# 무선 센서 네트워크에서 적응적인 링크 품질 측정
# (Adaptive Link Quality Estimation in Wireless Sensor Networks)

이 정 욱 † 원 광 호 ††
(Jungwook Lee) (Kwangho Won)

정 광 수 †††
(Kwangsue Chung)

**요 약** 멀티 홉을 이용하는 무선 센서 네트워크에서는 환경적 요인과 노드의 하드웨어적 제약으로 인해 링크의 품질변화가 불규칙하게 일어난다. 이러한 불규칙성에 대응하여 적절한 경로를 선택하지 못한다면 데이터의 손실이 빈번하게 일어날 수 있다. 기존에는 비컨을 주기적으로 브로드캐스팅하여 링크의 품질을 측정하였지만, 이 기법은 불규칙하게 변화하는 링크의 품질을 효율적으로 측정할 수 없다. 본 논문에서는 네트워크의 상태에 따라 링크의 품질 측정 주기를 적응적으로 측정하는 기법을 제안한다. 링크의 품질이 변화할 때 민첩하게 변화에 대응하여 패킷 손실을 줄이고 변화가 없을 때는 긴 주기로 링크 품질을 측정하여 에너지 소모를 줄이고자 한다. 실험을 통하여 제안된 기법이 기존에 제안된 기법보다 에너지 효율 및 패킷 수신율을 향상시킬 수 있음을 확인하였다

**키워드** : 센서 네트워크, 링크 품질, 신뢰성, 에너지 효율

***Abstract*** In the wireless sensor networks using a multi-hop, quality variation of links occurs irregularly due to the hardware restriction and environmental factor. If an appropriate route, which is affected by the quality variation, is not selected. Traditionally, a beacon is periodically broadcasted and the link quality is estimated. However, the periodically beacon based scheme cannot efficiently estimate the quality of the link changing irregularly. In this paper, a scheme to estimate the link quality adaptively according to network state is proposed. When the link quality changes, the scheme adapts to a change agilely and packet losses are reduced. When there is no change of the link quality, the link quality is estimated in the long period and the energy consumption is reduced. Through performance evaluations, we prove that our adaptive link estimation scheme improves the energy efficiency and packet reception ratio than the periodic estimation scheme.

**Key words** : Sensor Networks, Link Quality, Reliability, Energy Efficiency

· 본 연구는 지식경제부 및 정보통신연구진흥원의 IT성장동력기술개발사업의 일환으로 수행되었습니다(2008-S-041-01, u-City용 센서네트워크 PHY/MAC 개발). 연구비 지원에 감사 드립니다.
· 이 논문은 제36회 추계학술발표회에서 '무선 센서 네트워크에서 적응적인 링크 품질 측정에 관한 연구'의 제목으로 발표된 논문을 확장한 것임

† 학생회원 : 광운대학교 전자통신공학과
jwlee@adams.kw.ac.kr
†† 정 회 원 : 전자부품연구원 u-임베디드융합센터
khwon@keti.re.kr
††† 종신회원 : 광운대학교 전자통신공학과 교수
kchung@kw.ac.kr

논문접수 : 2009년 12월 24일
심사완료 : 2010년 2월 24일

Copyright©2010 한국정보과학회 : 개인 목적이나 교육 목적인 경우, 이 저작물의 전체 또는 일부에 대한 복사본 혹은 디지털 사본의 제작을 허가합니다. 이 때, 사본은 상업적 수단으로 사용할 수 없으며 첫 페이지에 본 문구와 출처를 반드시 명시해야 합니다. 이 외의 목적으로 복제, 배포, 출판, 전송 등 모든 유형의 사용행위를 하는 경우에 대하여는 사전에 허가를 얻고 비용을 지불해야 합니다.
정보과학회논문지: 컴퓨팅의 실제 및 레터 제16권 제5호(2010.5)

