

개미 시스템을 이용한 무선 센서 네트워크 라우팅 알고리즘 개발*

옥 창 수**

Ant-based Routing in Wireless Sensor Networks

Chang-Soo Ok**

■ Abstract ■

This paper proposes an ant-based routing algorithm, Ant System-Routing in wireless Sensor Networks(AS-RSN), for wireless sensor networks. Using a transition rule in Ant System, sensors can spread data traffic over the whole network to achieve energy balance, and consequently, maximize the lifetime of sensor networks. The transition rule advances one of the original Ant System by re-defining link cost which is a metric devised to consider energy-sufficiency as well as energy-efficiency. This metric gives rise to the design of the AS-RSN algorithm devised to balance the data traffic of sensor networks in a decentralized manner and consequently prolong the lifetime of the networks. Therefore, AS-RSN is scalable in the number of sensors and also robust to the variations in the dynamics of event generation. We demonstrate the effectiveness of the proposed algorithm by comparing three existing routing algorithms: Direct Communication Approach, Minimum Transmission Energy, and Self-Organized Routing and find that energy balance should be considered to extend lifetime of sensor network and increase robustness of sensor network for diverse event generation patterns.

Keyword : Wireless Sensor Networks, Distributed Control, Energy Balance, Ant System, Ant Colony Optimization, Routing Algorithm.

논문접수일 : 2010년 02월 08일 논문게재확정일 : 2010년 05월 11일

논문수정일(1차 : 2010년 04월 01일, 2차 : 2010년 05월 04일)

* 이 논문은 2009학년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No. 2009C107601).

** 홍익대학교 공과대학 산업공학과

1. 서 론

저렴하고 크기가 작은 무선센서가 개발됨에 따라 센서 네트워크를 이용해 위협하고, 까다롭고, 많은 시간을 요하는 감시 작업들이 가능하게 되었다. 일반적으로 센서 네트워크는 감시가 필요한 지역에 설치되어 이 지역에서 발생하는 사건들(events)을 감지하고 이에 해당하는 데이터를 기지국으로 전송하여 향후 분석 등에 활용할 수 있게 한다[1, 2]. 이러한 목적을 달성하기 위해서는 데이터를 기지국까지 전송하기 위하여 적절한 라우팅 알고리즘이 필수적이다. 센서 네트워크 라우팅 알고리즘의 개발에는 데이터를 기지국까지 전송하기 위한 경로를 검색하는 기본적인 요구사항 이외에도 다음과 같은 여러 사항들이 고려되어야 한다.

- 먼저, 센서들은 제한된 에너지를 보유하고 있기 때문에 센서 네트워크의 수명이 한정적이고 따라서 라우팅 알고리즘은 센서 네트워크의 수명을 연장하기 위하여 에너지 효율적인 경로를 찾을 수 있도록 설계되어야 한다.
- 그러나 대부분의 에너지 효율적인 라우팅 알고리즘은 특정 센서들(기지국 근처에 위치하거나 에너지 효율적인 경로 상에 위치한 센서들)에 불가피하게 많은 데이터 트래픽이 집중되어 이들 센서들의 에너지가 빨리 고갈되는 현상이 발생한다. 이 결과로 작동을 멈춘 센서들이 모여 있는 지역은 더 이상 감시를 할 수 없는 상황이 발생하게 된다. 따라서, 무선 센서 네트워크를 위한 라우팅 알고리즘은 에너지 효율성과는 별도로 데이터를 전체 네트워크로 분산시켜 가능한 많은 센서들이 오래동안 작동할 수 있도록 설계되어야 한다.
- 기존 대부분의 연구에서는 각 센서별에 대한 사건생성함수(Event Generation Function)가 일정하다고 가정하고 있다. 즉, 모든 센서들은 기지국으로 전송할 데이터를 동일한 비율로 가진다고 가정한다. 그러나 실제 경우에는 사건들이 임의로(randomly)[3], 균등하게(uniformly)[4], 그리고 특정지역에 반복적으로(repeatedly)[5] 발생한다.

심지어는 사건 함수가 시간에 따라 하나의 형태에서 다른 형태로 변화하기도 한다. 그러므로 라우팅 알고리즘은 다양한 사건 생성 함수에 충분히 둔감(robust)해야 한다.

- 센서 네트워크는 아주 많은 수의 무선 센서들로 이루어지므로 중앙 통제 구조(central control architecture)는 적합하지 않다. 센서 네트워크를 위한 라우팅 알고리즘은 분산 의사결정구조를 가져야 한다.

이러한 요구사항을 반영하기 위하여 본 연구에서는 개미 시스템을 이용한 무선 센서 네트워크 라우팅 알고리즘을 제안한다. 개미 시스템의 기본 아이디어는 선행 개미의 의사결정에 따른 결과를 후행 개미에게 제공하고 후행개미는 이 정보를 이용하여 좋은 해를 찾는 메커니즘이다[6]. 개미 시스템은 다음과 같은 이유로 통신 네트워크와 같은 대규모 동적 시스템의 제어에 적합하다. 첫째, 개미 시스템 내에서 개미들은 오직 로컬 정보(페로몬의 양)만을 가지고 경로를 탐색한다. 따라서 개미 시스템은 분산 제어 시스템의 형태를 가지며 대규모 시스템의 제어에 사용될 수 있다. 둘째, 개미 시스템은 예측 불가능한 환경의 변화에 잘 적응한다. 통신 네트워크에서 개미 시스템은 네트워크 트래픽에 따라 데이터의 경로를 변경하도록 설계되어 전송 네트워크 전체의 성능향상을 도모할 수 있다. 마지막으로 개미 시스템에서 가지고 있는 이전 확률(transition probability)은 우리가 고려하고 있는 라우팅 문제에서 가용 에너지를 기반으로 한 주변 노드의 가용성 척도로 사용될 수 있다. 이 가용성을 이용하여 우리는 센서 네트워크의 수명을 최대화하는 동시에 데이터 트래픽을 네트워크 전체로 분산하는 알고리즘을 개발한다.

본 논문에서는 앞에서 설명한 개미 시스템의 장점을 이용하여 무선 센서 네트워크를 위한 개미 시스템 라우팅 알고리즘(AS-RSN, Ant System-Routing

in Wireless Sensor Networks)을 제안한다. AS-RSN에서는 기지국으로 전송되는 각각의 데이터 패킷을 개미로 사용하고 각 패킷들이 경로의 다음 링크를 선택할 때 해당 링크에 연결된 센서의 잔존 에너지를 고려한다. 이를 위한 링크 코스트는 에너지 효율과 잔존 에너지양을 고려하도록 제안된 에너지 비용(EC, Energy Cost)를 사용한다[7]. 이와 같이 AS-RSN은 분산 의사결정 구조방식으로 에너지 균형을 도모하여 센서 네트워크의 수명을 최대화하는 동시에 센서 네트워크가 가변적인 네트워크 환경에 대비할 수 있게 한다.

논문의 구성은 다음과 같다. 제 2장에서는 본 연구에서 고려하는 센서 네트워크와 라우팅 문제에 대하여 설명하고 제 3장에서 기존 연구에 대하여 요약한다. 제 4장에서는 제 2장에서 소개한 라우팅 문제를 풀기위한 개미 시스템 기반의 라우팅 알고리즘(AS-RSN)에 대하여 설명하고 제 5장과 제 6장에서는 시뮬레이션 결과와 결론 및 향후 연구에 대하여 각각 논한다.

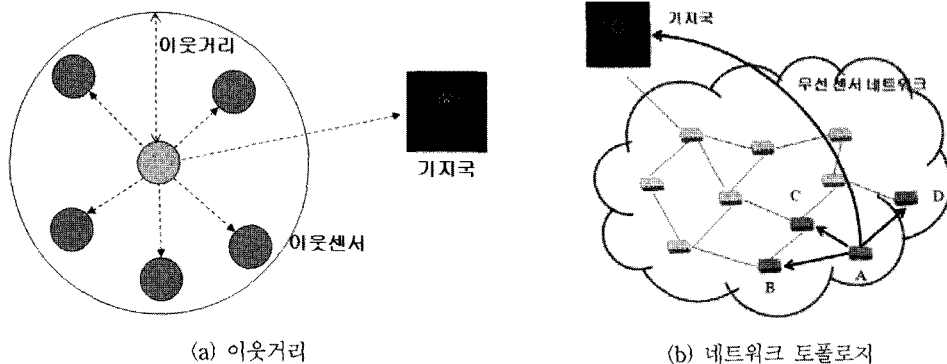
2. 센서 네트워크 모델

본 연구에서 우리가 고려하는 센서 네트워크는 n 개의 동일한 무선 센서(노드)가 감시가 필요한 지역에 무작위(randomly and uniformly)로 분포되어 있고 하나의 기지국이 이 지역 내에 또는 외에

위치하여 센서들이 감지한 데이터를 수집한다. 본 장에서는 이 일반적인 센서 네트워크를 대상으로 네트워크 토폴로지(network topology), 에너지 소비 모델(energy consumption model), 사건 생성 함수(event generation function), 그리고 센서 네트워크의 수명(lifetime of sensor network)을 정의한다.

