

# 머리전달함수 측정법의 실험적 비교

## Comparison of Measurement Methods for Head-related Transfer Function(HRTF)

안 태 수\*·이 두 호†

Tae-Soo Ahn and Dooho Lee

(2009년 8월 25일 접수 ; 2009년 11월 25일 심사완료)

**Key Words** : Head-related Transfer Function(HRTF, 머리관련 전달함수), MLS(maximum length sequence) Method(MLS 방법), Random Excitation Method(랜덤가진법), Stepped Sine Method(정현과가진법)

### ABSTRACT

Three methods(the stepped sine method, the statistical method(random excitation method) and the maximum-length sequence(MLS) method) for head-related transfer functions(HRTFs) are experimentally compared in view point of accuracy and efficiency. First, the stepped sine method has high signal-to-noise ratio, but low efficiency. Second, the statistical method is fast measurement speed, but weak to noise than the other methods. Finally, the MLS method shows both good efficiency and high signal-to-noise ratio, but it needs additional software or equipment such as MLS signal generator. For comparison of measurement accuracy, HRTFs of KEMAR dummy are measured for various azimuths and elevations. Error norms for magnitude and phase of HRTFs are defined and calculated for the measured HRTFs. The calculated error norms show that the methods give similar results in magnitude and phase except a little phase difference in the MLS method.

### 1. 서 론

머리관련 전달함수는 소음원으로 부터 귀까지의 소리의 전달함수로 정의되고 음원과 고막 사이의 기하학적 형상 및 표면의 반사특성에 의하여 결정된다. 머리전달함수는 음원으로부터 이도 입구까지 소리가 전달되는 특성을 포함하고 있기 때문에 인간이 인지하는 소리의 자연스러운 재현을 위해서는 반드시 고려해야 하는 특성이며 가상현실, 게임소프트웨어, 음향기기 및 디지털 방송장비 등의 멀티미디어 산업에서 삼차원의 입체음향을 구현하기 위하여 필수적인 정보로 사용되고 있다<sup>(1)</sup>. 대표적으로

사용되는 HRTF 정보는 MIT 미디어랩에서 측정한 KEMAR(Knowles Electronics Mannequin for Acoustic Research) 더미헤드에 대한 데이터<sup>(2)</sup>가 있으며 인터넷을 통하여 공유되고 있기 때문에 많은 음향장비가 이 데이터를 이용하여 입체음향을 구현하고 있지만 개인차가 커서 빠른 측정을 위한 여러 방법<sup>(3-7)</sup>들이 도입되고 있다.

머리전달함수의 측정은 직접측정법과 간접측정법으로 나눌 수 있다. 직접측정법은 음향가진장치를 외부 음원위치에 두고 마이크로폰을 이도나 이도 입구에 두어 음원과 이도 사이의 전달함수를 측정하는 방법이고, 간접 측정 방법은 음향상반원리를 이용하여 음원과 마이크로폰의 위치를 바꾸어 측정하는 방법<sup>(7)</sup>이다. HRTF의 특성은 개인 간에 차이가 커서 많은 연구가 개인적인 특성의 차이를 신속하게 측정할 수 있는 측정방법에 연구를 집중하고

† 교신저자; 정회원, 동의대학교 기계공학과  
E-mail : dooho@deu.ac.kr  
Tel : (051)890-1658, Fax : (051)890-2232

\* 정회원, 동의대학교 대학원 기계공학과

있으나, 최근의 연구<sup>(8)</sup>는 HRTF의 측정시스템과 측정방법의 차이에 의해서도 큰 차이가 날 수 있음을 보여주고 있다. 그러나 HRTF의 많은 측정에도 불구하고 측정방법에 따른 변동정도에 대한 데이터는 찾아볼 수 없으며 이에 대한 실험적 비교 연구가 필요하다.

HRTF의 측정은 보통 정현파 가진방법(swept sine method)<sup>(9)</sup>, 통계적 가진방법(statistical method, random excitation method)<sup>(10)</sup>, MLS 방법(maximum-length sequence method)<sup>(11)</sup> 등이 주로 쓰인다. 이 연구에서는 완전무향실 내에서 세 가지 실험방법으로 인체 더미에 대한 HRTF를 측정하고 측정 과정에서의 차이점과 측정된 HRTF의 응답특성을 비교하며 각 실험방법의 장단점을 논하고 측정결과의 정량적 비교를 수행하도록 한다.

