한국정보전자통신기술학회논문지(jkiiect)'17-10, Vol.10 No.5
논문 17-10-05-424 http://dx.doi.org/10.17661/jkiiect.2017.10.5.424

산업 무선 센서 네트워크에서 실시간 모니터링을 위한 신뢰성 향상 기법

오승민*, 정관수**

A Reliable Protocol for Real-time Monitoring in Industrial Wireless Sensor Networks

Seungmin Oh*, Kwansoo Jung**

요 약 산업 무선 센서 네트워크에서는 많은 응용들이 복합적인 서비스 품질 지원을 요구한다. 본 논문에서는 산업 무선 센서 네트워크에서 실시간 서비스의 신뢰성을 향상시키기 위하여 기회적 실시간 모니터링 데이터 전달 프로토콜을 제안한다. 전송 실패를 복구하기 위해 가장 많이 알려진 재전송 기법들은 실시간 요구사항에 위배되는 추가적 딜레이를 발생시키기 때문에 실시간 데이터 전달에 적절치 않다. 제안 프로토콜은 무선 네트워크의 브로드캐스팅 특성과 시간적 기회 제공 방법을 사용한다. 브로드캐스팅 특성을 통해서 라디오 반경 내 모든 이웃에게 전달하고, 시간적 기회 제공 방법으로 중계 우선순위를 정하여 모든 노드들이 중계 기회를 얻을 수 있게 한다. 제안 방안은 최대한 많은 노드가 라우팅에 참여하여 실시간 데이터 전송 확률을 높인다. 시뮬레이션을 통하여 제안 방안이 실시간 데이터 전송과 신뢰성 측면에서 우월함을 보인다.

Abstract In industrial wireless sensor networks, many applications require integrated QoS supporting. This paper proposes a reliable protocol for real-time monitoring in industrial wireless sensor networks. Retransmission is well-known to recover the transmission failure, however, this might cause the time delay to violate the real-time requirement. The proposed protocol exploits broadcasting feature of wireless networks and the temporal opportunity concept. The opportunities to relay the data packets are shared by the broadcasting feature and the temporal opportunity concept maximize the number of candidates in communication. Simulation results show that the proposed protocol is superior to the existing real-time protocols in term of real-time service and reliability.

Key Words : Industrial Wireless Sensor Network, Multipath Routing, Opportunistic Routing, Real-time Monitoring, Reliability

1. 서론

무선 센서 네트워크는 낮은 통신, 계산 능력을 지닌 많은 수의 센서 노드들로부터 데이터를 수집한다 [1]. 센서 노드들은 센싱한 정보에 대한 데이터를 생성하고 생성된 데이터를 다중 홉 통신을 이용하여 싱크 노드에게 전달한다 [2]. 특히, 산업 무선 센서 네트워크의 많은 응용 어플리케이션들은 대부분 빠르게 변화하는 상황에 대해서 빠르게 응답되고, 일정 시간 이내에 데이터를 수집하는 것이 요구된다. 산업 무선 센서 네트워크 응용 어플리케이션의 가장 큰

This work was supported by the National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Korea government(MSIP; Ministry of Science, ICT & Future Planning) (No. NRF-2017R1C1B5018377).
* University of California, Los Angeles
**Corresponding Author : Department of Cyber Security, Howon University (ksjung@howon.ac.kr)
Received October 10, 2017 Revised October 12, 2017 Accepted October 20, 2017

특징은 복합적인 서비스 품질 (QoS)을 요구한다는 것이다.

기존의 위치 정보 기반의 실시간 데이터 전달 프로토콜 [3][4]들은 센서 네트워크 전체에서 계산된 전달 속도를 유지하며 요구 시간 내 데이터 전달을 완수하였다. 이 프로토콜은 전달 속도보다 빠르게 처리할 수 있는 노드를 다음 홉 노드로 선정하여 데이터를 전달하였다. 하지만, 이 프로토콜에서는 실시간 데이터 전달에만 집중하였기 때문에 신뢰성이 있는 통신은 고려되지 못하였다. 즉, 많은 데이터가 손실되었다.

고장이나 통신 실패가 빈번히 일어나는 무선 센서 네트워크에서는 신뢰성 있는 통신을 위하여 많은 연구가 진행되어 왔다[5][6][7][8][9][10][11]. 신뢰성 있는 통신에서 가장 많이 사용되는 방법은 재전송 기법 [8][9]이다. 이 기법은 단순하게 전송 실패가 일어날 경우, 소스 노드나 중계 노드가 이를 인지하고 해당 패킷을 복구하여 다시 전송하는 것을 의미한다. 이러한 방법들은 실패가 일어났을 때, 신뢰성을 높이기 위하여 다른 노드를 선택하거나 혹은 이미 선택된 노드에게로의 재전송이 필요로 한다. 또 다른 신뢰성을 높이기 위한 방법으로 다중경로 라우팅이 있다 [10][11]. 다중 경로 라우팅 프로토콜은 하나의 패킷을 여러 개의 경로로 동시에 전송하여 목적지에서 수신할 확률을 높이는 방법이다. 이런 데이터 중복으로 인하여 신뢰성 높은 통신이 이루어진다.

하지만, 이러한 신뢰성 향상 기법들은 무선 센서 네트워크에서 실시간 데이터 전달에 적용하기에는 여전히 문제가 있다. 재전송 기법은 구현이 쉬운 반면에 전송 실패 인식, 다음 홉 노드 재선택 및 재전송을 위한 추가적인 딜레이를 야기하기 때문에 실시간 요구사항을 위배할 수 있다. 다시 말해서, 재전송할 노드는 이미 제한시간을 지나서 중계를 시작할 수 있기 때문에, 이미 시간적으로 중계 기회를 상실한 것이다. 다중 경로 라우팅 프로토콜들은 데이터 전달 확률을 높일 수는 있으나, 에너지 소모가 심하고, 무선 간섭이 일어날 수 있어서 이를 스케줄링하기 위한 추가적인 딜레이가 발생한다. 게다가 네트워크의 수명을 단축시키는 문제가 있다.

