

무선 센서네트워크에서 QoS 지원을 위한 패킷 우선순위 기법

이윤석*

A Packet Prioritization Scheme for supporting QoS in Wireless Sensor Networks

Yunseok Rhee *

요약

본 논문은 B-MAC 기반 센서네트워크에서 전송 패킷의 우선순위에 따른 차별화된 채널 선점권을 지원하기 위해, 프리앰블과 전송대기 시간을 활용한 패킷 우선순위화 기법을 제안한다. 이 기법은 높은 우선순위의 패킷의 전송 대기 시간을 줄이고 무선 채널의 선점을 보장하여 패킷 전달시간을 비롯한 QoS를 지원하고 센서 네트워크 전체의 무선 채널 사용에 대한 효율성 제고를 목적으로 한다. 이를 위해 무선 센서 네트워크에서 널리 사용되어지고 있는 TinyOS 기반 MAC 계층(B-MAC)에 다중 전송 큐를 설계하고 프리앰블 형식을 수정 설계하였다. 이를 통해 패킷의 우선순위에 따라 차등적 백오프를 적용할 경우, 상위 패킷의 전송시간을 82-88% 가량 단축시켜 긴급 어플리케이션의 실시간성을 확보할 수 있음을 뒷받침하였다.

Abstract

In this paper, we propose a packet prioritization scheme using preamble signal and backoff time which is designed to provide a differentiated channel occupation with a packet priority in wireless sensor networks. This scheme aims at enabling QoS such as fast delivery of high priority packets by reducing their backoff time as well as thus securing higher channel occupation. We expect that it could also improve the channel utilization of the entire network by avoiding unnecessary channel contention. For the purpose, we add new features of multiple queue and preamble modification to the TinyOS based B-MAC. This scheme achieves 82-88% reduction in delivery time of high priority packets, thus it enables realtime support for urgent applications.

▶ Keyword : 센서 네트워크(sensor network), QoS(Quality of Service), MAC 계층(MAC laer), 프리앰블(preamble), 패킷 우선순위화(packet prioritization), B-MAC

• 제1저자 : 이윤석

• 투고일 : 2009. 12. 04, 심사일 : 2009. 12. 11, 게재확정일 : 2010. 01. 26.

* 한국외국어대학교 전자정보공학부 교수

※ 이 논문은 2008년도 한국외국어대학교 학술연구비 지원에 의하여 이루어진 것임.

I. 서론

다양한 센서와 소형 프로세서를 결합한 센서 노드들이 자율적인 네트워크를 형성하여 특정 지역의 환경, 생태, 보안, 이동상태 등을 모니터링하는 무선 센서네트워크가 활발히 개발되고 있다. 이들 무선 센서네트워크에서는 다수의 센서 노드가 주변 환경 정보를 센싱하여 처리한 후 사용자가 원하는 정보를 사용자와 통신이 가능한 싱크 노드에게 전달한다. 이러한 정보를 이용하여 환경 모니터링, 자연재해와 같은 긴급 상황의 감지, 물체의 이동경로 추적 등 다양한 분야에서 응용할 수 있다. 특히 재해 상황의 감지 등과 같은 응용에서는 해당 정보(또는 이벤트)가 신속하고, 신뢰성 높게 전달될 필요가 있는데, 이를 위해 데이터의 중요도에 따라 (또는 우선순위에 따라) 차별화된 처리 기술이 필요하지만, 현재 대부분의 센서네트워크에서는 이를 지원하지 않고 있다. 특히 무선 센서네트워크에서 이와 같은 차별화 기술을 구현하기 어려운 이유는 무선 매체의 잦은 품질 변화와 무선 노드 간의 잦은 충돌로 인해 안정된 전송을 보장하기 어렵다는 것이다.

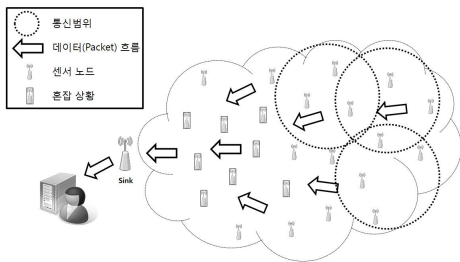


그림 1. 무선 센서네트워크 구성과 동작 상황
Figure 1. Construction and operation case of a WSN

[그림 1]에서 보는 바와 같이 무선 센서 네트워크에서는 보통 한정된 자원을 가진 노드들이 넓은 지역에 분포되어 있고, 통신을 위해 무선 채널을 공유한다. 또한 통신 가능한 전파 범위가 한정되어있기 때문에, 목적지 노드까지 여러 홉에 걸쳐 데이터 전송이 이루어진다. 특히 일반적으로 데이터를 생성한 노드로부터 목적지 노드까지 전송하는 과정을 상세히 살펴보면, 패킷을 전달하는 각 노드들 내에서의 데이터 처리시간, 전송 큐 대기시간, 무선 채널의 사용을 위한 백오프 지연시간, 전송 실패에 따른 재전송 시간 등으로 인해 전달 지연시간이 발생한다. 이 가운데 전달 지연시간을 증가시키는 가장 큰 원인으로 네트워크의 혼잡 상황을 들 수가 있다. 무선 센서 네트

워크의 특성 상 다수의 노드들에서 하나 혹은 소수의 싱크 노드로 데이터를 전송하므로 싱크 노드에 가까운 노드나 데이터가 비교적 많이 생성되는 지역에서는 패킷 수신이 집중되고, 이는 자연스럽게 네트워크의 혼잡 상황을 가져온다. 이런 지역적 혼잡 상황의 경우 한 노드 내에서의 전송 큐 대기, 패킷을 전송하려는 노드들 사이의 채널 사용을 위한 경쟁, hidden terminal 문제 등으로 인한 전송 실패로 전송 지연 시간이 더욱 증가한다[1]. 이러한 무선 센서 네트워크의 환경적, 기술적 특성으로 인해 QoS(quality of service) 제공이나 효율적인 패킷 전송을 하는데 어려움이 있다. 그럼에도 불구하고, 최근에는 무선 센서 네트워크의 응용 분야가 더욱 다양해지고 있으며, 데이터 특성에 따른 QoS를 제공할 필요가 있다[2].

