

미래 인터넷을 위한 녹색화 네트워크 연구

KAIST | 이지형 · 윤동규 · 이 응*

1. 녹색화 네트워크 연구의 필요성

지구 온난화에 따라 전 세계적으로 연평균 기온과 해수면이 상승하고 있다. 내륙 담수호들이 사라지며 사막화가 진행되는 지역이 확대되는 한편 극지방과 내륙의 빙하들이 빠른 속도로 녹고 있다. 뿐만 아니라 이상 기후로 인한 자연재해가 다발하고 있으며, 생태계의 교란도 심심치 않게 발생하고 있다. 실제로 우리나라의 기상재해 피해는 10년마다 3.2 배 증가하고 있으며, 연평균 기온은 1912년에 비해 2008년 쉰째 1.7도 상승하였는데, 이는 전 세계 연평균 기온의 상승치인 쉰째 0.74도의 두 배가 넘는 수치이다. 21세기 말에 해수면은 최대 59cm 상승할 것으로 예상되고, 지구의 평균 기온이 쉰째 3.5도 상승하게 될 경우 생물종의 40~70%가 멸종할 것으로 예상되고 있다[1].

이러한 기후 변화의 주요한 원인이 이산화탄소 등의 온실가스에 의한 온실효과임은 주지의 사실이다. 현재 기후변화 완화를 위한 온실가스 감축 비용은 GDP의 3% 이내이지만, 무대책시 피해비용은 연간 세계 GDP의 5% 이상을 차지하고, 2050년에는 20% 이상을 차지할 것으로 예상된다. 이에 많은 국가들이 증가추세에

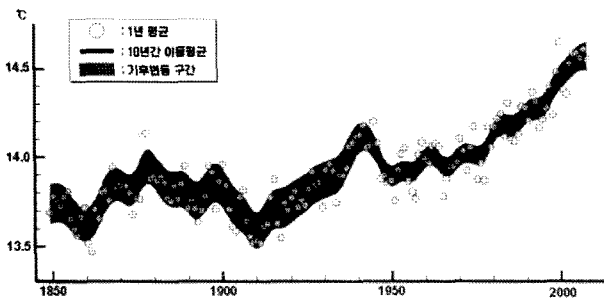


그림 1 전 세계 평균 온도 변화[2]

있는 대기 중의 온실가스 농도를 안정화시켜 생태계가 적응할 수 있는 시간의 범위 내에서 인위적으로 발생하는 기후변화를 방지하고자 기후변화협약을 체결하고 이행 중이다. 이에 따르면 선진국은 온실가스 배출량을 1990년 수준으로 감축시켜야 하고 개도국에 재정지원과 기술 이전 등의 의무를 지니며, 모든 국가는 온실가스 감축을 위해 노력해야 한다.

우리나라의 경우 2004년 온실가스 총 배출량은 5억 9100만 톤으로 1990년 대비 90.1% 증가하였고, 현재의 추세대로라면 2030년에는 90년 대비 216% 증가한 9억 5200만 톤으로 증가될 것이다. 2005년에 우리나라의 온실가스 배출량은 전 세계 배출량의 1.7%로 세계 10위였고, 1990년 대비 98.7%, 2000년 대비 12.1% 증가하였는데, 이는 멕시코를 제외한 OECD 국가 중 4위

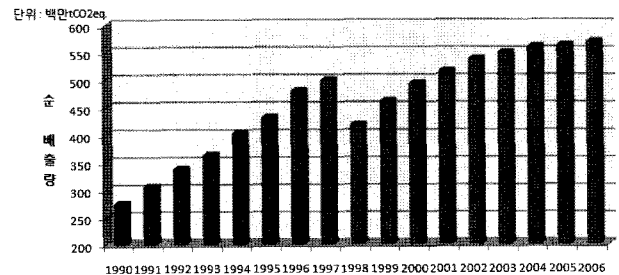


그림 2 대한민국 연도별 온실가스 순 배출량 (지식경제부, 2008)

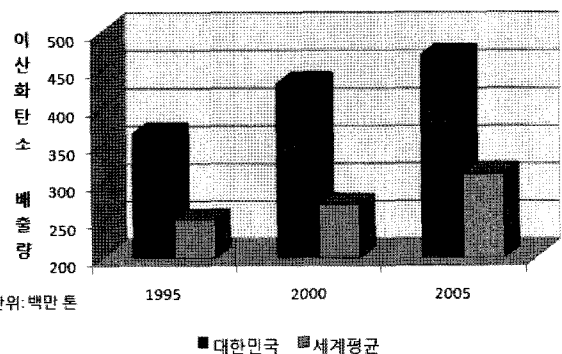


그림 3 대한민국과 세계평균 이산화탄소 배출량 (통계정보국, 2008)

* 정회원

† 본 연구는 기초기술연구회의 지원으로 수행하였음. 다양한 토론을 해주신, Princeton University의 Prof. Mung Chiang과 김홍석 박사 후 연구원에게 감사드립니다.

였다. 우리나라는 교토의정서 제1차 이행 기간(2008~2012년)에는 개발도상국으로 분류되어 감축의무 미부담국가였지만, 2013년부터 시작되는 제2차 이행 기간에는 감축의무 대상국에 추가 지정될 것이 가장 유력한 국가이다.

우리나라의 전력 소비 분야 중에서 IT분야의 전력 소비량은 2006년부터 연평균 9%씩 증가하여 2008년에는 총 4,202GWh의 전력을 소비하였다. 이 수치는 국가 전체 전력 소비의 1.2%로 우리나라 항공 산업에서 소모하는 양과 비슷한 수준이다. 온실가스 배출량은 1,750만 톤으로 국가 총 배출량의 2.8%를 차지하였으며, 2012년에는 3.1%를 차지할 것으로 예상된다. 전 세계적으로 IT분야는 기후변화에 영향을 미치는 요인 중 2~2.5%를 차지한다. 이러한 수치는 나머지 98% 가량을 차지하는 요인들에 비해 그리 크지 않다고 볼 수도 있지만, IT가 타 분야의 녹색화에 획기적으로 기여할 수 있다는 점에서 중요성은 크다고 볼 수 있다[3].

2008년 IT분야의 온실가스 배출량 중 네트워킹 시스템 분야가 차지하는 비율은 약 30%이다. 새로운 네트워크 서비스들과 사용자들의 증가에 따라 인터넷 트래픽은 기하급수적으로 증가하고 있다. 지금의 추세에 비추어 볼 때, 2025년에 IT분야는 평균적으로 2006년의 5배에 해당하는 전력을 사용할 것으로 예상되나 네트워크 분야는 13배의 전력을 소비할 것으로 전망된다. 이는 2006년에 IT분야의 전력 소모량 중 17%에 달하던 네트워크 분야의 전력 소비가 2025년에 43%로 증가할 것임을 의미한다. 이와 함께 네트워크 분야의 온실가스 배출량도 크게 증가할 것으로 예상된다.

하지만, 네트워크 녹색화에 대한 연구는 그 중요성에 비해서 전 세계적으로 태동 단계이다. 네트워크 분야의 주요 학회에서 녹색화에 대한 연구를 다루는 논문들이 아직 그 중요성에 비해서 많지 않아, 현재는 실제로 어떠한 접근 방법을 취해야 하는가에 대해서 생각하는 단계라고 할 수 있다. 본 논문에서는 네트워크 녹색화의 주요 연구를 소개하고, 전체적인 시스템의 관점에서 연구 문제화 할 수 있는 이론 및 실제적 방법론에 대해서 논한다. 특히 최적화 이론에 기반을 두어, 네트워크 녹색화 연구에 대한 관점을 데이터 요청자와 데이터 처리자의 관점에서 분류하여 논의한다.

