

## 무선 센서 네트워크의 링크 에러율을 고려한 에너지소모가 균등한 멀티 홉 라우팅 기법

이 현 석\*, 허 정 석\*\*

### An Energy Balanced Multi-Hop Routing Mechanism considering Link Error Rate in Wireless Sensor Networks

Hyun-Seok Lee \*, Jeong-Seok Heo \*\*

#### 요 약

무선 센서 네트워크에서 센서 노드의 수명은 배터리에 의해 제한되므로 에너지는 가장 중요한 고려사항이다. 기존의 에너지 효율적인 라우팅 프로토콜들은 대부분 에너지 소비를 최소화하기 위해 최소 에너지 경로를 사용하는 데, 이는 노드들 간의 잔류에너지를 불균등하게 만든다. 그 결과 에너지 효율적인 경로 상에 있는 노드들의 전원이 빠르게 고갈되고 네트워크에 참여할 수 없게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위해 노드들의 에너지 소모를 균등하게 만드는 기법들이 제안되고 있다. 무선 환경에서는 링크의 품질에 따른 재전송으로 불필요한 에너지 소모가 발생하는데 대부분의 기법들은 링크 에러율을 고려하지 않고 있다. 따라서, 본 논문에서는 잔여 에너지와 링크 에러율을 고려하여 균등한 에너지 소모를 가지는 클러스터 기반의 멀티 홉 라우팅 기법을 제안한다. 제안하는 기법은 링크 에러율을 고려하기 때문에 불필요한 재전송에 따른 에너지 소비를 줄이고 트래픽도 골고루 분산시킨다. 시뮬레이션 결과 타 기법에 비해 제안하는 기법은 재전송 횟수가 감소하여 에너지 효율적이었고, 에너지 소모가 균등한 경로를 사용하여 모든 노드가 네트워크에 참여하는 기간이 연장되었다.

▶ Keywords : 무선센서네트워크, 에너지 효율성, 에너지 균등성, 링크 에러율

#### Abstract

In wireless sensor networks, energy is the most important consideration because the lifetime of the sensor node is limited by battery. Most of the existing energy efficient routing protocols use the minimum energy path to minimize energy consumption, which causes an unbalanced distribution of

•제1저자 : 이현석 •교신저자 : 허정석

•투고일 : 2013. 4. 2, 심사일 : 2013. 5. 13, 게재확정일 : 2013. 5. 21.

\* 울산대학교 전기공학부(School of Electronic and Computer Engineering, University of Ulsan)

\*\* 울산대학교 전기공학부(School of Electronic and Computer Engineering, University of Ulsan)

※ 본 연구는 중소기업청에서 지원하는 2012년도 산학연공동기술개발사업(No. C0031322)의 연구수행으로 인한 결과물임.

residual energy among nodes. As a result, the power of nodes on energy efficient paths is quickly depletes resulting in inactive. To solve these problems, a method to equalize the energy consumption of the nodes has been proposed, but do not consider the link error rate in the wireless environment. In this paper, we propose a uniform energy consumption of cluster-based multi-hop routing mechanism considering the residual energy and the link error rate. This mechanism reduces energy consumption caused by unnecessary retransmissions and distributes traffic evenly over the network because considering the link error rate. The simulation results compared to other mechanisms, the proposed mechanism is energy-efficient by reducing the number of retransmissions and activation time of all nodes involved in the network has been extended by using the energy balanced path.

▶ Keywords : Wireless Sensor Network, Energy Efficiency, Energy Balancing, Link Error Rate

## I. 서 론

무선 센서 네트워크(Wireless Sensor Network)에서는 제한된 에너지를 가진 배터리를 사용하므로 에너지를 절약하기 위한 연구가 다각도로 진행되어 왔다. 무선 센서 네트워크에서는 많은 수의 센서 노드가 조밀하게 분포되어 멀티 홉(multi-hop) 네트워크 환경을 이루며, 각 센서 노드는 단말 노드의 역할과 라우터의 역할을 동시에 수행하므로 에너지를 모두 소비한 노드는 더 이상 네트워크에 참여하지 못하게 되고, 네트워크의 정상적인 통신이 불가능하게 된다. 따라서 무선 센서 네트워크의 수명을 연장하기 위해서는 한정된 에너지의 효율적인 사용이 매우 중요하다[1,2].

