

# 무선 센서 네트워크에서 싱크 이동성과 이벤트 이동성을 지원하는 데이터 전달 프로토콜

(Data Dissemination Protocol for  
Supporting Both Sink Mobility  
and Event Mobility in Wireless  
Sensor Networks)

최영환<sup>†</sup>      이동훈<sup>\*\*</sup>  
(Younghwan Choi)    (Donghun Lee)

전야<sup>†</sup>      진민숙<sup>†</sup>  
(Tian Ye)      (Minsook Jin)

김상하<sup>\*\*\*</sup>  
(Sang-Ha Kim)

**요약** 무선 센서 망에서 소스가 그리드 구조(grid structure)를 생성하는 접근 방법은 이벤트의 이동에 의해 소스가 연속적으로 변하거나 소스가 많아질 경우 심각한 에너지 손실이 일어난다. 반면, 싱크 기반(sink-initiated)의 질의메시지를 사용하는 접근 방법에서는 망의 모든 센서 노드들에게 질의메시지가 플러딩되기 때문에 이벤트를 인식하

지 않은 센서 노드들에게도 질의메시지가 플러딩되는 문제가 있다. 또한, 그들 접근 방법들은 싱크를 대신하는 중간자로서 고정 대리자(agent)를 사용하여 싱크에게 정보를 전달하는 방법을 사용하기 때문에 모든 소스에서 발생한 데이터가 항상 해당 대리자를 거치게 되고, 따라서 고정 대리자와 이동 싱크 간의 루트(route)에 혼잡도가 급격히 증가하게 된다. 본 논문에서는 이 문제들을 해결하기 위하여 싱크와 소스의 질의메시지를 관리하여 이벤트가 발생한 소스에서 이동 싱크까지의 루트를 형성하여, 직접 데이터를 전달하는 프로토콜을 제안한다. 제안 프로토콜은 소스와 싱크간의 연결을 위하여 위치정보 기반 라우팅(geographic routing)과 위치정보 관리자를 사용한다. 마지막으로 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 제안 프로토콜의 에너지 효율성을 입증한다.

**키워드** : 무선 센서 망, 싱크 이동성, 이벤트 이동성, 데이터 전달 프로토콜

**Abstract** Data dissemination schemes for wireless sensor networks, where sinks and event targets might be mobile, has been one of the active research fields. For doing that, stationary nodes gathered data on behalf of mobile sinks and the relayed data in previous studies. their schemes, however, lead to frequent query flooding and report congestion problems over sink moving. We propose a data dissemination protocol to solve both the query flooding and the report congestion problem. Our scheme improves the two shortcomings through sink location management. Finally, we prove effectiveness of our protocol through computer simulations.

**Key words** : Wireless sensor networks, Event mobility, Sink mobility, Data dissemination schemes

## 1. 서론

센서 네트워크에서는 싱크라 불리는 고정적인 데이터 수집 노드를 따로 두어 망 내에서 센서 노드를 통하여 데이터를 수집하고, 이 데이터를 이종 망을 통하여 정보 요구자에게 전달한다[1]. 이러한 센서 네트워크에서는 센서 노드에게 사용자의 관심사항을 알리기 위하여 또는 임무를 부여하기 위하여 싱크로부터 query를 전파한다. 이 query는 관심 정보를 전달하는 역할을 할 뿐만 아니라 소스 노드로부터 싱크까지의 연결 구조를 형성하는 역할도 함께 한다. 그림 1에서 이러한 예를 보여주고 있다.

그림 1과 같은 구조를 사용하여 데이터를 전달하는 방법은 data-centric한 통신 패러다임을 가져야 하는 센서 네트워크에서 이를 에너지 효율적으로 실현할 수 있는 유용하다[2]. 그 이유는 싱크 및 모든 노드들은 고정된 위치에 있기 때문에 같은 질의에 대하여 발생한 모든 정보는 한번 생성된 연결 구조를 통하여 언제든지 싱크로 전달될 수 있기 때문이다.

본 논문에서는 소스로부터 움직이는 싱크에게 연속적

· 본 연구는 충남대학교 컴퓨터공학과 BK21 차세대정보기술SW인력양성 사업단 지원으로 수행하였습니다.

· 이 논문은 제34회 추계학술대회에서 '무선 센서 망에서 싱크 및 이벤트 이동성 지원 데이터 전달 프로토콜'의 제목으로 발표된 논문을 확장한 것임

<sup>†</sup> 정 회 원 : 충남대학교 컴퓨터공학과  
yhchoi@cclab.cnu.ac.kr  
tianye@cclab.cnu.ac.kr  
badamul@cclab.cnu.ac.kr

<sup>\*\*</sup> 비 회 원 : 충남대학교 컴퓨터공학과  
dhlee@cclab.cnu.ac.kr

<sup>\*\*\*</sup> 종신회원 : 충남대학교 전기정보통신공학부 교수  
shkim@cnu.ac.kr  
(Corresponding author)

논문접수 : 2007년 12월 14일

심사완료 : 2008년 2월 14일

Copyright©2008 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 : 컴퓨팅의 실제 및 레터 제14권 제3호(2008.5)

