

<https://doi.org/10.7236/JIIBC.2017.17.2.191>

JIIBC 2017-2-27

## 음향 통신 및 위치측정 시스템에서의 비가청 음향 신호 설계에 관한 연구

### A Study on the Design of Inaudible Acoustic Signal in Acoustic Communications and Positioning System

오종택\*

Jongtaek Oh\*

**요 약** 스마트폰의 사용이 보편화됨에 따라 스마트폰을 이용한 다양한 응용서비스가 개발되고 있으며, 추가적인 장치 없이 음향 신호를 이용하여 데이터를 송수신하거나 위치를 측정하는 기술이 활발하게 개발되고 있다. 그러나 스마트폰 장치의 한계로 음향 주파수의 선택에 한계가 있고, 음향신호 발생 장치의 전자회로의 비선형성으로 인해 인간이 감지할 수 있는 음향신호 잡음이 발생하는 문제가 있다. 따라서 시끄러운 소리가 나므로 실용화에 어려움이 있다. 본 논문에서는 인간이 감지하는 음향 신호의 크기 측정 방법을 제안하고, 이에 따라 여러 가지 음향 신호를 비교 분석함으로써 음향 통신 및 위치측정 시스템 개발시에 비가청 음향 신호 설계에 활용하도록 한다.

**Abstract** According to the ubiquitous usage of smartphone, so many smartphone applications have been developed, and especially data communications and position measurement technologies without additional equipments have been developed using acoustic signal. But there is a limitation to select the frequency of the acoustic signal due to the smartphone hardware, and there is non-linearity in the electronic circuits in a sound generation devices, the audible sound generated from the speaker is not avoidable. And it causes critical difficulty to the commercial system deployment. In this paper, a simulation technique to calculate the power of the audible acoustic signal by human is applied to several types of acoustic signals to evaluate the loudness. These could be referred when the acoustic communications or positioning systems are designed, for the purposed of inaudible sounding to human.

**Key Words** : inaudible sound, signal shaping, communications, positioning, smartphone

## 1. 서 론

스마트폰의 사용이 활성화되고 보편화됨에 따라 이를 이용한 매우 다양한 서비스들이 개발되고 있다. 특히 사용자의 편의성 때문에 스마트폰에 추가적인 장치를 부착하지 않고 내장된 장치만을 이용하여 기능을 개발하는 것의 실용화 가능성이 크다. 스마트폰에는 Global

Positioning System (GPS), gyro 센서, 가속도 센서와 같은 센서 장치와 터치 스크린, 카메라, 플래쉬, 스피커, 마이크와 같은 입출력 장치류 및 이동통신, 무선랜, 블루투스과 같은 통신 장치가 내장되어 있다.

특히 통신 장치에 있어서 근거리에는 장치들끼리 통신하는 방식으로는 무선 통신 방식으로 무선랜이나 블루투스, 카메라와 플래쉬를 이용한 광통신이 사용되고

\*정회원, 한성대학교 전자정보공학과  
접수일자: 2016년 11월 29일, 수정완료: 2017년 2월 28일  
게재확정일자: 2017년 4월 7일

Received: 29 November, 2016 / Revised: 28 February, 2017 /

Accepted: 7 April, 2017

\*Corresponding Author: jttoh@hansung.ac.kr

Dept. of ICs Engineering, Hansung University, Korea

있다. 최근에는 도청 방지와 전파 신호의 간섭, 특정 송수신 기기의 제한적 통신 등의 목적으로 스마트폰의 마이크와 스피커를 이용한 음향 신호 통신이 활성화되고 있다<sup>[1]</sup>. 스마트폰에서 음향 신호를 이용하는 방법은, 음향 신호가 멀리 퍼져나가지 못하므로 한정된 범위 내에서만 신호를 인지하고 통신을 할 수 있어 통신 대상을 지정하기 쉽고 보안이 유지되는 장점이 있다. 또한 수신 범위가 한정되므로 위치인식이 자동으로 되는 장점이 있다. 통신 방식도 음향 신호 파형이 tone인 경우에는 Frequency Shift Keying (FSK)이나 Phase Shift Keying (PSK) 방식이 사용되며, Linear Frequency Modulation (linear chirp) 신호를 사용하여 신호대 잡음비를 높이는 방법도 사용하기도 한다.

