

# IEEE 802.15.4 네트워크에서 블록 ACK 전송 기법의 성능분석

이승수\*, 신연순\*, 이강우\*, 안종석\*\*  
동국대학교 \*정보통신공학과, \*\*컴퓨터공학과  
e-mail:{soo, yshsky, jahn, klee}@dgu.edu

## Performance Analysis of the Block ACK Scheme in IEEE 802.15.4

Seung-Soo LEE\* Youn-Soon Shin\* Kang-woo LEE\* Jong-Suk Ahn\*\*  
\*Dept of Information Communication, \*\*Dept of Computer Science,  
Dong-guk University

### 요 약

IEEE 802.15.4 프로토콜은 구현이 용이하여 다양한 응용 네트워크에서 사용되고 있다. 하지만 대용량 데이터 전송시 백오프(back-off), CCA(Clear Channel Assesment), IFS(Inter Frame Space), ACK 시간 등이 MAC 계층에서 오버헤드로 작용하여 네트워크 성능 저하의 요인이 된다. 본 논문에서는 IEEE 802.11e 프로토콜에서 사용되고 있는 블록(block) ACK 기법을 분석하고 이를 802.15.4 네트워크에 적용할 것을 제안하였다. 시뮬레이션을 통한 성능 분석을 실시하고 제안한 기법이 802.15.4에서도 네트워크 처리량을 크게 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

### 1. 서론

최근 들어 센서 네트워크가 실생활에 적용되는 범위가 급속하게 확산되고 있으며 이 분야에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 센서 노드는 그 수가 많고 사람이 접근하기 어려운 지형에 배포되는 경우가 생기기도 하므로 한번 배포되면 지속적인 관리가 어렵다. 따라서 지속적인 관리 없이도 오랜 기간 임무를 수행할 수 있어야 한다.

이러한 환경을 효율적으로 지원하기 위해 IEEE 802.15.4 표준[1]이 제정되었다. 802.15.4 표준은 LR-WPANs(Low Rate Wireless Personal Area Networks)에 대한 물리계층과 MAC 부계층을 정의하고 있으며 기존의 블루투스나 IEEE 802.15.3 네트워크와 같이 고속의 전송을 사용하지 않고 저전력, 저비용을 요구하는 환경에 적합하도록 설계되어 있다.

IEEE 802.15.4의 성능을 향상시키고자 하는 많은 선행 연구가 있었다. [2]에서는 전송 조건에 따라 백오프 범위를 동적으로 변화시킴에 따른 성능 변화를 연구하였고, [3]에서는 802.15.4 표준의 데이터 처리량과 에너지 소비량을 마코프 체인을 이용하여 수학적으로 분석하였다. [4]에서 분석한 IEEE 802.15.4의 포괄적인 성능에 따르면 802.15.4 표준은 전력을 효율적으로 사용하는데 초점을 맞추어서 다른 표준에 비해 처리량(throughput) 성능이 매우 떨어진다. 센서 네트워크의 활용범위가 점점 넓어지는 만큼 처리량 성능의 개선이 필요하다. 특히, 재프로그램과 멀티미디어 데이터 전송과 같은 대용량 데이터 전송시 성능 극대화를 위한 연구가 필요하다.

이에 본 연구에서는 대용량의 데이터를 신속히 전송하기 위해 블록 ACK 전송 기법을 사용한 802.11e와 같이 802.15.4에 블록 ACK 전송기법을 적용하는 방안을 제안한다. 블록 ACK 기법을 사용하면 채널 획득을 위한 오버헤드, ACK 등에 의한 시간을 줄일 수 있기 때문에 MAC 계층의 성능을 향상시킬 수 있다. 802.15.4 네트워크에 블록 ACK 전송 기법을 적용하는 경우 블록 크기가 10일 때 처리량 성능이 향상될 수 있음을 ns-2[8]를 이용한 시뮬레이션을 통해 확인하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 802.15.4 표준의 동작 방식과 802.11에서의 대용량 데이터 전송 기법을 알아보고 3장에서 IEEE 802.15.4 네트워크에 블록 ACK 전송 기법을 적용시키는 방안을 설명하고 4장에서 ns-2 시뮬레이터를 이용한 성능 평가 결과를 분석한다. 5장에서는 결론과 향후 과제를 기술한다.

