

PBS(Pairwise Broadcast Synchronization)를 위한 노드 쌍 선택 알고리즘

배 시 규[†]

Pair-nodes Selection Algorithm for PBS (Pairwise Broadcast Synchronization)

Shi-Kyu Bae[†]

ABSTRACT

PBS(Pairwise Broadcast Synchronization) is a well-known synchronization scheme for WSN(Wireless Sensor Networks). As PBS needs the set of node-pairs for network-wide synchronization by over-hearing, GPA(Group-Wise Pair Selection Algorithm) was also proposed after PBS. However, GPA is complex and requires too many message transmissions, leading to much power consumption. Besides, GPA is not appropriate to topology change or mobile wireless sensor networks. So, we propose a new and energy-efficient pair-node selection algorithm for PBS. The proposed scheme's performance has been evaluated and compared with GPA by simulation. The results are shown to be better than GPA.

Key words: Tree, Wireless Sensor Network, Synchronization, Pairwise Broadcast Synchronization, Energy efficiency, Pair Selection

1. 서 론

PBS[1]는 WSN에서 시각을 동기화하는 방안으로서 미국 Texas A&M 대학에서 제안하여 TPSN[2], FTSP[3], RBS[4]와 더불어 주요 시각 동기화 방안 중의 하나로 인정받고 있다. 센서 네트워크의 크기가 클 경우, 멀티 홉(multi-hop)을 구성하고 전체 네트워크를 동기화하기 위하여 대부분의 시각 동기화 방안이 트리 형태의 계층 구조를 형성하는 데, PBS는 두 노드간의 동기 동작이 오버히어링(over-hearing)을 통하여 이웃 노드들에게 영향을 끼치는 방식을 가지므로 노드 쌍의 집합이 필요하다.

Fig. 1에서 단일 홉(single-hop)에서의 PBS의 동작(단일 PBS)을 설명하면, 노드 A와 노드 P가 메시지를 교환하는 과정에서 노드 A와 노드 P를 오버히어링하는 위치에 있는 노드 B와 같은 노드들이 한꺼번에 동기화된다. 네트워크 전체를 동기화 하려면 이 단일 PBS 동작을 여러 번 반복하여 네트워크 내 전체의 노드가 동기화가 되도록 한다.

Fig. 2에서 나타내었듯이, 노드 1과 노드 3이 메시지를 교환하여 노드 2, 5, 4가 동기화되고, 노드 6은 노드 1과 직접 메시지를 교환하여 동기화된다. 그리고 노드 4와 노드 8이 메시지를 교환함으로써 노드 7이 동기화된다. 여기서 나머지 전체 노드가 동기화 되도록 메시지 교환에 참가하는 노드 쌍을 적절히 선택하는 것이 필요하다.

본 논문은 PBS를 사용하여 멀티 홉 네트워크를 동기화할 때 필요한 노드쌍의 집합을 구하는 알고리즘

본 논문은 PBS를 사용하여 멀티 홉 네트워크를 동기화할 때 필요한 노드쌍의 집합을 구하는 알고리즘

※ Corresponding Author : Shi-Kyu Bae, Address: (750-711) Dongyangdae-ro 145, Pung-Gi, Youngju, GyoungBuk, Korea, TEL : +82-54-630-1071, FAX : +82-54-636-8523, E-mail : skbae@dyu.ac.kr

Receipt date : Aug. 2, 2018, Revision date : Oct. 4, 2018
Approval date : Oct. 9, 2018

[†] Dept. of Computer Engineering , DongYang University

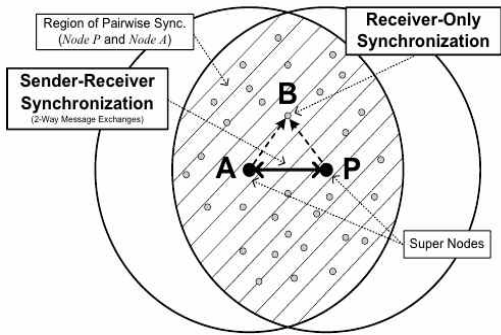


Fig. 1. Receiver-only synchronization [1].

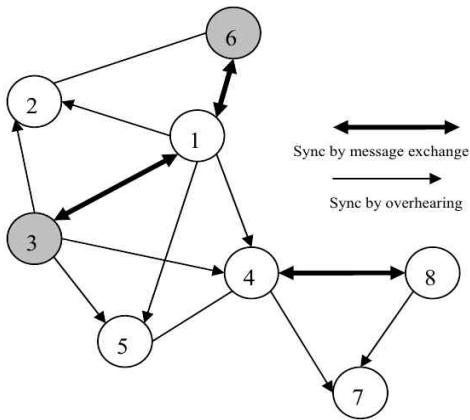


Fig. 2. 멀티홉 네트워크 전체 동기화 과정 [5].

