

헤드폰의 음향적 특성과 주관적 선호도간의 상관 관계

Correlation Between the Headphone's Acoustical Characteristics and Subjective Preferences

이 기 승*, 이 석 필**
(Ki-Seung Lee*, and Seok-Pil Lee**)

*건국대학교 정보통신대학 전자공학부, **전자부품연구원 방송통신융합 연구센터
(접수일자: 2008년 11월 26일; 채택일자: 2009년 1월 22일)

본 논문에서는 헤드폰의 음향적 특성과 주관적인 선호도간의 상관관계를 분석하고, 이로부터 음향적 특성을 이용한 주관적 선호도의 예측 가능성을 알아보았다. 헤드폰의 음향적 특성으로 좌, 우 채널에 대한 고조파 왜곡, 주파수 특성의 분산, 그리고 충격과 응답의 양이 상관 계수가 사용되었다. 이들 특성은 머리 모형을 이용하여 잡음이 없는 무향 환경에서 측정되었다. 주관적인 선호도는 음량감, 선명감, 공간감, 포만감, 전체적인 느낌의 5개 항목으로 점수화하여 나타내었다. 선호도 평가에는 음악 청취에 경험이 많은 12명의 청취자가 참여하였으며 샘플 음악은 가요, 팝, 경음악, 음성, 클래식 5 종류의 음악이 사용되었다. 실험에 사용된 헤드폰은 밀폐형 4종, 개방형 2종 귀속 삽입형 2종 등 총 8개가 사용되었다. 주관적인 선호도는 이월 매치법을 이용하여 주관적 선호도에 영향을 끼치는 요인을 분석하였으며 음향적 특성과 주관적인 선호도 점수 간의 상관 계수를 구하였다. 실험 결과 오른쪽 채널에서 측정된 주파수 크기 응답의 분산이 주관적인 선호도와 가장 높은 상관 계수를 갖는 것으로 나타났으며, 충격과 응답의 양이 상관 계수는 거의 상관 관계가 없는 것으로 나타났다.

핵심용어: 헤드폰, 주관적 선호도, 음향적 특성

투고분야: 전기음향 분야 (3.1)

In this paper, correlation between the headphone's acoustical characteristics and the subjective preferences is analyzed, and a possibility of predicting the subjective preferences using the acoustical characteristics is investigated. The headphone's acoustical characteristics include the total harmonic distortions, the variation of the frequency response which were measured by separate channel and the inter-aural correlation coefficients. Those characteristics were measured in a noise-free anechoic chamber, using a head and torso simulator. The subjective preferences were scored in terms of loudness, clearness, spaciousness, fullness and overall impression. In the subjective listening test, 12 subjects were participated who have plentiful listening experiences. The programs include 5 kinds of musics: korean popular song, pop song, light music, male-voice and classic. The 8 models of the headphones were employed, including 4 closed-type circumaural headphones, 2 open-type supraaural headphones and 2 intra-concha headphones. A significant test was carried on the results from the subjective test, using a two-way ANOVA test. The correlation coefficients between the acoustical parameters and the subjective preferences were computed. Experimental results showed that the variation of the magnitude of frequency response measured from a right channel revealed higher correlation with the subjective preferences. Whereas the inter-aural correlation coefficients have very low correlation coefficients.

Keywords: Headphone, Subjective preference, Acoustical Characteristics

ASK subject classification: Electro-Acoustics (3.1)

I. 서론

휴대용 멀티미디어 재생기, MP-3 재생기 내장형 휴대

폰의 폭발적인 보급에 따라 헤드폰 재생음의 품질에 대한 관심 또한 증가하고 있다. 헤드폰에 대한 음질 평가는 일반적으로 많은 시간과 비용이 요구될 수 있으며, 청취자의 주관적인 기호에 따라 그 평가 결과가 각기 다르게 나타날 수 있다. 이에 따라 객관적으로 측정될 수 있는 음향 지표를 이용하여 주관적인 음질을 예측하고 평가할

책임저자 이 기 승 (kseung@konkuk.ac.kr)

143-701 서울특별시 광진구 화양동 1번지 143-701

건국대학교 정보통신대학 전자공학과 1417호

(전화: 02-450-3489; 팩스: 02-3437-5235)

수 있는 방법이 필요하다.

헤드폰에 대한 음향 지표는 Martin 등의 연구 [1]에서 주파수 특성과 같은 선형적인 특성과 고조파 왜곡과 같은 비선형적인 특성으로 구분하여 나타내었다. 그러나 이 연구에서는 측정된 각 음향지표와 주관적인 음질간의 상호 영향에 대해서는 충분한 연구가 이루어 지지 않았다. Yano 등은 휴대용 재생기에 널리 쓰이고 있는 Intra-concha 형 헤드폰에 대한 성능을 평가하였으며 [2], 주로 헤드폰 재생으로 인한 양이재생 (Inter-aural playback) 환경에서 음원 위치의 재현성 관점에서 평가가 이루어졌다. 스튜디오 등에 널리 사용되고 있는 모니터링 용 헤드폰에 대한 평가 방법은 Theile에 의해 연구되었으며 [3] 레퍼런스적인 용도를 고려하여 가청 주파수 대역에 대해 주파수 크기 응답이 어느 정도로 평탄하게 나타나는가를 평가의 척도로 사용하였다. 이러한 주파수 응답의 평탄성은 이전의 Martin의 연구 및 최근에 수행된 헤드폰 평가 방법 [4][8]에서도 고려된 척도로서, 오디오 신호의 충실한 재현에 가장 큰 영향을 끼치는 파라미터로 간주되고 있다. 그러나 충실하게 재현된 오디오 신호가 청취자로 하여금 항상 높은 선호도를 나타낼 것이라는 주장에는 논란이 있으며 [5] 이는 주파수 응답 외에 다른 특성을 함께 고려하는 것이 보다 의미있게 헤드폰의 음질 평가하는 것임을 나타내고 있다. 본 논문에서는 8종류의 헤드폰에 대해 오디오 재생 기기 및 라우드 스피커의 선호도 평가에 사용되었던 5개 항목 (loudness, clearness, spaciousness, fullness, overall quality) [6] 별로 주관적인 선호도를 측정하였으며, 각 헤드폰에 대한 객관적인 특성을 측정하여 선호도 점수와의 상관도를 알아보았다. 객관적인 특성으로 좌, 우 채널에서 측정된 주파수 크기 응답의 평탄 정도, 고조파 왜율, 그리고 양이상관계수 (inter-aural correlation coefficient)를 사용하였다. 이러한 상관도 분석을 통하여 헤드폰의 음향적 특징 변수

중 어떠한 변수가 주관적인 선호도에 영향을 끼치는 것을 알아보았다.

