

# 은닉노드를 고려한 LR-WPAN 성능의 분석적 모델

신 연 순<sup>†</sup> · 현 규 완<sup>\*\*</sup> · 안 종 석<sup>\*\*\*</sup> · 김 희 철<sup>\*\*\*\*</sup> · 이 강 우<sup>\*\*\*\*\*</sup>

## 요 약

이 논문에서는 은닉 노드(hidden node)들이 있는 환경에서 IEEE 802.15.4의 성능을 정확하게 예측할 수 있는 수학적 모델을 제시한다. 기존의 802.15.4 성능 분석을 위한 수학적 모델은 은닉 노드들이 없는, 즉 모든 노드들은 다른 노드들의 전송 상태를 측정할 수 있는 이상적인 상황만을 고려하였다. 그러나 노드들의 배치에 따라서 은닉 노드들이 빈번하게 발생할 수 있어, 기존의 모델들은 현실적 환경에서 802.15.4의 성능을 정확히 측정하지 못하는 문제가 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 이 논문에서 제안한 모델은 기존의 802.15.4의 성능 모델에 은닉노드의 성능 영향 모델을 추가하였다. 제안한 802.15.4의 수학적 성능 모델에 의하면 작은 은닉 노드의 수에 의해 성능이 급격하게 저하된다. 일례로 전체 노드의 5%가 은닉노드일 때 802.15.4의 성능이 최대 62% 저하된다. 이러한 예측한 결과는 ns-2의 시뮬레이션 결과와 비교할 때, 최대 6%의 오류한도에서 동일하다.

키워드 : 802.15.4, CSMA/CA, 포화조건, 처리량, 전송 충돌, 은닉노드

## An Analytical Model for LR-WPAN Performance in the Presence of Hidden Nodes

Youn-Soon Shin<sup>†</sup> · Gyu-Wan Hyun<sup>\*\*</sup> · Jong-Suk Ahn<sup>\*\*\*</sup> · Hie-Cheol Kim<sup>\*\*\*\*</sup> · Kang-Woo Lee<sup>\*\*\*\*\*</sup>

## ABSTRACT

This paper proposes an analytical performance model of IEEE 802.15.4 in the presence of hidden nodes. Conventional 802.15.4 mathematical models assume ideal situations where every node can detect the transmission signal of every other nodes different from the realistic environments. Since nodes can be randomly located in real environments so that some nodes' presence is hidden from other ones, this assumption leads to wrong performance evaluation of 802.15.4. For solving this problem, we develop an extended performance model which combines the traditional 802.15.4 performance model with one for accounting the presence of hidden nodes. The extended model predicts the rapid performance degradation of 802.15.4 due to the small number of hidden nodes. The performance, for example, degrades by 62% at maximum when 5% of the total nodes are hidden. These predictions are confirmed to be equal to those of ns-2 simulations by less than 6% difference.

Keywords : 802.15.4, CSMA/CA, Saturation Throughput, Collision, Hidden Node

## 1. 서 론

저속 무선 근거리 개인 네트워크(LR-WPANs: Low Rate Wireless Personal Area Networks)를 지원하기 위해 IEEE 802.15.4

표준[1]이 정의되었다. 이는 IEEE 802.11표준[2]과는 달리 전원을 교체하기 어려운 무선 센서 네트워크 환경에서 효율적으로 동작될 수 있도록 제정되었다. 즉 802.15.4에서는 센서 노드가 일반적인 무선 노드에 비해 낮은 처리 능력과 한정된 전원을 갖는다고 가정한다. 또한 센서 노드가 이동성이 거의 없으며 한 셀 안에서는 802.11 랜의 접근점(access point)역할을 하는 PAN 조정자(coordinator)를 통해서만 통신이 이루어진다고 가정한다.

에너지를 효율적으로 사용하기 위하여, 802.15.4는 비콘 프레임(beacon frame)에 의해 구분되는 슈퍼프레임(superframe) 단위로 동작하도록 규정한다. 하나의 슈퍼프레임은 동작(active) 구간과 비동작(inactive) 구간으로 나누어지며, 동작 구간은 경쟁 기반의 CAP(Contention Access Period)와 비경쟁 기반의 CFP(Contention Free Period)로 세분된다. CAP에서는 CSMA/CA(Carrier Sense

\* 본 연구는 지식경제부 및 정보통신연구진흥원의 IT핵심기술개발사업의 일환으로 수행하였음. (2008-F-041-01, 학습 및 진화를 통한 S/W, H/W 적 재설계가 가능한 지능로봇 기술 개발).

\*\* 본 연구는 정보통신부 및 정보통신연구진흥원의 지원을 받아 수행되었음. (08-기반-13, IT특화연구소"유비쿼터스 신기술 연구센터" 설립 및 운영).

† 준 회 원 : 동국대학교 정보통신공학과 박사과정

\*\* 준 회 원 : 동국대학교 정보통신공학과 석사과정

\*\*\* 종신회원 : 동국대학교 컴퓨터공학과 교수

\*\*\*\* 정 회 원 : 대구대학교 정보통신공학부 교수

\*\*\*\*\* 종신회원 : 동국대학교 정보통신공학과 부교수(주저자)

논문접수 : 2008년 10월 28일

수정일 : 1차 2009년 1월 15일

심사완료 : 2009년 1월 15일

Multiple Access with Collision Avoidance) 알고리즘을 이용하여 데이터가 경쟁적으로 전송되며, CFP에서는 예약에 의해 비경쟁적 전송이 이루어진다. 데이터 전송간의 경쟁이 이루어지는 CAP에서 두 개 이상의 노드들이 동시에 전송을 하는 경우에는 전송 간의 충돌이 발생한다. 이 때 전송 충돌에 연관된 노드들은 해당 데이터를 재전송해야 되므로, 전체적인 데이터 처리량(throughput)이 저하되고 재전송으로 인한 전력의 추가 소모가 발생하는 등 LR-WPAN의 전체적인 성능을 저하시킨다.

특히, 802.15.4에서 각 노드는 노드별로 일정한 시점에서 채널이 사용되고 있는 지 여부만을 감지하여 전송 가능성을 확인하므로, 채널 상에 다른 노드들이 전송한 데이터가 존재하더라도 이를 감지하지 못한다면 데이터 전송을 시작한다. 즉, 임의의 노드들이 서로의 신호를 감지하지 못하는 공간에 위치하고 있는 경우에는 채널이 사용 가능하다고 판단함에 따라 데이터를 전송하여 예기치 않은 충돌이 발생한다. 이는 성능저하를 야기하는 또 다른 중요한 요소가 되며, 특히 노드의 수가 많은 대규모 네트워크에서 그 영향이 더욱 심각해진다. 이와 같이 다른 노드들이 자신의 신호를 감지하지 못하는 공간에 위치하고 있는 노드들을 은닉 노드(HN, Hidden Nodes)라 한다.

