

技術解説

Head and Torso Simulator를 이용한 음향측정 및 음장재생

강 성 훈

(한국전자통신연구소)

I. 서 론

음향기구나 콘서트홀의 설계·평가에는 청각심리의 주관평가 측정이 채용되어, 음향기술의 발달에 크게 기여해 왔다. 이 주관 평가 측정에서는 측정 정밀도를 높이기 위해, 3차원 음장을 미리서 녹음하여 청취실에서 재생하여 평가하는 방법을 사용하고 있다¹⁾의. 또 최근에는 스테레오 전화의 연구와 3차원 음장 재생을 포함한 고도의 통신처리 시스템의 구축이 검토되고 있다²⁾의. 이와같이 3차원 음장의 수음, 재생 및 평가를 위해서 더미헤드(Dummy Head: 좌우 위이도에 마이크로폰을 장착한 마네킹)를 이용하고 있다. 한편, 1983년에 IEC에서는 보청기 측정을 위한 더미헤드를 심의하여, 몸통(Torso)을 포함한 계측용 더미헤드는 Head and Torso Simulator(HATS)라고 명명하였다(이하에서는 몸통의 Simulator를 갖는 것은 HATS, 머리 부분만 있는 것은 더미헤드라고 한다).

최근에는 음장의 계측·평가 및 헤드폰, 스피커, 보청기 등의 전기음향 측정예의 활용도 적극적으로 검토되고 있으며, KEMAR, B&K-HATS, SAMRAI, ACHEN HEAD, OSS HATS 등이 사용되고 있다³⁾의. 본 고에서는 사용되고 있는 더미헤드의 종류 및 특성을 개략적으로 소개하고 음향기기의 전기음향 특성 측정, 3차원 음장 재생 등의 응용 분야에 대해 기술한다.

II. HATS의 요구 조건 및 HATS의 종류

1. 요구 조건

음향 시스템은 원래의 Orthoreference 음장내에서의 청각 인상을 사용자에게 전달하는 것을 목적으로 설계되어 있다⁴⁾의. 전기통신음향(Telephonic) 시스템의 경우에 Orthoreference는 두 사람이 자유공간에서 1m 떨어져 대화할 때의 공간 특성을 말한다. 업무용 및 일반용 음향(Stereophonic 또는 Ambiphonic) 시스템의 경우에 Orthoreference는 회의실이나 콘서트 홀 등 청각상상이 생기는 장소에 있어서 두 귀로 청취하는 것(Binaural Hearing)이다.

따라서 음향 시스템에 대한 객관 측정용 HATS는 그 음향 시스템이 전달하려고 하고 있는 오리지날의 Orthoreference 상황을 충실히 시뮬레이션해야 할 뿐만아니라, 테스트 대상인 음향 시스템과의 인체이소 및 비선형 왜곡이 일어나서는 안다. 이러한 조건이 만족되어야만 음향 시스템에 의해 일어난 주파수, 시간, 공간 등의 영역에 있어서 품질변화(또는 개선)의 양을 정하여 최적화할 수 있다. 또한 Telephonic이나 Stereophonic 등의 음향 시스템 및 부속의 단점 마이크로폰이나 스피커 시스템에 미치는 광범위한 변환기에 적용할 수 있는 저가의 목적 기준 HATS가 요구된다.

2. 종 류

현재, 몇가지의 HATS가 음향계측 및 음장 평가

목적으로 개발되었다. 이러한 HATS의 형상과 각각의 특징에 대해 기술한다.

1) KEMAR(Knowels Electronics Manikin for Acoustic Research)

KEMAR는 미국의 성인 남녀의 평균 귓수를 기본으로 구성된 HATS로서, 보청기의 측정을 목적으로 1975년 개발된 것이다¹¹⁾. 이 HATS는 유명한 Zwislocki Coupler라고 하는 정밀한 Ear Simulator가 이용되고 있으며, IEC에 있어서 HATS를 이용한 보청기 측정법의 제정에 기여한 바가 크다. 그러나, 이개가 딱딱하여 헤드폰의 측정 등에는 그다지 적합하지 않다는 보고도 있다.

