

<http://dx.doi.org/10.7236/JIIBC.2013.13.1.229>

JIIBC 2013-1-31

# 스마트폰 음향신호 기반의 상대위치 인식 기술 연구

## A Study on Relative Positioning based on Acoustic Signal of Smart phone

오종택\*

Jongtaek Oh

**요 약** 스마트폰의 보급과 위치 기반 서비스의 활성화로 스마트폰을 기반으로 하는 위치정보 서비스의 필요성과 중요성이 매우 중요해지고 있다. 그러나 기존의 방법들은 경제성이나 편의성, 정확도의 부족으로 실용화가 어려운 상황이며, 무선랜의 신호세기를 이용한 방법은 정확도가 떨어지는 문제가 있다. 본 논문에서는 스마트폰의 음향신호와 블루투스 통신 방식을 이용한 상대위치 인식 기술에 대한 기술적 배경과 구현 기술 및 측정 결과에 대해 기술하였다. 이 기술은 저렴한 구현 비용의 단일 장치로 스마트폰의 정밀한 측위가 가능하며, 특히 실내에서의 위치기반 지능화 서비스에 적합하다.

**Abstract** As the popularization and proliferation of smart phone and location based services, the necessity and importance of the location based service based on the smart phone becomes significant. But existing technologies could not be applied in real situation due to the lack of accuracy, economy, and convenience, the method using the signal strength of WLAN is not accurate. In this paper, the technical back ground, implementation issue, and measurement result are described for the proposed relative positioning technology using acoustic signal and Bluetooth with smart phone. It is possible to measure the position of the smart phone with accuracy and simple device, and it is very proper especially for the indoor location based intelligent services.

**Key Words** : 상대위치, 음향신호, 스마트폰

### 1. 서 론

실내에서의 위치인식기술은 각종 지능화 서비스를 위하여 반드시 필요하다. 무선랜이나 Zigbee, 가시광선, RFID 통신 방식 등을 이용하여 실내에서의 상대위치 인식을 위한 기술들이 연구되고 있으나 정확도가 낮고 구축비용이 크거나 별도의 기기를 사용해야 하므로 번거로

운 단점으로 인해 실용화가 되지 못하고 있다. 한편, 개인 환경 서비스(Personal Environment Service)에서는 생활 기기가 스마트폰의 상대적인 위치를 사용자의 위치로 인식하고 해당 지점에서 사용자가 선호하는 생활환경이 자동으로 구축되도록 하는 지능형 서비스 기술이다. 물론 스마트폰과 생활 기기들의 절대위치 좌표 값을 인식할 수 있다면 더욱 만족스러운 수준의 서비스를 지원할 수

\*정회원, 한성대학교 정보통신공학과  
접수일자 2012년 11월 6일, 수정완료 2013년 1월 5일  
게재확정일자 2013년 2월 8일

Received: 6 November 2012 / Revised: 5 January 2013 /  
Accepted: 8 February 2013

\*Corresponding Author: jttoh@hansung.ac.kr  
Dept. of ICs Engineering, Hansung University, Korea

있다<sup>[1,2,3]</sup>.

