

센서 네트워크에서 에너지 효율적인 라우팅을 위한 EVBT 개선방안에 관한 연구

A Study on EVBT Improvement Scheme for Energy Efficient Routing in Wireless Sensor Networks

이상혁¹, 정제희², 윤태복³, 이지형⁴

경기도 수원시 장안구 천천동 300 성균관대학교 정보통신공학부
E-mail: jenas82@nate.com¹, gullingi@hotmail.com², tbyoon@skku.edu³, jhlee@ece.skku.ac.kr⁴

요약

센서 네트워크에서의 에너지 효율적인 통신을 위한 infrastructure를 제공하고자 가상 백본(Virtual Backbone) 개념이 등장했다. 최근에는 트리 구조를 이용하여 가상 백본을 구성한 EVBT (Energy-aware Virtual Backbone Tree)가 제안되었다. 본 논문에서는 EVBT의 문제점을 개선한 m-EVBT(modified-EVBT) 생성 알고리즘에 대해 다룬다. EVBT와 달리 m-EVBT 생성 알고리즘은 백본 트리에 속하지 않은 센서 노드들의 업스트림 링크의 선정에 물리적 거리가 아닌 에너지 소모량 정보를 이용한다. 이 정보는 백본 트리를 만들 때 이용되는 ECR(EVBT Construction Request) 패킷에 포함되어 전송된다. 시뮬레이션을 통해 m-EVBT는 EVBT에 비해 데이터 전송시 에너지를 절약하고, 백본 트리 구축에 드는 추가적인 비용도 작다는 것을 확인할 수 있었다.

Key Words : sensor networks, routing protocol, virtual backbone tree, EVBT

1. 서론

최근 유비쿼터스 환경을 열어줄 핵심 기술로 센서 네트워크가 주목받고 있다. 센서 네트워크는 데이터를 수집하고자 하는 관심 있는 물리적 공간에 뿌려진 센서 노드들의 집합을 의미한다. 센서 노드들의 기본적인 목표는 데이터를 수집하고 처리하며, 수집된 데이터를 외부 네트워크나 컴퓨팅 장비와 연결되어 있는 싱크 노드로 전달하는 것이다. 센서 노드에는 여러 가지 제약 사항들이 있지만, 그 중에서도 교환이 불가능한 배터리로 동작하는 제한된 에너지원이 가장 큰 문제가 되고 있다. 이 때문에 최근 저전력 라우팅 프로토콜에 관한 연구가 활발하다 [1].

이러한 연구의 일환으로, 센서 네트워크에서의 효율적인 통신을 위한 infrastructure를 제공하고자 가상 백본(Virtual Backbone) [2] 개념이 등장했다. 최근에는 트리 구조를 이용하여 가상 백본을 구성한 EVBT(Energy-aware Virtual Backbone Tree) [3]가 제안되었다. EVBT는 싱크 노드를 루트로 하는 트리를 만들고, 데이터를 트리를 따라 올라가면서 릴레이 하는 방식으로 라우팅을 수행한다. 트리에 속하지 않은 노드들은 자신으로부터 가장 가까운 거리에 있는 트리 노드를 자신의 업스트림 링크(upstream link)로 지정하게 된다. 그러나 거리만으로 업스트림 링크를 지정할 경우, 해당 트리 노드까지의 에너지 소모는 최소화할 수 있지만 전체 라우팅 과정에서의 에너지 소모는 최소화하지 못한다는 문제점이 있다.

본 논문에서는 EVBT 생성 알고리즘을 개선한 m-EVBT (modified- EVBT) 생성 알고리즘에 대해 다룬다. EVBT와 달리 m-EVBT 생성 알고리즘은 백본 트리에 속하지 않은 센서 노드들의 업스트림 링크의 선정에 물리적 거리가 아닌 에너지 소모량 정보를 이용한다. 이 정보는 백본 트리를 만들 때 이용되는 ECR(EVBT Construction Request) 패킷에 포함되어 전송된다. 시뮬레이션을 통해 m-EVBT는 EVBT에 비해 데이터 전송시 에너지를 절약하고, 백본 트리 구축에 드는 추가적인 비용도 작다는 것을 확인할 수 있었다.

림 링크의 선정에 물리적 거리가 아닌 에너지 소모량 정보를 이용한다. 이 정보는 백본 트리를 만들 때 이용되는 ECR(EVBT Construction Request) 패킷에 포함되어 전송된다. 시뮬레이션을 통해 m-EVBT는 EVBT에 비해 데이터 전송시 에너지를 절약하고, 백본 트리 구축에 드는 추가적인 비용도 작다는 것을 확인할 수 있었다.

2. 관련 연구

거의 모든 라우팅 프로토콜은 저전력 데이터 전송에 그 초점을 맞추고 있다. SPIN [4], Directed-Diffusion [5], LEACH [6] 등이 대표적인 센서 네트워크 라우팅 프로토콜로 알려져 있다. 위의 프로토콜을 개선한 여러 라우팅 알고리즘이 제안되었고, 최근에는 가상 백본 [2] 개념과 트리구조를 결합하여 통신 infrastructure를 구성함으로써 라우팅을 수행하는 EVBT [3]가 등장했다.

