

무선 센서 네트워크를 위한 대규모 장애 적응적 라우팅 프로토콜

이 좌 형^{*} · 선 주 호^{**} · 정 인 범^{***}

요 약

무선센서네트워크는 위험 지역에서의 데이터 수집 용도로 최근 각광받고 있는 기술이다. 하지만 위험한 지역에서는 다수 노드들에서 동시 다발적인 장애발생 위험이 크기 때문에 대규모의 장애를 빠르게 복구시키기 위한 자가 복구 능력을 높여야 한다. 기존의 라우팅 프로토콜들은 하나의 노드에서 발생한 장애는 빠르게 복구하지만 다수의 노드들에서 장애 발생시 이에 효과적으로 대처하지 못한다. 이에 본 논문에서는 대규모 장애 발생시 이를 빠르게 복구하기 위한LSFA(Large Scale Failure Adaptive Routing Protocol)를 제안한다. LSFA는 다수의 노드들에 장애가 발생하여 데이터 전송이 이루어지지 못하는 환경에서 장애를 빠르게 감지하고 라우팅 주기를 적응적으로 조절하여 빠른 시간에 네트워크를 복구한다. LSFA는 패킷손실 정도를 장애발생 판단의 기준으로 사용하며 장애를 감지하면 라우팅 주기를 짧게 하여 장애가 발생한 사실이 네트워크에 빠르게 퍼지도록 한다. 베이스스테이션으로의 경로를 유지하고 있는 노드가 주위에 장애가 발생한 사실을 감지하면 자신의 라우팅 정보를 빠르게 전파시켜 장애 복구가 빠르게 이루어지도록 한다. 실험을 통하여 LSFA가 다른 프로토콜들에 비해 적은 패킷을 사용하면서도 장애를 빠르게 복구함을 보인다.

키워드 : 대규모 장애, 라우팅 주기, 장애감지, 장애복구

Large Scale Failure Adaptive Routing Protocol for Wireless Sensor Networks

Joahyoung Lee^{*} · Juho Seon^{**} · Inbum Jung^{***}

ABSTRACT

Large-scale wireless sensor network are expected to play an increasingly important role for the data collection in harmful area. However, the physical fragility of sensor node makes reliable routing in harmful area a challenging problem. Since several sensor nodes in harmful area could be damaged all at once, the network should have the availability to recover routing from node failures in large area. Many routing protocols take accounts of failure recovery of single node but it is very hard these protocols to recover routing from large scale failures. In this paper, we propose a routing protocol, which we refer to as LSFA, to recover network fast from failures in large area. LSFA detects the failure by counting the packet loss from parent node and in case of failure detection LSFAdecreases the routing interval to notify the failure to the neighbor nodes. Our experimental results indicate clearly that LSFA could recover large area failures fast with less packets than previous protocols.

Keywords : Fault Tolerance, Routing Interval, Failure Detection, Failure Recovery

1. 서 론

라디오 송수신 장비와 센서를 결합한 센서네트워크 기술은 센서노드를 통한 정보 수집을 목적으로 하는 홈 네트워

크, 환경 정보수집, 지능형 빌딩과 같은 다양한 분야에 사용된다. 하지만 센서노드는 열악한 환경에 설치되기 때문에 전원공급 차단 및 파괴등과 같은 다양한 위험에 노출되어 있다. 이러한 경우 일부 지역의 센서노드들에 장애가 발생하더라도 다른 노드로부터의 데이터 수신에는 문제가 없도록 하기 위한 자가 복구 능력과 데이터 신뢰성을 유지하기 위한 기법이 요구된다[1, 2, 3, 4, 8, 11].

센서네트워크에서의 멀티 홉 통신은 사람 대신 넓은 지역의 환경정보를 수집하기 위한 적합한 구조를 제공한다. 예

* 이 논문은 2008년도 정부재원(교육인적자원부 학술연구조성사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 연구되었음(KRF-2008-D00424(100901)).

[†] 준 회 원: 강원대학교 컴퓨터정보통신공학과 박사과정

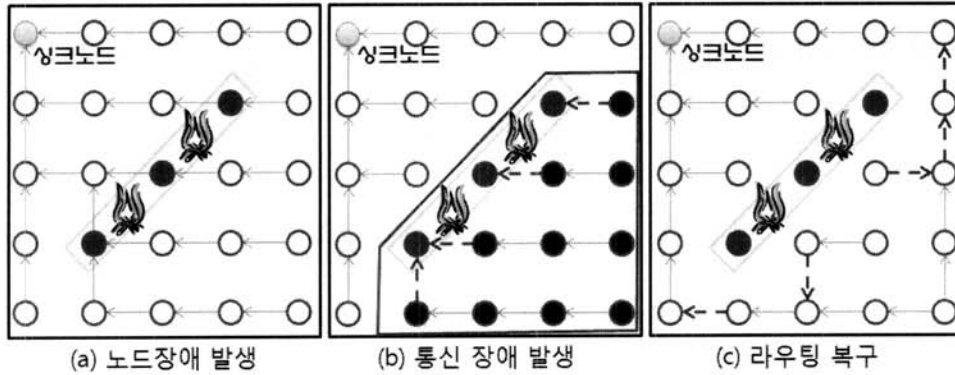
^{**} 준 회 원: 강원대학교 컴퓨터정보통신공학과 학부생

^{***} 종신회원: 강원대학교 컴퓨터정보통신공학전공 교수(교신저자)

논문접수: 2008년 5월 22일

수정일: 1차 2008년 12월 17일

심사완료: 2008년 12월 23일



(그림 1) 노드 장애로 인해 발생하는 문제점

를 들어, 센서네트워크의 멀티 홉을 이용한 산불 화재감시 시스템에서는 화재에 대한 모니터링이 필요한 장소에 센서 노드를 설치하여, 수집한 데이터를 바탕으로 산불의 진행방향과 규모 등을 알 수 있다[3]. 하지만 센서노드는 자연환경에 설치되기 때문에 전원공급 차단 및 파괴에 대한 위험에 항상 노출되어 있다. 이러한 경우 일부 지역의 센서노드에 장애가 발생하더라도 다른 노드로부터의 데이터 수신에는 문제가 없도록 하기 위한 자가 복구 능력과 데이터 신뢰성을 유지하기 위한 기법이 요구된다[4].

