

# 무선 환경 하에서 Slotted ALOHA 방식의 다중채널 경쟁에 대한 지연시간분석

허 선 · 김정기 · 남진규

한양대학교 산업공학과

## A delay analysis of multi-access protocol under wireless network

Sun Hur · Jeong-Kee Kim · Jin-Gyu Nam

Department of Industrial Engineering, Hanyang University

Slotted ALOHA(S-ALOHA) is widely used in local wireless network. We analyze the performance of contention-based model in wireless LAN using S-ALOHA protocol. We analyze the performance of binary exponential backoff (BEB) algorithm under the slotted ALOHA protocol : whenever a node's message which tries to reserve a channel is involved in a collision for the  $i$ th time, it chooses one of the next  $2^i$  frames with equal probability and attempts the reservation again. We derive the expected access delay and throughput which is defined as the expected number of messages that reserve a channel in a frame. A simulation study is performed to verify our method.

**Keywords** : MAC, Wireless Telecommunication Network, Binary Exponential Backoff, TDMA

### 1. 서론

Slotted ALOHA(S-ALOHA) 프로토콜은 무선 환경에서 MAC 프로토콜과 예약 프로토콜(reservation protocol)의 구성요소로 매우 널리 쓰이고 있다[1]. S-ALOHA는 pure ALOHA에 프레임을 작은 단위인 슬롯으로 나눈다는 개념을 도입한 프로토콜이다. 즉, S-ALOHA는 채널을 슬롯으로 나누고, 각 프레임 시작 시점에서 경쟁하여 경쟁에 성공하면 전송 예약을 받고 예약을 받은 메시지는 정해진 정책에 의해 전송이 이루어지는 경쟁 프로토콜(contention protocol)기반 전송방법이다. 충돌(collision)이란, 한 슬롯에 한 패킷만이 전송을 시도할 때 전송이 성공적으로 이루어지고, 한 슬롯에 두 개 이상의 패킷이 전송을 시도하면 충돌이 발생한다. 충돌이 발생한 패킷들은 임의의 시간 후에 재전송(re-transmission)을 시도하게 되며, 전송이 성공적으로 이루어질 때까지 반복하게 된다[10]. S-ALOHA에서는 재전송 패킷의 수가 처리할 수 없을 만큼 많아지면 과부하가 발생하여 시스템이 불안정

해진다. 그래서 이러한 채널 경쟁 제어 문제는 S-ALOHA 관련 시스템에서의 중요한 문제 중 하나이다. 일반적인 S-ALOHA 시스템에서는 충돌이 발생한 메시지들은 고정된 확률 값으로 경쟁에 다시 참여하는데, 이러한 시스템에서는 무한 가입자를 가지는 경우 안정적이지 못하다 [6]. 이를 해결하기 위한 재전송 방식의 중 하나로, Binary Exponential Backoff (BEB) 방식이 사용된다. BEB는 Ethernet[4]과 무선 LAN[5]에서 충돌이 발생하는 random access 정책에서 쓰이는 방식으로, 충돌이 발생하면 이를 해결하기 위한 여러 가지 충돌해소(collision resolution) 프로토콜을 사용하는데 이중에 가장 널리 사용되는 방식이다[2]. 매체접근제어 관련 프로토콜에서 BEB 알고리즘의 안정성과 성능 분석에 관한 해석적 모형과 시뮬레이션 모형의 연구는 많이 다루어져 왔다[1], [7], [8]. Aldous[7]에서는 BEB 알고리즘이 0이 아닌 도착률과 무한 노드를 가지는 모형에 대하여 불안정함을 증명하였고, 반면에 Goodman et al.[8]에서는 충분히 작은 도착률과 유한 노드를 가지는 모형에서는 안정적임을 보였

다. Jeong & Jeon[1]에서는 무선 LAN 환경 하에서 S-ALOHA 프로토콜에 Exponential Backoff (EB) 방식을 도입하여 full load 조건하에 시스템 용량과 throughput 대기시간을 유도하였고, EB 방식의 유용함을 보였다. Kwak et al.[2]에서는 EB 방식에 대한 saturation throughput과 대기시간을 유도하였고, 노드의 수가 무한히 증가 하더라도 EB 방식이 안정적임을 증명하였다.