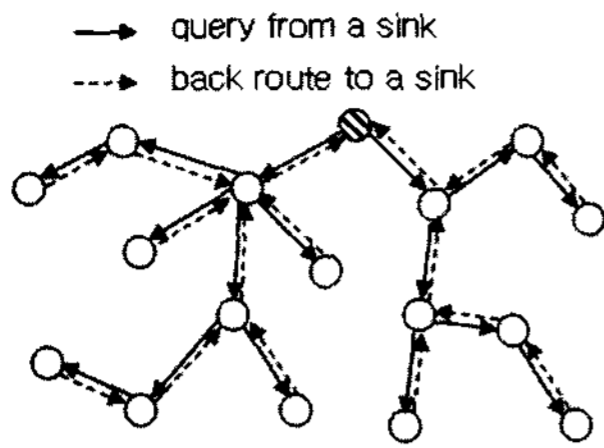


그림 1 무선 센서 망에서 데이터 전달 구조(라우팅 트리)

이와 지속적인 데이터를 에너지 효율적으로 전달할 수 있는 프로토콜인 방안을 제안한다. 제안 방안은 센서노드에게 임무를 부여하는 메시지와 이동 싱크의 위치를 전달하는 메시지를 분리하였다. 이러한 방법을 사용함으로써 데이터 보고 시 발생하는 혼잡현상을 해결할 수 있다.

이하 논문은 다음과 같이 구성된다. 2장은 선행 연구들이 가진 문제점을 분석하고, 3장은 그를 해결하기 위한 방안을 제시한다. 4장은 그에 대한 실험 결과를 통해 성능을 평가하고 5장에 향후 연구와 함께 결론을 맺는다.

## 2. 관련연구

센서 네트워크에서 이벤트와 싱크가 움직이는 환경에 대한 연구는 중심 화제 중 하나이다. 그러나 이벤트와 싱크가 이동성 환경에서는 앞서 언급한 것과 같은 형태의 연결 구조(싱크를 중심으로 하는 트리형태의 연결구조[3,4])를 사용하기 쉽지 않다. 트리의 중심이 되는 싱크가 이동하기 때문에 질의 이후에 구조를 형성할 시점의 구조 정보와 소스로부터 싱크로 데이터가 전달될 시점의 구조 정보가 달라지기 때문이다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 고정된 노드로 데이터를 모으고 이것들을 움직이는 싱크로 중계해주는 방법이 제안되었다 [5-7]. 이런 방법은 그 고정 노드로부터 싱크의 움직인 궤적을 따라 모든 데이터를 중계한다. 따라서 연속적으로 많은 데이터가 지속적으로 소스로부터 전달될 경우 싱크의 움직인 궤적에 위치한 노드들이 많은 에너지를 소모하는 문제점이 발생한다. 이러한 문제점을 본 논문은 “데이터 보고 혼잡 현상”이라고 지칭한다. 그림 2는 그런 현상을 나타낸다.

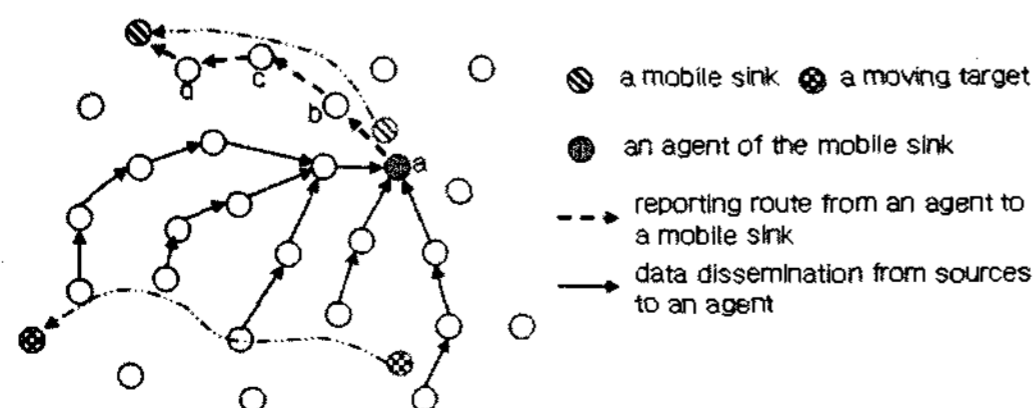


그림 2 데이터 보고 혼잡 현상의 예시

이벤트가 이동하면, 그것을 감지한 소스들이 연속적으로 발생한다. 소스들은 실선으로 표시된 것처럼 각각 따로 싱크의 중간전달노드에게 데이터를 전달한다. 이 데이터는 점선으로 표시된 것과 같이 싱크가 움직인 경로를 따라 싱크에게 중계된다. 이 경우 싱크의 궤적에 위치한 a, b, c, d 노드들은 각 소스들로부터 전달된 데이터를 전달하기 위해 총 5번의 전송을 한다. 즉, 소스로부터 중간전달노드까지의 데이터 전달은 각 소스에 따라 다른 루트를 이용하여 전달되지만 이동 싱크까지는 모든 데이터가 같은 루트로 전달된다. 따라서, 이 경로 상에 위치한 노드들은 네트워크의 다른 노드들보다 많은 에너지를 소모한다. 동일한 중간전달노드에 연속적인 다량의 데이터가 전달될수록 이런 불균형적인 에너지 소모는 심화될 수 있다.

