



# 청감의 속성과 계산모델 개요



정 혁\* · 이 정 권\*\*

(한국전자통신연구원 가상현실연구부 · 한국과학기술원 기계공학부)

## 1. 머리말

음질이란 작동 중 제품에서 발생하는 소리가 만족스러움지에 대한 주관적 평가를 의미하는 것이기 때문에, 평가에 대한 판단은 인간의 모든 청각 특성과 사용자의 지적, 감성적 특성에서 기인한 제품 특성의 선호도에 따라 결정된다. 따라서 개인의 경험 등에 의한 주관적 요인이 음질 판단에 있어서 중요하게 작용하기 때문에 음질을 측정하기 위해 피험자의 판단에 의한 임상 실험 방법 등이 이용된다. 그러나, 임상 실험에 의한 주관적 음질 측정 방법은 수많은 실험과 통계처리로부터 음질을 결정하는 인자들을 찾아내야 하므로 많은 자원 및 시간 또한 피험자의 교육 등이 요구되는 문제점을 내포하고 있다. 또한, 피험자는 음질에 대해서 언급을 할 때 '주파수가 높다' 또는 '음압 레벨이 높다' 등의 물리적 용어를 사용하지 않고 '소리가 날카롭다' 또는 '소리가 크다' 등의 비물리적 용어를 사용하기 때문에, 주관적 측정 결과가 재연성이 있게 관찰되었다고 하더라도 음질을 개선하기 위해서 개발자가 취해야 할 대책을 주관적 측정 방법으로부터 얻을 수 없는 문제점이 있다.

음질에 대한 주관적 평가를 음향 신호의 물리적

인 특성과 연관시키는 작업을 다루는 심리 음향 분야에서는 소음에 노출되었을 때 피험자가 갖는 음의 크기, 날카로움, 거칠기 등의 주관적 느낌, 즉 청감(auditory sensation)을 음향 신호의 물리적 인자를 통해서 모델링 하는 작업이 다루어지고 있다. 청감 모델이 구현되면 청감 모델과 음질에 관한 전체적인 평가와 연관을 지어 하나의 음질 평가치를 제시할 수 있으며, 청감 해석 결과로부터 음질 개선을 위한 물리적 정보를 얻을 수 있다. 이와 같이 청감 계산 모델을 근거로 하여 음질을 평가하는 방법을 객관적 음질 평가 방법이라고 정의하며, 임의 제품의 음질을 평가할 때 객관적 평가 방법을 이용하면 비용과 시간이 많이 요구되는 임상 실험을 하지 않고도 음질을 예측할 수 있다.

음질에 영향을 주는 청감으로는 라우드니스(loudness), 샤프니스(sharpness), 러프니스(roughness), 변동강도(fluctuation strength), 음정(pitch), 음정강도(pitch strength) 등이 있으며 본 글에서는 대표적인 청감인 라우드니스, 샤프니스, 러프니스, 변동 강도의 속성과 각각의 계산 모델에 대한 기본 개념을 소개하고자 한다.

## 2. 라우드니스(Loudness)

라우드니스는 그 자체로서도 음질을 결정하는 중요한 인자이며, 샤프니스, 러프니스, 변동 강도

\* E-mail : jay@etri.re.kr

등의 청감의 원인을 설명하는데 필요한 기본적 청감이다. 라우드니스는 주관적으로 느끼는 소리의 크기(the magnitude of an auditory sensation)를 의미하는 청감으로 정의된다.<sup>(1)</sup> 그 정의에서 나타나는 바와 같이 라우드니스는 음압 레벨과 밀접한 연관성을 가지고 있으며, 동일한 주파수에서 순음의 경우, 음압 레벨이 증가하면 라우드니스도 증가하는 특성이 있다. 그러나 동일한 음압 레벨의 주파수가 다른 두 순음은 외이에서 내이로의 음향 감쇠가 주파수에 따라 다르기 때문에 라우드니스가 서로 다르게 지각될 수 있다. 외이에서 내이로의 음향 감쇠 특성만을 고려하여 음의 크기를 판단하는 기준으로서 A 청감 보정<sup>(2)</sup> 등을 이용한 소음 레벨이 제안되었으며, 지난 오랜 동안의 소음 평가의 수단으로 이용되었다. 그러나 청각계는 동일한 중심 주파수와 레벨을 갖더라도 소음 성분의 대역폭에 따라서 라우드니스가 다르게 지각될 수 있는 특성이 있다. 예를 들면 백색 잡음의 경우, 주관적으로 느끼는 라우드니스 지각량이 동일한 레벨의 순음에 비해 3~4배가 되기도 한다. 따라서, 음향 감쇠만을 고려하여 음압 레벨을 비교하는 A 청감 보정 소음 레벨 값은 라우드니스 지각량과 큰 차이를 보일 수 있다.