본 연구에서는 무선 LAN 환경 하에서 S-ALOHA 방식과 BEB 알고리즘을 이용한 다중채널 경쟁 모형을 분석하는 새로운 성능 분석 방법을 제시하고자 한다. 본 연구에서는 채널을 프레임으로 나누고, 한 프레임을 다시 작은 슬롯 단위로 나누어 채널 점유하기 위해 경쟁하는 예약슬롯과 실제 데이터를 전송하기 위한 전송슬롯으로 구성한다. 각 터미널에서 전송하고자 하는 메시지들이 발생하면 먼저 프레임의 시작시점에서 채널 경쟁이 이루어지고, 채널 경쟁에 성공한 메시지들은 전송슬롯의 한 부분을 예약 받아 패킷 단위로 전송하게 된다. 예약 슬롯에서는 하나의 슬롯에 하나의 메시지만 경쟁을 시도할 때 전송 성공이 이루어지고, 하나의 슬롯에 두 개 이상의 메시지들이 경쟁을 시도할 때에는 충돌이 발생하게 된다. 충돌이 발생하면 BEB 알고리즘을 이용하여 재경쟁을 시도한다. 본 연구에서는 예약슬롯을 통한 채널 경쟁 모형에 대한 안정상태에서의 시스템 메시지 수, 경쟁에 성공하기까지의 평균 대기시간, 경쟁에 성공한 평균 메시지 수와 같은 성능척도들을 유도한다. 즉, S-ALOHA 방식과 BEB 알고리즘을 이용하여 채널 경쟁모형의 성능척도를 유도하고자 한다.

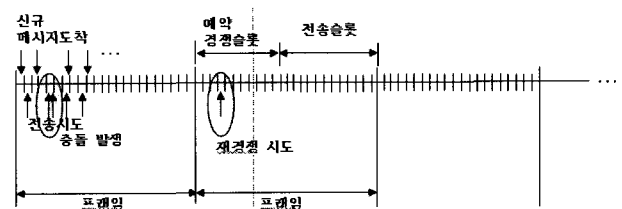
다른 통신 모형의 경우 일반적으로 신규 메시지의 도착률과 재전송되는 메시지의 재전송율을 구분하지 않고 신규 메시지의 도착률에 재전송율을 포함되어 있음을 가정하여 분석하고 있다. 이와 같이 시스템을 분석할 경우, 현실 모형과 개발 모형 간에 성능치들의 차이가 발생하고, 현실 모형에 대한 정확한 분석이 이루어질 수 없다. 그래서 본 연구에서는 신규 메시지의 도착률과 충돌 메시지의 재전송율을 구분하여 분석함으로써 보다 정확한 성능척도들을 유도하고자 한다. 본 연구의 모형은 IEEE 802.11 wireless LAN, ETSI HYPERLAN II, IEEE 802.16 wireless MAN과 같은 표준 스펙에 적용될 수 있으며, 이러한 모형에 대한 해석적 연구는 아직 미흡한 실정이다.

본 연구의 진행 절차는 다음과 같다. 2장에서는 본 연구와 관련된 시스템을 먼저 설명하고, 그 성능척도들을 유도한다. 3장에서는 본 연구와 관련된 수치예제를 제시하여 모델의 타당성을 검증한다. 마지막으로, 4장에서는 본 연구에 대한 결론과 추후 연구 방향에 대하여 논의한다.

