DOI: 10.3745/KIPSTC.2008.15-C.5.419

두 개의 우선순위 큐를 적용한 IEEE 802.15.4 GTS 서비스 지연에 대한 분석적 모델

신 연 순[†] · 안 종 석[††] · 이 강 우[†††]

요 약

IEEE 802.15.4에서는 실시간 전송을 위해 GTS 요청 패킷을 조정자에게 전송하여 전송 시간을 미리 예약한다. 본 논문에서는 GTS 예약 지연 시간을 감소하기 위해 802.11e와 같이 일반 데이터와 GTS 요청 패킷의 전송 우위를 차별화하기 위해 두 개의 전송 큐를 사용하는 GTS-FAT 방안을 소개한다. 즉 기존 방식은 이 두 종류의 패킷을 하나의 경쟁 윈도우에 의해 전송하였으나, GTS-FAT 방안은 두 종류의 패킷을 서로 다른 큐에 저장하고 서로 다른 경쟁 윈도우에 의해 전송한다. 또한 본 논문에서는 GTS-FAT의 서비스 지연시간을 분석하기 위해 기존의 802.15.4의 모델과 802.11e의 성능 모델을 결합한 수학적 모델을 제안한다. 제안된 모델의 수치 분석에 의하면 GTS-FAT 방안은 일반 데이터가 GTS 요청 패킷보다 4배 정도 많은 경우에 데이터 전송지연은 6.1%정도 증가하였으나 예약 요청 지연시간을 최대 50%까지 줄였다.

키워드 : GTS-FAT, 802.15.4, 실시간 전송, 우선순위, GTS 요청지연

An Analytical Model for GTS Service Delay of IEEE 802.15.4 with Two Priority Queues

Youn-Soon Shin[†] · Jong-Suk Ahn[††] · Kang-Woo Lee[†††]

ABSTRACT

IEEE 802.15.4 reserves transmission time to support real-time transport by sending GTS request packets to the PAN coordinator in advance. This paper introduces GTS-FAT technique to reduce the reservation time by giving a higher sending priority to GTS request packets than data packets. Differently from the conventional scheme where these two kinds of packets share a single transmission queue, GTS-FAT scheme allocates two queues with two different contention window sizes like IEEE 802.11e. This paper also proposes an analytical GTS delay model by combining the two legacy models for 802.15.4 and 802.11e to accurately predict the GTS-FAT delay over a given network topology. Our analysis shows that GTS-FAT reduces GTS service delay by up to 50% at the expense of the data delay by only up to 6.1% when GTS request packets four times outnumber data packets.

Keywords : GTS-FAT, 802.15.4, real-time applications, priority, GTS request, delay

1. 서 론

저속의 무선 근거리 개인 네트워크(LR-WPANs: Low Rate Wireless Personal Area Networks)를 지원하기 위해 국제전기전자학회(IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers)에서는 802.15.4 표준[1]을 정의하였다. 802.15.4 표준은 802.11[2] 랜과는 달리 전원을 교체하기 어려운 저전력 무선 센서 네트워크에서 효율적으로 사용될 수 있도록 제정되었다. 즉 802.15.4에서는 센서 노드가 일반적인 무선 노드에 비해 낮은 처리 능력과 한정된 전원을 갖는다고 가정한다. 또한 센서 노드가 이동성이 거의 없으며 한 셀 내에서는 802.11 랜의 접근점(access point)역할을 하는 PAN 조정자(coordinator)를 통해서만 통신이 이루어진다고 가정한다.

에너지를 효율적으로 사용하기 위하여, 802.15.4 표준은 비콘프레임(beacon frame)에 의해 구분되는 슈퍼프레임(superframe) 단위로 동작하도록 규정한다. 하나의 슈퍼프레임은 동작(active) 구간과 비동작(inactive) 구간으로 나누어지며, 동작 구간은 경쟁 기반의 CAP(Contention Access Period)와 비경쟁 기반의 CFP(Contention Free Period) 구간

※ 본 논문은 2005년도 동국대학교 연구년 지원에 의하여 이루어졌음.
† 준 회 원 : 동국대학교 정보통신공학과 박사과정
†† 종신회원 : 동국대학교 컴퓨터공학과 교수
††† 종신회원 : 동국대학교 정보통신공학과 부교수(주저자)
논문접수 : 2008년 4월 1일
수 정 일 : 2008년 7월 25일
심사완료 : 2008년 7월 28일

으로 세분된다. CAP 구간에서는 CSMA-CA(Carrier Sense Multiple Access-Collision Avoidance) 알고리즘을 이용하여 데이터가 경쟁적으로 전송되며, CFP 구간에서는 예약에 의해 비경쟁적 전송이 이루어진다. 즉, CFP 구간은 GTS(Guaranteed Time Slot)라는 일정한 크기의 시간 간격으로 나누어지며, 일반적으로 QoS(Quality-of-Service)를 요구하는 응용프로그램들의 신속한 프레임 전송을 보장하기 위하여 사용된다. QoS를 요구하는 응용프로그램은 데이터를 전송하기 전에 필요한 수의 GTS를 미리 예약하고, 승인된 GTS 구간에서만 데이터를 전송한다. 이를 위하여 GTS 전송을 원하는 노드들은 이전 슈퍼프레임의 CAP에서 PAN 조정자에게 GTS 서비스를 요청하며, 조정자는 GTS 서비스 요청에 대한 응답을 다음 슈퍼프레임의 시작을 알리는 비콘프레임을 이용하여 해당 노드들에게 알려 준다. 이와 같이 노드들의 GTS 사용에 대한 승인이 사용을 요청한 후 최소한 하나의 비콘프레임의 구간(BI: Beacon Interval) 뒤에 제공되기 때문에 실질적인 QoS 요구를 충족하기 어려운 점이 있다.

IEEE 802.15.4의 GTS 사용에 관련된 연구로는 [3]에서는 GTS 할당 지연시간과 GTS의 채널 이용을 분석하였다. 특히 GTS 서비스가 시작되기까지 발생하는 GTS 지연시간을 BO와 연계하여 분석하였으며 GTS 서비스 지연 시간이 너무 길기 때문에 실제적인 실시간 애플리케이션을 보장할 수 없다고 한다. [4]에서는 한정된 수의 GTS를 여러 장치들이 동시에 할당받아 효율적으로 사용할 수 있는 프로토콜을 제안하였다. GTS를 할당받은 장치들이 활용하지 않고 낭비하는 GTS 시간을 다른 장치들이 공유하여 사용할 수 있도록 암묵적인 할당 방법을 사용하였다. [5]는 GTS 서비스 지연과 에너지 소모와의 관계를 IEEE 802.15.4의 파라미터인 BO와 SO의 함수로 나타내는 네트워크 서비스 커브 모델을 제안하였다.

