

무선 센서 네트워크에서의 에너지 효율적인 ACO 기반의 라우팅 알고리즘 설계 ¹⁾

최재원^{○*} 정의현^{**} 박용진^{*}

^{*}한양대학교 전자통신컴퓨터공학과

^{**}한양대학교 디지털미디어공학부

{jwchoi[○], park}@hyee.hanyang.ac.kr, jung@anyang.ac.kr

Design of An Energy-efficient Routing Algorithm based on ACO for Wireless Sensor Networks

Jae-Won Choi^{○*} Eui-Hyun Jung^{**} Yong-Jin Park^{*}

^{*}Department of Electronics and Computer Engineering, Hanyang University

^{**}Department of Digital Media, Anyang University

요 약

무선 센서 네트워크는 기존의 무선 통신 기술로는 구현 불가능했던 다양한 응용 기술의 실현을 가능케 할 것으로 기대되고 있다. 이를 위해 제한된 자원의 효율적인 사용을 통한 무선 센서 네트워크의 성능 향상에 대한 연구가 지속되고 있으며 네트워크 계층에 있어서는 에너지 효율적인 라우팅 알고리즘에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 본 논문에서는 데이터 중심(data-centric) 멀티 홉(multi-hop) 평면 라우팅 알고리즘에 최적화 알고리즘의 하나인 Ant Colony Optimization을 적용한 에너지 효율적인 라우팅 알고리즘을 제안한다. 시뮬레이션 결과, 제안한 알고리즘은 기존의 알고리즘에 비해 데이터 전송 지연 시간을 줄였을 뿐만 아니라, 경로 선택 및 유지에 필요한 제어 메시지 최소화를 통해 에너지 소모를 줄여 데이터 전송량의 증가를 가능케 했다.

1. 서 론

센서 기술과 저전력 무선 통신 기술의 급속한 발전은 저전력, 저가의 소형 센서 노드의 개발을 가능케 했다. 제한된 자원을 가지고 동작하는 각각의 소형 센서 노드는 개별적으로는 큰 기능을 할 수 없지만 수많은 소형 센서 노드들로 이루어진 무선 센서 네트워크는 기존의 무선 통신 기술로는 구현하기 어려운 다양한 응용 기술의 실현을 가능케 할 것으로 기대된다. 예를 들어, 사람의 직접적인 접근이 불가능한 자연 환경 감시, 지진 또는 화산 활동 지역 감시, 의료분야의 응용으로는 원격지에 있는 환자의 건강 상태를 파악하는 원격의료, 군사적 응용으로 전장에서 적진의 동태 파악, 상업적 응용으로 제품 품질 관리 및 운송 추적 등 다양한 분야에 적용될 수 있다. 하지만, 일단 센서 노드들이 감시하고자 하는 지역에 배포되어 무선 센서 네트워크를 구성하고난 후에는 사용자의 직접적인 제어가 불가능하고 제한된 자원을 가지고 동작해야 하는 관계로 많은 제약 사항이 있다. 따라서 지금까지의 무선 센서 네트워크에 대한 연구는 제한된 자원을 에너지 효율적으로 사용하여 무선 센서 네트워크의 성능을 향상시키는데 주목해왔다. 특히 네트워크 계층에 있어서는 무선 센서 네트워크의 데이터 중심적인(data-centric) 특성, 제한된 전력, 자가 구성(self-organization) 능력 등의 무선 센서 네트워크의 특성을 고려한 다양한 에너지 효율적인 라우팅 알고리즘에 대한 연구가 계속 되어왔다. [1][2]

최근 개미와 같은 사회화된 곤충들의 행태에서 기인한 최적

화 알고리즘의 하나인 Ant Colony Optimization (ACO)을 라우팅에 적용한 연구들이 발표되었다. ACO에 대해 간단히 언급하자면, 개미들이 먹이를 찾아가거나 서식지로의 길을 찾아가갈 때 지나온 경로에 다른 개체들이 인식할 수 있는 페로몬(pheromone)이라는 화학물질을 뿌림으로서 개체간의 간접적 의사소통을 통해 목적지까지의 최단 경로를 찾아가는 행태에서 착안한 최적화 알고리즘이다. IP 기반의 기존 네트워크나 애드혹 네트워크에 대한 연구 중에 최적 경로를 통한 라우팅이나 부하 분산(load balancing) 등에 ACO가 적용된 경우가 있다. [3] 무선 센서 네트워크에도 ACO를 적용한 사례가 있지만 실제 무선 센서 네트워크 안에서의 라우팅에 직접적으로 적용된 경우는 드물다.

