

# 산업 무선 센서 네트워크에서 신뢰성 향상을 위한 다중 경로 실시간 데이터 전달 방안

오 승 민\*, 정 관 수<sup>o</sup>

## Multipath Routing for Reliable Real-Time Data Dissemination in Industrial Wireless Sensor Networks

Seungmin Oh\*, Kwansoo Jung<sup>o</sup>

요 약

산업 무선 센서 네트워크 기반의 많은 응용들은 산업 현장에서 모니터링과 즉각적 조치에 있어 실시간 데이터 전달과 신뢰성 통신을 요구한다. 요구 시간 내에 전달되어야 하는 실시간 데이터의 경우 신뢰성을 달성하기 위해서 재전송과 같은 추가적 시간을 발생시키는 방법은 사용될 수 없다. 무선 센서 네트워크에서 MMSPEED는 다중 경로 기반의 중복적 데이터 전달을 통해서 실시간 전송의 신뢰성을 향상 시켰다. MMSPEED는 다중 경로 설정을 위해 각각의 중계 노드가 지역적으로 분기를 결정하게 하였다. 즉, 신뢰성 향상을 위해서 각각의 중계 노드에서 실시간 제약조건을 만족하는 동시에 더 나은 신뢰성을 제공하는 다수의 노드를 다음 홉 분기 노드로 선택하게 하였다. 하지만, 이렇게 분기된 경로들은 지역적으로 결정되기 때문에 서로를 인지할 수 없다. 그렇기 때문에 이런 경로들은 일부 자원을 공유하거나 경로들이 서로 간에 합쳐질 가능성이 매우 높고, 목적지에 가까울수록 더욱 서로에 대한 자원 공유 및 간섭이 심해지기 때문에 오히려 신뢰성 향상에 방해가 된다. 더욱이 산업 센서 네트워크 프로토콜들은 중앙 조절 방식을 선호하기 때문에 이러한 지역적 분산 결정 방식의 다중 경로 라우팅은 직접 적용할 수 없다. 그러므로 본 논문에서는 산업 무선 센서 네트워크를 위한 실시간 데이터 전달을 위해 분기 통제가 가능한 다중경로 라우팅을 제안한다. 제안방안은 지리적으로 평행한 가상의 트랙을 기반으로 경로가 서로 합쳐지지 않고 데이터를 전달할 수 있게 유도함과 동시에 지역적 분기를 통제할 수 있다. 또한 에너지 절약을 위하여 인접 트랙간 경로 감시를 통하여, 이웃 노드와의 링크 상태를 반영한 적응형 다중 경로 분기를 사용한다. 시뮬레이션을 통해서 제안된 방안이 실시간 데이터 전달이 신뢰적으로 이루어짐을 보인다.

**Key Words** : Multipath routing, Reliability, Real-time, Industrial, Wireless Sensor Networks

### ABSTRACT

In Industrial Wireless Sensor Networks (IWSNs), typical applications require real-time and reliable communication for timely monitoring and response. For reliable communication for real-time data in the networks, retransmission could not be applied because it causes additional delay. MMSPEED in WSNs increases the reliability for real-time data using multipath routing and redundant data transmission. MMSPEED constructs multiple paths by local decision of relay nodes. Namely, each relay nodes on the paths decides path branch toward multiple neighbor nodes in order to increase the reliability. But, as the paths are branched locally, they

\* 본 연구는 한국연구재단 연구과제(2017R1C1B5018377) 지원 및 호원대학교 연구지원으로 수행되었습니다.

• First Author : (ORCID:0000-0002-2139-8746)University of California, Los Angeles, osm0804@ucla.edu, 정회원

◦ Corresponding Author : (ORCID:0000-0002-6777-9923)Howon University, ksjung@howon.ac.kr, 정회원

논문번호 : 201806-B-040-RN, Received June 15, 2018; Revised September 10, 2018; Accepted September 10, 2018

could not be aware of each paths. So, the paths have higher possibility of path merging and confliction of each other nearer the destination. Especially, it could not be applied to IWSNs as the networks are proper to be operated on the centralized protocols. Therefore, this paper proposes a controllable multipath routing for real-time data by parallel multiple tracks. The virtual tracks guide each path and keep the independence of each paths. In the tracks, the proposed protocol applied the adaptive branch for energy efficiency depending on the link status with neighbor nodes. Simulation results show that the proposed protocol is superior to the existing schemes.

## I. 서 론

산업 무선 센서 네트워크는 빌딩 자동화, 공급체인, 스마트 공장 제어, 실내 온/습도 감지 등 산업 전반에 걸쳐서 산업 현장을 모니터링 하여 발생할 수 있는 각종 이벤트나 사건/사고 등에 대한 데이터를 수집하고, 이를 조치할 수 있는 다양한 장비로 데이터를 전달함으로써 산업 분야의 효율을 높이는데 그 목적이 있다<sup>[1]</sup>. 국제자동제어협회 (ISA100 committee)에 따르면 공정 자동화 응용의 네트워크 트래픽은 지연 (delay) 혹은 레이턴시 (latency)나 신뢰성 등의 다양한 서비스 요구사항이 혼재한 안전 (safety), 조절 (control), 감시 (monitor) 등으로 분류할 수 있다<sup>[2]</sup>. 이런 응용에서는 네트워크 트래픽이 요구되는 시간 (time deadline) 이내 수신 보장이 가장 중요한 도전 과제이다. 기존에 산업 분야에 현장 전반을 모니터링 하고 제어하는 다양한 표준과 기술들이 있다. 대표적인 기술들은 Fieldbus, HART, WirelessHART, ISA 100.11A, WIA-PA 등이다<sup>[1]</sup>. 하지만 이런 기술들은 향후 산업분야에 적용하기에 문제점을 가지고 있다. 첫 번째로 유선 통신을 기반으로 하는 기술들은 장비 설치 고비용 등의 문제로 큰 범위에 적용하려는 산업 분야에 대해서 확장성의 문제가 있다. 그리고 무선 분야의 연구들은 TDMA 방식의 기술이 대부분이기 때문에 주파수 대역이나 타임 슬롯 수 등에 따라서 용량이 제한되는 단점이 있고, 주소의 크기가 한정되어 있어 이 역시 넓은 범위의 산업 필드에 적용하기에 문제가 있다.

