

서울지하철의 저주파소음 특성

정성수[†] · 신수현 · 김호철* · 이우섭**

한국표준과학연구원 음향진동그룹 · *KAIST 물리학과 · **아산정보기술대학 멀티미디어과

(2005년 4월 12일 접수, 2005년 11월 24일 채택)

Low Frequency Characteristic of Seoul Subway Noise

Sung Soo Jung[†] · Su Hyun Shin · Ho Chul Kim* · Woo Seop Lee**

Acoustics and Vibration Group, Korea Research Institute of Standards and Science

*Department of Physics, Korea Advanced Institute of Science and Technology

**Department of Multimedia, Asan Information Polytechnic College

ABSTRACT : The low frequency noise below 200 Hz, including inaudible infra-sound, is known to affect human physiology ; circulation, respiration, nerve, endocrine, etc. Legislation has been introduced in several countries regarding evaluation guideline and measurement method of low frequency noise. In this work, low frequency characteristics of the Seoul subway transportation system was investigated in terms of the noise level and spectrum in the interior of running passenger car and the subway station. The interior sound pressure level of the passenger car was between 60 and 105 dB in the frequency range of 1~200 Hz and varied with car speed. The marked sound pressure level peak at 8 Hz, infra-sound, observed for the most of Lines is shown to correspond to the resonance frequency of passenger car. The level of station platform noise was lower than the interior noise of running car because of the lower speed at arriving/departure. The results indicated that the interior noise level of running passenger car was inside the oppressive feeling region, proposed by Ochiai, in the frequency range of 20~80 Hz which makes a little concern.

Key Words : Low Frequency Noise, Infra-sound, Subway Noise, Sound Pressure Level

요약 : 사람의 귀에 들리지 않는 초저주파음을 비롯하여 200 Hz 이하의 저주파소음은 순환기, 호흡기, 신경, 내분비 등 사람의 생리에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 이에 몇몇 국가들은 나름대로 저주파소음의 측정법과 평가 기준안을 마련한 상태이다. 본 연구에서는 대중교통 수단인 서울지하철을 대상으로 객차 내와 승강장에서의 저주파소음레벨과 스펙트럼을 조사하였다. 측정결과 객차 내 소음레벨은 지하철 운행속도와 곡선구배 등에 따라 차이는 있었으나, 주파수 1~200 Hz 대역에서 60~105 dB로 나타났다. 특히 8 Hz에서의 소음 피크 값은 객차의 길이에 대한 공명주파수에 해당됨을 알 수 있었다. 승강장에서의 소음은 객차 내 소음보다 상대적으로 소음레벨이 낮게 측정되었는데 이것은 차량 도착 혹은 출발 시의 속력이 운행 시의 속력보다 낮기 때문에 판단된다. Ochiai의 소음에 의한 인체영향 연구를 고려할 때, 객차 내 소음은 주파수 20~80 Hz 구간에서 압박감을 줄 수 있기 때문에 주목할 필요가 있다.

주제어 : 저주파소음, 초저주파음, 지하철소음, 음압레벨

1. 서 론

일반적으로 소음은 가청주파수 20~20,000 Hz 사이에서 발생하는 음압의 변화로서 그 동안 소음저감을 위한 연구와 기술개발이 계속되어 왔다. 이에 반해 20 Hz 이하의 초저주파음을 포함한 저주파소음은 귀에 잘 들리지 않기 때문에 별로 주목을 받지 못했지만, 이들 저주파소음이 사람의 순환기, 호흡기, 신경, 내분비, 수면 등에 영향을 준다는 연구결과들^[1,2]이 발표됨에 따라 환경소음 전반에 걸쳐 점차 관심이 고조되고 있다. 저주파소음은 가청음에 비해 주파수가 낮기

때문에 흡음재와 차음재를 사용하는 일반적인 소음저감 방법으로는 차단이 힘들며, 주파수가 낮을수록 진동을 수반하는 경우가 많기 때문에 소음과 진동을 완전히 구분하기 힘든 특성을 가지고 있다.

