한국시뮬레이션학회 논문지
Vol. 21, No. 4, pp. 47-56 (2012. 12)
http://dx.doi.org/10.9709/JKSS.2012.21.4.047

센서 네트워크를 위한 계층적 라우팅 프로토콜의 성능 분석

서병석[1] · 윤상현[2] · 김종현[3†]

Performance Analysis of Hierarchical Routing Protocols for Sensor Network

Byung-Suk Seo · Sang-Hyun Yoon · Jong-Hyun Kim

ABSTRACT

In this study, we use a parallel simulator PASENS(Parallel SEnsor Network Simulator) to predict power consumption and data reception rate of the hierarchical routing protocols for sensor network - LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy), TL-LEACH (Two Level Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy), M-LEACH (Multi hop Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy) and LEACH-C (LEACH-Centralized). According to simulation results, M-LEACH routing protocol shows the highest data reception rate for the wider area, since more sensor nodes are involved in the data transmission. And LEACH-C routing protocol, where the sink node considers the entire node's residual energy and location to determine the cluster head, results in the most efficient energy consumption and in the narrow area needed long life of sensor network.

Key words : sensor network, hierarchical routing protocols, parallel simulation, energy efficiency

요 약

본 연구에서는 센서 네트워크용 병렬 시뮬레이터인 PASENS(Parallel SEnsor Network Simulator)를 이용하여 센서 네트워크에 이용되는 라우팅 알고리즘 중에서 계층적 라우팅 프로토콜의 대표적인 방식인 LEACH(Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy)와 그의 변형인 TL-LEACH(Two Level Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy), M-LEACH(Multihop Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy), 그리고 LEACH-C(LEACH-Centralized)의 전력 소모량과 데이터의 수신율을 비교하고 분석하였다. 시뮬레이션을 이용한 분석 결과에 따르면, M-LEACH 라우팅 프로토콜의 경우에는 여러 센서 노드들을 통하여 데이터가 전달되기 때문에 일정한 크기 이상의 넓은 공간에서 높은 수신율을 보였으며, LEACH-C 라우팅 프로토콜은 싱크 노드(서버)가 전체 센서 노드의 잔여 에너지와 위치를 고려하여 클러스터 헤드를 결정하기 때문에 좁은 공간에서 보다 오랜 수명을 필요로 하는 센서 네트워크를 구축하는데 가장 효율적이라는 것을 확인 할 수 있었다.

주요어 : 센서네트워크, 계층적 라우팅 프로토콜, 병렬 시뮬레이션, 에너지 효율

1. 서 론

1.1 연구배경 및 필요성

유무선 통신 기술의 발전과 스마트폰의 등장으로 언제 어디서든 원하는 정보를 얻을 수 있고 컴퓨터가 인간의 필요사항을 알아서 처리해주는 인간 중심의 유비쿼터스 컴퓨팅 패러다임이 보편화 되어 우리 생활의 많은 부분에 적용되고 있다[1]. 센서 네트워크는 유비쿼터스 컴퓨팅의 핵심적 기술로 많은 수의 센서 노드들로 구성되며, 각 센서 노드들은 독립적으로 동작하며, 센서 노드 간의 통신은 무선 통신을 기반으로 이루어진다. 이러한 구성과 동작 방식으로 인해 제한적인 전력으로 동작이 가능해야하며, 전체 전력 소모에서 무선 통신을 위한 전력 소모가 많은 비중을 차지한다[2].

센서 네트워크는 어떠한 환경에 구성되는가에 따라 큰 성능 차이를 보인다. 적합하지 않은 라우팅 프로토콜을 사용할 경우에는 불필요한 전력 소모를 가져와 전체 센서 네

접수일(2012년 11월 15일), 심사일(1차 : 2012년 12월 7일), 게재 확정일(2012년 12월 14일)
[1] 상지영서대학교 국방정보통신과
[2] (주)플랜티넷 연구개발센터
[3] 연세대학교 컴퓨터정보통신공학부
주 저 자 : 서병석
교신저자 : 김종현
E-mail; jhkim34@yonsei.ac.kr

트워크의 수명이 줄어들게 되고, 수집되는 데이터들 또한 전달되지 못해 정확한 기능을 수행할 수 없게 된다. 따라서 센서 네트워크 설계 시, 사용될 환경의 분석과 그 환경에 적합한 라우팅 프로토콜을 설정하는 것이 무엇보다 중요하다.

센서 네트워크상에서의 데이터는 무선 통신을 이용하여 서버로 전송되므로 잦은 데이터 전송은 과도한 전력 소모를 초래하게 된다. 그러나 데이터 전송이 원활하게 이루어지지 않는다면 즉각적인 대처가 불가능하다. 따라서 각 센서에서 전송 주기와 센서 정보의 전송 방식에 따라 센서 네트워크의 성능이 좌우된다. 최적의 센서 네트워크 라우팅 프로토콜의 조건은 다음과 같다[3,4].

- 어떤 센서가 수집한 데이터는 인접한 주변 센서 노드들의 데이터와 유사하므로 모든 센서 노드들이 데이터를 전송할 경우 전력 낭비가 된다. 따라서 인접한 센서 노드들의 데이터를 통합하여 한 번에 전송하는 방식이 필요하다.
- 센서 노드들 간의 라우팅 경로는 센서 노드의 상태와 전력 소모 상태에 따라 달라져야 한다. 만약 고정된 경로를 사용할 경우에는 특정 노드들의 전력 소모가 증가될 수 있다. 따라서 센서 네트워크를 구성하는 모든 센서 노드들이 균등한 전력을 소모하도록 조정하는 것이 전체 센서 네트워크의 수명을 연장시킬 수 있는 방법이다.
- 센서 네트워크에서의 센서들은 센서의 전력 소모와 주변 환경에 의해 동작이 실패하거나 기능이 소멸되는 경우가 있는데, 그러한 경우에도 전체 센서 네트워크의 동작에는 영향을 미치지 않아야 한다. 이를 위해서는 네트워크 라우팅으로서 정적이 아닌 동적 라우팅 기법을 사용하여야 한다.

이와 같은 조건들을 충족시키기 위하여 많은 라우팅 프로토콜들이 제안되어 왔다. 그러나 기존의 연구들은 단순히 센서 노드 수의 변화 혹은 시간의 흐름에 따른 에너지 소모량만을 비교하는 단편적인 비교와 성능 분석이 이루어졌을 뿐이다[5-7]. 따라서 실제 센서네트워크에 적용할 수 있는 라우팅 프로토콜에 대한 세부적인 기초자료는 부족한 실정이다.

