

Minimum LQI 기반의 On-demand 센서 네트워크 라우팅 프로토콜

이완직¹, 이원열², 허석렬^{1*}

¹부산대학교 바이오메디컬공학과

²영산대학교 사이버경찰학과

Minimum LQI based On-demand Routing Protocol for Sensor Networks

Wan-Jik Lee¹, Won-Youl Lee² and Seok Yeol Heo^{1*}

¹Department of BioMedical Engineering, Pusan National University

²Department of Cyber and Police Science, Youngsan University

요약 지금까지 다수의 센서 네트워크를 위한 on-demand 라우팅 프로토콜들이 제안되었다. 하지만 제안된 센서 네트워크용 on-demand 라우팅 프로토콜들은 대부분 hop count를 라우팅 메트릭으로 사용하기 때문에 상대적으로 열악한 무선 환경과 신뢰성을 요구하는 센서 응용에는 적합하지 않다. 본 논문에서는 이러한 환경에 적합한 minimum LQI(Link Quality Indicator) 기반의 on-demand 센서 네트워크 라우팅 프로토콜을 제안하였다. 또한 제안한 라우팅 프로토콜을 TinyOS 상에서 구현하였고, 멀티 홉 테스트 환경에서 hop count 기반의 라우팅 프로토콜과 성능을 비교, 측정하였다. 실험 결과, 제안된 라우팅 프로토콜이 열악한 무선 환경에서 더 나은 데이터 전송 성공률을 보임을 확인할 수 있었다.

Abstract A number of on-demand routing protocols for sensor networks have been proposed yet. However, the majority of proposed on-demand routing protocols for sensor networks are not suitable for a relatively poor wireless environment and sensor applications requiring reliable data transmission due to using a hop-count metric for their protocols. In this paper, we proposed a minimum LQI(Link Quality Indicator) based on-demand sensor network routing protocol that is suitable for a relatively poor wireless environment and implemented the proposed routing protocol on a TinyOS. We also compared the implemented protocol with typical hop count based routing protocol by carrying out performance experiments on a multi-hop testbed. The results from these experiments showed that the successful transmission rate of the proposed routing protocol is higher than that of typical hop count based routing protocol over a poor wireless link.

Key Words : Sensor Networks, Routing Protocol, On-demand, Minimum LQI, TinyOS

1. 서론

무선 센서 네트워크는 최근 활발히 논의되는 유비쿼터스 컴퓨팅의 핵심 기술로서 여러 대상체에 센서를 부착하여 각종 사물과 환경 정보를 실시간으로 수집하고 제어할 수 있는 환경을 제공한다. 이와 같은 특징 때문에

센서 네트워크는 환경 관리, 텔레메틱스, 보안 관리, 건강 관리, 재해 관리 등의 다양한 분야에서 널리 활용될 수 있으며, 이러한 서비스를 제공하기 위해 센서 네트워크에 관한 여러 가지 연구가 많이 진행되어 왔다.

센서 네트워크의 여러 연구 분야 중에서 라우팅 프로토콜은 여러 센서 노드가 측정된 데이터를 싱크 노드라

본 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의해 연구되었음.

*교신저자 : 허석렬(syheo@pusan.ac.kr)

접수일 09년 09월 08일

수정일 09년 11월 03일

게재확정일 09년 11월 12일

고 불리는 하나의 센서 노드로 수집하는 다대일 형태 (many-to-one)로 연구되어 왔으나, 최근에는 여러 센서 노드들이 서로 데이터 전달의 주체가 되는 다대다 (many-to-many) 형태의 연구도 활발히 진행되고 있다. 이러한 센서 네트워크의 다대다 형태의 라우팅 프로토콜들은 MANET 환경과의 유사성 때문에 MANET에서 연구된 on-demand 방식의 라우팅 프로토콜 기능과 흡사하게 설계된다.

본 논문에서는 on-demand 라우팅 프로토콜 중에서 열악한 무선 환경에 잘 대응할 수 있는 LQI 기반의 센서 네트워크 라우팅 프로토콜을 제안한다. 무선 센서 네트워크는 저가, 저출력의 라디오 링크를 활용하기 때문에 이동통신망, Wireless LAN 등의 다른 무선망보다 비교적 열악한 전파 환경을 가지며, 보안 관리, 재해 관리 서비스를 위한 일부 센서 네트워크 응용은 상대적으로 데이터 전송에 대한 높은 신뢰성을 요구한다. 이러한 환경을 위해 본 논문에서는 송신지와 목적지 사이의 다중 홉(Hop) 경로 중, 최소 LQI 값을 라우팅 메트릭으로 활용하며, LQI 기반 라우팅에서 발생할 수 있는 불필요한 노드 경유나 경로 루프(Loop) 발생의 해결 방안을 제안한다. 또한 제안된 라우팅 프로토콜을 TinyOS 상에서 직접 구현하고, 이를 hop count 메트릭을 사용한 라우팅 프로토콜과 비교, 실험하였다.