또한 전파 신호는 전파 속도가 빠르므로 음향 신호와 같이 전파 속도가 느린 장점을 이용한 실내 위치 측정 시스템도 활발하게 이용되고 있다<sup>[2-4]</sup>. 음향 신호를 이용한 위치 측정 기술은 작은 비용으로 위치 정확도가 높은 장치를 구현할 수 있으므로 많은 연구가 진행되어 왔고 위치 측정 정확도를 높이기 위해서는 음향 신호 파형을 설계할 때에 단순한 tone 신호 보다는 주파수 대역이 넓은 chirp 신호나 Pseudo-random Noise (PN) 신호를 사용한다<sup>[2]</sup>.

스마트폰이나 별도의 전자장치에서 음향 신호를 발생하면 사용자가 그 소리를 감지하게 되어 보안성이 떨어지든지 시끄러움을 느끼게 되어 실용성이 떨어진다. 따라서 개발된 시스템의 실용화를 위해서는, 시스템의 통신 효율이나 위치 측정 정확도뿐만 아니라 가청 음향 신호의 크기 정도가 시스템 설계시에 매우 중요한 요소가 된다<sup>[5-7]</sup>. 그러나 이에 관한 연구가 아직은 활발하지 못한 상태이다.

본 논문에서는 사용자가 감지할 수 없는 수준의 음향 신호를 설계하기 위하여, 우선적으로 음향 신호가 인간의 귀에 인식되는 정도를 계산하기 위한 방법을 제안하고, 설계된 몇 가지 음향 신호 파형에 이 방법을 적용하여 가청 음향 신호의 세기를 분석한다.

## II. 인간의 가청 대역 주파수 특성 및 측정 모델

다음 그림 1은 음향 신호 주파수에 대해 인간이 귀로

감지하는 음향 압력의 레벨이다. 통상적으로 인간의 가청 주파수 대역은 20Hz ~ 20kHz으로 알려져 있으나, 나이에 따라서 고주파 대역을 인지 못하는 경향이 있으며 개인 차이가 있다. 특히 가청 주파수 대역에서도 주파수에 따라 동일하게 감지하는 것이 아니라 그림 1에서 확인할 수 있듯이 2kHz ~ 5kHz의 음향 신호는 작은 소리도 인지할 수 있으며 주파수가 낮아질수록 감도가 떨어진다. 따라서 임의의 음향 신호에 대해서 인간의 인지도를 확인하기 위해서는 가청 주파수 대역에 대해서 동일하게 취급해서는 안 된다.

전통적으로 전화사업자가 전화 음질을 측정하기 위해서 계량적인 측정 방법을 사용하지 않고, Mean Opinion Score (MOS)라고 하는 방법을 사용하였다. 즉, 다수의 청취자를 모아 놓고 음향 신호를 듣게 하면서 음질의 정도를 5점부터 1점까지 주관적으로 평가하도록 하고, 이 점수들의 평균으로 음질을 측정하였다. 이것은 인간의 귀가 음질을 인지하는 데에 있어 계량적으로 평가하기 어렵기 때문이다.

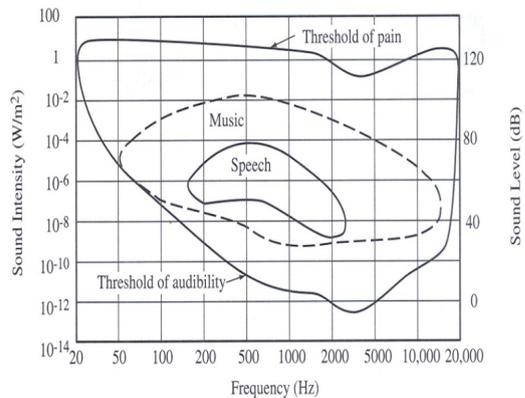


그림 1. 주파수에 대한 인간의 음향 압력 레벨[5]  
Fig. 1. The sound pressure level of human over frequency[5]

