

# 클럭 표류 영향을 고려한 양방향 거리 인지 기반의 TOA/TDOA 추정 방안

정회원 박운용\*, 준회원 박철웅, 정회원 최성수, 정회원 이원철\*

## TOA/TDOA Estimation Method Based on Two Way Ranging with Considering Clock Drift Effect

Woon Yong Park\* *Regular Member*, Cheol Ung Park *Associate Member*,  
Sungsoo Choi *Regular Member*, Won Cheol Lee\* *Regular Member*

### 요 약

일반적으로 양방향 전송을 통한 TOA(Time Of Arrival) 정보는 두 디바이스간의 정확한 RTT(Round Trip Time) 정보로부터 도출되지만 디바이스간의 서로 다른 클럭 표류의 영향으로 인하여 RTT 측정 시 요구되는 응답 시간이 길 경우 매우 심각한 TOA 오차를 야기 시키게 된다. 이를 해결하기 위해서 본 논문에서는 비동기 시스템에서 클럭 표류의 영향을 줄이면서 TOA와 TDOA(Time Difference Of Arrival) 정보를 획득하는 방안을 제안한다. 이를 검증하기 위해서 IEEE 802.15.4a Task Group에서 제시한 단방향 전송을 통한 측위 방안과 비교하였으며 제안된 방안이 기존 방법들보다 개선된 성능을 보임을 확인하였다.

**Key Words :** Time Of Arrival, Time Difference Of Arrival, GDOP, Clock Drift

### ABSTRACT

Generally time of arrival (TOA) information via two way communications can be derived by accurate round trip time (RTT) between two devices. However, response time demanded in RTT measurement is long, a serious TOA error is caused by each different clock drift between two devices. In order to solve this problem, we propose the TOA and time difference of arrival (TDOA) estimation scheme with mitigating clock drift effect. To verify the performance of proposed method, we compared the proposed scheme with one way based TDOA acquisition method introduced by IEEE 802.15.4a Task Group and then we could conclude that the proposed method has better performance over other methods.

### I. 서 론

최근 들어, 위치 기반 서비스가 이동 통신뿐만 아니라 센서 네트워크를 필두로 홈 자동화 등의 개인 사용자에게 다양한 응용 서비스를 제공하는 부분에서 급속한 발전이 예상되고, 더 나아가 개인의 안전

과 물품의 이동경로 파악이 유비쿼터스 환경에서 중요한 기능 중에 하나로 대두되면서 위치인식에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이러한 추세에 발맞추어, 2004년 5월부터 IEEE 802.15 무선 개인 네트워크 Working Group의 Task Group 4(TG4)는 저속, 저전력, 저비용의 구현을 위한 핵심 기술과 더불어

※ 본 논문은 “서울시 산학연 협력사업(과제번호: 10544)” 지원과 숭실대학교 교내연구비 지원으로 이루어졌음.

\* 숭실대학교 정보통신전자공학부 통신 및 신호처리연구실(mrjoy@amcs.ssu.ac.kr, wlee@ssu.ac.kr)

논문번호 : KICS2007-03-136, 접수일자 : 2007-03-23, 최종논문접수일자 : 2007년 7월 4일

초정밀 해상도를 가지는 무선측위 기능을 포함하는 저속의 무선 개인 영역 네트워크(LR-WPAN)에 대한 표준화 작업을 진행하고 있다<sup>11)2)</sup>.

일반적으로 이동통신 시스템에서 무선 측위는 측위의 계산 위치에 따라 핸드셋(태그) 기반의 무선 측위, 네트워크(측위 용 비콘) 기반의 무선 측위 그리고 하이브리드 무선 측위로 구분할 수 있다. 태그 기반의 무선 측위는 태그에서 신호들을 수신하여 측위 정보를 계산하기 때문에 태그의 복잡도 및 전력 소비가 커지게 되고 높은 비용이 요구된다. 또한 하이브리드 무선 측위 기법은 다수개의 측위 기법들을 결합하여 측위하기 때문에 LOS(Line Of Sight) 신호 성분을 확보하기 어려운 상황에서 극복할 수 있는 좋은 방법 중 하나이지만 시스템 복잡도 및 가격 상승의 단점을 가지고 있다.

태그의 위치를 추정하기 위한 방법으로는 측위 용 비콘에서 태그로부터 들어오는 신호의 도래각인 AOA(Angle of Arrival) 정보를 측정하여 태그의 위치를 추정하는 방법, 전파 전달 시간인 TOA 정보를 측정하여 태그의 위치를 추정하는 방법, 두 개의 측위 용 비콘으로부터 전파 도달 시각의 상대적인 차인 TDOA 정보를 이용하는 방법, 수신 감도를 나타내는 RSS(Received Signal Strength) 정보를 이용하는 방법, 그리고 전파의 fingerprint를 데이터베이스화하여 측위를 하는 RadioCamera 기법을 들 수 있다. 그러나 실내 환경에서는 거리가 짧고 다중 경로 페이딩의 영향을 많이 받을 뿐만 아니라 비용과 성능 측면을 고려할 때 RSS, AOA, Radio-Camera 측위 기법을 적용하기 어렵고 처리 구조가 간단하면서 측위의 정확도가 뛰어난 TOA, TDOA 정보를 이용한 삼각 측량 무선측위 방법이 현존하는 시스템에서 가장 널리 적용되고 있다<sup>3)4)5)</sup>.

