빔형성 기법을 이용한 고속철도차량의 공력소음특성 도출 연구

Aerodynamic Noise Characteristics of High-speed Trains by the Beamforming Method

노희민^{1*} · 최성훈¹ · 고효인² · 홍석윤³

Hee-Min Noh · Sunghoon Choi · Hyo-In Koh · Suk-Yoon Hong

Abstract In this paper, aerodynamic noise characteristics of high-speed trains were deduced from the beamforming method. First, pass-by noise of high-speed trains was measured by a microphone array system. This measurement suggested that the majority of the aerodynamic noise produced came from the bogie area, the pantograph and its cover, and inter-coach gaps. Then, beampower outputs of a position in high-speed trains were obtained from the beamforming method. By Fourier transform, sound characteristics of the position in the frequency domain were deduced from the beamforming power spectrum. From this study, aerodynamic noise characteristics from the major sources of high-speed trains were drawn.

Keywords : Aerodynamic noises, Sound Characteristics, Beamforming method

초 록 본 논문에서는 고속철도의 주행 시 발생하는 공력소음에 대한 특성을 도출하는 연구를 수행하였다. 우선, 마이크로폰 어레이 시스템을 이용하여 고속철도 차량의 주행 소음을 측정을 통해서, 주요 공력소음원이 고속철도 차량의 전두부, 팬토그래프, 차간 부위임을 확인하였다. 또한 측정된 데이터를 바탕으로 빔형성 방법을 이용하여 빔출력을 구하였으며, 푸리에 변환을 통해서 주파수 영역에서의 빔파워 스펙트럼을 도출하였다. 본 연구를 통해서 고속철도의 주요 공력 소음원인 전두부, 팬토그래프, 차간 부위에 대한 음압 특성이 빔형성 방법을 이용하여 도출되었다.

주요어 : 공력소음, 소음측정, 빔형성 방법

1. 서 론

현재 세계 철도 선진국에서는 열차의 속도를 높이기 위한 많은 연구가 진행되고 있으며, 향후 개발될 고속열차는 현재 운행 중인 300km/대의 속도에 비해서 최고운행 속도가 증가할 것으로 예상된다. 국내에서도 차세대 고속철도 사업에서 최고시속 430km/h의 동력분산형 차세대 고속열차가 개발 중에 있다. 하지만 고속열차의 속도 증가는 필연적으로 열차에서 발생하는 소음을 증가시킬 것으로 예상되고 있다. 고속열차에서 주로 발생하는 소음은 휠과 레일에 접촉에 의해서 발생하는 전동 소음과 공기 유동의 마찰에 의한 공력 소음이 주요 원인으로 밝혀져 있으며 [1], 특히 공력소음은 속도의 증가에 따라서 전체 소음에 미치는 영향이 급격히 증가하는 것으로 알려져 있다. 하지만 고속으로 주행하는 고속열차 차량에서 공력 소음의 특성을 도출하는 것은 그 측정의 어려움으로 인해서 아직 많은 연구가 진행되지 못한 실정이다.

고속열차 차량의 공력 소음을 측정하는 방법은 실제 차량

에 측정 장치를 부착하여 측정하는 방법과 마이크로폰 어레이를 고속 열차 선로변에 설치한 후에 주행 소음을 통해서 특성을 파악하는 방법이 있다. 실제 차량에 측정 장치를 부착하는 방법은 충분한 시간동안 원하는 위치에서의 소음을 측정할 수 있는 장점이 있으나, 공기역학으로 인해서 많은 소음이 측정되는 단점이 있다. 또한, 고속철도 차량의 속도가 증가할수록 측정 장비 주변으로 형성되는 난류에 의해서 정확한 측정 결과를 도출하기 어려운 면이 있다. 따라서, 실제 차량에 측정 장비를 이용하여 측정하는 방법은 측정 결과에 소음을 제거할 수 있는 신호 처리 기술이 요구된다[2].

마이크로폰 어레이를 이용하여 고속철도 차량의 공력 소음을 측정하는 방법은 고속 철도 차량의 소음원을 도출하는데 유용하며, 높은 분해능을 가지고 있어 복잡한 고속철도 차량의 소음원을 도출하는데 유용하다[3-4]. 또한 측정되는 신호가 고속철도 차량에서 발생하는 소음을 바탕으로 측정하기 때문에 보다 정확한 소음 측정이 가능하다. 하지만, 측정 시간이 적고 한정된 위치에서 측정되는 신호를 바탕으로 소음의 특성을 파악해야 하는 단점을 가지고 있다.

