

듀티사이클 무선센서네트워크에서 저전력과 저지연을 위한 다중경로 라우팅 프로토콜의 설계

Design of a multipath routing protocol for energy-efficiency and low-delay in duty-cycled wireless sensor networks

이 형 근[★]

Hyungkeun Lee[★]

Abstract

This paper presents the design of a routing metric for energy-efficient and low-delay path selection and a new routing protocol utilizing the metric in duty-cycled wireless sensor networks. The new routing metric based on duty cycle, EDW, can reduce the energy and delay of transmission paths, which represents total waiting time from source to destination due to duty cycle. Therefore, in this paper, we propose a new multipath routing protocol based on cross-layer information utilizing the new routing metric, and simulation results show that the proposed protocol shows better performance of end-to-end delay and energy consumption.

요 약

본 논문은 듀티사이클 기반의 무선센서네트워크에서 에너지 효율성을 높이고 시간 지연을 줄일 수 있는 경로설정을 위해 새로운 라우팅 메트릭을 고안하고 이를 활용한 라우팅 프로토콜을 제안한다. 듀티사이클을 고려한 새로운 라우팅 메트릭인 EDW 메트릭을 사용함으로써 에너지 효율적이며 저지연의 경로를 설정할 수 있다. 본 논문에서는 새로운 라우팅 메트릭을 적용하는 크로스레이어 기반의 다중경로 라우팅 프로토콜을 제안하고 실험을 통해 낮은 전송 지연시간과 적은 에너지소비를 확인하였다.

Key words : Wireless sensor networks, Cross-layer design, Multi-path routing protocol, MAC, Duty cycle

1. 서론

무선센서네트워크(wireless sensor networks)는 감지 및 통신 기능이 있는 다량의 작은 센서노드들로 구성된 네트워크로 센서노드들이 센서를 통해 주변 환경을 감시하고 데이터를 수집하는 등 다양

한 응용분야에 적용되고 있다[1]. 특히 군사지역에서 침입을 감지하는 보안용도, 자연 환경에서 특정 지역에서 습도나 온도 등의 환경 정보를 모니터링하기 위한 용도 등으로 사용될 수 있다. 그림 1과 같이 센서 네트워크는 기본적으로 많은 수의 센서노드들로 구성되며 센서노드들은 센서를 통해 정

* Dept. of Computer Eng., Kwangwoon University

★ Corresponding author

E-mail : hkleee@kw.ac.kr, Tel : +82-2-940-5128

※ Acknowledgment

This research has been conducted by the Research Grant of Kwangwoon University in 2018.

Manuscript received Mar. 11, 2020; revised Mar. 19, 2020; accepted Mar. 20, 2020.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

보를 수집하고 수집된 정보를 일정시간마다 최종 목적지인 싱크노드에게 전송하게 된다. 싱크노드는 센서 노드들로부터 데이터를 수집하여 수집된 데이터를 사용자에게 전송하게 된다.

