

M/G/1 복수 휴가 모델을 이용한 IEEE 802.16e 무선 MAN 수면모드 작동에 대한 성능분석*

정성환** · 홍정완*** · 장우진** · 이창훈**

Performance Analysis of a Sleep Mode Operation in the IEEE 802.16e Wireless MAN with M/G/1 Multiple Vacations Model*

Sung-Hwan Jung** · Jung-Wan Hong*** · Woo-Jin Chang** · Chang-Hoon Lie**

■ Abstract ■

In this paper, an analytic model of a sleep mode operation in the IEEE 802.16e is investigated. A mobile subscriber station(MSS) goes to sleep mode after negotiations with the base station(BS) and wakes up periodically for a short interval to check whether there is downlink traffic to it. If the arrival of traffic is notified, an MSS returns to wake mode. Otherwise, it again enters increased sleep interval which is double as the previous one. In order to consider the situation more practically, we propose the sleep mode starting threshold, during which MSS should await packets before it enters the sleep mode. By modifying the M/G/1 with multiple vacations model, energy consumption ratio(ECR) and average packet response time are calculated. Our analytic model provides potential guidance in determining the optimal parameters values such as sleep mode starting threshold, minimal sleep and maximal sleep window.

Keyword : IEEE 802.16e, Sleep Mode, M/G/1 Multiple Vacations, ECR(Energy Consumption Ratio), Packet Response Time

본 논문은 2007년도 한국경영과학회 추계학술대회 경쟁부분(이론) 수상논문으로 소정의 심사과정을 거쳐 게재 추천되었음.

* 본 연구는 2007년도 한성대학교의 연구비 지원에 의해 연구되었음.

** 서울대학교 산업공학과

*** 한성대학교 산업시스템공학과

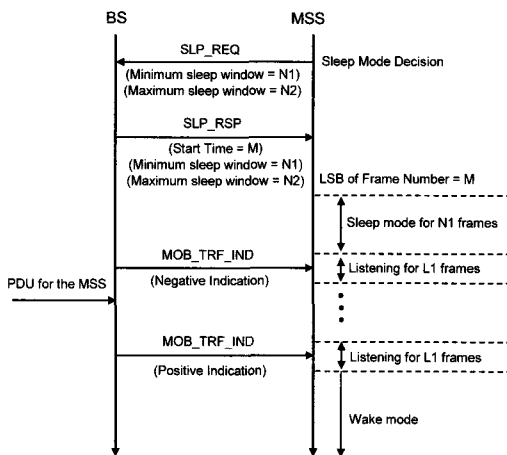
1. 서 론

IEEE 802.16 표준(WiMAX)은 설치비용이 고가인 유선망 서비스를 대체하면서 고속의 무선 멀티미디어 서비스를 제공할 수 있는 무선 MAN(Metropolitan Area Networks) 프로토콜이다. 그 수정안인 IEEE 802.16e는 WiMAX에 이동성 기능을 추가하여 사용자의 정지시와 이동시의 데이터 통신을 위한 물리계층과 매체접속제어(MAC: Medium Access Control)계층에 대한 정의들이 추가된 것이다. 국내에서는 와이브로(WiBro: Wireless Broadband Internet)란 이름으로 2003년도부터 2.3GHz 대역을 활용하여 이와 같은 무선광역인터넷 서비스 개발이 시작되었고 2006년 6월에는 상용화 서비스가 시작되었다. IEEE 802.16e의 이동성 보장으로 인해, 배터리를 사용해야하는 MSS(Mobile Subscriber Station)의 효율적 에너지 사용기술이 중요하게 부각되었고, MSS의 전원 사용을 줄이고, BS(Base Station)의 무선인터페이스 자원을 줄이기 위한 일환으로 수면모드(sleep mode) 메카니즘이 MAC 프로토콜에 규정되어 있다.

[그림 1]은 MSS의 수면모드와 활성모드(wake mode)를 보여 주고 있다. 수면모드 시작의 주도권은 MSS에게 주어지며, MSS는 일정기간 트래픽

의 도착이 없는 경우 정해진 기준에 의해 수면모드로 들어갈 것을 결정하고 SLP-REQ(Sleep Request message)를 BS에 보내어 수면모드에 들어갈 것에 대한 허락을 요청한다. SLP-REQ에는 최소수면기간(minimum sleep window), 최대수면기간(maximum sleep window), 청취기간(listen interval) 정보를 포함한다. BS으로부터 SLP-RSP(Sleep Response message)를 받은 MSS는 SLP-RSP에 포함된 Start Time에 수면모드에 들어가게 된다. 수면모드 기간중에 MSS는 일정 시간동안 청취모드(listen mode)로 전환하여 BS으로부터 보내지는 MOB-TRF-IND(Mobile Traffic Indication message)를 수신한다. MOB-TRF-IND에는 MSS의 수면기간동안 도착한 패킷이 있는지 여부에 대한 정보를 포함하고 있다. 만약, 이 정보가 negative indication이면, MSS는 청취 기간이 종료된 후 다시 정해진 기간동안 수면모드에 들어가게 되고, positive indication이면, 수면모드를 종료하고, 활성모드로 전환하게 된다. MSS의 수면모드 기간은 최소수면기간을 시작으로하여 이전 수면기간의 2 배씩 증가하게 되며, 최대수면기간 이상은 지속되지 않도록 되어 있다.