이 기술들의 대안으로 무선 센서 네트워크가 고려될 수 있다. 일반적으로, 무선 센서 네트워크는 많은 수의 센서 노드와 상대적으로 소수의 싱크 노드로 구성되어 있다<sup>[3][4]</sup>. 센서 노드는 특정 이벤트에 대한 데이터를 생성하고 이 데이터를 다중 홉을 거쳐 목적지인 싱크까지 전달한다. 센서 네트워크에서 가장 중요한 요소인 센서 노드들은 제한된 에너지, 계산 능력, 메모리 자원 등을 가지고 있다. 센서 노드의 제한에도 불구하고 무선 센서 네트워크에서의 화재 경보나 침

입 탐지와 같은 실시간 어플리케이션들은 빠르게 변화하는 이벤트들에 관하여 요구 시간 내에 데이터 수집을 필요로 한다. 특히, 산업 분야에서는 요구 시간 내 데이터 전달에 대한 필요성이 상당히 높은 실정이다. 요구 시간 내에 데이터를 전송하기 위해서 제안된 대표적 연구인 SPEED<sup>[5]</sup>는 데이터를 생성하는 소스 (source) 노드와 데이터를 수신/소비하는 싱크 (sink) 노드간의 지리적 거리와 응용의 요구 시간에 의해서 계산된 제약 전송속도로 데이터가 전달되는 방식을 사용한다. 제약 전송 속도는 전송 이전에 소스 노드에 의해서 싱크까지의 거리와 응용 어플리케이션의 요구된 시간을 통하여 계산된다. 즉, 전달 거리를 요구 시간으로 나누어 일정 시간마다 전달되어야 하는 거리를 속도로 나타낸다. 이 방안에서는 데이터 전달 경로의 노드들은 목적지에 가까우면서 더 나은 중계속도를 가진 이웃 노드를 다음 홉 노드로 선택한다. 중계 속도는 선택 노드를 통한 목적지로의 진보 거리 (advance distance)를 선택 노드의 처리 속도로 나눈 값을 의미한다. 모든 홉에서의 다음 홉 선택을 일정한 속도 이상의 처리 속도를 가진 노드를 선택함으로써 실시간 데이터 전달을 보장한다. 그러나 이러한 방안들은 오직 실시간 데이터 전달만을 고려하였고, 네트워크의 제한된 능력에도 불구하고 신뢰성 있는 통신은 고려하지 않았다. 그래서 네트워크 다이내믹스 (dynamics)나 노드의 고장이 빈번한 무선 센서 네트워크 환경에서는 이러한 프로토콜을 바로 적용할 수 없다.

무선 센서 네트워크에서 실시간 데이터 전달의 신뢰성 향상을 목적으로 MMSPEED<sup>[6]</sup>라는 방안이 제안되어 왔다. MMSPEED는 실시간 데이터 전달과 신뢰성 있는 데이터 전달을 동시에 고려하였다. 이 프로토콜은 SPEED로부터 다중 경로 방식을 추가함으로써 확장되었다. 신뢰성을 향상시키기 위해서 MMSPEED는 소스와 싱크 간에 요구되는 시간과 요구되는 신뢰성을 위해서 다수의 경로들을 설정한다. 실시간 데이터 전달을 위해서 미리 경로를 설정하고 데이터를 전달하는 것이 아니라, 데이터가 전달되면서

필요할 때마다 실시간 제약조건과 싱크까지의 도달을 (reachability)을 기반으로 신뢰성을 계산하여 경로의 분기를 결정한다. 하지만, MMSPEED는 산업 무선 센서 네트워크에 적용하기에는 여전히 고려해야만 하는 문제점이 존재한다.

첫째로, 이 프로토콜은 모든 분기를 지역적으로 결정한다. 즉, 전체 네트워크 상태 정보나 단-대-단 경로 설정 없이 작동하기 때문에, 생성되는 모든 경로들은 상호간의 정보를 가지고 있지 않다. 그래서 이렇게 생성된 경로들은 서로 일부 자원을 공유하거나 합쳐질 높은 가능성을 가지고 있다. 합쳐진 경로의 실패는 다중 경로 전체의 실패로 이어질 수 있다. 그리고 산업 센서 네트워크는 전체적인 네트워크를 싱크나 소스 노드에서 제어 메시지 등을 통하여 전체를 관리하고 제어할 수 있는 중앙 통제가 가능한 프로토콜이 적합하기 때문<sup>[6]</sup>, 이와 같은 지역 분기형 방식을 직접 적용하기 어렵고, 통제 가능한 다중 경로 설정이 요구된다.

두 번째로, 분기의 요건이 되는 기준이 하나의 센서 노드로부터 싱크까지의 도달율이 측정이 아닌 계산으로 이루어지는 것이다. MMSPEED에서는 다음 홉 노드까지의 1-홉 링크 질 (Link quality)이 싱크까지 계속된다는 가정하에 목적지 데이터 도달율이 계산된다. 하지만 이 계산된 값은 실제와는 큰 차이를 보이기 때문에 실제 네트워크에 적용할 수 없다. 그리고 목적지에서 멀수록 지역적으로 계산된 도달율을 기반으로 요구되는 단-대-단 도달율을 만족하기 위해서는 상당수의 경로 분기가 발생하게 된다. 이런 현상은 에너지 소모와 경로간의 충돌을 더욱 심각하게 만들 수 있다.

본 논문은 시간 내 전송과 신뢰성 전송을 동시에 요구하는 산업 현장에 적용할 수 있는 지리적 평행 다중트랙 방법을 사용하여 신뢰성 있고 실시간 전송이 가능한 프로토콜을 제안한다. 그림 1과 같이 지리적 평행 다중 트랙을 이용하여 트랙마다 하나의 경로를 할당한다. 이를 통해서 생성되는 모든 경로를 통제하

면서 각각 경로의 분리를 보장할 수 있다. 그리고 제안방안에서는 응용에서 요구하는 시간과 소스와 싱크 간의 거리로 계산되는 속도를 이용해서 경로의 분기가 수행될 수 있게 한다. 이로 인해서 분기되는 경로의 수를 조절할 수 있다. 시뮬레이션을 통해서 제안된 방안이 실시간 서비스뿐만 아니라 신뢰성 있는 통신을 제공할 수 있음을 보인다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 관련 연구에 대해서 살펴보고, 3장에서는 제안된 방안의 기반이 되는 네트워크 모델을 설명한다. 4장에서는 제안 방안을 보이고, 5장에서 시뮬레이션 결과를 설명한다. 그리고 6장에서 결론으로 맺는다.

## II. 관련 연구

### 2.1 무선 센서 네트워크의 실시간 데이터 전달

다중 홉 통신에서 실시간 데이터 전달을 위해서 각 홉 마다 지연시간은 가장 큰 영향을 끼치는 요소이다. 무선 센서 네트워크에서는 미리 경로를 정해 놓고 데이터 전달을 시작하는 상태보존 (stateful) 방식보다는, 데이터 전송 중에 경로를 정하는 상태비보존 (stateless) 방식을 더 선호한다. 이 방식 위에서 실시간 데이터 전달을 위한 기준을 만들기 위해 시공간적 (spatiotemporal) 통신을 적용한 실시간 데이터 전달이 제안되어 왔다<sup>[5-7]</sup>. 시공간적 방법에서는 우선 데이터가 도달해야 하는 목적지까지의 거리를, 요구되는 시간으로 나눈 값을 요구전달 속도로 설정한다. 그리고 데이터가 전달되는 동안 설정 속도보다 빠르게 전달할 수 있는 노드를 계속 선택함으로써 요구되는 시간 내 데이터 전달을 가능하게 하였다. 선택된 노드는 목적지에 좀 더 가까이 위치하고 있고, 처리 속도가 요구 속도보다 더 높은 값을 가지고 있어야 한다. 이 방식에서 프로토콜 설계의 목적은 시간 내 데이터 전달 성공률의 향상에 있다.