1.2 연구 목표

센서 네트워크의 설계를 위해서는 센서 네트워크의 용도와 사용되는 환경에 대한 분석이 필수적이다. 그러나 환경에 따른 라우팅 프로토콜의 수명과 성능에 대한 비교 연구는 거의 이루어지지 않았으며, 실제 센서 네트워크가 적용되는 다양한 환경에서의 비교가 아닌, 단순한 에너지 소모량의 비교 정도만이 이루어져 왔다.

본 논문에서는 선행적 네트워크에 속하며 계층적 라우팅 프로토콜 중에서 대표적인 LEACH 프로토콜과 그의 변형인 TL-LEACH, M-LEACH 및 LEACH-C 프로토콜을 다양한 센서네트워크 환경에서 비교 분석함으로써, 라우팅 프로토콜 선택에 도움이 되는 자료들을 제시하고자 한다.

2. 관련 연구

2.1 센서 네트워크 라우팅 프로토콜

무선 센서 네트워크는 기본적으로 센서 노드(sensor node)와 싱크 노드(sink node)로 구성되며, Fig. 1은 이런 센서 네트워크의 구성을 보여주고 있다. 센서 네트워크 내의 각 센서 노드에서 수집된 데이터는 싱크 노드로 전송되며, 싱크 노드에 수집된 데이터는 서버에 저장되어 일차적으로 가공된 후에, 인터넷 등의 외부 네트워크를 통해 사용자에게 전달된다.

2.1.1 목적에 따른 분류

무선 센서 네트워크의 라우팅 기법은 센서 네트워크의 사용 목적에 따라 다음과 같이 두 가지 종류로 분류된다[2].

- 선행적(proactive) 라우팅 프로토콜: 센서 노드들이 주기적으로 센서와 송신부의 동작을 통해 환경을 감시하고, 응용의 관심(interest)에 속하는 데이터를 전송한다. 이와 같은 네트워크는 주기적인 간격으로 환경의 상태를 파악할 수 있도록 해주기 때문에, 지속적인 변화에 대한 감시를 요하는 응용에 적합하다. 대표적인 라우팅 프로토콜로는 LEACH 프로토콜이 있다.
- 반응적(reactive) 라우팅 프로토콜: 센서 노드들이 연속

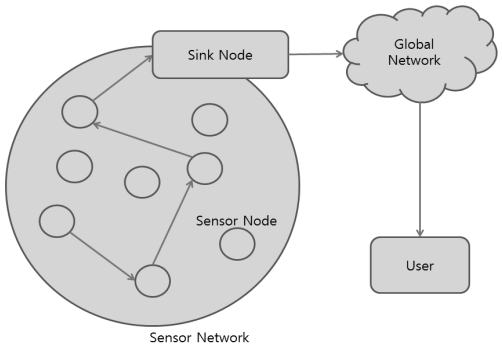

Fig. 1. Wireless sensor network architecture

적으로 환경을 감지하며, 속성 값의 갑작스런 변화가 발생한 경우에 즉시 서버(혹은 사용자)에게 알린다. 따라서 이러한 네트워크는 침입 탐지나 폭발 탐지 혹은 시간 임계적인(time-critical) 응용에 적합하다. 대표적인 라우팅 프로토콜로는 TEEN 프로토콜이 있다.

이러한 라우팅 프로토콜은 어떠한 응용에 적용되느냐에 수명과 성능이 판이하게 달라질 수 있기 때문에, 응용의 목적에 적합한 라우팅 프로토콜을 선택하여야 한다.

2.1.2 구성에 따른 분류

라우팅 기법은 센서 네트워크의 센서 노드들의 구성에 따라 평면적 라우팅 프로토콜(flat routing protocol)과 계층적 라우팅 프로토콜(hierarchical routing protocol)으로 구분된다[2].

- 평면적 라우팅 프로토콜: 평면적 라우팅 프로토콜은 모든 센서 노드들을 동등한 입장에서 공통의 라우팅 기법을 사용하는 방식으로, 요구 기반(on-demand) 방식과 테이블 기반(table-driven) 방식이 존재한다.
  요구 기반 방식을 사용할 경우, 수백에서 수천 개의 노드들이 경로를 찾기 위한 경로 요청 메시지들이 발생하게 되어 많은 에너지가 소비되고, 많은 지연이 발생하게 된다.
  테이블 기반 방식에서는 센서 노드가 네트워크 내 수많은 노드까지의 경로를 유지하는데 한계가 존재한다. 즉, 센서 노드의 메모리 용량이 수백 KB 정보를 가진 라우팅 테이블을 유지하고 관리하는 것은 사실상 어렵다[3].
- 계층적 라우팅 프로토콜: 계층적 라우팅 프로토콜은 Fig. 2와 같이 인접한 센서 노드들을 하나의 클러스터로 그룹핑하고, 클러스터 내에 존재하는 센서 노드들은 발생한 모든 정보를 클러스터 헤드(Cluster Head: CH)로 전달한다. 클러스터 헤드는 데이터 모음(data aggregation)을 수행하여 싱크 노드로 전달함으로써, 센서 노드들의 전체적인 통신 거리를 줄여 에너지 효율적인 라우팅이 가능하게 해준다. 또한 클러스터 헤드에 의해 싱크 노드로의 데이터 전송 경로가 결정되기 때문에 평면 프로토콜에서와 같은 경로 설정을 위한 불필요한 동작을 줄일 수 있다. 대표적인 라우팅 프로토콜로는 LEACH 프로토콜이 있다.

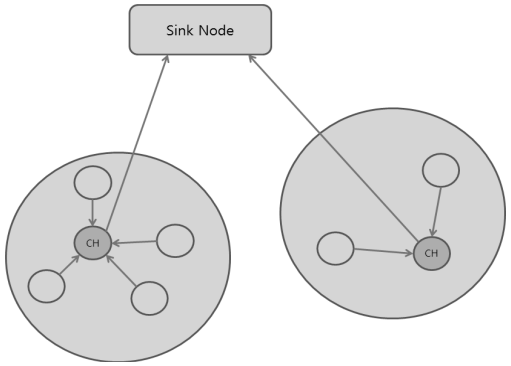

Fig. 2. Hierarchical routing protocol architecture

2.2 계층적 라우팅 프로토콜

본 연구에서는 계층적 라우팅 프로토콜에 대하여 세부적으로 분석하고자 하며, 대표적인 프로토콜들을 소개하면 다음과 같다.

