

정현파와 스위프 신호로 측정된 머리전달함수를 구하기 위한 시스템 식별 방법의 분석

Analysis of system identification for getting head-related transfer function measured with sine sweep signal

주용원† · 박영진* · 이석필**

Yongwon Ju, Youngjin Park and Seokpil Lee

1. 서 론

3차원 입체 음향을 구현하거나 그에 대한 연구를 하기 위해서는 머리전달함수의 데이터베이스 구축이 필요하다. 이러한 이유로 국내외 많은 연구실과 연구센터에서 머리전달함수 측정시스템을 개발하여 머리전달함수 데이터베이스를 구축했다. 그러나 본 실험실에서 측정하여 보유하고 있는 머리전달함수 데이터베이스의 경우, 머리전달함수 크기 스펙트럼에서 0°, 90°간격마다 원하지 않은 불연속적인 구간이 나타나 연속적인 소리의 재생 시 소리의 끊어짐이 발생하는 문제점이 존재한다. 불연속적인 구간은 긴 측정시간으로 인한 피실험자의 자세와 eartips의 위치변화 때문에 발생하며, 문제를 해결하기 위해 짧은 측정시간을 가지는 머리전달함수 측정시스템의 개발이 필요하다⁽¹⁾. 이를 위해 측정시간을 줄일 수 있는 정현파와 스위프 신호(sine sweep signal) 측정방법을 제안하였으며, 정현파와 스위프 신호 측정방법으로 데이터베이스 구축이 가능함을 검증하였다⁽²⁾. 제안된 정현파와 스위프 신호로 머리전달함수를 구하기 위해서는 시스템 식별(System identification, System ID)과정을 거쳐야 한다. 그러나, 정현파와 스위프 신호를 입력 신호로 사용하는 시스템의 전달함수를 구하기 위한 기존의 시스템 식별 방법은 고조파(higher harmonics)의 영향을 제거해줄 수는 있지만, 외부잡음에 의해 전달함수의 왜곡이 발생할 수 있다는 단

점이 존재한다. 따라서 본 연구에서는 외부잡음에 강건한 시스템 식별방법을 제안하고, 기존의 시스템 식별 방법과 비교 및 분석을 통하여 정현파와 스위프 신호로 측정된 머리전달함수를 구할 때 사용할 시스템 식별방법을 제안한다.

2. 시스템 식별 방법

2.1 기존의 시스템 식별 방법

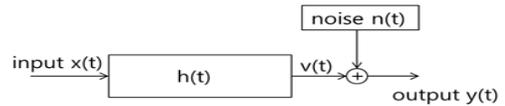


Fig 1 The general model for system identification

Fig 1은 시스템 식별을 위한 일반적인 모델로 이 시스템의 전달함수 $h(t)$ 를 구하기 위한 식은 다음과 같다.

$$h(t) = y(t) * x'(t) \quad (1)$$

(여기서, $x'(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{X(-\omega)}{|X(\omega)|^2} e^{j\omega t} d\omega$ 이며, 입력 신호의 군 지연(group delay)과 크기를 보상해준다)

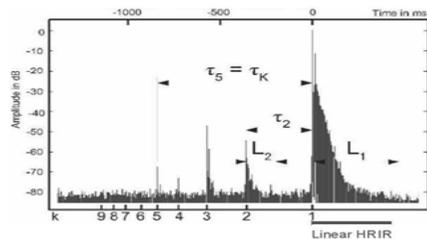


Fig 2 Series of harmonic impulse responses

† 교신저자; KAIST 기계공학과
E-mail : jyongw@kaist.ac.kr
Tel : (042) 350-3076, Fax : (042) 350-8220

* KAIST 기계공학과
** KETI 디지털미디어센터

식 (1)로 구해진 시간영역에서의 전달함수를 통해, Fig 2와 같이 고조파에 의한 영향을 확인할 수 있으며, 고조파의 영향은 windowing을 통해 제거 가능하다³⁾. 그러나 구해지는 주파수영역에서의 전달함수 $H(f)$ 는 외부 잡음이 존재할 경우, 다음 식 (2)와 같이 전달함수의 왜곡이 발생한다는 문제점이 존재한다.

