

## 무선 센서 네트워크용 시각 동기화 프로토콜의 고찰

배 시 규\*

# A Survey on Time Synchronization Protocols for Wireless Sensor Networks

Shi-Kyu Bae \*

### 요 약

무선 센서 네트워크 응용에서도 다른 유선 네트워크나 애드혹 네트워크의 응용과 마찬가지로 시간 관계를 유지하는 것이 중요하기 때문에 무선 센서 네트워크의 특성을 고려한 다양한 시각 동기화 프로토콜이 개발되어 왔다. 특히, 무선센서네트워크 환경에서는 동기화 정확도뿐 아니라 전력 소모도 함께 고려되어야 한다. 본 논문에서는 지금까지 개발된 무선센서네트워크용 시각 동기화 프로토콜들을 새로운 기준(즉, 전력 소모)으로 분류하고 분석하였다. 따라서 이 방법은 무선센서네트워크용 시각 동기화 프로토콜들을 전력 소모 관점에서 평가하거나 비교할 때 유용할 것이다.

▶ Keywords : 시각 동기화, 무선센서네트워크, 전력 소모, 성능 분석

### Abstract

Various Time Synchronization protocols considering for the characteristics of WSN(Wireless Sensor Network) have been developed, because a time relationship plays an important role in many WSN applications, as well. Synchronization accuracy as well as constraints of energy should be considered for WSN Time Synchronization protocols, especially. In this paper, I analyze Time Synchronization protocols for WSN after classifying these protocols with a new criteria (i.e. power consumption). So, this method will contribute to evaluating and comparing WSN Time Synchronization protocols in respect of power consumption.

▶ Keywords : Performance Analysis, Power Consumption, Time Synchronization, Wireless Sensor Network

---

•제1저자 : 배시규 •교신저자 : 배시규

•투고일 : 2014. 3. 12, 심사일 : 2014. 4. 22, 게재확정일 : 2014. 6. 15.

\* 동양대학교 컴퓨터공학과(Dept. of Computer Engineering, DongYang University)

## I. 서론

무선센서네트워크 분야에서 다양하고 방대한 연구가 이루어져왔으며, 그 중에 시각 동기화에 관한 연구가 있다. 시각 동기화에 관한 연구는 새로 시작된 것이 아니라 예전의 인터넷이 개발된 초기부터 있어 왔으나, 무선 네트워크 환경, 특히 무선 센서 네트워크 분야에서는 새로운 요구사항과 고려 사항이 필요하여 관심을 끌게 되었다. 대표적으로 인터넷과 같은 유선 네트워크에서 동작하는 NTP (Network Time Protocol)[1]가 일찍이 개발되었다. WSN에서의 각 센서 노드는 서로 협업을 하기 위하여 공통 클럭을 유지하는 것이 중요하며, 이를 이용하는 응용에서는 네트워크 전체 혹은 각 센서 노드간에 시각 동기화가 유지되는 것을 전제로 한다.

WSN에서 동작하는 많은 시각 동기화 프로토콜들이 개발되고 있으며, 각 프로토콜을 분석하는데 있어서 중요시하는 성능평가 요소나 분석 방법은 프로토콜에 따라 각기 다르므로, 기 제안된 시각 동기화 프로토콜들을 비교 평가하기는 쉽지가 않다. 무선 센서 네트워크를 설계할 때 중요한 사항이 전력 소모를 최소화하는 것이며 시각 동기화 프로토콜의 설계에도 마찬가지로 전력 소모를 최소화하는 것이 필요하다. 따라서 무선 센서 네트워크용으로 설계된 시각 동기화 프로토콜은 동기화 오류를 줄이는 것 못지않게 전력 소모를 최소화하고 네트워크 수명을 늘리는 노력을 함께 하여야 한다. 그렇게 하기 위해서는 전체 네트워크의 에너지 소비도 줄이면서 네트워크 내의 모든 노드에 에너지가 균등하게 소모되도록 하는 것이 필요하다.

이 논문에서는 무선 센서 네트워크의 동작에서 전력 소모의 영향을 인지하고 기존의 시각 동기화 프로토콜을 전력 소모 관점에서 분류하고 분석한다.

논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서 무선센서네트워크용으로 개발된 시각 동기화 프로토콜과 관련된 연구를 알아보고, 3장에서 무선 센서 네트워크의 에너지 모델을 나타내고, 에너지 소모 관점에서 시각 동기화 프로토콜의 동작 방식을 분류한다. 4장에서는 3장에서 제안한 분류 기준에 따라 실제 대표적인 시각 동기화 프로토콜의 메시지 복잡도를 분석한다. 5장에서는 4장에서의 메시지 분석도와 시뮬레이션 결과를 근거로 여러 시각 동기화 프로토콜의 전력 소모를 분석한다. 마지막으로 5장에서 결론을 다룬다.

## II. 관련 연구

무선센서네트워크 시각 동기화 프로토콜은 여러 기준에 따라 분류되고 있으며, Sundararaman[2]과 Rhee[3] 등이 분류한 기준은 다음과 같다.