2.2.1 LEACH

LEACH 라우팅 프로토콜은 클러스터링 기반의 대표적인 계층적 라우팅 프로토콜로서, 센서 노드들은 주변의 센서 노드들과 클러스터를 이루며, 각 클러스터에서는 클러스터 헤드가 선정된다. 센서 노드들의 데이터를 수집하고 싱크 노드로 전송하는 역할을 수행하는 클러스터 헤드는 전력소모가 집중되기 때문에, 네트워크에 있는 모든 센서 노드들의 에너지를 최대한 균등하게 소비시키기 위하여 클러스터 헤드를 무작위로 순환시키면서 선정한다. 또한 전체적인 통신비용을 줄이기 위해 클러스터 헤드만이 싱크 노드와 통신을 하도록 허용한다.

LEACH 라우팅 프로토콜의 동작 과정은 Fig. 3과 같이 라운드로 구분되며, 각 라운드는 설정 단계(setup phase)와 지속 상태 단계(steady-state phase)로 이루어진다. 설정 단계는 클러스터 헤드를 선정하고 데이터의 전송 경로를 설정하는 단계로서, 모든 센서 노드들에 대하여 이전 라운드에서 클러스터 헤드였는지의 여부와 정해진 클러스터 헤드 계수를 임의의 값과 비교하는 과정을 통하여 클러스터 헤드가 될 것인지를 결정한다[8].

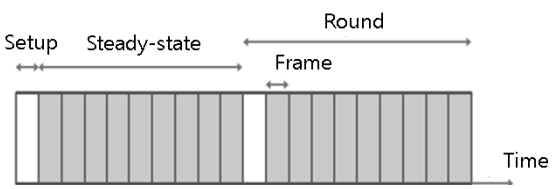

Fig. 3. Operation time of LEACH protocol

해당 라운드 동안 클러스터 헤드가 되기로 결정된 센서 노드는 자신이 해당 라운드의 클러스터 헤드가 되었음을 주변 센서 노드들에게 알린다. 클러스터 헤드의 알림 메세지를 수신한 센서 노드들은 알림 메세지의 강도를 기반으로 자신이 소속될 클러스터와 헤드를 결정하며, 데이터를 전송해야 할 목적 노드를 설정하고 알림 메시지에 대한 응답을 자신의 클러스터 헤드로 전송한다. 클러스터가 구성되면, 클러스터 헤드는 클러스터의 멤버 테이블을 생성하고, 멤버들의 데이터 전송 순서를 스케줄하여 멤버 노드들에게 전송하고, 지속 상태 단계로 넘어간다.

지속 상태 단계에서는 각 클러스터의 멤버 노드들이 자신의 해당 프레임에서만 데이터를 전송하고 나머지는 sleep 모드로 대기하여 전력 소모를 줄인다. LEACH 라우팅 프로토콜에서는 데이터 전송 시에 간섭을 피하기 위하여 클러스터 헤드가 시간을 분할하여 멤버 노드에 할당하는 방식을 취한다.

2.2.2 TL-LEACH

TL-LEACH 라우팅 프로토콜은 LEACH 라우팅 프로토콜의 변형으로서, 지속 상태 단계의 실행과정은 Fig. 3의 LEACH 라우팅 프로토콜과 같다. 그러나 설정 단계에서 클러스터 헤드를 선출 할 때 클러스터 헤드를 상위 클러스터 헤드와 하위 클러스터 헤드로 구분하여 계층적으로 구성한다. 결과적으로 클러스터 헤드에서 싱크 노드로 데이터를 전달 할 때 데이터 전송 거리가 줄어들고, 하나의 클러스터 헤드에 집중되는 멤버 노드들의 수가 줄어듦으로써 에너지 소모가 집중되는 클러스터 헤드의 부담을 줄여주는 방법이다. TL-LEACH의 구성은 다음의 Fig. 4

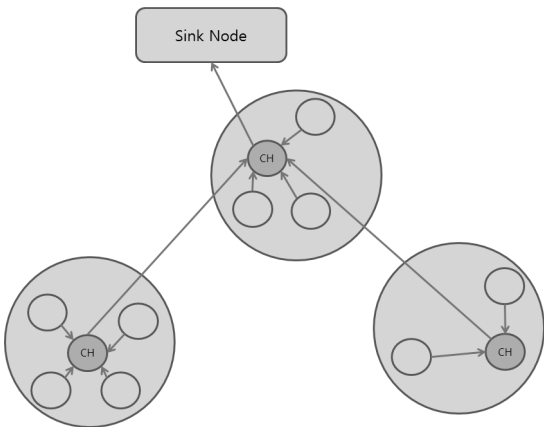

Fig. 4. TL-LEACH protocol architecture

와 같다[6].

TL-LEACH 라우팅 프로토콜은 설정 단계에서 싱크 노드와 일정 거리 내의 센서 노드들을 대상으로 상위 클러스터 헤드를 결정하고, 일정 거리 밖의 센서 노드들을 대상으로 하위 클러스터 헤드를 결정한다. 클러스터의 구성은 전체 클러스터 헤드에서 주변 센서 노드들에게 클러스터 헤드임을 알리는 알림 메세지를 전송하여 구성하는 LEACH 라우팅 프로토콜의 방법과 동일하지만, 상위 클러스터 헤드는 알림 메세지 전송 시에 상위 클러스터 헤드임을 메시지에 포함하여 이를 수신하는 하위 클러스터 헤드는 이 센서 노드를 자신의 전송 목표로 설정하도록 한다. 지속 상태 단계에서는 전체 클러스터 헤드들은 멤버 노드들의 데이터를 취합하고, 상위 클러스터 헤드는 하위 클러스터 헤드의 데이터를 다시 취합하여 싱크 노드로 전달한다.

TL-LEACH 라우팅 프로토콜은 하위 클러스터 헤드, 상위 클러스터 헤드 및 싱크 노드로의 데이터 전달 경로를 갖기 때문에, 싱크 노드로부터의 거리는 상위 클러스터 헤드가 하위 클러스터 헤드보다 가까워야 한다. 만약 상위 클러스터 헤드가 하위 클러스터 헤드보다 싱크 노드에서 더 멀리 떨어져 있다면, TL-LEACH 라우팅 프로토콜의 장점은 사라지고, 데이터의 손실이 발생할 수도 있다.

