

무선 센서 네트워크를 위한 협력 다중경로 라우팅 프로토콜

정관수*

Cooperative Multipath Routing Protocol for Wireless Sensor Networks

Kwansoo Jung*

요약 무선 센서 네트워크에서 다중경로 라우팅 프로토콜은 데이터 전송의 신뢰성을 향상시키기 위한 대표적인 방법들 중에 하나이다. 그러나 기존의 다중경로 라우팅 방법들은 응용의 요구된 전송 신뢰성을 만족시킬 수 있는 경로의 수를 결정하고 탐색하는 방안이 설계의 초점을 맞추고 있다. 따라서 기존의 방법들은 경로의 수가 증가할수록 경로의 공유나 경로 간의 간섭으로 인한 전송 실패율이 증가하게 되고 데이터 보고에 필요한 에너지 소비량이 급격히 증가하는 문제점들을 가지고 있다. 이런 문제점들을 해결하기 위해서, 본 논문은 전달 신뢰성의 손실 없이 경로의 수를 줄이기 위한 에너지 효율적인 협력 다중경로 라우팅 프로토콜을 제안한다. 제안 방법은 무선 분리된 다중경로들이 상호 협력하여 경로 실패에 대한 높은 회복력을 제공하고 적은 경로의 수로도 높은 전달 신뢰성과 안정적인 전달 지연시간을 보장할 수 있다. 본 논문은 모의실험을 통해서 기존의 방법과 제안 방법의 라우팅 성능을 비교 분석한다.

Abstract Multipath routing technique is recognized as one of the effective approaches to improve the reliability of data forwarding. However, the traditional multipath routing focuses only on how many paths are needed to ensure a desired reliability. For this purpose, the protocols construct additional paths and thus cause significant energy consumption. These problems have motivated the study for the energy-efficient and reliable data forwarding. Thus, this paper proposes an energy-efficient cooperative multipath routing protocol with a small number of paths based on an inter path communication. The inter path communication (namely, cooperative multipath routing) in the proposed protocol helps to reinforce the multipath reliability and reduce the use of network resources. In addition, the proposed protocol provides a reliable end-to-end transmission time by using a transmission recovery method based on the local decision for the path or transmission failures.

Key Words : Sensor networks, Multipath routing, Reliability, Energy efficiency, Failure recovery.

1. 서론

무선 센서 네트워크(WSN)는 연산, 통신 및 감지 기능이 있는 대량의 센서 노드들이 넓은 지역에 무작위로 배포되어 자율적으로 네트워크를 구성한 것이다. 센서 노드들은 온도, 소리, 진동, 압력, 모션, 오염 물질 등의 물리적 또는 환경적 상태를 협력하여 감시하고 관리자에게 보고한다. 이런 특징 때문에 무선 센서 네트워크는

다양한 분야와 응용에서 사용되고 있다. 하지만 WSN은 센서 노드의 낮은 처리 능력과 무선 통신 사용, 제한된 에너지 등의 많은 제약으로 다양한 응용들의 성능 요구와 함께 효율적인 통신 프로토콜을 설계하도록 많은 도전을 부과한다. 특히, 위험 지형이나 적대적 지형에서 환경 감시, 영토 보안, 그리고 생명과 재산을 보호하기 위한 긴급하고 중요한 응용들을 위한 라우팅 기

*Corresponding Author : Division of Computer Engineering, Chungnam National University(ksjung79@gmail.com)
Received October 8, 2015 Revised October 10, 2015 Accepted October 15, 2015

술은 전달 신뢰성과 에너지 효율성을 모두 고려하여 설계되어야 한다[1,2].

일반적으로 WSN에서는 예견할 수 없는 (unforeseeable) 높은 채널 에러가 있을 수 있기 때문에 라우팅 프로토콜들이 사용자의 높은 요구 성능을 항상 만족시키기가 어렵다[3,4]. 이를 극복하기 위한 신뢰성 전송기술 중에 하나가 다중경로 라우팅(multipath routing)이다. 기본적으로 다중경로 라우팅은 데이터의 높은 전달 신뢰성과 낮은 지연 시간을 위해서, 여분의 패킷들(redundancy packets)을 다중의 경로를 통해서 동시 라우팅(concurrent routing)하는 방법을 이용한다. 하지만 동시 다중경로 라우팅은 경로들 간의 간섭으로 충돌 및 혼잡이 발생할 수 있으며, 경로들 간의 자원 공유로 인한 핫 스팟 문제도 고려되어야 한다[5,6]. 최근에 이런 문제들을 보완하기 위해서 다중의 경로들을 노드나 링크, 영역 등과 같은 기준으로 완전 또는 부분 분리된 다중경로를 구축하고 이용하는 분리형(disjoint) 다중경로 라우팅 기술이 연구되고 있다[2,5]. 이런 분리형 다중경로 라우팅 연구들은 각 경로의 독립적인 라우팅 성능을 기반으로 사용자의 요구 성능을 보장한다. 따라서 불규칙적인 WSN에서 지역적으로 높은 채널 에러율이 존재하거나 경로의 거리가 길어질수록 응용의 요구를 충족시키기 위해서 필요한 경로의 수가 급격히 증가할 수 있다[7,8]. 결과적으로 분리형 다중경로 라우팅은 향상된 라우팅 성능을 제공하지만, 여전히 네트워크 자원을 낭비하는 문제가 남아있다. 이런 문제를 해결하기 위해서 본 논문은 적은 수의 다중경로를 이용하여 에너지 효율적으로 다중경로 라우팅을 수행하는 새로운 라우팅 프로토콜을 제안한다.