(1) 주종 (Master-slave) 대 대등(peer-to-peer) 동기화  
주종 관계 동기화는 한 노드가 주된 역할을, 다른 노드가 종 역할을 하는 방식이다. 반면에 대등 관계 동기화는 네트워크내의 어느 노드와도 직접 통신이 가능하다.

(2) 클럭 수정(Clock Correction) 대 클럭 반영(untethered Clock)

클럭 수정 형태는 각 노드의 로컬 클럭을 수정함으로써 동기화를 수행하는 반면, 클럭 반영 형태는 각 노드가 다른 노드의 클럭에 구속되지 않고 로컬 클럭의 수정 없이 시간 정보표를 유지하면서 필요시에 시각을 변환해서 사용하는 방식이다.

(3) 내부 대 외부 동기화

외부 클럭 동기화에서는 UTC(Universal Time)와 같은 표준 시각 소스가 제공된다. 반면에 내부 클럭 동기화에서는 글로벌 시각이나 실시간 정보는 제공되지 않고 각 노드간에 상대적인 시간을 최소화하는데 목적이 있다.

(4) 확률적(probabilistic) 대 확정적(deterministic) 동기화

확률적 동기화는 동기화 정확도가 실재 확률을 가지고 특정 범위 내에서 이루어진다. 반면에 확정적 동기화는 클럭 동기화 정확도 범위를 확정적으로 정한다.

(5) 송신-수신 대 수신-수신형 동기화

송신-수신(Sender-to-receiver)형 동기화는 한 노드가 송신자가 되어 데이터를 전송하며, 송신자를 제외한 다른 노드들은 수신자가 되어 보내어진 데이터를 수신한다. TPSN(Timing-sync Protocol for Sensor Networks)[4]과 FTSP(Flooding Time Synchronization Protocol)[5]이 여기에 속하며, 이 형태는 글로벌 참조 클럭을 전체 네트워크에 전달할 수 있다. 이와 대조적으로 수신-수신(Receiver-to-receiver)형 동기화에서는 참조 노드가 특정한 패킷을 한 번 전송하면, 이 후에는 전송한 노드를 제외한 다른 노드들이 서로 협력하여 동기화를 이루는 방식을 갖는다. 이 종류에 해당하는 대표적인 프로토콜이 RBS(Reference Broadcast Synchronization) [6]로서, 한 노드(송신자)가 다른 수신 노드들이 동시에 수신하도록 비이컨 메시지를 방송하면, 송신자를 제외한 다른 수신자들이 이 비이컨 메시지를 수신

한 각각의 로컬 클럭 값을 서로 교환하여 상호간의 클럭 오프셋을 기록한다. 이 RBS 프로토콜은 가까운 거리에 위치한 여러 노드간에 상대적인 클럭 오프셋을 비교적 정확하게 파악할 수 있지만, 특정 노드의 클럭(혹은 글로벌 클럭)으로 네트워크 전체를 동기화할 수는 없다.

수신 독자(Receiver Only)형은 송신-수신형 및 수신-수신형과 다른 형태로 나중에 추가되었으며, 특정한 두 노드간의 메시지 교환을 다른 노드들이 엿들으며(overhearing) 한 노드의 참조 클럭에 자신의 로컬 클럭을 동기화하는 방식으로, PBS(Pair-wise Broadcast SynchronizationS) [7]이 여기에 해당한다.

그 외에도 [2], [3]에서는 무선센서네트워크를 위한 여러 시차 동기화 프로토콜의 특징을 살펴보고 분석하였다.

본 논문에서는 다른 기준에서 무선센서네트워크를 위한 여러 시차 동기화 프로토콜을 분류하고 분석한다.

### III. 무선센서네트워크의 전력 소모 분석

자원의 제약이 많은 무선 센서 네트워크를 설계할 때 여러 고려 사항이 있으나, 그 중에서도 중요한 사항이 전력 소모이다. 시차 동기화 프로토콜의 설계에도 마찬가지로 전력을 소모를 최소한으로 줄이고, 에너지 소비를 균등하게 하여 네트워크 수명을 늘이는 것이 필요하다. 무선 센서 네트워크에서의 전력 소비에 영향을 끼치는 요소에 대하여 살펴본다.

대부분의 무선센서네트워크 응용에서 통신에 소모되는 전력이 컴퓨팅 처리할 때보다 더 많은 것으로 알려져 있으며, [8]에서도 센서 노드의 전력 소모는 컴퓨팅보다 주로 통신에 의해 주도되는 것으로 밝혀졌다. [9]에서 특정 라우팅 프로토콜을 예로 실험한 결과에서도 각 노드의 송수신장치에서 소모한 전력이 프로세서에서 사용한 전력보다 더 큰 것으로 나타났다. 송수신장치에서는 송신 상태에서의 전력 소모가 수신 상태에서보다 더 큰 것으로 나타났다. 즉, 같은 크기의 패킷을 보낼 때가 받을 때보다 더 많은 전력이 소모된다. 하지만, [9]에서의 다른 실험에서는 송수신장치의 수신 상태에서 송신 상태보다 더 많은 전력이 소모되는 결과가 나왔는데, 이는 각 노드에서 통신 영역 안에서 발생하는 모든 패킷을 수신한 결과이다. 이를 오버히어링(overhearing)이라고 하며, 무선 통신 방송의 특징상 각 노드는 자신을 목적지로 하지 않고 다른 노드로 보내어진 패킷을 모두 수신한다. 따라서 보낸 데이터보다 받은 데이터의 크기가 훨씬 커다면 수신에 사용된 전력이 송신에 사용된 것보다 커지게 된다. 이런 조건은 노드의 배치 상태인 노드 밀도에 의해서 결정된다.