802.11에서는 Request-to-Send/Clear-to-Send (RTS/CTS) 메커니즘을 사용한다. 즉, RTS/CTS 메커니즘은 각 노드들이 데이터 프레임 전송하기 전에 조정자에게 RTS 프레임을 전송하고, 조정자로부터 채널이 사용가능함을 알려주는 CTS 프레임을 수신함으로써 채널을 예약한다. 이와 같이 RTS/CTS 프레임을 교환함으로써, 802.11에서는 은닉 노드로 인한 문제가 완화될 수는 있지만 완전히 해결되는 것은 아니다. 이에, 802.11에서의 은닉 노드 문제를 해결하려는 연구가 계속되어 왔다. 일반적으로 802.11에서의 성능분석에서는 2차원 마코프 체인(Markov Chain)을 이용하여 백오프 절차와 전송 확률을 모델링한다. 백오프 절차는 충돌을 피하기 위해 CSMA/CA 알고리즘에서 사용하는 주된 방법이다. 그러나 은닉 노드의 영향력 분석에서는 백오프 절차가 무시되기도 했다. [3]에서는 포화 조건에서 은닉 노드의 영향을 백오프 절차를 포함하지 않고 분석한 모델이 제시되었다. 이에 [4, 5]는 포화(saturation) 조건과 비포화(non-saturation) 조건에서 은닉 노드가 존재하는 경우, RTS/CTS를 사용할 때와 사용하지 않을 때의 네트워크 처리량을 각각 백오프 절차를 포함하여 분석하였다. 즉, 은닉 노드가 서로 신호가 닿지 않는 곳에 위치한 다른 노드들과 동시에 데이터를 전송하는 경우의 전송 확률을 계산하기 위한 2차원 마코프 체인 모델을 제시하고 이를 ns-2를 이용한 시뮬레이션을 통해 검증하였다. [6]은 은닉 노드가 존재하고 노드에 이동성이 있는 802.11 무선랜의 성능을 분석하였다. 마코프 체인을 이용한 모델을 제시하고 시뮬레이션을 통해 이를 검증하였다. 은닉 노드의 수와 각 노드의 이동률의 변화에 따른 성능 분석을 통해 802.11 프로토콜이 보통의 이동성과 은닉 노드 조건의 환경을 충분히 지원할 수 있으며 파라미터를 적절히 조정한다면 극심한 이동성과 은닉 노드의 영향에도 성능을 향상시킬 수 있음을 증명하였다.

802.15.4에서의 은닉 노드 문제를 해결하기 위해 [7]은 RTS/CTS 메커니즘을 사용하지 않는 그룹화 전략을 제시하였다. 이

전략은 각 그룹 내에서의 모든 노드들이 서로에게 은닉이 되지 않도록 노드들을 그룹화 한다. 이 기법은 slotted CSMA/CA 알고리즘을 사용하는 각 그룹에 배타적인 시간 구간을 할당하여 은닉 노드로 인한 충돌을 제거함으로써 전송 효율과 에너지 절감의 효과를 얻었다. PAN 조정자는 은닉 노드가 발생한 상황을 인지하고 필요한 경우에는 그룹화 절차를 수행한다. [8]은 802.15.4에서 은닉 노드의 영향을 시뮬레이션을 통하여 분석하였고, 은닉 노드로 인하여 발생하는 문제를 완화시키기 위해 MAC 파라미터를 조정하는 방안을 제시하였다. [9]은 802.15.4 환경에서의 은닉 노드의 영향을 에너지 비용과 연관시킨 전송 지연과 처리량에 대한 평가를 시뮬레이션을 통하여 수행하였다. 전송 전력을 높이면 은닉 노드의 영향력을 줄여 처리량에 대한 영향을 최소화할 수 있지만 에너지 비용이 많아져 802.15.4의 저전력 특성을 유지할 수 없음을 분석하였다. [10]은 802.15.4의 CSMA/CA 알고리즘을 사용할 때 은닉 노드가 존재하는 경우에는 전송 충돌이 반복적으로 지속되기 때문에 성능이 저하되는 문제를 지적하며 빠른 복구 메커니즘을 제안하였다. 중앙의 조정자는 은닉 노드의 존재를 발견하면 충돌한 패킷의 재전송을 위한 우선순위를 결정하는 그룹 폴링 ACK를 전송하는 방안을 제시하고 시뮬레이션을 통해 성능을 분석하였다. 이와 같이 시뮬레이션을 이용한 은닉 노드의 영향에 관련된 연구는 많이 소개되었으나 은닉 노드의 영향을 수학적으로 분석한 연구는 소개되지 않고 있다.

기존의 IEEE 802.15.4의 성능 평가는 [11]에서와 같이 시뮬레이션에 의존하거나 다양한 수학적 모델들을 활용하여 왔다. [12, 13, 14]에서는 802.15.4에 대해 2차원 마코프 체인에 기반을 둔 모델을 사용하여 성능 분석을 시도하였으며, [15]에서는 802.15.4를 위한 2차원 마코프 체인 모델에 우선순위를 적용한 GTS 서비스 지연의 분석 모델을 제안하였다. 이들 성능 분석을 위한 수학적 모델은 은닉 노드들이 없는, 즉 모든 노드들은 다른 노드들의 전송 상태를 측정할 수 있는 이상적인 상황만을 고려하였다. 그러나 노드들의 배치에 따라서 은닉 노드들이 빈번하게 발생할 수 있어, 기존의 모델들은 현실적 환경에서 802.15.4의 성능을 정확히 측정하지 못하는 문제가 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 본 논문에서는 각 노드 내의 대기열에 전송할 데이터가 언제나 존재하는 포화 조건에서 802.15.4 네트워크에 은닉 노드가 존재할 때의 네트워크 처리량에 대한 수학적 분석 모델을 제안한다. 즉, 802.15.4의 성능에 대한 은닉 노드의 영향을 평가하기 위해 각 노드의 데이터 전송 확률과 네트워크 전체의 처리량과의 연관관계를 이용한 성능 분석 모델이다. 이를 위하여, 802.15.4의 처리량을 계산하기 위한 2차원 마코프 체인 모델과 802.11에서 은닉 노드의 영향력 분석을 위한 성능 모델을 결합하였다. 이러한 수학적 모델에 따르면 802.15.4 표준에서의 은닉 노드의 영향을 비교한 결과, 20개의 센서 노드가 채널에 접근하기 위해 경쟁할 때 은닉 노드가 존재하지 않는 경우에 비해 은닉 노드가 1개라도 존재하는 경우 성능이 62% 이상 저하되는 것을 확인하였다. ns-2[16]를 이용한 시뮬레이션의 결과와 비교하여 본 논문에서 제안하는 수학적 모델을 검증하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 802.15.4 표준을 소개하고 3장에서는 제안하는 성능 분석 모델을 설명한다. 4장에서

는 수학적 모델링 결과와 시뮬레이션 결과의 비교를 통해 제안한 모델의 정확성을 검증한다. 마지막으로 5장에서는 결론 및 향후 연구 과제를 기술한다.

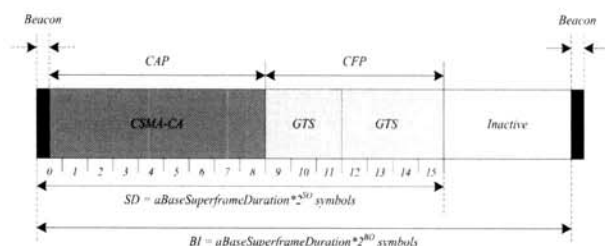
## 2. IEEE 802.15.4에서의 은닉 노드 문제

### 2.1 IEEE 802.15.4 표준

IEEE 802.15.4 표준은 LR-WPAN에 대한 물리계층과 MAC 부계층을 정의한다. 802.15.4 표준의 POS(Personal Operating Space)는 전송 전력에 따라 10미터에서부터 100미터에 이르기까지 다양하며 전력 공급이 제한된 장치들을 대상으로 한 저전력 센서 네트워크에 적합하도록 규정하고 있다. 효율적인 에너지 사용을 위해 비콘 프레임은 경계로 정의되는 슈퍼프레임 단위로 동작시간을 구분한다. 각 슈퍼프레임에서의 비콘 프레임은 PAN 조정자가 노드들에게 전송하며, 802.11에서의 비콘 프레임과 같이, 센서 노드들의 데이터 전송에 관련된 다양한 정보들을 제공한다. 예를 들어 비콘 프레임의 주기를 결정하는 비콘 오더(BO, Beacon Order)와 동작 구간의 길이를 결정하는 슈퍼프레임 오더(SO, Superframe Order) 등이 비콘 프레임 내에 포함된다.