위와 같은 배경에 근거하여, 본 논문에서는 미국 Berkeley 대학에서 개발한 센서노드용 운영체제인 TinyOS[3]에 구현된 B-MAC[4,5] 기반 센서네트워크에서 패킷우선순위 서비스 지원 기법을 제안하고자 한다. 제안하는 패킷우선순위 서비스 지원 기법은 전송 큐를 개선하여 전송 큐 대기시간을 감소하고, 노드들이 자신의 정보(다음에 전송할 패킷우선순위 정보)를 알려 MAC Layer에서 지역적인 네트워크 상황(이웃노드들이 전송하려는 패킷우선순위 정보)을 고려한 상대적인 패킷우선순위 순서에 따라 백오프 시간을 효율적으로 적용하여 백오프 지연시간 감소 및 네트워크의 전체적인 무선 채널 사용에 대한 효율성 높이고, 우선순위가 높은 패킷의 전달시간 향상 및 신뢰성을 보장하고자 한다.

II. 관련 연구

2.1 B-MAC

B-MAC이 제안되기 전까지 센서 네트워크의 MAC 프로토콜의 흐름은 S-MAC, T-MAC 등과 같이 Control Packet을 사용하여 동기를 맞춘 상태에서 동일한 시간에 깨어나서 데이터를 송/수신하고 일정한 시간동안 대기(sleep) 상태를 유지하여 에너지 소모를 절약하는 동기 방식의 복잡한 알고리즘이 대세를 이루었다. 하지만 동기 방식으로 동작하는 무선 센서 네트워크 MAC 프로토콜은 동기를 맞추기 위해 주기적으로 제어패킷(control packet)을 주고, 받기 때문에 프로토콜 오버헤드가 크며 송/수신에 참여하지 않는 노드들도 일정한 시간 동안 수신 대기(idle listening) 상태를 유지하기 때문에 이로 인한 에너지 낭비가 크다는 단점이 있다.

이와 달리 B-MAC 프로토콜은 비동기 방식으로 동작하는 대표적인 무선 센서 네트워크 MAC 프로토콜로서 LPL(low

power listening) 기법을 사용한다. LPL은 동기방식의 MAC 프로토콜들이 동일시간에 깨어나서 일정한 시간동안 수신 상태를 유지하여 발생하는 수신대기 시간을 최소화하며, 시간동기를 맞추기 위해 사용되던 제어패킷을 제거하고 간단한 프리앰블(preamble) 신호로 노드들이 서로 데이터를 송/수신하는 동기를 맞추도록 하였다.

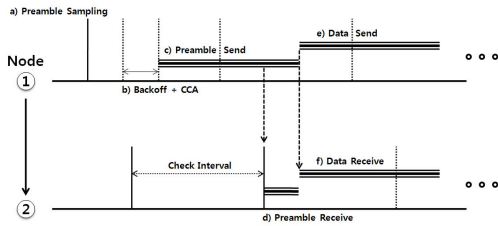


그림 2. B-MAC의 데이터 송수신 과정
Figure 2. Data send/receive procedure in B-MAC

[그림 2]는 B-MAC의 동작 과정을 보이는데, 센서 네트워크를 구성하고 있는 각 노드는 일정한 확인 간격(check interval)으로 프리앰블을 샘플링함으로써 이웃 노드들 중 데이터를 전송하고자 하는 노드가 있는지 확인하고 잡음 기준(noise floor)을 평가한다. 전송할 데이터가 있는 노드는 충돌 회피를 위하여 백오프 이벤트(backoff event)를 발생시키고 상위 어플리케이션에서 백오프값(backoff value)을 반환한다. 만약 백오프 이벤트를 무시하게 되면 임의의 짧은 백오프를 사용하게 된다. 백오프값이 설정되면 무선 채널이 사용 가능한 idle 상태인지를 효과적으로 평가하기 위해 단순한 low pass filter 기능이 구현된 CCA(clear channel assessment) 알고리즘을 수행하며 설정된 백오프값을 감소해 나가게 된다. 무선 채널이 사용 가능한 idle 상태이면 노드는 확인 간격보다 긴 프리앰블을 송신하여 자신이 전송하고자 하는 데이터가 있음을 알리게 되고 이웃 노드들은 임의의 시간에 깨어나더라도 프리앰블을 수신할 수 있게 된다. 이러한 과정을 통하여 노드 사이에 동기를 맞추고 데이터 프레임 송/수신하게 된다.

2.2 기존 연구사례

RAP[6]에서는 실시간 데이터 전송을 위한 프로토콜 아키텍처를 제안하였다. 패킷의 실시간성의 정도를 판별하기 위해 속도(velocity, 목적 노드까지의 거리 / 데드라인 시간)의 개념을 이용한다. 소스 노드에서 싱크 노드까지의 거리가 멀고, 패킷의 도착 한계시간인 데드라인이 짧을수록 패킷의 우선순위가 높도록 설정한다. 노드는 속도 수준(velocity level)에 따라 몇 개의 우선순위 큐를 두어 패킷을 수신했을 때 이 패킷의

