

# 대규모 유선 액세스 네트워크 환경에서 에너지 소모량과 안티그리닝 영향도 추정 모델링 기법

서유화\*, 김기영<sup>o</sup>

## Estimation Modelling of Energy Consumption and Anti-greening Impacts in Large-Scale Wired Access Networks

Yuhwa Suh\*, Kiyoung Kim<sup>o</sup>

### 요약

유선 데이터 네트워크(wired data network) 영역에서 가장 많은 에너지를 요구하는 영역은 액세스 네트워크(access network) 영역이다. 오늘날 그린 네트워킹(Green networking)은 유선 데이터 네트워크에서도 통합적인 에너지 관리를 통해 에너지 낭비와 CO<sub>2</sub> 배출 감소를 유도하기 위해 주요 관심분야가 되었다. 그러나 유선 액세스 네트워크의 에너지 소모량과 CO<sub>2</sub> 배출에 의한 환경적 영향에 대해서는 널리 알려져 있지 않으며, 그에 따른 범용적이고 정량적인 평가 기준도 매우 부족하다. 본 논문에서는 유선 액세스 네트워크의 에너지 소모량을 추정하는 기존의 모델링 기법들의 문제점을 비교 분석하고 하향식(top-down) 접근법을 이용하여 대규모 유선 액세스 네트워크의 에너지 소모량을 추정하는 모델링 기법을 제안한다. 또한 제안 모델로부터 도출된 추정치를 이용하여 액세스 네트워크들이 환경에 미치는 영향도를 산출하는 모델을 제안한다. 그리고 실제 사례를 적용하여 기존 모델과 제안 모델로부터 산출한 추정치와 해당 사례에 대한 기존의 조사와 실측 데이터와 비교 평가 한다

**Key Words** : Energy consumption, Access network, CO<sub>2</sub> emission, Green networking, Wired data network

### ABSTRACT

Energy consumption of today's wired data networks is driven by access networks. Today, green networking has become a issue to reduce energy wastes and CO<sub>2</sub> emission by adding energy managing mechanism to wired data networks. However, energy consumption and environmental impacts of wired access networks are largely unknown. In addition, there is a lack of general and quantitative valuation basis of energy use of large-scale access networks and CO<sub>2</sub> emissions from them. This paper compared and analyzed limits of existing models estimating energy consumption of access networks and it proposed a model to estimate energy consumption of large-scale access networks by top-down approach. In addition, this work presented models that assess environmental(anti-greening) impacts of access networks using results from our models. The performance evaluation of the proposed models are achieved by comparing with previous models based on existing investigated materials and actual measured values in accordance with real cases.

\* First Author : Department of Information and Communication, Seoil University, 5syh@seoil.ac.kr, 정회원

<sup>o</sup> Corresponding Author : Department of Computer Software, Seoil University, ganet89@seoil.ac.kr, 정회원

논문번호 : KICS2016-07-146, Received July 12, 2016; Revised July 22, 2016; Accepted July 25, 2016

## I. 서 론

오늘날 그린 네트워킹(Green networking)은 유선 데이터 네트워크의 에너지 낭비와 CO<sub>2</sub> 배출을 감소시키기 위해 주요 관심 분야가 되었다. [1, 2]에 따르면 오늘날 세계 유선 데이터 네트워크에 의한 에너지 소모량은 2011년의 경우 약 62TWh에 달하며, CO<sub>2</sub> 배출량은 0.1GtCO<sub>2</sub>e로 무선 네트워크의 배출량과 동일한 양이다. 그러나 유선 데이터 네트워크 장비에서 소모되는 에너지와 CO<sub>2</sub> 배출에 대한 연구는 무선 네트워크나 데이터 센터 및 사용자 단말 장비에 대한 연구<sup>[3-5]</sup>에 비해 상대적으로 부족한 실정이다.

오늘날 유선 데이터 네트워크에서 에너지 낭비의 주된 원인은 전통적인 네트워크 시스템의 설계 원리에 있다. 전통적인 네트워크 장비들은 최대 네트워크 처리량(throughput)과 최소 지연을 주요 목표로, 최대 로드(load)에서 성능 저하 상황들을 견디도록 설계되었고, 이 능력들은 일반적인 조건에서는 충분히 사용되지 않는다<sup>[6]</sup>. 따라서 네트워크 장비들은 유휴시간에조차 소비되는 많은 양의 에너지로 인해 높은 에너지 비용을 가지며, 이러한 이유로 네트워크 장비의 에너지 소모량에 관련된 문제는 에너지 절약을 위한 잠재성이 큰 영역이다.

오늘날 유선 데이터 네트워크의 에너지 요구량은 사용자 단말 장비를 제외하면, 액세스 네트워크에 의해 지배된다. [7]에 따르면, 오늘날 전형적인 유선 데이터 네트워크 구조에서 트랜스포트(transport) 및 코어(core) 네트워크 장비는 전체 유선 데이터 네트워크 에너지 요구량의 약 30%를 차지하고 액세스 네트워크 장비에서는 70%를 차지한다. 이것은 비록 장비 당 에너지 소모량이 액세스 네트워크 장비가 트랜스포트/코어 네트워크 장비의 에너지 소모량의 1/6 밖에 되지 않더라도, 액세스 네트워크의 장비 밀집도(장비의 수)가 트랜스포트/코어 장비보다 매우 높기 때문이다. 따라서 유선 데이터 네트워크의 에너지 사용에 있어 액세스 네트워크의 역할은 매우 중요하다고 할 수 있다.

그러나 현재 유선 액세스 네트워크는 그 규모로 인해 정확한 장비 수의 파악이 어렵고 전체적인 에너지 소모량에 대한 범용적인 측정 도구가 부족하기 때문에 실제적인 에너지 소모량을 추정하기 위한 범용적인 모델링 기법이 요구된다. 또한 오늘날 대규모 액세스 네트워크의 에너지 소모량을 추정하는 대표적인 모델링 기법들은 주로 가입자 수와 몇몇 특정 모델의 장비 당 에너지 소모량의 통합에 의한 상향식(bottom-up) 접근 방식을 취한다. 그러나 기존의 모델

링 기법들은 특정한 네트워크 장비와 네트워크 기술에 의존하기 때문에 범용성과 확장성이 부족하며, 주요 변수들인 네트워크 장비의 에너지 소모량과 장비 수에 따라 추정된 결과의 편차가 매우 커 신뢰성이 부족하다.

또한 이들은 ISP 사업자를 통해 상대적으로 그 장비 수를 파악하기 수월한 레지던셜 액세스 네트워크(residential access network)를 중심으로 제안되어 왔다. 그러나 상향식 접근 방식은 상대적으로 장비 수의 파악이 어렵고 다양한 제조사로부터 모든 장비를 고려하기 어려운 대규모 액세스 네트워크나, 엔터프라이즈 액세스 네트워크(enterprise access network)의 에너지 소모량을 추정하기는 용이하지 않다. 따라서 이를 위한 하향식(top-down) 접근 방식의 추정 모델이 요구된다.

본 논문에서는 하향식 접근법을 통해 대규모 유선 액세스 네트워크의 에너지 소모량 추정 모델을 제안한다. 제안 모델은 가입자 수와 특정한 장비 및 네트워크 기술에 의존하지 않고 액세스 네트워크가 위치한 영역을 기반으로 에너지 소모량을 추정하기 때문에 확장성과 범용성을 가지며, 변수 설정에 따른 추정 결과치의 편차가 적어 기존의 모델링 기법보다 향상된 신뢰성을 가진다. 또한 이 모델로부터 도출한 에너지 소모량 추정치로부터 CO<sub>2</sub> 배출량을 산출하여, 대상 액세스 네트워크들이 자신이 포함된 상위 액세스 네트워크의 영역에 환경적으로 미치는 영향을 비교 평가하고, 상위 액세스 네트워크의 영역의 그리닝(greening)에 있어 미치는 영향을 비교 평가하기 위한 모델을 제안한다.

본 논문의 제안 모델은 선행연구 [8]의 에너지 소모량 추정 방식에서 신뢰성과 정확성을 높이기 위해 더욱 정교화된 파라미터로 변경하였으며, [8]에서는 기존의 다른 모델링 방식과 명확한 비교를 통한 성능 평가를 제시하지 못하였으나, 본 논문에서는 기존의 다른 모델링 방식들과 정확성과 신뢰성 측면에서 성능 비교 분석을 수행하여 본 제안 모델의 우수성을 증명하였다. 또한 제안 모델의 결과를 이용하여 추정 대상 액세스 네트워크들의 환경적 영향도를 산출하여 평가할 수 있는 모델링 기법을 제안하였다.

