도플러 보정을 통한 고속열차 현장 측정 소음 분석

Analysis of Field Noise from High Speed Train Using Dedopplerization

이 용 우*. 이 덕 주†. 권 혁 빈**. 윤 수 환**

Yong Woo Lee, Duck Joo Lee, Hyeok Bin Kwon and Su Hwan Yun

(Received February 25, 2013 ; Revised April 9, 2013 ; Accepted April 17, 2013)

Key Words : Doppler Shift(도플러 쉬프트), Dedopplerization(도플러 효과 보정), High Speed Train(고속열차)

ABSTRACT

Measured acoustic signal from operating high speed train contains frequency change called doppler shift due to its motion. To avoid this doppler shift wind tunnel test is required. But scaledown of model can cause change of source characteristics. And measurements using some part of train cannot reproduce real flow condition. The best way to recognize real noise source characteristics is measurement from operating high speed train but doppler shift makes it hard. So, we developed simple dedopplerization technique for one microphone and applied to field test data of high speed train. Through this, we could capture real frequency of noise from operating high speed train.

1. 서 론

고속열차와 같이 움직이는 음원으로부터 방사된 소음은 고정된 마이크로폰 위치로 인하여 시간에 따라 변화하는 형태의 신호로 측정되게 된다. 이러한 현상은 잘 알려진 도플러 효과로 인하여 발생하게 되며 주파수의 변화와 크기의 변화를 야기하게 된다.

이러한 문제로 인하여 열차에 존재하는 소음원의 특성을 파악하기 위해서 축소 모델을 이용하여 풍동 시험을 수행하는 경우 스케일의 문제로 인하여 실제 소음과 다른 특성을 나타내게 되며 특정 부분을 이용한 풍동 시험의 경우 실제 열차에서의 유동장이 정확히 고려되지 않는다는 문제점이 있다. 가장 좋은 방법은 실제 주행중인 열차로부터 발생하는 소음을 측정하는 것인데 앞에서 언급한 도플러 효과로 인하여 왜곡된 신호가 측정되기 때문에 도플러 효과

를 보정하여 실제 소음원의 특성을 파악하는 것이 필요하다. 도플러 효과를 보정하기 위해서는 마이크로폰에 도달하는 음파의 시간 차이를 이용하여 주파수를 보정하는 방법^(1,2)과 소음원의 방사 방사특성(방향성)을 이용하여 크기를 보정하는 방법이 있다.

도플러 효과 중 크기가 바뀌는 도플러 증폭의 경우 기본음원인 단극, 이극, 사극 음원마다 방향성이 다르기 때문에 도플러 증폭 보정을 위해서는 음원의 정확한 방사 특성을 알아야 한다. 하지만 고속열차의 경우 여러 기본음원들이 혼합된 소음을 방사하기 때문에 측정된 소음 신호로부터 도플러 증폭 보정을 수행하기에는 많은 어려움이 있다. 때문에 그 본 연구에서는 움직임으로 인해 주파수가 바뀌는 도플러 쉬프트 보정을 목적으로 하였고 한 개의 마이크로폰을 이용하여 비교적 간단하게 도플러 쉬프트를 보정함으로써 실제 움직이는 고속열차의 소음 특성을 파악하였다.

† Corresponding Author ; Member, Aerospace Div. KAIST
E-mail : djlee@kaist.ac.kr

Tel : +82-42-350-3716, Fax : +82-42-350-3710

* Aerospace Div. KAIST

** Korea Railroad Research Institute

‡ Recommended by Editor Myung Jun Kim

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

2. 도플러 효과 보정

2.1 움직이는 음원의 도플러 효과

움직이는 음원과 고정된 수음자 위치로 인하여 발생하는 도플러 쉬프트는 Fig. 1과 같이 음원의 속도와 음파의 방사속도를 이용한 기하학적인 관계로부터 얻을 수 있다⁽³⁾.