## 2. HRTF 측정방법

HRTF의 특성은 시간영역의 단위충격함수나 주파수 영역의 전달함수로 나타낼 수 있고 주변 실험장치의 특성을 제외하고 두형의 특성만을 나타내기 위하여 음원과 이도 입구사이의 소리전달 이득 값을 이용하여 표시된다. 치환법(substitution method)을 이용하여 두형더미가 없을 때의 응답인 기준 주파수 응답함수( $H_r$ )와, 두형더미가 위치했을 때의 음향응답함수( $H_e$ )를 비교하면 소리전달경로의 이득 값  $G$ 는 다음과 같이 간단한 식으로 표현할 수 있다.

$$G(dB) = 20 \log \left( \frac{H_e}{H_r} \right) \quad (1)$$

### 2.1 정현파 가진법

정현파 가진방법(sine sweep)은 일정한 주파수의 정현파로 음향공간을 가진하면서 정상상태에 도달하면 응답을 측정하는 방법이다. 정상상태의 응답의 측정을 위한 샘플링 주파수는 보통 가진주파수와 한 정현파 내에서 측정하고자 하는 응답수를 곱해서 정해진다. 이 방법은 상대적으로 큰 에너지로 음향공간을 가진하므로 신호대 잡음비를 크게 할 수 있고 양질의 전달함수를 얻을 수 있는 장점이 있다. 또한 일정한 주파수로 가진하는 동안 정해진 주파수에서 시간응답을 측정하여 평균하므로 누설에 의

한 오차가 없고 푸리에 변환이 필요 없다는 장점이 있어 시스템의 비선형성을 분석하기도 쉽다. 그러나 이 방법은 전달함수에 측정에 필요한 시간이 길어서 HRTF와 같이 많은 측정점이 필요한 경우 큰 단점이 될 수 있다.

정현파 가진방법에서는 각주파수에서 일정한 파워로 음향공간을 가진하기 위하여 두형더미가 없을 때 기준점에서의 응답이 일정하도록 스피커의 출력을 결정하는 준비작업이 필요하다. 이 스피커의 출력은 우선 기준점에서의 응답크기  $P_r$ 을 결정하고 특정주파수에서 결정된 기준응답을 발생시키는 스피커의 입력전압을 폐루프제어(closed-loop control)를 통하여 결정함으로써 얻을 수 있다. 스피커 입력단의 가진 크기가 결정되면 HRTF의 측정은 폐루프의 구성없이 특정주파수에서 정해진 크기의 가진 입력을 내보내면서 음향응답을 측정함으로써 얻어진다.

### 2.2 통계적 가진법

정현파 가진법과 같은 단일 주파수 가진방법과 달리 통계적 가진법은 광대역의 가진신호를 이용하여 음향공간을 가진하고 응답신호를 통계적으로 처리하여 전달함수를 구하는 방법이다. 음향공간에서의 주파수전달함수  $H_e$ 는 가진신호의 파워스펙트럼  $G_{VV}$ 와 가진신호와 음향응답의 상호파워스펙트럼  $G_{PV}$ 로부터 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$H_e = \frac{G_{PV}}{G_{VV}} \quad (2)$$

식 (2)의 계산을 위해서는 보통 파워스펙트럼 계산 시 평균을 취함으로써 전달함수에 대한 최소자승 근사가 가능하도록 한다. 가진을 위한 신호로는

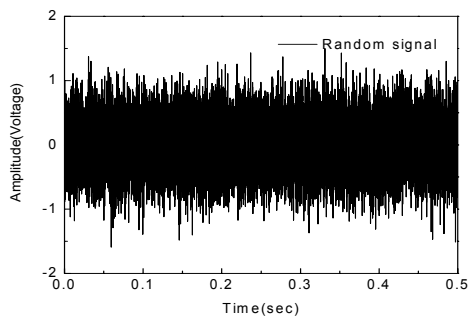


Fig. 1 White noise signal for the statistical method

광대역 백색잡음이 주로 쓰인다. 통계적 가진법은 비교적 빠른 시간에 전달함수를 측정할 수 있으나 양질의 데이터를 얻기 위해서는 많은 평균횟수가 필요하다는 단점이 있다. Fig. 1은 광대역 백색잡음 가진신호의 예를 보이고 있다.

### 2.3 MLS(maximum length sequence)가진 방법

ML 순열은 선형 피드백 시프트 레지스터(linear feedback shift register)에 의해 발생하는 이진 순열을 의미하는데  $m$ 개의 레지스터로 이루어진 경우  $L=2^m-1$ 개의 이진수로 이루어진 순열이 된다. Fig. 2는  $m=5$ 인 경우의 이진 순열을 나타내고 있다. ML 순열은 소프트웨어적으로도 쉽게 생성가능하고, 그 길이  $m$ 에 따라서 충분히 긴 주기의 신호를 발생시킬 수 있다. 이 순열은 주기적인 유사랜덤(pseudo-random) 신호이지만 같은 크기의 충격함수보다  $2^m$ 배의 에너지를 갖고 센서 등의 왜곡에 강한 특성이 있어 잡음이 많은 음향 측정공간에서도 양질의 시스템 전달함수를 측정할 수 있어 실내음향 분야의 측정에서 많이 쓰이고 있다.

