

저전력 대기를 사용하는 OBS 망에서 에너지 절감을 위한 상태 천이 결정 알고리즘

준회원 강 동 기*, 정회원 양 원 혁**, 학생회원 이 기 범***, 종신회원 김 영 천***

Transition Decision Algorithm for Energy Saving in OBS Network with LPI

Dong-Ki Kang* Associate Member, Won-Hyuk Yang** Regular Member,
Ki-Beom Lee*** Student Member, Young-Chon Kim*** Lifelong Member

요 약

미래의 에너지 소비 문제를 해결하기 위하여 Green IT 에 대한 관심이 높아짐에 따라 네트워크 장치에서 발생하는 에너지 소비 문제를 해결하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 에너지 절감을 위하여 네트워크 장치는 저전력 대기 (Low Power Idle) 를 사용할 수 있다. 본 논문에서는 OBS 망에서 에너지 절감 효율을 높이기 위한 저전력 대기 적용에 관한 연구를 수행하였다. 기존의 저전력 대기와 관련된 많은 연구들은 에너지 절감을 위해 수면 시간을 최대화시키는 것에만 관심을 기울여 왔다. 그러나 장치 상태 변경 시 발생하는 상태 천이 오버헤드 (Transition overhead)는 저전력 대기의 에너지 절감율을 낮출 뿐 아니라 패킷 지연 시간을 증가시킴으로써 망의 QoS 를 하락시킬 수 있다. 따라서 본 논문에서는 저전력 대기에서 발생하는 불필요한 상태 천이 횟수를 감소시킴으로써 에너지 절감율 및 QoS 를 향상시킬 수 있는 상태 천이 결정 알고리즘 (Transition Decision algorithm)을 제안한다. 제안한 상태 천이 결정 알고리즘의 성능을 분석하기 위하여 OPNET 을 이용하여 OBS 에지 라우터를 모델링하고 시뮬레이션을 수행하여 다양한 평가 지표를 기반으로 성능을 분석한다.

Key Words : Green IT, Energy Saving, LPI, OBS, Transition

ABSTRACT

Recently, many researchers have studied to solve the energy consumption of network equipments since the interest of Green IT has been increased. In this paper, we apply Low Power Idle (LPI) to OBS network to reduce energy consumption of network devices. Many previous researches have focused on maximizing the sleep time of network equipments to increase the energy saving efficiency of LPI. But transition overhead caused by LPI might not only depreciate the performance of energy saving but also increase packet delay. In this paper, Transition Decision (TD) algorithm is proposed to improve energy saving efficiency by reducing the number of unnecessary transition and guarantee the required QoS such as packet delay. To evaluate the performance of proposed algorithm, we model OBS edge router with LPI by OPNET and analyze the performance of the proposed algorithm in views of energy saving, transition count and average packet delay.

※ 본 연구는 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다.(No.2010-0013822, 2011-0000897).

* 한국과학기술원 전기및전자공학과 고성능네트워크연구실(dkkang@kaist.ac.kr)

** 전북대학교 컴퓨터공학과 차세대통신망연구실(whyang@jbnu.ac.kr)

*** 전북대학교 전자정보공학부(aresys@nate.com), 전북대학교 IT정보공학부 스마트그리드연구센터 (yckim@jbnu.ac.kr) (° : 교신저자)
논문번호 : KICS2011-09-410, 접수일자 : 2011년 9월 26일, 최종논문접수일자 : 2012년 5월 7일

I. 서 론

현재 인터넷 사용자 수는 지속적으로 증가하고 있으며, 음성과 영상정보를 포함한 멀티미디어와 같은 고용량의 다양한 트래픽이 증가함에 따라 이를 수용하기 위하여 네트워크 장치의 대역폭 및 속도가 크게 증가하고 있다. 네트워크 장치의 성능 증가에 비례하여 에너지 소비량 역시 증가하고 있으며 이는 네트워크 장치의 대역폭과 성능을 감소시킬 수 있다. 뿐만 아니라 최근에 이산화탄소 (CO₂) 배출 및 에너지 소비와 같은 환경 문제에 대한 관심이 커지고 있는 실정이다. 이에 따라 현재 네트워크 장치의 에너지 소비 문제에 대한 연구 역시 활발히 진행되고 있다.

미국에서 인터넷 사용으로 인해 소비되는 전력량은 연간 24TWh 에 달하며 이는 KWh 당 0.10\$ 로 계산할 때 년당 5~24 억 달러의 비용을 발생시킨다.^[1,2] 이러한 전력 소비에 따라 발생하는 CO₂ 량은 연간 75 만 톤 가량이다^[3]. 또한 NIC, 스위치, 라우터 등과 같은 네트워크 장치들에서 사용하는 전력 소비량만 고려할 때 연간 5.3TWh 를 소비한다.^[4]

이러한 문제를 해결하기 위하여 2007년 9월 인터넷장치에서의 에너지 소비 절감 달성을 목표로 하는 EEE (Energy Efficient Ethernet) 프로젝트를 위한 IEEE 802.3az Task Force 가 설립되었고, 2010 년 9 월 30 일 마침내 IEEE Std 802.3az 가 최종 승인되었다. 승인된 표준안에서는 네트워크 장치의 에너지 절감을 위하여 수면 모드 (Sleep mode) 를 수행하는 저전력 대기 (Low Power Idle : LPI) 방식이 채택되었다.

일반적으로 네트워크 장치는 트래픽이 흐르는 BUSY 상태와 트래픽이 흐르지 않는 유희상태인 IDLE 상태로 구분할 수 있다. 그러나 기존의 네트워크 장치들은 트래픽의 실제 입력 상황과 관계없이 항상 활성 상태를 유지하였다. 현재 백본망에서의 링크 사용량은 15 ~ 30% 이며, LAN 과 같은 액세스망 에서는 평균 1% 안팎에 불과하다^[5]. 그러므로 이러한 실제 망 사용률을 고려하지 않고 네트워크 장치가 항상 활성 상태를 유지하는 것은 불필요한 에너지 소비를 발생시킬 수 있다.

