

A-weighted 음압레벨과 음질 지수의 평가 및 비교를 통한 철도소음의 해석

An analysis of railway noise from comparison and evaluation between A-weighted SPL and sound quality indices

김대성† · 왕세명* · 신민철* · 조준호**

Daesung Kim, Semyung Wang, Mincheol Shin and Junho Cho

Key Words : Train noise (철도 소음), Time-varying loudness, Sharpness, 1/3 Octave Band (1/3 옥타브 밴드)

ABSTRACT

In the previous studies on railway noise analysis, the main purpose of noise analysis is concerned with the reduction of A-weighted sound pressure level in order to satisfy noise regulations. However, more important facts on noise reduction are the subjective feelings of the human being on noise because people might be annoyed from the noise caused by train. In this paper, railway noise from different type of train are compared using the calculation of sound quality metrics with using strength related method that is calculation of A-weighted sound pressure level.

1. 서론

열차는 승객과 화물의 효율적인 육상 운송 수단으로 사용되며 그 운행으로 인한 환경 소음 문제는 필연적으로 야기된다. 이러한 소음은 철도 인근 지역 주민들의 주거환경을 침해하기 때문에 적절한 대책이 마련되어야 한다.

기존에는 철도 소음을 분석하기 위해 외이에서 중이로의 음향 감쇠 특성만을 고려하여 A-weighted 음압레벨을 평가의 주요 판단 기준으로 이용하였다⁽¹⁾. 그러나 소음에 의한 annoyance는 음압 레벨 및 주파수 뿐만 아니라 소음 성분의 주파수 대역폭의 함수이다⁽²⁾. 음질을 평가하는 방법에는 주관적 및 객관적 평가방법이 있다. 임상 실험에 의한 주관적 음질 측정의 경우 수많은 소음 발생 인자를 포함하는 철도소음에 적합하지 않고 또한 측정 결과로부터 음질개선을 위한 대책을 세우기가 어렵다. 따라서 정확한 철도소음의 원인을 분석하고 이에 대한 적절한 대책을 세우기 위해서는 객관적 음질지수의 분석이 적합하다.

소음은 정상상태와 과도상태로 나눌 수가 있다. 정상상태 소음의 loudness의 경우 ISO 532B⁽³⁾에 규정되어 있지만 소음의 과도적인 성향을 음질에 반영하기 위해서는 1/3 옥타브밴드 대역별

Envelope 추출, 포스트 마스킹의 고려, loudness 시간적분 작업이 포함되어야 한다⁽⁴⁾.

본 논문에서는 대역별 Envelope 추출을 위해 Levenberg-Marquardt 알고리즘을 도입하여 최소제곱 에러(least-squares error)를 최소화하는 대역별 Envelope 을 추출하였고 과도상태 소음의 loudness 를 계산하였다.

한편 과도상태 소음의 Loudness의 경우, 기저막(basilar membrane)을 따라서 발생하는 임계대역에 대한 적분이 시간 적분보다 먼저 일어나기 때문에⁽²⁾ loudness가 주파수에 따라 그 특성이 표현될 수 없다. 그러나 노출시간에서 정의된 철도소음은 철로, 차종, 열차길이, 속도에 따른 특성이 나타나기 때문에 준-정상상태 소음(Quasi-steady state noise)으로 분류될 수 있다.

본 논문에서는 기존의 철도소음에 대한 임상실험 결과⁽²⁾로부터 5 Percentile Loudness(N5)의 임계대역 표현을 제시 하였고, 이를 철도소음 분석에 이용하였다. 최종적으로 시간과 주파수에 대한 A-weighted 음압레벨, loudness, sharpness 를 분석하여 각각 비교 하였다.