즘을 제안한다. 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서 본 논문에서 다루려는 문제를 정의하고 이와 관련된 기존연구들을 살펴본다. 3장에서는 본 논문에서 기존의 방안보다 실용적이고 에너지를 절약할 수 있는 새로운 트리 구성 및 노드쌍 집합을 결정하는 방안을 제안하고 설명한다. 4장에서는 실험을 통해서 제안 방안의 성능을 분석하고 기존의 방안과 비교한다. 마지막으로 5장에서 결론을 내린다.

2. 기존 연구

2.1 관련 연구

노드의 전송 반경 내에 있는 노드들을 ‘이웃 노드 집합’이라고 할 때, 두 노드(예, i, j)의 이웃 노드 집합이 같은 경우에 이 이웃 노드 집합을 ‘여분 노드 (Redundant set)’라고 하고, 두 노드 i 와 j 는 선택적으로 동작하도록 응용하는 방안을 연구하였다[6]. 네트

워크에서 감시하는 영역을 커버하는 노드의 집합을 다루는 Dominant Set 문제는 그래프 이론의 한 분야로서 여러 연구에서 이루어졌으며[7], 본 논문에서 다루는 문제와 유사하지만 동일하지 않다.

PBS를 제안한 미국 Texas A&M 대학은 계속해서 PBS를 실행하기 위해 노드 쌍을 결정하는 GPA [8]를 제안하였다. 또한 네트워크 전체를 PBS 방식으로 동기화하는데 최소의 메시지 교환 횟수를 찾는 것은 NP-complete 문제임을 증명하고, 대신 휴리스틱에 기반한 분산형 프로토콜을 제안하였다[5]. GPA 나 [5]에서 제안한 방안은 노드가 고정되어 있거나 토폴로지가 변하지 않는 고정형 네트워크를 가정하여 트리를 구성하는데 지나치게 복잡하고 많은 메시지 교환이 요구되므로 전력 소모가 큰 것이 부담이다.

2.2 문제 정의

Fig. 1에서 보듯이 노드 A와 노드 P의 메시지 교환에 의한 동기화를 주변에 있는 이웃노드가(노드 B) 오우버히어링을 하여 동기화하려면 노드 A와 노드 P의 전송 영역에 포함되어야만 한다. 노드 간의 관계를 Fig. 3에서 자세히 설명하면 다음과 같다. 부모 노드(그림에서 Parent-빨간색으로 표시)가 자식 노드 중 하나의 노드(파란색으로 표시)와 3번의 메시지 교환으로 동기화하는 과정에서, 자식 노드 중 두 원의 중복 영역에 있는 자식 노드들(노란색 표시)의 동기화가 함께 이루어진다. 흰 색으로 표시된 이웃 노드들은 부모 노드(빨간색)와 직접 메시지 교환에 참여한 노드(파란색)의 공통 전송 영역 내에 위치하지 않아 동기화를 할 수 없다.

이제 네트워크의 규모가 커 단일 홉으로 커버할

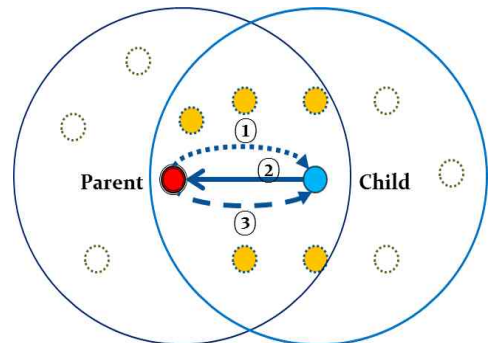


Fig. 3. Neighbor nodes to be overheard by two nodes(parent and child) at single hop.

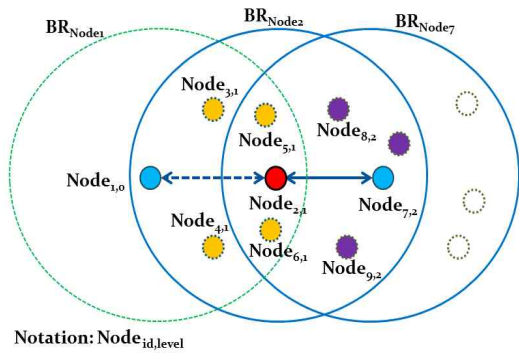


Fig. 4. Neighbor nodes to be overheard by two nodes (parent and child) at multi-hop.