IEEE 802.16e의 수면모드의 성능분석과 연관된 연구들 많이 진행되었다. Xiao[8]와 Zhang[9]는 패킷의 포아송 분포 도착 가정하에 그리고 Zhang [10]은 패킷의 도착이 Hyper-Erlang 분포라는 가정하에 MSS의 수면기간동안의 에너지 사용값(ECS: Energy Consumption in Sleep period)을 성능최도로 계산하여 성능분석을 시도하였다. 그러나, MSS의 정확한 에너지 사용량을 추정하기 위해서는 수면모드 기간뿐만 아니라 활성모드기간의 변화까지 반영한 모델이 필요하다. 왜냐하면, 수면기간의 길이는 MSS의 활성모드 기간에도 영향을 주기 때문이다. 즉, 수면기간이 길어지면 그 기간동안 패킷이 도착할 확률이 증가하여 평균도착 패킷의 수가 증가하고 이를 처리하기 위한 활성모드 기간이 길어지게 된다. 활성모드 기간이 길어지는 것은 에너지 사용의 증가효과가 된다. 따라서, 수면기간



[그림 1] IEEE 802.16e에서 수면 모드 작동

동안의 에너지 사용값만을 성능척도로 사용할 경우, 전체 에너지 절감효과를 과대평가하는 결과를 가져오게 된다. Park and Hwang [6]은 M/G/1/N 복수휴가모델을 이용하여 수면기간뿐 아니라 활동기간까지도 고려하여 MSS의 에너지 사용률(Power Consumption per unit time)과 패킷차단확률을 계산하였으나 패킷의 지연시간은 고려하지 못하였다. Seo et al.[7]은 수면모드에서의 패킷지연시간, turn off time ratio 등의 성능척도를 계산하였으나 MSS가 임의의 휴가기간에 있을 확률을 계산할 때, 전이확률만을 이용하고, 휴가기간에 머무를 시간을 반영하지 않음으로써 확률값의 왜곡을 가져왔다.

본 논문에서는 위에서 언급한 수면모드를 실제 적용하는 단계에서, 최적의 제어변수 값들을 결정할 수 있는 분석적인 방법론에 초점을 맞춘다. 이를 위하여, 먼저 MSS가 수면모드로 들어갈 것을 결정할 있는 수면모드 시작 임계값을 새로운 제어변수로 제안한다. MSS는 자신에게 오는 패킷수신이 끝난 후 수면모드 시작 임계값 이상동안 패킷의 도착이 없으면, SLP_REQ 메시지를 BS에 전송하여 수면모드에 들어가게 된다. 또한 본 연구에서는 MSS의 수면기간과 활성모드 기간의 변화를 모두 고려하기 위하여 M/G/1 복수 휴가(multiple vacation) 모델을 응용하여 단위시간당 MSS의 평균 에너지 사용량과 패킷의 서비스 지연 시간의 성능척도를 계산할 수 있는 닫힌해(closed form solution)를 제시한다. 구해진 해는 시뮬레이션 결과와 비교하여 그 타당성이 검증된다.

수면모드 동작은 트래픽 유형에 따라 다소 다른 프로토콜 클래스 표준이 제안되어 있다. 본 연구의 모델링은 BE(Best Effort)또는 NRT-VR(Non Real Time-Variable Rate) 유형의 트래픽에 맞는 수면모드 클래스에 적합하지만, 다른 트래픽 유형을 위한 수면모드 클래스에도 쉽게 응용할 수 있을 것이다. 본 연구는 IEEE 802.16e의 수면모드를 실제 시스템에 적용할 때, 각 제어변수 값이 시스템 성능에 미치는 영향을 더 정확히 예측하여 최적의 제

어 변수값을 결정하는데도 유용하게 사용될 것으로 기대된다.

2. 시스템 가정 및 모델링

본 연구는 BS에서 하나의 MSS에로의 패킷 전송만을 고려한다. 즉, 패킷 지연 시간이나 전송시간이 다른 MSS에게 전송되는 패킷들에 의해 영향을 받지 않는다고 가정한다. 또한 BS의 패킷 버퍼 용량은 제한이 없으며, 따라서 패킷 손실 확률은 존재하지 않는다고 가정한다. 시스템의 패킷 도착은 도착률이 λ 인 포아송(Poisson)분포를 따른다. 서비스 시간은 패킷의 전송시간에 해당한다. 실제로 패킷은 동일한 길이의 프레임(frame) 단위로 나누어져 MSS에게 전송되므로 서비스 시간은 패킷의 길이에 직접적으로 관련된다. 본 연구에는 패킷의 길이가 가변적이고, 분산이 큰 이더넷(Ethernet) 트래픽에도 적용가능하기 위하여 일반 서비스 분포를 가정한다. 청취기간에 패킷이 도착하면, 그 청취기간이 끝나는 즉시 수면모드에서 벗어나게 된다. 청취기간의 길이는 t_L 로 항상 일정하다. 시스템 제어변수는 수면모드시작 임계기간은 t_{th} 로, 최소수면기간은 t_{min} , 그리고 최대 수면기간은 t_{max} 로 나타낸다. t_{max} 는 $t_{max} = 2^{K-1} \cdot t_{min}$ 의 관계가 있다. 여기서 K 는 최대 수면기간에 이를 때까지 수면기간의 길이를 2배로 증가시키는 허용회수로서, t_{max} 와 t_{min} 가 주어지면 값이 정해진다.