## 2. 성능분석

### 2.1 시스템 설명

본 연구에서는 무선 네트워크 환경에서 S-ALOHA 방식과 BEB 알고리즘을 이용한 채널 경쟁 모형을 다룬다. 먼저 채널은 프레임 단위로 구성되며, 프레임은 여러 개의 슬롯으로 구분하여, 크게 채널 점유를 위한 메시지들의 경쟁이 이루어지는 예약슬롯과 실제 메시지 전송을 위한 전송슬롯으로 나눈다. 가입자의 수는 무한이라고 가정하고, 각 터미널에서는 도착률이  $\lambda$ 인 포아송 과정으로 메시지를 발생시킴을 가정한다. 각 터미널에서 전송하고자 하는 메시지들이 발생하면, 예약슬롯에서 S-ALOHA 방식으로 채널 경쟁이 이루어지며, 경쟁에 성공한 메시지들은 전송슬롯을 통하여 패킷 단위로 전송된다. 본 연구에서는 예약슬롯에서 이루어지는 채널 경쟁만을 다루며 예약슬롯의 개수는  $V$ 개임을 가정한다. 한 슬롯에 한 개의 메시지만 채널 점유를 시도할 경우 경쟁에 성공하게 되며, 한 슬롯에 두 개 이상의 메시지들이 채널 점유를 시도하면 충돌이 발생한다. 메시지들 간의 충돌이 발생할 경우, BEB 알고리즘을 이용하여 재전송이 이루어지며 처음부터 경쟁을 하게 된다. <그림 1>에서 보는 바와 같이 한 슬롯에서 임의의 메시지가  $i$  번 충돌이 발생하면 다음  $2^i$  개만큼의 프레임 중에 임의로 하나의 프레임을 선택하여 경쟁에 다시 참여한다. 예를 들어, 한 메시지가 두 번째 충돌이 발생하면 이후 4개의 프레임 중에서 하나를 선택하여 경쟁에 다시 참여한다. 이와 같은 방식으로 재경쟁을 시도하면 시스템에 과부하가 발생하지 않는다[2]. 시스템에 대한 보다 구체적인 설명은 2.2절에서 기호 정의와 함께 이루어진다.



<그림 1> BEB Algorithm의 예

### 2.2 안정상태 메시지 수의 분포와 충돌발생 확률

본 절에서는 본 연구 모형에 대한 프레임 시작 시점에서의 안정상태 메시지 수의 분포와 충돌발생 확률을 유도하고자 한다. 한 프레임의 길이(=  $D$ )는 고정되어 있

다고 가정한다. 각 프레임에서 경쟁에 실패한 메시지들-충돌이 발생한 메시지-은 다음 프레임부터 BEB 알고리즘에 의해 재전송을 한다. 즉, 경쟁에 참여하는 메시지가  $i$  번만큼 충돌이 발생할 때  $0 \leq i < 10$  이면  $2^i - 1$  프레임 중 임의로 한 프레임을 선택하여 재전송을 시도하고,  $10 \leq i < 16$  이면  $2^{10} - 1$  프레임 중 임의로 한 프레임을 선택하여 재전송을 시도한다.

$N_n$ 을  $n$ 번째 프레임 시작 시점에서의 시스템에 존재하는 메시지의 개수,  $J_n$ 을  $n$ 번째 프레임에서 경쟁에서 성공한 메시지들의 개수,  $A_n$ 을  $n$ 번째 프레임 동안 도착한 메시지들의 개수로 정의하면, 식 (2.1)과 같은 관계가 성립한다.

$$N_{n+1} = \begin{cases} N_n - J_n + A_n, & N_n \geq 1 \\ A_n, & N_n = 0, \dots \end{cases} \quad (2.1)$$

$n$ 번째 프레임 동안 도착한 메시지  $A_n$ 과 경쟁에 성공한 메시지  $J_n$ 은  $N_{n-1}$ 과 독립이고,  $N_{n+1}$ 은  $N_n$ 에만 의존함을 알 수 있다. 따라서 확률과정  $\{N_n, n \geq 1\}$ 은 Markov Chain이다. 식 (2.1)의 관계식을 이용하여 1-단계 전이확률을 식 (2.2)와 같이 유도할 수 있다.