본 논문의 II장에서는 제안 모델링 기법과 기존의 모델링 기법들에서 가정하는 유선 액세스 네트워크 환경을 설명하고 기존의 모델링 기법들의 특징과 문제점을 비교 분석한다. III장에서는 유선 액세스 네트워크의 에너지 소모량을 추정하는 모델을 제안하고 그 추정치로부터 산출된 CO<sub>2</sub> 배출량으로부터 그린 네

트위킹의 측면에서 로컬 액세스 네트워크가 자신이 포함된 상위 액세스 네트워크에 미치는 반환경적 영향도를 도출하는 안티그리닝(Anti-greening) 영향도 평가 모델을 제안한다. IV장에서는 제안 모델과 기존 모델들에 실제 사례를 적용하여 도출한 결과와 해당 사례에 대한 기존의 조사 및 실측 연구 데이터를 비교 분석하여 성능을 평가한다. 마지막으로 V장에서는 결론을 맺는다.

## II. 관련연구

### 2.1 유선 액세스 네트워크 환경

본 논문과 기존의 모델링 기법들에서 가정하는 액세스 네트워크 환경은 그림 1과 같다. 유선 데이터 네트워크는 액세스 네트워크(access network)와 트랜스포트 네트워크(transport network), 코어 네트워크(core network)의 계층적인 구조를 이루며, 이들 중 액세스 네트워크는 사용자 단말 장비를 인터넷 서비스 제공자 네트워크의 경계 스위치(edge switch)와 연결시키는 네트워크이다. 액세스 네트워크는 가정 내 단말 장비를 위한 레지던셜 네트워크(residential access network)와 회사 및 학교 등 기관의 단말 장비(end-user device)를 위한 엔터프라이즈 액세스 네트워크(enterprise access network)로 구분된다.

레지던셜 액세스 네트워크는 ADSL(Asymmetric Digital Subscriber Line), PON(Passive Optical Network), FTTN(Fiber to the Node), PtP(Point-to-Point optical) 등의 여러 네트워크 기술들에 의해 구축된다. ADSL은 유선 전화사업자에 의해 설치되는 코퍼(copper) 기반의 기술로 각 맥내 가입자의 ADSL 모뎀(modem)은 가장 가까운 중앙 오피스(central office)의 DSLAM(DSL Access Multiplexer)으로 전용 코퍼 쌍을 통해 연결된다.

엔터프라이즈 액세스 네트워크는 액세스 계층(access layer), 분배 계층(distribution layer), 코어 계층(core layer), 세 개 계층 구조의 LAN(Local Area Network)으로 구축된다. 여기서 사용되는 장비들은 주로 이더넷 스위치(Ethernet switch)와 라우터(router)들이다. 액세스 계층 스위치들은 사용자 단말 장비를 네트워크로 연결하여 통신이 가능하도록 하는 장비이며, 분배 계층 스위치들은 고성능 장비로써 액세스 계층으로부터 받은 데이터를 네트워크 관리 정책에 따라 코어 계층 스위치로 보내기 전에 통합하고 브로드캐스트 도메인(broadcast domain)을 구분하여 각 도메인 간에 라우팅(routing) 기능을 수행한다. 코어 계

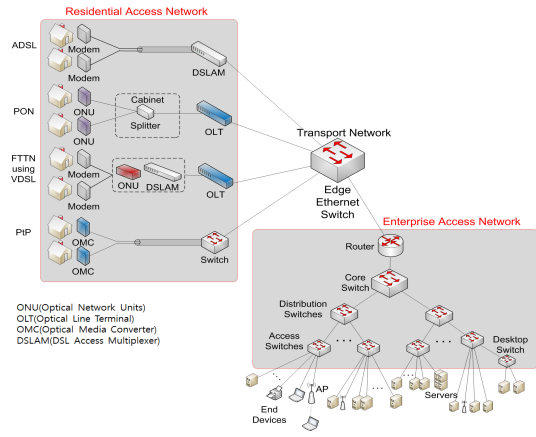


그림 1. 유선 액세스 네트워크 환경  
Fig. 1. Environment of wired access networks

층 스위치는 대용량의 고성능 장비로써 분배 계층 장비들로부터의 트래픽을 통합하여 인터넷으로 전송한다.

본 논문에서는 그림 1에서 회색 영역으로 표시된 유선 액세스 네트워크를 대상으로 하며, PC, 서버와 같은 사용자 단말 장비를 제외한 데이터 전송, 라우팅, 스위칭 또는 네트워크 트래픽 처리 기능을 가지는 액세스 네트워크 장비만을 대상으로 한다. 또한 제안 모델링 기법과 기존 모델링 기법에서 가정하는 에너지 소모량은 전력 소모량으로만 한정한다.

### 2.2 기존 모델링 기법 비교

현재 유선 액세스 네트워크의 에너지 소모량을 분석하는 연구<sup>2, 9-24</sup>는 시장 조사 자료와 실험실 테스트 또는 수학적 모델링을 통해 추정하는 방향으로 진행되어 왔다. 그러나 대규모 유선 액세스 네트워크의 에너지 소모량을 추정하는 연구는 상대적으로 매우 부족한 실정이다. 특히 대규모 유선 액세스 네트워크의 경우 실제 소모되는 에너지 량의 정확한 예측이 어렵기 때문에 인터넷 서비스 사업자와 장비 제조사로부터 수집된 데이터를 통합하는 방식에 의한 통계적 분석<sup>2, 14, 20-22, 24</sup>을 위주로 수행되어 왔다.

기존에 연구된 수학적 모델링 기법들<sup>9, 10, 14, 20</sup> 또한 서버 네트워크 및 일부 장비의 실험실 테스트 결과나 장비 제조업자 및 ISP 사업자들로부터 수집된 데이터를 합산하는 상향식(bottom-up) 접근을 통해 전체 에너지 소모량을 추정한다. 이들 모델들에서 주요 변수가 되는 요소는 서버 네트워크 및 일부 장비의 실험실 테스트 결과 또는 인터넷 서비스 제공자(ISP: Internet Service Provider)들로부터 조사된 가입자 수와 장비 수, 특정 장비 모델을 대상으로 한 장비 당 에너지 소비량이다.

그러나 이러한 요소들은 대규모 네트워크의 에너지 소비량을 추정하기에는 적합하지 않다. 특정 장비와 네트워크 시나리오 및 기술 기반의 모델링 기법이나, 몇몇 ISP나 장비 제조업체 등을 통한 자료 조사에 기반한 에너지 소모량의 추정은 모든 사례를 고려하기 어렵다. 특히 ISP들은 자신들의 망을 다른 망 사업자에게 임대하고, 그들의 사업적인 이유로 정확한 정보 노출을 꺼리는 경우가 있기 때문에 정확성과 신뢰성 있는 추정이 어렵다. 또한 ISP들은 전형적으로 자신의 서비스 능력 이상의 가입자를 허락하기 때문에 액티브(active) 사용자의 수는 네트워크 가입자의 작은 부분일 수 있어, ISP나 장비업체로부터 수집된 가입자의 수와 특정 서브 네트워크나 장비의 에너지 소모량의 통계적인 합산에 의존하는 방식은 대규모 액세스 네트워크의 에너지 소모량을 추정하는데 제한적이다. 따라서 본 절에서는 본 연구와 비교될 수 있는 대규모 액세스 네트워크를 고려한 기존의 수학적 모델링 방식만을 비교 분석한다.

표 1은 기존의 대규모 유선 액세스 네트워크의 에너지 소모량을 추정하는 모델의 특징을 비교한 것이다. 표 1과 같이 기존의 모델들은 주로 레지던셜 액세스 네트워크를 중심으로, 특히 옵티컬 네트워크(optical network) 기술을 기반으로 한다. 이들의 주요 변수는 가입자 수나 장비 당 에너지 소모량에 의존한다. 따라서 앞서 설명한 바와 같이 이들에 대한 정확한 수치적 파악이 어렵고, 모든 장비와 가입자 수를 적용할 수 없기 때문에 정확한 추정치를 도출하기 어렵다.

