

# 대규모 무선 센서 망에서 종단 간 신뢰성 보장을 위한 기회적 다중경로 라우팅 방안

김천용\*, 정관수°, 김상하\*

## Opportunistic Multipath Routing Scheme for Guaranteeing End-to-End Reliability in Large-Scale Wireless Sensor Networks

Cheonyong Kim\*, Kwansoo Jung°, Sang-Ha Kim\*

### 요약

무선 센서 망은 제한된 통신범위를 가지는 수많은 센서 노드들로 구성된다. 따라서 직접 통신이 가능하지 않은 노드들 사이에는 다중 홉으로 통신하게 되며, 이는 패킷 전달의 신뢰성을 저하시킨다. 다중경로 라우팅과 기회 라우팅은 무선 센서 망에서 신뢰성을 보장하기 위한 대표적인 연구들이다. 기존 방안들은 종단 간 홉 수가 작은 경우 효과적으로 신뢰성을 향상시키지만, 홉 수가 커질수록 성능이 급격히 떨어진다. 따라서 기존 방안들은 종단 간 홉 수가 큰 대규모 무선 센서 망에는 적합하지 않다. 본 논문에서는 대규모 무선 센서 망에서 신뢰성 보장을 위한 기회적 다중경로 라우팅 방안을 제안한다. 서로 다른 특성 때문에 다중경로 라우팅과 기회 라우팅을 동시에 적용하는 것은 매우 어렵다. 제안방안은 구간 단위의 라우팅을 통해 두 방안을 동시에 적용함으로써 종단 간 신뢰성을 크게 향상시킨다. 또, 기회적 다중경로 라우팅을 통해 요구되는 신뢰성을 보장하기 위해 구간 신뢰성 개념을 제안한다. 각 구간에서의 신뢰성을 요구되는 종단 간 신뢰성보다 높게 설정함으로써 종단 간 신뢰성을 보장할 수 있다. 성능 평가 결과는 제안방안이 기존 방안에 비해 대규모 무선 센서 망에서의 신뢰성 보장에 더 적합함을 보인다.

**Key Words** : Wireless sensor networks, Large-scale, Multi-hop, Reliability, Routing protocol

### ABSTRACT

Wireless sensor networks (WSNs) consist of a lot of sensor nodes having limited transmission range. So multi-hop transmission is used for communication among nodes but the multi-hop transmission degrade the end-to-end reliability. Multipath routing and opportunistic routing are typical approaches for guaranteeing end-to-end reliability in WSNs. The existing protocols improve the reliability effectively in small networks but they suffer from rapid performance degradation in large networks. In this paper, we propose the opportunistic multipath routing protocol for guaranteeing end-to-end reliability in large WSNs. Applying multipath routing and opportunistic routing simultaneously is very hard because their conflicting routing features. The proposed protocol applies these approaches simultaneously by section-based routing thereby enhancing end-to-end reliability. Additionally, the proposed protocol guarantees required reliability by the concept of section reliability. The

\* 이 논문은 2015년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(NRF-2015R1A2A2A01006442)

• First Author : Chungnam National University Department of Computer Engineering, cykim@cclab.cnu.ac.kr, 학생회원

° Corresponding Author : Chungnam National University Department of Computer Engineering, ksjung79@cnu.ac.kr, 정회원

\* Chungnam National University Department of Computer Engineering, shkim@cnu.ac.kr, 중신회원

논문번호 : KICS2015-06-174, Received June 8, 2015; Revised July 29, 2015; Accepted October 6, 2015

section reliability over a certain level might satisfy required end-to-end reliability. Our simulation results show that the proposed protocol is more suitable for guaranteeing reliability than existing protocols in large-scale WSNs.

## I. 서론

무선 센서 망은 화재 경보, 침입 감시 등 다양한 긴급 응용(emergency application)에 활용될 수 있다. 따라서 신뢰성 있는 데이터 전달은 무선 센서 망에 적용되는 라우팅 프로토콜의 핵심적인 성능 지표 중 하나이다. 무선 센서 망은 프로세서와 작은 저장 공간, 무선 통신 모듈, 그리고 제한된 에너지를 가지는 수많은 센서 노드들로 구성되며, 센서 노드들은 제한된 통신 범위를 가진다. 따라서 데이터를 생산하는 소스 노드(source node)와 데이터를 수집하는 목적지 노드(destination node) 사이, 즉, 중단 간(end-to-end)에는 다중 홉(multi-hop)으로 패킷이 전달되는 특징이 있다<sup>[1,2]</sup>. 이러한 제한적인 환경 때문에, 중단 간 신뢰성을 향상시키는 것은 매우 어려운 일이며, 응용이 요구하는 신뢰성을 보장하는 것은 중요한 연구 주제 중 하나이다. 일반적으로 중단 간 신뢰성은 중단 간 패킷 전송 성공률을 의미하며, 중단 간 신뢰성을 보장 한다는 것은 응용이 요구하는 비율 이상의 패킷 전송 성공률을 보장한다는 것을 의미한다.

기존에 무선 센서 망에서의 신뢰성 향상을 위한 방안은 크게 다중경로 라우팅(multipath routing)<sup>[3]</sup>과 기회 라우팅(opportunistic routing)<sup>[4]</sup>으로 구분할 수 있다. 먼저 다중경로 라우팅은 중단 간에 다중의 경로를 구성하고, 각 경로로 동시에 패킷을 전달함으로써 중단 간 신뢰성을 향상시킨다. 다중으로 구성된 경로 중, 적어도 하나의 경로가 패킷 전달에 성공하면 되기 때문에, 많은 경로를 이용할수록 신뢰성이 향상된다. 하지만, 이용하는 경로의 수에 비례하여 에너지 소비가 증가하는 단점이 있다. 한편, 기회 라우팅은 중단 간 신뢰성을 보장하지는 못하지만, 링크의 신뢰성을 크게 향상시킴으로써 중단 간 경로의 신뢰성을 향상시킬 수 있는 방안이다. 기회 라우팅은 무선 통신의 특징인 오버히어링(overhearing)을 활용한다. 전송 노드 자신보다 목적지에 가까운 이웃 노드들에게 다음 전송노드가 될 수 있는 기회를 부여한다. 즉, 전송 노드보다 목적지에 가까운 이웃노드 중 적어도 하나의 노드만 패킷 수신에 성공하면 되므로 이웃노드의 수, 즉, 노드의 밀도가 높을수록 1홉에서의 신뢰성이 높아진다.