제안 방법은 분리된 경로들이 가교 노드를 이용하여 상호 협력하는 에너지 효율적인 협력 다중경로 라우팅 프로토콜(Cooperative Multipath Routing Protocol)로 CMRP라 불린다. CMRP에서 가교 노드는 다중의 경로들 사이의 분리된 지역에 위치하여 전달 노드들의 데이터 전송을

추가 에너지 없이 감시할 수 있다. 또한 가교 노드들은 감시된 정보를 이용하여 경로의 전송 실패나 전달 지연을 판단할 수 있고, 이를 기반으로 전송 실패를 지역적으로 복구하거나 경로의 전달노드들에게 보고하여 다중경로 관리에 기여한다. 결과적으로 CMRP은 열악한 무선 통신 환경에서도 적은 경로의 수를 이용하여 높은 전달 신뢰성을 보장할 수 있는 에너지 효율적인 다중경로 라우팅을 제공한다.

본 논문에서 남은 부분은 다음과 같이 구성된다. 2장에서는 다중경로 라우팅 기술에 대한 문제 정의와 접근 방안에 대해서 소개한다. 3장에서는 제안 방법인 협력 다중경로 라우팅 프로토콜에 대해서 자세히 설명한다. 4장에서는 성능 시험을 통한 제안 방법의 라우팅 성능을 평가한다. 마지막으로 5장에서는 본 논문의 결론을 기술할 것이다.

2. 문제정의

기존 다중경로 라우팅 프로토콜들은 사용자의 요구 신뢰성을 보장하기 위한 경로의 수를 이용하여 데이터를 전송한다. 따라서 이들의 대부분은 다음과 같은 수식(1)에 기반을 둔 방법으로 필요한 다중경로의 수를 계산하고 구축한다.

$$N_P = \frac{\log(1 - DR)}{\log(1 - (1 - ER)^{HC})} \quad (1)$$

수식(1)에서 NP(the number of paths)는 경로들의 수이고 DR(desired reliability)는 요구 신뢰성, ER(error rate)은 채널 에러율, HC(hop count)는 홉 수를 나타낸다. 따라서 이들 다중경로 라우팅 프로토콜들의 성능은 채널 에러율과 목적지까지의 거리에 많은 영향을 받게 된다. 더욱이 응용의 요구 신뢰성이 높은 경우, 기존 방법들은 열악한 무선 환경이나 장거리 보고를 위해서 매우 많은 경로의 수를 요구하게 된다. 이는 급격한 자원 소비를 초래하여 네트워크 생명 주기를 단축시키게 된다. 또한 다중경로 라우팅 중에 발생하는 지역적인 문제를 인지하고 해결

하기까지 상당한 시간이 소요되기 때문에, 불규칙한 네트워크에서 요구 신뢰성을 보장하지 못할 수도 있다. 결과적으로 기존의 다중경로 라우팅 연구들은 안정적인 데이터 전송을 위해서는 비효율적으로 많은 자원을 사용하여 요구 성능을 보장하게 된다. 이와 같은 문제를 해결하기 위해서는 두 가지 측면에서 접근해야 한다. 하나는 경로의 수를 증가시키지 않고 요구 신뢰성을 만족시키는 것이다. 즉 최소의 자원으로 요구 신뢰성을 보장하는 방법이다. 다른 하나는 불규칙한 통신환경에 대한 다중경로의 강건성과 회복력을 향상시키기 위하여, 지역 결정 방법의 즉각적인 복구 전송을 통해서 안정적인 다중경로 라우팅 성능을 보장하는 방법이다.

3. 제안방법

본 논문의 목적은 다중경로 라우팅의 에너지 효율성을 높이기 위한 것으로 적은 경로의 수로 사용자의 요구 성능을 보장할 수 있는 강건한 다중경로를 구축하고 활용하는 방안을 제안한다. 이 장에서는 다중경로의 구축 방안과 다중경로 라우팅 방안을 자세히 설명한다. 우선, 제안 방법의 무선 센서 네트워크 초기화 방법은 싱크에 의해서 수행되며 전통적인 플러딩(flooding) 방식 [9]을 이용한다. 이 초기화 과정이 완료되면, 모든 노드들은 주변 이웃 노드들의 무선통신 환경 정보와 싱크까지의 홉 거리, 그리고 지연 시간과 같은 초기 라우팅 정보를 획득할 수 있다. 이렇게 습득된 라우팅 정보는 제안 방법에서 각 노드들이 경로를 탐색하고 유지하기 위해서 활용하는 정보로 이용된다. 초기화 과정을 통해서 얻은 라우팅 정보의 최신성과 정확성을 위해서 제안 방법은 노드들이 활동할 때마다 구축된 라우팅 정보를 갱신하여 네트워크의 운영시간이 지날수록 안정적이고 정확한 라우팅 정보를 이용한다.

