

# 클러스터-트리 기반 LR-WPAN에서 End-to-End 지연시간을 줄이기 위한 적응적 Beacon 스케줄링 알고리즘

정회원 강재은\*, 준회원 박학래\*, 종신회원 이정규\*

## Adaptive Beacon Scheduling Algorithm to Reduce End-to-End Delay in Cluster-tree based LR-WPAN

Jae-Eun Kang\* *Regular Member*, Hak-Rae Park\* *Associate Member*,  
Jong-Kyu Lee\* *Lifelong Member*

### 요약

본 논문에서는 IEEE 802.15.4 클러스터-트리 기반 LR-WPAN(Low Rate-Wireless Personal Area Network)에서 각 노드가 데이터량의 변화에 따라 실제 데이터 수신 구간을 조절하기 위한 적응적 Beacon 스케줄링 알고리즘을 제안한다. Beacon Interval을 짧게 조절하면, 노드는 일정한 시간동안에 더 많은 양의 데이터를 수신할 수 있다. 그러나 짧은 Beacon Interval을 가진 노드는 에너지 소비가 증가하게 되므로, 다시 수신할 데이터량이 줄어들면 Beacon Interval을 길게 조절함으로써 에너지 소비를 최적화시킨다. NS-2 시뮬레이터를 이용하여 검증한 결과, 제안하는 적응적 Beacon 스케줄링 알고리즘은 고정된 Beacon Interval을 사용하는 기법에 비해, 패킷 손실률과 End-to-End 전달 지연시간 측면에서 더 나은 성능을 보인다. 따라서 본 알고리즘과 결과는 향후 클러스터-트리 기반 LR-WPAN 설계 시, 서비스의 지연시간을 보장해야 하는 응용분야에 유용하게 사용될 수 있다.

**Key Words** : IEEE 802.15.4, LR-WPAN, cluster-tree network, Beacon Interval, Adaptive BI, End-to-End delay

### ABSTRACT

In this paper, we propose an adaptive beacon scheduling algorithm to control a reception period of actual data according to variation of amount of traffic in IEEE 802.15.4 LR-WPAN(Low Rate-Wireless Personal Area Network) with the cluster-tree topology. If a beacon interval is shortened, the amount of the traffic a node receives can be increased while consumption of the energy can be also increased. In this sense, we can achieve optimal energy consumption by controlling the beacon interval when the amount of data to be received is being decreased. The result of simulation using NS-2 shows that the proposed algorithm improves performances in terms of packet loss rate and end-to-end delay compared with algorithm using a fixed beacon interval. For a design of cluster-tree based LR-WPAN managing delay-sensitive services, the proposed algorithm and the associated results can be applied usefully.

### 1. 서론

최근 유비쿼터스 네트워크가 각광을 받으면서 낮

은 속도와 저렴한 가격, 매우 긴 배터리 수명, 그리고 간단한 구조 및 연결성을 제공하는 반경 10m 이내의 소규모 무선 네트워크에 대한 관심이 높아

\* 한양대학교 컴퓨터공학과 정보통신 연구실({jekang, hrpark, jklee}@cse.hanyang.ac.kr)

논문번호 : KICS2008-11-486, 접수일자 : 2008년 11월 3일, 최종논문접수일자 : 2009년 3월 3일

지고 있다. 이러한 특성을 갖는 대표적인 무선 표준들 중에서 USN(Ubiquitous Sensor Networking)의 요구 사항인 저가격, 설치의 용이성, 항시 접속성 등을 가장 적절히 지원해 주는 기술이 IEEE 802.15.4에서 제정한 LR-WPAN(Low Rate-Wireless Personal Area Network) 표준이다<sup>1)</sup>.

IEEE 802.15.4 표준은 기본적으로 성형 토폴로지를 지원하고, 네트워크의 확장을 위해서 메쉬(mesh) 토폴로지와 클러스터-트리 토폴로지를 추천하고 있다<sup>2)</sup>. 간단한 구조를 갖는 홈 네트워킹 또는 PC 및 TV 주변 장치 관리를 위한 저전력의 소규모 네트워크를 구성하기 위해서는 주로 성형 토폴로지를 사용하는 반면, 넓은 지역에서 사용되는 산업용 감시 시스템 등을 위해서는 클러스터-트리 구조가 보다 효과적으로 응용되고 있다. 특정한 예로서, 소규모 지역에서 수집된 홈 보안 또는 개인의 건강관리와 관련된 정보들을 한 곳으로 수집하기 위해서는 성형 토폴로지만으로 유지관리가 충분히 가능하다. 그러나 일정 반경 내의 다수의 주택을 위한 소량의 원격 검침 또는 원격 계량 정보를 저전력으로 수집하기 위해서는 802.15.4 LR-WPAN을 클러스터-트리 토폴로지로 구성함으로써 효율적으로 운용할 수 있다.