2.1 네트워크 토폴로지

본 연구에서 고려하는 센서들은 [그림 1(a)]에서 보는 바와 같이 센서들은 일정한 전송출력으로 이웃 센서들과 통신을 하는 반면 기지국과는 자신의 위치를 고려하여 통신이 가능한 최소한의 전송 출력으로 통신한다[4, 9-14]. 이때 이웃 센서를 위한 전송출력으로 통신 가능한 최대거리를 “이웃거리(neighboring distance)”라고 하고 어떤 센서에서부터 이 이웃거리 이내에 존재하는 센서를 그 센서의 “이웃 노드(neighboring node)”라고 정의한다. 이와 같은 통신 방식을 이용하여 각 센서는 기지국을 포함한 이웃 노드 셋을 갖게 되고 [그림 1](b)와 같은 네트워크 토폴로지를 구성하게 된다. 이 네트워크 토폴로지에서는 어떤 센서가 기지국으로 전송할 데이터를 가지고 있을 때 이 센서는 자신이 직접 그 데이터를 기지국에 전송하는 것이 좋은지 아니면 이웃노드 중에 하나로 전달하는 것이 좋은지 판단하여 데이터를 라우팅한다. 이 라우팅 과정은 해당 데이터가 기지국에 도착할 때까지 계속된다. 이



[그림 1] 이웃거리와 네트워크 토폴로지

와 같은 의사결정을 위해서 각 센서는 이웃 센서들의 현재 에너지양과 그 이웃 센서로부터 기지국까지 데이터를 전송하는 데 소요되는 에너지양을 알고 있다고 가정한다[15].

2.2 에너지 소비 모델

무선 센서들은 데이터를 감지하고, 수신하고, 그리고 전송할 때 에너지를 소비한다. 그러나 데이터를 감지할 때 사용되는 에너지는 라우팅 알고리즘에 의해 영향을 받지 않고 수신 시 사용되는 에너지는 센서가 유힬(idle)상태일 때와 큰 차이가 없다[4, 9, 10, 16-18]. 따라서 일반적으로 라우팅 알고리즘 설계에서는 전송에 소비되는 전력만을 주로 고려하고 그에 사용되는 에너지양의 결정에는 전송되는 거리의 제곱과 전송하는 데이터의 크기에 비례하는 단순 결정적 에너지 모델(deterministic energy model)을 사용한다[4, 9-14]. 따라서, 본 연구에서는 무선 특성 상수(radio characteristic constant)와 데이터 크기로 정규화(normalization)한 $E = d^2$ 라는 단순 에너지 소비 모델을 사용한다[4].

2.3 사건 생성 함수

대부분의 기존 연구들은 센서가 동일한 비율로 또는 균등분포(uniform distribution)로 기지국으로 전송할 데이터를 갖는다고 가정한다[4, 9, 14, 19]. 즉, 모든 센서들이 일정시간(round)내에 기지국으로 전송할 데이터 패킷 하나를 가지게 된다. 그러나 다른 많은 센서 네트워크 어플리케이션의 경우에는 다른 여러 가지 형태의 사건 생성 함수가 나타난다. 야생 동물 무리의 이주를 감시하는 어플리케이션의 경우, 동물들은 특정한 길만을 반복적(repeatedly)으로 이용한다[5, 20]. 반면, 화재 조기 경보의 경우에는 사건이 목표 지역 내에서 임의로 드물게(rarely and randomly) 나타난다[3]. 따라서 센서 네트워크를 위한 라우팅 알고리즘의 개발을 위해서는 앞에서 언급한 여러 사건 생성 패턴을 고려하는 것이 타당하다. 본 연구에서는 다음의 세 가

지 사건 생성 함수를 고려한다.

- 균일 사건 생성(Uniform event generation) : 한 라운드에서 모든 센서들이 기지국으로 전송할 하나 데이터 패킷을 갖는다.
- 임의의 사건 생성(Random event generation) : 한 라운드에서 모든 센서들이 기지국으로 전송할 하나 데이터 패킷을 임의율 α 의 확률로 갖는다.
- 지역 A내에서 반복 사건 생성(Repeated event generation) : 한 라운드에서 지역 A내에 존재하는 센서들 만 기지국으로 전송할 하나 데이터 패킷을 갖는다.

2.4 센서 네트워크 수명

본 연구의 목적은 센서 네트워크의 수명을 최대화하는 라우팅 알고리즘의 개발이므로 제한된 라우팅 알고리즘의 평가를 위해서 네트워크 수명의 정의가 필요하다. 각 라운드에서 센서들이 앞에서 정의한 사건 생성 패턴에 따라 전송할 데이터를 갖게 될 때, 센서 네트워크의 수명은 하나 또는 일부분의 센서가 에너지 고갈로 인하여 직접 또는 간접으로 데이터를 기지국으로 전송할 수 없을 때까지의 라운드 수로 정의된다[4, 9, 10, 14, 17, 18]. 얼마나 많은 센서가 작동을 멈추었을 때까지를 네트워크 수명을 볼 것인가는 센서 네트워크 어플리케이션에 따라 달라진다. 본 연구에서는 센서 네트워크의 수명을 첫 번째(L_1), 10%(L_{10}), 그리고 20%(L_{20})의 센서가 작동을 정지할 때까지의 라운드 수로 정의한다[15, 16]. 이때, L_1 는 완전 작동 기간(full-functioning period)이라고 하고 이는 가장 많이 사용되는 센서 네트워크 수명의 정의이다[4, 9, 10, 14, 17, 18].

3. 기존연구

1992년 Dorigo는 Traveling Salesman Problem (TSP)를 풀기 위하여 매타 휴리스틱인 개미시스템(Ant System)을 고안하였다[21]. TSP는 n 개의

도시를 연결하는 최소거리의 폐쇄경로를 찾는 문제이다. 개미 시스템은 m 개의 개미를 네트워크에 각기 다른 노드에서 출발시켜 해찾기를 시도한다. 이렇게 출발한 개미들은 전이 규칙(transition rule)에 따라 다음 도시로 이동한다. 이 전이 규칙은 각 링크를 선택하는 확률로 표현되고 이 확률은 해당 링크에 존재하는 페로몬의 양에 따라 달라진다. 그리고 개미들이 폐쇄경로를 완성하였을 때, 해당 폐쇄 경로에 포함된 링크들에 페로몬이 할당되고 할당되는 페로몬 양은 개미들이 찾은 폐쇄경로가 얼마나 좋은지에 따라 결정된다. 즉, 개미가 좋은 경로를 찾아내면 많은 양은 페로몬이 그 경로를 구성하는 링크들에 배당된다. d_{ij} 를 도시 i 와 j 간의 거리, $\tau_{ij}(t)$ 를 도시 i 와 j 사이의 링크가 가지는 페로몬양이라고 하면, 이때 도시 i 에 있는 k 번째 개미가 도시 j 를 선택할 확률은 식 (1)과 같다.

$$p_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha [1/d_{ij}]^\beta}{\sum_{l \in J_i^k} [\tau_{il}(t)]^\alpha [1/d_{il}]^\beta} & \text{if } j \notin tabu_k \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

α 와 β 는 조율 매개 변수들(tuning parameter)이고 J_i^k 는 도시 i 에서 개미 k 가 갈 수 있는 도시들의 집합이다. 그리고 $tabu_k$ 는 k 번째 개미가 가지는 타부리스트로써 이미 방문한 도시들의 목록으로 개미들이 모든 도시를 한 번만 방문하도록 하는데 사용된다. 따라서, 다른 타부리스트를 가지고 있는 두 개미의 도시 i 에서 도시 j 로 이동할 확률은 다르게 된다. 앞에서 설명한 바와 같이 개미들이 자신의 여행을 마치고 나면 이동한 경로에 포함된 링크들에 그 개미의 성과에 따라 페로몬을 식 (2)만큼 더하게 된다.

$$\Delta\tau^k = \begin{cases} Q/L^k & \text{if ant } k \text{ travels } (i, j) \\ & \text{between time } t \text{ and } t+n \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

Q 는 임의의 상수이고 L^k 는 개미 k 의 여행 경로의 길이를 의미한다. L^k 는 개미 k 의 성과를 측정할 수 있는 다른 값으로 대체될 수 있다. 이와 같이

