

# 무선 센서망에서의 주파수 차이 추정 비동기 Ranging 방식

남 윤 석<sup>†</sup> · 허 재 두<sup>\*\*</sup>

## 요 약

무선 센서망에서 이동노드의 위치를 추정하는데 센서노드의 클럭주파수 차이는 TOF 추정에 중요한 파라미터이며, 이동노드와 고정노드 간의 거리 추정에 크게 영향을 미친다. IEEE802.15.4a에서는 별도의 유선 등에 의한 망동기 공급이 없는 상태에서도 주파수 차이에 둔감한 비동기 TWR 및 SDS-TWR 거리 추정 방식을 제안하고 있다. 그러나 제안된 비동기 TWR 및 SDS-TWR 방식은 여전히 노드 쌍에 따른 주파수 차이, 프레임 처리 시간, 프레임 처리 시간 차이 등에 의한 영향을 충분히 제거하지 못하고 있다. 특히 주파수 차이가 큰 저가의 발전기 사용, 서로 다른 하드웨어 및 소프트웨어에서 동작하는 센서노드는 더 큰 위치추정 오류를 유발할 수 있다. 본 논문은 주파수 차이를 추정하는 방식을 제안하고, 기존의 TWR 및 SDS-TWR 방식에 적용하였다. 시뮬레이션을 통하여 주파수 차이 추정을 적용한 제안된 방식은 주파수 차이의 영향을 감소시켜 TWR 및 SDS-TWR 등의 성능을 개선시켰으며, 25cm 이하의 위치오류가 발생하는 것을 확인하였다.

**키워드** : 무선센서망, 실내측위, 거리추정, 위치추정, 비동기 거리추정, 주파수 차이

## Asynchronous Ranging Method using Estimated Frequency Differences in Wireless Sensor Networks

Yoon-Seok Nam<sup>†</sup> · Jae-Doo Huh<sup>\*\*</sup>

### ABSTRACT

The clock frequency difference of sensor nodes is one of main parameters in TOF estimation and affect to degrade ranging algorithms to estimate positions of mobile nodes in wireless sensor networks. The specification of IEEE802.15.4a describes asynchronous TWR and SDS-TWR insensitive to frequency difference without any additional network synchronization. But the TWR and SDS-TWR can not eliminate sufficiently the effect of frequency difference of node pair, packet processing delay and its difference. Especially use of low cost oscillator with wide range offset, sensor node with different hardware and software can make the positioning errors worse. We propose an estimation method of frequency differences, and apply the measured frequency differences to TWR and SDS-TWR. We evaluate the performance of the proposed algorithm with simulation, and make certain that the proposed method enhances the performance of existing algorithms with positioning errors less than 25 cm.

**Key Words** : Wireless Sensor Network, Indoor Location Awareness, Ranging, Positioning, Asynchronous Ranging, Frequency Difference, Frequency Offset

### 1. 서 론

측위 기술은 GPS(Global Positioning Service)를 시작으로 이동통신분야, 텔레메틱스, 홈네트워크, 센서네트워크 등 산업 전 분야에 적용되고 있는 중요한 기술이다. 실외에서는 주로 GPS 위성을 활용하는 것이 대부분이며, 휴대폰 망에서는 GPS를 활용하지 않고도 기존의 BS(Base Station)를 사용함으로써 이동 단말기의 위치인식이 가능하다. 실내 측위는 건물에 의하여 GPS 신호 접근이 차단될 뿐 만 아니라 흙, 사무실, 호텔 등과 같이 지역적으로 좁다는 특성을 갖는

다. 따라서 좁은 지역에 적합한 기술인 센서네트워크 기반에서 주로 연구가 수행되었으며, 영상을 이용한 Easy Living, 바닥에 압력센서를 설치한 Smart Floor[4], 적외선을 사용한 Active Badge[5], RF(Radio Frequency)와 초음파를 사용한 Active Bat, Cricket 및 Medusa 등[6, 7], RSSI(Received Signal Strength Indication)를 사용한 RADAR 및 WINS 등[8,9], 최근에는 UWB(Ultra Wide Band) 신호를 이용한 Ubisense 및 IEEE802.15.4a 등[2,3,14]이 있다. 측위정보는 측위의 정보로서 뿐 만 아니라 일반 센서정보와 결합하여 센서정보를 보다 유용하게 하고 또한 상황분석을 보다 용이하게 한다. 따라서 상황인지 서비스[15]를 제공하는 센서망에서는 당연히 측위기술이 필요하고 또한 더욱 정확한 위치 정보가 요구된다.