그러나 이러한 삼각 측량 기반의 측위 기법은 GDOP(Geometric Dilution Of Precision)와 같은 기하학적 문제로 인한 측위 저하를 초래할 수 있기 때문에 향후 Ad-hoc 네트워크 환경뿐만 아니라 유비쿼터스 환경에 있어 반드시 고려되어야한다.

시간 기반의 측위 방식은 시스템의 동기 여부에 따라 요구되는 정보 및 처리 구조가 달라진다. 일반적으로 동기식 시스템에서는 모든 측위 용 비콘과 태그가 동기화되어 있기 때문에 TOA 혹은 TDOA 정보를 간단하게 획득할 수 있으나 비용 측면을 고려할 때 저 비용을 기반으로 하는 무선 개인 네트워크에서는 부적합하다<sup>6)</sup>. 반면 비동기식 시스템에서는 외부 장치의 클럭과 동기화 과정을 거친 후

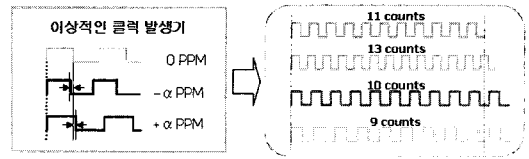


그림 1. 상이한 클럭 표류로 인한 카운팅의 예

TDOA 정보를 얻는 능동(Active)/수동(Passive) 형태의 단방향 무선 측위 기법(One Way Ranging; OWR based Positioning)을 이용하거나 동기화 과정 없이 TOA 정보를 얻는 양방향 전송을 통한 무선 측위 기법(Two Way Ranging; TWR based Positioning)을 들 수 있다<sup>6)</sup>. 그러나 전자의 경우에는 부정확한 동기화와 상이한 클럭 옵셋 문제, 후자의 경우에는 클럭 표류(Clock Drift) 영향으로 측위 저하를 초래할 수 있다. 클럭 표류의 단위는 ppm (part per million)으로써 일반적으로 대부분의 통신 시스템에서는 클럭 표류에 대해 커다란 영향을 미치지 않는다. 그러나 시간 기반의 거리 인지 및 측위 시스템에서는 클럭 기반의 카운팅 정보를 이용하기 때문에 클럭에 대한 영향에 매우 민감하다. 특히 양방향 전송 방식에서 응답시간이 길 경우 더욱 그러하다.

그림 1은 동일 클럭으로 동작되는 서로 다른 시스템에서  $-\alpha \sim +\alpha$  사이의 클럭 표류가 존재할 때 주어진 시간 동안의 카운팅 정보를 나타낸 것이다. 클럭 표류로 인해 같은 시간 동안 클럭 오차가 누적되어 서로 다르게 카운팅되고 있음을 알 수 있으며 수식적으로  $appm$ 에 대한 클럭 표류 영향인  $dk_{cdr}$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$dk_{cdr} = dk_{ref} \times (1 \pm appm) \quad (1)$$

이러한 영향은 저 비용을 요구하는 W-PAN에서 저가의 크리스털 오실레이터를 사용할 경우 클럭 표류의 영향이 더욱 커지게 된다. 따라서 본 논문에서는 무선 개인 네트워크에서 고정밀 측위에 적합한 양방향 전송 방식에서 클럭 표류의 영향을 줄이면서 TOA와 TDOA 정보를 획득하기 위한 방안을 제안한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II절에서는 일반적인 능동형 단방향 전송 방식의 측위 방안과 제안된 TOA, TDOA 정보획득 방안에 대해서 설명한다. III절에서는 시뮬레이션을 통해 기존 방법과 제안된 측위 운용 방안의 성능을 비교 분석하고 끝으로 IV절에서는 결론을 맺는다.

## II. TOA/TDOA 정보 획득 방안

### 2.1. 능동형 단방향 전송 방식의 측위 방안

일반적으로 TOA, TDOA 정보를 이용하여 태그의 위치를 추정하기 위해서는 3개 이상의 고정된 측위 용 비콘이 필요하다. 여기서 비콘들의 위치는 수직 센터의 거리 인지 정확도를 요구하기 때문에 실내에서 LOS가 보장되도록 설치되어야 하며 사전에 비콘의 위치, 즉 좌표를 정확히 측정하여야 한다. 그림 2는 IEEE 802.15.4a TG에서 소개된 TDOA 정보를 획득하기 위한 능동형 단방향 전송방식의 측위 방안을 나타낸다<sup>(7)</sup>.

여기서 모든 측위 용 비콘들과 제어 장치의 위치는 고정되어 있으므로 제어 장치와 비콘들 사이의 거리정보는 사전에 알 수 있다. 우선 제어 장치가 신호를 전송할 시점에 대한 정보와 측위 용 비콘들이 수신할 시각 정보를 실어 보내면 모든 측위 용 비콘들은 수신된 신호의 최초 도착 시점부터 사전 정의된 거리만큼 귀환시켜 모든 비콘들의 타이머를 동기화 시킨 후 정해진 시각에 맞추어 신호를 송신하면 이를 태그가 수신한 후 수신 신호의 시각차를 계산하여 TDOA 정보를 계산하게 된다. 그러나 이러한 방식은 태그의 저전력 소비측면에서 우수하나 서로 다른 클럭 옵셋의 영향으로 정확하게 동기화되기 어렵고 TDOA 정보만을 이용하기 때문에 열악한 GDOP 환경에서 측위의 오차가 심화될 수 있다. 뿐만 아니라 동기화 과정 후 태그가 전송할 때까지의 시간이 길 경우 클럭 표류의 영향으로 인해 부정확한 결과를 초래하게 된다.