전달함수의 측정에서 MLS 신호의 자기상관함수는 kronecker 델타 함수라는 성질을 이용하여 시스템의 단위충격함수를 다음의 식 (4)로 구할 수 있다.

$$R_{VP}(n) = h(n) - \frac{1}{L+1} \sum_{k=0}^{L-1} h(k) \quad (3)$$

위 식에서  $R, h$ 는 각각 상관함수와 단위충격함수이고  $n$ 은 시간을 의미한다. 식 (3)의 우변 두 번째 항은 교류성분의 신호인 경우 0이 되고 직류성분이

있는 경우에도  $L$ 이 크다면 무시할 수 있으므로 시스템의 주파수전달함수는 MLS 입력과 음향응답 사이의 상호상관함수로부터 충격응답함수를 구하고 이를 푸리에 변환하여 얻을 수 있다.

### 3. HRTF의 측정

HRTF의 측정은 Fig 3과 같이 GR.A.S.사의 KEMAR 마네킨에 KB0060, 61의 작은 귀(small ear)를 장착하여 완전무향실에서 이루어 졌다. 무향실은 3.2 \* 3.2 \* 2.5 m의 유효공간을 가지며 음향공간의 가지는 싱글드라이브를 갖는 Bose Model 32SE 라우드스피커를 이용하였고, 두형더미의 머리중심으로부터 1.5 m 거리에 위치시키고 이도입구에 마이크로폰을 설치하여 음향응답을 측정하였다. 측정 시 사용한 방위각과 고도 기준은 Fig. 4와 같다. HRTF의 측정은 고도가 -30°, 0°, 그리고 30°인 경우에 대하여 각각 방위각을 15°씩 증가시키면서 360°까지 회전시켜 모두 72번의 측정을 실시하였다. 측정은 앞절에서 기술한 정현파 가진법, 통계적 가진법 및 MLS 방법에 대하여 반복하여 수행되었다.

Fig. 5는 실험방법들에 대한 실험장비설정을 보여주고 있다. 정현파 가진방법(sine sweep)은 CADA-X 소프트웨어와 SCADAS III front-end를 이용하여 두형 더미가 없는 상태에서 더미 머리 중앙부 위치의 응답이 74 dB가 되도록 가진 라우드스피커에 입력되는 정현파 입력신호 크기를 제어 한 후

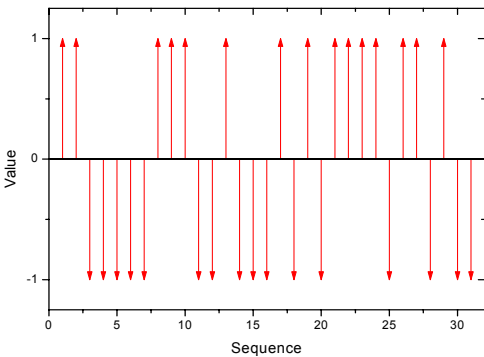


Fig. 2 ML sequence for  $m=5$



Fig. 3 Experimental set-up for HRTF measurement

두형더미를 설치하고 기록된 신호로 스피커를 가진 할 때 이도 입구에서의 음향응답을 측정하는 방법으로 HRTF를 구하였다. 이 연구에서는 100 Hz~12 kHz 주파수 영역대에 대해 로그스케일로 0.03 %씩

