

# 에너지 효율적인 이더넷에서 개선된 LPI 제어 메커니즘

이성근\* · 장용재\* · 유남현\*\*

An Enhanced LPI Control Mechanism in Energy Efficient Ethernet

Sung-Keun Lee\* · Yong-Jae Jang\* · Nam-Hyun Yoo\*\*

## 요약

IEEE 802.3az LPI 메커니즘은 전송할 데이터가 없을 경우 취침 모드로 천이하여 다수의 컴포넌트들을 저전력 상태를 유지하게 함으로써 에너지 효율성을 향상시킨다. LPI는 소량의 데이터가 주기적으로 전송되는 상황에서는 잦은 전송 모드 변환에 따른 오버헤드 때문에 에너지 효율이 크게 개선되지 못하는 문제점이 있다. 본 논문에서는 전송계층 트래픽 특성 및 네트워크 상태에 따라 LPI 모드 상태 천이를 적응적으로 수행하는 개선된 LPI 메커니즘을 제안한다. 시뮬레이션 방법을 의한 성능 분석을 통해 제안한 메커니즘이 다양한 트래픽 부하에 대해서 기존 방법보다 에너지 효율성을 향상시키는 것으로 나타났다.

## ABSTRACT

IEEE 802.3az LPI mechanism allows an Ethernet link to reduce power consumption by entering a low-power sleeping mode and letting some components being powered off when there is no data to be transmitted through the link. However, if small amount of packets are being sent periodically, such a mechanism can not obtain energy efficiency due to a high overhead caused by excessive mode transitions. In this paper, we propose an enhanced LPI mechanism which can perform state transition adaptively based on the traffic characteristics on transport layer and network status. This simulation result shows that proposed mechanism improves energy efficiency than LPI mechanism with respect to energy consumption rate for various traffic loads.

## 키워드

IEEE 802.3az, Energy Efficient Ethernet, Enhanced LPI Mechanism, Low-power Idle, Packet Combining Mechanism  
IEEE 802.3az, 에너지 효율적 이더넷, 개선된 LPI 메커니즘, 저전력 휴지, 패킷 결합 메커니즘

## 1. 서론

자원 고갈로 인한 에너지 부족과 온실가스 방출량 증가에 따른 다양한 환경문제가 인류에게 현실적인 위협으로 등장함에 따라, 이에 대한 대응으로 전세계가 IT의 역할과 가능성에 주목하고 있으며, 많은 나라

에서 그린 IT를 신성장 동력으로 인식하고, 저탄소 산업 강화 정책을 추진하고 있다[1]. GeSI(Global e-Sustainability Initiative)의 보고서에 따르면, IT 기기 및 기술 사용으로 생성되는 온실가스 방출량이 전체 방출량의 2%인 8.3억톤이며, 이중 통신 부문은 IT산업 전체 방출량의 37%에 해당된다[2]. 따라서, 다양한

\* 순천대학교 멀티미디어공학과(sklee@sunchon.ac.kr)

\*\* 경남대학교 KOSTEC(hyun43@gmail.com)

접수일자 : 2012. 08. 20

심사(수정)일자 : 2012. 09. 10

게재확정일자 : 2012. 10. 05

통신 분야에서 에너지 효율성을 증대시키기 위한 많은 연구가 이루어지고 있다[3][4][5].

이더넷은 전세계적으로 가장 널리 배치되어 사용되는 가입자망 네트워킹 기술로서, 이에 대한 에너지 효율적인 프로토콜을 개발하면 연간 최대 3 TWh의 에너지를 절감할 수 있고, 미국에서만 연간 4억 달러, 전세계적으로 연간 10억 달러가 넘는 에너지 비용이 절감될 것으로 전망된다[6]. IEEE 802.3 작업반은 2006년부터 이더넷의 에너지 효율성을 증대시키기 위한 표준화 작업을 수행하였고, 이러한 노력의 결과로서 2010년 9월에 IEEE Std 802.3az-2010 Energy Efficient Ethernet(EEE) 표준안을 확정하였다[8]. EEE는 기존 이더넷 규격에 에너지 효율성 특성을 부가한 형태로서, LPI(Low Power Idle) 모드를 사용한다. LPI는 이더넷 링크를 통해 전송할 패킷이 없을 때, 링크 상태를 저전력 모드로 전환함으로써 에너지 소모를 줄일 수 있는 메커니즘이다. LPI는 데이터가 버스트 특성을 가질 경우 높은 에너지 효율을 나타내지만, 소량의 데이터가 주기적으로 전송되는 상황에서는 잦은 전송 모드 변환에 따른 오버헤드 때문에 에너지 효율이 크게 개선되지 못하는 문제점이 있다[7].

