# Hardwired Low-MAC 기능을 이용한 IEEE 802.15.4 PHY/MAC 프로토콜 최적화

정회원 황 태 호*, 김 동 순*, 원 광 호**

# The Optimization of IEEE 802.15.4 PHY/MAC with Hardwired Low-MAC

Tae-ho Hwang*, Dong-Sun Kim*, Gwang-ho Won** ***Regular Members***

요 약

IEEE 802.15.4는 물리 계층(PHY)과 매체 접근 계층(MAC)을 정의하는 표준으로서, 저속도 무선 개인 통신망(Low Rate Wireless Personal Area Networks, LR-WPANs)을 위한 표준 중 하나이다. IEEE 802.15.4 프로토콜은 장치간의 저가격, 저속도 유비쿼터스 통신을 지향하기 때문에 PHY/MAC의 구현에 있어서 고도화된 최적화가 중요한 요구사항이라 할 수 있다. 최근 IEEE 802.15.4 MAC 프로토콜의 성능 분석에 대한 많은 연구가 진행되었으며, 이를 반영하여 송수신기는 가격 및 성능의 장점이 있는 SoC로 구현되는 추세이다. 이러한 구현 과정에서 CSMA-CA 및 MAC 프레임의 처리와 같은 표준에서 명시한 MAC의 세부 기능들은 성능의 향상을 위해 하드웨어 지향의 Low-MAC과 이를 이용한 소프트웨어 기반의 상위 MAC으로 구현된다. 본 논문은 IEEE 802.15.4 LR-WPAN의 물리계층과 매체 접근 계층 간의 최적화를 위해 Hardwired Low-MAC (HL-MAC)과 상태 기계(State Machine)를 통해 작은 코드 사이즈와 향상된 에너지 효율을 갖는 최적화 프로토콜을 구현방법을 제안하고자 한다.

**Key Words** : IEEE802.15.4, LR-WPAN, MAC, Optimization

ABSTRACT

IEEE 802.15.4 is the one of the protocols for radio communication in a personal area network. Since it aims to provide low cost and low power communication for ubiquitous communication, it requires high level of optimization in implementation. Recently, there have been many studies on the performance evaluation of IEEE 802.15.4 MAC protocol. According to the results of the studies, it is tendency that the transceiver is implemented to SoC type. On the implementation, the specific functions of MAC like CSMA-CA and MAC frame handling is designed to hardwired functions. In this paper, we implemented the protocol with hardwired low MAC (HL-MAC) and its state machine for the optimization from the physical layer and MAC layer. it has the characteristics of the small code size and the enhanced power consumption.

## Ⅰ. 서 론

IEEE802.15.4는 무선 개인 통신망(WPAN)의 기본적인 하위 네트워크 계층을 제공하기 위해 표준

※ 본 연구는 지식경제부 및 정보통신연구진흥원의 IT성장동력기술개발사업의 일환으로 수행되었습니다.[2008-S-041-01, uCity용 센서 네트워크 PHY/MAC개발] 연구비 지원에 감사드립니다.

* 전자부품연구원 멀티미디어IP 연구센터 (taeo@keti.re.kr, dskim@keti.re.kr),

** 전자부품연구원 u임베디드연구센터 (ghwon@keti.re.kr)

논문접수번호 : KICS2009-10-500, 접수일자 : 2009년 10월 31일 최종논문접수일자 : 2009년 12월 28일

으로서 장치간의 저가격, 저속도의 유비쿼터스 통신을 지향한다. 준비된 통신 인프라 스트럭쳐 없이도, 서로 가까운 거리에 있는 장치끼리 저가격, 저전력으로 통신을 할 수 있다는 점을 장점으로 하고 있다. 약 10~30 미터 거리 내, 대략 250 kbps의 전송속도를 목표로 하고 있고, 한 종류만의 물리 계층이 아니라 주파수 간섭 문제 해결과 더 적은 전력소모를 요구하는 임베디드 시스템에서 선택적으로 적용하고자 주파수 및 변복조 방식을 달리하는 여러 종류의 물리 계층을 정의하고 있다. 이에 따라, 전송속도는 20, 40, 100 kbps 등으로 구분될 수 있다.

IEEE802.15.4의 특징은 극도로 저렴한 제조 단가를 추구한다는 것이며, 이에 따른 기술적으로 단순함이 특징이자 목표가 될 수 있다. IEEE802.15.4의 이러한 특징은 구현상에서 고도의 최적화를 통한 효율성을 요구한다. 기능 별로 WPAN의 관리 기능을 가진 코디네이터와 이에 연결된 일반 장치들로 구분되며, 동작 모드는 두 가지 모드 즉, 장치들의 저 전력 동작 모드인 non-beacon 모드와 코디네이터를 포함한 WPAN 전체 장치들의 duty-cycle 기반 전원관리가 가능한 시분할 동작 모드인 beacon-enabled 모드를 지원한다. 시분할 동작 모드는 실시간 응용에 적합하도록 타임 슬롯을 예약하는 기능과 저전력 동작을 위한 WPAN의 inactive 구간을 포함하고 있다. 기본 매체 접근 방식은 CSMA/CA 을 이용한 충돌 회피를 사용하며, 데이터 암호화를 통한 보안 기능을 지원하고 있다.

앞서 설명했듯이, IEEE 802.15.4는 고도화된 최적화가 중요한 항목이라 할 수 있다. 최근 송수신 칩셋 및 프로토콜의 구현에 있어서 저전력, 저가격 통신을 추구하기 위해 기능 및 코드의 중복성이 제거되는 최적화의 설계를 거친다. 최적화의 최종 형태는 각 계층 간의 구분이 모호한 단일 컴포넌트 프로토콜, 단일칩(SoC)로 구현되는 추세이다. 이러한 구현에 있어서 성능의 향상을 위해 소프트웨어로 구현되는 MAC의 일부 기능은 구현 복잡도 대비 성능향상의 검토에 따라 하드웨어로 구현된다. 설계 과정에서 하드웨어로 구현되는 MAC 기능에 있어서 동작의 모호성 및 중복성이 제거되고, 송수신 장치의 효율적 동작 및 관리를 위해서 계층 간의 인터페이스 및 동작에 대한 명시 및 구조는 표준에서 정의한 구조와는 다르게 구현상에서 보다 명확하게 그리고 효율적으로 설계되어야 한다.

