

논문 2014-51-11-2

무선 센서 네트워크에서 에너지 효율성과 지연 감소를 위한 다중 채널 파이프라인 기법

(Multi-Channel Pipelining for Energy Efficiency and Delay Reduction in Wireless Sensor Network)

이 요 한*, 김 대 영**

(Yoh-han Lee and Daeyoung Kim[©])

요 약

무선 센서 네트워크에서 다중 흐름들 (multiple flows) 이 동시에 발생하여 sink 노드로 전달되는 과정에서 기존의 duty cycling 기반의 단일 채널 센서 네트워크 MAC 프로토콜들은 경쟁 (contention) 과 충돌 (collision) 로 인한 심각한 성능 저하를 보인다. 본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해서 다중 채널을 활용하는 Multi-Channel Pipelining (MCP) 기법을 제안한다. 본 논문은 종단 간 지연시간 (end-to-end latency) 을 최소화하기 위해서 다중 홉 상에 노드들의 wake-up 스케줄에 시차를 두는 SDPS (Staggered Dynamic Phase Shift) 알고리즘과 에너지 효율성을 최적화하기 위한 PLI (Phase-Locking Identification) 알고리즘을 제안한다. 이러한 방법을 바탕으로 다중 흐름들은 다중 채널에서 동적으로 파이프라인 (pipeline) 되어 처리됨으로써 성능이 향상된다. Qualnet 시뮬레이션을 통해 본 논문에서 제안하는 MCP 기법이 기존의 센서 네트워크 MAC 프로토콜들 보다 듀티 사이클 (duty cycle), 종단 간 지연시간, 패킷 전달율 (packet delivery ratio), 통합 처리량 (aggregate throughput) 관점에서 성능을 향상시켰음을 보였다. 또한, MCP 의 듀티 사이클과 종단 간 지연시간을 위한 분석 모델을 제안하고 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

Abstract

Most of the energy efficient MAC protocols for wireless sensor networks (WSNs) are based on duty cycling in a single channel and show competitive performances in a small number of traffic flows; however, under concurrent multiple flows, they result in significant performance degradation due to contention and collision. We propose a multi-channel pipelining (MCP) method for convergecast WSN in order to address these problems. In MCP, a staggered dynamic phase shift (SDPS) algorithms devised to minimize end-to-end latency by dynamically staggering wake-up schedule of nodes on a multi-hop path. Also, a phase-locking identification (PLI) algorithm is proposed to optimize energy efficiency. Based on these algorithms, multiple flows can be dynamically pipelined in one of multiple channels and successively handled by sink switched to each channel. We present an analytical model to compute the duty cycle and the latency of MCP and validate the model by simulation. Simulation evaluation shows that our proposal is superior to existing protocols: X-MAC and DPS-MAC in terms of duty cycle, end-to-end latency, delivery ratio, and aggregate throughput.

Keywords : Multi-channel Pipelining, Energy Efficiency, Dynamic Phase Shift, Wireless Sensor Network

* 정회원, 한국과학기술원 IT 융합연구소
(Korea Advanced Institute of Science and Technology)

** 정회원, 한국과학기술원 전산학과
(Korea Advanced Institute of Science and Technology)

© Corresponding Author(E-mail: kimd@kaist.ac.kr)

※ 본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소가 지원하는 국방위성항법특화연구센터 사업의 일환으로 수행되었습니다.
접수일자: 2014년08월18일, 수정일자: 2014년09월04일, 게재확정: 2014년11월02일