일반적으로 인접한 센서 노드는 유사한 정보를 가지므로, 로컬 클러스터를 형성하고 클러스터 헤드에 의해 집약된 데이터를 싱크 노드로 전송하는 클러스터링 기법이 저 전력 구동에 효과적이다. 또한 단일 홉 전송은 장거리 전송을 하게 되는 노드의 과도한 에너지 소모를 가져오게 되며 이는 네트워크의 수명을 단축시키게 된다. 따라서 무선 센서 네트워크에서는 네트워크의 사용시간을 연장시키기 위해 멀티 홉 전송 기법을 사용하는 것이 바람직하다[3,4,5].

무선 센서 네트워크의 에너지 효율적인 라우팅 프로토콜들은 에너지 소모를 최소화하기 위해 싱크 노드로의 최소 에너지 소모 경로를 사용해왔다. 최소 에너지 소모 경로는 네트워크의 생존시간을 연장을 시켜주지만 센서노드들의 에너지 소모를 불균등하게 만들어 모든 노드가 네트워크에 참여하는 전

체 네트워크의 생존시간이 줄어들게 된다[6,7]. 이를 보완하기 위해서 센서 노드들이 균등하게 에너지를 소모하여 네트워크의 생존 시간을 연장하는 기법들이 제안되고 있다.

에너지 소모를 균등하게 만드는 기법들은 현재 사용 중인 경로에서 후보 경로 중 균등한 경로를 선택해서 바꾸게 된다. 이때 균등한 경로를 선택하는 기준으로 노드의 잔여 에너지를 사용하는 기법[8,9,10]들과 노드의 위치 정보를 사용하는 기법[11,12] 등이 있다.

유선 환경에 비해 링크 에러율이 높은 무선 환경에서는 재전송에 따른 에너지 소모가 크다. 따라서 링크 에러율은 에너지 효율성에서 중요한 요소가 될 수 있다. 하지만 기존의 라우팅 기법들은 대부분 링크 에러율을 고려하지 않고 있다.

본 논문에서는 노드의 잔여 에너지와 링크의 에러율을 고려하여 불필요한 재전송을 회피함으로써 에너지 소모를 줄이고, 노드의 에너지가 균등하게 소모될 수 있는 경로를 찾아 전송하는 클러스터 기반의 멀티 홉 라우팅 기법을 제안하고자 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 서론에 이어 2장에서는 에너지 효율성 및 균등성과 관련된 기존의 라우팅 기법들에 대해 알아본다. 3장에서는 제안하는 클러스터 기반의 멀티 홉 라우팅 기법에 대한 기술 및 시뮬레이션을 통한 성능 평가 결과를 분석하고, 4장에서 본 논문의 결론을 기술한다.

## II. 관련 연구

본 장에서는 기존의 클러스터링 기법과 에너지 균등성을

고려한 라우팅 기법들에 대하여 알아보고자 한다.

LEACH(Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy)[13]는 클러스터링 기반 라우팅 기법으로, 클러스터헤드가 클러스터의 멤버 노드들로부터 데이터를 전송 받아 싱크노드로 전달하여 전체적인 통신비용을 줄인다. 그리고 네트워크를 구성하는 모든 노드들의 에너지 소모를 공정하게 분산시키기 위해 에너지 집약적인 기능을 하는 클러스터 헤드를 라운드(round)라는 시간 단위마다 무작위로 순환시켜 네트워크의 생존시간을 최대화한다.

각 라운드는 그림 1과 같이 클러스터 헤드와 클러스터를 구성하는 set-up 단계와 TDMA 스케줄에 따라 데이터의 전송이 이루어지는 steady-state 단계로 구성된다.

