

모바일 싱크를 사용하는 클러스터 기반 무선 센서 네트워크에서 전송 범위 최적화를 위한 적응적 방법

서 봉 수*

An Adaptive Strategy for Transmission Range Optimization in Cluster-based Wireless Sensor Networks with Mobile Sink

Bongsue Suh*

요 약

본 연구는 무선 센서 네트워크의 에너지 효율성 향상과 네트워크 수명 연장을 위해 센서 노드의 전송 거리를 동적으로 최적화하는 기법을 제안한다. 기존의 DHDP 기법을 기반으로 클러스터링과 경로 최적화는 유지하면서, 노드 수와 밀도에 따라 최적 전송 반경을 실시간으로 계산하는 알고리즘을 통합하였다. 제안한 알고리즘은 다양한 후보 전송 반경에 대해 클러스터 품질, 데이터 수집 경로 길이, 전체 에너지 소비량, 네트워크 수명을 평가하고, 이를 종합한 목적 함수 값을 최소화하는 전송 반경을 선택한다. 시뮬레이션 결과, 제안 기법은 기존의 방법에 비하여 네트워크 수명 시간을 연장시키거나 모바일 싱크의 데이터 수집 경로를 감소시킬 수 있음을 보여주었다. 특히, 네트워크 운영 목적에 따라 에너지 절약형, 수명 우선형, 경로 최적화형 등 다양한 전략을 적용할 수 있는 유연성을 제공할 수 있음을 확인하였다.

Abstract

This study proposes a dynamic transmission range optimization technique to improve energy efficiency and extend the network lifetime in wireless sensor networks. Based on the existing DHDP strategy, the proposed method preserves clustering and path optimization while integrating a real-time algorithm that calculates the optimal transmission radius according to node count and density. The algorithm evaluates multiple candidate transmission ranges by analyzing cluster quality, data collection path length, total energy consumption, and network lifetime, and selects the transmission radius that minimizes a composite objective function. Simulation results demonstrate that the proposed strategy can either prolong the network lifetime or reduce the data collection path of a mobile sink compared to the previous approach. Furthermore, the proposed strategy offers flexibility to apply various operational strategies, such as energy-saving, lifetime-prioritized, or path-optimized modes, depending on the specific goals of the network.

Keywords

wireless sensor network, mobile data sink, transmission distance

* 국립공주대학교 스마트정보기술공학과 교수
- ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5687-3159>

• Received: Aug. 01, 2025, Revised: Sep. 04, 2025, Accepted: Sep. 07, 2025
• Corresponding Author: Bongsue Suh
Department of Smart Information Technology Engineering, Kongju
National University, South Korea
Tel.: +82-41-521-9200, Email: bsuh@kongju.ac.kr

I. 서 론

무선 센서 네트워크(WSNs, Wireless Sensor Networks)는 환경 모니터링, 스마트 농업, 산업 제어 등 다양한 분야에서 활용되고 있으며, 제한된 에너지와 연산 자원을 가진 다수의 센서 노드로 구성된다. 특히 넓은 지역에 다수의 센서 노드가 배치된 환경에서는 데이터 수집의 효율성과 네트워크 수명의 균형이 매우 중요하다.

기존의 무선 센서 네트워크에서 데이터 수집은 고정된 싱크 노드를 통한 멀티홉 전송 방식을 주로 사용하였으나, 이 방식은 특정 중간 노드에 데이터 전송이 집중되는 핫스팟 문제를 유발하여 네트워크 수명을 단축시키는 한계가 있었다. 이를 해결하기 위한 방법으로 이동성이 부여된 데이터 수집 장치, 즉 모바일 싱크(Mobile sink)를 활용한 연구가 활발히 진행되었다[1]-[4].

대표적으로 제안된 DHDP(Distance-aware Hierarchical Data-collecting Path Selection)[2]는 R-HAC(Range bound Hierarchical Agglomerative Clustering) 기반 클러스터링과 ACO(Ant Colony Optimization) 기반 경로 최적화를 결합하여 데이터 수집 효율성을 향상시키고 핫스팟 문제를 완화하였다. 또한 클러스터 품질 평가를 위해 ASW(Average Silhouette Width)[5]를 적용하고, CA(Collection Agent)를 지정하여 네트워크 부하를 분산시킴으로써 데이터 수집 병목 현상을 감소시켰다.

그러나 DHDP와 유사한 기존 기법들은 대부분 고정된 전송 반경 설정을 기반으로 하여 네트워크 밀도 변화나 노드 분포의 동적 변화에 적응하지 못하는 한계를 지닌다. 이는 네트워크 환경에 따라 불필요한 에너지 소모와 저밀도 환경에서의 연결성 약화를 초래하여 성능 저하로 이어질 수 있다.