메쉬 토폴로지와 달리, 클러스터-트리 토폴로지 형태의 LR-WPAN을 형성할 경우, 통신하는 노드 간에는 서로 계층 구조를 이루어 부모-자식 관계를 생성한 후, 부모 노드가 발생시키는 제어 프레임에 의해 자식 노드는 동기화 된다. 따라서 동기화된 자식 노드들은 제어 프레임에 설정되어 있는 Beacon 스케줄링 정보 및 Duty Cycle에 따라 Active 구간과 Inactive 구간을 반복함으로써 불필요한 전력 낭비를 줄일 수 있다. 또한 트리의 구조적인 성질에 의해, Beacon 프레임을 이용한 효율적인 네트워크를 제어 가능하며, 데이터 전송 시 목적노드의 위치 파악이 용이하고, 각 노드는 목적 노드까지의 경로를 탐색하는 과정 없이 최적의 경로를 따라 원활한 통신을 하게 된다. 그러나 클러스터-트리 구조에서 네트워크의 중추 역할을 하는 중심 노드로 데이터가 수집되는 경우, 중심 노드 근처의 노드일수록 송·수신하게 되는 트래픽의 양이 많아지므로 상대적으로 많은 에너지를 소비하게 된다. 또한 많은 양의 트래픽은 End-to-End 전달 지연시간의 증가를 가중시키므로 만족할 만한 서비스의 질을 기대하기 어렵다. 그리고 이외에, 채널 접근 방식으로 CSMA/CA(Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) 프로토콜을 사용하므로, 한정된 자원에 접근하는 다

수의 경쟁 노드로 인해 전송하는 패킷의 충돌율이 높아져서 패킷 손실률이 커진다.

따라서 본 논문은 네트워크의 확장을 위해서 IEEE 802.15.4 클러스터-트리 네트워크를 적용할 경우, 각 노드가 수신하는 데이터량을 고려하여 Beacon Interval을 적응적으로 조절함으로써, 네트워크 내의 패킷 손실률을 줄이고 지연시간을 감소시키는데 목적이 있다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. II장에서는 IEEE 802.15.4 LR-WPAN의 슈퍼프레임 구조와 클러스터-트리 네트워크 구조에서의 데이터 전송과정에 대해서 설명한다. III장에서는 제안하는 적응적 Beacon 스케줄링 알고리즘에 대해서 소개하고, IV장에서는 고정된 Beacon Interval을 사용하는 모델과 데이터량의 따라 Beacon Interval을 적응적으로 조절하는 기법의 성능을 비교 평가한다. 마지막으로 V장에서는 본 논문의 결론을 맺는다.

## II. IEEE 802.15.4 LR-WPAN

IEEE 802.15.4 LR-WPAN은 저속으로 이동하는 근거리 무선 통신에서 주로 사용되며, 가격이 저렴하고 적은 전력으로 데이터 전송이 가능하다는 장점이 있다. 채널 접근 방식으로는 경쟁 기반의 CSMA/CA 프로토콜을 현재 표준에서 채택하고 있다. 클러스터-트리 기반의 LR-WPAN은 PAN Coordinator, Coordinator, 일반 Device 역할을 하는 노드들로 구성되는데, PAN Coordinator는 클러스터 내의 모든 데이터가 수집되는 노드로서 클러스터-트리 네트워크 전체를 관리하는 노드이다. PAN Coordinator 하위의 Coordinator 들은 자신의 하위노드인 일반 Device들로부터 정보를 모으고 자신이 보낼 데이터와 합쳐서 상위의 PAN Coordinator에게 전달하는 노드이다. 반면에, 또 다른 기본 토폴로지인 성형 네트워크는 하나의 Coordinator가 다수의 일반 Device와 직접 통신을 간단한 구조이다. 각 노드는 2가지 타입, FFD(Full Function Device)와 RFD(Reduced Function Device) 중에 한 가지 타입의 기기이다. FFD는 FFD와 RFD 모두 통신할 수 있으며, PAN Coordinator, Coordinator 또는 Device로서의 역할을 할 수 있다. 반면에 RFD는 FFD에 한하여 통신할 수 있으며, 오로지 Device로서의 역할만 할 수 있다. 또한 이러한 노드들은 기본적으로 성형 토폴로지 형태로 연결되는데, 최근에는 네트워크의 확장을 위해서 클러스터-트리 토폴로지에 대해 연구가 이루어지고 있다<sup>1)</sup>.

### 2.1 슈퍼프레임 구조

IEEE 802.15.4 LR-WPAN에서 Coordinator는 네트워크 내부에 있는 Device들에게 네트워크 기기의 동기화, Beacon 주기, 네트워크 식별자 등과 같은 정보가 포함되어 있는 Beacon 프레임을 주기적으로 브로드캐스팅 한다. 표준에서는 Beacon과 Beacon 프레임 사이의 구간을 슈퍼프레임이라고 정의하며, BO(Beacon Order) 값에 의해 결정되는 BI(Beacon Interval) 값이 슈퍼프레임의 길이를 나타낸다. 또한 SO(Superframe Order) 값에 의해 결정되는 SD(Superframe Duration) 구간은 실제로 데이터가 전송되는 Active 구간으로 BI 값과 상관없이 항상 16개의 슬롯으로 나누어지며, 이 구간은 다시 CSMA/CA 채널 접근 방식으로 데이터 송수신이 이루어지는 CAP(Contention Access Period) 구간과 경쟁 과정 없이 Coordinator가 특정 단말을 위해 슬롯을 할당한 CFP(Contention Free Period) 구간으로 나누어진다. CFP 구간은 VoIP와 같이 지연시간에 민감한 특성을 갖는 트래픽의 QoS(Quality of Services)를 보장하기 위해 미리 할당해 놓을 수 있다<sup>[3,4]</sup>.