SPEED<sup>[5]</sup>는 시공간적 접근법을 기반으로 시간 인식 피드백 조절 메커니즘과 비결정형 위치 기반 포워딩의 조합을 통해 단-대-단 실시간 서비스 질 (Quality of Service, QoS) 을 지원한다. 각각의 노드는 요구되는 전달 속도를 만족하는 노드를 선택하기 위하여 이웃 노드들의 1-홉 전달 속도를 저장하고 있다. 그리고 이에 따라서 선택된 노드에게 전달된다. SPEED는 센서 네트워크에서 실시간 데이터 전달을 위하여 시공간적 접근법을 적용한 첫 번째 통신 프로토콜이다. THVR<sup>[7]</sup>은 SPEED와 같이 요구되는 속도와 패킷 요구시간을 적용하였다. SPEED와의 차이점은 SPEED

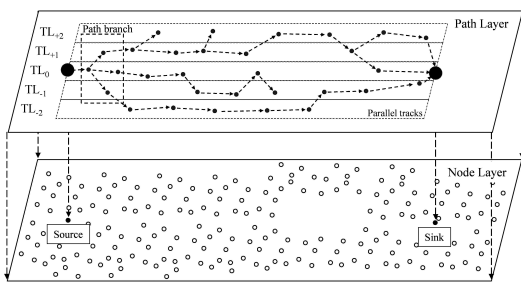


그림 1. 다중 경로를 통한 실시간 데이터 전달 기법  
Fig. 1. Multipath Routing for Real-time Data

는 1-홉 이웃 노드의 정보만을 가지고 다음 홉 노드를 선택하였지만, THVR은 다수-홉 노드까지의 정보를 이용하여 라우팅을 진행하기 때문에 좀 더 높은 성능을 보였다. 좋은 성능에도 불구하고 THVR은 이웃 노드 정보 획득에 필요한 에너지 소모와 복잡도로 인해 제한되고 있다. 이 방안들은 오로지 실시간 데이터 전달에만 집중되어 있기 때문에 소스와 목적지 간에 신뢰성 통신은 제공하지 못하고 있다.

## 2.2 고신뢰성 데이터 전달

신뢰성 통신은 목적지까지 데이터를 온전하게 전달하는 것을 목적으로 하고 있다.

### 2.2.1 재전송

재전송 기법<sup>[9]</sup>들은 가장 오랫동안 사용되었던 방법이다. 이것은 손실된 데이터 패킷을 다시 전송하는 방법을 의미한다. 이를 위해서 수신했다는 응답을 기다렸다가 잃어버린 패킷을 다시 전송하게 한다. 송신 노드는 응답을 받기 전까지 데이터를 임시적으로 유지하고 있다가 응답 이후에 폐기한다. 재전송 기법은 구현하기에 단순하고 쉽지만, 응답과 재전송 단계에서 추가적인 시간을 필요로 하기 때문에 실시간 데이터 전달에는 적용하기 적절치 못하다.

### 2.2.2 다중경로

다중 경로를 기반으로 한 실시간 데이터 전달 기법으로는 MMSPEED<sup>[6]</sup>가 있다. 이 방안은 다수의 경로를 통해서 신뢰성을 향상 시키는 기법으로 알려져 있다. MMSPEED는 SPEED를 확장하였다. 시간 내 전달을 위하여 MMSPEED는 다수의 속도 레이어를 구성하고 여러 레이어를 혼합적으로 활용하여 전송 확률을 증가시켰다. 이를 통해서 지역적 결정의 오류 가능성을 많이 줄였다. 하지만 MMSPEED는 지역적 결정의 한계 때문에 분기된 각각의 경로들은 서로에 대해서 인식할 수 없고, 이로 인해서 많은 경로가 생겨날수록 경로간 충돌이나 경로가 합쳐질 가능성이 늘어나게 되었다. 경로 충돌은 결국 신뢰성 하락의 이유가 되고 합쳐진 경로의 실패는 전체 프로토콜의 성능을 급격히 떨어뜨리는 원인이 된다.

## III. 네트워크 모델

### 3.1 네트워크 초기화 및 가정

본 논문의 제안방안은 기존의 실시간 라우팅 기법<sup>[5-7]</sup>이나 많은 위치 기반 라우팅 방법<sup>[10-12]</sup>에서 사용

하는 다음의 네트워크 모델을 기반으로 한다.

- (1) 센싱이 필요한 지역에 많은 센서 노드들이 균등하게 분포되어 있고, 분포와 동시에 스스로 네트워크를 설정할 수 있다. 장거리 통신은 센서 노드의 통신 반경의 한계로 인해 다중 홉 방식의 통신 방법으로 이루어진다.
- (2) 만약 하나의 이벤트가 발생하면, 이벤트 주변의 센서들은 정보를 모으고, 그 중 한 노드는 소스 노드가 되어 이에 대한 데이터를 싱크까지 전달한다.
- (3) 소스 노드는 싱크 위치 정보 서비스에 의해서 싱크의 위치를 제공받는다.
- (4) 위치 기반 라우팅을 위해 센서 노드는 GPS나 Localization을 통하여 자신의 위치를 알고 있다.
- (5) 모든 센서 노드는 비콘(Beacon) 신호를 통하여 자신 주변의 노드와 각각의 지연시간을 테이블로 저장하고 있다.

### 3.2 전달 속도 계산

무선 센서 네트워크에서 실시간 데이터 전달을 위한 위치 기반 라우팅 프로토콜들은 주어진 시간 내에 데이터를 전달하기 위해서 이 시간  $T_{setdeadline}$ 과 소스와 싱크 간의 거리  $D(source, sink)$ 를 통해서 전달 속도를 계산한다. 이를 위해서 소스 노드는 최초로 다음 식과 같이 전달 속도  $S_{setspeed}$ 를 계산한다.

$$S_{setspeed} = \frac{D(source, sink)}{T_{setdeadline}} \quad (1)$$

이 프로토콜에서는 데이터 전달 경로상에 있는 각각의 노드는 다음 홉 노드를 선정할 때 해당 노드보다 목적지에 가깝고, 계산된 전달 속도보다 지연 속도가 더 높은 노드를 선택한다. 지연 속도는 다음 노드까지의 거리를 지연 시간으로 나눈 값을 의미한다. 이런 방식을 소스로부터 싱크까지 유지함으로써 실시간 데이터 전달 방식이 달성하게 된다. 무선 센서 네트워크에서 이러한 방법의 실시간 전달이 필요한 것은, 무선 센서 네트워크에서는 다중 홉 방식으로 데이터가 전달되고, 무선 반경이 제한이 있기 때문이다. 그렇기 때문에 홉 별로 시간이 할당되는 것이 아니라, 일정 거리마다 시간이 할당되어 속도 기반의 처리가 적합하다.