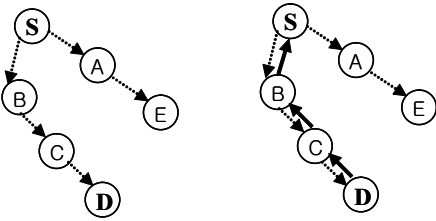
본 논문의 2장에서는 현재까지 연구된 대표적인 on-demand 방식 라우팅 프로토콜들을 소개하고, 3장에서는 본 논문에서 제안한 라우팅 프로토콜을 설명한다. 4장에서는 제안한 라우팅 프로토콜을 구현과 실험 결과를 논의하고 마지막 5장에서 결론을 맺는다.

2. 관련 연구

지금까지 제안된 대부분의 센서 네트워크용 on-demand 라우팅 프로토콜들은 IEEE 802.15.4[1]를 표준 PHY/MAC 계층으로 규정하고 있으며, MANET에서 제안된 AODV[2] 라우팅 프로토콜을 기본 모델로 설계되었다. 제안된 센서 네트워크 라우팅 프로토콜들은 AODV에서 트래픽 발생과 메모리 사용을 최소화하고, 시그널링 메시지 및 라우팅 테이블의 크기를 축소하는 형태를 가진다. 따라서 기본 동작원리는 AODV와 흡사하며, 송신 노드에서 목적지 노드까지의 경로를 찾기 위해 RREQ (Route Request), RREP (Route Reply) 메시지를 사용하고 전송 경로 상에서 발생한 에러를 통지하기 위해서는 RERR (Route Error) 메시지를 이용한다.

다음의 그림 1은 on-demand 방식의 라우팅 프로토콜

에서 사용하는 경로탐색 과정을 보여준다.



(a) RREQ 요청(flooding) (b) RREP 응답(unicast)

[그림 1] 경로탐색 과정

그림 1의 송신 노드 S는 목적지 D 노드의 경로를 탐색하기 위해 (a)와 같이 RREQ 메시지를 플러딩하게 된다. 이때 RREQ 메시지에는 송신자 S의 정보가 포함되므로 그림의 모든 노드들은 S 노드에 대한 역경로 정보를 라우팅 테이블에 저장할 수 있다. RREQ을 수신한 D 노드는 RREQ로 요청한 목적지가 자신이므로 RREP 메시지를 생성하여 이를 송신 노드 A로 전달한다. 이때 각 노드들은 RREQ 메시지에 의해 이미 저장된 S 노드로 가는 경로 정보를 이용하여 RREP 메시지를 유니캐스트 방식으로 전달한다. RREQ 메시지 전송 때와 동일하게, RREP 메시지가 전달되는 각 노드들(그림 1의 C, B, S)은 D 노드로의 경로 정보를 저장하게 된다.

다음의 표 1은 MANET 표준인 AODV 라우팅 프로토콜과 이를 바탕으로 제안된 대표적인 on-demand 방식의 센서 네트워크 라우팅 프로토콜들을 비교, 요약한 것이다 [3].

[표 1] On-demand 방식 라우팅 프로토콜 비교

	링크단절 탐지	RERR 사용여부	Local Repair	Routing metric
AODV[1]	Hello message, LLN	Yes	Yes	Hop Count
AODVbis [4]	LLN	No	No	Fastest RREP
Tiny AODV[5]	LLN	Yes	No	Hop Count
DYMO-low [6]	LLN	No	No	LQI, Hop Count (opt.)
LOAD[7]	LLN	Yes	Yes (may)	LQI

■ 링크단절 탐지

각 라우팅 프로토콜들은 현재 자신의 노드와 이웃한 노드들 간의 링크 연결 상태를 파악해야 하는데, AODV 프로토콜에서는 주기적인 Hello 메시지를 전송하고 이에 대한 ACK를 수신함으로써 이웃 노드들과의 연결 상태를 점검한다. 하지만 대부분의 센서 네트워크 라우팅 프로토콜들은 자원 소모를 줄이기 위해 이런 주기적인 패킷 교환 대신 하위 PHY/MAC 계층에서 제공하는 ACK(Link Layer Notification: LLN)를 사용하여 연결 단절을 탐지한다.

■ RERR 사용 여부

RERR 메시지는 현재 사용하고 있는 경로의 에러 발생을 다른 노드들에게 알려주기 위해서 사용되는데, 일부 센서 네트워크 라우팅 프로토콜들은 사용 메시지를 줄이고 구현의 단순화를 위해 RERR 메시지를 사용하지 않는다. 하지만 이런 프로토콜들에서 에러가 발생한 경로의 재설정은 기존 경로의 타임아웃이 발생한 경우에만 수행되기 때문에 경로 재설정이 신속하지 못하다는 단점을 가진다.