본 연구에서는 마이크로폰 어레이를 이용하여 고속철도 차량의 소음을 측정하고, 공력 소음이 발생하는 주 소음원을 도출하여 소음의 특성을 파악하는 연구를 수행하였다. 적은 측정시간은 다수의 고속철도 차량의 주행 소음의 분석을 통해서 보완을 하였으며, 측정 위치 또한 평탄 선로변 주변에

*교신저자 : 한국철도기술연구원 고속철도연구본부
E-mail : hmnoh@krrri.re.kr

¹한국철도기술연구원 고속철도연구본부

²한국철도기술연구원 에코시스템연구실

³서울대학교 조선해양공학부

어레이를 설치하여 주변의 영향을 받지 않는 고속철도 차량의 소음 측정이 되도록 하였다. 이러한 측정 방법 이외에도 공력 소음원에 대한 모델이 어레이 응답 함수에 미치는 영향을 검토하여 어레이 시스템의 공력 소음 측정에 대한 활용성을 검토하였으며, 분해능 분석을 통해서 최적의 측정 구간을 도출하였다. 이를 통해서 고속철도 차량의 주요 공력 소음에 대한 주파수 특성을 분석하였다.

2. 공력소음 분석방법

2.1 빔파워 이론식

다수의 마이크로폰 어레이를 이용하여 특정한 위치에서의 주파수 특성을 구하기 위해서는 우선 그림 1과 같이 이동하는 음원에 대한 정확한 위치를 파악하는 것이 중요하다. 고속철도 차량이 선로를 주행하는 경우에 마이크로폰 어레이가 선로로부터 수평으로 배열되어 있다고 가정하면, 고속철도 차량에서 관심점의 위치(R_i)는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$R_i(t) = (x_i + ut, y_i, z_i) \quad (1)$$

이때, u 는 일정한 속도로 이동하는 열차의 속도를 의미하며, (x_i, y_i, z_i) 는 관심점의 최초 위치를 의미한다.

또한, 다수의 마이크로폰 어레이에서 j 번째 마이크로폰의 위치를 (x_j, y_j, z_j) 라고 하면, 음원과의 거리(R_{ij})는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$R_{ij}^2(t) = \{(x_i + ut) - x_j\}^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2 \quad (2)$$

위 식을 이용하여, 음원($S(t)$)에 의해서 j 번째 마이크로폰에 측정되는 신호($P_j(t)$)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_j(t) = \frac{1}{R_{ij}(t)} S\left(t - \frac{R_{ij}(t)}{c}\right) \quad (3)$$

이때 c 는 음향의 전파속도(Propagation speed of sound, c)를 의미한다.

이를 통해, 이동하는 특정 위치(R_i)에서의 다수의 마이크로폰에 대한 빔출력(Z_i)을 구하면 다음과 같다.

$$Z_i(t) = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M P_j\left(t + \frac{R_{ij}}{c}\right) \quad (4)$$

Fig. 1 A moving source and a microphone

빔출력에 대한 푸리에 변화를 수행하면 주파수 영역에서의 특정위치에서 발생하는 음원의 특성을 도출할 수 있다.

$$Z_i(f) = \int_0^{\infty} Z_i(t) e^{-12\pi f t} dt \quad (5)$$

2.2 어레이 분해능 검토

고속철도차량의 주행 소음을 통해서 소음의 특성을 파악하기 위해서는 어레이의 분해능이 높은 구간에서의 측정값을 이용하는 것이 중요하다. 어레이의 분해능은 앞에서 주엽과 부엽의 크기에 의해서 결정된다. 주엽(Main lobe)의 폭은 3dB 밴드폭으로 나타내고 어레이의 공간 분해능을 의미한다. 부엽(Sidelobe)은 주엽 이외에 피크(peak)를 의미하며, 보통 최대부엽레벨 (Maximum Sidelobe Level, MSL) 값으로 표현된다[5]. 3dB 밴드폭이 작을수록 정확한 음원의 위치를 파악하기 용이하며, 최대부엽레벨의 값이 크면 가상 음원으로 인해서 실제 음원의 위치와 부엽의 위치를 구별하기 어려워진다. 일반적으로 그림 2와 같이 어레이가 음원과 중심에 위치하고 있는 경우에는 어레이의 공간 분해능은 어레이의 전체 크기가 클수록, 그리고 측정면까지의 거리가 가까울수록 좋아진다. 실제 어레이의 응답함수의 검토를 통해서 분해능을 검토해 볼 수 있다.