## 3. 싱크 및 이벤트 이동성 지원 데이터 전달 방안

제안방안은 데이터의 전송에 위치정보기반 라우팅 (geographic routing)을 사용한다. 따라서 소스는 목적지인 이동 싱크의 위치를 알아야 한다. 우리는 이러한 목적을 위하여 위치정보 관리자(Sink Location Manager SLM)이라는 노드를 두었다. 그림 3에서 RECONS의 작동 개념을 보여주고 있다. SLM은 현재 싱크의 위치를 저장하고 있다. 이 정보는 싱크가 미리 정의된 특정 거리를 넘어설 때마다 갱신된다. 실선 화살표가 이런 업데이트 정보를 나타낸다. 소스는 이동 싱크로 보낼 데이터가 생겼을 때 SLM으로 현재 이동 싱크의 위치 정보를 요청한다. 점선 화살표가 이것을 나타낸다. 제안방안의 특징은 이러한 동작으로 이동 싱크가 지속적인 데이터를 적은 패킷 오버헤드로 수집할 수 있다는 것이다. 본 장에서는 제안방안의 동작 과정에 대하여 자세히 기술한다.

### 3.1 노드의 배치 및 초기화

초기화는 매우 간단하게 이루어진다. 센서 노드는 랜덤하고 밀집하여 망 전체에 뿌려진다. SLM은 센서 노

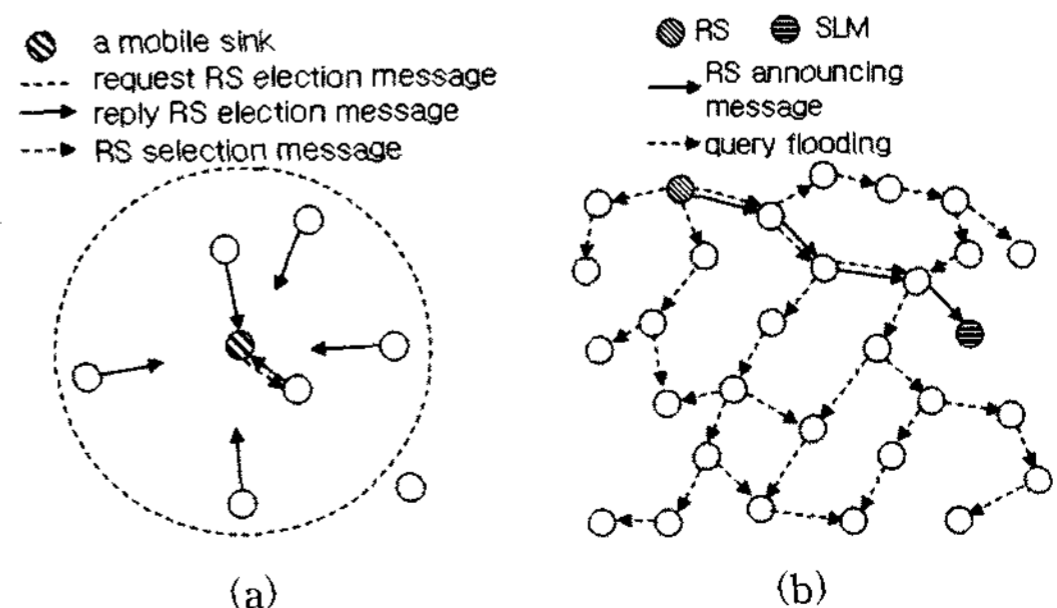


그림 3 RS 선정 과정

드와 통신이 가능한 곳에 배치된다. 싱크는 초기화가 완료되기 이전에도 망 내에 위치할 수 있으나 초기화가 끝날 때까지는 동작하지 않는다. 모든 노드가 배치된 후 초기화가 진행된다. 우선, SLM은 자신의 위치를 알리는 메시지를 망 전체에 플러딩(flooding)한다. 이때, 소스는 SLM에게 위치정보기반 라우팅(geographic routing)을 사용하여 싱크의 위치를 질의할 수 있다. 따라서 어떤 연결구조도 생성하지 않는다.

### 3.2 질의 과정

싱크는 망 내를 자유롭게 이동하다가 정보를 얻고자 할 때 센서에게 임무를 부여하는 내용을 담아서 질의한다. 질의를 하는 범위는 위치 정보를 사용하여 특정 지역에 국한될 수도 있고, 망 전체가 될 수도 있다.

