

# IEEE 802.15.4 기반 저전력 컨테이너 보안장치의 설계 및 구현

정회원 박 세 영\*, 준회원 김 택 현\*, 정회원 최 훈\*, 종신회원 백 운 주\*<sup>o</sup>

## Design and Implementation of Low Power Container Security Device based on IEEE 802.15.4

Seyoung Park\* *Regular Member*, Taekhyun Kim\* *Associate Member*,  
Hoon Choi\* *Regular Member*, Yunju Baek\*<sup>o</sup> *Lifelong Member*

### 요 약

컨테이너 보안장치(CSD)는 컨테이너의 도어를 통한 침입을 감시하는 장치이며, IEEE 802.15.4의 비컨 모드에서 RFD로 동작한다. 그러나 비컨 모드에서는 CSD 리더가 없어도 주기적으로 리더의 신호를 탐지하게 되므로 배터리 소모가 크다. CSD는 목적지에 도착할 때까지 이상없이 동작해야 하므로 배터리 소모를 줄이고 위험 발생 시 CSD 리더에게 능동적으로 메시지를 전달해야 한다. 본 논문에서는 미국 DHS의 CSD 규격에 부합하는 저전력 CSD를 제안한다. 제안하는 CSD는 전력 소모를 최소화한 하드웨어 디자인과 저전력 동작기법인 불침번 기법, 저전력 센싱 기능을 통해 배터리 소모를 줄인다. 또한 위험 상황 발생 시 리더에게 능동적으로 경고 메시지를 전달한다. 성능 평가 결과 제안한 CSD는 불침번 기법을 통해 배터리 소모를 70% 이상 줄이고, 저전력 센싱 기능을 통해 불필요한 센싱을 80% 이상 감소시키며, 직접적인 통신 거리 밖에 있는 리더에게 94%가 넘는 확률로 메시지를 전달할 수 있음을 보였다.

**Key Words** : CSD; Container Security Device; low power; night watch; IEEE 802.15.4.

### ABSTRACT

A container security device (CSD) monitors intrusions through the cargo door; it is a reduced function device that uses IEEE 802.15.4 with a beacon mode. However, in the beacon mode, the CSD consumes too much battery power in periodical idle listening and sensing trials. Moreover, the CSD cannot send the message to the CSD reader actively, and it makes big latency problem. Therefore, we propose a low-power CSD to reduce the unnecessary power consumption. The proposed CSD follows the requirements of the U.S. Department of Homeland Security, and reduces battery consumption through a power-efficient hardware design, a night-watch mechanism for low-power operation and low-power sensing to reduce unnecessary monitoring. And the CSD sends alert message to the CSD reader. Simulation results show that our CSD reduces battery consumption by over 70% through the night-watch mechanism and by approximately 80% through the low-power sensing. And the CSD can send the alert message to the remote CSD reader by over 94%.

\* “이 논문은 2008년 교육과학기술부로부터 지원받아 수행된 연구임” (지역거점연구단육성사업/차세대물류IT기술연구사업단)

\* 부산대학교 컴퓨터공학과(yunju@pusan.ac.kr), (°: 교신저자),

논문번호: KICS2009-10-462, 접수일자: 2009년 10월 13일, 최종논문접수일자: 2010년 1월 30일

## I. 서 론

전 세계적으로 물류 보안이 강화되면서 각국에서는 물류 보안을 위해 다양한 법안들을 발표하고 있다. 대부분의 법안은 긴 시간과 많은 비용을 요하는 전수검사를 포함하며, electronic seal (e-seal)과 같은 전자적 보안장치를 컨테이너에 설치한 경우 전수검사를 생략할 수 있도록 하고 있다.

2007년 12월에 미국 국토안보부(Department of Homeland Security (DHS))에서는 컨테이너를 이용한 테러 방지를 위해 container security device (CSD) 규격을 발표하였다<sup>[1]</sup>. CSD는 컨테이너 내부에 부착되어 컨테이너 도어를 통한 침입을 감지하는 장치로, 컨테이너 내부에 장착하고 통신 패킷을 암호화하여 기존 RFID 장치들에 비해 보안성을 높였다. CSD는 2.4GHz 대역 IEEE 802.15.4<sup>[2]</sup>의 비컨 모드에서 reduced function device (RFD)로 동작하며, CSD의 정보를 수집하는 CSD 리더(reader)는 WPAN coordinator로서 full function device (FFD)이다. CSD는 출발지에서부터 도착지까지의 모든 이벤트를 기록하며, 리더의 요청이 있을 때 이를 전달한다<sup>[3]</sup>. 또한 CSD는 1초마다 도어의 상태를 센싱해야 하며, 목적지에 도달할 때까지 이상 없이 동작할 수 있어야 한다<sup>[1]</sup>. 그러나 CSD는 비컨 모드로 동작하기 때문에, 주변에 네트워크 코디네이터인 CSD 리더가 없어도 주기적으로 리더의 비컨 신호를 탐색하며, 1초마다 도어와 내부 상태를 확인해야 하기 때문에 빠른 속도로 배터리를 소모하게 된다. 또한, 리더의 요청이 있을 때만 데이터를 전달할 수 있기 때문에, 화재와 같은 위험 상황을 감지했을 때에는 상태를 전달하지 못하는 문제가 있다.

본 논문에서는 전력 소모 문제와 수동적인 상태 전달 문제 해결을 위해, DHS의 CSD 규격을 준수하며 저전력으로 동작하는 CSD를 설계하고 구현하였다. 본 논문에서 구현한 CSD는 빠른 전력 소모 문제와 수동적인 상황 전달 문제 해결을 위해, CSD의 요구 기능을 만족하면서 전력을 적게 소모하는 부품들을 사용하였고, 저전력 동작 기법인 불침번 기법, 저전력 센싱 기능, 멀티홉 방식의 능동적 경보 기능을 구현하였다. 성능 평가 결과 제안한 CSD는 불침번 기법을 통해 배터리 소모를 70% 이상 줄이고, 저전력 센싱 기능을 통해 불필요한 센싱을 80% 이상 감소시켰으며, 멀티홉 방식으로 1홉 통신 거리 밖에 있는 리더에게도 94% 이상의 확률로 메시지를 전달할 수 있음을 보였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서 CSD의 실제 동작 과정과 저전력 동작 기법을 위한 기법의 관련 연구, 3장에서는 저전력을 고려한 하드웨어 설계를 언급하며, 4장에서 본 논문에서 설계 및 구현한 불침번 기법, 저전력 센싱 기능, 능동적 경보 기능에 대해 기술한다. 5장에서 제안한 하드웨어 성능을 기반으로 각 기법의 성능을 평가하고, 마지막으로 6장에서 결론을 맺는다.