속도에 알맞은 큐에 삽입한다. 높은 우선순위 큐에 있는 패킷부터 전송을 하는데 GPSR(greedy perimeter stateless routing) 방식으로 패킷을 전송할 다음 이웃 노드를 결정한다. 그리고 노드들 간의 패킷 전송에 있어서도 우선순위를 보장하기 위하여, 우선순위 MAC을 통하여 패킷을 전송한다. CSMA 방식의 MAC을 이용할 때 패킷 전송 시도 전에 백오프 시간을 갖는데 이 백오프 시간 설정을 현재 전송할 패킷의 속도를 기반으로 결정하는 방식을 사용한다. 이러한 방식은 높은 우선순위의 패킷의 무선 채널 선점의 확률은 높여줄 수 있지만 항상 보장하지는 않는다. 그리고 네트워크상에 낮은 우선순위의 패킷이 주류를 이루는 상황에서는 무선 채널을 사용하기 위해 항상 큰 범위에서 백오프 시간을 임의로 선택하게 되므로 무선 채널 사용의 효율성을 떨어뜨린다. 또한 Fusion[7]은 기존 센서 네트워크에서 제안된 일련의 혼잡 제어 기술들을 일부 변형하여 실제 하드웨어를 이용하여 검증한 연구이다. 큐 점유율을 이용하여 혼잡 정도를 판단하고 노드가 혼잡 상황이면 패킷의 혼잡 상황 알리는 필드에 값을 설정하고 전송하여 자식 노드들에게 알리게 된다. 자식 노드들은 overhearing를 통해 부모 노드의 혼잡 상황을 알게 되고, 패킷 전송을 줄이게 된다. 그리고 혼잡상황인 노드에게 짧은 백오프 시간을 설정하여 혼잡상황인 노드의 패킷 처리량을 늘려 혼잡 상황을 벗어날 수 있게 혼잡 제어를 수행한다. 이 방법은 혼잡상황에 따라 전체적인 흐름을 조절하는 기능을 제공하고 있지만, 본 연구와 같이 각 패킷의 우선순위에 따라 네트워크 사용권한을 차별화하여 궁극적으로 응용에 따른 서비스의 차별화를 실현할 수는 없다.

한편 SPEED[8]에서는 stateless non-deterministic geographic forwarding 방식의 전송 지연시간을 짧게 하는 라우팅 프로토콜을 제안한다. 모든 노드들은 주기적으로 beacon 메시지를 이웃노드들에게 전송하여 beacon 메시지의 round-trip 시간을 이용하여 이웃 노드까지 전송 지연 시간을 측정한다. 패킷을 전송할 때에는 이웃노드와 목적 노드까지의 거리가 현재 노드와 목적노드까지의 거리보다 짧고 이웃 노드의 속도 즉 (목적 노드까지의 거리/이웃노드까지 전송하는 데의 지연시간)이 패킷이 요구하는 최소 속도보다 큰 이웃 노드들 중에서 속도에 따라 가중치를 부여한 후 이에 기반으로 확률적으로 패킷을 전송할 다음 노드를 결정한다. 따라서 목적 노드까지의 거리가 가깝고 전송지연 시간이 적을수록 높은 확률로 패킷을 전송할 수 있게 된다. 지역적 혼잡 상황이 발생으로 모든 이웃 노드로의 전송 지연 시간이 증가하여 패킷의 최소 요구 속도를 보장할 수 없는 경우나 모든 이웃 노드의 목적노드까지의 거리가 현재 자신의 노드와 목적 노드 사이의 거리보다 긴 경

우에는 back pressure 메시지를 브로드캐스팅 하여 현재 노드가 제대로 패킷을 전송할 수 없음을 알린다. SPEED는 전송 지연 시간과 목적 노드까지의 거리를 기반으로 전송경로를 설정하는데 프로토콜의 동작은 beacon 메시지를 통한 이웃노드에 대한 정보유지에 의존적이다. 따라서 beacon 메시지 주기 사이에 일어나는 혼잡상황에 대해서는 즉각적인 반응이 힘든 문제가 발생한다. 실제 네트워크의 상황을 실시간적으로 반영하기 위해서는 beacon 메시지를 잦은 주기로 교환하여야 하는데 이는 네트워크에 부담을 줄 수 있다.

III. 제안하는 패킷우선순위화 기법

3.1 우선순위 지원을 위한 패킷 형식

본 연구에서 노드들 간 데이터 통신을 위해 TinyOS 1.x에서 제공하는 TOS_Msg Format을 활용하였다(9). [그림 3]은 본 연구를 위해 새로운 필드들이 추가된 Packet Format 이다. 패킷우선순위 서비스제공을 위해 priority(1byte)와 pinversion(1byte)을 추가하였고 성능 평가를 위해 pseqnum(2byte)과 sendTime(8byte)이 추가되었다. priority(1byte)는 패킷의 우선순위에 관한 정보들을 관리하기 위해 2가지의 정보를 상위 4bit과 하위 4bit에 나누어 저장하게 된다. 상위 4bit에는 노드의 정보를 알리기 위해 다음에 전송될 패킷의 우선순위 정보를 담는데 이러한 정보는 큐의 점유율을 이용하여 획득하게 된다. 하위 4bit은 현재 패킷의 우선순위 정보를 담는다. pinversion(1byte) TinyOS기반의 송/수신 처리과정에서 발생할 수 있는 높은 우선순위 패킷에 대한 데이터 처리지연을 개선하기 위해 사용된다. pseqnum(2byte)은 우선순위별 패킷 손실률을 평가하기 위해 사용되고, sendTime(8byte)은 패킷의 전달시간을 평가하기 위해 사용된다.