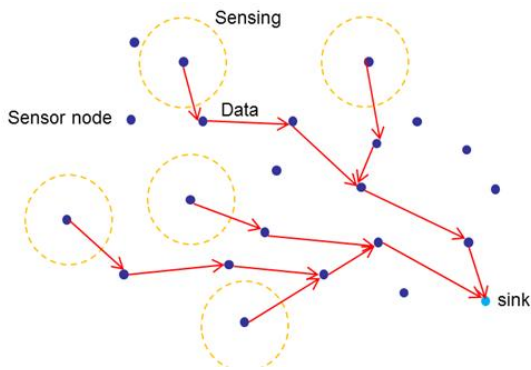


Fig. 1. Wireless sensor networks.
그림 1. 무선센서네트워크

무선 센서 네트워크에서 센서노드들은 보통 배터리와 같이 용량이 제한된 에너지를 사용하고 있으며 이에 따라 에너지를 효율적으로 관리하고 사용하는 것이 매우 중요하다. 따라서 센서노드의 에너지 효율은 가장 중요하게 다루어져야 하는 성능 척도이다. 이처럼 저전력 설계에 대한 요구가 증가하면서 그림 2과 같이 센서노드가 수면(sleep)모드와 동작(active)모드를 반복하여 동작하게 하는 듀티사이클(duty cycle) 방식을 많이 이용하고 있다 [2]. 수면모드 동안에는 전파의 송수신기를 모두 꺼서 에너지를 절약할 수 있지만 동시에 전송지연이 발생하게 된다. 이러한 듀티사이클의 동작 방식에는 두 가지가 있는데 동기 방식의 듀티사이클과 비동기 방식의 듀티사이클이다. 하지만 동기 방식의 듀티 사이클에는 프로토콜 오버헤드라는 해결하기 어려운 문제가 있어 현실적으로는 비동기 방식 듀티사이클이 널리 사용된다[3][4].

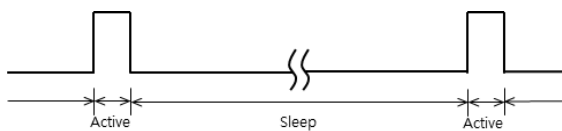


Fig. 2. Duty cycles.
그림 2. 듀티 사이클

가장 대표적인 비동기 방식의 듀티사이클을 지원하는 X-MAC은 LPL(Low Power Listening) 기법

을 개량하여 저전력 송수신을 가능하게 한 저전력 MAC 프로토콜이다. 듀티사이클을 가지며 노드들 간의 동기를 맞추지 않는 비동기 방식의 프로토콜은 송신 노드가 수신 노드에게 보낼 데이터가 있음을 알리기 위해 프리앰블 샘플링 기법을 사용한다. 짧은 프리앰블에 노드 주소를 포함시켜 전송하고 프리앰블 사이에 일정 기간의 listen 주기를 두어서 수신노드가 프리앰블의 수신여부를 알려줄 수 있게 한다. 자신의 주소 값이 포함된 프리앰블을 수신한 노드는 early-ACK를 보내서 프리앰블의 수신 여부를 알려주게 된다. early-ACK를 수신한 노드는 프리앰블 전송을 멈추고 바로 데이터를 전송함으로써 두 노드간의 데이터 전송이 이루어지게 된다. 송신 노드는 긴 프리앰블을 보낼 필요없이 수신노드로부터 early-ACK를 수신하면 바로 데이터를 보내 불필요한 컨트롤 프레임의 오버헤드를 줄일 수 있다. 또한 수신노드는 프리앰블에 포함되어 있는 주소 값을 확인함으로써 자신의 주소 값이 포함되지 않은 프리앰블의 경우 바로 수면모드로 들어감으로써 overharing을 효과적으로 줄였다.

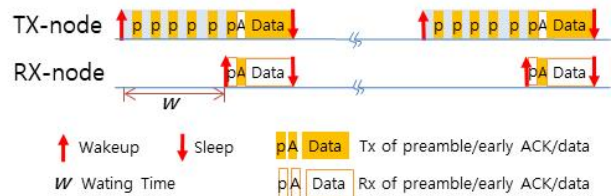


Fig. 3. X-MAC with asynchronous duty cycles.
그림 3. 비동기 듀티 사이클을 갖는 X-MAC

비동기 통신 방식인 X-MAC은 주변 노드의 스케줄이나 동기를 위한 과정을 생략함으로써 프로토콜 오버헤드를 줄임으로 에너지를 절약할 수 있다[5]. 그림 3은 X-MAC의 기본동작을 보여준다.

비동기 방식의 듀티사이클은 프로토콜 오버헤드의 문제는 해결할 수 있지만 센서노드간에 동작 구간이 달라 전송을 위한 대기시간이 동기 방식에 비해 증가하는 현상이 일어난다. 이러한 대기시간이 전체 전송경로에서 누적되게 되면 출발지에서 목적지까지 패킷은 높은 전송지연시간을 겪게되다, 더구나 송신노드는 듀티사이클에 따른 수신노드의 동작모드를 기다리면서 프리앰블을 지속적으로 전송하기 때문에 대기시간이 길어지면 송신노드의 에너지를 많이 낭비하게 되고 전체 전송경로에서

에너지 소비가 커지게 된다. 따라서 라우팅 프로토콜에서 MAC으로부터 수신노드들의 수면모드와 동작모드에 대한 시간정보를 받아 활용할 수 있다면 이러한 문제들을 완화할 수 있다. 만약 라우팅 프로토콜이 출발지에서 목적지에 이르는 여러 개의 전송경로 중에서 듀티사이클에 의한 대기시간을 최소화하는 전송경로를 선정한다면 이를 통해 전체 전송시간을 줄일 수 있을 뿐만 아니라 센서노드들에서 사용되는 에너지도 절약할 수 있게 된다.