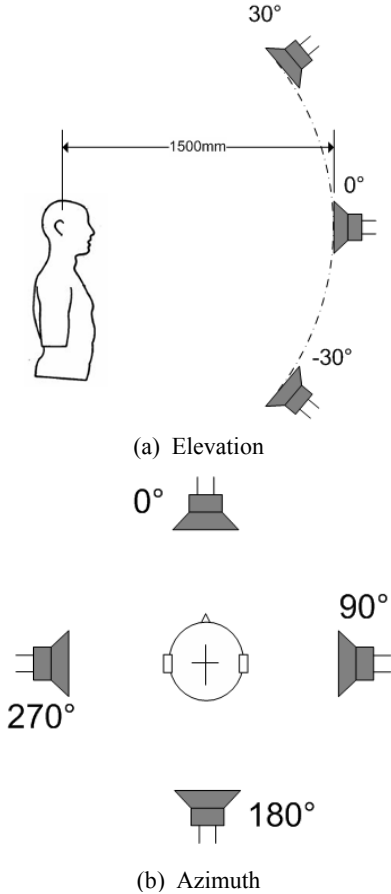


Fig. 4 Sign conventions of azimuth and elevation

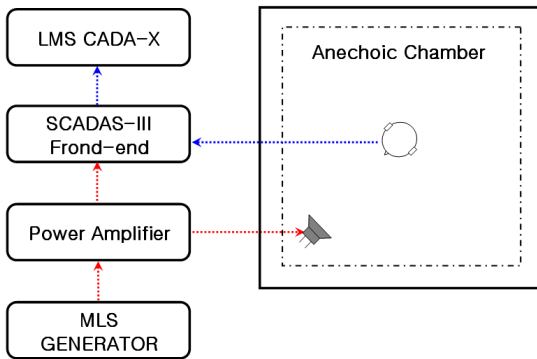
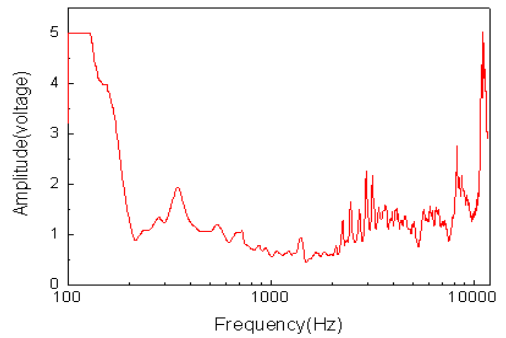
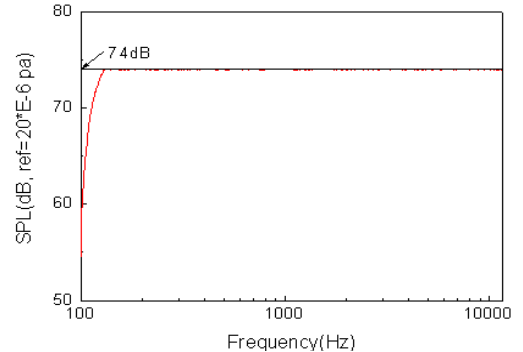


Fig. 5 Test set-up for measurement

주파수를 증가시키면서 총 958개의 주파수에 대한 응답을 측정하였고 그 시간은 한 세트 당 약 15분 정도의 시간이 소요되어 총 72번의 측정시간이 상당히 오래 걸렸다. Fig. 6에는 두형더미가 없을 때 머리 중심위치에서 일정한 음압을 유지하기 위한 가진 입력전압과 제어된 음향응답을 보여준다. Fig. 6에는 기준응답  $P_r$ 을 74 dB로 했을 때 스피커 입력단에 추가되는 필요 입력전압과 기준위치에서의 음향 응답의 예를 보여주고 있다. 그림을 보면 130 Hz 이하의 저주파 영역은 가진전압이 5 V로 일정하게 유지되는 것을 볼 수 있다. 이는 SCADAS-III frond-end의 D/A 단자 출력이 최대 5 V로 고정되어 있기 때문이다. 즉 이 주파수영역대에서 두형의 중심부에 대한 자유음장의 음압을 유지하기 위해서는 가진 스피커의 낮은 방사효율 때문에 더욱 더 높은 스피커의 출력이 요구되나 H/W의 한계로 인하여 충분한 가진을 하지 못하고 있는 것이다. Fig. 6(b)를 보면 해당 영역의 음압이 목표 값(74 dB)에 미치지 못하는 것을 확인할 수 있다.



(a) Excitation voltage of speaker



(b) SPL at the position of head center

Fig. 6 Stepped sine method

통계적 가진방법은 B&K 신호 발생기를 이용하여 100 Hz ~ 12 kHz 주파수 영역대의 백색잡음신호를 발생시켜 라우드스피커를 가진하고 그 음향응답을 측정하여 주파수 응답함수를 구하는 방법으로 HRTF를 구하였다. 광대역의 신호에 대해 아주 짧은 시간의 순간으로 측정이 가능하지만 노이즈의 영향으로 인해 양질의 주파수 응답함수를 얻기 위하여 매 10회의 평균을 취하여 응답을 계산하였다.

MLS 가진방법에서는 가진신호를 얻기 위해서 Sample Champion Pro 소프트웨어<sup>(12)</sup>를 이용하여 MLS 신호를 발생시켰다. MLS는 16383( $m=14$ )개의 신호를 발생시키고 반복적인 신호를 사용하였다. 가진신호를 라우드스피커의 입력단에 연결하여 가진 하고 입력신호와 두형더미 이도 입구에서의 음향응답과의 상호상관함수를 계산하여 충격응답 함수를 구하는 방법으로 HRTF를 측정하였다. 측정은 32 kHz의 샘플링 주파수에서 2 Hz의 주파수 분해능을 사용하여 데이터를 획득하고 충격응답을 구하였으며, 참고문헌 (2)에서 HRTF를 측정하는 방법과 같이 획득한 충격응답에서 시간 지연 및 구조적인 반사에 의한 영향을 줄이기 위해 충격응답에 대한 512개의 데이터만을 결과 값으로 추출한 후 푸리에 변환을 통하여 HRTF를 구하였다. 측정시간은 백색잡음 신호를 사용한 경우와 비슷하지만 샘플링 주파수에 따라 달라질 수가 있고, 또한 결과값에 대해 주파수 영역으로 나타내기 위해서 푸리에 변환이 필요해 측정 이후에 후처리 시간이 필요하다. Fig. 7에는 MLS 가진방법을 사용해서 구한 충격응답의 예를 보여주고 있는데 신호 앞부분에 라우드 스피커와 두형더미의 거리에 대해 시간 지연이 생기는

것을 확인 할 수 있다.