질의하기 위하여 먼저 싱크는 주변의 가까운 노드 중 하나를 전달노드(Relay Station RS)로 정한다. 선택된 RS는 싱크가 그것으로부터 일정 거리 이상 움직이지 않는 한 계속하여 그 역할을 수행한다. RS가 선택되면 싱크는 질의메시지를 RS에게 보내고, RS는 그 질의메시지를 망 내에 전파한다. 이 질의메시지에는 task 내용과 함께 싱크의 ID가 담겨있다. 싱크ID는 이후 데이터가 수집될 때 소스가 SLM에게 어떤 싱크의 위치를 찾아야 하는지를 구별할 때 사용된다. 질의 과정에서는 어떤 연결 구조도 형성하지 않는다. 이는 구현을 쉽게 해주는 요인이 되며 이후 연결 구조를 유지해야 하는 부담도 없다.

그림 3의 (a)는 RS의 선택 과정을 나타낸다. 점선으로 표시된 원처럼 싱크는 주변의 노드들에게 RS후보 요청 메시지를 브로드 캐스트 한다. 그 메시지를 받은 노드들은 자신의 위치를 담아서 싱크에게 단일 홉으로 보낸다. 이때 싱크의 라디오 범위가 일반 노드보다 더 크기 때문에 어떤 후보들의 메시지는 싱크에게 단일 홉으로 도달하지 못 할 수도 있다. 그러나 싱크는 가장 가까운 노드를 RS로 선택할 것이기 때문에 이것이 문제가 되지 않는다. 실선 화살표가 이 메시지를 나타낸다. 싱크는 후보들 중에서 자신의 현재 위치에서 가장 가까운 노드를 RS로 선정하여 RS 선정 메시지를 보낸다. 점선 화살표가 이를 나타낸다.

그림 3의 (b)는 RS로 선정된 이후의 과정을 나타낸다. RS로 선정된 노드는 현재부터 자신이 RS가 되었음을 알리는 RS 알림 메시지를 SLM에게 보낸다. 이 메시지에는 RS의 현재 위치가 담겨 있다. 실선 화살표는 이 과정을 나타내고, 점선 화살표는 이후 임무를 부여하는 질의가 네트워크에 전파되는 것을 의미한다.

### 3.3 이동 싱크

질의 후 데이터를 기다리는 동안 싱크는 이동 가능하다. 이동 거리는 RS의 라디오 반경보다 멀 수 있기 때

문에 RS는 데이터를 다중 홉으로 싱크까지 전송한다. 이 역시 정보기반 라우팅(geographic routing)을 쓴다. 이를 위하여 싱크는 자신의 위치를 알리는 비콘 메시지를 주기적으로 브로드캐스트 한다.

싱크의 무선 반경은 일반 노드들 보다 크기 때문에 싱글 홉으로 RS에게 도달할 수 있다. 싱크가 RS로부터 자신의 무선 반경보다 멀어지면 비콘 메시지가 RS에게 도달할 수 없기 때문에 일정 거리( $D_{rs}$ )만큼 멀어지면 RS를 다시 선택하여야 한다.  $D_{rs}$ 는 싱크가 이동할 수 있는 최대 속도와 관련이 있다. 식 (1)은  $V_{max}$ 가 싱크의 최대 속도,  $f_e$ 가 최소 RS의 변경주기이고  $T_{rs}$ 가 RS선택 마진 시간일 때  $D_{rs}$ 를 구하는 것을 나타낸다.  $T_{rs}$ 는 RS가 변경되는 동안에 싱크가 전송범위 밖으로 나가는 것을 방지하기 위한 시간이다. 또한  $D_{rs}$ 는 싱크의 라디오 범위보다는 작아야 한다.

$$D_{rs} = V_{max} \times f_e - V_{max} \times T_{rs} \quad (1)$$

종료 메시지에는 새로 선출된 RS의 위치와 RS의 임무를 종료할 것을 요청하는 내용이 담겨 있다. 이 메시지를 받은 이전의 RS는 현재 소스로부터 데이터를 받고 있지 않으면 RS의 임무를 종료한다. 만약 소스로부터 데이터를 받고 있으면 종료 메시지 이후에 자신에게 오는 데이터를 새로운 RS에게 포워딩 해준다. 또한 이중 점선 화살표에 나타나 있듯이 자신에게 데이터를 보내고 있는 소스에게 RS 변경 메시지를 보낸다. 이 메시지는 새로운 RS의 위치가 담겨있어서 소스는 이 메시지를 받은 이후에는 새로운 RS에게 데이터를 직접 보낼 수 있다.

