

Wi-Fi 시스템을 위한 공정성 고려한 에너지 효율적 패킷 전송 방법의 성능 평가

Performance Evaluation of Energy Efficient Packet Transmissions Considering Fairness for Wi-Fi System

신 태 휴*
(Taehyu Shin)
(Ericsson-LG)

박 수 원**
(Suwon Park)
(Kwangwoon University)

*Corresponding author: Suwon Park (Kwangwoon University), E-mail spark@kw.ac.kr

요 약

Wi-Fi 표준 규격에 기술되어 있는 전력절감방식으로 동작하는 Wi-Fi 단말이 Wi-Fi AP로부터 데이터 프레임 수신하는 경우에 시스템 성능(데이터 처리량, 시간지연)이 저하되는 문제점이 발생할 수 있다. 무선채널 상태로 인한 데이터 프레임 수신 실패와 이에 따른 재전송 횟수 증가가 이러한 문제점의 원인이 된다. 본 논문에서는 이러한 문제점을 개선하기 위하여 공정성을 고려한 수정된 전력절감방식을 제안하였다. 모의 실험을 수행하여 제안한 패킷 전송 시도 횟수 제한 방법과 HARQ를 사용할 경우 전송 시간지연의 변화없이 총 데이터 처리량을 증가시킬 수 있음을 보였다.

핵심어 : IEEE802.11, Wi-Fi, 전력절감방식, 데이터 처리량, 전송 시간지연, 공정성

ABSTRACT

Wi-Fi STAs in power saving mode described in the Wi-Fi specification can deteriorate the system performance such as throughput, time delay when they receive data frames from a Wi-Fi AP. This problem is caused by data frame reception failure due to the channel state, and it increases re-transmissions. In this paper, we propose a modified power saving mode considering fairness of Wi-Fi system in order to solve the problem. By simulation, we showed that data throughput can be increased without time delay degradation if the proposed method restricting the number of packet transmission attempts and HARQ are used.

Key words : IEEE802.11, Wi-Fi, Power Saving Mode, Throughput, Time delay, Fairness

† 본 연구는 2010년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 일부 지원을 받아 수행된 연구(NRF-2010-0025509)이고, 2013년도 광운대학교 교내 학술연구비 일부 지원에 의해 수행된 연구입니다.

* 주저자: Ericsson-LG 연구원

** 공저자 및 교신저자: 광운대학교 전자통신공학과 부교수

† Received 15 May, 2015; Reviewed 05 June, 2015; Accepted 7 June 2015

I. 서론

시스코(Cisco)의 “2013-2018 시스코 비주얼 네트워킹 인덱스 글로벌 모바일 데이터 트래픽 전망보고서 (Cisco Visual Networking Index Global Mobile Data Traffic Forecast for 2013 to 2018)”에 의하면 전 세계 모바일 데이터 트래픽이 4년간 약 11배 증가해 2018년에는 연평균 190 엑사바이트(1 엑사바이트 = 100경 바이트)에 달할 것이라고 밝혔다. 또 대한민국의 2018년 모바일 데이터 트래픽 총량은 7 엑사바이트를 기록하며 전 세계 수준과 같이 11배 성장할 것으로 내다 봤다. 모바일 트래픽은 주로 셀룰러 네트워크(cellular network, 3G, LTE, LTE-A 등)와 Wi-Fi 네트워크를 통하여 발생된다. 그 중 비면허대역을 사용하는 Wi-Fi 네트워크는 무선 통신 사업자가 데이터 오프로딩(offload) 등의 목적으로 설치된 Wi-Fi AP(Access Point)에 의해 구축된 것도 있지만, 일반 사용자들이 맥내 또는 사무실내에서 설치한 Wi-Fi AP에 의해 구축된 것도 있다.

