

무선 센서 네트워크의 목표 수명을 만족시키기 위한 에너지 효율적 라우팅 (Energy Efficient Routing for Satisfying Target Lifetime in Wireless Sensor Networks)

이 건택[†]
(Keontaek Lee)

박 선 주^{**}
(Sunju Park)

김 학 진^{***}
(Hak-Jin Kim)

한 승 재^{****}
(Seungjae Han)

요 약 대부분의 무선 센서 네트워크를 활용한 어플리케이션에서는 네트워크를 설치한 후 언제까지 작동해야 하는 지를 나타내는 목표 수명(target lifetime)을 가진다. 하지만 무선 센서 네트워크는 많은 경우에 각 센서 노드들이 배터리를 이용하여 작동하기 때문에 목표 수명을 만족시키는 것은 쉬운 문제가 아니며 이를 달성하기 위해서는 에너지 효율적인 라우팅 알고리즘이 필요하다. 본 논문에서는 무선 센서 네트워크의 목표 수명을 만족시키기 위한 라우팅 알고리즘을 제안한다. 제안하는 알고리즘은 선형 프로그래밍(Linear Programming)을 이용하여 에너지 효율적인 경로를 찾는 동시에 감지 비율(sensing rate)을 조절함으로써 무선 센서 네트워크의 목표 수명을 만족시킨다. 시뮬레이션을 통해 제안한 기법의 성능을 다른 기법들의 성능과 비교한다.

키워드 : 무선 센서 네트워크, 목표 수명, 라우팅, 선형 프로그래밍

Abstract In some wireless sensor networks, each wireless sensor network has its own target lifetime (desired lifetime after deployment). However, satisfying the target lifetime is not a trivial problem since the nodes in wireless sensor networks often rely on batteries as their power source. In this paper, we propose an energy efficient routing algorithm that satisfies the target-lifetime requirement of a wireless sensor network. The proposed routing algorithm not only finds energy efficient paths but also optimizes the sensing rate of each sensor node. Through simulation, we compare the performance of the proposed scheme with several other existing algorithms.

Key words : Wireless sensor networks, target lifetime, routing, linear programming

1. 서론

무선 센서 네트워크(Wireless Sensor Networks: WSNs)는 목표 추적(target tracking), 서식지 모니터링(habitat monitoring), 건물 모니터링(structure monitoring), 무선 감시(wireless surveillance) 등의 여러 유용한 어플리케이션들에서 사용되고 있으며, 어떤 어플리케이션을 수행하느냐에 따라 각각 다른 목표 수명(target lifetime)을 가지게 된다. 여기서 목표 수명이란, 무선 센서 네트워크가 설치되어 어플리케이션을 수행하기 시작한 이후 언제까지 동작해야 하는가를 의미한다.

하지만 무선 센서 네트워크의 목표 수명을 만족시키는 것은 쉬운 문제가 아니다. 현재 무선 센서 네트워크를 이루는 각 노드는 배터리를 전력 원으로 사용하고 있어 동작할 수 있는 시간이 한정되어 있기 때문이다. 배터리 자체의 수명이 충분히 길지 못 한 것도 문제이지만, 센서 노드의 수가 수백에서 수천 개에 까지 이를

* 본 연구는 지식경제부 및 정보통신산업진흥원의 대학 IT 연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었음(NIPA-2009-IITA-2009-C1090-0902-0006)

† 학생회원 : 연세대학교 컴퓨터과학과
ktleee@cs.yonsei.ac.kr
** 종신회원 : 연세대학교 경영학과 교수
boxenju@yonsei.ac.kr
*** 정 회 원 : 연세대학교 경영학과 교수
hakjin@yonsei.ac.kr
(Corresponding author)
**** 종신회원 : 연세대학교 컴퓨터과학과 교수
seungjaehan@yonsei.ac.kr
논문접수 : 2009년 1월 16일
심사완료 : 2009년 9월 2일

Copyright©2009 한국정보과학회 : 개인 목적이나 교육 목적인 경우, 이 저작물의 전체 또는 일부에 대한 복사본 혹은 디지털 사본의 제작을 허가합니다. 이 때, 사본은 상업적 수단으로 사용할 수 없으며 첫 페이지에 본 문구와 출처를 반드시 명시해야 합니다. 이 외의 목적으로 복제, 배포, 출판, 전송 등 모든 유형의 사용행위를 하는 경우에 대하여는 사전에 허가를 얻고 비용을 지불해야 합니다.

정보과학회논문지: 정보통신 제36권 제6호(2009.12)

수 있기 때문에 교체 역시 무리가 있다. 지금까지의 연구 결과를 통해 센서 노드의 에너지 소모를 일으키는 가장 주요한 요인이 무선 통신이라는 사실이 밝혀졌기 때문에 결과적으로 무선 센서 네트워크의 목표 수명을 만족시키기 위해서는 에너지 효율적인 무선 통신 기법이 필요하다. 이런 기법은 여러 측면에서 접근할 수 있지만, 본 논문에서 우리는 에너지 효율적인 라우팅 알고리즘을 제안하고자 한다.

무선 센서 네트워크는 학계의 지대한 관심을 받아 왔으며 관련된 연구들이 많이 이루어졌다. [1]에서는 최적의 경로들을 번갈아 가며 이용함으로써 네트워크의 수명을 증가시키는 라우팅 방식을 제안했다. 이는 최적의 경로를 계속 사용하면 그 경로 상의 센서 노드들의 에너지가 빨리 소모되기 때문에 결국 네트워크의 수명이 떨어진다는 관찰에 기반한 것이다. 이와 유사한 생각에서 비롯한 라우팅 방식들이 [2-4]에서도 제안되었다.

[5]에서는 네트워크의 수명을 최대화하는 방법으로선형 프로그래밍을 이용한 최적화와 휴리스틱 알고리즘을 제안했다. 하지만 네트워크 전체의 수명을 최초로 에너지가 모두 소모되는 노드가 생길 때까지로 정의한 점에서 우리의 연구와는 차이가 있다. 센서 네트워크는 많은 수의 센서 노드들로 이루어져 있기 때문에 일부 센서 노드의 에너지 고갈이 전체 네트워크의 동작에 직접적으로 연결되지는 않는다. 따라서 위와 같이 네트워크의 수명을 정의하는 것은 본 연구의 목적에는 적절하지 않다. [6]에서도 유사한 접근법을 사용하였다. 전송과 수신뿐만 아니라 센서의 감지와 채널을 듣는 작업에 필요한 에너지까지 고려한 선형 프로그래밍 기법을 제안하였고, 에너지 효율만을 고려하여 지나치게 긴 경로가 선택되는 경우를 막기 위하여 지연(delay)의 상한을 선형 프로그래밍 모델에 포함시키는 기법도 제안하였다. 하지만 역시 첫 노드의 에너지 고갈을 네트워크 전체의 수명으로 정의했다는 한계를 가지고 있다는 점에서 우리의 연구와는 차이가 있다. [7]에서는 라우팅에 사용할 새로운 기준(metric)을 제안하였다. 이 기준은 현재 센서 노드에 남아 있는 에너지의 양과 센서 노드가 에너지를 소모하는 비율(rate)를 동시에 고려한 것으로, 이 기준을 사용함으로써 에너지 효율성이 향상됨을 보였다.