3. m-EVBT 알고리즘

3.1 네트워크 모델

본 논문에서는 다음과 같은 네트워크 모델을 가정한다. 센서 네트워크는 데이터 중심적이며, 하나의 싱크 노드와 다수의 센서 노드의 집합으로 구성된다. 센서 노드의 에너지는 제한적이며, 전송 파워를 조절할 수 있고, 자신의 에너지 레벨을 알 수 있으며, 위치 탐색 시스템(location finding system)을 통해 자신의 위치를 알 수 있다고 가정한다. 싱크 노드는 외부 네트워크나 제어 시스템과 연결되어

있고, 에너지 제한이 없으며, mobilizer를 탑재하여 이동이 가능하다고 가정한다.

3.2 에너지 모델

여러 가지 에너지 모델 중 m-EVBT에서는 the first order energy model을 사용한다 [7].

$$E_{tx}(D) = \alpha_{11} + \alpha_2 D^n \quad (1)$$

$$E_{rx} = \alpha_{12} \quad (2)$$

$E_{tx}(D)$ 는 양 센서 노드의 거리가 D 만큼 떨어져 있는 경우 한 비트를 전송할 때 드는 송신 센서 노드의 에너지 소모량을 나타내며, E_{rx} 는 한 비트를 수신할 때 드는 수신 센서 노드의 에너지 소모량을 나타낸다. α_{11} 은 송신기에서 소모되는 energy/bit을 나타내며, α_2 는 송신시 신호를 증폭시켜 주기 위한 op-amp에서 소모되는 에너지를 나타내고, α_{12} 는 수신기에서 소모되는 energy/bit을 나타낸다.

그러나 긴 거리를 통해서 데이터를 전송하게 되면 에너지 소모량이 D 의 n 승으로 증가하기 때문에 긴 거리를 전송하는 것보다 짧은 거리로 전송하면 더 적은 에너지를 소모하게 된다. 송신 노드에서 d 만큼 떨어진 거리에 있는 릴레이 노드로 데이터를 릴레이 할 때, 릴레이 노드의 한 비트당 에너지 소모량은 다음과 같다.

$$E_{relay}(d) = \alpha_1 + \alpha_2 d^n, \alpha_1 = \alpha_{11} + \alpha_{12} \quad (3)$$

센서 노드는 송신시 뿐만 아니라 수신시에도 에너지를 소모하기 때문에, 너무 많은 릴레이 노드를 거쳐서 데이터를 전송하면 오히려 직접 목적지로 데이터를 전송하는 것 보다 비효율적일 수 있다. [7]에서는 거리 D 만큼 떨어진 노드로 데이터를 전송할 때의 에너지 소모량이 다음과 같다는 것을 증명하였다. 여기서 d_{char} 는 특성 거리(characteristic distance)라고 하며 식(5)와 같이 정의된다.

$$E_{path} \geq \alpha_1 \frac{n}{n-1} \frac{D}{d_{char}} - \alpha_{12} \quad (4)$$

$$d_{char} = \sqrt[n]{\alpha_1 / (\alpha_2(n-1))} \quad (5)$$

수식(4)와 (5)가 의미하는 바는, 만약 센서 노드의 에너지 모델을(1)과 (2)로 하였을 경우 d_{char} 에 근접한 거리로 데이터를 릴레이할 때 가장 적은 에너지가 소모된다는 것이다.

3.3 m-EVBT 알고리즘

m-EVBT는 싱크 노드를 루트로 하는 트리이다. 센서 노드에서 센싱된 모든 데이터는 m-EVBT 알고리즘에 의해 생성된 백본 트리를 따라서 루트인 싱크 노드로 전송된다.

트리의 생성은 싱크 노드가 ECR(EVBT Construction Request) 패킷을 자신의 전송 가능 범위내에 브로드캐스트하면서 시작된다. ECR 패킷을 받은 센서 노드들은 자신이 트리에 속할지 여부를 결정하게 된다. 이 결정에 사용되는 개념이 Fitness Indicator(f_i)이다. 모든 노드는 자신의 f_i 를 독립적으로 계산한다. f_i 의 계산식은 다음과 같다.

$$f_i = c_1 f_d + c_2 f_e + c_3 f_\beta \quad (6)$$

$$f_d = 1 - \min(1, \text{abs}(d - d_{char}) / d_{char}) \quad (7)$$

$$f_e = e$$

$$f_\beta = 1 - \text{abs}(\beta) / \pi$$

$$c_1, c_2, c_3 \geq 0, c_1 + c_2 + c_3 = 1$$

$$\text{where } e \in [0, 1], \beta \in [-\pi, \pi]$$

f_d 는 ECR 패킷을 보낸 노드와의 거리, f_e 는 자신의 에너지 잔량, f_β 는 링크의 각도이며, 각각 c_1, c_2, c_3 의 가중치를 가지고 있다.

