

# 무선 센서 네트워크에서 지역 결정을 통한 유연한 분리형 다중경로 라우팅 프로토콜

정 관 수\*, 엄 희 균\*, 박 호 성\*\*, 이 정 철\*\*, 김 상 하<sup>o</sup>

## Flexible Disjoint Multipath Routing Protocol Using Local Decision in Wireless Sensor Networks

Kwansoo Jung\*, Heegyun Yeom\*, Hosung Park\*\*, Jeongcheol Lee\*\*, Sang-Ha Kim<sup>o</sup>

### 요 약

무선 센서 네트워크에서 다중경로 라우팅 방안은 중단 간 데이터 전달의 신뢰성을 향상시키기 위한 연구주제 중 하나이다. 최근에는 다중경로의 강건함과 효율성을 위해서 경로의 분리와 관리를 위한 연구가 다수 진행 되었다. 그러나 이전의 연구들은 무선 통신 환경을 고려하지 않은 다중경로의 분리 방법을 이용하고 있다. 게다가, 그들은 불규칙 네트워크 환경에서 노드나 통신 실패로 인해 발생하는 경로 실패를 관리하는 방법이 없거나 추가경로를 생성하는 간단한 방법을 통해 다중경로를 유지한다. 이를 보완하기 위해서, 네트워크 오류지역을 우회 전송하고 경로를 재구성하는 다중경로 유지 방안이 제안되었지만, 중앙 집중적이고 정적인 경로 관리 방법을 이용하기 때문에, 경로 재구성 과정에서 데이터 전달의 중단이나 링크의 단절, 그리고 많은 경로 재구성 비용 등이 요구되는 문제가 있다. 이런 제약과 문제들은 데이터 전달의 신뢰성 저하와 긴급 데이터의 보고 실패로 이뤄질 수 있다. 따라서 본 논문에서는 불규칙적이고 제한적인 무선 센서 네트워크 환경을 고려하여 유연한 분리형 다중경로를 구축하는 방법과 효율적으로 다중경로를 유지할 수 있도록 경로의 우선순위 규칙을 적용한 지역 결정 기반의 다중경로 관리 방법을 제안한다. 그리고 제안 방법의 성능을 평가하기 위해서 시뮬레이션을 수행한다.

**Key Words** : Wireless sensor networks, Disjoint multipath routing, Local decision, Hole detouring.

### ABSTRACT

Multipath routing is one of challenging issues for improving the reliability of end-to-end data delivery in wireless sensor networks. Recently, a disjointedness and management of path have been studying to enhance the robustness and efficiency of the multipath routing. However, previous multipath routing protocols exploit the disjointed multipath construction method that is not to consider the wireless communication environment. In addition, if a path failures is occurred due to the node or link failures in the irregular network environment, they maintain the multipath through the simple method that to construct a new extra path. Even some of them have no a method. In order to cope with the insufficiency of path management, a hole detouring scheme, to bypass the failures area and construct the new paths, was proposed. However, it also has the problem that requires a heavy cost and a delivery suspension to the some or all paths in the hole detouring process due to the centralized and inflexible

• First Author : 충남대학교 컴퓨터공학과 컴퓨터네트워크 연구실, [ksjung@cnu.ac.kr](mailto:ksjung@cnu.ac.kr), 정회원

<sup>o</sup> Corresponding Author : 충남대학교 컴퓨터공학과 컴퓨터네트워크 연구실, [shkim@cnu.ac.kr](mailto:shkim@cnu.ac.kr), 정회원

\* 대전대학교 컴퓨터공학과 [yeom@dju.kr](mailto:yeom@dju.kr)

\*\* 충남대학교 컴퓨터공학과 컴퓨터네트워크 연구실, [hspark@cclab.cnu.ac.kr](mailto:hspark@cclab.cnu.ac.kr), [jclee@cclab.cnu.ac.kr](mailto:jclee@cclab.cnu.ac.kr), 학생회원

논문번호 : KICS2013-07-308, 접수일자 : 2013년 7월 25일, 최종논문접수일자 : 2013년 10월 28일

path management. Due to these limitations and problems, the previous protocols may lead to the degradation of data delivery reliability and the long delay of emergency data delivery. Thus, we propose a flexible disjoint multipath routing protocol which constructs the radio disjoint multipath by considering irregular and constrained wireless sensor networks. It also exploits a localized management based on the path priority in order to efficiently maintain the flexible disjoint multipath. We perform the simulation to evaluate the performance of the proposed method.

## I. 서 론

무선 센서 네트워크(WSNs)는 온도, 소리, 진동, 압력, 모션, 오염 물질 등의 물리적 또는 환경적 상태를 협력하여 감시하는 대량의 센서 노드들로 구성되며, 센서 노드들이 넓은 지역에 무수히 많이 배포되어 자율적으로 통신 네트워크를 구성한다<sup>[1,2]</sup>. WSNs는 환경 감시, 영토 보안, 그리고 생명과 재산을 보호하기 위한 긴급하고 중요한 응용 프로그램들에서 많이 사용되어왔다<sup>[3,4]</sup>. 이러한 응용들은 수집된 데이터의 신속한 전달과 신뢰성을 요구한다. 하지만, 무선 센서 네트워크는 센서 노드의 낮은 처리 능력과 무선 통신 사용, 제한된 에너지 등의 많은 제약으로 응용들의 요구사항을 만족시키기 쉽지가 않다<sup>[1]</sup>. 또한, 계획적으로 설계된 일반 네트워크와 다르게 임의적으로 배포된 노드들로 이루어진 불규칙적인 네트워크이기 때문에 노드의 밀집이나 홀 현상, 통신의 혼잡 및 충돌과 같은 문제들이 발생하게 된다<sup>[5,6]</sup>. 최근에 이러한 제약과 문제들을 고려한 다중경로 라우팅 방법이 많이 연구되고 있다. 다중경로 라우팅 방법은 열악한 네트워크 환경에서 여분의 경로를 제공함으로써 데이터 패킷이 목적지까지 손실이나 훼손 없이 도착할 수 있도록 충분한 기회를 제공하는 방법이다. 또한, 네트워크의 트래픽 부하를 분산시켜 높은 수준의 데이터 전송률을 제공할 수도 있다<sup>[1,7-9]</sup>. 그러나 다중경로 라우팅에서 중요한 이슈 중에 경로의 중복이나 경로 간 간섭 문제를 다루기 위해서는 노드, 링크, 무선 분리와 같은 분리형 다중경로의 구축과 이를 이용한 강건한 라우팅이 필요하다<sup>[9,10]</sup>. 하지만, 이전 연구의 분리형 다중경로 라우팅 프로토콜들은 네트워크 환경을 고려하지 않아 경로 분리의 효율성과 신뢰성이 항상 보장 될 수 없다. 또한, 불규칙적인 네트워크, 즉 역동적인 네트워크(network dynamics) 환경에서 노드 실패나 통신 실패로 인한 네트워크 홀 문제와 같은 국소현상이 발생해도 라우팅의 성능을 보장해줄 수 있는 효율적인 다중경로의 분리와 유지 및 관리 방안에 대한 연구가 필요하다<sup>[6,10]</sup>. 최근 이를 위한 연구들도 진행되

었지만, 선행 방법들은 중앙 집중 관리방식을 이용하기 때문에 경로 관리를 위한 보고와 수정요청, 경로 재구성 과정에서 라우팅 성능이 저하되는 문제가 발생할 수 있다. 결과적으로, 네트워크 환경을 고려한 유연한 분리형 다중경로를 구축하고 경로의 오류 시 지역결정을 통해 신속하게 경로를 재구성하여 다중경로를 유지할 수 있는 다중경로 라우팅 방법에 대한 연구가 필요하다. 따라서 본 논문에서는 앞서 언급된 문제들을 해결하고 안정적인 라우팅 성능을 제공하기 위한 접근 방법으로 유연한 분리형 다중경로 라우팅 FDMR(Flexible Disjoint Multipath Routing) 프로토콜을 제안한다.

본 논문에서는 제안 방법을 다음과 같은 구조로 설명하고 있다. 2장에서는 관련연구를 설명한다. 3장에서는 제안 방안에 대해서 자세하게 설명한다. 4장에서는 기존 연구와 제안 방법을 비교 분석하여 제안 방법의 라우팅 성능을 평가한다. 마지막으로 5장에서는 본 논문의 결론을 기술할 것이다.

