부산도시철도 3호선 실내소음 및 저주파 소음 특성

Interior Noise and Low Frequency Noise Characteristics of Busan Metro Line 3 Noise

홍도관*. 정재부**. 정승욱**. 강현욱***. 안찬우†
Do-Kwan Hong, Jae-Boo Jeong, Seung-Wook Jung,
Hyun-Wook Gang and Chan-Woo Ahn

(Received August 24, 2012 ; Revised September 21, 2012 ; Accepted October 17, 2012)

Key Words : Busan Metro Line 3(부산도시철도 3호선), Low Frequency Noise(저주파 소음), Articulation Index(대화 명료도 지수), Preferred Speech Interference Level(우선 대화간섭 레벨), ISO 226, 1/3-Octave Band(1/3 옥타브 밴드), Noise Criteria Curve(소음한계곡선)

ABSTRACT

This paper deals with the analysis of interior noise and low frequency noise characteristic for the Busan citizens to use public transport, Busan Metro Line 3. The interior noise evaluation index, articulation index(AI) is evaluated the lower value about average 22 % in a whole range, this is difficult to have a conversation. Also, noise criteria(NC) curve is partially evaluated as NC-65 below 2000 Hz, space type is evaluated as factories. Another of interior noise evaluation index, preferred speech interference level(PSIL) is evaluated the upper value about average 66 dB(A) in a whole range, this is evaluated to be interrupted. In the case of low frequency noise(20~200 Hz), the measurement of low frequency noise is assessed largely beyond noise criteria of ISO 226. The low frequency noise should be reduced because low frequency noise affects on psychological stress and displeasure although low frequency noise is not recognized by auditory sense. The low frequency noise criteria and guideline will be enacted from now on in Korea.

1. 서 론

소음연구는 주로 가청주파수 대역인 20~20000 Hz 사이에서 발생하는 음압의 변화에 대한 연구와 소음저감을 위한 기술개발이 계속 되어왔다. 이에 반해 전혀 들리지 않는 20 Hz 이하의 초저주파 소음과 사람의 귀에 잘 안들리는 20~200 Hz 이하 저

주파 소음은 별다른 주목을 받지 못했다. 하지만 저주파 소음이 사람의 호흡기, 순환기, 신경, 내분비, 수면, 사람들의 심리적 압박감과 불쾌감 등에 영향을 준다는 연구결과들이 발표됨에 따라 환경소음 전반에 걸쳐 저주파 소음에 대한 관심이 점차 고조되고 있다^(1~4). 우리 귀는 20~20000 Hz까지 인식하는데 저주파 소음은 귀가 잘 인식하지 못하는 주파수지만 몸은 느낄 수 있는 것이 문제이며 방음을 하더

† Corresponding Author ; Member, Department of Mechanical Engineering, Dong-A University
E-mail : cwahn@dau.ac.kr

Tel : +82-51-200-7643, Fax : +82-51-200-7656

* Member, KERI Electric Motor Research Center

** Graduate School of Mechanical Engineering, Dong-A University

*** GMB Korea Corporation R&D 1 team

‡ Recommended by Editor Jin Yong Jeon

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

라도 방음이 잘 되지 않고 주파수가 낮아 작은 틈새에도 전달될 수 있다.

Leventhall은 저주파 소음에 의해 유발된 불쾌감과 스트레스를 평가하였으며⁽⁵⁾, Feldmann 등은 저주파 음을 장기간 동안 노출시킬 경우 불쾌감 이외에도 신체 전반에 걸쳐 문제들이 유발되는 것을 연구하였다⁽⁶⁾. Inukai 등은 저주파 소음의 수용성에 관한 연구를 수행하였으며⁽⁷⁾, Kitamura 등은 저주파 소음에 의해 발생하는 간헐적 떨림에 대한 심리적 반응에 관한 연구를 수행하였다⁽⁸⁾. 이에 반해 우리나라에서는 저주파 소음에 대한 연구는 초기단계이며, 지침서를 발표하기 위한 준비단계라고 할 수 있다. 우리나라의 대중교통 수단의 실태조사 결과 상당한 저주파 소음이 발생했으며 최근에는 전자제품이 소형화에서 대형화로 바뀌면서 전기기기인 모터로 인해 특정주파수로 발생하는 저주파 소음이 우리의 일상생활에 상당히 많은 부분을 차지하고 있다. 또한 저주파 소음을 조사한 결과 수송기체인 KTX와 고속버스 및 지하철 객차 안에서 록밴드나 착암기가 내는 것만큼 큰 소음이 나는 것으로 조사됐다.

