

센서네트워크에서 전력 조절에 의한 에너지를 효율적으로 사용하는 라우팅

윤 형 옥(尹亨旭), 이 태 진(李泰珍)

성균관대학교 정보통신공학부

전화 : (031) 290-7982 / 팩스 : (031) 290-7982 / H.P 번호 : 017-238-0820

Energy Efficient Routing with Power Control in Sensor Networks

Hyung-Wook Yoon and Tae-Jin Lee

School of Information and Communication Engineering Sungkyunkwan University

E-mail : {hwoon,tjlee}@ece.skku.ac.kr

Abstract

A sensor network consists of many low-cost, low-power, and multi-functional sensor nodes. One of most important issues in of sensor networks is to increase network lifetime, and there have been researches on the problem. In this paper, we propose a routing mechanism to prolong network lifetime, in which each node adjusts its transmission power to send data to its neighbors. We model the energy efficient routing with power control and present an algorithm to obtain the optimal flow solution for maximum network lifetime. Then, we derive an upper bound on the network lifetime for specific network topologies.

I. 서론

센서네트워크(Sensor Network)는 여러 가지 기능을 가지고 있으면서도 전력 소비가 적고 저가인 소형의 센서노드(Sensor Node)로 구성된다. 이러한 센서노드는 기능을 유지하기 위한 전력공급부분, 대상목표로부터 센서등을 이용하여 데이터를 수집(Sensing)하는 부분과 데이터를 처리하는 부분 그리고 이렇게 얻은 데이터를 원하는 목적지까지 무선으로 전송하는 부분으로 구성되어 있다.

이러한 센서 네트워크는 재난이 일어나서 사람의 접근이 어려운 지역의 모니터링이나 건물붕괴시 인명 구출, 전쟁시 군대의 작전수행등 광범위한 응용분야에 쓰일 수 있다. 이런 다양한 응용분야에 사용할 수 있는 센서 네트워크를 설계하는데 있어서 가장 중요하게 고려되어야 하는 요소는 네트워크를 구성하고 있는 센서노드로부터 원하는 정보를 얼마나 정확하게 얻을 수 있을 것인가 라고 할 수 있다. 센서노드는 제한된 에너지원을 가지고 작동하게 되므로 일정 시간이 지나게 되면 에너지원이 고갈되어 센서노드는 작동을 멈추게

된다. 만일 일정지역을 모니터링 하고 있던 센서노드의 전력이 고갈된다면 그 지역에 대한 정보를 알 수 없게 된다. 따라서 이러한 제한된 에너지원을 가지고 있는 센서노드로 구성된 센서네트워크에서 네트워크의 지속시간(Network Lifetime - 센서네트워크를 구성하고 있는 노드중 하나라도 에너지가 고갈되어 작동하지 못하는 시점)을 늘려보고자 하는 시도는 여러 방법으로 연구되었다.

이러한 연구들은 주로 네트워크에서 사용되는 잉여 에너지 즉, 불필요하게 사용되는 에너지를 줄여서 네트워크의 지속시간을 늘려보고자 하는 방법들이 대부분인데 대표적으로는 노드의 주변환경에 의해서 노드의 작동상태를 조절하여 불필요한 작동을 하지 못하게 하여 에너지를 줄여보고자 하는 방법들[4][5]과 에너지의 효율면에서 기존의 라우팅 방법과 비교했을 경우 적은 에너지를 이용하여 효율적으로 라우팅 할 수 있는 방법[6][7]들이 있다.