최근 연구들은 이러한 한계를 보완하고자 다양한 접근을 제안하였다. 예를 들어 ERSS-POA(Efficient Relay Station Selection and Patch Optimization Algorithm)[3]는 네트워크에 직접 연결되지 않은 센서 노드를 포함하는 환경에서 모바일 싱크의 데이터 수집 지연을 최소화하기 위해 중계 노드의 최적 배치와 패치 기반 경로 최적화 알고리즘을 도입하

였다. 이를 통해 기존의 알고리즘 대비 지연 시간 감소, 패킷 손실을 저감, 에너지 소비 절감 및 네트워크 수명 연장에서 우수한 성능을 입증하였다.

다른 연구로 제안된 Merged Path 기법[4]은 다수의 모바일 싱크를 갖는 무선 센서 네트워크에서 모바일 싱크별로 설정된 독립적인 경로로 인한 자원 낭비 문제를 해결하기 위해 데이터 수집 경로를 경로 병합하는 분산 데이터 전송 방식을 도입하였다. 이를 통해 불필요한 중복 전송을 줄이고 최대 50% 에너지 절감, 충돌 감소 및 전송 신뢰성을 향상시키는 성과를 보였다.

이와 같이 모바일 싱크 기반 데이터 수집 연구는 단순히 핫스팟 문제 해결을 넘어, 지연 최소화와 자원 활용 효율성을 동시에 달성하는 방향으로 발전하고 있다. 그러나 기존 연구들은 여전히 센서 노드의 전송 반경 설정을 고정적으로 두는 경향이 있어, 네트워크의 동적인 특성과 운영 목표(예: 에너지 절감, 수명 연장, 데이터 수집 지연 최소화)에 따른 동적인 데이터 수집 전략을 충분히 반영하지 못하고 있다. 본 연구는 이러한 한계를 극복하기 위해 DHDP의 클러스터링·경로 최적화 구조를 유지하면서, 네트워크 밀도와 운영 목표에 따라 적응적으로 전송 반경을 계산하는 기법을 제안한다. 이를 통해 동일한 네트워크 환경에서도 목적에 따라 유연하게 운용할 수 있는 적응형 데이터 수집 체계를 구현하고자 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 기존 연구 동향과 한계를 분석하고, 3장에서는 제안 기법과 알고리즘을 설명한다. 4장에서는 컴퓨터 시뮬레이션 기반 성능 평가와 기존 기법과의 비교 결과를 제시하며, 5장에서 결론을 맺는다.

II. 기존 연구의 요약 및 분석

무선 센서 네트워크(WSN)에서 모바일 싱크 기반 데이터 수집은 네트워크 수명 연장과 데이터 수집 효율성 향상을 위해 활발히 연구되어왔다. 그러나 기존 연구들은 공통적으로 고정된 RP(Rendezvous Point) 기반 구조 또는 고정 송신 반경 가정에 의존함으로써, 노드 밀도와 네트워크 환경 변화에 따른 제약,

그리고 스케일 확장성 측면에서 한계를 보였다. 본 장에서는 대표적인 기존 기법들을 요약 분석하고, 본 논문이 이를 어떻게 개선하는지를 살펴본다.

WRP(Weighted Rendezvous Planning)[6]는 센서 노드를 RP로 간주하고 최단 경로 기반으로 모바일 싱크의 경로를 설계하였다. 소규모 네트워크에서 효율적이나, 대규모 환경에서는 RP 인근 노드 에너지 고갈로 인한 핫스팟 문제가 발생하였다. EAPC(Energy-Aware Path Construction)[7]은 스페닝 트리 기반 RP 선택과 Convex Polygon (볼록 다각형) 기반 경로 생성을 제안했으나, 경로 길이와 계산 복잡성이 크게 증가하였다. 이들 연구는 공통적으로 정적 RP 기반 경로 생성에 머물렀으며, 네트워크 크기 확장성과 환경 적응성에서 취약점을 드러냈다.

NDCMC(Nearest Distance Cluster-head based Mobile node Clustering)[8]는 계층적 클러스터링(HAC, Hierarchical Agglomerative Clustering) 기반으로 RP를 선택하고 가상 클러스터 헤드를 활용했으나, 사전 클러스터 수 지정과 경로 중첩 문제로 최적화가 어렵고 지연이 증가하였다. 또한, HACDC[10]는 클러스터 중심 노드를 RP로 지정해 모바일 싱크가 순회하는 구조를 제안하였다. 그러나 클러스터 형성 시 실제 송신 가능 여부를 고려하지 않아 네트워크 수명 단축과 수집 지연 증가로 이어졌다.

OSP-ACO(Optimal Sojourn Point selection using Adaptive Polar Orbit)[9]는 클러스터 크기를 송신 범위의 절반으로 제한하여 지연을 줄였으나, 클러스터 헤드 에너지 소모 집중 문제가 있었다. 즉, 클러스터링 기법들은 네트워크 분산화 및 경로 효율성 측면에서 유의미하였으나, 거리 기반 송신 가능성을 충분히 반영하지 못했고, 클러스터 헤드 집중으로 인한 에너지 소모 불균형 문제가 지속되었다.

