

# 결함이 발생하는 센서 네트워크 환경에서 다중 트리 기반 라우팅 프로토콜

(An Efficient Multiple Tree-  
Based Routing Scheme in Faulty  
Wireless Sensor Networks)

박준호\*                      성동욱\*  
(Jun Ho Park)               (Dong Ook Seong)

여명호\*                      김학신\*  
(Myung Ho Yeo)             (Hak Sin Kim)

유재수\*\*  
(Jae Soo Yoo)

**요약** 최근 무선 센서 네트워크는 광범위한 분야에서 적용되어 사용되고 있다. 많은 수의 센서 노드 간의 통신으로 이루어지는 무선 센서 네트워크는 각 센서 노드에 부착된 센서들을 이용하여 주변 환경의 데이터를 획득한다. 네트워크 결함이나 토폴로지 변화와 같은 가변적인 상황에서 노드 질의 결과의 높은 정확도를 위한 설계 요구조건 및 적합한 라우팅 알고리즘을 구성하는 것은 중요하다. 본 논문

에서는 네트워크 결함이나 토폴로지 변화에서도 높은 정확도를 보이는 새로운 라우팅 기법을 제안한다. 응용에 따라 수 개의 단일 경로 기반의 라우팅 트리를 생성하고 수집된 결과에서 가장 높은 정확도를 보이는 데이터를 최종 질의 결과로 반환한다. 제안하는 기법의 우수성을 보이기 위해 시뮬레이션을 통해 기존에 제안된 라우팅 기법과 성능을 비교하였다. 그 결과 기존의 기법과 마찬가지로 정확도가 높은 결과를 보였음에도 데이터 전송량을 약 70% 감소시키는 것을 확인할 수 있었다.

**키워드** : 센서 네트워크, 라우팅 트리, 라우팅 알고리즘, 다중 트리, 네트워크 결함

**Abstract** Wireless sensor networks (WSN) are widely used in many applications. WSN acquires the data of surrounding environments with sensors attached to each node. It is important to design sensor networks that can communicate energy-efficiently as well as to get sensor readings with high accuracy. In this paper, we propose a novel routing scheme that assures high accuracy and significantly reduces data transmission costs in WSN with faults. First, we organize a number of network topologies randomly for routing sensor readings to the base station. Because every sensor node is connected each other with a single path, redundant transmissions are not incurred. It can reduce unnecessary transmissions and guarantee final sensor readings with high accuracy. To show the superiority of our scheme, we compare it with an existing multi-path routing scheme. In the result, our scheme has similar accuracy as the existing scheme and reduces unnecessary data transmissions by about 70% over the existing technique.

**Key words** : Sensor network, Routing Tree, Routing Algorithm, Multiple Tree, Network Fault

\* 이 논문은 2009년 교육과학기술부의 지원(지역거점연구단육성사업/충북 BIT연구중심대학육성사업)과 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업의 결과임  
\* 이 논문은 2009 한국컴퓨터종합학술대회에서 '결함이 발생하는 센서 네트워크 환경에서 높은 정확도를 갖는 다중 트리 기반 라우팅 프로토콜'의 제목으로 발표된 논문을 확장한 것임

\* 학생회원 : 충북대학교 정보통신공학전공  
jhpark@netdb.cbnu.ac.kr  
sergei@netdb.cbnu.ac.kr  
mhyeo@netdb.cbnu.ac.kr  
hskim@netdb.cbnu.ac.kr

\*\* 종신회원 : 충북대학교 정보통신공학전공 교수  
yjs@chungbuk.ac.kr  
(Corresponding author)

논문접수 : 2009년 8월 13일  
심사완료 : 2009년 11월 3일

Copyright©2010 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 제16권 제1호(2010.1)

## 1. 서론

최근 컴퓨팅 기술의 비약적인 발전과 반도체 MEMS 기술의 발달로 인해 무선 센서 네트워크(Wireless Sensor Networks)에서 사용되는 센서 노드는 소형화, 저비용, 저전력이 가능하게 되었다. 많은 수의 센서 노드들과 통신으로 이루어지는 무선 센서 네트워크는 사람이 직접 수집하기 어려운 데이터들을 수집하고자 다양한 환경에 설치되어 현상에 대한 감시, 정보의 전달, 그리고 이웃 노드와의 협동 작업 등을 수행하게 되었다[1].

