

# 베이스 노드의 이동성이 큰 센서 네트워크 환경에서 최소 Wiener 수를 갖는 라우팅 트리를 위한 분기한정 알고리즘

정회원 강 승 호\*, 준회원 김 기 영\*\*, 이 우 영\*\*\*, 종신회원 송 익 호\*\*\*\*,  
정회원 정 민 아\*\*\*\*\*, 이 성 로\*\*

## A Branch and Bound Algorithm to Find a Routing Tree Having Minimum Wiener Index in Sensor Networks with High Mobile Base Node

Seung-Ho Kang\* *Regular Member*, Ki-Young Kim\*\*, Woo-Young Lee\*\*\* *Associate Members*,  
Ickho Song\*\*\*\* *Lifelong Member*, Min-A Jung\*\*\*\*\*, Seong-Ro Lee\*\* *Regular Members*

### 요 약

에너지 효율성과 같은 센서 네트워크에 중요한 요소들을 보장하기 위한 트리기반 프로토콜들이 여럿 제시되었다. 하지만 선박이나 해양 분야와 같이 베이스 노드의 이동성이 큰 네트워크 환경을 전제로 한 토폴로지에 대한 연구는 부족하였다. 본 논문에서는 베이스 노드의 이동성이 큰 센서 네트워크 환경에 적합한 토폴로지로서 최소 Wiener 수 신장트리를 제안한다. 가중치 있는 그래프로부터 최소 Wiener 수를 가진 신장트리를 구하는 문제는 NP-hard로 알려져 있다. 문제 해결을 위해 분기 한정 알고리즘을 설계하고 대표적인 신장트리 중 하나인 최소신장트리를 대상으로 라운드 패킷 전송에 필요한 전송 거리 및 에너지 소모량, 네트워크 수명을 모의실험을 통해 비교하였다. 전송 거리와 에너지 소모량은 제시한 트리가 최소신장트리에 비해 우수하였지만 네트워크 수명은 오히려 열등함을 알 수 있었다.

**Key Words** : MWT, Tree Topology, Sensor Networks, MST, Energy Efficiency, Network Lifetime

### ABSTRACT

Several protocols which are based on tree topology to guarantee the important metrics such as energy efficiency in sensor networks have been proposed. However, studies on the effect of topologies in sensor networks, where base node has a high mobility, are very few. In this paper, we propose a minimum Wiener index tree as a suitable topology to the wireless sensor networks with high mobile base node. The minimum Wiener index spanning tree problem which aims to find a tree with minimum Wiener index from a given weighted graph was proved to be NP-hard. We designed a branch and bound algorithm for this problem. To evaluate the performance of proposed tree, the comparisons with minimum spanning tree in terms of transmission distance, energy consumption during one round, and network lifetime was performed by simulations. Our proposed tree outperformed in transmission distance and energy efficiency but underperformed in lifetime.

※ 이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 대학중점연구소 지원사업으로 수행된 연구임(2009-0093828)

※ 이 논문은 2008년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. D00280)

\* 목포대학교 중점연구소(kinston@gmail.com), \*\* 목포대학교 정보전자공학과 ({danggadu, srlee}@mokpo.ac.kr)

\*\*\* 목포대학교 정보통신공학과(lwy1017@mokpo.ac.kr), \*\*\*\* 한국과학기술원 전기및전자공학과(isong0220@gmail.com),

\*\*\*\*\* 목포대학교 컴퓨터공학과(majung@mokpo.ac.kr)

논문번호 : KICS2010-02-066, 접수일자 : 2010년 2월 8일, 최종논문접수일자 : 2010년 4월 21일

## I. 서 론

저전력 디지털 통합(low-power digital integration) 기술과 MEMS (Micro-Electro- Mechanicla System) 기술의 비약적인 발전은 마이크로 센서 네트워크를 가능하게 하였다<sup>[1],[2],[9]</sup>. 네트워크를 구성하는 작은 센서들은 빛, 소리, 온도, 이미지, 압력, 진동 등의 다양한 형태의 정보들을 감지하는 기능뿐만 아니라 감지된 정보들을 특정 목적에 맞게 처리하는 컴퓨팅 기능과 처리된 정보를 베이스 노드까지 전송하는 기능도 가지고 있다. 이러한 센서들 덕분에 센서 네트워크는 국방 영역을 비롯해 환경 감시, 재해 예방, 의료 보건 분야 및 조선, 해양 영역 등 다양한 곳에서 여러 가지 목적으로 사용되고 있다<sup>[1],[2],[4]</sup>.