TOA(Time of Arrival) 기법을 이용한 위치 인식 기술은 기존에 많은 연구가 진행되어 왔다. 그 대표적인 적용 예는 GPS(Global Positioning System)로 동시에 4개의 GPS 위성으로 부터 절대시간 정보를 단말기에서 수신 받아 x, y, z 공간 정보 및 시간 지연 정보를 추정한다<sup>[4]</sup>. TOA는 간단한 방법이지만 기준 시간을 동기화 시켜야 한다는 조건이 있다. 이를 위해 GPS의 경우 위성에 원자 시계를 탑재하고 있다. 또 다른 예로는 [5]에서와 같이 실내 공간 천정의 4개의 꼭지점에 근거리 무선통신 장치를 내장한 초음파 기준 신호 발생기를 설치하고 이 발생기가 전파 신호와 초음파 신호를 동시에 발생하면, 공간 내부에 있는 수신기에서 전파 신호와 초음파 신호의 수신 시간 차이를 측정하여 상대적인 거리를 추정하고, 동일한 방법으로 나머지 세 개의 초음파 기준 신호 발생기의 신호를 측정하여, 공간 내부에서의 절대 위치를 추정하는 것이 있다. 전파 신호와 함께 초음파 신호를 사용하는 이유는, 초음파 신호의 전파 속도가 전파의 전파 속도보다 훨씬 느리므로 수신 신호를 처리하는 것이 훨씬 용이하기 때문이다. 따라서 장치 비용이 매우 저렴해질 수 있다. 그러나 이 경우에도 별도의 송신 장치들과 수신기를 설치해야하므로 비용 문제나 번거로움으로 상용화가 되지 못하고 있다.

본 논문에서는 음향신호와 전파신호를 사용한 TOA(Time of Arrival) 방식 및 TDOA(Time Difference of Arrival) 방식의 상대위치 인식 시스템 설계와 개발에 대한 내용을 기술하고 있다. 이 방식에서는 하나의 상대위치 측정 장치에서 복수의 마이크를 이용하여 음향신호를 발생하는 단말기 또는 스마트폰의 위치를 측정하므로 시스템이 간단해지고 저렴해지는 장점이 있다. 스마트 가전기기에서 사용자의 위치를 인식하고 서비스 기능을 제공하는 것에는 상대위치만을 인식하여도 충분한 특징을 활용한다.

## II. TOA 방식의 상대위치 인식

다음 그림 1은 전용 단말기에 설치된 스피커와 상대위치 측정 장치인 에어콘에 설치된 마이크들을 이용하여 TOA 기술로 거리와 각도를 측정하는 개념도이다<sup>[6]</sup>. 두 마이크에 수신된 음향 신호의 시간을 측정하여 단말기와

의 거리와 각도를 계산한다. 이 때 각 마이크까지의 시간 지연을 측정하기 위한 기준시간 동기화의 용도로 전용 RF 모뎀 장치가 사용된다.

두 개의 마이크 사이의 거리를  $c$ 라고 하고, 단말기의 스피커와 두 개의 마이크 사이의 거리를 각각  $a$ 와  $b$ 라고 하면, 두 마이크 사이의 중점과 스피커 사이의 거리,  $m_c$ 는 다음과 같다<sup>[7]</sup>.

$$m_c = \sqrt{\frac{1}{2}(a^2 + b^2 + c^2) - \frac{3}{4}c^2} \quad (1)$$

또한 상대위치 각도,  $\theta$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\theta = \cos^{-1} \left( \frac{m_c^2 + \left(\frac{c}{2}\right)^2 - a^2}{m_c c} \right) \quad (2)$$

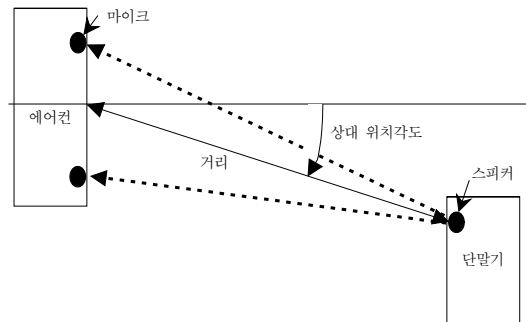


그림 1. TOA 방식의 상대위치 인식 시스템

Fig. 1. Relative positioning system using TOA

한 편, 수신 신호의 지연시간을 측정하기 위해서는 수신 신호의 포락선을 측정하던지 수신 신호와 송신 신호를 상호 상관 함수로 처리하여 첨두 값을 찾는 방법이 있다. 이 중에서 상호 상관 함수 방식은 잡음에 강하고 정확한 지연시간을 측정할 수 있다는 장점이 있으나 디지털 신호 처리의 부담이 있다. 본 연구에서는 상호 상관 함수 방식을 사용하였다.