센서 노드는 크기가 작고, 소형의 배터리를 이용하여 동작하므로 에너지 사용과 데이터 처리 능력에 제한이 있다. 또한 사람이 접근하기 힘든 환경에서 동작 하는 경우가 대부분이므로, 각 센서 노드의 배터리를 일일이 교체한다는 것은 불가능하다. 그러므로 효율적인 에너지 활용 및 원활한 통신을 위한 설계 요구조건을 구성하는 것이 중요하다.

센서 네트워크 내 질의는 일정한 주기로 데이터를 수집

하므로 많은 데이터 전송을 유발시키므로 통신비용을 줄이는 것이 중요하다. 병합 질의 처리는 라우팅 도중에 네트워크 내에서 데이터를 병합하여 전송함으로써 전송 횟수를 줄임으로 전송되는 동안에 발생하는 통신비용을 줄여준다.

하지만 센서 네트워크는 다양한 환경에 배포가 되기 때문에 센서 노드들은 통신 채널, 하드웨어 잡음 등과 같이 데이터 송수신에서 발생할 수 있는 오류에 노출되어 있고, 제한적인 에너지를 바탕으로 동작하기 때문에 노드의 에너지 소진에 의한 오류도 빈번하게 발생한다.

질의 결과 데이터를 베이스스테이션으로 수집하기 위해 라우팅 트리가 사용된다. 라우팅 트리를 이용한 데이터 전송 방법은 네트워크의 결합이나 토폴로지 변화가 발생하여 노드 간의 연결이 하위 노드의 데이터가 손실되어 정확도에 문제가 발생한다. 이러한 단점을 극복하기 위해서 다중 경로 기반 라우팅을 이용하여 결합에 따른 영향을 최소화 [2,3]시킬 수 있다. 하지만 다중 경로로 데이터를 전송하기 때문에 데이터의 중복 전송이 발생하고 이로 인해 집계된 데이터의 정확도가 낮아지는 문제점을 가지고 있다.

본 논문에서는 네트워크 결합 및 토폴로지의 변화가 발생하는 환경에서도 병합 질의 처리를 수행할 때 결과 데이터의 높은 정확도를 보장하기 위한 새로운 라우팅 기법을 제안한다. 제안하는 기법은 라우팅 트리를 생성한 후 결과 데이터를 수집하고, 이를 요청 질의 정확도(QoS)와 비교한다. 요청 질의 정확도보다 높은 결과를 보일 경우 수집을 완료하지만 미달할 경우에는 다수의 라우팅 트리를 동적으로 구성하여 추가적인 데이터를 수집함으로써 결과의 정확도를 높이면서도 불필요한 데이터 전송량은 줄일 수 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저, 제2장에서는 관련 연구의 분석을 통해 문제점을 설명한다. 제3장에서는 다중 라우팅 트리를 정의하고 라우팅 트리의 구성 및 데이터 수집 절차를 설명한다. 제4장에서는 기존 기법과의 성능을 비교하며, 마지막으로 제5장에서는 본 논문의 연구 결과와 향후 연구 방향에 대해서 설명한다.

2. 관련연구

질의 결과 데이터들을 베이스 스테이션으로 모으기 위한 방법으로 트리 기반의 라우팅 프로토콜이 많이 제안되었다. 라우팅 트리는 병합 질의에 따른 결과를 수집할 때 적은 데이터 전송을 하면서도 높은 정확도를 보이지만 네트워크 결합이나 토폴로지의 변화 등을 고려한 환경에서는 낮은 정확도를 나타낸다. 네트워크 결합이나 토폴로지의 변화에도 적용이 가능한 Sketch[4]와 같은 다중 경로 기반 라우팅 [5,6]이 제안이 되었다. 다중 경로 기반 라우팅의 경우 결합이 발생하지 않을 때엔 데이터 중복 발생에 따른 부정확한 데이터를 도출하는 한계를 가지고 있다. 그림 1은 라우팅 트리와 다중 경로 기반 라우팅 문제점의 예를 보여준다. 라