<표 1> MSS의 상태 정의

시스템 모드	MSS의 상태
활성모드 (wake mode)	패킷수신중(busy), 대기중(waiting)
수면모드 (sleep mode)	수면중(sleeping), 청취중(listening)

모델링과 분석을 위하여 본 연구에서는 시스템 모드에 따른 MSS의 상태를 다음 <표 1>과 같이

4가지로 분류하여 정의한다. 시스템이 활성모드일 때, MSS는 BS로부터 전송되는 패킷을 수신하는 패킷수신중(busy) 상태와 도착하는 패킷은 없지만 활성모드를 유지하고 있는 대기중(waiting) 상태로 나누어 진다. 시스템이 수면모드일 때 한 쌍의 수면중(sleeping) 상태와 청취중(listening) 상태로 이루어진 기본 기간을 수면사이클이라고 하자. 수면모드는 한 개 이상의 수면사이클로 구성된다.

s_k 를 k 번째 수면중 상태의 길이라고 정의하면, 시스템의 정의에 의해서 다음 식 (1)과 같이 표현 된다.

$$s_k = \begin{cases} 2^{k-1} \cdot t_{\min}, & 1 \leq k \leq K \\ t_{\max}, & k > K \end{cases} \quad (1)$$

S_k 를 k 번째까지 누적 수면중 상태기간이라고 하면, 이것은 식 (2)와 같이 계산될 수 있다.

$$S_k = \sum_{j=1}^k s_j = \begin{cases} c_1 \cdot (2^k - 1), & 1 \leq k \leq K \\ c_2 \cdot k + c_3, & k > K \end{cases} \quad (2)$$

단, $c_1 = t_{\min}$, $c_2 = t_{\max}$, $c_3 = -(K-2)t_{\max} - t_{\min}$

v_k 를 k 번째 수면사이클의 길이, 즉 $v_k = s_k + t_L$ 로 정의하자. 그리고 V_k 를 k 번째까지 수면중 기간과 청취중 기간을 포함한 수면모드 기간의 누적합이라고 정의하면 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_k = S_k + k \cdot t_L$$

$$= \begin{cases} c_1 \cdot (2^k - 1) + kt_L, & 1 \leq k \leq K \\ c_4 \cdot k + c_3, & k > K \end{cases} \quad (3)$$

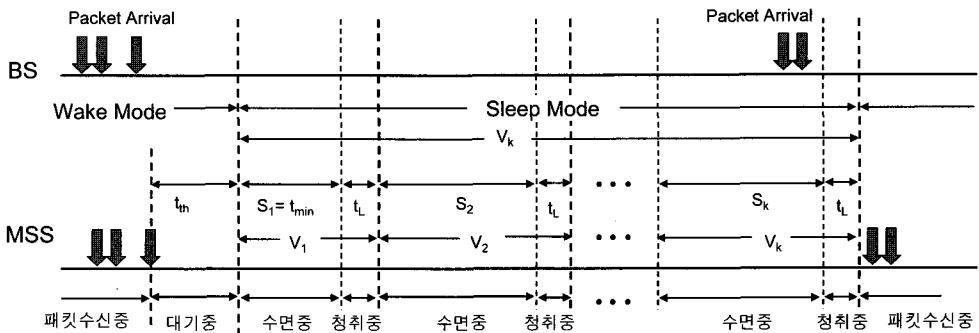
단, $c_4 = t_{\max} + t_L$

[그림 2]는 수면모드 기간중 s_k, v_k 그리고 V_k 와 의 관계를 도시해 주고 있다.

3. 시스템 성능 척도

시스템의 성능 척도를 계산하기 위하여, 먼저 다음과 같은 기호를 정의하자.

- E_S : MSS가 수면중 상태일 때, 단위시간당 에너지 사용량
- E_L : MSS가 청취중 상태일 때, 단위시간당 에너지 사용량
- E_W : 활성모드에서 MSS의 단위시간당 에너지 사용량
- T_S : 시스템이 정상(stationary)상태일 때, 수면모드 시작시점부터 다음 수면모드 시작시점까지 누적된 수면중 상태 기간
- T_L : 시스템이 정상상태일 때, 수면모드 시작시점부터 다음 수면모드 시작시점까지 누적된 청취중 상태 기간



[그림 2] 수면 모드 모델링을 위한 변수들의 관계

T_W : 시스템이 정상상태일 때, 수면모드 시작시점
부터 다음 수면모드 시작점까지 누적된 활성
모드 기간

T_R : 패킷 반응 시간, 즉 패킷이 도착해서 전송되
기 직전까지 걸리는 시간

수면모드 작동의 성능 분석에 있어 가장 중요한
척도는 에너지 사용량이다. 본 연구에서는 시간당
에너지 사용량인 ECR(Energy Consumption Ratio)
을 성능척도로 제시한다. 시스템의 상태는 활성모
드와 수면모드가 번갈아 가면서 바뀌는 재생과정이
된다. 따라서 재생이론에 의하여 활성모드와 수면
모드를 한 주기로 하는 에너지 사용량을 구하고 이
것을 주기로 나누면 시간당 에너지 사용량이 구해
지고 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$ECR = \frac{E_S \cdot E[T_S] + E_L \cdot [T_L] + E_W \cdot E[T_W]}{E[T_S] + E[T_L] + E[T_W]} \quad (4)$$

에너지 절약측면에서는 수면모드로 자주 전환될
수록 그리고 수면모드가 오래 지속될수록 효과적이
라고 기대할 수 있으나, 수면모드 기간이 길어지면
수면모드 기간동안에 도착하는 패킷의 수가 많아지
고 이를 처리하기 위한 활성모드 기간도 길어지게
된다. 또한 수면모드 기간이 길어지면 하나의 패킷
이 전송되기까지 기다리는 평균 시간도 길어지게
된다. 따라서 본 연구에서는 ECR과 더불어 평균
패킷 반응 시간인 $E[T_R]$ 를 또 다른 성능척도로 제
시하게 되었다. 앞서 논한바와 같이 ECR과 $E[T_R]$
은 서로 상충관계에 있으므로 만약 트래픽의 서비
스 품질을 만족시키는 평균 패킷 반응 시간의 상한
(R_u)이 주어진다면, 식 (5)와 같은 최적화 문제가
구성될 수 있을 것이다.

$$\begin{aligned} & \text{Min ECR} \\ & \text{s.t } E[T_R] < R_u \end{aligned} \quad (5)$$

4. 성능척도의 계산

4.1 시간당 에너지 사용률(ECR)의 계산

ECR을 계산하기 위하여 식 (4)에 따라, $E[T_S]$,
 $E[T_L]$ 그리고 $E[T_W]$ 의 값을 도출하는 것이 필요
하므로 이를 순서대로 구해보자.

