

# IEEE 802.15.4의 성능 향상을 위한 은닉 노드 인식 그룹핑 알고리즘

정회원 엄진영\*, 안종석\*, 이강우\*\*

## A Hidden-Node-Aware Grouping Algorithm for Improving Throughput of IEEE 802.15.4

Jin-Yeong Um\*, Jong-Suk Ahn\*, Kang-Woo Lee\*\* *Regular Members*

### 요약

본 논문은 IEEE 802.15.4 네트워크에서의 에너지 효율을 향상시키기 위해 은닉 노드들 간의 신호 충돌 문제를 해결하기 위한 은닉 노드 인식 그룹핑(HAG: Hidden-Node-Aware Grouping) 알고리즘을 제안한다. HAG 알고리즘은 노드들 간 수신 신호의 에너지를 이용하여 은닉 관계에 있는 노드들을 파악하고, 그들을 서로 다른 그룹에 배정하는 방식으로 그룹핑을 완성하고 그룹별로 신호 전송 주기를 할당한다. HAG 알고리즘의 정확한 성능 측정 및 예측을 위해 다양한 네트워크 상황을 고려하여 처리량에 대한 분석적 성능 모델을 제시한다. HAG 알고리즘을 사용하지 않은 네트워크 환경에서는 은닉 관계가 있는 노드들의 수가 증가함에 따라 처리량이 급속히 저하되지만, HAG 알고리즘을 적용하면 이와 같은 성능 저하를 예방할 수 있음을 분석적 성능 모델과 더불어 시뮬레이션 결과를 통하여 확인하였다.

**Key Words** : IEEE 802.15.4, USN, hidden node, grouping algorithm, analytical performance model

### ABSTRACT

This paper proposes a HAG(Hidden-Node-Aware Grouping) algorithm for IEEE 802.15.4 networks to enhance the performance by eliminating collisions resulted from the hidden node problem without adopting the RTS/CTS packet exchanges. To solve the hidden node problem, the HAG algorithm organizes nodes into disjoint transmission groups by dynamically allocating hidden nodes into separate groups which take turns in a round robin way for their transmission. For dynamic group adjustment, it periodically evaluates the presence of hidden nodes based on subordinate nodes' receipt reports. To accurately measure its behavior, this paper also builds an analytical model to estimate its throughput fluctuation over various network topologies. The mathematical model along with simulation results confirmed that the HAG technique gracefully degraded the throughput of IEEE 802.15.4 networks whereas the standard IEEE 802.15.4 networks suffer severe throughput fallout as hidden nodes become populated.

### I. 서론

저속 무선 근거리 개인 네트워크(LR-WPANs:

Low Rate-Wireless Personal Area Networks)를 지원하는 IEEE 802.15.4 표준<sup>1,2)</sup>은 전원을 교체하기 어려운 무선 센서 네트워크 환경에서 효율적으로 동작될

\* 이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2011-0004559)

\* 동국대학교 컴퓨터공학과 컴퓨터네트워크 연구실(mog07@dongguk.edu, jahn@dongguk.edu)

\*\* 동국대학교 정보통신공학과 컴퓨터 구조와 시뮬레이션 기술 연구실(klee@dongguk.edu)

논문번호 : KICS2011-03-163, 접수일자 : 2011년 3월 31일, 최종논문접수일자 : 2011년 8월 9일

수 있도록 제정되었다. IEEE 802.15.4에서는 에너지를 효율적으로 사용하기 위하여 비콘 프레임(beacon frame)에 의해 동기화되는 수퍼프레임(superframe) 단위로 동작하도록 규정한다. 수퍼프레임의 CFP(Contention Free Period)에서는 배타적 시간 슬롯을 사전에 할당하여 노드들 간의 통신이 이루어지는 반면에 CAP(Contention Access Period)에서는 노드들이 CSMA/CA(Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) 알고리즘을 이용하여 채널의 상태를 감지하여 전송 가능성을 확인한 후 경쟁적으로 패킷을 전송한다.

CAP 구간에서는 두 가지 이유에서 충돌이 발생할 수 있다. 첫 번째는 두 개 또는 그 이상의 노드들이 동일한 시점에 두 번의 CCA를 수행하여 채널이 유희함을 감지하고 동시에 데이터 전송을 시작한 경우이며, 두 번째는 은닉 노드(hidden node)들이 채널을 점유하고 있음을 감지하지 못한 채 전송이 이루어져 충돌이 발생하는 경우이다. 이전 연구<sup>3)</sup>에 따르면 노드의 수가 20개인 경우 은닉 상태에 있는 노드가 1개만 존재해도 네트워크의 처리량이 62%까지 급격하게 저하된다고 한다. 또한 IEEE 802.15.4에서는 RTS/CTS 메커니즘을 채택하고 있지 않아 데이터 전송 시에 은닉 노드 충돌이 발생해도 인지가 불가능하고, ACK 신호가 macAckWaitDuration 이내에 들어오지 않을 경우 은닉 노드는 데이터 전송이 실패한 것으로 인지하여 데이터를 재전송하기 위해 백오프 과정을 반복한다<sup>4)</sup>. 특히 최대 백오프 구간이 0에서 7사이의 임의의 값으로 그 백오프 구간이 작기 때문에 은닉 노드로 인한 충돌이 계속해서 발생할 확률이 높다.

그러나 이와 같은 문제에도 불구하고 IEEE 802.15.4 표준에서는 은닉 노드 문제를 해결을 위한 별도의 메커니즘을 사용하지 않는다. 이러한 상황에서 은닉 노드에서 패킷을 전송할 경우 예기치 않은 충돌로 인하여 처리량의 급속한 감소와 전력의 추가 소모 등 네트워크의 전체적인 성능 저하가 발생하게 된다. 따라서 은닉 노드로 인한 문제를 최소화 할 수 있는 방안이 요구된다.

본 논문에서는 IEEE 802.15.4 네트워크 환경에서 은닉 관계에 있는 노드들을 서로 다른 그룹에 배정하여 은닉 노드로 인한 충돌을 사전에 방지함으로써 네트워크의 성능을 유지할 수 있는 방안으로 은닉 노드 인식을 통한 그룹핑 (HAG: Hidden-node Aware Grouping) 알고리즘을 제시한다. 각 그룹 내에는 은닉 관계에 있는 노드가 존재하지 않으며, 각 그룹별로 채널에 접근할 수 있는 배타적 시간 구간을 할당하여 네

트워크에서의 충돌 발생 확률을 줄임으로써 은닉 노드로 인한 네트워크 성능 저하를 최소화한다. 이 과정에서 코디네이터와 각 노드 간의 통신을 통해 노드 간에 수신되는 신호의 세기를 이용하여 은닉 노드 관계를 파악한다.

