

센서네트워크의 에너지 효율성을 고려한 라우팅 알고리즘 설계 및 구현

정회원 정대인*, 채병진**

Design and Implementation of Routing Algorithms for Energy Efficiency in Sensor Networks

Daein Jeong*, Byongjin Chea** *Reguler Member*

요 약

본 논문은 센서네트워크에서의 에너지기반 라우팅 알고리즘에 대한 연구 내용으로서, 특히 에너지 인지에 따르는 여러 가지 간결한 경로 설정방식을 연구하였다. 네트워크 자가 구성과정을 통해 확보된 이웃 노드의 에너지 정보를 기반으로, 단일 홉 라우팅을 결정하는 네 가지 방식을 제안하였다. 다수의 경로 간에 에너지 소비를 고르게 분포시키며 에너지를 효율적으로 활용하는 것이 설계 목표이다. 에너지 상태정보로는, 각 노드의 가용 에너지 양이 기본적으로 활용되었다. 또한, 이웃 노드의 에너지 저하로 인해 관리노드로의 가용 경로정보가 상실된 경우, 간단한 우회 경로 탐색 방안을 제안하였고, 이는 에너지 효율성 개선방안으로 활용될 수 있음을 보였다. 제안된 알고리즘에 대해서 다양한 시뮬레이션을 기반으로 에너지 효율성, 데이터 전송의 신뢰성, 네트워크의 수명, 전송 delay 등 여러 성능 지표에 대한 검증을 수행하였으며, 단순한 구조의 라우팅 방안에 대한 가능성을 확인하였다.

Key Word : sensor network, self-organization, directional flooding, routing, energy-aware

ABSTRACT

In this paper, we propose energy-aware routing schemes which are simple enough to be applicable to the wireless sensor networks. The one hop upstream node in direction of the base-station is determined in four different ways based on the energy information of neighboring nodes, which are obtainable via the process of self-organization of the network. The fair distribution of the energy consumption over all the possible routes to the base-station is one of the design objectives. Also, an alternate route search mechanism is proposed to cope with the situation in which no routing information is available due to lack of remaining energy of the neighboring nodes. The mechanism turns out to be a supplementary scheme to improve the energy efficiency. Lots of simulations are performed to examine the performance metrics such as the energy efficiency, throughput, network lifetime, and the transmission latency of the proposed schemes. Simulation results show the feasibility of the simple routing schemes for the sensor networks.

I. 서 론

최근 저 전력, 저비용 통신 기술과 더불어 MEMS

(MicroElectroMechanical Systems) 기술의 발전에 힘입어, 무선 센서네트워크에 대한 관심과 그 응용 모델의 구현에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있

* 한국외국어대학교 전자정보공학부 (djeong@hufs.ac.kr),

** 동부정보기술 (jini_run@msn.com)

논문번호 : KICS2005-08-345, 접수일자 : 2005년 8월 23일

※ 이 논문은 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임.(R08-2003-000-10632-0)

다. 분산된 망구조와 자가 구성 능력을 갖추으로써, 센서네트워크는 진화된 정보환경에서의 다양한 활용이 예상되고 있다.

이러한 센서 네트워크는, 기존의 인프라 기반 네트워크, 또는 ad hoc 네트워크와는 구별되는 특징을 가진다^[1]. 망 구성 노드 개수의 큰 차이, 전력 에너지 지원의 제한성, base-station(이하 관리노드로 칭함) 중심의 통신 패턴, 토폴로지의 동적 특성 등이 센서 네트워크 고유의 특성이며, 이는 망 설계 시 중요하게 고려되어야 한다. 특히 네트워크 계층 프로토콜은 망 형상 변경에 적응할 수 있도록 동적 특성이 확보되어야 한다. 또한 저 에너지 소비, 신속성, 정확성, 그리고 신뢰성을 지원하여야 한다.

이러한 배경아래, 본 연구에서는 에너지 효율성 개선을 주목적으로 하는 라우팅 알고리즘을 연구하였다. 본 연구에서 가정된 네트워크 기능은 다음과 같다. 각 센서노드는 자가 망 구성 과정을 거쳐 자신이 관리노드로부터 몇 홉 떨어져 있는지에 대한 정보와 이웃 노드에 대한 정보를 파악한다. 각 노드는 자가 망 구성을 위해 정의된 advertise 메시지를 생성, 직접 이웃하고 있는 노드들에게만 지역적으로 브로드캐스팅하여 이웃에게 자신의 정보를 알려주는 동시에 이웃의 정보를 확보한다. 이웃으로부터의 advertise 메시지를 이용한 지역적 정보 교환은, 망 운용 중에 토폴로지의 변화, 노드의 장애 여부 등과 같은 동적 특성 감지를 가능하게 한다. 또한, 센서 네트워크 내 임의의 장소에 새로 진입한 노드는 advertise 정보를 활용하여 자신의 위치를 확인하게 된다. 이러한 초기화 과정을 거친 후, 각 노드는 데이터 메시지를 생성하거나, 요청메시지 또는 데이터 메시지의 중계역할을 수행하는데, 이러한 동작은 에너지 소비의 효율성에 중점을 두고 구현된다. 특히, 데이터 전송 경로와 그 역방향인 요청메시지 전송 경로를 밀접하게 관련지어, 각 노드의 에너지 상태, 또는 장애로 인한 토폴로지 변경에 따라 동적으로 구성되는 데이터 경로의 적응성이 요청메시지의 경로설정에서도 유지되도록 설계하였다. 본 논문에서는 데이터 경로 설정 관련 라우팅 알고리즘에 초점을 맞추었으며, 관리노드로부터의 요청메시지 전송에 대해서는 참고문헌 [2]에서 기술하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 본 연구의 내용과 기존의 관련된 연구내용 간의 관계를 개괄적으로 소개하였다. 3장에서는 네트워크 자가 구성 과정과, 이를 통해 확보한 정보를 이용하여 설계된 에너지 인지기반의 여러 가지 라우팅 알고리

즘들을 기술하였다. 4장에서는, 설계된 라우팅 알고리즘들에 대한 시뮬레이션을 수행하고, 이를 통해 관측된 다양한 시험결과에 대해 논의하였다. 5장에서는, 본 연구의 수행으로부터 도출된 향후 연구이슈들에 대한 논의와 더불어 연구의 결론을 맺었다.

II. 관련연구 및 연관성

센서네트워크는 응용 의존형 특성을 갖는다. 응용이 요구하는 정보 전송 유형에 따라 각각 적합한 라우팅 방식이 선택되어질 수 있는 것이다. 또한, 경로 선택의 기준으로 쓰이는 비용의 정의가 다양하다는 점에서 라우팅 방식별 적용 효율성이 차이가 있게 된다. 따라서 최적의 범용 메커니즘 구현을 목표로 갖기보다는 특정 응용환경아래 최적의 라우팅 방식을 찾는 연구가 이루어지고 있다.

