

# A Hexagon Model-based Efficient Beacon Scheduling Approach for Wireless Sensor Networks

Taekkyeun Lee\*

## Abstract

In this paper, we propose a hexagon model-based efficient beacon frame scheduling approach for wireless sensor networks. The existing beacon frame scheduling approaches use a lot of slots and subslots for the beacon frame scheduling. Thus, the data from source nodes are not efficiently delivered to a sink node. Also in case a sink node needs to broadcast a beacon frame to the nodes in the network, delivering the beacon frame to the network nodes is not efficient as well. Thus, to solve the problem, we use a hexagon model to find the number of slots and subslots for the beacon frame scheduling. By using them for the beacon frame scheduling, the proposed approach performs better than other approaches in terms of the data transmission delay, the number of received data, the beacon transmission delay and the number of relaying the beacon frames.

▶ Keyword: Beacon, Scheduling, Slot, Collision, Cluster Tree, Wireless Sensor Networks

## 1. Introduction

무선 센서네트워크는 저전력으로 운용되고 무선 통신이 가능한 센서 노드들로 구성되며 일반적으로 센서 노드는 주변 환경에 대해서 모니터링한 결과를 무선 통신을 통해서 싱크 노드에게 전송한다. 특히 무선 센서네트워크는 환경 모니터링[1], 헬스케어[2-3], 감시(Surveillance)[4-6] 그리고 군사분야[7-8] 등에 많이 응용된다. 그러나 센서 네트워크 전역에 걸쳐서 노드들로부터 데이터가 수집되며 또한 많은 데이터가 싱크 노드로 전송되는 경우에는 효율적인 전송 기법이 필요하다. 그래서 노드의 Active/Sleep 기간(Period)에 대한 정보를 포함하는 비콘 프레임(Beacon Frame)을 이웃 노드들에게 전송하여 데이터 전송을 위한 노드들 간에 동기화(Synchronization)를 하고 이러한 동기화를 통하여 노드들 간에 효율적이고 안전한 비콘 프레임 전송을 가능하게 하는 비콘 프레임 전송 스케줄링 기법들[9-16]이 제안이 되었다.

스케줄링 기법들[9-13]은 수신자(Receiver) 노드가 전송을 주도하는 스케줄링 기법들이며 이 기법들에서는 수신자 노드가 준비가 되면 송신자(Sender) 노드에게 수신자 노드의 비콘 프레임을 전송하고 비콘 프레임을 받은 송신자 노드들은 데이터

를 수신자 노드에게 전송한다. 특히 기법 BSR[13]은 클러스터 트리(Cluster Tree)에 기반한 비콘 스케줄링 기법으로 다른 스케줄링 기법들에 비해서 싱크에 도달하는 데이터 전송 시간(Delay)을 개선한 기법이다. 그러나 이 기법에서는 센서 노드들로 구성된 클러스터 트리의 각 레벨(Level)의 노드들이 전송을 위해서 필요로 하는 적절한 전송 시간대의 개수를 고려하지 않으며 또한 동시에 전송이 가능한 최소 레벨 간격에 대한 고려가 없다. 따라서 이로 인해서 전송을 위한 슬롯(Slot)의 수와 한 슬롯 안에 필요한 서브슬롯(Subslot)의 수를 많이 구성하여 사용하므로 소스 노드에서 싱크 노드로의 데이터 전송에 걸리는 시간이 길다. 또한 BSR[13]은 네트워크 노드들의 동기화를 위해서 싱크 노드가 비콘 프레임을 네트워크 노드들에게 전송을 하는 경우에 효율적이지 않아서 네트워크 노드들이 비콘 프레임을 전송받는 데 걸리는 시간이 길다.

따라서 본 논문에서는 이러한 문제점들을 개선하기 위한 기법을 제안한다. 제안 기법은 육사각(Hexagon) 모델에 기반하여 클러스터 트리 노드들의 전송에 사용되는 슬롯 수와 서브슬롯의 수를 구하고 이를 바탕으로 비콘 프레임 전송 스케줄링을

• First Author: Taekkyeun Lee, Corresponding Author: Taekkyeun Lee

\*Taekkyeun Lee (taekkle@ajou.ac.kr), Dasan University College, Ajou University, Suwon, Korea

• Received: 2018. 08. 07, Revised: 2018. 08. 20, Accepted: 2018. 08. 28.

한다. 우선 비콘 프레임 전송 스케줄링은 여러 개의 비콘 사이클 (Beacon Cycle)을 이용하여 구성하며 기본적으로 하나의 비콘 사이클은 여러 개의 슬롯으로 구성되어 있고 각 슬롯은 여러 개의 서브슬롯으로 이루어져 있다. 본 기법은 BSR[13] 기법과 같이 클러스터 트리의 각 레벨마다 하나의 슬롯을 지정한다. 그러나 슬롯 지정에 있어서 일정한 거리를 두고 충돌 없이 전송이 가능한 레벨들은 슬롯 지정에 있어서 같은 슬롯을 지정하여 전송에 이용하는 것이 가능하다. 따라서 헥사곤 (Hexagon) 모델에 기반하여 같은 슬롯을 이용하여 전송이 가능한 레벨들과 전송 충돌을 피하기 위해서 서로 다른 슬롯을 사용해야 하는 레벨들을 구분하여 클러스터 트리의 모든 레벨에 슬롯을 지정하기 위해 필요한 슬롯의 수를 구한다. 또한 하나의 슬롯은 여러 개의 서브슬롯들로 구성되어 있으며 각 레벨에 해당되는 노드들은 지정된 슬롯의 서브슬롯들을 이용하여 전송을 한다. 따라서 같은 레벨 노드들 중에서 같은 서브슬롯을 사용하여 전송이 가능한 노드들과 충돌로 인하여 다른 서브슬롯을 사용하여 전송해야 할 노드들을 헥사곤 모델을 기반으로 구분하여 레벨의 노드들의 전송을 위해서 필요한 서브슬롯의 수를 구한다. 즉 헥사곤 모델에 기반하여 구해진 슬롯의 수와 서브슬롯 수를 이용하여 비콘 프레임 전송 스케줄링을 한다. 본 기법은 효율적인 슬롯과 서브슬롯 수를 이용하여 비콘 프레임 스케줄링을 하므로 데이터 전송 시간, 수신된 데이터 수, 비콘 프레임 전송 시간, 그리고 비콘 프레임 전달 횟수 측면에서 다른 기법들에 보다 좋은 성능을 보인다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서 비콘 프레임 스케줄링 관련 연구를 소개하여 3장에서는 제안된 기법인 헥사곤 모델 기반의 효율적인 비콘 스케줄링 기법을 설명한다. 4장에서는 제안한 기법에 대한 성능을 평가하고 5장에서는 결론으로 마무리를 한다.