NS-2 시뮬레이터를 이용한 실험 결과에 따르면 은닉 노드가 1개 존재할 경우 일반적으로 널리 사용되고 있는 단일 그룹으로 이루어진 IEEE 802.15.4 표준과 본 논문에서 제안하는 알고리즘을 적용하여 그룹을 2개로 나누었을 경우 처리량을 비교하면 최대 80%, 평균 74%, 그룹을 3개로 나누었을 경우 최대 84%, 평균 75% 처리량이 증가한다. 또한 은닉 노드가 3개가 존재할 경우 그룹을 3개로 나누었을 경우 최대 97%, 평균 95% 처리량이 증가한다. 이는 HAG 알고리즘이 신호세기로 서로 은닉 관계인지를 확인하고, 은닉 노드가 발생하지 않도록 그룹을 편성하기 때문에 은닉 노드로 인한 충돌이 발생하지 않기 때문이다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 은닉 노드에 의하여 발생하는 문제에 대하여 알아보고, 이를 해결하기 위한 기존의 방안들을 소개한다. 3장에서는 본 논문에서 제안하는 알고리즘을 상세하게 설명하고, 이를 적용하여 4장에서 네트워크 처리량에 대한 분석적 모델을 제시한다. 또한 5장에서는 NS-2를 이용하여 일반적으로 널리 사용되고 있는 단일 그룹으로 이루어진 IEEE 802.15.4 표준과의 성능을 비교함으로써 HAG 알고리즘의 효율성과 분석적 모델의 정확성을 검증한다. 마지막으로 6장에서 결론을 맺는다.

## II. 관련연구

IEEE 802.15.4 네트워크 환경에서 은닉 노드 문제를 해결하기 위한 연구로는 RTS/CTS 메커니즘, 은닉 노드에 주기적 GTS 할당 메커니즘, 그룹핑 메커니즘 등을 활용하는 방안들이 있다. RTS/CTS 메커니즘은 은닉 노드로 인한 문제를 효과적으로 해결하지만 데이터 전송 이전에 제어 메시지를 주고받음으로써 추가적인 에너지 소모가 발생할 뿐만 아니라 통신 오버헤드로 인해 네트워크의 처리량 감소를 유발하는 문제가 있다<sup>5)</sup>. 또한 GPS 장비를 사용하여 위치 파악을 한 후 은닉 노드가 발생하지 않도록 노드들을 그룹으로 나누는 기법<sup>6)</sup>도 소개되었다. 그러나 저가의 장비를 지원해야 하는 IEEE 802.15.4 네트워크의 일반적인 특성에는 GPS 장비로 인한 추가 비용이 발생하는 것은 네트워크의 운영 목적에 맞지 않을 수 있다.

[7]에서는 은닉 노드로 인한 충돌이 발생하게 되면

신호세기 측정을 통한 은닉 관계 정보를 수집하여 그룹을 형성한다. 코디네이터는 은닉 노드의 데이터 전송을 위해 주기적으로 GTS를 할당한다. 이 방법은 GPS 없이 은닉 노드 문제를 해결하지만 은닉 노드에서 보낼 데이터가 없을 경우에도 GTS를 할당하여 채널 대역폭을 낭비하는 단점이 있다. [8]에서는 은닉 노드 문제가 발생하였을 때 코디네이터는 은닉 노드가 GTS에 데이터 전송을 하기 위한 GACK 패킷을 보내고, 이 GACK 패킷을 수신한 노드는 자신이 은닉 노드임을 인지하고, 다음 수퍼프레임에 GTS 할당을 받기 위해 패킷을 보낸다. 이는 채널 대역폭 낭비를 줄이는 장점이 있지만 코디네이터가 항상 은닉 노드의 주소 정보를 인식해야 한다. 하지만 은닉 노드의 주소 정보를 가지고 있지 않을 수도 있으므로 이 방법은 은닉 노드로 인한 충돌을 완벽하게 제거하지 못한다.

본 논문에서는 노드들 간의 전송되는 신호의 세기를 이용하여 은닉 노드를 파악하고, GTS를 할당 받지 않고 비콘 프레임에 의해 그룹에 할당된 채널 점유 시간을 나누어 은닉 노드를 배제하는 HAG 알고리즘을 제안한다.

### III. HAG 알고리즘

은닉 노드로 인한 충돌을 제거하기 위하여 본문에서 제안하는 HAG 알고리즘은 그림 1의 HAG 알고리즘의 흐름도와 같이 5개의 단계로 나누어지며, 아래에서는 각각의 단계를 상세히 기술한다.

#### 3.1 은닉 노드 상황 인지 단계

그림 2는 CSMA/CA 기반의 채널 접근 방식에서 나타나는 대표적인 충돌 유형<sup>[7]</sup>을 보여준다. 그림 2 (가)는 두 개의 노드가 동시에 CCA를 수행하여 채널 사용이 가능함을 감지함으로써 동일한 슬롯에 전송을 시도하는 경우이며, 그림 2 (나)는 노드 1이 전송을 하고 있지만 은닉 관계에 있는 노드 2가 채널이 사용 가능한 것으로 잘못 판단함으로써 전송을 시도하여 발생하는 충돌을 보여준다.

본 논문에서 제안하는 HAG 알고리즘에서는 그림 2 (나)와 같이 코디네이터가 하나의 노드로부터 신호를 전송받던 도중에 충돌을 감지하는 경우를 은닉 노드로 인한 충돌로 정의한다. 이러한 유형의 충돌을 감지한 코디네이터는 네트워크 내 은닉 관계에 있는 노드들이 존재한다는 사실을 인지하게 된다.

