

실내 음향신호 경로감쇠 모형 및 분석

준회원 정 상 효*, 정회원 이 의 형*, 유 승 수*, 종신회원 김 선 용*

A Study on Propagation Characteristics of Acoustic Signals in Indoor Environments

Sanghyo Jeong* Associate Member, Euihyoung Lee*, Seungsoo Yoo* Regular Members, Sun Yong Kim* Lifelong Member

요 약

본 논문에서는 경로감쇠에 기반한 실내 음향측위 시스템에 활용할 수 있는 실내 음향신호의 경로 감쇠 특성을 분석한다. 실내 음향시스템은 주로 25 평방미터 이내의 협소한 공간에서 적용되기 때문에 기존에 정의된 넓은 공간에서의 모형만으로는 경로감쇠에 기반한 실내음향측위 시스템을 설계할 수 없다. 따라서 본 논문에서는 자유음장 모형과 더불어 실내공간의 온도와 습도, 그리고 대기의 주요구성성분의 흡음영향을 고려한 실내 음향신호 경로 감쇠 모형을 보이고, 무향실에서 실제 실험을 통해 모형의 적절성을 평가한다. 실험을 위해서 1kHz~20kHz의 단일 주파수를 갖는 감쇠정현파를 사용한다. 그리고 실험 음원으로 두 개 이상의 단일 주파수를 갖는 감쇠정현파를 함께 사용할 대의 경로감쇠를 보이고, 이를 분석한다.

Key Words : Acoustic signals, Attenuation constant, Propagation loss, Indoor Positioning, Pathloss

ABSTRACT

Start This paper analyzes the propagation characteristics of acoustic signals in indoor environments, which is applicable to indoor positioning system. Indoor stereo sound system is generally valid within $25m^2$. So it is not possible to apply prevalent sound propagation characteristic to indoor positioning system because the prevalent acoustic signals propagation characteristic is defined under free space condition. Therefore, in this paper, we present the propagation characteristics of acoustic signals in indoor environments considering the free space propagation characteristic as well as room characteristics such as humidity, temperature, absorption of atmosphere and so on. To verify the designed propagation model of indoor acoustic signals, this paper presents the propagation characteristics of decreasing sinusoidal signals whose frequencies are from 1kHz to 20kHz in anechoic room. In addition, this paper also presents the propagation characteristics of decreasing sinusoidal signals which have multiple frequencies.

1. 서 론

최근 스마트 폰의 보편화와 함께 스마트 폰 기반 핵심 응용 제품의 하나로 위치기반서비스 (location-based service, LBS) 관련 제품에 대한 요구가 폭발적으로

증가하고 있다. LBS를 구현하기 위해서는 측위시스템 구현이 반드시 필요하다. 측위시스템은 측위공간, 측위신호, 측위를 위한 측정값 등에 따라 구분할 수 있다. 먼저, 공간에 따라 GPS와 (global positioning system) 같은 실외 측위시스템과 WLAN (wireless

* 본 연구는 한국연구재단 특정기초 연구과제 (R01-2008-0000-12271-0) 지원으로 수행되었습니다.

* 건국대학교 전자정보통신공학부 (kimsy@konkuk.ac.kr)

논문번호 : KICS2011-01-029, 접수일자 : 2011년 1월 10일, 최종논문접수일자 : 2011년 2월 8일

local area network), 가정내 극장의 (home theater) 측위시스템과 같은 실내 측위시스템으로 구분할 수 있다. 그리고, 측위를 위한 신호에 따라 전파기반 측위시스템과 음파기반 측위시스템으로 구분할 수 있으며, 측위를 위한 기본적인 측정값에 따라 송신기와 수신기 사이의 거리에 따른 신호세기 감쇠특성을 이용하는 수신신호세기 (received signal strength) 기반 측위기법, 전파지연 특성을 이용하는 도달지연시간 (time of arrival) 기반 측위기법, 송신기와 복수의 수신기 사이의 기하학적 배치와 전파지연 차를 이용하는 도달각 (angle of arrival) 기반 측위기법 등이 있다. 이 가운데 수신신호세기 기반 측위기법은 환경에 따라 편차가 큰 반면 구현이 용이하고, 도달지연시간과 도달각 기반 측위기법은 환경에 덜 민감한 반면 구현 복잡도가 큰 단점이 있다^[1]. 본 논문에서는 수신신호세기에 기반한 실내 음향 측위에 초점을 맞춘다.

