

양방향 통신을 지원하는 시분할 기반 무선 센서 네트워크의 구현

(Implementation of a TDMA-based Bidirectional Linear
Wireless Sensor Network)

이 형 봉[†] 박 래 정^{††} 문 정 호^{††} 정 태 윤^{††}

(Hyung Bong Lee) (Lae-Jeong Park) (Jung-Ho Moon) (Tae-Yun Chung)

요 약 다수의 센서 노드들이 임의의 장소에 불규칙하게 위치하는 비정형적 환경에서의 무선 센서 네트워크에서는 일반적으로 센서 노드들이 수집한 데이터가 싱크 노드 방향으로만 전송되기 때문에 단방향이라고 할 수 있다. 이런 센서 네트워크에서는 통신이 한쪽 방향으로만 이루어지기 때문에 어떤 특이 데이터가 수신되었을 때 이에 대한 재확인 명령의 전송이 어려우며 따라서 이에 대한 사후 대책 수립이 곤란하다. 이 논문에서는 TDMA에 기반한 단방향 무선 데이터 전송 프로토콜인 WSLP(Wireless Sensor Line Protocol)을 양방향 통신이 가능하도록 확장한 BiWSLP(Bidirectional WSLP)를 제안하고 이를 구현한다. 또한 제안한 BiWSLP의 기능을 평가하고 검증하기 위하여, 센서 노드를 통한 데이터 수집뿐만 아니라 노드들에게 명령을 전송하여 노드들의 동작을 제어하는 기능을 가지고 있는 가상 교량 관리 시스템을 구축하고 운영한 결과를 제시한다. 또한 가상 교량 관리 시스템을 운영 결과를 바탕으로 에너지 효율 및 양방향 통신 가능성의 관점에서 BiWSLP의 효용성을 보인다.

키워드 : S-MAC, T-MAC, B-MAC, TDMA, WSLP, 양방향 WSLP(BiWSLP)

Abstract Communication in wireless sensor networks comprising a plurality of sensor nodes located in an ad hoc environment is unidirectional in that data gathered by sensor nodes are transmitted to a sink node and not vice versa. In those networks, it is not possible for a server or a gateway to send commands to the sensor nodes to determine whether some previously received data are valid when the data indicate unusual conditions, which makes it difficult to make appropriate reactions to the unusual situations. This paper proposes and implements a TDMA-based sensor network communication protocol named BiWSLP (Bidirectional Wireless Sensor Line Protocol) supporting bidirectional communication capability. The BiWSLP is an extension of the WSLP, a unidirectional sensor network communication protocol based on the TDMA protocol. To test the feasibility of the proposed BiWSLP, we construct a virtual bridge management system capable of sending commands to sensor nodes as well as collecting data from the sensor nodes. Based on the test results of the virtual bridge management system, we show the applicability and advantages of the BiWSLP in terms of energy efficiency and bidirectional communication capability.

Key words : S-MAC, T-MAC, B-MAC, TDMA, WSLP, Bidirectional WSLP(BiWSLP)

· 이 연구는 강원 임베디드 소프트웨어 연구센터의 지원에 의해 이루어졌음

† 종신회원 : 강릉대학교 컴퓨터공학 교수
hblee@kangnung.ac.kr

†† 비 회 원 : 강릉대학교 전자공학 교수
ljpark@kangnugn.ac.kr
itsmoon@kangnung.ac.kr
tychung@kangnung.ac.kr
(Corresponding author)

논문접수 : 2007년 9월 6일

심사완료 : 2008년 3월 20일

Copyright©2008 한국정보과학회 : 개인 목적이나 교육 목적인 경우, 이 저작물의 전체 또는 일부에 대한 복사본 혹은 디지털 사본의 제작을 허가합니다. 이 때, 사본은 상업적 수단으로 사용할 수 없으며 첫 페이지에 본 문구와 출처를 반드시 명시해야 합니다. 이 외의 목적으로 복제, 배포, 출판, 전송 등 모든 유형의 사용행위를 하는 경우에 대하여는 사전에 허가를 얻고 비용을 지불해야 합니다.

정보과학회논문지: 컴퓨팅의 실제 및 레터 제14권 제4호(2008.6)

1. 서론

무선 센서네트워크는 전력 소모가 극히 적은 센서 노드(sensor node)들이 데이터 수집을 함과 동시에 RF를 통신 매개체로 삼아 서로가 통신 중개 역할을 담당하는 형태로 구성되는 비정형적인 통신 네트워크이다. 이 때 센서 노드들은 풍부하지 못한 전력 공급을 전제로 제작되고 동작하기 때문에 비교적 연약할 뿐만 아니라, 때로는 이동이 요구될 때도 있어서 네트워크 구성이 고정되지 않고 빈번한 변화에 잘 적응해야만 한다. 일반적으로 다수의 노드들이 불규칙적으로 분포하는 환경에서의 무선 센서네트워크에서는 센서 노드로부터 싱크 노드 방향으로만 데이터 전송이 진행된다. 그 이유는 센서 노드 자체가 복잡하고 고기능을 가진 큰 규모의 프로토콜을 감당할 수 있을 만큼 강력하지 못하기도 하지만, 그보다는 센서 노드의 고유 업무는 데이터 수집이기 때문이다. 즉, 센서 노드는 측정된 데이터를 단순히 지정된 일정에 따라 올려 보내기만 하는 수동적인 역할만 담당하면 되므로, 이를 지원하는 통신 네트워크가 단방향이면 충분하다.

이와 같은 단방향 센서네트워크는 화재 혹은 인공구조물 감시 시스템 등과 같이 데이터 수집과 이에 기반한 통제가 모두 필요한 모니터링 시스템에서는 크게 유용하지 못하기 때문에 이런 문제를 해결하기 위하여 양방향 통신 기능을 지원하는 센서네트워크가 필요하다.

논문에서는 센서네트워크의 가상 응용분야로 교량 관리 시스템을 설정하고, 교량 관리 시스템의 구축에 필요한 기본 요소인 양방향 센서 네트워크 프로토콜로서 BiWSLP (Bidirectional WSLP)[1]을 설계하고 구현한

다. BiWSLP는 TDMA 기반의 WSLP(Wireless Sensor Line Protocol)[2]에 양방향 통신을 지원하도록 기능을 확장한 프로토콜이다. 양방향 통신 프로토콜의 개발과 더불어, 이를 탑재하고 운용할 센서 노드(모트), 싱크 노드와 관제 센터를 연결할 게이트웨이, DB 서버, 웹 기반 모니터링 시스템 등 교량 관리 시스템에 필요한 다른 기본 요소들도 개발하여 그림 1과 같이 하나의 완성된 가상 터키 시스템을 구축하여 양방향 센서 네트워크 프로토콜인 BiWSLP의 효용성과 그 가능성을 검증한다.

이 논문은 제2장 관련 연구, 제3장의 BiWSLP의 설계, 제4장 가상 교량관리 시스템 구축 및 평가, 제5장 결론으로 구성되어 있다.

2. 무선 센서 네트워크 고찰

상시 사용가능한 전원을 가진 전통적인 의미의 네트워크 시스템과 비교할 때 무선 센서 네트워크 시스템이 당면한 가장 큰 어려움은 전송 매체인 RF를 최소의 전력 소모로 어떻게 효과적으로 공유할 것인가 즉, 어떻게 효율적인 MAC을 구성할 것인가 하는 문제이다.

2.1 네트워크 및 데이터 링크 계층

OSI 참조 모델에서 네트워크(라우팅) 계층은 하위의 데이터 링크 계층의 지원을 받아 임의의 두 노드 혹은 여러 노드간의 통신을 가능하게 하는 경로를 유지하는 라우팅 기능을 제공한다[3]. 따라서, 네트워크 계층의 라우팅 기능은 하위의 데이터 링크의 특성에 의존할 수밖에 없는 한계를 가진다. 무선 센서 네트워크 환경에서는 이러한 두 계층의 밀접한 관계성과 센서 노드가 가

