

러프니스 계산 알고리즘의 구현 및 이를 이용한 러프니스 기여성분 탐색방법의 제안

Calculation Model of Roughness for Searching Roughness-contributed Components

정 혁*, 김 현 빈*, 이 정 권**
(Hyuk Jeong*, Hyun-Bin Kim*, Jeong-Guon Ih**)

* 한국전자통신연구원 컴퓨터·소프트웨어기술연구소 가상현실연구개발센터

** 한국과학기술원 기계공학과 소음 및 진동제어 연구센터

(접수일자: 2001년 8월 2일; 채택일자: 2001년 9월 3일)

본 연구에서는 소리에 대한 주관적 평가 인자 중 하나인 러프니스 계산 모델을 구현하였다. 구현된 러프니스 모델은 기존 모델의 고찰을 통해 계산 모델을 구체화하였으며, 주파수 영역으로부터 상호 상관 인자를 구하는 방법 등을 이용하여 계산 효율 및 정확도를 향상시켰다. 또한 기존의 주관적인 러프니스 평가치와의 비교를 통해 구현된 모델의 유용성을 확인하였다. 한편 기존 모델 및 구현된 러프니스 계산 모델을 통해 얻을 수 있는 러프니스 스펙트럼이 주파수 영역에서의 슬롭 가진 (slope excitation)의 영향으로 인해 실제 변조되는 주파수 대역을 탐색하기 어려운 점을 발견하고, 구현된 모델의 상관 인자 계산 부분을 실제 변조가 발생하는 임계 대역에서만 러프니스 스펙트럼 값이 존재하도록 수정하여, 러프니스 기여성분의 탐색이 보다 용이해진 방법을 제안하였다.

핵심용어: 음질평가, 러프니스, 심리음향, 러프니스 스펙트럼

투고분야: 음악음향 및 음향심리 분야 (8.3), 소음 및 공력음향 분야 (10.2)

It is known that the roughness is one of the most important metrics in assessing the sound quality. In this study, a new roughness model is suggested by combing the previous auditory filter model and several signal processing methods for the enhancement of calculation efficiency and accuracy. For testing the usefulness of the present model, the predicted responses are compared with the experimental data and it is observed that they are in good agreements. Also, it is found that the previous models have limitations to search frequency components mainly contributed to overall roughness. By modifying the correlation criteria of the present model, the revised model for the proper estimation of roughness-contributed components is embedded.

Keywords: Sound quality analysis, Roughness, Psychoacoustics, Roughness spectrum

ASK subject classification: Musical acoustics and psychoacoustics (8,3), Noise and aeroacoustics (10,2)

I. 서론

Zwicker[1]를 비롯한 많은 심리 음향 학자들의 연구를 통

책임저자: 정 혁 (jay@etri.re.kr)
305-350 대전시 유성구 가정동
한국전자통신연구원 가상현실연구개발센터
(전화: 042-860-5461; 팩스: 042-860-5010)

해서 음질에 큰 영향을 미치는 청감 인자, 즉 라우드니스 (loudness), 러프니스 (roughness), 샤프니스 (sharpness), 변동강도 (fluctuation strength) 등이 정의되었으며, 각 청감 인자의 모델링이 지금까지 이루어지고 있다.

이들 청감 인자 중 러프니스는 주관적으로 느끼는 음의 거칠기에 대한 크기를 나타내는 것으로서, Aures에

의해서 실용적인 러프니스 모델링이 가능해졌다[2]. 최근에는 Aures 모델의 계산 효율을 증가시킨 모델[3]과 Aures의 모델로부터 모델의 정확도를 향상시킨 방법[4] 및 Zwicker의 라우드니스에 근거한 러프니스 계산 모델 등도 제시되고 있다[5].

그러나 기존의 방법들에는 각 단계별 상수 값이나 역치 값들을 구체적으로 제시하지 않고 있으며 각 방법들의 장점이 아직 포함되어 있지 않다. 따라서 본 연구에서는 기존 방법들의 고찰하고 각각의 장점을 포함한 알고리즘을 개발하였다.

II. Roughness 계산 모델의 구현

20 Hz 이상으로 진폭 또는 주파수 변조되는 소음의 경우에는 음의 크기 변화를 느끼지 못하며, 이러한 변조음에 노출될 경우 인간은 “거친 느낌”을 받는 것으로 알려져

있다. 이와 같은 청감을 러프니스 (roughness: R)라고 정의하며, 단위는 asper를 사용한다. 본 연구에서는 Aures의 모델[2]을 근거로 하고 Daniel 등의 개선 방법을 수용하여 그림 1과 같은 러프니스 계산 모델을 구성하였다.

그림 1의 러프니스 계산 모델은 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 과정으로 이루어져 있다. 각 단계의 세부 과정은 다음과 같다.

2.1. 음향 신호의 자극 스펙트럼을 구하는 과정

주어진 음향 신호를 약 100 ms 길이의 시간 블록으로 분할한다. 분할된 음향 신호에는 에지 효과를 최소화하기 위해 윈도우 함수가 곱해진다. 이때 시간 블록은 SIFT (short time Fourier transform)의 해석의 경우에서와 같이 주어진 윈도우에 따라 적절한 중첩비를 적용하여 분할된다.

