

논문 2012-50-4-30

WSN에서 에너지 효율적인 클러스터링 기법

(An Energy Efficient Clustering Scheme for WSNs)

정길수*, 이원석*, 송창영*

(Kil-Soo Chung, Won-Seok Lee, and ChangYoung Song)

요약

WSN (Wireless sensor network)은 에너지 제한적인 네트워크이기에 노드의 에너지 효율성이 중요한 문제이다. 라운드 단위로 동작하는 클러스터링은 노드의 먼 거리 통신을 피할 수 있기에 네트워크 수명을 증가시키는 효율적인 방법이며 그 성능은 라운드 시간에 좌우된다. 짧은 라운드 시간은 잦은 클러스터 재구성을 발생시키고 반면 긴 라운드 시간은 클러스터 헤드의 에너지 소비를 증가시킨다. 그래서 현존하는 클러스터링 기법들은 네트워크 초기 변수들을 기반으로 적절한 라운드 시간을 결정한다. 하지만 무선 센서 네트워크는 운용 특성 상 노드가 추가될 수도 혹은 사라질 수도 있는 동적인 네트워크이기에 네트워크 전체 수명에 대해 네트워크 구성 초기 파라미터를 계속 적용하는 것은 적절치 못하다. 본 논문에서는 현재 필드에 살아있는 노드의 수를 기반으로 라운드 시간을 계산하는 방법을 제안하여 노드 수가 변화할 수 있는 동적인 네트워크에 적용하도록 하였다. 성능 분석 결과 기존에 비해 노드의 에너지 소비량이 감소하였으며 수신되는 데이터 손실도 감소함을 확인하였다.

Abstract

As WSN is energy constraint so energy efficiency of nodes is important. Because avoiding long distance communication, clustering operating in rounds is an efficient algorithm for prolonging the lifetime of WSN and its performance depends on duration of a round. A short round time leads to frequent re-clustering while a long round time increases energy consume of cluster heads more. So existing clustering schemes determine proper round time, based on the parameters of initial WSN. But it is not appropriate to apply the round time according to initial value throughout the whole network time because WSN is very dynamic networks nodes can be added or vanished. In this paper we propose a new algorithm which calculates the round time relying on the alive node number to adapt the dynamic WSN. Simulation results validate the proposed algorithm has better performance in terms of energy consumption of nodes and loss rate of data.

Keywords : LEACH, Routing, Network, Sensor, Clustering

I. 서론

WSN은 필드에 뿌려진 다수의 센서들로 구성되는 네트워크이다. 초소형 전자 기계 시스템 기술의 발전은 아주 작고 적은 비용의 센서들을 가능하게 했다. 센서들은 메모리, 데이터 처리와 감지 유닛, 무선 통신 유닛,

그리고 배터리로 구성된다. 이러한 WSN은 계층적인 구조를 갖는데 최종 사용자가 네트워크와 직접 연결되지 않고 최소한 한 단계 이상을 거쳐 기지국과 연결되는 형태이다^[1].

WSN은 운용 특성상 대부분 가혹한 환경에서 동작하게 되고 센서 노드들은 제한된 배터리 파워, 작은 메모리 용량과 같은 제한적인 자원을 갖고 동작한다. 그래서 일단 필드에 적용된 센서들은 배터리의 충전 및 교환이 어려운 환경에 처하게 된다. 결국 센서들은 데이터 감지, 처리 그리고 송수신 동작을 하며 제한적인 배터리 파워를 소비하게 되는데 이 중 데이터 통신 시가

* 정회원, 동양미래대학교 전기전자통신공학부
(DongYang Mirae University)

※ 본 연구는 2012년도 동양미래대학교 학술연구비 지원에 의하여 이루어졌음을 알려드립니다.

접수일자: 2013년2월1일, 수정완료일: 2013년3월18일

장 큰 에너지를 소비하게 된다. WSN의 수명은 센서 노드들에 좌우되기에 에너지 효율성은 중요한 문제이다.