## II. Preliminaries

### 1. Related works

WiseMAC[14], B-MAC[15] 그리고 X-MAC[16]은 송신자 노드가 전송을 주도하는 기법들이며 수신자 노드가 sleep 상태에서 wake-up 상태가 될 때까지 송신자 노드는 preamble을 수신자 노드에게 전송을 한다. 송신자 노드로부터 preamble을 받은 수신자 노드는 송신자 노드로부터 데이터를 받는 동안에는 wake-up 상태를 계속 유지한다. 이 기법들은 에너지 사용 측면에서도 효율적이지 않으며 송신자 노드가 수신자 노드에게 지속적인 preamble 전송을 하므로 이웃 노드들의 데이터 전송을 방해하여 데이터 전송 시간 측면에서도 효율적이지 않다.

스케줄링 기법들[9-13]은 수신자 노드가 전송을 주도하는 기법들이다. 특히 RI-MAC[9]은 대표적인 수신자 전송 주도 기법이며 이 기법에서는 데이터 프레임을 수신하고자 하는 수

신자 노드가 준비가 되면 자신의 비콘 프레임을 송신자 노드에 게 전송한다. 수신자 노드의 비콘 프레임을 받은 송신자 노드는 수신자 노드의 Active/Sleep 기간에 대한 정보를 바탕으로 수신자의 Active 기간에 데이터를 전송한다. 이와 같이 수신자 노드와 송신자 노드 간의 비콘 프레임과 데이터 프레임의 교환을 통해서 데이터는 싱크 노드에게 전달된다. 그러나 이 기법은 소스 노드에서 싱크 노드로 데이터 전송이 효율적이지 않다.

이러한 문제를 개선하고자 BSR[13] 기법이 제안이 되었으며 다른 수신자 전송 주도 스케줄링 기법들에 비해서 BSR[13]은 소스 노드에 의해서 전송된 데이터가 싱크 노드에 도달하는 전송 시간(Delay)을 개선한 기법이다. 이 기법에서는 레벨별로 하나의 슬롯이 지정되며 효율적인 데이터 전송을 고려하여 슬롯이 지정된다. 또한 각 레벨에 있는 노드들에게 서브슬롯을 지정할 때는 노드가 트리의 단말 노드인지 아니면 비단말 노드인지를 구분하여 서브슬롯이 지정되게 하였다. 그러나 이 기법에서 각 레벨마다 슬롯을 할당할 때 충돌 없이 같은 슬롯을 이용하여 전송 가능한 최소 레벨 간격을 고려를 하지 않으므로 많은 수의 슬롯들이 사용되며 뿐만 아니라 한 슬롯 안에 있는 서브슬롯의 수도 많이 구성을 하여 사용한다. 이와 같이 많은 수의 슬롯들과 서브슬롯들로 구성된 비콘 사이클의 사용은 전송 시간 측면에 있어서 효율적이지 않다. 즉 소스에서 싱크로의 데이터 전송에 걸리는 시간이 길며 네트워크 노드들의 동기화를 위해서 싱크에서 네트워크 노드들에게 비콘 프레임을 브로드캐스팅을 하는 경우에도 네트워크 노드들이 비콘 프레임을 전송받는 데 걸리는 시간이 길다.

## III. The Proposed Scheme

본 장에서는 헥사곤 모델에 대해서 설명하고 이 모델에 기반한 비콘 스케줄링 기법에 관하여 기술한다.

### 1. Hexagon Model

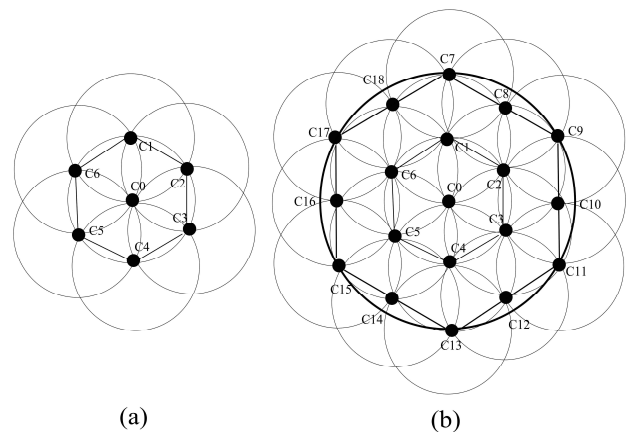


Fig. 1. Hexagon Model (L1 ~ L3)

본 기법은 클러스터 트리를 기반으로 하는 비콘 스케줄링 기법이다. 따라서 클러스터 트리의 hexagon 모델을 통해서 트리 레벨에 지정할 슬롯의 수와 서브슬롯의 수를 구하고자 한다. 그림 1는 레벨 1~3까지로 이루어진 클러스터 트리의 hexagon 모델을 보여주고 있으며 hexagon 모델에서 각 노드는 각 클러스터 영역의 클러스터 헤드(Cluster Head)를 의미한다. 본 기법 설명에서 사용되는 노드도 클러스터 헤드를 의미한다. 각 노드는 자신의 전송 범위(Transmission Range)를 가지며 각 노드의 주변에 있는 원은 노드의 전송 범위를 의미한다. 모든 노드들은 같은 크기의 전송 범위를 가진다고 가정하며 노드 X의 전송 범위를  $R(X)$ 라고 하고  $R(X)$ 의 반지름을  $r$ 이라고 한다.

그림 1에서 노드 C0은 클러스터 트리의 루트(Root)에 해당하고 레벨 1에 포함되는 노드이며 C0의 전송 범위  $R(C0)$  안에는 6개의 노드들(C1 ~ C6)이 있다. 트리 구조에서 C0은 6개의 자식 노드들(C1 ~ C6)을 가지며 이 6개의 노드들(C1 ~ C6)이 레벨 2에 해당하는 노드들이다. 또한 6개의 노드들(C1 ~ C6)은 12개의 자식 노드들(C7 ~ C18)을 가진다.  $L_i$ 를 트리의  $i$ 번째 레벨에 있는 노드들의 집합이라고 할 때  $L_1$ 에는 트리의 첫 번째 레벨에 해당되는 노드 C0가 포함되고  $L_2$ 에는 두 번째 레벨에 해당되는 6개 노드들(C1 ~ C6)이 포함된다.  $L_1$ 의 C0가 자신의 Active/Sleep 정보를 담은 비콘 프레임을  $L_2$ 의 6개의 자식 노드들(C1 ~ C6)에게 전송할 때 만약 자식 노드들(C1 ~ C6) 중에서 동시에 전송을 하는 노드가 있으면 충돌로 인해서 정상적인 C0의 비콘 프레임 전송이 어려워진다. 즉 노드 X와 노드Y 간의 직선거리를  $D(X, Y)$ 라고 할 때  $D(X, Y) \leq 2r$  인 노드 X와 Y가 동시에 전송을 할 경우에는 충돌로 인해서 안전한 비콘 프레임 전송이 이루어지지 않는다. 따라서  $L_1$ 의 노드 C0는  $L_2$ 에 있는 노드들과 같은 전송 시간대의 비콘 전송을 피해야 한다.