수 없어 멀티 홉으로 이루어지는 경우로 확대해 보자 (Fig. 4). 한 노드로부터 동기화를 시작하여(이를 루트 노드라고 부른다.) 다른 노드로 연속적으로 동기화를 실행하기 위해 트리를 구성하는데, 루트 노드의 레벨을 최상위 0으로부터 시작하여 순차적으로 하위 레벨로 내려가며 레벨 값을 큰 값으로 설정한다. 즉, $0 \leq \text{level} < \text{max_level}$. 그림에서 각 노드의 노드 번호와 레벨을 $\text{Node}_{id,level}$ 로 나타내고, BR_{node_id} 는 각 노드의 전송 거리(또는 방송 반경)를 나타낸다. 노드 1은 레벨 0인 루트 노드이고, 트리에서 노드 2~6(레벨 1)은 자식 노드로 연결이 되어 있다. 노드 1이 자식 노드들 중에 노드 2를 선택하여 동기화를 실행하면 노드 3~6이 함께 동기화된다. 다음에 계속하여 노드 2가 하위 레벨의 노드 중 하나인 노드 7과 동기화를 실행하면 노드 8과 노드9(보라색 표시)가 함께 동기화된다. 이 때, 노드 5 및 노드 6은 이미 상위 레벨에서 동기화되었으므로 하위 레벨에서 다시 동기화할 필요가 없으며, 필요에 따라 상위 레벨에서 동기화를 실패할 경우에 하위 레벨에서 선택적으로 동기화를 할 수 있다. 루트 노드로부터 시작하여 최하위 노드까지 연속적으로 부모-자식 노드간의 동기화가 실행되어 모든 노드가 동기화되면 하나의 동기화 라운드가 완료된다. 트리의 말단 노드를 제외하고 노드 중에 부모-자식 노드간의 동기화에 참가하는 노드 쌍을 결정하는 것이 중요하며 더욱이 노드 쌍의 수를 최소로 하는 것이 동기화 과정에서 교환하는 메시지 수를 최소화하여 전력 소모를 줄인다. 본 논문에서는 동기화를 위한 트리를 구성하고 노드 쌍을 결정할 때 복잡성을 줄이고 전력 소모를 절약하기 위한 방안을 제안한다.

3. 제안 방안

3.1 트리 구성과 노드 쌍 집합

트리에서 동기화 메시지 교환에 참가하는 노드들의 집합을 백본(back-bone) 노드라고 하자(예, Fig. 4에서 노드 1, 노드 2, 노드 7). Fig. 5는 두 노드간의 거리에 따른 공동 커버 영역의 범위가 달라짐을 나타내고 있다. 백본 노드 중에서 한 쌍의 노드간의 거리가 가까우면 두 노드가 공동으로 커버하는 영역이 넓고(Fig. b), 반대로 한 쌍의 노드간의 거리가 멀어지면 두 노드가 공동으로 커버하는 영역은 좁아진다(Fig. a). 다음으로 계속해서 선택된 한 쌍의 노드간의 거리가 가까우면 추가로 확장되는 커버 영역이 작은 반면(Fig. c), 노드쌍 간의 거리가 멀어지면 추가로 확장되는 커버 영역이 넓어진다(Fig. d). 그림에서 (a)와 (b)의 경우는 루트 노드와 한 쌍으로 결정한 노드간의 거리에 따라 공동 영역이 다름을 보여주며, (b)가 (a)보다 두 노드 간의 거리가 가까워 공동 영역이 더 넓다. (c)와 (d)는 (b)의 동작에 이어 다음 노드 쌍을 선택했을 때 거리에 따른 공동 영역을 나타내며, 거리가 멀수록 추가 공동 영역이 넓어짐을 보여준다.

최소의 백본 노드 수를 선택하여 커버 영역을 최대한으로 하려면 다음과 같이 하는 것이 좋다.

- 1) 레벨 1 노드들 중 루트 노드(레벨 0)와 가장 가까운 노드를 선택하여 레벨 1 백본 노드로 결정한다.
- 2) 레벨 L 노드들($1 < L$) 중 레벨 (L-1) 부모 노드와 가장 멀리 있는 노드를 선택하여 레벨 L 백본 노

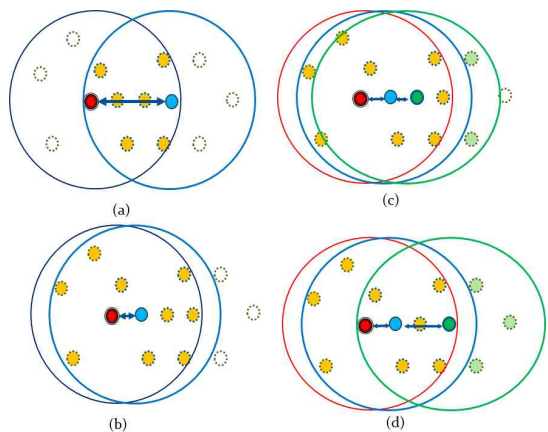


Fig. 5. Areas covered by pair-nodes according to the distance between pair-nodes.

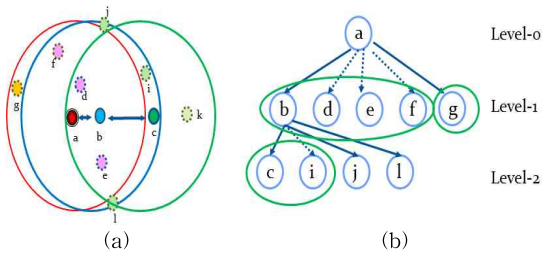


Fig. 6. Covered areas and tree level.

드로 결정한다.