전파(電波)나 음파 같은 파동의 기번족인 전파모형(傳播模型)은 자유공간 모형이다. 이는 장애물이 없고 공간을 구성하는 매질이 균일하며, 그 밀도가 상당히 소한 상태에 있고, 파동원은 점원이며, 송신기의 물리적 방사특성은 전방향 특성을 갖고 있다고 가정한다. 이러한 가정하에서 점원의 거리감쇠는 거리의 제곱에 반비례한다. 그러나 위성과 지상의 수신기 사이, 지표면, 건물 내와 같은 파동이 주로 활용되는 공간에서는 자유공간 모형만으로 파동의 전파(傳播)를 간단히 모형화할 수 없다. 각 파동의 전파특성(傳播模型)은 파동자체의 물리적 특성과 전파공간(傳播空間)의 물리적 및 화학적 구성에 크게 영향을 받으며, 이는 거리의 1.3~5 승에 반비례한다^[2-4].

이 가운데 전파전파(電波傳播) 특성은 전파통신관련 국제 표준화 및 각종 상업 연구를 통해 활발히 연구되었으며, 각종 통신 시스템에 따른 통신채널모형 등으로 발표된 바 있다^[2-5]. 그러나 음파전파(音波傳播) 특성은 [3]과 [4], [6]과 [7]처럼 실외공간에서만 연구되었을 뿐 협소한 실내공간에서는 거의 연구가 이루어지지 않았다. 특히, 본 논문에서 고려하고 있는 수신신호 세기에 기반한 실내 음향측위를 위한 음파전파(音波傳播) 특성에 관한 연구결과는 매우 부족하다.

본 논문에서는 2장에서 자유공간 음향신호 전파모형을 설명한다. 그리고 3장과 4장에서는 약 25평방미터 이내의 협소한 실내공간에서 자유음장모형과 온도, 습도, 그리고 대기 주요구성 성분에 의한 흡음영향을 고려한 실내 음향신호 전파모형을 보이고, 무향실에서 그 적절성을 평가한다. 실험을 위해서 1~20kHz의 단일 주파수를 갖는 감쇠정현파를 사용한다. 그리고 측

위 음원으로 두 개 이상의 단일 주파수를 갖는 감쇠정현파를 함께 사용할 때의 경로감쇠를 보이고, 이를 분석한다. 끝으로 5장에서는 결론을 맺는다.

II. 자유공간 음향신호 전파모형^[2-7]

장애물이 없고, 공간을 구성하는 매질이 균일하며, 그 밀도가 상당히 소한 상태에 있고, 파동원은 점원이며, 전파는 등방성 안테나, 음파는 등방성 확성기를 통해 전파될 때, 수신 안테나 또는 마이크로 수신되는 신호는 점원의 위치를 원점으로 하고, 점원의 위치와 수신 안테나 또는 마이크의 위치를 반지름으로 하는 원의 표면적 중 수신 안테나 또는 마이크가 차지하는 면적비 만큼 감쇠한다. 전파(傳播)되는 전력장은 전력 밀도라고 부르며, 그 단위는 Watt/meter(s)²이다. 자유공간에서 수신전력의 합 P_R 은 식 (1)과 같다.

$$P_R = G_{TR}P_TG_{RT}\frac{\lambda^2}{(4\pi r)^2}, \quad (1)$$

여기서, G_{TR} 과 G_{RT} 는 각각 송신 안테나 (또는 확성기)와 수신 안테나의 (또는 마이크) 이득이고, P_T 는 송출전력, λ 는 송신신호의 파장, r 은 송신 안테나 (또는 확성기)와 수신 안테나 (또는 마이크) 사이의 거리이다. 이때 $G_{TR}P_T$ 는 종종 유효방사전력으로도 (effective radiated power, ERP) 부른다. ERP와 P_T 가 모두 1일 때 자유공간에서 거리에 따른 수신전력의 감쇠, 즉 경로감쇠는 그림 1과 같다. 음향 시스템의 경우 식 (1)의 수신전력의 합을 마이크로 측정된 음의 크기인 음압으로도 (sound pressure) 표현한다. 확성기의 위치와 마이크 사이의 전파거리(傳播距離)가 r 일 때의 음압 $p(r)$ 은 식 (2)와 같다.

