

# 인간의 청각특성을 고려한 스피커의 성능평가법\*

## Evaluation of loudspeaker performance considering human auditory characteristics

방 희 석\*\*, 안 철 용\*\*, 성 광 모\*\*  
Hee-Suk Pang, Chul-Yong Ahn, Koeng-Mo Sung

**요 약** 스피커의 음질을 평가하기 위해서 가장 많이 측정하는 것은 주파수 응답이다. 그러나 주파수 응답으로부터 바로 스피커의 성능을 평가하기는 어렵는데, 이는 인간의 청각특성이 주파수나 음압에 대해 선형적인 관계를 가지지 않기때문이다. 본 논문에서는 인간의 청각특성 중 24개의 임계대역과 라우드니스 등을 이용하여 스피커의 성능을 평가하는 방법을 제안한다. 본 논문에서 제안하는 방법은 지향성을 고려하여 스피커의 주파수 응답을 구한 후 이를 이상적인 스피커의 주파수 응답과 임계대역-라우드니스 영역에서 비교하여 음질평가지수를 산출한다. 제안된 방법에 의한 스피커의 성능 평가법은 신뢰도가 가장 큰 문제가 되므로 청취평가를 수행하여 그 결과와 비교하고 상관관계를 보였다. 제안된 방법에 의한 결과와 청취평가의 결과는 0.9765의 높은 상관관계를 가졌는데, 이는 본 논문에서 제안하는 방법이 청취평가 대용으로 훌륭히 사용될 수 있음을 의미한다.

### 1. 서론

스피커에 대해서는 보통의 청취자나 음악전문가에게 시청평가를 하여 이로부터 음질을 평가하는 방법이 많이 쓰여 왔다. 그러나 이 방법은 시간과 비용이 많이 드는 단점이 있을 뿐 아니라, 특정한 시청평가의 자료가 모든 스피커에 대하여 음질을 평가하는 기준으로 채택되기에 어려움이 많다고 하겠다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위해서는 청취평가가 아닌 스피커에 대한 측정으로부터 스피커의 성능을 평가하는 방법이 필요하며, 이에 대한 연구도 활발히 진행되어 왔다[1,2].

스피커에 대해 측정하는 것은 주파수 응답, 지향성, 위상 응답, 비선형 왜곡, 전기-음향 효율 등이 있

는데 이 중에서 가장 중요한 것은 주파수 응답이다 [3,4]. 스피커의 주파수 응답은 평탄한 것이 가장 이상적으로 알려져 있는데, 실제의 스피커는 주파수 응답에 있어서 어느 정도 왜곡을 가지게 되므로 이 왜곡으로부터 스피커의 성능을 어떻게 평가할 것인지가 문제가 된다. 이에 있어 스피커의 주파수 응답으로부터 그 요철 정도를 계산하는 것도 하나의 방법이 되겠으나[5], 이는 다음의 두가지 문제점을 가진다. 첫째로 서로 다른 대역에 대해서 똑같은 크기의 주파수 응답차를 보이는 경우, 주파수 응답의 차이에 의해 성능을 평가하는 방법을 이용하면 두 경우 모두 똑같은 왜곡을 가지는 것이 되지만, 인간은 서로 다르게 느끼게 된다는 것이다. 이는 인간이 각 주파수 대역에 대해 민감도가 다르기 때문이며, 주파수 응답이 똑같은 차이를 보이고 있더라도 민감한 대역에서는 그 차이를 크게, 둔감한 대역에서는 그 차이를 작게 느끼게 된다. 둘째로 왜곡을 피크와 골 두가지로 나눌때, 두경우 모두 주파수 응답의 차로부터 구한 값은 같게 되나 인간은 서로 다르게 느끼게 된다는 점이다. 이는 피크의 경우가 골의 경우보다 에너지가

\* 본 연구는 한국학술진흥재단의 연구비 지원으로 이루어졌음.  
\*\* 서울대학교 전기공학부  
School of Electrical Engineering, Seoul National University  
연락처 : 서울시 관악구 신림동 서울대학교(151-742)  
뉴미디어통신공동연구소 음향공학연구실  
Tel : 880-8427 Fax : 888-3633  
E-mail : hspang@acoustics.snu.ac.kr

크며, 인간은 전체 신호중에서 에너지가 큰 대역에 대하여 민감하게 느끼기 때문이다.

