

# 헤드폰의 주파수 특성 측정방법에 관한 고찰

◦ 김성한, 강경옥, 강성훈

한국전자통신연구소/신호처리연구실

## On the frequency characteristics measurement methods of headphones

Sung-Han Kim, Kyeong-Ok Kang, Seong-Hoon Kang  
Electronics and Telecommunications Research Institute

### I. 서론

최근 PCM 녹음 재생 및 CD 등 전기음향 전송계의 기술적 발전은 디지털 기술의 도입에 의해 종래의 아날로그 기술만으로서 기대할 수 없었던 dynamic range의 증가나 S/N비의 향상이 가능하게 되었다. 이러한 전송방식의 진보에 비해 전송계의 단말인 스피커나 헤드폰 등의 변환기에는 본질적인 진보가 없었던 것이 현실이다. 이러한 원인 중 하나로서 스피커나 헤드폰 등에 대한 합리적인 측정 평가법이 아직 확립되지 않았다는 점을 들 수 있고, 그 결과 헤드폰을 사용한 청각 실험을 하는 경우 헤드폰의 주파수 특성의 측정방법에 따라 실험결과가 크게 변하기 때문에 표준 헤드폰의 주파수 측정 방법이 요구된다.

본고에서는 종래의 의사귀와 커플러를 이용한 헤드폰의 주파수 특성 측정방법과 최근 새로운 측정 방법으로 제안되고 있는 HATS(Head And Torso Simulator)를 이용한 헤드폰 측정방법을 사용하여 여러 형태의 헤드폰의 주파수 특성을 측정하였으며, 결과적으로 현실적인 헤드폰의 주파수 특성 측정방법 및 그 결과에 대해 고찰하고자 한다.

### II 헤드폰의 종류

현재 음향기기로 통용되고 있는 헤드폰의 종류는 IEC Pub. 268-7[2]에 따르면 헤드폰과 귀와의 음향적 커플링(coupling) 방법에 따라 circumaural 형, supraaural 형, intra-concha 형 및 insert 형으로 구별할 수 있고, 이는 또 다시 헤드폰의 후면을 통한 음향 신호의 누설(leakage) 여부에 따라 개방형과 밀폐형으로 나눌 수 있다.

또, 1988년 CCITT SG XII에는 잠정적으로 헤드폰의 ear pad부분의 외경에 따라 종류를 표 1과 같이 구분하고 있다.

### III. 헤드폰의 주파수 특성 측정 방법

종래의 헤드폰 측정방법은 Beranek(1950)[4]의 분

표 1. 헤드폰의 분류(CCITT SG XII)

헤드폰의 종류	외 경 (mm)
supra-aural	> 30
supra-concha	25 ~ 30
intra-concha	< 25

류에 의하면 크게 나누어 실제 귀를 이용한(real ear) 측정과 의사귀(artificial ear) 측정으로 나눌 수 있고, 전자는 다시 고막음압법, 외이도음압법 및 음량평형(loudness balance)법으로 나누어 진다. 여기서 실이 측정은 직접 사람을 이용하여 측정을 하는 것으로서, 고막음압법과 외이도음압법은 probetube microphone를 귓속에 삽입하여 헤드폰 착용시의 고막 또는 외이도에서의 음압을 측정하여 헤드폰 주파수 특성을 구하는 방법이다. 그리고 음량평형법은 사람이 스피커를 통해 자유음장에서의 기준음을 들은 후 헤드폰을 착용하고 다시 음을 듣고, 이 음의 크기와 자유음장에서의 기준음의 크기가 일치하도록 감쇠기를 조정해 그 감쇠값으로부터 헤드폰 특성을 구하는 방법이다. 이것은 사람의 감각에 기초를 둔 주관측정 방법이다.