개미시스템의 기본 아이디어는 선행 개미에 의해 발견된 좋은 링크에 보다 많은 페로몬이 할당되고 이를 통해 후행개미가 좋은 링크를 선택할 확률을 높이는 positive feedback 매커니즘에 있다. 그러나 이 과정에서 개미들이 현재 최선해(current best solution)에 해당하는 경로에 페로몬을 계속 증가시켜 시스템이 지역 최적해(local optimal)에 수렴하는 일이 발생할 수 있다. 따라서, 이러한 현상을 방지하고 다른 더 좋은 해를 찾을 가능성을 위해 개미 시스템이 각 링크의 페로몬을 갱신할 때 페로몬 증발(pheromone evaporation)이라는 개념을 사용한다. 모든 링크의 페로몬을 증발계수(coefficient of evaporation), ρ 에 따라 감소시켜 혹시 발생할지 모르는 지역 최적해로의 수렴을 방지하고 보다 나은 해를 찾을 수 있도록 유도한다. 식 (3)은 n 시간 간격동안 m 개의 개미가 링크(i, j)를 경유하였을 때의 페로몬 갱신률이다.

$$\tau_{ij}(t+n) = (1-\rho)\tau_{ij}(t) + \Delta\tau \quad \text{where } \Delta\tau = \sum_{k=1}^m \Delta\tau^k \quad \text{and } 0 \leq \rho \leq 1 \quad (3)$$

각 링크에는 초기 페로몬, τ_0 ,이 할당되고 식 (3)에 의해 갱신된다. 이 식은 페로몬 갱신 규칙(pheromone update rule) 또는 로 불린다. 사실, 이 갱신 과정은 개미가 여행을 마쳤을 때 그 여행의 성과를 바탕으로 여행 경로를 구성하는 모든 링크의 페로몬을 갱신하는 과정이므로 이 규칙은 시스템 전체 컨트롤러에 의해 실시되어 식 (3)은 광역 갱신 규칙(global update rule)으로도 불린다. 개미 시스템은 TSP이외에도 Quadratic Assignment 문제(QAP) [22], Job-shop Scheduling 문제(JSP)[23], Graphic Coloring 문제(GCP)[24], Vehicle Routing 문제(VRP) [25], 그리고 많은 NP-hard 문제를 해결하는데 광범위하게 활용되고 있다[26, 27].

이와 같이 개미 시스템을 이용하여 최적화 문제를 해결하기 위한 많은 연구가 수행되어 왔지만 네트워크 라우팅과 같은 동적 최적화 문제에는 상대적으로 작은 연구가 수행되었다. 개미 시스템의 장

점 중에 하나는 시간에 따른 환경의 변화에 대한 적응성이므로 개미 시스템은 여러 동적 시스템의 제어나 동적 최적화 문제 해법에 적합하다. Schoonderwoerd 등은 처음으로 개미 시스템을 통신 네트워크의 라우팅 문제에 적용하였다[28]. 이 연구에서 개미(작은 크기의 데이터 패킷)들을 주기적으로 임의의 노드에서 다른 노드들로 보내고, 이 개미들이 이동하면서 얻게 되는 네트워크 정보를 개미 시스템 접근방법에 따라 네트워크 라우팅 테이블에 적용하여 라우팅 문제를 해결하였다. Di Caro와 Dorigo는 네트워크 트래픽 상태에 따라 반응하는 개미 기반 적응적 라우팅 알고리즘(ant-based adaptive routing algorithm)인 AntNet을 제안하였다[29]. Schoonderwoerd의 연구와는 달리 AntNet는 데이터 통신망을 위해 개발되었고 데이터 트래픽에 대한 적응성을 보다 강화하였다. 이 연구의 실험 결과에 따르면 AntNet은 기존의 잘 알려진 라우팅 알고리즘인 NSFNET와 NTTnet보다 훨씬 뛰어난 성과를 보인다. White 등은 회로교환 네트워크의 라우팅에 사용되는 개미 기반 알고리즘을 제안하였다[30]. 이 라우팅 방식은 모든 시작과 도착점 조합에 대하여 개미를 이동시키고 주어진 비용함수에 따라 각 조합에 대하여 최선의 경로를 찾는다.

Zhang은 AntNet을 기반으로 하여 무선 센서 네트워크 라우팅 알고리즘인 Sensor-driven Cost-aware ant routing을 개발하였다[31]. 이 라우팅 알고리즘에서는 센서들이 그들의 이웃노드에서부터 도착점까지의 비용을 알고 있다고 가정한다. 이 정보를 이용하여 센서 i 에서 이웃노드 j 로의 전이 확률, P_{ij} 는 식 (4)에 의해 계산한다.

$$P_{ij} = \frac{C_j}{\sum_{k \in N_i} C_k} \quad (4)$$

N_i 는 노드 i 의 이웃노드의 집합이고 C_j 는 노드 j 로부터 목적지까지의 비용 또는 거리이다. 비록 이와 같은 방식으로 에너지 효율적인 경로를 찾아 낼 수 있지만, 이 알고리즘은 네트워크 전체의 에너지

균형에는 고려하지 못해 일부 센서들의 에너지가 빨리 고갈되는 현상이 발생하게 된다. 이러한 단점을 극복하기 위하여 [32]에서는 각 경로의 보유한 에너지양(E_j)을 식 (5)를 이용하여 고려한다.

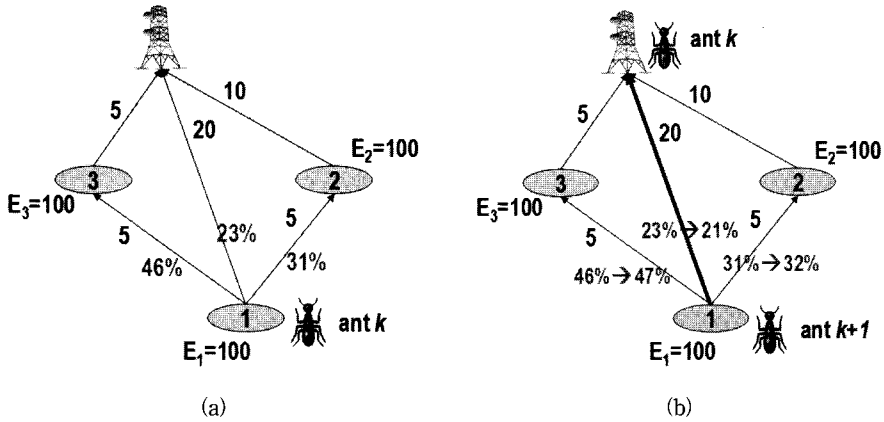
$$P_{ij}^k = \frac{\tau_{ij}^\alpha \eta_{ij}^\beta}{\sum_{l \in N_i, l \neq M^k} \tau_{il}^\alpha \eta_{il}^\beta} \text{ where } \eta_{ij} = \frac{E_j}{\sum_{l \in N_i} E_l} \quad (5)$$

η_{ij} 는 전송하려고 하는 노드 j 의 에너지양을 고려하기 위한 휴리스틱 척도이다. 노드 j 가 많은 양의 에너지를 보유하고 있으면 전이확률이 커지도록 설계되어 있다. E_j 와 M_k 는 각각 노드 j 의 현재 에너지양과 k 번째 개미의 타부 리스트이다. 에너지를 많이 가지고 있는 노드로 더 많은 데이터를 라우팅하여 전체 네트워크의 에너지 균형을 도모한다. 그러나 이 방식은 페로몬 업데이트 규칙을 통해 경로의 효율성을 고려하고 있기는 하지만 이웃노드가 다음 노드 또는 기지국과 통신할 때 발생하는 에너지 비용을 고려하지 않음으로써 발생하는 해의 품질 저하는 불가피하다. 즉, 에너지는 많지만 비효율적인 경로가 선택될 확률이 커지는 단점이 있다.