그림 1의 IEEE 802.15.4 LR-WPAN의 슈퍼프레임 구조에서 Superframe Duration SD와 Beacon Interval BI를 계산하는 식은 다음과 같다.

$$SD = sBaseSuperframeDuration \times 2^{SO} \quad (1)$$

$$= aNumSuperframeSlot \times aBaseSlotDuration \times 2^{SO}$$

$$= 16 \times 60 \times 2^{SO} \text{ Symbol}$$

$$BI = sBaseSuperframeDuration \times 2^{BO} \quad (2)$$

$$= aNumSuperframeSlot \times aBaseSlotDuration \times 2^{BO}$$

$$= 16 \times 60 \times 2^{BO} \text{ Symbol}$$

위의 식에서 SO와 BO는 다음 식 (3)과 같이 0에서 14사이의 값을 가지며, BO와 SO 사이의 관계에 따라 하나의 프레임 내에서 Active 구간의 비율을 나타내는 Duty Cycle은 식 (4)과 같이 계산되어진다.

$$0 \leq SO \leq BO \leq 14 \quad (3)$$

$$Duty Cycle (\%) = 2^{SO-BO} * 100 \quad (4)$$

BO와 SO 값의 차이에 따라, 하나의 슈퍼프레임 내에서의 실제로 데이터 전송이 발생하는 Active 구간의 비율을 구할 수 있는데, 이것을 Duty Cycle이라고 한다. 예를 들어, SO와 BO의 값이 같을 때 Duty Cycle이 100%가 되며, 슈퍼프레임의 전 구간이 Active 구간이 됨을 뜻한다. 이러한 Duty Cycle은 노드의 수명을 연장시키기 위해 제안되었는데, 노드는 Active와 Inactive 구간을 반복하면서 에너지 소모를 줄일 수 있다<sup>[5,6]</sup>. 또한, 취할 수 있는 값의 범위를 벗어나 SO와 BO 값이 모두 15의 값을 갖게 되면 Non Beacon-Enabled Network 방식으로 동작하며 슈퍼프레임 구조를 갖지 않게 된다.

### 2.2. 클러스터-트리 구조에서 데이터 전송 과정

그림 2는 클러스터-트리 기반의 LR-WPAN에서 노드 간의 데이터 전송 시점에 대한 예를 보여준다. 서로 다른 Beacon Interval을 갖는 세 노드 A, B, C가 있을 때, 노드 B는 클러스터-트리 네트워크에서 자신보다 상위 계층인 부모노드 A와 하위 계층인 자식 노드 C와 데이터를 주고받는다. 이 때, 시간 t1에서 데이터가 발생한 노드 B는 시간 t2에서 부모노드 A로부터 Beacon을 수신한 후에 데이터를 전송할 수 있다. 반면에, 자식노드 C에게 데이터를 전송하는 경우는 자식노드 C가 노드 B의 Beacon Interval을 알고 있으므로, 노드 B는 시간 t1 이후에 처음 발생하는 Active 구간인 시간 t3에서 자식 노드 C에게 데이터를 전송할 수 있다. 따라서 상위 계층으로 데이터가 모이는 대부분의 환경에서 부모-자식 노드 간의 한 홉(one-hop)에 해당하는 데이터 전송 시, 지연시간은 최대 부모의 Beacon Interval만큼 발생한다<sup>[7,8]</sup>.

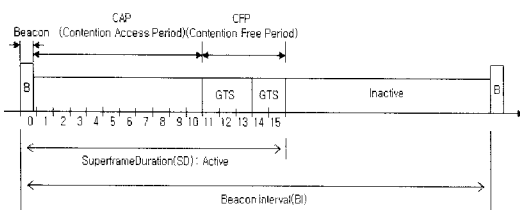


그림 1. IEEE 802.15.4 LR-WPAN 슈퍼프레임 구조

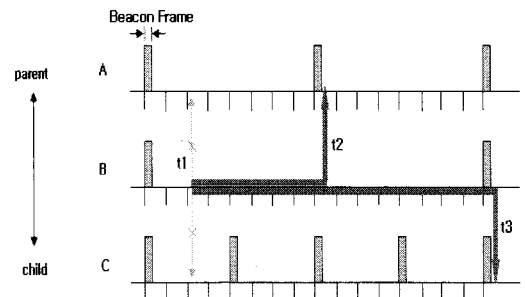


그림 2. 클러스터-트리 LR-WPAN에서 데이터 전송 타이밍

### III. 적응적 Beacon 스케줄링 알고리즘

클러스터-트리 기반의 LR-WPAN에서는 PAN Coordinator에 가까운 노드일수록 트래픽이 집중되는 현상이 발생한다. 또한 IEEE 802.15.4 LR-WPAN은 채널 접근 방식으로 CSMA/CA 방식을 사용하고 있으므로, 데이터를 전송하기 위해 채널 접근을 시도하는 경쟁 노드의 수가 많아지게 되면 데이터의 충돌로 인해 재전송이 증가하게 된다. 이것은 에너지 소모를 가중시키며, 지연시간을 늘어나게 한다<sup>[9]</sup>. 따라서 본 장에서는 데이터량에 따라 Beacon Interval을 적응적으로 변화시키는 알고리즘을 제안함으로써, 채널 경쟁을 하는 노드의 수를 줄이고 데이터의 End-to-End 전달 지연시간을 최소화하고자 한다.

