

# 자체발성음의 도달지연시간차 기반 상향 실내음향측위시스템 설계

정회원 유 승 수\*, 준회원 김 영 문\*, 정회원 이 기 승\*, 윤 경 로\*\*,  
이 석 필\*\*\*, 종신회원 김 선 용\*

## A Design for Uplink Indoor Acoustic Positioning System based on Time-Difference-of-Arrival of Self-Generating Sounds

Seungsoo Yoo\* *Regular Member*, Yeongmoon Kim\* *Associate Member*, Ki-Seung Lee\*,  
Kyoungro Yoon\*\*, Seok-Pil Lee\*\*\* *Regular Members*, Sun Yong Kim\* *Lifelong Member*

### 요 약

본 논문에서는 상향 실내음향측위를 위한 자체발성음으로서 휘파람소리, 손가락딱소리, 박수소리의 시간 및 주파수영역, 상관 및 전력스펙트럼밀도, 최대지연시간, 최대주파수, 대역폭 분석을 통해 여러 자체발성음의 측위음원으로서의 적합성을 판단한다. 그리고 자체발성음의 도달지연시간차에 기반을 둔 실내측위시스템을 설계하고 그 성능을 평가한다. 자체발성음 분석과 측위성능평가를 위해 여성과 남성 각 50명씩, 총 100명의 자체발성음 데이터베이스를 구축해 활용하였다.

**Key Words** : Indoor Positioning System, Uplink Positioning, Self-Generating Sounds, Hands-Clapping, and Time-Difference-of-Arrival

### ABSTRACT

An uplink indoor positioning system is proposed in the present work, where the acoustic signals are solely used for positioning. The underlying acoustic signals include whistle, finger snap, and hands-clapping. In the proposed method, positioning is achieved by finding the time-difference-of-arrivals using several self-generating sounds. To evaluate the feasibility of the signals and their positioning accuracies, the database of 100 persons about self-generating acoustic signals is built up. The results show that the hands-clapping sound is the most suitable for acoustic-based indoor positioning.

### I. 서 론

노매딕과 (nomadic) 유비쿼터스로 (ubiquitous) 대표되는 최근 정보통신기술에서 새로운 핵심 화두 가운데 하나는 위치기반서비스이다 (location base service, LBS). LBS 분야의 핵심기술 가운데 하나인 측위기술은 측위 공간에 따라 실외와 실내측위

기술로 구분된다. 실외측위기술은 범역측위시스템을 (global positioning system) 포함한 범역항법위성시스템과 (global navigation satellite system) 이동통신망을 이용한 실외무선측위시스템이 있다. 실내측위기술은 무선랜 (wireless local area network), 와이브로 (wireless broadband, wibro), 초광대역시스템 (ultra-wideband system) 등 전파를 이용하는 실

※ 본 연구는 과학기술부 한국과학재단 특정기초연구과제(R01-2008-000-12271-0)와 2단계 BK21 사업의 지원으로 수행되었습니다.

\* 건국대학교 전자정보통신공학부 (kimsy@konkuk.ac.kr), \*\* 건국대학교 컴퓨터공학부, \*\*\* 전자부품연구원

논문번호 : KICS2009-12-617, 접수일자 : 2009년 12월 17일, 최종논문접수일자 : 2010년 1월 7일

내무선측위시스템과 음파를 이용하는 실내음향측위 시스템이 있다<sup>[1], [2]</sup>. 본 논문은 음파를 이용하는 실내음향측위시스템에 초점을 맞춘다.

음파를 이용하는 실내음향측위시스템은 피측점에 마이크가 있고 측점에 스피커 등 측위음원발생기가 있는 하향식 시스템과 반대로 피측점에 측위음원발생기가 있고 측점에 마이크가 있는 상향 시스템으로 나눌 수 있다. 하향 시스템은 각 측점에서 서로 직교하도록 측위신호를 발생해야하기 때문에 시간 또는 주파수 자원이 많이 소모되며, 인공음원만을 측위음원으로 사용해야 한다. 반면, 상향 시스템은 피측점에서 발생시킨 단일 음원만으로 시스템 구성이 가능하며, 인공음원과 더불어 사람 스스로 발생할 수 있는 자체발성음을 사용할 수 있다. 자체발성음을 사용하는 경우 별도의 장치가 필요 없어 시스템을 단순하게 구성할 수 있고, 사용자는 유효측위 공간 내 어디서든 자유롭게 시스템을 이용할 수 있다<sup>[3], [4]</sup>. 본 논문에서는 자체발성음을 측위음원으로 사용하는 상향 실내음향측위시스템에 초점을 맞춘다.