$$p_{ij} = \Pr(N_{n+1} = j | N_n = i) = \sum_{k=\max(0, i-j)}^{\min(i, V)} a_{j-i+k} \Pr(J_n = k | N_n = i) \quad (2.2)$$

식 (2.2)에서  $a_j$ 는  $A_n$ 의 분포를 나타내며, Poisson 과정을 따른다.  $J(y, k)$ 는  $n$ 번째 프레임 시작 시점에서 경쟁에 참여하는 메시지의 개수가  $y$ 일 때, 경쟁에서 성공하는 메시지의 개수를 말한다.  $J(y, k)$ 는 Szpankowski[3]에서 유도하였다.  $Y(i, y)$ 는 안정상태에서  $i$ 개의 메시지 가운데 경쟁에 참여하는 메시지 개수가  $y$ 일 확률을 나타낸다.  $r$ 은 임의의 메시지가 경쟁에 참여할 확률을 나타낸다. 시스템 내에 대기중인 각각의 메시지들의 충돌횟수가 서로 다르기 때문에 backoff 상태를 조건을 주어 확률값  $r$ 을 구해야 한다.

$$r = \left( \frac{1 - (\gamma_c/2)^{11}}{1 - (\gamma_c/2)} \right) \frac{1 - \gamma_c}{1 - \gamma_c^{16}} + (\gamma_c/2)^{10} \frac{\gamma_c(1 - \gamma_c^5)}{1 - \gamma_c^{16}} \quad (2.3)$$

식 (2.3)에서  $\gamma_c$ 는 한 프레임 동안 임의의 특정 메시지가 충돌이 발생할 확률을 나타내며, 안정상태 확률  $\pi_j$ 와 연관하여 유도한다.

$\pi_j$ 는 안정상태에서 프레임 시작시점에서의 메시지들의 수가  $j$ 개일 확률로 정의한다. 여기서, 식 (2.3)에 나타난 것과 같이  $\gamma_c$ 와 연관되어 있으므로,  $\pi_j$ 를 유도하기 위해서는  $\gamma_c$ 의 값을 알아야 한다. 그래서 각 메시지들의 충돌확률  $\gamma_c$ 에 대한 관계식을 유도하면 다음과 같다.

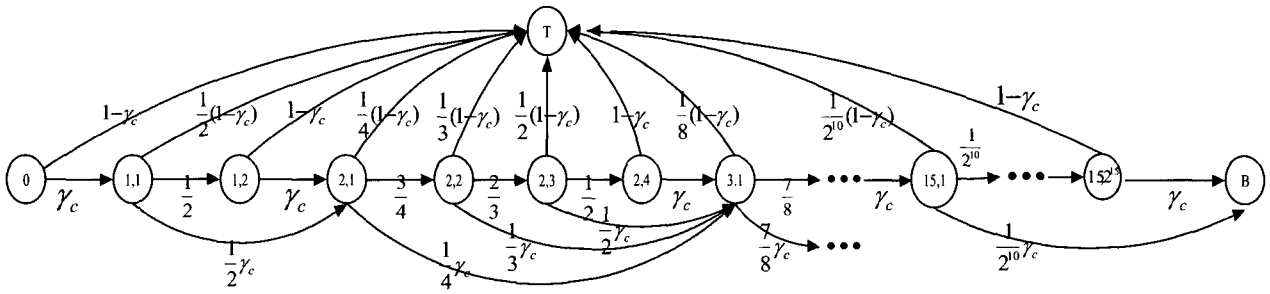
$$\begin{aligned} \gamma_c &= \sum_{m=2}^{\infty} \sum_{y=2}^m \sum_{i=1}^{y-1} \binom{y-1}{i} \left( \frac{1}{V} \right)^i \left( 1 - \frac{1}{V} \right)^{y-1-i} \cdot Y(m, y) \cdot \Pr(M=m) \\ &= \sum_{m=2}^{\infty} \left\{ 1 - \frac{V}{V-1} \left( 1 - \frac{r}{V} \right)^{m-1} + \frac{1}{V-1} (1-r)^m \right\} \cdot \frac{m\pi_m}{\sum_{j=0}^{\infty} j\pi_j} \quad \dots (2.4) \end{aligned}$$

