

# 무선센서 네트워크에서 주기적 메시지에 대해 신뢰성 있는 메시지 전송을 위한 라우팅 프로토콜

## Reliable Message Routing Protocol for Periodic Messages on Wireless Sensor Networks

호아이 풍, 김 명 균\*  
(Ngo Hoai Phong<sup>1</sup> and Myung-Kyun Kim<sup>1</sup>)  
<sup>1</sup>University of Ulsan

**Abstract:** In industrial distributed control systems, sensors collect data from the physical environment periodically and transmit them to the actuators, which process the control operations based on the received data. For the effective operation of the control systems, the data transmitted by the sensors has to be delivered to the actuators reliably within the deadline, and if the message reception rate of the actuators becomes lower than a threshold, then the performance of the control systems drops greatly. This paper suggests a message routing protocol to transmit periodic messages reliably in a distributed control system based on wireless sensor networks. For reliable message transmission, the proposed protocol selects a routing path whose end-to-end message reception rate is the highest before transmitting data messages. The proposed protocol has the capability of maintaining a target message reception rate for each flow. To maintain the required target reception rate, each destination monitors the actual message reception rate periodically and transmits a feedback message to the source if it drops below the target reception rate. On receiving the feedback message, the source tries to find a new path which can satisfy the target rate. The performance of the proposed protocol has been evaluated using simulation and compared with other protocols in terms of the message reception rate, the message delay and delay jitter, and so on. The simulation results show that the proposed protocol has a higher message reception rate and comparable message delay and delay jitter to other protocols. The simulation results also show that the proposed protocol has an ability to adapt well to the dynamic network traffic change.

**Keywords:** industrial distributed control systems, wireless sensor networks, sensor routing protocols, reliable message routing protocols

### I. 서론

최근 무선센서 네트워크 기술의 발전으로 산업용 분산제어시스템에서 무선네트워크 기술들을 적용하기 위한 많은 연구개발이 이루어지고 있다. 산업용 분산제어시스템에서 각 센서들은 주변환경의 특징값을 읽어 원하는 목적지(액츄에이터)에 주기적으로 전송하고, 액츄에이터들은 센서들로부터 받은 값을 기반으로 원하는 제어동작을 수행하게 된다. 이러한 제어시스템이 원활하게 수행되기 위해서는 센서들이 주기적으로 수집한 제어데이터들이 목적지(액츄에이터)에 원하는 시간내에 신뢰성 있게 전송이 이루어져야 하고, 수신자의 메시지 수신률이 일정값 이하로 떨어질 경우에는 제어시스템의 성능이 크게 저하되게 된다[4]. 그러나 무선네트워크들은 유선네트워크에 비해 어려움이 높고 시간에 따른 채널의 특성이 동적으로 변하여 신뢰성 있는 메시지 전송을 보장하기가 어렵다.

본 논문에서는 무선센서 네트워크에서 센서들이 수집한 주기적인 메시지들을 목적지에 일정한 수신률을 보장하면서 전송하기 위한 라우팅 프로토콜을 제안한다. 신뢰성 있는 메시지 전송을 위해 제안한 프로토콜은 경로설정과정을 통해

종단간 패킷 수신률(end-to-end packet reception rate)에 기반한 신뢰성 있는 경로를 설정한 뒤 데이터 패킷 전송을 시작한다. 제안한 프로토콜은 경로설정시 송신자와 수신자는 종단간 패킷 수신률이 가장 높은 경로를 선택하여 전송하고, 일정 이상의 목표 메시지 수신률을 보장하도록 하고 있다. 경로설정 후 주기적 메시지의 데이터 패킷을 전송하는 동안 네트워크 환경 및 트래픽의 변화로 인해 경로상의 링크들의 PRR(Packet Reception Rate) 값들이 바뀔 경우, 수신자의 실제 메시지 수신률이 요구하는 목표 수신률 보다 떨어질 수 있다. 이를 위해 각 수신자는 일정시간 간격으로 실제 메시지 수신률을 측정하고 이 값이 요구하는 수신률 이하로 떨어지면 송신자에게 이를 피드백하여 새로운 경로를 선택하도록 함으로써 정해진 목표 수신률을 유지하도록 하고 있다. 제안한 프로토콜의 성능 분석을 위해 QualNet 시뮬레이터를 이용한 시뮬레이션을 통해 AODV [8], MAODV-SIM [6] 등 기존의 프로토콜들과 성능을 비교 분석하였다. 성능 시뮬레이션 결과 제안한 프로토콜이 AODV, MAODV-SIM 프로토콜에 비해 패킷 수신률이 높고, 또한 네트워크 트래픽의 변화에 따른 적응력이 높음을 보여주었다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II 장에서는 무선센서 네트워크에서 신뢰성 있는 전송을 위한 기존의 프로토콜들에 대해 기술하고, III 장에서는 본 논문에서 제안하는 주기적 메시지 트래픽에 대한 신뢰성 있는 메시지 전송 프로토콜에 대해

\* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2010. 8. 23., 수정: 2010. 11. 12., 채택확정: 2010. 12. 24.

호아이풍, 김명균: 울산대학교 컴퓨터정보통신공학부

(phongnh85@gmail.com/mkkim@ulsan.ac.kr)

※ 이 논문은 2008년 울산대학교 연구비에 의하여 연구되었음.

기술한다. IV 장에서는 제안한 프로토콜에 대한 성능 시뮬레이션에 대해 기술하고, 마지막으로 V 장에서는 결론에 대해 기술한다.

## II. 관련 연구

무선센서 네트워크를 신뢰성을 요구하는 산업용 제어시스템에 적용하기 위한 연구가 최근 많이 이루어지고 있다[4,11]. 그러나 무선 링크는 유선 링크에 비해 감쇄 및 페이딩, 그리고 인접 노드 사이의 간섭 등으로 인해 링크의 신뢰성이 떨어지는데, 이러한 문제는 저전력 통신을 하는 무선센서 네트워크와 같은 네트워크에서 더욱 심각하다[2,12,13]. 이러한 무선센서 네트워크에서 신뢰성 있는 메시지 전송을 위해서는 송신자에서 수신자까지 신뢰할 수 있는 경로를 통해 전송하기 위한 라우팅 프로토콜이 필요하다.

