

## 철도 진동에 대한 위해성 평가 모델 연구

○정 완섭\*, 정성수\*, 김재환\*\*, 이 수갑\*\*

\*한국표준과학연구원, 기반표준부/역학그룹

\*\*서울대학교, 공과대학/기계항공공학부

## Study on Assessment Models for Analysis of the Adverse Effects of Railway Vibration on Residential Area

○Wan-Sup Cheung\*, Sung-Soo Jeong\*, Jae-Hwan Kim\*\*, Soo-Gab Lee\*\*

### ABSTRACT

This paper introduces what amount of railway vibration level observed from residential area. Five residential area located near the railway were selected to measure the vibration levels generated by the different types of Korean railway vehicles. Those 3-axis vibration measurements are applied to the frequency-dependent weighting functions recommended by ISO 2631-2, which are used to evaluate the 3-axis combined vibration levels such as peak levels, L10 levels and root-mean-squared values. These evaluated results are shown to indicate the environmental vibration severity for the different residential area. In addition to those physical vibration measurements, the survey of subjective responses of residents was also carried out by distributing the questionnaire suggested by WHO. The questionnaire includes the subjective scales for assessing the annoyance and the sleep-disturbance caused by the environmental vibration. The statistical analysis results collected from 386 respondents are introduced. The highly annoyed population and the highly sleep-disturbed one are examined to identify the relation between their subjective scale and their corresponding environmental vibration levels. These attempts are shown to lead to the salient model to relate the environmental vibration level and the subjective responses of Korean residents to annoyance and sleep-disturbance.

### 1. 서론

철도 유발 건물진동에 대한 연구가 영국에서 활발히 수행되었으며, Fields[1,2]은 철도 진동 유발에 의한 주민들의 불쾌함 호소는 철로 변 200 m 이내의 지역에서 대부분 발생하며 건물까지의 거리의 로그 함수의 역에 반비례한다는 점을 보고하였다. 특히 진동을 경험한 대부분의 주민들은 진동에 대한 불쾌함을 호소한다는 점을 강조하였다. Woolfroof 와 Griffin[3]은 철도 변 100 m 이내 거주인의 35 %가 철도 유발 진동에 대한 불쾌함(annoyance)을 호소하며 이는 전체 인구의 1.4 %에 달한다고 보고하였다. 또한 철로 변 주민들의 불쾌함에는 철도 유발 진동 뿐 아니라 소음 또한 많은 영향을 미친다는 점을 강조하였다[4].

국내에서 철도 진동에 의한 전국 5개 주거 지역의 진동 실태 조사가 2004~5년 수행된 바 있다. 본 연구에서는 주거 지역

주민들의 철도 진동에 대한 불쾌함과 수면 방해 정도를 질의서를 통하여 조사하였다[5]. 본 논문은 이들 연구에서 얻어진 주요 결과를 소개하고자 한다. 제 2 장에서는 환경 진동 실태 조사에 사용된 측정 장치와 평가 결과를 간략히 소개한다. 제 3절에서는 철로 변 주민들로부터 조사된 불쾌함과 수면 방해에 대한 설문 결과를 소개한다. 이들 주민들의 불쾌함과 수면 방해에 대한 반응과 이들 지역에서 측정된 환경 진동 평가치의 상관관계 모델에 대한 연구 결과를 제 4절에서 소개한다. 끝으로 제 5 절에서는 본 연구의 주요 결과를 간략히 요약한다.

### 2. 환경 진동 측정 및 평가 결과

다음 페이지의 Fig. 1은 병진 3축 진동을 동시에 측정할 수 있는 3 축 가속도계와 이들 진동 신호의 증폭기와 실

시간 진동 신호 기록계로 구성된 측정 장치를 보이고 있다.

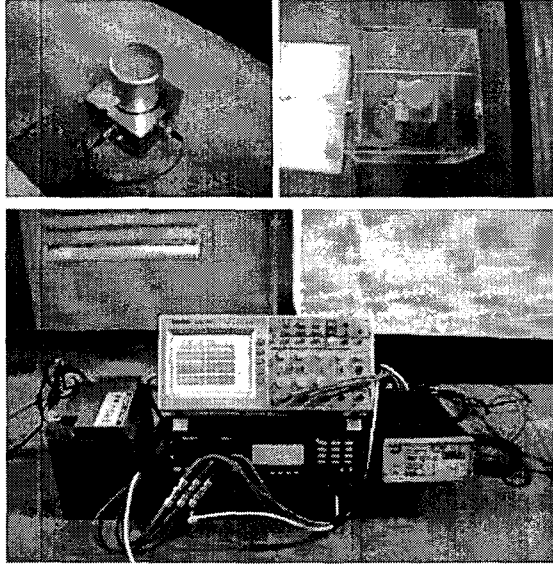


Fig. 1. Environmental vibration measurement system.

