

그린 인터넷을 위한 유선 액세스 네트워크의 에너지 절약 잠재성 추정 모델

서유화*, 김은희°, 김기영*

Energy Saving Potential Estimation Models of Wired Access Networks for Green Internet

Yuhwa Suh*, Eunhoe Kim°, Kiyoung Kim*

요약

유선 데이터 네트워크(wired data network)의 에너지 소모량은 사용자 단말 장비를 제외하면 액세스 네트워크(access network)에 의해 지배된다^[1]. 오늘날 액세스 네트워크를 위해 제안되고 있는 에너지 관리 기술들은 다양한 네트워크 환경에 대한 통합적인 고려가 미흡하고, 제안 기술들의 성능에 대한 범용적인 측정 기준의 제시가 부족하여, 그린 네트워킹(Green networking) 기술 적용의 적합성을 비교 평가하기가 어렵다. 또한 에너지 절약 잠재성을 추정하는 기존의 모델링 기법들은 특정한 네트워크 기술이나 규모에 제한되어 확장성과 범용성이 부족하다.

본 논문에서는 하향식(top-down) 접근법을 이용하여, 액세스 네트워크 환경에서 그린 네트워킹 기술에 의한 에너지 절약 잠재성 추정 모델을 제안한다. 본 연구는 네트워크 구조 기반과 트래픽 유형 기반의 두 가지 모델을 제안하며, 제안 모델들은 액세스 네트워크에서 그린 네트워킹 기술이 현재와 미래에 액세스 네트워크에 미치는 영향을 추정한다. 본 연구는 제안 모델과 기존 모델들에 그린 네트워킹 기술인 LPI(Low Power Idle)^[2,3] 전송기술을 적용하여, 정확성과 신뢰성 측면에서 성능을 비교 평가하였다.

Key Words : Energy consumption, Energy saving, Access network, Green networking, Wired data network

ABSTRACT

Energy consumption of today's wired data networks is driven by access networks[1]. However, there is a lack of general and quantitative valuation basis considering different access network environments to apply green networking technologies to them. Existing models to estimate energy saving potential for access networks have poor generality and scalability because they are based on particular network equipment and technologies and limited to scale of access networks. This study proposes models estimating energy saving potential of access networks by green networking technologies with a top-down approach. It provides two network-based and traffic-based models for various modelling environments and requirements. The performance evaluation is achieved by comparing and analyzing the results of an experiment in terms of a reliability and accuracy, which LPI(Low Power Idle)^[2,3], green networking technology for Ethernet is applied to existing models and ours.

* First Author : (ORCID:0000-0003-0884-2475)Seoil University Department of Information and Communication Engineering, 5syh@seoil.ac.kr, 정희원

° Corresponding Author : (ORCID:0000-0001-7599-8205)Seoil University Department of Software Engineering, ehkim@seoil.ac.kr, 정희원

* (ORCID:0000-0001-8191-4960)Seoil University Department of Software Engineering, ganet89@seoil.ac.kr, 정희원
논문번호 : 201807-224-B-RE, Received July 23, 2018; Revised August 22, 2018; Accepted August 23, 2018

I. 서 론

통합적인 에너지 관리를 통해 에너지 절약과 CO₂ 배출 감소를 목적으로 하는 연구 영역인 그린 네트워킹(Green Networking) 기술^[1-5]의 주요 이슈는 네트워크 장비들의 에너지 소비가 트래픽 로드와 최대한 비례(proportional)하게 접근하도록 하는 방안들을 모색하는데 있다.

액세스 네트워크(access network)는 사용자 단말 장비를 제외하면, 유선 데이터 네트워크(wired data network)의 에너지 소모량을 지배하는 영역이다^[1]. 유선 액세스 네트워크에서 에너지 효율성 향상을 위해 제시된 그린 네트워킹 기술들은 주로 동적 전력 스케일링(dynamic power scaling)^[4] 능력의 구현을 통해 이루어진다. 이것은 네트워크가 패킷 프로세싱 엔진 또는 링크 인터페이스의 동작율을 동적으로 줄이도록 하는 능력이다. 그러나 동적 적응 기술들은 에너지 절약과 네트워크 성능 간에 트레이드 오프(trade-off) 관계에 있고, 정교하고 복잡한 작업이 요구되기 때문에 기존의 연구들은 개별 장비 또는 로컬 네트워크 영역에서 고립되어 진행되는 경우가 많다. 또한 그린 네트워킹 기술들의 대부분은 소규모 네트워크 환경이나 소수의 장비 당 소모되는 에너지량의 측정을 통해 해당 기술의 에너지 효율성 정도를 제시하고 있다. 그러나 대표할 만한 측정 기준은 여전히 부족하고 다양한 유형의 장비를 포함하는 대표적인 데이터의 제시는 부족한 상황이다.

그린 네트워킹 기술은 특정한 종류의 개별적인 장비의 에너지 효율성 자체보다 해당 기술의 적용을 통한 통합적인 전체 네트워크의 에너지 절감에 큰 의미를 가진다. 그러나 대규모 액세스 네트워크는 그 규모로 인해 정확한 장비 수와 종류에 대한 파악이 어려울 뿐 아니라, 장비의 다양성과 여러 세부적인 고려사항(예를 들어, 다양한 장비의 전력 소모 모델들, 장비 중복성, 냉각 시스템 등) 때문에 에너지 소모량을 추정하기가 어렵다. 또한 제안된 기술들을 대규모 액세스 네트워크 환경에 적용했을 때 미칠 수 있는 전체적인 영향에 대한 고려가 부족하다. 따라서 그린 네트워킹 기술들은, 대규모 액세스 네트워크에서 해당 기술에 대한 성능과 신뢰성에 대한 검증이 어려우며, 각 기술들에서 제시하고 있는 성능과 에너지 효율성만으로는 제안 기술들의 적용에 대한 적합성과 신뢰성을 확보하는데 어려움이 있고, 제안 기술들의 영향을 비교 평가하기 위한 확장성과 범용성 있는 측정 도구도 부족한 상황이다.

본 논문의 선행연구^[6]에서는 액세스 네트워크의 환경적 특성과 기존의 에너지 소모량 추정 모델들의 문제점을 비교 분석하고, 범용성과 확장성을 고려한 대규모 액세스 네트워크의 에너지 소모량 추정 모델(이하 EMEC: Estimation Model of Energy Consumption^[6])을 제안하였다. 이 모델은 에너지 절감을 위한 두드러지는 기술적 노력을 고려하지 않았을 때, 액세스 네트워크의 에너지 소모량을 추정하는 모델이다.

본 논문에서는 [6]의 연구를 기반으로 하여, 그린 네트워킹 기술의 적용을 통한 액세스 네트워크의 에너지 절약 잠재성 추정 모델을 제안한다. 제안 모델은 다양한 네트워크 환경과 요구 사항을 고려하기 위해, 네트워크 구조 기반과 트래픽 유형 기반의 두 가지 모델을 제안하였고, 그린 네트워킹 기술이 에너지 절약의 측면에서 현재와 미래에 액세스 네트워크에 미치는 영향을 추정한다.

본 논문의 II장에서는 액세스 네트워크의 에너지 절약 잠재성을 추정하는 기존의 모델링 기법들을 소개하고 그 한계점을 분석한다. III장에서는 유선 액세스 네트워크의 에너지 절약 잠재성 추정 모델을 제안한다. IV장에서는 제안 모델의 성능 평가를 위해 네트워크 환경을 LBNL(Lawrence Berkeley National Laboratory)^[7]과 CEC(California Energy Commission)^[8]의 실제 사례와 동일하게 설정하고, 대표적인 그린 네트워킹 기술로서, IEEE 802.3az^[4] EEE(Energy Efficient Ethernet) 표준으로 승인된 LPI(Low Power Idle)^[2,3] 전송기술을 제안 모델과 기존 모델들에 적용한 결과와 OPNET 모듈러를 통한 시뮬레이션 결과를 정확성과 신뢰성 측면에서 비교 평가한다. 마지막으로 V장에서는 결론을 맺는다.

II. 관련연구

본 절에서는 액세스 네트워크(access network)에서 에너지 절약 잠재성을 추정하는 기존의 대표적인 수학적 모델링 기법들을 소개하고 문제점을 분석한다.

2.1 J.Baliga 모델^[9]

[9]에서 제안한 모델(이하 J. B. 모델)은 상향식(bottom-up) 접근 방식을 통해, 옵티컬 네트워크(optical network)의 기술 별 에너지 소모량과 에너지 절약 잠재성의 추정을 목적으로 한다. 이 모델은 액세스 네트워크를 기술 별로 분류하여 ADSL(Asymmetric, Digital Subscriber Line), PON(Passive Optical Network), FTTN(Fiber to the

Node), PtP(Point-to-Point Optical) 네트워크를 모델링하였다. J. B. 모델은 레지던셜 액세스 네트워크(residential access network)를 대상으로 일부 장비 모델과 몇몇 ISP(Internet Service Provider)로부터 수집한 장비 당 에너지 소모량과 가입자 및 장비 수를 기반으로 에너지 절약 잠재성을 추정된 모델이다.

J. B. 모델은 주요 설정 변수인 가입자와 장비 수, 장비 당 에너지 소모량에 크게 의존한다. 그러나 대규모 액세스 네트워크의 경우 이 설정 변수 값들에 대한 정확한 수를 파악하기 어려워 정확성과 확장성이 부족하다. 또한 사용하는 모든 네트워크 기술에 동일한 에너지 효율성 정도를 적용하여, 지나치게 단순한 파라미터를 사용하기 때문에 신뢰성이 부족하다.