자체발성음은 음성, 박수소리, 손가락딱소리, 휘파람소리 등이 있다. 본 논문에서는 여러 자체발성음을 분석하고 이 가운데 적합한 자체발성음을 선택한다. 그리고 선택한 자체발성음을 사용하는 상향 실내측위시스템을 구성하고 그 성능을 평가한다. 본 논문에서는 여성과 남성 각각 50명, 총 100명의 자체발성음 데이터베이스를 구축하여 자체발성음의 분석 및 그 측위성능을 평가했다.

## II. 자체발성음 분석

자체발성음은 사람 스스로 낼 수 있는 소리이다. 이를 측위음원으로 사용하기 위해서는 무엇보다 사용자가 제어 및 발생하기 쉬워야한다. 대표적인 자체발성음은 음성, 박수소리, 손가락딱소리, 휘파람소리이다. 이 가운데 음성은 상당히 주관적이며 종류가 너무 다양해 본 논문에서 고려하지 않는다. 본 논문에서 고려하는 자체발성음은 그림 1과 같다.

일반적으로 사람의 박수소리는 손바닥과 엄지손가락을 제외한 손가락을 사용해 발생된다. 본 논문에서는 엄지손가락을 제외한 네 손가락만을 손가락으로 부른다. 박수소리는 손바닥과 손가락의 마주침 형태에 따라 손바닥과 손가락 그림 1(a), 손바닥과 손바닥 그림 1(b), 그리고 손 전체를 그림 1(c) 부딪히는 형태로 구분할 수 있다. [4]에서는 이를 더 세분해 손바닥과 손가락을 세 영역으로 나누고, 각

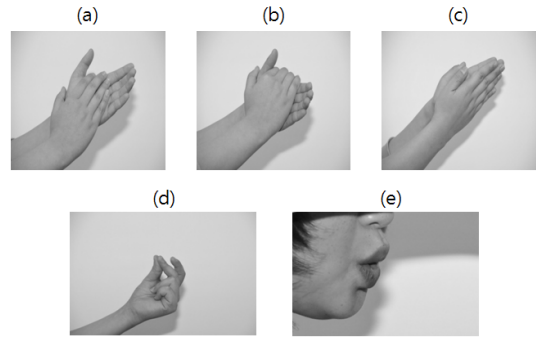


그림 1. 자체발성음: (a) A형 박수소리, (b) B형 박수소리, (c) C형 박수소리, (d) 손가락딱소리, (e) 휘파람소리

영역이 마주치는 정도에 따라 모두 8가지 형태로 박수소리를 구분하였으나 데이터베이스 구축을 통한 100명의 실험자 관찰 및 그 분석결과 박수소리를 측위음원으로 사용하는 것에는 3가지 형태구분이 유용함을 알 수 있었다.

본 논문에서는 자체발성음의 분석 및 측위성능 평가를 위해 여성 및 남성 각 50명, 모두 100명의 자체발성음 생성조사 및 그 데이터베이스를 구축하였다. 자체발성음의 녹음은 무반향실에서 진행하였다. 자체발성음 생성조사 결과는 표 1과 같다. 표 1에서 박수소리는 3가지 형태를 모두 포함한다. 조사결과 박수소리는 성별에 관계없이 누구나 낼 수 있는 소리임을 확인할 수 있었다. 그러나 휘파람소리와 손가락딱소리는 약 절반 정도만 낼 수 있었고, 특히 성별에 따라 그 편차가 심하게 나타났다.

