

수직 분할 태스크 모델 기반의 IEEE 802.15.4 소프트웨어 구현과 성능평가[†]

(Implementation and Analysis of IEEE 802.15.4 Compliant Software based on a Vertically Decomposed Task Model)

김 희 철*, 유 성 은**

(Hie Cheol Kim and Seong Eun Yoo)

요 약 IEEE 802.15.4의 물리계층은 저속, 저전력, 저가격 기반의 LR-WPAN(Low-Rate Wireless Personal Area Network)의 물리계층으로 세계적으로 가장 많이 사용되고 있다. IEEE 802.15.4에 대한 기존의 많은 이론 연구들은 저전력 무선네트워크 환경에서의 에너지효율성, 전송처리율, 전송신뢰성에 대한 거시적 이해와 안목을 제공하는 중요한 결과들을 산출하고 있다. 이 논문에서는 이러한 이론연구에 실험환경 요소를 보완하기 위해 MAC(Medium Access Control) 소프트웨어 구조부터 실제 네트워크 기반 성능분석에 이르는 실험연구를 수행한다. 연구에서는 수직분할 모델의 네트워킹 스택의 MAC 계층 기능으로 IEEE 802.15.4 MAC 스택을 구현하고 이를 네트워킹 스택에 통합하여 시험·분석을 수행한다. 이 연구에서 도출한 네트워크 소프트웨어 모델과 실험결과는 향후 IEEE 802.15.4 MAC 소프트웨어의 구현과 실용적인 네트워크 스택 환경에서의 성능에 참고자료로 활용될 수 있다.

핵심주제어 : IEEE 802.15.4, 네트워킹 스택, 최대전송율

Abstract IEEE 802.15.4 is one of the most widely adopted physical layer standards in the area of LR-WPAN(Low-Rate Wireless Personal Area Network). Numerous previous researches have contributed to deep insights on energy efficiency, transmission throughput, and reliability that IEEE 802.15.4 delivers to the LR-WPAN. As a research that is orthogonal and complementary to previous researches, we explore the implementation and practical performance evaluation of IEEE 802.15.4 MAC software. We implement the MAC software from the perspective of the networking stack, exploring the issues raised when the MAC software serves as a functional component in a complete networking stack consisting of MAC, network as well as application support layers. The performance is evaluated on a realistic experimental software environment integrated with operating system, networking stack, and applications.

Key Words : IEEE 802.15.4, Networking stack, Maximum transmission throughput

[†] 본 연구는 산업통상자원부 및 한국산업기술평가관리원의 산업융합원천기술개발사업[(정보통신)10041145, 자율군집을 지원하는 웹밍형 정보기기 내장 소프트웨어 플랫폼 개발]의 일환으로 수행되었음

* 대구대학교 임베디드시스템공학전공, 제1저자

** 대구대학교 임베디드시스템공학전공, 교신저자
(e-mail:seyoo@daegu.ac.kr)

1. 서론

IEEE 802.15.4는 저속의 통신을 위한 경량네트워크(LR-WPAN, Low-Rate Wireless Personal Area Network)를 위한 MAC(Medium Access Control)과 물리계층의 국제표준이다[1]. IEEE 802.15.4는 저전력 및 저비용과 낮은 주파수 제약 등의 장점들로 인해 산업계로부터 표준의 제정 시점부터 바로 주목을 받았으며, 이에 따라 IEEE 802.15.4를 지원하는 칩셋들이 많은 실리콘 벤더들로부터 공급되고 있다. 이에 따라, IEEE 802.15.4는 WSN(Wireless Sensor Network)을 비롯한 LR-WPAN의 구현에 가장 많이 채택되고 있다.

IEEE 802.15.4 표준의 장점으로 인해 학계에서도 IEEE 802.15.4에 관한 다양한 연구들이 지속적으로 수행되어 왔다. 이러한 연구들은 IEEE 802.15.4이 저전력 무선 네트워크에 제공할 수 있는 네트워크 노드 개수와 전송부하에 따른 에너지효율성, 전송처리율, 전송신뢰성을 분석하는데 주안점을 두었다. 대부분의 연구들이 테스트베드를 통한 실험보다는 분석모델과 시뮬레이션 방식을 주로 사용하고 있어 실 환경에서의 실용적인 정량화 수치를 제시하기 보다는 IEEE 802.15.4의 전송처리율과 전송신뢰성의 특성에 대한 이해와 안목을 갖는데 많은 기여를 하고 있다[2-6].