수동형 단방향 전송방식의 측위 방안은 태그에서 수신 시각 정보들을 추정해야 하기 때문에 능동형 태보다 태그의 복잡도 및 전력 소비가 증가하게 되고 마찬가지로 동기 후 측위용 비콘들이 송신할 때까지의 시간이 길 경우 이에 대한 클럭 표류의 영향을 받게 된다.

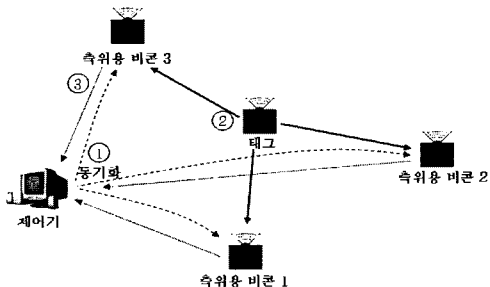


그림 2. 능동형태의 단방향 전송을 통한 측위 방안

### 2.2. 제안된 양방향 전송 방식의 측위 방안

양방향 전송을 통한 TOA 정보는 두 디바이스간의 RTT 정보를 이용하기 때문에 클럭 옵셋에 대한 영향은 받지 않는다. 그러나 디바이스간의 서로 다른 클럭 표류의 영향으로 인하여 RTT 측정 시 요구되는 응답 시간이 길 경우 매우 심각한 오차를 야기 시키게 된다. 이를 해결하기 위해서 본 논문에서 제안한 측위 운용 구조는 하나의 마스터 비콘 (master beacon A)과 두 개의 슬레이브 비콘 (slave beacon B, slave beacon C) 그리고 수집된 정보를 이용하여 태그의 위치를 계산하기 위한 제어부 (controller)로 구성된다. 여기서 측위 용 비콘들 및 제어부의 위치 좌표는 사전에 정확하게 측정되어야 하고 제어부에서는 클럭 표류의 영향이 거의 없는 클럭이 사용되며 마스터 비콘과 가까운 위치에 설치되어 마스터 비콘에 사용되는 클럭 표류 영향을 보정하는 기준 역할을 하게 된다. 본 논문에서는 제어부의 클럭 표류의 영향이 없다고(0 PPM) 가정하였고 모든 비콘들이 실내의 모든 태그들과 통신이 가능하다고 가정하였다.

우선 마스터 비콘 A는 클럭 표류의 영향으로 인한 잘못된 응답 시간  $T_{reply}^A$  를 보정하기 위해서 마스터 비콘 A와 제어 장치 사이의 RTT 정보를 계산한다.

그림 3은 이에 대한 처리 과정을 나타낸다. 여기서 처리 응답 시간  $T_{reply}^C$  는 제어 장치의 사전 정해진 응답 시간으로써 수신 신호의 최초 도착 성분에 대한 시각 정보를 추정하기 위한 알고리즘 처리 및 데이터 변/복조, 프레임 재구성 시에 필요한 시간들로 결정되기 때문에 매우 긴 시간이 요구된다. 제어 장치에서는 마스터 비콘 A에서 획득한 RTT 정보인  $T_{RT}^{A,C}$  를 이용하여 식(2)와 같이 두 디바이스 간의 거리에 대한 시간 정보를 획득할 수 있다.

$$T_{OA}^{A,C} = \frac{T_{RT}^{A,C}(1 + A_{ppm}) - T_{reply}^C}{2} = \frac{[2T_{OA}^{A,C}(1 + A_{ppm}) + T_{reply}^C(1 + A_{ppm})] - T_{reply}^C}{2} \quad (2)$$

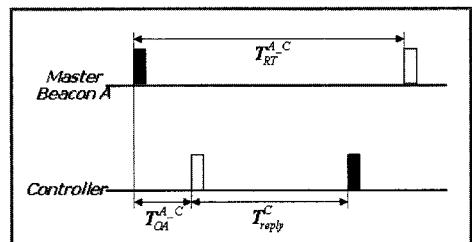


그림 3. 응답 시간에 대한 마스터 비콘 A의 클럭 표류 보정 과정

여기서  $A_{ppm}$ 은 마스터 비콘 A의 클럭 표류를 나타낸다. 고정된 두 디바이스간의 거리에 대한 시간  $T_{OA}^A$  정보는 사전에 알고 있고 두 디바이스간의 거리가 짧기 때문에 거리에 따른 클럭 표류의 영향은 거의 없다. 또한 제어 장치에서 동작되는 클럭의 표류 영향이 없다고 가정하면 마스터 비콘 A의 응답 시간  $T_{reply}^A$ 에 대한 대략적인 보정된 정보를 얻을 수 있다.

$$\tilde{T}_{reply}^A = T_{RT}^A - 2T_{OA}^A \quad (3)$$

그림 4는 사전에 제어부와 마스터 비콘간의 통신을 통해 얻은 응답 시간 정보  $\tilde{T}_{reply}^A$ 를 이용하여 태그의 위치를 추정하기 위해 요구되는 TOA, TDOA 정보를 획득하기 위한 처리 과정을 나타낸다.