피실험자에게 박수형태에 대한 설명을 하지 않고 자유롭게 박수를 치게 한 결과 각 박수소리의 선호도는 표 2와 같이 나타났다. 많은 사람들이 A형과 C형 박수를 선호했으며, 특히 남자는 A형, 여자는 C형 박수소리를 선호했다.

100명의 자체발성음 가운데 대표적인 자체발성음의 시간 및 주파수 영역은 그림 2에서 그림 6, 상관 및 전력스펙트럼 영역은 그림 7에서 그림 11처럼 나타난다. 그림 2와 그림 3, 그리고 그림 7과 그림 8에서 볼 수 있는 것처럼 A형 박수소리는 B형 박수소리에 비해 신호구간이 짧고, 최대주파수가 높

표 1. 자체발성음의 생성비율

	박수소리	휘파람소리	손가락딱소리
전체	100%	48%	58%
남성	100%	66%	70%
여성	100%	30%	46%

다. 본 논문에서 자체발성음의 최대주파수는 스펙트럼에서 최대크기를 갖는 주파수이다. 그림 4와 그림

표 2. 박수소리의 신호도

	A형 박수소리	B형 박수소리	C형 박수소리
	손바닥과 손가락	손바닥과 손바닥	손 전체
전체	42%	18%	40%
남성	60%	24%	16%
여성	24%	12%	64%