GRS^[3]에서는, 라우팅 과정에서의 loop-free 요건을 만족하기 위한 충분조건으로서, 관리노드 방향(positive advance)만으로서의 전송을 요구하고 있으며, 이를 위해 위치정보를 필요로 한다. 본 논문에서는 이러한 loop-free 요건을 만족하는 라우팅 방식들을 제시하며, 위치정보는 네트워크 구성 초기에 자가 구성 단계에서 확보된 각 노드의 홉 깊이와 전송범위 내의 이웃노드 정보만을 활용한다. 즉, 자신보다 홉 깊이가 작은 노드 만으로서의 전송이 이루어지도록 하여 loop-free 요건을 만족시키도록 한다. 더 나아가, 노드 장애 등의 이유로 그러한 노드가 가용하지 않은 경우, 우회 경로를 확보하기 위해 동일 홉 깊이를 가진 이웃 노드로의 전송을 허용하며, 그 노드로부터 새로운 경로 탐색이 이루어지도록 하였다. 이 경우, loop-free를 위해서는 전송 가능한 동일 노드에 대한 제한이 필요함을 확인하였다.

참고문헌 [4]에서는, 네트워크 토폴로지에 대한 정보비용과 통신비용과의 tradeoff를 분석하여, 부분적인 토폴로지 정보만으로도 효율적인 라우팅이 가능함을 보였다. [5]에서는, 제한된 영역내의 통신비용뿐만 아니라 메시지 간의 연관성을 분석하여 최소비용 경로를 선정하였다. 그러나 에너지 효율성 보다는 locating 및 tracking 응용에 적합하도록 데이터 aggregation의 효과에 초점을 두었으며, 따라서 구현의 복잡성이 증가되고, 전체 네트워크 위치 정보가 모든 노드에게 확보되어 있는 것을 전제하고 있다. 참고문헌 [6]과 [7]에서는, 제한된 네트워크 정보를 이용하여 구현 가능한 에너지 인지기반 라우팅 알고리즘(EAR: Energy-Aware Routing)과

directed-diffusion 방식이 각각 제안되었다. 두 경우 모두 on-demand 방식으로, 관리노드에서 요청메시지를 임의의 노드에 전송하는 과정에 각 노드는 관리노드로의 역 경로 정보를 확보하게 된다. 요청메시지 전송은 flooding을 적용하므로 다중 경로가 확보될 수 있으며, EAR의 경우 라우팅 테이블 내의 다중 경로 중 확률적인 경로선택이 이루어진다. Directed-diffusion 방식은, 응답 메시지의 전송지연 등 네트워크 파라미터를 이용하여 최적의 라우팅 경로를 설정하는 방식이다. EAR에서, 확률 산출을 위한 비용변수로서 가용 에너지 등을 사용하며, 비용은 경로별로 관리된다. 두 방식 모두 위치기반 on-demand 응용에 적용될 수 있으며, 모든 요청메시지는 방향성을 갖는 flooding을 통해 전송되므로, 주기적인 요청이 필요한 응용의 경우 flooding으로 인한 에너지 소비를 줄이기 위한 보완이 필요하다.

본 논문은, GRS에서 제시한 loop-free 요건을 만족하면서 EAR에서와 같이 다중경로를 활용한 라우팅 알고리즘을 제안한다. 참고문헌 [4]에서 확인된 바와 같이, 지역적 정보만으로도 충분히 효율적인 라우팅이 이루어질 수 있음을 적극 적용하여 단정한 홉 정보만을 이용하도록 설계하였으며, 라우팅 정보는 망의 자가 구성 과정 및 망 운용 중 확보도록 함으로써 on-demand 방식에만 제한되지 않도록 응용의 폭을 넓혔다. 또한, 요청메시지 전송을 위한 요청테이블을 정의하여, 데이터가 관리노드로 전송되는 과정에 필요정보를 확보함으로써 요청메시지 flooding 발생을 가능한 범위 내에서 최소화 하였으며, 이는 주기적인 요청이 필요한 경우 등 응용에 따라 활용 가능하다. 경로 레벨의 비용정보를 사용하는 EAR^[6]과의 비교를 통해, 단지 한 홉 간의 정보를 사용하는 간단한 방식임에도 에너지 효율성 면에서 뒤지지 않으며, 오히려 비용정보의 활용 방식에 따라서는 향상된 성능을 확인할 수 있었다.

III. 에너지 효율성을 고려한 라우팅 프로토콜의 설계

설계의 구현을 위하여 세 가지 메시지를 정의하였으며, 이들은 데이터 메시지, 요청메시지, 그리고 advertise 메시지로 구성된다. 각 메시지의 헤더 구조는 그림 1과 같으며, 각 헤더 영역에 대한 설명은 다음에 기술된 설계과정에서 소개된다.

3.1 네트워크 자가 구성 및 정보 교환

모든 노드들은 자신의 통신범위에 들어있는 이웃

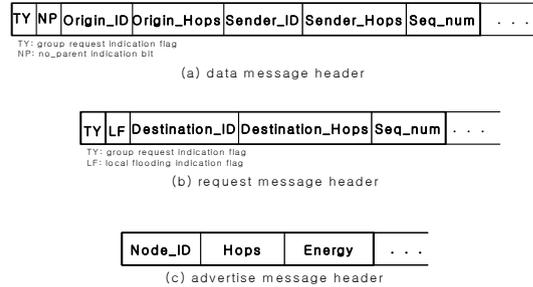


그림 1. 메시지별 헤더 구조

노드들의 정보를 이웃테이블에 저장한다. 초기 노드들의 이웃 테이블은, 관리노드에서 시작된 지역적인 advertise 메시지 내 정보를 이용하여 작성된다. Advertise 메시지에는 그림 1(c)에 보인 바와 같이 <Node_ID, Hops, Energy> 필드가 정의되어 있다. 여기서 Hops 는 관리노드로부터의 홉 깊이를 의미하며 홉 개수로 표현한다.

각 노드가 자신의 홉 깊이를 인지함과 동시에 이웃테이블을 설정하는 과정은 다음과 같다. 그림 2와 같이, 우선 관리노드는 자신의 홉 깊이를 0로 표기한 advertise 메시지를 전송한다. 관리노드로부터 advertise 메시지를 수신한 노드는 자신의 홉을 1로 설정하고, 이 정보와 자신의 노드 ID, 그리고 에너지 상태를 포함한 advertise 메시지를 생성하여 지역적인 브로드캐스팅을 한다. 이를 수신한 노드들은, 이미 자신의 홉 깊이를 아는 노드의 경우에는 자신의 홉 깊이보다 작은 노드들(앞으로 이러한 노드들은 “부모 노드군”으로 부른다.)의 정보를 자신의 이웃 테이블에 입력하며, 자신의 홉 깊이를 확보하지 못한 노드들은 수신된 메시지 중에서 가장 작은 홉 깊이를 갖는 노드들을 이웃테이블에 저장하고, 자신의 홉 깊이는 이들 값에 1을 더하여 설정한다. 그림 3에 보인 바와 같이, 이웃 테이블에는 이웃 노드의 ID, 라우팅을 위한 정보(예, 확률 값), 타이머, 이웃 노드의 에너지 잔량 등의 필드가 정의된다. 타이머는, 센서노드의 자원을 효율적으로 활용하고자 설정되었다. 이웃으로부터 advertise 메시지가 수신될 때 해당 노드의 타이머 값이 갱신된다.

