

IEEE 802.15.4에서 적응적 충돌 회피 알고리즘의 성능 분석

준회원 노기철*, 이승연*, 정회원 신연순*, 안종석**, 이강우*

Performance Evaluation of an Adaptive Collision Avoidance Algorithm for IEEE 802.15.4

Ki-Chul Noh*, Seung-Yeon Lee* *Associate Members*,
Youn-Soon Shin*, Jong-Suk Ahn**, Kang-Woo Lee* *Regular Members*

요약

IEEE 802.15.4는 전송된 프레임의 초기 충돌을 피하기 위해 대부분의 다른 무선 네트워크 프로토콜들처럼 프레임 전송하기 전 임의의 시간을 지연하는 CA(Collision Avoidance)알고리즘을 사용한다. IEEE 802.15.4의 CA 방식은 현재의 네트워크 상황에 관계없이 고정된 초기 백오프 선택 구간에서 임의의 백오프 지연 시간을 선택하기 때문에, 긴 시간 동안 높은 통신 부하를 유지하는 네트워크에서는 현재 상황에 알맞은 백오프 지연 시간을 선택하기까지 여러 번의 백오프 지연 과정을 반복하게 된다. 본 논문에서는 네트워크의 혼잡 상황에 따른 충돌 확률을 고려하여 초기 백오프 지연 시간을 적응적으로 선택할 수 있는 ACA(Adaptive Collision Avoidance) 알고리즘을 제안한다. ACA 알고리즘의 성능을 측정하기 위해 수학적 모델을 제시하며, ns-2를 이용한 시뮬레이션을 통해 모델의 정확성을 검증하고 네트워크 혼잡 상황에 따른 최적의 초기 백오프 지연 시간을 제시한다. 분석 결과, ACA알고리즘을 사용할 때 표준에 비해 처리량이 최대 41% 이상 증가하고 평균 서비스 지연 시간은 기존보다 더욱 짧게 나타났다.

Key Words : CA Algorithm, Adaptive CA Algorithm, BEB Algorithm, Marchov Chain Performance Model

ABSTRACT

Like other wireless network protocols, IEEE 802.15.4 adopts CA (Collision Avoidance)algorithm to avoid the early collision of a new packet by randomizing its first transmission time rather than its immediate delivery. The traditional CA scheme of IEEE 802.15.4, however, selects the random access time from the predetermined range without considering the degree of current congestion. It probably causes either a long delay to settle in the suitable range for the current network load or frequent clashes especially during the long lasting heavy traffic period. This paper proposes an ACA(Adaptive Collision Avoidance) algorithm adapting the initial backoff range to the undergoing collision variations. It also introduces a mathematical model to predict the performance of ACA algorithm added to IEEE 802.15.4. With only small deviations from corresponding simulations, our analytical model shows that ACA technique can improve the throughput of IEEE 802.15.4 by up-to 41% maximally in addition to shortening the packet delays.

※ 이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(2010-0013237).

* 동국대학교 정보통신공학과 CASTL 연구실(nox82@dgu.edu, lsy8711@dgu.edu, ysshin@dgu.edu, klee@dgu.edu)

** 동국대학교 컴퓨터공학과 Computer Network 연구실(jahn@dgu.edu)

논문번호 : KICS2010-11-532, 접수일자 : 2010년 11월 4일, 최종논문접수일자 : 2011년 3월 18일

I. 서 론

일반적으로 센서 네트워크 기술은 인식 거리에 따라 크게 무선랜(WLAN; Wireless Local Area Network WLAN) 기술과 무선 사설망(Wireless Personal Area Network; WPAN) 기술로 구분된다. 여기서, 무선랜은 IEEE 802.11 표준^[1]에 기반한 기술로서, 반경 100m 내외에서 기간망(backbone network)에 접속할 수 있는 기술이다. 그리고, 무선 사설망은 IEEE 802.15 표준에 기반한 기술로서, 블루투스(Bluetooth), 지그비(ZigBee), 초광대역 통신(Ultra Wide Band; UWB) 등이 있다. 이러한 센서 네트워크는 다수의 센서 노드로 이루어지며, 에너지를 절약하기 위해 주기적으로 활성(active) 상태와 비활성(inactive) 상태를 반복하여 유지한다. 다수의 센서 노드는 정해진 무선 채널(channel)을 이용하여 활성 구간에 통신을 수행한다. 즉, 센서 노드는 실시간으로 데이터를 수집하고, 활성 구간에 수집된 데이터 프레임 전송한다.

IEEE 802.15.4 표준^[2]은 저속 무선 개인 영역 네트워크(LR-WPAN: Low-Rate Wireless Person Area Network)의 물리 계층과 MAC(Medium Access Control) 부계층을 규정한다. IEEE 802.15.4 표준은 저속의 개인용 네트워크 또는 센서 네트워크를 지원하기 위해 개발된 것으로 전력을 적게 소비하며 구현 비용이 적게 드는 특징이 있다.

IEEE 802.15.4 표준에 따른 센서 네트워크는 다수의 센서 노드가 동시에 무선 채널에 접근할 때 발생하는 충돌을 피하기 위하여 CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) 알고리즘 및 BEB(Binary Exponential Backoff) 알고리즘을 사용한다. 각 센서 노드는 CSMA/CA 및 BEB 알고리즘을 이용하여 각 프레임의 전송시간을 임의로 결정한다. 이때, 임의로 결정되는 전송시간은 백오프 구간을 정의하는 변수 BE(backoff exponent)에 따라 결정된다. 센서 노드가 활성 상태에서 데이터 전송을 시도할 경우, CSMA/CA 알고리즘 운영에 필요한 모든 변수들은 미리 정해진 값에 따라 초기화된다.

이러한 고정 초기화 방식은 센서 노드 간의 충돌 확률을 감소시키는데 효과적이기는 하지만, 센서 노드 수의 증가나 데이터 전송 주기와 같은 네트워크 전송량 변화에 적절하게 대응하지 못한다는 문제점이 있다. 예를 들어, 데이터 전송량이 많아 네트워크가 혼잡할 경우, 각 센서 노드는 각 프레임의 전

송 초기단계에서 상대적으로 좁은 초기 백오프 선택 구간에서 임의로 백오프 구간을 선택하여 복수의 센서 노드가 동일한 백오프 지연시간을 갖게 될 확률이 높아지고, 결과적으로 동시에 백오프를 끝낸 노드들로부터 전송된 프레임들의 충돌이 빈번하게 발생할 수 있다.