기존 연구들을 통해 중단 간 신뢰성을 향상시킬 수

있지만, 기존 연구들은 중단 간 홉 수가 증가하면 성능이 급격히 감소하는 문제가 있다. 어떤 경로의 신뢰성은 그 경로를 구성하는 링크들의 신뢰성의 종속적이며, 경로가 많은 링크로 포함할수록 그 경로의 신뢰성이 감소한다. 다중경로 라우팅의 경우 중단 간 홉 수가 증가하면 각 경로의 신뢰성이 감소하게 되고, 결국 요구되는 신뢰성을 만족하기 위해 이용해야하는 경로의 수가 급격히 증가한다. 기회 라우팅의 경우도, 1홉에서의 신뢰성을 높더라도 중단 간 홉 수가 증가하면 신뢰성이 급격히 감소한다. 따라서 기존 방안들은 중단 간 홉 수가 매우 큰 대규모 무선 센서 망<sup>[5]</sup>에는 적합하지 않다.

본 논문에서는 대규모 무선 센서 망에서의 신뢰성 보장을 위한 구간 기반의 기회적 다중경로 라우팅 방안을 제안한다. 기존 방안들의 문제는 중단 간 홉 수가 증가할수록 성능이 급격히 떨어진다는 것이다. 즉, 중단 간 홉 수가 비교적 작을 때는 매우 효과적으로 신뢰성을 향상시킬 수 있으며, 전체 구간을 작은 구간들로 나눔으로써 기존 방안들의 성능을 최대한으로 발휘할 수 있게 한다. 즉, 중단 간 전체 구간을 몇 개의 작은 구간으로 나누고, 구간 경계에 위치하는 중간 노드들을 선정한다. 그 후, 중간노드들로 구성되는 가상의 다중경로를 구성하고, 각 경로에 기회라우팅을 적용한다. 제안방안에서, 나누어지는 소구간의 수와 선정되는 중간노드의 수는 제안방안을 통해 달성할 수 있는 신뢰성 수준과 밀접한 관련이 있으며, 이는, 중단 간 거리, 평균 링크 신뢰성 등 주어지는 네트워크 환경변수와 요구되는 신뢰성 수준에 따라 결정될 수 있다.

본 논문의 남은 부분은 다음과 같이 구성된다. 2장에서는 신뢰성 향상을 위한 연구들 즉, 기존의 다중경로 라우팅 방안들과 기회 라우팅 방안들을 소개한다. 3장에서는 제안방안인 기회적 다중경로 라우팅 방안을 자세히 설명한다. 4장에서는 실험 결과를 통해 제안방안의 성능을 검증한다. 5장에서는 본 논문의 결론을 맺는다.

## II. 관련 연구

이 장에서는 기존에 무선 센서 망에서 신뢰성 향상

을 위한 다중경로 라우팅과 기회 라우팅에 대해 설명한다. 기존에 신뢰성 향상을 위한 연구는 크게 중단 간 신뢰성 보장을 위한 다중경로 라우팅 방안과 1홉 신뢰성 향상을 위한 기회 라우팅으로 나눌 수 있다.

먼저 다중경로 라우팅<sup>13,61</sup>의 목적은 여러 개의 경로를 미리 준비하여 링크의 단절이나 망의 혼잡과 같은 열악한 무선 환경에서 신뢰성 있는 라우팅을 제공하는 것이다. 여러 개의 경로를 이용해 라우팅의 신뢰성을 향상시키기 위해서 다중경로의 구축과 관리가 가장 먼저 고려되어야 한다. 다중경로 라우팅이 이용하는 경로들은 개별적으로 패킷 전달을 할 수 있어야 하므로, 이용되는 경로들을 분리시키는 것은 다중경로 연구에서 가장 중요한 이슈 중 하나이다. 기존 연구들은 노드 분리형과 링크 분리형, 그리고 부분 분리형으로 구분할 수 있다. 노드 분리형 다중경로는 각 경로가 공유되는 노드나 링크 없이 완전히 분리된 형태를 말한다. 따라서 다른 방안과 달리 특정 노드나 특정 링크에서의 전송 실패는 하나의 경로에만 영향을 준다. 이러한 이유로 충분한 경로를 이용할 수 있는 네트워크 환경에서는 노드 분리형 다중경로가 선호된다. 기존 연구들은 서로 분리된 경로들로 동시에 패킷을 전달함으로써 신뢰성을 보장할 수 있었지만, 중단 간 홉 수가 커질수록 신뢰성 보장이 매우 어려워진다. 다중경로를 통해 향상시킬 수 있는 신뢰성은 경로 각각의 신뢰성에 종속적인데, 중단 간 홉 수가 증가하면 각 경로의 신뢰성이 급격히 낮아진다. 즉, 중단 간 거리가 멀수록 신뢰성 보장을 위해 이용해야 하는 경로의 수가 증가하고, 이는 경로의 수에 비례하는 에너지 소비로 이어지며, 제한된 에너지를 가지는 무선 센서 망에 적합하지 않다.