### 2. 관련 연구

2.1절에서는 802.15.4 표준 동작원리와 대용량 데이터 전송시 문제를 설명하고 2.2절에서는 802.11에서의 관련 연구를 분석한다.

#### 2.1 802.15.4 표준

IEEE 802.15.4 표준은 비콘 프레임(beacon frame)에 의해 구분되는 슈퍼프레임(superframe) 단위로 동작하도록 규정되어 있다. 하나의 슈퍼프레임은 동작(active)구간과 비동작(inactive)구간으로 나누어지며, 동작 구간은 경

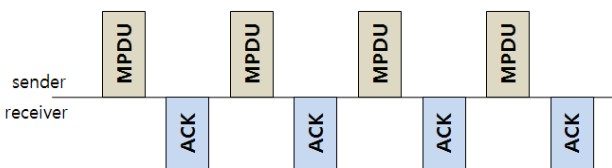
쟁 기반의 CAP(Contention Access Period)와 비 경쟁 기반의 CFP(Contention Free Period)로 세분된다. CAP 에서는 각 노드가 CSMA/CA(Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) 알고리즘을 통해 경쟁적으로 채널을 획득하고 전송이 이루어진다. CFP 에서는 안정적인 전송을 보장해야 할 경우 예약에 의해 특정 노드의 전송을 보장함으로써 QoS를 보장한다.

802.15.4 표준의 CAP 구간에서는 채널 획득을 위해 각 노드간 경쟁이 발생하므로 노드가 증가할수록 전송 충돌이 많이 생길 수 있다. 이러한 충돌은 네트워크 전체의 성능을 감소시키는데 CSMA/CA 알고리즘을 통해 이를 최소화 하도록 유도한다. 전송 초기에 각 노드는 임의의 시간동안 백오프 지연시간을 갖는다. 백오프 지연 시간이 모두 경과한 후 2 번의 CCA(Clear Channel Assessment)를 수행하여 두 번의 CCA 동안 채널이 유희하다면 전송을 시작한다. 전송이 끝나면 신뢰성 있는 전송을 위해 ACK를 받는다. 이 같은 알고리즘은 충돌을 피하는데 효과적이지만 하나의 프레임을 전송하는데 제어를 위한 많은 오버헤드가 생기게 된다. 이러한 오버헤드로 인해 802.15.4 네트워크에서는 대용량 데이터 전송 시 비효율적이다.

**2.2 802.11에 적용된 블록 ACK 기법**

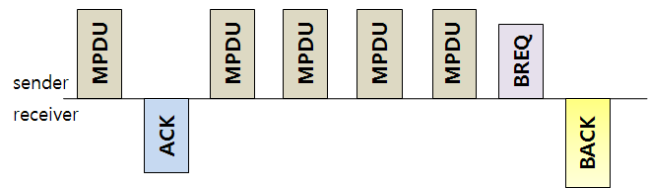
802.11 표준[5]에서도 경쟁 기반의 채널 접근 방법을 사용한다. 한 노드에서 프레임을 전송하려고 할 때 전송 충돌을 줄이기 위해 DIFS(Distributed inter-frame space) 동안 채널을 유희한지 우선 센싱하고 채널이 유희하다면 back-off 지연 단계로 들어간다. back-off 기간 동안 매 슬롯마다 채널을 센싱하여 채널이 사용 중으로 감지되면 DIFS동안 기다린 후 채널이 유희하다면 back-off를 진행한다. back-off가 종료되면 전송을 수행한다. 그리고 신뢰성 있는 전송을 위해 성공적인 전송 후에 해당 프레임에 대한 ACK를 전송한다.