결국 이러한 실이 측정법은 직접 사람을 이용하기 때문에 측정결과에서 사람의 개인차의 영향을 배제할 수 없다는 문제점 때문에 일반적으로 사용되지 않으며, 현재에는 주로 의사귀 측정법을 사용하고 있다. 이 의사귀 측정법이란 사람의 귀의 음향적 특성이나 용적 등을 모사한 커플러를 사용한 헤드폰 특성 측정법으로, 헤드폰 측정에 주로 많이 사용되는 의사귀로는 IEC 의사귀와 6cc 커플러를 들 수 있다. 6cc 커플러는 단순히 사람의 귀의 용적을 근사한 것인데 비해, IEC 의사귀는 귀의 용적을 모의하고 사람 귀의 음향 임피던스를 근사시킨 것이다.

최근에 새롭게 제안되고 있는 헤드폰의 측정방법에 대해 고찰해 보면 Bell 연구소의 Inglis(6)는 전화전송계의 평가시 '사람이 있어서 가장 자연적인 특성이란 무엇일까?' 라는 문제를 해결하기 위하여 정조통화계(Orthotelephonic System; OTS)를 정의 하였다. 그에 따르면 가장 자연적인 대화 상태는 사람이 서로 마주보고 대화를 하는 상태로 화자의 입으로부터 1m 떨어진 청자의 고막까지의 주파수 특성이 사람이 있어 가장 자연적인 특성이라고 정의했다. 이 정의를 전화전송계에 도입하여 전화의 경우 기준이 되는 계를 정조통화계라 하며, 이 정조통화계를 기준으로하여 전화전송계의 특성을 정량적으로 나타낸 것을 정조통화 레스폰스(Orthotelephonic response; OTR)라고 한다.

이와같이 사람의 자연적인 청취상태에서의 고막음압을 기준으로 하여 IEC에서는 보청기의 의사 "in situ" 측정을 표준화 하였다(7). 이때 Inglis의 정조통화계와는 달리 사람대신에 그것을 모사한 소위 dummy head microphone을 사용한 점이 특징이고, 이러한 "in situ" 측정의 표준화에 따라 이 dummy head microphone의 정식 명칭으로서 HATS(Head And Torso Simulator)가 제정되었다. 이 방법은 HATS가 음압의 주파수 특성이 평탄한 이상적인 스피커에 정면으로 대하고 있을 때의 고막음압  $P_o$ 와, HATS가 착용한 상태의 고막음압  $P_h$ 를 구해 보청기의 실제이득(삽입이득)을 구할 수 있다.

$$\text{삽입이득} = 20 \log_{10} \frac{P_h}{P_o} (\text{dB})$$

결국 지금까지 설명한 정조통화계의 개념에 기초를 둔 측정원리를 헤드폰의 경우에도 적용할 수 있다. 그림 1과 같이 공간에서 스피커를 정면으로 대하고 있는 HATS의 고막음압  $P_o$ 와, 다음에 HATS의 위치에 음압의 주파수 반응이 평탄한 이상적인 마이크를 두고 그 출력을 이상적인 앰프를 통해 헤드폰에 가해 이때의 고막음압  $P_h$ 를 구하면 그 헤드폰의 특성을 구할 수 있다. 이 원리에 의하면 사람이 각종 변환기를 통해 음을 들을 때의 고막음압을 측정할 수 있기 때문에 이를 자유음장에 있어서의 자연적인 청취상태의 고막음압과 비교해 변환기의 특성을 평가할 수 있고, 이때  $P_o$ 와  $P_h$ 가 완전히 일치하면 이 헤드폰 특성이 이상적인 것이 될 것이다. 그래서 HATS를 이용하면 종래의 의사귀에 의한 측정에서는 명확하지 않았던, 사람이 있어서 가장 자연적인 헤드폰 특성의 의미를 명확하게 나타낼 수가 있고, 종래에는 불가능했던 형식이 다른 각종 음향기기의 특성의 통일적 비교가 가능하게 된다.

#### IV. 실험

##### 1. 의사귀와 커플러를 이용한 헤드폰의 주파수 특성 측정

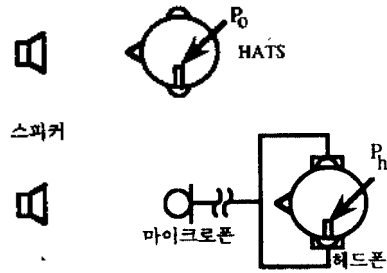


그림 1. 헤드폰의 측정

헤드폰 측정에 사용된 의사귀는 B&K 4153형과 B&K 4152형으로 B&K 4152형에서는 6cc 커플러(DB 0909)와 2cc 커플러(DB 0138)를 사용하였다. 실험에 사용한 의사귀의 제특성을 표 2와 같다.