사용자들은 Wi-Fi 모뎀이 내장된 스마트폰, 스마트패드 또는 랩탑컴퓨터 등을 이용하여 무선 인터넷 서비스를 이용한다. 이런 종류의 단말은 배터리로 동작하는 시스템이기 때문에 오랜 사용 시간을 확보하기 위해서는 단말의 전력 소모를 최소화할 필요가 있다.

Wi-Fi 네트워크 사용자가 늘어남에 따라 Wi-Fi 단말(STA: Station)의 전력 소모를 Wi-Fi 시스템 관점에서 줄이기 위한 여러 연구들이 진행되었다. Wi-Fi AP가 전송하는 비콘 프레임의 전송주기를 적응적으로 바꾸어 전력절약방식(PSM: Power Saving Mode)으로 동작하는 Wi-Fi STA가 전력을 보다 더 절약할 수 있도록 하는 방법에 관한 연구[1], Wi-Fi 단말이 백오프(backoff)를 하는 동안에 일정시간동안 무선채널이 사용되지 않는 경우에는 다음 백오프 시간을 보다 짧게 설정하여 데이터 처리량을 증가시키고, 시간지연을 감소시킴으로써 성능을 향상시키는 방법에 관한 연구[2], 분산 조정 기능(DCF: Distributed Coordination Function)을 기반으로 하는 Wi-Fi 시스템에서 연속적으로 패킷 전송이 성공하

는 경우에는 경쟁 윈도우(contention window)의 크기를 조절하여 시스템 성능을 향상시키는 방법에 관한 연구[3] 등이 있었다. 또한 Wi-Fi AP 부분 가상비트 지도(partial virtual bit map)를 사용하여 하나의 비콘 구간(beacon interval)동안 수신할 수 있는 Wi-Fi STA만을 깨워 패킷을 전송하여, PSM으로 동작하고 다른 Wi-Fi STA의 전력소모를 줄이는 방법 [4]에 대한 연구가 수행되었다.

앞의 연구는 데이터 전송 권한을 가진 Wi-Fi STA가 데이터 전송을 완료할 때까지 활성화방식(active mode)으로 동작한다. 그러나 전송 권한을 획득한 Wi-Fi STA의 무선채널 상태가 악화되어 데이터 수신이 실패하고, 이로 인해 재전송 요청이 반복되는 경우에는 전력 소모 증가와 더불어 시스템 성능 저하의 문제가 발생한다. 그래서, 본 저자의 논문 [6]에서 PSM으로 동작하고 있는 Wi-Fi STA가 데이터를 수신하기 위하여 전송 권한을 획득한 경우라도 Wi-Fi STA의 무선채널 상태가 좋지 않을 때 전송 실패 패킷수가 기준값 이상되는 경우에는 해당 Wi-Fi STA를 다시 PSM으로 동작하게 하여 무선채널 상태가 좋은 다른 Wi-Fi STA에게 무선 채널을 양보하게 하는 방법을 제안하였으나 이 방법에는 공정성 문제가 존재하였다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 2절에서 Wi-Fi 시스템의 PSM 동작과 그 문제점을 설명한다. 3절에서 공정성을 고려하여 이를 해결하기 위한 수정된 전력절감방식을 제안한다. 4절에서 수정된 전력절감방식의 성능을 평가한다. 마지막으로 5절에서 정리하고 결론을 맺는다.

II. PSM의 동작 및 문제점

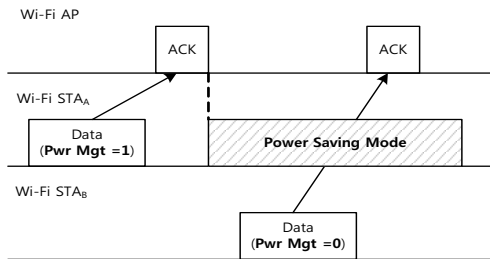
Wi-Fi STA는 전송 데이터가 없는 경우에 전력소모를 줄이기 위하여 PSM으로 동작한다.[5] PSM은 데이터 수신이 가능한 각성상태(awake state)와 데이터 수신이 불가능한 수면상태(sleep state)로 구분된다. PSM으로 동작하는 Wi-Fi STA는 대부분의 시간을 수면상태로 동작하여 전력소모를 줄인다. 또한 주기적으로 전송되는 비콘(beacon)프레임을 수신하

기 위하여 일정 시간동안 각성상태로 동작한다. 연이은 각성상태간의 시간인 청취 간격(LI: Listen Interval)은 Wi-Fi STA마다 다를 수 있지만, 비콘 간격(BI: Beacon Interval)의 배수이다.