그림 3에서는 망 설정 초기 시점에 자가 구성과정을 예시하고 있다. 우선 관리노드로부터 정보를 취득한 노드 1과 2는 다시 이 정보를 한 홉 브로드캐스팅 하여 노드 3, 4, 5로 하여금 이웃 및 자신의 정보를 취득하도록 한다. 이로부터 구성된 노드 3의 초기 이웃 테이블을 보면, 이웃 노드 1과 2의 정보를 저장하고 있으며, 반면에 노드 4와 5는 한 홉의

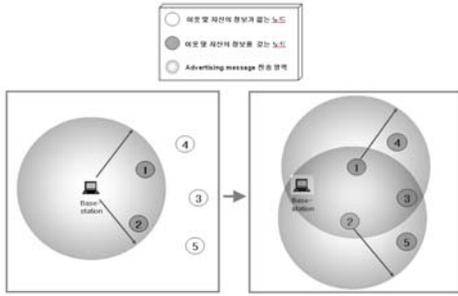


그림 2. 초기 설정 시 망 자가 구성 과정

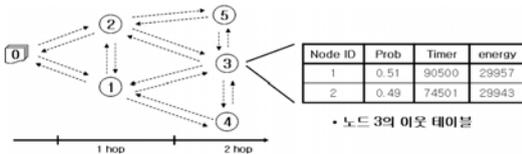


그림 3. 초기 이웃 탐색 및 이웃테이블 구성

거리에 있음에도 불구하고 노드 3과 같은 홉 깊이를 가지므로 이웃 테이블에는 등록되지 않는다.

각 노드는 이러한 이웃 테이블의 관리를 위해, 주기적으로 또는 필요시 advertise 메시지를 전송한다. 이를 통해 부모 노드 군에 속한 노드들의 통신 상태와 에너지 상태에 대한 정보의 갱신이 가능하다.

3.2 데이터 메시지 전송 및 요청 테이블 관리

관리노드가 특정 노드 또는 노드그룹에게 데이터 전송을 요청하는 응용구현을 위해서는, 관리노드로부터 특정 노드 또는 그룹으로의 요청 메시지 전달이 필요하다. 이를 위해, 임의의 중계노드에서 특정 목적 노드로의 요청메시지 전송을 위한 라우팅 정보가 필요하며, 이를 위해 정의된 것이 요청테이블이다. 요청테이블은 표 1에 보인 바와 같이 <Destination_ID, Child, Timer>로 구성되어 있다. Destination_ID는, 이 노드가 확보하고 있는 경로의 최종 목적노드를 의미하며, child는 그 목적 노드로 가기 위한 downstream 노드가 된다. 이 두 정보는 사전에 그 목적 노드로부터 생성된 데이터 메시지가 이 노드를 경유하여 관리노드로 전송될 때 확보되며, 이를 간략히 설명하면 다음과 같다.

표 1. 요청 테이블의 각 필드의 구성

Destination_ID	목적노드 주소, 또는 목적그룹ID
Child	목적노드에게 요청메시지 전송을 위한 이웃노드 주소
Timer	요청 테이블 각 entry의 수명을 결정하는 필드

임의의 센서노드에서 생성된 데이터 메시지는 관리노드에 도착하기 위해 센서노드들의 중계가 필요하다. 데이터 메시지를 관리노드로 중계하는 노드들에서는, 먼저 수신된 데이터 메시지(그림 1(a)참조)로부터 생성노드의 ID(Origin_ID, 그룹으로의 요청에 대한 데이터인 경우 그룹ID)와 데이터 메시지를 전송해준 이웃 노드 정보(Sender_ID)를 추출하여 자신의 요청테이블의 목적노드(Destination_ID)와 자식 노드(Child) 영역에 각각 기록한다. 이는 추후 목적노드 또는 그룹으로 요청메시지를 전송할 때 활용될 수 있는 라우팅 정보가 된다. 동시에, 중계노드는 자신의 ID와 홉 깊이를 데이터 메시지의 Sender_ID와 Sender_Hops 필드에 각각 대체 기록하여 관리노드 방향으로 전송한다. 데이터 메시지를 중계하는 각 센서노드는 데이터 메시지를 수신하게 되면, 우선 자신의 홉 깊이와 Sender_Hops를 비교하여, 자신의 홉 깊이가 Sender_Hops보다 작은 경우, 또는 우회 경로 탐색의 경우 동일 홉 깊이인 경우에도 데이터 메시지를 부모노드로 전송 또는 flooding을 수행한다. 이러한 과정을 거쳐 최종적으로 관리노드가 데이터를 수신하게 된다. 이와 같이, 요청테이블은 데이터 메시지를 관리노드에 전송하는 과정에 간단하게 생성된다. 초기 요청메시지의 경우와 같이 요청테이블에 가용 정보가 없을 경우에는 flooding이 적용된다. Flooding의 효율성 문제 등 요청메시지 라우팅에 대한 연구는 [2]에서 상세히 다루었으며, 본 논문은 데이터 메시지 라우팅에 초점을 둔다.

3.3 에너지 기반 라우팅 프로토콜

일반적으로 센서네트워크에서 모든 데이터는 관리노드 방향으로의 전송이 이루어진다. 이러한 환경 아래 다음과 같은, 오직 한 홉 정보만을 활용하는 네 가지 라우팅 알고리즘을 구현하였다.

- 최대 에너지 노드 선택(max_energy): 에너지 잔량이 최대인 부모 노드의 선택
- 확률 기반 노드 선택(random_energy): 에너지 잔량에 비례하는 확률로 부모 노드 선택
- 에너지 소모 비율 기반 노드 선택(random_rate): 에너지 소모비율에 반비례하는 확률로 부모 노드 선택
- round robin 기반 노드 선택(round_robin): 순차적 부모 노드 선택

3.3.1 최대 에너지 노드 선택

최대 에너지노드 선택은, 이웃 테이블에 저장된

이웃 노드들(전송범위 안에 드는 이웃 노드 중 부모 노드 군에 속하는 노드들)의 에너지 정보를 기반으로, 가장 에너지가 많은 노드를 부모노드로 선택하여 관리노드로의 패킷을 전송하는 방식이다. 이는 관리노드로의 경로별 에너지 상태를 참조하여 라우팅하는 방식⁶⁾에 비해 매우 간단한 방법이며, 확률적 선택이 아닌 결정적 형태의 선택이 이루어진다.

3.3.2 확률기반 노드 선택

확률 기반 노드 선택은, 이웃 노드들의 에너지 잔량 정보를 이용하여 노드별 확률을 산출하고, 산출된 확률 값을 기반으로 부모노드를 선택하는 방식이다. 즉, 최대 에너지 노드선택과는 달리 에너지 잔량에 비례한 확률을 산출하여, 이 확률 값에 따라 부모노드를 선택함으로써 메시지 경로를 분산시키는 방안이다. 임의의 노드 i 에서 이웃 노드 j 로의 확률을 $p_{i,j}$ 로 두면

$$p_{i,j} = \frac{E_{i,j}}{\sum_{k \in N_i} E_{i,k}}$$

와 같이 주어진다. 이와 같이 산출된 확률 값은 노드 i 의 이웃 테이블 내에 이웃 노드 j 에 대한 정보로 저장되며, 패킷의 전송 시 이 값들을 참조하여 부모노드가 결정된다.