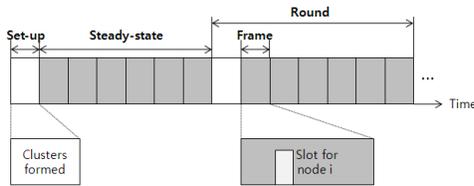


그림 1. LEACH의 타임 라인  
Fig. 1. Time Line of LEACH

클러스터 헤드는 수식 1의 threshold  $T(n)$ 를 난수와 비교하여 선정된다. 수식에서  $P$ 는 필요한 클러스터 헤드의 확률 (예,  $P=0.05$ ),  $r$ 은 현재 라운드의 순서번호,  $G$ 는 최근  $1/P$  라운드 동안 클러스터 헤드로 선정되지 않았던 노드들의 집합이다.

$$T(n) = \begin{cases} \frac{P}{1 - P(r \cdot \text{mod} \frac{1}{P})} & \text{if } n \in G \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

새로운 라운드가 시작되면 각 노드들은 0과 1사이의 난수를 선택하고, 수식 1에 따라 threshold  $T(n)$ 를 계산하여 두 수를 비교한다. 난수 값이 threshold  $T(n)$ 보다 작으면 클러스터 헤드로 선정되고, 난수 값이 threshold  $T(n)$ 보다 크거나 같으면 클러스터 멤버가 된다.

DEBR(Distributed Energy Balanced Routing)[9]은 그림 2에서와 같이 에너지 효율적인 경로로 전송했을 때 발생하는 센서노드의 불균등한 에너지 소모를 피하기 위한 방법을 제안하고 있다.

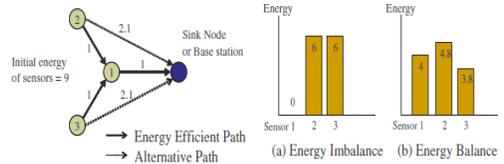


그림 2. 에너지 불균형(a)과 균형(b)  
Fig. 2. Energy Imbalance(a) and Balance(b)

DEBR은 잔존에너지량에 기반한 에너지 충분성(energy sufficiency)와 전송시 요구되는 에너지량에 기반한 에너지 효율성(energy efficiency)를 사용하여 에너지 비용(energy cost : EC)를 계산하고 최소 에너지 비용을 가지는 경로를 찾아 전송함으로써 네트워크의 생존시간을 연장한다.

EBRP(Energy-Balanced Routing Protocol)[10]은 센서노드의 불균등한 에너지 소모를 피하기 위해 깊이 (depth), 에너지 밀도(energy density), 잔여 에너지 (residual energy)의 세 가지 인자를 가지고 에너지 소모가 균등한 라우팅 경로를 설정하고 있다. 깊이는 싱크 노드로의 홉 수를 나타내며, 기존 라우팅 알고리즘의 최소 경로를 나타낸다. 에너지 밀도는 해당 지역의 잔존에너지 총합으로 정의되며, 높은 에너지 밀도를 가진 지역으로 패킷을 전송한다. 잔여 에너지는 개별 노드의 잔존 에너지를 나타내며, 패킷이 전송된 지역 내에서 잔존에너지가 적은 노드를 보호하기 위해 사용된다.

Ant Colony Optimization(ACO)[14]를 기반으로 하는 에너지 효율적이며 균등한 라우팅 기법도 제안되었다.[15] 이 기법의 기반인 ACO는 앞서간 개미의 의사 결정에 따른 결과를 뒤따르는 개미에게 제공하고 이 정보를 이용해 최적 경로를 선택하는 방법이다. 이 기법에서는 최소잔여 에너지, 홉 카운트, 전송 평균 에너지 등의 제공 되어진 결과를 이용하여 트래픽을 분산하고 에너지 사용을 감소할 수 있는 경로를 선택함으로써 네트워크의 수명을 연장하고 패킷 손실을 줄인다.

ERNC(Energy-balanced Routing protocol based on Network Coordinate)[12]는 위치기반 라우팅에서 네트워크 코디네이트(Network Coordinate : NC)를 기반으로 노드들의 위치 정보와 에너지 정보를 수집한다.

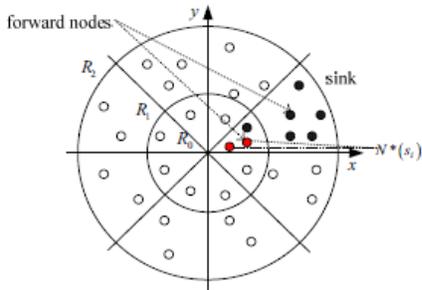


그림 3. 데이터 수집 링 스키마  
Fig. 3. Data-gathering Ring Scheme

ERNC는 균등한 에너지 소모를 경로를 찾기 위해 그림 3과 같은 데이터 수집 링 스키마(data-gathering ring scheme)를 사용한다. 데이터 수집 링 스키마는 먼저 이웃들을 섹터(sector)단위로 구분하고 전송할 섹터를 선택하게 되며, 선택되어진 섹터의 후보 노드들 중에서 위치 정보와 잔여 에너지를 기반으로 에너지 소모가 균등한 경로를 선택해 전송하게 된다.

