

무선 센서 네트워크에서 에너지 효율 향상을 위한 링크 비용 기반 라우팅 프로토콜

이대희¹ · 조경우² · 강철규³ · 오창헌^{4*}

Link Cost based Routing Protocol for Improving Energy Efficiency in Wireless Sensor Networks

Dae-hee Lee¹ · Kyoung-woo Cho² · Chul-gyu Kang³ · Chang-heon Oh^{4*}

¹Master's degree, Department of Electrical, Electronics & Communication Engineering, Korea University of Technology and Education(KOREATECH), Cheonan 31253, Korea

²Ph.D. student, Department of Electrical, Electronics & Communication Engineering, Korea University of Technology and Education(KOREATECH), Cheonan 31253, Korea

³Chief researcher, Photo Team, SEMES Co., LTD., Cheonan, 31040 Korea

^{4*}Professor, Department of Electrical, Electronics & Communication Engineering, Korea University of Technology and Education(KOREATECH), Cheonan 31253, Korea

요 약

기존의 에너지 효율적인 라우팅 프로토콜은 라우팅 메트릭 중 에너지에 높은 가중치를 적용하여 에너지 효율이 높은 경로에 노드가 집중되고 해당 경로의 에너지가 빠르게 고갈되는 문제가 발생한다. 이러한 무선 센서 네트워크의 불균형적인 에너지 소모는 네트워크의 분할 및 기능 상실을 야기하여 네트워크 수명을 감소시킨다. 따라서 본 논문에서는 무선 센서 네트워크의 불균형적인 에너지 소모를 해결하기 위해 링크 비용 기반 라우팅 프로토콜을 제안한다. 제안하는 라우팅 프로토콜은 네트워크 문제 상황에 따라 라우팅 메트릭의 가중치를 차등 적용하여 링크 비용을 산출하고 가장 낮은 값을 갖는 경로를 선정한다. 성능 분석 결과, 제안하는 라우팅 프로토콜이 기존 AODV 프로토콜보다 네트워크 수명이 22%, 에너지 소모 표준편차가 2%, 데이터 수신율이 2% 향상되었음을 확인하였다.

ABSTRACT

Conventional energy efficient routing protocols apply high weight to energy among routing metrics, causing nodes to concentrate on energy efficient paths and quickly exhaust energy on those paths. The unbalanced energy consumption of these wireless sensor networks causes network division and malfunction, and reduces network lifetime. Therefore, in this paper, it proposes a link cost based routing protocol to solve the unbalanced energy consumption of wireless sensor networks. The proposed routing protocol calculates the link cost by applying the weight of the routing metric differently according to the network problem situation and selects the path with the lowest value. As a result of the performance analysis, it confirmed that the proposed routing protocol has 22% longer network life, 2% energy consumption standard deviation and 2% higher data reception rate than the existing AODV protocol.

키워드 : 무선 센서 네트워크, 라우팅 프로토콜, 라우팅 메트릭, 링크 비용, 가중치

Key word : Wireless Sensor Network, Routing Protocol, Routing Metric, Link Cost, Weight

Received 26 February 2019, Revised 27 February 2019, Accepted 15 March 2019

* **Corresponding Author** Chang-Heon Oh(E-mail:choh@koreatech.ac.kr, Tel:+82-41-560-1215)

Professor, Department of Electrical, Electronics & Communication Engineering, Korea University of Technology and Education (KOREATECH), Cheonan 31253, Korea

Open Access <http://doi.org/10.6109/jkiice.2019.23.5.574>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

©This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

I. 서론

무선 센서 네트워크는 필드에 배치되어 온도, 먼지, 소리 등의 물리적 현상을 감지하는 센서 노드와 외부 네트워크를 연결하는 싱크 노드로 구성된다. 센서 노드는 필드에서 수집한 데이터를 노드간 협력을 통한 멀티 홉 방식으로 싱크 노드에 전송한다[1].