[8]에서는 각 센서 노드로부터 하나의 게이트웨이까지의 최적의 경로를 찾는 라우팅 알고리즘을 제안한다. 경로를 찾을 때 고려하는 두 가지 기준은 예상 에너지 소모량과 지연 시간(latency)이 일정 수준을 넘어갈 확률이다. 중앙집중형 알고리즘과 분산형 알고리즘을 제안하였고, 제안한 알고리즘의 성능을 수학적으로 증명하였다.

[9]에서는 기존의 지리적(geographic) 라우팅 알고리즘들이 이상적인 무선 링크를 가정했음을 지적하며, 불

안정한 무선 링크를 고려한 현실적이고 에너지 효율적인 지리적 라우팅 알고리즘을 제안하였다.

이처럼 배터리를 사용한다는 한계를 극복하기 위해 에너지 소모를 줄이기 위한 목적으로 다양한 라우팅 방법들이 제안되었다. 하지만 우리가 알고 있는 한, 주어진 목표 수명을 달성하기 위해 에너지 효율적인 경로를 찾는 동시에 감지 비율을 조절하는 라우팅 알고리즘은 제안된 바가 없다.

[10]에서는 네트워크의 수명 최대화를 위한 라우팅 알고리즘을 제안하였다. 본 논문과 [10]의 기본적인 방법론은 유사하나 그 목적에는 분명한 차이가 있다. [10]의 목적은 단순히 주어진 상황에서 네트워크의 수명을 최대화할 수 있는 에너지 효율적인 경로를 찾는 것이기 때문이다. 이 경우 역시 네트워크의 센서 노드 중 단 하나라도 에너지가 고갈되는 순간을 네트워크 수명의 종료로 보았다. 본 논문은 이와 달리 어플리케이션을 고려한 목표 수명을 설정한 뒤 감지 비율을 조절하여 정해진 목표 수명을 만족시키는 라우팅 알고리즘을 제안한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 논문이 고려하고 있는 네트워크 모델에 대해 기술한다. 3장에서는 제안하고자 하는 라우팅 알고리즘에 대해 설명한다. 4장에서는 시뮬레이션을 통해 제안한 라우팅 알고리즘의 성능을 분석한다. 5장에서 결론을 맺는다.

2. 네트워크 모델

이 장에서는 우리가 고려하고 있는 네트워크 모델과 이와 관련된 가정들을 어플리케이션과 연관시켜 기술한다.

본 논문에서 고려하는 어플리케이션은 각 센서 노드가 항상 주기적으로 주변 환경을 관찰하고 그에 대한 비디오나 이미지 데이터를 싱크 노드(sink node)로 전송하는 환경 감시(environmental monitoring) 센서 네트워크이다. 먼저 네트워크가 만족시켜야 할 어플리케이션의 목표 수명을 T 라 한다. T 는 n 개의 타임 슬롯(timeslot)으로 이루어져 있으며 각 타임 슬롯 $t \leq n$ 는 일정한 지속 시간 Δ 를 갖는다. 환경 감시 센서 네트워크의 목표 수명 T 를 1년으로, 이 1년을 이루는 타임 슬롯의 개수 n 을 365개로 가정한다면 각 타임 슬롯의 지속 시간 Δ 는 24시간이 될 것이다.

이런 무선 센서 네트워크는 무방향(unidirectional) 그래프 $G(V,E)$ 로 표현될 수 있다. 여기서 V 는 그래프의 노드들의 집합을, E 는 간선들의 집합을 나타낸다. 노드들 중 일부는 싱크 노드(sink node)라 불리며 여러 가지 역할을 담당한다. 싱크 노드는 트래픽의 끝점으로써 각 센서 노드들로부터 받은 트래픽을 취합, 정리하는 역할을 할 뿐 아니라, 다른 일반 센서 노드들에 비해 성능이 뛰어나고 에너지의 제한도 없기 때문에 3장에서 설

명할 라우팅 알고리즘을 수행하는 역할도 한다. 이런 싱크 노드들의 집합을 S 라 한다. 반면, $U = V - S$ 는 싱크 노드가 아닌 일반 센서 노드들의 집합이다.

데이터 통신에 사용될 수 있는 무선 채널의 데이터 전송 용량은 W 라 한다. W 는 트래픽의 양을 제한하는 역할을 하며 이에 대한 자세한 설명은 3장에서 기술한다. 노드 $v \in V$ 의 전송 범위 안에 있는 노드들을 이웃 노드라 하고, 이들의 집합을 $N(v)$ 라 한다. 노드 v 와 모든 이웃 노드 $u \in N(v)$ 사이에는 양방향의 무선 링크가 존재하고 간선 (u,v) 가 이 무선 링크를 나타낸다. 각 노드 $v \in V$ 의 초기 에너지 수준을 b_v 라 하고, 평균 트래픽 전송량을 d_v 라 한다. 또한 각 노드는 일정 시간에서의 감지 비율(sensing rate) $0 \leq r_{t,v} \leq 1$ 을 가지게 되는데 이 $r_{t,v}$ 는 시간이 지나면서 남아있는 배터리의 양에 따라 주어진 네트워크의 목표 수명을 만족시킬 수 있도록 조절된다. 따라서 어떤 타임 슬롯 t 에 센서 노드에 의해 전송되는 트래픽의 양은 $d_v \times r_{t,v}$ 로 나타낼 수 있다.

예를 들어, 목표 수명 T 가 1년인 환경 감시 센서 네트워크에서 한 타임 슬롯 내에 생성하여 전송해야 할 트래픽의 양이 d_v 라고 할 때, 만약 각 센서 노드의 초기 에너지 수준 b_v 가 항상 d_v 만큼 전송할 경우 1년 동안 동작할 수 있을 만큼 충분하지 않다고 가정해보자. 이런 상황에서 기존의 라우팅 알고리즘을 사용한다면 목표 수명을 만족시킬 수 없지만 우리의 라우팅 알고리즘은 감지 비율 $r_{t,v}$ 를 조절함으로써 목표 수명을 만족시킬 수 있다. 즉 매 1시간마다 주변 환경을 감지하여 24시간 동안 전송하는 트래픽 양이 d_v 라면, 우리의 라우팅 알고리즘은 이를 2시간마다 감지하는 것으로 감지 비율을 0.5로 조절함으로써 목표수명을 만족시킬 수 있다.

