

# Binaural Recording 기법을 이용한 다양한 철도차량의 Pass-by 소음의 성가심 분석

## Analysis of Annoyance of Various Train Pass-by Noise Using Binaural Recording

박 범\* · 고효인\*\* · 박준홍†  
Buhm Park, Hyo-In Koh and Junhong Park

(Received November 27, 2013 ; Revised March 10, 2014 ; Accepted March 10, 2014)

**Key Words** : Train Pass-by Noise(철도차량의 pass-by 소음), 성가심(Annoyance), Binaural Recording(바이노럴 녹음), Sound Quality Metrics(음질인자), Sound Pressure Level(음압레벨)

### ABSTRACT

Pass-by noises of various trains were recorded by binaural recorder. The measured noises were evaluated using a sound pressure level and psychoacoustic metrics objectively. To analyze a binaural effect on annoyance that can be caused by train noise, auditory experiments were performed. Through the experiments, the annoyance differences between monaural and binaural train noises, the annoyance differences due to measurement angle and the annoyance differences due to kinds of train and measurement distance were determined. A correlation analysis was conducted to determine which index can affect the annoyance more strongly. As the result, a maximum rate of change of sharpness difference between left and right channels was proposed to predict the annoyance.

### 1. 서 론

철도차량은 2012년 말 기준 영업거리 5571 km에 이르며 2015년 호남고속철도(182.3 km), 수도권고속철도(61.0 km)에 이어 2017년 원주~강릉간 고속철도(120.0 km) 등이 개통될 예정이다. 이처럼 철도구간이 늘어나고 그에 따른 철도차량운행이 많아짐에 따라 철도에 인접한 주민들의 소음에 대한 민원도 점차 많아지고 있다.

현재 우리나라는 환경부 고시 제 2010-73호 별표 2에 소음레벨에 의해 철도소음을 명시된 소음한도에

의해 권고하고 있다. 하지만 기준치 이내로 제시된 지역에서도 지속적으로 철도소음에 대한 민원이 발생함으로써 법적인 dBA 산출량으로 평가하는 방법의 한계성이 제시되고 있기 때문에 철도차량에 의한 성가심의 원인을 규명하고 해소할 수 있는 과학적 근거자료가 매우 요구되고 있다.

철도차량에 의한 성가심의 원인을 규명하고자 여러 연구들이 진행되고 있으며 Mellet 등<sup>(1)</sup>은 TGV의 pass-by 소음을 측정하여 철도차량의 앞뒤에 위치한 동력차들이 통과할 때 가장 큰 소음을 방사하며 특히 앞쪽의 동력차가 뒤쪽의 동력차보다 더 큰 소음을 방사함을 밝혔고 또한 성가심을 잘 표현할 수 있

† Corresponding Author ; Member, School of Mechanical Engineering, Hanyang University  
E-mail : parkj@hanyang.ac.kr  
Tel : +82-2-2220-0424, Fax : +82-2-2298-4634

\* Department of Mechanical Engineering, Hanyang University

\*\* Member, Korea Railroad Research Institute

‡ Recommended by Editor Myung Jun Kim

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

는 인자를 밝히기 위한 노력도 지속 중이며 D. Schömer<sup>(2)</sup>는 환경소음을 평가하기 위해  $L_{Aeq}$ 를 개선한 인자보다 그 자체가 더 정확함을 밝혔지만 강한 저주파 특성을 갖는 교통소음에 대해서는  $L_{Aeq}$ 보다 loudness-level-weighted sound exposure level(LLSEL)과 loudness-level-weighted equivalent level(LL-LEQ)이 유용함을 밝혔다. Ma와 Yano<sup>(3)</sup>는 다양한 거리에서 측정된 철도차량과 자동차의 pass-by noise의 음원에 대하여 5점 단어척도를 이용한 청감실험을 통하여 철도소음보다 자동차 소음이 더 성가심을 밝혔고 청감실험방법 또한 척도법 및 의미분법 등의 다양한 방법에 의한 철도차량의 성가심을 평가한 바 있다<sup>(4,6)</sup>. 하지만 이러한 연구들은 모두 monaural 측정에 의한 연구들이어서 실제 사람의 청각특성을 반영하기 더 유리한 binaural에 의한 측정 및 평가에 대한 연구는 매우 부족한 상황이다.

따라서 이 연구에서는 실제로 주민들이 느낄 수 있는 성가심을 분석하기 위하여 다양한 종류의 철도차량에 대해 binaural 녹음을 통해 철도차량의 pass-by 소음을 측정하고 차종별, 거리별 성가심을 음질인자들과 이들의 시간변화율을 사용한 객관적, 주관적 방법으로 분석하였다.

## 2. Binaural recording을 통한 철도차량의 pass-by 소음 측정

이 연구에서는 여러 지점에서 철도차량의 소음을 측정하였다. 첫 번째 측정지점은 천안시 서북구 성환읍이었으며 140 km/h 이하의 비교적 낮은 속도로 운행하는 전철, 무궁화호, 새마을호, 화물차, 누리로, KTX의 소음을 측정하였다. 두 번째 측정지점은 화성시 봉담읍이었으며 250~300 km/h의 고속으로 운행하는 KTX와 KTX산천에 대해 소음 측정을 진행하였다. 그리고 화성시 양감면 용소리에서는 비교적 거리가 먼 곳에서(50 m) KTX와 KTX산천의 상행선에 대하여 측정각도를 다르게 하며 측정을 하였다.

측정방법은 헤드폰 형태의 binaural recorder (Headacoustics, MHS-II) 3대를 동시에 사용하여 녹음을 진행하였다. Fig. 1에 나타난 바와 같이 성환읍과 봉담읍에서는 13, 26, 36, 39 m의 측정거리에서 레일을 직각으로 바라보는 각도로( $\theta=0^\circ$ ) 측정하였고 용소리에서는 50 m 측정거리에서 Fig. 1에 나타난 바

와 같이 측정각도를 0, 45, 90°로 다르게 하여 측정하였다. 측정높이는 약 1 m로 3대의 장비가 동일하도록 측정하였다. 외부측정에서 바람의 영향을 최소화하기 위하여 측정장비에 모두 방풍망을 부착하였다. 차량의 운행속도는 속도측정계(PR-1000)로 측정하였다.