멀티 홉 통신은 트리 형태의 네트워크를 구성하기 때문에 부모 노드가 고장이나 전원공급 중단으로 인해 동작을 하지 못하는 경우 신속하게 새로운 경로를 찾지 못하면 자식 노드들이 전송한 모든 데이터를 잃게 된다. (그림 1)의 (a)와 같이 센서노드의 주요 라우팅 경로에 발생한 산불로 인해 센서노드들이 유실될 경우 주변 노드들이 라우팅 경로를 빠르게 회복하여 수집된 필요한 정보를 싱크노드에 전송해야만 한다. 하지만 (b)와 같이 라우팅이 복구되지 못한다면 많은 노드로부터 전송된 데이터가 모두 유실되는 문제가 발생한다. 따라서 (c)에서처럼 새로운 전송경로를 라우팅을 복구하여 데이터가 싱크노드로 전송될 수 있도록 하는 장애를 감지하고 복구하는 기법이 필요하다.

라우팅 경로가 얼마나 빠르게 복구되는냐는 라우팅 메시지가 얼마나 빠르게 전달되는냐에 달려있다. 라우팅 메시지가 빠르게 전달되면 그만큼 복구도 빨라진다. 즉 장애를 빠르게 복구하기 위해서는 노드들 간에 라우팅 메시지를 빠르게 자주 주고받아야 하는 것이다. 매우 제한적인 자원을 가지는 센서노드에서 메시지 전송작업은 매우 많은 에너지를 소모하기 때문에 대부분에 센서네트워크 프로토콜에서 메시지 전송량을 줄이는 것을 최대 목표로 삼고 있다. 이는 빠른 장애 복구를 위해서는 라우팅 메시지 전송주기가 짧아야 한다는 것과 상반된다. 장애를 빠르게 복구하기 위해서는 라우팅 주기가 짧아야 하지만 이는 센서노드의 자원을 매우 많이 고갈시키는 문제가 있기 때문에 전체 네트워크 수명을 단축시키는 문제가 있다. 결론적으로 장애 발생시 에너지 소모를 최소화 하면서 빠르게 장애를 복구하는 기법에 관한 연구가 필요하다.

이러한 문제의 해결을 위해 본 논문에서는 LSFA(Large Scale Failure Adaptive Routing Protocol)기법을 제안한다. LSFA는 이웃 노드들이 전송하는 패킷들을 오버히어링(overhearing)하여 노드들의 상태를 파악하며 일정시간 동안 패킷을 수신하지 못하여 패킷 손실량이 기준치를 초과하는 경우 부모노드에 장애가 발생하였는지를 판단하고 라우팅 테이블 갱신을 위한 라우팅 주기를 동적으로 변화시켜 주변 노드들에 발생한 장애를 빠르게 감지하여, 노드장애로 인해 발생 가능한 데이터 손실을 줄여준다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 관련연구, 3장에서는 본 논문에서 사용된 LSFA에 대해 알아본다. 4장에서는 실험환경과 실험결과를 통한 성능평가를, 5장에서는 결론과 향후연구를 통해 끝을 맺는다.

2. 관련 연구

많은 라우팅 프로토콜들은 장애복구보다는 장애회피에 더 중점을 두고 있다. 라우팅시 에너지를 고려하는 프로토콜들은 패킷 전송을 여러 노드로 분산시켜 장애가 발생하지 않도록 한다. 가장 많은 에너지를 가지고 있는 노드를 부모로 선택하며 에너지가 일정수준 이하이면 부모 대상에서 제외된다. 이러한 프로토콜들에서는 장애가 발생한 상황에서 장애를 복구하는 것이 아니라 장애가 발생하지 않도록 예방차원에서 라우팅을 설정하기 때문에 대규모 장애에 적용하지 못한다[3, 5, 6, 10, 18].

장애를 회피하는 다른 방법으로 여러 경로를 통해 패킷을 전달하는 방식이 있다. 이러한 프로토콜들에서는 두 개 이상의 경로를 설정하고 하나의 패킷을 모든 경로로 중복해서 전송함으로써 경로상의 노드에 장애가 발생하여 일부의 패킷이 손실되더라도 여러 경로를 통해서 패킷이 전달되기 때문에 신뢰성을 높일 수 있다. 하지만 하나의 패킷을 여러 경로로 중복해서 전달하기 때문에 이로 인한 오버헤드가 문제가 된다. 제한적인 에너지 자원을 가지는 센서노드에서 많은 에너지를 소모하는 패킷 전송을 불필요하게 많이 하면 노드들의 에너지가 빠르게 고갈되어 네트워크의 수명이 단축되는 단점이 있다[7, 9, 11, 13].

장애가 발생하였는지 여부를 판별하기 위해서 이웃 노드들이 전송하는 패킷들을 관찰하는 기법이 많이 사용된다. 많은 패킷을 전송하던 노드가 어느 정도 시간 동안에 패킷을 전송하지 않는다면 해당 노드에 무엇인가 문제가 발생하였다고 추측할 수 있다. 센서네트워크에서 링크상태에 기반하여 경로를 설정하는 Minroute에서는 일정 시간 동안에 많은 패킷을 전송할수록 노드의 링크 품질이 높은 것으로 판단하여 링크 품질이 제일 높은 노드로 패킷을 전송한다. 이전에 수신한 패킷에 대한 통계값과 현재의 통계값에 각각 가중치를 두어 링크 품질을 계산하여 링크상의 작은 변화에 지나치게 민감하게 반응하는 것을 방지하였으나 과거 통계값에 대한 가중치로 인해 주위 환경 변화에 빠르게 적응하지 못하여 장애를 감지하고 복구하는데 어느 정도의 시간이 필요로 한다[16, 17, 19].

에너지 소모를 줄여 네트워크의 수명을 연장하는 것을 목적으로 개발된 PROC (Proactive Routing with Coordination)에서는 전송한 패킷에 대한 Ack패킷이 일정기준 이상 수신되지 않으면 부모노드에 장애가 발생한 것으로 간주하여 새로운 부모노드를 찾는다. Ack 패킷으로 부모노드의 상태를 파악하기 때문에 부모 노드의 상태변화에 빠르게 반응할 수 있으나 인접한 다수의 노드들에서 장애가 발생하는 상황을 고려하지 않았기 때문에 대규모 장애 복구에는 시간이 걸리는 단점이 있다[14, 15].