V. C. 모델<sup>[20]</sup>은 상향식 접근의 단점인 장비 중복성의 적용이 어려운 점을 해결하고 단위 시간 당 에너지

소모량을 추정하여 전체 에너지 소모량을 추정하는 모델을 제시하였으나, ADSL 네트워크 환경만을 고려했기 때문에 확장성이 부족하고 다양한 기술들을 가지고 있는 대규모 액세스 네트워크에 적용하기는 제한적이다. 따라서 대규모 네트워크의 에너지 소모량과 에너지 소모량 추정에 있어 상향식 접근을 취하는 것은 고려해야 할 세부 요소들이 매우 많고 적용범위가 제한적이기 때문에, 범용성과 확장성을 고려한 유선 액세스 네트워크의 에너지 소모량 추정 모델링 기법이 요구된다.

### III. 제안 모델

#### 3.1 액세스 네트워크의 에너지 소모량 추정모델

제안 모델을 개별적인 장비의 에너지 소모량의 합산을 통해 전체 액세스 네트워크의 에너지 소모량을 추정하지 않고, 영역 기반의 에너지 소모량 추정 방식을 사용한다. 액세스 네트워크 장비들은 대부분 빌딩 영역에 위치하고 있다는 점을 고려하여, 본 논문에서는 빌딩에서 소모하는 에너지 소모량으로부터 하향식(top-down) 접근 방식을 통해 로컬과 상위 네트워크의 에너지 소모량을 추정한다. 이때 추정 대상이 되는 액세스 네트워크가 위치한 영역을 로컬 네트워크 영역이라 하며 이 영역은 해당 영역 전체 에너지 소모량이 추정 가능한 영역으로 한 개의 로컬 네트워크 영역에는 한 개의 액세스 네트워크를 포함한다. 상위 네트워크 영역은 로컬 네트워크 영역을 포함하는 더 큰 규모의 네트워크 영역으로 해당 영역의 전체 에너지 소모량이 추정 가능한 영역이다. 로컬 네트워크 영역과 상위 네트워크 영역은 상대적인 개념으로써 예를 들어 미국 내 유선 액세스 네트워크의 에너지 소모량 중 캘리포니아 주의 유선 액세스 네트워크의 에너지 소모량을 추정 대상으로 한다면 상위 네트워크 영역은 미국, 로컬 네트워크 영역은 캘리포니아가 된다. 또한 캘리포니아 유선 액세스 네트워크의 에너지 소모량 중 LBNL(Lawrence Berkeley National Laboratory) 캠퍼스의 유선 액세스 네트워크의 에너지 소모량을 추정 대상으로 한다면 상위 네트워크 영역은 캘리포니아 주, 로컬 네트워크 영역은 LBNL 캠퍼스가 된다. 제안 모델에서 상위 네트워크의 에너지 소모량은 식 (1)과 같이 정의 한다. 식 (1)에서  $t$ 는 추정하고자 하는 연도이며,  $A_{E_e}(t)$ 는  $t$ 시간에 상위 네트워크의 에너지 소모량,  $R_{n_e i}(t)$ 와  $E_{n_e i}(t)$ 은 각각 로컬 네트워크  $i$ 의 레지던셜과 엔터프라이즈 네트워크의 에너지 소모량이다.

표 1. 기존 유선 액세스 네트워크의 에너지 소모량 추정 모델 비교  
Table 1. Comparison of existing energy consumption estimation models of wired access networks

Models	Methods	Network Environment		Scalability	Generality	Cooling system & Power supply	Device redundancy
		Residential	Enterprise				
J. B. <sup>[9]</sup>	Bottom-up	O	X	X	O	O	X
R. B. <sup>[10]</sup>	Bottom-up	O	O	X	X	O	X
S. L. <sup>[14]</sup>	Top-down	O	O	O	O	X	O
V. C. <sup>[20]</sup>	Bottom-up	O	X	X	X	X	O

$$A_{E_{nc}}(t) = \sum_{i=1}^n R_{nc_i}(t) + \sum_{i=1}^n E_{nc_i}(t) \quad (1)$$

$$R_{nc_i}(t) = E_i(t) \times B_i(t) \times r \cdot \frac{1}{PUE_{anc}} \times w_i \quad (t = t_0) \quad (2)$$

$$E_{nc_i}(t) = E_i(t) \times B_i(t) \times e \cdot \frac{1}{PUE_{anc}} \times w_i \quad (t = t_0) \quad (3)$$

$A_{E_{nc}}(t)$ 는  $n$ 개의 로컬 네트워크에서 레지던셜 네트워크의 에너지 소모량  $R_{nc_i}(t)$ 들의 합과 엔터프라이즈 네트워크의 에너지 소모량  $E_{nc_i}(t)$ 의 합을 더하여 유도한다. 로컬 네트워크 영역  $i$ 에 대한  $R_{nc_i}(t)$ 과  $E_{nc_i}(t)$ 은 식 (2)와 식 (3)에 의해 계산된다. 식 (2)와 식 (3)에서  $E_i(t)$ 는  $t$ 시간에 로컬 네트워크  $i$ 가 위치한 로컬 네트워크 영역  $i$ 의 에너지 소모량이며,  $B_i(t)$ 는  $E_i(t)$  중 빌딩에서 차지하는 에너지 소모량의 비율이다. 본 논문에서는 이 비율을 [27, 28]로부터 로컬 네트워크 영역  $i$ 가 위치한 국가의 전체 에너지 소모량 중 빌딩에서 차지하는 에너지 소모량의 비율을 사용한다. 이때 상위 네트워크와 로컬 네트워크는 상대적인 개념임으로 상위 네트워크에서  $n$ 개 로컬 네트워크의 에너지 소모량을 모두 추정할 수 없을지라도 상위 네트워크 영역의 에너지 소모량과 그 중 빌딩에서 차지하는 에너지 소모량의 비율을 알 수 있다면 (2)와 식 (3)을 통해서도 도출할 수 있다.

선행연구<sup>8)</sup>의 에너지 소모량 추정 방식에 있어서는 빌딩 내에서 유선 네트워크 장비의 에너지 소모량의 비율 값을 파라미터로 사용하며, 임의의 가정된 값을 사용한다. 제안 모델 (2)와 (3)에서는 추정 모델의 신뢰성과 정확성을 높이기 위해 IDC(Internet Data Center)에서 ICT 장비에 쓰이는 에너지 효율을 나타내는 지수 산출 방식<sup>29)</sup>을 이용한다.  $PUE_{anc}$ 는 널리 사용되는 전력 효율 지수(PUE : Power Usage Effectiveness)로 PUE는 IDC 시설(예를 들어 빌딩이나 일정영역 공간) 에너지 전체 사용량을 ICT 장비에서만 사용되는 에너지 사용량으로 나눈다. PUE는 1 이상의 값을 가지며, 1에 가까울수록 그들의 정보 처리보다 다른 곳에 사용되는 낭비가 적다<sup>20,29,31)</sup>.

식 (2)와 식 (3)의  $1/PUE_{anc}$ 는 빌딩에서 사용되는 에너지 소모량 중 유선 액세스 네트워크 장비에 의한 전력 소모량의 비율을 나타내며, 제안 모델에서 이 값은 [31]에 의해 0.7%을 가지는 것으로 가정한다.  $r$ 과  $e$ 는 빌딩에서 사용되는 에너지 중 레지던셜과 엔터프라이즈 네트워크 장비의 에너지 사용량의 비율이다.  $w_i$ 는 로컬 네트워크 영역  $i$ 의 액세스 네트워크 장비의

보유 정도와 기술 수준을 고려하기 위한 가중치 값으로 각 로컬 네트워크 영역  $i$ 마다, 자신의  $w_i$  값을 가지며 이것은 [8]에서의 산출 방식을 따른다.

제안 모델에서는 기준 시간  $t_0$ 로부터 로컬 네트워크  $i$ 의 레지던셜과 엔터프라이즈 네트워크의 미래 시간  $t$ 의 에너지 소모량을 각각 식 (4), 식 (5)에 의해 계산한다. 식 (4)와 식 (5)에서 레지던셜과 엔터프라이즈 네트워크  $i$ 의 에너지 소모량은 연간 에너지 소모량 증가율  $\beta$ 를 적용하여 계산한다.

$$R_{nc_i}(t) = R_{nc_i}(t_0) \cdot (1 + \beta)^{\frac{t-t_0}{\tau}} \quad (t > t_0) \quad (4)$$

$$E_{nc_i}(t) = E_{nc_i}(t_0) \cdot (1 + \beta)^{\frac{t-t_0}{\tau}} \quad (t > t_0) \quad (5)$$

제안 모델 (4), (5)에서는 선행연구 [8]의 모델에서 신뢰성과 정확성 향상을 위해 미래의 에너지 소모량 추정에 있어, 시간의 단위를 상쇄시키기 위한 고유시간  $\tau$ 를 적용하였다. [8]의 경우 에너지 효율성 향상 기술이 적용되는 영역과 적용되지 않는 영역을 구분하고 각각 다른 에너지 소모 증가율  $\beta$ 를 적용하여 미래의 액세스 네트워크의 에너지 소모량을 추정한다. 그러나 제안 모델에서는 하위 로컬 영역 별로 에너지 소모량을 추정하여 이를 합산하는 방식으로 상위 액세스 네트워크 영역의 에너지 소모량을 추정하기 때문에, [8]의 방식은 큰 의미를 가지지 않으면서도, 불필요한 수식의 복잡도를 더하기 때문에 별도의 영역을 구분하지 않고 계산하도록 하였다.