저전력 대기 방식에서는 트래픽이 흐르는 BUSY 상태에서는 네트워크 장치가 활성 모드 (Active mode) 를 수행하여 입력되는 트래픽을 처리하며, 트래픽이 흐르지 않는 IDLE 상태에서는 수면 모드

(Sleep mode) 를 수행하여 전력 소비를 감소시킨다. 일반적으로 수면 모드를 수행할 때에는 네트워크 장치의 에너지 소비량이 활성 모드 상태와 비교하여 약 10%정도에 불과하며 수면 모드를 수행하는 시간이 길어질수록 장치의 에너지 소비율도 감소한다.^[6]

지금까지 저전력 대기 표준은 이더넷에 기반한 액세스 망에서만 고려되어왔으나 이는 백본망과 같은 다른 다양한 네트워크에도 적용될 수 있다.

현재 계속해서 증가하는 트래픽 수용을 위한 높은 대역폭을 만족시키기 위해 광 버스트 스위칭 (Optical Burst Switching : OBS) 망이 유력한 차세대 통신망 기술로 기대되고 있다. OBS 망에서는 데이터를 전송하기 위하여 버스트 (Burst) 가 생성되며 이를 위해 다양한 버스트 어셈블 방식이 고려된다. OBS 망의 에지라우터에서 수신기 (Receiver : Rx) 의 어셈블러 (Assembler) 가 입력되는 패킷들을 모으는 시간 동안 발신기 (Transmitter : Tx) 는 IDLE 상태가 되는데 이 때 수면 모드를 수행하여 에너지 절감을 달성할 수 있으며 이에 대한 연구는 논문 [7] 에서 제안되었다.

수면 모드를 사용하는 네트워크 장치는 활성 모드에서 수면 모드로 전환되는 수면 천이(Sleep transition) 및 수면 모드에서 활성 모드로 변경되는 기상 천이(Wake transition) 같은 상태 천이 과정 (Transition mode)을 수행해야한다.

일반적으로 장치가 기상 천이를 수행할 때에는 두 개의 연결된 종점 네트워크 장치의 클럭이 재 동기화되는 과정이 요구되며 이는 추가적인 프로세싱 시간과 에너지 소비를 발생시킨다^[8]. 이와는 반대로 수면 천이는 거의 순간적으로 발생하며 추가적인 에너지 소비를 발생시키지 않으므로 일반적으로 무시할 수 있다.

상태 천이 과정은 저전력 대기 방식의 에너지 절감 성능을 하락시킬 수 있으며 추가적인 프로세싱 시간으로 인하여 패킷 지연 시간과 같은 망의 QoS 를 감소시킬 수 있다. 그러나 기존의 저전력 대기 방식에 관한 연구들은 에너지 절감 성능을 향상시키기 위해서 수면 모드를 수행하는 시간을 최대화하는 것에만 초점을 맞추었으며 상태 천이 오버헤드에 대한 연구는 거의 수행되지 않았다.

본 논문에서는 저전력 대기 방식을 이용하는 OBS 에지 라우터에서 불필요한 수면 천이 횟수를 감소시킴으로써 에너지 절감 성능을 향상시키기 위한 상태 천이 결정(Transit Decision : DA) 알고리

즘을 제안한다. 제안한 알고리즘은 망의 부하 상태를 측정과 시간 및 길이 임계값을 이용하여 수면 모드로 상태 천이 여부를 결정한다. 제안한 상태 천이 결정 알고리즘의 성능을 평가하기 위하여 OPNET Modeler 를 이용하여 저전력 대기를 사용하는 OBS 에지 라우터 모델을 구현하고 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션을 통하여 기존의 저전력 대기 방식과 상태 천이 결정 알고리즘을 적용한 저전력 대기 방식을 비교하여 수면 시간 및 에너지 절감율, 상태 천이 오버헤드, 평균 패킷 지연 시간 관점에서 성능을 분석하고 평가하였다.

본 논문의 2 장에서는 OBS 에지 라우터에 적용된 저전력 대기 모델을 설명하고 3 장에서 다양한 상태 천이 결정 알고리즘을 제안한다. 4 장에서는 OPNET Modeler 를 이용한 시뮬레이션을 수행하고 그 결과를 분석하며 5 장에서 결론을 내린다.

II. 관련 연구

2.1. 저전력 대기를 적용한 OBS 에지 라우터

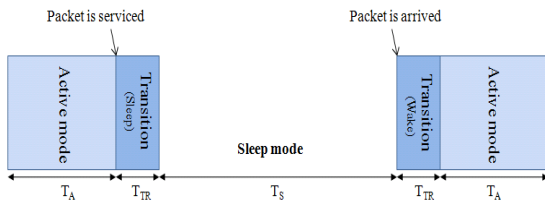


그림 1. 저전력 대기 방식
Fig. 1. Operation of LPI

네트워크 장치의 에너지 절감을 위한 저전력 대기 방식에서는 활성 모드, 수면 모드, 상태 천이 과정의 3 가지 상태가 존재한다. 그림 1 에서는 저전력 대기 운용 방식의 간단한 흐름을 보인다.

네트워크 장치에 입력 트래픽이 발생할 경우 이를 처리하기 위해 저전력 대기 방식을 사용하지 않는 기존의 방식과 동일한 전력을 소비하는 활성 모드를 수행한다. 네트워크 장치는 활성 모드를 유지하다가 더 이상의 입력 트래픽이 발생되지 않으면 에너지 절감을 위해 수면 모드로 상태를 변경하여 장치에 소비되는 전력량을 감소시킨다.

수면 모드 수행 중에 패킷이 입력되면 이를 감지하여 장치는 수면 모드 상태에서 활성 모드 상태로 다시 변경되어 입력된 패킷을 처리한다. 활성 모드 상태에서 수면 모드 상태로, 수면 모드 상태에서 활성 모드 상태로 천이되기 위해서는 상태 천이 과정

이 필요한데 이를 위해 연결된 두 노드간의 재동기화를 위한 시간이 발생되며 전원의 공급이 중단되어있던 컴포넌트들의 재가동을 위한 추가적인 에너지가 소비된다.

본 논문에서는 OBS 망 에지 라우터에서의 에너지 절감을 위하여 저전력 대기를 적용하였다. OBS 망의 에지 라우터 구조는 그림 2 에서 나타난다.

