

무선 센서 네트워크를 위한 신뢰적 브로드캐스팅 기법

학생회원 최원석*, 종신회원 조성래*

A Reliable Broadcast Scheme for Wireless Sensor Networks

Won Suk Choi* *Student Member*, Sungrae Cho* *Lifelong Member*

요약

본 논문에서는 무선 센서네트워크에서 타이머에 기반한 신뢰적 브로드캐스팅 기법 (TRB)을 제안한다. 제안된 신뢰적 브로드캐스팅 기법은 (1) 비트맵에 기반을 둔 명시적 ACK을 이용하여 필요 없는 에러제어 메시지를 줄이는 방식과 (2) 랜덤한 타이머를 기반으로 ACK을 전송함으로써 충돌을 줄이는 방식으로 구성되어 있다. 무선 센서 네트워크에서는 일반적으로 노드들이 밀집되어 있다는 가정 하에 100% 신뢰성을 요구하지는 않는다고 알려져 있으나, 노드들의 이동성과 전력감쇠에 의한 토폴로지의 변화에 따라 항상 밀집되어있다고 가정할 수는 없다. 따라서 완전한 신뢰성이 필요한 경우 (예, 매우 중요한 작업이거나, 작업 할당에 관한 메시지, 혹은 소프트웨어 업데이트 등), 일반적인 브로드캐스팅에 의한 데이터 전송에서는 문제가 될 소지가 있다. 따라서 본 논문에서는 TRB 알고리즘에 기반한 신뢰적 데이터 전달 기법을 제안한다. 성능 평가를 통해 TRB 알고리즘이 기존의 브로드캐스팅 기법들에 비해 100% 신뢰성을 보장하고 상대적으로 에너지 효율성 역시 높일 수 있음을 보인다.

Key Words : Wireless Sensor Network, Reliable Broadcast, Mesh Network, Timer-based Protocol

ABSTRACT

In this paper, we propose a new reliable broadcast protocol referred to as timer-based reliable broadcast (TRB) for wireless sensor networks (WSNs). The proposed TRB scheme exploits (1) bitmap based explicit ACK to effectively reduce the unnecessary error control messages and (2) randomized timer for ACK transmission to substantially reduce the possibility of contentions. Although it has been argued that 100% reliability is not necessary in WSNs, there should be messages (such as mission-critical message, task assignment, software updates, etc.) that need to be reliably delivered to the entire sensor field. We propose to use the TRB algorithm for such cases. Performance evaluation shows that the TRB scheme achieves 100 % reliability significantly better than other schemes with expense of slightly increased energy consumption.

1. 서론

최근 무선 센서 네트워크 (WSN : Wireless Sensor Network)는 학계와 산업체들에서 많은 주목을 받고 있는 기술로 유비쿼터스 컴퓨팅을 구축하기 위한 기반 기술로서 인식되어지고 있다. 유비쿼터스 환경 구축을 위해 무선 네트워크, 멤스 (MEMS : Micro-Electro-Mechanical System) 등의 수많은 구성 요소들이 하나의 칩에 집적되어 센서

의 크기와 전력 소비량이 작아지고 있고 비용 측면에서도 가격이 점차 하락하고 있는 추세이다. 이러한 작은 센서 노드들은 물류시스템, 건강관리, 재해 탐지, 보안, 빌딩 오토메이션 등 가정이나 혹은 군사용, 과학용, 각종 산업 환경에 응용되어질 수 있다¹⁾.

이러한 점에서 WSN에서의 응용 분야는 매우 넓고 매력적이지만 원활한 동작을 수행하기 위해서는 기술적으로 해결 되어야 할 문제점들이 많은 것 또

* 중앙대학교 컴퓨터공학부 (srcho@cau.ac.kr)

논문번호 : 98244-0608, 접수일자 : 1998년 6월 8일

※ 이 논문은 2007년도 교육인적자원부 학술연구조성사업비로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 연구되었음. (KRF-2008-331-D00383)

한 현실이다. 이러한 기술적인 문제점들로는 (1) 확장성 문제, (2) 신뢰성 문제 그리고 (3) 에너지 효율성 증대가 가장 현저한 문제점들이다.

본 논문에서는 다양한 큰 규모의 WSN 어플리케이션과 서비스 모델에서 하나의 노드에서 다수의 노드에게 데이터를 전송하는 경우, 즉 싱크 노드에서 멀티 홉 센서에게 데이터를 전송하는 경우를 한정지어 논하기로 한다. 이러한 데이터 전송 방식은 sink 노드에서의 데이터 흐름에 보다 높은 신뢰성을 필요로 한다⁴⁾. 예를 들면 보안 어플리케이션의 경우 어느 중요한 목표 센서의 유무와 어느 곳에 센서가 존재하는지 인식하는 것은 매우 높은 신뢰성을 요구한다. 이러한 본질적으로 매우 중요한 어플리케이션은 모든 작업이 sink 노드로부터 각각의 센서 노드에게 신뢰성 있게 전달되었는지를 파악할 필요성이 있다.

본 논문에서는 WSN에서 신뢰적 브로드 캐스팅 기법을 위해 Timer-based Reliable Broadcast(TRB) 방식을 제안하고 특정 한 노드에서 다수의 노드에서 데이터를 전달하는 경우 MAC/PHY 계층에서의 채널 에러와 충돌로 인한 통신제한을 극복하는 것을 목표로 한다. TRB 방식은 100%의 신뢰성을 보장하며 필요 없는 에러제어 메시지를 제거함으로써 에너지 절감 효과도 함께 가져온다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 관련 연구동향을 기술하고 III장에서는 TRB 방식의 설계 가이드라인과 기능들에 대해 설명, IV장에서는 TRB 프로토콜에 대해 상세하게 기술한다. V장에서는 성능 평가를 보이고, VI장에서 결론을 도출한다.