Protocol Version	Type	SubType	To DS	From DS	More Frag	Retry	Pwr Mgt	More Data	Protected Frame	Order
------------------	------	---------	-------	---------	-----------	-------	----------------	-----------	-----------------	-------

<그림 1> Wi-Fi 프레임 제어 필드 형식
<Fig. 1> Wi-Fi Frame Control Field Format

<그림 1>은 Wi-Fi 시스템 MAC 프레임 형식 중 프레임 제어 필드의 형식을 나타낸다. Wi-Fi 단말은 PSM으로 동작하기 위하여 PwrMgt (Power Management) 필드를 사용한다. '0'은 Wi-Fi STA가 활성 상태로, '1'은 PSM으로 동작함을 Wi-Fi AP에게 알린다. Wi-Fi STA는 PwrMgt 필드를 '1'로 설정하여 Wi-Fi AP에게 전송하고 긍정응답(ACK) 프레임 수신 후 PSM으로 동작한다.

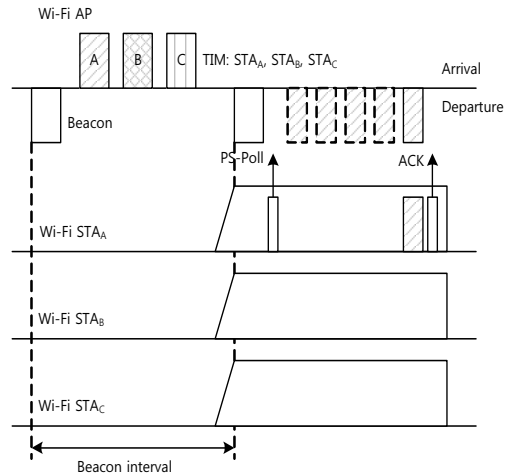


<그림 2> Wi-Fi 단말의 PSM 동작 예
<Fig. 2> Example of PSM of Wi-Fi STA

<그림 2>는 Wi-Fi STA_A가 PwrMgt 필드를 '1'로 설정하여 Wi-Fi AP에게 전송한 후 Wi-Fi AP로부터 긍정응답 프레임을 수신한 후에 PSM으로 동작함을 예시한 것이다.

PSM으로 동작하는 Wi-Fi STA는 수면상태에서는 데이터를 수신하지 않는다. 그래서, Wi-Fi AP에 도착한 데이터를 Wi-Fi AP가 송신하지 못하고 버퍼에 저장해 놓는다. 그리고 Wi-Fi AP는 비콘 프레임의 트래픽 표시 지도(TIM: Traffic Indication Map)에 Wi-Fi STA가 수신해야 하는 데이터가 버퍼에 저장되어 있음을 표시해 놓는다. 각성상태에서 비콘 프레임을 수신한 Wi-Fi STA는 TIM 정보를 해독한다.

만약 수신해야 할 데이터가 Wi-Fi AP에 있는 경우에는 PS(Power Saving)-Poll 프레임을 Wi-Fi AP에게 전송하여 버퍼에 저장되어 있는 데이터를 수신할 준비가 되었음을 알린다. 그러면, Wi-Fi AP는 버퍼에 저장되어 있던 데이터를 해당 Wi-Fi STA에게 전송한다. 만약 TIM 정보로부터 Wi-Fi AP의 버퍼에 수신해야 하는 데이터가 없다고 판단하는 경우에는 Wi-Fi STA는 다시 수면상태로 전환된다.