Wan 등[11]이 제안한 PSFQ (Pump Slowly, Fetch Quickly) 프로토콜은 무선센서 네트워크에서 노드들을 새로 프로그래밍할 경우 송신자 (싱크)에서 각 수신자 (센서노드)들로 패킷들을 신뢰성 있게 전송하기 위한 프로토콜이다. PSFQ 프로토콜은 각 링크 단위로 패킷 분실이 발생하면 해당 패킷을 가진 인접 노드에 요청하여 바로 복구하는 방법을 사용한다. 이를 위해 PSFQ 프로토콜은 각 노드가 수신한 패킷들을 일정시간 유지해야 하는 부담이 있고, 센서 노드가 센싱한 데이터 패킷을 목적지에 신뢰성 있게 전송하기 위한 응용에는 부적합하다. Stann과 Heidemann [10]이 제안한 RMST (Reliable Multi-Segment Transport) 프로토콜은 Directed Diffusion 기법[5]을 사용하여 센서 노드로부터 싱크 노드로 신뢰성 있는 데이터 전송을 위해 제안되었다. RMST 프로토콜은 센서 노드의 수집한 이벤트를 싱크 노드로 신뢰성 있는 전송을 위해 링크 단위로 재전송하는 방법을 사용하며 이를 위해 각 노드는 수신한 데이터를 캐싱해야 하는 부담과 또한 링크 단위 재전송으로 인한 부담으로 제한된 자원을 가지고 있는 센서네트워크에서 사용하기가 제한적이다. ESRT 프로토콜 [9]은 센서 노드에서 이벤트 발생시 이 이벤트를 싱크 노드에서 감지하기 위해 필요한 일정한 양의 이벤트 데이터를 받기 위해 송신센서 노드에서 이벤트 데이터를 전송하는 주기를 조절하는 방법을 사용한다. ESRT 프로토콜은 중간 노드들이 수신한 데이터를 캐싱할 필요가 없이 싱크 노드에서 수신한 데이터 양에 따라 송신 센서 노드의 전송 주기를 제어하여 무선센서 네트워크에서 효율적이지만 센서들이 정해진 주기로 데이터를 전송하는 제어시스템에는 부적합하다.

저전력 전송으로 인해 링크의 신뢰성이 낮은 무선센서 네트워크에서 신뢰성 있는 메시지 전송을 위해 다중경로를 이용하는 방법이 많이 사용되어 왔다[3,6,7]. Ganesan 등[3]은 다중경로를 이용하여 메시지를 전송하는 도중 전송실패가 발생하면 대체 경로를 통해 전송하도록 함으로써 신뢰성을 향상하는 라우팅 프로토콜을 제안하였다. 그러나 그들의 프로토콜은 일정한 정도의 신뢰성을 보장하는 기능이 없고 또한 산업용 제어시스템에서 많이 사용되는 주기적 메시지에 대한 고려를 하지 않고 있다. Nasipuri 등[7]이 제안한 AODMV (Ad hoc On-demand Multipath Distance Vector) 프로토콜은 AODV 프로토콜을 확장하여 송신자와 수신자 사이에 링크 중복이 없는 다중경로를 찾고 데이터 전송도중 링크에러가

발생할 경우 다른 경로를 이용하여 전송하도록 하고 있다. Mainaud 등[6]에 의해 제안된 MAODV-SIM 프로토콜도 AODMV 프로토콜과 마찬가지로 AODV 프로토콜을 기반으로 다중경로를 탐색하고, 그 중 하나를 기본경로로 선택하여 경로설정을 하여 데이터 전송을 시작하고, 데이터 전송도중 전송실패가 발생할 경우 다른 대체 경로를 통해 전송하는 방법을 사용한다. MAODV-SIM 프로토콜은 경로탐색시 각 경로를 구성하는 링크들의 신호강도(signal intensity) 값들 중 최솟값이 가장 큰 경로를 선택하는 방법을 사용하고 있다. 그러나 MAODV-SIM 프로토콜에서 사용하고 있는 LQI (Link Quality Indicator)나 RSSI (Received Signal Strength Indicator)와 같은 신호강도를 이용한 링크 성능평가 척도는 쉽게 구할 수 있는 반면 링크의 성능을 정확히 측정하기 위한 척도로 부적합하고[1], 경로에 속한 링크들의 신호강도(signal intensity) 값들 중 최솟값이 가장 큰 경로가 반드시 중단간 메시지 전송에서 가장 신뢰성이 높은 경로할 수 없다. 본 논문에서는 시뮬레이션을 통해 제안한 프로토콜과 MAODV-SIM 프로토콜과 메시지 신뢰성 측면에서 성능을 비교분석 하였다.

## III. 주기적 메시지에 대한 신뢰성 있는 메시지 라우팅 프로토콜

본 절에서는 패킷 수신률 (PRR: Packet Reception Rate)을 링크의 비용척도로 가지는 무선센서 네트워크에서 중단간 PRR에 기반한 신뢰성 있는 메시지 전송을 위한 라우팅 프로토콜을 기술한다.

### 1. 중단간 PRR에 기반한 신뢰성 있는 메시지 전송

PRR은 하나의 링크상에서 전송된 전체 패킷중에서 성공적으로 전송된 패킷의 수를 나타내는 값으로, 노드<sub>x</sub>와 y 사이의 링크 (x,y)의 PRR, PRR(x,y)은 다음과 같이 정의된다.

$$PRR(x,y) = \frac{\text{링크}(x,y)\text{에서 성공적으로 전송된 패킷의 수}}{\text{링크}(x,y)\text{에서 전송된 전체패킷의 수}} \quad (1)$$

네트워크상의 각 노드들은 인접노드들과의 PRR 값을 계산하여 유지하고 있으며, 이를 주기적으로 갱신하여 시간에 따라 변하는 네트워크 상태를 유지하고 있다. PRR을 링크의 비용척도로 가지는 무선센서 네트워크에서 송신자 S에서 수신자 D까지의 하나의 경로에 대한 중단간메시지 수신률,  $e2e\_PRR(S,D)$ , 값은 다음과 같이 정의된다.

$$e2e\_PRR(S,D) = \prod_{(x,y) \in \text{path}(S,D)} PRR(x,y) \quad (2)$$

여기서  $\text{path}(S,D) = (S, X_1, (X_1, X_2), \dots, (X_{k-1}, X_k), (X_k, D))$  는 노드 S에서 D까지 경로상에 있는 링크들의 집합을 의미한다.