2. 열차의 소음측정

2.1 거리별 소음 측정

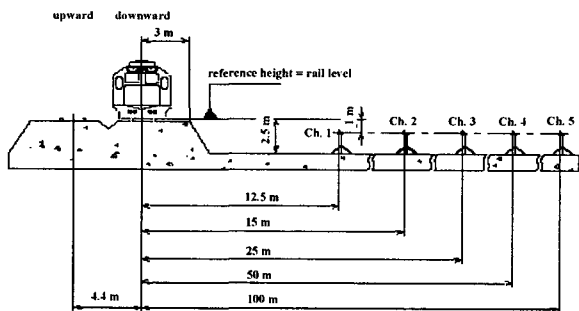
현장 정밀 조사를 통해 여러 장소를 선정하여 측정하였는데 본 논문에서는 무궁화 및 KTX 열차소음 분석에 바람직한 구간인 김제-감곡 구간 의 거리에 따른 측정을 선정 하였으며 이 구간은 직선, 용접레일 구간이었다. [그림 1]은 이 구간의 거리별 열차 소음 측정 단면을 나타낸 그림이다.

† 광주과학기술원 (GIST)
E-mail : dskim@gist.ac.kr
Tel : (062) 970-2409, Fax : (062) 970-2384

* 광주과학기술원 (GIST)

** 한국철도기술연구원(KRRI)

하행선 기준으로 12.5m 떨어진 곳에 ch1, 15, 25, 50, 100m 떨어진 곳에 각각 ch2 ~ ch5의 마이크로폰을 설치한 뒤 측정하였고, 이를 DAT 레코더에 기록하였다. 상행과 하행의 열차 선로는 4.4m의 거리 차이가 있었다. 측정 조건은 온도 23~24℃, 상대습도 39~40%, 풍속 0~1.2m/s이며, 소음의 회절 및 반사특성을 최대한으로 줄이기 위해 논발지역의 평지를 선택하였다.



[그림 1. 거리별 열차 소음 측정 방법]

3. 열차의 측정소음 분석방법

3.1 A-weighted 음압레벨에 의한 평가

A-weighting 필터는 외이에서 중이로의 음향 감쇠특성을 보정하는 특성을 가진다⁽⁵⁾. 측정된 철도소음은 음압으로 변환되고(calibration) A-weighting 청감보정을 거친 후 시간과 주파수에 따라 각각 분석될 수 있다.

(1) 시간 수열 분석

소음의 측정환경으로 인하여 DAT 레코더에 저장된 데이터에는 철로와 차중에 따라 규명이 가능한 정연한 성분과 규명이 불가능한 잡음성분이 모두 기록된다. 따라서 올바른 시스템의 경향을 파악하기 위해서는 통계적해석 수행하여야 한다. 유한한 비정상 신호(non-stationary signal)는 지역적인 구간에서 평균의 편차가 일정하다고 가정할 수가 있는데, 이러한 가정으로부터 신호를 해석하는 방법이 이동평균기법이다. 본 논문에서는 exponentially weighted moving averaging 기법을 시간 수열 분석에 사용하였고 아래식과 같이 일반적으로 표현된다⁽⁶⁾.

$$S(t) = \beta \sum_{j=1}^{t-1} (1-\beta)^{j-1} y(t-j) + (1-\beta)^{t-2} S(t-2), \quad t \geq 2 \quad (1)$$

여기서 S 와 y 는 정의된 지역적 구간의 평균과 이산 값을 각각 의미하며, β 는 smoothing 매개 변수로 구간내의 이산 데이터 개수와 관련이 있으며 0~1 사이의 값을 가진다. 식(1)에서 나타난 바와 같이 이전 구간에서 추정된 값과 현재 구간에서의 관측 값에 β 값이 지수적으로 각각 가중되어서 다음 상태의 거동을 예측하는 것을 알 수 있다. 필터의 출력은 잡음 성분이 제거된 철도소음의 시간에 따른 경향을 더욱 두드러지게 한다.

(2) 1/3 옥타브 밴드 분석

외이에서 내이로 전달되는 음향신호는 기저막을 진행하는 동안 그 주파수 성분이 분리된다. 이러한 과정은 인간의 청각 시스템이 음향신호를 시간영역에서 주파수 영역으로 변환하는 것으로 이해할 수 있다⁽⁷⁾.