### III. 제안하는 라우팅 기법

본 논문에서는 클러스터링 네트워크에서 네트워크 참여노드 전체의 생존시간을 연장하기 위해 무선 링크의 에러율까지 고려한 에너지 소모가 균등한 라우팅 경로 선택기법을 제안한다.

전체 네트워크의 생존시간을 연장하기 위해서는 잔여 에너지 양이 적은 노드의 사용을 피하는 것이 네트워크 노드의 에너지 소모를 균등하게 가져갈 수 있다. 또한 무선 환경에서는 무선 매체의 특성과 환경적 요인으로 인하여 유선 환경보다 비교적 링크 에러율이 높으므로, 에러율이 낮은 링크를 사용하는 것이 재전송으로 인한 추가적인 에너지 소모를 줄이는 방안이 될 수 있다.

본 논문에서는 라우팅 경로 상에 있는 노드의 잔여 에너지와 링크 에러율을 고려하여 각 라우팅 경로의 경로비용을 계산하고 최소 비용을 가진 경로를 선택하여 데이터를 전송하고자 한다. 이를 위한 경로 비용은 수식 2와 같이 계산한다.

$$LC_{ij} = \frac{1}{1 - \alpha_{ij}} * \frac{RE_{ij}}{AE_i} \quad (2)$$

- $LC_{ij}$  : 노드  $i$ 에서 노드  $j$ 로 전송시 경로 비용 (Link Cost)
- $RE_{ij}$  : 노드  $i$ 에서 노드  $j$ 로 전송시 요구 에너지 (Required Energy)
- $AE_i$  : 노드  $i$ 의 잔여 에너지 (Available Energy)
- $\alpha_{ij}$  : 노드  $i$ 와 노드  $j$ 간의 링크 에러율

제안하는 라우팅 기법은 그림 4에서와 같이 클러스터 내에서 클러스터 헤드로 전송하는 1단계와 클러스터 헤드에서 싱크 노드로 전송하는 2단계로 구성한다.

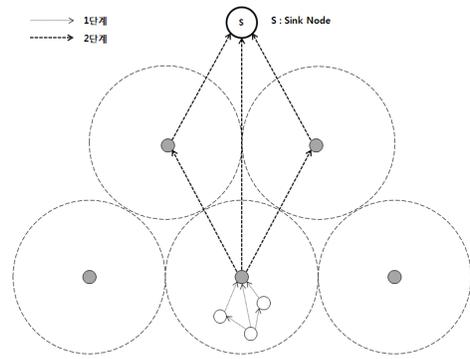


그림 4. 제안 기법의 전송 단계  
Fig. 4. Transfer phase of the proposed mechanism

클러스터 내에서의 라우팅은 전송하고자 하는 노드와 클러스터 헤드 사이의 라우팅으로 개별 클러스터 내에서만 이루어진다. 전송 노드에서 클러스터 헤드로 전송 가능한 경로 중 경로비용이 가장 적은 경로를 선택하여 전송을 하게 되며, 개별 경로의 경로 비용은 수식 3과 같이 계산되어 지며, 수식 4에 의해 최소 경로 비용을 가진 경로를 선택한다.

$$TLC_{ij} = LC_{ij} + LC_{j,CH} \quad (3)$$

- $TLC_{ij}$  : 노드  $i$ 에서 노드  $j$ 를 경유하여 클러스터 헤드로 전송하는 경로의 전체 경로 비용

$$P_{i,CH} = MIN_{n=1}^i \{TLC_{i,n}\} : n \in CMG \quad (4)$$

- $CMG$  : 클러스터의 멤버노드 그룹

아래 그림 5는 클러스터 내에서의 라우팅 경로를 선택하는 예제이다.