또한 사용하는 음향 신호도 지연시간을 정확하게 측정하기 위해서 적절하게 설계되어야 한다. pulsed CW (continuous wave) 신호는 발생시키기는 쉽지만 상호 상관 함수의 모양이 삼각형이므로 첨두값을 정확하게 찾기 어렵다. 이에 비해 주파수가 시간에 따라 선형으로 변화하는 pulsed chirp 신호는 상호 상관 함수의 모양이 매우 뾰족하므로 첨두 값을 찾기가 쉬운 장점이 있다. 본 논문

에서는 5msec 동안 500Hz에서 2kHz까지 주파수가 변화하는 pulsed chirp 신호를 사용하였다. 수신 신호의 샘플링 시간 간격은 100usec으로 제작되었으며 이 경우 위치 인식 오차는 약 3.4cm이다.

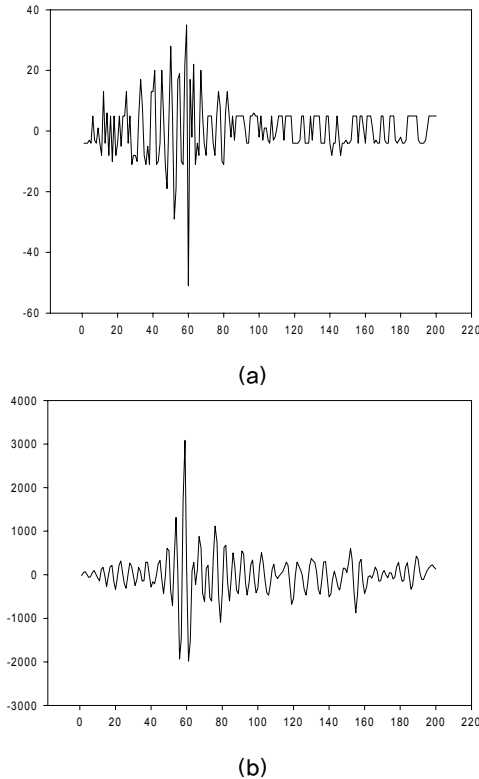


그림 2. (a) 측정 장치에 수신된 chirp 신호, (b) 수신 신호와 기준 신호의 상호 상관 함수의 결과

Fig. 2. (a) received chirp signal to measurement device, (b) cross-correlation result from the received signal and reference signal

TOA 방식에서는 매우 정밀한 기준 시간 정보가 필요하다. 블루투스 및 무선랜과 같은 스마트폰에 내장된 근거리 무선통신 방식은 송수신 지연시간이 일정하지 못하므로 이 방식에는 적용이 불가하다. 따라서 단말기에서 기준 시간 펄스를 측정 장치로 정확하게 보내기 위해 FSK 모델 방식의 전용 RF 모델을 사용하였다.

### III. TDOA 방식의 상대위치 인식 기술

한편, 단말기와 측정 장치사이에 동기 펄스 신호를 시

간 지연이 일정하게 송수신하기 위해서는 전용 RF 모델을 사용해야 하므로 실생활에 활용하기가 어렵다. 사용자가 항상 휴대하고 있는 스마트폰을 활용하기 위해서는 무선랜이나 블루투스 방식을 사용할 수 있어야 한다. 따라서 실용적인 상대위치 인식 기술을 위해서는 기준 시간 정보가 불필요한 TDOA 방식이 적합하다. 이 방식은 다음 그림 3과 같이 상대 위치 측정 장치에서 세 개의 마이크로 수신된 수신 신호들의 지연 시간들을 각각 측정하여 그 값들을 이용하여 스마트폰의 위치를 계산하는 방식이다<sup>[8,9]</sup>.