각 센서 노드는 트래픽을 생성하여 전송하는 동시에 다른 센서 노드들로부터 생성된 트래픽을 중계(relay)해주는 역할도 하게 된다. 본 논문에서는 모든 트래픽의 목적지가 싱크 노드인 상황 트래픽(up-link traffic)만을 고려한다. 또한 모델을 단순화하기 위해 센서 노드는 어떤 주어진 순간에 전송이나 수신 둘 중 하나의 동작만을 할 수 있고, 모든 트래픽은 똑같은 파워로 전송된다고 가정한다. 에너지 소모에 관해서도 에너지 소모를 일으키는 요인은 오직 전송과 수신뿐으로 두 동작은 같은 양의 트래픽에 대해서는 같은 양의 에너지를 소모한다고 가정한다.

3. 단일 경로 선택 라우팅 알고리즘

본 논문의 목적은 주어진 목표 수명을 달성하기 위한 에너지 효율적인 경로를 찾는 것이다. 이 장에서는 이 경로 선택에 대해 기술한다. 싱크 노드까지의 경로는 단일 경로이다. 즉 각 센서 노드에서 생성된 크기가 $d_v \times r_{t,v}$

인 트래픽은 하나의 경로를 통해 싱크 노드까지 전송된다. 이 단일 경로들의 집합 $\{P_v\}$ 를 route selection이라 한다.

본 논문에서 제안한 알고리즘은 두 개의 단계로 이루어져 있다. 첫 번째 단계에서 알고리즘은 각 센서 노드로부터 전송되는 트래픽의 양 $d_v \times r_{t,v}$ 를 작은 트래픽 흐름으로 나누어 서로 다른 여러 개의 경로를 통해 보내는 fractional solution을 계산한다. Fractional solution은 splittable flow solution이라 하기도 한다.

두 번째 단계에서는 첫 번째 단계에서 구한 fractional solution에 rounding 알고리즘을 적용하여 각 센서 노드들로부터 싱크 노드까지의 트래픽이 단일 경로로 가는 integral solution을 찾는다. Integral solution은 unsplittable flow solution이라 하기도 한다. 두 번째 단계는 [11]에서 제안된 Dinitz, Garg, Goemans의 단일-소스 unsplittable flow 알고리즘을 사용하였다.

첫 번째 단계의 결과인 fractional solution은 다음의 선형 프로그램을 통해 구할 수 있다.

$$\max \sum_{v \in U} d_v \cdot r_{n,v}$$

subject to:

$$(1) \quad \forall v \in U, t \leq n : \sum_{u \in N(v)} f_{t,v,u} = r_{t,v} \cdot d_v + \sum_{u \in N(v)} f_{t,u,v}$$

$$(2) \quad \forall v \in U, t \leq n : r_{t,v} \leq r_{t-1,v} \leq r_{1,v} \leq 1$$

$$(3) \quad \forall s \in S, t \leq n : W \geq \sum_{u \in N(s)} f_{t,u,s}$$

$$(4) \quad \forall v \in U, t \leq n : (W - d_v \cdot r_{t,v}) / 2 \geq \sum_{u \in N(v)} f_{t,u,v}$$

$$(5) \quad \forall v \in U, t \leq n : \Delta \cdot \left\{ \sum_t \left(d_v \cdot r_{t,v} + 2 \cdot \sum_{u \in N(v)} f_{t,u,v} \right) \right\} \leq b_v$$

$$(6) \quad \forall (u,v) \in E, t \leq n : f_{t,u,v} \geq 0, f_{t,v,u} \geq 0, r_{t,v} \geq 0$$

목표 수명의 만족은 모든 센서 노드 $v \in U$ 에 대해 마지막 타임 슬롯인 n 에서의 서비스된, 즉 각 센서 노드로부터 싱크 노드까지 성공적으로 전송된 총 트래픽의 양 $\sum_{v \in U} d_v \cdot r_{n,v}$ 을 최대화함으로써 이루어진다. 즉 우리의 경로 선택 문제는 2장에서 주어진 네트워크 모델에서 $\sum_{v \in U} d_v \cdot r_{n,v}$ 을 최대화하는 route selection을 찾는 것이다. 이것이 위 선형 프로그램 모델의 목적으로 표현되어 있다.

위의 모델에서 제약 조건 (1)은 모든 센서 노드 $v \in U$ 에 대해 v 로부터 나가는 트래픽 흐름의 양이 v 가 생성한 트래픽의 양과 v 로 들어오는 트래픽 흐름의 양의 합과 정확히 같아야 한다는 것을 나타내며 flow conser-

vation requirement를 표현한다. 제약 조건 (2)는 모든 센서 노드 $v \in U$ 에 대해 감지 비율은 반드시 1보다 작거나 같아야 하며 이전 타임 슬롯에서의 감지 비율은 반드시 다음 타임 슬롯에서의 감지 비율보다 크거나 같아야 함을 나타낸다.

타임 슬롯 t 에서 각 센서 노드 v 에 대해 v 로 들어오는 트래픽 흐름($f_{t,in}$)과 v 로부터 나가는 트래픽 흐름($f_{t,out}$)의 총합을 $F_{t,v}$ 라 한다. 이 때 모든 v 는 다음의 두 제약 조건을 만족해야 한다.

1. 각 싱크 노드 $s \in S$ 의 트래픽 흐름의 총합 $F_{t,s}$ 는 최대 W 이다.
2. 각 센서 노드 $v \in U$ 로 들어오는 트래픽 흐름 $f_{t,in}$ 은 최대 $(W - d_v \cdot r_{t,v})/2$ 이다.

2장에서 우리는 상향 트래픽만을 고려하기 때문에 모든 트래픽 흐름의 목적지는 싱크 노드가 됨을 기술한 바 있다. 따라서 어떤 순간 싱크 노드를 향해 들어오는 모든 트래픽 흐름의 총합은 무선 채널의 데이터 전송 용량인 W 에 의해 한정되게 된다. 또한 싱크 노드가 아닌 일반 센서 노드 v 로부터 나가는 트래픽의 크기는 $f_{t,in} + d_v \cdot r_{t,v}$ 이고, 들어오는 트래픽의 크기는 $f_{t,in}$ 이므로, 트래픽 흐름은 $W \geq 2 \cdot f_{t,in} + d_v \cdot r_{t,v}$ 로 한정된다. 결론적으로 위의 두 제약조건들은 트래픽 흐름의 크기가 무선 채널 용량 W 를 초과하지 않도록 하는 역할을 한다. 제약 조건 (3)과 (4)가 바로 이를 나타내고 있다.

