

에너지 하베스팅 활용 노드의 수명 연장을 위한 센서 네트워크 운용 기법

송우택¹, 유동우¹, 백돈규¹, 이형규²

¹충북대학교, ²덕성여자대학교

thd2775@chungbuk.ac.kr, ehddn1572@chungbuk.ac.kr, donkyu@cbnu.ac.kr, hglee@duksung.ac.kr

Sensor Network Management Technique for Extending the Lifetime of Energy Harvesting Nodes

Wootack Song¹, Dongwoo You¹, Donkyu Baek¹, and Hyung Gyu Lee²

¹Chungbuk National Univ., ²Duksung Women's Univ.

요약

에너지 하베스팅(Energy Harvesting, EH) 기반 센서 네트워크는 배터리 교체 주기를 줄이고 장기적인 서비스 지속성을 확보할 수 있다는 장점을 가진다. 그러나 기존의 클러스터 구조는 Cluster Head(CH)에 데이터 집계와 장거리 전송이 집중되면서 에너지 불균형과 네트워크 조기 단절을 초래할 수 있다. 또한 기존 연구들은 태양광 에너지와 같은 환경 에너지를 충분히 활용하지 못해, 실제 네트워크의 변동적 에너지 수급 상황을 반영하는 데 한계가 있었다. 본 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 Cluster Head(CH), Cluster Member(CM), Cluster Independent(CI)의 3계층 구조를 제안한다. 제안하는 CI는 특정 조건에서 클러스터에 종속되지 않고 독립적으로 서버와 직접 통신함으로써 CH의 과부하를 완화하고 네트워크의 유연성을 높인다. 각 노드는 에너지 잔량, 에너지 수확률, 링크 품질과 같은 상태 지표에 따라 CH - CM - CI 역할을 동적으로 전환할 수 있다. 데이터시트 기반 파라미터를 활용한 시뮬레이션 결과, 제안한 운용 기법은 기존 CH - CM 구조에 비해 CH의 에너지 집중을 완화하고 태양광 에너지를 효과적으로 활용하여 네트워크 수명을 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

I. 서론

사물인터넷(IoT)의 확산과 함께 다양한 센서 네트워크가 구축되고 있으며, 이들 네트워크는 장기간 안정적으로 동작하기 위해 배터리 교체 주기를 최대화하는 기술이 요구된다. 이를 해결하기 위한 방법으로 주변 환경에서 전력을 수확하는 에너지 하베스팅(Energy Harvesting, EH) 기술이 주목받고 있다. 특히 태양광은 대표적인 EH 자원으로 활용 가능성이 높지만, 기상 조건과 설치 환경에 따라 수확 가능한 에너지가 크게 변동하는 한계가 있다[1,2,3].

기존의 클러스터 기반 네트워크에서는 Cluster Head(CH)가 데이터 집계와 장거리 전송을 전담한다[4]. 그러나 이러한 구조에서는 CH에 에너지 소모가 집중되어 네트워크 전체 수명을 단축시키는 문제가 발생한다. 또한 기존 연구들은 EH를 고려한 다양한 관리 기법을 제시해 왔으나, 태양광과 같은 변동성이 큰 에너지 자원을 충분히 활용하지 못하거나, 노드 간 역할 불균형을 해소하는 데 한계가 있다.

본 연구에서는 이러한 문제를 보완하기 위해 CH, Cluster Member(CM), Cluster Independent(CI)로 구성된 새로운 노드 운용 구조를 제안한다. CI는 클러스터에 종속되지 않고 독립적으로 서버와 통신할 수 있는 노드로, 특정 조건에서 활성화되어 CH의 과부하를 완화하고 에너지 불균형을 줄인다. 또한 노드 상태에 따라 CH - CM - CI 역할을 유연하게 전환함으로써, 태양광 에너지와 같은 변동성 높은 자원을 보다 효과적으로 활용할 수 있도록 설계하였다.