## II. 관련연구

다중경로 라우팅의 목적은 여분의 경로를 미리 준비하여 링크의 단절이나 네트워크의 혼잡과 같은 열악한 무선 환경에서 신뢰할 수 있는 라우팅 성능을 제공하기 위한 것이다. 이런 목적을 달성하기 위해서는 다중경로의 구축과 관리가 먼저 고려되어야 한다. 우선, 다중경로의 구축에서 매우 중요한 이슈는 경로 간의 분리이다. 이전에 제안된 분리형 다중경로 연구들은 경로 분리(disjointedness)의 종류에 따라서 노드 분리와 링크 분리형, 그리고 부분 분리형 등으로 구분할 수 있다<sup>[10]</sup>. 노드 분리형 다중경로의 경우, 링크 분리형과 부분 분리형과 달리 구축된 경로들 사이에 공유되는 노드나 링크가 없다. 따라서 노드 분리형 다중경로의 집합에서 임의의 노드나 링크의 실패는 실패한 노드나 링크를 포함하는 경로에만 영향을 준다. 이러한 이유로 이전의 다중경로 라우팅 프로토콜들에서 높은 통합 네트워크 자원을 제공할 수 있는 노드 분리형 경로가 링크 분리나 부

분리형 경로보다 선호되고 있다. 하지만, 센서 노드의 임의 배포 때문에, 센서 노드와 싱크 노드 사이의 노드 분리형 경로를 다수로 구축하기가 어렵다. 게다가, 경로간의 간섭으로 인한 통신 혼잡과 충돌은 데이터 전달 지연, 노드의 자원 소비 증가, 성능 저하 등의 문제들을 초래할 수 있다. 이를 보완하기 위해서 노드 분리형의 한 종류로 MR2<sup>[11]</sup>, RDGM<sup>[13]</sup>와 같은 무선 분리형 다중경로가 제안되었다. 추가적으로, WSNs와 같은 제약적이고 불규칙한 통신 환경에서는 효율적이고 신뢰할 수 있는 경로들을 구축하기 위해서는 환경적 요인을 고려하고 적용한 경로 분리와 구축이 이뤄져야 한다. 그러나 이전의 무선 분리형 다중경로는 환경 요인을 고려하지 않기 때문에 응용에서 요구하는 성능을 안정적으로 제공하지 못할 수 있다. 즉, 안정적인 라우팅 성능을 보장하기 위해서는 환경을 반영한 분리형 다중경로의 구축 방법이 연구되어야 한다.

무선 센서 네트워크에서 노드의 일시적 또는 영구적 오류나 지리적 장애로 인한 통신 오류와 같은 네트워크 실패가 발생한 지역을 홀이라고 한다. 분리형 다중경로 라우팅 프로토콜은 홀과 같은 네트워크의 예기치 못한 변형에 대해 우회 전송과 기존 다중경로의 성능을 훼손하지 않으면서 경로를 재구성하는 방법 필요하다<sup>[10,14]</sup>. 하지만, 이전에 제안된 다중경로 라우팅 프로토콜들은 노드 장애나 통신 장애로 인한 경로의 실패를 신속히 복구할 수 없거나 일부 노드나 링크의 실패로 해당 경로의 전체를 이용하지 않고 새로운 경로를 생성 및 이용하는 비효율적인 경로 재구성 방법을 사용한다. 이런 문제를 보완하고 분리형 다중경로의 성능을 보장해줄 수 있는 경로 관리 방법이 필요하다. 이를 위해서 단일 경로를 위한 우회 전송 방법을 다중경로 라우팅에서 사용하게 되면 주변 경로를 간섭하기 때문에 다중경로의 성능을 저하시키게 된다. 따라서 다중경로 라우팅에서는 주변 경로와 함께 우회 되는 방법이 연구되어야 한다. 최근에 다중경로 상에서 홀을 우회하는 방법과 홀 경계 정보를 수집해서 다중경로를 수정하는 RDM이 제안되었다<sup>[14]</sup>. 이 방법은 다중경로 상에 홀이 발생하게 되면, 일단 우회 모드로 홀 경계 정보를 수집한다. 우회 모드에서 경계 정보 수집 메시지가 주변 경로를 침범하게 되면 주변경로들은 대기상태로 변경되고 데이터 전달을 중단한다. 홀 경계 정보가 목적이인 싱크로 수집되면, 싱크는 결과를 다시 소스로 보고한다. 이렇게 획득한 홀 경계 정보를 이용하여 소스는 홀을 회피하는 수정된 다중경로를

재구성한다. 이처럼 홀 정보를 수집해서 소스로 보고하는 중앙 집중 관리 방법은 신뢰성을 보장할 수 없는 무선 통신환경에서 경로를 수정하거나 새로 구성하기 위해서 많은 시간과 비용을 부담해야 한다. 최악의 경우 홀 정보가 수집 될 때까지 데이터 전달이 중단되어 데이터 전달이 장시간 지연되고, 소스에서 문제를 인지할 때까지 데이터 전송률이 저하되는 문제도 발생할 수 있다. 그러므로 무선 센서 네트워크와 같이 자원이 제한되고 열악한 통신환경에서는 특정 노드가 정보를 수집하는 중앙 집중 관리보다 오류가 발생한 지역에서 주변 노드들이 지역 결정을 통해서 신속하고 유연하게 경로의 실패를 복구하고 경로를 관리할 수 있는 지역적 경로 관리 방법이 더 적합하다.

제안 방법인 FDMR은 선행 연구들에서 나타난 사안들을 고려해서 통신 환경을 반영하여 경로간의 자원 공유나 간섭을 최소로 할 수 있는 유연한 분리형 다중경로를 생성하는 방법과 지역적 결정을 이용하여 홀을 우회하는 전송 방법, 그리고 우회 전송과 동시에 경로를 재구성하고 다중경로를 효율적으로 관리할 수 있는 방법을 제안한다.

### III. 본 문

이번 장에서는, 크게 세 가지 방법으로 구성된 제안 방법에 대해서 자세히 설명한다. 첫 번째는 분리형 다중경로를 구성하는 방법이고 두 번째는 분리형 다중경로를 이용한 데이터 전달 방법이다. 마지막은 분리형 다중경로를 관리하는 방법이다.

이번 연구에서 우리의 고려사항들과 가정들은 다음과 같다. 본 논문에서 고려한 네트워크 모델은 2차원 평면 지역에 무작위로 배포된 대량의 센서 노드들로 구성된다. 모든 센서 노드들은 GPS 장치나 위치 지역화 방법을 통해 자신의 위치 정보를 알 수 있고 통신 반경 안에 위치한 이웃 노드들의 정보를 알 수 있다고 가정한다<sup>[15]</sup>. 그리고 응용의 관심 정보를 감지하고 데이터를 생성해서 보고하는 객체를 소스라 한다. 또한, 응용의 관심 정보와 네트워크 환경 및 설정 정보를 센서 네트워크에 공지하고 감지된 관심 정보를 수집하는 객체를 싱크라 한다. 이러한 센서 노드들의 위치 정보는 통신을 위한 ID 또는 네트워크 주소로 사용된다. 또한 모든 센서 노드들은 싱크의 위치 정보와 네트워크 경계 정보를 미리 알고 있거나 위치 정보 서비스 프로토콜을 통해 위치 정보를 얻을 수 있다<sup>[16]</sup>.

### 3.1. 분리형 다중경로 구성 방법

무선 센서 네트워크에서 분리형 다중경로 라우팅은 종단간의 전송 신뢰성을 보장하기 위한 방법으로 다중경로의 구성이 라우팅 성능에 절대적인 영향을 준다. 따라서 신뢰성 저하의 원인이 되는 경로 간의 자원 공유나 경로간의 통신 간섭과 혼잡을 최대한 방지할 수 있도록 효율적으로 분리된 다중경로가 설계되어야 한다. 이를 위해서, 제안 방법은 우선순위 기반의 무선 분리형 다중경로를 제안한다. 제안하는 경로 분리 방법은 주경로를 중심으로 무선통신 반경의 간격을 두고 우선순위가 낮아지는 경로들로 이루어진 복합 분리형 다중경로로 각 경로마다 특정 지역을 선점하고 데이터 증계 시에 상위 경로의 통신을 간섭하지 않도록 데이터를 증계한다. 또한, 효율적인 경로 분리를 위해서 완전 분리 경로와 부분 분리 경로가 함께 구성되는 다중경로를 제안한다. 이런 규칙을 통해서 제안된 분리형 다중경로는 데이터 전달 시에 통신 간섭을 최대한 줄여 네트워크 혼잡 및 충돌로 인한 데이터 손실을 줄일 수 있다. 또한, 다중경로를 생성하기 위한 역할을 소스와 각 경로의 시작점인 입구노드가 분담한다. 소스는 다중경로 생성을 위해서 복잡한 계산 없이 응용의 요구사항을 만족시킬 수 있는 다중경로의 수와 각 경로의 폭 크기와 같은 경로 생성 정보를 계산한다. 그런 다음에, 소스가 계산한 정보를 이용하여 각 경로의 입력노드들이 해당 경로의 생성을 담당한다. 이런 역할 분담은 소스의 에너지 소비를 절약할 뿐만 아니라, 신속한 경로 생성과 감지된 데이터 보고를 신속하게 시작할 수 있도록 지원한다. 기본적으로 다중경로 라우팅에서 효율적인 다중경로를 구축하기 위해서는 다음과 같은 네트워크 정보를 고려해야 한다.