3.1 협력 다중경로 구축 방안

제안하는 무선 분리형 협력 다중경로는 경로

간의 상호통신을 위해서 서로의 역할이 다른 세 가지 종류의 경로들로 구성된다. 우선, 첫 번째는 다중경로의 기준이 되는 기본 경로이다. 기본 경로는 다중경로 중에서 첫 번째로 설립되며, 성능이 우수한 고품질의 링크들로 구성된다. 두 번째는 기본 경로와 협력하는 무선 분리된 두 개의 부경로들이다. 그리고 마지막은 경로들의 협력을 지원하기 위한 가교 노드로 구성되는 다수의 연결 경로들이다. 따라서 우리는 각 경로의 특성에 따른 세 가지 방법의 경로 탐색 알고리즘을 설명한다.

3.1.1 기본경로 탐색 알고리즘

제안하는 기본경로 탐색 알고리즘은 이전의 라우팅 연구들에서 제안된 경로 강화(reinforcement) 방안[9,10]에 기반을 둔 향상된 경로 탐색 방법을 이용한다. 제안 알고리즘은 노드들의 라우팅 정보를 기반으로 가장 우수한 성능의 링크를 선정하기 위해서 다음과 같은 기준을 근거로 전달 노드를 선정한다.

1) 최단 경로를 제공하는 노드(즉, 목적지까지의 홉 수가 짧은 노드)를 선정한다.

2) 채널 에러율이 가장 낮은 노드를 선정한다.

기본경로 발견과정은 다음과 같다. 우선 소스 또는 기본 경로의 전달노드에서 이웃한 노드들 중에 싱크까지의 홉 수가 가장 짧은 노드들을 선정하고, 그 중에서 링크의 에러율이 낮은 노드들을 선정한다. 그런 다음에 선정된 노드를 기본경로의 멤버로 참여시키기 위한 PREQ(Path discovery REQuest) 메시지를 선정된 노드에게 전달한다. 메시지는 다중경로의 정보(소스 및 싱크의 정보, 경로의 수, 경로의 평균 잔여 에너지 등)와 라우팅 정보(데이터 전달률, 지연시간)가 포함된다. 이와 같은 기본경로 탐색 절차는 PREQ 메시지가 싱크에 전달될 때까지 계속 진행된다. 그런 다음, PREQ를 수신한 싱크는 기본경로의 설립 완료를 위해서 소스에게 PREP(Path discovery REPLY) 메시지를 임시의 기본경로를 통해 전송한다. 이 메시지의 전달을

수행한 전달노드(멤버노드)들은 메시지 안에 포함된 경로 정보를 이용하여 자신의 라우팅 정보를 업데이트한다. 이를 통해서 소스를 포함한 모든 전달노드들은 싱크까지의 예상 신뢰성과 지연 시간을 획득할 수 있으며, 이 정보들을 이용하여 라우팅 및 경로 관리에 활용할 수 있다. 추가적으로 PREP 메시지는 무선 분리된 부경로들을 구성하기 위한 공지 메시지의 역할도 수행한다. 이와 같은 탐색 알고리즘은 그림 1과 같이 의사코드(pseudo code)로 작성될 수 있다.

```

if received_msg_type == PREQ then
  numOfList = Fn_Search_RT(candidate_list);
  if numOfList > 1 then
    numOfList = Fn_shortest_distance ( candidate_list );
    if numOfList > 1 then
      | numOfList = Fn_lowest_channel_error(candidate_list);
    end
    if numOfList > 1 then
      | numOfList = Fn_shortest_delivery_time(candidate_list);
    end
  end
  if num_ofList == 1 then
    | flag_select = true;
  else
    if num_ofList > 1 then
      | flag_select = Fn_select_random(candidate_list);
    end
  end
  if Flag_select == true then
    send_msg = Fn_update_msg(received_msg, candidate_list);
    Fn_send_msg(send_msg);
    Fn_update_RT(received_msg, send_msg);
    return success;
  else
    | Fn_send_msg(error_msg);
  end
end
return failure;
end

```

그림 1. 기본경로 탐색 과정에서 노드 선정을 위한 의사 코드
 Fig. 1. Pseudo code for node selection algorithm in default path discovery process

3.1.2 부경로 탐색 알고리즘

기본경로로부터 무선 분리된 부경로의 탐색 알고리즘은 기회주의적 노드 선정 방법을 이용한다는 것이다. 이는 기존의 기회주의적 라우팅 방법[11]을 기반으로 멤버 노드의 radio range 안에 위치한 이웃 노드들 중에서 무선 분리와 라우팅 성능에 대한 요구조건에 가장 적합한 노드가 경로 선정을 위한 경쟁에 참여하는 방법이다. 이를 위해서 부경로의 전달노드들은 이웃 노