임의의 한 메시지가 경쟁에 참여하는 프레임의 시작 시점에 존재하는 메시지들의 개수가  $M$ 개이고 그 중 경쟁에 참여하는 메시지의 수가  $y$ 개일 때, 임의의 한 메시지가 경쟁에 참여하여  $V$ 개 경쟁 슬롯 중 하나의 경쟁 슬롯을 선택하면 나머지  $(y-1)$ 개 중 한 개 이상의 메시지가 그 경쟁 슬롯을 선택할 사건과 같다. 즉,  $\pi_j$ 와  $\gamma_c$ 는 서로 연관되어 있는 관계식임을 알 수 있다. 결과적으로 recursive 방법으로 구하면 안정상태에서의  $\pi_j$ 와  $\gamma_c$ 의 값을 유도할 수 있다.

### 2.3 평균 메시지 대기시간

평균 메시지 대기시간을 유도하기 위해 먼저 임의의 특정 메시지의 특성을 이용하여 BEB 알고리즘을 이용한 재경쟁이 이루어지는 시스템 모형을 reducible 마코프 체인으로 모형화 한다.

특정 메시지가 시스템에 도착해서부터 경쟁에 성공하여 예약을 받을 때까지 걸린 프레임의 수를 구할 수 있다. 경쟁에 성공한 상태를  $T$ 라 하고, 경쟁에서 성공하지 못하고 블록이 되는 상태를  $B$ 라 한다. 그리고  $(b, f)$ 를 경쟁에서  $B = b$ 번 실패를 하고,  $f$ 번째 프레임에서 다시 재경쟁에 참여를 하는 상태를 의미한다. 전이확률은 각각의 화살표에 나타난 값이다. 만약, 메시지가 도착을 하여 처음 경쟁 시도만에 성공을 하면 평균  $3/2$  프레임의 대기시간을 갖는다. 충돌이 발생을 하면 다음  $2^b$ 개의 프레임중 하나의 프레임을 선택하므로  $\frac{1}{2} + \sum_{i=0}^b 2^i + \frac{1}{2^{10}} \sum_{j=0}^{2^{10}} j$  만큼의 시간이 시스템에서 소요된다. 임의의 특정 메시지가 도착하여 경쟁에 성공할 때까지 걸리는 프레임의 평균 대기시간  $E(D)$ 는 식 (2.4)과 같이 유도할 수 있다.



<그림 2> 상태전이확률 다이어그램

$$E(D) = \sum_{b=0}^{15} E(D|B=b)P(B=b)$$

$$= \frac{1}{2} \frac{1-\gamma_c}{1-\gamma_c^{16}} \left\{ \begin{aligned} &1+2.5\gamma_c+5.5\gamma_c^2+11.5\gamma_c^3+23.5\gamma_c^4 \\ &+47.5\gamma_c^5+95.5\gamma_c^6+191.5\gamma_c^7+383.5\gamma_c^8 \\ &+767.5\gamma_c^9+1535.5\gamma_c^{10}+2559.5\gamma_c^{11}+3583.5\gamma_c^{12} \\ &+4607.5\gamma_c^{13}+5631.5\gamma_c^{14}+6655.5\gamma_c^{15} \end{aligned} \right\} \dots (2.4)$$

<표 1> 수치예제 입력 데이터

Arrivals of new messages ~ <i>Poisson</i> (λ)	λ = 1, 2, ..., 30
Numbers of request slots (V)	V = 15, 20, 25, 30