■ Local Repair

Local Repair 기법은 전체 경로에서 에러가 발생한 일부 경로만 신속하게 복구하는 기법으로써, 경로 내의 노드가 사용 경로의 링크 에러를 탐지하면 송신 노드 대신 RREQ 메시지를 전송하여 여러한 경로의 우회 경로를 신속히 탐색하는 기법이다. 하지만 이러한 기능은 프로토콜의 복잡도를 증가시키기 때문에 대부분의 센서 네트워크 라우팅 프로토콜에서는 채택하지 않고 있다.

■ 라우팅 메트릭

대부분의 센서 네트워크 라우팅 프로토콜들은 AODV의 영향을 받아 hop count를 라우팅 메트릭으로 사용한다. 하지만 무선 링크가 상대적으로 열악한 센서 네트워크에서 hop count 메트릭을 적용할 경우에는 가까이 있는 노드보다 멀리 떨어진 노드를 전송 경로에 포함하기 때문에 설정된 경로가 불안한 경우가 자주 발생할 수 있다. 따라서 일부 센서 네트워크 라우팅 프로토콜들은 hop count 대신 LQI가 좋은 노드로의 경로를 선호한다. LQI는 수신 신호 세기를 정량화한 값으로 전파의 신호 감도가 좋을수록 LQI 값도 크다.

3. Minimum LQI 기반의 라우팅 프로토콜

본 논문에서 제안하는 라우팅 프로토콜 역시 on-demand 방식으로 동작하므로 기본적인 프로토콜 동작은 기존의 on-demand 센서 네트워크 라우팅 프로토콜과 크게 다르지 않다. 다음의 표 2는 본 논문에서 제안하는 라우팅 프로토콜의 특성을 요약한 것이다.

[표 2] 제안된 라우팅 프로토콜 특성

기능	내용
사용 메시지	RREQ, RREP, RERR
링크단절 탐지	LLN
Local Repair	사용하지 않음
사용 타이머	RREP 타이머, RREQ 재전송 타이머
라우팅 메트릭	Minimum LQI

본 논문의 라우팅 프로토콜은 AODV와 동일하게 RERR을 포함한 세 가지 라우팅 메시지를 모두 사용하며, 링크단절의 탐지는 하위 계층의 LLN 기능을 활용한다. 또한 Local Repair 기능은 사용하지 않으며, 프로토콜의 오버헤드를 줄이기 위해 타이머는 RREP 지연 전송과 RREQ 재전송 시에만 사용한다. Minimum LQI 라우팅 메트릭에 의한 경로 설정 등의 주요 기능은 다음의 각 절에서 상세히 설명한다.

3.1 Minimum LQI 라우팅 기법

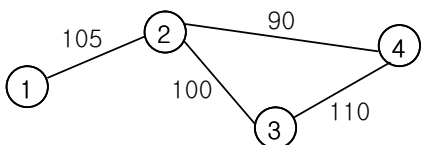
2장에서 언급한 센서 네트워크 라우팅 프로토콜들 중, DYMO-low와 LOAD에서는 라우팅 메트릭으로 LQI를 사용하거나 권장하고 있다. 하지만 이들 프로토콜에서는 LQI 값을 메트릭으로 사용한다는 언급만 있을 뿐, 실제 LQI를 이용한 경로 설정 방법에 대한 설명은 포함되어 있지 않다[6, 7]. 따라서 본 논문에서는 상대적으로 열악한 무선 센서 네트워크 환경에서 활용 가능한 minimum LQI 라우팅 기법을 제안한다.

3.1.1 Minimum LQI 라우팅 기법

본 논문의 minimum LQI 라우팅은 전체 경로의 멀티홉 링크 중에서 최소 값을 가진 LQI를 경로의 라우팅 메트릭으로 지정하고, 경로 설정 시에 이 minimum LQI 값이 가장 큰 경로를 선택하는 기법이다.

그림 2는 경로 상에서 minimum LQI 적용 예를 보여주고 있으며, 링크에 적힌 숫자는 실제 측정된 LQI 값을

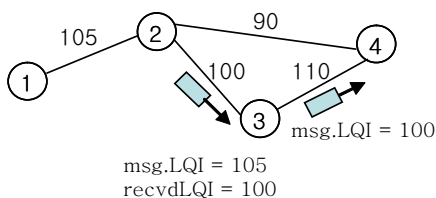
나타낸 것이다. 그림 2의 1번 노드에서 4번 노드까지의 경로 중, 1-2-4로 연결된 경로의 minimum LQI는 90이며, 1-2-3-4로 연결된 경로의 minimum LQI는 100이 된다. 따라서 minimum LQI 라우팅 기법에서, 4번 노드는 목적지 1번 노드의 경로 설정 시, next hop으로 3번을 선택하게 된다.



[그림 2] Minimum LQI 적용 예

본 논문의 프로토콜에서 라우팅 메시지들은 minimum LQI 값을 저장하는 필드를 가지고 있으며, 각 노드는 자신이 포워딩하는 메시지의 LQI 필드에 minimum LQI 값을 설정하게 된다. 예를 들어, 그림 2에서 3번 노드가 2번 노드로부터 메시지를 수신한 경우, 3번 노드는 메시지 수신 시에 LQI 값을 측정(recvdLQI)하고, 이 값을 수신한 메시지의 LQI 필드 값(msg.LQI)과 비교하여 더 작은 값을 minimum LQI로 선택한다.