본 논문에서는 이러한 듀티사이클 기반의 무선센서네트워크에서 비동기식 X-MAC을 사용할 때 센서노드들의 듀티사이클에 대한 정보를 활용하여 라우팅 메트릭과 프로토콜을 설계하고 시뮬레이션 실험을 통해 프로토콜의 에너지성능과 전송지연시간을 비교하고 분석하였다.

II. 본론

다중경로 라우팅 프로토콜은 여러 개의 경로 후보중에서 라우팅 메트릭에 근거하여 가장 최적의 경로를 선정한다. 이때 라우팅 프로토콜은 각 센서노드의 수면모드와 동작모드의 타이밍을 알기 위해서는 매체접근제어(MAC) 프로토콜로부터 이러한 정보를 제공받아야 한다. 네트워크에서 각 센서노드는 자신만의 비동기식 듀티사이클을 가지며 이에 따른 수면모드와 동작모드의 타이밍은 MACdp 의해 결정된다. 따라서 듀티사이클에 의한 대기시간을 최소화하는 전송경로를 선정하기 위해서는 크로스레이어 설계를 갖는 라우팅 프로토콜을 설계해야한다. 이 논문에서는 새로운 라우팅 메트릭에 기반한 크로스레이어 다중경로 라우팅 프로토콜의 설계를 제안한다.

1. 라우팅 메트릭 EDW

일반적인 무선네트워크의 라우팅 프로토콜에서 가장 보편적으로 널리 쓰이는 라우팅 메트릭은 ETX (expected number of transmission)로서 이는 출발지에서 목적지까지의 전송경로에서 발생하는 총 전송횟수를 의미한다. 라우팅 프로토콜은 목적지까지 패킷을 전송하는데 가장 적은 ETX를 갖는 경로를 최종 전송경로로 선정한다[6].

모든 노드들이 항상 전송을 기다리는 상태로 준비하고 있는 상황에서는 이러한 최소한의 ETX를

가진 경로가 가장 빠르고 에너지 소모가 적은 경로를 의미하며 결국에는 가장 좋은 성능을 나타내는 경로로 선정된다. 하지만 비동기식 듀티 사이클을 가지고 있는 무선 센서 네트워크에서는 하나의 경로가 최소의 전송횟수 즉 가장 작은 ETX의 값을 가지고 있음에도 불구하고 최소의 전송지연시간이나 최적의 에너지 효율성을 보장하지 못한다. 이는 비동기식 듀티사이클로 인한 중간 센서노드들 사이의 대기시간이 랜덤하게 발생하기 때문이다. 듀티사이클로 인한 대기시간을 줄이게 되면 전체 네트워크의 에너지 소비와 전송지연시간을 줄일 수 있다.

본 논문에서는 라우팅 프로토콜에서 최소의 전송지연시간을 가진 경로를 선정하기 위해 새로운 라우팅 메트릭으로 EDW(estimated duty-cycled wait)를 제안한다. EDW는 전체경로에서 발생하는 총 대기시간을 계산한 값이며, 그림 3에서 보는 것처럼 중계를 맡은 중간 센서노드들이 패킷을 전송하기 위해 수신 센서노드가 동작모드로 깨어날 때까지 기다리는 대기시간(W)들의 총량을 나타낸다. 그러므로 EDW를 최소화하는 경로는 전체 전송지연시간을 줄일 뿐만 아니라 그 경로에서 소비되는 에너지도 함께 줄여주기 때문에 결국에는 무선 센서 네트워크의 생존 수명을 길게 해주는 효과를 얻게 된다.