본 논문은 전송계층의 트래픽 특성에 따라 LPI 모드 상태 천이를 적응적으로 수행하는 개선된 LPI 메커니즘을 제안하고, 이에 대한 성능 분석을 수행한다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 에너지 효율적 이더넷의 효율성 분석과 문제점을 나타내고, 3장에서는 개선된 LPI 제어 메커니즘을 제안한다. 4장에서 시뮬레이션 방법을 통해 성능 분석을 수행하며, 5장에서 결론을 맺는다.

## II. 관련 연구

### 2.1 IEEE 802.3az LPI 메커니즘

IEEE 802.3az EEE 기능은 IEEE 802.3 MAC계층과 LPI 상태 동작을 지원하는 물리계층에 의해 수행되며, 이를 위하여 LPI Client 기능을 추가하였다[8]. 그림 1은 LPI Client 부계층과 RS 부계층간의 인터페이스를 나타낸다. LPI의 효율적인 제어를 위해서 그림 1에 나타난 바와 같이 LPI Client와 RS 부계층간에 LP\_IDLE.request, LP\_IDLE.indication 등 두 개의

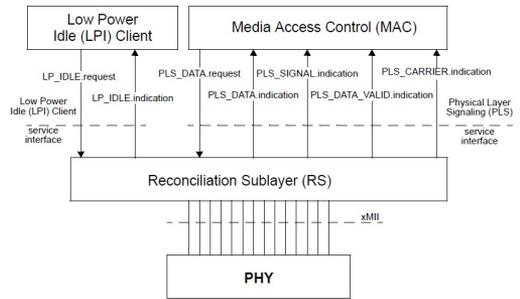


그림 1. LPI Client와 RS간 인터페이스  
Fig. 1 Interface between LPI client and RS

프리미티브가 새로 정의되었다. IEEE 802.3az LPI 모드는 active, sleep, refresh 구간으로 구성되며, 전송할 데이터가 있으면 active 구간에서 동작한다. 전송할 데이터가 없을 경우에는 sleep 모드로 천이하다가, 송신자와 수신자의 동기를 유지하기 위해  $T_q$  간격마다 Refresh 신호를 전송한다. 그림 2는 LPI 모드의 동작 절차를 나타낸다. Active 상태에서 전송할 데이터가 없을 경우 저전력 sleep 모드로 전환하며, 이때 sleep 모드로 전환하는데 소요되는 시간을  $T_s$ 로 정의한다. Sleep 모드가 되면, 장비는 송신자와 수신자의 동기를 유지하기 위해  $T_q$  간격마다 Refresh 신호를 전송하며, 나머지 구간은 휴지 상태를 유지한다. 이후, 상위계층으로부터 전송할 패킷이 도착하면, 링크는  $T_w$  이후에 active 상태로 전환하여, 데이터를 곧바로 전송한다.

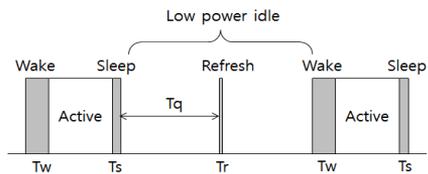


그림 2. LPI 모드의 동작 절차  
Fig. 2 Operating procedures of LPI mode

선행연구 결과[7]를 분석하면, 전송계층의 트래픽 특성에 따라 LPI 메커니즘의 에너지 효율성이 크게 달라지는 특성이 있다. 전송 링크 성능에 비해 트래픽 부하가 적을 경우에는 에너지 효율성이 크게 개선되지만, 트래픽 부하가 일정 이상이 되면 거의 100% 에너지 소비를 나타내어, 기존 이더넷과 성능에 대한 차