새로운 주기적 메시지 전송을 위한 경로설정은 송신자와 수신자 사이에 RREQ (Route REQuest) 패킷과 RREP (Route REPly) 패킷 교환을 통해 이루어 진다. 새로운 주기적 메시지 ( $M_i$ )의 전송이 필요할 경우 송신자는 수신자까지의 신뢰성 있는 경로설정을 위해 RREQ 패킷을 플러딩을 통해 수신자에게 전송한다. RREQ 패킷은 새로 전송하고자 하는 주기적 메시지에 대한 식별자  $M_i$ , 메시지  $M_i$ 에 대한 주기  $P_i$ , 그리고 PRR과 TTL 필드를 가지며, TTL 필드는 RREQ 패킷이 플러딩되는 최대 홉수를 나타내고, PRR 필드는 RREQ 패킷이 전송되면서 송신자에서 현재 노드까지 RREQ 패킷이 전

송된 링크들의 PRR들을 곱한 값을 갖게 된다. RREQ 패킷이 플러딩되는 과정에서, 중간노드 y가 노드 x로부터 RREQ( $M_i, P_i, PRR, ttl$ ) 패킷을 받으면, ttl 값을 1감소시키고 ttl 값이 0이 되면 이 패킷을 버리고, 그렇지 않으면 y는 먼저 패킷의 PRR 값에 PRR(x,y) 값을 곱하여 갱신하고, 수신한 RREQ 패킷을 보관하는 메시지큐에서 메시지  $M_i$  가 존재하는지를 검사한다. 만약 메시지  $M_i$  가 존재하지 않으면 y는 RREQ( $M_i, P_i, PRR, ttl$ ) 패킷을 브로드캐스트를 통해 다시 전송하고, 이를 자신의 메시지큐에 저장한다. 메시지  $M_i$  가 자신의 메시지큐에 존재하면, y는 메시지큐에 존재하는 메시지에 대한 PRR과 수신한 메시지의 PRR 값을 비교하여, 수신한 메시지의 PRR 값이 크면, 새로 수신한 RREQ 패킷을 브로드캐스트를 통해 다시 전송하고 메시지큐를 새로 수신한 메시지로 갱신한다. 만약 수신한 메시지의 PRR 값이 메시지큐에 존재하는 메시지에 대한 PRR 값보다 크지 않으면, 수신한 RREQ 패킷을 버리게 된다. 이와 같은 플러딩을 과정을 통해 RREQ 패킷이 수신자 노드에 전송이 되면, 수신자에 도착한 RREQ 패킷들은 PRR 필드에 송신자에서 수신자까지 거처온 모든 링크의 PRR 값을 곱한 값을 갖게 되고, 수신자는 이들 중에서 가장 큰 PRR 값을 가진 RREQ 패킷에 대해 RREP 패킷으로 응답함으로써 종단간 메시지 수신률이 가장 큰 경로를 선택하게 된다.

그림 1은 이와 같은 RREQ 패킷의 전송과정의 예를 보여 준다. 위 그림에서 송신자 S가 주기  $P_i$ 를 갖는 메시지  $M_i$ 의 전송이 필요하면, RREQ( $M_i, P_i, 1, 5$ ) 패킷을 플러딩을 통해 수신자 D에게 전송한다. 이 RREQ 패킷을 인접노드 a와 b가 받으면, a와 b는 각각 PRR 값과 ttl 값을 갱신하고, RREQ( $M_i, P_i, 1, 4$ ) 패킷과 RREQ( $M_i, P_i, 0.7, 4$ ) 패킷을 브로드캐스트를 통해 다시 전송하고, 이들을 자신의 메시지큐에 저장한다. 또한 a와 b는 수신자에서 송신자로의 RREP 응답패킷 전송을 위해 RREQ 패킷을 받은 노드로 역경로(backward path)를 설정하게

된다. 이어서 b가 전송한 RREQ( $M_i, P_i, 0.7, 4$ ) 패킷을 a가 받으면, a는 ttl 값과 수신한 메시지의 PRR 값을 갱신( $0.63 = 0.7*0.9$ )하고, 이 갱신된 PRR 값이 자신의 메시지큐에 있는 메시지  $M_i$  에 대한 PRR 값(1) 보다 작으므로 수신한 RREQ 패킷을 버리게 된다. 반면, a가 전송한 RREQ( $M_i, P_i, 1, 4$ ) 패킷을 b가 받으면, b는 수신한 메시지의 PRR 값을 갱신( $0.9 = 1*0.9$ )하고, 이 갱신된 PRR 값이 자신의 메시지큐에 있는  $M_i$  에 대한 PRR 값(0.7) 보다 크므로 수신한 RREQ( $M_i, P_i, 0.9, 3$ ) 패킷을 브로드캐스트를 통해 다시 전송하고, 메시지큐에 있는 기존의 메시지  $M_i$  를 새로 수신한 RREQ( $M_i, P_i, 0.9, 3$ ) 패킷으로 갱신하게 된다. 이런 과정을 통해 RREQ 패킷은 여러 경로를 통해 수신자에게 전송이 되고, 수신자에 도착한 각 RREQ 패킷은 전송된 경로에 속하는 모든 링크들의 PRR의 곱한 값, 즉 해당 경로의 종단간 PRR,  $e2e\_PRR(S,D)$ 을 가지게 된다. 수신자는 도착한 RREQ 패킷들 중에서 가장 큰 PRR 값을 가진 RREQ 패킷에 대해 RREP 패킷, RREP( $M_i, P_i, e2e\_PRR(S,D)$ ), 으로 응답을 보냄으로써 가장 큰 종단간 PRR 값을 가진 경로를 선택하게 된다. 예를 들어 앞의 그림 1에서 송신자 S가 RREQ 패킷을 플러딩하게 되면 수신자는 아래와 같이 3개의 경로를 통해 RREQ 패킷을 수신하게 된다.

- 경로1: (S,a)→(a,c)→(c,D) : RREQ( $M_i, P_i, 0.72, 3$ )
- 경로2: (S,b)→(b,e)→(e,D) : RREQ( $M_i, P_i, 0.63, 3$ )
- 경로3: (S,a)→(a,b)→(b,e)→(e,D) : RREQ( $M_i, P_i, 0.81, 2$ )

수신자 D는 이 중에서 RREQ( $M_i, P_i, 0.81, 2$ ) 패킷을 선택하고 이에 대한 응답 패킷 RREP( $M_i, P_i, 0.81$ )을 송신자로 전송하게 된다. RREP 패킷은 RREQ 패킷 전송과정에서 설정된 역경로를 통해 송신자에게 전송되고, RREP 패킷이 송신자에게 전송되는 과정에서 송신자가 수신자에게 전송하는 데이터 패킷을 위한 순방향경로(forward path)를 설정하게 된다. 그림 1(b)는 송신자 S에서 D 사이에 설정된 경로와 경로상의 각 노드에 유지되는 메시지큐 정보를 보여준다. 설정된 경로상의 노드 x는 자신을 통해 전송되는 각 메시지 경로에 대해 하나의 항 ( $M_i, P_i, BP_i, FP_i, PRR_i$ ) 을 갖는 메시지큐를 유지하는데,  $BP_i$  와  $FP_i$  는 각각 설정된 경로에서 이전노드와 다음노드를 나타내고,  $PRR_i$  는 송신자에서 자신까지의 종단간 PRR 값을 나타낸다. 송신자가 RREP 패킷을 받으면 송신자는 설정된 경로를 통해 주어진 주기  $P_i$  에 따라 데이터 패킷 전송을 시작하게 된다. 이렇게 하나의 주기적 메시지 플로우에 속하는 패킷들을 가장 큰 종단간 PRR 값을 갖는 경로를 통해 전송하도록 함으로써 송수신자 사이의 메시지 전송률을 유지하게 된다.