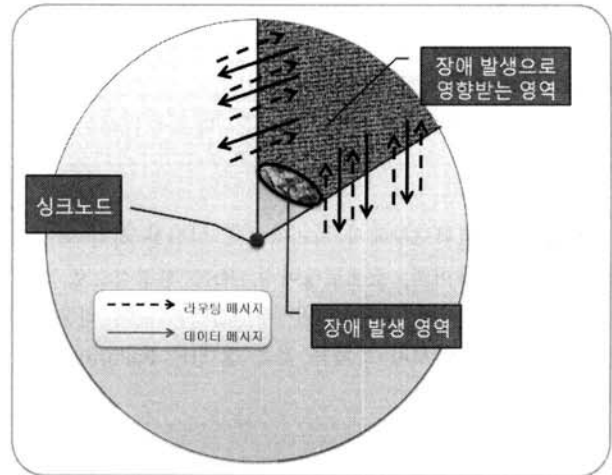
3. LSFA(Large Scale Failure Adaptive Routing Protocol)

본 논문에서는 싱크에서 주기적으로 라우팅 메시지를 전송하고 이를 수신한 노드들이 싱크까지의 홉카운트를 계산하여 라우팅 경로를 설정하는 트리기반의 라우팅을 기본으로 한다.

싱크노드는 홉카운트를 0으로 하여 라우팅 메시지를 전송하며 이를 수신한 싱크노드 주변의 노드들은 싱크노드를 부모노드로 설정하고 자신에 홉카운트를 1로 하여 라우팅 메시지를 전송한다. 홉카운트가 1인 라우팅 메시지를 수신한 노드들은 메시지를 전송한 노드를 부모노드로 설정하고 자신에 홉카운트를 2로 하여 라우팅 메시지를 전송한다. 이것은 모든 노드들이 부모노드를 찾을 때까지 진행된다. 모든 노드들이 부모노드를 찾으면 네트워크는 싱크노드를 root로 갖는 트리를 형성한다. 라우팅 트리에서 윗부분에 있는 노드를 상위노드라 하며 아랫부분에 있는 노드를 하위노드라 한다. 데이터 메시지는 부모노드로 전달되며 부모노드에 장애가 발생하거나 하는 경우 다른 상위노드를 부모노드로 설정한다. 노드들은 라우팅 경로를 유지하기 위해 주기적으로 라우팅 메시지를 전송한다. 노드들은 주기적으로 데이터를 전송하며 슬립 모드(Sleep Mode)로는 전환하지 않는다.

3.1 문제 정의

센서네트워크의 일부 영역에 있는 여러 개의 노드들에 동시에 다발적으로 장애가 발생할 경우 해당 영역 하위에 있는



(그림 2) 장애발생이 영향을 미치는 영역과 복구

노드들의 라우팅 정보가 이를 빠르게 반영하지 못하면 데이터를 전송할 수 없게 된다. (그림 2)는 센서네트워크가 원형으로 이루어져 있을 때 네트워크 중앙에 위치해 있는 싱크노드에 인접해 있는 영역에서 장애가 발생한 경우를 보여준다. 그림에서 보듯이 장애가 발생한 영역이 좁더라도 이로 인해 영향을 받는 영역은 매우 넓은 것을 알 수 있다. 이는 센서네트워크의 특성상 데이터들이 싱크노드가 있는 위치로 방향성을 가지고 전달되기 때문에 싱크노드 주변에 있는 노드들은 하위에 있는 매우 많은 수의 노드들로부터 전송되는 데이터를 싱크로 전달하기 때문이다.

노드에서 장애가 발생하면 해당 노드를 부모노드로 패킷을 전송하던 하위노드들은 새로운 부모를 찾아서 메시지를 전달해야만 한다. 장애가 하나의 노드에서 발생하였다면 해당 노드의 자식노드들만 부모노드를 다시 선택하면 되기 때문에 크게 문제가 되지 않는다. 이는 일반적으로 센서노드들이 매우 밀집해 있고 주위에 많은 수의 이웃노드를 가지고 있다고 간주되기 때문이다. 즉 하나의 노드에 장애가 발생하더라도 주위에 이를 대체할 다른 노드가 여러 개 있는 것이고 메시지 전송에 큰 문제가 발생하지 않는다. 하지만 장애가 동시에 인접해 있는 여러 노드에서 발생한다면 문제가 달라진다. 여러 노드들에 동시에 장애가 발생하면 하위 노드들은 새로운 부모노드를 찾기가 어려워진다. 기존 부모를 대체할 노드가 하나도 없다면 노드는 데이터를 전송할 수 없으며 이는 해당 노드의 하위 노드들에게도 영향을 미친다.

이런 현상은 장애가 발생한 영역이 싱크노드에 가까울수록 그리고 영역이 넓을수록 더 큰 문제가 된다. 장애가 발생하여 기존 부모를 대체할 노드가 하나도 없다면 해당 노드는 데이터를 전송할 수 없으며 이는 해당 노드의 하위 노드들에게도 영향을 미친다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 (그림 2)에서처럼 장애에 영향을 받지 않는 영역에서 장애에 영향을 받는 영역으로 라우팅 메시지가 전달되어 새로운 라우팅 경로가 설정되어야만 한다.

센서노드는 주기적으로 이웃노드 상태 테이블을 참조하여 이웃노드 테이블과 부모 후보 노드 테이블을 관리한다. 일정시간 동안 한 노드로부터 수신한 데이터 패킷이 없고 최대 라우팅 주기 내에 수신한 라우팅 패킷이 없는 경우 해당 노드에 장애가 발생한 것으로 간주하여 이웃노드 테이블에서 제거한다. 만약 해당 노드가 부모 후보 노드 테이블에 포함되어 있는 경우 부모 후보 노드 테이블에서도 제거한다. 부모 후보 노드가 없는 상태의 노드를 고아노드(ON, Orphan Node)라 하고 다음과 같이 정의한다.

[정의 4] 자신의 홉카운트보다 작은 홉카운트를 갖는 노드가 없는 상태의 노드를 부모가 없는 고아노드라 정의한다.

센서노드의 부모 후보 노드 테이블의 크기가 0인 경우 센서노드는 고아노드가 된다. 상위 노드들에 장애가 발생하면 고아노드가 되기 때문에 고아노드가 되느냐 여부로 장애가 발생하였는지 여부를 감지할 수 있다. 장애를 감지하기 위해서는 주위에 고아노드가 있는지 확인하여 부모 후보 노드에서 제외시켜야 한다. 만약 부모노드가 고아노드가 된다면 새로운 부모노드를 선택하여야 한다.

(그림 4)는 LSFA에서 장애를 감지하는 단계를 보여준다. 센서노드는 라우팅 주기마다 또는 주위로부터 라우팅 메시지를 수신하였을 때 테이블들을 업데이트하고 새로운 부모노드를 선출한다. 라우팅 주기가 되면 이웃노드 상태 테이블을 확인하여 패킷을 수신하지 못한 노드(패킷 손실이 기준 이상인 노드)를 제거하고 만약 부모 노드가 제거된 경우 부모 후보 노드 테이블에서 새로운 부모노드를 선택한다. 부모 후보 노드 테이블이 비어서 새로운 부모노드를 선택하지 못하는 경우에는 자신의 홉카운트를 최대로 하여 고아노드로 설정하고 라우팅 주기를 짧게 하여 장애가 발생하였음을

주위로 알린다. 주위로부터 라우팅 메시지를 수신하는 경우 테이블들을 업데이트한다. 만약 라우팅 메시지를 전송한 노드가 고아노드인 경우 라우팅 주기를 빠르게 하여 장애를 전파시키거나 복구를 진행한다.