초소형, 저전력, 저비용의 특성을 갖는 센서 노드는 다양한 응용 분야에 적용이 가능하지만 제한적인 메모리 및 프로세서, 배터리 용량으로 인해 한계점이 존재한다[2-5]. 특히 멀티 홉 방식으로 데이터를 전송하는 무선 센서 네트워크에서 배터리 용량에 따른 단일 노드의 수명 감소는 네트워크 수명에 영향을 미친다. 센서 노드에서 싱크 노드로 데이터 전송 시 싱크 노드 주변의 상위 노드는 데이터 전송량이 많아 데이터 손실 및 지연이 발생하고 네트워크 가장자리의 하위 노드보다 에너지 소모량이 크다. 이러한 네트워크 내 불균형적인 에너지 소모는 단일 노드의 에너지 단절로 인해 네트워크의 분할 및 기능 상실을 야기한다. 이러한 문제를 에너지 홀이라고 하며 이를 해결하기 위해 다양한 에너지 효율적인 라우팅 프로토콜 연구가 진행되고 있다[6-8].

하지만 무선 센서 네트워크에서 에너지 효율적인 라우팅 프로토콜은 에너지 소모를 최소화하기 위해 경로 선정 시 라우팅 메트릭 중 에너지에 높은 가중치를 적용하여 경로를 선정한다[9-11]. 이는 경로 재구성 시 네트워크 상황이 고려되지 않고 에너지 효율이 좋은 경로에만 다수의 노드가 연결되어 해당 경로의 에너지가 다른 경로에 비해 빠르게 고갈되는 문제를 발생시킨다. 따라서 본 논문에서는 무선 센서 네트워크의 불균형적인 에너지 소모를 해결하기 위해 링크 비용 기반의 라우팅 프로토콜을 제안한다. 제안하는 라우팅 프로토콜은 주기적으로 네트워크 문제 상황을 파악하고 해당 문제 상황과 관련된 라우팅 메트릭에 가중치를 차등 적용한다. 이후 라우팅 메트릭 기반 노드별 링크 비용을 산출 및 비교하여 최적의 경로를 선정한다.

II. 관련 연구

M. Azharuddin et al.의 연구에서는 DFCD(Distributed Fault-tolerant Clustering and Routing)이라 불리는 분

산 클러스터링 및 라우팅 알고리즘을 제안하였다. 클러스터 형성 과정에서 CH(Cluster Head) 노드의 잔여 에너지, 클러스터 내 센서 노드와 CH 사이의 거리 및 CH와 base station의 거리를 기반으로 비용 함수를 도출하여 최종 CH를 선출하였다. 라우팅 과정에서는 선출된 CH와 인접 노드의 거리, 인접 노드의 잔여 에너지 및 홉 수를 기반으로 다음 홉의 CH를 선출하였다. 알고리즘의 성능 분석 결과, 기존 알고리즘보다 패킷별 평균 에너지 소모율, 라운드별 CH의 잔여 에너지 표준편차가 더 나은 성능을 보였다고 평가하였다[12]. R. E. Mohamed et al.의 연구에서는 데이터 전송 시 균일한 부하 분산을 위해 CDA(Collaborative Distributed Antenna) 라우팅 프로토콜을 제안하였다. DCT(Degree Constrained Tree)에서 최소 에너지 소비를 위한 최적의 노드 차수를 도출하고 노드에서 데이터 전송 위상을 제어하여 단일 안테나에서 공동 데이터 전송을 수행하였다[13]. K. V. Nguyen et al.의 연구에서는 물리적 장애물 또는 노드의 고장 등을 나타내는 라우팅 홀을 우회하여 경로를 선정하는 라우팅 알고리즘을 제안하였다. 노드간 협력을 통해 라우팅 홀을 결정하고 이스케이프 경로를 통해 패킷 포워딩을 수행하였다. 라우팅 알고리즘 성능 분석 결과, 제안하는 방식이 기존 라우팅 알고리즘보다 에너지 소비는 16%, 네트워크 수명은 7% 향상됨을 확인하였다[14]. K. Cengiz et al.의 연구에서는 에너지 효율적인 에너지 인식 멀티 홉 라우팅 프로토콜을 제안하였다. 임계값을 기반으로 CH의 에너지를 확인하여 CH의 유지 및 변경을 결정하고 CH의 변경 횟수를 감소시킴으로써 통신간 오버헤드를 감소시켰다. 라우팅 프로토콜의 성능 분석 결과, 네트워크 수명이 DEEC(Distributed Energy-Efficient Clustering)에 비해 10.5%, SEP(Stable Election Protocol)에 비해 14.1% 향상됨을 확인하였다[15].