본 논문에서는 SoC의 하드웨어로 구현 가능한 MAC의 세부 기능들을 이용한 IEEE 802.15.4 PHY/MAC 프로토콜의 최적화 구조 및 구현에 대해 설명한다. II 장에서는 이와 관련된 IEEE 802.15.4 PHY/MAC 프로토콜의 관련 연구 및 기능적 개요 살펴보고, III 장에서는 구현한 프로토콜의 세부 구조를 설명한다. IV장에서는 구현한 SoC 아키텍쳐 및 프로토콜 구조를 및 성능을 설명한다.

## Ⅱ. IEEE802.15.4 PHY/MAC 프로토콜의 개요 및 관련 연구

IEEE802.15.4 표준에서 명시한 PHY, MAC 레이어의 참조 모델은 그림 1과 같다.[1] MAC 레이어는 MCPS (MAC common part sublayer)와 MLME (MAC sublayer management entity)의 두 가지 서브레이어로 명시된다. MCPS는 기본적인 MAC 데이터 프레임의 송수신을 담당하고, MLME는 WPAN의 관리를 위한 association 및 disassociation, channel scan, indirect 송수신, beacon 동기화 등의 역할을 수행한다. PHY 계층은 기본적인 송수신과 관련된 Baseband/Modem의 하드웨어 기능을 포함한 channel 관리 및 ED (energy detection), CCA (clear channel assessment) 등의 기능을 제공하는 PLME(PHY sublayer mamagement entity)로 구성되며, 하위에는 RF 블록을 제어한다.

앞서 언급한 것처럼 IEEE 802.15.4 MAC 프로토콜은 두 가지 모드 non-beacon 모드와 beacon-enabled 모드로 동작 할 수 있다. non-beacon 모드에서 코디네이터는 항상 수신기를 켠 상태에서 디바이스 노드들로부터 MAC 프레임을 기다린다. 디바이스 노드들은 CSMA-CA를 통해 코디네이터로 데이터를 바로 보낼 수 있으며, 주기적으로 data request command를 보내서 코디네이터로부터 데이터를 받

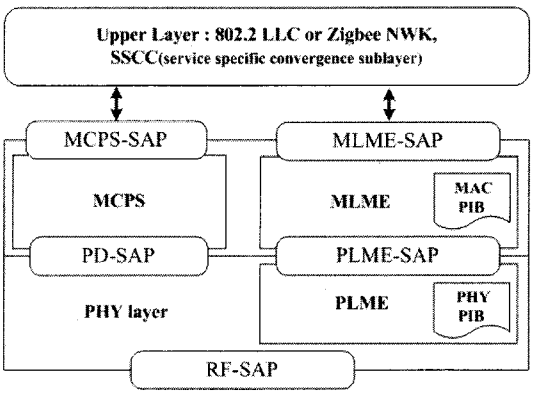


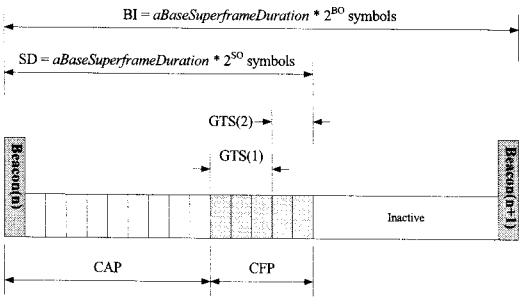

그림 1. IEEE802.15.4 PHY/MAC 참조 모델

을 수 있다. 이 모드는 PAN의 규모가 비교적 클 때, 각 노드의 전원 소모를 최소화 하며, 프로토콜 구조를 가볍게 할 수 있는 장점을 가지고 있다.

그러나, 코디네이터 역시 제한된 배터리 전원으로 운영되고, 실시간 데이터 전송이 필요한 경우, beacon-enabled 모드를 사용할 수 있다. beacon-enabled 모드에서 코디네이터는 주기적으로 beacon 프레임을 전송하여 PAN의 정보를 전송함과 동시에 각 노드들과 동기화된 송수신을 하게 된다. 이러한 동기화 구조를 superframe이라 하며, 구조는 그림 2와 같다.

그림 2의 superframe 구조는 크게 BO와 SO 파라미터에 의해 active구간과 PAN의 모든 노드가 동작을 멈추는 inactive구간으로 구분되며, active구간은 다시 16개의 슬롯을 갖는데, beacon 이후 연속된 슬롯은 CAP(contention access period)로서 slotted CSMA-CA를 통해 채널에 접근하며, inactive 구간 이전의 최대 8개까지의 연속된 슬롯들은 CFP (contention free period) 구간으로서 GTS(guaranteed time slot)을 코디네이터로부터 할당받아 CSMA-CA 없이 채널에 접근한다.

여러 IEEE 802.15.4 MAC 프로토콜의 성능을 분석한 연구들에서 작은 네트워크상[2]에서 그리고, 노드들이 밀집된 상태[3]에서의 MAC 프로토콜을 수학적으로 모델링하고 시뮬레이션한 연구들과 실험적으로 성능 평가[4][5]한 연구들이 있어왔다. 이러한 연구 결과들에서는 프로토콜의 구조적인 특성상 낮은




BI : Beacon Interval
BO : Beacon order
CAP : Contention Access Period
CFP : Contention Free Period
GTS : Guarenteed Time Slot
SD : Superframe Duration
SO : Superframe Order ($0 \le SO \le BO \le 14$)

| | |
|---|---|
| One symbol | = 16 usec/25usec |
| *aBaseSlotDuration* | = 60 symbols |
| *aNumSuperFrameSlots* | = 16 symbols |
| *aBaseSuperframeDuration* | = 960 symbols |
| *aUnitBackoffPeriod* | = 20 symbols |

그림 2. IEEE 802.15.4 superframe 구조

duty-cycle에서 IEEE 802.15.4 MAC 프로토콜은 확실한 저전력, 저가격 통신의 성능을 보여준 반면 많은 전송 지연과 낮은 전송속도를 갖는다. 이러한 전송지연의 문제는 IEEE 802.15.4의 CSMA-CA의 구조적인 특징으로서 기존 연구[6], [7]들에서 그 성능에 대한 분석이 연구되었다.