II. 사용된 헤드폰의 종류와 특성

본 논문에서 사용된 헤드폰의 종류를 표 1에 제시하였다. 총 8개의 헤드폰이 사용되었으며, 무향실에서 더미 헤드에 착용된 각 헤드폰의 사진을 그림 1에 제시하였다. IEC Pub. 268-7에서 정한 기준 [11]에 따라 사용된 헤드폰을 분류하면 헤드폰 A, B, C는 컷바퀴를 완전히 감싸는 circum-aural 형으로, 이 중 A, B는 스튜디오의 모니터링 용으로 사용되는 레퍼런스 헤드폰이었다. 헤드폰 D는 그림 1에 나타난 바와 같이 IEC 분류 법에서 circum-aural 형과 supra-aural 형의 중간 크기를 갖는 헤드폰이었으나 사용된 모형 헤드의 컷바퀴를 완전히 감싸지 못했기 때문에 supra-aural 형으로 분류하였다. 헤드폰 E는 그림 1에서 보듯이 마이크로 폰을 탑재한 헤드셋 형 헤드폰으로 주로 컴퓨터의 사운드 카드와 연결하여 사용되는 헤드폰이었다. 헤드폰 F는 헤드폰에 컷바퀴 걸이가 나와 있어 이를 컷바퀴의 뒷부분에 걸쳐서 부착시키는 방식으로 intra-concha 형 헤드폰인 G, H 보다 넓은 진

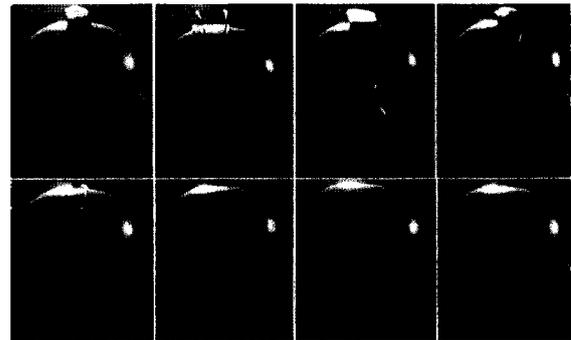


그림 1. 사용된 헤드폰의 사진
Fig. 1. The photography of each headphone.

표 1. 사용된 헤드폰의 종류
Table 1. The list of the headphones employed in this paper.

제조사	모델	방식	기호
Beyerdynamic	DT-990 PRO	개방형, Circum-aural	A
AKG	K240	반 개방형, Circum-aural	B
Behringer	HPX2000	밀폐형, Circum-aural	C
Numark	HF125	Supra-aural	D
Sennheiser	PC-131	Supra-aural	E
Panasonic	RP-HZ47-S	Supra-aural	F
Sony	MDR-E10LP	Intra-concha	G
Philips	SHS8000	Intra-concha	H

동판을 갖는다. G와 H는 이어폰 형태의 헤드폰으로 가장 작은 크기이다. 헤드폰 H는 헤드폰 F와 유사하게 컷 바퀴 길이가 마련되어 있으며, 진동판에 고무 재질의 튜브를 씌워 귀와의 거리를 어느 정도 유지하도록 설계되어 있다.

2.1. 사용된 헤드폰의 주파수 특성

그림 2는 사용된 헤드폰에 대한 주파수 특성을 나타내고 있다. 그림 2에 제시된 주파수 특성은 압소음 25 dB의 완전 무향실에서 헤드폰을 그림 1에 나타낸 바와 같이 더미 헤드 (B&K Model 4100, Demark)의 귀에 착용시키고 MLS (Maximum Length Sequence) 방법 [12]를 이용하여 측정하였다. 측정 시 무향실의 크기는 4x5x1.8 (WDH, m)

이었다. 사용된 더미 헤드는 ear canal이 없는 block ear canal 형태로서 이와 같은 더미 헤드에서 측정된 헤드폰의 주파수 특성은 귀의 입구에서 고막간의 특성을 나타내는 ear canal transfer function을 내포하고 있지 않다. Moller 등의 연구 [13]에 따르면, 이와 같은 block ear canal 측정 방법은 개인 간의 귀 특성 차이로 인한 측정 편차를 줄이면서 헤드폰 고유의 특성을 충분히 얻을 수 있다고 보고하였다. 또한 이러한 장점이 극대화되기 위해서는 FEC (Free-air Equivalent Coupling to the ear) 타입의 헤드폰 사용을 권고하고 있는데 본 연구에서 사용된 헤드폰 중 헤드폰 A, B가 FEC 헤드폰에 해당한다. 나머지 헤드폰에 대해서도 FEC 헤드폰과 완전히 동떨어진 특성을 갖는 것은 아니라고 볼 수 있기 때문에 본 논문

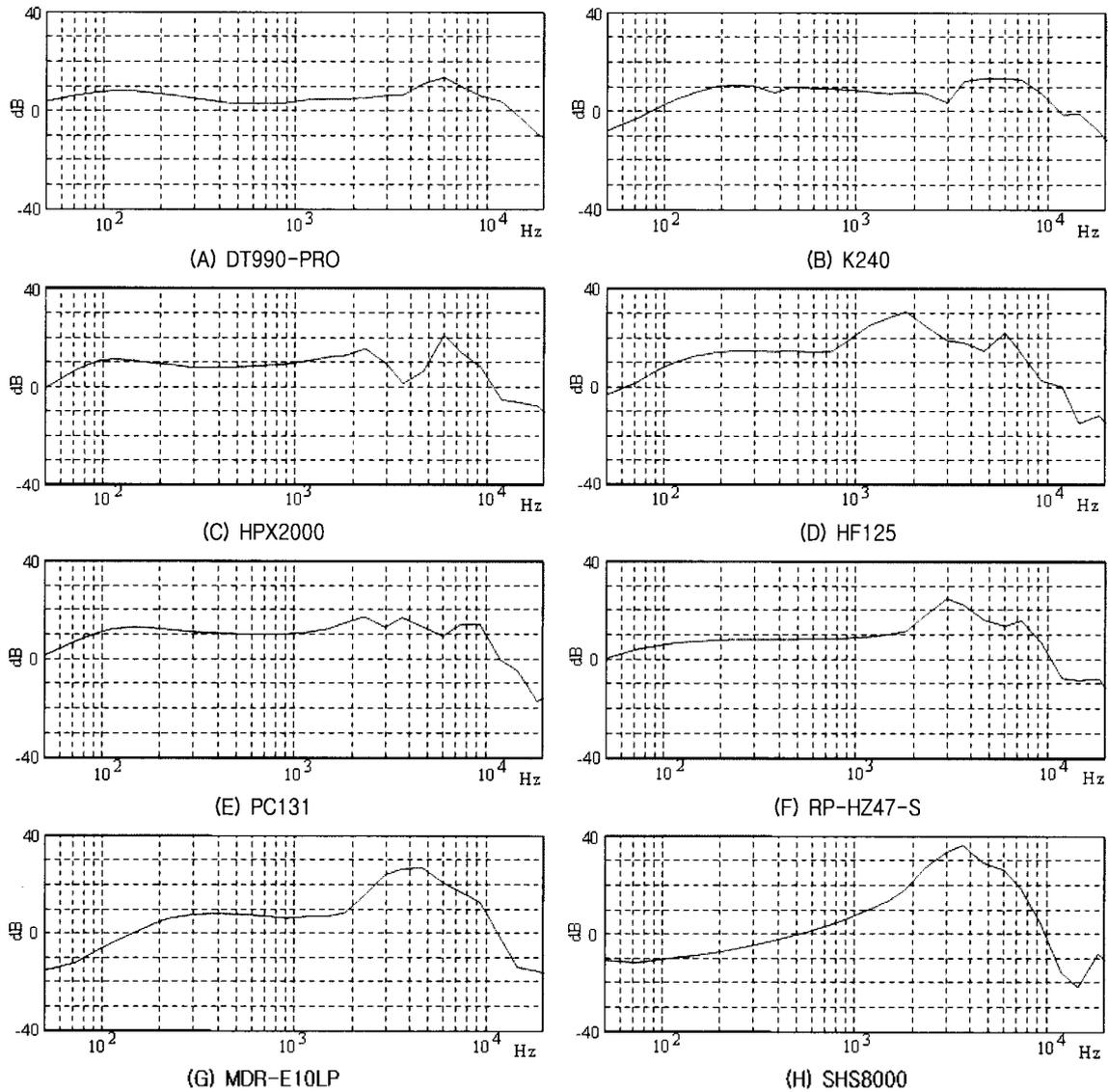


그림 2. 사용된 헤드폰의 주파수 특성
Fig. 2. The frequency responses for each headphone.

