

다이코틱 조건에서의 라우드니스 모델에 관한 연구

A Study on the Loudness Model in Dichotic Conditions

차정호* · 이정권** · 신성환**

Jeong-Ho Cha, Jeong-Guon Ih, and Sung-Hwan Shin

Key Words: Loudness, Dichotic Condition, Binaural Hearing, Equivalent Diotic Level

ABSTRACT

Existing loudness models are specified only to diotic sounds in spite of the fact that normal human beings hear dichotic sounds. Approximately, the arithmetic mean of loudness values of both ear signals has been suggested for the resultant perceived loudness. In this study, the dependence of overall loudness perception on the interaural level differences was investigated by the subjective tests. It was found that the larger the interaural level difference, the louder the perception than the mean of calculated loudness values at both ears and the lower the critical band rate or the reference level, the louder the perception than the mean value. A modified loudness model was proposed to be applicable to dichotic sounds by using the equivalent diotic levels.

1. 서론

기존의 라우드니스 (loudness) 모델들은 한 개의 귀로 청취된 음향 신호를 통해 전방 입사 또는 확산 음장에서의 소리의 크기를 분석한다. 그러나 두 개의 귀로 소리를 청취하는 것이 정상적이며, 귓바퀴, 머리, 어깨 등의 영향으로 인해, 일반적으로 양쪽 귀는 서로 다른 소리를 듣게 된다. 따라서 기존의 라우드니스 모델로는 일반적인 경우의 주관적 지각 정도를 올바르게 표현할 수 없다. 또한 음질 제어를 위한 소음의 측정 방법에 있어서도 청음자의 머리 한 가운데로 여겨지는 곳에 한 개의 마이크론을 위치시켜 측정하는 기존의 방법과는 달리, 최근에는 사람의 머리, 어깨, 귓바퀴 등을 모사하는 더미 헤드 (dummy head) 모형이나, 사람의 양쪽 귀 속에 삽입된 마이크론을 통해 두 개의 독립적인 음향 신호를 얻는 방법이 일반화 되고 있다.

그러나 두 귀로 부터의 음향 신호를 동시에 받을 때 있어서 (dichotic condition) 전체적인 음의 크기와 연관시키는 라우드니스 모델에 관한 선행 연구는 많지 않은데, 그 이유는 다이코틱 조건에서 라우드니스의 인지에 영향을 주는 변수의 수가 매우 많아지기 때문이다 [2]. 따라서 이에 관련된

연구는 주로 양쪽의 신호를 가지고 기존의 라우드니스 모델을 통해 얻은 두 개의 라우드니스 값의 산술 평균값을 대표값으로 하는 것에 대한 타당성이 연구되어 왔고, 그 중 Chouard [3]는 양쪽 신호의 차이가 비교적 큰 자동차 실내 소음에 대한 사례 연구를 하였다. 그러나 이와 같은 사례 연구에 비하여 일반화 된 연구는 거의 없었다.

본 연구에서는 청각계의 주파수 분석 특성인 임계 대역별, 그리고 여러 가지 기준 레벨 별로 각각 가장 큰 영향 인자인 상호 레벨 차이 (interaural level difference; ILD)를 변화시켜 가며 동일한 크기로 인지되는 다이코틱 (diotic) 레벨을 찾는 청음 실험을 한다. 이러한 청음 실험의 결과들로 통계 분석을 하여 다이코틱 조건에서의 라우드니스 인지 특성을 분석하며 그 영향을 함수화 한다. 또한 이 과정에서 기존의 라우드니스 대표값과 실험 결과의 비교를 통해 기존 대표값의 문제점을 살펴본다. 이를 바탕으로 기존의 라우드니스 모델을 개선하고자 한다.