제약 조건 (5)는 모든 센서 노드 $v \in U$ 에 대해 목표 수명 T 동안 소모되는 에너지의 양이 주어진 초기 에너지 수준 b_v 보다 작거나 같음을 보장한다. (2장에서 센서 노드의 에너지를 소모시키는 요인은 전송과 수신뿐이라는 것을 언급한 바 있다.) 마지막으로 제약 조건 (6)는 모든 트래픽 흐름과 감지비율이 0 이상이 되어야 함을 나타낸다.

Fractional solution을 얻어 낸 뒤에 우리는 rounding 알고리즘을 사용하여 integral solution을 얻어 낸다. 앞서 언급했듯이 rounding 알고리즘을 사용하여 integral solution을 구하는 목적은 각 센서 노드가 생성한 트래픽이 단일 경로를 통해 싱크 노드까지 전송되도록 하는 것에 목적이 있다. Rounding 알고리즘을 통해 integral solution을 얻는 과정과 얻어진 integral solution의 성능에 대한 내용은 [10]과 [11]에 자세히 기술되어 있기 때문에 본 논문에서는 생략하기로 한다.

우리가 사용한 rounding algorithm에 의해 얻어진 라우팅 경로는 트래픽이 풀리는 싱크 노드 주변의 센서 노드들에 걸리는 부담을 최대한 균등하게 만드는 것에 그 목적이 있다. 그림 1은 기본적인 최단 경로 라우팅에 의해 얻어진 라우팅 경로와 우리의 rounding algorithm에 의해 얻어진 라우팅 경로의 차이를 보여준다. 최단

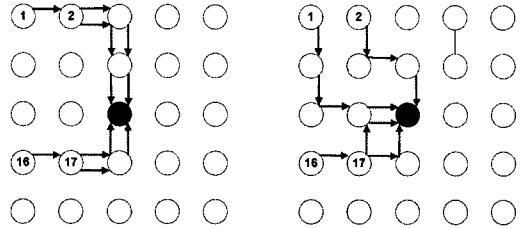


그림 1 최단 경로 라우팅 알고리즘에 의한 라우팅 경로(왼쪽)와 rounding algorithm에 의한 라우팅 경로(오른쪽) 비교

경로 라우팅에 의해 얻어진 라우팅 경로는 서로 겹치는 경우가 많은 것에 비해 rounding algorithm에 의해 얻어진 라우팅 경로는 싱크 노드 주변의 센서 노드들에 트래픽을 비교적 잘 분산시키는 것을 볼 수 있다.

4. 성능 평가

이 장에서는 우리가 제안한 라우팅 알고리즘의 성능을 시뮬레이션을 통해 평가한다. 우리는 각 센서 노드가 4개의 라디오 인터페이스를 가지고 있어 서로의 전송이 간섭(interference)을 일으키지 않는다고 가정하였으며 하나의 싱크 노드만 존재하는 정사각형의 바둑판 형태의 메쉬 토폴로지를 가정하였다. 따라서 각 센서 노드는 최대 4개의 무선 링크를 가지게 되고 모든 센서 노드들 간의 거리는 같다. 무선 채널의 용량 W 는 50으로 가정하였고 각 센서 노드들 $v \in U$ 의 초기 에너지 수준 b_v 는 120으로 모두 같다고 가정하였다.

우리는 3장에서 기술한 integral solution 알고리즘(INT)의 성능을 최단 경로 알고리즘(SP), 경로 변경 알고리즘(ALTER)의 성능과 비교하였다. Fractional solution은 상한으로써 가장 좋은 성능을 보여주지만 현실적으로 사용할 수는 없는 방식이기 때문에 비교 대상에서 제외시켰다.

여기서 사용된 최단 경로 알고리즘은 각 센서 노드로부터 목적지인 싱크 노드까지의 가장 작은 홉 수를 가지는 경로를 하나씩 찾아낸다. 모든 센서 노드들 간의 거리가 같고 에너지 소모를 일으키는 요인은 전송과 수신뿐이기 때문에 최단 경로 알고리즘을 통해 찾은 홉 수가 가장 작은 경로가 곧 각 센서 노드로부터 싱크 노드까지의 가장 에너지 효율적인 경로가 된다. 경로 변경 알고리즘은 [2]에서 제안된 기법을 일반화한 알고리즘으로 다음과 같은 방식으로 동작한다. 먼저 각 센서 노드로부터 싱크 노드까지의 최단 경로를 찾는다. 그 다음, 각 센서 노드는 첫 번째 찾은 최단 경로와는 전혀 중복이 되지 않는 최단 경로를 다시 한번 찾는다. 만약 어떤 목적지까지의 최단 경로가 단 하나밖에 존재하지 않는 경우라면

두 번째 경로는 좀 더 길어질 수 있다. 이런 방식으로 알고리즘은 각 센서 노드에 대해 최대 4개(square mesh 토폴로지에서의 최대치)의 경로를 생성한다. 따라서 이 과정까지 수행되면 각 센서 노드마다 싱크 노드까지의 서로 중복되지 않는 경로가 최대 4개씩 생기게 되는 것이다. 다음으로 각 센서 노드가 싱크 노드로 첫 번째 경로를 사용하여 전송을 시작한다. 알고리즘은 첫 번째 경로 상의 센서 노드들의 에너지 수준을 계속 관찰하고 있다가 어느 순간 에너지 수준이 더 이상 싱크 노드까지의 트래픽 흐름을 전송할 수 없을 만큼 소모되게 되면 다음 경로로 변경한다. 알고리즘은 최대 네 번째 경로 상의 센서 노드들의 에너지가 모두 소모되게 되는 순간까지 동작한다. 즉 여러 개의 경로를 번갈아 사용함으로써 네트워크의 수명을 증가시키는 방법이다.

