

산업용 무선 센서 네트워크에서 이동 장치로 인한 경로 파손을 방지하기 위한 라우팅 그래프 생성 방안

김상대*, 정관수*, 조현중**, 김천용**, 양태훈**, 김상하°

Routing Graph Construction Scheme to Prevent Path Failure Due to Mobile Devices in Industrial Wireless Sensor Networks

Sangdae Kim*, Kwansoo Jung*, Hyunchong Cho**, Cheonyong Kim**, Taehun Yang**,
Sang-Ha Kim

요약

산업용 사물 인터넷은 모니터링, 재고관리 및 장치 제어 등 다양한 산업 분야에서 생산성 향상 및 비용 절감을 위해 사용되고 있다. 이러한 산업 분야에서 사용되는 다양한 어플리케이션에서의 목적을 달성하기 위해서, 각각의 장치 및 주변 환경에서 탐지된 데이터가 유효한 시간 내에 수집되어야 한다. 데이터 수집을 위한 산업용 네트워크는 과거 유선으로부터 무선으로 연구가 진행되었고, 특히, WirelessHART로 대표되는 산업용 무선 센서 네트워크는 과거 유선 네트워크의 비용을 대폭 절감할 수 있었다. 또한, 전체 네트워크 위상에 대한 그래프 생성 및 자원 할당을 통해 전송 간 충돌 및 간섭을 방지함으로써, 산업 분야에서 요구하는 저 지연, 고 신뢰 데이터 수집을 가능하게 했다. 하지만, 산업용 무선 센서 네트워크는 배선으로 인한 문제를 해결하는데만 초점을 맞추고 있기 때문에, 오늘날 이동 장치가 공존하는 환경을 고려하지 않고 설계되었다. 이로 인해 이동 장치의 이동은 네트워크 그래프의 변화 및 이로 인한 경로 파손 문제를 야기한다. 즉, 경로 파손으로 인해 데이터 및 명령의 누락이 발생하고 이는 저 지연, 고 신뢰를 요구하는 산업 환경에서 치명적인 문제를 야기한다. 이러한 문제를 해결하기 위해 본 논문에서는 고정 장치와 이동 장치를 구분하여 고정 장치로 구성된 뼈대 그래프에 이동 장치를 접붙임으로써, 이동 장치의 이동으로 인한 다른 장치들의 경로 파손을 방지하는 방법을 제안한다. 또, 이를 시뮬레이션을 통해 제안 방안이 기존의 연구에 비해 이동 장치로 인한 경로 파손의 피해를 감소시킬 수 있음을 보인다.

Key Words : Industrial Wireless Sensor Network(IWSNs), Mobile Device, Path Failure, Routing Graph Construction

ABSTRACT

Industrial Internet of Things have been exploited to improve productivity and reduce the cost in various industrial fields such as manufacturing, logistics and control. To achieve the objective of the applications, sensing data from the device and environment should be collected in a valid time. An industrial network for collecting data has been started from a wired network to a wireless network, especially, Industrial Wireless Sensor

※ 본 연구는 2017년도 충남대학교 학술연구비에 의해 지원되었습니다.

♦ First Author : (ORCID:0000-0002-3073-3876)Chungnam National Univ. sdkim.cse@gmail.com, 학생회원

° Corresponding Author : (ORCID:0000-0001-7231-8163)Chungnam National Univ. shkim@cnu.ac.kr, 종신회원

* (ORCID:0000-0002-6777-9923)Howon Univ. Department of Computer Engineering, kshung@howon.ac.kr, 정회원

** (ORCID:0000-0002-5817-4623, 0000-0003-2276-8013, 0000-0001-8584-8868)Chungnam National Univ. Department of Computer Engineering, {hccho, cykim, thyang}@cclab.cnu.ac.kr

논문번호 : 201812-377-B-RN, Received December 5, 2018; Revised January 17, 2019; Accepted January 21, 2019

Networks(IWSNs) could reduce the cost of wiring. In addition, it prevents an interference and collision by constructing network graph and allocating resource. However, IWSNs only focus mitigating the problem of the wiring, it does not consider the mobile device. Thus, the mobile device causes the network changes and a path failure. This phenomenon leads to loss of the data, it brings about a critical problem in the industrial environment where requires high-reliability and low-delay. To solve this problem, we propose the graph construction scheme to prevent the path failure caused by the mobile device by attaching the mobile device to the skeleton graph consists of the static devices. The simulation results show that the proposed scheme significantly reduces the damage of the path failure by the mobile device rather than the existing studies.

I. 서 론

사물 인터넷 (IoT)은 다양한 사물들이 인터넷에 연결되는 기술로, 이 연결에 기반하여 제조, 채광, 농경 등의 다양한 산업분야에서 활용되는 기술을 산업용 사물 인터넷 (IIoTs)라고 한다^[1]. IIoT는 세계 경제에 상당한 파급력을 지닌 기술로 인식되고 있으며^[2], 현재 모니터링, 재고관리 및 제어 등의 어플리케이션을 통해 전술된 산업 분야에서 생산성 향상 및 이윤 증대 등의 이익을 목표로 활용되고 있다^[3,4]. 예를 들어, 모니터링 시스템^[5]의 경우, 현재 가동 중인 장비들의 상태를 지속적으로 관측함으로써 장비의 파손 및 고장 등을 사전에 예측하여 장비의 오류로 인한 품질 저하 또는 생산성 하락을 방지하고, 재고 관리 시스템^[6]의 경우, 원재료 및 제품 적재량 등을 통해, 원활한 원재료 공급 및 제품의 과적재 상태를 방지할 수 있다. 또한, 제어 시스템의 경우, 주변 센서로부터 발생한 데이터를 통해 공정을 자동화함으로써 비용 절감을 이끌어 낼 수 있으며, 재난 방제 시스템^[7]의 경우, 다양한 재난에 대해 즉각적인 초동대처를 통해 재난으로 인한 피해를 최소화 및 방지할 수 있다. 이러한 다양한 산업 어플리케이션에서의 효율성, 생산성 향상 및 자동화를 위해서 모두 공통적으로 각 장치 및 환경에서 탐지된 데이터가 유효한 시간 내에 수집되어야 한다. 즉, 오늘날 IIoT의 다양한 어플리케이션에서는 탐지된 데이터의 저지연 및 고신뢰 전송을 필요로 한다.^[8]

이를 위해, IIoT에서는 과거 HART^[9], FieldBUS^[10]와 같은 유선 시스템으로부터 ZigBee^[11], WirelessHART^[12] 및 ISA 100.11A^[13]와 같은 무선 시스템까지 다양한 기술을 활용해왔다. 특히, 무선 시스템은 과거 유선으로 구성된 시스템에 비해 설치가 용이하고, 배선 설비 및 보호를 위한 비용이 발생하지 않는다는 장점이 있다^[14,15]. 또한, 무선 시스템은 오늘날 다품종 소생산을 위한 설비의 재배치를 용이하게 함으로써 유선에 비해 각광받고 있다^[6]. 다양한 장점을 가진 무선 시스템

의 활용은 과거 ZigBee를 이용한 무선 센서 네트워크 (WSNs)으로부터 시작되었으나, 모든 센서 노드가 같은 채널을 사용하는 무선 센서 네트워크는 수많은 설비가 사용되는 산업 환경에서 데이터 전송 간 충돌 및 간섭으로 인해 다양한 산업 어플리케이션이 요구하는 저지연 및 고신뢰 전송을 달성하는데 어려움이 있다^[17]. 이러한 산업 환경에서의 요구사항을 만족시키기 위해, WirelessHART로 대표되는 산업용 무선 센서 네트워크 연구가 진행되었다. WirelessHART는 각 장치들의 정보를 수집하여 네트워크 전체 위상에 대해 유향 경로 그래프를 생성한다. 이 후, 생성된 그래프를 기반으로, Time Slotted Channel Hopping (TSCH)을 활용하여 각 장치들이 어떤 시간에, 어떤 채널을 통해 어떤 장치에게 데이터 및 명령을 전송할 것인지를 미리 결정하고 이를 하나의 프레임으로 만들어 각 장치들에게 알림으로써 데이터 전송 간 충돌 및 간섭 문제를 해결할 수 있다.^[12] 이를 통해, 기존 무선 센서 네트워크가 달성하지 못한 저지연 및 고신뢰 전송을 가능하게 했다.