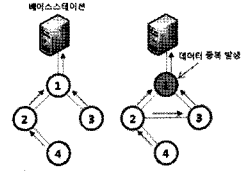


그림 1 라우팅 트리와 다중 경로 기반 라우팅

우팅 트리에서는 중간 노드에서 네트워크 결합이 발생했을 경우 자식 노드의 데이터가 누락되는 상황이 발생한다. 하지만 다중 경로 기반 라우팅에서는 다중 연결을 가지고 있으므로 결합으로 인한 문제는 적지만 데이터 중복 전송으로 인한 정확도 문제가 발생한다. 데이터 중복 문제를 해결하기 위한 방법으로 CountTorrent가 제안되었다.

CountTorrent[7]에서는 다중 경로 기반 라우팅을 이용하여 데이터를 수집한다. 모든 노드에 각 노드들 사이에 부모-자식 관계를 인식할 수 있는 유일한 비트 레이블을 할당하고, 데이터를 전송할 때 비트 레이블과 수집 데이터를 전송한다. CountTorrent는 중간 집계를 부모와 자식의 관계가 성립하는 데이터 사이에서만 수행하므로 단 한 번의 누계가 이루어진다. 따라서 CountTorrent는 데이터의 누락을 최소화하면서도 중복데이터에 따른 중복 집계 발생시키지 않으므로 결과적으로 결과 값의 높은 정확도를 제공한다.

CountTorrent는 비트 레이블 할당 단계와 데이터 수집 및 결합 단계로 구성된 핵심 알고리즘을 통해 구성된다. 먼저 비트 레이블 할당 단계는 각 센서 노드들 사이에 부모-자식 관계를 인식할 수 있는 유일한 비트 레이블을 할당한다. 그림 2와 같이 부모-자식관계를 인식할 수 있는 비트 레이블을 할당하기 위해 부모-자식 관계에는 마지막 비트를 제외한 동일한 접두사를 부여하게 되는데 이 레이블은 데이터 결합을 수행에 사용된다.

데이터 수집 및 결합 단계에서는 이웃 노드에 자신의 비트 레이블과 데이터 전송을 하고, 데이터를 수신한 노드는 수신한 데이터를 저장한다. 캐시에서 레이블을 비교하여 부모-자식 관계가 성립하는 두 데이터를 결합한 후 저장하고 또 다시 이웃 노드에 전송한다. 이러한 과정을 반복하면서, 최종적으로 네트워크 내 모든 노드의 데이터를 한 번씩 수집한 데이터가 결과로 전송된다. 그림 3은 데이터 결합 과정을 보이는데, 결합을 수행함에 있어서 할당 된 비트 레이블을 활용하게 되는데, 부모-자식 관계에 있는 센서 노드의 데이터를 결합하게 된다.

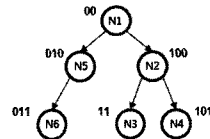


그림 2 비트 레이블 할당

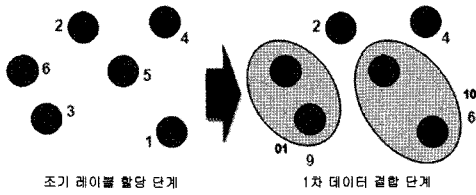


그림 3 데이터 결합 단계

CountTorrent는 유일한 레이블을 이용하여 기존의 기법에서 발생하는 중복 데이터로 인한 정확도 문제를 해결했다는 장점을 가진다. 하지만 센서 네트워크의 특징을 고려할 때 다음과 같은 문제점을 갖고 있다.

첫째로 일반적으로 센서 네트워크는 수백에서 수천 개 이상의 노드로 구성이 된다는 점에서 할당하는 비트의 크기가 하위 노드로 갈수록 기하급수적으로 길어진다. 해당 노드의 비트 레이블과 수집 데이터를 함께 전송하므로 데이터의 크기가 지나치게 커져서 과도한 전송량이 발생한다.