또한  $L_2$ 에 있는 6개 노드들(C1 ~ C6) 간의 직선거리는 서로  $2r$  보다 작거나 같다. 서로 거리가 가장 먼 노드 C1과 C4의 경우에는  $D(C1, C4) = 2r$  이므로 C1과 C4가 동시에 비콘 프레임을 전송하면 노드 C0에서 전송 충돌 발생이 가능하다. 그러나 C1과 C4가 동시에 비콘 프레임 전송을 하더라도 각각 자신의 비콘 프레임을  $L_3$ 에 있는 자식 노드들에게 전달하고자 하는 것이므로 C0에서 전송 충돌이 발생하여도 C1과 C4의 비콘 프레임들은  $L_3$ 에 있는 자식 노드들에게 충돌 없이 전송이 가능하다. 따라서  $L_2$ 의 노드들 중에서 동시에 비콘 프레임을 전송할 수 있는 노드들의 집합을  $SL2_k$  이라고 하면  $SL2_1 = \{C1, C4\}$ ,  $SL2_2 = \{C2, C5\}$ ,  $SL2_3 = \{C3, C6\}$ 와 같이 3개가 가능하다. 따라서 동시에 비콘 프레임을 전송할 수 있는 3개의 집합을 위해서 3개의 다른 전송 시간대가 필요하다. 즉  $L_2$ 의 노드들이  $L_3$ 에 있는 자식 노드들에게 비콘 프레임을 전송하기 위해서는 3개의 다른 전송 시간대가 필요하다.

그림 1의 (b)에는 12개의 노드들(C7 ~ C18)이 추가적으로

포함되어 있는 모델을 보여주고 있으며 이 12개의 노드들은  $L_3$ 에 포함된다. 트리에서 이 12개의 노드들(C7 ~ C18)은  $L_2$ 의 자식 노드들이다. 노드 C0를 중심으로 반지름이  $2r$ 인 영역에는 18개 노드들(C1 ~ C18)이 있으며 노드 C0와 다른 노드와의 직선거리를 살펴보면  $D(C0, C_i) \leq 2r$  ( $1 \leq i \leq 18$ )이므로 노드 C0와 18개 노드들(C1 ~ C18)은 서로 동시에 비콘 프레임 전송을 하면 충돌이 가능하다. 또한  $L_3$ 의 노드들 간의 비콘 프레임 전송을 살펴보면 12개 노드(C7 ~ C18)들 중에서  $D(C_i, C_j) > 2r$  ( $i \neq j, 7 \leq i \leq 18, 7 \leq j \leq 18$ )을 만족하는 두 노드는 동시에 비콘 프레임을 전송할 수 있다.  $L_3$ 에서 동시에 비콘 프레임을 전송할 수 있는 노드들의 집합을  $SL3_k$  이라고 하면  $SL3_1 = \{C7, C10, C13, C16\}$ ,  $SL3_2 = \{C8, C11, C14, C17\}$ ,  $SL3_3 = \{C9, C12, C15, C18\}$ 와 같이 3개가 가능하다. 따라서  $L_3$ 에 해당하는 12개(C7 ~ C18)의 노드들이 비콘 프레임 전송을 위해서는 3개 다른 전송 시간대를 필요로 한다. 그러므로 레벨 1 ~ 3의 hexagon 형태의 모델을 통해서 레벨  $L_i$  ( $1 \leq i \leq 3$ ) 간에는 서로 다른 시간에 전송이 필요하고  $L_i$ 에 소속되어 있는 노드들의 비콘 프레임 전송을 위해서는 최대 3개의 서로 다른 전송 시간대가 필요하다.

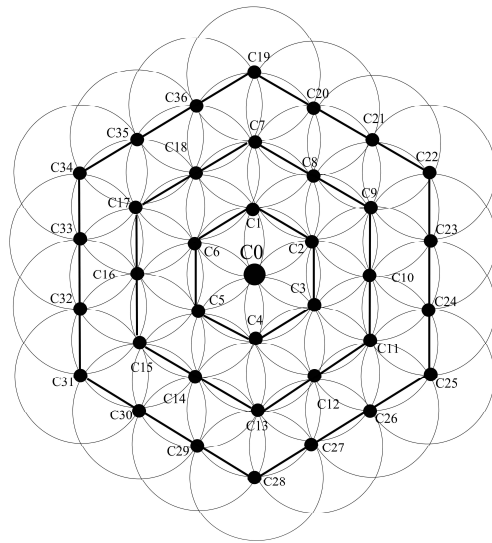


Fig. 2. Hexagon Model ( $L_1 \sim L_4$ )

그림 2에서는 네 번째 레벨 노드들을 추가한 hexagon 모델을 보여 준다. 네 번째 레벨에 해당되는 18개의 노드(C19~C36)는 집합  $L_4$ 에 포함된다. 그리고  $L_4$ 의 노드들 중에서  $D(C_i, C_j) > 2r$  ( $i \neq j, 19 \leq i \leq 36, 19 \leq j \leq 36$ )을 만족하는 노드들은 동시에 비콘 프레임을 전송할 수 있다. 따라서  $L_4$ 에서 동시에 전송할 수 있는 노드들의 집합을  $SL4_k$  라고 하면  $SL4_1 = \{C19, C22, C25, C28, C31, C34\}$ ,  $SL4_2 = \{C20, C23, C26, C29, C32, C35\}$ ,  $SL4_3 = \{C21, C24, C27, C30, C33, C36\}$ 와 같이 3개가 가능하다. 그래서  $L_4$ 에 해당되는 노드들의 비콘 프레임 전송을 위해서도

3개 다른 전송 시간대를 필요로 한다. 또한  $L_4$ 의 노드들은  $L_1$ 의 노드 C0와 직선거리  $D(C0, C_i) > 2r$  ( $19 \leq i \leq 36$ )이므로  $L_4$ 과  $L_1$ 의 C0는 동시에 비콘 프레임 전송이 가능하다.