2.2.3 M-LEACH

M-LEACH 라우팅 프로토콜은 TL-LEACH 라우팅 프로토콜과 마찬가지로 LEACH 라우팅 프로토콜의 변형으로서, 지속 상태 단계에서의 실행 과정은 거의 유사하다. 그러나 M-LEACH 프로토콜에서는 클러스터 헤드에서 싱크 노드로 데이터를 전송하는 과정에서 멀티홉 라우팅 프로토콜을 사용한다는 점이 다르다. 이때 멀티홉 라우팅 프로토콜을 통한 데이터 전송의 대상이 되는 센서 노드들은 구현 방법에 따라 클러스터 헤드만 참가시킬 수도 있고, 모든 센서 노드들을 참가 시킬 수도 있다. M-LEACH 라우팅 프로토콜의 구성은 Fig. 5와 같다[7].

Fig. 6의 탐색 과정을 살펴보면, 먼저 싱크 노드에서 모든 노드들에게 경로 탐색을 위한 요청 메시지들을 전송한다. 요청 메시지를 전송받은 센서 노드들은 통신 범위 내의 다른 센서 노드들에게 이 메시지를 전달하며, 모든 센서 노드들에게 요청 메시지가 전송이 완료되면, 각 센서 노드들은 요청 메시지의 강도에 따라 가장 강한 신호를 보낸 센서 노드로 응답 메시지를 보낸다. 이 응답 신호가 싱크 노드에까지 도달하면 최종 경로가 설정되고, 그 결과에 따라 데이터가 그 경로를 통하여 전송된다. 그리

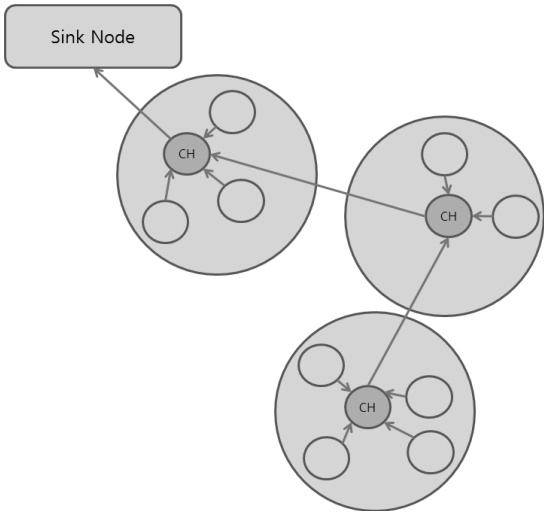

Fig. 5. M-LEACH protocol architecture

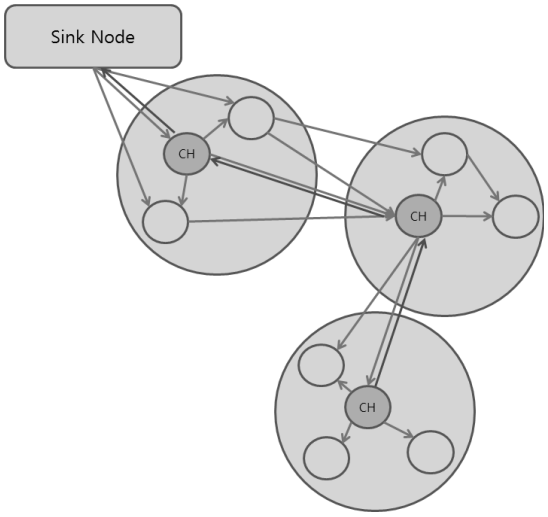

Fig. 6. Searching routing path of M-LEACH protocol

고 최종 클러스터 헤드에서 종합되는 데이터는 싱크 노드로 전송된다.

2.2.4 LEACH-C

LEACH 라우팅 프로토콜의 변형인 LEACH-C 라우팅 프로토콜은 중앙집중식 클러스터링 알고리즘을 적용한 방식이다. 실행 과정과 구성에 있어서는 LEACH 라우팅 프로토콜과 유사하지만, GPS 모듈을 탑재하여 각 센서 노드의 위치 정보와 센서 노드 간의 거리 정보와 매 라운드마다 싱크 노드에서 수집한 각 센서 노드의 잔여 에너지를 기반으로 클러스터 헤드를 선출한다. LEACH-C 라우팅 프로토콜의 구성은 LEACH 라우팅 프로토콜과 마찬가지로 Fig. 2와 같다. 하지만 클러스터 헤드 선출 시 각 센서 노드의 위치와 에너지 잔량을 매 라운드 마다 전달받으며, 그것을 기반으로 중앙의 싱크 노드(서버)에서 클러스터 헤드를 선출한다는 것이 다른 라우팅 프로토콜들과 다른 점이다.

2.3 센서 네트워크 시뮬레이터

많은 수의 센서 노드들을 갖는 센서 네트워크의 개발을 위한 센서 네트워크의 성능 분석과 검증을 위한 방법으로는 실제 센서 노드로 구성된 테스트베드를 이용하는 방법과 시뮬레이터를 사용하는 방법으로 분류된다[9]. 보다 정확한 검증을 위해서는 실제 센서 노드들을 사용하는 것이 좋겠지만 이는 실험 시간 및 공간 그리고 많은 비용을 필요로 한다.

센서 네트워크를 설계 및 개발하기 위하여 다양한 시뮬레이터들이 이용되고 있다. 널리 사용되는 센서 네트워크 시뮬레이터로는 NS-2, TOSSIM 등이 있는데, NS-2는 콜롬비아 대학에 의해 개발된 시뮬레이션 테스트베드인 NEST를 기반으로 UC Berkeley에서 1988년에 개발한 REAL이라는 네트워크 시뮬레이터를 기원으로 하고 있다. NS-2는 TCP, 라우팅 프로토콜, 멀티캐스트 프로토콜 등의 다양한 인터넷 프로토콜에 대한 시뮬레이션을 위한 여러 환경을 제공하며, 오픈 소스이기 때문에 교육용뿐만 아니라 여러 방면에 사용되고 있다. TOSSIM은 TinyOS 기반의 이벤트 시뮬레이터로 TinyOS의 어플리케이션을 TOSSIM 프레임워크를 통해 컴파일 함으로써 PC상에서 어플리케이션의 동작을 확인할 수 있다. TOSSIM은 기본적으로 최하위 레벨에서의 TinyOS의 동작을 시뮬레이션 하며, 하드웨어 통신, 센서 값 측정 등의 실제 하드웨어에서 일어나는 동작들이 시뮬레이션 되고 그 외의 동작들은 TinyOS 코드에 따라 실행된다.