따라서 이 연구에서는 대중교통수단인 부산도시철도 3호선을 대상으로 열차 운행 시 객차 내에서의 발생하는 실내소음을 recorder로 측정하였다. 실내소음은 A 보정으로 하고 저주파 소음은 보정없이 1/3-Octave band로 분석하였다. 운행조건에 따른 가감속, 등속 및 곡선주행 시 대화 명료도 지수(AI : articulation index), noise criteria curve(소음한계 곡선), 우선 대화간섭 레벨(PSIL : preferred speech interference level) 등의 실내소음을 평가하는 지표로 부산도시철도 3호선의 실내소음을 평가하였다. 저주파 소음은 사람의 귀에 잘 안들리는 20~200 Hz 사이의 소음으로 평가하였다. 저주파 소음에 대한 가이드라인을 가지고 있는 국외 가이드라인과 가정한계값인 ISO 226을 기반으로 역별로 발생하는 저주파소음의 실태에 대해서 분석하였다.

2. 실내소음 측정

2.1 측정대상 및 운행경로

이 연구의 측정대상은 부산 도시철도 3호선 임시 운행열차로 하였다. 왕복 32구간을 측정하였으며, 측정노선과 구간을 Table 1에 나타내었다. Fig. 1은

Fig. 1 Setup of the equipments

Table 1 The route of Busan metro line 3

NO.	Section(the up line)	Time required
1	Dajeo to Sports Park	1min. 6sec.
2	Sports Park to Gangseo-gu office	1min. 25sec.
3	Gangseo-gu office to Gupo	2min. 10sec.
4	Gupo to Deokcheon	1min. 56sec.
5	Deokcheon to Sukdeung	1min. 4sec.
6	Sukdeung to Namsanjeong	1min. 23sec.
7	Namsanjeong to Mandeok	1min. 33sec.
8	Mandeok to Minam	3min. 39sec.
9	Minam to Sajik	1min. 31sec.
10	Sajik to Sports Complex	1min. 18sec.
11	Sports Complex to Geoje	1min. 10sec.
12	Geoje to Yeonsan	1min. 8sec.
13	Yeonsan to Mulmangol	1min. 35sec.
14	Mulmangol to Baesan	1min. 36sec.
15	Baesang to Mangmi	1min. 35sec.
16	Mangmi to Suyeong	2min. 1sec.

부산도시철도 3호선에 측정장비를 설치하는 모습을 나타낸다. 측정 시 운행 철도차량은 측정에 필요한 최소인원만 탑승한 공차상태의 열차로서 상행선 운행 시에는 3호차, 하행선 운행 시에는 2호차의 위치에서 측정하였다. 도시철도 운행속도는 평균적으로 직선구간에서는 70 km/h, 곡선구간에서는 50 km/h로 주행하였고, 실내온도는 24℃~25℃를 유지하였으며, 기본적으로 필요한 전기장치는 작동시키고 실내방송은 하지 않은 상태로 측정하였다. 또한 각 역에 정차 시 문은 열지 않고, 주행패턴은 실제와 동일하게 하였다.

