creative commons

COMMONS DEED

저작자표시-비영리-동일조건변경허락 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

동일조건변경허락. 귀하가 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공했을 경우에는, 이 저작물과 동일한 이용허락조건하에서만 배포할 수 있습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

[UCI]I804:24011-200000237564

2009年 2月

碩士學位論文

무선 센서 네트워크에서 Cross-Layer 기반 MAC 프로토콜 설계 및 구현

朝 鮮 大 學 校 大 學 院

情報通信工學科

崔 豪 振

2009年 2月 碩士學位論文

cross-layer MAC

崔 豪 振

무선 센서 네트워크에서 Cross-Layer 기반 MAC 프로토콜 설계 및 구현

Cross-layer Based MAC Protocol Design and Implementation in Wireless Sensor Network

2 0 09 年 2月 25日

朝 鮮 大 學 校 大 學 院

情報通信工學科

崔 豪 振

무선 센서 네트워크에서 Cross-Layer 기반 MAC 프로토콜 설계 및 구현

指導敎授 邊 宰 瑩

이 論文을 工學碩士學位申請 論文으로 提出함.

2 0 08 年 10月 日

朝 鮮 大 學 校 大 學 院

情報通信工學科

崔 豪 振

崔豪振의 碩士學位 論文을 認准함

委員長 朝鮮大學校 敎授 朴 鍾 安 印

委 員 朝鮮大學校 敎授 韓 承 朝 印

委 員 朝鮮大學校 敎授 邊 宰 瑩 印

2 0 08 年 11 月 日

朝 鮮 大 學 校 大 學 院

목 차

그 림 목 차 ····· iii
표 목 차 ····· v
Abstract ····· vi

I. 서 론 ····· 1
A. 연구의 배경 및 목적 ····· 1
B. 연구의 내용 및 구성 ····· 3

II. 무선 센서 네트워크 (Wireless Sensor Network)
A. 무선 센서 네트워크 특성 ····· 5
1. 무선 센서 네트워크의 개념 ····· 5
2. 무선 센서 네트워크의 특징 ····· 8
B. 무선 센서 네트워크의 MAC 프로토콜 ····· 9
1. Sensor-MAC (S-MAC) ····· 9
2. Time-out MAC (T-MAC) ····· 12
3. Basic MAC/Wise MAC ····· 12
C. 무선 센서 네트워크 표준화 동향 ····· 13
1. IEEE 802.15.4/ IEEE 802.15.4b ····· 14
2. IEEE 802.15.4a ····· 14
3. IEEE 802.15.5 ····· 16
4. Body Area Network ····· 17

III. 제안하는 cross-layer 기반의 CL-SMAC ····· 18
A. 기존 MAC 프로토콜의 문제점 ····· 18
B. 제안하는 MAC 프로토콜의 특성 ····· 19

IV. 제안하는 MAC 프로토콜 실험 및 평가 ····· 22
A. 제안하는 MAC 프로토콜 실험 환경 ····· 22

B. 제안하는 MAC 프로토콜 실험 결과 및 분석 ····· 23

VI. 결론 및 향후 연구 ····· 39

참 고 문 헌 ····· 40

부 록 (무선 센서 네트워크 기반의 테스트 베드 구현) ····· 43

A. 시스템의 개발 동기 ····· 43

B. 무선 센서 네트워크 기반의 지하철 응급 상황 조치 시스템의 구성 ····· 44

1. 센서 노드 하드웨어 ····· 46

2. 센서 노드 운영체제 ····· 46

3. 지하철 응급 상황 조치 시스템의 환경 ····· 49

4. 실험 및 고찰 ····· 52

그 림 목 차

Fig. 1.1 Ubiquitous application ····· 2
Fig. 1.2 Subway emergency system based on wireless sensor network ····· 2
Fig. 2.1 Interconnection of Ubiquitous network and wireless sensor network ···· 6
Fig. 2.2 Basic components of Wireless sensor network ····· 7
Fig. 2.3 Wireless sensor network topology ····· 8
Fig. 2.4 S-MAC Frame structure ····· 9
Fig. 2.5 S-MAC of periodic listen and sleep ····· 10
Fig. 2.6 S-MAC message scenario ····· 10
Fig. 2.7 IEEE 802.11 message partition ····· 11
Fig. 2.8 S-MAC message partition ····· 11
Fig. 2.9 IEEE 802.15.4 TG4 ····· 13
Fig. 3.1 Normal situation ····· 18
Fig. 3.2 Emergency situation ····· 19
Fig. 3.3 CL-SMAC protocol stack ····· 20
Fig. 3.4 CL-SMAC protocol changed duty cycle ····· 20
Fig. 3.5 CL-SMAC flow chart ····· 21
Fig. 4.1 Node topology for NS-2 ····· 22
Fig. 4.2 Situation of scenario ····· 23
Fig. 4.3 Duty cycle factorof scenario I ····· 24
Fig. 4.4 Data latency of scenario I ····· 24
Fig. 4.5 Consumed energy at node 0 in scenario I ····· 25
Fig. 4.5 Consumed energy at node 1 in scenario I ····· 25
Fig. 4.6 Consumed energy at node 2 in scenario I ····· 26
Fig. 4.7 Consumed energy at node 3 in scenario I ····· 26
Fig. 4.8 CL-SMAC latency of scenario I ····· 27
Fig. 4.9 S-MAC latency of scenario I ····· 28
Fig. 4.10 Duty cycle factor of scenario II ····· 29
Fig. 4.11 Data latency of scenario II ····· 30

Fig. 4.12 Consumed energy at node 0 in scenario II ····· 30
Fig. 4.13 Consumed energy at node 1 in scenario II ····· 31
Fig. 4.14 Consumed energy at node 2 in scenario II ····· 31
Fig. 4.15 Consumed energy at node 3 in scenario II ····· 32
Fig. 4.16 CL-SMAC latency of scenario II ····· 32
Fig. 4.17 S-MAC latency of scenario II ····· 33
Fig. 4.18 Duty cycle factor of scenario III ····· 34
Fig. 4.19 Data latency of scenario III ····· 34
Fig. 4.20 Consumed energy at node 0 in scenario III ····· 35
Fig. 4.21 Consumed energy at node 1 in scenario III ····· 35
Fig. 4.22 Consumed energy at node 2 in scenario III ····· 36
Fig. 4.23 Consumed energy at node 3 in scenario III ····· 36
Fig. 4.24 CL-SMAC latency of scenario III ····· 37
Fig. 4.25 S-MAC latency of scenario III ····· 37

표 목 차

Table 2.1 Multiple connecting protocol ····· 17
Table 3.1 CL-SMAC Threshold value exchanged duty cycle ····· 21
Table 4.1 Simulation experiment for NS-2 ····· 22
Table 4.2 Scenario 1 compared of S-MAC and CL-SMAC ····· 27
Table 4.3 Scenario 2 compared of S-MAC and CL-SMAC ····· 32
Table 4.4 Scenario 3 compared of S-MAC and CL-SMAC ····· 37
Table 4.5 Data latency and energy compared with S-MAC and CL-SMAC ·· 37

부 록 목 차

Fig. 5.1 Dae-gu subway fire accident ····· 43
Fig. 5.2 Subway emergency system ····· 44
Fig. 5.3 Algorithm of subway emergency system ····· 45
Fig. 5.4 2.4 GHz ZigBee sensor node and extended sensor module ····· 46
Fig. 5.5 TinyOS layer ····· 47
Fig. 5.6 TinyOS nesC architecture of subway emergency system ····· 47
Fig. 5.7 Message format for RF transmission ····· 49
Fig. 5.8 Monitoring and control for subway emergency system ····· 50
Fig. 5.9 Control for subway emergency system ····· 50
Fig. 5.10 Monitoring program for portable type ····· 51
Fig. 5.11 Connecting with sensor node and monitoring program ····· 52
Fig. 5.12 Real-time sensing data ····· 54
Fig. 5.13 Subway emergency system using USN test bed ····· 54

Table 5.1 NesC code for subway emergency system ····· 48
Table 5.2 Experiment environment ····· 53
Table 5.3 Experiment data ····· 53

ABSTRACT

Cross-Layer Based MAC Protocol Design and Implementation in Wireless Sensor Network

Choi, Ho-Jin
Advisor : Prof. Pyun, Jae-Young, Ph. D
Department of Information and Communication Engineering
Graduate School of Chosun University

Wireless sensor network shows variety of applications in different real world scenarios because of their self organizing capabilities and their abilities to respond over varying environmental conditions. With the advance of efficient sensor nodes, the application areas have been increased considerably during the recent time. A wireless sensor network mostly uses SMAC as medium access control. The main features of SMAC protocol are periodic listen and sleep, collision avoidance, overhearing avoidance, and message passing. The S-MAC can reduce the energy consumption considerably by using these energy-saving features. In this thesis, proposed cross-layer based sensor MAC protocol (CL-SMAC) for delay-sensitive applications. The basic idea of CL-SMAC remains same as SMAC with the modification in periodic listen and sleep. CL-SMAC has more opportunities to transfer data by adjusting the transmission duty cycle. Simulation results show that the average latency for CL-SMAC can be reduced according to the sensed data at the delay-sensitive application. This thesis focused on faster data transfer over wireless sensor networks by using application-aware duty cycle adjustment. For faster data transfer, the sensor nodes must remain in the listen state for more time or it must listen to the environment periodically. Because of this, more energy is dissipated which lowers the energy efficiency of the sensor network. However, data transmission occurs at a faster rate in the case of emergency situation. Therefore, the proposed MAC protocol can be used for the delay-sensitive applications such as subway station, train station, army, and monitoring systems

I. 서 론

A. 연구의 배경 및 목적

유비쿼터스 (Ubiquitous)는 물이나 공기처럼 시공을 초월해 '언제 어디에나 존재한다'는 뜻의 라틴어로, 사용자가 컴퓨터나 네트워크를 의식하지 않고 장소에 상관없이 자유롭게 네트워크에 접속할 수 있는 환경을 말한다. 1988년 미국의 사무용 복사기 제조회사인 제록스의 와이저 (Mark Weiser)가 '유비쿼터스 컴퓨팅'이라는 용어를 사용하면서 처음으로 등장하였다. 당시 와이저는 유비쿼터스 컴퓨팅을 메인프레임과 퍼스널 컴퓨터에 이어 제3의 정보혁명을 이끌 것이라고 주장하였는데, 단독으로 쓰이지는 않고 유비쿼터스 통신, 유비쿼터스 네트워크 등과 같은 형태로 쓰인다. 곧 컴퓨터에 어떠한 기능을 추가하는 것이 아니라 자동차·냉장고·안경·시계·스테레오장비 등과 같이 어떤 기기나 사물에 컴퓨터를 집어넣어 커뮤니케이션이 가능하도록 해 주는 정보기술 (IT) 환경 또는 정보기술 패러다임을 뜻한다[1].

유비쿼터스화가 이루어지면 가정·자동차는 물론, 심지어 산 꼭대기에서도 정보기술을 활용할 수 있고, 네트워크에 연결되는 컴퓨터 사용자의 수도 늘어나 정보기술산업의 규모와 범위도 그만큼 커지게 된다. 그러나 유비쿼터스 네트워크가 이루어지기 위해서는 광대역통신과 컨버전스 기술의 일반화, 정보기술 기기의 저가격화 등 정보기술의 고도화가 전제되어야 한다. 이러한 제약들로 인해 일반화되어 진행이 빠르게 이루어 지고 있지 않지만, 휴대성과 편의성뿐 아니라 시간과 장소에 구애받지 않고도 네트워크에 접속할 수 있는 장점들 때문에 세계적인 개발 경쟁이 일어나고 있다.

이와 같은 유비쿼터스 시스템을 도입하기 위해서는 무선 센서 네트워크 기반의 시스템을 제반되어야 한다. 무선 센서 네트워크라 함은 센서로 센싱이 가능하고 수집된 정보를 가공하는 프로세서가 달려 있으며 이를 전송하는 소형 무선 송수신 장치를 말한다. 이는 센서 노드 (sensor node)와 이를 수집하여 외부로 내보내는 싱크 노드 (sink node)로 구성된 네트워크이다. 기존의 네트워크와 다르게 의사소통의 수단이 아니라 자동화된 원격 정보 수집을 기본 목적으로 하며 그림 1.1과 같이 과학적·의학적·군사적·상업적 용도 등 다양한 응용 개발에 폭넓게 활용가능하다.

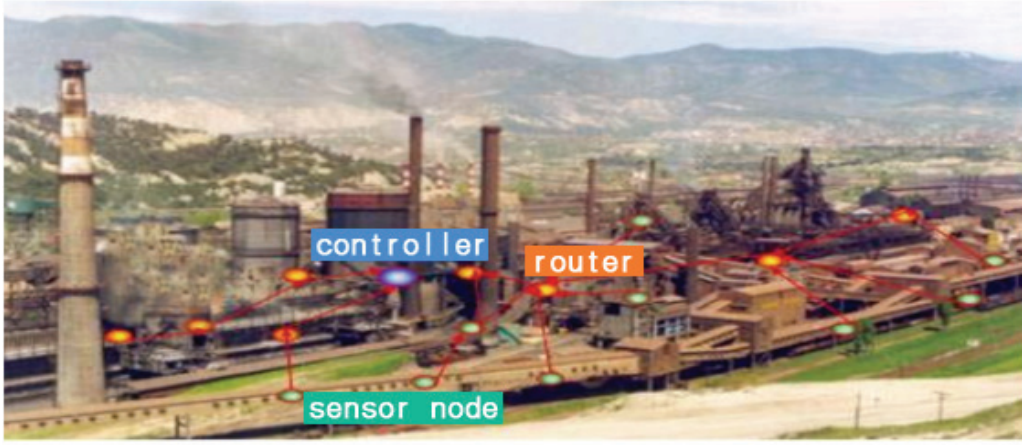

그림 1.1. 유비쿼터스 응용 분야

Fig. 1.1 Ubiquitous application

일반적인 무선 센서 네트워크의 활용 범위로 u-홈 네트워크, 화재 및 산불 감지시스템, 교통정보 시스템 등이 제안 및 연구되고 있다. 최근에는 데이터를 수집하는 차원이 아닌, 양방향 통신 및 제어 컨트롤 분야 등까지 폭넓게 응용 되어, 연구 및 개발의 폭이 넓어지고 있으며, 대표적인 사례로는 지하철 경보 시스템, 화재 경보 시스템, 경비 시스템, 응급 및 긴급 상황 알림 시스템 등이 있다. 예를 들어 그림 1.2와 같이 지하철 역사 내에서 응급 및 긴급 상황 발생 여부 감지를 위해 센서 네트워크를 활용할 수 있으며, 이러한 지하철 통제 시스템은 측정된 정보의 빠른 전달이 필요하다[1][2].

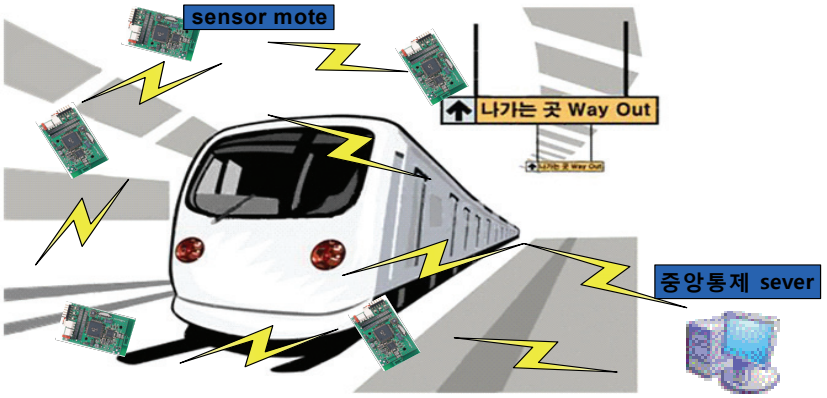

그림 1.2 응용분야인 지하철 역사내 응급 및 긴급상황 조치 시스템 구성도

Fig. 1.2 Subway emergency system based on wireless sensor network

무선 센서 네트워크는 유비쿼터스 홈 네트워크 및 응용서비스를 구축하기에 앞서 몇 가지 고려야해 할 사항이 있다. 무선센서네트워크를 구성하는 센서 노드의 에너지 효율성, 센서 노드간의 데이터 충돌 방지 등을 고려해야 한다. 이러한 몇 가지 문제점을 해결하기 위해서는 네트워크 계층 구조에서 기본이 되는 MAC 프로토콜의 개선이 요구된다. 현재 무선센서네트워크의 MAC 프로토콜로는 S-MAC (sensor medium access control) 프로토콜, T-MAC (time-out medium access control) 프로토콜, DSMAC (dynamic sensor medium access control) 프로토콜 등이 제안 되었다. 일반적으로 무선센서네트워크는 기존의 네트워크와 달리 크기와 배터리 용량이 작기 때문에 QoS (Quality of Service) 요구 보다 에너지 소비 최소화가 우선시 된다[3][4][5].

무선센서네트워크의 대표적인 S-MAC 프로토콜은 에너지 효율성 측면에서 좋은 효과를 기대할 수 있다. S-MAC은 listen, sleep의 주기적인 반복을 통해 전력 소모량을 줄일 수 있다. 이것은 listen 상태의 센서 노드가 데이터를 송수신 할 수 있는 반면, sleep 상태의 센서노드들은 데이터 송수신이 불가능하게 되기 때문이다. 본 논문에서 제안하는 MAC 프로토콜은 응급 및 긴급 상황 발생시에 listen 과 sleep 시간 주기적인 반복으로 구성되는 duty cycle을 변화시켜, 센서 노드간의 데이터의 지연을 억제한다. 응급 및 긴급 데이터 서비스가 아닐 경우, 에너지 효율성을 고려한 S-MAC 프로토콜과 같은 동작 과정을 갖으며, 긴급 데이터일 경우, listen 상태를 능동적으로 적용함으로써 효율성과 데이터의 지연 민감성을 만족하도록 한다. 에너지 소모는 S-MAC 대비 증가하게 되지만, 응급 및 긴급 상황 발생시의 센싱된 데이터 전달은 신속하게 이루어져 응급 및 긴급 상황 감지의 전송 응용 분야에서 활용할 수 있다.

B. 연구의 내용 및 구성

본 논문에서 제안하는 에너지 효율성과 데이터 lantency를 만족하는 cross layer 기반의 sensor MAC 프로토콜은 다음과 같은 단계로 구성하였다.

첫 번째로 일반적으로 사용되는 S-MAC 프로토콜을 분석하여 문제점에 대해서 분석하였다. 이를 통해, 에너지 효율성적인 측면에서는 만족하나 데이터의 latency에 대해서는 고려하지 않았다.

두 번째로 센서 노드로부터 측정된 정보들을 통해, 이론적 배경이 아닌 실제 환경에서의 data latency 측면이 필요 여부를 조사하였다.

세 번째로 이러한 문제점들을 취합하여, 무선 센서 네트워크 기반의 cross layer를 이용한 새로운 MAC protocol을 제안 및 설계 하였다.

네 번재로 이를 검증하기 위해서는 시뮬레이션 NS-2.31을 사용하여, 여러 가지 시나리오를 적용하여 각기 다른 환경에서의 효율성에 대해 나타 내었다.

마지막으로, 전체적인 무선 센서 네트워크를 구축을 통해, 실시간 정보 수집 및 에너지 효율성 만족 가능여부에 대해서 기술하였다.

이와 같은 단계를 거쳐서 구현한 시스템은 다음과 같은 요소들로 구성된다.

- 에너지 효율성과 data latency를 동시에 만족하는 새로운 MAC 프로토콜
- 응급 및 긴급 상황에 따른 신속한 데이터 처리 기능
- 무선 센서 네트워크 시스템에 대한 이해

이를 위해서 II장에서는 무선 센서 네트워크 배경 및 표준화, 기존의 제안된 MAC 프로토콜에 대해서 살펴보고, III장에서는 제안된 cross-layer 기반의 sensor MAC 프로토콜에 대해 기술한다. 또한, IV장에서 제안한 시스템을 설계 및 시뮬레이션을 분석하고, V장에서 무선 센서 네트워크 기반의 테스트 베드를 구축에 대해서 기술하며, 마지막 VI장에서 결론을 맺는다.