#### 3.1 데이터량에 따른 Beacon 스케줄링

각 노드는 전달 지연 시간과 패킷 손실률을 최소화하기 위해서, 수신하는 데이터의 정확한 양과 변화율을 측정하고 이를 수용하기에 충분한 자원을 할당할 필요가 있다. 대부분의 클러스터-트리 기반 LR-WPAN의 응용분야는 중앙의 PAN Coordinator로 주변 정보가 수집되므로, 각 Coordinator는 하위 노드들로부터 전송되는 데이터량을 측정한다.

그림 3은 특정 Coordinator가 슈퍼프레임 동안에 트래픽 수신 상황을 보여준다.  $i$ 번째 슈퍼프레임에서 Coordinator가 수신하는 총 데이터량을  $S_i$ 라고 하면,  $S_i$ 은 다음과 같다.

$$S_i = \sum_{j=1}^n Data_j \tag{5}$$

슈퍼프레임이 반복될 때마다 Coordinator는 매 슈퍼프레임에서 수신하는 데이터량을 측정할 수 있으므로, 이 데이터량의 변화율에 따라 Beacon Interval을 조절한다. 현재 슈퍼프레임에서의 데이터량과 이전 슈퍼프레임에서의 데이터량을 비교하여, 데이터량의 증감에 따라 적응적으로 계산되는 Beacon Interval은 다음 제안하는 알고리즘에 의해 결정되는  $BO$  값에 의해 달라진다.

표 1은 특정 노드가 이웃한 두 슈퍼프레임에서

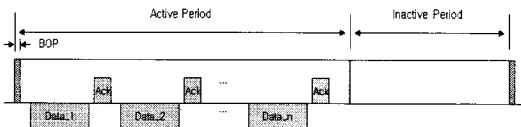


그림 3. Coordinator의 데이터량 측정

수신한 데이터량의 비를 이용하여  $BO$  값을 결정하는 기본 알고리즘이다. 식 (2)의  $BI$  계산식에서 Beacon Interval은  $BO$  값이 1만큼 증가 할 때마다 2배씩 늘어나므로, 제안하는 알고리즘은 데이터량의 상대적인 변화율에 밀어 2인 로그를 취한 결과를  $BO$  값 갱신에 이용한다. 만약, 현재의 데이터량에 비해 데이터량이 2배 늘어나게 되면, 현재의  $BO$  값을 1만큼 감소시켜서 Beacon Interval을 반으로 줄여서 더 많은 데이터를 전송할 수 있도록 한다.

그러나 데이터량이 급격히 변화하지 않아 현재 슈퍼프레임과 이전 슈퍼프레임 비교값이 다음 식 (6)과 같은 범위에 있어서  $BO$  값이 유지되는 경우에는, 서서히 데이터량이 증가하거나 감소하는 경우를 대비하기 위해서 다수의 슈퍼프레임에 걸쳐서 구간 변화율에 의해  $BO$  값을 결정한다.

$$\log_2 \frac{1}{2} < \log_2 \left( \frac{S_i}{S_{i-1}} \right) < \log_2 2 \tag{6}$$

표 1.  $BO$  값을 결정하는 기본 알고리즘

```

if  $\log_2 \left( \frac{S_i}{S_{i-1}} \right) \geq \log_2 2$ 
     $BO \leftarrow BO - \left\lceil \log_2 \left( \frac{S_i}{S_{i-1}} \right) \right\rceil$ 
else if  $\log_2 \left( \frac{S_i}{S_{i-1}} \right) \leq \log_2 \frac{1}{2}$ 
     $BO \leftarrow BO + \left\lceil \log_2 \left( \frac{S_i}{S_{i-1}} \right) \right\rceil$ 
else
     $BO \leftarrow BO$ 
    
```

표 2. 데이터의 변화폭이 적을 경우  $BO$  값을 결정하는 알고리즘

```

 $r \leftarrow r \times r_i$ 
if  $\log_2 r \geq \log_2 2$ 
     $BO \leftarrow BO - \left\lceil \log_2 \left( \frac{S_i}{S_{i-1}} \right) \right\rceil$ 
     $r \leftarrow 1$ 
else if  $\log_2 r \leq \log_2 \frac{1}{2}$ 
     $BO \leftarrow BO + \left\lceil \log_2 \left( \frac{S_i}{S_{i-1}} \right) \right\rceil$ 
     $r \leftarrow 1$ 
else
     $BO \leftarrow BO$ 
    
```

현재  $i$ 번째 슈퍼프레임과 이전 슈퍼프레임에서 노드가 수신하는 데이터량의 비를  $r_i$ 라고 하면,  $r_i$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$r_i = \frac{S_i}{S_{i-1}} \quad (7)$$

따라서 다수의 슈퍼프레임 동안에  $BO$  값의 변화가 없을 때에는, 표 2의 알고리즘과 같이  $r$  값을 두어 매 슈퍼프레임에서의 데이터 변화율에 대한 정보를 남겨둔다. 예를 들어,  $r$  값이 2가 되면 지난  $BO$  값 변경시점과 비교해서 수신하는 데이터량이 2배 늘어난 것이므로,  $BO$  값을 하나 줄여서 Beacon Interval을 반으로 줄이면 일정한 시간 동안에 2배의 데이터를 수신할 수 있게 된다. 그리고  $r$  값은 다시 1로 초기화 시켜서 다음 데이터량 변화를 감지할 수 있도록 한다.