본 논문에서는 인간의 귀에 인지가 잘 안 되는 음향 신호를 설계하는 것이 목적이므로, 여러 가지 음향 신호에 대해 청중의 주관적인 평가를 받는 방법이 사용될 수도 있지만, 다양한 시도를 하기에는 너무 번거롭고 청중에 따라 객관적인 평가 결과를 기대하기 어려우며, 음질 측정하는 것이 아니라 단순히 인지되는 음향 신호의 크기 정도만 측정하는 것이므로, 그림 2와 같이 International Electrotechnical Commission (IEC)에서 개

발한 Signal Pressure Level (SPL) 기술 (IEC 61672: 2003)을 이용한다<sup>[8]</sup>.

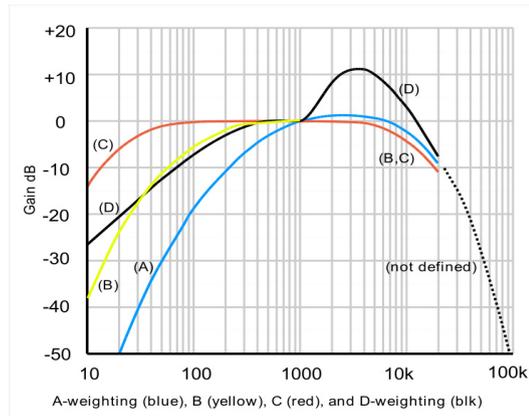


그림 2. IEC에서 개발한 인간의 인지능력을 고려한 음향 신호 압력 레벨 측정을 위한 필터의 주파수 응답 특성<sup>[8]</sup>  
 Fig. 2. The frequency response characteristics of the filter developed by IEC for considering the human sensitivity<sup>[8]</sup>

그림 2는 인간의 청각 능력을 고려하여 실제로 인간이 느끼는 음향 신호의 압력 레벨을 측정하기 위한 일종의 필터의 주파수 응답 특성이다. 여러 가지 종류의 주파수 응답 특성이 있지만 (A)의 A-weighting이 가장 많이 사용된다. 그림 1의 “Threshold of audibility”에 따른 인간의 음향 신호 감지 능력을 고려하여 실제 인간이 인식하는 정도를 측정하기 위해서는 그림 1의 역필터(inverse filter)의 모양이 적합하며 이를 고려해 보면 A-weighting이 가장 적합한 것을 알 수 있다. A-weighting의 주파수 영역에서의 수식은 다음과 같다<sup>[8]</sup>.

$$R_A = \frac{12194^2 \cdot f^4}{(f^2 + 20.6^2)(f^2 + 12194^2) \sqrt{(f^2 + 107.7^2)(f^2 + 737.9^2)}} \quad (1)$$

$$A(f) = 20 \cdot \log_{10}(R_A(f)) + 2$$

입의 음향 신호에 대해서 실제로 인간이 인식하는 음향 신호의 크기를 추정하기 위해서는, 먼저 설계된 음향 신호를 주파수 영역으로 변환한 후에 이를 A-weighting 필터를 통과시키고 다시 시간 영역으로 변환시킨 후, 음향 신호의 전력 크기를 계산한다. 이런 방법으로 다양한 음향 신호에 대해서 비교 분석하고 적절한 수준의 음향 신호가 선택되면, 실제로 해당 음향 신호를 스피커로 재생시키고 이를 직접 들어보고 확인한다.