## 1. 서 론

무선 센서 네트워크는 분산된 다수의 노드로부터 얻은 센싱 정보를 싱크 노드에 전달하며, 전송 반경의 제약으로 소스 노드가 목적지 노드로 직접 데이터를 전달하지 못할 시에는 물리적으로 두 노드의 중간에 위치하고 있는 중계 노드를 거치는 멀티 홉(Multi-hop) 방식으로 데이터를 전달한다. 경로를 설정하는 라우팅 프로토콜에서는 비용이 적은 경로를 설정하기 위하여 자신의 상위에 존재하는 다수의 부모 노드와의 홉 수를 계산하거나 링크의 품질을 측정하고 이를 기반으로 하여 최적의 경로를 선택하게 된다.

그러나 링크의 품질은 환경에 따라 불규칙하게 변화한다. 주로 이러한 불규칙성은 전송 범위가 대칭적으로 이루어지지 않고 비대칭적인 링크 특성을 지니기 때문에 상위 계층 프로토콜의 성능에 영향을 미친다[1]. 특히, 도시와 같은 환경에서는 밀집되어 있는 여러 가지 장애물에 의하여 페이딩(Fading)이 발생되며, 비슷한 주파수 대역을 사용하는 802.11b와의 간섭[2], 또는 온도, 습도와 같은 날씨로 인하여 링크 품질이 불규칙하게 변화한다. 그러므로 환경 요인은 다양한 환경에서 설치되는 무선 센서 네트워크에서 반드시 고려되야 할 특성이다. 또한 노드의 하드웨어적 특성에 따라 발생되는 경우로 동일한 조건의 하드웨어에서도 각 노드의 전송 파워와 같은 성능이 다르고 안테나의 방향성 및 노드를 설치한 방향에 따라서 전송 범위가 크게 달라질 수 있다.

링크의 품질을 측정하는 기법은 대표적으로 TinyOS에서 이용되고 있는 MultiHopLQI[3]기법이 있으며, 이것은 2.4GHz 대역의 RF 송수신기 칩인 CC2420[4]에서 지원하는 LQI(Link Quality Indicators)로 수신한 패킷

에서 비트 에러율을 계산하여 링크의 품질을 추정하는 것이다[3]. 하지만 이 기법은 불규칙한 링크의 품질이 존재하는 상황에서 패킷 수신율(Packet Reception Rate)이 현저하게 떨어져도 수신한 패킷에 한해서만 링크의 품질을 측정할 수 있다. 때문에 패킷 수신율의 변화가 매우 불규칙적인 상황에서 링크 품질을 측정한 시간의 LQI값이 좋은 경우 패킷의 수신율이 낮더라도 좋은 링크로 간주되어 버리는 문제가 있다[5]. 이러한 문제를 해결하기 위하여 소스 노드의 패킷이 목적지 노드까지의 전송에 성공하기 위해서 재전송을 포함한 양방향의 전체 패킷의 전송 횟수를 링크 품질의 지표로 하는 ETX(Expected Transmission Count)[6]가 제안되었다.

앞서 언급한 링크 품질의 지표들은 주로 주기적인 비컨 메시지를 브로드캐스팅하여 이웃 노드들과의 링크 품질을 측정한다. 하지만 네트워크가 동적으로 변화하는 환경에서의 주기적인 링크 품질 측정은 비효율적일 수 있다. 즉, 네트워크의 상태가 안정적일 때는 긴 주기의 측정 메시지를 보내야 하며, 노드가 이동을 하거나 불안정한 상황일 때는 좀 더 민첩하게 대응하기 위하여 비컨 메시지를 짧은 주기로 측정하는 방법을 이용해야 한다. 본 논문에서는 네트워크의 변화 요인을 파악하여 민첩하게 링크의 품질을 파악하고 이를 경로 선택에 반영함으로써 패킷 손실을 미연에 방지하며, 네트워크 상태에 따라서 링크 품질 측정 주기를 조절하여 에너지 소모를 줄인다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 실험을 통한 무선 링크의 특성에 대하여 분석하고 3장에서는 기존에 제안된 링크 측정 기법에 대하여 설명하며, 4장에서는 본 논문에서 제안한 링크 품질 측정 기법에 대하여 기술한다. 또한 5장에서는 실험을 통하여 제안된 기법의 성능을 평가한다. 마지막으로 6장에는 결론 및 향후 연구 방향을 기술한다.

