

두 개의 송신 노드가 경쟁하는 상황의 B-MAC 무선 센서 네트워크 프로토콜 성능 분석을 위한 분석적 모델*

정성환**† · 권태경***

Analytic Model for Performance Evaluation of B-MAC Protocol under Contention Transmission Condition of Two Senders

Sung Hwan Jung** · Taekyoung Kwon***

■ Abstract ■

In this paper, we present an analytic model that evaluates the performance of B-MAC protocol under contention transmission conditions of two senders in a single-hop wireless sensor network. Our model considers the impact of several important factors such as sleep cycle, the backoff mechanism and incoming traffic loads. After obtaining the service delay distribution of a sending node and expected delay of a receiving node, an iterative algorithm is presented for calculating the performance measures such as expected energy consumption usage per packet and latency. Simulation results show that the proposed analytic model can accurately estimate the performance measures under different traffic conditions.

Keyword : Wireless Sensor Networks, B-MAC, Contention Transmission Conditions,
Performance Analysis, Queueing Behavior

논문접수일 : 2009년 03월 23일 논문게재확정일 : 2009년 08월 19일

논문수정일(1차 : 2009년 07월 17일)

* 본 연구는 지식경제부 및 정보통신연구진흥원의 IT산업원천기술개발사업의 일환으로 수행하였음(2007-F-038-03, 미래 인터넷 핵심기술 연구).

** 서울대학교 BK21 정보기술사업단

*** 서울대학교 공과대학 컴퓨터공학부

† 교신저자

1. 서 론

무선 센서 네트워크의 프로토콜 설계에 있어서 가장 중요한 주제는 제한된 에너지 용량을 가진 센서들의 에너지 효율성을 증대시키는 것이다. 적은 에너지로 작동할 수 있는 가장 효과적인 방법 중의 하나는 센서들이 주기적으로 수면상태(sleep state)와 작동상태(awake state)를 반복하는 것이다. 주기적 수면모드 방식(duty cycling)을 채택한 MAC(Medium Access Control) 프로토콜은 크게 동기식(synchronized)과 비동기식(asynchronous)의 두 방식으로 분류할 수 있다. S-MAC[9]과 T-MAC[2]과 같은 동기식 프로토콜은 노드가 언제 수면상태에 들어 가고 다시 작동상태로 돌아오는 것에 대한 스케줄을 프레임 전송을 통해 미리 약속하여 작동하게 된다. B-MAC[6]과 WISEMAC[3]과 같은 비동기 방식의 프로토콜은 저전력 수신 기법(low power listening)을 이용하여 데이터를 송수신한다. 즉, 비동기식 전송 방식에서는 전송 노드에 전송할 패킷이 있는 경우에, 수신노드의 수면 기간보다 더 긴 프리앰블(preamble)을 보내게 된다. 수면 상태에서 깨어난 수신노드가 프리앰블을 수신하게 되면, 수면모드로 다시 들어가지 않고 프리앰블 후에 도착하는 데이터 패킷을 수신하기 위해 기다리게 된다. 비동기 방식은 노드간의 동기를 맞추기 위해 주기적으로 프레임을 송수신 해야 하는 동기식 방식에 비해 구현방식이 단순하고, 에너지 효율성 더 좋은 것으로 평가되고 있다. B-MAC 프로토콜은 무선 센서 네트워크의 저전력 통신을 위해서 버클리 대학에서 개발한 가장 대표적인 비동기식 MAC 프로토콜이다. B-MAC에서 각각의 노드는 독립된 스케줄의 수면, 작동모드를 가질 수 있다. [그림 1]에서와 같이, 데이터를 전송하는 노드는 프리앰블 기법을 통해서 수신 노드가 데이터를 받기 위해 작동모드 상태에 들어갈 것을 보장 받을 수 있다. B-MAC은 전송수율(throughput), 지연시간(latency) 그리고 에너지 사용을 측면에서 기존의 동기식 방식보다 훨씬 우수한 것을 알려져 있다. 또한 B-MAC의 메커

니즘을 모체로 한 비슷한 유형의 비동기식 MAC 프로토콜들이 계속 개발 되고 있는 상황이다[1, 8].

B-MAC은 상위의 어플리케이션에서 트래픽의 부하 변화에 따라 수면주기(sleep schedule)를 조정할 수 있는 인터페이스를 제공한다. 따라서 최적의 수면주기를 결정하는 것은 상위 어플리케이션 개발자의 몫이라고 할 수 있다.

B-MAC에서 채택한 핵심적인 매체 접속(media access) 기능들은 Clear Channel Assessment(CCA), 패킷 backoff 그리고 Low Power Listening(LPL) 등이다. CCA 기능은 무선 채널로부터 수신되는 신호를 샘플링(sampling)하여 무선채널이 바쁜지(busy), 즉 다른 노드에 의해서 사용되고 있는지 또는 유향한(clear or idle)지를 소프트웨어적으로 판단하는 기법이다. B-MAC에서 채택한 패킷 backoff 기능은 CSMA/CA(Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) 원리를 기반으로 한다. CSMA/CA는 무선채널이 다른 사용자에 의해서 사용중이라고 판단될 때, 채널이 유향해 질 때를 기다린 후 즉시 패킷을 전송하는 것이 아니라, random 한 시간길이를 정하여 패킷 전송을 인위적으로 지연시킴으로써 다른 노드에서 전송되는 패킷과의 충돌 확률을 줄이는 기법이다. B-MAC에서는 에너지의 효율성을 고려하여 미리 정해진 backoff window 크기 내에서 임의의 시간을 선택하여 backoff를 하는 가장 단순한 constant backoff window size/random backoff 방식을 채택하고 있다. B-MAC에서는 전송할 패킷이 있을 때, 먼저 initial backoff를 한다. 그 후에 CCA를 통하여 채널이 유향하다고 판단되면 프리앰블링을 통하여 패킷을 전송하고, 채널이 바쁜 경우에는, 다시 일정한 크기 내에서 랜덤하게 시간을 정하여 congestion backoff를 하게 된다. 일반적인 CSMA/CS 기반의 backoff 기법에서는, backoff 도중에도 연속적으로 채널 상태를 모니터링하여, 채널이 다른 패킷 전송에 의해서 점유된 경우에 즉시로 backoff counter를 멈추고 일시정지 상태(frozen state)에 있다가 채널이 유향해지면, 다시 backoff counter를 줄여가게 된다[5]. 이 방법은,

먼저 backoff를 시작한 패킷이 나중에 backoff를 시작한 패킷보다 채널을 점유할 확률을 높게 해주어 결과적으로 노드간의 형평성(fairness)을 보장해 준다.

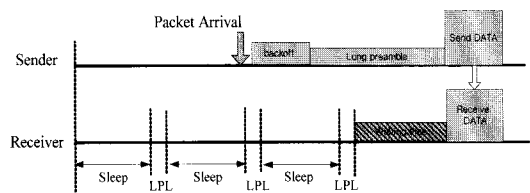
B-MAC의 성능 분석에 대한 연구는 주로 시뮬레이션이나 실험장치를 통해서 이루어 졌다[1, 6, 8]. 그러나 이러한 방법은 다양한 트래픽 상황이나 네트워크 토폴로지에서 프로토콜의 성능을 이해하고 최적 운영안을 찾는 데 있어서 시간적, 비용적 제약이 커진다는 한계를 가지고 있다. 따라서 B-MAC 프로토콜을 분석적으로 모델링하는 것은 운영자나 개발자가 적은 비용으로 프로토콜의 성능을 이해하고 최적의 운영 정책을 수립하는 데 중요한 기초 연구가 될 수 있다.

B-MAC을 대상으로 분석적인 모델링을 통하여 성능을 분석한 연구는 하나의 송신 노드가 또 다른 수신 노드에 데이터를 전송하는 경우에 에너지 사용량을 계산하는 가장 단순한 분석의에 이루어진 것이 없으며, 더군다나, 다양한 트래픽과 backoff 알고리즘까지 반영하여, 에너지 사용률이나 지연시간을 분석한 연구는 거의 없다. B-MAC의 분석적인 모델링이 어려운 이유는, backoff 작동 방식의 특수성 때문이라고 판단된다. 즉, 기존의 IEEE 802.11 DCF(Distributed Coordination Function)과 같은 일반적인 backoff 작동 방식은 backoff 기간 중 항상 채널 상태를 모니터링 하여 채널이 점유되면, 즉시 backoff counter를 일시중지(frozing)시키게 된다[10]. 이 경우는 counter의 슬롯(slot) 시간 단위로 Markov chain을 구성하여, backoff 기간 중, 각 슬롯 단위에서 다른 패킷의 충돌(collision)이나 성공적 전송에 의해서 backoff counter가 일시정지될 확률이 동일하다고 가정하여 backoff 시간 지연을 모델링할 수 있다[5]. 그러나 B-MAC의 경우에는 에너지 사용량을 줄이기 위하여 initial backoff 동안에는 채널 모니터링을 하지 않고 initial backoff가 끝난 후, CCA를 통하여 채널을 모니터링하기 시작한다. 그래서 congestion backoff 때에는 노드간의 형평성 보장을 위해서 일반적인 CSMA/CS 방식처럼 채널이 바빠질 때, frozing이 일어나게 된다.