IEEE 802.15.4가 보다 안정적이며 신뢰성을 갖는 무선 센서네트워크의 구축에 활용되기 위해서는 다양한 주제의 실험연구가 아직 필요하다. IEEE 802.15.4는 간접전송모드와 한 개 이상이 메시지 교환이 요구되는 관리 기능 등으로 전송부와 수신부가 상호 연계되며, 이에 따라 그 구현에 채택하는 소프트웨어 구조는 성능에 큰 영향을 미치게 된다[7-9]. 한편, IEEE 802.15.4는 독립적으로 네트워킹 기능을 수행하는 것이 아니라 물리계층 및 MAC계층만을 규정하므로 그 소프트웨어도 상위 네트워크 및 애플리케이션 계층의 소프트웨어와 통합되어 구동하게 된다. 따라서 애플리케이션에서 직접 호출해 사용하는 라이브러리 형태로의 구현은 그 소프트웨어의 활용도와 성능결과의 효율성 면에서 제한된다. 이러한 점들은 IEEE 802.15.4 MAC 소프트웨어의 구현과 평가에 다음과 같은 두 가지 점을 시사한다. 첫 번째는 전체 네트워킹 스택과 OS, 애플리케이션이 통합된 소프트웨어 구조 관점에서 제기되는 구현 이슈들이 IEEE 802.15.4 소프트웨어

의 구현에 반영되어야 한다는 점이다. 다른 하나는 IEEE 802.15.4 소프트웨어의 구현도 단독으로 평가되는 것이 아니라 네트워크 노드 내의 전체 소프트웨어에 통합된 상태에서 시험·평가되어야 한다는 점이다.

이 논문은 IEEE 802.15.4의 구현의 복잡성을 이해하고 성능에 영향을 미치는 주요 요소들을 도출하여 그 영향을 평가하는데 있어 기존 이론적 연구를 보완할 수 있는 실험 중심 연구를 수행한다. 이 연구는 IEEE 802.15.4 규격에 호환성을 갖는 비콘 모드(Beacon-enabled mode)와 논비콘 모드를 모두 지원하는 IEEE 802.15.4 호환 MAC 소프트웨어의 설계 및 구현을 다룬다. 아울러, 한 개 이상의 애플리케이션이 구동하는 최상위 애플리케이션 계층에 메시지 송수신 서비스를 제공할 수 있는 네트워킹 스택의 MAC 계층으로 기능하는 IEEE 802.15.4 MAC 소프트웨어를 개발한다. 네트워킹 스택은 전체 네트워크 계층을 수직분할(Vertical Decomposition) 모델을 채택하며, IEEE 802.15.4 MAC 소프트웨어도 이 모델에 부합하는 설계·구현한다. 구현된 IEEE 802.15.4 MAC 소프트웨어를 네트워킹 스택에 통합한 후, 이를 활용하여 최대 전송처리율을 중심으로 한 성능평가를 수행한다.

본 논문의 나머지 부분은 다음과 같이 구성된다. 2장에서는 본 연구와 관련된 배경지식으로 IEEE 802.15.4 표준을 비콘 모드를 중심으로 간략히 소개한다. 3장에서는 이 연구의 실험환경으로 사용된 IEEE 802.15.4가 포함된 네트워킹 스택의 구현을 소개한다. 4장에서는 802.15.4 스택의 전송처리율의 시험·분석 결과를 설명한다. 5장에서는 결론을 도출하고 향후 연구과제를 제시한다.

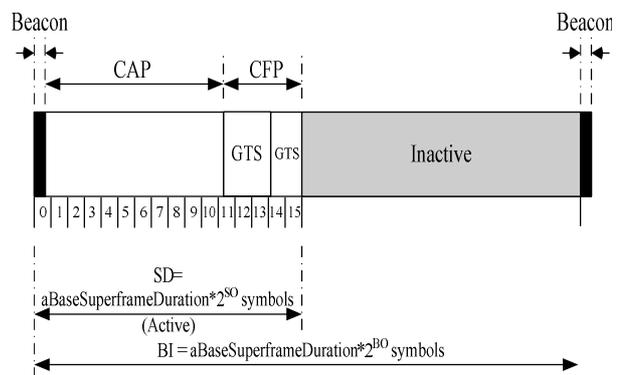
2. IEEE 802.15.4 소개

IEEE 802.15.4는 LR-WPAN에 적합한 특징을 가지고 있으며, 그 주된 장점으로 ISM 주파수 대역의 채택과 저전력 저가격의 설계를 꼽을 수 있다. 먼저, IEEE802.15.4는 물리 계층에서 사용하는 무선 주파수의 범위를 비인가 ISM(Unlicensed Industrial Science Medial) 주파수 대역인 868/915 MHz 대역과 2.45 GHz 대역을 사용하도록 정의하여 주파수 대역의 제약을 최소화시켰으며, 이로 인해 IEEE 802.15.4가 세계적으로 PAN의 구축에 광범위하게 채택될 수 있도