4. Ant System-Routing in Wireless Sensor Networks(AS-RSN)

이 장에서는 개미 시스템을 이용하여 에너지 효율적인 경로를 찾는 동시에 이웃노드 에너지 충분도(Energy Sufficiency)를 측정하는 척도를 이용하여 전체 네트워크의 에너지 균형을 도모하는 새로운 개미 시스템 기반의 라우팅 알고리즘을 제안한다. 먼저, 경로에 대한 에너지 효율성(Energy Efficiency)과 에너지 충분도(Energy Sufficiency)를 동시에 고려하기 위해서 [8]에서 정의한 에너지 비용(Energy Cost)을 사용한다. 노드 i 에서 노드 j 를 포함한 경로에 대한 에너지 비용(EC_{ij})은 식 (6)과 같이 정의된다.

$$EC_{ij} = \frac{e_{ij}}{E_i} + \frac{e_{i,BS}}{E_j} \text{ where } e_{ii} = 0 \text{ and } j \in N_i \quad (6)$$



[그림 2] 전이 확률(a) k번째 데이터 라우팅 전(b) k번째 데이터 라우팅 후

e_{ij} 는 노드 i 에서 j 로 단위 데이터 패킷을 전송하는데 필요한 에너지의 양이고 $e_{i,BS}$ 는 노드 i 에서 기지국으로 전송하는데 필요한 에너지의 양이다. 앞서 설명된 것처럼 모든 센서는 동일한 출력으로 이웃 센서들과 통신하므로 같은 e_{ij} 값을 가지게 되고 $e_{i,BS}$ 는 각 센서의 위치에 따라 다르게 되는데 센서들은 배포된 후 초기화 과정에서 이 값을 기지국과 통신을 통하여 설정한다.¹⁾ 그리고 E_i 와 E_j 는 각각 노드 i 와 j 의 현재 에너지량을 나타낸다. 이웃 노드 j 에 대한 에너지 비용은 센서 j 의 보유 에너지가 많을수록 기지국까지의 통신거리가 짧을수록 작아지도록 설계되어 있다. 이 에너지 비용을 이용하여 각 노드에서 개미들이 다음 센서로 이동할 전이 확률을 식 (7)과 같이 계산한다.

$$p_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha [1/EC_{ij}]^\beta}{\sum_{i \in J_i^k} [\tau_{ii}(t)]^\alpha [1/EC_{ii}]^\beta} & \text{if } j \notin tabu_k \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

이 전이 확률에 따라 각 센서들은 데이터 패킷들을 기지국까지 라우팅한다. 데이터 패킷에 대한 라

1) 각 센서 i 는 자신의 위치에서 통신이 가능한 최소한의 전송출력($e_{i,BS}$)으로 기지국과 통신한다고 가정되는데 이는 에너지 효율적인 라우팅 알고리즘 개발을 위한 최소한의 요구사항이고 이러한 센서의 기능은 현재까지 개발된 상용 칩셋을 활용하여 구현이 가능하다[4].

우팅을 마친 후에 또는 기지국에 데이터가 도착한 후에 라우팅에 관련된 모든 링크의 페로몬은 식 (8)에 의하여 갱신된다.

$$\tau_{ij}(t) \leftarrow (1 - \rho)\tau_{ij}(t) + \Delta\tau^k \quad \text{where } (i, j) \in tour_k \text{ and } 0 \leq \rho \leq 1 \quad (8)$$

$Tour_k$ 는 k 번째 개미 또는 데이터가 라우팅된 경로를 말하고 $\Delta\tau^k$ 는 데이터가 지나온 경로에 대한 비용을 나타낸다. 본 연구에서는 경로 비용으로 $1/\sum_{(i,j) \in tour_k} EC_{ij}$ 를 사용한다. 이는 해당 데이터가 이동하면서 사용한 에너지 비용으로 해당 경로가 얼마나 효율적이고 에너지가 충분한지를 나타낸다. 식 (8)에 의하여 에너지비용이 많이 발생한 경로는 페로몬이 작게 할당되고 반대의 경우에는 많은 페로몬이 할당되어 후속으로 라우팅되는 데이터들이 좋은 경로를 많이 사용할 수 있도록 유도한다.

4.1 예제

이 절에서는 AS-RSN 알고리즘을 두 개의 예제를 통하여 설명한다. 먼저, [그림 2]에서 센서 1이 데이터 패킷 k 를 기지국으로 보내려고 한다. 이 때 가능한 경로는 센서 1이 직접 기지국으로 보내는 직접 경로 하나와 센서 2와 센서 3을 경유하는 우회 경로 2개가 있다. 이 3개의 경로 중 하나를 선택

하기 위하여 센서 1은 각 경로에 대한 전이 확률을 식 (6)과 식 (7)을 통하여 계산한다(<표 1>). 이후 센서 1은 자신의 라우팅 테이블에 있는 전이 확률(<표 1>의 네 번째 컬럼)을 이용하여 3개의 경로 중 하나를 0.23, 0.31, 0.46 확률로 선택하고 패킷 k 를 그 경로로 전송한다. 만약, 기지국으로의 직접 경로를 선택하였다고 가정하면 기지국은 데이터를 수신한 후, 데이터 패킷의 오버헤드에 포함된 경로 정보를 이용하여 사용된 에너지 비용을 계산하고 이에 따라 데이터 패킷 k 가 지나는 경로를 구성하고 있는 링크들의 페로몬을 브로드캐스팅을 통해 수정한다. 예제의 경우, $l_0 = 1$ 이라고 하면, 데이터 패킷 k 의 여행 경로는 (1, BS)이고 이 여행에 사용된 에너지 비용은 20으로 결국 여행 경로를 이루는 각 링크에 할당될 페로몬의 양, $\Delta\tau$, 는 $1/20 = 0.05$ 가 된다. 이 계산을 통하여 새로운 $\tau_{1,BS}$ 는 1.05가 되고 τ_{12} 과 τ_{13} 는 변화가 없다. 그리고 센서 1이 데이터를 기지국으로 전송하였으므로 센서 1의 현재 에너지 량도 100에서 80으로 변경된다. 새로운 에너지 값과 페로몬 값을 이용해 경로별 새로운 에너지 비용과 전이 확률을 구하면 <표 2>와 같이 된다. 따라서, 센서 1에 도착한 새로운 데이터 패킷 $k+1$ 은 0.21, 0.32, 0.47의 확률로 각 경로에 라우팅된다.

두 번째 예제는 AS-RSN에서 타부리스트가 어떻게 사용되는지를 보여준다. 네트워크에서 목적지를 찾아가고 있는 개미 즉, 라우팅되고 있는 데이터 패킷은 자신이 방문한 노드들의 목록(타부 리스트)을 가지고 있다. 이 방식을 통해서 개미들은 목적지 또는 기지국으로 가는 루프(loop)없는 경로를 찾을 수 있게 된다. [그림 3]에서 보듯이 처음 개미 k 가 노드 1에 있을 때 개미 k 의 타부 리스트는 비어 있다. 따라서, 개미 k 는 노드 1의 이웃 노드인 노드 2, 3, 4중 하나로 전이 확률이 따라 이동하게 된다. 그 후에 개미 k 가 노드 3으로 이동하게 된다고 가정하면 노드 1은 개미 k 의 타부 리스트에 추가된다. 이때 개미 k 는 다음으로 이동할 노드를 결정할때, 노드 1은 비록 노드 3의 이웃노드이지만 타부리스트에 포함되어 있으므로 고려 대상에서 제외하고 그 외에 이웃노드 2, 4, 5, 6중에 하나로 이동한다. 개미 k 가 노드 2로 이동하였다면 개미 k 의 타부 리스트는 {1, 3}이 된다. 이와 같이 개미들은 타부 리스트를 이용하여 목적지까지 이동하게 되고 그 결과로 루프 없는 도착지까지의 경로를 찾게 된다.

4.2 알고리즘 설명

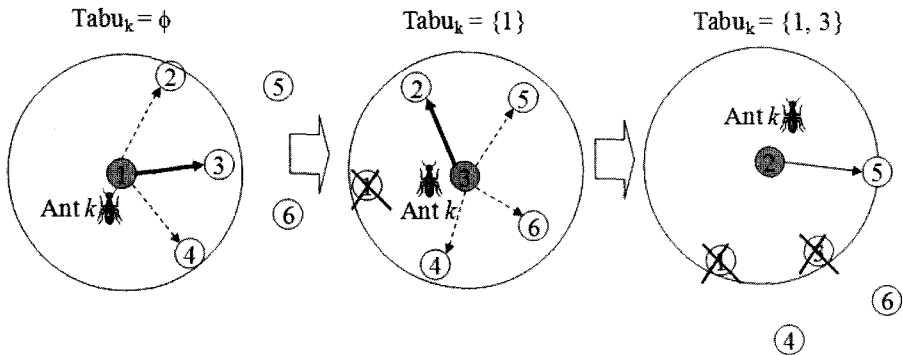
본 연구에서 제안하는 라우팅 알고리즘, AS-RSN,

<표 1> 데이터 패킷 k 를 라우팅하기 전 센서 1의 라우팅 테이블

j	τ_{ij}	$EC_{ij}(t)$	P_{ij}^k
BS	1.0	$\frac{20}{100} = 0.2$	$\frac{1/0.2}{1/0.2 + 1/0.15 + 1/0.1} = 0.23$
2	1.0	$\frac{5}{100} + \frac{10}{100} = 0.15$	$\frac{1/0.15}{1/0.2 + 1/0.15 + 1/0.1} = 0.31$
3	1.0	$\frac{5}{100} + \frac{5}{100} = 0.1$	$\frac{1/0.2}{1/0.2 + 1/0.15 + 1/0.1} = 0.46$