Fig. 2 Position of the equipments

Fig. 3 Measurement and analysis equipments

Table 2 Equipments for measurement and analysis

Equipment	Model	Quantity	Use
FFT analyzer	B&K3560-C	4ch.	Analyzer
Microphone	B&K4189L001	2ea.	Measure
	B&K4189A021	1ea.	
Sound level meter	RION NL-32	1ea.	
	RION NL-21	1ea.	
Tape recorder	SONY PC204A	4ch.	Recorder

2.2 측정 및 분석방법

이 연구에 사용된 측정 및 분석 장비는 Table 2에 나타내었고, 각 장비의 구성도는 Fig. 2와 Fig. 3에 나타내었다. 마이크로폰의 설치 위치는 실내소음의 경향을 다양하게 파악하고 주행방향으로의 소음변화를 알아보기 위하여 주행방향의 좌측에 승객의 앉은 높이 기준으로 1.2 m 높이로 전반, 중앙, 후반 지점으로 하였다. 환경부에서 발행한 저주파 소음 측정 및 평가기법 개발 보고서에 따르면 저주파 소음을

Table 3 AI scale

AI(%)	Rating scale
0~5	Confidential
5~20	Normal privacy
20~30	Readily understood
30~40	Unacceptable privacy
40~100	No privacy

실내에서 측정할 경우 마이크로폰의 위치는 벽체, 천정 등 경계면으로부터 1 m 이상, 그리고 높이는 바닥면으로부터 1 m 이상의 높이를 기본으로 한다고 명시되어 있다. 또한 철도차량 차내 실내소음 측정 규정인 KS I ISO 3381:2003⁽¹²⁾을 고려하여 Fig. 2에서 1, 2, 3번 위치에 6~20 kHz 영역을 측정할 수 있는 정밀급 마이크로폰으로 소음을 측정하여 B&K Pulse V 15.0을 사용하여 레코딩하였다. 저장된 소음의 raw data를 1/3-Octave분석을 수행하였다. 1/3-Octave분석은 저주파 소음의 관심영역인 20~250 Hz 대역을 집중적으로 분석 및 고찰을 수행하였다.

2.3 Articulation Index

닫힌 공간 내에서 대화할 때 소리의 주파수는 1/3 Octave band별로 16 band 주파수 영역이 있으며 각 band 대역에서 대화를 전달할 수 있는 가장 작은 소리와 가장 큰 소리의 차는 30 dB로 나타낸다. 측정된 소음레벨에 주파수별 인간의 청각 민감도를 반영하여 규정된 대화 명료도 지수(AI)값을 부여하였다. 그리고 관심 주파수 대역(200~10000 Hz)별 값에 대해 합산된 총계로 음질을 평가한다. 차량 내부에서 측정된 소음을 일상 대화 시 등장하는 배경 소음이라 정의할 경우, 대화에 대한 방해하는 정도를 표시하게 되며, 그 수치는 0~100 % 범위 내에서 표시된다. AI가 0 %는 소음으로 인해 대화를 할 수 없는 상태를 나타내며, 100 %는 차내에서 전혀 방해를 받지 않고 완전하게 대화를 할 수 있는 상태를 의미한다. 이런 AI를 이용한 음질평가 방법은 ANSI (American National Standard Institute) S3.5-1969 규격으로 제정된 이후, 자동차 실내소음을 평가하는 방법으로 지속적으로 사용되고 있다. 또한 자동차 실내에서 측정된 소음은 배경 암소음의 스펙트럼으로 처리하여 자동차 탑승자 상호간의 대화에 대한

Table 4 Recommended noise criterion

NC level	Equivalent sound level (dB(A))	Space type
25~35	35~45	Apartment houses
35~40	40~50	Libraries
40~45	50~55	Restaurants
40~60	50~75	Factories

명료도 평가가 가능하게 된다⁽⁹⁾. 이 논문에서는 철도차량의 실내소음을 평가하는 방법으로 활용하였다. Table 3은 명료도 지수가 의미하는 실내음향 상태를 나타낸다. 명료도 지수가 높을수록 방해받지 않고 완전하게 대화를 나누는 상태이지만, 다른 관점에서 본다면 대화 프라이버시는 노출이 되어 침해를 받는 상태가 된다⁽¹⁰⁾.