본 논문에서는 멀티 홉(multi-hop) 평면 라우팅에 ACO를 적용한 에너지 효율적인 라우팅 알고리즘을 제안한다. 제안한 알고리즘의 성능 평가를 위해 ns-2 [4] 시뮬레이터를 이용하여 멀티 홉 평면 라우팅 연구에 있어서 대표적인 프로토콜 중의 하나인 directed diffusion [5]과 비교하였다. 결과적으로, 제안한 알고리즘은 directed diffusion에 비해 최적의 경로를 선택하여 데이터 전송에 있어서 전송 지연을 줄였을 뿐만 아니라 주어진 에너지를 효율적으로 사용하여 directed diffusion과 거의 비슷한 에너지 소모로 데이터 전송량을 늘리는 결과를 보여주었다.

본 논문은 서론에 이어 2장에서 지금까지 제안된 멀티 홉 평면 라우팅 프로토콜에 대해 소개하며, 특히 본 논문의 비교 대상이 되는 directed diffusion에 대해 간략히 언급한다. 3장에서는 본 논문에서 제안하는 ACO 기반의 라우팅 알고리즘을 소개하고, 4장에서는 제안한 알고리즘의 효율성을 입증할 수 있는 시뮬레이션 결과 및 성능 평가를 기술하고, 5장에서 결론을 맺는다.

1) 이 연구에 참여한 연구자의 일부는 『2단계 BK21 사업』의 지원비를 받았다

2. 관련 연구

2.1 멀티 홉 (multi-hop) 평면 라우팅 프로토콜

무선 센서 네트워크에 있어서 라우팅 알고리즘은 크게 멀티 홉 평면 라우팅과 클러스터 기반의 계층적 라우팅 알고리즘으로 나뉜다. 본 논문에서는 멀티 홉 평면 라우팅의 성능 향상에 초점을 둔다. 멀티 홉 평면 라우팅 알고리즘에서는, 센서 노드들은 싱크(sink) 노드로부터 할당된 센싱 태스크에 따라 감시 지역에서 정보를 협력적으로 수집하고, 수집된 정보의 라우팅에 모든 노드들이 동등하게 참여하는 것을 특징을 한다. 각각의 센서 노드는 수집한 정보를 자신보다 싱크 노드에 가까운 이웃 노드에게 전달한다. 이웃 노드로부터 데이터를 받은 노드는 자신이 센싱한 데이터를 데이터 결합 (data aggregation)을 통해 전달받은 데이터에 추가하여 다시 싱크 노드에 가까운 이웃 노드에게 전달한다. 이 과정을 반복하여 센싱한 데이터는 홉 단위로 (hop-by-hop) 싱크 노드로 전달된다.