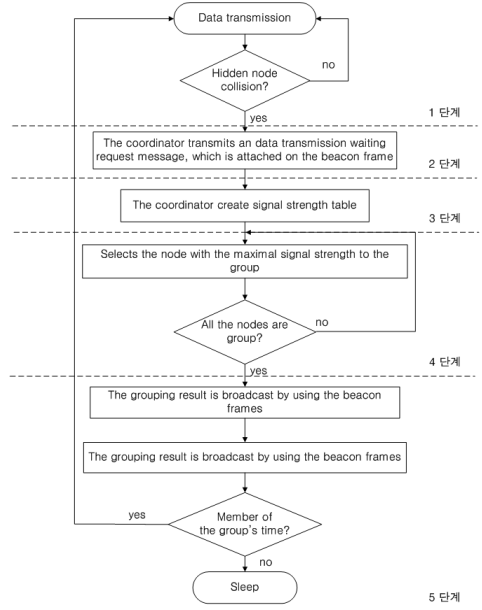


그림 1. HAG 알고리즘 흐름도  
Fig. 1. Flow chart of HAG algorithm

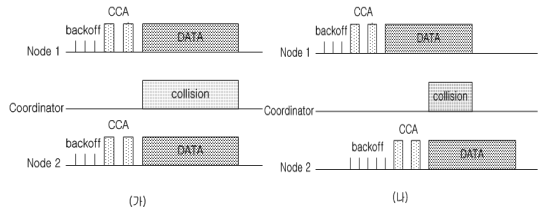


그림 2. (가) 동일한 백오프에 의한 충돌, (나) 은닉 노드에 의한 충돌  
Fig. 2. (가) Collision by same backoff, (나) Collision by hidden node

#### 3.2 은닉 노드 관계 파악 단계

은닉 노드 상황을 인지한 코디네이터는 비콘 프레임과 함께 네트워크에 속한 모든 노드들이 현재 수퍼프레임 기간 동안에 메시지 전송을 대기 하도록 요청하는 메시지를 함께 보낸다. 코디네이터는 각 노드에 순차적으로 메시지를 전송하고 코디네이터의 메시지를 수신한 노드들의 ACK 프레임을 기다린다. 코디네이터로부터 메시지를 수신한 각 노드들은 이에 대한 응답을 하며, 주변의 노드들 역시 노드의 응답 메시지를 수신하고, 수신된 메시지의 신호 세기를 기록한다. 만일 두 노드가 은닉 관계에 있는 경우 상대 노드로부터 ACK를 수신하지 못하며, 이때에는 신호 세기를 -1로 기록한다.

그림 3은 신호세기 수집 과정을 도식화한 것으로 노드  $N_A$ 와  $N_B$ 가 서로 상대의 신호를 감지하지 못하

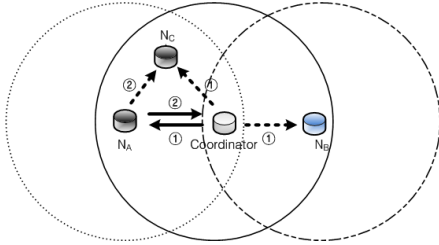


그림 3. 신호 세기 수집 과정  
Fig. 3. Collection of signal strength

는 은닉 관계에 있는 경우이다. ① 코디네이터가  $N_A$ 에게 메시지를 전송하면  $N_A$ 는 물론  $N_B$ 와  $N_C$ 도 이 신호를 수신한다. ②  $N_A$ 는 코디네이터에게 ACK 신호를 전송한다.  $N_C$ 는  $N_A$ 의 ACK 메시지를 수신하여 신호 세기를 기록하고, 은닉 관계에 있는  $N_B$ 는  $N_A$ 의 ACK 메시지를 수신하지 못하므로  $N_A$ 로부터의 신호 세기를 -1로 기록한다. 네트워크 내의 모든 노드에 대해 이와 같은 일련의 과정이 순차적으로 진행된 후에는 각 노드가 모든 노드들의 신호 세기를 기록하게 된다.

3.3 신호 세기 테이블 생성

네트워크 내의 모든 노드들이 주변 노드들 간의 신호 세기를 수집하면 코디네이터는 각 노드가 기록한 신호 세기를 보고하도록 요청하는 프레임을 전송하여 응답을 수신한다. 수집된 내용을 기반으로 코디네이터는 표 1과 같은 신호 세기 테이블에 각 노드가 기록한 주변 노드의 신호 세기를 기록한다.

표 1. 신호 세기 테이블  
Table 1. Signal strength table

	$N_1$	$N_2$	$N_3$	$N_4$
$N_1$		sig( $P_1, P_2$ )	sig( $P_1, P_3$ )	sig( $P_1, P_4$ )
$N_2$	sig( $P_2, P_1$ )		sig( $P_2, P_3$ )	sig( $P_2, P_4$ )
$N_3$	sig( $P_3, P_1$ )	sig( $P_3, P_2$ )		sig( $P_3, P_4$ )
$N_4$	sig( $P_4, P_1$ )	sig( $P_4, P_2$ )	sig( $P_4, P_3$ )	

3.4 그룹핑 알고리즘 적용단계

코디네이터는 신호 세기 테이블을 이용하여 가장 센 신호 세기를 갖는 두 개의 노드들로 이루어진 초기 그룹을 생성한다. 이어서 상호 은닉 관계에 있는 노드를 포함하지 않는 그룹들끼리의 신호 강도에 따라 순차적으로 그룹을 합병해 나간다. 예를 들어 그림 4(가)와 같이 6개의 노드들이 배치되어 있고, 그림 4(나)와 같은 신호 세기 테이블이 있다고 가정한다. 만일 2번 노드에서 그룹핑을 시작한다면 신호 세기가

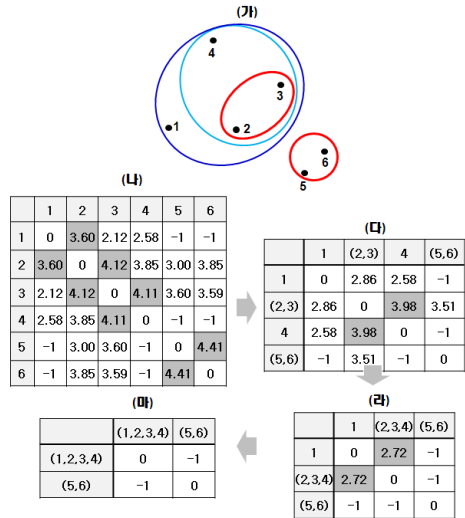


그림 4. 노드 신호세기에 따른 그룹결정  
Fig. 4. determined group according to the node signal strength

가장 큰 3번 노드와 먼저 그룹핑을 하고, 신호 세기 테이블에는 다른 노드들과의 신호세기 평균값을 저장한다. 그룹과 노드 간의 거리는 식 (1)을 사용하여 계산한다. 은닉 노드가 존재하지 않는 범위 내에서 그룹핑을 계속해서 진행하여 그림 4(마)와 같이 {1, 2, 3, 4}, {5, 6}으로 구성된 두 개의 그룹으로 나눈다.