에서 사용된 block ear canal 측정 방법은 더미 헤드의 고유한 귀 특성을 억제하면서 각 헤드폰의 고유한 특성을 충분히 제공해 줄 수 있을 것으로 판단된다.

더미 헤드의 귓바퀴에 헤드폰을 장착하여 측정된 주파수 특성은 헤드폰 고유의 특성 뿐이 아니고 더미 헤드의 귓바퀴에 의한 회절, 헤드폰의 진동판과 더미 헤드의 마이크로폰 간의 주파수 특성이 함께 포함되어 있다 [4]. 따라서 본 논문에서는 헤드폰의 순수한 주파수 특성만을 추출하기 위해 더미 헤드의 귓바퀴 회절로 인한 주파수 응답, 그리고 헤드폰의 진동판과 더미 헤드의 마이크로폰 간의 주파수 전달 함수를 별도로 측정하여 이를 측정된 주파수 전달 함수에서 제거하였다. 더미 헤드의 귓바퀴 특성과 마이크로폰 특성은 제작 업체인 B&K에서 제공된 1/3 octave 단위의 크기 응답 (magnitude response) 을 사용하였다. 각 헤드폰 별로 측정된 충격파 응답 (impulse response)은 푸리에 변환을 통해 주파수 응답으로 변환한 후 이를 크기 응답과 위상 응답으로 나누어 후 크기 응답을 더미 헤드의 크기 응답으로 나누어 보정하고 위상 응답과 다시 조합한 뒤 이를 역 푸리에 변환하여 최종적으로 보정된 충격파 응답을 얻었다.

또한 각 헤드폰의 주파수 응답은 측정 시의 조건 및 귀-진동판 간의 위치 차이 등에 따라 그 특성의 차이가 나타날 수 있다. 따라서 본 연구에서는 1일 4회 씩 총 5일 간에 걸쳐 측정된 20개의 측정 결과에 대해 평균을 취하고 이를 대표 특성으로 나타내었다. 평균값은 데시벨 스케일로 나타낸 주파수 크기 응답에 대해 계산되었으며 육안적으로 평균적인 특성에서 큰 차이를 보이는 주파수 크기 응답은 평균 계산에서 제외 하였다.

그림 2에 제시된 각 헤드폰의 주파수 전달 함수는 이와 같은 주파수 응답 보정 및 평균 과정을 통해 얻어진 것이다. 그림에서 세로축은 데시벨 스케일이며 가로축은 1/3 octave 단위로 평균화된 값을 나타낸다. 그림에서 보면 스튜디오 모니터용으로 사용되는 헤드폰 A, B는 다른 헤드폰에 비해 비교적 평탄한 주파수 특성을 나타내고 있으며, 특히 헤드폰 A는 저역에 있어서도 다른 헤드폰에 비해 감쇄량이 매우 적음을 알 수 있다. 거의 모든 헤드폰은 10 kHz 이상의 고역대에서 감쇄가 일어나며 특히 intra-concha 형 헤드폰인 G, H는 저역 및 고역대의 감쇄 정도가 다른 헤드폰에 비해 상대적으로 크게 나타남을 알 수 있다. Supra-aural 형 헤드폰인 D, E, F는 중역대 (1 kHz~3.5 kHz)에서 피크가 나타났으며 저, 고역대에서는 Circum-aural 형에 비해서는 다소 높은 감쇄량을 갖는 것으로 나타났다. 헤드셋 형의 헤드폰인 헤드폰 B는 100

Hz ~10 kHz 대역에서는 Circum-aural 형 헤드폰과 유사하게 평탄한 특성을 나타내었으며 10 kHz 이상에서는 다른 Supra-aural 형 헤드폰과 마찬가지로 급격한 감쇄 특성을 나타내고 있다.

2.2. 사용된 헤드폰의 음향적 특성

본 논문에서는 헤드폰의 주관적인 선호도와 연관성 있는 음향 특성으로 좌, 우 채널에서 측정된 주파수 크기 응답의 분산 (variance) [3][4][8], 좌, 우 채널에서 측정된 고조파 왜곡 [1], 그리고 임펄스 응답의 양이 상관 계수를 사용하였다. 주파수 응답의 분산과 임펄스 응답의 양이 상관 계수는 헤드폰의 선형 특성 (linear characteristic)과 관련된 음향적 특성이며 고조파 왜곡은 헤드폰의 비선형 특성 (non-linear characteristic)과 관련된 음향적 특성이라 볼 수 있다. 고조파 왜곡은 주파수 응답의 측정 시와 마찬가지로 헤드폰을 더미 헤드의 귀에 장착 시키고 100 Hz, 200 Hz, 400 Hz, 1 kHz 정현파 함수를 발생, 더미 헤드의 마이크로폰으로 녹음하였다. 녹음된 신호를 푸리에 변환한 뒤 각 고조파 신호의 크기를 측정하여 얻었다. 고조파 왜곡의 측정 시 각 헤드폰은 정현파 신호의 주파수에 대한 크기 응답이 서로 다르기 때문에 일정한 크기의 정현파 신호를 헤드폰에 입력하더라도 마이크로폰에 녹음된 소리는 각기 다른 크기를 갖게 된다. 본 논문에서는 녹음된 각 주파수의 정현파 크기가 주파수 별로 일정한 값을 갖도록 헤드폰에 입력되는 정현파의 크기를 적절히 조절하였다.

양이 상관 계수는 일반적으로 좌, 우 채널에 대한 임펄스 레스폰스의 시간 지연 (time-lag)를 변화시키며 최대 상호 상관 계수 (cross-correlation coefficient)가 얻어지는 지점에서 결정되는데 본 논문에서와 같이 헤드폰을 사용하는 경우에는 좌, 우 채널의 임펄스 레스폰스가 거의 같은 개시 시간 (onset time)을 갖기 때문에 상관 계수의 time-lag는 0으로 설정하였다.

표 2에 사용된 8 종류의 헤드폰의 음향적인 특성을 제시하였다. 표에서 TMD_L과 THD_R은 각각 좌, 우 채널에서 측정된 고조파 왜곡을, Freq_Dv는 주파수 크기 응답의 분산, IACC는 양이 상관 계수를 나타낸다. 200 Hz, 400 Hz에 대한 고조파 왜곡값은 헤드폰 종류별로 큰 차이를 보이지 않아 표 2에서 제외하였다. 표에서 보면 intra-concha 형 헤드폰인 G와 H는 100 Hz 정현파에 대한 고조파 왜곡이 다른 헤드폰에 비해 크게 나타남을 알 수 있다. 이는 작은 진동판을 갖는 헤드폰 G와 H가 낮은 주파수에 대한 주파수 크기 응답이 낮게 나타날 뿐 아니라

비선형 왜곡도 크게 나타냄을 의미한다. 모니터링 헤드폰으로 널리 사용되는 B도 100 Hz에 대한 고조파 왜곡은 다른 종류의 circum-aural 형 및 supra-aural 형 헤드폰에 비해 비교적 크게 나타났다. 반면 1 kHz에 대한 고조파 왜곡은 모든 헤드폰이 작은 값을 나타내었는데 이는 실험에 사용된 모든 헤드폰이 인간의 귀가 가장 민감하게 반응하는 주파수 대역인 1 kHz 근방에서 낮은 왜곡을 갖도록 설계된 것이라 볼 수 있다.