DHDP(Distance-aware Hierarchical Data-collecting Path Selection)[2]는 R-HAC 기반 클러스터링과 ACO 경로 최적화를 결합하고, 송신 거리 내에서 ASW로 클러스터 품질을 평가하였다. 또한, CA 노드를 지정하여 데이터 병목을 완화하였다. 기존 OSP-ACO[9]와 HACDC(Hierarchical Agglomerative Clustering based Data Collection)[10] 대비 넓은 지역에서 우수한 성능을 입증했으나, 여전히 고정 송신 반경 가정에 의존

하여 고밀도 환경에서 불필요한 에너지 소모, 저밀도 환경에서 연결성 문제를 야기하였다.

이와 유사한 문제 해결 방법으로 단절된 무선 센서 네트워크 환경에서 지연 최소화 경로 설정 기법을 제안하여, 거리 기반 전송 가능성을 반영하면서도 모바일 싱크의 이동을 최적화하였다[3]. 그리고 Merged Path 기법[4]에서는 다수 싱크 간 경로를 병합하여 데이터 분산 수집 효율을 높였다. 두 연구는 DHDP와 달리 동적 경로 설계 및 분산 경로 병합을 통해 실제 네트워크 환경에서의 지연 및 확장성 문제를 완화하였다.

하지만, 기존의 기존 연구들의 공통적인 문제는 여전히 존재하며, 이는 첫째로 고정된 RP 기반 구조로 인하여 네트워크 환경 변화에 적응이 부족하며, 둘째, 클러스터링 과정의 단순화로 인하여 송신 가능 여부 및 거리 기반 특성 반영 미흡하며, 셋째, 고정 송신 반경 사용함에 따라 센서 노드의 밀도 변화에 따라 적응적으로 동작하기 어렵고, 이에 따라 대규모 네트워크로의 스케일 확장성이 부족하여 경로 최적화 어려움이 존재할 수 있다.

본 논문은 DHDP 프레임워크(R-HAC 기반 클러스터링과 ACO 경로 최적화)를 유지하면서, 노드 수 및 밀도 기반의 송신 반경을 적응적으로 조정 기법을 제안한다. 이를 통해 클러스터링 기법의 장점을 유지하되, 거리 기반 전송 제어 방식과 결합하여 네트워크가 목표로 하는 지표에 따라 불필요한 에너지 낭비를 줄이거나 데이터 수집 지연 시간을 최소화하거나 네트워크 수명 연장을 달성하고자 한다. 이는 [3]의 지연 최소화 기법과 [4]의 분산 경로 최적화 접근을 포괄적으로 확장하여 제안하는 기법을 적용한 개선된 형태라 할 수 있다.

III. 제안하는 방법

앞에서 살펴본 바와 같이 무선 센서 네트워크에서 송신 거리는 클러스터링, 라우팅, 에너지 소비, 수명 등 거의 모든 성능 지표에 영향을 주는 핵심 변수이다. 따라서 센서 노드 수, 밀도, 네트워크의 상황과 환경의 조건에 따라 최적의 송신 거리를 구하는 것이 중요하다.

본 연구는 기존 DHDP의 R-HAC 클러스터링 및 모바일 싱크의 경로 최적화 방식은 유지하되, 센서 노드 수 및 밀도에 따라 최적의 전송 반경 값을 유동적으로 갖도록 하는 방법을 제안한다. 본 방법은 네트워크 수명과 데이터 싱크의 수집 경로 거리 등의 모든 조건을 만족시킬 수 없기 때문에 특정 네트워크가 최적화하고자 하는 목표에 따라 관련 파라미터를 조정하여 능동적으로 적용할 수 있음을 보이고자 한다.

본 논문에서는 고정된 크기의 네트워크 내에 무작위로 배치된 센서 노드 수의 변화에 따라 세가지의 목표에 근거하여 센서 노드의 전송 반경을 조정하도록 한다. 즉, 네트워크 수명 시간을 증대시키거나, 센서 노드들의 전체 에너지 소비량을 감소시키거나, 또는 모바일 싱크의 데이터 수집 경로를 감소시키는 목표 방법을 달성하기 위한 기준에 만족시키기 위하여 최적의 전송 반경을 구하도록 한다. 전체적인 알고리즘의 의사 코드는 그림 1과 같다.