J. B. 모델은 옵티컬 레지던셜 네트워크(optical residential network) 기술만을 가정하였다. 그러나 엔터프라이즈 네트워크(enterprise network)는 레지던셜 장비보다 장비 수와 장비 당 에너지 소모량을 더욱 파악하기 어려우며, 오늘날 엔터프라이즈 네트워크 장비는 레지던셜 네트워크 장비만큼 많은 수가 배치되어 있다.^[7,10] 따라서 J. B. 모델은 범용적인 적용이 어렵고, 전체 액세스 네트워크의 에너지 절약 잠재성을 파악하는 데는 제한적이다.

그러나 이전의 액세스 네트워크의 에너지 절약 잠재성을 추정하는 많은 연구들이 ISP 사업자와 장비 생산자로부터 수집한 자료에 의한 통계적인 방식에 의존한 반면, 대규모 액세스 네트워크의 에너지 소모량과 에너지 절약 잠재성을 수학적 모델링 방식을 통해 추정된 대표적인 연구로서 이후 다른 모델링 기법에 기초를 제공했다는 점에서 의미가 크다.

2.2 R. Bolla 모델^[11]

[11]에서 제안한 모델(이하 R. B. 모델)은 유선 데이터 네트워크의 에너지 효율성 향상을 위한 솔루션과 장비 원형의 설계와 개발을 목적으로 2013년 Energy Consumption Networks(ECONET) 프로젝트^[12, 13]에서 수용된 에너지 적응형 기술의 영향을 모델링한 것이다. R. B. 모델은 상향식 접근(bottom-up) 방식을 통해 그린 네트워킹 기술을 각 장비에 적용했을 때 대규모 유선 데이터 네트워크에 미치는 영향을 추정하였다.

R. B. 모델은 레지던셜과 엔터프라이즈 액세스 네트워크를 대상으로 대표적인 에너지 관리 기술인 ARL(Adaptive Link Rate)^[14,15]와 LPI(Low Power Idle)^[2,3] 기술을 적용하여 모델링하였다. 그러나 R. B. 모델은 ECONET 프로젝트에서 수용된 에너지 적응

형 기술에 특화하여 모델링하였기 때문에 세부 변수 값이 많고 복잡하여 사용이 용이하지 않다.

R. B. 모델은 특정한 네트워크 기술과 시나리오를 기반으로 한다. 현재 액세스 네트워크의 장비들은 다양한 형태의 에너지 적응형 기술을 사용하고, 그린 네트워킹 기술의 도입이 아직 일반화되지 않은 상황임을 고려해 볼 때, 향후 개발될 수 있는 새로운 그린 네트워킹 기술의 영향을 적용하기에는 고려 사항이 매우 많다.

R. B. 모델은 적용에 있어 네트워크 규모에 제한적이다. R. B. 모델은 결과에 큰 영향을 미칠 수 있는 핵심 변수 값들을 모두 ECONET의 설정 값에 의존한다. 그러나 이 값들은 네트워크 규모와 그 환경에 따라 다른 값을 가지는데 다른 규모의 네트워크에 사용하기 위해서는 많은 변수 값들이 새로 설정되어야 한다. 그러나 R. B. 모델에서는, 그 변수 값들의 측정 방식과 기준에 대해서는 명백한 제시가 없다.

또한 R. B. 모델은 네트워크 중복성에 따른 에너지 소비를 고려하지 않는다. 전체 네트워크를 위한 통합적인 모델링을 하였고, 가정한 액세스 네트워크 환경에서는 장비의 중복성이 존재하나, 실제 계산 과정에서는 반영되지 않는다. 그러나 R. B. 모델은 레지던셜 액세스 네트워크를 중심으로 제안된 기존의 모델들로부터 더욱 정교하고 신뢰성을 가진 형태로 발전된 모델이며, 그린 네트워킹 기술에 의한 에너지 절약 잠재성에 대해 세부적인 분석을 수행한 모델이라는 점에서 중요한 의미를 가진다.

III. 제안 모델

본 장에서는 하향식(top-down) 접근 방식을 통해 대규모 유선 액세스 네트워크 환경에서 그린 네트워킹 기술의 적용 전 후 현재와 미래의 액세스 네트워크의 에너지 절약 잠재성을 추정하는 모델을 제안한다. 본 연구는 액세스 네트워크의 구조를 고려하여 에너지 효율성 정도를 도출하여 반영하는 네트워크 구조 기반 모델과 트래픽 로드 에 대한 에너지 소모의 비례 정도로부터 에너지 효율성 정도를 도출하여 반영하는 트래픽 기반 모델을 제안한다.

3.1 용어 정의

제안 모델을 위해 사용되는 용어들은 다음과 같이 정의한다.

BAU(Business-As-Usual) : 에너지 소모의 감소를

위한 두드러지는 기술적 노력 없이 액세스 네트워크 장비의 현재 상황이 계속 유지되는 상태를 의미한다.

ECO : 액세스 네트워크에 그린 네트워킹 기술 구현을 통해 에너지 절약이 가능한 상태를 의미한다.

로컬 네트워크 영역 : 추정 대상이 되는 액세스 네트워크가 위치한 특정한 범위의 영역이며 해당 영역 전체 에너지 소모량이 추정 가능한 영역으로 한 개의 로컬 네트워크 영역에는 한 개의 액세스 네트워크를 포함한다.

상위 네트워크 영역 : 로컬 네트워크 영역을 포함하는 더 큰 규모의 네트워크 영역으로 한 개 이상의 로컬 네트워크 영역을 포함한다. 특정 범위의 네트워크 영역 내에서, 로컬 네트워크 영역의 영향도를 추정하고자 하는 영역이다. 상위 네트워크 영역은 해당 영역 내 전체 에너지 소모량이 추정이 가능한 영역이다.

로컬 네트워크 영역과 상위 네트워크 영역은 상대적인 개념으로서 예를 들어 미국 내 유선 액세스 네트워크의 에너지 소모량 중 캘리포니아 주의 유선 액세스 네트워크의 영향을 추정하고자 한다면 상위 네트워크 영역은 미국, 로컬 네트워크 영역은 캘리포니아가 된다. 또한 캘리포니아 주의 유선 액세스 네트워크의 에너지 소모량 중 LBNL (Lawrence Berkeley National Laboratory)^[7] 캠퍼스의 액세스 네트워크의 영향을 추정 대상으로 한다면 상위 네트워크 영역은 캘리포니아 주, 로컬 네트워크 영역은 LBNL 캠퍼스가 된다.

3.2 네트워크 구조 기반 모델

네트워크 구조 기반 모델은 액세스 네트워크에 그린 네트워킹 기술을 적용했을 때 로컬과 상위 네트워크 영역의 현재와 미래의 에너지 소모량을 추정함으로써, 그린 네트워킹 기술의 에너지 절약 잠재성을 추정한다. 제안 모델은 기준 시간 t_0 에서 BAU 상황과 ECO 상황으로부터 미래의 시간 t 의 로컬과 상위 네트워크 영역의 에너지 소모량을 추정한다. t_0 는 기준 연도이며, t 는 추정하고자하는 연도이다. 제안 모델은 액세스 네트워크 장비의 에너지 소모량 증가율과 무어의 법칙(Moore's law)과 드나드의 법칙(Dennard's scaling law)에 따른 최신 그린 네트워킹 기술의 에너지 효율성 향상율^{9, 16)}을 주요 변수로 사용한다. 또한 그린 네트워킹 기술이 영향을 미치는 부분과 미치지 않는 부분을 고려하여 t 시간에서 액세스 네트워크의 에너지 소모량을 추정한다.

식 (1)의 $A_{E_n}(t)_{ECO}$ 는 ECO 상황에서 t 시간에 상

위 네트워크 영역의 에너지 소모량이며 상위 네트워크 영역에는 n 개의 레지던셜 로컬 네트워크와 엔터프라이즈 로컬 네트워크가 각각 존재한다. $R_{n_{e_i}}(t)_{ECO}$ 는 레지던셜 로컬 네트워크(residential local network) i 의 에너지 소모량이고, $E_{n_{e_i}}(t)_{ECO}$ 는 엔터프라이즈 로컬 네트워크(enterprise local network) i 의 에너지 소모량으로 식 (2)와 식 (3)을 의해 도출된다.

$$A_{E_n}(t)_{ECO} = \sum_{i=1}^n R_{n_{e_i}}(t)_{ECO} + \sum_{i=1}^n E_{n_{e_i}}(t)_{ECO} \quad (1)$$

식 (2)와 (3)에서 BAU 상황에서의 t 시간에 레지던셜 로컬 네트워크 i 의 에너지 소모량 $R_{n_{e_i}}(t)_{BAU}$ 와 엔터프라이즈 로컬 네트워크 i ,의 에너지 소모량 $E_{n_{e_i}}(t)_{BAU}$ 는 본 논문의 선행연구 EMEC^[6]를 통해 도출한다. $E_{R_i}(t)$ 와 $E_{E_i}(t)$ 는 레지던셜 로컬 네트워크 i 와 엔터프라이즈 로컬 네트워크 i , 각각의 그린 네트워킹 기술의 에너지 효율성 향상도로서 식 (4)와 식 (5)를 통해 계산한다. 식 (4)의 $E_{r_{ECO}}(t)$, $E_{r_{BAU}}(t)$ 와 식 (5)의 $E_{e_{ECO}}(t)$, $E_{e_{BAU}}(t)$ 는 t 시간에 레지던셜 로컬 네트워크 i 와 엔터프라이즈 로컬 네트워크 i , 각각의 ECO와 BAU 상황의 에너지 효율성을 나타내며, 식 (6)과 식 (7)을 통해 도출된다.

$$R_{n_{e_i}}(t)_{ECO} = R_{n_{e_i}}(t)_{BAU} \cdot E_{R_i}(t) \quad (2)$$

$$E_{n_{e_i}}(t)_{ECO} = E_{n_{e_i}}(t)_{BAU} \cdot E_{E_i}(t) \quad (3)$$

$$E_{R_i}(t) = FR + (1 - FR) \left[\frac{E_{r_{ECO}}(t)}{E_{r_{BAU}}(t)} (1 - \alpha)^{\frac{t-t_0}{\tau}} \right] \quad (4)$$

$$E_{E_i}(t) = FR + (1 - FR) \left[\frac{E_{e_{ECO}}(t)}{E_{e_{BAU}}(t)} (1 - \alpha)^{\frac{t-t_0}{\tau}} \right] \quad (5)$$

식 (4)와 (5)에서 α 는 네트워크 장비의 연간 에너지 효율성 향상도 증가율로서 [17, 18]의 연구로부터 $\alpha=0.1$ 로 가정하며, τ 는 시간의 단위를 상쇄하기 위한 고유시간이다. 그러나 이 향상은 전체 네트워크에 모두 그린 네트워킹 기술이 적용되었을 경우의 에너지 효율성 향상율임으로 실제 에너지 효율성 향상도는 이보다 낮을 것이다. 따라서 제안 모델에서는 그린 네트워킹 기술이 적용되는 부분과 적용되지 않는 부분을 고려하기 위하여 FR 을 사용한다. FR 은 그린 네트워킹 기술이 영향을 미치지 않는 영역의 비율이다.