하지만 센서들은 대개 소형이며 전력이나 대역폭, 메모리 및 컴퓨팅 능력에서 기존의 애드 혹 네트워크 장치들에 비해 많은 제약이 따른다. 또한 다수의 센서가 무작위로 배치되어 사용되는 경우가 많아 센서 네트워크를 관리하는데 더 많은 기술적 요구가 발생하고 있다.

이 중 에너지의 효율성을 높이며 네트워크의 수명을 연장하기 위한 다양한 연구들이 있어왔는데 특히 클러스터나 신장 트리를 기반으로 한 여러 프로토콜<sup>[7],[9]</sup>이 제시 되었다. 트리를 네트워크 토폴로지로 사용하는 이유는 1) 전송 경로가 단일 경로여서 라우팅이 단순하며 2) 초기에 한 번 형성하면 되므로 오버헤드가 작다는 점 3) 노드 실패 시 지역적 교정으로 네트워크의 유지가 가능하다는 점 4) 비슷한 정보를 통합하여 정보량에 효율성을 기하는 데이터 집적(aggregation)의 사용이 가능하다는 점 등 때문이다.

하지만 기존의 트리 기반 프로토콜들은 대부분 베이스 노드가 고정되어있다는 가정을 전제로 하고 있다. 따라서 트리도 고정되어 있는 베이스 노드를 루트로 하여 형성하는 경우가 많다. 하지만 지질 탐사나 생태 조사, 해양 분야 등 다양한 응용에서 이러한 가정이 언제나 현실성이 있는 것은 아니다. 베이스 노드의 이동성이 큰 네트워크 환경을 고려하여야 하는 경우 또한 많다. 따라서 이러한 베이스 노드의 높은 이동성을 고려한 프로토콜의 개발이 요구되고 있다. 기존의 트리 기반 프로토콜들로 이처럼 이동성이 큰 네트워크 환경에 적용하는 데는 많은 어려움이 있다. 예를 들어 베이스 노드가 이동할 때마다 새로운 트리를 형성하려면 많은 제어 패킷의 전송이라는 오버헤드가 발생하는데 이는 센서

네트워크에서 가장 중요한 문제 중의 하나인 에너지의 낭비를 발생시키며 네트워크의 수명을 단축시킬 여지가 커진다.

본 논문은 베이스 노드의 이동성이 높은 네트워크 환경에 적합한 최소 Wiener 수 신장트리를 센서 네트워크의 토폴로지로 제시한다. 모든 정점간 거리의 합이 최소인 최소 Wiener 수 신장트리는 베이스 노드의 이동성이 높다 하더라도 베이스 노드의 이동시 마다 트리를 다시 형성하지 않아도 데이터의 이동 거리가 다른 트리에 비해서 상대적으로 작아 전송에 따르는 에너지 소모가 크지 않은 장점을 갖는다. 그러나 주어진 그래프로부터 최소 Wiener 수 신장트리를 찾는 문제는 NP-hard 문제이다. 본 논문은 이 문제를 엄밀히 정의하고 문제 해결 방법으로 분기 한정 알고리즘을 설계한다.

논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 최소 Wiener 수를 가진 트리의 특성을 알아보고 주어진 네트워크로부터 이러한 트리를 찾는 문제를 정의한다. 3장에서는 최소 Wiener 수를 갖는 트리를 구하는 NP-hard인 최적화 문제에 대해 최적해를 보장해주는 분기 한정 알고리즘을 제시한다. 4장에서는 패킷의 이동 거리, 에너지 효율성, 네트워크 수명 등을 모의 실험을 통해 대표적인 신장트리의 하나인 최소신장트리와 비교하고 5장에서는 결론과 함께 새로 제시한 토폴로지를 이동성이 높은 센서 네트워크 환경에 성공적으로 사용하기 위해 앞으로 해결해야 할 문제들을 논의 한다

## II. 최소 Wiener 수 신장트리

Wiener 수(Wiener index 혹은 Wiener number)란 주어진 그래프  $G=(V(G), E(G))$ 의 모든 정점 간 거리의 합을 가리킨다. 그래프 내의 임의의 두 정점  $u, v \in V(G)$ 간 거리  $d_G(u,v)$ 는 두 정점 사이의 최단 거리로 정의되며 그래프의 Wiener 수  $\sigma(G)$ 는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\sigma(G) = \frac{1}{2} \sum_{u \in V(G)} \sum_{v \in V(G)} d_G(u,v) \quad (1)$$