따라서 한 노드가 backoff하는 동안 한 슬롯에 머무르는 시간이 initial backoff와 congestion backoff에 따라서 차이가 발생하고, 결과적으로 슬롯 시간을 단위 시간으로 하는 이산 시간 Markov chain을 구성할 수 없게 된다. 본 연구에서는 이러한 모델링의 난점을 극복하기 위하여, 패킷이 도착하는 시점, backoff가 시작되고 끝나는 시점등의 특정한 시점하에서 채널 상황을 묘사할 수 있는 확률값을 유도하여 각 노드에서의 패킷 지연시간, 수신 노드의 데이터 수신을 위한 대기 시간 등을 계산 할 수 있는 모델링을 제안한다.

본 연구에서는 두 개의 송신 노드가 하나의 수신 노드에 패킷을 보내기 위해서 경쟁하는 상황에서, backoff 작동방식, 수면주기, 도착 트래픽의 변화 등을 고려하여 각 노드의 에너지 사용량, 패킷 지연 시간 등을 대기 지연(queueing delay)까지 반영하여 구할 수 있는 모델을 제시하였다.

본 논문은 비록 두 개의 전송 노드 만을 고려했다는 제한점이 있으나, 이것은 임의의 개수의 전송 노드가 경쟁하는 상황을 분석하기 위한 선행 연구가 될 수 있으며, 궁극적으로 트리(tree) 구조를 갖는 복수 홉(multi hop) 무선 센서 네트워크의 성능 분석으로 나아가기 위한 기초 연구가 될 수 있을 것으로 기대된다.



[그림 1] B-MAC 프로토콜의 기본 동작 방식

2. B-MAC 프로토콜의 분석적 모델링

2.1 모델 가정

본 연구에서는 하나의 홉(single-hop)을 갖는 무

선 센서 네트워크를 분석 대상으로 한다. 그리고 동일한 통계적 특성을 갖는 두 개의 송신 노드가 하나의 수신 노드에게 데이터를 보내기 위해서 경쟁하는 상황을 설정한다. 본 연구에서는 수신 노드가 패킷을 수신한 후 ACK(acknowledgement)를 보내며, backoff counter는 σ 를 기본 시간 단위로 하는 슬롯 방식으로 작동된다고 가정한다. 전술한 바와 같이 backoff counter 값은 0에서부터 backoff window 크기 미만의 값중에서 랜덤하게 정수값을 취하게 된다.

송신 노드에 도착하는 패킷의 분포는 도착률이 λ 인 포아송(Poisson) 분포를 따른다. 비록 패킷의 도착 시간 간격이 연속적이지만, 효과적인 모델링을 통해 최적의 프로토콜 제어변수(control parameter)를 결정하기 위해서 패킷의 도착분포를 bakcoff 슬롯 시간을 기본 단위로 하는 이산시간 분포를 갖는 것으로 가정하여 분석하기로 하자. 앞으로 임의의 연속시간확률변수 t_y 에 대하여 $k = \lfloor t_y \cdot \sigma^{-1} \rfloor$ 식을 만족하는 정수 k 의 확률질량함수, $f_y(k)$ 를 t_y 의 보정된 확률질량함수(modified probability mass function)라고 명명하기로 하자.

패킷의 도착간격 시간을 t_x 그리고 initial backoff 시간을 t_{b1} 라 하자. 모델 가정에 의해서 t_x 의 확률질량함수는 기하분포(geometric)를 따르게 되고, t_{b1} 는 이산 일양(discrete uniform)분포를 따르게 된다. 그리고 t_s 를 t_x 와 t_{b1} 와의 convolution 이라고 하면 이것은 임의의 시점 이후로 패킷이 도착하고, 즉시로 initial backoff를 시작하여 마칠 때까지 걸린 시간이라고 할 수 있다. 만약, initial backoff window 크기를 W_j 라고 정하면, t_s 의 보정된 확률질량함수는 다음과 같이 계산된다.

$$f_s(j) = \sum_{k=0}^{\text{Min}[W_j-j-1]} f_x(j-k) \cdot f_{b1}(k), \quad j=1, 2, \dots \quad (1)$$

$$\text{단, } f_x(k) = (e^{-\lambda\sigma})^{k-1} (1 - e^{-\lambda\sigma}), \quad k=1, 2, \dots,$$

$$\text{그리고 } f_{b1}(k) = \frac{1}{W_j}, \quad k=0, \dots, W_j-1 \quad (2)$$

또한 congestion backoff window 크기를 W_C 라

고 하면, congestion backoff 시간, t_{b2} 의 보정된 확률질량함수는 다음과 같이 주어진다.

$$f_{b2}(k) = \frac{1}{W_C}, \quad k=0, 1, \dots, W_C-1 \quad (3)$$

단, 식 (3)에서 congestion backoff 동안 다른 노드에 의한 채널 점유로 backoff counter가 일시정지되는 시간(frozen time)은 고려되지 않았다.

만약, 한 노드의 전체 backoff 기간 중 initial backoff가 차지하는 평균 시간길이의 비율을 γ 라고 정하고, 안정상태하에서 임의의 노드가 선택하게 되는 backoff 시간을 t_w 라고 정의하면 t_w 의 보정된 확률질량 함수는 식 (4)와 같이 계산될 수 있다.

$$f_w(k) = \begin{cases} \gamma \cdot f_{b1}(k) + (1-\gamma) \cdot f_{b2}(k) & 0 \leq k \leq W_C-1 \\ \gamma \cdot f_{b1}(k) & W_C \leq k \leq W_i-1 \end{cases} \quad (4)$$

또한, 시스템이 안정상태일 때 임의의 시점에서 송신노드의 상태가 y 에 속해 있고, 그 시간길이가 t_y 이며, 보정된 확률질량함수 f_y 를 따른다고 가정하자. 임의의 관찰한 시점부터 그 상태가 끝나게 될 잔여시간(residual time)을 \tilde{t}_y 라고 표기하고, 그 보정된 확률질량함수를 \tilde{f}_y 라고 하자. 노드가 backoff 중에 있는 상태를 w , 그리고 패킷을 전송하고 있을 상태를 $succ$ 라 하면, t_{succ} 값은 상수값이므로, \tilde{t}_{succ} 의 보정된 확률질량함수는 식 (5)와 같이 주어진다.

$$\tilde{f}_{succ}(k) = \frac{1}{\lceil t_{succ}/\sigma \rceil}, \quad k=1, 2, \dots, \lceil t_{succ}/\sigma \rceil \quad (5)$$

또한 \tilde{t}_w 의 보정된 확률질량함수는 식 (4)를 이용하여 식 (6)과 같이 주어진다.

$$\tilde{t}_w(k) = \{1 - F_w(k)\} / (E[t_w] \cdot \sigma^{-1}), \quad (6)$$

$$k=0, 1, 2, \dots, W_j-1$$

식 (6)에서 $E[t_w]$ 는 t_w 의 기대값을 의미한다. 식 (6)은 시스템이 슬롯단위로 작동한다는 가정하에서 이산시간 재생과정의 정리를 이용하여 잔여시간 확

률밀도함수를 구한 것이다[7].

2.2 송신 노드의 서비스 시간 모델

송신 노드의 서비스 시간(t_{sd})은 패킷이 노드의 대기 버퍼에 가장 첫 번째 순위에 놓이게 된 시점부터 패킷이 전송되어 수신 노드로부터 수신확인 ACK를 받는 시점까지로 정의하자. 서비스 시간은 크게 하나의 패킷을 전송하는데 소요된 누적 backoff 시간(t_B)과 순수하게 패킷 전송을 위해 필요한 시간(t_{succ})으로 구성된다.

분석을 위하여 누적 backoff 시간을 다음의 몇 가지 지연 요소로 나누어 생각할 수 있다. 1) 첫 번째는 initial backoff 시간(t_{b1})이다; 2) 두 번째는 initial backoff가 끝난직 후 채널이 바쁜 것이 확인되어, congestion backoff를 시작하기 전에 채널이 유희해 질 때까지 기다리는 초기 일시정지 시간(t_{f1})이다; 3) 세 번째는 congestion backoff 시간(t_{b2})이다; 4) 마지막 네 번째는 congestion backoff 기간중 다른 노드의 패킷전송으로 인해서 채널이 점유됨으로 congestion backoff counter가 일시정지되는 시간(t_{f2})이다. 본 연구에서는 이러한 시간 지연 요소들의 값들을 계산하기 위하여 확률생성함수(PGF : probability generating function)와 전달함수기법(transfer-function approach) [10] 을 사용하였으며 서비스 시간의 전달함수를 [그림 1]에 나타내었다.

[그림 1]에서 $Q_x(z)$ 는 특정 시간 지연 요소, t_x 의 보정된 확률질량함수로 생성된 PGF를 나타낸다.

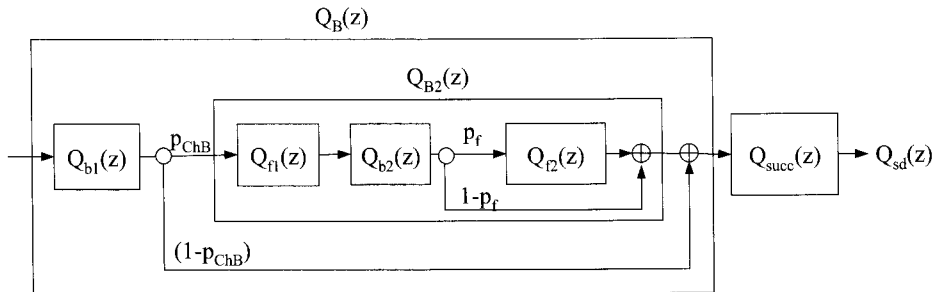
그리고 ChB 는 initial backoff 가 끝난 직후 채널이 바쁜 상태에 있을 사건이고, 그것의 확률값을 P_{ChB} 로 나타낸다. 아울러 p_f 는 congestion backoff 동안에 노드의 backoff counter가 일시정지 상태(frozen state)를 경험하게 될 확률이다.