<sup>†</sup> 정 회 원 : 동국대학교 정보통신공학과 부교수  
<sup>\*\*</sup> 정 회 원 : 한국전자통신연구원 센서네트워킹연구팀 팀장(교신저자)  
 논문접수 : 2007년 11월 22일, 심사완료 : 2008년 1월 7일

최근 저속 WPAN (Wireless Personal Area Network) 및 고속 WPAN에서는 UWB를 사용한 거리추정 기능을 PHY에서 선택사항으로 수용하고 있다. 저속 WPAN에서는 IEEE 802.15.4-2003 이후 IEEE802.15.4a 및 IEEE802.15.4b에서 각각 대체 PHY 및 PHY/MAC 기능개선 측면에서 연구가 진행되었으며, IEEE802.15.4b 내용은 IEEE802.15.4-2006[1]에 수용되었다. IEEE802.15.4a에서는 거리추정 기술과 데이터 전송 속도 등을 포함한 물리계층 기능 개선 표준기술이 연구되었다. 고속 WPAN에서는 WiMedia Alliance의 PHY 규격에 TOF(Time of Flight)를 정확하게 추정할 수 있는 물리계층 기능이 정의되기 시작하였다. 이러한 추세에 따라 실내측위 연구분야에서 기존의 다중경로 등에 의한 오류 연구 뿐 만 아니라 최근에는 망동기 설정 및 주파수 차이를 극복하는 알고리즘[12, 13] 등으로 확대되고 있다.

이동노드와 소수의 고정노드들 간 동기화 상태에서는 노드 간 거리추정과 TOA(Time of Arrival) 위치추정이 사용될 수 있다. 이동노드를 제외한 소수의 고정노드들 간 동기화 상태에서는 TDOA(Time Difference of Arrival) 위치추정[10, 11] 방식을 사용할 수 있다. IEEE802.15.4a에서는 고정노드 및 이동노드간에 동기화가 이루어지지 않은 상태에서 거리를 추정하는 TWR(Two-Way Ranging) 및 SDS-TWR (Symmetric Double Sided-TWR) 방식을 제안하고 있다. 또한 TWR 및 SDS-TWR의 문제점과 고정노드간의 동기화의 필요성, OWR (One-Way Ranging)을 사용하는 Active Bat과 같은 Active Mode와 Cricket과 같은 Passive Mode 사용방법에 대한 연구의 필요성도 기술하고 있다. TWR 등은 여러 번의 프레임 전송이 이루어진 다음 거리를 추정하지만 여전히 노드간의 주파수 차이와 응답시간에 민감하다. 따라서 본 논문은 주파수 차이를 추정하는 방식을 제안하고, 기존의 방식인 TWR, SDS-TWR와 주파수 차이의 영향을 제거한 위치추정 시뮬레이션 결과를 제시한다. 제안된 주파수 차이 추정 방식은 TWR 및 SDS-TWR 성능 개선 뿐 만 아니라 OWR 방식에 의한 거리추정에 확대 적용할 수 있을 것이다.

본 논문은 2장에서 기존 비동기 거리추정 방식과 상세 절차 및 개선의 여지를 살펴보고, 3장에서 주파수 차이를 추정하는 방식과 적용방법을 제안하고, 4장에서 시뮬레이션으로 제안된 방식의 성능을 평가 분석하고, 마지막으로 활용 방안 및 앞으로의 연구방향에 대한 내용으로 구성된다.

## 2. 비동기 거리추정 방식

### 2.1 거리추정 오류 고찰

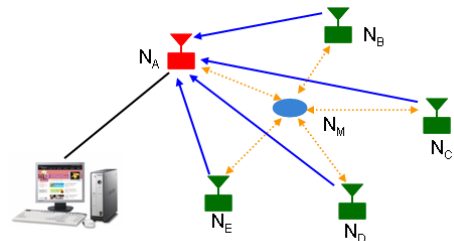
TOF를 사용하여 추정하는 거리에는 오류가 포함된다. 이러한 오류를 발생시키는 원인으로는 무선신호의 다중경로, NLOS(Non Line Of Sight), 수신기 잡음, 해상도, BS간의 동기, 노드간의 주파수 차이 등이 있다.

IEEE802.15.4a에서와 같이 Ranging 비트를 기준으로 시각을 표현하는 방법은 소자에서 여러 오류 원인을 처리한 다음 높은 해상도의 계수기 값으로 표현된다. 따라서 위의 오류 원인에서 다중경로 및 잡음 등에 의한 오류는 디지털 신호처리 알고리즘에 의하여 개선될 수 있다. 반면에 NLOS

에 의한 오류는 환경적인 요소로서 사물이나 사람 또는 동물에 의하여 LOS를 방해하는 요인에 의하여 항상 발생할 수 있으며, 이를 제어하기 위해서는 특정한 고정노드의 급격한 거리변화에 관심을 가져야 하고, 어쩌면 계속적으로 NLOS 발생을 인지하지 못 할 수도 있어서 복구가 어려워 경험적 방법 등으로 개선할 수 있을 것이다. BS간의 주파수 차이는 유선 케이블에 의한 망동기 공급 등의 수단으로 방법을 찾을 수 있다. IEEE802.15.4a에서는 비동기 상태에서 TWR 또는 SDS-TWR 방식으로 주파수 차이의 영향을 감소시켜 TOF를 추정하고 있으나 여전히 주파수 차이에 의한 거리추정 오류를 포함하고 있다.