II. 무선 센서 네트워크 (Wireless Sensor Network)

A. 무선 센서 네트워크의 특성

1. 무선 센서 네트워크의 개념

무선 센서 네트워크 다양한 센서노드로부터 수집된 사람, 사물 및 환경 정보를 인식하고 저장, 가공, 융합하여 언제, 어디서, 누구나 이용할 수 있는 인프라이다. 무선 센서 네트워크 기술은 외부 환경의 감지와 제어 기능을 가지고 있어 넓은 범위에 분산되어 있는 센서로부터 감지된 상황 데이터들을 응용 서비스와 연동하는 기술로서 통신 기술의 발전 및 모바일 기기의 보편화와 함께 유비쿼터스 컴퓨팅의 핵심 기술 및 제반 시스템으로 주목받고 있다. 무선 센서 네트워크에서는 센서를 통하여 다양한 주변 환경 정보의 감지가 가능하고 프로세서가 달려 있어 감지된 정보를 가공 및 처리할 수 있다. 뿐만 아니라 무선 모듈를 가지고 있어 이를 통해 전송할 수 있는 네트워크 구성이 가능하다. 무선 센서 네트워크의 가장 큰 목적은 각 단말에서의 에너지 소모를 최소화하여 통신하므로, 전체 네트워크의 수명을 최대화 하는 것이다. 주요한 이러한 기능을 위해선 몇 가지 충족 해야 될 사항이 있다. 이를 위해 무선 통신을 위한 MAC 프로토콜에서의 에너지 낭비 요인을 살펴보면 다음과 같다[12][14][15][16].

첫째, 전송된 패킷 또는 데이터가 hidden terminal 및 hidden exposed 문제로 인해 손상되어 재전송이 요구되는 충돌이 발생할 수 있다. 둘째, 네트워크망에서 다른 노드를 목적지로 하는 패킷을 엿듣게 되는 overhearing 문제이다. 셋째, 불필요한 제어 패킷 전송에 따른 오버헤드가 발생하는 것이다. 마지막으로 자신은 전송할 데이터가 없음에도 불구하고 이웃 노드가 언제 데이터를 전송할지 모르기 때문에 자신의 전원을 항상 수신 모드로 유지해야 하므로 발생하는 idle listening이 있다.

이러한 idle listening으로 인한 에너지 낭비 문제를 해결하기 위한 센서 네트워크의 MAC 프로토콜 방식으로는 센서 노드에게 duty cycle 적용하여 주기적으로 sleep 모드를 사용하는 기법이 활발하게 연구되고 있다. Idle listening으로 인한 에너지 낭비 문제를 해결하기 위한 전통적인 기법으로는 duty cycle이 내장되어 노드의 패킷 전송 시 충돌을 피할 수 있으므로 에너지가 보존되는 TDMA (Time Division Multiple Access) 기반의 MAC 프로토콜이 있다. 그러나 이 기법에서 센서 노드는 타임 스케줄

을 유지해야 하므로 추가적인 메모리가 요구되며, 시간을 매우 작은 슬롯 단위로 할당함으로 clock drift 문제가 발생한다. 경쟁기반의 CSMA (Carrier Sense Multiple Access) 기법을 사용하는 IEEE 802.11 MAC 프로토콜은 에너지를 절감하는 특성을 갖고 있지만, 노드가 하나의 동일한 네트워크 셀에 위치하여 1홉 범위에서만 통신이 가능하게 설계된 반면, 멀티-홉 통신이 요구되는 무선 센서 네트워크에 적용하기에는 부적절하다[12].

무선 센서 네트워크에서 에너지를 절감하기 위한 다른 방법은 노드 간 통신을 위해 사용되는 무선통신과 분리된 wake-up 제어 신호를 사용하는 방법이다. 이 신호는 duty cycle을 사용하지 않고 무선 통신을 꺼둔 상태에서 이웃 노드로 전송할 데이터가 발생할 경우 이 신호를 이용하여 이웃 노드를 통신이 가능한 모드로 전환하여 통신을 수행 한다. 이때 사용되는 신호는 별도의 프로세싱이 없으므로 소모되는 에너지는 매우 미약하다. 따라서 일반적으로 duty cycle을 사용하여 송수신 전원을 주기적으로 켜두어야 하는 방식과 달리 데이터 전송이 필요한 시점에서만 전원을 사용하므로 에너지 효율성 측면에서 매우 뛰어나다. 그러나 이런 기법을 적용 시 센서 노드에 추가적인 장치 및 데이터 송·수신용 주파수와 다른 별도의 주파수 사용이 요구된다. 현재까지 연구된 무선 센서 네트워크를 위한 에너지 효율적인 MAC 프로토콜은 duty cycle을 적용한 S-MAC과 T-MAC 프로토콜이 있다.

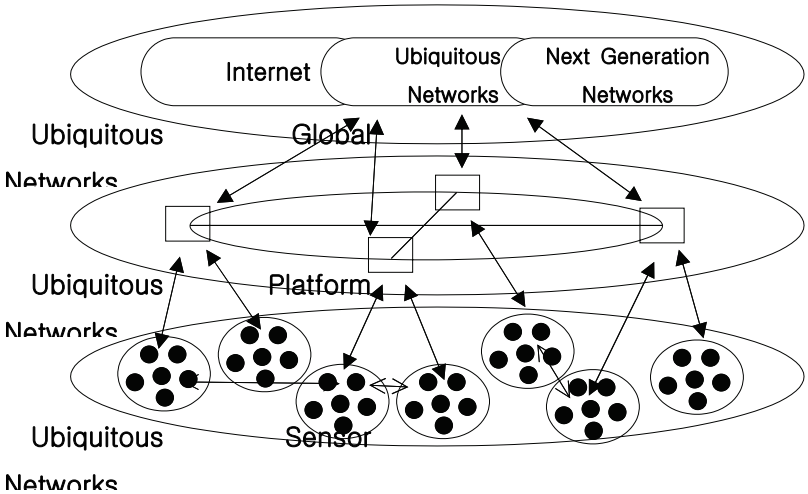

그림 2.1 유비쿼터스 네트워크와 무선 센서 네트워크와의 관계

Fig. 2.1 Interconnection Ubiquitous network and wireless sensor network

무선 센서 네트워크는 유비쿼터스 컴퓨팅 구현을 위한 기반 네트워크로 초경량, 저가격, 저전력의 많은 센서들로 구성된 무선 네트워크이다. 무선 센서 네트워크는 각각의 센서 노드들은 멀티 홉 무선 네트워크를 기본적으로 센서노드, 싱크노드 또는 게이트웨이 구성된다. 각각의 센서노드에서 센싱된 데이터들은 싱크노드에 의하여 수집되어 특정상황에서 유용한 정보를 요구하는 싱크 노드에게 인터넷 등의 외부 네트워크를 통하여 제공한다[10].

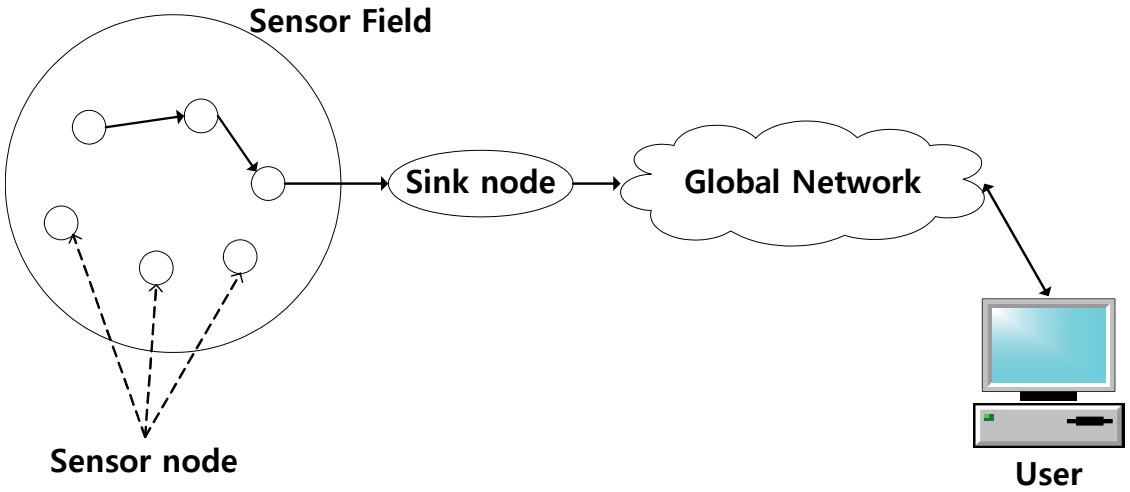

그림 2.2 무선 센서 네트워크의 기본 구성도

Fig. 2.2 Basic components of wireless sensor network

무선 센서 네트워크는 다양한 분야에 응용될 수 있는데 아군의 움직임 모니터 및 전장의 감시 등 군사 작전용, 그리고 산불 및 홍수 감지, 화산 활동 감시 등과 같은 환경 분야, 환자의 상태 모니터링, 병원의 약물 관리 등과 같은 의료 분야, 가정 자동화 시스템, 교통 시스템, 자동차 감시, 박물관 관리 등 가정 및 기타 산업 전반에 응용될 수 있다. 현재 무선 센서 네트워크의 개발은 미국의 대학 및 연구소를 중심으로 센서 노드, 센서 OS 등의 H/W 및 S/W 분야의 프로젝트가 진행 중이다. 센서 노드는 보다 작은 크기, 적은 전력으로 오랜 시간동안 감지, 정보처리 및 네트워크 기능을 수행하도록 연구가 이루어지고 있으며 특히 UC Berkeley의 MICA는 공개 H/W, S/W 정책으로 다른 연구 개발 그룹에 영향을 미치고 있다. 센서 네트워크의 운영 체제로는 TinyOS가 대표적이다[13].

2. 센서 네트워크의 특징

무선 센서 네트워크는 특정 현상을 감지하기 위한 많은 수의 센서 노드들로 이루어진 네트워크로서 정보 가전, 의학, 환경 감시, 군사 목적 등의 넓은 범위에서 사용이 가능하다. 센서 노드는 초소형, 저가격, 저전력의 특성이 요구되며 무선 센서 네트워크의 설계시 주요한 고려 대상으로 에너지 효율성, 확장성, 자가 구성 능력, 장애 허용성을 들 수 있다.

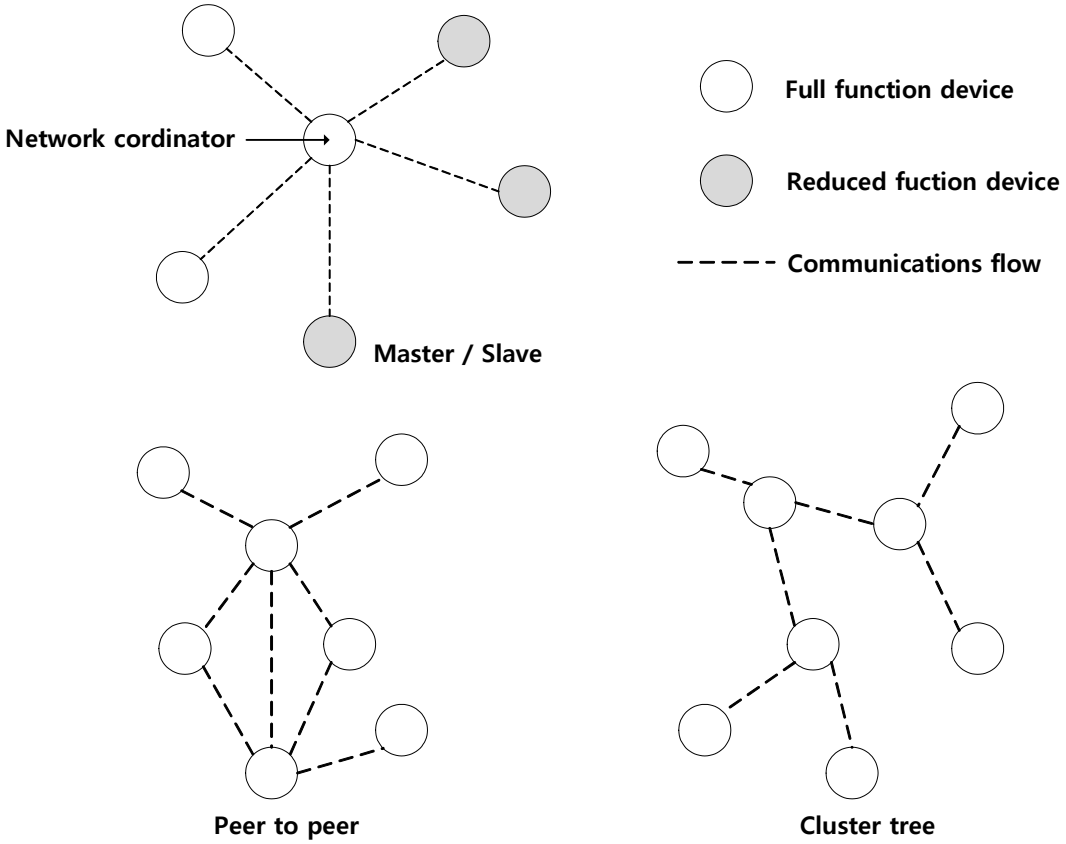

그림 2.3 무선 센서 네트워크 토폴로지

Fig. 2.3 Wireless sensor network topology

그림 2.3과 같이 무선 센서 네트워크는 다수의 센서 노드들로 구성되며 응용 목적에 따라 수백에서 수만에 이르는 노드들로 운영된다. 노드의 단가는 네트워크의 비용에 영향을 주게 된다. 따라서 노드의 단가는 충분히 낮아져야 한다. 또한 네트워크에 노드의 추가나 위치의 이동 등이 일어나더라도 네트워크에 영향을 주지 않고 적응할 수 있도록 확장성이 보장되어야 한다.

B. 무선 센서 네트워크 MAC 프로토콜

1. S-MAC 프로토콜

S-MAC 프로토콜은 무선 센서 네트워크를 위해 가장 처음 제안된 다중 접속 프로토콜로 전력 소모를 줄이는 것을 주된 목적으로 개발되었다. 하지만 SMAC에서는 전력 소모 최소화뿐만 아니라 충돌의 최소화와 시스템 확장성 또한 중요한 시스템요소로서 다뤄지고 있다. 그러나 공평성, 성능, 지연 등은 부차적인 요소로 다루고 있다. S-MAC은 에너지 효율성을 극대화하기 위해 센서노드의 duty cycle를 listen 과 sleep 상태를 주기적으로 반복하는 CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) 기반의 MAC 프로토콜이다. 즉, listen 상태인 경우는 센서노드간의 동기를 맞추는 sync 신호 및 RTS/CTS 전송시간으로 구성되며, sleep 상태는 센서노드간의 통신 휴면 상태가 된다[21][23][24][25][26].

S-MAC 프로토콜은 collision, overhearing, idle listening, overheard 로 인한 에너지 소비를 줄이기 위해 주요한 4가지의 해결책을 제시하였다. 주기적인 listen and sleep 상태, collision avoidance, overhearing avoidance, message passing이 주요한 아이디어이다.

그림 2.6은 S-MAC의 프레임 구조로써, listen과 sleep으로 구성되는 cycle 구간에서 SYNC, RTS, CTS, DATA, ACK를 송수긴 하기 위한 시간축에서의 데이터 구성을 보이고 있다.

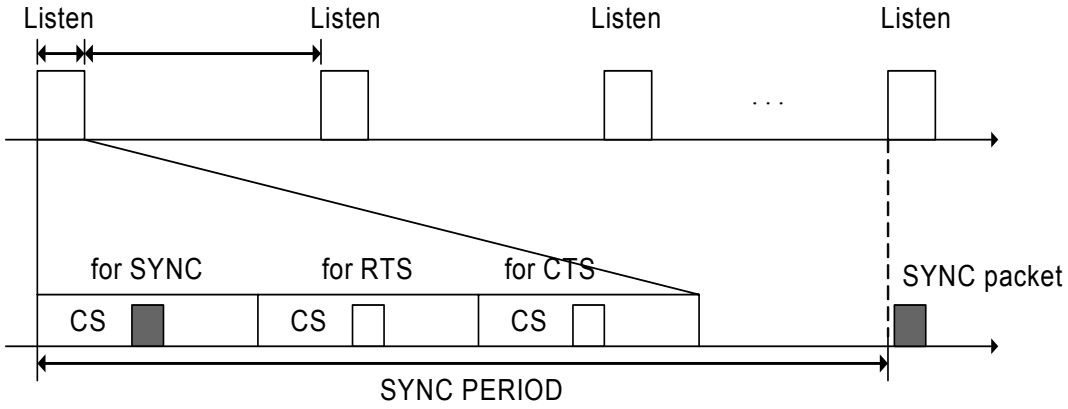

그림 2.4 S-MAC 프레임 구조

Fig. 2.4 S-MAC Frame structure

가. Periodic listen and sleep

무선 센서 네트워크에서의 센서 노드들은 일정한 주기를 가지고 운영 된다. 최초 sync을 맞춘 센서 노드들은 정해진 스케줄에 따라 listen 상태 혹은 sleep 상태로 운영 된다. 그림 2.7은 주기적인 sleep 과 listen 시간으로 구성된 duty cycle을 보이고 있다. 이러한 listen 상태에서는 sync 패킷을 통해 인접 센서 노드들과의 동기를 맞추는 한편, RTS/CTS 패킷 교환을 통해 센서 노드들 간의 송수신 데이터에 대해서 데이터 교환이 필요한지 여부를 판단하게 된다.

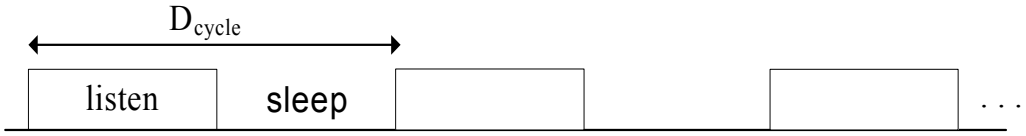

그림 2.5 S-MAC의 주기적인 listen/sleep

Fig. 2.5 S-MAC of periodic listen and sleep

나. Collision avoidance

무선 센서네트워크에서는 두 개 이상의 센서노드가 운영되고 있을 경우 각각의 데이터 송수신시 충돌이 야기될 수 있다. 이를 피하기 위한 방법으로 TDMA (time division multiple acess)와 같이 센서노드마다 특정 시간을 지정하여 전송하는 방법, 노드가 임의의 시간을 선택하여 경쟁을 통해 전송 매체를 점유하여 전송하는 방법이 있다. Multi-hop 기반의 무선센서네트워크는 IEEE 802.11 DCF (distributed coordination function)과 같은 경쟁 기반 프로토콜이 적합하다. S-MAC은 이를 적용하여, hidden terminal 문제 및 충돌을 예방할 수 있다. RTS/CTS기법을 사용하여, 그림 2.8과 같이 송신부, 수신부의 RTS-CTS-DATA-ACK 순서대로 송수신 하게 된다.

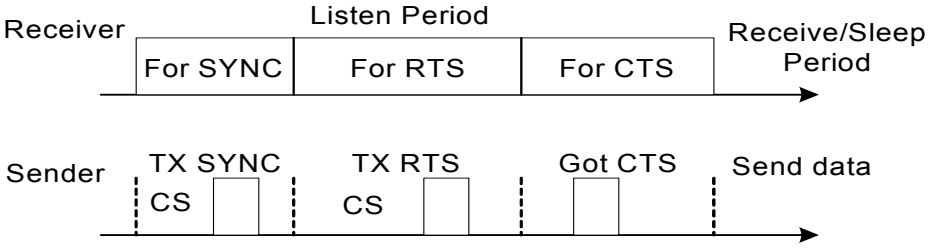

그림 2.6 S-MAC 메시지 시나리오

Fig. 2.6 S-MAC message scenario

다. Overhearing avoidance

Overhearing은 무선센서네트워크에서 소비하는 에너지 중 가장 많은 에너지 소비를 보인다. S-MAC은 간섭하는 인접 센서노드들을 sleep 모드로 전환시킴으로써, overhearing을 줄 일 수 있다. 또한 데이터 패킷들은 대체로 RTS/CTS 패킷보다 데이터의 길이가 길다. 이로 인해, 인접하는 센서노드들은 긴 데이터 패킷 혹은 ACK 패킷을 듣는것을 막을 수 있다. 즉, 송신자와 수신자와 이웃하는 센서노드들은 RTS/CTS 패킷을 듣고, 난 후 현재의 전송이 끝날 때 까지 sleep 상태를 유지한다.