II. 관련 연구 및 동향

무선 Ad Hoc 네트워크(MANETs)에서는 수개의 에너지 효율성을 위한 브로드캐스팅 Scheme들이 제안되었다⁵⁻⁷⁾. Williams 과 Camp 는 확률과 지역에 기반을 둔 방법, 그리고 이웃노드들의 지식에 기반을 둔 방법 등으로 구분지어 접근하였다⁸⁾. 그러나 이러한 방법들은 브로드캐스팅에서 에너지 효율성은 향상 시키나 엄격하게 100%의 신뢰성을 확보하지는 못한다.

최근에는 센서 네트워크를 위한 전송 계층과 링크 계층 사이에서 사용 가능한 방법들이 제안되었다. PSFQ 전송 계층 메커니즘⁴⁾은 수신 단으로부터의 Negative Acknowledgment (NAK)에 기반을 두어 재수행 및 재 프로그래밍을 거쳐 신뢰성을 확

보하는 방법이다. ESRT 프로토콜¹⁸⁾은 무선 센서 네트워크에서 이벤트에서 싱크까지 중간 캐쉬 과정이 없는 신뢰적 이벤트 감지 기법을 통해 최소한의 에너지 소비를 추구하는 방법이다.

또 다른 NAK에 기반을 둔 방식은 GARUDA¹⁹⁾ 기법인데, 이 기법은 싱크에서 센서노드들까지의 신뢰성을 보장하기 위해 제안된 방법이다. GARUDA는 효율적인 펄스에 기반을 둔 방법으로, 급박한 짧은 신뢰성 메시지를 마치 NAK과 유사한 특별한 펄스를 이용하여 전송이 필요함을 알려준다. 이러한 펄스는 어느 한 노드라도 브로드캐스팅 프레임을 송신기로부터 수신하지 못하는 경우 NAK 와 유사한 역할을 하게 된다.

지금까지 언급된 기술들은 모두 전송 계층 프로토콜이다. 이러한 프로토콜에서 가장 큰 문제점은 말단 노드에서 말단까지 에러를 복구하는 과정에서 멀티홉 센서 노드들에서는 링크 계층 에러가 지속적으로 증가하게 된다는 문제점이 존재한다. 복구 메커니즘은 기본적으로 말단과 말단 노드 사이에 신뢰성을 위해 보다 많은 중요한 에너지 자원을 낭비하게 된다. 따라서 데이터 오류가 전송 경로를 따라 전파되는 것을 방지하기 위하여 링크 계층에서의 신뢰성을 보장하는 것 필요하다¹⁰⁻¹¹⁾. 순방향 에러 수정코드 (FEC : Forward Error Correction) 방식 역시 큰 규모의 신뢰적 멀티캐스트 네트워크에서 발생하는 피드백의 방해 요인들을 고려해 볼 때 상당히 매력적이었다¹¹⁾. 그러나 FEC는 센서 네트워크에서의 하드웨어 비용과 복잡도를 증가시킨다는 점을 고려해야 한다. BMW¹⁰⁾ 방식은 Ad Hoc 네트워크에서의 브로드캐스팅 서비스를 위해 제안되었다. 이 방법은 Positive Acknowledgment (ACK)에 기반하고 있는 방법이다. 송신 노드로부터 데이터를 수신할 때 각 수신 노드들은 ACK을 동시에 전송하기 때문에 무선 채널에서는 노드간의 경쟁이 야기된다. 이로 인해 심각한 재전송 및 에너지 소모를 야기한다.

이와 반대로, NAK방식은 손실률이 적은 경우, 효율적으로 데이터 손실의 존재를 알려주는 메커니즘으로서 특히 그룹 통신에 있어 효과적인 방식이다. 그러나 NAK역시 네트워크의 특정 노드에서 모든 프레임이 손실된 경우까지는 처리 할 수는 없다. 특정 노드가 데이터 프레임을 수신 하였는지조차 모르는 경우, NAK를 이용하여 데이터 손실을 보고하여 재전송을 요청하는 것이 불가능하기 때문이다. 쿼리와 같은 몇 개의 작은 메시지 타입들을 전송할

때 노드가 모든 프레임을 수신 하지 않을 확률은 무시할 수 없다. 따라서 ACK과 NAK을 기반으로 하는 신뢰적 브로드캐스팅 서비스는 IEEE 802.11, IEEE 802.15과 같은 IEEE 802 표준화단체에서 채택되지 않고 있는 실정이다.

III. TRB 프로토콜 디자인

본장에서는 제안된 TRB 프로토콜의 디자인 이슈와 TRB 프로토콜을 구성하는 요소들에 대해 기술한다. TRB 프로토콜의 기본적인 디자인 아이디어는 랜덤화된 ACK 전송 시간과 Bitmap 에 기반한 목시적 ACK 방식이다. 일반적으로 WSN에서는 적은 양의 응용 트래픽이 생성되기 때문에, 프레임의 손실은 트래픽의 혼잡 문제 보다는 전송 에러와 충돌 문제가 큰 원인이 된다. 따라서 본 논문에서는 전송 계층에서의 어떠한 흐름 제어 메커니즘도 논의 밖으로 한다.

