

무선 센서 네트워크를 위한 계층적 라우팅 프로토콜에서의 이동 싱크 노드 지원 방안

정회원 김 대 영*, 조 진 성*

A Method to Support Mobile Sink Node in a Hierarchical Routing Protocol of Wireless Sensor Networks

Dae-Young Kim*, Jinsung Cho* *Regular Members*

요 약

센서 네트워크는 수많은 센서 노드로 구성되어 있으며, 주변 환경을 감시하는 용도로 사용된다. 현재까지 수행되어 온 센서 네트워크에 대한 연구는 대부분 고정된 상태의 싱크 노드를 고려하고 있기 때문에, 싱크 노드의 이동성을 바탕으로 한 유비쿼터스 응용에서는 센서 필드에서 수집된 데이터가 이동 싱크 노드까지 끊임없이 전송되는데 어려움이 존재한다. 센서 데이터가 손실되지 않고 이동 싱크 노드에 전달되기 위해서는 라우팅 경로가 싱크 노드의 이동에 따라 갱신되어야 하는데, 본 논문에서는 센서 네트워크의 계층적 멀티 홉 라우팅 프로토콜에서 이동 싱크 노드로 향한 라우팅 경로가 손실되지 않고 계속해서 갱신되도록 하는 방안을 제안한다. 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 제안한 방안의 우수성을 검증하였으며, 위치 기반 라우팅 프로토콜을 사용하여 이동 싱크 노드로 향한 경로를 갱신하는 기존 방법과 성능을 비교하여 제안된 방안이 기존 방안 보다 우수함을 보였다.

Key Words : Wireless sensor networks, Hierarchical routing protocol, Mobile sink node

ABSTRACT

Wireless sensor networks are composed of a lot of sensor nodes and they are used to monitor environments. Since many studies on wireless sensor networks have considered a stationary sink node, they cannot provide fully ubiquitous applications based on a mobile sink node. In those applications, routing paths for a mobile sink node should be updated while a sink node moves in order to deliver sensor data without data loss. In this paper, we propose a method to continuously update routing paths for a mobile sink node which can be extended on hierarchical multi-hop routing protocols in wireless sensor networks. The efficiency of the proposed scheme has been validated through comparing existing method using a location based routing protocol by extensive computer simulation.

I. 서 론

무선 센서 네트워크의 센서 노드들은 제한된 컴퓨팅 리소스와 충분하지 못한 에너지를 가지고 있

기 때문에, 무선 센서 네트워크 시스템을 설계하기 위해서는 에너지 효율적인 특성이 반드시 고려되어야 한다. 특히 센서 네트워크에서 RF 통신은 센서 노드에서 소비되는 전체 에너지 중에서 가장 큰 비

* 이 논문은 2005년도 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (KRF-2005-003-D00205)

* 경희대학교 컴퓨터공학과 모바일 및 임베디드 시스템 연구실 ({kimdy,chojs}@khu.ac.kr)

논문번호 : KICS2007-11-495, 접수일자 : 2007년 11월 8일, 최종논문접수일자 : 2007년 12월 10일

율을 차지하고 있기 때문에 에너지 효율적인 라우팅 프로토콜이 필요하다.

현재 무선 센서 네트워크를 위한 많은 라우팅 프로토콜들이 제안되어 있으며, 이 라우팅 프로토콜들은 계층적 라우팅 프로토콜, 평면 기반 라우팅 프로토콜, 그리고 위치 기반 라우팅 프로토콜로 분류된다^[1]. 평면 기반 라우팅 프로토콜과 위치 기반 라우팅 프로토콜은 데이터 중심적인 특성에 기반으로 하는 라우팅 기법을 사용하며 전체 네트워크로부터 데이터를 수집하고자 할 경우에는 데이터 전송에 참여하는 센서 노드의 수를 증가시켜 많은 에너지 소비를 유발하므로 적합하지 않다. 반면에 계층적 라우팅 프로토콜은 클러스터를 구성하고 각 클러스터의 대표 노드인 클러스터 헤드에서 클러스터 내부로부터 수집된 정보를 통합하여 싱크 노드로 전달한다. 이러한 계층적 라우팅 프로토콜은 싱크 노드로의 데이터 전송에 비교적 적은 수의 센서 노드들필요로 하기 때문에 일반적으로 다른 두 프로토콜보다 에너지 효율적이다^[2,3]. 그러나 이러한 센서 네트워크의 라우팅 프로토콜은 고정된 싱크 노드를 가진 정적인 환경만을 고려하고 있기 때문에 이동성이 강조되는 유비쿼터스 환경의 다양한 응용을 제공할 수 없다.

비록 MANET(Mobile Ad-hoc Network)에서는 개별 노드의 이동을 고려하는 라우팅 프로토콜이 있지만^[4], 센서 네트워크가 MANET과 다른 특성을 가지고 있기 때문에 이들은 무선 센서 네트워크에 적합하지 않다^[5]. 무선 센서 노드는 제한된 컴퓨팅 리소스와 에너지를 가지기 때문에 MANET처럼 센서 노드 스스로 이동성을 가질 수 없다. 하지만, 센서 노드보다 좀 더 많은 컴퓨팅 자원과 에너지를 가지고 있고 기지국(Base Station)의 역할을 수행하는 싱크 노드라면 이동성을 고려할 수 있으며, 무선 센서 네트워크의 라우팅 프로토콜이 이동 싱크 노드를 지원하면 다양한 유비쿼터스 서비스가 가능하게 된다. 현재 이동 싱크 노드 지원을 위한 몇 가지 방안들이 존재하지만, 위치 기반 프로토콜에 의존하는 방안들은 센서 노드의 위치 인식을 위한 에너지 소모가 많고 센싱 정보의 수집 면적이 커질수록 데이터 전송에 많은 에너지를 소비하게 되며, 노드의 위치 정보에 의존하지 않는 방안은 싱크 노드가 정지된 상태에서 싱크 노드로의 데이터 전송이 가능하기 때문에 다양한 서비스의 제공에 어려움이 따른다.