### 3.2 안티 그리닝 영향도 평가 모델

본 절에서는 로컬 액세스 네트워크가 자신이 포함된 상위 액세스 네트워크 영역의 CO<sub>2</sub> 배출에 있어 미치는 영향도와 상위 액세스 네트워크의 그리닝(greening)에 있어 미치는 영향도를 산출하는 안티 그리닝(Anti-greening) 영향도 평가 모델을 제안한다.

제안 모델은 3.1의 제안 모델로부터 도출한 에너지 소모량 추정치로부터 산출한 CO<sub>2</sub> 배출량으로부터 로컬 액세스 네트워크가 자신이 포함된 상위 액세스 네트워크 영역에 환경적으로 미치는 영향도를 수치적인 값으로 산출하며, 이 값이 클수록 환경에 부정적인 영향을 미치는 것으로 평가한다. 또한 제안 모델은 로컬 액세스 네트워크가 상위 액세스 네트워크의 그리닝(greening)에 미치는 영향을 수치적인 값으로 산출하며 이를 안티그리닝 영향도(Anti-greening impacts)라고 정의하며, 이 값이 클수록 부정적인 영향을 미치

는 것으로 평가한다.

평가 대상이 되는 로컬 네트워크  $i$ 가 에너지 소모에 있어, 상위 네트워크에 미치는 영향은 식 (6)과 식 (7)에 의해 유도된다. 식 (7)의  $I_{AE}$ ,  $I_{RE}$ ,  $I_{EE}$ 은 로컬 네트워크  $i$ 가 에너지 소모에 있어 상위 네트워크 전체에 미치는 영향도이며, 각각 전체, 레지던셜, 엔터프라이즈 로컬 네트워크의 영향도이다.

$A_{nc_i}(t)$ ,  $R_{nc_i}(t)$ ,  $E_{nc_i}(t)$ 은 식 (6)과 3.1절의 식 (4), 식 (5)를 통해 산출된 로컬 네트워크  $i$ 의 전체, 레지던셜, 엔터프라이즈 네트워크 각각의 에너지 소모량이며,  $A_{E_e}(t)$ 은 3.1절의 식 (1)로부터 도출된 상위 네트워크의 전체 에너지 소모량이다.

$$A_{nc_i}(t) = R_{nc_i}(t) + E_{nc_i}(t) \quad (6)$$

$$I_{AE} = \frac{A_{nc_i}(t)}{A_{E_e}(t)}, \quad I_{RE} = \frac{R_{nc_i}(t)}{A_{E_e}(t)}, \quad I_{EE} = \frac{E_{nc_i}(t)}{A_{E_e}(t)} \quad (7)$$

$$A_{CO_2}(t) = \sum_{i=1}^n R_{CO_2}(t) + \sum_{i=1}^n E_{CO_2}(t) \quad (8)$$

$$R_{CO_2}(t) = R_{nc_i}(t) \times g_i \quad (9)$$

$$E_{CO_2}(t) = E_{nc_i}(t) \times g_i \quad (10)$$

$$I_{ACO_2} = \frac{A_{CO_2}(t)}{A_{CO_2}(t)}, \quad I_{RCO_2} = \frac{R_{CO_2}(t)}{A_{CO_2}(t)}, \quad I_{ECO_2} = \frac{E_{CO_2}(t)}{A_{CO_2}(t)} \quad (11)$$

식 (11)에서  $I_{ACO_2}$ ,  $I_{RCO_2}$ ,  $I_{ECO_2}$ 는 각각 로컬 네트워크  $i$ 의 전체, 레지던셜, 엔터프라이즈 네트워크가 상위 네트워크 전체에 미치는 환경적 영향도를 나타낸다. 로컬 네트워크  $i$ 는 고유의 kWh당 탄소 배출량  $g_i$ 를 갖는데, 이것은 로컬 네트워크  $i$ 가 속한 국가의 수치<sup>[34]</sup>로 가정하며, 레지던셜과 엔터프라이즈 네트워크의 CO<sub>2</sub> 배출량은 식 (9)와 식 (10)으로 계산된다. 상위 네트워크의 CO<sub>2</sub> 배출량은 식 (8)에서  $n$ 개의 로컬 네트워크에 대한 CO<sub>2</sub> 배출량의 합으로 구한다. 이러한 과정에서 식 (7)로부터의 에너지 소모에 대한 영향도  $I_{AE}$ ,  $I_{RE}$ ,  $I_{EE}$ 와, 식 (11)로부터의 CO<sub>2</sub> 배출 영향도  $I_{ACO_2}$ ,  $I_{RCO_2}$ ,  $I_{ECO_2}$  각각은 식 (12), 식 (13), 식 (14)에 의해 로컬 네트워크  $i$ 가 상위 네트워크에 미치는 안티그리닝 영향도  $AGI_A$ ,  $AGI_R$ ,  $AGI_E$ 를 도출한다.

$AGI_A$ 는 로컬 네트워크  $i$ ,  $AGI_R$ 과  $AGI_E$ 는 로컬 레지던셜과 엔터프라이즈 네트워크  $i$ 가 각각 상위 네트워크 전체에 미치는 안티그리닝 영향도이다. 식 (12), 식 (13), 식 (14)에서  $\varepsilon$ 은 에너지 소모의 영향과 CO<sub>2</sub> 배출의 영향 간에 조정 값으로 0.034는 전력 소모량

1kWh을 생산하는데 소비되는 비용과 탄소배출량 1kg을 처리하는데 소모되는 비용 간의 비율을 나타낸다.  $\varepsilon$ 은 에너지 소모와 환경적 영향 간의 조정율로 1kWh 당 에너지 비용과 1kg의 CO<sub>2</sub> 처리 비용 간의 차이는 0.34배인 점을 고려하여  $\varepsilon > 0.75$ 이면 에너지 소모의 영향을 더 크게 고려하고,  $\varepsilon = 0.75$ 이면 에너지 소모와 환경적 영향을 동일하게 고려,  $\varepsilon < 0.75$  이면 환경적 영향을 더 크게 고려한다.

$$AGI_A = \varepsilon \cdot I_{AE} + (1 - \varepsilon) \cdot I_{ACO_2} \quad (12)$$

$$AGI_R = \varepsilon \cdot I_{RE} + (1 - \varepsilon) \cdot I_{RCO_2} \quad (13)$$

$$AGI_E = \varepsilon \cdot I_{EE} + (1 - \varepsilon) \cdot I_{ECO_2} \quad (14)$$

#### IV. 성능평가

제안 모델을 개별적인 장비의 에너지 소모량의 제안 모델의 성능 평가를 위해 실제 사례로써 미국과 캘리포니아의 레지던셜 액세스 네트워크 환경과 LBNL(Lawrence Berkeley National Laboratory) 캠퍼스와 LBNL 빌딩90의 엔터프라이즈 액세스 네트워크 환경을 가정하여 상위 액세스 네트워크와 로컬 액세스 네트워크의 에너지 소모량을 추정하고 기존 모델들로 부터의 추정치와 해당 사례의 조사 및 실측치와 비교 분석한다. 성능평가를 위해 사용된 데이터는 관련 분야에 있어 대표적인 연구 기관인 LBNL<sup>[2]</sup>과 CEC(California Energy Commission)<sup>[24]</sup>의 조사 및 실측 연구 데이터를 적용하였다. 제안 모델(이하 Y. H. 모델)은 기존 모델로써 J. B. 모델<sup>[9]</sup>과 R. B. 모델<sup>[10]</sup>의 산출 결과를 정확성과 신뢰성 측면에서 비교 평가한다. Y. H. 모델과 J. B. 모델, R. B. 모델의 에너지 소모량 추정치는 [2, 24]의 조사 및 실측 데이터와 작은 오차를 보일수록 정확성이 높으며 주요 변수의 설정에 따라 추정 에너지의 변화 정도가 적을수록 신뢰성이 높다. 이때 J. B. 모델은 레지던셜 액세스 네트워크만을 고려하기 때문에 엔터프라이즈 액세스 네트워크에서는 R. B. 모델만을 비교 대상으로 한다.