### 3.4 데이터 수집

센서 노드가 임무와 관련된 이벤트를 감지하면 그 센서 노드는 소스가 된다. 그림 4의 (a)는 소스가 데이터를 보내는 과정을 나타낸다. 먼저, 소스는 현재 싱크의 위치를 알기 위해 SLM에게 싱크 위치를 요청하는 Sink Location request(SLQ) 메시지를 보낸다. 이 메시지에는 감지한 이벤트와 관련한 task를 전파한 싱크 ID가 담겨있다. 실선 화살표가 이를 나타낸다. SLM은 SLQ message를 받은 후 자신이 저장하고 있는 싱크 위치 정보에서 요청된 싱크ID의 위치를 담은 Sink Location Reply(SLR) 메시지를 소스에게 보낸다. 점선 화살표가 이를 나타낸다. 소스는 그 메시지를 받은 후에 해당 RS로 데이터를 보낼 수 있다. 이동하는 이벤트를 추적할 경우 소스는 주변 센서 노드들로 계속하여 변한다. 하나의 이동하는 이벤트를 추적하는 연속적인 소스들이 SLM에게 SLQ 메시지를 보낸다면 패킷 부하가 크기 때문에 이를 좀 더 효율적으로 지원할 수 있는 방법이 필요하다(그림 4의 (b)). 점선 원으로 나타난 것처럼 소스 A가 SLR 메시지를 받으면 주변에 싱크의 위

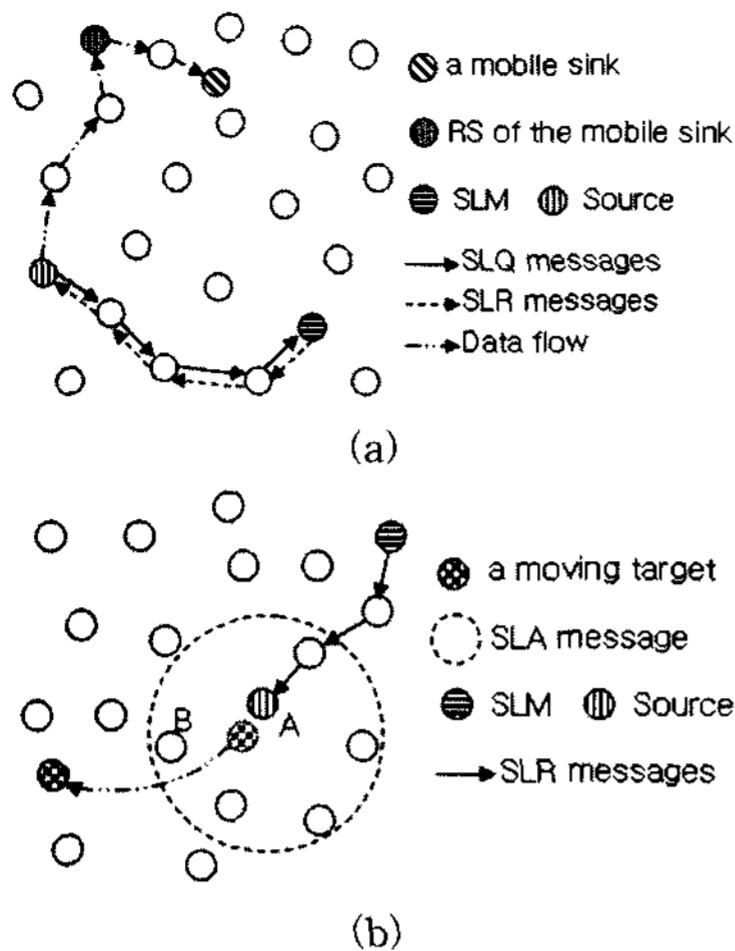


그림 4 소스의 데이터 보고 과정

치를 알리는 Sink Location announce(SLA) 메시지를 브로드캐스트 한다. 이벤트의 이동에 의하여 다음에 소스가 될 노드 B는 SLA 메시지로 인하여 싱크의 위치를 직접 알 수 있다. 이동하는 이벤트는 망 내부를 쉬지 않고, 이동 할 수 있기 때문에 이를 감지하는 센서 노드 또한 그 소스의 주변 노드일 것이다. 따라서 최초로 이벤트를 감지한 노드 이외에 같은 이벤트를 감지하는 주변 노드들은 SLM에게 싱크의 위치를 요청하지 않아도 싱크에게 데이터를 보낼 수 있다. 이후 싱크의 위치를 알고 있는 노드는 이벤트를 감지했을 때 주변의 노드를 위하여 SLA 메시지를 전파한다. 이런 방법은 연속적인 데이터가 발생할 때 빈번한 싱크 위치 요청으로 인해 SLM주변에 과도한 패킷이 생기는 것을 예방한다.