하지만, 산업용 무선 센서 네트워크는 과거 유선 시스템의 설치의 어려움, 배선 및 설비 보호 등의 단점을 완화하는데 초점을 맞추고 있기 때문에, 이동 장치가 산업 환경에서 주요한 역할을 수행할 것이라는 예측에도 불구하고 이동 장치가 공존하는 환경을 고려하지 않고 설계되었다^[18,19]. 이로 인해, 장치의 이동은 네트워크의 변화 및 이로 인한 경로 파손을 야기하게 된다. 이는 기존에 결정된 전송 시간 및 채널로 표현되는 경로의 단절을 의미하며, 이러한 변화가 복구될 때까지 데이터 및 명령의 누락이 발생한다. 이는 네트워크 전체적인 성능을 저하시킬 뿐 만 아니라, 전술된 다양한 산업용 어플리케이션에서 치명적인 문제를 야기한다. 이러한 문제를 해결하기 위해, 네트워크 변화를 빠르게 복구하기 위한 다양한 연구^[20,21]가 진행되었다. 이 방법들은 이동 장치의 이동을 빠르게 탐지하고, 이동으로 인한 네트워크 변화를 빠르게 복구하는

데 초점을 맞추고 있다. 하지만, 장치가 고속으로 이동하는 경우 이동 장치의 탐지 확률이 급격하게 저하되고, 네트워크의 변화를 복구하는데 긴 시간이 소요된다. 즉, 이전의 방법들은 이동으로 인한 네트워크의 변화를 근본적으로 방지할 수 없기 때문에, 앞서 언급된 데이터 및 명령 누락, 네트워크 성능 저하 문제에 대한 해결책으로 적절하지 않다.

따라서 본 논문에서는 이동 장치의 이동으로 인한 네트워크 변화를 방지하는 방법을 제안한다. 먼저, 장치의 정보를 수집하는 단계에서 이동 장치와 고정 장치를 구분한다. 이 구분에 기반 하여, 고정 장치로만 구성된 뼈대 그래프를 생성하고, 생성된 그래프에 이동 장치를 접붙인다. 이러한 생성 방법을 통해서, 이동 장치로 인해 발생하는 네트워크 변화를 방지할 수 있으며, 전술된 문제를 해결할 수 있다.

본 논문의 나머지는 다음과 같이 구성된다. 먼저 2장에서는 대표적인 산업 무선 센서 네트워크인 WirelessHART에 대한 전체적인 설명 및 라우팅에 대한 요구사항, 그리고 이 요구사항에 기반한 그래프 생성 방법에 대해 설명하고, 현재의 그래프 생성 방법이 가지는 문제점에 대해 기술한다. 3장에서는 이 문제점을 해결하기 위해 제안된 그래프 생성 방법에 대해 설명한다. 제안 방안 및 기존 연구에 대한 성능 평가 결과는 4장에서 제시될 것이고, 마지막으로 5장에서는 향후 연구와 함께 본 논문을 결론짓는다.

II. 관련 연구

본 장에서는 먼저 WirelessHART의 기본적인 동작 과정에 대해 설명하고, 표준에서 설명하는 라우팅 요구사항 및 이에 기반한 그래프 생성 예시에 대해 설명한다. 그리고 앞서 예시를 통해 생성된 그래프에서 이동 장치의 이동으로 인해 발생하는 문제에 대해 설명한다.

2.1 WirelessHART 개요

본 절에서는 WirelessHART의 전체적인 개요에 대해 설명한다. 그림 1은 WirelessHART 네트워크를 보여주며, 네트워크는 Field Device, Adapter, Access Point, Gateway, Handheld Device, Network Manager로 구성된다.

Field Device는 실제 배치된 센서 노드로, 장치나 환경 등으로부터 데이터를 수집하여, Access Point를 거쳐 Gateway로 데이터를 전달한다. Adapter는 비 WirelessHART 장치들을 WirelessHART 네트워크로

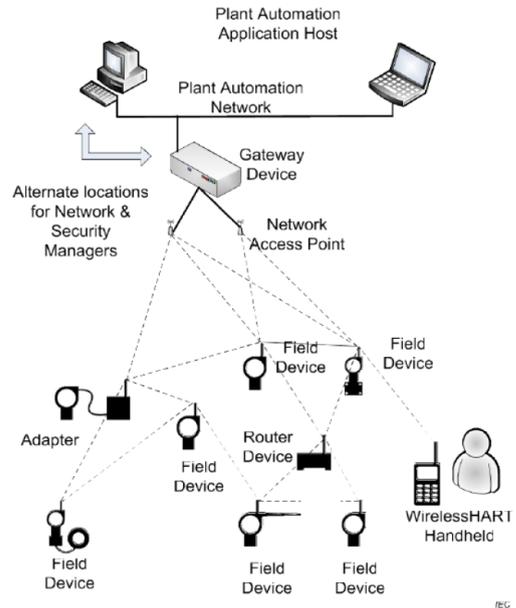


그림 1. WirelessHART 네트워크 [12]
Fig. 1. WirelessHART network [12]

연결하기 위해 사용된다. 예를 들어, HART는 이미 많은 산업 분야에서 사용되고 있으며, HART 장치에 Adapter를 설치함으로써, 기존 HART 장치들이 WirelessHART 네트워크로의 연결성을 가질 수 있게 된다. Access Point는 각각의 Field Device로부터 수집된 데이터를 Gateway 및 Network Manager로 전달하거나, 반대로 Network Manager의 명령을 Field Device에게 전달한다. Gateway는 WirelessHART 네트워크와 외부 관리 네트워크를 연결하는 중심점으로, 서로 다른 프로토콜을 번역한다. Handheld는 사용자가 네트워크의 진단, 제어 및 유지를 위해 사용하는 디바이스이다. 마지막으로, Network Manager는 장치들로부터 정보를 수집하고, 이에 기반하여 그래프 생성 및 자원 할당을 수행하여, 각 장치가 언제, 누구에게 전송할지 등을 결정한다. 특히 자원할당 과정에서 TSCH를 활용하여 각 장치의 전송 충돌 및 간섭을 배제한다. 이 외에도 Network Manager는 장치의 추가, 변경 및 제거 등의 네트워크 변화가 발생한 경우에 이를 반영하여 전송 경로 및 시간을 조율한다.