### III. 비가청 음향 신호의 파형 설계

스마트폰의 음향 신호를 이용한 통신 방식이나 위치 측정 방식에서는 기본적으로 스마트폰 하드웨어 장치의 성능에 제한을 받는다. 특히 별도의 장치에서 발생한 음향 신호를 스마트폰에서 수신하여 신호 처리할 때 스마트폰의 마이크와 증폭기 회로 등의 영향으로 그림 3과 같은 주파수 응답 특성을 갖는다. 즉, 주파수가 약 21 kHz 이상의 음향 신호에 대해서는 스마트폰에서 수신할 수가 없으므로 그 이하의 주파수를 사용해야 하고 그럴 경우 가청 주파수 대역에 해당하므로 사용자가 감지할 수 있게 된다. 더구나 광대역 음향 신호를 사용하거나 불연속적인 데이터나 PN 코드를 전송하는 경우에는 음향 신호 발생 장치에서 고조파가 발생하여 가청 주파수 대역에 신호가 존재하게 된다. 따라서 가능한 가청 주파수 대역에서 인식되는 신호의 크기가 작도록 음향 신호 파형을 설계하는 것이 중요하다.

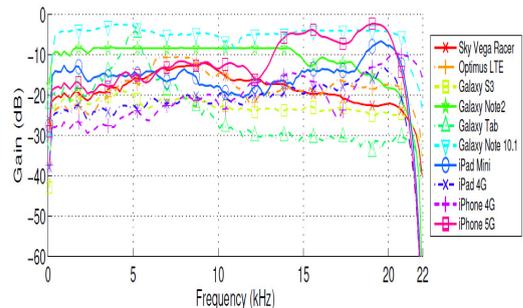


그림 3. 스마트폰 마이크의 주파수 응답<sup>[3]</sup>  
 Fig. 3. Frequency response of the microphones of various smart devices<sup>[3]</sup>

음향 신호의 가청 주파수 대역 성분을 줄이기 위해 chirp 신호의 앞과 뒤에 페이드-인 및 페이드-아웃 tone 신호를 연결하는 방법이 제안되었고, 다양한 chirp 주파수의 대역폭 및 시간 길이, 페이드-인 및 페이드-아웃의 형태에 대해 측정하였다<sup>[7]</sup>. 또한 불연속적인 음향 신호 파형 때문에 “클릭” 소리가 발생한다는 발표도 있다<sup>[6]</sup>. [5]에서는 인간의 가청 주파수 대역 특성을 이용하여 음향 신호 파형을 설계함으로써 가청 소리의 크기를 줄일 수 있다고 하였다.

본 논문에서는 스마트폰 위치 측정을 위한 음향 신호 발생 시스템<sup>[9]</sup>을 대상으로 가청 음향 신호를 최소화시키는 것을 목표로 음향 신호의 파형을 설계한다. 전반적인

로 음향 신호의 주파수가 매우 높거나 음향 신호 파형의 변화가 느릴수록 가청 음향 신호의 크기가 줄어든다. 그러나 이 경우에는 데이터의 전송 속도가 느려지거나 위치 측정의 정밀도가 떨어지므로 적절한 파라미터를 구해야 한다. 특히 스마트폰의 음향 수신 회로의 주파수 특성과 스마트폰에서의 음향 신호 최대 샘플링 주파수인 48 ksp/s를 고려할 때, 설계하는 음향 신호의 최대 주파수는 22 kHz 이하이어야 한다.

그림 4의 (a)는 설계된 1 kHz의 tone 신호에 대한 주파수 스펙트럼이다. (b)는 식 (1)에 따라 구현된 SPL A-weight 필터의 주파수 특성이다. 그림 2의 (A)와 동일한 형태인 것이 확인 되었다. (c)는 (a)의 tone 신호를 A-weight 필터로 통과시킨 출력 신호의 스펙트럼이다. 즉, (a)의 tone 신호가 실제로는 (c)의 신호로 인간의 귀에 인식이 된다. 낮은 주파수 부분이 실제로는 감쇠되어 귀에 잘 안 들리게 된다.

따라서 본 논문에서 음향 신호 파형을 설계할 때에 A-weight 필터를 사용하여 실제로 인간의 귀에 들리는 정도를 비교하여 효율성을 평가할 것이다.