표 2. B&K 의사귀의 제 특성

특성 의사귀	커플러 특성	용도	마이크로폰
B&K 4153형	IEC Pub. 318 사람의 귀의 유적, 통합 임피던스 모사	circumaural 형 supraaural 형 intra-cocha 형	B&K 1/2인치 콘덴서 마이크로폰 4134형
B&K 4152형	6cc 커플러(IEC Pub. 303) 귀의 용적만 모사	supraaural 형	B&K 1인치 콘덴서 마이크로폰 4144형
	2cc 커플러(IEC Pub. 126) 귀의 용적만 모사	보청기용 이어폰 (max형 이어폰)	

실험은 정현파 신호 발생기 B&K 1027형을 사용하여 발생시킨 정현파 신호를 의사귀의 커플러에 장착된 측정용 헤드폰의 입력단자에 가해, 이 헤드폰의 출력신호를 의사귀에 장착된 콘덴서 마이크로폰을 거쳐 의사귀에 연결된 프리앰프를 통해 측정용 앰프 B&K 2610형으로 보낸 후, 이 출력신호를 측정용 앰프에 연결된 레벨 기록기 B&K 2307형에서 기록하도록 하였다. 이때 레벨 기록기와 신호 발생기를 전기적으로 연동시켜 기록기와 신호발생기의 주파수를 일치하도록 하여 20Hz에서 20kHz까지의 주파수 범위에서, 헤드폰의 커플러에 1kHz의 정현파를 입력시켜 그 출력이 94dB SPL의 음압이 되도록 입력전압을 조정하여 주파수 특성을 측정하였다.

실험에 사용한 헤드폰의 종류와 제반 측정조건을 요약하여 표 3에 나타내었다.

##### 2. HATS를 이용한 헤드폰의 주파수 특성 측정

측정에 사용한 HATS는 B&K HATS 4128형으로 이 HATS를 이용한 헤드폰 측정은 실시간 디지털 주파수 분석기 B&K 2133형을 이용하여 내부의 신호 발생기로 pink noise를 발생시켜 이를 B&K 2706형 파워 앰프를 통해 HATS에 착용된 헤드폰의 입력단자에

표 3. 측정용 헤드폰의 종류와 측정조건

헤드폰	조건	입력전압 (V)		형(N)	이델터 (B&K 4153)
		B&K 4153	B&K 4152		
C1(circumaural, 개방형)		1.30		헤드밴드외 장력이용	DB 0643
C2(circumaural, 밀폐형)		0.20			
C3(circumaural, 개방형)		1.90			
S1(supraaural, 개방형)		0.28	0.24(6cc)	3	YJ 0304 역으로 설치
S2(supraaural, 개방형)		0.26	0.15(6cc)		
I1(intra-concha, 개방형)		0.84	1.38(2cc)	2	YJ 0304 역으로 설치
I2(intra-concha, 개방형)		0.44	1.50(2cc)		

가한다. 이때 헤드폰에 입력되는 전압을 일정하게 유지하기 위하여 IEC Pub. 268-7(1984)에 따라 120Ω 저항을 파워 앰프와 헤드폰의 입력단자 사이에 직렬로 연결하였다. 그리고 나서 헤드폰의 출력신호를 다시 B&K 2133으로 입력시켜 헤드폰의 주파수특성을 측정하였으며 IEEE bus에 의해 B&K 2319형 디지털 그래픽 플롯터에서 그 결과를 플롯하였으며 측정에 사용한 블록도는 그림 2와 같다.

이때 주파수 분석기에 나타난 헤드폰 출력단의 음압레벨이 주파수보정의 'A 보정'의 결과 1Pa(94dB SPL)이 되도록 각 헤드폰마다 파워 앰프를 조정하여 20Hz-20kHz까지의 주파수 특성을 측정하였고 사용한 헤드폰은 표 3과 동일하다.