<표 2> 데이터 패킷 k 를 라우팅한 후 센서 1의 라우팅 테이블

j	τ_{ij}	$EC_{ij}(t)$	P_{ij}^k
BS	$1 + \frac{1}{20} = 1.05$	$\frac{20}{80} = 0.25$	$\frac{(1.05) \cdot 1/0.25}{(1.05) \cdot 1/0.25 + 1/0.16 + 1/0.11} = 0.21$
2	1.0	$\frac{5}{80} + \frac{10}{100} = 0.16$	$\frac{1/0.16}{(1.05) \cdot 1/0.25 + 1/0.16 + 1/0.11} = 0.32$
3	1.0	$\frac{5}{80} + \frac{5}{100} = 0.11$	$\frac{1/0.11}{(1.05) \cdot 1/0.25 + 1/0.16 + 1/0.11} = 0.47$



[그림 3] k 번째 개미의 타부 리스트

은 다음과 같은 사항들을 고려하여 설계되었다. 먼저, 개미 시스템의 전이 확률을 사용하여 센서들의 데이터 트래픽을 전체 네트워크에 분산되도록 설계하여 네트워크의 에너지 균형을 도모하도록 하였고 그 결과로 네트워크 수명의 최대화를 유도하였다. 두 번째로 페로몬 갱신 규칙을 통하여 좋은 경로에 포함되어 있는 노드로의 전이 확률을 높여 좋은 경로가 자주 사용되도록 하였다. 마지막으로, 센서 네트워크의 경우에는 센서들의 현재 에너지량과 같은 네트워크 정보가 계속 변하기 때문에 현재 좋은 경로가 계속 좋은 경로라는 보장이 없다. 따라서 계속 변화하는 좋은 경로를 찾기 위해 개미 시스템의 링크 코스트를 에너지 코스트로 재 정의하여 전이 확률계산에 직접 반영하였다.

고려하는 센서 네트워크의 센서들은 주어진 사건 생성 함수에 따라 데이터를 가지게 되고 이 데이터 패킷들은 개미로 간주된다. 이렇게 생성된 모든 개미들은 기지국으로 보내져야 하며 기지국에 도착한 개미는 소멸된다. 개미 k 는 기지국에 도착할 때까지 하나의 노드에서 그 노드의 이웃노드로 이동하는 동시에 방문된 노드들은 타부 리스트에 기록되어 기지국에 도착한 후, 개미 k 가 지나온 경로 정보로 활용된다. 일단, 개미 k 가 기지국에 도착하면 식 (8)를 이용하여 경로에 포함된 링크에 페로몬을 갱신한다(global upate). 에너지 효율적인 경로에는 많은 페로몬이 비효율적인 경로에는 적은 페로몬이 할당되어 다음 개미들의 라우팅에 영향을 준다. 한편, 개미 k 는 식 (7)을 이용하여 기지국을 포함한 각

이웃노드로의 전이확률을 구하고 해당 노드는 식 (6)을 통해 에너지 비용을 갱신한다(local update). 이 에너지 비용 갱신에 따라 한번 사용된 노드에 대한 에너지 비용은 상승하게 하는데, 이 특징을 통해 제안하는 알고리즘은 네트워크 전체의 에너지 균형을 달성한다.

이와 같은 데이터 라우팅을 위해서 각 센서는 작은 규모의 라우팅 테이블을 가진다. 이 라우팅 테이블에서는 노드 식별번호(identification number), 기지국까지 전송하는 데 필요한 에너지 비용(기지국으로의 직접 통신), 이웃 노드별 링크의 페로몬 양, 전이 확률 등을 포함하고 있다. 알고리즘이 수행되는 단계는 다음과 같다.

- 1) 라우팅 테이블 초기화 : 초기화 기간 동안 각 센서는 기지국까지의 거리를 찾고 소요되는 에너지 비용을 계산한다. 그 이후에 센서들은 셋업 메시지를 사전에 설정된 출력으로 브로드 캐스팅한다. 이 메시지에는 자신의 식별 번호와 기지국까지의 에너지 비용 정보가 포함되어 있다. 이 메시지를 받은 모든 센서들은 송출한 센서를 자신의 이웃노드로 등록하고, 해당 페로몬은 1.0으로 설정하고, 전이 확률은 식 (7)로 계산하여 기록한다. 이 기간이 완료되면 모든 센서의 라우팅 테이블이 초기화 된다. 이 통신 환경의 변화가 빈번히 발생하는 경우에는 이 초기화가 일정 시간 간격으로 반복적으로 실행될 수도 있다.

〈표 3〉 AS-RSN 알고리즘

```

Let EV(t) be the set of nodes having data at time t
Let LT be the lifetime of network and  $nDead_0$  corresponding threshold
For t = 1 to  $t_{max}$  do
  For k = 1 to n do
    If  $k \in EV(t)$  then
      Launch  $ant^k(t)$  at node k
      Repeat
        Let i be the current node
        IF  $E_i \leq TEB_i$  then
           $nDead \leftarrow nDead + 1$ 
          If  $nDead \geq nDead_0$  then
             $LT = t$ 
          EndIf
        Else
          Choose the next node  $j, j \in N_i + \{BS\}$  with probability : 식 (7)
        EndIf
        After each transition  $ant^k(t)$  applies the local update rule : 식 (6)
        Until  $ant^k(t)$  arrives at BS
        Compute the length  $L^k(t)$  of the tour  $T^k(t)$  produced by  $ant^k(t)$ 
        For every edge  $(i, j) \in T^k(t)$  do
          Update pheromone trails by applying the rule : 식 (8)
        EndFor
      End If
    End For
  End For
  Print lifetime of network(LT)
  Stop

```

- 2) 지역갱신규칙(Local update rule) : 모든 센서의 라우팅 테이블에는 이웃 노드의 에너지 변화가 반영되어야 한다. 센서는 일반적으로 브로드 캐스팅 방식을 사용하기 때문에 이웃 노드가 전송하는 모든 메시지는 받을 수 있으므로 이웃 센서의 에너지 변화를 감지할 수 있다. 결과적으로 하나의 센서가 기지국 또는 이웃 센서로 데이터를 전송하면 그 센서의 변화된 에너지양을 모든 이웃 센서가 알게 되고 식 (7)을 통하여 새로운 전이 확률을 계산한다. 이 과정은 특정 센서의 에너지 변화가 있을 때 이 센서를 이웃 센서로 가지는 센서들에서 지역적으로 이루어진다(〈표 2〉의 세 번째 열).
- 3) 광역갱신규칙(Global update rule) : 기지국에 데이터 또는 개미가 도착하면, 기지국은 데이터에 포함된 경로 정보를 이용하여 그 경

로에 부과할 페로몬량을 계산하고 식 (8)에 따라 갱신한다. 이 갱신은 각 데이터 패킷이 기지국으로 전달된 후에 기지국에 의해서 광역적으로 실시된다. 무선 통신의 특징인 브로드캐스팅 방식으로 전체에 페로몬 갱신 명령을 전송하고 이에 해당 데이터 패킷이 경유한 경로 상에 위치한 센서들이 반응하여 페로몬을 갱신한다(〈표 2〉의 두 번째 열).

- 4) 새로운 라우팅 확률 계산 : 지역 및 광역 갱신 규칙으로 변경된 에너지 비용과 페로몬 양을 이용하여 각 이웃 센서에 대한 새로운 라우팅 확률을 계산한다. 새롭게 계산된 라우팅 확률은 각 센서가 보유한 라우팅 테이블에 보관되고 이는 다음 데이터 패킷의 라우팅에 사용된다(〈표 2〉의 마지막 열).

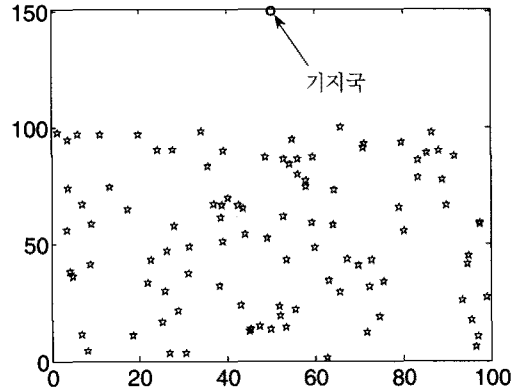
이 과정을 통하여 AS-RSN은 기지국까지의 경로를 찾아내게 된다. 〈표 3〉은 AS-RSN 알고리즘을 표현한 것이다.