어레이가 음원으로 부터 수평 평면(또는 X-Y 평면)에 위치하고 있다고 가정하는 경우에, 어레이 응답함수는 Z축 평면과는 무관한 값을 갖게 된다. 또한, X-Y 평면에서 원점에서 가장 큰 값인 1을 갖게 되며, 이 때의 값을 주엽이며, 그 이외에서의 피크는 앞에서 설명한 부엽을 의미한다. 그림 3은 본 연구에서 구현한 마이크로폰 어레이의 응답 함수를 보여주고 있다.

또한 음원의 주파수 특성을 도출하기 위해서는 일정한 시간 이상의 소음 측정을 통한 결과 분석이 필요하다. 하지만 어레이의 분해능은 그림 4와 같이 소음원이 어레이 중심에 있는 경우에 가장 높으며, 중심에서 멀어질수록 분해능이 떨어진다. 이에 본 연구에서는 중심에서부터 벗어난 각도를 중심으로 어레이의 분해능값인 3dB 밴드폭의 값을 그림 5와 같이 분석하였다. 어레이의 중심에서 수직으로 5m 떨어진

Fig. 2 Array response of prediction plane

Fig. 3 Array response function of 96CH microphone array

Fig. 4 Microphone array resolution regions

Fig. 5 3dB Bandwidth of degree off-axis

음원의 경우에 30°, 45°, 60° 떨어진 경우의 분해능을 검토해본 결과, 중심에서 벗어날수록 전체적으로 어레이의 분해능이 떨어지는 것을 확인하였으며, 특히 45° 이후에서는 분해능이 급격하게 떨어졌다. 이러한 결과는 MSL값에서도 나타났다. 3°의 각도에서만이 3dB이상 떨어지는 값을 보였으며, 45° 이후에서는 MSL의 값이 높게 형성되는 것을 확인할 수 있었다. 이를 통해서 0°~30°의 구간인 중심으로부터 0~2.5m 구간은 높은 분해능 구간으로, 2.5~5.0m 구간은 허용가능한 구간으로 5.0~10m까지는 낮은 분해능 구간으로 선정하였다.

중심에서 벗어난 각도뿐 만 아니라 차량의 높이에 따른 분해능의 변화를 검토하였다. 고속철도 차량의 동력차의 경우에 높이가 4.1m이다. 본 마이크로폰 어레이는 레일을 기준으로 2.3m 높이에 설치되어 있기 때문에 어레이 중심을 기준으로 +1.8 ~ -2.3m 사이에서의 음원을 측정하게 된다. 어레이의 높이에 따른 측정 범위에서 양 끝 점을 기준으로 분해능을 검토해본 결과를 그림 5에 나타내었다. 분석 결과 양 끝점의 경우에 3dB 밴드폭의 값은 어레이의 중심과 동일한 축에 있는 음원의 분해능과 유사한 결과를 나타내었으며, MSL의 값 또한 1000Hz이후로는 값이 떨어지는 것을 확인할 수 있었다. 이를 통해서 해석하고자 하는 높이에 대해서는 높은 분해능을 가지고 있음을 확인하였다.

Fig. 6 Weighting factor over the distance

고속열차 차량의 특정 영역에서의 음원의 특성을 도출하기 위해서는 특정 영역에서 측정된 정보만으로 음원의 특성을 파악하는 것이 중요하다. 그 이유는 앞에서 살펴본 바와 같이 어레이에서 중심으로부터 멀어질수록 분해능이 떨어지기 때문이다. 분해능이 낮은 지역의 측정 결과를 소음원의 특성을 도출하는데 사용하게 된다면, 왜곡된 결과를 바탕으로 결과를 도출하게 된다. 따라서 실제 신뢰할 수 있는 어레이의 분해능을 가지고 있는 영역을 도출하여, 그 안에서의 결과를 이용하는 것이 필요하다. 본 연구에서는 주행소음에서 측정되는 가중치를 부여하기 위해서 음원이 마이크로폰의 설치 위치에서 가까울수록 높은 가중치를 가지게 되고 멀어질수록 적은 가중치를 갖게 되도록 가중치 함수를 그림 6과 같이 설정하였다.