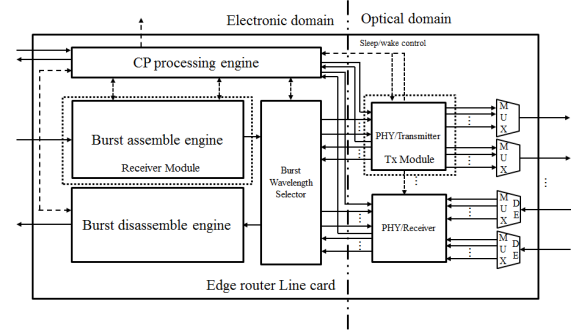


그림 2. OBS 망 에지 라우터 구조
Fig. 2. Architecture of OBS edge router

각 종단 유저로부터 전송되는 IP 패킷은 각 목적지와 요구되는 서비스 (Class) 에 따라 분류되어 OBS 에지 라우터의 수신기의 어셈블러 큐에 입력된다. 입력되는 패킷들은 미리 정의된 어셈블 임계값 (Assemble threshold value) 이 만족될 때까지 큐에서 대기하다가 임계값이 만족되는 순간 하나의 버스트로 병합된다. 병합된 버스트는 목적지 노드 주소를 체크하여 발신기의 버스트 큐에 입력되고 E/O 변환을 거쳐 코어 라우터에 연결된 광 링크를 통해 전송된다.

에지라우터에 입력되는 패킷을 처리하기 위해 수신기에서 소비되는 전력은 크지 않은 반면 발신기에서는 레이저 다이오드 등의 컴포넌트들로 인한 전력 소비량이 크다^[9]. 그러므로 에지 라우터의 에너지 절감 성능을 향상시키기 위해서는 발신기의 수면 시간을 증가시켜야 한다.

수신기 모듈에서 패킷들이 버스트로 병합되기 위하여 대기하는 시간동안 발신기 모듈은 수면 모드를 수행할 수 있으며 버스트가 병합되어 입력되면 다시 활성 모드로 천이되는 과정을 수행하여야 한다. 일반적으로 발신기 모듈의 수면 시간을 늘리기 위해서는 어셈블러의 버스트 어셈블 임계값을 증가시켜야 하는데 이는 에너지 절감을 고려한 동적 버스트 어셈블 알고리즘 방법에 의하여 수행될 수 있다.^[7] 그러나 이 주제는 본 논문의 초점을 벗어나므로 여기서는 논의하지 않는다.

2.2. 저전력 대기에서의 상태 천이 오버헤드

저전력 대기 방식을 사용하는 네트워크 장치에서 소비되는 총 에너지는 다음과 같다.

$$E_{TOTAL} = P_A \times t_A + P_S \times t_S + P_{TR} \times T_{TR} \quad (1)$$

$(P_{TR} \geq P_A \gg P_S)$

여기서 P_A , P_S , P_{TR} , t_A , t_S 와 T_{TR} 은 각각 활동 모드, 수면 모드와 상태 천이에서 소비하는 전력량과 시간을 나타낸다. T_{TR} 은 상태 천이 시간을 의미하므로 네트워크 장치의 에너지 소비를 최소화하기 위해서는 활성 모드 시간을 감소시키고 수면 모드 시간을 증가시킬 뿐 아니라 상태 천이 시간을 감소시켜야 함을 알 수 있다.

기존의 저전력 대기는 트래픽이 입력되면 활성 모드를 수행하여 입력 트래픽을 처리하고, 처리가 완료되어 유휴 상태가 되면 이후 트래픽의 입력 상황과 상관없이 바로 수면 모드로 천이되어 에너지 소비를 감소시키는 방식을 사용하였다.

일반적으로 망 부하가 감소할 경우, 수면 모드 수행 시 얻을 수 있는 수면 시간이 증가하며 망 부하가 증가할 경우 수면 시간이 감소된다. 따라서 부하 크기가 일정 수준 이상을 넘어설 경우에 수면 시간으로 얻을 수 있는 에너지 절감 보다 상태 천이로 인한 에너지 소비가 더 큰 상황이 발생할 수 있다.

상태 천이로 인한 에너지 소비가 수면 모드로 인한 에너지 절감 크기보다 더 큰 경우에는 추가적인 에너지 소비를 피하기 위해 수면 모드를 수행하지 않아야 하며 반대의 경우에는 수면 모드를 수행함으로써 에너지 절감을 달성하여야 한다. 그러므로 상태 천이 오버헤드가 수면 모드의 에너지 절감 크기보다 커지는 망 부하 크기를 분석하여 상태 천이 수행 여부를 결정하는 상태 천이 결정 (Transit Decision : TD) 알고리즘이 요구된다. 또한 망 부하가 높은 상태에서는 상태 천이 수행시간 동안 처리할 버스트가 큐에서 추가로 대기하는 시간이 발생할 수 있는데 이는 전체 패킷 지연 시간을 증가 시킴으로 망의 QoS 를 감소시킬 수 있다. 상태 천이 결정 알고리즘을 적용하면 에너지 절감 뿐 아니라 이와 같은 패킷 지연 시간의 증가를 감소시킬 수 있다.

상태 천이 결정 알고리즘은 상태 천이 수행 여부를 결정하기 위한 임계값 (Threshold value) 을 가지는데 임계값을 넘지 않을 경우 수면 모드로의 상

태 천이를 수행하여 에너지 소비 크기를 줄이고 임계값을 넘어설 경우, 수면 모드로의 상태 천이를 수행 하지 않음으로써 상태 천이로 인한 오버헤드를 발생시키지 않는다.

III. 상태 천이 결정 알고리즘

3.1. 비 상태 천이 결정 알고리즘 방식에서의 저전력 대기 모델

본 장에서 시간 기반 버스트 어셈블 (Time based burst assemble) 방식을 사용하는 OBS 망의 에지 라우터에 적용한 상태 천이 결정 알고리즘을 설명하고 각각의 수면 시간을 분석한다.