(그림 1)에서 보듯이 비콘 프레임 간의 구간(BI, Beacon Interval)은 동작구간인 슈퍼프레임 구간(SD, Superframe Duration)과 비동작 구간으로 구성되며, 비동작 구간에서는 트랜시버의 전원을 차단하여 에너지 소모를 줄인다. 동작 구간은 CAP와 CFP 구간으로 구성된다.  $aBaseSuperframeDuration$ 은 SO가 0일 때의 슈퍼프레임의 동작 구간의 길이를 의미하며, 그 크기는 사용되는 주파수 대역에 의존한다. 동작구간은 비콘 프레임 내에서 정의된 SO에 의해 그 길이가 정해지며, 16개의 동일한 시간 구간(TS, Time Slot)으로 구성된다. CAP 내에서는 데이터 전송을 원하는 센서 노드들이 CSMA/CA 알고리즘을 이용하여 경쟁적으로 전송한다. CFP 구간은 경쟁 없이 GTS 단위로 데이터를 전송할 수 있는데, 하나의 센서 노드는 최대 7개의 GTS를 할당 받을 수 있다.

CSMA/CA 매커니즘은 채널 상태를 사용(busy)상태와 유휴(idle)상태로 정의한다. 노드가 채널을 감지(CCA: Clear Channel Assessment)할 때 어떤 전송도 감지하지 못했다면 유휴상태라고 하고 그렇지 않다면 사용 상태라고 한다. 노드들은 전송 초기 단계에  $0 \sim (2^{DE}-1)$  사이에서 임의로 취한 백오프 기간(BP,  $aUnitBackoffPeriod$ )만큼의 백오프 지연시간(BD, Backoff Delay)을 갖는다. 여기서 BE(Backoff Exponent)란 노드가 채널을 감지하기 전에 어느 정도의 BD를 경과해야 하는지를 지정하는 값이다. BD가 경과한 후, 노드들은 데이터를 바로 전송하지 않고



(그림 1) IEEE 802.15.4 표준에서 슈퍼프레임의 구조

CCA단계에서 두 차례에 걸쳐 채널 상태를 감지한다. 이때 다른 센서 노드가 프레임을 전송하는 중이라면 채널을 사용 상태라고 판단하고 채널 감지 후에 전송이 지연된 횟수(NB, Number of backoff) 값을 1 증가시키며, 채널을 감지하는 횟수(CW, Contention Window) 값을 2로 재 초기화 한 후 다시 BD 단계로 진입한다. 채널이 유휴 상태로 감지되면 CW 값을 1 감소하고 다시 한 번 채널을 감지하게 된다. 두 번째 CCA에서도 채널이 유휴상태로 감지되면 비로소 프레임을 전송하며, 그렇지 않은 경우에는 첫 번째 CCA에서 채널이 사용 상태로 감지되었을 때와 동일한 절차를 따른다.

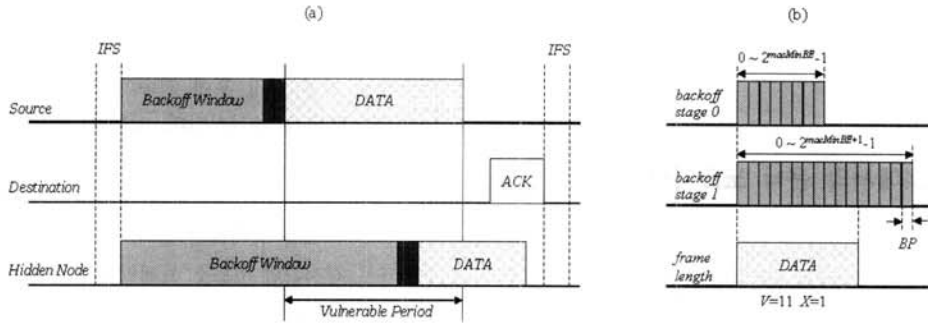
### 2.2 IEEE 802.15.4에서의 은닉 노드의 영향

CSMA/CA라는 경쟁 기반 채널 접근 방법은 구현이 용이하여 다양한 무선 네트워크에 적용되고 있지만 한 채널에서 여러 노드들이 동시에 데이터를 전송하는 경우 충돌이 발생하여 성능저하가 야기될 수 있다는 문제점을 가지고 있다. 특히 다음과 같은 상황이 발생하는 경우에는 802.15.4의 주요 성능 지표인 처리량, 전송지연, 에너지 소모 등에 지대한 영향을 준다.

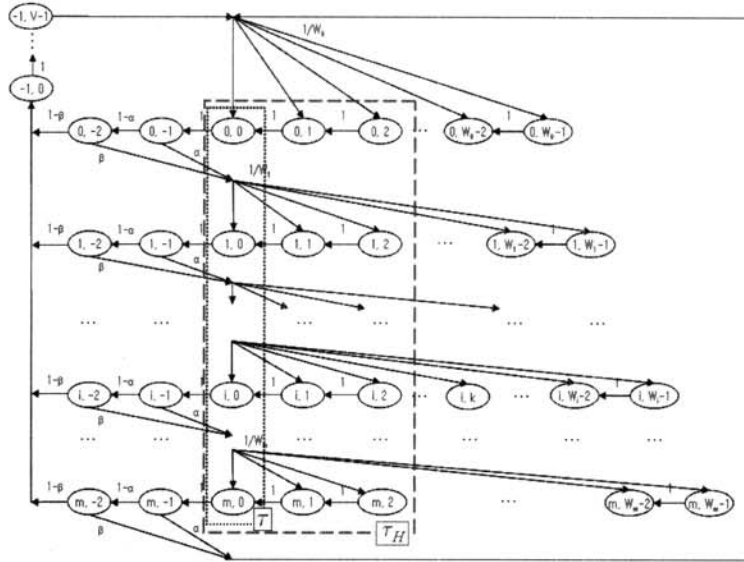
CSMA/CA를 이용할 때 어떤 노드들은 자신이 데이터를 전송하고 있음에도 불구하고, 자신들의 공간적 위치상의 특징으로 인하여 다른 노드들이 이 전송 신호를 감지할 수 없는 경우가 있다. 그 이유는 주로 거리와 지리적 요인에 의한 것으로서, 예를 들어, 중앙에 하나의 조정자가 있고 주변에 노드들이 원을 이루며 스타 토폴로지로 배치된 PAN을 가정할 때 모든 노드들은 조정자와 통신이 가능하지만 원점을 중심으로 대칭적 위치 또는 그 근방에 자리한 노드들은 상대의 신호를 감지하지 못할 수 있다. 이러한 노드들을 은닉 노드라고 부른다. 은닉 노드들과는 대조적으로 다른 노드들이 자신의 모든 전송을 감지할 수 있는 공간에 위치한 노드를 수용 노드(CN, Covered Node)라고 한다. 은닉 노드들이 존재할 때, 임의의 노드들은 CCA에서 은닉 노드들의 전송 신호를 감지하지 못함으로써 실제로는 사용 중인 채널을 유휴 상태로 잘못 판단하여 데이터를 전송하게 되고, 이는 곧 전송 충돌을 야기한다. 이로 인하여 네트워크 처리량이 감소할 뿐만 아니라 충돌한 데이터를 다시 전송하기 위해서 추가 시간과 전력이 요구된다.