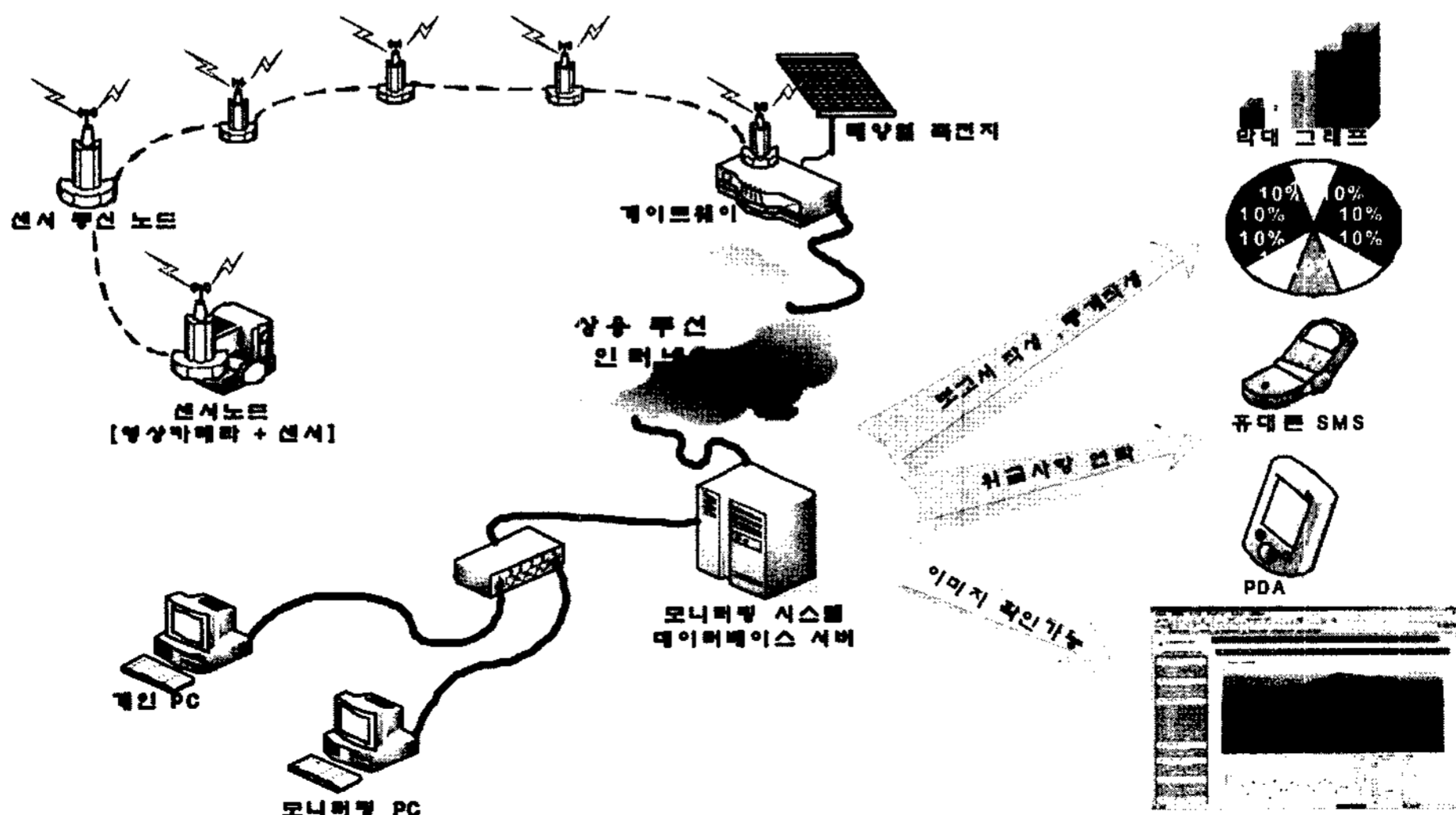


그림 1 가상 교량 관리 시스템의 개념도

진 메모리의 크기, 프로세서의 성능 제한 등으로 인해서 두 계층이 명확하게 구분되지 않는 경우가 많다 [2, 4]. MAC은 물리 계층에 대한 접근을 통제하면서 데이터 링크 계층에게 프레임 수준의 데이터 전송 기능을 제공하는데, 특히 무선 매체의 경우 반이중(half duplex)이기 때문에 충돌의 위험성이 매우 높다는 고유의 특성상을 해결하기 위한 다양한 방법의 MAC 프로토콜들이 제안되어 있다.

무선 매체를 위한 MAC은 크게 경쟁 기반 방식과 비경쟁 방식으로 분류할 수 있다. 경쟁 기반 방식은 전송 매체를 공유하는 모든 노드들이 각각 매체의 사용 여부를 확인한 후, 매체가 유휴 상태일 경우 전송을 시작한다. 이 때, 최대한 충돌을 피하기 위해 랜덤하게 주어지는 대기 시간을 갖는 것이 보통이다. 경쟁 기반 MAC 바탕 위에서 동작하는 전형적인 센서 네트워크 라우팅 계층으로 [5]의 예를 들 수 있다. [5]는 참여하고자 하는 자식 노드가 링크의 질이 가장 우수한 임의의 기존 참여노드를 부모로 설정함으로써 트리 구조 형태의 토폴로지를 형성하여 라우팅 정보로 활용한다. 이 구조의 방향 데이터는 1:1 통신이 가능하나 하향 데이터는 전파(flooding)에 의존해야 한다.

비경쟁 방식은 매체를 공유하는 모든 노드들 사이에 어떤 경우에도 전송 충돌이 일어나지 않도록 하는 규칙을 도입하는 방식인데, TDMA와 CDMA 등이 그 대표적인 예이다. TDMA의 경우, 모든 노드들은 자신이 매체를 사용할 수 있는 시간적 ID를 부여 받으며 자신의 ID에 해당하는 시간 동안에만 전송을 할 수 있다. 이 방식은 전송 충돌을 예방하면서 유휴 시간을 이용하여 전력을 절약할 수 있다면 측면에서 매우 효율적이거나, 분산되어 있는 모든 노드들을 동기화시켜야 하는 부담을 안고 있다.

2.2 경쟁 및 비경쟁(TDMA) 기반 혼합 무선 MAC

센서 네트워크를 위한 본격적인 MAC의 시작은 S-MAC(Sensor-MAC)[6]이라고 볼 수 있다. S-MAC은 주위의 노드들로 구성된 가상 클러스터가 주기를 맞추어 listen과 sleep을 반복함으로써 불필요한 상시 listen에 의한 전력 소모를 줄인다. 그러나, listen 주기에서는 기본적으로 경쟁 기반 통신 방식을 그대로 사용한다. 최초의 주기 동기화는 랜덤한 시간 동안 대기한 후에도 주기를 알리는 SYNC 패킷을 받지 못한 어느 한 노드가 자신의 일정을 방송함으로써 시작된다. 이 일정을 받은 다른 노드들은 그 일정을 기록하여 listen/sleep 주기에 참여한다. 또한 어느 한 노드는 주위의 다른 가상 클러스터의 멤버도 될 수 있기 때문에 양쪽 클러스터 간의 전달 기능을 담당할 수도 있다. listen 구간(duty cycle)에서 RTS-CTS에 의해 채널을 확보한

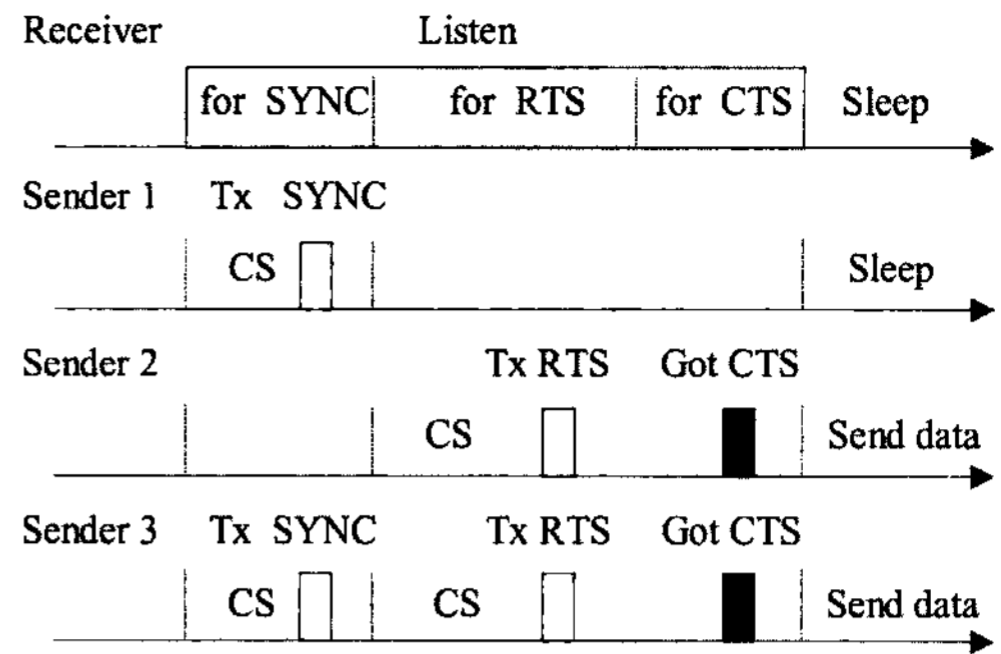


그림 2 S-MAC의 listen/sleep 주기

노드들은 통신을 계속하고, 나머지 노드들은 그들의 통신 시간을 고려하여 곧바로 sleep에 들어간다. 이 기법은 채널을 예약하는 결과로 이어지기 때문에 메시지 단위의 전송이 가능하고, 이는 곧 전체적인 데이터 전송 지연시간이 단축됨을 의미한다. 그림 2는 S-MAC의 전송 방식을 설명한다. 이 그림은 listen 주기가 크게 SYNC 구간과 RTS-CTS 구간으로 구분되어 있으며, RTS-CTS 구간이 끝나면 다른 노드들은 모두 sleep에 들어가고, 해당 노드들은 통신을 계속할 수 있음을 보여 준다.

T-MAC(Timeout-MAC)[7]은 S-MAC에서 고정되었던 listen 구간에 융통성을 부여하여 listen 구간 중 일정 시간 이상 통신이 없으면 예정보다 일찍 sleep에 들어감으로써 전력 소모의 감소를 시도하였다. 이 방법은 통신량이 꾸준한 경우에는 S-MAC과 비슷하지만, 통신량에 어느 정도 이상 편차가 있을 때는 효과가 있는 것으로 알려져 있다. 그림 3은 S-MAC과 대비되는 T-MAC의 개념을 설명한다. 이 그림의 데이터 ③, ⑦, ⑩은 S-MAC에서는 이어지는 다음 listen 구간에서 바로 전송되지만, T-MAC에서는 이전 데이터와의 시차가 일정 시간 t 보다 크기 때문에 한 구간이 더 지연된 후 전송된다. 즉, 최대 listen 구간은 아직 남아 있지만, 유휴 상태가 일정 시간 이상 지속되면 당분간 데이터 발생이 없을 가능성이 높을 것이라는 가정에 근거한다.