2.4 경쟁에서 성공한 메시지 개수의 분포

본 절에서는 S-ALOHA 방식과 BEB 알고리즘을 이용하여 경쟁에서 성공한 메시지 수의 분포를 유도한다. 앞에서 구한 임의의 프레임의 시작시점에서 시스템 내 메시지 수의 분포 π<sub>j</sub> = Pr(N=j), 경쟁에 참여하는 메시지의 개수인 Y의 분포, Szpankowski[3]에서 구한 식을 이용하여 한 프레임동안 경쟁에서 살아남는 메시지 개수 X의 분포와 평균 메시지 수 E(X)는 각각 식 (2.5), (2.6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Pr(X=x) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{y=0}^n J(y,x)Y(n,y)Pr(N=n) \dots (2.5)$$

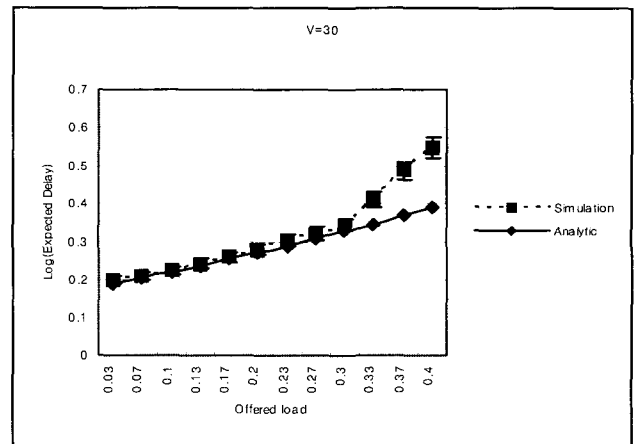
$$E(X) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{y=0}^n E(X|Y=y, N=n)Pr(Y=y|N=n)Pr(N=n)$$

$$= \sum_{n=0}^{\infty} nr \left(1 - \frac{r}{V}\right)^{n-1} Pr(N=n) \dots (2.6)$$

3. 수치 예제

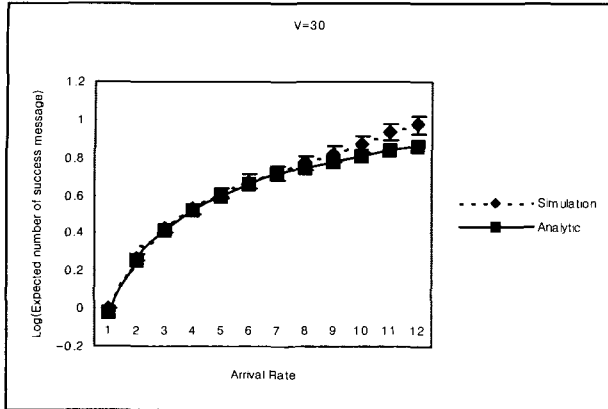
본 장에서는 앞 장에서 구한 S-ALOHA 방식과 BEB 알고리즘을 이용한 시스템 모형의 성능 척도들에 대한 간단한 예제들을 제시한다. 입력 데이터의 값은 다음 <표 1>과 같다.

각각의 경우에 평균 매체접근 대기시간과 throughput을 식 (2.5)와 (2.6)에 의해 구하였다. C++를 사용하여 해석적 모형에 대한 결과를 구하였으며 시뮬레이션은 Matlab을 사용하여 각각의 경우에 대하여 10회의 실험을 하여 구하였다. <그림 3>은 V=30일 때, offered load(λ/V)가 변화함에 따라 평균 매체접근 대기시간의 변화를 보여 준다. V=15, 20 and 25인 경우에도 같은 결과를 나타낸다. 각각의 시뮬레이션 값은 95% 신뢰구간으로 나타내어진다. 해석적 모형의 결과값이 약 0.3보다 작을 경우에 이 범위에 포함되어진다. λ/V가 0.3보다 클 경우에는 메시지의 도착이 많아지기 때문에 시뮬레이션의 결과가 굉장히 증가한다. 이를 시스템이 불안정한 상태라 할 수 있다.