한편 그림 5는 음향 신호를 이용하여 스마트폰의 위치를 측정하는 시스템<sup>[6]</sup>에서 사용한 음향 신호 파형에 관한 것으로, 한 chip의 길이는 6 msec이고 주파수가 15 kHz ~ 18 kHz이며 진폭은 1 V인 chirp 신호를 63 chips의 Kasami 시퀀스로 변조시킨 것이다. (a)는 원래 파형의 스펙트럼이고 (b)는 A-weight 필터를 통과시킨 후의 스펙트럼이다. 역시 낮은 주파수 대역의 감쇠가 확인된다. (c)는 필터 통과 후의 음향 신호 파형이다.

가청 주파수 대역인 20 Hz ~ 20 kHz에서 실제로 인간의 귀에 들리는 음향 신호의 전력을 계산한다. 그림 5에서 원래의 음향 신호 (a)의 전력은 500 mW인 반면 A-weight 필터를 통과하여 실제 인간의 귀에서 느끼는 값은 36 mW로 크게 줄었다. 즉, (a)의 신호에는 낮은 주파수 대역의 신호가 많이 포함되어 실제로 인간의 귀에 들릴 때는 작은 소리로 들리는 것이다. 이런 방법으로 다양한 음향 신호 파형에 대해 실제 인간의 귀에 들리는 크기를 계산하여 비교하는 방법으로 비가청 음향 신호를 설계한다.

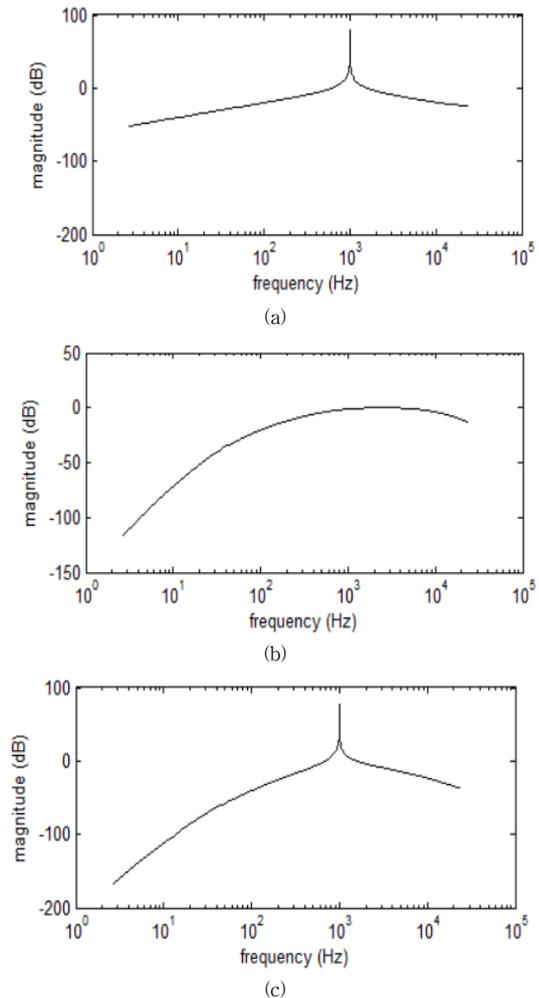


그림 4. (a) 1 kHz tone 신호의 스펙트럼과, (b) SPL A-weight 필터의 주파수 응답 특성, (c) 필터 통과 후의 tone 신호의 스펙트럼

Fig. 4. (a) the spectrum of 1 kHz tone signal, (b) the frequency response of the SPL A-weight filter, and (c) the spectrum of the tone signal after filtering

먼저, 인간의 귀에 잘 안 들리는 18 kHz부터 스마트폰의 마이크에서 감지가 가능한 21 kHz 까지 선형으로 주파수가 변화하는 chirp 신호의 chip 시간 길이에 따른 음향 신호의 전력을 분석하면 그림 6 (a)와 같다. chip의 길이가 길어지면 주파수가 천천히 변하므로 가청 음향 신호의 크기가 작아지는데 주파수 대역폭이 3 kHz로 작아서 그 효과가 없는 것이 확인되었다. chip 길이가 6 msec인 경우에 신호의 전력은 27 mW인데 조용한 환경에서 인식할 수 있는 정도의 크기이다. (b)는 chirp 신호 주파

수의 대역폭에 따른 전력의 변화로 대역폭은  $x$  kHz부터 21 kHz까지인 경우이다. chip 길이는 6msec이다.