노드의 수가 많을 경우 그룹 크기의 비대칭 문제를 예방하기 위해, 본 알고리즘에서는 그룹핑할 때 두 개의 조건을 적용한다. 즉, 첫 번째는 은닉 관계에 있는 노드가 속해 있는 지를 파악하여 소속될 그룹을 결정한다. 두 번째는 첫 번째에서 선택된 그룹에 속한 노드의 수가 최대 허용 노드 수를 넘은 경우에는 노드 수가 가장 작은 그룹을 선택하여 노드를 배정시킨다. [1]의 연구에서 보면 IEEE 802.15.4 표준에서 macMinBE 값이 5일때 네트워크의 노드 수가 12개를 넘어가면 처리량이 감소한다. 따라서 최대 허용 노드 수는 12로 두어 그룹을 나눈다.

$$\frac{\sum_{i=1}^n dist(x_i, t)}{n} \tag{1}$$

3.5 그룹별 채널 할당 단계

각 그룹에 채널을 할당할 수 있는 방법에는 여러 가지가 있을 수 있다. [6]의 연구에서는 그룹핑을 수행하고 나서 그룹의 리더를 선출한 후, 그룹 리더 간의 채널 경쟁을 통하여 승리한 그룹의 멤버들이 채널을

획득하여 전송하는 방식을 사용한다. 이 방식은 리더 선출과정이 시간적 낭비요소가 될 뿐 아니라 각 그룹의 리더가 채널 경쟁에 참여하기 위하여 그룹 멤버들의 전송 데이터 유무를 파악하는 단계도 필요하므로 비효율적이다. [10]에서는 연속적인 빈 슬롯 수와 충돌이나 성공적인 전송으로 인해 채널이 사용 중일 때의 슬롯 수의 비율을 통해 경쟁 노드 수를 추정하고 이를 기반으로 그룹을 결정한다. 각 노드는 자신의 그룹 주기 동안 데이터 전송을 하게 되는데 한 그룹에서 한번의 데이터 전송이 일어나면 채널 사용권은 다른 그룹으로 이양된다. 따라서 전송이 발생할 때 마다 그룹에 할당되는 채널 점유 시간이 가변적이다. 채널 점유 시간이 가변적이므로 각 노드는 그룹에 할당된 시간이 종료되는 시점을 알고 있어야 하는데, IEEE 802.11 표준에서는 모든 노드가 데이터 전송 과정을 듣고 ACK 메시지를 통해 전송이 끝났음을 알 수 있기 때문에 이 방법이 가능한 반면에 일반적으로 널리 사용되고 있는 단일 그룹으로 이루어진 IEEE 802.15.4 표준에서 각 노드는 CCA를 수행할 때만 채널 상태를 확인하므로 그룹 점유 시간에 동기를 맞출 수 없다.

본 논문에서는, 코디네이터는 그룹핑을 진행한 후 시간의 효율적인 사용을 위하여 각 그룹 당 배정된 슬롯 비율(Slot Ratio)에 따라 그룹 주기를 수정하여 전송을 시도한다. 이는 그룹 크기가 클수록 평균 충돌률이 높아지므로 해당 그룹에게 배정된 전송 시간을 증가시킨다. 그림 5는 각 그룹별 슬롯 비율에 따른 각 그룹의 전송시간 변화 예시를 보여준다. 초기 단계(initial round)에서는 코디네이터가 각 그룹의 전송 시간을 일정하게 나눈다. 그룹 시간 할당 단계(group time allocation round)에서는 코디네이터가 슬롯 비율에 따라 전송 시간을 조절해준다. 이 때, 전송 가능 구간을 알리기 위해 코디네이터가 비컨 프레임에 그룹별 전송 가능 구간에 대한 정보를 함께 전송한다. 코디네이터에게서 그룹별 전송 가능 구간에 대한 정보를 받은 후 각 그룹들은 자신에게 배정된 슬롯에서만 전송을 시도한다.

슬롯 비율은 식 (2)와 같이 정의된다. collision slots는 충돌로 인해 채널이 번잡 상태일 때의 슬롯 수이

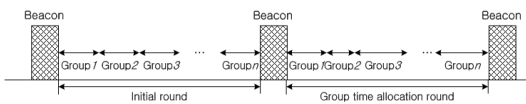


그림 5. 각 그룹 슬롯비에 따른 그룹 주기  
Fig. 5. group period per each group slot ratio

며, idle slots는 연속적인 빈 슬롯 수이다.

$$SR = \frac{\text{collision slots}}{\text{idle slots}} \quad (2)$$

각 그룹의 전송 시간마다 collision slots와 idle slots를 갱신한다. 즉, 각 단말은 채널 상태를 관찰하여  $i$  그룹의  $n$  번째 전송 시간 동안의 충돌 슬롯 수  $coll_n^i$ 와 유휴 슬롯 수  $idle_n^i$ 를 측정한다. 측정된 값과 EWMA(Exponential Weighted Moving Average)를 이용하여  $i$  번째 그룹의  $n$  번째 전송 시간 후의 각 그룹 당 평균 충돌 수  $E[\text{collision slots}]_n^i$ 와 평균 유휴 슬롯 수  $E[\text{idle slots}]_n^i$ 를 식 (3)과 같이 계산한다.  $\alpha$ 는 0과 1사이의 값으로 가중치를 정해주는 smoothing factor이다.

$$\begin{aligned} E[\text{collision slots}]_n^i &= \alpha E[\text{collision slots}]_{n-1}^i + (1-\alpha) coll_n^i \\ E[\text{idle slots}]_n^i &= \alpha E[\text{idle slots}]_{n-1}^i + (1-\alpha) idle_n^i \end{aligned} \quad (3)$$

모든 그룹은 처음 전송을 시작할 때 동일한 길이의 전송 시간을 갖는다. 성공적인 패킷 전송 후에 측정된 슬롯 비율과 최적 슬롯 비율을 이용하여 다음의 절차에 따라 그룹 주기를 갱신한다. 최적 슬롯 비율  $SR_{opt}$ 는 가장 좋은 효율을 얻을 때의 값으로 [11], [12]에 따르면 유휴 기간 동안 낭비된 시간과 충돌로 인해 낭비된 시간이 같을 때( $SR_{opt} = 1$ ) 네트워크는 가장 높은 효율을 보인다. 따라서  $SR_n^i > SR_{opt}$  이면 그룹 주기를 1 증가시키고,  $SR_n^i < SR_{opt}$  이면 그룹 주기를 1 감소시켜 각 그룹의 슬롯 비율에 따라 그룹 주기를 다르게 할당한다. 이렇게 할당받은 그룹 주기의 비율로 그룹 시간을 결정한다.

그룹 시간은 전체 그룹의 그룹 시간 중 자신의 그룹 시간의 비율을 이용하여 CAP를 각 그룹별로 시간을 나눈다. 그룹 시간을 구하는 식은 다음과 같다.

$$\text{Group time}_i = \frac{\text{Group time for group } i}{\text{total Group time per each group}} \times CAP \quad (4)$$

이와 같이 슬롯 비율을 이용하여 전송 시간을 조절할 경우 슬롯 비율 측정은 채널 검출방법이 모든 단말에 기본적으로 구현되어 있으므로 주기적인 오버헤드가 발생하지 않는다. 또한 채널 상태에 따라 전송 시간이 결정되므로 자기 그룹의 전송 시간이 아닌 경우 전송을 하지 않으므로 에너지 소비량은 감소되고 처

리량은 향상된다.