2) B & K-HATS

1988년 Brüel & Kjaer사가 개발한 HATS로서 헤드폰, 보청기 및 기타 전기음향 기기의 계측을 위해 개발된 것이다¹²⁾. Ear Simulator는 B & K사의 4158을 이용하고 있고, 보청기 계측에 관한 IEC 기준도 만족하도록 구성되어 있다. 이 HATS의 귓수는 세계 각국의 인종의 평균 귓수를 기본으로 만들어져 있다. 이 HATS의 커다란 특징의 하나는 국제 평균 송화자의 음장 특성을 모사한 인공입(Artificial Mouth)이 장착되어 있어서 핸드셋 전화기, 핸드 프리 전화기 및 접화 및 접화 마이크로폰 등의 "in situ" 측정을 할 수 있는 점이다. 앞으로는 전화기의 통화 품질 평가에 HATS가 널리 활용될 것이다¹³⁾.

3) SAMRAI(System for Acoustic Measurement and Research on Audio Information)

SAMRAI는 일본 성인 남성의 평균 귓수를 기본으로 구성된 HATS로서, 보청기나 헤드폰 등을 계측하는 목적으로 개발된 것이다¹⁴⁾. 이 HATS의 특징은 인간의 귀의 특성과 비슷한 부드러운 이개와 C Coupler라고 하는 Ear Simulator의 구조가 복잡하지 않고, 현장에서 안전성이 높게 계측할 수 있도록 설계되어 있다.

4) OSS-HATS

이진적 음향 전송계(Orthostereophonic System, OSS)용으로 음장 평가를 목적으로 개발되었다¹⁵⁾. 이 HATS는 30명의 일본 성인 남성의 두 귀 사이의 시간차, 진폭 특성과 머리 귓수, 한 쪽 귀의 진폭 특성, 균 지연시간 등을 데이터 베이스로 하여 설계되어 있다. 이것은 Occluded Ear Simulator가 아니고

외이도 입구에 마이크로폰을 설치하였다. 또 이벨라이저가 삽입되어 자유음장 정면 입사 특성이 평탄하도록 설계되어 있다.

III. 전기음향 특성 측정예의 응용

1. 헤드폰

헤드폰은 아주 종류가 많은 전기음향 변환기에 속한다. 그 종류는 Circumaural Type, Supraaural Type, Intra Concha Type, Insert Type 등이 있고, 또 이것들을 더욱 세분할 수 있고, 점점 복잡화되어 가고 있다¹⁶⁾. 현재까지 현실적이고 객관적이며 국제적으로 인정되는 측정법이 없고, 객관측정 규격으로 규정된 IEC 318 인공귀는 Supraaural Type에만 적용할 수 있다. 너무 단순화한 인공귀의 구조와 충실하다고 할 수 없는 Impedance Simulator, 측정용 마이크로폰의 부적절한 위치 등의 한계에 의해 얻어진 측정결과와 실제 사용시의 평가와 일치하지 않는다. 수가 많지 않는 Insert Type에 대해서만은 IEC 711 규격의 Ear Simulator가 존재한다.

실제 귀내에서 Probe 측정을 기본으로 하는 최근 연구에서는 개관적인 HATS가 헤드폰 장착시의 "in situ" 정위의 시뮬레이션과 같고, 헤드폰을 착용하지 않을 때의 확산 음장에 있어서 청취에 대해서도 아주 현실성 있는 시뮬레이션이 가능하다는 것을 증명하고 있다¹⁷⁾. "in situ"란 "본래의 위치에서"를 뜻하는 라틴어로 이 방법은 사람이 보청기를 착용한 상태의 보청기 특성을 구하는 것이다. 이 보청기의 의사 "in situ" 측정에서는 사람대신에 그것을 모사한 소위 dummy head microphone을 사용한 점이 특징이고, 이러한 의사 "in situ" 측정의 표준화에 따라 이 dummy head microphoned의 정식 명칭으로 HATS가 제정된 것이다. 그러나 이개 시뮬레이터의 기계 임피던스의 한계에 의해 딱딱한 Ear Pad를 사용한 고전적인 정면 검사용 Supraaural Type 헤드폰이나 Ear Pad의 깊이가 얇은 헤드폰에 대해서 음향 누설이 문제가 되는 경우도 있다. 그 외의 모든 경우에는 HATS를 이용하여 빠르고, 객관적이고, 대표적인 측정이 가능하다¹⁸⁾.