### 2.2 TWR 및 SDS-TWR 방식

TWR 및 SDS-TWR은 고정노드와 이동노드들이 비동기 상태에서도 상호간의 거리를 추정할 수 있는 방식으로 수행 절차가 복잡하다는 것과 노드간의 주파수 차이에 의한 거리추정 오류가 여전히 존재하며, 노드쌍의 특성에 따라 크게 차이날 수 있다는 단점이 있다. 따라서 실제로 발생하는 수행절차와 거리추정오류를 고찰하고자 한다. (그림 1)은 위치추정을 수행하는 센서네트워크의 구성 예를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 일반적으로 센서네트워크는 알려진 위치에 설치된 소수의 고정노드( $N_A \sim N_E$ )와 다수의 이동노드( $N_M$ ), 그리고 이동노드의 위치를 추정하는 위치서버로 구성된다. Cricket에서는 이동노드에서 단말기 자신의 위치를 추정하였지만 소형, 저가, 저전력 등의 센서노드 특성과는 맞지 않는다. 따라서 Active Bat, Ubisense 등과 같이 위치서버가 존재하는 구성이 보다 타당하다고 여겨진다. 그림에서 이동노드와 고정노드간의 거리에 관한 정보가 추정되어 위치서버로 취합되면 위치서버는 TOA, TDOA 및 AOA(Angle of Arrival) 등의 알고리즘으로 이동노드의 위치를 추정한다. 추정된 위치정보는 이동노드의 위치인식 및 망에서 각 노드에게 필요한 서비스를 제공하는데 사용될 수 있다.



(그림 1) 위치추정을 지원하는 센서네트워크 구성 예

#### 2.2.1 수행절차 분석

IEEE802.15.4a에서 제시된 TWR과 SDS-TWR의 수행절차에서 시각 정보의 기준은 Ranging 비트의 송신 및 수신시각으로 표시되며, 각각의 시각정보는 499.2MHz Chipping Rate와 보간법을 사용하여 64GHz 표본화에 의한 32비트 클럭 계수기로 표시된다. 이 시각 정보는 PHY에서 저장된 상태로 있다가 MAC의 요구에 의하여 응용계층으로 전달된다. 따라서 프레임 송신 시각은 RFrame을 전송한 다음 별도의 프레임 전

송에 의하여 전달이 이루어져야 한다. (그림 1)의 구성에서는 전달방향이 고정노드  $N_A$ 를 반드시 경유하는 위치서버이다.

### 2.2.2 TWR 수행절차 및 거리추정 오류

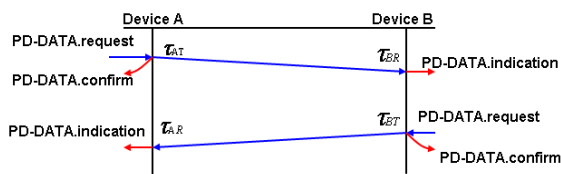
(그림 2)는 TWR에서의 거리추정 프레임 교환을 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 거리추정 시작 프레임을 전송한 측에서 TOF를 계산하는 것으로 가정한다. 먼저 Device A에서 MAC의 요구에 의하여 psdu와 Ranging 설정 정보를 포함한 PD-DATA.request Primitive가 발생하고 Ranging 비트가 Set된 프레임이 전송된다. 전송이 완료된 다음,  $\tau_{AT}$ 를 포함한 Ranging 정보와 함께 PD-DATA.confirm primitive가 MAC 방향으로 발생한다. Device B는 PLME-SET-TRX-STATE.request를 사용하여 RX\_WITH\_RANGING\_ON으로 미리 설정된 것으로 가정한다. Device A의 프레임을 Device B에서 수신하게 되면 psdu와 Ranging 정보  $\tau_{BR}$  등을 PD-DATA.indication에 의하여 MAC으로 전달한다. 이후 양쪽 노드에서 알고 있는 특정한 지연 이후 Acknowledge에 의한 Ranging 정보가 전달되어  $\tau_{AT}$ 이 취득되면 TOF 계산이 가능하다. 보다 정확한 TOF를 추정하기 위해서는 Device B에서 취득한  $\tau_{BT}$ 를 Device A로 전달하는 전달이 추가되어야 한다.