본 논문에서는 이러한 문제를 해결하기 위해서 기회적 라우팅을 적용한 실시간 데이터 전달 프로토콜을 제안한다. 본 방안은 무선 브로드캐스팅 특성과 시간적 중계기회 관점을 이용한다. 브로드캐스팅 특성에 의해서, 모든 이웃노드들은 데이터를 수신할 수 있다. 데이터를 수신한 노드들 중에 실시간 요구사항을 만족한 다수의 노드가 존재할 수 있다. 이 노드들은 시간적 선택 방안에 의해서 각각의 중계 기회를 얻을 수 있다. 후보 노드들 중에는 각각 다른 중계 시간을 가지고 있기 때문에, 우선순위에 따라서 중계를 할당받는 노드의 수가 달라지고, 전송 성공률이 달라질 수 있다. 최대한 많은 노드에게 기회를 제공하기 위해 본 방안에서는 짧은 중계시간을 가진 노드에게 먼저 기회를 부여하여 많은 노드가 기회적 라우팅에 참여하게 하였다. 이것을 통해서 해당 패킷의 전송 성공률을 높였다. 그리고 제안 방안은 단일 경로를 통한 데이터 전송이기 때문에, 에너지 소모도 줄이면서도 신뢰성 있는 통신을 제공할 수 있다. 시뮬레이션을 통해서 제안 방안이 기존 방안보다 실시간 데이터 전달 측면이나 에너지 소모 측면에서 우월함을 보인다.

논문 구성은 다음과 같다. 2장에서는 제안 방안의 시스템 모델 및 설계 원리에 대해서 언급하고, 3장에서는 제안 방안의 구성과 작동에 대해서 설명한다. 4장에서는 제안 방안의 성능을 보이기 위한 실험과 그 결과를 보이고, 5장에서는 논문의 결론을 맺는다.

2. 제안 방안의 설계 원리

본 장에서는 제안 방안이 운용될 시스템 모델과 시공간적 접근법, 그리고 제안 방안의 데이터 패킷 헤더에 대해서 설명한다.

2.1 시스템 모델

제안 방안은 기존의 무선 센서 네트워크에서 실

시간 데이터 전달 프로토콜 [3][4]과 위치 기반 라우팅 [12] 프로토콜에서 널리 쓰이고 있는 다음 사항과 같은 가정을 기반으로 한다.

① 한정된 산업 현장에 많은 수의 센서 노드들이 균등하고 밀접하게 배치되어 있다. 그리고 이 노드들은 스스로 애드 혹 (Ad Hoc) 네트워크를 구성한다. 장거리 데이터 전달은 다중 홉 통신을 거쳐서 이루어진다.

② 일단, 어떤 현상이 하나 또는 복수의 센서 노드들에게 감지되면, 센서 노드들은 협력적으로 데이터를 생성하고 노드들 중 한 노드가 소스로서 데이터를 송신한다 [1][2].

③ 센서 노드들은 보고해야할 장소인 싱크의 위치를 싱크 위치 서비스에서 제공받을 수 있다. [13][14]

④ 무상태 라우팅 방법 중 하나인 위치 기반의 유니캐스트 라우팅을 위해, 각각의 노드는 자신의 위치를 계산할 수 있다. 이를 위해서 GPS의 신호를 수신할 수 있거나, 위치화 (Localization) 알고리즘을 사용할 수 있다 [15][16].

⑤ 모든 센서 노드들은 자신과 단일 홉 이웃 노드들에 대한 좌표 정보와 홉 딜레이 정보를 주기적으로 비콘 (beacon) 신호에 의해서 교환한다 [3][4].

2.2 실시간 데이터 전달을 위한 시공간적 (Spatiotemporal) · 접근법

무선 센서 네트워크에서 실시간 데이터 전달 프로토콜 [3][4]들은 센서 노드로부터 싱크 노드까지 응용 어플리케이션에서 요구하는 $T_{setdeadline}$ 내에 데이터를 전달하기 위하여 시공간적 접근법을 사용한다. 다중 홉 무선 센서 네트워크에서는 단일 홉 통신의 전송 유효거리가 제한되기 때문에, 단대단 (end-to-end) 딜레이는 단일 홉 딜레이뿐만 아니라, 패킷이 전송되는 거리에 영향을 받는다. 시공간적 실시간 데이터 전달을 위해서 소스 노드는 다음과 같이 응용 어플리케이션의 제한 시간 $T_{setdeadline}$과 싱크와 소스 노드 간의 단대단 거리 *dist (source, sink)* 를 통해 전달 속도 $S_{setspeed}$를 계산한다:

$$S_{setspeed} = \frac{dist(src, snk)}{T_{setdeadline}} \quad (1)$$

본 접근법에서는 데이터 전달 경로 상의 노드들은 다음과 같은 법칙을 가지고 다음 홉 노드를 선택한다.

① 선택될 다음 홉 노드는 현재 데이터를 가지고 있는 노드보다 목적지인 싱크 노드에 더 가깝다.