주파수 응답의 분산은 그림 2에 제시한 1/3 octave 단위 평균화된 데시벨 크기 응답으로 계산되었다. 이 값은 평탄한 주파수 특성과 역관계를 갖으며 따라서 평탄한 주파수 특성에 가까운 헤드폰일수록 낮은 값을 나타낸다. 표 2를 보면 주파수 응답의 분산은 스튜디오 모니터링 용으로 사용되는 Circum-aural 형 헤드폰인 A가 다른 헤드폰에 비해 유의하게 낮은 값을 나타내었으며 PC의 헤드셋으로 사용되는 헤드폰 E도 다른 헤드폰에 비해 낮은 분산값을 나타내었다. 헤드폰 D는 다른 종류의 supra-aural 형 헤드폰에 비해 다소 높은 값을 나타내었는데, 이는 그림 2에서 보듯이 중역대에서 다소 높은 크기 응답을 갖는 것에 원인이 있는 듯 하다. Intra-concha 형 헤드폰인 H는 고조파 왜곡에서와 마찬가지로 다른 헤드폰에 비해 다소 높은 분산 값을 나타내었다. 이는 그림 2에 제시한 두 헤드폰의 주파수 특성이 저, 중, 고역대에 있어서

크기 응답의 편차가 큰 것에 기인된 것으로 보인다.

양이 상관 계수는 헤드폰 좌, 우 채널의 특성이 얼마나 유사한가를 반영하는 척도로 사용되었으며, 이 값이 높을수록 좌, 우 채널의 밸런스감이 높아질 것으로 기대된다. 표 2에 제시된 양이 상관 계수를 보면 고조파 왜곡, 주파수 응답의 분산에서와 같이 헤드폰의 형태 별로 그 값의 차이가 명확하게 구분되지는 않음을 알 수 있다. 헤드폰 D를 제외하고 모든 헤드폰은 0.9 이상의 높은 값을 나타내었다.

III. 헤드폰의 주관적인 선호도 추정을 위한 청취 테스트

본 논문에서는 헤드폰의 주관적인 선호도를 Gabrielsson에 의해 제안된 5개의 항목으로서, 다음과 같다 [6-7].

본 논문에서는 표 3의 항목에 대해 1점~10 점 사이의 점수로 평가하였다. 1점은 가장 낮은 만족도를 나타낸다. 주관적인 선호도 평가를 위해 남, 여 각각 4명, 8명의 총 12명이 청취 테스트에 참여하였다. 청취자의 연령대는 모두 20대로서 알려진 청각 장애를 갖고 있지 않았으며 8명은 과거에 유사한 청취 테스트에 참여한 바 있었다. 청취 테스트에 참여한 청취자는 표 3의 주관적인 선호도

표 2. 사용된 헤드폰의 음향적 특성
Table 2. The acoustical characteristics of each headphone.

기종	THD_L (100 Hz)	THD_R (100 Hz)	THD_L (1 KHz)	THD_R (1 KHz)	THD_L (Avg)	THD_R (Avg)	Freq_Dv (Left)	Freq_Dv (Right)	IACC
A	3.24	3.17	0.23	0.23	1.18	1.15	0.51	0.65	0.98
B	5.33	5.63	0.17	0.19	1.92	1.82	1.60	1.20	0.97
C	2.43	2.40	0.27	0.24	0.99	0.98	1.23	1.34	0.92
D	2.48	2.93	0.31	0.31	0.93	1.01	1.96	2.14	0.85
E	2.54	2.89	0.26	0.25	0.99	1.08	0.87	1.26	0.92
F	2.37	2.55	0.34	0.32	0.92	0.97	1.18	1.43	0.94
G	15.9	6.95	0.32	0.34	3.94	2.03	1.79	2.07	0.99
H	29.56	24.12	0.26	0.18	6.51	5.49	2.72	2.93	0.99

표 3. 주관적인 선호도 및 각 선호도에 대한 정의
Table 3. The list of subjective preferences and their definitions.

항목	정의
음량감 (Loudness)	재생음의 다이내믹감과 관련된 항목으로서 소리의 음량 변화가 뚜렷하게 느껴지는 정도
명확성 (Clearness)	재생음이 알만큼 뚜렷하고 명료하게 느껴지는 가를 나타내는 척도
공간감 (Spaciousness)	소리가 연주되는 공간의 좌우 거리, 원근의 깊이를 느낄 수 있는 정도
가득함 (Fullness)	소리가 공간에 가득 채워져 재생되고 있는 가를 나타내는 척도
전체적인 느낌 (Overall impression)	청취자의 개괄적인 만족감을 나타내는 척도로서 음량감, 공간감, 명확성에 우선적으로 영향을 받는 것으로 알려짐.

항목을 비교적 잘 구분하여 평가할 수 있는 사람들로써 [6]에서 제시한 청취 평가자의 기준을 만족하는 사람들로 구성하였다. 그 기준은 아래 3가지 조건 중 최소 두 가지 조건을 만족하는 경우이다.

- 1) 작곡, 기악 등을 전공하고 있는 사람.
- 2) 1달에 1회 이상의 음악회에 정기적으로 참석하는 사람.
- 3) 1일 1시간 이상 정기적으로 음악을 청취하는 사람.

청취 테스트에 사용된 샘플은 비교적 자주 심하게 들리는 음악과 음성으로서 표 4에 나타내었으며, 각 샘플에 대한 전력밀도함수 (power spectral density)를 그림 3에 나타내었다. 그림에서 보면 모든 샘플에 대해 대체적으로 10 kHz까지 높은 전력 분포를 갖는 반면 10 kHz 이상에서는 그 크기가 급격하게 감소하는 특성을 나타내었다. 각 샘플 음악은 약 30초의 길이를 갖는다. 샘플에 음성 신호를 포함시킨 것은 여화 하습이나 뉴스 청취와 같은 목적으로도 헤드폰이 자주 사용되기 때문이었다.

표 4에 제시된 5종류의 샘플 음악/음성에 대해 본 논문에서 사용된 총 8개의 헤드폰으로 재생음을 생성하고 음

표 4. 청취 테스트에 사용된 음악/음성
Table 4. The list of the sample musics/voices used in the listening test.