지금까지는 그림 2의  $L_1 \sim L_4$ 를 포함하는 헥사곤 모델을 기반으로 하여 분석을 하였으나 일반적인  $L_i$ 에 대하여 분석하고자 한다. M을 헥사곤 모델에서 최대 레벨이라고 할 때 일반적으로  $L_i(2 \leq i \leq M)$ 에는 존재하는 노드들의 수는 식 (1)과 같다.

$$6 * (i - 1) \quad (2 \leq i \leq M) \quad (1)$$

$L_i$ 의 노드들 중에서 동시에 비콘 프레임을 전송할 수 있는 노드들의 집합을  $SLi_k$ 라고 하면 한  $SLi_k$ 의 크기는 식 (2)와 같다.

$$|SLi_k| = 2 * (i - 1) \quad (2 \leq i \leq M) \quad (2)$$

식 (1)을 식 (2)로 나누면 한  $L_i$ 의 집합  $SLi_k$ 의 개수  $k$ 를 구할 수 있으며 식 (3)과 같다.

$$k = \frac{6 * (i - 1)}{2 * (i - 1)} = 3 \quad (2 \leq i \leq M) \quad (3)$$

따라서 각  $L_i(2 \leq i \leq M)$ 의 동시에 전송할 수 있는 노드들의 집합  $SLi_k(2 \leq i \leq M, 1 \leq k \leq 3)$ 은 3개가 존재하며 노드들의 전송을 위해서 3개의 다른 전송 시간대가 필요하다. 또한 레벨 간의 거리가  $D(X, Y) > 2r$  ( $X \neq Y, 1 \leq X, Y \leq M$ )이면 레벨 X와 Y는 동시에 비콘 프레임 전송이 가능하므로 레벨 X와 Y는 같은 전송 시간대를 사용할 수 있다. 따라서 레벨 간격의 차이가 3보다 크거나 같은 레벨들은 같은 전송 시간대에 비콘 프레임 전송이 가능하다. 본 기법에서는 같은 전송 시간대에 전송이 가능한 레벨들의 집합을  $T_h(1 \leq h \leq 3)$ 라고 하면  $T_1 = \{L_1, L_4, L_7, \dots\}$ ,  $T_2 = \{L_2, L_5, L_8, \dots\}$ ,  $T_3 = \{L_3, L_6, L_9, \dots\}$ 와 같이 세 집합으로 나뉘며 같은 집합에 소속된 레벨들은 동시에 전송이 가능한 레벨들이다.

### 2. Beacon Scheduling

본 절에서는 비콘 프레임 전송을 위한 스케줄링에 대해서 소개한다. 비콘 스케줄링을 통해서 여러 개의 비콘 사이클이 구성이 되며 하나의 비콘 사이클은 여러 개의 슬롯으로 구성되어 있고 하나 슬롯은 여러 개의 서브슬롯으로 이루어져 있다.

본 기법에서는 클러스터 트리의 각 레벨마다 하나의 슬롯을 지정한다. 그러나 레벨 간격 차이가 3인 레벨들은 서로 같은 슬롯을 이용하여 전송을 할 수가 있으므로 위에서 기술된 것처럼 같은 시간대에 전송이 가능한 레벨들의 집합  $T_1 = \{L_1, L_4, L_7, \dots\}$ ,  $T_2 = \{L_2, L_5, L_8, \dots\}$ ,  $T_3 = \{L_3, L_6, L_9, \dots\}$ 을 위

해서 각 집합마다 1개의 슬롯을 지정하면 총 3개의 슬롯이 필요하다. 즉 3개의 슬롯을 이용하여 모든 레벨에 슬롯을 지정한다. 또한 각 레벨  $L_i$ 마다 동시에 전송할 수 있는 노드들의 집합  $SLi_k(1 \leq k \leq 3)$ 가 3개 존재하며 각  $SLi_k$ 마다 하나의 서브슬롯을 지정하면 총 3개의 서브슬롯을 이용하여 해당 레벨의 노드들의 비콘 프레임 전송이 가능하다. 따라서 하나의 비콘 사이클은 3개의 슬롯들로 구성하고 하나의 슬롯은 3개의 서브슬롯들로 구성되어 비콘 프레임 전송 스케줄링에 이용한다.

그림 3에서는 비콘 프레임 전송 스케줄링 내용이 도식화되어 있다. 클러스터 트리의 최대 레벨을 M이라고 할 때 각 레벨  $i(1 \leq i \leq M)$ 를 3으로 나눈 나머지가 0인 경우에는 레벨  $i$ 를 위해서 우선 Slot1의 시작 시간을 지정한다. 그러나 만약 그 나머지가 2인 경우에는 레벨  $i$ 를 위해서 Slot2의 시작 시간을 지정하고 그 나머지가 1이면 Slot3의 시작 시간을 지정한다.

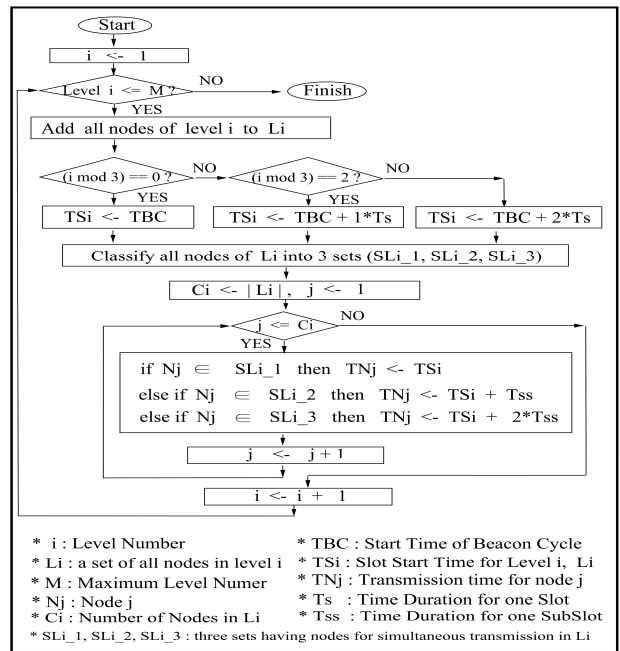


Fig. 3. Beacon Scheduling

해당 레벨을 위한 슬롯의 시작 시간 지정을 한 후에는 해당 레벨의 노드들을 위한 서브슬롯을 지정한다. 즉 해당 레벨  $i$ 의 노드들 중에서 동시에 비콘 프레임을 전송할 수 있는 노드들 그룹은 3개가 있으며 각 그룹이 3개의 집합  $SLi_1, SLi_2, SLi_3$  중에서 어느 집합에 소속될 지는 랜덤하게 결정된다.