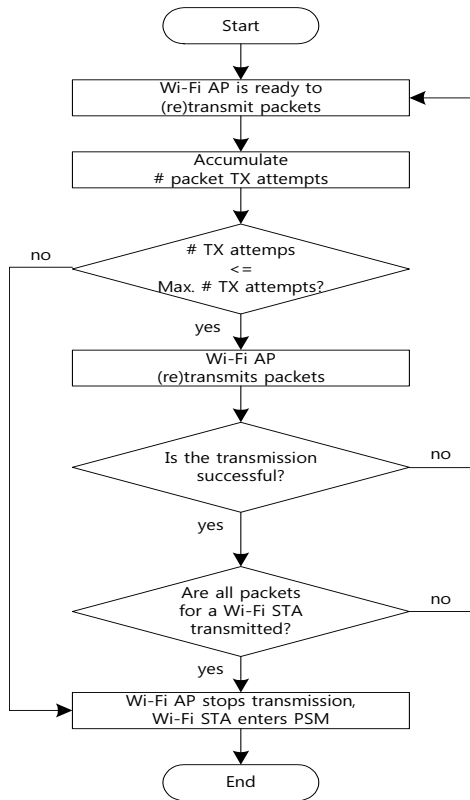


<그림 3> Wi-Fi 시스템의 기존 PSM
<Fig. 3> Conventional PSM of Wi-Fi system

<그림 3>은 Wi-Fi STA의 청취 간격이 다른 값을 가질지라도 다수의 Wi-Fi STA가 동일한 비콘 구간에서 데이터를 수신하기 위하여 동시에 각성상태로 동작하는 경우에 발생할 수 있는 문제점을 나타낸다. 다수의 Wi-Fi STA가 우연히 모두 각성상태로 동작하여 Wi-Fi AP내의 버퍼에 저장된 데이터를 수신하기 위해서는 경쟁을 거쳐 PS-Poll 프레임을 전송할 수 있는 무선채널을 획득해야 한다. Wi-Fi STA간 무선채널 획득을 위한 경쟁에 있어서 채널 상태를 고려하지 않기 때문에, 상대적으로 채널상태가 나쁜 Wi-Fi STA(STA_A로 가정)가 무선채널을 획득할 수 있다. 이러한 경우에 나쁜 무선채널 상태로 인하여 데이터 수신에 실패하여 Wi-Fi AP는 재전송을 하게 되어 무선채널을 계속해서 점유하는 상황이 발생할 수 있다. 이때, 동일한 비콘 구간에서 데이터를 수신하기 위하여 각성상태로 동작하고

있는 다른 Wi-Fi STA(STA_B, STA_C)들은 무선채널을 획득하지 못하여 PS-Poll 프레임을 전송하지 못하고 각성상태로 동작하게 된다. 이로 인하여 불필요한 전력을 소비하게 되는 문제점이 발생하고, 데이터 처리량과 시간지연 성능이 저하되는 문제점도 발생한다.

이러한 문제를 해결하기 위하여 본 저자의 논문 [6]에서 경쟁을 통해 무선채널을 획득한 Wi-Fi STA의 무선채널 상태가 좋지 않다는 것은 패킷을 전송하더라도 실패할 가능성이 높다는 것을 의미한다는 것에 착안하였다. 경쟁을 통해 무선채널을 획득한 Wi-Fi STA의 전송 실패 패킷수가 기준값 이상되는 경우에는 해당 Wi-Fi STA이 획득한 무선채널을 무선 채널 상태가 좋을 수 있는 다른 Wi-Fi STA에게 강제적으로 양보하도록 해당 Wi-Fi STA를 다시 PSM으로 동작하게 하는 방법을 제안하였었다.