2. 종단간 피드백 제어를 이용한 메시지 전송 신뢰도 유지

하나의 링크의 PRR 값은 송신노드와 수신노드에서의 간섭 및 혼잡정도에 따라 다르고 시간에 따라 네트워크 트래픽이 변함에 따라 달라지게 된다. 이렇게 동적으로 변하는 상황을 반영하기 위하여 각 노드는 일정한 시간간격으로 링크 PRR 값을 갱신하게 된다. 링크 PRR 값을 갱신하기 위하여 각 노드는 전체 시간을 일정시간 간격으로 나누고, 데이터 패킷을 전송하면서 각 구간내에서 전송된 패킷들에 대한 PRR 값을 측정한다. 이렇게 새로 측정된 PRR 값 (sampledPRR)과 현재

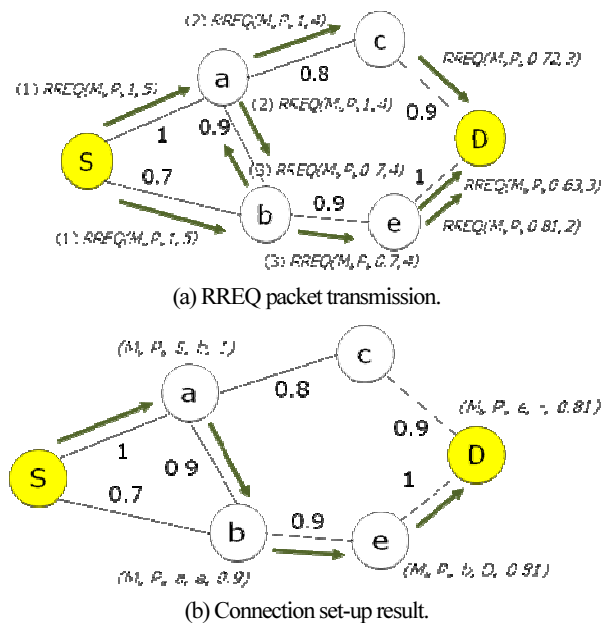


그림 1. 경로설정 과정 예.  
Fig. 1. Connection set-up process.

의 링크 PRR 값 (linkPRR)을 이용하여 다음과 같이 다음 구간에서 사용할 링크 PRR을 갱신하게 된다.

$$\text{linkPRR} = \alpha * \text{linkPRR} + (1 - \alpha) * \text{samplerPRR}, \quad (3)$$

$$(0 \leq \alpha \leq 1)$$

하나의 주기적 메시지 플로우에 속하는 패킷들이 전송되는 도중 해당 경로상에 있는 링크의 PRR 값이 변경되게 되면 중단간 메시지 전송률이 변하게 된다. 따라서 제안한 프로토콜에서는 수신자의 메시지 수신률이 목표 수신률 이상

```

// 송신자 동작
when (새로운 주기적 메시지  $M_i$  전송이 필요하거나 또는 수신자로부터  $NewRREQ$  패킷을 수신할 경우)
{
     $RREQ(M_i, P_i, 1, maxTTL)$  패킷 브로드캐스팅;
     $t\_RREP = Time\_for\_RREP$ ; //RREP 패킷 수신대기시간
}

when (주기적 메시지  $M_i$  에 대한 RREP 패킷 수신)
{
     $t\_RREP$  타이머 취소;
    주기  $P_i$  에 따라 주기적 메시지  $M_i$  전송 시작;
}

// 수신자, 노드 D, 동작
when ( $RREQ(M_i, P_i, PRR, ttl)$  패킷을 노드 x로부터 수신할 경우)
{
     $PRR = PRR * PRR(x, D)$ ;
    수신한  $RREQ(M_i, P_i, PRR, ttl)$  패킷을 RREQ 패킷큐에 저장;
    if (메시지  $M_i$  에 대한 첫번째 RREQ 패킷이면)
         $t\_RREQ = Time\_for\_RREQ$ ; //RREQ 패킷 수신대기시간;
}

when ( $t\_RREQ$  타임아웃 발생)
{
     $RREQ(M_i, P_i, PRR, ttl) \leftarrow selectRREQ(target\_e2e\_PRR)$ ;
    // selectRREQ: target_e2e_PRR 를 만족하는 RREQ 패킷중에서 PRR 값이 가장 큰 RREQ 패킷을 선택하는 함수
    송신자에게  $RREP(M_i, P_i, PRR)$  전송;
}

// 중간노드, 노드 y, 동작
when ( $RREQ(M_i, P_i, PRR, ttl)$  패킷을 노드 x로부터 수신할 경우)
{
     $ttl = ttl - 1$ ;
    if ( $ttl = 0$ )  $RREQ$  패킷을 버림;
     $PRR = PRR * PRR(x, y)$ ;
    if ( $M_i$  가 메시지큐에 존재하고,  $PRR \leq$  메시지큐의 PRR)
    {
        수신한  $RREQ$  패킷을 버림; exit;
    }
     $RREQ(M_i, P_i, PRR, ttl)$  패킷을 브로드캐스팅;
    ( $M_i, P_i, x, NULL, PRR$ ) 을 메시지큐에 저장;
}

when ( $RREP(M_i, P_i, PRR)$  패킷을 노드 x로부터 수신할 경우)
{
    ( $M_i, P_i, BP_i, FP_i, PRR_i$ )  $\leftarrow$  메시지  $M_i$  에 대한 메시지큐 항;
     $RREP(M_i, P_i, PRR)$  패킷을 노드  $BP_i$  에 전송;
     $FP_i = x$ ;
}

```

그림 2. 송신자, 수신자, 중간노드 동작.

Fig. 2. Operation of source node, destination node, and intermediate nodes.

을 유지하도록 하기 위해 수신자는 일정시간 간격으로 실제 메시지 수신률을 계산하고, 메시지 수신률이 목표 수신률 이하로 떨어지게 되면 송신자에게  $NewRREQ$  ( $New Route REQuest$ ) 패킷을 전송하여 이를 알리게 되고, 송신자는  $NewRREQ$  패킷을 받으면 RREQ 패킷 플러딩을 통해 새로운 메시지 전송경로를 설정하도록 함으로써 정해진 목표 수신률을 유지하도록 한다.

링크에러가 발생할 경우, 제안한 프로토콜은 AODV 프로토콜과 같이 링크에러를 탐지한 노드는 송신자에게 RERR ( $Route ERRor$ ) 패킷을 전송하고 송신자는 새로운 경로를 탐색하기 위해 RREQ 패킷을 플러딩을 통해 전송한다. 그러나 제안한 프로토콜은 경로설정 과정에서 안정적이고 신뢰성 있는 경로를 선택하기 때문에 다른 프로토콜들에 비해 데이터 패킷 전송도중 링크에러가 발생하는 빈도가 적어 RREQ 패킷 플러딩으로 인한 오버헤드가 적다(그림 9 시뮬레이션 참조). 그림 2는 제안하는 프로토콜을 위한 송신자, 수신자, 그리고 중간노드들이 수행하는 동작을 나타낸다.