이와 같은 문제점을 해결하기 위해서는 오디오 신호에 심리음향학적 모델을 적용해야 할 필요가 있는데 [6,7], 이의 대표적인 예는 주파수 대신에 임계대역(critical band)을 사용하고 음압레벨 대신에 라우드니스(loudness)를 사용하는 것이다[8]. 또한, 청취평가의 결과를 좀 더 세밀히 분석하기 위해 통계학적인 방법들이 사용되기도 하는데, Gabriellsson은 오디오 재생 시스템의 음질을 평가하기 위해, Klippel은 스피커에 대한 주파수 응답과 청취평가의 결과간의 관계를 밝히기 위해 인자분석을 행하기도 하였다[9,10].

본 논문에서는 스피커의 주파수 응답을 임계대역-라우드니스 차원으로 변환한 뒤, 이로부터 스피커의 성능을 평가하는 지수를 산출하는 방법을 제안한다. 그리고 신뢰도 검사를 위하여 청취평가를 수행하고, 이를 제안된 방법에 의한 결과와 비교하도록 하겠다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 우선 2절에서 인간의 청각특성 중 임계대역과 라우드니스에 대해 알아보고 3절에서는 본 논문에서 제안하고 있는 스피커의 성능 평가법을 설명한다. 4절에서는 3절에서 제안한 방법에 의한 스피커의 음질평가지수와 실제로 수행한 시정평가의 결과를 비교하고 5절에서 결론에 대하여 논하겠다.

## 2. 임계대역과 라우드니스

인간의 청각특성은 귀의 구조와 뇌에서의 처리과정에 의하여 결정되는데, 뇌에서의 처리과정은 아직 정확히 밝혀진 바 없다. 다만 입력신호에 대해 귀는 몇 개의 병렬 대역통과필터 역할을 하는 것이 알려졌다 [8]. 실제로는 인간의 귀가 신호를 24개의 대역으로 나누어 이를 처리하는 것이 밝혀졌는데 이를 임계대역(critical band)이라고 한다. 다음의 식 1과 2에서 주파수에 대한 인간의 24개 임계대역 및 임계대역폭의 근사식을 보이고 있는데, 여기에서 임계대역  $z$ 의 단위는 bark, 주파수  $f$ 의 단위는 kHz, 임계대역폭 CB의 단위는 Hz이다[11].

$$z = 13 \arctan(0.76f) + 3.5 \arctan\left(\frac{f}{7.5}\right)^2 \quad (1)$$

$$CB = 25 + 75[1 + 1.4f^2]^{0.69} \quad (2)$$

또한, 인간은 똑같은 크기의 소리를 들려주더라도

주파수에 따라 다른 크기로 인식하게 되는데, 이를 설명하는 것이 라우드니스 레벨(loudness level) 및 라우드니스이다. 1kHz의 주파수를 기준으로 각각의 주파수에 대해 인간이 주관적으로 같은 크기라고 느끼는 소리의 크기를 라우드니스 레벨이라고 하고 이의 단위로 phon을 쓴다. 각각의 주파수에 대한 음압레벨과 라우드니스 레벨과의 관계를 나타내는 등청감곡선을 다음의 그림 1에서 보이고 있다[12]. 귀의 구조에 의한 공진점인 2-6 kHz와 10-15kHz에서 실제의 소리보다 크게 느끼고 있음을 알 수 있다.

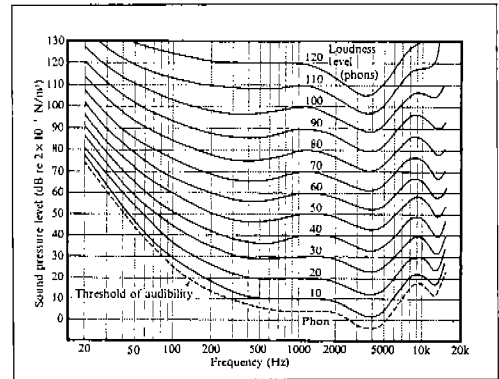


그림 1 등청감곡선

등청감곡선의 경우 주파수에 따른 인간의 민감도를 보정한 것으로 생각할 수 있다. 그런데, 이는 인간이 느끼는 직접적인 크기와 비례하는 것은 아니며, 이를 위해서는 라우드니스로 다시 한 번 변환하는 것이 필요하다. 인간은 30phon 이상의 소리에 대해서는 약 10phon이 커질 때마다 소리가 2배가 되는 것으로 느끼며 이는 주파수에 상관없이 있는 것으로 알려져 있다. 이에 근거하여 라우드니스는 40phon의 소리를 기준으로 하여 1sone으로 나타내고, 10phon이 커질 때마다 2배로 하는 다음의 식 3에 근거하여 구할 수 있다[12].