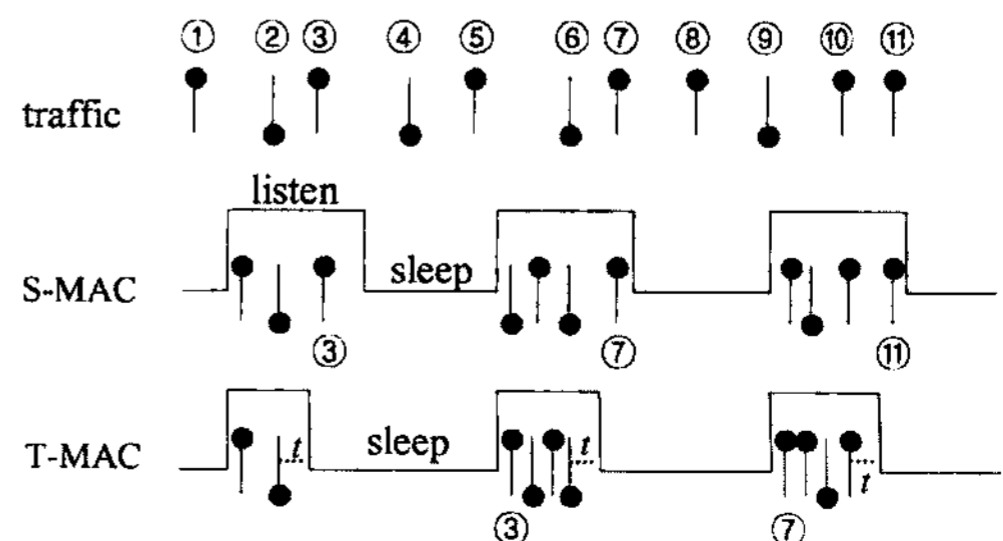


그림 3 T-MAC의 sleep 구간 적용

2.3 경쟁 기반 무선 MAC

B-MAC(Berkley-MAC)[8]은 매우 적은 전력으로 무선 매체의 유희상태와 사용 상태를 탐지할 수 있는 LPL(Low Power Listening) 기능을 전제로 하여, 강제적인 시간적 동기화 없이 경쟁에 기반을 두고 있는 MAC이다. 이 방법은 각 노드가 독립적으로 LPL과 sleep 주기를 반복하는데, LPL 구간 중 어떤 전송의 시작도 인지할 수 있도록 전송 프레임의 프리앰블(preamble)을 충분히 길게 하였다. 이 때 아주 민감한 사항은 LPL 구간에서 순간적인 노이즈 등에 영향 받지 않고 실제의 전송만을 정확하게 판단하여(CCA:Clear Channel Assessment) 정상적인 listen 모드로 전환할 수 있는 방법이다. 이를 위하여 B-MAC은 매체의 에너지 변화 추세를 지수 이동 평균으로 유지·관리하여 순간적인 노이즈에 의한 오판을 예방함으로써 불필요한 전력 소모를 최대한 줄인다. CCA의 정확도는 LPL 뿐만 아니라 전송을 시작하기 전 충돌을 회피하는 단계에서도 매우 중요하다. 또한 B-MAC은 일반적인 경쟁 기반 CSMA에서와 마찬가지로 전송 개시 때 랜덤한 대기 시간을 적용함으로써 충돌을 최대한 회피한다. 그 외에 전송 응답(acknowledgement)을 효율적으로 성사시키기 위해 데이터 수신 직후 채널 확보를 유지한 채 ACK를 보내는 MAC 계층 자동응답 기능을 고안하였다. 이와 같이 B-MAC은 LPL과 sleep 주기 및 정확한 CCA에 의한 listen 부담을 감소시키고 랜덤한 기다림에 의한 충돌을 예방하여 소모 전력을 줄인다. 이와 더불어 이러한 기능들을 유연하게 설정할 수 있도록 그림 4에 보인 MAC 인터페이스(TinyOS[4] 환경)를 제공함으로써 상위 계층과 뚜렷하게 분리되도록 하였다. 즉, B-MAC은 본래의 MAC 계층으로서 서비스 제공자 역할에 충실하여 보다 유연하고 잘 정의된 네트워크 계층 구성을 돕는다.

```

Interface MacControl {
  Command result_t EnableCCA();
  Command result_t DisableCCA();
  Command result_t EnableAck();
  Command result_t DisableAck();
}
Interface MacBackoff {
  event uint_16_t initialBackoff(void *msg);
  event uint_16_t congestionBackoff(void *msg);
}
Interface LowPowerListening {
  command result_t SetListeningMode(uint8_t mode);
  command uint8_t GetListeningMode();
  command result_t SetTransmissionMode(uint8_t mode);
  command uint8_t GetTransmissionMode();
  command result_t SetPreambleLength(uint16_t bytes);
  command uint16_t GetPreambleLength();
  command result_t SetCheckInterval(uint16_t ms);
  command uint16_t GetCheckInterval();
}
    
```

그림 4 B-MAC 설정 인터페이스

2.4 비경쟁 기반 무선 MAC

경쟁을 하지 않고 무선 매체를 전용으로 확보하여 사용하는 방법은 그 방법을 막론하고 다른 노드가 침범하지 않는 자신만의 고유한 채널을 확보할 수 있어야 한다. 이를 동일한 매체에 적용하기 위한 가장 일반적인 방법으로 주·종관계에 따라 임의의 시점에 전송 권한을 부여하는 비커닝(beaconing)과 엄격한 시간 조각을 따라 전송 권한을 할당하는 TDMA를 들 수 있다. 비커닝 방식의 예로는 IEEE 802.15.4[9]를 활용하는 Zigbee [10]를 들 수 있고, TDMA 방식의 예로 IEEE 802.15.1 [11]를 활용하는 Bluetooth[12] MAC을 들 수 있다. 특히, TDMA 환경에서는 엄격한 시간적 동기화가 유지되어야 하므로 여기에 참여하는 노드들은 물리적으로 매우 밀접한 클러스터를 형성해야한다. 즉, 클러스터 간의 간섭 통제나 클러스터 내 노드들의 추가·제거 부담이 커지기 때문에, 클러스터를 구성하는 노드 수에 상당한 제한이 있는 것이 보통이다. Bluetooth는 8개 이내의 노드들이 마스터를 중심으로 물리적인 클러스터를 형성하여 이동 중 무선 통신 네트워크를 형성한다.

WSLP(Wireless Sensor Line Protocol)[2]는 본 논문의 기반이 되는 프로토콜로서, 분산 TDMA 개념을 적용하여 전체 노드들을 논리적인 선형으로 배치함으로써 하나의 가상 링크를 형성한다. 분산 TDMA는 각 노드에 대한 채널(시간)을 중앙에서 할당하는 것이 아니고, 각자의 노드들이 협력하여 스스로 자신의 시간적 채널을 할당하거나 변경한다는 점에서 중앙 집중형 TDMA와 구별된다. WSLP는 그림 5와 같이, 전체 전송 시간을 균일화된 작은 시간 조각(time slot)으로 구성하고, 시간의 경과와 함께 논리적 선형 네트워크를 형성하고 있는 노드들 중 세 노드에게 폭포수 형태로 매체의 공유를 유지시킴으로써 궁극적으로 단말 노드에서 싱크 노드까지 통신 경로가 형성될 수 있도록한다. 그림 5에서 각각의 시간 조각을 3 ms라고 할 때 시간적 공간에서 1,000개의 노드가 형성하는 링크의 존재 시간은 약 3초가되지만, 각 노드는 약 9 ms 동안만 활동하므로 전력 소모가 크지 않다.

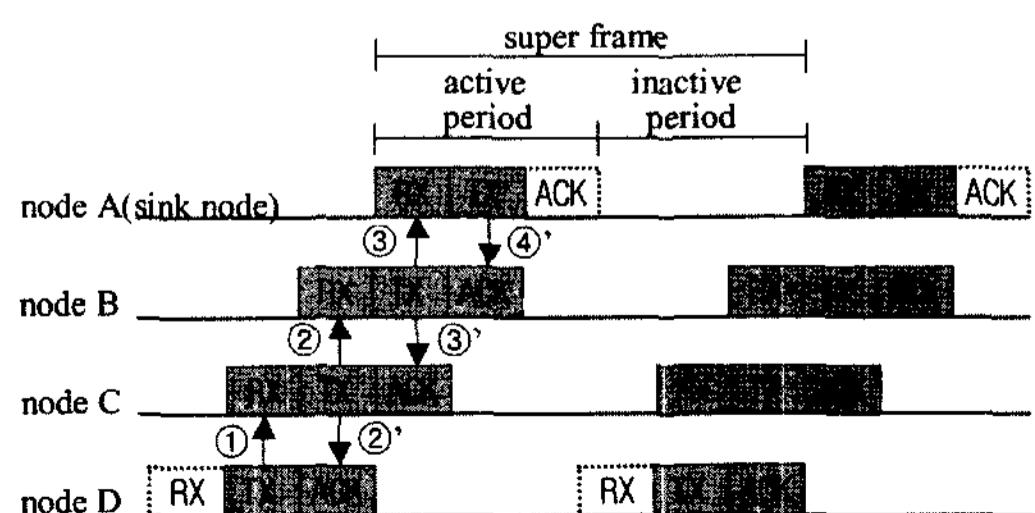


그림 5 WSLP의 가상 링크

3. 양방향 선형 무선 센서 네트워크 BiWSLP의 설계

3.1 WSLP의 동작 방식

WSLP는 어느 특정 시간 조각에서 반드시 세 개의 노드가 통신에 참여하는 형태인데 그 중 가운데 노드 하나에게만 전송 권한을 부여하고, 나머지 앞·뒤 두 노드는 수신 활동만 수행하도록 한다. 그림 6은 그림 5의 가상 링크에서 데이터가 전송되는 과정을 설명한다. 이를 요약하면, 각 노드는 정확히 자신의 RX구간에서 깨어나 데이터를 전달 받고, TX 구간에서 그 데이터를 송신(방송)하며, ACK 구간에서 바로 전 전송에 대한 응답을 받은 후 sleep 상태로 전환하는 과정을 반복한다. RX와 다음 RX 사이의 기간을 슈퍼프레임(super frame)이라 정의한다.

WSLP의 장점은 S-MAC, T-MAC, B-MAC 등과 같은 경쟁 기반 MAC과 달리 충돌을 원천적으로 예방할 수 있고, 데이터 전송 지연이 짧으며, 전력 소비를 크게 줄일 수 있다는 데 있다.

- 노드 D가 자신의 RX(수신) 구간에서 깨어나, 수신 할 것이 없으므로 TX(송신) 구간까지 기다린다.
- 노드 D의 TX 구간이 되었을 때, 노드 C는 RX 구간이 도래하여 깨어나 수신 준비를 한다.
- 노드 D는 자신의 TX 구간이 되었으므로 데이터를 전송(방송)하고, 이 데이터는 수신 대기 중인 노드 C에게 수신된다(①).
- 노드 D는 ACK(응답) 구간, 노드 C는 TX 구간이 되었을 때, 노드 B는 RX 구간이 되어 깨어난다.
- 노드 C가 데이터를 방송하면 그 데이터는 노드 B와 D에게 동시에 수신된다(②, ②'). 이 때 노드 B는 전달 받은 데이터로 인식하고(②), 노드 D는 노드 C로부터①에 대한 응답으로 간주한다(②').
- 노드 B는 TX, 노드 C는 ACK 구간이 되었을 때, 노드 D는 sleep에 들어가고, 노드 A가 RX 구간으로 깨어난다.
- 노드 B가 데이터를 방송하면 노드 A에게는 데이터로(③), 노드 C에게는 응답으로 전달된다(③').
- 노드 B는 ACK, 노드 A는 송신 구간이 되었을 때 노드 C는 sleep에 들어간다.
- 노드 A가 데이터를 방송하면 노드 B에게 응답으로 전달된다(④').
- 노드 A가 ACK 구간이 되었을 때 노드 B는 sleep에 들어간다.
- 다음 슈퍼프레임에서 위 과정을 반복한다.