수직 진동은 Quartz compression형 ICP 센서 Model 393C (PCB Piezotronics)을, 수평 x-축과 y-축은 각각 shear 형 ICP 센서 Model 393B (PCB Piezotronics)를 사용하였다. 이들 센서의 감도는 대략 1 [V/g] 수준이며 분해능이 1  $\mu\text{m/s}^2$  수준에 달하는 고감도 진동 센서이다. 그리고 0.025 Hz 수준의 저주파 진동 측정이 가능한 지진 측정용 가속도계이다. 공기의 진동 즉 음향에 의한 공기 유발 진동 전달을 최소화하기 위하여 10 mm 두께의 투명 아크릴로 차음상자를 제작하여 가속도 측정의 정밀도를 유지하도록 하였다. 그리고 가속도계를 연결하는 케이블 또한 외부 공기 진동의 영향을 최소화하기 위하여 5 mm 두께의 실리콘 고무판 사이에 끼워 공기 유발 진동의 영향 또한 최소화 하였다. 3 축 가속도계들에 4 mA의 정 전류 공급과 센서 출력 신호 증폭을 위하여 12 V 배터리 구동용 신호증폭기 Model 130 (Endevco)을 사용하였다. 증폭된 신호는 실시간 디지털 기록계 모델 PC-216A (Sony)에 기록하였다. 현장에서 측정되는 3 축의 진동 신호의 전압 범위와 상태를 점검하기 위하여 디지털 오실로스코프 model TDS-2013 (Tektronix)를 사용하였다.

국내 환경 진동 측정 방법[6]은 단축 진동의  $L_{10}$  즉 누적분포 90%에 해당되는 진동레벨을 제안하고 있다. 그러나 국내 환경 진동 평가 방법은 아직 국제규격(ISO 2631-2)과 적지 않은 차이점을 안고 있다. 이러한 문제점은 국내 환경 진동 측정 및 평가 지침이 최근 개정된 국제적 규격들의 변화에 적절한 대응이 미흡한 이유로 사료된다. 금번 연구에서는 3-축 진동의 동시 측정에 기반을 둔 ISO 2631-2 의 건물 진동 평가(3 축 주파수 가중함수  $W_m$  사용)기법을 사용하여 3 축 합성 진폭 환산을 수행하였다 (자세한 평가 절차는 참고 문헌 [5] 참조). 3 축 합성 진폭의 피크치와 누적 분포 90%에 해당되는 진동레벨  $L_{10}$  을 각 지역별 대표 값으로 선정하였다. 그리고 측정된 철도 진동은 차량의 종류에 따라 다른 평가치를 보이기 때문에 전체 측정치 중 상위 5 개의 평균 진동 레벨을 대표 값으로 사용하기를 국내법은 규정하고 있다. 따라서 금번 연구에서도 각 지역별 측정된 진동 중 상위 5 개를 선택하여 이들의 평균값을 평가 진동 레벨로 사용하였다.

Table 1. Surveyed results of railway-induced environmental vibration (reference vibration level =  $10^{-5} \text{ m/s}^2$ ).

그룹 및 지역		측정 진동 레벨: dB(V)				가중화된 진동 레벨: dB(V)				
		3축 합성 진폭		3축 합성 실효치		3축 합성 진폭		3축 합성 실효치		
		Peak	$L_{10}$	$L_{10}$	Mean	Peak	$L_{10}$	$L_{10}$	Mean	
그룹 1	현안 아파트	배경진동	40	38	29	27	31	27	19	15
	이파트	진동레벨	56	54	47	43	48	47	40	36
	홍도 아파트	배경진동	46	41	32	31	31	27	20	16
그룹 2	이파트	진동레벨	73	71	62	56	53	51	43	38
	양전 로얄	배경진동	45	41	33	31	29	24	16	14
그룹 3	이파트	진동레벨	57	56	48	43	42	41	33	28
	선대 아파트	배경진동	41	34	26	23	32	23	16	13
그룹 4	이파트	진동레벨	58	55	47	39	43	41	35	28
	다가 아파트	배경진동	41	33	28	24	30	21	14	11
그룹 4	이파트	진동레벨	59	56	48	43	48	47	40	34

Table 1은 국내 5개 철로 변에서 조사된 철도 환경 진동의 평가 결과를 보이고 있다.