장르	곡명	연주/가수
가요	운명물 거슬러	SG워너비, 김종욱
팝	Mamma Mia	ABBA
클래식	Eine Kleine Nacht Musik, K. 525, 1악장	Mozart
음성	지하철 안내 멘트	남성 성우
경음악	Souvenirs D' enfance	Richard Clayderman

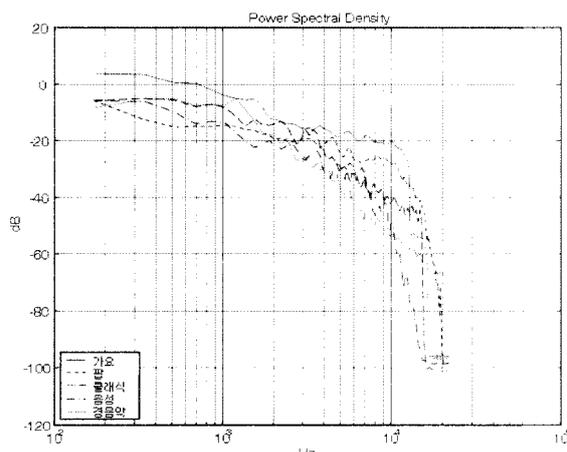


그림 3. 각 샘플에 대한 전력 밀도 함수
Fig. 3. The power spectral densities for each sample.

향 특성의 측정에 사용된 더미 헤드폰을 이용하여 녹음하였다. 따라서 청취사는 총 5x8=40개의 샘플을 청취하였다. ITU-R에서는 음질 평가가 오로지 청취음을 통해서만 이루어져야 하며 사용된 재생기기의 디자인, 가격과 같은 비 음향적인 요소의 영향을 배제해야 한다고 권고하고 있다 [5]. 그림 1에 제시한 각 헤드폰을 직접 착용하여 청취하는 경우, 청취사는 헤드폰의 디자인, 착용감, 브랜드의 개인적인 선호도에 따라 청취 테스트 결과가 영향을 받게 되며 이는 사용된 헤드폰의 음질적인 요소 외에 다른 요소에 의해 선호도 평가가 이루어짐을 의미한다 [10].

이와 같은 이유로 본 논문에서는 각기 다른 헤드폰을 사용하여 재생된 음악을 동일한 환경에서 녹음하고, 청취 테스트 시에는 녹음된 소리를 하나의 헤드폰으로 청취하는 방법을 사용하였다. 녹음은 그림 4에 나타난 바와 같이, 더미 헤드폰의 귀에 헤드폰을 장착하여 더미 헤드폰의 마이크로폰을 통하여 이루어진다. 녹음에 사용된 더미 헤드폰은 음향적 특성 측정에 사용된 것과 동일한 것을 사용하였다. 청취 테스트는 비교적 조용한 환경에서 디지털 오디오 인터페이스인 FireFace 100 (RME, Germany)와 헤드폰 A를 사용하여 이루어졌다. 청취 테스트에 사용된 모든 샘플 음악/음성은 그림 4에 나타난 바와 같이 헤드폰 A의 주파수 특성 및 더미 헤드폰의 전달 함수의 역 필터링을 수행하여 헤드폰 고유의 특성만을 반영하여 청취 테스트가 이루어지도록 하였다. 역 필터링은 아래 식과 같이 주파수 영역에서 크기 응답에 대해서만 수행되었다.

$$\hat{S}_N(f) = \frac{1}{|H_A(f)|} S_N(f) \tag{1}$$

여기서 $S_N(f)$ 는 N-번째 헤드폰으로 재생된 음악의 푸리에 변환을 나타내며 $\hat{S}_N(f)$ 는 보정된 음악의 푸리에 변환을, 그리고 $H_A(f)$ 는 헤드폰 A의 평균화된 주파수 특성을 나타낸다. 이와 같은 주파수 도메인의 역 필터링은 $|H_A(f)|$ 가 매우 작은 값을 갖게 되면 역수가 매우 큰 값을 갖게 되어 $\hat{S}_N(f)$ 가 $S_N(f)$ 와는 무관하게 매우 큰 값을 가질 수 있다. 따라서 본 논문에서는 역 필터링된 $\hat{S}_N(f)$ 가 비정상적으로 큰 값을 갖지 않도록 역 필터링이 수행되는 주파수 범위를 경험적으로 조절하였다.

청취 테스트 시 일부 참가자는 각 재생음에 대한 기준이 선정되지 않아 평가 시 어려움을 호소하였다. 따라서 본 논문에서는 일정 시간의 학습 과정 (training stage)을 청취 테스트 전에 시행하였다. 학습 과정에서는 8개 헤드폰에서 녹음된 소리의 첫머리 부분 10초 정도를 미리 들

려주어 가장 나쁜 음질과 가장 좋은 음질을 대략적으로 기억하도록 하였으며 실제 테스트 시에는 기억된 가장 좋은 음질과 나쁜 음질을 기준으로 점수를 부여하도록 하였다.

청취 테스트를 통해 얻어진 각 청취자의 선호도 점수를 살펴보면, 청취자 마다 선호도 점수의 분포가 각기 다르게 나타났다. 이는 청취자 개개인의 점수 산출 기준이 각기 다른 것에 기인된 것으로, ITU 권고안 [5]에서는 각기 다른 분포를 갖는 청취자의 테스트 결과를 스케일 팩터 (scale factor) 등을 이용하여 보정한 것을 추천하고 있다. 따라서 본 논문에서는 아래와 같은 식을 이용하여 정규화를 수행함으로써 모든 청취자에 대해 선호도 점수가 0의 평균과 1의 표준 편차를 갖도록 하였다.

$$S_i = \frac{S_i - \mu_i}{\sigma_i} \quad (2)$$

여기서 S_i 와 S_i 는 각각 i 번째 청취자의 본래 선호도 점수와 정규화된 선호도 점수를 나타내며 μ_i 와 σ_i 는 각각 i 번째 청취자의 선호도 점수에 대한 평균과 표준 편차를 나타낸다. 정규화는 5개 선호도 항목별로 독립적으로 수행하였다.

IV. 실험 결과

4.1. 유의도 검증

먼저 5개 선호도 항목에 대해, 선호도 점수에 유의한 영향을 끼치는 요인을 분석하기 위해 유의도 검증 (significant test)을 수행하였다. 유의도 검증은 2원 배치법 (2-Way ANOVA) 테스트를 사용하였으며 p 값 (유의 확률; significance probability)이 0.05 보다 작은 경우 통계적으로 유의한 차이가 있다고 간주하였다. 본 연구에서 선호도 점수에 영향을 끼치는 인자로는 헤드폰의 기종, 사용된 음악의 장르, 그리고 청취자를 들 수 있었는데, 청취자 요인은 식 (1)에 의해 모든 청취자의 선호도 점수가 평균이 0, 표준 편차 1을 갖도록 정규화 되었기 때문에 변동 요인에서 제외하였다. 표 5에 유의도 검증의 결과를 제시하였다. 5개 항목 모두에 대해 헤드폰 기종에 따른 p 값은 매우 작게 나타났으며 ($p < 10^{-16}$) 이로부터 헤드폰 기종별로 선호도 점수가 유의하게 차이가 남을 알 수 있다. 반면 청취 테스트에 사용된 음악의 장르는 선호도 점수에서의 영향을 끼치지 않았으며 ($p = 1.0$) 표에 제시되지는 않았지만 헤드폰 기종과 장르 간의 상호 작용도 거의 관찰되지 않았다 ($p = 1.0$).