집합  $SLi_1, SLi_2, SLi_3$ 에 대한 레벨  $i$  노드들의 소속이 랜덤하게 결정된 다음에 해당 레벨  $i$ 의 노드  $j$ 가 집합  $SLi_1$ 에 속한 노드이면 지정된 슬롯의 첫 번째 서브슬롯을 이용하여 비콘 프레임 전송하도록 전송 시간을 지정한다. 만약 노드  $j$ 가 집합  $SLi_2$ 에 속한 노드이면 지정된 슬롯의 두 번째 서브슬롯을 이용하여 비콘 프레임 전송하도록 전송 시간을 지정한다. 마지막으로 만약 노드  $j$ 가 집합  $SLi_3$ 에 속한 노드이면 지정된 슬롯의

세 번째 서브슬롯을 이용하여 비콘 프레임 전송하도록 전송 시간을 지정한다. 이와 같은 과정을 통해서 해당 레벨  $i$ 의 모든 노드들을 위하여 서브슬롯을 이용한 전송 시간 지정이 끝나면 레벨을 증가시켜서 다음 레벨을 위한 슬롯 및 서브슬롯의 전송 시간 지정을 하고 최대 레벨  $M$ 을 위한 슬롯 및 서브슬롯의 전송 시간 지정을 할 때까지 과정이 반복된다.

그림 4는 비콘 프레임 스케줄링에 의해서 소스 노드에서 싱크 노드로 데이터를 전송하는 예를 보여준다. 기본적으로 하나의 비콘 사이클은 3개의 슬롯(Slot)으로 구성되며 하나의 슬롯은 3개의 서브슬롯(Subslot)으로 구성된다. 사용되는 트리는 레벨 1 ~ 4로 구성되며 트리의 노드 구성은 다음과 같다. 레벨 1에는 노드 G가 있으며 노드 G의 자식 노드들로 노드 H, D, J가 있고 이 자식 노드들은 레벨 2에 속한다. 노드 H의 자식으로는 노드 K, 노드 D의 자식으로는 노드 M, 그리고 노드 J의 자식으로는 노드 Q가 있으며 이 자식 노드들은 레벨 3의 노드들이다. 마지막으로 노드 K의 자식으로는 노드 N, 노드 M의 자식으로는 노드 P, 그리고 노드 Q의 자식으로는 노드 R과 W가 있으며 이 자식 노드들은 레벨 4에 해당되는 노드들이다.

우선 레벨 3에는 SLOT1이 지정이 되며 레벨 3의 노드 K, Q, M은 전송에 SLOT1의 서브슬롯들을 이용한다. 레벨 2에는 SLOT2이 지정되며 레벨 2의 노드 H, J, D는 전송에 SLOT2의 서브슬롯들을 이용한다. 그리고 레벨 1에는 SLOT3이 지정되며 레벨 1의 노드 G는 전송에 SLOT3의 서브슬롯을 이용한다. 레벨 4는 레벨 1과 레벨 간격 차이가 3이므로 같은 슬롯을 이용하여 전송이 가능하다. 따라서 레벨 4에도 SLOT3이 지정되며 레벨 4의 노드 N, P, R, W는 전송에 SLOT3의 서브슬롯들을 이용한다.

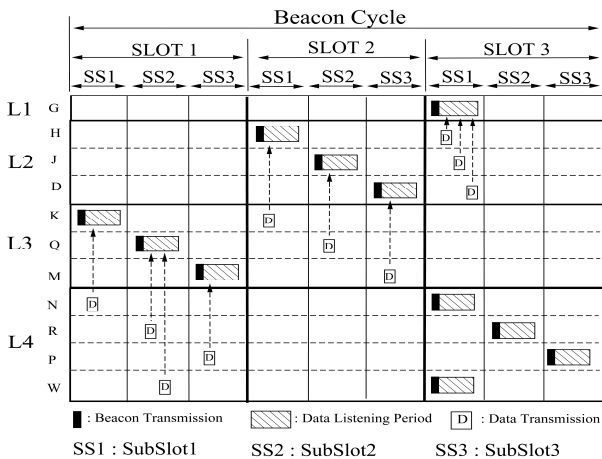


Fig. 4. Beacon Frame Scheduling Example

우선 레벨 3의 노드 K, Q, M은 서로 다른  $SL3_k$  ( $1 \leq k \leq 3$ )에 소속된다는 가정을 하며 각 노드가 3개의 집합  $SL3_1$ ,  $SL3_2$ ,  $SL3_3$  중에서 어느 집합에 소속될 지는 랜덤하게 결정된다. 그림 4에서는 노드 K에는 SLOT1의 subslot1이 지정되고, 노드 Q에는 subslot2이 지정되고, 그리고 노드 M에는 subslot3이

지정된 예를 보여준다. 또한 레벨 2의 노드 H, J, D도 서로 다른  $SL2_k$  ( $1 \leq k \leq 3$ )에 소속된다는 가정을 하며 노드 H에는 SLOT2의 subslot1이 지정되고, 노드 J에는 subslot2이 지정되고, 그리고 노드 D에는 subslot3이 지정된 예를 보여준다. 레벨 1의 노드 G에는 SLOT3의 subslot1이 지정된다. 뿐만 아니라 레벨 4의 노드 N, R, P도 서로 다른  $SL4_k$  ( $1 \leq k \leq 3$ )에 소속되며 노드 W는 노드 N과 같은 집합에 소속된다고 가정한다. 그래서 노드 N에는 SLOT3의 subslot1이 지정되고 노드 R에는 subslot2이 지정되고 노드 P에는 subslot3이 지정되고 그리고 노드 W에는 노드 N과 같이 subslot1이 지정된다.

그림 4에서 레벨 3의 노드 K가 SLOT1의 subslot1에서 비콘 프레임을 전송을 하고 데이터를 기다리고 있으면 노드 K의 비콘 프레임을 받은 레벨 4의 노드 N은 가지고 있는 데이터를 노드 K에게 전송을 한다. 마찬가지로 노드 Q가 SLOT1의 subslot2에서 비콘 프레임을 전송을 하고 데이터를 기다리고 있으면 노드 Q의 비콘 프레임을 받은 레벨 4의 노드 R과 W는 가지고 있는 데이터를 노드 Q에게 전송한다. 또한 노드 M이 SLOT1의 subslot3에서 비콘 프레임을 전송을 하고 데이터를 기다리고 있으면 노드 M의 비콘 프레임을 받은 레벨 4의 노드 P는 가지고 있는 데이터를 노드 M에게 전송한다. SLOT2에서도 마찬가지로 레벨 2 노드 H, J, D이 비콘 프레임을 전송하면 비콘 프레임을 받은 레벨 3의 노드들은 그 데이터를 레벨 2의 노드 H, J, D에게 전달한다. 또한 레벨 2의 노드들에게 전달된 데이터는 SLOT1에서 노드 G(싱크)가 비콘 프레임을 전송을 한 후에 비콘 프레임을 받은 노드 H, J, D에 의해서 노드 G(싱크)에게 전달된다.

