

# 임계 대역 필터를 이용한 과도음의 라우드니스 모델

정 혁, 이정권

한국과학기술원 기계공학과 소음 및 진동제어 연구센터

## Measurement of Time Varying Loudness by Using the Critical-banded Filters

Hyuk Jeong and Jeong-Guon Ih

NoViC, Department of Mechanical Engineering, KAIST

(e-mail:ihih@sorak.kaist.ac.kr)

### 요약문

본 연구에서는 기존의 문헌에 자세히 기술되지 않은 주파수 분할 방법에 대한 고찰을 통해 과도음의 라우드니스 해석에 적합한 임계 대역 해석 방법을 제안하고, 이를 근거로 과도음의 라우드니스 모델을 구현하여 기존의 임상 실험 결과와의 비교함으로써 그 유효성을 확인하였다. 또한 순음의 라우드니스 해석에서 기존 라우드니스 모델이 안고 있는 신호 해석 상의 문제점 등을 지적하고 이를 개선한 새로운 모델을 제시하였다. 개선 방법으로서 임계 대역폭의 1/2 간격으로 총 47개의 임계 대역 필터를 배치하여 필터의 경계에 순음이 존재할 때 발생할 수 있는 라우드니스 오차를 최소화 하였다. 또한 이 모델에서는 Zwicker가 제안했던 기존의 방법을 제안된 임계 대역 필터에 적합하도록 수정하는 작업이 포함되었다.

### 1. 서론

Zwicker [1]를 비롯한 많은 심리 음향 학자들의 지난 수십년 간의 연구를 통해서 음질에 큰 영향을 미치는 청감들, 즉 loudness, roughness, sharpness, fluctuation strength 등이 정의 되었으며, 각 청감들 모델링이 지금까지 이루어지고 있다. 이러한 청감들 중에서 주관적으로 느끼는 소리의 크기를 의미하는 loudness 는 그 자체로서도 음질을 결정하는 중요한 인자이며, sharpness, fluctuation strength, roughness 등의 청감 원인을 설명하는데 필요한 기본적 청감이다. Zwicker 는 청감의 주파수 분석 단위원 임계 대역을 기본으로 하는 loudness 측정 모델을 제안하였으며, 이 방법은 국제 표준으로 인증되어 loudness 측정에 널리 이용되고 있다 [2].

한편, 과도음의 청감 측정을 위해 Zwicker 는 자신의 라우드니스 계산 모델을 보완하여 아날로그 형태의 과도음 라우드니스 측정 기기를 개발하였다 [3]. 그러나 Zwicker 의 과도음 라우드니스 측정 방법은 개략적인 내용만이 소개되었을 뿐 구체적인 회로도 등이 문헌에 언급되지 않았기 때문에 이를 구현하기

가 어렵다. 다행히 컴퓨터 프로그래밍이 가능한 Zwicker 의 정상음의 라우드니스 측정 방법 [4]이 문헌에 구체적으로 소개되어 있기 때문에 과도음의 라우드니스 측정 방법에 필요한 각 단계별 아날로그 알고리즘을 디지털 알고리즘으로 변환한다면 Zwicker 의 방법과 유사한 과도음의 라우드니스 측정 모델을 구현할 수 있을 것이다. 본 연구에서는 Zwicker 의 아날로그 알고리즘으로부터 컴퓨터에서 구현이 가능한 과도음의 라우드니스 모델을 제시하고 기존의 임상 실험 결과와의 비교를 통해 그 유효성을 확인하고자 한다.

