

무선 센서 네트워크에서 에너지 효율적인 토폴로지 구성을 위한 Up-Down Tree 라우팅 알고리즘

(An UDT(Up-Down Tree) Routing Algorithm for Energy-Efficient
Topology Construction in Wireless Sensor Networks)

노 태 호 [†] 정 광 수 ^{**}
(Taeho Roh) (Kwangsue Chung)

요약 무선 센서 네트워크는 제한된 배터리를 갖는 노드로 구성되므로 전체 네트워크의 수명을 극대화하면서 에너지 효율적인 라우팅을 수행할 수 있도록 토폴로지(topology)를 구성하는 것이 중요하다. 이와 관련된 기존 연구들은 무선 센서 네트워크의 특정한 통신 패턴을 고려하지 않고 토폴로지를 구성하여 라우팅을 수행한다. 본 논문에서는 동적으로 전송 범위를 차별화시켜 라우팅을 수행하는 UDT(Up-Down Tree) 라우팅 알고리즘을 제안하였다. UDT는 전송 범위에 기반하여 트리(tree) 토폴로지를 구성하며, 무선 센서 네트워크의 특정한 통신 패턴에 맞게 트리 구성 단계와 데이터 수집 단계에 따라 전송 범위를 조절한다. 따라서 UDT는 전체 네트워크의 수명 극대화, 파티션(partition) 방지, 그리고 에너지 효율성을 향상시킬 수 있다. 실험을 통해 제안한 UDT가 최적의 토폴로지를 구성하여 에너지 효율성 측면에서 좋은 성능을 보임을 확인할 수 있었다.

키워드 : 무선 센서 네트워크, 전송 범위, 에너지 효율성, 토폴로지

Abstract Since wireless sensor networks consist of nodes with the constrained battery, it is important to construct the topology performing energy-efficient routing while maximizing the whole network lifetime. Previous works related to this do not take into consideration the specific communication pattern in wireless sensor networks. In this paper, we propose a novel routing algorithm, called Up-Down Tree(UDT), which first constructs the tree topology based on distance and then adjusts the transmission range determined by the two different phases, tree setup and data gathering, to adapt the specific communication pattern in wireless sensor networks. Therefore, the UDT can improve energy efficiency, maximize the network lifetime, and block network partition. Simulation results show that the UDT has the improved energy efficiency by constructing the optimal topology.

Key words : Wireless Sensor Networks, Transmission Range, Energy-Efficiency, Topology

1. 서론

주로 군사 응용으로 시작된 무선 센서 네트워크 연구는 저비용 센서와 통신 네트워크의 개발을 통해 많은 잠재적인 응용 개발에 활용되기 시작했다. 크고 작은 프

로젝트와 연구 활동으로 자연 환경과 동식물의 서식지 모니터링, 건물 구조 모니터링, 공장관리, 홈 네트워킹과 같은 다양한 응용 시나리오들이 개발되어 왔다. 무선 센서 네트워크는 센싱(sensing), 컴퓨팅, 그리고 무선 통신 능력을 갖춘 초소형의 센서 노드로 구성되며, 이러한 세 가지 능력이 하나의 형태로 통합되어, 제한된 파워에 의존하여 서로 유기적으로 움직인다. 또한, 무선 센서 네트워크는 무선 레디오 트랜시버(transceiver)로 멀티-홉 통신을 하는 Ad-hoc 네트워크의 특별한 형태 혹은 독립적인 형태로 분류될 수 있다. 이렇게 분류할 수 있는 한 가지 이유는 서로 다른 통신 패턴을 갖기 때문이

· 이 논문은 2006년 광운대학교 교내연구비 지원에 의해 수행되었으며, 또한 2007년도 정부(과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임(R01-2005-000-10934-0)

[†] 학생회원 : 광운대학교 전자통신공학과
thno@adams.kw.ac.kr

^{**} 종신회원 : 광운대학교 전자통신공학과 교수
kchung@daisy.kw.ac.kr

논문접수 : 2006년 8월 23일
심사완료 : 2007년 7월 2일

다. 즉, 근원지-목적지 쌍으로 이루어지는 Ad-hoc 네트워크의 일대일(one-to-one) 통신과 달리, 무선 센서 네트워크는 다대일(many-to-one) 통신 패턴을 갖는다. 이러한 통신 패턴은 각 센서 노드에서 센싱된 작은 데이터를 게이트웨이 기능을 하는 최종 목적지인 BS(Base Station)로 전송하는 형태이다[1].

이러한 특징들은 네트워킹 프로토콜 스택의 모든 계층에서 독립적 혹은 협력적으로 고려되어야 하며, 특히 네트워크 계층에서 한 노드의 에너지 고갈은 네트워크 파티션을 야기하여 전체 시스템 수명을 저하시키기 때문에 에너지 소모를 줄이는 것이 중요하다. 이러한 이슈를 다루기 위해 넓은 범위의 에너지 효율적인 라우팅 프로토콜 연구[2]와 좁은 범위의 데이터 수집 프로토콜에 관한 연구[10-14]가 활발하게 진행되고 있다. 하지만 이러한 연구들은 무선 센서 네트워크의 특정한 통신 패턴에 대한 고려가 미흡하며, 에너지에 대한 고려 없이 라우팅 프로토콜에 의해서 불명확하게 토폴로지를 구성하기 때문에 에너지 측면에서 비효율적인 문제가 있다. 따라서 노드가 서로 협력하여 전송 파워를 결정하고 어떤 기준 하에서 이웃과 적절한 관계를 형성함으로써, 에너지 소모를 줄이고 네트워크 수명을 연장할 수 있도록 바람직한 토폴로지를 구성하는 것이 필요하다[3].

본 논문에서는 무선 센서 네트워크의 수명을 극대화하면서 에너지 효율적인 라우팅을 위해 거리를 기반으로 에너지 효율적인 토폴로지를 구성하여, 트리 구성 단계와 데이터 수집 단계에 따라 전송 범위를 차별화시켜 라우팅을 수행하는 UDT(Up-Down Tree) 라우팅 알고리즘을 제안하였다. 각 단계에서 사용될 전송 범위는 초기에 트리 토폴로지를 구성할 때 결정되며, 이를 기반으로 전송 파워를 동적으로 조절한다. 제안하는 UDT를 통해 네트워크 수명을 극대화했을 뿐만 아니라, 라우팅 방식의 에너지 효율성도 확인할 수 있었다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 연구의 범위를 좀 더 명확하게 하기 위해서 관련 연구를 기술하였다. 3장에서는 기존의 연구 방식에 대한 문제점을 분석하였고, 4장은 제안된 UDT를 기술하였다. 5장에서는 UDT로 형성된 토폴로지를 제시하고 에너지 효율성을 평가하였다. 마지막으로 6장에서는 결론 및 향후 과제에 대해 기술하였다.