별성이 거의 없는 것으로 나타났다. 링크의 전송률이 높고, 트래픽 부하가 높을 경우 에너지 효율이 급격히 저하되는 이유는 빈번한 상태 천이에 기인한 오버헤드가 원인으로 분석되었다. 10Gbps 이더넷 링크의 경우,  $T_w = 4.16\mu s$ ,  $T_s = 2.88\mu s$  이며, 하나의 프레임을 전송하는데 소요되는 시간,  $T_{frame} = 1.2\mu s$  이므로 실제 전송 효율은 14.6%에 불과하므로 대부분의 시간을 idle과 active 간의 상태 천이하는데 소비한다. 이러한 오버헤드는 특히 링크의 전송 속도가 높을수록 많은 비중을 차지하게 된다. 따라서, LPI 메커니즘이 최악의 에너지 효율을 나타낼 수 있는 상황은 작은 패킷들이 일정한 기간을 가지고 주기적으로 도착하는 경우이다. 이 경우 패킷을 전송하는데 소모되는 에너지 이외에도 상태 천이를 위한 오버헤드( $T_w$ ,  $T_s$ )가 추가되므로, 기존 이더넷 방식에 비해 에너지 효율이 크게 개선되지 못한다는 문제점이 있다.

## 2.2 패킷 결합 메커니즘

LPI 메커니즘의 성능은 패킷 결합 기능(packet coalescing)을 통해 향상시킬 수 있다. 패킷 결합 기능은 가능한 많은 양의 패킷들을 버스트 형태로 전송하기 위하여, 상위계층에서 내려오는 패킷들을 FIFO 큐에 버퍼링하는 기능이다. 패킷 결합 기능은 일정 수 이상의 패킷이 도착하거나 또는 처음 패킷이 도착한 이후 일정한 시간이 경과되었을 때 결합과정이 완료되어, 축적된 패킷들을 버스트 형태로 전송한다. LPI의 상태는 패킷을 축적하는 idle 상태와 패킷을 전송하는 active 상태로 구성된다. 초기 상태인 리셋 상태에서 타이머를 초기화하고, 결합되고 있는 패킷의 개수를 의미하는 COUNT 변수를 0으로 초기화 한 후 idle 상태로 천이한다. Idle 상태에서 최초의 패킷이 도착하면 해당 패킷을 LPI 전송 큐에 저장하고, 타이머( $T_{coalesce}$ )를 작동하고, COUNT 변수를 증가시킨다. 이후 패킷이 도착할 때마다 COUNT 변수를 증가시킨다. Idle 상태에서 타이머가 만료되거나, COUNT 변수가 최대값에 도달하게 되면, active 상태로 천이하여 지금까지 결합된 패킷들을 버스트 형태로 전송한다. 전송이 완료되어, LPI 전송 큐가 비어지게 되면 관련 상태 변수들을 초기화 한 후 다시 idle 상태로 천이한다. 패킷 결합 메커니즘을 통해 일련의 패킷들을 하나의 큰 블록 형태로 버스트 형태로 전송함으로써 상태

천이에 기인한 오버헤드는 패킷의 전체 전송 시간에 비해 무시할 정도의 낮은 수준이 된다. 따라서 앞서 언급했던 LPI 메커니즘이 최대의 에너지 효율을 나타낼 수 있는 상황에 근접하게 할 수 있다. 선행연구 [7][8][9]에서 수행한 패킷 결합 기능의 성능 분석 결과를 정리하면, 이러한 패킷 병합 메커니즘을 통해 LPI 메커니즘의 에너지 효율성을 향상시킨다. 특히 트래픽 부하가 낮은 경우에서 에너지 효율성이 크게 향상되는 것으로 확인되었다. 그러나 패킷 결합 메커니즘은 또한 패킷 전달시 지연의 증대를 유발시키는 것으로 나타났다. 패킷 결합 메커니즘에서 타이머 설정값( $T_{coalesce}$ )과 큐에 결합되는 최대 패킷 수( $Q_{max}$ )에 따라 에너지 효율성과 전달 지연에 대한 성능이 크게 좌우된다.  $Q_{max}$ 나  $T_{coalesce}$ 의 설정값이 크면, 에너지 효율성은 향상되지만 패킷 지연이 증가하게 되고,  $Q_{max}$ 나  $T_{coalesce}$ 의 설정값이 적게 되면 패킷의 지연이 줄어들지만, 에너지 효율성은 상대적으로 낮아지게 된다.