두 번째는 네트워크에서 노드 결합이 발생 할 경우, 할당되어 있던 비트 레이블을 변경해야 한다. 추상 트리의 상위의 위치한 노드가 삭제되었을 경우 많은 수의 하위 노드에 할당 된 레이블을 변경하기 위해 큰 비용을 지불해야 한다.

센서 네트워크는 효율적인 에너지 활용 및 원활한 통신을 위한 설계 요구조건의 구성뿐만 아니라 높은 정확도를 가진 결과 데이터를 도출 하는 것도 매우 중요하다. 그러므로 전송량을 적게 사용하면서도 높은 정확도를 가진 기법의 연구가 필요하다.

### 3. 제안하는 다중 트리 기반의 라우팅 프로토콜

#### 3.1 제안하는 기법의 특징

본 논문에서는 네트워크의 결합이 발생하는 네트워크에서 정확도를 보장하기 위한 새로운 기법을 제안한다. 데이터 중복이 발생하지 않는 다수개의 단일 경로 라우팅 트리를 이용하여 데이터를 수집함으로써 정확도를 보장하면서도, 불필요한 데이터 전송을 줄이게 된다. 초기에 설정된 라우팅 트리에 따라 질의 결과를 수집하게 되고, 이를 질의와 함께 설정된 요청 질의 결과 정확도와 비교 평가한다. 수집 된 결과가 요청 정확도보다 높은 결과를 보일 경우 최종 결과로 반환하고 미달할 경우에는 다음 Epoch을 생성하여 새로운 라우팅 트리를 구축하여 데이터를 수집한다.

그림 4는 제안하는 기법의 수행 과정이다. 먼저 네트워크 초기화 단계에서 경로 설정 및 데이터 설정에 이용할 노드의 레벨과 후보 부모를 결정한다. 그 후 라우팅 경로 설정 및 데이터 수집 단계에서는 질의와 QoS가 배포되고 그림 5와 같은 K개의 Epoch이 구성된다. 이 때 Epoch에 따라 생성된 다수의 라우팅 트리가 생성이 되고 Epoch에 따라 여러 번의 결과 데이터를 수집하면서 정확도를 높인다.



그림 4 제안하는 기법의 수행 과정

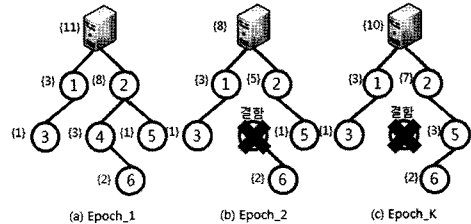


그림 5 결합에 따른 동적 라우팅 트리 구성

#### 3.2 네트워크 초기화 단계

본 단계를 통해 임의의 노드에 부모로 선정 될 수 있는 노드가 캐시에 저장된다. 베이스스테이션은 다음과 같은 포맷의 네트워크 초기화 메시지 준비하여 전체 네트워크에 플리딩 방식으로 전달한다.

<src\_id, level>

그림 6은 네트워크 초기화 과정을 보인다. 이웃 노드로부터 네트워크 초기화 메시지를 받으면 메시지를 전송한 노드를 캐시에 후보 부모 노드로 저장하고, 메시지의 level 값을 자신의 레벨로 설정 한다. 그리고 네트워크 초기화 메시지의 src\_id 속성에는 자신의 아이디를, level 속성에는 자신의 레벨 값에 1을 더한 값으로 설정한 후 이웃 노드에게 전달한다. 본 과정은 모든 센서 노드가 자신의 레벨과 후보 부모 노드를 캐시에 저장할 때까지 반복한다.

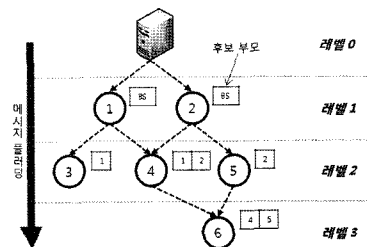


그림 6 네트워크 초기화 과정

#### 3.3 라우팅 경로 설정 및 데이터 수집

본 단계에서는 Epoch에 따른 라우팅 경로 설정 및 데이터 수집을 진행한다. 데이터 수집 단계에서는 노드 간의 데이터를 부모 노드에서 결합한다. 최하위의 노드는 캐시에 저장된 후보 부모 노드 중에서 랜덤하게 선정을 하여 부모로 결합한 후 아래와 같은 포맷으로 데이터를 전송한다.