한편, 기회 라우팅<sup>4,71</sup>은 무선 통신의 특징인 오버헤더를 활용해 단일 홉에서의 신뢰성을 향상시키는 방안이다. 즉, 전송노드는 자신의 이웃 노드들에게 다음 홉이 될 수 있는 기회를 부여함으로써 1홉의 신뢰성을 향상시킬 수 있다. 따라서 기회 라우팅을 이용해 향상시킬 수 있는 신뢰성은 이웃노드의 수에 크게 영향을 받는다는 특징이 있다. 기회 라우팅에서 가장 중요한 이슈는 두 가지로, 첫째, 다음 홉 후보가 되는 이웃노드를 선정하는 것과, 둘째, 다음 홉 후보들에게 우선순위를 부여하는 것이다. 예를 들어, 전송노드는 자신보다 목적지에 더 가까운 이웃노드들을 다음 홉 후보군으로 선택하고, 자신으로부터 거리가 먼 순서대로 우선순위를 부여할 수 있다. 이렇게 다음 홉 후보군 선정과 우선순위 부여가 완료되면, 전송노드는 이 정보를 포함한 데이터 패킷을 브로드캐스팅 한다. 이

데이터 패킷을 수신하는데 성공한 이웃노드 중 가장 높은 우선순위를 부여받은 이웃노드부터 같은 과정을 되풀이한다. 따라서 배치된 노드의 밀도가 높을수록 기회 라우팅을 통한 신뢰성 향상 효과가 크다. 하지만, 노드 밀도에 크게 영향을 받으며, 이웃 노드들이 순서대로 데이터 패킷 전송을 시도하기 때문에 중단 간 지연시간이 커지는 단점이 있다. 특히, 단일 경로를 이용하기 때문에 중단 간 홉 수가 커질수록 신뢰성 향상 효과가 급격히 감소한다. 따라서 중단 간 홉 수가 큰 대규모 무선 센서 망에 적합하지 않다.

이와 같은 다중경로 라우팅과 기회 라우팅의 장단점을 상호 보완하기 위해 두 방안을 조합해서 사용하는 것을 생각해 볼 수 있다. 하지만, 다중경로 라우팅은 다음 홉 전송 노드가 정해져 있는 경로들을 이용하는 결정적 라우팅 방안이고, 기회 라우팅은 매 홉마다 다음 홉 전송노드가 정해지는 비 결정적 라우팅 방안이다. 이처럼 근본적인 차이점 때문에 다중경로 라우팅과 기회 라우팅을 단순 조합해 적용하는 것은 매우 어려운 일이다. 제안 방안은 이 문제를 해결하기 위해, 중단 간 전체 구간을 작은 구간들로 나눔으로써 경로와 홉을 분리했다. 즉, 구간 단위로 가상의 다중경로를 구성하고, 각 경로들에 기회 라우팅을 적용함으로써 중단 간 신뢰성을 크게 향상시킬 수 있다.

### III. 제안 방안

이 장에서는 제안방안에 대해 설명한다. 먼저, 제안방안의 근간이 되는 다중경로 라우팅과 기회 라우팅에서의 신뢰성 향상에 대해 예시를 통해 간단히 소개한다. 다음으로 제안방안의 동작과정에 대해 자세히 설명한다. 마지막으로 제안방안을 통해 중단 간 신뢰성을 보장하는 방안에 대해 설명한다. 제안방안을 설명하기 위해 본 논문에서 가정한 사항은 다음과 같다. 첫째, 센서 노드들은 GPS, 또는 위치 서비스<sup>8,91</sup>를 이용해 자신의 위치를 알고 있으며, 패킷 전달을 위해 위치기반 라우팅<sup>101</sup>을 이용한다. 둘째, 중단 간에 위치기반 라우팅을 통해 존재할 수 있는 경로들의 최대 홉이 존재하며, 소스 노드는 이를 미리 알고 있다.

#### 3.1 다중경로 라우팅과 기회 라우팅의 신뢰성 향상

그림 1의 (a)는 다중경로 라우팅을 나타낸다. 소스 노드는 먼저 목적지 노드로의 사용 가능한 경로를 탐색한다. 경로 탐색이 끝나면, 요구되는 신뢰성을 만족시키는 경로들을 선택하고, 각 경로로 동시에 패킷을 전달한다. 동시에 패킷이 전달되는 경로들 중, 적어도

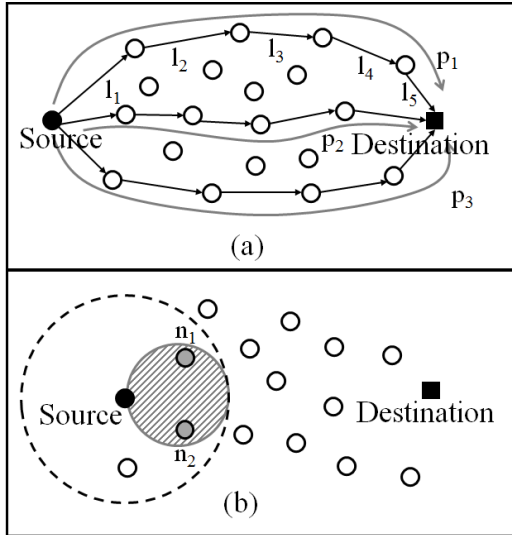


그림 1. (a)다중경로 라우팅 (b)기회 라우팅  
Fig. 1. (a)multipath routing (b)opportunistic routing

하나의 경로에서만 패킷 전달에 성공하면 종단 간 패킷 전달에 성공한 것으로 간주한다. 그림 1의 (a)의 경우, 경로  $p_1, p_2, p_3$ 의 신뢰성을 각각  $R_{p1}, R_{p2}, R_{p3}$ 라 하면 종단 간 신뢰성은 모든 경로에서 데이터 전달에 실패한 경우를 제외한  $1-(1-R_{p1}) \cdot (1-R_{p2}) \cdot (1-R_{p3})$ 가 된다. 이때, 경로  $p_1$ 의 신뢰성은 경로를 구성하는 링크  $l_1, l_2, l_3, l_4, l_5$ 의 신뢰성에 종속적이며, 링크의 신뢰성을 각각  $R_{l1}, R_{l2}, R_{l3}, R_{l4}, R_{l5}$ 라고 할 때  $R_{p1}$ 은 모든 링크에서 패킷 전송에 성공한 경우인  $R_{l1} \cdot R_{l2} \cdot R_{l3} \cdot R_{l4} \cdot R_{l5}$ 이다.