(1) $E[T_S]$

수면모드가 k 번째 수면 사이클에서 끝날 확률을
 vf_k 라고 정의하면, 이것은 식 (6)과 같이 계산될
수 있다.

$$vf_k = \begin{cases} 1 - e^{-\lambda v_1}, & k=1 \\ e^{-\lambda V_{k-1}} \{1 - e^{-\lambda v_k}\}, & k \geq 2 \end{cases} \quad (6)$$

vf_k 를 이용하여 한번의 수면모드 기간에 누적된
평균 수면중 상태기간 $[T_S]$ 는 식 (7)과 같이 정의
된다.

$$E[T_S] = \sum_{k=1}^{\infty} vf_k \cdot S_k \quad (7)$$

$$= \sum_{k=1}^K vf_k \cdot S_k + \sum_{k=K+1}^{\infty} vf_k \cdot S_k \quad (8)$$

식 (8)에서 $K+1$ 항부터의 무한급수는 식 (9)와
같이 계산된다.

$$\sum_{k=K+1}^{\infty} vf_k \cdot S_k = c_2 c_5 c_6 + c_3 c_5 c_7 \quad (9)$$

단,

$$c_5 = e^{\lambda \{(K-1) \cdot t_{\max} + t_{\min} + t_L\}} \cdot \{1 - e^{-\lambda(t_{\max} + t_L)}\}$$

$$c_6 = \left\{ \frac{(K+1)e^{-\lambda c_1(K+1)}}{1 - e^{-\lambda c_1}} + \frac{e^{-\lambda c_1(K+2)}}{(1 - e^{-\lambda c_1})^2} \right\}$$

$$c_7 = \left\{ \frac{e^{-\lambda c_1(K+1)}}{1 - e^{-\lambda c_1}} \right\}$$

(2) $E[T_L]$

한번의 수면모드 기간에서 누적된 청취중 상태 기간, $E[T_L]$ 은 식 (10)과 같이 계산된다.

$$E[T_L] = t_L \sum_{k=1}^{\infty} v f_k \cdot k = t_L \left\{ \sum_{k=1}^K v f_k \cdot k + \sum_{k=K+1}^{\infty} v f_k \cdot k \right\} \quad (10)$$

식 (10)에서 $\sum_{k=K+1}^{\infty} v f_k \cdot k = c_5 c_6$ 이 됨을 확인할 수 있다.

(3) $E[T_W]$

활성모드가 지속되는 평균 기간인 $E[T_W]$ 의 계산을 위하여 먼저 다음의 기호를 정의하자.

p_{th} : MSS의 패킷수신중 상태가 끝나고 대기중 상태가 시작된 시점부터 수면모드 시작 임계기간(t_{th}) 이내에 패킷이 도착할 확률.

N_B : 수면모드가 끝나고 패킷수신중 상태가 시작될 때 전송을 기다리는 패킷의 수.

$B^{(m)}$: 패킷수신중 상태가 시작될 때 m 개의 패킷이 기다리고 있다는 조건하에서 패킷수신중 상태가 지속되는 기간.

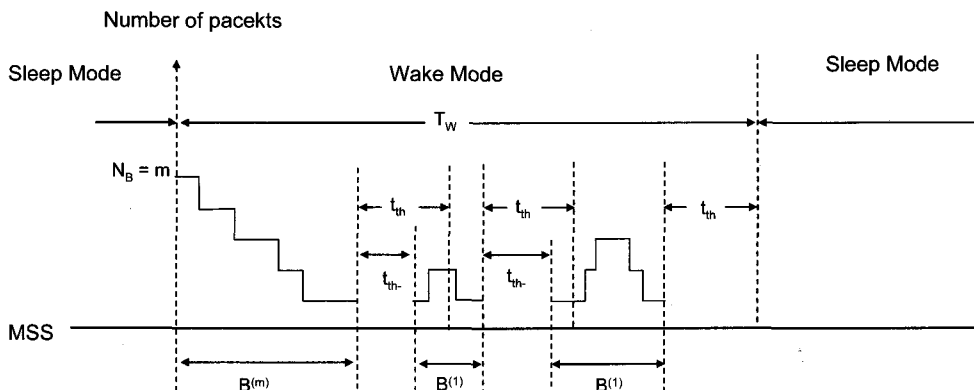
패킷 도착 분포의 포아송 가정에 의하여 $p_{th} = 1 - e^{-\lambda t_{th}}$ 로 간단히 계산된다.

활성모드의 길이는 일반 M/G/1의 바쁜 기간 (busy period)의 길이와 다르다. 왜냐하면, [그림 3]에서 보는 바와 같이 모든 패킷의 서비스가 끝났더라도, MSS는 바로 수면모드로 전환되지 않고, t_{th} 기간만큼 대기중 상태를 갖기 때문이다. MSS의 대기중 상태 기간도 시스템의 활성모드 기간에 포함되고, 이 기간중에 패킷이 도착하면, 다시 $B^{(1)}$ 기간만큼의 바쁜 기간이 시작된다. 이렇게 $B^{(1)}$ 의 기간이 반복되는 회수는 $1 - p_{th}$ 를 모수로 갖는 기하 분포를 이루게 된다. 이를 고려하면, 활성모드의 지속기간은 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_W = B^{(N_B)} + \sum_{j=0}^{\infty} p_{th}^j (1 - p_{th}) [j \cdot (t_{th-} + B^{(1)}) + t_{th}] \quad (11)$$

식 (11)에서 t_{th-} 는 MSS가 마지막 패킷 수신을 마치고 대기중 상태가 된 시점부터 수면모드 시작 임계기간 전에 패킷이 도착할 때까지의 경과시간을 의미한다. 이 값의 기대값은 도착분포의 포아송 가정을 이용하면, t_{th} 의 중앙값이 된다. 식 (11)에 기대값을 취하면 식 (12)와 같이 변환된다.