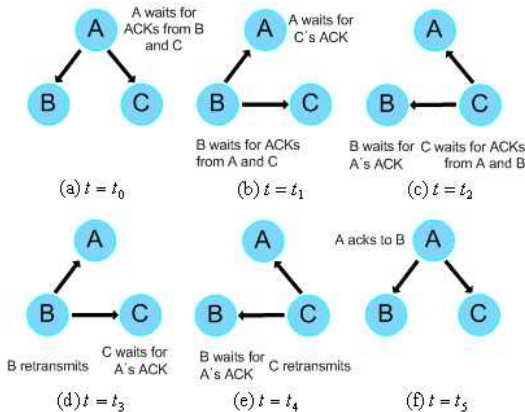


그림 1. 브로드캐스팅에서의 목시적 ACK의 부정적 영향

무선 센서 네트워크는 밀집되어 구성된다는 가정 하에서 100%의 신뢰성 보장 혹은 완전한 신뢰성이 필요 없다고 주장되어왔다. 그러나 노드의 이동성과 에너지의 한계로 인하여 네트워크가 동적으로 구성되는 경우, 항상 모든 노드가 다수의 이웃한 노드에 연결 되었다고 보장할 수는 없다. 부모 노드가 단 하나의 자식 노드를 가지고 있고 단 하나의 자식 노드는 수많은 자식 노드를 가지고 있다고 가정해 보자. 만일 자식 노드가 부모 노드에게 데이터를 전달받을 수 없는 경우, 모든 자식 노드는 브로드캐스팅 데이터를 전달 받지 못하게 된다. 만약 브로드캐스팅 데이터가 매우 중요한 프레임이라면, 브

로드캐스팅의 실패는 커다란 문제를 야기 할 수 있다. 따라서 TRB 방법을 이용하여 이 문제점을 해결 하는 방법에 대해 논해 보도록 하자. 물론 노드의 전원이 꺼지거나 무선의 범위 밖으로 벗어나 신뢰성을 보장할 수 없는 노드들에 대해서는 논외로 한다.

1. Bitmap을 사용한 목시적 ACK

그림 1과 같은 세 개의 센서노드 A, B, C가 있고 목시적 ACK를 사용하여 프레임을 브로드캐스팅한다고 가정하자. 또한, 노드간의 링크는 신뢰적이고 각각의 노드들은 자신의 이웃 노드들 (혹은 이웃 노드들의 목록)을 관리한다고 가정한다. $t=t_0$ 일 때, A가 데이터 프레임을 브로드캐스팅하고 B와 C로부터의 ACK을 기다리고 있다고 하자. $t=t_1$ 일 때, B는 수신한 데이터 프레임을 A와 C에게 브로드캐스팅 (전달)하게 되며 이때 A는 B가 데이터를 성공적으로 수신함을 알게 되어 이 데이터 프레임을 목시적 ACK으로 인식한다. 또한 A가 C로부터의 ACK를 기다리며 B는 A와 C로부터의 ACK를 기다리게 된다. $t=t_2$ 일 때, C는 수신한 데이터 프레임을 A와 B에게 전달하게 된다. 이때 A는 모든 노드로부터 ACK이 도달되었음을 알게 된다. 아직 B의 경우 A의 ACK를 기다리는 상태이며 C의 경우 A와 B로부터의 ACK를 기다리는 상태이다. $t=t_3$ 일 때, B는 자신의 타이머가 만료되어 프레임을 재전송하게 되며, C는 A로부터의 ACK만 기다리는 상황이 된다. $t=t_4$ 일 때, C는 재전송 타이머가 만료되어 프레임을 재전송 하게 되고 B는 A의 ACK을 기다린다. $t=t_5$ 일 때 B의 재전송이 ($t=t_3$ 일 때) A의 프레임 재전송을 자극하게 된다. 결과적으로 모든 노드는 프레임을 수신하게 된다. 위의 예제와 같이 목시적 ACK은 심지어 링크에 에러가 없는 가정할 때에도 불필요한 전송과 재전송의 긴 전송 사슬이 이루어지는 것을 볼 수 있다. 이러한 상황은 링크의 에러가 존재하는 경우에 더욱 심각하게 발생할 수 있다. 이러한 목시적 ACK 브로드캐스팅에서 나타나는 문제점을 해결하기 위해 각 센서 노드들은 비트맵 (bitmap)에 다음과 같은 정보를 저장한다.

- 이웃한 노드들의 주소
- 이웃한 노드들이 브로드캐스팅 프레임을 수신하였는지 표시 하는 플래그

각 노드는 1홉 거리의 이웃 노드목록으로 비트맵을 구성/관리한다. 비트맵은 1홉 이웃 노드의 수와

동일한 크기 (동일한 수의 bit)를 가지고 있으며 모두 초기 값은 0으로 세팅한다. 비트맵은 기본적으로 i 번째 비트가 i 번째 이웃 노드의 1홉 엔트리를 참조한다. 만약 데이터프레임 (혹은 묵시적 ACK)이 수신되면, 노드는 해당 비트를 1로 세팅한다. 모든 비트가 세팅되면 노드는 비로서 다음 프레임을 송신할 수 있다. 따라서, 비트맵은 각 순차번호 (SN: Sequence Number) 에 따라 관리된다.