임의의 시점에 노드가 전송할 패킷을 가지고 있다는 조건하에, 노드가 패킷을 전송하는 상태에 있을 확률을 ω 라고 하자. 재생이론(renewal theory)의 극한정리(limit theorem)에 의하여 ω 는 $\omega = t_{succ}/E[t_{sd}]$ 로 계산될 수 있고 아울러 제 2.1절에서 언급한 γ 값도 이와 유사하게 $\gamma = E[t_{b1}]/E[t_B]$ 로 계산될 수 있다[7].

서비스 시간을 계산하기 위해서, 본 연구에서는 패킷이 도착한 시점의 노드 상태, initial backoff가 끝난 시점의 채널 상태, congestion backoff가 시작되는 시점의 채널 상태 등, 특정한 시점 상태와 그 확률값을 계산하는데 중점을 두게 된다.

모델링을 위하여 두 개의 송신 노드중 임의로 선택한 한 노드를 선택노드라 명명하고, 그 선택노드에 도착한 임의의 선택된 패킷을 선택패킷이라고 하기로 하자. 또한 다음의 상태변수들을 정의하자. 지시확률변수 Nd 는 선택패킷이 선택노드에 도착했을 때, 선택노드의 상태를 나타낸다. 구체적으로 $Nd=1$ 은 선택노드가 유희한 상태, 즉 전송할 패킷이 없는 상태를 나타내고, $Nd=2$ 는 선택노드가 전송할 패킷을 가지고 있어서 바쁜 상태를 나타낸다.

또한 Ch 는 선택노드가 선택패킷을 보내기 위해서 initial backoff를 시작하는 시점의 채널 상태를 나타내는 지시확률변수라고 하자. 구체적으로 $Ch=1$ 일



[그림 2] 서비스 시간의 전달함수(transfer function)

때는 선택패킷을 위한 initial backoff를 시작할 때, 다른 노드도 자신의 패킷을 전송하기 위해서 back-off를 하고 있는 사건을 나타낸다. $Ch=2$ 는 선택패킷을 위한 initial backoff를 시작할 때 다른 노드와 채널이 모두 유희한 상태에 있을 사건을 나타낸다. 마지막으로 $Ch=3$ 은 선택패킷을 위한 initial back-off를 시작할 때 다른 노드가 패킷을 전송하고 있는 상태에 있을 사건을 나타낸다. Nd 의 값이 정해진 조건하에서 initial backoff가 끝나는 시점에 사건 ChB 가 발생될 확률은 initial backoff를 시작하는 시점의 채널상태인 Ch 의 값에 따라 세 가지의 배타적인 사건들의 확률로 구성된다. 따라서 전확률공식(the law of total probability)을 이용하여 확률값 P_{ChB} 를 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$P_{ChB} = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^3 P(Nd=i, Ch=j, ChB) \\ = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^3 P(Nd=i) \cdot P(Ch=j, ChB|Nd=i) \quad (7)$$

송신 노드의 대기시스템은 일량보존 시스템(work-conserving system)이므로 송신 노드에 제공되는 평균일량, 즉, 처리부하는 다음과 같이 계산된다.

$$\rho = \lambda \cdot E\{t_{sd}\} \quad (8)$$

송신노드 대기 시스템의 안정상태 조건 $\rho < 1$ 이 만족된다고 가정하면, 시스템에 단위시간당 제공되는 일량은 임의의 시점에 송신 노드가 바쁜 상태에 있을 확률, 즉 전송할 패킷을 가지고 있는 상태에 있을 확률이 된다. 따라서 안정상태 조건하에서 다음의 확률식이 만족된다.

$$P(Nd=1) = 1 - \rho, \quad P(Nd=2) = \rho \quad (9)$$

다음으로 P_{ChB} 값을 구성하는 확률값들을 계산하자. 시스템에 대한 관찰을 통해 다음의 확률값들의 관계식을 유도할 수 있다.

$$P(Ch=1, ChB|Nd=1) \\ (1-\omega)\rho \cdot P(\tilde{t}_w < t_{bl} < \tilde{t}_w + t_{packet}) \quad (10)$$

$$P(Ch=2, ChB|Nd=1) = (1-\rho) \cdot P(t_{bl} > t_s) \quad (11)$$

$$P(Ch=3, ChB|Nd=1) = \omega\rho \cdot P(t_{bl} < \tilde{t}_{succ}) \quad (12)$$

$$\text{단, } P(t_{bl} > \tilde{t}_w) = \sum_{i=1}^{W_r-1} \sum_{j=0}^{i-1} \tilde{f}_w(j) f_{bl}(i),$$

$$P(t_{bl} > t_s) = \sum_{i=1}^{W_r-1} \sum_{j=0}^{i-1} f_s(j) f_{bl}(i) = \sum_{i=1}^{W_r-1} \sum_{j=0}^{i-1} f_s(j) f_{bl}(i)$$

$$\text{그리고 } P(t_{bl} > \tilde{t}_{succ}) = \sum_{i=1}^{W_r-1} \sum_{j=i+1}^{\lfloor t_{succ}/\sigma \rfloor} \tilde{f}_{succ}(j) f_{bl}(i)$$

먼저, 식 (10)~식 (11)에서 $Nd=1$ 의 조건인 경우에는, 선택패킷이 도착한 시점과 initial backoff를 시작하는 시점이 동일함을 주지하자. 식 (10)에서 $(1-\omega)\rho$ 값은 선택패킷의 initial backoff가 시작될 때, 다른 노드가 backoff 상태에 있을 확률이다. $P(\tilde{t}_w < t_{bl} < \tilde{t}_w + t_{packet})$ 는 다른 노드가 backoff 상태라는 조건하에 선택패킷을 위한 initial backoff가 끝났을 때에도 다른 노드에 의해서 채널이 점유되고 있을 사건을 나타내는 확률이다. 식 (11)에서 $(1-\rho)$ 는 선택패킷의 initial backoff가 시작될 때, 다른 노드가 유희한 상태에 있을 확률이 된다. $P(t_{bl} > t_s)$ 는 다른 노드가 유희한 상태일 조건하에, 선택패킷의 initial backoff가 끝나기 전에 다른 노드에 도착한 패킷에 의해서 채널이 먼저 점유되는 확률 값이 된다. 식 (12)에서 $\omega\rho$ 는 선택패킷의 initial backoff가 시작될 때, 다른 노드가 패킷을 전송하는 상태에 있을 확률을 나타낸다. 또한 $P(t_{bl} > \tilde{t}_{succ})$ 는 선택패킷이 다른 노드의 패킷 전송상태 중에 도착하여, 패킷 전송 과정이 끝나기 전에 선택패킷의 initial backoff가 끝나게 될 조건부확률을 의미한다. 물론 $P(t_{bl} > \tilde{t}_{succ})$ 인 경우에도 채널이 바쁜 경우가 $P(t_{bl} > \tilde{t}_{succ} + t_{bl}')$ $\rho + P(t_{bl} > \tilde{t}_{succ} + t_s)(1-\rho)$ 의 확률로 존재하기는 하지만, 실제로 이 확률은 0에 가깝고 다른 확률값에 비해 무시할 만큼 작기 때문에 식 (12)에 삽입하지는 않았다.

$$P(Ch=1, ChB|Nd=2) \\ = (1-\omega)\rho \cdot P(\tilde{t}_w < t_{bl} < \tilde{t}_w + t_{packet}) \quad (13)$$

$$P(Ch=2, ChB|Nd=2) = (1-\rho) \cdot P(t_{bl} > t_s) \quad (14)$$

$$P(Ch=3, ChB|Nd=2)=0 \quad (15)$$

식 (13)~식 (15)에서 $Nd=2$ 인 조건에서는, 선택 패킷의 도착 직후 initial backoff가 이루어 지지 않고, 직전 패킷의 전송이 끝난 직후, initial backoff가 시작됨을 주지하자.

식 (13)에서 ρ 는 직전 패킷의 전송을 마치고 선택 패킷의 initial backoff를 시작할 때, 다른 노드가 패킷을 가지고 있을 확률이며, 이 경우, 다른 노드는 반드시 backoff 상태에 있게 된다. 식 (14)에서 $(1-\rho)$ 는 직전 패킷의 전송을 마치고 선택패킷의 initial backoff가 시작될 때, 다른 노드가 유휴한 상태에 있을 확률을 나타낸다. 식 (15)에서 선택패킷을 위한 initial backoff는 직전 패킷의 전송이 끝나는 순간에 시작되며 그 시점에는 항상 채널이 유휴한 상태이므로 채널이 바쁠 확률이 0이 되는 것이 자명하다.