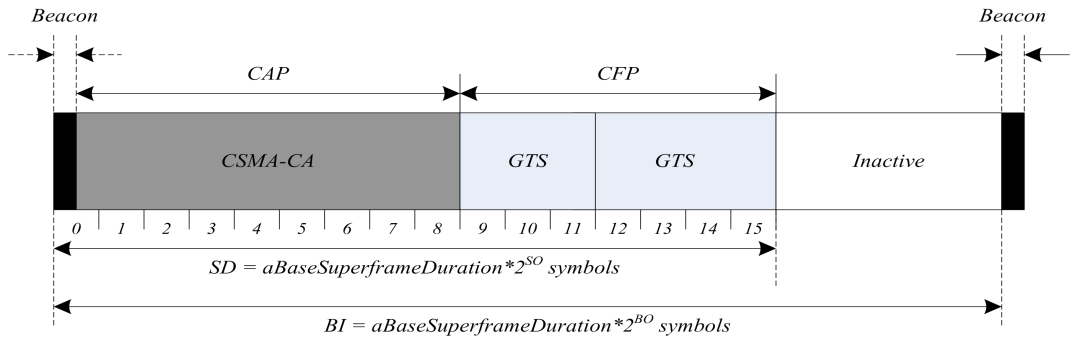
본 논문에서는 QoS를 요구하는 응용프로그램들의 보다 신속한 프레임 전송을 보장하기 위해 GTS 서비스 지연시간을 줄이는 GTS-FAT(GTS Fast Allocation Technique)라는 알고리즘을 제안한다. 이 방안의 핵심은 GTS 요청 프레임의 전송에 우선순위를 부여하는 것이다. 이를 위해 802.11e[6]와 같이 각 센서 노드의 내부에 2개의 분리된 대기열을 설정하여 GTS 서비스를 요청하는 프레임과 일반적인 데이터 프레임을 구별하여 저장하고 각 대기열에 서로 다른 CSMA-CA 파라미터를 부여한다. 또한 본 논문에서는 GTS-FAT 알고리즘의 성능을 분석하기 위하여 GTS 서비스 지연을 계산하는 분석적 모델을 소개한다. 이 방식에서는 기존의 802.15.4의 지연시간을 계산하기 위한 2차원 마코프 체인(Markov Chain) 모델과 두 개의 대기열에 서로 다른 CSMA-CA 파라미터를 채택한 802.11e 성능 모델을 결합하였다. 이러한 수학적 모델을 통하여 기존 802.15.4 표준과 GTS-FAT 방식의 성능을 비교한 결과, GTS-FAT은 기존 표준과 비교하여 GTS 서비스 요청지연시간을 최대 50% 줄일 수 있었다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 IEEE 802.15.4 표준을 소개하고 3장에서는 제안하는 GTS-FAT 알고리즘을 설명한다. 4장에서는 GTS 서비스 지연시간을 분석하기 위해 802.15.4 표준의 수학적 모델을 설명하고, 5장에서는 802.15.4의 성능 모델과 802.11e의 성능 모델을 조합한 GTS-FAT의 수학적 모델을 2차원 마코프 체인을 이용하여 설명한다. 6장에서는 수학적 모델링을 통한 FAT-GTS 방식과 기존 802.15.4의 방식의 성능을 비교한다. 마지막으로 7장에서는 결론 및 향후 연구 과제를 기술한다.

2. IEEE 802.15.4 표준

IEEE 802.15.4 표준은 LR-WPANs에 대한 물리계층과 MAC(Medium Access Control) 부계층을 정의한다. 802.15.4 표준의 POS(Personal Operating Space)는 10미터 정도이며 전력 공급이 제한된 장치들을 대상으로 하여 저전력 센서 네트워크에 적합하도록 규정하고 있다. 효율적인 에너지 사용을 위해 동작시간을 비콘프레임을 경계로 정의되는 슈퍼프레임 단위로 구분한다. 비콘프레임은 PAN 조정자가 전송하며, 802.11에서의 비콘프레임과 같이, 센서 노드들의 전송에 관련된 다양한 정보들을 제공한다. 예를 들어 비콘프레임의 주기를 결정하는 BO(Beacon Order)와 동작 구간의 길이를 결정하는 SO(Superframe Order) 등이 비콘프레임 내에 포함된다.

(그림 1)에서 보여주듯이 비콘프레임 구간 BI는 동작구간인 SD(Superframe Duration)와 비동작구간으로 구성되며, 비동작 구간에서는 트랜시버의 전원을 차단하여 에너지 소모를 줄인다. 동작 구간은 CAP와 CFP 구간으로 구성되며 CAP는 경



(그림 1) IEEE 802.15.4 표준에서 슈퍼프레임의 구조

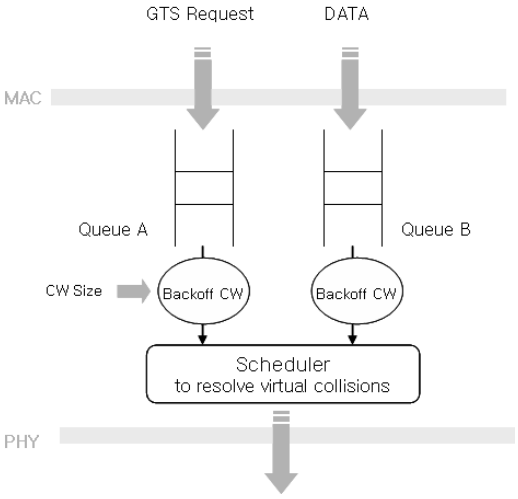
쟁 기반의 전송 방식을 제공하고 CFP는 비경쟁 기반의 전송 방식을 제공한다. $aBaseSuperframeDuration$은 SO가 0일 때의 슈퍼프레임의 동작 구간의 길이를 의미하며, 그 크기는 사용되는 주파수 대역에 의존한다. 동작구간은 비콘프레임 내에서 정의된 SO에 의해 그 길이가 정해지며, 16개의 동일한 시간 구간으로 구성된다. CAP 내에서는 데이터 전송을 원하는 센서 노드들이 CSMA-CA 알고리즘을 이용하여 경쟁적으로 전송한다. CFP 구간은 GTS 단위로 데이터를 전송할 수 있는데, 하나의 센서 노드는 최대 7개의 GTS를 할당 받을 수 있다.

노드들은 전송 초기 단계에서 $0 \sim 2^{BE}-1$의 임의로 결정되는 지연시간 BD(Backoff Delay)를 갖는다. 여기서 BE(Backoff Exponent)란 노드가 채널을 감지하기 전에 얼마나 많은 BD를 보내야 하는지를 결정하는 값이다. BD가 경과한 후, 노드들은 데이터를 바로 전송하지 않고 CCA(Clear Channel Assessment)단계에서 두 차례에 걸쳐 채널 상태를 감지한다. 이때 다른 센서 노드에 의해 프레임 전송이 이루어지고 있는 중이라면 채널을 사용 상태(busy state)라고 판단하고 NB(Number of backoff) 값을 1 증가시키며 CW(Contention Window) 값을 2로 재 초기화 한 후 다시 전송을 지연하는 단계로 진입한다. 여기서, CW는 채널을 감지하는 횟수, NB는 채널 감지 후에 전송이 지연된 횟수를 의미한다. 채널이 유휴 상태(idle state)로 감지되면 CW 값을 1 감소하고 다시 한 번 채널을 감지하게 된다. 두 번째 CCA에서도 채널이 유휴상태로 감지되면 비로소 프레임을 전송하며, 그렇지 않은 경우에는 첫 번째 CCA와 동일한 절차를 따른다. 이와 같이 IEEE 802.15.4 표준은 무선 LAN(Local Area Network)의 표준인 IEEE 802.11과 유사한 동작 원리를 갖지만, 지연시간마다 채널을 감지하는 방식 대신 무작위로 초기화된 지연시간인 BD가 경과한 뒤에 두 번의 채널 감지를 수행하는 차이가 있다.

3. GTS-FAT 방안

GTS 서비스는 일정한 대역폭 이상을 요구하는 QoS 응용 프로그램을 위해 고안되었음에도 불구하고, 실제적으로는 노드들이 GTS 배정을 조정자에게 요청하고 승인을 받기까지 소요되는 지연시간이 크기 때문에 QoS 응용프로그램에 적합하지 않다는 연구 결과들이 제시되고 있다[3,5].