록 하였다. 868/915 MHz 대역은 각각 유럽 및 북미에서 주로 사용하는 주파수 대역으로 2.45GHz대역보다는 상대적으로 간섭 신호 특성이 우수하다고 평가받고 있다. 한편, 2.45GHz대역은 일부 국가를 제외하고는 세계적으로 사용이 허가되고 있는 주파수 대역으로 국가별, 지역별 주파수의 사용 제한이 상대적으로 적다는 장점을 갖는다. 이들 각각은 20Kbps, 40Kbps, 250Kbps까지의 데이터 전송이 가능하다. 또한, 채널의 수는 868MHz에서 1개, 915MHz에서 10개, 그리고 2.4GHz에서 16개를 지원한다.

한편, IEEE 802.15.4의 또 다른 장점인 저전력 설계는 저전력 저비용의 디바이스의 구현을 가능하게 한다. 애초부터 IEEE 802.15.4의 기본적인 미션은 기본형 배터리로 디바이스들이 수 개월에서 수 년동안 동작을 지속할 수 있도록 하는 것이다. 이를 위해 IEEE 802.15.4는 저전력, 저비용으로 낮은 전송율과 전송 거리가 비교적 짧은 무선 개인영역 네트워크 기기에 적합하도록 설계되었다. 이를 위해 IEEE802.15.4의 물리계층은 송신 신호의 전력소모를 줄이기 위하여 기본적으로 스프레드 스펙트럼을 사용한다. 또한 2.45 GHz 대역에서는 송신 신호 주파수 대역의 급격한 위상 변화를 줄여 저전력 성능을 향상하기 위하여 O-QPSK를 사용한다. 이 표준에서 내장하고 있는 자원에 따라 디바이스들은 FFD(Full-functional device)와 RFD(Reduced-functional)로 분류되며, RFD는 에너지 소비 절감을 위해 지정된 주기(Duty cycle)로 활성화(Active)과 수면(Sleeping) 상태를 반복하는 모드를 동작할 수 있다.

IEEE 802.15.4는 프레임 전송 동작과 관련하여 비콘 모드와 논비콘 모드를 제공한다. 비콘모드는 비콘을 사용하여 전체 네트워크가 시간 동기적으로 동작할 수 있도록 하며, 논비콘 모드에서는 이러한 비콘을 사용하지 않아 네트워크가 비동기적으로 동작하게 된다. 논비콘 모드와 비교해 볼 때, 비콘 모드의 시간 동기적인 동작은 여러 가지 장점이 있다. 비콘 모드는 코디네이터와 디바이스들 간에 동기화를 통해 슬롯 기반 프레임 전송(Slotted-transmission)을 통해 프레임 충돌을 줄일 수 있는 수단을 제공한다. 한편, 비콘 모드는 지정된 듀티 사이클(Duty-cycle)로 비콘 간의 주기를 활성화 구간과 비활성화 구간으로 구성되는 에너지 절감 모드로의 동작을 지원하고, 전송지연을 최소화할 수 있는 GTS (Guaranteed Time Slot) 모드