현재 CSMA/CA 알고리즘의 성능을 향상시키기 위한 다양한 방안^{[3]-[6]}이 제안되고 있으나, 고정된 값으로 파라미터를 초기화하는데 따른 문제를 해결하기 위한 방법은 제시되지 않고 있다.

본 논문에서는 네트워크 상황이 빠르게 변화하지 않고 지속적으로 전송할 프레임이 존재하는 상황일 때는 새로운 프레임을 전송하기 위한 초기 백오프 지연시간을 이전에 전송된 프레임의 백오프 지연시간과 같게 유지하는 것이 보다 합리적이라고 가정한다. 따라서 네트워크 상황에 따른 충돌 확률을 고려하여 초기 백오프 지연 시간을 적응적으로 선택하는 ACA(Adaptive Collision Avoidance) 알고리즘을 제안한다.

네트워크 상황이 급박하게 변화하지 않는다는 전제는 네트워크에 전송될 데이터의 양이 급격히 변화하지 않는다는 의미를 나타낸다. 예를 들면 현재의 PAN 영역 내에 통신을 위해 경쟁하는 노드의 수가 순간적으로 급격히 증가 또는 감소하는 상황을 들 수 있다. 이로 인해 짧은 시간 동안의 트래픽 양이 심하게 변화되는 상황이 나타나게 된다. 이러한 상황을 판단하기 위한 성능 수치(metric)로 본 논문에서는 충돌율을 선택하였다. 충돌율이 적어도 2개의 프레임을 전송하는 시간동안에 변화하지 않는 상황을 네트워크의 traffic의 양이 급격하게 변화하지 않는 것으로 생각한다.

ACA 알고리즘은 충돌 확률에 따라 매 프레임의 초기 백오프 선택 구간을 적응적으로 선택하는 단계와 시간의 흐름에 따라 타이머를 이용하여 알고리즘의 처음 단계에서 선택한 백오프 구간을 재조정하는 단계로 나누어진다. 첫 번째 단계에서는 다음 초기 백오프 지연 시간을 결정할 때 측정된 충돌 확률이 임계 값보다 작은 경우에는 네트워크에 혼잡한 상황이 발생하지 않은 것으로 판단하고 기존 방식대로 정해진 초기값으로 파라미터들을 초기화 한다. 그렇지 않고 임계 값보다 측정된 충돌 확률이 큰 경우에는 이전 백오프 단계에서 사용했던 파라미터를 적용하여 현재의 백오프 지연시간을 선택한다. 두 번째 단계에서는 일정 시간 동안 전송할 프레임이 발생하지 않는 경우 현재 네트워크의 혼

잡 상황이 소강되었다고 판단하여 초기 백오프 선택 구간을 주기적으로 축소시킨다. 제안한 알고리즘의 성능을 예측하기 위해 Probabilistic Markov Chain 모델을 제안하였으며, 수학적 분석과 시뮬레이션을 통해 ACA 알고리즘을 이용할 때 기존 IEEE 802.15.4에 비해 데이터 처리량이 41%까지 향상되고 전송 지연 시간은 31% 감소되는 것을 보여주었다.

논문의 구성은 1장 서론에 이어 2장에서는 802.15.4 표준의 MAC계층의 동작과정에 대해 간략히 기술한다. 3장에서는 제안한 ACA 알고리즘을 자세히 설명하며, 4장에서는 ACA 알고리즘의 성능을 예측하기 위한 수학적 모델링이 이어진다. 5장에서는 수학적 모델과 ns-2를 이용한 시뮬레이션으로 얻어진 결과를 통해 처리량과 평균 서비스 지연 시간에 있어서의 성능 변화를 비교 분석한다. 마지막에 6장에서는 결론 및 향후 연구 과제를 기술한다.

II. 관련연구

IEEE 802.15.4는 비콘의 사용 유무에 따라 Beacon Enabled Mode와 None-Beacon Enabled Mode로 동작한다. Beacon Enabled Mode는 비콘을 통해 PAN 코디네이터와 센서 노드 사이에 시간적 동기를 맞출 수 있다. 이때, PAN 코디네이터와 PAN에 가입된 센서 노드는 에너지를 절약하기 위해 비콘에 의해 구분되는 시간 구조를 사용한다.

2.1 슈퍼프레임

IEEE 802.15.4에서는 PAN 조정자가 주기적으로 비콘(beacon)을 전송하여 PAN 내의 센서 노드들의 전송 시기를 동기화한다.

그림 1에서 보여주듯이 연속적으로 전송된 비콘 간의 시간 간격을 나타내는 BI(Beacon Interval)은 동작구간인 SD(Superframe Duration)와 비동작(Inactive) 구간으로 구성되며, 비동작 구간에서는 트랜시버의 전원을 차단하여 에너지 소모를 줄인다.

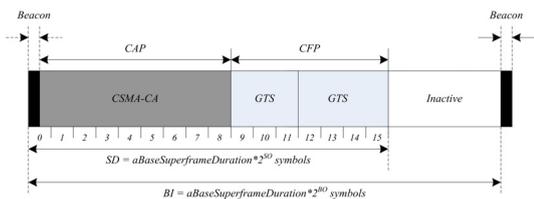


그림 1. IEEE 802.15.4 표준에서 슈퍼프레임의 구조

동작 구간은 CAP(Contention Access Period)와 CFP(Contention Free Period)로 구성되며 CAP에서는 센서 노드들이 경쟁 기반의 전송 방식인 CSMA/CA 알고리즘을 이용해 전송하고 CFP는 비 경쟁 기반의 전송 방식을 이용한다. 그림 1에서 aBaseSuperframeDuration은 SO (Superframe Order)가 0일 때의 슈퍼프레임의 동작 구간의 길이를 의미하며, 그 크기는 사용되는 주파수 대역에 따라 다르게 설정된다. 동작구간은 비콘 프레임 내에서 정의된 SO에 의해 그 길이가 정해지며, 16개의 동일한 시간 구간으로 구성된다. CAP 내에서는 데이터 전송을 원하는 센서 노드들이 CSMA/CA 알고리즘을 이용하여 경쟁을 통해 채널을 획득하고 프레임을 전송한다. CFP 구간은 GTS(Guaranteed Time Slot) 단위로 시간 구간을 할당 받아 데이터를 전송할 수 있는데, 전송에 앞서 미리 원하는 만큼의 GTS를 할당 받아야 하며 할당 받은 구간에서는 경쟁 없이 바로 데이터를 전송할 수 있다. 하나의 센서 노드는 최대 7개의 GTS를 할당 받을 수 있다.