### 3. 철로변 주민들의 반응 조사 결과

환경 진동 실태 조사는 주민들에 대한 설문지 조사를 통하여 수행하였다. 환경 진동에 대한

설문은 현재 거주하고 있는 집에서 “철도에 의한 진동을 느끼십니까?” 라는 설문을 통하여 진동 인지 유무를 파악하였다. 만약 환경 진동을 느끼고 있는 경우에 대하여 환경 진동에 대한 반응 즉 불쾌함(annoyance)와 수면장애(sleep disturbance) 정도를 0 ~ 10 까지의 의미론 눈금(semantic scale)으로 점수화하는 방법을 선정하였다. 다음 Table 2는 5개 지역 376 명의 설문자들로부터 조사된 주민 반응을 요약한 내용이다.

Table 2. Response overviews of environmental vibration questionnaires surveyed from residents.

그룹	설문 지역	설문 응답자 (명)	환경 진동 인지 응답자 (명)	불쾌함		수면장애	
				중간 수준 이상 (명)	상위 수준 (명)	중간 이상 수준(명)	상위 수준 (명)
그룹 1	현암 아파트	51	33	25	10	29	18
	홍도 APT	61	8	8	3	8	3
그룹 2	영진 로얄	89	34	28	8	27	15
그룹 3	신대 아파트	94	20	15	8	0	0
그룹 4	다가 아파트	81	31	21	11	25	16

위 표에서 의미론 수준이 5와 같거나 이보다 높은 수준을 중간 수준 이상으로, 그리고 의미론 수준이 8과 같거나 이보다 높은 수준을 상위 수준으로 구분하였다. 이러한 구분은 세계보건기구(WHO)에서 환경 진동의 인체 위해성 평가 방안으로 권장하는 방법[7]에 따라 구분하였다.

#### 4. 표준 위해성 평가 모델

앞서 소개한 5개 철로 변 주거 지역의 환경 진동 평가 결과 (Table 1)와 각 주거 지역의 주민이 불쾌함과 수면 장애를 경험하는 정도(Table 2)를 수학적 모델로 기술하고자 본 연구에서는 이진 로지스틱 회귀 모델(binary logistic regression model)을 이용하였다. 금번 연구에서는 가중화된 진동 신호의 실효치 L10 과 실효치 평균값에 대해서 환경 진동을 주민들의 응답과 비교 분석하였다. 주거 지역에서 철도 진동을 느끼고 있다고 대답한 응답자 중 매우 높은 수준(최대 수준 10에 대하여 8과 같거나 그 이상의 수준)의 불쾌감(highly annoyed)을

호소한 응답자들 ('HA' group)과 환경 진동 평가치와 관계를 이진 로지스틱 회귀 모델에 적용하여 얻어진 결과는 Table 3의 2번째 행과 같았으며, 본 회귀 모델로부터 25%의 응답자가 높은 불쾌감을 호소하는 수준에 대응되는 환경 진동 레벨은 Table 3의 세째 행과 같이 나타났다.

Table 3. Annoyance model of the study population according to the environmental vibration

	Binary logistic regression curve	Vibration level to the 25% highly annoyed [dB(V)]
Annoyance to rms L10	$y = \frac{100}{1 + e^{2.596 - 0.020 \cdot z}}$	88 dB(V)
Annoyance to rms mean	$y = \frac{100}{1 + e^{2.967 - 0.027 \cdot z}}$	71 dB(V)

Fig. 2는 진동 실효치의 상위 90%에 대응되는 진동 레벨 (rms-L10)과 높은 불쾌감을 호소한 응답자들의 관계를 모델화 한 결과이다. 본 회귀 모델로부터 25%의 응답자가 높은 불쾌감을 호소하는 수준의 진동 레벨은 88 dBV에 달함을 확인하였다.

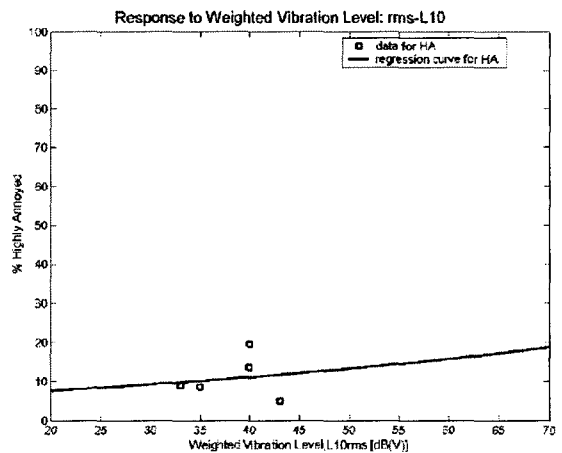


Fig. 2 Response characteristics of the highly annoyed population

이러한 모델은 환경 진동에 대하여 주민의 매우 높은 수준의 불쾌함을 정량적으로 평가 할 수 있는 환경 진동 평가 지표로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

Table 4는 주거 지역에서 매우 높은 수준

(최대 수준 10에 대하여 8과 같거나 그 이상의 수준)의 불쾌감(highly sleep-disturbed)을 호소한 응답자들 ('HS' group)과 환경 진동 평가치와 관계를 이진 로지스틱 회귀 모델에 적용하여 얻어진 결과를 보이고 있다. Table 4의 둘째 행은 환경 진동 평가치에 대한 주민의 수면 방해 정도를 정량적으로 기술하는 모델이며, 세째 행은 본 회귀 모델로부터 25 %의 응답자가 높은 수면 방해를 호소하는 수준에 대응되는 환경 진동 레벨을 각각 보이고 있다. 본 회귀 모델로부터 25 %의 응답자가 높은 불쾌감을 호소하는 수준의 진동 레벨은 52 dBV에 달함을 확인하였다.