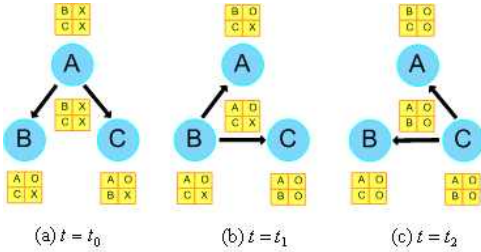


그림 2. 비트맵을 이용한 묵시적 ACK

그림 2는 그림 1과 같은 상황에서 순수한 묵시적 ACK를 사용한 경우에 비트맵을 적용한 경우의 이득을 설명한 것이다. $t=t_0$ 일 때, 노드 A는 자신의 비트맵을 초기화하고 데이터 브로드캐스팅 작업을 초기화 (x는 그에 상응하는 노드가 아직 ACK를 전송하지 않았거나 혹은 데이터를 전송하지 않았음을 의미한다.) 그 후, 노드 A는 그림 2와 같이 데이터 프레임에 A 자신의 비트맵을 포함하여 브로드캐스팅 한다. (a) 프레임을 수신한 후, 노드 B와 노드 C는 데이터 프레임의 전달을 하게 된다. $t=t_1$ 일 때, 노드 B는 자신의 Bitmap을 넣어 수신한 브로드캐스팅 데이터 프레임을 ACK로 보내게 된다. 노드 B의 Bitmap은 B는 A의 데이터 프레임을 이미 수신하였음을 알려주나, 아직 B는 C의 데이터 프레임 수신하지는 못하였음을 알려준다. B의 브로드캐스팅 프레임을 수신한 A는 B의 브로드캐스팅 프레임이 묵시적 ACK와 같은 역할을 하기 때문에, 자신의 Bitmap을 업데이트 하게 되고, B가 정상적으로 데이터 프레임을 수신하였음을 알게 된다. 또한 이때, B의 데이터 프레임을 수신한 노드 C는 자신의 Bitmap을 업데이트 하게 되는데, 노드 C는 자신의 Bitmap에서 노드 A와 노드 B의 비트를 모두 설정하게 된다. 노드 C의 경우 이미 A와 B로부터 브로드캐스팅 프레임을 모두 수신하였기 때문에 C의 Bitmap에 존재하는 노드 A와 B는 모두 정상적으로 데이터를 수신 하였다고 표기된다. $t=t_2$ 일 때, $t=t_0$ 일 때 A가 보낸 프레임에 대한 응답으로서 C

는 수신한 데이터 프레임에 자신의 비트맵을 포함하여 A와 B에게 전달하게 된다. 노드 C의 Bitmap은 노드 C가 노드 A와 B로부터 정상적으로 데이터 프레임을 이미 수신하였음을 알려준다. 노드 C의 브로드캐스팅 프레임을 수신한 A는 자신의 Bitmap을 업데이트 하게 되는데, 이미 모든 노드가 정상적으로 브로드캐스팅 데이터 프레임을 수신하였음을 알게 되고, 노드 A의 Bitmap에 존재하는 노드 B와 C의 관련 비트가 모두 설정된다. 노드 B 역시 C의 브로드캐스팅 데이터 프레임이 수신되고, 자신의 Bitmap을 업데이트하게 된다. 결과적으로 노드 B의 Bitmap 역시 Bitmap에 존재하는 노드 A와 노드 C의 관련 비트가 모두 설정되게 된다. 이 예에서 살펴 볼 수 있듯이, 브로드캐스팅 시에 묵시적인 ACK 기법을 사용하는 경우보다 전송 횟수를 보다 감소시킬 수 있음을 알 수 있다. 만일 토폴로지에서 보다 많은 이웃 노드들을 가지고 있는 경우, 이러한 장점은 보다 좋은 성능을 가져다 줄 수 있다.

2. 랜덤화 된 전송 시간

만약 그림 2와 같이 노드 B와 C가 동시에 응답을 보내는 경우(예를 들면 $t_1=t_2$)에는 충돌이 발생하게 된다. 이와 같은 충돌은 노드 B와 C가 ACK를 보내는 순간에 노드 A가 브로드캐스팅 데이터를 전송하는 경우에도 피할 수 없다. 노드 수가 증가함에 따라 이와 같은 충돌도 급속도로 증가하게 되는데 본 절에서는 이러한 충돌을 피하는 기법을 설명한다.

이와 같은 충돌을 방지하기 위해 TRB 기법에서는 수신 노드에서 랜덤화된 데이터 프레임 전송 시간을 생성하여 이용한다. TRB는 $[0, RBCastRxTimer]$ 의 범위를 갖는 균등분포의 랜덤화된 타이머를 각각의 노드가 데이터 프레임을 전달할 때 이용하게 된다. 데이터 프레임은 전달할 때, 데이터 프레임의 오류나 충돌로 인해 프레임이 손실되는 경우를 위해, 전송 노드는 $RBCastTxTimer$ 를 사용하는데 $RBCastRxTime < RBCastTxTime$ 의 조건을 갖게 된다.

IV. TRB 프레임워크

브로드캐스팅 데이터 프레임을 전송할 때, 노드는 목적지의 논리적 브로드캐스팅 주소, 즉 $BroadcastAddress$ 로 설정하고, 전송 노드의 주소는

브로드캐스팅 프레임 헤더에 들어가게 된다. 이 경우 프레임의 순차번호 (SN: Sequence Number)는 랜덤하게 생성되고, 이후 1씩 증가하게 된다. 전송 노드는 데이터 브로드캐스팅 프레임을 전송하는 즉시 *RBCastTxTimer*를 시작한다.

노드가 브로드캐스팅을 하거나 혹은 브로드캐스팅 프레임을 전달할 때에는 Broadcast Transaction 테이블을 유지 관리하게 된다. 이 테이블은 신뢰적 브로드캐스팅이나 비 신뢰적 브로드캐스팅 작업의 양쪽 모두에서 공유되게 된다. 비 신뢰적 브로드캐스팅의 경우, 프레임의 발신 노드의 주소와 순차번호 (SN: Sequence Number)를 기록하고 브로드캐스팅 데이터 프레임의 중복 수신을 처리하게 된다. 신뢰적 브로드캐스팅을 위해서는 응답 메시지를(동일한 브로드캐스팅 패킷의 중복 수신이나 ACK 로써의 데이터 프레임의 수신) 모든 이웃한 노드들로부터 수신하여야 전송이 성공적으로 이루어졌다고 할 수 있다. 또한 Bitmap 상의 발신 노드의 순차번호 (SN: Sequence Number)와 1-hop 이웃 노드들의 ACK를 관리하고 업데이트 해 주어야 한다. 기본적으로 Bitmap 의 크기(비트의 수)는 각각의 노드에서 이웃 노드 리스트의 노드들 중, 1-hop 이웃 노드들의 수와 동일하며 Bitmap은 초기에 0으로 초기화 된다. Bitmap은 i 비트의 비트가 1-hop 이웃 노드 리스트에서의 i 번째의 노드와 일치하도록 정렬된다.(이웃 노드 엔트리에는 k-hop의 이웃들이 포함되어 있어서 1-hop 노드들의 리스트에서 인덱싱하기 쉽다) 데이터 프레임 혹은 ACK로써의 데이터 프레임이 (브로드캐스팅 프레임과 동일한 순차번호 (SN: Sequence Number)를 갖는) 수신되면, 수신 노드는 관련 비트를 1로 설정한다. 모든 Bitmap 의 비트가 1로 설정 되면, 노드는 다음 브로드캐스팅 프레임을 전송하거나 전달하게 된다.

