소음계를 설치하여 측정하였다.

### 2.2 수치해석을 이용한 공력소음 예측

#### (1) 경계조건

전산해석 예측 결과에 대한 신뢰성 분석을 위하여 고속철도 차간 공간의 주변 유동장을 풍동실험과 같은 조건으로 모델링하였다. 그림 2에서 볼 수 있듯이 격자의 수를 최대한 줄이고 계산 효율을 증대시키기 위해 대칭적인 특징을 이용하여 전체 형상의 절반만을 사용하여 효율적인 해석을 수행할 수 있도록 모델링하였다. 공력소음해석을 위한 유동해석은 관심주파수의 파장을 고려하여 격자의 크기를 결정하여야 하며, 고주파수까지 정확하게 파악하기 위해서는 작은 격자와 타임스텝이 요구된다. 따라서 관심주파수를 100 Hz에서 2000 Hz까지 선정하여, 관심주파수의 상한 주파수를 고려해 격자크기를 2000 Hz의 파장보다 10배 이상 작도록 1~34 mm의 범위

로 설정하여 약 60만개의 Tetrahedral 격자를 생성하였다.

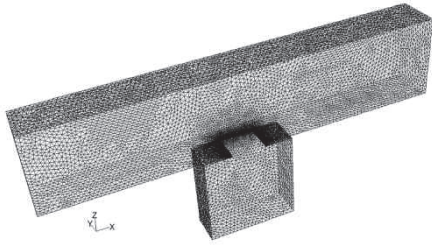


Figure 2 Mesh modeling for CFD

공력소음해석을 위해서는 일반적인 유동해석과는 달리 비정상현상이 지배적이고 소음원이 각 주파수에 따른 소음 수준을 가짐으로 비정상해석이 수행되어야 된다. 본 연구에서는 고속철도 차량이 고속주행 시 차간 공간의 소음을 예측하기 위해 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 수렴하는 시간을 단축하였다. 비정상상태의 정확한 난류 유동장을 파악하기 위해 대와류모사법(Large-Eddy Simulation; LES) 난류모델을 선정하였으며, 아격자 난류점성을 계산하기 위해 Smagorinski-Lilly 모델을 사용하였다.<sup>(5)</sup> 공기의 유입속도는 풍동실험결과와 비교를 위해 185, 200, 235 km/h로 설정하였다. 선정한 관심주파수의 고려하여 정확한 해석이 이루어질 수 있도록 타임스텝을 2000 Hz의 주기의 10배 이상 작도록 0.00005 s로 선정하였다. 또한 flow time은 저주파수인 100 Hz의 주기의 시간보다 10배 이상 길도록 0 ~ 3 s로 선정하여 해석을 수행하였다. 표 1은 해석조건을 나타낸다.

Table 1 Modeling and Simulation run parameter

Parameter	Condition
Frequency range	100 ~ 2000 Hz
Element size	1 ~ 34 mm
No. of Element	656553
Timestep	0.00005 s
Flow duration	0 ~ 3 s

## (2) 음향근사기법 (Acoustic analogy)

전산해석을 이용해 차간 공간의 공력소음을 도출하기 위해 음향근사 (Acoustic analogy)기법을 사용하였다. 음향근사기법인 FW-H (Ffowcs-Williams Hawkings) equation을 사용하였으며, 이 equation은 continuity equation과 Navier-Stokes equation을 파동 방정식의 형태로 발전시킨 것이기 때문에 유체문제에 있어서 유용하다. FW-H equation은 소음의 발생 원인별로 표현되며, 두 개의 surface source (monopole, dipole)과 하나의 volume source (quadrupole)를 포함하고 있고, 소음향은 다음식과 같이 세 개의 항으로 이루어져 있다.

$$p'(x, t) = p'_T(x, t) + p'_L(x, t) + p'_Q(x, t) \quad (1)$$

식 (1)은 물체의 형상과 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( $p'_Q$ ) 세 개 항으로 구성된다. 이렇게 각각의 발생 원인별로 독립적으로 표현되기 때문에 소음의 원인을 쉽게 판단할 수 있다. 이 중에서 thickness noise와 loading noise는 면적분(surface integration)을 통하여 구할 수 있으며, quadrupole noise의 경우 체적적분을 필요로 하게 되어 계산의 어려움을 수반한다. 또한, quadrupole noise의 경우 Ma수가 작은 경우 공력소음에 미치는 영향은 작다고 알려져 있으므로 본 연구에서는 유동해석 상용 코드인 Fluent의 FW-H 모델을 이용하여 thickness noise와 loading noise만을 고려하여 소음해석을 실시하였다.<sup>(6)</sup>

풍동실험 측정조건과 동일하게 차간 공간의 끝단에서 300 mm 떨어진 지점에 소음측정 포인트를 설정하였다. 소음측정 포인트의 압력변동을 확인하여 주기적인 압력변동이 관측되지 않고 불규칙한 압력 패턴을 보이는 0 ~ 1.0 s의 해석 초기 구간은 소음분석에 사용하지 않고 1.0 ~ 3.0 s의 구간을 소음분석에 사용하여 좀 더 정확한 소음해석결과를 도출하였다.