Algorithm 1: Determine R_{opt}

Input: Node set V , R_{range} , $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$, threshold

Output: R_{opt} , Clusters, CHs, Path, Metrics

```

1  $S^* \leftarrow \infty$ ;
2 for  $R \in R_{range}$  do
3    $C \leftarrow \text{R\_HAC\_Clustering}(V, R)$ ;
4   if  $ASW(C) < \text{threshold}$  then
5     continue
6    $CH \leftarrow \text{SelectAgents}(C)$ ;
7    $\Pi \leftarrow \text{ACO\_Path}(CH)$ ;
8    $(E_{av}, T_L, L_{path}) \leftarrow \text{Evaluate}(C, CH, \Pi)$ ;
9    $S(R) \leftarrow \text{Eq. (5)}$ ;
10  if  $S(R) < S^*$  then
11     $S^* = S(R)$ ;
12     $R_{opt} = R$ ;

```

그림 1. 센서 노드의 최적 전송 거리 구하는 알고리즘
Fig. 1. Algorithm to determine the optimal transmission distance of sensor nodes

모든 센서 노드들을 대상으로 R-HAC 기법을 기반으로 하여 클러스터링을 수행한다. 즉, 초기의 각 노드들은 각각이 하나의 독립적인 클러스터로 가정하며 이후, R-HAC 기법에 의하여 클러스터를 병합해 나간다. 이 과정에서 각 노드는 식 (1)을 이용하여 실루엣 값을 계산한다.

$$s(i) = \frac{b(i) - a(i)}{\max[a(i), b(i)]} \quad (1)$$

여기서, $a(i)$ 는 센서 노드 i 가 속해 있는 클러스터 내에 있는 다른 모든 센서 노드와의 거리의 평균, $b(i)$ 는 i 에서 가장 가까운 다른 클러스터에 속해 있는 센서 노드들과의 거리 평균을 의미한다. 즉, $s(i)$ 값이 1에 가까울수록 노드들이 이상적으로, -1에 가까울수록 비효율적으로 클러스터링되었음을 의미한다.

모든 노드에서의 실루엣 값의 평균, 즉, ASW(Average Silhouette Width)값을 구하면 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$ASW = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N s(i) \quad (2)$$

ASW 값이 1에 가까울수록 전체적으로 클러스터링이 이상적임을 확인할 수 있다. 본 알고리즘에서는 무작위로 배치된 센서 노드의 경우 ASW 값이 0.65 이상이면 적절히 클러스터링 되었다고 판단한다. 만약 이러한 조건을 만족하지 못하면 문턱값(Threshold) 값을 조금씩 낮추어 이를 만족하는 최종적인 클러스터 형성이 완료되도록 한다.

센서 노드의 전송 반경이 R 로 설정된 경우 ASW 값의 조건을 만족하면 클러스터링은 완료되고 클러스터 헤드(CH)가 결정되며, 이에 따라 모바일 싱크가 데이터 수집을 위하여 모든 클러스터를 방문하는 경로가 결정된다. 따라서 모바일 싱크의 데이터 수집 경로와 이의 $L_{path}(R)$ 가 결정된다. 이에 따라 모든 센서 노드에서 일어나는 데이터 수집 경로가 결정되며, 임의의 센서 노드 i 가 한번의 데이터 수집 주기 동안 소비하는 에너지 $E(i)$ 는 클러스터 내의 다른 센서 노드로부터 데이터를 수신하는데 필요한 에너지 $E_{RX}(\cdot)$ 와 수신 데이터에 자신의 데이터를 포함하여 다음 센서 노드 또는 모바일 싱크로 데이터를 보내는데 필요한 에너지 $E_{TX}(\cdot)$ 의 합으로 구할 수 있다.

따라서 센서 노드들의 전송 반경이 R 인 경우 한번의 데이터 수집 주기에 따른 전체 센서 노드가 소비하는 평균 에너지는 식 (3)으로 구할 수 있다.

$$E_{av}(R) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N E(i) \quad (3)$$

센서 네트워크의 수명을 정의하는 방법은 여러 가지가 있으나 본 논문에서는 다수의 데이터 수집 라운드를 수행한 후에 처음으로 에너지 고갈 상태에 도달하는 센서 노드가 발생하는 시점으로 정의한다. 즉, 센서 노드 i 가 초기 동작부터 m 번의 데이터 수집 라운드를 수행했을 때까지 소비한 에너지의 총량을 $E_A(i, m)$ 라고 하면 네트워크의 수명 시간 T_L 은 센서 노드의 전송 반경 R 값이 정해지면 결정되므로 식 (4)와 같이 표현할 수 있다. 여기서 E_0 는 단말 노드가 초기 상태에 보유하고 있는 에너지 값이다.

$$T_L(R) = \max m \text{ s.t } \exists E_A(i, m) < E_0, \quad \text{for } i = 1, 2, 3, \dots, N \quad (4)$$

결과적으로 센서 노드의 전송 반경의 특정 값 R 이 결정되면, 클러스터링 과정을 통하여 클러스터, 모바일 싱크의 데이터 수집 경로 길이 $L_{path}(R)$, 모든 센서 노드들의 평균 에너지 소비량 $E_{av}(R)$, 그리고 네트워크의 수명 $T_L(R)$ 이 결정된다. 네트워크 성능 측면에서 보면, L_{path} 와 E_{av} 는 작은 값으로, 그리고 T_L 은 큰 값을 가지는 것이 유리하므로, 특정 R 값이 적절한 값인지를 판단하는 기준식 $S(R)$ 을 식 (5)와 같이 정의한다.