2.2 CSMA/CA 알고리즘

CSMA/CA와 BEB 알고리즘은 경쟁 구간인 CAP에서 전송 충돌을 피하기 위해 사용되며, 각 센서 노드들은 이 알고리즘들을 이용하여 전송 전 임의의 백오프 시간을 지연하고 채널을 미리 감지함으로써 센서 노드간 전송 시간을 분산시킨다. CSMA/CA 알고리즘은 세 가지의 변수 NB(Number of Backoff), BE(Backoff Exponent), CW(Contention Window)를 이용하여 동작된다. 이때 NB는 한 번의 데이터 전송이 성공적으로 시작될 때까지 백오프를 시도했던 횟수를, BE는 임의의 백오프 지연시간을 결정하는 구간 $[0, 2^{BE}-1]$ 를 정의하는 백오프 지수를, CW는 백오프 지연 후 데이터를 전송하기 전에 채널의 사용가능 여부를 판단하기 위해 수행하는 채널 감지 횟수를 의미한다. 참고로 IEEE 802.15.4에서의 NB, BE, CW의 초기 값은 각각 0, 3, 2이다.

그림 2는 CSMA/CA 알고리즘의 블록 다이어그램을 나타낸 것이다. 각 센서 노드들은 $[0, 2^{BE}-1]$ 의 구간에서 임의로 정한 백오프 시간만큼 지연한 뒤 채널 감지(CCA: Clear Channel Assessment)를 수행한다. 백오프 시간이 경과하는 매 순간마다 채널의 상태를 감지하는 IEEE 802.11과는 달리 IEEE 802.15.4에서는 에너지를 절약하기 위해 백오프 카운터의 값이 0에 이르렀을 경우에만 두 번 연속으

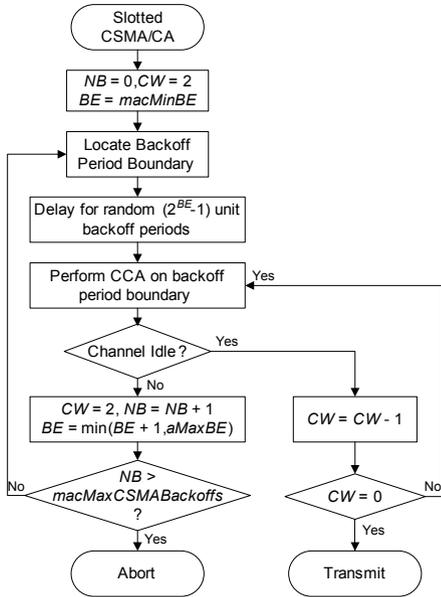


그림 2. IEEE 802.15.4 CSMA/CA 흐름도

로 채널을 감지한다. 채널 감지를 연속으로 수행하는 이유는 성공적으로 전송된 프레임에 대한 ACK 프레임이 길게는 한 백오프 슬롯 이후에 전송되기 때문에 이들 ACK 프레임과 새롭게 전송되는 데이터 프레임과의 충돌을 방지하기 위해 두 번째 채널 감지까지 수행한다. CCA에서 모두 채널이 유휴 상태(Idle)라고 판단되면 전송을 시작하며, 전송된 후에는 다음 프레임의 전송을 위해 모든 변수들을 초기화 한다. 그러나 두 번의 CCA 중, 한 번이라도 채널이 사용 중(Busy)이면 BE와 NB의 값을 각각 1씩 증가시킨 후 다시 백오프 지연을 시작한다. 이때, 백오프를 시도할 때마다 백오프 시간을 선택할 수 있는 구간은 이전 구간보다 배로 증가하며, BE 값이 최대 백오프 지수 값($aMaxBE=5$)에 도달하면 BE값은 더 이상 증가하지 않고 최대값을 유지하게 된다. 또한 NB의 값이 최대 백오프 시도 횟수 ($macMaxCSMABackoffs=4$)를 초과하면, 이 때는 채널 획득 실패로 간주되어 해당 프레임은 폐기되고 다음 전송을 위해 현재의 모든 변수가 초기화 된다.

III. 적응적 충돌 회피(ACA: Adaptive Collision Avoidance)알고리즘

그림 3은 본 논문에서 제안하는 ACA(Adaptive Collision Avoidance) 알고리즘의 흐름도를 나타내며, 전체 과정은 두 가지 가능한 백오프 구간으로부터

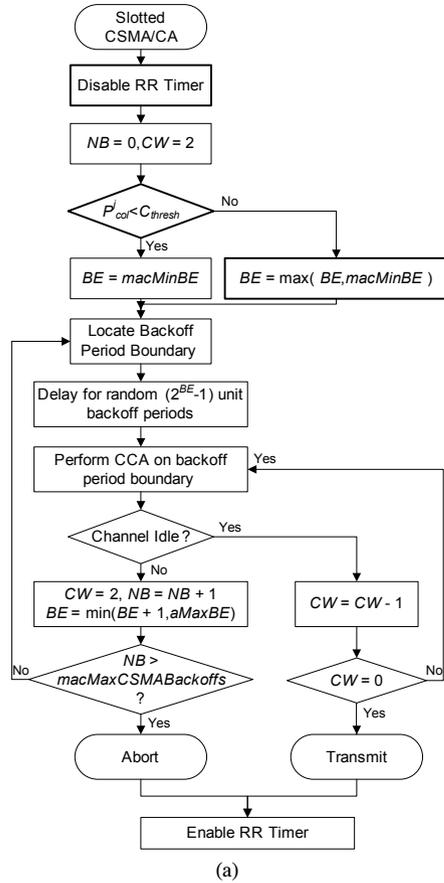


그림 3. ACA 알고리즘의 CSMA/CA 흐름도 (a) Dynamic Choice Part, (b) Range Regression Part

터 초기 백오프 구간을 선택하는 DC(Dynamic Choice)와 시간의 경과에 따라 초기 선택한 백오프 구간을 감소시키는 RR(Range Regression)으로 크게 두 부분으로 구성된다. 그림 3-(a)의 DC에서는 전송할 프레임이 큐의 맨 앞에 도착하면 RR 인터럽트 동작을 중지시키고 $macMinBE$ 와 $\max(BE, macMinBE)$ 라는 두 값 중 하나로 BE값을 재설정 한다. BE는 임의의 백오프 지연시간을 결정하는 초기 범위 $[0, 2^{BE}-1]$ 의 상한선을 결정하는 변수이다. BE값을 결정할 때는 새롭게 계산된 평균 충돌 확률(P_{col}^i)을 미리 정의된 임계값(C_{thresh})과 비교하여 P_{col}^i 의 값이