FR은 [19]에 의해 네트워크 장비의 연간 교체율이 평균 30%인 점을 고려하여 $FR \leq 1$ 로 가정한다. 그린 네트워킹 기술이 적용되어 영향을 미치는 부분인 $FR-1$ 에 대한 그린 네트워킹 기술의 에너지 효율성 향상도는 레지던셜 네트워크는 $E_{r_{ECO}}(t)/E_{r_{BAU}}(t)$ 로 엔터프라이즈 네트워크는 $E_{e_{ECO}}(t)/E_{e_{BAU}}(t)$ 로 나타내며, 각각 식 (6)과 식 (7)을 통해 계산된다. 이것은 로컬 네트워크 i 의 레지던셜과 엔터프라이즈 네트워크에서 BAU 상황에서와 ECO 상황에서, 각각의 계산된 값이 대입된다.

제안 모델에서는 그린 네트워킹 기술에 대해 네트워크 구조 기반의 에너지 효율성 정도를 반영한다. 네트워크 구조 기반의 에너지 효율성은 식 (6), 식 (7)과 같이 액세스 네트워크의 각 서브 네트워크의 에너지 효율성 정도를 더하여 계산한다.

$$E_r(t) = \rho \left(\frac{2hP_{TU_{op}}}{N_{CPE_{op}}(A_{P_{op}} + A_{I_{op}})} + \frac{P_{CPE_{op}} + P_{CPE_{pr}}}{A_{P_{op}} + A_{I_{op}}} \right) + (1-\rho) \left(\frac{2hP_{TU_{id}}}{N_{CPE_{id}}(A_{P_{id}} + A_{I_{id}})} + \frac{P_{CPE_{id}} + P_{CPE_{ft}}}{A_{P_{id}} + A_{I_{id}}} \right) \quad (6)$$

$$E_e(t) = \eta_{pr} \eta_c \left(\frac{P_{AS}}{C_{AS}} + \frac{P_{DS}}{C_{DS}} + \frac{P_{CS}}{C_{CS}} \right) \quad (7)$$

각 서브 네트워크의 에너지 효율성은 에너지 소모량에 대한 트래픽 처리능력(energy-to-capacity)의 비율로 정의한다. 식 (6)과 식 (7)에서 $E_r(t)$ 와 $E_e(t)$ 는 레지던셜과 엔터프라이즈 네트워크의 에너지 효율성으로 네트워크 구조에 따라 배치되는 각 장비 당 에너지 소모량에 대한 데이터 처리 능력(capacity)의 비율의 합으로 계산한다.

식 (6)에서는 옵티컬 기반 네트워크의 에너지 효율성과 전자 기반의 네트워크의 에너지 효율성을 구분하여 도출한다. 식 (6)에서 ρ 는 레지던셜 네트워크에 옵티컬 네트워크가 차지하는 비율로서 [20]에 의해 $\rho=0.16$ 으로 가정하며 h 는 냉각 및 전력 공급 장치에 의한 추가적인 오버헤드로 [9, 10]에 의해 $h=2$ 로 가정한다. 레지던셜 네트워크에서 에너지 효율성은 옵티컬 기반 네트워크와 전자 기반 네트워크 각각의 중앙 오피스 중단 장비(Central Office Terminal Unit : 이하 TU) 당 처리 능력에 대한 에너지 소모량 P_{TU} 와 가입자 대내 장비(CPE: Customer Premise Equipment) 당 처리 능력에 대한 에너지 소모량

P_{CPE} 의 합으로 계산한다. 이때 옵티컬 기반 네트워크와 전자 기반 네트워크 각각의 TU의 처리 능력은 이들 장비의 최대 접속률(Peak access rate) A_p 와 최저 접속률(Minimum access rate) A_l 의 평균값을 TU를 공유하는 대내 장비 수 N_{CPE} 의 곱으로 계산한다. 또한 가입자 대내 장비에서는 A_p 와 A_l 의 평균값에 대한 최대 접속율에서 에너지 소모량 P_{CPE_p} 와 최저 접속율에서 에너지 소모량 P_{CPE_l} 의 평균의 비로 계산한다.

식 (7)에서 η_{pr} 은 엔터프라이즈 네트워크의 프로비저닝(provisioning) 정도이며 η_c 는 엔터프라이즈 네트워크의 냉각을 위해 사용되는 에너지로서 [21]의 연구로부터 $\eta_{pr}=20$, $\eta_c=2$ 로 가정한다. 엔터프라이즈 네트워크의 에너지 효율성은 액세스, 분배, 코어 각 계층 스위치에 처리 능력(P_{AS} , P_{DS} , P_{CS})에 대한 평균 전력 소모량(C_{AS} , C_{DS} , C_{CS})의 비의 합으로 계산한다.

3.3 트래픽 유형 기반 모델

트래픽 유형 기반 모델은 ECO 상황에서 액세스 네트워크의 트래픽 유형별 에너지 소모량을 추정하고 이를 통한 그린 네트워킹 기술의 에너지 절약 잠재성을 예측한다. 이때 적용되는 그린 네트워킹 기술에 대해 트래픽 기반의 에너지 효율성 정도를 도출하여 반영한다. 트래픽 기반의 에너지 효율성은 액세스 네트워크 장비의 에너지 소모량이 트래픽 로드에게 대해 완전히 비례한 이상적인 경우를 1로 가정하였을 때, 그린 네트워킹 기술의 트래픽 로드에게 대한 에너지 소모량의 비례 정도(proportionality)를 계산하여 그린 네트워킹 기술의 에너지 효율성으로 나타낸다.

제안 모델은 연간 전체 유선 데이터 네트워크의 트래픽 발생량으로부터 트래픽 경로상의 서브 네트워크의 프로비저닝(provisioning) 정도를 통해 액세스 네트워크 장비들이 처리하는 트래픽 양을 추정한다. 그리고 그린 네트워킹 기술의 도입 후 에너지 감소량을 도출하기 위해 트래픽 기반의 에너지 효율성 정도를 반영하여 추정된 양의 트래픽을 처리하기 위한 에너지 소모량을 도출한다.

제안 모델의 t 시간에 상위 네트워크의 에너지 소모량 $E_T(t)$ 는 식 (8)에 의해 n 개의 레지던셜과 엔터프라이즈 로컬 네트워크 각각의 에너지 소모량의 합으로 계산한다. (9)의 $E_{T_j}(t)$ 는 t 시간에 상위 네트워크에서 유형 j 의 트래픽을 처리하기 위해 n 개의 레지던셜과 엔터프라이즈 로컬 네트워크 각각의 에너지 소모

량이다. 레지던셜과 엔터프라이즈 로컬 네트워크 i , 각각의 에너지 소모량은 식 (10)과 식 (11)에 의해 도출된다. 식 (10)과 식 (11)에서 $R_{i_T}(t)$ 와 $E_{i_T}(t)$ 는 레지던셜과 엔터프라이즈 로컬 네트워크 i 에서 m 개 유형의 트래픽을 처리하는데 소모되는 에너지양이다.

$$E_{T_i}(t) = \sum_{i=1}^n R_{i_T}(t) + \sum_{i=1}^n E_{i_T}(t) \quad (8)$$

$$E_{T_j}(t) = \sum_{i=1}^n R_{i_{T_j}}(t) + \sum_{i=1}^n E_{i_{T_j}}(t) \quad (9)$$

$$R_{i_T}(t) = \sum_{j=1}^m R_{iT_j}(t) \quad (10)$$

$$E_{i_T}(t) = \sum_{j=1}^m E_{iT_j}(t) \quad (11)$$

$R_{iT_j}(t)$ 와 $E_{iT_j}(t)$ 는 레지던셜과 엔터프라이즈 로컬 네트워크 i , 각각에서 유형 j 의 트래픽을 처리하는데 소모되는 에너지양으로 식 (12)와 식 (13)로 계산된다. 식 (12)와 식 (13)에서 T_j 는 t 시간에서 세계 유선 데이터 네트워크에서 발생하는 유형 j 의 트래픽 발생량이다. f_j 은 t 시간에 세계의 유형 j 의 트래픽 발생량 중에서 레지던셜과 엔터프라이즈 액세스 네트워크 i 에

서 처리되는 트래픽의 양을 추정하기 위한 변수이다.