2.2 WirelessHART 요구사항

본 절에서는 WirelessHART 표준에서는 특정한 라우팅 방법에 대해 설명하지 않는 대신, 다음과 같은 요구사항에 대해 설명하고 있다.

1) Network Manager는 각 장치로부터 주기적인

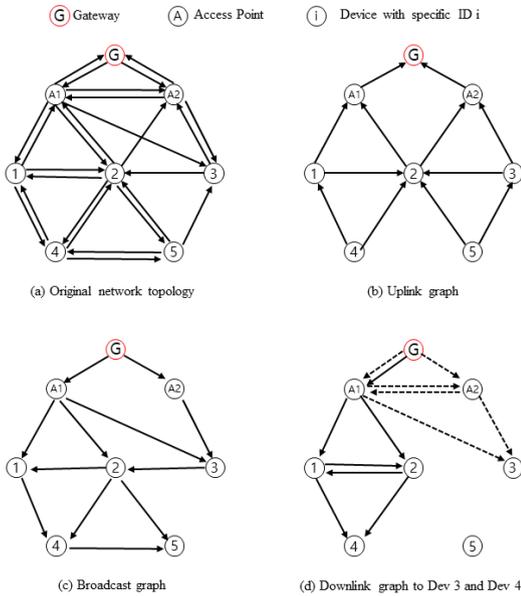


그림 2. [23]에 따른 그래프 생성 예제
Fig. 2. The example of graph construction by [23]

Health Report를 보고 받는다. Health Report는 각 장치와 이웃 노드간의 연결 상태 및 신호 강도 등의 정보를 담고 있으며, 이 정보를 통해 네트워크 통계를 집계하여 네트워크 장치들의 연결 상태를 파악한다.

2) Network Manager는 네트워크 매니저는 각 장치가 네트워크 내부에서 어떻게 상호간에 연결되어 있는지 그래프의 형태를 통해 알고 있으며, 데이터 및 명령의 전송을 위해 그래프의 일부를 활용한다.

3) Network Manager는 수집된 정보 및 생성된 네트워크 그래프를 기반으로, 각 장치로의 명령 전달을 위한 다운 링크 그래프(하향 그래프), 장치 데이터 수집을 위한 업 링크 그래프(상향 그래프), 그리고 네트워크 전체 장치에게 데이터를 전달하기 위한 브로드캐스트 그래프를 생성한다. 생성된 각각의 그래프는 어떠한 경로에도 순환 경로가 존재하지 않아야 한다.

2.3 WirelessHART 라우팅 그래프 생성 예시

라우팅 그래프를 생성하기 위해 다양한 방법들^[22-24]이 제안되었다. 특히 [23]은 산업용 무선 센서 네트워크에서 요구하는 저지연 및 고신뢰를 만족시킬 수 있는 가장 대표적인 방법으로써, 본 절에서는 [23]에서 라우팅 그래프를 생성하는 방법에 대해 간략히 설명한다.

[23]의 저자는 전송된 상향, 하향 및 브로드 캐스트 그래프에 대한 신뢰성을 만족시키기 위해 (k, m) -

reliability 개념을 적용하였다. k 는 각 노드의 입력 차수를 의미하며, m 은 출력 차수를 의미한다. Network Manager는 각 노드가 최소 2개의 입력 차수 및 출력 차수를 가질 수 있도록 그래프를 생성한다. 즉, 상향 그래프의 경우, $(0, 2)$ -reliability를 만족하는 그래프를 생성하고, 하향 그래프의 경우 $(2, 0)$ -reliability를 만족하는 그래프를 생성한다. 또한, 실시간 전송을 달성하기 위해 각 장치로부터 Gateway까지의 평균 홉 수가 적은 노드를 우선으로 그래프에 편입시킨다.

그림 2는 [23]의 그래프 생성 방법에 따른 상향, 하향 및 브로드 캐스트 그래프의 예시를 보여준다. 먼저 그림 2 (a)는 Network Manager가 각 장치의 Health Report를 통해 알고 있는 기본적인 토폴로지이다. 이를 기반으로, Network Manager는 각각의 (b), (c), (d)에 대한 그래프를 생성한다. 전송하였듯, [23]에서는 (k,m) -reliability개념을 적용하여 그래프를 생성한다. 즉, 그림에서 볼 수 있듯이 (b)의 상향 그래프의 경우, $(0,2)$ -reliability를 적용하여 각 노드에서 Gateway로 향하는 경로를 2개씩 생성한다. 이와 유사하게, (c)의 브로드 캐스트 그래프의 경우, $(2,0)$ -reliability를 적용하여 Gateway에서 각 노드로 향하는 경로를 2개씩 생성한다. 다만, 이러한 과정에서 조건을 만족하지 못하는 장치는 후순위로 연결되며, 하나의 경로만을 가지게 될 수 있다. 마지막으로 (d)와 같은 하향 그래프는 각 장치별로 생성되게 되며, (c)의 브로드 캐스트 그래프와 동일하게 $(2,0)$ -reliability를 만족시켜야함과 동시에, Loop문제를 해결하기 위해 다음과 같은 조건을 모두 만족해야한다.

- 1) 하향 그래프 생성을 위한 임의의 장치 v 는 적어도 두 개의 부모를 가지고 있어야한다.
- 2) 이 두 개의 부모는 유한 사이클이어야 한다.
- 3) 각 부모의 사이클은 적어도 하나의 다른 부모를 포함해야한다.

Network Manager는 임의의 장치 v 에 대한 하향 그래프를 생성할 때, v 의 부모 노드의 하향 그래프에 기반 하여 그래프를 생성한다. Network Manager는 부모의 그래프를 병합하고, 병합된 그래프로부터 v 에게 2개의 출력차수를 갖는 그래프를 생성한다. 이 과정은 v 에 대한 하향 그래프가 완성될 때까지 반복되며, 그래프가 완성된 후, 불필요한 경로는 삭제한다.

2.4 기존 그래프 생성 예시의 문제점

라우팅 그래프를 본 절에서는 앞 절에서 설명된 생

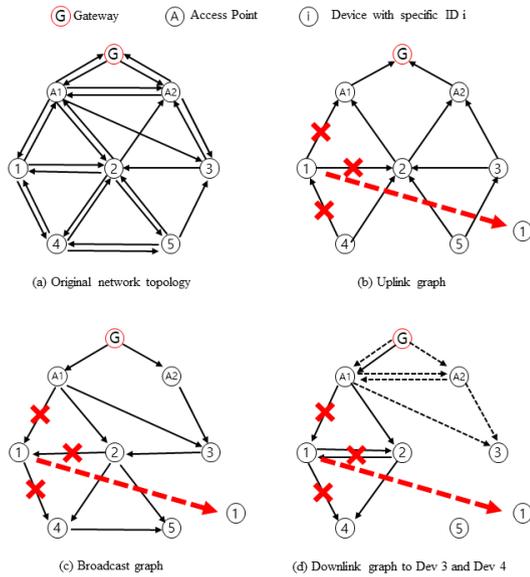


그림 3. 이동 장치로 인한 경로 파손 문제
Fig. 3. The problem on the topology caused by mobile device