$$Loudness = 2^{\left(\frac{L-40}{10}\right)} \quad (3)$$

## 3. 음질평가지수 산출법

사람의 가청영역은 20-20000 Hz의 비교적 넓은 대역을 가진다. 일반적으로 음악신호의 경우 광대역의 신호이므로 0-24bark(0-15500Hz) 범위의 모든 임계대역에 대해 고려하는 것이 필요하다. 실제의 경우 음악은 시간에 따라 음의 주파수나 크기 등이 변

하는 시변신호이므로, 계산과정을 간단히 하기위해서 백색잡음으로 가정을 한다. 이에 의해 스피커에 의한 출력신호는 주파수 응답과 선형적인 관계를 가지게 되는데, 이 크기는 측정시의 스피커의 구동 파워나 전기-음향변환효율, 마이크로폰의 측정 위치 등에 따라 영향을 받게 된다. 따라서 이를 보정하기 위해서는 측정 스피커에 대한 주파수 응답의 크기를 정규화할 필요가 있으며, 이를 위해 각 스피커들의 주파수 응답에 대한 전체의 라우드니스가 같도록 조정한다.

각 스피커에 의한 출력신호의 라우드니스를 계산함에 있어서 본 논문에서는 Zwicker의 라우드니스 계산법을 간략화한 방법을 사용한다[13]. 이 방법은 전체라우드니스가 신호들이 동일 임계대역 내에 존재할 때에는 인텐시티의 합에 비례하지만, 동일한 임계대역 내에 존재하지 않을 때는 각 대역의 라우드니스의 합에 비례한다는 사실에 기인한 것이다. 이에 의해 스피커의 주파수 응답을 24개의 임계대역으로 나눈 후 각 임계대역 내에서의 측정값들의 인텐시티를 평균한 값을 그 대역의 값으로 정하게 되는데, 이는 스피커의 주파수 응답을 스무딩하는 것으로 볼 수 있다. 이 24개의 대역에 대한 각각의 라우드니스를 전부 합하면 전체라우드니스를 구하게 되는데 이는 다음의 식 4로 표현가능하다.

$$Loudness = \sum_{z_1}^{z_{24}} S(z) \quad (4)$$

이상적인 스피커의 주파수 응답은 모든 대역에 대해 평탄한 값을 가지는 것으로 가정한다. 즉, 원래의 신호를 왜곡하지 않고 그대로 내보내는 것이 가장 좋은 스피커라고 할 수 있는 것이다. 모든 대역별로 60dB의 인텐시티를 가지는 이상적인 스피커의 주파수 응답을 간략화된 임계대역-라우드니스 스케일로 변환하면 그림 2와 같은 결과를 얻을 수 있다.

각 스피커의 성능은 각 스피커의 주파수 응답과 이상적인 스피커의 주파수 응답과의 차이에 관련됨을 알 수 있는데, 본 논문에서는 각 주파수 응답을 인간이 느끼는 직접적인 크기인 라우드니스 스케일로 변환하였기 때문에 다음의 식 5에 의해 음질평가지수를 산출할 수 있음을 알 수 있다. 여기에서  $S(z)$ 는 측정 스피커의 주파수 응답을,  $S_i(z)$ 는 이상적인 스피커의 주파수 응답을 임계대역-라우드니스로 변환한 것이다.

여기에서의 문제는  $S(z)$ 의 전체라우드니스와  $S_i(z)$ 의 전체라우드니스를 같도록 해야한다는 점인데, 이

는 비교하는 대상에 대해 전체라우드니스는 같게 한

$$S = \frac{1}{24} \sum_{z_1}^{z_{24}} |S(z) - S_i(z)| \quad (5)$$

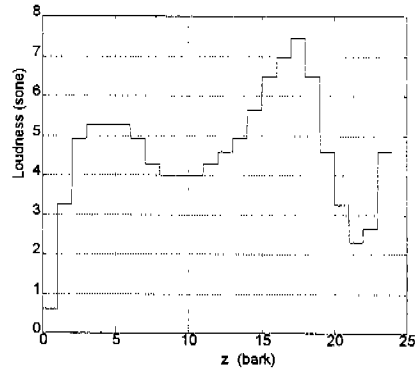


그림 2 이상적인 스피커의 주파수 응답의 임계대역-라우드니스 그래프

후 각 대역별 라우드니스의 차이만을 고려해야 한다는 점을 의미한다.