$$S(R) = \lambda_1 \frac{E_{av}(R)}{E_{\max}} + \lambda_2 \frac{L_{path}(R)}{L_{\max}} - \lambda_3 \frac{T_L(R)}{T_{\max}} \quad (5)$$

여기서 각각 λ_1 , λ_2 , λ_3 값은 센서 노드들의 평균 에너지 소비량, 모바일 싱크의 이동 경로 길이, 그리고 네트워크 수명을 고려한 가중치 값이다. 그리고, $E_{\max}$ 는 센서 노드가 한번의 데이터 전달에 소비하는 에너지 (본 논문에서는 2개의 데이터를 200미터 거리로 송수신 하는데 필요한 에너지), $L_{\max}$ 는 데이터 싱크가 이동하는 최대 이동거리 (본 논문에서는 네트워크 네 변의 길이의 합), 그리고

$T_{\max}$ 는 네트워크 수명의 한계값을 의미한다.

식 (5)에서의 세 가중치 값은 센서 네트워크가 우선적으로 목표하는 성능 지표에 따라 다르게 설정할 수 있도록 제안한다. 예를 들어, 센서 노드들이 에너지 하베스팅 기반의 저용량의 배터리로 동작한다면 λ_1 값을 크게하여 센서 노드들의 에너지 소모를 감소시키는 방향으로 최적화할 수 있다. 또는, 모바일 싱크가 에너지의 제약이 있거나 빠른 데이터 수집이 필요하면 λ_2 값을 크게 하도록 한다. 그리고, 센서 네트워크의 장시간 운용 목적성이 크다면 λ_3 값을 크게 설정한다.

이와 같이 네트워크 환경이나 운영 상황에 따라 우선시 하는 목표를 달성하기 위한 적절한 가중치 값을 적절하게 결정하면, 그에 따른 센서 노드들의 최적의 전송 반경 값 R_{opt} 를 식 (6)과 같이 구할 수 있다.

$$R_{opt} = \arg R \min_R S(R) \quad (6)$$

표 1. 수치 분석을 위한 파라미터 값

Table 1. Parameter values for numerical analysis

Parameters	Symbol	Value
Network size		300 m X 300 m
Number of sensor nodes	N	20 - 400
Initial energy per node	E_0	10 J
Data packet size	$R_{\max}$	4000 bits
Energy consump. constant	E_{elec}	50 nJ/bit
Free-space energy constant	ϵ_{fs}	10 pJ/bit/m ²
Max of energy for one round	$E_{\max}$	4.0 mJ
Max of gather path	$L_{\max}$	1200 m
Max of lifetime	$T_{\max}$	5000 rounds
Number of runs		20

IV. 성능 분석과 비교

본 논문에서는 300m × 300m 크기의 정사각형 영역 내에 동일한 사양을 가진 센서 노드들이 무작위로 배치되며, 각 노드는 동일한 수준의 트래픽을 발생시키는 것으로 가정한다. 센서 노드의 수가 20에서 400으로 변화함에 따라 각기 다른 목표를 가지는 방법의 최적 송신 반경(R_{opt})을 구하고, 이에 따

른 네트워크의 성능을 구하여 비교 분석하였다. 각 기법들의 알고리즘의 구현과 네트워크의 동작에 따른 성능 분석은 Scilab을 이용한 컴퓨터 시뮬레이션으로 실시하였으며, 각 조건별로 20회 반복하여 평균값을 구하였다. 사용된 파라미터는 표 1와 같다.

센서 노드의 에너지 소비 모델은 무선 매체를 통하여 송수신하는 두 노드 사이의 거리와 데이터 크기에 관계하는 에너지 소비량의 식[11]에 근거하였다. 즉, 길이 b 비트의 데이터를 x 미터 위치로 전송하기 위한 전송측 노드에서 소모되는 에너지 $E_{TX}(b, x)$ 및 b 비트를 수신하기 위한 수신측 노드에서 소모하는 에너지 $E_{RX}(b)$ 는 식 (7) 및 식 (8)과 같이 표현할 수 있으며, 사용한 파라미터는 $E_{elec} = 50 \text{ nJ}$, $\epsilon_{fs} = 10 \text{ pJ/bit/m}^2$ 으로 설정한다[11].

$$E_{TX}(b, x) = bE_{elec} + b\epsilon_{fs}x^2 \quad (7)$$

$$E_{RX}(b) = bE_{elec} \quad (8)$$

본 논문에서는 네트워크의 최적화 목표에 따라 표 2와 같이 네 가지의 다른 가중치 값 세트를 가지도록 하였으며, 또다른 비교 대상으로 고정된 센서 노드 전송 거리($R=24$)를 가지는 DHDP에 대해서도 함께 분석하였다.