본 논문에서는 효율적인 라우팅을 통해서 네트워크의 지속시간을 늘릴 수 있는 방법을 제안하고자 한다. 제안하는 방법은 노드의 전력을 조절해서 송신범위를 조절할 수 있게 하고, 이를 통하여 네트워크를 구성하고 있는 각각의 노드들이 정보를 보낼 때 소비되는 에너지의 소모를 줄일 수 있으므로 센서노드의 전력을 조절하지 않는 기존의 방법들에 비해서 네트워크의 지속시간을 향상시킬 수 있다. 따라서 본 논문에서는 각 센서노드가 송신전력을 조절하는 경우에 기존의 연구[1][2]를 바탕으로 에너지를 효율적으로 사용하는 라우팅 방법을 제시하여 센서노드의 에너지 소모를 줄임으로써 네트워크 지속시간이 얼마나 늘어날 수 있는지 성능분석을 통해 제시한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 센서노드가 전력 조절을 할 경우에 네트워크에 대한 모델링을 제시한다. 3장에서는 2장에서 나타낸 수식적인 모델링의 성능을 분석평가하기 위해서 제안한 알고리즘을 제시하고 4장에서는 기존의 방법과 노드의 전력조절을 이용하는 제안한 방법간의 성능분석평가를 다룬다. 마지막으로 5장에서 전체적인 논문의 결론과 네트워크 지속시간을 더욱 늘리기 위한 방향을 제시한다.

II. 모델링

센서네트워크는 노드의 집합 N 과 이러한 노드를 연결해 주는 링크의 집합 L 로써 나타낼 수 있고, 이것은 그래프 $G=(N, L)$ 로써 모델링이 가능하다. 노드들은 역할에 따라서 센서노드(sensor node), 싱크노드(sink node), 중추유닛(central unit)으로 구분할 수가 있다.

전체 네트워크 중에서 센서노드로 구성된 영역을 센서필드(sensor field)라고 한다. 이러한 센서필드를 구성하고 있는 각각의 센서노드는 자신의 데이터를 보내거나 다른 센서노드의 데이터를 중계해주는 역할을 하게 된다. 이러한 센서노드의 데이터는 직접 혹은 다중 홉으로 싱크노드(S)까지 전달되고, 이것은 전달매체에 관계없이 (유선 혹은 무선) 센서필드로부터 받은 정보를 직접 유선망등과 연결된 중추유닛(D)으로 보내주게 된다.

센서필드를 구성하고 있는 각각의 노드에 의해서 발생되는 정보의 흐름(flow)은 동시에 발생되고(concurrent) 모든 정보의 흐름들이 유용하다고(multi-commodity) 가정하면 센서필드 내에서 발생하고 있는 모든 정보는 싱크노드를 통해서 중추유닛까지 전달이 되어야 한다. 노드 j 가 i 에서 전송할 수 있는 범위 내에 직접 연결되어 있다면 i 와 j 의 링크는 (i, j) 로 나타내고, 노드 i 와 직접 연결된 링크를 가지고 있는 노드들의 집합은 $Z(i)$ 로 나타내기로 한다.

A. 기존의 제시된 방법

노드 i 에서 전송범위에 있는 $Z(i)$ 의 노드 j 로의 평균적인 정보 전송량을 F_{ij} 라고 하고, F_{ij} 와 노드 i 가 $Z(i)$ 에 대해서 최대로 처리 가능한 전송량(F_{Max})의 비율을 f_{ij} 라고 나타내기로 한다. ($0 \leq f_{ij} \leq 1$)

$$f_{ij} = \frac{F_{ij}}{F_{Max}}$$

또한 노드 i 에서 자체적으로 발생되는 정보량을 REQ_i 라 하면, F_{Max} 와 REQ_i 의 비율을 r_i 라고 나타내기로 한다. ($0 \leq r_i \leq 1$)

$$r_i = \frac{REQ_i}{F_{Max}}$$

그리고 각각의 노드들은 한정된 에너지원(배터리등)을 가지고 있다. 노드 i 의 지속시간(T_i)과 네트워크의 지속시간(T)은 정보의 전송을 위해서 노드 i 에서 사용할 수 있는 에너지의 초기값(E_i)과 $Z(i)$ 까지 단위 정보를 전송하는데 필요한 에너지 e_{ij} 에 따라서 다음과 같이 정의할 수 있다.