그림 1의 (b)는 기회라우팅을 나타낸다. 소스 노드는 자신보다 목적지에 가까운 이웃노드 중 빗금으로 표시된 영역에 위치한 노드를 후보군으로 한다. 빗금 영역은 오버헤더링을 이용하는 기회라우팅에서 히든 노드 문제 (hidden node problem)<sup>[11]</sup>를 발생시키지 않는 영역이다. 소스 노드는  $n_1, n_2$ 의 우선순위를 포함한 데이터를 브로드캐스팅 한다. 노드  $n_1$ 과  $n_2$ 의 신뢰성을 각각  $R_{n1}, R_{n2}$ 라 하면, 해당 홉에서의 신뢰성은 두 노드가 모두 데이터 수신에 실패한 경우의 수를 제외한  $1-(1-R_{n1}) \cdot (1-R_{n2})$ 가 된다.

이처럼 다중경로 라우팅과 기회 라우팅을 이용해 종단 간 경로의 신뢰성을 향상시킬 수 있다. 하지만, 기존 방안들은 종단 간 홉 수가 증가할수록 성능이 크게 저하되는 단점이 있다. 예를 들어, 어떤 망의 링크들이 평균 0.9의 신뢰성을 갖는다고 해도, 10홉 떨어진 종단 간 신뢰성은  $0.9^{10} \approx 0.34$ 로 크게 떨어진다. 따라서 다중경로 라우팅의 경우 종단 간 홉 수가

증가할수록 같은 수준의 신뢰성을 보장하기 위해 필요한 경로의 수가 급격히 증가하고, 기회 라우팅의 경우, 종단 간 홉 수가 늘어날수록 평균 단일 홉 신뢰성의 지수 승으로 신뢰성이 급격히 감소하게 된다.

### 3.2 기회적 다중경로 라우팅

기존의 신뢰성 향상 방안들의 근본적인 차이점, 즉, 다중경로 라우팅은 결정적 라우팅 방안이고 기회 라우팅은 비 결정적 라우팅이라는 점은 두 방안을 동시에 적용하는 것을 어렵게 한다. 제안방안은 종단 간 전체 구간을 작은 구간들로 나누고, 구간 단위의 가상의 다중경로를 구성함으로써 이 문제를 해결한다. 제안방안의 동작과정은 다음과 같다. 소스 노드는 먼저 종단 간 전체 구간을  $n$ 개의 작은 구간(section)으로 나누고, 각 구간의 경계에 위치하는  $m$ 개의 중간노드 (intermediate node)를 선정한다. 여기서  $x(1 \leq x < n)$ 번째 구간의 끝 경계에 위치하는 중간노드를  $IN_{xy}(1 \leq y < m)$ 으로 표현한다. 마지막 구간인  $n$ 번째 구간의 끝 경계에는 목적지 노드가 위치한다. 제안방안은  $x$ 번째 구간의 시작 경계에 위치하는 중간노드  $IN(x-1)y, \dots, IN(x-1)m$  각각의 가상의 목적지를  $IN_{x1}, \dots, IN_{xm}$ 로 설정하여 가상의 다중경로를 구성한다. 즉,  $x$ 번째 구간의 중간노드  $IN_{x1}, \dots, IN_{xm}$  중 적어도 하나의 중간노드만 패킷 수신에 성공하면,  $x$ 번째 구간에서 패킷 전달에 성공한 것이 된다. 패킷 수신에 성공한 중간노드는 자신을 포함하는 경계선을 따라 다른 중간노드들에게 패킷을 전달하고, 다음 구간의 전송노드들에게 패킷을 전달한다. 따라서 첫 번째 구간과 마지막 구간을 제외한 구간에는  $m-1$ 개의 다중경로가 형성된다. 첫 번째 구간과 마지막 구간에서는 한 쪽 경계에 소스 노드 혹은 목적지 노드가 위치하게 되므로  $m$ 개의 다중경로가 형성된다. 이때,  $n$ 과  $m$ 의 값은 종단 간 거리와 평균 링크 신뢰성, 그리고 요구되는 신뢰성 수준에 따라 결정될 수 있다.

그림 2는 제안방안인 기회적 다중경로 라우팅을 나타내며, 이 경우  $n=3, m=2$ 이다. 그림 2에서, 종단 간 전체 구간은 세 개의 구간 즉,  $S_1, S_2, S_3$ 로 나누어져 있으며, 각 구간의 경계에는 중간노드  $IN_{11}, IN_{12}, IN_{21}, IN_{22}$ 가 위치해 있다. 먼저, 종단 간 신뢰성은 각 구간 신뢰성의 곱으로 표현할 수 있으며, 구간  $S_1, S_2, S_3$ 에 대한 신뢰성을 각각  $R_{S1}, R_{S2}, R_{S3}$ 라 하면, 종단 간 신뢰성  $R_{e2e}$ 는  $R_{S1} \cdot R_{S2} \cdot R_{S3}$ 이며, 구간 신뢰성을 통한 종단 간 신뢰성의 보장은 3절에서 자세히 설명한다. 각 경로와 구간에서의 신뢰성은 다음과 같다.