클러스터링 (Clustering) 기법은 에너지 효율적인 WSN을 위한 좋은 방법이다^[2]. 클러스터링은 하나의 네트워크를 여러 개의 독립적인 클러스터로 나누는 방법이다. 각 클러스터에는 적어도 하나의 클러스터 헤드와 주변 데이터를 수집하고 수집한 데이터를 헤드로 전송하는 센서 노드들이 존재한다. 헤드는 수집된 데이터의 양을 줄이기 위해 데이터를 융합하고 융합된 데이터를 기지국으로 전송한다. 결국 클러스터링은 센서 노드의 통신 거리를 줄여 에너지를 절약하는 방법이다. 먼 거리에 위치한 기지국 대신 비교적 가까운 거리에 위치한 헤드로 데이터를 전송하는 것이다. 헤드는 센서 노드에 비해 훨씬 더 많은 일을 하게 되어 제한적인 배터리 파워가 더욱 빨리 소비될 것이다. 이러한 클러스터 헤드의 역할을 네트워크 내의 모든 노드들이 순환하며 담당하여 네트워크의 부하 균형을 맞추는 방식이다^[3].

에너지 효율성을 위해 각 센서 노드들이 헤드가 되는 시간은 적절해야만 한다. 노드가 헤드 역할을 하는 시간은 전체 프레임 시간 중 능동 모드로 동작하는 시간의 비율이다. 클러스터링은 대부분 클러스터 헤드와 통신하는 센서 노드의 TDMA 스케줄링을 사용한다. 노드들은 오직 할당된 시간 슬롯이 도착하는 경우에만 능동 모드로 동작한다. 결과적으로 클러스터링은 노드들이 클러스터 헤드가 되는 시간을 줄여준다^[4].

라운드 시간이라 불리는 특정한 시간 후에는 클러스터링이 다시 이루어진다. 라운드 시간은 클러스터 셋업 그리고 이어지는 데이터 처리 단계의 총 지속 시간이다. 클러스터링 알고리즘의 에너지 효율성은 이 라운드 시간에 주로 좌우된다.

본 논문에서는 에너지 효율성을 위해 네트워크의 동적인 변화에 적응할 수 있는 가변적인 라운드 시간에 주목한다. LEACH 및 이를 기본으로 하는 대부분의 프로토콜들에서 사용하는 일정한 라운드 시간 대신 가변적인 라운드 시간을 적용하여 에너지 효율성을 높이고자 하였다. WSN은 운용 특성 상 노드의 추가와 삭제 가능성이 많은 동적인 네트워크이기에 노드 수에 따른 라운드 시간 조절은 더욱 에너지 효율적 이었다. 더불어 비고기법을 적용하여 감지하는 데이터의 특성까지 고려하도록 하였다.

본 논문은 II장에서 클러스터링 관련 기존 연구에 대

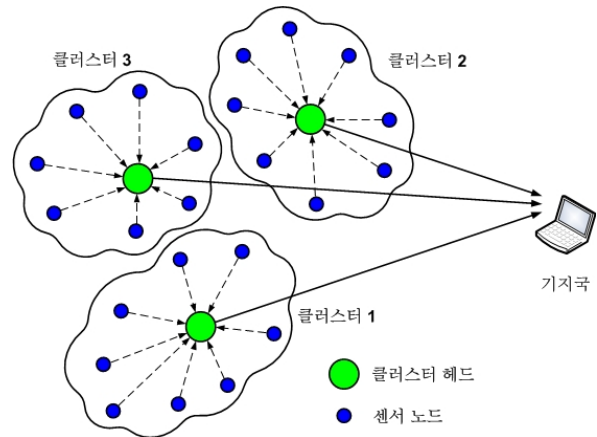


그림 1. LEACH 네트워크 구조
Fig. 1. Structure of a LEACH Network.

해 논하고 III장에서는 제안하는 클러스터링 기법을 소개한다. IV장에서 제안한 기법의 성능을 분석하고 V장에서 결론을 맺는다.

II. 관련 연구

1. LEACH 프로토콜

그림 1과 같은 구조를 갖는 LEACH는 무선 센서 네트워크를 위한 최초의 클러스터 기반의 계층적 라우팅 프로토콜이다^[5]. 필드에 뿌려진 센서들을 몇 개의 그룹 즉 클러스터로 분할한다. 각 클러스터에는 해당 클러스터에 포함된 모든 센서 노드를 제어하며 센서 노드들이 전송한 데이터를 융합하여 기지국으로 전송하는 헤드 노드와 데이터를 수집하여 자신이 속한 클러스터의 헤드에게 데이터를 전송하는 센서 노드들로 구성된다. 수신한 데이터를 병합해서 원거리에 위치한 기지국으로 전송해야하는 클러스터 헤드는 에너지 부담이 많기에 모든 노드가 순환하며 헤드 역할을 하기 위해 각 라운드 시작 시 정해진 확률로 헤드를 선택하게 된다.