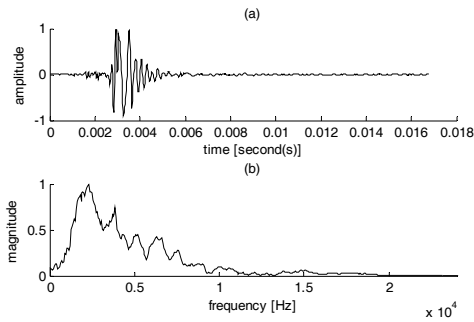


그림 2. 대표적인 A형 박수소리 (a) 시간영역 (b) 주파수영역

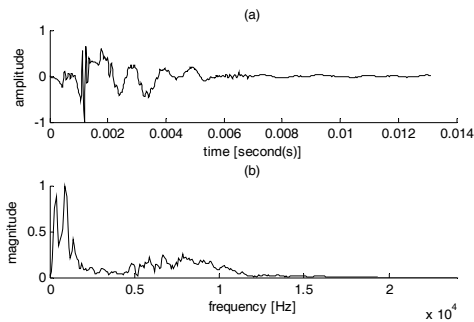


그림 3. 대표적인 B형 박수소리 (a) 시간영역 (b) 주파수영역

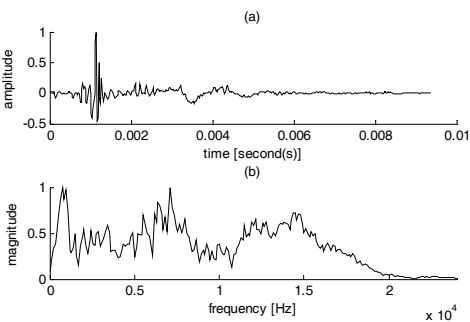


그림 4. 대표적인 C형 박수소리 (a) 시간영역 (b) 주파수영역

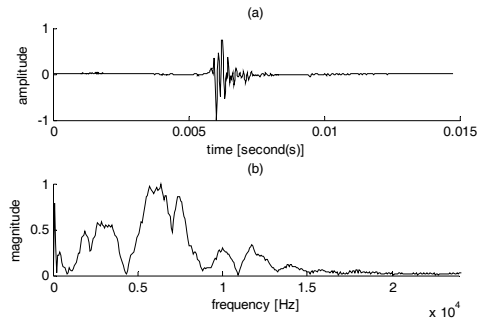


그림 5. 대표적인 손가락박소리 (a) 시간영역 (b) 주파수영역

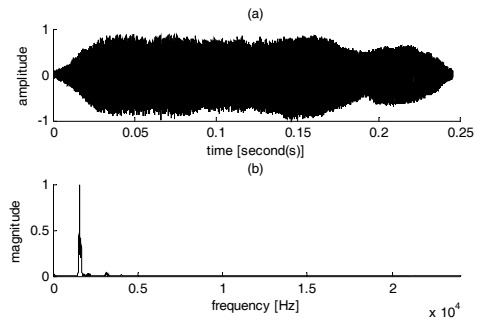


그림 6. 대표적인 뼉파람소리 (a) 시간영역 (b) 주파수영역

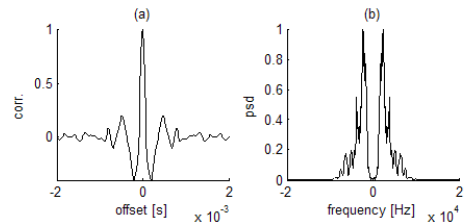


그림 7. 대표적인 A형 박수소리 (a) 상관함수 (b) 전력스펙트럼밀도

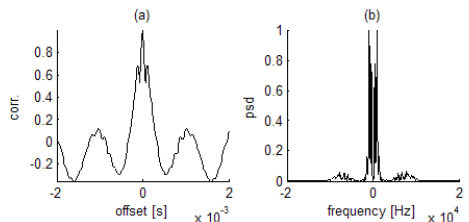


그림 8. 대표적인 B형 박수소리의 (a) 상관함수 (b) 전력스펙트럼밀도

9처럼 C형 박수소리는 A형과 B형 박수소리의 특징을 포함하고 있다. [4]의 분석처럼 박수소리에서 주파수는 손바닥과 손가락의 해부학적 구성과 관련이

있다. 손가락과 손바닥은 지골과 (指骨) 수근골의 (手根骨) 부피는 비슷하지만 근육 및 피부의 부피는 훨씬 작다. 따라서 전체적인 경도는 손가락이 손바닥보다 크다. 충격음은 매질이 단단할수록 높은 주파수를 갖는다<sup>[5]</sup>. 휘파람소리는 그림 6과 그림 11에서 볼 수 있는 것처럼 다른 자체발성음에 비해 단조로운 주파수 구성을 갖고 있다. 따라서 그림 11(a)처럼 다른 자체발성음에 비해 상관특성이 나쁘다.

본 논문에서는 자체발성음을 조금 더 자세히 분석하기 위해 자체발성음 데이터베이스의 음원을 활용해 박수소리, 손가락딱소리, 휘파람소리의 초과지연시간, 최대주파수, 대역폭을 분석하였다. 초과지연시간은 문턱 값을 초과하는 시점부터 미달되는 중점까지의 시간간격이고 대역폭은 최대주파수를 기준으로 -3dB가 되는 주파수 폭으로 측정하였다. 그 결과는 그림 12에서 그림 16과 같다.