각 경로는 매 홉마다 다음 전송노드가 정해져 있지

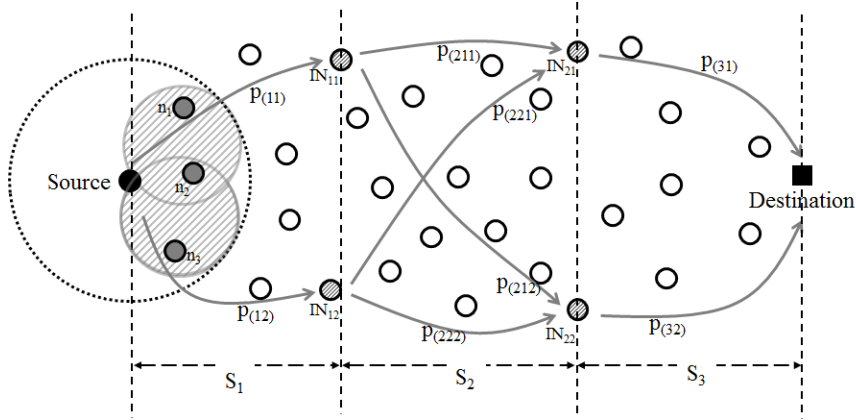


그림 2. 기회적 다중경로 라우팅 예시  
Fig. 2. An example for opportunistic multipath routing

않고, 출발지와 목적지만 정해져있기 때문에 기회 라우팅을 적용할 수 있다. 그림 2의 경우 소스 노드로부터  $IN_{11}$ 로의 경로의 다음 홉 후보군은  $n_1, n_2$ 이므로 각 노드의 신뢰성을 각각  $R_{n1}, R_{n2}$ 라 할 때, 해당 홉에서의 신뢰성은  $n_1, n_2$ 가 모두 패킷 수신에 실패한 경우를 제외한  $1-(1-R_{n1}) \cdot (1-R_{n2})$ 이다. 만약, 서로 다른 경로에서의 다음 홉 후보군이 겹치는 경우 우선순위를 조정함으로써 혼잡을 방지한다. 그림 2의 경우, 소스 노드로부터  $IN_{11}$ 로의 경로의 다음 홉 후보군은  $n_1, n_2$ 이고, 소스 노드로부터  $IN_{12}$ 로의 경로의 다음 홉 후보군은  $n_2, n_3$ 이므로  $n_2$ 가 두 경로의 다음 홉 후보군에 모두 포함된다. 소스 노드는  $IN_{11}$ 로의 경로에서 다음 홉 후보군의 우선순위를  $n_1 > n_2$ 로,  $IN_{12}$ 로의 경로에서 다음 홉 후보군의 우선순위를  $n_2 > n_3$ 로 설정함으로써  $n_2$ 에서의 혼잡을 예방하고,  $n_2$ 가 두 경로로의 패킷 전달에 모두 참여할 수 있게 한다.

각 구간에서의 신뢰성은 각 구간을 구성하는 경로들의 신뢰성으로 결정된다. 그림 2에서, a번째 구간을 구성하는 경로 중 b번째 중간노드에서 c번째 중간노드로 향하는 경로를  $p(abc)$ 로 표현하였다. 첫 번째 구간과 마지막 구간에는 각각 소스 노드와 목적지 노드가 위치하기 때문에 해당 구간을 구성하는 경로들은  $p(ac)$  혹은  $p(ab)$ 로 표현된다. 먼저 구간  $S_1$ 에서의 신뢰성  $R_{S1}$ 은 소스 노드에서 구간  $S_1$ 의 중간노드인  $IN_{11}$ 과  $IN_{12}$ 에 이르는 두 경로에 의해  $1-(1-R_{p(11)}) \cdot (1-R_{p(12)})$ 가 된다. 다음으로 구간  $S_2$ 에서의 신뢰성  $R_{S2}$ 는  $1-(1-R_{p(211)}) \cdot (1-R_{p(221)}) \cdot (1-R_{p(212)}) \cdot (1-R_{p(222)})$ 가 된다. 첫 번째 구간과 마지막 구간을 제외한 중간 구간에서는 중간노드 간에 형성되는 다중경로를 교차로 적용함으로써 신뢰성을 크게 높일 수 있다. 마지막으로 구

간  $S_3$ 에서의 신뢰성은 직전 구간  $S_2$ 의 중간노드인  $IN_{21}$ 과  $IN_{22}$ 에서 목적지 노드에 이르는 두 경로에 의해  $1-(1-R_{p(31)}) \cdot (1-R_{p(32)})$ 이 된다.

### 3.3 구간 신뢰성을 통한 종단 간 신뢰성 보장

2절에서 설명한 것처럼, 그림 2에서의 종단 간 신뢰성  $R_{e2e}$ 는  $R_{S1} \cdot R_{S2} \cdot R_{S3}$ 이다. 따라서 요구되는 신뢰성  $R_{req}$ 를 보장하기 위해서는  $R_{S1} \cdot R_{S2} \cdot R_{S3} > R_{req}$ 를 만족해야 한다. 여기서, 모든 경로의 신뢰성이  $R_p$ 로 같다고 가정했을 때,  $R_{S1}$ 과  $R_{S3}$ 의 구간 신뢰성은 같고,  $R_{S2}$ 는 이들보다 많은 경로로 구성되기 때문에  $R_{S1}^3 > R_{req}$ 를 만족한다면  $R_{S1} \cdot R_{S2} \cdot R_{S3} > R_{req}$ 를 만족하게 된다. 또 첫 구간에서의 신뢰성은  $1-(1-R_p)^2$  이므로  $(1-(1-R_p)^2)^3 > R_{req}$ 를 만족해야 한다. 이때, 2는 구간의 수이며, 3은 중간노드의 수이다. 즉, 종단 간 신뢰성은 구간의 수  $n$ 과 중간노드의 수  $m$ , 그리고 이를 통해 결정되는 경로의 신뢰성  $R_p$ 를 결정함으로써 보장할 수 있다.