가. LEACH 프로토콜의 구조 및 동작

그림 2에 나타나는 것과 같이 LEACH는 라운드 단위로 구성된다. 각 라운드는 셋업 단계와 안정 상태 단계로 이루어진다. 셋업 단계에는 센서 노드들을 여러 개의 클러스터로 나누는 클러스터링 즉 헤드 선출에 관련된 과정이 포함되고, 안정 상태 단계에는 센서 노드들이 감지한 데이터를 헤드로 전송하는 과정 및 클러스터 헤드가 기지국으로 병합한 데이터를 보내는 과정이

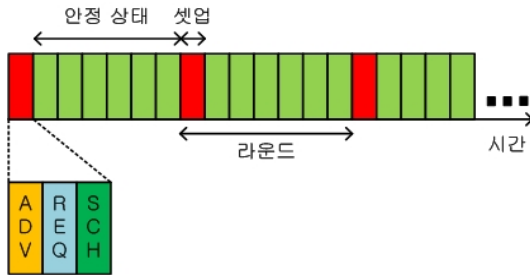


그림 2. 시간에 따른 LEACH 프로토콜의 동작
 Fig. 2. Time line showing operation of LEACH.

들어간다^[6].

세부적인 셋업 과정은 헤드가 자신이 선출되었음을 다른 센서 노드에게 알리기 위해 ADV (advertisement) 메시지를 방송하는 구간과 수신한 ADV 메시지의 신호 세기를 기반으로 센서 노드가 자신이 속 할 클러스터를 선택하고 해당 클러스터 헤드에게 자신이 편입됨을 알리는 join-REQ (request) 메시지 전송 구간 마지막으로 클러스터 헤드가 수신한 join-REQ 메시지를 기반으로 TDMA 방식의 스케줄, SCH를 작성하여 자신의 클러스터에 포함된 모든 멤버 노드들에게 전송하는 구간으로 구성된다. 안정 상태 구간은 프레임으로 구분되며 각 프레임은 SCH 순서에 따라 각 센서 노드가 데이터를 전송하는 시간 슬롯들로 이루어지게 된다^[1, 5].

나. LEACH의 클러스터 헤드 선택 기법

LEACH에서 클러스터 헤드는 센서 노드에 비해 멀리 떨어져 있는 기지국으로 데이터를 전송해야 하기 때문에 상대적으로 에너지 소모가 상당히 많다. 결국 모든 노드가 동일하게 에너지를 소비하기 위해 식 (1)과 같은 확률을 기반으로 헤드를 선출하게 된다^[5].

$$P_i(t) = \begin{cases} \frac{k}{N - k \times (r \bmod \frac{N}{k})} & : C_i(t) = 1 \\ 0 & : C_i(t) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

모든 노드가 동일한 회수로 클러스터 헤드가 되는 것을 보장하기 위해 각 노드가 평균적으로 N/k 라운드마다 한 번씩 클러스터 헤드가 되어야 한다. 식 (1)에서 N은 전체 노드 수, i는 노드 식별자, t는 시간, r은 라운드, k는 클러스터 수를 나타낸다. $C_i(t)$ 는 가장 최근 라운드($r \bmod N/k$)에서 노드 i가 헤드였는지를 결정하는 함수인

데, 예를 들어 노드 i가 헤드가 아니었다면 $C_i(t) = 1$ 이고 헤드가였다면 $C_i(t) = 0$ 이다. 결과적으로 N/k 주기로 순환되기 때문에 헤드로 선출되는 확률은 모든 노드가 동일하다고 할 수 있다^[6~7].

다. LEACH 프로토콜의 문제점

LEACH 및 이를 기반으로 하는 프로토콜들은 네트워크 초기 필드에 적용된 센서 노드 수를 기반으로 라운드 시간을 정하고 네트워크 수명이 다할 때 까지 정해진 라운드 시간에 기초해서 네트워크가 동작한다. 하지만 무선 센서 네트워크는 적진의 감시와 같은 군사 지역, 산불이나 홍수와 같은 자연재해 지역, 동식물의 생태를 관찰하는 넓은 지역 등 많은 부분 인간이 접근하기 힘들고 상당히 가혹한 환경에서 동작하게 된다.