그러나, 기존 수학적 모델링에 근거한 CSMA-CA의 성능 분석에 따른 프로토콜의 구현에서 있어서 그 방법과 구조에 따라 성능이 크게 개선될 수 있다. 가령, backoff 구간에서의 전원관리 방법에 따라 노드의 에너지 효율을 향상 시킬 수 있으며, 2.4GHz 대역의 실제 상황에서 CSMA-CA의 성능은 인접한 IEEE 802.15.1 혹은 WLAN의 영향[8], [9]을 받을 수 있기 때문에 channel SCAN, 또는 CCA(clear channel assessment) 모드에 따라 throughput이 크게 개선될 여지가 있다. 따라서, CSMA-CA와 같은 단일 기능의 성능개선 뿐만 아니라 MAC의 전체적인 관점에서 연관된 기능들의 최적화가 필요하다. 이러한 이유로 성능의 개선의 여지가 있는 몇 가지 IEEE 802.15.4 PHY/MAC 프로토콜의 주요 세부 기능은 다음과 같다.

1) Address Recognition : MAC 프레임을 수신할 때 해당 프레임이 자신의 것인지 MAC 헤더의 주소 정보를 확인 후, 프레임을 처리한다. 이때, 노드의 상태에 따라 즉, 코디네이터인지 아닌지, ACK 및 beacon 프레임의 수신등과 같은 조건에 따라 판별하는 알고리즘이 구현되어야 한다. 이를 위해 소프트웨어로 구현된 MAC은 시스템의 MCU가 매번 깨어나 동작해야만 하는 부담을 갖는다.
2) Acknowledgement : MAC 헤더의 FCF(frame control field)내 Ack-req. 플래그가 설정된 경우 수신측에서는 *aTurnaroundTime*(12symbol) 이후 ACK 프레임을 즉시 전송해야한다. 이때, ACK 프레임은 5 octets의 작은 프레임으로서 시퀀스 번호와 FCF내의 pending 플래그가 경우에 따라 바뀔 수 있고 나머지는 같은 프레임이 전송 된다. 마찬가지로 짧은 시간동안 ACK 프레임의 준비와 송신을 위해 MCU는 깨어나야 한다.
3) Re-transmission : Ack-req. 플래그를 설정하여 MAC 프레임을 송신 한 후, ACK 프레임을 수신하지 못했을 경우 해당 MAC 프레임을 최대 *macMaxFrameRetries*(3회) 만큼 재전송

해야 한다. 채널 상황이 불안정할 경우 MCU는 이 과정은 MAC 프레임을 전송할 때마다 반복할 수 있다.

4) CCA : CSMA-CA의 주요 절차 중에 하나로서 현재 설정된 모드에 따라 채널 상태에 대한 모니터링 결과를 반환한다. 따라서, MAC에서 수행하는 CSMA-CA를 위해 PHY는 이 기능을 표준에서 명시한 PLME-CCA.request() 프리미티브를 통해 제공해야만 한다. 그러나, PLME-CCA.request()의 수행이후, 결과를 받은 MAC 레이어는 다시 PLME-SET-TRX-STATE.request()를 호출하여 송신기를 켜고 송신을 시작 시켜야한다. MCU의 이 처리 과정에서 지연이 발생한다면 CCA의 일관성이 깨질 수 있으며, 성능의 저하를 가져올 수 있다.

5) CSMA-CA : 채널에 접근을 위한 방법으로서 IEEE802.15.4 표준의 목적에 맞게 간단한 구조로 설계 되었다. beacon-enabled 모드에서는 slotted CSMA-CA를 사용하여 코디네이터와 동기화된 슬롯 구간 내에 backoff boundary (20 symbols)에서 CCA를 수행한다. non-beacon 모드에서는 임의의 시점에서 random backoff 이후 CCA를 수행하여 채널이 비어 있을 경우, 바로 데이터를 전송하며, slotted CSMA-CA의 경우 CCA의 결과가 채널이 비어 있을 때, 다음 backoff boundary에서 한 번 더 CCA를 수행한다. 지수 승으로 증가하는 random backoff period로 인해 채널 상황이 좋지 않을 때 앞서 살펴본 성능 분석의 이전 연구에서와 같이 throughput 및 전원 관련 성능이 이에 비례하여 떨어 질 수 있다. 따라서 짧은 CCA 수행 시간 이외의 시간동안의 전원관리가 매우 중요하다.

6) MAC Frame Handling : 데이터를 송신 또는 수신할 경우 MAC 프레임을 조합(assembling)하고 분해(parsing)하여야 한다. MAC 프로토콜은 수신된 MPDU대해서 헤더 정보를 분해하고, beacon 또는 MAC command 프레임일 경우 payload부분 역시 해당 포맷에 맞게 분해하여야 한다. 반대로 MSDU를 송신할 때는 반대로 헤더를 붙여야한다. MAC의 소프트웨어 구현상에서 이러한 절차는 여러 프리미티브와 여러 프레임 타입을 지원하기 위해 코드의 중복의 가능성이 높다. 또한, indirect 송수신의 경우 data request command를 받은 코디네이터는 *aTurnaroundTime*내에 MAC 프레임의 헤더를 확인하고 로컬 pending queue에서 해당 프레임의 주소 정보를 검색하여 FCF의 pending 플래그를 설정하여 ACK 프레임을 준비해야한다. MCU의 성능을 고려할 때, 이러한 과정을 소프트웨어에서 *aTurnaroundTime* 내에 처리하는 것이 어려울 수 도 있다.

7) MAC Superframe Management : beacon-enabled 모드에서 코디네이터는 로컬에서 beacon 프레임을 BO가 정한 주기로 브로드캐스팅 한다. 코디네이터가 아닌 각 노드들은 inactive구간의 boundary에서 전송되는 beacon을 받아 로컬 타이머를 동기화 한다. 이 동기화 과정을 MCU가 inactive구간 이후 깨어나 처리하기에는 지연이 발생하기 쉬우며 이를 보정하기 위한 알고리즘이 별도로 구현되어야 한다. 또한 beacon-enabled 모드로 WPAN이 운영되는 상황에서 상위 레이어에서 임의의 시간에 데이터를 송신 할 때, BO와 SO의 차이가 1이상으로 그 차이가 커질수록 즉, inactive구간이 길어질수록 beacon 이후 첫 번째 슬롯에서는 여러 노드에서 데이터를 송신하려는 확률이 매우 커지게 된다. 이러한 상황 역시 전체적인 성능의 저하를 가져올 수 있다.