라. Message passing

무선센서네트워크의 메시지는 각 센서 노드와 관계된 개개의 데이터가 모아진 집합체이다. 이러한 메시지의 길이는 유동적이며, 각 센서노드들은 데이터를 처리하기 전에 관련된 데이터를 모두 수신해야 한다. 따라서 S-MAC에서는 긴 메시지를 단편화하고 이것을 한꺼번에 보내는 방식을 택했다. 이때 RTS/CTS 제어 패킷은 1회만 송수신하며, 전체 메시지가 에러 없이 성공적으로 전송 될 경우에는 가장 이상적이지만, 전송 중 데이터가 손실 혹은 여러 가지 사유로 전송이 안되었을 경우는 송신부에서 타이머를 늘려 즉시 재전송하는 방식을 사용하였다. 그림 2.9와 2.10은 IEEE 802.11와 S-MAC에서 사용하는 메시지 전송을 위해 채널 예약 설정 시간을 보이고 있다.

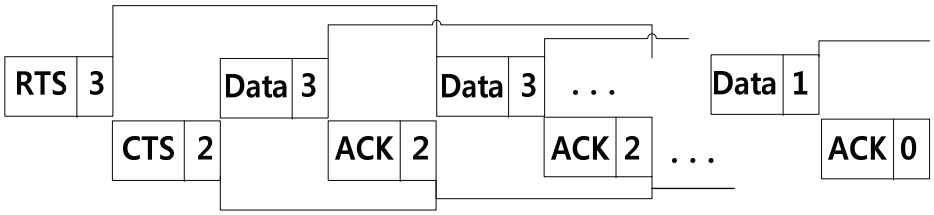

그림 2.7 IEEE 802.11 메시지 분할

Fig. 2.7 IEEE 802.11 message partition

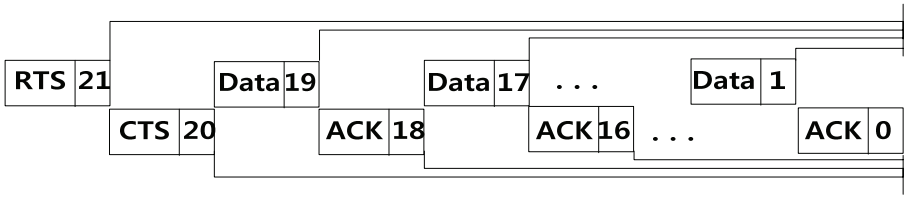

그림 2.8 S-MAC 메시지 분할

Fig 2.8 S-MAC message partition

2. T-MAC 프로토콜

T-MAC은 S-MAC에 부가적인 기능을 추가한 다중 접속 프로토콜이다. S-MAC과는 달리 수신자가 짧은 listen period에서 패킷을 수신 받지 못하면 바로 sleep 모드로 전환할 수 있다. 이는 시스템의 전체적인 wake-up 시간을 줄여 전력을 보전할 수 있도록 해준다.

3. B-MAC 프로토콜과 WiseMAC

B-MAC과 WiseMAC은 sleep/listen방법을 보다 효율적인 전력 보존을 위해서 preamble sampling을 사용한다. preamble sampling 기술은 노드가 반송파를 샘플링 할 정도의 아주 짧은 시간동안만 깨어 있다. 만약 반송파가 감지되지 않으면 노드는 바로 sleep 모드로 전환한다. 만약 반송파가 감지되면 노드는 깨어 있는 상태로 계속 preamble을 수신 한다. 모든 preamble이 수신되면 노드는 패킷의 수신자가 자신일 경우 전체 패킷을 수신하기 위해 계속 listen을 하게 되고 그렇지 않으면 바로 sleep 모드로 전환을 한다. 이 방법은 주변 노드의 sleep/listen 스케줄을 가지고 있을 필요가 없다는 측면에서 앞에 설명한 방식들에 비해 강점을 가지고 있다. 필요한 것은 이웃 노드의 wake-up 간격과 노드의 sleep 간격 보다 길게 preamble을 전송하는 것뿐이다. 이 방법을 토해 노드가 깨어 있는 동안에 확실하게 패킷을 전송 할 수 있다.

B-MAC은 CCA (Clear Channel Assessment)라는 방법을 사용한다. CCA는 센서 노드가 채널의 노이즈 레벨을 저장해 두고 그것의 평균을 내서 EMA (Exponentially Weighted Average) 알고리듬을 사용하여 데이터 패킷과 노이즈를 구분하는 방법으로 거짓 양성 (false postive)을 줄이고 정확한 반송파를 감지하는데 사용된다. 이 기능은 선택 적으로 사용 될 수 있어 사용하지 않을 경우는 B-MAC은 S-MAC처럼 동작하게 된다. 이 프로토콜들은 preamble의 길이를 줄이기 위해서 이웃노드들의 wake-up 시간을 저장하는 것으로 성능을 향상 시킬 수 있다. 클록 드리프트 (Clock Drift)에 의해 노드들 사이의 동기가 어긋나는 것을 보정하기 위하여 프리앰블의 길이를 늘이는 방법 또한 적용 되었다. 높은 트래픽 부하와 지연을 줄이기 위하여 adaptive cycle 기술이 제안되기도 하였다.

전력 소모는 duty cycle을 낮춤으로써 줄일 수 있지만 hidden terminal 문제로부터 발생하는 충돌에 의한 패킷 손실은 이 두 프로토콜에서 여전히 문제의 여지가 있다. 따라서 만약 패킷 충돌이 증가한다면 duty cycle을 낮추는 것이 크게 의미가 없게 될 수도 있다.

C. 표준화 동향

2003년 10월에 제정된 저속 무선 개인 영역 네트워크 (Low Rate Wireless Personal Area Network, LR-WPAN)의 PHY 및 MAC 표준인 IEEE 802.15.4-2003은 그 주된 응용 중의 하나로 센서 네트워크 분야를 포함하고 있으며, 현재 USN 분야에서 광범위하게 활용되고 있다. IEEE 802.15.4b Task Group은 IEEE 802.15.4-2003 표준의 명료화 및 성능 개선을 위해서 구성되었는데 2006년 6월 IEEE 802.15.4-2006 표준을 완료했다. IEEE 802.15.4a (Alternative PHY) Task Group은 전송 속도, 고정밀 거리 측정들 동시 지원, 높은 aggregate throughput. 저비용/초저전력 등을 목표로 IEEE 802.15.4a 표준화 진행 중인데, 이 표준은 2007년 3월 22일 IEEE-SA (Standards Association)에 의해서 IEEE 802.15.4-2006의 새로운 개정표준으로 승인되었으며, 2007년 6월 표준 출판을 목표로 표준화 마무리 중이다. IEEE 802.15.5 Task Group은 매시 네트워킹을 가능하게 하기 위해서 WPAN의 MAC 및 PHY에 있어야할 필요한 메커니증을 결정하기 위해서 결성되었다. BAN (Body Area Network)을 위해서 IEEE 802.15 Working Group 산하에 Study Group이 결성되어 활동하고 있으며, IEEE 802.15.6으로 표준화할 계획이다[27][28][29][30][31][32][33].

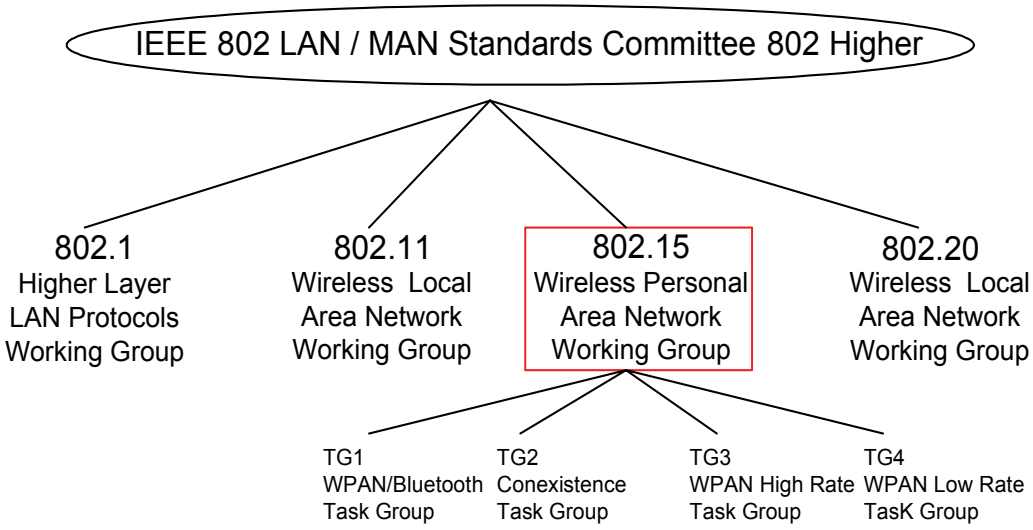

그림 2.9 IEEE 802.15.4 TG4

Fig. 2.9 IEEE 802.15.4 TG4

1. IEEE 802.15.4/IEEE 802.15.4b

IEEE 802.15.4표준은 단거리, 저전력, 저속의 무선 기기에 대한 표준으로 지역에 따라 혹은 국제적으로 사용상 라이센스 제약이 없는 868MHz, 915MHz, 2.4GHz 주파수 대역을 사용한다. 응용 분야로서는 센서, 액츄에이터, 대화형 장난감, 스마트 배지, 건강상태 모니터링, 컴퓨터 주변장치, 원격 제어, 산업 네트워크, 홈 자동화 등이 있다. 표준 단체의 최정적인 목적은 배터리의 수명을 수개월부터 수년까지 가능한 저전력 무선 기기의 PHY 계층 및 MAC 계층을 정의하는 것에 두고 있으며 2003년 10월에 표준 문서가 발표되었으며 IEEE802.15.4-2003으로 지칭되기도 한다.

IEEE 802.15.4 MAC은 기본적으로 CSMA/CA방식을 사용하며, beacon 기반의 super frame 구조를 지원한다. 이 super frame 활성 영역과 비활성 영역으로 나눠진다. super frame 구조에서는 시간 보장 슬롯을 이용해서 실시간 통신을 할 수 있으며, 비활성 영역에서 송수신기를 끔으로써 전력 소모를 줄일 수 있다.

물리계층은 물리계층 데이터 서비스와 물리계층 관리 서비스를 제공한다. 물리계층은 물리적 라디오 채널을 통해 물리 계층 프로토콜 데이터 유닛의 송신과 수신을 가능하도록 하며, 라디오 송수신기의 활성화와 비활성화, 채널 선택, 빈 채널 검출, 링크 성능 표시, 에너지 검출 등의 기능을 수행한다.

MAC 계층은 물리 계층 데이터 서비스를 통해서 MAC 프로토콜 데이터 유닛의 송신과 수신을 담당하며, 또한 비컨 관리, 채널, 접속, 시간 보장 슬롯 관리, 프레임 검증, ACK 프레임 전송, 네트워크 가입 및 탈퇴 등의 기능을 수행한다. IEEE 802.15 workging group의 TG4b task group은 IEEE 802.15.4-2003과의 호환성을 유지하는 것을 바탕으로 기존의 IEEE 802.15.4-2003표준에서 모호성 수정, 불필요한 복잡성 제거, 보안 키 사용에 있어서 유연성 증가, 1GHz미만 주파수 대역에 대한 전송속도 향상 등을 위하여 결성되어 2006년 6월 IEEE 802.15.4-2006 표준을 제정하였다.

2. IEEE 802.15.4a

IEEE 802.15.4a 표준은 IEEE 802.15.4 표준의 물리 계층 대신 선택적으로 물리 계층을 사용 할 수 있도록 새로운 물리 계층과 이에 따른 다중 접속 계층을 정의 하고 있다. IEEE 802.15.4a의 주된 목적은 높은 정밀도의 거리 측정의 제공과 더 높은 데이터 전송 속도, 더 긴 통신 거리, 낮은 전력 소모와 비용이다. 표준화 그룹에서는 이러한 주된 목적 달성을 통해서 중요한 새로운 응용과 시장의 확대를 기대하고 있다.

IEEE 802.15.4a는 2004년 3월에 공식으로 Task Group이 되었고, 2005년 3월에 26개의 물리 계층 후보군을 선정 했으며 이중 임펄스 기반 광대역 물리 계층과 CSS 물리 계층 두 가지를 기본으로 정하였다. 2006년 동안 각종 투표를 거쳐 2005년도에 정해진 물리 계층이 확정 되었으며, 2007년 3월에 IEEE-SA 표준 이사회에 의해 새로운 표준으로 승인 받았으며 현재 TG4a는 더 이상의 표준화 작업은 진행되지 않고 있으며 2007년 6월에 표준의 발표를 남겨둔 상태이다.

IEEE 802.15.4a에서 정의하고 있는 물리 계층은 임펄스 기반 광대역(Impulse Radio Ultra Wideband: IR-UWB)물리 계층과 CSS(Chirp Spread Spectrum) 물리 계층 두 가지이다. CSS 물리 계층은 2.4GHz을 사용하며 IR-UWB 대역은 3.1~4.9GHz대역을 사용한다.

다중접속계층은 데이터 전송 속도나 통신 거리 등의 물리 계층의 특징에 따라 약간의 수정 있으나 IEEE 802.15.4표준과 거의 흡사하다. 가장 큰 차이점은 바로 거리 측정을 지원하기 위한 거리 측정 프로토콜이다. 앞에서 설명하였듯이 IEEE 802.15.4a의 가장 큰 장점은 정확한 거리 측정에 있다. 기존의 15.4표준에서 RSS(Received Signal Strength)를 사용하여 거리를 측정할 경우 Multi-path Fading Channel로 인해 정확도와 안정성이 매우 떨어졌다. 하지만 15.4a 표준에서는 라디오 신호의 TOF(Time of Flight)와 광대역 통신을 거리를 측정하는 방식에 사용하여 RSS에 비해 정확하고 안정된 결과를 제공한다. 두 장치 사이의 Two-way TOA Ranging을 사용하여 거리를 측정하는 방법을 보여준다. TOA는 Time of Arrival의 약자로 라디오 신호의 TOF를 측정하여 두 장치의 거리를 측정 하는 방법으로 A가 패킷을 보내고 나서 B의 응답을 받는데 까지 걸리는 시간을 Tr이라고 하면 Tr = 2n + Tu가 된다. A가 Tu의 시간을 알고 있다면 A는 B와의 거리를 측정 할 수 있다.

IEEE 802.15.4a의 표준에서 사용하고 있는 거리 측정 프로토콜로 앞에서 설명한 Two-way TOA Ranging을 기본으로 송신 장치와 수신 장치가 상호간의 거리를 측정할 수 있도록 설계되어 있다. 거리를 측장하는 프로토콜까지를 IEEE 802.15.4a에서 정의 하고 있으며, 측정된 거리를 바탕으로 삼각측량 등의 방법을 통하여 위치 인식을 하는 것은 표준에 포함되어 있지 않다. 위치 인식은 네트워크 계층이나 응용 계층에서 다뤄야 한다.

3. IEEE 802.15.5

IEEE 802.15 계열의 WPAN 표준은 물리 계층과 미디어 접근 부 계층의 규격만을 표준화하게 되므로, 멀티 홉 통신을 기반으로 하는 메시 네트워크의 표준을 정의하는 데에 한계가 있다. IEEE 802.15.5 태스크 그룹은 이러한 IEEE 802.15 WPAN의 상위 계층에서 메시 네트워크를 규격화 하는 데에 필요한 미디어 접근 계층의 요구사항을 규격화 하기 위해 제정된 표준화 그룹이며, 표준화의 주요 범위는 IEEE 802.15.3HR-WPAN 및 IEEE 802.15.4 LR-WPAN이다.

IEEE 802.15.3 표준은 네트워크의 코디네이터 역할을 하는 Piconet Controller와 단말 노드인 DEV로 구성되며, QoS를 위해 데이터의 전송 시간을 미리 예약하는 CTA (Cannel Time Allocation)구간과 CSMA/CA기반의 CAP (Contention Access Period) 구간으로 구성된다. IEEE 802.15.3 표준에서는 블루투스와 마찬가지로 Peer-to-Peer 통신만을 지원할 뿐만 아니라, 15.3a의 경우 최대 전송 거리가 10미터를 넘기 못하여, 메시 네트워크 기능을 갖추지 못할 경우 응용 분야가 극히 제한적일 수밖에 없다. 이러한 제약 사항을 해결하기 위해 IEEE 802.15.5표준에서는 PNC 간 메시 네트워크 토폴로지를 구성하고 하나의 슈퍼프레임 구간 내에서 각 PNC가 서로 다른 시간에 비컨을 전송하고 DEV들과 통신하도록 함으로써 충돌을 회피하는 기법을 제안하였다. 즉, 새로운 PNC가 네트워크에 합류하면서 기존의 PNC가 전송하는 비컨을 일정 시간 동안 스캔함으로써 Idle한 구간을 탐색할 수 있다. 이외에도, 소스 노드와 싱크 노드 사이에 자원의 예약을 통해 데이터 전송의 QoS를 보장하는 DRP (Distributed Reservation Protocol)과 현재 합류해 있는 자손 노드들o의 수를 파악하고 블록 단위의 아이디를 할당하는 주소 할당 기법이 제안되어 있다. 한편, IEEE 802.15.4 LR-WPAN에서의 메시 네트워크를 위한 연구도 활발히 진행되고 있으며, 미국 CUNY (City University of New York)에서 제안한 ART (Adaptive Robust Tree) 및 이를 매시 토폴로지로 확장한 MART (Meshed ART) 기법을 기본으로 하고 있다. ART에서는 IEEE 802.15.4에서 정의하지 않은 16bit 네트워크 주소 할당 방식 및 트리라우팅 기법 등을 지원한다. ART 알고리즘은 크게 초기화 단계 및 운영 단계로 구성되며, 초기화 단계에서는 네트워크를 구성한 뒤, 각 노드가 가지는 자식 노드의 수를 트리의 루트 노드인 코디네이터에 보고하면, 코디네이터가 이를 바탕으로 노드들의 네트워크 주소를 할당하는 순서로 이루어진다. 운영 단계에서는 데이터의 교환이 이루어지며, 자식 노드들이 가지는 네트워크 주소범위 정보를 활용하여 멀티 홉으로 데이터를 전송하는 라우팅 기법을 제안하였다. MART에서는 자식 노드뿐만 아니

라 이웃 노드들이 가지는 네트워크 주소 범위 정보를 활용함으로써 트리 주고를 따라가야 하는 ART 라우팅의 비효율성을 극복하였다. 이 외에도, 멀티캐스트를 위한 알고리즘이 제안되었으며, 향후에는 저 전력 통신 기법, IEEE 802네트워크와의 연동 기법, 이동성 및 QoS 지원을 위한 기술 등의 연구한다.

4. Body Area Network

Body Area Network (BAN)는 체내 혹은 인체의 주변에서 일어나는 근거리 통신을 기반으로 구성된 네트워크로, 웨어러블 컴퓨팅, 센서 네트워크 등의 기술이 복합적으로 적용되어 이루어진 새로운 연구 분야이다. 이는 MP3플레이어와 헤드셋을 무선으로 연결해주는 것과 같은 비의료 (non-medical)분야와 심전도, 근전도 등의 사람의 생체신호를 측정하여 무선으로 데이터를 전송하는 의료 (medical) 분야에 사용될 수 있다. 특히, 의료분야의 BAN은 Body Sensor Network (BSN)이라고 명명된 센서 네트워크의 일종으로 연구되어 왔으니 최근에는 학문적 중요성과 다양성을 인정받아 BAN만을 위한 여러 학회가 개최되고 있다. IEEE 802.15워킹 그룹에서는 BAN 스터디 그룹을 결성하여 BAN표준화를 진행하고 있으며 향후 IEEE 802.15.6 표준으로 정립될 것이다. 또한, BAN은 응용분야가 다양하여 현재 스터디 그룹에서는 비의료 분야를 위한 BAN과 의료분야를 위한 medical BAN (mBAN)으로 나누어 표준화를 진행하고 있다. 하지만, 두 분야 모두 연구가 초기단계에서 진행이 되고 있어서 다중 접속 프로토콜을 위한 표준화는 기술적 요구사항의 정리가 진행되고 있는 수준이다. 표 2.6의 두 가지 분야의 요구사항을 살펴보면, BAN은 소리, 영상 등의 전송을 위해 고속의 데이터 전송 속도를 필요로 하고, mBAN은 생체 신호의 전달을 목표로 하여 저속 전송과 전력 소모의 효율성을 요구한다.