한편, 라우드니스가 주관적으로 느끼는 지각량을 비교하기 위한 것이기 때문에 음압 레벨과 같은 물리적 인자와 라우드니스와의 연관을 위한 라우드니스 레벨의 개념이 1920년대 초 Barkhausen에 의해 처음 소개되었다.<sup>(3)</sup> 주관적 소리 크기에 대한 반응을 물리적인 인자와 연관시키는 방법의 대표적인 예로는 임의의 소리를 전방에서 평면파로서 입사 되는 1 kHz 순음의 레벨과 비교하여 나타내는 것이다. 이때 비교 대상인 1 kHz 순음의 음압 레벨을 phon으로 나타내며, 예를 들어 임의의 소리의 크기가 40 phon이라고 나타난다면 이는 40 dB인 1 kHz 순음과 라우드니스 레벨이 같음을 의미한다.

Fletcher와 Munson 등을 비롯한 많은 연구자들은 1 kHz 순음의 레벨을 기준으로 하여 그와 동일한 라우드니스 레벨을 갖는 여러 주파수에서의 순음 레벨을 임상적 실험을 통해 구하였다. 이와 같은 실험으로부터 1 kHz 순음의 레벨과 동일한 라우드니스 레벨을 갖는 각 주파수에서의 음압 레벨을 연속적으로 이은 등-라우드니스-선도가 구해졌으며 이에 대한 표준화 작업이 이루어졌다.<sup>(4)</sup>

한편, phon에 의한 라우드니스 레벨은 1 kHz의 음압 레벨과의 비교만이 가능하기 때문에 라우드니스 레벨이 다른 두 소리의 지각량이 얼마나 차이가 나는지를 알 수 없다. 따라서 소리의 크기에 대한 주관적인 반응을 선형적인 비율로 나타내기 위하여 40 dB, 1 kHz 순음을 기준으로 단위, sone이 제안되었다.<sup>(5)</sup> 즉 40 dB의 1 kHz 순음의 라우드니스 값은 1 sone이며, 2 sone의 라우드니스 값을 갖는 임의의 음은 1 sone의 크기를 갖는 음에 비해 2배의 라우드니스 지각량을 제공하는 것임을 의미한다.

지금까지의 임상 실험 결과로부터 1 kHz 순음의 라우드니스 레벨과 라우드니스 값 사이에 다음과 같은 간단한 관계가 있음이 확인되었다.

$$\text{if } L \geq 40 \text{ dB } N = 2^{(L-40)/10} \quad (1a)$$

$$\text{if } L < 40 \text{ dB } N = \left(\frac{L}{40}\right)^{2.86} - 0.0005 \quad (1b)$$

여기서  $L$ 은 phon 단위의 라우드니스 레벨,  $N$ 은 sone 단위의 라우드니스 값을 의미한다. 따라서, 식 (1)과 등-라우드니스 레벨-선도를 이용하면 임의의 레벨과 주파수를 갖는 순음의 라우드니스 레벨 및 라우드니스 값을 구할 수 있다.