#### 4. HRTF 측정결과

Figs. 8~9는 각 실험방법들을 통하여 얻은 HRTF 결과를 비교하였다. Fig. 8은 고도가 0°일 때 방위각 0°와 45°에서의 세 가지 실험방법에 대한 측정결과를 나타내고 있다. 그림을 살펴보면 2~3 kHz와 5~6 kHz 영역에서 정현파 가진법에 의한 결과 값이 다른 두 비교실험방법보다 더 큰 값을 가지며, 전체적으로 백색잡음 가진방법의 이득측정결과가 작은 값을 가짐을 확인할 수 있다. 이는 정현파가진방법이 충분한 에너지를 갖고 음장을 가진 할 수 있고 신호대 잡음비로 높을 뿐만 아니라 누설에 의한 오차도 없기 때문으로 판단된다. Fig. 9에는 고도의 변화를 주어 고도가 30°와 -30°일 때의 방위각 0°에

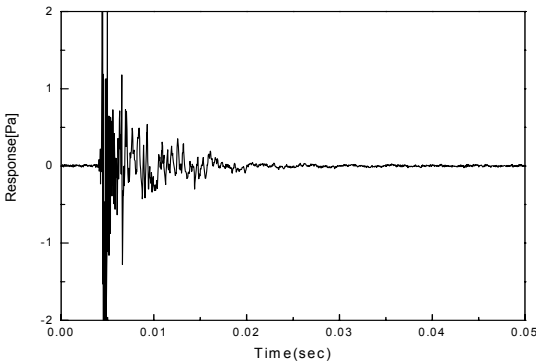
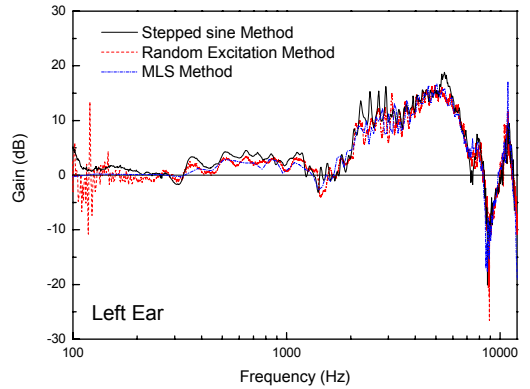
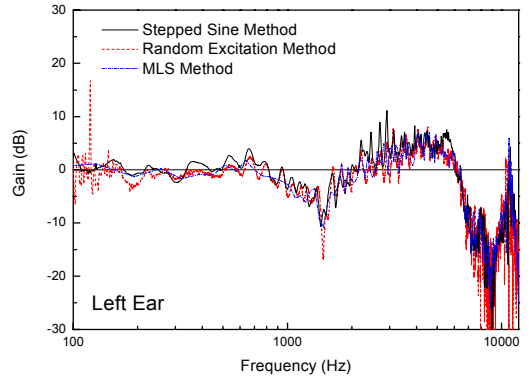


Fig. 7 An impulse response by MLS method



(a) Azimuth 0°



(b) Azimuth 45°

Fig. 8 Comparison of measured HRTFs(elevation 0°, left ear)

서 측정된 왼쪽 귀의 이득 값 측정결과로, 소음원의 위치 고도 변화에 따른 측정결과 값은 서로 다르지만 고도 0°에서의 측정결과 값과 마찬가지로 세 가지 실험방법에 의한 결과 값들은 그 경향과 그 크기가 대체로 일치함을 확인할 수 있다. Fig. 10에는 고도 0°에 대하여 대표적인 특정 주파수에서 방위각에 따른 HRTF의 값들을 비교하였다. 그림을 보면 백색잡음 가진방법의 결과 값이 다른 두 실험방법의 결과 값 보다 대체적으로 낮은 응답 값을 가지는 것을 확인할 수 있다. MLS 가진법의 경우 백색잡음보다 더 높은 에너지밀도를 갖고 0 dB의 크레스트값(crest factor)을 갖고 있기 때문에<sup>(4)</sup> 정현파 가진법에 좀 더 유사한 값을 갖는 것으로 판단된다.

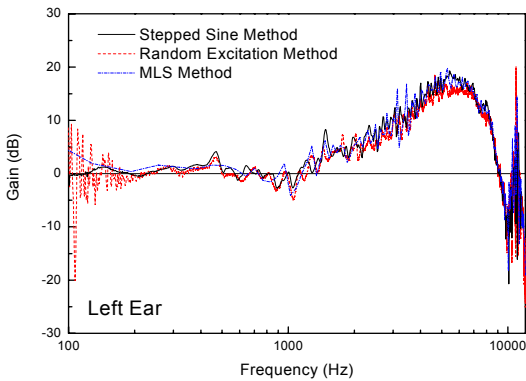
HRTF의 측정에서 중요한 점은 실험방법에 의한 HRTF의 차이가 소리의 정위감과 같은 소리인지에 차이를 일으킬 것인가에 있다. 참고문헌 (13)은

다음 식과 같이 정의되는 HRTF의 로그값 차이가 일정범위에 있으면 그 차이를 구분 할 수 없음을 밝히고 있다.