태그와 마스터 비콘 A 간의 거리를 추정하기 위해서 먼저 태그는 모든 측위 용 비콘들에게 신호를 전송하면서 전송 시점에서의 시각 정보  $S_{1th}^T$ 를 저장하고 모든 측위 용 비콘들은 수신 신호의 최초 수신 시각 정보  $S_{1th}^A, S_{1th}^B, S_{1th}^C$ 를 저장하게 된다. 이때 마스터 비콘 A는 사전 보정된 처리 응답 시간  $\tilde{T}_{reply}^A$  후에 신호를 재전송하게 되고 마찬가지로 태그 및 나머지 측위 용 비콘들은 수신 신호의 수신 시점에 대한 시각 정보  $S_{2th}^T, S_{2th}^A, S_{2th}^B, S_{2th}^C$ 를 저장하게 된다.

최종적으로 태그는 사전 정해진 처리 응답 시간  $T_{reply}^T$  후에 다시 한번 신호를 전송하면서 전송 시점의 시각 정보  $S_{3th}^T$ 를 저장하고 모든 측위 용 비콘들은 이를 수신하며 이때의 수신 시점에 대한 시각 정보  $S_{3th}^A, S_{3th}^B, S_{3th}^C$ 를 저장하게 되고 최종적으로 획득한 정보들은 제어 장치에 보내지며 다음과 같은 시간 정보들을 획득하게 된다.

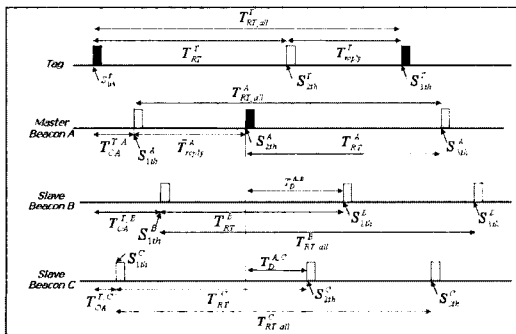


그림 4. 태그의 위치를 추정하기 위한 TOA, TDOA 획득 처리 과정

$$T_{RT,all}^T = S_{3th}^T - S_{1th}^T \quad (4)$$

$$T_{RT,all}^A = S_{3th}^A - S_{1th}^A \quad (5)$$

$$T_{RT,all}^B = S_{3th}^B - S_{1th}^B \quad (6)$$

$$T_{RT,all}^C = S_{3th}^C - S_{1th}^C \quad (7)$$

$$T_{RT}^T = S_{2th}^T - S_{1th}^T \quad (8)$$

$$T_{RT}^A = S_{2th}^A - S_{1th}^A \quad (9)$$

$$T_{RT}^B = S_{2th}^B - S_{1th}^B \quad (10)$$

$$T_{RT}^C = S_{2th}^C - S_{1th}^C \quad (11)$$

그러나 이러한 정보들은 모두 클럭 표류 영향으로 인해 부정확한 결과이며 정확한 TOA 정보를 추정하기 위해서는 보정 과정이 필요하다.

우선 제어 장치에서는 그림 5와 같이 두 번의 양방향 전송 과정을 통해 얻은 정보들로부터 마스터 비콘 A와 태그 간의 보정된 전파 전달 시간  $\tilde{T}_{OA}^A$ 을 계산한다. 여기서 식(8)과 식(9)로부터 얻은 결과들은 마스터 비콘 A에 대한 클럭 표류의 영향 및 태그의 클럭 표류 영향이 포함되어 부정확한 정보이다. 그러나 마스터 비콘 A의 보정된 응답 시간  $\tilde{T}_{reply}^A$ 을 기준 정보로 사용하여 비례식을 통해 식(5)로부터 얻은  $T_{RT,all}^A$ 의 보정값을 얻을 수 있다. 또한 보정된  $\tilde{T}_{RT,all}^A$ 를 기준 정보로 사용하여 태그의 보정된 응답 시간  $\tilde{T}_{reply}^T$ 을 계산한다.

$$\tilde{T}_{RT,all}^A = \frac{T_{reply}^T \times T_{RT,all}^A}{T_{reply}^A} \quad (12)$$

$$\tilde{T}_{reply}^T = \frac{T_{reply}^T \times \tilde{T}_{RT,all}^A}{T_{RT,all}^T} \quad (13)$$

여기서 식(12)로부터 얻은 수정된 정보에서 보정된 응답 시간  $\tilde{T}_{reply}^T$ 을 빼면 태그와 마스터 비콘 A 사이의 RTT 정보인  $\tilde{T}_{RT}^A$ 를 얻을 수 있으며 식(14)로부터 마스터 비콘 A와 태그 사이의 거리에 대한 시

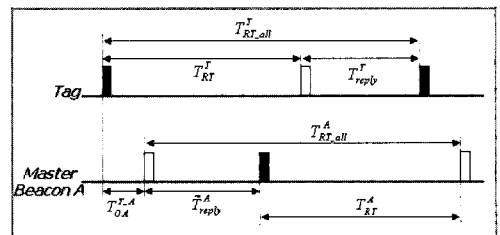


그림 5. 마스터 비콘 A와 태그 사이의 TOA를 얻기 위한 처리 과정

간 정보를 얻을 수 있다. 또한 이러한 정보는 IEEE 802.15.4a 표준 초안에 소개된 SDS-TWR (Symmetrical Double Sided-Two Way Ranging) 기법으로도 얻을 수 있다<sup>[8]</sup>.