2) 보청기

종래 보청기의 음향특성 측정에는 IEC Pub. 126¹⁹⁾에 따른 2cc 커플러를 이용한 측정방법이 주로 사용되어 왔다. 그러나 Indis에 의하여 사람의 자연적인 청취상태에서의 고막음압을 기준으로 하여 각종 음

향기거나 전송계의 특성을 평가하는 정조통화 레스폰스(OTR)가 확립된 후^[10], 이를 전화뿐만 아니라 보청기 측정에도 적용하려는 시도가 계속되어 1983년 IEC에 의해 보청기의 의사 "in situ" 측정^[18]이 표준화 되었다. 이 방법은 그림1과 같이 HATS가 음압의 주파수 특성이 평탄한 이상적인 스피커에 정면으로 대하여 있을 때의 고막음압 P_0 와, HATS가 보청기를 착용한 상태의 고막음압 P_h 를 구해 보청기의 실제이득(삽입이득; insert gain)을 (1)식과 같이 구할 수 있다.

$$\text{삽입이득} = 20\log_{10} \frac{P_h}{P_0} \text{ (dB)} \quad (1)$$

이는 결국 정조통화계에서 전화전송계의 송화기에서 수화기까지 보청기로 대치된 것으로 생각할 수 있다.

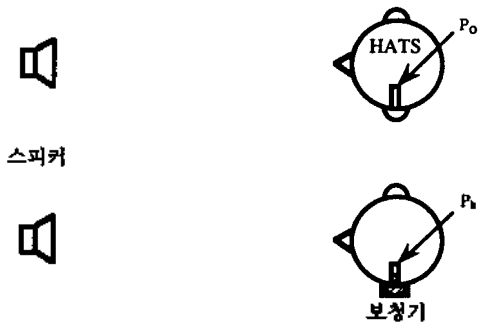


그림 1. 보청기의 "in situ" 측정

이러한 HATS를 이용한 의사 "in situ" 측정이 표준화된 후, 종래의 커플러 반응이 평탄한 보청기는 실제 착용시 음성의 정취에 중요한 2kHz~4kHz의 이득이 불충분하다는 것이 명확해져, 최근 HATS를 이용한 측정법이 이러한 문제점을 개선한 보청기 개발에 일조하고 있다.

3. 핸드-프리 전화기

핸드-프리 전화기의 전송특성에 대해서는 CCITT 권고 P.34^[19]에서 그 주관측정과 객관측정 등에 관해 권고하고 있다. 그 측정원리는 일반 핸드셋 전화기의 유량정격 측정에서 송화 유량정격 및 수화 유량정격을 측정하는 것과 동일하게, 송화감도 및 수화감도를 측정하여 CCITT 권고 P.79에 따른 알고리즘을 사용하여 송·수화유량정격을 계산한다^[2].

한편, HATS를 사용하여 핸드-프리 전화기의 정조통화 레스폰스를 측정할 경우에 그림2와 같이

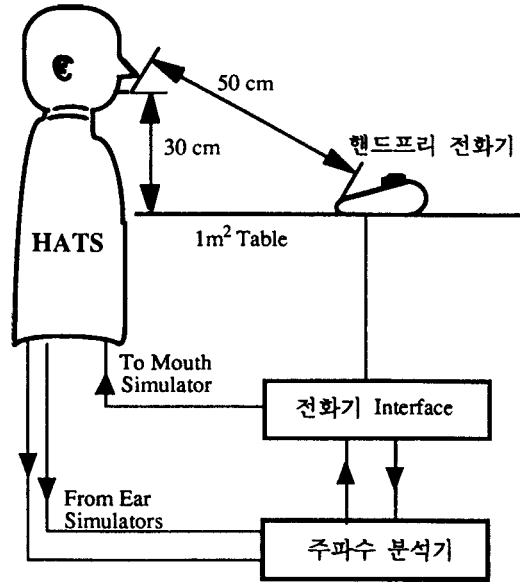


그림 2 HATS를 이용한 핸드-프리 전화기의 in-situ 측정

HATS를 사용한 기존의 핸드셋 전화기 "in situ" 측정의 개념을 적용할 수 있고, 핸드-프리 전화기의 송화 주파수특성은 (2)식으로 구하면 된다^[2].