측정된 음원들은 분석을 위하여 Fig. 2에서 볼 수

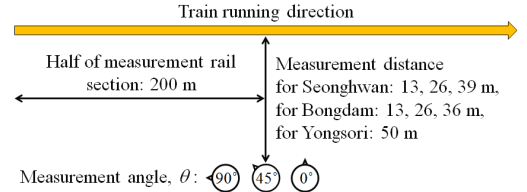


Fig. 1 Measurement condition using binaural microphones for train pass-by noise

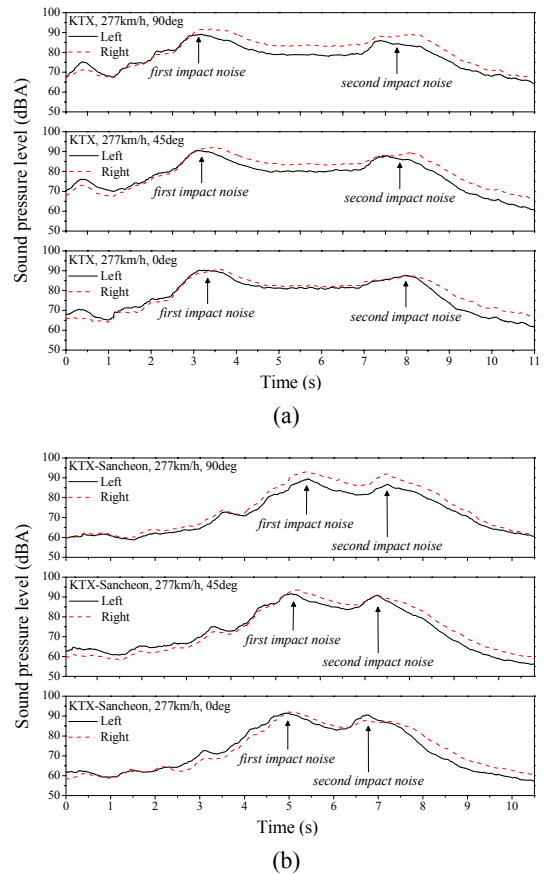


Fig. 2 Time history of sound pressure level due to measurement angle of (a) KTX, (b) KTX-Sancheon

있듯이 음원의  $L_{max}$ 를 기준으로 차량 통과 전후로 좌우 레벨 중 더 큰 쪽에서 25 dB 떨어지는 부분을 기준으로 편집하였으며 측정상 25 dB 차이가 나지 않는 저속운행 차량의 음원은 20 dB 기준으로 편집하였다. 이렇게 편집된 음원들은 차종별로 최대 소음도를 갖는 음원들을 대표음원으로 선정하여 분석을 진행하였다.

### 3. 철도차량 pass-by 소음의 물리적 특성 분석

앞서 편집된 음원들은 좌우채널을 구별하여 상용 프로그램(Headacoustics, Artemis 12.0)을 사용해 음압레벨 및 음질인자 해석을 수행하였다. Total loudness, N은 ISO 523B에 따라 다음과 같이 계산된다.

$$N = \int_0^{24\text{Bark}} N'(z)dz \quad (1)$$

여기서  $z$ 는 critical band rate(bark)이며  $N'$ 은 specific loudness이다. Sharpness는 Aures method에 따라 계산되며 모듈레이션의 효과를 대표하는 roughness와 fluctuation strength는 “partial roughness” 방법에 의해 계산되었다.

#### 3.1 측정각도에 따른 소음 특성 비교

측정각도에 따른 좌우 음압레벨 차이를 살펴보면 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 측정각도  $\theta$ 가 90°일 때 가장 큰 차이를 보이며 0°일 때는 가장 차이가 적었다. 반면 레벨이 역전되는 현상은  $\theta$ 가 90°일 때 거의 없지만 0°일 때는 좌우레벨의 역전현상이 명확하게 보였으며 특히 KTX 산천의 경우 더 뚜렷하였다. 특히 차량의 전면부/후면부가 측정지점을 지나가는 충격소음 부분에서 각도에 따른 좌우 레벨 차이가 크게 측정되었고  $\theta$ 가 45°의 경우 중간적인 특성을 보였다.

측정각도에 따른 좌우 loudness 차이를 살펴보면 Fig. 3에 나타낸 바와 같이 전체적인 경향은 음압레벨과 비슷하지만 차량이 측정지점을 통과하기 전의 경향이 달랐다. 음압레벨의 경우 차량 접근이 인지되는 멀리서부터 좌우차이가 나타나지만 loudness의 경우 좌우차이가 거의 없으며 차량이 통과한 후에는 좌우 차이가 관찰 되었고 이러한 특성은 측정각도가

클수록 경향이 명확하였다.

Fig. 4에 나타낸 바와 같이 측정각도에 따른 좌우 sharpness의 차이를 살펴보면 전체적인 경향은 loudness와 거의 유사하지만 KTX의 경우 차량이 측정지점을 빠져나가는 두 번째 충격소음 부분에서 첫 번째 충격소음보다 더 높은 값을 가지는 점이 특이하였다. 이는 측정지점으로 차량이 진입할 때 소리의 크기 자체는 크지만 오히려 나갈 때 더 날카로운 소리가 발생하며 고주파수 대역성분이 큰 영향을 미치는 것을 의미한다.