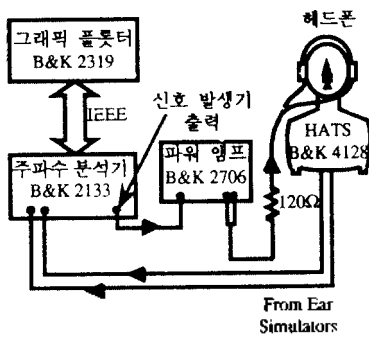


그림 2. HATS에 의한 헤드폰 측정 블록도

V. 결과 및 고찰

표 3의 7개 헤드폰에 대해 주파수 특성을 측정 한 결과를 circumaural 형은 그림 3에, supraaural 형은 그림 4에, 그리고 intra-concha 형은 그림 5에 나타내었다. 각 그림에서 좌측은 HATS에 의한 측정결과를, 우측은 의사귀와 커플러에 의한 측정결과를 나타내고, HATS에 의한 측정결과에는 HATS에 헤드폰을 착용한 상태의 주파수 특성을 실선으로, HATS에 대해 0°로 입사한 음원에 대한 자유음장 음원에서 고막까지의 총 주파수 반응의 측정치인 LFR 특성(circumaural), ERP\_EDRM 특성(supraaural), 및 EEP\_EDRM 특성(intra-concha)을 점선으로, 그리고 각 헤드폰 형태에 따른 헤드폰만의 주파수 특성

을 파선으로 나타내었다. 여기에서 HATS에 헤드폰을 착용한 상태의 주파수특성과 자유음장의 주파수 특성인 LFR 등을 비교함으로써 헤드폰 착용시의 특성이 어느만큼 자연적인 특성(LFR 등)에 가까운가를 확인할 수 있다.

그림 3의 circumaural 형 헤드폰의 측정결과에서는 HATS를 이용한 측정결과 중 파선으로 나타난 헤드폰만의 주파수 특성과, 의사귀 B&K 4153 형을 이용한 헤드폰 측정결과 사이에 어느 정도의 유사성을 보이고 있으나, 두 방법 사이에 일정한 관련성을 찾기 어렵다고 생각한다. 이는 HATS에 의한 측정결과에서는 자유음장의 주파수 특성인 LFR(점선)과 헤드폰 착용시의 주파수 특성(실선)의 비교에 의해 그 헤드폰 착용시의 특성이 어느만큼 자연적인 청취 상태에 가까운가를 알 수 있으나, 의사귀에 의한 측정결과로서는 착용시의 헤드폰 특성을 추정하는 것은 곤란하다는 것을 의미한다.

또 그림 4에서는 실험에 사용한 의사귀 B&K 4153형과 B&K 4152형에 따라 2KHz 이상의 주파수 특성에서 차이를 보이고 있는데, 이는 B&K 4152형에서는 귀의 용적만 모사한데 비해, B&K 4153형에서는 이외에도 귀의 음향임피던스까지 모사한 점에서 4152형보다 어느정도 HATS에 의한 주파수 특성에 유사하다고 볼 수 있다.

한편 그림 5의 intra-concha 형 헤드폰 측정결과를 두가지 의사귀 사이에서도 큰 차이를 보이는데, 이는 B&K 4152형의 2cc 커플러가 원래 보정기용 이어폰 측정에 사용되는 것이기 때문이라고 생각하며 결과적으로 intra-concha 형 헤드폰의 측정에는 부적합하다고 할 수 있다.

지금까지 살펴 본 두가지의 헤드폰 측정방법에 의한 주파수 특성 측정 결과의 차이는, 저주파 부분에서는 부정확한 누설(leakage) 모사에, 고주파 부분에서는 커플러에 의한 사람의 귀의 음향 임피던스의 불충분한 모사, 커플러내에 있어서의 공명현상, 그리고 사람의 자연적인 청취상태에서 존재하는 머리의 회절효과를 커플러가 모사하지 못한 점등에 기인한다고 할 수 있다.