### 2.3 공력소음 결과 비교

해석 결과의 신뢰성 검증 위해 공기 유입속도가 200 km/h 경우에 대하여 동일한 조건에서 수행한 전산해석과 풍동실험 결과를 비교하였다. 또한 음향 피드백 메커니즘에 근거하여 유도한 공동 내부의 진동 주파수를 예측하는 실험식인 Rossiter's equation에 의해 해당 주파수를 구하고 두 결과 값과 비교 분석해보았다. Rossiter's equation은 cavity에서 발생하는 유동과 음압의 피드백 현상을 바탕으로 만들어진 실험식이며, 식 (2)에 나타내었다.

$$\frac{L}{U_c} + \frac{L}{c} = \frac{n - \beta}{f_n} \quad n = 1, 2, 3 \dots \quad (2)$$

여기서,  $L$ 은 cavity의 길이,  $U_c$ 는 대류속도 (convection velocity),  $c$ 는 Sound velocity,  $\beta$ 는 위상지연(phase lag)이며 실험값으로 알려진 0.25를 사용하였다. Rossiter's equation에서 사용된 대류속도는 유입되는 유체속도의 60% 정도이다.<sup>(7)</sup>

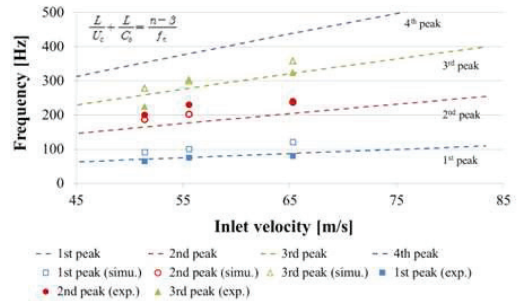
표 2는 풍동 실험 결과와 전산해석 예측 결과, Rossiter's equation의 주요 성분들을 정리한 표이다. 표에서 볼 수 있듯이 실험과 해석 결과는 첫 번째 주요 주파수 성분을 제외하고 나머지 성분들의 크기는 유사하지만 주파수 대역에서 다소 차이가 있는 것을 볼 수 있다. 이는 전산해석을 이용한 해석 시 풍동 실험에 대한 환경이 정확하게 묘사 되지 않았기 때문에 발생한 것으로 예상된다.

**Table 2** Sound pressure level at peak frequencies

		185 km/h		200 km/h		235 km/h	
		Freq.	SPL	Freq.	SPL	Freq.	SPL
1st Peak	Simul.	91	100	101	107	121	112
	Theory	70	-	76	-	88	-
	Exp.	65	113	75	115	80	116
2nd Peak	Simul.	187	112	202	111	237	120
	Theory	164	-	177	-	205	-
	Exp.	200	102	235	102	240	107
3rd Peak	Simul.	278	103	300	105	359	109
	Theory	259	-	278	-	322	-
	Exp.	225	106	305	96	325	97

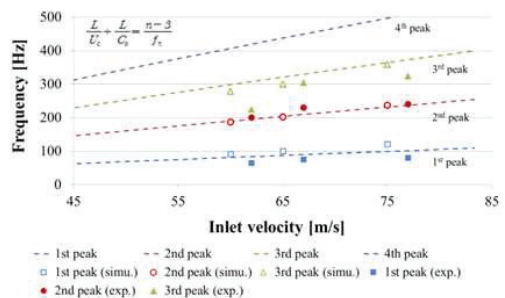
그림 3는 각 Rossiter's equation을 기준으로 주요 주파수 성분들의 속도 별 주파수를 도시화 하였다.

그림에서 볼 수 있듯이 이론식에 대하여 풍동 실험 결과는 대체적으로 유사한 것을 볼 수 있다. 하지만 전산해석 결과는 이론식에 비해 다소 높은 주파수 대역을 갖는 것으로 예측되었다. 이는 전산해석을 이용한 해석 시 실제 환경을 정확하게 묘사하지 못하였기에 이와 같은 오차가 발생한 것으로 예상된다. 따라서 속도 보정을 통하여 재해석을 수행하였다.