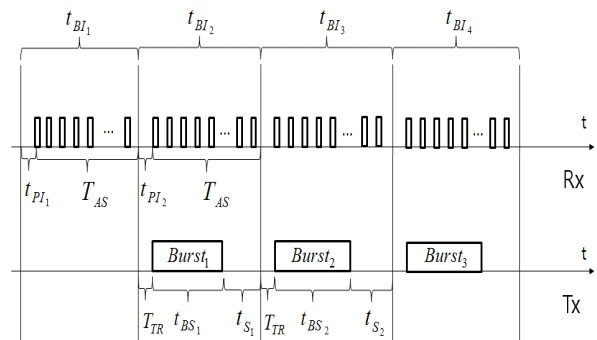


그림 3. OBS 망 에지 라우터의 저전력 대기
Fig. 3. OBS edge router with LPI

그림 3에서는 OBS 망의 에지 라우터의 수신기 모듈 (Rx module) 과 발신기 모듈 (Tx module) 에서 적용된 저전력 대기 모델의 시간 흐름을 보여주고 있다.

버스트를 만들기 위하여 비 주기적 생성 (Non-Periodic Assemble : NPA) 을 적용한 시간 기반 버스트 어셈블 방식을 사용하므로 첫 번째 패킷이 어셈블러에 입력된 이후부터 버스트 어셈블을 수행하며 t_{PI} 가 첫 번째 패킷 도달 간격 시간이고, T_{AS} 가 버스트 어셈블 시간일 때 버스트 도달 간격 시간 (Burst interarrival time) t_{BI} 는 다음과 같다.

$$t_{BI} = t_{PI} + T_{AS} \quad (2)$$

송신기는 어셈블러에서 버스트가 생성되어 입력될 때까지 처리할 입력 트래픽이 없을 경우 유휴 상태에 있게 되므로 이 때 수면 모드를 수행함으로써 에너지 절감을 달성할 수 있다. 상태 천이 시간을 T_{TR} , 버스트 서비스 시간을 t_{BS} 라 할 때, 발신기가 임의의 한 입력 버스트 구간 i 에 대해 수면 모드를 수행할 수 있는 시

간 t_{Si} 는 (3), (4) 식을 통해 구할 수 있다.

$$t_{SUR_i} = t_{BI_{i+1}} - (T_{TR} + t_{BS_i}) \quad (3)$$

$$t_{S_i} = \begin{cases} 0, & t_{SUR_i} \leq 0 \\ t_{SUR_i}, & otherwise \end{cases} \quad (4)$$

t_{SUR_i} 는 구간 i 의 수면 시간을 구하기 위한 시간 여유 값을 나타내며 이를 이용하여 한 입력 버스트 구간에서의 수면 시간은 버스트 도달 간격 시간, t_{BS_i} 와 버스트 서비스 시간 및 상태 천이 시간, T_{TR} 에 따라 결정됨을 보인다. 상태 천이 시간이 클수록 수면 시간이 감소하므로 그에 따라 에너지 절감율도 감소한다. t_{OH} 는 N 개의 버스트 구간에서 수면 모드를 수행했을 때 발생하는 오버헤드 시간의 총합을 의미하며 식 (5)와 같이 계산할 수 있다. 망의 부하가 일정 수준을 넘게 되면 버스트 서비스 시간과 상태 천이 시간의 합이 버스트 도달 간격 시간 크기를 초과하는 상황이 발생하는데 이 때 t_{SUR} 은 음수가 되며, 그림 4에서 그와 같은 상황을 보인다.

$$t_{OH_i} = \begin{cases} t_{SUR_i}, & \text{if } t_{SUR_i} < 0 \\ 0, & otherwise \end{cases} \quad (5)$$

$$t_{OH} = \sum_{i=1}^N |t_{OH_i}|$$

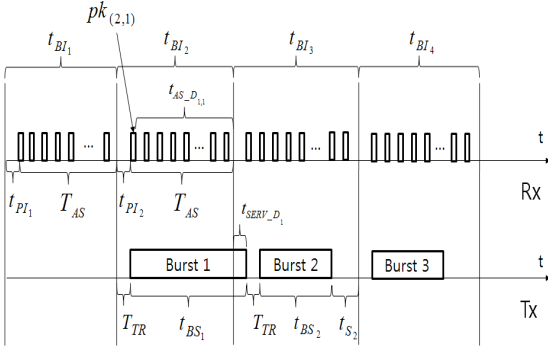


그림 4. 저전력 대기에서의 오버 헤드
Fig. 4. Transition overhead in LPI

그림 4와 같은 상황은 상태 천이로 인하여 오히려 버스트 1 구간의 에너지 소비가 증가함을 의미하며 이후에 입력되는 버스트의 처리도 늦춤으로써 패킷 지연 시간을 증가시키는 결과를 보여준다. 임의의 한 버스트 i 에 속한 패킷 j 의 지연 시간, $t_{D_{i,j}}$ 는 다음과 같다.

$$t_{D_{i,j}} = t_{AS_{D_{i,j}}} + T_{TR} + t_{SERV_{D_{i-1}}} \quad (6)$$

$$t_{SERV_{D_i}} = \begin{cases} 0, & \text{if } t_{SERV_{D_{i-1}}} - t_{SUR_i} \leq 0 \\ t_{SERV_{D_{i-1}}} - t_{SUR_i}, & otherwise \end{cases} \quad (7)$$

여기서 $t_{AS_{D_{i,j}}}$ 와 $t_{SERV_{D_i}}$ 는 버스트 i 에 속한 패킷들의 평균 지연 시간과 버스트 i 의 추가적인 서비스 시간을 나타낸다. 식 (3), (6), (7)을 통하여 상태 천이 시간이 증가할수록 에너지 소비뿐만 아니라 패킷 지연 시간도 증가함을 알 수 있다.

3.2. 시간 기반 상태 천이 결정 알고리즘

그림 4에서 본 바와 같이 상태 천이 오버헤드로 인한 추가적인 에너지 소비 증가 문제를 해결하기 위하여 고정된 시간 기반 상태천이 결정 (Fixed Time based Transit Decision : FT-TD) 알고리즘을 고려할 수 있다. FT-TD 방식에서는 발신기에 입력된 버스트를 링크로 전송한 후에 미리 정의된 시간 TWT (Transition Waiting Time) 값 동안 수면 모드로 천이 되지 않고 대기하며 추가 버스트 입력이 없을 경우 수면 모드로 천이한다. 그림 5에서 FT-TD 알고리즘의 동작을 보인다.