성 예시를 통해 생성된 그래프에서 이동 장치의 이동으로 인해 발생하는 문제에 대해 설명한다. 서론에서 언급하였듯이, 기존의 WirelessHART 표준은 이동 장치에 대해 고려하지 않고 설계되었기 때문에, 장치의 이동은 성능 저하를 야기하게 된다. 그림 3은 장치 1이 이동 장치인 경우를 가정하고, 장치 5 근처로 이동하는 경우 발생하는 문제를 보여준다. 먼저 장치 1은 자신과 관련된 상향, 하향 및 브로드 캐스트 그래프에 대한 경로를 잃게 되고, 장치 2, 4 및 Access Point A1 역시 1과 관련된 경로를 모두 잃어버리게 된다. 이러한 손실된 경로는 이동 장치에 대한 이웃 탐지 프로세스(Neighbor Discovery Process)를 통해 장치의 이동이 발견되거나, 이동 장치가 네트워크에 재 참가할 때 복구된다. 즉, 이웃 탐지 프로세스나 네트워크 참가 프로세스가 진행되는 동안에 장치 1은 Gateway로 데이터를 전송할 수 없고, 또한 Network Manager로부터 명령을 전달 받을 수 없다. 뿐만 아니라, 자신의 자손 장치의 그래프 또한 파손되어 자손의 데이터 전송 및 명령 전달에 악영향을 미친다.

정리하면, 기존의 WirelessHART 표준에서 이동 장치의 이동은 1) WirelessHART 네트워크로부터 이동 장치의 경로 단절 문제와 2) 이동 장치의 자손 장치의 성능 저하 문제의 두 가지 문제를 야기한다. 두 가지 문제 모두 저 지연, 고 신뢰를 요구하는 산업용 무선 센서 네트워크에서 치명적인 문제를 야기하게

된다. 이를 완화하기 위해, [20,21]과 같은 빠른 이동 탐지 방법들이 제안되었으나 장치가 고속으로 이동하는 경우, 이동 장치의 탐지 확률이 급격하게 저하되며 네트워크의 변화를 복구하는데 긴 시간이 소요된다. 즉, 이 방법들은 이동으로 인한 네트워크의 변화를 근본적으로 방지할 수 없기 때문에 경로 파손이 필연적으로 발생하며, 앞서 언급된 데이터 및 명령 누락, 네트워크 성능 저하 문제가 발생한다.

이를 해결하기 위해서, 본 논문에서는 이동 장치로 인한 경로 파손을 방지하기 위한 라우팅 그래프 생성 방안을 제안한다. 제안 방안에 대해 간략히 설명하면, 제안 방안은 고정 장치와 이동 장치를 구분하고, 고정 장치로 구성된 뼈대 그래프를 먼저 생성한다. 그리고 생성된 뼈대 그래프에 이동 장치를 접붙임으로써, 이동 장치의 이동으로 인한 고정 장치들의 그래프 파손을 방지한다.

III. 제안 방안

본 장에서는 앞서 설명된 기존 그래프 생성 방법에서 발생하는 문제를 해결하기 위한 그래프 생성 방안에 대해 설명한다. 앞서 언급했듯이, 본 연구의 주요 아이디어는 고정 장치와 이동 장치를 구분하는 것이며, 이 구분에 기반하여 이동 장치의 이동으로 인한 경로 파손을 방지한다.

3.1 장치 구분을 위한 수정된 참가 메시지

라우팅 그래프를 WirelessHART 표준에서 각 장치는 참가 메시지(Join Message)를 이용하여 자신의 네트워크 참여 의사를 Network Manager에게 알린다. 본 연구에서는 장치의 네트워크 참여 과정에서 고정 장치와 이동 장치를 구분하기 위해 이 참가 메시지를 수정한다.

표준에서 사용되는 모든 메시지는 그림 4와 같은 Data Link Protocol Data Unit (DLPDU) specifier라는 7 비트 배열이 존재하며, 이를 통해 각 메시지의

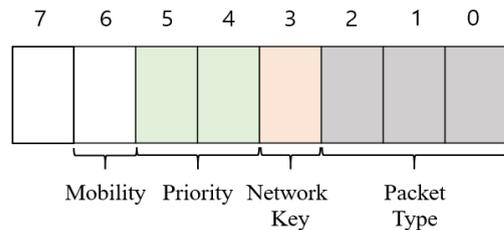


그림 4. 수정된 DLPDU specifier의 비트 배열
Fig. 4. The bit array of the modified DLPDU specifier

타입, 우선순위 등이 결정된다. 비트 배열에서 비트 6, 7은 예약된 비트로, 본 연구에서는 예약된 비트 중 비트 6을 이용하여 이동 장치와 고정 장치를 구분한다. 각 장치가 네트워크에 참여할 때, 자신이 고정 장치라면 비트 6을 0으로 설정하여 참여 메시지를 작성 및 네트워크 매니저에게 전달하고, 자신이 이동 장치라면 비트 6을 1로 설정하여 참여 메시지를 작성 및 네트워크 매니저에게 전달한다. 수정된 참가 메시지를 통해 Network Manager는 각 장치의 이동성을 판단할 수 있으며, 그래프를 생성하는 과정에서 이를 반영한다. 다음 절에서는 이러한 구별을 통해 그래프를 생성하는 과정에 대해 설명한다.

3.2 경로 파손을 방지하기 위한 그래프 생성 방안

라우팅 그래프를 본 절에서는 앞서 절에서 수정된 참가 메시지를 이용한 고정 장치와 이동 장치의 구분을 통해 경로 파손을 방지하기 위한 그래프를 생성하는 방법에 대해 설명한다. 제안된 방법은 앞서 언급된 다양한 그래프 생성 방법에 적용될 수 있지만, 그래프 생성 결과의 수월한 비교를 위해 [23]에서의 그래프 생성방법에 제안 방안을 적용한다. 이를 설명하기 위해, 본 절에서는 그래프 생성 알고리즘을 Pseudo code 형태로 제공하며, 이 알고리즘을 통해 생성된 그래프

를 보여준다.

알고리즘 1은 제안된 방안을 적용한 브로드 캐스트 그래프 생성에 대해 설명한다. 먼저 Network Manager는 고정된 장치를 기반으로 뼈대 그래프를 생성하기 위해 고정 장치로 구성된 장치 집합 ($V_x = V_{static}$)을 선정한다(line 8). 그리고 (2,0)-reliability를 만족시키기 위해, Network Manager는 V_B 로부터 적어도 2개의 간선을 가진 노드 v 를 선정한다(line 11). 만약, 장치 v 의 후보가 둘 이상이라면, Gateway로부터 평균 홉 수 h 가 더 적은 장치 v 를 선정하고(line 14-16), 선정된 장치 v 를 그래프에 추가한다(line 19). 이 과정을 반복하여 적어도 2개의 간선을 가진 고정 장치들이 모두 그래프 V_B 에 추가되면, 하나의 간선을 가진 고정 장치들을 그래프 V_B 에 추가한다(line 21-29). 고정된 장치들이 모두 연결되고 나면, $V_B = V_{static}$ 조건을 만족하므로, 10행의 반복문을 벗어나게 된다. 다시, 4행에서 아직 모든 장치 V_g 가 V_B 에 연결되지 않았으므로, 다시 반복문에 진입합니다(line 4). 이때, $V_B = V_{static}$ 이므로, V_B 에 연결될 다음 후보 장치의 집합 $V_x = V - V_{static}$ 으로 정의된다(line 6). 즉, 앞서 과정에서 고정 장치들 V_B 에 연결하고 남은 나머지 이동 장치들을 V_B 를 다음 후보 장치로 선정한다. 이후 과정은 앞서 고정 장치를 연결하는 과정과 동일하게 수행되며, 모든 장치 V_g 가 V_B 에 연결되면 완성된 그래프 G_B 를 반환하며 알고리즘을 종료한다. (line 4, 33)