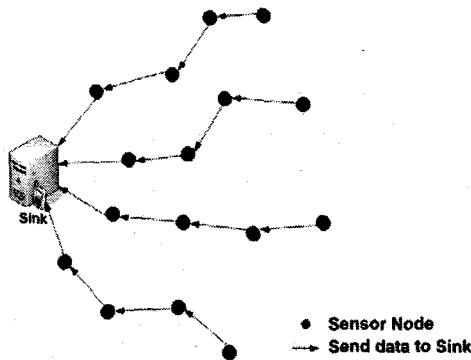


그림 1. 멀티 홉 평면 라우팅의 기본 구조

무선 센서 네트워크에 있어서 센싱 요청과 센싱 태스크는 데이터 중심적인 (data-centric) 특성에 따라 이루어진다. 다시 말해, 싱크 노드는 무선 센서 네트워크를 구성하는 각각의 센서 노드에게 센싱 요청을 하는 것이 아니라 정보를 얻고자 하는 특정 지역에 대한 요청을 한다는 것이다. 센싱 요청이 이루어진 지역에 위치한 센서 노드들은 자신이 수집한 정보를 전송함으로써 요청에 응답한다. 데이터 중심 라우팅의 대표적인 프로토콜로 SPIN(Sensor Protocols for Information via Negotiation)[6]과 directed diffusion[5]를 들 수 있다. 이 두 가지 라우팅 알고리즘은 데이터 협상 (data negotiation)과 데이터 결합(data fusion)을 이용하여 에너지 효율을 높이는 것으로 알려져 있으며, 그 이후에 제안된 데이터 중심 기반의 멀티 홉 라우팅 프로토콜들의 근간이 되었다.

2.2 Directed Diffusion

Directed diffusion[5]은 data를 속성-값 쌍 (attribute-value pair)으로 표현하는 데이터 중심의 라우팅 프로토콜이다. 싱크 노드는 센싱 지역과 센싱 대상을 지시하는 interest 메시지를 센서 네트워크에 유보(broadcast)한다. 센서 네트워크에 이와 같은 interest 메시지의 유보와 동시에 각 링크에 싱크 노드 방향으로 gradient가 생성된다. 여기서 말하는 gradient란 각 링크의 싱크 노드 방향으로의 데이터 전송률, 즉 데이터 전송의 시간적 간격을 의미한다. 싱크 노드가 보낸 interest 패킷이 목표 지역의 노드에 도달하고 각 링크에 싱크 노드 방향의

gradient 생성이 완료되면, 목표 지역의 노드, 즉 소스(source) 노드는 데이터 전송을 시작한다. 초기화 시점에는 각 링크의 gradient 값은 동등하게 주어진다. 목표 지역에 위치하면서 센싱 대상과 일치하는 정보를 가진 노드는 하나의 최적 경로가 아닌 가능한 모든 다중 경로를 통해 데이터를 전송하게 된다. 싱크 노드는 요청한 interest 메시지와 일치하는 데이터를 받게 되면 그 데이터를 제일 먼저 보내는 노드에게 초기 interest 메시지와는 달리 높은 gradient 값을 설정한 positive reinforcement 메시지를 보낸다. positive reinforcement 메시지를 받은 노드는 마찬가지로 자신에게 제일 먼저 데이터를 보내는 노드에게 전달한다. positive reinforcement 메시지를 받은 노드들로 연결되는 링크의 gradient 값이 높아짐으로서 그 링크들로 이루어진 경로가 라우팅 시에 선택될 확률이 높아지는 것이다. 이 과정을 반복하여 소스 노드에서 싱크 노드까지의 최적 경로가 얻어진다. 최적 경로에 데이터 전송이 집중되어 전송 지연이 발생하게 되면, 싱크 노드는 기존의 경로로 negative reinforcement 메시지를 보내어 gradient 값을 낮추고 다른 경로로 positive reinforcement 메시지를 보내어 전송 경로를 변경하여 데이터를 전송하게 된다.[5]

Directed diffusion이 에너지 효율이 뛰어난 멀티 홉 라우팅 기법으로 인식되고 있지만, 잠재적인 단점이 없지는 않다. 첫째, 초기화 시점에 있어서 데이터 전송이 최적 경로만을 통해서 이루어지는 것이 아니라 가능한 모든 경로를 통해서 이루어진다. 또한 최적 경로 설정을 위해서 싱크 노드는 reinforcement 메시지를 전송한다. 최적의 경로가 설정될 때까지 과정에서 요구되는 수렴 시간이 전송 지연 시간 증가의 요소로 작용할 수 있다는 것이다. 둘째, 기본적으로 라우팅이 노드간의 지역 상호작용(local interaction)을 통해 이루어지는 것으로 가정하고 있지만, 최적 경로 선택 및 관리에 있어서는 싱크 노드의 개입이 불가피하다는 점이다. 또한 최적 경로 관리를 위해 발생하는 positive/negative reinforcement 메시지의 빈번한 전송은 트래픽 오버헤드로 작용하여 혼잡(congestion)이나 불균등한 에너지 소비로 센서 노드 에너지 고갈을 초래할 가능성이 있다.