### 3.2 Beacon Interval 조절의 예

클러스터-트리 기반의 LR-WPAN에서 각 Coordinator는 자신이 수신한 데이터량을 고려하여 앞 절에서 제안한 알고리즘으로  $BO$  값을 조절할 수 있다. 그리고 이  $BO$  값은 식 (2)에서와 같이 Beacon Interval을 계산하기 위해 이용되어진다.

그림 4는 수신하는 데이터량에 따라 조절되는 Beacon Interval의 예를 보여준다. 현재  $i$ 번째 슈퍼프레임은 시간  $t_1$ 을 슈퍼프레임 시작 시점으로 갖는  $BO$  값과  $SO$  값의 차가 2인 Duty Cycle이 25%인 경우를 나타낸다. 이 때 수신하는 데이터량이  $S_i$ 일 때, 이전 슈퍼프레임에서 수신한 데이터량과 변화가 크지 않을 경우에는 다음 번 ( $i+1$ )번째 슈퍼프레임의 Beacon 프레임을 전송할 때, ( $i+2$ )번째 슈퍼프레임의 시작 시점이 현재 Beacon Interval을 유지하는  $t_4$  시점임을 포함해서 보낸다. 그러나  $i$ 번째 슈퍼프레임에서 수신한 데이터량  $S_i$ 이 이전의 데이터량에 비해 2배 늘어나게 되면 ( $i+2$ )번째 슈퍼프레임의 시작 시점은 시간  $t_4$ 가 아닌 시간  $t_3$ 가 되고, 반면에 데이터량이 반으로 줄어들면, 시간  $t_5$

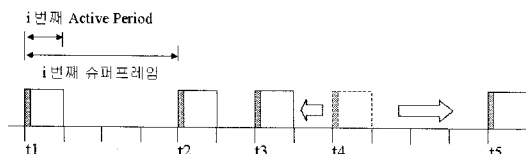


그림 4. 데이터량에 따른 Beacon Interval의 조절 예

로 바뀌게 됨을 Coordinator는 ( $i+1$ )번째 Beacon 프레임을 통해서 하위노드들에게 알리게 된다.

또한  $BO$  값이 달라짐에 따라 각 슈퍼프레임의 Duty Cycle은 달라졌지만, 실제 Active 구간의 길이는 달라지지 않았다. 따라서 수신하는 데이터량의 증가로  $BO$  값이 감소하게 되면, Beacon Interval이 짧아지게 되므로 일정한 시간 동안 더 많은 슈퍼프레임이 생기게 된다. 이는 노드가 더욱 자주 데이터를 수신할 수 있도록 하여 패킷 손실을 최소화하며, 하위 노드로부터 수신하는 데이터의 지연시간을 줄일 수 있다. 하위 노드에서 발생한 트래픽의 최대 지연시간은 상위 노드의 Beacon Interval과 같으므로, 네트워크 내에 트래픽이 많아 Beacon Interval을 줄이게 되면 결과적으로 End-to-End 패킷 전달 지연시간이 줄어들게 된다. 또한 Active 구간의 증가로 CSMA/CA 프로토콜로 채널 접근을 하는 노드들의 경쟁률을 낮춤으로써, 충돌로 인한 재전송도 줄이는 효과가 생긴다. 그러다가 수신해야 하는 데이터량이 줄어들면 Beacon Interval을 다시 늘리게 되므로 고정된 Beacon Interval을 적용하는 네트워크와 유사한 전달 지연시간과 에너지 소비 특성을 가지게 된다. 즉, 데이터량에 따라 적응적으로 Beacon 스케줄링을 함으로써, 클러스터-트리 기반의 LR-WPAN에서 패킷 손실률을 최소화하고 End-to-End 전달 지연시간을 줄일 수 있다. 또한 지연시간을 줄이기 위해 Beacon Interval을 줄이면 에너지 소비가 증가하는 단점이 있지만, 적응적으로 Beacon Interval을 조절하기 때문에 지연시간을 보장하는데 있어서 에너지 소비를 최적화 할 수 있다.

## IV. 성능 평가

제안하는 데이터량을 고려한 적응적 Beacon 스케줄링 알고리즘의 성능을 평가하기 위해, NS-2 시뮬레이터를 이용하여 데이터량에 따른 패킷 손실률과 End-to-End 지연시간을 측정하기 위한 모델을 제시한다. 우선 기본적으로 IEEE 802.15.4 LR-WPAN 표준에서 정의하고 있는 시스템 모델을 그대로 적용하고 다음과 같은 가정을 둔다. 첫째, 클러스터-트리 네트워크에서 멀티 홉(multi-hop) 전송이 이루어지며 각 노드에서 PAN Coordinator로 데이터가 수집되는 상향 링크만을 고려하였다. 둘째, 클러스터-트리 네트워크에서 Beacon 프레임의 충돌을 방지하기 위해 BOP(Beacon-Only Period)를 사용하였다<sup>[10]</sup>. 셋째, 노드들은 동일한 데이터 전송 범위를 가지고

있으며 일정한 반경을 가지고 고정되어있다. 넷째, 성능평가 도중 클러스터-트리 네트워크 외부로 이탈하고, 새로 생성되는 노드는 없다고 가정한다. 마지막으로, 각 노드는 평균 발생률이  $\lambda$ 인 Poisson 분포로 데이터를 생성한다. 본 논문에서는 하나의 PAN Coordinator를 중심으로 각각 10개, 20개의 노드들이 구성하는 클러스터-트리 네트워크 내에서 성능을 평가한다. 그 이외의 시스템 파라미터는 다음 표 3과 같다.