드들에게 OPREQ(Opportunistic Path discovery REQuest) 메시지를 전송하여 경쟁을 유도한다. 제안 알고리즘에 의한 노드 선정 과정은 다음과 같다. 소스나 부경로의 멤버로 선정된 전달노드는 다음 전달 노드를 선정하기 위해서 OPREQ 메시지를 단일 홉 브로드캐스팅을 한다. OPREQ 메시지를 수신한 후보 노드들은 자신의 라우팅 성능에 따른 대기시간 이후에 전달노드 참여를 위한 자신의 OPREQ 메시지를 전송한다. 부경로 탐색은 싱크로부터 1 hop 떨어진 전달노드를 선정할 때까지 계속 진행된다. 기본경로 탐색 방법과 동일하게 싱크는 부경로의 탐색 결과로 OPREP (Opportunistic Path discovery REPLY) 메시지를 이용해서 소스에게 보고한다. 소스에서 OPREP 메시지를 수신하면 부경로의 생성 과정이 완료된다. 추가적으로 제안 방법은 네트워크 환경이나 사용자 요구사항에 따라서 부경로의 수를 유연하게 구성할 수 있다. 이는 소스가 기본경로와 1개의 부경로를 생성하고 수집된 네트워크와 라우팅 정보를 기반으로 추가적인 부경로의 필요성을 판단한 후에 탐색할 수 있다. 물론, 프로토콜 운영 중에 추가적인 부경로를 설립할 수도 있다.

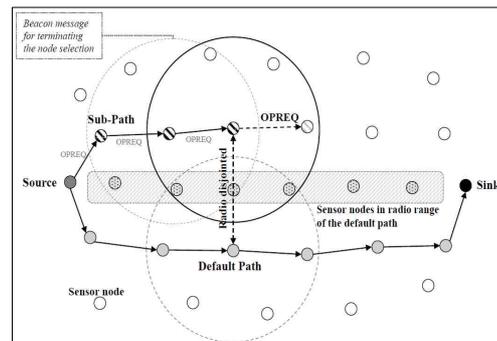


그림 2. 부경로 탐색 과정의 예
 Fig. 2. An example of the sub-path discovery process

3.1.3 연결경로 탐색 알고리즘

연결 경로는 기본경로와 부경로의 협력통신을 지원하기 위해서 가교 노드를 통해서 연결된 2개의 링크로 구축된 짧은 경로이다. 가교 노드는

이웃한 경로들을 감시하고 경로 간의 협력 통신을 위한 데이터 중계의 역할을 수행한다. 따라서 제안 방법은 이웃한 두 경로들과의 링크 품질이 가장 우수한 노드를 가교 노드로 선택한다. 자세한 가교 노드의 선정 과정은 다음과 같다. PREQ와 OPREQ를 모두 수신한 노드들 중에 경로에 참여하지 않은 노드들은 자신이 두 경로 사이의 무선 중첩지역에 위치한다는 것을 인지하고, 가교 노드 선정을 위한 BPREQ(Bridge Path REQuest) 메시지를 기본경로의 전달 노드로 전송한다. 이 메시지에는 이웃한 기본경로와 부경로의 전달노드들에 대한 링크정보를 담고 있다. 이 메시지를 수신한 기본경로의 전달노드는 일정시간 동안에 추가적인 BPREQ 메시지를 수신하고 가교 노드의 후보들 중에서 가장 라우팅 성능이 우수한 노드를 선정한다. 그리고 선정 결과를 공지하기 위한 BPRESP(Bridge Path RESPonse) 메시지를 브로드캐스팅한다. 제안 방법은 복구 전송 시에 싱크와 더 가까운 전달 노드가 먼저 데이터를 전달할 수 있도록 가교 노드의 공유를 허용한다. 이는 가교 노드가 필요한 경우에만 이용되기 때문에 중복된 사용이나 통신 혼잡의 문제가 발생하지 않고 라우팅 성능을 향상시킬 수 있는 이점이 있다. 그림 3은 연결 경로 탐색 과정의 예를 보여준다.

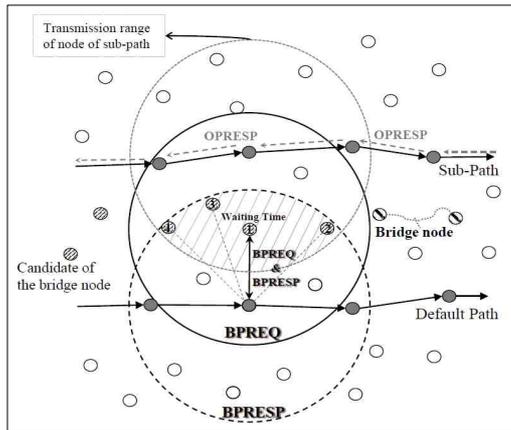


그림 3. 연결경로 탐색 과정의 예
Fig. 3. An example of the bridge path discovery process

3.2 협력 다중경로 라우팅 방안

3.2.1 경로 선정 및 데이터 전송 방법

협력 다중경로를 효율적으로 이용하기 위해서는 응용의 요구사항을 만족시킬 수 있는 경로들의 집합과 전송 모드(협력과 비협력)를 선정해야 한다. 이를 위해서 제안 방법은 소스가 협력 다중경로로 구성 가능한 경로 집합들이 제공하는 전달 신뢰성과 에너지 소비량을 사전에 분류 및 계산한다. 신뢰성 관점에서 구성 가능한 경로들의 집합은 총 10가지이다. 이 중에서 비협력 경로의 집합(1,2,3)은 두 개의 협력 경로의 집합들 보다 에너지 소비가 많고 신뢰성이 낮기 때문에, 분류에서 제외하고 사용하지 않는다. 표 1은 소스에 의해 관리되는 경로 집합 분류표를 보여준다.