독일, 네덜란드, 덴마크, 스웨덴, 폴란드 등 유럽 국가들은 이미 1990년 후반에 저주파소음의 측정법과 평가법에 대한 지침서를 마련하였는데,^[3~5] 주로 생활공간과 작업장 등에 대해 규정하고 있다. 미국과 일본도 그 동안의 연구결과를 토대로 현재 종합적인 대책 마련에 착수한 상태이나 우리의 경우는 아직까지도 저주파소음에 대한 연구가 거의 없는 실정이다.

본 연구에서는 대중교통수단인 서울지하철을 대상으로 1호선부터 8호선까지 열차 운행에 따른 객차 내와 승강장에서의 저주파소음을 측정하고 분석하였다. 분석된 자료를 토

† Corresponding author

E-mail: jss@kriss.re.kr

Tel: 042-868-5307

Fax: 042-868-5643

대로 이를 저주파소음이 인체에 어느 정도 영향을 미칠 수 있는지 살펴보았다.

2. 소음측정 방법

소음 측정 시 승객들이 많이 이용하는 시간대를 피하고, 대부분 자리에 앉아 있는 차량을 선택함으로서 말소리와 이동에 따른 영향을 최소화하였다. 지하철 전 노선에 대해 전 차량을 대상으로 하는 것이 가장 좋겠지만 본 연구의 목적을 빠른 실태조사에 두었기 때문에 한정된 조건하에서 수행하였다. 객차 내 소음측정을 위한 각 노선과 구간은 Table 1에, 그리고 승강장은 Table 2에 정리하였다. 소음레벨 평가에 있어 초저주파인 경우는 G 특성⁶⁾을 사용하는 경우도 있지만, 본 논문에서는 200 Hz까지 포함하기 때문에 평탄특성으로 분석하였다. 차량의 운행 속력은 승차역 간의 거리를 알기 때문에 출발과 정지 간의 시간을 측정한 후 평균속력으로 하였다.

Table 1. Seoul subway Lines and ranges for the measurement of interior noise of a passenger car

Subway Line	Range
1	Jonggak ~ City hall
	Jongno 3ga ~ Jonggak
	Hannam ~ Oksu
	Ichon ~ Seobinggo
2	Euljiro 1ga ~ Euljiro 3ga
	Euljiro 3ga ~ Euljiro 4ga
	Samseong ~ Sports Complex
	Sports Complex ~ Sincheon
3	Oksu ~ Apgujeong
	Dogok ~ Daechi
	Daechi ~ Hagnyeoul
	Hagnyeoul ~ Daecheong
4	Sadang ~ Chongshin Univ.
	Chongshin Univ. ~ Dongjak
	Dongjak ~ Ichon
5	Cheonho ~ Gwangnaru
	Jongno3ga ~ Gwanghwamun
	Janghanpyeong ~ Dapsipri
	Dapsipri ~ Majang
6	Gongdeok ~ Hyochang Park
	Yaksu ~ Beotigogae
	Beotigogae ~ Hangangjin
	Hangangjin ~ Itaewon
7	Isu ~ Naebang
	Naebang ~ Express bus terminal
	Children's Grand Park ~ Gunja
	Gunga ~ Junggok
8	Gangdong gu office ~ Cheonho
	Seokchon ~ Songpa
	Songpa ~ Garak Market
	Garak Market ~ Munjeong

Table 2. Seoul subway line and stations for the measurement of station platform noise

Subway Line	Station
1	Jonggak, Seoul station
2	Jamsil, Gangnam
3	Express bus terminal, Yangjae
4	Ichon, Sadang
5	Cheonho, Euljiro 4ga, Gongdeok
6	Gongdeok, Suseo
7	Express bus terminal, Nonhyeon
8	Mongchontoseong, Jamsil