### 2. 과도음의 라우드니스 모델

과도음의 라우드니스 해석을 위한 Zwicker 의 방법으로부터 그림 1과 같은 기본 흐름도를 구성할 수 있다. 라우드니스 해석에서는 일반적으로 20 Hz 에서 16 kHz 의 주파수 범위의 소음 성분이 포함되어야 하기 때문에 마이크로폰으로부터 입력된 음향 신호는 40 kHz 이상으로 샘플링된다. 현재 디지털 오디오의 포맷으로 주로 이용되는 샘플링 주파수는 44.1 kHz 또는 48 kHz 로서 본 연구에서도 이에 근거한 해석 방법을 제안한다. 다음은 라우드니스 해석을 위한 각 단계를 기술한 것이다:

#### 임계 대역 해석

A/D 변환된 음향 신호는 Zwicker 가 제안한 바와 같이 24 개의 임계 대역으로 주파수 분할된다 [4]. 본 연구에서는 디지털 라우드니스 측정 모델을 다루고 있기 때문에 Zwicker 알고리즘의 아날로그 필터 대신에 디지털 필터링 방법이 이용되어야 한다. 본 연구에서는 디지털 필터링의 방법으로 Waite 의 방법 [5]과 Zwicker 가 언급한 필터의 특성 [1]을 고려하였다. 아날로그 필터를 디지털 필터로 바꾸는 방법으로서 임계 대역의 경계 주파수와 필터의 종류 및 특성이 주어지면 최초의 샘플링 주파수에 대하여 디지털 필터를 구성하고 각 임계 대역별로 대역 통과 필터링을 고려할 수 있지만, 이 방법은 저주파 대역에서 계산 효율이 낮고, 최초의 샘플링 주파수에 비해 저주

과 대역에서의 대역폭이 너무 작기 때문에 필터링의 안정성이 떨어진다.

본 연구에서는 이러한 문제점이 해결된 Waite의 방법을 응용하여 그림 2와 같은 대역 통과 필터링 방법을 제안한다. 그림 2의 첫 대역 통과 필터링은 8.5 kHz, 10.5 kHz 및 13.5 kHz 중심주파수의 3개의 임계 대역 통과 필터와 half-rate decimation를 위한 저역 통과 필터를 이용한다. 이때 13.5 kHz가 중심 주파수인 임계 대역은 라우드니스 해석에 필요한 가장 높은 주파수 대역임을 의미한다. 최초 3개의 임계 대역 통과 필터링 수행 후, 저역 통과에 의한 half-rate decimation이 행해지고 이러한 과정이 반복되면 24개 임계 대역의 음향 신호를 구할 수 있다. 이때, 임계 대역 통과 필터링에는 ANSI [6]의 규격에 따라 3차 Butterworth 필터가 이용되었고, half-rate decimation을 위한 저역 통과 필터는 8차 elliptic 필터가 이용되었다.

한편, 주파수 분할된 음향 신호의 각 임계 대역별 음압 레벨을 구하기 위해서는 우선 대역 통과된 신호의 엔빌롭이 추출되어야 한다. Zwicker [3]는 임상 실험을 근거로 하여 과도음의 라우드니스 해석을 위한 최적의 시간 해상도를 2 ms 가정하였다. 따라서 각 대역별로 음압 레벨을 2 ms 간격으로 추출하여야 한다. Zwicker의 방법 [3]에서는 각 대역별 엔빌롭을 추출하기 위해서 시간 상수 2 ms의 1극 저역 통과 필터에 의한 정류 회로를 이용하였다. 따라서 고주파 대역에서 엔빌롭의 변화는 1극 저역 통과 필터의 시간 상수에 의해서 좌우되며, 본 연구에서는 이와 유사한 특성의 엔빌롭 추출 방법으로서 각 대역 음향 신호를 제공하여 순간 파워를 구하고 이로부터 시간 상수가 2 ms인 1극 저역 통과 필터를 이용하는 방법을 제안한다. 이 방법은 Zwicker의 제안을 이행하면서 엔빌롭의 변화를 민감하게 표현할 수 있기 때문에 각 대역별 엔빌롭 추출에 유용하다고 판단된다.