② 선택될 다음 홉 노드는 미리 정해진 전달 속도 $S_{setspeed}$ 보다 빠르게 데이터를 중계할 수 있다. 즉, 더 빠른 중계 속도 (relay speed)를 제공하는 노드가 선택된다. 하나의 다음 홉 노드의 중계 속도는 싱크로의 전진 (advance)을 단일 홉 딜레이로 나눈 값을 의미한다. 단대단 실시간 데이터 전달은 데이터가 전달되는 동안 이 전달 속도를 유지함으로서 달성된다.

2.3 패킷 헤더/메시지 종류 정의

이번 절에서는 먼저 제안 방안의 데이터 패킷 헤더의 구성에 대해서 언급하고, 각 헤더 필드의 의미에 대해서 설명한다. 패킷 헤더 구조는 다음과 같다.

① 타임 슬롯 (time slot)의 길이와 각 슬롯에 할당 된 노드의 좌표: 타임 슬롯은 하나의 노드가 데이터를 중계할 때 주어지는 시간을 의미한다. 제안 방안에서 하나의 슬롯에는 오직 하나의 노드만이 중계할 수 있다.

② 소스 노드와 목적지 노드의 좌표: 두 좌표들은 위치 기반 라우팅을 위하여 헤더에 포함된다. 이 정보는 소스 노드로부터 목적지에 이르기까지 절대 변하지 않는다.

③ 이전 중계 노드 (현재 데이터를 가지고 있는 노드)의 좌표: 이전 중계의 좌표는 목적지로의 전진 (advance)를 계산하기 위하여 필요하다.

④ 타임 가드 (time guard)의 길이: 타임 가드는 각 타임 슬롯 사이의 시간을 의미한다. 이것은 센서 노드들 간의 타임 싱크 (time sync)가 맞지 않

을 때에도 제안방안이 올바르게 운용되기 위해 사용된다.

⑤ 요구되는 전달 속도: 이 전달 속도는 소스 노드에 의해 계산되고, 데이터가 전달되는 동안 일정하게 유지된다.

⑥ 일련 (sequence) 번호: 일련번호는 데이터 패킷의 번호를 의미하고, 중복되는 데이터를 받았는지 검사하기 위하여 사용된다.

그리고 제안 방안을 운용하기 위한 메시지 종류에 대해서 설명한다.

① 전파 메시지 (advertisement): 실시간 데이터 전달 전에, 센서 노드의 홉 딜레이는 모든 이웃에게 전파되어야 한다. 모든 센서 노드는 이웃의 정보를 수집하여 저장하고, 실시간 라우팅에 활용한다.

② 취소 메시지 (cancel): 기회적 라우팅에서 중복 전송을 피하기 위하여 사용한다. 중계 후보 노드는 나머지 후보노드들의 타이머를 취소/해제 시켜야한다. 중계 노드는 취소 메시지를 단일 홉 내 모든 이웃에게 브로드캐스팅 한다. 취소 메시지의 식별자는 이미 보내졌던 데이터 패킷의 일련번호와 동일하다.

③ 데이터 메시지 (data): 이 메시지 안에는 센싱 데이터가 포함되어 있다. 이 메시지는 기회적 라우팅의 시작을 의미한다. 데이터 메시지는 일련번호와 소스 노드의 위치로 식별할 수 있다.

3. 제안 방안 운용

3.1 제안 방안 개요

본 절에서는 제안 방안의 개략적인 운용에 대해서 설명한다. 제안 방안은 다수의 센서 노드들 간의 상호작용을 통해서 운용된다. 무선 센서 네트워크에서 데이터 패킷은 다중 홉 통신을 통해서 전달된다. 데이터 전달을 위하여 데이터를 가지고 있는 송신 노드들은 목적지 노드로 데이터를 중계할 다음 홉 노드를 선정한다. 본 논문에서는 송신 노드와 다음 홉 노드의 후보 관점으로 본 방안을 설명한다.

모든 센서 노드는 비콘 신호를 교환함으로 자신의 이웃 노드에 대한 정보를 수집한다. 수집된 정보에는 이웃노드의 좌표와 홉 딜레이가 포함되어 있다 [3][4]. 이 정보를 기반으로 노드들은 자신의 이웃노드가 실시간 요구사항을 만족하는지 확인할 수 있다. 전송할 데이터를 가지고 있는 송신 노드는 라디오 반경 내의 단일 홉 이웃 노드 중 데이터를 중계할 다수의 다음 홉 후보 노드를 선택한다. 송신 노드는 중계 시간을 일정한 슬롯으로 나누고 각 슬롯마다 선택된 노드들을 할당한다. 충돌을 피하기 위하여 각 슬롯에는 하나의 노드만이 할당된다. 데이터가 단일 홉 브로드캐스팅 되는데 소요되는 시간 T_{Data}, 한 슬롯의 길이 T_S, 타임 가드의 길이 T_G라 할 때, n 번째 슬롯에 할당된 노드는 T_{Data}+(n−1)(T_S+ T_G)로부터 T_{Data}+(n−1)(T_S+ T_G)+ T_S까지 데이터를 중계할 수 있다.

전송된 데이터는 선택된 후보들에 의해서 수신된다. 데이터 수신 후 후보노드들은 자신에게 할당된 시간을 계산한다. 그리고 자신에게 할당된 슬롯 번호 n을 통해 (n−1)(T_S+ T_G) 시간의 타이머를 설정한다. 타이머가 완료되기 전까지 노드는 기다린다. 타이머 완료 전에 이전 슬롯에 할당된 노드의 전송이 성공하면 타이머를 초기화 하고 해당 패킷을 삭제한다. 그렇지 않다면, 타이머 완료와 동시에 패킷을 전송한다. 중복 전송을 방지하기 위하여, 송신 노드는 나머지 노드의 타이머를 초기화하기 위한 패킷을 전송한다.