Wiener 수는 원래 화학자들이 분자들의 물리적 화학적 구조와 특정 성질과의 관계를 밝히려는 시도에서 제안 되었다. 주어진 그래프를 대상으로 Wiener 수를 계산하는 다양한 알고리즘들이 제시되었는데 그 중 대표적인 것으로  $O(n^3)$ 의 Floyd 알

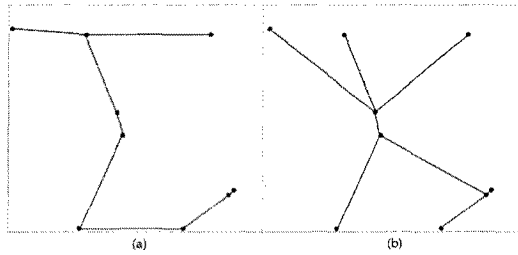


그림 1. (a) 최소신장트리 (b) 최소 Wiener 수 신장트리

고리짐이 있다. 현재 간선(edge)에 가중치가 없는 일반 트리의 경우엔 주어진 정점의 수와 트리의 차수에 대한 최소 Wiener 수 신장트리 형태가 알려져 있다<sup>3)</sup>. 간선에 가중치가 있는 경우에 대해서는 일반적인 트리 형태가 알려져 있지는 않지만 주어진 그래프로부터 Wiener 수를 최소로 하는 신장트리를 구하는 문제는 NP-hard임이 증명되어 있다. 최소 Wiener 수 신장트리 문제를 다음과 같이 엄밀히 정의할 수 있다.

**정의 1. 최소 Wiener 수 신장트리 문제**

가중치 있는 그래프  $G$ 가 주어졌을 때  $V(T) = V(G)$ ,  $E(T) \subseteq E(G)$ 를 만족하는  $G$ 의 모든 신장 트리  $T$ 중  $\alpha(T) \leq \alpha(T)$  인 트리  $T'$ 을 찾아라.

그림 1은 20m×20m인 필드에 9개의 센서를 임의로 배치하고 센서간의 거리를 간선의 가중치로 하여 최소신장트리와 Wiener 수 신장트리를 구한 것이다.

**III. 분기 한정 알고리즘**

이번 장에서는 앞 장에서 제시한 최소 Wiener 수 신장트리 문제를 해결하기 위해서 분기 한정 (Branch and Bound) 알고리즘을 설계한다. 분기 한정 알고리즘은 최적화 문제를 해결하는 대표적인 방법 중의 하나로 언제나 최적해를 보장해 주는 알고리즘이다<sup>6)</sup>. 하지만 한정 함수를 통해 탐색 영역을 줄인다 하더라도 전체 해공간을 대상으로 탐색해야 하기 때문에 센서수가 많아지면 사용하는데 한계가 있다. 분기 한정 알고리즘을 설계한 이유는 정확한 최소 Wiener 수 신장트리의 성능을 알아보고자 한 것이다.

**3.1 해 공간 트리**

분기 한정 알고리즘을 사용하기 위해서는 우선 탐색할 해 공간 트리를 정의해야 한다. 문제의 해인

신장트리를 표현 하는 방법으로 [8]이 제안한 방법을 조금 변형하여 사용하였다. 신장트리는 루트를 제외하면 반드시 하나의 부모 정점을 갖는다. 따라서 그래프의 정점의 개수를  $n$ 이라 하면 하나의 해를 차원이  $n$ 인 벡터  $T(v_1, v_2, v_3, \dots, v_n)$ 로 나타낼 수 있다. 즉, 벡터의 색인은 트리의 특정 정점을 나타내고 해당 벡터 값은 부모 정점을 나타내는 것이다. 이 중 타당한(feasible) 해는 벡터 값 중 하나가 NULL 이어야 하며 사이클이 없어야 한다. 이러한 벡터로부터 해 공간 트리를 생각할 수 있다. 모든 해의 경우의 수는  $O(n^{n-2})$ 가 된다.

**3.2 초기 상한**

최소 Wiener 수를 가진 신장트리를 구하는 문제는 최소화 문제이므로 초기 상한을 사용하면 해 공간 트리의 탐색 영역을 줄일 수 있다. 주어진 그래프에 대한 최소신장트리의 Wiener 수를 초기 상한으로 사용한다. 최소신장트리를 구하는 알고리즘에는 Kruskal 알고리즘, Prim 알고리즘, Solin 알고리즘 등이 있는데 간선의 수가 많은 완전 그래프를 대상으로 하므로 시간 복잡도가  $O(n^2)$ 인 Prim 알고리즘을 사용한다.