한편 은닉 노드가 있는 환경에서 처리량이 가장 크게 영향을 주는 요인은 전송되는 데이터 프레임의 크기와 노드 수로 표현되는 네트워크의 크기이다. 우선 은닉 노드가 있는 환경에서 전송 충돌을 유발하는 것은 채널 감지단계에서의 오류이며 이와 같은 채널감지 오류가 발생할 수 있는 시간 구간을 취약 구간(vulnerable period)라고 한다. 임의의 노드가 은닉 노드 관계에 있는 다른 노드에서 데이터를 전송하는 동안 데이터를 전송한다면 목적지에서는 충돌이 발생한 데이터를 수신하기 때문에 ACK를 전송하지 않는다. 은닉 노드로부터의 데이터 전송은 그 데이터에 대한 ACK를 감지하기 전에는 채널에 데이터가 전송되고 있음을 알 수 없기 때문에 재전송에서도 은닉 노드로 인한 충돌은 지속적으로 발생할 수 있다.

취약 구간은 (그림 2)의 (a)와 같이 은닉 노드가 전송하는 데이터 프레임의 길이와 같으므로 전송되는 데이터 프레임의 길이가 길면 취약 구간이 증가하며 이에 따라 전송 충돌 확률도 증



(그림 2) 취약 구간(Vulnerable Period)



(그림 3) 802.15.4의 마코프 체인 모델 (포화 조건)

가한다. 그림에서 임의의 송신 노드와 목적지 노드, 그리고 은닉 노드와 목적지 노드는 각각 서로의 신호를 감지할 수 있지만 송신 노드와 은닉 노드는 서로의 신호를 감지할 수 없는 위치에 있다고 가정한다. (그림 2)의 (b)에서  $V$ 는 취약 구간에서 데이터를 전송할 확률을 계산하는데 필요한 데이터 프레임의 길이를 나타내고  $X$ 는 백오프 지연시간이  $V$ 보다 커지는 최소 백오프 지연 단계를 나타낸다.

또한, 데이터 프레임 길이 외에 전송 충돌에 영향을 주는 다른 주요 요인은 전송 전의 백오프 지연 시간이라고 할 수 있다. 노드의 수가 많고 백오프 지연시간이 짧은 경우에는 동일한 시간 구간에 데이터를 전송할 확률이 높아지면서 더 많은 충돌이 발생한다. 이러한 빈번한 충돌은 네트워크 처리량을 심각하게 저하시킨다.

이에 본 논문에서는 은닉 노드로 인한 네트워크 전체의 처리량을 분석함에 있어서, 전체 네트워크의 크기와 은닉 노드의 수, 데이터 프레임의 길이, 백오프 지연시간 등이 성능에 미치는 영향을 분석하고 모델링한다.

### 3. 분석적 모델

#### 3.1 IEEE 802.15.4의 마코프 모델

본 논문에서 제안하는 은닉 노드가 존재할 때의 802.15.4에 대

한 성능 모델은 (그림 3)의 마코프 체인을 기반으로 한다.

(그림 3)은 포화 조건에서 하나의 센서 노드가 가질 수 있는 상태를 표현한 2차원 마코프 체인 모델이다. 각 원은 하나의 센서 노드가 가질 수 있는 상태를 표현한 것이며, 화살표는 상태 전이를, 그리고 화살표 위의 수는 전이 확률을 의미한다. 원안의 두 개의 숫자  $(i, k)$ 는 각 노드의 상태를 구분하기 위해 사용되는데,  $i$ 는 백오프 단계 또는 CCA 재시도 회수를,  $k$ 는 무작위 지연 시간을 나타내는 백오프 타이머를 의미한다.  $k=-1$ 과  $k=-2$ 는 각각 첫 번째 CCA와 두 번째 CCA 상태를 나타낸다. 이 때,  $m$ 과  $W_i$ 는 각각 최대 백오프 재시도 횟수와  $i$ 번째 백오프 지연 단계에서 가질 수 있는 최대 BD 기간(BP단위)을 의미하는데  $W_i$ 는 전송 지연이 한번 일어날 때마다 지수적으로 증가한다. 802.15.4 표준에서는  $m$ 의 값인 최대 전송 지연 횟수(*macMaxCSMABackoffs*)의 기본 값을 4로 규정하며,  $i$ 번째 재시도에서의 백오프 지연시간을 의미하는  $W_i$ 는 (식 1)과 같이 표현된다. 여기서 *macMinBE*는 CSMA/CA 알고리즘에서 BD를 선택하는 최소값이다. 802.15.4 표준에서는 BD를 결정하는 BE 값이 *macMaxBE*를 넘지 않도록 규정한다.

$$W_i = 2^{\text{macMinBE} + \min(i, \text{macMaxBE} - \text{macMinBE})} \quad (1)$$

센서 노드는 초기에 선택한 BD가 모두 경과한 후, 꺼져 있던 트랜시버를 켜고 두 번 연속 채널을 감지(CCA)하는데 첫 감지



에서 채널이 사용상태일 확률을  $\alpha$ 로 나타낸다. 첫 감지에서 채널이 유휴상태( $1-\alpha$ )라면 두 번째 감지를 수행하고, 이 때 채널이 사용상태일 확률을  $\beta$ 로 나타낸다. 두 번째 CCA에서 채널이 유휴 상태라면 BP 단위로 계산된 데이터 프레임의 길이인  $V$ 에 해당하는 기간 동안 전송상태( $i=-1, k=0, \dots, V-1$ )로 진입한다.

한편, 은닉 노드들이 이미 데이터를 전송하고 있는 상황에서 다른 노드들이 CCA를 수행하는 경우에는 은닉 노드의 전송을 감지하지 못함으로써 채널을 유휴 상태로 잘못 판단하여 전송 충돌이 발생하게 된다. 이러한 상황을 모델에 반영하기 위해 은닉 노드가 데이터를 전송하는 중에 첫 번째 CCA를 수행하는 모든 경우를 계산한다. (그림 3)에서 점선으로 이루어진 사각형으로 표현된  $\tau$ 와  $\tau_H$ 는 임의로 선택된 하나의 TS에 첫 번째 CCA를 수행할 확률과 은닉 노드로부터 데이터 프레임이 전송되는 동안의 취약 구간에서 처음으로 CCA를 수행하는 확률을 각각 나타낸다. 특히  $\tau_H$ 는 은닉 노드가 존재하는 상황에서 처리량을 계산하기 위해 반드시 고려되어야 한다.

(그림 3)에서 각 상태의 전이 확률은 다음과 같이 요약된다.

$$\begin{cases} p\{i, ki, k+1\} = 1, & k \geq 0 \\ p\{0, ki, 0\} = (1-\alpha)(1-\beta)/W_0, & i < m \\ p\{i, ki-1, 0\} = (\alpha+(1-\alpha)\beta)/W_i, & i \leq m, k \leq W_i-1 \\ p\{0, km, 0\} = (1-\alpha)(1-\beta)/W_0 + (\alpha+(1-\alpha)\beta)/W_0 \end{cases} \quad (2)$$

첫 번째 식은 각 BP 이후에 백오프 타이머가 감소되는 확률을 보여준다. 두 번째 식은 두 번의 CCA에서 채널이 유휴상태로 판단되어 데이터 프레임을 전송하고 난 후 새로운 백오프 절차를 시작하는 확률이다. 이때 전송된 데이터 프레임이 성공적으로 수신측에 전송되었는지 또는 전송 도중에 충돌이 있었는지에 관계없이 0단계의 백오프 지연에서는  $0 \sim (2^{macMinBE} - 1)$  사이에서 임의로 취한 백오프 기간으로 백오프 카운터를 초기화 시킨다. 세 번째 식은 CCA에서 채널이 사용 중으로 감지되어 다음의 백오프 지연 단계로 전이할 확률을 의미한다. 마지막 식은 최대 백오프 지연 단계의 전송 시도에서 채널이 유휴상태로 감지되어 데이터 프레임을 전송하는 경우와 채널이 사용 중이어서 전송 하지 못하는 경우 새로운 백오프 절차를 시작하는 확률을 더한 경우이다.

