

개선된 센서 라우팅 방식 : A-PEGASIS

(A-PEGASIS : Advanced Power Efficient GAthering in Sensor Information Systems)

서 창 진 ^{*} 양 진 용 ^{**}

(Changjin Suh) (Jinung Yang)

요약 무선 센서 네트워크(Wireless Sensor Network : WSN)는 센서 노드 자체의 라우팅 기능을 이용하여 센서필드에서 감지한 측정값을 기지 노드로 전송하는 특수한 네트워크이다. WSN의 센서노드는 재충전되지 않는 제한적인 에너지를 사용하기 때문에 에너지 효율을 극대화한 라우팅 기법이 필요하다. WSN의 수명이나 특성은 WSN의 응용과 밀접한 관계가 있기 때문에 다양한 WSN 라우팅 방법이 제안되었다.

본 논문은 PEGASIS의 라우팅 방식처럼 체인 토플로지를 사용하면서 개선된 체인을 사용하고 주기적으로 새로운 체인을 형성하는 방법을 추가하여 성능을 개선한 A-PEGASIS 알고리즘을 제안한다. 또한 우리는 시뮬레이션을 통하여 기존 방식인 LEACH, PEGASIS, PEDAP, PEDAP-PA와 제안된 방식의 성능을 비교하였다. 그 결과 A-PEGASIS는 WSN의 평균 수명이 향상되었으며 동작시간이 종료될 무렵까지 대부분의 센서노드가 동작하는 의미의 우수한 노드 생존성이 있음을 확인하였다.

키워드 : 센서 네트워크, 라우팅, 최소 스패닝 트리, Prim 알고리즘, Kruskal 알고리즘, 체인 토플로지, PEGASIS, LEACH, PEDAP

Abstract Wireless Sensor Network(WSN) is a special network that collects measured data by sensor nodes in the predefined sensor field and forwards them to the base station in a distance using their own routing scheme. WSN requires routing techniques to maximize energy efficiency because sensor nodes have non-rechargeable and thus limited energy. Characteristics of WSN are various according to applications, many of routing algorithms have been proposed.

This paper proposes an algorithm called A-PEGASIS that basically bases on PEGASIS and enhances in two aspects – an elegant chain generation algorithm and periodical update of chains. We compare performance of the previous algorithm of LEACH, PEGASIS, PEDAP and PEDAP-PA with ours through simulation. It confirms that the A-PEGASIS is most superior in terms of average WSN lifetime and high probability of node survival rate during WSN life time.

Key words : wireless sensor networks, routing, minimum spanning trees, Prim algorithm, Kruskal algorithm, chain topology, PEGASIS

1. 서 론

본 논문은 송설대학교 교내연구비 지원으로 이루어졌다.

* 종신회원 : 송설대학교 컴퓨터학과 교수
cjsuh@ssu.ac.kr

** 학생회원 : 송설대학교 컴퓨터학과
yjung98@nate.com

논문접수 : 2005년 11월 29일

심사완료 : 2007년 9월 17일

: 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 : 정보통신 제34권 제6호(2007.12)

Copyright@2007 한국정보과학회

반도체와 통신의 발전으로 무선 센서 네트워크(Wireless Sensor Network : WSN)가 상용화되고 있다. WSN은 각각 분산된 무선 센서를 통하여 지역의 온도와 소리, 움직임, 진동 등의 상태를 감시하는 망이다. WSN은 매우 다양한 분야에서 사용하는데 적용분야에 따라 다양한 형태의 라우팅이 필요하다[1-3].

WSN는 그림 1과 같이 센서 필드 내의 센서 노드를 무선으로 이은 무선망과 일반적인 유선망, 그리고 이 둘을 연결시키는 기지 노드(base station: BS)로 구성된다. WSN의 통신은 센서 노드에서 감지한 측정값을 유

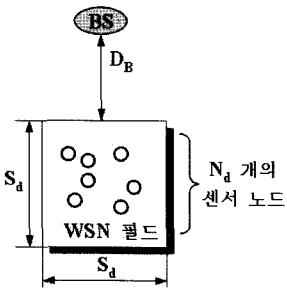


그림 1 고려되는 WSN 환경

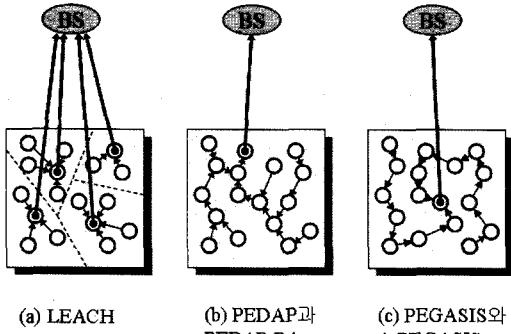


그림 2 여러 WSN 방식에서 사용되는 라우팅 토플로지

선망으로 전달하기 위해서 모든 센서 노드는 측정값을 BS로 전송하며 BS는 통합된 측정값을 유선망으로 전송하는 두 가지 절차가 필요하다[1]. BS는 일반적으로 에너지를 재충전하므로 WSN의 수명은 모든 센서 노드의 측정값을 BS에게 전달하는 과정까지 소모되는 에너지로 결정된다. 모든 센서 노드가 직접 BS와 통신하는 가장 간단한 라우팅 방식은 LEACH[4], PEDAP[5], PEDAP-PA[5], PEGASIS[6] 등에서 점진적으로 개선되었다.