**3.3 한정 함수**

분기 한정 함수의 효율성은 한정 함수에 달려 있다. 해공간의 특정 영역은 탐색 중간에 유망성(promising)을 점검하여 탐색을 회피 할 수 있다. 이처럼 안전하며 효율적인 회피는 한정 함수에 의존한다. 우선 필요한 용어들을 정의하고 한정 함수를 제시한다.

정의 2.  $T(v_i, \dots, v_n)$ 를 후보 해라고 하면,  $\sigma(v_i, \dots, v_n)$ 은 후보 해에 대한 Wiener 수를 말하고  $C(v_i, \dots, v_k)$ 는 부모 정점이 결정된 앞  $k$ 개의 정점들을 대상으로 연결된 컴포넌트들을 찾아서 컴포넌트를 구성하는 정점들 간의 거리를 계산한 것이다.  $R(v_i, \dots, v_n)$ 은  $C(v_i, \dots, v_k)$ 에서 계산된 정점들 사이를 제외한 나머지 정점들 간의 거리를 원래 그래프의 간선 중 최소값을 가진 간선 하나만을 사용하여 계산한 것이다.

보조정리 1.  $\alpha(v_i, \dots, v_n) \geq C(v_i, \dots, v_k) + R(v_i, \dots, v_n)$

증명)  $\alpha(v_i, \dots, v_n)$ 에 대한 Wiener 수 계산의 대상이 되는 정점 사이의 개수는  $C(v_i, \dots, v_k)$ 와  $R(v_i, \dots, v_n)$ 의 각각의 정점 사이 개수의 합과 같다. 한편,  $C(v_i, \dots, v_k)$ 에서 계산되는 정점간의 거리는  $\sigma(v_i,$

$\dots;v_n$ )에서와 같다. 그러나  $R(v_i, \dots;v_n)$ 에서의 각 정점 간의 거리는 간선 중 최소 거리이므로 당연히  $\sigma(v_i, \dots;v_n)$ 에서의 정점 간 거리보다 작다. 따라서 앞에서  $k$  정점까지 부모 정점이 결정된 정점과 간선들을 부분 트리로 갖는 어떤 트리도  $C(v_i, \dots;v_k)+R(v_i, \dots;v_n)$ 보다 작은 Wiener 수를 가질 수 없다. 따라서 보조정리는 증명되었다. □

한정 함수는 보조정리 1의 오른쪽 항  $C(v_i, \dots;v_k)+R(v_i, \dots;v_n)$ 을 사용하면 된다. 해공간의 탐색 중 특정 지점(여기서는  $k$ )에서의 한정 함수 값은 해공간을 나타내는 상태공간트리의 해당 지점을 루트로 하는 하위 트리의 모든 해에 대해서 하한값이 되기 때문이다.

분기 한정 알고리즘의 기본 전략은 전체 해의 상한을 갱신해 가며 이를 특정 정점의 한정 함수 값과 비교하여 해공간의 불필요한 부분 트리를 제거

**Function Bounding**

**Input:** node  $b$

**Output:** 하한값  $bound$

**Begin**

$bound \leftarrow 0.0;$

$b.T[b.level]$ 까지의 정점들을 대상으로 컴포넌트 조사;

**for**(각 컴포넌트) **do**

$bound \leftarrow bound +$  컴포넌트 내부 정점간의 거리;

**for**(이외의 정점 사이) **do**

$bound \leftarrow bound +$  정점간 최소 거리;

**End**

함으로써 탐색 공간을 최소화 하려는 것이다. 우선 해공간의 탐색은 하한값 우선탐색 방법을 사용하였다. 즉, 상태공간트리를 탐색할 때 우선 순위 큐를 사용하여 한정 함수의 값이 가장 작은 경로부터 탐색하는 것이다. 탐색의 특정 지점에서 계산한 한정 함수 값이 현재까지 구해진 전체 상태공간의 상한보다 크거나 같다면 하위 트리는 더 이상의 탐색이 불필요하고 오직 작은 경우에만 탐색을 확장한다. 단말 정점에 도달하면 정확한 Wiener 수를 계산하고 현재의 상한과 비교하여 작은 경우엔 상한을 갱신한다. 이와 같은 과정을 우선 순위 큐에 아무것도 남지 않을 때까지 반복해 나가면 최적해를 얻을 수 있다.