I. 서 론

무선 센서 네트워크는 IoT (Internet of Things) 을 위한 핵심 기술 중 하나로 분산 센싱 (distributed sensing), 탐지 (detection), 추적 (tracking) 등 다양한 응용 시나리오를 가능하게 한다^[1]. 다양한 무선 센서 네트워크에서 대부분의 센서 노드들은 제한된 배터리에서 동작하는 것을 가정하며 따라서 센서 네트워크 MAC 프로토콜 디자인에서 에너지 효율성은 가장 중요한 요구 사항 중 하나이다. 센서 노드의 에너지 소비를 줄이기 위해 각 센서들의 라디오 상태를 짧은 활동 기간 (active duration 혹은 listening duration 로 알려짐) 후에 상대적으로 긴 수면 기간 (sleep duration) 으로 주기적으로 변경하는 duty cycling 기법이 제한되었다. 기존의 duty cycling 기반의 센서 네트워크 MAC 프로토콜은 대략 동기적 접근방식과 비동기적 접근방식으로 나뉠 수 있다. S-MAC^[2] 과 DMAC^[3]과 같이 동기적 접근방식에서는 이웃 노드들 사이에 시각 동기 (time synchronization)를 기반으로 하여 주기적으로 수면 상태 (sleep state)와 활동 상태 (active state)를 반복하는 duty cycling 을 통해 에너지 효율성이 달성된다. 특히, DMAC 은 시간차를 둔 wake-up 스케줄링을 통해 종단 간 지연시간 최소화를 고려하지만 동기적 접근방식은 시각 동기를 유지해야 하는 오버헤드 (overhead) 가 있다. 반면, RICER/TICER^[4], X-MAC^[5]과 같이 비동기적 접근 방식에서는 각 노드가 별도의 시각 동기 없이 독립적인 wake-up 스케줄을 가지므로 송신자 (sender) 와 수신자 (receiver) 사이에 통신을 위해서는 rendezvous scheme (즉, X-MAC에서 short preamble, RICER 의 경우 beacon waiting)이 사용된다. 비록 비동기적 접근방식은 시각 동기를 위한 오버헤드를 피할 수 있지만 rendezvous scheme을 위해 평균적으로 wake-up 주기의 1/2을 활성화 상태로 보내야 하기 때문에 에너지 효율성뿐만 아니라 종단 간 지연시간 관점에서 개선의 여지를 남기게 된다. DPS-MAC^[6]은 이러한 비동기 방식의 rendezvous scheme 에 기인한 에너지 낭비를 줄이는 동시에 동기 방식의 시각 동기 오버헤드를 피하기 위해 DPS (Dynamic Phase Shift) 를 활용한 혼합된 방식을 제안하였다. 기존의 센서 네트워크 MAC 프로토콜들은 각각 장/단점을 가지지만 이들은 대부분 가벼운 트래픽 (light traffic) 조건에 최적화

되어 설계 되었다. 따라서 다중 흐름들이 동시에 발생하는 트래픽 조건 하에서는 에너지 효율성, 지연 시간, 전달율 관점에서 심각한 성능 저하를 보여준다.

본 논문에서는 다양한 트래픽 조건하에서도 높은 전달율, 최소화된 종단 간 지연시간과 에너지 효율성을 동시에 달성하기 위한 MCP(Multi-Channel Pipelining) 프로토콜을 제안한다. MCP는 멀티 홉 경로 (multi-hop path) 상에서 각 노드들의 wake-up 스케줄을 동적으로 위상 변위 (phase-shift) 시킬 수 있는 SDPS(Staggered Dynamic Phase Shift) 알고리즘을 이용한다. 또한, 새로운 데이터를 가진 송신자가 다음 wake-up 시간까지 활성화 상태 혹은 수면 상태를 유지해야 하는지 결정할 수 있는 PLI(Phase-Locking Identification) 알고리즘을 활용하여 에너지 소비를 최소화 한다. 더 나아가서 비록 다중 흐름들이 동시에 발생하더라도 각 흐름은 서로 간섭이 없는 다중 채널들 중 하나의 채널에서 SDPS 방식으로 데이터 패킷을 전달하게 되며 sink 노드는 서로 다른 채널로 스위칭 (switching) 하면서 연속적으로 각 흐름 데이터 (flow data)를 수신하게 된다. 본 논문에서는 Qualnet^[9] 시뮬레이터를 이용하여 기존의 X-MAC, DPS-MAC과 제안된 MCP 기법을 비교하였으며 에너지 효율성, 종단 간 지연시간, 패킷 전달율, 통합 처리량 관점에서 성능 개선을 확인하였다. 본 논문의 일부 내용이 [7]에 기술되었지만 본 논문에서는 추가로 MCP의 듀티 사이클과 종단 간 지연시간을 위한 분석 모델이 제안되었으며 다양한 조건에서 시뮬레이션 결과와 비교되었다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 제안된 MCP 프로토콜에 대해서 자세히 설명하고 III장에서는 MCP의 듀티 사이클과 지연 시간을 분석한다. IV장에서는 제안하는 MCP 프로토콜의 성능을 평가하고 마지막으로 V장에서는 결론을 맺는다.

II. 본 론

그림 1에서 보는 바와 같이 각 흐름상에 센서 노드들은 싱크 노드와 자신의 홉 거리 (hop distance)에 따라 1부터 n까지 레벨 값을 가진다.

MCP 프로토콜은 크게 3 가지 부분으로 나누어 설명될 수 있다. 첫째, SDPS 알고리즘은 시각 동기 오버헤드 없이 각 흐름이 다중 채널 중 하나에서 동적으로 시

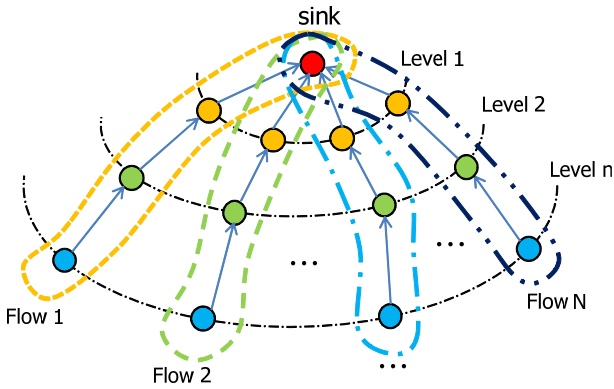


그림 1. MCP 프로토콜을 위한 시스템 모델
Fig. 1. System model for MCP protocol.

