

에너지 생산이 가능한 무선 센서 네트워크에서 잔여 에너지 인지 듀티-사이클 스케줄링 기법

이성원*, 유흥석*, 김동균^o

Residual Energy-Aware Duty-Cycle Scheduling Scheme in Energy Harvesting Wireless Sensor Networks

Sungwon Lee*, Hongseok Yoo*, Dongkyun Kim^o

요약

네트워크 수명을 연장시키기 위해 무선 센서 네트워크에서는 idle listening에 소비되는 에너지를 줄일 수 있는 듀티-사이클 MAC 프로토콜들이 제안되었다. 일반적인 듀티-사이클 MAC 프로토콜에서 각 센서 노드는 잔여 에너지양을 기반으로 듀티-사이클 주기를 계산한다. 그러나 에너지 수집이 가능한 센서 네트워크에서 기존 듀티-사이클 주기는 에너지 수집률이 높은 센서 노드에 불필요한 sleep 지연을 발생시킨다. 따라서 우리는 이전 연구에서 잔여 에너지양과 에너지 수집률을 함께 고려하여 듀티 사이클-주기를 조절하는 듀티-사이클 스케줄링 기법을 제안하였다. 그러나 이러한 듀티-사이클 MAC 프로토콜들은 듀티 사이클-주기 변화에 따른 성능 차이를 고려하지 않고 듀티-사이클 주기를 항상 선형적으로 조절하므로, 응용의 요구사항에 맞는 최적의 듀티 사이클 주기를 얻지 못한다. 본 논문에서는 듀티-사이클 주기를 계산하는 세 가지 기법들을 제안하고 그 결과에 대해 분석한다. 실험을 통해 제안된 기법들이 기존 듀티-사이클 스케줄링 기법에 비해 네트워크 수명, 단대단 패킷 전송 시간과 패킷 전송률을 각각 최대 23%, 44%, 31% 증가시킴을 확인하였다.

Key Words : Duty-cycle MAC protocol, Energy Efficiency, Energy Harvesting

ABSTRACT

In order to increase network lifetime, duty-cycle MAC protocols which can reduce energy consumption caused by idle listening is proposed for WSNs. In common duty-cycle MAC protocols, each sensor node calculates its duty-cycle interval based on the current amount of residual energy. However, in WSNs with the capability of energy harvesting, existing duty-cycle intervals based on the residual energy may cause the sensor nodes which have high energy harvesting rate to suffer unnecessary sleep latency. Therefore, a duty-cycle scheduling scheme which adjust the duty-cycle interval based on both of the residual energy and the energy harvesting rate was proposed in our previous work. However, since this duty-cycle MAC protocol overlooked the performance variation according to the change of duty-cycle interval and adjusted the duty-cycle interval only linearly, the optimal duty-cycle interval could not be obtained to meet application requirements. In this paper, we propose three methods which calculate the duty-cycle interval and analyse their results. Through simulation study, we verify that network lifetime, end-to-end delay and packet delivery ratio can be improved up to 23%, 44% and 31% as compared to the existing linear duty-cycle scheduling method, respectively.

* 본 연구는 미래창조과학부 및 한국산업기술평가관리원의 산업융합원천기술개발사업(SW·컴퓨팅)의 일환으로 수행하였음. [10041145, 자율군집을 지원하는 웹빙형 정보기기 내장 소프트웨어 플랫폼 개발]

♦ First Author : Kyungpook National Univ., School of Computer Science&Engineering, swlee@monet.knu.ac.kr, 학생회원

o Corresponding Author : Kyungpook National Univ., School of Computer Science&Engineering, dongkyun@knu.ac.kr, 종신회원

* Kyungwoon University

논문번호 : KICS2014-08-304, Received August 18, 2014; Revised September 15, 2014; Accepted September 15, 2014

I. 서 론

일반적인 무선 센서 네트워크에서 센서 노드들은 제한된 배터리를 사용하여 동작하므로 에너지 소모를 최소화하여 네트워크 수명을 연장시키는 것이 중요한 쟁점 중 하나이다¹⁾. 따라서 무선 센서 네트워크의 여러 프로토콜 계층에서는 센서 노드의 에너지를 효율적으로 사용하기 위한 다양한 연구들이 진행되어 왔다. 특히 Medium Access Control (MAC) 계층에서는 센서 노드가 통신 인터페이스에 전력을 공급하는 wake-up 과 전력 공급을 차단하는 sleep을 반복하여 에너지 소모량을 줄이는 듀티-사이클 MAC 프로토콜들이 다수 제안되었다²⁻⁴⁾. 듀티-사이클 MAC 프로토콜에서 각 센서 노드는 wake-up 구간에서 이웃 노드와 패킷을 송수신하며 sleep 구간에서는 통신 인터페이스에 공급되는 전력을 차단한다. 이 때, 센서 노드가 wake-up 한 시간부터 다음 wake-up 할 때까지의 시간을 듀티-사이클 주기라 정의한다.

듀티-사이클 주기가 길어질수록 센서 노드는 오랜 시간 sleep 하여 많은 에너지를 절약할 수 있으나 프레임이 전달되는 과정에서 시간 지연이 발생하며⁵⁾, 듀티-사이클 주기가 짧아진다면 센서 노드는 자주 wake-up하여 에너지를 소모하게 된다. 따라서 센서 노드들에게 최적의 듀티-사이클 주기를 설정하는 듀티-사이클 스케줄링 기법에 대한 다양한 연구가 진행되었다. 그 중에서도 잔여 에너지가 많은 센서 노드일수록 듀티-사이클 주기를 짧게 설정하여 프레임을 빠르게 전송하고 잔여 에너지가 적은 노드일수록 듀티-사이클 주기를 길게 설정하여 에너지 절약량을 증가시키는 잔여 에너지 기반 듀티-사이클 스케줄링 기법들이 널리 사용되고 있다^{6,7)}.