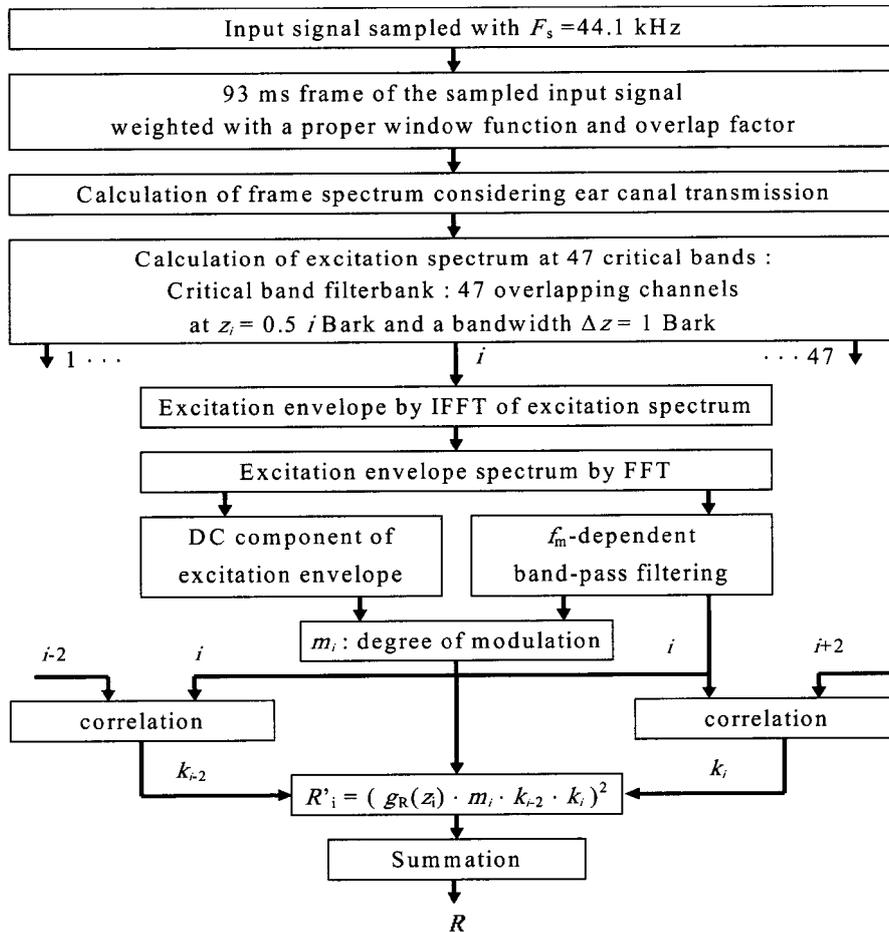


그림 1. 구현된 러프니스 모델의 개요
Fig. 1. Schematic diagram of the present roughness model.

Aures의 모델에서는 윈도우 함수나 중첩비에 대한 언급은 되어 있지 않으며, Daniel 모델에서는 Blackman 윈도우를 이용하였다. Blackman 윈도우는 Hanning, Hamming에 비해 사이드 로브 서프레션 (side-lobe suppression)이 상대적으로 크며, 이때 사이드 로브 서프레션은 메인 로브의 -60 dB 정도 크기이다. 본 연구에서도 Blackman 윈도우를 이용하였다.

A/D 변환된 음향 신호를 4096씩 FFT하여 스펙트럼을 구하였다. 본 연구에서의 샘플링 주파수는 44.1 kHz이므로 4096점 FFT의 경우에 각 블록의 길이는 93 ms이고 이때 스펙트럼의 주파수 해상도가 10.8 Hz이다. Aures의 방법에서는 주파수 해상도가 10 Hz, Daniel 등의 방법에서는 주파수 해상도가 5 Hz이다. 주파수 해상도는 FFT 블록의 시간 길이에 관계되며, 블록의 길이를 어느 정도로 결정해야 하는지에 대한 연구 결과는 아직 제시되지 않았기 때문에 본 연구에서의 블록의 길이는 일단 93 ms로 정하였다. 차후의 블록 길이에 대한 연구 결과가 쉽게 반영되도록 FFT 데이터 개수에 대한 사항의 변경이 용이하도록 하였다.

음향 신호의 스펙트럼이 구해지면 음장의 종류에 따라 외이에서 중이로의 음향 감쇠를 고려한다. 주어진 스펙트럼에 음장에 따른 감쇠 함수를 곱하여 음향 감쇠를 반영할 수 있다. 음향 감쇠가 고려된 스펙트럼으로부터 청각 필터를 이용하여 각 임계 대역에서의 자극 스펙트럼을 구할 수 있다. Aures 방법 및 Daniel과 Weber 방법에서 이용된 청각 필터는 주어진 임계 대역내에서의 감쇠가 0 dB이고 고주파 및 저주파 대역 쪽으로는 각각 기울기 s_1 , s_2 로 감쇠된다. 이때 각 기울기는 다음과 같다[2].

$$s_1 = -27 \text{ dB/Bark} \quad (1-a)$$

$$s_2 = \left[-24 - \frac{0.23 \text{ kHz}}{f_j} + 0.2 \frac{L_{Ej}}{\text{dB}} \right] \text{ dB/Bark} \quad (1-b)$$

여기서 f_j 및 L_{Ej} 는 j 번째 스펙트럼의 중심 주파수 및 음압 레벨을 나타낸다. 식 (1)에서 주어진 기울기로부터 각 임계 대역에서의 필터 형상을 구성할 수 있으며, 청각 필터의 크기 응답 함수를 이용하여 j 번째 임계 대역에서의 자극 스펙트럼 S_E 를 음향 스펙트럼 S 로부터 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} z(k) < z_1(j), & S_E^j(k) = S(k) \cdot 10^{0.06 \cdot s_2 \cdot (z_1(j) - z(k))} \\ z_1(j) \leq z(k) \leq z_2(j), & S_E^j(k) = S(k) \\ z(k) > z_2(j), & S_E^j(k) = S(k) \cdot 10^{0.06 \cdot s_1 \cdot (z(k) - z_2(j))} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 $z(k)$, $S(k)$, $S_E^j(k)$ 는 각각 k 번째 음향 스펙트럼의 임계 대역율, 음향 스펙트럼 및 자극 스펙트럼을 의미한다. 또한 $z_1(j)$ 및 $z_2(j)$ 는 각각 j 번째 임계 대역의 저주파 및 고주파 경계에서의 임계 대역율을 의미한다. Aures의 방법에서는 임계 대역을 겹침 없이 24개로 구성하였으며, Daniel 등의 방법에서는 0.5 Bark 씩 임계 대역이 겹치도록 47개의 임계 대역을 구성하였다. 겹침 없이 임계 대역이 배열된 경우, 변조음의 중심 주파수가 임계 대역의 경계에 위치하면 변조도를 정확하게 구하기 어렵고, 변조되는 대역의 파악이 어렵다. 따라서 본 연구에서는 Daniel 등의 방법[4]과 같이 0.5 Bark 씩 겹쳐진 47개의 임계 대역을 구성하였다.

2.2. 두번째 단계: 자극 스펙트럼으로부터 변조도를 구하는 과정

본 연구에서 구현된 러프니스 모델의 두번째 단계는 j 번째 임계 대역의 자극 스펙트럼으로부터 변조도를 구하는 것이다. 임상 실험 결과에 의하면 러프니스, R 은 다음 식과 같이 변조도 m 의 p 제곱에 비례하며 이때 p 값은 대략 1.5에서 2정도의 값임이 확인되었다[2].

$$R \propto m^p \quad (3)$$

변조도는 음향 신호의 엔빌롭으로부터 추출되기 때문에 j 번째 임계 대역의 자극 스펙트럼으로부터 엔빌롭을 구해야 한다. 시간 영역의 j 번째 임계 대역 자극을 구하기 위해 자극 스펙트럼을 IFFT (Inverse-FFT)하는 Hilbert 변환[6]을 이용한다. Hilbert 변환의 정의에 따르면 스펙트럼을 IFFT하여 얻은 수치의 절대값이 음향 신호의 엔빌롭이기 때문에, j 번째 자극 스펙트럼을 IFFT하여 얻은 신호의 절대값은 j 번째 임계 대역 자극의 엔빌롭이 된다.