제안방안은 구간의 수  $n$ 과 경로의 신뢰성  $R_p$ 를 다음과 같이 결정한다. 먼저 기회 라우팅이 단일 경로에서  $R_{req}$ 를 보장할 수 있는 최대 홉 수  $h$ 를 구해 한 구간에서의 최대 홉 수로 결정한다. 평균 링크 신뢰성을  $R_{avr}$ , 평균 홉 수를  $k$ 라고 했을 때, 기회 라우팅에서 단일 홉에서의 신뢰성은  $1-(1-R_{avr})^k$ 이다.  $(1-(1-R_{avr})^k)^h > R_{req}$ 를 만족해야 하므로  $h = \lceil \log_{1-(1-R_{avr})^k} R_{req} \rceil$ 이다. 여기서  $R_p = (1-(1-R_{avr})^k)^h$ 가 된다. 제안방안은  $h$ 를 구간의 폭으로 하고, 종단 간 홉 수  $H$ 를 통해  $n$ 을 구한다. 즉,  $n = \lceil H/h \rceil$ 이다. 예를 들어,  $R_{avr}=0.7, k=2, R_{req}=0.7, H=8$  일 때,  $h=3, R_p=0.75$ 이며,  $n=3$ 이다. 위 과정을 통해 구간의 수  $n$ 과  $R_p$ 를 구하면 첫 번째 구간

Table. 1. The summary of network parameters and variables in proposed protocol  
 표 1. 네트워크에서 주어지는 값과 제안방안의 변수 요약

Given values	Representative	Variables in proposed protocol	Expression
required end-to-end reliability	Rreq	maximum hop count for each section	$h = \lceil \log_{\{1-(1-R_{avr})^k\}} R_{req} \rceil$
average number of candidates for opportunistic routing	k	number of sections	$n = \lceil \frac{H}{h} \rceil$
end-to-end hop count	H	average reliability of each paths	$R_p = (1-(1-R_{avr})^k)^h$
average link reliability	Ravr	number of intermediate nodes	$m = \lceil \log_{(1-R_p)}(1-\sqrt[n]{R_{req}}) \rceil$

에서 만족해야 하는 구간 신뢰성을 통해 중간노드의 수  $m$ 을 구할 수 있다.  $(1-(1-R_p)^m)^n > R_{req}$ 을 만족해야 하므로  $m = \lceil \log_{(1-R_p)}(1-\sqrt[n]{R_{req}}) \rceil$ 이다. 위의 예제에서,  $R_p=0.75$ ,  $n=3$ ,  $R_{req}=0.7$  이므로,  $m=2$ 이다. 표 1은 네트워크에서 주어지는 값들과 이를 통해 얻을 수 있는 제안방안의 변수들을 요약해서 나타내며, 제안방안은 이를 통해 중단 간 신뢰성을 보장할 수 있다.

#### IV. 성능 평가

제안방안의 성능을 검증하기 위해, 기존의 다중경로 라우팅과 기회 라우팅, 그리고 제안방안을 MatLab<sup>[12]</sup>에서 구현하였다. 기본적인 실험 환경의 설정 값은 다음과 같다. 500mX500m 영역에 1000개의 노드가 균일하게 분포되어 있으며, 각 노드의 전송범위는 20m이다. 직접 통신 가능한 노드 사이의 평균 전송 성공률은 75%이다. 실험 1,2에서는 출발지 노드와 목적지 노드를 선정하고 10000개의 패킷을 전송해 도착한 패킷의 비율을 측정하였으며, 실험 3에서는 요구되는 신뢰성을 달성하기 위해 필요한 경로의 총 길이를 측정하였다. 각 그래프는 10회 실험한 결과의 평균을 나타낸다. 각 그래프에서, 기회 라우팅은 OR로 표시하였고,  $n$ 개의 경로를 이용하는 다중경로 라우팅은 MP<sub>n</sub>으로 표시하였다. 제안방안의 경우,  $n$ 개의 구간으로 나누고  $m$ 개의 중간노드를 선정해 이용하는 경우를 PP<sub>(n,m)</sub>으로 표시하였다.

##### 4.1 중단 간 홉 수에 따른 패킷 전송 성공률

그림 3은 중단 간 홉 수에 따른 패킷 전송 성공률을 나타낸다. OR은 중단 간 홉 수가 5홉일 때도 패킷 전송 성공률이 40%이하이며, 이는 단일 경로가 중단 간 신뢰성을 보장하는 데 매우 어렵다는 것을 나타낸

다. MP와 PP의 경우 중단 간 홉 수가 6홉 이하일 때는 모두 70%이상의 패킷 전송 성공률을 보인다. 하지만, MP는 이용하는 경로의 수에 따라 차이가 있지만, 공통적으로 중단 간 홉 수가 증가함에 따라 패킷 전송 성공률이 급격히 감소한다. 반면, PP는 MP에 비해 더 완만히 감소한다. 특히, MP<sub>11</sub>과 PP(3,2)를 보면, 중단 간 홉 수가 5홉일 때의 패킷 전송 성공률은 각각 약 96%와 약 79%로 MP<sub>11</sub>이 월등히 높았다. 하지만, 중단 간 홉 수가 11홉일 때 약 40%로 패킷 전송 성공률이 거의 같아지며, 중단 간 홉 수가 15홉일 때 각각 약 15%와 약 21%로 패킷 전송 성공률이 역전된다. 즉, 경로를 비교적 많이 이용하지만 각 경로의 신뢰성이 낮은 MP<sub>11</sub>보다, 이용하는 경로의 수가 비교적 적지만 각 경로의 신뢰성을 높인 PP<sub>(3,2)</sub>가 홉 수가 클 경우에 중단 간 신뢰성 보장하는데 더 적합하다. PP<sub>(3,3)</sub>은 중단 간 홉 수가 15홉인 경우에 약 44%정도로 가장 높은 패킷 전송 성공률을 보인다.