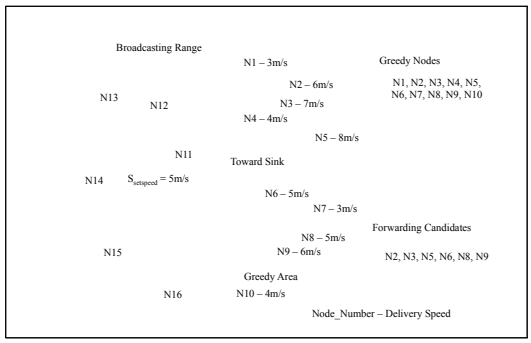

그림 1. 단일 홉 반경에서 다음 홉 노드 후보
Fig. 1. Next-hop Node Candidate in Single Hop.

3.2 기회적 라우팅을 위한 다음 홉 노드 선택

이번 절은 송신 노드의 다음 홉 노드 선택 절차를 설명한다. 앞서 설명한 것처럼, 센서 노드는 주기적으로 비콘 신호를 통하여 이웃노드들과 자신의 정보를 교환한다. 이 정보에는 노드 자신의 위치 좌표, 수신 패킷 처리 가능 시간 (두 노드 간의 홉 딜레이)을 포함한다. 무선 센서 네트워크의 기존 실시간 데이터 전달 프로토콜과 같이, 각각의 노드는 이 정보를 테이블로 저장하고 유지한다. 데이터 패킷을 전송하기 전에 송신 노드는 패킷을 받을 복수의 후보 노드들을 선택한다. 그림 1과 같이, 이웃 노드 집합 NS_i는 노드 i의 라디오 반경 이내의 다수의 이웃 노드들을 포함한다. 앞서 언급했듯이, 노드 i는 NS_i에 포함된 노드들의 좌표와 단일 홉 딜레이를 저장하고 있다. 송신 노드는 NS_i를 후보 노드군과 비 후보 노드군으로 나눈다. 후보 노드군을 위하여 제안 방안에서는 우선 위치 좌표를 통해 송신 노드보다 목적지 노드에 더 가까운 노드를 선택한다. 이렇게 선택된 이웃 노드 집합에서, 송신 노드는 각각의 노드에 대하여 목적지 노드에 대한 전달 속도 RS_j를 다음의 식을 통해 계산한다:

$$RS_j = \frac{advance(n_i, n_j, dest)}{hopdelay(n_i, n_j)} \qquad (2)$$

위 식에서, *advance* (A,B,C)는 A노드에서 B노드를 거쳐서 C노드를 향해서 갈 때, C노드에 가까워지는 거리를 의미하고, *hopdelay* (A,B)는 A노드와 B노드 사이의 홉 딜레이를 의미한다. 전송 후보 집합은 오직 목적지에 좀 더 가까워지고, 이미 계산된 요구 전달속도($S_{setspeed}$)보다 더 빠른 전달 속도 (RS_j)를 가진 노드를 포함하게 된다.

이것을 시간 관점으로 보면 다시 정리할 수 있다. 노드 j는 홉 딜레이 *hopdelay* (i, j) 이후에 데이터를 전송할 수 있다. 동시에, *advance* (n_i, n_j, *dest*)를 요구 전달속도($S_{setspeed}$)로 나눈 값, 즉 홉 유효시간 이내에 중계되어야 한다. 요구 유효시간 T_j는 다음과 같이 계산할 수 있다:

$$T_j = \frac{advance(n_i, n_j, dest)}{S_{setspeed}} \qquad (3)$$

후보 노드들 중 오직 다음 부등식을 만족하는 노드 j만이 최종 후보노드로 선택될 수 있다:

$$hopdelay(n_i, n_j, dest) < T_j. \qquad (4)$$

즉, *hopdelay*(n_i, n_j, *dest*)와 T_j 사이 시간이 노드 j가 실시간 요구사항을 만족할 수 있는 시간이다. 본 논문에서는 이 시간을 실시간 전송 가능시간이라 부른다. 그림 2는 홉 딜레이와 전송 가능시간을 보인다.

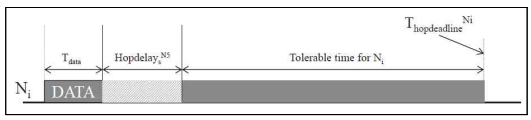

그림 2. 홉 딜레이와 전송 가능시간
Fig. 2. Hop Delay and Tolerable Time.

3.3 실시간 전송 가능시간의 배분

앞서 언급했듯이, 후보 노드 j는 *hopdelay*(n_i, n_j, *dest*)와 T_j 사이에 데이터를 전송할 수 있다. 하지만, 각각의 후보노드들이 스스로 중계시간을 결정한다면, 중복 전송과 패킷 충돌이 빈번히 일어나게 되고 데이터 전송 확률이 급격히 떨어진다. 이 문제를 피하기 위하여 그림 3과 같이 송신 노드는 전송 가능시간을 다수의 시간 슬롯(slot)으로 일정하게 나누고, 각각의 시간 슬롯에 후보 노드들을 배정한다. 그림 2에서 보면, 후보노드들의 전송 가능시간은 같은 길이의 슬롯으로 나누어진다. 다만, 하나의 후보가 여러 개의 슬롯에 할당될 수도 있다. 제안 방안은 실시간 전송 가능시간의 배분을 위해 다음의 우선순위 규칙을 적용하여 슬롯에 후보 노드들을 할당한다.