<sensor\_num, aggr\_data>

sensor\_num 속성은 데이터 수집에 참여한 노드의 수로 최하위 레벨의 노드는 sensor\_num 속성을 1, aggr\_data에는 자신이 수집한 데이터를 설정한 후 부모 노드로 전송하면, 부모 노드는 자식 노드들로부터 받은 결과 데이터와 자신의 결과 데이터를 모아 패킷 합병을 수행하고, sensor\_num 속성에 1을 더한 후 상위 노드로 전달한다. 따라서 다중 경로 기반 라우팅에서 보였던 비트레이블 할당 등의 정보를 함께 전송하지 않으므로 불필요한 데이터 전송량을 줄이는 결과를 얻게 된다. 그림 7은 노드 4의 에너지 소진 네트워크 오류가 발생한 경우의 라우팅 경로 설정 및 데이터 수집 과정을 나타낸다. Epoch\_1에서는 노드 6이 후보 부모 중 노드 4를 라우팅 경로로 설정하여 데이터를 전송하였을 때, 노드 4는 에너지 소진으로 노드 결합이 발생하였기 때문에 노드 6의 데이터는 결과에 반영이 되지 않으므로 부정확한 결과가 도출이 된다. 하지만 Epoch\_2에서는 Epoch\_1과는 다른 라우팅 경로를 설정하기 때문에 데이터의 삭제 없이 최종적으로 결과에 반영이 된다.

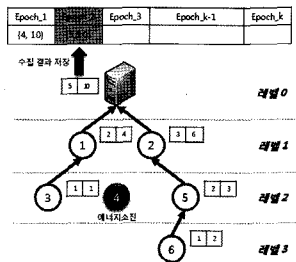


그림 7 라우팅 경로 설정 및 데이터 수집 과정

질의가 전달된 후 질의 결과를 수집하는 단위를 Epoch이라고 하며, 질의와 함께 설정된 QoS(요청 질의 정확도)에 따라 그 수가 결정된다. 하나의 Epoch에서는 라우팅 경로의 설정 및 데이터 수집이 수행되며, 이전 Epoch에서 선정되지 않은 후보 부모 노드 중에서 임의로 부모를 선정하여 데이터를 전송하기 때문에 각 Epoch마다 유일한 라우팅 트리를 구성하게 된다. 이는 결과적으로 Epoch의 수만큼의 라우팅 트리를 구성하게 되므로 네트워크 결합이 발생하더라도 정확도 높은 질의 결과를 발생시킬 기반을 제공한다.

3.4 최종 질의 결과 도출

Epoch에서 식 (1)에 의해 베이스스테이션에 수집된 최종 패킷에 대해 QoS를 계산하게 되고, 질의 배포 시에 설정한 QoS를 만족할 경우 베이스스테이션은 비컨 메시지를 전송하여 Epoch을 추가적으로 진행하지 않도록 한다.

$$QoS(\%) = \frac{\text{데이터 수집에 참여한 노드의 수}}{\text{전체 센서 노드의 수}} \times 100 \quad (1)$$

하지만 질의 결과가 QoS에 미달할 경우는 다음 Epoch을

수행하고, 이는 질의 배포 시에 QoS에 따라 결정된 Epoch의 수 한도에서 반복하게 된다. 모든 Epoch에서 QoS 수치를 만족시키지 못하는 결과를 수집하였을 경우, 수집된 결과 중에서 sensor\_num의 수치가 가장 높은 데이터를 선정하여 최종 결과 값으로 반환한다.