한편 청각 시스템이 구별할 수 있는 주파수 대역폭을 임계대역폭이라 하며 이는 스펙트럼 영역에서 인간의 주파수 민감도를 가장 잘 표현하는 것으로 알려져 있다⁽²⁾. 스펙트럼을 해석하는 방법 중 1/3 옥타브 밴드는 소음을 해석하는 전통적인 방법으로 채택되어 왔고, 또한 그 대역이 임계대역과 유사한 점이 있기 때문에 본 연구에서는 ANSI S1.1(1986)을 규정에 있는 필터를 사용하여 철도 소음의 스펙트럼을 분석하였다.

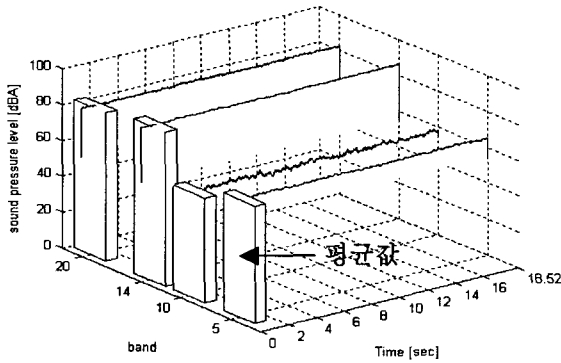
3.2 Loudness와 Sharpness에 의한 평가

음질을 결정하는 주요 요소로서 loudness는 음의 크기에 대한 주관적 지각량, sharpness는 음의 날카로움에 관한 주관적 지각량을 의미한다⁽²⁾. 철도소음은 인간의 거주환경과 밀접한 관련이 있기 때문에 소음에 의한 annoyance를 고려해야 하며 이는 음압레벨 보다는 loudness와 같은 음질요소와 상관도가 높다⁽⁸⁾. 한편 정상상태의 소음과는 달리 철도소음과 같은 노출시간내의 레벨변동이 심한 경우, annoyance 반응이 높게 나타나기 때문에⁽⁹⁾ 이에 해당하는 음질지수를 계산하여 평가하여야 한다.

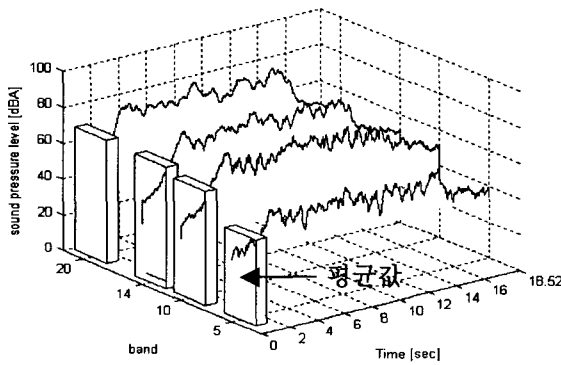
(1) LM 알고리즘을 이용한 대역별 Envelope 추출

음향감쇠가 고려되지 않은 1/3 옥타브 밴드 음압레벨(linearly-weighted SPL)은 Zwicker's loudness 계산의 입력 값이다. 필터에 의한 대역분할은 시간영역에서 이루어지는 컨볼루션(convolution) 과정이기 때문에 철도소음과 같은 변동이 심한 신호의 경우 Envelope 과 평균값 사이에는 큰 차이를 보인다. [그림 2]는 정상 음과 과도 음에 대하여 각 1/3 대역별 통과 신호의 패턴분석 결과와 평균값을 비교한 것이다. 정상 음

의 경우(a) 소음의 전 노출시간동안 레벨의 패턴이 각 대역별로 거의 동일하지만 과도 음의 경우(b) 각 대역별 평균값은 노출 시간에 따른 변동 특성을 충분히 반영하지 못한다.