소음측정은 주파수 0.07 Hz부터 측정이 가능한 1/2 인치 저주파용 마이크로폰(microphone, model 4193, B&K, Denmark)과 정밀급 소음계(sound level meter, model 2231, B&K, Denmark)를 사용하였다. 측정된 신호는 디지털레코더(DAT, model PC208Ax, Sony, Japan)로 녹음한 후 실험실에서 주파수 분석기(FFT analyzer, model 2144, B&K, Denmark)로 스펙트럼 분석을 하였다. 마이크로폰의 위치는 좌석에 앉아 있는 승객을 고려하여 바닥면에서 1.2 m 높이 그리고 객차의 중간지점으로 하였다. 참고적으로 유럽국가들의 지침서에는 실내 바닥으로부터 1.0~1.5 m 높이로 규정하고 있다. 승강장 소음은 차량 탑승지점으로부터 뒤로 3~4 m 떨어진 지점 그리고 차량이 터널에서 승강장으로 진입하는 지점으로부터 10 m 떨어진 지점으로, 소음측정 장비와 위치는 Fig. 1과 같다. 승강장에서는 공조시스템이 작동되기 때문에 차량의 운행이 없을 때 배경소음을 측정하여 공조시스템에 의한 영향은 자료 분석 시 보정하였다.

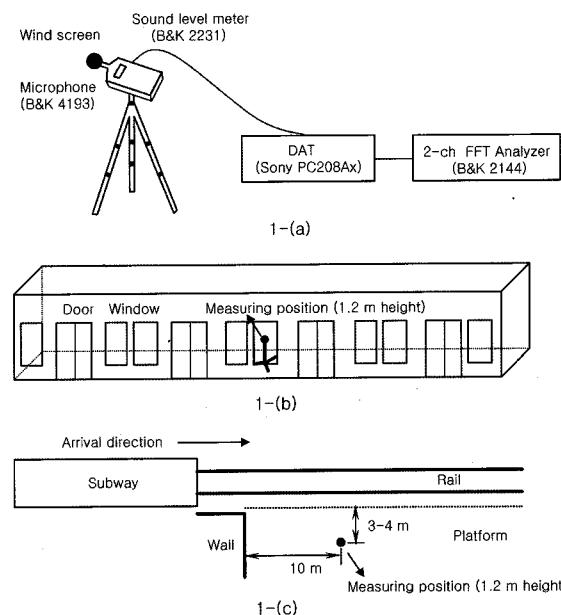


Fig. 1. Experimental set-up and noise measuring positions,
(a) block diagram of noise measuring apparatus,
(b) noise measuring position for the interior of a
passenger car, and (c) noise measuring position for a
subway station platform.

3. 결과 및 분석

3.1. 객차내 소음

1호선 각 구간에서 측정한 소음레벨 결과를 Fig. 2에 비교하였다. 결과를 보면, 종각-시청 구간이 가장 낮은 값을 보이고 있는데, 이 구간은 곡선 구배가 심한 곳으로 다른 구간에 비해 운행 속력을 26 km/h로 서행하였기 때문에 소음레벨이 낮게 측정되었다. 종각-시청 구간에 비해 직선 구간인 종로 3가-종각 구간은 차량 속력이 40 km/h로 증가되어 상대적으로 소음레벨이 높게 나온다. 저주파에서 고주파로 갈수록 소음레벨이 낮아지는 경향을 나타내는데, 이것은 일차적으로 차량을 구성하고 있는 구조물들이 고주파수에서 높은 차음 특성을 갖기 때문이다.

국철 구간인 청량리 지상 역사부터 용산까지 운행하는 노선인 경우, 이촌-서빙고 그리고 한남-옥수 구간에서 측정한 소음 스펙트럼은 상호 유사한 특성을 보이고 있다. 이는 동일한 차량으로, 운행속력 역시 비슷하게 평균 33 km/h로 운행되었기 때문으로 분석된다.