2. 브로드캐스팅 데이터 프레임의 ACK 및 처리

브로드캐스팅 데이터 프레임을 성공적으로 수신하면 (수신 노드가 기대하고 있는 시퀀스 번호와 일치하는 데이터 프레임) 해당 프레임이 처음 수신한 브로드캐스트 프레임일 때, 수신한 노드는 브로드캐스트 트랜잭션 테이블에 기록한다. 페이로드는 처리를 위해 해당 노드의 상위 레이어로 전달된다. 만약 신뢰적 데이터 전송이 필요한 경우에는, 수신 노드는 송신 노드로부터 데이터 프레임이 성공적으로 수신되는 경우 관련된 비트를 역시 설정한다. 비신뢰적 브로드캐스트의 경우, 중복되는 데이터 프레임은 폐

기한다. 신뢰적 브로드캐스팅의 경우 중복 데이터 프레임의 경우 관련 Bitmap 의 상응하는 비트를 설정하고 해당 프레임을 폐기한다.

수신 노드는 브로드캐스팅 프레임을 전달 해야 하는지 결정을 짓는다. 노드들은 Bitmap 에 하나의 설정되지 않은 값 0이 남아 있는 경우 그들의 1 홉 노드들에게 데이터 프레임을 전달하게 된다. 해당 프레임은 처음 데이터 프레임을 보낸 노드 혹은 송신 노드에게 목시적 ACK 수신한 효과를 가져오게 되고, 따로 ACK 프레임을 전송할 필요가 없게된다. 모든 노드들은 수신한 데이터 프레임을 다른 노드에게 전송할 때 랜덤화된 타이머를 이용하여 충돌 가능성을 줄인다. 타이머는 [0, *RBCastRxTimer*]의 범위 안에서 생성되어진다. 데이터 프레임을 다른 노드에게 전송한 뒤에는, 노드는 *RBCastTxTimer*를 설정한다.

브로드캐스팅 데이터 프레임을 성공적으로 수신하면 (수신 노드가 기대했던 시퀀스 번호와 동일한), 수신 노드는 모든 Bitmap 의 필드를 1로 설정하고 페이로드가 없는 프레임을 랜덤한 시간에 전송한다. (동일한 시퀀스 번호일 경우에만) 랜덤화된 데이터 전송은 충돌 가능성을 훨씬 줄이는 효과를 가져오게 된다.

3. 브로드캐스팅 데이터 프레임의 전송 및 처리
RBCastTxTimer 가 만료된 후에도 Bitmap 필드에 하나의 0 으로 설정된 항목이 남아 있는 경우, 노드는 데이터 프레임을 다시 브로드캐스팅 하게 되고, *RBCastTxTimer* 동안 응답을 기다린다. 어떠한 노드가 *MaxRBCastTrials* 횟수 만큼 다시 브로드캐스팅을 하게 된다면, 해당 노드는 상위 계층으로 수신하지 못한 노드를 자신이 가지고 있는 이웃 노드 리스트에서 삭제 하도록 보고한다.

V. 성능 평가

TRB 프로토콜의 신뢰성 성능 평가를 위해 IEEE 802.15.4 기반의 ns2 패키지를 이용하여 시뮬레이터를 개발 하였다. 해당 패키지 위에는 IEEE 802.15.5 주소 할당 알고리즘과, 연결 그리고 라우팅 모듈을 추가 하였다. TRB 알고리즘은 양쪽 패키지와 모듈에 추가 되었다. 시뮬레이터는 그림 3에서 보는 것과 같이 랜덤화 된 토폴로지를 생성하였다. 본 논문에서는 센서는 기본적으로 무선 통신의 범위가 10 m 로 고정 되어 있다고 가정 하였으며,

정사각형 형태의 공간에서 랜덤하게 생성하여 노드를 배치 시켰다. 그림 3은 생성된 네트워크 라우팅 트리 예를 보여준다.