알고리즘 2는 제안된 방안을 적용한 상향 그래프 생성에 대해 설명한다. 먼저 Network Manager는 기존의 그래프에서 유향 간선들의 방향을 반대로 바꾸고(line 3), 간선의 방향이 바뀐 그래프에 대해 앞서 설명된 알고리즘 1을 적용한다(line 4). 이 과정을 통해 역방향의 브로드 캐스트 그래프가 생성되고, 모든 장치들이 그래프에 연결되면 다시 각 유향 간선들의 방향을 반대로 바꾸고(line 7), 생성된 그래프 $G_U(V_U, E_U)$ 를 반환한다. (line 10)

Algorithm 1 Broadcast Graph Construction

```

1 :  $G(V, E)$  is the original graph.
2 : Initially  $V_B = g \cup V_{AP}$  and  $E_B$  contains all links from  $g$  to  $V_{AP}$ 
3 :
4 : while  $V_B \neq V$  do
5 :   if  $V_B = V_{static}$  then
6 :      $V_x = V - V_{static}$ 
7 :   else
8 :      $V_x = V_{static}$ 
9 :   end if
10 :  while  $V_B \neq V_x$  do
11 :    Find  $S' \subseteq V_x - V_B : \forall v \in S', v$  has at least two edges from  $V_B$ 
    and no mobility.
12 :    if  $S' \neq \emptyset$  then
13 :      for  $\forall v \in S'$  do
14 :        Sort its edges  $e_{u,v}$  from  $V_B$  according to  $\bar{h}_u$ 
15 :        Choose the first two edges  $e_{u_1,v}$  and  $e_{u_2,v}$ 
16 :         $\bar{h}_v = \frac{\bar{h}_{u_1} + \bar{h}_{u_2}}{2} + 1$ 
17 :      end for
18 :      Choose the node  $v$  with min  $\bar{h}_v$ 
19 :      Add  $v$  to  $V_B$  and add  $e_{u_1,v}$  and  $e_{u_2,v}$  to  $E_B$ 
20 :    else
21 :      Find  $S'' \subseteq V_x - V_B : \forall v \in S'', v$  has one edge  $e_{u,v}$  from  $V_B$ 
      and no mobility.
22 :      if  $S'' \neq \emptyset$  then
23 :        for  $\forall v \in S''$  do
24 :           $\bar{h}_v = \bar{h}_u + 1$ 
25 :          Calculate  $n_v$ , the # of its outgoing edges to  $V - V_B$ 
26 :        end for
27 :        Choose the node  $v$  with maximum  $n_v$ , break tie using  $\bar{h}_v$ 
28 :        Add  $v$  to  $V_B$  and add  $e_{u,v}$  to  $E_B$ 
29 :      end if
30 :    end if
31 :  end while
32 : end while
33 : return  $G_B(V_B, E_B)$ 

```

Algorithm 2 Uplink Graph Construction

```

1 :  $G(V, E)$  is the original graph
2 :  $G^R(V, E^R)$  is the reversed graph.
3 : Construct  $G^R(V, E^R)$ 
4 : Construct  $G_B(V_B, E_B)$  from  $G^R(V, E^R)$  by applying Algorithm 1
5 :
6 : if  $V_B = V$  then
7 :    $G_U(V_U, E_U) = G_B^R(V_B^R, E_B^R)$ 
8 : end if
9 :
10 : return  $G_U(V_U, E_U)$ 

```

알고리즘 3은 제안된 방안을 적용한 하향 그래프 생성에 대해 설명한다. 앞서 알고리즘들과 마찬가지로, Network Manager는 고정된 장치로부터 각 장치에 대한 하향 그래프를 생성한다. 브로드 캐스트 그래프를 생성하는 알고리즘 1과 유사하게, 먼저 고정 장치로 구성된 장치 집합($V_x = V_{static}$)을 선정한다(line 8). 이 후, (2,0)-reliability를 만족시키기 위해, 이미 하향 그래프가 생성된 장치 집합 S 로부터 적어도 2개의 간선을 가진 노드 v 를 선정한다(line 11). 또한, Loop를 방지하기 위해서 각 v 에 대해서 앞서 2장 3절에서 설명된 조건을 만족시키는 장치를 선별한다(line 15). 만약 상기 조건을 만족시키는 장치 v 의 후보가 둘 이상이라면, Gateway로부터 평균 홉 수 h 가 더 적은 장치 v 를 선정한다(line 20-21). 선정된 노드 v 는 집합 S 에 추가되며, Network Manager는 노드 v 에 대한 하향 그래프를 생성한다. v 는 자신의 부모 노드와 2개의 간선을 통해 연결되며, 연결 이후, 자신 및 자신의 부모와 관련 없는 모든 간선들을 삭제함으로

써 노드 v 에 대한 하향 그래프 생성을 완료한다. 이러한 과정을 모든 고정 장치에 대해 수행함으로써, Network Manager는 각 고정 장치들에 대한 하향 그래프를 획득할 수 있다. 각 고정 장치에 대한 하향 그래프를 획득한 후($S = V_{static}$), 아직 5행의 조건을 만족시키지 못하므로, 반복문으로 진입한다. 이 때, $S = V_{static}$ 의 조건을 만족하므로, 7행에 따라 하향 그래프를 생성할 후보 노드($V_x = V - V_{static}$)를 선정하고, 앞서 고정 장치에 대한 하향 그래프 생성과 마찬가지로 이동장치에 대한 하향 그래프 생성을 수행한다.