	Other WPAN standards	BAN(mBAN)
Range	~30m	< 2m
Piconetset	< 255 nodes, multiple hops	high number of nodes, sungle/multiple hops
Configuration	self-configuration	low complexity MAC layer
Power consumption	low power consumption	extremely low power consuption

표 2.6 다중 접속 프로토콜의 비교

Fig. 2.6 Multiple connecting protocol

III. 제안하는 Cross-Layer 기반의 CL-SMAC

A. 기존 MAC 프로토콜의 문제점

S-MAC 프로토콜은 앞서 소개한 에너지 효율성 향상 기법들을 통해 에너지 효율성 측면에서 좋은 효과를 기대할 수 있다. 즉, 주요한 아이디어인 주기적인 listen and sleep을 통해 그림 3.1과 같이 일정한 데이터들이 송수신 되었을 경우 전력 소모량 소비 하며 운영하게 된다. 하지만, sleep 상태의 센서노드들은 데이터 송수신이 불가능하게 되기 때문에 지하철, 대형 쇼핑몰과 같은 유동인구가 많은 지역에서의 그림 3.2와 같은 화재 및 사고 감지를 인식하게 될 경우 신속하게 처리 될 수 없게 된다. 이러한 S-MAC을 적용하게 될 경우, 응급 및 긴급 상황 발생시에는 데이터의 지연성을 고려하지 않아 신속하게 싱크 센서노드로 신속한 데이터 통신이 불가능하게 된다.

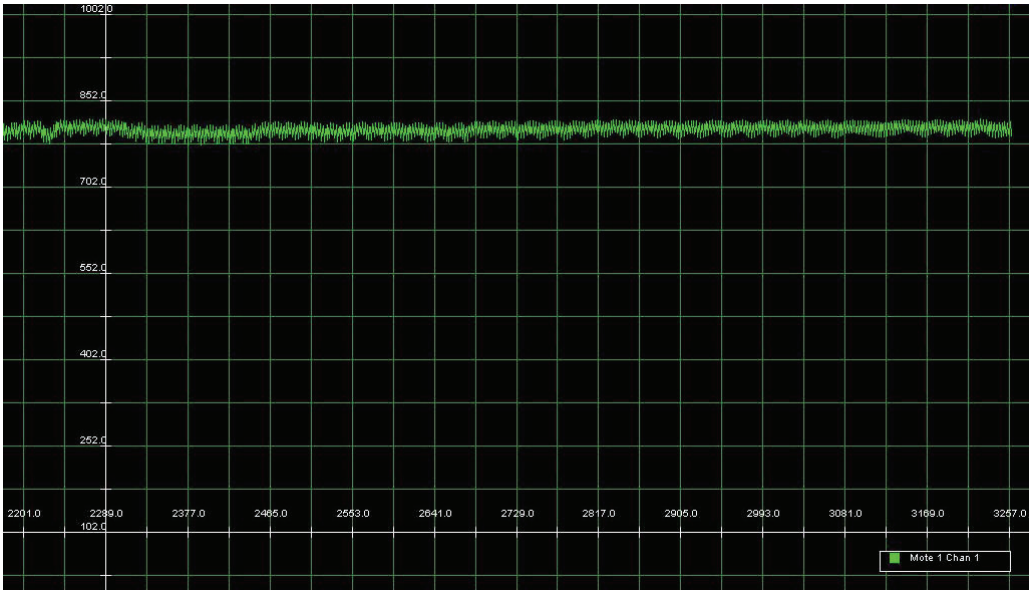

그림 3.1 일반적인 상황

Fig. 3.1 Normal situation

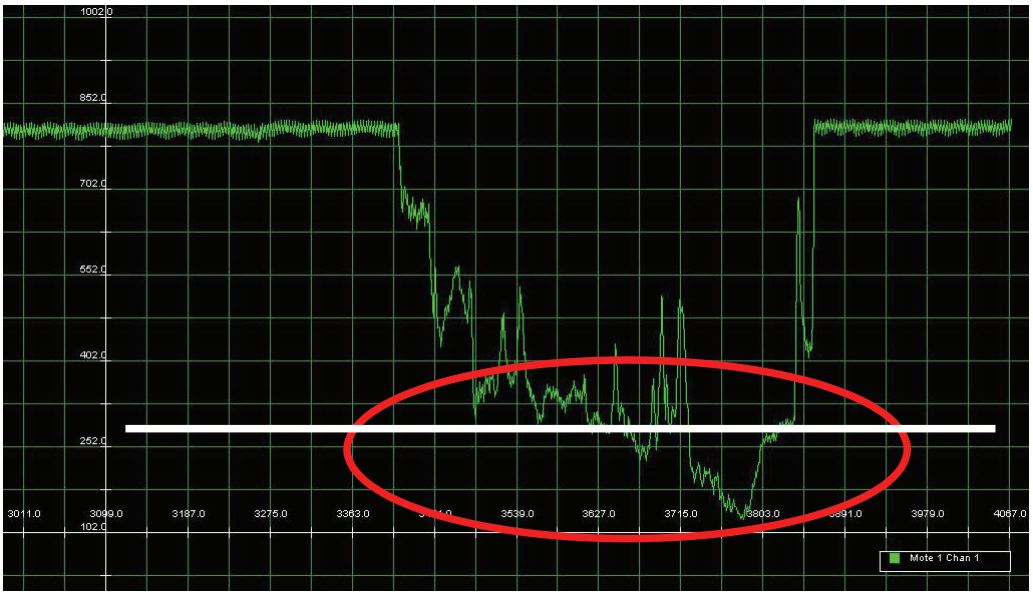

그림 3.2 응급 및 긴급 상황

Fig. 3.2 Emergency situation

B. 제안하는 MAC 프로토콜의 특성

제안하는 CL-SMAC 프로토콜은 응급 및 긴급 상황 발생시에 duty cycle을 변화시켜, 센서 노드간의 데이터의 지연을 억제한다. 그림 3.3은 CL-SMAC에서의 cross layer QoS controller는 응용계층에서 획득한 센싱 정보를 기반으로 하여 긴급성을 요하는 상황임을 인지하도록 하고, 이를 datalink 계층인 MAC에 전달하도록 한다. 이를 위해 센싱 정보의 평균 데이터와 이상 신호 데이터에 대한 사전에 미리 알고 판단한다. 따라서, 센싱 정보의 수치값의 변화가 없을 경우, application layer에서는 아무런 반응을 하지 않고, 일반적인 S-MAC프로토콜을 사용하여 listen and sleep를 한다. 반면 응급 및 긴급 상황 즉, 데이터의 변화를 application 계층에서 감지하게 될 경우 Cross layer QoS controller에 의해 CL-SMAC 프로토콜이 호출되며, 센싱 데이터를 신속정확하게 전송하게 된다.

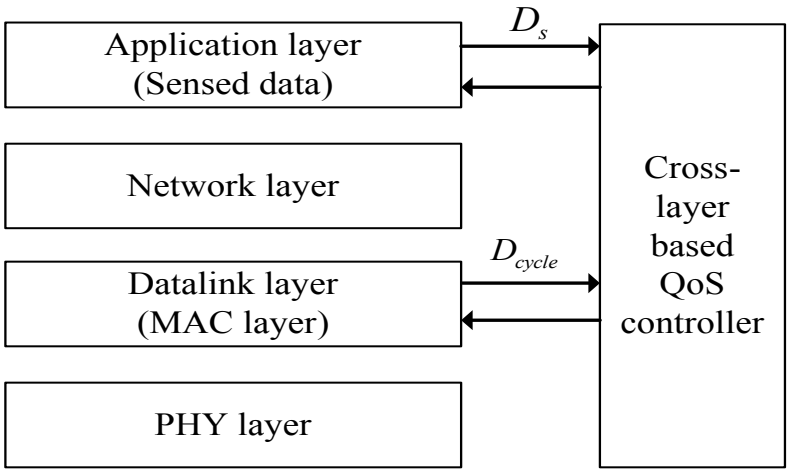

그림 3.3 CL-SMAC의 프로토콜 계층도

Fig. 3.3 CL-SMAC protocol stack

그림 3.4는 (A)는 일반적인 S-MAC 프로토콜에서 제안하는 MAC 프로토콜의 duty cycle을 보여주고 있다. 응급 및 긴급 상황이 지속될 경우 CL-SMAC에서 sync 패킷을 전송함으로써 (B),(C)와 같이 duty cycle의 주기를 변경하고, 데이터를 신속하게 전달할 수 있게 한다. 다시 말해, 응급 및 긴급 상황 발생시 에너지 효율성보다 데이터 전송 지연에 민감하도록 설계되어진다.

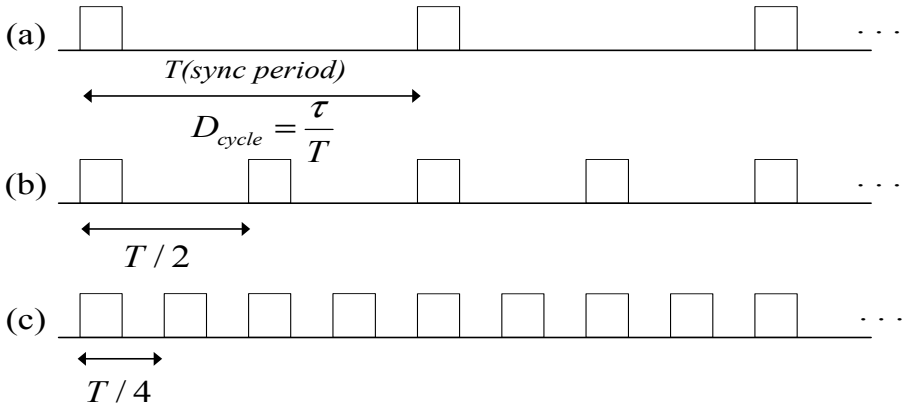

그림 3.4 CL-SMAC 프로토콜의 duty cycle의 변화

Fig. 3.4 CL-SMAC protocol changed duty cycle

그림 3.5과 표3.1은 CL-SMAC 프로토콜의 동작 flow chart를 나타내고 있다. 무선센서네트워크에서 센서노드들이 CL-SMAC으로 동작되기 위해서는 임계값을 정하고, 지정된 수치보다 높아지면 응급 및 긴급 상황으로 간주한다. 이는 응급 및 긴급 상황으로 인지하여 각 센서노드들의 duty cycle 변화시켜, 데이터 전송을 빠르게 한다.

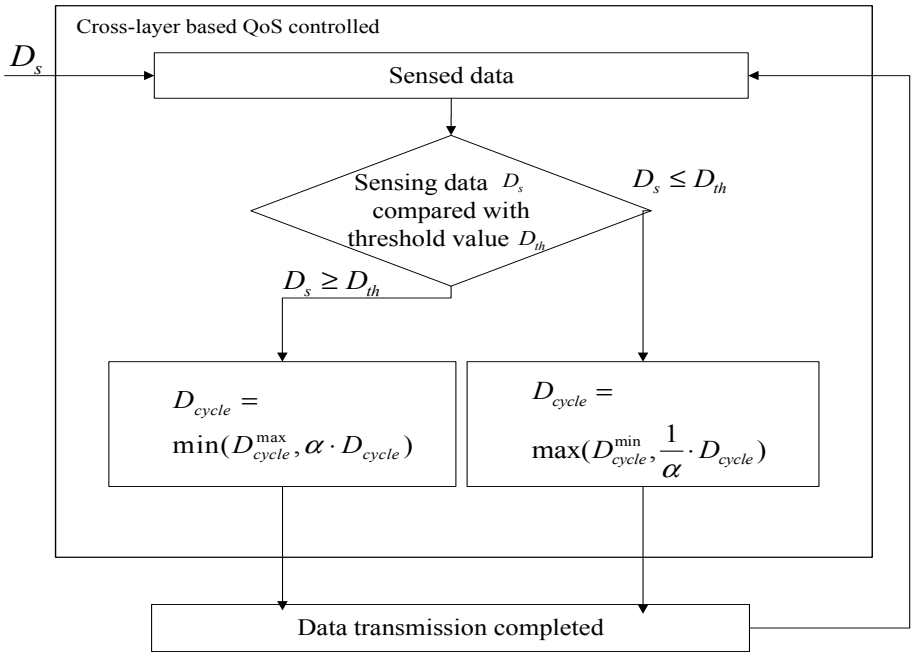

그림 3.5 CL-SMAC 흐름도

Fig. 3.5 CL-SMAC flow chart

Condition $\begin{cases} Ds: sensed value \\ D_{th1}, D_{th2}, \text{and} D_{th3}: threshold value \end{cases}$	$duty\,cycle$ (D_{cycle})
$D_s \le D_{th1}$	D_{cycle}
$D_{th1} \le D_s \le D_{th2}$	2 X D_{cycle}
$D_{th2} \le D_s \le D_{th3}$	4 X D_{cycle}

표 3.1 CL-SMAC 임계값에 따른 duty cycle의 변화

Table. 3.1 Duty cycle of CL-SMAC

IV. 제안하는 MAC 프로토콜 실험 및 평가

A. 제안하는 MAC 프로토콜 실험 환경

제안하는 CL-SMAC 프로토콜의 실험은 NS-2 시뮬레이션을 사용하였다. 테이블 4.1은 시뮬레이션 환경에 대해서 나타내고 있다. 또한 그림 4.1은 네트워크 토폴로지를 표현하고 있다. 본 시뮬레이션에서는 4개의 sensor node를 사용 하였으며, NOAH routing 프로토콜을 사용하였다. 센서 노드 0번에는 CBR Traffic application을 연결하여 주기적인 데이터를 생성하도록 하였다.

본 시뮬레이션은 S-MAC과 CL-SMAC 프로토콜의 에너지 소비량과 데이터 latency를 각각 비교한다.

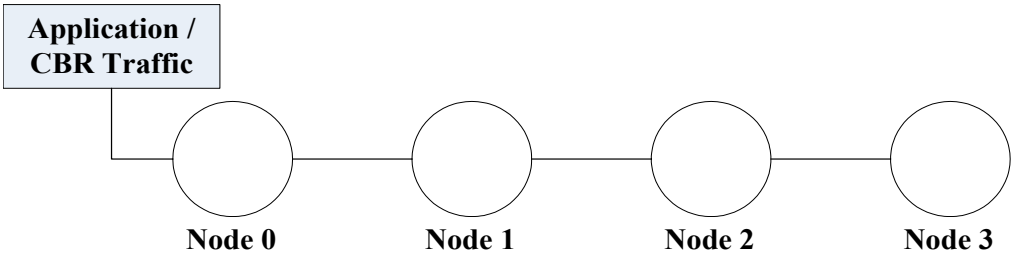

그림 4.1 노드 네트워크 토폴로지

Fig. 4.1 Node topology for NS-2

Simulation tool	NS-2.31
sensor node	4EA
Time schedule	1000s
application	CBR
routing protocol	NOAH routing protocol
duty cycle	10
sync Flag	1

표 4.1 시뮬레이션 환경

Table. 4.1 Simulation experiment for NS-2

B. 제안하는 MAC 프로토콜 실험 결과 및 분석

NS-2 시뮬레이션을 이용하여, S-MAC 프로토콜과 CL-SMAC 프로토콜의 에너지 효율성과 데이터의 지연성을 각각 평가를 한다. 이를 위해 그림 4.2와 같이 3개의 시나리오를 구성하여 결과를 분석하였다.

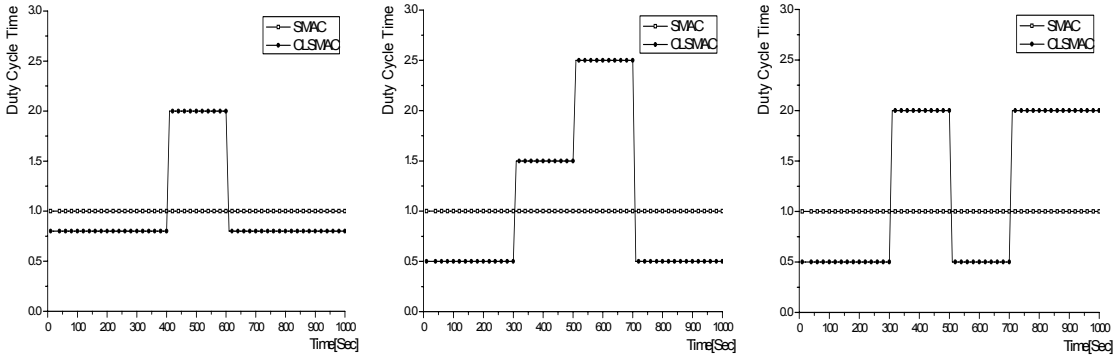

그림 4.2 상황별 시나리오

Fig. 4.2 Situation of scenario

그림 4.2.1과 같은 첫 번째 시나리오는 S-MAC 프로토콜과 비교하여 에너지 소비를 평상시에는 에너지 소비를 고려하여 duty cycle을 길게 해준다. 하지만 응급 및 긴급 상황 발생시에 빠르게 데이터를 전송하기 위해서 duty cycle을 짧게 해서, 데이터 전송률을 높여준다. 응급 및 긴급 상황 종료시 평상시와 같이 duty cycle을 길게 해줘서 응급 및 긴급 상황에 대해서 적절하게 대처할 수 있는 cross-layer based sensor MAC 프로토콜임을 보여준다.

그림 4.2.2의 두 번째 시나리오는 S-MAC 프로토콜에 비해 현저하게 duty cycle을 길게 해준다. 이럴 경우 에너지 효율성은 만족하게 되지만, 데이터 전송률이 현저하게 떨어지게 되며, 응급 및 긴급 상황 발견시 빠르게 전송하는데 목적을 두게 된다. 위의 시나리오는 응급 상황을 2단계로 구분지어, 보다 신속한 전송을 요구하는 데이터를 만족하기 위해 단계별 duty cycle을 조절하여 응급 및 긴급 상황에 대해서 조치하게 된다.

그림 4.2.3의 세 번째 시나리오는 응급 및 긴급 상황이 주기적으로 발생되는 상황에 대해서 S-MAC 프로토콜과 비교하여, 신속하게 데이터 전송을 가능여부에 대한 시나리오이다.

Duty cycle은 Listen time + Sleep time 으로 구성되어 있으며, 본 시나리오에서 나

온 duty cycle factor는 $D_{cycle}^{new} = \frac{1}{\alpha} D_{cycle}^{old}$을 적용하여 상수값을 결정하게 되었다.

1. 시나리오 I

S-MAC 프로토콜은 CL-SMAC 대비 에너지는 데이터의 지연성이 고려하지 않고 있다. 만약, 응급 및 긴급 상황 발생시에 신속한 데이터 전송을 요구 하고 있다.

그래서, 일반적인 상황시는 S-MAC 프로토콜보다 duty cycle을 적게 사용하여 에너지 소모를 줄이며, Application layer에서 응급 및 긴급 상황으로 인지시 그림 4.3과 같이 duty cycle을 신속하게 조절하여 데이터의 신속을 만족하게 된다. 이러한 경우 에너지는 소모량은 증가하게 되지만, 일반적인 상황에서 소모량이 줄어 전체적인 에너지 효율성은 평균적으로 비슷하며, 또한 데이터 지연성 비슷하지만, 그림 4.4와 같이 일시적인 상황에서의 데이터의 전송률은 증가하게 되어 응급 및 긴급 상황에서 충분히 사용될 수 있다.