TOS_Msg Format (36bytes)								
addr (2bytes)	type (1byte)	group (1byte)	length (1byte)	priority (1byte)	pseqnum (2bytes)	pinversion (1byte)	data (25bytes)	crc (2bytes)

MultihopMsg Format (25bytes)				
sourceaddr (2bytes)	originaddr (2byte)	seqno (2bytes)	hopcount (1byte)	data (18bytes)

SurgeMsg Format (18bytes)				
type (1byte)	reading (2bytes)	parentaddr (2bytes)	sendTime (8bytes)	data (5bytes)

그림 3. 우선순위화를 지원하기 위한 패킷 형식
Figure 3. Packet format for prioritization support

본 연구에서 패킷의 우선순위는 각 노드에서 주기적으로 발생하는 각 센서노트의 패킷을 중요도에 따라 4개의 우선순

위로 분류하고, priority 0, 1, 2, 3로 설정한다고 가정한다 (priority 0가 최상위 우선순위). 해당 우선순위는 TOS_Msg의 priority 필드에 하나의 비트로 처리하기 위해 1, 2, 4, 8과 같은 한 비트로 표현할 수 있는 값을 설정한다. 패킷의 우선순위는 응용 특성에 따라 사용자가 적용 기준을 달리하여 설정할 수 있다.

3.2 우선순위에 따른 정적 백오프 적용

MAC Layer에서 패킷우선순위를 고려한 서비스를 지원하기 위해서는 패킷의 우선순위에 따라 백오프 시간을 차별화하여 설정해 주어야 한다. 본 연구에서 높은 우선순위 패킷에 대한 백오프 지연시간 감소 및 무선 채널을 선점하게 하는 방안으로 먼저 고려한 것은 B-MAC에서 정의한 DRBR(default random backoff range, 기본 백오프 범위)를 기반으로 하되, 전송 패킷의 우선순위에 따라 차별적으로 백오프 범위를 설정하는 정적 백오프 범위(static backoff range, SBR)기법을 생각하였다 ([그림 4] 참조).

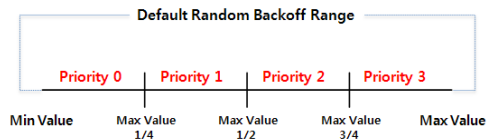


그림 4. 우선순위에 따른 SBR 적용 범위
Figure 4. Static backoff ranges with priorities

SBR을 적용하게 되면, 패킷 전송 전에 우선순위별로 차별화된 백오프 시간을 설정함으로써 우선순위가 높은 패킷의 무선 채널 선점을 보장하게 된다. 이러한 방식은 높은 우선순위 패킷이 전송 전 무선 채널을 사용하기 위해 대기하는 백오프 지연 시간이 감소하게 되고 패킷의 전달시간을 항상 시킬 수 있다.

하지만 전송하려는 패킷의 우선순위만 고려한 SBR은 무선 센서 네트워크상에 낮은 우선순위패킷들이 주류를 이루는 상황에서 낮은 우선순위 패킷은 높은 우선순위 패킷의 채널 선점을 보장하기 위해 항상 무선 채널을 사용하기 전 일정한 크기 이상의 백오프 시간을 가지게 되어 불필요한 지연시간이 발생하게 되고, 오히려 네트워크 전체에 대한 무선 채널 사용의 효율성을 저하시키는 문제점이 있다.

3.3 Overhearing을 통한 패킷우선순위 결정

앞서 설명한 SBR은 최상위 우선순위 패킷의 전달시간 향상을 보장하지만, 전송하려는 패킷의 우선순위만을 고려하여 백오프 시간을 설정할 경우 무선 센서 네트워크 전체에 대한 무선 채널 사용의 효율성을 저하시키는 문제점을 지닌다. 이

러한 문제점을 개선하기 위해서 각 노드들은 자신의 정보를 알고 통신 가능한 범위내의 이웃 노드들의 정보를 알 필요가 있다. 이와 같은 지역적인 네트워크 상황을 판단하기 위해 overhearing을 이용한 패킷우선순위 정보 교환 기법을 제안한다.

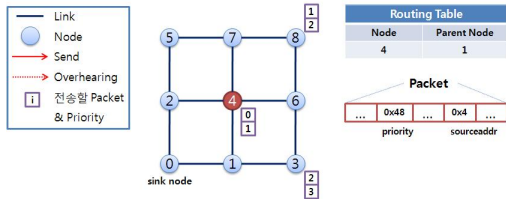


그림 5. NNIT Update 과정 : 1단계
Figure 5. NNIT Update procedure: Step 1

B-MAC에서는 노드가 송신할 패킷이 있을 때 무선 채널을 선점하게 되면 프리앰블 신호를 통해 통신 가능한 범위내의 노드들에게 송신할 패킷이 있다는 것을 알리고 패킷을 송신하게 된다. 이 신호를 수신한 노드들은 송신한 패킷을 수신할 수 있게 되는데 송신하는 패킷의 목적지 노드가 아니라도 송신하는 패킷을 overhearing 할 수 있다. 이러한 특성을 이용하여 각 노드들이 패킷을 송신할 때마다 3.1절에서 정의한 패킷 형식의 priority 필드(상위 4bit)에 다음에 전송될 패킷의 우선순위 정보를 담아 패킷을 송신하면 각 노드들은 다음에 전송할 패킷의 우선순위 정보를 알게 되고, 통신 가능한 범위내의 이웃노드들이 전송할 패킷의 우선순위 정보를 알 수 있다.

본 논문에서는 통신 가능한 범위내의 이웃 노드들이 전송하려고 하는 패킷우선순위 정보를 관리하기 위해 NNIT(neighbor nodes information table)을 정의하고 MAC 계층에 반영하였다. 각 노드는 수신하거나 overhearing한 패킷의 sourceaddr 필드(이웃 노드의 주소 정보)와 priority 필드(상위 4bit : 다음에 전송될 패킷우선순위정보)를 이용하여 NNIT를 업데이트 하고 정보를 관리하게 된다. 이러한 과정을 그림으로 살펴보면, [그림 5]는 그리드 형태의 토폴로지에서 노드 4가 무선 채널을 선점한 상황이다.