그림 5는 앞서 알고리즘들을 통해 생성된 상향, 하향 및 브로드 캐스트 그래프의 생성 예시를 보여준다. 그림에서 장치 1을 이동 장치라 가정하고, 나머지 장치 및 Access Point, Gateway는 고정 장치라고 가정하며, 검은색 방향선은 고정 장치의 연결을 나타내며, 붉은색 방향선은 이동 장치의 연결을 나타낸다. 앞서 그림 3과 같이 장치 1이 장치 5로 이동하는 경우, 제안된 방안은 그림 3과 달리 붉은색 방향선에 해당하는 연결을 잃게 되고, 다른 고정 장치 2, 4 및 Access Point A1은 경로의 변화가 발생하지 않는다. 이를 통해, 기존의 이동 장치의 이동으로 인한 경로 파손을 예방하고, 데이터 및 명령 누락, 네트워크 성능 저하 등의 문제를 방지한다.

```

Algorithm 3 Downlink Graph Construction
1 : Let  $S$  be the set of nodes with downlink graphs constructed
2 : Initially  $S = g \cup V_{AP}$  and  $G_g = (\{g\}, \emptyset)$ 
3 : Initially for each AP  $i$  in  $S$ , set  $G_i = (\{g \cup i\}, \{e_{g,i}\})$ 
4 :
5 : while  $S \neq V$  do
6 :   if  $S = V_{static}$  then
7 :      $V_x = V - V_{static}$ 
8 :   else
9 :      $V_x = V_{static}$ 
10 :   end if
11 :   while  $S \neq V_x$  do
12 :     Find  $S' \subseteq V - S : \forall v \in S', v$  has at least two edges from  $S$ 
13 :     if  $S' \neq \emptyset$  then
14 :       for  $\forall v \in S'$  do
15 :         for all edge pair  $(e_{u_1,v}, e_{u_2,v})$  form  $S$  do
16 :           if  $C1 \wedge C2 \wedge C3$  then
17 :              $S_r = S_r \cup \{v\}$ 
18 :           end if
19 :            $\bar{h}_{u_1,u_2} = (\bar{h}_{u_1} + \bar{h}_{u_2})/2$ 
20 :         end for
21 :         Choose the edge pair  $(e_{u_1,v}, e_{u_2,v})$  with min  $\bar{h}_{u_1,u_2}$ 
22 :          $\bar{h}_v = \bar{h}_{u_1,u_2} + 1$ 
23 :       end for
24 :       if  $S_r \neq \emptyset$  then
25 :         Add node  $v$  in  $S_r$  with min  $\bar{h}_v$  to  $S$ 
26 :       else
27 :         Add node  $v$  in  $S'$  with min  $\bar{h}_v$  to  $S$ 
28 :       end if
29 :       ConstructDG( $G, G_{u_1}, G_{u_2}, v$ )
30 :     else
31 :       Find  $S'' \subseteq V - S : \forall v \in S'', v$  has one edges  $e_{u,v}$  from  $S$ 
32 :       if  $S'' \neq \emptyset$  then
33 :         for  $\forall v \in S''$  do
34 :            $\bar{h}_v = \bar{h}_u + 1$ 
35 :           Calculate  $n_v$ , the # of  $v$ 's outgoing edges to  $V - S$ 
36 :         end for
37 :         Add  $v$  to  $S$  with maximum  $n_v$ , break tie using  $\bar{h}_v$ 
38 :         ConstructDG( $G, G_u, null, v$ )
39 :       end if
40 :     end if
41 :   end while
42 : end while
43 : return SUCCESS
    
```

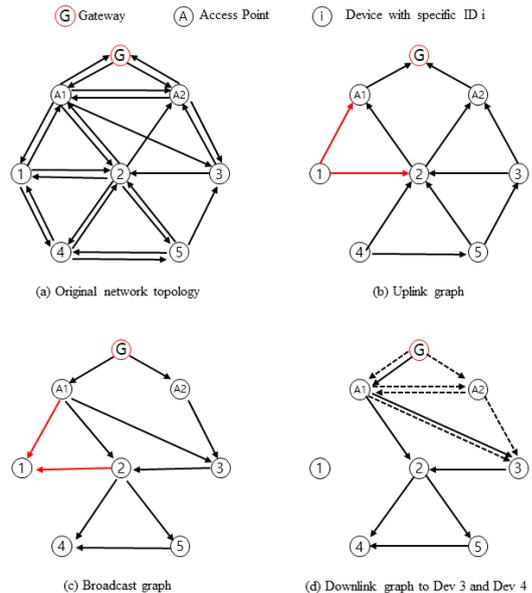


그림 5. 경로 파손을 방지하기 위한 그래프 생성 예시
Fig. 5. The example of graph construction to prevent path failure

IV. 성능 평가

본 장에서는 기존의 WirelessHART 표준에 따라 생성된 가장 단순한 그래프, [23]의 방법에 따라 생성된 그래프 및 제안 방안이 적용되어 생성된 그래프에 대한 성능 평가를 수행한다. 먼저 1절에서는 성능평가 환경에 대해 설명하고, 2절에서는 장치의 이동속도에 대한 평균전송 성공률에 대한 성능 평가 결과를, 3절에서는 이동 장치의 수에 따른 평균 전송 성공률에 대한 성능 평가 결과를 보여준다. 그리고 4절 및 5절에는 이동 장치 측면에서 각 프로토콜의 전송 성공률 및 에너지 소비량에 대한 성능 평가 결과를 보여 준다.

4.1 성능 평가 환경 및 요소

우리는 기존의 연구들과 제안된 프로토콜을 네트워크 시뮬레이터 NS-2 [24]를 통해 구현하였다. 500m x 500m의 필드에 100개의 장치를 격자 구조로 배치하였으며, 이 중 임의의 5개의 장치가 움직인다. 이동 장치는 1.5m/s의 속도로 움직이며, Random Way Point 방법에 따라 임의로 움직인다. (단, 네트워크를 벗어나지는 않는다) 각 장치의 전송 범위는 50m이며 모든 장치는 4초 간격으로 Gateway를 향해 데이터를 전송하며, 네트워크 변화로 인한 전송 성공률 저하 정도를 파악하기 위해 무선 전송 간의 전송 성공률은 100%로 가정한다. 총 시뮬레이션은 6400초간 진행되며 제공되는 시뮬레이션 결과는 각 시뮬레이션을 10회 진행하여 평균값이다. 제안된 방안의 성능 평가를 수행하기 위한 항목들과 용어들을 정리하면 다음과 같다.

장치의 수는 네트워크 내에서 동시에 움직이는 장치의 수로 정의 된다.

이동 속도는 네트워크 내에서 장치가 얼마나 빠르게 이동하는지를 나타낸다.

전송 성공률은 장치로부터 발생한 데이터의 수에 대비하여 게이트웨이까지 도달한 데이터의 수로 정의 된다.

에너지 소비량은 전체 시뮬레이션 시간 동안 장치가 소비한 전송, 수신 및 대기에 소비한 에너지 총량에 대해 보여준다.

4.2 이동 장치의 이동 속도에 따른 평균 전송 성공률

그림 6은 이동 장치의 이동속도 대비 전체 장치의 평균 전송 성공률에 대한 성능평가 결과 그래프이다. 이동 장치의 이동 속도가 증가함에 따라 전송 성공률이 하락하는 형태를 띄고 있다. 특히 기존의

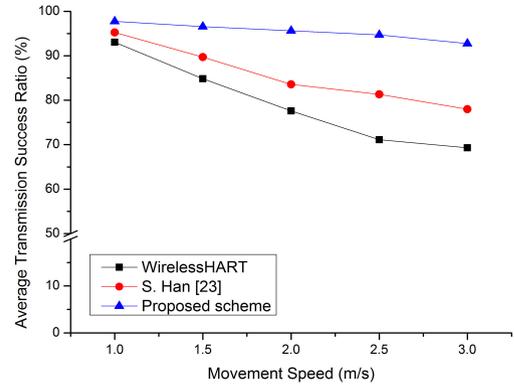


그림 6. 이동 속도 대비 평균 전송 성공률
Fig. 6. Average transmission success Ratio versus movement speed

WirelessHART 및 [23]의 경우, 이동 장치의 이동이 네트워크의 변화 및 경로 단절을 야기하기 때문에 급격한 전송 성공률 저하를 보인다. 하지만, 제안 방안의 경우, 고정 장치로 구성된 뼈대 그래프는 이동 장치의 이동으로 인한 네트워크 변화 및 단절이 발생하지 않기 때문에, 기존의 방법들에 비해 높은 전송 성공률을 나타낸다.