2. 관련 연구

본 논문의 연구 주제와 관련된 기존 연구로는 Ad-hoc 네트워크에서 연결성을 위해 전송 범위를 고려한 토폴로지 제어와 무선 센서 네트워크에서 수명을 극대화하기 위해 제안된 데이터 수집 프로토콜이 있다. 본 장에서는 기존 연구들을 간략히 정리 분석하고자 한다.

2.1 Ad-hoc 네트워크에서 토폴로지 제어 프로토콜

Ad-hoc 네트워크에서의 토폴로지 제어 프로토콜은 노드의 에너지 소모를 줄이면서 네트워크 연결성을 유지하기 위해 각 노드의 전송 범위를 결정하는데 초점을 맞추고 있다[4]. 그림 1은 대표적인 기존 연구들 전송 범위의 결정 방법에 따라 분류한 것이다. [5,6]에서는 네트워크 연결성을 만족하는 최적의 전송 범위를 결정하여 모든 노드가 이를 기반으로 토폴로지를 제어하는 방식이다. 이러한 접근 방식은 최적의 전송 범위를 결정하는데 중앙 집중적인 성향을 갖기 때문에 분산적이지 못하며, 모든 노드가 전송 범위에 대한 조절 없이 정적인 전송 범위를 사용하기 때문에 에너지 측면에서 비효율적인 문제가 있다.

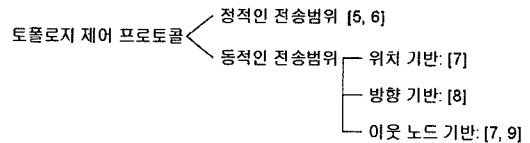


그림 1 토폴로지 제어 프로토콜의 분류

반면, 이러한 문제를 해결하기 위해 각 노드들이 동적인 전송 범위로 토폴로지를 제어하는 프로토콜들이 제안되었다[7-9]. 이러한 프로토콜들은 전송 범위를 결정하는 기준에 따라 위치, 방향, 이웃 노드 수 기반으로 구분된다. [7]에서는 위치 기반으로 토폴로지를 구성하는 중앙 집중적인 알고리즘과 이웃 노드 수를 기반으로 네트워크 연결성을 보장하는 분산적인 알고리즘을 소개하였다. 전자의 경우 정확한 노드의 위치를 알아야 하며, 후자의 경우 이웃 수에 대한 최적 값이 주어지지 않는다면, 네트워크 연결성이 보장되지 않으며, 전송 범위를 조절할 수 없게 된다. 이와 달리, [8]에서는 각 노드가 각도에 따라 가장 가까운 노드를 선택하는 분산적인 방식을 사용한다. 하지만, 각도에 따라 여러 다른 노드를 결정, 유지하기 위한 알고리즘이 복잡하고 방향성 안내가 필요하다는 단점이 있다.

2.2 무선 센서 네트워크에서 데이터 수집 프로토콜

무선 센서 네트워크의 수명을 극대화하기 위한 데이터 수집 프로토콜에 대한 연구는 [10-14]에서 순차적으로 수행되었다. 기존 연구들은 수명 극대화를 위해 노드의 송수신 수를 줄이는 방식과 가장 가까운 이웃 노드를 선택하여 노드 당 전체 에너지 소모를 최소화하는 방식, 그리고 네트워크의 전체 파워 소모에 대한 균형을 고려하는 방식 등을 사용하였다. 이러한 방식들은 무선 센서 네트워크의 수명 극대화를 위해 기본적으로 고려되어야 한다.

그림 2는 기존 연구들을 토폴로지 구조에 따라 분류

한 것이다. 클러스터 기반 프로토콜로는 LEACH(Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy)[10]와 PEGASIS (Power Efficient GATHERing in Sensor Information Systems)[11]가 있으며, LEACH는 네트워크 수명 극대화를 위해 몇 개의 클러스터 헤드만이 최종 BS로 데이터를 전달하는 클러스터링 구조를 도입하고 데이터 압축과 라우팅을 결합하였으며, 클러스터 헤드를 랜덤하게 선출하는 구성 단계와 BS로 데이터를 전달하는 안정 상태 단계로 동작한다. 하지만 LEACH의 구성 단계는 매 라운드마다 불명확한 토폴로지 구성과 랜덤하게 선출되는 클러스터 헤드로 인해 헤드 선출에 따른 큰 오버헤드 문제가 있다. 한편, PEGASIS는 BS로부터 가장 멀리 떨어진 노드부터 차례대로 탐욕 알고리즘을 적용하여 하나의 체인을 구성하며, LEACH의 클러스터 헤드 수를 하나의 리더(leader)로 줄이고 가장 가까운 노드로 데이터를 전송하게 함으로써 LEACH보다 네트워크 수명을 증가시켰다. 하지만 PEGASIS는 토폴로지 구성이 선형적이기 때문에 노드 수가 많아지면 에너지 측면에서 비효율적이다.

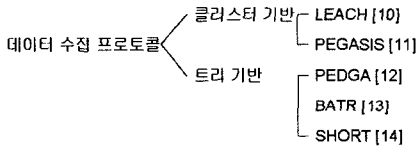


그림 2 데이터 수집 프로토콜의 분류

트리 기반 프로토콜로는 PEDGA(Power Efficient Data Gathering and Aggregation)[12], BATR(Balanced Aggregation Tree Routing)[13]과 SHORT(Short HOP Routing Tree)[14]가 있으며, PEDGA는 BS에서 가장 가까운 노드부터 Prim's 알고리즘을 사용하여 신장(spanning) 트리를 구성함으로써 네트워크의 수명을 증가시키려 한다. 하지만 PEDGA는 클러스터 기반의 PEGASIS[12]와 같이 선형적인 토폴로지 구성으로 인해 에너지 비효율적인 문제가 있다. 한편, BATR는 전체 파워 소모의 균형을 고려한 노드 당 로드 밸런싱(load balancing) 방식을 사용한다. SHORT는 기존의 접근 방식과 달리 에너지 효율성에 지연 혹은 처리율과 같은 메트릭(metric)을 고려하여 네트워크 성능에 대한 균형을 달성하기 위한 알고리즘을 제안하였다. 하지만, 기존 연구들은 에너지 효율적인 토폴로지 구성과 무선 센서 네트워크의 특정한 통신 패턴을 주의 깊게 고려하지 않았다.

3. 무선 전송 범위와 기존 방식의 문제점

본 장에서는 무선 센서 네트워크의 수명을 증가시키

면서 에너지 효율적인 라우팅을 위해 전송 범위를 고려한 이유를 기술하고, 기존 연구의 접근 방식에 대한 문제점을 간략히 분석하고자 한다.