2. 청음 실험

2.1 실험 개요

본 연구에서는 다이코틱 라우드니스의 인지 특성을 살펴 보기 위해 가장 주된 영향을 주는 인자인 상호 레벨 차이 (ILD)에 대해서 청음 실험을 행하고 그 특성을 살펴보았다. 실험은 크게 두 가지로 나눌 수 있는데, 하나는 ILD에 의한 양이 라우드니스의 인지 특성이 임계 대역 (critical band

* 삼성전자 리빙사업부 개발팀;

e-mail: jh007.cha@samsung.com

Tel: (031)200-6333, Fax: (031)200-6335

한국과학기술원 기계공학과 NoVic센터;

** e-mail: ihih@sorak.kaist.ac.kr

rate)에 따라 어떠한 특성을 갖는지, 다른 하나는 기준 레벨의 높낮이에 따라 어떠한 특성을 갖는지를 알아보기 위한 실험이다. 이 두 가지 인지 특성을 얻은 후, 함수화 하여 실제로 얻어진 두 개 신호의 레벨 차이를 라우드니스 모델에 적용하는 과정에 포함하게 되면, 다이코틱 신호를 위한 보정된 라우드니스 값을 얻을 수 있다.

2.2 임계 대역별 인지 특성에 관한 실험

(1) 실험 조건 및 내용

실험용 신호로는 임계 대역폭보다 작은 협대역 소음의 경우, 레벨이 같으면 대역폭에 관계없이 라우드니스가 같다는 특성을 감안하여 임계 대역폭을 갖는 소음 대신 몇몇 임계 대역의 중심 주파수에 해당하는 순음들을 사용하였으며, 임계 대역율은 1, 2.5, 8.5, 14.5, 20.5, 22, 23 Bark의 7가지였다. 신호들은 상용 소프트웨어를 사용하여 만들었으며 샘플링 주파수는 44.1 kHz, 분해능은 16 bits였다.

ILD는 3, 6, 9, 12, 15 dB의 5가지로 선정하였는데, 실제 상황에서 나타날 수 있는 대역당 ILD는 대개 수 dB 정도이며, 자동차 실내 소음의 경우에 최대 15 dB 정도로 관찰된 바 있다 [3]. 앞서 만들었던 신호들을 위의 5가지 ILD 만큼 감쇠시킨 신호들로 스테레오의 다이코틱 신호를 구성하였다. 본 실험이 주파수별 인지 특성을 알아보기 위한 실험이므로 양쪽의 위상은 동일하게 했으며, 기준 레벨은 70 dB로 고정하였다. 여기서 기준 레벨이라 함은 다이코틱 신호 중 감쇠되지 않은 원래의 신호의 레벨이 된다. 따라서 실험용 신호들의 총 개수는 35개이었다.

신호들은 헤드폰을 통해 들려지며 피험자들은 개인용 컴퓨터와의 GUI (graphic user interface)를 통해 실험을 하였다. 개인용 컴퓨터를 통해 생성된 비교 신호는 사운드 카드와 재생 시스템을 통해 헤드폰으로 들려지게 된다. 기준 레벨인 70 dB를 맞추기 위한 보정은 더미 헤드폰을 통해 행하였다. 실험 장소는 일반적인 방으로서 방의 내부에 컴퓨터 이외의 음원이 따로 존재하지 않는 곳이었다.

본 실험에서는 피험자들로 하여금 앞서 만든 다이코틱 신호들과 다이오틱 신호를 비교하여 다이코틱 신호와 같은 크기로 인지되는 다이오틱 신호를 찾도록 하였기 때문에, 조정법이나 추적법과 같은 방법이 사용될 수 있으나, 다이코틱 신호의 경우 소리의 상이 머리 속에서 한쪽으로 치우쳐 맺히는 현상 때문에 둘 간의 크기 비교가 다소 모호할 수 있다. 따라서 본 실험에서는 조정법을 사용하여 피험자들로 하여금 다양한 비교를 통해 동일 크기의 다이오틱 신호를 찾도록 하였다. 피험자들에게 주어지는 비교 신호는 Fig. 1과 같다. 우선 앞서 만든 레벨이 고정된 다이코틱 신호를 1000 ms 동안 들려주고 500 ms 동안의 휴지기를 거친 뒤 다이오틱 신호를 1000 ms 동안 들려주게 된다. 피험자는 두 신호의 전체적인 음의 크기를 비교하여 두 음의 크기가 같아 지도록 뒤의 다이오틱 신호의 레벨을 조정하게 된다.

실험에 참가한 인원은 모두 45명이었는데, 등라우드니스 선도 (ISO 226) [4]나 라우드니스 모델 (ISO 532) [5] 조건과 유사하게 피험자들의 연령을 18세에서 30세 사이로 제한하였다. 45명 중 24명이 남자, 21명은 여자였으며, 20명은 청음 실험 유경험자였다.