#### IV. 시뮬레이션

제안한 프로토콜의 성능분석을 위해 QualNet 시뮬레이터를 통한 시뮬레이션을 통해 기존의 AODV프로토콜[8], MAODV-SIM 프로토콜[6] 등과 비교를 하였다. MAODV-SIM 프로토콜은 신호강도(signal intensity)를 링크의 비용으로 갖는 무선센서네트워크에서 신뢰성 있는 경로선택을 위해 송신자와 수신자 사이의 경로 중에서 각 경로를 구성하는 링크들의 신호 세기의 최솟값이 가장 큰 경로를 선택하는 방법을 사용하고 있다. LQI (Link Quality Indicator)나 RSSI (Received Signal Strength Indicator)와 같은 하드웨어 기반의 링크성능 평가척도는 쉽게 구할 수 있는 반면에 성능평가의 정확성이 떨어지는 단점이 있다[1]. 본 논문에서는 링크의 신뢰성 성능평가 척도로 PRR을 사용하고 있으며, 따라서 MAODV-SIM 프로토콜과 성능 비교를 위해 본 논문에서는 링크 성능평가 척도를 PRR을 사용한 네트워크에서 MAODV-SIM 프로토콜의 성능을 측정하여 제안한 프로토콜과 성능을 비교하였다. 표 1은 성능분석을 위한 시뮬레이션 조건을 나타낸다. 전체 네트워크는 600m X 600m 크기에 75 - 200 개의 노드를 랜덤하게 배치하고 각 노드의 전송반경은 100m가 되도록 하였으며, MAC 프로토콜은 IEEE 802.11 DCF를 사용하였다. 또한 수신자에서 RREQ 패킷을 기다리는 기본 대기 시간( $\Delta d$ )은 250ms로 하였으며, RREQ 패킷 대기 시간( $\Delta d$ ) 변화에 따른 성능분석(그림 7)을 추가하였다. 네트워크 트래픽 변화에 따른 각 링크의 PRR 값 갱신 주기는 10s로 하였고, 각 주기적 메시지

표 1. 시뮬레이션 파라미터.

Table 1. Simulation parameters.

시뮬레이션 시간	30 분
네트워크 크기	600m x 600m
MAC 프로토콜	802.11 DCF
노드 전송반경	100m
RREQ 패킷 수신 대기시간( $\Delta d$ )	250ms
데이터 패킷 전송 주기	400ms
PRR 값 갱신 주기	10s

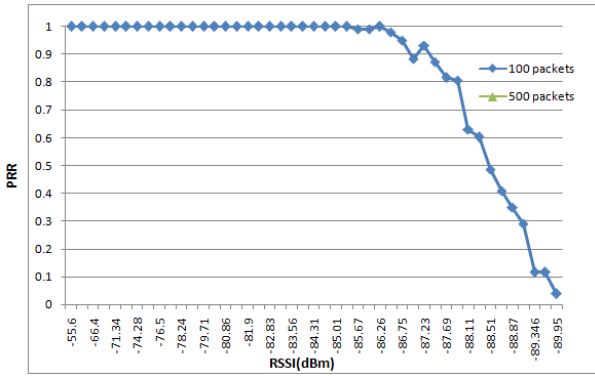


그림 3. RSSI 값에 따른 PRR 값.  
Fig. 3. PRR according to RSSI value.

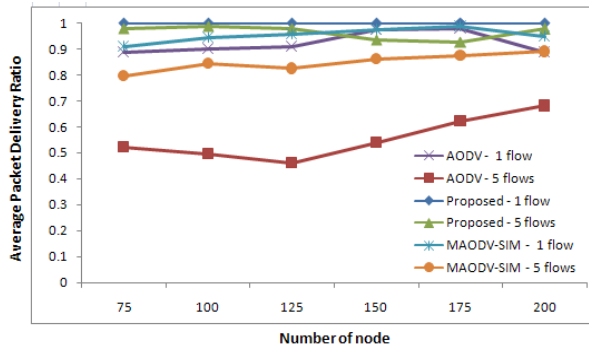


그림 4. 노드수 증가에 따른 종단간 패킷 수신률.  
Fig. 4. Packet reception rate in terms of node density.

들이 경로설정 후 데이터를 전송하는 주기는 400ms로 설정하였다.

시뮬레이션을 위해 각 노드는 인접노드 사이의 링크에 대해 PRR 값을 유지하고 있는데, 처음에는 초깃값을 할당받았 이후에는 PRR 값 갱신주기 (10초)에 따라 실제 PRR 값을 모니터링하여 링크 PRR 값을 갱신하게 된다. 링크 PRR의 초깃값 할당을 위해 3m 간격으로 일직선상에 노드들을 배치하고 노드 1 (가장 왼쪽의 노드)에서 500개의 패킷을 브로드캐스트를 통해 전송하고 나머지 노드들은 패킷을 수신하는 실험을 수행하였다.

그림 3은 실험 결과 각 노드에서 수신한 신호의세기 (Received Signal Strength Indicator: RSSI) r에 따른 패킷의 수신률, PRR(r), 을 나타내며, 이 PRR(r) 값은 다른 트래픽이 없는 네트워크에서 수신한 신호의세기에 대한 링크의 패킷의 수신률을 나타낸다. 네트워크 초기에 각 노드들은 인접노드 사이에 hello 패킷을 교환하며, 인접 노드로 부터 수신한 hello 패킷의 신호세기가 r일 경우 해당 링크의 PRR 초깃값을 PRR(r)로 할당하여 시뮬레이션을 수행하였다.

시뮬레이션은 600m x 600m 크기의 네트워크에서 노드의 수를 75개에서부터 시작하여 25개씩 증가시키면서 주기적 메시지 플로우에 대한 데이터 패킷의 수신률과 전송된 데이터 패킷들에 대한 평균 지연시간 및 지연시간지터를 측정하였다. 각 주기적 메시지 플로우들은 각각 서로 다른 송신자와 수신자를 갖고 있고 실험은 1개에서 5개의 플로우까지 증가하면서 수행을 하였다. 그림 4는 노드 수 및 플로우 수의

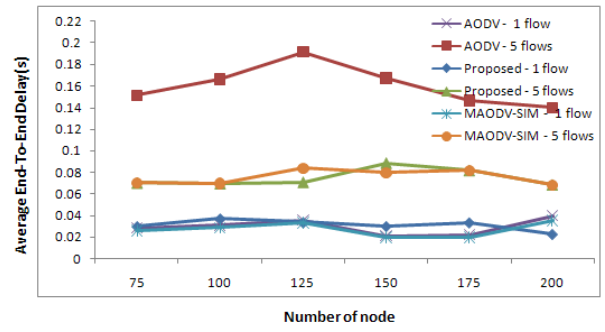


그림 5. 노드 수 증가에 따른 데이터 패킷들의 평균 지연시간.  
Fig. 5. Average delay of data packets in terms of node density.