2.4 Speech Interference Level

대화를 나누는데 있어서 주변 소음의 영향을 고려할 필요가 있으며, 대화간섭 레벨(SIL)은 이러한 평가를 위한 것으로 보통 우선 대화간섭 레벨(PSIL)로써 판단한다. 우선 회화 방해 레벨은 식 (1)과 같이 정의된다.

$$PSIL = \frac{LP_{500} + LP_{1000} + LP_{2000}}{3} \quad (1)$$

여기서, LP_{500} , LP_{1000} , LP_{2000} 은 각각 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz의 중심 주파수를 갖는 옥타브 대역에서의 음압 레벨을 의미하며, 해당 주파수 대역의 주변 소음(background noise)이 클수록 PSIL값이 커지므로 대화에 많은 방해를 받게 된다.

2.5 Noise Criteria Curve

회화 방해의 소음평가에 사용되는 소음한계 곡선이라고 하며, 음의 크기 레벨(loudness level)과 SIL의 2개의 요소를 조합한 실내 소음의 기준 곡선을 말한다. 소음을 8옥타브 밴드로 나누어 음압 레벨의 허용 값을 밴드별로 나타낸 것으로, 곡선에 부기한 NC값으로 소음 평가를 한다. Table 4는 실내공간에 따라서 권장하는 소음한계를 나타낸다.

3. 저주파 소음에 대한 국외 가이드라인

독일, 네덜란드, 덴마크, 스웨덴, 폴란드 등 유럽

Fig. 4 Comparison of reference noise criteria values

국가들은 이미 1990년 후반에 저주파 소음의 측정법과 평가법에 대한 지침서를 마련하였으며, 일본의 경우도 2004년에 환경성에서 지침서를 발표하고 있다. 이와 관련하여 국외의 저주파 소음에 대한 가이드라인과 ISO 226을 각각 비교하여 Fig. 4에 나타내었다.

Fig. 4에서 보는 바와 같이 가청한계값인 ISO 226에 비해 독일과 네덜란드는 좀 더 낮은 음압레벨로 엄격하게 규제하고 있으며, 일본의 경우는 다소 높은 음압레벨로 규제를 하고 있어 규제의 실효성에 대한 문제를 제기하면서 일본 국내에 규제치가 재산정 되어야 한다는 목소리가 높다. 저주파 소음에 대한 가이드라인을 준비하는 우리나라도 반드시 참고해야 할 사항으로 파악된다.

이 논문에서는 20~250 Hz의 저주파 영역을 평가해보고자 사람이 들을 수 있는 가청한계값인 ISO 226 규정과 비교 분석하였다. 독일, 네덜란드, 일본 가이드라인은 최대 100 Hz까지 있기 때문에 ISO 226과 비교 검토하였다.

4. 실내소음평가 및 저주파 소음 평가 결과

4.1 실내소음평가

부산도시철도 3호선의 상행선 전 노선구간에서 등속구간에서 철도차량 실내의 수음자 위치에서 측정한 소음을 AI와 PSIL로 분석하였으며 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 2의 1, 2, 3번 측정위치에 따라 결과의 큰 변화는 없어서 1번 측정위치의 결과로 분석하였다. 대화 명료도 지수인 AI의 경우 최소 10%, 최대 42%, 평균값 22% 및 중앙값 20%로 전반적으로 대화 명료도 지수가 낮게 평가되었으며 대화가

Fig. 5 The verification of AI and PSIL(measuring condition : constant velocity)

Fig. 6 Train speed and SPL

어려울 정도로 음질이 열세로 평가되었다. 가감속 구간에서 AI는 최소 0.5 %에서 최대 12.4 %까지 차이가 났으며 전체 노선의 평균으로는 약 1.5 %의 차이로 평가되었다.

우선 대화간섭 레벨(PSIL)의 경우 최소 60 dB(A), 최대 71 dB(A), 평균값 66 dB(A) 및 중앙값 67 dB(A)로 전반적으로 대화에 많은 방해를 받는 것으로 평가되었다. 가감속 구간에서 PSIL은 최소 0.1 %에서 최대 4.7 %까지 차이가 났으며 전체 노선의 평균으로는 약 0.3 %의 차이로 평가되었다.