$$S_{mj} = 20\log_{10} \frac{V_{ix}}{P_m} \text{ (dB)} \quad (2)$$

여기서 p_m 은 HATS의 MRP에서의 음압에 해당되고, V_{ix} 는 마이크로폰의 출력전압이다. 마찬가지로 수화 주파수특성은 (3)식으로 구한다.

$$S_{ie} = 20\log_{10} \frac{P_e}{V_{ir}} \text{ (dB)} \quad (3)$$

여기서 P_e 는 스피커 출력에 의한 HATS의 ERP에 생기는 음압, V_{ir} 는 스피커의 입력전압이다. 이와 같이 HATS를 이용한 의사 "in situ" 측정방법을 사용하여 송·수화 주파수특성을 측정한 후, 이로부터 송·수화 유량정격을 계산할 수 있다^[2].

4. 스피커 시스템

고품질 스피커 시스템 설계는 모달 해석이나 위텐시터 분석으로 크게 진보되었다. 여기에서 스피커 시스템의 전기음향 특성을 무향실내 뿐만이 아니고, 원유장을 재현할 필요가 있는 회의실이나 거실 등 이상적인 상태가 아닌 실제 사용 환경에서 최적화하지 않으면 안된다^[20].

Orthostereophonic과 같이 현재 상황에서 얻을 수 있는 수법을 사용하여 HATS의 Binaural 신호 파형을 녹음, 재생, 분석하는 것, 그리고 시간과 주파수 영역에서 스피커 시스템의 Binaural 특성을 조사하는 것은 비교적 간단하지만, 지각된 음장의 모든 특성을 표현하는 음향 심리적으로 적절한 Binaural Processing Model의 해명등은 연구되어야 할 문제이다. 확산감(auditory Spaciousness), 방향지각(perceived source location)이나 음상의 폭/해상도(width/definition)등과 같이 기본적인 공간 파라미터가 주어지지 않으면 안될 것이다. 그렇게 되면 음향 기기나 능동 음향제어 시스템, 홀 특성까지를 포함하는 시스템 설계자에게 문제가 되는 음성 채널의 시간, 주파수, 공간영역의 모든 특성을 비로소 개관화하고, 최적화할 수 있는 수단을 갖게 될 것이다.

IV. HATS를 이용한 음장재생

음향기술의 진보로 인류의 꿈이었던 시간과 장소에 관계없이 음악을 즐길 수 있게 된것은 약 100여년이 지났다. 그 사이의 진보에서 음악을 신호로서 전송하거나 기록하는 것은 비약적으로 진보한데 비해, 임장감 같은 공간음향 신호의 전송이나 기록은 처음 시도된 실험은 오래되었으나 별로 진전되고 있지 않다. 그 커다란 이유는 공간음향 정보를 전송할 수 없기 때문이다. 심리음향의 진보로 사람의 청각지각 현상이 밝혀지고, 양이효과(Binaural Efferct)가 공간음향지각에 아주 중요하다는 점을 알았고, 그 응용으로서 1881년 파리 만국 박람회에서는 Binaural 전화가 출현하여 화제가 되었다.

Binaural 전화의 임장감이 도약적으로 개선된 이유는 사람이 자연상태에서 듣고 있는 신호자체를 수음하고, 그대로 재생하는데 있다. 눈을 감고 있어도 음의 방향을 지각할 수 있지만, 이것은 두 귀에 입사한 음향신호가 그 실마리가 된다. 청취자의 두 귀에 도달하는 음향신호는, 음원으로 부터 나온 음이 공간의 벽으로부터 반사된 반사음을 포함하여 공간을 전반하는 동안에, 또 음원과 청취자의 위치관계에 의해 결정되는 머리와 어깨부의 영향에 따라 변한다. 이와 같은 음이 전반되는 공간적 청취자에 대한 음향정보가 고유적으로 결정되는 음향신호의 변화를 만들어 내는 것을 공간음향 전달함수라고 한다. 따라서 두 귀에 입사하는 음향신호의 음압 $f_h(t)$ 는, 음원 자체의 음향신호의 음압 $p(t)$, 음이 전반되는 공간의 공