III. 라우팅 메트릭 기반 링크 비용 산출

제안하는 라우팅 프로토콜은 4가지의 라우팅 메트릭인 홉 수, RSSI(Received Signal Strength Indicator), 배터리 소모량, 경로상 연결된 인접 노드의 수를 이용한다. 홉 수의 경우 소스 노드 및 목적지 노드 간 경로의 길이를 나타내는 척도로서 경로의 데이터 전송 시간을 고려하기 위해 선정하였다. 노드간 링크 품질을 나타내는

척도인 RSSI는 링크 상태를 고려하여 노드 간 데이터 수신율을 고려하기 위해 선정하였다. 배터리 소모량의 경우 산출값이 낮을수록 좋은 링크 비용을 고려하여 링크 비용과 비례 관계인 배터리 소모량을 선정하였다. 경로상 연결된 인접 노드 수의 경우 경로 선정 후 링크 비용이 좋은 경로에 노드가 집중되는 것을 방지하기 위해 라우팅 메트릭으로써 선정하였다.

네트워크의 문제 상황을 파악하기 위해 중앙 서버는 주기적으로 수집되는 노드별 센싱 데이터 저장 시 라우팅 메트릭 데이터를 추가 저장한다. 이후 DB에 저장된 노드별 배터리 소모량 및 센싱 데이터의 손실률을 확인한다.

배터리 소모량의 경우 식 (1)을 이용하여 주기적으로 네트워크 내 배터리 소모량이 높은 문제 노드를 파악한다. 전체 네트워크 배터리 소모량의 평균값보다 큰 값을 갖는 노드를 평균적으로 배터리 소모량이 큰 것으로 확인하고 문제 노드로 선별한다.

$$f_{eng_avg}(E_t - E_{t-1}) < f_{eng}(E_{nt} - E_{n(t-1)}) \quad (1)$$

먼저 현재 시간 t 의 전체 네트워크의 배터리 소모량 평균($f_{eng_avg}(E_t)$)과 이전 시간 $t-1$ 의 $f_{eng_avg}(E_t)$ 의 차를 산출한다. 이후 n 개의 노드 별 현재 시간 t 의 배터리 소모량($f_{eng}(E_{nt})$)과 이전 시간 $t-1$ 의 배터리 소모량 $f_{eng}(E_{n(t-1)})$ 의 차를 산출하여 전체 배터리 소모량 평균값의 차보다 큰 값을 갖는 문제 노드를 파악한다.

그림 1과 같이 t 와 $t-1$ 간 5번 노드의 배터리 소모량의 차($f_{eng}(E_{nt} - E_{n(t-1)})$)가 전체 배터리 소모량 평균값의 차($f_{eng_avg}(E_t - E_{t-1})$)보다 높으면 문제 노드인 5번 노드와 경로상 연결되어 있는 노드를 검색한다. 검색된 이전 노드의 인접 노드를 확인하여 해당 노드별 주소 및 RSSI 데이터를 불러오고 5번 노드와 연결된 2번 노드를 경로 재구성 노드로 선정한다. 이후 인접 노드 데이터에 저장된 노드와 경로 재구성 노드 간의 링크 비용을 산출하여 이전에 연결되었던 5번 노드를 제외한 가장 낮은 링크 비용의 경로를 선정한다.

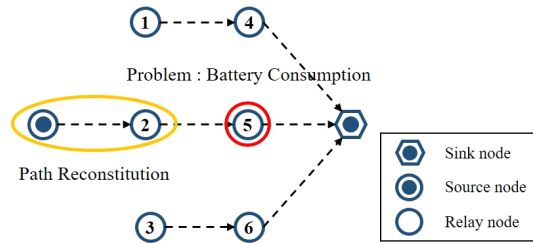


Fig. 1 Search for path reconfiguration nodes in case of battery consumption problems

손실률의 경우 DB에 저장된 센싱 데이터 전송 횟수를 나타내는 Count를 검사하여 데이터 손실 문제를 확인한다. 가장 최근 수집한 센싱 데이터의 Count와 이전 Count를 비교하여 차가 1을 초과하면 해당 노드에서 데이터 손실이 발생한 것으로 파악한다.

그림 2와 같이 5번 노드의 데이터 손실이 발생하면 5번 노드가 포함된 경로를 재구성하기 위해 5번 노드의 인접 노드 데이터를 검색하여 해당 노드별 주소 및 RSSI 데이터를 불러온다. 이후 인접 노드 및 5번 노드 간의 링크 비용을 산출하고 결과값을 비교하여 가장 낮은 링크 비용의 경로를 선정한다.