이러한 방식에서는 대용량 데이터 전송시 백오프, DIFS, SIFS 등이 시스템 비효율성을 초래하는 요인이 된다. [6]에서는 CSMA/CA 알고리즘의 비효율성을 완화시키기 위해 한번의 CSMA/CA 알고리즘 수행으로 일련의 프레임을 연속적으로 전송하는 Burst ACK scheme이 제안되었다. 이 방식에서는 (그림 1)처럼 송신측이 첫 번째 프레임에 대한 송신 기회를 CSMA/CA 알고리즘을 통해 얻게 되면 그 프레임만이 아니라 여러 프레임을 블록으로 묶어 연속적으로 전송하게 된다. 이때 전송되는 개별 프레임은 수신측으로부터 즉각적으로 개별 ACK를 받는다. 따라서 보내는 프레임의 숫자만큼 ACK가 전송된다.



(그림 1) Burst ACK scheme

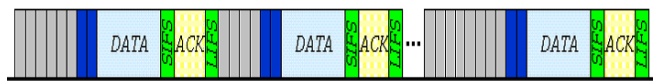
[7]에서는 BTA(A Block Transmission and ACK) scheme 이 제안되었다. 이 방식에서는 (그림 2)에서 보는 것과 같이 모든 데이터 프레임을 SIFS(Short Inter Frame Space) 간격을 두고 연속적으로 전송한다. 그리고 이들 프레임의 일련번호를 모아 하나의 ACK 프레임으로 수신 여부를 전송하게 되는데 BTA 방식에서는 모든 프레임에 대한 ACK를 보내지 않고 전송하려는 프레임을 연속적으로 송신한 후, 송신측에서 BAR(Block ACK Request) 프레임을 보내서 수신측에 이전까지 보낸 모든 프레임에 대한 일괄 ACK를 한번만 보내도록 요청한다. BAR 프레임을 받은 수신측은 SIFS 시간 기다린 후 에러가 발생한 각 프레임에 대하여 재전송을 요구하게 된다. 이 때, 에러가 발생한 프레임은 비트맵을 이용하여 구별하고 BA(Block ACK) 프레임으로 응답한다. 이 전송 기법은 후에 IEEE 802.11e[9] 표준으로 채택되었다. 802.11e에서는 일련의 프레임들을 일정 기간 동안 독점적으로 전송할 수 있는 TXOP (Transmission opportunity)라는 개념을 도입하였다. 경쟁기반의 CAMA/CA 알고리즘을 통해 획득되는 EDCA-TXOP를 통해 back-off 시간과 IFS에 의한 overhead를 줄일 수 있게 되었다.



(그림 2) BTA scheme

**3. 802.15.4 네트워크에서의 블록 ACK 전송 기법**

본 연구에서는 효율적인 대용량 데이터 전송을 위해 IEEE 802.11e 표준과 같이 802.15.4에서도 블록 ACK 기법을 적용하는 것을 제안한다.



(그림 2) IEEE 802.15.4 표준 MAC의 데이터 전송



(그림 4) 블록 ACK를 사용하는 IEEE 802.15.4 MAC의 데이터 전송

블록 ACK 기법을 사용하면 (그림 3)에서와 같이 802.15.4 표준 MAC에서 매 프레임의 전송마다 발생하는 백오프, CCA, IFS, ACK등의 MAC 오버헤드를 줄일 수 있다. 제안하는 블록 ACK 기법에서는 목적지가 같은 여러 프레임을 (그림 4)에서 보는 것처럼 하나의 블록으로 묶어 한번의 CSMA/CA 알고리즘 수행을 통해 전송한다. 이때, 각 프레임은 수신측의 데이터 처리를 위한 최소 시

간인 SIFS 구간만큼 지연하여 연속적으로 전송되고 개별적인 데이터 프레임에 대해서는 ACK를 보내지 않는다. 블록 전송이 완료되면 송신측은 블록의 끝을 알리고 전송한 블록에 대한 ACK를 요구하는 블록 ACK 요청 프레임을 보내게 된다. 이를 수신한 수신측은 전송된 모든 프레임에 대한 즉, 블록에 대한 일괄적인 ACK를 보내게 된다. 수신한 프레임 중 에러가 발생하여 수신하지 못한 프레임에 대한 정보는 이 일괄적인 ACK에 비트맵 형태로 포함되어 전송된다. 블록 ACK를 수신한 송신측은 에러가 발생한 프레임에 대해 재전송을 실시한다. 만약 전송 중 충돌이 발생한다면 충돌상황을 송신측에서 즉시 인지할 수 있도록 매 블록의 첫 번째 프레임에 대해서는 개별적인 ACK를 받는다. 만일 송신측이 첫 프레임에 대한 ACK를 macAckWaitDuration 시간 내에 수신하지 못한다면 전송 중 충돌이 발생하였다고 판단하고 해당 블록에 대한 재전송을 준비하게 된다.