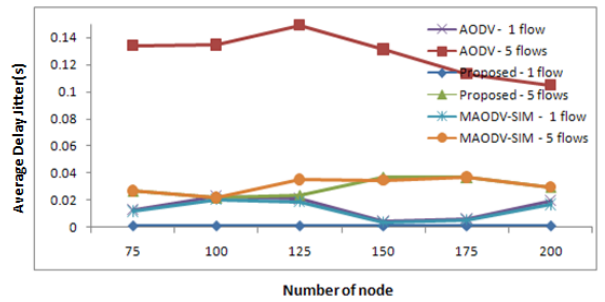


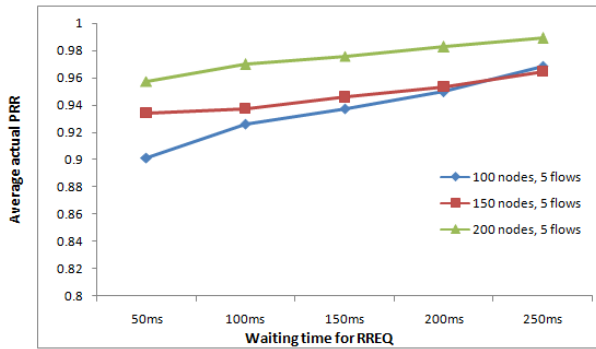
그림 6. 노드 수 증가에 따른 데이터 패킷들의 평균 지연시간 지터.  
Fig. 6. Average delay jitter of data packets in terms of node density.

증가에 따른 종단간 패킷 수신률을 나타낸다. 그림 4에서 보는 바와 같이 제안한 프로토콜의 평균 패킷 수신률이 AODV와 MAODV-SIM 프로토콜에 비해 높았고 이러한 차이는 플로우 수가 증가함에 따라 더욱 커짐을 보여주고 있다. 따라서 신뢰성 있는 메시지 전송을 위해서는 구성하는 경로들의 PRR들의 곱 (e2e\_PRR)이 가장 큰 경로를 선택하는 제안한 프로토콜이 구성하는 링크들의 PRR들의 최솟값이 가장 큰 경로를 선택하는 MAODV-SIM 프로토콜 보다 좋은 선택임을 알 수 있다.

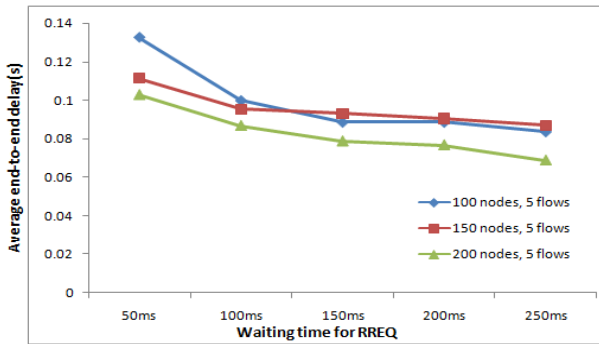
그림 5는 노드 수 및 플로우 수의 증가에 따른 전송되는 데이터 패킷들의 평균 지연시간을 보여준다. 그림에서 보는 바와 같이 제안한 프로토콜은 플로우 수에 따른 평균 지연시간이 MAODV-SIM 프로토콜과는 비슷한 지연시간을 가짐을 보였다. 반면 AODV 프로토콜의 경우에는 1개의 플로우의 경우에는 지연시간이 비슷하였지만 트래픽이 증가함에 (5개의 플로우의 경우) 따라 지연시간을 커짐을 알 수 있다.

그림 6은 노드 수 및 플로우 수의 증가에 따른 데이터 패킷들의 평균 지연시간 지터를 나타낸다. 그림 5에서 보는 것과 같이 제안한 프로토콜의 경우 지연시간 지터가 AODV 프로토콜과 MAODV-SIM 프로토콜에 비해 아주 작음을 알 수 있다. 이는 제안한 프로토콜이 선택하는 경로가 신뢰성이 있고 지연시간이 어느 정도 일정한 안정된 경로라는 것을 보여준다.

제안한 프로토콜에서 수신자는 송신자로부터 일정시간 동안 ( $\Delta t$ ) 대기하며 RREQ 패킷을 수신하고, 수신된 RREQ 패킷중에서 종단간 패킷 수신률이 가장 큰 경로를 선택한다. 따라서 대기시간에 따라 선택하는 경로가 달라질 수 있다.



(a) Packet reception rate according to the waiting time of RREQ.



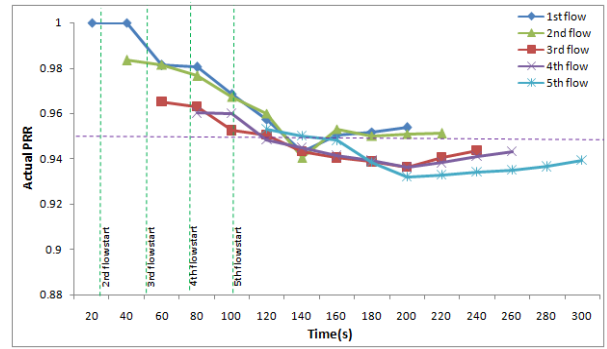
(b) End-to-end delay according to the waiting time of RREQ.

그림 7. 수신자의 대기시간 증가에 따른 프로토콜 성능.

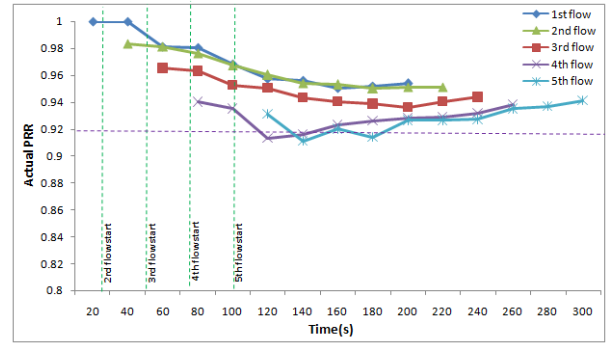
Fig. 7. Performance according to the waiting time ( $\Delta d$ ) at the destination.

본 시뮬레이션에서는 수신자에서 대기시간이 증가함에 따라 성능 변화를 측정하였다(그림 7). 시뮬레이션은 첫번째 RREQ 패킷이 도착한 후 대기시간을 50ms 간격으로 증가해 가며 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 7(a)에서 보듯이 수신자에서 대기시간이 증가함에 따라 실제 패킷 수신률은 조금씩 증가하였고 종단간 평균 패킷 전송 지연시간은 점차 감소함을 보여주었다. 이러한 결과는 제한한 프로토콜이 RREQ 패킷 대기시간이 증가함에 따라 조금 더 신뢰성 있는 경로를 선택함을 알 수 있다.