Y. H. 모델과 J. B. 모델, R. B. 모델들의 추정 에너지 소모량 분석을 위한 실험 값은 표 2, 표 3, 표 4와 같다. 세 모델에서는 액세스 네트워크의 네트워크 장비의 연간 에너지 소모량 증가율  $\beta$ 는 미국과 캘리포니아의 경우 [36]에 의해 0.075로 LBNL 캠퍼스와 LBNL 빌딩90의 경우 [2]에 의해 0.045로 설정한다. 표 2의 제안 모델에서  $E_i(t)$ 는 2008년 미국과 캘리포

표 2. Y. H. 모델의 실험값  
Table 2. Parameters of Y. H. model

Parameters	Meanings		Values
$t_0$	baseline year for estimation		2008
$t$	a estimated year for estimation		2009, 2010, 2011, 2012
$E_i(t)$	Residential access network	total energy consumption of the USA in 2008	3,184TWh
		total energy consumption of CA. in 2008	92.37TWh
	Enterprise access network	total energy consumption of LBNL campus in 2008	43,139MWh
		total energy consumption of LBNL building90 in 2008	1,618MWh
$B_i(t)$	the share of energy consumption by buildings in $E_i(t)$ in 2008		0.7
$r$	the share of energy consumption by residential buildings in $B_i(t)$ in 2008		0.37
$e$	the share of energy consumption by enterprise buildings in $B_i(t)$ in 2008		0.36
$\beta$	the annual growth rates of energy use of access network equipment		0.075 (residential), 0.045 (enterprise)
$1/PUE_{net}$	the share of energy consumption by network equipment in $B_i(t)$ in 2008		0.007
$w_i$	the level of access network equipment development of the USA in 2008		1.1

표 3. J. B. 모델의 실험값  
Table 3. Parameters of J. B. model

Types of networks		$N_{CPE}$ (million)	$N_{RN}$	$N_{TU}$	$P_{CPE}$ (Wh)	$P_{RN}$ (Wh)	$P_{TU}$ (kWh)
		the number of subscribers in 2008, 2009, 2010, 2011, 2012	the number of subscribers that share a remote node	the number of customers that share a terminal unit	the powers consumed by the customer premises equipment	the powers consumed by the remote node at the central office	the powers consumed by the terminal unit at the central office
ADSL	U.S.A.	35.9, 35.9, 36.4, 39, 41	N/A	1008	5.4	N/A	1.7
	CA.	2.79, 2.66, 2.56, 2.48, 2.41					
Cable	U.S.A.	46, 46, 47, 49, 54	120	480	6.2	571	0.62
	CA.	3.35, 3.35, 3.19, 3.06, 2.93					
Optical	U.S.A.	5.4, 5.4, 5.4, 7, 10	16	975	7.2	47	0.76
	CA.	2.43, 2.31, 2.23, 2.17, 2.11					

표 4. R. B. 모델의 실험값  
Table 4. Parameters of R. B. model

Types of networks			$N$	$P$ (Wh)
			the number of equipment in 2008 2009, 2010, 2011, 2012 (residential: million, enterprise: ea.)	energy consumption per device in 2008, 2009, 2010, 2011, 2012
Residential	Home	U.S.A.	87.4, 90.4, 94.2, 95, 105	6.9, 7, 7.03, 7.33, 7.5
		CA.	10.8, 10.14, 9.6, 9.04, 8.89	
	Access	U.S.A.	0.02, 0.02, 0.22, 0.22, 0.24	920
		CA.	0.012, 0.011, 0.018, 0.010, 0.09	
Enterprise	Core Switch	LBNL	110,114,118,123,129	315
		B90	N/A	110
	Access Switch	LBNL	570, 592, 617, 641, 666	33
		B90	76, 79, 82, 85, 89	

니아의 에너지 소모량으로 각각 [37]과 [38]의 수치로 설정하며 LBNL 캠퍼스와 빌딩90의 에너지 소모량은 [39, 40]의 수치로 설정한다.  $B_i(t)$ 는 [27, 28]로부터 0.7로,  $r$ 과  $e$ 는 [41]의 2008년 미국의 에너지 소모량 증 레지던셜과 엔터프라이즈 빌딩의 에너지 소모량의 비율에 따라 설정하며  $1/PUE_{net}$ 은 [32]에 의해 0.007로 설정한다. 표 3와 표 4의 J. B. 모델과 R. B.의 실험 값은 미국의 가입자 수와 장비 수는 [21, 22, 23]를 따라 설정하고, 캘리포니아의 경우 [24]의 수치로, LBNL 캠퍼스와 LBNL 빌딩90의 장비 수는 [2]의 수치로 설정한다. 또한 네트워크 장비 당 에너지 소모량은 미국과 캘리포니아의 경우 [17, 21, 22, 23]에 의해 평균 에너지 소모량으로, LBNL 캠퍼스와 LBNL 빌딩90의 경우, [2]에서의 추정치로 설정한다.

#### 4.1 제안모델의 정확성 분석

그림 2의 (a)는 상위 네트워크로써 2008년부터 2012년까지 미국 레지던셜 네트워크의 에너지 소모량을 Y. H. 모델과 J. B. 모델 및 R. B. 모델을 통한 추정 결과와 조사와 실측을 통한 LBNL의 추정치와 비교한 것이다. Y. H. 모델, J. B. 모델과 R. B. 모델로부터 추정한 2008년 에너지 소모량은 7.61TWh, 8.8TWh, 6.1TWh이며, 모델링 기법에 의한 산출치들 중 Y. H. 모델은 LBNL의 추정치 7TWh에 가장 가까운 에너지 소모량을 보이고, 2010년 이후 추정치들은 Y. H. 모델과 J. B. 모델 모두 LBNL 추정치에 근접

한 결과를 보인다. Y. H. 모델과 J. B. 모델, R. B. 모델은 각각 LBNL 추정치와 -0.6TWh, 1.7TWh, -0.9TWh 차이량을 보이며, 오차율은 그림 2의 (b)과 같이 Y. H. 모델은 8.7%, J. B. 모델은 25.7%, R. B. 모델은 12.8%로 Y. H. 모델의 추정치가 LBNL 추정치와 가장 근접한 결과를 보였으며, J. B. 모델은 가장 큰 오차율을 보였다. 2009년부터 2012년까지 평균 오차율은 Y. H. 모델의 경우 3.3%, J. B. 모델은 5%, R. B. 모델은, 23.5%로써, Y. H. 모델이 가장 적은 오차율을 보였다.

J. B. 모델의 경우 레지던셜 네트워크에서 라우터와 스위치 같은 소규모 LAN 장비는 고려되지 않았으며, 정확성 측면에서 더욱 의미 있는 비교체인 2008년 추정치와의 오차율이 Y. H. 모델의 경우 8.7% 이지 만, J. B. 모델의 경우 25.7%로 매우 큰 차이를 보이기 때문에 Y. H. 모델보다 정확성이 낮은 결과를 나타낸다고 할 수 있다. 또한 전체 평균 오차율에 있어서, Y. H. 모델, J. B. 모델, R. B. 모델 각각 4.3%, 9.1%, 21.4%로 Y. H. 모델에서 가장 적은 오차율을 나타내었다.