블록 ACK 기법을 사용하기 위해서는 송신측과 수신측 간에 블록 ACK 전송 절차를 확립하는 별도의 절차를 수행해야만 한다. 이 과정에서 송신측은 블록 ACK 전송 절차 개시를 요청하고 수신측에서는 이에 대한 응답 프레임을 전송하는 것이 필요하다. 이 같은 절차를 통해서 적절한 블록 크기, 즉 한 블록에 포함시킬 프레임의 수와 프레임의 크기 등이 결정된다.

이 절차는 블록 ACK 기법을 사용하는 오버헤드가 된다. 프레임을 블록 단위로 만들어 전송함으로써 얻는 이득이 블록 ACK 기법의 오버헤드보다 적게 되면 오히려 네트워크 성능이 더 떨어지는 결과를 초래할 것이므로 한 블록에 들어가는 프레임의 수는 성능에 직접적인 영향을 주는 인자가 될 수 있다.

일반적으로 데이터 프레임의 길이 혹은 한 번에 전송되는 블록의 크기가 크면 네트워크의 처리량은 증가한다. 하지만 802.15.4에서는 슈퍼프레임 구조를 사용하기 때문에 블록 크기가 커지는 것에 따른 손실도 커질 수 있다. 그 이유는 802.15.4에서는 비콘 프레임의 주기에 따라 슈퍼프레임의 길이가 결정되고 다시 동작구간과 비 동작구간으로 나누어지기 때문이다. 이때, 동작구간은 각 노드가 활성화 되는 구간인데 데이터 전송은 이 구간 동안만 일어날 수 있다. 따라서 전송 하려는 블록의 크기가 현재 슈퍼프레임의 동작 구간의 잔여기간 보다 크다면 전송은 유예되어야 한다. 이때, 유예된 전송은 다음 슈퍼 프레임의 동작구간에 다시 시도된다. 결국 블록의 크기가 커지면서 슈퍼프레임의 동작구간의 잔여구간에 대한 낭비도 커져야 하는 단점이 있다. 802.15.4 네트워크에서는 CSMA/CA 알고리즘을 수행하는 과정에서 백오프가 끝나고 CCA를 수행하기 전에 현재 슈퍼프레임의 잔여 구간이 얼마나 되는지 검사하여 해당 구간 동안에 데이터 전송을 완료할 수 있는지 여부를 검사한다. (식 1)은 한 슈퍼프레임 구간에서 데이터 블록의 전송이 다음 슈퍼프레임 구간으로 유예될 확률을 계산하는 것이다. 식에서  $Dt$ 는 두 번의 CCA

를 포함하여 데이터 블록을 전송하고 해당 데이터 블록의 성공적인 수신에 대한 ACK를 전송받기까지 요구되는 최소 백오프 슬롯 시간을 가리킨다.  $N_{frame}$ 개의 프레임이 하나의 블록을 구성하는 경우 모든 시간을 백오프 슬롯 단위로 계산할 때 데이터 프레임의 길이를  $L_{Data}$ , 개별 ACK 프레임의 길이를  $L_{Ack}$ , 블록 ACK 요청 프레임의 길이를  $L_{BAreq}$ , 블록 ACK 프레임의 길이를  $L_{BA}$ , ACK를 전송 받기까지 대기 시간과 프레임 간 간격을  $SIFS$ , 블록 간 간격을  $LIFS$ 라고 한다면 현재 슈퍼프레임 구간에 전송을 완료하기 위해 필요한 시간  $Dt$ 와 현재 슈퍼프레임의 잔여 구간이 전송을 완료하기에 충분치 않을 확률  $p_d$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.  $SD$ 는 한 슈퍼프레임 구간의 길이를 의미한다.