마이크 사이의 간격이  $L$  이라고 했을 때, 각각의 마이크에 수신된 신호의 시간 차이로 스마트폰의 좌표를 계산하기 위한 쌍곡선 모델은 그림 4와 같다. 우선  $\frac{x^2}{a_1^2} - \frac{y^2}{b_1^2} = 1$ 는 스마트폰의 스피커가 S의 위치에 있을 때, 마이크 M1과 M3에서의 거리 차이를 쌍곡선 수식으로 표시한 것이다. 이때의 정점은  $(a_1, 0)$ 에 있고, 점근선의 수식은  $y = \frac{b}{a_1}x$  이다.  $D_{13}$ 가 점 S에 대한 M1과 M3에서의 거리 차이라고 할 때,  $D_{13} = 2a_1$  이다. 또한  $b_1^2 = L^2 - a_1^2$  이다. 따라서 위 수식은 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\frac{4x^2}{D_{13}^2} - \frac{y^2}{L^2 - \left(\frac{D_{13}}{2}\right)^2} = 1 \quad (3)$$

여기서,  $D_{13}$ 는 M1과 M3에서 측정된 시간차이에 음파의 전파속도를 곱한 거리 차이이고,  $L$ 은 마이크 사이의 거리이다.

M2와 M3로 수신한 신호의 거리차이에 대해서 수식적으로 모델링하기 위해서, 처음에는 수식을 간단히 하기 위해 M2와 M3를 x축에서  $L/2$  만큼 왼쪽으로 이동하여 설치하였다고 가정한다. 따라서 M2와 M3 사이의 거리  $L$ 은 유지된다. 이때의 원점,  $(0, 0)$ 을 중심으로 하는 쌍곡선이 생성되는데 양의 x축에 생기는 정점을  $a_2$ 라고 하자. 그러면 M2 및 M3와의 동일 거리차를 갖는 점의 궤적은 다음과 같은 식으로 표시할 수 있다.(그림 4에서  $a_2' = a_2 + L/2$  이다.)

$$\frac{x^2}{a_2^2} - \frac{y^2}{b_2^2} = 1 \quad (4)$$

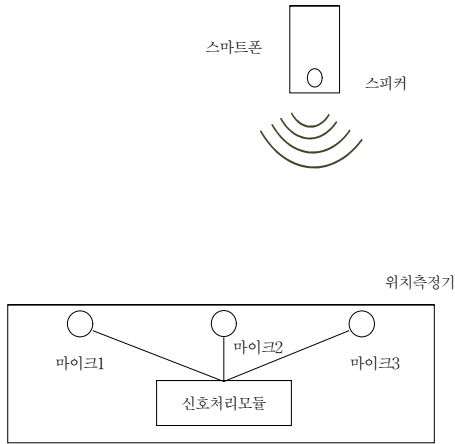


그림 3. TDOD 방식의 상대위치 인식 시스템  
Fig. 3. Relative positioning system using TDOD

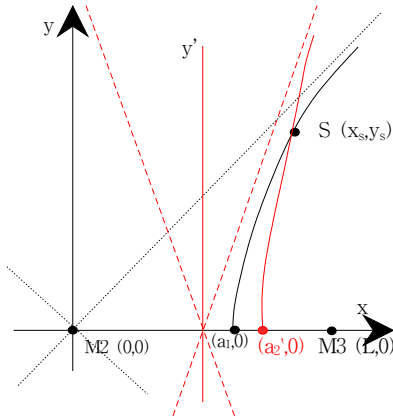


그림 4. TDOD 방식에 의한 위치 좌표 계산을 위한 쌍곡선 모델 (우측 2개의 마이크2와 마이크3만 표시됨)  
Fig. 4. Hyperbola model to calculate the position for the TDOD(Only the right two microphones are displayed.)