4.3 이동 장치의 수에 따른 평균 전송 성공률

그림 7은 이동 장치 수 대비 전체 장치의 평균 전송 성공률에 대한 성능평가를 수행한 결과 그래프이다. 이동 장치의 수가 늘어남에 따라 전송 성공률이 하락하는 형태를 띄고 있다. 이는 이동 장치의 이동이 자신과 관련된 자손 및 부모 장치의 연결성을 저해시키기 때문으로, 장치의 수에 따라 파손되는 자손 및 부모 장치의 경로들이 늘어나기 때문이다. 하지만, 제

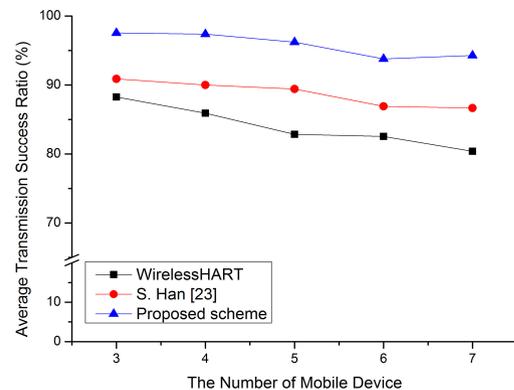


그림 7. 장치 수 대비 전송 성공률
Fig. 7. Average transmission success Ratio versus movement speed

안 방안의 경우, 이동 장치의 이동이 네트워크의 변화 및 단절을 발생시키지 않고, 단지 이동 장치의 경로만이 단절된다. 따라서 기존의 방법들에 비해 높은 전송 성공률을 나타내며 이동 장치의 수에 따라 전송 성공률이 선형적으로 감소함을 보인다.

4.4 이동 장치의 이동 속도에 따른 전송 성공률

그림 8은 이동 장치의 이동속도 대비 이동 장치의 전송 성공률에 대한 성능평가를 수행한 결과 그래프이다. 이동 장치의 이동 속도가 증가함에 따라 모든 방법의 전송 성공률이 하락하는 형태를 띄고 있다. 특히 기존 WirelessHART 및 [23]의 경우, 이동 장치의 이동으로 인한 네트워크 그래프 재계산에 긴 시간이 필요하기 때문에 빠르게 이동하는 장치의 경우 전송 성공률의 급격한 저하를 보인다. 하지만, 제안 방안의 경우, 고정 장치와 이동 장치를 분리한 그래프 생성을 통해 이동 장치의 이동에 대해 빠르게 대처가 가능하므로, 다른 방안들에 비해 높은 전송 성공률을 보장한다.

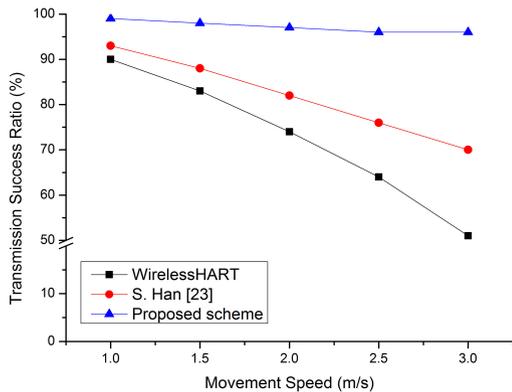


그림 8. 이동 속도 대비 전송 성공률
Fig. 8. Transmission success Ratio versus movement speed

4.5 평균 에너지 소비량

그림 9는 각 방법에서 전체 장치가 소비한 평균 에너지 소비량을 보여준다. WirelessHART와 [23]의 경우, 이동 장치가 이동하는 경우, 이동으로 인한 네트워크의 변화가 고정 장치에도 영향을 미치는 반면, 제안 방안의 경우 이동 장치의 이동은 고정 장치에 영향을 미치지 않는다. 따라서 제안 방안이 네트워크 그래프 재계산을 위한 상태 알림 및 재계산 결과를 알리는 제어메시지의 수가 다른 방법에 비해 월등히 적다. 하지만, 성능평가 결과는 유사한 에너지 소비량을 보이

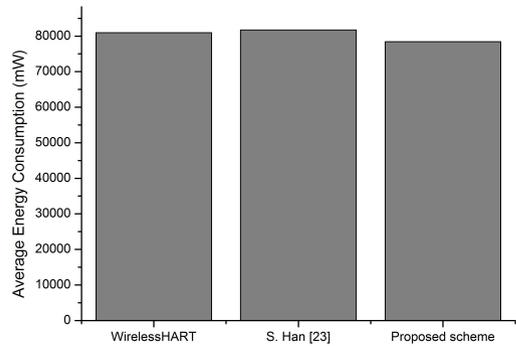


그림 9. 평균 에너지 소비량
Fig. 9. Average energy consumption

는데, 이는 WirelessHART 및 [23]의 경우, 전송 과정에서 경로 파손으로 인한 데이터 전송 실패로 인해 제안 방안보다 적은 데이터 전송 및 수신을 하기 때문이다.

V. 결론 및 향후 연구

본 논문에서는 산업용 무선 센서 네트워크에서 이동 장치로 인한 경로 파손을 방지하기 위한 라우팅 그래프 생성 방법에 대해 제안하였다. 제안 방안의 주요 아이디어는 수정된 참여 메시지를 통한 고정 장치와 이동 장치의 구분이다. 이를 통해, Network Manager는 고정 장치로만 구성된 뼈대 그래프를 생성하고 이동 장치를 뼈대 그래프에 접붙임으로써, 이동 장치의 이동이 야기하는 경로 파손을 미연에 방지한다. 시뮬레이션 결과, 제안 방안에서 고정 장치로만 구성된 뼈대 그래프는 이동 장치의 이동에 영향을 받지 않아, 기존의 표준 및 그래프 생성 방법에 비해 네트워크 전체적인 데이터 및 명령 전송 성공률이 증가함을 보인다. 이를 통해 제안된 방안이 산업용 무선 센서 네트워크에서 이동으로 인한 경로 파손을 방지하며, 네트워크 성능을 향상시킴을 알 수 있다.

다만, 본 연구는 생산 라인과 같이 이동 장치의 수가 고정 장치의 수에 비해 적은 경우를 상정하고 연구되었기 때문에, 물류 센터와 같이 이동 장치의 수가 고정 장치의 수에 비해 많은 경우에 대해 고려되지 않고 있다. 이로 인해, 고립된 고정 장치가 발생할 수 있고, 이동 장치만이 이웃 장치인 경우가 발생할 수 있다. 이러한 경우, 제안된 그래프 생성 방법은 원활히 동작하지 않을 가능성이 있다. 언급된 문제는 산업용 무선 센서 네트워크가 다양한 산업 환경에서 범용적으로 사용되기 위해 반드시 해결되어야 하며, 이를 위

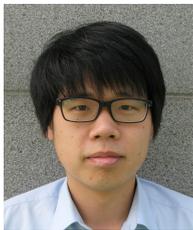
한 연구가 진행되어야 한다.