## II. 관련 연구

### 2.1 CSD 시스템 구성과 동작

그림 1은 CSD가 장착될 때부터 해제될 때까지의 통신 과정을 나타낸다. CSD의 시스템은 CSD, CSD 리더, data consolidation point (DCP)로 구성된다. CSD는 출발지에서 컨테이너에 장착(arm)되고, 중간 지점인 출발항에서 검수 절차를 거친 후 통관 된다. 중착지에 도착하여 검수 후 이상이 없으면 해제(deactivate)된다. CSD 리더는 CSD들과 네트워크를 구축하며, 고정형과 보안이동형 (secure hand-held reader (SHHR))으로 구분된다. 고정형 리더는 DCP와 TCP/IP 방식으로 통신하며, DCP와 CSD를 중계하는 역할을 한다. SHHR은 검수를 위해 사용되며, 검수할 CSD의 암호키를 DCP에서 미리 다운로드받아 DCP와 연결되지 않은 상태로도 CSD의 정보를 열람할 수 있다. DCP는 웹서버의 형태이며, 고정형 리더를 통해 CSD를 제어하고, 데이터를 교환하며, 모든 CSD들의 화물 정보, 이벤트 로그, 상태 데이터, 암호키 등을 관리한다.

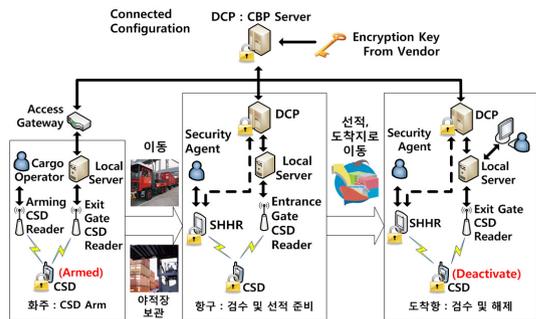


그림 1. CSD 시스템 흐름도  
Fig. 1. CSD system flow

### 2.2 무선 센서 네트워크의 에너지 효율성 향상

CSD는 무선 통신 기능과 센싱 기능을 포함하기 때문에 무선 센서 네트워크의 범주에서 생각할 수

있다. 센서 네트워크의 무선 통신 장치들처럼 CSD는 배터리로 동작하며, 무선 신호 송수신은 다른 동작에 비해 전력 소모가 크기 때문에 배터리 수명을 좌우하는 가장 큰 요인이다. 그러나 CSD의 경우에는 CSD 리더와 통신하는 시간이 전체 동작 기간 중 극히 낮은 비율에 해당한다. CSD의 경우 IEEE 802.15.4의 규정 속도인 250kbps로 통신하며, 100 byte의 데이터 전달에 약 3ms가 걸린다. 1회의 검수 시 CSD와 리더 간의 통신은 대부분 1분 이내에 모두 이루어진다. 따라서 실제 장착, 선적 전 검수, 도착항 검수를 모두 합쳐도 전체 통신시간은 10분 이하이며, CSD가 도착지에 도달하는 시간이 길수록 CSD의 전체 동작 시간에 대한 통신 시간 비율은 낮아지게 된다. 예를 들면, 한국에서 미국으로의 항해는 최소 8일 이상의 시간이 소요되며, CSD가 장착된 컨테이너들은 (8일-10분)/8일 = 99.99% 이상의 시간을 리더가 없는 야적장이나 컨테이너선에서 존재한다. 결국 CSD가 리더가 없는 환경에서 매우 오랜 시간 동작하게 되므로 불필요한 CSD의 동작을 가능한 최소화할 필요가 있다.

### 2.3 전력소모 절감을 위한 토폴로지 제어

야적장이나 컨테이너선과 같은 환경에서 오랜 시간 컨테이너들이 군집상태로 있기 때문에 다수의 CSD들의 연계된 동작을 고려할 수 있다. 다수의 CSD들을 연계하여 저전력으로 동작시키는 것은 무선 센서 네트워크의 토폴로지 기법 중 노드의 동작 상태 제어 방법과 유사하다. 노드의 동작 제어 방법은 지리적으로 비슷한 위치에 있어 동시에 동작할 필요가 없는 노드들을 저전력으로 동작시켜 에너지 소모를 줄이는 방법이다. 주로 유희 상태로 존재하는 시간을 줄이는 것이 목적이며, 각 노드들이 이웃 노드 정보, 싱크와 통신하기 위한 라우팅 경로, 노드들의 에너지 보유량 등의 정보를 관리해야 한다. 대표적인 것으로 Energy dependent participation (EDP)<sup>[4]</sup>, Geography-informed energy conservation for ad-hoc routing (GAF)<sup>[5]</sup> 등이 있다.

EDP는 노드 동작 제어 기법 중 하나로 이웃 노드의 정보, 위치 정보 등을 사용하지 않고 노드의 에너지 잔량에 의존해서 동작 상태를 결정한다. 그러나 노드의 에너지 잔량에 의한 확률에 의해 노드 동작 상태를 결정하기 때문에 노드의 에너지 소비에 따라 깨어 있는 노드 수가 적어지며, 시간에 따라 불규칙적인 잠은 노드들의 네트워크의 연결성을 떨어뜨리는 단점이 있다.

GAF의 경우 Zone(구역) 방식으로 노드들을 관리한다. 미리 정해진 각 구역마다 1개의 대표 노드를 선출하고, 대표 노드가 구역에 속하는 다른 노드들을 저전력으로 동작시켜 전력 소모를 최소화한다. 그러나 라우팅, 노드의 위치 확인과 같은 동작으로 인해 배터리 소모가 증가하는 문제가 있어 CSD에 적합하지 않다.