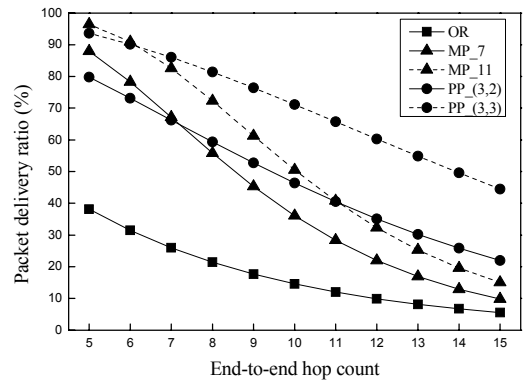


그림 3. 중단 간 홉 수에 따른 패킷 전송 성공률  
 Fig. 3. Packet delivery ratio according to end-to-end hop count

### 4.2 노드 밀도에 따른 패킷 전송 성공률

그림 4는 배치된 노드의 수에 따른 종단 간 패킷 전송 성공률을 나타내며, 종단 간 홉 수는 10홉으로 고정하였다. 센서 노드가 배치되는 영역의 크기에 변함이 없으므로, 배치된 노드의 수는 노드의 밀도에 영향을 준다. MP의 경우 패킷 전송 성공률이 노드의 수에 거의 영향을 받지 않는 것을 알 수 있다. 다중경로 라우팅은 경로를 탐색한 후에 다음 홉 전송노드가 정해져 있기 때문에, 노드의 밀도는 신뢰성 향상에 영향을 주지 않는다. 반면, OR과 PP의 경우 노드의 수가 많아질수록 패킷 전송 성공률이 높아지며, 이는 기회 라우팅에서 다음 홉 후보의 수가 많아지기 때문이다. 즉, 기회 라우팅에서는 일정한 후보 선택 영역을 사용하는데, 노드의 수가 많아질수록 후보 선택 영역에 포함되는 후보 노드의 수가 많아진다. 따라서 노드의 수가 많아지면 기회 라우팅을 통한 신뢰성 향상 효과가 크다. OR의 경우, 노드의 수가 700일 때는 약 3%로 매우 낮은 패킷 전송 성공률을 보였지만, 노드의 수가 1300일 때는 약 33%로 패킷 전송 성공률이 높아진다. PP는 OR보다 노드 수에 따라 패킷 전송 성공률이 더 급격히 향상되며, 이는 기회라우팅의 도움을 받는 경로의 수가 더 많기 때문이다. 노드의 수가 700일 때 PP(3,2)와 PP(3,3)의 패킷 전송 성공률이 각각 약 12%와 약 30%였지만, 노드의 수가 1300일 때는 각각 약 75%와 약 91%로 신뢰성이 크게 향상된다.

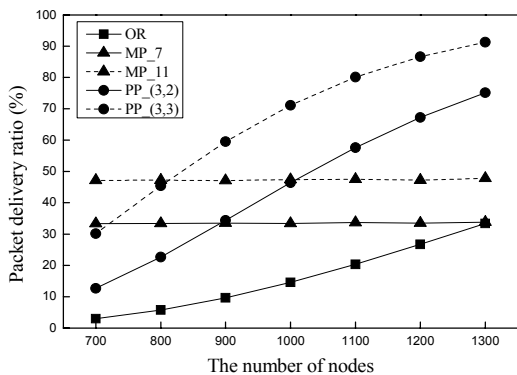


그림 4. 노드 수에 따른 패킷 전송 성공률  
Fig. 4. Packet delivery ratio according to the number of nodes

### 4.3 요구되는 신뢰성에 따라 구성되는 경로의 총 길이

그림 5는 요구되는 신뢰성에 따라 구성되는 경로의 총 길이를 나타낸다. 이 실험에서, 종단 간 홉 수는 10

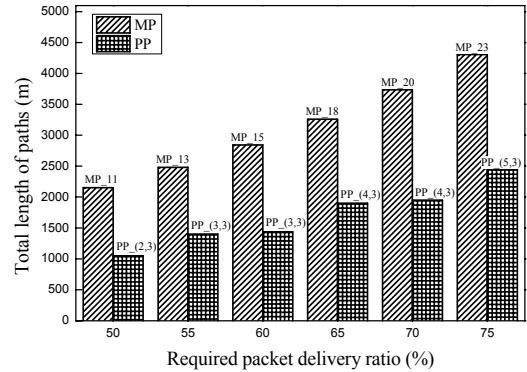


그림 5. 요구되는 신뢰성에 따라 구성되는 경로의 총 길이  
Fig. 5. Total length of paths according to required packet delivery ratio

홉으로 고정하였으며, 기회 라우팅은 종단 간 신뢰성 보장 방안이 아니기 때문에 제외하였다. MP의 경우, 요구되는 신뢰성에 따라 이를 보장하기 위해 필요로 하는 경로의 수가 달라지며, PP의 경우, 구간의 수와 중간 노드의 수가 달라진다. MP와 PP는 다중경로를 구성하고 각 경로로 패킷을 동시에 전달하기 때문에, 구성되는 경로의 총 길이는 패킷 전달의 에너지 효율성을 내포한다. MP의 경우 요구되는 신뢰성에 따라 구성되는 경로의 총 길이가 거의 선형적으로 증가하는 것을 알 수 있다. 즉, 요구되는 신뢰성이 높을수록 더 많은 경로를 구성해야 하므로, 경로의 총 길이가 길어진다. PP의 경우 MP와 다르게 요구되는 신뢰성에 따라 구성되는 경로의 총 길이가 선형적으로 증가하지는 않는다. 즉, 요구되는 신뢰성이 55%일 때와 60%일 때 구성되는 경로의 총 길이가 거의 같은데, 이는 구간의 수를 1 늘림으로써 향상되는 신뢰성이 매우 크지만, 유연하게 경로의 수를 조절하지는 못한다는 것을 의미한다. 하지만, PP는 MP에 비해 전반적으로 약 50%정도 길이의 경로가 구성되며, 이는 요구되는 신뢰성이 높을수록 PP가 MP보다 에너지 효율적으로 종단 간 신뢰성을 보장할 수 있음을 의미한다.