3.1 무선 전송 범위

본 논문에서 에너지 효율성을 극대화하기 위해 전송 범위를 고려한 이유는 다음과 같이 크게 세 가지로 정리할 수 있다. 첫째, 그림 3은 무선 센서 네트워크의 계층 구조와 통신 모델을 간단히 나타낸 것이다. 점선으로 표시된 부분은 [10]에서 소개된 간단한 라디오 모델의 기능을 보여준다. 데이터를 처리하는 송수신 회로(transmit/receive electronic)와 전파를 담당하는 전송 증폭부(Tx amplifier)로 구성된다. 또한, 파워 소모를 가능할 수 있는 에너지 모델링 공식으로 [10]에서 식 (1)을 제안하였다.

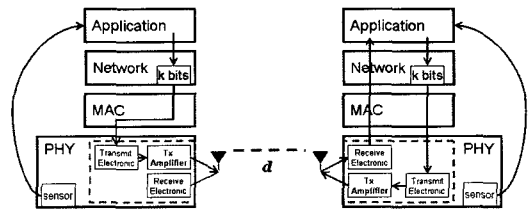


그림 3 무선 센서 네트워크의 계층 구조와 통신 모델

$$Tx\ Amplifier = k \times \epsilon_{amp} \times d^2 \tag{1}$$

식 (1)에서 파워에 영향을 주는 파라미터는 ϵ_{amp} , k , 그리고 d 이다. 여기에서 ϵ_{amp} 는 신호 대 잡음비(Signal to Noise Ratio)가 고려된 증폭도이고, k 는 데이터 크기이며, d 는 거리이다. 무선 센서 네트워크에서 데이터 크기는 상당히 작고 일정하며, 또한 모든 노드의 수용 가능한 신호 대 잡음비가 일정하다고 가정할 때, ϵ_{amp} 는 일정한 값을 갖는다. 따라서 두 파라미터가 일정하기 때문에 한 노드의 파워 소모는 전송 범위로 정의되는 두 노드 사이의 거리, d 에 상당히 의존적이다.

둘째, 한 노드의 전송 범위는 무선상의 링크 수를 결정하기 때문에 서로 다른 네트워크 토폴로지를 형성한다. 그림 4는 노드의 전송 범위에 따라 완전 그래프 구조에서 링 그래프 구조로 토폴로지가 변화됨을 보여준다. 예를 들어, 노드 A에서 D로의 전송에서, 왼쪽 그림의 직접 전송보다 노드 B나 C를 경유하여 라우팅을 하는 것이 효율적인 통신이라고 판단되면, 노드 A는 응답 자신의 전송 범위를 조절할 것이다. 그러므로 각 노드의 전송 범위를 현명하게 조절하여 자신에게 필요한 링크를 유지함으로써, 전체 네트워크 레벨의 파워 소모를 효율적으로 관리할 수 있다.

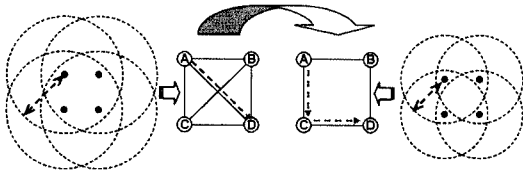


그림 4 전송 범위에 따른 토폴로지 변화

셋째, 그림 5는 전송 범위가 네트워크 이슈에 대한 하나의 상충 관계임을 보여준다. 긴 전송 범위는 홉 수는 감소하지만, 간섭이 증가하여 MAC 레벨 지연을 가속화시키기 때문에 네트워크 용량을 감소시키고, 노드 당 파워 소모 증가로 인해 에너지 측면에서 비효율적이다. 반면, 짧은 전송 범위는 적은 간섭으로 네트워크 처리율을 증가시키고, 노드 당 파워 소모를 줄여 에너지 측면에서 효율적이다. 상대적으로 각 노드가 짧은 전송 범위를 갖는 것이 더 좋은 성능을 보이지만, 노드간 연결성 보장이 없기 때문에 네트워크 파티션이 심각하게 발생한다. 그러므로 노드 레벨에서 네트워크 파티션이 발생하지 않는 최적의 전송 범위를 찾는 것이 중요하다.

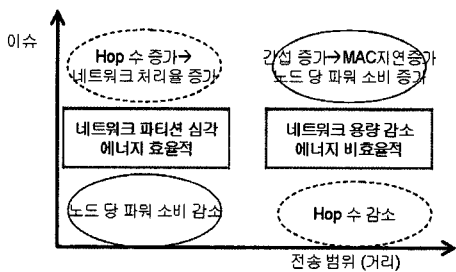


그림 5 상충 관계에 있는 전송 범위

3.2 기존 방식의 분석

대부분의 프로토콜들은 고정된 최대 전송 파워로 토폴로지를 구성하는 것이 일반적이다. 이러한 방식은 토폴로지 구성에 대한 제어와 전송 파워 조절이 없기 때문에 간단하지만, 에너지와 네트워크 구성 측면에서 비효율적이다. 이러한 문제를 해결하기 위한 접근 방식으로 (가) 최적의 전송 범위를 결정하여 모든 노드가 그 결정된 최적의 전송 범위로 토폴로지를 구성하는 방식과 (나) 각 노드가 어떤 기준에 따라 전송 범위를 결정하여 동적으로 토폴로지를 구성하는 방식이 있다. 실험을 통해 이러한 두 가지 방식을 분석하였다.

모든 노드가 위치를 알고 있다고 가정하며, 게이트웨이 역할을 하는 BS(Base Station)는 2차원 평면상의 아래 부분에 위치시키고, 10개의 노드를 랜덤하게 배치하였다. BS와 가까운 노드 5부터 두 가지 알고리즘을 동작시켜 토폴로지 구성과 그에 따른 문제점을 관찰하였다.

그림 6은 (가) 방식을 위해 [6]에서 제안된 알고리즘을 사용하여 얻은 결과이며, 그림 7은 (나) 방식을 위해 Prim's 알고리즘을 사용하여 얻은 결과를 나타낸 것이다. 그림 6에서는 모든 노드가 결정된 최적의 전송 범위인 '7.8102'로 토폴로지를 구성하며 에너지를 소모한다. 최적(Critical)의 전송 범위 방식은 토폴로지 구성이 불명확하며, 전송 범위 조절이 없기 때문에 에너지 측면에서 비효율적이다. 반면, 그림 7에서는 각 노드에서 자신의 전송 범위를 조절하여 에너지를 소모하기 때문에 그림 6과 비교하여 에너지 측면에서 더 효율적이다. 하지만 선형적인 토폴로지 구성과 노드 10과 7간의 긴 링크 전송 범위, '12'로 인해 토폴로지 구성이 최적화되지 않았기 때문에 에너지 측면에서 비효율적이다. 따라서 에너지 효율성을 향상시켜 네트워크 수명을 극대화하기 위해, 각 노드에서 최선으로 선택된 전송 범위로 전송 파워를 조절하고 동시에 최적의 토폴로지를 구성하는 것이 필요하다.