분기 한정 알고리즘과 한정 함수의 의사 코드를 제시한다. 자료구조  $node$ 는 상태공간트리의 특정 수준( $level$ )에서의 해 벡터와 하한값을 나타낸다.

**IV. 모의 실험과 결과 분석**

**4.1 실험 환경**

특정 센서 네트워크 표준 기술의 하위 계층 프로토콜들의 효과를 차단하고 순수한 토폴로지 효과만을 검증하기 위하여 모의 실험기(simulator)를 자체 제작하였다. 네트워크 내의 모든 센서는 동일한 종류를 가정하였다. 또한 패킷 충돌에 따른 재전송이나 누화(overhearing)이 없다고 가정하여 이에 따르는 전력 소모도 무시한 네트워크를 가정하였고 20m×20m 공간에 7, 8, 9, 10개의 센서가 임의로 배치된 상황에서 모든 실험이 진행 되었다. 그리고 이제까지 제시된 방법들이 기반하고 있는 신장트리 중 간선의 가중치의 합이 최소가 되는 최소신장트리를 대상으로 성능 비교하였다.

실험상의 제약 분기 한정 알고리즘을 이용해 최적해인 최소 Wiener 수 신장트리를 구하는데 너무 많은 시간이 소요되어 센서 수는 10개를 초과하지

```

Algorithm: Min_Wiener_Tree
Input: 그래프  $G$ , 정점의 개수  $N$ , node를 저장할 우선순위 큐  $PQ$ 
Output: 최소 Wiener 수를 가진 트리  $MWT$ 

typedef struct _node {
    int level; //상태공간트리에서의 레벨
    int T[N]; //해 벡터
    double low_bound; //현재 레벨에서의 하한값
} node
Begin
    node a의 초기화;
    up_bound ← wiener_index(SpanTree( $G$ ));// $G$ 의 최소신장트리를 사용하여 초기 상한 계산
    insert( $PQ$ ,a);
    while(!empty( $PQ$ )) do
        a ← del( $PQ$ );
        if(a.low_bound<up_bound) then
            b.level ← a.level + 1
            for i← 1 to  $N+1$  do //NULL을 포함한 가능한 모든 부모 정점
                b.T[b.level] ← i;
                if(타당한 해) then//사이클이 없고, NULL이 하나
                    if(b.level= $N$ )then
                        w ← wiener_index(b);
                        if(w>up_bound) then
                            up_bound ← w; //상한 갱신
                             $MWT \leftarrow b.T$ ; //최적해 갱신
                    else then
                        b.low_bound ← Bounding(b);
                        if(b.low_bound<up_bound)then
                            insert( $PQ$ ,b);
            end while
End
    
```

못한 점이다. 하지만 최적해를 사용하는 이유는 최소 Wiener 수 신장트리가 센서 네트워크에 미치는 효과를 엄밀히 분석하기 위해서 이다. 실용적인 관점에서는 근사해를 보장해 주는 근사 알고리즘이나 휴리스틱 알고리즘을 개발하여야 할 것이다.

본 논문의 목적은 베이스 노드의 높은 이동성이 있는 센서 네트워크에서의 특정 트리 토폴로지의 효율성을 분석하는 것이다. 따라서 베이스 노드의 높은 이동성을 실험에 반영해야 한다. 베이스 노드의 이동성은 라운드 패킷 전송을 정의하여 실현하였는데, 일반적으로 라운드 패킷 전송이란 네트워크 내의 베이스 노드를 대상으로 모든 센서들에서 동일한 크기의 패킷을 한번 전송하는 것을 말한다. 하지만 본 논문에서는 모든 센서의 근접 위치에 베이스 노드가 한 번씩 방문한다고 가정하고 그 때마다 근접 위치의 센서를 제외한 다른 센서들로부터 동일한 크기의 패킷 전송이 근접 위치의 센서로 보내지는 한 순회의 패킷 전송을 라운드 패킷 전송이라 정의 하였다.

네트워크의 에너지 소비 모델은 [5]의 것을 따른다. [7],[8]에서도 이 에너지 모델을 따랐기 때문이며 이 모델을 따른다 하더라도 성능 평가에 문제가 없을 것으로 판단되었기 때문이다. 표 1은 에너지 소비 모델의 파라미터 값들을 나타낸다.