2. 네트워크 녹색화

2.1 네트워크의 에너지 이용 현실

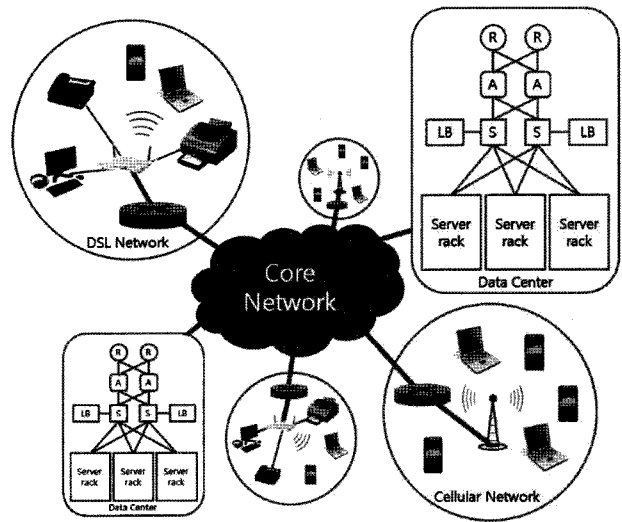


그림 4 데이터 센터와 에지 네트워크의 전체 구조

네트워크 분야에서의 전력 소모량이 빠르게 증가함에 따라 “네트워크 녹색화”가 새로운 주요 연구 분야로서 관심이 집중 되고 있다. 네트워크 녹색화는 크게 두 분야로 나뉘는데, 하나는 서버 집단으로서 사용자로부터 받은 요청이 수행되는 데이터 센터(Data Center)에 대한 녹색화이고, 나머지 하나는 개별 사용자의 요청이 시작되는 에지 네트워크(Edge Network)에 대한 녹색화이다(그림 4 참조).

최근 UCC, IPTV등 대용량 멀티미디어 콘텐츠 증가에 힘입어 전체 네트워크가 처리해야 할 데이터양이 급속히 늘어나고 있다. 이에 따라 데이터 센터에 대한 수요 또한 날이 커지고 있다. 그 결과 대학교, 금융기관, 정부기관, 미디어 기관 등과 거의 모든 경제 분야에 데이터 센터가 건설되고 있다. 글로벌 조사기관인 가트너에 따르면, 데이터 센터를 포함한 전체 서버에서 사용하는 에너지 소비량은 2008년 134TWh로 전체 IT 하드웨어 에너지 소비량의 16%를 차지한 것으로 밝혀졌다. 전 세계 데이터 센터의 전력 소모량은 이란·멕시코·스웨덴·터키 등이 각각 사용하는 전력량과 비슷한 수준으로 조사되었다[4]. 또한 미국 환경보호청의 보고서에 따르면 미국 데이터 센터의 연간 전력량이 2000년 약 300억 kWh에서, 2006년 610억 kWh로 두 배 증가했으며, 이 후 매년 15%씩 급증할 것이라 예상되고 있다[5].

에지 네트워크, 예를 들면 무선 액세스, DSL(Digital Subscriber Line) 액세스, LAN(Local Area Network) 액세스에서도 많은 사용자수에 기인하여 많은 양의 에너지가 소모되고 있다. 2007년 기준으로 세계적으로 41억 개 이상의 이동 전화 단말기가 있는데[6], 보통 이동 전화기의 대기전력이 0.2W이므로 이를 가정하여

계산하면, 이동 전화 단말기의 연간 전력 소모량이 전 세계적으로 약 70억 kWh에 육박함을 알 수 있다. 전 세계적으로 가장 많이 사용되는 광대역 접근망인 DSL도 2억 개 이상의 회선이 설치되어 있어 그에 따른 에너지 소모량도 엄청나다. 실제로 EU에서는 DSL에서의 에너지 소비량을 몇 년 이내에 현재 수준의 반으로 낮출 계획이라고 한다.

2.2 네트워크 녹색화에 대한 연구: 가능성 및 도전

네트워크 분야에서의 에너지 소비량과 그 증가율이 빠른 속도로 늘어나고 있지만, 이를 대폭 줄일 수 있는 여지는 충분히 존재한다.

- 데이터 센터의 경우 서버들의 평균 이용률(utilization)이 20~30%에 불과하다[7]. 이에 가상화 기술이나, 동적 전압 주파수 조절(DVFS)과 같은 에너지 비례적인 컴퓨팅 기술을 이용하여 서버들의 이용률 대비 전력 소모량을 줄이려고 하는 시도가 활발히 이루어지고 있다[8].
- 여러 종류의 무선 네트워크에서도 트래픽의 확률 특성을 고려하여 기지국이나 AP 장비를 효율적으로 켜고 끄므로써 에너지 소모량을 줄이려는 연구가 많은 곳에서 진행되고 있다[9,10].
- DSL 네트워크에서는, 작은 데이터 전송률의 희생으로 많은 양의 에너지를 줄일 수 있다는 결과가 도출 되는 등의 관련 연구가 진행되고 있다[11].

네트워크 녹색화에 대한 연구에서는 네트워킹 시스템 설계에 에너지 최적화 문제를 반영시키는 방법이 핵심이다. 새로운 네트워킹 알고리즘에 대한 연구도 필요할 뿐만 아니라, 기존의 알고리즘들은 재조사 및 수정되어야 한다. 에너지 최적화에 대한 이슈는 결국 *에너지와 시스템 효율 사이에서 트레이드오프(trade-off)를 적절하게 선택하는 방법*의 문제이다. 이를 위해 에너지 최적화에 대한 문제를 전체적인 입장에서 바라보면, (i) 새로운 척도와 문제 정의, (ii) 분산 및 모듈화된 녹색화 알고리즘, (iii) 녹색화 비용과 공평 녹색화와 같은 도전들이 존재한다. 이와 관련하여 5장에서 자세히 기술한다. 먼저 다음의 두 장에서 데이터 센터 네트워크와 에지 네트워크의 녹색화에 대한 연구의 예와 접근 방법에 대해서 기술한다.

3. 데이터 센터 네트워크 녹색화

3.1 개요 및 이슈

데이터 센터는 고객으로부터의 요청에 대해 여러

계산을 수행하고 그 결과를 고객에게 전달해 주기 위해 필요한 서버들과 저장장치들을 묶어 놓은 곳이다. 데이터 센터 녹색화는 데이터 센터의 여러 측면에서 소모되는 에너지들을 최적화하는 것을 의미한다. 데이터 센터에서 발생하는 에너지 소모는 그 특성에 따라 크게 데이터 센터의 일반적인 동작에 따른 에너지 소모와 데이터 센터 유지(냉각)에 따른 에너지 소모로 나뉜다.

데이터 센터 냉각과 관련된 에너지 소모 최소화에 대한 해결책으로는 IT 장비 간의 위치 조정이나 장비의 공기 흡입구에 천공타일을 추가하거나 제거하여 공기 흐름을 개선하는 방법, 수냉 이코노마이저나 가변 속도 드라이브가 장착된 CRAC(Computer Room Air Conditioners)장치와 같은 신식 냉각 시스템 및 열 저장 시스템 기기를 도입하는 방법 등이 제시되고 있다[12]. 이처럼 데이터 센터 냉각 에너지와 관련된 문제들은 주로 하드웨어 영역에서나, 열역학적인 영역에서 접근되므로, 여기서는 이 정도로만 언급을 하고 더 자세히 다루지는 않겠다.

이를 제외한 데이터 센터 녹색화는 주어진 지연 조건하에서 계산 및 결과의 전송 방법을 최적화하여 에너지 소모를 최소화하는 문제로 생각할 수 있다. 이 문제는 근본적으로 에너지 소모량과 지연 간의 상충 관계에 기인한 것이다. 사용자들의 요청을 받아 그를 수행하고 다시 사용자에게 응답하기까지의 지연을 줄이기 위해서는 계산과 전송의 속도를 높여야 하는데, 이는 자연스럽게 높은 에너지 소모를 유발하기 때문이다.