2) 데이터 패킷의 오버헤드 정보에 각 센서의 에너지 양 등을 포함시켜 활용한다.

5. 실험 결과

제안하는 라우팅 알고리즘의 성과를 보여주기 위해 여러 실험을 실시하였다. 본 장에서는 AS-RSN을 센서 네트워크에서 많이 사용되는 기존 세 개의 알고리즘 비교실험을 실시한다. 세 개의 알고리즘은 Direct Communication(Direct)[14], Minimum Transmission Energy(MTE)[14], Self-Organized routing(SOR)[4]이다. 먼저 Direct 알고리즘은 모든 센서들이 이웃노드를 경유하는 경로를 고려하지 않고 기지국과 직접 통신을 한다. MTE의 경우에는 항상 가장 에너지 효율적인 경로만을 선택하여 기지국으로 데이터를 전송한다. SOR의 경우에는 적절한 보상 구조에 따라 기지국 근처에 위치한 센서들이 다른 센서들의 중계자 역할을 하여 네트워크 전체에 에너지 효율과 균형을 도모한다. 제안 모델을 포함한 4개의 라우팅 알고리즘은 실험을 위하여 LINUX에서 C programming으로 구현되었다. 또한, AS-RSN의 성능을 Chang and Tassiulas [15]에 의하여 개발된 선형 계획(linear programming) 모형의 결과와도 비교한다. 이 선형계획모형은 센서 네트워크의 L_1 을 최대화하는 모델로 휴리스틱 라우팅 알고리즘의 성능 상한치를 제공한다. 이 선형모형은 LINGO를 이용하여 계산되었다.

[그림 4]에서 보는 바와 같이 실험을 위해서 $100m \times 100m$ 의 사각형 지역에 100개의 센서가 임의로 배포되어 있고 기지국은 (50, 150)에 위치한 센서 네트워크를 고려한다[7, 8, 9]. 각 센서들은 초기에 250,000단위 에너지를 가지고 있다고 가정하는데 이는 가장 멀리 떨어진 센서가 100번 기지국과 직접 통신을 할 수 있는 에너지양이다[4]. 다양한 사건 생성 함수의 효과를 측정하기 위하여 시뮬레이션은 균일, 임의, 반복 등 세 가지 사건 생성함수를 고려한다. 임의 사건 생성의 경우에는 임의률, α 로 0.25를 사용한다. 반면, 반복 사건 생성의 경우에는 (0, 0)과 (50, 50)가 이루는 정사각형 지역에 존재하는 센서들만 반복적으로 데이터를 가지게 된다고 가정한다. 그리고 AS-RSN의 경우 페로몬 증발률,



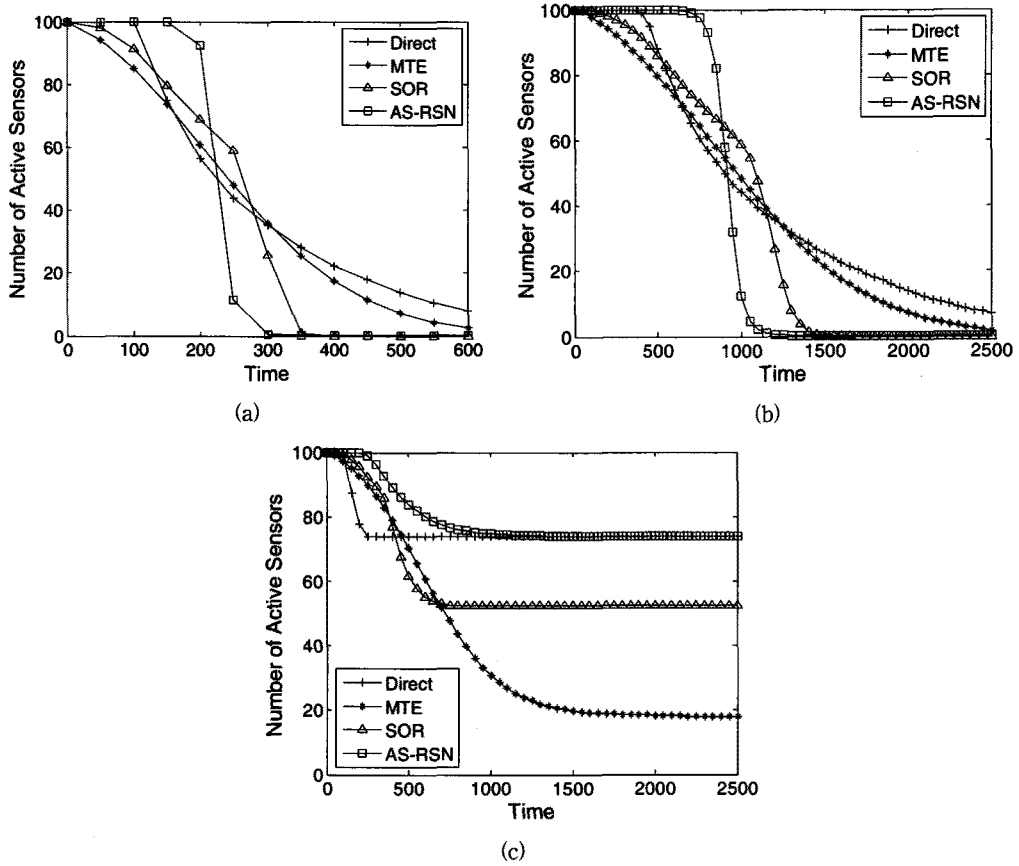
[그림 4] $100m \times 100m$ 내에 100개의 센서가 임의로 배포되어 있고 기지국은 (50, 150)에 위치해 있는 센서 네트워크

ρ , 는 0.01로 조율 매개 변수, α 와 β 는 1.0으로 동일하게 각각 설정하였다. 본 실험에서 사용하는 센서 네트워크는 임의로 생성되기 때문에 결과에 반영되는 임의 효과를 최소화하기 위하여 실험을 각 조건에 대하여 100번 실행한 후 평균한 결과값을 사용하였다.

실험 분석은 두 가지 주요 결과를 보여준다. 먼저, 5.1에서는 제안된 라우팅 알고리즘을 포함한 4개의 라우팅 알고리즘에 의한 네트워크 수명에 대하여 토론한다. 이를 통하여 AS-RSN이 에너지 효율과 균형을 얼마나 효과적으로 달성하는지 설명한다. 두 번째로 5.2에서는 각 알고리즘에 의한 라우팅 경로를 보여줌으로써 제안된 알고리즘이 어떻게 에너지 균형을 이루어 나가는 지에 대하여 설명한다.

5.1 네트워크 수명

[그림 5](a)는 센서들이 균일분포를 가질 때 각 라우팅 알고리즘별로 시간(라운드 수)에 따라 작동 중인 센서의 수를 그래프로 나타낸다. 그림에서 보듯이 AS-RSN은 약 40%의 센서가 에너지 고갈 때까지 나머지 세 개의 알고리즘보다 좋은 결과를 보인다. Direct, MTE, SOR의 경우에는 아주 초기부터 서서히 센서들의 에너지가 고갈되기 시작하고 이 현상은 시간이 지난 후에도 동일하다. 반면, AS-



[그림 5] 시간에 따른 작동 센서들이 수 (a) 균일 분포, (b) 임의 사건 생성, (c) 반복 사건 생성

<표 4> Direct, MTE, SOR, AS-RSN에 의한 네트워크 수명(L_1, L_{10}, L_{20})

	균일 사건 생성			임의 사건 생성			반복 사건 생성		
	L_1	L_{10}	L_{20}	L_1	L_{10}	L_{20}	L_1	L_{10}	L_{20}
Direct	105.24	122.72	141.75	394.81	492.63	567.95	107.67	143.51	190.14
MTE	12.13	77.58	125.91	50.09	311.17	504.75	37.43	269.35	416.05
SOR	29.81	110.24	151.42	121.2	442.57	607.28	110.91	305.99	405.91
AS-RSN	182.97	209.48	216.98	733.41	839.29	868.86	281.86	436.94	650.89
Optimal	282.2	282.2	282.2	1128.81	1128.81	1128.81	1115.43	1115.43	1115.43

RSN은 200라운드까지 모든 센서가 동작하고 이 시점을 지난 후 대부분의 센서 에너지가 급속히 고갈되는 것을 볼 수 있다. 사실, 이러한 현상은 네트워크 전체로 트래픽이 적절히 분산되어 센서들이 고루 에너지를 사용했음을 의미한다. 임의 또는 반복 사건 생성 함수의 경우에도 비슷한 결과를 보인

다([그림 5](b)와 (c)). 특히, 반복 사건의 경우 AS-RSN은 수명함수의 정의에 다른 알고리즘보다 월등한 성능을 보인다.