- 노드 밀도(Node density): 확률적으로 특정 영역( $\alpha^2$ ) 안에 배포된 센서 노드들의 수
- 통신 실패율(Communication failures rate): 노드간의 무선 통신 실패 비율
- 요구 신뢰성(Required reliability): 싱크나 응용으로부터 요구되는 데이터 전송의 신뢰성

이와 같은 네트워크 정보는 WSNs을 구축한 사용자나 싱크에 의해서 관심 정보 공지 메시지와 함께 노드들에게 제공된다. 소스는 효율적인 다중경로를 구축하기 위해서 제공받은 네트워크 정보를 토대로 경로 생성 정보를 계산한다. 제안방법에서 다중경로를 구성하기 위해 사용하는 세 가지 경로 생성 정보들은 다음과 같다.

- 다중경로의 수(The number of multipath): 싱크의 요구 신뢰성을 만족시키기 위해 필요한 다중경로의 수
- 경로의 넓이(The width of path): 데이터 전송이 이뤄지는 경로 영역의 넓이
- 경로의 간격(The interval of path): 다중경로에서 경로를 분리하기 위한 경로 간의 간격

경로 생성 정보들은 사용자의 초기 설정 값과 고려해야 할 네트워크 정보를 이용하여 제안하는 몇 가지 수식을 통해서 도출된다. 우선, 다중경로의 수는 통신 실패율  $F_R$ (Failure Rate)과 요구 신뢰성  $R_R$ (Required Reliability)을 근거로 계산되며, 기본 경로의 수는 사용자나 싱크와 같은 응용에 의해서 초기에 설정된다. 다중경로의 수는 수식(1)에 의해서 계산된다.

$$Mltipath\ Number = Default\ Path\ Number + \left[ \frac{1+R_R}{1-F_R} \right] \quad (1)$$

다음으로, 효율적인 전송 영역을 도출하기 위해서 우리는 몇 가지 요소들을 고려하였다. 우선, 본 논문에서 경로가 임의의 영역  $A(\alpha^2)$ 가 연속적으로 이어진 형태이고,  $A$ 안에 존재하는  $N$ 개의 노드 즉, 노드의 밀도를  $D_N$ (Density of Node)이라고 가정할 때, 네트워크의 노드 밀도는 수식(2)로 표현될 수 있다.

$$D_N = E[A(\alpha^2)] \geq 1 \quad (2)$$

여기서,  $\alpha$ 의 크기는 노드의 무선 전송 범위 안에 두 개의  $A(\alpha^2)$ 가 포함되도록 설정되어야 한다. 이것은 데이터를 전송하려는 노드가 위치한 영역에서 이웃한 다음 영역에 위치한 임의의 노드에게 통신이 가능하기 위한 최댓값 정보이다. 따라서  $\alpha$ 는 수식(3)을 이용하여 계산될 수 있다. ( $R$ : Radio transmission range)

$$\alpha = \frac{R}{\sqrt{5}} \quad (3)$$

이처럼 계산된  $\alpha$ 의 크기를 전송영역의 넓이인  $P_W$ (Path Width)로 설정할 수 있다. 하지만, 효율적인  $P_W$ 를 설정하기 위해서는 통신 실패율  $F_R$ 과 노드 밀도  $D_N$ 등의 네트워크 환경정보가 추가적으로 고려되어야 한다. 그래서 우리는 통신 실패율과 노드 밀도를 근거로 전송영역의 크기를 계산하기 위한 영역 보정계수  $C_P$ (Correction factor of path width)를 수

식 (4)를 이용해서 도출할 수 있다. 이것은 전송 영역의 크기가 노드의 밀도에 반비례하고 통신 실패율에 비례하는 성질을 근거하고 있다. 참고로 전송 영역의 크기가 무선 전송 범위를 넘지 않도록 전송 영역 보정계수의 범위는 수식(3)을 고려해야 한다. 또한,  $D_N$ 의 최댓값은  $MAX_{D_N}$ 으로 사용자에게 의해서 설정된다.

$$C_P = \left( \frac{F_R}{1 + (D_N / MAX_{D_N})} \right) \left( \text{If}, 0 \leq C_P \leq \frac{\sqrt{5}-1}{\sqrt{5}} \right) \quad (4)$$

네트워크 환경정보를 고려한 수식 (4)를 통해 도출된 영역 보정계수는 수식(5)와 같이 전송영역의 넓이  $P_W$ 를 계산하는데 이용된다. 전송영역은  $\alpha$ 를 기준으로 네트워크 환경에 따라 최대 무선 전송 범위까지 넓어질 수 있다.

$$P_W = \alpha + (R \times C_P) \quad (\text{If}, \alpha \leq P_W \leq R) \quad (5)$$

마지막으로, 효율적인 경로의 분리를 위한 경로 간격  $P_I$ (Path interval)는  $P_W$ 와  $D_N$ 를 고려한다. 이를 위해서  $D_N$ 을 반영한 간격 보정계수  $C_I$ (Correction factor of path interval)를 수식(6)을 통해 도출한다.

$$C_I = 1 - \frac{D_N}{MAX_{D_N}} \quad (\text{If}, 0 \leq C_I \leq 1) \quad (6)$$

수식(6)은  $D_N$ 이 클수록 경로의 중심에 위치한 노드들이 데이터 전달을 담당할 확률이 높아지기 때문에 노드의 밀도에 반비례하는 간격 보정계수를 도출하여 무선전송 범위를 벗어나지 않는 유연한 경로 간격을 설정하는데 사용된다. 경로 간격의 넓이는  $R$ 보다 작고  $P_W$ 보다는 크도록 설정한다. 이것은 노드의 밀도를 고려하여 경로의 간격을 효율적으로 줄이면서, 이웃한 경로간의 통신 간섭을 방지하기 위한 것이다. 경로 간격은 수식(7)을 이용해서 계산된다.

$$P_I = P_W + ((R - P_W) \times C_I) \quad (\text{If}, P_W \leq P_I \leq R) \quad (7)$$

이와 같은 과정을 통해서 도출된 경로 생성 정보는 네트워크 환경을 고려하여 분리형 다중경로를 효율적으로 생성하는데 이용된다. 결과적으로, 경로의 넓이와 경로의 간격을 네트워크 환경에 따라 유연하게 설정하여 데이터 전달에 참여하는 노드의 수를 줄일 수 있다. 이는 노드의 에너지 소비를 줄여 네트워크 수명을 늘리고, 각 경로에 참여한 노드의 수

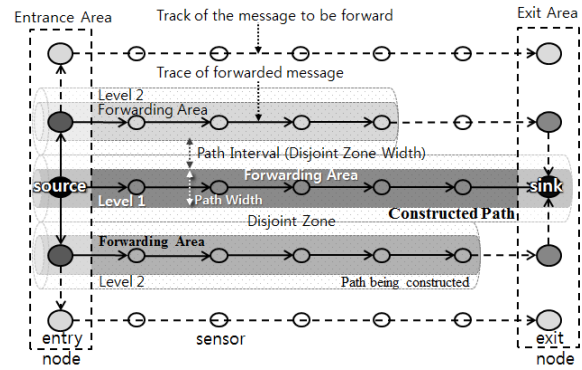


그림 1. 분리형 다중경로 구성 과정  
Fig. 1. Construction process of disjoint multipath

의 편차를 줄여 안정적인 데이터 전달 지연 시간을 제공한다.