이때, M2와 M3에 있어서 수신 신호의 거리 차이를  $D_{23}$ 이라고 하면,  $a_2 = \frac{D_{23}}{2}$ 이다. 또한  $b_2^2 = \left(\frac{L}{2}\right)^2 - a_2^2$ 이다. 따라서 식(4)는 식(5)로 표시될 수 있다.

$$\frac{4x^2}{D_{23}^2} - \frac{y^2}{\left(\frac{L}{2}\right)^2 - \left(\frac{D_{23}}{2}\right)^2} = 1 \quad (5)$$

그러나 실제로는 M2와 M3가 설치된 위치의 좌표는 각각 (0, 0) 및 (L, 0)이므로 위의 경우에서 식(5)를 x축을 따라 오른쪽으로 L/2 만큼을 이동시켜야 한다. 즉, 점근

선은 y축 대신에 y'축으로 중심으로 구성된다. 이때, 점근선과 x축 교점은 (L/2, 0)이다. 즉 점근선도 x축의 오른쪽 방향으로 L/2 만큼 이동하였다. 따라서 실제의 M2와 M3의 위치에 따른 쌍곡선의 수식은 다음과 같이 변환된다.

$$\frac{\left(x - \frac{L}{2}\right)^2}{a_2^2} - \frac{y^2}{b_2^2} = \frac{4\left(x - \frac{L}{2}\right)^2}{D_{23}^2} - \frac{y^2}{\left(\frac{L}{2}\right)^2 - \left(\frac{D_{23}}{2}\right)^2} = 1 \quad (6)$$

동일한 방법으로 M1과 M2로 수신한 신호의 거리차이,  $D_{12}$ 에 대해서도 수식적으로 모델링할 수 있다.

개발한 상대 위치 측정 시스템의 수학적 모델링을 검증하기 위해 MATLAB 프로그램을 사용하여 계산하였다. 그림 5를 보면, 세 개의 마이크에서 스피커 지점까지의 계산된 거리 차이,  $D_{13}$  및  $D_{23}$ ,  $D_{12}$ 를 위 수식에 대입했을 때 세 개의 쌍곡선이 교차하는 지점이 정확하게 산출되는 것을 확인할 수 있다.

끝으로, 세 개의 마이크로 측정한 거리차  $D_{12}$ 와  $D_{23}$ 를 이용하여 스피커 S의 좌표를 계산하는 수식을 유도한다.  $D_{12}$ 와  $D_{23}$ 에 대한 제곱 수식 (7)과 (8)을 연립하여 x와 y를 구한다.

$$\frac{x^2}{a_1^2} - \frac{y^2}{b_1^2} = 1 \quad (7)$$

$$\frac{\left(x - \frac{L}{2}\right)^2}{a_2^2} - \frac{y^2}{b_2^2} = 1 \quad (8)$$

$$b_1^2 x^2 - a_1^2 y^2 = a_1^2 b_1^2$$

$$b_2^2 \left(x - \frac{L}{2}\right)^2 - a_2^2 y^2 = a_2^2 b_2^2$$

$$(a_2^2 b_1^2 - a_1^2 b_2^2)x^2 + L a_1^2 b_2^2 x + a_1^2 (a_2^2 b_2^2 - \frac{L^2}{4} b_2^2 - a_2^2 b_1^2) = 0$$

$$c = a_1^2 (a_2^2 b_2^2 - \frac{L^2}{4} b_2^2 - a_2^2 b_1^2) \quad (9)$$

$$x = \frac{-L a_1^2 b_2^2 \pm \sqrt{L^2 a_1^4 b_2^4 - 4c(a_2^2 b_1^2 - a_1^2 b_2^2)}}{2(a_2^2 b_1^2 - a_1^2 b_2^2)}$$

또한 y는 식(7)과 위에서 구한 x를 이용하여 구할 수 있다.