표 1. 경로 집합 분류를 위한 예제
Table 1. An example for classification of path-sets

Set of paths	1	2	3	1,2	1,3	2,3	1-2	1-3	2-1-3
Reliability	R^P			$1-(1-R^P)^2$			$1-(1-R^{CP})^2$		$1-(1-R^{CP})^3$
Energy consumption	$P_H * H_{EC}$			$2P_H * H_{EC}$			$(2P_{H\alpha}) * H_{EC}$		$(2P_{H\alpha+\beta}) * H_{EC}$

여기서 R^P 는 단일 경로의 비협력 전달 신뢰성이고 R^{CP} 는 단일 경로의 협력 전달 신뢰성이다. 기본적으로 $R^P \leq R^{CP}$ 가 보장된다. 그리고 P_H 는 경로의 총 홉 수이고 H_{EC} 는 단일 홉 전송에 소요되는 에너지 소비량이다. α 와 β 는 인접한 두 경로 사이의 가교 노드가 복구 전송을 시도한 횟수이다.

소스는 경로 집합 분류표를 기반으로 경로 집합 DB를 구축한다. DB 구축 방법은 두 가지이다. 첫 번째는 소스가 라우팅 정보 수집 요청 메시지를 이용하여 다중경로의 모든 경로들에 대한 라우팅 정보를 수집하는 적극적 방법이다. 이는 경로 구축 초기와 라우팅 정보 수집이 장시간 이뤄지지 않은 경우에 이용된다. 다른 하나는 데이터 전달 과정에서 역학습을 통해 스스로 수집되는 라우팅 정보를 이용하는 소극적 방법이

다. 이를 위해서 모든 전달 노드들은 단일 경로의 전송 신뢰성과 협력 경로의 전송 신뢰성을 관리한다. 또한 에너지 정보의 공유를 위해서, 전달 노드들은 데이터 전달 시에 경로의 평균 에너지와 최소 에너지를 담아서 전송한다. 이렇게 구축된 DB는 소스에서 경로 선정 조건들과 함께 사용할 경로 집합과 전송 모드를 선정하는데 활용된다. 경로 선정 조건들은 다음과 같다.

- 1) 요구된 라우팅 성능을 보장할 수 있는가?
- 2) 에너지 효율적인 라우팅을 지원할 수 있는가?
- 3) 네트워크 자원(경로의 잔여 에너지 및 트래픽 처리량)이 충분한가?

3.2.2 경로 감시 및 복구 전송 방법

제안하는 다중경로 감시 방법은 무선 센서 네트워크의 브로드캐스팅 통신 특성을 이용하여 가교 노드가 이웃한 경로들의 통신을 엿듣고 이를 활용한다. 구체적인 활용 방법은 무선 중첩지역에 위치한 가교 노드들이 다중경로를 통해 전달되는 데이터가 수신되면, 이를 분석하여 간단하고 아주 적은 비용으로 다중경로의 데이터 전달을 감시할 수 있다. 또한, 제안된 감시 방법은 가교 노드들이 감시된 정보를 근거로 이웃한 경로의 전달의 실패나 경로의 실패를 감지하고 판단한다. 이를 위해서 가교 노드는 이웃 경로의 전달 노드들에 대한 평균 데이터 전달 시간을 수집하고 관리한다. 이 정보는 경로의 전송 실패를 정확하게 판단하기 위한 전달 노드들의 데이터 전달 임계 시간을 계산하기 위해 이용된다. 구체적인 판단 과정은 다음과 같다. 가교 노드에서 협력노드의 데이터가 수신되면, 데이터가 감지된 경로와 협력하는 경로를 감시한다. 감시 중인 경로에서 전달 임계 시간까지 데이터가 담지되지 않으면 가교 노드는 감시 중인 경로의 데이터 전달을 지연 및 실패로 판단하고 전송 복구를 시도한다. 제안하는 복구 전송 방법은 가교 노드에서 전송의 실패를 판단할 때까지 수신된 데이터를 저장하고 있다가 경로가 실패로 판단되면, 저장된 데이터를 브로드캐스팅한다. 복구

데이터를 수신한 다중경로의 전달 노드들은 경로 상의 데이터 전달이 계속 이뤄지도록 자신의 다음 전달 노드에게 데이터를 전달한다. 다중경로의 전달 노드들은 복구 전송으로 인하여 데이터가 중복 수신된 경우에 이를 무시한다. 이처럼 제안된 복구 전송 방법은 경로의 데이터 전달 실패를 지역적이고 즉각적으로 복구하여 다중경로의 강건성(robustness)과 결합 허용성(fault-tolerance)을 향상시킨다.