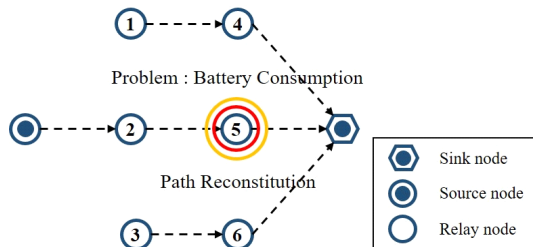


Fig. 2 Search for path reconfiguration nodes in case of data loss problem

경로 재구성 노드와 인접 노드 간의 링크 비용은 선정된 4가지의 라우팅 메트릭을 고려하여 식 (2)를 통해 산출된다.

$$LC = \delta(f_{eng}(E_{cur}) + f_{ngb}(N_{cur})) + (1 - \delta)(f_h(H) + |f_{rssi}(R_{cur})|) \quad (2)$$

식 (2)의 인접 노드의 배터리 소모량($f_{eng}(E_{cur})$), 인접 노드와 경로상 연결되어 있는 노드의 수($f_{ngb}(N_{cur})$), 인접 노드와 싱크 노드 간의 거리($f_h(H)$), 경로 재구성 노드와 인접 노드 간의 RSSI 절대값($|f_{rssi}(R_{cur})|$)을 이용하여 링크 비용을 산출한다. 링크 비용 산출 시 음수 값을 갖는 RSSI는 낮은 값일수록 성능이 좋은 링크 비용과 반비례 관계를 가지므로 절대값을 적용하였다.

δ 는 어떤 라우팅 메트릭에 좀 더 가중치를 줄 것인지 결정하는 실수로 $0 < \delta < 1$ 의 값을 갖는다. 배터리 소모량과 관련하여 경로 재구성이 진행되는 경우 배터리 소모량(f_{eng})과 경로상 연결되어 있는 노드의 수(f_{ngb})에 좀 더 높은 가중치를 적용한다. 또한 데이터 손실률과 관련하여 경로 재구성이 진행되는 경우 싱크 노드 간의 거리(f_h)와 RSSI 절대값($|f_{rssi}|$)에 더 높은 가중치를 적용한다.

식 (2)를 통해 산출된 인접 노드별 링크 비용을 비교하여 가장 낮은 값을 갖는 노드를 경로 재구성 노드의 목적지 노드로 선정한다. 서버에서는 경로 재구성 노드 및 목적지 노드를 포함하는 재구성된 라우팅 경로를 싱크 노드로 전송하고 이후 네트워크 내 노드에게 브로드캐스팅된다.

IV. 실험 및 결과

4.1. 실험 환경

제안하는 라우팅 프로토콜의 성능 분석을 위한 실험 환경은 13.2[m]×8.6[m] 크기를 갖는 한국기술교육대학교 강의실에 구축하였다.

실험 방법으로는 강의실에 8대의 센서 모듈 배치 후 싱크 노드는 서버와 연결하여 전원을 공급받고 이외 센서 노드들은 전압 3.7[V], 배터리 용량 1100[mAh]을 갖는 배터리를 통해 전원을 공급받는다. 배치된 모듈은 주기적으로 서버에서 확인되는 네트워크 내 배터리 소모량 및 데이터 손실률에 따라 경로 재구성을 진행하였다.

네트워크 수명 분석 실험은 시간 경과에 따른 네트워크 내 노드의 생존 수를 분석하였다. DB의 노드별 센싱 데이터 테이블을 조회하여 100%의 배터리 소모량을 갖고 데이터의 Count가 더 이상 증가되지 않으면 수명이 다한 노드로 판단하였다. 에너지 소모 표준편차의 경우

노드의 센싱 데이터 테이블을 조회하여 저장된 배터리 소모량을 확인하고 에너지 소모 표준편차를 산출하였다. 데이터 수신율의 경우 노드별 센싱 데이터 테이블을 조회하여 전체 네트워크 내 노드들이 전송한 데이터양 대비 수신한 데이터양을 비교하여 산출하였다.