이를 확인하기 위하여 시간대 주파수분석을 하였고 그 결과를 나타낸 Fig. 5를 보면 차량이 측정지점을 통과하는 첫 번째 충격소음보다 차량이 측정지점을 빠져나가는 두 번째 충격소음 부분에서 지배적인

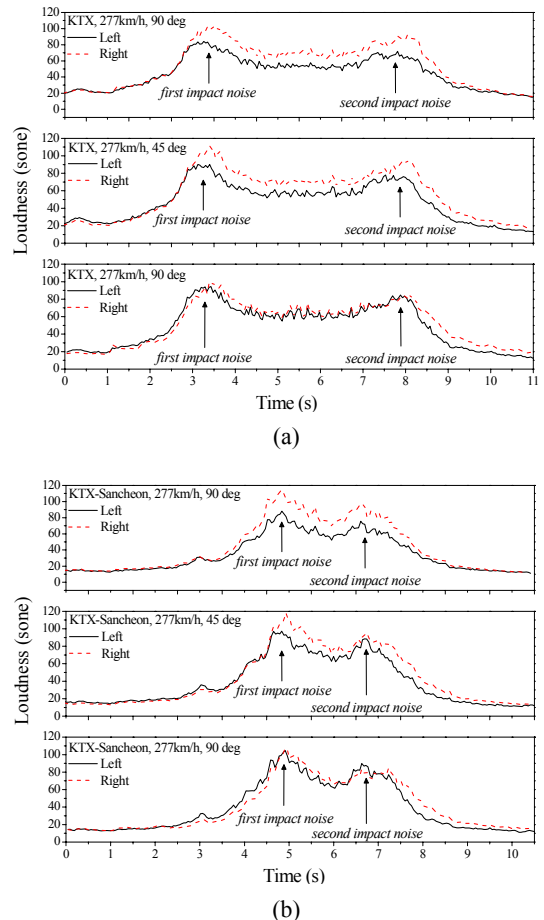
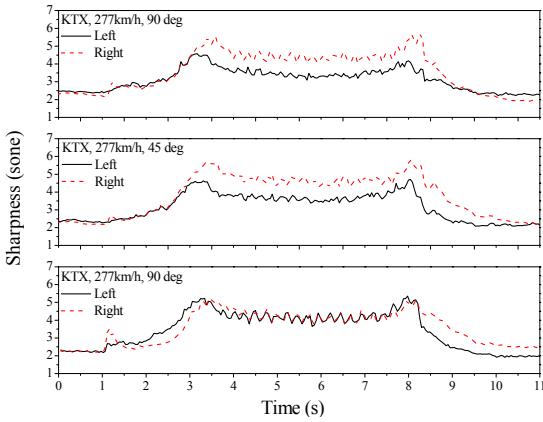
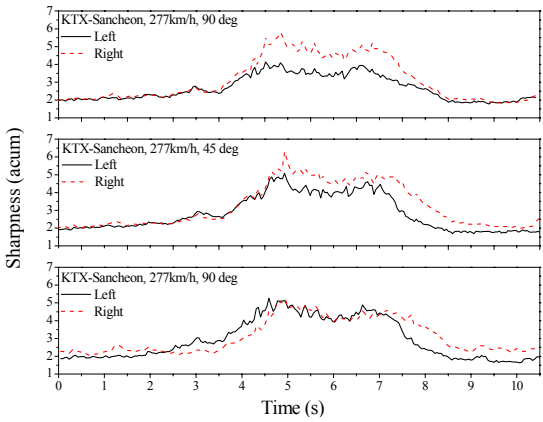


Fig. 3 Time history of loudness due to measurement angle of (a) KTX, (b) KTX-Sancheon



(a)



(b)

Fig. 4 Time history of sharpness due to measurement angle of (a) KTX, (b) KTX-Sancheon

주파수가 더 높으며 또한 지배적인 주파수영역이 도플러효과에 의해 낮아지는 것을 확인할 수 있었다. 차량이 측정지점을 통과하는 사이에는 지배적인 주파수영역이 2~500 Hz 대역이었으며 마찬가지로 도플러 효과에 의한 주파수가 낮아지는 현상이 보였고 이러한 현상이 주기적으로 반복되는 것을 확인할 수 있었다. 그 외의 음질인자들은 loudness와 경향이 거의 일치하였다.

3.2 차종/측정거리에 따른 소음의 특성 비교

차종별, 측정거리별 음압레벨 및 음질인자들을 비교한 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 차종과 거리에 따른 분석은  $\theta$ 가 0°일 때를 기준으로 하였다. 차종별로 측정된 여러 개의 음원들 중 최대 소음도를 갖는 음원들을 대표적인 음원들로 선정하였다. KTX의 경우 저속 운행하는 음원을 한 개만 확보하였고 고속 일 때의 음원은 측정조건이 달라 약간의 오차는 있을 수 있지만 대략적인 비교는 가능하였다.

대부분의 소음원들이 측정거리에 반비례하여 음의 크기가 줄어들지만 줄어드는 정도가 차량별로 차이가 있었고 음압레벨(dBA) 기준으로 지하철이 무궁화, 새마을, 화물차보다 더 큰 소음도를 갖지만 loudness 기준으로는 역전되었다. 이러한 현상에 따라 지하철의 경우 다른 차량들에 비해 속도가 낮음에도 소음도가 비슷한 수준임을 볼 수 있었다.