한편, 등-라우드니스 레벨-선도는 순음에 대해서만 적용할 수 있기 때문에 광대역 소음의 경우와 같은 순음 이외의 소음에 대한 라우드니스 측정 방법이 요구되었다. Stevens는 1/3 옥타브 해석에 근거한 라우드니스 계산법, Stevens Mark

VI, Mark VII을 제안하였으며, Stevens Mark VII은 라우드니스 측정의 국제 표준의 하나로서 인정되었다.<sup>(6)</sup> 그러나, Stevens에 의한 라우드니스 측정법은 음장에 따른 구분과 주파수 영역에서의 마스킹 현상인 스펙트럴 마스킹(spectral masking)을 고려하지 않았기 때문에 순음과 같이 주파수 스펙트럼이 불연속적으로 분포하는 소음의 해석에는 한계가 있었다. Kryter<sup>(7)</sup>가 제안한 노이지니스(noisiness)도 주관적 음의 크기와 관련되어 있으나 노이지니스는 항공 소음 등의 특별한 제한 조건에서만 이용되고 있다.

Zwicker는 음장 보정과 임계 대역 및 스펙트럴 마스킹 개념을 도입하여, 소음의 스펙트럼 분포에 상관 없이 해석이 가능한 라우드니스 측정법을 제안하였다. 이 방법 역시 Stevens의 방법과 동일하게 1/3 옥타브 해석 결과를 이용하였고, Stevens의 방법과 함께 ISO 532에 인증되었다. Zwicker의 방법이 주파수 및 레벨에 대한 스펙트럴 마스킹의 복잡한 비선형 특성을 반영했기 때문에 최근의 음질 연구에서 주로 이용되고 있다. Zwicker의 방법 이외에도 최근에는 1/3 옥타브 해석을 거치지 않고 스펙트럼에서 바로 라우드니스 값을 계산할 수 있는 방법이 Moore와 Glasberg에 의해 제안되었다. 이 모델은 Zwicker 모델과는 달리 FFT 등에 의한 협대역 해석법을 이용할 수 있기 때문에 순음의 유무나 협대역 소음의 대역폭을 쉽게 확인할 수 있으며, 슬롯 자극에 해당하는 기울기를 표에 의존하지 않고 간단한 수식으로부터 구하기 때문에 주파수 축에 대해 연속적인 형태의 자극 레벨(excitation level,  $L_E$ )과 스페시픽 라우드니스(specific loudness,  $N'$ )를 구할 수 있는 장점이 있다. 최근에는 순음 성분의 해석이 중요한 오디오 음질 연구 등의 분야에서 이들의 방법에 근거한 연구가 이루어지고 있다.

그림 1은 개념적으로 나타난 라우드니스 계산 모델이다. 각 단계를 설명하면 다음과 같다.

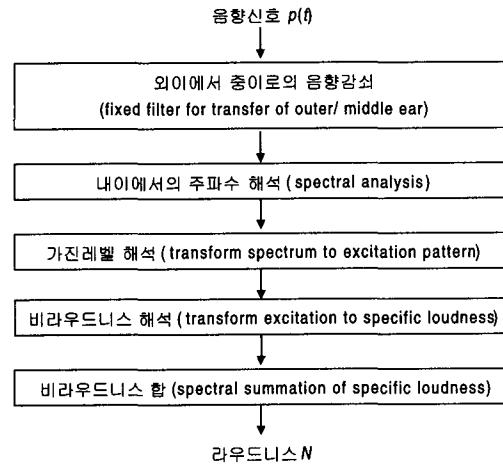


그림 1 라우드니스 계산 모델의 개요

(1) 외이에 도달한 음향 신호는 중이를 거치면서 음원의 위치, 음장의 종류 등이 반영되어 음향 감쇠가 이루어진다.

(2) 내이에 도착한 음향 신호는 청각 필터군에 의해 주파수 분할되며 이로부터 내이의 섬모세포를 자극하는 양, 즉 자극 레벨을 주파수 대역에 따라 구할 수 있다.

청각 필터의 해석 대역폭은 임계대역<sup>(8)</sup>으로 가정할 것인지 ERB(equal rectangular bandwidth)<sup>(9)</sup>로 가정할 것인지에 따라 다소 모델의 차이가 있을 수 있다. 최근의 연구에서는 Glasberg 등의 방법이 많이 이용되고 있지만 기존의 대부분 음질 측정 소프트웨어는 임계대역에 근거한 방법이 사용되고 있다. 그림 2는 임계 대역과 ERB를 주파수 대역에 대해 나타낸 것으로 ERB가 임계 대역에 비해 다소 작은 값을 갖는다.