$$E[T_W] = E[B^{(N_B)}] + (E[t_{th-}] + E[B^{(1)}]) p_{th} \sum_{j=1}^{\infty} j \cdot p_{th}^{j-1} (1 - p_{th}) + t_{th} = E[N_B] E[B^{(1)}] + \left\{ \frac{1}{2} t_{th} + E[B^{(1)}] \right\} \frac{p_{th}}{1 - p_{th}} + t_{th} \quad (12)$$



[그림 3] $E[T_w]$ 의 계산

식 (12)에서 $E[N_B]$ 의 값을 계산해 보자. 먼저, N_B 는 수면모드가 몇 번째 수면사이클에서 끝났는지에 대한 조건부확률을 취하여 식 (13)과 같이 표현될 수 있다.

$$N_B = \sum_{k=1}^{\infty} v f_k \cdot N_B^{(k)} \quad (13)$$

식 (13)에 기대값을 취하여 전개하면 식 (14)와 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} E[N_B] &= E\left[\sum_{k=1}^{\infty} v f_k \cdot N_B^{(k)}\right] \\ &= \sum_{k=1}^{\infty} v f_k \cdot E[N_B^{(k)}] \\ &= \sum_{k=1}^K v f_k \cdot E[N_B^{(k)}] + \sum_{k=K+1}^{\infty} v f_k \cdot E[N_B^{(k)}] \quad (14) \end{aligned}$$

식 (14)를 계산하기 위해서 먼저, $E[N_B^{(k)}]$ 의 값을 구해야 한다. 그런데 $N_B^{(k)}$ 의 분포는 k 번째 수면 사이클 기간동안에 도착한 패킷의 개수와 같으므로 식 (15)와 같이 계산되고 $E[N_B^{(k)}]$ 의 값은 식 (16)과 같이 계산된다.

$$\Pr(N_B^{(k)} = m) = \frac{e^{-\lambda v_k} (\lambda v_k)^m}{m!} \cdot \{1 - e^{-\lambda v_k}\}^{-1} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} E[N_B^{(k)}] &= \sum_{m=1}^{\infty} m \cdot \Pr(N_B^{(k)} = m) \\ &= \lambda v_k \cdot \{1 - e^{-\lambda v_k}\}^{-1} \quad (16) \end{aligned}$$

식 (14)에서 두 번째 항은 식 (17)과 같이 계산됨을 확인할 수 있다.

$$\begin{aligned} &\sum_{k=K+1}^{\infty} v f_k \cdot E[N_B^{(k)}] \\ &= \lambda(t_{\max} + t_L) \cdot \{1 - e^{-\lambda(t_{\max} + t_L)}\}^{-1} \cdot c_5 \cdot c_7 \quad (17) \end{aligned}$$

마지막으로, 식 (12)에서 한 개의 패킷을 서비스

하는 것으로 시작되는 바쁜기간의 평균길이는 $E[B^{(1)}] = \frac{E[S]}{1-\rho}$ 이다[4].

4.2 평균 패킷 반응시간($E[T_R]$)의 계산

평균 패킷 반응시간의 계산을 위하여 다음의 기호를 정의하자.

N_q : 패킷이 도착한 시점에서 전송중인 패킷을 제외한 버퍼에 있는 대기 패킷의 개수

V_+ : 시스템이 수면모드 상태일 때, 도착하는 임의의 패킷이 보는 잔여 수면모드시간

$V_+^{(n)}$: n 개의 대기패킷을 보고 도착하는 패킷이 기다리는 잔여 수면모드시간

S_+ : MSS가 패킷수신중 상태, 즉 서버가 바쁜 상태일 때 도착하는 임의의 패킷이 보는 잔여 서비스 시간

$S_+^{(n)}$: MSS가 패킷수신중 상태이며 서비스 받는 패킷을 제외하고 버퍼에 n 개의 패킷이 있다는 조건하에 도착한 패킷이 보는 서비스의 조건부 잔여서비스 시간

r_1 : 서버에 전송할 패킷이 없다는 조건하에 MSS가 수면중 또는 청취중 상태일 확률

r_2 : 서버에 전송할 패킷이 없다는 조건하에 MSS가 대기중 상태일 확률

또한, 임의의 패킷이 도착했을 때, MSS의 상태를 변수 x 를 이용하여 다음 식 (18)과 같이 정의하자.

$$x = \begin{cases} 0, & \text{패킷수신중} \\ 1, & \text{대기중} \\ 2, & \text{휴면모드(수면중, 청취중)} \end{cases} \quad (18)$$

위에서 정의한 기호들을 이용하여 버퍼에 있는 평균 패킷 반응시간은 다음 식 (19)와 같이 표현될 수 있다.

$$E[T_R] = \frac{\sum_{i=0}^2 \sum_{n=0}^{\infty} E(T_R | N_q = n, x = i)}{\Pr(N_q = n, x = i)} \quad (19)$$

식 (19)에서 먼저 $x=0$, 즉, MSS가 패킷수신중인 경우만을 보면 식 (20)과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} & \sum_{n=0}^{\infty} E(T_R | N_q = n, x = 0) \Pr(N_q = n, x = 0) \\ &= \sum_{n=0}^{\infty} \{E[S_+^{(n)}] + nE[S]\} \cdot \Pr(N_q = n | x = 0) \cdot \Pr(x = 0) \\ &= \rho E[S_+] + \rho E[S] E[N_q | x = 0] \end{aligned} \quad (20)$$

식 (20)의 마지막 결과는 $\Pr(x = 0) = \rho$, $\sum_{n=0}^{\infty} E[S_+^{(n)}] \cdot \Pr(N_q = n | x = 0) = E[S_+]$ 그리고 $\sum_{n=0}^{\infty} n \cdot \Pr(N_q = n | x = 0) = E[N_q | x = 0]$ 이라는 사실을 이용한 것이다.