Fig. 6에서 한 쌍의 노드에 의해서 커버되는 영역과 트리의 레벨간의 관계를 설명한다. 루트 노드(level 0)의 전송 범위 내에 있는 노드 b(파란색), 노드 d, e, f(분홍색), 노드 g(노랑색)는 레벨 1로 설정한다. 노드 b의 전송 범위 내에 있는 자식 노드는 노드 {c, i, j, l}이다. 노드 쌍(a,b)에 의해서 노드 {d, e, f}는 커버가 되나 노드 g는 커버되지 않고 같은 레벨 중에 커버할 노드가 없으므로 레벨 0 노드와 직접 커버하여야 한다. 계속해서 노드 쌍(b,c)에 의해 노드 i는 커버가 되나, 노드 {j, l}은 노드 c와 같은 레벨 2 노드임에도 커버가 되지 않아 이전 레벨의 노드 b와 직접 커버하여야 한다. 다음 노드 b를 중심으로 노드 {c, j, l}이 전송 범위 내에 있어 같은 레벨로 설정되었으나, 노드쌍 (b,c) 또는 (b,i) 중 하나에 의해 노드 {c, i}가 함께 커버되지만, 노드 j와 노드 l은 따로 부모 노드 b에 의해서 직접 커버되어야 한다. 즉, 노드 {c, i}, {j, l}이 별도의 그룹으로 구분된다. 노드 k는 레벨 2 미만으로 설정이 될 것이다. 트리 구성을 나타내면 Fig. 6-(b)와 같다. 노드 (a,b)쌍에 의해서 커버되는 노드 {d, e, f}를 녹색 원으로 표시했으며, 마찬가지로 노드(b,c)쌍에 의해서 노드 {c, i}가 커버된다. 여기서 노드쌍 집합은 {(a,b), (a,g), (b,c), (b,j), (b,l)}이며, 이를 연결한 것을 백본 노드라고 앞서 정의하였다.

추가로 노드 {g, j, l} 등을 커버하기 위하여 GPA에서는 한 부모 노드 아래에 있는 자식 노드들 간의 연결 관계를 파악하여 별도의 그룹을 형성을 하여 노드 쌍을 결정하는 방법을 사용한다. 이를 위해서 모든 자식 노드들간의 메시지 교환과 그룹의 크기(차수)를 부모노드에게 보고하는 과정이 필요하므로 추가의 트리 형성 시간과 전력 소모가 발생한다.

본 논문에서는 수시로 토폴로지가 변하는 동적인

네트워크 환경에서 트리 형성의 시간과 전력 소모를 줄이면서 트리의 레벨별로 연결 관계를 보장하여 동일 레벨의 노드를 모두 커버하는 트리 구축 방안을 제안한다.

3.2 제안 방안의 트리 구성 및 백본 노드 결정

PBS 동작을 할 때 두 노드의 전송 거리(또는 방송 반경)을 BR_{PBS} 라고 하자. PBS를 실행할 트리의 모든 부모 노드와 자식 노드간의 거리(D)를 최대 $R_{PBS}/2$ 로 제한한다. 즉, $0 < D < R_{PBS}/2$.

트리를 T라고 하고, 각 노드의 집합을 V, 두 노드간의 연결 링크를 E라고 할 때, $T = (V, E)$ 로 나타내기로 하자. 부모 노드 i의 자식 노드 집합 C는 노드 i로부터 $BR_{tree}=R_{PBS}/2$ 이내에 있어 연결이 존재한다.

$$C(i) = \{j \in V : i \neq j \text{ and } (i,j) \in E\} \quad (1)$$

노드 j의 부모 노드를 P(j)라고 하면, 식 (1)에서 집합 C의 모든 노드 j에 대하여 $P(j) = i$ 이다.

트리 구성 알고리즘이 실행되면 루트 노드를 포함한 각 부모 노드는 자식 노드의 정보를 가지게 되며, 말단(terminal 또는 leaf) 노드는 자식 노드로부터 통지를 받지 않으므로 부모 노드가 되지 않는다.

본 논문에서의 트리 구성 과정은 TPSN과 [9]에서 사용한 트리 구성 방법을 기초로 하지만, 다음 사항을 수정하였다.

3.2.1 트리 구성 패킷 송신 전 대기 시간

루트 노드를 제외한 모든 노드들은 부모 노드로부터 트리 구성을 위한 패킷(discovery 패킷이라고 부른다)을 받으면 부모 노드와 자신과의 거리에 따라 대기 시간을 결정하여 그 이후에 다시 트리 구성을 계속한다. 이 때 각 노드들의 대기 시간은 다음과 같이 결정한다.

1) 레벨 1 노드

루트 노드(레벨-0)로부터 트리 구성 패킷을 처음 받은 노드들(레벨-1 노드들) 중에 루트 노드와 가장 가까이 있는 노드가 트리 구성 패킷을 가장 먼저 송신하도록 한다. 나머지 레벨-1 노드들 중에 같은 레벨-1의 트리 구성 패킷을 감지한 노드는 추가적인 트리 발견에 참여하지 않는다. 일정 시간 이후에도 같은 레벨-1의 트리 구성 패킷을 감지하지 못한 노드

는 계속해서 트리 구성에 참가하여 트리 구성 패킷을 방송한다.

