

머리전달함수를 이용한 공간 음상 정위의 문제점 고찰

정 완섭*, 황 신**, 이 정훈, 권 휴상*

*: 한국표준과학원 음향진동그룹, **: 광운대학교 컴퓨터공학과

Issues in Localising 3D Sound in Space Using Head-Related Transfer Functions

Wan-Sup Cheung*, Shin Hwang**, Jeung-Hoon Lee, Hyu-Sang Kyun*

Abstract

This paper addresses major issues in localising sound sources in space using the experimental data set of head-related responses in the time or frequency domain. They come from the technical realisation steps for implementing the convolution of HRIR's with sound sources, the cross-talk cancellation for transaural filtering, the matched time delay compensation, etc. In real, those technical matters seem to be minor because they can be realised in off-line signal processing schemes. This paper puts much emphasis on what we misunderstood about the sets of HRTF's or HRIR's. More specifically, the sets of HRTF's or HRIR's of course supply relevant information to sound localisation but include much useless 'rubbish' that have made for us to fail to put spatial image into real sound signals such as voices and music's. This paper proposes possible reasons for such failure and, furthermore, introduces detained subjects that should be challenged so as to resolve them.

1. 서론

1980년 중반이후부터 수행된 음원의 공간적 위치로부터 양 귀까지의 음압 전달특성의 많은 실험적 연구 결과[1-6]는 공간 음상 정위 기술의 가능성을 제시하였으며, 이를 실현하기 위한 시도는 국내외적으로 1990년 중반이후 활발히 진행되었다[1,7]. 특히, 양 귀의 시간영역 음압 전달함수(HRIR)를 실현하기 위한 디지털 신호처리 기술들, 즉 고속 convolution 기법, 최소 위상 특성을 갖는 역 필터 구현 방안, 그리고 시간 지연 처리 기술 등에 관련된 연구에 성공적 사례가 많이 발표되었다[1].

그러나, 이러한 성공적 음상 정위 기술의 연구 결과와는 달리 많은 연구자들은 양 귀의 시간영역 음압 전달 함수에 의하여 발생하는 원 음원의 왜곡, 음질의 현

격한 저하, 음원의 공간적 명료도 저하 등과 같은 본질적 문제점에 직면하고 있다[1].

사실 음반 및 방송 분야에서 원음의 음질 저하 및 음색 왜곡에 관련된 문제점은 가장 중요한 인자이기 때문에 양 귀의 시간영역 음압 전달 함수에 대한 새로운 문제점의 인식이 매우 절실하다. 본 논문은 이러한 문제점을 야기하는 양 귀의 시간영역 머리 전달함수에 대한 근본적 원인들의 재조명과 더불어 음색 및 음질의 저하를 최소화 할 수 있는 새로운 방향을 모색하기 위한 기반 설정에 그 목적이 있다. 제 2 절에서는 머리전달 함수에 포함된 정보들에 대한 음향학적 고찰을, 제 3 절에서는 음상 정위에 필요한 핵심 요소들의 추정 방안을, 그리고 제 4 절에서는 향후 연구 방향을 제시한다.

2. 머리전달 함수의 음향학적 특성 고찰

아래 그림은 본 연구팀이 보유한 B&K 4100D HATS의 수평면에 대한 방위각의 변화에 대한 머리 전달함수의 주파수 특성을 나타내고 있다.

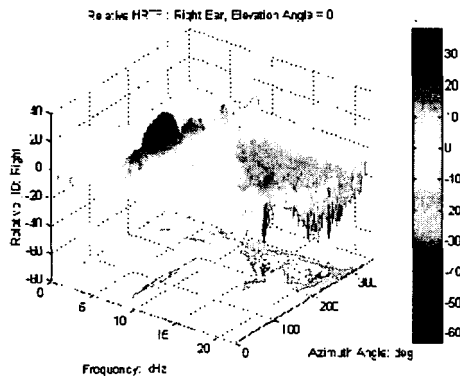


Fig.1 Head-related frequency response functions of B&K 4100D HATS.