다음으로 식 (19)에서 $x=1$ 일 때를 보자. 즉, MSS가 대기중 상태일 때는 패킷 도착즉시 서비스가 가능하므로 식 (21)이 성립한다.

$$\sum_{n=0}^{\infty} E(T_R | N_q = n, x = 1) \Pr(N_q = n, x = 1) = 0 \quad (21)$$

마지막으로 식 (19)에서 $x=2$ 인 경우를 보면 식 (22)와 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} & \sum_{n=0}^{\infty} E(T_R | N_q = n, x = 2) \Pr(N_q = n, x = 2) \\ &= \sum_{n=0}^{\infty} \{E[V_+^{(n)}] + nE[S]\} \cdot \\ & \quad \Pr(N_q = n | x = 2) \cdot \Pr(x = 2) \\ &= (1-\rho)r_2 E[V_+] + (1-\rho)r_2 \\ & \quad E[S] E[N_q | x = 2] \end{aligned} \quad (22)$$

식 (22)의 마지막 결과는 $\sum_{n=0}^{\infty} E[V_+^{(n)}] \cdot \Pr(N_q = n | x = 2) = E[V_+]$ 이라는 사실과 $\Pr(x = 2) = (1-\rho)r_2$

라는 사실을 이용한 것이다.

이제 식 (19)에 식 (20)~(22)의 결과를 대입하여 정리하면 식 (23)과 같이 된다.

$$\begin{aligned} E[T_R] &= \rho E[S_+] + \rho E[S] E[N_q | x = 0] \\ & \quad + (1-\rho)r_2 E[V_+] + (1-\rho)r_2 E[S] E[N_q | x = 2] \\ &= \rho E[S_+] + (1-\rho)r_2 E[V_+] + E[S] E[N_q] \end{aligned} \quad (23)$$

식 (23)의 마지막 결과는 식 (24)에 의한 것이다.

$$\rho E[N_q | x = 0] + (1-\rho)r_2 E[N_q | x = 2] = E[N_q] \quad (24)$$

식 (24)는 $(1-\rho)r_1 E[N_q | x = 1] = 0$ 항을 생략한 것이다.

$\rho = \lambda E[S]$ 와 Little의 법칙을 적용하면 $E[S] E[N_q] = \rho E[T_R]$ 가 성립되고 이것을 식 (23)에 대입하여 정리하면 식 (25)과 같이 정리된다.

$$E[T_R] = \frac{\rho}{1-\rho} E[S_+] + r_2 E[V_+] \quad (25)$$

식 (25)에서 $E[S_+] = \frac{E[S^2]}{2E[S]}$ 이다[4]. 다음으로 $E[V_+]$ 는 식 (26)과 같이 계산될 수 있다.

$$\begin{aligned} E[V_+] &= \sum_{k=1}^{\infty} v f_k \cdot E[V_{k+}] \\ &= \sum_{k=1}^K v f_k \cdot E[V_{k+}] + \sum_{k=K+1}^{\infty} v f_k \cdot E[V_{k+}] \end{aligned} \quad (26)$$

식 (26)에서 $E[V_{k+}] = \frac{v_k}{2}$ 이다. 따라서 식 (26)의 두 번째 항은 식 (27)과 같이 계산됨을 확인할 수 있다.

$$\sum_{k=K+1}^{\infty} v f_k \cdot E[V_{k+}] = \frac{1}{2} (t_{\max} + t_L) \cdot c_5 \cdot c_7 \quad (27)$$

마지막으로 r_2 를 구해보자. r_2 는 임의의 패킷이 도착했을 때, 서버에 전송할 패킷이 없다는 조건하

에 시스템이 휴면모드 상태일 확률이다. 전송하는 패킷이 없는 경우는 MSS가 대기중 상태이거나 휴면 모드 상태 2가지 경우뿐이다. PASTA 성질에 의하여 도착하는 패킷이 두 가지 상태중 특정한 상태를 볼 확률은 그 상태가 유지되는 길이에만 비례할 것이다. 따라서, r_2 는 식 (28)과 같이 추정할 수 있다.

$$r_2 = \frac{E[V]}{E[V] + t_{th}} \quad (28)$$

식 (28)에서 $E[V]$ 는 휴면모드 기간의 평균값으로서 식 (29)와 같이 주어진다.

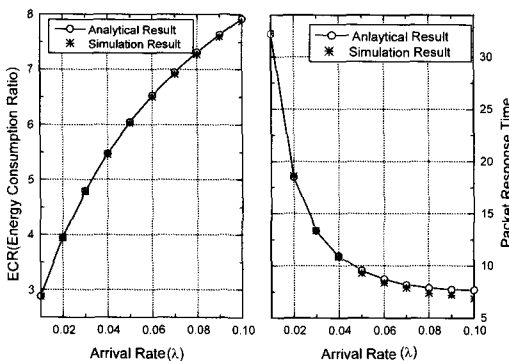
$$\begin{aligned} E[V] &= \sum_{k=1}^{\infty} v f_k \cdot V_k \\ &= \sum_{k=1}^K v f_k \cdot V_k + \sum_{k=K+1}^{\infty} v f_k \cdot V_k \end{aligned} \quad (29)$$

식 (29)의 두 번째 항은 식 (9)와 유사한 형태로 다음 식 (30)과 같이 계산된다.