본 연구에서 사용된 시뮬레이터인 PASENS(PAllel SEnsor Network Simulator)는 연세대학교 유비쿼터스응용 연구실에서 개발한 명령어-레벨의 병렬 시뮬레이터로서, 실제 센서 노드에 적재되는 실행 이미지를 작업부하로 사용하며, 센서 노드에서 하드웨어적으로 발생하는 동작들을 시스템 클록 수준의 기계 명령어들을 시뮬레이션 한다. 이러한 방법으로 실제 센서 네트워크 어플리케이션의 동작과 실행 시간 및 에너지 소모량의 측정을 보다 정

확하게 예측할 수 있다. 또한 센서 네트워크의 운영체제, 라이브러리 및 개발 언어에 구애받지 않고 실행 이미지만으로 시뮬레이션이 가능하기 때문에, 하드웨어 의존(hardware dependent)이라는 문제가 남아있기는 하지만 기존의 소프트웨어 의존성 제약에서는 벗어난 방법이다[10].

3. 시뮬레이션

3.1 시뮬레이션 환경 설정

본 연구에서는 센서 네트워크를 위한 계층적 라우팅 프로토콜 중에서 대표적인 LEACH 라우팅 프로토콜과 그의 변형인 TL-LEACH, M-LEACH 라우팅 프로토콜 및 LEACH-C 라우팅 프로토콜을 병렬 시뮬레이터인 PASENS를 이용하여 성능을 비교하였다.

계층적 라우팅 프로토콜의 구현은 TinyOS를 플랫폼으로 nesC 언어를 사용하여 작성하였으며, MICAz 모델의 MPR2400 보드를 시뮬레이션 대상 하드웨어 모델로 선정하였다. Fig. 7은 라우팅 프로토콜의 구현을 위한 컴파일 과정을 보여주고 있다.

LEACH-C 라우팅 프로토콜을 제외한 나머지 라우팅 프로토콜은 클러스터 헤드의 선출 방법이 무작위로 선출되기 때문에 클러스터 헤드의 수는 알 수가 없다. 그리고 중앙의 싱크 노드에서 각 클러스터의 클러스터 헤드를 선출하는 LEACH-C 라우팅 프로토콜에서는 전체 센서 노드 수의 20%가 클러스터 헤드로 지정되도록 설정하였다. 또한 LEACH-C 라우팅 프로토콜의 클러스터 헤드 선출 방식은 균등한 에너지 소모를 위해 싱크 노드로부터 일정 거리(통신 가능한 거리)에 있는 센서 노드의 순으로 라운드-로빈 방식으로 설정하였다.

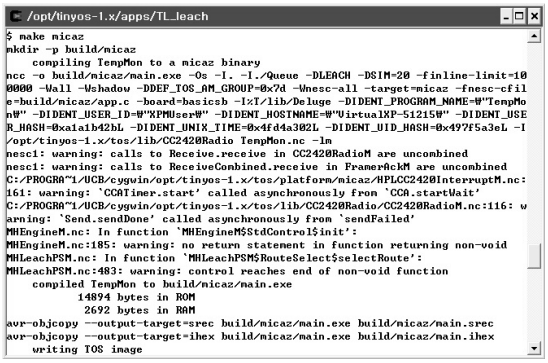

Fig. 7. Compiling process of routing protocol

3.2 시뮬레이션 방법

본 연구에서 PASENS를 이용한 병렬 시뮬레이션은 다음과 같이 세 가지의 방법으로 수행하였다.

- 기본적으로, LEACH-C 라우팅 프로토콜을 제외한 나머지 라우팅 프로토콜에서는 센서 노드의 위치를 임의로 배치하는 것을 원칙으로 하되, TL-LEACH의 클러스터 헤더와 LEACH-C의 위치 정보를 고려하기 위한 부분은 지정 또는 범위 제약을 두고 배치한다.
- 첫째, 센서 노드의 수는 100개에서 800개까지 증가시키며, 센서 노드를 배치하는 공간의 크기는 싱크 노드를 중심으로 반경 100m의 3차원 공간으로 한다. 이때의 전체 전력 소모량, MCU의 전력 소모량, RF 통신에 의한 전력 소모량, 그리고 센싱되는 데이터가 싱크 노드에 도달하는 비율을 나타내는 데이터 수신율을 측정하여 분석한다.
- 둘째, 센서 노드의 수를 100개로 고정시키고, 센서 노드를 배치하는 공간의 크기를 싱크 노드를 중심으로 반경 10 m에서 100m의 3차원 공간까지 넓이를 증가시키면서, 각 센서 노드에서 센싱되는 데이터가 싱크 노드에 안전하게 도달하는 비율인 데이터 수신율을 측정한다.
- 셋째, 센서 노드의 수는 100개로 고정시키고, 센서 노드를 배치하는 공간의 크기도 모든 라우팅 프로토콜이 100% 데이터의 수신이 가능한 반경 10m의 3차원 공간에 센서 노드들을 배치하고, 시간에 따른 가용 센서 노드의 수를 구하여 센서 네트워크의 수명을 예측한다.

위의 세 가지 방법을 통해 각 라우팅 프로토콜의 데이터 수신율과 에너지 소모량을 측정하여, 동작 환경에 따라 라우팅 프로토콜의 선택에 도움을 줄 수 있는 자료를 제시하고자 한다.

3.3 시뮬레이션 수행

Fig. 8은 시뮬레이션의 초기 수행 과정을 보여주고 있는데, 센서 노드 종류, 실험 센서 노드 수, 실행 이미지 등의 시뮬레이션에 필요한 설정을 하고 있다. “image.srec”는 MICAz를 위한 실행 이미지이며, 각 센서 노드는 5000ms 간격으로 실행된다. 가상 센서 노드 실행 시, 설정 파일인 “pasens.cfg”에서 센싱 데이터를 읽어 센서 노드의 데이터를 초기화한다. 병렬 시뮬레이션은 동일한 성능의 PC 4대를 이용하여 실험하였다.

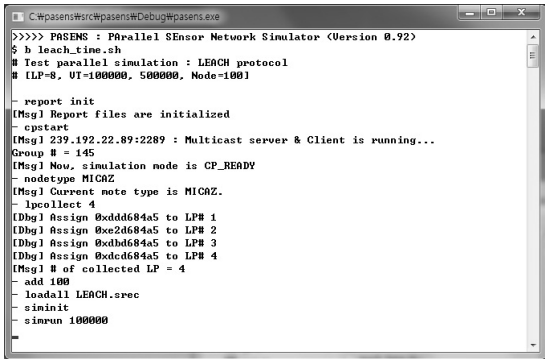

Fig. 8. Execution process of simulation

4. 시뮬레이션 결과

시뮬레이션의 결과는 센서 노드의 전력 소모량을 바탕으로 한 전체 네트워크의 수명과 센싱되는 데이터가 싱크 노드에 도달하는 수신율, 이 두 가지를 기준으로 각각의 다른 환경에서 안정적으로 오랜 수명을 유지하는 라우팅 프로토콜은 어떤 것인지 분석하였다.