간략한 관계식을 얻기 위하여 음원은 초기에 원점에 위치하고 있으며 x축으로 일정한 속도 U 로 움직이고 있다고 가정한다. 또한 음원의 방사시간 τ^* 동안 음원이 움직인 거리는 원점으로부터 수음자 위치까지의 거리보다 충분히 짧다고 가정한다 ($|\vec{x}| \gg |U\tau^*|$). 이는 마이크로폰에 측정된 신호의 각 수음자 시간 간격마다 음원이 초기위치에 있었다고 간주함으로써 가능하다. 이러한 가정으로부터 다음과 같은 관계식을 유도할 수 있다.

$$a_0(t - \tau^*) \simeq |\vec{x}| \left\{ 1 - \frac{Ux_1\tau^*}{|\vec{x}|^2} \right\} \quad (1)$$

위 식을 수음자 시간 t 에 대하여 미분하게 되면 다음과 같이 수음자 시간과 음원 방사 시간 사이의 관계식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial \tau^*}{\partial t} = \frac{1}{1 - M \cos \theta} \quad (2)$$

즉, 마이크로폰 측정 시간과 음원 방사 시간 사이의 관계는 도플러 팩터라 불리는 음원의 마하수와 음원과 수음자 사이의 거리벡터와 음원의 이동방향 벡터가 이루는 각도로 나타내어진다. 따라서 측정시간에서의 음원의 위치를 알고 있다면 위 관계식을 이용하여 측정 신호를 재정렬하여 음원의 주파수를 파악할 수 있게 된다. 이를 수식으로 나타내면 식 (3)과 같다. T_R 은 마이크로폰에 측정된 수음자 시간을 의미하며 θ_s 는 수음자 시간에서 수음자와 음원 사이의 거리벡터와 음원의 움직임벡터 사이의 각이다. 상첨자 *는 도플러 팩터를 이용하여 변환된 시간을 의미한다.

$$(T_{R2}^* - T_{R1}^*) = \frac{1}{1 - M \cos \theta_s} (T_{R2} - T_{R1}) \quad (3)$$

식 (3)을 이용하게 되면 도플러 쉬프트로 인하여 높아지거나 낮아진 소음의 주파수를 맞춰줌으로써 측정된 소음 신호로부터 정확한 음원의 주파수를 알 수 있다. 식 (3)을 통하여 변환된 신호는 도플러 팩터가 곱해져 있기 때문에 시간간격이 일정하지 않게 된다. 따라서 분석 가능한 데이터로 만들기 위해서는 변환된 신호의 시간간격을 일정하게 맞춰주는 작업이 필요하다. 이는 내삽을 통하여 이루어지게 되며 이를 통하여 재구성된 신호는 일정한 시간 간격을 갖는 측정 신호와 같이 다뤄질 수 있게 된다. 이러한 과정은 Fig. 2에서 확인할 수 있다. 유도된 도플러 팩터는 1차원 운동에 대하여 유도되었지만 3차원 운동에 대해서도 동일하게 적용 가능하다.

이 방법을 이용하여 가상의 움직이는 단극 음원에 대하여 도플러 효과 보정 기법을 적용함으로써 방법을 검증하였다. 음원의 초기위치는 앞에서 설명한 바와 같이 원점으로 정하였으며 속도는 100 m/s

Fig. 1 Relation between moving source and fixed observer

Fig. 2 Reconstruction procedure of dedopplerization

($M=0.2915$)으로 하였다. 음원의 강도는 500 N/m^2 이며 주파수는 1 kHz 로 설정하였다. 수음자의 위치는 $(200 \text{ m}, 20 \text{ m}, 0 \text{ m})$ 이다. 즉, 음원과 같은 높이에 마이크로폰을 위치하였다. 측정 샘플링 속도는 주파수의 정확한 측정을 위하여 20 kHz 로 하여 충분히 높은 주파수까지 잡을 수 있도록 하였다. 수음자 위치에서 측정된 가상의 신호는 Fig. 3과 같다.

가상으로 생성된 단극음원으로부터 측정된 신호를 분석하기 위하여 STFT 분석을 수행하였다. Fig. 4와 Fig. 5는 도플러 효과 보정 전과 후의 STFT 결과를 보여주고 있다. 그림의 x축은 시간이며($0 \text{ s} \sim 5 \text{ s}$) y축은 주파수($0 \text{ Hz} \sim 5 \text{ kHz}$)이다. 도플러 효과 보정 전의 경우 음원이 수음자 위치로 가까이 다가오면서 주파수가 높아졌다가 음원으로부터 멀어지면서 주파수가 낮아지는 도플러 쉬프트가 발생하였음을 확인할 수 있다. 하지만 도플러 효과 보정 후에는 신호의 실제 주파수인 1 kHz 를 정확하게 나타내고 있음을 확인할 수 있다. 즉, 이 연구에서 사용한 도플러 효과 보정 기법을 적용함으로써 음원의 실제 주파수를 정확하게 파악할 수 있음을 의미한다. 다음으로 여러 개의 주파수가 섞여 있는 경우에도 도플러 효과 보정 기법이 효과가 있는지를 살펴보기 위하여 주파수 성분이 두 개인 신호를 생성하여 분석하였다. 신호의 주파수는 1 kHz 와 2 kHz 로 하였고 수음자 위치 및 음원의 이동속도, 음원의 강도는 단일 주파수일 때와 같다.