모델에서 각 상태의 합은 정규화 조건에 따라  $\sum_{i=0}^m \sum_{k=-2}^{W_i-1} b_{i,k} + \sum_{i=0}^{V-1} b_{-1,i} = 1$  이 성립한다. 이 관계식을 이용하여 마코프 체인에

$$b_{0,0} = \frac{2(1-p_b)(1-2p_b)}{W(1-p_b)(1-(2p_b)^{m+1}) + (1-2p_b)(5-2\alpha+2(1-p_b)V)(1-p_b^{m+1})} \quad (3)$$

when  $m \leq macMaxBE - macMinBE$

$$b_{0,0} = \frac{2(1-p_b)(1-2p_b)}{W(1-p_b)(1-(2p_b)^{m'+1}) + (1-2p_b)(5-2\alpha+2(1-p_b)V)(1-p_b^{m'+1}) + W2^m p_b^{m'+1}(1-2p_b)(1-p_b^{m-m'})} \quad (4)$$

when  $m > macMaxBE - macMinBE$ ,  $m' = macMaxBE - macMinBE$

서 백오프 타이머가 0이 되는 상태를 나타내는  $b_{0,0}$ 에 대한 일반식을 유도하면 [식 3], [식 4]와 같다. 여기서  $p_b$ 는 CCA에서 채널이 사용 상태로 확인되어 전송을 지연하고 다음 단계의 백오프를 실행할 확률로써  $p_b = \alpha + (1-\alpha)\beta$ 이다.

또한  $W$ 는 센서 노드의 초기 백오프 지연시간을 의미한다. (식 2)의 상태 전이 확률을 이용하여 센서 노드가 임의의 TS에서 처음으로 CCA를 수행하는 확률  $\tau$ 를 구하면 (식 5)와 같다.

$$\tau = \sum_{i=0}^m b_{i,0} = b_{0,0} \frac{(1-p_b^{m+1})}{(1-p_b)} \quad (5)$$

임의의 노드에서 채널을 감지했을 때 채널이 사용 중이라면, 같은 시각에 적어도 하나의 노드가 프레임을 전송하고 있다는 것을 의미한다. 그런데, 적어도 하나의 노드가 채널에 프레임을 전송하는 확률은  $P_{tr} = (1-(1-\tau)^n)(1-\alpha)(1-\beta)$ 로 나타낼 수 있으므로,  $n$ 개의 노드가 채널 접근을 위해 경쟁중인 경우, 첫 번째 CCA에서 채널이 사용 중으로 판단되어 다음 백오프 단계로 전이할 확률  $\alpha$ 와 첫 CCA에서는 채널이 유휴상태였으나 두 번째 CCA에서 채널이 사용 중이어서 다음 백오프 단계로 전이할 확률  $\beta$ 는 각각 다음과 같이 주어진다[13].

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

$$\beta = (1 - \frac{P_{tr}}{P_{tr}(1 + \frac{1}{1-(1-\tau)^n})})(1-(1-\tau)^n)$$

다음으로 센서 노드가 취약 구간 내의 임의의 TS에서 처음으로 CCA를 수행하는 확률  $\tau_H$ 를 구하면 (식 7)과 같다. 여기서  $V$ 는 BP 단위로 계산된 데이터 프레임의 길이로 취약구간을 의미하고,  $X$ 는 백오프 지연시간이  $V$ 보다 커지는 최소 백오프 지연 단계를 나타낸다. 예를 들어 (그림 2)의 (b)에서와 같이  $V=11$ 일 때  $W_0 < V \leq W_1$ 이고  $X=1$ 이 된다. 은닉 노드가 존재하지 않는 경우의 첫 CCA 확률인  $\tau$ 는 다른 노드가 데이터 프레임을 전송하지 않는 경우의 첫 CCA 확률을 나타내므로  $V=0, X=0$ 인 특수한 경우의  $\tau_H$ 라고 할 수 있다.

$\alpha_H$ 는 은닉 노드가 존재하는 경우 데이터를 전송할 때 현재 전송하려는 노드를 제외한 적어도 하나의 수송 노드가 채널을 사용 중일 확률이며 아래의 (식 8)과 같이 계산된다. 이때 전송하려는 노드는 은닉 노드의 전송을 감지하지 못하기 때문에 CCA에서는 수송 노드의 전송만이 고려된다.  $n_C$ 는 전송하려는

$$\tau_H = \sum_{i=0}^m \sum_{k=0}^V b_{i,k} \tag{7}$$

$$= b_{0,0} \left[ \left( \frac{1-p_b^X}{2} + \frac{W(1-(2p_b)^X)}{2(1-2p_b)} \right) + \left( (V+1) \frac{p_b^X - p_b^{m+1}}{1-p_b} - \frac{V(V+1)}{2W} \frac{\left(\frac{p_b}{2}\right)^X - \left(\frac{p_b}{2}\right)^{m+1}}{1-\frac{p_b}{2}} \right) \right]$$

when  $0 < V \leq W_m, 0 \leq X \leq m$

노드를 포함한 수용 노드의 수,  $n_H$ 는 은닉 노드의 수,  $n$ 은 전체 노드 수라고 할 때  $n = n_C + n_H$ 이다.

$$\alpha_H = V[1 - (1-\tau)^{n_C-1}](1-\alpha)(1-\beta) \tag{8}$$

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

### 3.2 처리량(Throughput) 모델

이 절에서는 포화 조건에서 네트워크 처리량을 분석한다. 처리량은 TS 동안 성공적으로 전송된 데이터 프레임의 평균 양으로 표현할 수 있다.

임의의 노드가 성공적으로 데이터를 전송하려면 두 번의 연속적인 CCA를 수행하고 그 두 번의 CCA에서 채널이 모두 유휴 상태이어야 한다. 즉 어떤 노드가  $\tau$ 의 확률로 첫 번째 CCA를 수행한다고 할 때 성공적으로 프레임을 전송하려면 다른 노드들이 동일한 TS에서 동시에 CCA를 수행하지 않아야 한다. 이는  $n$ 개의 노드로 구성된 네트워크에서 현재 데이터를 전송하려는 노드를 제외한 나머지 수용 노드와 모든 은닉 노드가 동시에 CCA를 하지 않음을 의미하며 그 확률은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$P_S = (1-\tau)^{n_C-1} (1-\tau_H)^{n_H} \tag{9}$$

그러면 은닉 노드가 존재할 때 TS 기간 동안의 성공적으로 전송된 평균 네트워크 처리량  $S$ 는 (식 10)과 같이 계산된다.

$$S = \frac{n\tau(1-\alpha_H)(1-\beta_H)P_S L_H}{(1-\tau) + \tau\alpha_H + 2\tau(1-\alpha_H) + \tau(1-\alpha_H)(1-\beta_H)[P_S T_s + (1-P_S)T_c]} \tag{10}$$

여기서 분모는 한 TS의 평균 시간을 계산한 것이며 분자는 성공적으로 전송된 데이터의 양을 의미한다.  $T_s$ ,  $T_c$ ,  $L_H$ 은 각각 성공적으로 데이터를 전송하는데 소요된 시간, 전송된 데이터에 충돌이 발생했을 때 소요된 시간, 헤더를 제외하고 전송된 순수 데이터 길이를 BP 단위로 계산한 값이다. (식 11)에서와 같이,  $T_s$ 에는 두 번의 CCA 수행 시간, 데이터 프레임을 전송한 시간, LIFS(Long Inter-Frame Spacing), ACK를 전송받는 시간이 포함된다. 각각의 시간은 (식 11)에서  $2T_{CCA}$ ,  $V$ ,  $LIFS$ ,  $T_{W\_Ack} + L_{Ack}$ 로 표기되었다. 또한  $T_c$ 의 계산에는 두 번의 CCA 수행 시간, 데이터 프레임 전송 시간, 최대 ACK 대기시간( $macAckWaitDuration$ )이 포함된다. (식 11)에서  $T_{macAckWaitDuration}$ 는 최대 ACK 대기시