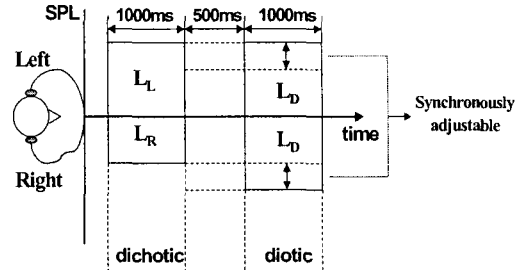


Fig. 1. Test signals.

(2) 실험 결과 및 분석

Fig. 2는 5가지 상호 레벨 차이에 대한 등가 다이오틱 레벨의 중앙값만을 표시한 것이다. 전반적으로 20.5 Bark (7 kHz)이하의 범위에서는 등가 다이오틱 레벨이 임계 대역에 크게 영향을 받지 않는 것으로 보여지나, 22, 23 Bark (9.5, 12 kHz)와 같은 고주파 영역에서는 중앙값이 다른 임계 대역에 비해서 작게 나타나는 경향을 관찰할 수 있다.

지금까지의 기준 모델에서는 다이코틱 신호의 라우드니스 대표값으로서 양쪽 신호로부터 각각의 라우드니스를 계산하여 둘의 평균값을 사용하는 다음식을 쓰고 있었다:

$$N_M = \frac{N_L + N_R}{2} \quad (\text{sones}). \quad (2.1)$$

여기서, N_L 과 N_R 은 각각 좌, 우측 신호로부터 계산된 라우드니스 값이다. 이 값이 실제 임상 실험 결과와 부합하지 않을 알아보기 위하여 위의 실험을 통해 얻어진 결과로부터 등가 다이오틱 라우드니스 (equivalent diotic loudness), N_{EQ} 를 계산하고 이를 N_M 값과 비교해 보았다. 모든 라우드니스의 계산은 Zwicker의 모델을 근간으로 하는 소프트웨어 (PSQ-TEAM)를 사용하였다. Fig. 3은 7가지 임계 대역에 대해서 $ILD, \max(N_L/N_R, N_R/N_L)$ 과 N_{EQ}/N_M 의 관계를 보여준다. 그래프상의 점들은 모두 중앙값만을 표시하였다. 상호 라우드니스 비율은 다이오틱 상황에서 1의 값을 가지며 ILD가 커질수록 증가하며, N_{EQ}/N_M 값은 1에 가까울수록 N_M 값이 실제 임상 결과와 잘 부합함을 의미한다. Fig. 3으로부터 전체적으로 양쪽의 크기 차이가 클수록 N_{EQ}/N_M 값이 증가하는 경향을 관찰할 수 있는데, 이는 곧 양쪽 귀에서의 소리의 크기 차이가 클수록 양쪽 라우드니스의 평균값인 N_M 보다 더 크게 소리를 인지함을 의미한다. Fig. 4는 임계 대역별 특성을 보기 쉽게 5가지 각각의 상호 레벨 차이에 대해서 N_{EQ}/N_M 값

의 중앙값만을 연결해 놓은 것인데, 전체적으로 N_{EQ}/N_M 값이 저주파 한계쪽에서 상대적으로 높게 나타나고 중주파 영역에서는 서서히 감소하다가 고주파 한계쪽에서 급격히 감소하는 경향을 보이고 있음을 관찰할 수 있다. 그림에서 실선은 Zwicker [2]의 1 kHz 순음 데이터로 계산한 라우드니스의 JND (just noticeable difference)이다.

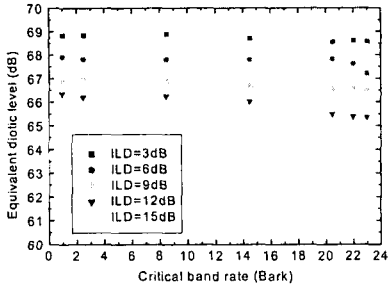


Fig. 2. Equivalent diotic levels.

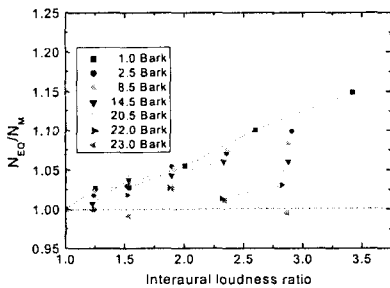


Fig. 3. N_{EQ}/N_M , function of ILR.