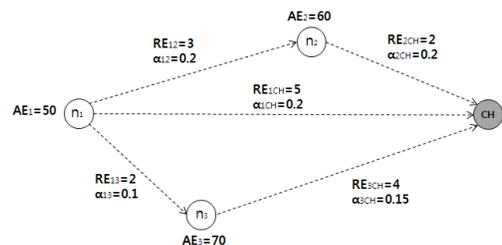


그림 5. 라우팅 경로 선택 예제  
Fig. 5. Example of routing path selection

노드 n1에서 클러스터 헤드로 전송 가능한 경로는 표 1과 같이 3가지가 존재한다. 경로1과 경로2는 전송시 요구에너지는 같지만 노드의 잔여에너지를 고려하여 경로비용을 계산하면 경로2가 더 작은 경로 비용을 가진다. 경로3은 요구에너지는 더 크지만 노드의 잔여에너지와 링크 에러율에 의해 최소 경로 비용을 가진다.

표 1. 경로비용  
Table 1. Path Cost

경로	세부경로	LC <sub>ij</sub>	LC <sub>j,CH</sub>	TLC
1	n1 → CH	0.125		0.125
2	n1 → n2 → CH	0.075	0.042	0.117
3	n1 → n3 → CH	0.044	0.067	0.111

클러스터 헤드 간의 라우팅은 클러스터 헤드와 싱크 노드 사이의 라우팅으로 클러스터 헤드들만이 전송에 참여할 수 있다. 싱크 노드로 전송 가능한 경로 중 경로비용이 가장 작은 경로를 선택하여 전송을 하게 되며, 개별 경로의 경로 비용은 수식 5와 같이 계산되어 지며, 수식 6에 의해 최소 경로 비용을 가진 경로를 선택한다.

$$TLC_{ij} = LC_{ij} + LC_{j,S} \quad (5)$$

$$P_{i,S} = \text{MIN}_{n=1}^i \{TLC_{i,n}\} : n \in \text{CHG} \quad (6)$$

- CHG: 클러스터 헤드노드 그룹

#### IV. 성능 평가

본 장에서는 제안하는 라우팅 기법의 성능 평가를 위해 노드들이 직접 싱크 노드로 전송하는 직접 전송(direct communication : DC)과 클러스터를 형성하고 클러스터 헤드가 싱크 노드로 직접 전송하는 LEACH 그리고 클러스터 내에서 최소 비용이 드는 경로로 전송하는 제안 기법을 비교하여 네트워크의 수명을 평가하고자 한다.

성능평가를 위한 시뮬레이션은 NS-2.27에 MIT의 NS2-LEACH 패키지를 변형하여 사용하였으며, 시뮬레이션 환경과 에너지 모델은 표 2와 같다. 센서 네트워크의 크기는 100×100m, 센서 노드의 개수는 100개, 링크 에러율은 최소 0%에서 최대 50%로 무작위로 적용하였으며, 노드의 이동성은 없는 것으로 가정하였다.

표 2. 시뮬레이션 파라미터 설정값  
Table 2. Simulation parameter setting value

파라미터	값
네트워크 크기	100×100m
센서노드의 수	100
싱크노드의 위치	(0, 50)
클러스터 헤드 선정 확률 (p)	0.1
센서 노드 초기 에너지량	1J
데이터 송수신 소모 에너지량 (E <sub>tr</sub> )	50nJ/bit
송신 증폭 에너지량 (E <sub>amp</sub> )	100pJ/bit/m <sup>2</sup>
데이터 패킷 크기	1024 bits
링크에러율	0 ~ 0.5

전송시 요구에너지(RE)는 데이터 송수신에 소모되는 에너지량(E<sub>tr</sub>)과 송신 증폭 에너지량(E<sub>amp</sub>)의 합으로써 수식 7에 따라 구해진다.

$$RE_{ij} = E_{amp}(i,j) + E_{tr}(i) \quad (7)$$

#### 1. 링크 에러율별 재전송 횟수

링크 에러율이 증가함에 따른 각 라우팅 기법별 재전송 횟수를 알아보기 위해 링크의 에러율을 최저 0%에서부터 최대 10%까지 무작위 분배하고 링크 에러율 최대치를 10%씩 증가하여 최대 100%까지 10번에 걸쳐 실험하였다.

