

원전 무선 센서 네트워크에 적합한 클러스터 헤드 체인 라우팅 프로토콜

정 성 민*

Cluster Head Chain Routing Protocol suitable for Wireless Sensor Networks in Nuclear Power Plants

Jung Sungmin

〈Abstract〉

Nuclear power plants have a lower cost of power generation, and they are more eco-friendly than other power generation plants. Also, we need to prepare nuclear plant accidents because of their severe damage. In the event of a safety accident, such as a radiation leak, by applying a wireless sensor network to a nuclear power plant, many sensor nodes can be used to monitor radiation and transmit information to an external base station to appropriately respond to the accident. However, applying a wireless sensor network to nuclear power plants requires routing protocols that consider the sensor network size and bypass obstacles such as plant buildings. In general, the hierarchical-based routing protocols are efficient in energy consumption. In this study, we look into the problems that may occur if hierarchical-based routing protocols are applied to nuclear power plants and propose improved routing protocols to solve these problems. Simulation results show that the proposed routing protocol is more effective in energy consumption than the existing LEACH protocol.

Key Words : Wireless Sensor Network, Nuclear Power Plants, Routing Protocol, Energy Consumption

I. 서론

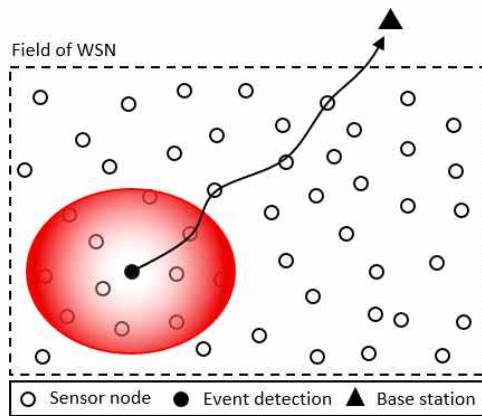
원자력 발전소는 일반 화력이나 수력발전소와는 달리 핵분열을 이용하여 증기를 생산하고 터빈을 돌려 전기 에너지를 생산한다. 원자력 발전소는 다른 발전소에 비해 발전 단가가 낮고 이산화탄소의 배출 측면에서 친환경적이다. 하지만 방사능과 밀접한 관계가 있어 사고에 대한 피해 규모가 매우 크기 때문

에 일반적인 발전소와는 달리 다양한 안전 관련 시스템으로 보호되고 있다[1]. IAEA에서 원자력 시설에서 일어날 수 있는 사건을 분류한 국제 원자력 사건 등급(INES, International Nuclear Event Scale)에 따르면 사건의 안전성과 대중에 대한 방사선의 영향에 따라서 1등급에서 7등급까지 사건의 등급을 분류하였고 1등급부터 3등급까지는 고장, 4등급 이상은 사고로 정의한다[2].

원자력 발전소에 안전과 관련된 사고를 빠르게 탐

* 한국원자력연구원 선임연구원

지하고 초기에 적절하게 대응하기 위해 무선 센서 네트워크 기술을 이용할 수 있다. <그림 1>과 같이 원자력 발전소에서 무선 센서 네트워크는 용도에 따라 주변의 온도, 습도, 그리고 방사능을 감지할 수 있는 센싱 기능과 무선 통신 기능을 갖춘 다수의 센서 노드와 외부의 사용자에게 해당 정보를 전달하는 베이스 스테이션으로 구성될 수 있다. 원자력 발전소에서 방사능 유출과 같은 사고가 발생하면 센서 노드가 방사능을 탐지하고 그 정보를 수집하여 사고 대응에 필요한 사항을 실시간으로 전달할 수 있다. 다수의 센서 노드가 실시간으로 협업을 통해 데이터를 수집하기 때문에 데이터의 신뢰성이 높다[3-5].



<그림 1> 무선 센서 네트워크의 구성

일반적으로 센서 노드는 저성능, 초소형, 저전력과 같은 한계를 가지고 있다. 그리고 원자력 발전소는 규모가 크고 원자로 건물을 비롯하여 다양한 구조물로 구성되어 있다. 따라서 원자력 발전소에 무선 센서 네트워크를 적용하기 위해서 라우팅 프로토콜은 센서 노드의 물리적인 한계와 원자력 발전소의 특징을 고려해야 한다.