그림 12에서 그림 16처럼 자체발성음의 초과지연시간, 최대주파수, 대역폭은 성별에 따라 큰 차이를

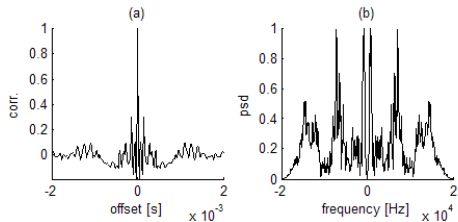


그림 9. 대표적인 C형 박수소리의 (a) 상관함수 (b) 전력스펙트럼밀도

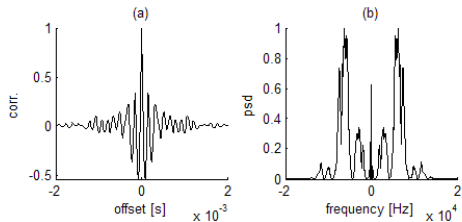


그림 10. 대표적인 손가락딱소리의 (a) 상관함수 (b) 전력스펙트럼밀도

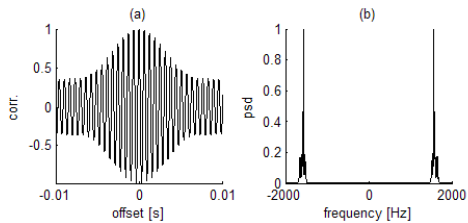


그림 11. 대표적인 휘파람소리의 (a) 상관함수 (b) 전력스펙트럼밀도

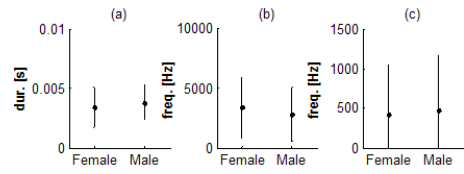


그림 12. 성별에 따른 A형 박수소리의 (a) 초과지연시간, (b) 최대주파수, (c) 대역폭의 평균과 분산

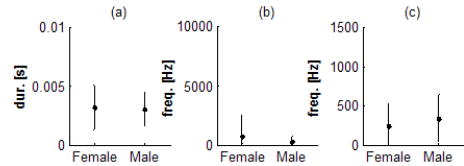


그림 13. 성별에 따른 B형 박수소리의 (a) 초과지연시간, (b) 최대주파수, (c) 대역폭의 평균과 분산

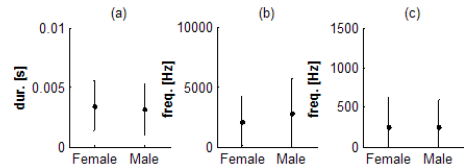


그림 14. 성별에 따른 C형 박수소리의 (a) 초과지연시간, (b) 최대주파수, (c) 대역폭의 평균과 분산

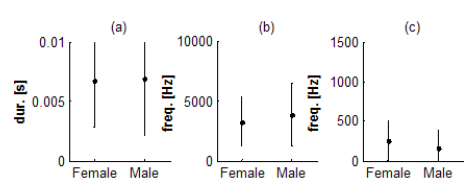


그림 15. 성별에 따른 손가락딱소리의 (a) 초과지연시간, (b) 최대주파수, (c) 대역폭의 평균과 분산

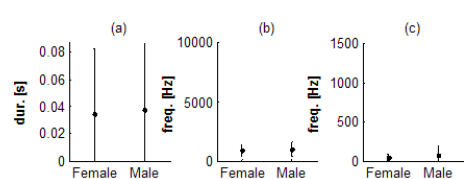


그림 16. 성별에 따른 휘파람소리의 (a) 초과지연시간, (b) 최대주파수, (c) 대역폭의 평균과 분산

보이지 않는다. 그림 12(a), 그림 13(a), 그림 14(a)처럼 박수소리의 최대초과지연시간은 형태에 상관없이 약 5ms, 그림 15(a)처럼 손가락딱소리의 최대초과지연시간은 약 10ms, 그림 16(a)처럼 휘파람소리의 최대초과지연시간은 약 80ms이다. 일반적으로, 측위신호가 충격함수에 (impulse function) 가까울수

록 시간해상도가 좋아 측위에 적합하다. 따라서 신호의 초과지연시간이 짧고, 대역폭이 넓은 박수소리가 다른 두 소리에 비해 측위에 적합하다.

그림 12에서 그림 16의 비교로부터 그림 12(c)처럼 A형 박수소리가 가장 넓은 대역폭 가짐을 확인할 수 있다. 초과지연시간과 반대로 대역폭이 넓을 수록 신호의 분해능이 높으므로 측위음원으로 적합하다. 대역폭은 그림 12(c)처럼 A형 박수소리가 제일 넓고, 그림 16(c)처럼 휘파람소리가 제일 좁다.

이상의 분석으로부터 A형 박수소리가 자체발성음을 사용한 측위음원으로서 가장 적합함을 알 수 있다.