그리고 P_{ChB} 값을 계산한 방법을 이용하여 t_f 의 기대값을 식 (16)과 같이 계산할 수 있다.

$$E[t_{f1}] = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^3 \{E[t_{f1} | Nd=i, Ch=j, ChB] \cdot P(Nd=i, Ch=j, ChB)\} \cdot P_{ChB}^{-1} \quad (16)$$

식 (16)에서 초기 일시정지의 원인이 되는 각각의 사건에 대하여 일시정지 시간의 조건부 기대값을 구하면 다음과 같다. 식 (17)~식 (18)은 $Nd=1$ 인 조건하의 일시정지시간의 조건부 기댓값들이다.

$$E[t_{f1} | Nd=1, Ch=1, ChB] \quad (17)$$

$$= \left[\sum_{i=1}^{W_c-1} \sum_{j=0}^{i-1} \{t_{succ} - (i-j)\sigma\} \tilde{f}_w(j) f_{b1}(i) \right] \left\{ \sum_{i=1}^{W_c-1} \sum_{j=0}^{i-1} \tilde{f}_w(j) f_{b1}(i) \right\}^{-1}$$

$$E[t_{f1} | Nd=1, Ch=2, ChB] \quad (18)$$

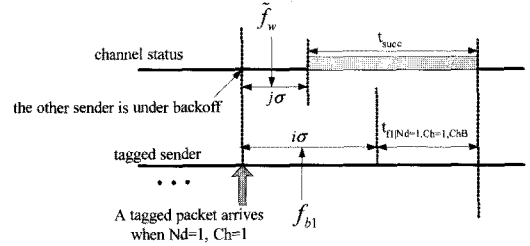
$$= \left[\sum_{i=1}^{W_c-1} \sum_{j=0}^{i-1} \{t_{succ} - (i-j)\sigma\} f_s(j) f_{b1}(i) \right] \left\{ \sum_{i=1}^{W_c-1} \sum_{j=0}^{i-1} f_s(j) f_{b1}(i) \right\}^{-1}$$

$$E[t_{f1} | Nd=1, Ch=3, ChB] \quad (19)$$

$$= \left[\sum_{i=1}^{W_c-1} \sum_{j=0}^{\lceil \tilde{t}_{succ}/\sigma \rceil} (i-j)\sigma \cdot \tilde{f}_{succ}(j) f_{b1}(i) \right]$$

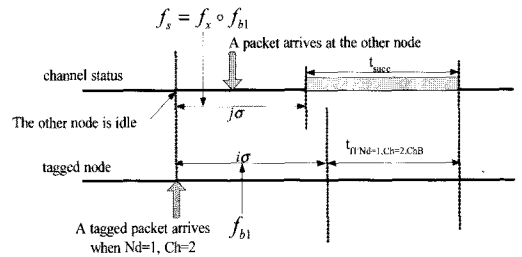
$$\left\{ \sum_{i=1}^{W_c-1} \sum_{j=0}^{\lceil \tilde{t}_{succ}/\sigma \rceil} \tilde{f}_{succ}(j) f_{b1}(i) \right\}^{-1}$$

식 (17)은 [그림 3]에서 보는 바와 같이 패킷전송 시간(t_{succ})에서 initial backoff값과 다른 노드의 back-off 잔여시간과의 차이를 빼주면, 선택노드가 initial backoff를 끝나고 일시정지 상태에 있을 시간이 됨을 확인할 수 있다.

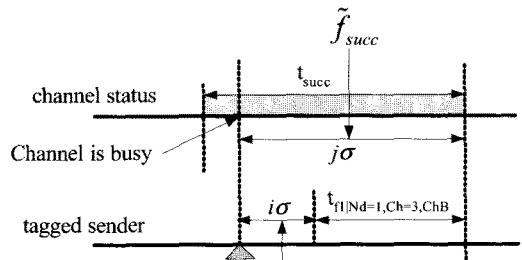


[그림 3] $E[t_{f1} | Nd=1, Ch=1, ChB]$ 의 계산

식 (18)은 [그림 4]에서 보는 바와 같이 패킷전송 시간(t_{succ})에서 initial backoff의 합과의 차이를 빼주면, 선택노드가 initial backoff를 끝나고 일시정지 상태에 있을 시간이 됨을 확인할 수 있다.



[그림 4] $E[t_{f1} | Nd=1, Ch=2, ChB]$ 의 계산



[그림 5] $E[t_{f1} | Nd=1, Ch=3, ChB]$ 의 계산

식 (19)는 [그림 5]에서 보는 바와 같이 패킷 전송 시간의 잔여시간과 initial backoff 시간과의 차이가 선택 노드가 initial backoff를 끝나고 일시정지 상태에 있을 시간이 됨을 확인할 수 있다.

$Nd=2$ 인 조건하의 일시정지시간의 조건부 기대값은 $Ch=1$ 과 $Ch=2$ 인 경우에 $Nd=1$ 인 조건하의 기대값과 확률적으로 차이가 없다. 따라서 식 (20)~식 (21)이 성립된다.

$$\begin{aligned} E[t_{f1}|Nd=2, Ch=1, ChB] \\ = E[t_{f1}|Nd=1, Ch=1, ChB] \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} E[t_{f1}|Nd=2, Ch=2, ChB] \\ = E[t_{f1}|Nd=1, Ch=2, ChB] \end{aligned} \quad (21)$$

$Nd=2$ 인 조건하의 $Ch=3$ 경우에 일시정지가 일어날 확률값은 0이므로 식 (22)가 성립하는 것은 자명하다.

$$E[t_{f1}|Nd=2, Ch=3, ChB] \quad (22)$$

다음으로 p_f 값을 계산해 보자. 선택패킷을 위한 congestion backoff 도중에 다른 노드의 패킷 전송에 의한 backoff의 일시정지가 일어나는 사건은, 초기 일시정지상태가 끝나고, congestion backoff가 시작되는 시점에서 다른 노드의 상태에 종속되고 그 확률은 식 (23)과 같이 근사된다.

$$p_f \approx (1-\rho) \cdot P(t_{b2} > t_s) + \rho \cdot P(t_{b2} > t_{b1}) \quad (23)$$

식 (23)의 첫 항은 congestion backoff가 시작되는 시점에서 다른 노드가 전송할 패킷을 가지고 있지 않을 확률을 $(1-\rho)$ 로 근사시킨 것이고, 다른 노드에 새롭게 도착한 패킷이 선택 노드보다 빨리 패킷을 전송할 확률인 $P(t_{b2} > t_s)$ 로 구성된다. 식 (23)의 둘째 항은 congestion backoff가 시작되는 시점에서 다른 노드가 전송할 패킷이 있는 조건값을 ρ 로 근사시키고, $P(t_{b2} > t_{b1})$ 는 다른 노드의 initial backoff가 선택노드의 congestion backoff보다 빨리 종료되어 패킷을 먼저 전송할 확률을 의미한다. 본 논

문에서는 congestion backoff도중에 다른 노드의 패킷 전송에 의해서 선택노드의 backoff 일시 정지가 일어나는 사건이 오직 1회만 있다고 가정하였다. 그러나 확률적으로는, 다른 노드에 의한 bakcoff 일시 정지가, 작은 값이긴 하지만 2회 이상 일어날 수 있다. 이 사건은 다른 노드의 다음 initial backoff 값이 선택노드의 현재 남아있는 congestion bakcoff counter보다 작을 때 발생할 수 있을 것이다. 그러나 이 경우까지 모델링에 반영하려면, 일시정지가 일어나는 회수별로 발생할 수 있는 모든 사건들의 조합을 모두 고려하여 추적해야 하기 때문에, 모델의 복잡도가 너무 커지는 문제가 발생한다. 본 연구에서는 시스템 성능분석 관점에서 일시정지 회수가 성능척도값의 오차에 크게 영향을 주지 않음을 실험결과를 통해서 확인하였고 1회의 일시정지만 있다는 가정을 하게 되었다.

Congestion backoff 도중 일시정지가 되면 다른 노드의 패킷전송시간만큼의 지연이 생기는 것이므로 식 (24)가 성립된다.

$$E[t_{f2}] = t_{succ} \quad (24)$$

이제 최종적으로 서비스 시간(t_{sd})의 PGF를 구해 보자. [그림 2]에서 보는 바와 같이 서비스 시간은 크게 총누적 backoff 시간과 패킷전송 시간으로 구성되므로 t_{sd} 의 PGF는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_{sd}(z) = Q_B(z) \cdot Q_{succ}(z) \text{ 단, } Q_{succ}(z) = z^{t_{succ}} \quad (25)$$

식 (25)에서 $Q_B(z)$ 는 [그림 2]와 같이 여러 지연 시간요소들의 선형 결합으로 이루어져 있고 구체적으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} Q_B(z) = Q_{b1}(z) \{ (1-p_{ChB}) + p_{ChB} \\ \cdot Q_{f1}(z) Q_{b2}(z) \{ (1-p_f) \cdot p_f \cdot Q_{f2}(z) \} \} \end{aligned} \quad (26)$$

$$\text{단, } Q_{b1}(z) = \frac{1}{W_I} \sum_{j=0}^{W_I-1} z^{j\sigma}, \quad Q_{b2}(z) = \frac{1}{W_C} \sum_{j=0}^{W_C-1} z^{j\sigma},$$

$$Q_{f1}(z) = z^{E[t_{f1}]}, \quad Q_{f2}(z) = z^{E[t_{f2}]}$$

식 (25)와 식 (26)을 통하여 서비스 시간의 분포 함수를 구하였다. 참고로 식 (26)을 z 에 대하여 미분한 후 $z=1$ 을 대입하여, 총 누적 backoff의 평균값을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$E[t_B] = E[t_{b1}] + P_{ChB}\{E[t_{f1}] + E[t_{b2}] + p_f E[t_{f2}]\} \quad (27)$$

2.3 수신 노드의 패킷 수신 지연 시간모델

본 절에서는 수면과 작동상태를 주기적으로 반복하는 수신 노드가 임의의 시간에 전송 노드로부터 전송된 패킷을 받을 때까지 걸리는 평균 수면주기 회수와 프리엠블을 확인한 후 패킷을 수신할 때까지 기다리는 평균 시간을 구하고자 한다.