**Figure 3** Numerical and experimental comparison based on Rossiter's equation

그림 4은 동일한 해석 모델을 가지고 유동 속도만 10 m/s를 증가하여 재해석 한 결과를 보여준다. 그림에서 볼 수 있듯이 속도 보정을 한 결과 Rossiter's 이론식과 매우 유사하게 해석 결과가 도출된 것을 볼 수 있다. 이는 실제 실험을 정확하게 반영하지 못하는 모델의 한계에 의해 발생한 것으로 예상되며 이는 초기조건인 유동 속도를 약 10 m/s 보정한다면 실제 결과와 유사한 것을 확인 할 수 있다. 따라서 전산해석 수행 시 대상 유동 속도에 10 m/s 보정을 한다면 실제 실험과 유사한 결과가 나오는 것을 확인 할 수 있다.



**Figure 4** Comparison following the fluid flow speed adjustment

### 3. 부엉이 깃의 스케일링 효과

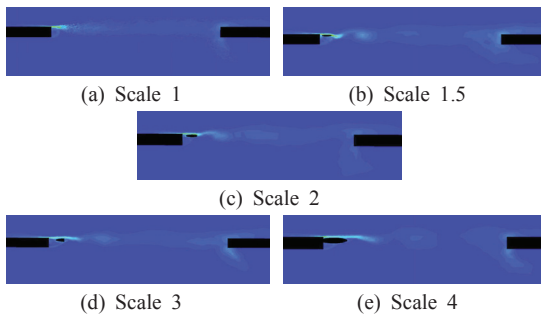
#### 3.1 부엉이 깃의 스케일링

실제 차간 공간에 깃 형상을 적용하기 위해서는 깃 모델의 크기를 확대 시켜야 한다. 기존 해석 모델은 실제 깃 형상의 크기로 수행하였기 때문에 크기가 약 14 mm 이며, 이는 제작 및 실제 차간 공간 적용에 어려움이 따른다. 선행연구에서 도출한 최적의 깃 형상의 효과를 적용하기 위해 형상 비를 유지한 채 확대하여 전산해석을 수행 하였으며 각 모델별 소음 저감 효과를 살펴보았다. 표 3는 형상 비에 맞게 확대된 깃 형상 모델들의 사양을 보여준다.

**Table 3** Scale model specification

	Length	Y-axis angle	Z-axis angle	width	Gap distance	No. of feather
×1	14mm	15°	0°	3mm	3mm	41
×1.5	21mm	15°	0°	4.5mm	4.5mm	27
×2	28mm	15°	0°	6mm	6mm	20
×3	42mm	15°	0°	9mm	9mm	13
×4	56mm	15°	0°	12mm	12mm	10

그림 5는 풍동모델의 사이 차간 공간의 와류분포도를 나타낸다. 각 scale model에 따라 와류가 다르게 형성되는 것을 확인할 수 있다. 표 4은 차간공간 주변 유동장의 vortices magnitude값의 평균값을 나타내었다. Scale 1과 Scale 2는 비슷한 vortices magnitude로 확인되며, Scale 4는 보다 많은 와류를 생성하는 것을 확인하였다.



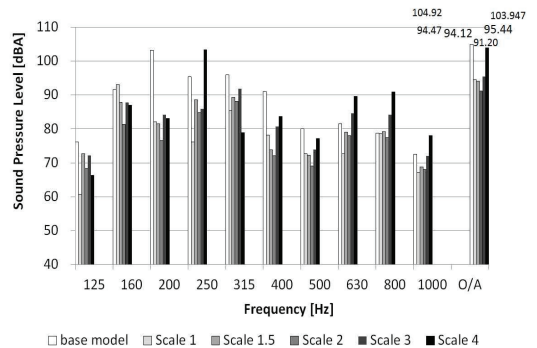
**Figure 5** Vortex distribution for different models

**Table 4** Averaged vortices magnitude

	Averaged vortices magnitude
Scale 1	1228 $S^{-1}$
Scale 1.5	1227 $S^{-1}$
Scale 2	1205 $S^{-1}$
Scale 3	1242 $S^{-1}$
Scale 4	1272 $S^{-1}$