스피커의 주파수 응답은 측상에서 측정하는 것이 일반적이다. 그러나, 실제의 경우 청취자들이 스피커의 측상뿐 아니라 측상에서 벗어난 각도에서 청취를 하는 것도 일반적이므로 스피커의 음질평가지수 산출시에 이를 고려하여야 한다. 대체로 이 효과는 측상에서 30° 이내로 하면 충분하므로, 스피커의 지향성을 고려한 음질평가지수는 다음과 같이 정의한다. 여기에서  $S_\theta$ 는 측상에서  $\theta$  떨어진 각도에서 측정된 주파수응답에 대한 음질평가지수를,  $K$ 는 측정공간 내에서의 측정회수를 의미한다.

$$Score = \frac{1}{K} \sum_{\theta} S_\theta \quad (\theta \leq 30^\circ) \quad (6)$$

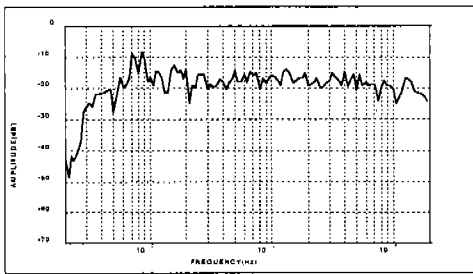
#### 4. 음질평가지수와 청취평가 결과의 비교

스피커의 주파수 응답은 무향실에서 측정하는 방법과 실제의 시청실에서 측정하는 방법 두가지가 있을 수 있으며, 이 둘은 각각의 의미를 가진다. 본 논문에서의 측정의 목적은 측정 결과를 청취실험의 결과와 비교하는 것이고 이는 청취실에서 이루어지므로 측정

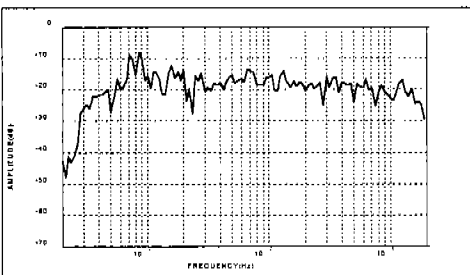
공간을 청취실로 정하였다. 청취실은 IEC 표준에 적합한 장소로 선택하였으며[14], 각 스피커들에 대한 평가는 7점 척도의 상대평가로 하여 각 스피커들의 소리를 비교하여 상대적인 점수를 매기도록 하였는데 이는 인간이 절대적인 음질에 대한 기준이 없기 때문에 절대평가에 의해 점수를 매기는 것 보다는 훨씬 정확하다고 할 수 있다.

#### 4.1. 스피커의 측정 및 음질평가지수 산출

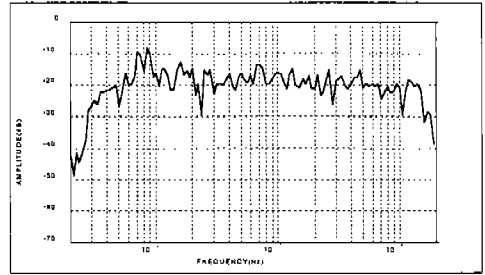
스피커 4조를 대상으로 서울대학교 부설 뉴미디어 통신공동연구소 무향준비실에서 측정 및 청취실험을 하였다. 스피커는 고급 스피커, 중고급 스피커, 중급 스피커, 보급형 스피커로 분류할 수 있는데 앞으로 이들을 스피커 A, B, C, D라고 한다. 측정시 B&K 2012 오디오 분석기를 이용하여 측상 0도, 15도, 30도에서 측정을 하였으며, 각 측정시에 10번 이상을 측정하여 평균을 구하였다. 이때, 마이크로폰은 우퍼와 트위터의 중간에 위치하도록 하고 스피커로부터 2.5m의 거리를 가지게 하였고 모든 스피커에 대해 1W의 파워로 구동하였다. 그림 3-6에서 각 스피커에 의한 측정 결과를 보이고 있다.