이에 본 논문에서는 센서 노드가 일반 데이터 프레임과 GTS 요청 프레임을 동시에 전송하고자 할 때, GTS 전송 프레임을 우선적으로 전송하도록 함으로써 GTS 사용 요청과 승인과정에서 발생하는 지연을 최소화할 수 있는 GTS-FAT 방안을 제안한다. 이는 무선 LAN 상에서 QoS를 보장하기 위해 제안되었던 IEEE 802.11e 표준과 유사한 방식으로써, 센서 노드에서 전송할 프레임을 일반적인 데이터 프레임과 GTS 요청 프레임으로 분류한 다음 프레임을 종류에 따라 (그림 2)와 같이 각 센서 노드 내에 구현된 2개의 대기열 버퍼에 선택적으로 저장하여 대기하도록 한다. 이 때, 각 대기열은 서로 다른 CSMA-CA 파라미터를 갖는다. 즉, GTS 요청 프레임을 저장하기 위한 버퍼인 대기열 A의 최소 BE값($macMinBE$)을 일반 프레임을 위한 대기열 B의 최소 BE값보다 작은 값을 갖도록 함으로써, 채널을 사용함에 있어서 우선순위를 갖도록 한다. 또한 2개의 대기열의 프레임들의 지연 카운터가 동시에 0으로 되는 경우 가상 충돌 처리기(virtual collision resolver)에 의해 우선순위가 높은 GTS 요청 프레임의 전송을 보장한다.



(그림 2) GTS-FAT에서 도입한 센서노드 내의 2개의 대기열 버퍼

본 논문에서는 주어진 기간 동안 하나의 노드는 단 하나의 대기열에만 전송할 프레임을 갖는 것으로 가정한다. 즉, 몇 개의 노드들은 대기열 A에만 GTS 요청 프레임을 가지고 있으며 나머지 노드들은 대기열 B에만 일반 데이터 프레임들을 가지고 있는 것으로 한다. 이렇게 함으로써 GTS 요청 프레임으로 인한 통신부하의 비율을 일정하게 유지하는 것이 용이해지며, 나아가 성능을 비교함에 있어서 그 영향을 명확하게 분석할 수 있다. 이렇게 얻어진 결과는 한 노드에 있는 두 개의 대기열에 전송할 프레임이 있도록 하고 전송할 프레임들의 최소 BE값을 조절하여 GTS 요청 프레임으로 인한 통신부하의 비율을 일정하게 유지하는 것과 동일하다는 것을 밝혀둔다.

4. GTS 서비스 지연 모델

본 논문에서는 GTS 서비스 지연시간을 GTS 서비스 실행 단계에 따라 다음의 세 가지 지연시간으로 구분한다. 첫째는 CAP 구간에서 센서노드가 전송한 GTS 요청 프레임이 CSMA-CA 방식으로 경쟁을 통해 조정자에게 도착했을 때까지의 시간을 의미하는 GTS 요청지연시간($D_{request}$)이다. 둘째는 GTS 요청 프레임을 수신한 조정자가 다음 주기의 비콘프레임의 GTS Specification 필드를 사용하여 PAN 내의 모든 센서 노드들에게 GTS 할당 사실을 확인해주기까지의 시간인 GTS 확인지연시간($D_{confirm}$)이다. 마지막으로, GTS 서비스를 요청한 센서 노드들 중 조정자로부터 GTS를

할당 받은 노드들이 CAP 구간 동안을 기다려 자신에게 할당된 CFP 내의 GTS 구간에서 프레임을 전송하기까지의 시간이며, 본 논문의 모델에서는 T_{CAP}로 고정한다. 이렇게 세 단계의 지연 구간을 모두 더한 시간을 GTS 서비스 지연시간($D_{GTSservice}$)이라 하겠다.

4.1 GTS 요청지연시간($D_{request}$)

우선 $D_{request}$는 [7]에서와 같이 2차원 마코프 체인 모델을 이용하여 계산할 수 있다. 여기서는 각 전송 지연 단계에 있을 확률과 해당 전송 지연 단계에서 평균적으로 소요되는 시간을 계산한다. 즉, (그림 3)과 같이 세 개의 요소, 즉 전송할 프레임이 대기열의 맨 앞에 도착할 때까지의 시간 t, CSMA-CA 알고리즘을 수행하는 과정의 지연시간 $D_{CSMA-CA}$, 프레임이 매체를 통하여 센서 노드로부터 조정자까지 전송되는 시간 L_{req}로 계산된다. 이때 t는 프레임이 대기열의 맨 앞에 도착하는 시간으로 $D_{CSMA-CA}$를 계산할 때 직접적인 변수로 사용되지는 않지만 프레임을 전송할 수 있는 CAP 구간의 평균값으로 계산되어 적용된다. L_{req}는 두 번의 CCA 시간과 GTS 요청 프레임 전송시간, 조정자로부터 ACK 프레임을 전송받을 때까지의 시간, 그리고 프레임 간의 간격을 포함한다[3].

$$D_{request} = D_{CSMA-CA} + L_{req} \quad \text{(식 1)}$$

한편, 802.15.4 표준에서는 CAP에서 프레임을 전송하기 위하여 BD를 보낸 후, 현재 슈퍼프레임의 잔여 CAP 구간이 두 번의 CCA를 수행하고 프레임을 전송하기에 충분하지 않다면 다음 슈퍼프레임의 CAP로 전송을 미룬다. 이때에도 프레임의 전송시간에는 ACK 프레임의 수신시간까지 포함된다. 이러한 동작 방식을 CCA difference라고 한다. CCA difference가 일어날 확률인 P_{cd}와 일어나지 않을 확률인 P_{ncd}는 다음과 같이 계산된다[8].

$$P_{cd} = \frac{2CCA + Frame_{GTSreq} + ACK + IFS}{T_{CAP}} = \frac{L_{req}}{T_{CAP}} \quad \text{(식 2)}$$

$$P_{ncd} = 1 - P_{cd}$$

CCA difference가 발생하지 않은 경우의 GTS 요청지연시간(D_{ncdReq})과 CCA difference가 발생하는 경우의 GTS 요청지연시간(D_{cdReq})를 계산하면 (식 3)과 같다. 여기서 n_{cd}는 평균 CCA difference 횟수를 의미한다.

$$D_{ncdReq} = D_{CSMA-CA} + L_{req}$$
$$D_{cdReq} = n_{cd} BI - \frac{T_{CAP}}{2} + D_{ncdReq} \quad \text{(식 3)}$$

최종적으로 GTS 서비스를 요청하기 위해 지연된 시간($D_{request}$)에 관한 (식 1)은 CCA difference를 적용하여 (식 4)와 같이 변경될 수 있다.

$$D_{request} = P_{ncd} D_{ncdReq} + P_{cd} D_{cdReq} \quad \text{(식 4)}$$

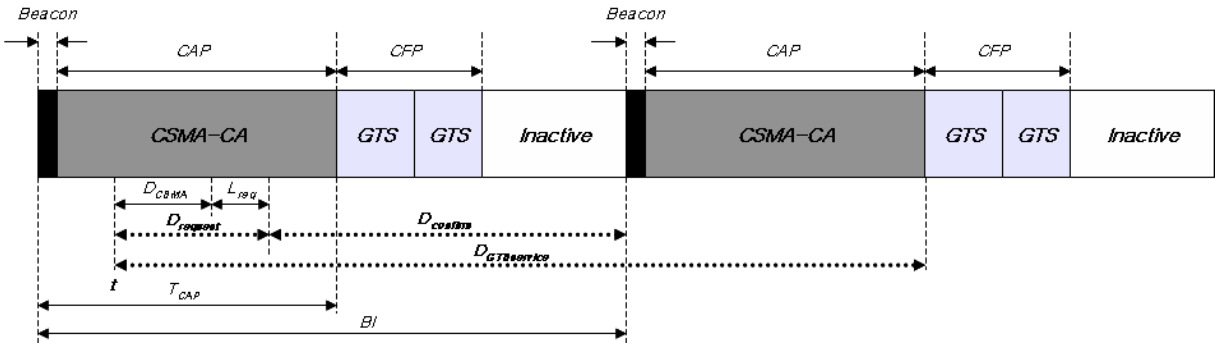
4.2 GTS 확인지연시간($D_{confirm}$)