(3) 순음의 스펙트럴 마스킹 곡선은 가로축을 주관적인 음정과 관계되는 임계대역율(critical band rate)로 세로축을 dB 단위로 나타내었을 때 단순한 모양으로 나타낼 수 있으며,<sup>(3)</sup> 자극 레벨 패턴이 스펙트럴 마스킹 곡선과 동일한 모양으로 자극 레벨 패턴의 극대값만 임계 대역내 총 음압

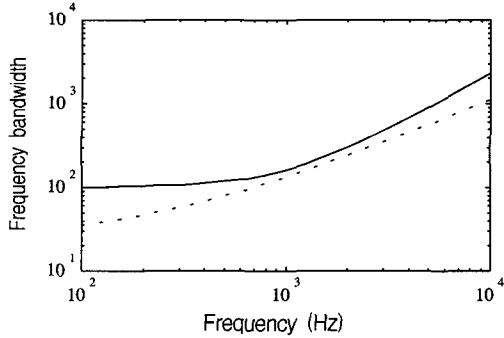


그림 2 청각 필터의 대역폭 비교  
——, 임계 대역; ---, ERB

레벨이 된다는 가정을 통해 주파수 영역에서의 자극 레벨 패턴을 구할 수 있다.

(4) 스펙트럴 마스킹을 이용하여 구해진 자극 레벨 패턴이 전체 라우드니스 값과 연관성을 갖기 위해서는 적절한 변환을 통해 자극 레벨을 라우드니스 인지량과 선형적인 관계가 되도록 스페시픽 라우드니스로 변환하는 과정이 필요하다. 즉, 스페시픽 라우드니스는 내이에 의해 인지되는 와우의 기저막(basilar membrane) 부위별 자극량을 지각 관점에서의 선형 스케일로 나타낸 것으로 이해할 수 있다. 이때, 스페시픽 라우드니스 해석 과정에는 인체 내부 소음과 가청 역치에 의한 영향이 함께 고려된다. 다음 식은 자극 레벨을 스페시픽 라우드니스로 변환시키는 식이다.

$$N' = N_0 \cdot 10^{0.1rL_{TQ}} \cdot [(1-s + s \cdot 10^{0.1(L_E - L_{TQ})})^r - 1] \quad (2)$$

여기서  $N'$ 은 주라우드니스,  $N_0$ 는 비례 상수,  $L_{TQ}$ 는 dB 단위의 절대 가청 역치,  $L_E$ 은 dB 단위의 음향 신호 자극 레벨,  $s$ 는 역치 인자(threshold factor),  $r$ 은 압축 인자(compression factor)이다.  $L_{TQ}$ 는 인체 내부 소음에 영향을 받으며 청신경이 손상되었을 경우에는  $L_{TQ}$  값이 증가하는 것으로 가정할 수 있다. 라우드니스 모

델을 구현하기 위해서는 식 (1)과 같은 이미 잘 알려진 임상 실험 결과들이 출력과 일치하도록 식 (2)의 상수들을 구해야 한다.

(5) 스페시픽 라우드니스를 임계 대역율로 나타내고 모든 대역에 대해 적분하면 총 라우드니스 값을 구할 수 있다. 이때  $z$ 는 임계 대역율을 의미한다.

$$N = \int N' dz \quad (3)$$

한편, 과도음의 경우에는 그림 1의 과정에 post-masking 영향이나 loudness integration 영향이 포함되어야 한다.<sup>(10, 11)</sup>

### 3. 샤프니스(Sharpness)

동일한 라우드니스 값을 제공하는 소음일지라도 고주파수 대역에 주요 소음 성분이 존재하는 소음은 그렇지 않은 소음에 비해 더욱 “sharp” 또는 “shrill” 한 느낌을 준다. 이와 같은 청감의 척도를 샤프니스( $S$ )라고 정의하며, 샤프니스는 라우드니스 스펙트럼  $N'$ 의 저주파-고주파 성분간의 분포에 의해 결정된다. 또한 샤프니스는 동일한 음압 레벨에서 주파수가 증가함에 따라 증가하는 경향이 있다. 샤프니스의 단위는 acum이며, 1 acum은 60 dB, 1 kHz의 순음의 샤프니스 지각량을 의미한다. 라우드니스의 단위 sone과 마찬가지로 acum은 샤프니스 지각량과 선형적인 관계를 갖는다.