본 논문에서는 계층적 멀티 홉 라우팅 프로토콜에 적용할 수 있는 이동 싱크 노드 지원 기법을 제시하며 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 이에 대한 성능을 검증

한다. 일반적으로 센서 네트워크의 계층적 라우팅 프로토콜은 클러스터링과 데이터 전송을 위해 단일 홉 전송을 사용한다. 따라서 센서 네트워크의 계층적 라우팅 프로토콜을 현실 환경에 적용하기 위해서는 반드시 멀티 홉 전송 방안이 존재해야 한다. 센서 노드가 멀티 홉 전송을 수행하기 위해서는 홉수와 같은 정보를 이용하여 라우팅 테이블을 구성해야 하고 각 센서 노드는 이 라우팅 테이블을 사용하여 클러스터 헤드 또는 싱크 노드로 멀티 홉을 통해 데이터를 전송할 수 있다. 이렇게 멀티 홉 전송이 가능한 계층적 라우팅 프로토콜을 위해 제안된 이동 싱크 노드 지원 기법은 GPS 정보를 사용하지 않고 싱크 노드가 이웃 노드에 대한 테이블을 유지하여 이동하면서 이웃 노드의 라우팅 테이블을 갱신하도록 메시지를 보냄으로써 싱크 노드가 이동하는 동안 싱크 노드를 향한 경로를 유지하도록 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II절에서는 관련 연구로서 무선 센서 네트워크에서의 이동성 지원 기법에 대한 내용을 기술하고, III절에서는 센서 네트워크의 계층적 멀티 홉 라우팅 프로토콜을 간략히 소개한 후, IV절에서 이러한 계층적 멀티 홉 라우팅 프로토콜에 적용시킬 수 있는 싱크 노드의 이동성 지원 방안을 설명한다. V절에서는 성능 평가를 보이고, 마지막 VI절에서 본 논문의 결론을 맺는다.

II. 관련 연구

현재 무선 센서 네트워크의 라우팅 프로토콜들은 정적인 네트워크 환경을 고려하고 있으며, 일부의 GPS 정보를 이용하는 라우팅 프로토콜과 제약된 환경에서 동작하는 GPS-less 라우팅 프로토콜들이 이동 싱크 노드를 지원하기 위한 방안을 제공한다.

GPS 정보를 이용하지 않는 프로토콜에는 MobiRoute가 있다^[6]. MobiRoute는 싱크 노드의 이동이 멈추었을 때 토폴로지 컨트롤 메시지를 브로드캐스트 함으로써 네트워크의 모든 노드가 변경된 싱크 노드의 위치로 데이터를 전송할 수 있도록 라우팅 테이블을 변경한다. 이 때 전체 토폴로지의 변경을 위해 많은 시간이 필요하며 많은 데이터들은 부분적으로 최적화된 경로를 이용하게 된다. 또한 싱크 노드가 이동하는 동안 싱크 노드 주변의 노드들이 싱크 노드로 전송되는 데이터를 버퍼링하여 데이터 손실을 방지한다. 그러나 이러한 방법은 센서 노드의 데이터 전송률이 아주 작다는 가정 아래

에서 가능하며 실제 센서 노드는 제한된 버퍼 크기를 가지기 때문에 유비쿼터스 센서 네트워크의 다양한 응용분야에 적용하는 데 어려움이 있다.

TTDD(Two-tier Data Dissemination Model)는 각각의 데이터 소스가 격자(grid)를 구축한다. 그 후 싱크 노드는 자신이 속해 있는 격자 내부에 질의(query)를 플러딩(flooding)하여 가장 가까운 격자의 교차점(dissemination 노드)에 자신의 정보를 등록한다⁷⁾. 이렇게 함으로써 소스 노드와 싱크 노드 사이의 연결(connection)은 유지되고, 싱크 노드는 이동하더라도 데이터를 계속 수신할 수 있다. TTDD는 GPSR(Greedy Perimeter Stateless Routing) 프로토콜⁸⁾을 기반으로 하여 이동 중인 싱크 노드로 데이터를 전달하며 이 때 격자의 교차점을 경유하여 목적지로 향한다. TTDD는 소스 노드가 격자를 구축하는데 오버헤드가 발생하기 때문에 단일 소스 노드가 아닌 경우에는 사용하기 힘들다.

또 다른 라우팅 프로토콜로 이동 싱크 노드를 위한 비동기적 데이터 전송을 다루는 SEAD(Scalable Energy-efficient Asynchronous Dissemination protocol)가 있다^{9,10)}. SEAD에서는 싱크 노드가 소스 노드로 질의를 보내기 위해 이웃 노드중 하나를 액세스 노드로 선택한다. 이 액세스 노드가 싱크 노드의 이동을 추적한다. 만약 싱크 노드가 액세스 노드로부터 멀리 떨어지게 되면 싱크 노드는 이동한 위치의 이웃 노드 중 하나를 새로운 액세스 노드로 선정한다. SEAD는 별도의 격자를 구성할 필요가 없기 때문에 TTDD 보다 우수한 성능을 보인다⁹⁾.

그러나 TTDD와 SEAD는 데이터 전송을 위해 사용되는 라우팅 프로토콜로 GPSR을 사용한다. 대표적인 위치 기반 프로토콜인 GPSR은 센서 노드의 위치 인식을 위하여 에너지 소모가 많은 GPS 장치를 사용한다. 비록 Bulusu et al.^[11]처럼 GPS 장치 없이도 노드의 위치를 예측하는 방안들이 존재하지만, GPSR은 라우팅 경로로써 목적지와 가장 가까운 좌표를 가진 이웃 노드를 선택해야 하기 때문에 노드의 위치를 정확히 알아야 한다. 따라서 TTDD와 SEAD는 GPS 장치를 사용하지 않는 다른 라우팅 프로토콜과 비교하였을 때 네트워크 생존시간에 대한 성능을 보장할 수 없게 된다.