간음향 전달함수 $s(t)$, 그리고 음원과 청취자의 위치관계로 결정되는 청취자 고유의 머리 전달함수(Head-Related Transfer Function) $h_r(t)$ 의 3가지 요인으로 (4)식과 같이 결정된다²¹⁾.

$$f_h(t) = p(t) \cdot s(t) \cdot h_r(t) \tag{4}$$

여기에서는 HATS를 이용한 음장재생방법에 대하여 설명한다.

5.1 헤드폰 재생 방식

사람이 음장에 있어서 음을 지각하는 실마리로서 고막에 입사하는 음파에만 착안하면, 더미헤드 녹음·재생계의 물리적인 목표는 더미헤드로 수음하고, 헤드폰으로 청취하였을 때 청취자 고막상에서의 음압을 원음장에서 청취자 고막상의 음압에 진폭과 위상을 같게 하는 것이다. 이렇게 하기 위해서는 그림 3에서 음원으로부터 청취자 고막까지의 머리 전달함수 H_M , 음원으로 부터 더미헤드 출력까지의 머리 전달함수를 H_D , 전송계의 전달함수를 H_T , 헤드폰으로부터 고막까지의 전달함수를 H_C 라고 하면, 두 귀에서

$$H_M = H_D \cdot H_T \cdot H_C \tag{5}$$

이 성립되면 된다. 또 직접음만이 아니고 간접음이 있는 경우에도 간접음 선부에 대해서 (5)식의 관계가 성립하면 된다.

일반적으로 더미헤드로 수음한 신호는 헤드폰으로 재생하는 경우가 많으나, 실제로는 정면이나 정중면의 음상재생이 안되는 경우가 많고, 가끔은 머리내에 음상이 정위(In-Head Localization)하는 경우도 있다. 그 원인에 대해서는 아직 해명된 것은 없다.

2) 스피커 재생 방식

2개의 스피커로 더미헤드 녹음을 재생하는 경우에는 오른쪽 스피커로 부터 청취자의 오른쪽 귀에, 왼쪽 스피커로 부터 오른쪽 귀에 입사하는 공간 Crosstalk 성분이 존재하므로 음상이 방향정위가 정위되지 않는다. 스피커도 재생된 경우의 그림 1과 같은 방법으로 Crosstalk을 제거하는 TRADIS(True Reproduction of All Directional by Stereophony)방식이 있다²²⁾. 즉, 스피커와 두 귀사이의 전달함수를 가까운 쪽의 귀에 대해 $S=S(\omega)$, 먼 쪽의 귀에 대해

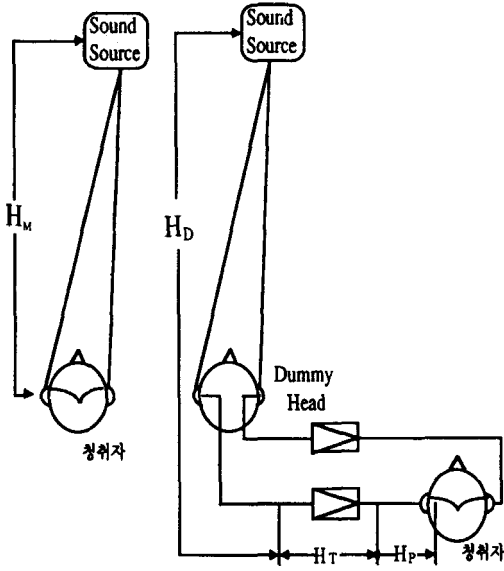


그림 3. 더미헤드의 의한 헤드폰 재생방식의 원리

$$\begin{aligned}
 Y_l &= (L+R.C). (1-C^2)^{-1}. S^{-1}. S+ \\
 &\quad (R+C.L). (1-C^2)^{-1}. S^{-1} \\
 &= L.(1-C^2)^{-1}. [1+C.A.S^{-1}] + \\
 &\quad R.(1-C^2)^{-1}. [C+A.S^{-1}]
 \end{aligned}$$

이 되고, 우변 제1항 []안은 1, 우변 제2항 []안은 0이 되므로 $Y_l = L$ 이 되고, 같은 방법으로 $Y_r = R$ 이 되며, 재생음장에서의 머리 회절 효과는 상쇄된다.