## III. 저전력을 고려한 컨테이너 보안장치의 설계

### 3.1 하드웨어 설계

#### 3.1.1 IEEE 802.15.4 동작

CSD는 2.4GHz 대역 IEEE 802.15.4 기반으로 동작해야 하며, 배터리 절약을 위해 저전력 동작이 가능해야 한다. 본 논문에서는 CSD의 동작 구현을 위해 Texas Instrument사의 CC2430F128 one-chip RF 프로세서<sup>[6]</sup>를 선택하였다. CC2430은 표 1과 같은 다양한 전력 모드를 지원하며, Power mode (PM) 2, 3에서는 0.5 $\mu$ A 이하의 낮은 전류를 소모한다. PM 2는 내부의 sleep timer를 이용해 자동으로 sleep/wake up이 가능하며, PM 3는 외부 인터럽트를 통해서만 wake up이 가능하다. 제안하는 CSD는 0.15 $\mu$ A의 적은 전류를 소모하며, 정확한 시간 유지 기능, 주기적 인터럽트 생성 기능이 있는 real time clock (RTC)를 장착하여 사용하므로, PM 3로 동작하여 0.45 $\mu$ A의 전류를 소모한다. 또한 CC2430은 내부에 AES128 coprocessor를 내장하여 빠른 속도로 패킷을 암호화할 수 있고, 온도 센서를 내장하여 추가적인 하드웨어 없이 온도 측정이 가능하다.

표 1. CC2430의 전력 모드  
Table 1. Power mode of CC2430

모드	소모 전류	설명
Active	12.3mA	32MHz XOSC running High MCU activity
PM 1	190 $\mu$ A	Digital regulator on 32MHz XOSC off 32.768kHz XOSC on
PM 2	0.5 $\mu$ A	Digital regulator off Sleep timer active
PM 3	0.3 $\mu$ A	No Clock

#### 3.1.2 도어 상태 확인

CSD의 가장 중요한 기능 중 하나는 컨테이너 도어의 개폐를 정확히 감지하는 것이다. CSD의 규격에서는 1초마다 도어의 상태를 확인해야 하며, 도

어가 2인치 이상 열리는 것을 감지하도록 되어 있다. 그러나 실제 컨테이너 도어는 도어의 잠금장치만 해제해도 2인치 이상 열리므로 CSD가 미세한 도어의 움직임을 잘 감지할 수 있어야 한다. 본 논문에서는 정확한 도어 개폐 감지를 위해 마이크로 스위치<sup>7)</sup>를 사용하였다. 마이크로스위치는 그림 2의 상단의 시뮬레이터 레버의 움직임 감지를 통해 정확한 도어 개폐 인지가 가능하다. 또한 평소 소비 전력이 0이며, 움직임 감지 시 전기적 신호를 발생시키기 때문에 인터럽트 방식으로 사용하여 인터럽트가 있을 때만 도어 상태를 감지하면 되므로 전류 소모량을 크게 줄일 수 있다.



그림 2. 마이크로스위치의 설치  
Fig. 2. Microswitch installation on the CSD

3.1.3 암호화 모듈

제한한 CSD 시스템에서는 CSD 규격의 데이터 암호/복호 과정을 위해 HMAC-SHA256 암호 알고리즘<sup>8)</sup>과 3.1.1에서 언급된 CC2430의 AES128 암호 기능<sup>9)</sup>을 사용해 CSD와 DCP 사이의 데이터들을 암호화한다. 각 CSD는 고유한 UID와 암호키를 가지며, DCP가 이 데이터들을 관리한다. 각 장치는 그림 3과 같이 암호키와 HMAC-SHA256 알

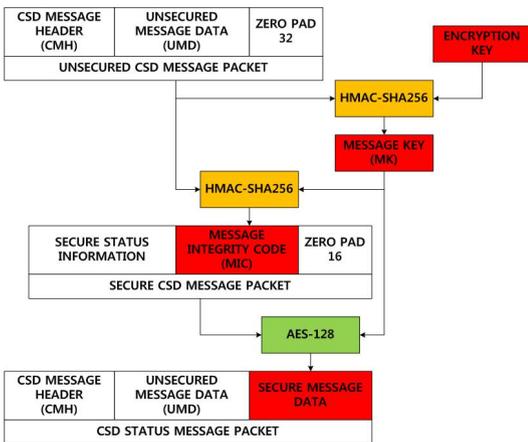


그림 3. CSD의 Status Message 암호화  
Fig. 3. CSD Status Message encryption

고리즘을 사용해 메시지와 암호화된 1차 데이터를 생성한다. CSD는 메시지를 이용해 AES128

암호 기능을 초기화하고, 1차 데이터를 AES128 기능을 통해 최종적으로 암호화 한다.

IV. 저전력 CSD를 위한 동작 설계

CSD는 가장 주된 배터리 소모의 원인인 불필요한 비컨 탐색(idle listening)을 줄여 무선 신호 수신 시도를 줄이고, 주기적인 센싱을 최소화하여 깨어있는 시간을 줄일 필요가 있다. 또한 서론에서 언급했듯이 CSD는 리더와 통신하지 않는 시간에 다른 많은 CSD들과 오랜 시간 군집 상태로 존재한다. 이 장에서는 이런 특징에 착안해, 다수의 CSD가 연계하여 CSD의 전체 동작 시간을 줄이고 비컨 탐색을 최소화하는 불침번 기법, 능동적으로 상태 측정 빈도를 조절하는 저전력 센싱 기능을 소개한다. 또한 불침번 기법과 연동하여 동작하는 능동적 경보 기능을 소개한다.