Fig. 6과 Fig. 7은 주파수가 1 kHz 와 2 kHz 인 신호의 분석 결과이다. 단일주파수일 때와 마찬가지로 도플러 효과 보정 기법을 적용함으로써 실제 소음원

의 주파수인 1 kHz 와 2 kHz 를 정확하게 나타내고 있음을 확인할 수 있다. 이 연구에서 사용한 도플러 효과 보정기법은 시간영역에서 측정된 신호를 보정하기 때문에 주파수와 상관없이 도플러 쉬프트를 보정할 수 있다. 즉, 순음 소음원 뿐만 아니라 광역소음 소음원 역시 이 연구에서 사용한 기법을 적용함으로써 측정된 신호로부터 정확한 소음원의 주파수를 파악할 수 있다. 또한 도플러 팩터는 음원과 수음자 사이의 기하학적인계로부터 유도되었기 때문에 단극, 이극, 사극 등 기본음원의 방사 특성과 상관없이 적용이 가능하다.

Fig. 4 STFT result for original signal(1 kHz)

Fig. 5 STFT result for dedopplerized signal(1 kHz)

Fig. 3 Measured signal of artificially moving monopole(left: whole signal, right: zoomed signal)

Fig. 6 STFT result for original signal(1 kHz, 2 kHz)

Fig. 7 STFT result for dedopplerized signal(1 kHz, 2 kHz)

2.2 고속열차 현장 소음 측정 데이터 분석

실제 고속열차에서 발생하는 소음 분석을 위하여 주행 중인 고속열차의 소음을 측정하였다. 측정된 열차는 KTX와 HEMU이다. KTX는 현재 상용주행 중인 열차이며 HEMU는 국내 기술로 개발된 고속 열차로 현재 시험주행 중이다. 실제 주행 중인 열차의 소음을 측정하기 위하여 경부고속철도의 한 구간에 마이크론을 설치하였다. 산이 많은 우리나라의 특성상 고속열차가 지나가는 구간중 소음을 측정하기에 용이한 구간이 별로 없기 때문에 부득이 하게 터널이 있는 구간을 선정하였다. Fig. 8은 소음 측정 장소의 정보이다. 그림에서 확인할 수 있듯이 상행은 터널로부터 열차가 나오는 방향이고 하행은 터널로 열차가 들어가는 방향이다. 열차가 터널에 들어가고 나가게 될 때는 급격한 압력 구배로 인한 압력파가 발생하게 된다. 발생한 압력파는 음파의 속도로 전파하게 되며 터널 내부의 벽면에 부딪히게 되면 반사되게 된다. 따라서 터널로부터 나오는 고속 열차의 소음은 열차가 터널의 반대편에 들어갈 때 발생한 압력파가 먼저 마이크론에 도달하게 되며 이는 개활지에서 주행 중 발생하는 고속열차의 소음과는 다른 성분이 된다. 또한 압력파는 한번만 측정되는 것이 아니라 터널 끝에서의 임피던스 불일치로

Table 1 Noise measurement information

Case	Type	Speed(m/s)	Initial position(m)
1	KTX	74.1	-433.342
2	KTX	75.0	-457.17
3	HEMU	71.4	-419.783
4	HEMU	73.5	-433.79
5	HEMU	73.5	-529.66

Fig. 8 Noise measurement site

Fig. 9 Measured noise signal of HEMU

인하여 반사된 압력파가 터널을 지나 다시 터널 입구 밖으로 방사되기 때문에 터널 길이에 따른 시간 간격으로 계속적으로 압력파가 측정되게 된다. 따라서 터널로부터 나오는 열차로부터 측정된 신호는 압력파로 인하여 고속열차의 주행 소음을 분석하기 어렵다. 따라서 이 연구에서는 터널로 들어가는 하행 열차로부터 측정된 신호만을 분석에 사용하였다. 또한 압력파가 측정된 것으로 생각되는 시간부터의 신호는 사용하지 않음으로써 순수 열차의 주행소음만을 분석하였다. Fig. 9는 HEMU 고속열차의 측정 신호로 터널로 들어가면서 발생한

압력파가 터널 끝에서 반사되어 계속 측정되고 있음을 보여주고 있다.