최초의 계층구조 알고리즘인 LEACH에서 센서노드는 직접 BS로 전송하는 대신에 각 지역에 하나씩 선정되는 클러스터 헤더를 거쳐서 BS로 전송한다. 이후에 체인을 사용한 PEGASIS와 최적 스패닝 트리를 사용하는 PEDAP이 제안되었다. 이 논문에서 트리 혹은 체인은 스패닝 트리와 스패닝 체인을 의미하고 노드는 센서 노드를 뜻한다. WSN에서 사용되는 라우팅 알고리즘은 형성하는 토플로지에 따라서 상이한 특성을 갖는다. 그림 2에서 보듯이 LEACH는 이단 스타를, PEGASIS는 트리를, PEGASIS와 본 논문이 제안하는 A-PEGASIS는 체인을 각각 사용한다. 이들을 하나씩 살펴보자.

WSN에서 사용되는 가장 간단한 방법은 방송이다[4]. 이 방식에서 각 노드는 다른 노드를 거치지 않고 직접 BS로 전송한다. 대부분의 경우 BS가 WSN 외부에 위치하고 있기 때문에 이 방식은 WSN 내부에 위치한 노

드가 BS로 송신할 때에 전송에너지가 많이 필요하다는 점과 여러 센서 측정값을 합쳐서 전송할 때에 전송할 크기가 줄어드는 퓨전(fusion) 효과([7,8])를 활용하지 않는 점 때문에 라우팅 에너지가 많이 소모된다[4]. 이를 개선하기 위해서 추후의 라우팅은 멀티 흡 형태로 이루어진다.

그림 2(a)에 표시된 LEACH는 최초의 계층구조를 갖는 라우팅 알고리즘이다. LEACH는 WSN 지역을 여러 개의 클러스터로 나누어서 각 클러스터마다 클러스터 헤더를 분산적으로 선정한다. 노드는 측정값을 자신이 속한 영역을 담당하는 클러스터 헤더로 전송하며 해당 영역의 모든 노드로부터 측정값을 전달받은 클러스터 헤더는 측정값들을 하나의 패킷으로 퓨전하여 BS에게 전송한다. LEACH는 그 결과 멀리 떨어져 설치된 BS와 직접 통신하는 노드의 수를 줄이고 헤더 노드에서의 측정값들을 퓨전하여 라우팅하는 동안에 소모되는 에너지를 감소시켰다. 불행하게도 LEACH는 최소한 TDMA, CDMA, CSMA와 같은 여러 다중화방식을 사용해야 하며, 클러스터 헤더를 분산적이며 확률적인 방법으로 선정하는 과정에서 클러스터 헤더가 한 지역에 밀집되는 현상이 발생한다. 이러한 단점 때문에 측정값을 전달하는 경로의 총길이가 매우 길어져서 클러스터 헤더를 도입하였지만 그 효과가 미미하였다.

PEGASIS는 모든 노드를 한 개의 체인으로 연결한다. 체인이란 양끝 노드를 제외한 모든 중간노드에서 인근 노드 수 혹은 연결차수(node degree)가 2인 특수한 트리이다. BS와의 통신은 체인의 순서에 따라서 한 번씩 돌아가면서 담당한다. 라운드라고 부르는 기본주기마다 노드는 체인을 따라서 미리 정한 최종전달노드에게 측정값을 전송하면 최종전달 노드는 이를 모아서 BS에게 전송한다. PEGASIS에서는 본 논문이 가정하는 100% 퓨전 덕택에 에너지를 많이 소모하는 BS로의 패킷을 전달하는 최종전달노드수가 하나로 축소하였기 때문에 에너지가 절약된다. 체인이란 토플로지는 이처럼 좋은 성질을 가지고 있지만 PEGASIS에서 사용되는 체인은 개선의 여지가 있다. 즉 PEGASIS가 생성한 체인은 평균 길이도 길고 특히 마지막으로 선정된 링크의 길이가 대단히 긴 단점을 갖는다. 그 결과 이러한 긴 링크에 접해 있는 노드는 과도한 전송에너지로 에너지가 일찍 고갈된다.

마지막으로 PEDAP은 최소비용 신장 트리(minimum spanning tree: MST)를 라우팅 트리로 사용한다. PEDAP은 다른 라우팅 알고리즘에 비해 라우팅 트리의 총 길이의 합과 측정값 전송 시에 소모되는 에너지가 가장 적다. 하지만 MST에서는 연결차수가 3개 이상인 노드가 많이 발생하는데 한 노드에서 소모되는 에너지

는 연결차수에 매우 민감하기 때문에 연결차수가 높은 노드는 연결차수가 낮은 노드에 비해서 에너지가 빨리 고갈된다. 이처럼 PEDAP은 최소한의 에너지만을 사용하는 대가로 각 노드에서 에너지 잔량분포를 불균등하게 만든다. 이를 개선하기 위해서 PEDAP-PA에서는 PEDAP에서 사용했던 링크값인 일회전송 에너지값인 w 대신에 w 를 에너지 잔량으로 나눈 값을 사용한다. 이러한 변형은 각 노드에서 에너지 잔량분포를 어느 정도 균일하게 유도하지만 그 대가로 총 소비 에너지가 증가한다.

본 논문은 LEACH에서 정의한 가정을 바탕으로 PEGASIS에서 제안한 방법 중 개선된 체인 알고리즘을 사용하고 일정 주기마다 체인을 새로 정의하는 방법으로 노드의 최소 수명과 평균 수명을 연장하여 WSN의 수명과 품질을 동시에 연장하고자 한다. 센서 노드의 수명은 WSN의 전체의 품질을 결정하고 WSN에 투여할 총 예산을 결정한다. 가령, WSN의 특정 지역에 집중적으로 센서 노드가 소멸된다면 WSN이 감지할 수 없는 지역이 생겨나며 센서노드의 수명이 두 배로 된다면 새로운 센서노드를 추가하지 않고도 WSN의 수명이 두 배가 되므로 투자효율을 개선할 수 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 WSN의 기본적인 특성과 가정을 설명한 후에 본 논문이 얻으려는 목표를 정의한다. 3장에서는 A-PEGASIS의 동작방법과 체인 알고리즘을 소개한다. 4장에서는 모의실험을 통해서 우리가 제안한 방법이 거의 모든 상황에서 평균 수명과 1/8의 노드가 사멸하는 시점의 관점에서 가장 우수함을 밝히고 결론을 맺는다.