최근에는 센서 노드의 한정된 전력 문제를 개선하기 위해 태양열, 풍력, 조류 등의 주변 환경으로부터 전력을 생산할 수 있는 에너지 생산(또는 에너지 수집) 기술이 센서 네트워크에 적용되고 있다^{8,9)}. 에너지 생산 기술이 적용된 센서 네트워크에서는 현재 잔여 에너지양이 적은 노드이더라도 에너지 생산율이 높을 경우 다른 노드에 비해 최종적으로 더 많은 에너지를 사용할 수 있다. 그러나 기존 잔여 에너지 기반 듀티-사이클 스케줄링 기법들에서는 이러한 에너지 생산을 고려하지 않고 잔여 에너지양만을 고려하므로 불필요하게 긴 듀티-사이클 주기가 설정될 수 있다. 따라서 우리들은 이전 연구에서 센서 노드의 잔여 에너지양과 에너지 생산율을 함께 고려하여 듀티-사이클 스케줄을 결정하는 MAC 프로토콜인 Duty cycle

Scheduling based on Prospective increase in residual energy(DSP)¹⁷⁾를 제안하였다.

DSP 기법에서 센서 노드들은 잔여 에너지양과 초당 수집되는 에너지양을 합하여 사용 가능한 에너지양을 계산하고, 사용 가능한 에너지양이 감소할수록 긴 듀티-사이클 주기를 설정한다. 하지만 네트워크 수명, 단대단 패킷 전송 지연 시간, 패킷 수신율 등의 네트워크 성능은 이러한 듀티-사이클 주기 설정 방식 뿐만 아니라 사용 가능한 에너지양 대 듀티-사이클 주기 증가량의 비율 또한 영향을 미칠 수 있으나, DSP 기법에서는 이러한 특성을 간과하고 소모한 에너지양에 따른 듀티-사이클 주기의 증가량을 항상 일정하게 유지한다.

따라서 본 논문에서는 사용 가능한 에너지양에 따른 듀티-사이클 주기의 변화량을 서로 다른 방식으로 조절하는 세 가지 듀티-사이클 스케줄링 기법을 제안하고 각 기법의 특징을 비교, 분석한다. 제안된 세 기법 모두 센서 노드의 잔여 에너지양과 수집 가능한 에너지양을 함께 고려하여 사용 가능한 총 에너지양을 계산하되, 같은 양의 에너지가 감소할 때 듀티-사이클 주기의 증가량은 다른 방식으로 계산한다. 첫 번째 기법에서는 사용가능한 에너지가 많을수록 듀티-사이클의 변화량을 감소시켜 패킷 전송량이 많은 네트워크에 적합한 듀티-사이클 주기를 계산한다. 두 번째 기법에서는 듀티-사이클 주기를 급격히 증가시켜 긴 네트워크 수명을 요구하는 응용에 적합한 듀티-사이클 주기를 계산하며, 세 번째 기법에서는 일정 이상의 듀티-사이클 주기를 유지함으로써 최소 전송 지연에 대한 요구사항이 있는 응용에 적합한 듀티-사이클 주기를 계산한다.

본 논문의 나머지 구성은 다음과 같다. II장에서는 대표적인 듀티-사이클 MAC 프로토콜들의 동작에 대해 설명한 후 에너지 생산을 고려한 듀티-사이클 스케줄링 기법인 DSP에 대해 살펴본다. III장에서는 제안된 세 가지 듀티 사이클 주기 계산 기법들에 대해 설명하며 IV장에서는 NS-2 시뮬레이터를 사용하여 제안된 패킷들의 성능을 평가하고, 그 결과에 대해 논의한다. 마지막으로 V장에서 결론을 맺는다.

II. 관련 연구

2.1 듀티-사이클 MAC 프로토콜의 동작

앞서 언급한 것처럼, 듀티-사이클 MAC 프로토콜에서 센서 노드는 주기적인 sleep 통하여 idle listening 에 소모되는 에너지를 줄일 수 있다. 이러한

듀티-사이클 MAC 프로토콜에서 센서 노드는 wake-up 상태에서만 패킷을 송수신하는 것이 가능하므로 프레임을 전송하고자 하는 노드(전송 노드, sender)는 프레임을 수신해야 하는 노드(수신 노드, receiver)가 wake-up 하는 시점을 파악할 수 있어야 한다. 듀티-사이클 MAC 프로토콜은 전송 노드가 수신 노드의 wake-up 시점을 파악하는 방식에 따라 동기식 듀티-사이클 MAC 프로토콜과 비동기식 듀티-사이클 MAC 프로토콜로 분류할 수 있다.

대표적인 동기식-듀티 사이클 MAC 프로토콜인 S-MAC^[10]에서는 그림 1과 같이 네트워크를 구성하는 모든 센서 노드가 주기적인 SYNC 프레임을 전송하여 센서 노드들의 시간을 동기화시킨다. 각 센서 노드는 동기화된 시간 정보를 기반으로 동일한 듀티-사이클 주기를 설정하므로 정해진 시간에 모든 센서 노드가 동시에 wake-up 한다. 따라서 전송 노드는 자신이 wake-up 한 후 수신 노드에게 프레임을 전달할 수 있다.