샤프니스는  $N'$ 의 스펙트럼 밸런스(spectral balance) 개념으로 생각할 수 있으며 Bismarck는 다음과 같은 계산 모델을 제안하였다.<sup>(3)</sup>

$$S = C \cdot \frac{\int_0^{24 \text{ Bark}} N' \cdot g_S(z) \cdot z \cdot dz}{N} \quad (\text{acum}) \quad (4)$$

이때,  $S$ 는 샤프니스를 나타내며,  $z$ 는 임계 대역울,  $N'$ 는 스펙시픽 라우드니스,  $g_S(z)$ 는 임계 대역의 함수로 주어지는 샤프니스 가중치로써 임계 대역울이 16 Bark미만일 때는 1의 값을 가지며, 24 Bark일 때의 가중치  $g_S(z)$ 가 4가 될 때까지 다음식과 같이 지수적으로 증가하는 경향을 보인다.

$$g_S(z) = 0.066 \cdot e^{0.171 \cdot z / \text{Bark}} \quad (5)$$

Bismarck이 제안한 비례 상수,  $C$ 는 0.11이다.

한편, Aures는 기존의 모델이 임상 실험치와 다소 차이가 있음을 확인하고 기존 모델을 개선한 다음과 같은 샤프니스 모델을 제안하였다.<sup>(12)</sup>

$$S = C \cdot \frac{\int_0^{24 \text{ bark}} N' \cdot g'_S(z) \cdot dz}{\ln \left( \frac{N / \text{sones} + 20}{20} \right)} \quad (\text{acum}) \quad (6)$$

이때 가중치  $g'_S(z)$ 는 다음과 같다.

$$g'_S(z) = e^{0.171 \cdot z / \text{Bark}} \quad (7)$$

스펙시픽 라우드니스와 전체 라우드니스 값만 알고 있다면 식 (4) 또는 식 (6)을 통해 쉽게 계산 모델을 구현할 수 있다. 샤프니스 계산 모델은 라우드니스와는 달리 아직 표준 방법이 정해져 있지 않지만 기존의 많은 음질 측정 소프트웨어는 주로 Aures의 모델을 사용한다.

#### 4. 러프니스(Roughness)

20 Hz 이상으로 진폭 또는 주파수 변조되는 소음의 경우에는 음의 크기 변화를 느끼지 못하며, 전체적인 “거친 느낌”을 제공한다. 이와 같은 청감을 러프니스( $R$ )라고 정의하며, 단위는 asper를 사용한다. 1 asper은 1 kHz의 순음이 70 Hz의

변조 주파수로 100 %의 크기 변조될 때의 러프니스 지각량을 나타내는 것이며, asper는 라우드니스의 sone과 마찬가지로 지각량과 선형적으로 비례한다.

일반적으로 러프니스는 변조도가 증가함에 따라 그 값이 증가하며, 중심 주파수가 1 kHz 부근일 때 가장 큰 값을 제공한다.<sup>(13)</sup> 변조 주파수에 따른 러프니스 변화는 중심 주파수 대역에 따라 다르지만 중심 주파수가 1 kHz 이상인 경우에는 70 Hz의 변조 주파수에서 가장 큰 러프니스 값을 얻을 수 있다. 1 kHz 이하인 경우에는 중심 주파수가 감소함에 따라 러프니스가 가장 큰 변조 주파수가 감소하는 경향이 있다. 임상 실험에 의한 여러 가지 함성음에 대한 러프니스 측정 결과는 Kemp<sup>(14)</sup> 및 Fastl<sup>(3)</sup> 등에 의해 제시되었다.