(a) 정상음



(b) 과도음

[그림 2. 시간 패턴과 구간 내 평균값과의 관계]

따라서 정상 음과는 다르게 소음의 과도적 성향을 loudness 와 같은 음질요소에 반영하기 위해서는 저역 통과 필터를 이용한 Envelope 추출을 해야 한다⁽⁴⁾. Zwicker 는 이를 위해 2 ms 의 시간상수를 가진 아날로그 회로를 사용하였고⁽¹⁰⁾, 본 연구에서의 구현은 1/3 옥타브 밴드 중심주파수가 63Hz 이하의 대역에 대하여 필터의 시간상수를 늘리고 줄어든 이산 데이터만큼 보간을 하였다. Envelope을 추출하기 위해 3.1 절의 시간수열 분석법을 사용하였는데, 식(1)에서 나타난 바와 같이 β 값이 지속적으로 가중된 이동평균의 특성을 나타내고 있으므로 이의 선정이 중요하다. 음향신호의 시간수열 해석을 위해 일반적인 β 값은 0.077 로 이는 0.125 초의 시간 구간에 해당한다⁽¹¹⁾. 그러나 전 대역을 포함하는 시간수열 해석과는 달리 대역별 해석에서는 fast mode에 해당하

는 일정한 β 값을 사용할 경우 해석 전후 신호의 최소제곱 에러가 존재하며 대역별로 그 차이 또한 크다. Hunter 는 그의 논문에서 이 최소제곱 에러를 최소화하는 β 값을 선정할 것을 제안하였다⁽⁶⁾ 본 논문에서는 최적의 β 를 찾기 위해서 다음과 같은 비제약 최적설계문제를 이끌어 내었다.

$$\min. f(t) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m e_i^2(t) \Big|_{\beta} \quad (2)$$

$$e(t) = y(t) - S(t-1), 0 < \beta \leq 1$$

식(2)는 현재구간에서의 관측 값과 이전구간에서 다음구간으로의 예측 값과의 차이를 에러 함수로 정의하고 그 제곱의 합을 최소화하는 문제로 본 논문에서는 Levenburg-Marquardt 알고리즘⁽¹²⁾을 도입하여 최적의 β 값을 구하였다.

(2) Time-Varying Loudness

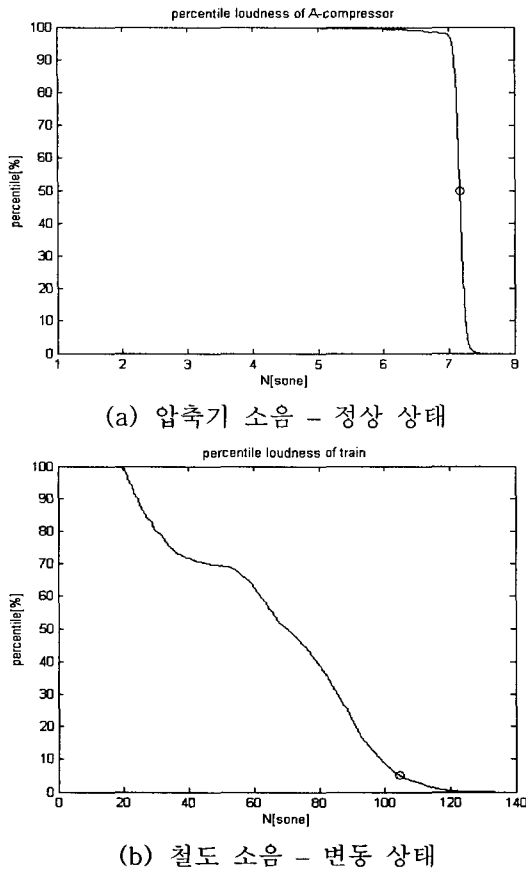
시간 변동이 심한 음의 loudness를 계산하기 위해서는 서론에서 언급한 바와 같이 1/3 옥타브 밴드 대역별 Envelope 추출, 포스트-마스킹(post-masking)의 고려, loudness 시간적분(temporal integration) 작업이 포함되어야 한다⁽⁴⁾. 포스트 마스킹 현상은 음향신호의 노출시간에 따른 비선형적인 특성⁽¹³⁾을 말하며, loudness 시간적분은 동일 레벨의 음향신호에 대하여 그 노출시간에 따라서 음의 크기를 다르게 지각하는 청각계의 특성을 구체화 한 것이다⁽⁴⁾.