2) 레벨 2 이하의 노드

레벨 2 이하의 노드들은 부모 노드로부터 트리 구성 패킷을 처음 받은 노드들 중에 부모 노드와 가장 멀리 있는 노드가 트리 구성 패킷을 가장 먼저 송신하도록 한다. 즉, 트리 구성 패킷을 계속해서 전송하기 전에 다음과 같이 대기 시간(W)을 결정한다.

$$W = k * BR_{tree} / D \text{ (seconds)} \quad (2)$$

BR_{tree} : 방송 반경(m), D : 부모노드와 자신과의 거리(m), k : 상수

D는 노드 위치가 고정된 고정식 WSN인 경우에 계산에 의해서 미리 알고 있거나, 노드 위치가 변하는 동적 WSN에서는 보내어진 신호의 강도를 측정하여 거리를 계산할 수 있다. 부모 노드와의 거리에 따라 지연 시간을 다르게 부여하여 트리를 구성하는 방안은 처음 [10]에서 제안되었다.

3.2.2 트리 구성에 부모 노드로의 참여 여부

백본 노드로 참가하는 노드들은 다른 노드보다 전력 소모량이 크므로 전력을 다 소진할 경우 전체 네트워크의 수명에 영향을 끼친다. 따라서 트리 구성 과정에서 일정량 미만의 잔여 전력을 가진 노드는 백본 노드에 참가하지 않고 다른 이웃 노드에게 양보한다. 즉,

if(node's residual power > threshold) 계산된 지연 시간 후 트리 구성 패킷 방송
 else 트리 구성 패킷 방송에 참여하지 않음.

이 트리를 PBS에서의 방송 반경 BR_{PBS} 에서 동작할 때.

$$C(i) = \{k,l \in C(i) : k \neq l \text{ and } (k,l) \in E\} \quad (3)$$

이 성립한다. 즉, 한 부모 노드 아래에 있는 모든 자식 노드들은 연결 거리 이내에 있다.

3.3 제안 방안의 특징

GPA에서는 1단계에서 전체 트리를 구성한 다음, 2단계에서 부모노드를 중심으로 자식 노드간의 연결

여부를 확인하여 서로 연결되는 자식들의 그룹을 별도로 나눈다. 이 트리 구성 2단계 과정에서 루트 노드를 제외한 모든 자식 노드간의 메시지 교환이 필요하며, 또한 트리 구성 3단계에서 커버 영역이 최대가 되는 노드를 선택하기 위해 그룹의 크기 정보를 부모 노드에게 보고하는 과정에서도 메시지 전송이 추가로 필요하므로 복잡도가 증가하고, 전력 소모가 추가 소요된다.

본 제안 방안은 트리의 노드간 거리의 제한을 두어 같은 레벨의 자식 노드간의 연결을 보장하도록 트리를 구성하여 같은 레벨의 자식 노드를 한 그룹으로 구성함으로써 동시에 커버를 하도록 한다. 이렇게 하여 GPA와 그룹 수를 대등하게 하거나 더 줄인다면 메시지 전송 수 및 전력 소모를 줄일 수 있다. GPA는 고정 WSN을 가정하여 트리 구성 과정이 복잡하고 전력 소모가 크더라도 단 한 번만 시행하면 큰 부담이 없다고 하지만, 모바일 WSN에서나 노드들의 전력 소모 불균형으로 인하여 토폴로지 구성이 변화하는 환경에서는 트리를 재구성해야 할 필요성이 요구되므로 본 제안 방안이 더 효과적이다.

제안 방안의 특징을 요약하면 다음과 같다.

- 제안 방안은 PBS(또는 GPA)와 동일한 송신전력(또는 BR)을 사용하며, 차이점은 백본 트리를 구성하는 과정에서만 GPA와 달리 송신전력을 줄여 트리를 완성시킨다.

- 제안 방안은 트리의 상하 노드간 거리의 제한을 두어 같은 레벨의 자식 노드간의 연결을 보장하여 한 그룹으로 구성함으로써 GPA보다 그룹 수를 줄인다.

- GPA에서는 트리를 구성할 때 임의의 대기 시간을 사용하므로 동작할 때마다 임의의 기본 트리가 생성이 되어 PBS의 동작에 영향을 끼치지만, 제안

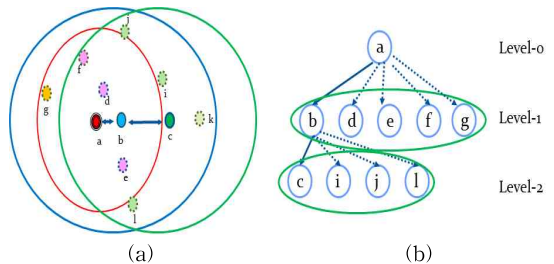


Fig. 7. Covered areas and tree level in the proposed scheme.

```

Set BRtree to BRpbs/2
if (root node)
  Broadcast a discovery-level packet(node-id, level#)
For all nodes except root node {
  if (packet received && firstly received) {
    Set level=parent node's level+1;
    if(node's residual power > threshold) {
      Distance = distance between
                    parent & node itself;
      if(level != 1) {
        Wait (k* BRtree /Distance) seconds;
      }
      Broadcast additional discovery-level packet
    }
  }
}

```

Fig. 8. Tree Construction Algorithm proposed.