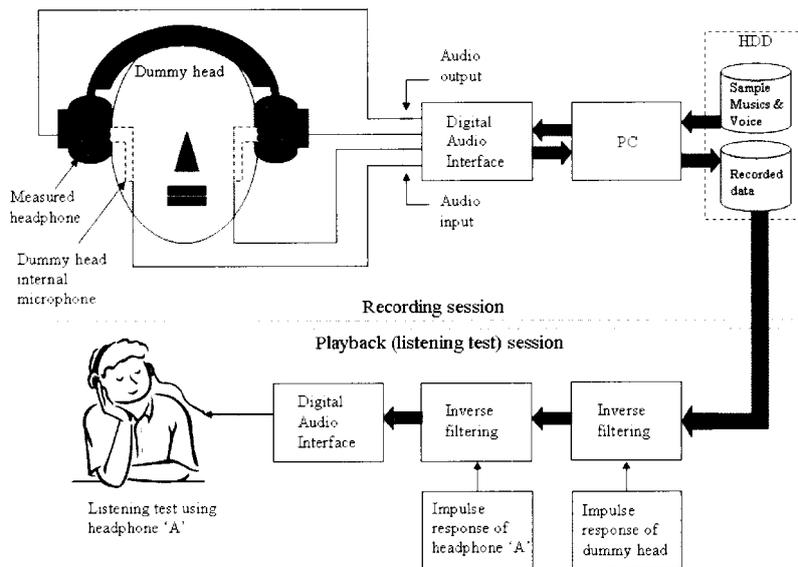


그림 4. 청취 테스트를 위한 녹음 (상) 및 재생 과정 (하)
Fig. 4. Recording session (Top) and playback session (Bottom) in listening test.

표 5. 각 선호도 항목별 유의도 검증 결과 (p-값)
Table 5. The results for each preference (p-value).

	Loudness	Clearness	Spaciousness	Fullness	Overall
헤드폰기종 별	1.3E-12	4.49E-13	2.5E-14	5.2E-17	1.9E-16
장르 별	1	1	1	1	1

4.2. 헤드폰 별 선호도

표 6에 각 헤드폰에 대한 장르 별 평균 선호도를 나타내었다. 표 6에 제시된 점수는 본래 테스트에서는 1과 10 사이의 점수로 평가되었으나 평균과 분산이 각각 0과 1을 갖도록 정규화되었기 때문에 점수 분포 또한 이에 대응하는 분포를 나타내고 있다. 각 항목, 장르 별로 가장 높은 점수에 대해서는 굵은 글씨체로 표시하였다. 표 2에서 보던 헤드셋 형 헤드폰인 헤드폰 E가 모든 선호도 항목에 걸쳐 높은 점수를 나타내고 있으며 모니터링 헤드폰인 헤드폰 A는 가요에 대해 높은 선호도를 나타내고 있다. 이와 같은 결과는 표 2에서 헤드폰 E가 전대역에 걸친 고조파 왜곡, 주파수 크기 응답의 분산값에서 일관되게 낮은 값을 나타내었으며, 특히 낮은 주파수의 고조파 왜곡에서 우수한 특성을 나타낸 사실과 대체적으로 일치하는 결과라고 보인다.

표 6에서 보면 circum-aural 형 헤드폰인 A, B, C는 5개 항목에 대해 대체적으로 높은 점수를 나타내고 있으며, intra-concha 형 헤드폰 G, H는 상대적으로 낮은 값

을 나타내고 있다. 이는 circum-aural 형 헤드폰의 주파수 특성이 intra-concha 형에 비해 평탄하게 나타나며 고조파 왜곡 및 주파수 특성의 분산에서도 유의하게 낮은 값을 갖는 것에 기인된 듯 하다. 헤드폰 C는 다른 circum-aural 형 헤드폰에 비해서는 낮은 값을 나타내고 있는데 이 헤드폰의 고주파 대역 주파수 특성이 헤드폰 A, B에 비해서는 덜 평탄하며 표 2에 제시된 고조파 왜곡과 주파수 특성의 분산도 다른 circum-aural 형에 비해 높게 나타난 것으로 설명될 수 있다.

Supra-aural 형 헤드폰인 D, E, F는 E를 제외하고 거의 모든 항목과 장르에 대해 낮은 점수를 보이고 있다. 헤드폰 F는 intra-concha 형 헤드폰인 G 보다도 다소 낮은 점수를 나타내었는데, 표 2에 제시된 객관적인 특성에서 헤드폰 G 보다 우수하게 나타난 것을 고려하면 조금의 의외의 결과로 보인다. 이는 헤드폰 F의 물리적인 형태에 그 원인이 있는 듯하다. 즉 헤드폰 F는 supra-aural 형 헤드폰으로 분류할 수 있지만, 실험에 사용된 다른 supra-aural 형 헤드폰에 비해 머리 밴드가 없는 형태이고 컷

표 6. 각 헤드폰에 대한 장르별 평균 선호도 점수
Table 6. The averaged scores of each headphones for each music style.

		A	B	C	D	E	F	G	H
Loudness	가요	1.03	0.34	0.30	-0.59	0.87	-0.33	-0.34	-1.27
	경음악	0.26	0.79	0.71	-0.27	0.81	-0.69	-0.36	-1.25
	음성	0.79	0.76	0.23	-0.32	1.16	-0.25	-0.96	-1.41
	팝	0.23	0.34	0.85	-0.55	0.68	-0.24	-0.35	-0.96
	클래식	0.34	0.57	0.38	-0.49	0.72	-0.13	-0.18	-1.21
Clearness	가요	0.42	0.22	0.25	-0.25	0.84	-0.16	0.01	-1.34
	경음악	0.15	0.55	-0.18	-0.03	0.92	0.23	-0.27	-1.37
	음성	0.78	0.56	0.35	-0.21	0.53	-0.23	-0.59	-1.19
	팝	0.25	0.42	0.12	-0.19	0.77	-0.02	0.10	-1.44
	클래식	0.26	0.70	-0.17	-0.42	0.82	0.20	0.19	-1.59
Spaciousness	가요	0.79	0.48	0.23	-0.47	0.71	-0.18	-0.21	-1.35
	경음악	0.49	0.62	0.29	-0.25	1.04	-0.61	-0.44	-1.13
	음성	0.56	0.96	0.24	-0.39	0.81	-0.27	-0.72	-1.19
	팝	0.40	0.78	-0.04	-0.50	1.02	-0.59	-0.48	-0.58
	클래식	0.37	0.45	0.18	-0.57	1.03	-0.05	-0.37	-1.04
Fullness	가요	0.92	0.33	0.40	-0.53	0.80	-0.24	-0.27	-1.41
	경음악	0.49	0.63	0.33	-0.35	1.06	-0.56	-0.23	-1.38
	음성	0.67	0.72	0.31	-0.22	1.15	-0.43	-0.67	-1.54
	팝	0.38	0.70	0.60	-0.52	0.84	-0.62	-0.26	-1.12
	클래식	0.34	0.59	0.48	-0.58	0.98	-0.09	-0.24	-1.48
Overall	가요	0.78	0.33	0.25	-0.46	0.98	-0.05	-0.26	-1.58
	경음악	0.35	0.67	0.28	-0.06	1.15	-0.71	-0.46	-1.22
	음성	0.55	0.61	0.26	-0.15	1.07	-0.27	-0.50	-1.57
	팝	0.48	0.60	0.52	-0.62	0.98	-0.45	-0.28	-1.22
	클래식	0.55	0.67	-0.02	-0.65	1.24	-0.16	-0.24	-1.39

바퀴에 고리 형태로 귀에 장착하는 형태를 갖고 있다. 이러한 구조의 헤드폰에서는 머리 밴드에 의해 고정되는 헤드폰 D, E에 비해 귀에 대한 밀착력이 부족할 것으로 판단되며, 이와 같은 불안정한 착용이 재생음의 품질에 영향을 끼친다고 생각된다.