다양한 라우팅 프로토콜 중에서 LEACH 프로토콜 [6]은 계층기반 라우팅 프로토콜로서 평면기반 라우팅 프로토콜보다는 에너지 효율적이지만, 센서 노드

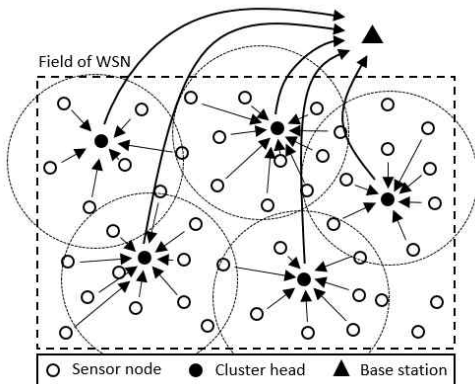
에 남아있는 에너지나 주변의 환경과 상관없이 클러스터 헤드가 베이스 스테이션과 통신한다는 가정하고 있어 원자력 발전소와 같은 환경에서는 외부의 베이스 스테이션과 통신을 위한 클러스터 헤드의 에너지 소모가 크고 높은 구조물이나 원자로 건물과 같은 주변의 환경에 따라 베이스 스테이션과 통신이 불가능한 경우도 발생한다[7].

본 연구에서는 LEACH 프로토콜을 개선하여 원자력 발전소의 환경에 적합하도록 센서 노드의 에너지 잔량과 네트워크 규모를 고려하고, 구조물의 우회를 위한 개선된 라우팅 프로토콜을 제안한다. 2장에서는 평면기반 라우팅 프로토콜과 계층기반 라우팅 프로토콜을 살펴보고, 원자력 발전소에 적용하였을 때 고려해야 할 문제점을 알아본다. 3장에서는 구조물의 우회와 네트워크 규모를 고려한 개선된 라우팅 프로토콜을 살펴본다. 4장에서는 제안된 라우팅 프로토콜에 대해 시뮬레이션을 통해 기존 LEACH 프로토콜과 성능을 비교하고 마지막으로 5장에서 결론을 맺는다.

II. 관련 연구

무선 센서 네트워크를 위한 평면기반 라우팅 프로토콜로 Flooding 프로토콜은 센서 노드는 수집된 데이터를 단순히 모든 주변 노드에 전달한다. 전달된 데이터를 받은 센서 노드는 데이터를 보낸 노드를 제외하고 주변의 노드에게 데이터를 전달한다. 위와 같은 과정을 반복하여 데이터가 네트워크 전체로 전달되고 모든 노드가 데이터를 수신하면 알고리즘을 종료한다[8]. 알고리즘이 간단하지만, Flooding 프로토콜은 이웃 노드에 데이터를 전송할 때 해당 데이터를 다른 노드로부터 수신했는지 확인하지 않기 때문에 하나의 노드가 데이터를 중복해서 받을 수 있다. 이는 데이터 송수신과 병합 과정에서 추가적인 에너지를 소모를 유발한다. 그리고 많은 센서 노드가 네트

워크에 배치되기 때문에 두 개의 노드에 의해 중복되어 탐지되는 부분이 발생하여 데이터의 중복 문제가 있다. 마지막으로 센서 노드의 에너지를 고려하지 않기 때문에 통신 경로상의 특정 센서 노드가 수명이 다하면 일부 지역에 대한 데이터를 수집하지 못하는 통신 단절의 문제가 있다. 이를 개선하여 무작위로 하나의 노드만 선택하여 데이터를 전달하는 Gossiping 프로토콜, 데이터를 전달하기 전에 필요한 정보를 확인하여 중복을 회피하는 SPIN 프로토콜 등이 있다[8, 9]. 평면기반 라우팅 프로토콜은 대부분 플러딩(Flooding)에 기반을 둔 라우팅 프로토콜이다. 센서 노드는 전역 식별자를 가지기 어려우므로 일반적으로 같은 역할을 수행하며 데이터에 기반을 둔 라우팅을 이용한다.