2. WSN 라우팅 모델링

2.1 WSN 모델링

다음은 LEACH에 처음 소개한 후 많은 후속 논문에서 널리 사용하고 있는 WSN 모델이다. 본 논문도 이와 동일하게 가정한다.

- BS는 일반 노드가 모여 있는 WSN 필드 바깥에 있으며(그림 1 참조), 충분한 에너지와 강력한 연산능력을 보유하고 있다.
- 노드들은 동일한 성능의 센서와 송수신기를 보유하고 있으며 초기에 동일한 에너지를 가지며 보충되지 않는다.
- 모든 노드와 BS는 이동하지 않는다.
- 노드는 매 라운드에 b 비트 패킷을 생성하고 이를 BS에게 보낸다.
- 완전 퓨전 : 중간노드는 두 개 이상의 b 비트 패킷을 수신하면 자신의 측정값과 모든 수신된 측정값을 압축하는데 그 결과 동일한 길이(b 비트)의 패킷 하나를

생성한다.

- 노드는 패킷을 송수신할 때에만 에너지를 소모한다. 즉 라우팅 트리를 설정하거나 감지하거나 감지된 측정값을 분석할 때에 소모되는 에너지는 무시한다.
- 라우팅 도중에 노드가 에너지를 완전히 소모할 경우 라우팅 경로는 자동으로 재구성된다.
- 모든 노드는 다른 노드 사이의 거리를 알고 있다. BS는 보고된 모든 노드 사이의 거리를 이용해 라우팅 트리를 계산한다.
- 전송은 항상 성공한다.
- $bbit$ 패킷을 무선 송신거리 d 만큼 떨어진 노드에게 송신할 때에 소모되는 에너지 E_{tx} 와 수신할 때 소모되는 에너지 E_{rx} 는 다음과 같다. 이때 송수신기의 소모 에너지인 E_{elec} 는 $50nJ/bit$ 이고 송신 시에 증폭기가 소모하는 에너지인 E_{amp} 는 $0.1nJ/bit/m^2$ 이며 b 는 2000 bit 이다.

$$E_{tx}(d^2) = E_{elec} \cdot b + E_{amp} \cdot b \cdot d^2, \quad (1)$$

$$E_{rx} = E_{elec} \cdot b. \quad (2)$$

또한 본 논문은 각 노드가 식 (1)과 (2)에 따라서 자신이 송수신에 소모되는 에너지를 스스로 계산할 수 있다고 가정하였다. 이 가정은 PEDAP과 PEDAP-PA에서도 동일하게 전제하고 있다. 반면에 이 논문에서는 PEDAP-PA에서 사용했던 에너지 잔량 측정 기능을 사용하지 않는다.

2.2 문제의 정의

본 논문은 다음과 같은 문제를 풀고자 하며 그 해답으로 A-PEGASIS를 제안한다.

문제정의 : 2.1에서 정의한 WSN에서 기존의 방법에 비해서 WSN의 수명을 늘리고 동시에 동작기간 중에 좋은 측정 품질을 유지할 수 있는 라우팅 방식을 찾는다.

우리의 제안은 개선된 체인의 사용과 '수퍼라운드' 개념 도입으로 이루어진다. 우리는 PEGASIS에서 사용하고 있는 노드 체인을 다음의 두 가지 면에서 개선하였다. 첫째로 체인의 평균 링크 길이를 줄였고, 둘째로 체인을 구성하는 링크 중 길이가 긴 링크를 집중적으로 줄였다. 또한 우리는 수퍼라운드마다 체인을 재설정한다. 재설정과정에서 에너지가 고갈된 노드에게는 짧은 링크를 부여하여 전체적으로 균등한 에너지 소비를 유도한다.

본 논문은 WSN의 라우팅 방식의 우열을 T_1 과 $T_{1/8}$, T_{avg} 의 세 가지의 WSN 수명으로 판별한다. 이들은 각각 노드가 최초로 죽는 시점과 전체 노드의 1/8이 죽는 시점, 모든 노드의 평균 수명을 라운드로 표시한 값이다. 이 세 성능요소는 각각 WSN의 품질이 최초로 나빠지기 시작한 시점과 WSN 품질이 제법 나빠진 시점 그

리고 WSN의 평균수명이란 의미를 가진다. 성능 요소 T_{avg} 는 저자가 파악하는 한도에서 본 논문이 최초로 제안하였다.

3. A-PEGASIS

3.1 동작 개요

A-PEGASIS는 수퍼라운드 주기와 라운드 주기마다 특정한 작업을 반복한다. A-PEGASIS에서는 매 수퍼라운드마다 새로운 노드 체인이 만들어진다. 각 라운드 동안에는 설정된 체인을 따라서 생성된 측정값들이 최종 전달 노드에게 전달하면 최종전달 노드는 수집한 데이터를 BS에게로 최종전달한다. 우리는 최종전달 이외의 송수신을 중간전달이라고 명명하며 최종전달 노드 외의 센서노드를 중간전달 노드라고 부른다. 그림 2(c)에서 최종전달 노드는 노드 중간이 겹게 표시되어 있다. 한 수퍼라운드가 종료될 즈음에 BS는 모든 노드에게 새로운 수퍼라운드 동안에 사용할 체인 모양의 스패닝 트리와 각 라운드에서의 최종전달 노드를 계산한 후에 WSN 전체에게 광고한다.