식 (12)에서 E_{MB_i} 은 레지던셜 로컬 네트워크 i 에서 전자 기반 네트워크 장비가 1MB 트래픽 처리를 하는데 사용되는 평균 에너지 소모량이며, $E_{MB_{op}}$ 은 옵티컬 기반 네트워크 장비가 1MB 트래픽 처리를 하는데 사용되는 평균 에너지 소모량이다. 식 (13)에서 E_{MB_s} 는 엔터프라이즈 로컬 네트워크 i 에서 네트워크 장비가 1MB 트래픽 처리를 하는데 사용되는 평균 에너지 소모량이다.

제안 모델에서는 표 1에서와 같이 4개 ($m=4$)의 어플리케이션 트래픽 유형을 분류하고, j 유형의 트래픽 T_j 에 대해 f_j 값을 할당한다.

$$R_{iT_j}(t) = \frac{1}{p_{el}} (f_j T_j \times \frac{E_{r_i}}{W_r} \rho \times E_{MB_i}) + \frac{1}{p_{op}} (f_j T_j \times \frac{E_{r_i}}{W_r} (1-\rho) \times E_{MB_{op}}) \quad (12)$$

$$E_{iT_j}(t) = \frac{1}{p} (f_j T_j \times \frac{E_{e_i}}{W_e} \times E_{MB_s}) \quad (13)$$

표 1의 f_j 값은 [22]의 네트워크 경로 모델과 네트워크 프로비저닝(provisioning)모델을 참조하여 유형 j 트래픽 경로 상에 서브 네트워크들의 프로비저닝 정도 값들의 합에 대한 추정 대상 네트워크의 프로비

표 1. 액세스 네트워크의 트래픽 양의 추정 가중치
Table 1. Volume weights of traffic types in access networks

트래픽 유형	네트워크 유형	값 (f_j)
웹/이메일/데이터	레지던셜	$\frac{residential}{residential + metro/edge(\times 2) + long Haul + enterprise} = 0.01$
	엔터프라이즈	$\frac{enterprise}{residential + metro/edge(\times 2) + long Haul + enterprise} = 0.23$
비디오	레지던셜	$\frac{residential}{residential + metro/edge + long Haul + enterprise} = 0.02$
	엔터프라이즈	$\frac{enterprise}{residential + metro/edge + long Haul + enterprise} = 0.36$
파일 공유	레지던셜	$\frac{residential(\times 2)}{residential(\times 2) + metro/edge(\times 2) + long Haul} = 0.03$
	엔터프라이즈	$\frac{enterprise}{enterprise(\times 2) + metro/edge(\times 2) + long Haul} = 0.19$
인터넷 게임	레지던셜	$\frac{residential}{residential + metro/edge(\times 2) + long Haul + enterprise} = 0.01$
	엔터프라이즈	$\frac{enterprise}{residential + metro/edge(\times 2) + long Haul + enterprise} = 0.23$
기타	레지던셜	$\frac{residential}{residential + metro/edge(\times 2) + long Haul + enterprise} = 0.01$
	엔터프라이즈	$\frac{enterprise}{residential + metro/edge(\times 2) + long Haul + enterprise} = 0.23$

IV. 성능평가

저닝 정도의 비율로 계산한다. 식 (12)에서 E_r/W_r 는 BAU 상황에서 세계 레지던셜 액세스 네트워크의 에너지 소모량 중 레지던셜 로컬 네트워크 i 의 에너지 소모량의 비율이며, 식 (13)에서 E_c/W_c 는 엔터프라이즈 액세스 네트워크에 대한 것이다. 이것은 세계 액세스 네트워크의 트래픽 발생량으로부터 추정 대상이 되는 로컬 네트워크 i 의 트래픽 발생량을 도출하기 위한 값으로 EMEC^[6]를 통해 도출할 수 있다.

ρ 는 레지던셜 로컬 네트워크 i 중 옵티컬 기반 네트워크의 비율로 [20]에 의해서 $\rho=0.16$ 으로 가정한다. p 는 액세스 네트워크 장비의 에너지 효율성으로서 그린 네트워킹 기술의 트래픽 로드 에 대한 에너지 소모량의 비례 정도이다. 그림 1은 유선 액세스 네트워크 장비의 트래픽 로드 에 대한 에너지 소모량을 나타낸다. 이상적인 경우 트래픽 로드 μ 에 비례하여 에너지가 소모되며, 최대 트래픽 로드의 에너지 소모량 M 의 값은 가능한 작아야 한다. 그러나 네트워크 장비는 현실적으로는 붉은 색의 곡선으로 표시된 형태를 따르며, 최악의 경우 트래픽 로드 에 상관없이 네트워크 장비는 항상 M 의 에너지를 소모한다. 트래픽 기반의 에너지 효율성 p 는 그린 네트워킹 기술의 에너지 효율성 정도를 계산하며 식 (14)에 의해 유도된다.

이것은 그림 1에서 이상적인 경우 액세스 네트워크 장비의 트래픽 로드 μ 에 대한 에너지 소모량 총량(면적)을 그린 네트워킹 기술을 도입 후 측정된 총 에너지량(면적)으로 나눈 값으로 나타낸다. p 는 1에 가까울수록 그린 네트워킹 기술은 에너지 효율성이 높으며 $p=1$ 일 경우 트래픽 로드 에 대한 에너지 소모량은 완전히 비례한다. $p=0.5$ 일 경우는 최악의 경우로 트래픽 로드 에 상관없이 항상 최대 에너지를 소모한다.

$$p = \frac{0.5M}{\int_0^1 \Phi(\mu) d\mu} \quad (14)$$

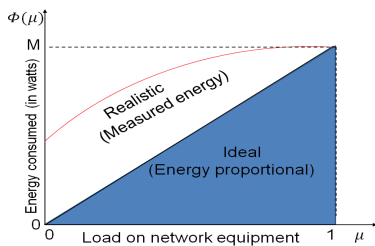


그림 1. 유선 액세스 네트워크 장비의 에너지 소모 형태
Fig. 1. ideal and realistic power characteristic of network equipment

본 절에서는 제안 모델과 J. B. 모델, R. B. 모델에 액세스 네트워크를 위한 대표적인 그린 네트워킹 기술로서 LPI(Low Power Idle)^[2, 3] 전송 기술을 적용하여 ECO 상황을 설정하고 정확성과 신뢰성 측면에서 비교 평가한다. 실험에서는 ECO 상황에서 제안 모델과 J. B. 모델 및 R. B. 모델의 에너지 소모량 추정치로부터 산출한 에너지 절감율이 LPI 전송 기술에서 제시한 에너지 절감율과 작은 차이를 보일수록, 정확성에 있어 우수함을 보인다고 가정한다. LPI 전송 기술은 이미 널리 알려진 표준 기술로서 신뢰성있는 에너지 절감율을 제시하고 있기 때문에 제안 모델의 정확성 판단의 기준으로 한다.

또한 OPNET 모듈러 시뮬레이션을 통해 에너지 소모량 추정치와 에너지 절감율을 산출하고 제안 모델과 기존 모델들의 추정치와 비교 평가한다. 실험에서는 2008년 LBNL(Lawrence Berkey National Laboratory)의 빌딩90^[7]과 동일한 네트워크 환경을 설

표 2. R. B. 모델의 실험값
Table 2. Values of parameters used in R. B. model

표기	의미	값
Φ_{imin}	네트워크 장비가 유휴(idle)상태에서 슬리핑(sleeping) 상태일 때 최소 에너지 소모량	2.3Wh
Φ_{amax}	네트워크 장비가 활동(active)상태 일때 최대 에너지 소모량	6.9Wh
ψ_{ctr}	컨트롤 플랜(Control Plane)에 의한 에너지 소모량의 비율	0.03
ψ_{data}	데이터 플랜(Data plane)에 의한 에너지 소모량의 비율	0.95 / 0.80
ψ_{cool}	냉각 및 전력 공급 장치에 의한 에너지 소모량의 비율	0.02 / 0.17
κ	냉각 및 전력 공급 장치에서 간접적인 에너지 절약 정도	0.15
S	이용 가능한 에너지 상태의 수	5
ν	에너지 상태들의 에너지 소모의 형태를 나타내는 변수	2
σ	유휴상태의 최적 효율성 형태를 나타내는 변수 (이상적인 경우 $\sigma=1$, 현실의 경우 $\sigma < 1$)	0.5
γ	에너지 상태들로부터 유휴상태의 최적화 의존도 변수(0일 경우 유휴로직(idle logic)은 에너지 상태를 완전히 불인식(unaware), 1일 경우 유휴로직이 없음)	0, 0.05
ξ	그린 네트워킹 기술의 이용 수준	0
$p_\lambda(\lambda)$	유입 트래픽 로드의 확률 분포	0.25
θ_d	액세스 네트워크의 장비들의 평균 중복정도(redundancy)	0
θ_l	액세스 네트워크의 링크들의 평균정도	0

표 3. J. B. 모델의 실험값
Table 3. Values of parameters used in J. B. model

표기	의미	값
A_p	가입자당 최대 접속율	55Mb/s
A_0	가입자당 평균 접속율	2Mb/s
M	초과 가입율	10
α	최신 기술을 통한 에너지 효율성 향상율	0.1
β	인터넷의 연간 트래픽 성장률	1.42

표 4. 네트워크 구조 기반 모델(YH_{ECO-N})의 실험 값
Table 4. Values of parameters used in YH_{ECO-N} model based network infrastructures

유형	표기	의미	값 (BAU/ECO)
레지던셜	$P_{CPE_{Ad}}$	미국과 캘리포니아의 최대 접속율에서 ADSL 댁내 장비 당 에너지 소모량	5.88/3.5 Wh
	$P_{CPE_{Ld}}$	미국과 캘리포니아의 최저 접속율에서 ADSL 댁내 장비 당 에너지 소모량	5.86/ 0.12 Wh
	A_{Pd}	미국과 캘리포니아의 네트워크의 댁내 장비의 최대 접속율	55Mb/s
	A_{Ld}	미국과 캘리포니아의 레지던셜 네트워크의 댁내 장비의 최저 접속율	0Mb/s
	ρ	미국과 캘리포니아의 옵티컬 기반 레지던셜 네트워크의 비율	0.16
엔터프라이즈	P_{AS}	LBNL 캠퍼스에서 액세스 스위치 당 평균 에너지 소모량	67/30.9 Wh
	P_{DS}	LBNL 캠퍼스의 분배 스위치 당 평균 에너지 소모량	110/50.8 Wh
	P_{CS}	LBNL 캠퍼스의 코어 스위치 당 평균 에너지 소모량	315/ 230.4 Wh

정하고 LPI 전송 기술을 적용했을 때 산출되는 결과와 제안 모델 및 기존 모델들의 추정치가 작은 차이를 보일수록 높은 정확성을 보인다고 할 수 있다. 또한 주요 변수의 설정에 따라 추정 에너지 절감율의 변화 정도가 작을수록 신뢰성이 높다.