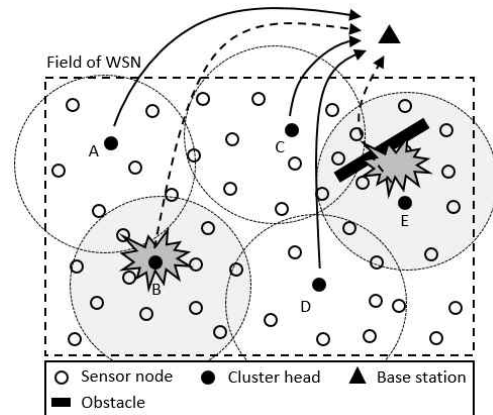


<그림 2> LEACH 프로토콜

계층기반 라우팅 프로토콜은 네트워크를 일정 크기의 지역으로 나누어 클러스터를 형성하고 클러스터 내의 센서 노드들의 데이터 수집과 전송을 책임지는 클러스터 헤드를 선택한다. 클러스터 헤드는 클러스터 내에서 감지한 데이터를 센서 노드로부터 수집한 후 데이터 병합을 수행하고 베이스 스테이션으로 전송한다. 평면기반 라우팅 프로토콜의 알고리즘 특성상 다수의 노드에서 베이스 스테이션으로 데이터

를 전송하면 베이스 스테이션과 가까이 있는 센서 노드들은 데이터 전송이 많으므로 다른 센서 노드보다 먼저 에너지가 소모될 수밖에 없다. 계층기반 라우팅 프로토콜은 클러스터 헤드가 베이스 스테이션으로 데이터를 전송하는 역할을 수행하는데 이 역할을 모든 센서 노드가 번갈아 수행함으로써 결과적으로 무선 센서 네트워크 내의 에너지 소모를 줄일 수 있다.

계층기반 라우팅 프로토콜인 LEACH(Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy) 프로토콜은 <그림 2>와 같이 다수의 클러스터 헤드를 선택하고 선택된 클러스터 헤드를 중심으로 일정한 그룹을 형성한다. 라운드에 따라 주기적으로 모든 센서 노드가 클러스터 헤드의 역할을 수행하여 전체적으로 무선 센서 네트워크상의 각 센서 노드들은 에너지를 균등하게 소비한다[6].



<그림 3> 원자력 발전소에 적용하는 경우의 문제점

하지만, LEACH 프로토콜은 원자력 발전소와 같은 환경에 적용하기에는 센서 노드는 네트워크의 크기와는 상관없이 베이스 스테이션으로 데이터를 전송할 수 있는 충분한 에너지가 있고 항상 원홑으로 통신할 수 있다는 가정에 따른 문제점이 있다. 첫째로 <그림 3>과 같이 만약 규모가 큰 무선 센서 네트워크에서 클러스터 헤드인 B 노드와 베이스 스테이션의

거리가 멀다면 다른 센서 노드보다 B 노드의 에너지 소모가 너무 크다. 그리고 에너지 잔량에 따라 센서 노드의 신호 세기가 약하다면 베이스 스테이션과 통신이 불가능할 수 있다. 둘째로 클러스터 헤드인 E 노드의 경우처럼 베이스 스테이션의 사이에 구조물이 있다면 경우에 따라 통신이 어려운 경우가 생길 수 있다. 따라서 원자력 발전소는 규모가 크고 여러 구조물이 있는 환경에 적합한 라우팅 프로토콜이 필요하다.

III. 원전에 적합한 무선 센서 네트워크 라우팅 프로토콜

본 논문에서 제안하는 프로토콜은 LEACH 프로토콜에 기반을 두고 있다. 다수의 클러스터 헤드를 선택하고 클러스터 헤드를 중심으로 일정한 클러스터를 형성하게 된다. 주기적으로 모든 센서 노드가 클러스터 헤드의 역할을 하면서 무선 센서 네트워크의 각 노드의 에너지를 균등하게 소비한다. 제안하는 프로토콜은 광고, 클러스터 구성, 클러스터 헤드 체인, 스케줄 생성, 그리고 데이터 전송의 4단계로 구성된다.

• 광고 단계

클러스터 헤드를 선택하기 위해 각 센서 노드 n 은 0부터 1 사이의 임의의 숫자를 선택한다. 식 (1)에 따라서 그 임의의 숫자가 정해진 임계값보다 작다면 그 노드는 현재 라운드에서 클러스터 헤드로 선택된다.