## III. 알고리즘 제안

### 3.1 기본 설계 방향

에너지 효율성과 지연에 대한 요구조건을 만족하기 위하여 전송계층의 트래픽 특성을 예측하여  $Q_{max}$ 와  $T_{coalesce}$  파라미터 값을 적응적으로 조정한다. TCP 혼잡 제어 메커니즘의 데이터 전송 주기는 RTT 값에 의해 결정되지만, 실제 데이터 전송은 RTT 기간 동안에 균등하게 전달되는 것이 아니라, 해당 주기 시작 시점의 극히 짧은 시간에 버스트 형태로 전송이 이루어진다. 또한 버스트 데이터의 크기는 수신측에서 전달되는 광고 윈도우의 크기를 초과하지 않는 범위 내에서 TCP의 혼잡 윈도우(cwnd) 크기에 따라 결정된다. TCP에서 패킷을 수신할 때마다 현재의 패킷 도착률을 측정하고, 이 값과 cwnd 정보와의 연계를 통해 트래픽 특성을 예측한다. LPI 메커니즘의 에너지 효율성을 증대시키기 위해서 sleeping 기간을 증대시키는 것도 중요하지만, 오버헤드를 줄이기 위해서 상태 천이 횟수를 줄이는 것도 고려해야 한다. 짧은 기간의 잦은 sleeping 보다는 상대적으로 긴 기간 동안의 적은 횟수의 sleeping이 더 효율적이다. 그러나 이 경우

지연의 증가에 대해서도 고려해야 한다. 현재 전송할 데이터가 없을 경우라도 sleeping 해서 다시 active 로 천이하는데 필요한  $T_s+T_w$  기간 동안 일정 양 이상의 데이터가 수신된다고 예측된다면, sleeping 상태로 천이하지 않고 계속해서 active 상태를 유지하는 방법도 타당성이 있다고 판단된다. 또한 sleeping 상태에서 타이머가 만료되었을 때 곧바로 active 상태로 천이하지 않고, 큐 내에 축적된 패킷의 개수와 해당 패킷의 지연에 대한 요구조건에 따라 필요하다면 하나의 주기 동안 더 sleeping 하게 함으로써 에너지 효율성을 더 향상시킬 수 있다.

### 3.2 적응형 상태전환 알고리즘

앞 절의 기본 설계 방향을 토대로 본 논문에서 제안한 알고리즘의 idle 및 active 상태에서의 흐름도를 그림 3과 그림 4에 각각 나타내었다. Idle 상태에서 TCP로부터 패킷이 도착하면 LPI 전송 버퍼에 패킷을 저장하고, 유입되는 패킷의 순간 도착률을 측정하고, 최근 수신한 일정 개수의 패킷들에 대한 평균 도착률  $K$ 를 계산한다. 또한 TCP의 혼잡 윈도우 값을 확인하여, 초기 설정된  $Q_{max}$  이상이 되면 식 (1)에 의해  $Q_{max}$ 를 수정한다. 식 (1)에서  $\alpha$ 는 0부터 1까지의 값을 가지면서, 트래픽 특성의 반영 비율을 의미한다.

$$sleeping = Q_{max} + (cwnd - Q_{max}) \times \alpha \quad (1)$$

만일 처음 수신한 패킷일 경우에는 패킷의 중요도에 따라  $T_{coalesce}$  타이머 값을 설정하고,  $T_{coalesce}$  타이머를 동작시킨다. 현재 수신된 패킷의 개수가  $Q_{max}$  값 이상이면,  $T_{coalesce}$  타이머를 중지하고,  $T_w$  이후에 active 상태로 천이하여 패킷 전송을 수행한다. Idle 상태에서  $T_{coalesce}$  타이머가 만료되면 CNT가  $Q_{max}/2$ 를 초과하는가를 비교한다.  $Q_{max}/2$ 에 도달하지 못하였다면, 유입된 패킷의 중요도에 따른 상태전환이 필요하다. 유입량이  $Q_{max}$ 의 절반에 도달하지 않았다는 것은, 트래픽 부하가 낮다는 것을 의미한다. 패킷의 지연에 대한 우선순위가 낮을 경우에는 상태전환의 횟수를 줄여 에너지 효율성을 높일 수 있음을 의미한다.