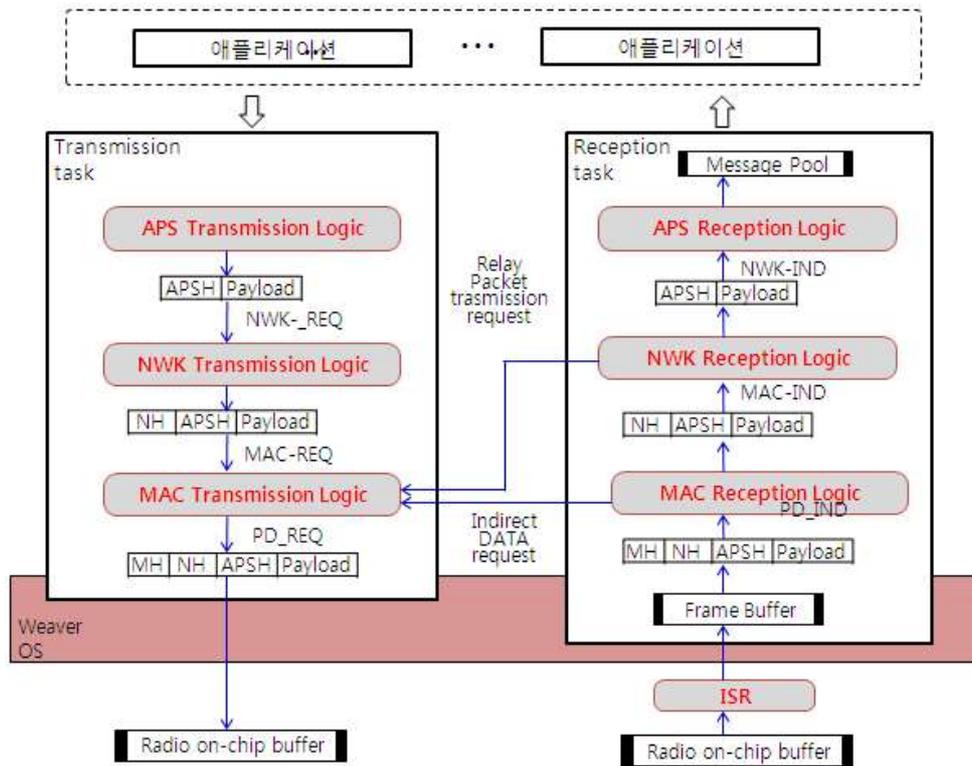
< Fig. 1 > Superframe structure

를 지원한다.

IEEE 802.15.4의 비콘모드에서는 코디네이터와 이 코디네이터를 통해 네트워크에 가입한 디바이스들은 코디네이터가 주기적으로 전송하는 비콘을 통해 동기화를 유지하면서 지정된 규격의 수퍼프레임에 의거해 프레임 송수신을 수행한다. <Fig 1>은 비콘 모드를 사용할 때 수퍼프레임의 구조를 보여준다. 수퍼프레임은 비콘과 비콘사이 시간의 구성을 나타내는 규격으로 프레임 전송이 가능한 활성화(Active) 구간과 프레임 전송이 가능하지 않은 비활성(Inactive) 구간으로 나뉜다. 모두 16개의 슬롯(Slot)으로 구성되는 활성화 구간은 세부적으로 충돌기반접근(Collision Access Period) 구간과 충돌자유접근(Collision-Free Period)구간으로 나뉜다. 충돌기반접근 구간에서는 매체접근에 있어 Slotted CSMA/CA(Carrier-Sensing Multiple-Access/ Collision-Avoidance) 방식을 사용한다. 한편, 충돌자유접근 구간에서는 해당 노드들은 GTS 충돌이 없이 프레임 전송을 보장받는다. 수퍼프레임과 활성화 구간의 크기는 고정된 것이 아니라 설정에 의거해 그 크기가 변경될 수 있다. 수퍼프레임의 크기는 BO(Beacon Order) 값으로 지정되며, 활성화 구간의 크기는 SD(Superframe Duration)의 값에 의해 결정된다. BO와 SD 값의 범위는 이후 성능평가와 관련하여 설명한다.

3. 네트워크 스택 설계 및 구현

이 연구는 무선센서네트워크 구축에 사용될 실용적인 소프트웨어 플랫폼을 개발하는 연구개발 프로젝트



<Fig. 2> Network Stack Structural Overview

의 일부분으로 수행되었다. 위버 OS와 네트워킹 스택, 애플리케이션 개발을 위한 위버 워크벤치(Weaver Workbench)는 무선센서네트워크 구축을 위한 실용적인 소프트웨어 플랫폼을 제공하고 있다. 이 절에서는 네트워킹 스택의 구조와 이 스택에 포함되어 있는 MAC 계층에 대해 소개한다.

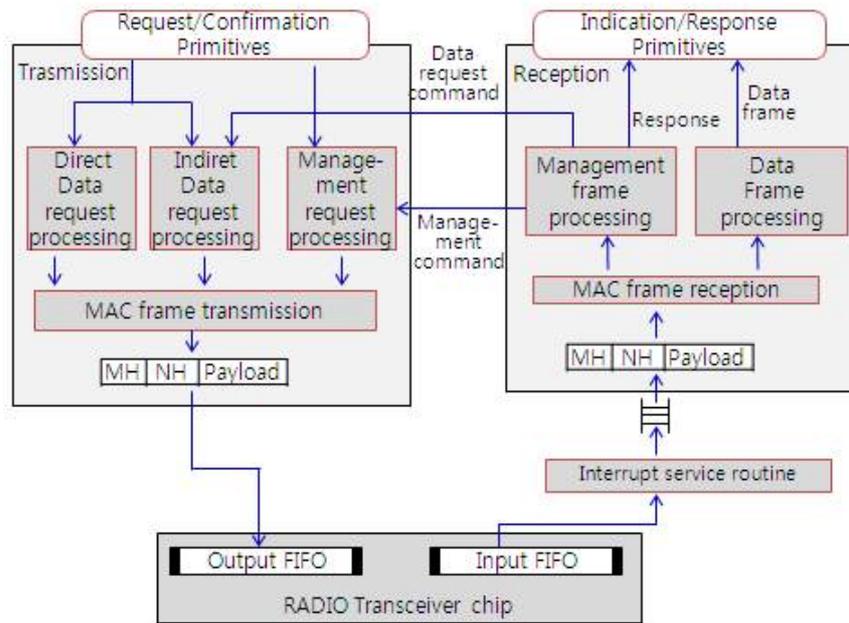
소프트웨어 플랫폼에 실용적으로 활용될 수 있도록 이 연구에서 구현한 네트워킹 스택은 IEEE 802.15.4 물리계층과 무선 메시 프로토콜 기반의 정적 라우팅을 지원하는 네트워킹 계층, 애플리케이션에 메시지 전송 및 수신 서비스를 제공하는 APS(Application Support) 계층으로 구성되는 기본적인 네트워킹 스택의 구성요소는 모두 갖추고 있다.