수퍼라운드는 기본적으로 WSN을 구성하는 센서노드 수(N_d)에 따라서 정해진다. 성능평가 결과에 따르면 한

수퍼라운드의 길이가 ($\frac{1}{10} \cdot T_{avg}$)를 넘지 않아야 좋은 결

과를 얻기 때문에 ($N_d > \frac{1}{10} \cdot T_{avg}$)인 경우는 수퍼라운드

의 수를 $\frac{1}{k} \cdot N_d$ ($k=1,2,3..$)로 축소하여 사용한다. 가령 $k=3$ 인 경우는 나누어진 j 번째 수퍼라운드 동안에는 노드 번호를 나눈 나머지 값이 ($j-1$)인 노드만이 최종 전달 동작을 수행시켜서 k 개의 수퍼라운드가 종료될 때에 각 노드가 오직 한 번씩을 최종전달하도록 라운드마다 최종전달노드를 설정한다. 이하에서는 한 수퍼라운드 주기가 노드 수 N_d 인 경우로 단순화하여 언급한다.

체인이 만들어진 상태에서 한 라운드동안에는 다음의 작업이 반복된다. 중간전송은 체인의 양쪽 끝노드에서 동시에 시작한다. 노드 i 가 인접 노드 j 로부터가 측정값을 전달받으면 수신한 측정값과 자신의 측정값을 퓨전한 후에 반대편 인근 노드에게 퓨전한 측정값을 전송한다. 이러한 동작은 현 라운드에서 최종전달 노드로 선정된 노드가 양쪽의 이웃 노드에서 측정값을 전달받을 때까지 반복된다. 최종전달노드가 자신의 양쪽 이웃 노드가 전송한 측정값과 자신의 측정값을 퓨전한 후에 BS로 최종전달한다.

체인 알고리즘은 각각의 무선링크에 길이 C 를 책정한 후 이들의 총길이가 짧은 체인을 찾는다. 서로의 거리가 d_{ij} 인 두 노드 i 와 j 를 잇는 링크 l_{ij} 의 길이는 식

(3)에 따라서 링크 길이 C_{ij} 로 정의된다. 식 (3)은 특정 링크로의 통신은 한 번의 송신과 한 번의 수신으로 이루어지기 때문에 식 (1)과 식 (2)를 합쳐서 만들어진다.

$$C_{ij} = 2 \cdot E_{elec} \cdot b + E_{amp} \cdot b \cdot d_{ij}^2. \quad (3)$$

우리가 사용할 체인 알고리즘은 3.2에서 정의된다. 이에 앞서 여기에서는 PEGASIS에서 사용했던 Prim[9]을 기본으로 한 체인 알고리즘을 소개한다. 체인은 BS와 가장 먼 거리에 위치한 노드 M_1 을 선정한 후에 링크를 하나씩 선택한다. 링크가 하나 선택할 때마다 선택된 링크에 연결된 노드를 서브-체인에 추가한다. k 번째 선택된 노드를 M_k 라고 하자 ($k=1,2, \dots, N_d$, N_d 는 센서노드의 총개수). PEGASIS는 k 개의 노드가 선정된 상태에서 현재까지 선택되지 않은 노드 중 M_k 와 가장 가까운 노드를 찾아서 이를 M_{k+1} 로 선정한다.

3.2 스패닝 체인 알고리즘

사용하는 알고리즘[11]은 크게 세 단계로 구성된다. 첫째 단계는 현재의 수퍼라운드가 종료하기 직전에 현재까지 소모된 에너지를 계산한다. 둘째 단계에서는 첫 단계의 계산 결과 에너지가 특히 많이 고갈된 노드가 다음 수퍼라운드에서는 에너지를 적게 소모하도록 유도하기 위한 사전정지 작업으로 초기 링크를 선정한다. 둘째 단계에서 산출된 체인은 최적 해법이 아니므로 셋째 단계에서 만들어진 체인의 순서를 적절히 바꾸면서 체인의 총 링크의 길이를 줄이고 특히 긴 링크를 짧은 링크로 교체하는 방법으로 체인을 개선한다. 둘째 단계는 총 전송 소모 에너지를 균등하게 하며, 셋째 단계에서는 에너지 균등과 총에너지 소비 감소를 공히 이룬다. 둘째 단계에서의 초기 체인을 작성하는 부분과 셋째 단계의 체인의 길이를 줄이는 방법은 LECSEN에서 제안한 방법을 이용하였다[11].

3.2.1 첫째 단계 - 에너지 잔량 계산

A-PEGASIS에서 각 노드는 에너지 잔량을 측정하는 대신에 다음과 같이 계산에 의해서 에너지 잔량을 추정한다. $E(k,r)$ 은 초기에너지 E_0 에서 노드 k 가 수퍼라운드 ($r-1$)까지 소요한 모든 전송 에너지와 수퍼라운드 r 에서 소요한 최종전달 에너지를 제외한 에너지 잔량의 추정치이다. $E(k,1)$ 은 $(E_0 - E_{tx}(d_{k,B}))$ 를 가진다. $E(k,r)$ 은 $E(k,r-1)$ 로부터 재귀적으로 얻는데 이 경우 노드 k 가 N_d 개의 라운드로 구성된 수퍼라운드 ($r-1$)에서 소요되는 총 중간전달 에너지와 수퍼라운드 r 에서 시행하는 최종전달 에너지를 빼야 한다. $u(k,r-1)$ 를 ($r-1$) 번째 수퍼라운드에서 (N_d-1) 라운드 동안에 중간전달 노드로서 소요한 에너지와 한 라운드 동안에 최종전달 노드로서 소요한 에너지의 합으로 정의하자. A-PEGASIS는 한 수퍼라운드에서 각 노드는 항상 한 번만