무선 센서네트워크에서 한 노드에서 메시지를 전송함에 따라 통신 영역 주위에서 소모되는 전력과 여러 노드에서 메시지 전송이 이루어졌을 때 전체 네트워크에서 소모되는 전력을 살펴보기로 하자.

각 노드에는 두 가지 형태의 전력 소모, 즉, 송신전력( $E_{Tx}$ )과 수신전력( $E_{Rx}$ )이 발생한다고 가정하자. 모든 센서 노드가 동일하고(homogeneous), 각 센서 노드는 처음 배치할 때 위치가 고정된(static) 네트워크를 고려하자. 각 노드에서의 에너지 소모는 가장 많이 활용되는 [10]에서 제안한 에너지 방출 모델을 사용하기로 한다.

거리( $d$ ) 떨어진 곳으로  $b$  비트의 데이터를 보내기 위하여 필요한 전력은

$$E_{Tx}(b,d) = E_{Tx-elec}(b) + E_{Tx-amp}(b,d) \quad (1)$$

이며, 송수신 노드간 거리가 문턱값  $d_0$ 보다 작을 때 적용하는 자유공간모델을 고려하면,

$$E_{Tx}(b,d) = bE_{elec} + be_{fs}d^2, d < d_0 \quad (2)$$

이다. 여기서  $E_{elec}$ , 은 전자 에너지로 디지털 코딩, 필터링, 변조, 신호 스프레딩(spreading) 등에 의해서 결정되는 값이다.  $e_{fs}d^2$ ,는 증폭 에너지로 송수신 노드간의 거리와 비트 오류율에 의해서 결정된다.

수신 노드에서 거리 문턱값( $d_0$ ) 보다 가까운 거리에 있는 다른 노드로부터  $b$  비트의 데이터를 수신하는 데 소모하는 전력은

$$E_{Rx}(b) = E_{Rx-elec}(b) = bE_{elec} \quad (3)$$

이다.

통신 반경 내에 여러 노드로 구성된 환경에서, 한 노드가 다른 노드로 패킷을 보내면 송신 노드가 송신전력을 사용할 뿐만 아니라 그 노드를 둘러싼 통신 반경 내의 다른 노드들은 수신전력을 소모하게 된다. 즉, 하나의 노드로부터 송신이 이루어지면 통신 반경 내에서 소모되는 전체 전력은 송신노드의 송신전력과 이웃 노드들의 수신전력의 합으로 나타난다.

하나의 송신 노드에서  $b$  비트의 데이터를 보냈을 때, 송신 노드를 중심으로 전송 범위( $R$ ) 내에 존재하는 모든 노드들의 전력 소모의 합( $E_R$ )은

$$\begin{aligned} E_R(b,R) &= E_{Tx}(b,R) + (n(t)-1) E_{Rx}(b) \\ &= bE_{elec} + be_{fs}R^2 + (n(t)-1)*bE_{elec} \\ &= n(t)*bE_{elec} + be_{fs}R^2 \end{aligned} \quad (4)$$

과 같다. 여기서  $n(t)$ 은 송신 노드를 포함한 전송 범위 내에 있는 노드들의 수이며, 노드 밀도와 이동성에 의해 시간  $t$ 에서 결정된다.

노드의 이동성이 없는 고정형 WSN을 가정하여  $n(t)$ 은 노드 밀도에만 의존하는 상수가 되므로  $n$ 으로 표시할 수 있다. 따라서 식 (3)에서  $E_R$ 은 다음과 같이 나타난다[11].

$$\begin{aligned} E_R(b,R) &= n*bE_{elec} + be_{fs}R^2 \\ &= b * (n*E_{elec} + e_{fs} * R^2) \end{aligned} \quad (5)$$

여기서  $n$ 은 노드의 배치가 일정하고 고정형 WSN에서 배치된 노드의 밀도에 의해 결정되는 송신노드와 이웃노드의 수의 합이다.

식 (5)는 중요한 의미를 가진다. 노드의 배치가 일정하고 고정형 WSN에서  $E_R$ 은 전송하는 데이터의 크기에 비례한다. 만일 전송 범위  $R$ 이 일정하게 고정되면  $E_R$ 은 전송하는 데이터의 크기에만 비례한다. 그러므로 네트워크 전체의 소모 전력은 다음 식과 같이 네트워크 전체에서 발생하는 데이터의 총 크기로 산출할 수 있다[11].

$$\begin{aligned} E_{network}(b) &= \sum M E_R(b) \\ &= (n*E_{elec} + e_{fs} * R^2) * M * b \end{aligned} \quad (6)$$

여기서  $M$ 은 네트워크 전체에서 발생한 전체 메시지의 수이다.