제안하는 다중경로는 노드 분리형 경로들과 부분 분리형 경로들로 구성된 우선순위 기반의 복합 분리형 다중경로이다. 다중경로 구축 방법은 소스에서 계산된 경로 생성 정보를 기반으로 각 입구영역에 속하는 입구노드들에게 경로 생성 정보를 전달하여 각 입구 노드들이 지역적으로 우선순위를 가지는 해당 경로를 생성하기 위한 작업으로 이루어진다. 제안하는 다중경로의 구축 과정은 그림 1과 같이 도식화할 수 있다.

우선, 소스노드는 우선순위가 가장 높은 주경로를 생성한다. 주경로의 구축은 경로 생성 메시지가 소스와 싱크를 잇는 기준선 주변의 노드들을 통해서 전달되고 메시지를 수신한 주변 노드들은 경로 정보를 참조하여 경로 참여를 결정함으로써 경로가 구축된다. 경로 생성 메시지는 소스와 싱크의 위치, 경로 사이의 간격, 필요한 경로의 수 등의 정보들을 포함하고 있다. 그런 다음에 소스는 응용의 요구에 따라 필요한 수의 우선순위가 낮은 부경로들을 생성한다. 부경로의 생성 과정은 주경로를 기준으로 부경로들이 교차로 생성된다. 부경로는 주경로를 기준으로 네트워크 영역이 넓은 지역에 먼저 생성된다. 즉, 센서 노드들이 다수 존재할 확률이 높은 넓은 영역부터 부경로가 생성되고, 주경로를 기준으로 맞은편 지역에 부경로가 교차하여 생성된다. 이와 같이 부경로의 교차 생성 과정은 요구되는 다중경로의 수만큼 계속된다. 경로의 우선순위는 주경로를 기준으로 양쪽의 부경로들이 한 단계씩 낮아진다. 각 경로의 입구영역과 출구영역은 다음과 같이 설정된다. 우선, 주경로의 입구영역과 출구영역은 소스의 위치와 싱크의 위치 정보를 이용하여 설정된다. 그리고 소스노드는 경로의 넓이와 경로의 간격을 고려하여

이웃한 부경로의 입구영역과 입구노드를 설정한다. 또한, 설정된 부경로의 입구노드들은 자신보다 우선 순위가 한 단계 낮은 부경로의 입구영역과 입구노드를 설정한다. 이와 같이, 요구되는 경로의 수를 소스노드가 설정하면 상위 레벨의 입구노드들이 이웃한 하위 레벨의 입구영역과 입구노드들을 분담하여 설정한다. 이런 과정을 통해서 선정된 각 부경로의 입구노드들은 싱크의 위치정보와 경로의 간격을 고려하여 해당 경로의 출구영역을 계산하고, 출구영역으로 경로 생성 메시지를 전송한다. 메시지를 전달하는 중간 노드들이 경로에 참여하고, 출구영역과 출구노드가 설정되면 경로 생성이 완료된다. 모든 경로의 생성이 완료되면, 우선순위 기반의 분리형 다중경로의 구축이 완성된다. 이후 소스노드는 감지된 데이터를 자신의 경로를 통해 전송하고 이웃한 부경로들의 입력노드에게도 전달한다. 또한, 입력노드들도 소스와 같이 자신의 경로를 통해 데이터를 전송하고 하위 부경로의 입력노드에게 데이터를 전달한다. 이런 역할 분담은 소스노드의 부담을 덜어주고 신속한 경로의 구축과 짧은 데이터 전달 지연 시간을 제공할 수 있는 장점이 있다. 경로 생성과정에서 입구노드와 출구노드는 설정된 입구영역과 출구영역의 다수의 노드들 중에서 노드의 위치와 노드의 에너지 잔량 등의 정보를 참고하여 지역적 결정에 의해서 선택된다. 결과적으로, 제안하는 다중경로 구축 방법은 네트워크의 환경 정보를 적용한 경로 생성 정보를 통해 효율적인 복합 분리형 다중경로를 구축할 수 있으며, 소스노드의 부담을 완화시킬 수 있는 경로 생성 방법을 통해 소스노드의 수명을 연장시키고 신속한 데이터 전달을 수행할 수 있는 이점을 제공한다. 더욱이, 우선순위가 적용된 경로들은 경로 우회와 재구성 시에 지역적 관리를 통해 경로를 신속하고 간단하게 관리할 수 있는 이점을 제공한다.

### 3.2. 데이터 전달 방법

제안한 방법에서 기본적인 데이터 전달 방법은 기존의 위치 기반 라우팅 중 하나인 그리디 전달 방법(GPSR)을 사용한다. 그리고 복합 분리형 다중경로 상에서 안정적이고 효율적인 데이터 전달을 위해서, 다중경로를 세 구간으로 나누어서 운영한다. 각 구간은 소스에서 각 경로 입구영역까지의 배포 구간, 경로 입구에서 출구까지의 전달 구간, 그리고 각 경로의 출구영역에서 싱크까지의 수렴 구간으로 구성된다.

먼저, 배포 구간에서는 소스가 보고할 데이터가 주경로와 완전히 분리된 하위(레벨 2) 부경로의 입구노드들에게 전달된다. 또한, 입구노드들은 부분 분리된 자신의 하위 부경로에게 수신된 데이터를 전달한다. 이와 같은 배포과정을 통해서, 모든 경로의 입구노드들은 보고할 데이터를 전달 받게 된다. 추가적으로, 입구영역에서는 통신 혼잡과 충돌을 회피하기 위해서, 입구노드는 먼저 자신의 경로를 통한 데이터 전송을 수행하고 나서 하위 부경로로 데이터를 전달하는 방법을 사용한다. 다음으로, 전달 구간에서는 각 경로에 속한 중간 노드들을 통해 데이터를 출구영역까지 위치정보 라우팅을 이용하여 전달한다. 이때, 중간 노드들은 위치정보 라우팅을 위해서, 출구영역의 위치정보와 경로의 중심 위치정보를 고려하여 다음 전달 노드들 선택한다. 마지막으로, 수렴 구간은 각 경로의 출구영역에서 목적지 싱크로 데이터가 수렴되는 구간이다. 추가적으로, 이 구간에서는 데이터의 전달을 보장하면서 데이터의 중복을 최소로 해야 하기 때문에, 신뢰성과 효율성을 개선하기 위한 두 가지 방법을 제안한다. 하나는 효율적으로 데이터의 중복을 방지하기 위한 데이터 여과 방법이다. 이를 위해서 각 경로의 출구영역은 주경로의 출구영역을 루트로 하는 가상의 트리를 구성하여 상위 출구영역으로 데이터를 전달한다. 각 경로의 출구노드는 전달된 데이터가 중복 전송되지 않도록 데이터의 여과를 실행한다. 이를 통해서, 싱크 주변의 통신 혼잡을 줄이고 출구노드들의 에너지 소비를 절감할 수 있다. 다른 하나는 전달 신뢰성 보장을 위한 피드백 방법이다. 각 경로의 출구노드는 수신 데이터를 버퍼에 보관하고 있다가 재전송 요청을 수신하거나 해당 데이터에 대한 수신 응답을 받지 못하면 싱크로 데이터를 재전송하여 전달 신뢰성을 향상시킬 수 있다. 데이터의 보관 시간( $T$ )은 우선순위 레벨( $L$ )과 홉 당 지연시간( $H_D$ )을 고려하는 수식 (8)을 이용하여 각 출구노드가 지역결정을 통해 설정한다.

$$T_i = \sum_{i=1}^n L_i \cdot (2H_D) + H_D \quad (8)$$

추가적으로, 싱크는 일반 센서 노드들과 달리 에너지에 제한이 없고 성능도 더 우수하다고 가정한다. 그래서 싱크의 피드백 메시지를 단일 홉 방송(One-hop Broadcasting)으로 전달할 수 있다. 단일 홉(One-hop)의 크기는 가변적일 수 있기 때문에, 재



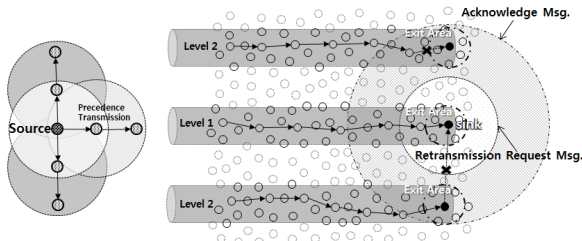


그림 2. 데이터 전달 및 피드백 방법  
Fig. 2. Data Delivery and Feedback Method

전송의 경우는 통신 환경에 따라서 다중경로의 전부 또는 일부에게 요청하고, 수신 응답 메시지는 모든 출구노드에게 전송한다. 결과적으로, 제안된 데이터 전달 방법은 복합 분리형 다중경로를 통한 데이터 전달에 참여하는 노드의 수를 줄이면서도 신뢰성을 보장하는 효율적인 다중경로 라우팅을 제공한다. 그림 2는 데이터 배포와 데이터 피드백 방법의 예를 보여준다.