간 차를 두고 파이프라인(pipeline) 되어 처리되도록 한다. 둘째, PLI 알고리즘은 에너지 효율성을 최적화 한다. 셋째, 앞선 SDPS와 PLI 알고리즘을 기반으로 한 다중 채널 pipelining은 다중 흐름들이 서로 간섭 없이 효율적으로 처리되도록 한다.

1. 시간차를 둔 동적 위상 변화

(Staggered Dynamic Phase Shift)

다중 홉 경로를 거쳐 연속적으로 데이터를 전송함으로써 종단 간 지연시간을 최소화시키기 위해서 receiver-initiated 방식에 기반을 둔 SDPS 알고리즘을 제안한다. 초기에 각 노드는 독립된 wake-up 스케줄에 갠 후 IB (Invitation Beacon) 패킷을 자신의 자식(child) 노드에게 보낸다. 그림 2에서 보는 바와 같이 첫 번째 패킷이 도착했을 때 송신자는 해당 수신자가 깨어나서 IB 패킷을 보낼 때까지 활성 상태에 머무른다. IB

패킷은 수신자의 wake-up 시점과 IB 패킷 전송이 끝나는 시점 사이의 시간 차 정보 (α)를 포함한다. 기본적으로 모든 노드는 T_w 간격으로 duty cycling을 위해 깨어나지만 송신자는 IB 패킷을 받을 때마다 즉시 현재 wake-up 스케줄 타이머를 멈추고 다음의 값 β_s 로 타이머 값을 업데이트 시킨다.

$$\beta_s = T_w - \alpha - T_o \quad (1)$$

여기서, T_o 는 IB 패킷과 데이터 패킷을 처리하기 위해 요구되는 시간 간격 (offset)이다. 제안하는 SDPS 알고리즘은 각 송신자의 wake-up 시점을 해당 수신자의 wake-up 시점보다 T_o 시간차를 두고 앞서게 동적으로 위상을 이동 시킨다. 초기에 데이터 패킷은 비동기적으로 운반되지만 (그림 2에서 'asynchronous forwarding' 부분) 각 노드의 wake-up 스케줄이 일정한 시간 간격 (T_o)으로 위상 변위됨에 따라 패킷은 자식 노드에서 부모 (parent) 노드로 즉시 운반 된다(그림 2에서 'pipelined forwarding' 부분). 한편, 그림 2에서 T_{dwell} 은 IB 패킷을 보낸 후 잠재적인 데이터 패킷 수신을 위한 부가적인 활성 상태 체류 시간이다.

2. 위상 로킹 판별

(Phase-Locking Identification)

다중 홉 경로 상에 노드들의 wake-up 스케줄이 SDPS 알고리즘에 의해 이동되어 각 부모 노드의 wake-up 스케줄과 locking 된 경우에도 (그림 2에서 'phase locked' 부분), 송신자가 데이터 도착 시점 후 IB 패킷 도착 시점까지 활성 상태에 있으면 불필요한

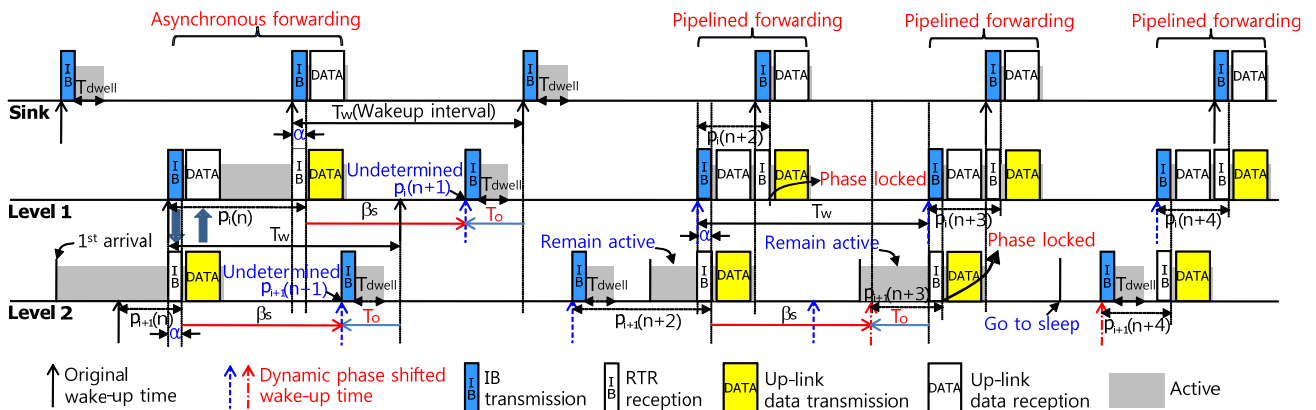


그림 2. 시간차를 둔 동적 위상 변화와 위상 로킹 판별 타이밍 구조
Fig. 2. Timing structure of staggered dynamic phase shift and phase-locking identification.