2호선의 경우, 을지로입구-을지로3가 그리고 을지로3가-을지로4가 구간은 같은 차량이고, 삼성-종합운동장 그리고 종합운동장-신천 구간 역시 같은 차량이지만 을지로 구간의 차량과는 다른 차량이다. 객차 내에서 측정한 소음 스펙트럼을 Fig. 3에 비교하였는데, 같은 차량인 경우는 유사한 소음 스

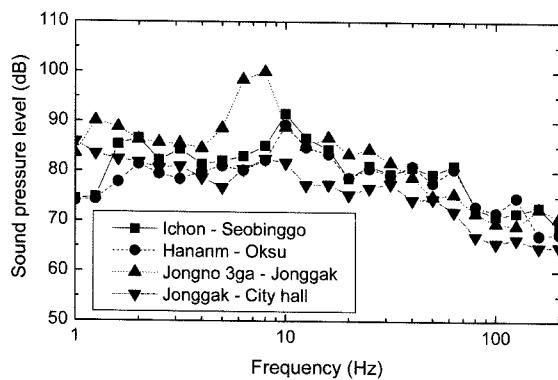


Fig. 2. Sound pressure level spectrum in the interior of a passenger car for different passing ranges in the Line 1.

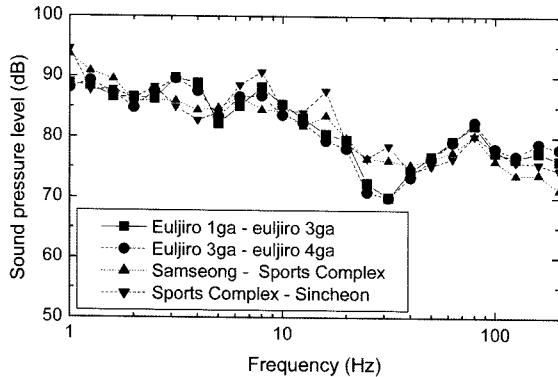


Fig. 3. Sound pressure level spectrum in the interior of a passenger car for different passing ranges in the Line 2.

펙트럼을 나타내지만 차량이 다른 경우는 서로 다른 스펙트럼 형상을 가짐을 알 수 있다.

3호선 구간에 대한 결과는 Fig. 4에 나타냈다. 소음레벨을 비교해 보면, 도곡-대치 구간이 다소 높게 나오는데 이것은 본 구간에서는 차량 속력이 54 km/h인데 반해 다른 지하구간에서의 운행속력은 각각 34, 43 km/h로 상대적으로 느리게 운행되었기 때문이다. 한편, 옥수-압구정 구간은 지상 교량(동호대교) 구간이지만 학여울-대청 구간의 소음 스펙트럼과 유사한 저주파소음 특성을 보이고 있다. 이 결과로부터 동호대교인 경우는 교량 구조물에서 발생되는 소음이 객차 내에는 큰 영향을 주지 않음을 알 수 있다. 일반적으로 지하 구간에서 운행될 때가 지상보다 더 시끄럽게 느껴지는데 이것은 200 Hz 이하의 저주파대역이 아니라 그 이상의 고주파대역의 소음이 증가하기 때문임을 본 결과로부터 알 수 있다.

Fig. 5에는 4호선부터 8호선까지 각각 구간에서 측정한 소음레벨의 산술 평균값을 비교하였다. 결과에서 확인할 수 있듯이 각 노선별로 소음레벨이 10 dB 이상 차이를 보이고 있다. 이것은 각 노선별로 차량의 상태, 특히, 바퀴와 레일의 마모 상태와 차량의 운행 속도의 차이 등으로 인해 발생되는 현상이다.