좀 더 나아가 데이터 센터 녹색화 문제는 정해진 지연 조건 안에서 여러 데이터 센터들로 구성된 네트워크의 총 에너지 소모량을 최소화하는 문제로 일반화 될 수 있다. 이 전역(global) 최적화 문제는 데이터 센터의 네트워크적인 특성을 이용한 녹색화이므로, 이를 데이터 센터 네트워크 녹색화 문제라 명명할 수 있을 것이다. 한편 이 문제는 중앙 집중식으로 풀기에는 너무 복잡하다. 그러나 이 문제를 잘 들여다보면 다음의 최적화 문제들이 최적화 대상에 따라 계층적으로 결합되어 있음을 확인 할 수 있다.

- 각 서버 컴퓨터의 에너지 최적화
- 한 데이터 센터 내의 서버 클러스터들의 에너지 최적화
- 지리적으로 분산된 여러 데이터 센터들의 에너지 최적화

이러한 계층적 문제 구조 속에 데이터 센터 네트워크 녹색화는 궁극적으로 다음과 같은 기술적인 문

제를 해결 하는 것이다.

- 각 서버 컴퓨터에서의 작업 스케줄링 및 클락 속도 조정의 최적화
- 여러 서버들 사이에서의 작업량 분산 최적화

위의 문제들에 대한 접근 방법을 설명하고자 데이터 센터 네트워크를 간략하게 모델링하고 그에 대한 녹색화 문제를 수학적으로 정의하겠다.

3.2 데이터 센터 네트워크 녹색화 문제 정의의 예

한 회사가 소유한 데이터 센터에 총 N 개의 서버 $i = 1, 2, \dots, N$ 가 있다고 하자. 이 서버들은 여러 개의 데이터 센터에 분산되어 있을 수도 있고 한 데이터 센터 내에 위치할 수도 있다. 서버 i 의 클락 속도를 s_i 라고 하자. 또한 서버 i 가 클락 속도 s_i 에서 동작할 때의 전력 소모량을 $p_i(s_i)$ 라고 하자. 그리고 사용자의 요청들 $j=1, 2, \dots, J$ 가 있다고 하고, 요청 j 에 의해 총 수행되어야 할 계산량을 r_j 라고 하자. 이 계산량 r_j 는 일부의 서버들 $I_j \subset \{1, 2, \dots, N\}$ 에게 분산되어 실행된다고 하자. 여기서 서버 $i \in I_j$ 는 요청 j 에 대해 x_{ij} 만큼의 계산을 수행하며, $\sum_{i \in I_j} x_{ij} = r_j$ 이다. 이러한 요청 j 의 작업량 분배에 대한 계산은 요청 j 가 시작된 곳에서 이루어진다고 간주한다.

위와 같은 환경에서 데이터 센터 네트워크 녹색화에 대한 전역 최적화 문제는 다음과 같이 수식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} & \text{minimize } \sum_i (p_i(s_i) \frac{\sum_j x_{ij}}{s_i}) + \sum_j \sum_{i \in I_j} x_{ij} (\alpha p_{ji} d_{ji} + \beta p_{ij} d_{ij}) \\ & \text{subject to} \\ & \max_{i \in I_j} (\frac{x_{ij}}{s_{ij}} + d_{ji} + d_{ij}) \leq D_j, \quad \forall j = 1, \dots, J \\ & \sum_i x_{ij} = r_j, \quad \forall j = 1, \dots, J, \quad \sum_j s_{ij} = s_i, \quad \forall i = 1, \dots, N \\ & \text{over } x_{ij} \geq 0, \quad s_i \geq 0, \quad s_{ij} \geq 0 \end{aligned}$$

목적 함수의 첫 번째 항은 각 서버 내에서 소모되는 에너지량을 나타낸다. 서버 i 는 총 요청받은 작업 $\sum_j x_{ij}$ 을 수행하는데 $(\sum_j x_{ij})/s_i$ 의 시간이 걸린다. 그러므로 서버 i 에서의 총 에너지 소모량은 $p_i(s_i)(\sum_j x_{ij})/s_i$ 가 된다. 목적 함수의 두 번째 항은 데이터 센터 네트워크에서 서버 간에 트래픽을 전송하는 과정에서 소모되는 에너지량이다. 요청 j 가 시작된 곳에서 작업량 분배에 대한 계산이 끝나면 그에 대한 정보를 각 서

버 $i \in I_j$ 들에게 전달해야 한다. 여기서 서버 i 가 받아야 할 정보량은 x_{ij} 에 비례한다고 가정하여 αx_{ij} 라고 전달하는데 걸리는 시간을 d_{ji} 라고 하자. 또한 데이터 센터 네트워크에서의 라우팅은 이미 결정되어 있으며, 모든 링크 상의 전송이 각 링크의 캐피시티(capacity) 속도로 이루어진다고 가정한다. 여기에 모든 링크의 캐피시티와 전송 대역폭을 알고 있다면, 그에 따라 요청 j 가 시작한 곳으로 부터 서버 i 까지 1비트를 전송하는데 소모되는 전력량을 구할 수 있다. 이 단위 전력 소비량을 p_{ji} 라고 하자. 요청 j 는 서버 i 에게 αx_{ij} 만큼의 데이터를 전송하므로 여기에 총 $\alpha p_{ji} x_{ij}$ 의 전력이 사용된다. 그러므로 요청 j 의 작업량 분배에 관한 전송에 드는 총 에너지 소비량은 $\alpha \sum_{i \in I_j} p_{ji} x_{ij} d_{ji}$ 가 된다.

반대로 I_j 에 속하는 각 서버들의 계산결과를 요청 j 가 시작된 곳으로 전송하는데 소모되는 에너지를 고려해보자. 서버 i 가 보내야 할 계산 결과의 정보량도 x_{ij} 에 비례하여 βx_{ij} 의 값을 갖는다고 하고, 그것의 전송 시간을 d_{ij} 라고 하자. 그러면, 요청 j 에 대해 계산 결과 값을 전달하는데 사용되는 에너지량은 $\beta \sum_{i \in I_j} p_{ij} x_{ij} d_{ij}$ 가 된다. 그러므로 요청 j 의 작업 분산화에 따른 네트워크의 전송 에너지 소모량은

$$\sum_{i \in I_j} (\alpha p_{ji} x_{ij} d_{ji} + \beta p_{ij} x_{ij} d_{ij}) = \sum_{i \in I_j} x_{ij} (\alpha p_{ji} d_{ji} + \beta p_{ij} d_{ij})$$

가 된다.

일반적으로 각 요청을 한 사용자들은 그들의 서비스가 일정 시간 내에 이루어지기를 원한다. 이를 반영하여 요청 j 에 대한 결과값이 지연 D_j 안에 해당 사용자에게 전해져야 한다고 하자. 한편 하나의 서버가 여러 요청들을 동시에 수행하는 경우에는 요청별로 서버의 처리자원(클락 속도)을 분배해줘야 한다. 서버 i 에서 작업 x_{ij} 들에게 분배되는 일정한 클락 속도를 s_{ij} 라고 표기하자. 그러면 요청 j 에 대한 사용자가 느끼는 지연은 수식으로 나타낼 수 있다.

$$\max_{i \in I_j} (\frac{x_{ij}}{s_{ij}} + d_{ji} + d_{ij})$$

괄호안의 첫 번째 항은 서버 i 에서 작업 x_{ij} 가 수행되는데 걸리는 시간이고, 두 번째 항과 세 번째 항은 작업 x_{ij} 에 대한 정보와 계산 결과를 송수신하는데 걸리는 시간이다. 여기에는 지연 시간이 최대 지연으로 결정된다는 가정이 깔려있다.