### IV. 제안 방안

#### 4.1 소스에서 싱크까지 데이터 전달

소스 노드는 데이터 패킷을 생성하여 싱크에게로 전달한다. 이 데이터 패킷에는 다음 정보가 포함되어 있다. 소스와 싱크의 좌표, 요구되는 전달 속도  $S_{setspeed}$ , 시퀀스 번호, 요구되는 시간  $T_{setdeadline}$ , 트랙의 폭, 트랙 번호, 페이로드 위치 기반의 라우팅을 위해서 우리는 싱크와 소스노드의 좌표를 사용한다. 요구되는 전달 속도  $S_{setspeed}$ 는 실시간 데이터 전달을 위해서 사용한다. 데이터 전달 경로 상에 있는 모든 노드는  $S_{setspeed}$ 보다 더 나은 전달 속도를 가진 노드를 다음-홉 노드로 선정한다. 시퀀스 번호는 패킷 중복을 확인하기 위해서 사용된다. 그리고 요구되는 시간  $T_{setdeadline}$ 은 응용에서 요구하는 시간이고, 즉 패킷이 유효한 시간을 의미한다. 트랙의 폭은 트랙 레벨을 계산하기 위해서 포함되고, 페이로드는 소스에서 싱크로 보내는 데이터를 의미한다.

#### 4.2 다중 트랙의 설정

제안 방안에서, 우리는 개념적으로 분리형 다중 경로를 위해서 소스와 싱크 사이에 지리적 다중 트랙을 설정한다. 분리형 다중 경로를 보장하기 위해서 우리는 하나의 트랙마다. 오직 하나의 경로만 허용한다. 우리의 프로토콜은 우선 트랙을 위한 지역을 제한적으로 결정한다. 지역을 제한하는 것은 센서 노드가 제한된 능력을 가지고 있기 때문이다. 우리는 다음 식에 의해서 그림 2에서 지역의 반폭인  $H$ 를 정한다.

$$\frac{RT}{LT_{setdeadline}} < \sqrt{D(source,sink)^2 + 4H^2} \quad (2)$$

이 식에서  $R$ 은 라디오 반경이고,  $T$ 는 대역폭을 의

미한다. 그리고  $L$ 은 패킷의 크기를 의미한다. 이 식은  $SPEED$ 를 기반으로 한다. 이 식에 의해서 데이터 패킷이 소스와 싱크간의 직선으로부터  $H$  이상으로 떨어지면 데이터 패킷이 시간 내에 싱크로 도착할 수 없다고 판단한다.

제안 방안에서 소스 노드나 중계 노드는 다수의 다음-홉 노드를 선정하고, 이 노드들에게 데이터를 동시에 보낸다. 하나의 노드로부터 다중 경로로의 데이터 전달을 동시에 수행하기 위해서 하나의 노드의 라디오 범위 내에는 다수의 트랙이 지나는 것을 보장되어야 한다. 하나의 트랙의 폭  $h$ 는 다음 방법에 의해서 결정된다. 하나의 센서 노드가 최소 3개의 트랙을 라디오 반경에 포함하기 위해서 하나의 트랙의 폭은 다음과 같이 적어도 라디오 반경의  $1/2$ 배보다는 적어야 한다.

$$0 < h \leq 1/2R. \quad (3)$$

다수 트랙을 통한 라우팅을 위해서, 우리는 각각 트랙에 트랙 레벨  $L$ 을 할당한다. 그림 2와 같이, 중심 트랙의  $L$ 은 0이다. 그리고 중심 트랙의 상부에는 양수 번호 (1, 2, 3, ...)를 할당하고, 하부에는 음수 번호 (-1, -2, -3, ...)를 할당한다. 트랙 폭이 너무 좁을 때에는 경로가 많이 발생하여 경로 간에 무신 충돌이 일어날 가능성이 높게 된다. 이럴 때에는 트랙 번호를 비교하여 중심 트랙에 가까울수록 더 높은 우선순위를 부여하여 먼저 데이터를 전송할 수 있는 차등적 트랙 픽 전송방식을 사용한다. 중심 트랙에 가까울수록 경로 길이가 짧아져서 에너지 소모를 줄이기 위함이다.

센서 노드의 밀도에 따라서 각 트랙마다 충분한 노드가 존재하지 않아서 경로를 구성할 수 없거나 강건한 경로를 유지하기 어려울 수 있다. 따라서 제안 방안은 노드 밀도가 낮을 경우, 데이터를 트랙 간에 넘겨줄 수 있다. 즉 신뢰성 전송을 위해서 이웃 트랙의 경로를 이용하는 것을 허용하여 다른 트랙을 통해서 데이터가 전달되는 방법을 이용할 수 있다. 구체적으로 한 노드의 라디오 범위 내에 동일 트랙 상에 데이터를 수신할 수 있는 노드가 없을 때, 해당 노드는 이웃 트랙으로 데이터를 보낸다. 이렇게 트랙을 넘어간 패킷은 향후 원래의 트랙에 노드가 존재할 때 다시 돌아오기 위한 복귀 과정을 통해서 원래 트랙을 통해서 데이터 전달이 수행될 수 있다. 데이터 전송과정에서 트랙의 이탈과 복귀의 절차는 다음과 같다. 최상위 0번 트랙의 이탈을 위해, 우선 1-홉 내의 이웃 노드를 트랙별로 구분하여 동일 트랙에 노드가 있는지 확인

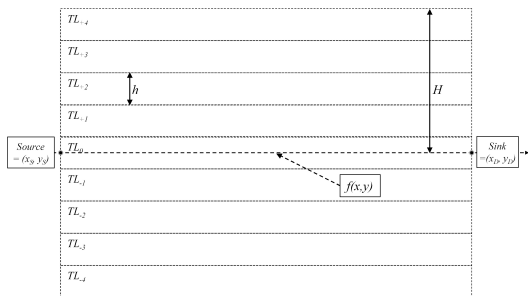


그림 2. 소스와 목적지간 다중 경로를 위한 트랙 생성  
Fig. 2. Track Construction for Multipath Routing between a Source and a Destination