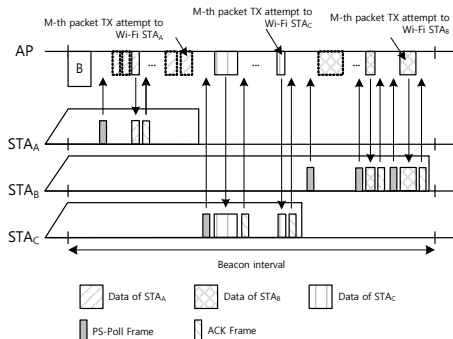


〈그림 4〉 패킷 전송 시도 횟수를 제한하는 방법
 〈Fig. 4〉 Method restricting the number of packet transmission attempts

III. 공정성 고려한 수정 전력 절감 방식

기 제안된 방법[6]은 ARQ 또는 HARQ에 의해 여러 번의 재전송 과정을 통해 최종적으로 전송 성공으로 판정나는 패킷과 재전송 과정을 별로 거치지 않고 단번에 전송 성공한 패킷의 구별이 없다. 즉, 여러 번의 재전송과정을 거쳐 패킷을 수신하는 Wi-Fi STA와 재전송과정 별로 없이 단번에 전송 성공하는 Wi-Fi STA간의 공정성 문제가 존재하였다.

그림 4는 Wi-Fi STA간의 기회 균등 차원에서 공정성을 고려하여 전송 실패 패킷수를 기준으로 기 획득한 무선채널의 강제 양보 여부를 결정하는 대신에 패킷 전송 시도 횟수를 기준으로 기 획득한 무선채널의 강제 양보 여부를 결정하는 방법의 순서도이다. Wi-Fi AP가 각성상태로 동작하는 Wi-Fi STA로 데이터를 전송하는 경우에, 패킷 전송의 성공여부에 상관없이 미리 설정된 패킷 전송 시도 횟수만큼 데이터를 전송한 후에, 해당 Wi-Fi STA로의 데이터 전송을 중지하여 다른 Wi-Fi STA들이 데이터를 수신할 수 있는 기회를 얻게 하는 방법이다.



〈그림 5〉 패킷 전송 시도 횟수 제한 방법의 사례
 〈Fig. 5〉 Case of the method restricting the number of packet transmission attempts

그림 5는 패킷 전송 시도 횟수를 제한하는 방법의 예를 나타내는 그림으로, 패킷 전송 시도 횟수는 N회로 가정하였다. Wi-Fi AP는 각성상태로 동작하는 Wi-Fi STA 간 경쟁을 통하여 PS-Poll 프레임을 보내 승인된 순서대로 데이터를 전송한다. Wi-Fi AP가 무선채널을 먼저 획득한 Wi-Fi STA_A로 데이

터를 전송하는 동안, 전송 성공여부에 상관없이 M 번의 패킷 전송을 시도한 후에, 다른 Wi-Fi STA_C에게 데이터를 전송한다. Wi-Fi STA_C에게 M번의 패킷 전송 시도를 한 후에, Wi-Fi STA_B에게도 M번의 패킷 전송을 시도한다. 각 Wi-Fi STA는 패킷 전송 시도 횟수를 누계하여 M번에 이르게 되면 다시 PSM으로 동작한다.

IV. 모의 실험 결과

<표 1>과 <표 2>는 패킷 전송 시도 횟수 제한 방법의 성능을 검증하기 위한 시뮬레이션 환경과 조건이다.