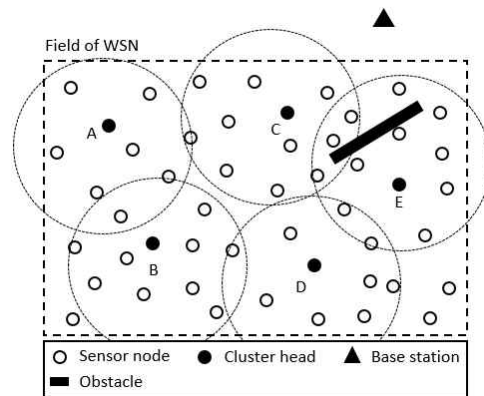
$$T(n) = \begin{cases} \frac{p}{1 - p(r \bmod (1/p))} & , \text{if } n \in G \\ 0 & , \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

여기서 p 는 전체 노드 개수에 비례하여 클러스터

헤드의 개수를 백분율로 나타낸 값이다. r 은 현재 라운드를 나타내고, G 는 마지막 라운드($1/p$)에서 클러스터 헤드로 선택되지 않은 노드들의 집합을 나타낸다. 따라서 한번 선택된 노드는 $1/p$ 라운드 동안에 클러스터 헤드로 선택되지 않는다. <그림 4>에서 5개의 클러스터 헤드가 선택되었음을 보여준다. 클러스터 헤드는 일정한 세기의 신호를 이용하여 자기가 클러스터 헤드임을 주변 센서 노드들에 알린다. 자신의 클러스터를 구분하기 위해 메시지를 받은 주변의 센서 노드들은 메시지 신호의 세기를 비교해 신호가 가장 큰 클러스터 헤드를 선택한다.

• 클러스터 구성 단계

클러스터 헤드를 정한 각 센서 노드들은 자신이 클러스터의 구성원임을 클러스터 헤드에 알린다. 이렇게 함으로써 <그림 4>와 같이 클러스터와 클러스터 헤드 그리고 클러스터의 구성 노드들이 정해진다.

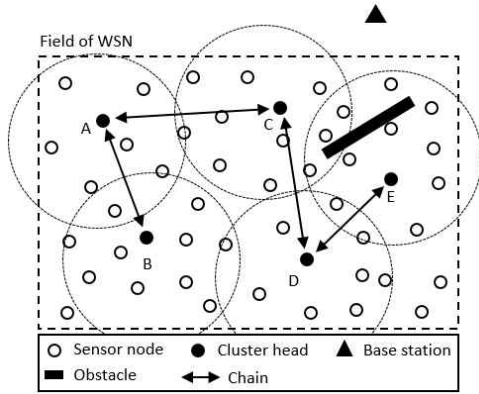


<그림 4> 클러스터 헤드 선택 및 클러스터 설정

• 클러스터 헤드 체인 단계

클러스터가 구성된 후에 클러스터 헤드는 주변에 이웃하는 클러스터 헤드를 파악하게 된다. <그림 5>와 같이 각 클러스터 노드는 체인 알고리즘을 이용해서 클러스터 헤드들을 하나의 체인으로 연결하게 된

다. 이때 클러스터 주변의 구조물에 따라 체인이 다르게 형성될 수 있다. <그림 5>에서는 클러스터 헤드 C와 E 사이의 구조물 때문에 클러스터 헤드 B, A, C, D, E 순서로 체인이 형성되었다.