3.3 분산화에 의한 문제 해결

앞에서 언급되었듯 본 최적화 문제는 중앙 집중식으로 풀기 어려우므로 이에 대한 분산화된 알고리즘이 제시되어야 한다. 최적화 이론이나 제어 이론의 수학적 도구들을 이용하면 위 문제는 계층적이고 분산화된 문제들 — 데이터 센터 간 혹은 한 데이터 센터 안에서의 최적화 문제, 한 서버에 대한 최적화 문제 — 로 분해될 수 있다. 분해된 하위 문제들은 각각 서로 다른 네트워크 구성 요소들이 독립적으로 해결하게 된다. 이를 테면 각 서버들은 자신의 클락 속도를 얼마로 결정할 것인지, 그리고 결정된 클락 속도를 각 요청들에게 어떻게 분배할 것인지를 결정한다. 요청이 들어온 서버나 별도의 로드 밸런서(load balancer)에서는 해당 요청에 대한 작업량을 각 서버들에게 어떻게 배분해야 할지 결정한다.

여기서 한 가지 눈여겨 볼 사항은 앞의 최적화 문제를 푸는 방법만 분산화된 것이 아니라, 그 문제에 대해 제시되는 답도 주어진 작업량을 각 서버들에 분산하자는 대안을 제시한다는 것이다. 다시 말해 녹색화 문제 자체는 분산화 된 방법으로 해결 하는데, 그에 따른 답도 다른 의미의 “분산화” 형태를 띠는 것이다. 그런데 어떤 요청이 들어왔을 때, 그 요청을 받은 서버에서 그에 따른 모든 작업을 수행하면 안 되는 것인지, 혹은 굳이 그 요청에 대한 작업량을 다른 서버들에게도 분배해야만 하는 것인지에 대해 의문을 가질 수 있다.

이에 대해 생각해보면, 앞에 정의한 문제에서 에너지 소모를 크게 서버 내에서의 에너지 소모와 서버들 간의 트래픽 전송에 의한 에너지 소모로 구분하였는데, 우선 작업량을 분산하는 것이 서버 내에서의 에너지 소모 절약 측면에서 더 유리한 것인지 살펴보겠다.

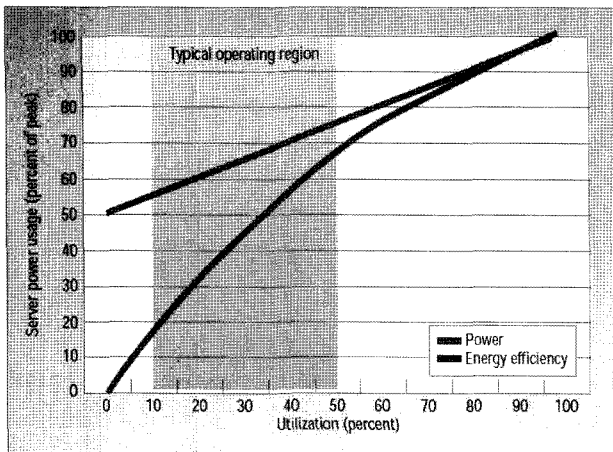


그림 5 서버 CPU 이용률에 따른 전력 사용량 및 에너지 효율 [7]

앞에서는 서버 CPU의 동작과 소모 전력량의 관계를 단순히 주어진 외부함수로 두었는데, 이 함수가 대략 어떤 형태를 갖을지는 그림 5를 보고 유추할 수 있다[7].

그림 5에서 직선으로 나타나는 것은 전력이고 곡선으로 나타나는 것은 에너지 효율인데, 에너지 효율은 CPU 이용률을 전력 사용량으로 나눈 값으로 정의되었다. 에너지 효율 곡선은 단조 증가 곡선의 형태를 띠므로, CPU의 이용률이 올라감에 따라 에너지 효율 역시 증가한다는 것을 알 수 있다. 반대로 CPU 이용률이 떨어짐에 따라 점점 에너지 효율은 감소하여 서버에 작업량이 없을 때(CPU 이용률 0)는 무려 최대 전력의 반에 해당되는 전력이 소모된다. 이런 현상을 극복하고자 서버가 유휴상태일 때, 약간의 반응 지연 시간에 대한 것은 희생하되 서버(CPU는 물론 전력 공급 장치도)를 켜고 끌 수 있는 파워 냅(power nap)이라는 기술이 발명되었다[13]. 이와 같은 기술에 힘입어 CPU 이용률이 0일 때, 무시할 수 있을 만큼의 전력이 소모된다면, 많은 수의 서버로 CPU 이용률이 작은 상태로 작업하는 것보다 더 적은 수의 서버로 높은 CPU의 이용률 환경에서 작업하는 것이 에너지 사용 효율 측면에서 더 바람직할 것이다. 이와 같은 관점에서 본다면 요청 받은 작업량을 굳이 분산화하지 않고, 한 개의 서버에서 CPU를 풀가동하여 작업을 수행하는 것이 에너지 절약에 더 도움 될 것이다.

더구나 같은 요청에 대해 많은 서버에서 작업할수록 그들 간의 통신에 사용되는 에너지 소모도 증가한다는 사실을 고려하면 요청된 작업을 분산화하지 않는 것이 에너지 절약 측면에서 더 유리해 보인다. 그러나 작업들을 분산화 하여 처리하지 않고 요청 받은 서버만이 해당 작업을 수행한다면 작업이 완료되기까지 긴 시간이 걸릴 것이다. 만약 어떤 특정 서버로 요청들이 몰린다면, 뒤늦게 요청한 사용자들을 앞의 많은 요청에 대한 작업이 전부 끝날 때까지 꽤나 오랜 시간 기다려야 할 것이다. 이를 반가워할 사용자는 거의 없다. 따라서 결론적으로 각 요청에 대한 작업이 아주 길지 않은 시간 안에는 완료되어야 한다는 “지연 조건”에 의해 데이터 센터 내의 각 서버들은 분산된 방식으로 작업을 수행하게 된다.

4. 에지 네트워크의 녹색화

오늘날 전 세계 수 억 명의 사람이 네트워크를 사용한다. 이들의 PC, 휴대전화와 같은 개인 단말은 에지 네트워크에 속하며, 접속 네트워크(access network)를 통해 중심 네트워크(core network)와 연결되고, 다른

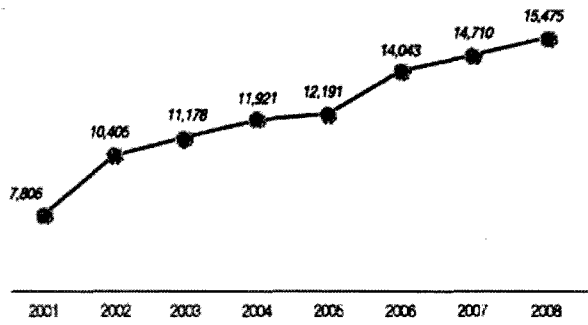


그림 6 연도별 초고속인터넷 가입자 수 (단위: 천명)[1]

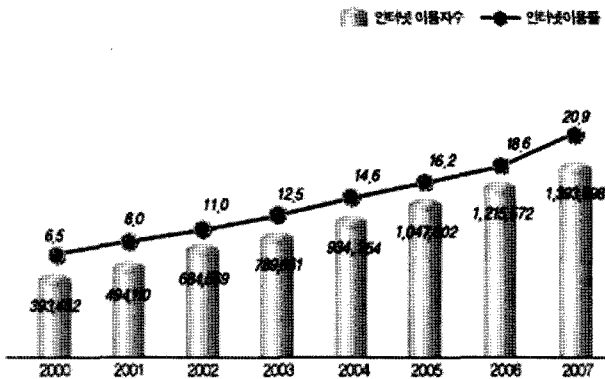


그림 7 세계 인터넷 이용자 수 및 이용률 (단위: 천명, %)[1]

에지 네트워크의 PC, 휴대전화, 서버, 데이터 센터 등과 통신한다. 우리나라에는 많은 초고속인터넷 서비스 사용자가 있고, 그 수는 지속적으로 늘고 있다. 전 세계적으로는 2013년까지 이동통신 가입자 수가 20억 명 가량 증가해 향후 5년간 60% 늘어날 전망이다. 광대역 서비스 가입가구 순증은 7억 이상으로 72%의 성장이 예상된다. 높은 사용자 수와 성장률을 고려할 때 에지 네트워크에서 데이터 송수신을 담당하고 있는 접속 기술들의 에너지 효율 향상을 위한 연구는 매우 중요하며, 많은 가능성을 내포하고 있다.