위의 결과에서 관측되는 측정 머리전달함수의 가장 큰 특징은 수 많은 피크와 노치로 구성된 복잡한 스펙트럼 특성을 갖는다는 점이다. 이러한 복잡한 주파수 특성은 외이를 구성하는 pinna와 concha부의 산란과 집중, Ear canal의 음파 전달 특성, 그리고 머리 및 상체에 의한 음의 산란과 회절 등의 음향학적 영향이 복합적으로 작용하기 때문이다. 이러한 “복합적 영향 인자를 포함한 머리전달 함수를 이용하여 공간에 음상을 정위를 자유로이 수행할 수 있을까”에 대한 근본적 의문을 체계적으로 수행한 연구는 아직 발표되지 못하고 있는 실정이다.

가장 대표적인 사례로, 측정된 머리 전달함수를 이용하여 음악이나 음성 신호와 같은 실제 신호를 공간상에 자유로운 정위에 성공한 예는 아직 발표되지 못하고 있다. 본 연구팀은 최근 MIT Media Lab에서 제안한 방법[7]을 따라 한국인의 음성과 음악을 적용한 결과, 머리 전달함수를 이용한 음상 정위 시도는 매우 실망스러운 결과들로 일단락을 맺은 바 있다. 주된 실패 원인은 원음의 왜곡, 즉 음성 및 음악 신호에 포함된 고조파 성분의 왜곡에 의한 음질 및 음색 저하가 가장 큰 문제점으로 대두되었

다. 이러한 시도는 측정 머리전달함수의 복잡한 주파수 특성때문으로 사료되며, 이는 측정 머리전달함수의 직접 이용의 한계점을 의미할 뿐 아니라, 음색 및 음질 왜곡에 대한 개선책의 절대적 필요성을 의미한다. 그리고, 공간 음상 정위를 위한 새로운 시도가 원음의 음색이나 음질을 저하시키는 한 그 기술의 현실적 활용도는 기대하기가 어렵다는 범을 본 연구는 강조한다.

금번연구에서 제안하는 첫번째 개선 방안은 기존의 측정된 머리전달함수에 포함된 수 많은 피크와 노치에 대응되는 주파수 성분들을 청각구조가 명확히 구분하여 인지를 하는가에 대한 심리 음향학적 의문점이며, 둘째 그렇게 복잡한 머리전달함수에 내재한 외이의 영향인자 (pinna, concha, ear canal 등)가 포함된 전달함수를 음상 정위에 꼭 필요한 것인가에 대한 음향학적 의문점에서 해결점을 찾을 수 있으리라 사료된다. 심리 음향학적 견지에서 우선 제기할 수 있는 의문점은 청각구조의 임계 밴드 폭에 대한 이해에서 출발할 수 있다. 주어진 주파수 대역에서 근접한 피크 성분들 사이의 청각 구분 한계는 측정 머리 전달 함수가 갖는 수 많은 피크와 노치 성분들의 인식정도에 대한 교훈을 우리는 아직 이용하지 않고 있다는 점이다.

그리고, 외이의 영향인자 (pinna, concha, ear canal 등)들에 대한 음압 전달 특성 이해는 아직도 음향학의 미 개척분야일 뿐 아니라, 이들 전달 특성이 사실 음상 정위에 꼭 필요하지도 않다는 점이다. 음원을 설계하는 측면에서 볼 때 청음자의 외이가 없을 때는 기존의 측정 머리전달함수가 도움이 될 수 있지만 좌우측 귀를 가진 청음자의 음원 설계 시는 측정 머리전달함수에 내재된 외이 영향을 역으로 제거할 필요가 있다. 게다가 음향학적 측면에서 이러한 이전 측정 머리전달함수의 외이 영향을 제거하는 문제가 항상 가능하다는 사실 또한 보고된 바가 없다. 이러한 사실은 기존의 측정 머리전달함수에 불필요한 음향학적 정보가 포함되어 있으며, 불필요한 음향학적 정보가 공간 음상 정위에 어떠한 어려움을 야기하는 가에 대한 정확한 이해가 필요함을 본 연구는 특히 강조하고 있다.