그림 6 그림 5의 WSLP 기본 동작 방식

3.2 BiWSLP의 설계

3.2.1 V형 BiWSLP와 ^형 BiWSLP

이 논문에서는 단방향 통신만을 지원하는 그림 5의 WSLP에 양방향 통신 기능을 추가하여 BiWSLP로 확장하기 위하여 그림 7과 그림 8의 두 가지 방법을 고려하였다. 그림 7의 V형 BiWSLP는 싱크 노드로부터 단말 노드까지 하향 가상 링크를 형성한 후, 이어서 단말

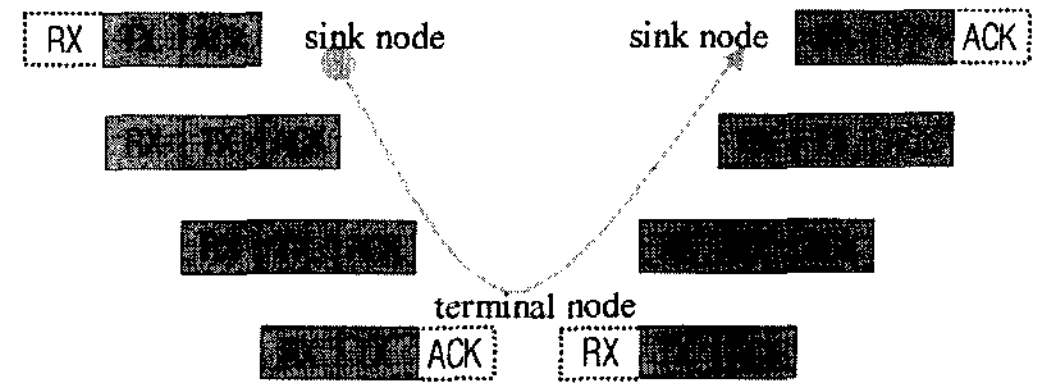


그림 7 V형 BiWSLP

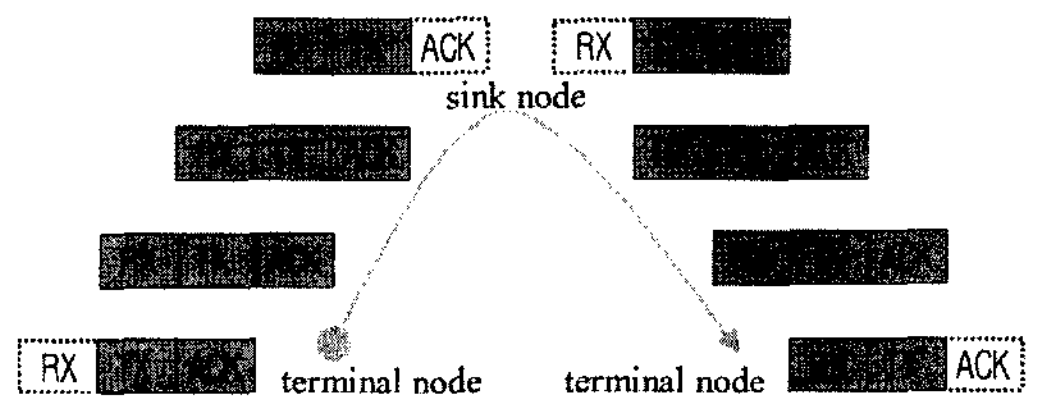


그림 8 ^형 BiWSLP

노드에서 싱크 노드 방향으로의 상향 가상 링크를 형성하는 방법이고, ^형 BiWSLP는 원래대로 단말 노드에서 싱크 노드 방향으로의 상향 가상 링크를 형성한 후, 곧이어 싱크 노드로부터 단말 노드까지의 하향 가상 링크를 형성하는 방법이다. 즉, V형 BiWSLP는 센서 노드로의 명령을 먼저 전달한 후, 센서 노드로부터의 데이터를 싱크 노드로 전달하고, ^형 BiWSLP는 센서 노드로부터의 데이터를 싱크 노드로 먼저 전달한 후 센서 노드로의 명령을 전달한다.

V형 BiWSLP와 ^형 BiWSLP 사이에는 적용 분야에 따른 미세한 장·단점이 존재할 것이다. 이 논문에서는 싱크 노드 기능의 복잡성, 교량 관리 시스템에서 하향 명령어에 대한 각 노드의 사후 대응 형태, 구현의 편의성 등을 고려하여 ^형을 선택하였다.

3.2.2 노드 참여(node join)

그림 8의 가상 링크를 형성하기 위해서는 노드의 참여 절차를 잘 정의할 필요가 있다. 이 논문에서는 그림 9와 같이 노드 참여 방법을 단말 참여와 중간 참여 등 두 가지로 분류하였는데 이들 참여 방법의 선택은 주변 탐색 결과에 따라 결정 된다.

• 단말 참여(terminal join)

그림 9(a)와 같이 새로운 노드가 현재 단말 노드의 뒤로 참여하여 새로운 단말 노드가 되었을 때 이를 단말 참여라 정의한다. 단말 참여는 현재 형성되어 있는 링크에 변화를 주지않고, 새로 참여하는 노드에게만 적절한 시간 조각을 할당하므로 참여 과정이 간단하다. 가상 링크가 맨 처음 형성되기 시작할 때는 싱크 노드가 단말 노드로 출발하여 주위의 노드들이 차례로 단말로 참여하면서 링크가 확장되게 된다(참여 과정은 아래의 중간 참여 과정과 동일).

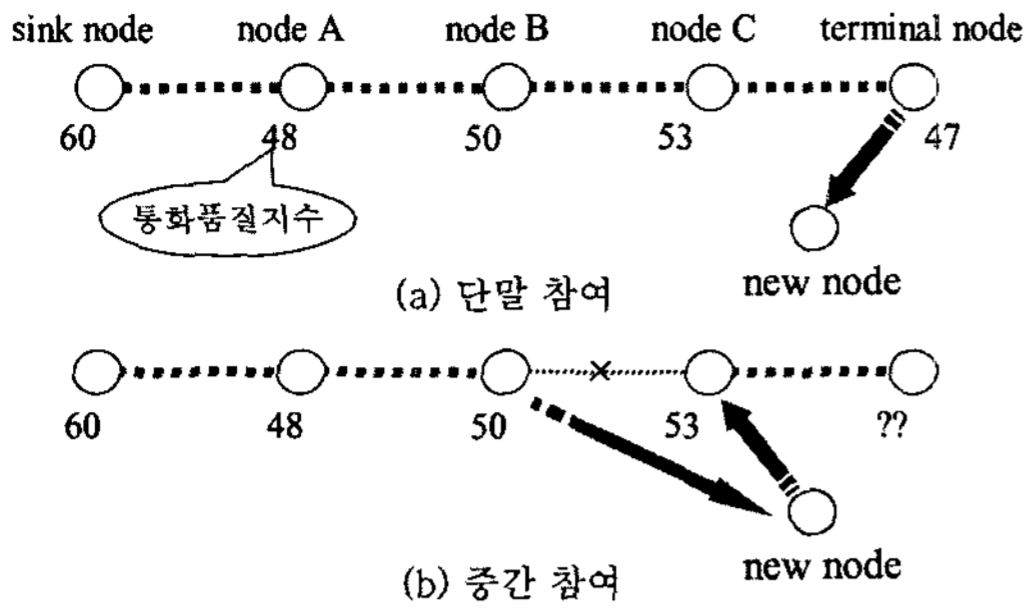


그림 9 노드 참여 방법

• 중간 참여(break join)

새로운 노드가 임의의 두 노드 사이로 끼어들면서 참여할 때 이를 중간 참여라 정의한다. 중간 참여는 이미 참여 중인 각 노드에게 할당된 시간 조각에 대한 조정이 필요하므로 참여 과정이 단말 참여보다 복잡하다. 그림 9(b)의 중간 참여 과정을 그림 10에 보였고 그 내용은 아래와 같다.

- 새 노드(new node)가 주변 탐색(neighbor scan)을 통해 node B를 가장 적절한 자신의 부모 노드로 결정하고, node B의 상향 링크 TX 구간을 이용하여 node B에게 참여 요청 메시지(join req.)를 보낸다(②). 이 때 node B의 TX 구간과의 충돌을 회피하기 위하여 TX 구간 중 메시지 처리 기간(processing time)을 참여 요청 메시지 송신 구간으로 활용한다.
- 만약 동일한 노드에게 여러 개의 노드가 동시에 참여를 희망할 경우, 충돌을 최대한 회피하기 위해 참여를 희망하는 노드들은 노드 id, 희망 노드와의 거리(신호 세기) 등을 고려하여 랜덤한 지연 시간을 가진 후 전송한다.
- 참여 요청 메시지를 받은 node B는 하향 링크에서 new node와 node C에게 참여 응답 메시지를 보낸다(③, ③'). 이 때, new node는 자신의 시간 조각을 그대로 확정하고, node C와 그 이하 모든 노드들은 각각 위로부터 전달 받은 참여 응답 메시지를 아래로 전송한 후(④), 자신의 시간 조각을 이동(shift)시켜 재설정한다(⑤).
- 주변 탐색(neighbor scan)

BiWSLP에 참여하고자 하는 노드는 주변에서 일어나고 있는 통신을 엿듣고, 논리적 가상 링크 상에서 자신이 어느 지점에 위치하는 것이 가장 효율적인 지를 판단하고, 그 결과에 따라 결정된 부모에게 참여 요청 메시지를 보낸다. 이 때 가장 이상적인 위치는 아래와 같다.