한편 GTS 요청 프레임을 수신한 조정자는 현재 네트워크 환경에서 허용 가능한 GTS가 있는지 확인하여 GTS를 할당한 후 다음 주기의 비콘프레임에 GTS 할당에 관련된 정보를 알려준다. 따라서 CAP 내에서 GTS를 요청한 센서 노드들은 당시 슈퍼프레임의 잔여 CAP와 CFP 구간 및 비동작 구간이 경과하고 나서 그 다음 비콘프레임을 받아야 GTS를 이용한 통신 가능 여부를 알게 된다. 물론, 시스템 환경, 즉 프로세서의 종류와 프로그램 처리 방식, BO 등에 따라 실제로 지연되는 시간은 다를 수 있지만 일반적으로 각 노드들은 다음 슈퍼프레임의 CAP 구간이 경과한 뒤 CFP 구간 내의 할당받은 GTS에서 비로소 통신을 할 수 있게 된다.

최종적으로 GTS 요청에서 확인까지의 총 지연시간($D_{confirm}$)은 (식 5)와 같이 구할 수 있고, GTS 서비스 요청 프레임이 대기열의 맨 앞에 도착하고 난 후 GTS를 할당받아 해당 GTS 구간에서 데이터 프레임을 전송할 수 있는 최소 GTS 서비스 지연시간($D_{GTSservice}$)은 $D_{request}$와 $D_{confirm}$의 합에 경쟁 구간의 시간을 더해서 구할 수 있다.

$$D_{confirm} = \left(BI - \frac{T_{CAP} - D_{CSMA} - L_{req}}{2} \right) - D_{ncdReq} \quad \text{(식 5)}$$

$$D_{GTSservice} = D_{request} + D_{confirm} + T_{CAP}$$



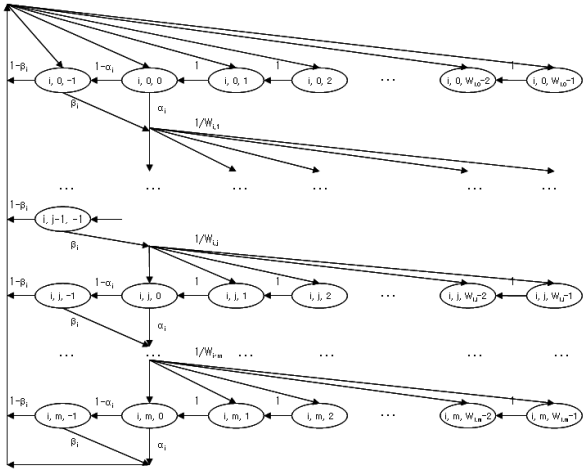
(그림 3) GTS 서비스 요청 지연 시간의 모델링

5. GTS-FAT 서비스 지연 모델

IEEE 802.15.4 표준이 제안된 이래 프로토콜의 성능은 주로 단위 시간 당 데이터 전송량으로 평가되어 왔으며, 성능 평가를 시뮬레이션에 의존하거나 많은 가정으로 인하여 비교적 정확도가 낮은 수학적 모델들이 사용되어 왔다. 이에 [9]에서는 IEEE 802.15.4 표준을 2차원 마코프 체인에 기반한 모델을 이용하여 정확한 분석을 시도하였으며, 본 논문에서의 성능 평가는 이와 유사한 (그림 4)의 모델을 기반으로 한다.

IEEE 802.15.4 표준은 어떤 우선순위 기법도 적용되지 않고 모든 센서 노드들은 동일한 우선순위로 채널에 접근한다. 본 논문에서는 IEEE 802.15.4에 IEEE 802.11e의 우선순위 방법론과 같이 모든 프레임들을 N개의 우선순위 그룹으로 분류하고 CSMA-CA 알고리즘을 실행하는 과정에서 각 우선순위 그룹에 서로 다른 파라미터를 적용하는 방법을 설명한다. 우리의 모델에서는 N을 2로 가정한다. (그림 4)는 하나의 센서 노드가 가질 수 있는 상태를 마코프 체인으로 표현하는데, 원은 센서 노드의 상태를, 화살표는 상태 천이를, 그리고 화살표 위의 수는 천이 확률을 의미한다. 원안의 세 개의 숫자 (i,j,k)는 각 노드의 상태를 구분하기 위해 사용되는데, i는 각 노드가 속한 우선순위 그룹$(i=0,..,N-1)$, j는 CCA 재시도 회수$(j=0,1,...,m)$, k는 무작위 지연 시간$(k=0,1,...,W_{i,j}-1)$을 의미한다. 이 때, m과 $W_{i,j}$는 최대 전송 지연 횟수와 우선순위가 i인 노드의 j번째 전송 지연단계에서 가질 수 있는 최대의 BD를 의미한다. 802.15.4 표준에서는 m의 기본 값인 최대 전송 지연 횟수 *macMaxCSMABackoffs*를 4로 규정하며, j번째 재시도에서의 BD를 의미하는 $W_{i,j}$는 (식 6)으로 표현된다. 여기서 *macMinBE*는 CSMA-CA 알고리즘에서 무작위 지연시간을 선택하는 최소 값을 의미한다. IEEE 802.15.4 표준에서는 BD를 결정하는 BE 값이 BD를 선택하는 최대값인 *macMaxBE*를 넘지 않도록 규정한다.

$$W_{i,j}=2^j 2^{macMinBE} \qquad \text{(식 6)}$$



(그림 4) 2차원 마코프 체인을 이용한 IEEE 802.15.4 모델

우선순위가 i인 센서 노드는 초기에 선택한 무작위 시간이 다 흐른 뒤, 꺼져 있던 트랜시버를 켜고 채널을 최대 두 번 감지하는데 첫 감지에서 채널이 사용 상태일 확률을 α_i로 정의하고, 첫 감지에서 채널이 유휴 상태$(1-\alpha_i)$라면 두 번째 감지를 수행하는데 이 때 채널이 사용 상태일 확률을 β_i로 정의한다. (식 7)은 (그림 4)에서 각 상태의 다양한 천이 확률을 요약한다.

$$\begin{cases} p\{i,j,k|i,j,k+1\}=1,\ j\in(0,m),\ k\in(0,W_{i,j}-2) \\ p\{i,j,-1|i,j,0\}=1-\alpha_i,\ j\in(0,m) \\ p\{i,j,k|i,j-1,0\}=\alpha_i/W_{i,j},\ j\in(1,m),\ k\in(0,W_{i,j}-1) \\ p\{i,j,k|i,j-1,-1\}=\beta_i/W_{i,j},\ j\in(1,m),\ k\in(0,W_{i,j}-1) \end{cases} \qquad \text{(식 7)}$$

(식 7)의 상태 천이 확률을 이용하여 우선순위가 i인 센서 노드가 데이터를 전송할 수 있는 확률 γ_i를 구하면 (식 8)과 같다. 여기서 $W_{i,0}$는 우선순위가 i인 노드의 초기 BD를 의미하며, p_i는 전송을 지연할 확률로써 $p_i=\alpha_i+(1-\alpha_i)\beta_i$이다.