그림 2에서 3번 노드가 2번 노드로부터 수신한 메시지의 msg.LQI 값은 105이며(1-2 링크), recvdLQI 값은 100이므로 3번 노드가 이 메시지를 포워딩 할 경우 라우팅 메시지의 msg.LQI 값을 100으로 업데이트 시킨다(그림 3 참조).



[그림 3] msg.LQI와 recvdLQI 설정

Minimum LQI에 따른 라우팅 테이블 설정 과정을 그림 4에 의사(pseudo) 코드 형태로 기술하였다. 그림 4와 같이, 메시지 수신 시에 수신한 메시지의 Origin 주소(메시지 생성 노드의 주소)로 기존 경로를 우선 검색(getRoute 함수)한다. 기존 경로가 존재할 경우에는 Origin의 일련번호(sequence number) 값이 우선순위가 제일 높고, 일련번호가 동일할 경우에는 수신 메시지의 minimum LQI가 기존 라우팅 테이블의 LQI 값보다 큰

경우에 경로 업데이트를 수행한다.

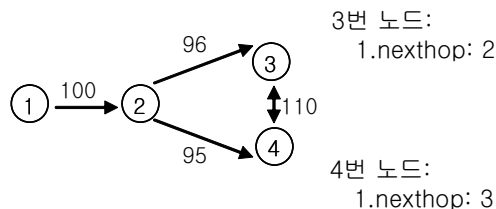
```

i = getRoute(msg.OriginAddr);
if (i != -1)
{
    if (msg.OriginSeq > RouteTable[i].Seq ||
        (msg.OriginSeq == RouteTable[i].Seq &&
            min(msg.LQI, recvdLQI) > RouteTable[i].LQI))
    {
        updateTable(&msg, recvdLQI, i);
        forward.LQI = min(msg.LQI, recvdLQI);
    }
}
else
{
    updateTable(&msg, recvdLQI, i);
    forward.LQI = min(msg.LQI, recvdLQI);
}
    
```

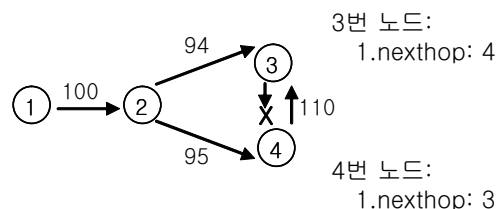
[그림 4] minimum LQI에 의한 경로 설정 절차

3.1.2 Minimum LQI 개선 기법

단순히 minimum LQI로 경로를 설정할 경우, 상대적으로 불필요한 노드를 경유하거나, 특정 경우에 경로 상에 루프(loop)가 발생할 수도 있다.



a) 첫 번째 RREQ Forwarding



b) 두 번째 RREQ Forwarding

[그림 5] minimum LQI 기법 적용 시, 발생할 수 있는 경로 루프 문제

그림 5의 a)와 같이 2-3번 노드 간의 거리와 2-4번 노드 간의 거리가 거의 동일할 경우, 실제 두 링크 간의 LQI 값이 흡사(96, 95)함에도 불구하고, 4번 노드는 1번 노드의 경로 설정 시, 3번 노드를 next hop으로 설정한다. 이는 4-2-1의 minimum LQI는 95이고, 4-3-2-1의 minimum LQI는 96이기 때문이다.

그리고 그림 5의 a)와 같이 경로가 설정된 후, 다른 RREQ 메시지가 그림 b)와 같이 전달되었다고 가정하자. b)번 그림에서는 2-3번 링크의 LQI가 94로 변경되었으며, 3번 노드가 포워딩한 RREQ 메시지가 4번 노드에서 제대로 수신되지 않았다. 이 경우에 3번 노드는 목적지 1번 노드에 대한 next hop을 4번으로 변경함으로써, 3번과 4번 노드에서 라우팅 루프가 발생하게 된다.

이러한 경로 루프를 제거하고 불필요한 노드 경우를 억제하기 위해, 본 논문에서는 minimum LQI 뿐만 아니라 hop count 메트릭을 함께 활용한다. 이 개선된 경로 기법은 각 경로의 minimum LQI 값을 비교하여, 이 값들이 서로 유사할 경우에는 hop count가 작은 경로를 선택한다. 이 유사 LQI 값 판단 기준은 실측 최대 LQI의 값, 120에 대한 비율로 정의함으로써 이 값이 작을수록 LQI 값을 우선하여 경로를 결정하고, 이 값이 클수록 hop count에 의한 경로 선택이 수행되도록 하였다. 따라서 본 논문의 라우팅 기법을 사용할 경우, 센서 네트워크 사용 환경에 따라 LQI와 hop count에 대한 경로 선택을 융통성 있게 적용할 수도 있다.