3.3.3 에너지 소모비율 기반 노드 선택

각 노드는 자신의 에너지 정보를 이웃 노드에게 주기적으로 또는 임계 값 만큼의 변화가 감지될 때 통보함으로써, 상황의 변화에 따르는 라우팅 갱신이 이루어지도록 정보교환을 한다. 이러한 정보를 이용하면 임의의 이웃 노드가 갖는 에너지 소모비율을 간단하게 산출할 수 있다. 즉, 노드 i 에서, 이어지는 두 개의 advertise 시각 t_{k-1} 과 t_k 시점에 확보된 이웃 노드 j 의 에너지 정보를 각각 $E_{j,k-1}$ 과 $E_{j,k}$ 로 두면, 노드 j 의 에너지 소모비율을 $r_{i,j}$ 라고 할 경우 최근 한 주기 동안

$$r_{i,j} = \frac{E_{j,k-1} - E_{j,k}}{t_k - t_{k-1}}$$

의 비율로 에너지를 소모하였음을 확인할 수 있다. 부모노드의 선택은, 이웃 테이블 내의 노드 중에서 에너지 소모비율에 반비례하는 확률 값에 의해 선택한다. 즉,

$$p_{i,j} = \left(\frac{1}{r_{i,j}}\right) / \left(\sum_{k \in N_i} \frac{1}{r_{i,k}}\right)$$

을 구하여, 확률 값 $p_{i,j}$ 에 비례하여 부모노드를 선택한다. 이와 같은 방식은 최대 에너지 노드의 선택 방식과는 달리, 노드로의 데이터 집중도를 변수로 활용하므로, 에너지 효율성과 더불어 패킷의 충돌 현상에 대한 경감 효과도 기대할 수 있게 한다.

3.3.4 Round robin 방식의 라우팅 알고리즘

데이터 메시지의 라우팅 방식으로 앞에서 기술한 세 가지는 모두 지속적인 advertise 메시지가 필요한 공통점이 있다. 이에 비해, 에너지 정보에 무관하게 단순한 round robin 방식의 라우팅을 가정할 수 있다. Round robin 방식은, 관리노드로의 데이터 전송을 위해 이웃테이블내의 부모노드 군에 속한 노드들에게 순차적으로 번갈아 균등하게 데이터를 전송하는 방식이다. 이는 균등한 분배가 보장되는 형태를 갖추고 있으나, 통신 경로가 관리노드로 집중되는 센서네트워크의 특성으로 인해 불균등한 결과를 초래함을 쉽게 확인할 수 있다. 이러한 단순한 round robin 방식은, 다른 세 가지 라우팅 방식의 성능 검증을 위한 참조모델로서 활용한다.

3.4 에너지 모니터링을 통한 작업 관리

라우팅을 위한 이웃 노드의 에너지 정보는 advertise 메시지를 통해 확보되는데, 주기적인 advertise 방식은 네트워크의 에너지 효율성 측면에서 바람직하지 않다. 가령, 주기 내에 에너지의 변화가 매우 미미하거나 반대로 급격한 경우 주기적 정보 갱신은 적시성이 떨어지게 되어 적응 능력의 한계로 작용한다. 이러한 문제점을 해결하기 위한 방법으로, 초기 전송 이후에는 주기적 전송 보다는 임의의 기준 값을 설정하여, 이 값만큼의 에너지 감소가 인지될 때 마다 advertise 메시지를 전송하는 방식을 적용한다.

한편, 네트워크의 수명을 연장하기 위해서는 에너지 소비가 급격한 노드의 부하를 조율할 수 있는 장치가 필요하다. 예를 들어, 라우팅 경로를 이루는 부모노드 군이 소수일 경우, 이는 라우팅 알고리즘과는 무관하게 네트워크 수명의 잠재적 bottleneck 요인이 된다. 본 연구에서는 임의의 임계값을 설정하여, 각 노드별로 임계 값 이하의 에너지를 보유하게 되면 이를 advertise 메시지를 통해 이웃들에게 알리고, 이후에는 자신이 생성한 데이터 메시지 전

송 이외의 다른 작업(데이터 메시지의 중계, 요청 메시지의 중계, advertise 메시지 생성 및 전송)은 수행하지 않도록 하였다. 이는, 임계 값 이하의 에너지 값이 기록된 advertise 메시지를 수신한 이웃 노드에서 해당노드를 이웃 테이블과 요청테이블 모두에서 삭제함으로써 간단히 구현된다.

여기서 문제점은, 이와 같이 처리된 노드들로 인해 이웃 테이블에서 부모노드군 정보를 모두 상실하게 되는 노드들이 발생할 수 있다는 점이다. 이러한 경우를 포함하여, 네트워크 운용 중 장애발생 시 대처방안에 대해서는 다음 절에서 기술하였다.

3.5 장애검출에 따르는 경로 재구성

네트워크 운용 중에, 타이머 동작 또는 에너지 저하에 따른 작업관리 등의 이유로, 이웃 테이블에 아무런 부모노드 군을 갖지 못한 노드가 발생하게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위해 다중경로를 활용하는 방안을 제안한다. 그림 4에 한 예를 보았다.

그림 4(a)와 같이 정상적인 데이터 메시지 경로를 통한 데이터 메시지의 전송이 이루어지고 있는 상황에서, (b)와 같이 임의의 노드 C에 장애가 발생한 경우를 가정한다. 이 경우, 노드 A는 부모노드군의 이웃 노드를 전혀 갖지 못한 상태가 된다. 이를 대비하여, 모든 센서노드들은 별도의 정보 영역에 <sub_parent> 정보를 갖는다. 이웃 테이블에 부모노드 군의 노드가 있는 경우에는 단지 standby 정보로서 존재하며, 부모노드 군의 노드가 없게 된 경우 대체 노드로서 sub_parent 노드가 활용된다.

sub_parent 노드를 선정하는 방법은 여러 가지가 있을 수 있으며, 주의할 점은 loop-free가 보장되도록 선정 되어야 한다는 점이다. 본 연구에서는 일정 양 이상의 에너지를 갖고 있으면서 가장 최근에 advertise 메시지를 전송한 동일 홉 노드 중, 선택하는

노드의 ID보다 작은 ID를 갖는 노드로 sub_parent를 제한하였다.

이와 같이 동일 홉 깊이를 갖는 노드로부터의 데이터 메시지 수신에 요구되는 경우를 위해, 그림 1(a)의 데이터 메시지 헤더에 1-bit의 NP (No_Parent) 영역을 정의하였다. NP 영역은, 부모노드 군에 아무런 노드가 없는 경우 1로 설정되며, 이를 수신한 이웃 노드는 자신과 동일한 홉 깊이를 갖는 노드로부터 수신한 경우에도, 정상적인 메시지 수신으로 처리한다. 수신 노드도 역시 부모노드 군을 갖고 있지 않다면 위의 과정이 반복되도록 한다. Sub_parent 노드를 확보하지 못한 노드에 이르면 결국 브로드캐스팅 하도록 구현하였다.