4.1 불침번 기법

불침번 기법은 서로 연결되지 않는 지역적 네트워크를 구성하는 방식이다. 토폴로지나 클러스터 방식처럼 노드를 관리하는 불침번 노드들은 서로 통신하지 않는 거리에 위치하게 되며, 지역적 네트워크들은 불침번 변경에 따라 주기적으로 재구성된다. 불침번 기법은 그림 4와 같이 스탠드 열론 모드, 불침번 모드, 저전력 수신 모드의 3가지 모드로 구성되며, CSD의 기본 동작에 크게 변형을 주지 않는 범위에서 설계되었다. 불침번 기법에 따라 CSD는 주변 상황에 따라 능동적으로 모드를 변경하여

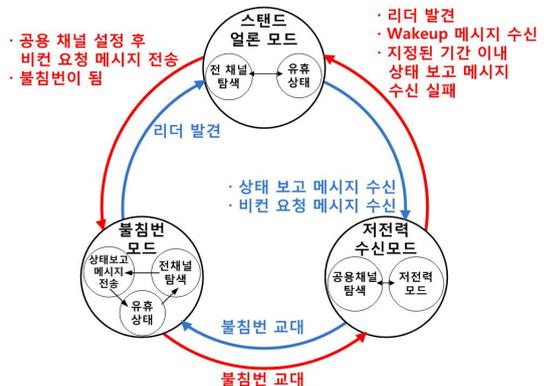


그림 4. 불침번 기법의 모드 변화  
Fig. 4. Mode change of the night watch mechanism

전력 소모를 줄인다. 또한 공용 채널 탐색 방식을 통해 불필요한 채널 스캐닝을 줄였다. 불침번 기법의 특징은 다음과 같다. 첫째, 대부분의 시간에 리더와 통신이 불가능하므로 라우팅 패스, 토폴로지 관리 등의 복잡한 연산을 줄이고, CSD들이 상황에 맞게 모드를 변경하며, CSD가 보내는 대부분의 메시지는 방송(broadcast) 형식으로 처리한다. 둘째, 저전력 모드(sleep mode)와 공용 채널 탐색 방법을 통해 배터리 소모를 줄인다. 저전력 수신 모드는 저전력 모드와 공용 채널 탐색 방식을 함께 사용하는 방식이다. 불침번 이외의 CSD들은 sleep/wake up을 반복하는 저전력 수신모드로 동작하며 wake up을 했을 때는 불침번 CSD가 정하는 공용 채널 1개만을 스캔하여 불필요한 채널 스캔을 줄였다.

#### 4.1.1 스탠드 얼론(Stand Alone) 모드

스탠드 얼론 모드는 CSD의 기본 동작이며 RFD의 기본 동작을 따른다. CSD는 리더의 비컨 수신을 위해 IEEE 802.15.4의 전 채널을 탐색하고 비컨을 수신하지 못하면 일정 시간 후 다시 채널 탐색을 시도한다. 전 채널 탐색 횟수가  $n$ 을 넘으면 사용이 가능한 가장 빠른 번호의 채널을 공용 채널로 설정하고 비컨 요청 메시지(불침번 선언 메시지)를 전 채널 탐색기간의 두 배의 기간 동안 전송한다. 그리고 불침번 모드로 전환한다. 비컨을 찾는 동안 다른 CSD의 불침번 선언 메시지나 상황 보고 메시지를 수신하면 수신한 채널을 공용 채널로 설정하고 저전력 수신 모드로 전환한다.

#### 4.1.2 불침번 모드

불침번 모드에서 CSD는 전 채널을 탐색하고 리더의 비컨이 없으면 공용 채널에 상태 보고 메시지를 전송한 후 다시 채널 탐색을 반복한다. 불침번 CSD는 상태 보고 메시지로 리더가 없음을 알리고 리더의 비컨을 발견하면 wake up 메시지를 CSD들의 저전력 수신 모드 1주기(저전력 모드 + wake up 시간의 합) 동안 전송하여 주변의 CSD들을 깨운다. 불침번 CSD는 상태 보고 메시지를 일정횟수 이상 전송하면 자신의 불침번 횟수를 기록한 불침번 교대 요청 메시지를 공용 채널에 전송한다. 불침번 CSD는 교대 요청에 가장 먼저 응답한 CSD에게 다시 교대 확정 메시지를 전송하여 불침번 역할을 넘기고, 저전력 수신 모드로 전환하게 된다. 불침번 역할이 몇몇 노드에게 집중되어 배터리 소모가 높아지는 것을 막기 위해 불침번 CSD는 응답을 받지

못해도 저전력 수신 모드로 전환한다. 불침번이 아닌 CSD들은 불침번 CSD의 ID에 상관없이 불침번 CSD의 메시지에 따라 동작을 결정하게 된다. 따라서 여러 불침번들이 통신 영역에 존재할 수 있다.

#### 4.1.3 저전력 수신 모드

저전력 수신 모드에서 CSD는 저전력 모드(PM3)와 공용 채널 탐색을 반복한다. CSD는 저전력 수신 모드에서 상태 보고 카운터를 유지한다. 상태 보고 메시지를 받으면 상태 보고 카운터를 초기화하고 저전력 모드를 유지하며, 받지 못하면 상태 보고 카운터를 증가시킨다. 이 때 상태 보고 카운터가 임계값 이하이면 저전력 수신 모드를 유지하고, 임계값 이상이면 스탠드 얼론 모드로 전환한다. 공용 채널을 통해 불침번 교대 요청 메시지를 수신하면, 수신한 메시지에 포함된 불침번 CSD의 불침번 횟수를 자신의 불침번 횟수와 비교하고, 자신의 불침번 횟수보다 많은 경우, 랜덤 백오프(random backoff) 방식으로 응답한다. 응답 후 교대 요청 메시지를 받으면 불침번 모드로 전환한다. wake up 메시지 수신 시에는 wake up 메시지를 1회 방송한 후 스탠드 얼론 모드로 전환한다.