등속구간 뿐만 아니라 가감속 구간 및 곡선행행부에서도 세부적인 실내소음 특성을 비교해보기 위해 강서구청~구포 구간에 대해 정밀분석을 수행하였다. Fig. 6은 운행속도, 곡선행행부, 등속 및 가감속 영역을 나타내었으며, 이 영역에서 분석된 결과로 AI,

Fig. 7 NC curve(Gangseo-gu office to Gupo)

Table 5 AI & PSIL(Gangseo-gu office to Gupo)

Condition	AI(%)	PSIL(dB(A))
Acceleration	27.92	62.79
Constant velocity	42.05	60.40
Deceleration	49.44	53.8
Curve(R400)	26.32	66.10
Curve(R200)	26.43	64.62

PSIL, NC 등을 비교하였다. Fig. 7은 강서구청~구포 구간의 NC 곡선을 나타낸다. 2 kHz미만에서 감속일 경우를 제외한 등속, 가속, 곡선부(R400, R200)이 모두 NC-65를 넘어서 NC-65로 평가되었다. 이 결과는 Table 4의 공장의 환경수준정도로 평가된다.

Table 5는 강서구청~구포 구간의 AI와 PSIL을 나타낸다. 등속 및 감속구간에서 상대적으로 AI가 크게 나타났으며, 가속 및 곡선부(R400, R200)에서는 작게 나타났다. PSIL의 경우도 감속 및 등속구간에서 상대적으로 작게 나타났으며, 가속 및 곡선부(R400, R200)에서는 크게 나타났다. 철도차량 실내의 명료도 지수를 증가시키기 위해서는 고속철도차량과 같이 흡음계수가 높은 천장재와 바닥재의 이용과 차음재를 이용한 방법 등을 적용하여 개선을 할 필요가 있을 것으로 판단된다.

4.2 실내 저주파 소음 분석결과

Table 6의 No는 Table 1의 역간을 나타낸다. 각 역의 등속구간을 분석하였으며 사람의 귀에 잘 안들리는 20~200 Hz사이의 저주파 소음을 1/3-Octave로 나타내었다. 가감속 구간과 비교해보면 가속과 등속은 약 1.6 dB 차이이고 감속 시에는 등속과의 평균

Table 6 Comparison of reference noise criteria values

Frequency No.	20	25	31.5	40	50	63	80	100	125	160	200	250	dB_{sum}
1	76.7	74.3	75.5	74.6	75.2	69.3	68.2	68.9	69.2	66.4	64.7	69.4	87.2
2	77.5	80.8	76.1	79.2	77.2	72.0	69.8	69.7	72.5	69.1	68.5	70.9	88.9
3	76.5	79.4	79.0	71.7	74.3	67.9	68.4	70.0	69.0	67.5	64.9	68.4	86.1
4	68.3	75.2	75.2	73.4	76.1	70.3	65.7	68.3	70.1	68.6	66.3	68.6	84.4
5	77.2	79.9	76.4	75.6	75.7	73.2	68.8	70.2	73.0	73.3	71.0	74.7	88.4
6	74.8	79.2	76.0	70.4	75.7	70.0	69.4	68.6	70.4	70.5	68.7	70.8	86.2
7	70.1	81.9	76.8	69.1	73.8	67.2	64.1	71.0	69.7	70.2	70.3	71.7	89.7
8	76.9	73.9	76.5	69.5	73.0	71.6	68.1	70.4	73.2	71.1	69.3	73.6	87.7
9	77.7	77.5	76.0	78.3	79.8	72.0	67.9	70.5	71.2	68.4	69.5	71.2	88.5
10	74.9	72.3	73.5	68.4	75.9	68.7	65.9	68.3	68.7	69.0	67.9	71.3	84.6
11	80.0	76.0	74.8	77.1	75.7	71.3	68.2	66.6	67.1	64.8	67.3	71.3	87.5
12	74.2	71.8	76.6	73.0	78.2	72.0	69.5	69.7	70.2	69.9	69.0	71.7	86.6
13(max)	75.5	84.3	85.8	74.0	74.6	71.2	66.3	69.7	68.9	68.7	68.2	72.8	90
14(min)	70.6	76.4	77.4	67.9	69.8	66.2	64.3	63.5	66.6	66.3	66.4	69.3	84.1
15	74.6	76.9	75.5	67.5	72.6	68.5	68.0	67.6	68.6	69.4	69.1	71.5	85.7
16	72.2	76.9	76.9	70.8	72.3	69.4	68.4	68.8	70.8	71.7	68	70.7	85.2