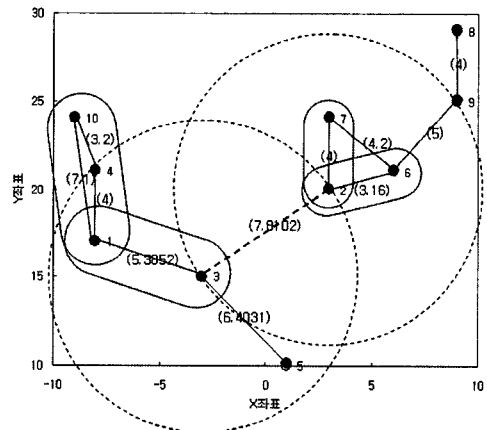


그림 6 Critical 전송 범위

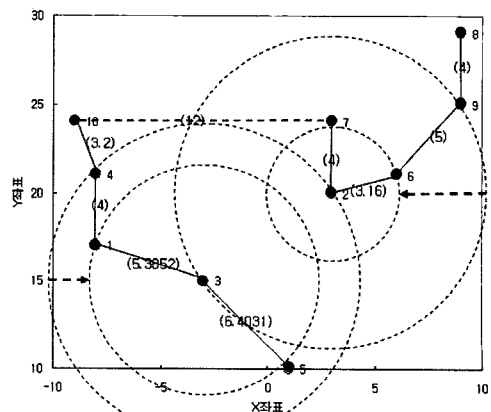


그림 7 MST 기반 전송 범위

4. UDT(Up-Down Tree) 라우팅 알고리즘

4.1 UDT의 개요

본 장에서는 2, 3장에서 지적한 기존 접근 방식의 문제점을 해결하기 위해 새롭게 제안한 UDT 라우팅 알고리즘에 대해 기술한다. 기존 연구들은 무선 센서 네트워크의 특정한 통신 패턴에 대한 고려가 미흡하며, 최대 전송 파워로 에너지에 대한 고려 없이 라우팅 프로토콜에 의해 불명확하게 토폴로지를 구성하기 때문에 에너지 측면에서 비효율적인 문제가 있다. 하지만 UDT는 거리를 기반으로 에너지 효율적인 트리를 구성하며, 통신 패턴에 맞게 트리 구성 단계와 데이터 수집 단계에 따라 전송 범위를 차별화시켜 전송 파워를 조절한다.

제안하는 UDT는 기본적으로 트리 구조를 갖는다. 트리 구성은 최초 BS에서 시작하며, 각 노드는 두 개의 자식 노드를 선택하여 그 중 긴 거리를 트리 구성 단계에 사용될 DTR(Down-link Transmission Range)로 결정하고, 동시에 짧은 거리를 데이터 수집 단계에 사용될 UTR(Up-link Transmission Range)로 결정한다. 전송 범위 결정에 있어서 긴 거리를 DTR로 결정한 이유는 센서 노드의 에너지 고갈 혹은 고장으로 인해 트리를 재구성할 필요가 있거나, 쿼리 기반 응용에서 센서 노드로 질의를 줄 경우, 센서 노드들에게 재구성과 질의를 빠르게 전파할 수 있도록 하기 위함이다. 또한, 짧은 거리를 UTR로 결정한 이유는 센싱 데이터가 최종 목적지인 BS로 전달되는 데이터 수집 단계의 활동이 상대적으로 상당히 많이 일어나기 때문에, 가장 짧은 거리를 UTR로 결정함으로써 에너지 측면에서 효율성을 달성하기 위함이다.

4.2 UTR과 DTR

그림 8은 UTR과 DTR를 도입한 이유를 나타낸 것이다. 최초 BS는 가장 가까운 두 노드를 선택하여 그 중에서 긴 거리($d_{BS \rightarrow a}$)를 자신의 전송 범위로 결정하며, 동일한 방식으로 노드 a와 b도 각각 $d_{a \rightarrow b}$, $d_{b \rightarrow c}$ 로 전송 범위를 결정한다. 하지만 각 노드가 결정된 전송 범위로 데이터 수집을 수행할 경우 문제가 발생한다. 노드 b가 노드 a에게 데이터를 전송할 경우, 노드 a에 적용하여 자신의 전송 범위를 $d_{b \rightarrow c}$ 에서 $d_{b \rightarrow a}$ 로 조절하지 않기 때문에 에너지 측면에서 비효율적인 문제가 있다. 또한, 노드 a가 BS에게 데이터를 전송할 경우, $d_{a \rightarrow b}$ 에서 $d_{a \rightarrow BS}$ 로 전송 범위를 조절하지 않기 때문에 네트워크 파티션 문제가 발생한다. 이러한 두 문제의 근본적인 원인은 데이터 수집을 고려하지 않고 전송 범위를 결정하기 때문이다. 따라서 이러한 문제를 해결하기 위해 트리 구성 단계와 데이터 수집 단계를 정의하여, 각 노드가 트리를 구성할 때 각 단계에서 사용될 DTR과 UTR를 결정할 수 있도록 하였다.

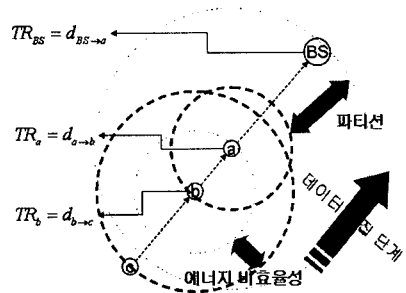


그림 8 UTR과 DTR

그림 9는 트리 구성 단계에 사용될 DTR를 결정하는 방식을 개념적으로 나타낸 것이다. BS는 가까운 두 자식 노드와의 거리 중에서 긴 거리를 자신의 DTR로 결정하며, 또한 노드 a와 b도 동일한 방식으로 DTR를 결정한다. 식 (2)은 이러한 방식을 관계식으로 나타낸 것이며, 이 식에서 노드 j는 자신이 선택한 두 자식 노드 (k, k')와의 거리 중에서 가장 긴 거리를 자신의 DTR로 결정하게 된다.