우리의 시뮬레이션에서는 목표 수명인 T를 15로 가정하였으며, 타임 슬롯의 수 n이 1일 때($\Delta = 15$)와 5일 때($\Delta = 3$)를 실험하였다. 각각은 INT(1)와 INT(5)로 칭한다. 3장의 선형 프로그램 모델을 통해 알 수 있듯이 n = 1일 때는 하나의 fractional solution이 나오게 되고 이 결과에 rounding algorithm을 적용하여 얻어진 하나의 integral solution을 이용하여 계속 사용하게 된다. 마찬가지로 n = 5일 때는 각 timeslot 마다 하나씩, 결국 5개의 fractional solution이 나오게 된다. 물론 각 fractional solution에 rounding algorithm을 적용하여 integral solution을 구해낼 수도 있지만 이 방식으로 얻어진 integral solution은 정확한 결과라고 할 수 없다. 각 timeslot에 해당하는 fractional solution은 fractional solution에 의해 소모된 에너지의 양을 고려한 결과지만 실제 우리가 사용하는 것은 integral solution이기 때문에 integral solution에 의해 소모된 에너지의 양을 고려해야 한다. 우리는 이 문제를 해결하기 위하여 다음과 같은 방식으로 INT(5)를 구했다. 먼저 n = 5일 때 선형 프로그램을 수행하여 첫 번째 timeslot의 fractional solution을 이용해 integral solution을 구한 후 $\Delta = 3$ 동안 수행한다. 다음 n = 4로 수정하여 선형 프로그램을 다시 수행되, integral solution에 의해 소모되던 에너지의 잔량을 모델의 b_v 값으로 넣어준다. 역시 결과로 나온 첫 번째 timeslot의 fractional solution을 $\Delta = 3$ 동안 수행한다. 이런 식으로 총 5번의 선형 프로그래밍과 rounding algorithm을 수행하여 각 timeslot에서 사용할 integral solution을 구해냈다.

시뮬레이션은 5 × 5 메쉬 토폴로지(전체 노드의 수는 25)와 10 × 10 메쉬 토폴로지(전체 노드의 수는 100) 두 경우에 대하여 각각 싱크 노드가 토폴로지의 중앙에 위치했을 때와 코너 쪽에 가까이 위치했을 때에 대하여 수행되었다. 싱크 노드를 제외한 모든 센서 노드들이 트

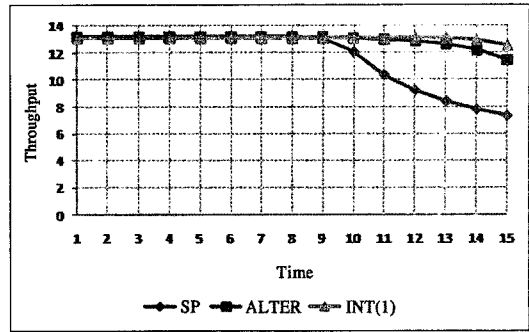


그림 2 5 × 5 메쉬 토폴로지에서 싱크 노드가 중앙에 위치했을 때 throughput 비교

래픽을 생성, 전송하게 되고 그 양은 0과 1사이의 랜덤한 실수이다. 단, $r_{t,v}$ 에 의해 트래픽의 크기가 지나치게 작아지는 것을 막기 위해 0.1보다 작은 수는 없도록 하였다. 모든 시뮬레이션은 300번 수행되었고 그 평균값을 결과로 사용하였다.

그림 2는 5 × 5 메쉬 토폴로지에서 싱크 노드가 중앙에 위치한 경우의 시뮬레이션 결과를 보여준다. INT(1)의 1는 timeslot의 수 n이 1임을 나타낸다. x축은 시간을 나타내고, y축은 단위 시간 당 서비스 된, 즉 각 센서 노드로부터 싱크 노드까지 성공적으로 전송된 트래픽의 총량(throughput)을 나타낸다. 즉 에너지가 아직 고갈되지 않은 센서 노드들의 $d_v \times r_{t,v}$ 값의 합이다. 모든 센서 노드가 트래픽을 전송하기 때문에 센서 노드의 수가 네트워크의 부하(load)에 직접적으로 연결된다. 초기 에너지 수준 $b_v = 120$ 에 비해 24개의 센서 노드는 상대적으로 부하가 크지 않기 때문에 중앙까지 3가지 방식 모두가 최대치의 트래픽을 전송하고 있음을 볼 수 있다. 하지만 중반 이후로 에너지가 모두 소모된 센서 노드들이 생기면서 SP와 ALTER의 트래픽 총량이 떨어지기 시작하는 것을 볼 수 있다. SP는 에너지의 효율성은 전혀 고려하지 않기 때문에 트래픽 총량이 가장 크게 떨어지는 것을 확인할 수 있다. INT는 단일 경로 방식임에도 불구하고 여러 경로를 바꿔가며 사용하는 ALTER보다 뛰어난 성능을 보인다.

그림 3은 5 × 5 메쉬 토폴로지에서 싱크 노드가 코너 쪽에 위치한 경우의 시뮬레이션 결과를 보여준다. 전체적으로 싱크 노드가 중앙에 위치해있을 때와 비슷한 경향을 보이지만 SP의 성능이 비교적 크게 떨어져 있음을 확인할 수 있다. 싱크 노드가 코너 쪽에 위치하게 되면 중앙에 위치했을 때 보다 상대적으로 많은 트래픽이 싱크 노드 근처의 특정 노드에 몰리는 현상이 생긴다. 이런 현상이 생겼을 때 경로를 변경하지 않는 SP의 성능이 크게 떨어지는 것은 자명한 결과이다.