$$\tilde{T}_{RT}^A = \tilde{T}_{RT\ all}^A - \tilde{T}_{reply}^T \quad (14)$$

$$\tilde{T}_{OA}^{T,A} = \frac{\tilde{T}_{RT\ all}^A - T_{reply}^C}{2} \quad (15)$$

태그와 슬레이브 비콘 B 사이의 전파 도달 시간 정보를 얻기 위한 과정은 다음과 같다. 우선, 슬레이브 비콘 B에 저장된 수신 정보  $S_{2th}^B$ 는 슬레이브 비콘 A와 B 사이의 클럭 표류의 영향으로 부정확하다. 이러한 부정확한 정보를 보정하기 위해서 식 (12)로부터 얻은 보정된 정보  $\tilde{T}_{RT\ all}^A$ 와 식(6)의 결과와의 비를 통해 보정된  $\tilde{T}_{RT}^B$ 를 얻을 수 있다. 물론  $\tilde{T}_{RT\ all}^A$ 는 보정된 정보이기 때문에 오차가 존재할 수 있으며 이를 통한 보정된  $\tilde{T}_{RT}^B$  또한 오차가 가중될 수 있다. 그림 6은 이러한 마스터 비콘 A와 B 사이의 TOA를 얻기 위한 처리 과정을 나타낸다.

$$\tilde{T}_{RT}^B = \frac{\tilde{T}_{RT\ all}^A \times T_{RT}^B}{T_{RT\ all}^B} \quad (16)$$

식(16)으로부터 얻은 결과와 슬레이브 비콘 B의 최초 수신 시점 정보인  $S_{1th}^B$ 를 더함으로써 보정된 시각  $\tilde{S}_{2th}^B$ 를 얻을 수 있다.

$$\tilde{S}_{2th}^B = S_{1th}^B + \tilde{T}_{RT}^B \quad (17)$$

최종적으로 사전에 알고 있는 마스터 비콘 A와 슬레이브 비콘 B 사이의 거리에 대한 시간 정보  $T_D^{A,B}$ , 식(15)와 식(17)에서 얻은 결과들을 토대로 태그와 슬레이브 비콘 B 사이의 거리에 대한 시간 정보를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \tilde{T}_{OA}^{T,B} &= (T_D^{A,B} + \tilde{T}_{OA}^{T,A} + T_{reply}^C) - \tilde{T}_{RT}^B \\ &= S_{1th}^B - [\tilde{S}_{2th}^B - (T_D^{A,B} + \tilde{T}_{OA}^{T,A} + T_{reply}^C)] \end{aligned} \quad (18)$$

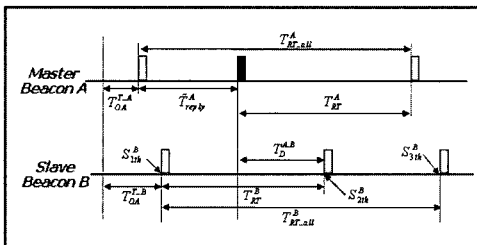


그림 6. 마스터 비콘 A와 슬레이브 비콘 B 사이의 TOA를 얻기 위한 처리 과정

마찬가지로 슬레이브 비콘 C에 저장된 수신 정보  $S_{2th}^C$ 를 보정하기 위해서 앞 서 설명한 방법과 동일하게 적용된다. 식(12)으로부터 얻은 보정된 정보  $\tilde{T}_{RT\ all}^A$ 를 기준하여 비례식을 통해 보정된  $\tilde{T}_{RT}^C$ 를 얻을 수 있다.

$$\tilde{T}_{RT}^C = \frac{\tilde{T}_{RT\ all}^A \times T_{RT}^C}{T_{RT\ all}^B} \quad (19)$$

식(19)로부터 얻은 결과와 슬레이브 비콘 B의 최초 수신 시점 정보인  $S_{1th}^C$ 를 더함으로써 보정된 시각 정보  $\tilde{S}_{2th}^C$ 를 얻을 수 있다.

$$\tilde{S}_{2th}^C = S_{1th}^C + \tilde{T}_{RT}^C \quad (20)$$

최종적으로 사전에 알고 있는 마스터 비콘 A와 슬레이브 비콘 C 사이의 거리에 대한 시간 정보  $T_D^{A,C}$ , 식(15), 그리고 식(20)에서 얻은 결과들을 토대로 태그와 슬레이브 비콘 C 사이의 거리에 대한 시간 정보를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \tilde{T}_{OA}^{T,C} &= (T_D^{A,C} + \tilde{T}_{OA}^{T,A} + T_{reply}^C) - \tilde{T}_{RT}^C \\ &= S_{1th}^C - [\tilde{S}_{2th}^C - (T_D^{A,C} + \tilde{T}_{OA}^{T,A} + T_{reply}^C)] \end{aligned} \quad (21)$$

또한 식(15), 식(18) 그리고 식(21)로부터 각각의 TOA 정보의 차를 구하면 식(22)와 식(23)과 같이 TDOA 정보들을 얻을 수 있으며 이러한 정보를 이용하여 태그의 위치를 추정하게 된다.

$$\hat{T}_{DOA}^{A,B} = \hat{T}_{OA}^{T,A} - \hat{T}_{OA}^{T,B} \quad (22)$$

$$\hat{T}_{DOA}^{A,C} = \hat{T}_{OA}^{T,A} - \hat{T}_{OA}^{T,C} \quad (23)$$

최종적으로 이렇게 얻은 TOA/TDOA 정보들을 무선 측위 알고리즘에 적용함으로써 태그의 위치를 계산할 수 있다. 표 1은 2장에서 설명한 능동과 수동 형태의 TDOA 획득 방안들과 제안된 TOA/TDOA 획득 방안을 비교한 것이다.