$$y = b_1 \sqrt{\frac{x^2}{a_1^2} - 1} \quad (10)$$

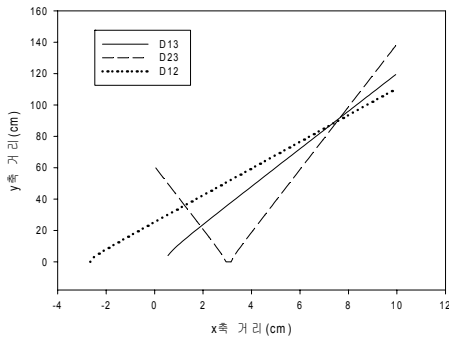


그림 5.  $D_{13}=1\text{cm}$ ,  $D_{23}=0.3\text{cm}$ ,  $D_{12}=0.7\text{cm}$ 일 때의 스피커 S의 위치(세 선이 겹치는 지점) (실선은  $D_{13}$  궤적, 파선은  $D_{23}$  궤적, 점선은  $D_{12}$  궤적)

Fig. 5. The position of speaker S for the case of  $D_{13}=1\text{cm}$ ,  $D_{23}=0.3\text{cm}$ , and  $D_{12}=0.7\text{cm}$

#### IV. 구현 및 측정

TOA 방식은 ADC(Analog-to-Digital Converter)를 하나만 사용하여 차례로 마이크의 수신신호를 저장하고 신호처리하면 되었지만, TDOA 방식에서는 3개의 마이크로 수신된 신호들을 동시에 저장해야해야 하므로 각각 세 개의 ADC와 메모리가 필요하다. 20kHz로 샘플링하는 ADC와 FIFO 메모리, ATmega128 MCU를 사용하여 그림 6과 같이 하드웨어를 구성하였다. 또한 안드로이드폰에 앱 프로그램을 개발하여 설치하여, 측정 장치에 설치된 블루투스 모듈과 페어링을 수행한 후, 음향 신호 발사 버튼을 누르면 블루투스 트리거 신호와 함께 pulsed chirp 음향 신호가 발사된다. 이 때 블루투스 신호는 시간 동기 신호로 사용되는 것이 아니고, 측정 장치에 신호 처리를 준비하라는 트리거 신호로 사용된다. 또한 chirp 신호는 5msec 동안 1kHz에서 3kHz까지 주파수가 변화한다.

그림 7은 스마트폰에 저장된 기준 신호와 마이크를 통해 수신되고 샘플링된 수신 신호를 상호상관 시킨 결과 값이다. 또한 다음 표 1에는 측정 장치 전면의 몇 군데 특정 지점에서 측정된  $D_{13}$ ,  $D_{23}$  및 이 값들과 앞에서 유도한 좌표식을 이용하여 산출한 스마트폰 스피커의 좌표값이 표시되어 있다. 샘플링 주기로 인해 제작된 측정 장치로 측정한 각 마이크들과 스피커와의 거리 차이,  $D_{13}$  및  $D_{23}$ 는 오차의 범위인  $1.7\text{cm}(=340\text{m/s} \times 1/20\text{kHz})$  이내임을 확인하였다. 그러나 표 1의 실제 좌표와 측정으로 산출된 좌표를 비교해 보면,  $D_{13}$  및  $D_{23}$ 의 측정값이 실제

값과 오차의 범위에 있음에도 불구하고, 산출된 좌표값은 위치에 따라 오차가 작지 않은 경우가 발생한다. 그 이유는 쌍곡선의 방정식의 궤적에서 오차에 민감한 위치가 있기 때문이다. 이 문제는 샘플링 주파수를 높여서 거리 차이의 오차값을 줄이든지, 다른 좌표 산출 알고리즘을 사용해야 할 것이다.