### Main loudness 계산

임계 대역 레벨은 라우드니스 지각량과 선형적인 관계가 아니기 때문에 임계 대역 레벨을 선형적으로 나타내기 위한 방법이 요구된다. Zwicker는 이를 위하여 다음과 같은 식을 제안하였다 [1].

$$N' = N_0 \cdot 10^{0.025L_{TQ}} \cdot \left[ (1 - s + s \cdot 10^{0.1(L_z - L_{TQ})})^{25} - 1 \right] \quad (\text{some/Bark}). \quad (1)$$

여기서  $N_0$ 는 비례 상수,  $L_{TQ}$ 는 절대 가청 역치 레벨,  $s$ 는 역치 인자,  $L_z$ 는 임계 대역  $z$ 에서의 음압 레벨이다.

### Post-masking의 고려

청각계는 음향 신호에 의한 자극이 주어졌다가 멈추더라도 어느 정도 시간 안에는 새로운 자극에 둔감해 지는 특성을 가지고 있다. 이를 post-masking 현상이라고 하며 post-masking은 라우드니스의 시간 변화와 동일한 모양으로 가정할 수 있기 때문에 과도음의 라우드니스 모델에는 이에 대한 고려가 필요하다. Post-masking 현상은 음향 신호의 노출 시간에

따른 비선형 함수로서 나타나며 Zwicker는 다이오우드를 이용한 post-masking 모의 방법을 제안하였다 [3]. 또한 최근에는 이 방법의 디지털 알고리즘이 Widmann [7]에 의해 제안되었고, 이 방법은 Zwicker의 아날로그 방법의 결과와 유사한 특성을 보이고 있음이 확인되었다. Widmann의 방법은 그 구체적인 알고리즘이 프로그램 리스트로 공개 되어 있어서 과도음 라우드니스 모델에 대한 적용이 용이하다. 그림 3은 Widmann의 방법을 적용하여 60 dB, 2 kHz 순음의 노출시간에 따른 post-masking 곡선을 나타낸 것으로 임상 실험 결과 [7]와 유사함을 확인할 수 있다.

### Spectral-masking의 고려

시간 축에서 뿐만 아니라 주파수 축에서도 큰 자극에 의해 주변 주파수 대역에서 자극에 둔감한 현상이 발생하는데 이를 spectral-masking이라고 한다. Zwicker [1]에 의하면 spectral masking의 모양은 주파수 축에서의 specific loudness와 동일하기 때문에 이를 이용하면 자극에 의한 주파수 축에서의 라우드니스 분석이 가능하다. Spectral-masking을 고려한 specific loudness의 구체적인 계산 알고리즘은 Zwicker 등의 방법 [4]을 이용하였다. 한편 전체 라우드니스 값은 specific loudness를 임계 대역에 대해서 적분함으로써 계산할 수 있다.

### Loudness integration

인간의 청각은 동일 레벨의 음향 신호가 주어졌을 때 그 노출 시간에 따라서 라우드니스 지각량이 다르게 나타난다 [1]. 이는 인간의 라우드니스 지각 과정에서 음향 신호에 의한 자극이 신경계에 어느 정도 축적될 때 자극으로서 인지되는 특성을 반영한 것으로서 이와 같은 현상, loudness integration을 고려하기 위한 특별한 저역 통과 필터가 요구된다. 이에 대한 구체적인 적용은 차후 연구에서 다루고자 한다.

## 3. 기존 방법의 문제점 및 개선 방법

기존의 과도음의 라우드니스 측정 모델에는 음향 신호의 주파수 분할을 위해서 임계 대역 통과 필터링과 같은 필터를 이용한 해석법이 이용된다. 대역 통과 필터링을 이용하는 방법은 청각계의 특성인 높은 주파수 대역에서의 높은 시간 해상도와 낮은 주파수 대역에서의 높은 주파수 해상도를 만족시킴으로써 과도음의 라우드니스 모델에 유용하게 적용될 수 있는 방법이지만, 임계 대역폭 미만의 협대역 소음이 필터의 경계 주파수 부근에 위치하게 되면 필터의 감쇠 특성에 따라 loudness 계산치가 크게 차이가 나는 라우드니스 불연속성 현상이 발생하게 된다. 예를 들어 표준 필터 규격 중 하나인 DIN 45652의 경우, 대역 필터의 경계에서의 감쇠특성이 대역 중심 주파수에 대해  $\pm\infty$ 에서 0.5 dB으로 광범위하게 주어져 있다. 따라서, 순음이 필터의 경계 주파수 부근에 위치할 때, 필터의 감쇠가  $\pm\infty$ 인 경우에는 라우드니스가 0 some이 되며, 감쇠가 0.5 dB인 경우에는 약 2