f_i 의 값이 큰 센서 노드일수록 백본 트리에 속하게 될 가능성이 높다. 우선, (7)에서 f_i 는 $[0, 1]$ 의 범위로 제한되는 것을 알 수 있다. f_d 는 d_{char} 의 거리일 때 가장 큰 값을 가지게 되는데, 이는 가장 효율적인 전송이 이루어지도록 d_{char} 만큼 떨어진 노드를 백본 트리에 포함시킬 가능성을 높여주겠다는 의미이다. f_e 에서는 에너지 잔량이 높은 노드를 선택할 확률을 높이겠다는 뜻이며, f_β 는 백본 트리가 가능하면 직선으로 뻗어나가게 해주는 역할을 한다.

f_i 는 M 부분으로 나누게 된다. [3]에서는 보통 3 또는 4 부분으로 나누는 것이 적합하다고 말하고 있다.

$$0 = f_i(0) < f_i(1) < f_i(2) < \dots < f_i(M) = 1 \quad (8)$$

ECR을 받은 노드들은 자신의 f_i 를 계산하여 자신의 f_i 값에 해당하는 딜레이만큼 대기하게 된다. 딜레이 타임 t_d 는 다음과 같이 정의한다.

$$t_d = ((M - k) + \text{random}()) * s \quad (9)$$

$$\text{for } f_i \in [f_i(k), f_i(k+1)]$$

여기서 s 는 미리 할당되어 있는 수 ms 단위의 작은 딜레이 타임을 말한다. $\text{random}()$ 은 0과 1사이의 수를 반환해주는 함수이다.

ECR 패킷을 받은 노드는 자신의 f_i 를 계산함으로써 딜레이 t_d 만큼 대기하게 된다. 만약 t_d 가 만료되기 전에 또 다른 ECR 패킷을 전송받지 못한다면 그 노드는 백본 트리에 속하는 노드가 되고 ECR 패킷을 보낸 노드를 업스트림 링크로 지정하게 된다. 반대로 t_d 가 만료되기 전에 다른 노드로부터 ECR 패킷을 재전송 받게 되면 해당 노드는 자신이 백본 트리에 속하지 않는 것으로 판단하게 된다.

m-EVBT 알고리즘의 기술을 용이하게 하기 위해 노드를 다음과 같이 구분 짓는다.

- 흰색 : ECR 패킷을 전혀 받지 않은 노드
- 검은색 : 백본 트리에 속한 노드
- 회색 : ECR 패킷을 받고 아직 t_d 가 만료되지 않은 노드
- 파란색 : 백본 트리에 속하지 않는 노드

m-EVBT의 생성전의 모든 센서 노드들은 흰색 노드이고 백본 트리의 생성이 끝나면 모든 노드는 검은색 노드이거나 파란색 노드이다.

EVBT 생성 알고리즘과 달리 m-EVBT의 ECR 패킷에는 해당 검은색 노드로부터 싱크 노드까지의 소모 에너지량 정보를 포함하고 있다. m-EVBT 생성 알고리즘은 다음과 같다.

- 싱크 노드는 검은색 노드이며 최초로 ECR 패킷을 브로드캐스트 한다.