$$\gamma_i=\frac{2(1-\alpha_i)(1-\beta_i)(1-2p_i)(1-p_i^{m+1})}{W_{i,0}(1-p_i)[1-(2p_i)^{m+1}]+(1-2p_i)(3-2\alpha_i)(1-p_i^{m+1})} \qquad \text{(식 8)}$$

본 논문에서 제안하는 GTS-FAT 방안을 수학적으로 분석하기 위해서 네 개의 대기열을 갖는 802.11e의 성능을 분석하는 것[10]과 같이 각 센서 노드에 존재하는 2개의 대기열에 대해 각각 2차원 마코프 체인을 이용하여 모델링하였다. 즉, 우선순위가 높은 GTS 요청 프레임을 위한 대기열 A와 일반 데이터 프레임을 위한 대기열 B는 서로 상이한 지연시간 관련 파라미터를 가지므로, (식 8)에서의 γ_i은 (식 9)와 같이 대기열 A에 속한 데이터를 전송할 확률 γ_A와 대기열 B에 속한 데이터를 전송할 확률 γ_B로 구분된다. (식 9)에서 W_A와 W_B는 각각 대기열 A와 대기열 B에 저장된 프레임에게 생성 초기에 주어질 무작위 지연시간을 의미한다.

$$\begin{cases} \gamma_A=\dfrac{2(1-\alpha_A)(1-\beta_A)(1-2p_A)(1-p_A^{m+1})}{W_A(1-p_A)[1-(2p_A)^{m+1}]+(1-2p_A)(3-2\alpha_A)(1-p_A^{m+1})} \\ \gamma_B=\dfrac{2(1-\alpha_B)(1-\beta_B)(1-2p_B)(1-p_B^{m+1})}{W_B(1-p_B)[1-(2p_B)^{m+1}]+(1-2p_B)(3-2\alpha_B)(1-p_B^{m+1})} \end{cases} \qquad \text{(식 9)}$$

대기열 A, B에 각각 속한 프레임을 전송하기 위한 첫 번째 CCA에서 채널이 사용 상태라고 판단할 확률 α_A와 α_B는 (식 10)으로 정의된다.

$$\begin{cases} \alpha_A=1-(1-\gamma_A)^{n_A-1}(1-\gamma_B)^{n_B-D} \\ \alpha_B=1-(1-\gamma_A)^{n_A}(1-\gamma_B)^{n_B-1} \end{cases} \qquad \text{(식 10)}$$

(식 10)에서 n_A와 n_B는 각각 대기열 A와 B에 해당하는 프레임을 전송하려는 센서 노드의 수를 의미하는데, (식 10)은 두 가지 경우, $n=n_A=n_B$ 와 $n=n_A+n_B$ 경우를 기술한다. $n=n_A=n_B$의 경우는 하나의 센서 노드에 속한 대기열 A와 대기열 B에 전송할 데이터가 항상 존재하는 경우로 이때 (식 10)의 D의 값은 1을 갖는다. 즉, (식 10)의 α_A는 임의의 대기열에서 데이터를 보내고 있는 확률로써 1에서 아무도 데이터를 보내지 않는 확률을 뺀 값이다. 아무도 데이터를 보내지 않을 확률은 자기 노드의 대기열을 제외한 (n_A - 1)개의 대기열 A와 (n_B - 1)개의 대기열 B에서 전송이 일어나지 않고 있어야 한다.

반면에 $n=n_A+n_B$의 경우는 하나의 센서 노드 내에 전송할 데이터 프레임이 대기열 A나 대기열 B 둘 중 하나에만 존재하는 경우를 의미하는 것으로써 이 때에는 D의 값이 0이 된다. 즉 이 경우의 α_A는 자신의 대기열 B에는 전송할 프레임이 없기 때문에 n_B개의 대기열 B 모두와 자신을 제외한 (n_A - 1)개의 노드들이 데이터를 전송하고 있지 않아야 한다.

이상과 같은 수식을 이용하여 n_i를 우선순위 i인 그룹의 노드 수라고 할 때, 우선순위가 i인 센서 노드가 CCA 단계에서 채널이 사용 상태라고 감지할 확률 $p_{i,b}$는 다음과 같이 계산된다.

$$p_{i,b}=1-\left((1-\gamma_i)^{(n_i-1)}\prod_{h=0,h\neq i}^{N-1}(1-\gamma_h)^{n_h}\right)^2 \qquad \text{(식 11)}$$

본 논문의 제 4장에서는 IEEE 802.15.4 표준의 GTS 서비스 지연에 대한 일반적인 모델을 $D_{request}$, $D_{confirm}$, $D_{GTSservice}$로 구분하여 설명하였다. 여기서는 $D_{request}$의 일부로써 GTS 서비스 요청 프레임을 전송하기 위하여 CSMA-CA 알고리즘을 실행하는 단계의 지연시간인 $D_{CSMA-CA}$에 우선순위를 적용하여 $D_{i,CSMA-CA}$를 구하는 방법을 논의한다.

$D_{i,CSMA-CA}$는 총 지연시간 중 우선순위에 가장 크게 영향을 받는 부분이다. 우선순위가 i인 센서 노드가 전송하고자 했던 GTS 요청 프레임이 CCA 단계에서 채널이 사용 상태로 감지되어 $j-1$회에 걸쳐 연속적으로 전송에 실패하고 j번째 시도에서야 성공적으로 전송하는 시점까지의 누적된 단계별 BD와 W_i의 평균은 다음과 같이 구한다. 이때 $k_{i,j}$는 j번째 시도에서야 프레임이 전송될 확률을 나타낸다.

$$W_i=\sum_{h=0}^{j}(W_{i,h}-1)/2 \qquad \text{(식 12)}$$
$$E[W_i]=\sum_{j=0}^{m}k_{i,j}W_i$$

$$k_{i,j}=\frac{p_{i,b}^{j}(1-p_{i,b})}{1-p_{i,b}^{m+1}} \qquad \text{(식 13)}$$

(식 12)의 $E[W_i]$에는 BD만이 포함되었을 뿐이며 각 단계에서의 CCA 실행 시간은 적용되지 않았다. 따라서 $D_{i,CSMA-CA}$를 계산하기 위해서는 각 BD 단계에서의 평균 CCA 실행 시간이 필요하다. $E[N_{i,CCAFail}]$은 우선순위가 i인 센서 노드가 각 BD 단계까지 수행하게 되는 CCA 재시도 회수의 평균을 나타내고 $E[N_{i,CCA}]$는 임의의 BD 단계에서의 평균 CCA 회수를 의미하며, 모든 노드는 기본적으로 첫 번째 CCA를 수행하고 나서 $(1-\alpha_i)$의 확률로 두 번째 CCA를 수행한다.

$$E[N_{i,CCAFail}]=\sum_{j=0}^{m}\frac{jp_{i,b}^{j}(1-p_{i,b})}{1-p_{i,b}^{m+1}} \qquad \text{(식 14)}$$

$$E[N_{i,CCA}]=1+(1-\alpha_i) \qquad \text{(식 15)}$$

우선순위가 i인 센서 노드가 프레임을 전송하려 할 때의 CSMA-CA 알고리즘 실행 지연시간인 $D_{i,CSMA-CA}$는 (식 16)과 같이 구할 수 있다. 이 때 σ와 T_{CCA}는 각각 무작위 지연시간의 단위시간과 CCA 수행 시간을 나타낸다.

$$D_{i,CSMA}=E[X_i]\sigma+E[N_{i,CCAFail}]E[N_{i,CCA}]T_{CCA} \qquad \text{(식 16)}$$