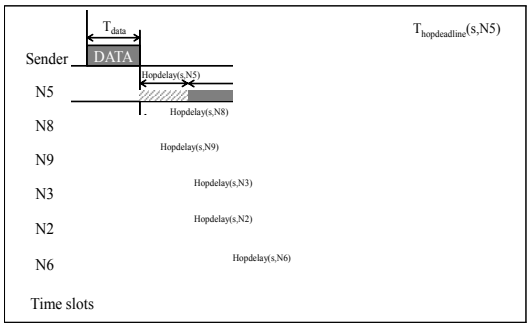

그림 3. 후보노드 간 시간적 기회 배분
Fig. 3. Temporal Opportunity of Next-hop Candidate Nodes.

① 하나의 슬롯에 하나의 노드만이 전송 가능하다면, 해당 슬롯에 해당 노드를 배정한다.

② 하나의 슬롯에 다수의 노드가 전송 가능하다면, 가장 적은 슬롯을 가진 노드에게 해당 슬롯을 배정한다.

③ 하나의 슬롯에 다수의 노드가 전송 가능하고, 가장 적은 슬롯을 가진 노드가 2개 이상일 경우, 이미 할당받은 슬롯이 가장 적은 노드가 해당 슬롯을 배정받는다.

④ 하나의 슬롯에 다수의 노드가 전송 가능하고 미배정 슬롯이 가장 적고 이미 할당받은 슬롯의 수가 같은 경우, 목적지에 더 가까운 노드가 해당 슬롯에 해정된다.

이 규칙들은 최대한 많은 노드에게 중계 기회를 제공함으로서 제안 방안의 신뢰성을 높일 수 있다. 그림 4에서 예를 들면, 5개의 타임 슬롯 TS2, TS3, ..., TS6는 다수의 후보 노드가 배정받을 수 있다. 첫 번째 규칙을 통해서 TS2에는 노드 N5가 배정받는다. 두 번째 규칙은 TS5와 TS6에 각각 N3, N6을 배정한다. 그리고 최종적으로 TS3과 TS4에는 N9와 N8이 세 번째 규칙에 의해서 배정된다. 이렇게 배정된 결과는 패킷 헤더에 저장되어 다음 홉 후보 노드들에게 데이터와 함께 중계된다. 슬롯의 번호와 배정된 노드의 좌표가 쌍으로 헤더에 저장된다.

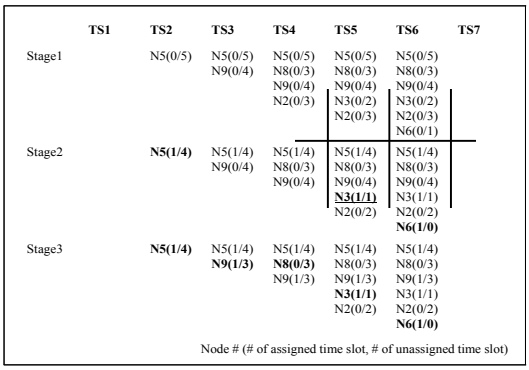

그림 4. 후보노드들의 슬롯 할당의 각 단계
Fig. 4. The Stages for Assigning the Time Slot to Neighbor Candidate Nodes.

3.4 후보 노드들의 중계

데이터 패킷을 수신한 모든 노드는 우선 헤더의 후보 노드 리스트에 자신이 포함되어 있는지 확인한다. 후보 노드 리스트에 자신이 없으면 해당 패킷을 삭제한다. 이것을 먼저 확인해야 하는 것은, 단일 홉 브로드캐스팅으로 패킷이 전송되기 때문에, 후보가 아닌 노드들도 모두 데이터를 전송받을 수 있기 때문이다. 자신이 노드 리스트에 포함되어 있으면 자신의 홉 딜레이에 자신에게 할당된 슬롯 시간 전까지 타이머 (timer)를 설정한다. 즉, n번째 슬롯에 할당된 노드 i는 $T_B+(n-1)(T_S+T_G)$의 시간만큼 기다린다.

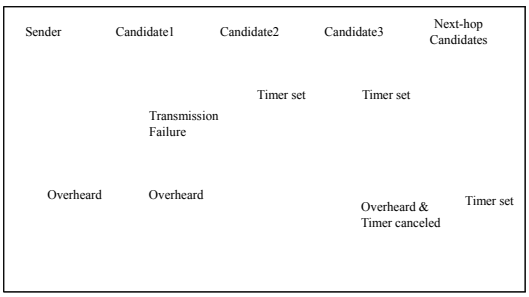

그림 5. 데이터 전송의 시간 순서도
Fig. 5. Time Diagram for Data Transmission

그림 5에서 각 슬롯에 배정된 모든 후보 노드 C1, C2, C3는 각각의 타이머를 시작한다. 그러나 후보노드 C1은 전송이 실패되었으므로 타이머를

설정할 필요가 없다. 모든 후보는 다른 후보의 해당 패킷 전송을 오버히어링(overhearing)을 통해서 확인해야만 한다. 이것은 중복 전송을 피하기 위함이다. 다른 노드의 전송을 오버히어링한 후보노드는 자신의 타이머를 해제하고 해당 데이터 패킷을 삭제한다. 만약, 자신의 타이머가 종료될 때까지 다른 노드의 전송이 일어나지 않는다면, 해당 노드는 다음 홉 노드로서의 데이터 패킷 중계를 시작한다. 기회적 라우팅은 다른 노드의 전송을 확인해야만 한다는 제한점을 가지고 있다. 그렇지 않다면 중복 전송 문제가 야기될 수 있다. 이것을 방지하기 위하여 본 제안 방안에서는 송신 노드가 후보 노드 중의 한 노드가 중계에 성공하면 나머지 후보 노드의 타이머를 해제하기 위하여 컨트롤 패킷(control packet)을 단일 홉 브로드캐스팅 한다.