에너지를 평균적으로 wake-up 주기의 1/2 동안 낭비하게 된다. 따라서 다중 홉 경로 상에 각 노드들의 wake-up 스케줄이 locking 되었는지 un-locking 되었는지 판별하여 그에 따라 송신자의 데이터 도착 시점 이후 다가오는 wake-up 시점까지 수면 상태를 유지할지 (phase-locked 된 경우) 아니면 활성 상태를 유지할지 (phase-unlocked 된 경우) 결정할 수 있는 방법이 필요하다. Sink 노드를 제외한 모든 노드들은 자신과 부모 노드 사이의 위상차를 다음 (2) 식을 이용하여 계산한다.

$$P_i(n) = nth \text{ IB reception time} - nth \text{ wakeup time} \quad (2)$$

여기서, n 은 노드 I 가 깨어날 때 마다 하나씩 증가하는 sequence number이다. 만약 어느 노드의 $P_i(n)$ 값이 문턱 값 (실험에서는 $1.5T_o$ 사용) 보다 작고 자신의 부모 노드가 이미 phase-locked 되었다면 자신도 다중 홉 경로 상에서 phase-locked 된 상태로 간주한다. 이 조건을 만족시키는 각 노드는 자신의 IB 패킷 안에 phase-locking identification flag을 set 시켜 자식 노드에게 알린다. Sink 노드의 wake-up 스케줄은 SDPS 알고리즘에 의해서 동적으로 변화하지 않으므로 예외적으로 위 조건에 상관없이 항상 phase-locking identification flag을 set 시킨다. 이러한 과정을 통해 다중 홉 패스 상에 모든 노드들이 phase-locked 된 상태라는 사실을 인식하게 되면 송신자는 새롭게 데이터가

도착한 시점으로부터 다음 IB 패킷 수신 시점까지 수면 상태로 머물며 에너지 소비를 최소화 한다.

3. 다중 채널 파이프라인 (Multi-Channel Pipelining)

Sink 노드를 제외한 각각의 데이터 흐름상의 노드들은 서로 간섭이 없는 채널들 중 하나에서 앞서 기술한 SDPS 와 PLI 방법을 이용하여 채널 스위칭 없이 데이터를 전송한다. 반면, 그림 3에서 보는 바와 같이 sink 노드는 활성구간 동안 매 T_o 마다 동작 주파수를 각각의 자식 노드의 채널에 맞추고 IB 패킷을 보낸 후 각 데이터 흐름으로부터 데이터를 수신한다. 따라서 동시에 다중 흐름이 발생하더라도 sink 노드는 가능한 빠르고 에너지 효율적으로 각 흐름으로부터 데이터를 연속적으로 수신하게 된다. 즉, 이웃하는 흐름들은 간섭 없이 시간 축에서 서로 중첩 (그림 3에서 파란색 원 표시 부분) 되며 가능한 빨리 sink 노드에게 데이터를 전송하게 된다.

III. 성능 분석

본 장에서는 MCP 프로토콜의 성능을 에너지 소비와 중단 간 지연시간 관점에서 분석한다. 에너지 소비의 판단 척도로 전체 동작 시간 중 평균 활성 상태가 차지하는 비율로 정의되는 평균 듀티 사이클 (average duty cycle)을 이용한다. 데이터 패킷의 평균 도착 시