모델링을 위하여 다음을 정의하자. 먼저 $p_s(n)$ 는 안정상태하에서 전송할 패킷을 가지고 있는 전송노드의 개수를 나타내는 확률이다. 각각의 전송노드에 도착하는 패킷의 도착은 독립과정이므로, 이 확률은 전송 노드가 바쁠 확률값 ρ 를 입력으로하는 이항분포를 따르게 된다. 구체적으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$p_s(n) = \binom{2}{n} \rho^n (1-\rho)^{2-n}, \quad n=0, 1, 2 \quad (28)$$

이제 임의의 변수 t_y 에 대하여, $t_{y(i)}$ 를 n 개의 샘플을 오름차순을 정렬했을 때, 동일값은 허용하지 않는 첫 번째 순서통계량(order statistic)이라고 하자. 그러면 $t_{y(i)}$ 의 보정된 확률질량함수는 다음을 따르게 된다.

$$f_{y(i)}^{(n)}(j) = n \cdot f_y(j) [1 - F_y(j)]^{n-1} \quad (29)$$

$$j=1, 2, \dots, n=1, 2, \text{ 단, } F_y(j) = \sum_{k=0}^j f_s(k)$$

또한, 변수 t_y 의 잔여 시간변수 \tilde{t}_y 에 대하여, $\tilde{t}_{y(i)}$ 의 보정된 확률질량함수도 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tilde{f}_{y(i)}(j) = n \cdot \tilde{f}_y(j) [1 - \tilde{F}_y(j)]^{n-1} \quad (30)$$

$$j=1, 2, \dots, n=1, 2, \text{ 단, } \tilde{F}_y(j) = \sum_{k=0}^j \tilde{f}_s(k)$$

2.3.1 평균 수면 주기 회수($E[n_{SC}]$)의 계산

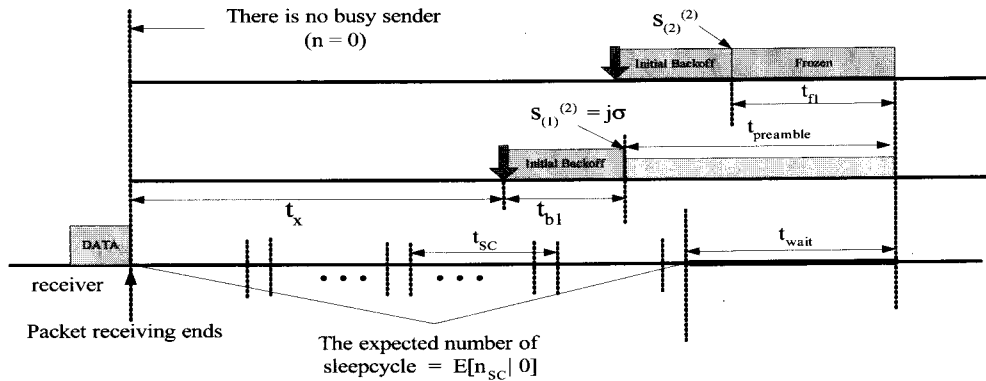
먼저, 수신 노드의 수면기간을 t_{sleep} , LPL 기간을 t_{LPL} 로 표기하기로 하자. 이때 $t_{SC} = t_{sleep} + t_{LPL}$ 는 한 수면주기의 길이를 의미한다. 변수 n_{SC} 를 수신 노드가 패킷을 전송 받기까지 경험하는 수면주기의 회수라고 하자. n_{SC} 는 수신 노드가 수면상태에 들어가는 시점에서 전송할 패킷을 가진 송신 노드의 개수에 영향을 받는다. 따라서 n_{SC} 의 기대값은 수신 노드가 수면모드에 들어가는 시점에 패킷을 전송하는 송신 노드의 개수를 조건부로 하여 다음 식 (31)과 같이 나타낼 수 있다. 본 시스템에서는 패킷 전송이 끝나는 시점과 수신노드가 수면모드에 들어가는 시점은 동일하다고 가정한다. 즉, 패킷전송이 끝나면 수신 모드는 즉시로 수면모드에 들어가게 된다.

$$E[n_{SC}] = \sum_{n=0}^2 E[n_{SC}|n] \cdot p_s(n) \quad (31)$$

본 연구에서는 수신 모드가 수면모드에 들어가는 시점에서 전송노드의 상태를 나타내는 분포는 안정상태에서 패킷을 가지고 있는 전송노드의 상태확률 $p_s(n)$ 와 같음을 가정하였고, 이것은 시뮬레이션을 통하여 검증하였다. 식 (31)에서 조건부 기대값 $E[n_{SC}|n]$ 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E[n_{SC}|n] = \begin{cases} \sum_{j=1}^{\infty} \lceil j\sigma/t_{SC} \rceil \cdot f_s^{(n)}(j) \\ \approx \lceil \{(2\lambda)^{-1} + E[t_{b1}] \} \rceil, & n=0 \\ 1, & n=1, 2 \end{cases} \quad (32)$$

[그림 6]은 패킷전송이 끝난 후, 수신노드가 수면모드에 들어가는 시점에 전송할 패킷을 가진 송신 노드가 없는 경우, 즉 $n=0$ 인 경우, 수신노드가 다음 패킷을 수신하기 전까지 경험하는 평균 수면주기 회수를 나타내고 있다. 이 경우 $t_{y(i)}$ 값이 $E[n_{SC}|i]$ 에 영향을 줄을 알 수 있다. 식 (32)에서 $n=0$ 인 경우에, 무한 급수 형태를 갖는 추정식의 계산량을 줄이기 위하여 패킷의 도착시간과 initial backoff의 평균값을 대입하여 기대값을 계산하는 근사식을 제안하였다. 이 식은 정확하게 실제값에 근사됨을 실



[그림 6] $E[n_{SC} | 0]$ 의 계산

험 예제를 통하여 확인하였다. 또한, $n = 1, 2$ 인 경우에, $W_C \sigma < W_I \sigma < t_{sleep}$ 의 조건이 만족되면, 수면모드의 첫 번째 수면기간 동안에 전송노드로부터 반드시 프리앰블이 도착하게 된다. 따라서 수신노드는 첫 번째 수면주기 후에 패킷을 수신 받게 된다.

2.3.2 프리앰블 수신후 평균 대기시간($E[t_{wait}]$)의 계산

송신노드에서 보내는 프리앰블의 길이를 $t_{preable}$ 이라할 때, B-MAC이 작동하기 위해서는 $t_{preable} > t_{sleep}$ 성립해야 함을 주지하자. 수신노드가 수면주기를 시작한 시점부터 전송노드의 initial backoff가 끝난시점까지 기간을 t_{elapsd} 라 하고, 수신노드가 LPL을 통해 프리앰블을 확인한 후, 패킷을 수신하기 위해 깨어있는 시점부터 실제 패킷을 수신하기 직

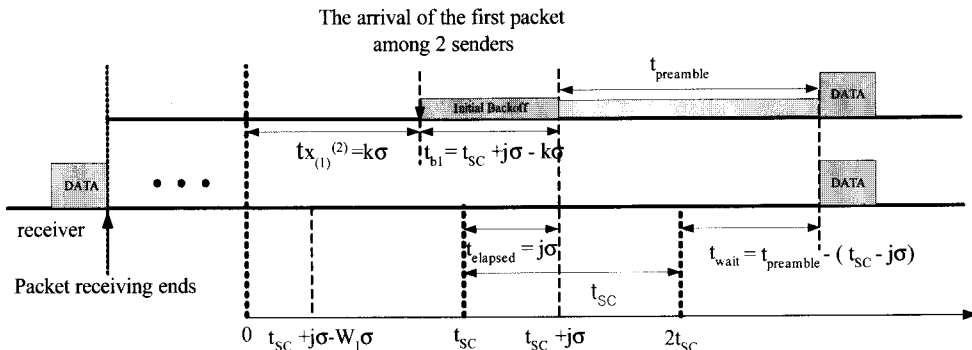
전까지의 기간을 t_{wait} 라 하자. 이 시간들의 관계는 [그림 7]에서 관찰할 수 있듯이 다음을 만족한다.

$$E[t_{wait}] = t_{preable} + E[t_{elapsd}] - t_{SC} \quad (33)$$

식 (33)에서 $E[t_{elapsd}]$ 를 계산해 보자. 이 경우도 앞 절의 $E[n_{SC} | n]$ 의 계산과 유사하게, 수신노드가 새로운 수면주기를 시작하는 시점에 송신노드의 상태를 조건부로 하여 식 (34)과 같이 나타낼 수 있다.

$$E[t_{elapsd}] = \sum_{N=0}^2 E[t_{elapsd} | n] \cdot p_s(n) \quad (34)$$

식 (34)에서 $E[t_{elapsd} | n]$ 는 다음과 같이 계산될 수 있다.



[그림 7] $p_s(0)$ 인 경우, $E[t_{wait}]$ 의 계산

$$E[t_{elapsed}|n] = \begin{cases} \left\{ \sum_{j=1}^{SC} j\sigma \cdot f_{t_{listen}}(j) \right\} \left\{ \sum_{j=1}^{SC} f_{t_{listen}}(j) \right\}^{-1} \cdot f_{elapsed}(j) \\ = \sum_{k=SC-W_j+1}^{SC+j} f_{\alpha(1)}^{(2)}(k) \cdot f_{b1}(SC+j-k), \quad n=0 \\ \left\{ \sum_{j=1}^{W_j-1} j\sigma \cdot \bar{f}_{\alpha(1)} \right\} \left\{ \sum_{j=1}^{W_j-1} \bar{f}_{\alpha(1)} \right\}^{-1}, \quad n=1, 2 \end{cases} \quad (35)$$

단, $SC = \lfloor t_{SC}/\sigma \rfloor$

[그림 7]에서 관찰되듯이, $n=0$ 일 때, $t_{elapsed} = j\sigma$ 로 주어지고, $t_{\alpha(1)} = k\sigma$ 이면, initial backoff 시간은 $t_{b1} = t_{SC} + j\sigma - k\sigma$ 로 나타낼 수 있다. $t_{b1} \in [0, (W_j - 1)\sigma]$ 이므로, $t_{\alpha(1)}$ 가 취할 수 있는 범위는 $[t_{SC} + j\sigma - W_j\sigma, t_{SC} + j\sigma]$ 임을 알 수 있다.