표 2. 최적화 목표에 따른 가중치 값

Table 2. Weight values for different optimization aims

Optimization aim	λ_1	λ_2	λ_3
Lifetime prioritized	0.2	0.1	0.7
Energy-saving prioritized	0.6	0.3	0.1
Gathering path prioritized	0.3	0.6	0.1
Balanced	1/3	1/3	1/3

4.1 센서 노드 수 변화에 R_{opt} 분석

그림 2은 센서 노드 수가 20개에서 400개로 증가할 때 본 논문에서 제안하는 방법을 적용한 경우의 최적 송신 반경 변화를 나타낸다. 네 가지 최적화 목표에 따라 결과가 다르게 나타남을 확인할 수 있었다. 데이터 수집 경로 감소를 우선하는 경우, 센서 노드 수가 많아질수록 송신 반경이 커지는데, 이

는 큰 반경으로 소수의 대형 클러스터를 형성하여 전체 경로 길이를 줄이려는 전략이 반영된 결과다. 반면 에너지 절약 또는 네트워크 수명을 우선하는 경우에는 작은 송신 반경을 통해 전송 에너지 소모를 줄이는 것이 유리하므로, 센서 노드 수 증가 시 오히려 송신 반경을 축소하는 결과를 보였다.

특히, 에너지 절약을 우선시하는 제안 방법을 적용할 경우 단일 고정 송신 반경을 사용하는 기존 DHDP 대비, 센서 노드 밀도와 네트워크 상황에 따라 송신 반경을 실시간으로 조절할 수 있다는 특징을 가진다. 이로써 노드 밀도가 낮을 때는 경로 길이를 줄이기 위해 반경을 키우고, 노드 밀도가 높아 중계 데이터의 증가할 경우에는 반경을 줄여 에너지를 절약하는 방식으로 적응성을 확보하였다.

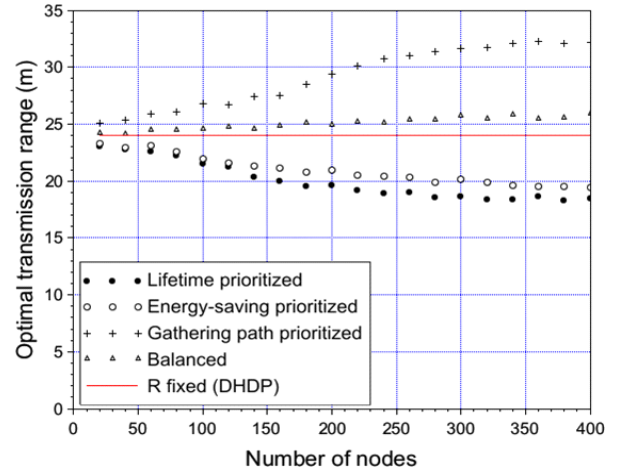


그림 2. 센서 노드의 개수 변화에 따른 센서 노드의 최적 전송 거리

Fig. 2. Optimal transmission distance of sensor nodes versus number of sensor nodes

4.2 네트워크 수명 분석

그림 3은 센서 노드 수에 따른 네트워크 수명을 나타낸다. 전반적으로 노드 수가 증가할수록 전체적으로 네트워크 수명이 감소하는 경향을 보였다. 그러나 최적화 목표에 따라 차이가 뚜렷해졌다. 네트워크 수명을 우선하는 전략을 적용한 경우, 제안 기법은 모든 조건에서 가장 긴 수명을 달성했으며, 특히 노드 수가 많아져 중계할 데이터가 증가하는 경우에는 송신 반경을 동적으로 조절함으로써 불필요한 에너지 낭비를 최소화하였다.

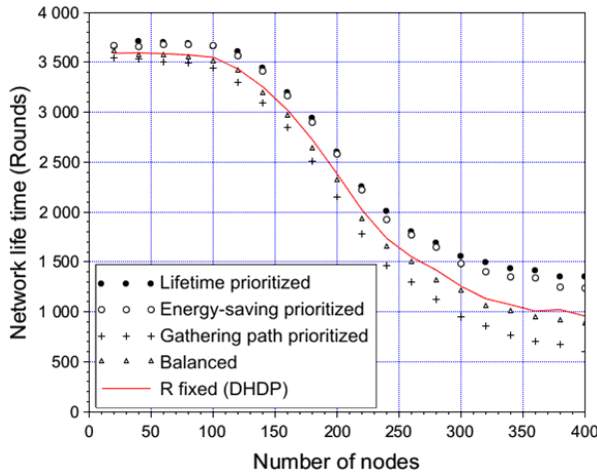


그림 3. 센서 노드의 개수 변화에 따른 네트워크 수명 시간

Fig. 3. Network life time versus number of sensor nodes

이와 달리 데이터 수집 경로 최소화를 우선하는 전략은 큰 송신 반경을 채택하여 전반적인 에너지 소모가 커지고, 결과적으로 네트워크 수명이 짧아지는 결과를 보였다. 이는 성능 향상의 원인이 단순히 최적화 목표 차이에 있는 것이 아니라, 제안 방법이 에너지 모델과 네트워크 밀도 변화에 맞추어 송신 반경을 동적으로 최적화했기 때문임을 알 수 있다.