TWR 방식에서 양쪽 노드의 국부클럭 주파수가 기준주파수와 동일하다면 TOF는 식 (1)과 같이 표현된다. 계수기에 포함된 주파수 차이를 고려한 TOF는 식 (2)와 같이 표현되고, 차이는 식 (3)과 같이 표현된다. 여기에서  $r_{replyB}$ 는 Device B에서 프레임을 수신하고 Ack를 전송하는데 걸린 시간으로 프로세서의 성능과 프로그래밍 코드와 관련된 것으로 수 ms가 될 수도 있으며, 미리 정의한 시간으로 설정가능하다. 따라서 식 (2)에서 두 장치간의 주파수 차이와 프로세서 처리시간에 따라 심각한 거리추정 오류가 발생할 수 있다.

$$t_p = \frac{1}{2} \{ (\tau_{AR} - \tau_{AT}) - (\tau_{BT} - \tau_{BR}) \} \quad (1)$$

$$2\hat{t}_p = (\tau_{AR} - \tau_{AT})(1 + e_A) + (\tau_{BR} - \tau_{BT})(1 + e_B) \quad (2)$$

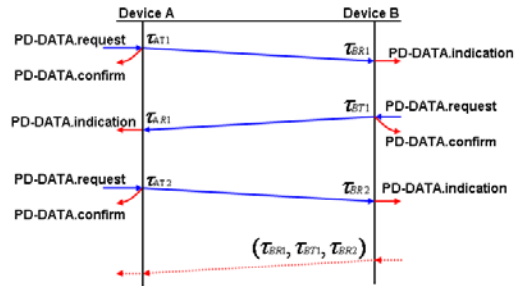
$$\begin{aligned} \hat{t}_p - t_p &= \frac{1}{2} r_{replyB} (e_A - e_B) + t_p \cdot e_A \\ &\approx \frac{1}{2} r_{replyB} (e_A - e_B) \end{aligned} \quad (3)$$



(그림 2) TWR에서의 프레임 교환

### 2.2.3 SDS-TWR 수행절차 및 거리 추정 오류

(그림 3)은 SDS-TWR에서의 거리추정 프레임 교환을 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 거리추정 시작 프레임을 전송한 Device A에서 Device B에서의 Ranging 정보까지 취



(그림 3) SDS-TWR에서의 프레임 교환

합하여 TOF를 계산하는 것으로 가정하였다. SDS-TWR에서는 양 노드의 시각 정보를 취합하여야 정확한 TOF 추정이 가능하다. 따라서 그림에서와 같이 마지막 프레임전달이 실제로 발생하게 된다.

SDS-TWR 방식에서 양쪽 노드의 국부클럭 주파수가 기준주파수와 동일하다면 TOF는 식 (4)와 같이 표현된다. 계수기에 포함된 주파수 차이를 고려한 TOF는 식 (5)와 같이 표현되고, 차이는 식 (6)과 같이 표현된다. 여기에서  $\Delta_{reply}$ 는 Device A와 Device B간의 응답시간 차이를 나타낸 것으로 동일한 H/W 및 S/W로 구성되었다면 거의 오류가 발생하지 않을 수도 있다. 서로 다른 H/W 및 S/W의 경우, 심각한 거리추정 오류가 발생할 수 있다.

$$\begin{aligned} t_p &= \frac{1}{4} \{ (t_{roundA} - t_{replyA}) + (t_{roundB} - t_{replyB}) \} \\ &= \frac{(\tau_{AR1} - \tau_{AT1}) - (\tau_{AT2} - \tau_{AR1})}{4} \\ &\quad + \frac{(\tau_{BR2} - \tau_{BT1}) - (\tau_{BT1} - \tau_{BR1})}{4} \end{aligned} \quad (4)$$

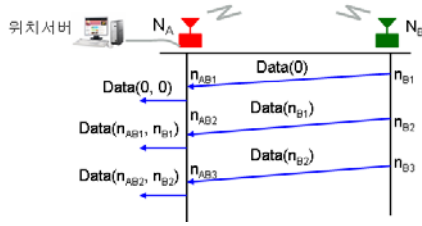
$$\begin{aligned} \hat{t}_p &= \frac{(\tau_{roundA} - \tau_{replyA})(1 + e_A)}{4} \\ &\quad + \frac{(\tau_{roundB} - \tau_{replyB})(1 + e_B)}{4} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \hat{t}_p - t_p &= \frac{1}{2} t_p (e_A + e_B) + \frac{1}{4} \Delta_{reply} (e_A - e_B) \\ &\approx \frac{1}{4} \Delta_{reply} (e_A - e_B) \end{aligned} \quad (6)$$