그림 5와 6은 하나의 PAN Coordinator를 중심으로 각각 10개, 20개의 노드들이 클러스터-트리 기반의 LR-WPAN를 형성했을 때, 트래픽 변화에 따라 고정된 Beacon Interval을 사용하는 모델과 제안하는 Beacon 스케줄링 알고리즘에 따라 매 프레임마다 Beacon Interval을 적응적으로 변경하는 모델에 대해서 패킷 손실률을 측정하였다. 트래픽이 증가하면 할수록 두 모델에서의 패킷 손실률의 차이는 점점 커진다. 클러스터-트리 기반의 LR-WPAN에서는 트래픽의 발생률이 높을수록 중앙 PAN Coordinator

표 3. 시뮬레이션 파라미터.

Item	Value
Area	50 m×50 m
Transmission rate of data frames	250 Kbps
Transmission Range	15 m
Initial MAC beacon order	6
MAC superframe order	3
PAN Coordinator	1
Number of nodes	10, 20
Data frame size	50 bytes
Conductive power	10 mW

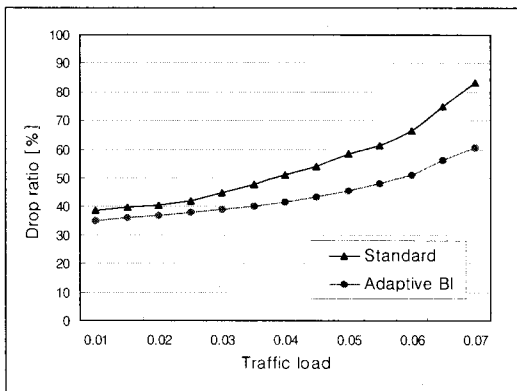


그림 5. Traffic Load 증가에 따른 패킷 손실률 (노드수=10)

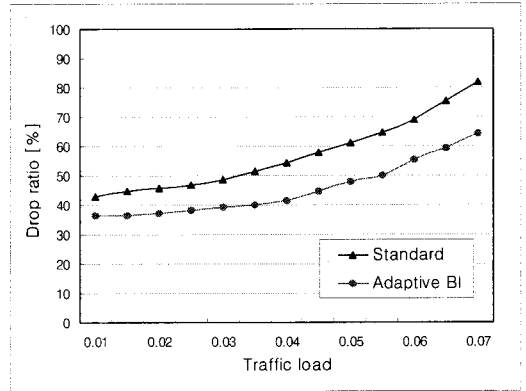


그림 6. Traffic Load 증가에 따른 패킷 손실률 (노드수=20)

근처의 노드들이 수신해야 하는 트래픽이 급격히 늘어나게 된다. 그러나 이 때, 데이터량과 상관없이 고정된 BO 값을 사용할 경우, 한정된 CAP 구간에서 전송을 시도하는 트래픽들 간에 충돌이 발생함으로써 패킷이 손실되는 현상이 발생하게 되고, 트래픽이 많아질수록 패킷 손실률도 더욱 증가하게 된다. 즉, 이와 같이 패킷의 손실이 발생하는 이유는 하위 노드로부터 전송되는 데이터량에 비해 노드가 데이터를 수신할 수 있는 Active 구간이 짧기 때문이다. 따라서 제안하는 기법에서는 수신하는 데이터량이 많은 경우 Beacon Interval을 짧게 조절하므로, 일정한 시간 동안에 Active 구간을 더 할당하여 데이터의 충돌율을 줄임으로써 패킷 손실률을 줄일 수 있다.

그림 7과 8은 각각 PAN Coordinator를 중심으로 네트워크 내의 노드의 수가 10개, 20개 일 때, 트래픽의 변화에 따른 평균 지연시간을 보여준다. 기본적으로 클러스터-트리 기반의 LR-WPAN에 트

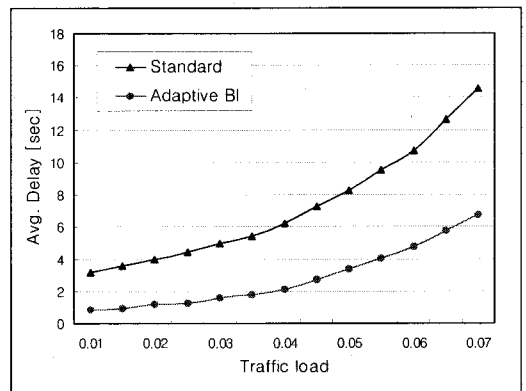


그림 7. Traffic Load 증가에 따른 평균지연시간(노드수=10)