간을 의미한다. 이때 모든 시간의 단위는 BP로 한다.

$$T_S = 2T_{CCA} + V + T_{W\_Ack} + L_{Ack} + LIFS \tag{11}$$

$$T_C = 2T_{CCA} + V + T_{macAckWaitDuration}$$

## 4. 성능 평가

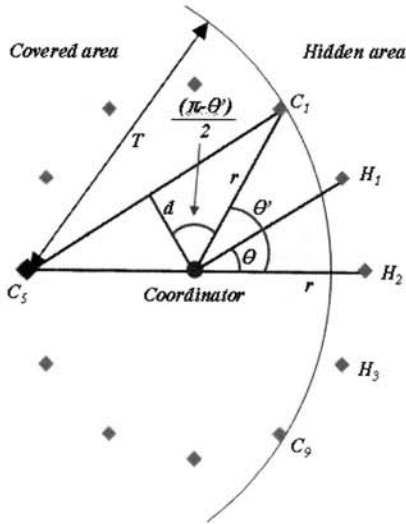
### 4.1 시뮬레이션 환경

본 절에서는 제 3장에서 제안한 모델의 정확성을 검증한다. 이를 위하여 ns-2를 이용한 시뮬레이션을 통하여 얻은 결과와 본 논문에서 제안한 수학적 모델들의 값을 비교한다. <표 1>은 제안된 모델에 대한 성능을 평가하기 위한 802.15.4 표준에서 정의된 파라미터들의 설정 값을 보여준다.

ns-2 시뮬레이터로 은닉 노드의 영향을 분석하기 위해서는 어떠한 노드에서도 동일한 개수의 은닉 노드를 갖도록 노드를 배치해야 한다. 전송 노드와 수신 노드의 거리 차이가 교차 거리 이하로 있을 때는 수신측에서 받는 전파의 세기는 거리의 제곱에 반비례 한다는 Friis의 공식에 의거하여 전송 전력을 일정하게 하고 각 노드간의 거리를 다르게 한다면 다양한 은닉 노드 비율에 맞는 노드 배치를 얻을 수 있다. 이를 위해 네트워크 구성은 중앙에 하나의 PAN 조정자와  $n$ 개의 센서 노드로 구성된 스타 토폴로지를 가정하며 노드의 배치 위치는 수학적 계산을

<표 1> 성능 분석을 위한 파라미터 집합

Parameters	Value
Packet Payload	70 Bytes
MAC header	7 Bytes
PHY header	6 Bytes
ACK	11 Bytes
Channel Bit Rate	250 Kbps
aMinSIFSPeriod	12 symbols
aMinLIFSPeriod	40 symbols
Ack_timeout	54 symbols
macMinBE	3
aMaxBE	5
macMaxCSMA	4
Beacon Order	10
Superframe Order	10

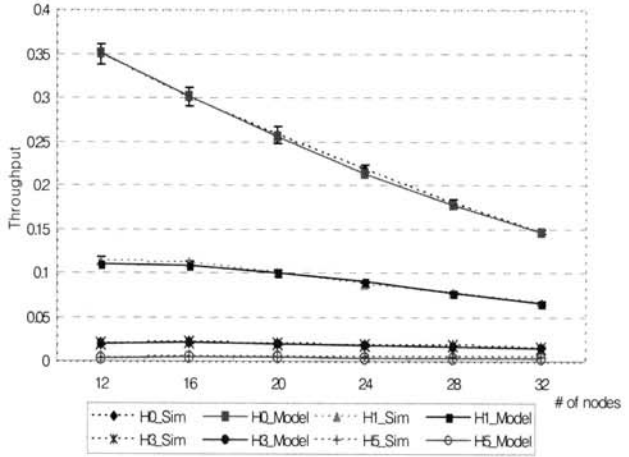


(그림 4) 은닉 노드를 포함한 노드의 배치

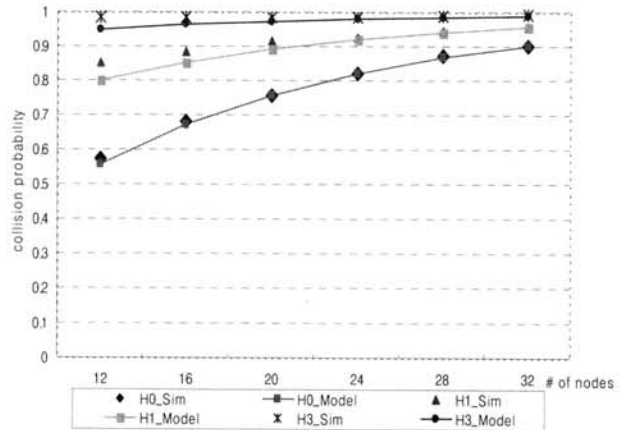
통해 결정한다. (그림 4)는 총 노드 수가 12일 때 각 노드들의 입장에서 볼 때, 항상 3개의 은닉 노드가 존재하도록 배치한 예이다. 여기서  $T$ 는 각 노드의 최대 전송 거리,  $r$ 은 조정자와 각 노드들과의 거리,  $\theta$ 는 조정자를 중심으로 할 때 각 노드들 간의 각도를 나타낸다. 그림에서 노드  $C_3$ 은 노드  $C_1$ 과  $C_2$ 의 전송 신호까지는 감지하지만 전송 범위 밖에 위치한 노드  $H_1, H_2, H_3$ 의 전송 신호는 감지할 수 없다. 노드를 이와 같이 배치할 때 어느 위치의 노드라도 반대편의 세 노드와는 은닉 노드 관계가 형성된다. 본 연구에서는 서로 경쟁하는  $n$ 개의 노드들 중 은닉 노드의 수를 1, 3, 5개로 변화시키는 세 가지 서로 다른 네트워크 상황을 고려한다.

4.2 모델 검증 및 성능 분석

(그림 5)는 전체 센서 노드의 수를 12개에서부터 32개까지 증가시키면서, 또한 각 경우마다 은닉 노드의 수를 1, 3, 5개인 경우의 단위 시간당 네트워크 처리량에 대한 분석 모델의 결과와 ns-2를 이용한 시뮬레이션 결과를 비교하여 보여준다. 그림에서 보는 것처럼 분석 결과와 시뮬레이션 결과가 매우 근사하게 일치함을 보인다. 그림에서  $x$ -축은 증가하는 노드의 수를 나타내며  $y$ -축은 처리량을 나타낸다. 그림에서 보듯이 은닉 노드가 1개라도 존재하는 경우는 은닉 노드가 존재하지 않는 경우에 비하여 처리량이 극히 적게 나타났다. 예를 들어, 노드의 수가 20일 때, 은닉 노드가 존재하지 않는 경우의 처리량은 0.26이지만 은닉 노드가 1개인 경우는 처리량이 0.1로 급격히 감소되어 은닉 노드가 없는 경우에 비해 62%의 처리량 저하를 보이고 있다. 이는 노드들이 CCA에서 다른 은닉 노드의 전송을 감지하지 못하고 프레임들 동시에 전송하여 데이터 프레임이 충돌하면서 처리량이 급격히 감소하기 때문이다. 은닉 노드가 3개 이상인 경우 처리량은 0.02 이하로 더 심하게 감소한다. 이와 같이 처리량 그래프가 전체 노드 수의 증가에 비해 은닉 노드의 수에 더욱 민감하게 변화하는 것을 볼 수 있는데 이는 은닉 노드가 다른 노드들과 동시에 전송할 수 있는 취약구간이 길어 전송 충돌 확률이 급속하게 증가하기 때문이다.