그림 5는 그림 4에서 사용된 비콘 스케줄링에 기반하여 싱크 노드의 비콘 프레임 브로드캐스팅의 예를 보여준다. 트리는 그림 4에서 사용된 트리와 (레벨 1 ~ 4로 구성된) 같은 트리를 이용한다. 그림 5는 3개의 비콘 사이클을 이용하여 싱크 노드에서 네트워크 노드들로의 비콘 프레임 브로드캐스팅을 보여준다. 검은 색 사각형은 싱크 노드가 브로드캐스팅을 한 첫 번째 비콘 프레임이 네트워크 노드들에게 전달되는 것을 보여주며 회색 사각형은 싱크 노드가 브로드캐스팅을 한 두 번째 비콘 프레임이 전달되는 것을 보여준다.

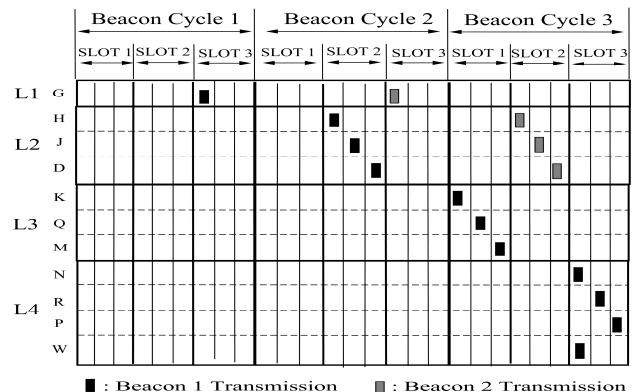


Fig. 5. Beacon Frame Broadcasting Example

우선, 싱크 노드 G는 Beacon Cycle 1의 Slot3의 subslot1을 이용하여 첫 번째 비콘 프레임을 자식 노드 H, J, D에게 전송을 한다. 싱크로부터 비콘 프레임을 받은 노드 H, J, D는 Beacon Cycle 2의 Slot2의 subslot1, subslot2, subslot3을 이용하여 노드 K, Q, M에게 비콘 프레임을 전송한다. 비콘 프레임을 받은 노드 K, Q, M는 Beacon Cycle 3의 Slot1의 subslot1, subslot2, subslot3을 이용하여 노드 N, R, P, W에게 비콘 프레임을 전송한다. 비콘 프레임을 받은 노드 N, R, P, W도 Beacon Cycle 3의 Slot3의 서브슬롯들을 이용하여 비콘 프레임 전송한다.

### V. Performance Evaluatoin

본 장에서는 제안 기법 및 기존의 기법들을 OMNET++로 구현하여 성능평가를 수행하였다. 성능평가를 위하여 1000 x 1000 m2의 크기의 네트워크에 1200개의 노드들이 랜덤하게 위치하게 하였으며 각 노드의 통신 범위는 40m이다. 또한 네트워크에서 사용되는 모든 노드들은 고정(stationary) 노드들이다. 성능 평가를 위해서 하나의 서브슬롯의 길이는 100ms, 비콘 프레임의 길이는 6Bytes, 데이터 프레임의 길이는 18Bytes로 하였다.

제안 기법의 구현을 위해서는 네트워크의 중심에 싱크 노드를 위치시키고 싱크 노드를 중심으로 hexagon 모델에 기반한 클러스터 헤드들을 선정을 한다. 클러스터 헤드들의 선정은 hexagon 모델의 클러스터 헤드 위치에 가장 가까운 노드들을 클러스터 헤드들로 선정하였으며 이를 기반으로 하여 트리를 구성하였으며 구성된 트리를 기반으로 스케줄링을 하였다. 원래 BSR 기법에서는 트리 구현을 위해서 싱크 노드를 중심으로 네트워크 노드들 중에서 임의의 노드들을 클러스터 헤드들로 지정하여 트리를 구성하였으며 또한 하나의 Operation Cycle이 10개의 슬롯을 가지며 하나의 슬롯은 40개의 서브슬롯을 가지도록 구성을 하였다. 따라서 본 논문의 성능 비교를 위한 BSR 기법 구현을 위해서 이와 동일한 조건들을 가지고 BSR 기법을 구현하였다. 뿐만 아니라 랜덤(Random) 기법과도 성능을 비교하였으며 랜덤 기법은 BSR 기법을 제안한 논문에서 성능 평가를 위해서 이용된 기법으로 해당 레벨을 위한 슬롯 지정 시에 임의의 슬롯이 지정되는 방식이다. 랜덤 기법의 구현은 BSR 기법 구현과 동일한 조건들을 가지고 구현되었으나 레벨별로 슬롯을 지정하는 방식은 임의의 슬롯이 레벨에 지정되도록 구현이 되었다.

그림 6에서는 비콘 프레임 스케줄링에 기반한 소스 노드들의 싱크 노드로 데이터 전송에 걸리는 시간을 보여준다. 싱크 노드는 레벨 1에 해당되며 레벨 2, 4, 6, 8, 10의 각 레벨마다 임의의 5개의 소스 노드들을 선택하였으며 5개의 소스 노드들이 싱크 노드까지 데이터 전송을 하는데 걸리는 평균적인 시간을 각 레벨의

전송 시간으로 이용하였다. 그림 6에서는 전체적으로 데이터를 전송하는 소스 노드들이 싱크 노드에서 멀리 있을수록 데이터 전송 시간이 증가하며 제안 기법이 다른 기법들보다 데이터 전송 시간 측면에서 좋은 성능을 보인다. 제안 기법은 hexagon 모델을 통해서 구해진 슬롯의 수 및 서브슬롯의 수를 이용하여 전송을 하므로 BSR 기법에 비해서 전송 시간이 짧다. 랜덤 기법은 가장 좋지 않은 성능을 보이며 그 이유는 제안 기법과 BSR 기법은 싱크 노드로의 효율적인 데이터 전송을 고려하여 슬롯을 지정하지만 랜덤 기법은 해당 레벨에 임의의 슬롯을 지정하여 데이터 전송을 하므로 데이터 전송 시간이 길다.