다음 절에서는 기존의 머리전달함수를 이용한 공간 정위를 실현하기 위하여 수행되어야 할 연구 과제들을 고찰한다.

3. 머리전달 함수의 음향학적 특성 고찰

음원의 공간적 위치에 대한 방향 인자는 양귀의 음압 세기 차이 (Interaural Intensity Difference, IID)와 시간 차이 (Interaural Time Difference, ITD)로 구성 되어 있다는 고전적 개념 ("Rayleigh's Duplex Theory, [8])은 앞서 소개한 머리 전달함수의 문제점을 접근하는데 가장 기본 개념이라 저자는 판단하고 있다. 우선 양귀 음압 세기를 기존의 좌우측 머리 전달함수로부터 환산하는 논리적 방안을 고찰하자. 양귀 음압 세기는 머리전달함수의 주파수 진폭 특성에서 이해할 수 있다. 앞서 지적한 바와 같이 머리 전달 함수의 주파수 특성은 수 많은 피크와 노치 성분들을 갖고 있기 때문에 단순 주파수 전달 함수의 상대적 비로 계산할 경우, 음색 및 음질의 저하는 불가피하다.

따라서, 심리음향학적 특성을 이용한 임계 밴드[9] 혹은 1/3-옥타브 등과 같이 밴드폭 내의 '등가 음압 전달 진폭'을 추정하여 이를 이용하는 방법을 제안한다. 그러나, 아러한 절차에 따라 얻어진 밴드폭 내의 진폭 이득율은 pinna, concha, 그리고 ear canal 등에 의한 영향이 포함되어 있다. 이러한 영향을 최소화 하기위한 부수적 과정이 또한 필요하다. 본 논문은 이러한 외이 영향을 최소화하기 위하여 고도가 0° 인 수평면에서 측정된 좌우측 전달함수를 기준으로 하여 임의 위치에서 측정된 머리전달 함수의 상대적 주파수 전달 특성을 먼저 추정하기를 제안한다. 이와 같이 수평면에 대한 상대적 전달함수는 외이의 영향인자를 효과적으로 줄일 수 있기 때문이다. 머리 전달 함수에 내재하고 있는 피크와 노치를 효과적으로 줄일수 있는 또 하나의 방법은 Oxford 대학[10]에서 이용한 방법과 유사하게 청감 보정함수 (A-weighting function) 을 사용할 수도 있다.

앞서 소개한 방법에 따라 기존의

머리전달함수를 인간 청각특성에 보다 적합한 유한 밴드폭에 따라 좌우측의 '음압세기'의 Database 구축 작업을 진행하고 있다. 금번 7-8월 경 본 DB 연구의 결과에 대한 주관적 객관적 평가를 수행할 예정이다.

은원 공간 정위에 필요한 또 하나의 주요 인자는 양위에 도달하는 음파의 도달 시간에 대한 정보이다. 양귀 도달 시간 차이는 양귀와 음원의 상대적 입체각에 관련된 인자이며, 기존의 측정 머리전달함수에서 추정하는 방법은 많은 연구[7]가 진행되었다. 본 연구에서는 200 - 800 Hz 대역의 상대적 위상차에 해당되는 수십 개의 데이터로부터 시간지연을 추정하는 기법을 사용하였다. 본 시간 지연 추정 기법은 최소자승법을 이용한 인자 추정 기법으로 매우 높은 신뢰성을 갖는 결과를 제공한다.

앞서 소개한 상대적 음압 세기에 대한 DB 구축과 더불어 음원의 공간 위치에 따른 초기 도달 음의 시간 차이에 대한 DB 또한 구축을 진행하고 있다.