### 3.3. 분리형 다중경로 관리 방법

이번 단락에서는 지역 결정기반의 유연한 분리형 다중경로 관리 방법을 자세히 설명한다. 제안 방법은 네트워크 오류가 생긴 지역을 우회 전송하는 동시에 다중경로를 재구성하는 방법이다. 분리형 다중경로의 관리를 위한 우회 전송과 경로 재구성 방법은 다음과 같다.

#### 3.3.1. 홀 우회 전송 방법

본 논문에서는 지역 결정 기반의 홀 우회 전송 방법을 제안한다. 기본적으로 GPSR의 홀 우회 전송 방법을 기반으로 복합 분리형 다중경로의 우선순위를 고려하여 지역 결정을 통해 홀을 우회하는 방법이다. 분리형 다중경로에서 지역 결정 기반의 홀 우회 전송을 위한 규칙은 다음과 같다.

- 모든 경로는 네트워크의 오류로부터 경로를 유지하기 위해서 자신보다 낮은 우선순위의 이웃 경로를 침범하는 우회 경로를 구성할 수 있다.
- 주경로(레벨 1 경로)에 오류가 발생하면, 주경로는 네트워크 영역이 넓은 방향으로 우회한다.
- 상위레벨의 경로 우회로 인하여 경로가 침범되면, 해당 경로의 노드들과 주변 노드들은 우회 전송 메시지의 정보를 이용하여 자율적으로 경로 정보를 변경한다. 즉, 지역 결정을 통해서 우회된 상위 경로의 멤버로 참여한다.
- 경로 정보가 변경된 노드들은 이전에 참여했던 경로에서 데이터가 요청되면, 데이터 전달을 수행하지 않고 경로가 우회된 정보를 공지한다.

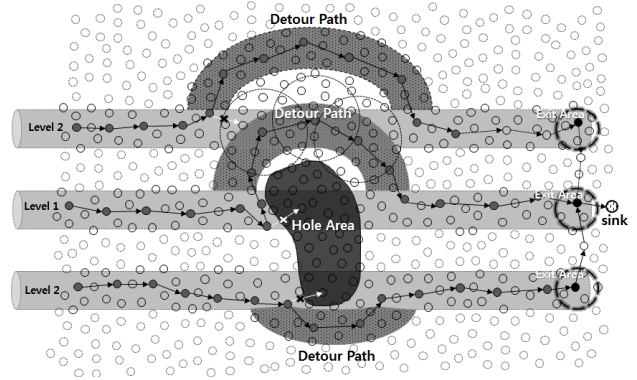


그림 3. 홀 우회 전송 및 경로 수정의 예  
Fig. 3. Hole Detouring and Multipath Modification

- 경로 우회 공지를 수신한 노드는 우회 전송을 위한 우회 경로를 경로의 간격과 경로의 넓이를 고려한 지역 결정을 통해서 생성한다.

다중경로 상에 홀이 탐지된 경우, 제안된 홀 우회 규칙을 따르는 경로는 데이터 우회 전송과 동시에 경로의 수정이 가능하다. 이후에 상위 우선순위 경로에게 경로가 침범되거나 간섭을 받게 되는 경로들도 홀 우회 규칙을 적용하여 경로를 수정할 수 있다. 이를 위해서 사용되는 우회 전송 메시지에는 소스와 싱크의 위치정보, 경로생성 정보 등을 메시지에 추가하여 전달한다. 이와 같은 지역결정 기반의 홀 우회 과정을 통해서 모든 경로가 순차적으로 수정될 수 있으며, 모든 경로가 함께 우회되는 분리형 다중경로를 유지할 수 있다. 또한, 홀 우회 방법에서 경로의 우선순위를 이용하기 때문에 기존의 다중경로의 성능을 최대한 유지하면서 경로의 길이가 긴 경로를 대상으로 우회전송을 시행하여, 기존의 홀 우회 방법보다 안정적이고 효율적인 우회전송을 실시할 수 있다. 결과적으로 제안 방법은 경로의 일부에서 일어난 오류로 인해 다수의 하위경로가 수정되어 자원의 소비가 증가하지만, 다중경로에서 여분의 경로 수를 줄일 수 있고 경로의 실패로 인한 신뢰성 저하를 복구하기 위해서 경로를 새로 구성하는 비용보다 저렴하다. 따라서 불규칙 환경에서도 홀 문제로 인한 데이터 전달의 중단 및 지연 없이 효율적으로 데이터를 전달하면서 전달 신뢰성의 저하 없이 분리된 다중경로를 효율적으로 유지할 수 있다. 홀 우회 전송과 경로 재구성 과정은 그림 3과 같다.

#### 3.3.2. 다중경로 재구성 방법

제안 방법에서 경로 실패 시, 다중경로는 홀 우회 규칙을 준수하여 데이터가 우회 전송되면서 경로의 초기 수정이 이루어진다. 하지만 이는 최적화

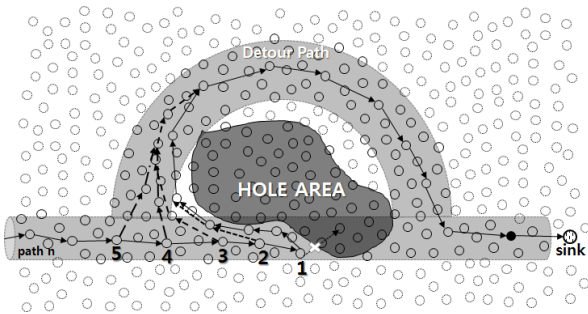


그림 4. 역방향 우회 경로의 보정 예  
Fig. 4. Example of Reverse Path Collection

된 우회 경로가 아닐 수 있기 때문에 최적화를 위한 경로 보정이 이뤄져야 한다. 또한 일시적 네트워크 실패로 인해 수정된 경로를 복원할 수 있어야 한다. 따라서 이번 단락에서는 재구성된 분리형 다중경로를 최적화하기 위한 세 가지 보정 방법을 제안한다. 제안하는 보정 방법들은 다음과 같다.

첫 번째 방법은 목적지의 역방향으로 우회 전송되는 경로를 보정한다. 이 보정 방법은 수정된 경로가 목적지로부터 역방향으로 홑을 우회하게 될 경우에 전달 홑 수가 증가하는 문제를 보완할 수 있다. 이를 위해서 네트워크 오류가 발생한 전송영역의 노드들은 도청(overhearing)<sup>[16]</sup>을 통해서 데이터가 역방향으로 우회 전송되는지를 지역적으로 감시한다. 이를 노드가 감지하면, 역방향 경로를 점진적으로 순방향 경로가 되도록 경로를 보정한다. 보정은 도청을 통해 수집된 우회경로 정보를 기반으로 노드가 감지한 역방향 전달 노드로 우회 경로를 수정하여 역방향 경로를 보정할 수 있다. 이처럼 지역적인 보정 방법을 통해서 비효율적인 역방향 경로를 최적화된 순방향 우회 경로로 수정할 수 있다. 이 보정 과정의 예는 그림 4에서 보여준다. 그림에서 번호는 보정 횟수를 가리키며, 경로가 순방향이 될 때까지 순차적으로 경로가 보정되는 과정을 나타낸다.