$$H(f) = W(f) \left\{ \frac{V(f)}{X(f)} \left(1 + \frac{N(f)}{X(f)} \right) \right\} \quad (2)$$

2.2 제안하는 시스템 식별 방법

기존의 시스템 식별 방법이 가지고 있는 위와 같은 문제를 해결하기 위해, 새로운 시스템 식별 방법을 제안하였다. 새로운 시스템 식별 방법은 아무런 정보를 가지지 않는 임의의 백색 잡음 신호(white noise signal)을 생성하고, 측정된 입력 및 출력 신호 $x(t), y(t)$ 간의 convolution을 통해, 결정적 신호(deterministic signal)를 확률론적 신호(stochastic signal)인 $\tilde{x}(t), \tilde{y}(t)$ 로 만들어준 후 power 그리고 cross spectral density function을 이용하여 전달함수를 구하는 방법이다. 이렇게 구해지는 전달함수 $\tilde{H}(f)$ 의 경우, 외부잡음이 없다고 가정할 때, 식 (3)과 같이 기존의 방법과 같은 결과를 나타낸다.

$$\tilde{H}(f) = \frac{S_{\tilde{y}\tilde{y}}}{S_{\tilde{x}\tilde{x}}} = \frac{\tilde{X}^* \tilde{Y}}{\tilde{X}^* \tilde{X}} = \frac{X^* W^* W Y}{X^* W^* W X} = \frac{Y(f)}{X(f)} = H(f) \quad (3)$$

제안된 시스템 식별 방법은 외부 잡음이 존재하는 경우, 외부 잡음이 측정되는 신호들과 연관되지 않다고(uncorrelated) 가정하면, 다음 식 (4)와 같이 외부 잡음에 의한 전달함수의 왜곡은 발생하지 않게 되므로, 기존의 방법에 비해 잡음에 강건하게 된다.

$$\tilde{H}(f) = \frac{S_{\tilde{y}\tilde{y}}(f)}{S_{\tilde{x}\tilde{x}}(f)} = \frac{S_{xv}^-(f) + S_{xn}^-(f)}{S_{xx}^-(f)} = \frac{S_{xv}^-(f)}{S_{xx}^-(f)} \quad (4)$$

그러나, 제안된 시스템 식별 방법은 시스템이 선형적이라는 가정에서 출발하기 때문에, 고조파에 의한 전달함수의 왜곡이 발생할 수 있다는 단점이 존재한다.

2.3 시스템 식별 방법에 따른 머리전달함수

앞서 언급한 장점과 단점들을 가지는 시스템 식별방법들 중 머리전달함수 데이터베이스 구축에 더 적합한 방법을 찾기 위해서는 각각의 방법들이 가지고 있는 단점들이 머리전달함수의 왜곡에 얼마만큼의 영향을 미치는지 알아야 한다. 이를 위해 Table1과 같은 실험환경에서 머리전달함수를 측정하여 고조파의 영향과 잡음의 영향을 분석하였다.

Table 1 Experimental setup

Features	Specifications
Source position	Azimuth 0°, Elevation 5°
Signal	Sine sweep signal(500ms)
sampling frequency	44100Hz
Frequency resolution	43Hz

(1)고조파의 영향

실험에서, 스피커에 출력되는 음압의 크기를 증폭시키면서 실험을 하였으며, 마이크로폰으로 측정되는 음압의 크기가 약 66dB이상일 때부터, 고조파의 영향을 확인할 수 있었다. 고조파가 미치는 영향을 확인하기 위해, 고조파의 영향을 제거해 줄 수 있는 기존의 방법과 그렇지 않은 제안된 방법을 이용하여 머리전달함수를 구하고 Fig 3과 같이, 머리 전달함수의 크기 차이를 비교하였다. Fig 3의 결과에서 머리전달함수 크기 차이의 스펙트럼은 고조파의 발생 여부와 상관없이 거의 같은 경향과 크기를 나타냄을 확인할 수 있다. 또한, 크기 차이는 0.1dB 정도의 매우 작은 값을 가지기 때문에, 시스템 식별 방법에 따라 구해진 머리전달함수 간의 차이가 거의 없음을 알 수 있다.