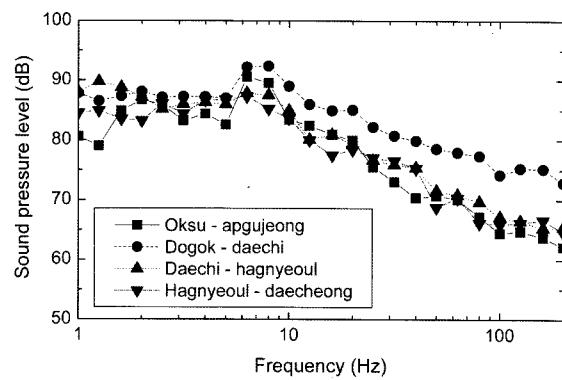


Fig. 4. Sound pressure level spectrum measured in the interior of a passenger car for different passing ranges in the Line 3.

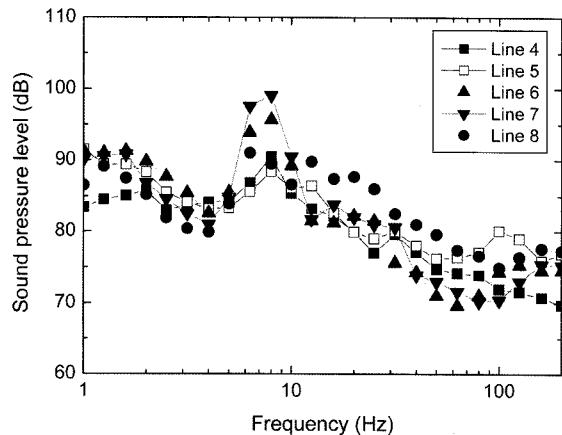


Fig. 5. Average sound pressure level spectrum measured in the interior of a passenger car for the Line 4 to the Line 8.

지금까지의 결과들을 종합해 볼 때, 대부분 노선에서 10 Hz까지의 저주파에서 비교적 높은 소음레벨을 보이고 있다. 수 Hz 근처에서는 높은 저주파소음은 차량전체가 하나의 선로에 연결되어 있기 때문에 차량전체에서 발생되는 저주파음과 운행하는 지하 통로 길이 방향으로의 음향 공명 등에 의한 것이지만, 이들에 대한 영향을 주파수별로 명확히 구분하는 것은 사실상 불가능하다. 하지만 Fig 5에서 보듯이 8 Hz 부근에서 피크값은 객차 한량을 밀폐된 사각상자로 고려할 때 내부에서의 음향 공명현상에 관련된 것으로 해석이 가능하다. 차량 길이(L) 방향으로의 첫 번째 공명주파수 (f_1)와 음속(c)과의 관계식은 $f_1 = c/(2L)$ 을 만족하게 된다.⁷⁾ 전철의 경우 객차 한량의 길이는 19.5 m이지만 실제 차량 연결 통로 길이를 제외하면 19 m 정도가 되기 때문에 f_1 은 8.9 Hz ($c = 340 \text{ m/s}$ 로 하였음)에서 발생되며, 1/3-옥타브 밴드로 분석할 경우는 8 Hz에서 나타나게 된다.

Fig. 1에서 이천-서빙고 구간의 경우는 10 Hz 대역에서의 피크 소음레벨이 나타나고 있는데, 본 차량의 경우는 다른 차량과 달리 첫 번째 전동차에서 측정하였기 때문에, 운전석 공간만큼의 길이 1 m 정도를 감소하게 되면 차량 내부 공간의 길이가 짧아져 8 Hz보다 고주파 대역으로 공명 주파수가 이동하기 때문이다.