4. 성능 분석

본 장에서는 시뮬레이션을 통하여 실시간 데이터 전달과 신뢰성 측면에서 제안 방안의 성능을 평가한다.

4.1 시뮬레이션 환경

시뮬레이션을 위하여 본 논문에서는 네트워크 시뮬레이터 Qualnet [17]을 사용하였다. 성능 비교 분석을 위하여 무선 센서 네트워크에서 실시간 데이터 전송 프로토콜로 가장 많이 알려진 SPEED [3]와 MMSPEED [4]를 비교 프로토콜로 정한다. 시뮬레이션 필드는 가로, 세로 500m의 정사각형으로 하고, 이 지역에 200~700개의 센서 노드를 일정하게 배치한다. 각 노드의 라디오 반경은 약 50m로 정한다. 소스 노드는 0.05초 간격으로 30 바이트의 데이터를 생성한다. 시뮬레이션 시간은 50초이고, 요구되는 전송 신뢰성은 85%이다. 그래프의 실험결과는 시뮬레이션 100회 수행의 평균값이다.

4.2 시뮬레이션 측정 지표

본 논문에서는 성능 평가를 위하여 다음의 측정 지표를 사용한다.

① 요구시간 내 전송 성공률: 이 지표는 소스 노드에 의해 생성된 데이터 패킷 중에 요구시간 내에 성공적으로 목적지에 데이터가 수신된 패킷의 수의 비를 나타낸다. 데이터 패킷의 신뢰성을 내포하고 있다. 이 지표는 실시간 시스템과 신뢰성 통신에서 중요한 지표이다.

② 에너지 소비량: 이 지표는 실시간 데이터 전달을 위해 소모된 에너지의 총량이다. 무선 센서 망에서 에너지 소비는 중요한 성능 지표 중 하나이다. 송/수신에 소모된 에너지는 21mW(송신)/15mW(수신)이다. MICA2 표준 [18]이 실험 설정에 사용되었다.

4.3 단대단 거리에 의한 실험결과

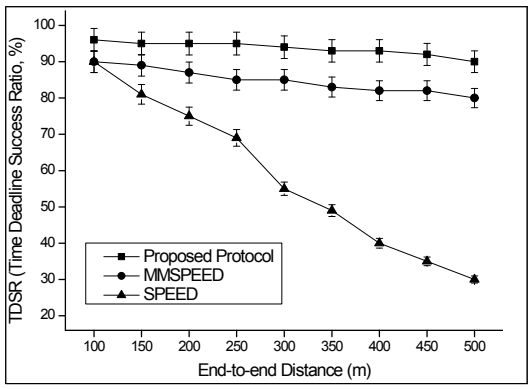

그림 6. 단대단 거리에 따른 요구시간 내 전송 성공률
Fig. 6. Time Deadline Success Ratio within the End-to-end Distance

본 실험에서는 단대단 (end-to-end) 거리를 100m에서 500m까지 변화시켰다. 그림 6은 단대단 거리에 따른 요구시간 내 전송 성공률을 나타낸다. SPEED에서는 단대단 거리가 길어질수록, 전송 성공률이 급격히 떨어진다. 이것은 SPEED에서는 신뢰성은 고려하지 않았기 때문에, 많은 수의 패킷이 많은 노드를 지날수록 손실되기 때문이다. MMSPEED에서는 요구된 신뢰성과 비슷한 결과를 나타낸다. 이것은 요구된 신뢰성을 지원하기 위하여 다수의 경로를 생성하여 분기하여 같은 패킷

이 여러 다중경로를 통하여 동시에 전송하게 함으로서 신뢰성을 높였기 때문이다. 제안 방안은 각 홉마다 신뢰성을 향상시켰기 때문에 결과적으로 전체 신뢰성도 높은 결과를 보이고 있다.

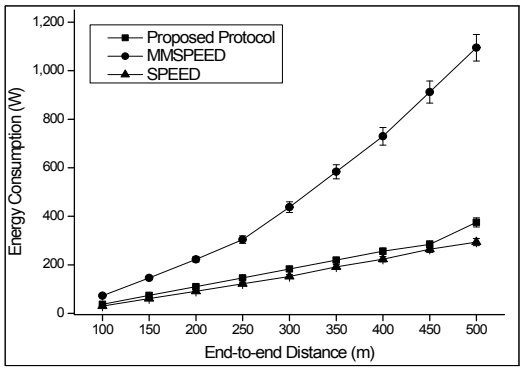

그림 7. 단대단 거리에 따른 에너지 소모
Fig. 7. Energy Consumption according to the End-to-end Distance

그림 7은 단대단 거리에 의한 에너지 소모량을 보이고 있다. MMSPEED는 요구되는 신뢰성을 달성하기 위하여 많은 수의 경로가 생성되기 때문에 SPEED나 제안 방안에 비하여 급격히 많은 에너지가 소모된다. 그리고 단대단 거리가 길어질수록 더 많은 경로가 생성되어지고, 더 많은 에너지가 소모됨을 확인할 수 있다. SPEED보다 에너지를 약간 더 소모함을 볼 수 있는데, 이것은 제안 방안이 오버히어링 때문에 에너지를 더 사용하지만, 이로 인한 증가량은 전체 에너지 소모에서 극히 미미한 부분을 차지하였다. 즉, 에너지 소모는 거의 비슷한 추이와 결과를 보이고 있다.