3. ACO 기반의 라우팅 알고리즘

3.1 Ant Colony Optimization

부하 분산, 라우팅, 혼잡 제어 등과 같은 네트워크 관리에 있어서 복잡한 문제 해결을 위한 연구가 계속되어 왔으며, 개미와 같은 사회적 곤충의 행태에서 착안한 이동 에이전트 기반의 컴퓨팅 기술들이 이를 해결하기 위한 방안으로 제안되기도 했다. 개미는 개체 하나만으로는 단순하고 정교하지 못한 곤충이지만, 무리를 이루었을 때는 집을 짓거나 먹이를 찾는 등의 유용한 일을 할 수 있다. 여기서 주목할 것은 개미가 먹이 또는 서식지까지의 최단 경로를 찾아갈 때 페로몬(pheromone)이라는 화학 물질을 이용한 간접적 의사소통을 통해 최단 경로에 대한 정보를 공유한다는 점이다. 개미는 지나온 경로에 페로몬을 뿌리고 그 경로를 지나는 다른 개미들이 이전에 뿌려진 페로몬의 강도에 따라 경로를 선택하게 된다. 최근 이러한 개미의 집단 지능을 이용한 최적화 및 제어 알고리즘에 대한 연구가 이루어지고 있으며 네트워크 라우팅과 부하 분산에 대한 연구도 이루어지고 있다.[3]

ACO가 효율적인 최적화 알고리즘으로서 대두되고 있지만 ACO를 적용하는 데 있어서 문제점이 없지는 않다. ACO를 적용하여 구해진 최적 경로를 통해서 계속적으로 라우팅이 이루어지면, 그 경로에는 페로몬 강도가 계속 강해지고 다른 경로로는 페로몬이 뿌려지지 않을 것이다. 따라서 최적 경로로의 트래픽 집중을 피할 수 없게 된다. 최적 경로로 판단되었던 경

로가 혼잡 발생으로 인해 더 이상 최적 경로가 아닌 상황이 발생할 수도 있으며 네트워크 토폴로지의 변경으로 또다른 최적 경로가 발견될 수도 있다. 그럼에도 불구하고 ACO 알고리즘 자체로서는 이 문제를 해결하지 못한다. 이를 정체(stagnation) 현상이라고 한다. 이를 해결하기 위한 방법으로 pheromone evaporation, pheromone aging, pheromone smoothing과 같은 방법들이 제안되었다.[3]

무선 센서 네트워크에 있어서 ACO를 이용한 연구는 많지 않다. 예를 들어, 계층적 라우팅 기법에 속하는 AntChain[7]의 경우에는 싱크 노드에서 ACO를 이용하여 계층적 라우팅 트리를 형성한 후 센서 노드들에게 라우팅 트리 정보를 전송하게 되고 이 라우팅 트리를 통해 센서 노드들이 데이터를 전송하는 구조의 알고리즘이다. 이와 달리 제안하는 알고리즘은 실제로 네트워크 안에서의 (in-network) 라우팅에 ACO를 적용한 라우팅 알고리즘이다.

3.2 제안 알고리즘

본 논문에서 제안하는 ACO 기반의 라우팅 알고리즘은 데이터 중심의 멀티 홉 라우팅 기법에 속한다.

제안 알고리즘은 지나가는 경로에 위치한 노드의 페로몬 테이블을 갱신하고 지나온 노드의 정보를 자신의 자료구조에 저장하는 단순한 패킷 형태의 이동 에이전트인 Explorer Ant Agent (ExAnt)를 정의하여 최적 경로 선택에 이용한다. 페로몬 테이블의 각 목록은 페로몬 값과 이웃 노드 ID로 구성된다. 각각의 노드는 ExAnt에 의해서 갱신되는 페로몬 테이블과 통과한 노드 목록을 이용하여 데이터를 전송하거나 전달할 노드를 결정하게 된다. ExAnt 헤더 형식과 페로몬 테이블 구조는 다음과 같다.