러프니스 계산 모델은 Fastl과 Aures<sup>(13)</sup> 및 Daniel 등<sup>(15)</sup>에 의해서 제안되었다. Fastl의 모델은 Zwicker의 라우드니스 해석 모델에 근거한 것으로서 제한된 조건에서만 러프니스 해석이 가능하며 임상 실험치와도 많은 차이를 보이고 있다. Aures의 모델은 다양한 변조음의 러프니스 해석에 적용가능하며, 임상 실험과도 근접한 결과를 보여준다. 한편 Daniel 등의 모델은 Aures 모델에 근거한 것으로서 대부분의 알고리즘은 동일하고 신호 처리 측면을 보완하여 임상 실험 결과에 보다 근접한 결과를 제공한다. 최근에는 러프니스에 크게 기여하는 주파수 대역을 파악하기 위한 계산 방법<sup>(16)</sup> 등도 제시 되고 있다.

그림 3은 러프니스 계산 과정을 요약한 것으로서 크게 다음과 같은 4단계로 구성되어 있다. 즉 음향 신호의 자극 스펙트럼을 구하는 과정, 자극 스펙트럼으로부터 변조도를 구하는 과정, 이웃하는 임계 대역의 상관 인자를 구하는 과정 및 부분 러프니스,  $R'$ 과 전체 러프니스,  $R$ 을 구하는 과정이다. 각 단계의 세부 과정 다음과 같다.

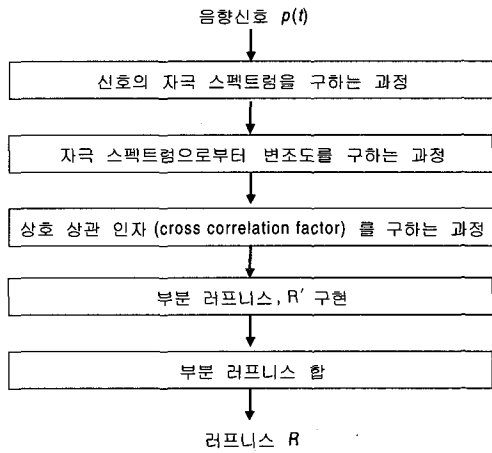


그림 3 구현된 R 모델의 개요

(1) 주어진 음향 신호를 약 100 ms 길이의 시간 블록으로 분할하여 이를 푸리에 해석하여 스펙트럼을 구하고 정해놓은 임계대역 구간별로 자극 스펙트럼을 구한다. 이때 음향 신호의 스펙트럼이 구해지면 라우드니스 계산 과정과 마찬가지로 음장의 종류에 따라 외이에서 중이로의 음향 감쇠를 고려한다. 자극 스펙트럼은 정해진 임계 대역에서 관측되는 청각 필터의 주파수 응답을 의미하는 것으로서, 청각 필터의 크기 응답을 주어진 임계 대역 내에서는 감쇠가 0 dB, 저주파 및 고주파 대역 쪽으로는 각각 기울기  $s_1$ ,  $s_2$ 로 감쇠 된다고 가정하여 구할 수 있다. 이때 각 기울기는 다음과 같다.

$$S_1 = \left[ -24 - \frac{0.23 \text{ kHz}}{f_j} + 0.2 \frac{L_{Ej}}{\text{dB}} \right] \text{dB/Bark} \quad (8a)$$

$$S_2 = 27 \text{ dB/Bark} \quad (8b)$$

여기서  $f_j$  및  $L_{Ej}$  는  $j$  번째 스펙트럼의 중심 주파수 및 음압 레벨을 나타낸다.

(2) 임계 대역별로 자극 스펙트럼이 구해지면 이로부터 각 대역별 변조도를 구해야 한다. 변조

도는 음향 신호의 엔빌롭으로부터 추출되기 때문에 자극 스펙트럼을 역푸리에 변환하는 Hilbert 변환<sup>(17)</sup>을 통해 각 임계 대역 별로 엔빌롭을 구한다. 또한 이를 다시 푸리에 변환하여 엔빌롭의 스펙트럼을 구한다. 이는 엔빌롭 스펙트럼이 구해지면 다음식에 의해 변조도,  $m$  을 예측할 수 있기 때문이다.