II. 운용 기법

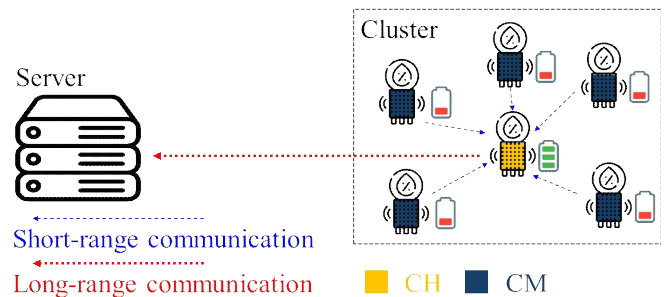


그림 1. 기존 CH-CM 구조

그림 1과 같이 기존의 클러스터 기반 센서 네트워크에서는 배터리 잔량이 높은 CH가 다수의 CM으로부터 데이터를 수집하고 이를 서버로 전송하는 구조를 사용한다. 그러나 CH는 지속적인 데이터 집계와 장거리 통신을 동시에 수행해야 하므로 에너지 소모가 집중되고, 결과적으로 네트워크 수명 단축을 초래하는 병목 지점이 된다.

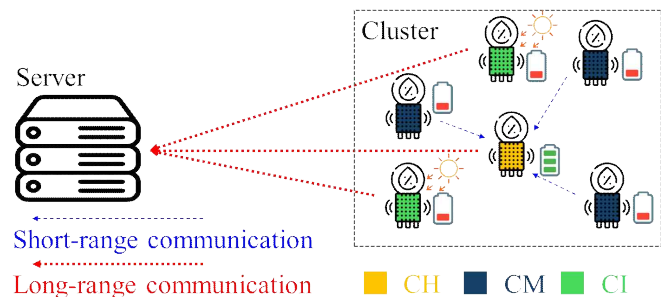


그림 2. 제안하는 CH-CM-CI 구조

본 연구에서는 이러한 한계를 완화하기 위해 CI 개념을 제안한다. 그림 2에서 CI는 기존의 CH - CM 계층 구조에 종속되지 않고, 에너지 수확량이 장거리 통신을 활용할 수 있을 정도로 충분한 경우에, 독립적으로 서버와 장거리 통신을 수행하는 노드이다. 이를 통해 CH의 과부하를 줄이고, 네트워크 전체의 에너지 균형을 개선할 수 있다.

```

1: Input:  $E_{batt}, E_{harv}$ 
2: Output:  $CM, CH, CI$ 
3:  $CM \leftarrow \{\}, CH \leftarrow \{\}, CI \leftarrow \{\}$ 
4: for  $i = 1$  to  $n$  do
5:    $E_{avail,i} = E_{batt,i} + E_{harv,i}$ 
6: end for
7:  $CH \leftarrow$  node  $i$  with highest  $E_{avail,i}$ 
8: for  $i = 1$  to  $n$  do
9:   if  $E_{harv,i} > E_{LoRa}$  then
10:     $CI \leftarrow$  node  $i$ 
11:   else
12:     $CM \leftarrow$  node  $i$ 
13:   end if
14: end for

```

그림 3. 제안하는 구조 운용 기법

또한 기존 CM이 상황에 따라 CI로 전환될 수 있도록 설계함으로써, 네트워크는 동적으로 변화하는 EH 환경에 유연하게 대응할 수 있다. 그림 3에서 CI의 도입은 노드의 상태(배터리 잔량, 하베스팅량)를 기반으로 CH - CM - CI 간 역할을 재구성함으로써, 에너지 하베스팅 센서 네트워크의 수명을 효과적으로 연장할 수 있다.