네트워크 생존시간 측면에서는 무선 센서 네트워크의 라우팅 프로토콜 중에서 적은 데이터 전송으로 통신비용을 줄인 계층적 라우팅 알고리즘을 사용하는 프로토콜들이 보다 효율적이며^{2,3)}, 대표적인 계층적 라우팅 프로토콜로는 LEACH(Low-Energy

Adaptive Clustering Hierarchy)^[12]가 있다. 계층적 라우팅 프로토콜들은 주기적으로 클러스터를 재구성하고 라우팅 테이블을 갱신하는 것에 의해서 부분적으로는 싱크 노드가 이동하더라도 프로토콜이 이동성을 지원하게 되지만, 현존하는 계층적 라우팅 프로토콜의 이러한 점이 싱크 노드에 대한 완전한 이동성 제공하는 것은 아니다. 싱크 노드가 이동하고 나면 싱크 노드가 다시 interest 메시지를 플러딩하기 전까지는 라우팅 경로가 변경되지 않아 싱크 노드까지의 데이터 전송은 불가능하게 된다.

이러한 계층적 라우팅 프로토콜에 이동성을 지원하고자 하는 여러 가지 방안들이 있다. Liu et al.^[13]은 LEACH 프로토콜을 사용하는 센서 노드들이 GPS 모듈을 탑재하고 있어서 센서 노드가 이동하더라도 위치 정보를 이용하여 최단 거리에 있는 클러스터 헤드에 멤버 노드로 참여한다. 그러나 클러스터 구축을 위해 제한된 자원을 가진 센서 노드가 GPS 모듈을 사용하는 방안은 적합하지 않다. 또한 Yang et al.^[14]는 여러 개의 셀을 만들고 각 셀의 경계를 라우팅 경로로 설정한다. 노드가 이동할 때, 단지 이동하는 노드의 인접 셀이 재구성되고 라우팅 경로는 변경된다. 이 때 각 노드는 셀 내부의 모든 노드들에 대한 위치와 전송 지연 시간의 정보를 알고 있어야 한다.

현재까지 무선 센서 네트워크에서 이동 싱크 노드를 지원하는 방법들은 앞에서 언급한 것처럼 위치 기반 프로토콜을 사용하는 경우, 정보 수집의 범위가 커질수록 센서 노드들의 에너지 소모는 더 커지게 되고 센서 데이터 수집에 따른 전송 지연 시간도 더 길어지게 된다. 그렇지 않은 경우는 이동 중인 싱크 노드가 정지한 상태에서 싱크 노드로의 데이터 전송이 가능하다. 한편, 무선 센서 네트워크의 계층적 라우팅 프로토콜은 평면 기반 라우팅 프로토콜보다 에너지 측면에서 효율적이지만 이동 싱크 노드를 지원할 수 없기 때문에 싱크 노드에 전달되는 데이터 손실이 자주 발생한다. 따라서 본 논문에서는 멀티 홉 전송을 기반으로 하는 계층적 라우팅 프로토콜에서 싱크 노드의 이동에 따른 데이터 손실률을 최소화하는 방안을 제안한다.

III. 계층적 멀티 홉 라우팅 프로토콜

무선 센서 네트워크의 계층적 라우팅 프로토콜들의 동작은 클러스터링 단계와 데이터 통신 단계로 구분되며, 데이터 통신 단계는 다시 클러스터의 멤

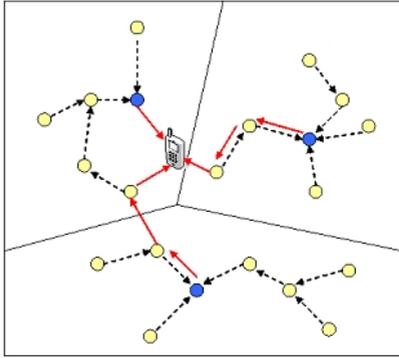


그림 1. 계층적 멀티 홉 라우팅

버 노드와 클러스터 헤드 그리고 클러스터 헤드와 싱크 노드가 직접 통신하는 형태로 데이터 전송이 이루어진다. 그러나 IEEE 802.15.4를 기반으로 하는 무선 센서 노드는 짧은 데이터 전송거리(POS¹⁾)를 가지고 있으며 극히 제한된 에너지를 포함하고 있기 때문에 이러한 현실적인 상황에서 직접 통신에 의해서는 원거리의 싱크 노드까지 데이터를 전송할 수 없게 된다. 따라서 계층적 라우팅 프로토콜은 원거리의 목적지까지 멀티 홉 통신에 의한 데이터 전송이 가능해야 한다. 그림 1은 계층적 멀티 홉 라우팅 프로토콜에서의 데이터 통신을 보여준다. 점선으로 나타난 클러스터 내부의 통신과 실선으로 나타난 클러스터 헤드와 싱크 노드 사이의 통신은 모두 멀티 홉 라우팅에 의해 이루어진다.

한편, 몇 개의 클러스터들이 단일 홉 클러스터를 구성하게 되면 모든 클러스터가 센서 필드를 포함하기 위해서 센서 노드의 데이터 전송거리가 길어져야 하지만, 현실적인 환경에서 센서 노드는 POS를 가지기 때문에 클러스터들이 센서 필드를 포함하기 위해 설정된 클러스터의 수 보다 더 많은 수의 클러스터가 형성되는 문제점이 발생할 수 있다. 이는 클러스터 헤드에서 싱크 노드로의 데이터 전송에 많은 노드를 참여시키기 때문에 전체 네트워크에서의 에너지 소비를 가중시킨다.

HSHR(Hierarchical Shortest Hop Routing)^[3]은 노드의 잔존 에너지와 연결도를 이용한 분산적인 방법에 의해 클러스터 헤드를 효율적으로 선택하며, 주어진 클러스터 헤드의 비율을 유지하기 위해 클러스터의 범위를 확장함으로써 적절한 수의 클러스

터를 구성하여 싱크 노드로의 데이터 전송에 참여하는 클러스터 헤드의 수를 효율적으로 관리할 수 있다. 그리고 흡수와 노드의 잔류 에너지를 이용한 라우팅 테이블을 구성하여 멀티 홉 라우팅을 수행하기 때문에 클러스터 내부의 멤버 노드와 클러스터 헤드 사이와 클러스터 외부의 클러스터 헤드와 싱크 노드 사이가 POS 이상의 거리에 위치하더라도 중계 노드를 이용하여 데이터를 전송할 수 있다.