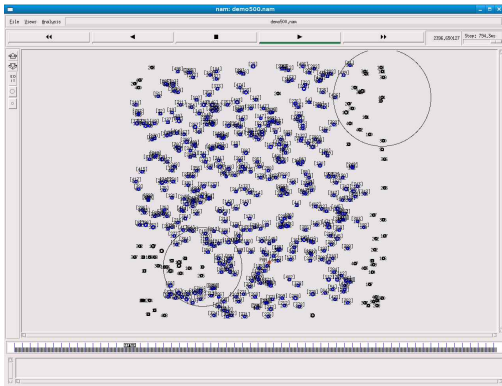


그림 3. TRB 프로토콜을 이용한 랜덤하게 생성한 500개의 노드 ns2 에서의 시뮬레이션 스냅샷

이 트리는 각각의 노드의 메트릭에 근접하게 구성 되어지며, 노드들은 IEEE802.15.5 주소 할당 알고리즘에 기반하여 이웃 노드 리스트를 유지한다. 주소 할당 알고리즘에 따라서 기본적으로 트리의 맨 아래 노드(sink)가 무작위로 시뮬레이터에서 선택 된다. sink 노드에서부터 시작하여, 노드들은 점차 네트워크에 참여하게 되고, 트리가 구성되어진다. 그러나 이 트리는 아직 주소 할당이 이루어지지 않았기 때문에 논리적인 트리는 아니다. 각각의 트리의 가지의 끝단에서 상향식으로 노드의 수를 계산하는 고정 이벤트가 일어난다. 그 뒤 sink 노드는 각각의 가지에 대한 노드 수 정보를 모든 트리의 가지로부터 수신하게 되고, 그 뒤 주소 할당이 일어나게 된다. 주소 할당은 기본적으로 하향식 방법을 이용한다. sink 노드는 각각의 가지 노드에 요청된 주소의 수 많은 일관된 주소 블록을 할당한다. 이 과정은 트리의 맨 끝단에 이를 때까지 반복적으로 수행된다. 주소 할당이 이루어진 후에는 논리적인 트리가 완성되고, 각각의 노드는 이웃 노드 리스트를 해당 가지의 노드 수에 따라 구성한다. 센서의 수를 증가시킬 때, 본 논문에서는 변화하는 시뮬레이션 환경의 면적을 밀도를 유지시키면서 변화 시켰다. 본 시뮬레이션을 위해 기본적으로 밀도는 0.01을 유지하였다. 예를 들면, 100개의 센서의 경우 100m X 100m 의 시뮬레이션 공간에서 랜덤하게 노드를 위치시킨다. 모든 시뮬레이션의 결과는 20개 이상의

랜덤하게 생성된 토폴로지와 95% 의 신뢰 구간을 통해 얻어진 평균 메트릭을 보여준다. 무선 채널 에러는 (충돌이 원인이 아닌) 10% 로 고정하고 시뮬레이션을 하였다. 최대 전송 대역폭은 250kbps (IEEE802.15.4)를 사용하였고, 프레임은 초당 2개를 생성하여 전송 하였다.

성능 비교 분석에 있어서, 우리는 4가지 프로토콜들을 고려한다. (1) 단순 전달, (2) NAK 기반의 방법, (3) ACK 기반의 방법, (4) TRB 기반의 방법이 바로 그것이다. 단순 전달¹⁰⁾은 송신 노드에서 브로드캐스팅을 모든 이웃 노드에게 프레임을 보내면서 시작된다. 각각의 이웃 노드들은 수신한 프레임을 단순히 네트워크에서 전달 가능한 범위까지 이웃한 노드들에게 단 한 번의 전달만을 하게 된다. IETF의 제안에서는 단순 전달은 밀도가 낮고 높은 이동성을 가진 ad hoc 네트워크에서 브로드캐스팅과 멀티캐스팅 용으로 사용하고 있다.

NAK 기반의 방법^{6,11)} 수신 노드들은 오직 NAK 응답만이 가능한 경우이다. 필요 없는 추가적인 기능들은 존재하지 않고 본 논문에서는 오직 NAK 기반의 피드백 메커니즘만을 적용 시켰고 이 방식은 TRB 알고리즘과의 비교 분석을 위한 목적으로 제작 되었다. 단순 전송이 신뢰성을 보장하지 못하는 것처럼 NAK 기반 역시 NAK의 손실이 발생하는 경우 2절에서 설명한 바와 같이 신뢰성을 보장할 수 없다는 문제점이 있다. ACK 기반의 방법¹¹⁾은 수신 노드들은 다음 프레임을 전송하기 전까지 모든 노드들에게 ACK를 기다리고 있기 때문에 보다 높은 신뢰성을 보장할 수 있다. 하지만 이러한 이유로 인해 ACK 기반의 방법은 보다 많은 에너지를 소비하게 된다.

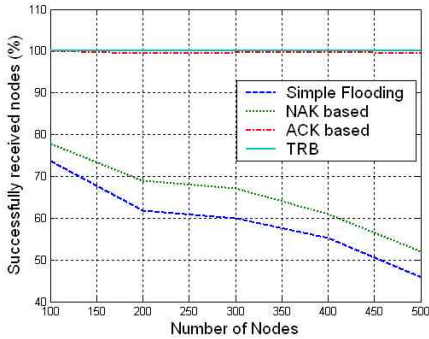
본 논문에서의 시뮬레이션은 다음과 같은 메트릭을 통해 성능을 평가 하였다.

- 성공적으로 수신한 노드 수 (%) : 노드들이 프레임을 성공적으로 수신한 각각의 프레임에 대해 각각의 다른 전송 방법을 적용하여 신뢰성을 관찰한다. 그 후 전체 노드의 수에 대비한 성공적으로 수신한 노드 비율을 계산하여 % 로 환산한다.
- 에너지 소비량 : 노드들의 프레임당 평균 전송 횟수를 구해 그 값을 이용하여 에너지 효율성을 측정한다.

1. 신뢰성

본 절에서는 실험을 통해 4가지 알고리즘 (단순전

달, NAK 기반의 전송, ACK 기반의 전송 그리고 TRB 프로토콜) 의 브로드캐스팅 시 신뢰성을 측정한다. 그림 4에서는 네트워크의 전체 노드에 대비한 성공적으로 데이터를 수신한 노드의 비율을 보여준다. 보는 바와 같이 신뢰성은 NAK 기반의 방법과 단순 전달 방식이 노드 수가 증가함에 따라 점차 낮아지는 것을 관찰 할 수 있다. 보다 많은 센서 노드들이 밀집되어 있는 경우, 무선 채널에서는 보다 많은 경쟁이 일어나게 되고, NAK들과 전송 프레임들의 손실이 보다 많이 일어나게 된다. 게다가 신뢰성은 양쪽 방법 모두 많은 수의 노드가 존재하는 경우 매우 낮다. 노드의 수가 500개 일 경우, 양쪽 방법 모두 50% 정도의 네트워크 신뢰성을 제공하고 있으며, 매우 중요한 메시지를 네트워크에서 전



달하는 경우 바람직하지 못함을 알 수 있다.

그림 4. 성공적으로 수신한 노드의 비율 vs. 노드의 수 (프레임 에러율 = 10%)

단순 전달과 NAK 기반의 방법에 비교해 볼 때, ACK 기반의 방법과 TRB 알고리즘은 보다 높은 신뢰성을 제공할 수 있음을 알 수 있다. TRB 프로토콜은 네트워크에서 100%의 신뢰성을 달성하고 있으며 ACK 기반의 방법 역시 100%에 가까운 신뢰성을 보여주고 있다.