4.2. 실험 결과 및 검토

그림 3은 AODV 및 제안하는 라우팅 프로토콜의 시간에 따른 네트워크 생존 수를 나타낸다. AODV의 경우 9시간 경과 후 싱크 노드 주변의 상위 노드가 전원을 모두 소모하여 네트워크 기능을 상실하였다. 이후 11시간 경과 후 네트워크 내 노드의 전원이 모두 소모되었다. 제안하는 라우팅 프로토콜은 11시간 경과 후 싱크 노드 주변 상위 노드들의 전원이 모두 소모되어 네트워크 기능을 상실하였다. 이후 13시간 경과 후 네트워크 내 노드의 모든 전원이 소모되었다.

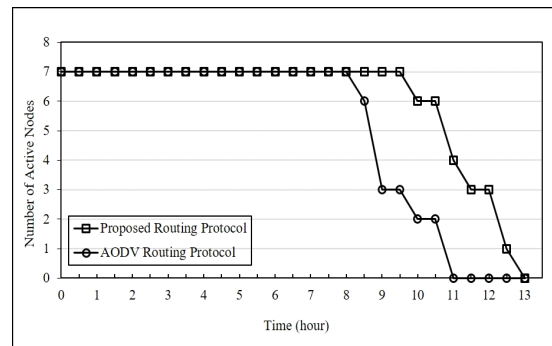


Fig. 3 Network lifetime of proposed routing protocol and AODV

실험 결과, 제안하는 라우팅 프로토콜은 AODV 방식에 비해 전체 네트워크 수명이 약 22% 증가하였으며 네트워크 내 모든 노드의 생존 시간은 약 18% 증가하였다. AODV 방식의 경우 센서 노드 간 주기적인 Hello 메시지 전송 및 홉 수만을 이용하여 경로를 재구성함으로써 네트워크의 불균형적인 에너지 소모가 발생하였다. 하지만 제안하는 라우팅 프로토콜은 네트워크 내 문제 상황 파악을 통해 불필요한 데이터 전송을 방지하고 문제 상황에 따른 라우팅 메트릭의 가중치를 적용하여 에너지를 고려함으로써 네트워크의 수명이 향상됨을 보였다.

그림 4는 시간 경과에 따른 AODV 및 제안하는 라우

팅 프로토콜의 에너지 소모 표준편차를 나타낸다. AODV 프로토콜의 경우 약 8시간 경과 전까지 에너지 소모 표준편차가 급격하게 증가하였으며 이후 노드들의 전원이 모두 소모되기 시작하자 표준편차가 감소하기 시작하였다. 제안하는 라우팅 프로토콜의 경우 약 9시간 경과 전까지 에너지 소모 표준편차가 AODV에 비해 상대적으로 완만하게 증가하였으며 9시 경과 후 표준편차가 감소하기 시작하였다. AODV 프로토콜은 네트워크 운영 시간 대비 약 7%의 에너지 소모 표준편차를, 제안하는 라우팅 프로토콜은 약 5%의 에너지 소모 표준편차를 보였다.

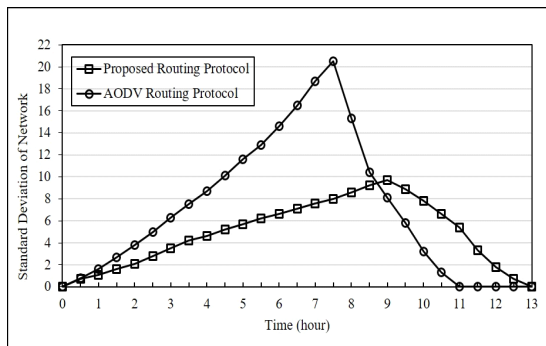


Fig. 4 Energy consumption standard deviation of proposed routing protocol and AODV

실험 결과, 제안하는 라우팅 프로토콜이 AODV에 비해 전체 네트워크의 균형적인 에너지 소모가 발생하였음을 확인하였다.

그림 5는 AODV 프로토콜의 시간 경과에 따른 데이터 수신율을 나타낸다. AODV의 경우 9시간 경과 전에는 평균 97.23%의 데이터 수신율을 보였지만 9시간 경과 후 싱크 노드 주변 상위 노드들의 전원이 모두 소모되어 싱크 노드로 데이터 수집이 진행되지 않아 0%의 데이터 수신율을 확인하였다. 제안하는 라우팅 프로토콜의 경우 11시간 경과 전에는 평균 99.6%의 데이터 수신율을 보였지만 11시간 경과 후 네트워크 기능이 상실되어 0%의 수신율을 확인하였다.