앞서 살펴본 기능들을 위해 상용 칩인 TI의 CC2420[10]은 몇 가지 MAC의 하부 기능들을 하드웨어의 Low MAC 기능으로 구현하였다. Auto address recognition을 통해 MCU가 자신의 데이터가 왔을 때에만 깨어나 동작 하며, 'CCA with Tx'의 기능 또한 PHY에서 구현하여 CCA 이후, 채널이 비어있을 경우 지연 없이 바로 데이터를 송신하는 기능을 제공 한다. 이렇듯 성능향상을 위해 표준안에서 명시한 PHY/MAC간의 서비스의 구분 보다는 HL-MAC을 이용한 설계를 통해 단일 프로토콜 컴포넌트로 프로토콜을 구현하는 것이 보다 효율적일 수 있다.

본 연구에서는 앞서 언급한 기능들을 중심으로 구현된 HL-MAC 기능을 이용하여 공통의 상태 기계에 기반한 단일 PHY/MAC 레이어를 설계하고 구현하였다. 구현한 프로토콜은 표준안에서 명시한 PHY, MAC 프로토콜과 등가의 기능을 갖는다. 다음 장에서는 구현한 서브레이어의 자세한 구조를 설명한다.

## Ⅲ. HL-MAC 구조

앞서 그림 1에서의 IEEE 802.15.4 MAC 서비스의 서브레이어는 SoC에서 제공되는 HL-MAC을 이용한 최적화 구현을 위해 그림 3에서 송수신기 제어부인 TRCP의 PHY 추상화 레이어와 연결된다. 그림 3에서 가장 하위에 송수신기의 하드웨어 장치와 HL-MAC 장치가 위치한다. 두 하드웨어 장치는 TRCP에 의해 제어되며, 상위의 MCPS와 MLME 서브레이어로부터 PHY 서비스 프리미티브를 통한 이벤트로 TRCP로 전달된다.

TRCP의 내부 구조는 그림 4와 같다. 그림 4에서 TRCP는 네 부분으로 구성되는데 송수신기 장치의 상태에 따른 처리를 담당하는 송수신 상태기계가 있으며, 상태에 따른 시스템 전원을 제어하는 SWC(Sleep and wakeup controller)가 있다. SWC는 상태 기계의 동작 과정에서 MCU를 포함한 각 장치들의 전원 레벨을 조절하는 역할을 담당한다. 한편, 송수신기 및 HL-MAC 하드웨어로부터의 인터럽트 및 제어 이벤트의 처리를 담당하는 PEH

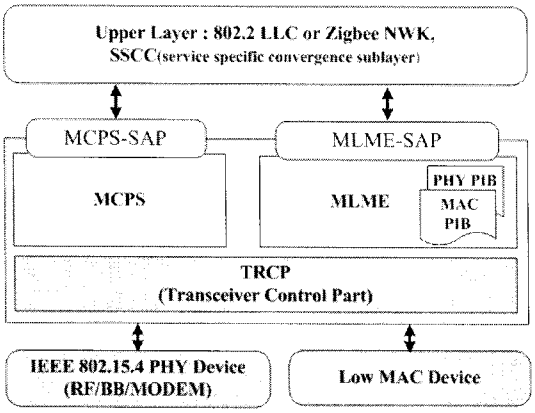



그림 3. IEEE 802.15.4 PHY/MAC의 SoC 구현 모델

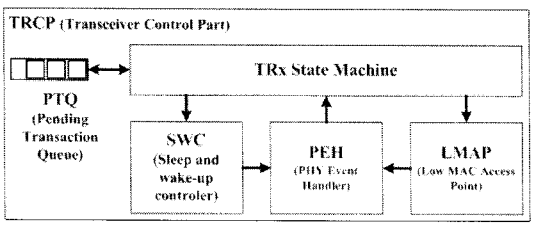



그림 4. 송수신기 제어부(TRCP)의 다이어그램

(PHY event handler)가 있고, HL-MAC 장치의 제어 부분인 LMAP(low MAC access point) 이 있다.

### 3.1 LMAP

HL-MAC은 앞서 Ⅱ장에서 살펴보았던 주요 기능들에 대응되어 하드웨어로 구현된다. LMAP은 HL-MAC을 제어하는 API를 제공하며, 구현된 HL-MAC의 주요 기능들은 다음과 같다.

1) AAR(auto address recognition) : 로컬 메모리에 저장된 PAN Id, 16-bits short address , 64bits extended address의 주소 정보와 자신이 코디네이터 인지를 나타내는 플래그 정보를 MAC이 초기화 될 때, 지정된 레지스터에 입력된다. 이후, 수신된 프레임을 받을 것인지, 버릴 것인지를 MCU의 개입 없이 HL-MAC에서 이를 판단한다. 그 규칙은 표준 문서[1]에서 명시된다.
2) MHP(MAC header parser) : Baseband에서 SFD (start-of-frame delimiter) 수신 이후의 신호를 demodulation하는 과정에서 프레임 length와 MAC header의 각 필드 정보는 분해되어 지정된 레지스터에 써진다. 이때 앞의 AAR 블럭이 동시에 동작하며, 주소 정보를 확인한다. 주소 정보가 일치 하지 않아 수신된 프레임을 버릴 경우, PHY 헤더에 명시된 프레임의 길이를 바탕으로 남은 IFS(inter-frame spacing)을 고려한 프레임의 길이만큼 수신기를 꺼서 수신기의 전원 소모를 최소화 한다.
3) AACK(auto acknowledement) : 수신된 프레임의 MAC 헤더에서 ACK 프레임을 요구할 경우, HL-MAC은 수신된 프레임의 시퀀스 번호를 복사하여 ACK 프레임을 로컬 Tx FIFO에 복사한다. 지정된 레지스터에 pending 플래그를 0또는 1로 써주면 ACK 프레임이 전송된다. 이때 노드가 코디네이터가 아닐 경우 indirect 송수신에 대한 설정을 하지 않으면 *aTurnaroundTime* 이후, pending flag가 0으로 설정되어 ACK 프레임은 자동으로 전송된다.
4) Re-transmission : MAC 프레임의 송신 후, Ack 프레임을 못 받은 경우, 송신 노드는 같은 프레임을 재전송 해야 한다. 따라서, 재전송과정에서 MCU의 간섭을 최소화시키기 위해 상태기계의 송신 과정이 끝날 때까지 즉, state machine에서 송신의 종료 이벤트를 받기 전까

지 HL-MAC에서는 Tx FIFO의 데이터를 계속 유지시키며, 재전송 카운터를 제공하여 PEH에서 재전송을 할 것인지 에러를 반환할 것인지에 대한 이벤트를 분기시킬 수 있게 한다.