그러나 대표적인 계층적 라우팅 프로토콜인 LEACH^[12]는 확률을 기반으로 한 분산적인 방법에 의해서 클러스터를 구성하고 각 클러스터 헤드가 수집한 데이터를 싱크 노드로 전송하지만, POS 환경에서 클러스터 헤드가 싱크 노드까지 데이터를 전송하기 위해서 LEACH의 클러스터링 부분을 제외한 데이터 통신 부분을 멀티 홉 전송이 가능하도록 수정하여야 한다. 본 논문에서는 이를 LEACH2로 정의한다. LEACH2는 싱크 노드에서 플러딩되는 *interest* 메시지가 전달되는 흡수를 이용하여 라우팅 테이블을 구성하고 이 테이블을 사용하여 멀티 홉 통신을 수행하게 된다.

IV절에서 소개될 이동 싱크 노드 지원 방안은 HSHR이나 LEACH2처럼 라우팅 테이블을 기반으로 한 계층적 멀티 홉 라우팅 프로토콜에 적용 가능하도록 설계된다.

IV. 이동 싱크 노드 지원 방안

고정된 싱크 노드를 고려한 계층적 라우팅 프로토콜들은 현실적인 환경에서 전통적인 센서 네트워크 서비스만 가능하기 때문에 다양한 센서 네트워크 서비스를 위해서 이동 싱크 노드를 지원하기 위한 방안이 필요하다. 이를 위해 라우팅 프로토콜은 싱크 노드의 이동에 의해 링크가 단절되는 것과 같은 데이터 전송 경로의 변화에 대응할 수 있어야 한다.

본 논문에서는 라우팅 테이블을 기반으로 하는 계층적 멀티 홉 라우팅 프로토콜에 이동성 지원 모듈(mobility module)을 탑재하여 이동 싱크 노드를 지원하기 위한 센서 네트워크의 프레임워크를 제안한다. 네트워크 필드에서 클러스터가 구축된 후 클러스터 헤드에서 수집한 데이터는 싱크 노드에 이웃하는 센서 노드(*neighbor*)를 경유하여 싱크 노드로 전달된다. 클러스터 헤드에서 싱크 노드로의 데이터 전송 이동성 지원 모듈이 제공되지 않으면 클러스터 헤드로부터의 데이터는 이웃 노드까지 전달될 뿐 이동 중인 싱크 노드로 완전하게 전달되지

1) POS: Personal Operating Space, 전방향 최대 10m, IEEE 802.15.4는 POS에 초점을 맞추고 있다.

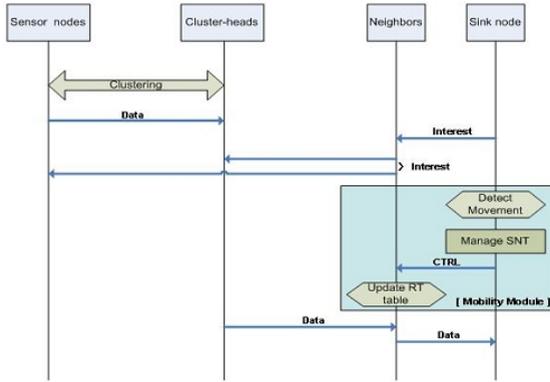


그림 2. 이동성 지원 모듈을 탑재한 계층적 센서 네트워크 프레임워크

못한다. 이동성 지원 모듈에서는 그림 2처럼 싱크 노드에서 이웃 노드 테이블(SNT: Sink-Neighbors Table)을 관리함으로써 싱크 노드가 이동할 때마다 컨트롤(CTRL) 메시지를 통해서 이웃 노드에서 싱크 노드로 향하는 경로를 갱신하여 클러스터 헤드에서 전송되는 데이터가 전송과정에서 손실되지 않고 싱크 노드로 전달될 수 있도록 한다. 여기서 SNT는 싱크 노드가 이웃 노드에 대한 식별을 위해 사용하는 테이블로 센서 노드의 라우팅 테이블과는 다르다.

싱크 노드가 관리하는 SNT의 동작은 그림 3에서 자세히 설명된다. 이동 싱크 노드를 향한 라우팅 경로를 유지하기 위해서, 싱크 노드는 가장 먼저 현재 자신의 이웃 노드를 탐색하여 SNT에 등록하고 다른 곳으로 이동하기 전에 탐색된 이웃 노드를 O(Original)타입으로 설정한다. 그 후 싱크 노드가 이동하면서 주기적으로 이웃 노드를 탐색하여 새로 발견되어 SNT에 추가된 노드를 N(New) 타입으로 설정한다. 이 때 중복 탐색된 노드는 D(Duplicate) 타입으로 설정한다. SNT의 갱신이 완료되고 나면, 싱크 노드는 현재 이웃 노드의 라우팅 경로를 갱신하기 위해서 CTRL 메시지를 발송한다. 이 메시지는 D와 N타입의 이웃 노드에게 전달되며, O타입 노드의 식별자를 포함하기 때문에 이 메시지를 수신한 D타입 노드는 O타입 노드에 이 메시지를 전달하여 라우팅 테이블이 갱신되도록 한다. 예를 들면, 그림 3의 가운데 그림의 경우, 노드 3, 4, 5는 싱크 노드로부터 질의 메시지를 수신하게 된다. N타입 노드인 노드 5는 라우팅 테이블에 싱크 노드를 추가하고, D타입 노드 3과 4는 자신의 라우팅 테이블에 있는 O타입 노드에게 질의 메시지를 포위

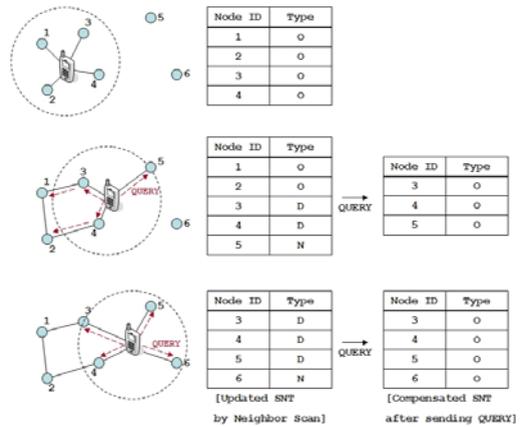


그림 3. 이동 싱크 노드의 SNT

당한다. 노드 3으로부터 질의 메시지를 전달받은 노드 1은 라우팅 테이블에 있는 노드 3의 홑수를 2로 설정하고 나머지 노드들의 홑수를 1증가 시킨다. 노드 4로부터 질의 메시지를 전달받은 노드 2도 같은 방법으로 라우팅 테이블을 갱신한다. 싱크 노드에서 질의 메시지의 전송이 끝난 후, SNT에서 O타입의 노드는 제거되고 D와 N타입의 노드는 O타입으로 재설정된다.