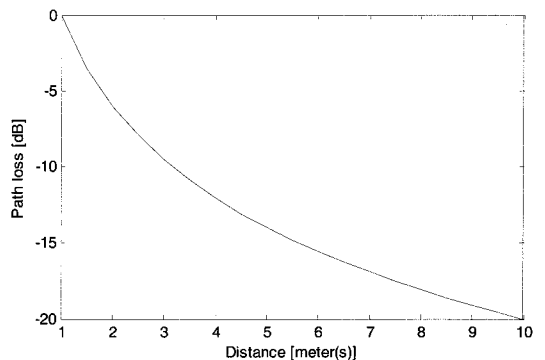


그림 1. 자유공간에서 거리에 따른 수신전력의 감쇠 (경로감쇠)

$$p^2(r) = \frac{\rho\nu P_{TR}}{4\pi r^2}, \quad (2)$$

여기서 ρ 는 전파 매질(傳播媒質)의 밀도, ν 는 음향신호의 속도이다. 식 (1)과 (2)를 바탕으로 자유공간 음향신호 전파모형을 음향수준으로 변환해 식 (3)처럼 다시 쓸 수 있다.

$$L_p = L_w - 20\log(r) - 10\log\left(\frac{4\pi}{\rho\nu}\right), \quad (3)$$

여기서, $L_p = 10\log(p^2(r))$, $L_w = 10\log(P_{TR})$ 이다.

III. 실내 음향신호 전파모형

실제환경에서 음향신호는 전파공간의 흡음, 음향신호의 방향성, 벽에 의한 잔향, 공간 구조에 따라 감쇠 특성이 다르게 나타난다. 특히, 물체 혹은 공기 내 수분이 소리를 흡수하는 일을 뜻하는 흡음률은 공간내의 온도, 습도 및 재생 신호의 주파수, 전파거리 등에 따라 다르며, 이는 음향신호의 감쇠에 큰 영향을 준다^[4]. 본 논문에서는 실내 음향신호 전파모형을 설계하기 위해 공간내에 존재하는 감쇠요소들을 고려한다. 감쇠요소들을 적용한 음향신호의 감쇠식은 식 (3)에 감쇠요소를 덧붙여 식 (4)처럼 다시 쓸 수 있다. 본 논문에서는 자유공간과 실제환경을 구분하기 위해 실제 환경에 관련된 매개변수와 함수 등에 (·)으로 실제환경 관련변수임을 표시한다.

$$L_p' = L_w - 20\log(r) - 10\log\left(\frac{4\pi}{\rho c}\right) - A_{abs} - A_E, \quad (4)$$

여기서 A_{abs} 는 재생신호의 주파수, 현재의 온도, 습도, 재생신호의 전파거리 등에 영향을 받는 식 (5)와 같은 공기의 흡음에 의해 나타나는 흡음감쇠요소, A_E 는 방향성, 날씨, 공간의 벽재질, 공간 구조 등에 의해 나타나는 감쇠상수이다. 본 논문에서는 A_E 에 관해서는 다루지 않는다. A_E 는 소거되기 때문에 음원의 위치 추정에 직접적인 영향은 미치지 않는다.

$$A_{abs} = \alpha r \quad (5)$$

여기서, 흡음감쇠요소의 단위는 dB/m이며, α 는 식 (6)과 같은 흡음계수이다.

$$\alpha = 869 \times f^2 \left\{ 1.84 \times 10^{-11} \left(\frac{T}{T_0}\right)^{1/2} + \left(\frac{T}{T_0}\right)^{-5/2} \right. \\ \left. \times \left(0.01275 \frac{e^{-2239.1/T}}{F_{r,O} + f^2/F_{r,O}} + 0.1068 \frac{e^{-3352/T}}{F_{r,N} + f^2/F_{r,N}} \right) \right\}, \quad (6)$$

여기서, f 는 재생신호의 중심주파수, T 는 절대온도 단위의 현재온도, $T_0 = 293.15K$ 이고, $F_{r,N}$, $F_{r,O}$ 는 각각 식 (7)과 식 (8)과 같은 질소와 산소의 완화주파수 성분이다.

$$F_{r,N} = \left(\frac{T_0}{T}\right)^{1/2} \left(9 + 280he^{-4.17[(T_0/T)^{1/3}-1]}\right), \quad (7)$$

$$F_{r,O} = 24.0 + 4.04 \times 10^4 h \frac{0.02 + h}{0.391 + h}, \quad (8)$$

여기서 h 는 수증기의 몰농도이며, 이는 현재온도와 상대습도를 이용하여 구해질 수 있다. 즉, 흡음계수를 구하기 위해 필요한 인자는 재생신호의 주파수, 현재온도, 그리고 상대습도이다. 식 (4)를 사용해 주파수에 따른 실내 음향신호의 감쇠추이는 그림 2와 같다.