3.3 장애복구

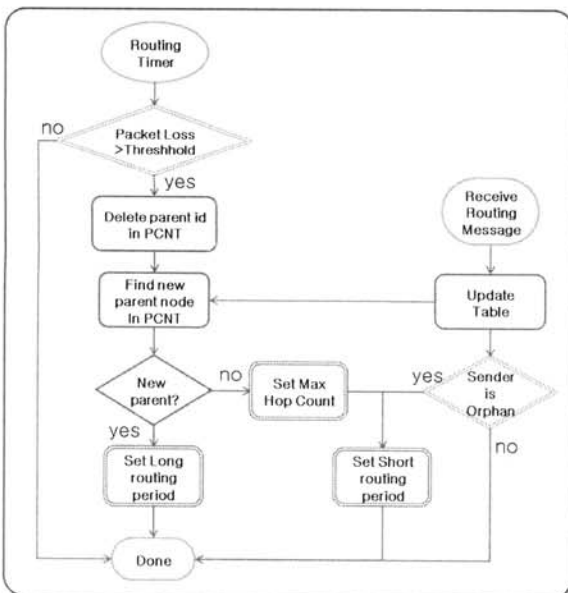
여기서 장애복구는 장애가 발생한 노드를 복구하는 것이 아니라 장애발생으로 문제가 발생한 라우팅 경로를 복구한다는 것이다. 장애는 장애가 발생한 노드들 뿐만 아니라 하위의 모든 노드들에 영향을 미치기 때문에 장애복구도 자신 뿐만 아니라 하위의 모든 노드들에 영향을 미친다. 부모노드가 없는 고아노드는 데이터를 싱크로 전송할 수 없기 때문에 데이터가 손실된다. 라우팅 경로가 복구되어야만이 데이터가 싱크로 전송될 수 있기 때문에 장애를 빠르게 복구하는 것은 매우 중요하다.

고아노드는 라우팅 메시지 전송주기를 조절하여 장애를 복구한다. 센서노드가 고아노드가 되면 자신의 홉카운트를 홉카운트 최대값으로 설정하고 고아 라우팅 메시지(ORM, Orphan Routing Message)를 빠른 간격으로 주위에 전송한다. 고아 라우팅 메시지를 보낸 센서노드가 부모노드인 경우에는 새로운 부모노드를 찾고 부모 후보 노드인 경우 해당 노드를 부모 후보 노드 테이블에서 제거한다. 만약 모든 부모 후보 노드가 제거되면 고아노드가 된다.

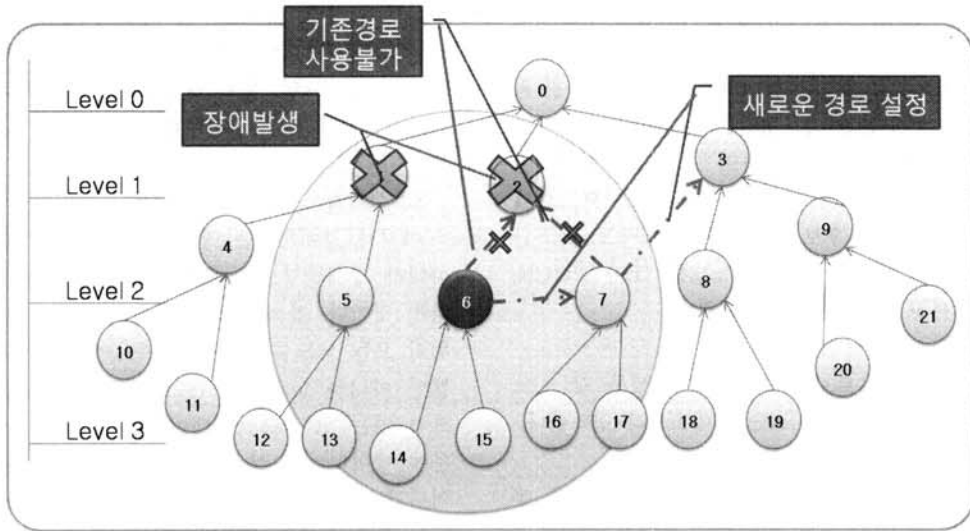
고아 라우팅 메시지를 받은 센서노드들 중에서 일정시간 이상 동안에 부모노드로부터 정상적인 라우팅 메시지를 수신하고 데이터 메시지의 손실율이 기준이하인 노드는 라우팅 복구 메시지(RRM, Routing Recovery Message)를 빠르게 전송하여 고아노드가 경로를 설정할 수 있도록 한다. 라우팅 복구 메시지를 수신한 고아노드는 라우팅 복구 메시지를 전송한 노드를 부모노드로 설정한다. 고아노드로부터 복구된 노드는 주위로 라우팅 복구 메시지를 빠르게 전파하여 주위 노드들이 라우팅을 복구할 수 있도록 한다. 주위로부터 고아 라우팅 메시지를 더 이상 수신하지 못하는 노드는 라우팅 복구 메시지전송을 중단하고 라우팅 메시지 전송주기를 길게 설정하여 네트워크 부하를 줄인다.

3.4 동작예시

(그림 5)는 장애복구 과정 예시를 보여준다. 1, 2번 노드에서 장애가 발생하면 6번 노드는 부모 후보 노드(PCN)가 없어지고 고아노드(ON)가 되어 고아 라우팅 메시지(ORM)을 전송한다. 6번 노드로부터 고아 라우팅 메시지(ORM)을 수신한 7번 노드는 부모노드(PN)인 3번 노드로 데이터 메시지에 대한 Ack메시지와 라우팅 메시지를 수신하기 때문에 라우팅 복구 메시지(RRM)을 6번 노드로 전송한다. 7번 노드로부터 라우팅 복구 메시지(RRM)을 수신한 6번 노드는 7번 노드를 부모노드(PN)로 설정하고 7번 노드로 데이터 메시지를 전송한다. (그림 6)은 (그림 5) 예시의 시퀀스 다이어그램을 보여준다.