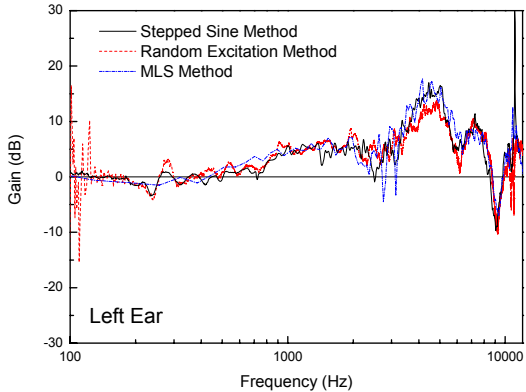
$$e_m = \left[ \frac{1}{f_2 - f_1} \int_{f_1}^{f_2} (G - G_{ref})^2 df \right]^{1/2} \quad (4)$$

$$e_p = \left[ \frac{1}{f_2 - f_1} \int_{f_1}^{f_2} (\arg(G) - \arg(G_{ref}))^2 df \right]^{1/2} \quad (5)$$

위 식에서  $e_m$ 과  $e_p$ 는 각각 진폭과 위상차이를 나타내고  $G$ 와  $G_{ref}$ 는 각각 HRTF와 기준 HRTF를 나타낸다.  $\arg()$ 는 위상을 나타낸다. 참고문헌 (13)은  $e_m$ 과  $e_p$ 가 200 Hz 위에서 각각 2.4~2.7 dB와 0.323~0.328 radian 보다 작으면 구분할 수 없다는 것

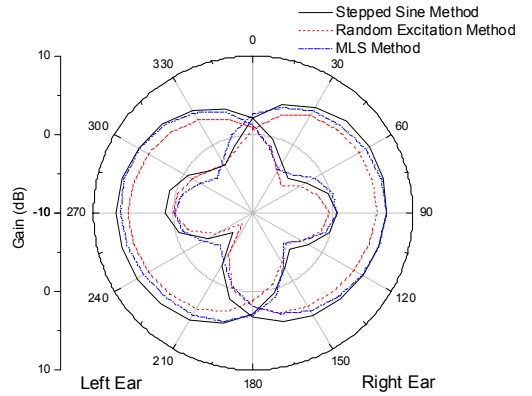


(a) Elevation 30°

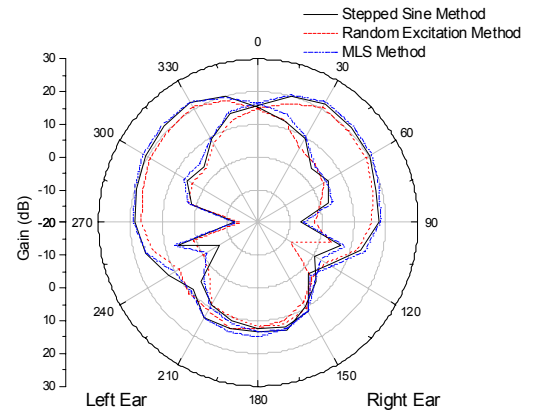


(b) Elevation -30°

Fig. 9 Comparison of measured HRTFs(azimuth 0°, left ear)



(a) 1 kHz

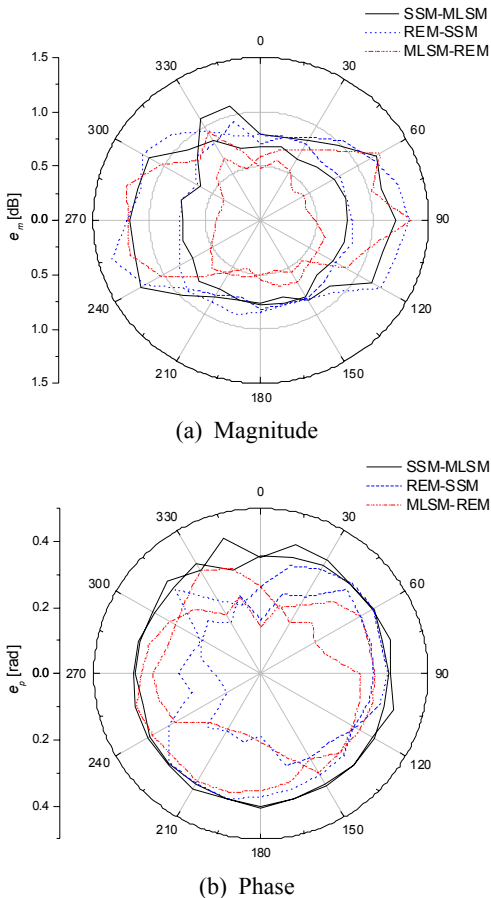


(b) 5 kHz

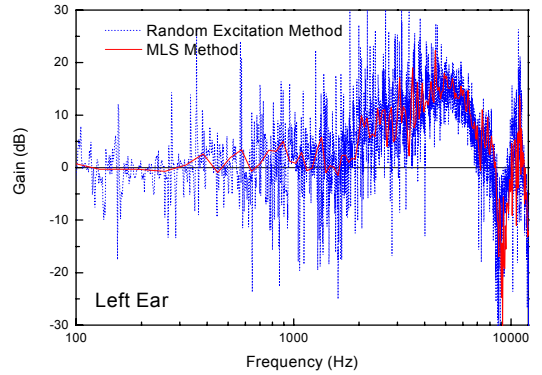
Fig. 10 Comparison of measurements method of HRTFs at specific frequencies(elevation 0°)