Sharpness 특성을 살펴보면 고속으로 운행하는 KTX를 제외하면 지하철이 가장 날카로운 소리

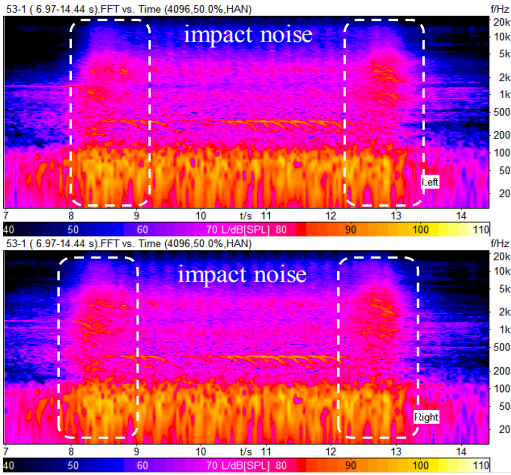


Fig. 5 Time-frequency analysis of KTX pass-by noise

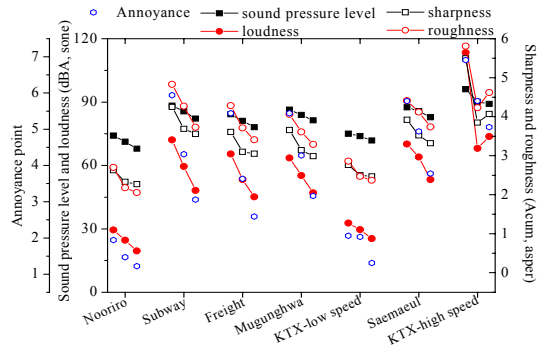


Fig. 6 Single value of sound pressure level and sound quality metrics due to measurement distance, and obtained annoyance from an auditory experiment by magnitude estimation method in section 4

특성을 가지는 것을 알 수 있었다. KTX가 다른 열차와 비슷한 속도로 운행될 때는 누리로 보다도 오히려 sharpness는 낮았다. 모듈레이션과 관련된 기타 음질인자들을 살펴보면 roughness의 경우 비슷한 속도에서의 KTX는 기타 차량보다 훨씬 부드럽게 들릴 수 있으며 누리로도 속도는 약간 적지만 거칠기의 정도가 적었다.

차종별 차량의 속도와 측정거리에 따른 주파수특성의 변화를 Fig. 7에 나타내었다. KTX의 경우 속도가 증가하면 300 Hz 부분에서 순음 성분이 발생하며 이는 차간공간에서 발생하는 공력소음의 영향

이었고 1~5 kHz 대역의 증가 또한 두드러졌다. 속도가 낮을 때 거리에 대한 레벨의 감소가 주로 고주파 쪽에서만 있으며 고속일 때는 전체적인 감소가 나타나지만 마찬가지로 고주파의 감소가 두드러졌다. 지하철의 경우 속도차가 매우 작아 속도에 의한 영향은 보기 어려웠지만 거리가 멀어질수록 200~800 Hz 대역의 감소가 두드러지며 6 kHz 이상의 고주파 영역에서도 거리에 비례하여 매우 큰 감소가 보였다. 지하철은 300~1000 Hz과 2 kHz 이상의 대역에서 가장 높은 레벨을 가지며 300 Hz 이하는 매우 낮았다. 이러한 특성이 앞서 언급했던 바와 같이 지하철의 소음레벨 값과 sharpness 값이 높도록 하는 원인이 되었다. 무궁화호와 새마을호의 경우 또한 속도분포가 매우 좁아 거리에 의한 영향만 관찰할 수 있었고 두 차량의 소음특성은 서로 매우 유사하였다. 두 차량 모두 100~200 Hz 성분이 매우 지배적이며 디젤차량들이 대부분 이러한 특성을 보였다.

#### 4. Pass-by 철도소음의 주관적 성가심 분석

청감실험은 binaural 효과를 고려한 다양한 기준의 성가심의 정도를 측정함을 목표로 수행하였다. 배경소음이 35 dB 이하인 실험실에서 고성능 헤드폰(젠하이저 HD600)을 사용하였다. 실험은 각기 다른 방법으로 총 4회에 걸쳐 진행되었으며 첫 번째 실험은 같은 소음에 대해서 monaural과 binaural 녹음에 따른 성가심 분석을 위해 단순비교법으로 실시하였고 두 번째 실험은 binaural 녹음된 소음에 대해 측정각도에 따른 성가심을 순위법에 의하여 실시하였다. 마지막으로 실제차량소음에 대한 성가심 분석을 위하여 쌍대비교법과 크기추정법에 의한 실험을 각각 실시하였다.

##### 4.1 녹음채널에 따른 성가심 분석

첫 번째 실험은 monaural과 binaural 녹음에 따른 성가심 분석을 위하여 고속주행시의 철도소음 5개에 대해 같은 조건에서 monaural과 binaural로 동시에 녹음된 총 10개 음원에 대해 비교법으로 실시하였다. 이 때 monaural 음원은 마이크로폰의 방향이 레일과 직각일 때 녹음된 음원이었고 binaural 음원은 측정각도  $\theta$ 가  $0^\circ$ 일 때의 음원이었다. 실험에 사용된 음원은 각각 278 km/h의 KTX, 277 km/h의 KTX산

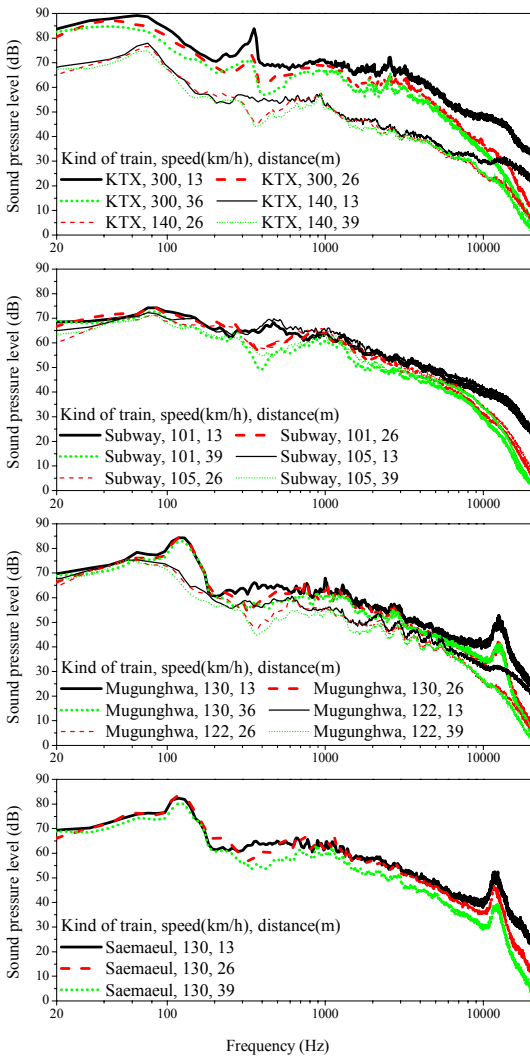


Fig. 7 Frequency characteristics with kind of trains and measurement distance

천, 253 km/h의 KTX산천, 290 km/h의 KTX, 277 km/h의 KTX의 pass-by 소음이었다. 21명의 실험참가자들(여:4, 남:17, 19~40세)에게 동일 차량에 대한 monaural과 binaural로 동시에 녹음된 음원을 제시한 후 더 성가신 것을 선택하게 하였고 실험참가자들이 판단한 더 성가신 음원은 1점, 아닌 음원은 0점으로 모든 참가자들의 응답의 비율로 결과 분석하였다.