- 기존의 연속된 두 노드 사이의 통신 품질은 낮고, 새로운 노드와 그 둘과의 통신 품질은 높을 때 그

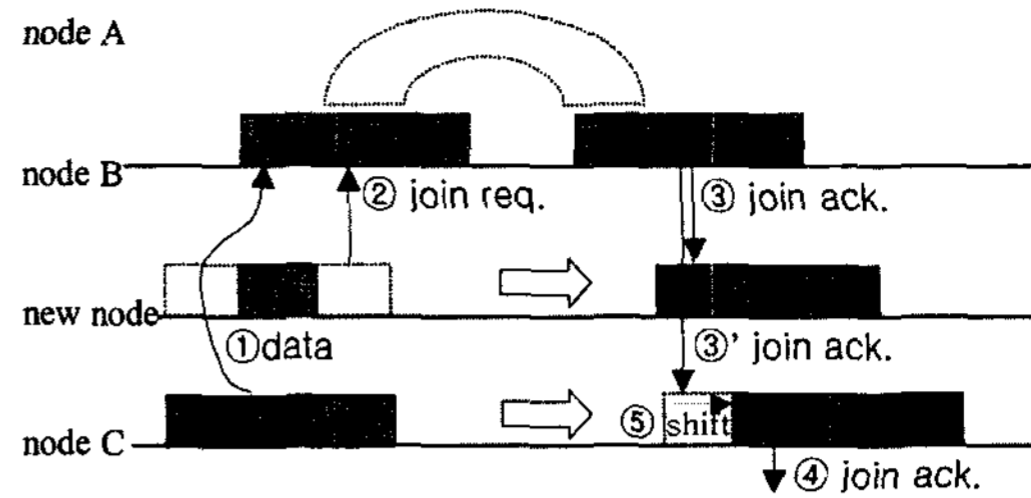


그림 10 노드의 중간 참여 과정

두 노드 사이가 최적의 위치임.

- 새로운 노드가 추가되는 되는 과정에서 기존 링크에 대한 변화가 최소일 때가 최적의 위치임.

이 논문에서 설계된 BiWSLP에서는 통신 품질 지수로 RSSI(Received Signal Strength Indicator)를 사용하기 때문에 새로운 노드는 링크에 참여하고 있는 임의의 두 노드 사이의 통신 품질을 알지 못한다. 따라서 이 논문에서는 새로운 노드가 자신의 참여 위치를 아래의 정책에 따라 결정한다.

- 단말 참여가 가능할 때 즉, 단말 노드가 탐색되면 단말 참여를 우선적으로 시도(그림 9의 (a)).
- 연속되는 노드들과 자신과의 통신 품질 중, 품질이 최하인 노드와 결부된 위치를 차례로 제외한 나머지 부분에서 선택. 예를 들어 그림 9의 (b)에서, new node 관점에서 조합 가능한 통신 품질은 (60, 48), (48, 50), (50, 53), (53, 47)인데, 이 중 우선 일차적으로 (60, 48), (48, 50)이 제외되고, 나머지 (50, 53), (53, 47) 중에서 이차적으로 (53, 47)이 제외되기 때문에, 최종적으로 (50, 53) 즉, node B와 node C 사이를 선택.

3.2.3 링크 복구(link recovery)

노드의 고장이나 전원 고갈, 혹은 장애물이나 노이즈 등에 의해 링크가 단절될 수 있다. 이 경우 통신 장애를 확인한 노드는 부모의 상위 노드에게 링크 복구를 요청하여 링크를 복구한다. 링크 단절은 그림 11과 같이 어느 노드를 중심으로 한 쪽만 단절되는 경우와 양쪽 모두 단절 되는 경우로 분류할 수 있다.

• 한 쪽 단절(single break)

그림 11의 (a)에서 node C는 node B와의 통신 장애를 확인하고, node B의 상위 노드인 node A에게 링크 복구 요청 메시지를 보낸다. 이 때, node A 입장에서는 node B와의 통신이 잘 되므로 node C의 요구를 거절하고, 이에 따라 node C는 자신과 node B 사이만이 장애 구간임을 판단하여 스스로 링크에서 탈퇴한다. 그 결과 node C의 자식으로 있던 노드가 node B와의 링크 복구를 시도하게 된다.

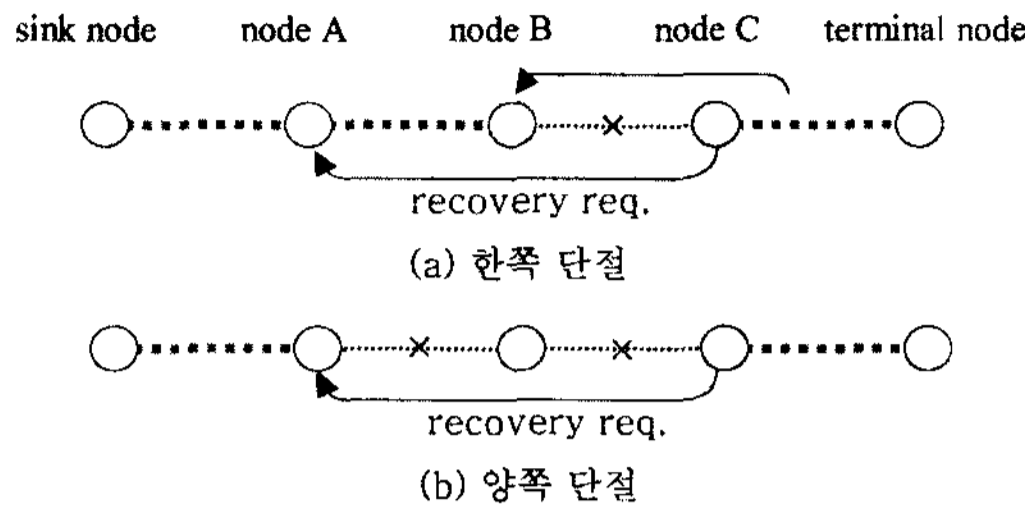


그림 11 링크 단절의 유형

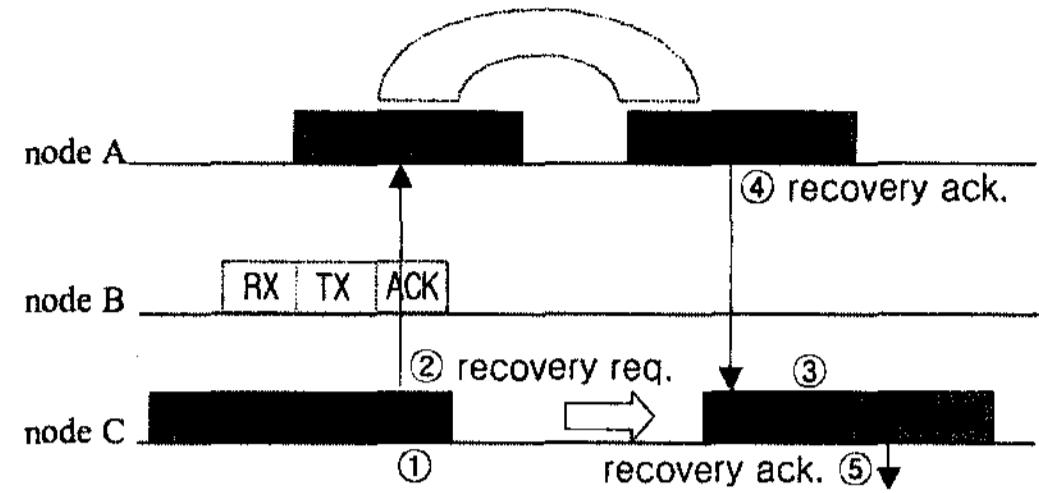


그림 12 링크 복구 과정

• 양쪽 단절(double break)

그림 11의 (b)와 같이 node C와 node A 모두가 node B와의 통신 장애에 대한 확인이 가능할 때에는, node A에 대한 node C의 링크 복구 요청이 수용되어 node B가 제외된 새로운 링크가 생성된다(그림 12 참조).

- node C가 링크 복구 요청 메시지를 node A에게 보낸다. 이 때 node B의 TX와의 충돌 가능성이 있으므로 node A의 TX 구간 중 처리 시간을 활용한다. 이를 위해서 자신의 시간 조각을 임시로 연장하고(①), 메시지를 보낸 다음(②)에는 자신의 RX 구간을 이동(③, blank 구간)시켜 새로운 부모 node A와의 통신이 가능하도록 한다(③).
- node A는 하향 링크에서 node C에게 링크 복구 응답 메시지를 보낸다(④).
- node C는 아래의 노드에게 링크 복구 응답 메시지를 보내(⑤) 시간 조각을 이동시키도록 하고, 자신의 blank 구간을 제거한다. 이 과정이 아래의 모든 노드들에게 차례로 전파되도록 한다.

3.2.4 타임 동기화(time synchronization)

무선 센서 네트워크에서 시간 동기화가 필요할 때는 TPSN[13], FTSP[14] 등 시간 동기화를 위한 별도의 프로토콜을 활용하는 것이 일반적이다. 그러나 이 논문의 BiWSLP에서는 바로 다음 노드로부터 데이터 전송에 대한 응답이 수신되는 순간을 기준으로 다음 주기에서 깨어날 시간을 설정하기 때문에, 타이머의 차이로 인한 시차가 누적되는 일이 일어나지 않는다. 이 때, 다음 주기까지의 시간은 RX, TX, ACK 등 시간 구간의 길이와 자신이 위치하고 있는 논리적 위치(depth)를 사용해서 계산될 수 있고, 그 위치는 단말 참여 및 중간 참여, 링크 복구 시 각 노드에게 알려진다.

3.2.5 큐 정책(queue scheduling)

수퍼 프레임 주기 즉, 가상 링크 1회에 전달될 수 있는 데이터의 양이 한정되어 있으므로 이를 수용하기 위한 큐 정책이 필요하다. BiWSLP의 큐 정책은 아래와 같다.

- 기본적으로 각 노드는 수집된 데이터 등 자신의 큐

에 대기 중인 데이터를 현재 운반 중인 프레임에 실는다.

- 이 때, 프레임에 여유 공간이 있으면 현재 자신의 큐에서 대기 중인 데이터 중, 우선 순위가 높은 것부터 프레임이 꽂 찰 때까지 실는다.
- 만약 프레임에 더 이상의 여유 공간이 없으면, 프레임에 실려있는 데이터 중, 자신의 큐에 있는 데이터의 우선 순위보다 낮은 것을 찾아서 자신의 큐에 내려 놓고, 대신 큐에서 대기 중인 높은 우선 순위의 데이터를 실는다.