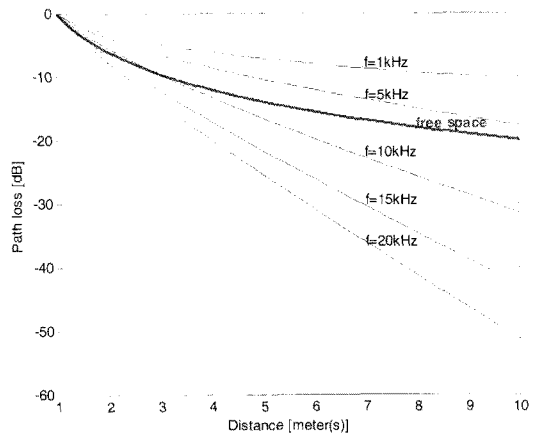


그림 2. 주파수에 따른 실내 음향신호의 감쇠추이

IV. 실험결과

3장에서 보인 실내 음향감쇠 모형의 적절성을 판단하기 위해 3.25m×2.5m 무반향실에서 실험을 수행하였다. 이상적인 무반향실은 반향이 전혀 없기 때문에 그 크기는 무한대로 가정할 수 있다. 음향감쇠 실험에서 모니터 앰프로는 ALESIS社의 RA300을 사용하였으며 녹음 장비로는 8채널 동시 녹음이 가능한 MOTU社의 828 MK3와 SP 828을 사용하였다. 그리

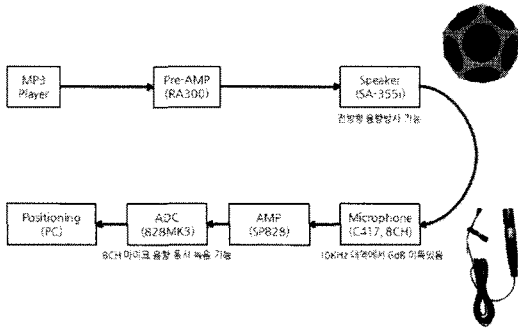
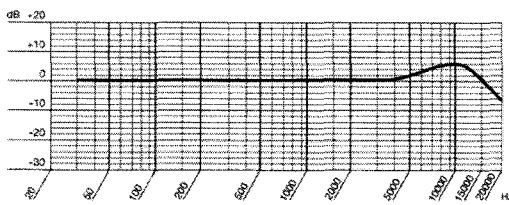


그림 3. 음향감쇠 실험 구성

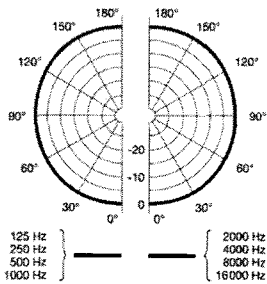
고 실험 중 스피커와 마이크의 지향성이 음향감쇠 실험에 미치는 영향을 배제하기 위해 SOLID ACOUSTIC社에서 제작한 SSA-355i 전방향 스피커와 AKG社에서 제작한 C417 전방향 마이크를 사용하여 실험을 진행하였다. 전방향 마이크 C417의 특성은 그림 4와 같다. 그리고 실험에 사용한 음원으로는 식 (9)와 같은 단일 주파수를 갖는 감쇠정현파를 사용하였다.

$$s(t) = \sin(2\pi ft)e^{-4t}. \quad (9)$$

그림 5는 $f=1\text{kHz}$ 인 감쇠정현파이다. 실험을 위해 측정된 무향실의 온도는 25°C , 상대습도 40%이다. 무향실을 밀폐한 상태에서 송풍기를 가동해 실험 공간 내 온도와 습도가 최대한 균등하게 분포할 수 있도록 실험을 통제했다. 이런 환경하에서 주파수가 각각