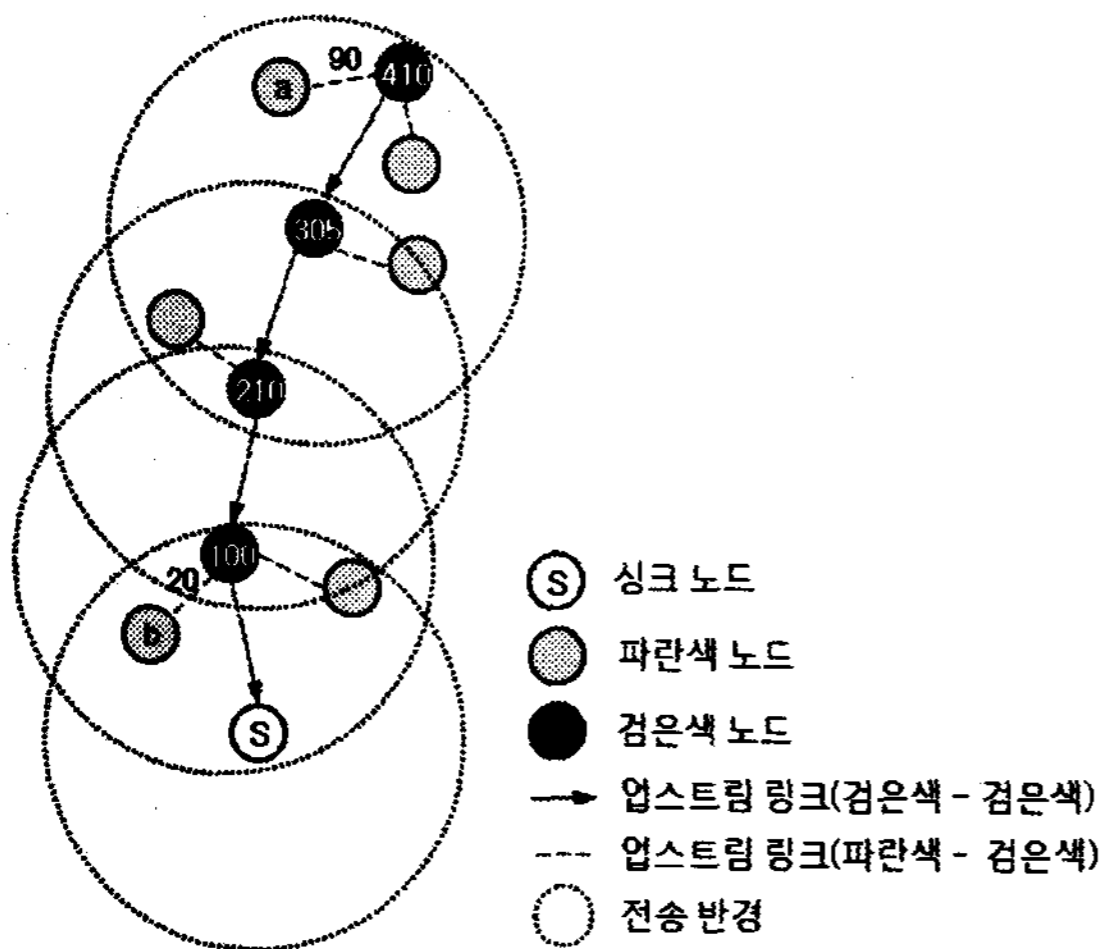


그림 1. EVBT를 이용한 백본 트리 예시.

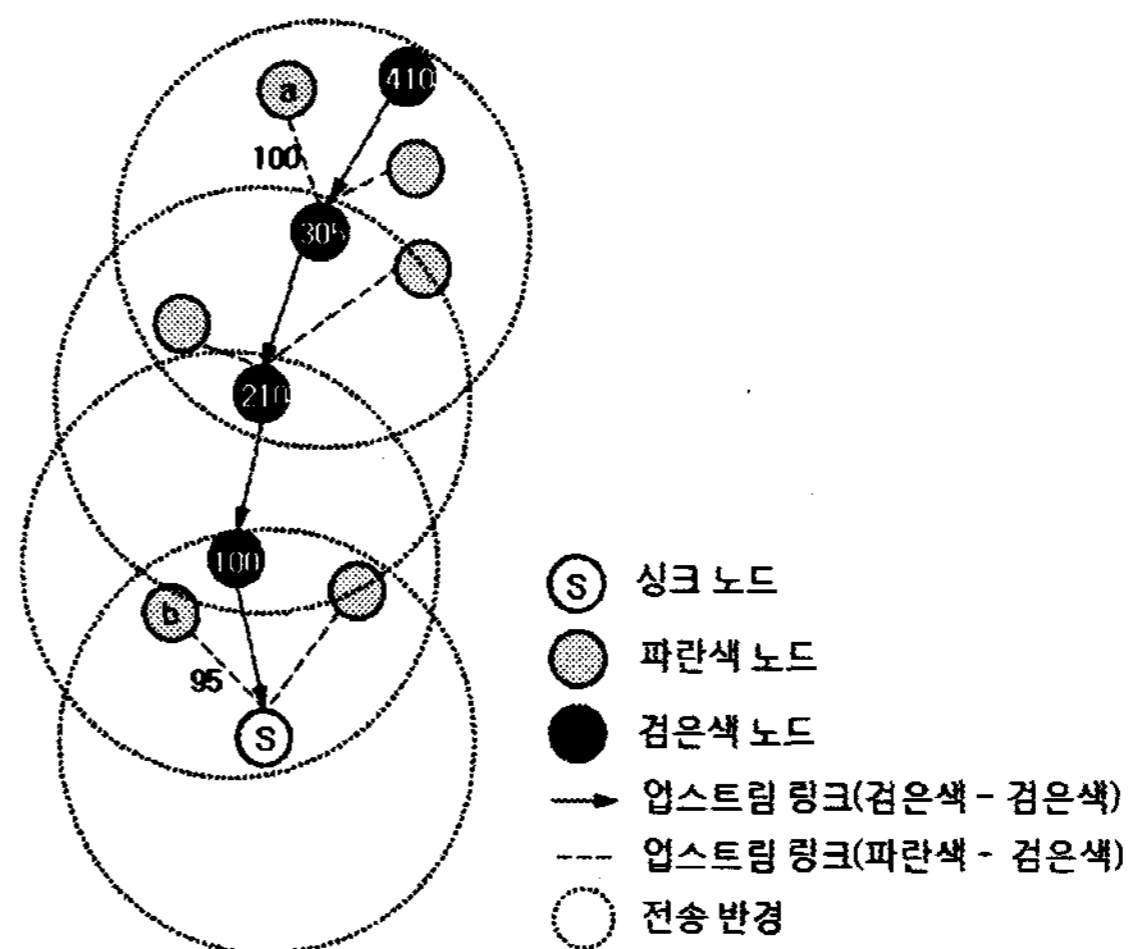


그림 2. m-EVBT를 이용한 백본 트리 예시.