최종전달을 수행하므로 우리는 초기값과 재귀식으로식(4)를 얻는다.

$$\begin{aligned} E(k,1) &= E_0 - E_{tx}(d_{kB}^2), \quad u(k,0) = 0, \\ E(k,r) &= E(k,r-1) - u(k,r-1), \quad r = 1, 2, \dots \end{aligned} \quad (4)$$

한편, 체인을 구성한 결과 슈퍼라운드 r 에서 노드 k 와 연결한 노드의 연결차수를 $f(k,r)$ 로 표현하고, 노드 k 와 연결된 두 링크의 거리를 d_{kl} 과 d_{kr} 로 표시하자. $u(k,r-1)$ 은 $(r-1)$ 번째 수퍼라운드에서 $(N_d - 1)$ 라운드 동안에 중간전달 노드로서 소요한 에너지와 한 라운드 동안에 최종전달 노드로서 소요한 에너지의 합이다. 이를 근사식 (5)로 표현한 후에 정리하여 식 (6)을 얻었다. 노드 k 가 끝노드가 아닌 경우에는 전송거리의 제곱을 인접한 링크 거리 제곱의 평균값으로 $\frac{1}{2}(d_{kl}^2 + d_{kr}^2)$ 로 단순화하여 사용한다.

$$\begin{aligned} u(k,r-1) &\cong (N_d - 1)((f(k,r) - 1) \cdot E_{rx} + E_{tx} \left(\frac{d_{kl}^2 + d_{kr}^2}{2} \right) \\ &\quad + (f(k,r) \cdot E_{rx} + E_{tx}(d_{kB}^2))) \quad (5) \\ &= (N_d \cdot f(k,r) - N_d + 1) \cdot E_{rx} + E_{tx}(d_{kB}^2) + \\ &\quad (N_d - 1) \cdot E_{tx} \left(\frac{d_{kl}^2 + d_{kr}^2}{2} \right), \quad r = 1, 2, \dots \quad (6) \end{aligned}$$

3.2.2 둘째 단계 - 제한된 스패닝 체인 알고리즘

둘째 단계에서는 첫 단계에서 계산한 노드 에너지 잔량 $E(k,r)$ 에 따라 모든 노드에 노드 등급을 부여한 후 제한된 Kruskal 스패닝 체인 알고리즘[10]을 시행한다. 우리는 에너지 잔량이 제일 적은 두 노드를 3 등급 노

드로, 에너지가 세 번째부터 $\frac{N_d}{10}$ 번째로 적게 남은 노드를 2 등급 노드로, 나머지를 모두 1등급 노드로 각각 정의한다. 3등급 노드는 끝노드로 선정되어서 가장 적은 중간전달 에너지를 소모한다. 끝노드는 자신이 최종전달 노드일 때를 제외하고는 수신에너지지를 소모하지 않기 때문이다. 추가적으로 3등급 노드와 2등급 노드는 가장 가까운 인근의 노드를 이웃 노드로 미리 선별하여서 중간전달 에너지를 낮춘다.

노드등급이 정해지면 Kruskal이 제안한 MST 알고리즘에 추가적인 제한을 가하여 체인을 구성한다. 체인은 각 노드의 최대 연결차수 f 를 2로 제한한 MST이다. Kruskal 알고리즘은 전체적인 연결여부를 고려하지 않고 다만 루트를 만들지 않는 링크 중 링크 길이가 최소인 링크를 하나씩 추가한다. 이 동작은 MST를 최종적으로 완성될 때까지 반복한다. 작업 중에는 서로 연결되지 않는 여러 개의 서브-체인으로 구성되는 포리스트(forest) 형태를 유지하다가 알고리즘이 진행됨에 따라서 서로 떨어진 서브-체인들을 연결하여서 궁극적으로 스패닝

체인을 완성한다.

둘째 단계에서 노드마다 등급을 정하고 등급에 따라 노드에게 우선적으로 링크를 배정할 수 있는 배경에는 Kruskal 알고리즘이 있다. 이 알고리즘은 중간 형성 과정에서 서로 연결되지 않는 여러 개의 서브-트리인 포리스트를 허용하기 때문이다. 제안된 Kruskal 체인 알고리즘은 k 개의 링크를 선택한 상태에서 $(k+1)$ 번째 링크를 선택하는 기본 동작은 다음과 같다. i) 현재 노드 연결차수가 0이나 1인 노드에 대해서 ii) 현재까지 선택되었던 링크에 의해서 서로 연결되지 않는 두 노드 i, j 를 연결하는 링크값 C_{ij} 가 가장 적은 값을 갖게 하는 두 노드를 i_s, j_s 라고 할 때에 이 두 노드를 연결하는 링크 $l(i_s, j_s)$ 를 포리스트에 추가하고 i_s 와 j_s 의 연결차수를 1씩 증가한다.

다음에는 3등급 노드로 선정한 노드를 어떻게 체인 알고리즘이 양끝 노드로 수용하는지를 설명한다. 이 방법은 그림 3에 나와 있다. 그림 3에서 3등급 노드는 '3'으로 표시되어 있으며 둘째 단계를 거친 후에 만들어진 체인의 양끝 노드는 'e'로 표시하고 있다. 그림 3에서 굵은 선은 여러 개의 링크로 구성된 경로이며 가는 선은 단일 링크이다. 그림 3(a)에서 아랫쪽 세 개의 단일 링크는 제한된 Kruskal 알고리즘이 수행되기 직전에 선택되며, 나머지 경로는 제한된 Kruskal 알고리즘이 수행되면서 완성된다. 이렇게 만든 체인을 그림 3(b)로 전환하면 비로소 둘째 단계가 종료된다. 그 결과 우리는 선택한 두 노드가 양쪽 끝노드로 책정된 체인을 만들었다.