## 2. 무선 링크의 특성 분석

무선 링크의 불규칙성은 크게 두 가지 요소에 기인한다. 첫 번째는 노드 특성에 따라 발생되는 경우로써, 노드는 하드웨적으로 동일한 조건으로 만들어질 수 없기 때문에 각각의 노드가 동등한 성능을 지닐 수가 없으며, 안테나의 방향성에 따라 전송 범위가 크게 달라질 수 있다. 보통 배터리를 사용하는 노드는 배터리의 전압레벨에 따라 링크의 특성이 변화가 될 수 있다. 따라서 무선 송신기의 전송파워를 설정할 때, 배터리 전압에 대한 레귤레이션을 하지 않고 이를 기준으로 하여 전송파워의 레벨을 설정하게 되면, 각각의 노드들이 동일한 전송파워를 설정하더라도 노드의 배터리 상태에 따라서 링크의 품질이 달라지는 문제를 초래할 수 있다[7]. 초기 전압레벨에서 전송이 가능하였지만, 시간이 흐름에 따라 배터리의 전압레벨이 낮아지고 전송파워 레벨이 감소하면서 전송이 불가능하게 되는 현상이다. 결국 배터리 레벨에 따라서 전송파워 레벨을 보상하지 않거나 변경된 전송파워 상태에서 링크의 품질을 주기적으로 측정할 시에 변화된 네트워크 상황에 주어진 측정 주기에 따라 적응할 수 있기 때문에 심각한 데이터 손실을 야기할 수 있다.

두 번째로 링크의 품질을 불규칙하게 하는 것은 주변의 환경적인 요인이다. 이것은 네트워크 환경의 건물, 사람, 차량 등과 같은 장애물에 의한 페이딩 현상으로 링크 품질이 저하될 수 있다. 특히 장애물이 불규칙하게 이동하게 되면 링크의 품질 변화가 많을 수 있다. 실제 실험을 통하여 실내환경에서 장애물(사람)의 이동이나 변화에 따른 페이딩 효과에 의해 링크의 품질이 변화하는 것을 확인하였다. 즉, 동일한 실내 장소에서 주변 환경이 안정적인 시간(업무시간 외)과 불안정한 시간(업무시간)에서 약 80분 동안 두 노드 간의 양방향 패킷 수신율을 측정하였다. 그림 1과 같이 시간에 따라 링크의 품질이 변화하는 것을 알 수 있었으며, 특히 불안정한 네트워크 환경에서 링크의 품질 변화가 빈번한 것을 확인할 수 있었다. 또한 그림 2와 같이 평균 수신율을 산출하였을 때에 불안정한 네트워크에서 각 방향의 패킷 수신율이 약 4% 정도 감소하는 것을 확인하였다.