Aures는 자극의 엔빌롭으로부터 변조도를 구하는 알고리즘을 제안하였다. 우선 자극의 엔빌롭으로부터 FFT에 의해 엔빌롭 스펙트럼을 구한다. 엔빌롭 스펙트럼이 구해지면 다음 식에 의해 변조도, m 을 예측할 수 있다.

$$m = \sqrt{P_{AC} / P_{DC}} \quad (4)$$

여기서 P_{DC} 와 P_{AC} 는 각각 엔빌롭 스펙트럼의 DC 파워 및 AC 파워를 의미한다.

한편 동일한 변조도라도 변조 주파수 및 임계 대역에 따라 느끼는 러프니스 값이 다르며, 동일한 변조 주파수라 할지라도 해석하는 임계 대역에 따라 러프니스에 기여하는 변조도가 다르기 때문에 이에 대한 보정이 필요하다. Daniel[4] 등은 Aures 모델로부터 그림 2와 같은 임계 대역 및 변조 주파수에 따른 보정 함수, $H_j(f_m)$ 를 구하였다. 여기서 j 및 f_m 은 각각 임계 대역 인덱스 및 변조 주파수를 나타낸다. 그림 2에 나타나지 않은 j 번째 대역의 $H_j(f_m)$ 은 다음과 같다:

- $j=1, 2, K, 4$ 인 경우, $H_1=H_2=H_3=H_4$
- $j=6, 8, K, 16$ 인 경우, $H_{j-1}=H_j$ 이고 H_j 는 H_4 와 H_{16} 을 선형 보간 한다.
- $j=17, 18, K, 20$ 인 경우, $H_j=H_{16}$
- $j=22, 24, K, 42$ 인 경우, $H_{j-1}=H_j$ 이고 H_j 는 H_{20} 와 H_{42} 를 선형 보간 한다.
- $j=43, 44, K, 47$ 인 경우, $H_j=H_{42}$

임계 대역 및 변조 주파수에 따른 러프니스 모델의 보정 함수를 고려하면 식 (4)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$m = \sqrt{\frac{H_j(f_m) \cdot P_{AC}}{P_{DC}}} \quad (5)$$

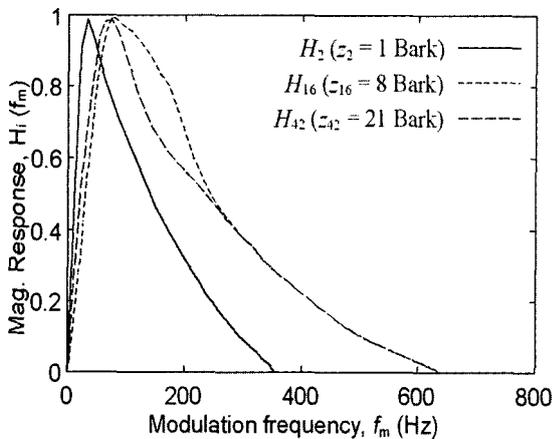


그림 2. 변조 주파수의 함수로서 주어지는 대역 통과 필터의 크기 응답
 Fig. 2. The magnitude response of modulation frequency dependent band-pass filter for calculating the roughness.

2.3. 세번째 단계: 상호 상관 인자 (cross correlation factor)를 구하는 과정

백색 잡음과 같이 각 임계 대역별 자극이 독립적으로 존재하는 경우에는 R 이 0에 가깝다. 그러나 식 (5)에 의하면 백색 잡음의 경우에도 매우 큰 변조도가 출력되며, Aures는 다음의 상호 상관 인자를 도입하여 이와 같은 문제점을 개선하였다.

$$k_{i,j} = \frac{\sum x_i x_j - \frac{1}{n} \cdot (\sum x_i)(\sum x_j)}{\sqrt{\left[\sum x_i^2 - \frac{1}{n} \cdot (\sum x_i)^2\right] \cdot \left[\sum x_j^2 - \frac{1}{n} \cdot (\sum x_j)^2\right]}} \quad (6)$$

여기서 $k_{i,j}$ 은 i 번째와 j 번째 임계 대역의 엔빌롭 신호간의 상관 인자이고, x_i, x_j 는 각각 변조 주파수에 대한 가중치가 고려된 i 번째, j 번째 임계 대역의 엔빌롭 신호이다. 변조 주파수에 대한 가중치가 고려된 시간 영역 신호 x_i 는 엔빌롭 스펙트럼에 변조 주파수에 따른 가중 함수를 곱하고 다시 IFFT하여 계산할 수 있다. Parseval 이론을 이용하면 시간 영역에서의 상관 인자 계산 대신 다음과 같은 주파수 영역에서의 상관 관계를 구할 수 있으므로 IFFT에 의한 x_i 계산 작업이 생략될 수 있다.

$$k_{i,j} = \frac{2 \sum_{n=0}^{M-1} \text{Re}\{X_i(n) \cdot X_j^*(n)\} + X_i(0) \cdot X_j(0) + X_i\left(\frac{M}{2}\right) \cdot X_j\left(\frac{M}{2}\right)}{\sqrt{\left[2 \sum_{n=0}^{M-1} |X_i(n)|^2 + |X_i(n)|^2 + |X_i(n)|^2\right] \cdot \left[2 \sum_{n=0}^{M-1} |X_j(n)|^2 + |X_j(n)|^2 + |X_j(n)|^2\right]}} \quad (7)$$

이때 X_i, X_j 는 각각 x_i, x_j 를 FFT한 값이다. 또한 M 은 640 Hz미만의 엔빌롭 스펙트럼의 개수이다. 640 Hz는 러프니스 계산 모델에서 고려하는 최대 변조 주파수이다. 식 (7)에서 주어진 엔빌롭 스펙트럼 자체가 작은 경우에는 분모항이 작음에 따라 상관 인자의 수치 예러가 발생할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 각 대역에서의 음압 레벨이 절대 가청 역치 미만인 경우에는 상관 인자를 0으로 고정하였다.

2.4. 네번째 단계: 부분 러프니스, R' 과 전체 러프니스, R 의 계산

임계 대역에 따른 러프니스 차이를 고려하기 위해 가중치 $g_R(z)$ 를 도입하였고 본 연구에서 가정한 값은 그림 3과 같다.