(a)

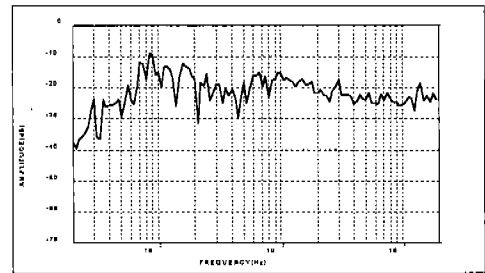


(b)

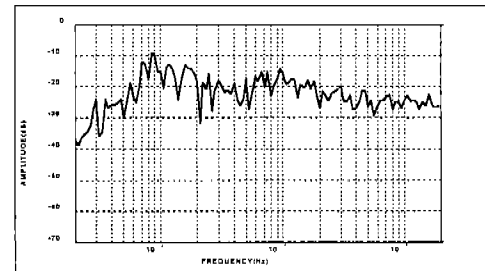


(c)

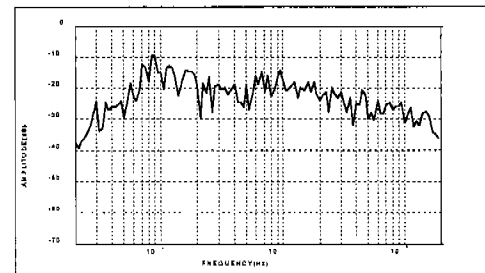
그림 3. 스피커 A의 측정결과 (a) 측상 (b) 측상에서 15° (c) 측상에서 30°



(a)

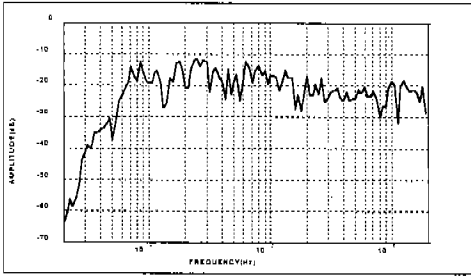


(b)

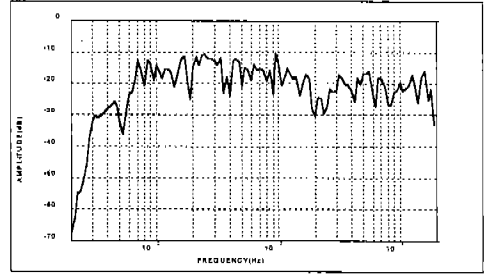


(c)

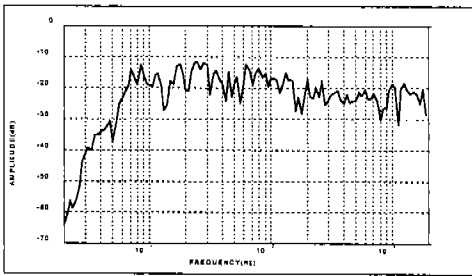
그림 4. 스피커 B의 측정결과 (a) 측상 (b) 측상에서 15° (c) 측상에서 30°



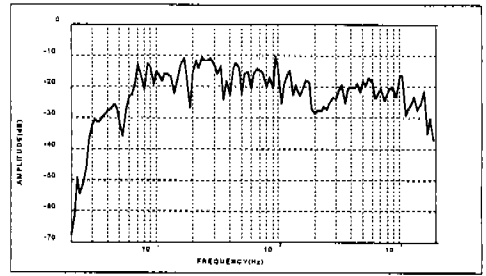
(a)



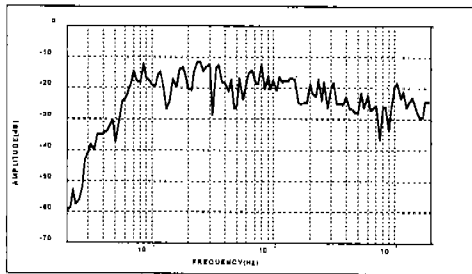
(b)



(b)

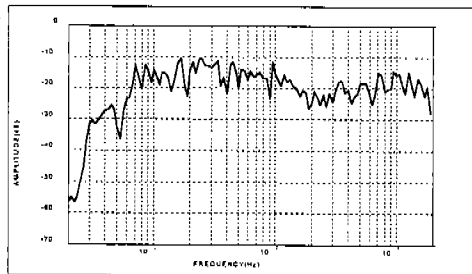


(c)