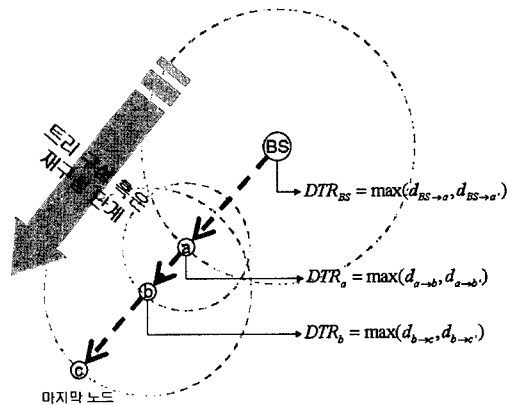


그림 9 DTR(Down-link Transmission Range)

$$DTR_j = \max(d_{j \rightarrow k}, d_{j \rightarrow k'}) \quad (2)$$

그림 10은 데이터 수집 단계에 사용되는 UTR를 개념적으로 나타낸 것이다. UTR은 트리를 구성할 때 DTR과 함께 결정되며, 노드는 자신을 선택한 부모 노드들과의 거리를 독립적으로 비교하여 가장 짧은 거리를 자신의 UTR로 선택하게 된다. 이러한 방식을 간단하게 식 (3)으로 나타낼 수 있다.

$$UTR_j = \min_{n \in N} d_{j \rightarrow n} \quad (n \text{ 노드 } j \text{를 선택한 부모 노드}) \quad (3)$$

식 (3)에서는 노드 j가 자신을 선택한 부모 노드들과 거리를 비교하여 가장 최소의 거리로 UTR를 결정하는 것을 의미한다. 즉, 노드 j는 식 (2)와 (3)을 통해 짧은 UTR과 긴 DTR를 갖게 된다. 따라서 각 노드는 이렇

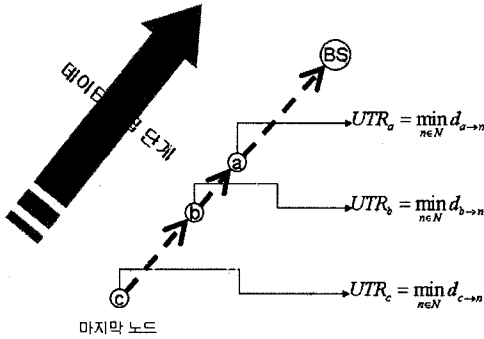


그림 10 UTR(Up-link Transmission Range)

게 결정된 두 전송 범위를 기반으로 센서 네트워크의 통신 패턴에 맞게 단계에 따라 라우팅을 수행하기 때문에 에너지 비효율성과 네트워크 파티션 문제를 동시에 해결할 수 있다.

4.3 UDT 라우팅 알고리즘

본 논문에서 제안하는 UDT는 크게 트리 구성 단계와 데이터 수집 단계로 나뉘며, 최초 BS에서 트리를 구성하기 시작한다. 모든 노드가 거리 정보를 알고 있으며, 링크(link)가 대칭적이고 양방향성이라고 가정한다. 트리 구성 단계에서는 거리를 기반으로 각 노드의 UTR과 DTR를 결정하고, 데이터 수집 단계에서는 그 결정

된 전송 범위를 기반으로 기존의 전송 범위를 조절하여 데이터 수집을 수행한다.

그림 11은 UDT의 트리 구성 단계와 참조 모델을 나타낸 것이다. 각 노드의 전송 범위를 찾기 위해 T_s , N_s , $Temp$ 집합을 정의하였다. T_s 는 각 노드를 트리 구성에 포함시키기 위한 집합이며, N_s 는 노드가 선택한 두 자식 노드 중 가장 짧은 노드를 유지하기 위한 집합이고, $Temp$ 는 긴 노드를 위한 집합이다. $Temp$ 를 고려한 이유는 부모 노드에서 선택한 자식 노드가 그 부모 노드에겐 긴 거리에 위치한 노드였지만 다른 부모 노드에겐 짧은 거리에 위치한 노드가 될 수 있기 때문이다. 즉, UTR를 결정하는데 있어서 최선의 것을 찾기 위함이다. 결국 N_s 와 $Temp$ 에 속해 있던 노드들은 T_s 에 포함되며, 모든 노드가 T_s 에 포함될 때 알고리즘은 종료된다.

그림 11에서 최초 BS가 가장 가까운 노드를 선택함으로써, 자신의 DTR과 선택된 노드의 UTR이 결정된다. 그 이후 BS를 제외한 모든 노드가 T_s 에 포함될 때까지, 각 노드는 거리를 기반으로 각 단계에 사용될 DTR과 UTR를 결정하게 된다. N_s 에 포함되고 UTR이 결정된 PN(Parent Node)은 T_s 에 포함된 노드를 제외하고 두 자식 노드로서 가장 가까운 CN(Child Node)1과 CN2를 선택하여 그 중 긴 거리를 자신의 DTR로 결정하게 된다. 최종적으로 UTR과 DTR이 결정된 PN은 T_s 에 포함되어 트리 구성에서 제외된다.

한편, 짧은 거리에 놓인 노드를 N_s 에 포함시켜 그 노

Assuming all nodes know the location information and the links are symmetric and bi-directional.

I. Tree Setup Phase(Re-setup or Query)

while 모든 노드 T_s 에 포함

if $PN(N_s$ 에 포함되고 UTR이 결정된 노드)

가까운 두 자식 노드(CN1, CN2) 선택

$DTR_{PN} = \max(d_{PN \rightarrow CN1}, d_{PN \rightarrow CN2})$

if $DTR_{PN} == d_{PN \rightarrow CN2}$

$CN1 \in N_s$ and $TR_{CN1} = d_{CN1 \rightarrow PN}$

$CN2 \in Temp$ and $Pre_TR_{CN2} = d_{CN2 \rightarrow PN}$

else

$CN1 \in Temp$ and $Pre_TR_{CN1} = d_{CN1 \rightarrow PN}$

$CN2 \in N_s$ and $TR_{CN2} = d_{CN2 \rightarrow PN}$

if PN 의 DTR_{PN} 과 UTR_{PN} 결정

$PN \in T_s$

if $NN(N_s$ 에 포함된 노드)

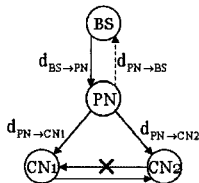
if 이전에 $Temp$ 에 포함된 노드

$UTR_{NN} = \min(TR_{NN}, Pre_TR_{NN})$

else

$UTR_{NN} = TR_{NN}(d_{NN \rightarrow PN})$

if BS
가장 가까운 한 노드 선택(PN)
 $UTR_{PN} = d_{PN \rightarrow BS}$
PN을 N_s 에 포함
 $DTR_{BS} = d_{BS \rightarrow PN}$
BS를 T_s 에 포함



if CN1 included in N_s , CN2 in $Temp$ doesn't decide CN1 as a child node.