그림 2의 (c)는 로컬 네트워크로써 2008년~2012년 캘리포니아 레지던셜 액세스 네트워크의 에너지 소모량을 Y. H. 모델과 J. B. 모델 및 R. B. 모델을 통한 추정치와 조사 및 실측을 통한 CEC의 추정치와 비교한 것이다. 특이한 점은 CEC의 조사 데이터에서도 볼 수 있듯이 미국 레지던셜 네트워크는 2008년부

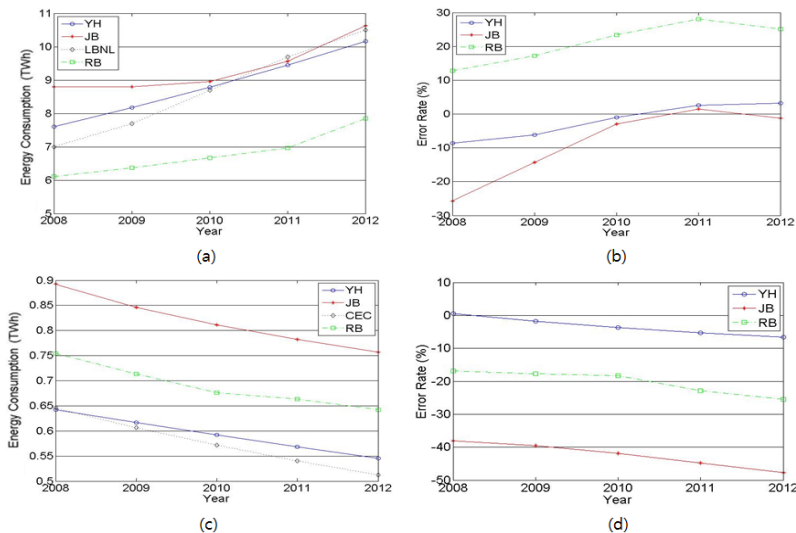


그림 2. (a) 미국 레지던셜 액세스 네트워크의 에너지 소모량, (b) LBNL 추정치와의 오차율, (c) 캘리포니아 레지던셜 액세스 네트워크의 에너지 소모량, (d) CEC 추정치와의 오차율  
 Fig. 2. (a) Energy consumption of the USA residential access networks, (b) Error rates over LBNL estimates, (c) Energy consumption of California residential access networks, (d) Error rates over CEC estimates



터 2012년까지 매년 증가하는 에너지 소비 형태를 보이는 반면 캘리포니아 레지던셜 네트워크는 에너지 소비량이 감소하는 형태를 보이고 있다. 그 이유에 대해 <sup>42, 43, 44)</sup> 등 다수의 연구들의 지배적인 의견은, 캘리포니아가 미국의 다른 주들보다 앞서 1970년대 중반 이후부터 지난 40년 넘게 계속해서 빌딩과 전자 장비들에 에너지 효율성 표준을 제시하고 그에 따라 엄격한 규제를 하는 적극적인 노력을 실행해 왔기 때문이라는 것이다. 또 다른 견해로는<sup>45, 46, 47)</sup> 지난 50년 동안 계속해서 캘리포니아 주 내부의 인구가동이 온화한 기후의 지역으로 이동하는 현상이 있었고 캘리포니아 지역의 온화한 기후는 에너지 소모량 감소에 큰 영향을 미쳤다는 것이다. 또한 캘리포니아 주는 다른 주에 비해 에너지 소모에 있어 낮은 소득 탄력성(income elasticity)<sup>46)</sup>을 가지기 때문이라는 분석이 있다.

Y. H. 모델, J. B. 모델과 R. B. 모델로부터 추정한 2008년 에너지 소모량은 각각 0.64TWh, 0.89TWh, 0.75TWh이며, 모델링 기법에 의한 산출치들 중 Y. H. 모델은 LBNL의 추정치 0.65TWh에 가장 가까운 에너지 소모량을 보인다. 그림 2 (d)는 모델링 기법을 통한 추정치와 CEC 추정치와의 오차율을 나타낸다. Y. H. 모델과 J. B. 모델, R. B. 모델의 5년 추정치들의 평균 오차율은 3.6%, 42.4%, 20.2%로써 Y. H. 모델이 가장 작은 오차율을 보인다.

그림 3은 상위 엔터프라이즈 액세스 네트워크로써 LBNL 캠퍼스 네트워크, 하위 엔터프라이즈 액세스 네트워크로써 LBNL 캠퍼스 내의 빌딩90의 네트워크의 에너지 실제 측정치와 Y. H. 모델과 R. B. 모델의 추정치를 비교한 것이다. 그림 3의 (a)에서 Y. H. 모델, R. B. 모델로부터 추정한 2008년 에너지 소모량은 각각 322.2MWh, 233.3MWh이며, Y. H. 모델은 LBNL의 측정치 357TWh에 가장 가까운 에너지 소모량을 보인다. [2]로부터 LBNL 캠퍼스의 2008년 데이

터는 실측을 통한 에너지 소모량이며 2009년부터 2012년은 2008년 데이터로부터 4.5%의 연 성장률을 가정하여 예상한 수치이다. 따라서 정확성의 측면에서 2008년의 에너지 소모량의 비교는 2009년~2012년 보다 더욱 중요한 의미가 있으며, 모델링 기법을 통한 2008년 추정치가 LBNL 추정치에 가까울수록 높은 정확성을 보인다고 할 수 있다. 그림 3의 (a)에서와 같이 2008년 Y. H. 모델과 R. B. 모델은 각각 LBNL 추정치와 24.8MWh, 83.7MWh, 차이를 보이며, 2008년부터 2012년 평균 차이량에서도 Y. H. 모델과 R. B. 모델은 각각 4.7MWh와 44.9MWh로 Y. H. 모델이 더 높은 정확성을 보인다. 그림 3의 (b)에서 Y. H. 모델, R. B. 모델로부터 추정한 2008년 에너지 소모량은 12.4MWh, 9.8MWh이며, LBNL 측정치는 12.5MWh로써, Y. H.의 추정치는 실측치와 근접한 결과를 보이며, Y. H. 모델과 R. B. 모델에 의한 추정치와 LBNL 실측치와의 연평균 차이량에 있어서도 각각 0.04MWh와 2.73MWh로 Y. H. 모델이 더 근소한 차이를 보인다.

#### 4.2 제안모델의 신뢰성 분석

그림 4는 2008년~2012년 미국 레지던셜 액세스 네트워크와 LBNL 캠퍼스 엔터프라이즈 액세스 네트워크의 에너지 소모량에 대한 조사 및 실측치와 모델링 기법에 의한 추정치와의 차이 정도를 나타낸다. 모든 년도의 추정치에 대해 신뢰성을 갖기 위해서는 모든 추정 년도마다 산출된 에너지량이 LBNL의 추정치와의 차이량의 변화 정도가 작아야 하며, 따라서 매년 LBNL 추정치와의 차이량의 표준편차가 0에 가까울수록 높은 신뢰성을 가진다. 그림 4의 (a)에서와 같이 미국 레지던셜 네트워크에 대한 Y. H. 모델과 J. B. 모델, R. B. 모델의 매년 LBNL의 추정치와의 표준편차는 각각 0.4, 0.8, 0.8이다. 이 값은 0에 가까울수록 더 높은 신뢰성을 가지며 비교 모델 중 Y. H. 모델이

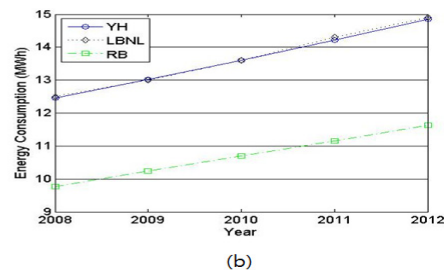
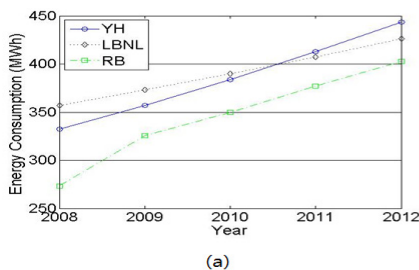


그림 3. (a) LBNL 캠퍼스 엔터프라이즈 액세스 네트워크의 에너지 소모량, (b) LB90NL 빌딩 90 엔터프라이즈 액세스 네트워크의 에너지 소모량  
 Fig. 3. (a) Energy consumption of LBNL campus's enterprise access networks (b) Energy consumption of LBNL building's enterprise access network