4.3 데이터 수집 경로 길이 분석

그림 4은 센서 노드 개수 변화에 따른 모바일 시크의 데이터 수집 경로 길이를 보여준다. 센서 노드 수가 증가하면 클러스터 수가 증가하는 경향이 있고, 수집 지점이 세분화되어 전체 경로 길이가 일정 수준 증가하는 경향을 보인다. 센서 노드의 수가 더욱더 커지면 클러스터의 수가 적절히 감소하면서 전체적인 데이터 수집 경로는 다시 감소함을 알 수 있다. 특히, 데이터 수집 경로 길이 감소를 우선적으로 목표하는 R_{opt} 값을 적용하는 경우 다른 방법들에 비하여 데이터 수집 경로가 10~20% 정도 감소함을 확인할 수 있다.

특히 다른 방법들에 비하여 그 감소의 효과가 센서 노드의 수의 변화 전 영역에서 이루어짐을 확인할 수 있다. 이는 제안 기법이 단순 클러스터링이 아니라, ACO 기반 경로 최적화와 연계되어 있어 경로 증가를 억제할 수 있었기 때문이다.

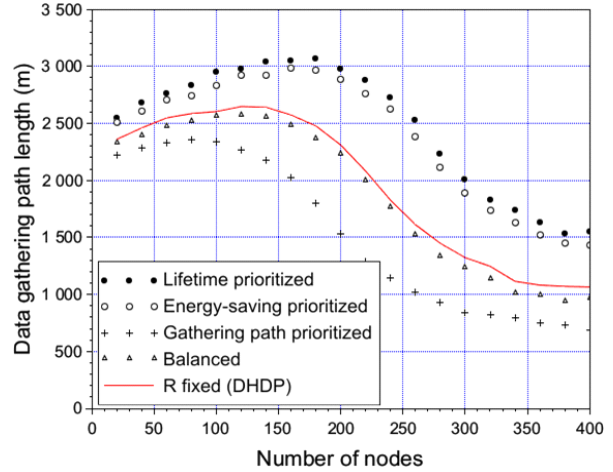


그림 4. 센서 노드의 개수 변화에 따른 데이터 수집 경로 길이

Fig. 4. Data gathering path length versus number of sensor nodes

반면, 네트워크의 수명 시간을 우선시하는 방법을 적용한 경우는 센서 노드의 전송 반경을 감소시키는 것이 유리하므로 상대적으로 많은 클러스터가 형성되고 이에 따라 다른 경우에 비하여 데이터 수집 경로의 길이가 증가함을 확인할 수 있다.

4.4 목표에 따른 최적화 전략

일반적으로 센서 네트워크의 주요 요소인 센서 노드는 독립적인 에너지를 이용하기 때문에 에너지 사용에 제약이 많기 때문에 네트워크 수명에 중요한 영향을 끼친다. 또한, 모바일 싱크도 네트워크 상황에 따라서 에너지 제약이 있는 경우이거나 수집한 데이터가 실시간적인 중요성을 가질 경우 데이터 경로 길이는 네트워크 성능의 중요한 지표가 될 수 있다.

결과적으로 제안 기법은 네트워크 상황과 목표에 맞추어 송신 반경을 조절함으로써, 기존 고정 반경 기반 기법 대비 성능 향상을 보였다. 실시간성 측면에서의 장점으로 센서 노드 밀도, 에너지 잔량, 간섭 수준에 따라 송신 반경을 조절하여 네트워크 환경 변화에 즉각 대응할 수 있다. 이러한 성능 향상 원인은 기존의 오예 기법에 네트워크가 우선시하는 성능 지표에 따라 센서 노드의 전송 거리를 적응적으로 도입하여 송신 에너지 낭비를 줄이거나

데이터 수집 시간을 감소시킬 수 있기 때문이다. 이는 클러스터 구조와 ACO 기반 경로 최적화를 함께 고려하여 경로 길이와 에너지 사용을 균형 있게 최적화했기 때문이다.

따라서 제안 기법은 대규모 센서 네트워크 환경에서도 자원 제약을 고려한 실시간 적응형 최적 송신 환경 제어라는 설계적 장점을 가지며, 네트워크 수명, 에너지 효율, 경로 최적화라는 상충하는 성능 지표들 사이에서 상황에 맞는 균형을 달성할 수 있음을 확인하였다.

V. 결 론

본 논문에서는 무선 센서 네트워크에서 모바일 싱크 기반 데이터 수집의 성능을 향상시키기 위해, 센서 노드의 수와 밀도에 따라 센서 노드의 전송 거리를 동적으로 최적화하는 새로운 기법을 제안하였다. 제안 기법은 기존 DHDP 프레임워크의 R-HAC 클러스터링과 ACO 경로 최적화 구조를 유지하면서, 전송 반경을 실시간으로 계산하여 노드 분포에 적합한 최적값을 적용함으로써 네트워크가 우선시하는 목표를 달성할 수 있도록 동적으로 반영할 수 있도록 하였다.