표 1에서 보여 주듯이 제안된 정보 획득 방안은 태그가 송·수신을 해야 하기 때문에 다소 비용이 증가되고 다른 방안들보다 송·수신 횟수가 많은 단점이 있으나 TOA/TDOA 정보 모두를 사용할 수 있기 때문에 열악한 GDOP 상황에서도 거리 인지 및 측위 오차가 다른 방안보다 적다는 장점을 가지고 있다. 또한 소비 전력 측면에서 볼 때 기존의 방안들은 주기적으로 동기화를 해야 함으로 다소 많은 전력 소비가 예상된다.

표 1. 측위를 위한 3가지 정보 획득 방안 비교

파라미터	능동 형태의 단방향 측위 방안	수동 형태의 단방향 측위 방안	제안된 정보 획득 방안
거리 인지 방식	OWR	OWR	TWR
열악한 GDOP 상황에서 거리 인지 및 측위 성능	좋지 않음	좋지 않음	좋음
송/수신 횟수	5	5	8
요구되는 태그의 기능	Tx	Rx	Tx/Rx
무선 측위를 위해 사용 가능한 정보	TDOA	TDOA	TOA/TDOA

표 2. 시뮬레이션 파라미터 설정

파라미터	설정 값
클럭 한 주기	0.78 nsec
$R_e$ (거리 인지 오차)	$\pm 23.4$ cm
두 디바이스간의 최대 거리	18.4 m
$T_r$ (응답 시간)	0.78 msec
측위 용 마스터 비콘 A	40 ppm
슬레이브 비콘 B	-25 ppm
슬레이브 비콘 C	25 ppm
태그 클럭 표류	-40 ~ +40 ppm
$T_c$ (동기 후 전송할 때까지 시간)	0.1 msec

### III. 시뮬레이션 과정 및 결과

본 논문에서는 제안된 클럭 표류를 고려한 TOA/TDOA 정보 획득 기법에 대한 성능을 검증하기 위해서 시뮬레이션 파라미터들을 표 2와 같이 설정하였다. 기본적으로 적용된 클럭의 한 주기는 0.78 nsec로 설정하였고 TOA 추정 오차는 한 주기의 클럭에 대한  $\pm 23.4$  cm로 설정하였다. 또한 양방향 전송을 통한 거리 인지 시 요구되는 응답 시간은 0.78 msec로 하였고 측위 용 비콘들의 클럭 표류는 표 2와 같이 고정하였고 태그는 -40 ~ +40 ppm에서 랜덤하게 발생시켰다. 또한 가장 단순한 방법인 3번의 TWR을 통한 TOA 추정 방안과 2장에서 소개한 능동형 OWR 기반의 TDOA 추정 방안을 제안된 방식과의 비교대상으로 선정하였다. 다음의 라벨은 각 측정 방안들에 대한 시뮬레이션 결과를 의미한다.

“PROP” = 제안된 TOA/TDOA 추정 방안

“CONV1” = 3번의 TWR을 통한 TOA 추정 방안

“CONV2” = 능동형 OWR 기반의 TDOA 추정 방안

표 2에서 제시된  $T_c$  는 OWR 방식의 TDOA 추정 과정에서 동기화 후 태그가 전송할 때까지 걸리는 시간을 의미한다.

그림 7은 시뮬레이션을 위한 각 디바이스의 위치 설정을 나타낸다. 공정한 시뮬레이션을 위하여 태그의 위치는 균일 간격으로 설정하였다.

그림 8은 TWR 시에 응답시간을 0.78 msec로 설정하였을 때 비콘과 태그 사이의 클럭 표류 보정 유무에 따른 TOA 오차를 거리로 환산했을 때의 결과를 나타낸다. 여기서 “PROP”는 제안된 방식을 통해 얻은 TOA 오차를 나타낸 것이고 “CONV”는 보