결과적으로 필드에 뿌려졌지만 네트워크 구동 초기 다양한 이유로 인해 동작을 하지 못 하다 네트워크 구동 중간에 새롭게 센서 노드로 편입되는 센서 노드가 존재할 수도 있으며 정상적이지 않은 이유로 네트워크 구동 중 갑자기 사망하는 노드도 충분히 발생할 수 있다. 결국 네트워크 초기에 정해진 고정된 라운드 시간을 네트워크 사망 시 까지 계속 운용한다는 것은 특히나 긴 라운드 시간을 갖는 경우 클러스터 헤드의 에너지 소비 불필요하게 증가될 것이고 짧은 라운드 시간을 갖는 경우 노드 수 대비 너무 빈번한 클러스터 재구성 작업이 발생되어 더욱 빠른 노드의 에너지 고갈을 야기할 것이다.

III. 에너지 효율성을 위한 라우팅 기법

센서 노드들을 몇 개의 그룹으로 분할하는 클러스터링 기법은 무선 센서 네트워크에서 에너지 효율적인 방법이다. 네트워크를 다시 클러스터링 하는 라운드 시간은 에너지 효율성을 높이기 위해 매우 중요한 부분이다. 클러스터 헤드 입장에서 긴 라운드 시간은 헤드로서의 역할이 길어지니 에너지 부담이 커질 것이다. 반면 라운드 시간이 짧다면 센서 노드들의 에너지 소비가 증가하게 될 것이다. 결국 상황에 맞는 라운드 시간 조절은 더욱 에너지 효율적인 프로토콜을 위해 필요한 부분이다.

LEACH 및 이를 기반으로 하는 알고리즘들은 대부분 고정된 라운드 시간을 갖고 있으며 초기 센서 노드

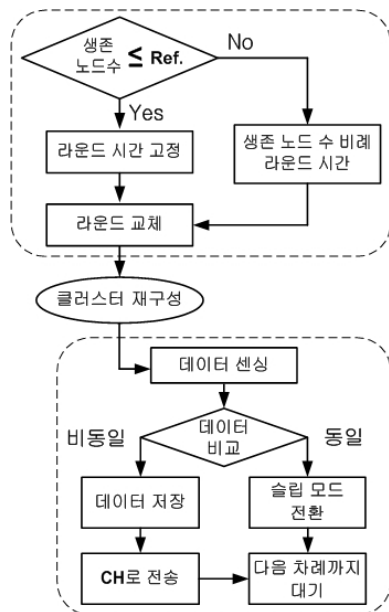


그림 3. 제안한 기법의 동작
Fig. 3. Operation of the proposed scheme.

들의 수를 기준으로 라운드 시간을 선택한다. 하지만 WSN은 특성 상 대부분 상당히 가혹한 환경에서 운용되기에 센서 노드들이 추가될 수도 있고 센서 노드의 에너지가 고갈될 수도 있다. 일정한 라운드 시간을 갖는 프로토콜의 경우 센서 노드가 추가되면 완벽한 동작을 하는데 라운드 시간이 부족할 것이고 빈번한 클러스터 재구성이 일어나 네트워크 부담이 증가할 것이다. 반대로 센서 노드들이 수명을 다하게 되면 기존의 정해진 라운드 시간은 상대적으로 너무 길어져 헤드의 에너지 소비가 늘어날 것이다. 결과적으로 센서 노드의 수에 따라 라운드 시간을 조절하는 가변적인 라운드 시간의 운용이 가능해진다면 네트워크 수명이 연장되게 될 것이다. 실제적으로 WSN 내 모든 노드들은 한 번씩 클러스터 헤드 역할을 하며 동시에 네트워크 수명이 최대화되는 적당한 시간 동안 헤드 역할을 하게 될 수 있다.