4. 열차 소음 음질지수의 임계대역표현

4.1 Percentile Loudness

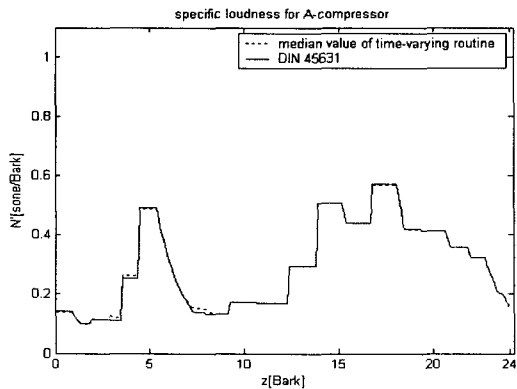
Percentile 은 임의의 값에 대한 분포의 %가 같거나 이하를 나타내는 100-scale의 값이다. 50 percentile 값은 전체 값의 분포에 대해 50% 이하에 분포하는 값을 의미하며 대부분의 percentile 추정은 median으로 지칭되는 이 값을 사용한다⁽¹⁴⁾. [그림 3]은 압축기 정상소음과 철도 소음의 percentile loudness 분포를 보여주고 있는데, 소음의 상태에 따른 변동을 함께 묘사하고 있다.

한편 계산된 음질지수는 임상실험과의 검증이 요구되는데, 과도 음의 loudness는 시간에 대한 값을 가지기 때문에 지속시간동안 음의 크기를 대표할 수 있는 값이 필요하다. 철도소음의 경우 전체 노출시간에 대한 값의 분포 중 5 percentile loudness가 임상실험에 가장 근접한 결과로 알려져 있다⁽²⁾.



[그림 3. 압축기소음과 철도소음의 percentile loudness 분포]

[그림 4]는 정상 음에 과도 음의 loudness 계산 과정을 적용시켜 각 밴드별 50 percentile loudness 를 임계 대역으로 표현한 것과 ISO 532B 규정에 의해 계산한 specific loudness 를 비교한 것이다. 실제로 정상상태 음의 loudness 는 시간적분이 고려되지 않기 때문에 두 결과는



[그림 4. 각 밴드별 median 값과 specific loudness 의 비교]

거의 동일하다. 과도 음의 경우 기저막(basilar membrane)을 따라서 발생하는 임계대역에 대한 적분이 시간 적분보다 먼저 일어나기 때문에⁽²⁾ loudness가 주파수에 따라 그 특성이 표현될 수 없다. 그러나 노출시간이 정의된 철도소음의 경우 준-정상상태 신호라 볼 수 있기 때문에 정상상태의 음과 동일하게 각 대역별로 5 percentile loudness 값을 적용시킬 수 있다.

4.2 Sharpness

음의 날카로움에 대한 주관적 지각량을 표현하는 Sharpness 의 계산모델은 Bismarck, Zwicker & Fastl, Aures 등에 의해 제안되었지만 표준으로 채택된 것은 없다. 본 논문에서는 식(3)과 같은 Zwicker & Fastl 방법을 사용하였다.

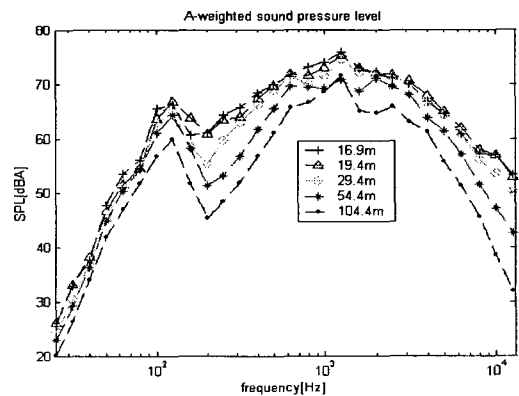
$$S = 0.11 \cdot \frac{\int_0^{24 \text{ Bark}} N' \cdot g(z) \cdot z \cdot dz}{\int_0^{24 \text{ Bark}} N' \cdot dz} \text{ acum} \quad (3)$$

여기서 N' 은 specific loudness 를, z 는 임계대역율(critical band rate[Bark])을, $g(z)$ 는 z 에 대한 가중치 함수를 나타낸다.