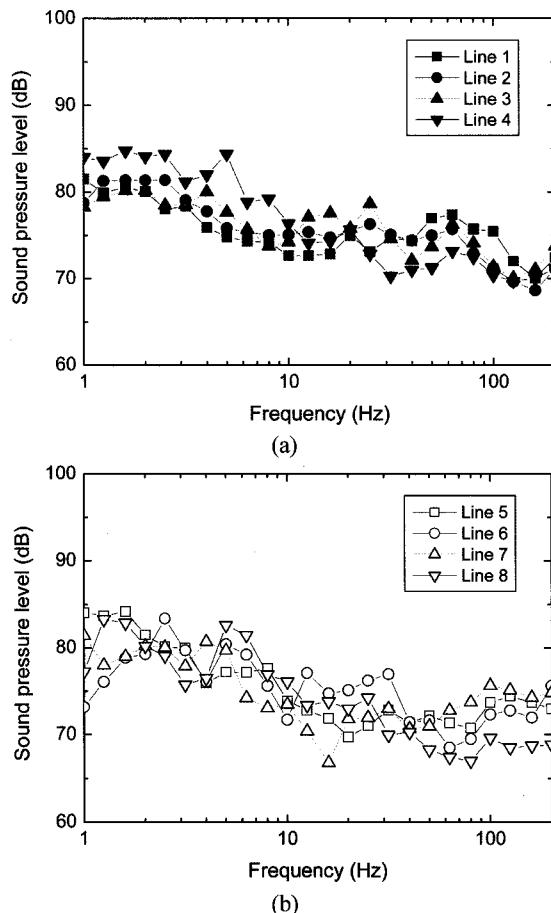


Fig. 6. Average sound pressure level spectrum measured at the subway station platform. (a) Line 1 to Line 4, (b) Line 5 to Line 8.

3.2. 승강장에서의 소음

승강장에서의 소음은 차량이 들어오고 나갈 때 바람이 수반되기 때문에 마이크로폰에 방풍망을 씌우고 측정하였다. 1호선부터 4호선까지의 측정결과는 Fig. 6(a)에, 그리고 5호선부터 8호선까지의 결과는 Fig. 6(b)에 나타냈다. 결과를 보면, 객차 내 소음에 비해 전반적으로 소음레벨이 낮음을 확인할 수 있다. 차량이 승강장에 도착할 경우, 브레이크 소음이 상당히 크게 들려오지만 200 Hz 이상의 주파수 대역에 있기 때문에 본 결과에는 피크 값이 나타나지 않고 있다. 한편, 객차 내에서 나타났었던 8 Hz 근처에서의 큰 피크는 볼 수 없는데, 이것은 8 Hz 소음이 밀폐된 객차에서 음향 공명에 의한 것임을 다시 한번 증명해 주는 결과이다.

3.3. 저주파소음에 의한 인체 영향

저주파소음이 인체에 미치는 영향을 정확히 알기 위해서는 사람에게 직접 폭로해야 되지만, 이러한 실험자체가 위험할 수도 있기 때문에 본 연구에서는 직접 실행하지 않고 다른 연구자들의 결과를 토대로 지하철 운행에 따른 저주파소음의 영향을 살펴보았다. 저주파 소음이 사람에게 영향을 주기 시작하는 어떤 한계 음압레벨에 대한 독일, 스웨덴, 네덜란드 국가에서 제시하고 있는 음압레벨 값을 Table 3에 비교하였다. 표에서 보듯이 각 국가마다 적용하고 있는 주파수 대역은 다르며, 독일과 네덜란드의 경우, 같은 주파수에서는 비슷한 소음레벨 값을 나타내지만 스웨덴의 경우와는 차이가 있음을 확인할 수 있다. 이를 값들은 실내공간에 대한 규정이기 때문에 본 연구의 대상인 지하철 객차의 내부 공간에 대해서도 적용이 가능하다. 하지만 Table 3은 구체적으로 각 주파수에 따라 어떤 영향이 있을 수 있는지를 제시하지 않고 있다.