- ECR 패킷을 전송받은 흰색 노드들은 회색 노드로 변한다. 이 노드들은 (6), (7), (8), (9)의 수식을 사용하여 f_i 를 계산하고 이에 따른 t_d 만큼의 딜레이를 가진다. 또한 자신의 업스트림 링크로 ECR 패킷을 보낸 노드를 지정하게 된다.
- 회색 노드가 ECR 패킷을 다시 수신하면 그 노드는 파란색 노드가 된다.
- 회색 노드가 t_d 의 딜레이동안 어떠한 ECR 패킷도 받지 않았다면 검은색 노드가 된다.
- 파란색 노드가 ECR 패킷을 다시 수신하면, ECR 패킷에 저장되어 있는 누적 에너지량 정보를 토대로 가장 에너지 효율적인 노드를 자신의 업스트림 링크로 재지정한다.

EVBT 방식에서는 파란색 노드가 자신으로부터 거리가 가장 가까운 검은색 노드를 업스트림 링크로 지정한다. 하지만 이렇게 할 경우 백본 트리에도달할 때까지의 에너지 소모는 최소화할 수 있지만, 백본 트리상에서 데이터가 릴레이될 때 무의미한 에너지 소모를 야기하는 문제점이 있다. 즉, 전체적인 라우팅 과정에서는 오히려 거리가 가장 가까운 검은색 노드를 업스트림 링크로 선정하는 것이 비효율적인 경우가 많다는 것이다. 이 문제점을 해결하기 위해서 m-EVBT에서는 ECR 패킷에 해당 검은색 노드로부터 싱크 노드까지의 소모 에너지량 정보를 포함하여 전송한다. 파란색 노드의 업스트림 링크는 이 정보를 토대로 가장 에너지를 절약할 수 있는 검은색 노드를 가리키게 된다.

그림 1와 그림 2에 각각 EVBT와 m-EVBT를 이용하여 생성된 트리의 예가 제시되어 있다. 검은색 노드안에 쓰여 있는 숫자는 각 검은색 노드로부터 싱크 노드까지 1bit의 데이터를 전송하는데 소모되는 에너지량을 의미한다. 파란색 노드는 ECR 패킷에 포함되어 있는 소모 에너지량과 자신으로부터 검은색 노드까지 1bit의 데이터를 전송하는데 소모되는 에너지량을 계산한 후 그 둘을 합해서 값이 더 작은 검은색 노드를 자신의 업스트림 링크로 지정하게 된다. 노드 a는 $410+90 > 305+100$ 의 소모 에너지 계산을 통해 자신의 업스트림 링크로 305 검은색 노드를 지정하게 된다. 노드 b의 경우에도 동일한 에너지 비교를 통해 업스트림 링크를 결정하게 된다. 이와 같은 방법을 통해서 m-EVBT는 가장 에너지 효율적인 파란색 노드의 업스트림 링크

를 결정해 줌으로써, 데이터 전송시의 에너지를 절약할 수 있다.

m-EVBT는 또한 [3]에서 소개된 백본 트리의 유지와 관련된 여러 가지 방법들을 그대로 사용할 수 있다.

4. 성능 분석

EVBT와 m-EVBT의 성능 비교를 위해, Java를 이용하여 시뮬레이터를 구현하였다.

시뮬레이션을 위해 일반적인 변수 값들을 사용했다. 수식 (1)과 (2)에서 $n=2$, $\alpha_{11}=\alpha_{12}=80nJ/bit$, $\alpha_2=100pJ/bit/m^2$ 로 설정하도록 한다. 따라서 수식 (5)에 따라 $d_{char}=40m$ 가 된다. 그리고 수식 (6)에서 $c_1=c_2=c_3=1/3$ 로 설정하였다.

논의를 간단히 하기 위해 모든 노드들의 성능은 동일하다고 가정한다. m-EVBT는 ECR 패킷에 소모 에너지량 정보를 추가로 전송해야 한다. 따라서 ECR 패킷이 2bytes 더 큰 것으로 가정했다. 그리고 백본 트리가 한 번 만들어지면 모든 노드들이 적어도 한 번씩은 싱크 노드로 데이터를 전송하는 것으로 가정하였다.

4.1 데이터 전송시 에너지 소모량 비교 실험

데이터 전송시의 에너지 소모량 비교를 위해서 [3]에서 제시한 것과 동일한 실험을 실시해보았다. $600m \times 600m$ 필드에 10,000개의 노드가 있다고 가정한다. 각 노드는 필드의 한가운데에 있는 싱크 노드로 20bytes의 데이터를 트리를 따라서 전송한다. m-EVBT의 에너지 소모량은 백본 트리의 추가적인 구축비용을 뺀 값을 알려준다. 추가적인 실험으로 $100m \times 100m$ 필드에 100개의 노드가 있다고 가정하여 동일한 실험을 실시해보았다.

그림 3와 그림 4에서 각각의 결과를 보여주고 있다. 그림에서 살펴볼 수 있듯, m-EVBT는 모든 경우에 있어 EVBT에 비해 에너지를 절약하는 것으로 나타났다. 또한 전송 반경이 커질수록 절약된 에너지량이 점점 더 증가하는 경향성을 볼 수 있다.