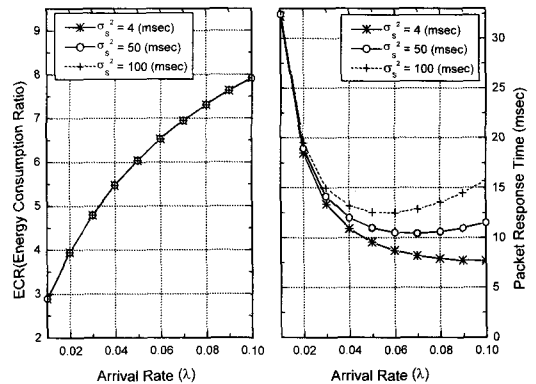
$$\sum_{k=K+1}^{\infty} v f_k \cdot V_k = c_4 c_5 c_6 + c_3 c_5 c_7 \quad (30)$$

5. 실험예제

본 장에서는 제 4장에서 분석적인 형태로 구한



[그림 4] Analytic Result vs. Simulation Result ($t_{th} = 10, t_{min} = 10, t_{max} = 160$)

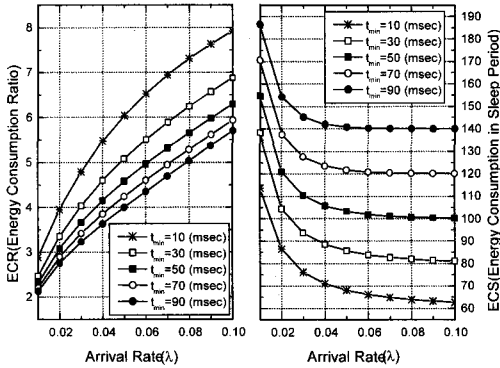


[그림 5] σ_s^2 값에 따른 성능척도의 변화 ($t_{th} = 10, t_{tim} = 10, t_{max} = 320, \mu_s = 4$ msec)

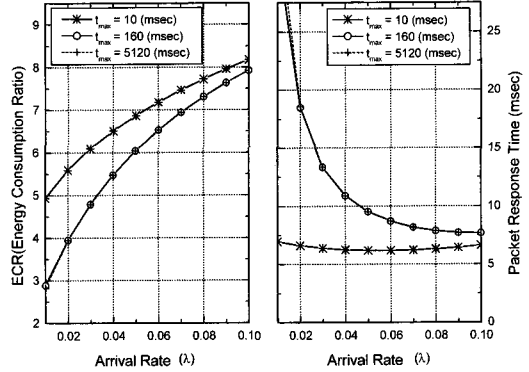
성능척도들의 값을 시뮬레이션 결과와 비교하여 그 정확성을 검증한다. 또한 각 제어변수들의 값의 변화에 따라서 성능척도들의 값이 변화되는 추세를 예제를 통하여 보여준다.

실험 예제에서 무선망의 대역폭은 10 Mbps로 가정하였다. 또한 패킷의 평균 크기는 500 bytes로서 패킷 서비스 시간의 평균은 $E[S] = \mu_s = 4$ msec이 고정하였다. ATM과는 달리 IP 패킷은 동일한 길이를 갖지 않는다. IPv4인 경우 최소 헤더 크기가 20 bytes이고 IPv6인 경우는 40 bytes이다. 최대 패킷 크기는 특정 sub-network이 어떤 기술을 사용하느냐에 달려있다. 이것을 반영하기 위하여 패킷 서비스 시간의 분산, $\sigma_s^2 = E[S^2] - (E[S])^2$ 의 크기를 변화시켜가며 실험을 하였다. 그리고 $T_L = 5$ msec로 가정하였다.

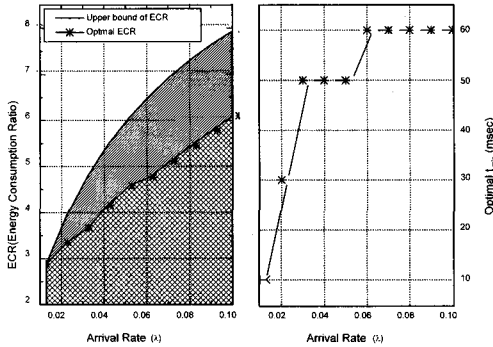
본 연구에서 제시한 성능척도 계산식의 타당성을 검증하기 위한 시뮬레이션에서는 패킷 서비스 시간을 평균이 4 msec이고 분산이 4 msec인 감마 분포를 가정하고 매 100,000번 패킷도착을 관측하였으며, 동일한 설정값에 대하여 30회 반복하여 그 평균값을 취하였다. 또한, 시스템의 각 모드별 에너지 사용률의 비율은 다음과 같이 $E_W : E_L : E_S = 10 : 10 : 1$ 로 가정하였다[8]. [그림 4]에서 보는 바와 같이 본 연구에서 제시한 분석적인 계산값이 시뮬레이션 결과와 잘 대응됨을 확인할 수 있다.



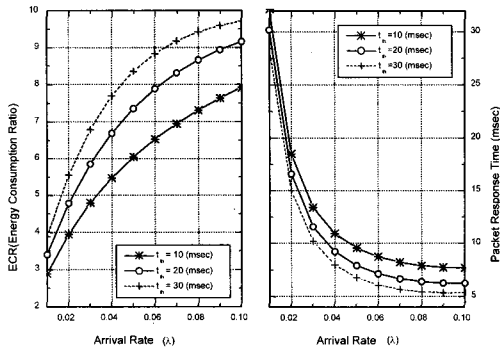
[그림 6] t_{min} 값에 따른 ECR vs. ECS
 ($t_{max} = 160, t_{th} = 10, \sigma_s^2 = 4$ msec)



[그림 9] t_{max} 값에 따른 성능척도의 변화
 ($t_{min} = 10, t_{th} = 10, \sigma_s^2 = 4$ msec)



[그림 7] Optimal ECR and t_{min}
 ($t_{max} = 160, t_{th} = 10, \sigma_s^2 = 4$ msec, $R_u = 35$ msec)



[그림 8] t_{th} 값에 따른 성능척도의 변화
 ($t_{max} = 10, t_{th} = 320, \sigma_s^2 = 4$ msec)

[그림 5]는 서비스 시간의 분산이 성능척도에 미치는 영향을 보여주고 있다. 서비스 시간은 패킷길

이와 직접 연관되어 있으므로, 평균 패킷 길이가 같다면 패킷 길이의 분산은 평균 에너지 사용률에는 영향을 미치지 않지만 패킷 대기 시간은 분산이 작을수록 그 값이 작아지는 것을 확인할 수 있다.