sones 이 된다. 물론 본 예제는 필터의 감쇠 특성을 극단적으로 가정했을 때의 경우이지만, 각각은 임계 대역 필터의 조건이 Zwicker 모델이 요구하는 필터의 표준 감쇠 특성을 만족하는 경우에도 나타날 수 있는 결과이기 때문에 라우드니스의 표준화 작업에 있어 매우 심각한 문제가 아닐 수 없다.

대역 필터를 이용했을 때 발생할 수 있는 위의 문제점이 실제의 경우에 어느 정도 오차를 갖는지를 확인하기 위하여 2장에서 제안된 방법을 이용하여 1 kHz에서 2 kHz 까지 주파수를 변화 시키면서 그림 4와 같이 60dB 순음의 라우드니스를 계산하였다. 이때, 대역 필터에 의한 신호 해석상의 문제점만을 관찰하기 위하여 외이에서 내이로의 감쇠 영향은 무시하였다. 만일 대역 통과 필터가 이상적인 대역폭과 감쇠 특성을 가지고 있다면 외이에서 내이로의 감쇠 영향이 무시되었기 때문에 라우드니스 값이 주파수에 따라 4 sone으로 일정하게 나타나야 한다. 그렇지만 순음의 주파수가 1040 Hz 일 때는 3.7 sone, 1110Hz 일 때는 4.3 sone의 라우드니스 값이 계산되며 이는 Zwicker의 방법이 라우드니스 해석에서 문제가 될 수 있는 7.5 % 정도의 오차를 포함한다는 것을 의미한다.

이러한 문제점을 개선하기 위하여 본 연구에서는 24개의 각 임계 대역 사이에 각 임계 대역의 중심 주파수를 경계 주파수로 하는 23개의 임계 대역 필터를 추가로 구성하고 이를 이용한 라우드니스 계산 방법을 제안한다. 총 47개의 대역 통과된 임계 대역 신호들은 2장에서와 동일한 과정으로 main loudness로 변환된다. 이 이후의 과정도 동일하며 단지 차이점은 specific loudness를 구하는 과정에서 ISO 532 B와 같이 1 Bark 폭의 임계 대역레벨을 그리지 않고 0.5 Bark 폭의 막대그래프를 그리고 나머지는 기존의 방법을 동일하게 적용하는 것이다. 그림 5는 그림 4에서 문제가 되었던 60dB, 1100Hz 순음의 specific loudness 패턴을 두 방법을 이용하여 각각 나타낸 것으로서 저주파 대역 쪽으로의 specific loudness 패턴의 해상도가 개선됨으로써 전체 라우드니스 레벨이 이상적인 값에 근사해짐을 확인할 수 있다. 그림 4의 접선은 47개 대역 필터를 이용하여 1 kHz에서 2 kHz까지 순음의 전체 라우드니스를 계산한 것으로서 이상적인 값 4 sone에 대해 라우드니스 해석에 만족할 만한 수준인 4%내의 오차를 갖는 것을 확인할 수

있다.

#### 4. 결론

본 연구를 통해서 과도음의 라우드니스를 계산할 수 있는 디지털 모델이 구현되었다. 본 연구에서는 디지털 필터를 이용한 임계 대역 해석 방법이 이용되었으며 순음이 필터의 경계에 위치 할 때의 문제점을 개선하기 위하여 중첩된 47개 임계 대역 필터를 이용하였다. 또한 post-masking을 고려하기 위해 디지털 알고리즘을 도입하였고, 이 방법의 결과가 임상 실험 결과와 근사함을 확인하였다. 본 연구의 방법은 라우드니스 해석에 만족할 만한 수준의 오차를 만족하는 것으로 평가되며, 차후에는 이를 이용한 roughness, fluctuation strength 등의 청감 모델을 제시하고자 한다.