현재 본 논문에서는 무선 환경이 열악한 센서 네트워크를 고려하여, 유사 LQI 판단 기준을 실험적으로 5%로 적용하였다. 따라서 서로 다른 경로의 minimum LQI가 6 (120×0.05) 이상 차이가 날 경우에는 minimum LQI 값이 작은 경로가 선택되고, 6 이상 차이가 나지 않을 경우에는 hop count가 작은 경로를 선택한다. 이렇게 유사 LQI 판단 기준을 5%로 적용하였을 경우, 그림 5 b)와 같은 상황의 노드 3에서 4번 노드를 경유한 (1번 목적지에 대한) 경로의 minimum LQI가 95이고, 2번 노드를 경유한 경로의 minimum LQI가 94이므로 이 두 값의 차이는 6보다 작다. 그러므로 3번 노드는 hop count가 작은 2번 노드를 목적지 1번 노드의 next hop으로 설정한다. 이와 동일하게 그림 5의 노드 4번도 목적지 1번 노드의 next hop으로 2번 노드를 선택한다. 따라서 본 논문의 minimum LQI 개선 기법을 적용할 경우, 그림 5와 같은 상황의 경로 루프가 제거되며, 유사한 minimum LQI 경로들에서는 hop count가 작은 경로를 선택하여 상대적으로 불필요한 노드 경유도 제거할 수 있다.

개선된 minimum LQI 경로 설정 절차는 그림 6에 나타내었다.

```
#define MAX_LQI 120
#define LQI_DECISION 0.05

i = getRoute(msg.OriginAddr);
if ( i != -1)
{
    if (msg.OriginSeq > RouteTable[i].Seq ||
        (msg.OriginSeq == RouteTable[i].Seq &&
         isSuperior(&msg, recvdLQI, i) == TRUE)) {
        updateTable(&msg, recvdLQI, i);
        forward.LQI = min(msg.LQI, recvdLQI);
    }
    .....
}

bool isSuperior(msgInfo *msg, uint8_t recvdLQI, int8_t i)
{
    if (msg->HopCount <= RouteTable[i].HopCount) {
        if (min(msg->LQI, recvdLQI) > RouteTable[i].LQI)
            return TRUE;
    }
    else if (min(msg->LQI, recvdLQI) > RouteTable[i].LQI &&
             ((min(msg->LQI, recvdLQI) - RouteTable[i].LQI) >
              MAX_LQI*LQI_DECISION))
        return TRUE;
    return FALSE;
}
```

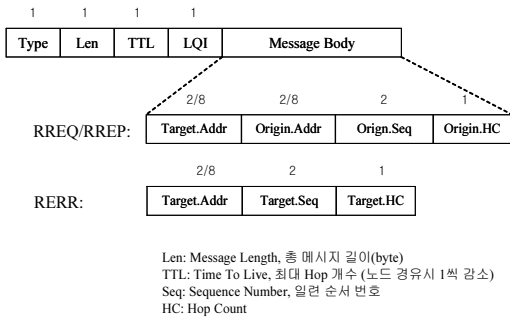
[그림 6] 개선된 minimum LQI 경로 설정 절차

3.2 Delayed RREP 전송

본 논문과 같은 on-demand 방식의 라우팅 프로토콜에서 RREQ 메시지는 모든 노드로 플러딩되기 때문에 목적지 노드는 여러 개의 RREQ 메시지를 수신하게 된다. 이 경우 먼저 수신한 RREQ 메시지는 일반적으로 hop count가 작은 경로로 전달된 메시지일 가능성이 높다. 즉 minimum LQI를 경로 설정 메트릭을 적용하더라도, minimum LQI 값이 작고 hop count도 작은 메시지가 먼저 전달된다. 따라서 제안된 방법에서는 목적지 노드가 모든 RREQ 메시지를 수신한 후, 그 중 minimum LQI 값이 가장 큰 메시지로 경로를 업데이트하고 이 메시지에 대한 RREP 메시지를 송신하도록 RREP 전송을 일정 시간 동안 지연시킨다. 본 논문에서는 첫 번째 RREQ 수신 후, 최대흡수 × 10ms 이후에 RREP를 리턴하도록 한다. 현재 구현은 최대흡수(MAX_HOP_LIMIT)을 16으로 정의하였기 때문에 160ms 이후 RREP를 전송하게 된다.

3.3 메시지 및 라우팅 테이블 구조

본 논문에서 사용하는 라우팅 메시지의 포맷을 그림 7에 나타내었다.



[그림 7] 라우팅 메시지 포맷

그림 7의 각 메시지 필드 상위의 숫자는 필드의 크기 (byte 단위)를 나타내며 메시지의 각 주소 필드에 '2/8'로 나타낸 것은 IEEE 802.15.4 표준에서 Short Address를 사용할 경우에는 2바이트 길이를 사용하고, Long Address (EUI-64)를 사용할 경우에는 8바이트 길이를 사용한다는 의미이다.