정의 1 : 노드 i 의 지속시간(T_i)

$$T_i = \frac{E_i}{\sum_{j \in Z(i)} e_{ij} f_{ij}}$$

정의 2 : 네트워크의 지속시간(T)

$$T = \min_{i \in N} T_i = \min_{i \in N} \left(\frac{E_i}{\sum_{j \in Z(i)} e_{ij} f_{ij}} \right)$$

각각의 센서노드에서 정보를 생성하고 싱크노드를 통해서 중추유닛까지 전달하는 네트워크에서의 네트워크 지속시간(T)을 만족하는 노드와 노드사이의 링크의 전송량은 다음의 조건을 만족해야만 한다.

$$\begin{aligned} \bar{f}_{ij} &\geq 0, & \forall (i, j) \in L \\ \sum_{k \in Z(i)} \bar{f}_{ki} + r_i \cdot T &= \sum_{j \in Z(i)} \bar{f}_{ij}, & \forall i \in N - \{S, D\} \\ \sum_{k \in Z(i)} \bar{f}_{ki} &= \sum_{j \in Z(i)} \bar{f}_{ij}, & \forall i \in S \\ \sum_{k \in Z(i)} \bar{f}_{ki} + \sum_{j \in Z(i)} \bar{f}_{ij} &\leq T, & \forall i \in N - \{S, D\} \end{aligned}$$

여기서 \bar{f}_{ij} 는 노드 i 에서 j 까지 T 만큼의 시간동안 전송된 정보의 양으로 정의된다. 즉, $\bar{f}_{ij} = f_{ij} T$ 이다.

B. 제안하는 모델링 방법

노드 i 가 노드 j 까지 전송전력을 조절하면서 단위정보를 전송하기 위해 필요한 에너지(e_{ij})는 노드사이의 거리에 대한 함수와 기존의 방법에서 단위정보를 전송하는데 필요한 에너지(e_0)에 의해서 나타낼 수 있다.

그리고 실제로 무선 노드간의 정보(단위정보)를 전송하는데 있어서 전송시 소모되는 에너지는 다음과 같이 나타낼 수 있다[3].

$$e = e_{elec} + e_{Tx} + e_{Rx}$$

여기서, e_{elec} 은 노드에서 송수신장치를 제외한 장치에서 소모되는 에너지이고, e_{Tx} 과 e_{Rx} 는 실제로 정보를 주고 받을때 송수신장치에서 사용되는 에너지이다.

e_{elec} 과 e_{Rx} 는 노드에서 고정적으로 소모되는 에너지이므로 정보를 보내는데 필요한 에너지 e_{ij} 는 거리에 따라서 결정되는 e_{Tx} 에 의해서 결정되며, 네트워크 구성에 있어서 노드사이의 거리(d_{ij})에 따라 단위 정보당 전달 에너지(e_{ij})는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$e_{ij} = \left(\frac{d_{ij}}{d_0} \right)^r \cdot e_0 \quad (1)$$

여기서 e_0 는 노드가 전송할 수 있는 최대 범위(d_0)까지 전송하는데 필요한 에너지이고, r 은 거리에 따른 손실을 나타내는 상수로 2~4의 값을 갖는다.

목적은 센서노드 i 가 발생시키는 정보(r_i)에 대해서 식 (1)처럼 전력조절을 하는 라우팅 방법을 이용하여 네트워크 지속시간이 최대가 될 수 있도록 노드와 노드간의 최적의 전송량(f_{ij})를 구하는 것이라 하겠다. 노드와 네트워크의 지속시간은 정의 1, 2에 의해서 다음과 같이 나타낼 수 있다. (싱크노드의 경우는 에너지에 대한 제약은 없다고 설정($E_{Sink} = \infty$))한다. 따라서 싱크노드의 경우는 네트워크가 지속되는 시간에 영향을 주지 않는다.)