## V. 결론

본 논문에서는 대규모 무선 센서 망에서의 종단 간 신뢰성 보장을 위한 기회적 다중경로 라우팅 방안을 제안했다. 기존의 다중경로 라우팅과 기회 라우팅은 종단 간 홉 수가 증가할수록 신뢰성이 급격히 하락하는 문제가 있기 때문에 대규모 무선 센서 망에 적합하지 않다. 게다가 두 방안은 근본적인 차이점, 즉, 다중경로 라우팅은 다음 홉 전송노드가 정해져 있고, 기회

라우팅은 다음 홉 전송노드가 정해져 있지 않다는 점 때문에, 두 방안을 동시에 적용하는 것이 매우 어려웠다. 제안방안은 종단 간 전체 구간을 작은 구간들로 나누고, 각 구간의 경계에 중간 노드들을 선정함으로써 기회적 다중경로 라우팅을 구현하였고, 이를 통해 종단 간 신뢰성을 크게 향상시켰다. 또한, 구간 신뢰성이라는 개념을 도입함으로써 기회적 다중경로 라우팅을 통해 종단 간 신뢰성을 보장하는 방안을 제안하였다. 성능평가 결과는 제안방안이 기존방안에 비해 종단 간 홉 수가 큰 대규모 무선 센서 망에서의 신뢰성 보장에 더 적합함을 보인다.

### References

[1] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, "Wireless sensor networks: A survey," *Comput. Netw.*, vol. 38, no. 4, pp. 393-422, Mar. 2002.

[2] J. N. Al-Karaki and A. E. Kamal, "Routing techniques in wireless sensor networks: a survey," *IEEE Wirel. Commun.*, vol. 11, no. 6, pp. 6-28, Dec. 2004.

[3] M. Radi, B. Dezfouli, K. A. Bakar, and M. Lee, "Multipath routing in wireless sensor networks: Survey and research challenges," *Sensors*, vol. 12, no. 1, pp. 650-685, Jan. 2012.

[4] H. Liu, B. Zhang, H. T. Mouftah, X. Shen, and J. Ma, "Opportunistic routing for wireless ad hoc and sensor networks: Present and future directions," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 47, no. 12, pp. 103-109, Dec. 2009.

[5] S. Park, E. Lee, H. Park, J. Lee, S. Oh, J. Jung, and S.-H. Kim, "Scalable and robust data dissemination scheme for large-scale wireless sensor networks," *J. KICS*, vol. 34, no. 12, pp. 1359-1370, Dec. 2009.

[6] K. Jung, H. Yeom, H. Park, J. Lee, and S.-H. Kim, "Flexible disjoint multipath routing protocol using local decision in wireless sensor networks," *J. KICS*, vol. 38, no. 11, pp. 911-923, Nov. 2013.

[7] S. Biswas and R. Morris, "ExOR: opportunistic multi-hop routing for wireless networks," in *Proc. ACM SIGCOMM 05*, pp.

133-144, New York, NY, USA, Oct. 2005.

[8] J. Hightower and G. Borriella, "Location systems for ubiquitous computing," *IEEE Computer*, vol. 34, no. 8, pp. 57-66, Aug. 2001.

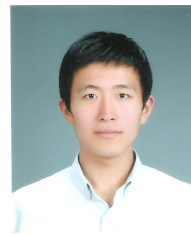
[9] H. Park, J. Lee, S. Oh, Y. Yim, and S.-H. Kim, "Sink location service via circle path for geographic routing in wireless sensor networks," *J. KICS*, vol. 35, no. 16, pp. 585-593, Jun. 2010.

[10] J. N. Al-Karaki and A. E. Kamal. "Routing techniques in wireless sensor networks: A survey," *IEEE Wirel. Commun.*, vol. 11, no. 6, pp. 6-28, Dec. 2004.

[11] S. Khurana, A. Kahol, and A. Jayasumana, "Effect of hidden terminals on the performance of IEEE 802.11 MAC protocol," in *Proc. IEEE LCN 98*, pp. 12-20, Lowell, MA, USA, Oct. 1998.

[12] MathWorks, Matlab, Retrieved on July 10th, 2012, from <http://www.mathworks.co.kr/products/matlab>.

김 천 용 (Cheonyong Kim)



2013년 2월 : 충남대학교 컴퓨터공학과 학사  
 2015년 2월 : 충남대학교 컴퓨터공학과 석사  
 2015년 3월 ~ 현재 : 충남대학교 컴퓨터공학과 박사과정  
 <관심분야> Wireless Sensor Networks, MANET, Internet of Things 등



정 관 수 (Kwansoo Jung)



2005년 2월 : 충남대학교 컴퓨터공학과 학사

2007년 2월 : 충남대학교 컴퓨터공학과 석사

2015년 2월 : 충남대학교 컴퓨터공학과 박사

<관심분야> Internet Routing,

Wireless Sensor Networks, D2D, 5G 등

김 상 하 (Sang-Ha Kim)



1980년 : 서울대학교 학사

1984년 : University of Houston 석사

1989년 : University of Houston 박사

1992년~현재 : 충남대학교 컴퓨터공학과 교수

<관심분야> Internet Routing, Wireless Sensor Networks, MANET, 4G, Mobility, Multicast 등