따라서 시각 동기화 프로토콜과 같은 WSN 응용의 전력 소모에 대한 비교는 발생하는 데이터의 량을 비교함으로써 가능해 진다.

## IV. 무선센서네트워크 시각동기화 프로토콜의 분석

네트워크 전체 동기화는 여러 노드를 대상으로 하는 기본 동기 동작을 연속적 혹은 반복적으로 실행함으로써 완성된다. 기본 동기 동작에 참가하는 여러 노드들 간에는 단일 전송 혹은 방송 전송으로 하나 이상의 메시지 전송이 필요하며, 정확한 전송 메시지 수는 동기화 방안에 따라 결정된다.

네트워크 전체의 동기화가 완전히 이루어지더라도 시간이

지남에 따라 다시 여러 노드 간에는 클럭 드리프트로 인하여 다시 클럭 오프셋이 발생하므로, 이를 수시로 보상하거나 다시 네트워크 전체의 동기화가 이루어져야하면, 이를 재동기화라고 한다. 재동기화는 일정 시간마다 반복되거나, 특정 조건이 되었을 때 이루어진다. 이 논문에서는 이를 동기화 라운드(synchronization round)라고 부르며, 여러 동기화 방안을 비교하기 위하여 일련의 기본 동기화 동작을 통하여 네트워크 전체를 동기화하는 한 번의 네트워크 동기화 동작으로 정의한다.

앞 장의 식 (5)에서 네트워크 전체의 전력 소모는 네트워크 전체에서 발생하는 전송 메시지의 총 크기로 평가할 수 있음을 보였다.

여기서 우리는 전송 메시지 측면에서 동기 동작이 진행되는 방식에 따라 동기화 방안을 크게 두 가지 형태로 분류하고, 다시 세분화한다. 즉, 상호 동기화(pair-wise synchronization)과 그룹 동기화(group-wise synchronization)로 크게 나눈다.

### 1 동기화 방안의 분류

#### 1.1 상호 동기화

상호 동기화는 기본 동기 동작에서 두 노드 간에 하나 이상의 메시지를 주고받으며 유니캐스트 전송을 주로 사용한다. 전체 네트워크를 동기화하기 위해서는 전형적으로 트리 구조가 사용된다. 대표적인 프로토콜로는 TPSN과 RBS가 여기에 속한다.

#### 1.2 그룹 동기화

그룹 동기화에서는 한 번의 기본 동기 동작에서 방송영역 내에 있는 일부 또는 전체 노드가 방송(또는 멀티캐스터)을 통해서 동기화된다. 전체 네트워크 동기화는 방송 영역 단위로 연속적으로 혹은 병렬로 여러 번의 기본 동기 동작이 완료됨으로써 이루어진다. 이 방식에서는 전형적으로 클러스터 구조가 사용된다. 클러스터 구조는 클러스터를 형성하는데 추가로 오버헤드가 필요하지만, 클러스터 구조가 자주 변경되지 않는다면 전력소모 면에서 장점이 있다. FTSP를 비롯하여 최근에 제안되는 동기화 방안들이 여기에 속한다.

### 2. 상호 동기화 방식 프로토콜의 메시지 복잡도 분석

#### 2.1 TPSN

가장 대표적인 동기화 프로토콜로서 TPSN은 전형적으로

트리 구조에서 동작하며, 루트 노드에서 레벨 단위로 노드 간에 쌍으로 동기화 동작을 실시한다. 그림 1은 상호 동기화 방식의 예로서 TPSN의 동작을 나타낸다.

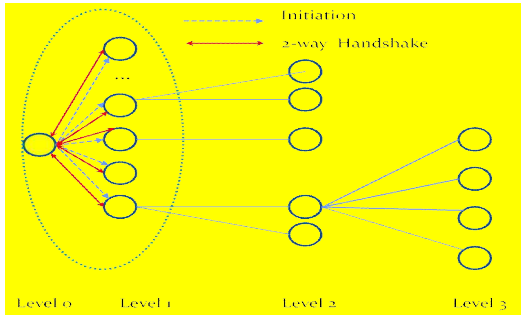


그림 1. TPSN의 동작 : 상호 동기화 방식의 예  
Fig. 1 Operation of TPSN : an example of pair-wise synchronization category

TPSN[4]은 두 개의 단계, 즉, 레벨 탐색 단계와 동기화 단계로 이루어진다. 레벨 탐색 단계에서는 트리 구조가 생성된다. 동기화 단계에서 모든 노드는 상위 레벨의 노드와 양방향 통신을 통해서 동기화를 이루며 궁극적으로 모든 노드는 루트 노드와 동기화를 이룬다.

전체 네트워크의 노드 수를  $n$ 이라고 하면, TPSN에서 트리 구조를 만들는데 단순한 플러딩(flooding)을 사용하므로  $n$ 번의 메시지 전송이 필요하다. 트리에서 부모 노드의 수를  $n_p$ 라고 하면  $n_p$ 의 범위는  $1 < n_p < (n-1)$ 이다. TPSN의 동기화 단계에서 부모 노드 당 1회의 시작 메시지와 부모-자식 노드 쌍 사이에 2회의 메시지 교환이 필요하다. 따라서 한 번의 동기화 라운드에 필요한 메시지 교환 회수는  $M_{TPSN} = n_p + 2(n-1) = 2n + n_p - 2$ 이다.