#### 4. 성능 평가

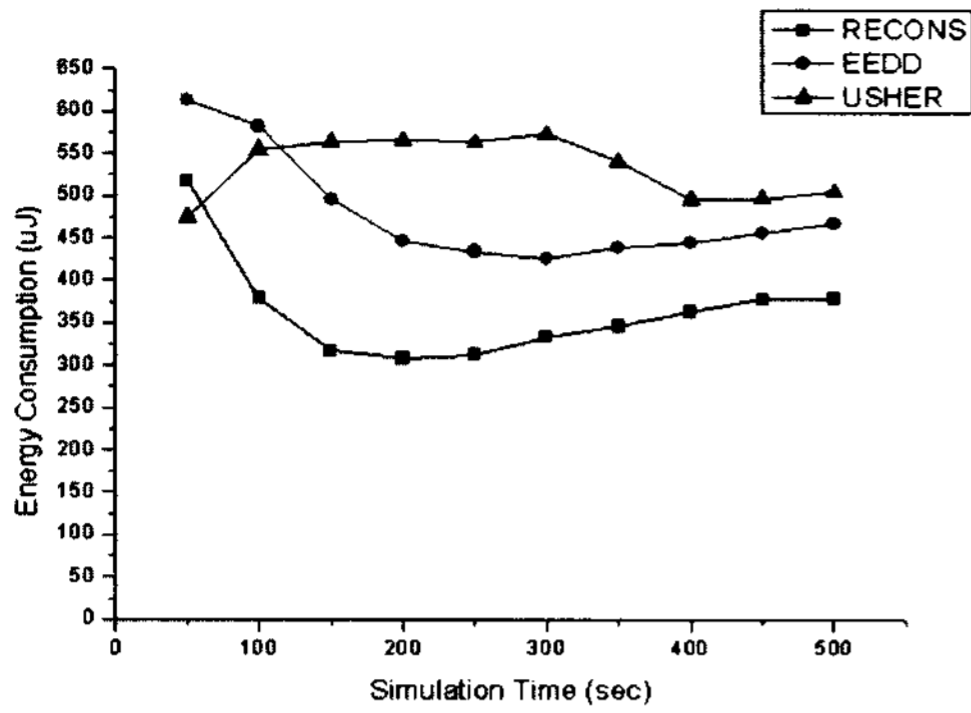
본 장은 EEDD, USHER와 비교를 통하여 제안 알고리즘의 우수성을 증명한다. 성능평가는 컴퓨터 시뮬레이터인 QualNet ver.3.8을 사용하였다. 실험 망을 750m × 750m로 하고 225개의 센서노드를 배치하였으며, 하나의 이동 싱크를 배치하였다. 라디오 범위는 100m이고 SLM과 일반 노드의 라디오 범위는 50m로 하였다. 에너지 모델은 MICA2[8]를 사용하였다. 실험 결과에 나타난 에너지 소모는 전송에 사용된 에너지 소모만을 계산한 결과이다. QualNet에서 현재 이벤트를 감지하는 것은 구현되어 있지 않기 때문에 이벤트를 이동하면서 일정 주기로 비콘 신호를 전파하는 것으로 설정하였다.

본 논문에서 제안하는 프로토콜은 연속적이고 지속적인 데이터를 이동 싱크가 에너지 효율적으로 받을 수 있도록 하는 목적을 갖고 있다. 따라서 EEDD에서 제안하고 있는 스케줄링 기법은 시뮬레이션에서 고려하지

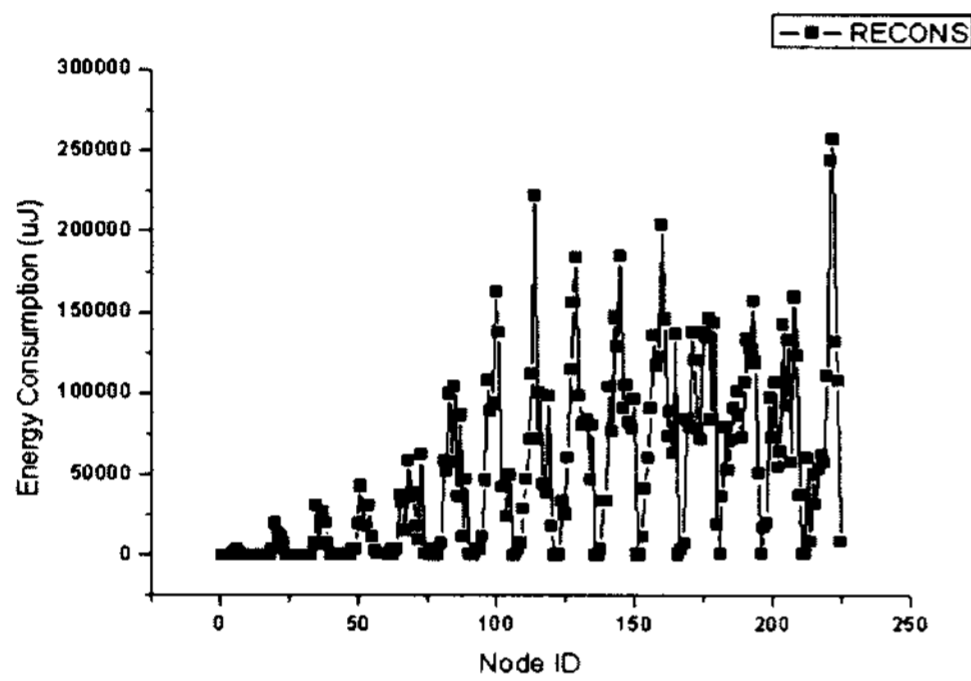
않았다. 제안방안의 Drs는 80m로 설정하였고, EEDD에서 쿼리를 재전송하는 거리 또한 80m로 설정하였다. 그림 5의 (a)는 시간의 흐름에 따라 데이터 10bytes를 전송하는데평균적으로 사용된 에너지 소모를 보여준다. 200bytes의 데이터를 매 3초마다 연속적으로 전송하였다. 싱크는 10m/s의 속도로 임의로 이동한다. 50초와 100초에서 보다 큰 에너지 소모를 보이는 것은 쿼리를 뿌리는 등의 초기화 비용에 비하여 전송된 데이터가 적기 때문에 나타나는 현상이다. EEDD의 경우 데이터가 전송되는 기간과 상관없이 전체적으로 제안방안보다 큰 에너지 소모를 보인다. 이것은 싱크가 일정 거리를 이동하면 다시 쿼리를 전체 네트워크에 플래딩하기 때문에 나타나는 현상이다. USHER의 경우 시간이 길어지면 소모되는 에너지가 증가한다. 이것은 고정 노드로부터 이동 싱크까지 데이터가 증계되는 거리가 늘어나기 때문에 일어난다. 또한 300초 이후 안정화 되는 것은 시뮬레이션 필드가 고정되어 있기 때문에 임시 싱크로부터 이동 싱크까지의 거리가 무한정 늘어나지 않기 때문이다. 데이터의 크기가 쿼리의 크기보다 훨씬 크기 때문에 시간이 길어질수록 EEDD보다도 에너지를 많이 소모하고 있다. 제안방안은 가장 적은 에너지 소모를 나타낸다. 50초 일 때 가장 크고 시간이 지날수록 작아지면서 안정되는 것을 볼 수 있다. 이것은 초기에 질의 메시지가 한번만 뿌려진다는 것을 나타낸다. 또한 싱크의 이동에 따라서 부가적으로 발생하는 에너지 소모가 적음을 나타낸다. 그림 5의 (b), (c), (d)는 500초를 실행했을 경우 각 노드의 에너지 소모를 나타낸다. EEDD는 모든 노드가 최소 25000uJ 이상을 소비하고 있다. 이것은 빈번하게 쿼리 플래딩이 일어나기 때문에 전체적으로 많은 에너지를 소모하는 것을 나타낸다. USHER는 153, 158, 159, 167, 168, 183등의 특정 몇몇 노드들이 다른 노드들과 비교하여 큰 에너지를 소모한다. 이는 모든 데이터가 하나의 임시싱크로부터 이동싱크로 증계되기 때문이다. 앞서 설명한 “데이터 보고 혼잡 현상”을 나타내는 결과이다. 제안 방안은 앞선 프로토콜들보다 균등하게 에너지를 사용하고 있으며, 평균적으로 적은 에너지를 사용하고 있다. 연속적인 데이터를 에너지 효율적으로 전달받고 있으며, 데이터 보고 혼잡 또한 해결하고 있음을 보여준다.