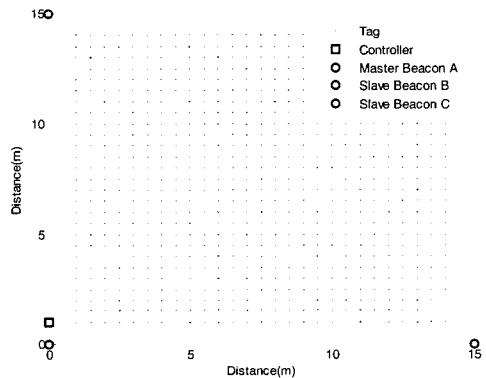


그림 7. 시뮬레이션을 위한 각 디바이스들의 위치 설정

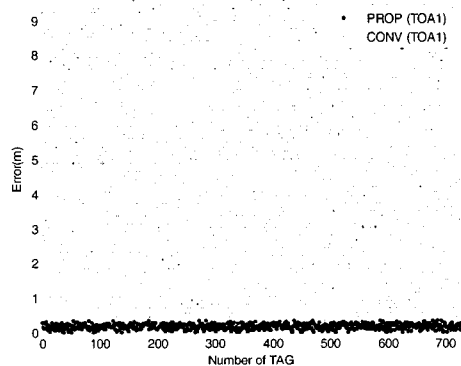


그림 8. 마스터 비콘 A와 태그 사이의 클럭 표류 보정 유무에 따른 결과 비교

정을 하지 않았을 때의 결과를 나타낸다. 아래 그림에서 보여주는 바와 같이 표 2의 조건하에서 클럭 표류를 보정하지 않을 경우 최대 약 9 m의 오차가 발생함을 알 수 있으며 제안된 방식은 첫 번째 TOA의 오차가 다른 두 개의 TOA 정보 획득에 다소 누적 요인으로 작용하였지만 전반적으로 클럭 표류의 영향이 매우 감소했음을 알 수 있다.

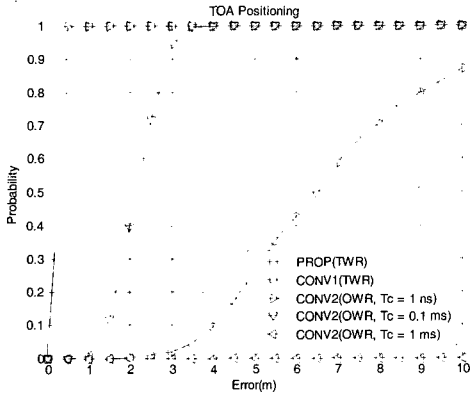


그림 9.  $T_c$  변화에 따른 측위 성능 결과

이러한 오차는 적용되는 클럭의 표류가 클수록 더욱 커지고 응답시간이 길어질수록 더욱 오차는 증가된다. 이처럼 IEEE 802.15.4a TG에서 제시한 요구사항들 중 하나인 저비용을 고려할 때 저가의 크리스털 오실레이터의 사용이 필수적이며 시간 기반의 고정밀 거리인지 및 무선 측위를 하기 위해서는 반드시 클럭 표류의 영향을 고려해야 한다.

그림 9는  $T_c$  변화에 따른 OWR 기반의 TDOA 기법에 대한 측위 성능 결과, “CONV2”와 제안된 기법과의 비교를 나타낸다. 여기서 “CONV2”는 동기화 후 전송 시까지의 시간  $T_c$ 가 매우 짧을 경우 제안된 방식과 거의 비슷하지만 그림 9와 같이  $T_c$ 가 0.1 msec 일 경우 TDOA 오차가 증가됨을 알 수 있다. 이처럼 OWR 기반의 TDOA 획득 기법은 처리 과정이 매우 단순하다는 장점이 있으나  $T_c$ 가 길 경우 클럭 표류에 대한 영향을 받을 수 있고 주기적으로 매우 짧은 간격으로 측위용 비콘들이 동기화가 이루어져야 하기 때문에 높은 전력 소비가 요구된다.

그림 10은 거리 인지 오차 변화에 따른 각 기법들에 대한 측위 성능을 비교한 것이다. 그림 10에서 보여주는 바와 같이 제안된 방식은 거리 인지 오차가 클 경우 TOA 오차에 대한 누적이 가중되기 때문에 다른 방식들의 성능 결과에 대한 감소 격차가 다소 큼을 알 수 있으나 여전히 다른 시스템에 비하여 성능이 개선되었음을 알 수 있다.

그림 11은 응답 시간  $T_r$  변화에 따른 각 기법들에 대한 측위 성능 결과를 나타낸다. “CONV2” 기법은 OWR 방식이기 때문에 응답 시간이 존재하지 않으므로 거의 일정한 결과를 나타내는 반면에 “CONV1” 기법은 응답 시간에 대한 클럭 표류의 영향으로 응답 시간이 약 1 msec 이상일 경우 측위 오차가 급격히 증가됨을 알 수 있다.