실험결과, monaural과 binaural 중 더 성가시다고 응답한 비율은 monaural이 전체의 53%, binaural이 전체의 47%로 거의 비슷하였다. 하지만 Table 1에 나타낸 바와 같이 음크기를 비교해보면 monaural 음원이 binaural 음원의 좌측보다 2 dB 이상 더 컸다. 일반적으로 80 dBA 이상의 음원에 대해서 그 음원의 크기차이가 1 dB 이하일 때도 그 차이를 감지할 수 있다고<sup>(7)</sup> 알려져 있으며 성가심에 주로 영향을 미치는 인자가 음크기인 것을 생각해보면 binaural 음원이 더 성가시다고 응답한 비율이 매우 높은 것을 알 수 있다. 이로 미루어 보아 binaural 효과에 의한 성가심 기여도가 존재한다고 생각할 수 있고 따라서 성가심 인덱스 도출 시 binaural 효과를 고려해 주는 것이 중요한 것으로 판단되었다.

### 4.2 녹음각도에 따른 성가심 분석

두 번째 실험은 철도소음이 방사되는 대표적인

각도를 고려하여 측정각도  $\theta$ 가 0°, 45°, 90° 각도로 녹음된 고속주행시의 KTX소음 5개(각도고려 총 15개)에 대해 순위법으로 실시하였다. 총 32명의 실험참가자들(여:7, 남:25, 19~28세)에게 동일 차량에 대한 세 각도의 음원들을 무작위로 제시한 후 성가신 순서를 결정하게 하였다. 여기서 순위법(ranking method)이란 비교하고자 하는 두 개 이상 음원의 우열을 순위를 매겨 판정하는 실험방법이며 방법이 간단하기 때문에 잘 이용되지만 상대적인 우열의 정보만을 얻을 수 있으며 전에 받은 자극을 잊어버리면 정확도가 떨어진다는 단점이 있다. 실험참가자들이 판단한 성가심의 순위대로 가장 성가신 음원은 3점, 두번째 2점, 마지막은 1점을 부여하여 모든 참가자들의 응답의 평균값과 표준편차로 결과를 분석하였다.

Table 2에 나타낸 결과를 보면 음원마다 차이가 있으며 순위법에 의한 결과이기 때문에 신뢰수준은 낮은 편이지만 대략의 경향을 분석할 수 있었고 각각의 동일음원에 대해  $\theta=45^\circ$ 인 음원의 성가심이 가장 컸으며 0°, 90°의 순이었다. 앞서 측정각도에 따른 소음특성을 나타내었던 Figs. 2~4를 보았을 때 좌우 소음특성들의 크기가 충격음이 발생하는 지점

**Table 1** Averaged point of annoyance due to measurement angle

No	Train (Running speed)	Sound pressure level (dBA)			Maximum difference between monaural and binaural (dBA)
		Monaural	Binaural		
			Left	Right	
1	KTX (278 km/h)	87.42	85.2	86.4	2.22
2	KTX-Sancheon (277 km/h)	87.14	85.27	85.34	1.87
3	KTX-Sancheon (253 km/h)	82.62	80.23	81.02	2.39
4	KTX (290 km/h)	86.82	84.66	85.2	2.16
5	KTX (277 km/h)	84.9	82.9	83.6	2

**Table 2** Averaged point of annoyance due to measurement angle

Train	Running speed (km/h)	Measurement angle	Averaged point of annoyance	Standard deviation
KTX	278	90°	1.66	0.69
		45°	1.88	0.70
		0°	2.47	0.83
KTX-Sancheon	277	90°	2.47	0.75
		45°	1.63	0.78
		0°	1.91	0.68
KTX-Sancheon	253	90°	1.59	0.74
		45°	2.41	0.70
		0°	2.00	0.79
KTX	290	90°	1.59	0.74
		45°	2.44	0.75
		0°	1.97	0.73
KTX	277	90°	1.66	0.69
		45°	2.41	0.74
		0°	1.94	0.83

에서 역전되는 현상이 뚜렷하였던  $\theta=45^\circ$  와  $\theta=0^\circ$ 의 특성이 매우 유사하였고 철도차량과 가까운 쪽이 역전현상 없이 소음특성의 크기가 더 큰  $\theta=90^\circ$  보다 성가심의 크기가 더 크게 나왔다는 것은 좌우 소음의 역전현상이 성가심에 기여하며 따라서  $\theta=0^\circ, 45^\circ$ 의 음원이 가장 성가신 경우라고 할 수 있다.