$$\begin{aligned} T_i &= \frac{E_i}{\sum_{j \in Z(i)} e_{ij} f_{ij}} = \frac{E_i}{\sum_{j \in Z(i)} \left(\frac{d_{ij}}{d_0} \right)^r e_0 f_{ij}} \\ &= \frac{E_i}{e_0 \sum_{j \in Z(i)} \left(\frac{d_{ij}}{d_0} \right)^r f_{ij}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T &= \min_{i \in N} T_i = \min_{i \in N} \left(\frac{E_i}{\sum_{j \in Z(i)} e_{ij} f_{ij}} \right) \\ &= \min_{i \in N} \left(\frac{E_i}{e_0 \sum_{j \in Z(i)} \left(\frac{d_{ij}}{d_0} \right)^r f_{ij}} \right) \end{aligned}$$

센서필드에서 노드와 노드간에 정보를 주고받는 경우 정보의 흐름은 동시에 발생되고 모든 정보의 흐름이 유용하다고 가정하였으므로 노드 i 가 실제 전송해야 하는 전력의 범위는 노드 i 와 연결되어 있는 노드들의 집합

Z(i)에서 가장 멀리 떨어져 있는 노드와 전송이 가능한 거리가 되어야 한다. 따라서 네트워크 지속시간은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T = \min_{i \in N} \left(\frac{E_i}{e_0 \cdot \sum_{j \in Z(i)} \left(\max_{j \in Z(i)} \frac{d_{ij}}{d_0} \right)^r f_{ij}} \right)$$

$$= \min_{i \in N} \left(\frac{E_i}{e_0 \cdot \left(\max_{j \in Z(i)} \frac{d_{ij}}{d_0} \right)^r \sum_{j \in Z(i)} f_{ij}} \right)$$

그리고 네트워크를 구성하고 있는 링크의 전송량은 노드 에너지와 주변 노드의 환경에 대해서 다음의 조건을 만족해야 한다.

$$\sum_{j \in Z(i)} \bar{f}_{ij} \leq \frac{E_i}{e_0 \cdot \left(\max_j \frac{d_{ij}}{d_0} \right)^r}, \quad \forall i \in N - \{S, D\}.$$

따라서 노드 j의 지속시간이 T_j 이라면, 노드 i가 단위 시간동안 보낼 수 있는 노드전송용량(node flow capacity)인 C_i 는 다음과 같다.

$$0 \leq C_i \leq 1$$

$$C_i = \frac{E_i}{e_0 \cdot \left(\max_j \frac{d_{ij}}{d_0} \right)^r} \cdot \frac{1}{T_i}, \quad \forall i, j \in N - \{S, D\}$$

$$C_i \leq \frac{E_i}{e_0 \cdot \left(\max_j \frac{d_{ij}}{d_0} \right)^r} \cdot \frac{1}{T}, \quad \forall i, j \in N - \{S, D\}.$$

각 노드에서 링크를 통해서 전송되는 전송량은 노드의 전송용량(C_i)에 의해서 결정된다.

센서필드를 구성하고 있는 각각의 노드에 의해서 발생하는 정보의 흐름(flow)은 동시에 발생되고 모든 정보의 흐름은 유용하다고 가정하면 센서필드 내에서 발생하고 있는 모든 정보는 싱크노드를 통해서 중추유닛까지 전달되어야 한다.

III. 제안 알고리즘

동시에 발생되면서 모든 정보들이 유용한 정보량에 대한 최적화된 해결책(optimal solution)을 구하기 위해서 maxflow알고리즘을 이용한다[8].