2. 에너지 효율성

서로 다른 각각의 알고리즘에서 어떻게 에너지를 낭비하게 되는지 측정하기 위해, 하나의 프레임을 전송하는데 필요한 평균 전송 횟수 (에너지 소비량)를 그림 5와 같이 측정한다. 에너지 효율성은 ACK 기반의 전송 방법에서는 다른 3가지 전송 방법과는 다르게 에너지의 낭비가 보다 심해, 최대값 없이 지속적인 선형적 증가를 보여준다. 단순 전달은 이웃한 노드들에게 단 한 번의 전송만을 통하여

하나의 프레임을 전송하기 때문에 가장 적은 에너지 소비를 보이고 있다. NAK 기반의 기법은 TRB 기법이 프레임당 3.5 회의 전송이 이루어지는데 비해, 1.5 회 정도의 전송이 이루어짐으로써 적은 에너지를 소비하고 있다. 다음 절에서는 에러 비율에 따른 성능을 분석해 보고 이에 따라 어떠한 프로토콜이 적합한지 살펴보기로 한다.

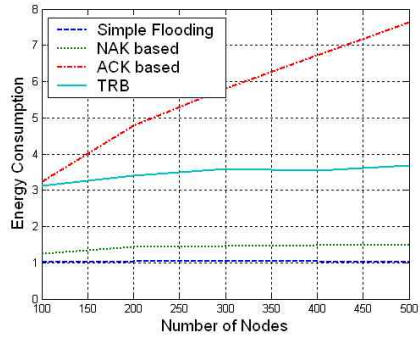


그림 5. 에너지 효율성 vs. 노드의 수 (프레임 에러율 = 10%)

3. 채널 에러 비율의 효과

4가지 기법에 따른 채널 에러 비율에 따른 성능 분석을 위해, 본 논문에서는 에러 비율을 5%에서 50%까지 증가 시키면서 관찰하였다. 그림 6은 프레임 에러 비율에 따른 전체 네트워크의 노드 수 대비 성공적으로 수신한 노드수를 보여주고 있다. 신뢰성 결과를 살펴보면, 프레임의 에러 비율 증가에 따라 TRB 프로토콜 그래프는 다른 세 개의 기법과는 다른 기울기를 보이고 있다. 눈여겨보아야 할 점은 NAK 기반의 신뢰성과 단순 전달 기법은

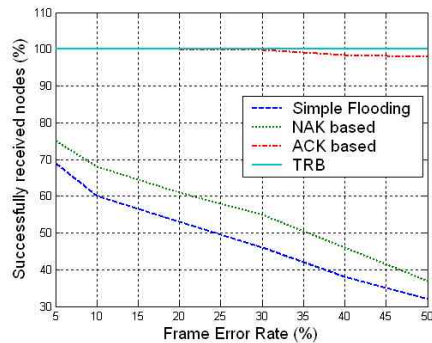


그림 6. 성공적으로 수신한 노드 비율 vs. 프레임 에러 비율 (노드의 수 300)

프레임 에러 비율이 약 50% 정도일 때 30% 정도의 신뢰성을 보이고 있다. 대조적으로, 제안된 TRB

기법은 프레임 에러 비율에 상관없이 100% 신뢰성을 달성하고 있다.

그림 7에서는 각각의 기법에 대한 에너지 효율성을 프레임 에러 비율에 따라 비교하였다. 그림 5와 유사하게 에너지 효율성은 ACK 기반의 방법은 최대 한계 값이 없이 다른 세 개의 기법에 비해 보다 많은 에너지를 소비하고 있음을 볼 수 있다.

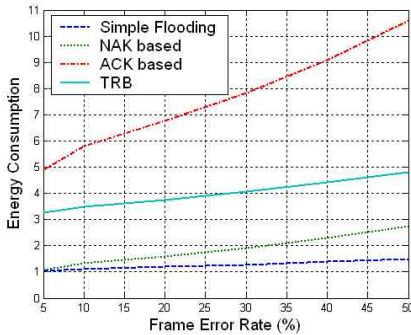


그림 7. 에너지 효율성 vs. 프레임 에러 비율 (노드의 수 300)

4. 성능 비교

본 절에서는 4가지 다른 프로토콜에서의 신뢰성과 에너지 효율성 성능을 비교해 본다. ACK 기반의 프로토콜과 TRB 프로토콜은 NAK 기반의 프로토콜과 단순 전달에 비해 보다 나은 신뢰성을 보여주며, NAK 기반의 프로토콜과 단순 전달 방법은 ACK 기반의 방법과 TRB 방법에 비해 보다 나은 에너지 효율성을 보여준다.

다음과 같은 시나리오에서 우리는 TRB 프로토콜과 같은 신뢰성을 보이기 위해 얼마나 많은 전송 횟수가 필요한지 살펴보아야 한다. 기본적으로 하나의 프레임을 생성하고 모든 노드가 성공적으로 프레임을 수신하는 것을 관찰해 보자. 어떤 노드가 프레임을 성공적으로 수신하지 못하는 경우, 계속해서 하나의 프레임을 생성하여 모든 노드가 성공적으로 프레임을 수신할 수 있도록 계속한다. 그림 8과 그림 9에서는 하나의 프레임을 전송하는데 필요한 전송 횟수를 노드의 수와 프레임 에러 비율에 따라 각각 보여주고 있다.

그림에서 관찰 할 수 있듯이, 제안된 TRB 기법은 최소한의 전송 횟수가 필요하며, 최대한의 에너지 효율성을 달성하고 있음을 알 수 있다. 보다 중요한 것은, TRB 방법은 다른 방법들과 비교해 볼 때 보다 높은 확장성을 달성하고 있다는 점이다.