4. 가상 교량 관리 시스템 구축 및 BiWSLP 평가

4.1 BiWSLP 구현

3장에서 설계한 BiWSLP을 위해 필요한 주요 구성 요소의 구현 및 설정 내용은 다음과 같다.

- 시간 조각
RX, TX, ACK, 수퍼프레임 주기 설정을 표 1에 보였다. 이 표에서 Guard는 휴면 중 발생할 수 있는 타임 드리프트를 고려하여 할당된 RX 시각보다 약간 일찍 깨어나기 위한 완충 시간이며, Processing은 RX와 TX 시간 조각 사이에서 이루어지는 패킷 작성 등의 처리 시간을 말한다.

표 1 BiWSLP 시간 조각 설정

항목	값	항목	값
RX	7.712ms	ACK	7.712ms
TX	3.456ms	Guard	1.928ms
Processing	24.192ms	Superframe	7487ms

- 프레임 구조
그림 13에 BiWSLP의 프레임 구조를 보였다.
- 센서 노드 플랫폼
본 연구에서 개발된 센서 노드 플랫폼의 사양은 표 2와 같고, 그림 14에 그 모습을 보였다.

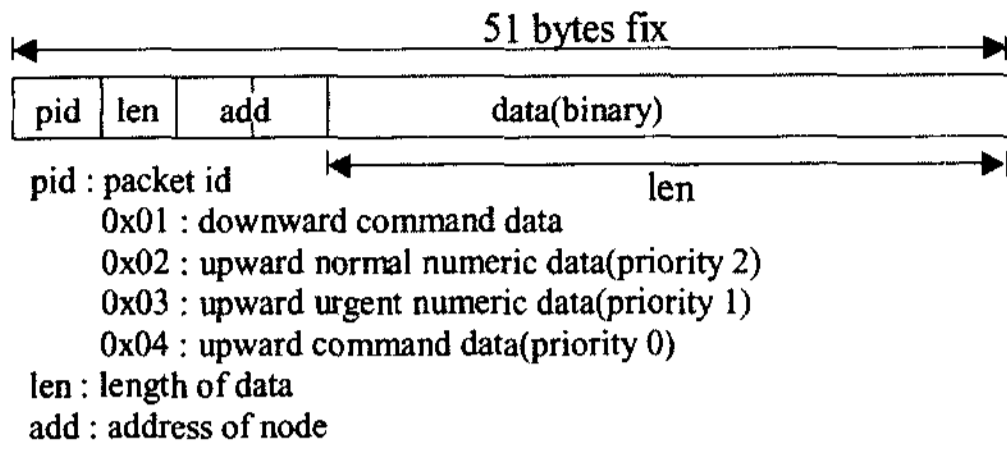


그림 13 BiWSLP 프레임 구조

표 2 BiWSLP 탑재용 센서 노드 플랫폼

항 목	사 양 (모 델)	
MCU	CPU	Atmega2560(7.372 MHz)
	Flash	256KB
	SRAM	8KB
	소모전력	active mode:8mA, sleep mode:15μA
외부 메모리	128KB	
RF 프로세서	CC1100(800~928MHz, 500Kbps)	
안테나	1/4λ mono pole	
전원	리튬 AA 배터리 2개(3.6V)	
센서	LVDT(거동량, LPS-50S, 50mm)	
	온·습도(Inoization)	

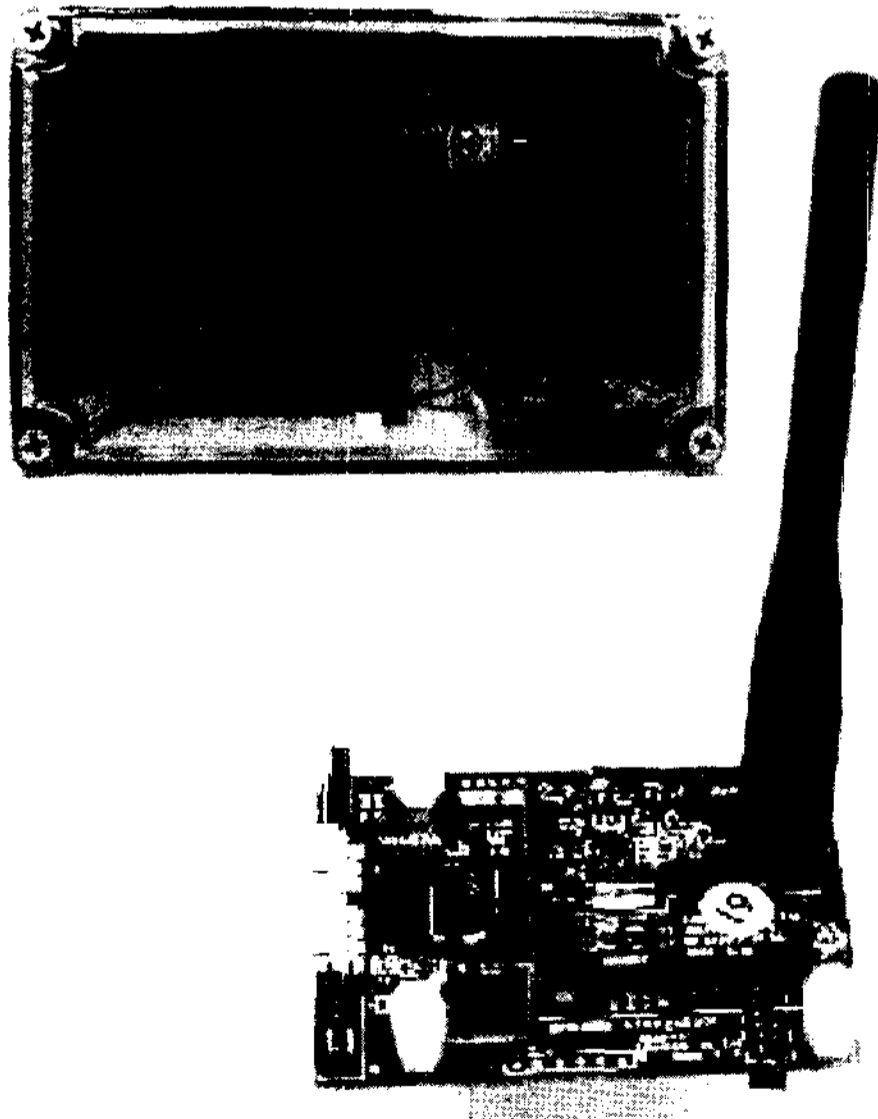


그림 14 노드 플랫폼 및 거동량 센서

■상향 데이터

각 센서 노드는 온도, 습도, 거동량 등 자신에게 부착된 센서의 값과 배터리 전압을 매 수퍼 프레임마다 측정하여, 그 값이 주어진 임계치를 벗어나면 즉시 전송하고, 그렇지 않은 경우는 주어진 일정 시간 주기로 전송한다.

■하향 명령어

측정된 값이 이상 징후로 나타났거나, 5분 이내에 데이터 측정을 원할 경우 관리자는 서버 및 게이트웨이를 거쳐서 특정 센서 노드에게 측정 및 전송 명령을 내린다.

■싱크 노드 기능

싱크 노드는 기본적으로 센서 노드와 동일하지만 아래의 특수 역할을 추가로 담당한다.

- 후면에 들어가지 않고, 수퍼프레임 주기마다 시리얼(RS232C) 통신을 통해 게이트웨이와 통신한다.
- 프레임에 실려있는 데이터를 게이트웨이로 전달한다.
- 게이트웨이로부터 명령어를 전달 받아 프레임에 싣는다.
- 센서 노드들에 대하여 BiWSLP의 관리용 통계 정보 수집 등을 위한 지휘 명령을 보낸다.

4.2 가상 교량 관리 시스템

BiWSLP 평가를 위한 가상 교량 관리 시스템 구축을 위해 그림 15와 같이 건물 주변 나무에 평균 약 18m 간격으로 11개의 노드를 일직선에 가까운 선형 토폴로지로 배치하였다. 노드들을 크게 고유 기능의 센서 노드와 릴레이 노드 두 유형으로 분류하여, 센서 노드에는 교량 상판의 이동량을 0.5mm 단위의 정밀도로 측정할 수 있는 LVDT(Linear Variable Differential Transformer) 센서, 온도 센서, 습도 센서, 전압 센서(전압 측정 기능) 등 4 개의 센서를 부착하였고, 릴레이 노드에는 전압 측정 기능만을 부착하였다.

각 노드는 부착된 센서에 따라, 일상 데이터로 5분 주기마다 변위, 온도, 습도, 전압 값을 측정하여 올려보내고, 이 때 모든 센서 측정 값은 센서 타입 1 바이트, 값 2 바이트로 표시되므로 최소한 3 바이트를 차지한다. 여기에 프레임 id 1 바이트와 node id 2 바이트를 헤더로 필요로 한다. 따라서, 센서 노드의 경우 1회 데이터 발생량은 1(프레임 id)+2(node id)+3(센서 id, 측정 값)×4(센서 4 종류) = 15 바이트이다. 릴레이 노드의 경우는 전압 1 종류이므로 1회 데이터 발생량은 1(프레임 id)+2(node id)+3(전압 id, 측정 값)×1(전압 1 종류) = 6 바이트가 된다.

그림 15에서 센서 노드가 3개, 릴레이 노드가 노드가 7개 이므로 가상 교량 관리 시스템에서 5분 주기마다 발생하는 총 데이터량은 87(=15×3+6×7) 바이트인데 이는 0.29 bytes/sec를 의미한다.