마지막으로, 음원의 공간 정위에 필요한 또 하나의 중요한 기술 분야는 "어떻게 측정점 이외의 임의 연속 공간에 대한 상대적 양귀 음압세기와 시간차이 데이터를 정확히 추출할 수 있는가"하는 점이다. 금번 연구에서는 머리전달함수 측정에 사용된 구면 좌표계에 대한 공간적 내삽 (interpolation)을 가장 효과적으로 처리할 수 있는 'Surface spherical harmonics (SSH)' [11,12]를 이용하여 양귀 음압 세기와 시간 차이에 대한 수학적 모델을 도출하여 사용할 예정이다.

4. 맺음말

금번 연구에서는 기존의 머리 전달 함수를 이용하여 음원의 공간 은상 정위에서 직면하는 가장 큰 문제점인 원음의 음색 및 음질 왜곡에 대한 문제점과 이를 해결하기 위하여 현재 진행중인 연구 과제를 소개하고 있다. 원음의 음색 및 음질 왜곡은 측정 머리 전달 함수에 내재된 광대역 주파수 영역의 수 많은 피크와 노치에 의하여 야기되며, 이러한 문제점은 심리음향학적 특성을 이용한 유한 대역의 상대적 평균 음압

세기를 추정 활용하는 방법을 소개하였다. 그리고, 기존의 측정 머리 전달 함수로부터 양귀 초기 음의 도달 시간차이를 쿼적으로 추정할 수 있는 최소 자승법에 대한 접근 방법 또한 소개하고 있다. 그리고, 임의 공간에 자유로이 음상을 정위하기 위하여 양귀 음압 세기와 시간 차이를 구형 좌표계의 연속적 수학적 모델로부터 환산할 수 있는 방법론에 대한 개념을 또한 소개하였다.

금번 7-8월에 본 DB 연구의 결과에 대한 주관적 객관적 평가를 수행할 예정이다.

본 연구는 G7 감성공학과제 중 소음진동에 대한 인체영향 연구 (과가부 과제 번호: 17-01-03-A-02)의 지원으로 얻어진 일부의 결과이다.

Reference

- [1]Wan-Sup Cheung, *et al*, Study on Acoustical Environmental Simulators of Generating the 3D Sound Field, *Acoust. Soc. Of Korea*, 16(2), pp. 209-212, 1997
- [2]F. Wightman and D. Kistler, Headphone Simulation of Free-field Listening: I. Stimulus Synthesis, *J. Acoust. Soc. Am.*, 85(6), pp. 858-867, 1989
- [3]F. Wightman and D. Kistler, "Headphone Simulation of Free-field Listening: II. Psychophysical validation", *J. Acoust. Soc. Am.*, 85(6), pp. 868-878, 1989
- [4]H. Moller, *et al*, "Head-Related Transfer Functions of Human Subjects", *J. Audio Eng. Soc.*, 43(5), pp. 300-321, 1995
- [5]W. Gardner, *et al*, *HRTF Measurements of a KEMAR Dummy-Head Microphone*, MIT Media Lab Perceptual Computing - Technical Report #280, MIT, 1994.
- [6]S. Carlile and D. Pralong, "The Location-Dependent Nature of Perceptually Salient Features of the Human Head-related Transfer Functions", *J. Audio Eng. Soc.*, 95(5), pp. 3445-3459, 1995
- [7]W. Gardner, *3-D Audio Using Loudspeakers*, Ph. D. Thesis, MIT, 1997
- [8]Lord Rayleigh, "On Our Perception of Sound Direction," *Phil. Mag., 6th Series*, 214-232, 1907.
- [9]Z. Zwicker and H. Fastl, *Psychoacoustics: Facts and Models*, Springer-Verlag, 1990.
- [10]S. Carlile and D. Pralong, "The Location-dependent Nature of Perceptually Salient Features of the Human Head-Related Transfer Functions," *J. Acoust. Soc. Am.*, 95(6), 3445-3459, 1995
- [11]K. Atkinson, "Numerical Integration on the Sphere," *J. Aust. Math. Soc. B, Appl. Math.*, 23, 332-347, 1982
- [12]M. Evans, J.A.S. Angus and A. Tew, "Analyzing Head-related Transfer Function Measurement Using Surface Spherical Harmonics," *J. Acoust. Soc. Am.*, 104(4), 2400-2411, 1998