본 논문에서 설계한 라우팅 테이블 구조를 표 3에 나타내었다. 현재 설계에서 최대 라우팅 엔트리 개수는 7로 설정하였으며, 라우팅 엔트리에 대한 Timer는 사용하지 않는다. 라우팅 엔트리가 모두 할당된 경우에 새로운 경로 추가는 LastUsed 필드를 이용하여 가장 최근에 사용되지 않았던 엔트리부터 할당된다.

[표 3] 라우팅 테이블 구조

필드	크기 (Byte)	용도
Addr	2/8	목적지 노드의 주소
NextHop	2/8	경로상의 다음 노드 주소
Seq	2	최근 수신한 목적지 노드의 일련번호
HopCont	1	목적지 노드로의 Hop Count
LQI	1	경로의 Minimum LQI 값
LastUsed	2	가장 최근 사용한 Time 값
Flag	1	ROUTE_BROKEN, ROUTE_EMPTY 등의 Flag 필드

4. 프로토콜 구현 및 실험

본 논문에서 제안한 라우팅 프로토콜은 TinyOS 운영 체제[8]에서 구현되었다. 프로토콜 구현에 관한 사항은 표 4에 정리하였다.

[표 4] 프로토콜 구현 관련사항

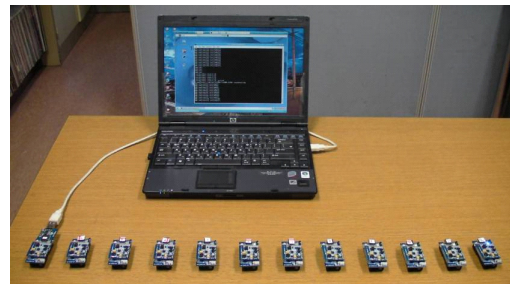
항목	내용
구현 운영체제	TinyOS 2.1
사용 언어	nesC
노드 플랫폼	Telosb (MSP430 CPU)
PHY/MAC (통신모듈)	IEEE 802.15.4 (CC2420)
구현 코드 크기	29,818 bytes
사용 RAM	1,672 bytes

제안된 라우팅 프로토콜은 TinyOS에서 사용하는 nesC 언어의 컴포넌트 기반[8, 9]으로 구현되었으며, 표 4와 같이 노드의 프로그램 메모리(Flash-RAM)에 포팅되는 코드 크기는 30 Kbyte 미만이며 1.7 Kbyte 이내의 RAM만 사용한다.

4.1 실험 환경

실험의 편이성과 열악한 무선 환경을 위해 노드의 RF Power를 최소값인 1로 설정(최고값은 31)[9, 10]하였다. RF Power를 최소로 설정할 경우, 실제 측정된 최장 전송 범위는 15 cm 이내였으며, 실측한 LQI 값은 60에서 115 사이였다.

실험 환경은 그림 8과 같이 노드를 5cm 간격으로 일렬로 배치하였으며, 설치 노드 수는 최소 3개에서 최대 12개로 구성하였다.



[그림 8] 라우팅 프로토콜 실험 환경

본 논문에서 제안한 minimum LQI 라우팅 기법과 일반적인 hop count에 의한 라우팅 기법을 비교하기 위해, 구현된 라우팅 프로토콜은 소스 코드 내의 #define문과 조건 지시자에 의해 minimum LQI 라우팅 적용과 hop count 라우팅 적용을 선택적으로 수행하도록 하였다.

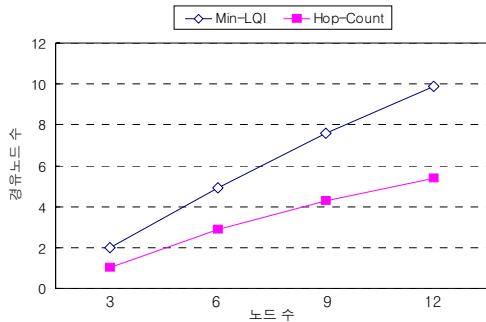
비교 실험을 위한 설정은 표 5에 정리하였으며, 실험 결과 값은 그림 8과 같이 송신 노드나 수신 노드에서 USB를 통해 노트북으로 출력하도록 하였다.

[표 5] 실험에 관한 설정

구분	내용
노드 수	3개~12개(3개씩 증가)
전송 데이터	송신노드 주소 및 카운터 (총 4 byte)
전송 간격	2 초
평균값 산출	실험 당 50회 전송, 총 10회 실험의 평균값

4.2 경유 노드 수 비교

Minimum LQI 라우팅과 hop count 라우팅의 경유 노드 수를 비교하기 위해 전체 노드 수를 3개에서 12개까지 3개씩 증가한 상태에서 각 프로토콜별 평균 경유 노드 수(목적지 노드 포함)를 그림 9에 나타내었다.