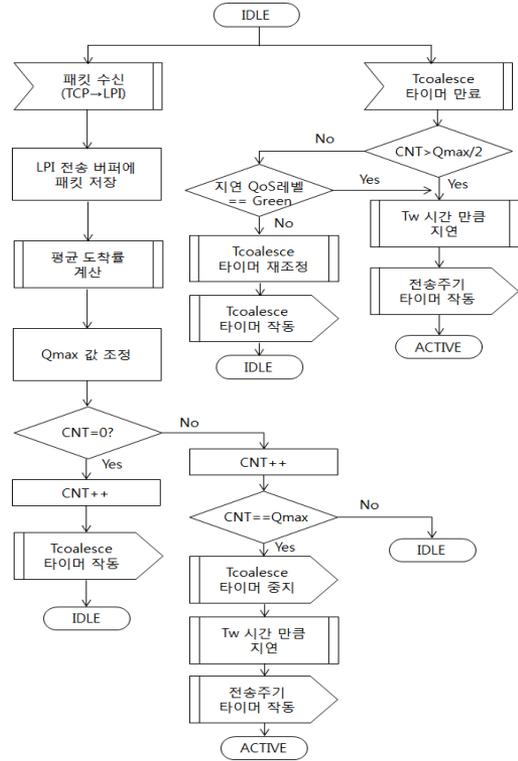


그림 3. LPI Idle 상태 다이어그램  
Fig. 3 LPI Idle status diagram

따라서,  $Q_{max}/2$ 에 미치지 못할 경우, 패킷의 중요도를 점검한다. 우선순위가 낮을 경우에는  $T_{coalesce}$  타이머를 재설정하여 idle 상태를 계속 유지 하도록 한다. 패킷의 개수가  $Q_{max}/2$ 를 초과하거나, 우선순위가 높은 경우에는  $T_w$  이후에 active 상태로 천이하여 패킷 전송을 수행한다.

Active 상태에서 전송 주기에 따라 패킷을 버스트 형태로 전송한다. 모든 패킷을 송신하여 큐에 패킷이 없다면, 평균 패킷 도착률  $K$ 를 기반으로 식 (2)를 이용하여  $T_s+T_w$  동안의 예상 패킷 도착량을 계산한다.

$$P_{arrival} = K \times (T_s + T_w) \quad (2)$$

Active 상태에서 MAC계층의 전송 큐에 패킷이 존재하지 않더라도, 낮은 부하의 네트워크에서 바로 idle 상태로 전환하게 되면, 오히려 잦은 상태전환으로

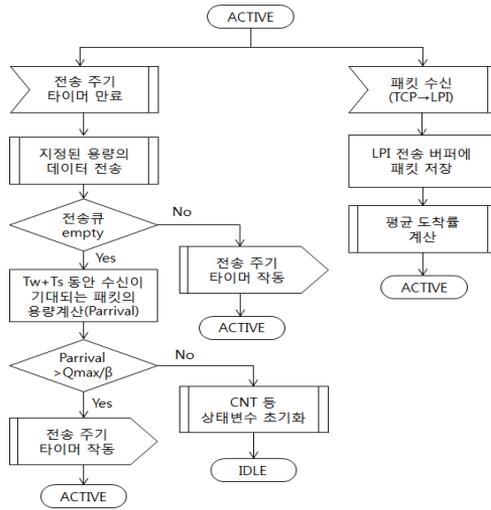


그림 4. LPI active 상태 다이어그램  
Fig. 4 LPI active status diagram

인한 오버헤드가 발생한다. 따라서  $T_s+T_w$  기간에 일정 양( $Q_{max}/\beta$ ) 이상의 데이터가 수신된다고 예측되면, 상태전환 하지 않고 계속 active 상태를 유지한다.