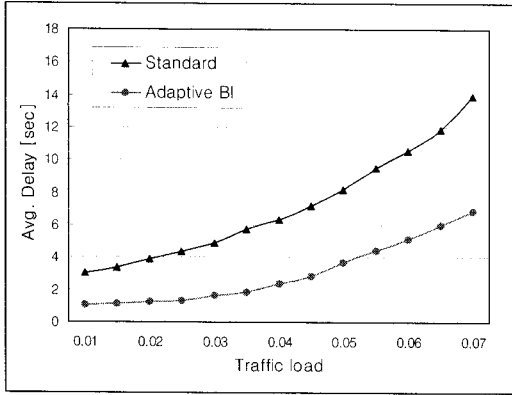


그림 8. Traffic Load 증가에 따른 평균지연시간(노드수=20)

래픽이 증가하게 되면 한정된 자원을 다수의 노드들이 공유하므로 End-to-End 전달 지연시간은 증가하게 된다. 그러나 그림 7과 8에서 볼 수 있듯이, 기존의 고정된 Beacon Interval을 적용하는 경우에 비해 제안하는 기법의 지연시간이 더 적게 발생한다. 실제로 노드 간의 전달 지연시간은 상위노드의 Beacon Interval에 영향을 받는데, 수신하는 데이터량이 증가하면 Beacon Interval이 짧아져서 보다 짧은 시간 내에 Active 구간이 발생하므로 지연시간을 줄일 수 있다. 또한 일정한 시간동안에 더 자주 데이터를 수신할 수 있으므로, 많은 데이터량으로 인해 길어질 수 있는 지연시간을 데이터량과 상관없이 유지할 수 있다. 따라서 클러스터-트리 기반의 LR-WPAN 내에 트래픽 발생률이 증가하여 상위노드가 수신해야 하는 데이터량이 많아져도 실제로 지연시간이 크게 늘어나지 않는 이유는 Beacon Interval의 주기가 짧아졌기 때문이다. 그러나 제안하는 기법은 이와 같이 End-to-End 전달 지연시간을 보장하는 반면에, 데이터량이 많을 때에 더 짧은 주기로 Active 구간을 제공하므로 에너지 소비량이 커지는 단점이 있다.

그림 9와 10은 트래픽의 변화에 따른 노드의 에너지 소비를 보여준다. 에너지 소비는 수명을 다하는 노드가 처음 발생하는 시점으로 측정하였으며, 제안하는 기법에서는 데이터량에 따라 동적으로 Beacon Interval을 조절함으로써 패킷 손실률을 줄이고 있으므로 각 노드는 더 많은 에너지를 소비하게 된다. 특히, 많은 양의 데이터를 수집하는 PAN Coordinator에 인접한 노드일수록 에너지 소비량이 커지게 된다. 또한 평균적으로 같은 양의 데이터를 발생시키는 노드들이 존재하는 네트워크에서는 클러

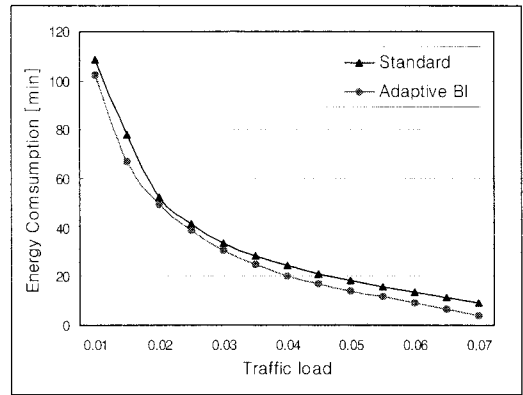


그림 9. Traffic Load 증가에 따른 에너지 소비(노드수=10)

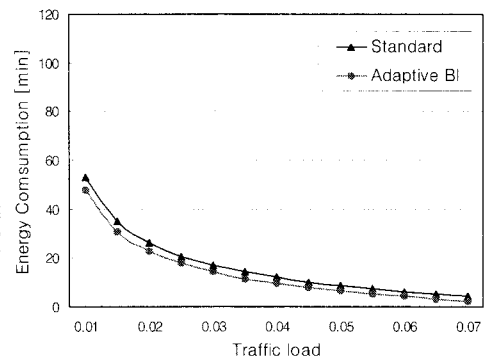


그림 10. Traffic Load 증가에 따른 에너지 소비(노드수=20)

스터-트리를 구성하고 있는 노드의 수가 많으면 많을수록 상위 노드들의 에너지 소비가 늘어남으로써, 노드의 수명을 더욱 짧아짐을 알 수 있다.

IEEE 802.15.4 LR-WPAN을 클러스터-트리 토폴로지로 구성했을 때, 가장 큰 장점은 네트워크의 확장이 용이하다는 것이다. 간단한 구조를 갖는 성형 토폴로지에 비해 관리가 쉽지는 않지만, 비교적 넓은 지역에서 저용량의 데이터를 저전력으로 수집하기에 유리한 특성을 가지고 있다. 따라서 최근 들어, 원격 검침 또는 계량과 같은 응용 분야에 적합한 구조로 거론되고 있다.