만약 싱크 노드가 이동한 후 D타입의 노드가 SNT에 존재하지 않으면, 이전의 O타입 노드에 질의 메시지가 전달될 수 있도록 하기위해서 N타입의 노드는 이 메시지를 k홑까지 지역적 플러딩을 수행한다. k는 임의로 설정될 수 있으며, k가 증가하면 싱크 노드가 빠르게 이동하더라도 싱크 노드로의 데이터 전송이 가능하지만 질의 메시지 플러딩에 대한 오버헤드가 발생한다.

일반적으로 싱크 노드를 추적하는 방안에서는 싱크 노드가 이동할수록 라우팅 경로가 길어짐으로써 비효율적인 데이터 라우팅이 발생한다. 따라서 주기적으로 전체 센서 노드의 라우팅 테이블에 대한 갱신이 필요한데, SEAD는 일정 홑 이상 이동할 때마다 새로운 액세스 노드를 선정하고 라우팅 테이블 갱신을 위한 메시지를 브로드캐스트한다. 제한된 방안은 SNT에 변화가 있다면 SEAD와 비슷하게 이동 싱크 노드가 일정 시간마다 라우팅 테이블 갱신을 위한 메시지를 브로드캐스트함으로써 라우팅 경로가 비효율적으로 길어지는 것을 피할 수 있다.

그림 4는 이동성 지원 모듈의 의사코드를 보여준다. 롱텀(LT: Long-Term) 타이머를 사용하여 네트워크 전체에 대한 라우팅 테이블 갱신이 이루어지고,

```

1: If LT timer is not expired
2:   If ST timer is expired
3:     If Movement of sink node is detected
4:       Update SNT
5:       Send CTRL message
6:       Compensate SNT
7:     Else
8:       Keep current status
9:   Else
10:    flood CTRL message
    
```

그림 4. 이동성 지원 모듈의 의사코드

숏텀(ST: Short-Term) 타이머를 사용하여 주기적으로 싱크 노드가 이동하는 지 검사한다. 이동이 발생하면 그림 3처럼 4, 5, 6번 줄의 동작이 수행되고 그렇지 않으면 8번 줄처럼 현재 상태를 유지하게 된다.

이렇게 제안된 방안으로부터, 클러스터가 재구성되기 전에 싱크 노드가 이동하더라도 싱크 노드의 SNT를 이용하여 이웃 노드의 라우팅 경로를 갱신하는 것에 의해서 싱크 노드를 추적할 수 있고 따라서 싱크 노드로 끊임없는 데이터 전송이 가능해진다.

또한, 제안된 방안은 싱크 노드의 SNT와 싱크 노드의 이웃 노드에서 작용하기 때문에 모든 테이블 기반의 계층적 멀티 홉 라우팅 프로토콜에서 쉽게 적용할 수 있다. 실제로 HSHR과 LEACH2에서 라우팅 테이블 갱신을 위한 CTRL 메시지의 내용만 차이가 날 뿐, 이동성 지원 모듈의 그 외 다른 부분은 모두 동일하게 적용된다.

V. 성능 분석

IV절에서 제안된 방안은 GPS를 사용하지 않는 무선 센서 네트워크의 계층적 멀티 홉 라우팅 프로토콜에서 이동 중인 싱크 노드로 향하는 패킷의 손실을 줄이기 위해 고안되었다. 이 절에서는 HSHR^[3], LEACH^[12], SEAD^[9,10]와의 컴퓨터 시뮬레이션 결과의 비교를 통해서 성능 분석을 수행한다. 시뮬레이션은 싱크 노드가 주기적으로 보내는 *interest* 메시지를 수신한 센서 노드들이 데이터 전송 프레임에 따라 수집한 정보를 싱크 노드에 전송하는 구조로 이루어지며 계층적 멀티 홉 라우팅 프로토콜에서의 클러스터는 *interest* 메시지가 수신될 때마다 구축된다. 컴퓨터 시뮬레이션을 위해서 C++를

이용하여 시뮬레이션 프로그램을 제작하고 5.1절의 시뮬레이션 환경 아래에서 시뮬레이션을 하였다.

4.1 시뮬레이션 환경

100m x 100m의 사각형 네트워크 필드에 300개의 센서 노드를 랜덤하게 분포시켰으며, 0m/s, 2m/s, 5m/s, 8m/s 그리고 10m/s의 이동 속도를 가진 싱크 노드는 센서 필드의 중앙에서 부터 설정된 이동 속도로 센서 필드 내부에서 랜덤한 방향으로 이동한다. 센싱 정보는 전체 센서 필드에서 발생하는 글로벌 상태 정보(global state information)로 가정하였으며, 모든 센서 노드는 초기 에너지로 10Joule을 가진다. 계층적 라우팅 프로토콜에서 클러스터 헤드 선정을 위한 확률 p 는 LEACH^[12]에서 사용한 것처럼 0.05로, HSHR의 클러스터 확장 범위 d 는 HSHR^[3]에 의해 계산되는 4홉으로 설정하였다. 또한 싱크 노드로 부터의 *interest* 메시지는 평균이 5초인 포아송(Poisson) 분포를 따르고, *interest* 메시지를 수신한 후 계층적 라우팅 프로토콜에서의 데이터 전송은 4개의 데이터 전송 프레임으로 이루어지며 비교적 긴 데이터 전송 시간을 가진 평면 라우팅 프로토콜에서는 2개의 데이터 전송 프레임을 사용하여 데이터 전송이 이루어지도록 하였다. 센서 노드의 에너지 소비를 나타내기 위해서 무선 채널로써 식(1), (2)와 같은 LEACH^[12]의 전파 모델을 사용하였으며 무선 채널에서 발생하는 에러는 고려하지 않았다