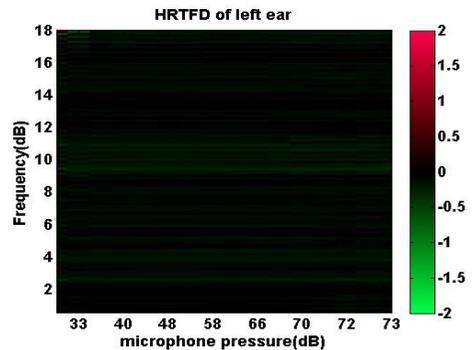


Fig 3 The magnitude difference of HRTF between two System ID

이를 통해, 제안된 시스템 식별 방법을 사용하더라도 고조파에 의해 발생하는 머리전달함수의 왜곡의 정도는 미미하여 무시할 수 있다는 결론을 내릴 수 있다.

(2)외부 잡음의 영향

외부 잡음의 영향을 알아보기 위해, 고조파가 발생하지 않은 측정데이터에 임의의 잡음을 넣어준 후 시스템식별 방법에 따라 머리전달함수를 구하였다. 사용한 측정데이터는 마이크로폰에서 측정된 음압이 62dB인 데이터이며, 입력해준 임의의 잡음은 백색 잡음이다. 신호대 잡음비(Signal to noise ratio, SNR)를 0~60dB로 변화시켜 주며, 시스템 식별 방법에 따라 머리전달함수를 구하였다. Fig 4와 같이 잡음을 넣어 주지 않은 데이터에서 구한 머리전달함수와 신호대 잡음비에 따라 구해진 머리전달함수 간 크기 차이의 평균을 구하여, 각각의 시스템 식별 방법에 따라 잡음에 의해 왜곡된 정도를 정량적으로 비교하였다. Fig 4의 결과에서, 기존의 방법이 제안된 방법에 비해 잡음에 의한 머리전달함수의 왜곡이 더 크게 나타남을 확인할 수 있다. 이를 통해, 식 (2), (4)에서 증명되었던 것과 같이, 제안된 시스템 식별 방법이 외부 잡음에 더 강건하다는 것을 알 수 있다.

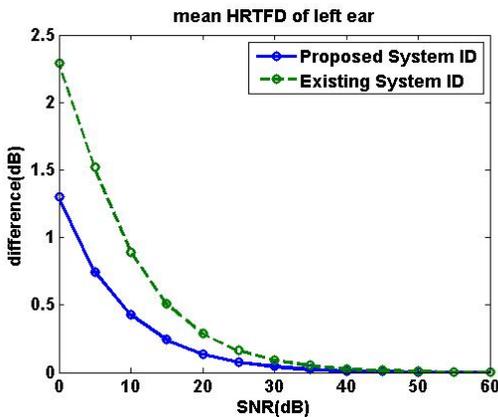


Fig 4 The mean of magnitude difference between HRTF without noise and HRTF with noise

3. 결 론

본 논문에서는 정현파 스위프 신호를 입력 신호로 사용하는 시스템의 머리전달함수를 구하기 위해 새로운 시스템 식별 방법을 제안하고, 기존의 시스템 식별 방법과 비교하였다. 비교 및 분석 결과를 통해, 고조파에 의해 발생하는 머리전달함수의 왜곡이 무시할 수 있을 정도로 작고 외부 잡음에 더 강건한 특징을 가지는 제안된 시스템 식별 방법이 머리전달함수 데이터베이스 구축에 더 적합한 방법이라는 결론을 내릴 수 있다. 그러므로, 정현파 스위프 신호를 사용하는 머리전달함수 측정시스템에서, 제안된 시스템 식별 방법을 사용하여 머리전달함수 데이터베이스를 구축할 것이다.

후 기

이 논문은 정부(지식경제부)의 재원으로 산업원천 기반구축사업의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 10037244).

참 고 문 헌

- (1) Y. Ju, Y. Park, Y. Park, and S. Lee, 2010, Calibration of measured head-related transfer function, ICCAS2010, Gyeonggi-do, Korea.
- (2) Y. Ju, Y. Park, Y. Park, and S. Lee, 2011, Analysis of head-related transfer function measured with sine sweep signal, KSNVE, Gangwon-do, Korea.
- (3) S. Muller and, P. Massarani, 2001, Transfer-Function Measurement with Sweeps, J. Audio Eng. Soc., vol. 49, pp. 443-471