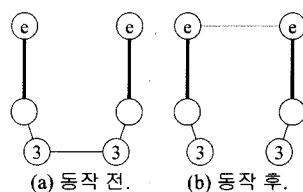


그림 3 체인의 양끝 노드 설정

3.2.3 셋째 단계 - 링크 스와핑

셋째 단계에서는 셋째 단계에서 완성된 체인을 구성하는 몇몇 링크를 그림 4와 같이 연결된 순서를 바꾼다. 연결차수의 제한없이 트리를 구성하는 모든 링크의 총 길이 합을 최소화하는 MST 문제는 쉬운 최적의 해법이 존재하지만 연결차수를 최대 2로 제한하면 유명한 NP-complete 문제인 travelling salesman 문제와 매우 유사하게 변형된다. 이는 최소 길이의 체인을 찾는 문제 역시 NP-complete임을 의미한다.

우리는 가장 짧은 길이의 스패닝 체인을 단번에 찾는 대신에 주어진 스패닝 체인을 부분적으로 개선하면서

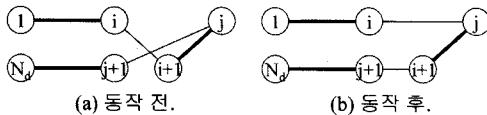


그림 4 링크 스와핑

총 길이를 줄이는 방법을 사용한다. 이 원리를 그림 4에서 이해하자. 그림 4에서 노드는 체인의 순서에 의거해서 1부터 N_d 까지의 일련번호로 표시되었다. 굵은 줄은 여러 개의 링크로 연결된 서브-체인이며 가는 줄은 단일 링크이다. 등급 3 노드와 연결된 링크를 제외한 나머지 링크 중 큰 길이의 $C_{j,j+1}$ 에 대해서 $C_{i,i+1} + C_{j,j+1} > C_{i,j} + C_{i+1,j+1}$ 의 조건을 만족하는 i 를 찾았다고 하자. 이는 전환 이후에 에너지 소모가 줄어드는 노드 i 가 있음을 뜻한다. 그림 4(a)의 체인을 스와핑한 결과 그림 4(b)의 체인을 얻는다. 얻은 체인에서는 j 부터 $i+1$ 에 이르는 서브-체인의 순서가 체인에서 뒤바뀐다. 식 (3)에서 보듯이 링크값 $C_{j,j+1}$ 은 노드 j 와 $j+1$ 사이의 실제 거리를 제공한 값이기 때문에 평균 길이보다 긴 링크 $l_{j,j+1}$ 가 있다면 스와핑 조건을 만족하는 i 를 찾을 수 있다.

3.3 체인의 비교

그림 5는 동일한 WSN에 대해서 PEGASIS와 A-PEGASIS 방식에 따라 생성된 두 개의 체인을 보여준다. 그림 5(a)와 5(b)에서 체인의 양끝 노드는 하단에 위치하며 이들 노드는 화살표로 표시되어 있다. 그림 5(a)는 우측 끝노드에서 시작하여 좌측 끝노드로 체인이 완성되었다. 체인 상에서 좌측 끝노드로부터 첫 번째와 두 번째 링크는 길이가 크며 특히 첫 번째 링크는 매우 긴 것을 알 수 있다. 반면에 그림 5(b)의 체인에서는 큰 길이의 링크가 거의 사라졌다. 그 결과 평균 링크의 길이와 링크 길이의 편차를 동시에 줄였다. 개선된 방법은 일반적으로 육안으로는 개선점을 찾기가 힘들 정도의

정교한 체인을 제공한다.

그림 5(a)에서는 두 링크가 평면상에서 교차된 부분이 다섯 군데 있다. 이중 좌측 끝노드에서 연결된 첫 번째 링크는 너무 길어서 예외로 하고 나머지 네 군데를 점선으로 연결한 타원으로 표시하고 있다. 하반부와 좌상단의 타원에는 우리가 원하지 않은 노드를 포함하고 있어서 해당하는 노드만을 작은 원으로 표시하였다. 그림 5(a)에서 교차하는 다섯 부분 모두는 그림 5(b) A-PEGASIS에서는 더 이상 교차하지 않는다. 반면에 A-PEGASIS는 새로이 교차된 링크를 중앙부분에 포함하고 있는데 이 교차된 부분은 쪽쪽으로 연결되어 있어서 개선할 수 없다.

4. 모의실험 및 분석

우리는 LEACH와 PEGASIS, PEDAP, PEDAP-PA, A-PEGASIS의 성능을 측정하는 시뮬레이터를 만들었다. 모든 알고리즘은 100개의 WSN에 대해서 성능을 측정한 후 평균값을 제시하였다. 노드의 수명과 에너지 잔존형태를 분석하기 위해서 세 가지 시뮬레이션의 결과물을 제시하였다. 우선 다양한 조건에서 노드의 수명을 측정한 테이블과 기준 조건에서 시간축으로 소멸한 노드 수를 그래프로 나타냈으며, 특정 시간에 각 노드의 에너지 잔량 분포를 그렸다. 표 1에 표시된 WSN 환경은 (노드가 보유한 초기에너지, WSN 필드와 BS와의 거리, WSN 필드의 한 변의 길이, WSN을 구성하는 노드 수)로 단순화하여 정의하며 이를 (E_0, D_B, S_d, N_d) 로 표시한다.