결과적으로, 제안 방법은 협력 다중경로 라우팅을 위해서 필요시에만 경로를 감시하고 전송의 실패를 지역적이고 즉각적으로 복구할 수 있는 에너지 효율적인 복구 전송 방법을 통해서 사용자의 요구 신뢰성을 만족시켜줄 수 있다.

4. 성능평가

이번 단락에서는 협력 다중경로 라우팅 프로토콜의 성능 시험을 수행하고 이를 비교 평가한다. 제안 방법의 성능 평가를 위한 비교대상은 다중경로 라우팅 프로토콜의 대표적인 선행 연구들로 ReInForM[12], MMSPEED[13], MCMP[14]를 선정하였다. 프로토콜의 성능비교를 위한 평가 항목들은 다음과 같다.

- 패킷 전달률: 소스에서 전송된 패킷의 수 대비 손실 없이 목적지에 전달된 패킷의 수
- 에너지 소비량: 센서 노드가 패킷을 전송하기 위해 소비한 에너지의 양

프로토콜들의 성능 시험을 위한 시뮬레이션 환경은 표2와 같다. 그리고 각 시험에 사용되는 기본 값은 경로 길이 15홉, 요구 신뢰성 90%, 채널 에러율 10%이다.

표 2. 시뮬레이션 환경과 변수 설정
Table 2. Simulation Environment and Parameters Settings

Parameters	Values
Network size	500m X 500m
Number of sensors	1,000
Node placement	Random deployment
Number of source	1

Number of Destination	1
Sensor node model	MICA2
Current draw	Tx: 20mA => 3.12μJ/bit Rx: 15mA => 2.34μJ/bit
Initial Battery Power	10 Joules
Radio range	30m (omni-directional)
MAC layer	IEEE 802.11 DCF
Packet sizes	Control packet: 15byte Data packet: 64byte
Simulation time	600~1,000 seconds

4.1 패킷 전달률에 대한 성능 분석

이번 절에서는 경로의 길이, 요구 신뢰성, 채널 에러율에 따른 각 프로토콜들의 패킷 전달률에 대한 성능 시험을 분석한다. 우선 그림 4에서 기존 다중경로 라우팅 프로토콜들은 홉 길이의 변화에 따른 패킷 전달률의 편차가 안정적이지 못한 것을 보여주고 있다. 이는 다중경로의 수에 의존하는 라우팅 신뢰성의 특징 때문이다. 하지만 제안 방법은 경로의 길이가 길어져도 안정적인 패킷 전달률을 제공하는 것을 확인할 수 있다.

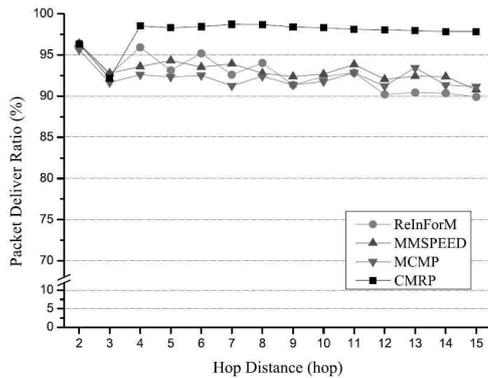


그림 4. 경로 길이에 따른 패킷 전달률
Fig. 4. Packet delivery ratio for hop distance

그림 5는 각 프로토콜의 요구 신뢰성에 따른 전달 신뢰성을 보여주고 있다. 기존의 다중경로 라우팅 프로토콜들은 요구된 신뢰성을 보장하는 수준의 패킷 전달률을 제공한다. 하지만 제안 방법은 요구 신뢰성에 관계없이 높은 신뢰성을 제

공한다. 그러나 제안 방법은 높은 신뢰성에 비하여 추가적으로 소비하는 에너지가 다른 프로토콜과 비슷하거나 오히려 적다. 이에 대한 시험 결과는 다음절에 나오는 그림 8에서 확인할 수 있다.

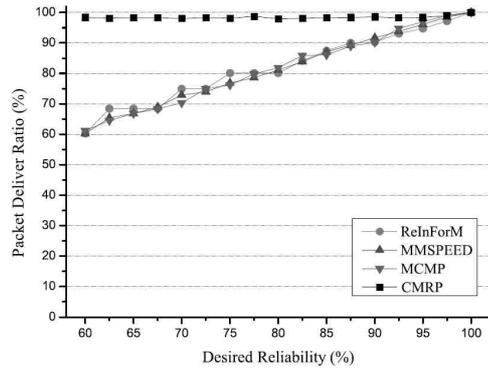


그림 5. 요구 신뢰성에 따른 패킷 전달률
Fig. 5. Packet delivery ratio for desired reliability

그림 6은 각 프로토콜의 채널 에러율에 따른 전달 신뢰성을 보여주고 있다. 이 시험의 결과는 홉 수 증가와 전달 에러율 증가의 상관관계로 인하여 그림 4와 비슷한 결과를 보여주고 있다. 결과에서 모든 프로토콜들은 채널 에러율이 증가해도 요구 신뢰성을 만족시켜주는 신뢰성을 제공하고 있다. 하지만 제안 방법이 가장 안정적이고 높은 패킷 전달률을 제공함으로써, 다중경로 라우팅의 신뢰성 향상에 기여한 것을 알 수 있다.