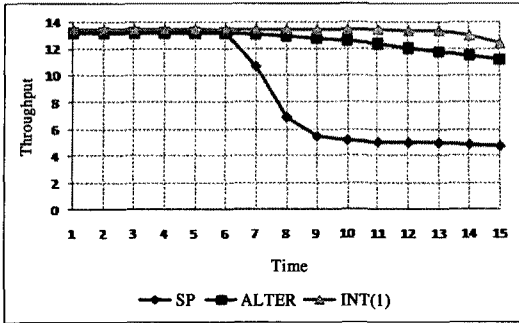


그림 3 3×3 메쉬 토폴로지에서 싱크 노드가 코너 쪽에 위치했을 때 throughput 비교

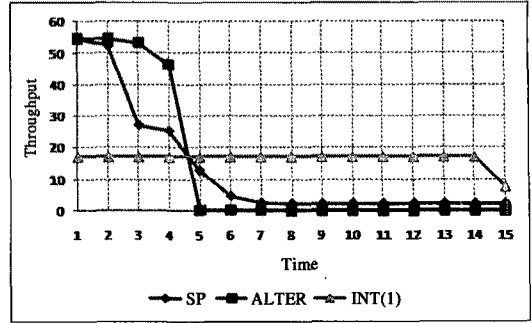


그림 6 10×10 메쉬 토폴로지에서 싱크 노드가 중앙에 위치했을 때 throughput 비교

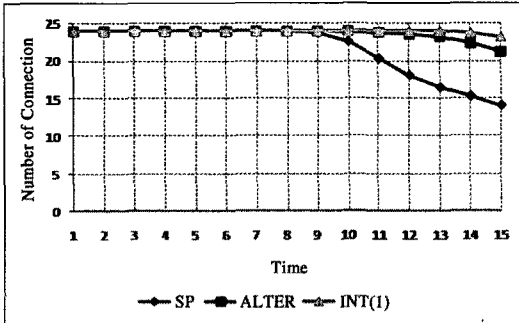


그림 4 5×5 메쉬 토폴로지에서 싱크 노드가 중앙에 위치했을 때 작동 중인 센서 노드 수 비교

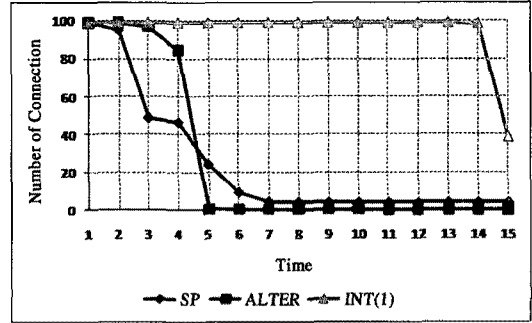


그림 7 10×10 메쉬 토폴로지에서 싱크 노드가 중앙에 위치했을 때 작동 중인 센서 노드 수 비교

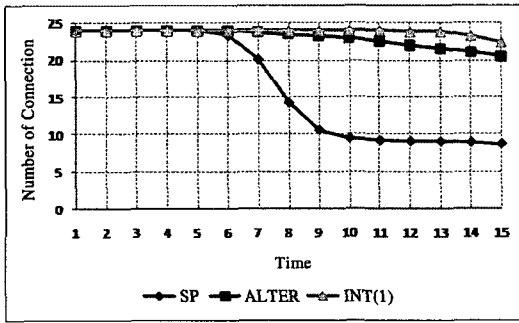


그림 5 5×5 메쉬 토폴로지에서 싱크 노드가 코너 쪽에 위치했을 때 작동 중인 센서 노드 수 비교

그림 4와 5는 각각 5×5 메쉬 토폴로지에서 싱크 노드가 중앙과 코너 쪽에 위치했을 때의 작동 중인 센서 노드의 수를 보여준다. 여기서 작동 중인 센서 노드는 아직 에너지가 완전히 소모되지 않은 센서 노드를 의미한다. 모든 센서 노드가 트래픽을 전송하기 때문에 작동 중인 센서 노드의 수는 곧 트래픽의 총량과 연결된다. 따라서 그림 3과 4는 각각 그림 1과 2와 비슷한 경향을 보임을 확인할 수 있다. INT와 ALTER는 상대적으로 많은 수의 노드를 유지함으로써 목표 수명을 유지하지

만 SP는 에너지 효율성을 고려하고 있지 않고, 경로를 변경할 수도 없기 때문에 많은 수의 노드들의 에너지가 고갈되는 것을 확인할 수 있다.

그림 6은 10×10 메쉬 토폴로지에서 싱크 노드가 중앙에 위치한 경우에 서비스된 트래픽의 총량을 보여준다. 99개의 센서 노드가 트래픽을 생성하여 전송하기 때문에 이는 초기 에너지 수준 $b_v = 120$ 에 비해 상대적으로 매우 큰 부하이다. SP와 ALTER는 감지 비율을 조절하지 않기 때문에 처음부터 최대치의 트래픽을 전송하게 된다. 그 결과로 목표 수명에 도달하기 훨씬 전에 에너지가 고갈되는 노드들이 다수 생기면서 트래픽 총량이 급격하게 떨어지게 되고 목표 수명에 가서는 전혀 트래픽을 전송할 수 없는 상태가 됨을 확인할 수 있다. 이에 반해 INT는 목표 수명을 만족시키기 위해 감지 비율을 적절히 조절함으로써 초반에는 SP와 ALTER에 비해 적은 양의 트래픽이 서비스되지만 트래픽 양을 끝까지 유지할 수 있다.

그림 7은 10×10 메쉬 토폴로지에서 싱크 노드가 중앙에 위치했을 때와 코너 쪽에 위치했을 때의 작동 중인 센서 노드의 수를 나타낸다. SP와 ALTER의 경우 목표 수명 훨씬 전에 거의 모든 센서 노드의 에너지가 고갈되는 것에 반해, INT는 목표 수명까지 많은 센서

노드가 동작함을 볼 수 있다. 이 결과로 INT가 감지 비율을 적절히 조절함으로써 목표 수명까지 에너지가 고갈되는 노드의 수를 최소화함을 확인할 수 있다.

싱크 노드가 코너 쪽에 위치했을 경우의 결과는 5×5 메쉬 토폴로지에서의 결과를 통해 볼 수 있듯이 중앙에 위치했을 때와 비슷한 경향을 보이기 때문에 생략하였다.

목표 수명을 만족시키기 위해 감지 비율을 조절하는 것은 우리가 제안하는 라우팅 알고리즘의 중요한 부분이다. 따라서 지금까지의 실험은 SP와 ALTER의 감지 비율을 1로 고정시킨 상태에서 수행하였다. 하지만 실험 결과로부터 각 라우팅 알고리즘에 의해 얻어진 라우팅 경로 자체의 성능을 비교하기는 어렵다. 우리는 이 문제를 해결하기 위해 INT에 의해 얻어진 각 센서 노드들의 감지 비율을 평균하여 그 값을 SP와 ALTER의 각 센서 노드들에 동일하게 적용시킨 후 실험을 하였다. 이 실험은 10×10 메쉬 토폴로지에서 싱크 노드가 중앙에 위치했을 때의 경우에서 수행하였다. 지금까지의 실험 결과에 의해 throughput과 작동 중인 센서 노드 수는 정확히 일치하는 경향을 보이고 있음을 볼 수 있다. 따라서 앞으로의 실험 결과는 작동 중인 센서 노드의 수만으로 나타내도록 하겠다. 그림 8의 결과는 INT에 의해 얻어진 sensing rate 값의 평균을 SP와 ALTER에 적용해도 여전히 INT의 성능이 더 뛰어나다는 것을 보여준다.