### 4.2 저전력 센싱 기능

CSD의 표준 규격에는 도어 상태 측정 외의 다른 측정 기능은 언급되지 않았으나 최근의 RFID 장치들은 온도, 습도 등의 센싱 기능을 포함하는 추세이다. 저전력 센싱 기능은 측정된 데이터의 변화에 따라 측정 빈도를 조절하여 불필요한 배터리 소모를 줄이는 방법이다. 저전력 센싱의 동작은 그림 5와 같다. 저전력 센싱 기능은 측정 빈도와 측정 횟수를 관리하며, 측정 빈도에 따라 측정 횟수도 변화한다. 측정된 데이터의 변화가 적을 때는 측정 빈도를 감소시켜 CSD가 액티브 상태로 존재하는 시간을 줄이고, 변화가 클 때는 측정 빈도를 증가시켜 변화에 빠르게 대응하도록 한다. 초기 빈도를  $T$ , 측정 횟수를  $A$ 라 할 때 CSD는 가장 최근의  $n$ 개의 센싱 데이터를 보관하며 센싱할 때마다 보관하는 데이터를 갱신한다. 가장 오래된 데이터와 가장 최신의 데이터를 비교하여 동작을 결정한다. CSD는  $T$ 의 빈도로  $A$ 회 측정하는 동안 설정된 임계치 이상의 변화가 없으면 측정 빈도와 측정 횟수를 절반으로 감소시킨다. 변화가 없을 때는 빈도와 측정 횟수를 계속 절반으로 줄이되  $1/2^n$  이하로는 감소시키지 않는다. 임계치 이상의 변화가 있을 때는 즉시

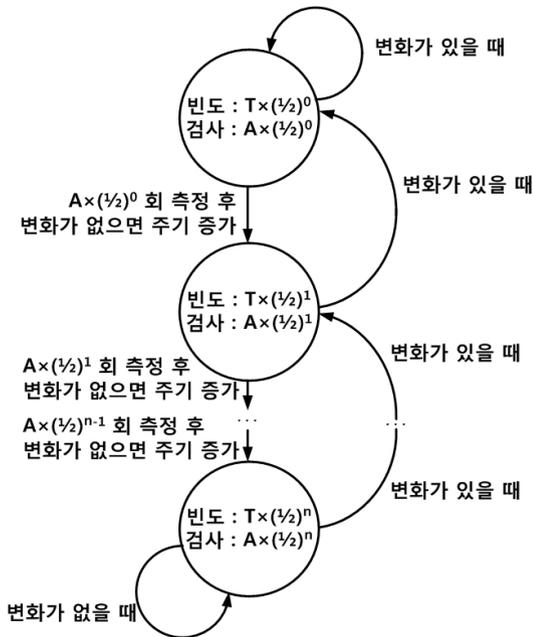


그림 5. 저전력 센싱 알고리즘  
Fig. 5. Low power sensing algorithm

측정 빈도와 측정 횟수를 2배 증가시키되 초기값인 T, A 이상으로 증가시키지 않는다.

### 4.3 능동적 경보 기능

CSD는 대부분의 시간을 리더의 통신 거리 밖에서 존재한다. 리더의 통신 거리 밖에 있을 때 화재 등의 위험이 발생했을 때를 대비하기 위해, 통신 거리 밖에 있는 리더에게 메시지를 전달할 방법이 필요하다. 본 논문에서는 4.1에서 언급한 불침번 기법을 바탕으로 센싱 데이터가 임계치를 초과했을 때 경고 메시지를 멀티홉 방식으로 전달하고자 한다.

CSD는 컨테이너에서 임계치 이상의 값이 측정되거나, 해제(deactivate) 상태가 아닐 때 도어가 열리면 경고 메시지를 전송한다. 능동적 경보 기능의 특징은 다음과 같다.

#### 4.3.1 플루딩(flooding) 방식의 멀티홉 메시지 전달

CSD는 메시지 라우팅을 위한 별도의 네트워크 구성을 하지 않기 때문에 복잡한 네트워크 구성 절차가 없는 플루딩 방식을 사용해 경고 메시지를 전달한다. 더군다나 불침번 CSD들이 클러스터처럼 서로간의 통신 거리를 유지하지도 않으며, 채널을 계속 변경해가며 검색하기 때문에 동기적으로 메시지를 전달하기 어렵다. 그러므로 CSD들은 채널 변경 주기(31ms)마다 N번 공용 채널로 경고 메시지를

전송하며, 이 메시지를 수신한 모든 CSD들은 과도한 메시지 재생성을 막기 위해 메시지 재전송 조건에 의거해 주변으로 메시지를 재전송한다.

#### 4.3.2 메시지 재전송 조건

CSD는 재전송 조건에 의거해 경고 메시지 전달 여부를 결정한다. 재전송 조건은 다음과 같다.

- 1) 최초 발신 후 2초가 지난 메시지는 재송신하지 않는다.
- 2) 동일한 순서 번호의 경고 메시지는 2회 이상 전송하지 않는다.
- 3) 경고 메시지를 수신한 CSD들은 수신한 메시지에 기록된 경고 메시지 발생시각을 자신의 현재시각과 비교하여 그 차이인 S 이내에 K 홉 이하의 홉을 가지는 메시지에 대해서만 홉수를 증가시키고, 주변으로 전송한다.

#### 4.3.3 경고 메시지 패킷 구성

경고 메시지는 그림 6과 같이 메시지 헤더와 Alert 부분으로 구성된다. 메시지 헤더는 경고 메시지를 전달하는 CSD가 기록하며, Alert 부분은 위험 상황을 감지한 CSD가 생성한다. 경고 메시지를 받은 CSD들은 Alert 부분을 복제하여 이웃에 전달하며, Alert Time과 Alert Hop을 이용해 경고 메시지 재전송을 결정한다. 그리고 컨테이너의 실제 위치 파악을 용이하게 하기 위해 Container ID를 포함하였다.

CSD Message Header					Alert Data					
CSD Time	CSD UID	CSD TYPE	MSG TYPE	MSG LENGTH	ALERT Container ID	ALERT TIME	ALERT CSD UID	ALERT TYPE	ALERT DATA	ALERT HOP

그림 6. 경고 메시지 패킷 형태  
Fig. 6. Alert message packet format

## V. 성능 평가

이 장에서는 불침번 기법과 저전력 센싱 기능에 대한 시뮬레이션을 통해 CSD의 전류 소모 정도를 측정하고 표준 규격의 요구사항만을 적용시킨 CSD와 비교를 통해 CSD의 전류 소모 정도를 측정하고 표준 규격의 요구 사항만을 적용시킨 CSD와 비교를 통해 성능을 평가한다. 그리고 능동적 경보 기능을 사용해 원격지의 리더에게 메시지를 제대로 전달하는지를 검증한다.