#### IV. 시뮬레이션 결과 분석

##### 4.1 시뮬레이션 환경

시뮬레이션 환경은 표1에 나타난 바와 같이 Intel Core i7 2670QM 2.2Ghz, Ram 8Gb, Windows 7 64bit 환경의 Visual Studio 2010 .Net Framework 3.5의 C#을 이용하여 개발하였다. 시뮬레이션은 기본 LPI 알고리즘과 개선된 LPI 알고리즘을 구현하고, 1Gbps 네트워크 환경에서 네트워크 부하를 증가시키면서 각 알고리즘에 대한 에너지 사용률을 측정한다. 시뮬레이션에서 적용된 TCP 혼잡제어 메커니즘의 RTT는 200msec, ssThred값은 256으로 설정하였고, 전송 에러율은 1/50이고, 전송 에러에 대한 혼잡 복구 메커니즘은 fast recovery와 slow start가 각각 0.5 확률로 수행된다고 가정하였다. 트래픽 부하는 혼잡 윈도우와 TCP의 패킷 발생 주기를 조절하여 1Gbps 네트워크의 10%부터 100%까지 적용하였다. 비교 대상은 EEE를 사용하지 않는 기존 이더넷 방법, 기본 LPI 메커니즘, 이상적인 경우, 그리고 본 논문에서 제

안한 개선된 LPI 메커니즘이다.

표 1. 시뮬레이션 환경  
Table 1. Simulation environment

분류	세부 사항
H/W	Intel Core i7 2.20Ghz 8GB
OS	Windows 7(64bit)
구현 툴	Visual Studio 2010
구현 언어	C#
Framework	.Net Framework 3.5

##### 4.2 시뮬레이션 결과 분석

그림 5는 네 가지 메커니즘에 대한 에너지 소비율을 나타낸 그래프이다. EEE를 사용하지 않는 기존 이더넷 방법은 네트워크 부하에 상관없이 항상 Active 상태를 유지하므로 에너지 소비율이 100%이다. 이상적인 메커니즘은 네트워크의 부하에 따라 에너지 소비율이 선형적으로 비례하는 경우를 의미한다. 기존 LPI 메커니즘은 트래픽 부하가 10%일 때 약 28%의 에너지 사용률을 나타내며, 부하가 증가함에 따라 에너지 소비율이 급증한다. 트래픽 부하가 50%를 넘어서면 90% 이상의 에너지 사용률을 나타

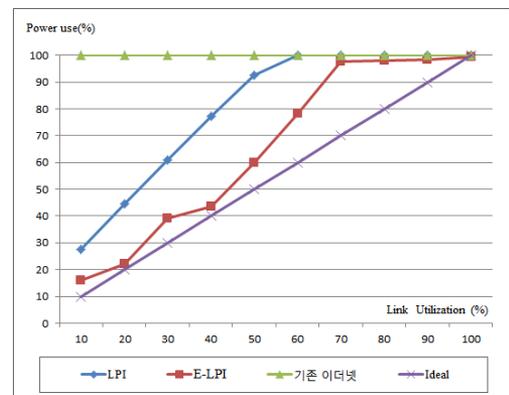


그림 5. 에너지 소비율  
Fig. 5 Rate of energy consumption

내며, 60%인 경우에는 100%의 에너지 소비율을 달성한다. 기존 LPI 메커니즘은 성능은 선형연구의 결과와 비슷한 추이를 나타내고 있다. 개선된 LPI 메커니즘은 트래픽 부하가 10% 일 때 약 17%의 에너지

사용률을 나타내며, 부하가 증가함에 따라 에너지 소비율이 증가하게 된다. 트래픽 부하가 70%일 경우에 에너지 소비율이 100%에 도달한다. 모든 트래픽 부하에 대해 기존 방식보다 에너지 소비율이 크게 개선된 것으로 나타났다.

### VI. 결론

LPI는 데이터가 버스트 특성을 가질 경우 높은 에너지 효율을 나타내지만, 소량의 데이터가 주기적으로 전송되는 상황에서는 잦은 전송 모드 변환에 따른 오버헤드 때문에 에너지 효율이 크게 개선되지 못하는 문제점이 있다.