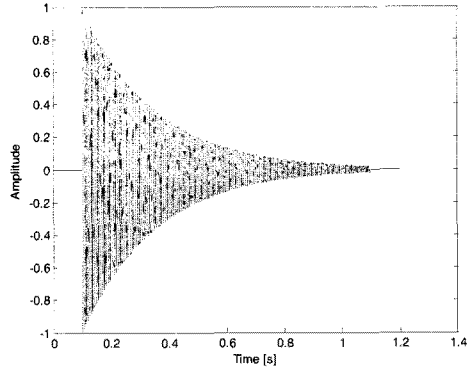


(a) 주파수 응답

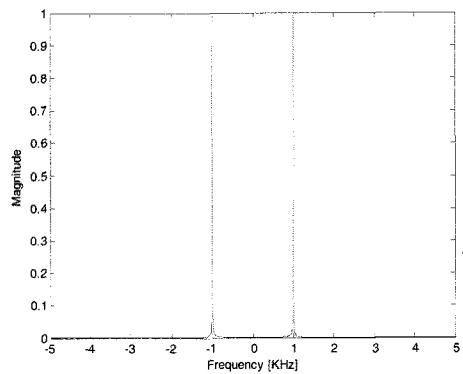


(b) 방사 형태

그림 4. 실험에 사용한 마이크의 특성



(a) 시간축 특성



(b) 주파수축 특성

그림 5. 주파수가 1kHz인 감쇠정현파의 통계적 특성

1kHz, 10kHz인 감쇠정현파의 이론적 감쇠와 측정결과는 그림 6처럼 나타났다. 그림 6에서 볼 수 있듯이, 3장에서 보인 실내 음향감쇠 모형이 대체적으로 적절함을 확인할 수 있다. 그러나 1m 이내에서는 다소 차이를 보이는데 이는 식 (4)에서 보인 실내 음향감쇠 모형은 자유음장모형을 포함하고 있는데 자유음장모

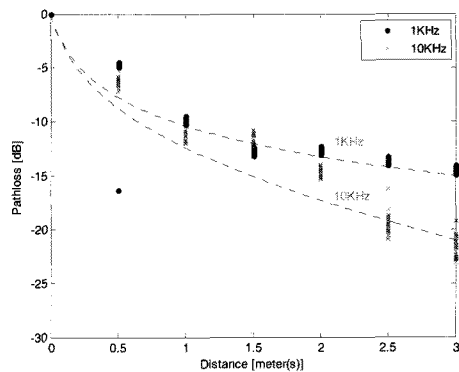


그림 6. 주파수가 1kHz, 10kHz인 감쇠정현파 이론적 신호감쇠와 측정결과

형의 경우 1m 이후부터 정의된 모형으로 1m 이내의 정확한 자유음장모형을 갖추지 못했기 때문이다.

1m 이내의 자유음장모형에 대한 연구가 추가적으로 요구되나 본 논문에서 주요하게 고려하는 실내음향측위시스템의 경우 유효 청취범위를 고려할 때 청취자가 스피커를 기준으로 최소 1m 이상 이격되어 위치함으로 해당 범위 내 오차는 본 논문에서 고려하지 않는다.

음향 측위시스템을 위한 측위음원으로 지금까지 고려한 단일주파수 기반 감쇠정현파만을 사용할 수도 있지만 박수소리나 손가락 딱소리와 같은 청취자의 자체발성음을 측위음원으로 고려할 경우 여러 주파수를 갖는 신호에 대한 경로감쇠 분석이 추가적으로 요구된다. 본 논문에서는 이를 고려하기 위해 각기 다른 단일 주파수를 갖는 두 개의 감쇠정현파가 함께 전송될 때의 경로감쇠 실험을 수행하고, 그 결과를 분석한다.

1kHz부터 20kHz 사이의 두 개의 감쇠정현파 조합을 고려할 때 하나의 감쇠정현파에 대해 다른 하나의 감쇠정현파가 그 고조파인 (harmonic) 경우와 그렇지 않은 경우를 생각해볼 수 있다. 1kHz부터 20kHz까지 간격이 1kHz인 여러 감쇠정현파를 고려할 때 두 감쇠정현파의 주파수가 각각 2kHz, 3kHz, 5kHz, 7kHz, 11kHz, 13kHz, 17kHz, 19kHz 가운데 선택되면 어느 한 감쇠정현파의 고조파가 다른 감쇠정현파에 영향을 주지 않는다.