### 2.2 RBS

RBS[6]는 그림 2와 같이 그물망 토폴로지와 유사한 구조에서 동작하며, 한 번의 방송 메시지와 송신자를 제외한 모든 수신자 간에 메시지 전송이 이루어지므로, 최대  $1 + (n-1) \times (n-2)$  (전체 네트워크의 노드 수  $n$ ) 회의 메시지 전송이 사용 된다

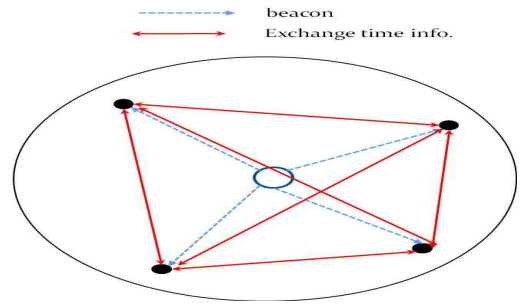


그림 2 RBS의 동작  
Fig. 2 Operation of RBS

## 3 그룹 동기화 방식 프로토콜의 메시지 복잡도 분석

### 3.1 FTSP

FTSP[5]는 루트 노드로부터 시작하여 모든 노드에 확산하는 방식으로 동기화를 한다. 즉, FTSP는 별도의 계층 구조를 만들지는 않지만 루트 노드로부터의 거리에 따라 계층 구조가 형성되어 있는 것으로 고려할 수 있다. FTSP는 중심에 있는 노드로부터 통신 영역 내에 있는 모든 노드에게 시간 정보의 전송이 이루어지며, 루트 노드로부터 시작하여 단계적으로 모든 노드에게 전송이 이루어진다. 전달되는 순서는 미리 정해진 구조가 없으므로 중심 노드로부터의 거리에 따라 결정이 된다. 플러딩으로 인하여 지나치게 많은 메시지가 전송되는 것을 방지하기 위하여 모든 노드는 반드시 한 번만 전송을 하도록 하고 있으므로, 총  $n$  회의 방송 메시지 전송이 이루어진다.

### 3.2 TSRT(Tree Structured Referencing Time Synchronization).

이 프로토콜[12]에서는 그림 3에 나타난 것처럼 일차적으로 참조 노드라고 불리는 중심 노드에서 통신 영역 내에 있는 노드 중 한 노드와 2회의 메시지를 교환함으로써 클럭 오프셋을 계산한 후, 통신 영역 내의 모든 노드들에게 이 클럭 오프셋을 방송으로 전달한다. 특이한 점은, 처음 클럭 오프셋을 계산할 때 전송하는 채널과 전체 멤버들에게 방송할 때의 채널을 별도로 함으로써 채널 간의 충돌이나 지연 시간의 임의성을 줄여 정확도를 높인다. 어쨌든 클러스터 당 3회의 메시지 전송이 필요하며, 네트워크 전체로는 (3 x 클러스터 수) 회의 메시지 전송이 필요하다.

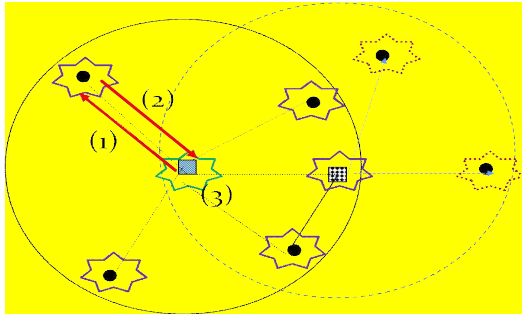


그림 3 TSRT의 동작  
Fig. 3 Operation of TSRT

### 3.3 ATS(Adaptive Time Synchronization for Homogeneous WSNs)

[13]의 프로토콜은 그림 4에 나타난 것처럼 클러스터 구조를 가지고 있으며, 루트 노드를 포함하는 클러스터 헤더 간에는 상호 동기화 방식을 사용한다. 그 다음, 각 클러스터 헤더는 클러스터 헤더와 클러스터 멤버 중의 한 노드와 메시지를 교환함으로써 지연 시간 정보를 계산한 다음 전체 클러스터 멤버에게 방송으로 이 정보를 전달하여 동기화를 이룬다.  
 $n_{CH}$  : 클러스터 헤드 수,  $n_p$  : 부모 노드 수라고 할 때,

$$\begin{aligned}
 M_{ATS} &= 3 * (n_p - n_{CH}) + n_{CH} \\
 &= 3 * n_p - 2 * n_{CH} \\
 &= 1 \quad (n_p = n_{CH} = 1 \text{ for 1-hop}) \\
 &= \rangle n_{CH} \quad (\text{for multi-hop backbone})
 \end{aligned}$$