5.1 배터리 수명 계산 방법

정확한 수명 계산을 위해서는 CSD 하드웨어의 상태별 소모 전력과 소요 시간을 정확히 측정해야 한다. 그림 7은 구현된 CSD의 전류 소모량을 나타낸다. ①은 슬립 모드에서의 전류량을 나타낸다. 수면 모드에서의 전류량은 1mA 이하의 값으로 표현되어 있으나, 사용한 오실로스코프의 해상도로  $\mu A$  단위의 측정은 어려움이 있어 실제 전류 소모량을 각 칩의 전류 소모량으로 볼 때 CC2430의 PM 3의 전류 소비량, 시리얼 플래쉬 메모리, RTC의 전류 소모량의 합산으로 0.00265mA일 것으로 예측된다. ②는 PM 3에서 액티브 모드로 돌아올 때 발생하는 응답시간 전류이며, 이 값은 실제 전류소모량 계산에 포함시키지 않는다<sup>[10]</sup>. ③은 액티브 모드에서 사용하는 전류량이며, CC2430의 표 1의 액티브 모드 전류 소모량보다 다소 높은 14.3mA를 소모한다. ④는 RX 전류 소모량을 나타낸다. ④에서는 29mA가 아닌 33.4mA를 소모하는데, 이는 CC2430이 IEEE 802.15.4 표준에 따라 무선 신호를 수신할 때 CSMA/CA 코프로세서를 사용하기 때문에 4mA 정도를 더 소모하기 때문이다<sup>[10]</sup>. 따라서 각 모드에서의 전류 소모량을 정리하면 표 2와 같고, 이는 식 (1)을 통해 구할 수 있다.

$$\text{배터리잔량} = \text{배터리총량(mAh)} - \{(33.4\text{mA} \times t_1) + (29\text{mA} \times t_2) + (14.3\text{mA} \times t_3) + (0.00265\text{mA} \times t_4)\} \quad (1)^{[10]}$$

표 2. CSD의 모드별 소모량 계산  
Table 2. Power consumption calculation of CSD modes

동작	소모 전류량	각 모드별 동작 시간	합계
RX	33.4mA	t1	33.4 × t1
TX(-0.4dBm)	29mA	t2	29 × t2
Active	14.3mA	t3	14.3 × t3
Sleep	0.00265mA	t4	0.00265 × t4

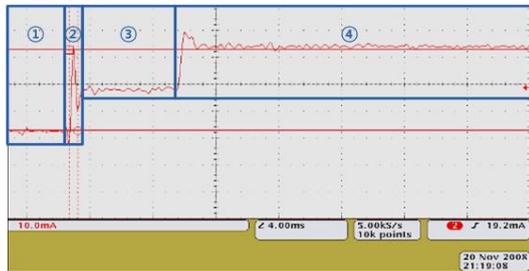


그림 7. CSD의 전류 소모량  
Fig. 7. power consumption of the CSD

5.2 불침번 기법

불침번 기법의 성능 평가는 컨테이너 야적장과 같은 실제 환경 조성이 어렵기 때문에 parallel simulation environment for complex (PARSEC) 시뮬레이터를 사용해 성능을 측정하였다. CSD의 동작 구현은 PARSEC 시뮬레이터를 기반으로 무선 센서 네트워크 환경이 구축된 NESLSim 코드를 사용해 재구성하였다. 컨테이너의 크기는 20피트 컨테이너 기준으로 길이 5.455m, 높이 2.252m, 폭 2.29m 이다. CSD는 가로 10개, 세로 10개를 배치하였으며, CSD는 컨테이너의 일정한 위치에 설치되므로 그리드 형식으로 배치된다. CSD의 신호 전달 거리는 20m, 30m로 한정했다<sup>[1]</sup>. CSD는 임의의 순서로 시작되며 번호와 무관하다.

성능 평가 기준은 불침번 기법을 통한 배터리 소모가 항상 정도와 통신 거리에 따른 성능 차이이다. 성능 평가 비교 대상은 표준 규격만을 적용한 CSD, 2초마다 sleep/wakeup을 반복하면서 전 채널을 탐색하는 CSD이다. CSD의 어플리케이션을 실제 구현하면서 CSD 리더와 CSD가 associate되어 안정적으로 통신이 가능한 최소 비컨 탐색 시간이 31ms<sup>[2]</sup>였기에 1개 채널 탐색 시간은 모두 동일하게 31ms로 설정하였고, 불침번 기법에는 표 3과 같은 설정을 적용하였다. 실험에서 배터리는 AA배터리 4개의 5,600 mAh를 기본 배터리 수명으로 사용하며, 시뮬레이션 시나리오는 표 4에 나타나 있고 동일한 시나리오로 20회 실시되었다.

그림 8은 시간 흐름에 따른 비교 대상들의 배터

표 3. 불침번 기법을 위한 설정  
Table 3. Configuration of the night watch mechanism

모드	항목	설정
스탠드 얼론 모드	전 채널 탐색 횟수	500회
	전 채널 탐색 후 유휴 시간	1s
	비컨 요청 메시지 전송 횟수	33회
저전력 수신 모드	수면 시간	2s
	1채널 탐색 시간	4ms
	상태보고 수신실패 한계 횟수	124회
불침번 모드	전 채널 탐색 횟수	500회
	전 채널 탐색 후 유휴 시간	1s
	불침번 고대 요청 메시지 전송 횟수	66회
	불침번 고대 요청 메시지 전송 주기	16ms
	Wake up 메시지 전송 주기	10ms
	Wake up 메시지 전송 횟수	201회

표 4. 시뮬레이션 시나리오  
Table 4. Simulation scenario

상태	시간 소요	군집 유무	시간
Deactivate 상태	.	Alone	00:00
Arming	3분	Alone	00:03
항구로 이동(부산)	1시간	Alone	01:03
항구 도착/야적장 대기	3시간	Group	04:03
검수	3분	Alone	04:06
선적/항해(미국 롱비치항)	192시간	Group	196:06
도착 및 야적장 적재	2시간	Group	198:06
검수 및 Deactivate	3분	Alone	198:09