비동기식 듀티사이클 기반의 무선 센서 네트워크에서는 센서노드가 패킷을 다음 센서노드에게 전송하고자 할 때 패킷을 수신할 노드가 동작모드로 깨어날 때까지 기다렸다가 깨어난 후에 전송을 완료한다. 임의의 시간 t 에서 전송 노드가 i 이고 수신 노드가 j 일 때 하나의 홉에서 발생하는 대기시간을 $W_{ij}(t)$ 라고 정의할 수 있고 전체 전송경로에 걸친 총 대기시간, W_p 는

$$W_p = \sum_{all\ hops} W_{ij}(t) \quad (1)$$

로 정의할 수 있다. 일반적으로 듀티사이클로 인한 대기시간은 상대적으로 전송지연시간, 처리지연시간 등과 같은 다른 원인으로 인한 지연시간에 비해 매우 크기 때문에 이 EDW는 전체 지연시간을 결정하는 중요한 라우팅 메트릭이 될 수 있다.

예를 들어 그림 4에서 S 노드가 메시지를 노드 D로 전송한다고 할 때 노드 A를 통하여 전달되거나 노드 B와 노드 C를 통하여 전달되는 두 가지의

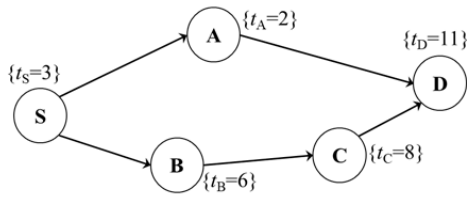


Fig. 4. Message relay over two paths.
그림 4. 두 가지 경로를 통한 메시지 전달

경로가 존재한다. 여기서 노드에 표기된 타이밍 값 t 는 듀티 사이클의 주기 안에서 각 노드가 동작 상태로 깨어나는 시간을 표기하고 있다. 그림4의 경우 노드 A를 통해 전달되는 경로에서는 노드 S로부터 노드 A에게 메시지를 전달하기 위해서 하나의 주기를 넘어서 다음 주기에 전송이 완료된다. 반면에 노드 B와 노드 C를 통하는 경로에서는 최종적으로 노드 D까지 하나의 주기 안에서 전송이 완료된다. 기존의 라우팅 매트릭인 ETX를 사용할 경우 전송경로는 노드 A를 통해 노드 D로 되지만 새로운 매트릭인 EDX를 사용하면 노드 B와 노드 C를 통하여 노드 D에 이르는 경로를 선정하고 이 경로는 더 작은 지연시간을 갖게된다.

2. 다중경로 라우팅 프로토콜

무선센서네트워크에서 목적지까지의 전송은 센서노드들의 제한된 전송반경과 근접하게 설치된 센서노드들로 인해 멀티홉 포워딩을 이용하여 이루어진다. 멀티홉 전송환경에서 효율적인 전송경로를 선정하는 것이 라우팅 프로토콜의 중요한 목적이며 다중경로 라우팅(multipath routing)은 무선센서네트워크의 성능을 높이는 기술로 활용되고 있다. 다중경로를 활용한 라우팅은 여분의 경로를 미리 확보하고 네트워크의 환경변화에 효과적으로 적응할 수 있는 프로토콜로 사용되어 진다. 이러한 접근방식은 네트워크 상태의 변화로 인해 출발지에서 목적지까지의 전송경로에 문제가 생길지라도 대체 경로를 활용함으로써 전송 지연시간을 단축시키고 전송성공률을 향상시키는 장점을 지닌다[7].

라우팅 프로토콜에서 다중경로의 구축과 EDW기반의 라우팅 기술은 무선센서네트워크의 싱크노드에 의해서 수행되며 초기화를 위해 플러딩 방식을 활용한다. 이 과정이 완료되면 모든 센서노드들은 이웃 센서노드들의 정보와 싱크노드까지의 홉 수와 전송지연시간 등의 라우팅 정보를 획득할 수 있

다. 이런 라우팅 정보는 정확성을 위해서 필요에 따라 주기적으로 수집될 수 있다. 이러한 초기 과정은 싱크노드의 HELLO 메시지 발송에 의해 수행된다.