이와 같은 동기식 듀티-사이클 MAC 프로토콜은 시간 동기화를 위한 오버헤드가 클 뿐 아니라 시간 동기화의 정확성 때문에 대규모의 센서 네트워크에는 적합하지 않다. 따라서 시간 동기화 없이 프레임을 송수신 할 수 있는 비동기식 듀티-사이클 MAC 프로토콜들이 제안되었다. 이러한 비동기식 듀티-사이클 MAC 프로토콜에서 전송 노드는 수신 노드가 wake-up 할 때 까지 대기한 후 프레임을 전송할 수 있도록 디자인되었다. 대표적인 비동기식 듀티 사이클 MAC 프로토콜 중 하나인 RI-MAC^[11]의 동작은 그림 2와 같다.

RI-MAC에서 각 노드들은 서로 다른 듀티-사이클 주기를 가져 주기적으로 wake-up 하며, wake-up 할

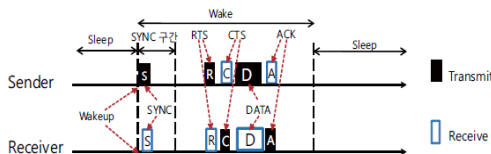


그림 1. S-MAC의 동작 과정
Fig. 1. Operation of S-MAC

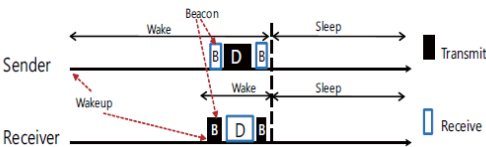


그림 2. RI-MAC의 동작 과정
Fig. 2. Operation of RI-MAC

때 마다 자신이 wake-up 했다는 사실을 알리는 beacon 메시지를 브로드캐스트한다. 전송할 프레임을 생성한 전송 노드는 wake-up 하여 채널을 idle listening함으로써 수신 노드로부터 전송되는 beacon 메시지를 대기한다. 수신 노드로부터 전송된 beacon 메시지가 수신될 경우 전송 노드는 즉시 패킷을 전송하며, 패킷 수신이 종료된 후 송신 노드는 beacon 메시지를 전송하여 성공적인 프레임 수신을 알린다.

2.2 Duty-cycle Scheduling based on Prospective increase in Residual energy(DSP)

DSP는 에너지 생산이 가능한 센서 네트워크에서 센서 노드의 에너지 생산율을 고려하여 듀티-사이클 주기를 동적으로 조절하는 듀티-사이클 스케줄링 기법이다. 식 (1)과 같이, DSP 기법에서 센서 노드는 자신의 잔여 에너지(E_r)이 일정 threshold 이하 ($E_{threshold}$)일 경우에는 최대 초기 듀티-사이클 주기 (DC_{max})를 설정하며, 그렇지 않을 경우에는 최대 잔여 에너지(E_{max})과 현재 잔여 에너지를 기반으로 초기 듀티-사이클 주기(DC_{init})를 계산한다.

$$DC_{init} = \begin{cases} DC_{max} & (\text{if } E_r \leq E_{threshold}) \\ \frac{DC_{max} - DC_{max} \times (E_r - E_{threshold})}{E_{max} - E_r - E_{threshold}} & (\text{if } E_r > E_{threshold}) \end{cases} \quad (1)$$

이후 센서 노드는 자신의 초당 에너지 생산율을 기반으로 초기 듀티-사이클 주기를 업데이트한다. 센서 노드는 T초 후에 에너지 수집을 통해 증가하는 에너지 양 $E_r(+T)$ 을 예측하여 T초 후의 듀티-사이클 주기인 $DC_{E_r(+T)}$ 을 계산한다. 최종 듀티-사이클 주기(DC_r)는 T초 후의 듀티-사이클 주기와 현재 듀티-사이클 주기를 통해 아래 식 (2)와 같이 계산한다.

$$DC_r = (DC_{E_r(+T)} - DC_{E_r}) \times \frac{E_r}{E_{max} - E_r} \quad (2)$$

식 (2)에서 시간 T 및 최대 에너지양 (E_{max}) 는 네트워크 파라미터로 설정된다. 결과적으로, DSP 기법의 듀티-사이클 주기는 사용 가능한 에너지양 (잔여 에너지양 + 생산되는 에너지양)이 감소함에 따라 아래 그림 3과 같은 형태로 선형적으로 증가한다. 이러한 형태의 듀티-사이클 주기 변화량은 사용 가능한 에너지양이 많은 노드와 사용 가능한 에너지양이 적은 노드가 혼재한 상황에서 각 센서 노드들의 사용 가능한 에너지양을 빠르게 평준화시킬 수 있다. 따라서

DSP 기법의 듀티-사이클 스케줄링 기법은 불규칙적인 패킷 전송 발생하는 응용이 동작하는 무선 센서 네트워크에 적합하다.

III. 본 론

3.1 네트워크 수명 연장을 위한 듀티-사이클 스케줄링 기법

앞장에서 언급한 것처럼, DSP 기법의 듀티-사이클 스케줄링 기법은 불규칙적인 패킷 전송이 발생하는 응용이 동작하는 무선 센서 네트워크에서 사용 가능한 에너지양을 빠르게 평준화시키기에 적합한 스케줄링 기법이다. 따라서 DSP 기법의 듀티-사이클 스케줄링 기법은 산불 감지, 해일 감지 등 긴 네트워크 수명을 필요로 하되 패킷 전송량이 적은 응용에는 적합하지 않다¹³⁾. 이러한 응용에서는 사용 가능한 에너지양이 감소할수록 듀티-사이클 주기를 급격하게 증가시켜 보존할 수 있는 에너지양을 증가시키는 듀티-사이클 스케줄링이 필요하다. 따라서 네트워크 수명 연장을 위한 듀티-사이클 스케줄링 기법(Duty-cycle Scheduling Scheme for Network lifetime Extension, DS_NE)은 다음과 같은 방식으로 듀티-사이클 주기를 계산한다.