엔빌롭 스펙트럼으로부터 구한 각 대역의 변조도, 대

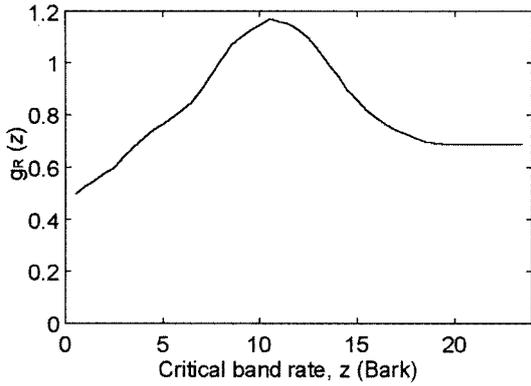


그림 3. 진폭 변조음의 중심 주파수에 관련된 가중 함수, $g_R(z)$
Fig. 3. Weight function for describing frequency dependency of roughness.

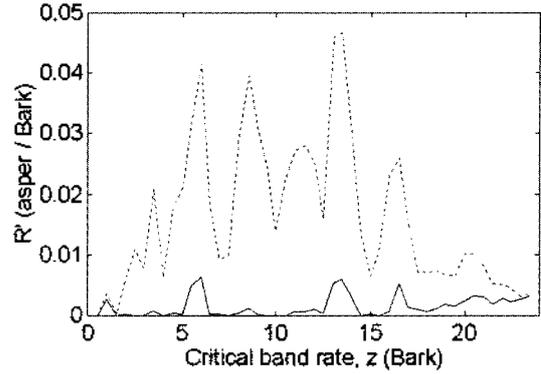


그림 4. 백색 잡음의 R' 해석 예: , Aures의 식 (8)을 이용한 경우; _____ , Daniel 등의 식 (9)를 이용한 경우
Fig. 4. The example of roughness spectrum analysis for white noise: , in case of using Eq. (8); _____ , in case of using Eq. (9).

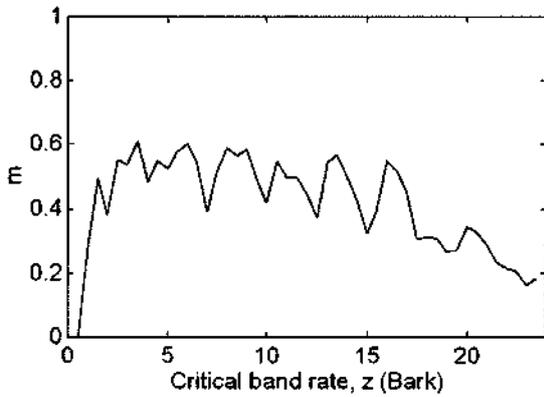


그림 5. 백색 잡음의 변조도 스펙트럼, m'
Fig. 5. Example of modulation spectrum of white noise.

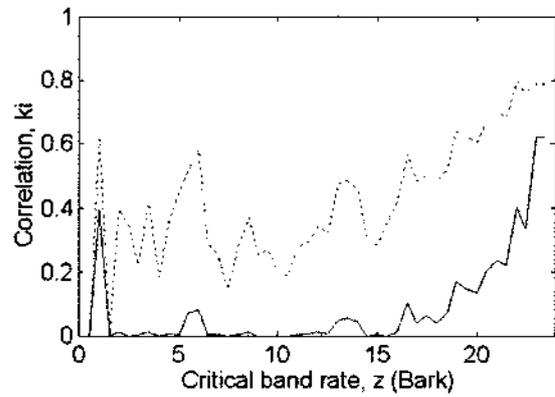


그림 6. 백색 잡음의 상관 인자 평균치 비교: , Aures의 식 (8)을 이용했을 때; _____ , Daniel 등의 식 (9)를 이용했을 때
Fig. 6. Correlation spectrum of white noise: , in case of using Eq. (8); _____ , in case of Eq. (9).

역간의 상관 함수로부터 R' 을 구성할 수 있다. Aures는 R' 을 구성하기 위해 다음 식과 같이 가정하였다.

$$R_j = (\hat{m} \cdot g_R(z_i))^2 \cdot \frac{k_{i,i-1} + k_{i,i+1}}{2} \quad (8)$$

그러나 Daniel[4] 등에 따르면 Aures의 방법은 주관적인 러프니스가 거의 0인 백색 잡음에서도 상당히 큰 R 값을 출력하는 문제점이 있다. Daniel 등은 식 (8)을 개선한 다음 식을 제안하였으며, 이를 이용할 경우에는 백색 잡음의 R 값이 이상치에 근접함을 확인하였다.

$$R_i = (\hat{m} \cdot g_R(z_i))^2 \cdot (k_{i,i-1} \cdot k_{i,i+1})^2 \quad (9)$$

식 (8)의 Aures 방법과 식(9)의 Daniel 방법에 의한 결과를 비교하기 위하여 $R=0$ 인 백색 잡음의 러프니스를 해석하였다. 각 방법에 의한 R' 결과는 그림 4와 같으며,

Aures의 방법 및 Daniel 방법에 의한 R 값은 각각 0.38 asper 및 0.04 asper이다. 청각계의 러프니스를 인지하는 한계를 고려하더라도 Aures에 의한 결과는 백색 잡음의 러프니스 해석에 있어서 많은 문제점을 내포하고 있다.

그림 5는 예제로 해석된 백색 잡음의 변조도 스펙트럼, m' 이며 각 대역의 m' 값은 크지만 각 대역간의 상관성이 거의 없기 때문에 러프니스로 기여하는 양은 거의 없다. 그림 6에서 상관 인자 $k_{i,j}$ 로부터 상관 인자의 평균치를 구하는 방법, 즉 $(k_{i,i-1} + k_{i,i+1})/2$ 및 $(k_{i,i-1} \cdot k_{i,i+1})^2$ 를 비교하면 그림 4의 R' 차이가 상관 인자의 평균치를 구하는 방법의 차이로 인한 것임을 확인할 수 있다. 본 연구에서는 Daniel이 제안한 식 (9)를 이용하였다. 한편 R 은 다음과 같이 R' 의 합으로서 나타낼 수 있다.