국가에 따라 약간의 차이가 있지만, DSL, 수동 광통신망(Passive Optical Network, PON), 동축 케이블 통신망(coaxial cable network) 등의 유선 접속 기술들과 셀 방식 네트워크(cellular network), WiMAX 등의 무선 접속 기술들은 널리 사용되고 있는 접속 기술들이다. 이러한 시스템들은 대부분 데이터 전송률을 높이기 위해 전력 소모를 증가시키면 간섭 현상의 영향이 더욱 커져 일정 이상의 전력을 사용했을 경우, 전송 성능 향상이 둔화되는 특성을 가지고 있다. 이러한 특성은 에너지 효율을 고려할 경우에는 데이터 전송 성능과 에너지 소비 사이에 상충관계를 형성하여 시스템을 에너지 최적화하는데 중요하게 이용될 수 있다. 이 장에서는 최근의 연구 결과들을 바탕으로 DSL과 무선 접속망에서의 주요 녹색화 관련 접속 기술들

을 살펴보고, 전력 소모를 감소시킬 수 있는 방안에 대해 살펴보겠다.

4.1 DSL

DSL은 지역 전화망의 구리선을 통해 데이터를 전송하는 접속 기술이다. 전 세계에서 ADSL, VDSL 등으로 상업화되어 2억 명 이상이 사용하고 있으며, 광대역 접속 기술 시장의 65%를 차지하고 있다.

DSL에서는 한 전선 뭉치에서 동작하는 다른 회선 간에 누화(crosstalk)라 불리는 전자기 간섭이 발생하는데, 이는 데이터 전송률을 높이기 위해 소비 전력을 증가시킬수록 그 영향이 커진다. 즉 누화는 DSL의 데이터 전송 성능 향상을 저해하는 요소이다. 누화를 해결하기 위한 핵심 기술이 동적 스펙트럼 관리(Dynamic Spectrum Management, DSM)이다. DSM은 모든 유저들의 스펙트럼을 조절하여 누화를 막거나, 신호를 조정하여 누화를 제거하는 기술이다. 이를 바탕으로 지난 몇 년간 DSL의 데이터 전송률을 크게 향상시키는 강력한 DSM 알고리즘들이 발표되어왔다. 이 알고리즘들은 완벽히 자율적이고 분산되어 있는 것에서부터 완전히 중앙 집중적인 것에 이르기까지 매우 다양하다[14-18]. 하지만, DSM 알고리즘들은 대부분 데이터 전송률의 최대화를 목적으로 할 뿐, 에너지 소비에 대한 것은 고려하지 않는다. 최근의 그린 ICT에 대한 요구에 따라 에너지 소비를 고려한 DSM 알고리즘이 제안되기 시작했다. 에너지를 고려한 DSM 알고리즘(이하 그린 DSL)은 데이터 전송 성능과 에너지 소모 간의 상충 관계에서 최적화를 다루는 방향으로 생각할 수 있다. 우리는 최근의 연구 결과를 통해 기존 DSL의 전력 소비를 약 50%로 줄이면서도 기존 대비 85%의 데이터 전송 성능을 얻을 수 있음을 확인하였다[11]. DSL의 전력제어를 통한 동적 스펙트럼 관리문제에서 에너지 최적화에 대한 고려를 어떻게 하는지 간략하게 다루고자 한다.

- 전송률 최적 DSM

이를 개략적으로 설명하면 다음과 같다. 기존 DSM 알고리즘은 모뎀(또는 사용자)별로 사용할 수 있는 전력의 최대값이 정해져 있고, 한 모뎀의 각 채널별로 부여할 수 있는 전력 역시 최대값이 한정되었다. 이러한 제한 조건 내에서 각 모뎀의 데이터 전송률의 가중합을 최대로 하는 전력 분배를 찾는 것이 기존의 문제이다. 이 때 가중합을 사용하는 이유는 데이터 전송률을 최대로 할 때 발생할 수 있는 공정성의 문제 또는 우선권의 문제를 반영하기 위한 것이다.

이를 수식적으로 표현하면, N 개의 간섭하는 모뎀

들이 각각 K 개의 주파수 대역(톤)을 이용할 수 있을 때, 모뎀 n 의 데이터 전송률은 $R^n = f_s \sum_{k \in K} b_k^n(s_k)$ 이며, 여기에서 f_s 는 DMT(Discrete Multi Tone) 기호 전송률을 의미한다. b_k^n 은 모뎀 n 이 톤 k 로 전송하는 비트 전송률로, 각 모뎀들이 톤 k 에 할당하는 전송 전력의 벡터인 $s_k = [s_k^1, \dots, s_k^N]^T$ 의 함수이며, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$b_k^n(s_k) = \log_2 \left\{ 1 + \frac{(\text{channel gain})s_k^n}{\sum_{m \neq n} (\text{channel gain})s_k^m + \text{noise}} \right\} \text{bit/Hz}$$

위의 관계에서 비트 전송률이 모든 톤과 모든 모뎀에 걸쳐 결합되어 있음을 알 수 있다. 이는 한 모뎀에서 전송 전력을 증가시킬 경우 모든 모뎀들이 그 영향을 받는다는 것, 즉 누화를 의미한다. 따라서 전송 전력을 증가시키는 것이 전체 데이터 전송률의 증가에 부정적인 영향을 끼치게 될 수 있는 것이다. 이러한 관계를 바탕으로, 다음과 같은 데이터 전송률의 가중합을 최대화하는 문제를 생각할 수 있다.

$$\begin{aligned} & \max_{\{s_k^n, k \in K, n \in N\}} \sum_{n \in N} \omega_n R^n \\ & \text{s.t. } P^n \leq P^{n, \text{tot}}, n \in N \\ & 0 \leq s_k^n \leq s_k^{n, \text{mask}}, k \in K, n \in N \end{aligned}$$

위 식에서 모든 n 에 대하여 ω_n 은 모뎀 n 의 가중값이다. 그리고 $P^{n, \text{tot}}$ 는 모뎀 n 의 전체 가용 전력이고, $s_k^{n, \text{mask}}$ 는 모뎀 n 이 톤 k 에 실을 수 있는 전송 전력의 스펙트럼 마스크 제약 조건이다. 이러한 제한 조건 하에서 가장 큰 데이터 전송률을 확보하는 것이 기존 DSM 알고리즘의 목적임을 알 수 있다.