### 4.3 차종, 측정거리에 따른 성가심 분석

세 번째 실험은 실제 차량 소음을 binaural 녹음된 음원들로 성가심을 비교하였다. 총 7개 차종들을 (누리로: 113 km/h, 지하철: 105 km/h, 화물차: 80 km/h, 무궁화호: 130 km/h, 저속운행 KTX: 140 km/h, 새마을호: 129 km/h, 고속운행 KTX: 290 km/h) 13, 26, 39 m 거리에서 녹음된 음원들 중 각 차종에서 가장 큰 소음도를 갖는 경우를 대표음원으로 선정하였다. 실험은 두 개의 서브세션으로 나누어 차종별 소음특성에 따른 성가심과 차종, 측정거리를 모두 고려한 성가심을 분석하였다. 첫 번째 실험은 총 26명의 19~28세의 평가자들을(여 6명, 남 20명) 대상으로 7개 차종에 대해 26 m 거리에서 측정된 음원들을 쌍대비교법으로 성가심을 비교하였고 두 번째 실험은 총 32명의 평가자들을(여 7명, 남 25명) 대상으로 7개 차종에 대해 13, 26, 39 m(고속운행 KTX의 경우 13, 26, 36 m) 거리에서 측정된 21개 음원에 대해 크기추정법으로 성가심을 측정하였다.

쌍대비교법으로 실험한 경우에는 결과의 신뢰성을 높이기 위하여 실험참가자들의 응답이 얼마나 일관되었는지와 전체 참가자간의 경향성이 잘 맞는지 확인하였고 크기추정법으로 실험한 경우에는 7점 척도법을 사용하였으며<sup>(1-7)</sup> 실험 전 기준음을 선정하여 4점이라고 참가자들에게 말한 후 3번 반복하여 들려주고 실험 후 기준음의 점수가 4점에 가까운지를 확인하여 결과의 신뢰성을 높였다.

쌍대비교법에 의한 차종별 성가심 분석결과를 Fig. 8(a)와 같다. 결과의 신뢰성 테스트 결과 실험참가자 개인들의 일관성 평가와 참가자들간의 경향성이 잘 일치하였으며 같은 거리에서 측정된 고속의 KTX를 제외한 6종의 차량들의 성가심은 새마을 > 무궁화 > 화물차 > 지하철 > KTX > 누리로의 순이었다. 같은 속도였지만 새마을이 무궁화에 비해 성가심이 높았고 화물차는 지하철보다 25 km/h가량

느렸음에도 성가심이 더 높았다. 반면 KTX가 140 km/h의 속도로 다른 차량에 비해 빨랐음에도 성가심이 매우 낮았으며 누리로는 성가심이 가장 낮게 평가되었다. 종합적으로 새마을과 무궁화, 지하철과 화물차, KTX저속과 누리로가 서로 비슷한 성가심의 정도를 지녔음을 알 수 있었다.

크기추정법에 따른 차종별, 측정거리별 성가심 정도의 결과는 Fig. 8(b)와 같다. 실험 전 무궁화 26 m 음원을 4점이라 말해주고 3번 반복하여 들려준 후 실험하였고 기준음의 결과값이 4.28이며 표준편차도 모든 음원이 1 이내이어서 좋은 결과라고 판단되었다. 다만 앞선 쌍대비교법의 결과와 비교하면 지하철의 성가심이 높게 평가되었다. 고속의 KTX를 제외하면 지하철이 속도가 105 km/h로 낮음에도 성가심의 정도는 가장 높은 수준이며 새마을 열차와 비슷하였고 화물차도 속도가 약 80 km/h로 가장 낮음에도 성가심의 정도가 높았다. 지하철과 화물차는 거리가 가까워질수록 성가심의 증가도 커졌다. 누리로와 KTX는 속도가 각각 110, 140 km/h 정도임에도 가장 낮은 성가심 정도를 보이며 거리에 따른 성가심의 증가폭도 크지 않았다.

청감실험으로 도출된 성가심의 정도와 물리적 인자와의 관계를 살펴보면 Fig. 9에서 나타난 바와 같이 쌍대비교법 결과 성가심과 가장 유사한 경향을 보이는 값들은 음크기와 관련된 dBA나 loudness였다.

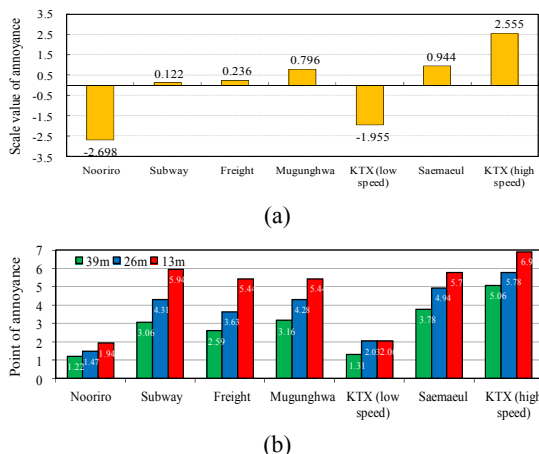
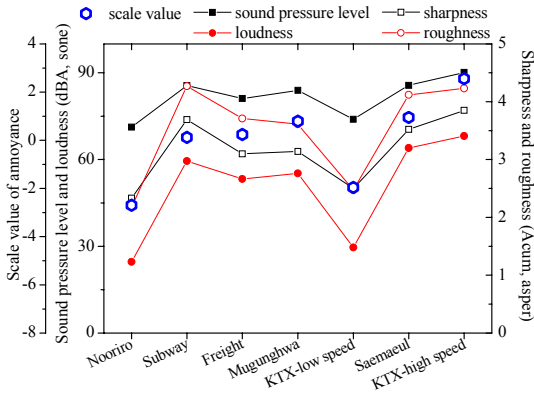


Fig. 8 Results of auditory experiment to analyze annoyance by (a) paired comparison method and (b) magnitude estimation method, with kind of trains and measurement distance



**Fig. 9** Comparison between obtained annoyance from auditory experiment by a paired comparison and sound quality metrics

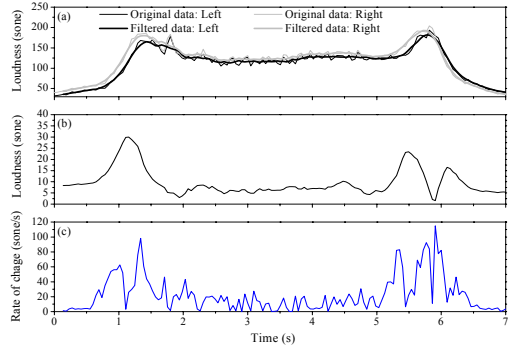
앞서 Fig. 6에서 나타났던 크기추정법 결과에서 7번 음원인 고속운행시의 KTX 소음은 측정조건상 39 m 대신 36 m 거리였고 사선으로 위치했었던 이유로 반대의 경향이 나온 것을 제외하고 거리별로 모든 인자가 반비례하고 있으며 음원별로 거리에 따른 인자값들의 감소비율이 상이하다는 것을 알 수 있다.