한다. 밀도에 따라서 노드가 존재하지 않을 수 있는데, 노드가 존재하지 않을 경우, 다른 트랙을 통해서 데이터를 전송하기 위하여 이웃한 대체 트랙 마다 데이터 전달이 가능한 후보 노드를 하나씩 선정한다. 그리고 에너지 절약을 위해서 이 중에서 목적이인 싱크 노드에 제일 가까운 노드의 트랙을 대체 트랙으로 선정하고 해당 트랙을 통하여 이탈 패킷을 전송한다. 향후에 이탈 패킷의 본 트랙 복구를 위하여 패킷의 헤더에는 복구 정보를 담아서 전송한다. 복구 정보는 긴급 전송을 위한 플래그 정보(urgent flag)와 본 트랙과 대체(복구) 트랙의 번호를 담는다. 이를 통해서 대체(복구) 트랙을 통하여 데이터 전송이 지속될 수 있다. 또한, 해당 패킷을 기존 트랙의 노드들이 수신할 수 있다면 기존 트랙으로의 데이터 전달이 복구되도록 기존 트랙의 노드들이 헤더 정보를 수정하여 전송하게 한다. 하지만, 이렇게 이웃한 대체 트랙으로 넘어간 데이터 전송은 기존의 대체 트랙을 이용하여 전송되던 데이터와 중복될 수 있어서 뒤늦게 받는 데이터는 버려진다. 이탈 패킷이 전달되는 대체 트랙은 본 트랙에서 복구가 일어날 경우에 이를 인지할 수 있는 시간이 필요하기 때문에, 패킷의 정보를 수정하여 보내는 지연 시간을 줄이기 위해서 이탈 패킷의 정보를 수정하지 않는다. 이를 통해서 경로의 손실로 인한 데이터의 전달의 지연시간을 최소로 줄일 수 있다. 추가적으로 이탈 패킷이 전송되고 있는 대체 트랙에서 문제가 발생할 경우에 대체 트랙에서는 이웃한 하나의 트랙이 아니라 인접한 두 트랙으로 모두 이탈 패킷을 전송한다. 이것은 트랙의 전송 속도(순서)의 변경으로 상위 트랙의 전송보다 빨라진 하위 트랙에서 상위 트랙으로의 이탈 패킷을 전달하기 위해서이다. 또한 하위 트랙의 복구 전송은 패킷의 트랙 정보를 통해서 쉽게 이뤄질 수 있다. 상위 트랙으로 전송되는 패킷에 자신의 트랙으로 데이터 전송이 이뤄져야 한다는 것을 인지할 수 있어서 특정 시간 뒤에도 자신의 트랙으로 데이터가 전송되지 않는다면 트랙에서 전달 가능한 노드가 스스로 오버히어링(overhearing)한 데이터를 활용하여 복구 전송을 수행한다.

### 4.3 트랙 기반의 다음 홉 노드 결정

제안 방안에서 다음-홉 노드 결정을 할 때 실시간 제약조건과 신뢰성 있는 통신을 고려한다. 다음 홉 노드 결정 과정은 다음과 같다.

(1) 위치 기반 라우팅: 상기의 가정에 의해서, 모든 노드는 비콘 신호를 통하여 이웃 노드의 정보를 얻고 이 정보를 테이블로 저장한다. 데이터 패킷을

받은 이후에 소스 노드와 중계 노드는 후보 전달 노드의 집합을 만든다. 이 집합은 이웃 노드들 중 패킷의 헤더에 담겨있는 목적지에 보다 더 가까운 노드들의 집합이다. 이웃 노드 테이블은 라디오 반경에 의존하지만 전달 노드 후보 집합은 목적지 지역에 의존한다.

- (2) 시공간적 접근법 (Spatiotemporal approach): 무선 센서 네트워크의 다른 실시간 데이터 전달 프로토콜과 같이 우리는 1-홉 지연 시간을 한 노드의 부하를 측정하는데 사용한다. 지연 측정은 송신 측에서 이뤄진다. 패킷이 네트워크의 송신 큐에 들어가는 시간을 패킷에 표시하고, 그리고 마지막 비트가 나가는 시간을 표시한다. 편도 지연 시간은 이 두 시간의 차이를 의미한다. 이렇게 측정된 시간은 이웃 노드 테이블에 저장되어 있다.
- (3) 트랙 레벨에서의 이웃노드 그룹화: 데이터 패킷을 수신 이후에, 센서 노드는 자신의 트랙 레벨을 계산하고 전달 후보 노드 집합을 계산한다. 이 계산을 위해서 제안 방안에서는 다음 식을 사용한다:

$$f(x, y) = (y_D - y_S)x - (x_D - x_S)y + (x_D - x_S)y_S - (y_D - y_S)x_S \quad (4)$$

이 식에서 소스와 싱크의 좌표를  $(x_S, y_S), (x_D, y_D)$ 로 표시한다. 이 식의 그래프는  $f(x, y) = 0$ 일 때 소스와 싱크간의 직선으로 표시된다. 4번 식을 통해서, 이 직선으로부터 센서 노드  $(x_i, y_i)$ 까지의 거리  $d_i$ 를 다음 식으로 구할 수 있다:

$$d_i = \frac{|f(x_i, y_i)|}{\sqrt{(x_D - x_S)^2 + (y_D - y_S)^2}} \quad (5)$$

이웃 노드 테이블은 트랙 레벨로 나뉘질 수 있다. 트랙 레벨은 소스 노드와 싱크 노드가 포함된 트랙을 기준으로 0부터 번호가 할당된다. 이는 계산이 용이하게 하기 위함이다. 5번 식에 의해서 하나의 센서 노드  $(x_i, y_i)$ 는 레벨  $L_i$ 를 다음 식으로 구할 수 있다.

$$L_i = \left\lfloor \frac{f(x_i, y_i)}{h^* \sqrt{(x_D - x_S)^2 + (y_D - y_S)^2}} + 0.5 \right\rfloor \quad (6)$$

다음-홉 선택은 이렇게 3단계에 걸쳐서 이루어진다. 결국, 소스노드나 중계노드는 전송할 수 있는

트랙별로 한 노드씩 선택하여 동시에 데이터를 전송한다.

#### 4.4 다중트랙 기반의 적응형 분기 (Branch)

가상의 다중 트랙을 통한 데이터 전달은 다음과 같다. 전달할 데이터를 가지고 있는 노드 (소스 노드 혹은 중계 노드)는 위 수식들에 의해서 다수의 다음 홉 노드들을 선정한다. 레벨  $TL_i$ 의 노드  $n_i$ 는 다음의 최대 3개의 노드들 다음 홉 노드로 선정한다.  $n_{i,(i-1)}$ ,  $n_{i,i}$ ,  $n_{i,(i+1)}$ . 선정된 노드 중 자신과 같은 트랙 상에 있는 노드  $n_{i,i}$ 는 먼저 데이터를 전달하게 한다. 트랙  $i$ 에서 이웃 트랙  $i-1$ 이나  $i+1$ 로의 무조건 경로 분기는 에너지 낭비 및 충돌을 야기할 수 있기 때문에 다음의 조건을 따라서 수행한다.

첫째로, 어떠한 경로도 이웃한 인접 트랙을 지나고 있지 않을 때 분기를 한다. 제안 방안에서는 한 트랙에 한 경로를 할당하기 때문에 전송 실패나, 노드의 고장 등으로 트랙이 사용되지 않을 수 있다. 이럴 경우에는 그림 3과 같이 인접한 트랙에서 오버히어링으로 사용되지 않는 트랙을 인지하고, 실패된 트랙으로 데이터를 전송하여 경로를 추가적으로 분기할 수 있다. 그림 3에서 노드 B는 이웃 트랙의 노드 A가 전송 실패함을 인지하고, 실패된 트랙으로 데이터를 전송하기 위하여 추가적으로 데이터를 전송한다. 향후 노드 D에서 트랙 3번으로 전송할 수 있는 노드가 있을 때 노드 E로 데이터를 전송하여 기존에 실패되었던 트랙을 다시 사용할 수 있게 한다. 다시 말하면, 이웃 트랙이 사용 중이라면 이웃한 경로로의 분기는 일어나지 않고, 현재 트랙만을 따라 데이터를 전송시킨다. 이를 판단하기 위하여 이웃 트랙의 전송을 오버히어링을 통하여 판단하고, 동일 시퀀스 번호 패킷이 전송되었는지 확인한다.