DS_NE 기법에서 일정 threshold 이하($E_{threshold}$)의 잔여 에너지양을 보유한 센서 노드는 DSP 기법과 마찬가지로 최대 듀티-사이클 (DC_{max})을 설정하여 에너지 소모량을 최소화한다. 일정 이상의 잔여 에너지양을 보유한 센서 노드들은 DSP 기법에서 살펴본 것과 같은 방식으로 현재 잔여 에너지양을 고려하여 초기 듀티-사이클 주기를 계산하고 수집 가능한 에너지양에 따라 초기 듀티-사이클 주기를 업데이트한다. 이때, DSP 기법과는 달리 DS_NE 기법에서는 잔여 에너지 및 생산되는 에너지양과 최대 에너지양의 차이를 제공하여 듀티-사이클 주기를 계산한다. 이러한 방식을 통해 잔여 에너지양 및 생산되는 에너지양과 최



그림 3. DSP 기법의 듀티-사이클 주기
Fig. 3. Duty-cycle interval interval in DSP scheme

대 에너지양의 차이가 적을수록 더 많은 듀티-사이클 주기가 증가한다. DS_NE 기법의 듀티-사이클 스케줄링은 아래 식 (3)과 식 (4)를 통해 계산된다.

$$DC_{init} = \begin{cases} DC_{max} & (\text{if } E_r \leq E_{threshold}) \\ DC_{max} - DC_{max} \times \left(\frac{E_{threshold} - E_r}{E_{threshold} - E_{max}} \right)^2 & (\text{if } E_r > E_{threshold}) \end{cases} \quad (3)$$

$$DC_r = (DC_{i(E_r(+T))} - DC_{i(E_r)}) \times \frac{E_r - E_{threshold}}{E_{max} - E_{threshold}} \quad (4)$$

결과적으로 DS_NE 기법을 통해 계산된 듀티-사이클 주기는 사용 가능한 에너지양이 많은 경우에는 듀티-사이클 주기가 급격히 증가하고, 사용 가능한 에너지양이 적은 경우에는 듀티-사이클 주기가 완만히 증가하는 그림 4와 같은 형태를 가진다.

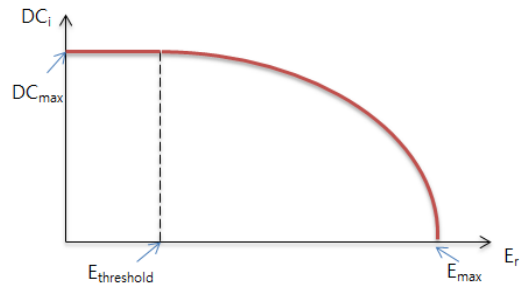


그림 4. DS_NE 기법의 듀티-사이클 주기
Fig. 4. Duty-cycle interval in DS_NE scheme

3.2 빠른 데이터 전송을 위한 듀티-사이클 스케줄링 기법

앞 절에서 살펴본 DS_NE 기법은 패킷 전송량이 적고 긴 네트워크 수명을 요구하는 응용이 동작하는 센서 네트워크에 적합한 듀티-사이클 스케줄링 기법이다. DS_NE 기법에서 일정 이상의 에너지를 소모한 센서 노드들은 긴 듀티-사이클 주기를 설정하게 되므로 태풍 및 폭설 등 기상 상태 측정, 건설 현장 소음 감지 등 전송 시간에 민감한 형태의 응용에는 적합하지 않다¹⁴⁾. 이러한 특성을 고려하여 빠른 데이터 전송을 위한 듀티-사이클 스케줄링 기법 (Duty-cycle Scheduling Scheme for Fast packet Delivery, DS_FD)은 다음과 같은 방식으로 듀티-사이클 주기를 설정한다.

DSP 및 DS_NE 기법과 마찬가지로, 일정 threshold 이하($E_{threshold}$)의 잔여 에너지양을 보유한 센서 노드는 최대 듀티-사이클 주기 (DC_{max})를 설정하여 에너지 소모량을 최소화한다. 일정 이상의 잔여 에너지양을

보유한 센서 노드는 현재 잔여 에너지양을 기반으로 초기 듀티-사이클 주기를 계산하고, 에너지 수집률을 고려하여 최종 듀티 사이클-주기를 계산한다. 듀티-사이클 주기 계산 과정에서 잔여 에너지 및 생산되는 에너지양과 최대 에너지양의 차이를 제공하였던 DS_NE 기법과는 달리 DS_FD 기법에서는 잔여 에너지 및 생산되는 에너지양과 에너지의 threshold 값을 제공하여 듀티-사이클 주기를 계산한다. 이 때 에너지의 threshold 값은 최대 에너지양보다 작은 값으로 주어진다. 따라서 센서 노드의 잔여 에너지양 및 생산되는 에너지양과 최대 에너지양의 차이가 클수록 듀티-사이클 주기의 증가량은 감소하게 된다. DS_FD 기법에서는 초기 듀티-사이클은 DC_{init} 를 식 (5)와 같이 계산하고 에너지 수집을 통해 감소시킬 수 있는 듀티-사이클 주기 DC_r 을 식 (6)과 같이 계산한다.