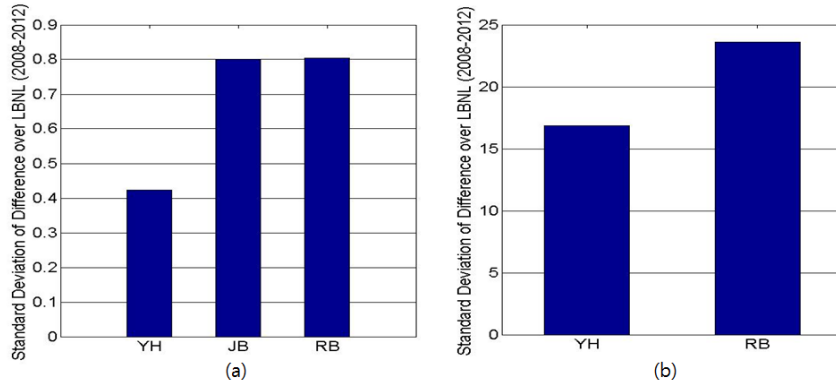


그림 4. (a) 미국 레지던셜 액세스 네트워크의 LBNL 추정치와의 차이량에 대한 표준편차, (b) LBNL 캠퍼스 액세스 네트워크의 실측치와의 차이량에 대한 표준편차  
 Fig. 4. (a) Standard deviations of differences over LBNL's estimates for the USA residential access networks, (b) Standard deviations of differences over LBNL's measured values for LBNL campus enterprise access networks

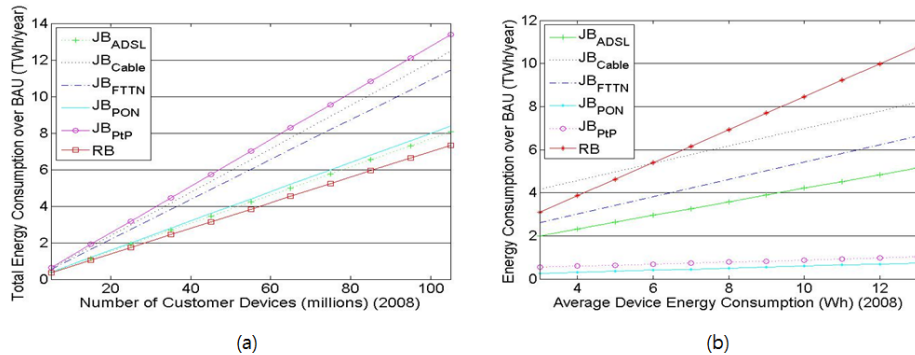


그림 5. (a) 장비 수에 따른 J. B. 모델과 R. B. 모델에 의한 에너지 소모량, (b) 장비 당 평균 에너지 소모량에 따른 J. B. 모델과 R. B. 모델의 에너지 소모량  
 Fig. 5. (a) Energy consumption from J. B. model and R. B. model by the number of customer devices, (b) Energy consumption from J. B. model and R. B. model by average energy use per device

가장 좋은 신뢰성을 보임을 확인할 수 있다. 그림 4의 (b)는 LBNL 캠퍼스 엔터프라이즈 네트워크에 대한 Y. H. 모델과 R. B. 모델의 매년 LBNL의 실측치와의 표준편차는 16.9와 23.6이며, 소규모 네트워크에서도 Y. H. 모델이 R. B. 모델보다 표준편차가 0에 더 가까우므로 더 좋은 신뢰성을 보인다.

그림 5는 주요 변수로서 장비 수 및 가입자 수를 사용하는 J. B. 모델과 R. B. 모델의 장비 수와 장비 당 평균 에너지 소모량에 대한 2008년 미국 레지던셜 액세스 네트워크의 추정 에너지 소모량의 변화 정도를 나타낸다. 그림 5의 (a)에서 J. B. 모델에서 전자 기반 네트워크의 경우, 옵티컬 기반 네트워크의 에너지 소비량에 비해 더 많은 변화를 보인다. 이것은 네트워크 장비의 에너지 효율성은 전자(electrical) 기반 네트워크 장비보다 옵티컬(optical) 기반 네트워크 장비가 더 우수하며, 네트워크 장비는 최대 서비스 용량에 근접할수록 높은 에너지 효율성을 보이기 때문

에, 다수의 사용자 단말 장비를 서비스하는 고속의 네트워크 장비일수록 높은 에너지 효율성을 가지기 때문이다<sup>9)</sup>. 따라서 옵티컬 장비는 장비 수가 증가하더라도 전자 기반 장비보다 에너지 소모량의 변화가 적다. 그러나 전체적으로 모든 네트워크 기술에서 적용되는 네트워크 장비 수에 따라 추정되는 에너지 소모량의 차이는 매우 큰 것을 확인할 수 있으며 적용되는 장비 수에 따라 1,000만 대 마다 약 1TWh 이상의 에너지 소모량의 차이를 보인다. 그러나 대규모 액세스 네트워크일수록 가입자 수에 따른 장비 수는 파악이 어렵고, 각 네트워크 기술 종류별로 그 수를 정확히 J. B. 모델과 R. B. 모델에 적용하는 것은 어렵기 때문에 기존 모델링 기법들에 의한 에너지 소모량의 추정치는 신뢰성이 부족하다. 또한 J. B. 모델의 경우 네트워크 기술의 종류에 따라 가입자 및 장비의 수를 다르게 적용해야 한다. 따라서 전자기반 장비와 옵티컬 기반 장비는 에너지 소모량의 차이가 매우 크기 때문

에 정확한 변수 설정을 하지 못할 경우 추정 에너지의 변화 정도가 매우 커 J. B. 모델의 추정치는 더욱 신뢰성이 부족하다.

그림 5의 (b)에서 J. B. 모델에서 옵티컬 기반 네트워크 장비는 전자 기반 장비에 비해 에너지 효율성이 우수하여 미래 인터넷의 그리닝을 위한 완전한 교체를 통한 대안으로까지 제시되고 있기 때문에 장비 당 에너지 소모량에 크게 의존하지 않는 에너지 소비 형태를 보인다. 그러나 현재 전자 기반 네트워크 장비는 저렴한 비용 때문에 세계 브로드밴드 레지던셜 액세스 네트워크 장비의 80%<sup>[42]</sup> 이상을 차지하고 있다. 따라서 그림 5의 (b)와 같이 장비 당 전력 소모량을 주요 변수로 사용하고 있는 J. B. 모델과 R. B. 모델의 추정 에너지 소모량의 변화 정도는 매우 크다. [43]에 따르면 현재 액세스 네트워크의 맥 내 네트워크 장비의 에너지 사용량은 3Wh에서 13Wh로 큰 폭의 편차를 보인다. 이때 각 네트워크 기술별로 추정 에너지 소모량은 약 3TWh에서 8TWh의 편차를 보인다.

그림 6은 J. B. 모델, R. B. 모델, Y. H. 모델에서 장비 당 에너지 소모량에 따른 2008년 미국 레지던셜 네트워크 추정 에너지 소모량의 표준편차를 나타내며 이 값이 0에 가까울수록 추정 에너지 소모량의 변화 정도가 작아 신뢰성이 높다. J. B. 모델에서 전자 기반 네트워크의 평균 표준편차는 1.24이며, 옵티컬 기반 표준편차는 0.16, 전체 평균 표준편차는 1.32이며, R. B. 모델의 표준편차는 2.54, Y. H. 모델은 0.38로써, 모델링 기법 중 Y. H. 모델이 가장 높은 신뢰성을 보인다.

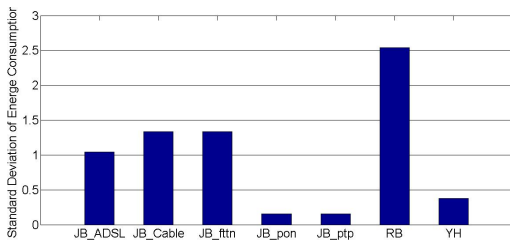


그림 6. 장비 당 평균 에너지 소모량에 따른 액세스 네트워크 에너지 소모량의 표준편차  
Fig. 6. Standard deviations of energy consumption of access network by average energy use per device

### V. 결 론

본 논문에서는 하향식(Top-down) 접근법을 통해 액세스 네트워크의 에너지 소모량을 추정하는 모델링

기법을 제안하였고, 제안 모델로부터 도출된 추정치를 이용하여 액세스 네트워크의 환경적 영향을 평가하기 위한 안티그리닝(Anti-greening) 영향도 평가 모델을 제안하였다. 본 논문에서는 LBNL<sup>[2]</sup>과 CEC<sup>[24]</sup>에서 연구한 미국과 캘리포니아 레지던셜 액세스 네트워크와 LBNL 캠퍼스와 LBNL 빌딩90의 엔터프라이즈 액세스 네트워크 환경을 적용하여 제안 모델과 기존 모델로부터 에너지 소모량을 산출하였고 LBNL과 CEC의 추정치와 비교 평가하였다.