4.2 백본 트리 구축비용 비교 실험

두 번째 실험은 m-EVBT를 이용했을 때 절약되는 에너지량이 센서 네트워크의 다양한 환경에서

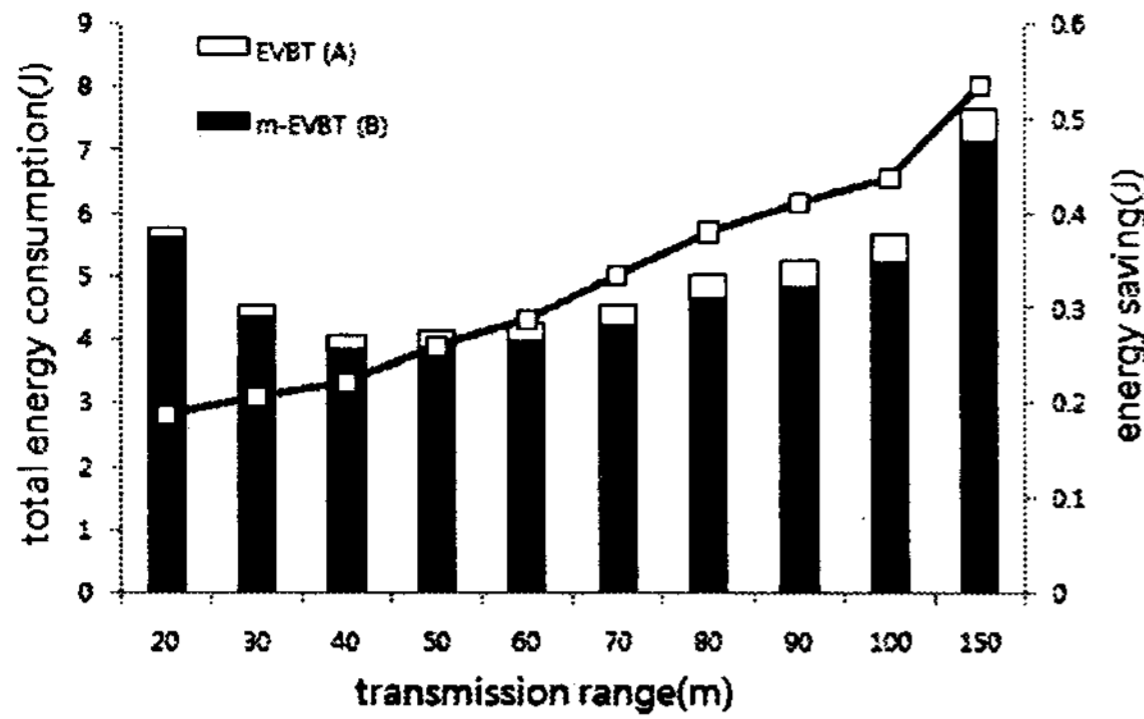


그림 3. 총 에너지 소모량 그래프 1.