따라서 (식 3)~(식 5)는 최종적으로 (식 17)과 같이 정리된다.

$$D_{i,ncdReq}=D_{i,CSMA-CA}+L_{req} \qquad \text{(식 17)}$$

$$D_{i,cdReq}=n_{cd}BI-\frac{T_{CAP}}{2}+D_{i,ncdReq}$$

$$D_{i,request}=P_{ncd}D_{i,ncdReq}+P_{cd}D_{i,cdReq}$$

$$D_{i,confirm}=\left(BI-\frac{T_{CAP}-D_{i,CSMA}-L_{req}}{2}\right)-D_{i,ncdReq}$$

$$D_{i,GTSservice}=D_{i,request}+D_{i,confirm}+T_{CAP}$$

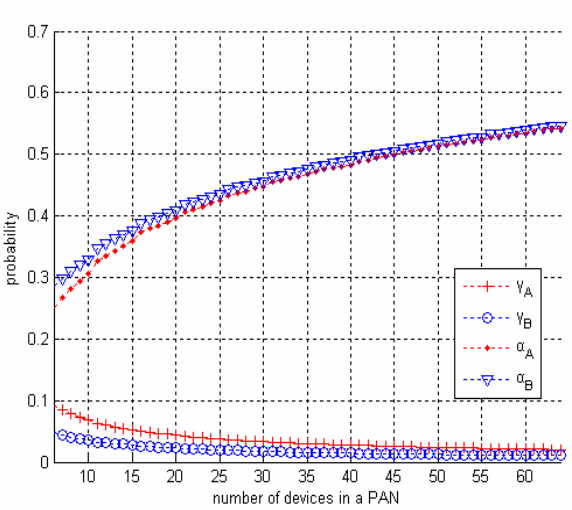
6. GTS-FAT 성능 분석

본 절에서는 제 4, 5장에서 제안한 모델의 정확성을 평가한다. <표 1>은 제안된 모델에 대한 성능을 평가하기 위한 IEEE 802.15.4 표준에서 정의된 파라미터들의 설정 값을 보여준다. 대기열 A와 대기열 B의 우선순위에 차별을 두기 위해 대기열 A의 *macMinBE*의 값을 1 또는 2로 변화를 주고 대기열 B의 *macMinBE*의 값은 3으로 고정하였다. 또한 SO와 BO는 각각 2와 3으로 설정하였으며 패킷 길이는 헤더를 포함하여 83 Bytes로 하였다. 지연시간의 비교에서 일반 데이터 프레임과 GTS 요청 프레임의 비율은 8:2로 설정하였다. 이 가정은 GTS 할당이 빈번히 발생하지 않는다는 실제 상황과는 매우 다를 수 있지만 보다 높은 우선순위를 갖는 데이터에 대한 전송지연시간 감소라는 성능 분석상의 편의를 위해 전제된 것이다.

〈표 1〉 수학적인 분석을 위한 파라미터 집합

Parameters	Value
Packet Payload	70 Bytes
MAC header	7 Bytes
PHY header	6 Bytes
ACK	11 Bytes
Channel Bit Rate	250 Kbps
SIFS Period	21.5 symbols
LIFS Period	40 symbols
Ack_timeout	54 symbols
macMinBE	1~3
aMaxBE	5
macMaxCSMA	4
Beacon Order	3
Superframe Order	2

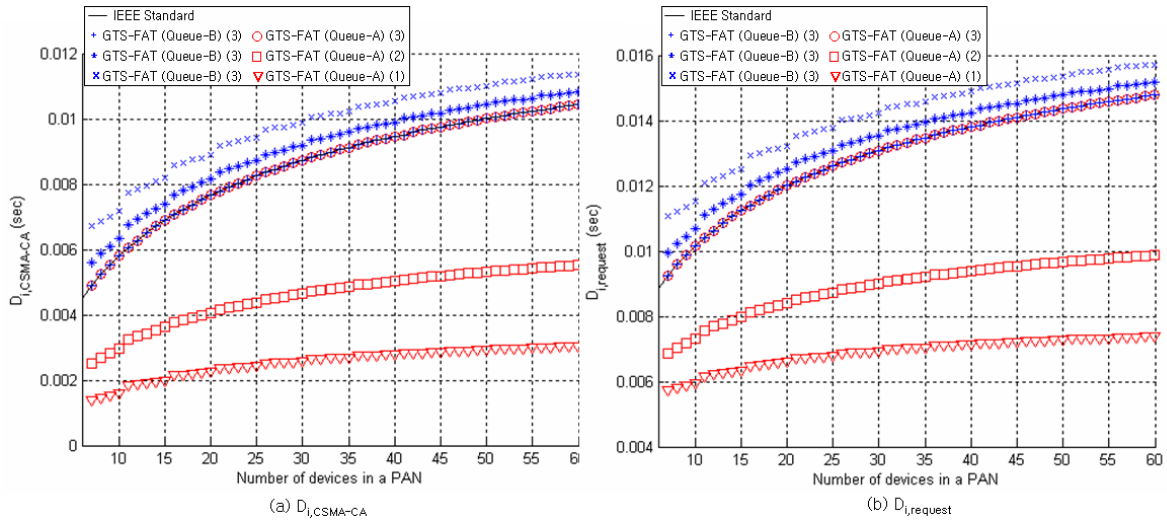
(그림 5)는 대기열 A의 *macMinBE*의 값을 2로 설정하였을 때의 PAN 내에 존재하는 센서 노드의 수에 따른 전송 확률 γ_A와 γ_B, 그리고 첫 번째 CCA 단계에서 채널이 사용 상태라고 판단할 확률 α_A와 α_B 값의 변화를 보여준다. x축은 노드의 수를, y축은 확률을 나타낸다. 그래프에서 보듯이 대기열 A가 대기열 B에 비해 전송 확률(γ)은 더 높고 채널이 사용 상태로 감지될 확률(α)은 더 낮다. 예를 들어 10개의 노드가 프레임을 전송하려할 때, $\gamma_A = 0.07$, $\gamma_B = 0.04$, 그리고 $\alpha_A = 0.31$, $\alpha_B = 0.33$을 나타낸다. 그러나 PAN 내에 존재하는 센서 노드의 수가 많아지면서 두 확률은 각각 대기열의 구분 없이 거의 같아진다. 이는 (식 10)에서와 같이 노드의 수가 지수로 사용되는 확률의 계산에서 적은 수의 노드는 각 대기열의 데이터를 전송하고 있지 않을 확률에 영향을 크게 미치