본 논문에서는 먼저 하나의 감쇠정현파에 대해 다른 하나의 감쇠정현파가 그 고조파인 경우를 고려한다. 이를 위해 설정한 감쇠정현파의 조합은 '1kHz+10kHz' 와 '10kHz+20kHz' 이다. 주파수가 각각 1kHz와 10kHz인 감쇠정현파를 함께 전송했을 때와 각각 10kHz와 20kHz인 감쇠정현파를 전송했을 때의 경로감쇠 실험결과는 그림 7과 같다. 그림 7의 결과 도출을 위해 0m부터 0.5m간격으로 마이크를 배치해 한 위치에서 50회 녹음했다. 그림 7처럼 두 주파수가 함께 전송되는 경우 전체적인 경로감쇠 경향은 높은 주파수의 경로감쇠를 따르는 것을 확인할 수 있다. 또한 '1kHz+10kHz' 조합에 비해 '10kHz+20kHz' 조합의 경우 신호감쇠가 덜 나타나는 것을 볼 수 있는데, 이는 주파수 10kHz를 갖는 감쇠정현파는 주파수 1kHz를 갖는 감쇠정현파의 제 10고조파지만, 20kHz를 갖는 감쇠정현파는 주파수 10kHz를 갖는 감쇠정현파의 제 2 고조파이기 때문이다. 고조파는 고조계수가 클수록 그 크기가 줄어든다.

다음으로 하나의 감쇠정현파에 대해 다른 하나의 감쇠정현파가 그 고조파가 아닌 경우를 고려한다. 이

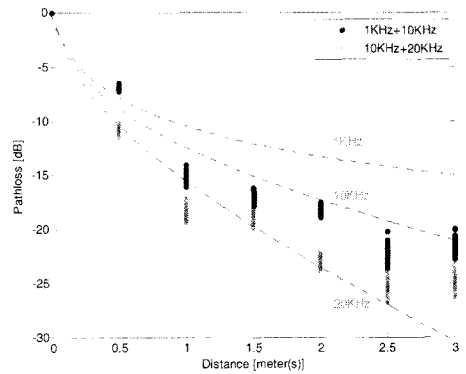


그림 7. 주파수가 각각 1kHz, 10kHz인 감쇠정현파를 함께 전송했을 때와 각각 10kHz, 20kHz인 감쇠정현파를 함께 전송했을 때의 경로감쇠

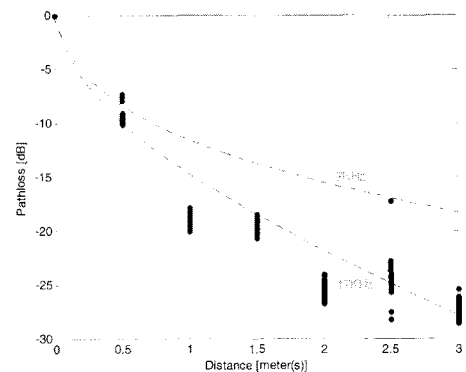


그림 8. 주파수가 각각 7kHz와 10kHz인 감쇠정현파를 함께 전송했을 때의 경로감쇠

상적인 경우 두 감쇠정현파는 청음주파수 내에서 서로 독립적으로 전송된다. 이를 위해 감쇠정현파의 조합은 '7kHz+17kHz'이다. 주파수가 7kHz인 감쇠정현파와 함께 주파수가 17kHz인 감쇠정현파를 전송했을 때, 경로감쇠 실험결과는 그림 8과 같다. 그림 7에서 보인 경향처럼 고조파가 아닌 경우에도 높은 주파수 성분 신호의 경로감쇠경향을 따른다. 그림 7과 그림 8의 결과로부터 다수 주파수가 중복된 신호가 측위음원으로 사용될 경우 신호를 구성하는 주파수 성분의 고조파까지 고려해 감쇠경향을 고려해야하며, 특히 가장 높은 주파수 성분이 감쇠경향에 주요한 영향을 미침을 확인할 수 있었다.