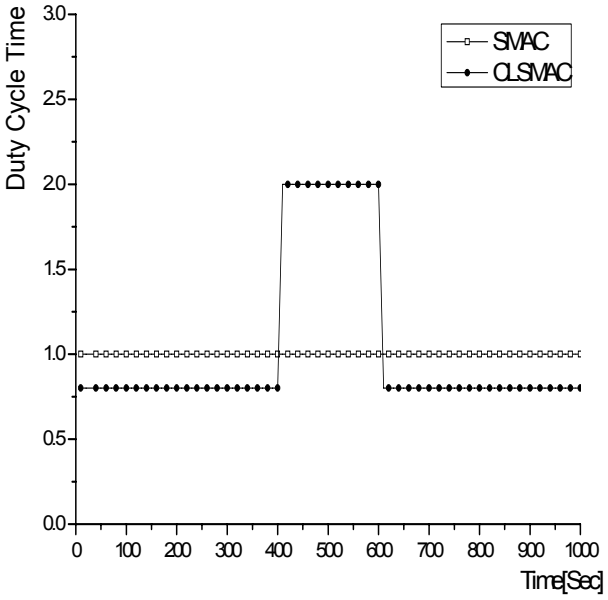

그림 4.3 시나리오 I의 Duty cycle 수치

Fig. 4.3 Duty cycle factor of scenario I

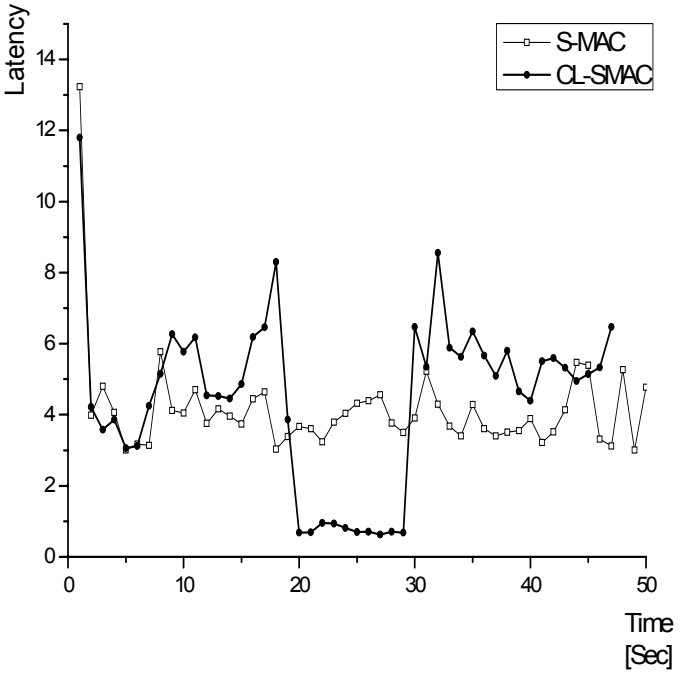

그림 4.4 시나리오 I의 데이터 지연성 비교

Fig. 4.4 Data latency of scenario I

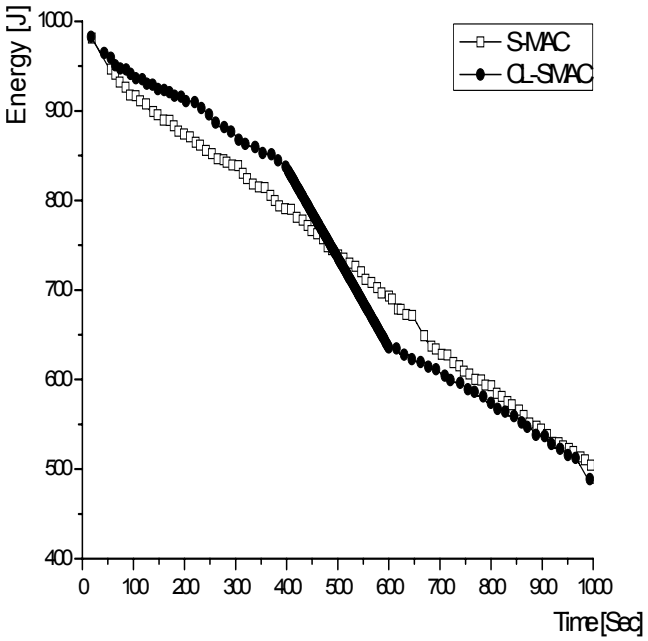

그림 4.5 노드 0의 에너지 소비량

Fig. 4.5 Consumed energy at node 0 in scenario I

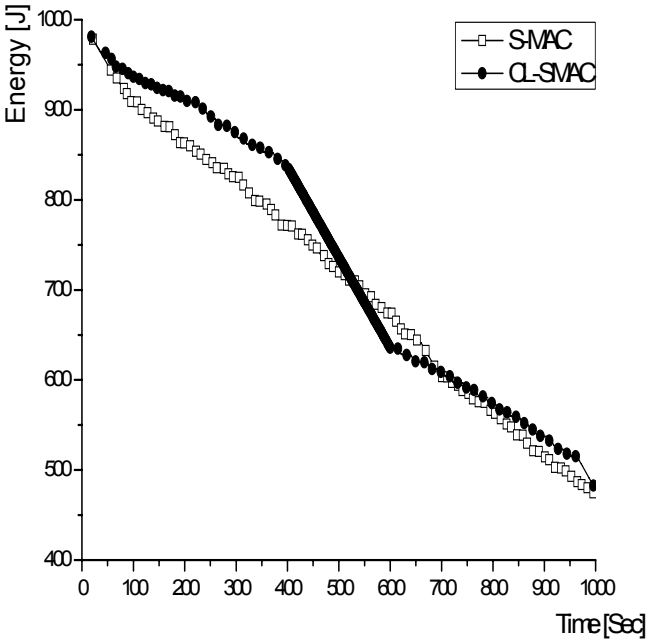

그림 4.6 노드 1의 에너지 소비량

Fig. 4.6 Consumed energy at node 1 in scenario I

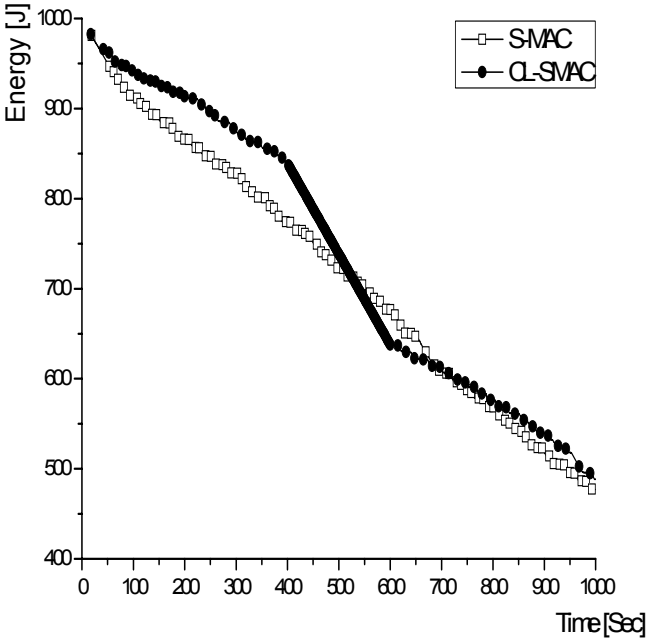

그림 4.7 노드 2의 에너지 소비량

Fig. 4.7 Consumed energy at node 2 in scenario I

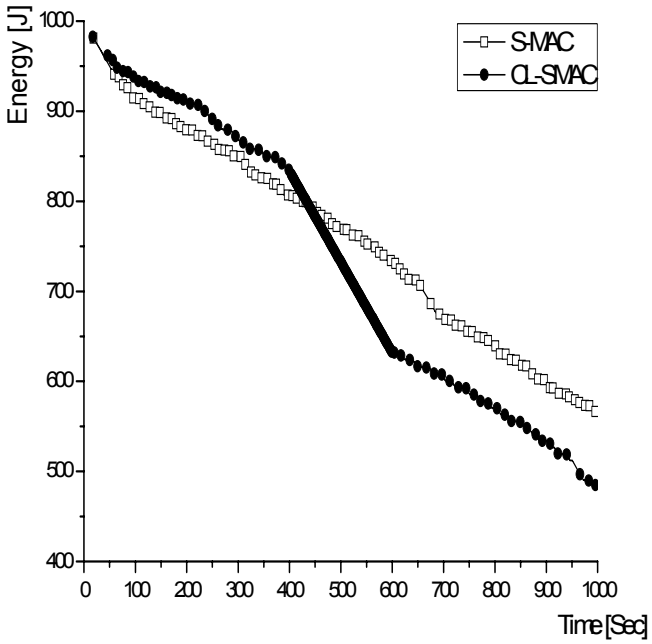

그림 4.8 노드 3의 에너지 소비량

Fig. 4.8 Consumed energy at node 3 in scenario I

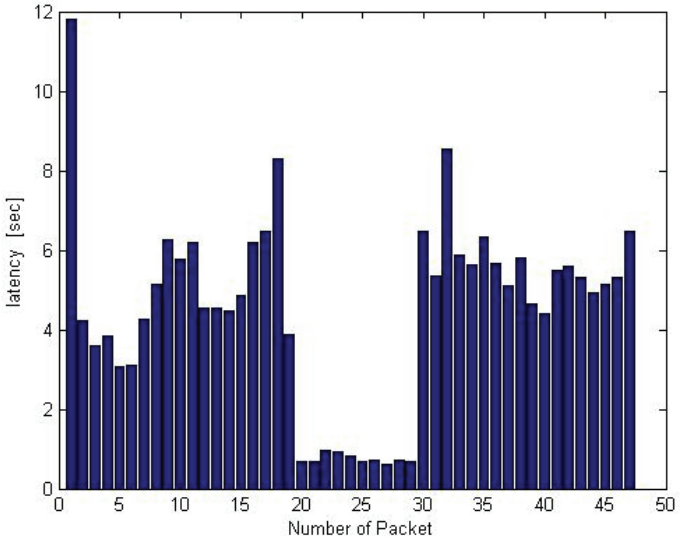

그림 4.9 시나리오 I의 CL-SMAC latency

Fig. 4.9 CL-SMAC latency of scenario I

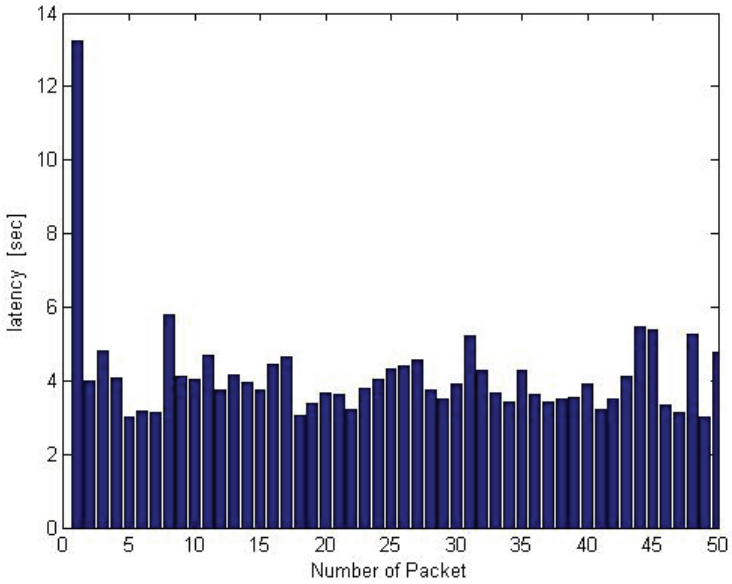

그림 4.10 시나리오 I의 S-MAC latency

Fig. 4.10 S-MAC latency of scenario I

그림 4.5, 4.6, 4.7, 4.8은 각 센서노드의 에너지를 나타내고 있다. 최초 동작을 할 때 일반적인 S-MAC 대비 에너지 소모량은 적게 사용하다가 응급 및 긴급 상황이 400초에 발생하였다는 가정하에 신속하여 duty cycle을 바꿔줬다. 그래서 일시적으로 그림 4.8과 같이 데이터의 지연성을 만족하게 된다. 또한 Table 4.2에서 보는바와 같이 전체적인 에너지 소모량은 비슷하며, 응급 및 긴급 상황에서 본 프로토콜은 적절함을 보여주고 있다.

	평균 latency[Sec]	평균 energy[J]	남은 에너지			
			node 0	node 1	node 2	node 3
SMAC	4.1603	505	504	474	476	566
CL-SMAC	4.4704	483	484	480	488	482

표 4.2 시나리오 I에서의 S-MAC 과 CL-SMAC의 비교

Table 4.2 Scenario I compared of S-MAC and CL-SMAC

2. 시나리오 II

앞의 시나리오는 응급 및 긴급 상황을 1단계로 심플하게 구성하였다면, 본 시나리오는 응급 상황을 2단계로 나누어 보다 응급 및 긴급 상황의 수위에 따라 데이터 전송을 보다 효율적임을 보이고자 한다.

본 시나리오는 그림 4.11과 같이 duty cycle을 조절하였다. duty cycle을 증가하게 되면 상대적으로 에너지를 많이 소비하게 된다. 에너지 소모량을 S-MAC과 비슷하게 유도하기 위하여 duty cycle을 일반적인 S-MAC 대비 1/2 수준으로 낮추었다. 그 결과, 그림 4.12와 같이 느린 데이터 전송률을 보이고 있다. 하지만, 응급 및 긴급 상황 1단계, 2단계를 걸치면서 빠르게 데이터를 전송하게 된다.