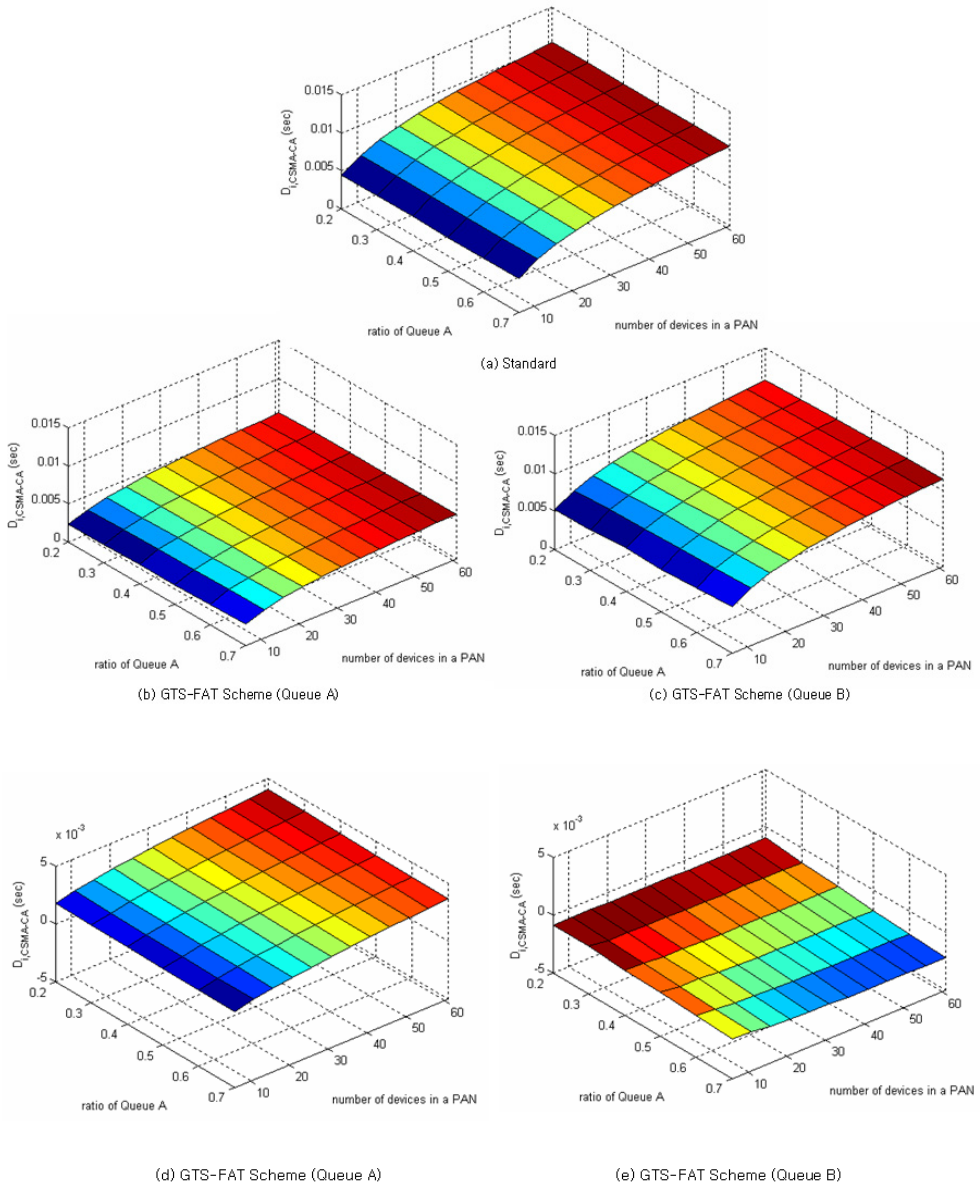
(그림 5) GTS-FAT 방안에서의 전송 확률

지만, 센서 노드의 수가 증가함에 따라 이로 인한 영향이 작아져 최종 결과에 있어 거의 차이가 나지 않기 때문이다.

(그림 6-(a))는 CSMA-CA 지연시간인 $D_{i,CSMA-CA}$가 802.15.4 표준과 GTS-FAT 방안의 경우 *macMinBE* 값에 따라 변화하는 추이를 보여준다. x축은 노드의 수를, y축은 $D_{i,CSMA-CA}$를 나타낸다. 우선 하나의 대기열만을 사용하는 802.15.4 표준과 GTS-FAT 방안에서의 두 대기열의 경우 모두 PAN 내에 존재하는 센서 노드의 수가 증가할수록 $D_{i,CSMA-CA}$가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 그러나 GTS-FAT 경우에는 *macMinBE* 값을 작게 설정한 대기열 A의 지연시간이 표준의 지연시간에 비해 더 작게 나타났으며, 반대로 대기열 B의 지연시간은 표준에 비해 더 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. 또한 대기열 A의 *macMinBE* 값을 더 작게 할수록 그 차이가 더 커진다. 예를 들어 PAN 내에 노드의 수가 60개인 경우 *macMinBE*=2인 대기열 A는 표준에 비해 47.1%, *macMinBE*=1인 대기열 A는 표준에 비해



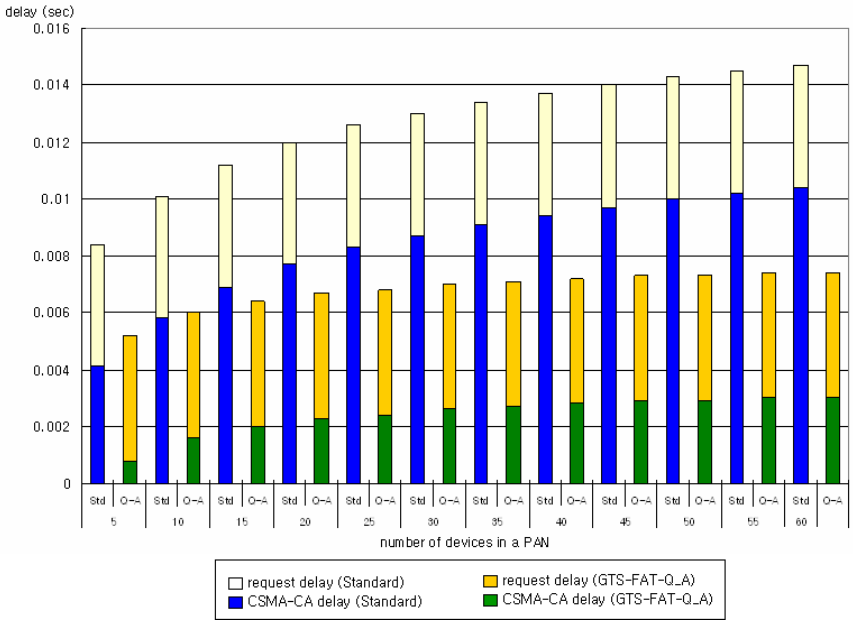
(그림 6) GTS 요청지연시간 (표준 및 GTS-FAT 방안)



(그림 7) 대기열 A와 대기열 B의 비율에 따른 CSMA-CA지연시간

71.2%의 지연시간을 감소시키고 있고, 대기열 A의 각 *macMinBE* 값에 따른 대기열 B는 지연시간이 각각 3.8%, 9.6% 증가되고 있다. 이는 표준에서의 *macMinBE* 값과 새로운 방안에서의 대기열 B의 *macMinBE* 값이 같더라도 대기열 B의 프레임들은 대기열 A와의 채널 경쟁에서 탈락해 다시 무작위 지연으로 들어가게 되어 표준에 비해 요청 지연이 길어지기 때문이다. (그림 6-(b))는 GTS 서비스 요청지연시간인 $D_{i,request}$를 보여준다. 제안된 GTS-FAT 방안은 대기열 A의 *macMinBE*가 1이고 노드 수 60인 경우에 데이터 전송 지연은 6.1%정도 증가하였으나 $D_{i,request}$는 최대 50%까지 감소하는 것을 볼 수 있다.

(그림 7)은 전송할 프레임이 있는 전체 센서 노드 중 대기열 A와 대기열 B의 비율에 따른 $D_{i,CSMA-CA}$를 보여주고 있다. 전체 노드 중 대기열 A를 사용하는 노드의 비율을 20%에서 70%까지로 변화를 주면서 지연시간을 확인한 결과 모든 경우에 대기열 A의 지연시간이 더 짧게 나타났으며 두 개의 대기열 모두 대기열 A를 사용하는 노드의 비율이 커짐에 따라 $D_{i,CSMA-CA}$가 조금씩 길어지고 있다. (그림 7-(b))의 대기열 A는 전체 노드 수가 10일 때 최소와 최대 비율에 대해 약 15.6%, 전체 노드 수 60에서는 5.4%의 차이가 있고 (그림 7-(c))의 대기열 B는 전체 노드 수 10에서 13.4%, 노드 수 60에서 5.5%의 차이가 있어 대기열 A의 노드 비율에 따른 감소 비율이 더 크게 나타나고 있다. (그림 7-(d,e)는 802.15.4 표준과 비교하여 대기열 A와 대기열 B의 $D_{i,CSMA-CA}$값의 성능이득(그림 7-(d))과 성능 손실(그림 7-(e))을 각각 보여준다.