4. 성능 평가 및 분석

4.1 실험 환경

본 논문에서는 시뮬레이션 실험을 수행하여 기존 기법과 제안하는 라우팅 프로토콜을 사용하였을 때의 성능 차이를 비교하였다. 센서 네트워크는 100m×100m~ 800m×800m의 사각형의 형태를 가진다. 가로의 길이를 w 미터, 세로 길이를 h 미터, 밀도를 d(단위 공간 안에 존재하는 센서 노드의 개수)라고 할 때, 센서 네트워크에 존재하는 노드의 개수는  $N = d \times w \times h$  개이다. 센서 네트워크상에 N개의 노드를 무작위로 배치하여 구성을 하고, 베이스스테이션은 전체 네트워크의 정중앙에 위치한다. 각 센서 노드들은 통신 반경 내의 이웃 노드들과 서로 통신할 수 있으며, 통신은 무손실 통신을 가정한다.

표 1은 실험에 사용된 파라미터들을 나타낸다. 센싱 데이터의 크기는 4Bytes, 각 노드의 식별자를 위한 데이터의 크기는 센서 노드의 수에 따라 2~3Bytes로 가정하였다.

표 1 성능 평가 환경

파라미터	값
센서네트워크의 크기(미터×미터)	100×100~800×800
밀도	0.01
센서 통신 반경 (미터)	50
센싱 데이터의 크기 (Bytes)	4 Bytes
센서 노드 식별자의 크기 (Bytes)	2~3 Bytes
네트워크 결합률 (%)	1~10

4.2 실험 결과

4.2.1 네트워크 결합에 따른 질의 결과 정확도

네트워크 결합에 따른 결과 정확도 실험에서는 100m×100m의 센싱 영역에 100개의 센서 노드를 배치한 후 네트워크 결합률을 0.01부터 0.1까지 변화시켜가며 두 라우팅 방법의 성능을 비교하였다. 또한 제안하는 기법의 QoS는 최대정확도의 결과를 수집하도록 설정하였다. 그림 8은 센서 네트워크의 결합 발생에 따른 제안하는 기법과 Count-Torrent의 질의 결과 정확도를 평가한 결과이다. 네트워크 결합률에 따라 두 기법의 질의 정확도는 99% 이상의 높은 정확도를 보였다. CountTorrent의 경우, 레이블을 이용한 다중 경로 기반의 라우팅 기법을 기반으로 하기 때문에 질의 결과의 높은 정확도를 제공한다. 반면에 제안하는 기법은 다수의 라우팅 트리를 이용하여 서로 다른 경로로 많은 결과를 수집하게 된다. 하나의 고정 된 라우팅 트리는 데이

터의 중복을 피하고, 질의 결과의 정확도에 따라 동적으로 라우팅 트리를 생성하기 때문에 높은 정확도를 보였다. 하지만 네트워크 결합 발생률이 높아짐에 따라 질의 결과 정확도가 조금씩 낮아지게 되는데, 이는 네트워크 결합이 많이 발생할 경우 통신 반경 내에 데이터를 전달할 수 있는 노드가 발생하기 때문에 데이터 누락 현상이 발생하기 때문에 정확도가 감소하였다.