<표 1> 모의 실험 환경

<Table 1> Simulation environments

System	Wi-Fi
MAC layer	IEEE 802.11 (CSMA/CA)
PHY layer	IEEE 802.11a (OFDM)
Traffic model (Arrival Rate)	Poisson process ($0 \leq \lambda \leq 1000$)
Packet size (Byte)	2312
Data rate (Mbps)	12
Modulation	QPSK
Channel	AWGN
Channel coding	Convolutional coding ($R=1/2, K=7$)
Re-transmission	ARQ(Stop and wait), HARQ(Chase combining)
# Beacon frames	1000
# Simulation iterations	1000

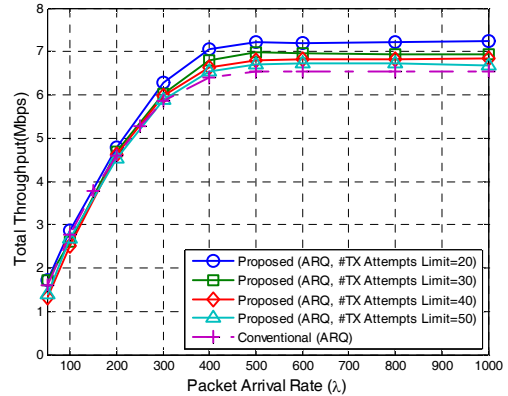
<표 1>은 제안한 패킷 전송 시도 횟수 제한 방법의 성능을 검증하기 위한 모의 실험 환경이다. 1회의 모의 실험은 1000개의 비콘구간동안 수행되며, 1000회 반복하여 성능평가를 하였다.

<표 2>는 모의 실험 조건이다. 모의 실험에서는 두 대의 Wi-Fi STA가 PSM으로 동작하고 있다고 가정한다. 두 대의 Wi-Fi STA는 각각 상태가 나쁜 무선 채널($E_b/N_0 = 0$ dB)과 양호한 채널 상태($E_b/N_0 = 6$ dB)에 있다. Wi-Fi AP가 전송하는 비콘 프레임은 200ms 마다 전송된다. 최대 패킷 전송 시도 횟수 M은 20, 30, 40, 50으로 설정하였다.

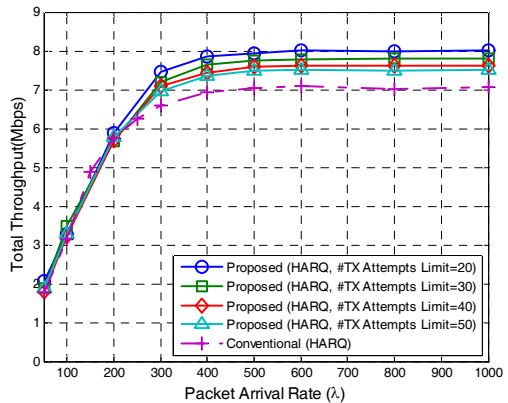
<표 2> 모의 실험 조건

<Table 2> Simulation conditions

E_b/N_0	STA _A = 0 dB
	STA _B = 6 dB
Listen interval (ms)	200
Offset for awake interval (ms)	0, 100
# Wi-Fi STAs	2
Max. # Transmission Attempts (M)	20, 30, 40, 50



(a) ARQ



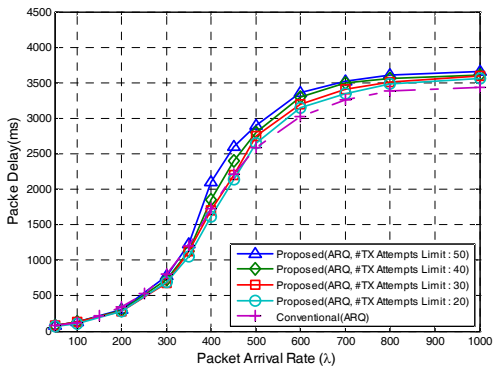
(b) HARQ

<그림 6> 패킷 전송 시도 횟수 제한방법의 데이터 처리량 <Fig. 6> Throughput of the method restricting the number of packet transmission attempts

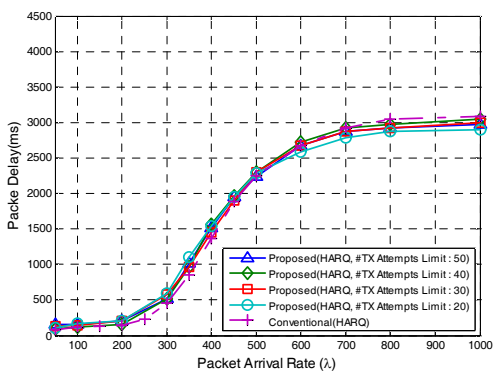
<그림 6>은 패킷 전송 시도 횟수 제한 방법에 따른 각 조건별 Wi-Fi STA 수신기에서 ARQ 또는 HARQ가 이용될 경우의 두 Wi-Fi STA의 데이터 전송량의 합계인 총 데이터 처리량 결과를 그린 것이다.