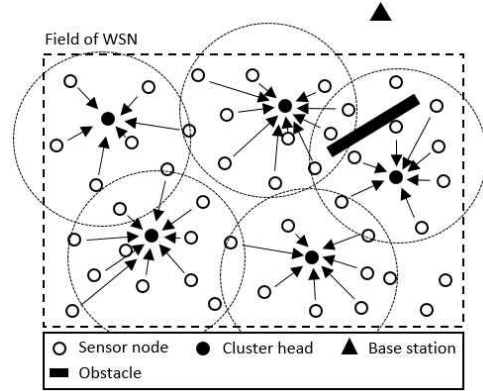
<그림 5> 클러스터 헤드의 체인 형성

• 스케줄 생성 단계

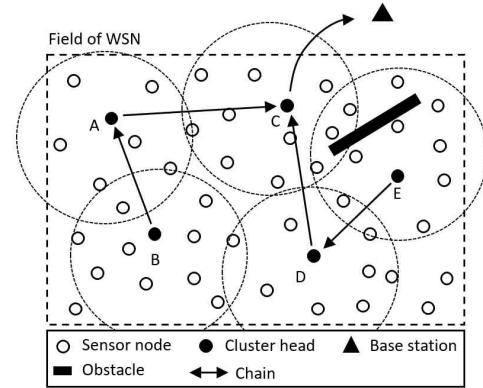
클러스터 안의 모든 센서 노드로부터 메시지를 받은 클러스터 헤드는 센서 노드의 개수에 맞게 TDMA 스케줄을 구성하여 클러스터를 구성하는 센서 노드들에 전달한다. 각 센서 노드는 스케줄에 따라 자신이 데이터를 보내야 할 시간을 알게 되고 정해진 스케줄을 이용하여 순차적으로 데이터를 클러스터 헤드로 전송한다.

• 데이터 전송 단계

무선 센서 네트워크에서 클러스터와 각 TDMA 스케줄이 정해지게 되면 데이터의 송수신이 발생한다. <그림 6>과 같이 각 노드는 TDMA 스케줄에 따라 정해진 전송 시간에 클러스터 헤드로 데이터를 주기적으로 전송한다. 그리고 <그림 7>과 같이 클러스터 안의 모든 노드로부터 데이터를 받은 클러스터 헤드는 데이터 병합 과정을 수행하고 이후에 형성된 클러스터 헤드의 체인을 따라서 이웃하는 클러스터 헤드로



<그림 6> 클러스터 내의 데이터 수집



<그림 7> 클러스터 헤드 간 데이터 송수신

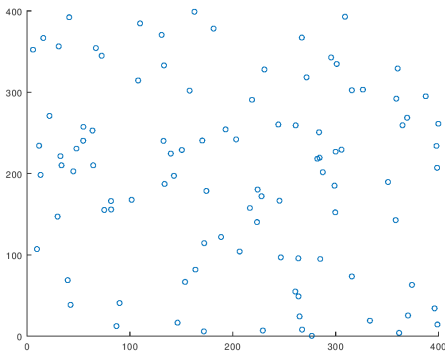
데이터를 전송한다. 현재 클러스터 헤드 B는 A 노드를 거쳐 클러스터 헤드 C로 데이터를 보내고 클러스터 헤드 E는 구조물 때문에 클러스터 헤드 D를 통해 클러스터 헤드 C와 체인을 형성하게 된다. 현재 라운드에서 체인의 마지막 클러스터 헤드 C 노드는 최종적으로 베이스 스테이션으로 전체 데이터를 전송하게 된다.

본 논문에서 제안하는 방식은 원자력 발전소처럼 규모가 큰 네트워크에도 적합하고, 구조물을 우회하여 데이터를 전달할 수 있으므로 데이터 수집에서 발생할 수 있는 클러스터 헤드 노드의 불필요하게 소모

되는 에너지를 줄이고 일정 지역의 통신이 단절될 수 있는 문제를 해결할 수 있다.

IV. 에너지 효율 비교 및 분석

본 연구에서 제안된 클러스터 헤드 체인 라우팅 프로토콜에 대한 효율을 분석하기 위해 [10]에 소개된 일반적인 라디오 모델을 사용한다. 무선 센서 네트워크의 크기는 가로 400m와 세로 400m의 크기로 가정한다. 초기에 배치된 센서 노드는 총 100개이고 센서 노드는 <그림 8>과 같이 무작위로 배치하였다. 외부의 베이스 스테이션의 위치는 (200, 450)이라고 가정한다. 센서 노드의 초기 에너지는 1 joule로 가정한다.