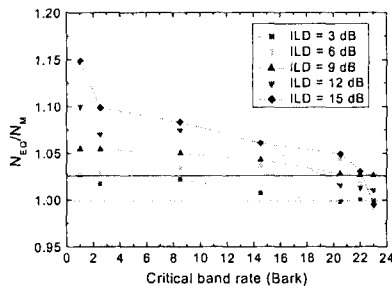


Fig. 4. N_{EQ}/N_M , function of CBR.

Fig. 4로부터 양쪽 귀에 서로 다른 크기의 순음이 들릴 경우 저주파일수록 평균값 N_M 보다 더 크게 전체 크기를 인

지하며, 고주파 한계 부근에서는 실제로 N_M 과 의미있는 차이가 존재하지 않는다고 할 수 있다.

2.3 기준 레벨별 인지 특성에 관한 실험

(1) 실험 조건 및 내용

앞선 실험이 일정한 레벨의 주파수가 서로 다른 순음들을 대상으로 한 실험이었다면, 본 실험은 동일한 주파수의 레벨이 서로 다른 순음들을 대상으로 하는 실험이다. 따라서 신호의 주파수는 1 kHz로 고정하였고, 기준 레벨은 15 dB 간격으로 40, 55, 70, 85, 100 dB의 다섯 가지를 설정하였다. ILD는 앞선 실험과 마찬가지로 하였다. 따라서 실험용 신호의 총 개수는 25개이었다.

실험 방법은 앞선 실험과 동일하였고, 실험에 참가한 인원은 18~30세 사이의 남자 24명, 여자 21명으로 총 45명이었으며, 이 중 앞선 실험에 참가했던 사람은 39명이었다.

(2) 실험 결과 및 분석

Fig. 5는 5가지 기준 레벨에 대해서 상호 라우드니스 비율과 N_{EQ}/N_M 의 관계를 보여준다. 그래프상의 점들은 모두 중앙값만을 표시하였다. 여기에서도 앞선 실험과 마찬가지로 양쪽의 크기 차이가 클수록 N_{EQ}/N_M 값이 증가하는 경향을 관찰할 수 있다. Fig. 6은 기준 레벨별 특성을 보기 쉽게 5가지 각각의 상호 레벨 차이에 대해서 N_{EQ}/N_M 값의 중앙값만을 연결해 놓은 것인데, 전체적으로 기준 레벨이 증가함에 따라 N_{EQ}/N_M 값이 감소하는 경향을 보이고 있음을 관찰할 수 있다. Fig. 6으로부터 양쪽 귀에 서로 다른 크기의 순음이 들릴 경우 그 전체적인 크기가 작을수록 평균값 N_M 보다 더 크게 전체 크기를 인지하며, 순음의 경우 약 100 dB 이상의 큰 소리에 대한 크기 인지는 실제로 N_M 과 비슷함을 알 수 있다.

3. 다이코틱 라우드니스 모델

3.1 모델의 개요

본 연구에서 바탕을 두고 있는 라우드니스 모델은 Zwicker의 모델인데 이는 다이코틱 조건을 가정하였기 때문에 일반적인 다이코틱 조건에 적용할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 다이코틱 신호에 대한 두 개의 서로 다른 정보를 다이코틱 조건에 해당하는 하나의 등가 정보로 변환하는 과정을 포함함으로써 이 모델을 다이코틱 신호에 적용할 수 있도록 하고자 한다.

Fig. 7은 본 연구에서 제안하는 Zwicker 라우드니스 모델의 수정된 계산 모델의 개요이다. 여기에서 n 은 연속된 임계 대역 필터의 개수이고, L_L 및 L_R 은 각각 왼쪽 및 오른쪽 귀에서의 신호에 의해 계산된 각각의 임계 대역 레벨을 의미하며, L_{EQ} 는 각각의 임계 대역에 대해서 L_L 과

L_R 로부터 얻게 되는 등가 다이오틱 임계 대역 레벨을 의미한다. 이렇게 모든 임계 대역에 대해서 얻어진 등가 다이오틱 레벨을 가지고 나머지 라우드니스 계산 과정을 거치면 다이오틱 신호의 라우드니스를 얻게 되는 것이다. 이 중에서 L_{EQ} 에는 앞에서 살펴 보았던 다이오틱 조건에서의 인지 특성이 포함되어야 하며 임의의 좌, 우 신호가 주어질 때 L_{EQ} 를 얻을 수 있어야 한다.