Intra-concha 형 헤드폰인 헤드폰 H는 다른 헤드폰에 비해 유의하게 낮은 값을 나타내었다. 이 헤드폰은 진동판에 고무 형태의 튜브 부착하여 일종의 wave guide 역할을 하면서 귀에 안정적으로 장착되도록 하였다. 따라서 헤드폰 H는 다른 헤드폰에 비해 고막과의 거리가 가장 짧으며, 고막 간의 경로를 모델링 하는 헤드폰-귀 경로 전달 함수(headphone-to-ear canal transfer function)의 영향을 가장 덜 받는 헤드폰으로 간주할 수 있다. 그럼에도 불구하고 가장 낮은 점수를 나타낸 것은 청취자의 개인적 선호도가 헤드폰 귀 경로 전달 함수의 차이에 영향을 받기 보다는 진동판의 고조파 왜곡, 주파수 특성에 더 영향을 받는다는 것을 의미한다. 헤드폰 H가 다른 헤드폰에 비해 낮은 점수를 나타낸 또 다른 원인으로서 청취 테스트에 사용된 헤드폰이 circum-aural 형 헤드폰인 것을 들 수 있겠다. 이는 피실험자들이 헤드폰 H로 녹음된 소리를 들었을 때, 헤드폰의 시각적인 형태에 비해서 실제 재생음이 매우 이질적으로 느껴진 것으로 보인다.

4.3. 헤드폰의 음향적 특성과 주관적 선호도간의 상관관계

본 논문의 목적은 주관적인 선호도와 높은 상관관계를 나타내는 음향적인 특성을 찾아내어, 궁극적으로는 헤드폰에 대한 주관적인 선호도 테스트를 객관적인 음향적 특성으로 이용하여 대체하는 것이다. 이러한 목적에 부합하도록 본 논문에서는 표 2에 제시한 각 음향적 특성과 표 6에 제시한 선호도 점수간의 상관 계수(correlation coefficient)를 구하고 이를 분석하였다. 표 7에 상관 계수를 제시하였으며, 각 장르, 선호도 항목 별로 가장 높은 상관 계수를 진한 글씨체로 나타내었다.

표에서 보면 양이상관계수 IACC를 제외하고는 대부분의 음향적 특성이 주관적 선호도와 높은 상관 관계를 나타냄을 알 수 있다. Clearness를 제외한 모든 항목에 대해 장르와 관계없이 가장 높은 상관도를 나타낸 음향 특성은 오른쪽 채널에서 측정된 주파수 크기 응답의 분산(Freq_Dv_R)이었다. 이는 Theile의 연구 결과 [3]와 일치하는 것으로, 평탄한 주파수 특성이 높은 음질적인 선호도와 연결되는 것으로 풀이할 수 있다. 장르 별로 살펴보면 가요에서는 Clearness 항목을 제외하고 주파수 응답의 분

산과 주관적 선호도간의 상관도가 0.9 이상으로서, 높은 상관도를 나타내었다. 비교적 낮은 상관도를 나타낸 장르는 팝으로서 Sharpness 항목에서 0.67을 나타내었다. 선호도 항목별로 살펴보면 거의 모든 항목이 0.8 이상의 높은 상관도를 갖는 음향 특성을 1개 이상 갖고 있으며, 이는 본 연구에 사용된 선호도가 고조파 왜곡, 주파수 크기 응답의 분산과 같은 객관적인 지표로 비교적 잘 예측될 수 있음을 의미한다.

Clearness 항목의 경우 팝과 경음악에 대해서는 100 Hz 고조파 왜곡이, 나머지 장르에 대해서는 주파수 크기 응답의 분산이 가장 높은 상관도를 나타내었다. 본 논문에서 사용된 팝과 경음악은 다른 장르에 비해 악기의 수가 많지 않은 정보량이 적은 음악이라 할 수 있는데 이는 적은 정보량의 음악에서 고조파 왜곡이 음의 명료성을 결정하는 중요한 음향적 특성이라고 해석할 수 있다. 100 Hz~1 kHz의 고조파 왜곡 평균값도 각 선호도와 높은 상관도를 보이고 있지만 100 Hz의 단일 정현파 신호에 대한 고조파 왜곡이 전반적으로 약간 높은 상관도를 나타내었다. 한편 200 Hz, 400 Hz 정현파 신호에 대한 고조파 왜곡은 주관적인 선호도와 낮은 상관관계를 나타내었다.

각 채널에 따른 선호도간의 상관관계를 살펴보면 오른쪽 채널에서 측정된 음향적인 특성과 왼쪽 채널에서 측정된 음향적 특성의 각 상관도가 뚜렷하게 차이를 나타내고 있지는 않지만 오른쪽 채널에서 측정된 음향적 특성이 대체적으로 높은 상관도를 보이고 있다. 이는 청취 테스트에 참여한 피실험자가 모두 오른손잡이로서, 오른쪽 귀에서 들리는 음이 왼쪽 귀에 들리는 음에 비해 주관적인 선호도에 더 영향을 끼친다고 볼 수 있다.

IACC는 거의 모든 장르와 선호도 항목에 비해 0.1 이하의 낮은 값을 나타내어 주관적인 선호도 결정에는 거의 영향을 끼치지 못함을 알 수 있었다. 이는 표 2에 제시된 바와 같이 헤드폰 종류 별로 IACC가 큰 차이를 나타내지 못했다는 사실과 좌, 우 채널에서 개별적으로 측정된 음향적인 특성도 서로 큰 차이를 나타내지 않은 결과와 일치하는 결과로 볼 수 있다.

V. 결론

헤드폰의 음향적인 특성으로 주관적인 선호도를 예측하기 위한 선행 연구로 본 논문에서는 두 변수간의 상관관계를 측정하고 이를 분석하였다. 실험에 사용된 헤드폰은 8 종류로서, Circum-aural 형 3 종, Supra-aural

표 7. 각 장르 별 선호도 점수와 헤드폰의 특성간의 상관 관계

Table 7. The correlation coefficients between the headphone characteristics and the preference scores for each music category.