둘째로, 우리의 방안에서 하나의 트랙은 중복적으로 데이터 패킷을 인접한 이웃 트랙의 경로로부터 받을 수 있다. 그래서 우리는 이것을 방지할 추가적인

방안이 필요하다. 하나의 트랙에서 여러 개의 경로가 지나가는 것을 막기 위해서 우리는 무선 전송의 오버히어링 기법을, 활용한다. 그림 3과 같이 데이터를 수신한 한 노드는 같은 트랙의 또 다른 한 노드를 이웃 노드로 선택한다. 그리고 데이터 패킷을 전송했다면 수신 노드뿐만 아니라 전송한 노드의 라디오 반경 이내의 모든 노드들은 이 데이터 패킷을 오버히어링 할 수 있다. 그러면 그 노드들은 이 데이터 패킷의 시퀀스 번호를 요구되는 시간 동안 캐시에 저장한다. 그 이후에 중복되는 패킷이 도착할 수 있는데, 그런 노드는 이 패킷과 시퀀스 번호를 비교하여 중복되면 해당 패킷을 무시한다. 이렇게 함으로써 하나의 트랙에 여러 개의 경로가 생기는 것을 방지한다. 이와 같은 적응형 분기를 통하여 에너지 소비를 줄이고 동시에 신뢰성을 향상시킬 수 있다.

분기된 경로들은 목적지에 가까울수록 집중되기 때문에 일부 노드에 의해서 서로 겹쳐질 수 있다. 이를 위해서 경로 간에 스케줄링이 필요하다. 한 노드에서 만난 경로들은 목적지까지 남은 거리가 같기 때문에 실시간 요구사항에 의한 시간 데드라인은 같다. 그래서 우리는 이 중복된 경로를 처리하기 위하여 FIFO 방식의 큐를 사용한다. 다만, 먼저 도착한 경로가 다음 홉 노드로의 전송이 성공할 경우, 큐에 대기하고 있는 다음 경로의 패킷은 삭제된다.

## V. 성능 평가

본 장에서는 제안 방안의 신뢰성과 실시간 데이터 전달을 평가하기 위하여 시뮬레이션을 통하여 성능을 측정하고 분석하였다.

### 5.1 시뮬레이션 환경

본 시뮬레이션은 네트워크 시뮬레이터 Qualnet 4.0<sup>[4]</sup>을 이용해서 제안 방안을 구현하였다. 성능을 비교하기 위하여 제안 방안인 MPRT (Multipath Routing for Real-Time Application)와 무선 센서 네트워크에서 가장 잘 알려진 실시간 프로토콜인 SPEED<sup>[5]</sup>와 MMSPEED<sup>[6]</sup>와 비교하였다. 시뮬레이션 지역은 500m X 500m이고 약 500개의 노드가 균등하게 흩어져 있다. 기존 연구에서보다 더 넓은 지역에서 실험을 수행하였는데, 이는 더 넓은 산업 지역에 적용하기 위함이고, 밀도는 일정하게 유지하였다. 각각 센서 노드의 라디오 반경은 약 70m이다. 통신 반경 또한 기존 연구보다 더 넓게 설정하였다. 이것은 MMSPEED의 경우에 장거리/다중 홉 통신을 지원하려면 많은 수의

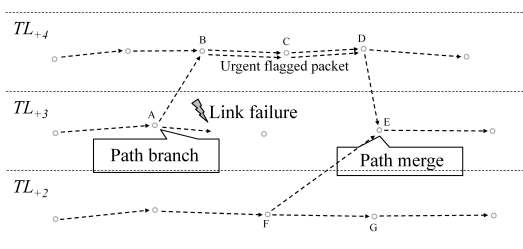


그림 3. 적응형 다중 경로 분기  
Fig. 3. Adaptive Multipath Branch

다중경로와 많은 수의 이웃노드가 필요하기 때문에 더 넓은 반경으로 설정하였다. 데이터를 생성하는 소스 노드는 32 bytes의 데이터 패킷을 0.05초 간격으로 전송한다. 기타 환경들은 기존의 SPEED와 MMSPEED의 모델을 동일하게 구성하였다. 시뮬레이션 시간은 50초이고, 요구되는 신뢰성은 85%로 설정하였다. 시뮬레이션 결과는 100번 수행의 평균값이다.

### 5.2 성능 평가 지표

본 논문에서는 다음의 지표를 사용하였다.

- 시간 내 전송 성공률 (Time Deadline, Success Ratio, TDSR): 본 지표는 소스 노드로부터 생성된 모든 패킷의 수에 대하여 성공적으로 시간 내에 수신된 패킷의 수의 비율을 나타낸다. 이것은 실시간 성 뿐만 아니라 패킷의 신뢰성까지 포함하는 지표이다. 이 지표는 실시간 시스템과 신뢰성 통신에서 가장 중요한 지표 중의 하나이다.
- 에너지 소비 (Energy Consumption, EC): 무선 센서 네트워크에서 가장 중요한 이슈 중에 하나는 에너지 소비이다. 이 지표는 실시간 데이터 전달을 위하여 소모된 센서 노드의 총 에너지 사용량을 의미한다. 기존 연구에서는 메시지의 수를 통해서 에너지 소비를 표현하였지만, 본 시뮬레이션에서는 메시지 송수신을 위한 에너지 소모량을 표현하였다. 실시간 데이터 전송과 위치 기반 전송의 특성상 추가 제어 메시지를 사용하지 않고 오로지 주어진 패킷 정보만을 가지고 프로토콜을 운용한다. 모든 시뮬레이션 상의 에너지 소비량은 메시지 전송에 따른 에너지 소모량만을 표현한다. 송수신 데이터 소비는 각각 21mW와 15mW이고, Mica2 표준<sup>13)</sup>을 참조하였다. 메시지 길이에 따라서 에너지 소모가 달라질 수 있는데, 본 연구는 길이에 영향을 주지 않기 위하여 MAC 헤더의 reserved field나 unused field를 사용하여 구현하였기 때문에 메시지의 길이는 동일하게 설정하였다.