Sequence No.	Msg. Type (HELLO)	Sink Node ID	Forward Node ID	Hop Count	Cumulative Wait Time
--------------	-------------------	--------------	-----------------	-----------	----------------------

Fig. 5. HELLO message format.
그림 5. HELLO 메시지 구조

HELLO 메시지에서 sequence number는 싱크노드에서 순차적으로 생성되는 번호이며 다른 HELLO 메시지와 구분하기 위해 사용된다. 그리고 message type은 다중경로 라우팅 프로토콜에서 사용하는 메시지의 종류를 나타내고 sink node ID와 forward node ID는 이 메시지의 출발지인 싱크노드와 바로 이전 센서노드의 주소를 각각 나타낸다. 마지막으로 hop count와 cumulative wait time은 싱크노드에서 현재 노드에 이르는 홉 수와 듀티사이클에 의해 발생하는 누적 대기시간을 기록한다.

제안하는 다중경로 탐색 알고리즘은 이전의 연구에서 제안된 알고리즘[8][9]에 기반을 둔 경로 탐색 방법을 이용한다. 제안하는 알고리즘은 센서노드들의 정보를 기반으로 최적의 성능의 전송경로를 선정하기 위해서 다음과 같은 기준에 의해

- 1) 듀티사이클에 의한 최소 대기시간(EDW)과
- 2) 목적지까지 최단 경로(ETX)에 의해

전달노드를 선정한다. HELLO 메시지를 수신한 센서노드는 싱크노드까지의 다중경로를 확보하기 위하여 R_REQ(Route Request) 메시지를 싱크노드에게 전송한다. 메시지에는 경로의 정보(출발지 및 싱크노드의 정보, 전송경로의 고유값 등)와 라우팅 정보(총 대기시간과 총 전송횟수)가 포함된다.

Sequence No.	Msg. Type (R_REQ)	Source Node ID	Sink Node ID	Path ID	Forward Node ID	Path Cost (EDW)	Path Cost (ETX)
--------------	-------------------	----------------	--------------	---------	-----------------	-----------------	-----------------

Fig. 6. R_REQ message format.
그림 6. R_REQ 메시지 구조

R_REQ를 수신한 싱크노드는 다중경로를 최종 선정하기 위해서 센서노드에게 ASSIGN 메시지를 각각의 다중경로를 통해 전송한다. 싱크노드는 다중경로의 우선순위나 경로의 개수를 제한하여 ASSIGN 메시지를 전송하게 된다. 이 메시지를 수신한 중간

노드들은 메시지 안에 포함된 전송경로 정보를 이용하여 자신의 라우팅 정보를 업데이트하고 센서 노드들은 싱크노드까지의 예상 전송지연 시간과 전송 횟수를 얻을 수 있다.

Table 1. Experimental parameters.

표 1. 실험 파라미터

Parameters	Value
Duty cycle rate	0.5 %
Default wakeup time	0.02 second
Agent (Traffic model)	CBR/Poisson
Message interval in sources	20s
Message size	60 bytes
Number of simulation flows	8 flows
Link bandwidth	250 Kbps
Rx power in mode	15.2 mA
Tx power in mode	28.9 mA
Sleep power in state	0.004 mA
Idle(wake-up) power in state	12.8 mA
RX (TX) / CS range	25 / 30 meters

3. 실험 및 환경

새로운 라우팅 메트릭인 EDW를 기반한 다중경로 라우팅 프로토콜의 성능을 검증하고 이를 ETX를 사용한 다중경로 라우팅 프로토콜과 비교하기 위하여 시뮬레이션을 통한 실험을 NS-2를 이용하여 수행한다. 먼저 실험을 위한 센서노드와 네트워크의 환경에 대한 파라미터 값들은 표 1과 같다. 비동기식 듀티사이클 기반의 무선 센서네트워크에서 모든 센서노드들은 자신의 수면모드/동작모드의 타이밍을 다른 센서 노드들과 관계없이 결정할 수 있고 이러한 정보를 주변 이웃 노드들과 공유한다. 단, 무선 센서네트워크에 있는 모든 센서노드들의 특성은 동일하며 동일한 듀티사이클의 주기를 갖는다. 또한 실험에서는 두 가지의 트래픽을 사용하였다. 항상 일정한 전송량을 생성하는 정적인 트래픽(static)과 포아송의 분포를 갖는 랜덤한 트래픽(poisson)을 적용했으며 발생하는 데이터의 시간과 공간 간의 상호 연관된 트래픽(RCE)을 적용하여 실험하였다[10]. 이러한 실험 환경에서는 발생하는 모든 센싱된 데이터가 공간적으로나 시간적으로 매우 밀접한 관련성을 가지고 있으며 실제 센서네트워크에서 발생하는 현상과 유사하다.