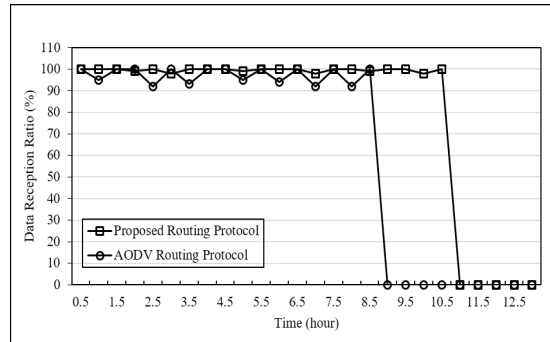


Fig. 5 Data reception ratio of proposed routing protocol and AODV

데이터 수신율 실험 결과 제안하는 라우팅 프로토콜이 RSSI 라우팅 메트릭을 고려함으로써 네트워크 수명 중 데이터 수신율이 AODV의 97.23%에서 제안하는 라우팅 프로토콜의 99.6%으로 2% 향상됨을 확인하였다.

V. 결론

무선 센서 네트워크의 에너지 홀 문제를 해결하기 위해 다양한 에너지 효율적인 라우팅 프로토콜이 연구되고 있다. 하지만 라우팅 메트릭 중 에너지에 높은 가중치를 적용하여 에너지 효율이 높은 경로에 노드가 집중되고 해당 경로의 에너지가 빠르게 고갈되는 문제가 발생한다. 이로 인한 멀티 홉 방식의 무선 센서 네트워크에서 노드의 수명 감소는 전체 네트워크의 수명 감소를 야기한다.

따라서 본 논문에서는 무선 센서 네트워크에서 문제 상황을 파악하고 관련된 라우팅 메트릭에 높은 가중치를 적용하여 최적의 경로를 선정하는 링크 비용 기반 라우팅 프로토콜을 제안하였다. 제안하는 라우팅 프로토콜은 먼저 중앙 서버에서 센싱 데이터 외 4가지의 라우팅 메트릭인 홉 수, RSSI, 배터리 소모량, 경로상 연결된 인접 노드의 수를 네트워크로부터 추가 수집 및 저장하였다. 이후 주기적으로 네트워크 내 노드별 배터리 소모량, 센싱 데이터의 손실률을 확인하여 문제 상황을 파악하였다. 이후 발견된 문제 상황에 따라 관련된 라우팅 메트릭에 가중치를 차등 적용하여 링크 비용을 산출하고 최적의 경로를 선정하였다.

라우팅 프로토콜의 성능 분석 결과, 네트워크 수명의 경우 AODV에 비해 네트워크 수명이 22% 향상되었음을 확인하였다. 또한 네트워크의 에너지 소모 표준편차의 경우 네트워크 운영시간 대비 AODV에 비해 2% 향상되어 균형적인 에너지 소모가 발생되었음을 확인하였다. 마지막으로 네트워크의 데이터 손실을 확인하기 위해 데이터 수신율을 실험한 결과, AODV에 비해 데이터 수신율이 2% 향상되었음을 확인하였다.

ACKNOWLEDGEMENT

This paper was supported by the Education and Research Promotion Program of KOREATECH in 2018.