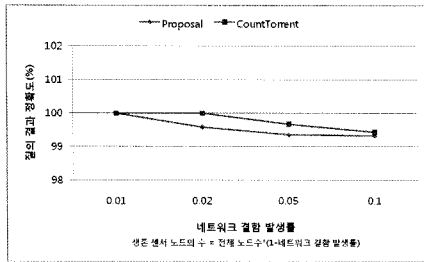


그림 8 네트워크 결합에 따른 질의 결과 정확도

#### 4.2.2 센서 노드 수에 따른 데이터 전송량

그림 9은 센서 노드의 수에 따른 데이터 전송량을 나타낸다. 실험방법은 동일할 밀도 하에서 센서 네트워크의 크기를 100m×100m부터 800m×800m까지 변화시키며 두 라우팅 방법의 성능을 비교하였다. 센서 노드 수에 따른 데이터 전송량의 실험은 밀도 및 질의 정확도를 고정된 상태에서 실행하였다. 실험 결과 센서 노드 수가 증가함에 따라 두 라우팅 방법의 성능 차이는 점점 증가하였다. CountTorrent는 레이블을 할당하고 데이터 전송 시에 레이블을 함께 전송하기 때문에 불필요한 데이터 전송을 많이 하게 된다. 제안하는 기법의 경우 기본 라우팅 정책으로 트리를 사용하기 때문에 낮은 데이터 전송량을 보이게 된다. 실험 결과 그래프에서 센서 노드의 수가 증가함에 따라 두 라우팅 방법의 성능 차이는 점점 증가하다가 600개 이상이 될 때 그 차이가 급격히 증가한다. 센서 노드가 600개 이상에서 두 라우팅 방법의 성능 차이가 커지는 이유는 CountTorrent에서 500개 이하의 노드 수는 레이블을 위한 데이터 공간으로 2Bytes면 충분히 전송이 가능한 반면 600개 이상의 노드는 3Bytes 이

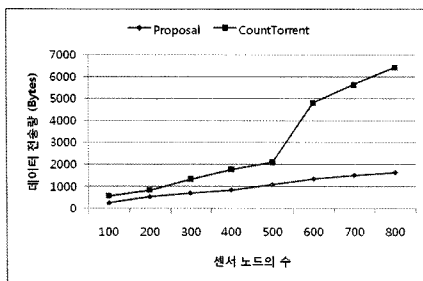


그림 9 센서 노드 수에 따른 데이터 전송량

상의 데이터 공간을 요구하기 때문이다. 두 라우팅 방법을 비교 평가한 결과 데이터 전송량이 평균 66% 감소하였다.

### 5. 결론 및 향후 연구

본 논문에서는 기존에 제안된 다중 경로 기반의 라우팅 기법의 문제점을 분석하고, 정확도를 고려한 다중 라우팅 트리 기반의 라우팅 기법을 제안하였다. 기존의 기법의 문제점을 해결하기 위하여 다수의 라우팅 트리를 구성하여 데이터를 수집하는 기법을 제안하였다. 네트워크 결합을 고려하여 다수의 트리 기반의 라우팅을 이용하기 때문에 레이블 할당을 하지 않으면서도 데이터 누락 및 중복이 발생하지 않아 처리 결과의 높은 정확도를 얻을 수 있다. 성능 평가 결과, CountTorrent의 높은 질의 처리 정확도와 유사한 결과를 보이면서도, 불필요한 데이터 전송이 약 66% 감소하였다. 향후 연구는 잔여 에너지량을 고려한 동적 라우팅 트리 구성을 접목하여 네트워크의 생존시간을 증가시키는 기법을 제안하는 것이다.

### 참고 문헌

- [1] Culler, D., Estrin, D., and Srivastava, M., "Guest Editors' Introduction: Overview of Sensor Networks," *IEEE Computer*, vol.37, issue 8, pp.41-49, 2004.
- [2] Manjhi, A., Nath, S. and Gibbons, P. B., "Tributaries and Deltas: Efficient and Robust Aggregation in Sensor Network Streams," *Proc. of the 2005 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data*, pp.287-298, 2005.
- [3] Madden, S., Franklin, M. J., Hellerstein, J. M., and Hong, W., "TAG: a Tiny AGgregation service for ad-hoc sensor networks," *Proc. of the 5th Symposium on Operating Systems Design and Implementation*, pp.131-146, 2002.
- [4] Flajolet, P. and Martin, G. N., "Probabilistic Counting Algorithms for Database Applications," *Journal of Computer and System Sciences*, vol.31, issue 2, pp.182-209, 1985.
- [5] Nath, S., Gibbons, P. B., Seshan, S., and Anderson, Z., "Synopsis Diffusion for Robust Aggregation in Sensor Networks," *Proc. of ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, pp.250-262, 2004.
- [6] Considine, J., Li, F., Kollios, G. and Byers, J., "Approximate Aggregation Techniques for Sensor Databases," *Proc. of the 20th International Conference on Data Engineering*, pp.449-461, 2004.
- [7] Kamra, A., Misra, V., and Rubenstein, D., "Count-Torrent: ubiquitous access to query aggregates in dynamic and mobile sensor network," *Proc. of the 5th International Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, pp.43-57, 2007.