4.3 BiWSLP 평가

4.1, 4.2 절에서 BiWSLP가 적용될 수 있는 매우 현실적인 응용분야의 한 예로 가상 교량관리 시스템을 도입하였다. 이 환경에서 BiWSLP의 타당성을 검증하기 위하여 최근 연구 및 교육용 센서 네트워크 프로토콜로 널리 사용되는 [15]의 Surge_Reliable 응용 프로그램을

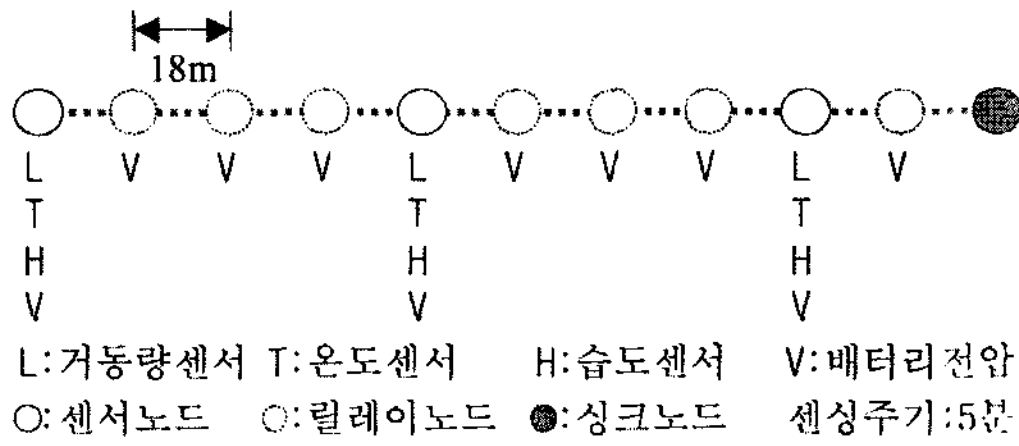


그림 15 가상 교량 관리 시스템을 위한 노드 배치

개발하여 CCSR(Customized Crossbow Surge_Reliable)이라 칭하고, 그 적용 결과를 BiWSLP와 비교하였다. [15]는 [8]의 B-MAC과 [16]의 XMesh 라우팅 프로토콜을 사용하는데, 주요 개발 내용은 [13]의 타임 동기화 프로토콜을 삽입하여 전체 노드들이 하나의 동작/휴면 주기(수퍼프레임 개념)를 따를 수 있도록 동기화를 실현했다는 점이다. 이 때, 시간 동기화를 위하여 매 8 번째 수퍼프레임 즉, 약 1분 주기(7.487×8=59.896sec)로 타임 동기 및 명령어를 위한 하향 데이터 전송 주기로 할애하였다. 또한, CCSR의 센서 인터페이스 제한으로 LVDT 센서는 부착하지 못했는데, 이는 오히려 CCSR의 최소 요구 데이터 전송률에 도움이 되는 요소이므로 BiWSLP와의 비교 결론에는 아무런 영향도 주지 못한다. 표 3에 CCSR 환경의 사양을 요약하였다.

표 3 Customized Crossbow Surge_Reliable (CCSR) 환경 사양

항 목	값(프로토콜, 시간, 플랫폼, OS)
MAC	B-MAC
Routing	XMesh(EWMA, flooding & broadcasting)
Superframe	7487ms
RX, TX, Processing	2000ms
Time synchronization	FTSP
Platform	Mica2, TinyOS
Gateway, viewer	MIB600, MoteView(PostGresql)

■ 데이터 전송률 평가

BiWSLP의 최대 데이터 전송률은 그림 13의 프레임 구조와 표 1의 수퍼프레임 주기에 의하여 51 bytes / 7.487sec 즉, 6.8 bytes/sec가 된다. 이는 가상 교량 관리 시스템에 요구되는 실효 전송률인 0.29 bytes/sec보다 20배 이상 높아서 충분하다.

CCSR의 경우 충돌을 감수하는 경쟁기반 MAC을 사용하기 때문에 최대 전송률을 확정적으로 단정지을 수 없다. 다만, 10개의 노드가 충돌을 회피하면서 시간 지체없이 차례로 전송하는 이상적인 환경이라면, CC1000 RF chip의 최대 데이터 전송률인 128K bytes/sec에 근

접할 것이라는 예측을 할 수 있다. 그러나, 실제로는 경쟁을 위한 랜덤 대기 및 충돌에 의한 분실 등이 고려되었을 때, 노드수가 늘어남에 따라 그 전송률이 급격하게 저하된다는 사실 외에 노드 수와 토폴로지가 주어진 상황에서 조사 최대 전송률을 결정지을 수 없다는 것은 중대한 단점이 아닐 수 없다.

본 연구의 실험결과, 그림 15의 상황에서 CCSR은 다양한 토폴로지를 형성하였는데, 그 중 몇 가지를 그림 16에 보였다. (a)의 경우, 1 번 노드의 데이터는 총 10 번의 홉간 통신을 거쳐서 전달되고, 2 번 노드는 9번의 홉간 통신을 거쳐야 한다. 이런 형태로 1 번 노드 데이터까지 총 55 번의 홉간 통신을 거쳐야 하는데, 이는 동일한 전송률을 얻으려면 BiWSLP의 10번을 기준으로 5.5배 이상의 전송률이 요구됨을 의미한다. (c)의 경우에서 노드 5, 7, 8, 9, 10은 3 번의 홉간 통신이 필요하고, 노드 2, 4, 6은 2 번, 노드 1, 3은 1 번의 홉간 통신이 각각 필요하여 총 23 번의 홉간 통신이 필요하기 때문에 BiWSLP보다 2.3 배 이상의 전송률이 요구된다. 실험 결과, (c)와 같은 토폴로지는 생성되지 않았고, 주로 (b) 형태의 토폴로지가 형성되었다.

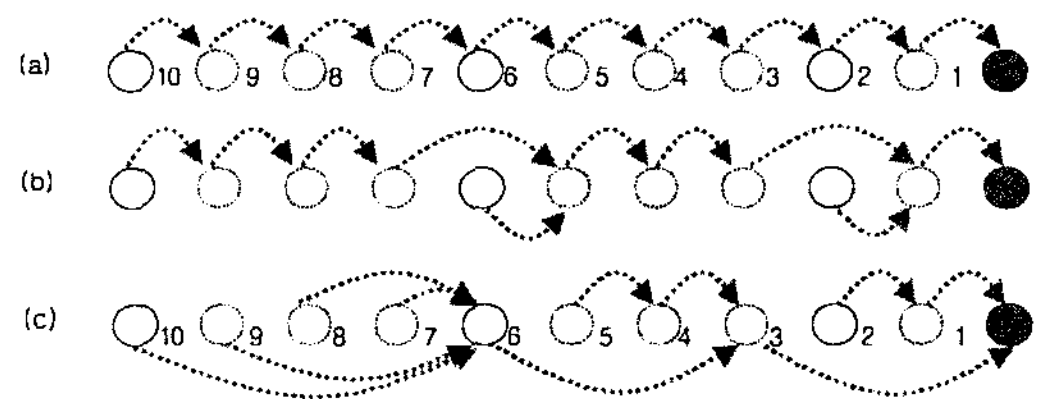


그림 16 CCSR이 형성하는 토폴로지의 예

■ 데이터 수신률 평가

BiWSLP를 4 주간 운영한 결과, 각 노드의 5 분 주기의 변위, 온도, 습도, 전압 등의 데이터 수집률은 100%로 나타났다.

CCSR의 경우 그림 16의 (a), (b) 형태의 토폴로지 하에서는 BiWSLP와의 비교가 불가능할 정도로 격차가 심해, 약간의 위치 조정과 장애물을 이용하여 (c) 형태의 토폴로지를 형성하도록 한 후, 72 시간 동안 측정된 수신률을 사용하였다. 이 때, 통계 수치의 의미를 향상시키기 위해 데이터 발생 주기를 약 1 분(8 개의 수퍼프레임 주기)로 단축하였는데, 이는 데이터 발생*전송 사건이 다음 번 발생*전송 사건과는 전혀 독립적이기 때문에 5 분 주기에서의 실험 조건과 동일하다. 이 환경에서 더 이상의 수신률 개선이 이루어지지 않는 최소 활동 시간(RX+TX+Processing)으로 2초(2000ms, 표 3 참조)를 설정하였다(최소 활동 시간을 더 줄일 경우 데이터 수신률이 희생됨).

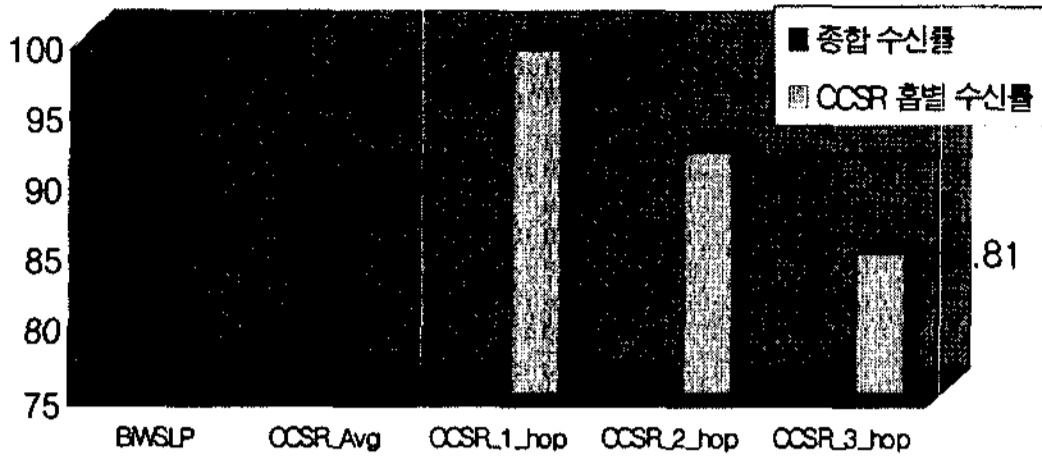


그림 17 BiWSLP와 CCSR의 데이터 수신률 비교

그림 17에 BiWSLP 및 CCSR의 수신률 측정 결과를 보였는데, CCSR의 수신률은 89.9%로 나타났다. 더불어, 이 그림으로부터 선형 토폴로지에서 노드 수가 늘어남에 따라 CCSR의 수신률은 크게 감소할 것이라는 사실을 더욱 확실하게 유추할 수 있다.