(c)

그림 5. 스피커 C의 측정결과 (a) 측상 (b) 측상에서 15° (c) 측상에서 30°



(a)

그림 6. 스피커 D의 측정결과 (a) 측상 (b) 측상에서 15° (c) 측상에서 30°

이 측정결과에 대해 식 5와 6을 이용하여 음질평가지수를 산출하였다. 표 1에서 보이고있는 값은 스피커의 왜곡 정도를 나타내는 것이므로 작을수록 성능이 좋음을 알 수 있는데, 스피커 A, B, C, D의 순으로 선호도를 가짐을 알 수 있다. 그런데, 표에서 알 수 있듯이 스피커 C와 D는 측정각에 따라 선호도가 바뀌는 경향이 있으며 점수차이도 크지 않기 때문에 이 둘 사이의 우열을 완벽히 가리기 힘들음을 예상해볼 수 있다.

표 1 스피커의 음질평가지수

	스피커 A	스피커 B	스피커 C	스피커 D
측상에서 측정	0.2879	0.6647	0.8241	0.8627
15° 에서 측정	0.3500	0.7121	0.8241	0.8121
30° 에서 측정	0.3853	0.7887	0.9279	0.9351
평균	0.3411	0.7218	0.8587	0.8700

## 4.2. 청취평가 결과

청취평가를 수행할 때는 시청공간의 선택 및 시청평가의 수행 절차와 방법 등이 중요하게 되는데 이에 대한 기준을 IEC에서 제시하고 있다[14]. 이 기준에 따르면, 시청실은 부피는 80 m<sup>3</sup> 정도를 가지며, 250Hz-4000Hz에서 0.3-0.6 초의 잔향시간을 가지는 것이 적당하고 특히 에코 등이 생기지 않도록 해야한다. 한 번의 시청평가에서 시청자는 5명을 넘지 않는 것이 좋고, 프로그램은 모든 악기들이 화음을 이루는 관현악단의 연주를 넣는 것이 필수적이다. 스피커의 출력음향의 크기는 결과에 절대적인 영향을 미치므로 모든 스피커와 프로그램들에 대해 같은 레벨로 출력을 조정하는 것이 필요하다.

본 연구에서는 스피커의 측정 장소와 동일 장소에서 39명의 20-30대의 청각에 문제가 없는 청취자에 대해 청취실험을 행하였다. 청취자 중에는 12명의 음대재학생도 포함되었다. 청취실험시에 사용된 음악은 CD에 녹음되어있는 Tchaikovsky의 "1812" Overture으로 하였는데, 여러 악기의 합주로 이루어져 있으며 연주 주파수 대역이 넓기때문에 스피커의 전체적인 신호도를 판별하기에 적절하다고 사료된다. 청취시간은 20초 내외로 하였으며 2-3번의 청취를 반복하였고, 청취자들의 요청이 있을때는 이를 연장하였다. 청취자들은 1번에 5명을 초과하지 않았으며, 대체로 한번에 3-4명 정도를 위주로 하였다.

청취실험에서는 비교대상 스피커가 4조이며 상대평가를 목표로 하였으므로, 전체적으로는 6회의 실험이 이루어졌다. 이 결과를 그림 7에서 보이고 있는데, 각 스피커들의 신호도 차이를 비교적 잘 구분함을 알 수 있다.

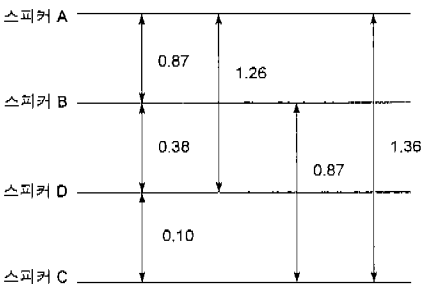


그림 7. 청취평가에 의한 스피커들의 신호도 결과

## 4.3. 음질평가지수와 청취 평가 결과의 비교

제안된 방법에 의해 음질평가지수를 산출하는 방법과 청취평가지수를 비교하는데는 다음의 문제가 있다. 첫째, 청취평가의 결과는 상대평가에 의한 결과이므로 스피커 4개의 상대적 비교치인 6개의 값이 나오는데, 이를 각 스피커의 점수로 변환해야 한다. 둘째, 음질평가지수는 좋은 스피커일수록 점수가 낮게 나오지만, 청취평가의 결과는 그 반대이다. 셋째, 음질평가지수와 청취평가의 결과값의 크기를 적절히 정규화해야 한다.