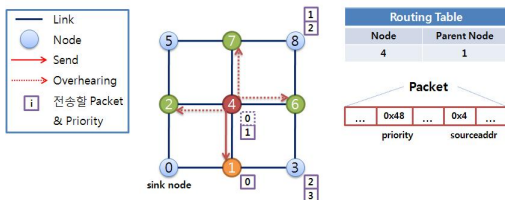


그림 6. NNIT Update 과정 : 2단계
Figure 6. NNIT Update procedure: Step 2

노드 4의 부모 노드는 노드1이고, 노드 4는 다중 우선순위 전송큐(multiple priority queue)에 priority 0, 1인 패킷이 있다. 노드 4는 큐 점유율 정보를 이용하여 다음에 전송될 패킷의 우선순위가 priority 1임을 알게 되고, priority 필드에 정보를 담아 패킷을 전송한다. 노드 4가 다음에 전송될 패킷우선순위 정보를 담아 송신하게 되면, [그림 6]에 보이는 바와 같이 통신 가능한 범위내의 있는 노드들 중 노드 1은 송신한 패킷의 목적지 노드이므로 패킷을 수신하게 되고, 노드 2, 6, 7은 패킷을 overhearing 하게 된다.

노드 4가 송신한 패킷을 수신하거나 overhearing 한 노드들 중 [그림 7]에 보이는 노드 1과 노드 6의 NNIT의 변화를 살펴보면, sourceaddr 필드의 정보를 이용하여 패킷을 송신한 노드의 주소가 노드 4임을 알 수 있고, priority 필드의 상위 4bit을 이용하여 노드 4가 다음에 전송될 패킷의 우선순위가 priority 1임을 알 수 있게 되어 노드 1, 6의 NNIT를 업데이트 하게 된다.

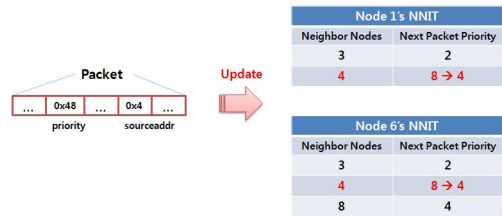


그림 7. NNIT Update 과정 : 3 단계
Figure 7. NNIT Update procedure: Step 3

이러한 과정을 통해서 각 노드들은 통신 가능한 범위내의 이웃 노드들이 전송하려는 패킷의 우선순위정보를 알 수 있게 되고, 이를 관리할 수 있다. 만약 다음에 전송될 패킷이 없다면 priority 필드의 상위 4bit에 0을 담아 전송하게 되므로 이웃 노드들 중 전송할 패킷이 없는 상황도 알 수 있다.

3.4 동적 백오프 적용

전송하려는 패킷의 우선순위만 고려하여 백오프 시간을 설정하게 되면, 전체적인 네트워크의 무선 채널 사용의 효율성이 떨어지게 된다. 그러므로 3.3절에서 제안한 overhearing을 이용한 패킷우선순위 정보를 교환 기법을 적용하면 각 노드들은 지역적인 네트워크 상황, 즉 통신 가능한 이웃 노드들이 전송하려는 패킷의 우선순위 정보를 알 수 있어 전송하려는 패킷의 우선순위와 비교하여 패킷우선순위의 상대적인 순서를 판단할 수 있다. 이렇게 비교된 상대적인 패킷순위를 Order 0 - Order 4까지로 정의하고, 지역적인 네트워크 상황에 맞게 Order에 따라 차별화된 동적 백오프 범위(dynamic backoff

range.)를 적용할 수 있다. DBR 기법에 의해 설정되는 백오프 시간은 [그림 8]에 보이는 바와 같다.

DBR 기법은 3.2절에서 정의한 DRBR을 지역적인 네트워크 상황에 맞게 비교된 Order에 따라 차별적으로 설정하는 방법이다. [그림 8]의 범위 값으로 현재는 B-MAC이 사용하는 DRBR의 1/2의 범위에 해당하는 짧은 범위를 사용했지만, 실제로는 어플리케이션이나 무선 센서 네트워크 상황에 맞게 달리 설정 할 수 있다.

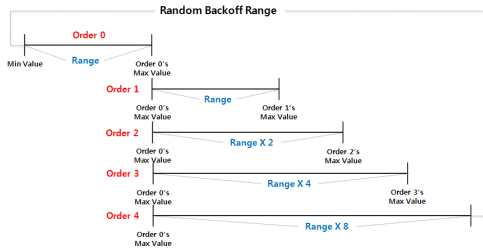


그림 8. Order에 따른 DBR 설정 방법
Figure 8. DBR setting with orders

DBR 설정 특징을 살펴보면, 비교된 상대적인 패킷우선순위 순서에 따라 Order 0은 짧은 범위 내의 임의값(random value)을 갖도록 백오프 시간을 설정하고, Order i는 Order i-1의 값에 일정한 값을 증가시켜, 그 범위 안에서 임의값과 Order 0에 설정한 최대값을 더하여 백오프 시간을 설정하게 한다. 이러한 방법으로 백오프 시간을 설정하게 되면 기본적으로 Order 0의 무선 채널 선점을 보장하고, 나머지 Order는 순서에 따라 평균적으로 보다 짧은 백오프 시간이 설정되어 무선 채널을 선점할 수 있는 기회를 높여주게 된다. 본 논문에서 제안한 동적 백오프 범위(DBR) 적용 기법은 전송하려는 패킷의 우선순위만을 고려하지 않고, 지역적인 네트워크 상황에 따라 백오프 시간 설정이 동적으로 변하게 된다. 이러한 적용 기법은 높은 우선순위 패킷의 무선 채널 선점을 보장한다. 또한 낮은 우선순위의 패킷도 상황에 따라 효율적으로 백오프 시간을 설정하게 되고 통신 가능한 범위내의 노드들이 전송할 패킷이 없다면 패킷의 우선순위에 상관없이 Order 0에 해당하는 짧은 백오프 시간이 설정되므로 네트워크의 전체적인 무선 채널 사용 효율성을 높인다.