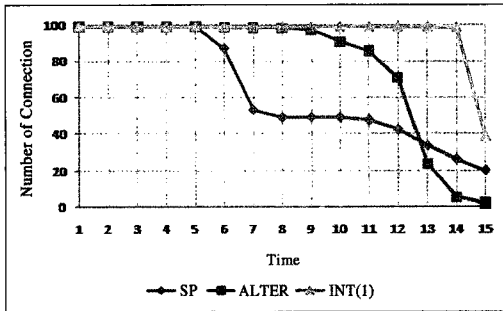


그림 8 INT에 의한 감지 비율을 적용했을 때 작동 중인 센서 노드 수 비교

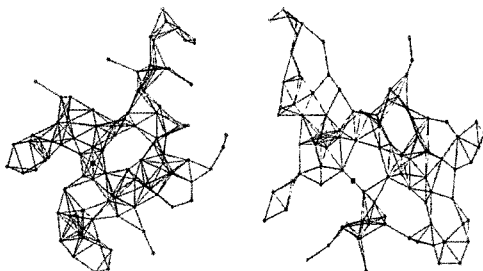


그림 9 실험에 사용된 두 랜덤 토폴로지(왼쪽: 랜덤 토폴로지1, 오른쪽: 랜덤 토폴로지2)

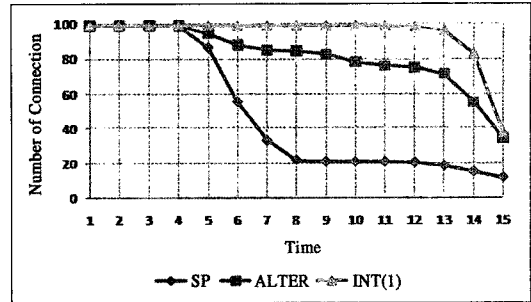


그림 10 랜덤 토폴로지1을 사용했을 때의 작동 중인 센서 노드 수 비교

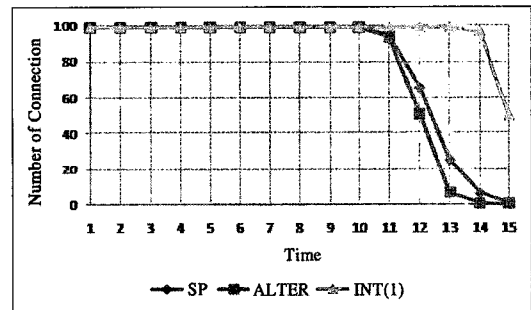


그림 11 랜덤 토폴로지2를 사용했을 때의 작동 중인 센서 노드 수 비교

이에 더하여 우리의 라우팅 알고리즘이 기본적인 바둑판 모양의 메쉬 토폴로지에서뿐만 아니라 좀 더 일반적인 랜덤한 토폴로지에서도 잘 동작할 수 있을지를 확인하기 추가적인 실험을 수행하였다. 그림 9는 실험에 사용된 2가지의 랜덤 토폴로지를 보여준다. 랜덤 토폴로지 1은 싱크 노드와 직접적으로 연결된 1-hop neighbor 노드가 6개이다. 결국 트래픽이 몰리는 곳은 싱크 노드의 주변이기 때문에 싱크 노드의 1-hop neighbor가 많으면 트래픽이 좀 더 균등하게 분산될 가능성이 높다. 랜덤 토폴로지2의 경우는 싱크 노드의 1-hop neighbor가 2개이기 때문에 랜덤 토폴로지1과 비교했을 때 트래픽이 몰리는 현상이 더 심할 수 밖에 없는 토폴로지이다. 이와 같은 토폴로지 상의 특성은 실험 결과에 직접적으로 영향을 준다.

그림 10과 11은 각각 랜덤 토폴로지1과 랜덤 토폴로지2를 사용했을 때 3가지 라우팅 알고리즘의 작동 중인 센서 노드의 수에 대한 실험 결과를 보여준다. 이 실험에도 각 라우팅 알고리즘에 의해 얻어진 라우팅 경로 자체의 성능을 비교할 수 있도록 INT에 의해 얻어진 감지 비율 값들의 평균을 SP와 ALTER에 적용하여 실험을 수행하였다. 이 경우에도 INT가 SP와 ALTER보다 좋은 성능을 보이고 있다는 것을 확인할 수 있다. 또한 랜덤 토폴

로지1의 경우 싱크 노드의 1-hop neighbor가 바둑판 모양의 매쉬 토폴로지의 경우(4개) 보다 많기 때문에 좀 더 트래픽이 균등하게 분산될 수 있고 ALTER의 경로 변경에도 좋은 영향을 미쳐 ALTER의 성능이 향상되었음을 확인할 수 있다. 반면 랜덤 토폴로지2의 경우 싱크 노드의 1-hop neighbor가 2개뿐이기 때문에 트래픽이 몰리는 현상이 심해지고 ALTER의 경로 변경에 의한 효과도 거의 기대할 수 없기 때문에 ALTER와 SP가 거의 비슷한 성능을 보이는 것 역시 확인할 수 있다.

그림 12는 10×10 매쉬 토폴로지에서 싱크 노드가 중앙에 위치한 경우에 작동 중인 센서 노드의 수에 대한 timeslot의 수 n 의 영향을 보여준다. 앞서 기술한 대로 INT(5)의 경우 여러 번 선형 프로그램과 rounding algorithm을 수행함으로써 상대적으로 짧은 시간 동안 사용할 integral solution을 여러 번 구하는 방식이기 때문에 INT(1)에 비해 더 좋은 성능을 기대할 수 있게 되지만 그에 따른 연산 복잡도(computational complexity)가 커지고 경로의 변경이 생기기 때문에 오버헤드가 크게 늘어나는 것은 피할 수가 없게 된다. 그림 12에서 n 의 값이 5로 늘어나면 성능의 향상이 있음을 확인할 수 있지만, 그 차이는 매우 근소하다. 이는 연산 복잡도도 작고 경로 변경의 오버헤드도 없는 INT(1)을 사용하여도 좋은 성능을 얻을 수 있다는 의미이고 우리가 시뮬레이션에서 INT(1)을 사용한 이유이기도 하다.

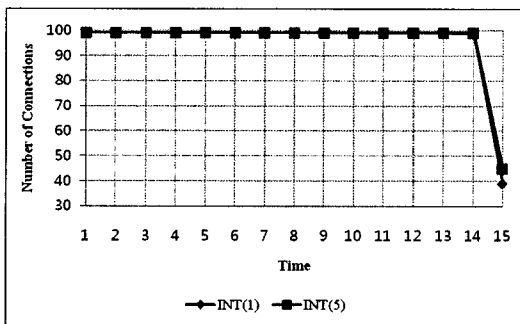


그림 12 싱크 노드가 중앙에 위치한 10×10 매쉬 토폴로지에서 작동 중인 센서 노드 수에 대한 timeslot 수의 영향

표 1 각 토폴로지에서 INT와 ALTER의 경로 변경 수 비교

	INT(1)	INT(5)	ALTER
5×5 (center)	0	39.16	15.38
5×5 (corner)	0	39.98	24.66
10×10 (center)	0	199.64	51.01
10×10 (corner)	0	224.24	71.96

표 1은 각 토폴로지에서 INT와 ALTER에 대해 경로 변경의 수를 비교한 표이다. 표의 값들은 총 99개의 센서 노드들로부터 싱크 노드까지의 99개의 경로들 중 경로 변경이 일어난 횟수를 모두 합한 뒤 총 시뮬레이션 수행 횟수인 300으로 나눈 값이다. 앞서 언급한 대로 INT(1)은 경로 변경을 전혀 하지 않는다는 것을 알 수 있고 timeslot의 수가 커질수록 자연스럽게 경로 변경 수가 늘어남을 확인할 수 있다. ALTER 역시 센서 노드의 수가 늘어남에 따라 경로 변경 수가 늘어나는 것을 볼 수 있으며 이는 INT(1)과 비교했을 때 매우 큰 오버헤드라고 할 수 있다.