네트워킹 스택의 구현에는 수직적 분해(Vertical decomposition) 모델을 채택하고 있다. 이 모델에서는 네트워킹 스택의 기능을 메시지 전송(Transmission) 부문과 메시지 수신(Reception)으로 구분해 각각 독립적인 태스크로 구현한다. 이 태스크들은 각각 전송 전송과 수신 기능을 담당하며, 각각 상위 APS 계층부터 하위 MAC/PHY 계층까지의 전

체 기능을 포함하고 있다.

<Fig. 2>는 네트워킹 스택의 태스크를 포함한 노드에 탑재되는 소프트웨어 구성을 보여준다. 노드에 탑재되는 소프트웨어는 한 개 이상의 애플리케이션과 위버 경량 OS(Operating system), 그리고 네트워킹을 구성하는 전송태스크, 수신태스크로 구성된다. 전송과 수신 태스크는 멀티프로그래밍 환경을 지원하는 위버 경량 OS(Operating system)에서 각각 독립적으로 구동하면서 상위 애플리케이션 태스크들에게 메시지 송수신 서비스를 제공한다.

전송 태스크는 상위 애플리케이션 계층에서 요청한 메시지를 네트워킹 계층별로 단계적 처리를 통해 최종적으로 무선 송수신 하드웨어를 통해 전송하는 기능으로 구성된다. 수신 태스크는 이웃노드로부터의 전송된 프레임의 처리해서 네트워킹 계층별 단계적 처리를 통해 최상위에 올려주는 기능을 갖는다. 두 태스크는 독립적인 태스크로 구동하지만 필요에 따라 그 동작에 있어서는 일부 연계성이 존재한다. 수신 태스크는 수신된 프레임의 종류에 따라 최종 결과를 상위 애플리케이션에 올려주지 않고 중간에 다른 노드로



<그림 3> Functional description on the Transmission and Reception blocks in the implemented IEEE 802.15.4 MAC stack

중계하거나 새로운 프레임 전송해야 하는 경우가 있다. 이러한 경우에는 수신태스크는 해당 프레임이나 패킷 전송을 전송 태스크에게 요청하게 된다. <Fig. 3>은 MAC 계층의 기능 구성과 송신 태스크와 수신 태스크의 연계성을 보여준다. 이에 대한 보다 구체적인 내용은 바로 아래의 이벤트 설명부에서 다룬다.

네트워크 태스크, 즉 전송 태스크와 수신 태스크는 모두 일종의 이벤트 기반(Event-driven) 기반의 동작 모델을 갖는다. 먼저, 각 네트워크 태스크는 영구적 태스크(Permanent task)로서 시스템이 부팅을 하여 구동을 시작한 이후부터 전원이 꺼질 때까지 종료하지 않고 계속 외부 이벤트를 차례로 처리하는 과정을 반복하며 구동하게 된다. 네트워크 태스크는 이벤트를 처리하는 실행방식은 외부 이벤트들을 차례로 수행하므로 항상 실행 상태는 단일 이벤트 처리 문맥(Single event context)로 이루어진다. 따라서 여러 외부 이벤트가 발생했을 때, 네트워크 스레드는 각 이벤트에 대해 처리를 끝낼 때까지 다른 이벤트의 처리를 시작하지 않는다. 다시 말하면, 여러 이벤트들이 요청되었다 하더라도 이들은 네트워크 태스크에 의하여 중첩해 동시에 처리되지 않는다.