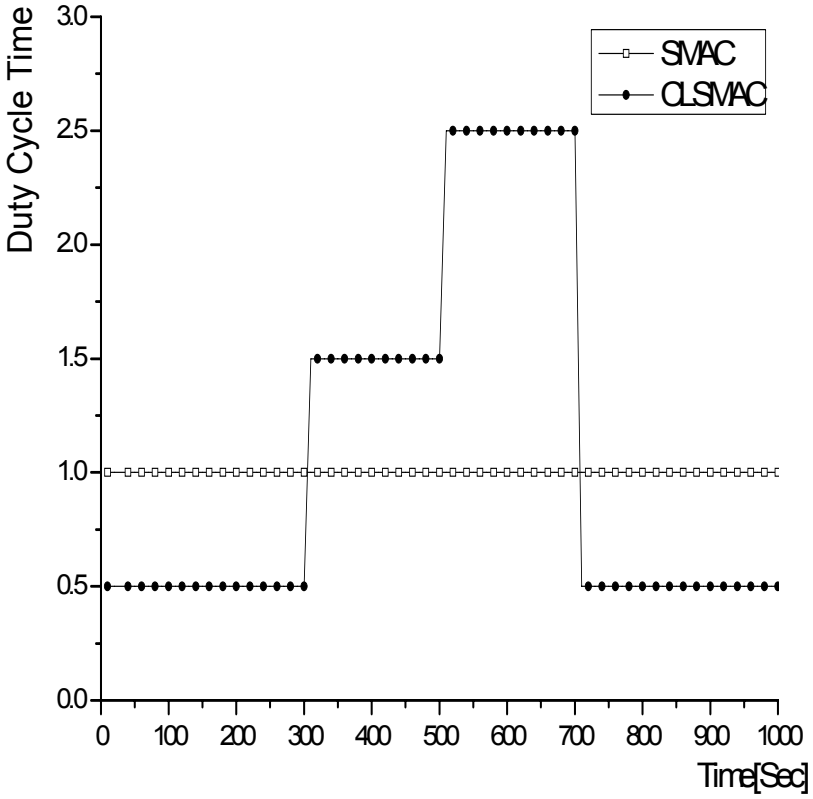

그림 4.11 시나리오 II의 Duty cycle 수치

Fig. 4.11 Duty cycle factor of scenario II

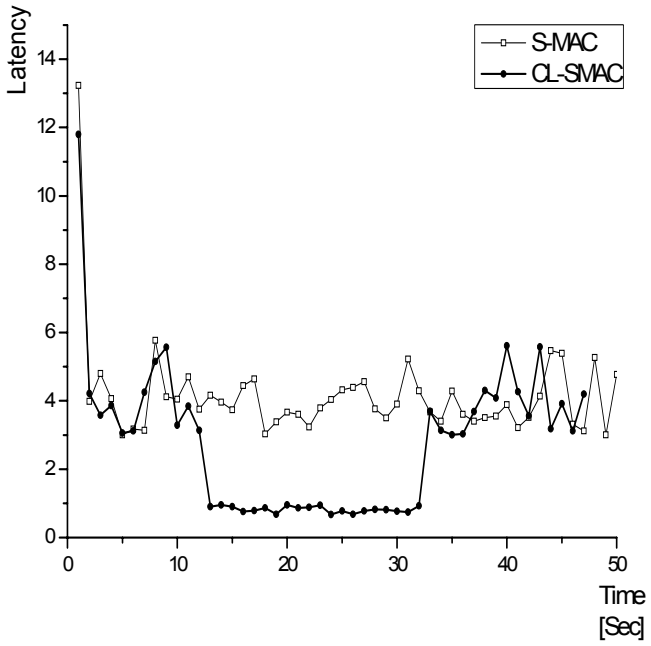

그림 4.12 시나리오 II의 데이터 지연성 비교

Fig. 4.12 Data latency of scenario II

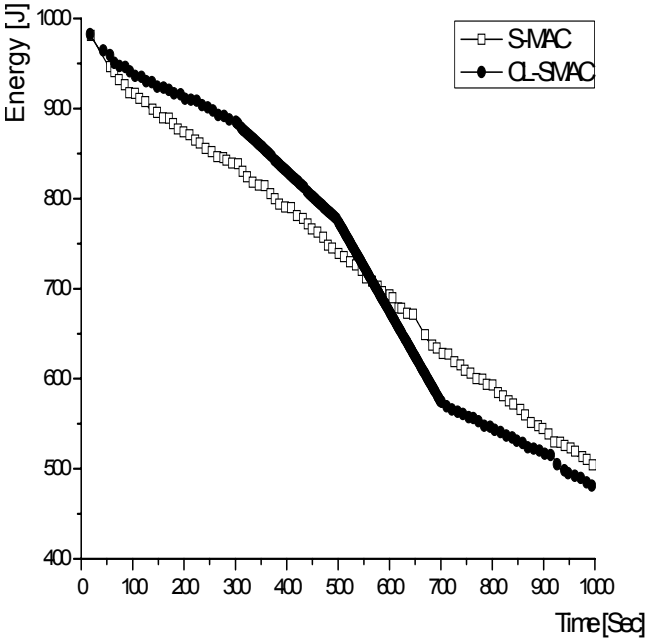

그림 4.14 노드 0의 에너지 소비량

Fig. 4.14 Consumed energy at node 0 in scenario II

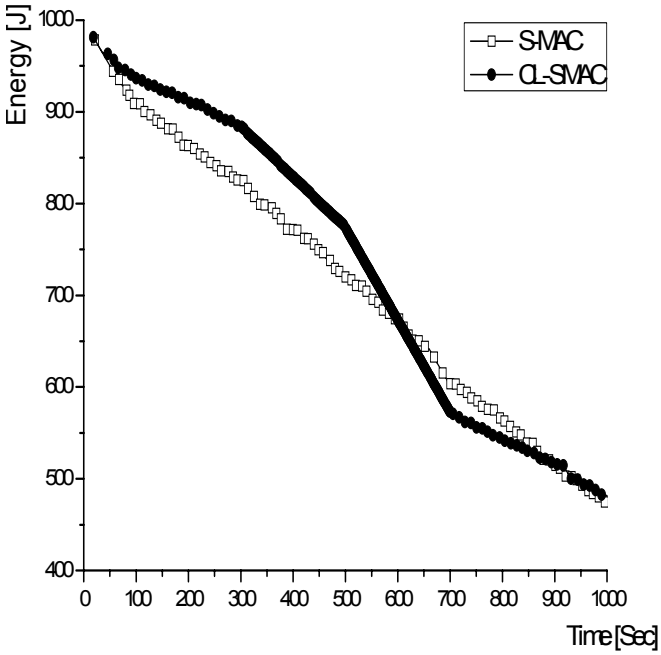

그림 4.14 노드 1의 에너지 소비량

Fig. 4.14 Consumed energy at node 1 in scenario II

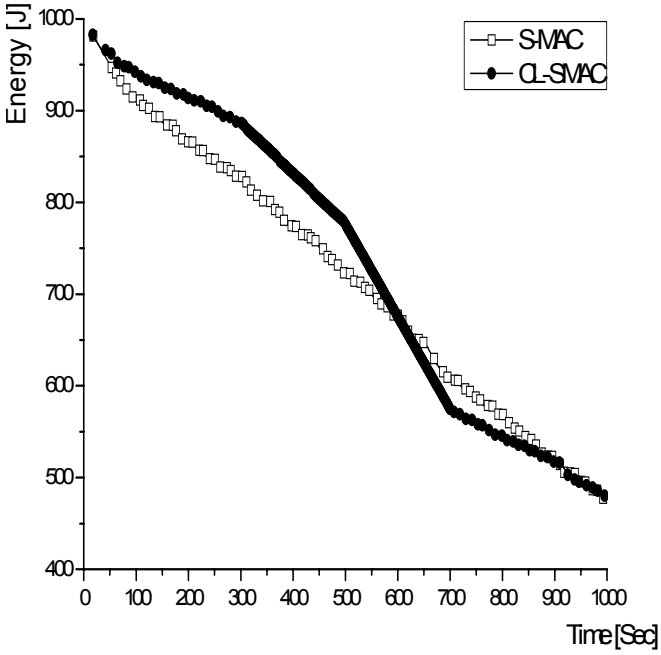

그림 4.15 노드 2의 에너지 소비량

Fig. 4.15 Consumed energy at node 2 in scenario II

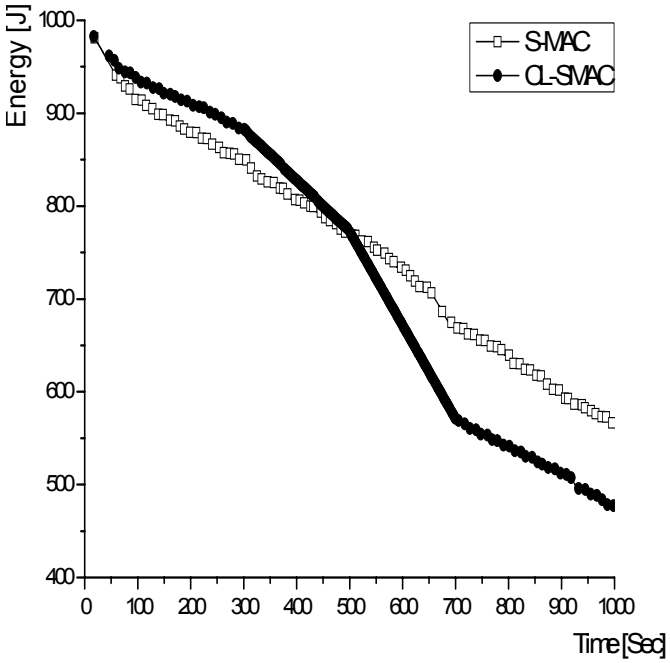

그림 4.16 노드 3의 에너지 소비량

Fig. 4.16 Consumed energy at node 3 in scenario II

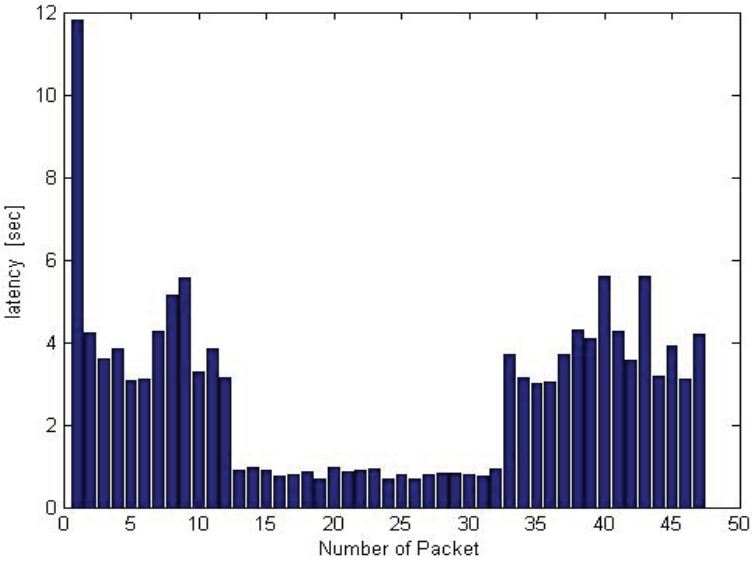

그림 4.17 시나리오 II의 CL-SMAC latency

Fig. 4.17 CL-SMAC latency of scenario II

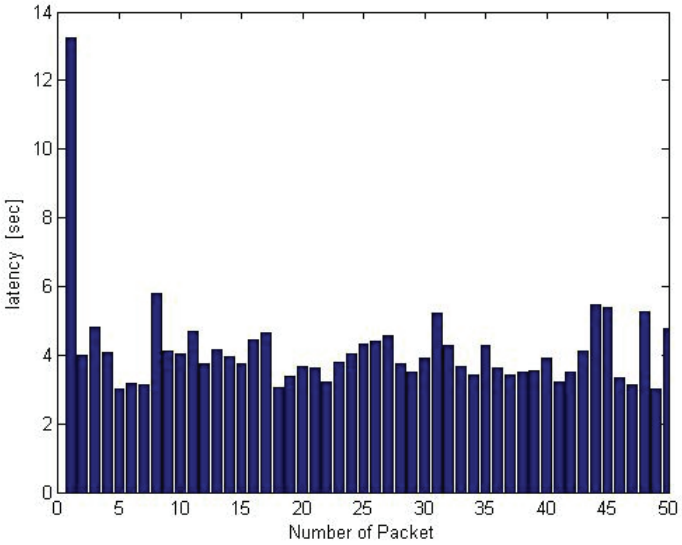

그림 4.18 시나리오 II의 S-MAC latency

Fig. 4.18 S-MAC latency of scenario II

그림 4.13, 4.14, 4.15, 4.16는 각 센서노드의 에너지를 나타내고 있다. 최초 동작을 할 때 일반적인 S-MAC 대비 에너지 소모량은 적게 사용하다가 응급 및 긴급 상황을 단계를 나누었다. 300초와 700초에 각각의 duty cycle을 변화하였다. 300초 이전과 700초 이전은 일반적인 상황으로 인지하여 duty cycle을 아주 낮게 하여, 에너지 소모량을 최소화하였다. 하지만 300초부터 700초까지는 응급 상황이 발생을 가정하였기에 에너지를 가파르게 소모하였다. 그 결과 데이터의 latency는 신속하게 긴급을 요하는 데이터를 전달하게 되었다.

	평균 latency[Sec]	평균 energy[J]	남은 에너지			
			node 0	node 1	node 2	node 3
SMAC	4.1603	505	504	474	476	566
CL-SMAC	4.4704	479	480	481	479	477

표 4.3 시나리오 II에서의 S-MAC 과 CL-SMAC의 비교

Table 4.3 Scenario II compared of S-MAC and CL-SMAC

3. 시나리오 III

마지막으로 응급 및 긴급 상황이 아니라, 일반적인 측정된 데이터들이 일시적으로 빠른 전송을 요구하게 되었을 경우를 가정하였다.

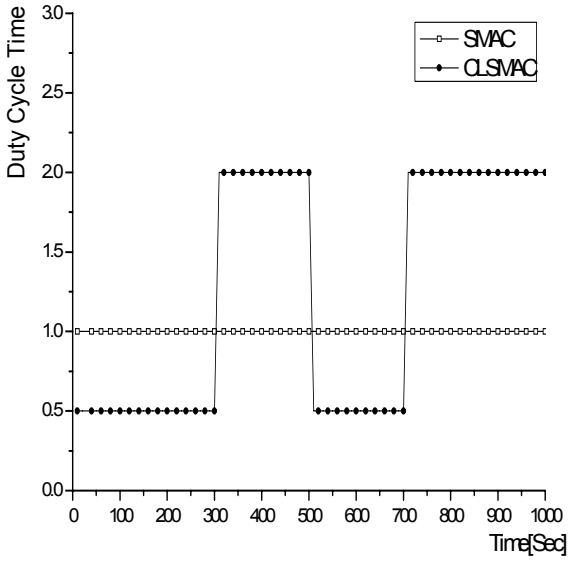

그림 4.19 시나리오 III의 Duty cycle 수치

Fig. 4.19 Duty cycle factor of scenario III

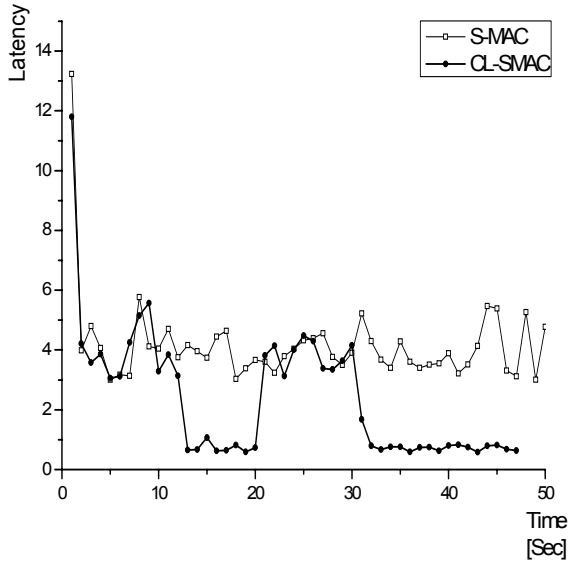

그림 4.20 시나리오 III의 데이터 지연성 비교

Fig. 4.20 Data latency of scenario III

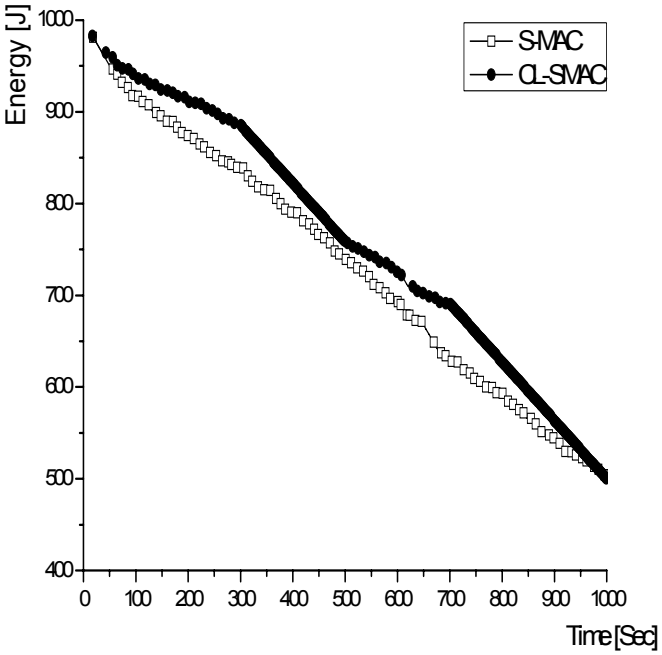

그림 4.21 노드 0의 에너지 소비량

Fig. 4.21 Consumed energy at node 0 in scenario III

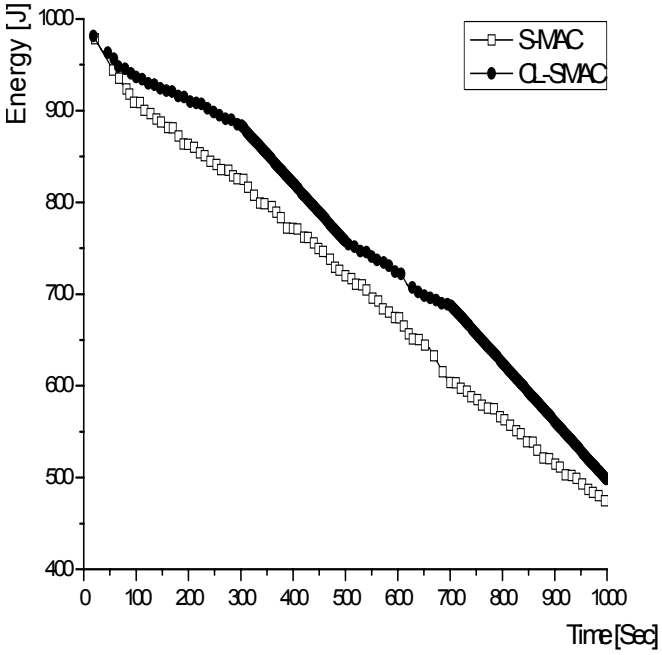

그림 4.22 노드 1의 에너지 소비량

Fig. 4.22 Consumed energy at node 1 in scenario III

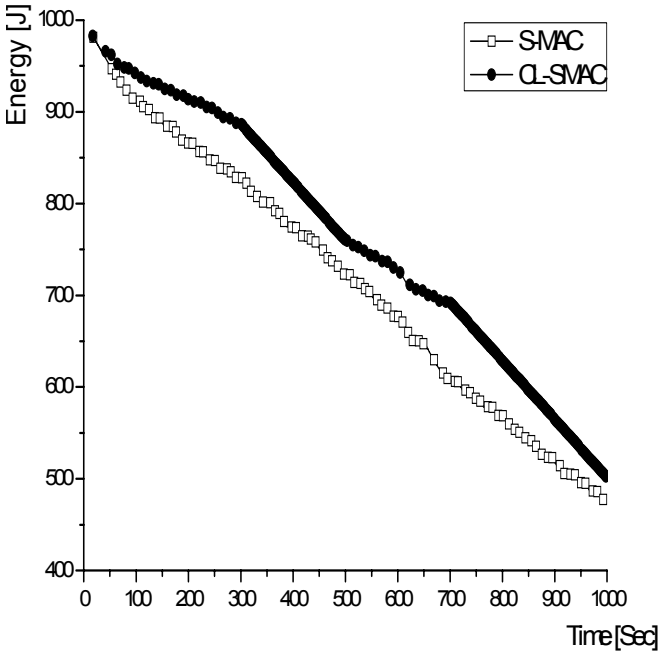

그림 4.23 노드 2의 에너지 소비량

Fig. 4.23 Consumed energy at node 2 in scenario III

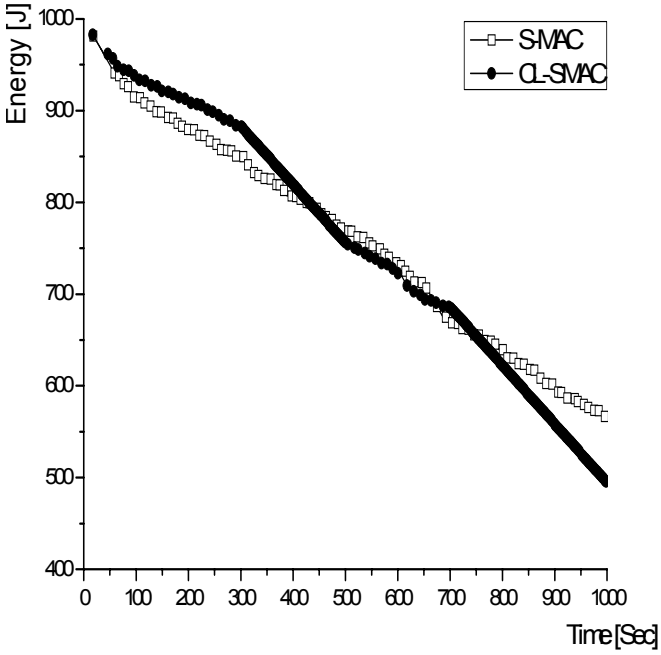

그림 4.24 노드 3의 에너지 소비량

Fig. 4.24 Consumed energy at node 3 in scenario III

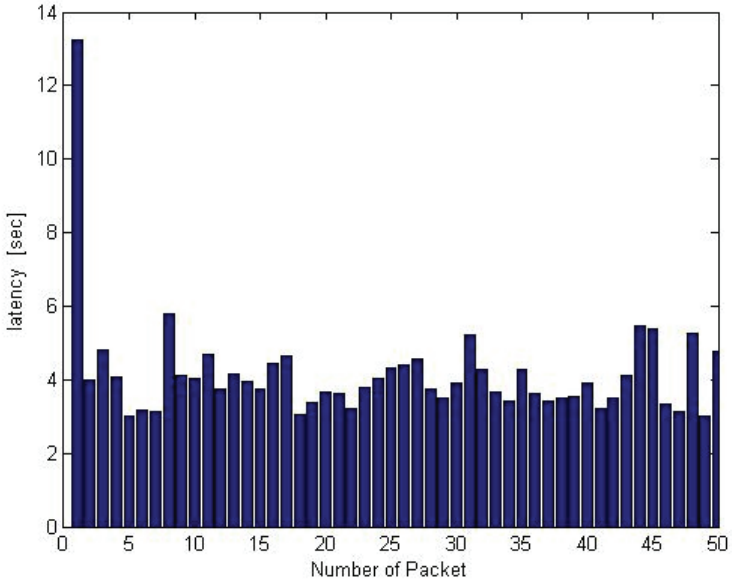

그림 4.25 시나리오 III의 S-MAC latency

Fig. 4.25 S-MAC latency of scenario III

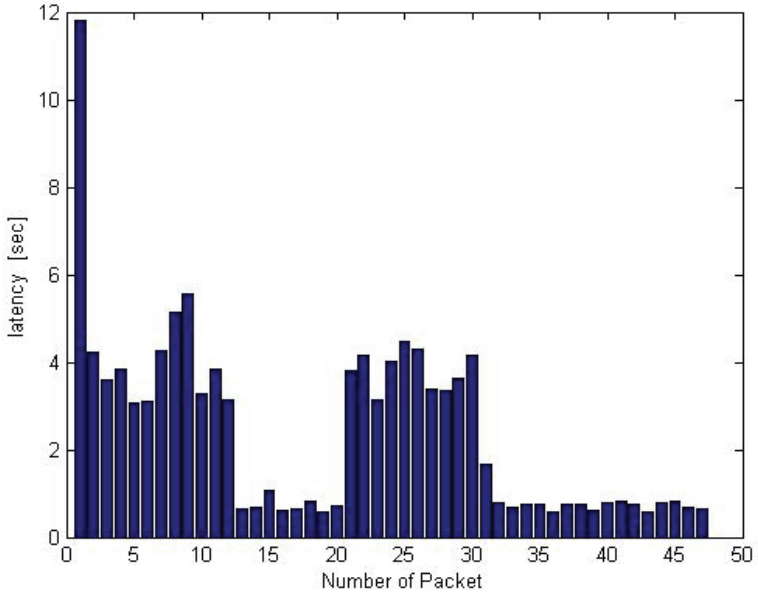

그림 4.26 시나리오 III의 CL-SMAC latency

Fig. 4.26 CL-SMAC latency of scenario III

그림 4.21, 4.22, 4.23, 4.24는 각 센서노드의 에너지를 나타내고 있다. 최초 동작을 할 때 일반적인 S-MAC 대비 에너지 소모량은 적게 사용하다가 응급 및 긴급 상황으로 가정하고, 300초와 700초에 각각의 duty cycle을 변화하였다. 300초 이전과 700초 이전은 일반적인 상황으로 인지하여 duty cycle을 아주 낮게 하여, 에너지 소모량을 최소화하였다. 하지만 300초부터 700초까지는 응급 상황이 발생을 가정하였기에 에너지를 가파르게 소모하였다. 그 결과 데이터의 latency는 신속하게 긴급을 요하는 데이터를 전달하게 되었다.

	평균 latency[Sec]	평균 energy[J]	남은 에너지			
			node 0	node 1	node 2	node 3
SMAC	4.1603	505	504	474	476	566
CL-SMAC	2.3913	493	500	497	501	477

표 4.4 시나리오 3에서의 S-MAC 과 CL-SMAC의 비교

Table 4.4 Scenario 3 compared of S-MAC and CL-SMAC

4. 시나리오 결과 비교 분석

에너지와 데이터 latency는 두 개를 동시에 만족할 수는 없다. 이는 에너지를 만족시키기 위해서는 MAC 프로토콜에서 최소화한 duty cycle을 운영해야 되지만, 이럴 경우 응급 및 긴급한 데이터를 송수신하게 될 경우 데이터의 지연이 발생하게 된다. 또한 데이터의 지연성을 만족하게 된다면 duty cycle을 최대화하여 빈번하게 데이터를 송수신하게 되어 표 4.5에 보는 바와 같이 에너지의 소모량이 증가하게 된다.