표 1. ExAnt 헤더 형식

ant_num	target_type	target region	forwarder_id	sender_id
transit node	transit node			transit node
id [0]	id [1]	...		id [i]

표 2. 페로몬 테이블

pheromone value	neighbor ID
13	4
10	12
8	7
...	...
2	18

싱크 노드는 사용자로부터 센싱 태스크를 받으면 센싱하고자 하는 지역의 좌표와 센싱 대상이 명시된 ExAnt를 센서 네트워크에 유포한다. 이 정보는 무선 센서 네트워크의 데이터 중심적 특성에 근거한 것이다. 목표 지역에 위치하면서 목표 대상에 일치하는 데이터를 가진 노드가 ExAnt를 받으면, 그 노드는 자신을 소스 노드로 인식하게 되고 싱크 노드를 목적으로 하는 데이터 패킷을 전송한다.

센서 노드는 이웃 노드로부터 ExAnt를 받으면, 페로몬 테이블을 참조하여 이전에 다른 이웃 노드로부터 같은 ExAnt를 받은 적이 있는지 확인한다. 만약 새로운 ExAnt라면, 그 이웃 노드에 대해 가장 높은 페로몬 값을 가지는 새로운 페로몬 테이블 목록을 생성한다. 이전에 같은 노드로부터 받은 적이 있는 ExAnt일 경우, 해당 페로몬 목록의 페로몬 값을 증가시켜 갱신한다. 만약 다른 이웃 노드로부터 받았던 ExAnt이고 이번에 보내온 이웃 노드에 대한 목록이 없을 경우, 이전에 보내온 노

에 부여한 페로몬 값보다 적은 값의 페로몬을 할당하여 새로운 페로몬 테이블 목록을 생성한다.

이와 같은 페로몬 테이블 갱신 작업 이후, 센서 노드는 자신이 ExAnt에 명시된 센싱 지역에 위치하고 센싱 대상과 일치하는 데이터를 가졌을 경우, 자신의 페로몬 테이블을 참조하여 가장 높은 페로몬 값을 가진 이웃 노드에게 데이터를 전송한다. 그렇지 않을 경우, 노드는 ExAnt를 이웃 노드들에게 유포한다. 이웃 노드로부터 데이터 패킷을 받은 노드는 자신의 페로몬 테이블을 참조하여 가장 높은 페로몬 값을 가진 이웃 노드에게 전달한다.

이와 같은 과정을 반복하여 데이터는 소스 노드로부터 싱크 노드까지 최단 경로를 통해서 전달된다. 최소 지연 경로를 최단 경로, 즉 최적 경로로 간주할 수 있는 것은 노드간의 거리가 짧은 링크일수록 해당 링크로의 전송 시간이 짧을 것이기 때문이다. 다시 말해, ExAnt를 다른 이웃 노드들 보다 먼저 보내온 이웃 노드가 싱크 노드 방향으로 거리가 제일 가까운 노드라고 할 수 있는 것이다. 따라서 지역적으로 보았을 때, 싱크 노드방향으로 제일 가까운 것으로 판단되는 링크들로 구성되는 경로가 네트워크 전체로 보았을 때 싱크노드와 소스 노드 간에 최단 경로가 되는 것이다.

싱크 노드는 각각의 센서 노드의 페로몬 테이블에 전체 네트워크의 상태(예를 들어, 링크 소실, 혼잡 발생 등)를 반영하기 위해 주기적으로 ExAnt를 유포한다. 또한, ExAnt 유포에 의해 발생할 수 있는 브로드캐스트 스톰(broadcast storm)을 방지하기 위해 센서 노드들은 ExAnt를 받으면 이웃 노드들에게 전송하기 이전에 ExAnt의 번호를 확인하여 중복 전송을 피한다.