제한한 프로토콜은 새로운 주기적 플로우 전송이 필요한 경우, 송신자와 수신자 사이에 RREQ 패킷과 RREP 패킷 교환을 통해, 목표 수신률 이상인 경로중에서 종단간 패킷 수신률이 가장 높은 경로를 설정한 뒤 데이터 패킷을 전송한다. 그러나 데이터 패킷 전송 도중 새로운 트래픽이 추가되어 링크 PRR이 변할 경우 수신자에서 수신하는 실제 수신률이 목표 수신률 이하로 떨어질 수 있다. 이럴 경우 수신자는 이를 송신자에게 NewRREQ 패킷을 전송하여 알리고, 송신자는 새로운 경로설정 과정을 통해 목표 수신률을 만족하는 경로를 찾게 된다. 새로운 경로설정 과정에서 목표 수신률을 만족하는 새로운 경로를 찾게 되면 송신자는 새로운 경로를 통해 데이터 패킷을 전송하게 되고, 만약 목표 수신률을 만족하는 경로가 존재하지 않을 경우 수신자는 목표 수신률을 낮추어 데이터 패킷 전송을 그대로 유지하게 된다. 본 논문의 피드백 메커니즘에 대한 시뮬레이션을 위해 처음 정해진 목표 수신률을 갖는 하나의 주기적 메시지를 생성하고 데이터 패킷



(a) When target\_e2e\_PRR = 0.95.

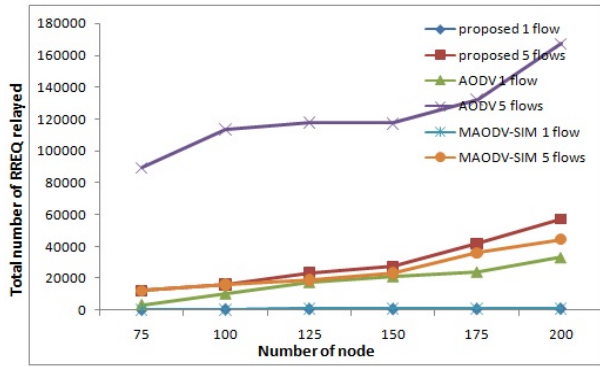


(b) When target\_e2e\_PRR = 0.92.

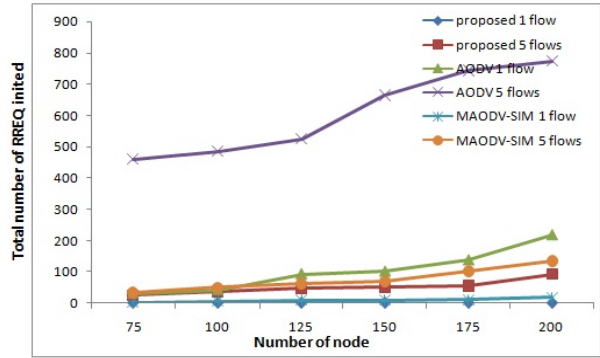
그림 8. 트래픽 증가에 따른 종단간 패킷 수신률 변화.

Fig. 8. End-to-end Packet reception rate according to the traffic increase.

을 전송하는 도중 일정한 간격으로 새로운 주기적 메시지들을 추가함에 따라 각 수신자에서의 실제 패킷 수신률을 측정하였다. 그림 8은 첫번째 주기적 메시지에 대해 경로설정 후 데이터 패킷을 전송하는 도중, 25초 간격으로 주기적 메시지들을 추가해 가며 각 주기적 메시지들에 대한 패킷 수신률을 나타낸다. 각 수신자들의 목표 수신률은 0.95와 0.92로 설정하여 각각의 경우에 대해 시뮬레이션을 수행하였으며, 수신자들은 평균 패킷 수신률을 20초 간격으로 모니터링하였다. 목표 수신률이 0.95인 경우(그림 8(a)), 첫번째와 두번째 주기적 메시지는 새로운 주기적 메시지들이 추가 됨에 따라 실제 패킷 수신률이 점차 감소하였고, 6번째 주기적 메시지 추가 후 수신률이 목표 수신률 이하로 떨어져서 피드백 메커니즘에 의해 새로운 경로를 설정하여 160초 이후에는 목표 수신률 이상을 만족함을 보여주고 있다. 반면 나머지 주기적 메시지들의 경우에는 6번째 주기적 메시지 추가 후 수신률이 목표 수신률 이하로 떨어져서 피드백 메커니즘에 의해 새로운 경로를 탐색하였지만 목표 수신률 이상을 만족하는 경로를 찾지 못하여 목표 수신률을 낮추어 전송이 계속됨을 보여주고 있다. 반면, 목표 수신률이 0.92인 경우(그림 8(b)), 첫번째, 두번째, 세번째 주기적 메시지들의 경우에는 새로운 주기적 메시지들이 추가 됨에 따라 실제 패킷 수신률이 점차 감소하였지만 계속 목표 수신률 이상을 유지하였고, 네번째와 다섯번째 주기적 메시지들의 경우에는 목표 수신률 이하로 떨어진 뒤 피드백 메커니즘에 의해 다시 목표 수신률 이상을 회복함을 보여 주고 있다.



(a) Total number of RREQ packets according to the number of nodes.



(b) Total number of RREQ packets retransmitted at the source according to the number of nodes.

그림 9. 노드 수 증가에 따른 프로토콜 오버헤드.

Fig. 9. Protocol overhead in terms of node density.

제안한 프로토콜은 신뢰성을 보장하기 위해 종단간 경로 설정을 위해 링크 척도로 PRR을 사용하고 있지만, 센서 네트워크의 특성상 프로토콜 오버헤드가 적어야 한다. 본 논문에서는 제안한 프로토콜의 오버헤드를 분석하기 위하여 경로설정과정에서 발생하는 RREQ 패킷의 수를 측정하여 비교하였다. 각 프로토콜은 하나의 주기적 메시지에 대해 경로를 설정하고 데이터 패킷을 정해진 주기에 따라 전송하고, 전송도중 링크 에러가 발생할 경우 송신자에 RERR (Route Error) 패킷을 전송하여 새로운 경로를 설정하게 된다. 본 시뮬레이션에서 각 주기적 메시지들은 경로설정 후 400ms 주기로 총 500개의 데이터 패킷들을 주기적으로 전송하며, 시뮬레이션 시간 동안 네트워크 전체에서 발생한 RREQ 패킷의 총 수와 각 송신자에서 전송한 RREQ 패킷의 수를 비교하였다. 그림 9(a)에서 보듯이 제안한 프로토콜에서 발생한 RREQ 패킷의 수가 AODV 프로토콜에 비해 월등히 적고, MAODV-SIM 프로토콜 보다는 약간 적은 것을 알 수 있었다. 이러한 결과는 그림 9(b)에서 보는 것과 같이 제안한 프로토콜이 각 송신자들이 전송한 RREQ 패킷의 수에서 다른 프로토콜에 비해 적었기 때문이며, 이러한 사실은 제안한 프로토콜에서 선택한 경로가 다른 프로토콜에서 선택한 경로에 비해 안정된 경로라는 것을 의미한다.