3.5 Packet Priority Inversion 처리

패킷우선순위 서비스를 제공하는 상황에서 높은 우선순위의 패킷이 노드의 전송 큐에 삽입되어 있지만 낮은 우선순위의 패킷에 대한 내부적인 송신 처리 과정이 완료되기 전까지 높은 우선순위의 패킷은 내부적인 데이터 처리 지연시간이 발생하게 된다. 낮은 우선순위의 패킷에 설정된 백오프 시간이

클수록 이웃 노드들이 무선 채널을 선점할 확률이 높아져 그만큼 지연시간은 더 늘어나게 된다.

본 연구에서 이러한 PPI(packet priority inversion) 현상을 방지하기 위해서는 TinyOS의 내부적인 송/수신 처리과정의 개선을 위해 다음과 같은 과정을 제안한다.

- 1) Radio Stack에서 패킷 수신 시 내부적인 송신 처리과정이 진행 중인지 확인
- 2) 내부적인 송신 처리과정이 진행 중이면, 수신된 패킷의 우선순위와 진행 중인 패킷의 우선순위를 비교
- 3) 수신된 패킷의 우선순위가 높으면, 처리 중인 패킷의 설정된 백오프 시간을 초기화 및 pinversion 필드의 값을 1로 설정하여 송신 처리 과정의 완료를 전송 큐에 알림
- 4) 전송 큐는 패킷의 pinversion 필드 값을 확인하여, 1이면 해당 패킷을 제거하거나 재전송 여부를 판단하지 않고 전송 큐에 삽입되어 있는 높은 우선순위의 패킷을 송신하기 위해 내부적인 송신 과정을 진행

IV. 실험 및 성능 평가

4.1 실험 환경

본 논문에서 제안한 기법들의 성능 평가를 위해 무선 센서 네트워크의 시뮬레이션에 적합한 TinyOS 상에서 동작하는 TOSSIM 시뮬레이터를 사용하였다. TOSSIM은 nesC 언어로 작성된 응용 프로그램을 사용자 PC 상에서 센서 노드들의 동작을 시뮬레이션해주는 시뮬레이터이다. 실험을 위해 구현한 응용 프로그램은 각 노드들이 싱크 노드로 데이터로 전송하는 Collection 프로그램인 Surge를 기반으로 하였다.

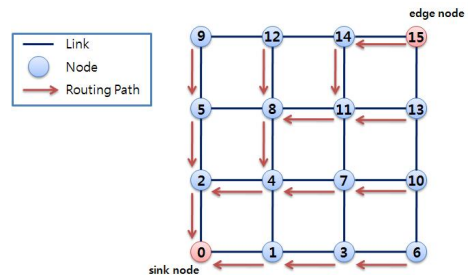


그림 9. 실험 토폴로지의 예 (4x4 그리드)
Figure 9. Example of experiment topology (4x4 grid)

실험에 적용된 토폴로지는 [그림 9]와 같이 그리드(grid) 형태로 배치하고, 하나의 노드는 한 홉의 통신거리에 최소 2개에서 최대 4개의 이웃 노드들을 갖게 된다. 전송 큐 및 MAC

계층에서 효율적인 패킷 처리를 평가하기 위해 라우팅 프로토콜은 배제하고 고정된 라우팅 경로를 사용하였다.

표 1. 실험환경과 설정값
Table 1. Experiment environment and parameters

분류	내용
Simulator	TOSSIM
TinyOS version	ver 1.1.15
Platform	Mica (ATmega128)
Radio model	CC1000
Topology	6 × 6 Grid, 8 × 8 Grid
Parameter	Max Retransmit Count : 15
	Queue Size : 256
Initial condition	모든 노드는 one-hop 통신이 가능하다.
	무선통신에 대한 bit error 는 없다.

실험 환경을 정리하면 [표 1]과 같다. 시뮬레이션 토폴로지 구성 시 모든 노드는 한 홉 통신이 가능하고, 패킷 전송 중 데이터의 비트에러와 같은 데이터 오류에 의한 패킷 손실은 없도록 설정하였다. 패킷 손실이 발생하는 경우는 패킷간의 충돌에 의한 최대 재전송 카운트 초과에 의한 drop 및 전송 큐 overflow에 의한 drop 이다.

시뮬레이션 상에서 노드에 대한 기본 설정은 다음과 같다. 각 노드의 부팅시간은 싱크 노드(node 0)의 부팅시간 기준으로 순서대로(node 1부터) 2.5초 간격으로 부팅하도록 설정하였다. 패킷의 발생 주기는 모든 노드가 동일하게 설정하였고 6×6 grid 토폴로지에서는 4.7초마다, 8×8 grid 토폴로지에서는 9초마다 한번 발생하게 하였다. 노드들이 발생하는 패킷의 우선순위는 에지 노드를 제외한 모든 노드들은 3.1.2절에서 정의한 분류 기준에 맞추어 임의로 발생하고, 에지 노드는 패킷을 발생할 때마다 priority 0, 1, 2, 3의 순으로 반복적으로 발생하게 하였다.

실험을 통한 성능 평가 지표는 에지 노드에서 싱크 노드까지 패킷 전달시간(packet delivery time) 과 에지노드에서 전송한 패킷의 우선순위 별 패킷 손실률(packet loss rate) 이다. 패킷 전달시간을 측정하기 위하여 TOSSIM에서 제공하는 tos_state.tos_time을 사용하여, 에지 노드에서 패킷을 전송하기 전 측정된 시간과 싱크 노드에 패킷이 도착한 시간의 차이를 이용하여 패킷 전달시간을 평가한다. 패킷 손실율은 패킷의 우선순위 별로 계산하기 위해 에지 노드에서 priority 별 발생한 패킷 수에서 싱크 노드에 우선순위 별 수신된 패킷 수의 차를 이용하여 우선순위 별 패킷 손실 수를 구하여 싱크 노드에 우선순위 별로 수신된 패킷 수로 나누어 우선순위 별 패킷 손실률을 평가한다.