4.4 센서 노드의 수에 의한 실험결과

그림 8은 센서 노드의 수 (밀도)에 따른 요구시간 내 전송성공률을 보이고 있다. 본 실험에서 센서 노드의 수는 200개에서 700개까지 변화를 주었다. 센서 노드의 증가는 밀도의 증가를 의미한다. SPEED에서 송신 노드는 데이터를 전송하기 위하여 단 하나의 다음 홉 노드를 선택한다. 그렇기 때문에, SPEED의 전송률은 노드가 증가하더라도 거의 일정한 결과를 보이고 있다. 제안 방안과 MMSPEED는 센서 노드가 증가될수록 높은 성공률을 보이고 있다. MMSPEED는 센서 노드가 늘어날수록 경로를 만들기 쉬워지기 때문에 성공률이 늘어난다. 그리고 제안 방안에서는 센서 노드가 증가될수록 데이터를 중계할 기회가 늘어나기 때문에 높은 성공률을 보이고 있다. 센서 노드가 늘어날수록 결과 값은 거의 95%에 수렴하고 있다.

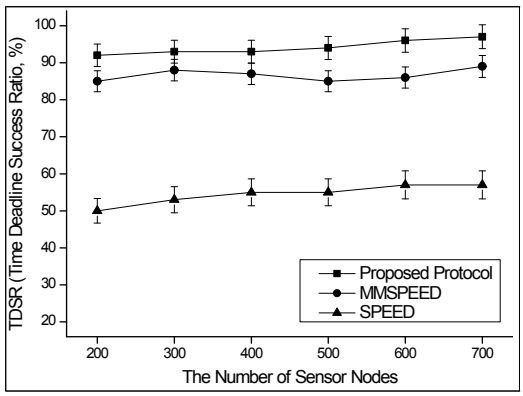

그림 8. 센서 노드 수에 따른 요구시간 내 전송 성공률
Fig. 8. Time Deadline Success Ratio impacted by the Number of Sensor Nodes

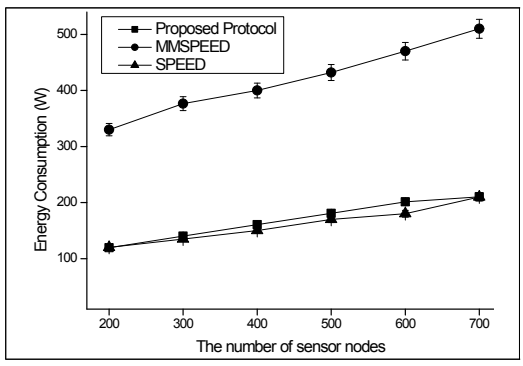

그림 9. 센서 노드 수에 따른 에너지 소모
Fig. 9. Energy Consumption impacted by the Number of Sensor Nodes

그림 9에서는 센서 노드 수에 따른 에너지 소모

를 보이고 있다. 앞서 언급한 것과 같이, 다중 경로를 기반으로 하는 MMSPEED는 센서 노드가 늘어날수록 더욱 많은 경로를 생성하기 때문에 에너지 소모 역시 급격히 증가한다. SPEED나 제안 방안은 단일 경로 기반의 라우팅이기 때문에, 에너지 소모가 적은 양씩 증가됨을 확인할 수 있다. 이것은 주변 노드와 노드 정보를 주고받고, 오버히어링하기 위한 에너지 소모량이다.

4.5 단대단 요구시간 (End-to-end Time Deadline)에 의한 실험결과

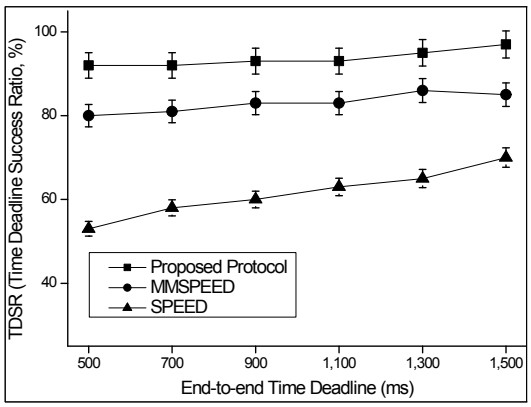

그림 10. 단대단 요구시간에 따른 요구시간 내 전송 성공률
Fig. 10. Time Deadline Success Ratio according to the End-to-end Time Deadline

그림 10과 11은 단대단 요구시간에 의한 성능을 보이고 있다. 실시간 시스템에서 단대단 요구 시간은 가장 중요한 요인이다. 우리는 요구시간을 0.5초에서 1.5초까지 변화시켰다. 모든 프로토콜에서 요구 시간이 길어질수록, 실시간 요구사항이 완화되기 때문에 성공률이 높아짐을 볼 수 있다. 제안 방안이 다수의 이웃 노드에게 중계 기회를 제공함으로서 다른 방안보다 높은 성공률을 또한 보이고 있다. 에너지 소모 측면에서는 짧은 요구시간을 가진 MMSPEED가 상당한 수의 경로가 필요하고 많은 수의 센서 노드가 경로에 참여하기 때문에 에너지 소모가 많아지는 것을 확인할 수 있었다. 제안 방안은 많은 노드가 라우팅에 참여함에도 단일 경로만을 생성하기 때문에 SPEED와 비슷한 양의 에너지를 소모함을 보였다.