약 7.2 dB로 결과를 판단하는데 큰 차이가 없이 나타났다. 따라서 등속 시의 결과로 분석하였다. Table 6의 dB_{sum} 은 사람의 귀에 잘 안들리는 주파수 영역인 20~250 Hz 음압레벨을 합산 한 값이며 아래의 식을 이용하여 총합을 구할 수 있다.

$$dB_{sum} = 10 \log \left(10^{\frac{L_{20}}{10}} + \dots + 10^{\frac{L_{250}}{10}} \right) \quad (2)$$

여기서, L_{20} , L_{250} , dB_{sum} 은 각각 20 Hz, 250 Hz의 중심주파수 음압레벨을 나타낸다.

국외의 가이드라인과 ISO 226에서 공통으로 다루는 20~250 Hz의 저주파 대역을 각각 1/3-Octave 분석을 수행하였다. Table 6에서 저주파 전대역의 음압레벨이 가장 높은 13번 연산~물만골 역간 등속구간에서의 측정된 소음 신호를 1/3-Octave 분석을 수행하여 ISO 226과 일본의 저주파 가이드라인을 비교하여 Fig. 8에 나타내었다.

31.5 Hz에서 음압레벨이 최대 85.8 dB로 나타났으며, 31.5 Hz 이상에서는 전반적으로 ISO 226과 일본의 저주파 가이드라인보다 크게 넘어서는 것을 볼 수 있다. 그리고 Table 6에서 저주파 전대역의 음압레벨이 가장 낮은 14번 물만골~배산 역간 등속구간에서의 측정된 신호를 1/3-Octave 분석을 하여 ISO

Fig. 8 Comparison of Yeonsan to Mulmangol with ISO 226

226과 일본의 저주파 가이드라인을 비교하여 Fig. 9에 나타내었다. 31.5 Hz에서 음압레벨이 최대 77.4 dB로 나타났으며, 전반적으로 ISO 226과 일본의 저주파 가이드라인보다 크게 넘어서고 있으며 장시간 노출 시 불만족감을 느끼게 된다.

Fig. 8과 Fig. 9에 주파수 밴드에 따른 인체에 미치는 Ochiai⁽¹¹⁾ 곡선과 비교하면, 심리영향을 나타내는 압박감과 진동 그리고 불쾌감을 나타내는 곡선과 비교해보면 모두 경계값 안에 들어오기 때문에 이러한 영향은 안받는 것으로 평가된다.

Table 6의 결과를 살펴보면 14번 물만골~배산 역간

Fig. 9 Comparison of Mulmangol to Baesan with ISO 226

등속구간에서의 소음은 몇 개를 제외한 대부분의 주파수 영역에서 최저값이며, 20~250 Hz의 저주파 전 대역의 음압레벨 값도 최저값으로 나타났다.