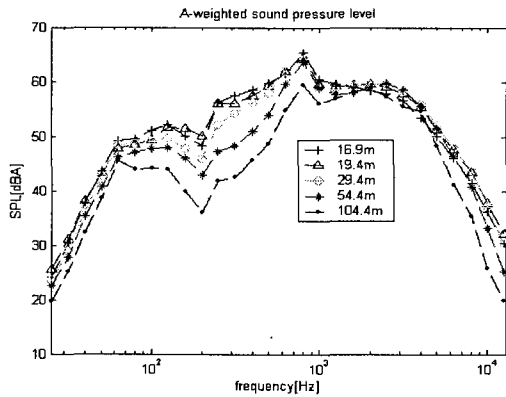
5. 열차소음 해석결과 비교

5.1 거리에 따른 무궁화 및 KTX 열차의 음압 레벨과 loudness 의 스펙트럼 특성 비교

열차에 의해 발생하는 소음의 원인은 다양하며 차종이나 열차길이 및 속도에 의존성이 있다. 철도에 의한 소음과 열차 통로에서 발생하는 공력소음이 무궁화와 KTX 차종에 대하여 큰 차이가 없다고 가정하면 무궁화 열차의 주요 소음 원은

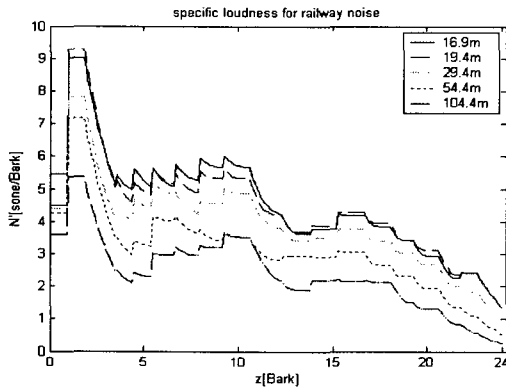


(a) 무궁화 열차의 1/3 분석(거리별)

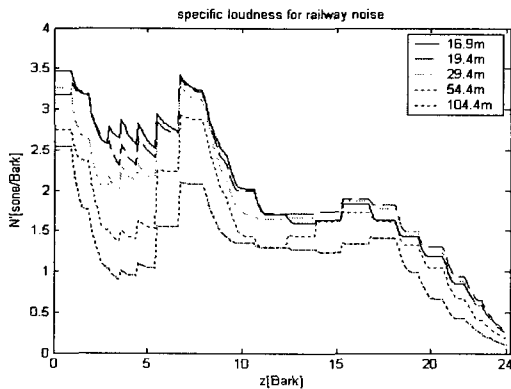


(b) KTX 열차의 1/3 분석(거리별)
[그림 5. A-weighted SPL 스펙트럼]

기관음이며, KTX 열차의 그것은 집전기 (pantograph)로부터 발생되는 공력 음으로 생각할 수 있다.



(a) 무궁화 열차의 거리별 specific loudness



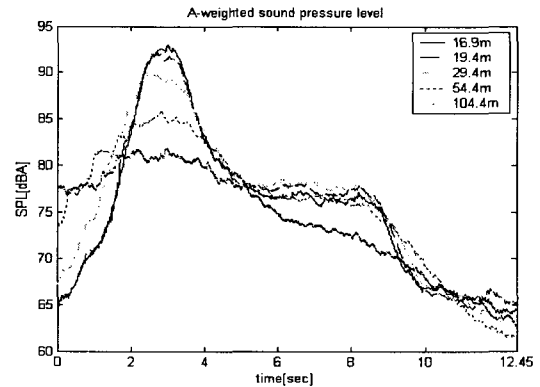
(b) KTX 열차의 거리별 specific loudness
[그림 6. Specific loudness]

[그림 5]는 무궁화 및 KTX 차종에 대한 A-weighted 음압레벨의 스펙트럼을, [그림 6]은 specific loudness 를 거리에 따라 비교한 것이다. 각 차종에 대하여 loudness 는 주파수에 따라 다