그림 11 UDT의 트리 구성 단계

드의 UTR를 결정할 수 있도록 하였고 Temp에 포함된 노드는 가장 최선의 전송 범위를 찾을 수 있도록 현재 PN과의 거리를 Pre_TR 에 저장하여 이후에 비교하도록 하였다. PN이 선택한 CN1과 CN2 중에서 최단 거리에 위치한 노드를 N_s 에 포함시키고 그 노드를 NN(Nearest Node)으로 정의하여, 각 노드에서 최선의 UTR를 결정할 수 있도록 하였다. 즉, NN일 경우 현재 PN과의 거리가 최단이기 때문에 비교 과정 없이 자신의 UTR를 결정하게 된다. 이러한 노드는 N_s 에 포함되고 반드시 UTR이 결정되기 때문에 다음 PN의 조건이 되며, 다른 노드는 이러한 노드를 자식 노드로 선택할 수 없게 된다. 그렇지 않고 현재 N_s 에 포함되는 NN이면서 이전에 Temp에 포함된 노드일 경우, 최선의 UTR를 결정하기 위해 Pre_TR 과 현재 TR을 비교하여 최단 거리로 UTR를 결정하게 된다. 이러한 일련의 과정을 통해 모든 노드가 T_s 에 포함될 때 트리 구성 단계는 종결되며, 그 결과로 BS와 마지막 노드를 제외한 모든 노드는 UTR과 DTR를 갖게 된다.

그림 12는 UDT의 데이터 수집 단계를 나타낸 것이다. 각 노드는 트리 구성 단계에서 결정된 전송 범위를 기반으로 기존의 전송 범위를 조절하여 데이터 수집 단계를 수행한다. 이것은 물리 계층의 전송 파워 조절을 야기하며 이로 인해 에너지 효율성을 향상시키고 전체 네트워크의 수명을 극대화시킬 수 있다. 또한 각 노드가 동적으로 전송 범위를 차별화시켜 네트워크 연결성을 유지하기 때문에 파티션을 방지할 수 있다.

II. Data Gathering Phase

for $n=1:N(n \in T_s)$

UTR_n 을 기반으로 TR_n 조절

UTR_n 을 기반으로 데이터 전송

그림 12 UDT의 데이터 수집 단계

5. 실험 및 성능 평가

5.1 실험 환경

본 장에서는 새로 제안한 UDT의 성능 평가를 위해 Matlab[15]를 사용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 13은 모든 실험에 사용된 20m × 20m의 이동성이 없는 정적인 네트워크를 나타낸 것이다. BS의 위치는 원점 (0,0)에 고정시켜 센서 필드로부터 10m 떨어뜨려 배치하였고, 랜덤하게 배치된 10개의 노드에 노드번호를 할당하였다. 또한 제안한 UDT의 에너지 소모 분석을 위해 [10]에서 제안된 라디오 모델의 라디오 특성과 에너지 소모 방정식을 사용하여 실험을 수행하였다.

5.2 성능 평가

성능 평가는 크게 두 가지 방향으로 수행되었다. 우

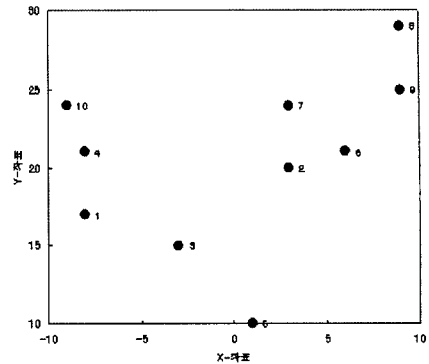


그림 13 20m × 20m 네트워크

선, 제안된 UDT가 에너지 측면에서 상대적으로 효율적인 토폴로지를 구성하여 네트워크 수명을 극대화할 수 있는지에 대한 평가를 수행하였다. 다음으로, 제안된 알고리즘에 의해 형성된 특정 노드에서 최종 BS까지의 경로에 대한 에너지 소모를 분석하여, 데이터 수집 단계의 UTR를 기반으로 에너지 효율적인 데이터 수집 라우팅을 수행하는지에 대한 평가를 수행하였다.

5.2.1 에너지 효율적인 토폴로지 구성과 네트워크 수명

그림 14는 제안된 UDT가 동적으로 토폴로지를 구성하는 것을 나타낸 것이며, 각 노드는 무선 센서 네트워크의 특정한 통신 패턴에 맞게 단계에 따라 차별적인 전송 범위를 갖는 것을 확인할 수 있다. 예를 들어, 노드 7은 트리 구성, 트리 재구성, 쿼리를 위해 DTR를 d_{7-8} (7.8)로 설정하고, 데이터 수집을 위해 UTR를 d_{7-2} (4)로 설정한다. 사실, 데이터 수집 단계는 실제적인 데이터 전달을 수행하기 때문에 트리 구성 단계보다 에너지 측면에서 더 효율적이어야 한다. 따라서 UTR은 상대적으로 훨씬 작게 결정된 것을 확인할 수 있으며, 반면에 DTR은 빠른 트리 구성과 트리 재구성, 빠른 쿼리를 위해 길게 결정되는 것을 확인할 수 있다.

제안된 UDT의 토폴로지 구성에 대한 에너지 효율성을 평가하기 위해 기존 접근 방식 중 MST 기반의 토폴로지와 제안된 알고리즘으로 형성된 토폴로지를 비교하였다. Critical 전송 범위로 토폴로지를 구성하는 방식은 토폴로지 구성이 불명확하기 때문에 비교 대상에서 배제하였다. 이러한 토폴로지 비교는 노드 배치의 랜덤 성향에 맞게 반복 수행되었으며, 그림 15는 MST 기반의 토폴로지 결과를 나타낸 것이다. 그림 15는 기존의 고정된 전송 범위를 결정된 전송 범위로 조절하지만, 전형적인 토폴로지 구성과 노드 7에서 10의 너무 긴 링크로 인해 토폴로지 구성이 에너지 측면에서 비효율적이다. 또한 MST 기반의 토폴로지 구성은 통신 패턴에 대한 고려가 부족함을 알 수 있다. 하지만 제안된 알고리