(그림 4) 장애감지단계 순서도



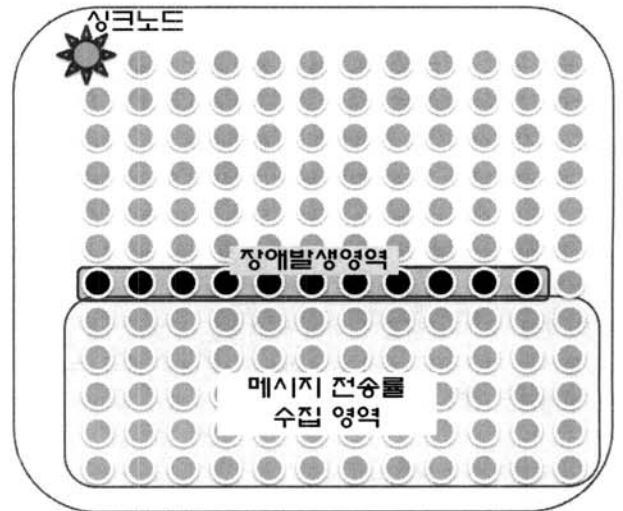
(그림 5) 장애복구 예시

4. 성능 평가

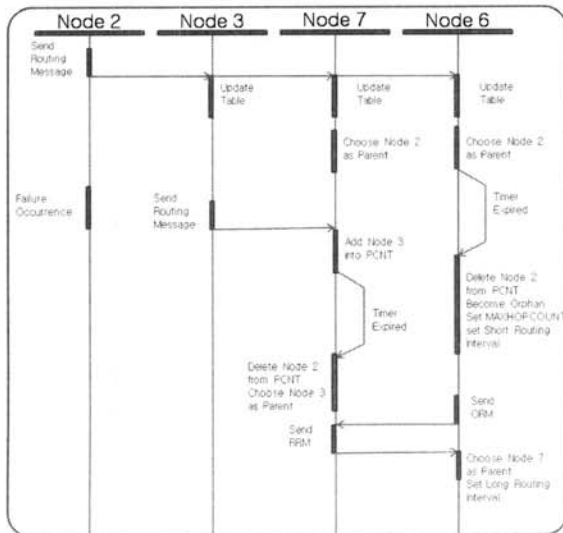
4.1 실험 환경

본 논문에서 제안하는 LSFA 기법의 성능을 평가하기 위하여 센서네트워크를 위한 컴포넌트 방식의 운영체제인 TinyOS와 시뮬레이터인 TOSSIM 을 이용하였다. 실험은 (그림 7)과 같이 144개의 센서노드들이 12 × 12 의 그리드 형태로 배치된 시뮬레이션 환경에서 실시하였다. 각 노드의 통신거리는 가로, 세로 각각 1 hop의 거리로 설정하여 대각선 방향으로로는 전송이 이루어지지 않도록 하였다[12]. 센서 노드들은 1초 간격으로 데이터를 싱크노드로 전송하도록 하였다.

실험에 사용된 센서노드는 Crossbow사에서 개발한 Micaz 모드로 <표 2>의 사양을 갖는 것으로 설정하였다.



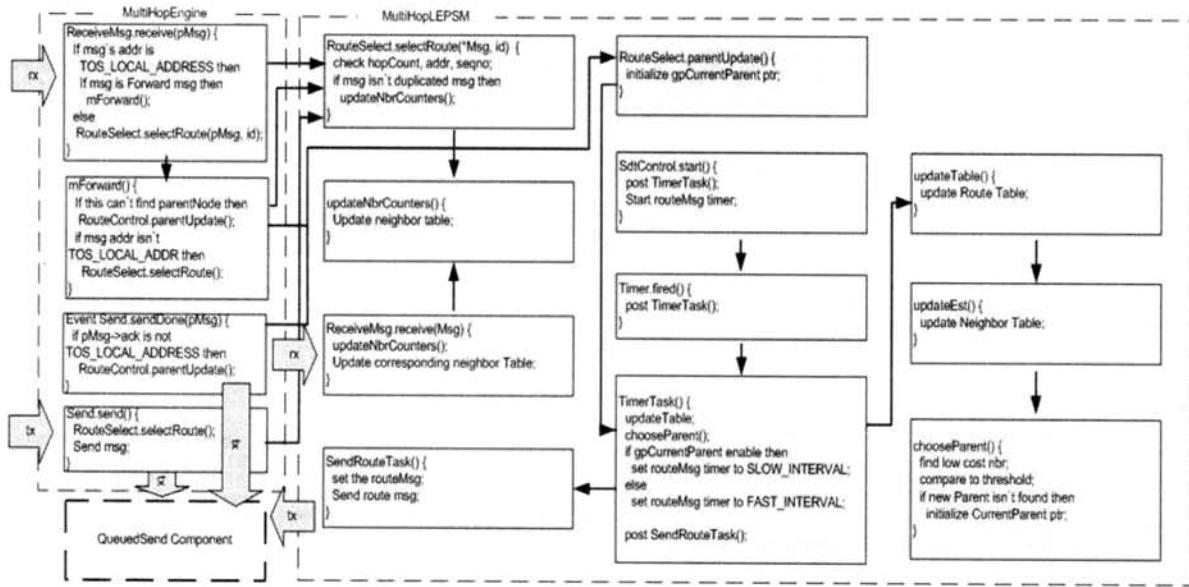
(그림 7) 실험시 노드 배치



(그림 6) 장애복구 시퀀스 다이어그램 예시

<표 2> 실험용 센서노드 사양

MCU	ATMEGA 128L 8MHz
Memory	4K RAM / 128K FLASH
RF Transceiver	Chipcon CC2420 IEEE 802.15.4/ZigBee compliant 2.4GHz Frequency band 250Kbps Transmit data rate -24dBm to 0 dBm RF power 20m to 30m indoor Range



(그림 8) LSFA 구현 예시

Micaz은 센서네트워크용으로 개발된 센서노드로서 8MHz의 저사양의 MCU를 가지며 4KByte의 메모리 공간을 가진다. 무선통신에 사용되는 RF Transceiver로는 Chipcon CC2420 칩을 사용하여 최대 250Kbps의 대역폭을 제공한다.

성능 비교 대상으로는 링크 상태에 따라 부모노드를 선택하는 Mintroute(MINT로 표시)와 Ack패킷 수신여부에 따라 부모노드를 선택하는 Proc(PROC로 표기)를 선택하였다. Mintroute는 이웃노드들의 링크 상태를 평가하며 링크상태가 가장 좋은 노드를 부모노드로 선택한다. 부모노드에 장애가 발생하더라도 과거에 측정된 링크상태 값들이 부모노드 선택에 반영되기 때문에 장애발생에 빠르게 적응하지 못한다. Mintroute에서도 Ack패킷의 수신여부를 확인하지만 부모 선택에 큰 영향을 미치지 않는다. Proc는 Ack패킷을 수신하지 못하면 새로운 부모노드를 선택한다. 하지만 LSFA과 달리 고정적인 라우팅 주기를 사용하며 부모노드의 상태를 검사하지도 않기 때문에 단일 노드의 장애에는 빠르게 적응하지만 대규모 장애에는 사용하기 어려운 단점이 있다.