회로구성은 스피커와 두 귀사이의 임펄스 레스폰스 $s(t)$ 와 $a(t)$ 를 구하고 푸리에 변환에 의해 $S(\omega)$ 와 $A(\omega)$ 를 구하여, 그 역 필터를 구성하면 된다. 음상의 방향정위에 대한 실험 결과에서 수평면내 360도 방향에 음상정위가 가능하다. 그러나 이 재생방법 청취 위치가 한점에 고정되어 있으며, 머리를 조금이라도 움직이면 조건이 만족되지 않은 문제점이 있다.

V. 결 론

개관적 기준 HATS는 단순히 개방된 입과 귀의 시뮬레이션에 의한 조합 셋트가 아니다. HATS는 송화자 및 수화자의 음향 특성을 충실히 재생한 인간의 시뮬레이션이다. 따라서 HATS는 Orthotelephonic이나 Orthostereophonic 등의 특성의 측정을 가능하도록 하였고, 음향 시스템의 사용시 "in situ" 특성 뿐만이 아니라, 그 "in situ" 특성이 판단되는 기준이 되는 Orthoreference 특성을 충실히 시뮬레이션 할 수 있다. 해부학적으로도 충실히 복제된 기준 HATS는 음향 인터페이스를 갖는 시스템의 계획에 커다란 공헌을 할 것이다.

전화회선의 음향계의 평가에 있어서도 HATS를 사용하여 개관적 Telephonometric 측정이 가능하다. 이것은 현재의 협대역 전화 뿐만이 아니라, 장래의 광대역 전화 핸드-프리 전화의 성능 평가에도 유익하게 활용될 수 있을 것이다. CCITT SG XII에서는 이러한 개선책의 도입 방법에 대해 적극적으로 검토되고 있다.

업무용이나 일반용 음향 시스템의 평가에 HATS를 사용하면, 이러한 시스템과 마이크로폰, 헤드폰, 스피커 등의 객관적 "in situ" 성능 평가에 크게 기여할 것이다. 예를들면, 대부분의 헤드폰에 대해 오늘날 규격화되어, 현실적 측정용 변환기가 없던 상황에 대해서 HATS는 현실적이고 객관적인 측정을 위한 기준이 될 것이다. 이때문에 HATS는 IEC에서 이러

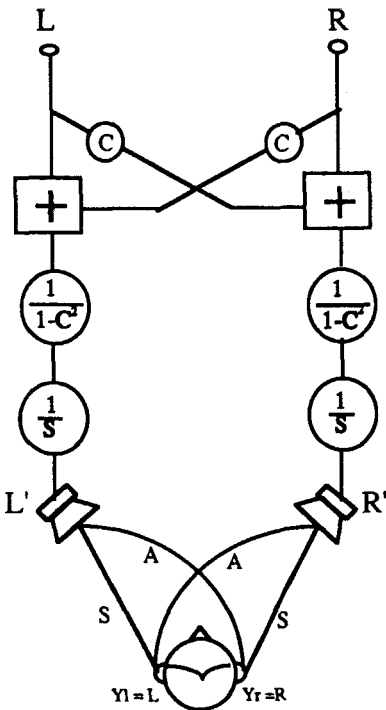


그림 4. TRADIS 방식에 의한 스피커 재생

$=A(\omega)$ 로 하고, 보상회로 중의 함수 $C=C(\omega)$ 를 $C(\omega) = -A(\omega) / S(\omega)$ 로 하면, L, R은 더미헤드로 녹음한 좌우 신호이고, 이 보상회로를 통하여 재생음장 내에서 두 귀에 도달하는 신호 Y_l, Y_r 은

한 측정을 위한 규격안을 채택하여 검토하고 있다. 객관 측정용 HATS의 이용 가치를 높이기 위해서는 라우드니스 지각, 요해도, 음상정위(Localization), 확산감(Spaciousness)등을 모델화하는 객관적 Binaural 음향 심리 신호처리 알고리즘의 해명과 그 통일이 얻어지면 가능할 것이다. 이것이 가능하면 음향 시스템의 시간, 주파수, 공간 변조 등의 영역에 있어서 열화나 개선도를 측정하여, 최적화하는 것도 가능할 것이다.