IV. 시뮬레이션 및 결과 분석

본 연구에서 제시한 방식들의 검증을 위해서, C언어를 사용하여 센서네트워크의 시뮬레이션 프로그램을 개발하였으며, 이를 이용하여 다양한 시뮬레이션을 수행하였다. 실험 중 에너지 잔량이 0이 되는 노드의 발생 시점을 “네트워크 수명”으로 정의하며, 이는 네트워크 운용 방식간의 성능 비교를 위해 중요 변수가 된다.

4.1 데이터 전송 라우팅 알고리즘 비교

4.1.1 실험 환경

시뮬레이션은 1,000m x 1,000m의 영역 내에 총 400개의 센서노드들을 그림 5와 같이 격자 모양으로 50m 간격을 두고 분포시킨 환경을 설정하였으며, 관리 노드는 아래 변의 가운데에 설치하였다. 망의 초기화는, 각 노드로부터의 한 홉에 그치는 지역적 advertise 메시지를 기반으로 모든 노드가 자신의 홉 깊이를 인지하는 자가 구성 방식으로 수행된다. 각 센서노드는 최대 4개까지의 메시지 버퍼링 영역을 확보하고 있으며, 충돌 또는 버퍼의 용량 한계를 넘어 폐기되는 패킷을 손실된 메시지로 간주하였다. 모든 노드는, 자신의 통신 거리 안의 노드 중 부모노드 군에 속하는 노드들만을 이웃 테이블에 등록하여, 데이터 메시지의 전송을 위한 부모노드 선택에 활용한다. 또한, 다른 노드로부터의 데이터 메시지 수신 시 취득할 수 있는 정보를 이용하여, 추후 해당 노드로 요청메시지를 중계할 경우를 대비한 별도의 요청테이블을 설정, 관리한다. 무선 대역폭은 100kbps로 설정하였고, 메시지의 길이는 50bytes로 두었다. 관리노드를 포함한 모든 노드는

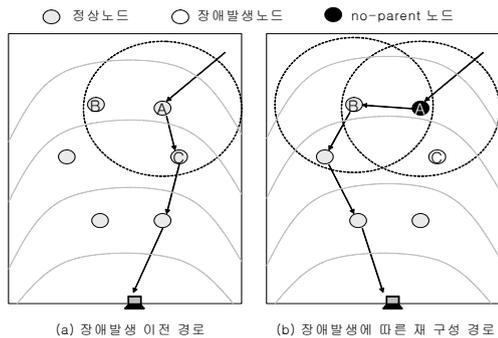


그림 4. 경로 상의 장애 발생에 따른 경로 재구성

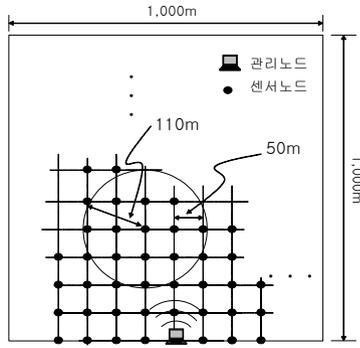


그림 5. 실험 토폴로지

메시지의 전송에 앞서 캐리어 감지를 수행하며, 채널이 유흡상태임이 확인되면 전송한다. 캐리어 감지는 두 홉까지의 영역을 감지하는 것으로 하였다. 캐리어 감지 기간은 임의의 값으로 제한할 수 있도록 하였으며, 그러한 제한을 초과할 경우 해당 메시지는 손실로 처리하였다.

각 노드의 에너지 소모에 대해서는 다음과 같은 간단한 모델링을 취하였다^[8]. 패킷의 무선 송신 및 수신회로 구동을 위하여 50nJ/bit 의 에너지를 소모하며, 만족할만한 수신 데이터 품질을 위해 필요한, 거리에 따르는 송신 증폭에너지는 100pJ/bit/m² 로 두었다. 따라서 n-bit 메시지를 거리 d meter 만큼 전송하기 위한 전송에너지(E_{tx})는

$$E_{tx} = 50n.J/bit \times nbit + 100pJ/bit/m^2 \times nbit \times d^2$$

가 되며, 동일한 메시지의 수신에너지(E_{rx})는

$$E_{rx} = 50n.J/bit \times nbit$$

가 된다. 표 2에는 실험환경을 구성하는 각종 파라미터들을 정리하였다.

표 2. 실험환경 설정을 위한 파라미터 및 정의

파라미터 이름	파라미터 정의	설정 값
N	센서노드의 개수	400
R	무선통신거리	110m
Width	망 영역(가로)	1000m
Height	망 영역(세로)	1000m
Up	MAC 파라미터(재전송 허용회수)	7
BACKOFF_RANGE	충돌 시 최대 backoff 기간	5
B	센서노드 내 이웃테이블 용량	16
Q	센서노드 내 버퍼 용량	4
rec_energy	수신회로 구동 에너지	50nJ/bit
tx_energy	송신회로 구동 에너지	100pJ/bit/m ²
listen_energy	채널 감지회로 구동 에너지	50nJ/bit

4.1.2 라우팅 알고리즘 비교

먼저, 본 논문에서 제시한 네 가지의 라우팅 알고리즘 성능 관측을 위하여, 기존의 EAR^[6] 알고리즘과의 비교 실험을 수행하였다. 관리노드로부터 임의의 목적노드로 요청메시지가 발생하면 flooding에 의해 목적노드로 전송되고, 이를 수신한 목적노드는 데이터 메시지를 생성하여 관리노드로 전송하며, 이 데이터 메시지가 관리노드에 도착하기까지의 과정을 관측하였다. EAR 알고리즘과 다른 알고리즘과의 차이는 다음과 같다.

- (1) 이웃테이블은, EAR의 경우 요청메시지가 flooding되는 과정에 생성되며, 제안된 네 가지의 알고리즘에서는 이미 네트워크 초기화 과정에 구비된다.
- (2) 요청테이블은, EAR의 경우 없으며, 제안된 네 가지의 알고리즘에서는 데이터 메시지가 관리노드로 전송되는 과정에 생성된다.
- (3) 제안된 네 가지의 알고리즘에서는 초기 에너지의 1/10 만큼의 에너지 감소가 발생할 때 마다 advertise 메시지를 이웃노드에게 알려준다.

EAR의 경우 각 노드에서 이웃테이블이 완성되기 위해서는 모든 부모 노드 군으로부터의 요청메시지가 도달되어야 하며, 이러한 점을 고려하여 실험하였다. 실험의 편의를 위하여 관리노드로부터의 요청메시지가 주기적으로 발생하는 환경을 실험하였다. 이 때, 네 가지 알고리즘에 대해서는 요청테이블의 사용 여부가 결과에 미치는 영향이 크므로, 이를 구별 지어 실험하였다.