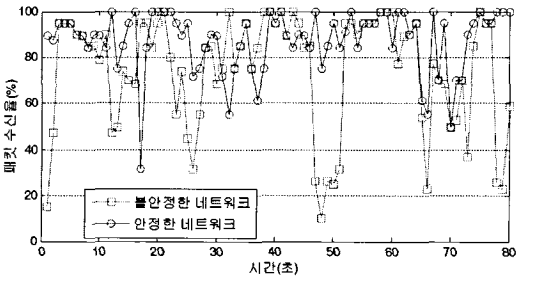


그림 1 환경에 따른 링크의 품질 변화

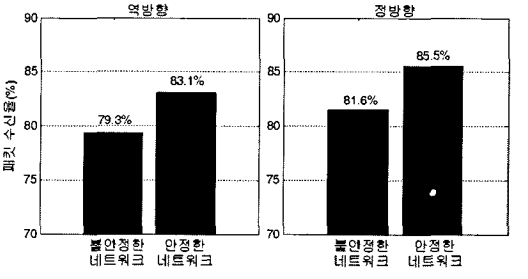


그림 2 링크의 방향별 평균 패킷 수신율

## 3. 관련 연구

LQI는 하드웨어 자체에서 지원하는 링크 품질 지표로

비용적 측면에서 저렴하고 RSSI 값을 기반으로 칩 에러율(Chip Error Rate)을 계산하여 링크의 품질을 산출한다. 하지만 CC1000[8]등과 같은 315/433/868/915MHz 대역을 지원하는 라디오 송수신기의 경우 LQI를 제공하지 않고 RSSI 만을 지원하기 때문에 확장성에 대한 문제가 발생된다. 또한 수신된 패킷에 근거하여 링크의 품질을 측정하므로 패킷을 자주 손실하는 링크라고 하여도 샘플링한 LQI 값이 좋은 경우에는 수신율이 거의 0에 가까워도 품질이 좋은 링크로 판단하기 때문에 패킷 손실이 종종 발생할 가능성이 존재한다. 결국 물리계층에서는 링크의 품질을 미리 예상하고 상위 계층에서 대응할 수 있는 정보로 이용될 수 있지만, 정확한 정보를 얻을 수 없다는 단점이 있다.

데이터 링크 계층에서는 ETX와 같이 링크의 두 방향에서 패킷의 전달 여부와 전달된 패킷의 ACK(Acknowledgment) 수신 여부의 확률을 계산한다. 데이터를 전송할 때는 경로 설정 정보가 정확하고 민첩해야 한다. 즉, 데이터 링크 계층의 ETX 기법은 전송한 패킷에서 샘플링한 수가 많을수록 정확한 정보를 얻기 때문에 물리 계층의 링크 품질 측정 방법보다 느리게 측정할 수 있다.

## 4. 적응적인 링크 품질의 측정

비컨 패킷을 기반으로 하는 대부분의 링크 품질 측정 기법에서는 주기적으로 비컨을 브로드캐스팅 한다. 간단한 예로 싱크 노드인 A노드와 일반 노드인 B노드가 있다고 가정할 때 싱크인 A노드는 설정된 타이머의 값에 따라 주기적으로 비컨 패킷을 브로드캐스팅한다. 이를 수신한 B노드는 마찬가지로 비컨을 브로트캐스팅하여 비컨 패킷을 플러딩하게 된다. 여기서 각 노드는 비컨 패킷에 시퀀스 넘버를 포함하여 자신을 기준으로 단 방향의 ETX를 산출할 수 있다. 즉 B노드는 A노드로 부터 수신한 비컨 신호를 통하여 자신을 역방향의 품질을 측정하게 되고 B노드가 브로드캐스팅하는 비컨 신호로부터 A노드가 B노드의 정방향 링크 품질을 측정한다. 또한 A노드는 비컨 패킷에 B노드의 정방향 품질을 포함하여 B에게 전달된다. 결국 B노드는 자신의 양방향 링크 품질인 ETX를 산출하게 되고 이를 라우팅 메트릭으로 참조하여 최적의 경로로 데이터를 전달한다. 하지만 주기적으로 링크 품질을 측정하게 되면 그림 3과 같이 현상이 발생될 수 있다.

그림 3과 같이 노드가 이동을 할 때와 배터리의 레벨이나 주변환경의 온도나 습도의 변화로 인하여 전송 파워가 감쇄되었을 때 토플로지의 변화가 발생된다. 즉 주기적으로 링크의 품질을 측정하는 B노드는 다음의 주기기 도달할 때까지 토플로지의 변화를 파악할 수 없기