또는, HATS로 수용된 음은 마치 그 장(Field)에 있는 것과 같이 아주 임장감(또는 현실감)있는 3차원 음향정보를 포함하고 있으므로 3차원 음장통신에도 적용되고 있다¹¹. 이와같이 HATS는 음향연구에서 다방면으로 응용되고 있으며, HATS의 연구의 앞으로 더욱더 활성화될 것이다.

참 고 문 헌

1. P.Damaske, "Head-related two channel stereophony with loudspeaker reproduction," J. Acoust. Soc. Am. 52, pp 1109-1115(1971).
2. B.S. Atal & M.R. Schroeder, "Apparent sound source translator," U.S. Patent 3, 236, 949(1966, 2, 22).
3. R. Botoros, O.A. Abdel-Alim, P. Damaske and R. Goubtram, "Stereophonic Telephony," Proc. 12th Int. Cong. Acoust(Toronto), Vol. II, E9-2(1986).
4. 강성훈, "음장통신을 위한 음향신호처리 기술의 현재" 전자공학회 논문 발표대회(1992.5).
5. B&K, "Hand-free and Handset Mobile Telephony: Simulated in situ Assessment of Telephonic Signals and Noise using HATS," CCITT WP XII (2 D.19(CCITT, Geneva, 1990).
6. 강경욱, 강성훈 "HATS를 이용한 헤드폰의 in situ 측정방법에 관하여," 한국음향학회 제11권 제2호, 15-27(1992).
7. 장대영, 강경욱, "핸드 프리 통신의 음향품질 평가," 한국통신학회 하계학술 발표대회, 293-296(1992, 7).
8. C.J. Struck, "Evaluation of Headphone Performance with a Head and Torso Simulator," 13th ICA, Belgrade, Yugoslavia(1989).
9. K. Fukudome, "Equalization for the Dummy-Head Headphone System Capable of Reproducing True Directional Information," J. Acoust. Soc. Jpn. (E) 4, pp 59-67(1980).
10. L.L. Beranek, "Acoustical Measurements," Revised Edition, pp 609-611, American Institute of Physics, New York(1988).
11. M.D. Brukhard and R.M. Sachs, "Anthropometric Manikin for Acoustic Research," J. Acoust. Soc. Am 58, 214-222(1975).
12. B&K, "Head and Torso Simulator Type 4128," Instruction Manual(1988).
13. K. Okabe, "System for Simulator in situ Measurement for Hearing Aids," J. Acoust. Soc. Jpn. (E) 5, 95-103(1984).
14. 岡部 馨, 水内宗崇行, 浜田晴夫, 三浦種敏, "標準 HATSを用いた OSS の検討, その1-標準 HATS の構成," 音講演集 1-5-8, pp 365-366(1988.3).
15. CCITT, "Provisional definition of terms," Annex A, Question 12/XII, COM. XII-R-2-F(CCITT, Geneva, 1989).
16. G. Theile, "On the standardization of the frequency response of high-quality studio headphones," J. Audio Eng. Soc. 34, pp 956-969(1986).
17. IEC Pub. 126, "IEC reference coupler for the measurement of hearing aids using earphones coupled to the ear by means of means of ear inserts," IEC, Geneva(1973).
18. IEC Pub. 118-8, "Hearing aids, Part 8: Methods of measurement of performance characteristics of hearing aids under simulated in situ working conditions," IEC, Geneva(1983).
19. CCITT Rec. P, 34, "Transmission characteristics of hands-free telephones," CCITT, Geneva(1989).
20. Keld Baden-Kristensen, "音響機器測に関する應用," 日本音響學會誌, 46卷8號, pp 662-671(1990).
21. S.H. Kang, "Subjective Response and Audiotry Evoked Response for Sound Environment," Doctoral Dissertation, Kobe Univ., Japan(1987).

▲강 성 훈: 9권 1호 참조