이 중 첫째 문제를 해결하기 위해서는 각 스피커에 대해 다른 세 스피커와의 비교치를 평균하는 방법을 택한다. 둘째와 셋째 문제를 해결하기 위해서는 음질평가지수를 적절하게 선형변환하여 음질이 좋은 스피커에 대해 높은 값을 가지도록 한 후, 그 크기를 정규화하면 된다. 다음의 그림 8에서 제안된 방법을 통해 계산된 음질평가지수와 청취평가결과를 보이고 있다.

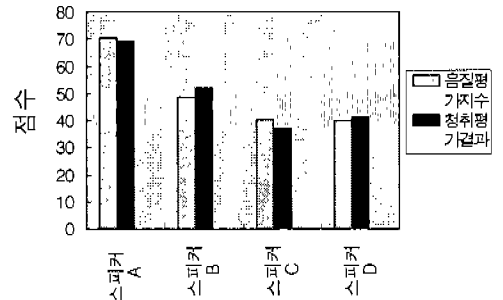


그림 8. 음질평가지수와 청취평가결과와의 비교

그림 8의 결과를 보면 스피커 A와 B의 결과는 비교적 정확하지만, 스피커 C와 D의 신호도에서 약간의 차이가 있음을 알 수 있다. 이는 음질평가지수 산출시에 예측이 되었던 결과로, 스피커 D의 경우 측정각에 따라 음질평가지수가 스피커 C보다 더 작은 경우도 있었으므로 어느 정도 설명할 수 있다.

음질평가지수와 청취평가의 결과간의 상관관계를 구해보면 각 스피커에 대한 음질평가지수를 x, 청취평가의 결과를 y라고 했을 때 다음의 식 7로 표현할 수 있다. 여기에서 이 둘은 선형적인 관계를 가지고 있다고 가정할 수 있으며, 둘의 관계는 반대이기때문

에 -부호로 보정한다. 이 식에 결과들을 대입하면 0.9765의 값을 얻을 수 있는데, 이는 음질평가지수에 의해 청취평가와 상당히 근접한 결과를 얻을 수 있음을 의미한다.

$$a = - \frac{E\{(x - m_x) \cdot (y - m_y)\}}{\sigma_x \cdot \sigma_y} \quad (7)$$

## 5. 결론 및 토의

지금까지 본 논문에서 제안하고 있는 인간의 청각 특성을 이용한 스피커의 성능 평가법에 대한 기본 이론 및 유도 과정을 보였고, 또한 이 방법을 이용하여 실제 스피커의 주파수 응답으로부터의 음질평가지수를 산출하였다. 본 논문에서 제안하고 있는 스피커의 성능 평가법은 어떠한 스피커에 대해서도 지향성을 고려하여 주파수 응답만을 측정하면 그 스피커의 성능을 평가할 수 있다는 점에서 유용하며, 청취평가의 결과와도 높은 상관관계를 보이고 있으므로 충분한 신뢰도를 가지고 있다고 하겠다. 만약 TV 수상기의 스피커와 같이 음성신호 재생을 목표로 하는 스피커라면 계산영역을 약 5kHz(임계대역으로는 19bark) 까지로 제한함으로써 음성신호 재생에 대한 음질평가지수를 산출하는 것이 가능하다.

본 논문에서 고려하지 않았지만 실제로 중요한 것으로는 마스킹 효과(masking effect)가 있다. 마스킹 효과란 여러 소리가 함께 들릴 때 그 중 어떤 것들이 다른 것들을 덮어버려서 덮힌 소리들은 마치 없는 것처럼 된다는 것이다. 이에 의하면 주파수 응답에서 나타나는 피크와 골 중에서 골은 거의 영향을 미치지 못함을 알 수 있다. 그러나 마스킹 효과는 대역별, 크기별로 모두 다르기 때문에 이를 고려하려면 스피커에 의해 재생되는 소리를 알아야하므로 음악을 백색 잡음으로 단순화하는 것이 불가능해지고, 따라서 전체 과정이 아주 복잡해진다. 그러나, 이런 계산과정의 복잡함에도 불구하고 마스킹 효과를 고려함으로써 좀더 정확한 스피커의 성능평가를 수행할 수 있을 것으로 생각된다.