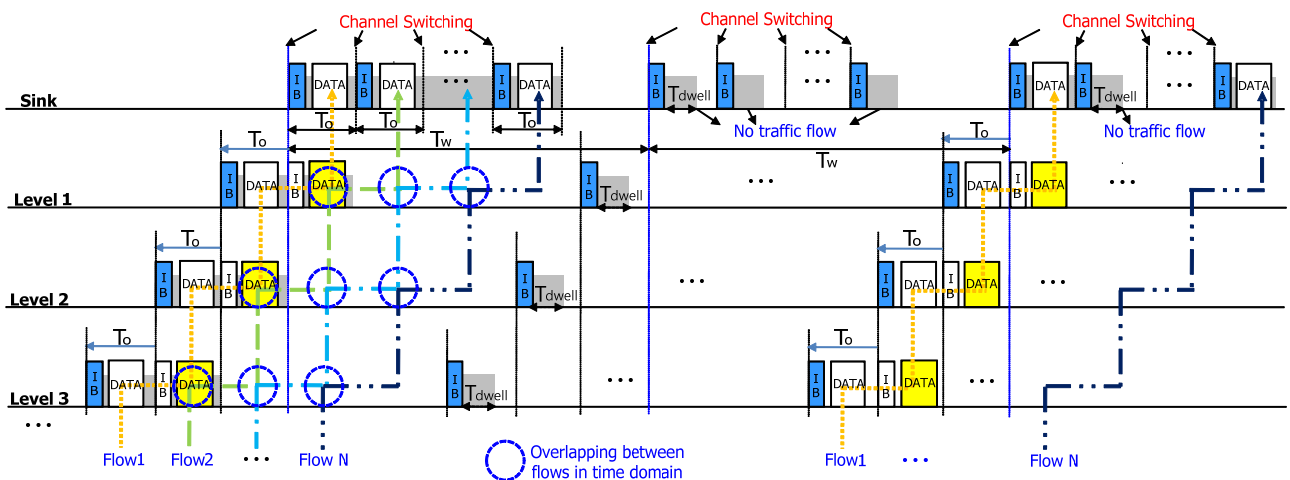


그림 3. 다중 채널 파이프라인 타이밍 구조
Fig. 3. Timing structure of multi-channel pipelining.

간 간격 (average inter-arrival time) $E(T_d)$ 가 wake-up 주기 (T_w)보다 길다고 가정하면, sink 노드의 평균 듀티 사이클은 renewal reward theorem^[8]에 의해서 다음과 같다.

$$E_{\text{sink}} = \frac{NT_o + \left(\frac{E(T_d)}{T_w} - 1\right)NT_{\text{dwell}}}{E(T_d)} \quad (3)$$

여기서, N 은 다중 흐름들의 개수, T_{dwell} 은 잠재적인 데이터 패킷 수신을 위한 부가적인 체류 시간이다. (3) 식에서 첫째 항 ($NT_o/E(T_d)$)은 매 $E(T_d)$ 마다 N 개의 다중 흐름들이 데이터 패킷을 받기 위해 깨어 있는 활성 시간을 나타내며 둘째 항은 매 $E(T_d)$ 마다 sink 노드가 체류하는 총 T_{dwell} 의 합을 의미한다. 임의의 한 흐름상에 모든 노드들이 phase-locked 된 상태라는 가정 하에 센서 노드의 평균 듀티 사이클은 다음과 같이 주어진다.

$$E_{\text{sensor}} = \frac{2T_o + \left(\frac{E(T_d)}{T_w} - 1\right)T_{\text{dwell}}}{E(T_d)} \quad (4)$$

(4) 식에서 첫째 항 ($2T_o/E(T_d)$) 은 매 $E(T_d)$ 마다 phase-locked 상태에서 데이터 패킷을 전달하는데 사용되는 활성 시간을 나타내며 둘째 항은 매 $E(T_d)$ 마다 센서 노드가 체류하는 총 T_{dwell} 의 합을 의미한다. 최종적으로 노드 당 평균 듀티 사이클은 (3)과 (4) 식을 이용하여 다음 (5) 식과 같이 주어진다.

$$E_{DC}(N_n) = \frac{E_{\text{sink}} + (N_n - 1)E_{\text{sensor}}}{N_n} \quad (5)$$

여기서, N_n 은 센서 네트워크상에 존재하는 sink 노드와 모든 phase-locked 된 센서 노드들의 개수의 합이다.

종단 간 지연시간은 개시 노드 (initiator node) 에서 데이터 패킷이 발생 된 후 최종 sink 노드에 도착할 때까지 걸린 총시간으로 정의된다. 임의의 한 흐름상에 모든 노드들이 phase-locked 된 상태라는 가정 하에 평균 종단 간 지연시간 (average end-to-end latency) 는 다음과 같이 주어진다.

$$E_L(h) = \frac{T_w}{2} + hT_o \quad (6)$$

여기서, h 은 개시 노드와 sink 노드 사이에 홉 수 (the number of hops)이다. (6) 식에서 첫째 항 ($T_w/2$)은 그림 2에서 보는 바와 같이 개시 노드에서 패킷이 발생되고 부모 노드의 IB 패킷에 의해서 초대 받을 때까지 걸리는 평균 지연 시간을 나타내며 둘째 항은 그림 3에서 보는 바와 같이 각 홉에서 데이터를 포워딩 (forwarding) 하는데 걸리는 시간의 총합을 의미한다.