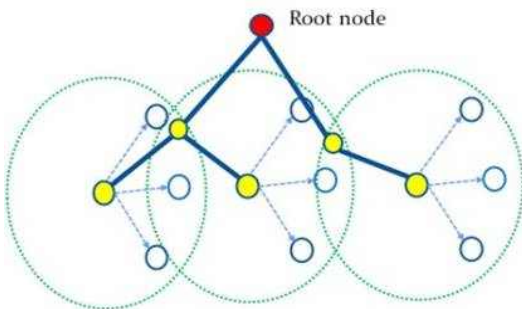


그림 4 [12] 프로토콜의 동작  
Fig. 4 Operation of [13]'s protocol

### 3.4 CTS(Clustered Time Synchronization Algorithm for Wireless Sensor Networks)

[14]의 알고리즘에서는 Inter-cluster와 Intra-cluster 동기화 단계로 나누어진다. Inter-cluster 단계에서는 베이스 스테이션과 클러스터 헤더 간에 2회 메시지 교환으로 클럭

오프셋을 계산하여 동기화한다. Intra-cluster 동기화 단계에서는 클러스터 헤더가 선택한 클러스터 멤버 중에 한 노드가 RBS에 기초한 참조 방송으로 클러스터 헤더의 시간 정보를 다른 멤버에게 방송하여 클러스터 전체를 동기화 한다.

### 3.5 IBS (Indirect-Broadcasting Synchronization).

이 프로토콜[15]에서는 노드를 리더노드(Leader Node : LN)와 일반노드(Normal Node : NN)로 나누며, LN은 두 가지 역할, 즉 SYNC(Synchronizer)와 ASST(Assistant)로서 동작한다. 그림 5에 나타난 것처럼 SYNC 노드는 동일한 홉 내에 있는 다른 노드에게 비이컨 패킷을 방송함으로써 이를 수신한 노드들이 비이컨 수신 시간을 자신의 로컬 클럭으로 파악하도록 하며, ASST 노드와 협력하여 클러스터 전체를 동기화시킨다. 이 때, ASST는 동기화시킬 노드들의 기준 시간을 유지하며 SYNC로부터 요청이 있으면 기준 시간 정보를 알려준다. 그림 5는 IBS의 기본 동작을 나타내고 있다. IBS의 메시지 복잡도는 클러스터 당 3개의 메시지가 사용되어

$$M_{IBS} = 3 * n_{CH} \quad (n_{CH} : \text{클러스터 헤드 수}) \text{ 이다.}$$

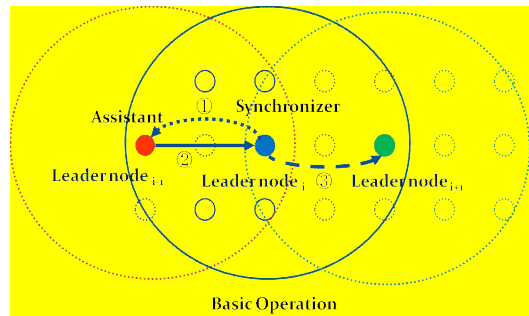


그림 5 IBS 프로토콜의 동작  
Fig. 5 Operation of IBS

## V. 시뮬레이션 및 종합 분석

### 1 시뮬레이션

3장에서 나타난 결과를 검증하기 위하여 NS2(Network Simulator)-2.33[16]을 사용하여, 그림 6에서 나타난 것처럼 (3행 \*6열)형태로 구성된 센서 네트워크 토폴로지에서 실험하였다.

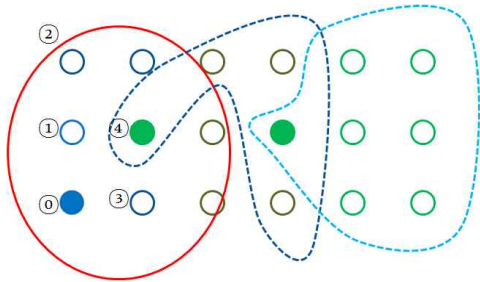


그림 6 시뮬레이션 시험 토폴로지  
Fig. 6 Topology used in simulation

시뮬레이션 환경은 노드간 거리 100m, 전송 영역 반경 550m이고, 노드에서의 전력 변수로는 송신전력(0.660W), 수신전력(0.395W), 대기전력(0.035W)으로 설정하였다.

전송 메시지 수와 전력 소모와의 관련성을 알아보기 위하여 대표적인 3개의 시각 동기화 프로토콜을 실행하였다. 그림 6의 실험 네트워크 토폴로지에서, 노드 #0은 3개의 동기화 프로토콜에서 루트 노드로 사용되었으며, 루트 노드를 포함한 노드 #4와 노드 #10은 TPSN 트리에서는 부모 노드로 혹은 RBS에서는 각 홉의 송신 노드로 사용되었다. RBS의 동작은 원래 1-홉에서만 제안되었으나, 다른 프로토콜과의 동일한 성능 비교를 위해 3개의 홉에서 별도로 동작을 실행시켜 결과를 얻었다.