본 논문에서는 그림 3과 같이 노드의 클러스터 헤드 역할 수행 시간 즉 라운드 시간을 조절하기 위해 네트워크 내에 살아있는 센서 노드 수를 확인하고 그 값을 참고하여 라운드 시간을 결정한다. 즉 살아있는 센서 노드의 수가 많으면 그에 비례하여 긴 라운드 시간을 갖고 사망한 센서 노드 수가 증가하면 그에 반비례하여 라운드 시간이 줄어드는 방식이다. 기존 LEACH 및 이를 기반으로 하는 프로토콜들의 고정된 라운드 시간은 무선 센서 네트워크가 구성되어 모든 노드가 살아

있는 조건을 기준으로 정해진 라운드 시간이기 때문에 네트워크에 사망한 센서 노드들이 발생되기 시작하면 초기에 정해진 고정된 라운드 시간은 적절치 못 하는 것이다.

본 논문에서 라운드 시간은 네트워크 내에 살아있는 센서 노드들의 수를 기준으로 조절된다. 네트워크 후반부에 살아있는 센서 노드 수가 감소하면 그에 비례하여 라운드 시간도 짧아질 것이다. 짧은 라운드 시간이란 빈번한 클러스터 재구성을 의미하는데 이는 원래 목적과 반대로 더욱 많은 에너지 소비를 야기하게 된다. 이를 방지하기 위해 네트워크 후반부 즉 센서 노드의 잔류 에너지가 일정 레벨 이하일 땐 다시 고정된 라운드 시간을 갖도록 설계하였다. 더불어 감지하는 데이터 특성까지 고려 가능하도록 비교 과정을 추가해 기존 LEACH에서는 할 수 없었던 사용자가 관심 있는 정보만을 감지하게 되며 이러한 과정을 네트워크 종료 시까지 반복할 수 있게 하였다.

IV. 성능분석

이번 장에서는 클러스터링 기법을 사용한 대표적 라우팅 프로토콜인 LEACH와 본 논문에서 제안하는 방법에 대해 성능 분석을 수행하였다. 시간에 대한 생존 노드 수 그리고 시간에 대한 노드의 에너지 소모를 제시하는 평균 에너지 소비량을 성능 평가 기준으로 선택하여 제안한 기법의 네트워크 성능을 비교 분석하고자 하였다.

1. 시뮬레이션 환경

시뮬레이션은 NS-2와 LEACH extension을 기반으로 진행하였다^[8~9]. 시뮬레이션은 넓이 100m×100m의 영역에 랜덤하게 배치된 100개의 센서 노드들 그리고 고정된 위치를 갖는 기지국을 기반으로 진행하였다. 클러스터 형성 과정 및 기타 사항은 LEACH에서 사용한 라디오 전파 모델과 TEEN (Threshold sensitive Energy Efficient sensor Network protocol)의 환경 설정을 그대로 이용하였으며 이를 표 1에 제시한다^[5,10].

더불어 제안 기법 적용 시 비교 분석 과정에 따른 에너지 소비는 극히 적다고 판단하여 무시하고 진행하였으며 간단하게 온도 변화가 랜덤하게 발생하는 조건이므로 균형 잡힌 환경 조건을 위해 여러 번의 시뮬레이

표 1. 시뮬레이션 환경 변수
Table 1. Simulation parameters for the proposed.

Parameter	Value
Base station	(50, 175)
E_{elec}	50nJ/bit
Initial energy/node	2J
E_{DA}	5nJ/bit
ϵ_{amp}	100pJ/bit/m ²
ϵ_{fs}	10pJ/bit/m ²
ϵ_{mp}	0.0013pJ/bit/m ⁴

션을 수행하고 종합함으로써 랜덤하게 발생하는 데이터에 따른 편차를 줄이고자 하였다.

2. 시뮬레이션 결과 및 분석

기존 LEACH 프로토콜에 본 논문에서 제안한 기법을 적용하여 각각 시간 추이에 따른 생존 노드 수 성능 분석을 수행 하였다. 그림 4에서와 같이 기존 프로토콜의 고정된 라운드 시간에 비해 라운드 시간 조절 기법이 적용된 경우 더욱 향상된 결과를 확인 할 수 있었다. 이는 본 논문에서 제시한 생존 노드 수에 비례하는 라운드 시간 조절을 통해 클러스터 헤드의 부담을 상황에 맞게 조절한 것이 주된 이유이다.