### III. 상향 실내음향측위시스템 설계 및 성능평가

본 논문에서는 자체발성음의 측위성능평가를 위해 그림 17처럼 상향 실내음향측위시스템을 설계하였다. 자체발성음의 발생은 방사전력을 일정하기 위해 미리 무반향실에서 녹음한 소리를 MP3 재생기로 재생하였다. 최종적인 음향신호는 피측점에 위치한 전방향 스피커를 이용해 발생시켰다. 음향의 동시녹음을 가로×세로×높이가 2.02m×2.08m×0.80m인 직육면체 각 꼭짓점을 측정으로 모두 8개의 마이크를 설치하였으며<sup>6)</sup>, 이를 음향녹음전용장비를 사용해 동시에 (지연시간 10us이내) 녹음하였다. 측위결과는 녹음 후에 오프라인 처리를 통해 도출하였다. 각 측위결과 도출을 위해 자체발성음은 모두 1,000회 발생했으며, 그림 18처럼 반향과 잔향이 없는 무향공간과 가로×세로×높이가 약 4.00m×8.00m×2.40m인 반향이 있는 일반공간에서 실험을 진행하였다. 자체발성음의 도달지연시간차를 측정하기 위해 오경보확률을  $10^{-8}$ 로 설정한 에너지검파기를 사용했다. 측위를 위한 방법은 [7]의 최소자승기반 도달지연시간차 측위기법을 사용했다. 무반향실에서

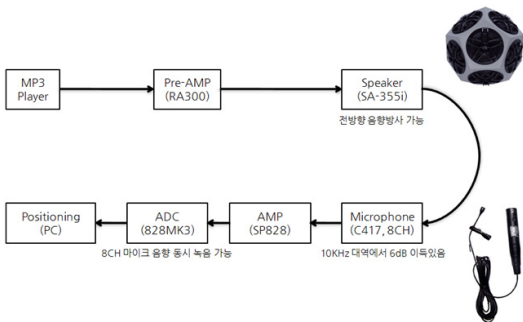


그림 17. 상향 실내음향측위시스템의 구성



그림 18. 실험공간: (a) 무반향실, (b) 반향이 있는 일반공간

각 음원의 측위결과는 그림 19와 그림 20처럼, 일반공간에서는 그림 21처럼 나타났다.

그림 19, 그림 20, 그림 21에서 ‘Sweet spot’은 스테레오 음향시스템에서 청취자가 음향효과의 차이를 느끼지 못하는 공간으로 약 0.25m이다<sup>8, 9)</sup>. 즉, 반경 0.25m 이내의 구체공간 안에서는 동일한 음향효과로 인지한다. 따라서 자체발성음을 사용한 실내 측위기법에서는 0.25m이내의 측위오차가 발생한 확률이 성능평가의 중요한 지표가 된다. ‘Sweet spot’의 반경 0.25m를 평균자승측위오차로 환산하면 약 0.07m<sup>2</sup>가 된다. 본 논문에서는 평균자승측위오차가