4.1 센서 노드 수의 증가에 따른 전력 소모량과 데이터 수신율

Fig. 9, 10 및 11은 각각 제한된 공간에서 센서 노드수의 증가에 따른 전체 전력 소모량, MCU에 의한 전력 소모량, 그리고 RF 통신에 의한 전력 소모량을 측정한 결과를 보여주고 있다.

먼저 Fig. 9를 살펴보면, 센서 네트워크의 전체 전력 소모량은 M-LEACH 프로토콜이 다른 프로토콜들에 비해 다소 많은 전력을 소모하고 있으며, 그 외의 프로토콜들은 비슷한 양의 에너지를 소모하고 있다.

좀 더 세부적인 분석을 위하여 Fig. 10의 MCU에서의 전력 소모량을 살펴보면, 모든 프로토콜들이 소모하는 전력의 양이 거의 비슷하다는 것을 알 수 있다. 이것은 MCU에서의 전력 소모량은 전체 네트워크의 수명에 크게 영향을주지 않는 다는 것을 의미한다.

반면에, Fig. 11의 RF 통신에 의한 전력 소모량을 살펴보면, 수치의 차이는 있지만 Fig. 8의 전체 전력 소모량 그래프와 유사한 형태를 나타내고 있다. 이 결과로부터 라우팅 프로토콜에 따른 RF 통신 방법이 센서 네트워크의 전체 전력 소모량에 가장 큰 영향을 미치고 있다는 것을 알 수 있다.

Fig. 9에서 M-LEACH 프로토콜의 전체 에너지 소모량이 다소 크게 나타나는 이유는 Fig. 12에서 발견할 수 있다. Fig. 12는 반경 100m의 제한된 공간에서 센서 노드 수의 증가에 따른 데이터 수신율을 보여주고 있다. 이 결과에 따르면 멀티홉 라우팅을 사용하는 M-LEACH 프로토콜이 각각의 클러스터 헤드에서 직접 싱크 노드로 데이

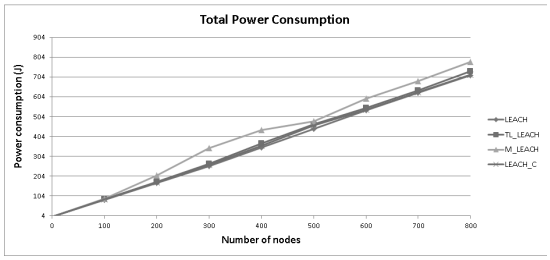

Fig. 9. Power consumption according to increasing nodes

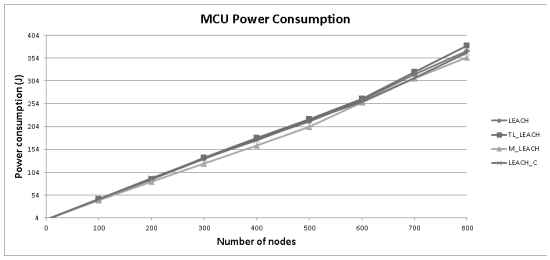

Fig. 10. MCU power consumption according to increasing nodes

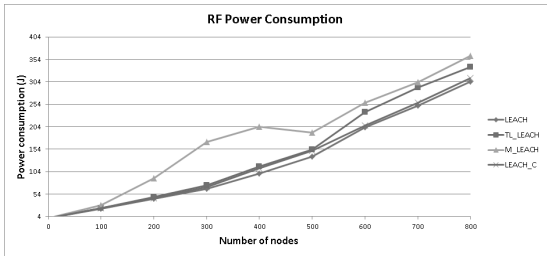

Fig. 11. RF power consumption according to increasing nodes

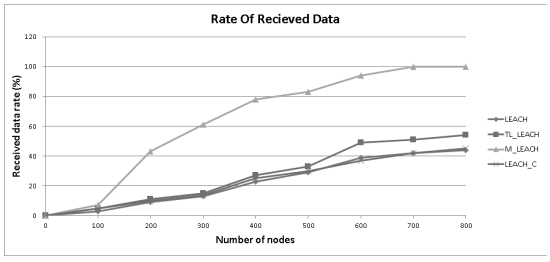

Fig. 12. Data reception rate according to increasing nodes

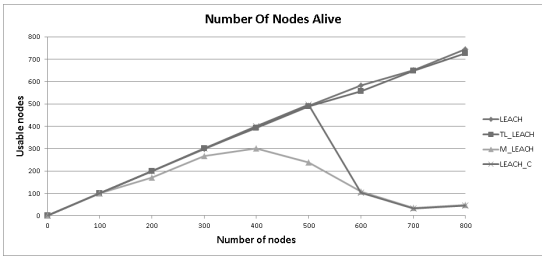

Fig. 13. Network life-time according to increasing nodes

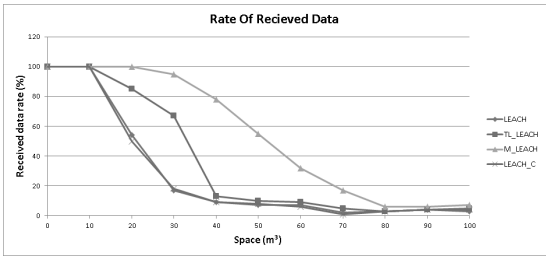

Fig. 14. Data reception rate according to increasing space

터를 전송하는 LEACH 및 LEACH-C 프로토콜과 두 단계의 계층을 이루어 데이터를 전송하는 TL-LEACH 프로토콜에 비하여 데이터 수신율이 월등하게 높다는 것을 알 수 있다.

이것은 M-LEACH 프로토콜이 센서 노드 간의 통신 거리가 유지되어 클러스터 헤드의 위치와는 무관하게 데이터를 전송할 수 있는 반면에, 나머지 프로토콜들은 직접 또는 하나의 중계 노드만을 사용해야하는 클러스터 헤드의 위치에 따른 제약이 있기 때문이다. 다시 표현하면, 클러스터 헤드 위치에 따른 전력 소모량이 적은 M-LEACH 프로토콜이 많은 양의 데이터를 수신할 수 있고, 그에 따른 RF 통신 모듈의 빈번한 작동으로 인해 더 많은 에너지를 소모하게 된다는 것을 말한다. 또한, LEACH, TL-LEACH 및 LEACH-C 프로토콜의 데이터 수신율이 센서 노드 수가 증가하여도 일정이상 증가하지 않는 이유는 일정 크기 이상의 공간에 센서 노드들을 배치하게 되면 클러스터 헤드의 위치가 싱크 노드와의 통신 거리를 벗어나거나, 센서 노드가 클러스터 헤드와 거리가 멀어 클러스터에 포함되지 못하기 때문이다.