IV. 성능 평가

본 논문에서 제안하는 MCP 프로토콜을 기존의 X-MAC^[5], DPS-MAC^[6]과 비교, 평가하기 위해서 Qualnet^[9] 시뮬레이터에 3가지 MAC 프로토콜을 모두 구현하였다. Qualnet 라이브러리에서 제공되는 IEEE 802.15.4 PHY 모델을 이용하였으며 전파 모델 (propagation model)은 two-ray path-loss, 전송 거리 (transmission range)는 250 m로 설정하였다. 성능 평가 지표로 듀티 사이클 (duty cycle), 종단 간 지연시간 (end-to-end delay), 패킷 전달율 (packet delivery ratio), 통합 처리량 (aggregate throughput) 4 가지를 선택 하였다. 여기서, 듀티 사이클은 노드 당 평균 듀티 사이클, 종단 간 지연시간은 어떤 일정 수의 패킷들의 종단 간 지연시간 평균, 패킷 전달율은 모든 source 노드들에서 생성된 패킷들 중 성공적으로 sink 노드까지 도착한 패킷들의 비율, 통합 처리량은 모든 다중 흐름들의 처리량의 총합으로 정의한다. IB 패킷의 payload 크기는 5bytes이며 α 값과 phase-locking identification flag을 위해 사용된다. 데이터 패킷의 payload 크기는 50 bytes이다. IEEE 802.15.4 PHY 모델과 패킷 크기를 고려하여 MCP의 T_o 는 7 ms, T_{dwell} 은 5.4ms로 설정되었다. X-MAC의 listening duration은 short preamble, early ACK, 데이터 패킷을 모두 처리하는데 필요한 시간인 10.368 ms 로 설정되었다. 한편, DPS-MAC의 listening duration^[6]은 adaptive listening 기반의 지연시간 감소 (latency reduction)를 위해 X-MAC의 listening duration보다 3배 크게 설정 (31.104 ms) 되었다. 여기서, MCP의 listening duration이 다른 프로토콜들 보다 작은 이유는 sender-initiated 기반인 X-MAC과 DPS-MAC의 경우 노드 간 rendezvous을 위한 short preamble이 필요하지만 MCP는 receiver-initiated 기반의 MAC 프로토콜이기 때문

표 1. 시뮬레이션 파라미터
Table 1. Simulation Parameters.

Category	Parameter	Value
Common	Transmission range	250 m
	Data packet	50 bytes
MCP	IB packet	5 bytes
	T_o	7 ms
	T_{dwell}	5.4 ms
X-MAC	Listening duration	10.368 ms
DPS-MAC	Listening duration	31.104 ms

에 short preamble 을 필요로 하지 않기 때문이다. 표 1은 주요 시뮬레이션 파라미터들을 보여준다.

1. 스트링 토폴로지 (string topology)에서 결과

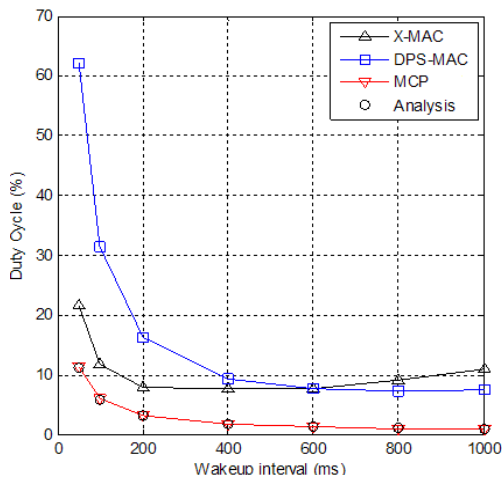
우선, 스트링 토폴로지 상에 200 m 간격으로 떨어진 6 개의 노드들을 가지고 성능 평가를 수행하였다. Leaf 노드에서 sink 노드로 2 s 시간 간격으로 총 1,000 개의 패킷을 발생시켰다. 그림 4(a)는 wake-up 주기 (T_w)가 변함에 따라 각 프로토콜의 듀티 사이클을 보여준다. T_w 짧은 때는, listening duration의 영향이 모든 프로토콜에서 지배적이므로 DPS-MAC의 듀티 사이클이 가장 크며 MCP의 듀티 사이클이 가장 작다. T_w 가 점점

길어짐에 따라, X-MAC의 short preamble로 인해서 X-MAC의 듀티 사이클은 점점 증가하다가 가장 큰 값을 보여 준다. 하지만, MCP와 DPS-MAC의 경우 T_w 가 점점 증가함에 따라, 듀티 사이클은 감소하는 경향을 보인다. 그림 4(b)에서 보는 바와 같이 모든 프로토콜에서 T_w 가 점점 길어짐에 따라, 종단 간 지연시간이 선형적으로 증가한다. DPS-MAC에 사용된 지연시간 감소 기법에 의해서 DPS-MAC이 X-MAC 보다 더 짧은 지연시간을 보이지만, MCP는 시간차를 둔 동적 위상 변화에 의해서 가장 짧은 종단 간 지연시간을 보여 준다. 또한, 그림 4의 분석 모델 결과 (analysis)는 시뮬레이션 결과와 잘 일치함을 확인할 수 있다.