기존의 모델링 기법들은 상향식(bottom-up) 접근 방식을 취하고, 특정한 장비와 네트워크 기술에 의존하기 때문에 범용성과 확장성이 부족하였다. 그러나 제안 모델은 로컬 액세스 네트워크가 위치한 영역 기반으로 에너지 소모량을 추정하기 때문에 특정한 네트워크 장비 및 기술에 제한되지 않고, 변수 설정에 따른 추정 결과치의 편차가 적어 기존 모델링 기법보다 확장성과 신뢰성을 가짐을 보였다. 또한 제안 모델링 기법을 통해 산출한 결과는 널리 알려진 기존 조사 및 실측치와 적은 오차율을 보임으로써 비교 모델링 기법보다 높은 정확성을 가짐을 확인하였다.

제안 모델은 기존의 모델링 기법과 비교할 때 네트워크 규모에 제약이 없고, 변수 설정이 용이하면서도, 기존 모델링 기법보다 우수한 정확성과 신뢰성을 가진다. 제안 모델링 기법은 액세스 네트워크의 에너지 소모에 따른 환경적 영향의 범용적인 평가 기준을 제시하였으며, 이를 통한 그린 네트워킹 기술 도입의 가속화에 기여 할 수 있을 것으로 기대한다.

### References

- [1] SMARTer 2020 team, *SMARTer2020: The role of ICT in driving a sustainable future*, Global e-Sustainability Initiative(GeSI) and The Boston Consulting Group (BCG), 2012.
- [2] 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.
- [3] Y. Seo and Y. B. Ko, "Dynamic power management for energy efficient Wi-Fi direct," *J. KICS*, vol. 38B, no. 08, pp. 663-671, 2013.
- [4] K. K. Jun, "Management of base stations having cell zooming capability for green cellular networks," *J. KICS*, vol. 36, no. 08,

- pp. 904-909, 2011.
- [5] Y. C. Kim, "Reduction effect of CO<sub>2</sub> discharge of green PC," *J. KICS*, vol. 39C, no. 02, pp. 115-121, 2014.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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. Netw. and Comput. Appl.*, vol. 57, pp. 156-168, 2015.
- [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] 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.
- [11] R. Bolla, F. Davoli, R. Bruschi, K. Christensen, and F. Cucchietti, "The potential impact of green technologies in next generation wireline networks : Is there room for energy savings optimization?," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 49, no. 8, pp. 80-86, 2011.
- [12] 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.
- [13] J. Baliga, K. Hinton, and R. S. Tucker, "Energy consumption of the Internet," in *Proc. Joint Int. Conf. Optical Internet*, pp. 13, Melbourne, Australia, Jun. 2007.
- [14] 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.
- [15] W. Vereecken, W. V. Heddeghem, M. Deruyck, B. Puype, B. Lannoo, and W. Joseph, "Power consumption in telecommunication networks: Overview and reduction strategies," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 49, no. 6, pp. 62-69, 2010.
- [16] 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.
- [17] A. Gladisch, C. Lange, and R. Leppla, "Power efficiency of optical versus electronic access networks," in *Proc. 34th Eur. Conf. Exhibition on Optical Commun.*, pp. 1-4, Bruxel, Belgium, Sept. 2008.
- [18] J. Baliga, R. Ayre, M. V. Sorin, K. Hinton, and R. S. Tucker, "Energy consumption in access network," in *Proc. Optical Fiber Commun./National Fiber Optic Eng. Conf.*, pp. 1-3, San Diego, California, USA, Feb. 2008.
- [19] V. C. Coroama, L. M. Hilty, E. Heiri, and F. M. Horn, "The direct energy demand of internet data flows," *J. Ind. Ecology*, vol. 17, no. 5, pp. 680-688, 2013.
- [20] 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.
- [21] U. Bryan, R. Verena, R. Kurt, *Energy Consumption of Consumer Electronics in U. S. Homes in 2010*, Fraunhofer USA Center for Sustainable Energy Systems, Dec. 2011.
- [22] U. Bryan, S. Victoria, L. Brian, and R. Kurt, *Energy Consumption of Consumer Electronics in U. S. Homes in 2013*, Fraunhofer USA Center for Sustainable Energy Systems, Jun. 2014.
- [23] H. Gregg, S. Jeffrey, W. Philip, D. Debbie, and D. Katherine, *Small Network Equipment Energy Consumption in U. S. Homes Using*

- Less Energy to Connect Electronic Devices*, The Natural Resources Defense Council, Jun. 2013.
- [24] California Energy Commission, *Small Network Equipment*, California Energy Commission, Jul. 2013.
- [25] 2014 ECONET Consortium. *low Energy COonsumption NETworks (ECONet) Deliverable D6.5 Benchmarking and Performance Evaluation Result(2014)*, Retrieved Jul., 12, 2016, from <http://www.econet-project.eu>
- [26] R. Bolla, *ECONet low Energy Consumption NETworks*, Presentation at National Inter-University Consortium for Telecommunications (CNIT), Oct. 2010.
- [27] MEF, *Technology action plan: Buildings sector energy efficiency 2009*, The United States in consultation with Major economies Forum on Energy and Climate (MEF) Partners, 2009.
- [28] European Communities, *Gas and electricity market statistics 2005*, European Communities, 2005.
- [29] *42U Data Center Solution*, Retrieved Jul., 12, 2016, from <http://www.42u.com/measurement/pue-dcie.htm>
- [30] A. Rawson, J. Peuger, and T. Cader, *Green grid data center power efficiency metrics: PUE and DCIE*, Technical Report White Paper #6, The Green Grid, 2008.
- [31] M. Stansberry and J. Kudritzki, *2012 Data Center industry survey technical report*, Uptime Institute, 2012.
- [32] B. Nordman, "What the real world tells us about saving energy in electronics," in *Proc. the 1st Berkeley Symp. Energy Efficient Electronic Systems (E3S)*, University of California, Berkeley, USA, Jun. 2009.
- [33] IEA(International Energy Agency), *CO<sub>2</sub> emissions from fuel combustion highlights*, IEA, 2013.
- [34] Australian Government, *Department of Climate Change and Energy Eciency Estimate of energy wasted by network-connected equipment final report*. Australian Government, 2011.
- [35] IEA(International Energy Agency), *Electricity Information 2010*, Jul. 2010.
- [36] *Electricity Consumption by County*, Energy Consumption Data Management System of the California Energy Commission, Retrieved Jul., 12, 2016, from <http://www.ecdms.energy.ca.gov/elecbycounty.aspx>
- [37] Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL), *FY 2012 LBNL Site Sustainability Plan*, LBNL, Dec. 2011.
- [38] Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL), *LBNL Site Sustainability Plan for FY 2011*, LBNL, Dec. 2010.
- [39] U. S. Department of Energy, *2010 Buildings Energy Data Book*, U.S. Department of Energy, Mar. 2011.
- [40] 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.
- [41] H. Mellah and B. Sanso, "Routers vs switches, How much more power do they really consume? A datasheet analysis," in *Proc. WoWMoM*, pp. 1-6, Lucca, Tuscany, Italy, Jun. 2011.
- [42] California Public Utilities Commission and California Energy Commission, *Energy Efficiency: California's Highest-Priority Resource*, Jun. 2006.
- [43] Steven Chu interviewed by Larry Klein and published in NOVA Online Jan. 20, 2009, Retrieved Jul., 12, 2016, from <http://www.pbs.org/wgbh/nova/tech/energy-secretary-chu.html>.
- [44] L. Ettenson, *Energy efficiency: California's leading energy resource*, Electric Light and Power, Nov. 2011.
- [45] C. Mitchell, R. Deumling, and G. Court, *Stabilizing California's Demand: The Real Reasons Behind the States's Energy Savings*, Public Util. Fortnightly, pp. 50-62, Mar. 2009.
- [46] A. Levinson, "California energy efficiency: Lesson for the rest of the world, or not?," *J. Econ. Behavior & Org.*, vol. 207, pp. 269-289,

2014.

- [47] A. Sudarshan, "Deconstructing the resenfeld curve: making sense of california's low electricity intensity," *Energy Econ.*, vol. 39, pp. 197-207, 2013.

서 유 화 (Yuhwa Suh)



2003년 2월 : 숭실대학교 컴퓨터 학부 졸업

2005년 8월 : 숭실대학교 일반대학원 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 일반대학원 컴퓨터학과 석사

2003년 8월 : 숭실대학교 일반대학원 컴퓨터학과 박사

2004년 3월~현재 : 서일대학교 컴퓨터소프트웨어과 부교수

<관심분야> 모바일 컴퓨팅, 사물인터넷, ITS, 네트워크보안