임계값보다 크지 않다면 BE값은 기존 IEEE 802.15.4에 정의된 방식대로 $macMinBE$ 로 초기화되고, $Cthresh$ 보다 크다면 현재 네트워크 상태가 부하가 높은 상황이라 판단하고 이전 백오프 단계에서 사용한 것과 같은 BE값을 이용한다. 이렇게 이전 백오프 단계에서의 BE값을 유지한다면 각 센서 노드는 상대적으로 넓은 초기 백오프 선택 구간을 갖기 때문에, 복수의 센서 노드가 동일한 백오프 지연 시간을 선택할 확률이 낮아진다. 초기 백오프 선택 구간이 정해지면 이후 과정은 기존 IEEE 802.15.4에서와 동일한 방식으로 동작한다. 채널 획득에 실패하여 다시 백오프를 시도하는 경우에는, 연속적인 센서 노드 간 전송 충돌을 방지하기 위하여 백오프 선택 구간을 두 배로 증가시킨다. 마지막으로 센서 노드가 전송을 시도하거나 채널 점유에 실패하는 경우에는 그림 3-(b)의 RR Timer 인터럽트 동작이 활성화 된다.

여기서 평균 충돌 확률 P_{col}^j 은 다음과 같이 EWMA(Exponentially Weighted Moving Average)를 이용하여 계산된다. 식 (1)에서 P_{cur}^j 은 특정 주기에서 ACK를 받지 못한 프레임의 수(Send-Ack)와 동일 주기에서 전송된 전체 프레임(Send) 수 간의 비율을 나타낸다. P_{col}^j 은 이전 주기인 $j-1$ 번째 주기에서의 충돌 확률을 의미하며, δ 는 0에서 1사이의 값으로 급격한 변동을 완화하기 위한 평활 계수(smoothing factor)로 이용된다.

$$\begin{aligned} P_{cur}^j &= (Send_j - ACK_j) / Send_j \\ P_{col}^j &= (1 - \delta) \times P_{cur}^j + \delta \times P_{col}^{j-1} \end{aligned} \quad (1)$$

그림 3-(b)는 ACA알고리즘의 RR 단계를 나타내며 전송할 새로운 프레임이 도착하지 않는 동안 타이머를 이용하여 일정 시간이 경과할 때마다 BE값을 감소시킨다. 이 동작은 네트워크의 상태가 급격히 변화하지 않는다는 가정 하에 동작한다.

IV. ACA 알고리즘의 수학적 분석

4.1 ACA 알고리즘의 마코프체인 모델

그림 4는 ACA 알고리즘의 수학적 분석을 돕기 위한 2차원 마코프 체인 모델을 보여주고 있다. 원은 전송 센서 노드의 상태를, 화살표는 상태 천이를, 그리고 화살표 위의 수는 천이 확률을 의미한다. 원 안의 두 개의 변수 (i, k) 는 각 센서 노드의 상태를 구분하기 위해 사용되는데, i 는 전송을 위해

센서 노드가 백오프를 재시도한 횟수($i=0,1,\dots,m$)를, k 는 임의의 순간에 남은 백오프 지연 시간 ($k=0, 1, \dots, W_i-1$)을 의미한다. m 과 W_i 는 최대 전송 백오프 시도 횟수와 i 번째 백오프에서 가질 수 있는 최대 백오프 지연시간을 의미한다.

ACA 알고리즘의 수학적 분석을 위해, 기존 IEEE 802.15.4 모델^{[10]-[12]}과는 달리 몇 가지 상태 천이 과정과 확률을 추가 또는 변경하였다. 각 백오프 단계에 삽입된 천이 확률 $P_{col_const}(1-\beta)$ 는 i 단계 백오프 이후 프레임 전송을 시도하고 다음 전송을 위해 현재 백오프 단계에서 임의의 상태 (i, k) 로 천이할 확률을 나타내며, 이는 전송 후 초기 백오프 지연 시간을 선택할 때 현재 전송이 이루어지기 이전의 백오프 단계에서와 동일한 백오프 선택 구간에서 초기 백오프 시간을 결정한다는 것을 의미한다. 기존 모델은 i 단계에서 전송이 이루어지면 다음 전송을 위한 초기 백오프 시간으로의 천이를 나타내기 위해 오직 처음백오프 단계의 상태 $(0, k)$ 로만 천이가 되었으며, 이는 백오프 시간을 선택하는 초기 백오프 구간 역시 $[0, 2^{macMinBE}-1]$ 로 고정됨을 의미한다. 새로운 천이 확률로 인해 기존 $(i, -1)$ 에서 $(0, k)$ 로 천이할 확률 $(1-\beta)$ 는 $(1-P_{col_const})(1-\beta)$ 로 변경되었다.

이러한 변경으로 인해 임의의 프레임을 전송할 때 초기 BE값은 상수 P_{col_const} 에 따라 확률적으로 $macMinBE$ 또는 이전의 전송에서 사용되었던 BE에 유사한 값으로 설정된다. 그림 3에서는 P_{col}^j 가 현재의 네트워크 혼잡 상황에 따라 동적으로 변화되지만 모델에서는 계산을 단순화하기 위해 P_{col}^j 을 상수 P_{col_const} 로 설정했다. 이러한 두 가지 변화로 인해 제시된 모델이 동적으로 BE값이 적용되는 ACA 알고리즘과 정확히 일치하지는 않지만, 제시된 PCA(Probabilistic Collision Avoidance) 모델을 이용해 적어도 ACA 알고리즘이 갖는 성능의 양상을 정확히 예측 할 수는 있다. 다시 말해 제시된 PCA 모델은 가장 최근의 BE와 $macMinBE$ 중에서 확률적으로 초기 BE를 선택하는 pseudo ACA 알고리즘을 개념적으로 요약한다. ACA 알고리즘은 확률적으로는 아니지만 동적으로 매번 새롭게 계산된 평균 충돌 확률에 따라 두 가지 가능한 범위 중 하나로 초기 백오프 지연 시간을 선택하기 때문에, PCA 모델이 적어도 ACA 알고리즘 처리량의 최저 한계치는 제공할 수 있다.