을 밝혔다. 식 (4), (5)의 에러 척도를 이용하여 HRTF의 측정방법을 평가하기 위하여 실험방법 중 두 방법씩을 선택하여 총 세 쌍의 실험방법에 대하여 두 방법 사이의 차이를 계산하였다. Fig.11에 그 계산한 결과를 보였다. 그림을 살펴보면 HRTF의 진폭에 대한 비교는 각각의 측정방법에 의한 결과 값이 매우 근사한 것을 볼 수 있고 정현파가진방법 vs. MLS 가진방법, 통계적 가진방법 vs. 정현파가진방법 및 MLS 방법 vs. 통계적 가진방법의 비교결과는 평균  $e_m$ 이 각각 0.84, 0.88, 0.72 dB였다. Fig. 11을 보면  $e_m$ 은 방위각에 따라 가진점의 위치에서 먼 쪽에 있는 경우 HRTF의 측정값의 차이가 상대적으로 커짐을 볼 수 있다. 위상 차이는 각각이 나타내는  $e_p$ 값이 각각 0.37, 0.28, 0.29 라디안으로 세 가지

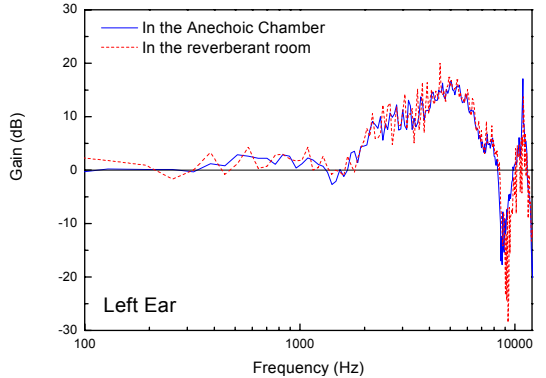
비교의 경우에 대한 차이를 알 수 없을 것으로 판단되나 정현파 가진법과 MLS 가진방법의 경우 참고문헌 (13)에서 제시한 기준을 초과하여 그 차이를 미미하게 인지할 수도 있음을 보여준다. 이 위상차이가 정확히 어느 정도의 차이를 보여주는지는 이 연구의 범위를 넘어서지만 향후 연구로 확인이 필요할 것으로 판단된다.



**Fig. 11** Comparison of the error norms(elevation 0°). SSM-stepped sine method, REM-random excitation method, MLSM-MLS method



**Fig. 12** HRTFs measured in a reverberant room (azimuth 0°, elevation 0°, left ear)



**Fig. 13** HRTFs measured by the MLS method (azimuth 0°, elevation 0°, left ear)

**Table 1** Error estimation on the HRTFs measured in a reverberant rooms by MLS method (elevation 0°, left ear)

Azimuth	$e_m$	$e_p$
0°	2.09	0.35
45°	2.97	0.45
90°	4.12	0.51
180°	1.85	0.33
270°	1.67	0.27

Fig. 12는 무향실이 아닌 일반 실험실 공간에서 HRTF를 측정된 결과를 보여준다. 실험이 행해진 공간은 특별한 흡음처리를 하지 않은 일반적인 실내로서, 실험환경조건의 일정함을 유지하기 위해 새벽시간대에 측정을 실시하였다. 이 실험에서 정현파 가진법은 많은 주파수에서 목표음압을 주는 스피커 입력을 찾을 수 없어 실험에 실패하였기 때문에 결과를 그릴 수 없었다. Fig. 12를 보면 통계적 가진법은 많은 평균횟수에도 불구하고 큰 잡음을 보이고 있지만 MLS 방법은 상대적으로 적은 잡음을 보이고 있음을 볼 수 있다. 이는 MLS 방법이 실험실 벽면의 반사파 등에 의한 잡음에 강한 장점을 갖고 있음을 잘 보여주고 있다. Fig. 13에는 무향실과 일반 실험실 공간에서 MLS 방법을 사용하여 측정된 HRTF 결과를 비교하였다. Fig. 13의 경우  $e_m = 2.07, e_p = 0.35$ 로 무향실과 같은 자유음장 공간이 없는 경우에도 MLS 방법을 이용하면 HRTF를 측정하는 것이 가능하다는 것을 알 수 있다. Table 1은 주요 방위각에 대해서 MLS 방법을 사용하여 일반실험실에서 HRTF를 측정했을 경우 무향실 측정 경우를 기준으로  $e_m$ 과  $e_p$ 의 값을 계산한 결과를 보여주고 있다. 표를 보면 45°와 90°도 위치를 제외한 다른 방위각에서는 오차값이 허용범위 영역에 위치하여 일반 실험실 환경에서 가진원과 귀의 위치가 반대방향에 위치하고 있지 않으면 HRTF를 측정하는 것이 가능함을 보여주고 있다. 방위각 90°의 경우 측정되어지는 마이크로폰의 위치가 음원의 위치와 정 반대방향으로 위치하였을 경우의 응답으로 왜곡이 크게 발생함을 확인 할 수 있다.