3. B-MAC 성능척도의 계산

본 연구에서는 B-MAC 프로토콜의 성능을 평가하기 위하여 기존의 센서네트워크의 MAC 프로토콜 연구에서 많이 사용하는 다음과 같은 성능척도를 채택하였다.

- E_{tx} 송신 노드에서 하나의 패킷을 전송하는데 소모되는 평균 에너지량
- E_{rx} 수신 노드에서 하나의 패킷을 수신하는데 필요한 평균 에너지량
- Lat 패킷이 하나의 홉(single hop)을 지나는데 소요되는 시간지연

각 상태별 에너지 사용률(mW)을 다음과 같이 정의한다.

- P_{tx} 패킷을 전송하는데 소모되는 에너지 사용률
 - P_{rx} 패킷을 수신하는데 소모되는 에너지 사용률
 - P_{sleep} 수면모드에 소모되는 에너지 사용률
 - P_{listen} LPL 모드에 소모되는 에너지 사용률
- E_{tx} 와 E_{rx} 는 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$E_{tx} = P_{listen} \cdot E[t_B] + P_{tx} \cdot (t_{preamble} + t_{packet}) + P_{rx} \cdot t_{ACK} \quad (36)$$

$$E_{rx} = P_{rx} \cdot t_{packet} + P_{listen} \cdot E[T_{listen}] + P_{sleep} \cdot E[T_{sleep}] + P_{tx} \cdot t_{ACK} \quad (37)$$

식 (37)에서 T_{sleep} 와 T_{listen} 는 수신 노드가 새로운 패킷을 수신하기까지 누적 수면기간과 LPL 기간을 각각 나타내는 것으로 그 기대값은 다음과 같이 계산된다.

$$E[T_{sleep}] = t_{sleep} \cdot E[n_{SC}], \\ E[T_{listen}] = t_{LPL} \cdot E[n_{SC}] + E[t_{wait}] \quad (38)$$

패킷이 송신 노드에 도착한 후 수신노드에 도착할 때까지 소요되는 평균시간(Lat)은 패킷이 송신 노드의 버퍼에서 기다리는 대기시간(queueing delay)과 서비스 지연시간으로 구성된다.

$$Lat = E[t_q] + E[t_{sd}] \quad (39)$$

식 (39)에서 $E[t_{sd}]$ 와 식 (25)에서 구한 t_{sd} 의 PGF를 이용하여 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$E[t_{sd}] = \frac{d}{dz} Q_{sd}(z) \Big|_{z=1} \quad (40)$$

$E[t_q]$ 는 M/G/1 대기행렬 모델의 결과값[4]을 이용하여 다음과 같이 계산된다.

$$E[t_q] = \frac{\lambda E[t_{sd}^2]}{2(1-\rho)} \quad (41)$$

단, $E[t_{sd}^2] = \frac{d^2}{dz^2} Q_{sd}(z) \Big|_{z=1} + \frac{d}{dz} Q_{sd}(z) \Big|_{z=1}$

본 장에서 제시한 성능척도들을 계산하기 위해서는 제 2장에서 제시한 서비스 지연 모델들의 구체적인 값들이 계산되어야 한다. 이를 위한 반복적인 계산알고리즘을 다음과 같이 제시한다.

- Step 1 : Initialize $E[t_B]$ and $E[t_{sd}]$
- Step 2 : Calculate $\gamma, \omega, \rho, p_{ChB}, E[t_{f1}]$ and p_f
- Step 3 : Update $E[t_B]$
- Step 4 : If $E[t_B]$ converges within predefined

threshold then go to Step 5

otherwise go to Step 2

Step 5 : Calculate $E[T_{listen}]$, $E[T_{sleep}]$, E_{rx} , E_{tx} and Lat

4. 실험 예제

본 장에서는 제안된 분석적인 모델의 정확성을 다양한 트래픽 부하에서 시뮬레이션 결과와의 비교를 통해서 검증한다. 실험에 필요한 설정값은 [1, 6]을 참조하여 <표 1>에 정리하였다. Initial backoff window 크기, $W_I=32$, congestion backoff window 크기는, $W_C=16$ 으로 각각 설정하였다. 각 전송노드에 도착하는 트래픽 부하는 $\lambda=0.2$ 부터 $\lambda=2.0$ 까지 단계적으로 증가시키며, 모델에 의한 계산값과 시뮬레이션을 통해 관측된 값을 도시하였다.

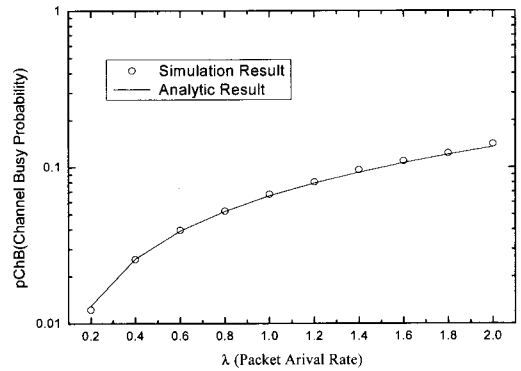
<표 1> 실험 설정값

Notation	Value
P_{tx}	86.2mW
P_{rx}	96.6mW
P_{sleep}	0.0183mW
P_{listen}	96.6mW
$t_{preamble}$	48ms
t_{packet}	15ms
t_{ACK}	2ms
t_{LPL}	2ms
$t_{ACK_timeout}$	3ms
σ	1ms
t_{sleep}	40ms

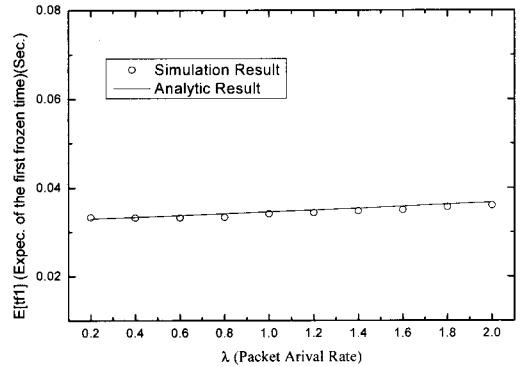
[그림 8]은 트래픽 부하에 따른 p_{ChB} 값의 변화를 도시한 것이다. 모든 트래픽 부하에서 제안된 모델에 의한 값과 시뮬레이션에 의한 관측값이 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다.

[그림 9]는 트래픽 부하에 따른 $E[t_{f1}]$ 값의 변화를 도시한 것이다. 트래픽의 증가함에 따라 $E[t_{f1}]$ 값은 거의 변화가 없고 소폭 증가하는 것을 관찰할

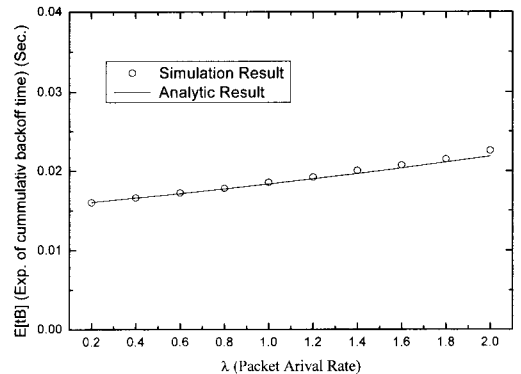
수 있다. 트래픽이 증가하면 initial Backoff가 끝날 때, 채널이 바쁠 확률은 크게 증가하지만, backoff가 일시정지되는 시간은 거의 변화가 없다는 것을 알 수 있다.



[그림 8] p_{ChB} 값의 추정



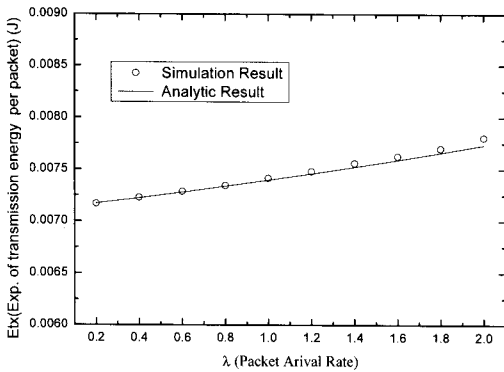
[그림 9] $E[t_{f1}]$ 값의 추정



[그림 10] $E[t_B]$ 값의 변화

[그림 10]은 트래픽 부하에 따라서 하나의 패킷을 전송하기까지 누적된 backoff시간인 $E[t_B]$ 값의 변화를 도기한 것이다. 트래픽의 증가함에 따라 $E[t_B]$ 은 낮은 기울기로 선형적으로 증가함을 확인할 수 있다.