#### IV. HAG 알고리즘 분석적 모델

본 논문에서는 [3]에서 분석한 마코프 체인 모델을 사용하여 은닉 노드가 존재할 때 네트워크의 처리량을 분석한다. 또한 은닉 노드가 존재할 때 그룹핑 알고리즘을 사용한 경우와 사용하지 않은 경우를 비교하여 그룹핑 알고리즘 사용의 효율성을 증명한다.

[13]의 마코프 체인 모델을 바탕으로 IEEE 802.15.4 네트워크 처리량을 분석하면 식 (5)와 같이 정리할 수 있다. 처리량은 성공적으로 전송된 데이터 프레임의 평균 양으로 정의한다. 각 노드에서 초기에 선택한 백오프 시간이 경과된 후, 두 번 연속 채널을 감지한다. 식 (6)은 첫 감지에서 채널이 사용 상태일 확률을 계산한다. 첫 감지에서 채널이 유휴상태 ( $1-\alpha$ ) 라면 두 번째 감지를 수행하고, 이 때 채널이 사용 상태일 확률을 식 (7)과 같이 계산한다. 두 번째 CCA에서 채널이 유휴 상태라면 데이터 프레임의 길이인  $L$  에 해당하는 기간 동안 전송 상태로 진입한다. 센서 노드가 임의의 백오프 시간에서 처음으로 CCA를 수행하는 확률  $\tau$ 는 식 (8), 적어도 하나의 노드가 채널에 프레임을 전송할 확률  $P_{tr}$ 는 식 (9)와 같이 계산된다.  $n$ 은 전체 노드 수를 의미한다.

$$S(n) = Ln\tau(1-\tau)^{n-1}(1-\alpha)(1-\beta) \quad (5)$$

$$\alpha = L[1-(1-\tau)^{n-1}](1-\alpha)(1-\beta) \quad (6)$$

$$\beta = \left[1 - \frac{P_{tr}}{P_{tr}(1 + \frac{1}{1-(1-\tau)^n}})\right](1-(1-\tau)^n) \quad (7)$$

$$\tau = 1 - \left(1 - \frac{\beta}{1-\beta}\right)^{1/n} \quad (8)$$

$$P_{tr} = (1-(1-\tau)^n)(1-\alpha)(1-\beta) \quad (9)$$

두 개의 그룹으로 그룹핑을 하였을 때 개별적 상황에 대한 성능이 다르므로 발생할 수 있는 한 그룹당 속한 노드의 수를 변화 시키가면서 처리량 평균을 구하였다. 식 (10)을 사용하여 처리량 평균을 계산하였다. 여기서  $i$ 는 한 그룹에 속한 노드 수,  $(n-i)$ 는 다른 그룹에 속한 노드 수를 의미한다. 또한  $2^n - 2C_1$ 는 전체의 경우의 수에서 한 그룹에 노드가 존재하지 않은

경우를 제외한 것이다. 한 그룹에 노드가 존재하지 않은 경우를 제외한 이유는 본 알고리즘을 사용할 경우 한 그룹당 적어도 하나의 노드가 배정되도록 가정하였기 때문이다. 또한 식 (10)에는 신호 세기 테이블을 수집, 분석하는 수행시간은 포함하지 않았다. 이는 노드들의 빈번하게 움직이지 않는 환경에서는 수집, 분석이 자주 필요하지 않기 때문에 전송 시간에 비해서 무시할 수 있을 정도로 가정하였다.

$$S_{2groups}(n) = \sum_{i=1}^{n-1} \left(\frac{1}{2}(S(i) + S(n-i))\right) \times \frac{n C_i}{2^n - 2C_1}, \quad (10) \quad n \geq 2$$

[3]에서는 은닉 노드들을 고려하여 처리량을 계산하였다. 은닉 노드들이 이미 데이터를 전송하고 있는 상황에서 다른 노드들이 CCA를 수행하는 경우에는 은닉 노드의 전송을 감지하지 못하므로 채널을 유휴 상태로 잘못 판단하여 전송 충돌이 발생한다. 이러한 상황을 성능 모델에 반영하기 위해 은닉 노드가 데이터를 전송하는 중에 첫 번째 CCA를 수행하는 모든 경우를 계산한다. 그림 6에서 점선으로 이루어진 사각형으로 표현된  $\tau$ 와  $\tau_H$ 는 임의로 선택된 시점에 첫 번째 CCA를 수행할 확률과 은닉 노드로부터 데이터 프레임이 전송되는 동안의 취약 구간에서 처음으로 CCA를 수행하는 확률을 각각 나타낸다.

이 때, 은닉 노드가 있는 환경에서 전송 충돌을 유발하는 것은 채널 감지 단계에서의 오류이며 이와 같은 채널감지 오류가 발생할 수 있는 시간 구간을 취약 구간이라고 한다. 취약 구간은 은닉 노드가 전송하는 데이터 프레임의 길이와 같으며, 데이터 프레임의 길이 길면 취약 구간이 증가하며 이에 따라 전송 충돌 확률도 증가한다.

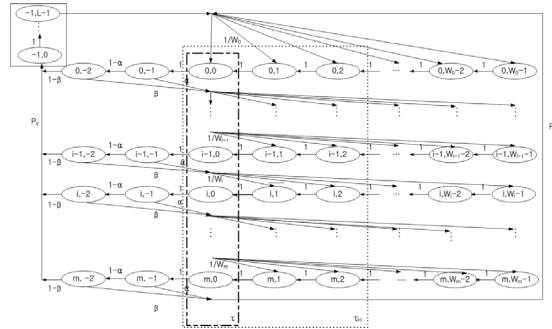


그림 6. 은닉 노드 상황을 고려한 IEEE 802.15.4 마코프 체인 모델  
Fig. 6. IEEE 802.15.4 Markov chain with the presence of hidden nodes

$$S(n) = \frac{n\tau(1-\alpha_H)(1-\beta_H)P_s L}{(1-\tau) + \tau\alpha_H + 2\tau(1-\alpha_H) + \tau(1-\alpha_H)(1-\beta_H)[P_s T_s + (1-P_s) T_c]} \quad (11)$$