## 3. 주파수 차이 추정

### 3.1 주파수 차이 추정 방법

발전기의 특성 가운데 주파수는 주로 주파수안정도(Frequency Stability)와 Aging 특성 파라메타에 의하여 명시된다. 주파수안정도는 발전기의 중심주파수에 관한 것으로 생산당시 포함되는 주파수 편이의 범위이다. Aging은 Jitter 및 노화에 의하여 중심주파수로부터 변화할 수 있는 편이의 범위이다. 주파수안정도는 발전기에 적용된 기술에 따라 큰 차이를 보이며, Aging은 좁은 범위의 값을 갖는다. 본 논문에서는 센서노드의 발전기에 의한 계수기 클럭의 주파수 차이를 추정하고자 한다.



(그림 4) 주파수 차이 추정 설명도

(그림 4)는 주파수 차이를 추정하는 방식을 설명하기 위한 것이다. 그림에서와 같이 두개의 고정된 위치에 놓인 노드 간에 발생하는 연속된 프레임 전송은 전송간에 클럭 계수기의 차이를 가지며, 이는 주파수 차이로부터 발생한다. 노드-B에서 프레임을 송신한 시각을 나타내는 계수기의 값  $n_{B1}, n_{B2}$  등은 각각 정보가 발생한 이후의 프레임 전송에 전달하는 것으로 가정한다. 노드-A에서 프레임을 수신한 시각 정보  $n_{AB1}, n_{AB2}$  등은 다음 처리에서 사용하는 것으로 가정한다. 따라서 위치서버는  $Data(n_{AB1}, n_{B1})$ 과  $Data(n_{AB2}, n_{B2})$  쌍에 의하여 주파수 차이를 계산할 수 있다.

노드 A, B의 주파수를 기준주파수부터 편이된 것으로 나타내면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} f_A &= f_R(1 + e_A) \\ f_B &= f_R(1 + e_B) \end{aligned} \quad (7)$$

여기에서

- $f_R$  : 기준 주파수
- $f_A, f_B$  : 노드-A, B의 주파수
- $e_A, e_B$  : 노드-A, B의 주파수 편이 (ppm)

두 쌍의 프레임 전송으로부터 프레임 송신간의 시간간격과 프레임 수신간의 실제 시간간격은 동일하므로 다음과 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} t_2 - t_1 &= \frac{1}{f_A} (n_{AB2} - n_{AB1}) = \frac{n_A}{f_A} \\ t_2 - t_1 &= \frac{1}{f_B} (n_{B2} - n_{B1}) = \frac{n_B}{f_B} \end{aligned} \quad (8)$$

따라서

$$\frac{n_A}{1 + e_A} = \frac{n_B}{1 + e_B}$$

노드-A가 기준클럭( $e_A = 0$ ) 이거나 또는 주파수 편이를 알면, 노드-B의 주파수 편이는 다음과 같다.

$$e_B = \frac{n_B}{n_A} (1 + e_A) - 1 \quad (9)$$

이러한 방식으로 무선 센서망에서 특정한 노드의 클럭을 기준으로 모든 노드들에 대한 주파수 차이를 추정할 수 있다. (그림 1)에서와 같이 위치서버와 접속하는 중요한 위치의 고정노드가 기준주파수로 동작한다면 노드간의 계수기에 대한 상호 비교가 더욱 용이해 질 수 있다.

### 3.2 주파수 차이 추정의 활용 방안

무선 노드간의 동기화는 용이하지 않다. Ubisense의 경우 일정한 길이의 유선케이블을 사용하여 고정노드간의 동기클럭을 공급하고 있다. (그림 1)에서와 같은 구성에서 노드-A의 클럭을 정확히 알게 되면, 노드-B, C, D, E 등 고정노드간의 주파수 편이를 추정함으로써 가상 망동기가 가능하다.

SDS-TWR은 절차에 있어서 연속된 데이터 전송이 발생한다. 따라서 추가적인 계산만으로 주파수 차이의 영향을 제거할 수 있다. 반면에 TWR의 경우 단일 절차에서 주파수 차이 추정이 불가능하므로 절차 간의 시간 간격 활용도 가능하며, 또는 사전에 망에 소속된 노드의 특성 추출절차도 가능한 방법이다.