실험은 600초 동안 실행되었으며 200초에 11개의 노드에 장애가 발생하도록 하였다. 라우팅 패킷을 전송하는 간격에 따라 복구되는 정도가 달라지기 때문에 Mintroute와 Proc에서는 5초 간격과 10초 간격으로 라우팅 패킷을 전송하도록 하였으며 LSFA에서는 최소 5초에서 최대 20초 사이에 패킷을 전송하도록 하였다.

성능평가 요소로는 장애가 영향을 미치는 영역에 있는 노드들이 전송한 패킷이 싱크에서 수신되는 정도, 장애를 복구하기 위해 전송되는 브로드캐스트 패킷에 수의 변화, 전체 브로드캐스트 패킷의 수 그리고 장애복구에 소모되는 에너지를 측정하였다.

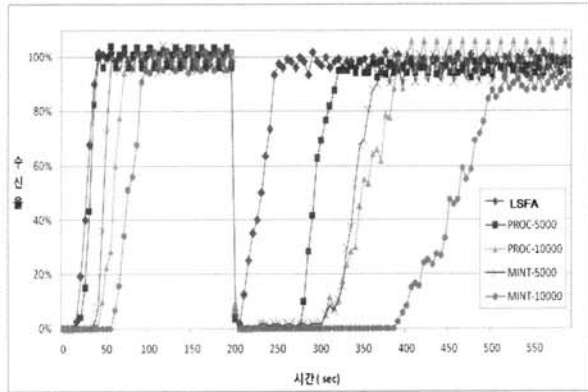
4.2 구현

(그림 8)은 센서네트워크용 운영체제인 TinyOS에 LSFA를 구현한 예시이다. TinyOS는 컴퍼넌트들로 구성되며 컴퍼넌트간의 통신은 Command와 Event로 이루어진다. MultiHopEngine 컴퍼넌트는 자식노드로부터 수신한 패킷을 부모노드로 전달하는 역할을 담당하며 MultiHopLEPSM 컴퍼넌트는 라우팅 상태를 모니터링하고 주기적으로 라우팅 메시지를 전달하는 역할을 담당한다.

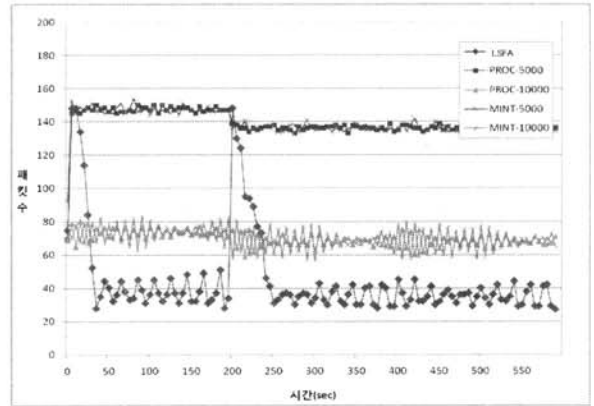
4.3 실험결과

패킷 수신율은 장애에 영향을 받는 영역에 있는 노드들에서 전송된 패킷이 싱크노드에 수신되는 정도를 나타낸다. 장애가 복구되는 정도에 따라 패킷 수신율이 변하기 때문에 수신율의 변화를 보면 장애가 복구되는 속도를 확인할 수 있다. 실험에서는 장애가 영향을 미치는 72개의 하위 노드들의 패킷 수신율을 측정하였다. (그림 9)는 싱크노드에서의 패킷 수신율을 보여준다. 그래프에서 Proc과 Mintroute의 5000과 10000은 라우팅 주기를 나타낸다. 숫자가 클수록 라우팅 주기가 길어진다. 200초에 장애가 발생하기 전에는 수신율이 거의 100%이기 때문에 모든 노드들이 부모노드를 정상적으로 설정하고 있음을 확인할 수 있다. 200초에 장애가 발생하면 장애가 발생한 영역에 인접한 노드들은 부모노드로 패킷을 전달할 수 없기 때문에 패킷 전송율이 0%까지 떨어진다. 여기까지는 세 프로토콜들이 비슷하게 동작하지만 장애를 인식하고 복구하는 방식에 따라 수신율이 다시 100%가 되기까지 걸리는 시간이 달라지는 것을 볼 수 있다.

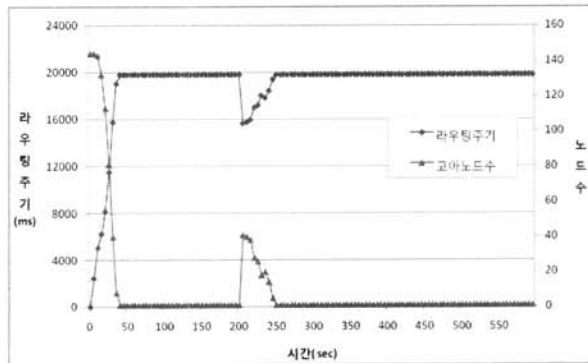
(그림 9)에서 LSFA는 장애가 발생하자마자 패킷 수신율이 0%로 떨어지지만 바로 즉시 패킷 수신율이 회복되어 장애 발생후 50초 정도 시간이 경과하면 제일 먼저 패킷 수신율이 100%로 높아지는 것을 볼 수 있다. LSFA에서는 부



(그림 9) 싱크에서의 메시지 수신율



(그림 11) 라우팅 패킷 수의 변화



(그림 10) 라우팅 주기와 고아노드 수의 변화

모노드에 장애가 발생하면 패킷이 손실되고 장애가 발생한 것이 인식되어 즉시 장애복구에 들어가기 때문에 패킷 수신율이 급격히 증가한다. 이에 비해 다른 프로토콜들은 대규모 장애를 인식하지 못하기 때문에 긴 시간 동안에 전혀 패킷을 수신하지 못하다가 서서히 장애가 복구가 되어 패킷 수신율이 높아진다.