5) CCA with Tx: HL-MAC은 CCA가 끝남과 동시에 채널이 비어 있을 경우, 송신을 시작하는 기능을 제공한다. 이때, NB(num of backoff), CW(contention window) 그리고, *macMaxCSMABackoff* 와 같은 CSMA-CA 파라미터 값을 입력 받아, CCA의 결과에 이를 반영한 인터럽트를 띄운다.

6) superframe management: beacon-enabled 모드에서의 superframe을 구현하기 위해 HL-MAC에서는 symbol resolution (2.5GHz에서 16 usec, sub1GHz에서 25usec)의 전용 타이머를 제공한다. superframe 타이머는 slot boundary와 backoff boundary에서 인터럽트를 발생시킬 수 있으며, beacon 동기화시 MHP와 연동하여 beacon 수신 시, SFD에서 타이머가 reset되도록 설정할 수 있다.

7) Auto-CRC, AES-128/CCM encryption/decryption : MAC 프레임을 수신 후, 자동으로 CRC를 체크하는 기능을 제공하며, security 체크가 필요한 경우, encryption과 description의 기능을 제공한다.

### 3.2 SWC

SWC(Sleep-and-wakeup controller)는 상위의 TRx state machine에서 각 상태에 따라 필요한 전원 모드로 시스템을 설정하는 API를 제공한다. 구현한 SoC에서 제공하는 전원 모드는 다음의 표 1과 같다.

표 1에서 PM_FULL은 MCU의 최고 클럭(32MHz)을 사용하는 모드이며, PM_SAVE는 절반인 클럭(16MHz)을 사용하는 모드이다. PM_STNBY와 PM_IDLE 모드는 저전력을 위해 32.768kHz의 클럭을 사용하는 모드이다. PM_STNBY모드는 PLL들을 비롯한 주요 하드웨어 블록들이 대기하는 상태에서 바로 동작이 가능한 상태이지만, PM_IDLE에서는 RTC와 최소 메모리를 제외한 모든 하드웨어의 전원이 차단되며, 외부 인터럽트에 의해 깨어날 수 있으며 약 500 msec 정도의 start-up 시간이 필요한 모드이다. PM_PWDN모드는 power-on-reset으로 깨어날 수 있다.

표 1. SoC 전원 소모 파라미터 요약 (uA)

| 항목 | | Value |
|---|---|---|
| MCU | PM_FULL | 20,000 |
| | PM_SAVE | 9,600 |
| | PM_STNBY | 296 |
| | PM_IDLE | 0.9 |
| | PM_PWDN | 0.4 |
| Transceiver | Tx | 17,400 |
| | Rx | 18,800 |
| | IDLE | 426 |
| | PWDN | 1 |

### 3.3 PEH

송수신기 장치와 HL-MAC에서의 인터럽트는 PEH로 라우팅되고, PEH는 HL-MAC의 각 상태 레지스터에 맞게 인터럽트를 소프트웨어 이벤트로 분기시켜 상위의 송수신 상태기계로 전달한다. 정의된 이벤트들은 그림 5와 같다. 각 이벤트에 대한 설명은 다음 절에서 상태기계와 같이 설명한다.

```
E_RESEST
E_EXPIRED_TIMER
E_PD_DATA_REQUEST
E_PLME_CCA_REQUEST
E_PLME_ED_REQUEST
E_BUSY_CHANNEL
E_IDLE_CHANNEL
E_CHANNEL_ACCESS_FAILURE
E_START_TX
E_TX_END
E_TX_END_ACK_REQUIRED
E_NO_ACK
E_RX_END
E_RX_END_ACK_REQUIRED
E_TURNON_RX
```

그림 5. TRx 이벤트 정의

### 3.4 TRx State Machine

IEEE 802.15.4 PHY/MAC의 최적화를 위해 설계한 상태 기계의 구조는 그림 6과 같다. TRx state machine은 하위의 PEH를 통해 이벤트를 받으며, 상위 레이어의 MAC 프리미티브 이벤트를 받아서 처리를 한 다음 결과를 해당 MAC 프리미티브에 전달한다. 상태 기계는 CSMA-CA의 과정을 포함한 직접적인 송수신에 관련된 상태를 명시하며, IEEE 802.15.4 에서 정의된 MAC의 관점에서 PHY의 상태 및 상태전환 이벤트들을 일반화 시켜 정의한다. 각 상태의 정의와 세부 동작은 다음과 같다.