III. 시뮬레이션 결과

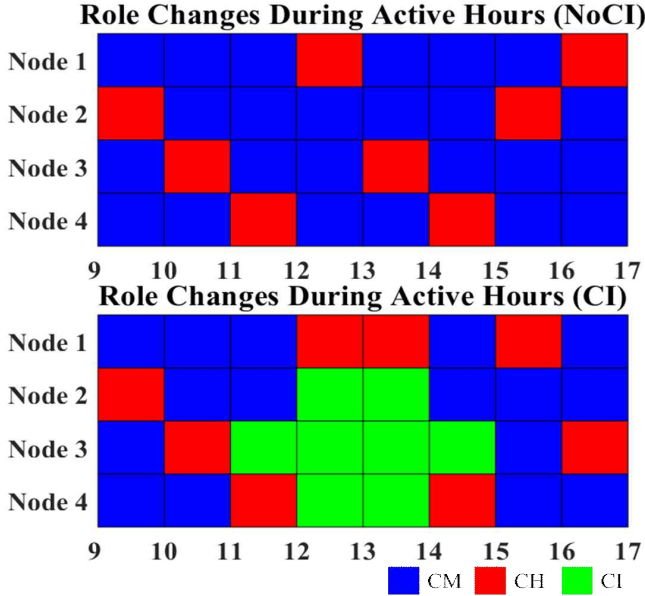


그림 4. 시간에 따른 클러스터 내 역할 변화 그래프

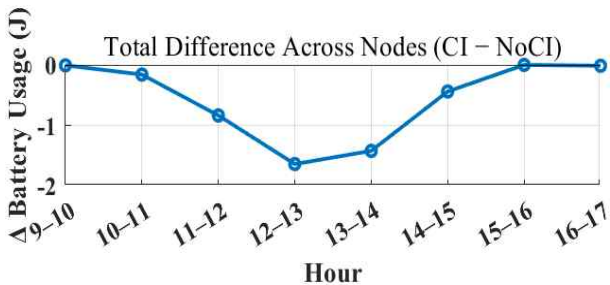


그림 5. CI 유무에 의한 배터리 사용량 차이

본 시뮬레이션은 용산구 지역의 일조량 데이터를 기반으로 하여, 장거리 통신, 단거리 통신 및 센싱과 같은 일련의 동작을 데이터시트 참조 값을 이용해 정량화하여 수행하였다. 그림 4는 4개의 센서노드를 가정하여 제안한 구조를 적용한 결과이다. 그림 5는 CI를 도입한 경우와 그렇지 않은 경우(NoCI)를 비교하여, 시간대별 전체 노드의 배터리 사용량 차이를 나타낸 것이다. 그래프에서 CI - NoCI 값이 음수로 나타나는 구간(특히 11시 - 14시)은 CI를 적용했을 때 전체 네트워크의 배터리 소모가 줄어드는 효과가 있음을 의미한다.

즉, 태양광 발전량이 충분한 시간대에 일부 CM이 CI로 전환하여 서버와 직접 통신하면서, CH에 집중되던 부하가 분산되었고 결과적으로 네트워크 전체 에너지 효율이 개선되었다. 이후 오후 시간대에는 CI와 NoCI의 차이가 줄어들지만, 적어도 피크 시간대의 배터리 소모를 줄여주는 효과가 확인되었다.

IV. 결론

본 연구에서는 에너지 하베스팅 기반 센서 네트워크에서 발생하는 CH 과부하 문제를 완화하기 위해, CI를 포함한 CH - CM - CI 구조를 제안하였다. CI는 태양광 발전량과 배터리 잔량을 기반으로 동적으로 활성화되어 서버와 직접 통신함으로써, 기존 CH - CM 구조에서 집중되던 에너지 소모를 분산시킨다.

정량화된 데이터 기반 시뮬레이션을 통해 CI 운용의 효과를 검증하였다. 그 결과, 태양광 발전량이 충분한 시간대에 CI가 활성화됨으로써 네트워크 전체의 배터리 소모가 줄어들고, CH의 에너지 집중 문제가 완화됨을 확인하였다. 이는 에너지 하베스팅 환경에서 불규칙한 에너지 수급 조건에도 보다 안정적으로 대응할 수 있음을 보여준다. 따라서 CI를 포함한 역할 전환 기반 관리 기법은 센서 네트워크의 에너지 균형을 개선하고, 네트워크 수명을 효과적으로 연장할 수 있는 접근법이라 할 수 있다. 향후 연구에서는 실제 하드웨어 실험을 통해 제안 기법의 타당성을 검증하고, 다양한 환경 조건에서의 일반화를 진행할 예정이다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2025년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. RS-2020-NR049604).

참 고 문 헌

- [1] Kamal Gulati, et al., "A review paper on wireless sensor network techniques in Internet of Things (IoT)", Materials Today: Proceedings, volume 51, part 1, 2022, pp. 161-165.
- [2] Jash Doshi, Tirthkumar Patel, Santosh kumar Bharti, "Smart Farming using IoT, a solution for optimally monitoring farming conditions", Procedia Computer Science, volume 160, 2019, pp. 746-751.
- [3] N. Havard, S. McGrath, C. Flanagan and C. MacNamee, "Smart Building Based on Internet of Things Technology," 2018 12th International Conference on Sensing Technology (ICST), Limerick, Ireland, 2018, pp. 278-281.
- [4] L. Qing, Q. Zhu, and M. Wang, "Design of a distributed energy-efficient clustering algorithm for heterogeneous wireless sensor networks," Computer Communications, vol. 29, no. 12, pp. 2230 - 2237, 2006.