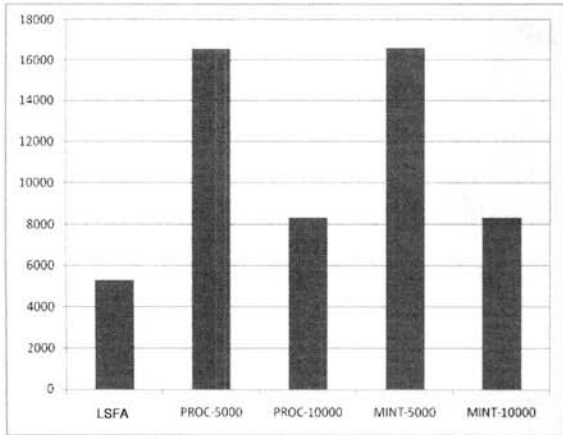
Mintroute의 경우 과거 일정시간 동안의 부모노드에 대한 링크 비용이 서서히 감소하여 어느 정도 시간이 지나야 장애를 인지하고 새로운 부모노드를 선택한다. 따라서 세 프로토콜 중 장애 복구에 제일 오랜 시간이 걸리는 것을 알 수 있다. 이에 비해 Proc는 Ack패킷이 손실되면 바로 새로운 부모노드를 선택하기 때문에 Mintroute에 비해 빠르게 장애를 복구하지만 부모노드가 정상적인 경로를 가지고 있는지 여부를 파악하지 않으며 장애가 발생하더라도 라우팅 주기가 변하지 않기 때문에 LSFA에 비해서는 장애 복구에 많은 시간이 걸린다.

Proc와 Mintroute의 경우 라우팅 주기에 따라 장애 복구에 차이가 있음을 (그림 9)를 통해 알 수 있다. 라우팅 메시지를 빠르게 주고받으면 그만큼 장애의 인식과 복구도 그만큼 빠르게 이루어진다. 하지만 LSFA과 달리 다른 프로토콜들은 고정 라우팅 주기를 사용하기 때문에 라우팅 주기를 빠르게 하면 장애 복구는 빠르게 이루어지지만 브로드캐스트되는 패킷수가 늘어나는 단점이 있다.

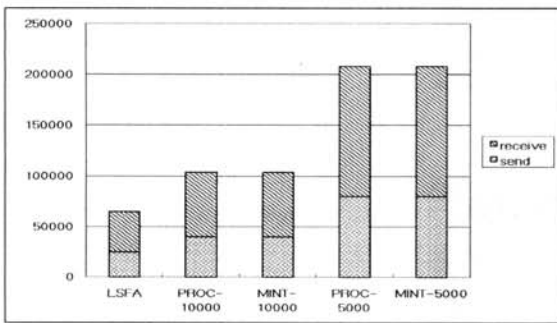
LSFA에서는 부모노드에 장애가 발생하는 경우뿐만 아니라 부모노드가 정상적인 경로를 갖지 못하는 경우에도 새로운 부모노드를 선택하고 부모 노드가 없는 고아노드가 되면 라우팅 주기를 짧게 하여 장애가 발생하였음을 빠르게 알리기 때문에 장애로부터 매우 빠르게 복구된다. LSFA에서 시간에 따른 고아노드의 수와 라우팅 주기의 변화를 측정할 결과인 (그림 10)에서 이를 확인할 수 있다. (그림 10)을 보면 장애가 발생하는 200초 시점에 40여 개의 노드들이 부모노드가 없는 고아노드가 되는 것을 확인할 수 있으며 고아노드가 증가함에 따라 평균적인 라우팅 주기도 감소하였다가 장애가 복구되면서 고아노드도 감소하고 라우팅 주기도 증가하는 것으로 나타나 LSFA가 정상적으로 동작하는 것을 확인할 수 있다.

(그림 11)은 노드들에서 전송되는 라우팅 패킷 수를 보여 준다. Proc와 Mintroute는 고정 라우팅 주기를 사용하기 때문에 장애 발생 여부에 상관없이 라우팅 패킷 수가 시간에 따라 일정한 것을 볼 수 있다. 이에 비해 LSFA는 부모노드로 패킷이 정상적으로 전송되면 라우팅 주기를 길게 설정하였다가 장애가 감지되면 라우팅 주기를 매우 짧게 하기 때문에 장애 발생 여부에 따라 라우팅 메시지 수가 다르게 나타난다. (그림 11)에서 실험 초기에 LSFA의 라우팅 패킷 수가 많아지다가 서서히 감소하는 것을 볼 수 있는데 이는 3장에서 언급된 것처럼 센서노드들이 동작을 시작하는 초기에는 부모노드가 없어 자연스럽게 고아노드가 되어 라우팅 주기가 짧게 설정되기 때문이다. 싱크노드로부터 라우팅 패킷이 전파되어 부모노드를 설정하면 라우팅 주기를 길게 설정하기 때문에 라우팅 패킷이 줄어든다. 200초에 장애가 발생하면 부모노드가 없는 고아노드가 되기 때문에 다시 라우팅 주기가 짧아져서 라우팅 패킷수가 증가하지만 장애가 복구되면 라우팅 패킷수가 서서히 감소하는 것을 볼 수 있다.

LSFA에서는 장애가 발생하였을 때에만 많은 양의 라우팅 패킷을 전송하기 때문에 다른 프로토콜들에 비해 장애 복구에 필요한 라우팅 패킷수가 매우 적은 것을 (그림 12)에서 확인할 수 있다. 고정 라우팅 주기를 사용하는 다른 프로토콜들은 라우팅 주기에 따라 라우팅 패킷수가 크게 차



(그림 12) 전체 라우팅 패킷 수



(그림 13) 장애복구를 위한 에너지소모량 비교

이가 나는 것을 볼 수 있는데 이는 장애복구를 고려하지 않기 때문이다. Mintroute나 Proc는 라우팅 주기가 빠르면 장애를 빠르게 복구하지만 이를 위해 많은 수의 라우팅 패킷이 지속적으로 전송되기 때문에 브로드캐스트 패킷수가 매우 많아지는 단점이 있다.

(그림 13)은 장애발생시 소모되는 에너지 소모량을 나타낸다. LSFA에서는 장애가 발생하였을 때에만 많은 양의 라우팅 패킷을 전송하기 때문에 다른 프로토콜들에 비해 장애복구에 소모되는 에너지가 매우 적은 것을 (그림 13)에서 확인할 수 있다. 고정 라우팅 주기를 사용하는 Mintroute나 Proc는 라우팅 주기가 빠르면 장애를 빠르게 복구하지만 이를 위해 많은 수의 라우팅 패킷이 지속적으로 전송되기 때문에 에너지소모가 매우 많아지는 단점이 있다.

5. 결론 및 향후 연구

센서네트워크가 다양한 분야에서 사용되면서 시스템에 대한 요구사항도 다양해지고 있다. 센서 노드가 사용되는 환경은 지금보다 더욱 나빠질 수 있으며 이를 위해 네트워크의 자가 복구 능력과 데이터의 신뢰성을 높여야 한다.