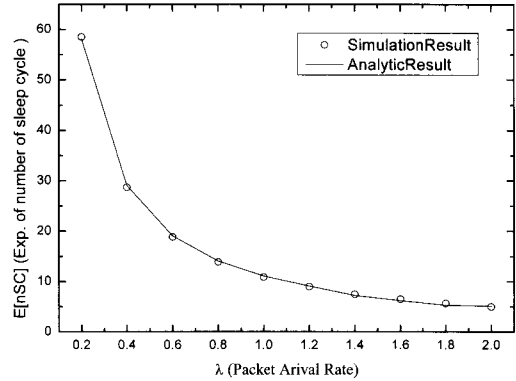
[그림 11]는 트래픽 부하에 따라서 하나의 패킷을 전송하기위해 필요한 평균에너지 사용량인 E_{tx} 의 변화를 도기한 것이다. 모델에 의한 계산값과 시뮬레이션 결과가 모든 트래픽 부하에 대하여 비교적 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다. 식 (36)에서 $E[t_B]$ 값 외에는 트래픽 변화에 무관한 상수이므로, E_{tx} 값은 $E[t_B]$ 값에 정비례함을 알 수 있다. 실제로 [그림 10]과 [그림 11]를 비교하면 동일한 트래픽 변화에 대하여 동일한 패턴임을 확인할 수 있다.



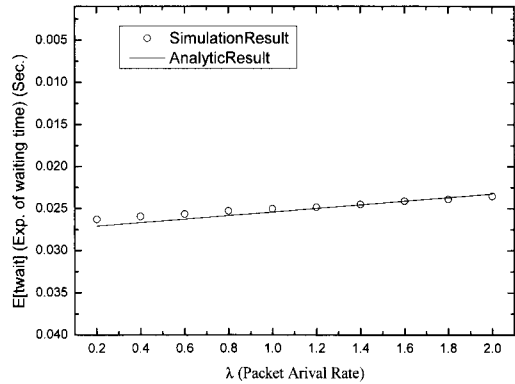
[그림 11] E_{tx} 값의 추정

[그림 12]는 트래픽 부하에 따라서 수신 노드가 하나의 패킷을 전송받기까지 수면주기에 들어가는 평균 회수인 $E[n_{SC}]$ 값의 변화를 도기한 것이다. 본 연구에서 제시한 모델에 의한 계산값이 실제값을 매우 정확히 추정하고 있음을 확인할 수 있다. 또한 수신 노드의 수면주기 회수는 전송 노드와 달리 트래픽 부하에 대하여 큰 영향을 받음을 확인할 수 있다.

[그림 13]은 트래픽 부하에 따라서 수신 노드가 프리앰블을 확인한 후 패킷을 전송받기까지 기다리는 평균 시간인 $E[t_{wait}]$ 값의 변화를 도기한 것이다. 제안된 모델에 의한 계산값이 실제값을 비교적 정확히 추정하고 있음을 확인할 수 있다.

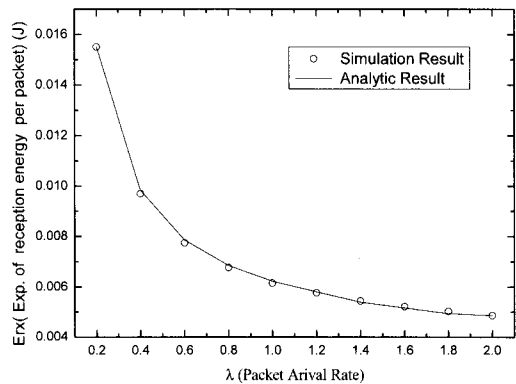


[그림 12] $E[n_{SC}]$ 값의 추정



[그림 13] $E[t_{wait}]$ 값의 추정

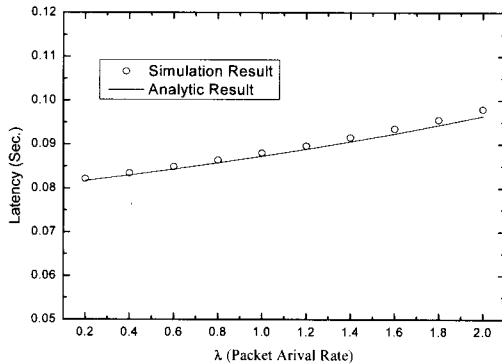
[그림 14]는 트래픽 부하에 따라서 수신 노드가 하나의 패킷을 전송받기까지 소모하는 평균 에너지 값인, E_{rx} 값의 변화를 도기한 것이다. 트래픽 부하



[그림 14] E_{rx} 값의 추정

가 커질수록 하나의 패킷을 전송받는데 필요한 에너지는 급격히 감소함을 알 수 있다. 또한 식 (37)과 (38)에서 확인할 수 있듯이 E_{rx} 값은 $E[n_{SC}]$ 와 $E[t_{wait}]$ 값에 비례하며, 특히 $E[n_{SC}]$ 의 변화에 절대적인 영향을 받음을 [그림 12]과 [그림 14]의 패턴 변화를 통해서 확인할 수 있다.

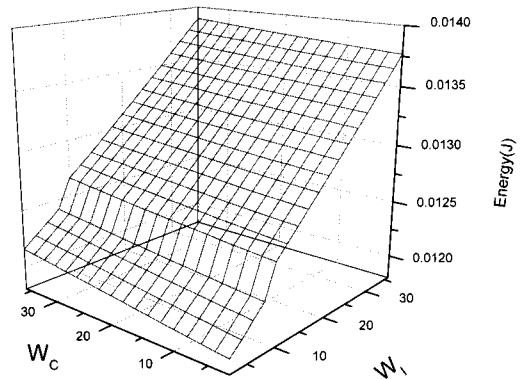
[그림 15]는 트래픽 부하에 따라서 패킷이 송신 노드에 도착한 시점부터 수신노드에 도착한 것이 확인되는 시점까지 길이인 Lat의 변화를 도시한 것이다. 식 (39)에 확인되듯이 Lat는 패킷이 initial back-off를 하기까지 기다리는 시간인 $E[t_q]$ 와 실제 서비스 받는 시간인 $E[t_{sd}]$ 로 구성되는데, 시뮬레이션과 비교한 결과, $E[t_q]$ 값은 본 모델에 의한 값이 실제 값보다 과소추정됨을 확인할 수 있었고 $E[t_{sd}]$ 값은 비교적 정확하게 실제값을 추정하고 있었다. $E[t_{sd}]$ 값이 Lat에 더 항상 큰 비율로 영향을 주기 때문에 전체적으로는 [그림 16]과 같이 거의 모든 트래픽 부하에 대하여 모델값이 실제값을 잘 추정함을 확인할 수 있다.



[그림 15] Latency의 추정

본 분석적 모형은 네트워크 트래픽 부하에 따른 프로토콜의 최적 제어를 위해 활용될 수 있다. 베이스 정리를 이용하여 트래픽 부하를 실시간으로 추정하는 방법론[1] 등을 이용하여 네트워크의 트래픽 부하가 정해지면, 본 모형을 활용하여 최적의 프로토콜 제어변수를 추정할 수 있다. 에너지 사용률과 연관하여 가장 중요한 제어변수는 수신 노드의

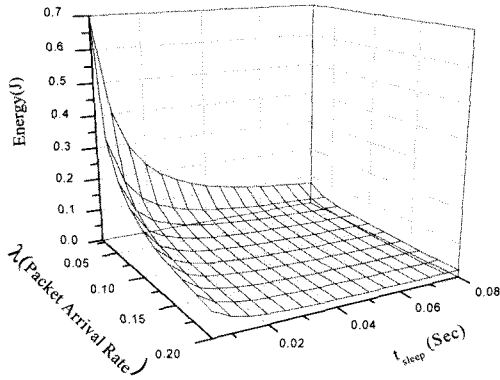
수면기간이다. LPL기간은 시스템의 특성에 따라 정해지는 값이고, 프리앰블 길이도 수면기간이 정해지면, 수면기간 보다 큰 최소값으로 정하면 된다. 본 연구에서는 2개의 경쟁 노드 상태를 가정했기 때문에 패킷 전송시 충돌확률이 매우 적다. Backoff는 에너지 사용 측면보다는 사용자의 형평성(fairness)을 보장하기 위한 매커니즘이므로 센서 네트워크에서 트래픽 부하가 크지 않고(non saturated), 경쟁 노드의 수가 적은 경우는 [그림 16]의 실험결과에서 확인할 수 있듯이 backoff window는 작을수록 좋은 결과를 낸다. 그러나 경쟁노드의 수가 많아지면 전송시 패킷 충돌의 확률이 무시할 수 없을 정도로 증가하기 때문에, 최적의 backoff window 크기를 정하는 문제가 중요해진다. 최적 backoff window 결정 문제는 다수의 경쟁노드를 반영할 수 있는 추후연구에 다루기로 하겠다.



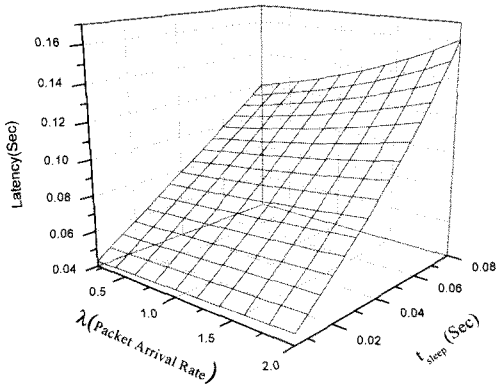
[그림 16] Backoff window 크기에 따른 에너지 사용률($\lambda = 1$)

[그림 16]과 [그림 17]에서의 에너지 사용률은 송신노드와 수면노드의 에너지 사용량을 합한 시스템의 전체 에너지 사용률을 나타낸다.