표 1은 다섯 가지 프로토콜에 대해서 네 가지 파라미터로 정의한 환경에서의 첫 노드가 죽는 시점(T_1)과 전체 노드의 $1/8$ 이 죽는 시점($T_{1/8}$), 전체 노드의 평균 수명을 각각 보여준다. 네 가지 환경은 (0.25J, 100m, 50m, 100개)를 기본환경으로 정하고 파라미터 하나만을

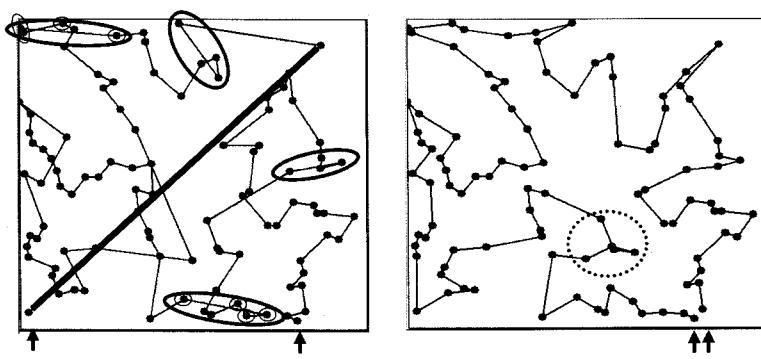


그림 5 기존 알고리즘과 개선된 알고리즘에 의해 생성된 체인 토플로지의 비교

표 1 WSN 환경설정에 따른 노드의 수명

설정된 환경	프로토콜	노드의 수명		
		T ₁	T _{7/8}	T _{avg}
E _d : 0.25J D _B : 100m S _d : 50m N _d : 100개	LEACH	533	568	636
	PEGASIS	604	998	1034
	PEDAP	111	798	1013
	PEDAP-PA	202	866	1043
	A-PEGASIS	<u>998</u>	<u>1023</u>	<u>1060</u>
E _d : 1.00J D _B : 100m S _d : 50m N _d : 100개	LEACH	2184	2291	2539
	PEGASIS	2418	3996	4142
	PEDAP	443	3224	4169
	PEDAP-PA	3070	3807	4224
	A-PEGASIS	<u>4017</u>	<u>4085</u>	<u>4239</u>
E _d : 0.25J D _B : 400m S _d : 50m N _d : 100개	LEACH	96	104	124
	PEGASIS	323	408	433
	PEDAP	8	90	273
	PEDAP-PA	8	91	278
	A-PEGASIS	<u>401</u>	<u>416</u>	<u>446</u>
E _d : 0.25J D _B : 100m S _d : 100m N _d : 100개	LEACH	278	344	427
	PEGASIS	286	773	879
	PEDAP	108	739	943
	PEDAP-PA	191	798	<u>959</u>
	A-PEGASIS	<u>799</u>	<u>863</u>	935

변형하면서 조성하였으며 각 환경에서 가장 좋은 결과는 밀줄과 굵은 글씨체로 강조하였다.

그 결과 A-PEGASIS는 한 가지 경우를 제외하고 모든 환경에서 가장 좋은 결과를 보인다. $S_d = 100m$ 인 경우에 T_{avg} 에서 예외적으로 PEDAP과 PEDAP-PA가 A-PEGASIS를 앞선다. 그 이유는 MST는 체인에 비해서 WSN의 센서 밀도가 낮을수록 체인보다 트리의 장점이 부각되기 때문이다.

그림 6은 기본 WSN 환경에서 노드들이 소멸하는 시간을 라운드 단위로 보여준다. (x,y) 그래프는 x 라운드에 이미 소멸한 노드의 수를 y로 표시한다. 노드의 수명이 비슷할 경우에는 기울기가 적은 곡선 형태를 띠며,

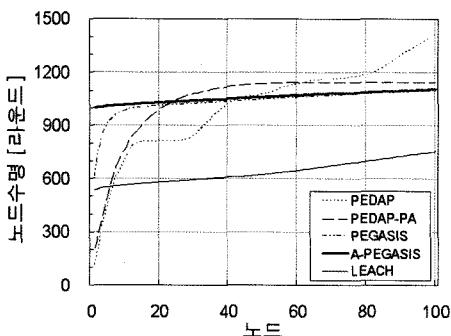


그림 6 (0.25J, 100m, 50m, 100개) WSN에서의 노드 수명의 분포

y가 높은 값을 가질수록 WSN의 수명이 길어진다. 굵은 선으로 표시한 A-PEGASIS는 다른 프로토콜에 비해서 높은 위치에서 편평한 기울기를 지닌 곡선 형태를 보인다. 높은 위치는 WSN 수명이 긴 것을, 편평한 기울기는 노드의 에너지 분포가 균등함을 각각 의미한다. 그럼 7은 A-PEGASIS가 비교되는 모든 방식 중에서 센서노드의 양적인 면(평균수명)과 질적인 측면(사멸되는 시점)에서 가장 좋은 방식임을 증명하고 있다.

그림 7은 기본 WSN 환경에서 600 라운드 시점에서 노드들의 에너지 잔량 분포를 보여준다. (x,y) 그래프는 노드 중에서 x 번째로 에너지가 많이 남은 노드의 에너지를 y 값으로 그렸다. 노드 간의 에너지 배분이 고른 경우는 기울기가 적은 곡선으로 나타난다. 중앙에 굵은 선으로 표시한 A-PEGASIS의 곡선은 여타 곡선에 비해서 매우 편평하다. 이처럼 A-PEGASIS는 전체적으로 에너지를 고르게 소모한다. 맨 아래쪽의 LEACH는 30여 노드가 이 시점에서 소멸하여서 에너지가 0을 나타내고 있으며 남은 노드들도 타 방식에 비해서 에너지 잔량이 적다. PEDAP과 PEDAP-PA의 그래프는 계단 형태를 가지는데 이는 MST에서 노드 연결차수가 따라서 에너지 소모량이 크게 차이가 나 수명도 따라서 구분되기 때문이다.