결과적으로 DS_FD 기법에서는 그림 5와 같은 형태로 사용 가능한 에너지양이 많은 경우에는 듀티-사이클 주기가 천천히 증가하고 사용 가능한 에너지양이 적은 경우에는 듀티-사이클 주기를 급격히 증가한다.

$$DC_{init} = \begin{cases} DC_{max} & (\text{if } E_r \leq E_{threshold}) \\ \frac{DC_{max} - DC_{max} \times (E_{max} - E_r)^2}{(E_{max} - E_{threshold})^2} & (\text{if } E_r > E_{threshold}) \end{cases} \quad (5)$$

$$DC_r = (DC_{i(B(+T))} - DC_{i(E_r)})^2 \times \frac{DC_{max}}{(E_{max} - E_{threshold})^2} \quad (6)$$

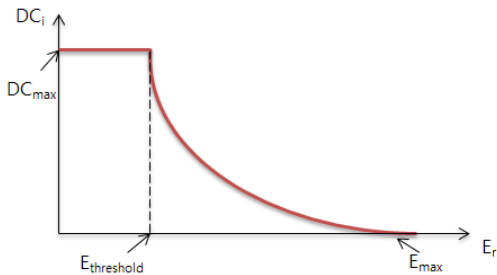


그림 5. DS_FD 기법의 듀티-사이클 주기
Fig. 5. Duty-cycle interval in DS_FD scheme

3.3 최대 전송 지연 기반 듀티-사이클 스케줄링 기법

앞 절에서 살펴본 DS_FD 기법은 빠른 데이터 전송이 요구되는 응용의 요구사항을 고려하여 듀티-사이클 주기를 천천히 증가시키는 듀티-사이클 스케줄링 기법이다. 하지만 차량 사고 정보 등의 응용에서는 데이터 전송 지연을 최소화하는 것 보다 소스 노드에서 생성된 데이터가 일정 시간 안에 목적지까지 전달되

어야 하는 형태의 QoS 요구사항을 가진다[15]. 이러한 요구사항을 가진 응용에서는 짧은 듀티-사이클 주기를 설정하는 DS_FD 기법보다는 일정한 듀티-사이클 주기를 오랜 시간 동안 유지시키는 형태의 듀티-사이클 스케줄링 기법이 더욱 효율적이다. 따라서 최대 전송 지연 기반 듀티-사이클 스케줄링 기법 (Duty-cycle Scheduling Scheme based on Maximum Transmission Delay, DS_MD)에서는 이러한 응용의 QoS 요구사항을 고려하여 다음과 같은 방식의 듀티-사이클 스케줄링을 수행한다.

DS_MD 기법 역시 일정 threshold 이하($E_{threshold}$)의 잔여 에너지양을 보유한 센서 노드에게는 최대 듀티-사이클 주기(DC_{max})를 설정하여 에너지 소모량을 최소화한다. 또한 일정 이상의 잔여 에너지를 보유한 센서 노드는 잔여 에너지양의 threshold 값인 $E_{threshold}$ 와 최대 잔여 에너지양 값인 E_{max} 의 정 가운데 값을 중간 잔여 에너지양(E_{half})로 설정한다. 센서 노드는 자신이 보유하고 있는 잔여 에너지양이 중간 잔여 에너지양보다 많을 경우에는 응용의 요구사항을 만족시킬 수 있는 듀티-사이클 주기인 DC_{req} 에 가까워 질 수 있도록 초기 듀티-사이클 주기를 급격히 증가시킨다. 응용의 요구사항을 만족시킬 수 있는 듀티-사이클 주기인 DC_{req} 은 네트워크 파라미터로 제공된다고 가정하였다. 이방식을 통해 잔여 에너지양이 많은 센서 노드 이더라도 DC_{req} 이상의 듀티-사이클 주기를 설정하지 않도록 하여 불필요한 wake-up으로 인해 소모되는 에너지양을 감소시킬 수 있다.

만약 센서 노드가 보유한 잔여 에너지양이 중간 잔여 에너지양보다 적을 경우에는 반대로 듀티-사이클을 천천히 증가시켜 응용의 요구사항을 만족시킬 수 있는 듀티-사이클 주기를 오랜 시간 유지할 수 있도록 한다. 중간 잔여 에너지양을 전후로 한 초기 듀티-사이클 주기 계산 공식은 DS_NE 기법 및 DS_FD 기법의 듀티-사이클 주기 계산 공식을 응용하여 식 (7)과 같이 계산한다. 초기 듀티-사이클 주기를 계산한 센서 노드는 식 (8)을 사용하여 에너지 수집량을 고려하여 듀티-사이클 주기를 업데이트한다. 역시 식 (8) 역시 앞에서 설명한 식 (4)와 식(6)을 응용하여 계산한다.

$$DC_{init} = \begin{cases} DC_{max} & (\text{if } E_r \leq E_{threshold}) \\ \frac{DC_{req}}{(E_{half} - E_r)^2} \times \frac{DC_{req} - DC_{req}}{(E_{half} - E_r)^2} & (\text{if } E_{threshold} < E_r \leq E_{half}) \\ \frac{DC_{req} - DC_{req} \times (E_{half} - E_r)^2}{(E_{half} - E_{max})^2} & (\text{if } E_r > E_{half}) \end{cases} \quad (7)$$

$$DC_r = \begin{cases} \frac{(DC_{i(E_r(+T))} - DC_{i(E_r)})^2 \times DC_{max}}{E_{max} - E_{threshold}} & (\text{if } E_r \leq E_{half}) \\ \frac{(DC_{i(E_r(+T))} - DC_{i(E_r)})^2 \times (E_r - E_{threshold})}{E_{max} - E_{threshold}} & (\text{if } E_r > E_{half}) \end{cases} \quad (8)$$