Table 3. Comparison of reference noise criteria values

(Hz)	Germany	Netherlands	Sweden
8	103		
10	95		
12.5	87		
16	79		
20	71	74	
25	63	64	
31.5	55.5	55	56
40	48	46	49
50	40.5	39	43
63	33.5	33	41.5
80	28	27	40
100	23.5	22	38
125			36
160			34
200			32

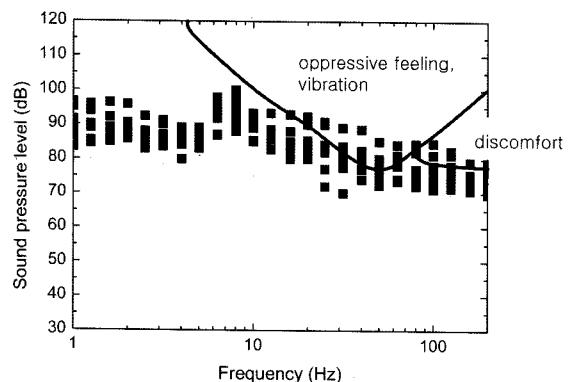


Fig. 7. Comparison between the average sound pressure levels measured in the interior of passenger cars and the threshold of oppressive feeling or vibration and discomfort.

저주파소음이 인체에 미치는 영향에 대한 연구 중 Ochiai⁸⁾의 한계곡선을 Fig. 7에 나타냈다. 이 한계곡선은 주파수와 음압레벨에 따른 심리적 반응을 나타낸 한계곡선으로, 이들 곡선을 경계로 하여 주파수별로 이 곡선보다 높은 영역에 속하는 음압레벨을 가지면 영향을 받게 됨을 뜻한다. 이 한계곡선은 특정한 소음원에 대한 것이 아니라 모든 저주파 소음에 적용되는 것으로 주파수에 따라 한계곡선을 초과하는 음압레벨에 노출되면 인체에 영향이 있음을 나타내는 곡선이다. 8호선까지 객차 내에서 측정한 평균 소음레벨은 주파수 1~200 Hz 대역에서 60~105 dB 사이의 값을 가지며, Fig. 7에서 보듯이 20~80 Hz 대역에서는 일부 측정값들이 압박감/진동감에 속하는 영역 내에 들어 있으며, 80~200 Hz 사이에서도 불쾌감의 영역에 있음을 확인할 수 있다. 따라서 서울지하철 일부노선의 경우, 객차에 있는 승객들은 지하철이 운행될 때 압박감/진동감 혹은 불쾌감의 영향을 받고 있다고 할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 대중교통 수단인 서울지하철을 대상으로 객

차 내와 승강장에서 200 Hz 이하의 저주파소음을 측정하고 인체에 미치는 영향을 살펴보았다. 측정결과, 승강장에서의 소음은 인체에 미치는 영향이 크지 않았지만 객차 내인 경우는 20 Hz 이상 주파수대역에서 신체에 압박감 혹은 불쾌감을 줄 수 있다는 것을 확인하였다. 이것은 열차의 운행속도, 차량의 제작연도, 곡선구배 등에 따라 달라질 수 있기 때문에 좀 더 많은 차량을 대상으로 한 연구가 필요하다 하겠다.

참 고 문 헌

1. Broner, N., "The effects of low frequency noise on people - a review," *Journal of Sound and Vibration*, **58**(4), 483~500(1978).
2. Berglund, B., Hassmen, P., and Soames Job, R. F., "Sources and effects of low frequency noise," *J. Acoust. Soc. Am.*, **99**(5), 2985~3002(1996).
3. DIN 45680, Measuring und Bewertung tieffrequenter gerauschimmissionen in der nachbarschaft(1997).
4. SOSFS, 7E. General guidelines issued by the Swedish national board of health and welfare, indoor noise and high sound levels(1996).
5. Yamada, S., "Actual condition of low frequency noise problems and recommendation level of foreign countries," *The Journal of the INCE of Japan*, **23**(5), 297~300(1999).
6. ISO 7196, Frequency weighting characteristics for infrasound measurements(1995).
7. Kinsler, L. E., Frey, A. R., Coppens, A. B., Sanders, J. V., *Fundamentals of Acoustics*, Chap. 9, 4th Edition, John Wiley & Sons(2000).
8. Ochiai, H., "Measurement of infra and low frequency noise," *The Journal of the INCE of Japan*, **23**(5), 306~310(1999).