목적노드는 그림 5에서 오른 쪽 위 꼭지점에 위치한 노드로 설정하였다. 이는 관리노드로부터 가장 먼 거리에 있는 노드로서, 각 노드의 통신범위를

110m로 두었을 때 홉 깊이가 14를 갖는다. 10초 간격으로 관리노드가 요청메시지를 생성하며, 각 노드는 초기 에너지 0.1J을 갖도록 하였다.

그림 6의 가로축은 시간을, 세로축은 에너지 양을 나타내며, 각 알고리즘별로 네트워크 수명 시점에서의 홉 단위의 평균 에너지 잔량 분포를 보인다. 예를 들면, EAR의 경우 네트워크 수명은 850초이며, 이 시점에서 가장 에너지 소모가 많은 홉에 속한 노드들의 평균 에너지 잔량은 29mJ이고, 가장 에너지 소모가 작은 홉에 속한 노드들의 평균 에너지 잔량은 37mJ임을 관측할 수 있다. 그림 6에서 확인할 수 있듯이, 요청테이블을 사용하지 않는 라우팅 알고리즘의 경우 네트워크 수명은 모두 유사한 결과를 보이고 있다. 특히 max_energy 알고리즘의 경우에는 요청테이블을 사용하지 않는 경우에도 EAR 보다 우수한 결과를 보이고 있는데, 이는 경로 단위로 산출되는 비용 값을 기반으로 이루어지는 라우팅(EAR)에 비해 매우 단순한 1 홉 정보만을 사용한 라우팅 방식이 성능 면에서 뒤지지 않는다는 점을 보여준다. 더 나아가, 요청테이블을 사용하면 주기적인 요청이 발생하는 경우 flooding 개수를 대폭 줄이게 되어 에너지 효율 및 네트워크 수명을 대폭 개선할 수 있음을 확인할 수 있다. 지면 부족으로 본 논문에는 도시하지 않았지만, 관리노드에 도착한 패킷의 평균 지연, 도착률 값은 모든 방식에 대해 유사한 결과를 보였다.

그림 7은, 그림 6의 결과가 도출된 실험에서, 네트워크 수명시점에서의 각 노드별 에너지 잔량을 3차원으로 도시한 그림이다. EAR 방식과, 요청테이블을 사용한 max_energy 방식의 두 경우에 대해서만 도시하였다. 요청테이블을 사용하지 않는 다른 방식들의 경우 EAR과 유사한 결과를 보여 생략하였다.

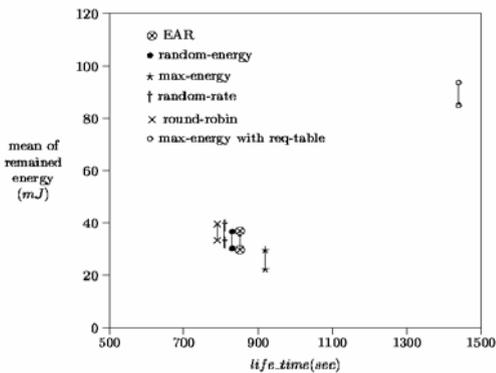
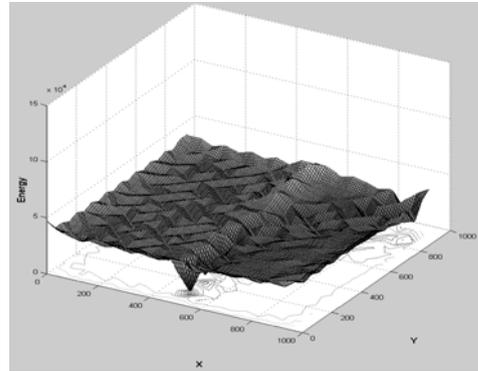
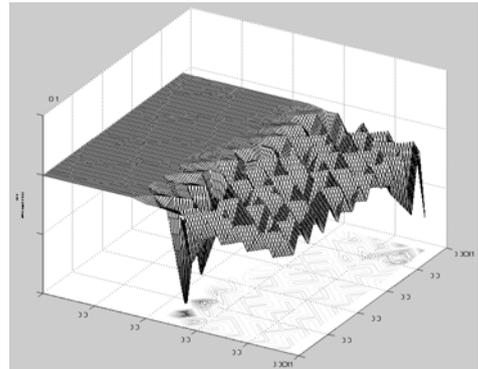


그림 6. 라우팅 방식별 네트워크 수명 및 에너지 잔량 분포



(a) EAR의 경우



(b) 요청테이블을 사용한 max_energy 방식의 경우

그림 7. 라우팅 방식별 에너지 분포 비교

였다. 그림 7에서, 요청테이블 사용 효과를 명확하게 확인할 수 있다. 첫 요청의 경우를 제외하고는 동일 목적노드로의 요청메시지 flooding이 발생하지 않으며, 따라서 데이터 메시지 경로 상에 있는 노드 이외의 노드에서는 불필요한 에너지 소모가 거의 발생하지 않고 있다.

4.1.3 라우팅 알고리즘의 에너지 소모량 비교

앞의 실험에서, 본 논문에서 제안한 네 가지의 단순한 라우팅 방식이 EAR 알고리즘과 성능 면에서 견줄 수 있다는 점을 확인하였다. 다음으로, 네 가지 라우팅 방식 간의 비교를 위한 실험을 수행하였다. 관리노드로부터의 요청 메시지 없이 모든 노드가 각자의 주기에 맞추어 관리노드로 데이터를 발생시키는 환경을 실험하였다. 그림 5와 같이 각 노드들을 배치하였으며, 각 노드의 통신범위를 110m로 두었다. 각 노드는 초기 에너지 0.5J을 갖는 것으로 설정하였다. 센서노드들은 각각 30초의 동일한 주기를 갖고 서로 랜덤하게 시차를 두면서, 관리노드를 목적지로 하는 데이터 메시지를 이웃 테이블

을 참조하여 전송한다. 또한 각 노드에서 초기 에너지의 1/10 만큼의 변화가 있을 때 마다 advertise 메시지를 이웃에게 전송한다.

각 노드별 에너지 소모량의 비교를 위해, 관리 노드로부터 홉 깊이가 같은 노드들이 네트워크 수명 시점에서 갖는 에너지 잔량의 평균값을 홉별로 그림 8에 도시하여, 라우팅 방식간의 성능을 비교하였다. 그림 8에서 확인할 수 있는 것은, 관리노드에 가까울수록 에너지 소모량이 증가한다는 점이다. 이는, 관리노드로 데이터의 전송이 집중되는 센서네트워크의 전형적인 특징이며, 지수적인 증가를 확인하였다는 점이 주목할 만하다.