하나의 센서 노드가 i 번 채널 접근에 실패한 후, k 만큼 백오프 지연시간을 갖고 있음을 나타내는 상태를 $b_{i,k}$ 라 하면, $b_{j,l}$ 상태에서 $b_{i,k}$ 상태로 천이될

확률을 $P\{b_{i,k}|b_{j,l}\}$ 로 표현할 때, ACA 알고리즘 모델에서 각 상태의 천이 확률을 구하면 다음과 같다.

$$\left\{ \begin{array}{ll} P\{b_{i,k}|b_{i,k+1}\}=1 & \begin{array}{l} i \in (0, m) \\ k \in (0, W_i - 2) \end{array} \\ P\{b_{0,k}|b_{1,0}\} = \frac{(1 - P_{col_const})(1 - \alpha)}{W_0} & \begin{array}{l} i \in (0, m-1) \\ k \in (0, W_i - 1) \end{array} \\ P\{b_{i,k}|b_{i-1,0}\} = \frac{(\alpha + (1 - \alpha)\beta)}{W_i} & \begin{array}{l} i \in (0, m) \\ k \in (0, W_i - 1) \end{array} \\ P\{b_{i,k}|b_{i,0}\} = \frac{P_{col}(1 - \alpha)(1 - \beta)}{W_{i-1}} & \begin{array}{l} i \in (2, m) \\ k \in (0, W_{i-1} - 1) \end{array} \\ P\{b_{0,k}|b_{m,0}\} = \frac{(1 - P_{col_const})(\alpha + (1 - \alpha)\beta)}{W_0} & k \in (0, W_m - 1) \\ P\{b_{m,k}|b_{m,0}\} = \frac{P_{col_const}(1 - \alpha)(1 - \beta)}{W_0} & k \in (0, W_m - 1) \end{array} \right. \quad (2)$$

식 (2)에서 W_0 와 W_m 은 센서 노드가 첫 번째 백오프 단계에서 CCA 재전송 할 때 초기 백오프 전송 지연과 최대 백오프 단계에서의 전송 지연을 나타낸다.

IEEE 802.15.4 표준에서는 선택된 임의의 백오프 지연이 끝난 후 채널을 감지하기 위해 두 번의 CCA를 실행한다. 이때 첫 번째 채널 감지에서 채널이 사용 중일 확률을 α 로 정의하고, 첫 번째 채널 감지에서 채널이 유휴 상태이고(1- α), 두 번째 채널 감지에서 채널이 사용 중일 상태를 β 라 정의한다. 채널이 다른 센서 노드에 의해 사용 중일 때, 전송이 지연될 확률을 $p = \alpha + (1 - \alpha)\beta$ 라고 정의하면, ACA 알고리즘 모델은 식 (2)로부터 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} b_{0,0} &= P_{col_const}(1-p)b_{0,0} + (b_{0,0} + b_{1,0}) \\ &\quad + (1 - P_{col_const}) \left[(1-p) \sum_{i=0}^{m-1} b_{i,0} + pb_{m,0} \right] \\ b_{i,0} &= \frac{p}{1 - P_{col_const}(1-p)} b_{i-1,0} \quad i \in (1, m-1) \\ b_{m,0} &= \frac{p}{1 - P_{col_const}} b_{m-1,0} \end{aligned} \quad (3)$$

식 (2)와 식 (3)을 이용하여 일반항을 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} b_{0,0} &= \frac{(1 - P_{col_const}) \left[(1-p) \sum_{i=0}^m b_{i,0} + pb_{m,0} \right]}{1 - P_{col_const}(1-p)} \quad i = 0 \\ b_{i,k} &= \left(\frac{W_i - k}{W_i} \right) \left(\frac{p}{1 - P_{col_const}(1-p)} \right)^i b_{0,0} \quad \begin{array}{l} i \in (1, m-1) \\ k \in (0, W_i - 1) \end{array} \\ b_{i,k} &= \left(\frac{p}{1 - P_{col_const}} \right) \left(\frac{p}{1 - P_{col_const}(1-p)} \right)^{m-1} b_{0,0} \quad i = m \end{aligned} \quad (4)$$

마코프 체인의 모든 상태의 확률을 합하면 1이 되어야 하므로, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$1 = \sum_{i=0}^m b_{i,-1} + \sum_{j=0}^{L-1} b_{-1,j} + \sum_{i=0}^m \sum_{k=0}^{W_i-1} b_{i,k} \quad (5)$$

식 (5)의 첫 번째 항은 모든 백오프 단계의 첫 번째 채널 감지에서 채널이 유휴 상태일 경우의 확률을, 두 번째 항은 두 번의 채널 감지를 성공한 경우 전송 상태일 확률을 나타낸다. 이때, L 은 슬롯 단위로 계산된 프레임 전송 시간을 나타낸다. 식 (5)의 각 항을 풀어보면 다음의 식 (6), 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sum_{i=0}^m b_{i,-1} = (1 - \alpha) \sum_{i=0}^m b_{i,0} = b_{0,0} (1 - \alpha) \sum_{i=0}^m \left(\frac{p}{1 - P_{col_const}(1-p)} \right)^i \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \sum_{j=0}^{L-1} b_{-1,j} &= L(1 - P_{col})(1 - \alpha)(1 - \beta) \sum_{i=0}^m b_{i,0} \\ &= b_{0,0} L(1 - P_{col})(1 - \alpha)(1 - \beta) \sum_{i=0}^m \left(\frac{p}{1 - P_{col_const}(1-p)} \right)^i \end{aligned} \quad (7)$$

데이터 전송을 위해 각 센서 노드가 임의의 백오프 단계에서 첫 번째 CCA를 시도할 확률을 τ 라고 했을 때, 다음과 같이 나타낸다.

$$\tau = \sum_{i=0}^m b_{i,0} = \sum_{i=0}^m \left(\frac{p}{1 - P_{col_const}(1-p)} \right)^i b_{0,0} \quad (8)$$

그림 4에서 제안한 모델은 P'_{col} 이 Cthresh 보다 클 때 초기 백오프 구간을 $P_{col_const}(1-\beta)$ 의 확률로 이전과 동일한 구간으로 설정한다. 보다 다양한 초기 백오프 구간에서의 성능을 비교하기 위해 그림 5에서는 이전에 사용한 백오프 구간이 아닌 BE값을 하나 감소시킨 축소된 백오프 구간을 사용한다.