시뮬레이션 결과, 본 기법은 네트워크의 상황과 성능 목표의 중요도에 따라 네트워크 수명 시간을 증가시키거나, 데이터 수집 경로를 감소시키는 등 기존의 DHDP 방법에 실제로 효과적으로 적용할 수 있음을 보였다.

향후 연구로는 장애물이나 간섭, 채널 오류 등 실제 환경의 불확실성을 고려한 모델 확장과 기계 학습 기반의 전송 거리 예측 모델을 결합하여 더욱 지능적인 자율 최적화 기법으로 발전시키는 것을 목표로 한다.

References

- [1] H. Wang and H. Byun, "An energy-density-based trajectory planning method for wireless sensor networks with mobile collectors", *Journal of Communications and Networks*, Vol. 27, No. 3, Jun. 2025. <https://doi.org/10.23919/jcn.2025.000022>.
- [2] G. Kalla, A. P. Mazumdar, D. K. Tyagi, and A. Narwaria, "Distance-aware Hierarchical Data-collecting Path Selection for Mobile Sink in Sparse WSNs", 2022 IEEE 8th World Forum on Internet of Things (WF-IoT), Yokohama, Japan, Nov. 2022. <https://doi.org/10.1109/wf-iot54382.2022.10152025>.
- [3] J. Ren and Y. Li, "Latency-aware path planning for disconnected WSNs with mobile sinks", *IEEE Wireless Commun. Lett.*, Vol. 14, No. 8, pp. 2551-2555, Aug. 2025. <https://doi.org/10.1109/lwc.2025.3575504>.
- [4] X. Wang, A. Hawbani, L. Zhao, S. H. Alsamhi, W. Othman, M. A. A. Al-qaness, and A. V. Shvetsov, "Merged path: Distributed data dissemination in mobile sinks sensor networks", *IEEE Trans. Sustain. Comput.*, Vol. 10, No. 1, pp. 161-172, Jan.-Feb. 2025. <https://doi.org/10.1109/tsusc.2024.3410247>.
- [5] F. Batool and C. Hennig, "Clustering with the average silhouette width", *Computational Statistics & Data Analysis*, Vol. 158, No. 107190, Jun. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.csda.2021.107190>.
- [6] H. Salarian, K.-W. Chin, and F. Naghdy, "An energy-efficient mobile-sink path selection strategy for wireless sensor networks", *IEEE Transactions on vehicular technology*, Vol. 63, No. 5, pp. 2407-2419, Jun. 2014. <https://doi.org/10.1109/tvt.2013.2291811>.
- [7] W. Wen, S. Zhao, C. Shang, and C.-Y. Chang, "EAPC: Energy-aware path construction for data collection using mobile sink in wireless sensor networks", *IEEE Sensors Journal*, Vol. 18, No. 2, pp. 890-901, Jan. 2018. <https://doi.org/10.1109/jsen.2017.2773119>.
- [8] R. Zhang, J. Pan, D. Xie, and F. Wang, "NDCMC: A hybrid data collection approach for large-scale wsns using mobile element and hierarchical clustering", *IEEE internet of things journal*, Vol. 3, No. 4, pp. 533-543, Aug. 2016.

<https://doi.org/10.1109/jiot.2015.2490162>.

- [9] S. Roy, N. Mazumdar, and R. Pamula, "An optimal mobile sink sojourn location discovery approach for the energy-constrained and delay-sensitive wireless sensor network", *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, Vol. 12, No. 12, pp. 10837-10864, Jan. 2021. <https://doi.org/10.1007/s12652-020-02886-z>.
- [10] P. K. Donta, B. S. P. Rao, T. Amgoth, C. S. R. Annavarapu, and S. Swain, "Data collection and path determination strategies for mobile sink in 3D WSNs", *IEEE Sensors Journal*, Vol. 20, No. 4, pp. 2224-2233, Feb. 2020. <https://doi.org/10.1109/jsen.2019.2949146>.
- [11] W. B. Heinzelman, A. P. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, "An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks", *IEEE Trans. Wireless Commun.*, Vol. 1, No. 4, pp. 660-670, Oct. 2002. <https://doi.org/10.1109/twc.2002.804190>.

저자소개

서 봉 수 (Bongsue Suh)



1993년 2월 : 경북대학교

전자공학과(공학사)

1995년 2월 : 한국과학기술원 전기

및 전자공학과(공학석사)

1999년 8월 : 한국과학기술원

전기및전자공학과(공학박사)

1999년 7월 ~ 2004년 2월 :

한국전자통신연구원 선임연구원

2005년 9월 ~ 현재 : 국립공주대학교 정보통신공학부

교수

관심분야 : 컴퓨터 네트워크, 무선 네트워크