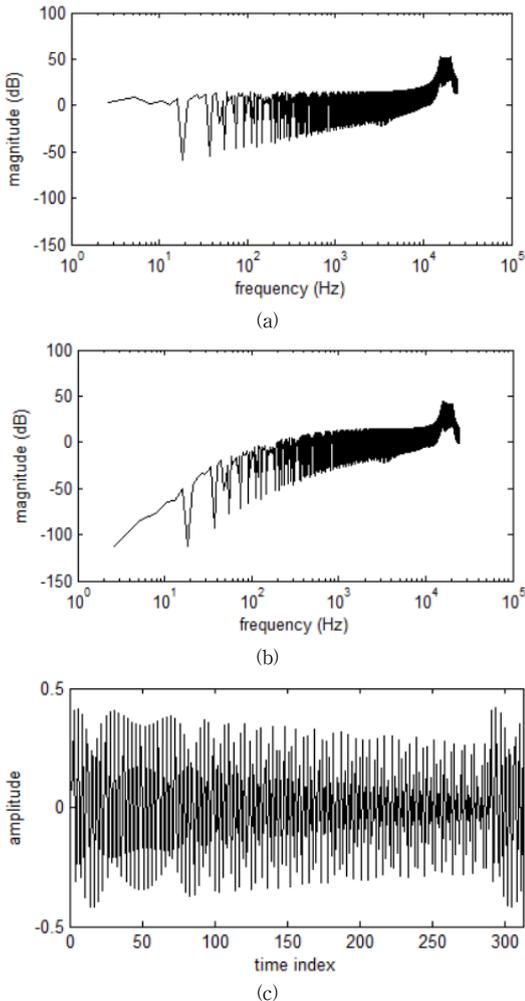


그림 5. (a) chirp으로 변조된 PN 코드 파형에 대한 스펙트럼, (b) A-weight 필터 통과 후의 스펙트럼 및 (c) 필터 통과 후의 음향 신호 파형  
 Fig. 5. (a) the spectrum of chirp modulated PN code signal, (b) the spectrum of the signal after A-weight filtering, and (c) the acoustic waveform of the signal after filtering

기본적으로 음향 신호의 주파수에 따라 전력 크기의 변화는 없으므로 A-weight 필터를 통과시키기 전에는 500 mW로 동일하며,  $x$  주파수가 높아질수록, 즉 chirp 신호의 대역폭이 작아질수록, 또한 낮은 주파수 성분이 줄어들 수 록 전력의 크기가 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 이것은 저주파 대역의 신호 성분이 줄어들기 때문

에 실제로 인간의 귀에는 감지가 작게 되는 것이다. 심지어 21 kHz의 tone 신호인 경우에도 26 mW의 신호가 들리는 이유는 63 chips의 PN 코드로 6 msec 마다 불연속 경계가 발생하므로 고조파에 의한 저주파 음향 신호 성분이 발생하기 때문이다.  $x$ 가 1 kHz 일 때, 즉 chirp 주파수가 1 kHz에서 21 kHz까지 선형으로 변화하는 경우에는 음향 신호의 전력이 84 mW로 매우 큰 소리를 감지할 수 있다.

[7]에서는 가청 음향 신호의 크기를 줄이기 위해 chirp 신호의 앞과 뒤에 chirp 신호의 시작과 끝 주파수와 동일한 주파수의 tone 신호를 붙여서 신호의 변화를 줄이는 방법을 사용하였다. 이 음향 신호 파형에 대해 동일한 방법으로 그 효과를 분석하면 다음 그림 7과 같다.