#### 5. 결론

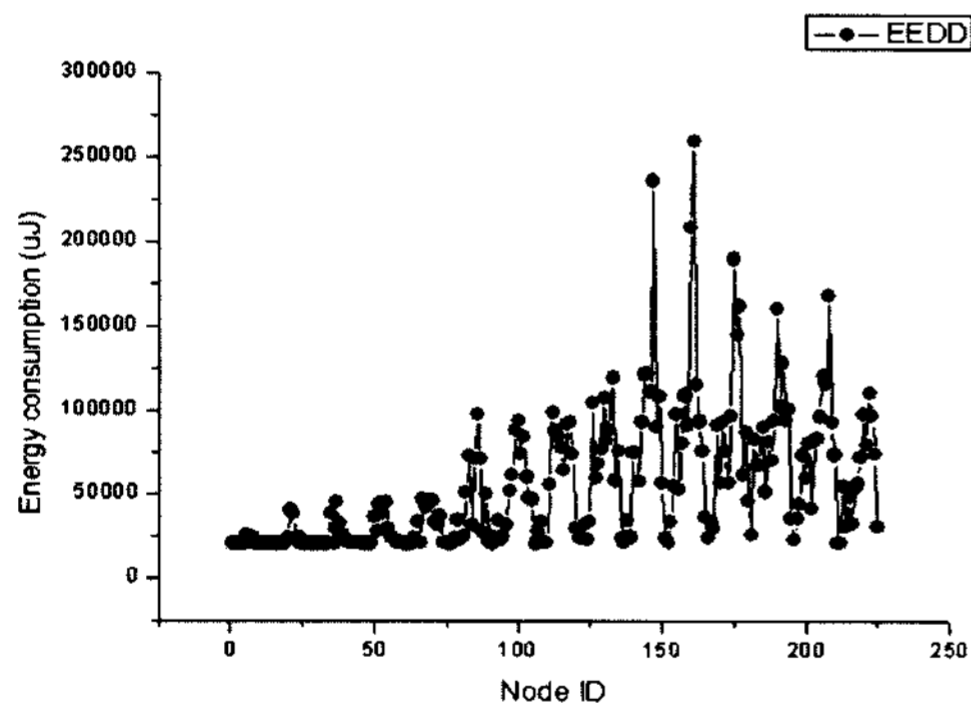
본 논문에서 싱크가 움직이는 환경에서 연속적이고 지속적인 데이터를 수집하는 경우 데이터 보고 혼잡 현상에 대해 기술하였다. 또한 이를 해결하기 위해서 동일한 임무의 질의를 빈번하게 플래딩하는 것은 망에 상당한 에너지 부하를 준다. 제안 방안에서 같은 임무를 부