본 논문에서 이상적인 스피커를 모든 주파수 대역에 대해 평탄한 소리를 가지는 것이라고 가정했는데 실제로는 그렇지 않다. 예를 들어, 청소년들은 저음성분이 증폭된 것을 선호하며, 중장년층은 고음성분이 없는 것을 선호한다. 따라서, 각 연령별로 가장 선호하는 스피커의 주파수응답 곡선을 찾아내는 작업이

선행된다면, 본 논문의 음질평가지수 산출방법은 더 개선될 수 있으리라 사료된다.

## 감사의 글

이 논문은 한국학술진흥재단의 연구비 지원을 받았습니다. 함께 토론해주신 명형국 학형, LG 전자의 허성욱 박사님, 동아방송전문대학교의 최영하 교수님께 감사드립니다.

## 참고문헌

- H. Staffeldt, "Correlation between subjective and objective data for quality loudspeakers," J. Audio Eng. Soc., Vol.22, No.6, pp. 402-415, 1974.
- Y. Tannaka, T. Koshikawa, "Correlations between sound field characteristics and subjective ratings on reproduced music sound quality," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 86, No. 2, pp. 603-620, 1989.
- F.E.Toole, "Loudspeaker measurements and their relationship to listener preferences: Part 1," J. Audio Eng. Soc., Vol.34, No.4, pp. 227-235, 1986.
- F.E.Toole, "Loudspeaker measurements and their relationship to listener preferences: Part 2," J. Audio Eng. Soc., Vol.34, No.5, pp. 323-348, 1986.
- Hyung-Gook Myung, Koeng-Mo Sung, "Loudspeaker performance evaluation algorithm using frequency response characteristic", J. Acoust. Soc. Korea, Vol. 14, No. 2E, pp. 65-72, 1995.
- J. G. Beerends, J. A. Stemerding, "A perceptual audio quality measure based on a psychoacoustic sound representation," J. Audio Eng. Soc., Vol. 40, No. 12, pp. 963-978, 1992.
- B. Paillard, P. Mabilieu, S. Morissette, J. Soumagne, "PERCEVAL : Perceptual evaluation of the quality of audio signals," J. Audio Eng. Soc., Vol. 40, No. 1/2, pp. 21-31, 1992.

- E.Zwicker, H.Fastl. Psychoacoustics. Springer—  
Verlag, 1990.
- A. Gabrielsson, H. Sjogren. "Perceived sound  
quality of sound-reproducing systems." J.  
Acoust. Soc. Am., Vol. 65, No. 4, pp.  
1019-1033, 1979.
- W.Klippel. "Multidimensional relationship  
between subjective listening impression  
and objective loudspeaker parameters,"  
Acustica, Vol.70, 1990.
- E. Zwicker, E. Terhardt. "Analytical expressions  
for critical-band rate and critical  
bandwidth as a function of frequency," J.  
Acoust. Soc. Am., Vol. 68, No. 5, pp.  
1523-1525, 1980.
- T. D. Rossing. The science of sound, Addison  
Wesley, 1990.
- 방희석, 인간의 청각특성을 이용한 스피커의 성능평가  
법, 서울대학교 석사학위논문, 1996.
- International Electrotechnical Commission,  
Publication 268-13, "Sound system  
equipment, Part 13 : Listening tests on  
loudspeakers." Bureau central de la  
Commission Electrotechnique Interna-  
tionale, 1985.



## Evaluation of loudspeaker performance considering human auditory characteristics

Hee-Suk Pang, Chul-Yong Ahn, Koeng-Mo Sung

(School of Electrical Engineering, Seoul National University)

**Abstract** The most widely used method for the evaluation of loudspeaker performance is measuring the frequency response of it. But it is hard to evaluate the performance of loudspeaker directly from the frequency response since human auditory characteristics are not linearly related to it. In this paper, psychoacoustical theories such as 24 critical bands and loudness are used for the evaluation of loudspeaker performance. Sound quality evaluation value is calculated from the comparison between frequency response of a loudspeaker and that of ideal one in the critical band-loudness domain. In doing so, we also consider the directivity characteristics of the loudspeakers by measuring the off-axis frequency response of them. For testing the reliability of the proposed method, listening tests were performed. The correlation between the results of proposed method and listening tests was 0.9765, which shows the proposed method can be used as a substitute for the listening tests.