전송 태스크의 이벤트는 지정된 패킷 또는 프레임의 전송을 요청하기 위한 목적을 가지며, 상위 애플리

케이션과 수신 태스크에서 발생시키는 이벤트로 구성된다. 먼저, 상위 애플리케이션으로부터의 이벤트는 기본적으로 메시지 전송요청이다. <Fig 2>에서 보는 바와 같이 시스템 아키텍처에서는 여러 개의 애플리케이션이 존재할 수 있으며, 각 애플리케이션은 필요에 따라 전송 태스크에 메시지 전송을 요청할 수 있다. 한편, 수신 태스크로부터의 이벤트는 네트워크 계층과 MAC 계층 기능으로 분류할 수 있다. 네트워크 계층의 대표적인 이벤트로 다른 노드와의 중계되어야 할 수신 프레임의 전송요청이 있으며, MAC 계층의 대표적인 이벤트로 수신 태스크의 간접전송 명령(Command)의 수신에 따른 전송 태스크로의 해당 프레임의 전송 요청이 있다. 이외에도 네트워크 구성(Association) 기능과 같이 MAC 계층 또는 네트워크 계층의 여러 명령어가 상호 교환하는 관리 기능을 수행하는 경우에도 수신 태스크는 해당 프레임 전송을 전송 태스크에 요청하게 된다. 전송 스레드에 대한 이벤트는 앞에서 본 바와 같이 여러 다양한 종류로 구성되며, 동시에 한 개 이상의 이벤트들이 요청될 수 있으므로 전송 태스크는 이벤트의 저장구조로 환상형 큐(Circular Queue)를 사용한다.

수신 태스크의 이벤트는 한 종류로서 외부에서 송수신기 하드웨어를 통해 수신된 프레임이다. 이웃 노

드로부터 프레임이 수신되며, 그 프레임은 RADIO 송수신기의 내부 버퍼에 보관되며, 동시에 하드웨어적으로 프레임 수신 인터럽트가 요청된다. 이로 인해 호출된 인터럽트 서비스 루틴은 RADIO 송수신기의 내부 버퍼에서 프레임을 읽어 낸다. 읽어 낸 프레임을 저장하는 버퍼는 앞에서 설명한 전송요청 이벤트의 저장 구조와 마찬가지로 큐로 이루어져 있으며, 이를 “수신 프레임 큐”라고 부른다. 이 수신 프레임 큐의 프레임은 네트워크 스레드의 외부 이벤트로서의 역할을 한다.

각 네트워크 태스크는 OS에서 제공하는 멀티태스킹(Multi-tasking) 환경의 태스크 스케줄링 원칙에 따라 이벤트 기반 동작을 수행하게 된다.

이벤트 처리를 마치고 더 이상 이벤트 큐에 이벤트가 존재하지 않으면 태스크는 OS에 의해 문맥교환(Context switching)을 통해 대기상태(Waiting state)로 머물게 된다. 이후 이벤트가 발생하게 되면 다시 준비상태(Ready state)로 천이되어 준비 큐(Ready Queue)에 위치하게 된다. OS의 태스크 스케줄러는 준비 큐에 위치한 태스크들 중에서 이후 우선순위에 따라 차례로 구동(Running state)시킨다. 여기서 한 가지 주목할 것은 처리 지연으로 수신 프레임의 유실을 줄이기 위해 수신 태스크에 더 높은 우선순위가 부여된다. 여기서는 단순히 네트워크의 구현을 이해하는 선에서 구동모형을 다루므로 스케줄링과 관련된 보다 구체적인 사항은 다루지 않는다.

4. MAC 계층의 최대 전송률 평가

무선 센서 네트워크에서는 에너지 효율적인 운영을 위해 일부 디바이스는 일정한 주기(Duty cycle)로 활성상태와 휴지상태 상태를 반복하며 동작하며 전송되는 데이터 프레임도 대부분 크지 않고 전송용량 요구도 비교적 경량인 경우가 많다. 이에 따라 최대 전송률은 전송신뢰성(Transmission reliability)보다는 성능지표로서는 상대적으로 덜 중요시 된다. 하지만, 최대 전송률은 네트워크 스택의 효과적이고 안정적인 구현 여부를 반영하는 중요한 지표로 이용된다.

IEEE 802.15.4 표준에 의거하면 2.4 GHz 대역의 송수신기는 PPDU(Physical Protocol Data Unit) 기준 최대 256 Kbps의 전송률을 제공한다. 일반적으로 이

<Table. 1> Maximum Transmission Throughput

	No ACK	H/W ACK	S/W ACK
초당 최대 전송 횟수 (회)	136	119	97
전송 간격 (msec)	7.352	8.403	10.309
최대전송률 (Kbps)	138.2	120.9	98.6

표준의 실제 구현에 있어서는 프레임 송수신 처리와 관련한 소프트웨어 오버헤드와 신뢰성 향상을 ACK(Acknowledge) 기반 전송 지원과 관련된 오버헤드 등으로 인해 실제로 얻을 수 있는 최대 전송률(Transmission throughput)은 그 값에 크게 미치지 못한다.