- 에너지 효율을 고려한 DSM

여기에 때때로 각 모뎀의 최소 데이터 전송률을 보장하기 위해서 데이터 전송률의 하한을 제시하는 조건이 추가되기도 한다. 한편 데이터 전송 성능의 최소 요구값을 만족시키는 한도 내에서 전력 소모를 최소화 하는 방법도 생각해 볼 수 있다. 이 방법에서는 시스템 전체 전력의 합을 최소화 하는 것을 목적으로 하고, 한 모뎀이 한 채널에서 사용할 수 있는 전력량과 모뎀별로 이 값들을 더한 전력량의 상한이 제한 조건으로 제시된다. 이를 수식적으로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \min_{\{s_k^n, k \in K, n \in N\}} \sum_{n \in N} P^n \\ & \text{s.t. } P^n \leq P^{n, \text{tot}}, n \in N \\ & 0 \leq s_k^n \leq s_k^{n, \text{mask}}, k \in K, n \in N \\ & R^n \geq R^{n, \text{target}}, \forall n \in N \end{aligned}$$

위의 식에서 데이터 전송률의 하한을 $R^{n, \text{target}}$ 으로 지정하여 최소한의 요구 성능을 보장함을 알 수 있다.

이의 연장선상에서 생각해 볼 때, 데이터 전송 성능과 전력 소비를 동시에 고려하여 최적의 결과를 도출해 내고자 한다면, 데이터 전송률의 가중합에서 소비 전력의 가중합을 빼 값을 최대화 시키는 문제를 생각할 수 있다. 이를 수식적으로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \max_{\{s_k^n, k \in K, n \in N\}} \sum_{n \in N} \omega_n R^n - \sum_{n \in N} \ell^n P^n \\ & \text{s.t. } P^n \leq P^{n, \text{tot}}, n \in N \\ & 0 \leq s_k^n \leq s_k^{n, \text{mask}}, k \in K, n \in N \\ & R^n \geq R^{n, \text{target}}, \forall n \in N \\ & \sum_{n \in N} P^n \leq \alpha \sum_{n \in N} P^{n, \text{tot}} \end{aligned}$$

위의 식에서 시스템의 성능 보장을 위해 전송률의 하한을 둔 것을 확인할 수 있다. 또한 비례상수 α 를 두어 소비 전력의 상한을 두었다. 이를 통해 원하는 수준 이상의 전력 소비 감소를 확실하게 이룰 수 있다.

위에서 제시한 최적화 문제들 중에서, 에너지 소비와 관련된 제한 조건을 넣는 경우와 목적 함수에 에너지를 고려한 부분을 추가한 경우 모두 녹색화는 데이터 전송률과 같은 성능 척도를 감소시키게 된다. 이는 녹색화의 대가이다. 그러나 이를 바탕으로 한 시뮬레이션 결과를 통해서 적은 대가를 치르면서도 에너지 소비를 크게 줄일 수 있음을 확인할 수 있는데, 이는 매우 고무적이다.

- 에너지 효율의 사용자간 공평성

네트워크의 녹색화는 크게 보면, 에너지 효율을 높여 에너지 사용량을 줄이면서도 시스템 효율의 감소를 적정선에서 유지하는 것이 핵심 연구 방향이다. 이때, 녹색화의 대상을 각 주체(예를 들면, 사용자)의 관점에서 바라볼 때, 새롭게 생각할 수 있는 문제가 에너지 효율의 공평성(Fairness in Greening)이다. 예를 들어, 에너지를 반으로 줄였다고 했을 때, 누구의 에너지를 얼마나 줄였는가에 따라 각 사용자들이 느끼는 서비스의 질은 달라질 것이다. 즉, 전체 에너지의 반을 줄였다고 했을 때, 누구의 에너지를 얼마나 줄였는가에 대한 이슈가 대두되는 것이다.

최근 연구에서 우리는 간섭이 어느 정도 한정된 네트워크에서, 하나의 일반적인 최적화 문제로 표현되는 공평성을 고려한 에너지 최적화 공식 네 가지와 이의 해를 구하는 분산 알고리즘을 제시하였다[19].

- Greening 1: 각 모뎀의 가용 전력을 같은 비율로 제한하며 전송률의 가중합을 최대화

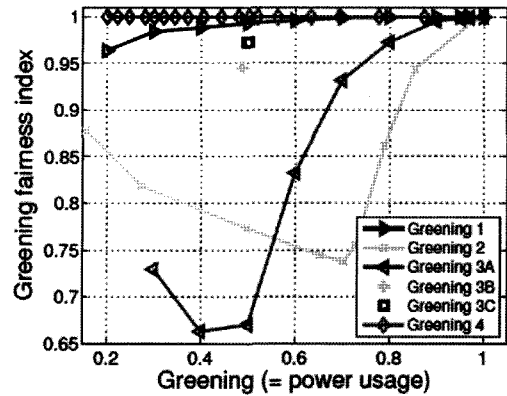
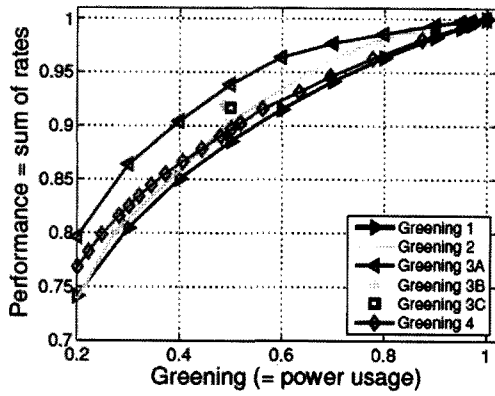


그림 8 녹색화 정도와 성능 간의 상충 관계

- Greening 2: 전송률의 하한을 같은 비율로 낮추며 전력의 합을 최소화
- Greening 3: 총 가용 전력만을 제한하고 전송률과 공평척도함수의 가중합을 최대화
- Greening 4: 소비전력 당 데이터 전송률을 녹색화 이전을 기준으로 하여 제한하고 데이터 전송률의 가중합을 최대화

위의 네 가지 최적화 문제 중 특히 Greening 3에서 공평척도함수와 그 가중치를 달리하여 3A, 3B, 3C라고 할 때 시뮬레이션 결과는 그림 8과 같다.

위의 시뮬레이션 결과에서 볼 수 있듯이, 녹색화 방법과 그 정도에 따라 공평성이 크게 차이를 알 수 있다. 보편적으로 전력 소비를 크게 줄여도 데이터 전송률이 상대적으로 적게 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 그러나 공평성은 각 경우에 큰 편차를 보이므로, 사용자가 요구하는 서비스의 질을 고려하여 녹색화 방법과 정도를 달리하는 것이 매우 중요하다. 이를 위해 서비스 환경을 수학적으로 깊게 연구하여 다양한 시뮬레이션을 통해 최적의 공평한 녹색화 방안을 찾는 것이 필수적이고, 이는 중요한 연구주제가 될 수 있다.

4.2 무선 광대역 접속망

무선 센서 네트워크 분야에서는 에너지 소모를 고려한 통신 규약 등에 대한 연구가 활발하게 진행된 반면, 무선 셀룰러 네트워크와 같은 인프라 기반의 무선 접속망에서의 에너지 절약은 상대적으로 거의 주목받지 못했다. 기존의 무선 셀룰러 네트워크의 전력 제어에 대한 연구들은 대부분 단말 장치와 기지국에서의 에너지 절약보다는 주로 간섭을 조절하여 성능을 높이는 데 초점을 두고 있다. 에너지 소모를 줄이기 위한 제시된 방법들은 주로 대기상태(sleep mode)와 유ힴ상태(idle mode)를 두는 것이다. 이는 이동 단말이 데이터를 송수신하지 않는 동안에 시스템을 대기상

태로 전환시키는 방법이다. 대기상태의 시스템은 주기적으로 수신할 데이터가 있는지를 확인한다. 유ힴ상태는 대기상태의 다음 단계로, 이동 단말은 이 상태에서 IP를 보유하지 않으며, 매우 긴 기간 동안 비활성화 된다.