센서들의 초기 에너지는  $1J$ 을 가정하였고 패킷의 크기는  $1000bit$ 를 가정하였다. 송, 수신에 따르는 전력 소모량은 다음과 같은 수식에 의해 계산할 수 있다.  $k bit$ 의 패킷을  $d$ 미터 떨어져있는 다른 센서에 송신하는데 드는 전력 소모량  $E_{Tx}(k,d)$ 은 식 (2)에 의해 계산한다.

$$E_{Tx}(k,d) = E_{Tx} * k + \epsilon_{amp} * k * d^2 \quad (2)$$

그리고  $k bit$ 의 패킷을 수신하는데 드는 전력 소모량  $E_{Rx}(k)$ 은 식 (3)에 의해 계산한다.

$$E_{Rx}(k) = E_{Rx} * k \quad (3)$$

표 1. 에너지 소비 모델 파라미터

Transmitter electronics ( $E_{Tx}$ )	50nJ/bit
Receiver electronics ( $E_{Rx}$ )	50nJ/bit
Transmitter amplifier ( $\epsilon_{amp}$ )	100pJ/bit/m <sup>2</sup>
Initial sensor energy	1J
Packet size	1000bit

따라서  $d$ 미터 떨어진 연속한 두 정점 간  $k bit$  크기의 패킷 전송에 소모되는 전력량은 식 (2) + 식 (3)임을 알 수 있다.

그리고 실험의 신뢰성을 높이기 위해 필요한 경우 동일한 환경 하에 20개의 사례를 생성하여 실험하고 이를 평균하여 결과 그래프를 작성하였다.

#### 4.2 패킷의 이동 거리

최소신장트리(MST)와 최소 Wiener 수 신장트리(MWT)로 형성된 네트워크에 1 라운드 패킷 전송을 실행하고 이때 전송된 모든 패킷의 이동거리를 센서 수를 달리하여 측정해 보았다. 어느 경우나 1 라운드 패킷 전송에 경유하는 이동 거리는 최소 Wiener 수 신장트리가 작다는 것을 알 수 있다. 예를 들어 센서수가 10인 경우 MST의 평균 패킷 이동거리는 1391.771이고 MWT는 1242.383으로 약 10.7%의 개선이 있는 것으로 나타났다.

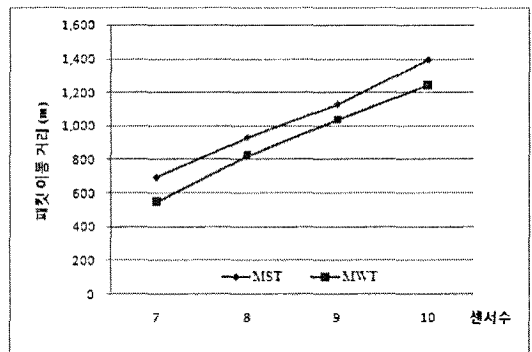


그림 2. 20m×206간에서 MST와 MWT의 1 라운드 패킷 이동 거리 비교

#### 4.3 에너지 효율성

[5]의 에너지 소비 모델을 사용하여 이동 거리의 측정과 동일한 조건하에서 두 트리의 전력 사용량을 측정하였다. 패킷 전송 시에 증폭에 필요한 에너지는 전송거리의 제곱에 비례한다는 사실로부터 전송 거리의 차이가 전력 소모에 미치는 영향이 단순 패킷 전송 거리의 차보다 훨씬 크고 중요하다는 사실을 알 수 있다. 그림 3에서도 이와 같은 사실을 확인할 수 있다. 센서수가 많아지면 전체 전송거리가 커지므로 에너지 효율성의 차이가 더 커지는 것이다. 센서수가 8, 9인 경우는 MWT의 에너지 소모량이 약 16%정도 개선이 있지만 10인 경우엔 약 32%의 개선이 있다.