	SMAC 동작	시나리오 1	시나리오 2	시나리오 3
Latency[Sec]	4.1603	4.4704	2.7610	2.3913
Energy[J]	505	483	479	493

표 4.5 S-MAC과 CL-SMAC의 에너지 및 데이터 지연성 비교

Fig. 4.5 Data latency and energy compared with S-MAC and CL-SMAC

V. 결론 및 향후 연구과제

본 논문에서는 무선 센서 네트워크에서 응급 상황 발생시 데이터 긴급 전송 성질을 만족하는 효율적인 MAC 프로토콜을 제안하였다. 일반적으로 무선센서네트워크에서의 구축을 위한 센서노드 배터리 사용량은 중요한 성능요소이며, 이를 위해 많은 MAC과 network layer 프로토콜이 개발되었다. MAC 프로토콜로 널리 사용되고 있는 S-MAC의 주된 기능은 에너지 효율성을 위해 존재한다. 이러한 기능들은 periodic listen and sleep, collision avoidance, overhearing avoidance, message passing이 있으며, 이들은 데이터 전송 지연 특성에 대해서는 고려하고 있지 않다. 따라서, 응급 및 긴급 상황 제어를 위한 응용 서비스의 경우 에너지 소비 효율성과 데이터 지연성을 동시에 제어할 수 있는 새로운 MAC 프로토콜이 필요하다.

본 논문에서는 응급 및 긴급 상황 발생시 센싱 정보에 따라 duty cycle을 제어함으로써, 센서 노드간의 데이터의 지연 문제를 개선한 CL-SMAC 실험 및 결과 분석을 하였다. 본 실험을 통해서 에너지와 데이터 latency를 동시에 만족하기는 어렵다는 것을 알 수 있었다. 이는 에너지를 만족시키기 위해서는 MAC 프로토콜에서 최소화한 duty cycle을 운영해야 되지만, 이럴 경우 응급 및 긴급한 데이터를 송수신하게 될 경우 데이터의 지연이 발생하게 된다. 또한 데이터의 지연성을 만족하게 된다면 duty cycle을 최대화하여 빈번하게 데이터를 송수신하게 되어 에너지의 소모량이 증가하게 된다. 그래서 Cross Layer 개념을 도입하여 application layer계층에 임계값을 지정하여 신속한 데이터 전송이 요구될 시 duty cycle을 조절할 수 있는 유기적인 duty cycle을 제공하여, 에너지 효율성과 데이터의 지연성까지 만족하는 CL-SMAC을 제한하였다.

이를 통해, 지하철에서의 응급 상황 발생시 인명 및 재산 피해을 최소화 시킬 수 있다. 교통, 보건, 환경, 복지, 위생, 안전, 산림보호, 그리고 재난 방재와 같은 모든 분야에 적용이 가능하다. 이것은 무선 센서 네트워크 관련 서비스들이 여러 분야에 광범위하게 적용 될 수 있음을 보이고 있다. 추후 테스트 베드에 CL-SMAC을 탑재하여 S-MAC과의 성능비교를 하고자 한다. 이를 위해서 nesC 기반의 TinyOS를 분석 및 S-MAC의 실제 구현에서 어떻게 동작되는지 알아볼 필요성이 있다.

향후 연구 과제로 전력소비 문제와 전송률 만족하기 위해서 새로운 routing protocol model을 제시하여 MAC 프로토콜과 routing 프로토콜간의 유기적인 시스템을 개발 하고자 한다.

참고 문헌

[1] 과학기술부 KISTEP, “2005년도 RFID/USN 기술영향평가 보고서,” 2005. 12

[2] 서창수, “USN overview 기술 교육 방안,” 한국컴퓨터정보학회 학술발표논문집, 제14권, 제1호, 2006. 6.

[3] 이해림, 정민영, 이태진, “IEEE 802.15.4 무선 PAN의 Slotted CSMA/CA MAC 시뮬레이션,” 한국시뮬레이션학회 논문지, 제14권, 제3호, 2005. 9.

[4] 서창수, 고영배, 김재훈, “무선 센서 네트워크에서의 에너지 효율적 MAC 프로토콜,” 한국정보과학회 학술발표논문집, 2004년도 봄(A), 2004. 4.

[5] 한정안, 김윤형, 김병기, “무선 센서 네트워크 환경에서 노드의 에너지 소비 절감을 위한 파워 제어 프로토콜,” 한국통신학회 논문지, 제30권, 1A호, 2005. 1.

[6] 성안당, “AVR ATmega128 마이크로컨트롤러,” 2005. 4

[7] 한백전자기술연구소, “유비쿼터스센서네트워크시스템,” 2006. 5

[8] 황현석, “센서 네트워크의 수명연장을 위한 버퍼 임계값 조정 MAC 프로토콜,” 연세대학교 석사학위논문, 2005.

[9] 신용태외, “센서 네트워크 식별체계동향 분석 및 관리방안 연구,” 한국인터넷진흥원 연구보고서, 2007.

[10] 정보통신부 MIC, “u-센서네트워크(USN) 구축기본계획,” 2004.

[11] 김성운, “센서 네트워크 기술,” 정보통신 시험 및 표준화 동향 워크샵, 2003.

[12] ADDISON WESLEY, “Mobile Communications Second Edition,” Jochen Schiller

[13] Wei Ye, John Heidemann, and Deborah Estrin, “Medium Access Control With Coordinated Adaptive Sleeping for Wireless Sensor Networks,” IEEE/ACM Transactions of Networking, Vol. 12, No. 13, Jun. 2004.

[14] T.V. Dam and K. Langendoen, “An Adaptive energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks,” The First ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems, Nov. 2003.

[15] P. Lin, C. Qiao, and X. Wang, “Medium access control with a dynamic duty cycle for sensor networks,” IEEE Wireless Communications and Networking Conference, vol. 3, pp. 1534-1539, Mar. 2004.

[16] K. Romer, T. Schoch, F. Mattern and T. Dubendorfer, “Smart Identification Frameworks for Ubiquitous Computing Application,” IEEE Intl. Conf. on Pervasive Computing & Comm, pp. 253 - 262, Mar. 2003.

[17] I. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, “A Survey on Sensor Networks,” IEEE Communications. Magazine, Volume: 40, Issue: 8, pp. 102-114, Aug. 2002.

[18] D. Estrin, J. Heidemann, and W. Ye, “An energy-efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks,” in proceeding of the IEEE INFOCOM, pp. 1567-1576, 2002.

[19] H. Karl, M. Kubisch, J. Rabaey, A. Wolisz, and S. Zhong, “Distributed Algorithms for Transmission Power Control in Wireless Sensor Networks,” in Proceeding of IEEE Wireless Communications and Networking. vol. 1, pp. 58-563, Mar. 2003.

[20] P. Havinga and G. Smit, “Energy-efficient TDMA Medium Access Control Protocol Scheduling,” In Asian International Mobile Computing Conference, pp. 1-9, Nov. 2000.

[21] E. Cayirci, Ian F.Akyildiz, Y. Sankarasubramaniam, and W. Su, “A Survey on Sensor Networks,” IEEE Comm Magazine, vol. 40, No. 8, pp. 2-114, Aug. 2002.

[22] T. van Dam and K. Langendoen, “An adaptive energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks,” In Proceedings of the First ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems, Nov. 2003.

[23] J. Polastre, J. Hill, and D. Culler, “Versatile low power media access for wireless sensor networks,” In Proceedings of the Second ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems, Nov. 2004.

[24] El-Hoiydi, J-D. Decotignie, “WiseMAC: an ultra low power MAC protocol for the down-link of infrastructure wireless sensor networks,” Ninth IEEE Symposium on Computers and Communications, Volume 1, pp. 244-251, 2004.

[25] Sinem Coleri and Pravin Varaiya, “PEDAMAACS: Power Efficient and Delay Aware Medium Access protocol for Sensor Networks,” Jul. 2004

[26] V. Rajendran, K.Obraczka, J.J. Gracia-Luna Aceves, “Energy-Efficient,

Collision-free Medium Access Control for Wireless Sensor Networks," In Proceedings of the First International Conference on Embedded Networked Sensor Systems, Nov. 2003.

[27] Ho-in Jeon, "Standard Activities on IEEE 802.15.5 Mesh network," IT Standard Weekly, TTA, Feb. 2006.

[28] IEEE, "Wireless Medium Access Control(MAC) and Physical Layer(PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks(LR-WPANs)," IEEE Std 802.15.4-2003, IEEE Computer Society, Oct. 2003.

[29] http://www.ieee802.org/15/pub/TG4b.html

[30] http://www.ieee802.org/15/pub/TG4a.html

[31] http://www.ieee802.org/15/pub/TG5.html

[32] http://www.ieee802.org/15/pub/SGmban.html

[33] NS-2 simulation website. http://www.isi.edu/nsnam/ns/

[34] The NO Ad-Hoc Routing Agent website. http://icapeople.epfl.ch/widmer/uwb/ns-2/noah/

부 록(무선 센서 네트워크 기반의 테스트 베드 구축)

A. 테스트 베드 개발 동기

최근 5년간 크고 작은 지하철 관련 사고들이 빈번하게 발생하였다. 실례로, 그림 5.1과 같이 2003년 2월 18일에 발생한 대구 지하철 화재 참사는 사망 192명, 부상 148명이라는 초유의 인명 및 재산 피해가 발생되었다. 또한, 2008년 9월 18일에 발생한 지하철 선로에 뛰어 들어 자살하는 사건 등 지속적으로 빈번하게 사건/사고들이 발생하고 있다. 그래서 이와 같은 사고를 재발 하지 않기 위해, 지하철 역사 내 응급 상황을 사전 탐지 및 빠른 전송, 처리까지 할 수 있는 무선 센서 네트워크 기반의 지하철 응급 상황 조치 시스템을 제안한다. 제안하는 지하철 응급제어 시스템은 ZigBee 프로토콜을 사용하여 지하철 역사내 각종 돌발 상황을 감지하며, 중앙 제어 시스템과 지하철간의 통신 및 제어가 가능하도록 하고 있다. 또한, 중앙 제어 시스템은 응급상황 감지 신호에 따라 원격제어 CCD 카메라를 통해 응급 상황을 보여주는 기능을 가지고 있다.

그림 5.1 대구 지하철 화재 참사 상황도

Fig. 5.1 Dea-gu subway fire accident

B. 무선 센서 네트워크를 기반의 지하철 응급상황 조치 시스템

지하철은 대중 교통수단으로 널리 이용되고 있으나, 최근 크고 작은 지하철 사고가 빈번하게 발생하고 있다. 이용객들은 이용하면서 불안해하며, 근본적인 해결 방법을 요구하게 되었다. 그림 5.2와 같은 지하철 응급 상황 조치 시스템은 지하철역사내에서 일어나는 다음과 같은 응급사태에 대해서 무선 센서 네트워크를 통해 해결하고자 한다.

첫 번째, 연기 및 온도 센서를 통해 화재여부를 판단 할 수 있다. 그리고, 화재 발생 여부를 감지한 센서 노드는 응급 상황 경고 메시지를 역내 시설 및 차량 통제소에 위치한 중앙제어 시스템으로 전달하며, 지하철을 제어한다.

두 번째, 인체감지 센서를 선로에 설치하여 선로에 뛰어든 사람을 육안 감지가 아닌 sensor를 통해 감지를 하였다. 중앙 제어 시스템에는 sink 센서 노드가 장착되어 있어, 각각의 센서 노드들이 보내주는 메시지를 수신하게 된다. 수신된 메시지를 통해 응급 상황 발생 여부를 판단할 수 있는 video monitoring을 실시하게 된다. 이는 원격 제어 CCD 카메라를 이용하며, 센서 노드의 주변을 감지 및 관찰 할 수 있다.

세 번째, 지하철 내부에 온도센서, 적외선 센서 등을 부착하여 역사내로 진입하는 지하철 내부 환경을 실시간으로 무선 모니터링 및 제어 가능하게 하였다. 만약, 센서 노드에서 이상 징후를 감지시, 중앙통제실에서는 위험을 인지하고, 지하철 출발을 통제하는 등의 위험 상황에 대처하도록 하고 있다.

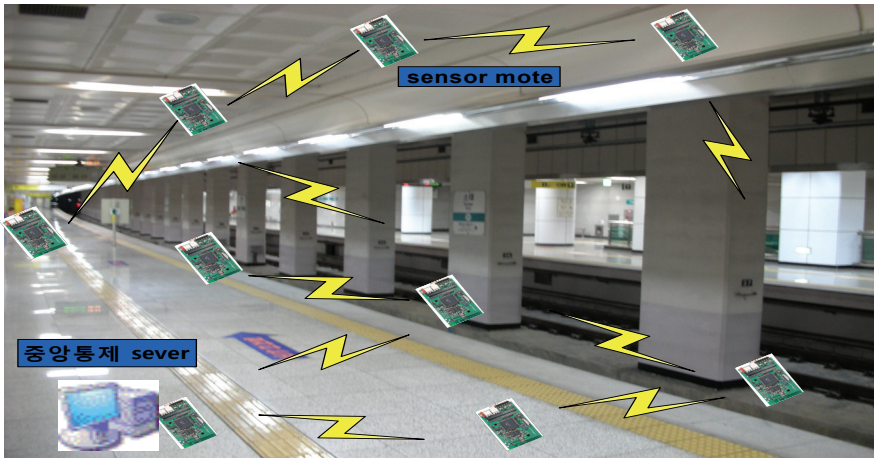

그림 5.2 지하철 응급 상황 조치 시스템

Fig 5.2 Subway emergency system

그림 4는 지하철 응급 상황 조치 시스템의 flow chart를 보이고 있다. 이는 각종 센서들이 부착된 센서 노드들이 응급상황을 감지 여부를 판단 후 중앙 제어 시스템으로 전달하게 된다. 전달된 센서들의 데이터를 통해 중앙 제어 시스템에서는 각각의 상황을 인지 및 상황별에 적절한 행동을 하게 된다. 또한 화재, 연기 등과 같이 특수한 상화에서는 자동으로 동작이 되게 제작하였다.

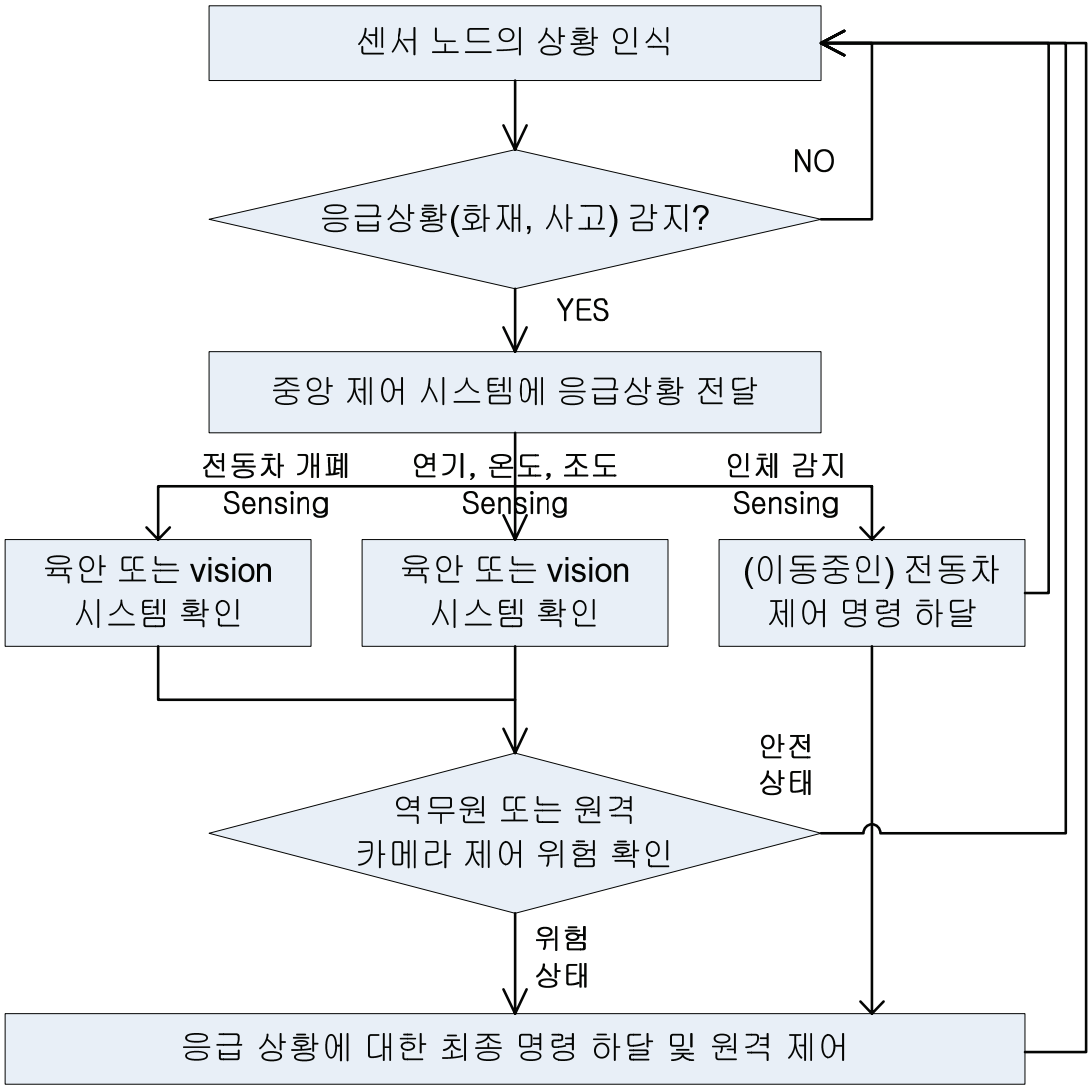

그림 5.3 지하철 응급 상황 조치 시스템의 동작 알고리즘

Fig. 5.3 Algorithm of subway emergency system

1. 센서 노드 하드웨어

그림 5.4에서 보는 바와 같이 본 시스템에서 사용된 지하철 응급 상황 탐지 센서 노드는 MCU ATemel사의 Atmega128L (128KB Flash, 2KB RAM, 4KB EEPROM)이며, RF통신을 위해서는 Chipcon사의 CC2420을 사용하였다. 반면, PCB antenna를 사용하였으며, 각 센서 노드 간 10m까지 통신이 가능하다. 그리고, 외장형 antenna를 사용하였을 경우, 75m까지 통신이 가능하다. 또한 데이터 전송 속도는 250kbps, 주파수 대역은 2.4GHz를 사용하고 있으며, 사용 채널은 16CH로 구성 된다 [6].

이와 같은 구성으로는 본 논문에서 제안하는 지하철 응급 상황 시스템의 모든 기능을 만족할 수 없으므로 확장 module을 추가 제작하였다. 확장 module은 그림 5에서 보는 바와 같이 인체감지, 연기, 조도, 온도/습도 센서로 구성된다. 인체감지를 위해서는 적외선 센서를 사용하였으며, 연기 감지를 위해서는 photo interrupter 그리고, 온도 감지의 경우는 SENSIRION사의 sht11 타입의 sensor를 사용하였다.확장 sensor module은 ATemel사의 Atmega128L CPU 각각의 port들은 ADC INPUT기능과 GPIO 연결을 갖고 있으므로, photo interrupter는 Port F 6(pin 24)과 CDS는 Port F 2(pin 32), 인체감지는 Port F 5(pin 26)에 연결되어 있다.