1) _IDLE : 시스템의 전원이 켜지고 E_RESET의

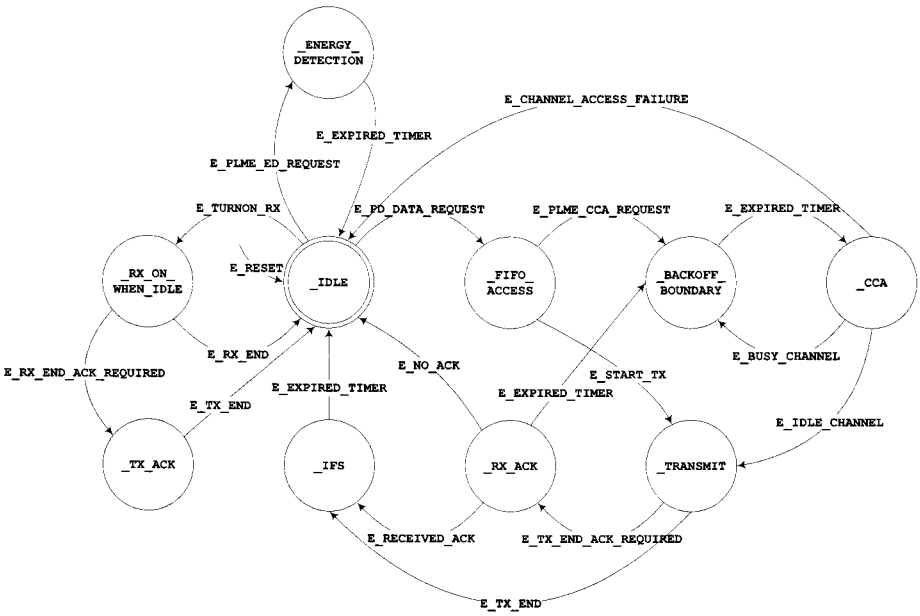



그림 6. 송수신 상태기계 다이어그램

이벤트에 의해 송수신기의 초기화가 되면 해당 상태로 전환 후 다음 이벤트를 기다린다. _IDLE 상태에서는 표준의 PD_DATA.request() 프리미티브에 대응되는 E_PD_DATA_REQUEST의 이벤트를 받으면 _FIFO_ACCESS상태로 전환하고, HL-MAC의 FIFO에 송신하고자 하는 데이터 프레임을 적는다. 한편, E_TURNON_RX 이벤트에 대해서는 수신기 장치를 켜고 데이터를 수신 대기를 한다. 또한, 상위 레이어에서 PLME_ED.request()에 대응되는 E_PLME_ED_REQUEST를 받게 되면 타이머를 설정하고 E_ENERGY_DETECTION상태로 전환한다.

2) _FIFO_ACCESS : 송수신기는 데이터를 전송하기 위해 FIFO에 보낼 데이터를 적는 작업이 끝나길 기다리며, E_PLME_CCA_REQUEST를 받게 되면 CSMA-CA의 과정을 시작한다. HL-MAC의 기능을 이용하여 backoff 타이머를 시작하고, backoff의 길이에 따라 SWC를 통해 시스템의 전원을 관리한다. 그런 다음 _BACKOFF_BOUNDARY 상태로 전환한다. 한편, E_START_TX의 이벤트를 받으면, 송수신기는 contention free 송신으로 간주하고 CSMA-CA없이 즉시 데이터를 전송하도록 제어한다.

3) _BACKOFF_BOUNDARY : 이 상태에서는 backoff가 끝나길 기다리며, E_EXPIRED_TIMER의 이벤트를 PEH로부터 받게 되면 backoff boundary를 찾고 HL-MAC에서 제공하는 CSMA-CA 파라미터 값을 조정한 다음 HL-MAC에서 제공하는 CCA를 동작 시킨다. 그리고 _CCA로 상태를 전환한다.

4) _CCA : 약 8 symbols 이상 채널 모니터링이 끝나길 기다리며, 결과로서 현재의 채널이 사용중일 경우, PEH로부터 E_BUSY_CHANNEL 또는 E_CHANNEL_ACCESS_FAILURE의 이벤트를 받는다. E_BUSY_CHANNEL 이벤트는 아직 CSMA-CA의 과정이 끝나지 않았음을 의미하며, CSMA-CA의 파라미터 레지스터 값들을 갱신하고 _BACKOFF_BOUNDARY의 상태로 전환하여 다시 수행한다. 한편, E_CHANNEL_ACCESS_FAILURE의 이벤트는 CSMA-CA의 처리 결과 채널을 얻을 수 없다는 의미로써, _IDLE 상태로 전환하고, 모든 전송 상태를 취소한다. _CCA 상태에서 채널이 비어 있을 때, 송수신 상태 기계는 E_IDLE_CHANNEL 이벤트를 받는다. 이 이벤트에 대해 slotted CSMA-CA의 경우 한 번 더 backoff boundary에서 CCA를 수행하고 그렇지 않으면 바로 HL_MAC에서는 송신이 시작되고, 상태는 _TRANSMIT상태로 전환된다.

5) _TRANSMIT : 데이터의 전송이 완료되길 기다린다. E_TX_END_ACK_REQUIRED일 경

우, ACK 프레임을 수신하기 위해 _RX_ACK 상태로 전환한 다음 수신기를 켜고 타이머를 동작시키고, ACK 프레임이 도착하길 기다린다. 만약, E_TX_END일 경우, ACK가 필요 없는 송신으로써 IFS(interframe spacing)을 위해 _IFS 상태로 전환한 다음 IFS를 위한 타이머를 동작시킨다.

6) _RX_ACK : ACK 프레임의 수신을 기다리는 상태로서 ACK를 수신하게 되면, E_RECEIVED _ACK의 이벤트를 받게 되고, ACK를 수신하지 못하면, 타이머로부터 E_EXPIRED_TIMER를 받는다. E_RECEIVED_ACK를 받게 되면, 앞서 _TRANSMIT 상태에서와 마찬가지로 _IFS상태로 전환한다. 그리고, E_EXPIRED_TIMER 이벤트를 받게 되면, 재전송을 하기 위해 _BACKOFF_BOUNDARY 상태로 전환하고, E_NO_ACK를 받게 되면 _IDLE 상태로 전환하고 데이터의 송신과정을 마친다.
7) _IFS : IEEE 802.15.4 표준에서는 interframe spacing을 명시하고 있다. 프레임의 길이 따라 서로 다른 시간을 설정하여 타이머가 종료되길 기다린 다음 E_EXPIRED_TIMER 이벤트를 받아서 _IDLE 상태로 전환하고, 데이터의 송신을 마친다.
8) _RX_ON_WHEN_IDLE : 이 상태는 수신기를 켜고 임의의 프레임이 도착하길 기다리는 상태이다. E_RX_END_ACK_REQUIRED의 이벤트의 경우, 수신된 프레임은 ACK 프레임을 요구했기 때문에 코디네이터가 아닐 경우, HL-MAC에 의해 자동으로 ACK가 전송되고, ACK프레임의 송신 완료를 위해 _TX_ACK 상태로 전환한다. 코디네이터일 경우 HL-MAC을 직접 제어하여 ACK를 전송해야한다. 이때, 프레임의 타입이 data request command일 경우, pending queue를 검색하여 pending 플레그를 설정하여 ACK가 전송되게 한다. 만약 E_RX_END 이벤트의 경우, 데이터 송신이 종료되었기 때문에 _IDLE 상태로 전환하여 수신한 프레임을 상위 레이어에서 처리할 수 있도록 한다.
9) _TX_ACK : ACK 프레임의 전송이 끝나길 기다린다. PEH로부터 E_TX_END의 이벤트에 대해 송수신기를 끄고 _IDLE상태로 전환한다.
10) _ENERGY_DETECTION : 입력된 시간동안 채널의 에너지 상태를 모니터링하는 과정이 끝나길 기다린다. E_TIMER_EXPIRED 이벤트를 받게 되면, 송수신기를 끄고, HL-MAC으로부터 결과 값을 저장한 다음, _IDLE상태로 전환한다.