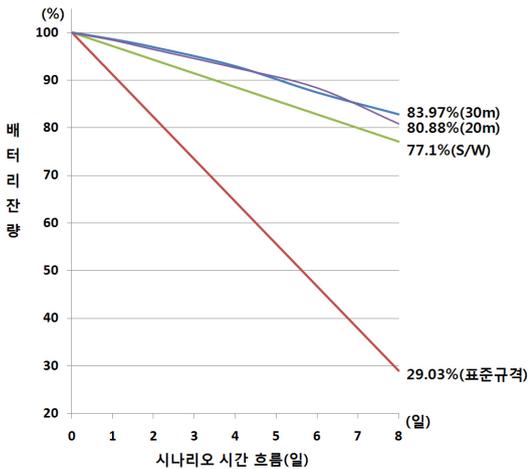


그림 8. 시간 흐름에 따른 배터리 잔량  
Fig. 8. Power remains with time flow

리 잔량 분포를 보여준다. 표준 규격 CSD는 8일 이후 배터리가 29% 남아 있으며, 2.496초마다 전 채널을 탐색하는 방법(sleep/wake up)은 77% 정도의 배터리 잔량을 보인다. 불침번 기법을 적용한 경우에는 통신거리가 20m, 30m인 것 둘 다 80% 넘는 배터리가 남아 있으며, 실제 표준 규격에서의 71% 소모량보다 불침번 기법을 사용했을 때 76% 정도의 전력 소모 개선이 있음을 알 수 있다. CSD의 통신 범위가 넓으면 불침번 횟수가 줄어들어 통신 거리가 30m인 기법이 더 높은 성능을 보인다.

그림 8에서는 통신 거리에 따른 배터리 소모 정도 차이가 두드러지지 않으나 그림 9에서 시간의 흐름에 따른 배터리 잔량 분포를 보면 그 차이를 확연히 알 수 있다. 시간의 경과에 따라 통신 거리가 20m인 것과 30m인 것에서 점차 차이가 발생하는 것을 알 수 있다. 또한 두 가지 경우 모두 CSD의 분포에서 가장자리에 위치하는 CSD들의 배터리 소모가 조금 더 커지는 것을 알 수 있는데, 이는 중

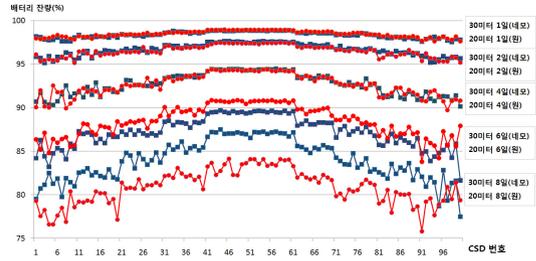


그림 9. 통신 거리별 잔량 분포  
Fig. 9. Power remain distribution in communication range

앙에 위치한 CSD들이 통신 영역에 포함되는 CSD들이 상대적으로 많기 때문에 불침번을 설 확률이 낮고, 외부에 위치하는 CSD들은 통신영역에 포함되는 CSD들이 적어, 상대적으로 더 많은 횟수의 불침번을 서게 되기 때문이다.

### 5.3 저전력 센싱 기능

저전력 센싱 기능에서는 하루 동안의 평이한 온도 변화 데이터와 급격한 온도 변화가 포함된 데이터를 사용하며 매초마다의 온도 변화 데이터에 저전력 센싱 기능을 적용하였다. 온도 측정 주기는 최소 1초, 최대 16초이며, 가장 최근의 측정값 5개 중 제일 처음값과 가장 최근값을 비교해 1도 이상 변화시 측정 주기를 2배 증가시키고 측정 횟수는 절반으로 감소시킨다. 최초 측정 횟수는 240회이며 측정주기(빈도) 변화에 따라 변하게 된다.

실험 결과는 그림 10, 11과 같다. 빈도는 주기조절을 통해 나타내었다. 온도 변화가 작은 0 - 30,000초 구간과 70,000 - 86,400초 구간에서는 측정 주기가 넓으며, 변화가 심한 낮 시간과 이상 온도가 발생한 구간에서는 주기가 짧고 변화가 극심하다. 저전력 센싱 기법을 사용하지 않은 경우 매초 측정을 하고 있으나, 저전력 센싱 기능을 적용한 경우 측정 횟수가 15,000-18,000회로 현저히 줄어들었다. 따라서 전류 소모량도 17% 수준으로 줄어들었음을 알 수 된다.

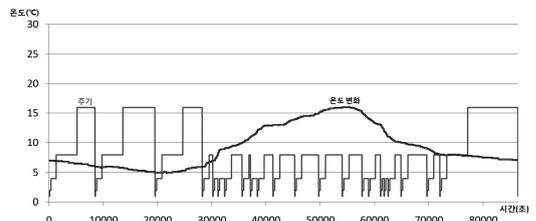


그림 10. 평이한 온도변화에 적용된 알고리즘의 결과 데이터  
Fig. 10. General temperature change result

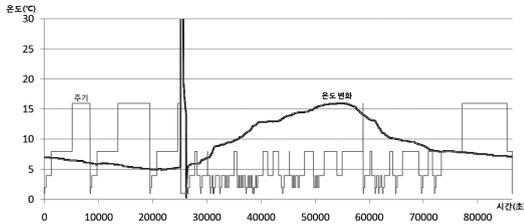


그림 11. 급격한 온도변화에 적용된 알고리즘의 결과 데이터  
Fig. 11. Rapid temperature change result

#### 5.4 능동적 경보 기능 실험

능동적 경보 기능의 실험은 불침번 기법 상에서 행해지며, 동일하게 PARSEC 시뮬레이터를 사용한다. 실험에서는 1번 CSD에서 위험 상황이 발생하고, 100번 CSD가 CSD 리더와 통신할 수 있는 위치에 있는 것으로 가정한다. 1번 CSD에서 송신한 경고 메시지가 100번 CSD에게 전달되는 시간과 성공률을 측정하며, 재전송 초과시간(time out)은 5초이며 재전송 한계 횟수는 10회로 제한하였다. 1번 CSD와 100번 CSD간의 거리는 53.31m로 1회로 통신이 불가능하기 때문에 멀티홉으로만 메시지 전달이 가능하다. 실험 기간은 24시간이며, 시간 내 임의의 시간에 2회의 위험상황이 발생하게 되어있다. 각 실험은 50회 반복하여 수행되었으며, CSD의 통신 거리는 20m로 고정하였다.