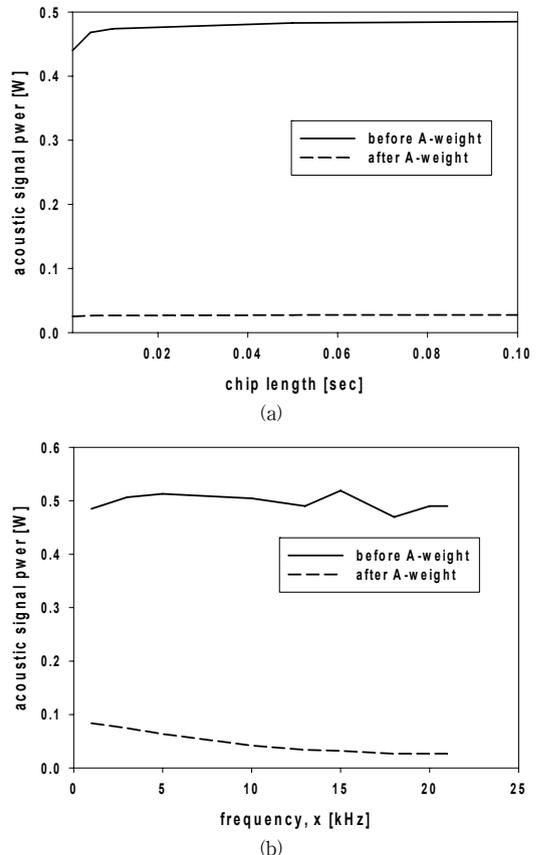


그림 6. (a) 대역폭이 18~21 kHz인 chirp 음향 신호의 chip 시간 길이에 따른 전력 크기, (b) chirp 음향 신호의 대역폭에 따른 전력 크기

Fig. 6. (a) the power according to chip length for the chirp acoustic signal with 18~21 kHz bandwidth, (b) the power according to the bandwidth of chirp acoustic signal

그림 7의 (a)는 10 msec의 chirp 신호의 앞과 뒤에 200 msec의 tone 신호를 붙인 것이다. 페이드-인 및 페이드-아웃 목적으로 tone 신호에 지수 함수의 가중치를 곱한 형태이다. (b)는 여러 가지 길이의 페이드-인 및 페이드-아웃 시간과 다양한 형태의 가중치에 따른 음향 신호의 전력의 크기를 표시한다.

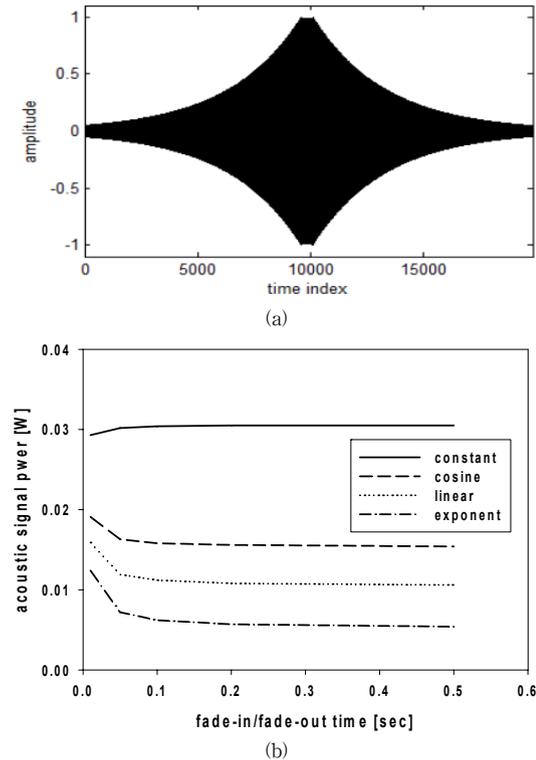


그림 7. (a) 10 msec의 chirp 신호의 앞과 뒤에 200 msec의 페이드-인 및 페이드-아웃 tone 신호를 붙인 음향 신호, (b) 여러 가지 길이의 페이드-인 및 페이드-아웃 시간과 다양한 형태의 가중치에 따른 음향 신호의 전력