## Ⅳ. 성능 평가

우리는 IEEE802.15.4 호환 SoC을 구현 하였다. 그림 7은 구현한 SoC 칩과 모듈이며 구현한 SoC 칩의 내부 블록도는 그림 8과 같다. SoC는 8051 코어의 MCU를 가지고 있으며,. 128K 플래시 메모리와 8Kbytes의 데이터 메모리에, BB/Modem 및 RF 블럭을 포함한다. 또한 앞서 설명한 HL-MAC의 주요 기능 구현되었으며, 타이머, UART 및 GPIO등의 주변 장치들을 포함하고 있다.

구현한 SoC 모듈에서 동작하는 소프트웨어의 구조는 그림 9와 같다. uCOS-II[13]의 multi tasking 소형 운영체제에서 MAC과 네트워크 프로토콜이 동작한다.

MAC 프로토콜의 성능 평가를 위해 FFD(full function device)의 기능을 갖는 소프트웨어 PHY/MAC 스택을 구현하였다. 또한, 간단한 예제 SNF(sense and forward)[11]를 구현하여 기능을 검증하였다. SNF는 주기적으로 장착된 온도센서에서 데이터를 센싱하여 코디네이터로 약 20bytes의 데이

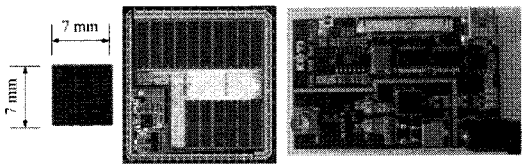



그림 7. Ubichip SoC 및 센서 모듈

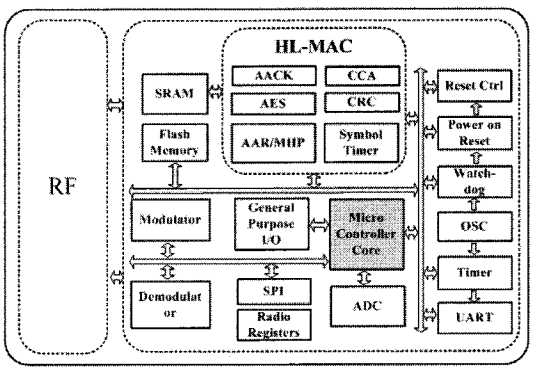



그림 8. Ubichip SoC 블록 다이어그램

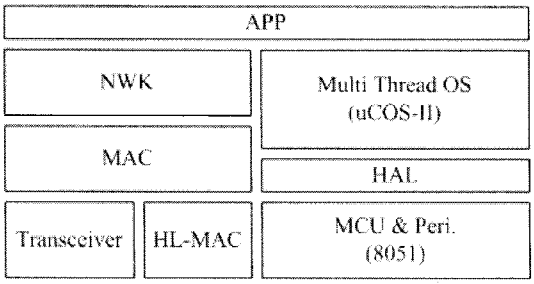



그림 9. 시스템 소프트웨어 블록 다이어그램

터를 전송하는 응용이다.

먼저, 구현한 시스템 전체의 코드 사이즈 비교는 표 2와 같다. HL-MAC을 사용하지 않았을 때와 사용하여 같은 기능의 FFD를 구현했을 때를 비교하면 MAC의 코드 사이즈는 약 40%가까이 줄었으며, 전체 노드의 관점에서 봤을 때, 코드에서 약 30%이상 사이즈가 줄었음을 보여준다.

표 3은 SNF의 1주기의 송신 과정에서 MAC의 동작을 위해 MCU가 PM_SAVE이상의 모드에서 동작하는 평균 시간을 측정한 결과이다. HL-MAC을 사용할 경우 MCU의 동작 시간은 55%이상 줄어들었다.

SNF의 응용을 소프트웨어 구현 MAC과 HL-MAC으로 동작 시켰다. 2개의 AA 전지로 노드가 동작한다고 했을 때 duty-cycle에 대한 예상 수명[12]을 비교한 결과는 그림 10과 같다. 그림 10의 결과는 시스템 동작 과정에서 각 하드웨어 블록단위로 구간별 시간과 소모 전원을 측정하여 계산한 값으로서 HL-MAC을 이용한 MAC 스택의 전원 소모 성능이 더 좋음을 알 수 있다. 이것은 HL-MAC을 이용하여 MCU의 동작 시간을 크게 줄이고, TRx state machine에서 SWC을 통해 MAC의 세부적인 전원관리를 해준 결과이다.

표 2. 코드 사이즈 비교 (bytes)

| 항목 | | SW-MAC | HL-MAC | 차이 |
|---|---|---|---|---|
| Program | HAL | 4,567 | 3,307 | 1,260 (27.5%) |
| | KERNEL | 6,799 | 6,799 | - |
| | MAC | 29,084 | 17,377 | 11,707 (40.3%) |
| | APP | 1,077 | 1,077 | - |
| | Total | 41,527 | 28,360 | 12,967 (31.2%) |
| Data | HAL | 466 | 326 | 140 (30%) |
| | KERNEL | 201 | 201 | - |
| | MAC | 3,106 | 2,005 | 1,101 (35.4%) |
| | APP | 358 | 358 | - |
| | Total | 4,131 | 2,890 | 1,241 (30.0%) |

표 3. MCU Bound Time (usec)

| MAC 서비스 | SW MAC | HL-MAC | 차이 |
|---|---|---|---|
| MAC Primitives | 186 | 162 | 24(12.9%) |
| CSMA-CA | 211 | 45 | 166(78.7%) |
| TRx Frame | 46 | 32 | 14(30.4%) |
| TRx ACK | 151 | 24 | 127(84.1%) |
| Total | 594 | 263 | 331(55.7%) |