그림 6의 마코프 체인을 바탕으로 은닉 노드를 고려한 네트워크 처리량을 분석하면 식 (11)과 같이 정리할 수 있다. 참고로,  $\alpha_H$ 는 은닉 노드가 존재하는 경우 데이터를 전송할 때 현재 전송하려는 노드를 제외한 적어도 하나의 수용 노드, 즉, 다른 노드들이 자신의 모든 전송을 감지할 수 있는 공간에 위치한 노드가 채널을 사용 중일 확률이며 식 (12)와 같이 계산된다. 이때 전송하려는 노드는 은닉 노드의 전송을 감지하지 못하기 때문에 CCA에서는 수용 노드의 전송만이 고려된다.  $n_C$ 는 전송하려는 노드를 포함한 수용 노드의 수,  $n_H$ 는 은닉 노드의 수,  $n$ 은 전체 노드 수라고 할 때  $n = n_C + n_H$ 이다.  $T_s$ ,  $T_c$ 은 각각 성공적으로 데이터를 전송하는데 소요된 시간, 전송된 데이터에 충돌이 발생했을 때 소요된 시간을 계산한 값을 의미한다.  $P_s$ 는 성공적으로 데이터를 전송할 확률을 의미한다.  $T_{CCA}$ ,  $T_{AckWaitTime}$ ,  $T_{macAckWaitDuration}$ ,  $L_{ACK}$ 는 각각 CCA 수행시간, ACK를 전송받는 시간, 최대 ACK 대기시간, ACK의 길이를 의미한다.

$$\alpha_H = L[1 - (1-\tau)^{n_C-1}](1-\alpha)(1-\beta) \quad (12)$$

$$\beta_H = \left[1 - \frac{P_{tr}}{P_{tr} \left(1 + \frac{1}{1 - (1-\tau)^{n_C}}\right)}\right](1 - (1-\tau)^{n_C}) \quad (13)$$

$$T_s = 2T_{CCA} + L + T_{AckWaitTime} + L_{Ack} + LIFS \quad (14)$$

$$T_c = 2T_{CCA} + L + T_{macAckWaitDuration} \quad (15)$$

$$P_s = (1-\tau)^{n_C-1} (1-\tau_H)^{n_H} \quad (16)$$

### V. 실험 및 성능 분석

단일 그룹으로 이루어진 IEEE 802.15.4 표준과 본 논문에서 제안하는 그룹핑 알고리즘의 성능을 비교하기 위해 네트워크 처리량과 충돌 확률을 비교 분석한다. 네트워크 시뮬레이션 프로그램인 NS-2<sup>[14]</sup>를 이용하여 실험하였으며 시뮬레이션을 위한 파라미터는 표 2와 같다.

은닉 노드 문제가 발생하는 환경을 구성하여 성능

을 분석하기 위하여 <sup>[3]</sup>에서 사용한 은닉 노드 배치 기법을 사용한다. <sup>[3]</sup>에서 사용한 배치 기법은 Friis의 공식<sup>[15]</sup>에 의거하여 전송 전력을 일정하게 하고 각 노드 간의 거리를 다르게 함으로써 원하는 만큼의 은닉 노드를 포함할 수 있도록 한다. 즉, 네트워크 구성은 중앙에 하나의 코디네이터와  $n$ 개의 센서 노드로 구성된 스타 토폴로지를 가정하며 노드의 위치는 수학적 계산을 통해 결정한다. 스타 토폴로지 상태에서 중심에 코디네이터를 두고 코디네이터를 중심으로 노드의 수와 원하는 은닉 노드의 수에 따라 다른 수학적 모델링을 통하여 노드를 배치하여 은닉 노드 상태를 만든다. 본 논문에서는 서로 경쟁하는  $n$ 개의 노드들 중 은닉 노드의 수를 0, 1, 3개로 변화시켜가며 서로 다른 네트워크 상황을 고려하였다.

그림 7은 수학적 분석 모델과 시뮬레이션 모델의 차이를 보여준다. model로 표시된 곡선은 수학적 분석 결과이고, sim으로 표시된 곡선은 실험 결과이다. sim(HAG-2groups)는 그룹을 2개로 나누었을 때, 모든 경우의 수의 평균을 나타낸 값이다. 수학적 분석 결과와 실험 결과를 비교해 보면 IEEE 802.15.4 표준은 최대 9%, 평균 8%의 차이가 나고, HAG를 사용하여 그룹을 2개로 나누었을 경우 최대 6% 평균 5%의 차이에 불과하다. 아울러 노드 수의 증가에 따른 네트워크 처리량은 변화 추이가 일치하므로 확률적인 오차 범위를 감안한다면 수학적 분석과 시뮬레이션 모델의 차이가 없음을 확인할 수 있다.

또한 은닉 노드가 네트워크 처리량에 미치는 영향을 보여주기 위해 그림 7은 IEEE 802.15.4 표준에서 은닉 노드 관계가 없을 경우와 은닉 노드가 존재하는 경우의 처리량을 비교분석 한다. 또한 각 선은 은닉 노드가 0, 1, 3개일 때를 나타낸다. 은닉 노드가 1개

표 2. 성능분석을 위한 파라미터  
Table 2. Parameters for performance analysis

파라미터	값
Packet Payload	70 Bytes
MAC header	7 Bytes
PHY header	6 Bytes
ACK	11 Bytes
Channel Bit Rate	250 Kbps
macMinBE	3
aMaxBE	5
Beacon Order (BO)	3
Superframe Order (SO)	3

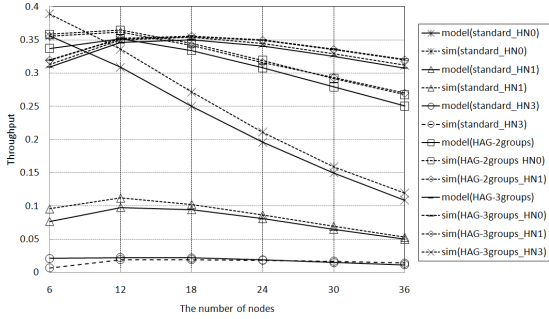


그림 7. 수학적 분석 모델과 시뮬레이션 모델 비교  
Fig. 7. Analytic model vs. simulation model

존재할 때, 존재하지 않을 때에 비해 최대 75%, 평균 60% 처리량이 감소된다. 또한 은닉 노드가 1개 존재할 때, 은닉 노드가 3개 존재할 때에 비해 최대 92%, 평균 78% 처리량이 감소된다. 이처럼 은닉 노드의 존재는 처리량을 크게 감소시킨다. 그림 7에서 standard\_HN0은 단일 그룹으로 이루어진 IEEE 802.15.4 표준이며, 은닉 노드의 수가 0개를 의미한다. standard\_HN1은 IEEE 802.15.4 표준이며, 은닉 노드의 수가 1개를 의미한다. 은닉 노드가 1개라는 의미는 어떤 노드가 전체의 노드에서 1개의 노드만이 은닉 노드 관계임을 의미한다. 그림 8에서 2개의 그룹으로 나눌 때 은닉 노드가 없을 때와 거의 유사하다. 이는 HAG 알고리즘을 사용할 경우 은닉 노드의 여부가 처리량에 영향을 미치지 않으므로 기존의 단일 그룹 방식에 비해 높은 처리량을 보여준다.