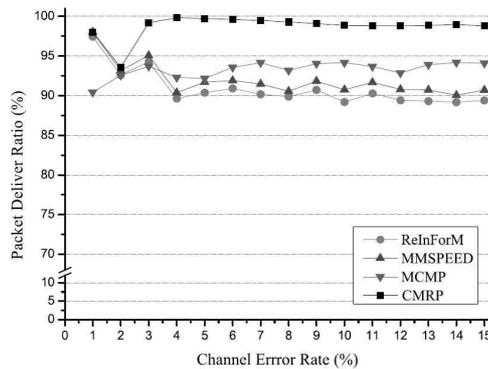


그림 6. 채널 에러율에 따른 패킷 전달률
Fig. 6. Packet delivery ratio for channel error rate

4.2 패킷당 에너지 소비량에 대한 성능 분석

이번 절에서는 경로의 길이와 요구 신뢰성, 채널 에러율에 따른 패킷당 에너지 소비량과 시뮬레이션 시간에 따른 전체 에너지 소비량에 대한 성능 시험을 분석한다. 그림 7은 기존 다중경로 라우팅 프로토콜들보다 제안 방법이 경로 길이의 변화에 대해서 가장 낮고 안정적인 패킷당 평균 에너지 소비량을 보여준다.

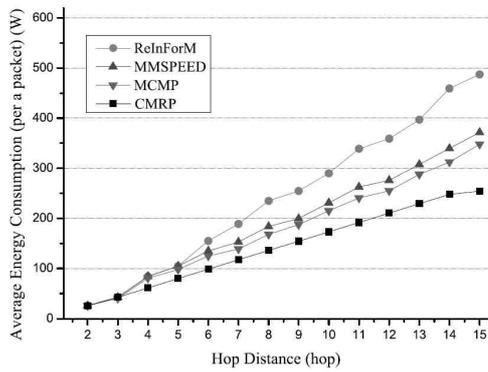


그림 7. 경로 길이에 따른 패킷당 평균 에너지 소비량
Fig. 7. Average energy consumption per a packet for hop distance

그림 8에서는 요구 신뢰성이 증가할수록 기존 방법들의 에너지 소비량이 급격하게 증가하는 것을 보여준다. 이에 반하여, 제안 방법은 요구 신뢰성이 증가하여도 아주 미세한 수준의 에너지 소비량을 보여준다.

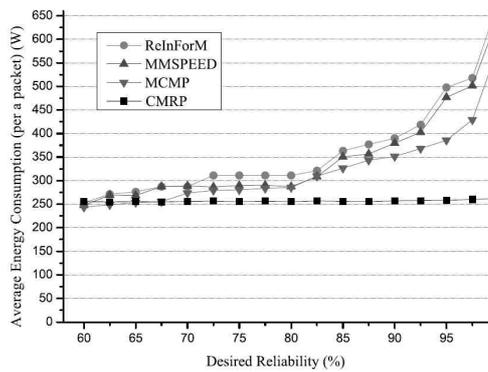


그림 8. 요구 신뢰성에 따른 패킷당 평균 에너지 소비량
Fig. 8. Average energy consumption per a packet for desired reliability

지 소비량의 증가를 요구하고 있다. 이는 제안 방법이 적은 경로의 수를 이용하는 협력 전송으로 요구 신뢰성을 보장하기 때문이다. 이런 현상은 채널 에러율이 증가하는 상황에서도 비슷한 결과를 보여주게 된다. 채널 에러율에 따른 결과는 그림 9에서 확인할 수 있다.

그림 9는 채널 에러율이 증가할수록 각 프로토콜이 소비하는 에너지의 증가율을 보여준다. 앞서 언급했듯이 제안 방법이 다른 프로토콜에 비해서 열악한 무선 환경에서 적은 에너지로 요구 신뢰성을 보장하는 것을 확인할 수 있다.

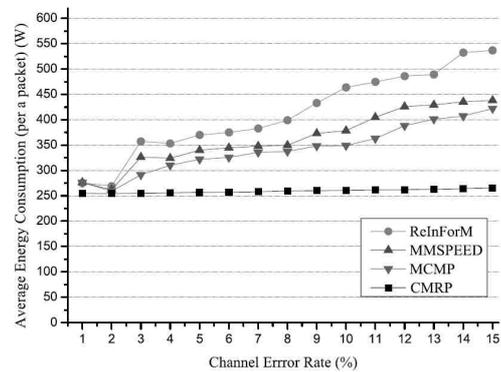


그림 9. 채널 에러율에 따른 패킷당 평균 에너지 소비량
Fig. 9. Average energy consumption per a packet for channel error rate