<그림 3> 평균대기 시간 vs. Offered load ( V = 30)

<그림 4>에서는 도착률이 변화함에 따라 경쟁에 성공한 메시지수의 변화를 나타낸다.  $V=15, 20$  and  $25$ 인 경우에도 같은 결과를 나타낸다.



<그림 4> Throughput vs. 도착률 ( $V=30$ )

<그림 4>에서 도착률이 9보다 작은 경우에 해석적 결과와 시뮬레이션 결과값이 거의 일치함을 보인다. 즉, 도착률이  $V$ 의 0.3배 정도까지 근사한 결과값을 나타낼 수 있다. 결과적으로 throughput과 평균대기시간은  $\lambda \leq 0.3V$  인 경우에 좋은 결과를 나타낼 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 무선 환경에서 가장 많이 사용되는 S-ALOHA 방식과 BEB 방식을 이용한 채널경쟁모형을 분석하였다. 또한, 해석적인 방법을 이용하여 성능척도를 구할 수 있었다. 본 연구와 관련된 모형의 성능척도으로써 안정상태에서 프레임 시작 시점에 시스템에 존재하는 메시지 수의 분포와 충돌 확률을 recursive 방법을 이용하여 유도하였고, 이를 이용하여 채널 경쟁에서 성공하는 데 걸리는 평균 메시지 대기시간과 한 프레임 내에 채널 경쟁에 성공한 평균 메시지 수를 유도하였다.

본 연구에서는 한 프레임을 크게 예약슬롯과 전송슬롯으로 구분하여, 한 프레임 내 예약슬롯에서의 채널경쟁에 대한 성능을 분석하였다. 그리고 수치예제를 통하여 평균대기시간과 throughput에 대한 결과를 시뮬레이션과 해석적 모형에 대하여 비교하였다. 결과적으로 해석적 방법은  $\lambda \leq 0.3V$  조건에서 시뮬레이션의 결과와 거의 유사하다는 것을 알 수 있다. 이 연구를 바탕으로, 전송슬롯에서의 메시지 전송 부분에 대한 성능을 분석함으로써 무선 LAN 환경에서 S-ALOHA와 BEB 방식을 이용하는 현실 모형을 분석하는 데 필요할 것이다.

#### 참고문헌

- [1] D. G. Jeong, and W. S. Jeon, "Performance of an Exponential Backoff for Slotted-ALOHA Protocol in Local Wireless Environment", IEEE TRANS. Veh. Technol., vol. 44, no. 3, pp. 470-479, Aug. 1995.
- [2] B. J. Kwak, N. O. Song, and L. E. Miller, "Analysis of the stability and Performance of Exponential Backoff", IEEE WCNC 2003, vol. 3, pp. 1754-1759, Mar. 2003.
- [3] W. Szpankowski, "Analysis and stability considerations in a reservation multiaccess system", IEEE Trans. on Comm., vol. com-31, no. 5, pp. 684-692, May 1983.
- [4] R. M. Metcalfe, and D. G. Boggs, "Ethernet : Distributed packet switching for local computer network", Comm. ACM, vol. 19, no. 7, pp. 395-404, July 1976.
- [5] IEEE Std 802.11, "IEEE standard for wireless LAN medium access control and physical layer specifications", Nov. 1997.
- [6] L. Kleinrock, "queueing system, vol. 2 : computer applications", New York : Wiley, 1976.
- [7] D. J. Aldous, "Ultimate instability of exponential back-off protocol for acknowledgement-based transmission control of random access communication channels", IEEE Trans. Information Theory, vol. 33, no.2, pp. 219-213, Mar. 1987.
- [8] J. Goodman, A. G. Greenberg, N. Madras, and P. March, "Stability of binary exponential backoff", Journal of ACM, vol. 35, no. 2, pp. 579-602, July 1988.
- [9] R. Rom, and M. Sidi, "Multiple Access protocols : performance and analysis", Springer-Verlag New York, 1990.