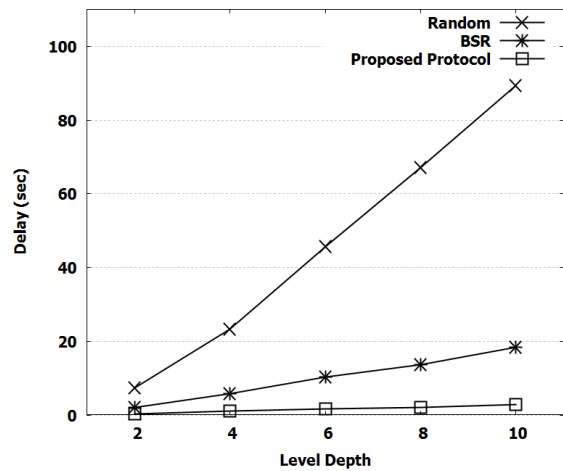


Fig. 6. Data transmission delay from different levels

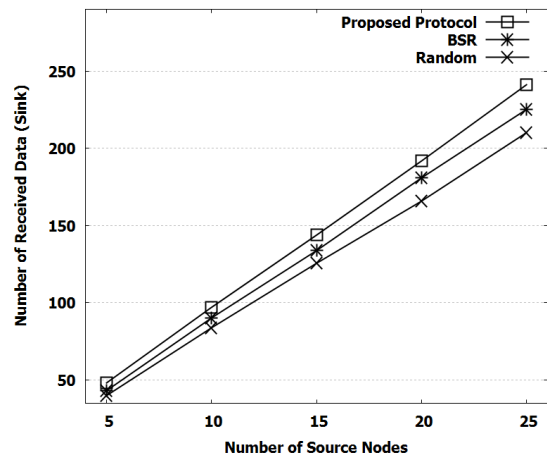


Fig. 7. Number of received data with different number of source nodes

그림 7에서는 네트워크의 소스 노드의 수가 증가할 때 싱크 노드에서 수신한 데이터의 수를 보여준다. 네트워크에서 랜덤하게 5, 10, 15, 20, 25개의 소스 노드들을 선택하였으며 각 소스 노드는 10개씩의 데이터를 전송하였다. 싱크 노드에서 수신한 데이터 수 측면에서 제안된 기법이 가장 좋은 성능을 보이며 제안 기법은 hexagon 모델을 통해서 구해진 효율적인 슬롯 및 서브슬롯의 수를 이용하여 전송을 하므로 BSR 기법에 비해서 싱크 노드가 더 많은 데이터를 수신한다. 랜덤 기법은 임의

의 슬롯을 레벨에 지정하므로 소스 노드에서 싱크 노드로의 데이터 전송이 효율적이지 못하다. 따라서 수신한 데이터 수 측면에서 제안 기법과 BSR 기법에 비해서 적은 수의 데이터가 싱크 노드에 수신된다.

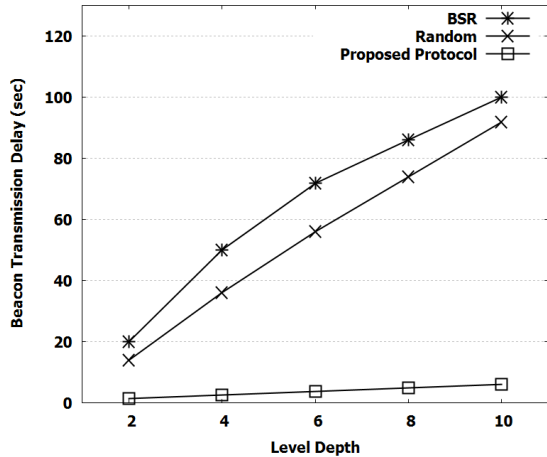


Fig. 8. Beacon transmission delay from different levels

그림 8에서는 싱크 노드가 각 레벨 2, 4, 6, 8, 10의 노드들에게 비콘 프레임을 전송하는 데 걸리는 시간을 보여준다. 즉 싱크 노드가 비콘 프레임을 전송한 후 해당 레벨의 모든 노드들에게 비콘 프레임이 전달되는 데 걸리는 시간을 보여준다. 전체적으로 레벨이 증가할수록 비콘 프레임 전송 시간이 증가하며 제안 기법이 다른 기법들보다 비콘 전송 시간 측면에서 좋은 성능을 보인다. 제안 기법에서 이용하는 hexagon 모델에 기반하여 구해진 슬롯 및 서브슬롯의 수는 BSR 기법에서 이용하는 슬롯 및 서브슬롯의 수보다 적다. 따라서 싱크 노드에서 다른 노드들로 비콘 프레임이 전송되는 시간 측면에서 제안 기법이 BSR 기법보다 좋은 성능을 보인다. 또한 BSR 기법에서는 싱크 노드에서 네트워크 노드들로 비콘 프레임 전송을 위한 스케줄링이 랜덤 기법보다 효율적이지 않으며 시간이 많이 걸린다. 따라서 BSR 기법은 랜덤 기법보다 성능이 좋지 않다.