J. B. 모델은 레지던셜 네트워크만을 고려하기 때문에 엔터프라이즈 네트워크에서는 R. B. 모델만을 비교 대상으로 한다. 실험에서는 LPI 전송 기술을 레지던셜 네트워크에서는 ADSL 홈 게이트웨이(home gateway) 장비에 모두 적용하는 것을 가정하고, 엔터프라이즈 네트워크에서는 전체 스위치에 적용하는 것을 가정한다. [23]에 따르면 ADSL은 저렴한 가격 때문에 세계의 유선 브로드밴드 레지던셜 액세스 네트워크 기술 중 63% 이상을 차지하고, 스위치는 세계

표 5. 트래픽 유형 기반 모델(YH_{ECO-T})의 실험 값
Table 5. Values of parameters used in YH_{ECO-T} model based traffic types

표기	의미					
	트래픽 유형	2008	2010	2012	2014	2016
T (PB/ Month)	파일 공유	2,361	4,943	6,155	6,044	6,599
	인터넷 게임	187	47	22	30	915
	인터넷 비디오	1,713	4,891	10,230	20,485	38,369
	웹 / 이메일 / 데이터	999	2,339	4,851	5,018	6,795
	기타	3,064	4,002	8,321	11,656	16,556
E_{MB}	1MB 트래픽을 처리하는데 소모하는 레지던셜(옵티컬/전자)과 엔터프라이즈 네트워크 장비의 에너지 소모량		레지던셜 : 0.0042/ 0.0014Wh 엔터프라이즈: 0.0002Wh			
	p	액세스 네트워크 장비의 에너지 효율성	1.97			

표 6. OPNET 실험 환경
Table 6. OPNET experimental setup

사용된 링크 전송률	10Mbps, 100Mbps, 1Gbps
활동상태의 포트 당 에너지 소비량	1.4Wh(100M), 2.3Wh(G)
저전력 유휴상태의 포트 당 에너지	0.14Wh(100M), 0.23(G)
패킷 수	1000개(1518byte)
장비 수	10/100 독립형 스위치 (8port) 70개, 10/1000 독립형 스위치 (24port) 13개
T_w (활동상태로의 전이 시간)	30.5 μ sec(100Base T), 16.5 μ sec(1000Base T)
T_s (저전력 유휴상태로의 전이 시간)	200 μ sec(100Base T), 182 μ sec(1000Base T)
T_f (당 패킷 전송 시간)	120 μ sec(100Base T), 12 μ sec(1000Base T)
최대 버퍼 크기	1000개의 패킷
트래픽 패턴	포아송기반 트래픽
버스트 크기	1, 100, 1000
포트 이용율 / 링크 이용율	40% / 20%

엔터프라이즈 네트워크 기술 중에서 50% 이상을 차지하는 기술로 에너지 절약 잠재성이 가장 많은 영역이다. 따라서 본 연구에서는 성능 평가와 더불어, 그린 네트워킹 기술의 영향 정도를 확인 할 수 있도록

두 가지 장비에 대한 사례를 가정하였다.

제안 모델과 기존 모델들의 에너지 절감량 분석 위한 실험값은 BAU 상황의 경우 [6]의 실험값과 동일한 값으로 설정하였고, ECO 상황에 대한 기존 모델들의 실험값은 표 2, 표 3과 같으며, [9], [11]의 설정을 따른다. 제안 모델의 실험값은 표 4, 표 5와 같다. 표 5에서 1MB 트래픽을 처리하는데 소모하는 네트워크 장비 당 에너지 소모량(E_{MB})은 [7]과 [24]에 따라 설정하고, 2008년도부터 2016년 트래픽 발생량은 [25-30]로부터 설정한다. 표 6은 OPNET 모듈러를 이용한 시뮬레이션의 실험값으로 [7]의 LBNL90 빌딩의 측정환경과 동일한 값으로 설정한다.

4.1 정확성 분석

그림 2의 (a-1)과 (a-2)는 미국 레지던셜 ADSL 네트워크의 에너지 소모량과 에너지 절감율의 추정치이다. ECO 상황에서 2008년 미국 레지던셜 ADSL 네트워크의 에너지 소모량은 YH_{ECO-N} 모델과 YH_{ECO-T} 모델은 각각 1TWh, 0.8TWh, J. B. 모델은 1.2TWh, R. B. 모델은 2.1TWh로 산출되었고, 연평균 에너지 소모량은 YH_{ECO-N} 모델과 YH_{ECO-T} 모델은

각각 1.1TWh, 0.8TWh, J. B. 모델은 1.3TWh, R. B. 모델은 2.4TWh로 산출되었다. 연평균 에너지 절감율은 YH_{ECO-N} 모델은 61%, YH_{ECO-T} 모델은 68%, J. B. 모델은 56%, R. B. 모델은 99%를 보인다. 이것은 LPI 전송 기술에서 제시하는 에너지 절감율 50~90%에 대해 연평균 오차율이 YH_{ECO-N} 모델은 27.3%, YH_{ECO-T} 모델은 32.5%, J. B. 모델은 16%, R. B. 모델은 44%를 보였다. J. B. 모델은 LPI 전송 기술에서 제시하는 에너지 절감율에 있어서는 제안 모델보다 더 근접한 수치를 나타낸다.

그림 2의 (b-1)은 ECO 상황에서 제안 모델과 R. B. 모델의 LBNL 캠퍼스 네트워크의 에너지 소모량 추정치를 비교한 것이다. YH_{ECO-N} 모델과 YH_{ECO-T} 모델은 2008년 각각 155MWh와 146MWh이고, R. B. 모델은 126MWh이다. YH_{ECO-N} 모델과 YH_{ECO-T} 모델의 에너지 소모량은 연간 약 3%의 감소를 보이나, R. B. 모델은 연간 약 10%의 증가율을 보인다.

그림 2의 (b-2)는 2008년부터 2016년까지 ECO 상황의 연평균 에너지 절감율을 나타낸 것으로, [6]으로부터 적용된 BAU 상황의 에너지 소모량과 그림 2

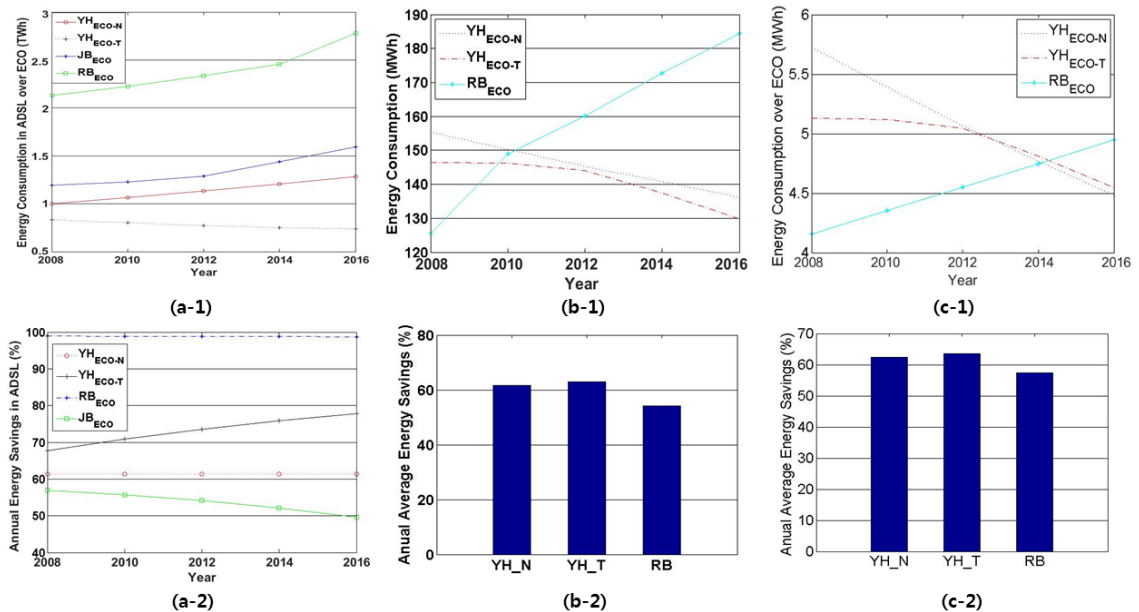


그림 2. (a-1) ECO 상황에서 미국 레지던셜 ADSL 네트워크 에너지 소모량, (a-2) ECO 상황에서 미국 ADSL 레지던셜 네트워크 연평균 에너지 절감율, (b-1) ECO 상황에서 LBNL 캠퍼스 네트워크 에너지 소모량, (b-2) ECO 상황에서 LBNL 캠퍼스 네트워크 연평균 에너지 절감율, (c-1) ECO 상황에서 LBNL 빌딩90 네트워크 에너지 소모량, (c-2) ECO 상황에서 LBNL 빌딩90 네트워크 연평균 에너지 절감율

Fig. 2. (a-1) Energy consumption of the USA's residential ADSL over ECO scenarios, (a-2) Annual energy savings of the USA's residential ADSL over ECO scenarios, (b-1) Energy consumption of LBNL campus networks over ECO scenarios, (b-2) Annual energy savings of LBNL campus networks over ECO scenarios, (c-1) Energy consumption of LBNL building90's networks over ECO scenarios, (c-2) Annual energy savings of LBNL Building90's networks over ECO scenario

(b-1)의 ECO 상황의 에너지 소모량으로부터 도출된 것이다. YH_{ECO-N} 모델과 YH_{ECO-T} 모델은 각각 62%와 63%, R. B. 모델은 54%의 에너지 절감율을 보이며, LPI 전송 기술에서 제시한 절감율과의 연평균 오차율은 YH_{ECO-N} 모델은 27%, YH_{ECO-T} 모델은 28%, R. B. 모델은 24%로서, 세 모델 모두 유사한 차이를 보인다.