$$m = \sqrt{P_{AC} / P_{DC}} \quad (9)$$

여기서  $P_{DC}$  와  $P_{AC}$  는 각각 엔빌롭 스펙트럼의 DC 파워 및 AC 파워를 의미한다. 이때, 인간의 청각은 동일한 변조도라도 변조 주파수 및 임계 대역에 따라 느끼는 러프니스 크기가 다르며, 동일한 변조 주파수라 할지라도 해석하는 임계 대역에 따라 러프니스에 기여하는 변조도가 다르기 때문에 이에 대한 보정치를 엔빌롭 스펙트럼에 곱하여 이로부터 엔빌롭 스펙트럼의 AC 파워를 구한다.<sup>(13)</sup>

(3) 과정 (2)에 의한 변조도 계산 방법은 러프니스가 전혀 없는 백색 잡음의 경우에도 매우 큰 변조도가 출력되기 때문에 단순히 변조도만을 이용하여 러프니스를 추정할 수는 없다. 이때 이웃하는 임계 대역의 엔빌롭 신호 간에 유사도를 고려하면 대역별 유사도가 적은 백색잡음의 유무와 그 정도를 파악할 수 있기 때문에 러프니스 계산 모델에는 각 이웃하는 대역 간의 엔빌롭의 유사도를 구하는 과정이 포함된다. 유사도는 상호 상관 인자(cross correlation factor)를 이용한다.

(4) 유사도  $k$  와 각 대역별 러프니스 보정함수  $g_R(z)$ 를 이용하면  $i$  번째 임계 대역에서의 부분 러프니스  $R'_i$ 을 다음과 같이 구성할 수 있다.

$$R'_i = (m \cdot g_R(z_i))^2 \cdot (K_{i,i-1} \cdot k_{i,i+1})^2 \quad (10)$$

한편  $R$  은 다음과 같이  $R'$  의 합으로서 나타낼 수 있다.



$$R = C \sum_{i=0}^{24\text{Bark}} R'_i; \quad (\text{asper}) \quad (11)$$

러프니스 계산 모델은 임계 대역별로 많은 푸리에 해석 과정이 포함되어 라우드니스 계산보다는 계산량이 많이 필요하다. 또한 샤프니스와 마찬가지로 그 계산 모델이 표준화되어 있지 않고 있으며 기존의 음질 측정 프로그램들 사이에도 차이가 많이 있어 추후에는 이에 대한 표준화 작업이 요구된다.

### 5. 변동 강도(Fluctuation Strength)

20 Hz 미만으로 진폭 또는 주파수 변조되는 소음은 정상 상태의 소음에 비해 훨씬 짜증스러움을 느끼게 하며 심리 음향학에서는 이러한 청감을 "변동 강도"(F)라고 정의한다. 변동 강도의 단위는 vacil를 사용한다. 1 vacil은 1 kHz의 순음이 4 Hz의 변조 주파수로 100%의 크기 변조될 때의 변동 강도를 나타내는 것이며, vacil은 라우드니스의 sone과 마찬가지로 지각량과 선형적으로 비례한다.

일반적으로 변동 강도는 변조 강도와 마찬가지로 변조도가 증가함에 따라 그 값이 증가하며, 중심 주파수가 1 kHz 부근일 때 가장 큰 값을 제공한다.<sup>(3)</sup> 변조 주파수에 따른 변동 강도 변화는 중심 주파수 대역에 따라 다르지만 중심 주파수가 1 kHz 이상인 경우에는 4 Hz의 변조 주파수에서 가장 큰 변동 강도 값을 얻을 수 있다. 러프니스와는 달리 중심 주파수 대역에 관계 없이 4 Hz의 변조 주파수에서 가장 큰 변동 강도를 보인다.

Fastl<sup>(3)</sup>에 의해서 제안된 변동 강도 계산 모델은 변조 주파수를 알 수 있어야 하기 때문에 일반적인 상황에서의 변동강도 계산에는 적합하지 못하다. 각 음질 측정 소프트웨어는 변동 강도 구하는 프로그램이 구성되어 있지만 그 구현이 Fastl

의 방법에 많이 의존하고 있어서 추후 이에 대한 개선이 요구된다. 한편 변동강도는 기본적으로 변조도와 변조주파수 등 러프니스 계산에 필요한 요소들을 많이 포함하고 있어서 러프니스 계산 모델을 이용한 변동 강도 모델도 구상할 수 있다.