Fig. 13은 Fig. 9, 10, 11, 12와 동일한 환경에서 일정한 시간이 지난 후에 사용 가능한 센서 노드의 수를 측정한 것으로, 이것을 통해 프로토콜에 따른 전체 센서 네트워크의 수명을 예측할 수 있다. Fig. 13에서 M-LEACH 프로토콜을 제외한 나머지 프로토콜들은 센서 노드 수가 100개인 경우에는 초기 전체 네트워크의 센서 노드 수와 시간이 지난 후 사용 가능한 센서 노드 수가 비슷하다는 것을 알 수 있는데, 이것은 통신에 의한 전력 소모가 적기 때문이다. 반면에 M-LEACH 프로토콜은 센서 노드 수가 증가하더라도 사용가능한 센서 노드 수가 유지되다가, 센서 노드 수 400개를 기점으로 급격히 감소하는 것을 볼 수 있다. 이것은 센서 노드가 400개 이상인 경우에는 빈번하게 데이터의 송·수신이 일어났기 때문이다.

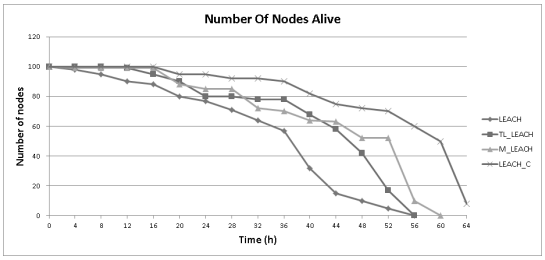

Fig. 15. Number of nodes that remain alive in time

4.2 공간 크기의 변화에 따른 수신율

Fig. 14는 고정된 수의 센서 노드들을 각각의 프로토콜별로 센서 노드를 배치하는 공간의 크기에 따른 수신율을 측정한 것이다. LEACH 프로토콜과 LEACH-C 프로토콜은 각 클러스터 헤드에서 싱크 노드로 직접 통신을 하기 때문에 센서 노드 간의 통신 거리인 $10m^3$가 넘는 공간에서는 데이터 수신율이 급격히 감소한다. 마찬가지로, TL-LEACH 프로토콜의 경우에도 클러스터 헤드의 위치 제약으로 인해 $40m^3$ 이상의 크기의 공간에서는 매우 낮은 데이터 수신율을 보인다. 반면에, M-LEACH 프로토콜의 경우에는 센서노드가 배치되는 공간의 크기가 증가하더라도 데이터 수신율이 감소하는 것을 확인할 수 있는데, 그 이유는 멀티홉 라우팅을 위하여 클러스터 헤드 간의 거리만 유지되면 통신이 가능하기 때문이다.

4.3 센서 네트워크의 전체 수명

세 번째는 같은 조건에서 센서 네트워크의 수명이 가장 긴 프로토콜을 예측하기 위한 시뮬레이션이다. Fig. 15는 센서 네트워크 내의 모든 센서 노드들을 통신이 가능한 범위에 배치하고, 1시간 단위로 주변 환경 정보를 측정할 경우, 일반적인 1.2V의 건전지를 사용하는 센서 노드들로 이루어진 센서 네트워크의 수명을 예측한 결과들을 보여주고 있다.

Fig. 15를 살펴보면, LEACH 프로토콜의 경우에 8시간이 경과한 후부터 사용 가능한 센서 노드의 수가 가장 급격하게 감소한다는 것을 알 수 있다. 그 이유는 LEACH 프로토콜에서 클러스터 헤드와 싱크 노드가 직접적으로 통신을 하므로 클러스터 헤드의 평균 통신 거리가 가장 멀어져 클러스터 헤드가 되는 센서 노드의 에너지가 집중적으로 소모되기 때문이다. 반면에, LEACH-C 프로토콜의 경우에는 사용 가능한 노드 수가 가장 천천히 줄어드는데, 그 이유는 싱크 노드(서버)에서 각 센서 노드의 에너지 잔량과 위치를 기반으로 에너지 소모가 집중되는 클러스터 헤드를 균등하게 선정하기 때문이다. 센서 네트워크에서 전체 센서 노드의 20% 이상이 사용 불가능해지거나 싱크 노드와 인접한 센서 노드들의 사용이 불가능해진다면, 대부분의 센서 노드들에서 데이터를 전달 받을 수 없기 때문에 센서 네트워크는 그 기능을 다하기는 힘들다. 따라서 네트워크에서 사용 가능한 노드의 수가 전체 노드의 80퍼센트 이상 유지될 때까지를 네트워크 수명이라고 본다면, LEACH-C 프로토콜을 사용하는 경우에 수명은 24시간 정도로 가장 길다고 할 수 있다.

5. 결 론

본 연구의 시뮬레이션 결과에서 알 수 있듯이, 좁은 공간에서의 센서 네트워크는 센서 노드 간의 거리와 센서 노드별 에너지 잔량 관리를 통해 센서 노드들이 균등하게 전력을 소모하는 LEACH-C 라우팅 프로토콜을 사용하는 센서 네트워크의 수명이 가장 길게 나타났다. 또한 넓은 공간에서의 센서 네트워크 경우는 빈번한 데이터 수신 동작에 의해 많은 전력을 소모하는 M-LEACH 프로토콜의 수명이 가장 짧은 것으로 나타났다. 그리고 그 외의 프로토콜들은 비슷한 전력 소모량을 보였다.

M-LEACH 라우팅 프로토콜은 멀티홉 통신을 이용하기 때문에 다른 라우팅 프로토콜들보다 먼 거리까지 안정적으로 데이터를 전달할 수 있다. 일반적으로, 선행적 네트워크는 주기적으로 센서의 데이터를 읽어 전송해야 하기 때문에 수명을 늘리기가 어렵다. 그러나 라우팅 프로토콜의 개선으로 불필요하게 전송되는 메시지들을 줄이려는 노력은 계속해서 이루어졌으며, 균등한 에너지 소모를 통한 센서 네트워크 전체의 네트워크의 수명 증가를 시도하였고, 그를 위한 대표적인 라우팅 프로토콜이 LEACH-C 프로토콜이다. 그러나 LEACH-C 프로토콜은 LEACH 프로토콜과 마찬가지로 클러스터 헤드에서 싱크 노드에 직접 통신을 하는 형태로 구성하기 때문에 매우 좁은 공간에서만 안정적인 센서 네트워크의 구축이 가능하다.