그림 8은 은닉 노드가 존재하지 않는 상황에서 IEEE 802.15.4 표준에 따라 단일 그룹으로 했을 때와 그룹을 2개, 3개로 나누었을 경우의 처리량이다. 실험 결과 단일 그룹 상황과 비교했을 때 그룹을 2개로 나

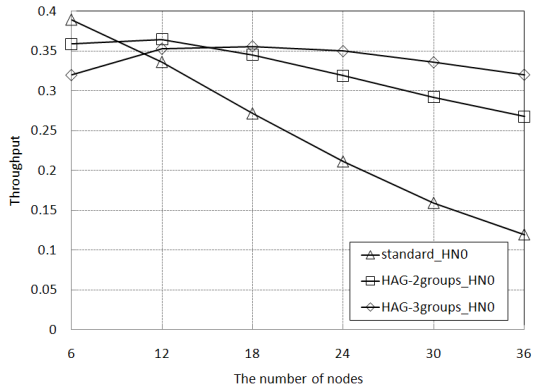


그림 8. 은닉 노드가 존재하지 않은 환경에서의 처리량  
Fig. 8. Throughput with the absence of hidden nodes

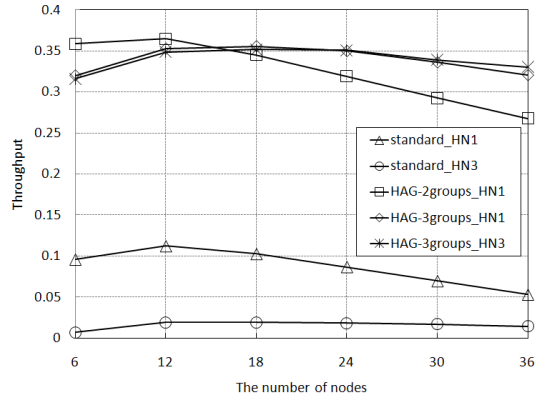


그림 9. 은닉 노드가 존재하는 환경에서의 처리량  
Fig. 9. Throughput with the presence of hidden nodes

누었을 경우 노드 수가 10개를 초과하는 경우 처리량이 최대 55%, 평균 33% 만큼 높으며, 그룹을 3개로 나누었을 경우 처리량이 최대 62%, 평균 37% 만큼 높은 것을 확인할 수 있다.

그림 9는 은닉 노드가 존재하는 상황에서 단일 그룹과 그룹을 2개, 3개로 나누었을 경우의 처리량을 보여준다. 은닉 노드가 1개 존재할 경우 표준과 비교했을 때, 그룹을 2개로 나누었을 경우 최대 80%, 평균 74%, 그룹을 3개로 나누었을 경우 최대 84%, 평균 75% 처리량이 증가한다. 또한 은닉 노드가 3개가 존재할 경우 그룹을 3개로 나누었을 경우 최대 97%, 평균 95% 처리량이 차이가 난다. 이는 HAG 알고리즘은 신호세기로 서로 은닉 관계인지를 확인하고, 은닉

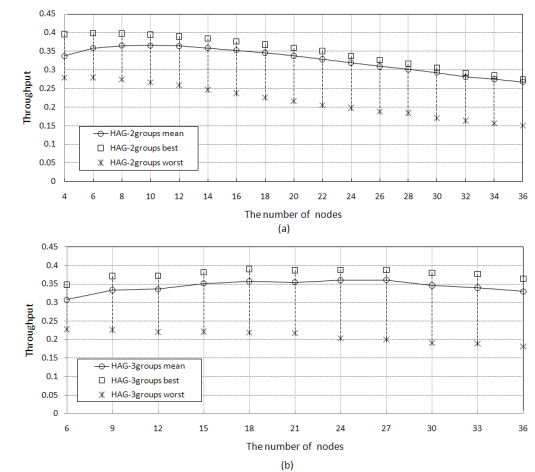


그림 10. HAG 알고리즘을 사용하였을 때 최상, 최악, 평균 경우의 비교  
(a) 그룹이 2개일 경우, (b) 그룹이 3개일 경우  
Fig. 10. Performance comparison of HAG algorithm for best, worst, mean cases (a) 2 groups, (b) 3 groups



노드 관계가 아닐 경우에만 그룹핑을 진행하므로 은닉 노드에 대한 영향을 받지 않기 때문에 처리량이 향상되었음을 입증하는 결과이다.

그림 10은 HAG 알고리즘을 사용하였을 때 평균, 최상, 최악의 경우의 처리량 변화를 보여준다. (a)는 그룹이 두 개일 경우를 보여준다. 두 개의 그룹으로 나눌 때 한 그룹에는 한 개의 노드만을 두고, 나머지는 다른 그룹에 속하게 하여 실험하였을 경우(최악: worst)와 두 개의 그룹에 정확히 같은 수의 노드를 넣어 실험했을 경우(최상: best)를 비교하면 최대 46%, 평균 39% 처리량의 차이가 나는 것을 확인할 수 있었다. 또한 (b)는 그룹이 세 개일 경우를 보여준다. 세 개의 그룹으로 나눌 때 두 그룹에는 한 개의 노드만을 두고, 나머지 한 그룹에는 다른 그룹에 속하게 하여 실험하였을 경우와 세 개의 그룹에 정확히 같은 수의 노드를 넣어 실험했을 경우를 비교하면 최대 50%, 평균 46% 처리량의 차이가 나는 것을 확인할 수 있었다. 이는 최악의 경우만 아니라면 HAG 알고리즘이 성능 개선에 크게 기여함을 보여준다.

그림 11은 은닉 노드 문제를 해결하기 위해 IEEE 802.15.4에 RTS/CTS 알고리즘을 적용하였을 경우와 HAG 알고리즘을 적용하였을 경우를 비교하여 보여준다. RTS/CTS 알고리즘을 사용하였을 경우 보다 HAG 알고리즘을 사용하여 그룹핑 하였을 경우 2개일 경우 평균 27% 최대 55%, 3개일 경우 평균 36%, 최대 69% 처리량의 차이가 있다. 이는 은닉 노드가 있는 경우에는 RTS/CTS에 비해 본 논문에서 제안하는 HAG 알고리즘이 효율적이라는 것을 보여주고 있다.