고속열차 소음측정은 총 5번 이루어졌다. 이중 두 번은 KTX 주행이며 3번은 HEMU 주행이다. 앞에서 정리한 도플러 효과 보정 기법을 사용하기 위해서는 고속열차의 주행 속도와 초기 위치 정보가 필요하다. Table 3은 주행소음 측정을 수행한 고속열차의 정보이다. 고속열차의 속도는 마이크로폰으로 측정되는 동안 일정하게 유지된다고 가정하였다. Table 3에 나타나있는 초기위치는 마이크로폰 앞을 원점으로 하여 정의된 위치이며 고속열차가 마이크로폰으로부터 멀리 떨어진 위치에 있을 때 방사된 소음의 경우 배경소음에 묻히게 될 가능성이 있기 때문에 열차가 마이크로폰 앞에 위치하기 약 5~6초 전의 신호부터 분석에 사용하였다. 실제 도플러 효과 보정 기법을 적용할 때에는 Table 3의 초기위치를 원점으로 하고 마이크로폰 위치를 이동하였다. 이러한 정보를 이용하여 측정된 고속열차의 소음에 도플러 효과 보정기법을 적용하여 고속열차 소음원의 실제 주파수를 파악하였다. Fig. 10부터 Fig. 14는 각 케이스의 STFT 결과이다. 모든 컬러맵의 음압 범위는 0 dB부터 100 dB이고 x축은 시간(보정 전: 0 s~5 s, 보정 후: 0 s~보정시간), y축은 주파수(0 Hz~3 kHz)이다. 각 그림의 위는 도플러 효과 보정 전의 신호에 대한 STFT 결과이고 아래는 보정 후의 신호에 대한 STFT 결과이다. 결과의 일관성을 위하여 5초 동안의 측정 신호를 이용하여 도플러 효과 보정을 수행하였으며 마이크로폰으로 다가오는 주행 조건에서의 측정 결과이기 때문에 보정 후의 신호는 5초보다 늘어났음을 알 수 있다. 먼저 KTX의 신호인 Case1과 Case2를 살펴보자. 보정 전의 신호에서는 두 케이스 모두 약 1.1 kHz 주변에서 강한 순음성분이 존재함을 확인할 수 있다. 이러한 순음성분은 도플러 효과 보정기법을 적용함으로써 약 850 Hz 근방으로 주파수가 하락 하였으며 이는 마이크로폰으로 다가오고 있는 열차의 주행조건으로 인하여 주파수가 높아진 것이다.

즉, 실제 주행중인 열차에서 발생하는 순음 소음원의 주파수는 약 850 Hz임을 알 수 있다. HEMU의 경우에는 KTX에 비하여 낮은 주파수 영역에 순음성분이 존재하고 있다. 보정 전의 신호에서는 약 400 Hz 부근의 순음성분을 확인할 수 있었으며 보정

Fig. 10 STFT result of case1(KTX)

Fig. 11 STFT result of case2(KTX)

Fig. 12 STFT result of case3(HEMU)

Fig. 13 STFT result of case4(HEMU)

Fig. 14 STFT result of case5(HEMU)

후의 신호에서는 300 Hz의 순음성분을 확인할 수 있었다. 주목할 점은 모든 경우에 도플러 증폭 보정을 적용하지 않았기 때문에 정량적인 비교는 힘들지만 비슷한 속도임에도 불구하고 KTX에 비하여 HEMU의 측정소음 크기가 낮게 나타나고 있다는 점이다. 도플러 증폭의 경우 단극, 이극, 사극 소음 원마다 다른 방향성으로 인하여 다른 증폭 특성이 나타나기 때문에 음원의 특성이 명확하지 않은 측정 소음에 도플러 증폭 보정을 적용하기에는 많은 어려움이 있다. 하지만 도플러 증폭효과는 음원 속도의 함수이기 때문에 두 열차의 소음원이 유사한 특성을 가지고 있다고 본다면 같은 속도에서의 도플러 증폭 효과는 유사하게 나타날 것으로 예상할 수 있다. 따