기지국에서 수신된 데이터를 제시하는 그림 5 또한 기존 LEACH에 비해 더욱 많은 데이터를 수신했음이 확인되었다. 네트워크 후반부 노드의 잔류 에너지가 많

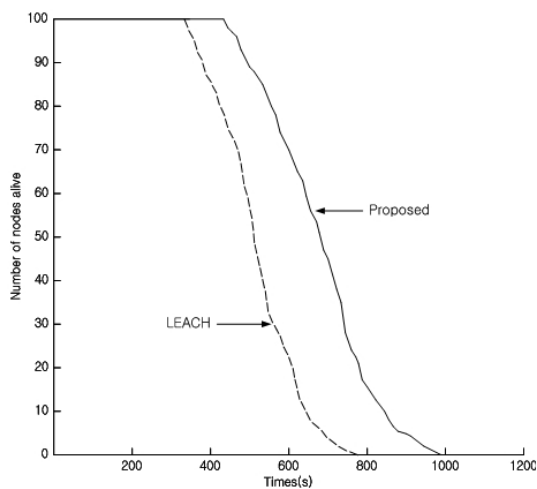


그림 4. 시간에 따른 생존 노드 수
Fig. 4. Number of active nodes.

지 않은 상황에서 고정된 라운드 시간 동안 헤드 역할을 하게 되면 헤드로서의 임무를 마무리하지 못하고 헤드가 사망하게 되는 경우가 발생한다. 이러한 경우 센서 노드들이 감지하고 전송한 데이터가 기지국으로 전송되지 못하고 헤드의 사망과 함께 사라지게 된다. 반면 생존 노드 수에 비례하는 라운드 시간을 사용하는 제안 기법은 초기에 비해 감소된 라운드 시간을 갖고 있기 때문에 클러스터 헤드가 헤드 역할을 하다 사망하는 비율이 감소하고 결국 손실되는 데이터의 양도 기존 프로토콜에 비해 감소하게 되는 것이다.

각 노드의 평균 에너지 소비량을 제시하는 그림 6에서도 기존 LEACH에 비해 좀 더 향상된 성능을 확인할

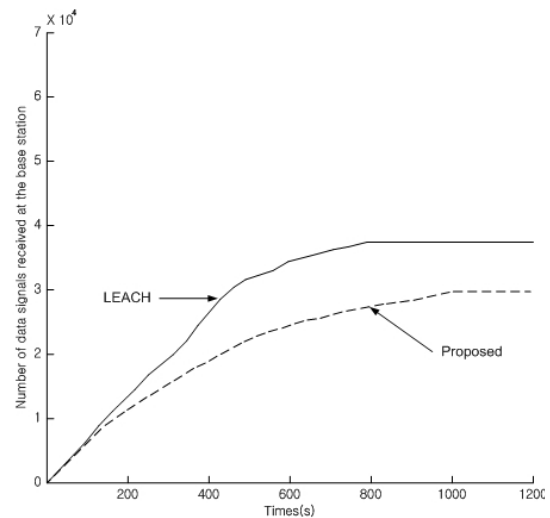


그림 5. 시간에 따른 기지국 수신 데이터
Fig. 5. Total data received at the BS over time.

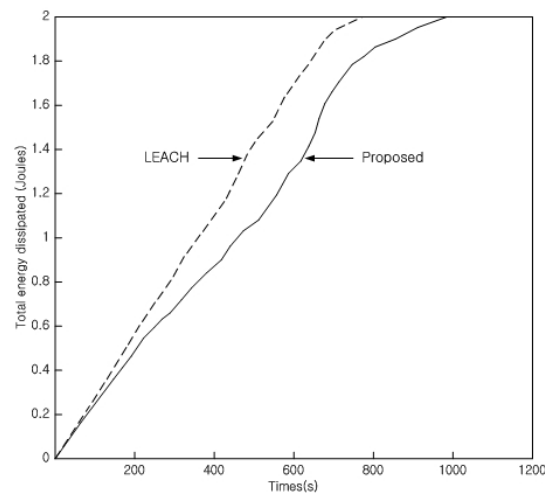


그림 6. 평균 에너지 소비량
Fig. 6. Average energy dissipated.

수 있었다. 라운드 시간 조절에 따라 노드가 클러스터 헤드로서 임무를 수행하는 시간이 감소했기 때문이다. 센서 노드보다 더 많은 에너지를 소비하는 헤드로서의 시간이 감소했기에 노드의 에너지 소비량도 줄어든 것이다.