[그림 17]과 [그림 18]은 트래픽 부하와 수면기간의 변화에 따른 시스템의 단위 패킷 처리에 소요되는 에너지 사용과 패킷지연시간(Latency)의 변화를 각각 도시한 것인데 이를 이용하여 최적 수면기간을 구할 수 있다. 예를 들어 패킷지연시간의 상한이 80ms로 주어진 상황에서 트래픽 부하가 0.4로 측정



[그림 17] 트래픽 부하와 수면시간에 따른 에너지 사용률



[그림 18] 트래픽 부하와 수면시간에 따른 패킷 Latency

되었다면, 부하가 0.4인 경우에 에너지 사용은 감소 함수이므로 지연시간이 80ms를 넘기지 않는 최대 수면기간을 [그림 18]에서 찾으면 최적 수면기간은 40ms가 됩니다. 시스템 부하에 따른 최적값을 off-line으로 미리 계산하여 테이블화 하면, 실제 환경에서는 트래픽 부하를 주기적으로 측정하고 미리 계산된 최적값 테이블을 활용하여 프로토콜의 on-line 자동 제어도 구현할 수 있을 것이다.

5. 결론 및 추후 연구 방향

본 연구에서는 B-MAC 프로토콜하에서 두 개의 송신노드가 하나의 수신 노드에게 패킷을 전송하기

위해 경쟁하는 상황을 분석할 수 있는 분석적인 모델을 제시하였다. 구체적으로, initial backoff 후에 무선 채널의 모니터링이 일어나는 B-MAC 프로토콜의 특수성으로 인해 기존의 Markov chain 모델링 어렵다는 한계를 극복하였으며, 패킷의 도착 부하, backoff 알고리즘, 수면 노드의 수면주기 등을 고려하여 패킷의 전송을 위한 서비스 시간 분포를 PGF 형태로 계산하였다. 또한 이를 이용하여, 센서 네트워크에서 중요하게 평가되는 전송 및 수신 노드에서의 단위 패킷당 에너지 사용량과 latency를 성능척도로서 계산하는 반복적인 알고리즘을 제시하였다. 실험결과를 통하여 본 연구에서 제시된 모델에 의한 추정값이 실제값과 잘 일치됨을 확인할 수 있었다.

본 연구는 다양한 제어 변수와 트래픽 하에서, 시뮬레이션이나 실험장치를 통한 연구에 비해, 적은 비용으로 B-MAC 프로토콜의 성능을 평가할 수 있게 해 준다. 이를 통해서 B-MAC 프로토콜의 최적 운영정책 수립에도 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구는 두 개의 전송 노드만을 고려하여, 충돌 (collision)이 발생할 확률을 모델에 반영하지는 않았다는 한계를 가지고 있으나, 전송 노드가 n개인 일반적인 상황의 모델 연구를 위해서 반드시 필요한 선행 연구라고 할 수 있다. 또한, 본 연구의 모델링 방법론은 트리 구조와 같이 복수홉(multi-hop)의 일반적인 구조를 갖는 B-MAC 또는 이와 유사한 비동기식 무선 센서네트워크 MAC 센서네트워크 성능분석에 기초 연구가 될 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

[1] Buettner, M., G.V. Yee et al., "X-MAC : A short preamble MAC protocol for duty-cycled wireless wensor Networks," In *SenSys 2006 : Proceedings of the 4th international conference on Embedded networked sensor systems, Boulder, Colorado, USA* : ACM

- Press, 2006.
- [2] Dam, T. van and K. Langendoen, "An Adaptive energy-efficient mac protocol for wireless sensor networks," In *SenSys 2003 : ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, (2003), pp.171-180.
- [3] El-Hoiydi, A. and J. Decotignie, "Low power down-link mac protocols for infrastructure wireless sensor networks," *ACM Mobile Networks and Applications*, Vol.10, No.5(2005), pp.675-690.
- [4] Gross, D. and C.M. Harris, *Fundamentals of Queueing Theory, 2nd ed.*, John Wiley and Sons, New York, 1985.
- [5] Bianchi, G., "Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, Vol.18, No.3(2000), pp.535-547.
- [6] Polastre, J., J. Hill, et al., "Versatile low power media access for wireless sensor networks," In *SenSys 2004 : Proceedings of the 2nd international conference on Embedded networked sensor systems*, New York, NY, USA : ACM Press, (2004), pp.95-107.
- [7] Ross, Sheldon M., *Stochastic Processes*, 2nd ed., John Wiley and Sons, Inc, 1996.
- [8] Stone, K. and M. Colagrosso, "Efficient duty cycling through prediction and sampling in wireless sensor networks," *Wireless Communications and Mobile Computing*, Vol.7(2007), pp.1087-1102.
- [9] Ye, W., J. Heidemann, and D. Estrin, "Medium access control with coordinated, adaptive sleeping for wireless sensor networks," *ACM Transactions on Networking*, Vol.12, No.3 (2004), pp.493-50.
- [10] Zhai, Hongqiang, Kwon, Younggoo and Fang, Yuguang "Performance analysis of IEEE 802.11 MAC protocols in wireless LANs," *Wireless Communications and Mobile Computing*, Vol.4(2004), pp.917-931.
- [11] 이호우, 대기행렬이론 제3판, 시그마프레스, 2006.

(부 록) 기호 정의

• 시스템 변수 및 성능척도

σ	backoff counter의 슬롯 시간 단위
W_f	initial backoff window 크기
W_C	congestion backoff window 크기
t_{sleep}	수신노드의 수면기간
t_{LPL}	LPL 기간
P_{tx}	패킷을 전송하는데 소모되는 에너지 사용률
P_{rx}	패킷을 수신하는데 소모되는 에너지 사용률
P_{sleep}	수면모드에 소모되는 에너지 사용률
P_{listen}	LPL 모드에 소모되는 에너지 사용률
E_{tx}	송신노드에서 하나의 패킷을 전송하는데 소모되는 평균 에너지량
E_{rx}	수신노드에서 하나의 패킷을 수신하는데 필요한 평균 에너지량
Lat	패킷이 하나의 홉(single hop)을 지나는데 소요되는 시간지연

• 모델링 변수 및 확률

λ	송신노드에 도착하는 패킷의 도착률
t_x	패킷의 도착간격 시간
t_{bi}	initial backoff 시간
t_{b2}	congestion backoff 시간,
t_s	($=t_x + t_{bi}$) 임의의 시점기준으로 패킷 도착간격과 initial backoff시간을 합한 시간
γ	한 노드의 전체 backoff 기간 중 initial backoff가 차지하는 평균 시간길이의 비율
t_w	안정상태하에서 임의의 노드가 선택하게 되는 backoff 시간
t_{sd}	송신노드의 서비스 시간
t_{succ}	순수하게 데이터 패킷을 전송하는데 소요되는 시간
t_B	하나의 패킷을 전송하는데 소요된 누적 backoff 시간
t_{f1}	initial backoff가 끝난 직후 채널이 바뀐 것이 확인되어, 채널이 유희해질 때까지 기다리는 시간
t_{f2}	congestion backoff 기간중 다른 노드에 의해 채널이 점유됨으로 backoff counter가 일시 정지되는 시간
p_f	congestion backoff 동안에 노드의 backoff

ω	counter가 일시정지 상태를 경험하게 될 확률임의 시점에 노드가 전송할 패킷을 가지고 있다는 조건하에, 노드가 패킷을 전송 상태에 있을 확률
t_y	상태가 y에 속해 있을 때, 그 상태의 시간길이를 나타내는 연속 확률변수
$f_y(k)$	연속확률 변수 t_y 에 대하여 $k = \lfloor t_y \cdot \sigma^{-1} \rfloor$ 식을 만족하는 정수 k 의 확률질량함수(probability mass function)로서 t_y 의 보정된 확률질량함수로 명명함
\tilde{t}_y	임의의 관찰 시점부터 시작하여 상태 y가 끝나게 될 잔여시간(residual time)
\tilde{f}_y	\tilde{t}_y 의 보정된 확률질량함수
$t_{y(n)}$	임의의 변수 t_y 에 대하여, n 개의 샘플을 오름차순을 정렬했을 때, 동일값은 허용하지 않는 첫 번째 순서통계량(order statistic)
t_{SC}	($=t_{sleep} + t_{LPL}$) 수신노드의 한 수면주기
n_{sc}	수신노드가 패킷을 전송 받기까지 경험하는 수면주기의 회수
$t_{preamble}$	송신노드에서 보내는 프리앰블의 길이
$t_{elapsed}$	수신노드가 수면주기를 시작한 시점부터 전송노드의 initial backoff가 끝난시점까지 기간
t_{wait}	수신노드가 패킷을 수신하기 위해 깨어있는 시점부터 실제 패킷을 수신하기 직전까지의 기간
ChB	initial backoff가 끝난 직후 채널이 바뀐 상태에 있을 사건
Nd	선택패킷이 선택노드에 도착했을 때, 선택노드의 상태 $Nd=1$ 선택노드가 유희한 상태 $Nd=2$ 선택노드가 전송할 패킷을 가지고 있어서 바뀐 상태
Ch	선택노드가 initial backoff를 시작하는 시점의 채널 상태를 나타내는 지시확률변수 $Ch=1$ initial backoff를 시작할 때, 다른 노드도 backoff를 하고 있는 사건 $Ch=2$ initial backoff를 시작할 때 다른 노드와 채널이 모두 유희한 상태에 있을 사건 $Ch=3$ initial backoff를 시작할 때 다른 노드가 패킷을 전송하고 있는 상태에 있을 사건