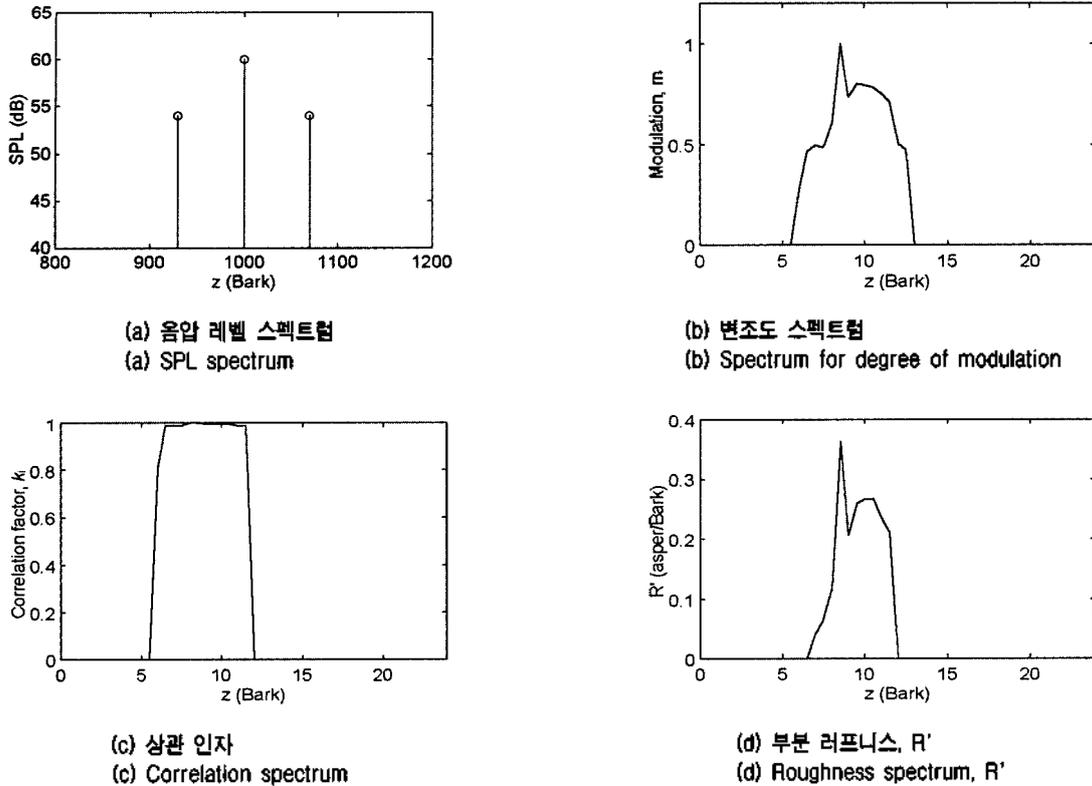


그림 7. $L=60\text{dB}$, $f_m=70\text{Hz}$, $m=1$ 인 1kHz 순음의 R 해석 예
Fig. 7. Example of roughness analysis for 1kHz pure tone with $L=60\text{ dB}$, $f_m=70\text{Hz}$ and $m=1$.

$$R = C \sum_{j=0}^{24\text{Bark}} R'_j(z) \quad (\text{asper}) \quad (10)$$

여기서 상수 C 는 중심 주파수가 1 kHz, 변조도가 1, 변조 주파수가 70 Hz, 음압 레벨이 60 dB인 크기 변조음의 러프니스가 1 asper임을 이용하여 구할 수 있으며, 본 연구에서의 C 값은 0.3239이다.

러프니스 해석에 필요한 각 단계별 결과는 구성된 모델을 이해하는데 도움이 되기 때문에 중심 주파수가 1 kHz, 변조도가 1, 변조 주파수가 70 Hz, 음압 레벨이 60 dB인 크기 변조음의 각 단계별 결과를 확인하였다. 그림 7(a)는 주어진 신호의 음압 레벨 스펙트럼을 나타낸다. 크기 변조음이기 때문에 중심 주파수 순음 성분 외에도 중심 주파수를 기준으로 변조 주파수만큼 떨어진 주파수에 순음이 존재한다. 그림 7(b)는 청각에 의해 느껴지는 변조도를 구한 것이다. 1 kHz가 중심 주파수인 9번째 임계 대역에서의 변조율은 1이며 이는 주어진 변조도와 동일하다. 그러나 이외의 대역에서도 신호에는 포함되지 않았던 변조도가 나타나는데 이는 청각 필터에 의한 슬림 가진의 영향 때문이다. 그림 7(c)는 이웃하는 대역간의 엔빌롭 신호에 대한 상관 인자를 계산한 결과이다. 물리적으로 신호가 주어진 임계 대역을 어느 정도 벗어난 경우에는 슬림

가진 크기가 가청 역치 이하이기 때문에 상관 인자가 0이 된다. 그림 7(b) 및 (c)의 결과로부터 식 (9)에 의해 그림 7(d)의 R' 을 구할 수 있다. N' 과 마찬가지로 R' 을 임계 대역에 대해 적분하면 R 값을 구할 수 있다.

그림 8은 변조도 m 에 따른 1 kHz 크기 변조음의 R이다. 임상 실험 결과의 근사식과 비교할 때 구현된 방법에 의한 결과는 근사식보다 전체 m 에 대해 다소 낮은 값

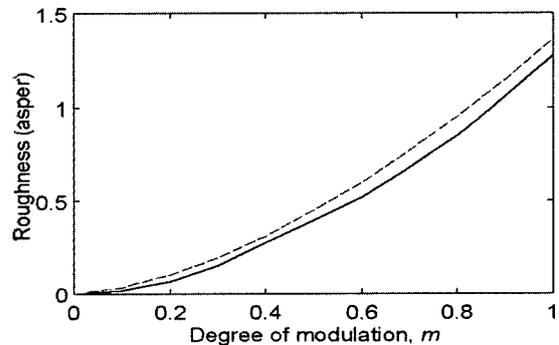


그림 8. 변조도, m 에 따른 1kHz 진폭 변조율의 R 변화 ($f_m=70\text{Hz}$, $L=70\text{dB}$): —, 계산 결과; - - -, 임상 실험의 근사식
Fig. 8. Roughness as a function of degree of modulation, m for a 1kHz AM tone ($f_m=70\text{Hz}$, $L=70\text{dB}$): —, calculated; - - -, experimental.

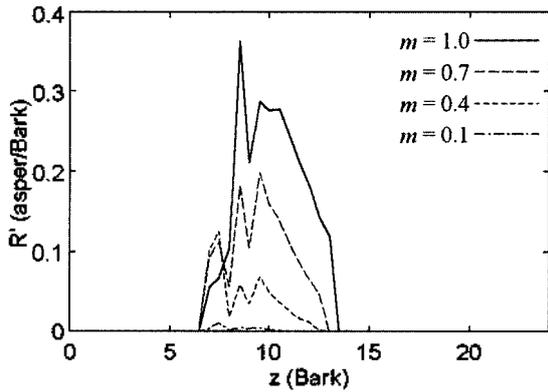


그림 9. 변조도, m에 따른 1kHz 진폭 변조음의 R' 변화 ($f_m=70\text{Hz}$, $L=70\text{dB}$)
 Fig. 9. Roughness spectrum roughness as a function of degree of modulation, m for a 1kHz AM tone: ($f_m=70\text{Hz}$, $L=70\text{dB}$).