라우팅 방식간의 비교를 보면, max-energy 방식의 경우 가장 에너지의 소비가 많은 것으로 나타났는데, 네트워크 수명과 관련지어 평가해야할 사항이다. 그림 9에서는 그림 8의 내용에 네트워크 수명을 연관 지어 도시하였다. 수평축은 시간 축이고, 수직축은 에너지 잔량을 나타내는데, 각 라우팅 방식별 에너지 잔량의 분포를 자신의 네트워크 수명 시간 포인트에 도시하였다. 그림 9에서 보듯이, max-energy의 경우 가장 긴 네트워크 수명을 보이고 있으며, round-robin 방식이 가장 짧은 네트워크 수명을 갖는다. Max-energy의 경우 네트워크 운용 시간이 다른 방식에 비해 가장 오래되므로, 에너지 소비의 홉 깊이 간 차이가 두드러지게 됨을 확인하게 된다. 노드별 잔류 에너지 분포를 보다 구체적으로 확인하기 위하여, 그림 10에서는 에너지 잔량을 네트워크 평면상에서 도시하였다. 그림 10에서, 각 노드가 놓인 위치 별 에너지 잔량에 따라 명암이 차이를 보이고 있는데, 밝을수록 에너지의 양이 많고 어두울수록 에너지가 적음을 나타낸다. 그림에 도시되지 않은 random-rate 방식과 round-robin 방식은 random-energy 방식의 결과와 거의 유사하여 생략하였다. 그림 10의 (a)와 (b)를 비교하면, max-energy의

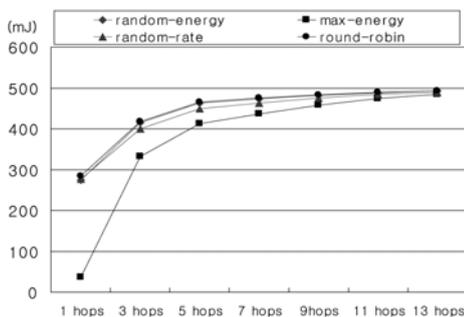


그림 8. 홉 깊이별 잔여 에너지 평균 값

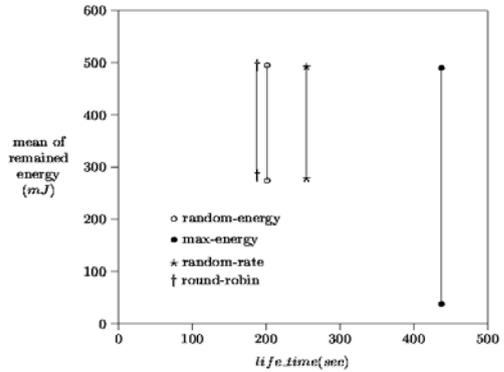
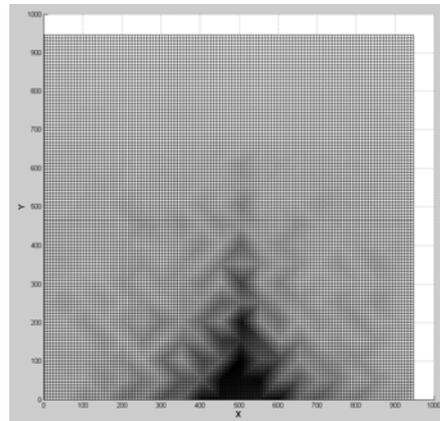
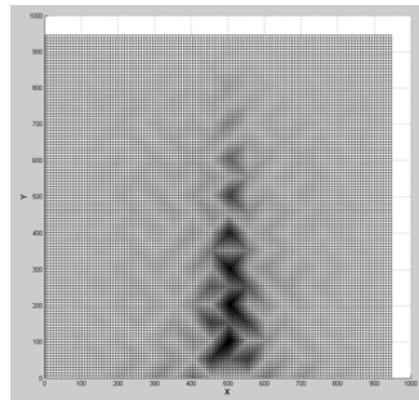


그림 9. 라우팅 방식별 네트워크 수명 및 에너지 잔량 평균 값 분포도



(a) max-energy 방식의 경우 노드별 에너지 잔량



(b) random-energy 방식의 경우 노드별 에너지 잔량
그림 10. 라우팅 방식별 에너지 잔량 비교

경우 관리노드에 인접한 홉 깊이가 1인 노드들의 에너지가 모두 고르게 대량 소모되었음을 확인할 수 있는 반면, random-energy 방식의 경우 홉 깊이가 1인 노드 중 특정 노드에서만 에너지의 대량 소비가 있고 그 외의 노드에서는 에너지 소비가 상대적으로

로 많지 않음을 확인할 수 있다. 이는, 데이터 경로의 설정이 max-energy 의 경우 가장 분산효과가 좋고, 다른 방식들에서는 기대되는 달리 분산효과가 미미함을 확인시켜준다. 이러한 분산효과는 그림 9에서 확인할 수 있듯이 곧 네트워크의 수명과 직접적인 연관을 갖는다.

결국, max-energy 라우팅 방식은 에너지의 균등한 소모 특성을 제공하며, 따라서 우수한 네트워크 수명이 확보될 수 있는 방안으로 평가된다. 이 결과는, max-energy 라우팅 방식과 같이 매우 단순한 라우팅 알고리즘을 통해서도, 센서네트워크에서 공통적으로 요구되는 에너지 소모의 균등한 분포가 우수하게 확보될 수 있다는 사실을 보여준다는 점에서, 매우 중요한 결과로 볼 수 있다. 물론 이러한 라우팅 알고리즘이 라우팅 테이블을 사용한다는 점과 라우팅 정보를 확보하기 위해 노드 간 정보교환이 주기적, 또는 이벤트 기반으로 요구된다는 점 등의 오버헤드를 필요로 한다는 점이, 상대적으로 단순한 라우팅 방식과 tradeoff 관계에 있음을 지적해둔다.

4.2 경로 재구성 실험

이번 실험에서는, 장애 발생으로 데이터 메시지 경로가 재구성되는 경우와, 그렇지 않고 브로드캐스팅 방식으로 해결하는 방법과의 비교 실험을 수행하였다. 앞에서의 실험과는 달리 장애 발생을 유도하기 위해, 그룹으로의 데이터 요청과 응답이 이루어짐으로써, 특정 노드에게 에너지 소비가 집중되도록 하였다. 또한, 우회 경로 개수가 서로 다른 상황을 시험하기 위해 각 센서노드의 전송범위 R을 변경하면서 비교 실험하였다. 데이터 메시지 전송을 위한 라우팅 알고리즘으로는 max-energy 라우팅 방식만을 적용하였다. 10초의 주기로 특정 그룹에 데이터를 요청하고, 해당그룹으로부터 데이터 메시지가 전송되도록 하였는데, 그룹은 관리노드로부터 가장 먼 곳에 위치한 그룹 21(그림 11 참조)을 선택하였다. 각 그룹은 16개의 센서노드로 구성된다. 그림 12에서는, 센서노드의 전송범위 R이 60m, 110m, 160m, 그리고 210m 일 때 네트워크 수명, throughput, 그리고 지연 성능을 각각 비교하였다.