Fig. 7. (a) the acoustic signal of 10 msec chirp signal with 200 msec fade-in and fade-out tone signal attached to the front and back of the chirp, (b) the acoustic signal power according to the fade-in and fade-out time, and the type of windows weighting

페이드-인 및 페이드-아웃 시간이 각각 100 msec 정도이면 충분한 것을 확인할 수 있고, 지수 함수 가중치를 적용할 때 인식되는 음향 신호의 전력이 가장 작아지는 것을 확인하였다. 이때의 가청 음향 신호 전력은 6.2 mW로 거의 들리지 않는다. 이 결과는 스피커를 통해서도 확

인하였다.

결론적으로 설계된 이 음향 신호를 사용하면 음향 신호 전송 시간이 늘어나고 음향 데이터 전송 속도는 낮아지지만 사용자가 거의 감지하지 못할 정도로 소음이 작아지는 효과가 있다.

## IV. 결론

본 논문에서는 음향 신호의 스펙트럼과 실제로 인간의 귀에 들리는 스펙트럼의 차이를 고려한 비가청 음향 신호 파형의 설계 방법을 제안하고, 제안된 방법에 따라 몇 가지 음향 신호 파형을 설계 및 비교 분석하였으며, 스피커 소리를 통해서 그 결과가 확인되었다. 다양한 형태의 음향 신호 설계 시에 제안된 기술이 활용될 수 있다.

## References

- [1] K.Liu, X.Liu, and X.Li, "Acoustic Ranging and Communication via Microphone Channel," in proc. Global Communications Conf. (GLOBECOM), Anaheim, U.S.A., Dec. 2012.
- [2] Y.Lu and A.Finger, "Ultrasonic beacon-based local positioning system using broadband PN - chirp codes," in proc. Int. Conf. Wireless Optical Comm., Banff, Canada, July 2009.
- [3] H.Lee, T.Kim, J.Choi, and S.Choi, "Chirp Signal-Based Aerial Acoustic Communication for Smart Devices," 2015 INFOCOM, pp.2407-2415, Hong Kong, April, 2015.
- [4] H.Kim and N.Kim, "Multiple Access Control Method for Distance Measurement Using Radio and Ultrasonic Wave," J. Korean Inst. Info. Tech., vol. 11, no. 1, pp.1-7, Jan. 2013.
- [5] Z.Zhou, W.Diao, X.Liu, and K.Zhang, "Acoustic Fingerprinting Revisited: Generate Stable Device ID Stealthy with Inaudible Sound," in proc. 2014 ACM SIGSAC Conf. Computer and Comm. Security, pp. 429-440, Scottsdale, U.S.A., Nov. 2014.

- [6] L.Deshotels, "Inaudible Sound as a Covert Channel in Mobile Devices," USENIX Workshop for Offensive Technologies, 2014.
- [7] P.Lazik and A.Rowe, "Indoor Pseudo-ranging of Mobile Devices using Ultrasonic Chirps," in Proc. ACM Conf. Embedded Network Sensor Systems, pp.99-112, Toronto, Canada, Nov. 2012.
- [8] <https://en.wikipedia.org/wiki/A-weighting>
- [9] J.Oh, "A Study on Multi-hop Positioning Error in Indoor Positioning System," J. IIBC, vol. 16, no. 2, pp.123-129, April 2016.

#### 저자 소개

##### 오 중 택(정회원)



- 2000년 3월 ~ 현재 한성대학교 정보통신공학과 교수
- 1993년 12월 ~ 2000년 2월 : 한국통신 무선통신연구소 선임연구원
- 1989년 3월 ~ 1993년 2월 : 한국과학기술원 전기및전자공학과 박사 졸업

<주관심분야 : 지능형 무선통신 네트워크, Personal Environment Service>

※ 본 연구는 한성대학교 교내학술연구비 지원과제 임