## V. 결 론

IEEE 802.15.4 LR-WPAN을 확장하기 위해 고려된 클러스터-트리 토폴로지는 PAN Coordinator에 인접한 노드일수록 트래픽이 집중되는 현상이 발생한다. 따라서 각 노드의 위치와 역할에 상관없이 동

일한 Beacon Interval을 사용하게 될 경우에는 상위 노드일수록 데이터의 충돌율이 증가하며 재전송을 인해 지연시간이 늘어남으로써, 네트워크 내의 트래픽을 원활하게 처리할 수 없게 된다. 따라서 본 논문에서는 각 노드가 데이터량에 따라 Beacon Interval을 적응적으로 조절함으로써, 전달되는 패킷의 손실률을 최소화하고 End-to-End 전달 지연시간을 줄이는 Beacon 스케줄링 기법을 제안하였다. 또한 NS-2 시뮬레이터를 이용한 성능 평가 결과, 패킷 손실률과 평균 지연시간 측면에서 성능이 개선되는 것을 확인하였다. 제안하는 기법은 각 노드가 수신하는 데이터량의 분산이 크고, End-to-End 지연시간에 민감한 데이터들이 전송되는 환경에서 더욱 유리하게 적용될 수 있다.

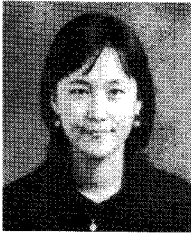
### 참 고 문 헌

- [1] "IEEE Standard 802.15.4 Technical report," May 2003.
- [2] Anis Koubaa, Andre Cunha and Mario Alves, "A Time Division Beacon Scheduling Mechanism for IEEE 802.15.4/Zigbee Cluster-Tree Wireless Sensor Networks," Euromicro Conference on Real-Time Systems (ECRT 2007), pp. 125-135, July 2007.
- [3] Sofie Pollin, Mustafa Ergen, Sinem Coleri Ergen, Bruno Bougard, Liesbet Van Der Perre, Francky Catthoor, Ingrid Moerman, Ahmad Bahai and Pravin Varaiya, "Performance Analysis of Slotted Carrier Sense IEEE 802.15.4 Medium Access Layer," IEEE Transactions on Wireless Communications, Volume 7, Issue 9, pp. 3359-3371, Sep. 2008.
- [4] Anis Koubaa, Mario Alves and Eduardo Tovar, "A comprehensive simulation study of slotted CSMA/CA for IEEE 802.15.4 wireless sensor networks," IEEE(Institute of Electrical and Electronics Engineers), pp. 183-192, June 27.
- [5] Mario Neugebauer, Jorn Plonnigs and Klaus Kabitzsch, "A new beacon order adaptation algorithm for IEEE 802.15.4 networks," IEEE Proceedings of the Second European Workshop on Wireless Sensor Networks (EWSN 2005), pp. 302-311, 2005.
- [6] Shiann-Tsong Sheu, Yun-Yen Shih and Lu-Wei Chen, "An adaptive interleaving access scheme (IAS) for IEEE 802.15.4 WPANs," IEEE Vehicular Technology Conference (VTC 2005), Volume 3, pp. 1523-1527, Jun. 2005.
- [7] Diba Mirza, Maryam Owrang and Curt Schurgers, "Energy-efficient wakeup scheduling for maximizing lifetime of IEEE 802.15.4 networks," International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (WICOM 2005), pp. 130-137, July 2005.
- [8] Gang Ding, Zafer Sahinoglu, Philip Orlik, Jinyun Zhang and Bharat Bhargava, "Tree-Based Data Broadcast in IEEE 802.15.4 and ZigBee Networks," IEEE Transactions on Mobile Computing, Volume 5, Issue 11, pp. 1561-1574, Nov. 2006.
- [9] Junkeun Song, Kee-Young Shin, Misun Yu, JinWon Kim and PyeongSoo Mah, "NACA: A New Adaptive CSMA/CA Algorithm of IEEE 802.15.4 in Beacon-enabled Networks," International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT 2007), Volume 1, pp. 266-269, Feb. 2007.
- [10] Ho-In Jeon, Yeonsoo Kim, "BOP (Beacon-Only Period) and Beacon Scheduling for MEU (Mesh-Enabled USN) Devices," International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT 2007), Volume 2, pp. 1139-1142, Feb. 2007.



강재은 (Jae-Eun Kang)

정회원



2001년 2월 한양대학교 전자  
컴퓨터 공학부 졸업

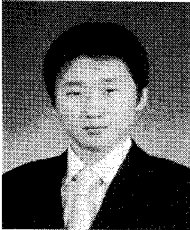
2003년 2월 포항공과대학교 전  
자전기공학부 석사

2004년 3월~현재 한양대학교  
컴퓨터공학과 박사과정

<관심분야> 차세대 이동통신,  
광대역 무선 통신망

박학래 (Hak-Rae Park)

준회원



2007년 2월 한서대학교 전자  
통신 공학과 졸업

2007년 3월~현재 한양대학교 컴  
퓨터공학과 석사과정

<관심분야> 차세대 이동통신,  
센서 네트워크, 광대역 무선  
통신망

이정규 (Jong-Kyu Lee)

종신회원



1979년 2월 한양대학교 전자  
공학과 졸업

1986년 5월 미국 UCLA 전자  
공학과 석사

1989년 2월 미국 UCLA 전자  
공학과 공학박사

1990년 2월~현재 한양대학교

컴퓨터공학과 교수

1979년 3월~1984년 8월 국방과학 연구소 연구원

1989년 3월~1990년 2월 삼성전자 정보통신 연구소  
수석 연구원

<관심분야> 차세대 이동통신, 광대역 무선 통신망