결국 이상을 종합하면, 헤드폰 사용자가 다름아닌 사람이기 때문에 자연적인 청취상태에 입각한 헤드폰 착용시의 특성을 구하기 위해서는 HATS를 이용하는 것이 의사귀를 이용하는 것보다 보다 유리한 장점을 가지고 있다고 할 수 있을 것이다.

한편 통상 헤드폰의 착용상태나 방법에 따른 음색의 변화를 확인하기 위하여 HATS를 사용하여 그 주파수 특성을 평가해 보았다. 즉, 실험에 사용된 헤드폰 중 밀폐형과 개방형인 2개의 circumaural 형 헤드폰, 개방형인 supraaural 및 intra-concha형 헤드폰 각 1개를 이용하여 각각 5회에 걸쳐 측정한 주파수 특성을 그림 6에 나타낸다. 측정결과를 살펴보

던 헤드폰의 형태, 즉 circumaural, supraaural, intra-concha 형에 따라서는 그 특성변화의 차이가 없고, 단지 그 헤드폰이 밀폐형인지 개방형인지에 따라 그 변화의 폭에 차이를 보이고 있다. 즉 밀폐형인 C<sub>1</sub> 헤드폰의 경우 그 착용상태에 따라 특성 변화의 폭이 크며 특히 500Hz 이하의 저역에서 그러한 경향이 두드러졌으나, 나머지 개방형 헤드폰에 대해서는 착용상태에 따른 특성변화가 없다. 이 밀폐형 헤드폰의 저역에서의 두드러진 변화는 귀와 헤드폰의 음향 결합에 따른 누설의 변화가 착용상태에 따라 변하기 때문이라고 생각한다. 이러한 경향은 참고문헌[3]에서도 볼 수 있다.