을 출력하고 있으나 이때의 오차는 러프니스의 JND (just-noticeable difference)인 $\Delta R/R=17\%$ 이내이다. 또한 변조도 증가에 따른 러프니스 증가를 관찰하기 위해서 몇 개의 m 값에 대해 R' 을 그림 9와 같이 나타내었다. $m=1$ 인 경우에는 물리적으로 신호가 존재하는 1 kHz 대역에서 R' 이 가장 크게 나타나지만 그 외의 m 값에 대해서는 1kHz 대역 이외의 대역에서 최대 R' 이 나타난다. 실제 신호가 존재하는 1kHz 이외의 대역에서도 상대적으로 큰 R' 값을 관찰할 수 있다.

그림 10은 음압 레벨에 따른 러프니스 변화를 관찰한 것으로서 음압 레벨이 증가함에 따라 R 값도 증가한다. 그림 11은 음압 레벨에 따른 R' 을 관찰한 것으로서 1kHz 대역에서의 R' 값은 모든 경우에 동일하다. 그러나 1kHz

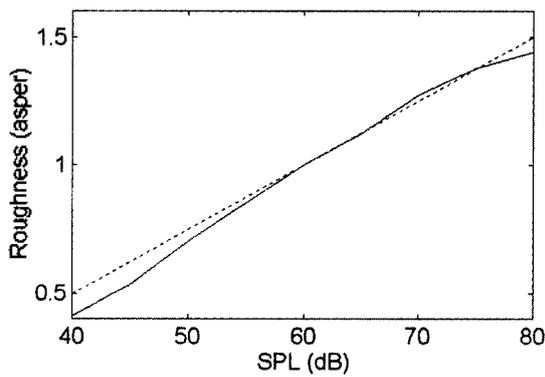


그림 10. 음압 레벨에 따른 1kHz 진폭 변조음의 R 변화 ($f_m=70\text{Hz}$, $m=1$): —, 계산 결과; ·····, 임상 실험 결과[4]
 Fig. 10. Roughness as a function of SPL for a 1kHz AM tone ($f_m=70\text{Hz}$, $m=1$): —, calculated; ·····, experimental[4].

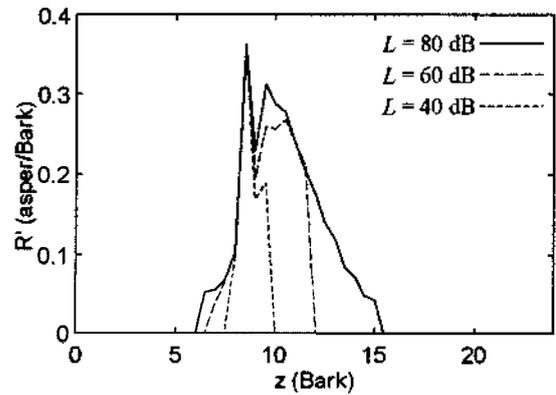


그림 11. 음압 레벨에 따른 1kHz 진폭 변조음의 R' 변화 ($f_m=70\text{Hz}$, $m=1$)
 Fig. 11. Roughness spectrum as a function of SPL for a 1kHz AM tone ($f_m=70\text{Hz}$, $m=1$).

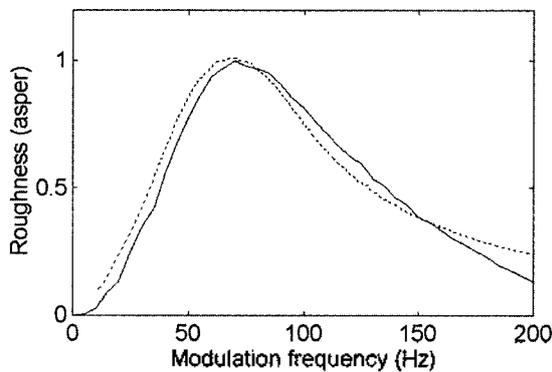


그림 12. 변조 주파수에 따른 1 kHz 진폭 변조음의 R' 변화 ($L=60\text{dB}$, $m=1$): —, 계산 결과; ·····, 임상 실험 결과[1]
 Fig. 12. Roughness as a function of modulation frequency, f_m for a 1kHz AM tone ($L=60\text{dB}$, $m=1$): —, calculated; ·····, experimental [1].

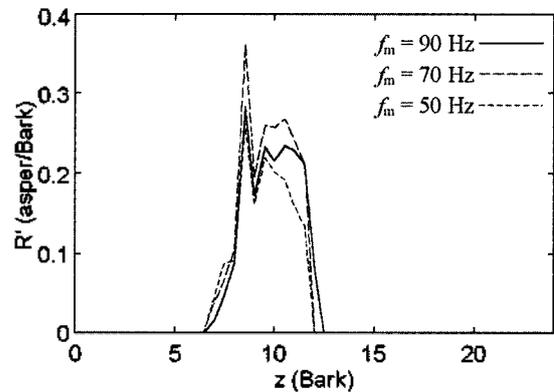


그림 13. 변조 주파수에 따른 1kHz 진폭 변조음의 R' 변화 ($L=60\text{dB}$, $m=1$)
 Fig. 13. Roughness spectrum as a function of modulation frequency, f_m for a 1kHz AM tone ($L=60\text{dB}$, $m=1$).

주변 대역에서 슬롭 가진의 영향이 절대 가청 역치 이하인 경우에는 R' 이 0으로 고려되기 때문에 음압 레벨에 따라 고주파 대역 쪽으로의 R' 이 차이난다.

러프니스는 또한 변조 주파수의 함수이고 이에 대한 모델의 계산 결과를 검증하기 위해서 그림 12와 같이 변조 주파수에 따른 1 kHz 진폭 변조음의 러프니스를 관찰하였다. 1 kHz 이상의 순음이 크기 변조될 때 70 Hz 정도에서 가장 큰 R' 값이 나타난다. 변조 주파수가 0인 경우는 변조가 전혀 없는 것을 의미하며 이때의 값은 0으로 출력되었다. 그림 13의 변조 주파수에 따른 R' 변화를 관찰하면 1 kHz 대역에서 $f_m=70$ Hz일 때의 R' 이 가장 큰 것을 확인할 수 있다. 이는 엔빌롭 스펙트럼에서 변조 주파수에 따른 대역 통과 필터, $H(f_m)$ 에 의한 것이다.