<그림 8> 센서 노드의 배치

시뮬레이션 환경을 위한 파라미터는 <표 1>과 같다. 프로토콜의 헤드 노드를 정하기 위한 확률(p)은 0.05로 정한다. 즉, 노드가 100개이므로 라운드마다 무작위로 5개의 클러스터 헤드가 정해진다. 한 비트를 송신 및 수신하는데 드는 비용(E_{elec})은 한 비트당 50 nJ로 정의한다. 그리고 송수신하는 노드 사이의 거리(d)에 따라 한 비트의 데이터를 송신하는데 드는 비용(E_{amp})은 다른 값으로 주어진다. 만약 데이터를 송신하는 노드와 수신하는 노드 사이의 거리가 정해

진 값보다 작은 경우에 자유공간 모델 상수(E_{fs})를 적용하게 되며, 반대의 경우로 만약 송수신 노드의 사이의 거리가 정해진 값보다 크거나 같은 경우에는 다중경로 모델의 상수(E_{mp})를 적용하게 된다. 자유공간 모델의 상수는 한 비트당 10 pJ 이고 다중경로 모델의 상수는 0.0013 pJ 이다. 그리고 거리에 따른 자유공간과 다중경로 방식을 구분하는 값(D_{th})은 식 (2)에 따라서 87.71m로 정해진다.

$$D_{th} = \sqrt{\frac{\epsilon_{fs}}{\epsilon_{mp}}} \quad (2)$$

<표 1> 시뮬레이션 환경

구분	파라미터	값
네트워크	네트워크 크기	(0,0) to (400,400)
	베이스 스테이션 위치	(200,450)
	초기 노드 에너지	1 J
라디오 모델	p	0.05
	E_{elec}	50 nJ
	E_{fs}	10 pJ/bit
	E_{mp}	0.0013 pJ/bit
	E_{agg}	5 nJ/bit
	D_{th}	87.71 m
	k	3,000 bits

송수신 노드의 거리에 따라 k 비트를 전송하는 경우에 소비되는 에너지(E_{TX})는 식 (3)과 같고 세부적으로 식 (4) 그리고 식 (5)와 같이 정의된다.

$$E_{TX}(k,d) = E_{elec}(k) + E_{amp}(k,d) \quad (3)$$

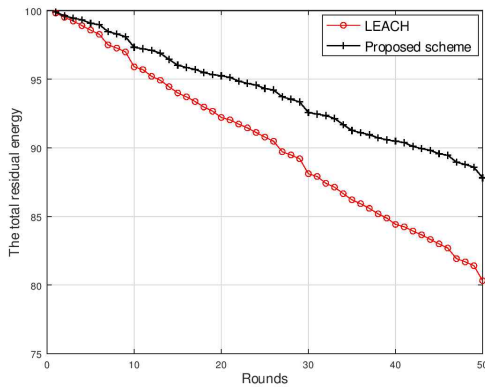
$$E_{elec}(k) = E_{elec} \times k \quad (4)$$

$$E_{amp}(k,d) = \begin{cases} \epsilon_{fs} \times k \times d^2 & \text{if } d < d_0 \\ \epsilon_{mp} \times k \times d^4 & \text{if } d \geq d_0 \end{cases} \quad (5)$$

마지막으로 일정한 k 비트를 수신하고 데이터 병합을 수행하는 경우에 소비되는 에너지(E_{RX})는 식 (6)과 같다.

$$E_{RX}(k) = E_{elec} \times k + E_{agg} \times k \quad (6)$$

프로토콜의 알고리즘을 바탕으로 수식에 따라서 LEACH 프로토콜과 제안된 프로토콜의 라운드별로 소비되는 에너지를 비교한다. 시뮬레이션에서 총 50 라운드 동안 모든 센서 노드의 에너지 합을 계산하여 비교한다.



<그림 9> 에너지 잔량 비교

<그림 9>는 주어진 시뮬레이션 환경을 바탕으로 계산된 LEACH 프로토콜과 클러스터 헤드 체인에 기반을 둔 프로토콜의 무선 센서 네트워크에서 에너지의 잔량을 보여준다.

<표 2>와 같이 50라운드에서 센서 노드에 남은 에너지 양의 합이 LEACH 프로토콜의 경우 80.324 J이고, 제안된 라우팅 프로토콜의 경우 87.817 J로 제안된 라우팅 프로토콜이 에너지 효율적임을 알 수 있다.