패킷 도착률(λ)이 상대적으로 낮은 200이하인 구

간에서는 ARQ 및 HARQ 사용한 경우 모두 제안한 방법과 종래의 방법의 데이터 처리량이 큰 차이가 없다. 그러나, 패킷 도착률이 상대적으로 높은 200 이상의 구간에서는 ARQ 및 HARQ 사용한 경우 모두 제안한 방법의 데이터 처리량이 종래의 방법보다 크다는 것을 알 수 있고, HARQ를 사용한 경우가 ARQ를 사용한 경우보다 약 10%정도 총 데이터 처리량이 크다. 또한 이 구간에서 최대 패킷 전송 시도 횟수(M)를 적게 할수록 총 데이터 전송량은 더 많아진다. 이는 Wi-Fi AP가 상대적으로 무선채널 상황이 좋지 않은 Wi-Fi STA로의 패킷 전송 시도 횟수를 빨리 제한하여 무선채널 상황이 좋은 Wi-Fi STA로의 패킷 전송 시도가 빨리 전환될 수 있게 했기 때문에 총 데이터 전송량이 커지게 된 것이다.



(a) ARQ



(b) HARQ

<그림 7> 패킷 전송 시도 횟수 제한 방법의 시간 지연
<Fig. 7> Time delay of the method restricting the number of packet transmission attempts

<그림 7>은 패킷 전송 시도 횟수 제한 방법에 따른 각 조건별 Wi-Fi STA 수신기에서 ARQ 또는 HARQ가 이용될 경우의 두 Wi-Fi STA에 수신성공된 패킷의 평균 시간지연 결과를 그린 것이다.

Wi-Fi STA에서 ARQ를 사용하여 패킷을 수신할 경우에는 최대 패킷 전송 시도 횟수(M)를 적게 할수록 상대적으로 패킷의 시간지연이 적다. 그러나, HARQ를 사용하여 패킷을 수신할 경우에는 최대 패킷 전송 시도 횟수(M)에 상관없이 비슷한 추세를 보이고 있고, ARQ를 사용하는 경우에 비해 약 15% 정도의 평균 시간지연 감소가 있다.

수신 성공된 패킷의 평균 시간 지연은 Wi-Fi AP에 도착한 시각부터 고려하는 것이 아니라 최초 전송 시작 시각부터 수신 성공할 때까지의 시간을 측정하는 것이기 때문에 패킷 도착률이 증가함에도 포화되는 양상을 보이는 것이다. 만약 패킷이 Wi-Fi AP에 도착한 시각부터 시간지연을 측정하면 패킷 도착률이 증가함에 따라 Wi-Fi AP내의 버퍼 크기가 무한대라고 가정하면 급격히 증가할 것이다.

V. 결 론

본 논문에서는 PSM으로 동작하고 있는 다수의 Wi-Fi STA가 데이터를 수신하기 위하여 동일한 비혼 구간에서 각성상태로 동작하는 경우에, 상대적으로 무선채널 상황이 좋지 않은 Wi-Fi STA가 무선채널을 선획득함으로 인해 생길 수 있는 데이터 처리량 감소 및 시간 지연 증가 문제를 공정성을 고려하여 해결하기 위하여 패킷 전송 시도 횟수를 제한하는 방법을 제안하였다. 제안한 방법의 성능 검증하기 위하여 여러 조건하에서 모의실험을 수행하였다.