$$E_{TX}(n,l) = E_{elec} \times n + \epsilon_{amp} \times n \times l^2 \quad (1)$$

$$E_{RX}(n) = E_{elec} \times n. \quad (2)$$

n bits 메시지와 거리 l 이 주어지면, 전파는 이 메시지를 전송하기 위해서 송신 노드에서 식(1)과 같이 에너지를 소비하고, 이 메시지를 수신한 노드에서는 식(2)와 같이 에너지를 소비한다. 여기서 E_{elec} 는 신호의 디지털 코딩, 변조, 필터링을 위해서 전자 회로에서 소비되는 에너지이고 ϵ_{amp} 는 송신기의 증폭기를 위한 상수 값이다. 표 1은 에너지 소비 모델을 위해 본 논문에서 사용한 시뮬레이션 매개 변수들을 나타낸다.

성능 분석을 위해서, 클러스터 헤드에서 싱크 노드로 직접 전송에 의해 데이터를 전송하는 LEACH를 대신하여 III절에서 언급했던 것처럼 멀티 홉 전송이 가능하도록 수정한 LEACH2를 사용한다. 또

표 1. 성능 분석을 위한 환경 변수

Parameters	Value
Network size	100m x 100m
Data packet size	100 bytes
Query packet size	25 bytes
Packet header size	25 bytes
E_{elec}	50 nJ/bit
ϵ_{amp}	10 pJ/bit/m ²
E_{mit}	10 J
# of nodes	300
p	0.05
d	4
Energy consumption for GPS	No consideration

한 위치 기반 라우팅 알고리즘을 사용하는 SEAD에서는 글로벌 상태 정보를 수집하는 경우 많은 에너지 소비가 예상되기 때문에 데이터 라우팅에 필요한 GPS 정보를 수신하기 위한 에너지 소모는 고려하지 않는다.

4.2 시뮬레이션 결과

본 논문은 싱크 노드가 이동하는 환경의 무선 센서 네트워크에서 끊임없이 싱크 노드로 데이터가 전송되는 것을 목적으로 하고 있기 때문에 성능 측정기준(metrics)으로 싱크 노드에서 수집된 데이터 패킷의 수, 패킷 손실률, 소비된 에너지 평균 그리고 평균 전송 지연 시간을 사용하였으며, 제안된 싱크 노드의 이동성 지원 방안을 적용한 mLEACH2 (mobile LEACH2)와 mHSHR(mobile HSHR), 적용하지 않은 LEACH2와 HSHR, 그리고 SEAD의 시뮬레이션 결과로 성능비교를 수행하였다.

LEACH2와 HSHR에서 소비되는 에너지는 클러스터 내부에서 소비되는 에너지와 클러스터 외부에서 소비되는 에너지로 구분되며 식 (3), (4)와 같이 나타낼 수 있고, SEAD에서는 클러스터 없이 개별 노드가 싱크 노드와 통신하므로 소비 에너지는 식 (5)처럼 표현할 수 있다

$$E_{HSHR} = n \times p \times t + (1-p) \times n \times d \tag{3}$$

$$E_{LEACH2} = (n \times p + a) \times t + (1-p) \times n \times d \tag{4}$$

$$E_{SEAD} = n \times t. \tag{5}$$

여기서 n 은 전체 노드의 수, t 는 싱크 노드까지의 평균 홉수, d 는 HSHR에서 클러스터의 범위에 대한

홉수, p 는 클러스터 헤드의 비율이며, a 는 LEACH2에서 np 만큼의 클러스터 헤드가 결정된 이후, 클러스터 범위에 들어가지 못한 센서 노드들에 의해 재결성 되는 클러스터 헤드의 수를 나타낸다. $p=0.05$, $t=8$, $d=4$ 이면, $n \gg a$ 이므로 네트워크에서의 소비 에너지는 $E_{LEACH2} < E_{HSHR} < E_{SEAD}$ 로 예측할 수 있다. 그림 5는 네트워크 필드에서 센서 노드가 싱크 노드로 수집된 데이터를 전송하는 데 소비되는 평균 에너지를 나타내며 에너지 소비의 예측 결과와 시뮬레이션 결과가 일치함을 확인할 수 있다. 클러스터 기반의 계층적 라우팅 프로토콜인 mLEACH2와 mHSHR이 평면 기반 라우팅 프로토콜을 사용하는 SEAD 보다 훨씬 적은 에너지를 소모함을 볼 수 있다. 계층적 라우팅 프로토콜은 클러스터링에 의해 데이터 전송에 참여하는 노드가 줄어들기 때문에 글로벌 상태 정보를 수집하는 경우 에너지 측면에서 높은 효율을 나타낸다. mLEACH2와 mHSHR 사이에서 mHSHR의 에너지 소모가 조금 더 큰 이유는 클러스터를 확장하면서 발생하는 메시지 전송과 확장된 범위에서의 데이터 전송에 의한 것이다. SEAD는 라우팅 프로토콜로써 위치기반의 GPSR을 사용하는데, GPSR은 GPS 정보를 이용하여 데이터를 라우팅 하는데, 일반적으로 센서 노드에 장착될 수 있는 작은 GPS 모듈은 위치 정보 수신시 65mA의 전류를 소비하며^[15], 센서 노드의 RF 모듈은 데이터 수신시 19.7mA의 전류를 소비한다^[16]. 즉, 센서 노드에서 GPS 정보 수신시 RF 데이터 수신하는 경우 보다 약 3배 정도의 더 많은 에너지 소비가 발생하게 된다. 시뮬레이션에서는 이러한 GPS 수신시 발생하는 에너지를 고려하지 않았음에도 SEAD의 평균 소비 에너지가 높게 나타났다. 만약 SEAD에 GPS 수신 에너지를 더하게 되면 그림 5에서 보여주는 소비 에너지 보다 더 큰 에너지를 소모하게 된다.