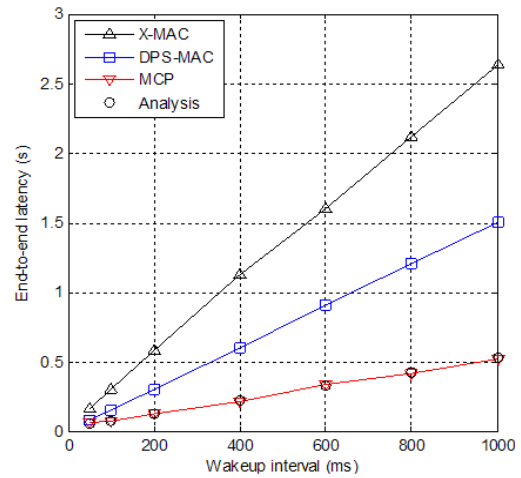
2. 랜덤 토폴로지 (random topology) 에서 결과

다중 흐름들이 동시에 발생하는 트래픽 상황에서 성능 평가를 위해서 50의 노드들을 1000m × 500m 영역에 랜덤하게 분포시킨 후 sink 노드는 하측 중앙에 위치시켰다. Source 노드에서 sink 노드까지 4hop 거리를 가지는 흐름을 1개에서 8개까지 개수를 증가시키며 모든 source 노드들이 동시에 1,000개의 패킷을 2 s 간격으로 생성하도록 하였다. 모든 경우 T_w 는 500ms 로 고정시켰다.

그림 5(a), 5(b)에서 보는 바와 같이 데이터 흐름 개수가 증가함에 따라 기존의 단일 채널을 이용하는 X-MAC과 DPS-MAC의 듀티 사이클 및 지연시간 성

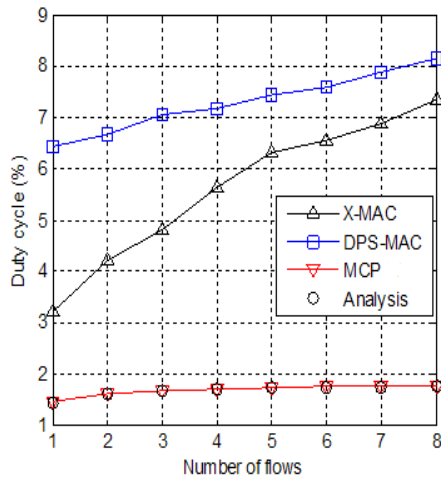


(a) Duty cycle

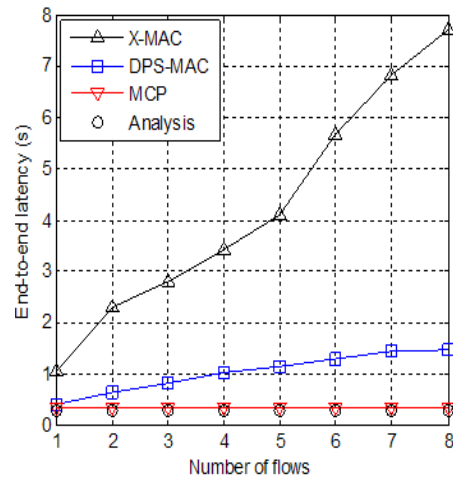


(b) End-to-end latency

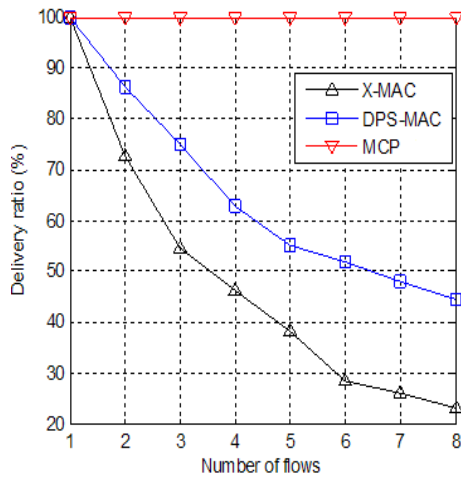
그림 4. 스트링 토폴로지서 성능 비교
Fig. 4. Performance comparisons in string topology.



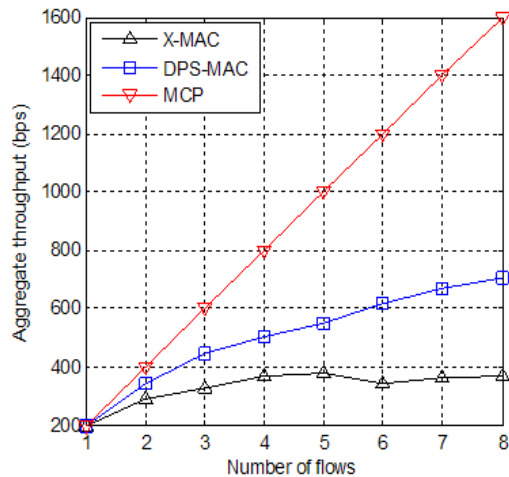
(a) Duty cycle



(b) End-to-end latency



(c) Delivery ratio



(d) Aggregate throughput

그림 5. 랜덤 토폴로지에서 성능 비교
Fig. 5. Performance comparisons in random topology.