라우드니스와 마찬가지로 러프니스도 중심 주파수에

따라 그 크기가 달라진다. 중심 주파수에 따라 러프니스 값이 다른 이유로는 외이에서 중이로의 음향 감쇠, 절대 가청 역치 등의 차이에 의한 것이다. 그림 14는 구현된 모델로부터 70 Hz로 100% 크기 변조하는 60 dB 순음의 R' 변화를 나타낸 것으로서 1-2 kHz 부근에서 가장 큰 R' 값이 나타나며, 이는 라우드니스의 경우와 비슷하다. 그림 15는 그림 14의 몇가지 중심 주파수에 대해 R' 을 나타낸 것으로 R' 의 최대값은 1 kHz가 중심 주파수인 경우이며 중심 주파수에 따른 R' 의 최대값의 경향이 R' 의 경향과 일치하였다.

앞서 구현된 러프니스 모델은 임상 실험 결과와 상당히 일치하는 결과를 보여주고 있다. 그러나 구현된 러프니스 모델을 이용하여 최대 R' 의 임계 대역을 러프니스 제어를 위한 대역으로 선택하게 되면 오류를 범할 수 있

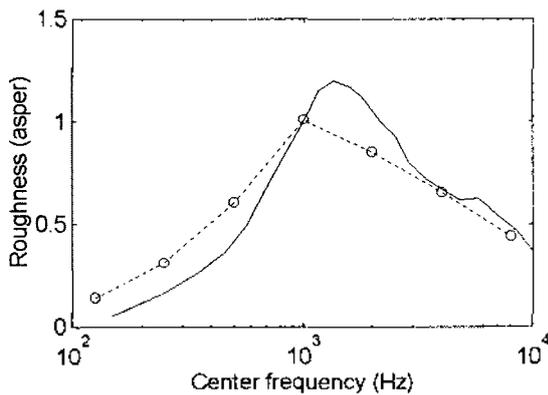


그림 14. 중심 주파수에 따른 진폭 변조음의 R' 변화 ($f_m=70$ Hz, $L=60$ dB, $m=1$): —, 계산 결과; --○--, 임상 실험 결과 [4]

Fig. 14. Roughness as a function of center frequency for several AM tones ($f_m=70$ Hz, $L=60$ dB, $m=1$): —, calculated; --○--, experimental [4].

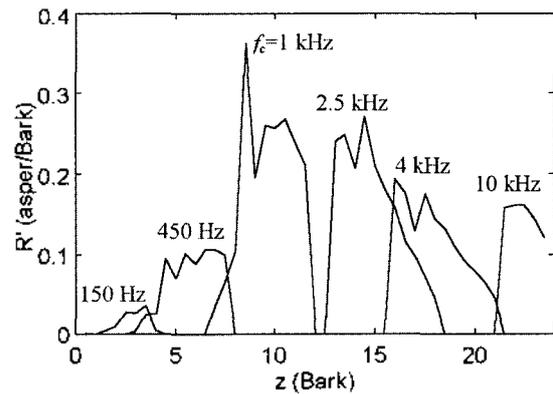
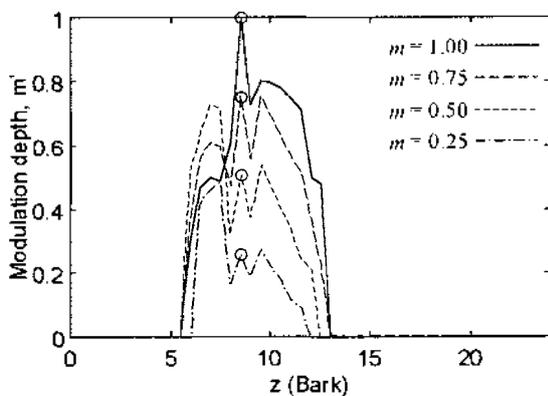
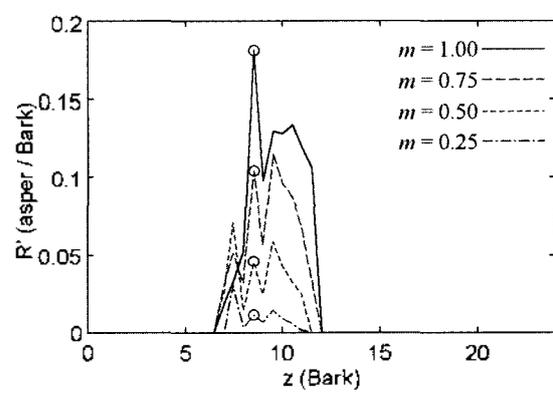


그림 15. 중심 주파수에 따른 진폭 변조음의 R' 변화 ($f_m=70$ Hz, $L=60$ dB, $m=1$)

Fig. 15. Roughness spectrum roughness as a function of center frequency for several AM tones ($f_m=70$ Hz, $L=60$ dB, $m=1$).



(a) 변조도 스펙트럼



(b) 러프니스 스펙트럼

그림 16. 소음원 탐색을 고려하지 않은 러프니스 모델의 해석 예 ($f_c=1$ kHz, $f_m=70$ Hz, $L=60$ dB)

Fig. 16. Example of roughness analysis before modifying the correlation criteria for searching roughness contributed components ($f_c=1$ kHz, $f_m=70$ Hz, $L=60$ dB).

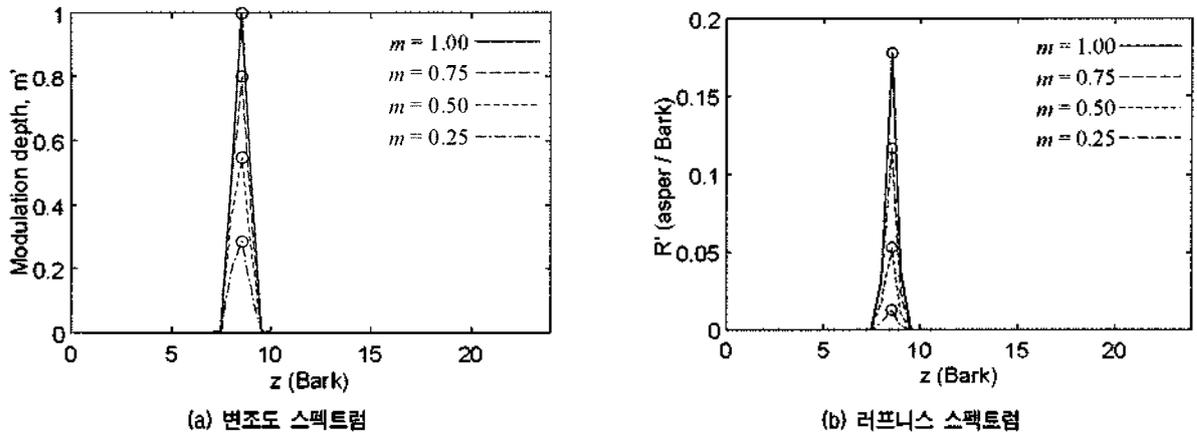


그림 17. 러프니스에 기여하는 주파수 성분 탐색 모델을 이용한 해석 예 ($f_c=1\text{kHz}$, $f_m=70\text{Hz}$, $L=60\text{dB}$)

Fig. 17. Example of roughness analysis in order to modify the correlation criteria for searching roughness contributed components ($f_c=1\text{kHz}$, $f_m=70\text{Hz}$, $L=60\text{dB}$).