각 메시지의 크기는 20바이트로 동일하게 적용하였으며, 측정된 결과는 그림 7과 그림8에서 나타난 것처럼 네트워크에서 소모되는 전력은 전송된 메시지 수와 상관이 있음을 알 수 있다. 그림 7에서 나타난 것처럼 전송 메시지의 수가 많은 순서인 RBS > TPSN > FTSP의 관계가 전력 소모량에서도 일치한다. 단, 이때 전송 메시지의 수는 실제 전송 계층에서 전송 완료된 메시지의 회수이며, 전력 소모량은 MAC 계층에서의 재전송을 포함한 총 전력소모량이므로 메시지 수와 전력 소모량이 정확히 비례하지는 않았다.

그림 8은 그룹 동기화 방식의 3개의 프로토콜은 동일한 조건에서 실험한 결과이다. FTSP가 TSRT나 IBS보다 메시지 전송이 많음에도 불구하고 전력 소모가 적게 나타난 것은 방송만을 사용하여 연속적으로 빠른 시간내에 동기화가 완료되기 때문이다. 반면에 TSRT와 IBS는 방송과 일대일통신을 함께 사용하고 노드간 메시지를 주고 받는 동안의 대기 전력이 추가된 것으로 보인다. 이 비교는 동기화 라운드 당 전력 소모를 비교한 것이며, 각 프로토콜의 구체적인 동기화 과정은 서로 다르다. FTSP는 동기화 측정값으로부터 클럭 오프셋을 추정하기 위하여 기본적으로 연속적인 8개의 동기화 라

운드를 요구한다. 따라서 일정한 크기의 재동기화 구간에서 3개의 동기화 프로토콜을 비교하면, TSRT와 IBS가 한 번의 라운드로 동작하지만, FTSP는 8개의 라운드가 필요하므로 더 많은 전력이 소모된다고 볼 수 있다.

전력 소모는 3장에서 분석하였듯이, 송신 노드의 송신 전력 뿐 아니라 수신노드의 수신 전력이 영향을 끼치므로 노드의 분포 밀도와 통신 영역의 크기에 따라 결정된다. 앞에서 언급한 시뮬레이션 환경에서, 노드 간의 거리를 조정하여 밀도를 변화시키거나, 사용하는 송신전력, 수신전력 및 대기전력의 값을 조정하여 실험한 경우에도 측정된 전력 소모량은 달랐지만, 각 프로토콜의 상대적인 순서는 변하지 않았다.

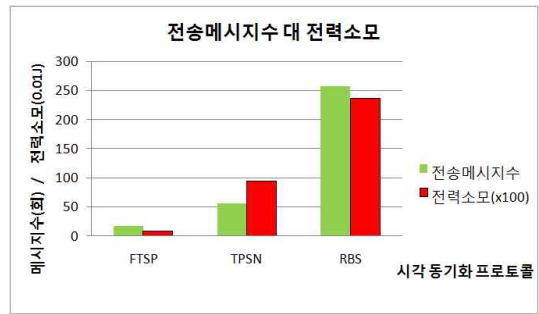


그림 7 각 동기화 프로토콜의 전송 메시지 수와 전력 소모량  
Fig. 7 The number of transmission messages versus Power consumption for each scheme.

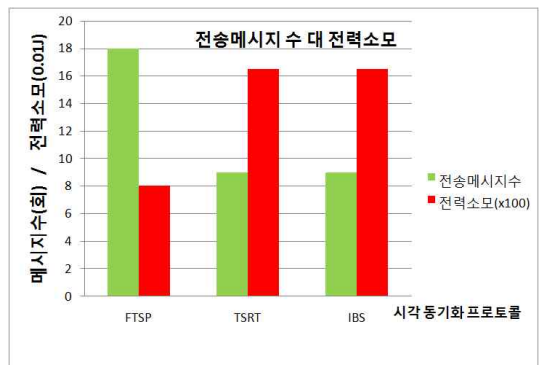


그림 8 그룹 동기화 방식 프로토콜의 전송 메시지 수와 전력 소모량  
Fig. 8 The number of transmission messages versus Power consumption for group-wise synchronization protocols.

## 2 종합 분석

4장의 메시지 복잡도 분석 결과를 고려하여 전력소모에 따른 시각 동기화 프로토콜을 세분화하여 정리하면 그림 9와 같

다. 상호 동기화 방식은 주로 트리 구조를 사용하는 방식과 그렇지 않는 방식으로 다시 나누었다. 또한 그룹 동기화 방식은 계층 구조를 구성한 후 동작하는 방식과 별도의 계층구조를 갖지 않는 방식으로 다시 세분하였다.

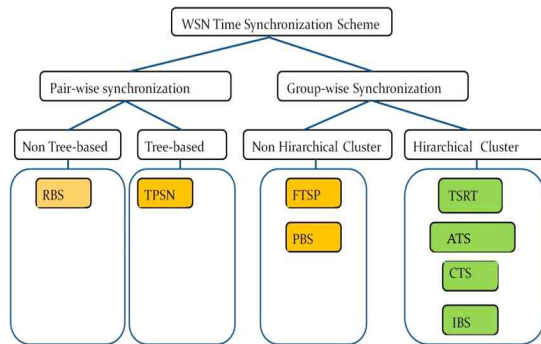


그림 9 WSN 시각 동기화 프로토콜의 새로운 분류  
Fig. 9 New Classification of Time Synchronization Protocols for WSN.