그림 2의 (c-1)과 (c-2)는 LBNL 빌딩90의 전체 스위치에 LPI 전송 기술을 적용 후 에너지 소모량과 절감율을 나타낸 것이다. 2008년 YH_{ECO-N} 모델과 YH_{ECO-T} 모델의 에너지 소모량은 각각 5.7MWh, 5.1MWh, R. B. 모델은 4.2TWh로 산출되었고, YH_{ECO-N} 모델과 YH_{ECO-T} 모델은 각각 연평균 5.9%, 3%의 증가율을, R. B. 모델은 4.5%의 증가율을 나타내었다. 그림 2의 (c-2)에서와 같이 연평균 에너지 절감율은 YH_{ECO-N} 모델과 YH_{ECO-T} 모델은 각각 62%, 64%, R. B. 모델은 57%를 나타내었다. LPI 전송 기술의 에너지 절감율과의 연평균 오차율은 YH_{ECO-N} 모델과 YH_{ECO-T} 모델이 모두 28%, R. B. 모델이 26%로 세 모델 모두 유사한 차이를 보인다.

표 7과 표 8은 앞서 설명한 실험 결과를 정리한 것이다. LPI 전송 기술에서 제시된 에너지 절감율과 비교할 때 제안 모델이 R. B. 모델보다는 낮은 오차율을 보이며, J. B. 모델보다는 높은 오차율을 보인다. 그러나, 본 실험에서 ECO 상황의 에너지 절감량을 산출하는데 있어 베이스라인(baseline)이 되는 BAU 상황의 에너지 소모량 추정치를 살펴 볼 필요가 있다. [6]에 따르면, BAU 상황에 대해 제안 모델에서 적용한 EMEC로부터의 에너지 소모량과 J. B. 모델로부터의 에너지 소모량을 LBNL 실측 데이터^[7] 비교했을 때 오차율이 EMEC는 8.7%, J. B. 모델은 25.7%, CEC 조사 데이터^[8]와 비교했을 때 오차율은 EMEC는 3.6%, J. B. 모델이 42.5%로 EMEC로부터 산출한 에너지 소모량이 정확성에 있어 더 우수하였다. 따라서 BAU 상황에서 J. B. 모델의 에너지 소모량의 오차율에 비해서는 표 8의 제안 모델에서의 에너지 절감율의 오차율은 작은 범위라고 할 수 있다. 또한 J. B. 모델은 레지던셜 네트워크만을 대상으로 모델링을 하였기 때문에 ECO 상황에서의 정확성과 확장성에 있어서 Y. H 모델이 우수하다고 할 수 있다.

그림 3의 (a)와 (b)는 2008년 LBNL 빌딩90^[7] 전체 네트워크와 동일한 네트워크 환경을 가정하며 OPNET 모듈러에서 ECO 상황을 가정하여 실험하였을 때 에너지 소모량의 측정 결과이다. 그림 3의 (a)는

표 7. ECO 상황에서 모델링 기법에 의한 추정 에너지 절감율 비교
Table 7. Annual energy savings by models over ECO scenarios

모델 구분 네트워크 형태	YH_{ECO-N}	YH_{ECO-T}	J. B.	R. B.
미국 ADSL	61%	68%	56%	99%
LBNL 캠퍼스	62%	63%	-	54%
LBNL 빌딩90	62%	64%	-	57%
평균	62%	65%	56%	70%

표 8. LPI 전송 기술에서 제시된 에너지 절감율과의 오차율
Table 8. Error rates by LPI's energy saving rate

모델 구분 네트워크 형태	YH_{ECO-N}	YH_{ECO-T}	J. B.	R. B.
미국 ADSL	27.3%	32.5%	16%	44%
LBNL 캠퍼스	30%	28.3%	-	45%
LBNL 빌딩90	27.7%	28.3%	-	25.5%
평균	28%	30%	16%	38%

스위치에 LPI 전송 기술을 적용하였을 때, 버스트 크기(Burst Length)를 달리하며 트래픽 로드에서 에너지 소모량을 측정된 결과이다. 버스트 크기를 크게 할수록 에너지 소모량은 트래픽 로드에서 비례한 형태를 나타내며 이것은 버스트 크기를 크게 할수록 에너지 효율성이 높아짐을 의미한다. 이러한 에너지 소비 형태를 보이는 이유는 버스트 크기가 클수록 활동 상태에서 한 번에 보낼 수 있는 패킷의 수가 많아지고, 이것은 유휴상태와 활동상태의 전환의 횟수가 줄어들기 때문에 빈번한 상태 전환에 따른 오버헤드가 줄어 에너지 효율성이 높아지기 때문이다.

그림 3의 (a)에서와 같이 BAU 상황에서는 트래픽 로드와 관계없이 항상 동일한 12MWh의 에너지 소비량을 보이는 반면, 유입 트래픽이 없을 경우 최저 에너지 소모량은 약 2MWh이며 최대 트래픽 로드에서는 약 12MWh의 에너지 소비 형태를 보인다. 그림 3의 (b)는 포트 이용률에 따른 에너지 소비량을 나타낸다. BAU 상황에서는 포트 이용율에 관계없이 항상

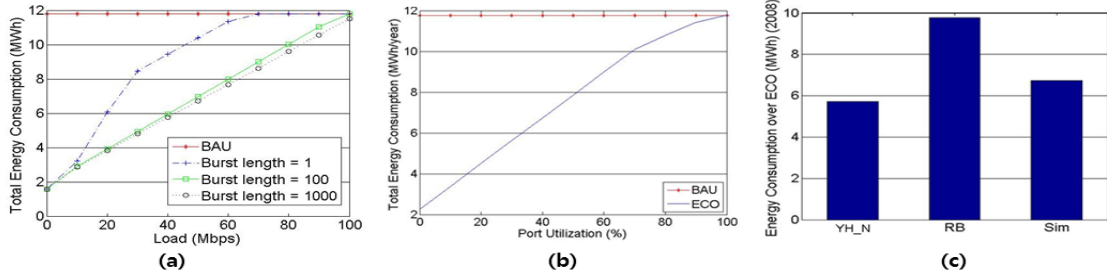


그림 3. (a) ECO 상황에서 LBNL 빌딩90 네트워크의 트래픽 로드에서 따른 에너지 소모량, (b) ECO 상황에서 LBNL 빌딩90 네트워크의 포트 이용률에 따른 에너지 소모량, (c) 2008년 ECO 상황에서 LBNL 빌딩90 네트워크의 에너지 소모량
 Fig. 3. (a) Total energy consumption of LBNL building90 by traffic loads over ECO scenarios, (b) Total energy consumption of LBNL building90 by port utilizations over ECO scenarios, (c) Energy consumption of LBNL building90's networks in 2008 over ECO scenarios

최대 에너지 소비량을 보이는 반면 LPI 전송 기술에서는 포트 이용률에 비례한 에너지 소비 형태를 보인다.

그림 3의 (c)는 2008년 LBNL 빌딩90의 에너지 소모량과 동일하게 20%의 링크 로드와 40%의 포트 이용률 버스트 크기를 1000으로 하였을 때 OPNET 모델러부터의 측정치(이하 Sim)와 YH_{ECO-N} 모델과 R. B. 모델의 에너지 소모량을 나타낸다. Sim의 6.7MWh에 대해 YH_{ECO-N} 모델은 5.7MWh, R. B. 모델은 9.2MWh로 Sim과의 차이량은 YH_{ECO-N} 모델은 1MWh, R. B. 모델은 2.5MWh로서, YH_{ECO-N} 모델의 오차율은 15%로 R. B. 모델의 오차율은 37%를 보인다. 에너지 절감율에 있어서는 Sim이 63%, YH_{ECO-N} 모델은 54%, R. B. 모델은 58%로 Sim과의 오차율은 YH_{ECO-N} 모델이 14%, R. B. 모델은 9%로 R. B. 모델이 Sim에 더 가까운 수치를 보였다. 그러나 ECO 상황의 에너지 절감율 산출의 기반이 되는 BAU 상황에서의 에너지 소모량 추정치의 정확성은

YH_{ECO-N} 모델에서 사용하고 있는 $EMEC^{[6]}$ 가 R. B. 모델 보다 더 우수함을 나타내었다. LBNL 빌딩90의 에너지 소모량 실측치^[7] 및 Sim 결과로부터 $EMEC^{[6]}$ 와 R. B. 모델의 에너지 소모량 추정치를 비교했을 때, 각각 평균 0.3%, 21.7%의 오차율을 보였기 때문에 전체적으로는 YH_{ECO-N} 모델이 R. B. 모델이 보다 정확성에 있어 우수하다고 할 수 있다.