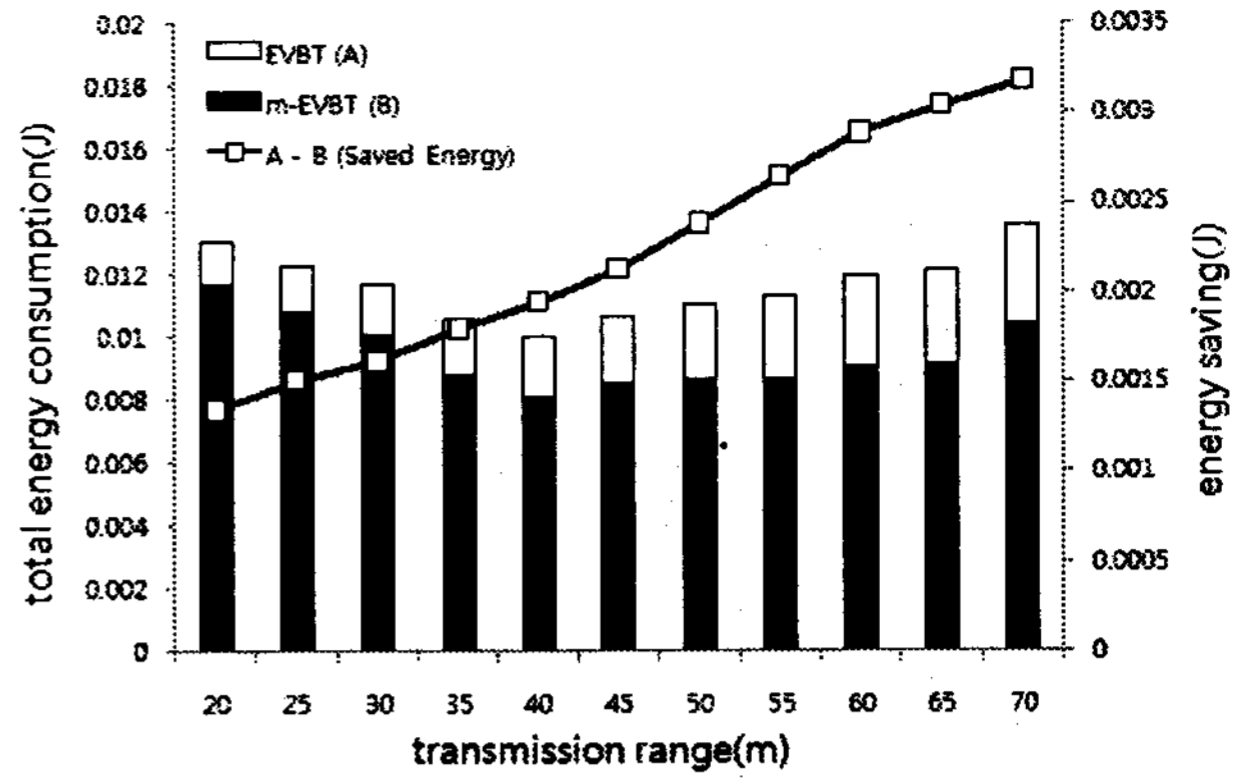


그림 4. 총 에너지 소모량 그래프 2.

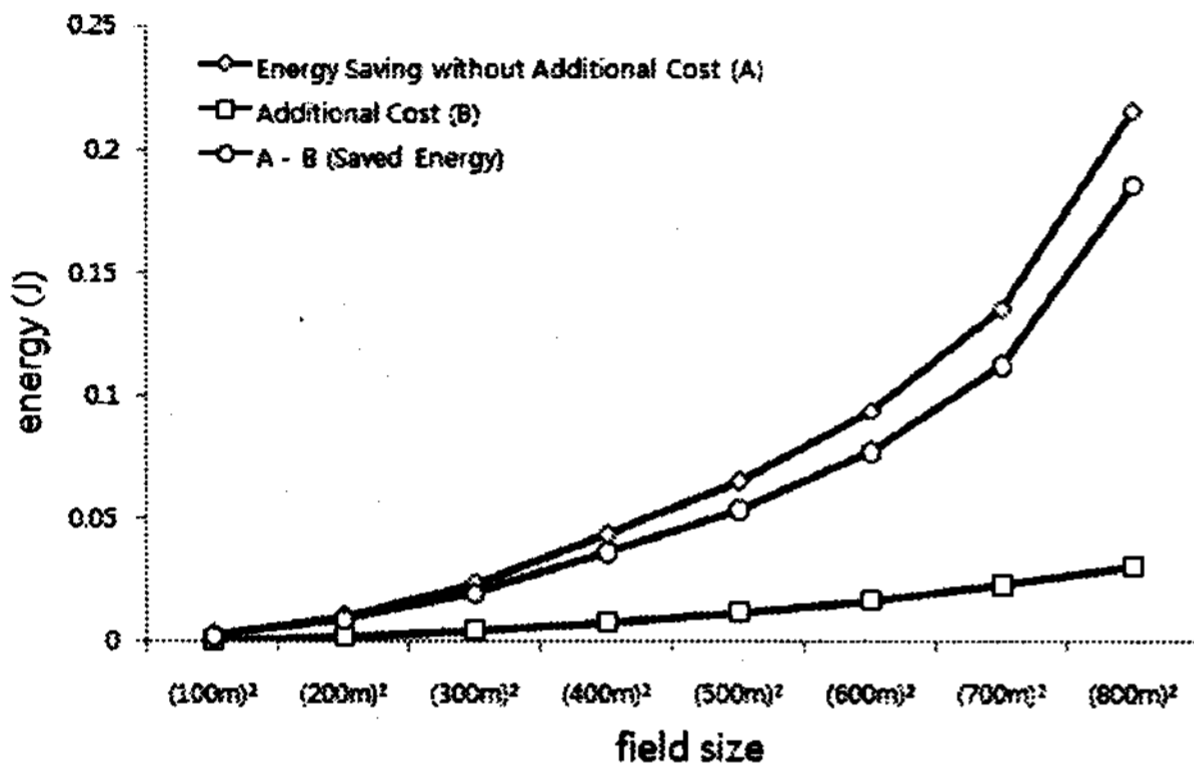


그림 5. 전송 반경 40m에서의 절약된 에너지량 그래프.