총 데이터 처리량은 패킷도착률이 200이상인 구간에서 ARQ 및 HARQ를 사용하는 경우 모두에서 종래의 방법보다 커짐을 알 수 있었고, 또한 패킷 전송 시도 횟수를 적게 제한할수록 더 커짐도 알 수 있었다.

패킷의 전송 지연시간은 HARQ를 사용하는 경우에는 종래의 방법과 별로 차이가 없고, 최대 패킷

전송 시도 횟수의 변화에도 별로 차이가 없다. ARQ를 사용하는 경우에는 특정 구간에서 종래의 방법보다 시간 지연이 소폭 증가하고, 최대 패킷 전송 시도 횟수를 크게 할 경우에도 소폭 증가함을 알 수 있었다.

제안한 패킷 전송 시도 횟수 제한 방법과 HARQ를 사용할 경우 전송 시간지연의 변화없이 총 데이터 처리량을 증가를 얻을 수 있고, 데이터를 수신하지 않는 Wi-Fi STA는 다시 PSM으로 동작하게 하여 불필요한 전력소모를 줄일 수 있다.

REFERENCES

- [1] Ju-Hee Lee, Taek-Hun Kim, Jin-Woo Song, Kwang-Jo Lee, and Sung-Bong Yang, "An Efficient Power Saving Mechanism for IEEE 802.11 PSM in Double-Layerd Mobile P2P Systems," in Proc. *Advanced Communication and Networking*, vol. 77, pp.64-73, Miyazaki, Japan, June 2010.
- [2] Nakjung Choi, Yongho Seok, Yanghee Choi, Sunmann Kim and Hanwook Jung, "P-DCF: Enhanced Backoff Scheme for the IEEE 802.11 DCF," *IEEE Vehicular Technology Conference*, pp.2067-2070, Dallas, USA, June 2005.
- [3] Chonggang Wang, Bo Li, and Lemin Li, "A New Collision Resolution Mechanism to Enhance the Performance of IEEE 802.11 DCF," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 53, pp.1235-1246, July 2004.
- [4] S. Moon, T. Shin, S. Park, H. Lee, C. Shon, Y. Chung and H. Hwang, "Energy Saving Method for Wi-Fi Stations Based on Partial Vitrual Bitmap," *ACN 2011, CCIS 199*, pp.355-340, August 2011.
- [5] IEEE Std 802.11, "Part 11: Wireless LAN Medium Access Control(MAC) and Physical Layer(PHY) Specifications," 1999 Edition
- [6] T. Shin, J. Kim, S. Park, "Performance Evaluation of Energy Efficient Packet Transmission for Wi-Fi System," *The Journal of The Korea Institute of ITS*, vol. 13, Issue 3, pp.38-46, June 2014.

저자소개



신 태 휴 (Shin, Taehyu)
 2012년~현재 Ericsson-LG(주) 주임연구원
 2012년 광운대학교 전자통신공학과 공학석사
 2010년 광운대학교 전자통신공학과 공학사
 e-mail : taehyu.shin@gmail.com



박 수 원 (Park, Suwon)
 2006년 3월~현재: 광운대학교 전자통신공학과 전임강사, 조교수, 부교수
 2002년 6월~2006년 2월: 삼성전자(주) 통신연구소 책임연구원
 1999년 3월~2002년 5월: 한국전자통신연구원 시간제 위촉연구원
 1998년 9월~1999년 2월: 한국과학기술원 전일제 위촉연구원
 1994년 3월~1998년 9월: 삼성전자(주) 정보통신개발센터 전임연구원
 2003년 2월 : KAIST 전자전산학과 전기및전자공학전공 공학박사
 1996년 2월 : KAIST 전기및전자공학과 공학석사
 1994년 2월 : KAIST 전기및전자공학과 공학사, 수학과 (복수전공)
 e-mail : spark@kw.ac.kr; spark@ieee.org