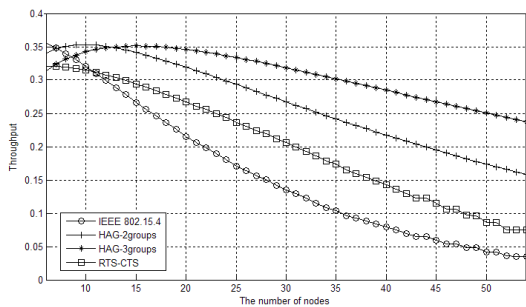


그림 11. HAG 알고리즘과 RTS-CTS 알고리즘 비교  
Fig. 11. Performance comparison of HAG algorithm and RTS-CTS algorithm

## VI. 결 론

IEEE 802.15.4 네트워크 표준은 에너지를 효율적으로 사용하기 위해서 은닉 노드 문제를 해결하기 위

한 메커니즘을 사용하지 않기 때문에 은닉 노드가 발생하면 네트워크의 처리량은 급격히 저하된다. 본 논문에서는 IEEE 802.15.4에서 은닉 노드 문제를 해결하기 위한 HAG 알고리즘을 제안하여 네트워크 내에 은닉 관계에 있는 노드들을 서로 다른 그룹에 배치하고 각 그룹이 채널에 배타적으로 접근하도록 시간 구간을 할당함으로써 은닉 노드로 인한 충돌을 줄여준 것은 물론, 채널 경쟁을 특정 그룹 내의 노드 수로 한정함으로써 충돌 확률을 완화하는 효과를 동시에 얻을 수 있다. 본 논문을 통하여 은닉 노드로 인한 처리량 감소를 극복할 수 있고 노드가 많고 처리해야 할 데이터가 많은 상황에서도 이에 대처할 수 있는 HAG 알고리즘을 제안하였다.

향후 그룹핑 후 각 그룹이 효율적으로 채널을 접근할 수 있는 방법에 대한 연구가 지속적으로 필요하며 전체 네트워크에 있는 노드 수에 따른 최적화된 그룹 수를 결정하는 문제와 결정된 그룹 내의 노드 수를 최적화 하는 연구가 필요하다.

## 참 고 문 헌

- [1] Wireless Medium Access Control(MAC) and Physical Layer(PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs), IEEE Standard 802.15.4-2003.
- [2] Wireless Medium Access Control(MAC) and Physical Layer(PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs), IEEE Standard 802.15.4-2006.
- [3] Y. S. Shin, G. W. Hyun, J. S. Ahn, H. C. Kim and K. W. Lee, "An Analytical Model for LR-WPAN Performance in the Presence of Hidden Nodes", The KIPS Transactions: Part C, no. 1, pp.133-142, 2009.
- [4] S. Zhang and S. J. Yoo, "Fast Recovery from Hidden Node Collision for IEEE 802.15.4 LR-WPANs", In Computer and Information Technology, pp.393-398, 2007.
- [5] Jianliang Zheng and Myung J. Lee, "A comprehensive Performance Study of IEEE 802.15.4", IEEE Press Book, 2004.
- [6] Z. Abichar, J. Chang, and D. Qiao, "Group-Based Medium Access for Next-Generation Wireless LANs", Proceedings of the 2006 International Symposium on World of

Wireless, Mobile and Multimedia Networks table of contents, pp.35-41, 2006.

- [7] L. J. Hwang, S. T. Sheu, Y. T. Shih, and Y. C. Chen, "Grouping Strategy for Solving Hidden Node Problem in IEEE 802.15.4 LR-WPAN", In proceedings of Wireless Internet Conference, WICON, pp.26-32, Jul. 2005.
- [8] S. T. Sheu and Y. Y. Shih, "P-Frozen Contention Strategy for solving Collision Chain Problem in IEEE 802.15.4 WPANs", Vehicular Technology Conference 2006-Spring, pp.1323-1327, 2006.
- [9] R. K. Patro, M. Raina, V. Ganapathy, M. Shamaiah, C. Thejaswi, "Analysis and improvement of contention access protocol in IEEE 802.15.4 star network", Mobile Adhoc and Sensor Systems, 2007. IEEE International Conference on, Page(s): 1-8, 2007.
- [10] S. M. Kim and Y. J. Cho, "A virtual Grouping Scheme for Improving the Performance of IEEE 802.11 Distributed Coordination Function", Proceedings of Wireless Networks and Emerging Technologies, pp.535-544, 2004.
- [11] F. Cali, M. Conti, and E. Gregori, "Dynamic Tuning of the IEEE 802.11 Protocol to Achieve a Theoretical Throughput Limit", IEEE/ACM Transactions on Networking, vol. 8, no. 6, 2000.
- [12] R. G. Gallager, "A Perspective on Multiaccess Channels", IEEE Transactions on Information Theory, vol. IT-31, no. 2, 1985.
- [13] S. Pollin, M. Ergen, *et al.*, "Performance analysis of slotted IEEE 802.15.4 medium access layer", Technical Report, Sept. 2005.
- [14] ns-2 official Site, <http://www.isi.edu/nsnam/ns>
- [15] H. T. Friis, Proc. IRE, vol. 34, p. 254. 1946.

**엄진영 (Jin-Yeong Um)**

정회원



2004년 2월 동국대학교 컴퓨터공학과 졸업  
 2008년 2월 동국대학교 컴퓨터공학과 석사  
 2008년 8월~현재 동국대학교 컴퓨터공학과 박사과정  
 <관심분야> 무선통신, 센서네트워크, 네트워크 시뮬레이션

**안종석 (Jong-Suk Ahn)**

정회원



1983년 2월 서울대학교 전자공학과 졸업  
 1985년 2월 KAIST 전기 및 전자공학과 석사  
 1985년~1989년 삼성전자 주임연구원  
 1995년 2월 University of Southern California 컴퓨터공학과 박사  
 1995년~1996년 삼성전자 선임연구원  
 2001년~2002년 USC/ISI 교환 연구원  
 1996년~현재 동국대학교 컴퓨터 공학과 교수  
 <관심분야> 네트워크 시뮬레이션, 무선 통신, 라우팅 알고리즘, 센서 네트워크 등

**이강우 (Kang-Woo Lee)**

정회원



1985년 2월 연세대학교 전자공학과 학사  
 1991년 2월 University of Southern California 전기공학과 석사  
 1997년 2월 University of Southern California 전기공학과 박사  
 1998년~현재 동국대학교 정보통신공학과 교수  
 <관심분야> 컴퓨터 구조, 임베디드 시스템, 센서 네트워크 등