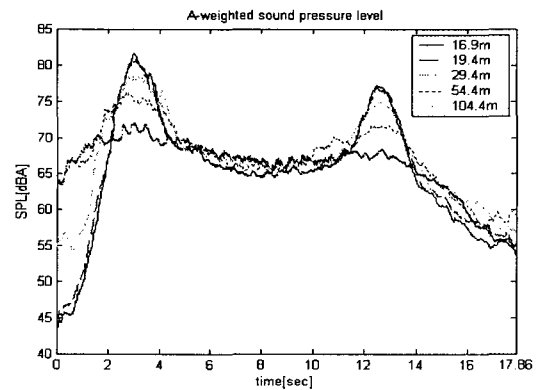
른 특성이 두드러지게 나타난 반면 음압레벨은 무궁화열차의 기관소음에 해당하는 부분을 제외하고 별다른 특성이 없는 것을 확인 할 수 있다. 거리에 따른 특성도 loudness 결과가 그 상대적인 감소가 더욱더 크게 나타나는 것을 알 수 있다.

5.2 거리에 따른 무궁화 및 KTX 열차의 음압레벨과 sharpness 의 시간영역 특성 비교

시간영역의 A-weighted 음압레벨 특성은 전동음에 해당하는 구간(무궁화: 2~4 초, KTX : 2~4 초, 12~14 초)과 열차통로에 기인하는 소음특성이 시간에 따라서 구별되게 나타나며, 그림에는 없지만 노출시간에 대한 loudness 특성도 이와 동일하다. 한편 소음 원과는 관계없이 열차에 의해 발생한 소음은 거리에 따라서 감소하며, 이러한 특성은 [그림 7]과 같이 각 시간구간에 관계없이 나타난다.



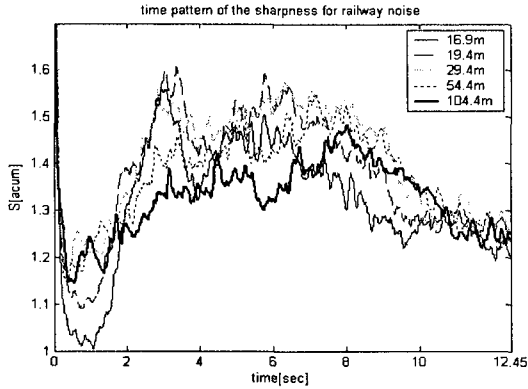
(a) 무궁화 열차의 시간영역 분석(거리별)



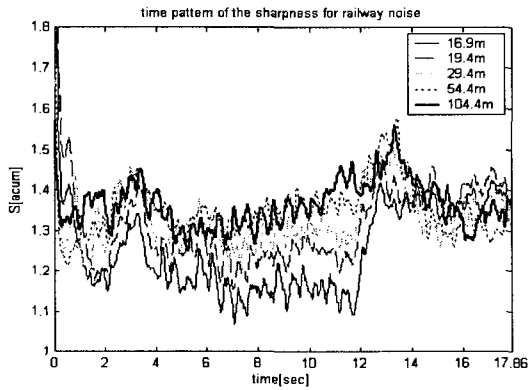
(b) KTX 열차의 시간영역 분석(거리별)
[그림 7. A-weighted SPL 시간 패턴]

그러나 주관적 지각량인 sharpness 의 경우 이와는 양상이 다르다. [그림 8]의 (b)에 나타난 바와 같이 KTX 열차의 거리별 sharpness 특성은 거리가 멀어짐에 따라 오히려 증가한다. 무궁화

열차의 경우에서도 sharpness 는 거리별 특성보다는 어떤 소음원이 그 시간대에 지배적이나에 따라서 높게 또는 낮게 나타나는 것을 알 수 있다.