방안은 가장 거리가 먼 노드를 우선 백본 노드로 결정하므로 트리가 일정하고 노드 밀도가 높을수록 우수한 트리를 형성한다.

- GPA는 백본 노드 구성과정에 더 많은 전력 소모와 트리 형성 시간이 소요되며 고정된 센서 네트워크를 가정하고 있어, 모바일 센서 네트워크나 노드 수명으로 인한 토폴로지 변화가 큰 환경에 라운드가 진행될수록 본 제안 방안이 효율적이다.

Fig. 8은 클러스터링 알고리즘을 유사코드로 나타낸 것이다.

Table 1. Parameters for simulation test

Parameters	Value
MAC	802.11
Routing Protocol	DSDV
Distance among nodes	100 m (default), 50 m, 25 m, 13 m
Transmission_range (BR)	250 m (default), 115 m
Transmit_power	0.660 W (default), 0.165 W
Receive_power	0.395 W (default), 0.099 W
Idle_power	0.035 W(default)
Deployment	3×8(default), 3×16, 3×24, 3×48
init power per node	10 J

4. 시뮬레이션

제안한 알고리즘의 동작을 검증하기 위하여 NS2 (Network Simulator)-2.35[11]을 사용하여 시뮬레이션하였으며, 기본적으로 사용된 시뮬레이션 환경은 Table 1과 같다.

시뮬레이션에서 확인한 성능 평가 변수로는 트리 구성에 필요한 전송 메시지 수, 트리의 최대 깊이 및 노드쌍 집합의 크기(그룹 수) 이다. 제안한 방법과 GPA의 성능을 비교하고자 하나, GPA 방안은 레벨 발견 과정에서 임의의 대기 시간을 사용하므로 실험할 때마다 매번 다른 형태의 트리가 형성된다. 그러므로 일정하고 동일한 조건에서 두 방안을 비교하기 위하여 노드 레벨 구성 과정을 동일하게 하였다.

4.1 기본 트리 구성

제안 방안에서는 Fig. 7의 조건을 만족하는 트리를 형성하기 위해 Fig. 8의 알고리즘을 사용하였다. Table 1의 시뮬레이션 변수 중 디폴트값은 PBS가 동작할 때의 값이며, GPA에서는 트리 구성에도 동일한 값을 사용하지만, 제안 방안에서는 전력에 관련된 변수 값에 다음과 같이 변화를 주었다. Transmission_range(BR)=115 m, Transmit_power=0.165 W, Receive_power=0.099 W.

전송 거리를 디폴트 값(250m)의 1/2이하로 제한하기 위해 노드의 송신 전력을 1/4정도로 조절하였으나 NS-2에서 송신 전력과 전송 거리를 정확히 계산하기 어려워, 실제 수신 여부를 여러 차례 확인하며 송신 전력을 조절하여 전송 거리를 115 m로 설정하였다. 만들어진 트리는 Fig. 9와 같이 레벨-5까지 구성되고, 각 레벨의 노드들 중 하나를 백본으로 결정(예, 가장 작은 번호를 가진 노드)하였다(Fig. 9-b).

4.2 제안 방안과 GPA의 트리 특성 비교

제안 방안과 GPA 방안으로 생성되는 트리로부터 다음의 성능 변수를 비교한다. 즉, 트리 구성에 소요되는 전송 메시지 수(#MSG), 트리의 최대 깊이(Max_Depth), PBS동작에 필요한 #Pair_nodes 이다. 트리의 수준을 PSTN 및 GPA 등에서 레벨로 표현하였으나, 본 논문에서는 동일한 의미로 일반적으로 많이 사용되는 깊이(depth)로 사용하였다.

Fig. 10은 제안 방안과 GPA를 사용하여 트리를

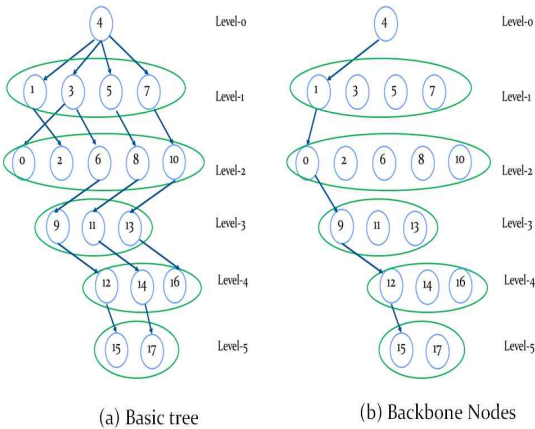


Fig. 9. Tree and backbone nodes constructed at the basic topology.

생성하는데 필요한 전송 메시지 회수와 만들어진 트리의 최대 깊이를 비교한 것이다. 노드 수를 18, 36, 72, 144로 증가시키며 트리를 생성하는데 필요한 전송 메시지 수가 제안 방안이 GPA보다 약 1/3수준임을 알 수 있으며 이는 전력 소모와 직결된다. 제안 방안의 생성된 트리의 최대 깊이가 GPA의 트리보다 표면적으로 크게 나타나 불리해 보이지만, 최종적으로 노드쌍의 수가 중요하므로 아래에 더 자세히 살펴본다.