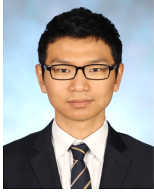
REFERENCES

- [1] M. E. Migabo, K. Djouani, T. O. Olwal, and A. M. Kurien, "A survey on energy efficient network coding for multi-hop routing in wireless sensor networks," *Procedia Computer Science*, vol. 94, pp. 288-294, 2016.
- [2] W. Guo, and W. Zhang, "A survey on intelligent routing protocols in wireless sensor networks," *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 38, pp. 185-201, 2014.
- [3] M. Radi, B. Dezfouli, K. A. Bakar, and M. Lee, "Multipath routing in wireless sensor networks: Survey and Research challenges," *Sensors*, vol. 12, no. 1, pp. 650-685, 2012.
- [4] N. Sharoon, "Dynamic path construction in multi-hop wireless networks," *Asia-pacific Journal of Convergent Research Interchange*, vol. 2, no. 2, pp. 19-25, 2016.
- [5] H. K. Park, "Sensed data based duty-cycle scheduling scheme for energy harvesting wireless sensor networks," *Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering*, vol. 22, no. 4, pp. 670-675, 2018.
- [6] J. Ren, Y. Zhang, K. Zhang, A. Liu, J. Chen, and X. S. Shen, "Lifetime and energy hole evolution analysis in data-gathering wireless sensor networks," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 12, no. 2, pp. 788-800, 2015.
- [7] N. Jan, N. Javaid, Q. Javaid, N. Alrajeh, M. Alam, Z. A. Khan, and I. A. Niaz, "A balanced energy-consuming and hole-alleviating algorithm for wireless sensor networks," *IEEE Access*, vol. 5, pp. 6134-6150, 2017.
- [8] R. E. Mohamed, A. I. Saleh, M. Abdelrazzak, and A. S. Samra, "Energy-efficient routing protocols for solving energy hole problem in wireless sensor networks," *Computer Networks*, vol. 114, pp. 51-66, 2017.
- [9] G. Han, L. Liu, J. Jiang, L. Shu, and G. Hancke, "Analysis of Energy-Efficient Connected Target Coverage Algorithms for Industrial wireless sensor networks," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 13, no. 1, pp. 135-143, 2015.
- [10] B. Zenga, and Y. Dong, "An improved harmony search based energy-efficient routing algorithm for wireless sensor networks," *Applied Soft Computing*, vol. 41, pp. 135-147, 2016.
- [11] T. T. Huynh, A. V. Di-Duc, and C. H. Tran, "Delay-constrained energy-efficient cluster-based multi-hop routing in wireless sensor networks," *Journal of Communications and Networks*, vol. 18, no. 4, pp. 580-588, 2016.
- [12] M. Azharuddin, P. Kuila, and P. K. Jana, "Energy efficient fault tolerant clustering and routing algorithms for wireless sensor networks," *Computers & Electrical Engineering*, vol. 41, pp. 177-190, 2015.
- [13] R. E. Mohamed, W. R. Ghanem, A. T. Khalil, M. Elhoseny, M. Sajjad, and M. A. Mohamed, "Energy efficient collaborative proactive routing protocol for wireless sensor network," *Computer Networks*, vol. 142, pp. 154-167, 2018.
- [14] K. V. Nguyen, P. L. Nguyen, Q. H. Vu, and T. V. Do, "An energy efficient and load balanced distributed routing scheme for wireless sensor networks with holes," *Journal of Systems and Software*, vol. 123, pp. 92-105, 2017.
- [15] K. Cengiz, and T. Dag, "Energy aware multi-hop routing protocol for WSNs," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 2622-2633, 2018.



이대희(Dae-Hee Lee)

2017년 3월 ~ 현재 한국기술교육대학교 전기전자통신공학과 석사과정
2017년 2월 공주대학교 전기전자제어공학부 전자공학나노정보공학전공 전자공학트랙 공학사
※관심분야 : Wireless Sensor Network, QoS, 무선 통신, Industrial IoT



조경우(Kyoung-Woo Cho)

2015년 3월 ~ 현재 한국기술교육대학교 전기전자통신공학과 박사과정
2015년 2월 한국기술교육대학교 전기전자통신공학과 공학석사
2013년 2월 공주대학교 전기전자제어공학부 전자공학나노정보공학전공 전자공학트랙 공학사
※관심분야 : 미세먼지 예측, 인공신경망, 심층신경망, Industrial IoT, LPWA



강철규(Chul-Gyu Kang)

2012년 9월 ~ 현재 ㈜세메스 책임연구원
2012년 8월 한국기술교육대학교 전기전자통신공학과 공학박사
2006년 2월 한국기술교육대학교 전기전자통신공학과 공학석사
2004년 2월 한국기술교육대학교 정보통신공학과 공학사
※관심분야 : 기계 학습, MIMO, Wireless Sensor NW



오창현(Chang-Heon Oh)

1999년 2월 ~ 현재 한국기술교육대학교 전기전자통신공학부 교수
2006년 8월 ~ 2007년 7월 방문교수(University of Wisconsin-Madison)
1993년 10월 ~ 1999년 2월 삼성전(주) CDMA 개발팀 선임연구원
1990년 2월 ~ 1993년 8월 한진전자(주) 기술연구소 선임연구원
1996년 2월 한국항공대학교 항공전자공학과 공학박사
1990년 2월 한국항공대학교 항공통신정보공학과 공학석사
1988년 2월 한국항공대학교 항공통신공학과 공학사
※관심분야 : 무선/이동통신, IoT, 기계학습 기반 통신시스템