4.2 성능 평가 및 결과 분석

4.1절에서 설명한 성능 평가 지표를 분석하기 위해 본 논문에서는 4가지의 비교 대상을 6×6, 8×8 그리드 토폴로지 환경에 적용하여 실험하였다. 4가지의 비교 대상은 아래와 같이 각 적용기법에 따른 백오프 시간 설정은 [표 2]와 같다.

- 1) Single FIFO Queue + DRBR 적용
- 2) Multiple Priority Queue + Priority SBR 적용
- 3) Multiple Priority Queue + Differentiated DBR 적용
- 4) Multiple Priority Queue + Differentiated DBR + PPI 개선 적용

표 2. 적용기법에 따른 백오프 시간 설정
Table 2. Backoff time setting with applying scheme

	적용 기법에 따른 Backoff 시간 설정 범위(Range)			
	Priority 0	Priority 1	Priority 2	Priority 3
Default Random Backoff Range	0.65 ms ~ 100 ms			
Priority Static Backoff Range	0.65 ms ~ 25 ms	25 ms ~ 50 ms	50 ms ~ 75 ms	75 ms ~ 100 ms
Differentiated Dynamic Backoff Range				
Order 0	0.65 ms ~ 50 ms			
Order 1	50 ms ~ 100 ms			
Order 2	50 ms ~ 150 ms			
Order 3	50 ms ~ 250 ms			
Order 4	50 ms ~ 450 ms			

6×6, 8×8 grid 토폴로지 환경에 4가지 비교 대상을 적용한 실험 결과를 살펴보면, 모든 노드가 주기적으로 패킷을 발생하는 상황에서는 패킷 충돌에 따른 재전송에 의한 지연시간, 전송 큐 대기 지연시간, 백오프 지연시간, 노드내의 데이터 처리에 의한 지연시간 등의 지연요소들이 발생하게 된다.

무선 센서 네트워크 환경에서 일반적으로 사용되는 Single FIFO Queue + DRBR을 적용한 경우는 지연 요소들 중 전송 큐 대기 지연시간이 크게 발생하게 된다. [그림 10]와 [그림 11]에 보이는 패킷 전달시간의 차이는 싱크 노드까지의 홉 수와 전체적인 노드 수가 증가 하였고, 큐 점유율 상태가 6×6 토폴로지에서는 에지 노드의 패킷을 포워딩하는 노드 중 한 노드의 큐 점유율이 약 50% 정도인 상황이고, 8×8 토폴로지에서는 거의 95% 정도인 상황에 의한 전송 큐 대기 지연 시간이 발생한 경우이다. 백오프 시간 설정은 모든 패킷이 같은 범위 안에서 랜덤하게 설정되므로 패킷의 우선순위에 상관없이 같은 지연요소들을 갖게 되고, 패킷 전달시간은 거의 유사하다.

Multiple Priority Queue + Priority SBR을 적용하게 되면 지연요소 중 높은 우선순위 패킷에 대한 전송 큐 대기 지연시간 및 백오프 지연시간이 감소하게 된다. 우선순위가 높은 패킷일수록 전송 큐에서 전송기회를 우선적으로 갖게 되고, 짧은 백오프 시간이 설정되어 무선 채널을 선점할 수 있게 된다.

패킷 전달시간 측면에서 Single FIFO Queue + DRBR을 적용한 경우보다 priority 0, 1, 2에 대한 패킷 전달시간의 향상을 볼 수 있다. 하지만 최하위 우선순위의 패킷은 전송 큐 대기 지연시간 및 항상 일정한 크기 이상의 백오프 시간 설정으로 인해 전송 지연요소가 더 크게 발생하여 패킷 전달시간의 편차가 크게 나타난다.

표 3. 적용기법별 패킷 손실율 (6x6 그리드)
Table 3. Packet losses with applying schemes (6x6 grid)

Packet Loss Rate				
비교 대상	Priority 0	Priority 1	Priority 2	Priority 3
Single FIFO Queue + Default Random Backoff	0 %	0 %	0 %	0 %
Multiple Priority Queue + Priority Static Backoff	12 %	3 %	0 %	0 %
Multiple Priority Queue + Differentiated Dynamic Backoff	10 %	14 %	5 %	7 %
Multiple Priority Queue + Differentiated Dynamic Backoff + Packet Priority Inversion 개선	9 %	9 %	10 %	12 %

표 4. 적용기법별 패킷 손실율 (8x8 토폴로지)
Table 4. Packet losses with applying schemes (8x8 grid)

Packet Loss Rate				
비교 대상	Priority 0	Priority 1	Priority 2	Priority 3
Single FIFO Queue + Default Random Backoff	0 %	0 %	0 %	0 %
Multiple Priority Queue + Priority Static Backoff	9 %	0 %	0 %	0 %
Multiple Priority Queue + Differentiated Dynamic Backoff	9 %	7 %	0 %	4 %
Multiple Priority Queue + Differentiated Dynamic Backoff + Packet Priority Inversion 개선	7 %	0 %	2 %	0 %

차별화된 DBR을 적용한 경우는 지역적인 네트워크 상황을 고려하여 상황에 맞게 동적으로 백오프 시간을 설정하므로 모든 우선순위 패킷에 대한 전체적인 백오프 지연시간이 감소하게 된다. Priority SBR을 적용한 경우와 비교해 보면 priority 0, 1, 2에 대한 패킷 전달시간은 유사한 성능을 나타내며 토폴로지가 커질수록 패킷 전달시간이 더욱 향상됨을 볼 수 있다. 최하위 우선순위의 패킷 전달시간 편차도 크게 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 또한 PPI 현상에 대한 TinyOS상의 내부적인 송/수신 처리과정의 개선으로 노드내의 높은 우선순위 패킷에 대한 데이터 처리시간 향상을 확인할 수 있다.