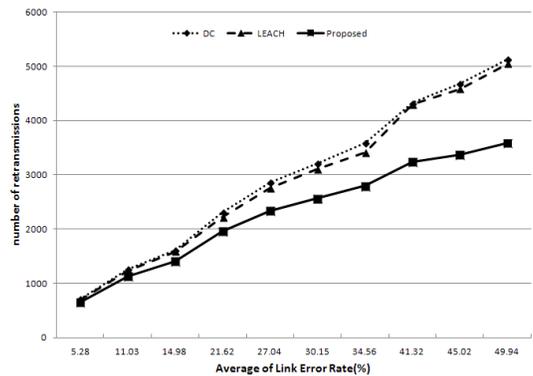


그림 6. 링크 에러율에 따른 재전송 횟수  
Fig. 6. Number of retransmissions under different link error rates

그림 6은 각 링크 에러율 범위에 따른 평균 링크 에러율에서 100 라운드 동안 재전송 횟수를 측정된 결과이다. 링크 에러율을 고려하지 않은 DC와 LEACH 기법은 거의 유사한 재전송 횟수를 가지며, 링크 에러율을 고려한 제안 기법은 링크 에러율이 증가할수록 재전송 횟수가 줄어드는 것을 볼 수 있다.

## 2. 재전송 횟수에 따른 에너지 효율성

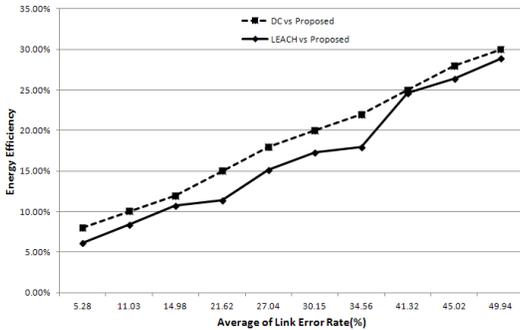


그림 7. 제안 기법의 에너지 효율성  
Fig. 7. Energy efficiency of the proposed mechanism

그림 7은 제안 기법과 타 기법 사이의 재전송 횟수를 비교하여 링크 에러율이 증가함에 따른 제안 기법의 에너지 효율성을 나타내고 있다. 제안 기법은 DC와 비교했을 때 평균 링크 에러율이 5.28%일 때 재전송 횟수에 따른 에너지 소모가 8.01% 감소하였고, 평균 링크 에러율이 증가함에 따라 최대 30% 까지 에너지 소모가 감소하였다. LEACH와 비교했을 때에는 평균 링크 에러율이 5.28%일 때 6.16% 감소하였고, 평균 링크 에러율이 증가함에 따라 최대 28.88% 까지 에너지 소모가 감소하였다. 제안 기법은 무선 네트워크의 링크 에러율이 높을수록 타 기법에 비해 재전송으로 인한 에너지 소모가 감소하여 에너지 효율적임을 알 수 있다.

## 3. 라운드별 네트워크 참여 노드의 수

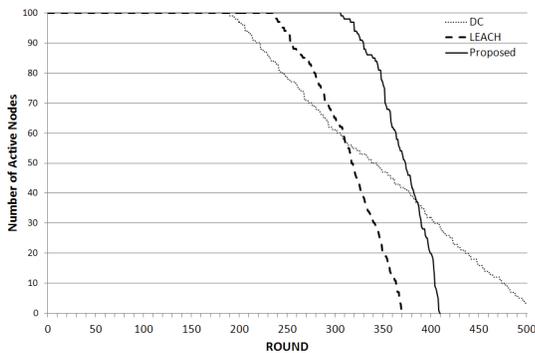


그림 8. 라운드별 네트워크 참여 노드의 수  
Fig. 8. Number of active nodes in each round

그림 8은 링크 에러율 0%에서 최대 50%까지 무작위로 분배한 네트워크 환경에서 라운드가 지나감에 따라 네트워크에 참여하고 있는 노드의 수를 보여준다.