[그림 6]은 패킷 도착률과 최소수면기간(t_{min})의 변화에 따른 성능척도들의 변화를 보여주고 있다. 여기서 ECS는 한번의 수면모드에서 사용된 평균 에너지 사용량을 나타낸다. [그림 6]에서 ECR은 최소수면기간의 길이가 증가할수록 그 값이 감소하는 경향을 나타내는 반면에 ECS는 최소수면기간의 길이가 증가할수록 그 값이 증가하는 경향을 나타냄을 확인할 수 있다. 따라서, ECS 값만을 에너지 사용 척도로 사용하면, 패킷반응시간의 상한이 주어졌을 때 항상 시간 프레임의 최소값이 최적의 최소수면기간이 되며, 이것은 ECR관점에서는 에너지 사용의 상한값에 해당된다. 식 (5)에서 패킷반응시간의 상한(R_u)을 35 msec로 가정하고, 최소단위의 시간 프레임을 10 msec로 두었을 때 최적의 ECR 값과 그 때의 t_{min} 값이 [그림 7]에 도시되어 있다. 이를 통해 본 연구에서 제시한 ECR과 $E[T_R]$ 계산식을 이용하면, 에너지 사용을 최적화할 수 있는 제어변수값들을 찾을 수 있음을 확인할 수 있다.

[그림 8]은 수면모드 시작 임계기간(t_{th})의 값의 변화에 따른 성능척도 값들의 변화를 보여주고 있다. t_{th} 값이 커질수록 수면모드에 들어가게 되는

확률이 작아지므로 에너지 사용량은 줄어들고, 패킷 대기 시간은 짧아짐을 알 수 있다.

[그림 9]는 최대수면기간(t_{max}) 값의 변화에 따른 성능척도 값들의 변화를 보여주고 있다. 그림에서 t_{max} 는 일정값이상 커지면 성능척도에 영향을 주지 못하는 것을 확인할 수 있다. 이는 t_{max} 이 커지면서 수면모드 기간이 최대수면기간까지 이를 수 있는 확률이 0에 가까워 지기 때문이다.

6. 결론 및 추후연구

본 연구에서는 IEEE 802.16e 수면모드를 실제 적용함에 있어 필요한 성능척도들을 계산하기 위한 분석적인 형태의 해를 제시하였다. 이를 위하여, 수면모드 시작 임계기간을 도입하고 M/G/1 복수휴가모델을 응용하여 주어진 제어변수하에서 에너지 사용률과 패킷반응시간을 구하였다. 시뮬레이션 결과와의 비교를 통해서 모델의 정확성이 검증되었고 실험 예제를 통해 패킷반응시간의 제약하에 에너지 사용률을 최소화하는 제어변수 값들을 구할 수 있음을 보일 수 있었다.

본 연구는 기존연구의 일반적인 가정과 같이 패킷 도착 분포가 포아송이라는 가정을 가지고 있다. 그러나 실제 인터넷 트래픽을 고려할 경우, bursty한 트래픽 도착 특성을 보이므로 이를 위한 확장연구가 필요하다.

참고 문헌

- [1] 이호우, 「대기행렬이론」, 3판, 시그마프레스, 2006.
- [2] TTAS.KO-06.0082/R1 "Specifications for 2.3 GHz band Portable Internet Service, Physical and Medium Access Control Layer," 한국정보통신기술협회, 2005.
- [3] J.M. Pitts, J.A. Schormans, C.I. Phillips and J.M. Griffiths "Accurate Delay Bounds for Real-time IP Services in Presence of Variable Packet Size," *Electronics Letters*, Vol. 37. No.3(2000), pp.166-167.
- [4] Kleinrock, Leonard, *Queueing Systems Volume I: Theory*, John Wiley & Sons, Inc., 1975.
- [5] Nejatian, N. Mohammad, P. and M.M. Nayebi, "Evaluating the Effect of non-Poisson Traffic Patterns on Power Consumption of Sleep Mode in the IEEE 802.16e MAC," *Wireless and Optical Communications Networks, 2007. WOCN 2007*. July, 2007. pp.1-5.
- [6] Park, Yunju and Hwang, Ganguk, "Performance Modelling and Analysis of the Sleep-Mode in IEEE802.16e WMAN," *IEEE Vehicular Technology Conference, VTC2007-Spring*, (2007), pp.2801-2806.
- [7] Seo, J.B., S.Q. Lee, N.H. Park, H.W. Lee, and C.H. Cho, "Performance Analysis of Sleep Mode Operation in IEEE 802.16e," *IEEE Vehicular Technology Conference*, Vol.2(2004), pp.1169-1173.
- [8] Xiao, Yang, "Energy Saving Mechanism in the IEEE 802.16e Wireless MAN," *IEEE Communications Letters*, Vol.9, No.7(2005), pp.595-597.
- [9] Zhang, Yan and Fujise, Masayuki, "Energy Management in the 802.16e MAC," *IEEE Communications Letters*, Vol.10, No.4(2006), pp.311-313.
- [10] Zhang, Yan, "Performance Modeling of Energy Management Mechanism in IEEE 802.16e Mobile WiMAX," *Wireless Communications and Networking Conference, 2007.WCNC*, (2007), pp.3205-3209.