그림 12에서 보듯이, 전송범위에 따라 rerouting의 성능 개선효과가 다름을 알 수 있다. 전송범위 110m의 경우 수명, throughput, 그리고 지연 성능 등 모든 성능지표에서 rerouting의 상대적 우수성이 명확히 관측되는 반면, 전송범위가 더 커지게 되면 오히려 성능은 브로드캐스팅의 경우가 상대적으로

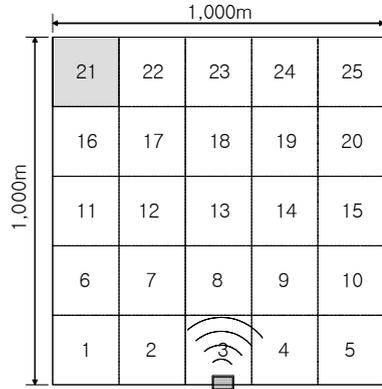
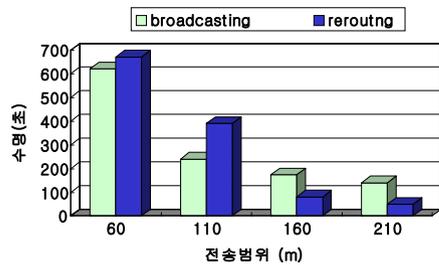
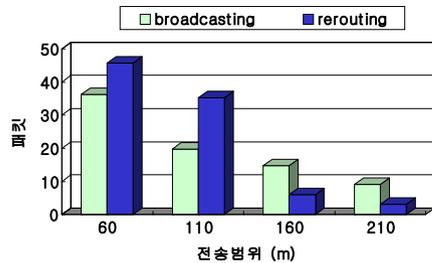


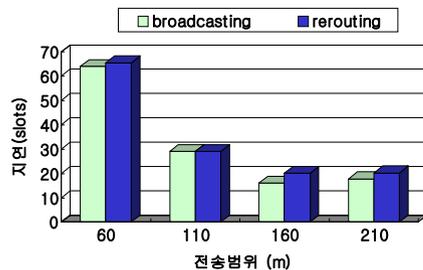
그림 11. 실험 영역 내의 그룹 설정



(a) 네트워크 수명



(b) 그룹21 내 임의의 노드로부터의 패킷 개수



(c) 그룹21 내 임의의 노드로부터의 지연 평균
그림 12. 장애검출 시 rerouting vs. 브로드캐스팅 비교

우수한 결과를 보이고 있다. 이는 rerouting의 경우, 동일 홉을 갖는 노드의 수가 어느 정도 증가하기까지는 우회 경로 확보 기회도 증가하는 반면, 임의의

임계 값에 도달한 이후 오히려 우회 경로 탐색의 부하가 가중됨을 확인시켜준다. 전송범위 110m는 일반적인 응용에서 상당히 큰 수치이며, 따라서 대체로 rerouting 기능을 구현하는 것이 일반적인 응용에서는 효과가 기대되는 실험결과이다.

V. 결론 및 향후 연구 과제

본 연구에서는, 센서네트워크의 에너지 인지 기반 라우팅 알고리즘에 대한 연구를 수행하였다. 데이터 메시지의 전송과정에서, 부모노드 군에 속하는 이웃 노드들의 에너지 상황을 인지하여 동적으로 라우팅 선택이 이루어지는 방안을 연구하였으며, 이러한 특성을 갖는 네 가지 라우팅 알고리즘을 제안, 그 성능을 비교 관측하였다. 이로부터, 간결한 라우팅 방식의 구현으로도 주목할 만한 성능 개선이 기대될 수 있음을 확인하였다.

한편으로, 메시지 집중으로 인한 조기 에너지 고갈을 방지하기 위해, 임의의 값 이하의 에너지 잔량을 갖는 노드는 최소한의 기능만을 유지하도록 하였으며, 이에 따르는 이웃 노드의 라우팅 정보 상실 문제는 우회 경로 탐색 기능으로 완화될 수 있음을 보였다. 그 과정에서, 일반적인 전송범위 내에서는 라우팅 정보의 부재 시 브로드캐스팅 보다는 우회 경로를 탐색하여 다중 홉 전송을 하는 것이 에너지 효율 면에서 유리함을 확인하였다.

궁극적으로 센서네트워크는 application-specific한 특성을 가지므로, 범용 최적화된 라우팅 알고리즘의 구현보다는 적용 환경별 고유 특성에 적합한 형태의 다양한 라우팅 알고리즘이 요구되어질 것이다. 이러한 전망에 의하면, 본 연구에서와 같이 구현이 간단한 특성을 유지하면서, 다양한 형태로 구현되는 라우팅 알고리즘들에 대한 특성 분석이 면밀히 이루어져, 목적별 적합한 라우팅 알고리즘의 선택이 유연하게 이루어질 수 있도록 하는 지속적인 노력이 필요하다고 본다.

참 고 문 헌

[1] I. A. Akyildiz, W. Su, Y. Sankara subramaniam, and E. Cayirci, "A Survey on Sensor Networks," *IEEE Communications Magazine*, vol. 40, no. 8, pp. 102-114, Aug. 2002.

[2] J. Kim, B. Chea, and D. Jeong, "Energy en-

hancement on query processing via table usage in wireless sensor networks," *한국통신학회 하계학술대회 논문집*, June, 2005.

[3] G. G. Finn, "Routing and addressing problems in large metropolitan-scale internetworks," *ISI Res. Rep. ISU/ RR-87-180*, Mar. 1987.

[4] T. Melodia, D. Pompili, and I. F. Akyildiz, "On the independence of distributed topology control and geographical routing in ad hoc and sensor networks," *IEEE J. on Sel. Areas in Commun.* vol. 23, no. 3, pp. 520-532, Mar. 2005.

[5] J. Liu, F. Zhao, and D. Petrovic, "Information-directed routing in ad hoc sensor networks," *IEEE J. on Sel. Areas in Commun.* vol. 23, no. 4, pp. 851-861, April, 2005.

[6] R. C. Shah and J. M. Rabaey, "Energy Aware Routing for Low Energy Ad Hoc Sensor Networks," in Proc. in *WCNC2002*, Orlando, FL. Mar. 2002.

[7] C. Intanagonwivat, R. Govindan, D. Estrin, J. Heidemann, and F. Silva, "Directed diffusion for wireless sensor networking," *IEEE/ACM Trans. on Networking*, vol. 11, no. 1, pp. 2-16, Feb. 2003.

정 대 인 (Daein Jeong) 정회원
 1984년 2월 서울대학교 제어계측공학과 졸업
 1986년 2월 서울대학교 제어계측공학과 석사
 1987년 5월~1999년 8월 한국통신 선임연구원
 1998년 1월 Polytechnic Univ. 박사(E.E)
 1999년 9월~2000년 8월 홍익대학교 과학기술대학
 조교수
 2000년 9월~현재 한국외국어대학교 정보산업공과
 대학 부교수
 <관심분야> QoS 제어, 차세대인터넷, 멀티미디어통신, 센서네트워크

채 병 진 (Byongjin Cheq) 정회원
 2003년 2월 한국외국어대학교 디지털정보공학과
 졸업
 2005년 2월 한국외국어대학교 전자정보공학과 석사
 2005년 1월~현재 동부정보기술 연구원
 <관심분야> WLAN, 센서네트워크 MAC 및 라우팅
 프로토콜