(그림 5) 노드 수에 따른 처리량



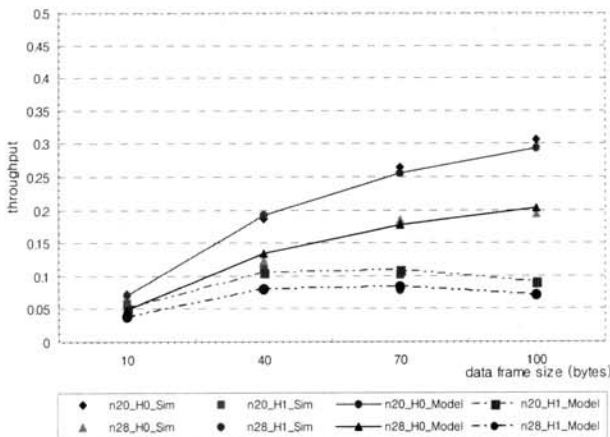
(그림 6) 노드 수에 따른 충돌 확률

(그림 6)은 은닉 노드가 존재하지 않는 경우와 은닉 노드가 1, 3개인 경우 전송된 데이터 프레임의 충돌 확률을 보여주고 있다.  $x$ -축은 증가하는 노드의 수를 나타내며  $y$ -축은 충돌 확률을 나타낸다. 은닉 노드가 존재하지 않는 경우, 노드의 수가 증가함에 따라 충돌 확률이 90% 이상으로 크게 증가하고 있다. 그러나 은닉 노드가 존재할 때는 노드 수가 증가할수록 충돌 확률이 증가하기도 하지만 은닉 노드가 없는 경우에 비해 더 높은 충돌 확률을 나타내면서 노드 수 증가에 따른 충돌 확률 증가율이 비교적 작게 나타나고 있다. 노드 수가 32개일 때, 은닉 노드가 존재하지 않을 경우에는 충돌 확률이 90%였으나, 은닉 노드가 3개인 경우에는 충돌 확률이 99%에 이르고 있다. 이는 (식 8)에서 보여주는 것처럼 채널 감지에서 은닉 노드의 전송이 고려되지 않은 이유로 전송된 데이터가 이미 은닉 노드에서 전송했던 데이터와 충돌하기 때문이다.

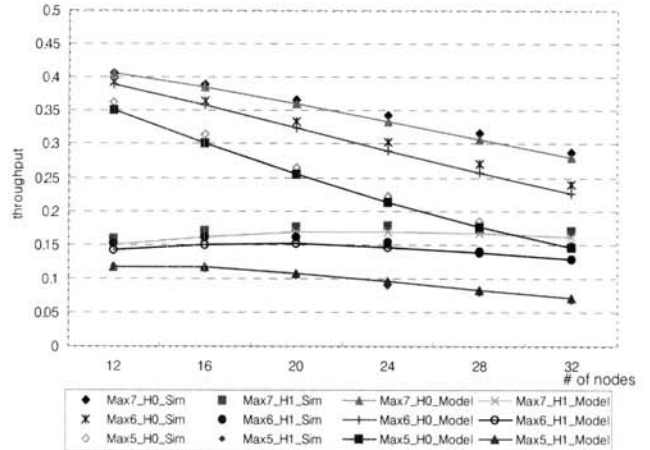
(그림 7)은 전체 센서 노드 수가 20, 28일 때에 있어서, 은닉 노드가 존재하지 않는 경우와 은닉 노드가 1개인 경우의 데이터 프레임 길이에 따른 처리량을 보여주고 있다.  $x$ -축은 증가하는 프레임의 길이를 나타내며  $y$ -축은 처리량을 나타낸다. 은닉 노드가 존재하지 않는 경우에는 프레임 길이가 증가함에 따라 처리량이 점차 증가하고 있다. 또한 그 증가율은 노드 수가 적은

경우에 더 크게 나타난다. 그러나 은닉 노드가 존재할 때는 초기에는 프레임 길이가 증가할수록 처리량도 함께 증가하지만 프레임 길이가 70 바이트 이상일 때는 프레임 길이가 증가할수록 오히려 처리량이 감소하는 현상을 보인다. 예를 들어 전체 노드 수가 20일 때, 은닉 노드가 존재하지 않을 경우는 프레임 길이가 100 바이트에서 처리량이 최고 0.29까지 증가하지만 은닉노드가 존재하는 경우는 프레임 길이가 70 바이트일 때 처리량이 0.11까지 증가하다가 프레임 길이가 100 바이트일 때는 처리량이 0.09로 다시 감소하였다. 이는 (식 7)과 같이 센서 노드가 취약 구간 내의 임의의 TS에서 처음으로 CCA를 수행하는 확률  $\tau_H$ 가 데이터 프레임의 길이에 따라 증가하기 때문이다. 취약 구간의 길이는 (그림 2)와 같이 데이터 프레임의 길이와 같고 그 구간에서의 전송은 바로 전송 충돌과 관련되기 때문에 전체 네트워크 처리량은 감소한다.

(그림 8)은 전체 센서 노드의 수를 12에서부터 32개까지 변화시킬 때 은닉 노드가 존재하지 않는 경우와 은닉 노드가 1개인 경우 백오프 지연시간을 변화시키며 네트워크 처리량의 변화를 비교한 것이다. 그림에서  $x$ -축은 증가하는 노드의 수를 나타내며  $y$ -축은 처리량을 나타낸다. 은닉 노드가 존재하지 않는 경우에는  $macMaxBE$ 가 커짐에 따라 처리량이 크게 나타나고  $macMaxBE$ 에 따른 처리량의 차이는 노드 수가 많을 경우에 더 크게 나타난다. 이와 마찬가지로 은닉 노드가 존재하는 경우에도  $macMaxBE$ 가 커짐에 따라 처리량이 크게 나타나고 있으며  $macMaxBE$ 에 따른 처리량의 차이도 노드 수가 많을 경우에 더 크게 나타났다. 또한  $macMaxBE$ 가 클 경우는 노드 수 변화에 따른 처리량의 변화가 더욱 적게 나타난다.  $macMaxBE$ 가 클 경우는 백오프 지연시간을 선택할 수 있는 범위가 넓어짐으로 인해 각 노드들이 서로 다른 지연시간이 경과 한 후 데이터를 전송하게 되어 전송된 데이터들 간의 충돌이 더 적어지기 때문이다. 예를 들어,  $macMaxBE$ 가 7일 때, 은닉 노드가 존재하는 경우에는 전체 노드수가 12개일 때에 비하여 32개일 때의 처리량은 오히려 7% 정도 증가하였으며,  $macMaxBE$ 가 5인 경우에는 전체 노드수가 32일 때가 12일 때에 비해 처리량이 40%정도 감소하였다. 참고로  $macMaxBE$ 가 5인 경우 최대 백오프 지연 시간은 31 BP이고  $macMaxBE$ 가 7인 경우는 최대 백오프 지연 시



(그림 7) 데이터 프레임 길이에 따른 처리량



(그림 8) 백오프 지연시간에 따른 처리량

간이 127 BP로 백오프 지연 시간의 결정에 있어 그 선택의 범위가 4배정도 더 넓어지는 것을 알 수 있다. 이는 노드 수가 많은 경우 백오프 지연 시간의 범위가 넓다면 은닉 노드로 인한 충돌의 영향을 더 줄일 수 있음을 보여주는 것이다.