표 3. 노드의 네트워크 참여 라운드 및 표준편차  
Table 3. Network participation round of node and standard deviation

	DC	LEACH	Proposed
노드가 죽은 최초 라운드	190	235	306
노드가 죽은 최종라운드	507	371	409
최초와 최종 라운드 사이의 표준 편차	224.15	96.17	72.83

표 3에서와 같이 네트워크에서 노드가 죽은 최초 라운드는 DC는 190 라운드, LEACH는 235 라운드, 제안기법은 306 라운드로 전체 노드가 네트워크에 모두 참여하는 시간은 제안 기법이 DC보다 62%, LEACH보다 30% 더 연장됨을 알 수 있다. 마지막 노드가 죽은 최종 라운드는 DC의 경우 507 라운드로 가장 긴 수명을 가지는데, DC는 제어 메시지의 사용에 따른 에너지 소모가 없고 싱크 노드에 근접한 노드일수록 에너지의 소모가 줄어들기 때문이다.

표 3의 노드가 죽은 최초 라운드와 마지막 노드가 죽은 최종 라운드 사이의 표준 편차는 에너지 소모가 얼마나 균등하게 이루어졌는가를 나타내는 지표이며, 표준 편차가 작을수록 에너지 소모가 균등하게 이루어졌음을 나타낸다. 제안 기법은 표준편차 72.83으로 타 기법에 비해 에너지 소모가 균등하게 이루어지고 있음을 보여준다.

## 4. 링크 에러율별 에너지 균등성

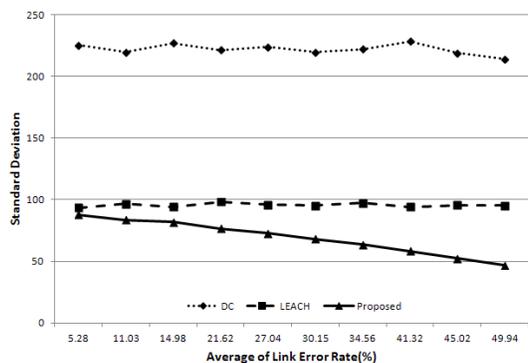


그림 9. 링크 에러율에 따른 에너지 균등성  
Fig. 9. Energy balancing under different link error rates

그림 9는 링크 에러율이 증가함에 따른 각 기법 별 최종 노드가 죽은 라운드와 최종 노드가 죽은 라운드의 표준 편차를 나타내고 있다.

DC와 LEACH는 링크 에러율이 증가하여도 표준편차가 유사한 수치를 보여주고 있는 반면 제안 기법은 링크 에러율이 증가할수록 표준 편차가 감소하고 있다. 이는 링크 에러율이 높은 환경일수록 제안기법이 균등한 에너지 소모 경로를 지향하고 있음을 보여준다.

## V. 결 론

본 논문에서는 노드의 잔여 에너지와 링크의 에러율을 고려하여 노드의 에너지가 균등하게 소모될 수 있는 경로를 찾아 전송하는 클러스터 기반의 멀티 홉 라우팅 기법을 제안하였다.

에러율이 높은 무선 환경에서는 재전송을 줄이는 것이 불필요한 에너지 소모를 줄이는 방법이며, 노드의 에너지 소모를 균등하게 가져가는 것이 모든 노드들이 네트워크에 참여하는 시간을 연장시킬 수 있다. 따라서, 본 논문에서는 링크 에러율과 잔여 에너지를 고려하여 재전송의 가능성이 낮으면서 에너지 소모가 균등한 경로를 선택해 전송하고자 하였다.

시뮬레이션 결과를 통하여 제안하는 기법은 타 기법에 비해 링크 에러율이 높아질수록 재전송 횟수가 감소하였으며, 이에 따라 최대 30%까지 에너지 소모를 감소할 수 있었고 네트워크의 수명이 연장됨을 보여주었다. 또한 균등한 에너지 소모 경로를 사용한 결과로 네트워크에서 첫 번째로 노드가 죽은 라운드와 마지막 노드가 죽은 라운드의 표준 편차가 가장 작게 나타났으며, 링크 에러율이 높은 환경일수록 성능이 더욱 향상됨을 보여주었다.

향후에는 이번 시뮬레이션에서 고려하지 못한 경로 선택을 위한 프로세싱 에너지 등 노드 내에서의 에너지 소비도 함께 고려하여 실제 네트워크에서의 모든 사항을 고려하고자 한다.