<표 4>는 각 알고리즘에 대하여 제 2장에서 정의한 세 가지 네트워크 수명 L_1, L_{10}, L_{20} 의 값을 세 가지 사건 생성 함수에 대하여 보여준다. AS-RSN

의 경우 다른 알고리즘들에 대하여 고려하는 모든 네트워크 수명 정의에 대하여 좋은 결과를 보여주고 있으며 선형모형에 의한 최적 값에도 상당히 근접한 값을 제공함을 알 수 있다.

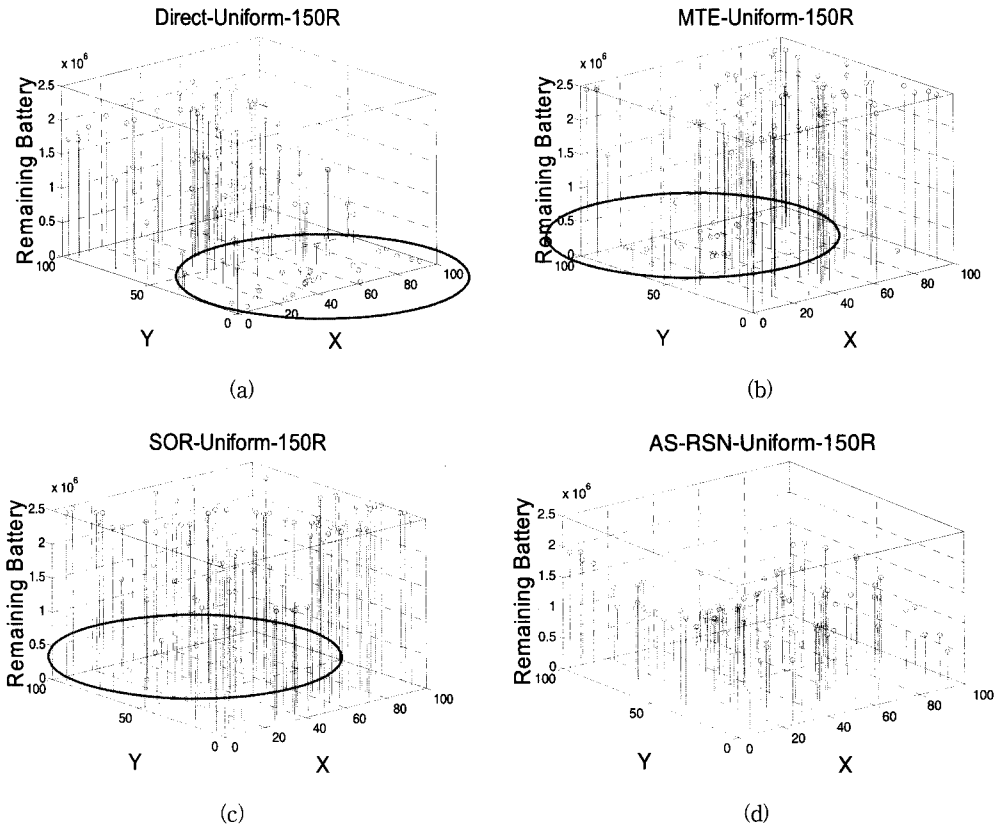
이와 같이 제안된 라우팅 알고리즘은 에너지 효율과 균형을 동시에 고려하여 네트워크의 수명을 최대화하고 있다.

5.2 에너지 균형

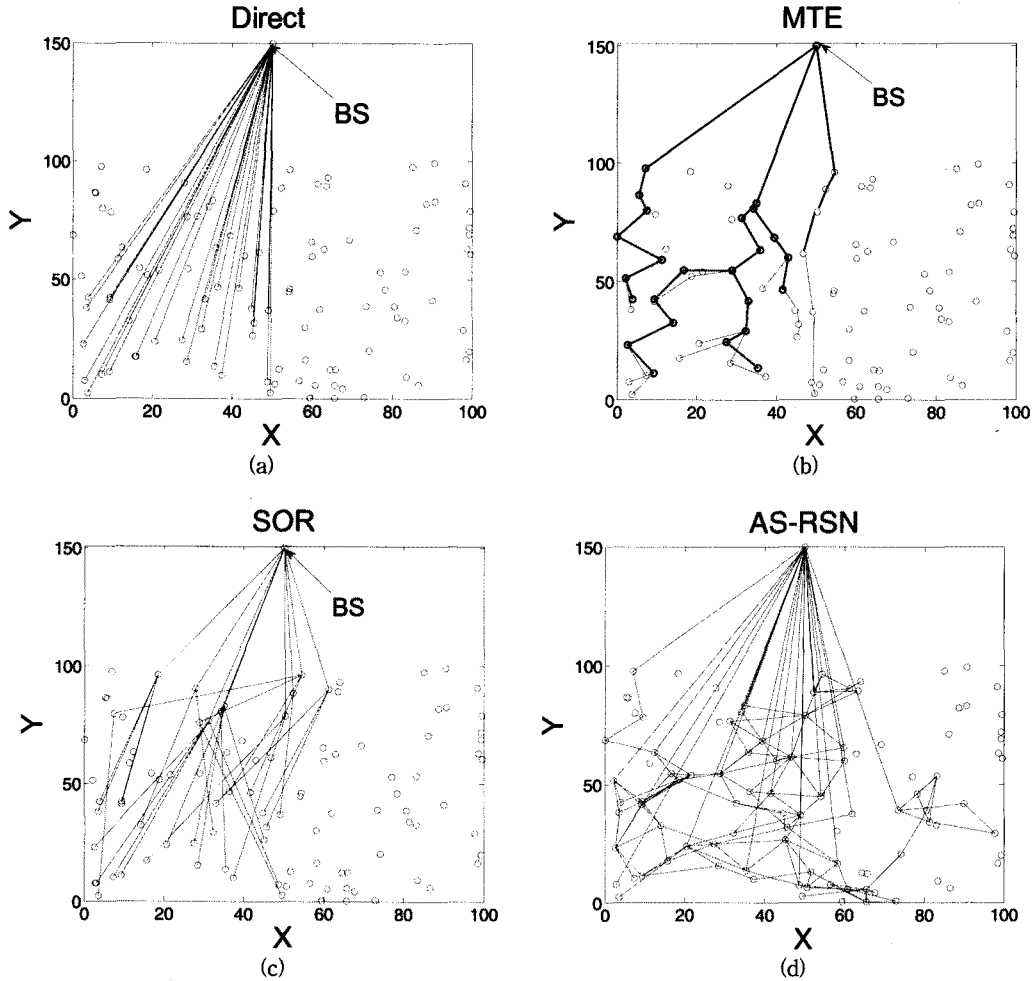
[그림 6]은 AS-RSN이 네트워크 전체에 얼마나 에너지 균형을 잘 달성하는지를 보여준다. [그림 6]은 시간이 150일 때, 각 알고리즘에 의해 운영된 네트워크의 센서들이 보유하고 있는 에너지량을 보여준다. x, y축값은 센서들의 위치를 나타내고 z축은

센서가 현재 보유한 에너지량을 나타낸다. 그리고 기지국은 (50, 150)에 위치한다. Direct([그림 5](a)), MTE([그림 5](b)), SOR([그림 5](c))의 경우 기지국 근처의 센서들은 이미 고갈되어 있다. 그러나 AS-RSN의 경우에는 모든 센서가 여전히 충분한 에너지를 보유하고 있다([그림 5](d)). 이 결과를 통해서 AS-RSN은 네트워크 전체의 에너지를 골고루 사용하여 에너지 균형을 이루고 있음을 알 수 있다.

[그림 7]은 (0, 0)과 (50, 50) 사이에 센서들만 전송할 데이터를 가지는 경우 네 개의 알고리즘에 의해 생성되는 라우팅 경로를 표시한 것이다. Direct, MTE, SOR의 경우에는 데이터 트래픽이 센서 네트워크의 1/4 또는 1/2지역에 집중되는 반면, AS-RSN의 경우에는 가능한 넓은 지역으로 트래픽을 분산한다.