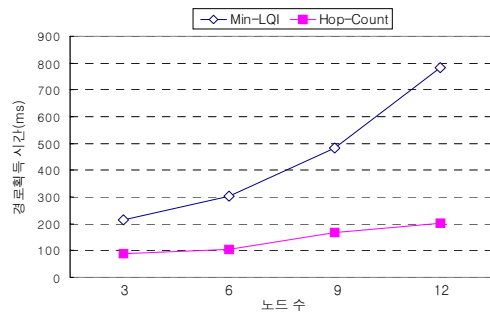
[그림 9] 노드 수에 따른 평균 경유 노드 수

예상과 같이, minimum LQI 라우팅 기법이 hop count 라우팅 기법보다 더 많은 노드를 경유하여 전송되는 것을 확인할 수 있었다.

4.3 경로 설정 시간 비교

앞 절의 실험과 동일한 환경에서 송신 노드의 목적지 경로 획득에 소요되는 시간을 측정하였다. 경로 획득 시간은 송신 노드에서 RREQ 메시지를 전송한 시간부터 전송한 RREQ에 대한 응답으로 RREP 메시지를 수신하는데 소요된 시간으로 측정하였다. 실험 결과는 경로 획득에 성공한 (RREQ, RREP) 쌍으로 산출하였으며, RREP 메시지 수신에 실패한 경우는 제외하였다.

그림 10은 두 라우팅 기법에서 경로 획득에 소요된 시간을 그래프로 나타낸 것이다.

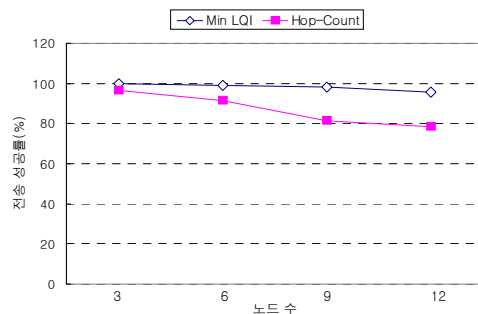


[그림 10] 노드 수에 따른 평균 경로 획득 시간

그림 10에서 minimum LQI 라우팅 기법의 경로 획득 시간이 hop count 라우팅 기법의 경로 획득 시간보다 많이 걸리는 것을 확인할 수 있다. 이는 minimum LQI 기법이 경유 노드 수가 많으며, 160 ms 정도의 RREP 지연 시간이 포함(3.2절 참조)되기 때문인 것 같다. 그리고 노드 수가 증가할수록 minimum LQI의 경로 획득 시간이 급격히 증가되는 현상은 RREQ 재전송에 의한 노드들의 메시지 처리 부담이 늘어나기 때문이다. 현재 프로토콜 구현에서 RREQ의 재전송 시간을 두 라우팅 기법 모두 250 ms 간격으로 설정하였기 때문에 minimum LQI 기법에서 경유 노드 수가 많아질수록 RREQ 재전송이 빈번히 발생하고, 이에 대한 노드의 메시지 처리 부담이 급격히 증가하는 것으로 해석된다. 따라서 minimum LQI와 같이 경유 노드 수가 많고, 지연된 RREP 기법을 사용하는 라우팅 프로토콜에서는 RREQ 재전송 간격을 지수적으로 증가시키는 등의 불필요한 메시지 처리 부담을 감소하는 방안이 필요할 것으로 생각된다.

4.4 전송 성공률 비교

두 라우팅 기법의 데이터 전송 성공률 실험 결과는 그림 11에 나타내었다.



[그림 11] 노드 수에 따른 평균 전송 성공률

그림 11과 같이 hop count 라우팅 기법은 노드 수가 증가할수록 전송 성공률이 많이 감소하는 것을 알 수 있다. 이에 반해 minimum LQI 라우팅은 노드 수가 증가하더라도 전송 성공률이 많이 감소하지 않는다. 실험 과정에서, minimum LQI 라우팅은 경로가 설정된 후 매우 안정적으로 데이터 전송이 이루어짐을 확인할 수 있었지만, hop count 라우팅에서는 경로가 설정이 된 상태에서도 무선 링크의 불안으로 경로 재설정이 자주 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 특히 경우 노드 수가 작을수록, 경로 재설정이 매우 빈번히 발생하는 것을 확인할 수 있었다.

5. 결론 및 향후 계획

현재까지 여러 가지 on-demand 방식의 센서 네트워크 라우팅 프로토콜이 제안되었고, 일부 라우팅 프로토콜에서는 라우팅 메트릭으로 LQI 사용을 권고하고 있지만, 경로 선택 시에 구체적인 LQI 적용 방법을 제시하지는 않는다[6, 7].

이에 따라 본 논문에서는 경로 상의 minimum LQI 값을 이용하여 열악한 무선 환경의 센서 네트워크에 적합한 on-demand 방식의 라우팅 프로토콜을 제안하였다. 제안한 라우팅 프로토콜은 minimum LQI를 라우팅 메트릭으로 사용하지만 hop count 값을 함께 활용하여 상대적으로 불필요한 노드 경유와 라우팅 루프를 제거하도록 설계하였다.