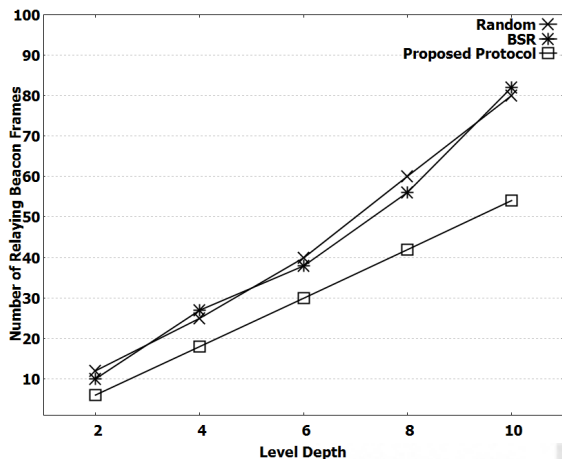


Fig. 9. Number of beacon transmission with different levels

그림 9에서는 싱크 노드에서 네트워크의 모든 노드들로 비콘 프레임이 브로드캐스팅될 때 레벨 2, 4, 6, 8, 10의 노드들이 비콘 프레임을 전달(Relay)하는 횟수를 보여준다. 즉 싱크 노드에서 비콘 프레임이 전송된 후에 레벨 2, 4, 6, 8, 10에서 비콘 프레임 전달하는 횟수를 보여준다. 레벨이 증가할수록 레벨에 있는 노드들의 수도 많으므로 보다 많은 노드들이 비콘 프레임 전달에 관여하여서 비콘 프레임 전달 횟수도 증가를 한다. 제안된 기법에서는 hexagon 모델에 기반한 클러스터 트리를 구성하므로 레벨별로 전송에 관여하는 노드들의 수가 BSR 기법과 랜덤 기법에서 만들어 사용되는 트리 레벨에 존재하는 노드들(비콘 프레임 전송에 관여하는 노드들)의 수보다 적다. 따라서 제안된 기법은 BSR 기법과 랜덤 기법에 비해서 적은 횟수의 비콘 프레임 전달을 통해서 네트워크 노드들에게 브로드캐스팅을 한다. 따라서 제안 기법이 비콘 프레임 전달 횟수 측면에서 BSR 기법과 랜덤 기법보다 좋은 성능을 보인다. BSR 기법과 랜덤 기법은 랜덤하게 클러스터 헤드를 결정하여 트리를 구성하므로 트리의 레벨을 구성하는 노드들의 개수가 비슷하다. 따라서 BSR 기법과 랜덤 기법은 비슷한 성능을 보인다.

## V. Conclusions

본 논문에서는 hexagon 모델에 기반한 비콘 스케줄링 기법에 대해서 제안하였다. 제안 기법에서는 hexagon 모델을 통해서 클러스터 트리의 효율적인 비콘 스케줄링에 필요한 슬롯의 수와 서브슬롯의 수를 구하여 비콘 스케줄링에 이용한다. 제안 기법은 hexagon 모델에 기반한 비콘 스케줄링을 하므로 다른 기법들에 비해서 데이터 전송 시간, 수신된 데이터 수, 비콘 프레임 전송 시간, 그리고 비콘 프레임 전달 횟수 측면에서 좋은 성능을 보인다. 기본적으로 hexagon 모델에 기반한 비콘 스케줄링 기법은 모든 노드가 고정(Stationary) 노드인 경우를 고려하여 제안된 기법이다. 그래서 향후 연구 계획으로는 hexagon 모델에 기반하여 모바일 노드들을 고려한 스케줄링 기법에 대해서 연구하고자 한다. 모바일 센서 노드들의 이동으로 인하여 다양한 네트워크 토폴로지가 가능하며 이러한 네트워크 토폴로지를 위한 스케줄링 기법 및 여러 개의 모바일 싱크들이 존재하는 경우를 고려한 효율적인 스케줄링 기법에 대해서도 연구하고자 한다.

## REFERENCES

- [1] L. M. Oliveira and J. J. Rodrigues, "Wireless sensor networks: A survey on environmental monitoring," *Journal of Communications, Academy Publisher*, Vol. 6, No. 2, pp. 143-151, April 2011.

- [2] K. Kim, "Implementation of Patient Monitoring System based on Mobile Healthcare," *Journal of The Korea Society of Computer and Information*, Vol. 17, No. 12, pp. 1-10, December 2012.
- [3] Y. Zhang, L. Sun, H. Song and X. Cao, "Ubiquitous WSN for Healthcare: Recent advances and future prospects," *Internet of Things Journal*, IEEE, Vol. 4, No. 1, pp. 311-318, August 2014.
- [4] N. Li, B. Yan, G. Chen, P. Govindaswanmy, and J. Wang, "Design and implementation of a sensor-based wireless camera system for continuous monitoring in assistive environments," *Journal of Personal and Ubiquitous Computing*, Vol. 14, Issue 6, pp. 499-510, September 2010.
- [5] M. Chen, S. Gonzalez, H. Cao, Y. Zhang, and S. T. Vuong, "Enabling low bit-rate and reliable video surveillance over practical wireless sensor network," *Journal of Supercomputing*, Springer, Vol. 65, No. 1, pp. 289-300, July. 2013.
- [6] Y. Ye, S. Ci, A. K. Katsaggelos, Y. Liu, and Y. Qian, "Wireless Video Surveillance: A Survey," *IEEE Access*, Vol. 1, No. 1, pp. 646-660, September 2013.
- [7] S. Kim, "Development Trends of the Future Soldier System," *KIDA on Defense and technology*, Vol. 382, pp. 76-87, December 2010.
- [8] J. Heo, S. Lee, Y. Choi and H. H. Choi, "A Study on Land Warrior System Design Based on IEEE 802.15.4," *Journal of The Korea Society of Computer and Information*, Vol. 17, No. 5, pp. 71-80, May 2012.
- [9] Y. Sum, O. Gurewits, and D. B. Johnson, "RI-MAC: A receiver-initiated asynchronous duty cycle mac protocol for dynamic traffic loads in wireless sensor networks," *Proceedings of the 6th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys'08)*, pp. 1-14, November 2008.
- [10] T. Wada, I. T. Lin, I. Sasase, "Asynchronous receiver-initiated mac protocol with the stair-like sleep in wireless sensor networks," *Proceedings of International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, pp. 854-858, September 2011.
- [11] H. Tang, J. Cao, C. Sun, and K. Lu, "REA-MAC: A low latency routing enhanced asynchronous duty-cycle mac protocol for wireless sensor networks," *Journal of Central South University*, vol. 20, no. 3, pp. 678-687, March 2013.
- [12] P. Huang, C. Wang, and L. Xiao, "RC-MAC: A receiver-centric mac protocol for event-driven wireless sensor networks," *IEEE Transactions on Computers*, vol. 64, no. 4, pp. 1149-1161, March 2015.
- [13] A. Fujimoto, Y. Masui, T. Yoshihiro and F. Uchio, "Beacon Scheduling in Receiver-initiated MAC Protocols for Low-delay and Energy-efficient WSNs," *Proceedings of Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, March 2017.
- [14] A. El-Hoiydi and J. Decotignie, "WiseMAC: An ultra low power mac protocol for multi-hop wireless sensor networks," *Proceedings of the International Workshop on Algorithmic Aspects of Wireless Sensor Networks*, pp. 18-31, July 2004.
- [15] J. Polastre, J. Hill and D. Culler, "Versatile low power media access for wireless sensor networks," *Proceedings of the 2th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, pp. 95-107, Baltimore, MD, USA, November 2004.
- [16] M. Buettner, G. V. Yee, E. Anderson, and R. Han, "X-MAC: A Short Preamble MAC Protocol for Duty-Cycled Wireless Sensor Networks," *Proceedings of the 4th International Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, pp. 307-320, Boulder, Colorado, USA, November 2006.

## Authors



Taekkyeun Lee received Ph.D. degrees in Computer Science and Engineering from the State University of New York at Buffalo in 2010. He is currently a teaching-oriented professor (assistant professor) in Dasan University College Ajou University. He is

interested in wireless sensor networks and security for wireless sensor networks.