5. 결 론

부산도시철도 3호선의 실내소음과 저주파 소음에 대한 분석을 수행하였다. 실내소음 평가지표인 대화 명료도 지수인 AI의 경우 전 역에서 평균 22%로 전반적으로 대화 명료도 지수가 낮게 평가되어 대화가 어려울 정도로 음질이 열세로 평가되었다. 또한 우선 대화간섭 레벨(PSIL)의 경우 평균값 66 dB(A)으로 전반적으로 대화에 많은 방해를 받는 것으로 평가되었다. 고속철도차량과 같이 흡음계수가 높은 천장재와 바닥재의 이용과 차음재를 이용한 방법을 적용하여 실내소음을 개선할 필요가 있을 것으로 판단된다. 또한 저주파 소음의 경우 가청한계값인 ISO 226과 일본의 저주파 가이드라인을 비교한 결과, 가청한계값을 크게 넘어서는 것으로 평가되었다. 귀가 잘 인식하지 못하는 저주파수에 장시간 노출 시 불만족감을 느끼기 때문에 많은 사람들이 이용하는 대중교통수단인 도시철도에 20~250 Hz대역의 저주파 소음을 저감하는 노력을 기울여야 향후 국내에서 제정될 저주파 가이드라인에 대비할 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

이 논문은 동아대학교 학술연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

- (1) Jung, S. S. and Jeon, B. S., 2007, Low Frequency Noise of Train, The 2007 Environmental Societies Joint Conference, pp. 1017~1018.
- (2) Jung, S. S., Lee, D. H. and Shin, S. H., 2004, Low Frequency Characteristics of Subway Noise, Proceeding of the Korean Society of Environmental Engineers Spring Conference, pp. 717~718.
- (3) Jung, S. S., Shin, S. H. and Lee, W. S., 2005, Low Frequency Characteristic of Seoul Subway Noise, Transaction of the Korean Society of Environmental Engineers, Vol. 27, No. 11, pp. 1193~1197.
- (4) Jung, S. S., Suh, S. J., Seo, J. G. and Jeon, B. S., 2005, Low Frequency Noise of Daejeon Subway, Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference, pp. 887~890.
- (5) Leventhall, H., 2004, Noise & Health, No. 6, pp. 59~72.
- (6) Feldmann, J. and Pitten, F. A., 2004, Effects of Low frequency Noise on Man-a Case Study, Noise & Health, No. 7, pp. 23~28.
- (7) Inukai, Y., Tayal, H., Yamada, S., Ochiai, H. and Tokita, Y., 2006, Acceptability of Narrow Band Noise and Complex Noise at Low Frequencies, Conference Proceedings, International Conference for Low Frequency Noise and Vibration Control, Britsol, UK.
- (8) Kitamura, T., Shiina, I. and Yamada, S., 2006, Psychological Response of Intermittent Rattling Noise of Fittings by Low Frequency Noise, Conference Proceedings, International Conference for Low Frequency Noise and Vibration Control, Britsol, UK.
- (9) Lee, J. W., Lee, S. N., Shim, J. H., Jung, P. K., Lee, W. K. and Bang, B. J., 2011, The Study on Improvement of Acoustic Performance for Automobile Sound-absorbing Materials Using Hollow Fiber, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 21, No. 9, pp. 850~857.
- (10) Harris, C. M., 1993, Noise Control in Buildings : A Practical Guide for Architects and Engineers, McGraw-Hill.
- (11) Ochiai, H., 1999, Measurement of Infra and Low Frequency Noise, The Journal of the INCE of Japan,

Vol. 23, pp. 306~310.

(12) KS I ISO 3381, 2003, Acoustics - Measurement of Noise Inside Railbound Vehicles.

Chan Woo Ahn is a professor in the Department of Mechanical Engineering at Dong-A University. He received Ph. D. degree from Han-Yang University in 1988. He is teaching Dynamics, Kinematics of Machinery and Mechanical vibrations in the Department of Mechanical Engineering at Dong-A University. His research interests are vibration control, noise and vibration of automotive systems.

Do Kwan Hong received Ph. D degree in mechanical engineering from the Dong-A University, Busan, Korea, in 2004. Since March 2004, He has been a senior researcher with Electric Motor Research Center in Korea Electrotechnology Research Institute(KERI), Changwon. His current research interests and activities are focused on rotordynamics of high speed machine, interior noise and vibration verification of for railway, vibration and low frequency noise in commercial induction motor.