트리 구성은 노드들의 배치 밀도에 따라 달라지므로 동일한 노드 수(18개)에서 노드간의 간격을 1/2 (즉, 노드 밀도를 1/4)로 변화시키면서 트리를 생성하고 최대 깊이를 비교하면 Fig. 11과 같다. 노드 밀도가 낮을 때는 두 방안에서 최대 깊이가 차이 있지만, 노드 밀도가 높아지면 차이가 점점 줄어들어 큰 차이가 없음을 알 수 있다.

제안 방안과 GPA의 목적은 PBS에서 사용할 노드쌍의 수를 최소화하는 것이다.

제안 방안은 한 번의 트리 구성으로 백본 노드 구성이 완료되어 노드쌍의 수가 결정된다. 즉, 제안 방안의 트리를 구성하는데 필요한 전송 메시지 수(N_{tree} (proposed))는 모든 노드가 1번씩 참가하므로 노드 수와 같다. 트리를 구성함과 함께 백본 노드가 결정이 되며 노드쌍의 수는 백본 노드(또는 트리의 최대 깊이 값)에 의해서 결정이 된다. 즉, $N_{tree}(\text{proposed}) = \text{No. of nodes}$.

한편, GPA에서는 트리를 구성하고 노드쌍 그룹을 결정하는데 3 단계의 메시지 교환이 필요하다. 1 단계에서 기본 트리를 구성하는데 제안 방안과 마찬가지로 노드 수와 동일한 전송 메시지가 필요하다. 여기에 2단계와 3단계에서 추가로 메시지 교환이 필요하며 다음 식과 같다. 즉,

$$N_{tree}(\text{GPA}) = \text{No. of nodes} + 2 \times (\text{No. of nodes} - 1) = 3 \times (\text{No. of nodes}) - 2 \quad (4)$$

첫째 항은 기본 트리 구성하는데 필요한 전송 횟수로 제안 방안과 동일하다. 여기에 GPA에서는 추가로 자식 노드들 간의 연결정보를 파악하기 위하여 루트 노드를 제외한 전 노드가 메시지를 전송하고, 연결된 자식 노드들 중에 차수가 가장 큰 노드를 선택하기 위하여 부모 노드에게 차수를 보고하기 위한 메시지 전송이 요구되므로 둘째 항이 필요하다. Fig. 12는 제안 방안과 GPA에서 생성된 트리에서 최종적으로 결정된 노드쌍 그룹의 수를 비교한 것이다.

제안 방안은 루트 노드로부터 최대 깊이 노드의 노드까지 백본 노드를 이루고 노드 수가 4이상일 때

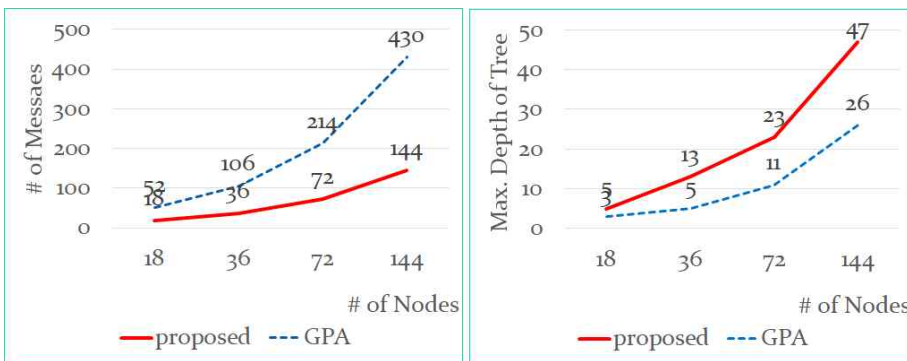


Fig. 10. Comparison of # MSG and Max_Depth of Trees constructed by two algorithms.

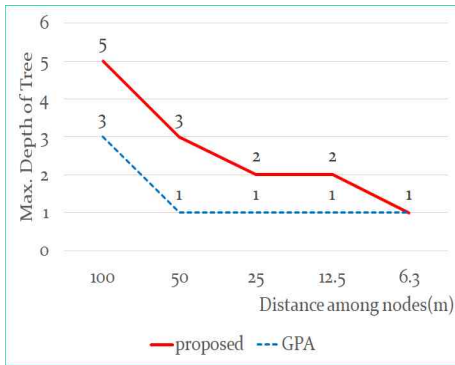


Fig. 11. Comparison of Max-Depth of Trees for two algorithms according to changing density.

(백본 노드 수 -2)만큼의 노드쌍을 결정한다. 이와 비교하여 GPA에서는 같은 레벨의 노드들 사이에 연결 그룹을 나누고, 이 중 최대 차수를 커버하는 노드를 선택적으로 노드쌍으로 결정하며 제안 방안의 백본 노드처럼 노드쌍끼리의 연결성은 없다. 최종 노드쌍 집합의 크기는 최소한 (최대 깊이-1)이며 노드 배치에 따라 동일 레벨에서 1개 이상의 그룹이 형성되어 (최대 깊이-1)보다 큰 값을 갖는다.