## 참고문헌

- [1] J. N. Al-Karaki, A. E. Karnal, "Routing Techniques in wireless sensor networks : A Survey", *Wireless Communications, IEEE*, Vol 11, NO. 6, pp.6-28, 2004
- [2] I. F. Akyldiz, W. Su, Y. Sankarusubramaniam, and E. Cyirci, "Wireless sensor networks: a survey", *Computer Networks*, vol. 38, no. 4, pp. 393-422, Aug. 2002.
- [3] K. Akkaya, M. Younis, "A survey on routing protocols for wireless sensor networks", *Ad Hoc Networks*, Vol. 3, NO. 3, pp.325-349, 2005
- [4] S. Bandyopadhyay and E. Coyle, "An energy efficient hierarchical clustering algorithm for Wireless Sensor Networks", in *Proc. of INFOCOM 2003*, vol. 3, pp.1713~1723, 2003
- [5] M. Singh and V. Prasanna, "Energy-Optimal and Energy-Balanced Sorting in a Single-Hop Wireless Sensor Network," *Proc. First IEEE Int'l Conf. Pervasive Computing and Comm.*, 2003.
- [6] S. Olariu and I. Stojmenovic, "Design Guidelines for Maximizing Lifetime and Avoiding Energy Holes in Sensor Networks with Uniform Distribution and Uniform Reporting", *Proc. IEEE INFOCOM*, 2006.
- [7] J. N. Dehankar, P. Patil, G. Agarwal, "Survey on Energy Consumption in Wireless sensor Network", *IJERT*, vol. 2 Issue 1, Jan. 2013
- [8] Z. Son, M. Cha, M. Shon, M. Kim, M. Kim and H. CHOO, "A Hole Detour Scheme Using Virtual Position Based on Residual Energy for Wireless Sensor Networks", *ICCSA*, Springer-Verlag, LNCS 6786, pp. 193-205, June 2011.
- [9] Ok C.-S., Lee S., Mitra P., Kumara S, "Distributed energy balanced routing for wireless sensor networks", *Comput. Ind. Eng.* 57, pp. 125-135, 2009
- [10] Fengyuan Ren, Jiao Zhang, Tao He, Chuang Lin and Sajal K. Das, "EBRP: Energy-Balanced Routing Protocol for Data Gathering in Wireless Sensor Networks", *IEEE Transactions On Parallel And Distributed Systems*, Vol. 22, No. 12, December 2011
- [11] J. You, D. Lieckfeldt, F. Reichenbach and D. Timmermann, "Context-aware Geographic Routing for Sensor Networks with Routing Holes", *Proceedings of the IEEE WCNC*, April 2009.
- [12] Wenlin Wang, Qiong Huang, Xiaolong Yang,

- "ERNC : An Energy-balanced Routing Protocol based on Network Coordinate for Wireless Sensor Networks", IEEE Conf. CSAE, vol. 2, pp. 80-84, May 2012
- [13] W. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, "Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks", Proceedings of HICSS, pp.3005-3014, Jan. 2000.
- [14] M. Dorigo, G. Di Caro, "Ant colony optimization: a new meta-heuristic", Proceedings of the 1999 Congress on Evolutionary Computation, Proceedings, 1999.
- [15] A. M. S. Saleh, B. M. Ali, M. F. A. Rasid, A. Ismail, "A Self-Optimizing Scheme for Energy Balanced Routing in Wireless Sensor Networks Using SensorAnt", Sensors 12, no. 8 : 11307-11333, Aug. 2012.

## 저 자 소 개



### 이 현 석

2001: 울산대학교 금속공학과 공학사.

2003: 울산대학교

컴퓨터정보통신공학부 공학석사.

2005~현재: 울산대학교

전기공학부 박사과정

관심분야: 무선센서네트워크, Ad-hoc

네트워크, 이동통신

Email : jamesjkh@ulsan.ac.kr



### 허 정 석

1976: 서울대학교 전기공학과 공학사.

1985: 서울대학교

컴퓨터공학과 공학석사.

1995: 부산대학교

컴퓨터공학과 공학박사

현 재: 울산대학교 전기공학부 교수

관심분야: 무선센서네트워크,

광대역네트워크, 이동통신

Email : heojs@ulsan.ac.kr