### 5.3 단-대-단 (End-to-end) 거리 영향

단-대-단 거리의 영향을 측정하기 위해서 본 논문에서는 거리의 변화에 따른 요구시간 내 데이터 수신 성공률 (Time Deadline Success Ratio, TDSR)을 평가하였다. 단-대-단 거리는 소스 노드와 싱크 노드간의 거리로서 50m에서 300m까지 다양하게 하였다. 다양한 전송 거리를 요구하는 산업 분야를 반영하기 위함이다. 거리에 따라서 다중 경로의 수가 달라질 수 있다. 그림 4는 거리에 따른 TDSR의 변화를 나타낸

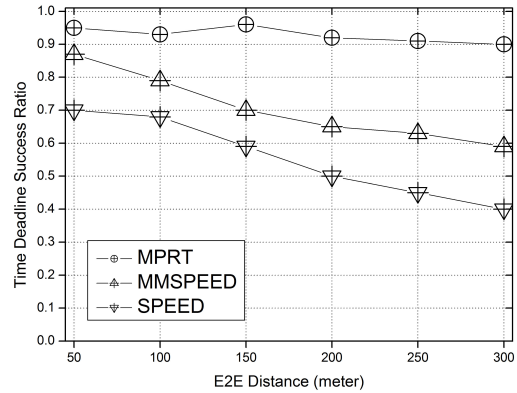


그림 4. 단-대-단 거리에 따른 요구시간 내 수신 성공률  
Fig. 4. Time Deadline Success Ratio according to the End-to-end Distance

다. SPEED는 신뢰성을 고려하지 않기 때문에 많은 수의 패킷이 네트워크 다이내믹스에 의해서 손실된다. 반면, MMSPEED는 실시간 데이터 패킷에 대해서 높은 신뢰성을 보여주고 있다. 하지만, 거리가 증가할수록 데이터 손실이 증가된다. 이는 경로가 합쳐지고 합쳐진 경로의 실패가 일어나서 생기는 데이터 손실 때문이다. 하지만 제안 방안은 계속해서 경로를 분기하기 때문에 몇몇의 경로가 실패하더라도 신뢰성 있는 통신을 달성한다.

그림 5는 단-대-단 거리 변화에 따른 에너지 소모량을 나타낸 것이다. SPEED는 단일 경로를 기반으로 이루어져 있고, 많은 경우에서 실패되기 때문에 에너지 소모량이 제일 적게 측정되었다. MMSPEED는 단-대-단 거리가 길어질수록 목적지까지의 도달율이 떨어진다. 그렇기 때문에 요구되는 신뢰성을 달성하기 위하여 많은 수의 경로로 분기가 되어 데이터가 전달

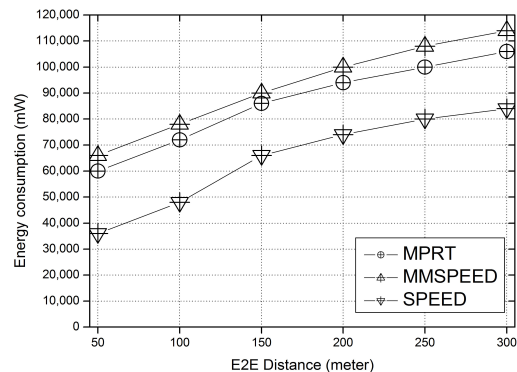


그림 5. 단-대-단 거리에 따른 에너지 소모량  
Fig. 5. Energy Consumption according to the End-to-end Distance



된다. 하지만 소스 노드 주변에서는 많은 노드들이 경로에 포함되어 통신에 참여하게 되고, 많은 에너지를 낭비하게 된다. 하지만 제안 방안은 평행 트랙의 수에 따라서 경로의 수를 제한할 수 있기 때문에 에너지 소모를 줄일 수 있다.

#### 5.4 단-대-단 요구시간 영향

실시간 시스템에서 요구시간 (time deadline)은 가장 중요한 요소이다. 그림 6과 7은 요구시간 변화에 따른 TDSR과 에너지 소모의 변화를 보여준다. 이를 측정하기 위해 우리는 요구하는 시간을 0.5초에서 1.5초로 변화를 주었다. 모든 프로토콜에서 시간이 길어질수록, TDSR은 증가하였다. 이것은 시간제한이 완화되었기 때문이다. 하지만 우리의 제안방안은 넓은 지역에 걸쳐서 여러 경로를 계속해서 만들기 때문에 시간과 상관없이 항상 높은 성공률을 보였다. 에너지 소모의 경우 SPEED는 소모량이 제일 적게 측정된다.

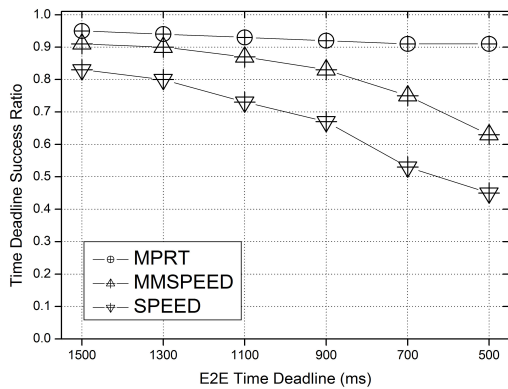


그림 6. 단-대-단 요구시간에 따른 요구시간 내 수신 성공률  
Fig. 6. Time Deadline Success Ratio by the End-to-end Time Deadline

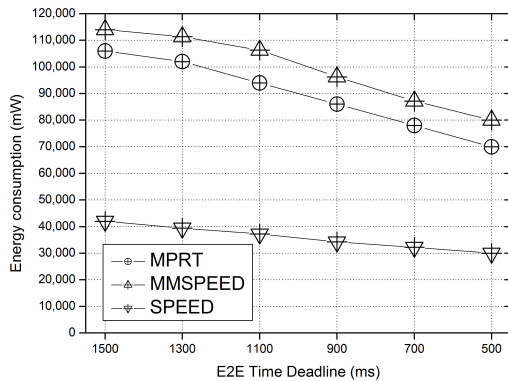


그림 7. 단-대-단 요구시간에 따른 에너지 소모량  
Fig. 7. Energy Consumption by the End-to-end Time Deadline

이것은 단일 경로 기반일 뿐만 아니라, 시간제한이 엄격해질수록 더 적은 노드만이 경로에 참여하기 때문이다. 다중 경로 기반인 MMSPEED와 제안 방안의 경우에는 제안 방안이 좀 더 나은 성능을 보이게 되는데, 이것은 제안 방안에서는 소스 노드와 목적지 노드 간의 분기되는 경로의 수를 제한하고 조절할 수 있기 때문에 에너지 소모가 줄어들게 되는 것이다.

#### 5.5 평행 트랙의 폭의 영향

제안 방안은 평행 트랙을 기반으로 작동하기 때문에 평행 트랙의 폭에 따라서 성능에 영향을 끼칠 수 있다. 트랙의 폭의 영향을 평가하기 위해서 우리는 폭을 10m, 15m, 20m, 25m, 30m, 35m, 로 설정하여 시간 내 전송 성공률과 에너지 소모를 측정하였다. 그림 8은 단-대-단 거리에 따라서 각각의 폭일 때 시간 내 전송 성공률을 보여준다. 폭이 좁을수록 더 많은 경로가 형성되기 때문에 시간 내 전송 성공률은 높아진다.