마지막으로 그림 10은 시뮬레이션 시간에 따른 각 프로토콜의 전체 에너지 소비량에 대한 시험 결과를 보여준다. 그 결과는 기존 프로토콜

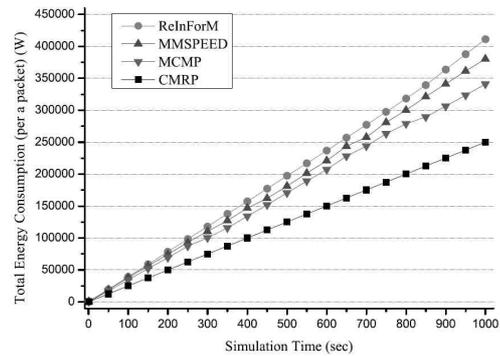


그림 10. 시뮬레이션 시간에 따른 전체 에너지 소비량
Fig. 10. Total energy consumption for simulation time

들에 비해서 제안 방법이 에너지 소비량이 적고 증가율도 가장 안정적인 것을 나타내고 있다.

5. 결론

본 논문은 다중경로의 협력 라우팅을 이용하여 데이터 전달 신뢰성을 보장하면서도 적은 경로의 수를 사용하는 에너지 효율적인 협력 다중경로 라우팅 프로토콜을 제안하였다. 제안 방법은 무선 분리된 다중경로를 탐색하고 경로 간의 무선중첩지역에 가교 노드들을 이용한 연결 경로를 설립하여 다중경로의 강건성을 강화하여 열악한 무선 환경에서도 적은 수의 경로들만으로도 응용의 요구 신뢰성을 보장할 수 있는 다중경로 라우팅을 제공한다. 추가적으로 본 논문은 제안 방법의 성능 평가를 위해서 시뮬레이션을 수행하고 기존 방법들과 비교를 통해서 제안 방법의 우수한 성능을 입증하였다.

REFERENCES

- [1] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, "Wireless sensor networks: a survey," *Computer Networks*, 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 Wireless Communications*, vol. 11, no. 6, pp. 6-28, Dec. 2004.
- [3] Z. Wang, E. Bulut, and B. K. Szymanski, "Energy Efficient Collision Aware Multipath Routing for Wireless Sensor Networks," in *Proceedings of IEEE International Conference on Communications (ICC)*, pp. 1-5, Jun. 2009.
- [4] J. Kim, J. Choi, M. Shin, J. Lee and S. Yoo, "An efficient routing algorithm considering packet collisions in cognitive radio ad-hoc Network," *J-KICS*, vol. 38, no. 9, pp. 751-764, Sep. 2013.
- [5] 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.
- [6] S. Mueller, R. Tsang, and D. Ghosal, "Multipath Routing in Mobile Ad Hoc Networks: Issues and Challenges," *Performance tools and applications to networked systems*, Springer, pp. 209-234, 2004.
- [7] 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.
- [8] H. Heo, J.-H. Hwang, and M.-S. Yoo, "Interference-free multipath routing protocol for M2M wireless network to enhance packet delay performance," *J-KICS*, vo. 35, no. 12, pp. 1859-1866, Dec. 2010.
- [9] D. Ganesan, R. Govindan, S. Shenker, and D. Estrin, "Highly-Resilient, Energy-Efficient Multipath Routing in Wireless Sensor Networks," *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, Vol. 5, pp. 11-25, Oct. 2001.
- [10] C. Intanagonwivat, R. Govindan, and D. Estrin, "Directed Diffusion: A Scalable and Robust Communication Paradigm for Sensor Networks," In *Proceedings of the 6th annual international conference on Mobile computing and networking (ACM MOBICOM)*, pp.56-67, Aug. 2000.
- [11] 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*

- Communications Magazine, vol. 47, no. 12, pp. 103-109, Dec. 2009.
- [12] B. Deb, S. Bhatnagar, and B. Nath, "ReInForM: Reliable Information Forwarding using Multiple Paths in Sensor Networks," in Proceedings of the 28th Annual IEEE International Conference on Local Computer Networks (LCN'03), pp. 406-415 Bonn, Germany, 20-24 Oct. 2003.
- [13] E. Felemban, C.-G. 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, pp. 738-754, 2006.
- [14] X. Huang and Y. Fang, "Multiconstrained QoS Multipath Routing in Wireless Sensor Networks," Wireless Networks, Vol. 14(4), pp. 465-478, 2008.
- [15] IEEE, Wireless LAN Medium Access Protocol (MAC) and Physical Layer (PHY) Specification, IEEE Standard 802.11, 2012.
- [16] J. Polastre, H. Jason, and C. David, "Versatile Low Power Media Access for Wireless Sensor Networks," in Proceedings of the 2nd international conference on Embedded networked sensor systems, ACM, 2004.
- [17] Scalable Network Technologies, Qualnet, <http://www.scalable-networks.com>. Retrieved Oct., 30, 2013.

저자약력

정 관 수(Kwansoo Jung)

[정회원]



- 2005년 2월 : 충남대학교 컴퓨터공학과 (공학사)
- 2007년 2월 : 충남대학교 컴퓨터공학과 (공학석사)
- 2015년 2월 : 충남대학교 컴퓨터공학과 (공학박사)

<관심분야>

WSN, MANET, IoT, D2D, 5G, Security