반면에, M-LEACH 라우팅 프로토콜은 보다 적은 수의 센서 노드로 넓은 공간에 센서 네트워크를 구축하기에는 적합하지만 싱크 노드(서버)에서 직접 전체 센서 노드들의 전력 잔량과 위치를 고려하여 클러스터 헤드를 선택하는 LEACH-C 라우팅 프로토콜보다 불균형적인 전력 소모를 보인다. 이러한 이유 때문에 센서 네트워크의 수명이 짧아진다. 그리고 넓은 공간에 센서 네트워크를 구축할 경우에는 다른 프로토콜들보다 데이터 수신율이 높아지기 때문에, 빈번한 수신 동작에 의해 더 많은 전력을 소모한다.

좁은 공간에서 센서 네트워크를 구축하는 경우에 각 라우팅 프로토콜의 사용가능한 센서 노드의 수가 80% 이하로 떨어지는 시점은 LEACH-C 라우팅 프로토콜이 다른 프로토콜들에 비하여 가장 느리다. 또한 넓은 공간의 경우에는 M-LEACH 프로토콜이 많은 에너지를 소모하지만 나머지 프로토콜들은 안정적인 데이터 전송을 보장할 수 없기 때문에 M-LEACH 프로토콜을 사용하는 것이 더욱 효율적이다.

센서 네트워크를 설계하고 개발하는데 있어서 가장 큰 비중을 차지하는 라우팅 프로토콜의 선택은 구축하는 환경에 따라 달라질 수밖에 없다. 본 연구에서 언급한 LEACH 라우팅 프로토콜과 그의 변형 라우팅 프로토콜들 사이에서도 상황과 구축 환경에 따라 필요한 요소들이 다르기 때문에 성능도 다르게 나타난다. 본 연구의 결과에서 알 수 있듯이, 넓은 공간에 센서 네트워크를 구축하기 위해서는 M-LEACH 라우팅 프로토콜이 성능이 가장 우수한 것을 알 수 있다. 그 외의 라우팅 프로토콜은 일정 크기 이상의 공간에서는 만족할만한 수신율을 얻을 수 없으므로 넓은 공간에 센서 네트워크를 구축하는 경우에는 사용을 지양하는 것이 바람직하다. 또한 좁은 공간에서 오랜 수명을 필요로 하는 센서 네트워크를 구축하기 위해서는 LEACH-C 라우팅 프로토콜이 가장 효율적인 것으로 나타났다.

이와 같이 본 연구에서는 여러 가지 계층적 라우팅 프로토콜들을 시뮬레이션 하여, 환경에 따른 적합한 라우팅 프로토콜의 선택을 위한 기초 자료를 제공하였으며, 그들을 이용하면 센서 네트워크의 개발 비용, 시간 및 노력을 줄이는데 큰 도움이 될 것이다.

참 고 문 헌

1. K. Akkaya and M. Younis (2005), “A Survey on Routing Protocols for Wireless Sensor Networks,” in *Ad Hoc Networks*, Vol.3, No.5, pp.325-349.
2. Jamal N. Al-karaki, Ahmed E. Kamal (2004), “Routing Techniques in Wireless Sensor Networks: A Survey,“ IEEE *Wireless Communications*, pp.6-28.
3. Jung, Yong Doc (2006), *Routing Protocols Performance Analysis using Sensor Network Simulator*, master’s thesis, Yonsei University, pp.1-19.
4. Ian F. Akyildiz, Weilian Su, Yogesh Sankarasubramaniam, and Erdal Cayirci (2002), “A Survey on Sensor Networks,” IEEE *Communication Magazine*, pp.102-114.
5. M. Bani Yassein, A. Al-zou'bi, Y. Khamayseh, W. Mardini (2007), “Improvement on LEACH Protocol of Wireless Sensor Network”, *International Conference on Sensor tchnologies and Applications*, pp.260-264.
6. V. Loscrì, G. Morabito and S. Marano (2005), “A Two-Levels Hierarchy for Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy”, *Vehicular Technology Conference*, pp.1809-1813.
7. Rajashree. V. Biradar, Dr. S. R. Sawant, Dr. R. R. Mudholkar, Dr. V. V. Patil (2011), “Multihop Routing In Self-Organizing Wireless Sensor Network“, *International Journal of Computer Science Issues*, Vol.8, Issue 1, pp.155-164.
8. W.R. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan (2000), “Energy-Efficient Communic*ation Protocol for Wireless Microsensor Networks,” Proc. of the 33rd International Conference on System Sciences*, Hawaii.
9. Park, Sang Jun, Moon, Young Baek, Park, Jong Jun (2007), “Sensor Network Simulation,“ *Journal of The Korea Information Science Society*, Vol.25, No.12, pp.74-82.
10. Kim, Bang Hyun (2007), *Parallel Simulator for Large-scale Wireless Sensor Network*, doctoral thesis, Yonsei University, pp.4-41.

서 병 석 (magics94@yonsei.ac.kr)

2000 연세대학교 전산학과 학사
2008 연세대학교 전신학과 석사
2011 연세대학교 전산학과 박사수료
2012～현재 상지영서대학교 국방정보통신과 조교수

관심분야 : 유비쿼터스 센서네트워크, 시뮬레이션, 병렬처리

윤 상 현 (hanadamaru@naver.com)

2010 연세대학교 컴퓨터정보통신공학부 학사
2012 연세대학교 전신학과 석사
2012～현재 (주)플랜티넷 연구개발센터 연구원

관심분야 : 유비쿼터스 센서네트워크, 시뮬레이션

김 종 현 (jhkim34@yonsei.ac.kr)

1976 연세대학교 전기공학과 학사
1981 연세대학교 전기공학과 석사
1988 Arizona State University 전기및컴퓨터공학과 Ph.D
1988～1990 한국전자통신연구원(ETRI) 프로세서구조연구실 실장
1990～현재 연세대학교 과학기술대학 컴퓨터정보통신공학부 교수

관심분야 : 컴퓨터구조, 병렬처리, 시뮬레이션, 성능분석, 유비쿼터스 센서네트워크