그림 6은 평균 데이터 전송 지연 시간을 보여준다. 데이터 전송 지연 시간은 싱크 노드와의 데이터 통신과 관련이 있으며 식 (3), (4), (5)를 통해서 싱크 노드와의 데이터 통신에 참여하는 노드 수를 예측할 수 있다. HSHR에서는 np 개, LEACH2에서는 $np+a$ 개, SEAD에서는 n 개의 노드가 데이터 전송에 참여한다. SEAD는 싱크 노드를 향한 데이터 전송을 위해 많은 센서 노드를 전송에 참여시키기 때문에 긴 전송 지연 시간이 발생하고 그림 5처럼 많은 에너지가 사용된다. mHSHR은 클러스터를 확장하는 것으로써 클러스터의 수를 적절하게 유지하기

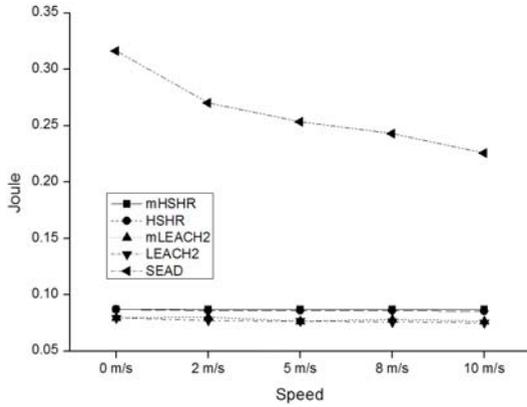


그림 5. 평균 소비 에너지

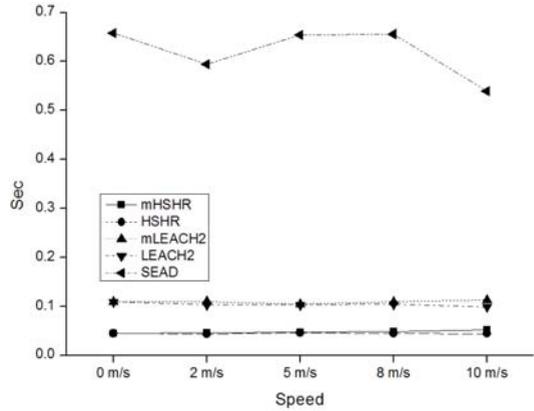


그림 6. 평균 전송 지연 시간

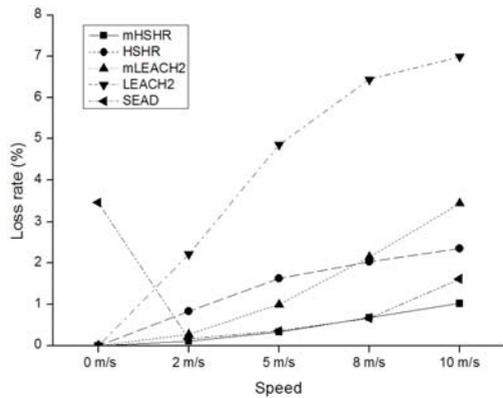


그림 7. 패킷 손실률

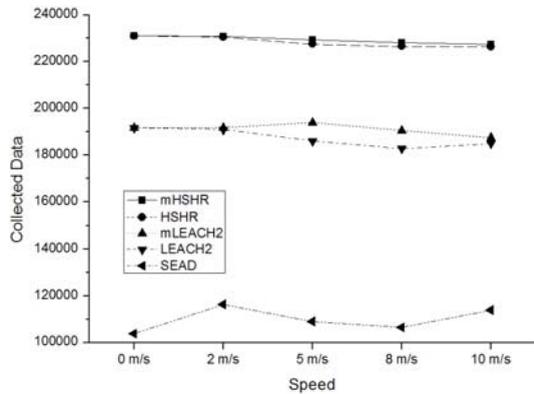


그림 8. 수집된 데이터 양

때문에 싱크 노드로 데이터를 전송해야 하는 클러스터 헤드의 수는 mLEACH2보다 적다. 따라서 mHSHR에서는 클러스터 헤드에서 싱크 노드로의 전송 횟수가 줄어들기 때문에 전체 전송 지연이 mLEACH2보다 줄어든다.

그림 7은 싱크 노드의 이동 속도에 따른 패킷 손실률을 나타낸다. 싱크 노드가 이동하더라도 끊임없는 서비스를 제공하기 위해서는 낮은 패킷 손실률을 유지해야 한다. 싱크 노드의 이동성을 지원하기 위한 방안을 적용한 mLEACH2와 mHSHR에서는 이동성을 지원하지 않는 LEACH2와 HSHR보다 패킷 손실률이 크게 줄어들었으며 mHSHR은 SEAD보다 낮은 패킷 손실률을 제공하였다. 특히 SEAD의 경우 싱크 노드가 이동하지 않으면 싱크 노드의 주변의 노드에 데이터 트래픽이 집중되면서 빠른 에너지 소비로 인해 싱크 노드와 연결되는 노드들

의 기능이 정지하게 되고, 이로 인해 데이터 패킷의 손실이 발생하게 된다. 0m/s에서 SEAD의 패킷 손실률이 높은 것은 이러한 이유에서 비롯된다. 또한 제안된 이동성 지원 방안은 HSHR 외에도 LEACH2와 같이 다른 계층적 멀티 홉 라우팅 프로토콜에 적용시킬 수 있지만, HSHR에서 가장 좋은 성능을 보였다.

그림 8은 싱크 노드에서 최종적으로 수집된 데이터 패킷의 수를 나타낸다. 평면 기반의 프로토콜을 사용하는 SEAD는 긴 전송 지연 시간으로 인해 싱크 노드가 수집하는 데이터의 양이 아주 적다. 그러나 계층적 멀티 홉 라우팅 프로토콜인 mLEACH2와 mHSHR을 사용하는 경우 싱크 노드는 SEAD보다 많은 데이터를 수집하였으며, mLEACH2와 mHSHR 중에서는 mHSHR이 더 많은 데이터를 수집하였다.