### 5. 성가심 예측을 위한 인덱스 도출

#### 5.1 Binaural 효과를 반영하기 위한 인자 도출

성가심 예측을 위한 인자들은 통상적으로 널리 사용되는 dBA, loudness, sharpness, roughness, fluctuation strength를 사용하였고 음의 크기를 나타내는 인자들에 대하여 통계적값인 percentile value, L5, L10, N5, N10들을 고려하였다. Binaural effect를 고려한 성가심 예측을 위하여 우선 가장 단순한 좌우채널의 각 인자별 등가단일값의 차이를 우선적으로 고려하였고 나아가 시간영역에서의 좌우채널 차이를 계산한 후 이들이 시간에 대해 변화하는 비율의 최대값을 계산하였다.

물리적 인자들의 좌우 차이의 시간영역에서 최대 변화율을 계산하는 과정을 Fig. 10에 나타내었다. 좌우차이의 시간변화율은 시간에 따른 좌우 데이터를 보면 시간에 따른 변동이 매우 심하기 때문에 moving average filter를 사용하여 smooth화 하였다. Moving average filter는 입력신호에 대해 시간영역



**Fig. 10** Obtaining procedure of gradient values using moving average filter. (a) measured train noises using binaural recorder, black line: left, gray line: right noise, thin line: original, thick line: filtered data, respectively (b) noise difference between filtered left and right channel (c) obtained change rate of noise difference between left and right channel

에서 원하는 구간 Δ만큼 평균값을 구해 출력신호를 만들어 주는 간단한 신호처리법이며 rolling average, rolling mean, running average 라고도 불리며 다음 식과 같이 정의된다.

$$y[n] = \frac{1}{M} \sum_{i=0}^{M-1} x(n-i), \tag{2}$$

여기서 x는 입력신호, y는 출력신호이며 M은 평균 시간 동안 신호의 개수이다. 필터창의 크기는 0.25 초로 각 인자별로 동일하게 적용하였으며 이렇게 필터처리된 좌우 데이터의 차이를 구한 후 이를 최종적으로 시간에 대한 변화율을 계산하여 최대값을 도출하였고 Fig. 10에서 볼 수 있듯이 시간에 대한 변화율의 최대값은 좌우의 크기가 반전되는 부분에서 주로 나타나기 때문에 적합한 인자라고 판단되었다. Fluctuation strength는 시간에 대한 변동강도를 나타내는 인자이기 때문에 분석에서 제외하였다.

#### 5.2 주관적 성가심과 물리적 인자간의 상관관계 분석

성가심 예측 인덱스를 도출하기 위하여 앞 절에서 언급하였던 dBA나 음질인자들과 그의 통계적값은 좌우 채널 중 더 큰 값을 사용하였다. 쌍대비



**Table 3** Correlation analysis result of auditory experiment by paired comparison method

	Annoyance		$L_{Aeq}$	
	Correlation coefficient	Significance probability, p-value	Correlation coefficient	Significance probability, p-value
Annoyance	1		0.420	0.580
$L_{Aeq}$	0.420	0.580	1	
$L_5$	0.860	0.140	0.820	0.180
$L_{10}$	0.818	0.182	0.865	0.135
Loudness	0.359	0.641	0.863	0.137
$N_5$	0.993	0.007	0.484	0.516
$N_{10}$	0.994	0.006	0.489	0.511
Sharpness	-0.115	0.885	0.846	0.154
Roughness	-0.230	0.770	0.751	0.249
Fluctuation strength	0.222	0.778	0.662	0.338
$(\Delta L_A)_{grad, max}$	0.704	0.296	0.631	0.369
$(\Delta Loudness)_{grad, max}$	0.905	0.095	0.247	0.753
$(\Delta Sharpness)_{grad, max}$	0.997	0.003	0.360	0.640
$(\Delta Roughness)_{grad, max}$	0.724	0.276	0.301	0.699

교법에서 도출된 성가심은 비교음원의 개수는 7개로 적으나 실험방법의 특성상 성가심의 정확도는 더 높다고 볼 수 있다. 하지만 쌍대비교법은 실험방법상 많은 음원을 비교하는 것은 음원쌍의 조합이 너무 많아져 실험시간이 길어지고 이에 따라 평가자의 집중도가 떨어져 나중에 평가된 결과들은 신뢰성이 떨어진다는 문제가 있다. 걱정한 음원개수를 선정하기 위해 차종별로 기준이 되는 26 m의 음원들만 고려하였으나 차종별 음원의 음크기가 뚜렷하게 나타났기 때문에 성가심 측정 결과에 음크기가 너무 지배적이라는 문제점이 있었다. 따라서 쌍대비교법에서 사용된 7개의 음원 중 소음의 크기가 작은 누리로와 저속운행시의 KTX, 그리고 소음의 크기가 큰 고속운행시의 KTX 음원을 제외한 서로 비슷한 음크기를 갖는 4개의 음원들의 성가심을 계산하여 물리적 인자와의 상관관계를 분석하였고 그 결과는 Table 3과 같다. Table 3에 나타난  $(\Delta L_A)_{grad, max}$ ,  $(\Delta Loudness)_{grad, max}$ ,  $(\Delta Sharpness)_{grad, max}$ ,  $(\Delta Roughness)_{grad, max}$ 는 각각 앞서 언급하였던 각 인자의 좌우채널차이의 최대시간변화율을 뜻한다.