Maxflow알고리즘을 적용할 수 있도록 하기 위해서 먼저 각 노드 i를 그림 1과 같이 두개의 부수적인 노드(sub-node) i_i, i_0 로 나누어서 설정하고, 한 노드에서 만들어진 두개의 부수적인 노드는 노드의 에너지와 노드 주변의 환경에 의해서 크기(capacity)가 결정되는 내부링크(internal link)로써 연결되도록 설정한다. (노드 i로 들어오는 전송량은 노드 i_0 로 들어와서 내부링크를 거쳐 i_i 를 통하여 나가게 된다. 이때의 노드 i에서 자체적으로 발생시키는 정보량(REQ_i)는 노드 i의 REQ_{i_i} 가 된다.)

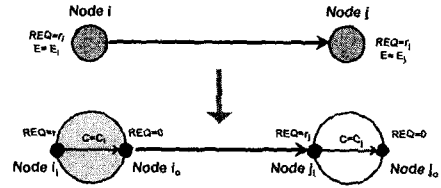


그림 1 Node Capacity를 Link Capacity로 설정

여기서 노드 i의 내부링크의 크기($C_{i_{i_0}}$)는 C_i 에 의해서 정의될 수 있으며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_{i_{i_0}} = \min \left\{ 1, \frac{E_i}{e_0 \cdot \left(\max_{j \in Z(i)} \frac{d_{ij}}{d_0} \right)^r} \cdot \frac{1}{T_i} \right\}$$

위와 같이 노드전송용량(node capacity)을 링크전송용량(link capacity)으로 재구성된 네트워크를 얻을 수 있으며, 이러한 네트워크를 구성하고 있는 용량이 제한되어 있는 링크를 통하여 센서노드 i에서 발생하는 정보를 네트워크가 지속되는 시간내에 보내지 못하는 정보 없이 모두 전달해야 한다. 즉, 네트워크가 지속되는 시간 동안 센서필드내에서 발생된 모든 정보($\sum_{i \in Z(i)} r_i \cdot T$)는 싱크노드를 거쳐서 중추유닛까지 손실이 발생하지 않도록 전달해야 한다. 이때 네트워크 전체의 링크에서 전송량이 이와 같은 조건을 만족한다면 feasible flow라고 할 수 있다. 이러한 조건을 만족하는 각 링크의 전송량과 네트워크 지속시간은 그림 2와 같이 제한한 알고리즘으로부터 얻을 수 있다. 제한한 알고리즘은 크게 두 부분으로 나눌 수 있다. 먼저 네트워크에서 노드용량에 대한 거리의 인수(distance factor)인 DF_i 와 에너지(E_i)를 링크용량에 대한 요소 C_i 로 재구성한다. 이렇게 하면 다음에 나오는 feasible time을 결정하는데 있어서 maxflow알고리즘에 편리하게 이용할 수 있다. 그리고 나머지 부분은 feasible time의 최대값을 이진탐색(binary search)을 이용해서 찾아나가는 부분으로써 T_{Max} 값으로부터 이진탐색을 시작하여 maxflow알고리즘을 만족하는 최대 네트워크 지속시간을 찾는다.

```

// N:Node set, S:Sink node, D:Central unit
// DF:Distance factor
// Ex:Remaining information

STEP1. Transform the node-capacitated network to
a link-capacitated network
STEP2. Set  $DF_i = (\max_{j \in Z(i)} d_{ij} / d_0)^r, \forall i \in N - \{S, D\}$ 
 $t = T_{Max}$ 
STEP3. Execute
until | Feasible_Time - nonFeasible_Time | < Tolerance
 $C_i = (E_i / (e_0 \cdot DF_i)) / t$  for  $\forall i \in N - \{S, D\}$ 
Find flow value using maxflow algorithm
// Check if t is feasible
IF  $Ex_i = 0$  ( $\forall i \in N - \{D\}$ )
Update Feasible_Time = t
Else
Update nonFeasible_Time = t
Update t using binary search
STEP4. Set T(Network Lifetime) = t
STEP5. Obtain feasible time(T) & flow value

```

그림 2 네트워크 지속시간과 전송량(flow value)을 구하기 위해 제안한 알고리즘.