두 번째 방법은 비효율적인 우회 경로를 보정한다. 홑이 다중경로에서 한쪽 방향으로만 크게 발생하거나 홑이 네트워크 경계까지 이어진 개방형 홑이 발생하면 초기에 수정된 우회경로는 비효율적으로 재구성되기 때문에 경로의 보정이 필요하다<sup>[14]</sup>. 이 보정 방법은 싱크의 경로 감시와 경로 보정 요청으로 구성된다. 싱크는 각 경로의 전달 홑 수나 수신된 데이터의 전달 지연 시간, 데이터의 전달률 등을 감시하고 감시 기준치와 비교하여 경로의 비효율적 재구성을 판단한다. 경로의 감시 기준치는 전체 경로에서 감시된 성능의 평균값을 기반으로 도출할 수 있다. 경로 보정 요청은 싱크에서

경로의 이상이 탐지되면, 싱크가 소스까지의 추가 부경로를 새로 생성하고 소스에게 문제된 경로를 폐쇄하도록 요청하는 보정 방법이다. 싱크는 다중경로의 최하위 부경로에 이웃한 곳에 새로운 부경로를 생성하기 위해서 경로 생성 메시지를 보낸다. 소스는 싱크로부터 경로 생성 및 보정 요청 메시지를 수신하면 문제된 경로로 더 이상 데이터를 보내지 않고 새로 생성된 최하위 부경로를 통한 데이터 전송을 수행한다. 이런 과정을 통해서 제안방법은 다중 경로의 전달 신뢰성과 효율성을 유지 및 관리할 수 있다. 추가적으로, 개방형 홑과 같은 비균형적인 홑을 우회할 경우, 경로가 네트워크 경계에 이르거나 소스의 X 좌표 뒤로 우회하는 역방향 경로로 수정되는 문제가 발생한다. 이런 현상은 패킷에 담긴 소스의 위치정보를 이용하여 데이터 전달 시에 전달 노드들에 의해서 감지될 수 있다. 이를 감지한 전달 노드들은 경로 우회를 중단하고 소스에게 경로 수정 불가를 보고한다. 이런 문제를 보고 받은 소스는 경로를 폐쇄하고 대체할 수 있는 새로운 부경로를 생성한다.

마지막은 일시적 오류로 인해 수정된 우회 경로를 복원하는 보정 방법이다. 이 방법은 네트워크 오류를 탐지하고 지역 결정에 따라 경로 우회 전송을 시작한 노드가 오류가 발생한 영역을 일정시간 동안 주기적으로 점검하고 오류의 복구가 확인되면, 수정된 우회 경로를 복원하고 기존 경로를 재사용한다. 경로의 복원은 우회 경로로 복원 메시지를 전송하여 전달 노드들이 이전 경로의 정보를 복원시켜 경로를 복원하여 이뤄진다. 경로의 오류 복구 점검을 위한 주기와 총 점검시간은 응용에 의해서 설정된다. 이처럼 경로 복원 방법은 초기에 생성된 최적의 다중 경로를 재사용하여 비효율적인 우회 전송을 최소화할 수 있다. 결과적으로, 제안 방법은 최단거리로 구성된 기존의 분리형 다중경로를 최대한 사용하여 네트워크 수명의 연장과 효율적인 데이터 전달을 통해 라우팅 성능을 안정적으로 유지할 수 있는 효과가 있다.

#### IV. 성능 평가

제안된 프로토콜의 성능 평가를 위해서 데이터 전달률과 전달 지연시간, 에너지 소비량을 시험 항목으로 선정하고, 무선 센서 네트워크에서 선행 연구된 분리형 다중경로 프로토콜들인 EDM<sup>[12]</sup>과 RDGM<sup>[13]</sup>, RDM<sup>[14]</sup>을 제안 프로토콜 FDMR과 비교 분석하였다.



4.1. 실험 환경

제안된 방법의 성능 평가를 위한 시뮬레이션 환경 정보는 표 1과 같다.

표 1. 시뮬레이션 환경 정보  
Table 1. Simulation Environments

Parameters	Values
Simulator	Qualnet 4.0 <sup>[17]</sup>
Sensor node model	MICA2 <sup>[18,19]</sup> (Ptx:25mW, Prx: 15mW)
MAC layer	IEEE 802.11 <sup>[20]</sup>
Network size	800m × 800m
Radio range	50m
Number of Sensor	1000
Packet generation rate	64 byte/sec
Simulation time	1000 second
Irregular area size	10~200m <sup>2</sup>

본 단락에서 성능 평가 항목들은 다음과 같다.

- 패킷 전달 비율(Packet delivery ratio): 소스에서 전송된 패킷 중에 손실 없이 목적지에 전달된 패킷의 수
- 종단 간 지연 시간(End-to-end delay time): 소스에서 목적지까지 데이터가 도착하는데 걸리는 시간
- 평균 에너지 소모량(Average energy consumption): 시험기간에 소비된 센서 노드들의 평균 에너지 소비량

4.2. 정상 네트워크에서의 실험 성능 분석

이번 단락에서는 홀이 발생하지 않은 정상적인 네트워크 환경에서 프로토콜들의 성능을 실험하고 제안방법의 성능을 분석하였다. 복합 분리형 다중경로의 수 변화에 따른 시뮬레이션 결과는 그림 5~7에서 확인할 수 있다. 실험에서 링크의 실패율은 5%로 설정하였다. 이것은 데이터 전달 과정에서 경로

간의 간섭으로 나타나는 통신 혼잡과 충돌의 영향을 분석하기 위한 것이다. 그림 5는 각 프로토콜의 패킷 전달 비율을 그래프로 보여주고 있다. 이 결과는 3개 이하의 다중경로를 이용한 데이터 전달에서는 프로토콜들의 성능 차이가 크지 않다는 것을 보여준다. 하지만, 높은 신뢰성을 요구하는 응용에서 다중경로를 4개 이상 구성할 경우, 분리된 다중경로들이 서로 인접한 EDM보다 무선통신 반경을 기반으로 분리된 다중경로를 구성하여 이용하는 프로토콜들이 다중경로의 수가 증가해도 안정적인 신뢰성을 제공하고 있다는 것을 보여주고 있다. 이런 이유는 다중경로에서 데이터가 동시에 전달되면서, 경로들 간의 무선 통신 간섭과 통신 혼잡이 발생하기 때문이다. 그 결과, EDM은 다중경로의 수가 증가할수록 통신 간섭과 혼잡이 더 심해져 통신 오류가 발생하게 된다. 반면에, 통신 반경을 분리한 프로토콜들은 통신 간섭과 혼잡이 적어 패킷 전달 비율이 안정적이고 우수한 결과를 보여준다.

다음으로, 그림 6의 그래프는 패킷이 목적지까지 전달되는 시간의 평균에 대한 결과를 보여주고 있다. 제안 프로토콜은 다른 프로토콜들에 비해서, 다수의 경로를 이용할 경우에도 안정적인 전달 지연 시간을 제공하고 있다. 이것은 제안 프로토콜이 EDM에 비해 주경로를 통한 데이터 전달에서 통신 간섭의 영향을 덜 받고, 소스의 데이터 분배와 노드의 데이터 전달에 대한 부담이 RDGM에 비해 적기 때문에 가능하다.

게다가, 제안 프로토콜은 신뢰성과 신속성을 개선하면서도 기존 분리형 다중경로들과 비슷한 에너지 소비량을 요구하는 것을 실험을 통해서 확인할 수 있다. 이 결과는 그림 7의 그래프에서 보여준다. 다중경로의 수가 증가할수록 제안 방법이 EDM보다 전체 전달 홉수가 증가하지만, 통신 혼잡과 충돌로 인한 노드의 에너지 손실이 적어 평균

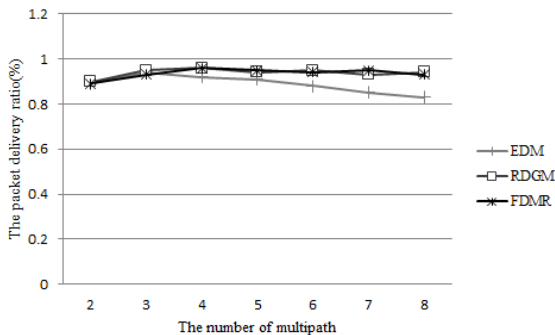


그림 5. 패킷 전달 비율  
Fig. 5. The Packet Delivery Ratio

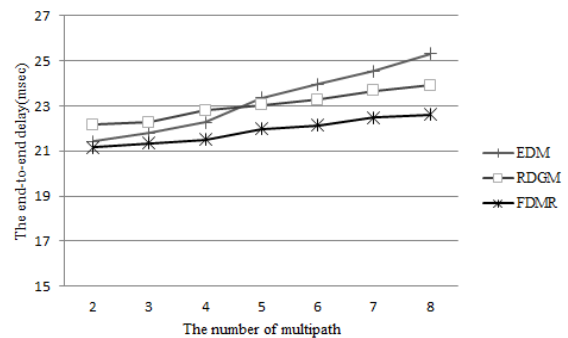


그림 6. 종단 간 지연 시간  
Fig. 6. The End-to-End Delay Time

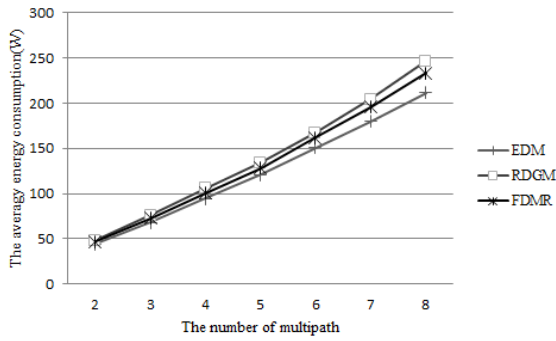


그림 7. 평균 에너지 소비  
Fig. 7. The Average Energy consumption

에너지 소비율은 많은 차이를 보이지 않고 있다. 또한, 제안 방법은 RDGM에 비해서 소스와 싱크 주변의 통신 혼잡이 적고 데이터 분배와 수렴이 간단하여 에너지 소비가 낮은 것을 확인할 수 있다. 결과적으로, 이번 장에서는 제안된 프로토콜이 정상적인 환경에서 다중경로의 수가 증가할수록 이전에 제안된 연구들보다 개선된 성능을 제공한다는 것을 실험을 통해 입증하였다.