3. 공력소음 특성도출 방안

3.1 소음 측정

고속철도 차량의 음원의 특성을 파악하기 위해서 차량의 주행 소음을 측정하였다. 측정 열차의 소음측정은 300km/h 대로 운행하는 국내 고속차량을 대상으로 이루어졌다. 고속열차의 주행 속도선도 자료를 바탕으로 마이크로폰 어레이 등 측정장비가 설치 가능한 지역을 선정하였다. 선정된 장소는 송라터널 부근으로, 주로 300km/h대로 주행하는 열차의 소음이 측정되었다.

본 연구에서는 소음원의 위치를 파악하기 위해 다수의 마이크로폰이 부착된 마이크로폰어레이를 이용하여 철도 차량의 소음을 측정하였다. 측정에 사용된 마이크로폰 어레이는 방사형 어레이로 96개의 마이크로폰을 장착하였다. 어레이는 사각 프로파일을 이용하여 방사형으로 제작하였으며 마이크로폰 홀더를 이용하여 마이크로폰을 배치하였다. 어레이의 직경은 약 3.4m이며 마이크로폰 간격은 약 0.05~0.13m의 간격을 보여주고 있다. 1.6m와 1m반경의 네스트(Nest)에 6개의 마이크로폰이 30°와 60° 간격으로 교차로 방사형으로 배치되어 있으며, 마이크로폰 간격은 안쪽의 간격이 좁으며 바깥쪽은 넓다. 마이크로폰은 BSW사의 1/4인치(MPA 416)를 이용하였다. 고속 열차의 속도 측정은 포토 센서를 이용하여 수행하였다.

어레이는 선로로부터 5m 떨어진 곳에서 설치되었으며, 높이는 KTX차량의 동력차 (4.1m), 동력객차 (3.484m) 및 가

Fig. 7 Microphone array measurement setup

선 높이(5.08m)를 고려하여 선로로부터 마이크로폰 중앙의 위치가 2.3m가 되도록 설치하였다. 측정 및 분석은 내셔널 인스트루먼트(National Instrument)사의 PXI(DAQ 보드: PXIe-1065, 제어기: PXIe-8133, 데이터 스트리밍: NI 8260)를 이용하였고 샘플링 주파수는 6.4kHz와 주파수 분해능(Frequency Resolution)은 5.00Hz로 측정하였다. 또한 마이크로폰 어레이를 이용하여 정확한 음원을 추정하기 위해서는 정확한 음원의 위치를 파악하는 것이 중요하며, 이를 위해서는 시간에 따른 음원의 이동 위치와 속도 측정이 필요하다. 고속 열차의 속도 측정은 포토 센서를 이용하여 수행하였다. 포토 센서는 발광 센서와 수광 센서가 한 쌍을 이루고 있으며, 선로 양 쪽 기둥면에 레일방향으로 1.4m와 레일 레벨 기준으로 높이 1m 지점에 시작과 끝 트리거 센서가 위치하도록 고정하였다. 열차의 속도는 열차가 진입쪽 선로 기둥면을 통과 시 시작 트리거가 작동하게 되며, 진출 쪽 기둥면을 통과 시 끝 트리거를 작동하게 되어 통과 시간을 측정하고, 양 기둥면 사이의 거리를 통해서 구하게 된다. 본 연구에서의 전체적인 측정 장비의 구성도는 그림 7과 같다.

3.2 빔파워 스펙트럼 도출

고속철도 차량에서 공력 소음의 특성을 도출할 해석의 위치를 선정하였다. 고속 철도 차량의 소음원 분석에 관한 논문[4,7,9]을 바탕으로 주요 소음원의 위치를 선정하였다. 고속철도 차량이 고속으로 주행 시 주요 공력 소음원이 발생하는 부분은 차량의 전두부, 팬토그래프, 차간 및 대차 부분으로 볼 수 있다.