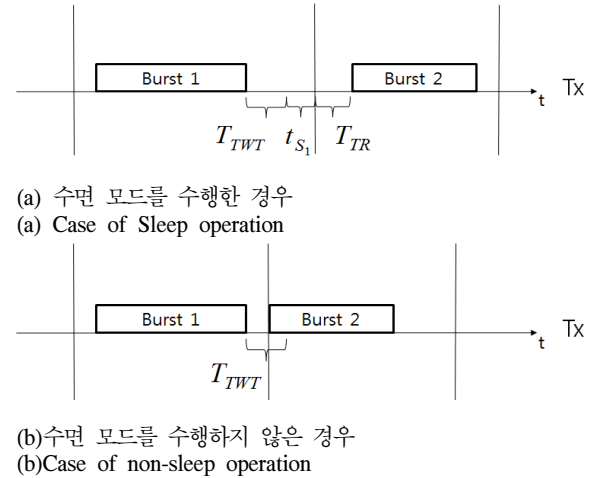


그림 5. FT-TD 알고리즘
Fig. 5. FT-TD algorithm operation

FT-TD 알고리즘에서의 수면 시간, t_{Si} 는 다음과 같다.

$$t_{S_i} = \begin{cases} 0, & \alpha_{i-1} = 1 \text{ and } t_{TR_{ON_i}} \leq T_{TWT} \\ t_{TR_{ON_i}}, & \alpha_{i-1} = 1 \text{ and } t_{TR_{ON_i}} > T_{TWT} \\ 0, & \alpha_{i-1} = 0 \text{ and } t_{TR_{OFF_i}} \leq T_{TWT} \\ t_{TR_{OFF_i}}, & \alpha_{i-1} = 0 \text{ and } t_{TR_{OFF_i}} > T_{TWT} \end{cases} \quad (8)$$

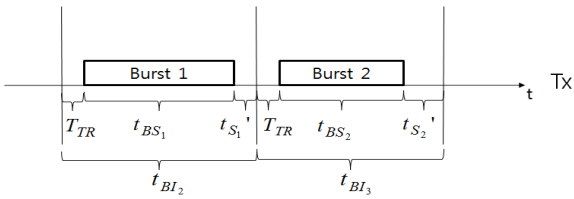
$$t_{TR_{ON_i}} = t_{BI_{i+1}} - (t_{BS_i} + T_{TR} + T_{TWT}) \quad (9)$$

$$t_{TR_{OFF_i}} = t_{BI_{i+1}} - (t_{BS_i} + T_{TWT})$$

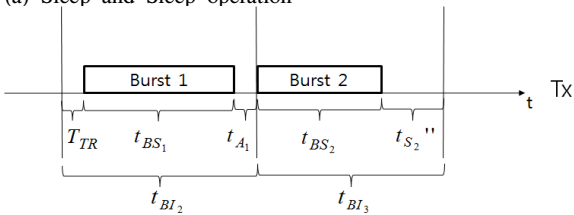
여기서 t_{TR_ONi} 와 t_{TR_OFFi} 는 α_{i-1} 에 따라서 이전 구간에서 수면 모드를 수행했을 경우($\alpha_{i-1}=1$)와 수행하지 않았을 경우($\alpha_{i-1}=0$)의 시간을 나타낸다. 식 (8)에서는 이전 버스트의 수면 모드 수행 여부에 따라 이후 버스트 구간의 수면 모드 수행 시간이 달라짐을 보여주고 있다. 이전 버스트 구간에서 수면 모드를 수행하지 않을 경우에 이후 버스트 구간에서는 상태 천이 시간이 발생하지 않으므로 수면 시간이 더욱 길어져 에너지 절감 성능을 증가시킬 수 있다. 또한 망의 부하가 증가할수록 TWT 값 사용에 의해 수면 모드로의 상태 천이 횟수가 감소되므로 에너지 절감의 향상 뿐 아니라 패킷 지연 시간의 증가도 막을 수 있다.

이와 같이 FT-TD 알고리즘은 망의 상태를 반영하여 상태 천이 수행 여부를 결정할 수 있으며 이에 따라 기존의 저전력 대기 방식보다 더 향상된 에너지 절감율 및 망의 QoS를 보여줄 수 있다. 그러나 TWT는 일종의 오버헤드 값으로써 이 값이 크면 클수록 버스트 구간에서 가져갈 수 있는 수면 수행 시간이 감소되므로 이에 대한 해결책이 요구된다.

3.3. 길이 기반 상태 천이 결정 알고리즘



(a) 수면 모드 - 수면 모드
(a) Sleep and Sleep operation



(b) 비수면 모드 - 수면 모드
(b) Non-sleep and sleep operation

그림 6. Tx 모듈에서 수면 모드 수행 비교
Fig. 6. Comparison of sleep mode at Tx module

FT-TD 알고리즘은 TWT 값 동안 발신기가 활성화 모드를 수행하여야 하므로 수면 시간에서 TWT 값만큼의 오버헤드가 발생하여 에너지 절감 성능이 감소된다. 이와 같은 문제를 해결하기 위하여 본 논문에서 제시하는 길이 기반 상태 천이 결정 (Burst Length based Transit Decision : BL-TD) 알고리

즘은 어셈블러에 입력된 버스트의 길이를 검사하여 미리 정의된 길이 임계값과 비교 후 임계값을 넘어서지 않으면 수면 모드로의 상태 천이를 수행하며 임계값을 넘어서면 상태 천이를 수행하지 않는다. 그림 6에서 두 개의 버스트 구간에서의 수면 모드를 수행하는 경우와 수행하지 않는 경우를 비교하여 보여주고 있다.

C를 링크 속도로 할 때, 그림 6에서 (a)가 (b)의 경우보다 에너지 소비가 클 조건은 식 (9)와 같다.

$$l_{B_1} > \frac{((t_{PI_2} + T_{AS} - T_{TR})(P_A - P_S) + (T_{TR}(P_S - P_{TR})))C}{P_A - P_S}$$

$$\therefore L_{TR_ON} = \frac{((T_{AS} - T_{TR})(P_A - P_S) + (T_{TR}(P_S - P_{TR})))C}{P_A - P_S} \quad (9)$$

식 (9)에서 버스트 2의 첫 패킷 도달 간격 시간 t_{PI_2} 의 크기는 고정되어 있지 않은 가변적인 변수이며, 입력 부하량이 일정 크기 이상인 경우에는 버스트 어셈블 시간과 비교하여 전체 버스트 도달 간격 시간에서 차지하는 비율이 낮으므로 일반적으로 무시할 수 있다⁹⁾.