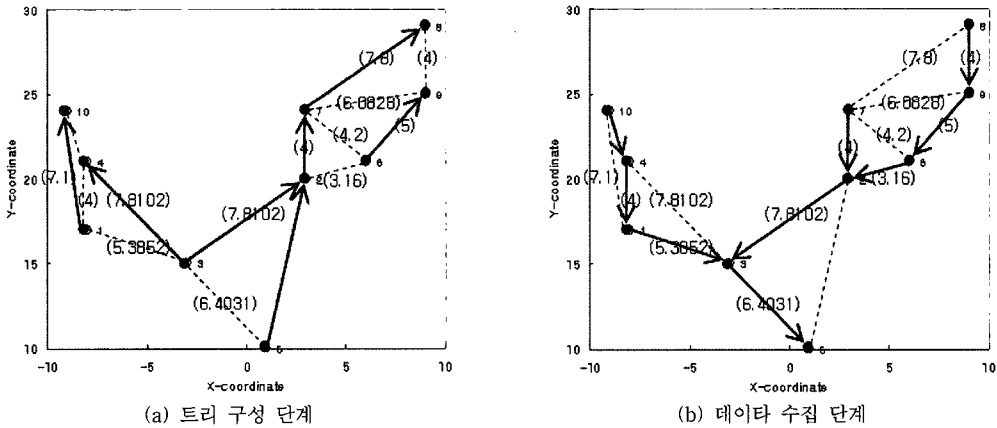


그림 14 UDT의 토폴로지 구성

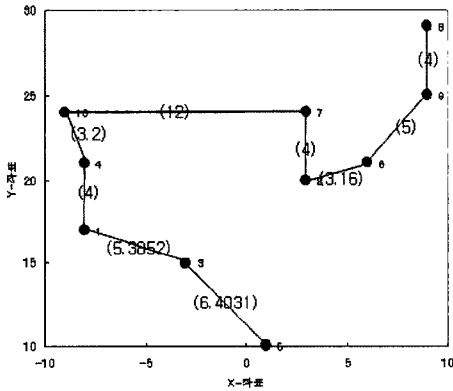


그림 15 MST 기반의 토폴로지 구성

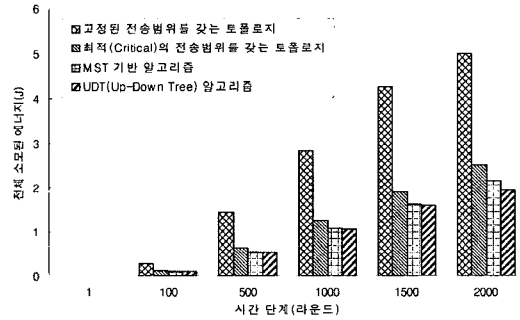


그림 16 전체 네트워크 수명

즘은 트리 구성과 데이터 수집에 따른 효율적인 토폴로지를 구성함을 확인할 수 있다.

네트워크 수명을 평가 위해 라운드 당 전체 네트워크의 소모 에너지를 고려하였다. 여기에서, 라운드란 센서 노드들에서 최종 BS까지 데이터 수집 과정을 말한다. 그림 16은 라운드 당 전체 네트워크 소모 에너지를 나타낸 것이며, 각 노드는 노드 당 0.5J의 동일한 초기 에너지를 갖고며 네트워크의 전체 에너지는 5J이다. 에너지 소모는 각 노드의 트리 구성 단계에 사용된 송수신 에너지와 데이터 수집 단계에 사용된 수신 에너지를 제외하고 데이터 수집 단계의 전송 에너지만을 고려하여 계산되었으며, UDT와 세 가지 항목을 비교하였다. 첫 번째 항목은 20m × 20m의 네트워크 영역을 커버할 수 있도록 모든 노드가 '30.364'의 고정된 전송 범위로 토폴로지를 구성하는 것을 고려한 것이며, 두 번째 항목은 모든 노드가 '11.4018'의 critical 전송 범위[6]로 토폴로지를 구성하는 것을 고려한 것이다. 마지막 비교 항목으로 MST기반의 Prim's 알고리즘을 고려하였다.

그림 15에서, 고정된 전송 범위를 갖는 토폴로지는 전송 범위를 조절하지 않기 때문에 2000 라운드에서 전체 에너지가 완전 소모됨을 확인할 수 있다. 최적의 전송 범위를 갖는 토폴로지는 이전의 방식보다 좋은 성능을 보이지만, 각 노드가 전송 범위를 적용적으로 조절하지 않기 때문에 MST기반이나 UDT보다 네트워크 수명이 짧음을 확인할 수 있다. 반면에 MST기반 알고리즘은 전송 범위를 조절하기 때문에 이전의 두 방식보다 좋은 성능을 보이지만, 제안된 UDT와 비교해 볼 때, 에너지 효율적인 토폴로지를 구성하지 못하기 때문에 네트워크 수명이 짧음을 확인할 수 있다. 이러한 결과로부터 제안된 UDT가 전송범위를 차별적으로 조절할 뿐만 아니라 에너지 효율적인 토폴로지를 구성하기 때문에, 네트워크 수명을 극대화할 수 있음을 확인하였다.

5.2.2 데이터 수집 단계에서의 경로 당 에너지 효율성
본 절에서는 제안된 UDT에 의해 형성된 특정 노드에서 최종 BS까지의 경로에 대한 에너지 소모를 분석하여, 제안된 알고리즘이 데이터 수집 단계의 UTR를 기반으로 에너지 효율적인 데이터 수집 라우팅을 수행하는 것을 확인할 것이다.

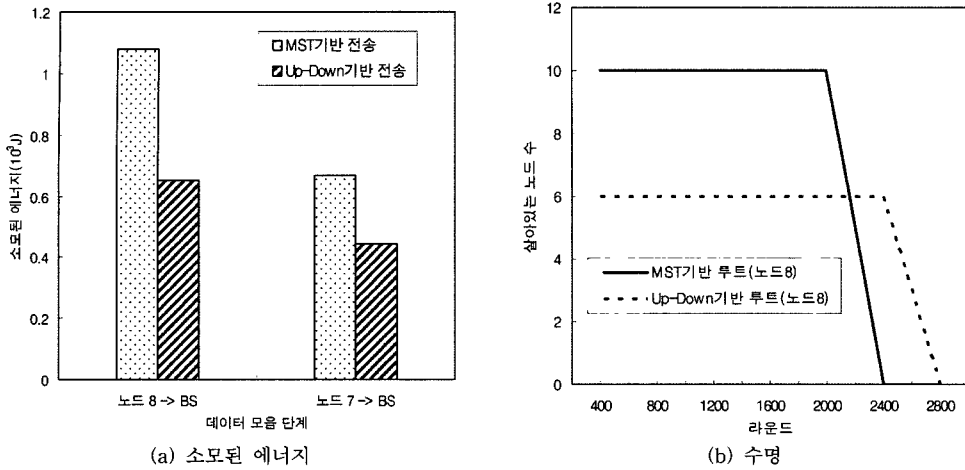


그림 17 경로 당 에너지 효율성

MST기반과 UDT의 경로 당 에너지 효율성을 확인하기 위해 이미 구성된 토폴로지에서 특정한 노드에서 최종 BS까지 형성된 경로상의 에너지 소모와 수명을 비교하였으며, 그림 17은 그 결과를 나타낸 것이다. 이전의 실험과 달리, 수신 노드 수 관점에서 데이터 수집 단계의 수신 에너지를 무시할 수 없기 때문에 각 노드의 송신과 수신 에너지를 모두 고려하였다. 즉, 에너지 소모는 송신만 하는 노드 7과 8 그리고 송신과 수신을 하는 중간 노드들의 에너지를 모두 고려하여 계산되었다. 그림 17의 (a) 결과는 노드 8과 7에서 BS까지 데이터 수집을 한번 수행했을 경우 소모된 에너지를 킬로 단위로 환산하여 나타낸 것이다. 이러한 결과를 통해 제안된 UDT가 MST기반 알고리즘과 비교하여 에너지 효율적인 토폴로지를 구성하기 때문에 경로 당 에너지 효율성이 높음을 확인할 수 있다.