본 논문은 LPI 메커니즘의 동작 효율성과 문제점을 제기하였고, 네트워크 상태와 패킷 중요도에 따라 패킷 결합 파라미터를 적응적으로 조절하는 개선된 LPI 메커니즘을 제안하였다. 성능분석 결과, 제안한 메커니즘은 트래픽 부하가 10%일 때 약 17%의 에너지 사용률을 나타내며, 70%일 경우에 에너지 소비율이 100%에 도달한다. 다양한 트래픽 부하에 대해서 기존 방법보다 에너지 효율성을 향상시키는 것으로 나타났다. 현재 패킷 우선순위에 대한 차별화된 지원을 보장하는 메커니즘에 대한 성능분석이 진행 중에 있으며, 향후 본 논문에서 제안한 메커니즘에 대한 성능 파라미터의 최적화에 대한 연구가 수행되어야 할 것이다.

#### 감사의 글

본 논문은 중소기업청에서 지원하는 2012년도 산학연공동기술개발사업(No. C0029530)의 연구수행으로 인한 결과물임을 밝힙니다.

#### 참고 문헌

- [1] Green Growth Korea, "Green IT National Strategy for Low Carbon and Green Growth", May 2009.
- [2] <http://www.gesi.org>, Global e-Sustainability initiative
- [3] 김성훈, 고선복, 정창렬, 이성근, "에너지 효율성과 서비스 품질 보장을 위한 MAC 프로토콜",

한국전자통신학회논문지, 3권, 2호, pp. 74-78, 2008.

- [4] 전동근, "Ad hoc 무선 센서네트워크에서의 효율 전력 매니지먼트에 관한 연구", 한국전자통신학회논문지, 6권, 6호, pp. 809-814, 2011.
- [5] 강희훈, 이영중, 한완욱, "유비쿼터스 센서 네트워크를 위한 에너지-효율적인 계층구조 클러스터 기반 라우팅 기법", 한국전자통신학회논문지, 4권, 3호, pp. 243-246, 2009.
- [6] K. Christensen, P. Reviriego, B. Nordman, M. Bennette, M. Mostowfi, J.A Maestro, "IEEE 802.az: the road to energy efficient ethernet", Communications Magazine, IEEE, Vol. 48, No. 11, pp. 50-56, 2010.
- [7] P. Reviriego, J. Hernandez, D. Larrabeiti, and J. Maestro, "Performance evaluation of Energy Efficient Ethernet", IEEE Communication Letters, Vol. 13, No. 9, pp. 697-699. Sep. 2009.
- [8] IEEE P802.3az, Energy Efficient Ethernet Task Force, Sep. 2010.
- [9] M. Mostowfi, K. Christensen, "Saving energy in LAN switches: New methods of packet coalescing for Energy Efficient Ethernet", Green Computing Conference and Workshops(IGCC), pp. 1-8, 2011.

#### 저자 소개

#### 이성근(Sung-Keun Lee)



1985년 고려대학교 전자공학과 졸업 (공학사)  
 1987년 고려대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사)  
 1995년 고려대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학박사)  
 2004년~2005년 UC Davis 컴퓨터과학과 방문교수  
 1997년~현재 순천대학교 멀티미디어공학과 교수  
 ※ 관심분야 : 에너지 효율적인 이더넷, WSN, 멀티미디어 통신, 인터넷 QoS



**장용재(Yong-Jae Jang)**

2010년 순천대학교 멀티미디어 공학과 졸업(공학사)

2012년 순천대학교 대학원 멀티미디어 공학과 졸업(공학석사)

※ 관심분야 : 에너지 효율적 이더넷, WSN, 인터넷 QoS



**유남현(Nam-Hyun Yoo)**

1999년 순천대학교 컴퓨터과학과 졸업

2001년 순천대학교 대학원 컴퓨터과학과 졸업(이학석사)

2007년 순천대학교 대학원 컴퓨터과학과 졸업(이학박사)

2011년~현재 경남대학교 해양시스템융합기술연구센터 책임연구원

※ 관심분야 : Embedded System, Robots