또한 제안한 프로토콜을 TinyOS 기반으로 구현하여 실제 센서 노드에 탑재하였으며, 일반적인 hop count를 사용한 라우팅 프로토콜과 성능을 비교, 측정하였다. 실험 결과를 통해 본 논문에서 제안한 프로토콜은 hop count 기반의 라우팅 프로토콜보다 경로 설정 시에 매우 안정적으로 동작하고, 노드 수가 증가하더라도 데이터 전송 성공률이 상대적으로 높다는 것을 확인할 수 있었다.

본 논문의 프로토콜은 LQI 값을 기반으로 동작하기 때문에, hop count를 이용한 프로토콜보다 경유 노드 수가 많으므로 전반적인 센서 네트워크의 전원 소모는 크다고 볼 수 있지만, 재난 관리, 보안 등의 전송의 신뢰성이 요구되고, 이벤트 기반으로 데이터를 전송하는 센서 응용에서 충분히 활용될 수 있으리라 기대된다.

앞으로 본 논문의 minimum LQI 라우팅 기법을 센서 네트워크의 다대일 형태의 라우팅 프로토콜에 도입하는 연구와 전송 성공률 등의 성능을 유지하면서 노드의 전원 소모를 감소시키는 방안에 대한 연구를 추가적으로

수행할 예정이다.

참고문헌

- [1] IEEE, "802.15.4 Wireless Medium Access Control(MAC) and Physical Layer(PHY) Specification for Low-Rate Wireless Personal Area Network(LR-WPANs)", IEEE Computer Society, October 2003.
- [2] C. Perkins, E. Belding-Royer, "Ad hoc On Demand Distance Vector (AODV) Routing", RFC 3561, July 2003.
- [3] C. Gomez, et al., "Adapting AODV for IEEE 802.15.4 Mesh Networks: Theoretical Discussion and Performance Evaluation in a Real Environment", World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks, 2006.
- [4] C. E. Perkins, E. Belding-Royer, I. Chakeres, "Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing", draft-perkins-manet-advbis-01, IETF Internet Draft, February 2004.
- [5] TinyOS Community Forum, Open Source, <http://nesct.sourceforge.net/tinyadv.html>.
- [6] K. Kim et. al, "Dynamic MANET On-demand for 6LoWPAN(DYMO-low) Routing", draft-montenegro-6lowpan-low-routing-03, IETF Internet-Draft, June 2007
- [7] K. Kim and S. Daniel, "6LoWPAN Ad Hoc On-Demand Distance Vector Routing(LOAD)", draft-daniel-6lowpan-load-adhoc-routing, IETF Internet- Draft, September 2006.
- [8] Stephen Dawson-Haggerty, et. al., "TinyOS 2.1 tutorial", <http://doc.tinyos.net/index.php/Ipsn2009-tutorial>, April 2009.
- [9] Philip Levis, "TinyOS Programming", <http://www.tinyos.net/tinyos-2.x/doc/tinyos-programming.pdf>, October 2006.
- [10] 김신재 외, "TinyOS를 기반으로한 On-demand 방식 센서 네트워크 라우팅 프로토콜 설계 및 구현", 한국정보기술학회논문지, 2009년 8월.

이 완 직(Wan-Jik Lee)

[정회원]



- 1992년 2월 : 경북대학교 통계학과 학사
- 1994년 2월 : 경북대학교 컴퓨터공학과 석사
- 2007년 8월 : 경북대학교 컴퓨터공학과 박사
- 1997년 3월 ~ 2005년 2월 : 밀양대학교 정보통신공학부 교수
- 2006년 3월 ~ 현재 : 부산대학교 바이오메디컬공학과 교수

<관심분야>

센서 네트워크, 통신 프로토콜, u-Healthcare 응용

허 석 렬(Seok-Yeol Heo)

[정회원]



- 1986년 2월 : 경북대학교 전자공학과 학사
- 1991년 2월 : 경북대학교 컴퓨터공학과 석사
- 2008년 2월 : 경북대학교 컴퓨터공학과 박사
- 1992년 3월 ~ 2005년 2월 : 밀양대학교 컴퓨터공학부 교수
- 2006년 3월 ~ 현재 : 부산대학교 바이오메디컬공학과 교수

<관심분야>

RFID/USN, 컴퓨터 네트워크, u-Health

이 원 열(Won-Youl Lee)

[정회원]



- 1987년 2월 : 경북대학교 전자공학과 학사
- 1993년 2월 : 경북대학교 컴퓨터공학과 석사
- 2002년 2월 : 경북대학교 컴퓨터공학과 박사
- 1997년 9월 ~ 2002년 2월 : 성심외국어대학 정보통신학과 교수
- 2002년 3월 ~ 현재 : 영산대학교 IT건축대학 사이버경찰학과 교수

<관심분야>

이동통신망 라우팅 기술, VNET 통신 기술, 센서 네트워크 라우팅 기술