현실적으로 네트워크가 기동된 이후 시간에 센서 노드가 추가될 수도 있고 구동 초기라 하여도 현장에 뿌려진 센서 노드가 모두 살아있다고 보기 힘든 점을 고려할 때 비록 무작위로 데이터가 발생하는 상황을 가정 한 네트워크이기에 이전에 발생한 데이터와 일치하는 횟수가 몇 번인지에 따라 적용한 프로토콜의 성능이 다소 유동적이라 판단할 수도 있지만 무선 센서 네트워크가 적용되는 현장이 대부분 가혹한 환경이고 성능 분석 시 적용한 100개의 센서 보다 더욱 많은 수의 센서가 배치됨을 고려한다면 라운드 시간 조절 방식은 기존에 비해 더욱 에너지 효율적인 라우팅 알고리즘이라 생각할 수 있다.

V. 결 론

WSN을 구성하는 센서 노드를 역할에 따라 계층적으로 분류하는 라우팅 알고리즘인 LEACH와 이를 기본으로 하는 동종 프로토콜들은 효율적인 에너지 사용을 위해 일정한 라운드 시간 하에서 주로 셋업 단계와 안정 상태 단계의 조절 과정 자체에 관심을 두었다. 하지만 WSN 운용 특성 상 노드가 추가될 수도 혹은 없어질 수도 있기에 본 논문에서는 현재 필드에 살아있는 노드의 수에 따라 라운드 시간을 조절하는 가변적인 라운드 개념을 도입하였다. 헤드 역할을 하는 노드의 에너지 부담을 최소화하고 네트워크 후반부 잔존 에너지가 적은 상태에서 클러스터 헤드 역할을 하다 사망하는 헤드가 최소화 되는 방법을 제안하였다. 여러 번의 성능 분석 결과 평균적으로 10% 가까이 향상된 네트워크 수명과 수신된 데이터 측면에서는 평균 8% 정도의 향상된 성능을 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

[1] W. B. Heinzelman, "Application-specific protocol architectures for wireless networks," Ph.D. dissertation, Mass. Inst. Technol., Cambridge,

2000.
[2] D. Ganesan, A. Cerpa, W. Ye, Y. Yu, J. Zhao, and D. Estrin, "Networking Issues in Wireless Sensor Networks," in Journal of Parallel and Distributed Computing (JPDC), July 2004.
[3] 송창영, 이상원, 조성수, 김성일, 원영진, 강준길, "무선 센서 네트워크에서 데이터 센싱을 고려한 라우팅 기법," 전자공학회논문지, 제47권 IE편 제1호, 41-47쪽, 2010년 3월
[4] S. D. Muruganathan, D. C. F. Ma, R. I. Bhasin, and A. O. Fapojuwo, "A Centralized Energy-Efficient Routing Protocol for Wireless Sensor Networks," IEEE Communication Mag., Vol. 43, Issue 3, pp. S8-S13, Mar. 2005.
[5] W. B. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, "Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks," in Proc. of the Hawaii International Conference on System Science, pp. 3005-3014, Jan. 2000.
[6] 송창영, 김성일, 원영진, 정용진, "클러스터 기반 WSN에서 에너지 효율적 라우팅 기법," 전자공학회논문지, 제47권 IE편 제3호, 41-46쪽, 2010년 9월
[7] W. B. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, "An Application-Specific Protocol Architecture for Wireless Microsensor Networks," IEEE Transactions on Wireless Communications, Vol. 1, No. 4, pp. 660-670, Oct 2002.
[8] W. R. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, "uAMPS ns Code Extensions," LEACH Algorithm Code, http://www.mtl.mit.edu/researchgroups/icsystem/s/uamps/research/leach/leach_code.shtml
[9] UCB/LBNL/VINT. "Network Simulator-ns," <http://www.mash.cs.berkeley.edu/ns>
[10] A. Manjeshwar and D. P. Agrawal, "TEEN: A Protocol for Enhanced Efficiency in Wireless Sensor Networks," Proc. of the Ist International Workshop on Parallel and Distributed Computing Issues in Wireless Networks and Mobile Computing. San Francisco, April 2001.

저 자 소 개

정 길 수(평생회원)
대한전자공학회 논문지
제49권 IE편 제2호 참조

이 원 석(평생회원)
대한전자공학회 논문지
제49권 IE편 제2호 참조

송 창 영(정회원)-교신저자
대한전자공학회 논문지
제46권 IE편 제4호 참조