References

- [1] X Luo, et al., "A large-scale web QoS prediction scheme for the Industrial Internet of Things based on a kernel machine learning algorithm," *Computer Network*, vol. 101, no. 4, pp. 81-89, Jun. 2016.
- [2] Copyright Accenture, "Driving Unconventional Growth through the Industrial Internet of Things," Available: https://www.accenture.com/ph-en/_acnmedia/Accenture/next-gen/reassembling-industry/pdf/Accenture-Driving-Unconventional-Growth-through-IIoT.pdf, Accessed on 2015.
- [3] Copyright Deutsche Bank Research, "Industry 4.0: Huge potential for value creation waiting to be tapped," Available: <https://www.i40.de/wp/wp-content/uploads/2015/04/Industry-4.0-Huge-potential-for-value-creation-waiting-to-be-tapped.pdf>, Accessed on 2014
- [4] G. P. Sullivan, R. Pugh, A. P. Melendez, and W. D. Hunt, "Operations & maintenance best practices: A guide to achieving operational efficiency, Release 3.0," Pacific Northwest National Laboratory, U.S. Department of Energy, Aug. 2010.
- [5] H. Hashemian, "Wireless sensors for predictive maintenance of rotating equipment in research reactors," *Annals of Nuclear Energy*, vol. 38, pp. 665-680, 2011.
- [6] K. S. Low, W. N. N. Win, and M. J. Er, "Wireless sensor networks for industrial environments," in *Proc. IEEE Int. Conf. Comput. Intell. for Modeling, Contr. and Automation and Int. Conf. Intell. Agents, Web Technol. and Internet Commerce (CIMCA-IAWTIC'06)*, vol. 2 pp. 271-276, Nov. 2005.
- [7] H. Hashemian, "Aging management of instrumentation & control sensors in nuclear power plants," *Nuclear Eng. and Design*, vol. 240, no. 11, pp. 3781-3790, 2010.
- [8] S. Oh and K. Jung, "Multipath routing for reliable real-time data dissemination in industrial wireless sensor network," *J. KICS*, vol. 43, no. 10, pp. 1608-1618, Oct. 2018.
- [9] Hart specification. [Online]. Available: <https://fieldcommgroup.org/hart-specifications/>
- [10] I. Iec, "62601: Industrial communication network - fieldbus specifications - wia-pa communication network and communication profile," IEC: Geneva, Switzerland, 2008.
- [11] Zigbee alliance. [Online]. Available: <http://www.zigbee.org/>
- [12] I. Iec, "62591: Industrial communication networks-wireless communication network and communication profiles-wirelesshart," IEC: Geneva, Switzerland, 2009.
- [13] I. S. of Automation (ISA), "The international society of automation. wireless systems for industrial automation: process control and related applications," ISA Standard ISA-100.11a-2011, 2009.
- [14] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, "A survey on sensor networks," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 40, no. 8, pp. 102-114, Aug. 2002.
- [15] I. F. Akyildiz and I. H. Kasimoglu, "Wireless sensor and actor networks: research challenges," *Ad Hoc Networks*, vol. 2, no. 4, pp. 351-367, Oct. 2004.
- [16] L. Zheng, "Industrial wireless sensor networks and standardizations: The trend of wireless sensor networks for process automation," in *Proc. SICE Annual Conf. 2010*, pp. 1187-1190, Aug. 2010.
- [17] K. N. Qureshi and A. H. Abdullah, "Adaptation of wireless sensor network in industries and their architecture, standards and applications," *World Applied Sci. J.*, vol. 30, no. 10, pp. 1218-1223, 2014.
- [18] S. Montero, J. Gozalvez, M. Sepulcre, and G. Prieto, "Impact of mobility on the management and performance of wireless industrial communications," in *Proc. 17th IEEE Int. Conf. Emerging Technol. Factory Automation(ETFA'12)*, pp. 1-4, Sep. 2012.
- [19] L. Zheng, "Industrial wireless sensor networks and standardizations: The trend of wireless

sensor networks for process automation,” in *Proc. SICE Annual Conf. 2010*, pp. 1187-1190, Aug. 2010.

- [20] W. Sun, Z. Yang, X. Zhang, and Y. Liu, “Energy-efficient neighbor discovery in mobile ad hoc and wireless sensor networks: A survey,” *IEEE Commun. Surv. Tuts.*, vol. 16, no. 3, pp. 1448-1459, Third 2014.
- [21] S. Montero, J. Gozalvez, and M. Sepulcre, “Neighbor discovery for industrial wireless sensor networks with mobile nodes,” *Computer Commun.*, vol. 111, pp. 41-55, Oct. 2017.
- [22] A. S. Ibrahim, Z. Han, and K. J. R. Liu, “Distributed energy-efficient cooperative routing in wireless networks,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 7, no. 10, pp. 3930-3941, Oct. 2008.
- [23] S. Han, X. Zhu, A. K. Mok, D. Chen, and M. Nixon, “Reliable and real-time communication in industrial wireless mesh networks,” in *Proc. 2011 17th IEEE Real-Time and Embedded Technol. and Appl. Symp.*, pp. 3-12, Apr. 2011.
- [24] P. Zand, E. Mathews, P. Havinga, S. Stojanovski, E. Sisinni, and P. Ferrari, “Implementation of wireless hART in the ns-2 simulator and validation of its correctness,” *Sensors*, vol. 14, no. 5, pp. 8633-8668, May 2014.



김 상 대 (Sangdae Kim)

2013년 2월 : 충남대학교 컴퓨터공학과 졸업

2013년 3월~현재 : 충남대학교 컴퓨터공학과 석박사통합과정

<관심분야> Wireless Sensor Networks, IoT, Industrial Wireless Sensor Network, IIoT 등

정 관 수 (Kwansoo Jung)



2005년 2월 : 충남대학교 학사
2007년 2월 : 충남대학교 컴퓨터공학과 석사졸업

2015년 2월 : 충남대학교 컴퓨터공학과 박사졸업

2016년 3월~현재 : 호원대학교 사이버보안학과 조교수

<관심분야> Wireless Sensor Network, VANETs, IoT, Security

조 현 중 (Hyunchong Cho)

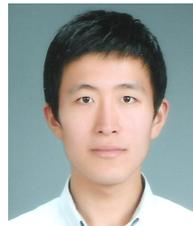


2013년 2월 : 전북대학교 전자정보공학부 컴퓨터공학과 졸업

2013년 3월~현재 : 충남대학교 컴퓨터공학과 석박사통합과정

<관심분야> Wireless Sensor Networks, IoT, Industrial Wireless Sensor Network, IIoT 등

김 천 용 (Cheonyong Kim)



2013년 2월 : 충남대학교 컴퓨터공학과 졸업

2015년 2월 : 충남대학교 컴퓨터공학과 석사졸업

2015년 3월~현재 : 충남대학교 컴퓨터공학과 박사과정

<관심분야> Wireless Sensor Networks, IoT 등

양 태 훈 (Taehun Yang)



2014년 8월 : 충남대학교 컴퓨터공학과 졸업

2014년 9월~현재 : 충남대학교 컴퓨터공학과 석박사통합과정

<관심분야> Wireless Sensor Networks, IoT 등

김 상 하 (Sang-Ha Kim)



1980년 : 서울대학교 학사

1984년 : University of Houston
석사졸업

1989년 : University of Houston
박사졸업

1992년~현재 : 충남대학교 전기
정보통신공학부 교수

<관심분야> Internet Routing,

Wireless Sensor Networks, MANET, 4G,
Mobility, Multicast 등