(그림 8) 표준 및 GTS-FAT 방안의 GTS 서비스 요청지연과 CSMA-CA지연

(그림 8)은 *macMinBE*가 1일 때 CCA difference를 최대 1번으로 제한한 상황에서의 $D_{i,CSMA-CA}$와 $D_{i,request}$를 802.15.4 표준과 GTS-FAT의 대기열 A를 비교하여 보여준다. x축은 802.15.4 표준과 대기열 A의 전체 노드 수를 나타내며 y축은 지연시간을 나타낸다. 각 막대는 GTS 서비스 요청을 위한 지연시간 $D_{i,request}$를 의미하며 막대의 아래 부분은 GTS 서비스 요청을 위한 $D_{i,CSMA-CA}$를 의미한다. 전체적으로 보면 PAN 내에 있는 센서 노드의 수가 증가할수록 802.15.4 표준과 새로운 방안 모두 $D_{i,request}$가 증가하며, 이 때 $D_{i,CSMA-CA}$의 비율이 더 빠른 상승을 보이고 있다. 그러나 802.15.4 표준에 비해 GTS-FAT 방안에서 전체 요청지연시간 중 $D_{i,CSMA-CA}$의 비율이 상대적으로 낮게 나타나며 그 시간도 더 짧다는 것을 확인할 수 있다. 예를 들어 PAN 내 전체 노드의 수가 60개인 경우, 표준에서의 $D_{i,CSMA-CA}$의 비율은 전체 요청지연시간의 70.7%를 차지하고 있지만 GTS-FAT의 대기열 A에서의 비율은 40.5%이며 $D_{i,CSMA-CA}$ 시간도 각각 0.0104초와 0.003초로 대기열 A에서 더 짧게 나타난다. 이는 GTS를 요청할 때 표준의 경우에 비하여 GTS-FAT 방안에서는 평균적으로 더 적은 무작위 지연시간을 보내기 때문에 $D_{i,CSMA-CA}$는 물론 전체 지연시간을 줄여주고, 이로 인해 QoS를 요구하는 데이터에 더 유용하게 적용될 수 있음을 보여준다. 노드 수가 60개에 이르면 $D_{i,CSMA-CA}$는 표준에 비해 71.2%까지 지연을 줄이는 결과를 보이고 있다.

7. 결론 및 향후 연구 과제

한정된 전원의 근거리 네트워크를 위해 IEEE에서는 802.15.4 표준을 제정하였다. 이 표준에서 배타적으로 채널을 할당하는 GTS 서비스는 GTS 요청 프레임을 CSMA-CA 방식으로 CAP 내에서 전송해야 하므로 이에 대한 요청 전송 지연 때문에 실제적으로는 빠른 반응 시간을 요구하는 QoS 응용프로그램에 적합하지 않다. 본 논문에서는 GTS 서비스 지연시간을 분석하고 이를 줄이기 위한 GTS-FAT 방안을 제안하였다. GTS-FAT 방안은 CSMA-CA 알고리즘으로 인해 발생하는 지연시간을 줄이기 위해 GTS 요청 프레임에게 우선순위를 부여하는 방식을 사용한다. 제안한 방안은 기본적인 IEEE 802.15.4 표준과 성능을 비교하였을 때 CSMA-CA 알고리즘을 수행하는데 소요되는 지연시간을 최대 71.2%까지 줄일 수 있다. 향후에는 제안한 방안의 시뮬레이션을 통한 분석과 PAN 내의 트래픽 양에 따라서 CSMA-CA 알고리즘의 *macMinBE* 등 파라미터 초기 값이 네트워크 성능에 미치는 영향에 대하여 분석할 것이다. 이를 이용하여 동적으로 네트워크의 상황을 판단하여 적응적으로 CSMA-CA 알고리즘의 파라미터를 조정하는 방안에 대하여 연구할 계획이다.

참 고 문 헌

[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] IEEE 802.11 WG, Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specification, 1999.

[3] W. Kwak, and J. Lee, “Performance Analysis of IEEE 802.15.4 GTS Mechanism,” in Proc. KICS 2007, Jul. 2007.

[4] Anis Koubaa, André Cunha, Mário Alves, Eduardo Tovar, “An implicit GTS allocation mechanism in IEEE 802.15.4

for time-sensitive wireless sensor networks: theory and practice", Springer Real-Time Systems Journal, Vol.39, Numbers 1-3, pp.169-204, August 2008.
[5] Anis Koubaa, Mário Alves, Eduardo Tovar, "Energy/Delay Trade-off of the GTS Allocation Mechanism in IEEE 802.15.4 for Wireless Sensor Networks" International Journal of Communication Systems, Vol.20, No.7, pp.791-808, July 2007.
[6] IEEE Std 802.11e-2005 Amendment 8: Medium Access Control (MAC) Quality of Service Enhancements, 2005.
[7] P. Chatzimisios, A. C. Boucouvalas and V. Vitsas, "IEEE 802.11 Packet Delay - A Finite Retry Limit Analysis," in Proc. GLOBECOM'03, pp.950-954, Dec. 2003.
[8] J. Misic, V. Misic, and S. Shafi, "Performance of IEEE 802.15.4 Beacon Enabled PAN with Uplink Transmissions in Non-Saturation Mode-Access Delay for Finite Buffers," in Proc. BROADNETS'04, pp.416-425, Oct. 2004.
[9] J. Zheng and M. J. Lee, A Comprehensive Performance Study of IEEE 802.15.4, IEEE Press Book, Wiley Interscience, Chapter 4, 2006.
[10] Y. Xiao, "An Analysis for Differentiated Services in IEEE 802.11 and IEEE 802.11e Wireless LANs," in Proc. IEEE ICDCS'04, pp.32-39, March 2004.

신 연 순

e-mail : ysshin@dgu.edu
1999년 동국대학교 전산통계학과(학사)
2002년 동국대학교 정보통신공학과(공학석사)
2007년~현 재 동국대학교 정보통신공학과 박사과정
관심분야 : 컴퓨터 구조, 임베디드 시스템, 무선 통신, 센서 네트워크 등

안 종 석

e-mail : jahn@dgu.edu
1983년 서울대학교 전자공학과(학사)
1985년 KAIST 전기 및 전자공학과 (공학석사)
1985년~1989년 삼성전자 주임연구원
1995년 USC(University of Southern California)컴퓨터공학과(공학박사)
1995년~1996년 삼성전자 선임연구원
2001년~2002년 USC/ISI 교환연구원
1996년~현 재 동국대학교 컴퓨터공학과 교수
관심분야 : 네트워크 시뮬레이션, 무선 통신, 라우팅 알고리즘, 센서 네트워크 등

이 강 우

e-mail : klee@dgu.edu
1985년 연세대학교 전자공학과(학사)
1991년 USC(University of Southern California)컴퓨터공학과(공학석사)
1997년 USC 컴퓨터공학과(공학박사)
1998년~현 재 동국대학교 정보통신공학과 부교수
관심분야 : 컴퓨터 구조, 임베디드 시스템, 센서 네트워크 등