식 (9)는 최적의 초기 백오프 선택 구간을 비교하기 위해 식 (3)을 변형한 것이다.

$$\begin{aligned} b_{0,0} &= P_{col_const}(1-p)(b_{0,0} + b_{1,0}) \\ &\quad + \sum_{i=0}^m (1 - P_{col_const})(1-p)b_{i,0} + (1 - P_{col_const})pb_{m,0} \\ b_{i,0} &= pb_{i-1,0} + P_{col}(1-p)b_{i+1,0} \quad i \in (1, m-1) \\ b_{m,0} &= pb_{m-1,0} + P_{col}pb_{m,0} \end{aligned} \quad (9)$$

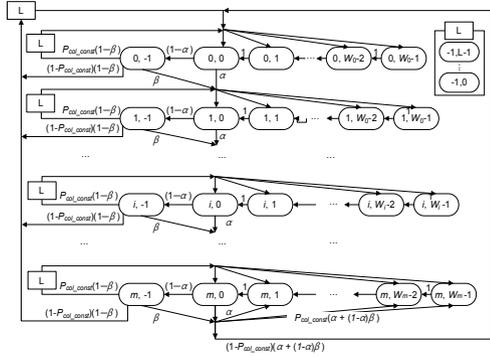


그림 4. Probabilistic Collision Avoidance 알고리즘의 2차원 마코프체인 모델

식 (10)는 식 (4)를 변형한 것으로 식 (9)을 이용하여 구한 일반항을 나타낸다.

$$\begin{aligned}
 b_{i,0} &= \left[\frac{f_{m+1-i}}{f_{m+1}} \right] p^i b_{0,0} \quad i \in (1, m-1) \\
 b_{i,k} &= \left(\frac{W_i - k}{W_i} \right) \left[\frac{f_{m+1-i}}{f_{m+1}} \right] p^i b_{0,0} \quad i \in (1, m-1), k \in (0, W_i - 1) \\
 f_n &= (-1)^n (1 - P_{col} p) w^{n-2} + \sum_{j=0}^{n-3} (1 - P_{col} p + w) (-w)^j r^{n-2-j} \\
 w &= \frac{-1 + \sqrt{1 - 4P_{col}(1-p)p}}{2}, r = \frac{1 + \sqrt{1 - 4P_{col}(1-p)p}}{2}
 \end{aligned} \tag{10}$$

는 다음과 같이 나타낸다.

$$\tau = \sum_{i=0}^m b_{i,0} = \sum_{i=0}^m \left(\frac{f_{m+1-i}}{f_{m+1}} \right) p^i b_{0,0} \tag{11}$$

α 는 첫 번째 CCA에서 채널이 사용되고 있을 확률로, 다른 센서 노드가 프레임 및 ACK를 전송할 경우 첫 번째 CCA에서 채널이 사용되고 있을 확률로 표현된다. 여기서 L 은 전송되는 프레임의 크기를, n 은 센서 노드 수를 의미한다. 첫 번째 CCA에서 채널이 유힬 상태이고, 두 번째 CCA에서 채널이 사용되고 있을 확률을 의미하는 β 또한 α 와 같은 방식으로 계산된다. 식 (12)와 식 (13)은 α 와 β

의 식을 나타낸다.

$$\alpha = L(1 - (1 - \tau)^{n-1})(1 - \alpha)(1 - \beta) \tag{12}$$

$$\beta = \frac{1 - (1 - \tau)^{n-1}}{2 - (1 - \tau)^n} \tag{13}$$

4.2 ACA 알고리즘의 처리량(Throughput) 모델

IEEE 802.15.4에서 전송할 프레임이 항상 존재하는 포화 상황에서의 데이터 처리량은 다음과 같다. 식 (14)에서 $E[slot]$ 은 IEEE 802.15.4 표준에서 $aUnitBackoffPeriod$ 로 정해진 슬롯의 평균 시간을 나타낸다. $L_{payload}$ 는 프레임 중 헤더를 제외한 순수한 데이터의 길이를 슬롯 단위로 나타내었고, $P_{transmit}$ 와 $P_{success}$ 는 각각 주어진 슬롯시간 동안 적어도 하나의 센서노드가 전송할 확률과 성공적으로 전송될 확률을 나타낸다.

$$T = \frac{P_{transmit} P_{success} L_{payload}}{E[slot]} \tag{14}$$

식 (14)에서 $P_{transmit}$ 은 적어도 하나의 센서노드가 전송할 확률이며, 동일한 시간에 같은 채널에 접근하는 센서 노드가 없는 경우이다. 즉, 전송할 센서 노드가 두 번의 CCA를 할 동안 채널은 연속해서 유힬 상태가 되어야 하므로 다음과 같이 구할 수 있다.

$$P_{transmit} = (1 - (1 - \tau)^n)(1 - \alpha)(1 - \beta) \tag{15}$$

식 (13)에서 $P_{success}$ 는 n 개의 노드 중 하나의 센서노드만이 전송할 확률을 나타낸 것으로 다른 $(n-1)$ 센서 노드는 전송이 이루어지지 않는 경우를 다음과 같이 구할 수 있다.

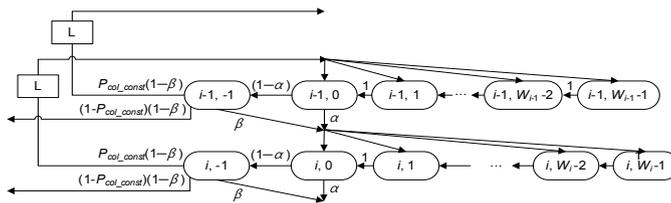


그림 5. 다양한 초기 백오프 구간을 선택하는 비교 모델의 2차원 Markov Chain 모델

$$P_{\text{success}} = \frac{n\tau(1-\tau)^{n-1}(1-\alpha)(1-\beta)}{P_{\text{transmit}}} \quad (16)$$

V. 성능분석

5장에서는 IEEE 802.15.4 표준과 ACA 알고리즘의 성능을 수학적 모델을 이용하여 분석한다. 표 1은 IEEE 802.15.4 표준과 ACA 알고리즘에 대한 성능을 평가하기 위해 정의된 파라미터들의 설정값을 보여준다. [13]는 SO 값이 작을수록 비콘 전송이 빈번해지고, 현재 슈퍼프레임 구간에서 잔여 시간의 부족으로 다음 슈퍼프레임 구간으로 전송이 지연(deferment)되는 현상이 많아짐으로 성능의 저하가 심화된다는 것을 보여주었다. 본 논문에서는 이러한 전송 지연의 영향을 최소화하기 위해 BO(Beacon Order)와 SO(Superframe Order)를 9로 설정하였다.