이 절에서는 본 논문에서 구현한 네트워크 스택, 특히 IEEE 802.15.4 비콘모드 MAC의 구현이 일반 상용 버전에 상응하는 안정적인 수준인지를 검증하기 위하여 최대 전송률을 평가한다. 이러한 평가의 일부 목적은 이전 소절의 있을 비콘 동기화의 성능분석의 결과의 타당성을 뒷받침하는 것도 있다.

최대 전송률에 직접적인 영향을 미치는 요소는 매우 다양하나 ACK 방식이 일반적으로 가장 중요한 요소로 간주되고 있다. 이 실험은 ACK의 사용여부 및 구현방식에 따라 세 가지 유형으로 구성된다. 첫 번째는 프레임 전송에 ACK 프레임을 사용하지 않는 경우이다. 두 번째는 ACK를 사용하며 ACK 기능은 CC2420 칩의 하드웨어 자동 ACK 생성 기능을 사용하는 경우이다. 마지막으로 세 번째는 MAC 부계층에서 직접 소프트웨어로 구현한 ACK를 사용하는 방식이다. 이 방식들은 각각 No ACK, CC2420 ACK, Software ACK라고 부른다.

실험 방법은 대한 상세한 사항은 다음과 같다. 먼저, 최대전송률은 MAC 계층에 대한 것이므로 데이터 전송에는 MAC 데이터 전송 프리미티브를 직접 활용하였다. 채널 상태를 검사하는 방식은 IEEE 802.15.4 표준에 준한 RANDOM BACKOFF 기반 CSMA/CA 알고리즘을 그대로 활용하고 있다. 실험 네트워크는 코디네이터와 한 개의 일반 디바이스로 구성되며 통신방식으로 코디네이터에서 디바이스로의 간의 일 대

일 통신을 사용한다. 이 실험은 최대전송률을 얻는 것이므로 최대 크기의 PPDU 프레임을 사용하였다. 이 프레임은 그 크기가 127 바이트로서 세부적으로는 MHR(9byte), FCS(2byte), MAC Payload(116byte)로 구성된다. 최대 전송량은 위 프레임의 MAC 계층 전송요청을 연속적으로 수행해서 1초 동안에 호출한 평균 최대 개수를 집계하는 방식을 통해 구했다. 참고로, CCA 오류 또는 ACK 수신 오류 등으로 인한 재전송이 발생하는 경우 최대전송율은 낮아 질 수 있다는 점을 유의 바란다. 최대전송율은 “(페이로드 * 8) * 초당 최대 전송회수”으로 계산된다.

<Table 1>은 각 실험 유형별 초당 최대 전송 횟수, 데이터 전송 간격, 최대전송률을 보여준다.

ACK 미사용 방식, 하드웨어 ACK 방식, 소프트웨어 ACK 방식은 각각 138.2, 120.9, 98.6 Kbps의 최대 전송율을 기록하고 있다. 여기서, No ACK, 즉 ACK 미사용 방식은 실환경에서는 신뢰성을 고려해 거의 사용되지 않으므로 단순히 상대 비교를 위한 참조 값으로 사용하면 된다. ACK를 사용하는 경우에는 하드웨어 ACK 방식이 소프트웨어 ACK 방식보다 약 22.6% 높은 최대전송율을 보이고 있다. 소프트웨어 ACK 방식의 낮은 최대전송율은 주로 ACK 처리를 위한 소프트웨어 오버헤드와 RADIO 칩의 FIFO 큐 접근시간 등으로 기인하며, 네트워크 스택이 대기상태에 있을 경우의 컨텍스트 스위칭(Context Switching) 시간도 그 원인으로 작용한다. 이러한 낮은 최대전송율에도 불구하고 소프트웨어 ACK 방식의 지원도 필요하다. 그 이유는 일부 벤더들의 노드 중에는 아직까지 탑재하고 있는 IEEE 820.15.4 MAC 부계층 스택이 표준적합성에 있어 미미한 점이 있어 소프트웨어 ACK가 수신된 경우에는 동작을 하지만 하드웨어 ACK에는 동작하지 않는 노드들이 있기 때문이다.