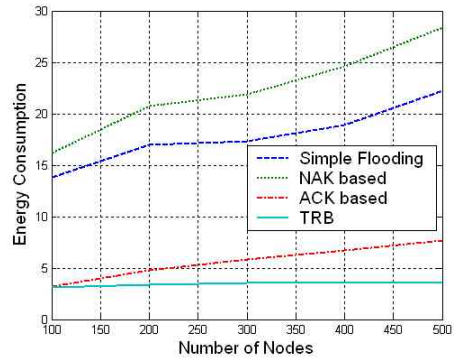


그림 8. 에너지 효율성 vs. 노드의 수 (프레임 에러 비율 = 10%)

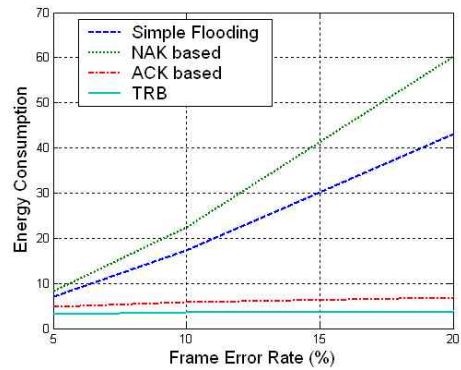


그림 9. 에너지 효율성 vs. 프레임 에러 비율 (노드의 수 300)

VI. 결론

본 논문에서는 무선 센서 네트워크 (WSNs)를 위한 링크 계층의 신뢰적 브로드캐스팅 프로토콜을 제안하였다. 제안된 TRB 기법은 (1) Bitmap 기반의 명시적 ACK를 이용하여 필요 없는 에러 제어 메시지를 효과적으로 줄일 수 있으며 (2) 랜덤화된 타이머를 이용하여 ACK를 전송함으로써 경쟁이 발생할 확률을 충분히 줄일 수 있다. WSNs에서 100%의 신뢰성이 필요한지에 관해는 논쟁이 있지만, 신뢰성을 필요로 하는 메시지(매우 중요한 임무의 메시지, 작업 할당, 소프트웨어 업데이트 등)의 경우 신뢰적으로 모든 센서 필드에 전달할 필요성이 있다. 본 논문에서는 이러한 경우 TRB 기법을 제안하고 있다.

성능 분석 결과 TRB 기법은 100%의 신뢰성을 달성하여 다른 어떤 기법보다 높은 신뢰성을 보장하였으며, 에너지 효율성 역시 서서히 증가하는 양상을 띠고 있다. 따라서 무선 센서 네트워크에서 단순 전달 프로토콜과, TRB 기법을 통합하여 효과적

인 서비스가 가능할 것이다.

참 고 문 헌

[1] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, "A Survey on Sensor Networks," IEEE Communications Magazine, pp. 102 - 114, August 2002.

[2] S. Cho, "Proactive Data Filtering Algorithm for Aggregation in Wireless Sensor Network," IEICE Transactions on Communications, vol. E91-B, no. 3, March 2008.

[3] S. Cho, "Bidirectional Data Aggregation Scheme for Wireless Sensor Networks," Lecture Notes in Computer Science, pp. 595 - 604, September 2006.

[4] C.-Y. Wan, A. T. Campbell, and L. Krishnamurthy, "Pump-Slowly, Fetch-Quickly (PSFQ): A Reliable Transport Protocol for Sensor Networks," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 23, no. 4, pp. 862-872, April 2005.

[5] S.-Y. Ni, Y.-C. Tseng, Y.-S. Chen, and J.-P. Sheu, "The Broadcast Storm Problem in a mobile Ad Hoc Networks," in Proc. Of ACM MOBICOM, pp. 151-162, August 1999.

[6] W. Peng and X. Lu, "Efficient Broadcast in Mobile Ad Hoc Networks Using Connected Dominating Sets," Journal of Software, vol. 12, no. 4, pp. 529-536, December 1999.

[7] B. Williams and T. Camp. "Comparison of Broadcasting Techniques for Mobile Ad Hoc Networks," in Proc. Of ACM MOBIHOC, pp. 194-205, June 2002.

[8] O. B. Akan and I. F. Akyildiz, "Event-to-Sink Reliable Transport in Wireless Sensor Network," IEEE/ACM Transactions on Networking, vol. 13, no. 5, pp. 1003-1016, October 2005.

[9] S.-J. Park, R. Vedantham, R. Sivakumar, and I. F. Akyildiz, "GARUDA: Achieving Effective Reliability for Downstream

Communication in Wireless Sensor Networks," IEEE Transactions on Mobile Computing, vol. 7, no. 2, February 2008.

[10] K. Tang and M. Gerla, "MAC Reliable Broadcast in Ad Hoc Networks," in Proc. Of IEEE MILCOM, pp. 1008-1013, August 2001.

[11] J. Byers, M. Luby, M. Mitzenmacher, and A. Rege, "A Digital Fountain Approach to Reliable Distribution of Bult Data," in Proc. Of ACM SIGCOMM, pp. 56-67, October 1998.

최 원 석 (Won Suk Choi)

학생회원



2007년 2월 : 중앙대학교 컴퓨터 공학부 학사
 2007년 3월~현재 : 중앙대학교 컴퓨터공학부 석사과정
 <관심분야> 무선네트워크, 유비쿼터스 컴퓨팅

조 성 래 (Sung Rae Cho)

종신회원



1992년 2월 : 고려대학교 전자 전산공학과 학사
 1994년 2월 : 고려대학교 전자 공학과 석사
 2002년 12월: 미국 조지아공대 전기및컴퓨터공학과 박사
 1994년 2월~1996년 8월 : 한국

전자통신연구원 연구원

2003년 1월~2003년 7월: 삼성 종합기술원 전문연구원
 2003년 8월~2006년 7월: 미국 조지아서던대학교 컴퓨터학과 조교수
 2006년 9월~현재 : 중앙대학교 컴퓨터공학부 조교수
 <관심분야> 무선네트워크, 유비쿼터스 컴퓨팅