그림 6은 P_{col_const} 가 0.2간격으로 0부터 1까지 증가할 때 그림 4의 PCA 모델의 처리량이 센서 노드 수의 증가에 따라 변화하는 모습을 보여준다. 센서 노드 수 10개 이후부터는 P_{col_const} 와 센서노드 수가 증가할수록 PCA 알고리즘의 데이터 처리량이 기존 IEEE 802.15.4보다 높게 나타난다. 특히, 센서 노드 수가 40개일 때 고정된 초기 백오프 구간을 갖는 $P_{col_const}=0$ 일 때보다 $P_{col_const}=1$ 일 때 최대 41%까지 향상된 데이터 처리량을 보였다. 그 이유는 PCA 알고리즘이 네트워크 상황에 맞는 초기 백오프 구간을 선택함으로써 충돌 확률을 낮췄기 때문이다. 그러나 PCA 알고리즘은 센서 노드 수 10개 이하에서처럼 네트워크 통신 부하가 낮을 때는 불필요하

표 1. 시스템 파라미터

Parameters	Value
Frame Payload	50 Bytes
MAC header	7 Bytes
PHY header	6 Bytes
ACK	11 Bytes
Channel Bit Rate	250 Kbps
macMinBE	3
macMaxBE	7
macMaxCSMA	4
Beacon Order	9
Superframe Order	9

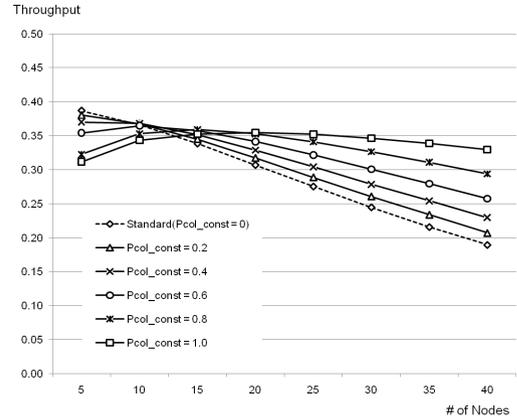


그림 6. P_{col_const} 변화에 따른 PCA 모델의 데이터 처리량

게 긴 백오프 지연을 갖게 되어 더 낮은 데이터 처리량을 나타낸다.

그림 7은 다양한 초기 백오프 구간 선택의 성능을 비교하기 위해 센서 노드 수의 증가에 따른 데이터 처리량을 나타낸다. 그래프의 구분을 위해 이전 구간을 사용하는 방식을 PCA_1, 축소된 구간을 사용하는 방식을 PCA_2라고 명명한다. 센서 노드 수 10개 이후부터 PCA_1과 PCA_2는 최대 3%의 성능 편차를 보이며, 기존 IEEE 802.15.4 보다 높은 데이터 처리량을 나타낸다. 이는 초기 백오프 구간의 축소는 성능의 큰 영향을 미치지 않으며, 충돌 확률에 따른 적응적 초기 백오프 구간 선택이 성능에 큰 영향을 미치고 있음을 보여준다.

그림 8은 모델의 정확성을 검증하기 위해 기존 IEEE 802.15.4와 P_{col_const} 가 0.2간격으로 0부터 1까지 증가할 때 ACA 알고리즘 모델의 처리량을 ns-2

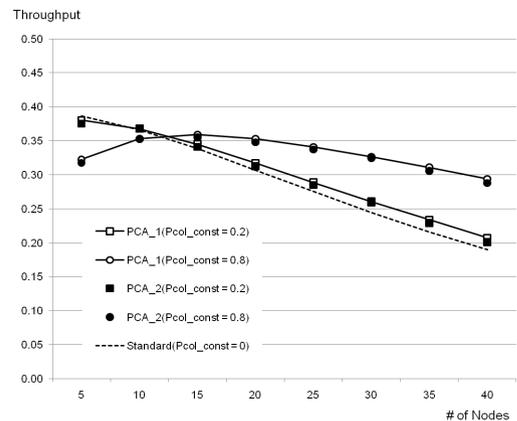


그림 7. PCA_1과 PCA_2의 데이터 처리량

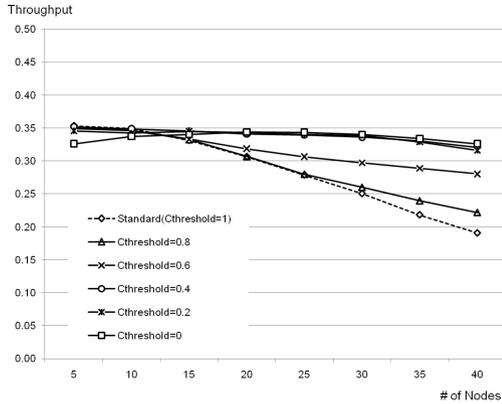


그림 8. Cthresh변화에 따른 ACA 알고리즘의 데이터 처리량

시뮬레이션 결과와 비교하였다. PCA 알고리즘과 초기 백오프 구간을 설정하는 방식이 다르기 때문에 센서 노드 수가 5이고 Cthresh가 0일 때를 제외하고 모든 경우에 ACA 알고리즘의 처리량이 표준보다 높게 나타났다. 또한, Cthresh가 낮을수록 처리량이 증가하는 추세를 나타낸다. 그림 6과 그림 8의 성능을 비교해보면, PCA 모델이 ACA 알고리즘의 처리량을 거의 유사하게 예측한 것을 볼 수 있다. PCA 모델의 예측처럼, ACA 알고리즘의 성능은 센서 노드 수 40개, Cthresh=0.2에서 0.35정도를 나타낸다. 그림 9에서처럼 ACA 알고리즘에서 Cthresh가 0일 때와 PCA 모델에서 P_{col_const} 가 1일 때 모델과 시뮬레이션의 차이는 7% 이내에 있다. 이러한 결과를 바탕으로, PCA 모델이 정확하게 ACA 알고리즘의 성능을 예측할 수 있음을 알 수 있다.