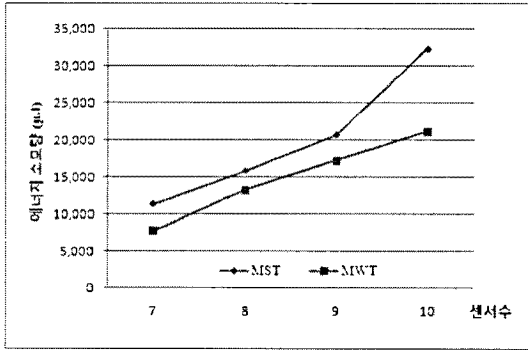


그림 3. 20m×20m 공간에서 MST와 MWT의 1 라운드 패킷 전송에 소모되는 전력량 비교

#### 4.4 네트워크 수명

네트워크의 수명은 최초로 전력이 모두 소모되는 센서가 발생할 때까지의 라운드 수로 측정하였다. 센서 수가 늘어날수록 1라운드에 전송되는 패킷의 수도 많아지기 때문에 네트워크의 수명이 센서 수에 반비례함을 알 수 있다. 하지만 보다 중요한 점은 최소신장트리의 네트워크 수명이 최소 Wiener 수 신장트리보다 길다는 사실이다. 센서가 10개인 경우 MST의 네트워크 수명은 197이고 MWT는 127로 MST가 약 35% 정도 우수하다. 전송 거리의 효율성을 극대화 하는 과정에서 특정 노드의 사용이 상대적으로 많아졌기 때문으로 판단된다. 어쨌든 이는 최소 Wiener 수 신장트리를 베이스 노드의 이동성이 높은 네트워크 환경에서 사용하기 위해 반드시 해결해야 할 문제이다. 트리의 형성 과정에 네트워크의 수명을 고려하도록 하거나 전력이 집중적으로 소모되는 센서를 대체하는 메커니즘 등의 기법이 필요할 것으로 보인다.

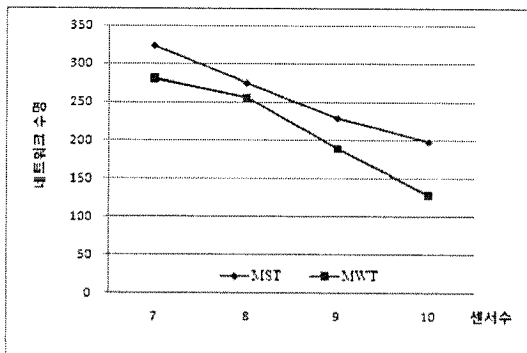


그림 4. 20m×20m 공간에서 MST와 MWT의 네트워크 수명 비교

## V. 결론

본 논문은 베이스 노드의 높은 이동성이 예측되는 센서 네트워크 환경에 적합한 최소 Wiener 수 신장트리를 토폴로지를 제안하였다. 주어진 그래프로부터 최소 Wiener 수 신장트리를 찾는 문제는 NP-hard인 문제이다. 최소 Wiener 수 신장트리의 엄밀한 효율성을 알아보기 위해 최적해를 구하는 분기 한정 알고리즘을 설계하였다.

제안한 최소 Wiener 수 신장트리의 성능을 패킷의 전송거리와 에너지 효율성, 네트워크 수명을 기준으로 최소신장트리와 비교하였다. 1 라운드 패킷 전송에 필요한 전송 거리나 에너지 소모량은 최소 Wiener 수 신장트리가 최소신장트리에 비해 좋은 성능을 보였지만 네트워크 수명은 보다 짧은 사실을 알 수 있었다.

본 논문에서 제안한 트리 토폴로지를 이동성이 높은 네트워크 환경에서 사용하기에는 아직 많은 과제들이 남아있다. 제시한 분기 한정 알고리즘은 최적해를 보장해 주지만 많은 시간을 요구하므로 적은 수의 센서를 사용하는 네트워크에만 사용이 가능하다. 따라서 센서 수가 많은 네트워크 환경에 적합한 근사 알고리즘이나 휴리스틱 알고리즘의 개발이 필요하다. 많은 수의 센서들을 사용해서 여러 요소들에 대한 성능 분석도 이루어져야 한다. 이러한 작업의 결과가 어느 정도 성공적이라면 IEEE 802.15.4와 같은 표준의 물리 계층과 MAC 계층을 고려한 모의 실험과 테스트 베드의 구현 실험도 필요하다.

## 참고 문헌

- [1] I. F. Akyildiz, et al., "Wireless sensor networks: a survey," *Computer Networks*, Vol.38, pp.393-422, Mar., 2002.
- [2] I. F. Akyildiz, et al., "A survey on wireless multimedia sensor networks," *Computer Networks*, Vol.51, pp.921-960, 2007.
- [3] M. Fischermann, et al., "Wiener index versus maximum degree in trees," *Discrete Applied Mathematics*, Vol.122, pp.127-137, 2002.
- [4] D. Ganesan, et al., "Networking Issues in Wireless Sensor Networks," *Journal of Parallel and Distributed Computing*, Vol.64, pp.799-814, July, 2004.