(a) 무궁화 열차 - 거리별 sharpness



(a) KTX 열차 - 거리별 sharpness
[그림 8. Sharpness 시간 패턴]

6. 결론

철도소음은 철로 인근 지역 주민들의 생활권과 관계되는 환경소음이기 때문에 소음에 대한 레벨뿐만 아니라 소음에 의한 annoyance 를 함께 고려해야 한다. Annoyance 는 음질요소와 밀접한 관련이 있으며 이를 고려하기 위해 소음의 loudness 와 sharpness 를 계산하였다.

소음의 과도적인 성향을 정확하게 반영하기 위해 Levenburg-Marquardt 알고리즘을 도입하여 최소제곱 에러를 최소화하는 Envelope 을 추출하였고 기존에 연구된 사항을 참고하여 time-varying loudness 를 계산하였다. 그러나 일반적인 과도 음에 대한 loudness 는 임계대역에 대한 최종표현이 불가능 하므로 철도 소음의 정연한 특성으로부터 그것을 준-정상상태 소음이라 가정하였다. 이 가정으로부터 스펙트럼에 대한 적분과정

과 시간에 대한 적분과정의 순서를 바꿔서 각 밴드별 5 percentile 값을 구하여 specific loudness 를 표현하였다.

마지막으로 무궁화 및 KTX 차종에 대하여 A-weighted 음압레벨, loudness, sharpness 를 각각 시간 또는 주파수에 따라 비교를 수행하였다. 분석된 음질지수는 기존의 분석에 비해 실제로 사람들이 느끼는 소음의 관점에서 더욱더 유용한 자료가 될 것으로 사료된다.

후기

본 연구에 사용된 데이터는 한국 철도 기술 연구원(KRRI)에서 수행하고 있는 환경기술개발사업(2003-11001-0004-1)의 철도 소음 측정 자료임.

참고문헌

- (1) 신민철, 김대성, 왕세명, 조준호, "새마을 열차의 소음 측정, 분석과 DB 구축을 위한 인터페이스 프로그램의 개발", 추계 소음진동공학회, 2005.
- (2) E. Zwicker, H. Fastl, "Psychoacoustics, Facts and Models", 2nd Updated Edition, Springer-Verlag, Berlin, 1999.
- (3) E. Zwicker, H. Fastl, U. Widmann, K. Kurakata, S. Kuwano, S. Namba, "Program for Calculating Loudness According to DIN 45631 (ISO 532B)", J. Acoust. Jpn (E), vol. 12, pp. 39-42, 1991.
- (4) Hyuk Jeong, "Sound Quality Analysis of Non-stationary Acoustic Signals", ph. D. thesis, KAIST, 1999.
- (5) IEC/CD 1672, "Electroacoustics-sound Level Meters", The Journal of Acoustical Society of America (CD-ROM ed) 1996.
- (6) J. S. Hunter, "The Exponentially Weighted Moving Average", Journal of Quality Technology, Vol. 18, No. 4, October 1986.
- (7) Dillon Harvey, "Hearing Aids", Boomerang Press, 2001
- (8) Y. Yamada, "Loudness, Noisiness, and Annoyance of Complex Sounds(Comparison of Japanese with German)", in Proc. Inter-Noise'85, pp.977-980, 1985.
- (9) Cardoze B. L. and van der Veen K. G, "Estimation of annoyance due to low level sound", Applied Acoustics 12(5), pp.389-396, 1979.
- (10) E. Zwicker, "Procedure for calculating loudness of temporally variable sounds", J. Acoust. Soc. Am., Vol. 62, No. 3, Sempther, 1977.
- (11) Manual, "LMS Cada-x: Time Data Processing Monitor", LMS product.
- (12) D. Marquardt, "An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters", SIAM J. Appl. Math., 1963, Vol. 11, pp. 431-441.
- (13) U. Widmann, R. Lippold, H. Fastl, "A COMPUTER PROGRAM SIMULATING POST-MASKING FOR APPLICATIONS IN SOUND ANALYSIS SYSTEMS", Noisecon 98, Ypsilanti, Michigan, USA, pp. 451-456, 1998.
- (14) R. Suoranth, K. Estola, "New Low Variance L-Estimator for Percentile Estimation", IEEE Winter Workshop on Jan. 17-20, 1993.