차량의 전두부에서는 고속으로 주행 시 공기의 마찰에 의한 난류(Turbulence)로 인해서 소음이 발생하는 것으로 알려져 있다. 팬토그래프 또한 공기에 흐름에 의한 와류(Vortex)로 인해서 고속으로 고속차량이 주행 시에 많은 소음이 발생하며, 팬토그래프의 커버(Cover) 또한 자체의 소음원으로 소음을 발생한다. 고속철도의 차간은 차량 사이의 빈 공간에 공기의 유입으로 인한 소음이 발생하는 위치이다[10]. 대차 부분은 휠과 레일의 접촉에 의해서 발생하는 전동소음(Rolling noise)과 공기의 유입과 유동으로 인한 공력소음 또한 발생하는 함께 발생하는 부분이다[11]. 이에 본 논문에서

Fig. 8 Aerodynamic noise positions of a High-speed train

Fig. 9 Pass-by noise data of a high-speed train

Fig. 10 High-pass filtered signal

Fig. 11 Weighted signal at inter-coaches gap

그림 8과 같이 고속철도 차량의 주요 소음원의 위치 중에서 공력 소음이 발생하는 부분인 전두부, 팬토그래프 및 커버, 차간 부위를 설정하였다. 해석점의 좌표는 전두부는 (2.10m, 1.27m)이고, 팬토그래프는 (15.22m, 3.27m)와 (372.89m, 3.80m), 차간공간은 (153.15m, 2.30m)였다.

선정된 위치에 대한 빔파워 스펙트럼(Beampower Spectrum)을 얻는 과정은 크게 데이터 측정, 측정 위치 선정, 신호 처리, 결과도출로 나눌 수 있다. 우선 고속철도 차량의 주행 소음과 속도를 측정하는 것이 중요하다.

Fig. 12 Noise characteristics of main noise sources

그림 9는 속도 303.3km/h로 주행하는 경우에 선로로부터 5m의 위치에 수평하게 설치된 마이크로폰 어레이 중에서 한 마이크로폰에 측정되는 신호를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 20Hz 이하에서 차량의 고속 주행에 따른 압력파가 측정되는 것을 확인할 수 있다. 이를 보정하기 위해서는 그림 10과 같이 하이패스 필터(High-pass filter)를 이용하여 압력파를 제거하는 것이 필요하다. 그 후 마이크로폰 어레이의 위치에 따른 신호지연을 보정하는 지연-합을 적용한다.

지연-합이 적용한 후에는 선정된 위치에서의 분해능이 높은 지역에서 측정된 신호의 가중치를 높여주는 창 함수를 그림 11과 같이 적용한다. 가중치를 적용한 후에는 푸리에 변환을 실시하고, 가청주파수의 특성을 반영하기 위해 A-가중치 함수를 부여하였다. 이렇게 얻어진 빔파워 스펙트럼은 선정된 위치에서의 주행 소음을 통해서 얻어진 주파수에 따른 소음의 특성을 보여준다.

3.3 결과 분석 및 고찰

고속철도 차량의 위치별 주파수 특성을 빔파워 스펙트럼을 통해서 그림 12와 같이 도출하였다. 고속철도 차량의 전두부에서는 300km/h 대로 주행 시 약 1000Hz 이하의 저주파 영역에서 높은 소음이 발생하며, 주파수가 증가할수록 감소되는 경향이 그림 12의 (a)와 같이 나타났다. 이는 전두부에서 발생하는 소음이 공기의 마찰로 인한 난류의 영향으로 인해서 저주파 영역에 집중된다는 것을 보여주고 있다. 고속철도 차량은 운행 시 진출 부분의 동력차량에서는 팬토그래프를 접은 상태(Closed knee)로 운행하고, 끝 부분의 동력차량에서는 가선과 접촉한 상태(Open knee)로 운행을 한다. 접은 상태에서는 팬토의 커버 부분에서 주로 소음이 발생하며, 접촉한 상태에서는 커버 부분과 팬토그래프에서 소음이 발생하게 된다. 팬토그래프를 접은 상태에서는 그림 12의 (b)와 같이 약 1500Hz의 비교적 저주파 영역에서 소음이 발생하는 것으로 나타났으며, 이는 주로 팬토그래프의 커버 부분에 난류에 의한 소음으로 볼 수 있다. 팬토그래프가

가선과 접촉하기 위해서 정상 상태인 경우에는 약 2500Hz 부근의 고주파 영역에서도 높은 소음이 발생함을 확인해 볼 수 있다. 이는 팬토그래프의 팬헤드(Panhead), 암(Arm), 봉(Rod) 등의 주변을 흐르는 와류에 의해서 고주파까지 소음의 발생이 높아지는 것으로 보여진다. 끝으로 차간 부위에서는 그림 12의 (c)와 같이 빈 공간에 공기의 유입에 의한 소음으로 500Hz이하의 저주파 영역에서 토널 소음(Tonal noise)가 발생함을 확인할 수 있다. 차간 공간의 저주파 영역에서의 토음 소음 발생은 고속열차 차간 공간에서 발생하는 소음 특성의 시험적 규명 결과와 유사함을 확인할 수 있다[12].