DS_MD 기법을 사용하여 센서 노드의 듀티-사이클 주기를 계산할 경우 잔여 에너지가 일정 이상이거나 일정 이하일 경우 듀티 사이클 주기가 급격히 증가하지만, 이 구간을 제외한 나머지 구간에서는 응용의 요구사항을 만족시킬 수 있는 듀티-사이클 주기인 DC_{req} 를 오랜 시간 동안 유지할 수 있다. DS_MD 기법에 따라 계산되는 센서 노드의 듀티-사이클 주기는 그림 6와 같은 형태를 보인다.

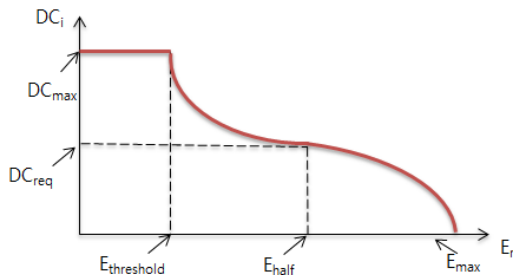


그림 6. DS_MD 기법의 듀티-사이클 주기
Fig. 6. Duty-cycle interval in DS_MD scheme

IV. 실험 결과

4.1 실험 환경

본 실험에서는 NS-2 시뮬레이터를 사용하여 제안한 패킷들의 성능평가를 수행하였다. 시뮬레이션을 위해 $N \times N$ 크기의 그리드 토폴로지 (Grid topology) 들을 이용하여 다양한 센서 네트워크 시나리오를 구성하였다. 각 센서 노드 간 간격은 20m로 설정하였으며 센서 노드의 최대 전송거리는 30m로 설정하였다. 싱크 노드는 토폴로지의 정 가운데 위치하며 싱크 노드를 제외한 모든 센서 노드는 랜덤한 주기로 패킷을 생성하여 싱크 노드에게 전송한다. 본 논문에서 제안된 듀티-사이클 주기 계산 기법을 구현하기 위한 듀티 사이클 MAC 프로토콜로는 RI-MAC^[11]을 사용하였다.

또한 각 센서 노드마다 초당 20mW, 5mW, 1mW의 세 가지 에너지 수집률 중 하나를 랜덤하게 설정하였다. 각 노드는 50J의 초기 에너지를 가지며, 전송으로 초당 31.2mW의 에너지를 소모하며 수신 및 idle listening으로 초당 22.2mW의 에너지를 소모하도록

설정하였다. RF 송수신을 제외한 센서 노드의 운영에 사용되는 에너지는 실험에 반영되지 않았다. 실험에서 사용된 네트워크 파라미터인 $E_{threshold}$ 는 30J로 설정하였으며 DS_FD 기법을 위한 응용의 단대단 패킷 지연 요구사항 0.6초로 설정하였다. DC_{req} 는 실험을 통해 최적의 값을 찾아 사용하였다.

4.2 실험 결과

그림 7은 토폴로지의 크기 N에 따라 네가지 듀티-사이클 스케줄링 기법의 네트워크 수명을 비교한 그래프이다. 본 성능 평가에서는 네트워크가 프레임을 전송하기 시작한 후부터 하나의 센서 노드가 모든 에너지를 소모할 때 까지 소모되는 시간을 네트워크 수명으로 정의한다. 그림 7을 통해 적용된 듀티-사이클 스케줄링 기법에 관계없이 토폴로지 크기가 증가할수록 네트워크 수명은 감소함을 확인할 수 있다. 이는 토폴로지 크기가 증가할수록 생성되는 프레임의 수가 증가하므로 전송된 프레임을 처리하기 위해 많은 에너지가 소모되기 때문이다.

또한 제안된 듀티 사이클 주기 계산 기법들 중에서 DSP 기법과 제안된 DS_FD 기법은 유사한 네트워크 수명을 보임을 확인할 수 있다. 이는 DS_FD 기법에서 사용된 DC_{req} 가 DSP 기법으로 계산된 듀티-사이클 주기의 평균값과 유사하기 때문이다. 또한 DS_NE 기법이 가장 긴 네트워크 수명을 보이는데, 이는 네트워크가 동작을 시작한 후 듀티-사이클 주기를 급격히 증가시켜 많은 에너지를 보존하기 때문이다. 이와 반대로 DS_FD 기법은 짧은 듀티-사이클 주기를 오래 유지하므로 네트워크 수명은 감소하게 된다.