[그림 6] 균일 사건함수의 경우 150라운드 이후 센서들의 잔여 에너지량 (a) Direct, (b) MTE, (c) SOR, (d) AS-RSN



[그림 7] (0, 0)과 (50, 50)사이에서 반복 사건이 발생할 때 라우팅 경로 (a) Direct, (b) MTE, (c) SOR, (d) AS-RSN

6. 결론 및 향후 연구 과제

무선 센서 네트워크는 동적이고 대규모의 시스템이므로 시스템 제어를 위해서는 분산 제어 시스템이 필요하다. 개미 시스템은 이와 같은 분산 제어 방식을 제공하므로 본 연구에서는 이 개미 시스템을 이용한 라우팅 알고리즘을 제안하였다. 개미 시스템의 전이 확률을 각 센서의 라우팅 의사결정 구조에 적용하고 이를 통해 전체 네트워크의 에너지 균형을 도모하는 라우팅 알고리즘을 제안하였

다. 또한, 이 전이 확률을 계산할 때 에너지 비용을 사용하여 에너지 균형을 직접적으로 고려하도록 하였다. 이 제안된 AS-RSN는 기존의 3개 알고리즘과 시뮬레이션을 통하여 비교하여 보다 좋은 결과를 제공하였다.

네트워크 내에서 센서들은 임의로 배포되는 특성상 다른 이웃 노드의 수나 기지국까지의 거리를 가진다. 다시 말해, 이러한 척도를 고려할 때 네트워크 내의 센서들은 이질적(Heterogeneity)이라고 할 수 있다. 이와 같은 이질성은 센서 네트워크 라

우팅 알고리즘의 향상을 위하여 다음과 같이 고려할 수 있다[33]. 많은 이웃 노드를 보유하고 있는 센서의 경우에는 적은 수의 이웃 노드를 가진 센서보다 트래픽을 네트워크 전체로 분산 시킬 기회를 더 많이 보유하고 있어 이러한 센서의 활용도를 높이면 에너지 균형은 보다 잘 달성될 수 있다. 따라서 향후연구에는 센서들의 네트워크 상의 이질성을 고려한 라우팅 알고리즘을 개발하고자 한다.

참 고 문 헌

- [1] Estrin, D., R. Govindan, J. Heidemann, and S. Kumar, "Next century challenges : scalable coordination in sensor networks," Proceedings of the 5th annual ACM/IEEE international conference on Mobile computing and networking, (1999), pp.263-270.
- [2] Akyildiz, I.F., W. Su, Y. Sankarasubramanian, and E. Cayirci, "A survey on Sensor Networks," *IEEE Communications Magazine*, Vol.38, No.8(2002), pp.102-114.
- [3] Braginsky, D. and D. Estin, "Rumor Routing Algorithm for Sensor Networks," Proceedings of the first Workshop on Sensor Networks and Applications (WSNA)(2002), pp. 22-31.
- [4] Rogers, A., E. David and N.R. Jennings, "Self-organized routing for wireless microsensor networks," *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, Part A, Vol.35, No.3 (2005), pp.349-359.
- [5] Butler, Z. and D. Rus, "Event-based motion control for mobile-sensor networks," *IEEE Pervasive Computing*, Vol.2, No.4(2003), pp.34-42.
- [6] M. Dorigo and L.M. Gambardella, "Ant Colony System : A Cooperative Learning Approach to the Traveling Salesman Problem," *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, Vol.1, No.1(1997), pp.53-66.
- [7] Ok, C.-S., P. Mitra, S. Lee, and S. Kumara, "Maximum Energy Welfare Routing in Wireless Sensor Networks," *Networking*, LNCS 4479(2007), pp.203-214.
- [8] OK, C.-S., S.-C. Lee, P. Mitra, and S. Kumara, "Distributed Energy Balanced Routing for Wireless Sensor Networks," *Computers and IE*, Vol.57, No.1(2009), pp.125-135.
- [9] Lindsey, S., C. Raghavendra, and K. M. Sivalingam, "Data Gathering Algorithms in Sensor Networks Using Energy Metrics," *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, Vol.13, No.9(2002), pp.924-935.
- [10] Zhang, H. and J. C. Hou, "Maximizing a -Lifetime for Wireless Sensor Networks," *SenMetrics*, (2005), pp.70-77.
- [11] Wanger, J. and R. Cristescu, "Power Control for Target Tracking in Sensor Networks," Conference on Information Sciences and Systems, 2005.
- [12] Wattenhofer, R., L. Li, P. Bahl, and Y. Wang, "Distributed topology control for power efficient operation in multihop wireless ad hoc networks," *INFORCOM*, (2001), pp.1388-1397.
- [13] Ramanathan, R. and R. Rosales-Hain, "Topology Control of Multihop Wireless Networks using Transmit Power Adjustment," *INFOCOM*, (2000), pp.404-413.
- [14] Heinzelman, W.R., A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, "Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks," Proceedings of the 33rd Hawaii International Conference on System Sciences, (2000), pp.1-10.

- [15] IEEE.802.11, Wireless LAN Medium Access Control(MAC) and Physical Layer(PHY) Specification(1999).
- [16] Ye, W., J. Heidemann, and D. Estin, "Medium Access Control with Coordinated Adaptive Sleeping for Wireless Sensor Networks," *IEEE/ACM Transaction on networking*, Vol.12, No.3(2004), pp.493-506.
- [17] Gandham, S.R., M. Dawande, R. Prakash, and S. Venkatesan, "Energy Efficient Schemes for Wireless Sensor Networks with Multiple Mobile Base Stations," *Proceedings of IEEE Globecom*, (2003), pp.377-381.
- [18] Chang, J. and L. Tassiulas, "Maximum Lifetime Routing in Wireless Sensor Networks," *IEEE/ACM TRANSACTION ON NETWORKING*, Vol.12, No.4(2004), pp.609-619.
- [19] Bandyopadhyay, S., C. Giannella, U. Maulik, H. Kargupta, K. Liu, and S. Datta, "Clustering distributed data streams in peer-to-peer environments," *Information Sciences*, Vol. 176, No.10(2006), pp.2188-2205.
- [20] Ren, Q. and Q. Liang, "Energy and quality aware query processing in wireless sensor database systems," *Information Sciences*, Vol.177, No.20(2007), pp.4526-4538.
- [21] Dorigo, M., "Ottimizzazione, apprendimento automatico, ed algoritmi basati su metafora naturale," in *Dipartimento di Elettronica*, Ph.D. Politecnico di Milano, 1992.
- [22] Maniezzo, V. and A. Colomi, "The Ant System Applied to the Quadratic Assignment Problem," *Knowledge and Data Engineering*, Vol.11, No.5(1999), pp.769-778.
- [23] S. Van Der Zwaan and C. Marques, "Ant Colony Optimisation for Job Shop Scheduling," in *the Third Workshop on Genetic Algorithms and Artificial Life* Lisbon(1999), Portugal.
- [24] Costa, D. and A. Hertz, "Ants can colour graphs," *Journal of Operational Research Society*, Vol.48(1997), pp.295-305.
- [25] Bullnheimer, B., R. Hartl and C. Strauss, "An improved Ant System algorithm for the Vehicle Routing Problem" *Annals of Operations Research*, Vol.89(2004), pp.319-328.
- [26] Gambardella, L.M. and M. Dorigo, "HAS-SOP : Hybrid Ant System for the Sequential Ordering Problem," in *Technical Report : IDSIA-11-97*, 1997.
- [27] Michel, R. and M. Middendorf, "An Island Model Based Ant System with Lookahead for the Shortest Supersequence Problem," the 5th International Conference on Parallel Problem Solving from Nature, (1998), pp.692-701.
- [28] Schoonderwoerd, R., O.E. Holland, J.L. Bruten, and L.J.M. Rothkrantz, "Ant-Based Load Balancing in Telecommunications Networks," *Adaptive Behavior*, Vol.5, No.2(1997), pp.169-207.
- [29] Caro, G.D. and M. Dorigo, "AntNet: Distributed Stigmergetic Control for Communications Networks," *Journal of Artificial Intelligence Research*, Vol.9(1998), pp.317-365.
- [30] White, T., B. Pagurek, and F. Oppacher, "Connection Management using Adaptive Agents," 1998 International Conference on Parallel and Distributed Processing Techniques and Applications(PDPTA'08), 1998.
- [31] Zhang, Y., L.D. Kuhn and M.P.J. Fromherz, "Improvements on Ant Routing for Sensor Networks," *Lecture Notes in Computer Science*, Vol.3172(2004), pp.154-165.
- [32] Okdem, S. and D. Karaboga, "Routing in Wireless Sensor Networks Using Ant Colo-

ny Optimization,” *The first NASA/ESA conference on Adaptive Hardware and Systems*, (2006), pp.401-404.

[33] Thadakamalla, H.P., S. Kumara, and R. Albert, “Search in weighted complex networks,” *Physics Review E*, Vol.72(2005).