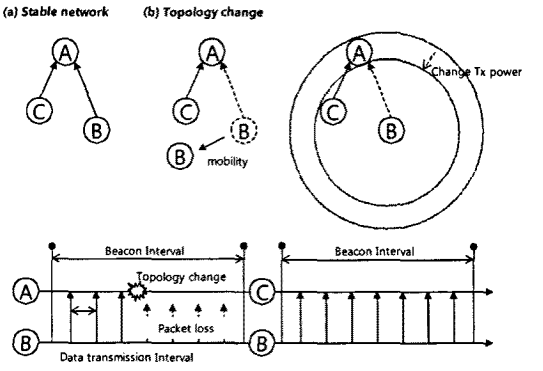


그림 3 주기적인 링크 품질 측정 기법의 문제

때문에 변화 발생으로부터 변화를 인식하는 기간 동안 패킷을 손실하게 된다. 만약 재전송을 사용하게 된다면 손실한 패킷에 대한 재전송은 토플로지 변화상태 파악 후에나 가능하기 때문에 패킷 전송의 지연을 야기시킨다. B노드는 현재의 상황에서 적합한 경로인 중계 노드 C를 통하여 최종 목적지인 A노드에게 데이터를 전송할 수 있도록 빠르게 토플로지 변화를 감지해야 한다. 네트워크가 안정적일 때는 빠른 주기의 비컨의 패킷은 불필요한 에너지 소모를 일으키기 때문에 느린 주기로 링크의 품질을 측정하는 것이 바람직하다.

본 논문에서 제안하는 네트워크의 밀집도를 고려한 적응적인 링크 품질 측정 알고리즘은 그림 4와 같다. 먼저 초기 설정에서는 링크의 변화가 발생될 시 적응적으로 링크의 품질을 측정하기 위한 주기의 최소값과 최대값을 설정한다.

```
PROGRAM Adaptive link quality estimation

    GROBAL BIcurrent, Ncurrent
    Set the [max,min] beacon interval BImax, BImin

    WHILE
        Broadcast beacon estimation(BIcurrent)
        Unicast data packet forward
        IF (New node || Data packet loss) THEN
            Beacon timer reset
            Beacon interval = BImin
        ELSE
            Beacon interval = BIcurrent
            Increase multiplicatively the BIcurrent
            IF(BIcurrent> BImax) THEN
                BIcurrent= BImax
            ENDIF
        ENDIF
    ENDWHILE

END PROGRAM
```

그림 4 적응적인 링크 품질 측정 기법

다음은 링크의 품질의 변화를 판별(Link Variation Trigger)하는 단계로 새로운 노드가 생성되어 이웃 노드와의 링크 품질을 측정하여 새로운 경로선택이 필요할 때와 현재 통신을 하던 노드가 이동을 하거나 주변 환경의 영향으로 인해 패킷 손실이 발생되는 경우로 ETX와 같은 라우팅 메트릭이 급격하게 감소할 때 링크의 품질변화가 있음을 감지한다. 이러한 링크의 품질의 변화가 없다고 판별될 때는 초기에 설정한 최대의 링크 품질 측정 주기로 동작하여 에너지와 오버헤드를 감소시킬 수가 있다. 만약 링크 품질의 변화가 일어났을 때 링크의 품질을 측정하는 주기가 초기화되고 설정한 최소의 링크 품질 측정 주기로 동작하여 변화된 링크에 따라 빠른 속도로 적응한다. 따라서 주기적으로 링크 품질을 측정하는 기법에 비하여 패킷 손실이나 지연을 방지할 수 있도록 한다. 마지막으로 변화된 링크에 적응하였을 때는 현재의 빠른 주기는 네트워크에 많은 비용을 초래하기 때문에 다시 최대의 주기로 도달하도록 하였다.

## 5. 실험 결과 및 분석

본 장에서는 적응적인 링크 품질 측정 기법의 성능 평가를 위해 TinyOS[9]의 TOSSIM[10]을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였으며, ETX로 링크 품질을 측정하여 라우팅에 참조하도록 하였다.