**Table 4** Correlation analysis result of auditory experiment by magnitude estimation method

	Annoyance		$L_{Aeq}$	
	Correlation coefficient	Significance probability, p-value	Correlation coefficient	Significance probability, p-value
Annoyance	1		0.840	0.009
$L_{Aeq}$	0.840	0.009	1	
$L_5$	0.830	0.011	0.878	0.004
$L_{10}$	0.824	0.012	0.903	0.002
Loudness	0.973	0.000	0.879	0.004
$N_5$	0.866	0.005	0.768	0.026
$N_{10}$	0.876	0.004	0.783	0.022
Sharpness	0.535	0.172	0.670	0.069
Roughness	0.756	0.030	0.771	0.025
Fluctuation strength	0.833	0.010	0.877	0.004
$(\Delta L_A)_{grad, max}$	0.098	0.818	0.357	0.385
$(\Delta Loudness)_{grad, max}$	0.861	0.006	0.682	0.062
$(\Delta Sharpness)_{grad, max}$	0.847	0.008	0.624	0.098
$(\Delta Roughness)_{grad, max}$	0.386	0.345	-0.018	0.967

성가심과 가장 상관관계가 높은 인자는  $N_{10}$ 이었으며 유의확률도 매우 높았다. 좌우 단일값의 차이는 유의한 결과가 나오지 않았으며 상관관계도 낮았다. 하지만 시간에 따른 좌우차의 변화율의 최대값은 loudness와 sharpness의 경우 매우 유의하며 상관관계가 높은 결과가 나왔으며 특히 sharpness의 변화율 최대값이 매우 높게 나왔다.

쌍대비교법 결과에서 상관분석에 사용한 음원의 개수가 적었기 때문에 음크기들을 갖는 여러 개의 음원들을 평가할 수 있는 크기 추정법에 의한 성가심 측정 결과와의 비료를 통해 쌍대비교법의 결과를 검증하였다. 쌍대비교법과 마찬가지로 음크기의 지배적인 영향을 최대한 배제하기 위하여 앞서 사용되었던 총 21개의 음원중 Fig. 6에 나타난 바와 같이 13, 26, 39 m의 측정거리에서 측정되어 비슷한 음크기를 갖는 85 dBA에서  $\pm 3$  dBA 이내에 들어오는 8개의 음원들로 상관분석을 실시하였으며 이렇게 도출된 성가심과 물리적 인자와의 상관관계를 Table 4에 나타내었다. 쌍대비교법에 의한 결과와 마찬가지로 시간에 따른 좌우 차의 변화율의 최대값은

loudness와 sharpness의 경우 성가심과 매우 유의한 관계가 나왔다. 따라서 앞서 언급하였던 바와 같이 binaural효과에 의한 성가심 기여가 크다는 것을 확인할 수 있었다.

## 6. 결 론

이 연구에서는 binaural방식으로 다양한 철도차량의 소음을 녹음하고 특성 분석 후 청감실험을 통하여 다양한 환경에서의 binaural 소음 측정 및 분석을 통한 성가심도에 미치는 영향을 파악하였다. 동일한 음원에 대해 monaural과 binaural로 각각 녹음된 철도소음에 대한 성가심을 비교하였고 녹음각도가 0, 45, 90°일 때 성가심의 차이를 분석하였다. 또한 다양한 차종과 측정거리 등을 고려하여 쌍대비교법과 크기추정법의 두 가지 방법으로 성가심을 분석하여 loudness 및 sharpness 좌우차이의 시간변화율이 성가심에 밀접한 영향을 미친다는 것을 밝혔다.

이 연구에서 분석된 결과를 통하여 향후 철도소음에 대한 민원의 근거를 분석하고 객관적 음질평가 지표와 청감적 성가심도 연계결과를 제시하여 소음 저감 방안을 제시하는데 기초적인 정보를 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

## 후 기

이 연구는 한국철도기술연구원 “철도 친환경성 향상기술 개발”의 지원으로 수행되었습니다.

## References

(1) Mellet, C., Létourneaux, F., Poisson, F. and Talotte, C., 2006, High Speed Train Noise Emission: Latest Investigation of the Aerodynamic/rolling Noise Contribution, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 293,

No. 3-5, pp. 535~546.

(2) Schömer, D., 2000, Loudness-level Weighting for Environmental Noise Assessment, *Acta Acoustica United with Acoustica*, Vol. 86, No. 1, pp. 49~61.

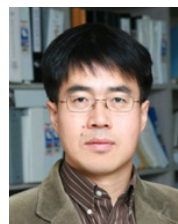
(3) Ma, H. and Yano, T., 2004, An Experiment on Auditory and Non-auditory Disturbances Caused by Railway and Road Traffic Noises in Outdoor Conditions, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 277, No. 3, pp. 501~509.

(4) Fields, M., Dejong, G., Gjestland, T., Flindell, H., Job, S., Kurra, S., Lercher, P., Vallet, M., Yano, T., Guski, R., Felscher-Suhr, U. and Schumer, R., 2001, Standardized General-purpose Noise Reaction Questions for Community Noise Surveys: Research and a Recommendation, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 242, No. 4, pp. 641~679.

(5) Yun, H. and Kim, J., 2005, An Experimental Study on the Propagation Characteristics of Railway Noise Passing Urban Area, *Journal of Architectural Institute of Korea*, Vol. 21, No. 4, pp. 175~182.

(6) Chun, H., Kim, D., Ko, J. and Chang, S., 2008, Jury Evaluation Test for Annoyance Response of KTX(Korea Train Express) and Ordinary Train Noise, *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 18, No. 3, pp. 355~344.

(7) Zwicker, E. and Fastl, H., 1999, *Psychoacoustics: Facts and Models*, Springer 2nd Edition.



**Junhong Park** received the Ph.D. degree in 2002 from Department of Mechanical Engineering in Purdue University. He is an associate professor of Mechanical Engineering at Hanyang University. His main research interests are in the fields of acoustics, noise and vibration.