Table 4. Sleep-disturbance model of the study population according to the environmental vibration

	Binary logistic regression curve	Vibration level to the 25 % highly sleep-disturbed [dB(V)]
Sleep-disturbance to rms L10	$y = \frac{100}{1 + e^{3.705 - 0.69 \cdot x}}$	52
Sleep-disturbance to rms mean	$y = \frac{100}{1 + e^{4.522 - 0.63 \cdot x}}$	41

Fig. 3은 실효치 진동 레벨의 상위 90%에 대응되는 진동레벨(rms-L10)과 높은 수면 방해를 호소한 응답자들의 관계를 모델화 한 결과이다.

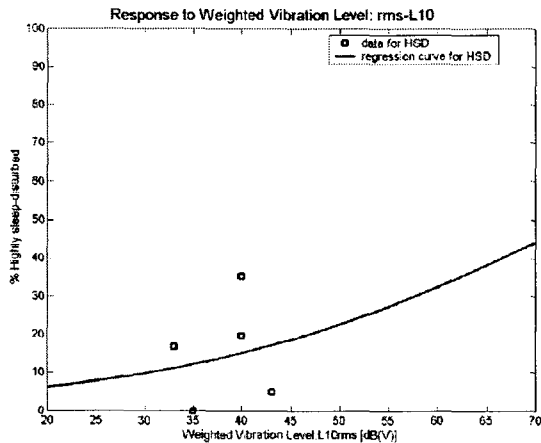


Fig. 3 Response characteristics of the highly sleep-disturbed population

위 모델은 환경 진동에 대하여 주민의 매우 높은 수준의 불쾌함을 정량적으로 평가 할 수 있는 환경 진동 평가 지표로 활용될 수 있을

것으로 판단된다.

## 5. 결론

본 연구에서는 환경 진동 레벨 평가치 L10 수준이 88 dB(V) 이상일 경우 전체 주민 중 25 % 정도 (quartile, 사사분율)가 매우 높은 수준의 수면 방해를 호소함을 알 수 있었으며, 환경 진동 레벨 평가치 중 실효치 평균값이 71 dB(V) 이상일 경우 전체 주민 중 25 % 정도 (quartile, 사사분율)가 매우 높은 수준의 수면 방해를 호소함을 알 수 있었다. 그리고 환경 진동 레벨 평가치 L10 수준이 52 dB(V) 이상일 경우 전체 주민 중 25 % 정도 (quartile, 사사분율)가 매우 높은 수준의 수면방해를 호소함을 알 수 있었으며, 환경 진동레 벨 평가치 중 실효치 평균값이 41 dB(V) 이상일 경우 전체 주민 중 25 % 정도 (quartile, 사사분율)가 매우 높은 수준의 수면 방해를 호소함을 알 수 있었다. 이러한 결과로부터 환경 진동은 낮 시간대의 불쾌함 보다는 밤 시간대 수면 방해의 주된 요인이 됨을 확인할 수 있었다.

## References

- [1] Fields, J.M. and Walker, J.G., The effects of railway noise and vibration on the community, Contract Report 77/18, Institute of Sound and Vibration, University of Southampton, 1977
- [2] Field, J.M. "Railway noise and vibration annoyance in residential areas," *Journal of Sound and Vibration*, 66, 445-458, 1979.
- [3] Woodroof, H.J. and Griffin, M.J., A survey of the effect of railway-induced building vibration on the community, Technical Report No. 160, Institute of Sound and Vibration, University of Southampton, 1987.
- [4] Howarth, H. V. C. *Annoyance caused by railway vibration and noise in buildings*, Ph.D thesis, University of Southampton, 1989.
- [5] 정 완섭, 서 재갑, 환경 진동의 인체 위해성 평가 기술 개발 (II), *KRISS/IR-2005-04*, 한국표준과학연구원, 2005
- [6] 한국소음진동공학회 편찬위, *소음진동 편람*, 한국소음진동공학회, 1995.
- [7] *Environment Health Indicators: Development of a Methodology for the WHO European Region*, Interim Report by WHO Regional Office for Europe, December 2000.