지금까지 본 논문에서 제안한 라우팅 알고리즘의 성능을 시뮬레이션을 통해 분석해보았다. INT의 성능은 SP에 비해 월등히 뛰어났으며, 도중에 경로를 바꾸지 않는 방식임에도 불구하고 여러 경로를 바꿔가며 사용하는 ALTER와 비교해도 목표 수명을 더 잘 만족시킴을 보였다. 특히 네트워크의 부하가 클 때에 목표 수명을 잘 만족시키고 있다는 것에서 제안한 알고리즘의 장점을 찾을 수 있다. 또한 timeslot의 수가 알고리즘의 성능에 크게 영향을 주지 않는다는 것을 보임으로써 오버헤드를 줄일 수 있음도 확인했다.

6. 결론

무선 센서 네트워크는 다양한 어플리케이션에 따른 다양한 목표 수명을 가지게 된다. 하지만 센서 노드는 여러 가지 면, 특히 에너지 면에서 제약이 심하기 때문에 목표 수명을 만족시키기 위해서는 에너지 효율적인 라우팅 알고리즘이 필요하다.

본 논문에서는 먼저 최적의 fractional solution을 얻고, 이 결과를 이용하여 최적으로 가까운 integral solution을 얻는 근사 알고리즘을 제안하였다. 우리가 제안한 라우팅 알고리즘은 단순히 에너지 효율적인 경로를 찾는데 그치지 않고, 목표 수명을 고려하여 감지 비율을 적절히 조절함으로써 주어진 목표 수명을 만족시킨다.

시뮬레이션 결과는 우리의 알고리즘이 기존의 방법들에 비해 목표 수명을 더 잘 만족시킴을 보였다.

참고 문헌

- [1] R. Shah and J. Rabaey, Energy Aware Routing for Low Energy Ad Hoc Sensor Networks. In *Proceedings of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference, WCNC'02*, Orlando, FL, U.S.A., 2002.
- [2] Y. Chen and N. Nasser. Energy-Balancing Multipath Routing Protocol for Wireless Sensor Networks. In, Waterloo, Ontario, Canada, 2006.
- [3] I. Slama, B. Jouaber, and D. Zeghlache. Routing

for Wireless Sensor Networks Lifetime Maximisation under Energy Constraints. In *Proceedings of the 3rd international conference on Mobile technology, applications & systems Mobility'06*, Bangkok, Thailand, 2006.

- [4] C. Ma and Y. Yang. Battery-Aware Routing for Streaming Data Transmissions in Wireless Sensor Networks. *Mobile networks and applications*, vol. 11, no.5, pp.757-767, October 2006.
- [5] J. Chang and L. Tassiulas. Maximum Lifetime Routing in Wireless Sensor Networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol.12, no.4, pp. 609-619, 2004.
- [6] S. Ergen and P. Varaiya. Energy Efficient Routing with Delay Guarantee for Sensor Networks. *Wireless Networks*, vol.13, no.5, pp.679-690, October 2007.
- [7] F. Block and C. Baum. An Energy-Efficient Routing Protocol for Wireless Sensor Networks with Battery Level Uncertainty. In *Proceedings of IEEE MILCOM'02*, Anaheim, California, U.S.A., 2002.
- [8] W. Lei and L. Paschalidis. Sensor Network Minimal Energy Routing with Latency Guarantees. In *Proceedings of the 8th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing MobiHoc'07*, Montreal, Quebec, Canada, 2007.
- [9] K. Seada, M. Zuniga, A. Helmy, and B. Krishnamachari. Energy-Efficient Forwarding Strategies for Geographic Routing in Lossy Wireless Sensor Networks. In *Proceedings of the 2nd international conference on Embedded networked sensor systems Sensys'04*, Baltimore, MD, U.S.A., 2004.
- [10] 이건택, 한승재, 박선주. 다중-홉 무선 네트워크 환경에서 수명 최대화를 위한 라우팅 알고리즘. 한국정보과학회, 정보과학회논문지 정보통신 제35권 제4호, 2008. 8, pp.292-300.
- [11] Y. Dinitz, N. Garg, and M. X. Goemans. On the single-source unsplittable flow problem. In *IEEE Symposium on Foundations of Computer Science, FOCS'98*, pp.290-299, 1998.



박 선 주

1989년 서울대학교 컴퓨터공학과(학사)
 1991년 서울대학교 컴퓨터공학과(석사)
 1999년 Univ. of Michigan, Ann Arbor, CSE (Ph.D.). 1999년~2005년 Rutgers University, MSIS Department (Assistant Professor). 2005년~현재 연세대학교 경영학과(부교수). 관심분야는 에이전트 시스템, 육선, 온라인 사회연결망, 네트워크 가격정책



김 학 진

1987년 연세대학교 경영학과(학사). 1994년 Univ. of Illinois, Urbana-Champaign, Math.(M.S.). 2001년 Carnegie Mellon University, Tepper School, OR (Ph.D.) 2002년~2003년 연세대학교 경영학과(객원교수). 2003년~현재 연세대학교 경영학과(부교수). 관심분야는 최적화, 제약식프로그래밍, 의미 웹, 그리드컴퓨팅



한 승 재

1989년 서울대학교 컴퓨터공학과(학사)
 1991년 서울대학교 컴퓨터공학과(석사)
 1998년 Univ. of Michigan, Ann Arbor, CSE(Ph.D.). 1999년~2005년 Bell Laboratories, Wireless Research Lab(연구원). 2005년~현재, 연세대학교 컴퓨터과 학과(부교수). 관심분야는 차세대 이동통신망, 멀티미디어 네트워킹, 센서네트워크



이 건 택

2007년 서강대학교 컴퓨터공학과(학사)
 2007년~현재 연세대학교 컴퓨터학과(박사과정). 관심분야는 센서 네트워크, Vehicular Ad hoc 네트워크에서의 라우팅