싱크를 포함한 15개의 노드를 랜덤하게 배치하고 기존에 제안된 주기적인 링크 품질 측정 기법과 본 논문에서 제안하는 적응적인 링크 품질 측정 기법을 비교를 하였다. 총 1000초의 시간 동안에 2초마다 데이터 전송하고 링크의 품질인 ETX를 측정하는 주기를 5초, 30초와 본 논문에서 제안한 링크 상태에 따른 적응적인 링크 측정 기법의 비컨 발생 횟수를 비교하였다. 그 결과 그림 5와 같이 5초, 30초, 적응적인 측정의 순으로 비컨이 발생하는 것을 알 수 있었다. 주기적인 측정 기법은 총 실험시간 동안에 발생 주기에 비례하여 균일하게 발생되는 결과를 나타냈다. 구체적으로는 5초의 주기로 측정하는 기법은 약 220개의 비컨을 발생시켰고 30초의 주기로 측정하는 기법은 약 470개의 비컨을 발생시켰다. 적응적인 측정 기법은 네트워크에서 초기인 0-130초에서 생성된 노드들 간에 빠르게 링크의 품질을 측정하기 때문에 많은 양의 비컨 발생 수를 발생시켰다. 또한 링크의 품질이 불규칙하다고 판단되는 시간인 200-260초, 400-500초 등에서 적응적으로 비컨 패킷을 다수 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 링크가 안정되면서 측정 주기가 길어지고 비컨의 발생 수가 줄어들게 되었다. 최종적으로 제안한 기법은 비컨의 발생횟수가 190개로 다른 주기적인 측정기법에 비해 적은 것을 확인할 수

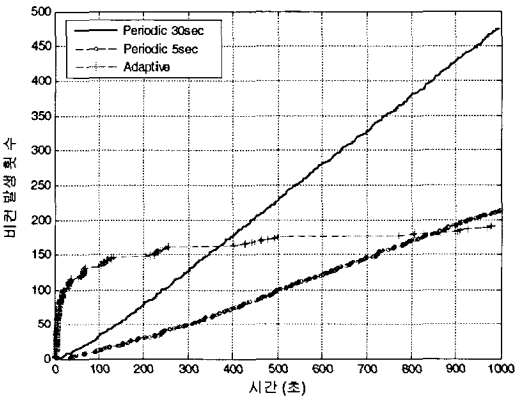


그림 5 링크 품질의 적응적인 측정과 주기적인 측정의 비컨 발생 수의 비교

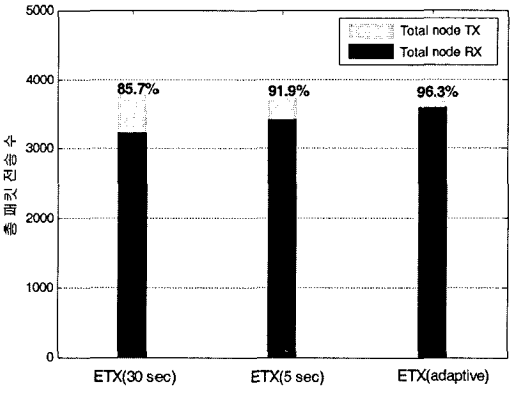


그림 6 링크 품질의 적응적인 측정과 주기적인 측정의 패킷 수신율 비교

있다. 즉 적은 수의 비컨으로 링크의 품질을 효율적으로 측정함으로써 비컨 발생에 따른 노드의 에너지 소모를 줄일 수 있음을 확인할 수 있다.

또한 신뢰성 실험에서는 그림 6과 같이 전체 15개의 노드에서 전송한 패킷과 싱크 노드에서 수신한 패킷에서 주기가 긴 30초의 경우 가장 낮은 수신율인 85.7%를 보여 주었다. 이는 초기 생성되는 노드들끼리 빠른 속도로 링크를 측정하지 못할 뿐만 아니라 링크 품질의 변화에도 적응적으로 반응하지 않기 때문에 패킷의 수신율이 짧은 주기인 5초에서는 적응적인 측정 기법보다 낮다. 하지만 5초마다 측정할 때에는 그림 5에서와 같이 비컨 발생에 따른 에너지 소모 및 브로드캐스팅하는 오버헤드 패킷이 많아지는 단점이 존재한다. 결국 본 논문에서 제안한 적응적인 측정 기법이 기존에 주로 사용하는 주기적인 링크 품질 측정 기법에 비하여 적은 수의 비컨으로 패킷 수신율을 개선할 수 있었다.