장르	음향적 특성	Loudness	Clearness	Spaciousness	Fullness	Overall
가요	THD_L (100 Hz)	-0.75	-0.79	-0.76	-0.75	-0.80
	THD_R (100 Hz)	-0.75	-0.84	-0.76	-0.75	-0.81
	THD_L (Avg.)	-0.73	-0.77	-0.73	-0.73	-0.79
	THD_R (Avg.)	-0.73	-0.82	-0.74	-0.74	-0.80
	Freq_Dv_L	-0.92	-0.87	-0.90	-0.93	-0.93
	Freq_Dv_R	-0.94	-0.85	-0.95	-0.94	-0.93
	IACC	-0.07	-0.22	-0.05	-0.07	-0.15
경음악	THD_L (100 Hz)	-0.68	-0.84	-0.68	-0.71	-0.69
	THD_R (100 Hz)	-0.66	-0.82	-0.64	-0.70	-0.65
	THD_L (Avg.)	-0.65	-0.81	-0.66	-0.68	-0.67
	THD_R (Avg.)	-0.64	-0.75	-0.73	-0.77	-0.67
	Freq_Dv_L	-0.65	-0.75	-0.73	-0.77	-0.67
	Freq_Dv_R	-0.76	-0.78	-0.80	-0.82	-0.73
	IACC	-0.23	-0.34	-0.21	-0.18	-0.31
음성	THD_L (100 Hz)	-0.78	-0.81	-0.73	-0.79	-0.83
	THD_R (100 Hz)	-0.68	-0.75	-0.64	-0.73	-0.80
	THD_L (Avg.)	-0.76	-0.79	-0.70	-0.77	-0.81
	THD_R (Avg.)	-0.67	-0.73	-0.62	-0.72	-0.23
	Freq_Dv_L	-0.82	-0.85	-0.75	-0.80	-0.83
	Freq_Dv_R	-0.88	-0.94	-0.87	-0.87	-0.87
	IACC	-0.23	-0.19	-0.14	-0.26	-0.30
팝	THD_L (100 Hz)	-0.68	-0.81	-0.43	-0.63	-0.67
	THD_R (100 Hz)	-0.65	-0.87	-0.35	-0.61	-0.65
	THD_L (Avg.)	-0.66	-0.78	-0.40	-0.60	-0.64
	THD_R (Avg.)	-0.64	-0.85	-0.33	-0.59	-0.63
	Freq_Dv_L	-0.76	-0.80	-0.58	-0.71	-0.79
	Freq_Dv_R	-0.80	-0.82	-0.67	-0.79	-0.85
	IACC	-0.16	-0.23	0.02	-0.09	-0.08
클래식	THD_L (100 Hz)	-0.76	-0.73	-0.70	-0.77	-0.68
	THD_R (100 Hz)	-0.76	-0.79	-0.67	-0.77	-0.67
	THD_L (Avg.)	-0.72	-0.69	-0.68	-0.74	-0.65
	THD_R (Avg.)	-0.74	-0.77	-0.65	-0.75	-0.65
	Freq_Dv_L	-0.83	-0.76	-0.84	-0.83	-0.82
	Freq_Dv_R	-0.89	-0.80	-0.86	-0.88	-0.85
	IACC	-0.10	-0.08	-0.10	-0.15	-0.05

형 3 종, Intra-concha 형 2 종이 사용되었다. 무향 환경에서 터미 헤드폰 이용, 각 헤드폰의 충격파 응답을 측정하였으며 이로부터 각 헤드폰의 음향적인 특성을 계산하였다. 사용된 음향적 특성은 고조파 왜곡, 주파수 크기 응답의 편차 (분산), 그리고 양 쪽 채널의 충격파 응답에 대한 양이 상관 계수였다. 주관적인 선호도는 가요, 팝, 클래식, 경음악, 음성에 대해 음량감, 명확성, 공간감, 포만감, 전체적인 느낌의 5개 항목으로 평가하였다. 터미 헤드폰에 각기 다른 헤드폰을 착용시켜 녹음된 소리를 들려주

는 청취 테스트 방법을 사용하였으며, 실험 결과 Circum-aural 형이 전반적으로 높은 선호도를 나타내었으며 헤드셋 형 supra-aural 헤드폰이 가장 높은 선호도를 나타내었다. 상관도는 양이 상관 계수를 제외한 음향적 특성이 대체적으로 높은 값을 나타내었으며, 오른쪽 채널에서 측정된 주파수 크기 응답의 분산이 주관적인 선호도 결정에 유의한 영향을 끼치는 음향적 특성임을 알 수 있었다. 추 후 연구로는 본 연구에서 밝혀진 상관 관계를 이용해 헤드폰의 음질을 자동적으로 평가하는 시스템을

구현하는 것을 들 수 있겠다.

참고 문헌

1. D. W. Martin and L. J. Anderson, "Headphone measurements and their interpretation", *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 19, No. 1, pp.63-70, 1947.
2. S. Yano, H. Hokari and S. Shimada, "A study on the derivation of transfer functions for sound image localization using stereo earphones", *J. Audio Eng. Soc.*, Vol. 47, No. 6, pp. 469-478, 1999.
3. G. Theile, "On the standardization of the frequency response of the high-quality studio headphones", *J. Audio Eng. Soc.*, Vol. 34, No. 12, pp. 956-969, 1986.
4. T. Hirvonen, M. Vaalgamãa, J. Backman and M. Karjalainen, "Listening test methodology for headphone evaluation", *AES 114th convention*, Preprint No. 5736, 2003.
5. International Telecommunications Union, ITU-R Recommendation BS. 1116, 1994-1997.
6. A. Gabrielsson, "Perceived sound quality of high-fidelity loudspeakers", *J. Audio Eng. Soc.*, Vol. 33, No. 1/2, pp. 33-53, 1985.
7. A. Gabrielsson, B. N. Schenkman, and B. Hagerman, "The effects of different frequency responses on sound quality judgements and speech intelligibility", *J. Speech Hear Res.*, 31, pp.166-177, 1988.
8. 성호영, 김종배, 이준현, 장성철, "헤드폰 및 이어폰의 데이터 측정 및 객관적 음질 평가 방법", *한국음향학회 추계학술발표대회 논문집* 제23권 2호, 505-506쪽, 2004년 11월.
9. 김성한, "헤드폰의 주파수 특성 측정방법에 관한 고찰", *한국음향학회 학술발표회 논문집*, 99-103쪽, 1991년 6월.
10. F. Toole and S. E. Olive, "Hearing is believing vs. Believing is hearing: blind vs. sighted listening tests, and other interesting things", *AES 91th convention*, Preprint No. 3894, 1994.
11. IEC Pub. 268-7, Sound System Equipment - Part 7 "Headphones and headsets", 1984.
12. D. D. Rife and J. Vanderkooy, "Transfer-function measurements using maximum-length sequences", *J. Audio Eng. Soc.*, Vol. 37, No. 6, pp. 419-444, 1989.
13. H. Moller, D. Hammershol, C. B. Jensen and M. F. Sorensen, "Transfer characteristics of headphones measured on human ear", *J. Audio Eng. Soc.*, Vol. 43, No. 4, pp. 203-217, 1995.

저자 약력

•이 기 승 (Ki-Seung Lee)



1991년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학사)
 1993년 2월: 연세대학교 대학원 전자공학과 (공학석사)
 1997년 2월: 연세대학교 대학원 전자공학과 (공학박사)
 1997년 3월 - 1997년 9월: 연세대학교 신호처리 연구센터 선임 연구원
 1997년 10월 - 2000년 9월: AT&T Shannon Lab 연구원
 2000년 11월 - 2001년 8월: 삼성종합기술원 HCI Lab 전문연구원
 2001년 9월 - 2007년 8월: 간국대학교 정보통신대학 전자공학부 조교수
 2007년 9월 - 현재: 건국대학교 정보통신대학 전자공학부 부교수
 *주관분야: 생체 신호 처리, 오디오 신호 처리 등.

•이 석 필 (Seok-Pil Lee)



1990년 2월: 연세대학교 전기공학과 (공학사)
 1992년 8월: 연세대학교 대학원 전기공학과 (공학석사)
 1997년 8월: 연세대학교 대학원 전기공학과 (공학박사)
 1997년 7월 - 2002년 2월: 대우전자(주) 선임연구원
 2002년 3월 - 현재: 전자부품연구원 방송통신융합 연구센터장
 *주관분야: 비디오 신호 처리, 오디오 신호 처리