#### 참 고 문 헌

- [1] E. Zwicker and H. Fastl, *Psychoacoustics, Facts and Models*, Springer-Verlag, Berlin, Germany, 1990.
- [2] ISO 532 B, "Acoustics-Method for Calculating Loudness Level", International Organization for Standardization, 1975.
- [3] E. Zwicker, "Procedure for Calculating Loudness of Temporally Variable Sounds," *J. Acoust. Soc. Am.* vol. 62, no. 3, 1977.
- [4] E. Paulus and E. Zwicker, "Computer Programs for Calculating Loudness from Third-Octave Band Levels or from Critical Band Levels," *Acustica*, vol. 27, no. 5, pp. 253-266, 1972.
- [5] J. W. Waite, "A Multi-rate Bank of Digital Bandpass Filters for Acoustic Applications," *Hewlett-Packard Journal*, April, pp. 73-81, 1993.
- [6] ANSI S1.11, "American National Standard for Specification for Octave-band and Fractional-octave-band Analog and Digital Filters," *J. Acoust. Soc. Am.*, 1986.
- [7] U. Widmann, R. Lippold and H. Fastl, "A Computer Program Simulating Post-masking for Applications in Sound Analysis Systems," *Proc. Noise Con '98*, pp. 451-456, 1998.

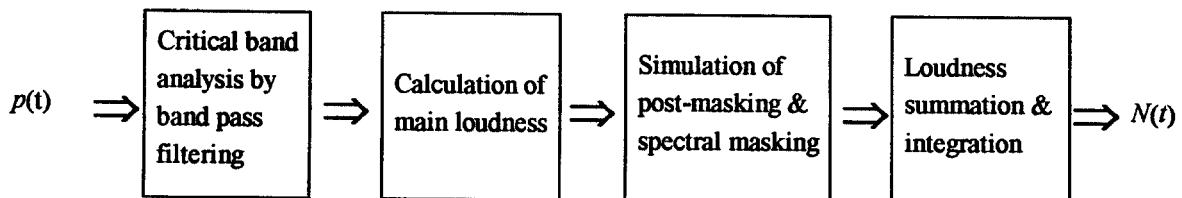


그림 1. 과도음 라우드니스 모델의 개요.