그림 17의 (b)는 최초로 고갈된 노드가 발견될 때까지 데이터 수집 단계를 계속해서 수행했을 경우, 노드 8에서 BS까지의 경로에 대한 수명을 나타낸 것이다. 즉, (b)의 결과는 최초로 고갈된 노드의 시기만을 나타낸다. MST기반 알고리즘으로 형성된 경로는 8-> 9-> 6-> 2-> 7-> 10-> 4-> 1-> 3-> 5-> BS까지 10개의 노드로 구성되며, 2185 라운드에서 5번 노드의 에너지가 최초로 고갈됨을 확인하였다. 반면에 UDT로 형성된 경로는 8-> 9-> 6-> 2-> 3-> 5-> BS까지 6개의 노드로 구성되며, 2475 라운드에서 최초 3번 노드의 에너지가 최초로 고갈됨을 확인하였다. 이러한 결과를 통해 제안한 UDT가 데이터 수집 단계의 UTR를 기반으로 에너지 효율적인 데이터 수집 라우팅을 수행하는 것을 확인할 수 있다.

6. 결론 및 향후 과제

제한된 배터리를 갖는 노드로 구성되는 무선 센서 네트워크에서, 네트워크 계층 프로토콜은 전체 네트워크의 수명을 극대화하면서 에너지 효율적인 라우팅을 수행할 수 있도록 토폴로지를 구성하는 것이 중요하다. 또한, 무선 레디오 통신으로 각 노드의 연결성을 유지하기 때문에 네트워크 파티션에 대한 문제도 고려되어야 한다. 이러한 문제를 해결하기 위한 기존 접근 방식은 무선 센서 네트워크의 특정한 통신 패턴에 대한 고려가 부족하기 때문에 에너지와 네트워크 토폴로지 구성 측면에서 비효율적이다. 따라서 통신 패턴에 맞는 에너지 효율적인 토폴로지 구성을 위해 새로운 접근 방식이 필요하다.

본 논문에서는 동적으로 전송 범위를 차별화시켜 라우팅을 수행하는 UDT를 제안하였다. UDT는 전송 범위에 기반하여 트리 토폴로지를 구성하며, 무선 센서 네트워크의 특정한 통신 패턴에 맞게 트리 구성 단계와 데이터 수집 단계의 전송 범위를 차별화시켜 전송 범위를 조절한다. 그러므로 UDT는 전체 네트워크의 수명 극대화, 파티션 방지, 그리고 에너지 효율성을 향상시킬 수 있으며 이를 실험을 통해 확인하였다.

향후 과제로는 대규모 네트워크 환경에 제안된 알고리즘을 적용하여, 에너지 효율성과 함께 지연을 고려한 연구를 수행 할 것이다. 그리고 네트워크 크기와 밀도 혹은 MAC 레벨의 간섭을 고려한 복합적인 성능 검증 을 수행할 것이다.

참고 문헌

- [1] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramanian, and E. Cayirci, "A Survey on Sensor Networks," *IEEE Communications Magazine*, August 2002.
- [2] Jiageng Li, David Cordes, and Jingyuan Zhang, "Power-Aware Routing Protocols in Ad Hoc Wire-

less Networks," *IEEE Wireless Communications*, December 2005.

- [3] Jennifer Hou, Ning Li, and Ivan Stojmenovic, "Topology Construction and Maintenance in Wireless Sensor Networks, Handbook of Sensor Networks: Algorithms and Architectures," *Wiley*, 2005.
- [4] P. Santi, "Topology Control in Wireless Ad Hoc and Sensor Networks," *ACM Computing Surveys*, June 2005.
- [5] M. Sanchez, P. Manzoni and Zygmunt J.Hass, "Determination of Critical Transmission Range in Ad Hoc Networks," In *Proceedings of Multiaccess, Mobility and Teletraffic for Wireless Communications Conference(MMT)*, October 1999.
- [6] S. Narayanaswamy, Vikas Kawadia, R. S. Sreenivas and P. R. Kumar, "Power Control in Ad-Hoc Networks: Theory, Architecture, Algorithm and Implementation of the COMPOW Protocol," In *Proceedings of European Wireless Conference 2002*.
- [7] R. Ramanathan and Regina Rosales-Hain, "Topology Control of Multihop Wireless Networks using Transmit Power Adjustment," In *Proceedings of IEEE Infocom 2000*.
- [8] R. Wattenhofer, L. Li, P. Bahl, and Y. M. Wang, "Distributed Topology Control for Power Efficient Operation in Multihop Wireless Ad Hoc Networks," In *Proceedings of IEEE Infocom 2001*.
- [9] Vikas Kawadia and P. R. Kumar, "Power Control and Clustering in Ad Hoc Networks," In *Proceedings of IEEE Infocom 2003*.
- [10] W. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, "Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks," In *Proceedings of the Hawaii Conference on System Sciences*, January 2000.
- [11] Stephanie Lindsey and Cauligi S. Raghavendra, "PEGASIS: Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems," In *Proceedings of IEEE Aerospace Conference 2002*.
- [12] Huseyin Ozgur Tan and Ibrahim Korpeoglu, "Power Efficient Data Gathering and Aggregation in Wireless Sensor Networks," *ACM SIGMOD Record 2003*.
- [13] Hyun-sook Kim and Ki-jun Han, "A Power Efficient Routing Protocol Based on Balanced Tree in Wireless Sensor Networks," In *Proceedings of the International Conference on Distributed Frameworks for Multimedia Applications(DFMA) 2005*.
- [14] Y. Yang, H. Wu, and H. H. Chen, "SHORT: Shortest Hop Routing Tree for Wireless Sensor Networks," In *Proceedings of IEEE ICC 2006*.
- [15] The MathWorks Inc. *Matlab version 7.0.1* 2001. <http://www.mathworks.com>



노 태 호

2005년 광운대학교 전자공학부 학사. 2007년 광운대학교 전자통신공학과 석사. 2007년~현재 이노와이어리스 정보통신연구소 T&M S/W개발팀. 관심분야는 센서 네트워크, 임베디드시스템, ad-hoc 네트워크

정 광 수

정보과학회논문지 : 정보통신
제 34 권 제 2 호 참조