IV. 성능분석

그림 3의 네트워크 구성은 논문[1]에서 제시하고 있는 것과 동일한 것으로서 전력조절을 통한 전송범위의 변화를 주기 위해서 노드간의 거리(Dist)를 임의로 설정한 것이다.

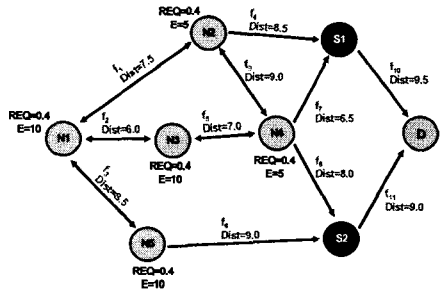


그림 3 성능분석을 위한 네트워크 구성(Network Topology) 또한 반복적인 알고리즘을 수행하기 위해서 이진탐색으로 feasible time을 찾을 때 시작값인 T_{Max}를 100으로 설정하였고, 노드주위의 환경에 따라 변화되는 환경변수인 r은 모든 노드에 대해서 2로, 노드의 최대 전송범위인 d₀는 10으로 설정하였다. 먼저 전력조절을 하지 않고 각 노드가 전송할 수 있는 최대범위(d_{ij}=10, $\forall i,j$)로 정보를 전송하는 기존의 방법의 경우 결과는 표1, 2와 같다. 네트워크 지속시간이 7.69가 된다.

$f_{(N1-N2)}$	$f_{(N2-N3)}$	$f_{(N3-N4)}$	f_d	$f_{(S1-N4)}$
0.35	0.25	0.3	0.65	0.15
f_e	f_r	f_s	f_e	$f_{(f_r+f_s)}$
0.7	0.35	0.3	0	2.0

표 1 전력조절 없는 경우 전송시 각 링크의 전송량(flow).

	Initial Energy	Consumed Energy	Residual Energy
Node 1	5	5	0
Node 2	5	5	0
Node 3	10	3.07	6.93
Node 4	5	5	0
Node 5	10	5.38	4.62

표 2 전력조절이 없는 경우 전송시 각 노드의 에너지 소모량 비교.

다음으로 노드가 자신의 주변의 전송 가능한 노드의 집합 Z(i)중에서 가장 멀리 놓여있는 노드와의 거리 ($d_{ij} = \max_{j \in Z(i)} d_{ij}, \forall i,j$)까지만 전송 가능하도록 전력조절을 할 경우는 표3, 4와 같다. 네트워크 지속시간은 11.33으로 47% 증가함을 알 수 있다.

$f_{(N1-N2)}$	$f_{(N2-N3)}$	$f_{(N3-N4)}$	f_d	$f_{(S1-N4)}$
0.31	0.21	0.3	0.61	0.19
f_e	f_r	f_s	f_e	$f_{(f_r+f_s)}$
0.7	0.39	0.3	0	2.0

표 3 전력조절을 할 경우 전송시 각 링크의 전송량(flow).

	Initial Energy	Consumed Energy	Residual Energy
Node 1	5	5	0
Node 2	5	5	0
Node 3	10	2.22	7.78
Node 4	5	5	0
Node 5	10	6.43	3.57

표 4 전력조절을 할 경우 전송시 각 노드의 에너지 소모량 비교.

위의 결과에서 보는 바와 같이 네트워크 내에 존재하고 있는 센서노드들은 전력조절에 의해서 전송거리를 조절하게 될 경우 각각의 노드에서 링크를 통해서 전송되는 전송량의 변화와 함께 네트워크 지속시간의 향상을 가져온다.