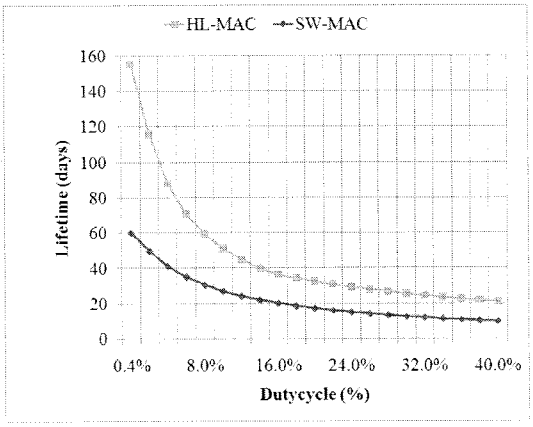



그림 10. 시스템 Lifetime 비교

## V. 결 론

본 논문에서는 IEEE802.15.4 MAC 프로토콜의 분석과 성능 평가의 기존 연구들을 바탕으로 SoC의 구현에 있어서 MAC의 세부 기능을 추출하여 HL-MAC으로 설계하고 구현하였다. 구현한 HL-MAC을 이용하여 PHY와 MAC 레이어의 소프트웨어 프로토콜을 최적화 할 수 있었다. 실험적으로 측정한 구현의 결과는 하드웨어 구현으로 인한 복잡도 및 가격 상승에 비해 소프트웨어의 메모리 효율을 향상 시킬 수 있었으며, MCU의 전원소모를 최소화 할 수 있었고, MAC 프로토콜의 타이밍 동작에서 빠른 응답시간을 확보 할 수 있었다.

## 참 고 문 헌

[1] IEEE Std 802.15.4-2006, IEEE Standard for Information technology -. Telecommunications

and information exchange between systems -. Local metropolitan area networks -. Specific requirements, Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs), 2006.

[2] G. Lu, B. Krishnamachari, and C. S. Raghavendra, "Performance evaluation of the IEEE 802.15.4 MAC for low-rate low-power wireless networks," in Proc. Workshop EWCN, pp. 701 - 706, Apr. 2004.

[3] B. Bougard, F. Catthoor, D. C. Daly, A. Chandrakasan, and W. Dehaene, "Energy efficiency of the IEEE 802.15.4 standard in dense wireless microsensor networks: Modeling and improvement perspectives," in Proc. Des. Autom. Test Eur., pp.196 - 201, Mar. 2005.

[4] J.-S. Lee, "An experiment on performance study of IEEE 802.15.4 wirelessnetworks," in Proc. IEEE Conf. ETFA, pp.458 - 466, Sep. 2005.

[5] A. Kouba, A. Cunha, and M. Alves, "A time division beacon scheduling mechanism for IEEE 802.15.4/zigbee cluster-tree wireless sensor networks," in Proc. 20th Euromicro Conf. Real-Time Syst. ETFA, pp.125 - 135, Jul. 2007.

[6] A. Koubaa, M. Alves, and E. Tovar, "A comprehensive simulation study of slotted CSMA/CA for IEEE 802.15.4 wireless sensor networks," in Proc. IEEE Int. WFCS, pp. 183 - 192, Jun. 2006.

[7] T. O. Kim, H. Kim, J. Lee, J. S. Park, and B. D. Choi, "Performance analysis of the IEEE 802.15.4 with non beacon-enabled CSMA/CA in nonsaturated condition," in Proc. Int. Conf. EUC, pp.884 - 893, Aug. 2006.

[8] Lo Bello, L.; Toscano, E., "Coexistence Issues of Multiple Co-Located IEEE 802.15.4/ZigBee Networks Running on Adjacent Radio Channels in Industrial Environments", Industrial Informatics, IEEE Transactions on Volume 5, Issue 2, pp.157-167, May 2009.

[9] S. Shin, et al, "Packet error rate analysis of IEEE IEEE 802.15.4 under between IEEE 802.15.4 and IEEE 802.11b interference," Proc. WWIC'05, pp.279-288

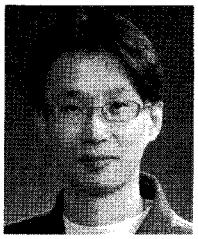
[10] TI, "CC2420 2.4 GHz IEEE 802.15.4 / ZigBee-ready RF Transceiver," http://www.chipcon.com.

[11] S. Bhatti, J. Carlson, H. Dai, J. Deng, J. Rose, A. Sheth, B. Shucker, C. Gruenwald, A. Torgerson, R. Han, "MANTIS OS: An Embedded Multithreaded Operating System for Wireless Micro Sensor Platforms", ACM/Kluwer Mobile Networks & Applications (MONET). Special Issue on Wireless Sensor Networks Vol. 10. No. 4, 2005, pp. 563-579.

[12] A. Mainwaring, J.Polastre, R. Szewczyk, D. Culler, J. Anderson, "Wireless Sensor Networks for Habitat Monitoring", First ACM Workshop on Wireless Sensor Networks and applications, 2002, pp.88-97.

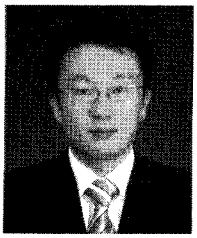
[13] uCOS-II, http://www.micrium.com/

**황 태 호** (Hwang Tae-ho) 정회원



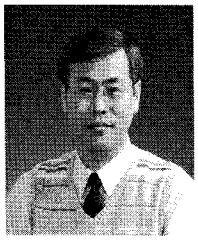
2000년 2월한국외국어대학교 컴퓨터공학과 석사
2000년 1월~현재 전자부품연구원 멀티미디어IP 연구센터
2007년 2월~현재 한국외국어대학교 컴퓨터공학과 실시간 운영체제 박사수료
<관심분야> WPAN MAC/NWK, 실시간운영체제

**김 동 순** (Kim Dong-sun) 정회원



1997년 2월 인하대학교 전자재료공학과 석사
2005년 2월 인하대학교 전자재료공학과 미디어시스템 박사
1999년 2월~현재 전자부품연구원 멀티미디어IP 연구센터
<관심분야> 임베디드 하드웨어, SoC Design

**원 광 호** (Won Gwang-ho) 정회원



1981년 2월 단국대학교 정보통신 석사

1998년 2월~현재 전자부품연구원 u임베디드 연구센터

2007년 2월 광운대학교 전자통신 박사수료

<관심분야> WPAN(ZigBee, UWB) 기술, 지능형 홈 네트워크