V. 결론

본 논문에서는 경로감쇠에 기반한 실내 음향측위 시스템에 활용할 수 있는 실내 음향신호의 경로감쇠 특성을 분석하였다. 실내 음향시스템은 주로 25 평방

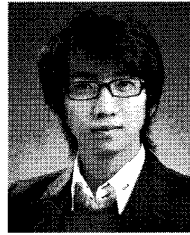
미터 이내의 협소한 공간에서 적용되기 때문에 기존에 정의된 넓은 공간에서의 모형만으로는 경로감쇠에 기반한 실내음향측위 시스템을 설계할 수 없다. 따라서 본 논문에서는 자유음장 모형과 더불어 실내공간의 온도와 습도, 그리고 대기의 주요구성성분의 흡음 영향을 고려한 실내 음향신호 경로감쇠 모형을 보이고, 무향실에서 1kHz~20kHz의 단일 주파수를 갖는 감쇠정현파를 이용한 음향감쇠 실험을 통해 경로감쇠 모형의 적절성을 평가하였다. 또한 두 개 이상의 단일 주파수를 갖는 감쇠정현파를 함께 사용할 때의 경로감쇠를 실험을 통해 분석하였으며, 실험 결과 다수 주파수가 중복된 신호의 경로감쇠는 신호내의 높은 주파수 성분 신호의 경로감쇠경향을 따른다. 향후에는 본 경로감쇠 모형을 이용한 음원의 위치결정 기법에 대한 연구를 진행하고자 한다.

참 고 문 헌

- [1] A. Bensky, *Wireless Positioning Technologies and Applications*, Artech House, Inc., Norwood, MA, 2008.
- [2] R. A. Poisel, *Modern Communications Jamming Principles and Techniques*, Artech House, Inc., Norwood, MA, 2004.
- [3] A. Dennis, "Environmental effects on the speed of sound," *Journal of the Audio Engineering Society*, Vol.36, No.4, pp.223-231, Apr. 1988.
- [4] M. J. Crocker, *Handbook of noise and vibration control*, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, 2007.
- [5] R. Vaughan and J. B. Andersen, *Channels, Propagation and Antennas for Mobile Communications*, IEE Press, London, UK, 2003.
- [6] T. Wiens, S. Bradley, and K. George, "Experimental Characterization of sound propagation in a dense New zealand forest," *Proc. International Congress and Exposition on Noise Control Engineering*, CD-ROM, Changhai, China, Oct. 2008.
- [7] L. L. Beranek and I. L. Ver, *Noise and Vibration Control Engineering: Principles and Applications*, John Wiley and Sons, Inc., Hoboken, NJ, 1992.

정 상 호 (Sanghyo Jeong)

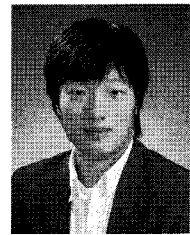
준회원



2010년 8월 건국대학교 정보통신공학전공 공학사
2010년 9월~현재 건국대학교 전자정보통신공학 석사과정
<관심분야> 통계학적 신호처리, 음향신호처리, 위성신호처리

이 의 형 (Euihyoung Lee)

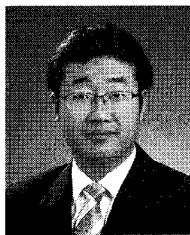
정회원



2007년 2월 건국대학교 정보통신공학전공 공학사
2011년 2월 건국대학교 전자정보통신공학부 공학석사
2011년 2월 ~ 현재 뷰익스 연구소 연구원
<관심분야> 통계학적 신호처리, 음향신호처리, 위성신호처리.

유 승 수 (Seungsoo Yoo)

정회원



2004년 2월 건국대학교 전자공학부 공학사
2005년 2월 건국대학교 전자정보통신공학부 공학석사
2010년 8월 건국대학교 전자정보통신공학부 공학박사
2010년 9월~현재 건국대학교

BK21 핵심사업단 박사후과정
<관심분야> 이동통신, 통신신호처리, 무선측위, GNSS.

김 선 용 (Sun Yong Kim)

중신회원



1990년 2월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 학사(최우등)

1993년 2월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 공학석사

1995년 8월 한국과학기술원 전자전산학과 박사

1995년 4월~1996년 3월 동경대학교 생산기술연구소 박사연구원

1996년 9월~1998년 12월 한국전자통신연구원 초빙연구원

1996년 3월~2001년 8월 한림대학교 정보통신공학부 전임강사, 조교수

2001년 8월~현재 건국대학교 전자공학부 조교수, 부교수, 교수

1990년 IEEE Korea Section 학생논문대회 우수상 받음

1992년~1993년 IEEE Communication Society 장학금 받음

대한전자공학회, 한국통신학회 중신회원, IEEE 선임회원 <관심분야> 통계학적 신호처리, 이동통신, 통신이론