일반적인 센서네트워크 라우팅 알고리즘은 소량의 노드 손실이 발생한 경우 네트워크 복구에 큰 문제가 생기지 않는다. 하지만 본 논문의 실험환경과 같은 극단적으로 좋지

않은 환경에서는 네트워크 마비로 인해 자칫 큰 문제가 발생할 수 있다. LSFA는 이러한 노드의 장애로부터 데이터 손실을 줄여, 긴급한 상황에 네트워크 문제로 인해 발생할 수 있는 사고를 예방할 수 있다. 향후에는 네트워크의 오버헤드를 줄이고자 적은 라우팅 메시지를 이용하여 자가 복구 능력을 향상시키는 방안을 연구할 예정이다.

참고 문헌

- [1] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci. "A Survey on Sensor Networks." *IEEE Communications*, 40(8):102 - 114, 2002.
- [2] A. Avizienis, J.-C. Laprie, B. Randell, and C. Landwehr. "Basic concepts and taxonomy of dependable and secure computing." *IEEE Trans. Dependable Secur. Comput.*, 1(1):11 - 33, 2004.
- [3] A. Boukerche, X. Cheng, and J. Linus. "Energy-aware data centric routing in microsensor networks." In *Proceedings of the 6th international workshop on Modeling analysis and simulation of wireless and mobile systems*, pp 42 - 49. ACM Press, 2003.
- [4] D. S. J. De Couto, D. Aguayo, J. Bicket, and R. Morris. "A high-throughput path metric for multi-hop wireless routing." In *Proceedings of the 9th ACM International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom '03)*, San Diego, California, Sep., 2003.
- [5] D. Ganesan, R. Govindan, S. Shenker and D. Estrin. "Highly-Resilient, Energy-Efficient Multipath Routing in Wireless Sensor Networks." In *Proceedings of SIGMOBILE Mob. Comput. Commun. Rev.*, 5(4):11 - 25, 2001.
- [6] M. Hollick, I. Martinovic, T. Krop, and I. Rimac. "A Survey on Dependable Routing in Sensor Networks, Ad hoc Networks, and Cellular Networks." In *Proceedings of the 30th IEEE EUROMICRO Conference 2004*, pp.495 - 502, Rennes, France, Sep., 2004.
- [7] C. Intanagonwiwat, R. Govindan, D. Estrin, J. Heidemann, and F. Silva. "Directed diffusion for wireless sensor networking." *ACM/IEEE Transactions on Networking*, 11(1):2 - 16, Feb., 2002.
- [8] K. Sohrabi and J. Gao and V. Ailawadhi and G. Pottie. "Protocols for Self-Organization of a Wireless Sensor Network." *IEEE Personal Communications*, 7(5):16 - 27, 2000.
- [9] C. Karlof, Y. Li, and J. Polastre. "ARRIVE: Algorithm for robust routing in volatile environments." *Technical Report UCB//CSD-03-1233*, University of California, Berkeley, CA, Mar., 2003.
- [10] G. Khanna, S. Bagchi, and Y.-S. Wu. "Fault tolerant energy aware data dissemination protocol in sensor

networks." In IEEE Dependable Systems and Networks Conference, June, 2004.

[11] F. Koushanfar, M. Potkonjak, and A. Sangiovanni-Vincentelli. "Fault tolerance in wireless sensor networks." In Handbook of Sensor Networks: Compact Wireless and Wired Sensing Systems. CRC Press, 2004.

[12] 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." In W. Weber, J. Rabaey, and E. Aarts, editors, Ambient Intelligence. Springer-Verlag, New York, NY, 2004.

[13] B. Lussier, R. Chatila, F. Ingrand, M.-O. Killijian, and D. Powell. "On fault tolerance and robustness in autonomous systems." In 3rd IARP-IEEE/RAS-EURON Joint Workshop on Technical Challenges for Dependable Robots in Human Environments, 2004.

[14] D. F. Macedo, L. H. A. Correia, A. L. dos Santos, A. A. Loureiro, and J. M. Nogueira. "A pro-active routing protocol for continuous data dissemination wireless sensor networks." In 10th IEEE Symposium on Computer and Communications (ISCC), June, 2005.

[15] J. Polastre, J. Hill, and D. Culler. "Versatile low power media access for wireless sensor networks." In Proceedings of the 2nd international conference on Embedded networked sensor systems, pp.95 - 107. ACM Press, 2004.

[16] N. Reijers, G. Halkes, and K. Langendoen. "Link layer measurements in sensor networks." In Proceedings of 1st IEEE Int. Conference on Mobile Ad hoc and Sensor Systems (MASS '04), Oct., 2004.

[17] R. Szewczyk, J. Polastre, A. Mainwaring, and D. Culler. "Lessons from a sensor network expedition." In Proceedings of the First European Workshop on Sensor Networks (EWSN), pp.307 - 322, Jan., 2004.

[18] W. Rabiner, H. Heinzelman, and A. Chandrakasan. "Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks." In Proceedings of the 33rd Hawaii International Conference on System Sciences, 2000.

[19] A. Woo, T. Tong, and D. Culler. "Taming the underlying challenges of reliable multihop routing in sensor networks." In Proceedings of the first international conference on Embedded networked sensor systems, pp 14 - 27. ACM Press, 2003.

[20] P. Levis, N. Lee, M. Welsh, and D. Culler, "TOSSIM: Accurate and scalable simulation of entire TinyOS applications," in Proceedings of SenSys'03, First ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems, 2003.



이좌형

e-mail : jinnie4u@kangwon.ac.kr
 2003년 강원대학교 정보통신공학과(공학사)
 2005년 강원대학교 컴퓨터정보통신공학과
 (공학석사)
 2005년~현재 강원대학교 컴퓨터정보통신
 공학과 박사과정
 관심 분야: 멀티미디어 시스템, 센서 네트워크



선주호

e-mail : jhseon@snslab.kangwon.ac.kr
 2009년 강원대학교 컴퓨터정보통신공학과
 학부생
 관심분야: 센서네트워크, Ad-Hoc, 임베디드
 시스템



정인범

e-mail : ibjung@kangwon.ac.kr
 1985년 고려대학교 전자공학과(학사)
 1985년~1995년 (주) 삼성전자 컴퓨터
 시스템사업부 선임연구원
 1992년~1994년 한국과학기술원
 정보통신공학과(석사)
 1995년~2000년 8월 한국과학기술원
 전산학과(박사)
 2001년~현재 강원대학교 컴퓨터정보통신공학전공 교수
 관심분야: 운영체제, 소프트웨어 공학, 멀티미디어 시스템,
 센서네트워크