### 6. 맺음 말

청각계에 대한 연구는 상당히 오랫동안 연구되었지만 청각계에 대한 생리적인 현상들은 아직도 규명되지 못한 부분이 많이 있다. 심리 음향학은 단지 특정한 신호에 대한 소리에 대한 느낌, 즉 청감을 임상 실험을 통해 수치화하고 이에 대한 과정을 임상 실험 결과에 의존하여 이끌어 내기 때문에 보다 객관적인 음질 계산 모델을 구하기 위해서는 청각계에 대한 규명이 요구된다.

더구나 청감에 대한 많은 연구 결과가 이미 발표되었음에도 불구하고, 청감 모델링을 위한 주요 과정이나 많은 내용들이 생략되거나 비공개로 다루어진 부분이 많아서 기존의 청감 모델링을 그대로 재현하는 것조차 용이하지 않다. 특히 기존의 음질 측정 프로그램들은 각 제작사 별로 독립된 알고리즘을 적용하고 있기 때문에 객관적인 음질 측정에 어려움을 겪고 있다. 국내의 음질 관련 연구가 더욱 활성화되기 위해서는 각 음질 측정 프로그램들의 측정 결과 비교 작업과 아울러 각 방법의 표준화가 시급히 이루어져야 할 것이다.

### 참고 문헌

(1) Anon., "American National Standard : Bioacoustical Terminology," ANSI S3.20-1995, 1995.  
 (2) Beranek, L. L., Noise and Vibration Control, Institute of Noise Control Engineering, Chapter 4, 1971.

- (3) Zwicker, E. and Fastl, H. Psychoacoustics, Facts and Models, Springer-verlag, Berlin, 1990.
- (4) Anon., "Acoustics-normal Equal-loudness Contours," International Organization for Standardization, ISO 226, 1987.
- (5) Stevens, S. S., "Perceived Level of Noise by Mark VII and Decibels," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 51, No. 2, pp. 575~601, 1971.
- (6) Anon., "Acoustics-method for Calculating Loudness Level", International Organization for Standardization, ISO 532, 1975.
- (7) Kryter, K. D., The Effects of Noise on Man, Academic Press, 1970.
- (8) Zwicker, E., "Subdivision of the Audible Frequency Range into Critical Bands," J. Acoust. Soc. Am. Vol. 33, p. 248, 1961.
- (9) Glasberg, B. R. and Moore, B. C. J. "Derivation of Auditory Filter Shapes from Notched-noise Data," Hearing Res., Vol. 47, pp. 103~138, 1990.
- (10) Zwicker, E., "Procedure for Calculating Loudness of Temporally Variable Sounds," J. Acoust. Soc. Am., 62, 675-682, 1977.
- (11) 정혁, 이정권, "입계 대역 필터를 이용한 과도음의 라우드니스 모델 및 측정," 한국음향학회지, 제 19 권 제 5 호 pp. 65~70, 2000.
- (12) Aures, W., "The Sensory Euphony as a Function of Auditory Sensations," Acustica, Vol. 58, pp. 282~290, 1985.
- (13) Aures, W., "A Procedure for Calculating Auditory Roughness," Acustica, Vol. 58, pp. 268~281, 1985.
- (14) Kemp, S., "Roughness of Frequency-modulated Tones," Acustica, Vol. 50, pp. 126~133, 1982.
- (15) Daniel, P. and Weber, R., "Psychoacoustic Roughness : Implementation of an Optimized Model," Acustica, Vol. 83, pp. 113~123, 1997.
- (16) 정혁, 김현빈, 이정권, "러프니스 계산 알고리즘의 구현 및 이를 이용한 러프니스 기여성분 탐색방법의 제안", 한국음향학회지, 제 20 권, 제 7 호, pp. 3~12, 2001.
- (17) Bendat, J. S., A. G. Piersol, Random Data: Analysis and Measurement Procedures, John Wiley & Sons, 1991.