실험 결과는 그림 12와 같다. CSD1과 CSD100간의 거리인 53.31m는 2홉으로 데이터를 전달할 수 있는 거리이지만, 불침번 기법에서의 CSD들의 동작 비동기성 때문에 2홉으로 전송하기 어렵기 때문에 대부분의 메시지가 100ms가 넘는 시간이 걸리는 것을 알 수 있다. 메시지의 50%는 1초 이내에 도착했으며, 메시지 수신 성공률은 94%였다. 평균 1.045s 정도의 시간이 소요되었으며, 실제 위험상황이 발생 시 빠른 시간 내에 메시지를 원거리에 위치한 리더에게 전달할 수 있음을 의미한다.

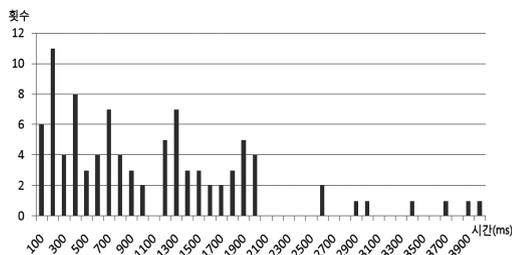


그림 12. 능동적 경보 기능의 결과  
Fig. 12. Result of active alert function simulation

## V. 결 론

항만 물류 환경이 개선되면서 RFID 기술의 수요도 늘어나고 있고, 국내에서도 활발히 연구 개발이 진행되고 있다. 하지만, 보안 관련 RFID 기술의 개발은 아직 국내에서는 미미한 수준이다. 본 논문에서 제안한 저전력 CSD는 미국 DHS의 CSD 규격을 준수하며, 배터리 수명향상을 위한 저전력 하드웨어 플랫폼과 동작 기법들을 설계하였다. 제안한 CSD는 불침번 기법과 저전력 센싱 기능을 통해, 불필요한 배터리 소모를 70% 이상 줄여, CSD의 동작 시간을 향상시켰고, 능동적 경보 기능을 이용해 먼 거리에서도 1초 정도의 시간으로 컨테이너의 상태를 전달하여 상황에 빠르게 대처할 수 있도록 하였다. 본 논문에서는 각 기법에 대해 시뮬레이션만을 수행하였으나 향후 다수의 컨테이너에 설치하여 실험을 진행할 계획이다. 또한 불침번 기법의 플루딩 형식의 메시지 전달 방식을 개선하여 더 오랜 시간의 항해에도 적합하도록 수명을 더욱 증대시킬 수 있도록 하는 연구를 진행할 것이다.

## 참 고 문 헌

- [1] U.S. Department of Homeland Security (DHS), Conveyance Security Device (CSD) Requirements, Baseline 3.0, *U.S. DHS*, July 26 2007.
- [2] IEEE, Local and 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 (LRWPANS), IEEE Std. 802.15.4-2006, *IEEE*, 2006.
- [3] U.S. DHS, CSD-to-CSD Reader Interface Control Document(ICD), *U.S. DHS*, July 2007.
- [4] M. R. Pearlman, J. Deng, B. L. Zygmunt and J. Haas, "Elective Participation in Ad Hoc Networks Based on Energy Consumption", *IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM)*, 1, pp.26-31, November 2002.
- [5] Y. Xu, J. Heidemann, D. Estrin, "Geography-informed Energy Conservation for Ad Hoc Routing", *Proceedings of the 7th annual international conference on ACM Mobicom*, pp. 70-84, July 2001.
- [6] Texas Instrument (TI), CC2430, A True

- System-on-chip solution for 2.4GHz IEEE 802.15.4 / ZigBee(TM) (Rev.F), *TI*, June 2008.
- [7] 대성마이크로스위치, DSB2P152, <http://www.daesungmicro.co.kr>
  - [8] FIPS PUBS 180-2, HMAC-SHA256 Secure Hash Standard, Federal Information Processing Standards Publication 180-2, <http://csrc.nist.gov>, August 2002.
  - [9] FIPS PUBS 197 Specification for the Advanced Encryption Standard (AES), <http://csrc.nist.gov>, November 2001.
  - [10] TI, AN053 Measuring power consumption with CC2430 & Z-Stack, *TI*, July 2008.

박 세 영 (Seyoung Park)

정회원



2007년 2월 부산대학교 컴퓨터공학과  
 2009년 2월 부산대학교 컴퓨터공학과 석사  
 2009년 3월~현재 부산대학교 컴퓨터공학과 박사과정  
 <관심분야> 무선 센서 네트워크, 저전력, RFID

김 택 현 (Taekhyun Kim)

준회원



2008년 2월 한국해양대학교 컴퓨터공학과  
 2008년 3월~현재 부산대학교 컴퓨터공학과 석사과정  
 <관심분야> RFID, 무선 센서 네트워크

최 훈 (Hoon Choi)

정회원



2005년 2월 부산대학교 컴퓨터공학과  
 2007년 2월 부산대학교 컴퓨터공학과 석사  
 2007년 3월~현재 부산대학교 컴퓨터공학과 박사과정  
 <관심분야> 무선 센서 네트워크, 저전력, RFID

백 윤 주 (Yunju Baek)

종신회원



1990년 2월 한국과학기술원 전산학과  
 1992년 2월 한국과학기술원 전산학과 석사  
 1997년 2월 한국과학기술원 전산학과 박사  
 1999년~2002년 (주)NHN 연구소장

2003년 9월~현재 부산대학교 정보컴퓨터공학부 교수  
 <관심분야> 무선 센서 네트워크, 컴퓨터구조, 임베디드시스템, RTLS