이렇게 이동 싱크 노드를 지원하기 위한 기존 방안인 SEAD는 낮은 패킷 손실률을 제공하여 끊임없는 서비스가 가능하지만 평면 라우팅 기반이기 때문에 에너지 소비, 전송 지연 시간, 수집된 데이터 패킷 수에서 한계를 드러낸다. 그러나 계층적 멀티홉 라우팅 프로토콜에 적용한 제안된 방안은 낮은 소비 에너지와 짧은 전송 지연 시간을 가지면서 많은 데이터를 수집할 수 있음에도 SEAD보다 낮은 패킷 손실률을 제공할 수 있다.

VI. 결론

무선 센서 네트워크의 계층적 라우팅 프로토콜들이 일반적으로 많은 장점을 가지고 있지만, 데이터 전송에 대한 비현실적인 가정으로 인해 실제 환경에 적용하는데 문제가 있다. 또한 이동성을 고려하지 않고 있기 때문에 센서 네트워크의 다양한 응용분야를 제공하지 못하였다. 본 논문은 짧은 데이터 전송거리를 가지는 노드들로 구성된 센서 네트워크에서 요구되는 현실적인 계층적 멀티홉 라우팅 프로토콜에서 이동 싱크 노드를 추적하는 방안을 제시하고, 클러스터 헤드와 싱크 노드 사이에 끊임없는 통신 서비스가 가능함을 시뮬레이션을 통해 검증하였다. 본 논문에서 제안한 이동 싱크 노드 지원 방안을 탑재한 계층적 멀티홉 라우팅 프로토콜 (mLEACH2, mHSHR)은 싱크 노드의 이동 속도가 증가하더라도 패킷 손실률을 줄일 수 있었으며, 평균 소비 에너지, 평균 전송 지연시간, 수집된 데이터의 양에 대한 측면에서 SEAD보다 우수한 성능을 보였다. 특히 mHSHR은 SEAD와 비슷하거나 보다 낮은 패킷 손실률을 제공하였고, 가장 많은 양의 데이터 수집이 가능함을 보여주었으며, 평균 소비 에너지가 mLEACH2보다 조금 많음에도 불구하고 평균 전송 지연시간을 mLEACH2의 1/2로 줄였다. 따라서 향후 계층적 라우팅 프로토콜을 사용하는 무선 센서 네트워크의 다양한 응용분야에 본 논문에서 제안한 이동 싱크 노드 지원 방안이 적용될 수 있다.

참고 문헌

[1] K. Akkaya and M. Younis, "A Survey on Routing Protocols for Wireless Sensor Networks," *Journal of Ad Hoc Networks*, Vol.3, pp.325-349, 2005.

[2] H. Karl, "Protocols and architectures for wireless sensor networks," John Wiley & Sons, May 2005.

[3] D. Y. Kim, J. Cho and B. S. Jeong, "A Practical Algorithm for Clustering and Routing in Hierarchical Sensor Networks," submitted to *IEICE Trans. on Communications*, 2007.

[4] <http://www.ietf.org/html.charters/manet-charter.html>

[5] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam and E. Cayirci, "A Survey on Sensor Networks," *IEEE Communications Magazine*, Vol.40, pp.102-114, August 2002.

[6] J. Luo, J. Panchard and M. Piorkowski, "MobiRoute: Routing towards a Mobile Sink for Improving Lifetime in Sensor Networks," *International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems*, pp.480-497, June 2006.

[7] F. Ye, H. Luo, J. Cheng, S. Lu and L. Zhang, "A Two-tier Data Dissemination Model for Large-scale Wireless Sensor Networks," *Proc. of International Conference on Mobile Computing and Networking*, pp.148-159, September 2002.

[8] B. Karp and H. Kung, "Greedy Perimeter Stateless Routing," *Proc. of International Conference on Mobile Computing and Networking*, pp.243-254, August 2000.

[9] H. S. Kim, T. F. Abdelzaher and W. H. Kwon, "Minimum-Energy Asynchronous Dissemination to Mobile Sinks in Wireless Sensor Networks," *Proc. of International Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, pp.193-204, November 2003.

[10] S. Bhattacharya, H. Kim, S. Prabh and T. Abdelzaher, "Energy-Conserving Data Placement and Asynchronous Multicast in Wireless Sensor Networks," *Proc. of International Conference on Mobile Systems, Applications and Services*, pp.173-185, May 2003.

[11] N. Bulusu, J. Heidemann and D. Estrin, "GPS-less Low-Cost Outdoor Localization for Very Small Devices," *IEEE Personal*

- Communications, Vol.7, No.5, pp.28-34, October 2000.
- [12] W. R. Heinzelman, A. Chandrakasan and H. Balakrishnan, "Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks," Proc. of the Annual Hawaii International Conference on System Sciences, pp.1-10, January 2000.
- [13] C. Liu, C. Lee and L. Wang, "Power-Efficient Communication Algorithms for Wireless Mobile Sensor Networks," Proc. of International Workshop on Performance Evaluation of Wireless Ad hoc, Sensor and Ubiquitous Networks, pp.121-122, October 2004.
- [14] Y. Yang, D. Y. Lee, M. S. Park and H. P. In, "Dynamic Enclose Cell Routing in Mobile Sensor Networks," Proc. of the 11th Asia-Pacific Software Engineering Conference, pp.736-737, December 2004.
- [15] Leadtek GPS 9546 Module Technical Specification : <http://www.leadtek.com>.
- [16] CC2420 Specification : <http://focus.ti.com/docs/prod/folders/print/cc2420.html>.

김 대 영 (Dae-Young Kim)

정회원



2004년 2월 경희대학교 전자공학과 졸업
 2006년 2월 경희대학교 컴퓨터공학과 (석사)
 2006년 3월~현재 경희대학교 컴퓨터공학과 박사과정
 <관심분야> 모바일 네트워크, 센서 네트워크, 임베디드 시스템

조 진 성 (Jinsung Cho)

정회원



1992년 2월 서울대학교 컴퓨터공학과 졸업
 1994년 2월 서울대학교 컴퓨터공학과 (석사)
 2000년 2월 서울대학교 컴퓨터공학과 (박사)
 1997년 4월~8월 IBM T.J. Watson Research Center Visiting Researcher
 1999년 9월~2003년 2월 삼성전자 책임연구원
 2003년 3월~현재 경희대학교 컴퓨터공학과 조교수
 <관심분야> 모바일 네트워크, 센서 네트워크, 임베디드 시스템