4.2 신뢰성 분석

그림 4의 (a)는 2008년 미국 레지던셜 네트워크 대해 J. B. 모델과 R. B. 모델에서 산출한 장비 수 및 가입자 수에 따른 에너지 소비량의 변화 정도를 나타낸다. ECO 상황에서의 에너지 소비량에 있어서 J. B. 모델은 큰 폭의 변화를 보였으며 주요 변수인 장비 수 및 가입자 수에 따라 추정된 에너지 소모량이 매우 큰 편차를 가질 것으로 예상된다.

그림 4의 (b)는 장비 수 및 가입자 수에 대한 J. B. 모델과 R. B. 모델로부터 산출한 에너지 소모량의 표준편차를 나타낸 것으로 표준편차가 0에 가까울수록

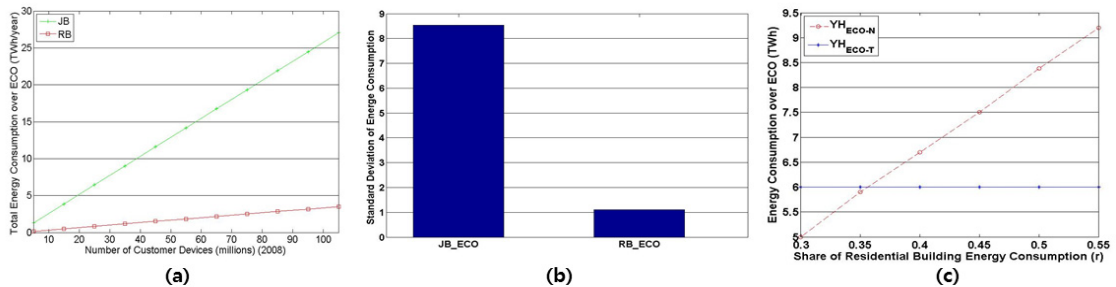


그림 4. (a) ECO 상황에서 장비 수에 따른 미국 레지던셜 네트워크의 에너지 소모량, (b) ECO 상황에서 장비 수에 따른 추정 에너지 소모량의 표준편차, (c) 제안 모델의 변수 r에 대한 미국 전체 레지던셜 네트워크의 에너지 소모량
 Fig. 4. (a) Total energy consumption of the USA's residential networks by number of customer devices over ECO scenarios, (b) Standard deviation of total energy consumption of the USA's residential networks by number of devices over ECO scenarios, (c) Total energy consumption of the USA's residential networks by parameter r in Y. H. models over ECO scenarios

모델링 기법은 더 신뢰성이 높다. 그림 4의 (b)와 같이 J. B. 모델의 표준편차는 8.5, R. B. 모델의 표준편차는 1로서, J. B. 모델은 R. B. 모델에 비해 매우 낮은 신뢰성을 보인다.

그림 4의 (c)는 제안 모델에서 주요 변수인 전체 에너지 소모량 중 레지던셜 빌딩에서 소모되는 에너지의 비율을 나타내는 변수 r 에 따른 2008년 미국 레지던셜 네트워크의 에너지 소모량의 변화 정도를 나타낸다. 미국 전체 에너지 소모량 중 레지던셜 빌딩에서 소모하는 에너지의 비율은 조사 기관에 따라 약 30%~55%의 수치를 나타내는데 이에 따른 추정 에너지 소모량의 표준편차는 0에 가까울수록 신뢰성이 높다. YH_{ECO-N} 모델은 1.5, YH_{ECO-T} 모델은 0의 표준편차를 보이며 두 제안 모델은 평균 0.75의 표준편차를 가진다. 이때 YH_{ECO-T} 모델은 주요 변수 r 의 반영이 세계 레지던셜 네트워크의 에너지 소모량에 대한 레지던셜 로컬 네트워크의 에너지 소모량의 비율로서 다시 환산하여 적용되기 때문에 변수 r 이 에너지 소모량에 영향을 미치지 않아 0의 표준편차를 보인다. 이것은 장비 수 및 장비 당 전력에 따라 평균 1.32의 표준편차를 보이는 J. B. 모델과 2.54의 표준편차를 보이는 R. B. 모델에 비해 더 우수한 신뢰성을 보인다.

표 9는 앞서 설명한 모델링 기법들의 주요 변수 설정에 따른 미국 레지던셜 네트워크의 추정 에너지 소모량의 표준편차를 정리한 것으로 표준편차가 0에 가까울수록 신뢰성이 더 높다. 표 9에서와 같이 각 모델들의 평균 표준편차는 YH_{ECO-N} 모델이 0.6, J. B. 모델이 4.91, R. B. 모델이 1.8로서 비교 모델링 기법 중 YH_{ECO-N} 모델이 신뢰성에 있어 우수함을 보인다.

표 9. 주요 변수에 설정 따른 에너지 소모량의 표준편차
Table 9. Standard deviation of total energy consumption by critical parameters in models

모델 구분	YH_{ECO-N}	J. B.	R. B.
네트워크형태			
장비 수에 따른 표준편차	-	8.5	1
장비 당 에너지 소모량에 따른 표준편차	0.38	1.32	2.54
레지던셜 빌딩의 에너지 소모 비율에 따른 표준편차	0.75	-	-
평균	0.6	4.91	1.8

V. 결 론

본 논문에서는 그린 네트워킹 기술 적용을 통한 에

너지 절약 잠재성을 예측하는 모델링 기법을 제안하였다. 제안 모델은 다양한 모델링 환경과 요구사항을 고려하기 위해 네트워크 구조 기반과 트래픽 유형 기반의 모델링 방식을 제안하였다.

상향식(bottom-up) 접근 방식을 취하는 기존의 모델들은 주요 변수로 가입자가 공유하는 종단 장비의 수나 표본으로 수집된 장비 당 에너지 소모량의 합산을 통해 액세스 네트워크의 에너지 절약 잠재성을 추정한다. 그러나 이러한 방식은 장비 수에 대한 정확한 파악이 어렵고, 모델 별로 차이가 큰 장비 당 에너지 소모량을 모두 고려할 수 없다. 또한 기존의 모델들은 대규모 액세스 네트워크나 엔터프라이즈 네트워크에서는 적용이 어렵다.

기존 모델들은, 특정한 네트워크 기술과 시나리오에 의존하는 경우가 많아, 세부 변수의 설정이 매우 복잡하여 사용이 용이하지 않고 다양한 네트워크 환경에서의 적용이 어렵다. 따라서 기존의 모델들은 대규모 네트워크에서의 적용이 어려워, 개별 장비나 소규모 네트워크를 기반으로 하는 경우가 많고, 이러한 점에서 확장성과 범용성에 있어 한계를 가진다.

기존에 제안된 모델들은 현재의 에너지 소모량에 대한 추정만을 고려하거나, 전체적인 연평균 에너지 효율성 향상도를 추정하여 에너지 절약 잠재성을 추정한다. 그러나 이러한 방식은 그린 네트워킹 기술별로 차이가 많은 에너지 효율성 향상도를 정교하게 고려하지 못하기 때문에 신뢰성이 부족하고, 기술별 에너지 절약 잠재성의 비교 평가에는 활용되기 어렵다. 또한 그린 네트워킹 기술을 통한 에너지 효율성 향상을 정교하게 고려한 모델에서도 특정한 그린 네트워킹 기술의 동작에 의존함으로써 세부 설정 값이 매우 많고, 향후 개발될 수 있는 새로운 기술들에 대한 적용이 어렵다.

본 연구에서는 하향식(Top-down) 접근법을 사용하여 그린 네트워킹 기술을 통한 대규모 유선 액세스 네트워크의 에너지 절약 잠재성을 추정하는 모델을 제안하였다. 제안 모델은 다양한 네트워크 환경과 요구사항을 고려하기 위해 네트워크 구조 기반과 트래픽 유형 기반의 두 가지 모델로 구성된다. 제안 모델은 로컬 네트워크가 위치한 지리적 영역을 기반으로 에너지 절약 잠재성을 추정하기 때문에 특정한 네트워크 장비 및 기술에 제한되지 않고, 지속적인 네트워크 연결성을 지원하기 위한 에너지 소모 외에 추가적 에너지 소비원과 네트워크 중복성을 고려할 수 있다.

본 연구에서는 성능평가를 위해 그린 네트워킹 기술로서, IEEE 802.3az^[4] EEE(Energy Efficient

Ethernet) 표준 기술인 LPI(Low Power Idle) 전송 기술을 제안 모델과 대표적인 기존의 수학적 모델인, J. B. 모델과 R. B 모델에 적용하였다. 그 결과, LPI 전송 기술에서 제시한 에너지 절감율과 평균 오차율에 있어 네트워크 구조 기반 모델은 28%, 트래픽 유형 기반 모델은 30%, J. B 모델, R. B. 모델 각각 16%, 38%를 보였다. 제안 모델은 에너지 절감율에 있어서는 J. B. 모델보다는 높은 오차율을 보였으나, J. B. 모델은 베이스라인(baseline)이 되는 BAU 상황으로부터의 에너지 소모량 추정치가 제안 모델이 사용하고 있는 EMEC(Estimation Model of Energy Consumption)^[6]보다 낮은 정확성을 가진다. EMEC와 J. B. 모델의 BAU 상황에서 에너지 소모량 추정치는 LBNL(Lawrence Berkeley National Laboratory)^[7] 실험데이터와 오차율이 각각 8.7%, 25.7%이며, CEC(California Energy Commission)^[8] 조사 데이터와의 오차율이 각각 3.6%, 42.4%로 J. B. 모델의 정확성이 EMEC보다 낮다. 또한 J. B. 모델은 레지던셜 네트워크에 대해서만 대상으로 모델링하였기 때문에, 제안 모델이 전체적으로는 기존 모델들보다 정확성과 확장성에 있어서 더 우수하다고 할 수 있다.