4. 결 론

본 논문에서는 음원과 어레이간에 거리에 따른 가중치를 부여하는 빔형성 방법을 이용하여 고속철도 차량의 소음에 대한 특성을 도출하는 연구를 수행하였다. 본 연구를 통해서 고속철도 차량이 고속으로 주행 시 전두부에서는 저주파 영역에서 높은 소음이 발생함을 확인하였으며, 팬토그래프에서는 팬헤드, 암, 봉 등으로 인해서 가선과 접촉한 상태에서 접힌 상태보다 고주파 영역에서 소음이 발생함을 확인할 수 있었다. 또한 차간 부위에서는 차간 공간의 유동으로 인해서 저주파 영역에서 토널 소음이 발생함을 확인하였다. 본 연구결과를 통해 얻어진 공력소음의 주파수 특성을 통해서 향후 고속철도 차량에서 발생하는 방사 소음을 연구하는데 도움이 될 것으로 예상된다. 하지만 본 연구결과의 보다 명확한 검증을 위해서는 고속철도 차량의 주행 조건을 고려한 풍동 시험 결과와의 비교가 요구된다.

후 기

본 연구는 국토해양부의 400km/h급 고속철도 인프라 시범적용 사업의 400km/h 고속철도 소음원 모델 구축 및 소음원 기여도 분석 과제의 지원을 받아 수행하였습니다. 이에 관계자께 감사드립니다.

참고문헌

- [1] David Thompson (2009) Railway noise and vibration: mechanism, modelling and means of control, Elsevier, pp. 6-9.
- [2] N. Fremion, N. Vincent (2000) Aerodynamic noise radiated by the inter coach spacing and the bogie of a high-speed train, *Journal of Sound and Vibration*, 231(3), pp. 577-593.
- [3] H.M. Noh, S. Choi, S.Y. Hong, S.W. Kim (2011) Designing a Microphone Array System for Noise Measurements on High-Speed Trains, *Journal of the Korean Society for Railway*, 14(6), pp. 477-483.
- [4] H.M. Noh, J.H. Cho, S. Choi, S.Y. Hong (2012) Noise sources localization on high-speed trains using a microphone array, *Journal of the Korean Society for Railway*, 15(1), pp. 23-28.
- [5] Bruel & Kjaer, Technical Review No.1 (2004) Beamforming
- [6] Xuetao Zhang, The Directivity of Railway Noise at Different Speeds, *Journal of Sound and Vibration*, 329(25), pp. 5273-5288.
- [7] F. Possion, P.E. Gautier, F. Letorneaux (2008) Noise Sources for High Speed Trains: a Review in the TGV Case, Noise and Vibration Mitigation for Rail Transportation Systems, Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design, Volume 99, pp.71-77.
- [8] Earl G. Williams, Fourier Acoustics-Sound Radiation and Nearfield Acoustic Holography (1999).
- [9] C. Mellet, F. Letourneaux, F. Possion, C. Talotte (2006) High speed train noise emission: Lasted Investigation of the aerodynamic/rolling noise contribution, *Journal of Sound and Vibration*, pp. 535-546.
- [10] C. Talotte (2000) Aerodynamic noise : A critical survey, *Journal of Sound and Vibration*, 231(3), pp. 549-562.
- [11] E. Scheneider, K. Popp (1988) Noise Generation in Railway Wheels due to Rail-wheel Contact Forces, *Journal of Sound and Vibration*, 120(2), pp. 227-244.
- [12] S. Choi, C.S. Park, J. Park, S.S. Kim (2007) Experimental Investigation of Noise Generation from the Inter-coach Spacing of a High-speed Train, *Journal of the Korean Society for Railway*, 10(6), pp. 786-791.

접수일(2012년 2월 3일), 수정일(2012년 4월 3일),
게재확정일(2012년 5월 19일)