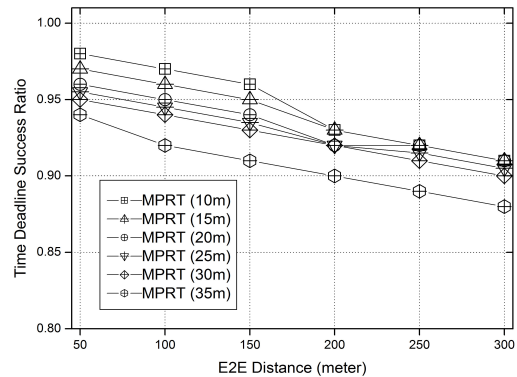


그림 8. 평행 트랙의 폭에 따른 요구시간 내 수신 성공률  
Fig. 8. Time Deadline Success Ratio according to the Width of Tracks

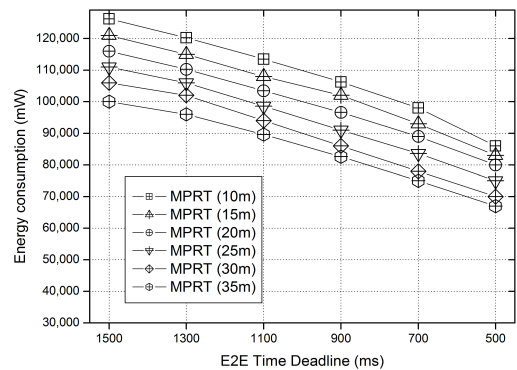


그림 9. 평행 트랙의 폭에 따른 에너지 소모량 비교  
Fig. 9. Energy Consumption according to the Width of Tracks

그림 9는 단-대-단 요구시간에 따른 각각의 폭 설정의 에너지 소모를 보여준다. 트랙의 폭이 좁아질수록 경로의 수는 증가하기 때문에 에너지 소모는 이에 따라서 증가된다. 그러므로 트랙의 폭은 전송 성공률과 에너지 소모 간에 트레이드오프 (trade-off)를 야기할 수 있다. 각각의 응용에서는 요구사항에 따라서 트랙의 폭을 적절히 조정할 필요가 있다.

## VI. 결 론

본 논문은 산업 무선 센서 네트워크에서 신뢰성을 제공하는 동시에 실시간 데이터 전달을 하는 프로토콜을 제안하였다. 기존의 무선 센서 네트워크에서 신뢰성 있는 실시간 데이터 전달 방안 중 하나인 MMSPEED는 다중 경로를 지역적으로 만들기 때문에 생성된 경로들 간에 서로를 인지할 수 없었고, 생성과 분기에 통제가 쉽지 않았다. 그래서 경로들 간에 서로 합쳐질 가능성이 높아서 다중 경로의 효과를 이용하지 못한다. 이로 인해서 높은 신뢰성과 실시간 데이터 전달을 요구하는 산업 무선 센서 네트워크의 중앙 조절 방식을 선호하는 네트워크의 특성 상 직접 적용이 불가능하였다. 이 문제를 해결하기 위해서 본 논문에서는 분리형 경로를 위한 지리적 평행 트랙을 활용한 다중경로 라우팅 방안을 제안하였다. 본 방안은 평행 트랙을 이용하여 경로들 간에 정보를 제공하였고, 이로 인해서 실시간 데이터 전달의 신뢰성을 향상 시켰다. 시뮬레이션을 통하여 제안 방안이 신뢰성과 시간 내 데이터 전송 측면에서 나음을 보였다.

## References

[1] Q. Wang and J. Jiang, "Comparative examination on architecture and protocol of industrial wireless sensor network standards," *IEEE Commun. Surv. Tuts.*, vol. 18, no. 3, pp. 2197-2219, 3rd Quart., 2016.

[2] International Electrotechnical Commission, *Industrial Networks-Wireless Communication Network and Communication Profiles-ISA 100.11a*, 2014.

[3] I. F. Akyildiz, et al., "A survey on sensor networks," *IEEE Commun.*, vol. 40, no. 8, pp. 102-114, Aug. 2002.

[4] T. Yang, et al., "Improved real-time transmission scheme using temporal gain in

wireless sensor networks," *J. KIISE*, vol. 44, no. 10, pp. 1062-70, Oct. 2017.

[5] T. He, et al., "A spatiotemporal communication protocol for wireless sensor networks," *IEEE Trans. Parall. and Distrib. Syst.*, vol. 16, no. 10, pp. 995-1006, Oct. 2005.

[6] E. Felemban, et al., "MMSPEED: Multipath multi-SPEED protocol for QoS guarantee of reliability and timeliness in wireless sensor networks," *IEEE Trans. Mob. Comput.*, vol. 5, no. 6, pp. 738-754, Jun. 2006.

[7] Y. Li, et al., "Enhancing real-time delivery in wireless sensor networks with two-hop information," *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. 5, no. 2, pp. 113-122, May 2009.

[8] W. Shen, et al., "PriorityMAC: a priority-enhanced MAC protocol for critical traffic in industrial wireless sensor and actuator networks," *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. 10, no. 1, pp. 824-35, Feb. 2014.

[9] S. Noh, et al., "Effective retransmission scheme for supporting Communication Reliability in sensor networks," in *Proc. 2010 IEEE PIMRC*, pp. 2180-2185, Istanbul, Turkey, Sep. 2010.

[10] E. B. Hamida and G. Chelius, "Strategies for data dissemination to mobile sinks in wireless sensor networks," *IEEE Wireless Commun.*, vol. 15, no. 6, pp. 31-37, Dec. 2008.

[11] B. Karp and H. T. Kung, "GPSR: Greedy perimeter stateless routing for wireless networks," in *Proc. Annu. Int. Conf. Mob. Comput. and Netw.*, pp. 243-254, Boston, U.S.A, Aug. 2000.

[12] N. Bulusu, et al., "GPS-less low cost outdoor localization for very small devices," *IEEE Pers. Commun. Mag.*, vol. 7, no. 5, pp. 28-34, Oct. 2000.

[13] J. Hill and D. Culler, "Mica: A wireless platform for deeply embedded networks," *IEEE Micro*, vol. 22, no. 6, pp. 12-24, Nov./Dec. 2002.

[14] Scalable Network Technologies, Qualnet, [online] from <http://web.scalable-networks.com>.

오 승 민 (Seungmin Oh)



2009년 2월 : 충남대학교 컴퓨터공학과 졸업  
2015년 8월 : 충남대학교 컴퓨터공학과 (공학박사)  
2016년 2월~현재 : UCLA 박사후연구원  
<관심분야> WSNs, VANETs, IoT, Security

정 관 수 (Kwansoo Jung)



2005년 2월 : 충남대학교 컴퓨터공학과 졸업  
2007년 2월 : 충남대학교 컴퓨터공학과 (공학석사)  
2015년 2월 : 충남대학교 컴퓨터공학과 (공학박사)  
2016년 3월~현재 : 호원대학교 사이버보안학과 조교수

<관심분야> WSNs, VANETs, IoT, Security