라서 이 논문의 연구 내용으로 두 열차에서 방사되는 소음의 정량적인 비교는 어렵지만 HEMU가 KTX에 비하여 외부로 방사되는 소음에 대한 설계가 잘 되어 있다고 추측할 수 있다. 또한 HEMU에서 측정된 소음의 경우 약 300 Hz 영역에서 가장 높은 음압레벨을 나타내고 있으며 이는 KTX의 850 Hz에 비하여 사람이 듣는 소리의 크기가 낮게 인지되기 때문에 실제로 HEMU의 외부 방사 소음의 인지 정도는 더욱 낮을 것이라고 예상된다. 향후 고속 열차의 소음원 방사 특성에 대한 연구가 이루어진다면 이를 통하여 도플러 증폭효과를 보정하는 연구를 진행함으로써 고속열차의 외부방사소음의 정량적인 평가가 가능할 것으로 생각된다.

3. 결 론

주행중인 고속열차에서 방사되는 소음을 측정하여 고속열차 소음원의 특성을 파악하기 위하여 고정된 마이크로폰에 측정된 고속열차 소음 신호에 도플러 효과 보정기법을 적용하였다. 이를 위하여 먼저 한 개의 마이크로폰을 이용하여 비교적 간단하게 고속열차 소음원의 주파수를 파악할 수 있는 관계식을 유도하였다. 움직이는 음원과 수음자 사이의 기하학적 관계로부터 도플러 팩터를 유도할 수 있었고 가상의 움직이는 단극 음원에 이를 적용함으로써 도플러 효과가 정확하게 제거되는 것을 확인하였다. 실제 주행 중인 KTX와 HEMU고속열차에서 방사되는 소음을 마이크로폰을 이용하여 측정하였고, 측정된 신호에 도플러 효과 보정 기법을 적용하였다. KTX의 경우 약 850 Hz 근방에 강한 순음성분이 존재함을 확인하였고 HEMU의 경우 약 300 Hz 근방에 순음성분이 존재함을 확인하였다. 비슷한 속도로 움직이는 KTX와 HEMU의 소음을 비교하였을 때 HEMU의 소음이 더 낮게 나타남을 알 수 있었다. 이 연구에서는 주파수의 도플러 쉬프트만 보정하였지만 도플러 증폭효과는 속도의 함수이기 때문에 비슷한 속도인 경우 도플러 증폭 효과 역시 비슷할 것이다. 따라서 실제 HEMU에서 방사되는 소음은 KTX보다 낮을 것이라는 예측을 할 수 있으며 이는 향후 고속열차의 소음원 특성 규명 및 도플러 증폭 보정에 대한 연구를 진행함으로써 정량적인 평가가 가능할 것으로 생각된다.

후 기

이 연구는 한국철도기술연구원의 “고속열차 공력 소음 평가 기반기술 연구” 과제 지원으로 수행되었으며 이에 한국철도기술연구원 관계자 분들께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) Go, Y. J., Rhee, W., Choi, J. S., Ahn, B. K. and Lee, C. S., 2010, Doppler Effects in the Underwater Noise Source Localization, Proceedings of the KSNVE Annual Autumn Conference, pp. 592~593.
- (2) Rhee, W., Park, S., Choi, J. S. and Kim, J. M., 2006, Elimination of Self Noise & Doppler Effects from the Microphone Array Measurement, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 16, No. 7, pp. 677~682.
- (3) Dowling, A. P. and Ffowcs Williams, J. E., 1983,

Sound and Sources of Sound, Ellis Horwood Limited, Chichester.

Yong Woo Lee received BS degree in Div. of Aerospace in KAIST, Korea. He is now PhD candidate in Div. of Aerospace in KAIST, Korea. His research interests are instability feedback noise and BEM.

Duck Joo Lee received his PhD degree in Dept. of Aero& Astronautics from Stanford University. He is currently a professor at Div. of Aerospace Engineering in KAIST, Korea. His research interests are rotor aerodynamics & aeroacoustics and aeroacoustics analysis and reduction of applications.