V. 결론

산업용 무선센서 네트워크에서 송수신자 사이의 신뢰성 있는 메시지 전송은 제어시스템의 원활한 동작을 위해 매우

중요하다. 본 논문에서는 PRR (Packet Reception Rate)을 링크의 성능평가 척도로 가지는 무선센서 네트워크에서 주기적 메시지에 대해 종단간 신뢰성 있는 전송을 위한 라우팅 프로토콜을 제안하였다. 제안한 프로토콜은 주기적 메시지에 대해 신뢰성 있는 메시지 전송을 위해 경로탐색과정을 통해 경로를 구성하는 링크들의 PRR 값들의 곱이 가장 큰 경로를 선택하여 경로를 설정한 후 데이터 패킷들을 전송한다. 또한 수신자는 경로 설정 후 실제 패킷 수신률을 일정시간 간격으로 모니터링하고 패킷 수신률이 목표 수신률 이하로 떨어지면 이를 송신자에 피드백하여 송신자가 목표 수신률을 만족하는 새로운 경로를 탐색하도록 함으로써 주어진 주기적 메시지 플로우에 대해 일정한 목표 수신률을 보장하기 위한 방법을 사용한다. 제안한 프로토콜의 성능분석을 위해 QualNet 시뮬레이터를 이용하여 시뮬레이션을 수행하고 기존의 AODV프로토콜과 MAODV-SIM 프로토콜과 성능비교를 하였다. 시뮬레이션 결과 제안한 프로토콜은 AODV 프로토콜과 MAODV-SIM 프로토콜에 비해 패킷 수신률이 우수하여 신뢰성 있는 메시지 전송을 함을 보여주었다. 또한 제안한 프로토콜은 AODV 프로토콜과 MAODV-SIM 프로토콜에 비해 전송되는 데이터 패킷들의 평균 전송지연 시간은 약간 큰 반면에 평균 전송지연 시간 지터는 작아 매우 안정된 경로를 선택하여 전송함을 보여 주었다.

본 논문에서 제안한 프로토콜은 각 주기적 메시지에 대해 목표 수신률을 만족하도록 하기 위해 피드백 메커니즘을 사용하여, 송신자는 목표 수신률을 보장하는 새로운 경로를 탐색하게 되는데 네트워크 상황에 따라 목표 수신률 이상을 보장하는 경로를 찾을 수 없는 경우가 발생할 수 있다. 이런 경우 본 논문에서는 목표 수신률을 낮추어 현재 전송을 유지하도록 하고 있는데, 다중 경로를 이용하는 방법이 하나의 해결책이 될 수 있다. 현재 본 논문을 다중경로를 이용하여 신뢰성을 보장하는 프로토콜에 대해 연구를 진행 중이다.

참고문헌

- [1] N. Baccour et al., "A comparative simulation study of link quality estimators in wireless sensor networks," *Proc. MASCOTS '09*, London, pp. 1-10, Sep. 2009.
- [2] A. Cerpa, J. L. Wong, L. Kuang, M. Potkonjak, and D. Estrin, "Statistical model of lossy links in wireless sensor networks," *Proc. IPSN'05*, Los Angeles, USA, pp. 81-88, Apr. 2005.
- [3] D. Ganesan et al., "Highly resilient energy efficient multipath routing in wireless sensor networks," *Proc. of the 2nd ACM International Symposium on Mobile ad Hoc Networking & Computing*, New York, USA, 2001.
- [4] V. C. Gungor and G. P. Hancke, "Industrial wireless sensor networks: challenges design principles, and technical approaches," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 56, no. 10, pp. 4258 - 4265, Oct. 2009.
- [5] C. Intanagonwiwat, R. Govindan, and D. Estrin, "Directed diffusion: A scalable and robust communication paradigm for sensor networks" *Proc. ACM Mobicom*, Boston, MA, 2000.
- [6] B. Mainaud, M. Zekri, and H. Afifi, "Improving routing reliability on wireless sensors network with emergency paths," *Proc. of the 2008, The 28th International Conference on Distributed Computing Systems Workshops*, Beijing, pp. 545-

- 550, Jun. 2008.
- [7] A. Nasipuri and S. R. Das, "On-demand multipath routing for mobile ad hoc networks," *Proc. of the 8th Int. Conf. On Computer Communications and Networks (IC3N)*, Boston, pp. 64-70, Oct. 1999.
- [8] C. Perkins, E. Belding-Royer, and S. Das, "Ad hoc on-demand distance vector (AODV) routing," *Internet experimental RFC 3561*, July 2003.
- [9] Y. Sankarasubramaniam, O. B. Akan, and I. F. Akyildiz, "Esrt: Event-to-sink reliable transport in wireless sensor networks," *IEEE/ACM Transactions on Networking (TON)*, vol. 13, no. 5, Oct. 2003.
- [10] F. Stann and J. Heidemann, "RMST: Reliable data transport in sensor networks," *Proc. SNPA'03*, 2003.
- [11] C. Y. Wan, A. T. Campbell, and L. Krishnamurthy, "PSFQ: a reliable transport protocol for wireless sensor networks," *Proc. ACMWSNA*, Atlanta, GA, pp. 1-11, Sep. 2002.
- [12] A. Willig, "Recent and emerging topics in wireless industrial communications: A selection," *IEEE Trans. on Industrial Informatics*, vol. 4, no. 2, May 2008.
- [13] A. Woo, T. Tong, and D. Culler, "Taming the underlying challenges of reliable multihop routing in sensor networks," *Proc. of the 1st international conference on Embedded networked sensor systems*, New York, USA, 2003.
- [14] J. Zhao and R. Govindan, "Understanding packet delivery performance in dense wireless sensor networks," *Proc. of the 1st international conference on Embedded networked sensor systems*, New York, USA, 2003.
- [15] Qualnet simulator, <http://www.scalable-networks.com>.



#### 호아이 풍

2003년~2007년 베트남국립대 학사과정.  
2007년~2009년 소프트웨어 회사 경력.  
2009년~현재 울산대학교 컴퓨터정보통신공학 석사과정. 관심분야는 무선 센서네트워크, 실시간 라우팅 프로토콜.



#### 김 명 군

1984년 서울대학교 컴퓨터공학과 졸업.  
1986년, 1996년 한국과학기술원 전산학과 졸업(석사, 박사). 1998년~현재 울산대학교 전기공학부 교수. 관심분야는 산업용 네트워크, 실시간 통신.