#### 3.2 스케일링 효과

그림 6는 각 scale model의 음향근사기법을 활용한 소음도 해석 결과를 나타낸다. 그림 6에서 볼 수 있듯이 깃을 적용할 경우 125 ~ 500 Hz 영역인 저주파수 대역에서 주로 소음 저감효과가 크고 630 Hz 이후 대역에서는 소음 저감효과가 적은 것을 확인할 수 있다. Scale 1의 깃 형상을 적용하는 경우 기존 차간 공간 대비 125 ~ 1000 Hz 영역에서 약 10 dB 저감 효과가 있으며, Scale 2의 깃 형상을 적용한 경우 추가적으로 약 2 dB 저감 효과가 있는 것으로 예측되었다. 하지만 깃 형상 모델을 3, 4배 증가 시킨 경우에는 630 Hz 이후 대역에서는 오히려 기존 차간 공간보다 소음이 커지는 효과를 가져오는 것으로 예측 되었다. 따라서 깃 형상을 적용하는 것은 소음 저감효과를 가져오나 적용되는 깃 형상의 크기에 따라 소음 저감효과가 다른 것으로 판단된다.



**Figure 6** Sound pressure level according to scaling



## 4. 결 론

본 연구에서는 차간공간의 공력소음을 예측하고 생체모방공학을 이용한 설계 모델을 실제 차간 공간에 적용할 수 있도록 확대 설계하여 그 효과를 파악하였다. 결과는 다음과 같다.

(1) 본 연구의 차간 공간 소음을 파악하기 위하여 풍동 실험과 전산해석을 수행하였으며 두 결과와 Rossiter's equation을 비교 분석하여 신뢰성을 파악하였다. 풍동 실험 결과 대비 전산 해석 결과는 주요 주파수 성분들의 크기는 유사하나 주파수 대역에서 차이가 있는 것으로 분석되었다. 따라서 Rossiter's equation을 통하여 속도 보정을 수행하였다. 속도 보정은 전산해석이 실제 현상을 정확하게 대변 할 수 없는 한계에 대하여, 초기 조건을 약 10 m/s 추가로 입력하여 수행 한 결과 실제 결과와 유사하게 예측 되었다. 따라서 전산 해석 수행 시, 대상 속도에 대하여 10 m/s 속도 보정을 한다면 실제 실험 결과와 유사한 것으로 판단된다.

(2) 깃 형상을 실제 차간 공간에 적용하기 위하여 형상 비를 유지하여 최적화된 모델의 크기를 증가시켰다. 증가 비는 1.5, 2, 3, 4배로 하여 동일한 전산해석을 수행하였다. 저주파수 대역에서 주로 소음 저감효과가 크고 630 Hz 이후 대역에서는 소음 저감효과는 적은 것으로 판단된다. 적용되는 깃 형상의 크기에 따라 소음 저감효과가 다르며, 예측 결과 2배 증가 시킨 모델이 깃 형상을 부착하지 않은 모델보다 약 12 dB 소음 저감 효과가 있는 것으로 예측되었다.

## 후 기

본 연구는 한국연구재단 과제 (생체모방공학을 활용한 공학디자인 방법론 개발)로 수행중인 연구 결과입니다.

## 참 고 문 헌

(1) D. Rocchi, A. Zasso, 2002, Vortex shedding from a circular cylinder in a smooth and wired configuration: comparison between 3D LES simulation and experimental analysis, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 90, pp. 475~489.

(2) Choi, S. H., Park, C. S., Park, J. H. and Kim, S. S., 2007, Experimental Investigation of Noise Generation from the Inter-coach Spacing of a High-speed Train, Transactions of the Korean Society for Railway. Vol. 10, No. 6, pp. 786~791.

(3) Choi, H. C. Park, H. M. SAGONG, W. 2010, Bio-Mimetic Flow Control, Physics & High Technology, pp. 28~33

(4) Han, J. H., Kim, J. S., 2011, An Aerodynamic Noise Reduction Design at Inter-coach Space of High Speed Trains Based on Biomimetic Analogy, Proceedings of International Journal of Railway, pp. 74~79.

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

(6) Yoo, S. W., Min, O. K., Park, J. S. and Chung, H. C., 2000, A Study on Aerodynamic and Aeroacoustic Characteristics around Pantograph, Proceedings of the KSR Annual Spring Conference, pp. 529~536.

(7) Park, K. Y., Park, J. H., Song, S. M., Kim, T. H., Lee, T. J. and Choi, S. H., 2006, Wind tunnel tests for analyzing noise generation from the inter-coach spacing of a high-speed train, Proceedings of the KSNVE Annual Fall Conference, pp. 65~68.