그림 8은 토폴로지 크기 N에 따라 각 듀티-사이클 스케줄링 기법들의 단대단 (end-to-end) 지연 시간을 비교한 그래프이다. 그림 8을 통해 적용된 듀티 사이

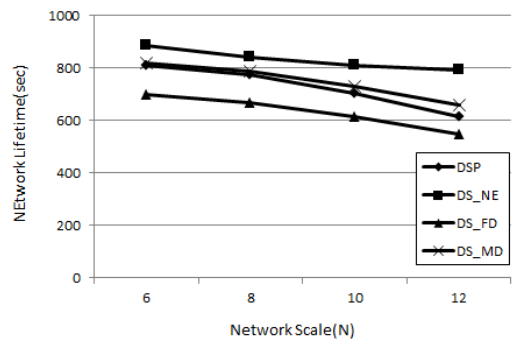


그림 7. 네트워크 수명
Fig. 7. Network Lifetime

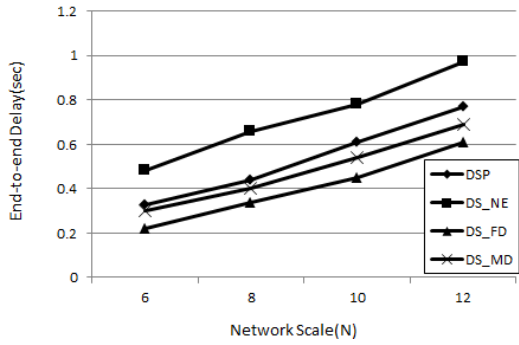


그림 8. 단대단 패킷 전송 시간
Fig. 8. End-to-end delay

클 계산 기법에 관계없이 토폴로지 크기가 증가할수록 많은 수의 홉을 거쳐 패킷을 전송해야 하므로 단대단 지연 시간은 증가하게 된다.

또한 듀티-사이클 스케줄링 기법들 중에서 많은 에너지가 소모되더라도 짧은 듀티-사이클 주기를 설정하는 DS_FD 기법이 적용될 경우 sleep으로 인한 전송 지연이 감소하므로 가장 짧은 단대단 지연 시간을 보인다. 이와 반대로 사용 가능한 에너지량이 많더라도 긴 듀티 사이클-주기를 설정하는 DS_NE 기법은 전송 노드가 많은 시간을 대기한 후에야 패킷을 전송할 수 있으므로 가장 긴 단대단 지연 시간을 보인다. 또한 DS_MD 기법은 DSP 기법에 비해 조금 더 짧은 단대단 지연 시간을 보이는데, 이는 DS_MD 기법의 DC_{req} 값이 에너지가 소모된 후 DSP 기법의 듀티-사이클 주기보다 짧기 때문이다.

그림 9는 토폴로지 크기 N에 따라 각 듀티-사이클 스케줄링 기법의 패킷 전송 성공률을 비교한 그래프이다. 이 성능 평가에서는 응용의 최대 패킷 전송 지연에 대한 요구사항이 존재함을 가정하여 전송된 후 0.6초가 지난 패킷은 전송하지 않고 폐기되도록 설정

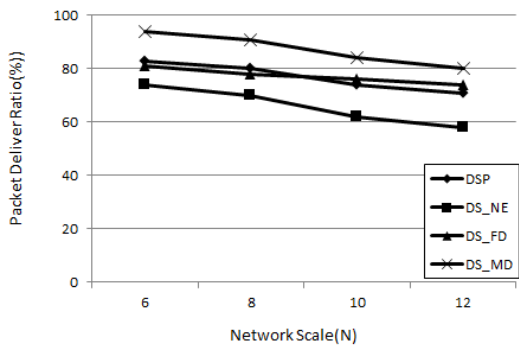


그림 9. 패킷 전송 성공률
Fig. 9. Packet delivery ratio

하였다. 적용된 듀티-사이클 스케줄링 기법에 관계없이 토폴로지 크기가 증가할수록 많은 수의 홉을 거쳐 패킷을 전송해야 하므로 충돌로 인해 소실되는 패킷의 수가 증가할 뿐 아니라 전송 과정에서의 지연 시간으로 인해 폐기되는 패킷의 수가 증가하므로 패킷 전송 성공률은 감소한다.

또한 제안된 듀티-사이클 스케줄링 기법들 중에서 에너지 소모량에 따라 듀티-사이클 주기를 급격히 증가시키는 DS_NE 기법의 경우 어느 정도 시간이 지난 후에는 증가한 듀티-사이클 주기로 인해 폐기되는 패킷의 수가 증가하므로 가장 낮은 패킷 전송 성공률을 보인다. 또한 DSP 기법 및 에너지 소모량에 따라 듀티-사이클을 천천히 증가시키는 DS_FD 기법에서도 일정 이상의 잔여 에너지량이 소모되면 듀티-사이클 주기가 응용의 요구사항을 만족시켜주지 못해 폐기되는 패킷량이 증가한다. DS_MD 기법에서는 응용의 요구사항을 만족시켜 줄 수 있는 길이의 듀티-사이클을 가장 오랜 시간동안 유지할 수 있으므로 가장 높은 패킷 전송 성공률을 보인다.

V. 결론

본 논문에서는 에너지 생산 기술이 적용된 무선 센서 네트워크에 적합한 세 가지 듀티-사이클 스케줄링 기법을 제안하였다. 제안된 기법들은 센서 노드의 에너지 생산율을 고려하여 듀티-사이클 주기를 계산하되, 사용 가능한 에너지양에 따른 듀티-사이클 주기의 증가량을 다른 방식으로 계산함으로써 응용의 QoS 요구사항을 제공한다. 네트워크 수명연장을 위한 듀티-사이클 스케줄링 기법에서는 센서 노드의 에너지 소모량에 따라 듀티-사이클 주기를 급격히 증가시켜 긴 네트워크 수명을 제공하였으며 빠른 데이터 전송을 위한 듀티-사이클 스케줄링 기법에서는 에너지가 소모에 따른 듀티-사이클 주기의 증가량을 감소시킴으로써 짧은 듀티-사이클 주기를 설정하였다. 또한 최대 전송 지연 기반 듀티-사이클 스케줄링 기법에서는 일정 이상의 듀티-사이클 주기가 유지되도록 듀티-사이클 주기 증가량을 조절하였다.