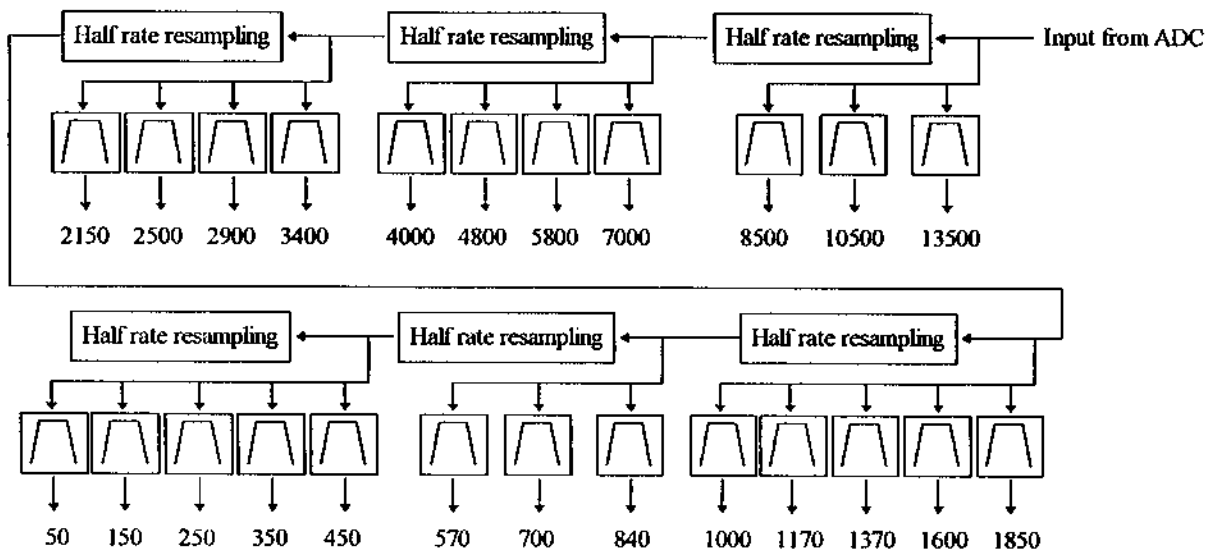


그림 2. Half-rate decimation을 이용한 임계 대역 필터링 방법.

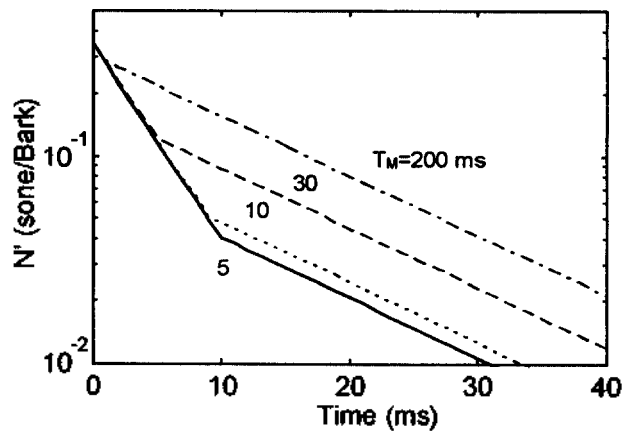


그림 3. Post-masking 곡선. ( $T_M$ 은 masker의 노출시간.)

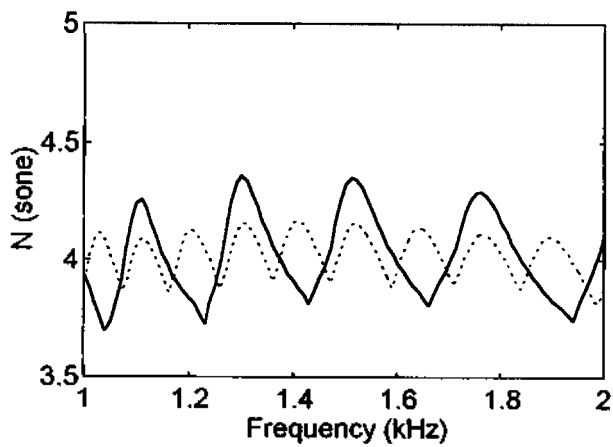


그림 4. 순음의 라우드니스 해석 결과.  
 —, 24개 임계 대역 필터를 이용한 경우;  
 ---, 47개 임계 대역 필터를 이용한 경우.

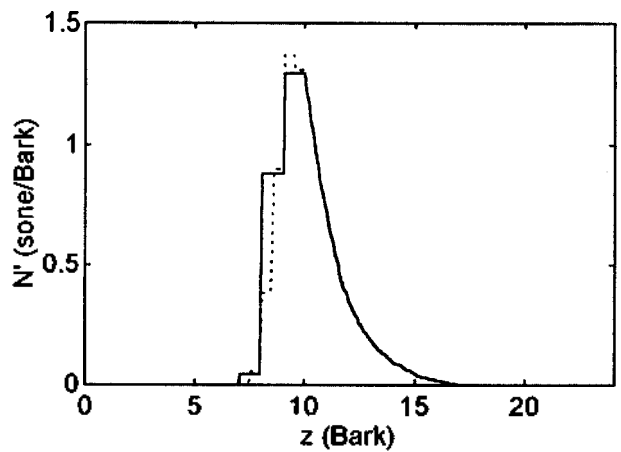


그림 5. 1100Hz, 60 dB 순음의 specific loudness 패턴.  
 —, 24개 임계 대역 필터를 이용한 경우;  
 ---, 47개 임계 대역 필터를 이용한 경우.