V. 결론

계층기반 라우팅 프로토콜은 무선 센서 네트워크 내에서 여러 클러스터를 구성하여 클러스터 헤드가 클러스터 내의 데이터 병합하고 외부의 베이스 스테이션으로 수집된 데이터를 전송하는 역할을 수행한다. 이와 같은 클러스터 헤드의 역할을 각 센서 노드가 번갈아 수행하며 전체적인 에너지 소모를 줄일 수 있다. 하지만 계층기반 라우팅 프로토콜인 LEACH 프로토콜에서 센서 노드가 베이스 스테이션과 원홉으로 통신이 가능하다는 가정 때문에 원자력 발전소와 같은 규모가 크고, 구조물에 따라 통신에 영향을 받을 수 있는 환경에서는 그대로 적용하기는 어렵다.

<표 2> 라운드별 에너지 잔량 비교

라운드	LEACH (J)	Proposed Scheme (J)
0	100.0	100.0
5	98.574	99.075
10	95.901	97.325
15	94.000	96.021
20	92.211	95.246
25	90.785	94.321
30	88.112	92.571
35	86.212	91.267
40	84.423	90.492
45	82.997	89.567
50	80.324	87.817

따라서, 제안된 방법과 같이 기본적인 클러스터 형성에서 클러스터 헤드를 체인으로 구성하게 되면 규모가 큰 센서 네트워크에 적합하고 구조물에 따라 우회할 수 있으므로 원자력 발전소에 적합한 무선 센서 네트워크 라우팅 프로토콜이 될 수 있다. 향후, 시뮬레이션 결과를 바탕으로 무선 센서 네트워크에 라우팅 프로토콜을 구현하여 최적의 네트워크 수명에 대해 분석할 예정이다.

참고문헌

- [1] 이철권, "원전 계측제어시스템 사이버보안 기술 동향," 한국정보보호학회, 정보보호학회지, 제22

- 권, 제5호, 2012, pp.28-34.
- [2] INES/등급분류 체계, <https://opis.kins.re.kr/opis?act=KROCA1100R>.
- [3] J. N. Al-Karaki and A. E. Kamal, "Routing techniques in wireless sensor networks: a survey," in IEEE Wireless Communications, Vol. 11, No. 6, 2004, pp.6-28.
- [4] J. Ebenezer and S. S. Murty, "Deployment of Wireless Sensor Network for radiation monitoring," 2015 International Conference on Computing and Network Communications (CoCoNet), Trivandrum, 2015, pp.27-32.
- [5] 이대희, 조경우, 강철규, 오창현, "무선 센서 네트워크에서 에너지 효율 향상을 위한 링크 비용 기반 라우팅 프로토콜," 한국정보통신학회논문지 Vol. 23, No. 5, May.2019, pp.574-580.
- [6] W. B. Heinzelman, A. P. Chandrakasan and H. Balakrishnan, "An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks," in IEEE Transactions on Wireless Communications, Vol. 1, No. 4, 2002, pp.660-670.
- [7] S. Jung, N. Kim and T. Chung, "The clusterhead chaining scheme considering scalability of the wireless sensor networks," The International Conference on Information Network 2012, Bali, 2012, pp.497-500.
- [8] J. Kulik and W. Heinzelman, and H. Balakrishnan, "Negotiation-Based Protocols for Disseminating Information in Wireless Sensor Networks," Wireless Networks, Vol. 8, 2002, pp.169-185.
- [9] A. S. Yuan, H. Fang and Q. Wu, "OpenFlow based hybrid routing in Wireless Sensor Networks," 2014 IEEE Ninth International Conference on Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing (ISSNIP), Singapore, 2014, pp.1-5.
- [10] O. Younis and S. Fahmy, "HEED: a hybrid, energy-efficient, distributed clustering approach for ad hoc sensor networks," in IEEE Transactions on Mobile Computing, Vol. 3, No. 4, 2004, pp.366-379.

■ 저자소개 ■



정 성 민
Jung, Sungmin

2014년 3월~현재
한국원자력연구원 선임연구원
2014년 2월
성균관대학교
전자전기컴퓨터공학과 (공학박사)
2008년 2월
성균관대학교
전자전기컴퓨터공학과 (공학석사)
2005년 2월
성균관대학교
정보통신공학부(공학사)

관심분야 : 산업시설보안, 제어시스템보안,
센서네트워크, 클라우드 컴퓨팅
E-mail : smjung@kaeri.re.kr

논문접수일 : 2020년 6월 10일
게재확정일 : 2020년 6월 18일