그림 6에서 임의의 버스트 구간에서 수면 모드가 수행되지 않으면 그 다음 버스트 구간에서는 상태 천이 시간이 발생하지 않음을 알 수 있으므로 두 번째 버스트에서 상태 천이 여부를 결정하기 위한 임계값을 구하기 위해서는 식 (9)의 임계값을 구하는 식에서 상태 천이 시간을 제외시키면 된다. 두 번째 버스트의 상태 천이 수행 여부를 결정하는 임계값은 다음과 같다.

$$l_{B_2} > \frac{((t_{PI_3} + T_{AS})(P_A - P_S) + (T_{TR}(P_S - P_{TR})))C}{P_A - P_S}$$

$$\therefore L_{TR_OFF} = \frac{(T_{AS}(P_A - P_S) + (T_{TR}(P_S - P_{TR})))C}{P_A - P_S} \quad (10)$$

식 (9)와 (10)을 사용하여 임계값 L_{TR_ON} , L_{TR_OFF} 를 구했을 때 BL-TD에서의 임의의 입력 버스트 구간 i 에서의 수면 시간은 다음과 같다.

$$t_S = \begin{cases} 0, & \alpha_{i-1} = 1 \text{ and } l_{B_i} \geq L_{TR_ON} \\ t_{BI_{i+1}} - (t_{BS_i} + T_{TR}), & \alpha_{i-1} = 1 \text{ and } l_{B_i} < L_{TR_ON} \\ 0, & \alpha_{i-1} = 0 \text{ and } l_{B_i} \geq L_{TR_OFF} \\ t_{BI_{i+1}} - t_{BS_i}, & \alpha_{i-1} = 0 \text{ and } l_{B_i} < L_{TR_OFF} \end{cases} \quad (11)$$

BL-TD 알고리즘은 수면 시간의 길이뿐만 아니라 활성화 모드, 수면 모드 및 상태 천이 과정에서의 소비되는 전력 크기도 고려하므로 망 상태 및 장치의 성능에 따른 최적의 상태 천이 수행 여부를 결

정할 수 있다.

IV. 시뮬레이션 결과 분석

3장에서 제안한 상태천이 결정 알고리즘의 성능을 보이기 위하여 본 논문에서는 OPNET Modeler를 사용하여 저전력 대기 방법을 적용한 OBS 망에서 라우터의 수신기 및 발신기 모델을 설계하고 각 상태 천이 결정 알고리즘의 수면 시간과 에너지 절감율, 상태천이 오버헤드 크기 및 평균 패킷 지연 시간을 관측함으로써 성능을 평가 분석한다.

표 1에서 OPNET 시뮬레이션을 위한 파라미터의 명세를 보인다.

표 1. 시뮬레이션 파라미터 값
Table 1. Simulation parameters

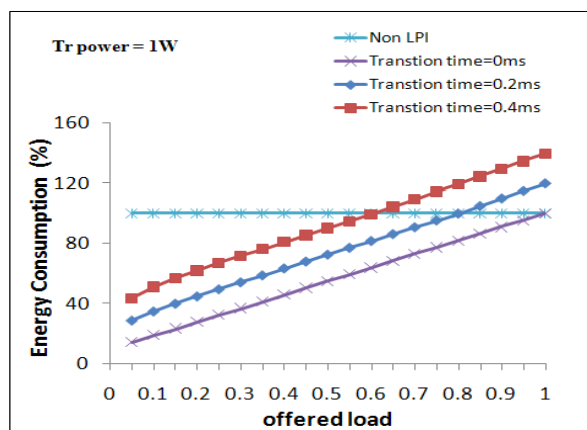
Parameter	Value
Link rate	1Gbit/sec
Packet size	1500Bytes
Burst assemble time	1ms
Transition time	0, 0.2, 0.4ms
Active power	1W
Sleep power	0.1W
Transition power	1W, 1.5W, 2W

패킷 크기는 이더넷 프레임 표준 크기인 1500bytes 이며 링크 속도는 1Gbps 이다. 트래픽 생성 패턴은 시뮬레이션의 복잡성을 줄이기 위하여 지수분포에 기반을 두고 있으며 버스트 어셈블 시간은 1ms 로 설정하였다. 상태 천이 시간은 0ms, 0.2ms, 0.4ms 로 버스트 어셈블 시간의 약 0, 20, 40 퍼센트로 나누어 설정함으로써 상태 천이 시간에 따른 성능 결과를 분석하였다.

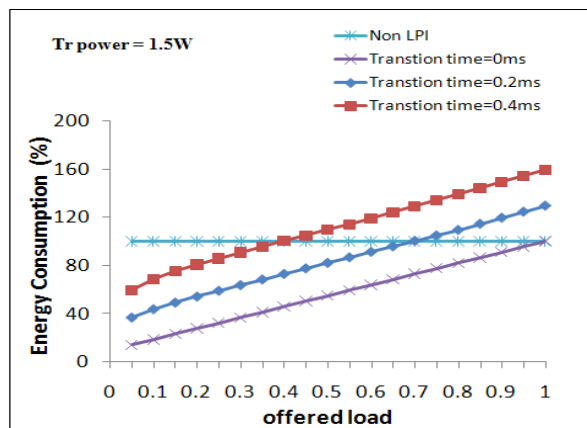
FT-TD 알고리즘의 임계값은 0.01ms 이며 이 값이 크면 클수록 대기 시간동안의 에너지 소비 오버헤드가 증가한다. BL-TD 알고리즘의 L_{TR_ON} 값은 표 1 의 시뮬레이션 파라미터와 식 (9) 를 사용하여 계산하였으며 L_{TR_OFF} 값은 식 (10) 을 통해 구하였다. 활성 모드에서의 에너지 소비는 1W 로 가정하였고, 수면 모드 시에는 활성 모드의 10% 수준인 0.1W 로 설정하였으며, 상태 천이 시에 필요한 전력 소비량은 1W, 1.5W, 2W 로 각각 설정하여 전력 소비량에 따라 에너지 절감율에 미치는 성능을 분석하였다.