그림 6. 구현된 스마트폰 음향신호를 이용한 TDOA 방식의 상대위치 인식 시스템

Fig. 6. Implemented relative TDOA positioning system using smartphone acoustic signal

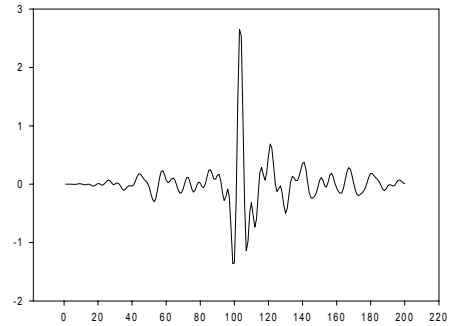


그림 7. 수신 신호와 기준 신호의 상호 상관 함수의 결과

Fig. 7. Cross-correlation result from the received signal and reference signal

표 1. 실제 좌표와 측정값, 산출된 좌표

Table 1. Real position, measured difference, and calculated position

실제 좌표		실제값		측정값		산출 좌표	
		$D_{13}$	$D_{23}$	$D_{13}$	$D_{23}$	x	y
20	10	17.5	8.2	15.3	6.8	19.0	9.9
20	16	15.1	6.7	13.6	5.1	11.3	13.2
20	20	13.7	5.9	11.9	5.1	22.9	17.1
20	24	12.4	5.2	11.9	5.1	22.9	17.1
14	10	15.2	6.4	13.6	5.1	11.3	13.2
14	16	12.4	4.7	11.9	3.4	8.3	17.1
14	20	10.8	4.0	10.2	3.4	11.5	22.0
14	24	9.6	3.5	8.5	3.4	20.7	28.4

## V. 결 론

각종 지능화 서비스에서 위치정보는 가장 기본적인 정보이므로, 스마트폰을 이용한 위치 인식 기술은 그 활용도가 매우 크다. 본 논문에서는 스마트폰의 음향 신호를 이용하여 위치 측정 장치로부터의 스마트폰의 상대 위치를 측정하는 알고리즘과 측정 결과에 대해 기술하였다. 각 마이크에서의 시간 지연 차이는 오차 범위 내에서 측정되었고, TDOA 방식에서 위치 정보를 정확히 인식하기 위해서는 시간 지연 차이의 오차에 민감하지 않은 알고리즘이 연구되어야 한다.

## 참 고 문 헌

- [1] M.M.Lankhorst, H.Kranenburg, A.Salden, and A.J.H.Peddemors, "Enabling Technology for Personalizing Mobile Services," Proc. of 35th Hawaii International Conference on System Sciences, 2002.
- [2] A.Haber, F.Reichert, and A.Fasbender, "UPnP Control Point for Mobile Phones in Residential Networks," in 15th IST Mobile & Wireless Communication Summit Myconos, Greece, 2006.
- [3] J.Oh and Z.Haas, "Personal environment service based on the integration of mobile communications and wireless personal area networks," IEEE Comm. Mag. Vol. 48, No. 6, pp. 66-72, June 2010.
- [4] S.Capkun, M.Hamdi, and J.Hubaux, "GPS-free Positioning in Mobile Ad Hoc Networks Cluster Computing," Kluwer Academic Publishers, 5, 157 - 67, 2002.
- [5] J.Park, D.Lee, S.Kim, and Y.Mun, "A study on the recognizing range expansion techniques of the ultrasonic location awareness system for the ubiquitous computing," J. Korean Inst. Comm. Sciences, vol.31. no.7B, pp.595-601, 2006.
- [6] J. Oh, H. Kim, "Relative positioning system for PES," JCCI, April 2012.
- [7] A.C.Nathan, College Geometry, Dover, 2007.
- [8] S. Moon, S. Jun, "A study on acoustic sound tracking system on 2-dimensional plain IV," J. Korean Inst. Navigation, vol.25, no.4, pp.371-379, 2001.
- [9] Y. Han, "Indoor location system using passive RFID," J. Korean Inst. Info. Tech., vol. 5, no.4, pp. 82-88, Dec. 2007.

※ 본 연구는 한국연구재단의 연구비 지원을 받았음.

## 저자 소개

### 오 중 택(정회원)



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

<주관심분야 : 지능형 무선통신 네트워크, Personal Environment Service>