4. 성능 분석

실험의 결과로서 가장 중요한 두 가지 성능 지표인 평균 전송지연시간과 평균 에너지소비량을 측정하였으며, 두 가지 라우팅 메트릭(EDW와 ETX)에 대해 비교 분석하였다. 이들 성능 지표들은 무선센서 네트워크에서 매우 중요하게 다루어지며 평균 에너지소비량은 각 센서노드의 송신과 수신을 포함한 네트워크의 평균 에너지소비량을 나타내며 평균 전송지연시간은 출발지에서 패킷을 전송하기 시작하여 싱크노드에 성공적으로 도달할 때까지 소요되는 시간을 의미한다.

그림 7은 듀티사이클의 주기 변화에 따른 출발지-싱크노드 종단간의 전송지연시간을 측정한 결과 그래프이다. 두 개의 라우팅 메트릭을 사용한 다중경로 프로토콜 모두 둘사이클의 주기가 길어질수록 전송지연시간이 증가하였으며 특히 EDW를 적용한 라우팅 프로토콜의 경우 전송지연시간이 약 33% 이상 감소하였으며 이는 0.5%의 듀티사이클 비율을 갖는 네트워크의 특성으로 인해 수신노드의 동작모드를 기다리는 대기시간이 상당히 크다는 것을 알 수 있다.

그림 8에서는 듀티사이클의 주기 변화에 따른 센서노드에서 소비하는 평균 에너지를 측정하였다. 듀티사이클의 주기가 길어질수록 각 센서노드에서 소비되는 에너지의 사용량은 줄어들고 EDW를 적용한 라우팅 프로토콜의 경우 에너지 소비량이 약 30% 정도 적은 것으로 나타난다. 이는 수신노드의 동작모드를 기다리는 대기시간 동안에 송신노드는 프리앰블을 지속적으로 보내야 하는 상황에서 에너지 소비가 증가한 것으로 보여진다. 또한 ETX를

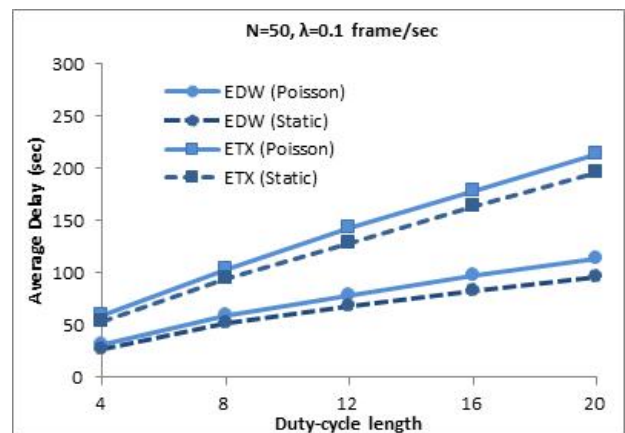


Fig. 7. Average delay vs. Duty-cycle length.

그림 7. 듀티사이클 길이에 따른 평균 전송지연시간

사용하는 라우팅 프로토콜의 경우 듀티사이클의 주기가 길어짐에 따라 에너지 사용량의 감소율이 적은 것으로 나타나는데 이는 듀티사이클의 주기가 길어짐으로써 대기시간도 상대적으로 길어지기 때문으로 판단된다.