4.3. 불규칙 네트워크에서의 실험 성능 분석

이번 단락에서는 홀이 있는 불규칙적인 네트워크 환경에서 프로토콜들의 성능을 실험하고 제안방법의 성능을 분석하였다. 홀 크기의 변화에 따른 세 가지 이슈에 대한 시뮬레이션 결과는 그림 8~10에서 확인할 수 있다. 불규칙 네트워크 환경에서 이뤄진 실험에서는 모든 프로토콜들이 4개의 경로를 구축하여 동일한 시험 환경을 구성하였다. 시험 결과인 그래프를 분석하기에 앞서, RDGM은 홀 우회 알고리즘의 부재로 홀의 크기가 커질수록 신뢰성과 전달 지연 시간 항목에 대한 성능이 급격히 악화되었다. 또한, 에너지 소비 항목에서는 패킷 전송이 중단된 경로들로 인해서 패킷 전달이 중단되기 때문에 발생하는 에너지 소비의 감소와 같은 측정결과가 나온다. 따라서 제안 방법의 주요 비교 대상은 EDM을 불규칙 네트워크 환경에서도 강건하게 유지할 수 있도록 홀 우회 전략을 적용한 노드 분리형 다중경로 프로토콜인 RDM을 대상으로 한다.

그림 8은 패킷 전달 비율에 대한 각 프로토콜의 성능 분석 결과를 그래프로 보여주고 있다. 제안된 프로토콜은 다른 프로토콜들에 비해서 네트워크 장애에 더 강건하다는 것을 안정적인 그래프를 통해 확인할 수 있다. 이런 결과의 이유는, 네트워크 홀이 발생했을 때, RDM이 우회 경로를 구성하는 과정에서 장애 지역의 정보를 수집하고 우회 경로를

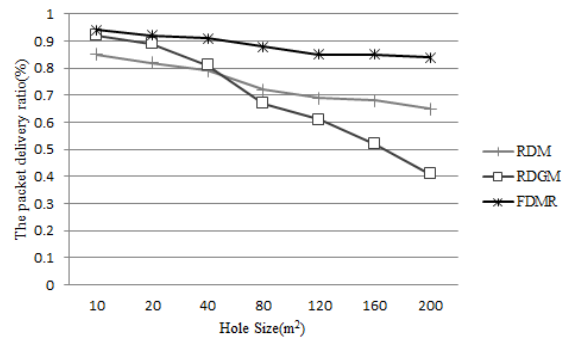


그림 8. 패킷 전달 비율  
Fig. 8. The Packet Delivery Ratio

새로 구성하는 과정에서 다중경로의 일부 또는 전부를 통한 데이터의 전달이 중단되기 때문이다. 이와 같은 데이터의 전달 중단은 패킷 전달률이 저하되고 평균 전달 지연 시간이 증가되는 원인이 된다. 반면에, 제안 프로토콜은 네트워크 홀이 발생했을 때, 우회 전송과 동시에 경로를 재구성하기 때문에 패킷 전달의 중단 없이 안정적으로 목적지까지 데이터를 전달할 수 있는 것이다.

다음으로 중단 간 전달 지연 시간의 성능을 분석한 결과는 그림 9와 같다. 그래프의 결과는 RDM이 홀의 증가에 따라서 전달 지연시간이 가장 많이 증가하는 것을 보여준다. 심지어, 홀의 크기가 100m²에서는 우회 경로가 없는 RDGM보다도 더 많은 지연시간을 보여준다. 이것은 RDM이 홀의 정보를 수집하고 새로운 경로를 소스가 생성하기 위한 과정에서 패킷의 전달이 중단되는 현상과 새로 생성된 경로들이 다 같이 우회되기 때문이다. 하지만, 제안 방법은 홀의 정보를 수집하거나 중앙 집중 관리를 이용하지 않기 때문에 데이터 전달의 중단과 지연 없이 동적으로 경로를 재구성할 수 있어 가장 낮은 지연시간 증가율을 보여준다. 이런 이유로 네트워크 오류 영역이 넓어져도 중단 간 전달 지연시간에서 선행 프로토콜들 보다 개선된 성능을 제공할 수 있다.

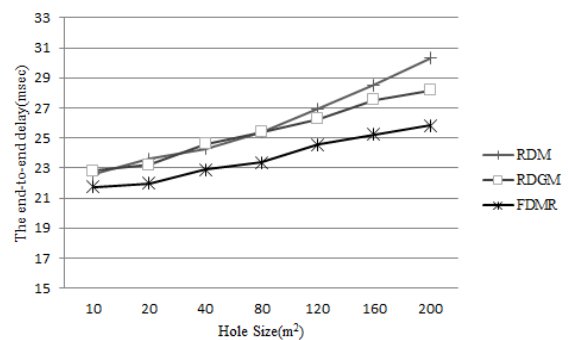


그림 9. 중단 간 지연 시간  
Fig. 9. End-to-End Delay Time

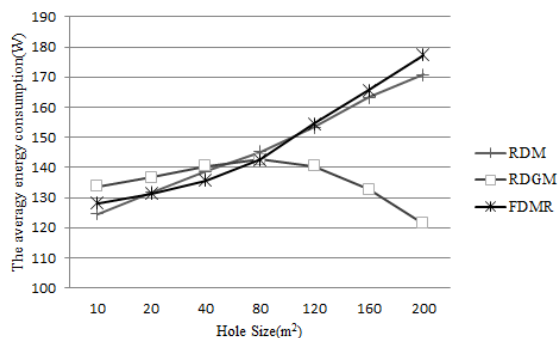


그림 10. 평균 에너지 소비  
Fig. 10. The Average Energy consumption

그림 10의 그래프에서는 각 프로토콜의 평균 에너지 소비량을 비교하였다. 이 결과는 제안 방법이 네트워크 장애로 인한 홀 우회 전송 및 경로 재구성을 신속히 수행하여 신뢰성과 신속성을 개선하고도 추가적인 에너지를 요구하지 않는 것을 확인 할 수 있다. 다시 말해서, 제안방법은 성능을 개선시키면서 RDM과 비슷한 에너지 소비율을 보여주고 있다. 하지만, 홀 크기가 100m<sup>2</sup>이상에서는 가장 많은 에너지를 소비하고 있는 것을 볼 수 있다. 이것은 다중 경로 전체를 우회 수정하면서 패킷을 전달하기 때문에 나타나는 현상이다. 이와 달리, RDM은 데이터 전달을 중지하고 새로운 경로를 생성하면서 경로 수정 시간동안 노드의 에너지 소비가 절약되었기 때문이다. 결과적으로, 에너지 효율성 측면에서는 제안된 방법이 다른 프로토콜에 비해서 약간이나마 우수하다는 것을 확인할 수 있다. 이번 장에서는 제안된 프로토콜이 네트워크 장애가 있는 불규칙적인 환경에서도 기존의 선행 연구들보다 개선된 라우팅 성능을 제공한다는 것을 실험을 통해 입증하였다.