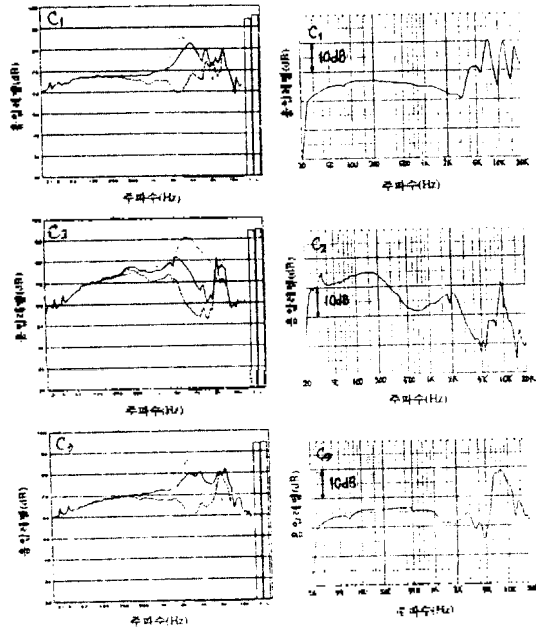


그림 3. circumaural 형 헤드폰의 측정 결과

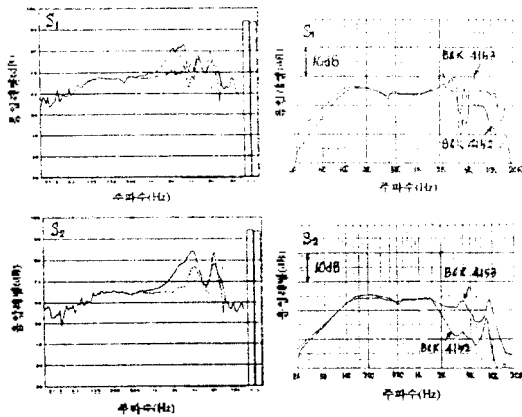


그림 4. supraaural 형 헤드폰의 측정 결과

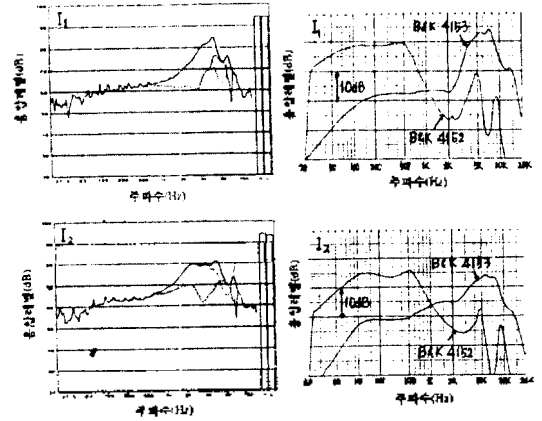


그림 5. intra-concha 형 헤드폰의 측정 결과

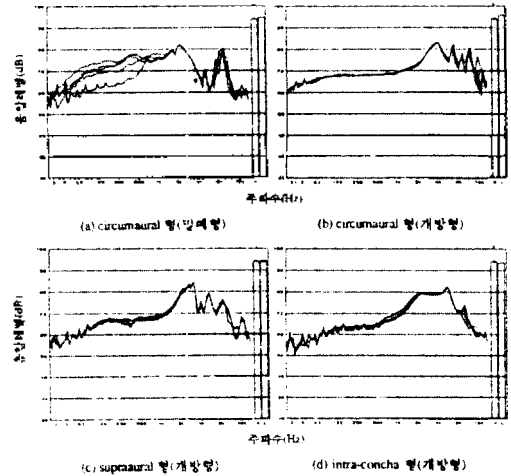


그림 6. 착용상태에 따른 헤드폰의 주파수 특성의 변화

## VI. 결론

사람에 있어서 자연적인 청취상태에 입각한 헤드폰 측정방법에 대해 고찰해 보기 위하여 HATS와 의사귀를 사용하여 헤드폰의 주파수 특성을 측정해 보았다.

측정결과 의사귀와 커플러에 의한 헤드폰 측정에서는 사용하는 의사귀와 커플러에 따라 그 특성이 다를 뿐만 아니라, 의사귀에 의한 사람의 귀의 음향 임피던스의 부정확한 모사, 사람의 머리의 회절 효과를 나타내지 못하는 점 등의 의해 자유음장 주파수 특성과 차이를 보여 결과적으로 어떠한 특성이 실제 헤드폰을 사용하는 사람에 있어 가장 자연적인 특성인가를 알기 어려웠다.

반면에 HATS를 이용하면 사람의 귀의 음향 임피던스, 머리의 회절효과 등의 보다 정확한 모사에 의해 사람의 자연적인 청취상태의 주파수 특성인 자

유음장 특성과 헤드폰 착용시의 주파수 특성의 비교를 통해 사람의 자연적인 청취상태에 입각한 주파수 특성을 측정할 수 있었다. 그러나 HATS의 귓바퀴가 실제 사람의 그것보다 두껍게 묘사되었기 때문에 전형적인 헤드밴드의 힘으로써는 실제 귀에 커플링되는 것보다는 약해, 결과적으로 저주파 부분에서 정확하게 누설을 묘사하지 못하는 점 등이 지적되고 있기도 하다. 그러므로 앞으로는 이러한 물리적 특성의 보완과 아울러 실제 사람을 이용한 음량평형법이나, HATS를 이용하여 정조통화계에 기초를 둔 실이측정, HATS 측정 및 커플러 측정을 비교해 볼 필요가 있다.

#### 참고문헌

- [1] 坪原達也, 上田和夫, "聽覺實驗用ヘッドフォンの検討", 日本音響學會講演論文集, 2-2-4, p 378-379(1989. 10).
- [2] IEC Pub. 268-7, Sound System Equipment - Part 7 "Headphones and headsets"(1984).
- [3] 岡部 馨, 三浦種敏, "DMI-ヘッドによるヘッドホン測定", JAS Journal '85-6月號, p 18-26(1985).
- [4] L. L. Beeranek, "Acoustic Measurements", John Wiley & Sons, New York(1950).
- [5] Kazuo Ueda & Tatsuya Hirahara, "Frequency response of headphones measured in free field and diffuse field by loudness comparison", *J. Acoust. Soc. Jpn. (E)* 12, 3, p 131-138(1991).
- [6] A. H. Inglis, "Transmission feature of new telephone sets", *Bell. Syst. Tech. J.* 17, p. 358(1938).
- [7] IEC Pub. 118-8, "Measurements of hearing aids under simulated in situ working conditions"(1983).