앞서 언급한 ACO의 약점인 정체 현상은 무선 센서 네트워크에서도 피할 수 없다. 최적 경로로의 지속적인 데이터 전송은 경로 상에 위치한 노드들의 에너지 소모를 증가시켜 다른 노드들에 비해 일찍 에너지 고갈 상태에 이르게 한다. 따라서 더 이상의 데이터 전송이 이루어지지 못한다. 이를 해결하기 위해 제안 알고리즘에서 각각의 노드는 자신의 에너지 상태를 주기적으로 확인하여 에너지 고갈 상태에 근접할 때 이웃 노드들에게 자신의 에너지 고갈 상태를 알리는 node depletion 메시지를 보낸다. 이 메시지를 받은 노드는 해당 페로몬 목록의 페로몬 값을 최소값으로 바꾸어 데이터 전송 시에 다른 노드를 선택할 수 있도록 한다. 따라서 최적 경로가 소실되는 경우 새로운 최적 경로를 찾기 위한 추가적인 알고리즘 구현 없이 차선의 최적 경로를 통해 계속적으로 데이터 전송이 이루어질 수 있다.

4. 성능 분석

4.1 시뮬레이션 환경

제안 알고리즘의 성능 평가를 위해 ns-2 [4] 시뮬레이터를 이용하여 대표적인 데이터 중심 멀티 홉 라우팅 프로토콜인 directed diffusion과 비교 실험하였다. 800m x 800m 네트워크에 30개의 센서 노드를 균등하게 배치하였다. directed diffusion과의 성능 비교를 위해 싱크 노드가 하나의 소스 노드에게 데이터 전송을 요청하는 상황으로 설정하였다. 싱크 노드는 실험 네트워크의 왼쪽 아래 모서리에 위치하고 소스 노드는 오른쪽 윗 모서리에 위치하는 것으로 가정하였다. 에너지 소모 모델은 directed diffusion의 에너지 모델을 따른다. 각 센서 노드는 1.1J의 초기 에너지를 가지고 있다. 전송 에너지 소모량은 0.600W, 수신 에너지 소모량은 0.395W, 대기 상태의 에너지 소모량은 0.035W이다. 싱크 노드는 ExAnt를 매 5초마다 전송하며, 이는 directed diffusion의 interest 메시지 전송 간격과 같다. 소스 노드 역시 directed diffusion에서와 유사하게 첫 번째 ExAnt를 받은 시점 이후로 0.167초 간격으로 데이터

를 전송한다.

4.2 성능 평가

그림 2는 시간에 따른 데이터 전송 지연 시간을 나타낸다. 여기서 데이터 전송 지연 시간이란 소스 노드로부터 싱크 노드까지 데이터가 전송되는 데 걸린 시간으로 정의한다. 그림에서 보는 바와 같이 directed diffusion의 경우는 데이터 전송 지연 시간의 변동이 심한 것을 알 수 있다. 그 이유는 directed diffusion은 하나의 최적 경로를 통해서 계속 데이터를 보내는 것이 아니라 전송 경로 상의 링크 상태에 따라 여러 개의 경로를 통해 데이터가 전송되기 때문이다. 반면 제안 알고리즘의 경우, 데이터 전송 지연 시간이 0.015초 근처에서 수렴하는 것을 볼 수 있다. 이는 제안 알고리즘에서는 최적 경로 상에 위치한 노드들이 에너지 고갈 상태가 되기 이전에는 초기에 얻어진 최적 경로를 통해서 계속 데이터 전송이 이루어지기 때문이다. 실험 결과, 제안 알고리즘이 directed diffusion에 비해 평균적으로 6.73% 만큼 데이터 전송 지연 시간을 줄였다. 또한 데이터 전송이 끝난 시점에서 두 알고리즘을 비교했을 때, diffusion은 15.695초에 99번째 데이터 패킷까지 전송하였으며, 제안 알고리즘은 19.488초에 117번째 데이터 패킷까지 전송했다. 제안 알고리즘이 18.2%만큼 더 많은 데이터를 전송했다.