■경보(alarm) 및 양방향 통신 효율성 평가

그림 15에서 LVDT의 입계 값을 20mm로 설정해 놓은 상태에서 LVDT를 인위적으로 20mm 이상으로 움직여 놓으면 특이 데이터가 발생하고, 이 데이터는 다음 슈퍼프레임 주기에 즉시 싱크노드에 전달된다. 이 데이터는 다시 게이트웨이를 경유해서 서버에 전달되고 곧 이어 서버는 경보를 발령한다. 경보에 접한 관리자가 서버 웹 인터페이스를 이용해서 특이 데이터에 대한 재측정 명령어를 보내고, 이에 대한 측정 값이 도달하는 모든 과정의 시도에서 BiWSLP가 설계 의도대로 동작됨이 확인되었다.

CCSR에서는 타임 동기화를 위한 하향 명령어의 전달 기능에 의해 양방향 통신 기능을 확인할 수 있다. 그러나, 하향 명령어가 방송에 의해 전파되기 때문에 신뢰성이 BiWSLP보다 낮아 명령어 분실 확률이 높고, 단 하나의 명령어를 내리기 위해 많은 양의 패킷을 방송 패킷으로 전파(flooding)시키기 때문에 전송 효율성 및 실시간성이 보장되지 않는다.

즉, 하향 데이터의 신뢰성, 전송 효율성, 실시간성 측면에서 BiWSLP의 상대적인 우수성을 충분히 가늠할 수 있다.

■에너지 효율성 평가

표 1로부터 BiWSLP는 7487ms의 슈퍼프레임 중, 상향 링크에서 45(=1.928+7.712+24.192+3.456+7.712)ms, 하향 링크에서 45ms 동안 각각 활동하고 나머지 7397ms 동안(98.8%)은 휴면한다. CCSR은 BiWSLP와 동일한 7487ms의 슈퍼프레임 중, 2000ms 동안 활동하고 나머지 5487ms 동안(73.29%) 휴면한다(그림 18 참조). 즉, 단순 휴면시간 비교에서 BiWSLP가 약 22(=2000ms/90ms)배 우수하다. 여기에, 그림 16에서 보았던 홉간 전송 횟수에 따른 송·수신에 소요되는 전력 소모를 고려하면 그 차이는 더욱 커진다.

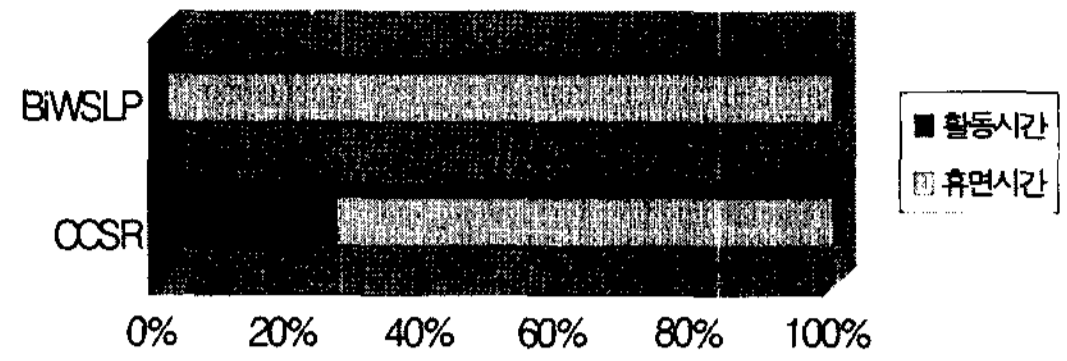


그림 18 BiWSLP와 CCSR의 휴면 시간 비교

이 연구에서는 리튬 건전지(2400mA, 3.6V) 2 개를 사용했는데, 이전의 선행 연구 결과 등을 종합했을 때 BiWSLP의 건전지 교체주기가 최소한 1년 이상 보장되는 것으로 예측되었다.

5. 결론

교량·터널과 같은 인공 구조물의 모니터링이나, 홍수·화재와 같은 재난·재해 감시 시스템에 센서 네트워크를 적용하는 경우, 센서의 오동작에 따른 오보(false alarm)가 가장 큰 문제점 중의 하나이다. 오보에 대응하기 위한 가장 좋은 방법은 해당 데이터나 주변의 다른 센서 값을 즉시 다시 얻어 확인하는 것이다. 이를 위해서는 센서 네트워크의 실시간적이고 효율적인 양방향 통신 기능이 필수적이다. 그 외에 전송 속도, 전송 신뢰성, 에너지 효율성 또한 중요한 요소이다.

이 연구에서는 양방향성, 데이터 전송 속도, 데이터 수신률, 에너지 효율성 등 센서 네트워크에서의 4 가지 논점에서 상당한 장점이 있다고 판단되는 BiWSLP[1]를 설계·제시하고 구현하였으며, 가상 교량 관리 시스템 적용 및 Crossbow의 Surge_Reliable과의 비교를 통해서 그 가능성을 검증해 보였다. 앞으로, 다양한 응용 분야별로 T-MAC, B-MAC, Zigbee 등 다른 MAC 프로토콜이나 네트워크와의 정량적인 비교·분석을 통해 그 우수성을 보다 일반적인 차원으로 검증해 보일 예정이다. 또한 통신 환경이 열악한 경우의 링크 복구와 노드 참여의 효율성 및 링크 유지율 즉, 네트워크의 강건성(robustness) 향상에 관한 연구도 진행할 예정이다.

참고 문헌

[1] 정한수, 문정호, “양방향 데이터통신이 가능한 선형구조를 갖는 무선센서네트워크 및 그 방법”, 대한민국 특허청, 국내특허출원, 10-2007-0008935, 2007년 1월.
 [2] 김재호, 이상신, 안일엽 외. “선형구조를 가지는 실시간 무선 센서네트워크 통신방법”, 대한민국 특허청, 등록특허공보, 10-0656385, 2006년 12월.
 [3] William Stallings, Data And Computer Communications 2nd Edition, Maxwell Macmillan, pp. 9-12, 1989.
 [4] P. Levis, S. Madden, J. Polastre, R. Szewczyk, K. Whitehouse, A. Woo, D. Gay, J. Hill, M. Welsh,

E. Brewer, and D. Culler, "TinyOS: An operating system for wireless sensor networks," Ambient Intelligence, Springer-Verlag, 2004.

[5] Ning Xu, Sumit Rangwala, Krishna Kant Chintalapudi, et al, Deepak Ganesan, Alan Broad, Ramesh Govindan, and Deborah Estrin, "A Wireless Sensor Network For Structural Monitoring," SenSys'04, Baltimore, November 2004.

[6] W. Ye, J. Heidemann, and D. Estrin. "An Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks," INFOCOM 2002, Vol.3, pp. 1567-1576, June 2002.

[7] Tijs van Dam, Koen Langendoen. "An Adaptive Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks," SenSys'03, Los Angeles, November 2003.

[8] Joseph Polastre, Jason Hill, David Culler, "Versatile Low Power Media Access for Wireless Sensor Networks," SenSys'04, Baltimore, November 2004.

[9] IEEE std 802.15.4-2006, "IEEE Standard for Information technology-Telecommunications and information exchange between systems-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 (WPANs)," 2006.

[10] S. Safaric, K. Malaric, "Zigbee wireless standard," 48th International Symposium ELMAR-2006, June 2006.

[11] IEEE std 802.15.1-2005, "IEEE Standard for Information technology-Telecommunications and information exchange between systems-Local and metropolitan area networks-Specific requirements. Part 15.1: Wireless medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications for wireless personal area networks (WPANs)," 2005.

[12] Specification of the Bluetooth System: Core(2001), <http://www.bluetooth.org/>

[13] S. Ganeriwal, R. Kumar, M. B. Srivastva, "Timing-sync Protocol for Sensor Networks," SenSys '03, Los Angeles, November 2003.

[14] M. Maroit, B. Kusy, G. Simon, A. Ledeczi, "The Flooding Time Synchronization Protocol," SenSys'04, Baltimore, November 2004.

[15] Crossbow, "Multihop Mesh Networking : XMesh," Crossbow tutorial lab, Beijing, March 2005.

[16] Alec Woo, Terence Tong, David Culler, "Taming the Underlying Challenges of Reliable MultiHop Routing in Sensor Networks," SenSys'03, Los Angeles, November 2003.



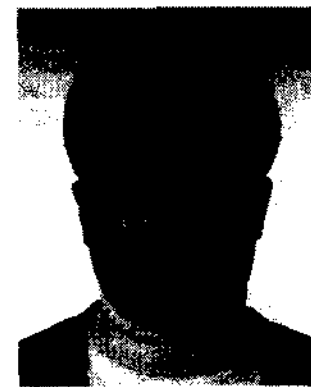
이 형 봉

1984년 2월 서울대학교 계산통계학과 학사. 1986년 서울대학교 계산통계학(전산과학)과 석사. 2002년 강원대학교 컴퓨터과학과 박사. 1986년~1993년 LG전자 컴퓨터연구소 선임연구원. 1994년~1999년 한국디지털(주) 책임컨설턴트. 1999년~2003년 호남대학교 조교수. 2004년~현재 강릉대학교 부교수. 관심분야는 임베디드 시스템, 센서 네트워크, 데이터 마이닝 알고리즘



박 래 정

1991년 서울대학교 전기공학과 학사. 1993년 KAIST 전기 및 전자공학과 석사. 1997년 KAIST 전기 및 전자공학과 박사. 1997년~2000년 LG 종합기술원 선임연구원. 2001년~현재 강릉대학교 전자공학과 부교수. 관심분야는 기계학습, 최적화, 임베디드 시스템, 센서 네트워크



문 정 호

1991년 서울대학교 제어계측공학과 학사. 1993년 KAIST 전기 및 전자공학과 석사. 1998년 KAIST 전기 및 전자공학과 박사. 1998년~2002년 삼성전자 중앙연구소 및 휴맥스 연구소 책임연구원. 2003년~현재 강릉대학교 전자공학과 부교수. 관심분야는 임베디드 시스템, 센서 네트워크, 디지털 제어



정 태 운

1987년 연세대학교 전기공학과 학사. 1989년 연세대학교 전기공학과 석사. 2000년 연세대학교 전기컴퓨터공학과 박사. 1989년~1996년 삼성종합기술원. 1996년~2001년 삼성전자 중앙연구소 책임연구원. 2002년~현재 강릉대학교 전자공학과 부교수, 강원 임베디드 소프트웨어 연구센터 센터장. 관심분야는 임베디드 시스템, 센서 네트워크, 영상 부호화