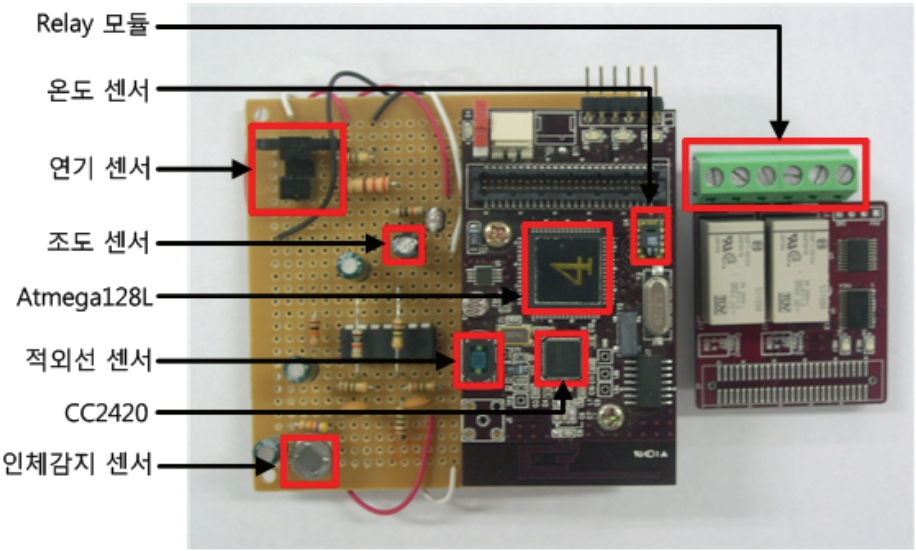

그림 5.4 2.4 GHz ZigBee 센서 노드와 확장 센서 모듈

Fig. 5.4 2.4 GHz ZigBee sensor node and extended sensor module

2. 센서 노드 운영체제

센서 노드의 운영체제로는 그림 5.5의 계층 구조를 갖는 TinyOS 1.X를 사용하였으며, 이는 nesC (network embedded system C) 기반의 프로그래밍 방식이다. 이 계층 구조를 통해 알 수 있듯이 적외선 센서, 온도센서, 조도 센서 등은 ADC 컴포넌트 기능에 활용하며, 모든 데이터는 RFM 또는 UART를 통해 원격지와 모니터링 호스트 컴퓨터로 전달 할 수 있다.

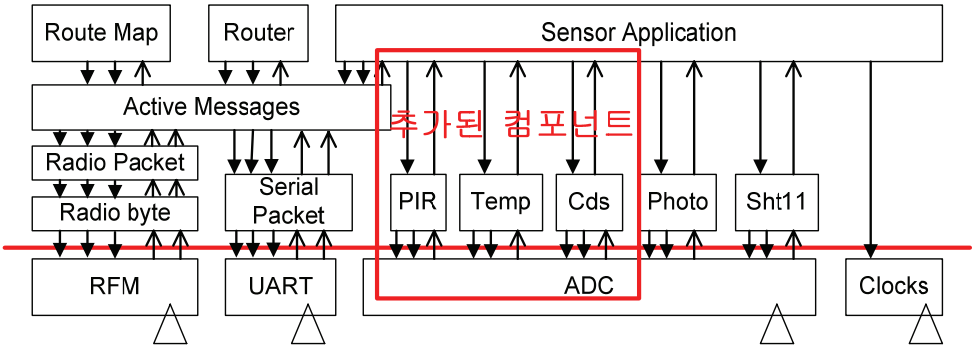

그림 5.5 TinyOS 레이어

Fig. 5.5 TinyOS layer

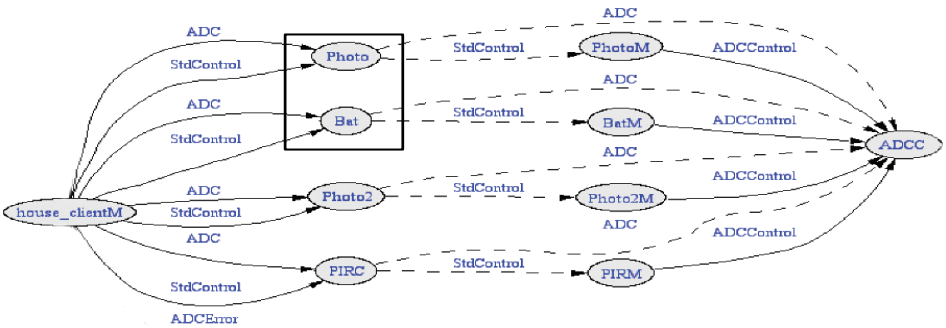

그림 5.6 지하철 응급 상황 조치 시스템의 TinyOS nesC 설계

Fig. 5.6 TinyOS nesC architecture of subway emergency system

그림 5.6은 컴포넌트를 연결하는 인터페이스를 보이고 있으며, photo 컴포넌트의 경우, ADC와 StdControl 인터페이스를 그리고, 인체를 감지를 위한 PirC의 경우 StdControl, ADCControl 인터페이스를 이용하고 있음을 알 수 있다.

표 5.1은 지하철 응급 상황 조치 시스템의 센서 노드에 탑재 되는 nesC 코드이다. 주요 센서와 ADC 컴포넌트들의 인터페이스를 보이고 있으며, 이들의 데이터 전달을 위한 MCU Pin 디스크립션을 보이고 있다.

```
module AllertM
{
  provides interface StdControl;
  uses {
    interface Timer as STimer;
    interface StdControl as relayControl;
    interface StdControl as PhotoControl;
    interface StdControl as Photo2Control;
    interface StdControl as PIRCControl;
    // StdControl과 각 컴포넌트간의 연결
    interface ADC as PhotoADC;//CDS센서
    interface ADC as Photo2ADC;//연기센서
    interface ADC as PIRCADC;//인체감지
    // ADC와 각 컴포넌트간의 연결
    interface StdControl as BatControl;
    interface ADC as BatADC;
    interface ADCError as STH11_Temp_Error;
    }
...
    TOSH_ACTUAL_PHOTO_PORT = 6
    // Photo ADC 2번 포트 50Pin(32)
    TOSH_ACTUAL_PHOTO2_PORT = 2
    // CDS ADC 6번 포트 50Pin(24)
    TOSH_ACTUAL_PIR_PORT = 5
    // PIR ADC 5번 포트 50Pin(26)
...
}
```

표 5.1 지하철 응급 상황 조치 시스템 nesC 코드

Table. 5.1 NesC code for subway emergency system

각 센서 노드간의 통신은 Chipcon사의 CC2420 칩을 통한 RF통신을 하게 된다. 각 센서 노드들의 RF전송 메시지 포맷은 그림 5.7에서와 같이 구성 된다.

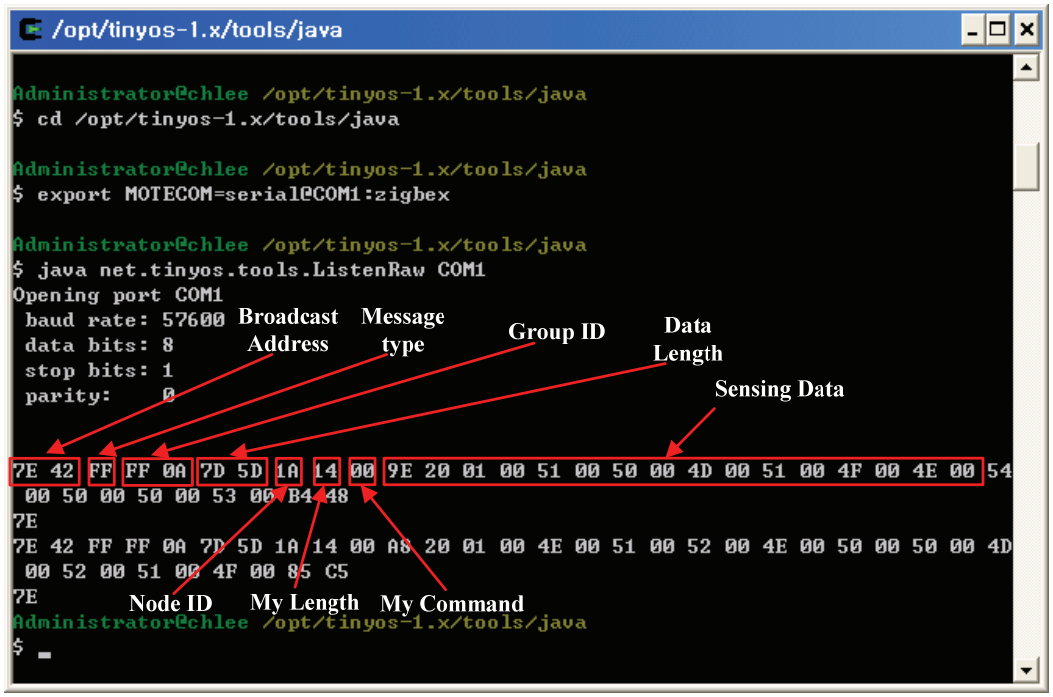

그림 5.7 RF 전송 메시지 포맷

Fig. 5.7 Message format for RF transmission

3. 지하철 응급 상황 조치 시스템의 모니터링 환경

본 지하철 응급 상황 조치 시스템은 중앙 통제실에서 지하철 및 역사내 통제 및 감시를 위해 그림 5.8과 같은 원격 제어 프로그램이 필요하다. User interface(UI) 환경은 windows xp 환경에서 Visual C++ 6.0으로 제작하였으며, 각종 센서노드로부터 정보를 실시간으로 전송받아 DB화하고 특정 한계치이상의 데이터가 감지시 사고 발생으로 판정하여 관리자에게 알릴 수 있도록 하였다.

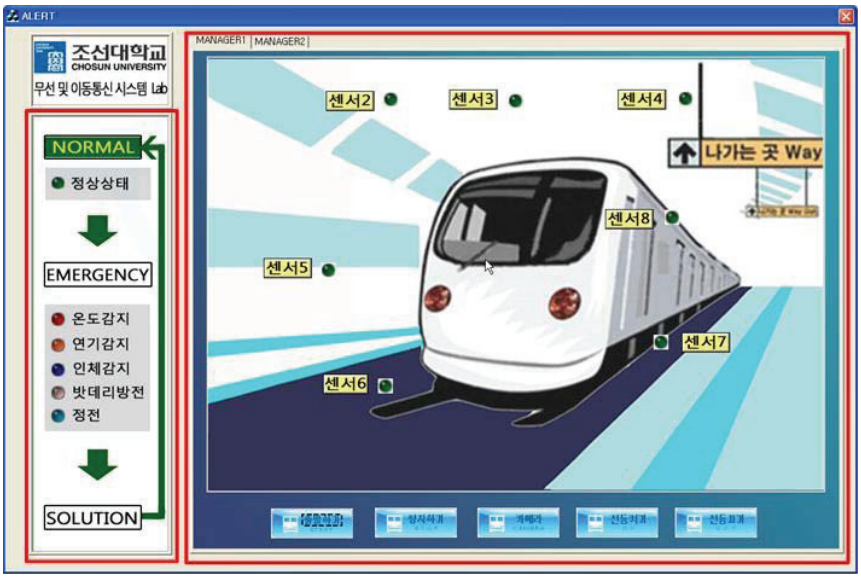

그림 5.8 지하철 응급상황 조치를 위한 서버 모니터링 및 제어 시스템

Fig. 5.8 Monitoring and control for subway emergency system

그림 5.8은 중앙 통제실에서 운영 할 수 있는 고정형 제어 프로그램이다. 그림의 좌측은 현재의 상황을 NORMAL 상태 혹은 EMERGENCY 상황, 그리고 이러한 상황을 해결 여부를 확인 하는 SOLUTION으로 구분지어 설계하였다. 또한, 우측에는 각 센서 노드들의 위치를 나타내어 문제가 발생되는 센서 노드를 실시간 파악 할 수 있도록 하였다.

그림 5.9 지하철 응급상황 조치를 위한 서버 모니터링 컨트롤

Fig. 5.9 Control for subway emergency system

그림 5.9는 모니터링 프로그램의 세부 컨트롤 버튼이다. 지하철에는 센서 노드와 제어 컨트롤 모듈이 부착되어 있어, 통제실에서 지하철의 출발 및 정지를 조정 한다. 또한 선로에 인명 및 기타 응급 상황 발생시 확인 할 수 있는 카메라와 연결한다. 그리고, 화재 및 정전 발생시 전등을 켜거나 팬을 돌리는 제어를 하게 된다.

그림 5.10은 중앙 통제실에서 운영 할 수 있는 고정형 제어장치 프로그램이라면 그림 11은 휴대가 가능한 PDA 타입으로 제작된 모니터링 시스템이다. 본 시스템은 Linux 커널 2.6 기반에서 Qt를 이용하여 제작하였으며, 현장 근무자나 사고 발생시 대처에 용이하게 할 수 있도록 하였다. 세부적인 기능은 서버 모니터링과 유사 하며, 센서 노드의 추가 확장을 할 수 있다.

그림 5.10 휴대용 타입의 모니터링 프로그램

Fig. 5.10 Monitoring program for portable type

또한 각각의 UI는 sensing 정보 및 시변 정보를 보이게 구성되어 있으며, 원격 제어 CCD 카메라와의 연결을 위해 UDP 기반의 socket programing을 삽입하였다. 각각의 센서 노드로부터 그림 12와 같이 실시간 sensing값의 변화를 수치화하여 표현하였다.

4. 실험 및 고찰

그림 5.11과 같이 본 시스템은 연기 및 화재 등을 감지 할 수 있는 센서 노드와 이를 송수신 및 통제, 감지 판단하는 중앙의 모니터링 프로그램으로 구성된다. 각 센서 노드들로부터 감지되어진 측정데이터는 중앙 통제실로 ZigBee통신으로 전달되며, 이러한 메시지의 정확성을 파악하기 위해 위험 상황 발생 여부를 원격 제어 CCD 카메라가 이용된다.

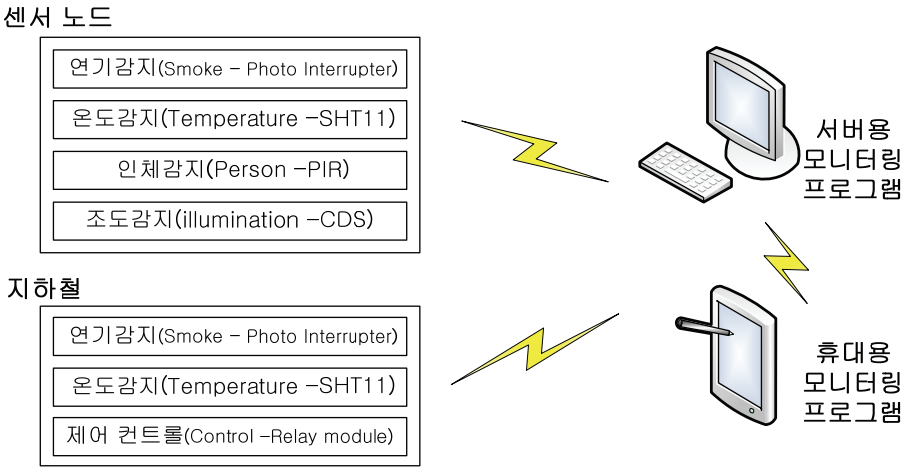

그림 5.11 센서 노드와 모니터링 프로그램의 연결

Fig. 5.11 Connecting with sensor node and monitoring program

지하철 시스템 환경을 위해 그림 5.12와 같은 측정 데이터의 통계, 디스플레이, 사고 판단이 가능하도록 UI환경을 구현하였다. 표 5.2는 이러한 모니터링 시스템의 환경을 보여주고 있으며, 이때 각종 센서들이 측정 범위와 위험 탐지 한계값은 표 5.3과 같다.

센서 노드	
MCU	Atmel 사의 ATmega128L
RF	Chipcon 사의 CC2420
Antenna	PCB Antenna(50m)
O/S	TinyOS 1.X(nesC)
sensor	인체감지 센서 – PIR 조도센서 – cds 온도센서 – sht11 연기센서 – photo interupter 제어센서 – relay module.
모니터링 프로그램(중앙 통제실)	
운영체제	Windows xp 기반
제작 툴	Visual C++ 6.0
모니터링 프로그램(휴대용 타입)	
운영체제	리눅스 임베디드 Kernel 2.6
CPU	Intel XScale PXA-255(400MHz)
Display	6.4inch LCD
제작 툴	Embedded Qt

표 5.2 실험 환경

Table. 5.2 Experiment environment

사고 감지 환경	평균 측정값	한계값
온도 감지(화재)	20 ~ 40도	50도 이상
연기 감지(화재)	600 ~ 900	400 이하
조도 감지(화재)	500 ~ 1000	300 이하
적외선 감지(인체)	300~ 800	10000 이상

표 5.3 실험 데이터

Table. 5.3 Experiment data

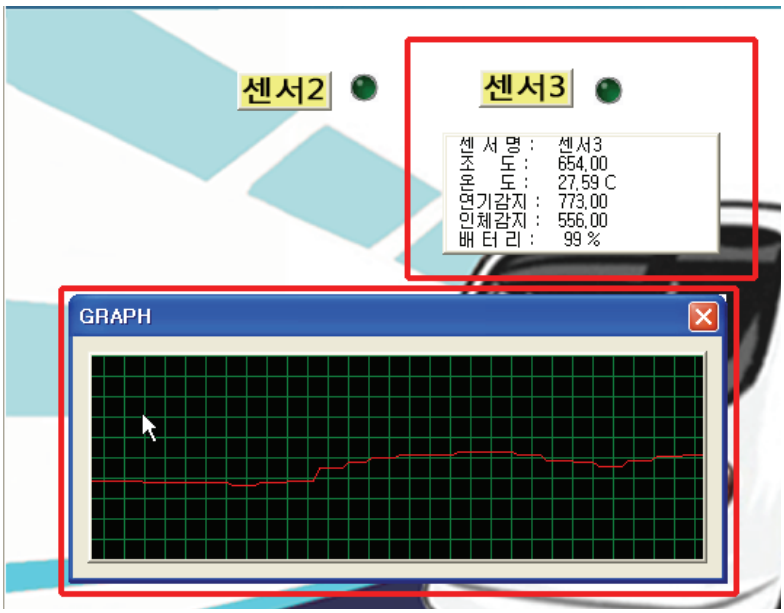

그림 5.12 실시간 측정 데이터

Fig. 5.12 Real-time sensing data

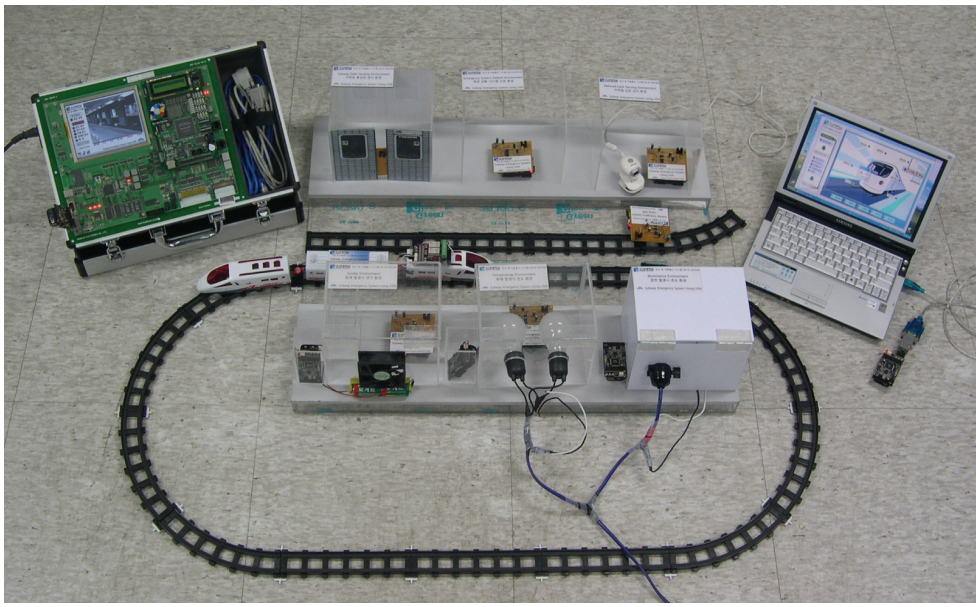

그림 5.13 지하철 응급 상황 조치 시스템을 위한 테스트 베드

Fig. 5.13 Subway emergency system using USN test bed