하지만 높은 우선순위 패킷의 백오프 지연시간 감소 및 무선 채널 선점을 위해 3.1절에서 설명한 hidden 노드 간에 패킷 전송을 보장해 줄 수 있는 시간 범위를 갖는 DRBR 보다 작은 범위에서 짧은 백오프 시간을 설정하게 되어 hidden 노드 간의 패킷 충돌 발생 확률이 높아지게 되고, [표 3]과 [표 4]에서 보는 바와 같이 백오프 시간을 차별적으로 적용하는 기법들은 약 10% 정도의 패킷 손실이 발생하게 된다.

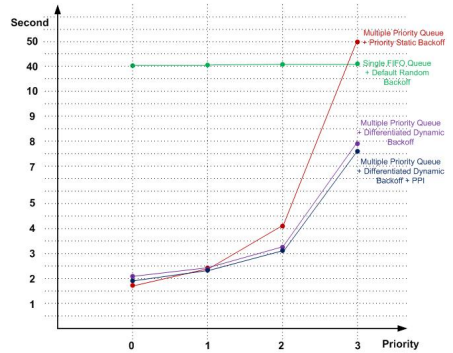


그림 10. 6x6 그리드에서의 평균 전송시간
Figure 10. Average delivery time in a 6x6 grid

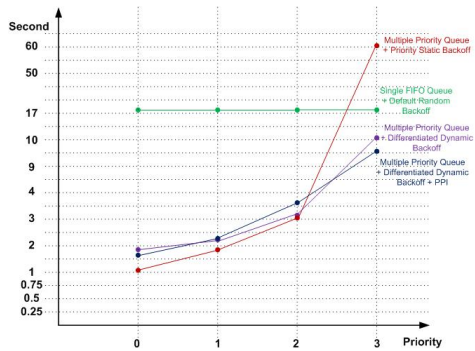


그림 11. 8x8 그리드에서의 평균 전송시간
Figure 11. Average delivery time in an 8x8 grid

또한 [그림 10]과 [그림 11]에 각각 보이는 바와 같이, 패킷의 우선순위에 따라 차등적 백오프를 적용함으로써 상위 패킷의 전송시간을 82-88% 가량 단축시켜 긴급 패킷의 실시간성을 확보할 수 있음을 뒷받침하고 있다. 다만, 정적 백오프 방식은 상위 패킷에 대해서는 다른 방식에 비해 최선의 전송시간을 보장하지만, 하위 패킷에 대해서는 항상 가장 긴 백오프 시간을 적용함으로써 오히려 좋지 않은 결과를 가져온다. 따라서, 주변 패킷의 우선순위에 따른 상대적인 순서를 매기고 이에 따라 백오프를 차별화하는 DBR 기법이 가장 효과적임을 알 수 있다.

VI. 결론

본 논문에서는 단순히 전송하려는 패킷의 우선순위만을 고려하여 백오프 시간을 설정하는 것이 아닌 노드들이 자신의 정보를 알리고 이러한 정보를 바탕으로 지역적인 네트워크 상황(상대적인 우선순위 순서)에 맞게 백오프 시간을 설정하는

패킷우선순위 서비스 지원 기법을 연구하고 제안하였다. TinyOS 기반 센서네트워크 모의실험기인 TOSIM을 이용한 실험을 통하여 높은 우선순위의 패킷에 대한 백오프 지연시간 감소 및 무선 채널의 선점을 보장하여 패킷 전달시간 및 센서 네트워크의 전체적인 무선 채널 사용에 대한 효율성이 향상되는 것을 확인할 수 있었다. 특히패킷의 우선순위에 따라 차등적 백오프를 적용함으로써 상위 패킷의 전송시간을 82-88% 가량 단축시켜 긴급 패킷의 실시간성을 확보할 수 있음을 뒷받침했다.

참고문헌

- [1] C. Chong, S. Kumar, "Sensor Networks: Evolution, Opportunities, and Challenges," Proc. of the IEEE, 2003.
- [2] K. Akkara, M. Younis, "A Survey of Routing Protocols in Wireless Sensor Networks," Ad Hoc Network Journal, Vol. 3, No. 3, pp. 325-349.
- [3] <http://www.tinyos.net/>
- [4] Joseph Polastre, "Sensor Network Media Access Design," Computer Science Division EECS Department U.C.Berkeley, 2003.
- [5] Joseph Polastre, Jason Hill, David Culler, "Versatile Low Power Media Access for Wireless Sensor Networks," Computer Science Division EECS Department U.C.Berkeley, 2004.
- [6] C. Lu, B. M. Blum, T. F. Abdelzaher, J. A. Stankovic, T. He, "RAP : A Real-Time Communication Architecture for Large-Scale Wireless Sensor Networks," In Proc. of RTAS 2002.
- [7] B. Hull, K. Jamieson, H. Balakrishnan, "Mitigating Congestion in Wireless Sensor Networks," In Proc. of ACM SenSys 2004.
- [8] T. He, J. A. Stankovic, C. Lu, T. F. Abdelzaher, "SPEED : A Stateless Protocol for Real-Time Communication in Sensor Networks," In Proc. of ICDCS 2003.
- [9] Nelson Lee, Philip Levis, Jason Hill "Mica High Speed Radio Stack," 2002.

저 자 소개



이 윤 석

1988년 2월 : 서울대학교 계산통계학과 학사

1999년 2월 : 한국과학기술원 전산학과 박사

1999년-현재 : 한국외국어대학교 교수
관심분야 : 분산시스템, 임베디드 컴퓨팅