Fig. 12에서 나타나듯이, 제안 방안에서의 노드 수가 18과 36일 때 노드 쌍의 수가 GPA보다 약간 크게 나타났으나, 노드 수가 72 일 때는 오히려 GPA의 노드쌍 수가 더 증가하였다. 이로부터 제안 방안이 트리의 상하 노드간 거리의 제한을 두어 같은 레벨의 자식 노드간의 연결을 보장하도록 그룹을 구성함으로써, GPA보다 트리 형성 과정에서 전력 소모와 트리 형성 시간을 절약하는 장점이 있으며, 그룹 수는 대등하거나 밀도에 따라 줄어들어 동기화 라운드에

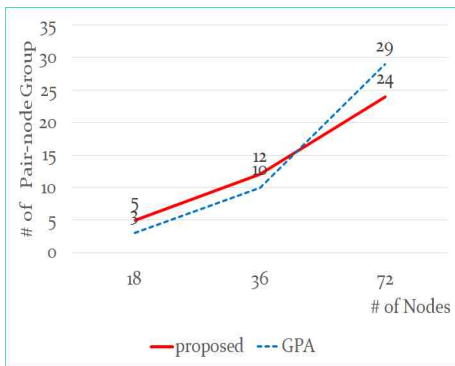


Fig. 12. Comparison of # of Pair-node groups in both algorithms according to the # of nodes.

서 전력 소모는 큰 차이가 없음을 알 수 있다.

5. 결 론

WSN에서 동기화 방안으로 널리 알려진 PBS는 노드쌍을 적절하게 결정하는 것이 중요하며, 최적의 노드쌍 집합을 결정하는 것이 NP-Complete 문제이므로 휴리스틱 알고리즘인 GPA가 제안되었다. 하지만 GPA는 복잡하고 많은 메시지 전송으로 인하여 전력 소모가 많을 뿐 아니라 토폴로지 변화가 심한 환경에는 적합하지 않다. 새로 제안한 알고리즘은 GPA보다 간단하고 메시지 전송 수를 줄여 에너지 효율적이며, 특히 토폴로지 변화가 심한 환경에서도 장기적으로 전력 부담이 줄어드는 장점이 있다.

REFERENCE

- [1] K. Noh, E. Serpedin, and K. Qaraqe, "A New Approach for Time Synchronization in Wireless Sensor Networks: Pairwise Broadcast Synchronization," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Vol. 7, No. 9, pp. 3318-3322, 2008.
- [2] S. Ganeriwal, R. Kumar, and M. Srivastava, "Timing-Synch Protocol for Sensor Networks," *SenSys'03 Proceedings of the 1st International Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, pp. 138-149, 2003.
- [3] M. Maroti, B. Kusy, G. Simon, and A. Ledeczi, "The Flooding Time Synchronization Protocol," *SenSys'04 proceedings of the 2nd International Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, pp. 39-49, 2004.
- [4] J. Elson, L. Girod, and D. Estrin, "Fine-Grained Network Time Synchronization using Reference Broadcasts," *Proceeding of the 5th Symposium on Operating Systems Design and Implementation*, pp. 147-163, 2002.
- [5] K. Cheng, K. Lui, Y. Wu, and V. Tam, "A Distributed Multihop Time Synchronization Protocol for Wireless Sensor Networks Using Pairwise Broadcast Synchronization," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Vol.

- 8, No. 4, pp. 1764-1772, 2009.
- [6] H. Wang, H. Roman, L. Yuan, Y. Huang, and R. Wang, "Connectivity, Coverage and Power Consumption in Large-scale Wireless Sensor Networks," *Computer Networks*, Vol. 75, pp. 212-225, 2014.
- [7] S. Buló and M. Pelillo, "Dominant-set Clustering: A Review", *European Journal of Operational Research*, Vol. 262, No. 1, pp. 1-13, 2017.
- [8] K. Noh, Y. Wu, K. Qaraqe, and B. Suter, "Extension of Pairwise Broadcasting Clock Synchronization for Multi-cluster Sensor Networks," *Eurasip Journal on Advances in Signal Processing*, Vol. 2008, pp. 1-10, 2008.
- [9] S. Bae, "An Energy-efficient Pair-wise Time Synchronization Protocol for Wireless Networks," *Journal of Korea Multimedia Society* Vol. 19, No. 10, pp. 1808-1815, 2016.
- [10] S. Bae, "Enhanced Tree Construction Algorithm for Timing-sync Protocol for Sensor Networks," *Journal of Advances in Computer Networks*, Vol. 3, No. 1, pp. 28-31. 2015.
- [11] The Network Simulator ns-2: Documentation, <http://www.isi.edu/nsnam/ns/ns-documentation.html> (accessed Jun., 19, 2018).



배 시 규

1998년 경북대학교 컴퓨터공학과 (박사)
1995년~현재 동양대학교 교수
관심분야: Computer Networks,
Mobile Networks,
Internet Applications,
IoT