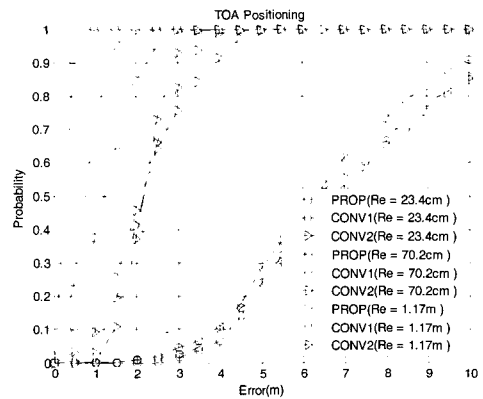


그림 10. 거리 인지 오차 변화에 따른 각 기법들에 대한 측위 성능 결과

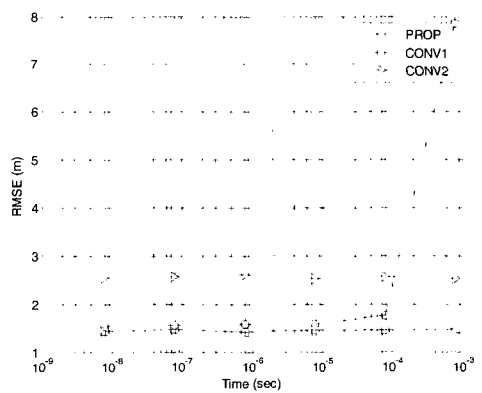


그림 11. 응답 시간 변화에 따른 각 기법들에 대한 측위 성능 결과

#### IV. 결론

본 논문에서는 무선 측위의 오차를 유발시키는 원인들 중의 하나인 클럭 표류의 영향을 줄이면서 TOA와 TDOA 정보를 획득하는 방안을 제안하였다. 또한 기존의 기법 및 IEEE 802.15.4a TG에 소개된 OWR 기반의 TDOA 획득 방안을 비교 대상으로 선택하여 시뮬레이션을 통해 제안된 방안의 성능을 비교 분석하였다. 분석 결과, OWR 기반의 TDOA 획득 방안은 주기적으로 동기화를 시켜야하기 때문에 소비 전력이 크고 동기화 후 태그가 전송할 때까지의 시간에 매우 의존적이었으며 이때의 클럭 표류 및 흡셋 등의 영향으로 제안된 기법보다 열화된 측위 성능을 가질 수 있음을 확인하였으며 주기적 동기화로 인한 전력 소비 증가와 같은 단점을 가지고 있었다. 반면, 제안된 기법은 송수신 과정이 다소 많지만 동기화 과정이 필요 없기 때문에 설치가 용이하고 주기적으로 동기화를 하지 않아도 되기 때문에 전력 소비가 적다는 장점과 클럭 표류

영향에 덜 의존적이고 TOA와 TDOA 정보를 얻을 수 있기 때문에 열악한 GDOP 상황에서 다소 좋은 성능을 가질 수 있음을 확인하였다. 추가적으로 향후, TOA, TDOA에 대한 신뢰성을 나타낼 수 있는 정보 추출 및 획득 알고리즘과 이러한 정보들로부터 측위 오차를 줄이기 위한 고차원적인 측위 알고리즘에 대한 연구가 필요하다.

**참 고 문 헌**

- [1] F. Chin, Zhi. Wanjun and Ko. Chi-Chung, "System performance of IEEE 802.15.4 low rate wireless PAN using UWB as alternate-PHY layer," *Proc. IEEE Conference on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC 2003)*, Vol. 1, pp.487-491, Sept. 2003.
- [2] J.C. Adams, W. Gregorwich, L. Capots, and D. Liccardo, "Ultra-Wideband for Navigation and Communications," *Proc. IEEE on Conference Aerospace*, Vol. 2, pp.785-792, March 2001.
- [3] R.J. Fontana, S.J. Gunderson, "Ultra-Wideband Precision Asset Location System," *Proc. IEEE Conference on UWB Systems and Technologies (UWBST)*, pp.147-150, May 2002.
- [4] D. Niculescu and N. Badri, "Ad hoc positioning system (APS) using AOA," *Proc. 22th Joint IEEE Computer Communications Soc. (INFOCOM' 03)*, vol. 3, Mar. 30-Apr. 3, pp. 1734-1743, 2003.
- [5] K. Pahlaven and X. Li, "Indoor geolocation science and technology," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 40, no. 2, pp. 112-118, Feb. 2002.
- [6] Y. Ohta, M. Sugano and M. Murata, "Autonomous localization method in wireless sensor networks," *Proc. IEEE conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PERCOMW 2005)*, pp.379-384, March 2005.
- [7] IEEE 802.15-TG4a, Precision Ranging Subcommittee, "Ranging Subcommittee Final Report," available at <http://ieee802.org/15/pub/TG4a.html>
- [8] R. Hach, "Symmetric Double Sided Two-Way Ranging", IEEE P802.15 Working Group for Wireless Personal Area Networks (WPAN), Doc. IEE P.802.15-05-0334-00-004a, June 2005.

**박 운 용 (Woon-Yong Park)**

정회원



2000년 2월 남서울대학교 정보통신공학과 학사  
 2002년 2월 송실대학교 정보통신공학과 석사  
 2007년 2월 송실대학교 정보통신공학과 박사  
 2007년 3월~현재 BK21 사업, 차세대 이동통신 산학공동협력팀 Post Doc.

<관심분야> Position Location based on UWB, Cognitive Radio, SDR 기술, RFID

**박 철 응 (Cheol-Ung Park)**

준회원



2006년 2월 남서울대학교 정보통신공학과 학사  
 2006년 3월 송실대학교 정보통신공학과 석사과정  
 <관심분야> Position Location based on UWB, RFID

**최 성 수 (Sungsoo Choi)**

정회원



1996년 2월 경원대학교 전자공학과 졸업  
 1998년 8월 광주과학기술원 정보통신공학과 석사  
 2002년 1월 미네소타대학교 Pre-Doctoral Assistant  
 2003년 2월 광주과학기술원 정보통신공학과 박사

2003년 3월~현재 한국전기연구원 융합기술연구단 선임연구원

<관심분야> LR-UWB, WPAN, BPLC

**이 원 철 (Won-Cheol Lee)**

정회원



1986년 2월 서강대학교 전자공학과 학사  
 1988년 2월 연세대학교 전자공학과 석사  
 1994년 New York Polytechnic Univ. Electronic Eng. 박사  
 1995년~현재 송실대학교 정보통신전자공학부 부교수

<관심분야> Cognitive Radio, SDR 기술, Position Location based on UWB, CDMA2000/WCDMA, Smart Antenna