그 밖에 경우로, 활성상태에서 데이터를 송수신하는 이동 단말의 전력 소모를 줄이기 위한 방법을 생각할 수 있다. 새너의 용량 공식을 고려하여 소비전력과 용량 간의 관계를 간단히 나타내면 다음과 같다.

$$x = \omega \log \left(1 + \frac{p_{out} g}{\sigma^2} \right) \Leftrightarrow p_{out} = \left(\exp \left(\frac{x}{\omega} \right) - 1 \right) \frac{\sigma^2}{g}$$

이 때 x 는 전송률이고, ω 는 주파수 대역이다. p_{out} 은 RF 전력 증폭기의 출력 전력이고, g 는 채널 증폭률이며 σ^2 은 잡음 전력이다. 이 식에서 대기 중으로 방출되는 전력이 데이터 전송률에 지수적으로 비례한다는 점은 매우 중요하다. 데이터 전송률을 조금만 줄여도 소비 전력이 크게 감소한다는 의미이기 때문이다. 즉 전송 속도에 크게 민감하지 않은 시스템의 경우 에너지와 지연 간의 상충 관계를 통해 매우 큰 경제적 이득을 얻을 수 있다.

충분히 활용되지 않고 있는 시스템의 경우에서도 역시 에너지 절감을 달성할 수 있다. 무선 접속 네트워크는 채널 상태가 시간에 따라 크게 변화하고, 부하의 급격한 변화가 예측되지 않기 때문에 이에 대응하기 위하여 대부분 비효율적으로 사용되고 있다. 게다가 무선 접속 네트워크가 담당하고 있는 영역 내의 공간에 따라 전송량이 다르기 때문에, 시스템 부하의 변화가 크다. 뿐만 아니라 무선 셀룰러 네트워크의 경우에는 한 셀의 이용 단말이 다른 셀로 이동할 때 통화 절단을 예방하기 위해 상당량의 주파수 대역을 남겨 두어야 하는데, 통화 절단률을 0.5%로 보장하기 위해서는 시스템 용량의 30%를 남겨두어야 한

다. 또한 큰 부하가 걸리는 경우에는 이러한 문제가 시스템의 낭비를 더욱 심화시키는데, 그럴수록 이동 단말의 에너지를 절약할 수 있는 가능성은 커진다.

한편 이와 같이 이동 단말의 전력 소모와 데이터 전송률 간의 관계를 따질 때, 회로 전력(circuit power)과 대기 전력(standby power)에 의한 전력 소모도 고려하여야 한다. 이 연구들에 따르면, 기본적으로 통신에 필요한 연산을 처리하기 위해 사용되는 전력이 있기 때문에 느리게 전송하는 것이 항상 에너지를 절약하는 방법은 아니며, 때로는 빠르게 전송을 끝마치는 것이 더 이익인 경우도 있다. 이러한 연구들은 단일 에너지를 짚[20], 무선 근거리 네트워크[21], 애드혹 네트워크[22], 다중 입출력(Multiple-Input Multiple-Output, MIMO) 시스템[23], 직교 주파수 분할 다중 접속(Orthogonal Frequency-Division Multiple Access, OFDMA) 시스템[24], IEEE 802.16m WiMAX2[25] 등에서 회로 전력 소모와 전송량. 이러한 연에너지 최적의 전송률을 얻 빠르게 전통합계층적 관점으로 진행되었다. 그러나 정적인 시스템으로부터 얻어진 에너지 최적 전송률이 가변적 환경에서도 반드시 최적일 수는 없다. 게다가 정적 환경에서의 에너지 최적 전송률을 바탕으로 전운영은 정체 현상을 일으킬 수 있는데, 이로 인해 대기 전력으로 소모되는 에너지의 양이 증가한다. 이 문제는 가변적 환경에서 이동 단말의 에너지 소모를 최적화하는데 있어 해결해야 할 과제이다.

기지국은 이동 단말과 함께 에지 네트워크를 구성한다. 사람들은 기지국의 에너지 소비가 이동 단말보다 훨씬 크다는데 주목하기 시작하였다. 최근의 연구 결과에 따르면 기지국은 이동 단말의 열 배에 해당하는 에너지를 소모한다[26]. 일부 연구 결과에서는 에너지를 이보다 더 많이 소모한다고 보고한다[27]. 이를 감소시키기 위한 방안으로 트래픽이 적을 때는 기지국의 일부가 대기 상태로 전환되고, 나머지 기지국들이 더 넓은 영역을 담당하는 방식이 제안되었다[9]. 이 방식은 셀 간의 간섭을 완화시키기 위한 방법으로도 제시되었다[10, 28, 29]. 한 예로 두 개의 기지국을 비동기적으로 운영하는 시나리오가 있는데, 두 기지국을 같은 시간 단위 동안 켜두는 것 보다 한 기지국을 좀 더 오랫동안 작동시키는 것이 셀 간의 간섭을 줄이는데 더 효과적이고, 결과적으로 기지국들의 에너지 효율을 향상시킬 수 있다.

5. 네트워크 녹색화 연구의 난해성 및 도전거리

3장과 4장에서 데이터 처리자와 요청자의 관점에서 데이터 센터와 무선 접속망 네트워크에서 녹색화 연

구에 대한 개요와 가능성을 살펴보았다. 본 장에서는 더 나아가 전체적인 관점에서 네트워크 녹색화 연구가 지니고 있는 가능성 및 도전에 대해서 살펴본다.

5.1 새로운 문제 정의

컴퓨터 하드웨어 설계, 무선 장치에서의 물리 계층 설계와 같은 분야와는 달리 “에너지 소모”는 상위 계층 네트워크 알고리즘에서 다소 새로운 척도이다. 지금까지의 상위 계층 네트워크 연구들은 주로 처리율, 지연, 패킷 손실과 같은 효율 척도들에 대해 최적화하는 매키니즘 고안에 집중되었다. 그러나 여기에 에너지 소모도 같이 고려한다면 기존 자원 분배 알고리즘들의 문제 공간(problem space)이 필연적으로 바뀌게 될 것이다. 보통 에너지 소모 감소는 지연이나 처리율 요구 조건에 상충되는 경우가 많으므로 이 요소들을 함께 묶어 공동 최적화(joint optimization)를 수행해야 한다. 이 때 기존에 존재 하는 알고리즘 재검토, 각각의 독립적인 알고리즘 결합 방법을 모색하는 과정이 수반되어야 할 것이다.

5.2 전체적인 관점과 분산화된 알고리즘

네트워크의 모든 구성 요소에서 전기가 사용되므로, 반드시 전체적인 관점에서 에너지 문제에 접근하여야 한다. 한 개의 서버에서 다수의 데이터 센터까지, 물리 계층에서 응용 계층 까지, 라우팅 방법에서 저장소(storage) 관리 방법까지의 전 범위에 걸친 전체 구조의 특성을 반영할 수 있도록 네트워크 시스템의 전체적인 재설계가 요구된다. 그러나 전체적인 최적화 문제는 규모가 너무 크고, 복잡하므로 분산화된 방법으로 국부적인(local) 알고리즘들을 통해 해결되어야 한다. 에너지 관리는 결국 시간적으로나 공간적으로 분산되어 수행된다. 하지만 각각의 계층에서의 최적을 결합한 것이 단순히 전체 계층에서의 최적을 의미하는 것은 아니므로, 어떻게 구조적으로 각 분산화 알고리즘이 상호협력해서 작동해야 하는가에 대한 이론적인 방안이 제시되어야 한다. 이때, 분산화 알고리즘의 성능과 복잡도 간의 상충관계 조절에 대한 부분도 고려되어야 한다. 수학적이고 과학적인 접근을 위하여 최적화 이론, 확률 이론, 게임 이론 등 다양한 틀이 사용될 수 있을 것이다.