4장에서 분석한 여러 시각 동기화 프로토콜의 메시지 복잡도를 정리하면 그림 10과 같다. 메시지 복잡도는 전력 소모량과 직결되므로 각 프로토콜의 전력 효율은 그림 10의 우측 열과 같이 비교할 수 있다.

TSP	type	Message Complexity	Power Consumption
TPSN	Pair-wise	$2n + n_p - 2$	High
RBS	Pair-wise	$n(n-1)$	High
FTSP	Group-wise	$n$	Medium
TSRT	Group-wise	$3^*n_{CH}$	Low
ATS,CTS	Group-wise	$3^*n_p - 2^*n_{CH}$	Low
IBS	Group-wise	$3^*n_{CH}$	Low

그림 10 시각 동기화 프로토콜들의 비교  
Fig. 10 Comparison of Time Synchronization Protocols.

## VI. 결 론

많은 시각 동기화 프로토콜이 개발되어 왔지만, 서로 다른

목표와 방식으로 설계되어 비교하기는 쉽지 않다. 특히, WSN 환경에서는 동기화 정확도뿐 아니라 전력 소모도 함께 고려되어야 한다. 본 논문에서는 지금까지 개발된 무선센서네트워크용 시각 동기화 프로토콜들을 새로운 기준(즉, 전력 소모)으로 분류하고 분석하였다. 분석 결과, 클러스터 구조를 가진 그룹 동기화 방식이 전력 효율 면에서는 우수함을 알 수 있다. 따라서 이 방법은 무선센서네트워크용 시각 동기화 프로토콜들을 전력 소모 관점에서 평가하거나 비교할 때 유용할 것이다.

## 참고문헌

- [1] D. Mill, *Computer Network Time Synchronization: the Network Time Protocol on Earth and in Space*, Second Edition, CRC Press, 2011.
- [2] B. Sundararaman, U. Buy, and A. D. Kshemkalyani, "Clock synchronization for wireless sensor networks: a survey", *ELSEVIER Ad-hoc Networks 3*, pp.281-323, 2005.
- [3] I. Rhee, J. Lee, J. Kim, E. Serpedin, and Y.Wu, "Clock Synchronization in Wireless Sensor Networks : An Overview", *Sensors 9*, www.mdpi.com/journal/sensors , 2009.
- [4] S. Ganeriwal, R. Kumar, and M. B. Srivastava, "Timing-Synch Protocol for Sensor Networks, in *Proceeding of ACM Sensys*, USA, 2003.
- [5] M. Maroti, B. Kusy, G. Simon, and A. Ledeczi, "The Flooding Time Synchronization Protocol", in *Proceeding of ACM SenSys'04*, 2004.
- [6] J Elson, L. Girod, and D. Estrin, "Fine-grained network time synchronization using reference broadcasts", in *Proceeding of ACM OSDI* , 2002.
- [7] K. Noh, E. Serpedin, and K. Qaraqe, "A New Approach for Time Synchronization in Wireless Sensor Networks: Pairwise Broadcast Synchronization", *IEEE Tran. On Wireless Comm.*, Vol. 7, No. 9, Sep. 2008.
- [8] I. Mahgoub, and M. Ilyas, *Sensor Network Protocols*, CRC Press, 2006.
- [9] H. Zhou, D. Luo, Y. Gao, and D. Zuo, "Modeling of Node Energy Consumption for Wireless Sensor Networks", *Wireless Sensor Networks*, Vol. 3, 2011.



- [10] W. Heinzelman, A. P. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, "An Application-Specific Protocol Architecture for Wireless Microsensor Networks", *IEEE Trans. on Wireless Communications*, Vol. 1, No. 4, Oct. 2002.
- [11] S. Bae, "Power Consumption Analysis of Prominent Time Synchronization Protocols for Wireless Sensor Networks", *Journal of Information Processing Systems (JIPS)* accepted, 2013.
- [12] S. Rahamatkar and A. Agarwal, "An Approach towards Lightweight, Reference Based, Tree Structured Time Synchronization in WSN", in *Proceeding of CCSIT 2011*, pp. 189-198, 2011.
- [13] S. Chauhan and L. K. Awasthi, "Adaptive Time Synchronization for Homogeneous WSNs", *International Journal of Radio Frequency Identification and Wireless Sensor Networks*, 2011.
- [14] A. Zurani and B. N. Mahajan, "Clustered Time Synchronization Algorithm for Wireless Sensor Networks", *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)*, Vol.1, Jun 2012.
- [15]. S. Bae, "Time Synchronization by Indirect -Broadcasting for Wireless Sensor Networks", *Lecture Notes in Electrical Engineering* Volume 181, 2012, pp 659-666.
- [16] "The Network Simulator ns-2: Documentation", <http://www.isi.edu/nsnam/ns/ns-documentation.html>, Nov. 2011.

## 저 자 소 개



배 시 규

1986: 경북대학교

전자공학과 공학사.

1998: 경북대학교

컴퓨터공학과 공학박사.

2011: 미국 Iowa주립대 방문교수

현 재: 동양대학교

컴퓨터정보전학과 교수

관심분야: 컴퓨터네트워크

Email : skbae@dyu.ac.kr