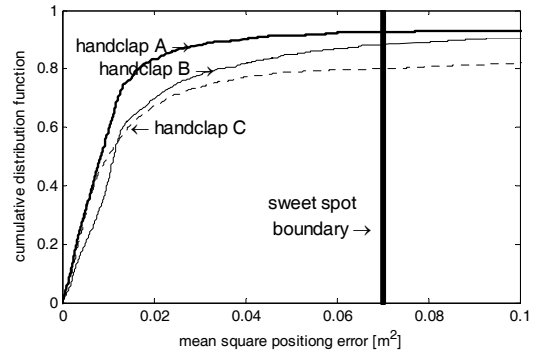


그림 19. 무반향실에서 박수소리를 측위음원으로 사용했을 때 평균자승측위오차의 누적분포함수

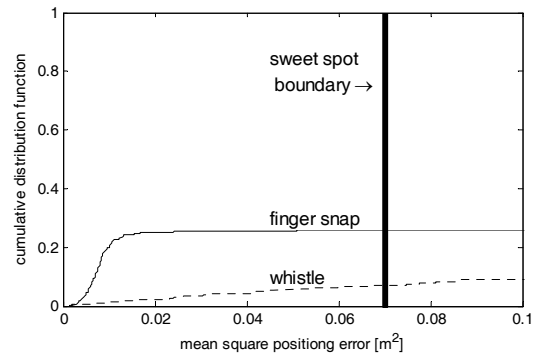


그림 20. 무반향실에서 손가락딱소리와 휘파람소리를 측위음원으로 사용했을 때 평균자승측위오차의 누적분포함수

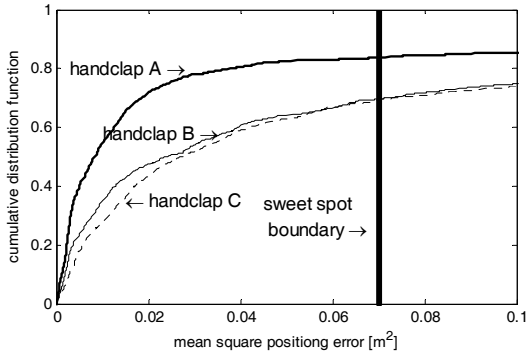


그림 21. 반향이 있는 일반공간에서 박수소리를 측위음으로 사용했을 때 평균자승측위오차의 누적분포함수

0.07m<sup>2</sup>이내일 확률, 즉, 평균자승측위오차가 0.07m<sup>2</sup> 일 때의 누적분포함수 값을 각 자체발성음의 측위 성능으로 평가한다.

그림 19와 그림 20처럼 무반향실에서 A형 박수소리의 평균자승측위오차가 0.07m<sup>2</sup>이내일 확률은 약 90%이고, B형 박수소리는 약 85%, C형 박수소리는 약 75%이다. 그리고 손가락딱소리는 약 25%, 휘파람소리는 약 10%이다.

그림 21처럼 반향과 잔향이 있는 일반공간에서 A형 박수소리의 평균자승측위오차가 0.07m<sup>2</sup>이내일 확률은 약 80%이고, B형 박수소리는 약 60%, C형 박수소리는 약 60%이다.

그림 19와 그림 21처럼 일반공간에서는 반향과 잔향으로 인한 간섭 때문에 약 15% 전후의 성능열화가 나타난다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 상향 실내측위를 위한 자체발성음으로 휘파람소리, 손가락딱소리, 박수소리를 고려했다. 모든 자체발성음의 시간, 주파수, 상관, 전력스펙트럼밀도와 그 통계적 특성의 분석과 그 측위성능평가 결과, 박수소리, 특히 A형의 박수소리가 실내측위에 가장 적합한 자체발성음을 확인하였다.

본 논문에서는 자체발성음의 측위가능성 및 그 성능을 보였다. 향후에는 본 결과를 공간뒤틀림 보정, 상호간섭 제거, 음상위치 제어 등에 활용한 연구를 진행할 예정이다.

#### 참 고 문 헌

- [1] A. Bensky, *Wireless Positioning: Technologies and Applications*, Altech House, Inc., Norwood, MA, 2008.
- [2] 김원겸, “입체음향 기술동향”, 정보통신연구진흥원 주간기술동향, 1130호, <http://kidbs.itfind.or.kr/WZIN/jugidong/1130/113001.htm>, 2004년 4월.
- [3] A. Jylha and C. Erkut, “Inferring the hand configuration from hand clapping sounds,” *Proc. International Conference on Digital Audio Effects (DAFx)*, Espoo, Finland, Sep. 2008.
- [4] B. Repp, “The sound of two hands clapping: An exploratory study,” *Trans. Acoustical Society of America*, Vol.81, No.4, pp.1100-1109, Apr. 1987.
- [5] J. Cutnell and K. Johnson, *Essentials of Physics*, John Wiley & Sons, Inc., New York, NY, 2006.
- [6] E. Habets and P. Sommen, “Optimal microphone placement for source localization using time delay estimation,” *Proc. Workshop on Eindhoven University of Technology*, Eindhoven, Netherland, Dec. 2002.
- [7] W. Foy, “Position-location solutions by Taylor-series estimation,” *Trans. IEEE Aerospace and Electronic Systems*, Vol.AES-12, No.2, Mar. 1976.
- [8] J. Bauck and D. Cooper, “Generalized transaural stereo and applications,” *Trans. Audio Engineering Society*, Vol.44, No.9, pp.683-705, Sept. 1996.
- [9] J. Rose, P. Nelson, B. Rafaely, and T. Takeuchi, “Sweet spot size of virtual acoustic imaging systems at asymmetric listener locations,” *Trans. Acoustical Society of America*, Vol.112, No.5, pp.1992-2002, Nov. 2002.
- [10] 유승수, 김영문, 이정혁, 이석필, 김선용, “청취자 측위 음원으로서의 박수소리 분석”, *대한전자공학회 하계학술대회 논문집*, CD-ROM, 대한민국 제주, 2009년 7월.