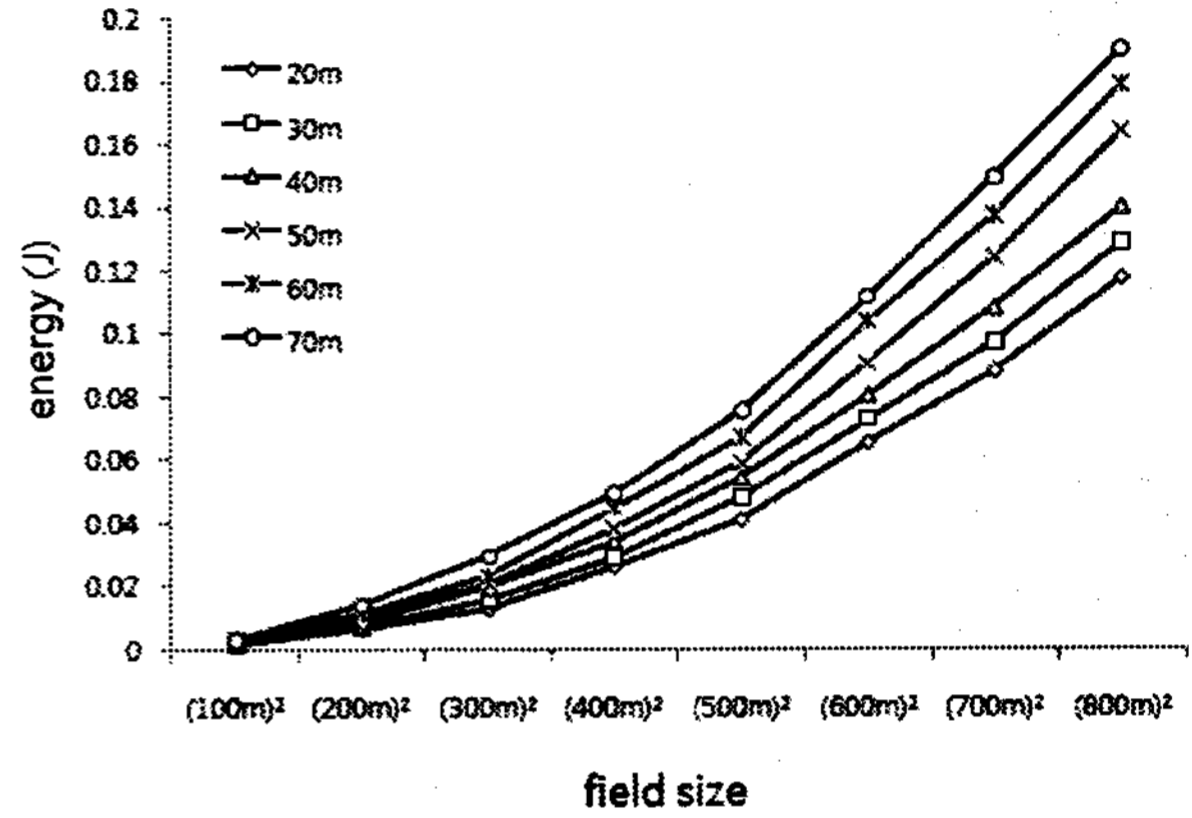


그림 6. 전송 반경에 따른 절약된 에너지량 그래프.

추가적인 트리 구축비용을 상쇄함을 보이기 위한 실험이다.

각 필드의 크기에 따라서 노드의 개수는 밀도가 0.01이 되도록 했다. 첫 번째 실험은 각 필드 사이즈에 따라서 전송 반경이 40m(=d_{char})일 때 절약된 에너지량을 측정했다. 그림 5에서 모든 경우에 절약된 에너지량이 추가적인 트리 구축비용을 상쇄함을 볼 수 있으며, 필드 사이즈가 커질수록 절약되는 에너지량도 따라서 증가하는 것도 살펴볼 수 있다.

두 번째는 전송 반경이 40m일 때뿐만 아니라 20m에서 70m까지 늘려가면서 실험해보았다. 그림 6에서 실험결과를 보여주고 있다. 역시 모든 경우에 절약된 에너지량은 0보다 큰 것을 알 수 있다. 또한 필드 사이즈가 커질수록, 전송 반경이 커질수록 절약된 에너지량은 더 커지는 것을 살펴볼 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 센서 네트워크에서의 범용 통신을 위한 EVBT 생성 알고리즘의 개선 버전인 m-EVBT 알고리즘을 제안하였다. m-EVBT의 핵심 아이디어는 ECR 패킷에 소모 에너지량 정보를 추가하여 전송해줌으로써 파란색 노드가 가장 에너지 효율적인 업스트림 링크를 선택하도록 하는 것이다. 제안된 알고리즘이 기존의 알고리즘에 비해 데이터 전송시 에너지를 적게 소모하며, 추가적인 백본 트리의 구축비용도 매우 작음을 시뮬레이션을 통해 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] K. Akkaya, M. Younis, "A survey on routing protocol for wireless sensor networks," Ad Hoc Networks, Vol. 3, pp. 325-349, 2005.
- [2] M. Gerla et. al., "Multicluster, mobile, multimedia radio networks," ACM J. Wireless Networks, Vol. 1, No. 3, pp 255-265, 1995.
- [3] Z. Bosheng, et. al., "An energy-aware virtual backbone tree for wireless sensor networks," Proc. of IEEE GLOBECOM, Vol. 3, pp 162-167, 2005.
- [4] W. R. Heinzelman, et. al., "Adaptive Protocols for Information Dissemination in Wireless Sensor Networks," ACM/IEEE Conf. on Mobile computing and networking, pp.174-185, 1999.
- [5] C. Intanagonwiwat, et. al., "Directed Diffusion: A Scalable and Robust Communication Paradigm for Sensor Networks," Conf. on Mobile Computing and Networking, pp. 56-67, 2000.
- [6] W. R. Heinzelman, et. al., "Energy-efficient communication protocols for wireless microsensor networks," Int'l conf. on System Sciences, pp. 179-193, 2000.
- [7] M. Bhardwaj et. al., "Upper Bounds on the Lifetime of Sensor Networks," IEEE Int'l conf. on Comm., Vol. 3, pp. 785-790, 2002.