이것은 같은 정보량을 전송하는데 있어서 노드에서 소비되는 에너지가 전력조절을 하지 않는 기존방법에 비해 적게 소모되므로 네트워크 지속시간이 더 늘어날 수 있게 되는 것이다. 또한 네트워크 지속시간이 늘어나므로 네트워크 지속시간 내에 네트워크를 구성하고 있는 각각의 노드가 보낼 수 있는 정보량도 늘어나게 된다. 즉, 동일한 에너지를 가지고 전체 네트워크에서 처리할 수 있는 정보량은 더 늘어날 수 있다는 것을 나타낸다. 이러한 결과는 노드의 주변 환경이 전송에너지 소모가 더 큰 환경(r≈4)일 경우 전력조절에 의해서 전송거리를 조절하는 라우팅 방법이 에너지의 사용에 있어서 기존의 방법보다 효율적이라는 것을 보여준다.

V. 결론

센서네트워크에서 중요한 평가요소 중 하나인 네트워크의 지속시간을 늘리기 위한 여러 가지 방법중에서 본 논문에서는 센서노드의 전력조절에 의한 효율적 라우팅 방법을 제안하였다. 즉, 노드의 전력조절을 통하여 노드가 전송할 수 있는 전송범위를 가변적으로 조절할 수 있도록 하여 에너지를 효율적으로 사용할 수 있는 라우팅 방법을 제시하였다. 그리고 이것을 모델링하고 네트워크 지속시간과 링크에서의 전송량을 평가하기 위한 최적화 문제를 제시하였다. 최적화 문제에서 네트워크 지속시간을 구하기 위하여 동시발생적인 최대정보량(Concurrent Maxflow)을 구하는 반복적인 알고리즘을 제안하였고 성능평가를 수행하였다.

성능분석결과 실제로 전력을 조절하지 않고 노드가 전

송할 수 있는 범위를 노드가 보낼 수 있는 최대범위로 고정시킨 결과에 비해서 제안한 방법에서는 네트워크 지속시간을 훨씬 길게 유지할 수 있었으며 네트워크를 구성하고 있는 각 노드의 에너지를 보다 효율적으로 사용하고 있음을 확인하였다.

전체 네트워크 지속시간은 초기 에너지가 적으면서 정보량이 집중되는 노드의 지속시간에 의해서 결정된다. 따라서 네트워크의 지속시간을 더욱 늘리기 위해서는 라우팅시에 에너지가 적은 노드에 정보량의 집중을 막기 위한 방법(센서필드 주변에 싱크노드를 적절히 배치하는 방법등)이 필요하다고 하겠다.

Reference

- [1] G. Zussman and A. Segall, "Energy Efficient Routing in Ad-Hoc Disaster Recovery Network," in Proc. of IEEE INFOCOM, vol. 1, pp. 682-691, Apr. 2003.
- [2] J.-H. Chang and L. Tassiulas, "Energy Conserving Routing in Wireless Ad-hoc Network," in Proc. of IEEE INFOCOM, vol. 1, pp. 26-30, Mar. 2000.
- [3] P. Chen, B. O'Dea, and E. Callaway, "Energy Efficient System Design with Optimum Transission Range for Wireless Ad Hoc Networks," in Proc. of IEEE ICC, vol. 2, pp. 945-952, 2002.
- [4] A. Cerpa and D. Estrin, "ASCENT : Adaptive Self-Configuring Sensor Networks Topologies," in Proc. of IEEE INFOCOM, vol. 3, pp. 1278-1287, Jun. 2002.
- [5] F. Ye, G. Zhong, J. Cheng, L. Zhang "PEAS_a robust energy conserving protocol for long-lived sensor networks," in Proc. of Distributed Computing Systems, pp.28-37, 2003.
- [6] C.-K. Toh, "Maximum Battery Life Routing to Support Ubiquitous Mobile Computing in Wireless Ad Hoc Networks," IEEE Communications Magazine, vol. 39, pp.102-114, Jun. 2001.
- [7] W. Ye, J. Heidemann, D. Estrin, "An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks," in Proc. of INFOCOM 2002, vol. 3, pp. 1567-1576, Jun. 2002.
- [8] R. K. Ahuja, T. L. Magnanti, and J. B. Orlin, Network Flows, Prentice Hall, 1993.