먼저 상태 천이 결정 알고리즘이 적용되지 않은 기존의 저전력 대기 방식에서 상태 천이 오버헤드가 성능에 미치는 영향을 분석하기 위하여 상태 천

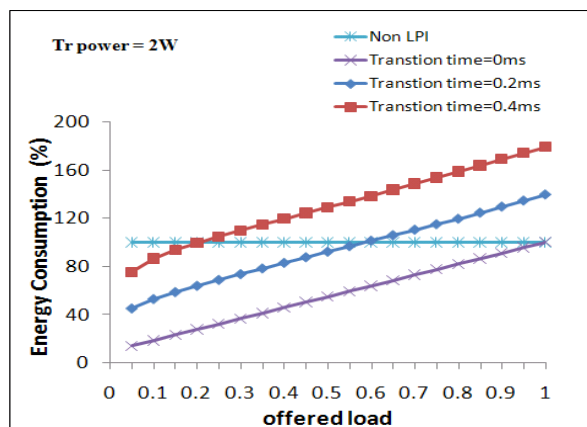
이 전력 크기에 따른 에너지 절감율을 보인다.



(a) 천이 전력: 1W
(a) case of transition power: 1W



(b) 천이 전력: 1.5W
(b) case of transition power: 1.5W

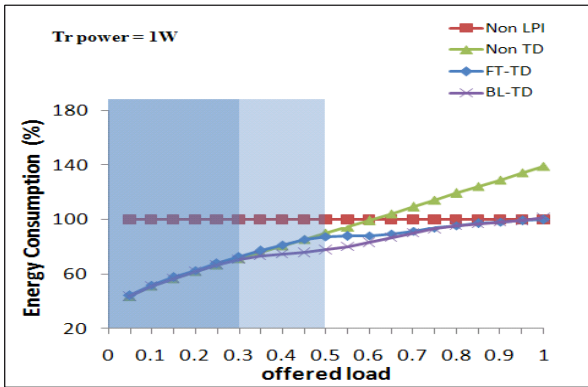


(c) 천이 전력: 2W
(C) case of transition power: 2W

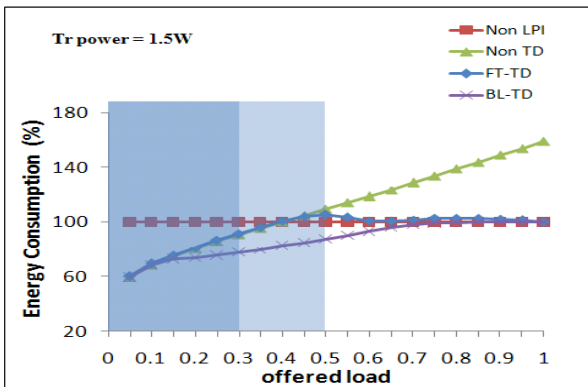
그림 7. 상태 천이 시간에 따른 에너지 절감율
Fig. 7. Energy consumption according to transition time

그림 7에서는 상태 천이 시간과 상태 천이의 에너지 소비 크기가 클수록 에너지 소비율이 크게 증

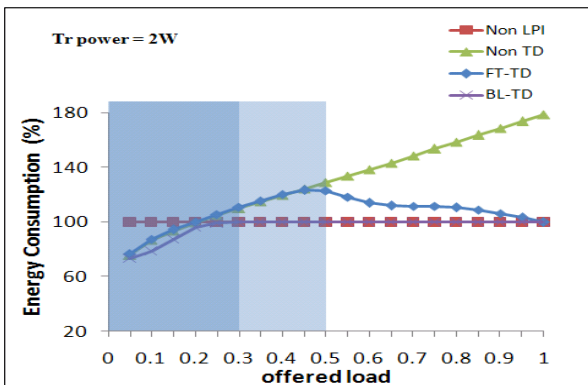
가하며 일정 부하 이상이 되면 수면 모드 수행으로 인하여 오히려 저전력 대기를 사용하지 않는 경우보다 에너지 소비율이 증가하는 결과를 보인다. 3장에서 언급한 대로, 기존의 저전력 대기 방식에서는 망의 부하 상태를 고려하지 않고 무조건 수면 모드로의 천이를 수행하기 때문에 상태 천이로 인한 에너지 소비 오버헤드가 수면 시간으로 인한 에너지 절감 크기보다도 더 커지는 상황이 발생한다.



(a) 천이 전력: 1W
(a) case of transition power: 1W



(b) 천이 전력: 1.5W
(b) case of transition power: 1.5W



(c) 천이 전력: 2W
(c) case of transition power: 2W

그림 8. 상태 천이 전력 소비량에 따른 에너지 절감율
Fig. 8. Energy consumption according to transition power

그림 8에서는 각 상태 천이 전력 소비량에 따라 3장에서 제안한 상태 천이 결정 알고리즘 FT-TD와 BL-TD의 에너지 절감율을 보이고 이를 기존의 저전력 대기 방식과 비교하였다. 백분망의 평균 이용률은 0.3이며 유효 부하 구간을 0.5 이내로 설정하여 이를 그래프에서 사각형 영역으로 표시하였다.

그림 8-(a)에서는 상태 천이 전력 소비가 1W인 경우를 보인다. 먼저 전체 부하 (0~1.0) 관점에서 보았을때, 기존의 저전력 대기 방식은 일정한 부하 지점 (0.6)을 넘은 이후에는 저전력 대기를 사용하지 않는 장치보다도 더 큰 에너지 소비를 발생시키는 것에 비하여 제시한 FT-TD와 BL-TD 방식은 부하에 관계없이 일정한 에너지 절감율을 보임을 확인할 수 있다. 이는 상태 천이 결정 알고리즘이 망의 상태를 적절히 반영하여 상태 천이 여부를 결정하고 있음을 보여준다.

그러나 유효 부하 구간 (0~0.5) 관점에서 보았을 때는 기존의 방식과 제안한 방식의 성능차이가 크게 발생하지 않는데 이는 상태 천이 전력 소비량이 활성 모드와 동일하고, 또한 부하가 낮으면 상태 천이에 의한 에너지 오버헤드가 수면 시간에 의한 에너지 절감율보다 크지 않아 상태 천이 결정 알고리즘의 이점이 크게 작용하지 않기 때문이다.