5. 결론 및 향후 연구과제

이 논문은 기존 이론연구를 실환경 요소를 보완하는 MAC(Medium Access Control) 소프트웨어 구조부터 실제 네트워크 기반 성능분석에 이르는 실험연구 내용을 발표한다. 네트워크 스택의 구현에 채택한 전송부와 수신부를 수직적으로 분할하여 독립적인 태스크로 구현하는 수직적 분할(Vertical decomposition)

모델은 네트워크 계층의 중계메시지 처리뿐만 아니라 IEEE 802.15.4의 간접전송 및 ACK 및 관리 기능과 관련된 수신부와 전송부의 연계성을 유지하며 전송부와 수신부와 단일 이벤트 문맥을 유지하는데 매우 효과적인 것으로 나타났다. 구현된 IEEE 802.15.4 소프트웨어를 실용적인 네트워킹 스택에 통합하여 MAC 계층의 최대전송처리율에 대한 시험·분석을 수행하였다. 최대전송처리율은 ACK를 사용하지 않는 경우, 하드웨어 ACK를 사용하는 경우, 소프트웨어 ACK를 사용하는 경우 각각 138.2, 120.9, 98.6 Kbps를 기록하고 있다. 이 연구에서 도출한 네트워크 소프트웨어 모델과 실험결과는 향후 IEEE 802.15.4 MAC 소프트웨어의 구현과 실용적인 MAC 소프트웨어 구현 환경에서의 성능에 참고자료로 활용될 수 있을 것으로 사료된다. 향후 전체 네트워크 송수신 처리 성능과 다수의 노드 환경에서의 전송신뢰성에 대한 시험·분석에 대한 후속연구를 수행할 예정이다. 아울러 단일 문맥 처리 기반의 MAC 실행모델을 복수 문맥 처리 기반으로 확장하는 연구도 수행할 예정이다.

References

- [1] IEEE Part 15.4: Wireless Medium Access control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs), IEEE Std., Rev. IEEE Std 802.15.4-2006 and IEEE Std 802.15.4-2007a, 2007.
- [2] G. Lu, B. Krishnamachari, C. Raghavendra, Performance evaluation of the IEEE 802.15.4 MAC for low-rate low-power wireless networks, in: Proceedings of the EWCN'04, Held in Conjunction with the IEEE IPCCC, April 2004.
- [3] J. Mi-si'c, S. Shafi, V.B. Mi-si'c, Performance of a beacon enabled IEEE 802.15.4 cluster with downlink and uplink traffic, IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems 17 (4) (2006) 361 - 76.
- [4] S. Pollin, M. Ergen, S.C. Ergen, B. Bougard, F. Catthoor, A. Bahai, and P. Varaiya. Performance analysis of slotted carrier sense ieee 802.15.4

acknowledged uplink transmissions. In Wireless Communications and Networking Conference, 2008. WCNC 2008. IEEE, pages 1559 - 564, 312008-april3 2008.

- [5] C.Y. Jung, H.Y. Hwang, D.K. Sung, and G.U. Hwang. Enhanced markov chain model and throughput analysis of the slotted csma/ca for ieee 802.15.4 under unsaturated traffic conditions. Vehicular Technology, IEEE Transactions on, 58(1):473 - 78, 2009.
- [6] F. Osterlind, A. Dunkels, J. Eriksson, N. Finne, and T. Voigt. Cross-level sensor network simulation with cooja. In Local Computer Networks, Proceedings 2006 31st IEEE Conference on, pages 641 - 48, 2006.
- [7] A. Cunha, M. Alves, and A. Kouba, "An IEEE 802.15.4 protocol implementation (in nesC/TinyOS): Reference Guide v1.2," Polytechnic Institute of Porto (ISEP-IPP), Porto, Technical Report 1.2, 2007. [18] MicaZ WIRELESS MEASUREMENT SYSTEM, crossbow, 2004.
- [8] J. H. Hauer, "TKN15.4: An IEEE 802.15.4MAC Implementation for TinyOS 2," Telecommunication Networks Group, Technical University Berlin, Technical Report TKN-08-003, 2009.
- [9] Ricardo Severino Jasper Büsch Marco Tiloca Stefano Tennina Jan-Hinrich Hauer, Roberta Daidone. An open-source ieee 802.15.4 mac implementation for tinyos 2.1. In European Conference on Wireless Sensor Networks, 2011.



김 희 철 (Hie Cheol Kim)

- 정회원
- 연세대학교 전자공학과 학사
- 남가주대학교 컴퓨터공학과 석사
- 남가주대학교 컴퓨터공학과 박사
- 대구대학교 정보통신대학 임베디드시스템공학전공 교수
- 관심분야 : 임베디드 운영체제, 무선센서네트워크



유 성 은 (Seong Eun Yoo)

- 정회원
- 한양대학교 전자전기공학부 공학사
- 한국정보통신대학교 공학부 공학 석사
- 한국과학기술원 정보통신공학과 공학박사
- 대구대학교 정보통신대학대학 임베디드시스템공학 전공 조교수
- 관심분야 : 실시간 임베디드 시스템, 무선센서네트워크

논문 접수일 : 2013년 09월 16일
 1차수정완료일 : 2013년 11월 15일
 2차수정완료일 : 2014년 01월 17일
 게재확정일 : 2014년 01월 28일