### V. 결 론

본 논문에서, 우리는 이전에 연구된 분리된 다중 경로의 문제점을 살펴보고, 이를 개선하기 위해서 지역 결정 기반의 유연한 분리형 다중경로 라우팅 프로토콜 FDMR을 제안하였다. 제안된 프로토콜의 목적은 선행 다중경로 연구들이 고려하지 않았던 통신 간섭과 혼잡, 그리고 네트워크 오류로 인해서 다중경로에서 발생하는 문제들을 개선하는 것이다. 다시 말해서, 다중의 경로들 간에 통신 간섭과 혼잡을 방지함으로써, 통신 오류로 인한 데이터 손실을 줄이고 통신 및 노드 장애와 같은 네트워크 장애로 인한 분리된 다중경로의 단절 현상을 방지하거나 복구하기 위한 것이다. 이를 위하여, FDMR은 분리된

다중경로의 구성 방법과 분리된 다중경로의 관리 방법을 제안하였다. 분리된 다중경로의 구성 방법은 지역 결정을 통해 통신반경이 분리된 다중경로를 역할 분담하여 생성하고 관리함으로써, 소스 노드의 부담을 줄여준다. 그리고 제안한 데이터 전달 방법은 분리형 다중경로를 이용해서 안정적이고 효율적인 패킷 전달을 제공한다. 마지막으로, 제안한 분리형 다중경로의 관리 방법은 불규칙적인 네트워크 환경에서도 다중경로가 강건하도록 지역 결정을 통해 분리된 다중경로를 신속하고 유연하게 관리함으로써, 네트워크 홀이 발생해도 강건하게 분리형 다중경로를 유지하여, 안정적인 라우팅 성능을 제공할 수 있다. 결과적으로, 제안 프로토콜은 응용에서 요구하는 높은 패킷 전달 비율과 안정적인 전달 지연 시간을 불규칙 네트워크 환경에서도 보장할 수 있도록 라우팅 성능을 안정적으로 개선하였다. 이런 개선된 성능 결과는 시뮬레이션을 통해서 확인할 수 있었다.

### References

- [1] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, "Wireless sensor networks: a survey," *Comput. Networks*, vol. 38, no. 4, pp. 393-422, Mar. 2002.
- [2] K. Romer and F. Mattern. "The design space of wireless sensor networks," *IEEE Wireless Commun.*, vol. 11, no. 6, pp. 54-61, Dec. 2004.
- [3] O. Younis, M. Krunz, and S. Ramasubramanian, "Node clustering in wireless sensor networks: recent developments and deployment challenges," *IEEE Network*, vol. 20, no. 3, pp. 20-25, Dec. 2006.
- [4] A. Boukerche, R. B. Araujo, and L. Villas, "Optimal route selection for highly dynamic wireless sensor and actor networks environment," in *Proc. 10th ACM Symp. Modeling, Analysis, Simulation Wireless Mobile Syst. (MSWiM '07)*, pp. 21-27, Chania, Greece, Oct. 2007.
- [5] D. Ganesan, R. Govindan, S. Shenker, and D. Estrin, "Highly-resilient, energy-efficient multipath routing in wireless sensor

- networks.” *ACM SIGMOBILE Mobile Comput. Commun. Review*, vol. 5, no. 4, pp. 11-25, Oct. 2001.
- [6] Q. Fang, J. Jao, and L. J. Guibas, “Locating and bypassing routing holes in sensor networks,” in *Proc. IEEE INFOCOM 2004*, vol. 4, pp. 2458-2468, Anchorage, U.S.A., Mar. 2004.
- [7] S. Dulman, T. Nieberg, J. Wu, and P. Havinga, “Trade-off between traffic overhead and reliability in multipath routing for wireless sensor networks,” in *Proc. IEEE Wireless Commun. Networking Conf. (WCNC 2003)*, vol. 3, pp. 1918-1922, New Orleans, U.S.A., Mar. 2003.
- [8] E. P. C. Jones, M. Karsten, and P. A. S. Ward, “Multipath load balancing in multi-hop routing in wireless sensor networks,” in *Proc. IEEE Wireless Mobile Comput. Networking, Commun. (WiMob 2005)*, pp. 158-166, Montreal, Canada, Aug. 2005.
- [9] S. Waharte and R. Boutaba, “Totally disjoint multipath routing in multihop wireless networks,” in *Proc. IEEE Int. Conf. Commun. (ICC '06)*, pp. 5576-5581, Istanbul, Turkey, June 2006.
- [10] M. Radi, B. Dezfouli, K. A. Baker, and M. Lee, “Multipath routing in wireless sensor networks: survey and research challenges,” *Sensors*, vol. 12, no. 1, pp. 650-685, Jan. 2012.
- [11] M. Maimour, “Maximally radio-disjoint multipath routing for wireless multimedia sensor networks.” in *Proc. ACM Workshop Multimedia Networking Performance Modeling (WMuNeP '08)*, pp. 26-31, Vancouver, Canada, Oct. 2008.
- [12] H. W. Oh, J. H. Jang, K. D. Moon, S. Park, E. Lee, and S.-H. Kim, “An explicit disjoint multipath algorithm for cost efficiency in wireless sensor networks,” in *Proc. IEEE Personal Indoor Mobile Radio Commun. (PIMRC)*, pp. 1899-1904, Istanbul, Turkey, Sep. 2010.
- [13] J. Lee, H. Park, S. Oh, Y. Yim, and S.-H. Kim, “A radio-disjoint geographic multipath routing in wireless sensor networks,” in *Proc. IEEE Advanced Inform. Networking Applicat. (AINA)*, pp. 803-809, Fukuoka, Japan, Mar. 2012.
- [14] S. Kim, H. Park, J. Lee, S. Oh, and S.-H. Kim, “A robust disjoint multipath scheme based on geographic routing in irregular wireless sensor networks,” *J. Korea Inst. Commun. Inform. Sci. (KICS)*, vol. 37, no. 1B, pp. 21-30, Jan. 2012.
- [15] N. Bulusu, J. Heidemann, and D. Estrin, “Gps-less low cost outdoor localization for very small devices,” *IEEE Personal Commun.*, vol. 7, no. 5, pp. 28-34, Oct. 2000.
- [16] F. Yu, E. Lee, T. Kim, J. Lee, and S.-H. Kim, “Circle path based sink location service for geographic routing scheme,” in *Proc. IEEE Wireless Commun. Networking Conf. (WCNC)*, pp. 1-6, Budapest, Hungary, Apr. 2009.
- [17] Scalable Network Technologies, *Qualnet*, Retrieved May, 30, 2013, from <http://www.scalable-networks.com>.
- [18] W. Ye, J. Heidemann, and D. Estrin, “An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks,” in *Proc. IEEE INFOCOM*, vol. 3, pp. 1567-1576, New York, U.S.A., June 2002.
- [19] V. Shnayder, M. Hempstead, M.-R. Chen, G. W. Allen, and M. Welsh, “Simulating the power consumption of large-scale sensor network applications,” in *Proc. ACM Embedded Networked Sensor Syst. (SenSys)*, pp. 188-200, Baltimore, U.S.A., Nov. 2004.
- [20] IEEE, *Wireless LAN Medium Access Protocol (MAC) and Physical Layer (PHY) Specification*, IEEE Std 802.11-2012, 2012.

**정 관 수 (Kwansoo Jung)**



2005년 2월 충남대학교 컴퓨터 공학과 졸업  
2007년 2월 충남대학교 컴퓨터 공학과 석사  
2010년 2월 충남대학교 컴퓨터 공학과 박사수료  
<관심분야> Internet Routing, Wireless Sensor Networks, Small Cell 등

**이 정 철 (Jeongcheol Lee)**



2008년 2월 충남대학교 전기정보통신공학부 컴퓨터전공 졸업  
2010년 2월 충남대학교 컴퓨터 공학과 석사  
2012년 8월 충남대학교 컴퓨터 공학과 박사수료  
<관심분야> Internet Routing, Wireless Sensor Networks, MANET, Multicast 등

**염 희 균 (Heegyun Yeom)**



1997년 2월 대전대학교 컴퓨터 공학과 졸업  
2002년 2월 대전대학교 컴퓨터 공학과 석사  
2007년 8월 대전대학교 컴퓨터 공학과 박사졸업  
<관심분야> Internet Routing, Wireless Sensor Networks 등

**김 상 하 (Sang-Ha Kim)**



1980년 서울대학교 학사  
1984년 University of Houston 석사  
1989년 University of Houston 박사  
1992년~현재 충남대학교 전기정보통신공학부 교수  
<관심분야> Internet Routing, Wireless Sensor Networks, MANET, 4G, Mobility 등

**박 호 성 (Hosung Park)**



2008년 2월 충남대학교 전기정보통신공학부 컴퓨터전공 졸업  
2010년 2월 충남대학교 컴퓨터 공학과 석사  
2012년 2월 충남대학교 컴퓨터 공학과 박사수료

<관심분야> Internet Routing, Wireless Sensor Networks, MANET 등