$$Dt = 2CCA + L_{Data}N_{frame} + SIFS(N_{frame} + 2) + L_{Ack} + L_{BAreq} + L_{BA} + LIFS$$

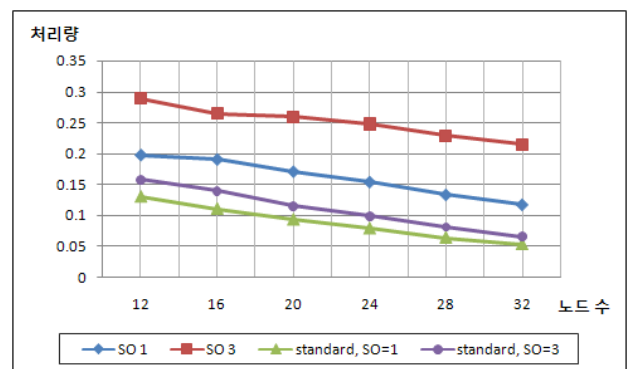
$$p_d = \frac{Dt - 1}{SD}$$

(식 1)

데이터 전송이 유예되는 확률은 (식 1)에서 볼 수 있듯이 데이터 프레임의 크기, 블록의 크기와 관련된다. 또한, 슈퍼프레임의 길이도 영향을 미치는데 이는 노드의 동작구간을 결정하는 SO(superframe order)에 의해 결정된다. 프레임 전송시 슈퍼프레임의 잔여구간보다 전송할 프레임이 슈퍼프레임의 길이가 길면 전송이 다음 슈퍼프레임으로 유예되는 확률이 낮아지기 때문이다. 4장의 성능 평가에서는 SO가 블록 ACK 전송에 미치는 영향도 함께 분석한다.

#### 4. 성능 평가

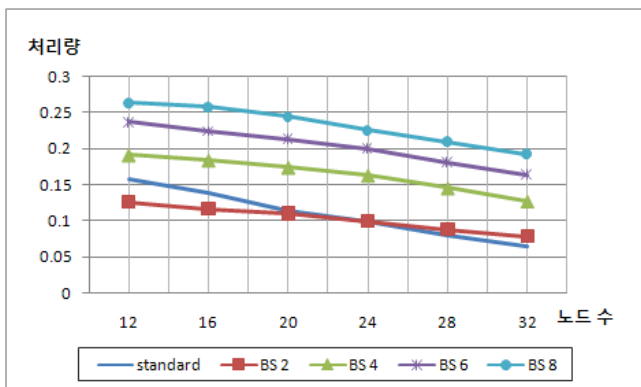
802.15.4 네트워크에서 블록 ACK 기법의 성능을 알아보기 위해 ns-2 시뮬레이터를 사용하였다. 시뮬레이션은 히든 노드가 없는 경우를 가정하여 진행하였다.



(그림 5) 노드 수에 따른 처리량

(그림 5)는 802.15.4 네트워크에서 블록 ACK 사용시

SO 값 변화에 대한 처리량을 노드 수에 따라 나타낸 그래프이다. x축은 노드의 수, y축은 처리량을 의미한다. 한 블록의 크기를 10으로 고정하고 프레임의 크기를 20bytes로 하였을 때 처리량은 20 bytes로 하였다. 그림에서 보듯이 블록 ACK를 사용한 경우가 표준보다 처리량이 많고 SO가 1인 경우보다 3인 경우가 처리량이 더 크게 나타났다. 예를 들어, 노드수가 20이고 표준을 사용하는 경우 SO가 1, 3일 때 처리량이 각각 0.09, 0.11인데 반해 블록 ACK 기법을 사용하는 경우에는 처리량이 각각 0.17, 0.25로 블록 ACK를 사용하는 함으로써 성능이 개선된 것을 볼 수 있다. 이는 SO가 작은 경우 전송이 다음 슈퍼프레임 구간으로 유예되는 확률이 커지면서 전송이 다음 슈퍼프레임으로 유예되는 비율이 커지기 때문이다. 전송이 다음 슈퍼프레임으로 구간으로 유예되는 횟수가 늘어나면 처리량은 심하게 감소된다. 이로써 802.15.4에서는 802.11과는 달리 노드의 동작이 슈퍼프레임 단위로 동기화되어 움직이기 때문에 블록 ACK의 효율이 SO 값에 따라 심하게 영향을 받는 것을 확인하였다. 따라서 802.15.4에서 블록 ACK를 사용하기 위해서는 SO 값에 따라 성능을 최대로 할 수 있는 블록 크기를 선택하는 것이 무엇보다 중요하다는 것을 알 수 있다. 향후 네트워크 상황에 맞게 블록 크기를 동적으로 변화시켜서 전송하는 방법의 연구가 추가적으로 필요하다.