## 6. 결론 및 향후 연구

멀티 홉으로 구성되는 무선 센서 네트워크에서는 환경의 변화 및 하드웨어적인 노드의 제약으로 인하여 링크의 품질이 불규칙하게 변화한다. 따라서 불규칙하게 변화하는 링크의 특성을 감안하여 링크의 품질을 정확하고 빠르게 측정하여 품질이 좋은 링크를 경로를 찾고 데이터를 전송해야 한다. 또한 무선 센서 네트워크는 배터리로 동작하는 응용이기 때문에 지속적으로 네트워크를 유지하기 위한 링크 품질 측정은 에너지 효율적으로 동작할 필요가 있다.

본 논문에서는 불규칙한 링크의 품질 변화에 대한 것을 무선 간섭, 페이딩 등과 같은 환경적인 요인과 노드 자체의 성능의 제약으로 나누었으며, 링크의 품질 변화에 따른 토플로지의 변화에 따라서 적응적으로 링크의 품질을 측정하는 기법을 제안하였다. 실험을 통하여 제안한 기법은 기존의 주기적인 링크 품질 측정 기법에 비하여 패킷 수신율을 통한 신뢰성과 비컨 발생 횟수에 따른 에너지 오버헤드측면에서 좋은 결과를 확인할 수 있었다. 특히 링크 품질 측정의 다수의 샘플링을 요구하는 ETX와 같은 품질 측정기법에서 효율적으로 링크의 품질을 측정할 수 있을 것으로 예상된다.

향후 연구로는 응용 및 네트워크 상황에 따라 각 노드가 능동적으로 네트워크의 토플로지를 제어할 뿐만 아니라 이에 변화하는 링크의 품질 변화를 적응적인 링크의 품질 측정을 통하여 네트워크의 신뢰성 및 에너지 효율성 개선시킬 수 있는 연구가 수행되어야 할 것이다.

## 참 고 문 헌


[1] G. Zhou, T. He, and J. A. Stankovic, "Impact of Radio Irregularity on Wireless Sensor Networks," *Proc. of the ACM International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services (MobiSys)*, pp.125-138, June, 2004.

[2] K. Srinivasan, P. Dutta, A. Tavakoli, and P. Levis, "Some Implication of Low Power Wireless to IP Networking," *Proc. of the ACM the Fifth Workshop on Hot Topics in Networks(HotNets-V)*, pp.31-36, November 2006.

[3] TinyOS, MultiHopLQI,http://www.tinyos.net/tinyos-1.x/tos/lib/MultiHopLQI.

[4] CC2420, 2.4 GHz IEEE 802.15.4 / Zigbee RF Transceiver, http://ti.com.

[5] R. Fonseca, O. Gnawali, K. Jamieson, and P. Levis, "Four-Bit Wireless Link Estimation," *Proc. of the ACM the Sixth Workshop on Hot Topics in Networks (HotNets-VI)*, pp.92-98, November 2007.

[6] D. Couto, D. Aguayo, J. Bicket, and R. Morris, "A High-Throughput path Metric for Multi-hop Wireless Routing," *Proc. of the ACM Conference on Mobile Computing and Networking(MobiCom'03)*, pp.134-146, September 2003.

[7] D. Ganesan, B. Krishnamachari, A. Woo, D. Culler, D. Estrin, and S. Wicker, "Complex Behavior at Scale: An Experimental Study of Low-power Wireless Sensor Networks," In *Technical Report UCLA/CSD-TR02-0013*, 2002.

[8] CC1000, Single Chip Very Low Power RF Transceiver, http://ti.com.

[9] TinyOS, TOSSIM simulator, http://tinyos.net.