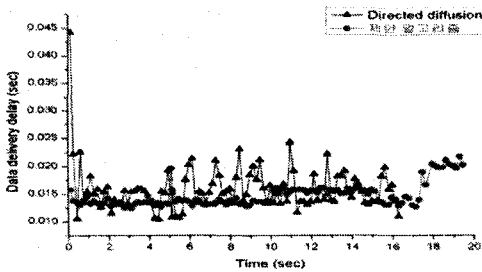


그림 2. 시간에 따른 데이터 전송 지연 시간

그림 3은 시간에 따른 전체 에너지 소모량을 나타낸 그래프이다. 그림에서 보는 바와 같이 제안 알고리즘이 directed diffusion에 비해 효율적인 에너지 소비를 하고 있음을 알 수 있다. Directed diffusion은 경로의 선택 및 유지에 있어서 빈번한 reinforcement 메시지의 사용이 불가피하다. 반면에 제안 알고리즘은 최적 경로 선택 및 유지에 있어서 제어 메시지의 발생을 최소화함으로써 에너지 소비를 줄였다. 또한 제한된 에너지를 효율적으로 사용함으로써 더 많은 데이터의 전송을 가능케 했다.

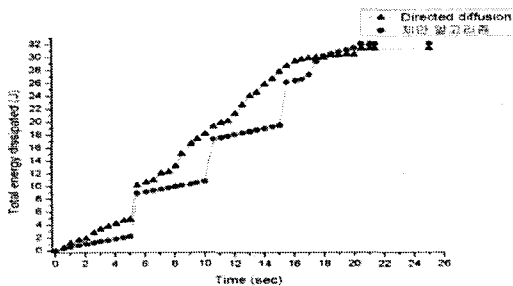


그림 3. 시간에 따른 전체 에너지 소모량

5. 결론

무선 센서 네트워크는 기존의 무선 통신 기술로는 구현 불가능했던 다양한 분야의 응용기술을 가능케 할 것으로 기대되고 있다. 이를 위해 무선 센서 네트워크의 제한된 자원을 효율적으로 사용하여 네트워크의 성능을 향상시킬 수 있는 방안에 대한 연구가 계속되어 왔다. 본 논문에서는 최적화 알고리즘의 하나인 Ant Colony Optimization을 데이터 중심의 멀티 홉 평면 라우팅에 적용한 에너지 효율적인 라우팅 알고리즘을 제안하였다. 시뮬레이션 결과, 제안하는 알고리즘은 기존의 라우팅 알고리즘에 비해 데이터 전송 지연 시간을 줄였을 뿐만 아니라 경로 선택 및 유지에 필요한 제어 메시지를 최소화함으로써 에너지 소비 효율을 높여 데이터 전송량의 증가를 가능케 하는 성능 향상을 보여주었다.

참고문헌

- [1] Ian F. Akyildiz, Weilian Su, Yogesh Sankarasubramaniam, and Erdal Cayirci, "A Survey on Sensor Networks," IEEE Communications Magazine, Aug. 2002.
- [2] Jamal N. Al-Karaki and et al, "Routing Techniques in Wireless Sensor Networks: A Survey," IEEE Wireless Communications, Dec. 2004
- [3] Kwang Mong Sim and Weng Hong Sun, "Ant Colony Optimization for Routing and Load-Balancing: Survey and New Directions," IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans, Vol. 33, No. 5, Sep. 2003
- [4] K. Fall and K. Varadhan, "ns Notes and Documentation" The VINT Project, UC Berkeley, LBL, USC/ISI, and Xerox PARC, available from "http://www.isi.edu/nsnam/ns/", Dec 2003.
- [5] Chalermek Intanagonwiwat and et al, "Directed Diffusion: A Scalable and Robust Communication Paradigm for Sensor Networks," Proceedings of the Sixth Annual International Conference on Mobile Computing and Networks (MobiCOM 2000), Aug 2000, Boston, Massachusetts.
- [6] Joanna Kulik and et al, "Negotiation-Based Protocols for Disseminating information in Wireless Sensor Networks," Wireless Networks 8, 169-185, 2002, Kluwer Academic Publishers.
- [7] Niannian Ding, Peter X. Liu and Chao Hu, "Data Gathering Communication in Wireless Sensor Networks," IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems(IROS 2005), Aug. 2005.