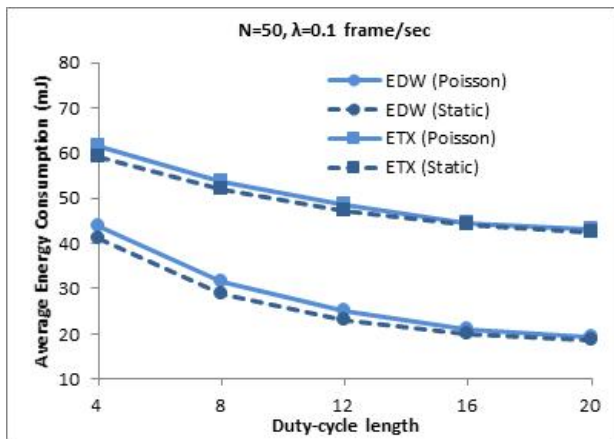


Fig. 8. Average energy consumption vs. Duty-cycle length. 그림 8. 듀티사이클 길이에 따른 평균 에너지소비

그림 9는 각 센서노드에서 발생하는 데이터 패킷들의 발생률에 따른 출발지-싱크노드 종단간의 전송지연시간을 측정한 결과 그래프이다. 두 개의 라우팅 메트릭을 사용한 다중경로 프로토콜 모두 패킷의 발생률이 증가함에 따라 전송지연시간은 지속적으로 증가한다. 이는 전송할 패킷이 많이 생성됨으로써 각 패킷이 겪게되는 대기시간이 증가함을 것을 의미한다. 마찬가지로 EDW를 적용한 라우팅 프로토콜의 경우 전송지연시간이 약 30% 정도 감소하였으며 수신노드의 동작모드를 기다리는 대기시간이 줄어들면서 평균 전송지연시간이 줄어

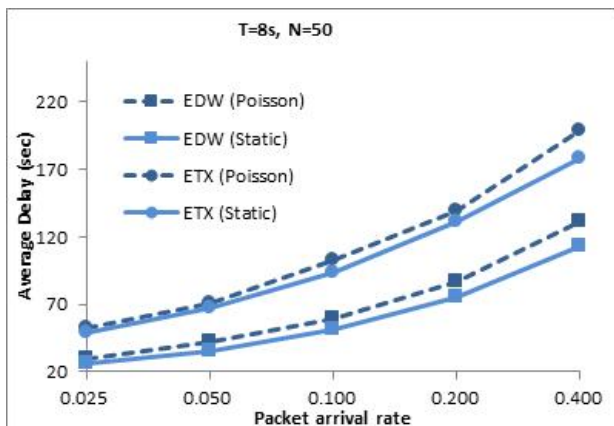


Fig. 9. Average delay vs. Packet arrival rate. 그림 9. 패킷 발생률에 따른 평균 전송지연시간

든다는 것을 알게 된다.

그림 10은 데이터 패킷들의 발생률에 따른 센서노드에서 소비하는 평균 에너지양을 보여준다. 패킷 발생률이 증가함에 따라 각 센서노드에서 소비되는 에너지의 사용량은 증가하지만 전송할 수 있는 패킷의 수가 제한적이므로 에너지 소비가 크게 증가하지 않는다. 대신 그림 9에서 보았던 것처럼 전송지연시간이 크게 증가하게 된다.

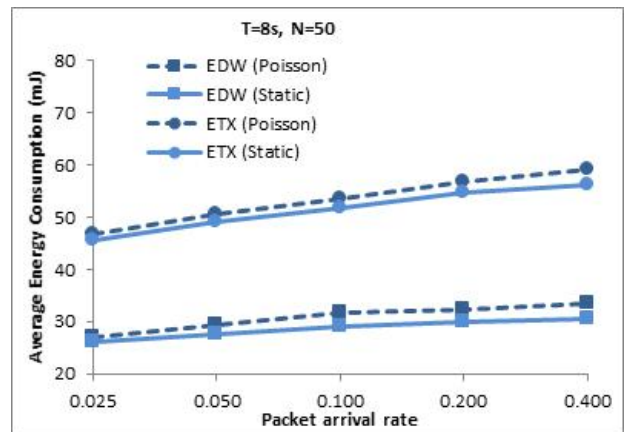


Fig. 10. Average energy consumption vs. Packet arrival rate. 그림 10. 패킷 발생률에 따른 평균 에너지소비