NS-2 시뮬레이터를 사용한 실험을 통해 제안된 듀티-사이클 스케줄링 기법들은 기존의 선형적인 듀티-사이클 주기 계산 기법에 비해 네트워크 수명, 단대단 패킷 전송 지연 시간 및 패킷 전송 성공률에 대한 성능을 각각 최대 23%, 44%, 31% 증가시킴을 확인하였다.

References

- [1] I. F. Akyildiz, W. Su, and Y. Sankarasubramaniam, E. Cayirci, "Wireless sensor networks: A survey," *J. Computer Netw.*, vol. 38, no. 4, pp. 393-422, Dec. 2002.
- [2] T. van Dam and K. Langendoen, "An adaptive energy efficient MAC protocol for wireless sensor networks," *ACM Conf. Embedded Netw. Sensor Syst. (SenSys)*, pp. 171-180, Nov. 2003.
- [3] M. Buettne, G. Yee, E. Anderson, and R. Han, "X-MAC: A short preamble MAC protocol for duty-cycled wireless sensor networks," *ACM Conf. Embedded Sensor Syst. (SenSys)*, pp. 307-320, Nov. 2006.
- [4] Y. Gu and T. He, "Data forwarding in extremely low duty-cycle sensor networks with unreliable communication links," *ACM Conf. Embedded Netw. Sensor Syst. (SenSys)*, pp. 321-334, Nov. 2007.
- [5] S. Ramakrishnan, H. Huang, M. Balakrishnan, and J. Mullen, "Impact of sleep in a wireless sensor MAC protocol," in *Proc. VTC*, pp. 4621-4624, Sept. 2004.
- [6] L. Wang, Z. Yuan, L. Shu, L. Shi, and Z. Qin, "An energy-efficient CKN algorithm for duty-cycled wireless sensor networks," *Int. J. Distributed Sensor Netw.*, vol. 2012, pp. 1-15, Mar. 2012.
- [7] H. Yoo, M. Shim, and D. Kim, "Dynamic duty-cycle scheduling schemes for energy-harvesting wireless sensor networks," *IEEE Commun. Lett.*, pp. 202-204, Feb. 2012.
- [8] V. Raghunathan, A. Kansal, J. Hsu, J. Friedman, and M. Srivastava, "Design considerations for solar energy harvesting wireless embedded systems," *Inf. Process. Sensor Netw.*, pp. 457-462, Apr. 2005.
- [9] X. Jiang, J. Polastre, and D. Culler, "Perpetual environmentally powered sensor networks," *Inf. Process. Sensor Netw. (IPSN 2005)*, pp. 463-468, Apr. 2005.
- [10] W. Ye, J. Heidemann, and D. Estrin, "Medium access control with coordinated adaptive sleeping for wireless sensor networks," *IEEE/ACM Trans. Netw.*, vol. 12, no. 3, pp. 493-506, Jun. 2004.
- [11] J. Polastre, J. Hill, and D. Culler, "Versatile low power media access for wireless sensor networks," *ACM Conf. Embedded Netw. Sensor Syst. (SenSys)*, pp. 95-107, Nov. 2004.
- [12] Y. Sun, O. Gurewitz, and D. B. Johnson, "RI-MAC: A receiver initiated asynchronous duty cycle MAC protocol for dynamic traffic load," *ACM Conf. Embedded Netw. Sensor Syst. (SenSys)*, pp. 1-14, Nov. 2008.
- [13] W. Park, "Low power MAC protocol design for wireless sensor networks using recursive estimation method," *J. KICS*, vol. 39C, no. 3, pp. 39-42, Mar. 2014.
- [14] J. Cha and J. Kim, "Multi-hop transmission scheme for delay-sensitive information in wireless sensor networks," *J. KICS*, vol. 37A, no. 10, pp. 876-884, Oct. 2012.
- [15] K. Lee, K. Han, K. Cho, Y. Baek, and J. Kim, "An efficient broadcast scheme for disseminating emergency message in urban vehicular ad-hoc networks," *J. KICS*, vol. 38C, no. 7, pp. 605-611, Jul. 2013.

이 성 원 (Sungwon Lee)



2010년 2월 : 경북대학교 컴퓨터공학과 졸업
 2012년 2월 : 경북대학교 컴퓨터학부 석사
 2012년 3월~현재 : 경북대학교 컴퓨터학부 박사과정
 <관심분야> 무선 센서 네트워크, IoT, D2D

유 흥 석 (Hongseok Yoo)



2005년 7월 : 경북대학교 컴퓨터공학과 졸업
2008년 2월 : 경북대학교 전자전기컴퓨터학부 석사
2014년 2월 : 경북대학교 컴퓨터학부 박사
2014년 3월~현재 : 경운대학교

IT에너지대학 모바일공학과 조교수

<관심분야> 근거리통신망, IoT, CPS, 지능형교통시스템, D2D

김 동 균 (Dongkyun Kim)



1994년 2월 : 경북대학교 컴퓨터공학과 졸업
1996년 2월 : 서울대학교 컴퓨터공학과 석사
2001년 2월 : 서울대학교 컴퓨터공학과 박사
2009년 3월~현재 : 경북대학교 컴퓨터학부 정교수

<관심분야> 컴퓨터통신, 이동인터넷, 모바일 애드혹 네트워크, 센서 네트워크, 무선메쉬 네트워크, IoT