(그림 6) 블록 크기에 따른 처리량 payload=20bytes

(그림 6)은 블록 크기에 따른 처리량 변화를 노드 수에 따라 나타낸 그래프이다. x축은 노드의 수, y축은 처리량을 의미한다. 한 블록 내에 포함되는 프레임의 수를 2, 4, 6, 8, 10개로 변화 시켰을 때 처리량을 보여주는데 그림에서 보듯이 블록에 들어가는 프레임의 수가 많아질수록 처리량이 증가한다. 그러나 블록 크기가 2일 때는 블록 전송을 하는 이점보다 블록 ACK 기법을 사용하는 오버헤드가 더 커지므로 노드수가 24개 이하에서는 표준 802.15.4에서의 성능 보다 오히려 더 떨어지는 것을 확인 할 수 있다

## 5. 결론

본 연구에서는 802.11e 네트워크에서 사용되는 블록 ACK 기술을 802.15.4 네트워크에 적용하는 것을 제안하였

다. 블록 ACK 전송 기술을 802.15.4 네트워크에 적용하여 시뮬레이션을 수행한 결과 슈퍼프레임의 길이를 결정하는 SO값을 고려하여 블록 크기를 결정한다면 802.15.4 네트워크에서도 처리량을 크게 향상시킬 수 있음을 확인하였다. 이는 프레임을 전송할 때마다 추가적으로 필요했던 오버헤드가 줄어드는 결과이다. 향후 히든 노드를 포함한 환경에서의 시뮬레이션 실험과 시뮬레이션 결과를 합리적으로 설명할 수 있는 수학적 성능 분석 모델을 개발하는 것이 필요하다.

## 참고문헌

- [1] Wireless Medium Access Control(MAC) and Physical Layer(PHY) specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks(LR-WPANs), IEEE Standard 802.15.4, 2003
- [2] J. G. Ko, Y. H. Cho, H. G. Kim, "Performance Evaluation of IEEE 802.15.4 MAC with Different Backoff Ranges in Wireless Sensor Networks", Communication systems, 2006. ICCS 2006. 10th IEEE Singapore International Conference, pp.1-5, Oct 2006
- [3] Zhijia Chen, C. Lin, Hao Wen, Hao Yin, "An Analytical Model for Evaluating IEEE 802.15.4 CSMA/CA protocol in Low-rate wireless application", 21st International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops (AINAW'07), pp. 899-904, May 2007
- [4] J. Zheng and M.J. Lee, "A Comprehensive Performance Study of IEEE 802.15.4", Sensor Network Operations, IEEE Press, Wiley Interscience pp. 218 - 237 (Chapter 4) 2006
- [5] IEEE 802.11 WG, "Part 11:wireless LAN MAC and physical layer specifications, reference number ISO/IEC 8802-11:1999(E)" IEEE Std 802.11, 1999
- [6] Tourrilhes J, "Packet Frame Grouping: Improving IP multimedia performance over CSMA/CA" Proc. of ICUPC 1998.
- [7] I. Tinnirello, s.Choi, "Efficiency analysis of Burst Transmission with Block ACK in Contention-Based 802.11e WLANs" IEEE ICC 2005
- [8] ns-2 official site, <http://www.isi.edu/nsnam/ns>
- [9] IEEE 802.11e WG. "Part11: wireless LAN medium access control(MAC) and physical layer (PHY) specifications: medium access control (MAC) quality of service (QoS) enhancements" IEEE 802.11e D8.0, February 2004