### 5. 결론

IEEE 802.15.4 MAC은 CAP 구간에서 CSMA/CA 알고리즘을 사용할 때 IEEE 802.11과 같은 RTS/CTS 매커니즘을 사용하지 않기 때문에 은닉 노드로 인한 데이터 전송 충돌의 증가에 따르는 네트워크의 성능저하 문제를 피할 수 없다. 이 문제는 노드의 수가 많은 대규모 네트워크에서 매우 심각한 성능저하를 가져올 수 있다. 이에 본 논문에서는 포화 조건에서 은닉 노드가 존재하는 802.15.4의 처리량에 대한 분석적 모델을 제시하였다. 제안하는 모델은 은닉 노드의 존재에 따라 처리량이 62% 이상 감소함을 보여주었으며 이 결과는 ns-2를 이용한 시뮬레이션 결과와 매우 근사하게 일치하였다. 따라서 제안하는 모델은 은닉 노드가 존재하는 802.15.4 네트워크의 정확한 성능 평가를 위한 모델로 사용될 수 있음을 보여준다.

현재 본 연구실에서는 비포화 조건의 네트워크에서  $macMinBE$ ,  $CW$  등 802.15.4의 파라미터 초기 값을 달리하는 우선순위를 적용할 때, 은닉 노드가 네트워크 성능에 미치는 영향력을 분석하여 우선순위가 적용된 802.15.4 네트워크에서의 은닉 노드의 영향을 고려한 성능 분석 모델에 대한 연구를 수행하고 있다.

### 참고 문헌

- [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] IEEE 802.11 WG, Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specification, 1999.
- [3] A. Kahol, S. Khurana, S. K. S. Gupta, and P. K. Srimani, "Performance Evaluation of Distributed Co-ordination Function for IEEE 802.11 LAN Protocol in the Presence of



Mobile and Hidden Terminals", Proc. of MASCOT '99, pp.40-47, 1999.

- [4] F. Hung, S. Pai and I. Marsic, "Performance Modeling and Analysis of the IEEE 802.11 Distribution Coordination Function in Presence of Hidden Stations", IEEE/AFCEA MILCOM, pp.1-7, Oct. 2006.
- [5] F. Hung and I. Marsic, "Analysis of Non-Saturation and Saturation Performance of IEEE 802.11 DCF in the Presence of Hidden Stations", Proc. of the IEEE 66th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall-2007), pp.230-234, 2007.
- [6] Khurana, S., Kahol, A., Gupta, S. K. S. and Srimani, P. K., "Performance Evaluation of Distributed Co-Ordination Function for IEEE 802.11 Wireless LAN Protocol in Presence of Mobile and Hidden Terminals", MASCOT'99, pp.40-47, 1999.
- [7] L. Hwang, S. T. Sheu, Y. Y. Shih, and Y. C. Cheng, "Grouping Strategy for Solving Hidden Terminal Problem in IEEE 802.15.4 LR-WPAN". Proc. of the 1st International Conference on Wireless Internet (WICON'05), pp.26-32, 2005.
- [8] A. Koubaa, M. Alves, B. Nefzi, and Y. Q. Song, "Improving the IEEE 802.15.4 Slotted CSMA/CA MAC for Time-Critical Events in Wireless Sensor Networks," Workshop on Real Time Networks RTN'06, 2006.
- [9] H-M Manjukumar, B. Tarun, P. J. Anura, "Performance Degradation of IEEE 802.15.4 Slotted CSMA/CA due to Hidden Nodes", 32nd IEEE Conference on Local Computer Networks (LCN 2007), pp.264-266, 2007.
- [10] Shengzhi Zhang, Sang-Jo Yoo, "Fast Recovery from Hidden Node Collision for IEEE 802.15.4 LR-WPANs", Computer and Information Technology (CIT 2007), pp.393-398, 2007
- [11] J. Zheng and M. J. Lee, "A Comprehensive Performance Study of IEEE 802.15.4", IEEE Press Book, Wiley Interscience, Chapter 4, 2006.
- [12] Z. Chen, C. Lin, H. Wen, and Hao Yin, "An Analytical Model for Evaluating IEEE 802.15.4 CSMA/CA Protocol in Low-Rate Wireless Application", Proc. of AINAW'07, pp.899-904, May 2007.
- [13] Pollin S, et al., "Performance analysis of slotted IEEE 802.15.4 medium access layer", Technical Report, DAWN Project, [http://www.soe.ucsc.edu/research/ccrg/DAWN/papers/ZigBee\\_MACvPV.pdf](http://www.soe.ucsc.edu/research/ccrg/DAWN/papers/ZigBee_MACvPV.pdf), Sep. 2005.
- [14] T. Park, T. Kim, J. Choi, S. Choi and W. Kwon, "Throughput and Energy Consumption Analysis of IEEE 802.15.4 Slotted CSMA/CA", IEEE Electronics Letters, vol. 41, issue 18, pp.1017-1019, Sep. 2005.
- [15] 신연순, 안종석, 이강우, "두 개의 우선순위 큐를 적용한 IEEE 802.15.4 GTS 서비스 지연에 대한 분석적 모델", 정보처리학회 논문지 C Vol. 15-C, pp.419-428, Oct. 2008.
- [16] Information Science Institute ISI, "Network simulator ns-2", <http://www.isi.edu/nsnam/ns>



**신연순**

e-mail : ysshin@dgu.edu

1999년 동국대학교 전산통계학과(학사)

2002년 동국대학교 정보통신공학과  
(공학석사)

2007년~현재 동국대학교 정보통신공학과  
(박사과정)

관심분야: 컴퓨터 구조, 임베디드 시스템, 무선 통신, 센서 네트워크 등



**현규완**

e-mail : redwany@paran.com

2007년 동국대학교 정보통신공학과(학사)

2007년~현재 동국대학교 정보통신공학과  
(석사과정)

관심분야: 컴퓨터 구조, 컴퓨터 시뮬레이션,  
네트워크 시뮬레이션



**안종석**

e-mail : jahn@dgu.edu

1983년 서울대학교 전자공학과(학사)

1985년 KAIST 전기 및 전자공학과  
(공학석사)

1985년~1989년 삼성전자 주임연구원  
1995년 USC(University of Southern

California)컴퓨터공학과(공학박사)

1995년~1996년 삼성전자 선임연구원

2001년~2002년 USC/ISI 교환연구원

1996년~현재 동국대학교 컴퓨터공학과 교수

관심분야: 네트워크 시뮬레이션, 무선 통신, 라우팅 알고리즘,  
센서 네트워크 등



**김희철**

e-mail : hckim@daegu.ac.kr

1983년 연세대학교 전자공학과(학사)

1990년 USC(University of Southern California)컴퓨터공학과(공학석사)

1999년 USC(University of Southern California)컴퓨터공학과(공학박사)

1983년~1988년 삼성전자 책임연구원

1996년~1997년 삼성SDS 수석연구원

1997년~현재 대구대학교 정보통신공학부 교수

2007년 4월~현재 정보통신부 USN 기본계획(2)수립 전문위원

2006년 9월~2006년 12월 정보통신부 2007년 RFID/USN 분야  
선도기술기획위원

2005년 7월~현재 경상북도 RFID 산업특성화(RIS) 사업단장

2005년 10월~2005년 12월 정보통신부 2006년 RFID/USN 분야  
선도기술기획위원

관심분야 : 병렬처리



**이강우**

e-mail : klee@dgu.edu

1985년 연세대학교 전자공학과(학사)

1991년 USC(University of Southern California)컴퓨터공학과(공학석사)

1997년 USC 컴퓨터공학과(공학박사)

1998년~현재 동국대학교 정보통신공학과  
부교수

관심분야 : 컴퓨터 구조, 임베디드 시스템, 센서 네트워크 등