- [5] W. R. Heinzelman, et al., "Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks," *In Proc. of the 33rd Hawaii International Conference on System Sciences*, pp.1-10, 2000.
- [6] J. Hromkovic, *Algorithmics for Hard Problems, 2nd Edition*, Springer, 2004.
- [7] S. Hussain and O. Islam, "An Energy Efficient Spanning Tree Based Multi-hop Routing in Wireless Sensor Networks," *In Proc. of Wireless Communications and Networking Conference*, pp.4383-4388, 2007.
- [8] S. Hussain and O. Islam, "Genetic Algorithm for Energy Efficient Trees in Wireless Sensor Networks," *Advanced Intelligent Environments*, Springer, pp.1-14, 2008.
- [9] R. Khanna, H. Liu, and H. H. Chen, "Self-Organization of Sensor Networks Using Genetic Algorithms," *In Proc. of IEEE Intl. Conf. on Communications(ICC)*, pp.3377-3382, 2006.
- [10] S. Okdem and D. Karaboga, "Routing in Wireless Sensor Networks Using an Ant Colony Optimization Router Chip," *Sensors*, Vol.9, pp.909-921, Feb., 2009.

강 승 호 (Seung-Ho Kang)

정회원

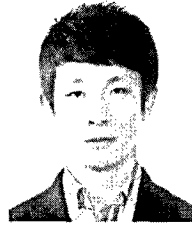


1994년 8월 전남대학교 전산학과 학사  
 2003년 2월 전남대학교 전산학과 석사  
 2009년 8월 전남대학교 전산학과 박사  
 2009년 12월~현재 목포대학교

정보산업연구소 전임연구원  
 <관심분야> 센서네트워크, 생물정보학, 알고리즘

김 기 영 (Ki-Young Kim)

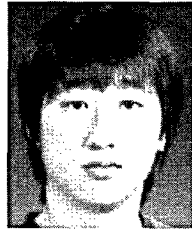
준회원



2009년 2월 목포대학교 정보전자공학과 학사  
 2009년 2월~현재 목포대학교 전자공학과 석사과정  
 <관심분야> 임베디드시스템, 무선통신, 센서네트워크

이 우 영 (Woo-Young Lee)

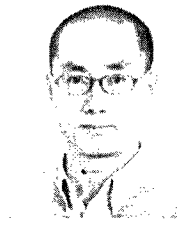
준회원



2009년 2월 목포대학교 정보통신공학과 학사  
 2009년 2월~현재 목포대학교 정보통신공학과 석사과정  
 <관심분야> 무선통신, 안드로이드

송 익 호 (Ickho Song)

종신회원



1982년 2월, 1984년 2월 서울대학교 전자공학과 공학사(준최우등), 공학석사  
 1985년 8월, 1987년 5월 펜실베이니아대학교 전기공학과 공학석사, 공학박사  
 1987년 3월~1988년 2월 벨 통

신연구소 연구원

1988년 3월~현재 한국과학기술원 전기및전자공학과 조교수, 부교수, 교수  
 1995년 1월~현재 한국통신학회논문지 편집위원, 편집 부위원장, 이사  
 2010년 1월~현재 한국정보전자통신기술학회논문지 편집위원, 부회장  
 대한전자공학회, 한국음향학회, 한국통신학회 평생회원, IET 석학회원, IEEE 석학회원  
 <관심분야> 통계학적 신호처리와 통신이론, 신호검파와 추정, 이동통신

정민아 (Min-A Jung)

정회원



1992년 2월 전남대학교 전산통계학과 학사  
1994년 2월 전남대학교 전산통계학과 석사  
2002년 2월 전남대학교 전산통계학과 박사  
2005년 3월~현재 목포대학교 컴

퓨터공학과 조교수

<관심분야> 데이터베이스/데이터마이닝, 생체인식시스템, 무선통신응용분야(RFID, USN, 텔레메틱스), 임베디드시스템

이성로 (Seong-ro Lee)

정회원



1987년 2월 고려대학교 전자공학과 학사  
1990년 2월 한국과학기술원 전기및전자공학과 석사  
1996년 8월 한국과학기술원 전기및전자공학과 박사  
2005년 3월~현재 목포대학교

정보전자공학전공 부교수

<관심분야> 디지털통신시스템, 이동 및 위성통신시스템, USN/텔레메틱스응용분야, 임베디드시스템, 생체인식시스템