## 4. 시뮬레이션 및 고찰

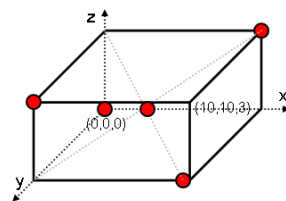
### 4.1 시뮬레이션 환경

발전기는 생산하면서 특정 주파수로부터 일정 범위내의 차이를 갖는다. 또한 긴 시간에 걸쳐 발생하는 주파수 변화도 있다. <표 1>은 발전기 특성의 예를 나타낸 것이다. 시뮬레이션에서는 표에 명시된 주파수 관련 파라미터를 사용하였다. 특히 주파수 안정도에서는 주파수 안정도는 IEEE802.15.4a에서 TWR 및 SDS-TWR의 거리추정 오류 비교에 사용한 ( $e_A - e_B$ ) 값인 2, 20, 40, 80 ppm에 해당하는  $\pm 1, \pm 10, \pm 20, \pm 40$  ppm을 적용하였다. 또한 각 프레임 처리시간 동안  $\pm 1$  ppm 지터가 추가되는 것으로 가정하였다.

(그림 5)는 시뮬레이션에서 사용한 공간에서 고정노드의 위치를 나타낸 것이다.  $10m \times 10m \times 3m$  공간에서 이동노드를 x축, y축 및 z축으로 단위거리를 이동하면서 30여만 지점에 대하여 1회씩 거리를 추정하고, 위치를 추정하는 것으로 수행하였다. 고정노드의 위치는 각 축에 대하여 가장 안

<표 1> 발전기 주요 특성 예

Parameters	unit	Features	
Supply Voltage	VDC	3.3, 5	
Nominal Frequency	MHz	specified	
Frequency Stability	ppm	$\pm 1, \pm 10, \pm 20, \pm 40$	
Frequency Deviation Aging (25oC)	ppm	$\pm 1$ / year(Max)	
Operating Temperature	oC	-40 ~ +85	
Input Current	mA	dependent on freq	
Output	Output Load	pF	15
	Duty Cycle	%	45~55
	Rise/Fall Time	ns	dependent on freq
	Logic "1"	VOH	Min 90% Vdd
	Logic "0"	VOL	Max 10% Vdd



(그림 5) 시뮬레이션 공간

정적인 특성을 제공할 수 있도록 선정하였다. 각 노드의 주파수 차이는 Uniform 분포로부터 발생시켰으며, Jitter는 프로세서의 프레임처리마다 포함되는 것으로 가정하였다. 위치추정은 TOA의 Matrix를 직접 계산하여 구하였다.

4.2 시뮬레이션 결과 및 분석

시뮬레이션 결과는 그래프에서 주파수 안정도에 따라 실선은 2, dash 선은 20, dash-dot 선은 40, 그리고 점선은 80ppm 으로 나타내었다. (그림 6)은 프로세서 처리시간이 100us인 TWR에 대한 PDF(Probability Distribution Function) 및 CDF (Cumulative Distribution Function)이다. 주파수 차이가 2, 20, 40, 80ppm으로 증가할 수록 위치추정 오류가 증가한다. TWR에서는 30cm 이하의 오류를 제공하기 위해서는  $\pm 1$ ppm 발진기 사용이 요구된다. 100cm 이하의 오류를 제공하기 위해서는  $\pm 20$ ppm 정도 까지만 허용되는 것으로 분석되었다.  $\pm 40$ ppm 발진기는 200cm 이상의 너무 큰 오류를 포함한다. 프로세서 처리시간 5ms에 대해서는  $\pm 1$ ppm의 경우에도 거리추정 오류가 150cm 정도 발생하므로 위치추정에서는 더욱 증가하여 너무 큰 오류를 발생하여 시뮬레이션을 수행하지 못하였다.

(그림 7)은 프레임 처리지연 차이가 100us인 SDS-TWR에 대한 PDF 및 CDF이다. 프레임 처리지연 시간 차이가

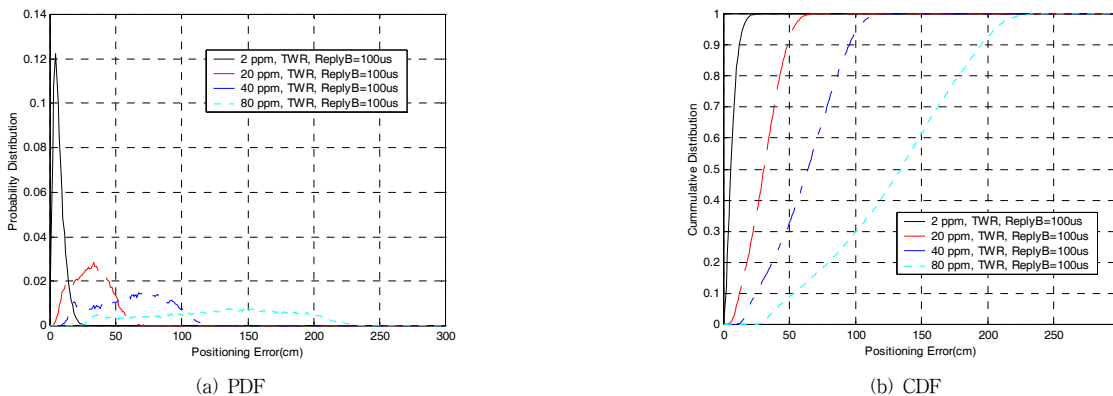
1us, 10us의 경우 위치추정 오류가 100cm 이하에서 발생하였기 때문에 결과에는 포함시키지 않았다. SDS-TWR는 프레임 처리지연 차이가 작은 것으로 가정하였고, 또한 주파수 차이 및 프레임처리지연시간 차이 등이 TWR에 비하여 반으로 감소하여 영향을 미치지 때문에 기대한 바와 같이 개선된 성능을 나타내었다.  $\pm 40$ ppm 발진기는 110cm 까지의 오류를 포함한다.