그림 8-(c)에서는 상태 천이 전력 소비가 2W인 경우를 보이는데 이 경우에 BL-TD는 평균 이용률인 0.3 부하 이내에서 높은 에너지 절감율을 보이고 부하가 0.3을 넘어서도 에너지 소비율이 비저전력 대기 방식을 초과하지 않는것에 비하여 FT-TD 방식은 부하가 0.2를 넘어서면 상태 천이로 인해 에너지 소비 오버헤드가 크게 발생함을 볼 수 있다. 이는 BL-TD 방식은 저전력 대기의 각 상태에 따른 전력 소비량을 고려한 임계값을 사용하여 상태 천이를 결정하는 것에 비하여 FT-TD 방식은 전력 소비량을 고려하지 않고 오직 수면 시간과 상태 천이 시간 측면만 반영하여 알고리즘을 수행하기 때문이다. 상태 천이를 위한 에너지 소비는 활성 모드시의 에너지 소비보다 크기 때문에 BL-TD 알고리즘이 실제 망에서 좀 더 유용한 성능을 보일 수 있음을 알 수 있다.

그림 9에서는 상태 천이 결정 알고리즘에 따른 상태 천이 횟수를 보이는데 FT-TD와 BL-TD 알고리즘은 망의 상태에 따라 상태 천이 여부를 결정하므로 망의 부하가 증가할수록 상태 천이 횟수가 감소한다.

FT-TD 와 BL-TD 에서의 평균 패킷 지연 시간은 그림 10 에서 보여준다. 기존의 저전력 대기 방식은 0.5이상의 부하에서는 패킷 지연 시간이 무한으로 발산하는데 비하여 FT-TD 와 BL-TD 방식은 패킷 지연 시간이 1ms 이하로 거의 일정하게 유지된다. 시뮬레이션 결과를 통하여 본 논문에서 제시한 상태 천이 결정 알고리즘은 기존의 저전력 대기에서 발생하는 상태 천이 오버헤드 문제를 크게 감소시킬 뿐만 아니라 망의 적절한 QoS 를 보장할 수 있음을 확인할 수 있다.

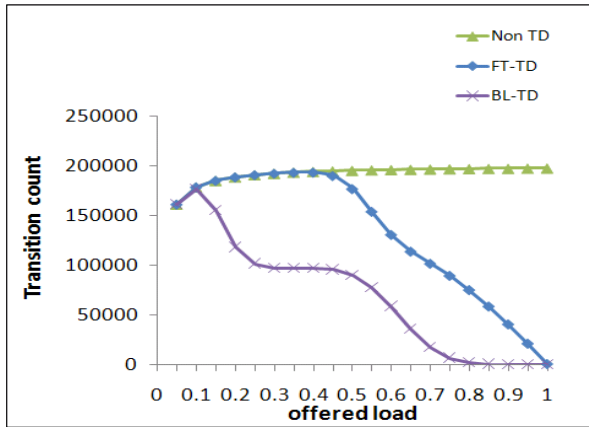


그림 9. 상태 천이 횟수
Fig. 9. The number of transition

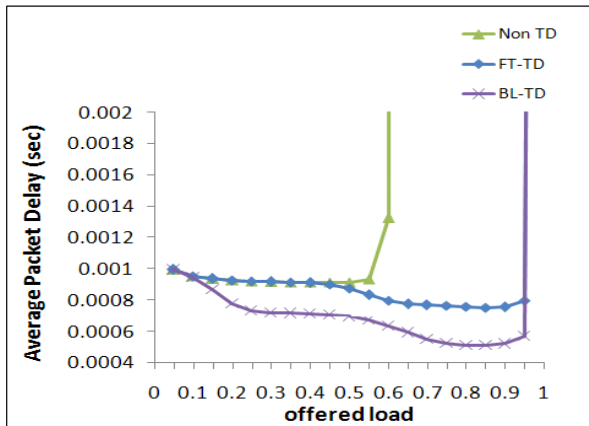


그림 10. 평균 패킷 지연 시간
Fig. 10. Average packet delay time

V. 결 론

현재 급격히 증가하는 네트워크 장치의 에너지 소비 문제를 해결하기 위하여 저전력 대기에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그러나 저전력 대기 에 관한 기존의 연구들은 에너지 절감 성능 향상을 위하여 수면 시간 증가에만 초점을 맞추었으며 상

태 천이 오버헤드에 대한 문제는 고려하지 않았다. 본 논문에서는 OBS 망의 에지 라우터에 저전력 대기를 적용하였으며 상태 천이 오버헤드를 감소시키기 위한 상태 천이 여부를 결정할 수 있는 FT-TD 와 BL-TD 알고리즘을 제시하고 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 결과 FT-TD 와 BL-TD 알고리즘은 기존의 저전력 대기 방식보다도 20% 가량의 에너지 절감 성능 향상을 보였으며 BL-TD 알고리즘은 높은 부하에서도 상태 천이에 의한 에너지 소비 오버헤드를 효과적으로 줄일 수 있었다. 또한 제시한 알고리즘은 패킷 지연 시간을 1ms 이하로 일정하게 유지함으로써 망의 QoS 도 보장함을 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] B. Nordman and K. Christensen, "Reducing the Energy Consumption of Network Devices," Tutorial presented at the July 2005 IEEE 802 LAN/MAN Standards Committee Plenary Session, <http://www.csee.usf.edu/~christen/energy/pubs.html>, July 2005.
- [2] K. W. Roth and F. Goldstein, et al. "Energy consumption by Office and Telecommunications Equipment in Commercial Buildings-Volume 1:Energy Consumption Baseline," Tech. Rep. 72895-00, Arthur D. Little, Inc, Jan. 2002.
- [3] "Carbon Dioxide Emissions from the Generation of Electric Power in the United States," US Dept. of Energy and the Environmental Protection Agency, http://www.eia.doe.gov/cneaf/electricity/page/co2_report/co2report.html, July 2000.
- [4] B. Nordman and K. Christensen, "Reducing the Energy Consumption of Network Devices," Tutorial presented at the July 2005 IEEE 802 LAN/MAN Standards Committee Plenary Session, <http://www.csee.usf.edu/~christen/energy/pubs.html>, July 2005.
- [5] A. Odlyzko, "Data networks are lightly utilized, and will stay that way," Review of Network Economics, vol. 2, no. 3, pp.