5. 결 론

WSN에서 노드의 최초 사망 시간과 평균 사망 시간은 WSN의 품질과 수명을 간명하게 알려준다. 좋은 WSN 라우팅 방식은 두 성능 요소에 대해서 공히 큰 값을 가져야 한다. 본 논문은 이 두 성능 요소를 동시에 향상시키는 WSN 라우팅 방식인 A-PEGASIS를 제안하였다.

성능 개선은 정교한 체인을 사용하고 주기적으로 체인을 교체하여서 얻었다. A-PEGASIS는 세 단계에 걸쳐서 링크 길이의 평균과 편차를 동시에 줄인 체인을 생성하여 최초 노드 사망 시간과 평균 사망 시간을 연

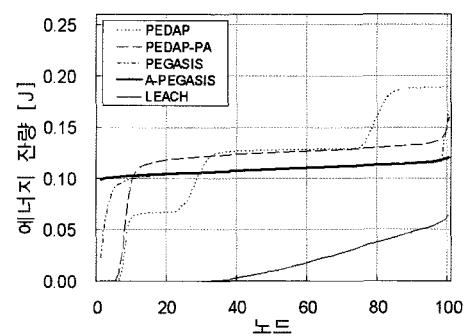


그림 7 (0.25J, 100m, 50m, 100개) WSN에서 600 라운드에서의 에너지 잔량의 분포

장하였다. 또한 수퍼라운드 개념을 도입하여 일정 라운드마다 새로운 체인을 형성하는데 이때에 에너지가 고갈된 노드는 에너지를 절약시켜서 전체 노드가 균등하게 에너지를 소비하도록 유도하였다. 시뮬레이션 결과에 따르면 A-PEGASIS는 모든 환경에서 최초 및 1/8의 노드 사망 시간이 타 방식을 압도하였으며, 평균 사망 시간은 센서간의 거리가 매우 길 경우를 제외하고는 항상 제일 좋은 결과를 보였다.

노드가 동작 중에 사망할 경우에는 라우팅 경로의 복구는 이론처럼 쉽게 해결되지 않는 작업이다. 이를 대비하기 위해서는 복잡한 관리절차가 세워져야 하며 이런 절차 하에서도 한 라운드동안 수집한 측정값을 몽땅 잃어버릴 수도 있다. A-PEGASIS는 모든 노드가 거의 동일한 시점에서 사멸하는 최초의 WSN 라우팅 방식이다. 따라서 A-PEGASIS는 시뮬레이션에서 보여준 우수한 수치 이외에도 재구성에 따른 부담이 거의 없다는 것이 장점이다.

참 고 문 헌

- [1] Jamal N. Al-Karaki and Ahmed E. Kamal, "Routing Techniques in Wireless Sensor Networks : A Survey," IEEE Wireless Communications, Dec. 2004.
- [2] Lan F. Akyildiz, Weilian Su, Yogesh Sankarasubramaniam, and Erdal Cayirci, "A Survey on Sensor Networks," IEEE Communications Magazine, pp. 102-114, Aug. 2002.
- [3] Ruiz, L.B., Nogueira, J.M. and Loureiro, A.A.F., "MANNA: a management architecture for wireless sensor networks," Communications Magazine, IEEE, Volume 41, pp. 116-125, Feb. 2003.
- [4] W. R. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, "Energy-Efficient communication protocol for wireless micro sensor networks," in 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences, pp. 3005-3014, 2000.
- [5] Huseyin Ozgur Tan and Ibrahim Korpeoglu, "Power Efficient Data Gathering and Aggregation in Wireless Sensor Networks," SIGMOD Record, Vol.32, No.4, Dec. 2003.
- [6] S. Lindsey and C. S. Raghavendra, "PEGASIS: Power-efficient gathering in sensor information systems," in IEEE Aerospace Conference, March 2002.
- [7] J. N. Al-Karaki et al., "Data Aggregation in Wireless Sensor Networks - Exact and Approximate Algorithms," Proc. IEEE Workshop. High Performance Switching and Routing 2004. Phoenix, AZ, Apr. pp. 13-21, 2004.
- [8] L. Klein, "Sensor and Data Fusion Concept and Applications," Artech House, Boston, Mar, 1993.
- [9] R. C. Prim, "Shortest Connection Networks and some Generalizations," Bell System Technical Journal, 36, pp. 1389-1401, 1957.
- [10] J. B. Kruskal, "On the Shortest Spanning Subtree of a Graph and the Traveling Salesman Problem," Proceedings of the American Mathematical Society, 7, pp. 48-50, 1956.
- [11] 신지수, 서창진, "링크 교환을 이용한 무선 센서 네트워크용 체인 토플로지: LECSEN", 정보처리학회 논문지 발간예정



서 창 진

1982년 서울대학교 공과대학 제어계측학과 학사. 1984년 서울대학교 공과대학 제어계측학과 석사. 1996년 Univ. of Massachusetts at Amherst, Dep. of Electric and Computer Engineering, Ph. D. 1985년~1990년 전자통신연구원 선임연구원. 1996년~1997년 삼성전자 네트워크 사업부 부장. 1997년~ 송실대학교 컴퓨터학부 (현) 부교수. 주관심분야는 라우팅 기법, BGP, 무선센서네트워크, 이더넷 스위치, MANET



양 진 웅

2003년 한남대학교 컴퓨터공학과(학사) 2006년 송실대학교 컴퓨터학과(석사). 2006년~현재 디지캡 연구원. 관심분야는 센서네트워크 라우팅 알고리즘, Conditional Access System(CAS), Downloadable CAS