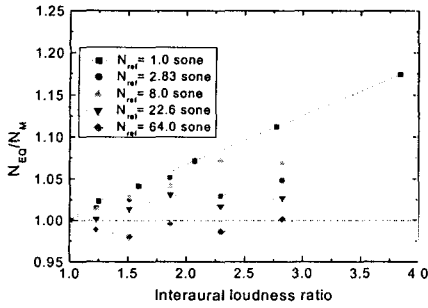


Fig. 5. N_{EQ}/N_M , function of ILR.

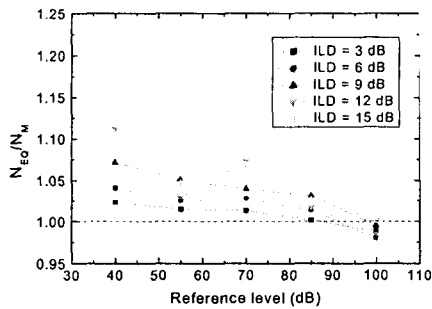


Fig. 6. N_{EQ}/N_M , function of L_{ref} .

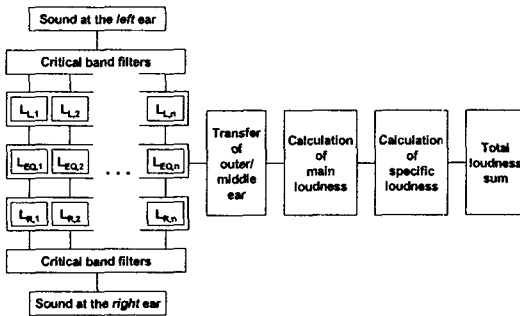


Fig. 7. Modified loudness calculation model.

3.2 등가 다이오틱 레벨

Fig. 8은 앞선 기준 레벨별 실험 결과 중에서 70 dB 기준 레벨인 경우의 등가 다이오틱 레벨을 나타내는데, 상호 레벨 차이가 커질수록 실선으로 표현된 L_M 보다 더 큰 등가 다이오틱 레벨이 형성되는 경향이 있었으며 이러한 경향은 다른 기준 레벨에 대해서도 동일하였다. 여기서 L_M 은 N_M 의 라우드니스 값을 갖는 1 kHz 순음의 레벨로서 다음과 같이 표현된다:

$$L_M = 10 \log_2 \left(2 \frac{L_L - 40}{10} + 2 \frac{L_R - 40}{10} \right) + 30 \text{ (dB)}. \quad (3.1)$$

따라서, L_{EQ} 는 다음과 같은 식으로 표현될 수 있다:

$$L_{EQ} = (1 + f(\max(L_L, L_R))g(CBR)|L_L - L_R|) \times \left[10 \log_2 \left(2 \frac{L_L - 40}{10} + 2 \frac{L_R - 40}{10} \right) + 30 \right] \text{ (dB)}. \quad (3.2)$$

여기서 함수 f 와 g 는 실험을 통해 얻어진 인지 특성을 포함할 수 있는 보정계수 역할을 하게 된다.

Fig. 9의 점들은 식(3.2)를 기준 레벨별 인지 특성 실험 데이터에 적용하여 회귀분석한 결과이고, Fig. 10의 점들은 임계 대역별 인지 특성 실험 데이터에 적용하여 회귀분석한 결과이다. 한편 L_M 항은 어디까지나 1 kHz (8.5 Bark) 순음에만 적용되는 식이기 때문에 임계 대역별 특성을 나타내는 g 는 8.5 Bark에 대해서 정규화하는 것이 바람직하다. 따라서 $g(8.5)$ 의 값이 1이 되도록 f 와 g 의 값을 점으로 표시하고 회귀곡선으로 표현한 것이다. 여기에서 f 는 Fig. 6과 같이 기준 레벨이 감소할수록 양쪽 라우드니스의 평균값보다 더 크게 전체 크기를 인지한다는 특성을 고려하여 기준 레벨이 증가할수록 감소하는 직선으로 회귀분석을 하였고, g 는 Fig. 5와 같이 고주파로 갈수록 그 특성이 서서히 감소하다가 고주파 한계쪽에서 급격히 감소하는 특성을 고려할 수 있도록 20.5 Bark를 기점으로 두 개의 기울기가 다른 직선으로 회귀분석을 하였으며 그 결과식은 다음과 같다:

$$f = 0.00393 - 0.00004 \max(L_L, L_R), \quad (3.3)$$

$$g = 1.2933 - 0.0345 CBR \quad (CBR \leq 20.5), \quad (3.4.a)$$

$$g = 4.1756 - 0.1748 CBR \quad (CBR > 20.5). \quad (3.4.b)$$

이것을 식(3.2)에 포함시키면 임의의 좌, 우 레벨에 대한 등가 다이오틱 레벨식을 얻게 된다.

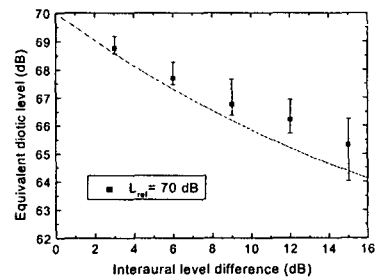


Fig. 8. Equivalent diotic level for 70 dB ref..

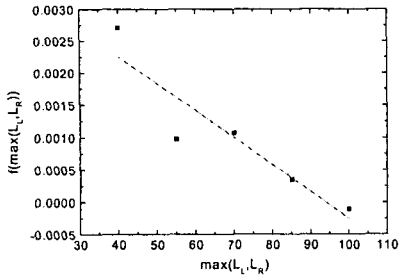


Fig. 9. Regression of $f(\max(L_L, L_R))$.

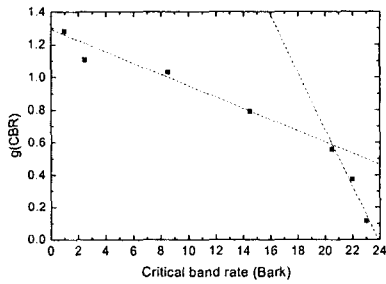


Fig. 10. Regression of $g(\text{CBR})$.

4. 결론

본 연구에서는 소리의 크기에 대한 주관적 지각량을 객관적인 양으로 표현할 수 있는 여러 음질 인자 중, 국제 표준화가 되어 있는 라우드니스에 대해서 기존의 다이오틱 가정을 벗어나 다이오틱 조건에서의 라우드니스 인지 특성에 대해서 연구하고, 이러한 특성을 포함시킨 수정된 라우드니스 계산 모델을 제안하였다.

청음 실험을 통해 양쪽 귀에 레벨이 서로 다른 순음에 대한 등가 다이오틱 레벨을 얻었다. 위와 같은 다이오틱 조건에서 소리의 크기 인지 특성을 양쪽 신호로부터 계산된 라우드니스의 평균값과 비교해 본 결과, 실제 임상 결과는 ILD가 클수록 값보다 더 큰 라우드니스의 인지를 보였으며, 이러한 특징은 주파수가 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타내었고 전체적으로 레벨이 높아질수록 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 크기가 서로 다른 두 소리를 양쪽 귀로 들었을 경우, 양쪽 귀에서의 인지량이 각각 독립적으로 작용하여 더해진다기보다는 양쪽 중 더 큰 쪽에 영향을 더 많이 받음을 암시한다.

후 기

본 연구는 BK 21과 NRL 에서 일부 지원을 받았습니다.

참 고 문 헌

- [1] Genuit, K. and Poggenburg, J., 1998, "21st century noise control: A way to a convenient future," Proc. Sound Quality Symposium, pp. 93-98.
- [2] Zwicker, E. and Fastl, H., 1990, *Psychoacoustics: Facts and Models*, Springer-Verlag, Berlin.
- [3] Chouard, N., 1997, *Loudness and Unpleasantness Perception in Dichotic Conditions*, Ph. D. Thesis, University of Le-Mans.
- [4] Anon., 1987, "Acoustics-Normal equal-loudness level contours," ISO 226.
- [5] Anon., 1975, "Acoustics-Method for calculating loudness level," ISO 532.
- [6] Jeong, H., Choi, J. S., and Ih, J.-G., 2003, "Calculation model of time-varying loudness by using critical band filters," Proc. WESPAC8, (CD Rom).