(그림 8)은 각각의 주파수 차이를 알고 있다는 가정에서 TWR에 대한 PDF이다. 주파수 차이의 영향이 제거된 상태에서는 4개의 데이터가 중복되어 하나의 그래프 처럼 나타났다. Jitter와 프로세서 처리시간의 영향에 의하여 최대 25cm 까지 오류가 발생하였다.

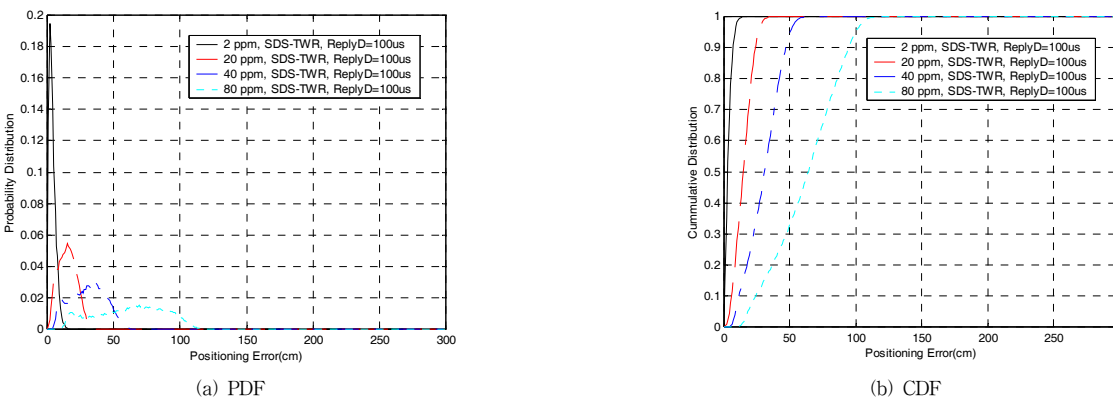
(그림 8) 주파수 차이를 적용한 TWR 시뮬레이션 결과

5. 결론

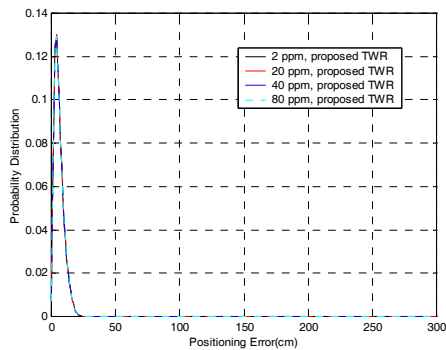
본 논문은 노드간의 주파수 차이를 추정하는 방법을 제안하였고, 이를 TWR 및 SDS-TWR 방식에 적용하는 방안을 제시하였다. 시뮬레이션을 통하여 TWR, SDS-TWR, 주파수 차이 결과를 적용한 TWR에 대한 성능을 분석하였다. TWR은 프레임 수신 후 송신까지의 처리시간에 따라 거리추정 오류가 증가될 수 있으며, SDS-TWR은 오류가 감소하였지만



(그림 6) TWR 시뮬레이션 결과



(그림 7) SDS-TWR 시뮬레이션 결과



(그림 8) 주파수 차이를 적용한 TWR 시뮬레이션 결과

절차가 더 복잡하고 프로세서 처리시간에 따라 여전히 오류가 존재한다. 본 논문의 방식에 의한 주파수 편이 추정 결과를 적용함으로써 TWR 방식이 주파수 차이에 둔감해진 것을 확인하였다. 본 시뮬레이션에 의한 위치추정 오류의 범위는 시뮬레이션에 따라 다소 달라질 수는 있지만 기존 알고리즘에서 노드의 주파수 차이에 대한 영향을 획기적으로 줄일 수 있다는 데 의의가 있다. 시뮬레이션 결과 오류 범위는 25cm 이내로 나타난 바, 별도의 후처리가 불필요하거나 또는 아주 간단한 후처리 정도로도 충분한 성능으로 판단된다.