III. 결론

본 논문은 듀티사이클 기반의 무선센서네트워크에서 에너지 효율성을 높이고 시간 지연을 줄일 수 있는 경로설정을 위해 사용하는 새로운 라우팅 메트릭을 고안하고 이를 활용한 라우팅 프로토콜을 제안한다. 기존의 무선센서네트워크에서 경로설정을 위해 사용하는 라우팅 메트릭으로는 목적지까지의 전송횟수, 중간노드들의 잔여 에너지량, 또는 네트워크에서의 노드들의 위치정보 등 다양한 메트릭들이 사용되고 있지만 듀티사이클 기반의 무선센서네트워크에서는 듀티사이클로 인해 송신노드와 수신노드사이의 상당히 긴 대기시간이 발생하게 된다. 따라서 듀티사이클을 고려한 새로운 라우팅 메트릭인 듀티사이클 대기시간(EDW)의 메트릭을 제안함으로써 에너지 효율적이며 저지연의 경로를 설정할 수 있게 되고 이를 이용해 새로운 라우팅 프로토콜을 설계할 수 있다. 이 EDW는 출발지에서 목적지까지의 모든 전송경로에서 듀티사이클로 인해 발생하는 총 대기시간을 나타내는 값으로 이를 최소화함으로써 어떤 노드가 대기하는

동안 동작상태를 유지하면서 불필요한 짧은 프리 앰블을 연속적으로 전송하고 이로 인해 노드들 간섭을 발생하는 등의 문제점을 줄일 수가 있다. 이로 인해 긴 지연 시간과 함께 많은 에너지를 낭비하는 경로 설정을 방지함으로써 에너지 효율적이고 저지연의 무선 센서 네트워크를 설계할 수 있다.

References

- [1] J. Yick, B. Mukherjee and D. Ghosal, "Wireless sensor network survey," *Computer Networks*, Vol.52, No.12, pp.2292-2330, 2008.
DOI: 10.1016/j.comnet.2008.04.002
- [2] K. Han, J. Luo, Y. Liu and A. V. Vasilakos, "Algorithm Design for Data Communications in Duty-Cycled Wireless Sensor Networks: A Survey," *IEEE Communications Magazine*, Vol.51, No.7, pp.107-113, 2013.
DOI: 10.1109/MCOM.2013.6553686
- [3] Y. Li, W. Ye, J. Heidemann, "Energy and Latency Control, in Low Duty Cycle MAC Protocols," *IEEE Wireless Communication and Networking Conference*, 2005.
DOI: 10.1109/WCNC.2005.1424589
- [4] Q. Cao, T. Abdelzaher, T. He, and J. Stankovic, "Towards optimal sleep scheduling in sensor networks for rare-event detection," *4th International Symposium on Information Processing in Sensor Networks*, pp.20-27, 2005.
DOI: 10.1109/IPSN.2005.1440887
- [5] M. Buettner, G. V. Yee, E. Anderson and R. Han, "X-MAC: a short preamble mac protocol for duty-cycled wireless sensor networks," *4th ACM Conference on Embedded Networked Sensor System*, pp.307-320, 2006.
DOI: 10.1145/1182807.1182838
- [6] S. J. Douglas, D. Aguayo, J. Bicket, and R. Morris, "A High-Throughput Path Metric for Multi-Hop Wireless Routing," *Wireless Networks*, Vol.11, No.4, 2003. DOI: 10.1145/938985.939000
- [7] 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, 2012. DOI: 10.3390/s120100650
- [8] Y. M. Lu and V. W. S. Wong, "An Energy-Efficient Multipath Routing Protocol for Wireless Sensor Networks," *International Journal of Communication Systems*, Vol.20, No.7, pp.747-766, 2007. DOI: 10.1109/VTCF.2006.505
- [9] Sunghune Lee, Hyungkeun Lee, "Research of Energy-efficient Multipath Routing Algorithm in Wireless Sensor Networks," *Journal of the Korea Society of Computer and Information*, Vol.14, No.8, pp.59-64, 2009.
- [10] R. Shakya, Y. Singh, N. Verma, "A correlation model for MAC protocols in event-driven wireless sensor networks," *IEEE TENCON*, pp.1-6, 2012. DOI: 10.1109/TENCON.2012.6412198

BIOGRAPHY

Hyungkeun Lee (Member)



1987 : BS degree in Electronic Engineering, Yonsei University.
1998 : MS degree in Computer Engineering, Syracuse University.
2002 : PhD degree in Computer Engineering, Syracuse University.

1987~1994 : Research Engineer, Samsung Electronics.