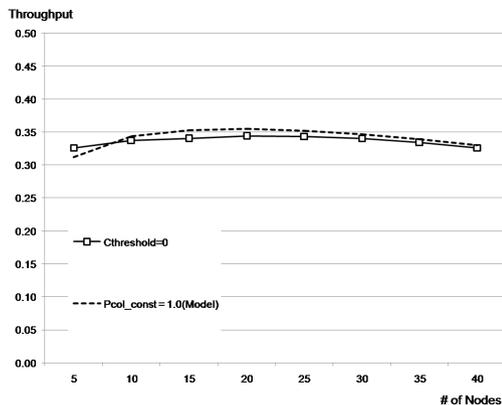


그림 9. ACA 알고리즘 처리량의 시뮬레이션 검증

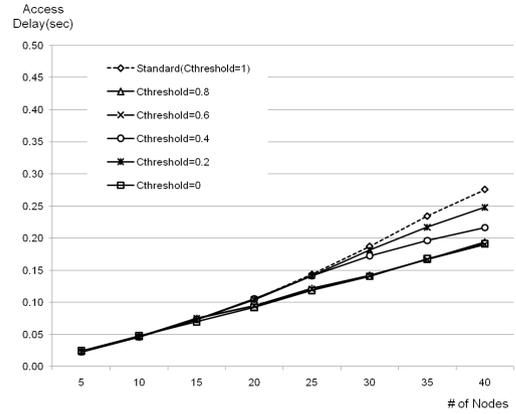


그림 10. Cthresh변화에 따른 ACA 알고리즘의 평균 서비스 지연시간

그림 10은 기존 IEEE 802.15.4와 ACA 알고리즘의 성공적으로 전송된 프레임간의 간격으로 표현되는 평균 서비스 지연 시간을 나타낸다. 그림 7의 데이터 처리량의 경우처럼 ACA 알고리즘의 평균 서비스 지연 시간은 센서 노드 수와 상관없이 표준에 비해 작게 나타나며, 특히 노드 수 40일 때 Cthresh가 0.2보다 작을 경우에는 Cthresh=1인 표준에 비해 최대 31%까지 지연시간이 단축된다. 센서 노드 수가 적은 상황에서도 평균 서비스 지연 시간은 계속 낮게 유지된다. 그 이유는, ACA 알고리즘에 의한 추가적인 백오프 지연이 충돌 및 채널 접근 실패와 비교하여 평균 서비스 지연 시간을 결정하는 절대적 요인은 아니라는 것이다.

VI. 결론

본 논문에서는, 네트워크 혼잡 상황에 따른 충돌 확률을 고려하여 적응적으로 초기 백오프 지연시간을 설정하는 ACA 알고리즘을 제안한다. ACA 알고리즘은 충돌 확률에 따라 보다 넓은 초기 백오프 구간을 선택하게 함으로써 복수의 센서 노드가 동일 한 지연시간을 선택할 확률을 줄여 충돌을 줄이고 성능을 향상시킨다. ACA 알고리즘의 성능을 측정하기 위해 수학적 모델을 제시하며, ns-2를 이용한 시뮬레이션을 통해 모델의 정확성을 검증한다. 시뮬레이션과 수학적 분석 결과, ACA 알고리즘을 이용할 때 기존 IEEE 802.15.4보다 최대 41%까지 향상된 데이터 처리량을 얻었으며, 평균 서비스 지연 시간 또한 31%까지 단축시켰다.

향후 연구에서는 비포화 조건에서 백오프 지연

시간을 결정하는 방법을 보다 다양화하여 ACA 알고리즘의 성능을 측정하고자 한다. 또한, 버스트 트래픽 등 보다 현실적인 네트워크 상황을 고려하여 ACA 알고리즘을 개선해갈 계획이다.

참 고 문 헌

[1] IEEE Std. 802-11, "IEEE Standard for Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specification," Jun., 1997.

[2] IEEE Standard for Part 15.4: Wireless Medium Access Control Layer (MAC) and Physical Layer(PHY) Specifications for Low Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANS), Oct., 2003.

[3] SY. LEE, YS. Shin, JS. Ahn, KW. LEE, "Performance Analysis of a Non-Overlapping Binary Exponential Backoff Algorithm over IEEE 802.15.4", in *Proc. of the 4th International Conference on Ubiquitous Information Technologies & Applications(ICUT 2009)*, Institute of Electrical and Electronic Engineers, Inc., Fukuoka, Japan, pp.1-5, 20-22, Dec., 2009.

[4] P. Papadimitratos, A. Mishra, D. Rosenburgh, "A Cross-Layer Design Approach to Enhance 802.15.4", in *Proc. of IEEE MILCOM*, pp.1719-1726 Vol.3, 2005.

[5] T. Kim and S. Choi, "Priority-based Delay Mitigation for Event-Monitoring IEEE 802.15.4 LR-WPANS", *IEEE Communications Letters*, pp.213-215 Vol.10, Nov., 2005.

[6] H. Minooei and H. Nojumi, "Performance Evaluation of a New Backoff Method for IEEE 802.11", *Comp. Comm.*, Vol.30, No.18, pp.3698-3704, Dec., 2007.

[7] YS. Shin, JS. Ahn, KW. LEE, "Analytical Performance Evaluation of IEEE 802.15.4 with Multiple Transmission Queues for Providing QoS under Non-Saturated Condition", *APCC 2010*, Oct., 2010.

[8] G. Bianchi, "Performance Analysis of the IEEE 802.11 Distributed Coordination Function," *IEEE J-SAC* Vol.18 No.3, pp.535-547, Mar.,

2000.

[9] 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", in *Proc. AINAW'07*, pp.899-904, May, 2007.

[10] J. Mistic and V.B. Mistic, "Access Delay for Nodes with Finite Buffers in IEEE 802.15.4 Beacon Enabled PAN with Uplink Transmissions", *Computer Communications*, Vol.28, No.10, pp.1152-1166, 2005.

[11] S. Pollin et al. "Performance Analysis of Slotted Carrier Sense IEEE 802.15.4 Medium Access Layer", in *Proc. IEEE GLOBECOM 2006*, pp.1-6, Nov., 2006.

[12] Younggoo Kwon, "A Novel MAC Protocol with Fast Collision Resolution for Wireless LANs", *INFOCOM 2003*, pp.853-862 Vol.2, March, 30 2003-April 3.

[13] GW. Hyun, YS. Shin, JS. Ahn, KW. Lee, "Analysis of Effects of Hidden Nodes and CCA Deferment Algorithm on IEEE 802.15.4 Performance using ns-2 Simulator", *Korea Information Processing Society Letter*, 16-3 pp.393-406, 2009.

[14] ns-2 official Site, <http://www.isi.edu/nsnam/ns>.

노 기 철 (Ki-Chul Noh)

준회원



2009년 동국대학교 정보통신공학과(학사)
2011년 동국대학교 정보통신공학과(공학석사)
<관심분야> 통신, 임베디드 시스템, IEEE 802.15.4

이 승 연 (Seung-Yeon Lee)

준회원



2009년 동국대학교 정보통신공학과(학사)
2011년 동국대학교 정보통신공학과(공학석사)
<관심분야> 무선센서네트워크, 시뮬레이션, IEEE 802.15.4

신 연 순 (Youn-Soon Shin)

정회원



1999년 동국대학교 전산통계학과(학사)

2002년 동국대학교 정보통신공학과(공학석사)

2011년 동국대학교 정보통신공학과(공학박사)

<관심분야> 컴퓨터 구조, 임베디드 시스템, 무선 통신, 센서 네트워크 등

이 강 우 (Kang-Woo Lee)

정회원



1985년 연세대학교 전자공학과(학사)

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

1997년 USC 컴퓨터공학과(공학박사)

1998년~현재 동국대학교 정보통신공학과 교수
<관심분야> 컴퓨터 구조, 임베디드 시스템, 센서 네트워크 등

안 중 석 (Jong-Suk Ahn)

정회원



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