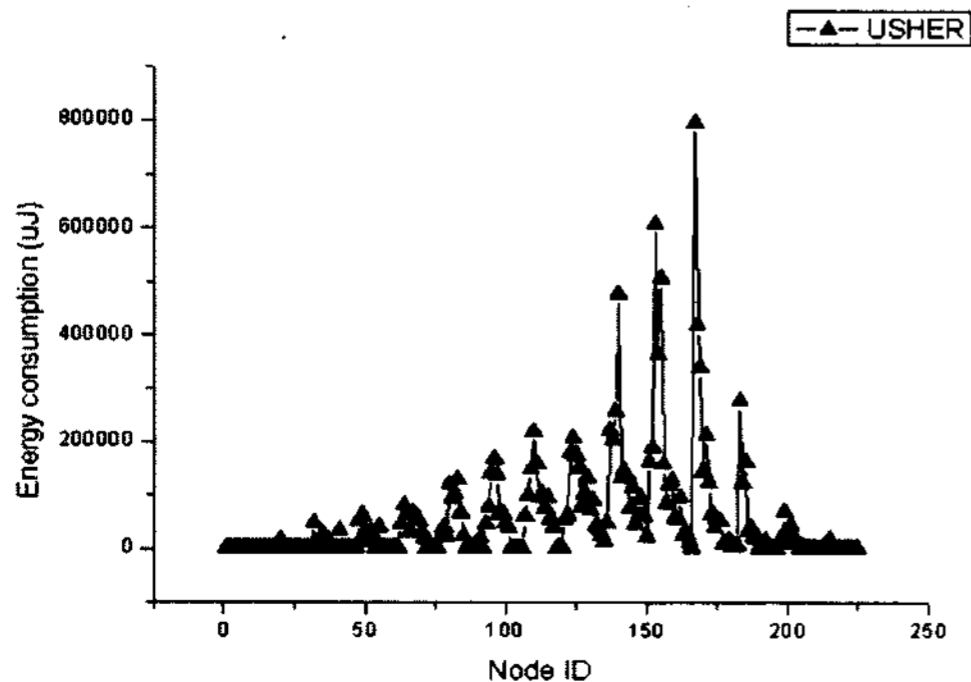
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 5 실험 결과

여하는 질의는 단 한번만 플러딩 된다. 대신 SLM을 이용하여 이동 싱크의 위치를 소스가 필요할 때 전달해준다. 이런 방법은 중간전달노드로부터 이동 싱크까지 중계되는 거리를 짧게 하고 이동에 따라 중계경로를 적은 에너지 소비하도록 하여 그 문제점을 개선한다.

실험을 통하여 제안방안은 데이터 보고 혼잡 현상을 해결했으며, 이동 싱크와 이벤트의 이동성을 지원할 수 있음을 증명하였다. 더불어 기존에 제안되었던 EEDD와 USHER와의 비교를 통하여 연속적이고 지속적인 데이터를 수집하는 환경에서 우월한 성능을 보임을 증명하였다.

참고 문헌

- [1] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and Erdal Cayirci, "A Survey on Sensor Networks," IEEE Communication Magazine, Vol.40, Aug. 2002, pp. 102-114.
- [2] C. Intanagonwiwat, R. Govindan, D. Estrin, J. Heidemann, and F. Silva, "Directed Diffusion: A Scalable and Robust Communication Paradigm for Sensor Networks," Proc. ACM MobiCom '00, Boston, MA, 2000, pp. 56-67.
- [3] M. Ding, X. Cheng, and G. Xue, "Aggregation Tree Construction in Sensor Networks," IEEE VTC 2003, Vol.4, Oct. 2003, pp. 2168-2172.
- [4] S. Madden, M. J. Franklin, J. M. Hellerstein, and W. Hong, "TAG: a Tiny Aggregation service for ad-hoc sensor networks," ACM SIGOPS Operation Systems Review, Vol.36, Dec. 2002, pp. 131-146.
- [5] H. Luo, F. Ye, J. Cheng, S. Lu and L.Zhang, "TTDD: Two-tier Data Dissemination in Large-scale Wireless Sensor Networks," ACM International Conference on Mobile Computing and Networking, Atlanta, GA., Sep. 2002.
- [6] Z. Zhou, X. Xiang and X. Wang, "An Energy-Efficient Data-Dissemination Protocol in Wireless Sensor Networks," IEEE WoWMoM'06 26-29 June 2006, pp. 10-19.
- [7] S. Park, D. Lee, E. Lee, Y. Choi, and S. H. Kim, "A Communication Architecture to Reflect User Mobility Issue in Wireless Sensor Fields," IEEE WCNC, March 2007.
- [8] J. Polastre, R. Szewczyk, and D. Culler, "Telos: Enabling Ultra-Low Power Wireless Research," IEEE IPSN 2005, 15 April 2005, pp. 364-369.