[11] 유승수, 김영문, 채원병, 이석필, 김선용, “박수소리를 이용한 청취자 측위성능분석”, 대한전자공학회 하계학술대회 논문집, CD-ROM, 대한민국 제주, 2009년 7월.

**유 승 수 (Seungsoo Yoo)** 정회원



2004년 2월 건국대학교 전자공학부 공학사  
 2005년 2월 건국대학교 전자공학전공 공학석사  
 2005년 3월~현재 건국대학교 전자공학전공 박사과정  
 <관심분야> 이동통신, 통신신호처리, 무선측위, GNSS.

**김 영 문 (Yeongmoon Kim)** 준회원



2009년 2월 건국대학교 정보통신공학전공 공학사  
 2009년 3월~현재 건국대학교 전자정보통신공학 석사과정  
 <관심분야> 통계학적 신호 처리, 음향신호처리.

**이 기 승 (Ki-Seung Lee)** 정회원



1991년 2월 연세대학교 전기공학(공학사)  
 1993년 2월 연세대학교 대학원 전자공학과(공학석사)  
 1997년 2월 연세대학교 대학원 전자공학과(공학박사)  
 1997년 3월~1997년 9월 연세대학교 신호처리 연구센터 선임 연구원  
 1997년 10월~2000년 9월 AT&T Shannon Lab 연구원  
 2000년 11월~2001년 8월 삼성종합기술원 HCI Lab 전문연구원  
 2001년 9월~2007년 8월 건국대학교 정보통신대학 전자공학부 조교수  
 2007년 9월~현재 건국대학교 정보통신대학 전자공학부 부교수  
 <관심분야> 생체 신호 처리, 오디오 신호 처리 등.

**윤 경 로 (Kyoungro Yoon)** 정회원



1987년 2월 연세대학교 전자전산기공학과 학사  
 1989년 12월 미시간대학교 전기공학과 석사  
 1999년 5월 시라큐스대학교 전산학 박사  
 1999년 6월~2002년12월 LG 전자 전자기술원 정보기술연구소 선임연구원, 책임연구원  
 2003년 1월~2003년 8월 LG전자 전자기술원 모바일멀티미디어연구소 그룹장  
 2003년9월~현재 건국대학교 컴퓨터공학부 조교수, 부교수, ISO IS 15938-12, ISO IS 23005-2, ISO IS 23005-5, ISO IS 24800-3 편집인, ISO/IEC JTC1 SC29 WG11 (JPEG) JPSearch AHG 의장, 한국정보과학회 종신회원  
 <관심분야> 멀티미디어처리, 멀티미디어검색

**이 석 필 (SeokPhil Lee)** 정회원



1990년 2월 연세대학교 전기공학(공학사)  
 1992년 8월 연세대학교 대학원 전기공학과(공학석사)  
 1997년 8월 연세대학교 대학원 전기공학과(공학박사)  
 1997년 7월~2002년 2월 대우전자(주) 선임연구원  
 2002년 3월~현재 전자부품연구원 방송통신융합 연구센터장  
 <관심분야> 비디오 신호 처리, 오디오 신호 처리

김 선 용 (Sun Yong Kim)

중신회원



1990년 2월 한국과학기술원  
전기 및 전자공학과 학사  
(최우등)

1993년 2월 한국과학기술원 전  
기 및 전자공학과 공학석사

1995년 8월 한국과학기술원 전  
자전산학과 박사

1995년 4월~1996년 3월 동경

대학교 생산기술연구소 박사연구원

1996년 9월~1998년 12월 한국전자통신연구원 초  
빙연구원

1996년 3월~2001년 8월 한림대학교 정보통신공학  
부 전임강사, 조교수

2001년 8월~현재 건국대학교 전자공학부 조교수,  
부교수, 교수

1990년 IEEE Korea Section 학생논문대회 우수상  
받음.

1992년~1993년 IEEE Communication Society 장  
학급 받음. 대한전자공학회, 한국통신학회 정회원,  
IEEE 선임회원

<관심분야> 통계학적 신호처리, 이동통신, 통신이론.