본 논문에서 제안된 주파수 차이 추정방식은 고정노드 간의 가상 망동기를 설정할 수 있을 것으로 기대한다. 따라서 무선망에서 별도의 유선케이블 등으로 망동기 신호를 공급하지 않고 고도 OWR 및 TOA/TDOA에 의한 위치추정이 가능할 것이다.

### 참 고 문 헌

[1] IEEE802.15.4, "Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer(PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs)," Sep. 2006.  
 [2] IEEE802.15.4a/D7, "Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer(PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs): Amendment to add alternate PHY," Jan. 2007.  
 [3] 이철효, 김재영, "위치인식 저속 WPAN 표준화 동향," 방송공학회지, 제10권, 333-339쪽, 2007년.  
 [4] Jeffrey Hightower and Gaetano Borriello, "Location System for Ubiquitous Computing," IEEE Computer Society, Vol.34, No.8, pp.57-66, Aug. 2001.  
 [5] R. Want, A. Hopper, V. Falco and J. Gibbons, "The Active Badge Location System," ACM Transactions on Information Systems 10, pp.91-102, Jan. 1992.  
 [6] Andy Harter, Andy Hopper, Pete Steggles, Andy Ward and Paul Webster, "The anatomy of a Context-Aware Application," In Wireless Networks, Vol.8, pp.187-197, Feb. 2002  
 [7] Hari Balakrishnan and etc., "Lessons from Developing and Deploying the Cricket Indoor Location System," <http://nms.lcs.mit.edu/cricket/>  
 [8] Paramvir Bahl and Venkata N. Padmanabhan, "RADAR: An in-building RF-based user location and tracking system,"

INFOCOM, pp. 775-784, Mar. 2000.

[9] 남윤석, 최은창, 허재두, "저속 WPAN에서 수신신호세기의 Vector Matching을 이용한 위치인식 방식," Journal of Information Technology Applications & Management, 제12권, 제4호, 93-104쪽, 2005년 12월.  
 [10] Wade H. Foy, "Position-Location Solutions by Taylor-Series Estimation," IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems, Vol.AES-128, No.2, pp.187-194, March 1976.  
 [11] Hyonnin Kong, Youngmi Kwon, Taekyung Sung, "Comparisons of TDOA Triangulation Solutions for Indoor Positioning," Proceedings of The 2004 International Symposium on GNSS /GPS, Dec. 2004.  
 [12] 이영규, 양성훈, 이승우, 이창복, 김영범, 최성수, "실내측위를 위한 새로운 클럭 동기 방안," 한국통신학회논문지, 제32권, 제3호, 237-246쪽, 2007년 3월.  
 [13] 박운용, 박철웅, 최성수, 이원철, "클럭 표류 영향을 고려한 양방향 거리 인지 기반의 TOA/TDOA 추정 방안," 한국통신학회논문지, 제32권, 제7호, 608-615쪽, 2007년 7월.  
 [14] <http://www.ubisense.net>  
 [15] Seungho Baek, Hyunjeong Lee, Shinyoung Lim, and Jaedoo Huh, "Managing mechanism for service compatibility and interaction issues in context-aware ubiquitous home," IEEE Trans. Consumer Electronics, Vol.51, No.2, pp.524-528, May 2005.

### 남 윤 석

e-mail : ysnam@dongguk.ac.kr

1984년 경북대학교 전자공학과(공학사)  
 1987년 경북대학교 대학원 전자공학과(공학석사)  
 1995년 경북대학교 대학원 전자공학과(공학박사)



1987년~1999년 한국전자통신연구원 책임연구원  
 2000년~현 재 동국대학교 정보통신공학과 부교수  
 2004년~현 재 한국전자통신연구원 초빙연구원  
 관심분야: 데이터통신, 트래픽 제어, 성능평가, 센서네트워크, 위치인식, 저속 WPAN, 고속 WPAN, 메시네트워크 등

### 허 재 두

e-mail : jdjuh@etri.re.kr

1987년 경북대학교 전자공학과(공학사)  
 1990년 경북대학교 대학원 전자공학과(공학석사)  
 2000년 경북대학교 대학원 전자공학과(공학박사)



1987년~현 재 한국전자통신연구원 책임연구원,  
 센서네트워크연구팀장, TTA PG304 의장, 국제 IT 표준전문가  
 관심분야: 센서네트워크, 홈네트워크, 위치인식, 저속 WPAN, 고속 WPAN, 상황인지 컴퓨팅, 상황인지 미들웨어 등