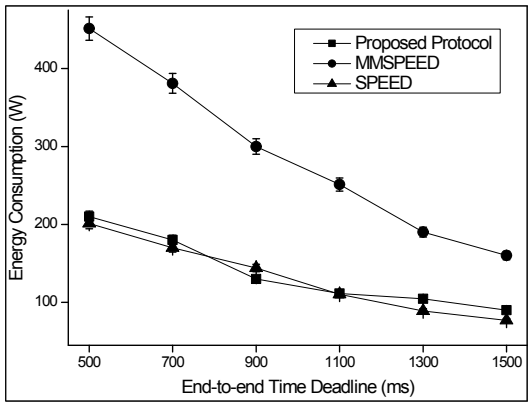

그림 11. 단대단 요구시간에 따른 에너지 소모
Fig. 11. Energy Consumption according to the End-to-end Time Deadline

5. 결론

본 논문에서는 산업 센서 네트워크에서 실시간 서비스와 신뢰성을 동시에 지원하기 위한 실시간 데이터 기회적 라우팅 프로토콜을 제안하였다. 산업 현장에서는 실시간성과 신뢰성과 같은 서비스 품질 요구사항이 동시에 달성되어야 한다. 재전송 방안은 추가적인 딜레이를 발생시키기 때문에 실시간 데이터 전송에는 사용될 수 없다. 제안 방안에서는 무선 브로드캐스팅 특성과 시간적 중계 기회 분배를 통해서 다수의 노드에게 실시간 데이터의 중계 기회를 제공함으로서 신뢰성을 향상시켰다. 시뮬레이션을 통해서 제안 방안이 실시간 데이터 전달 측면과 신뢰성 측면에서 우월함을 보였다.

REFERENCES

[1] I. F. Akyildiz et al., “A Survey on Sensor Networks,” *IEEE Communications*, Vol. 40, pp. 102-114, Aug. 2002.
[2] J. N. Al-Karaki, “Routing Techniques in

Wireless Sensor Networks: a Survey," *IEEE Wireless Communications*, vol.11, no.6, pp.6-28, Dec. 2004.

[3] T. He, J. A. Stankovic, T. F. Abdelzaher, and C. Lu, "A Spatiotemporal Communication Protocol for Wireless Sensor Networks," *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, Vol. 16, No. 10, pp. 995-1006, Oct. 2005.

[4] E. Felemban, C. Lee, and E. Ekici, "MMSPEED: Multipath Multi-SPEED Protocol for QoS Guarantee of Reliability and Timeliness in Wireless Sensor Networks," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, Vol. 5, No. 6, pp. 738-754, Jun. 2006.

[5] Özgür B. Akan and Ian F. Akyildiz, "Event-to-Sink Reliable Transport in Wireless Sensor Networks," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Vol.13, No.5, Oct.2005, pp.1003-16.

[6] J. Heo, J. Hong, and Y. Cho, "EARQ: Energy Aware Routing for Real-Time and Reliable Communication in Wireless Industrial Sensor Networks," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, Vol.5, No.1, Feb.2009, pp.3-11.

[7] Mario Di Francesco, Giuseppe Anastasi, Marco Conti, Sajal K. Das, and Vincenzo Neri, "Reliability and Energy-Efficiency in IEEE 802.15.4/ZigBee Sensor Networks: An Adaptive and Cross-Layer Approach," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol.29, No.8, Sep.2011, pp.1508-24.

[8] Y. Sankarasubramaniam, O. B. Akan, and I. F. Akyildiz, "ESRT: Event-to-Sink Reliable Transport in Wireless Sensor Networks," *in Proc. ACM Mobihoc '03*, Jun., 2003.

[9] F. Stann and J. Heidemann, "RMST: Reliable Data Transport in Sensor Networks," *in Proc. IEEE SNPA '03*, May, 2003.

[10] D. Ganesan, R. Govindan, S. Shenker, and D. Estrin, "High-Resilient, Energy-Efficient Multipath Routing in Wireless Sensor Networks," *in Proc. ACM SigMobile '01*, 2001.

[11] A. Srinivas and E. Modiano, "Minimum Energy Disjoint Path Routing in Wireless Ad-hoc Networks," *in Proc. ACM Mobicom '03*, 2003.

[12] F. Ye, H. Luo and J. Cheng, "A Two-tier Data Dissemination Model for Large Scale Wireless Sensor Networks," *in Proc. the 8th ACM Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, Sep., 2002.

[13] D. Liu, I. Stojmenovic, and X. Jia, "A Scalable Quorum based Location Service in Ad Hoc and Sensor Networks," *in Proc. 3rd IEEE Int. Conf. Mobile Ad-Hoc and Sensor Syst. (MASS '06)*, Oct. 2006.

[14] F. Yu, Y. Choi, S. Park, E. Lee, M.-S. Jin, and S.-H. Kim, "Sink Location Service for Geographic Routing in Wireless Sensor Networks," *in Proc. IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC 2008)*, Mar. 2008.

[15] B. Karp and H.T. Kung, "GPSR: Greedy Perimeter Stateless Routing for Wireless Networks," *in Proc. of the 6th Annual Int'l Conf. on Mobile Computing and Networking*, ACM Press, 2000.

[16] N. Bulusu, J. Heidemann, and D. Estrin, "GPS-less Low Cost Outdoor Localization for Very Small Devices," *IEEE Personal Communications Magazine*, vol. 7, no. 5, pp. 28-34, Oct. 2000.

[17] Scalable Network Technologies, Qualnet, [online] available: http://www.scalable-networks. com.

[18] J. Hill and D. Culler, "Mica: a Wireless Platform for Deeply Embedded Networks," *IEEE Micro*, Vol. 22, Iss. 6, pp. 12-24, Nov./Dec. 2002.

저자약력

오 승 민(Seungmin Oh) **[정회원]**

- 2009년 2월 : 충남대학교 컴퓨터공학과 (공학사)
- 2015년 8월 : 충남대학교 컴퓨터공학과 (공학박사)
- 2016년 2월 ~ 현재 : 미국 UCLA 박사후연구원

<관심분야> WSN, VANET, IoT

정 관 수(Kwansoo Jung) **[정회원]**

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

<관심분야> WSN, VANET, IoT, Security