능은 저하된다. 하지만, MCP는 다중 채널 파이프라인을 활용하여 다중 흐름을 효과적으로 처리할 수 있으므로 데이터 흐름 개수에 상관없이 X-MAC과 DPS-MAC 보다 작은 듀티 사이클과 짧은 지연시간을 유지한다. 또한, MCP는 흐름 개수가 증가하더라도 100% 전달율 (그림 5(c))과 선형으로 증가하는 통합 처리량 (그림 5(d))을 보여준다. 하지만, X-MAC과 DPS-MAC은 다중 흐름간의 간섭, 충돌로 인한 심각한 성능 저하를 보여준다. 덧붙여, 시뮬레이션 결과는 분석 모델 결과 (analysis) 와 잘 일치함을 확인할 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 무선 센서 네트워크를 위해 다중 채널 파이프라인을 활용하는 MCP 프로토콜이 제안되었다. 에너지 효율성을 향상시키고 지연시간을 최소화하기 위해 동적으로 wake-up 스케줄에 시간차를 두는 동적 위상 변화 (staggered dynamic phase shift) 알고리즘이 고안되었다. 또한, 에너지 효율성을 최적화하기 위해서 위상 로킹 판별 (phase-locking identification) 알고리즘이 제안되었다. 더 나가 다중 흐름이 동시에 발생하는 조건 하에도 높은 패킷 전달율, 최소화된 지연시간, 에너지 효율성을 동시에 달성할 수 있는 다중 채널 파이프라인 (multi-channel pipelining) 기법이 제안 되었다.

Qualnet 시뮬레이션 결과를 통해서, 제안하는 MCP가 듀티 사이클, 지연시간, 패킷 전달율, 처리량 측면에서 기존 단일 채널 X-MAC, DPS-MAC 대비 뛰어난 성능을 보임을 확인하였고 MCP의 성능 분석 모델의 타당성을 검증하였다. 이미 표준화된 다중 채널을 지원하는 IEEE 802.15.4 트랜시버 (transceiver) 등을 이용하면 MCP를 실제 적용 가능하며 이를 통해 비약적인 성능 향상이 기대된다.

REFERENCES

- [1] Atzori, Luigi, et al., "The internet of things: A survey," *Computer Networks*, 54(1), pp. 2787-2805, 2010.
- [2] W. Ye, J. Heidemann, and D. Estrin, "Medium access control with coordinated, adaptive sleeping sleep for wireless sensor networks," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 12(3), pp. 493 - 506, June 2004.
- [3] Gang Lu et al., "An adaptive energy-efficient and low-latency MAC for data gathering in sensor networks," in Proc. of IEEE International Parallel and Distributed Processing Symposium, April 2004.
- [4] En-Yi A. Lin, et al., "Power-efficient rendezvous schemes for dense wireless sensor networks," in Proc. of IEEE International Conference on Communications, pp. 3769 - 3776, June 2004.
- [5] M. Buettner et al., "X-MAC: a short preamble mac protocol for duty-cycled wireless sensor networks," in Proc. of ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems, pp. 307 - 320, November 2006.
- [6] L. Yoh-han and K. Daeyoung, "An energy-efficient MAC using dynamic phase shift for wireless sensor networks," in Proc. of IEEE Wireless Communications and Networking Conference, pp. 1 - 6, April 2010.
- [7] 이요한, 김대영, 허미정. "무선 센서 네트워크에서 다중 채널 파이프라인을 이용한 MAC 프로토콜." 한국통신학회 학술대회논문집 (2013): 796-797.
- [8] S. M. Ross, *Introduction to Probability Models*, Academic Press, 7th edition, 2000.
- [9] Scalable Network Technologies, Qualnet, <http://www.scalable-networks.com>, 2014.

저자 소개



이요한(정회원)

1999년 서강대학교 전자공학과
학사 졸업

2001년 서강대학교 전자공학과
석사 졸업

2014년 KAIST 전기 및 전자공학과
박사 졸업

2014년~현재 KAIST IT 융합연구소 선임 연구원

<주관심분야 : 임베디드 시스템, 인지 라디오 네트워크, 센서 네트워크>



김대영(정회원)-교신저자

1990년 부산대학교 전산통계학과
학사 졸업

1992년 부산대학교 전산통계학과
석사 졸업

2001년 University of Florida
박사 졸업

2009년~현재 KAIST 전산학과 교수

<주관심분야 : 실시간 임베디드 시스템, RFID, USN, Internet of Things>