또한, OPNET 시뮬레이션 결과에서 에너지 소모량과의 오차율은, 제안 모델은 15%, R. B. 모델은 37%를 보여 제안 모델이 정확성에 있어 기존 모델보다 우수한 것을 확인하였다. 주요 변수 설정에 따라 추정되는 에너지 소모량의 표준편차의 경우, 제안 모델과 J. B 모델, R. B. 모델은 각각 평균 0.6, 4.91, 1.8로 제안 모델이 0에 더 가까운 값을 보여 신뢰성에 있어서도 제안 모델이 기존 모델들보다 우수함을 보였다. 제안 모델에서는 전체적인 에너지 절약 잠재성 뿐 아니라, 기존 모델에서는 제공하고 있지 않은 트래픽 유형별 에너지 소모량과 절감율에 대한 산출이 가능함으로 다양한 모델링 환경의 반영이 가능하고, 네트워크 관리 정책 결정과 그린 네트워킹 기술 도입에 있어 판단의 기준으로 활용될 수 있다. 제안 모델은 기존 모델들과 비교할 때 네트워크 규모에 대한 제약이 없고, 변수 설정이 용이하면서도, 기존 모델들보다 우수한 정확성과 신뢰성을 가진다. 따라서 제안 모델은 그린 네트워킹 기술 적용을 위한 상대적인 비교에 있어서는 더욱 유용하게 사용될 수 있어, 그린 인터넷으로의 전환을 가속화하는데 널리 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

그러나 제안 모델을 포함하여 오늘날 대부분의 모델링 방식에서는 액세스 네트워크에서 노드의 에너지 소모량에 대해서만 고려하고, 링크의 에너지 소모량은

고려하지 않기 때문에 실제 액세스 네트워크의 에너지 소모량과 절감량의 절대적인 수치에 있어서는 모델의 적용 환경에 따라 상이한 결과를 나타낼 수 있다. 따라서 향후 연구 과제로서 유선 네트워크의 세부적인 환경 요소를 고려한 더욱 정교한 모델 개발이 필요하며 연구 결과를 일반화하기 위한 다양한 사례 연구가 요구된다.

References

- [1] R. Bolla, R. Bruschi, F. Davoli, and F. Cucchietti, "Energy efficiency in the future Internet: A survey of existing approaches and trends in energy-aware fixed network infrastructures," *IEEE Commun. Surveys & Tuts.*, vol. 13, no. 2, pp. 223-244, 2011.
- [2] V. Sivaraman, P. Reviriego, Z. Zhao, A. Sanchez-Macian, A. Vishwanath, J. A. Maestro, and C. Russell, "An experimental power profile of energy efficient ethernet switches," *Computer Commun.*, vol. 50, pp. 110-118, 2014.
- [3] R. Hays, Active/idle toggling with 0BASE-x for energy efficient ethernet, in: presentation to the IEEE 802.3az Task Force, Nov. 2007.
- [4] IEEE WG802.3, IEEE Std 802.3az: Energy Efficient Ethernet, IEEE Computer Society, 2010.
- [5] A. P. Bianzino, C. Chaudet, D. Rossi, and J. Rougier, "A survey of green networking research," *IEEE Commun. Surveys & Tuts.*, vol. 14, no. 1, pp. 3-20, 2012.
- [6] Y. H. Suh and K. Y. Kim. "Estimation modelling of energy consumption and anti-greening impacts in large-Scale wired access networks," *J. KICS*, vol. 41, no. 08, pp. 928-941, 2016.
- [7] S. Lanzisera, B. Nordman, and R. Brown, "Data network equipment energy use and savings potential in buildings," *Energy Efficiency*, vol. 5, no. 2, pp. 149-162, 2012.
- [8] CEC(California Energy Commission), *Small Network Equipment*, CEC, 2013.
- [9] J. Baliga, R. Ayre, W. V. Sorin, K. Hinton, and R. S. Tucker, "Energy consumption in

- optical IP networks,” *J. Lightwave Technol.*, vol. 27, no. 13, pp. 2391-2403, 2009.
- [10] S. Lambert, W. V. Heddeghem, W. Vereecken, B. Lannoo, D. Colle, and M. Pickavet, “Worldwide electricity consumption of communication networks,” *Optics Express*, vol. 20, no. 26, pp. B513-B524, 2012.
- [11] R. Bolla, R. Bruschi, A. Carrega, F. Davoli, D. Suino, C. Vassilakis, and A. Zafeiropoulos, “Cutting the energy bills of Internet Service Providers and telecoms through power management: An impact analysis,” *Computer Networks*, vol. 56, pp. 2320-2342, 2012.
- [12] 2014 ECONET Consortium low Energy COnsumption NETworks (ECONet) Deliverable D6.5 Benchmarking and Performance Evaluation Result(2014), Retrieved Jul., 12, 2018, from <http://www.econet-project.eu>
- [13] R. Bolla, *ECONet low Energy Consumption NETworks*, Presentation at National Inter-University Consortium for Telecommunications (CNIT), 2010.
- [14] C. Gunaratne, K. Christensen, and B. Nordman, “Managing energy consumption costs in desktop PCs and LAN switches with proxying, split TCP connections, and scaling of link speed,” *Int. J. Network Management*, vol. 15, no. 5, pp. 297-310, 2005.
- [15] C. Gunaratne, K. Christensen, S. Suen, and B. Nordman, Reducing the energy consumption of ethernet with an adaptive link rate (ALR), *IEEE Trans. Comput.*, vol. 57, no. 4, pp. 448-461, 2008.
- [16] K. Hinton, J. Baliga, M. Feng, R. Ayre, and R. S. Tucker, “Power consumption and energy efficiency in the Internet,” *IEEE Network*, vol. 25, no. 2, pp. 6-12, 2011.
- [17] V. C. Coroama, C. Schien, C. Preist, and L. M. Hilty, “The energy intensity of the internet: Home and access networks ICT innovations for sustainability,” *Advances in Intell. Syst. Comput.*, vol. 310, pp. 137-155, 2015.
- [18] T. N. David, Photonics for switching and routing, *IEEE J. Sel. Topics in Quantum Electron.*, vol. 12, no. 4, pp. 669-678, 2006.
- [19] IDC(International Data Corporation), Updated Worldwide Router Market Forecast and Analysis, 2001-2006, IDC, 2002.
- [20] P. Cota and T. Pavicic, “New technologies for improvement of characteristics in DSL access networks,” in *Proc. Int. Convention on Inf. and Commun. Technol.*, pp. 511-516, Opatija, Croatia, May 2011.
- [21] M. Stansberry and J. Kudritzki, *2012 Data Center industry survey technical report*, Uptime Institute, 2012.
- [22] D. C. Kilper, G. Atkinson, S. K. Korotky, and S. Goyal, “Power Trends in Communication Networks,” *IEEE J. Selected Topic in Auantum Electron.*, vol. 17, no. 2, pp. 275-284, 2011.
- [23] Y. H. Suh, K. Y. Kim, A. R. Kim, and Y. T. Shin, “A study on impact of wired access networks for green Internet,” *J. Network and Computer Appl.*, vol. 57, pp. 156-168, 2015.
- [24] J. Baliga, R. W. Ayre, K. Hinton, and R. S. Tucker, “Energy consumption in wired and wireless access networks,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 49, no. 6, pp. 70-77, 2011.
- [25] Cisco Systems, Inc. Cisco Visual Networking Index: Forecast and Methodology 2007-2012, Cisco Systems, Inc. 2008.
- [26] Cisco Systems, Inc. Cisco Visual Networking Index: Forecast and Methodology 2008-2013, Cisco Systems, Inc. 2009.
- [27] Cisco Systems, Inc. Cisco Visual Networking Index: Forecast and Methodology 2010-2015, Cisco Systems, Inc. 2011.
- [28] Cisco Systems, Inc. Cisco Visual Networking Index: Forecast and Methodology 2012-2017, Cisco Systems, Inc. 2013.
- [29] Cisco Systems, Inc. Cisco Visual Networking Index: Forecast and Methodology 2014-2019, Cisco Systems, Inc. 2015.
- [30] Cisco Systems, Inc. Cisco Visual Networking Index: Forecast and Methodology 2016-2021, Cisco Systems, Inc. 2017.

서 유 화 (Yuhwa Suh)



2003년 2월 : 숭실대학교 컴퓨터 학부 졸업

2005년 8월 : 숭실대학교 일반 대학원 컴퓨터학과 석사

2007년 11월~2009년 10월 : 정보통신연구진흥원((현)정보통신산업진흥원) 연구원

2016년 2월 : 숭실대학교 일반대학원 컴퓨터학과 박사

2016년 3월~현재 : 서일대학교 정보통신과 조교수
<관심분야> 그린네트워킹, 유무선통신, 네트워크보안

김 기 영 (Kiyoung Kim)



1996년 2월 : 상지대학교 전자계산학과 졸업

1995년~1997년 2월 : 삼보정보통신 기술연구소 연구원

1999년 2월 : 숭실대학교 일반 대학원 컴퓨터학과 석사

2003년 8월 : 숭실대학교 일반 학원 컴퓨터학과 박사

2004년 3월~현재 : 서일대학교 소프트웨어공학과 부교수

<관심분야> 모바일 컴퓨팅, 사물인터넷, ITS, 네트워크보안

김 은 회 (Eunhoe Kim)



1998년 8월 : 숭실대학교 일반 대학원 컴퓨터학과 석사

2006년 8월 : 숭실대학교 일반 대학원 컴퓨터학과 박사

2007년 8월~2012년 2월 : 숭실대학교 정보미디어기술연구소, 지능형로봇연구소 전임 연구원

2013년 3월~현재 : 서일대학교 소프트웨어공학과 조교수

<관심분야> IoT, 분산처리, 클라우드 컴퓨팅