다. 그림 16은 주어진 m 값에 따른 변조도 스펙트럼, m' 으로서 주어진 m 값이 0.5 이하인 경우, 변조가 물리적으로 발생하는 1 kHz 대역 이외에 다른 대역에서 R' 이 최대가 나타나는 것을 확인할 수 있다. 따라서 R' 이 최대인 대역과 물리적으로 변조가 발생하는 대역은 일치하지 않을 수가 있으며 구현된 러프니스 모델에 의한 R' 을 근거로 러프니스에 기여가 큰 주파수 성분을 파악하는 것은 한계가 있다.

본 연구에서는 기존의 모델을 수정하여 변조가 발생하는 대역에서 최대 R' 값이 출력되는 새 모델을 제안한다. 알고리즘의 전체적인 구성은 그림 1과 같으며 단지 슬롭 가진을 주 가진 대역의 ± 1 Bark 내에서만 고려한다. 변조가 발생하는 k 번째 대역의 인접 대역에서도 슬롭 가진에 의한 변조가 나타나지만 $k \pm 2$ 번째 대역과의 상관 인자가 0이기 때문에 $k \pm 2$ 번째 임계 대역에서의 R' 는 0이 된다. 따라서 실제 변조가 발생하는 임계 대역에서만 m' 이나 R' 값이 존재하게 되어 m' 이나 R' 에 의한 변조 주파수 대역 판정이 가능해진다. 그림 17은 그림 16과 동일한 신호의 m' 과 R' 을 구한 것으로 변조음이 존재하는 대역에서 가장 큰 값이 출력되는 것을 확인할 수 있다. 러프니스에 기여하는 주파수 성분 파악 방법은 슬롭 가진의 적용 영역을 인위적으로 조정하였기 때문에 전체 러프니스 계산에는 적합하지 못하며 전체 러프니스를 구하기 위해서는 기존의 모델을 이용하여야 한다.

III. 결론

본 연구에서는 기존의 러프니스 계산 방법들을 고찰한 뒤 각각의 장점을 고려하여 실제 구현이 가능한 모델을 제시하였고 기존의 주관적 평가치와의 비교를 통해 그 유용성을 검증하였다. 궁극적으로 러프니스를 관찰하는 것은 주관적으로 짜증스러움을 제공하는 주파수 대역이나 시간 패턴을 파악하고자 하는데에 있다. 그러나 기존의 모델이나 본 연구에서 구현된 러프니스 계산 모델을 통해 얻을 수 있는 러프니스 스펙트럼이 주파수 영역에서의 슬롭 가진 (slope excitation)의 영향으로 실제 변조되는 주파수 대역을 탐색하기 어려운 점을 발견하였다. 이를 해결하기 위하여 구현된 모델의 상관 인자 계산 부분을 수정하여 실제 변조가 발생하는 임계 대역에서만 러프니스 스펙트럼 값이 존재하도록 하였으며 예제를 통해 실제 러프니스에 기여하는 주파수 성분을 보다 쉽게 찾을 수 있음을 확인하였다.

참고 문헌

1. E. Zwicker and H. Fastl, *Psychoacoustics, Facts and Models*, Springer-Verlag, Berlin, 1990.
2. W. Aures, "A Procedure for Calculating Auditory Roughness," *Acustica*, vol. 58, pp. 268-281, 1985 A.
3. Anon., *Binaural Analysis System Manual*, Appendix B, HEAD-Acoustics GmbH, Herzogenrath, 1996.
4. P. Daniel and R. Weber, "Psychoacoustic Roughness: Implementation of an Optimized Model," *Acustica*, vol. 83, pp. 113-123, 1997.
5. U. Widmann and H. Fastl, "Calculating Roughness Using Time-

varying Specific Loudness Spectra," *Sound Quality Symposium* 98, Ypsilanti, Michigan, USA, pp. 55-60, 1998.

6. J. S. Bendat, A. G. Piersol, *Random Data: Analysis and Measurement Procedures*, John Wiley & Sons, 1991.

저자 약력

● 정 혁 (Hyuk Jeong)



1969년 8월 23일생
1991년 2월: 한국과학기술원 기계공학과 (학사)
1993년 2월: 한국과학기술원 기계공학과 (석사: 음향학)
1999년 8월: 한국과학기술원 기계공학과 (박사: 음향학/심리음향)
1999년 9월~2000년 2월: 한국과학기술원 기계기술연구소 박사후 연구과정 (Post Doc.)
2000년 3월~ 현재: 한국전자통신연구원 컴퓨터소프트웨어기술연구소 선임연구원

※ 주관심분야: 심리 음향, 신호 처리, 음질 해석, 시간-주파수 해석

● 김 현 빈 (Hyun-Bin Kim)



1959년 7월 8일생
1985년: 중앙대학교 정경대학 응용통계학과 (학사)
1988년: 중앙대학교 정경대학 응용통계학과 (석사)
1991년~1993년: Nagoya Univ. 大學院工學研究科 연구원
1996년: Okayama Univ. 大學院自然科學研究科 (박사)
1984년~1998년: 시스템공학연구소 (연구원/선임)
1998년~ 현재: 한국전자통신연구원 컴퓨터소프트웨어기술연구소 (선임/책임)

※ 주관심분야: Virtual Reality, Game, Bioinformatics, HCI (Human Computer Interface), AI (Artificial Intelligence), 3D Sound

● 이 정 권 (Jeong-Guon Ih)



1979년: 서울대학교 기계공학과 (학사)
1981년: 한국과학기술원 기계공학과 (석사: 음향학)
1985년: 한국과학기술원 기계공학과 (박사: 음향학/소음제어)
1979년~1990년: 대우자동차 기술연구소 NVH담당 (대리/과장/차장)
1987년~1988년: 영국 Southampton Univ., ISVR, Research Staff
1999년~2000년: 영국 Loughborough Univ., 수학과, 초빙교수
1990년~ 현재: 한국과학기술원 기계공학과 교수 (조교수/부교수/정교수)