#### 4. 결 론

이 연구에서는 머리관련전달함수를 측정하는 정현파 가진법, 통계적 가진법, MLS 방법의 세 가지 실험방법에 대하여 그 정확성을 정량적으로 상대 비교하고 장단점을 살펴보았다. 세 가지 방법을 이용하여 무향실 환경에서 HRTF를 측정한 결과 각각의 방법들에 의한 결과 값의 경향이 거의 일치하며 MLS 방법의 경우는 정현파 방법과 인지할 수 있는 위상차이가 발생할 수 있는 경우도 있었지만 일반적으로 크기 역시 크게 차이가 없는 것을 확인할

수 있었다. 그러므로 HRTF의 측정은 가용한 측정 장비와 측정의 효율을 기준으로 실험방법을 선택할 수 있다.

정현파 가진법은 정도의 차이는 있지만 다른 두 실험방법에 비해 많은 시간이 소요되고, 백색잡음을 이용한 통계적 가진법은 가장 일반적인 측정 장비로 빠르게 실험이 가능하나 그 결과 값에 상대적으로 잡음이 많음을 알 수가 있었다. 또 MLS 가진법은 잡음에 강하고 측정 속도도 빠르나 MLS 신호발생기가 필요하고 측정 후 후처리 과정을 거쳐야 하는 부담이 있다. 또한 MLS 방법을 사용하면 자유음장이 아닌 일반적인 실내 공간에서 최소의 오차로 HRTF의 측정이 가능함을 확인할 수 있었다.

#### 후 기

이 논문은 2008학년도 동의대학교 교내일반연구비 지원에 의하여 연구되었음(과제번호 2008AA156).

#### 참 고 문 헌

- (1) Kim, Y. T. and Kim, S. M., 2005, "New HRTFs and Applications to the Virtual Acoustic Imaging Systems," Proceedings of KSNVE Annual Autumn Conference, pp. 616~619.
- (2) Gardner, W. and Martin, K., 1994, "HRTF Measurement of a KEMAR Dummy-head Microphone," Technical Report #280, MIT Media Lab.
- (3) Preves, D. A., 1976, "Some Considerations in Using KEMAR to Measure Hearing Aid Performance," Proceedings of a Conference Organized by M.D. Buckhard, Presented in Washington, D.C.
- (4) Douglas, D. R. and Vanderkooy, J., 1989, "Transfer-function Measurement with Maximum-length Sequences," J. Audio Eng. Soc., Vol. 37, No. 6, p. 1989.
- (5) Lee, D. H. and Ahn, T. S., 2008 "Development of Experimental Dummy and Measurement of HRTF for Average Korean Head Shape," Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 18, No. 8, pp. 841~848.
- (6) Schnupp, J., Booth, J. and King, A., 2003



“Modeling Individual Differences in Ferret External Ear Transfer Function,” *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 113, pp. 2021~2030.

(7) Zotkin, D. N., Duraiswami, R., Grassi, E. and Gumerov, N. A., 2006, “Fast Head-related Transfer Function Measurement via Reciprocity,” *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 120, No. 4, pp. 2202~2215.

(8) FG Katz, B. and Begault, D. R., 2007, “Round Robin Comparison of HRTF Measurement Systems: Preliminary Results,” *The Proceedings of 19th International Congress on Acoustics, PACS*: 43.66.

(9) Lee, S. L., Kim, L. H., Pang, H. S. and Sung, K. M., 2000, “3-channel HRTF Measurement for Binaural Synthesis,” *The Proceedings of the Acoustical Society of Korea Conference*, Vol. 19, No. 2(s), pp. 337~340.

(10) Shin, K. H. and Park, Y. G., 2004, “Measurement and Analysis of the Near-field HRTFs for Virtual Audio Enhancement,” *The Proceedings of the Acoustical Society of Korea Conference*, Vol. 23, No. 2(s), pp. 335~338.

(11) Kang, K. O., Kang, D. G., Hahn, M. S., Jho, M. J. and Jeong, D. G., 1997, “HRTF Measurement and Its Application for 3-D Sound Localization,” *The Journal of the Acoustical Society of Korea*, Vol. 16. No. 3E, pp. 50~55.

(12) Guidorzi, P., *Sample Champion Pro 3.8 User Guide*, 2005, <http://www.purebits.com>.

(13) Blommer, M. A. and Wakefield, G. H., 1997, “Pole-zero Approximations for Head-related Transfer Functions Using a Logarithmic Error Criterion,” *IEEE Transactions on Speech and Audio Processing*, Vol. 5, No. 3, pp. 278~287.