5.3 녹색화 비용과 공평한 녹색화

데이터 센터 네트워크나 에지 네트워크에서의 녹색화는 단순히 기존 최적화 문제에 에너지 항(term)을 목적함수나 조건에 추가시키는 것보다 훨씬 더 많은 것을 포함한다. 녹색화는 이전의 문제에서는 고려되

지 않은 새로운 이슈를 갖고 있다. 예를 들면 DSL이나 무선 접근 네트워크에서는 녹색화와 전송 속도간의 트레이드 오프가 존재한다. 그러면 녹색화를 위해 전송 속도가 떨어지는 희생을 어떤 사용자가 얼마나 감수해야 할 것인가? 비교적 덜 간섭을 받는 사용자, 지리적으로 안 좋은 위치에 존재하는 사용자, 많은 양의 트래픽을 전송해야 하는 사용자들은 그들의 특성을 고려하여 속도를 거의 그대로 유지하도록 하는 것이 합리적인 것인가? 등등의 문제가 자연스럽게 발생한다. 이처럼 녹색화에 대한 비용을 사용자들에게 어떻게 분배해야 할지에 대한 공평성 문제는 녹색화 연구에서 심도 있게 다뤄야 할 주제 중 하나이다.

5.4 새로운 에너지 최적화 기술들

미국 환경보호청에서는 에너지 소모를 대폭 줄이기 위해서는 새로운 몇몇 기술들이 완전히 상용화되어야만 할 것이라고 예측하였다[5]. 예를 들면 에너지 절약을 위해 동적으로 특정 서버를 끄고 싶다면 데이터 일관성 유지 및 결함 허용이 우수한 신기술이 필요하다. 또 다른 예로 지리적으로 떨어진 여러 데이터 센터들에 걸쳐서 동적으로 작업량을 재분배하기 위해서는 급격한 전기 변동 하에서도 서비스 성능을 보장할 수 있는 새로운 알고리즘과 프로토콜 기술 개발이 필요할 것이다. 에너지 최적화를 위해서, 수반되는 다른 녹색화 기술들과 그들과의 통합의 관점에서의 연구가 필요하다.

6. 결론

본 논문에서는 네트워크 분야에서 녹색화에 대한 연구의 예들과 관점들에 대해서 개괄적으로 논의하였다. 근본적으로 녹색화 네트워크 연구는 효율과 에너지 사용사이의 트레이드 오프를 얼마나 선택적 및 지능적으로 이용할 수 있는가의 문제이다. 현재 네트워크는 에너지 효율에 대한 고려가 미진하여, 최적화를 할 수 있는 부분들이 많이 존재하며, 그러한 부분들을 찾아서 연구 주제화하는 것이 필요하다. 이때, 강조되어야 할 것은 녹색화 문제를 지역적으로 볼 것이 아니라, 새로운 네트워크 시스템의 재설계의 관점에서 각각의 구성요소들의 관계와 상호 작용을 이해하여 수행해야 한다는 것이며, 이러한 연구는 사회-경제적으로 큰 영향을 가지고 있다고 생각한다.

참고문헌

[1] 기후변화홍보포털, http://www.gihoo.or.kr/portal/01_General_Info/02_Nature.jsp.

[2] Core writing team, Pachauri, R.K., Reisinger, A., "Climate Change 2007: Synthesis Report", pp.31, IPCC, 2008.

[3] 김광수, "녹색 방송 통신 종합 계획", 정보통신/환경융합 워크숍, pp.9, ICT/환경융합표준포럼, 2009.

[4] 한국인터넷진흥원, "2009 한국인터넷백서", pp.9-10, 32, 한국인터넷진흥원, 2009.

[5] US Environmental Protection Agency, "Report to congress on server and data center energy efficiency", http://www.energystar.gov/ia/partners/prod_development/downloads/EPA_Datacenter_Report_Congress_Final1.pdf.

[6] Chris Tryhorn, "Nice talking to you... mobile phone use passes milestone", <http://www.guardian.co.uk/technology/2009/mar/03/mobile-phones1>, 2009.

[7] L.A. Barroso and U. Hözl, "The case for energy-proportional computing", Computer, Vol. 40, No. 12, pp.33-37, 2007.

[8] B. Zhai, D. Blaauw, D. Sylvester, and K. Flautner, "Theoretical and practical limits of dynamic voltage scaling", in DAC, 2004.

[9] M. A. Marsan, L. Chiaraviglio, D. Ciullo, and M. Meo, "Optimal energy savings in cellular access networks", in First International Workshop on Green Communications(GreenComm'09), 2009.

[10] T. Bonald, S. Borst, and A. Proutiere, "Inter-cell scheduling in wireless data networks", in European Wireless Conference, 2005.

[11] P. Tsiaflakis, Y. Yi, M. Chiang, and M. Moonen, "Green DSL: Energy-efficient DSM", In Proceedings of IEEE ICC, 2009.

[12] IBM, "그린 데이터 센터(Green Data Center) - 사회적 책임을 넘어, 성장, 경제적 이익 및 운영 안정성을 위한 기반", pp.6-7, IBM, 2007.

[13] David Meisner, Brian T. Gold, and Thomas F. Wenisch, "Powernap: eliminating server idle power", in ASPLOS'09: Proceeding of the 14th international conference on Architectural support for programming languages and operating systems, New York, NY, USA, pp.205-216, ACM, 2009.

[14] R. Cendrillon, J. Huang, M. Chiang, and M. Moonen, "Autonomous spectrum balancing for digital subscriber lines", IEEE Trans. on Signal Processing, Vol. 55, No. 8 pp.4241-4257, 2007.

[15] W. Yu, G. Ginis, and J. Cioffi, "Distributed multi-user power control for digital subscriber lines", IEEE

- J. Sel. Area, Comm., Vol. 20, No. 5 pp.1105-1115, 2002.
- [16] J. Papandriopoulos and J. S. Evans, "Low-complexity distributed algorithms for spectrum balancing in multiuser DSL networks", In Proceedings of IEEE ICC, 2006.
- [17] P. Tsiaflakis, M. Diehl, and M. Moonen, "Distributed spectrum management algorithms for multiuser DSL networks", IEEE Trans. on Signal Processing, Vol. 56 No. 10, pp.4825-4843, 2008.
- [18] R. Cendrillon, W. Yu, M. Moonen, J. Verlinden, and T. Bostoen, "Optimal multiuser spectrum balancing for digital subscriber lines", IEEE Trans. Communications, Vol. 54 No. 5 pp.922-933, 2006.
- [19] P. Tsiaflakis, Y. Yi, M. Chiang, and M. Moonen, "Fair greening for dsl broadband access", In ACM Workshop on GreenMetrics, 2009.
- [20] S. Cui, A. J. Goldsmith, and A. Bahai, "Energy-constrained modulation optimization", IEEE Trans. Wireless Commun., Vol. 4 pp.2349-32360, 2005.
- [21] S. Pollin, R. Mangharam, B. Bougard, L. V. der Perre, I. Moerman, R. Rajkumar, and F. Catthoor, "MEERA: Cross-layer methodology for energy efficient resource allocation in wireless networks", IEEE Trans. Wireless Commun., Vol. 6 pp.617-628, 2007.
- [22] R. Madan, S. Cui, S. Lall, and A. J. Goldsmith, "Modeling and optimization of transmission schemes in energy-constrained wireless sensor networks", IEEE/ACM Trans. Networking, Vol. 15 No. 6 pp. 1359-1372, 2007.
- [23] H. Kim, C. Chae, G. de Veciana, and R. Heath Jr, "A cross-layer approach to energy efficiency for adaptive MIMO systems exploiting spare capacity", IEEE Trans. Wireless Communications, Vol. 8, No. 8, 2009.
- [24] G. Miao, N. Himayat, Y. Li, and A. Swami. "Cross-layer optimization for energy-efficient wireless communications: A survey", Wiley Journal Wireless Commun. and Mobile Computing, Vol. 9, 2009.
- [25] N. Himayat and et al, "Improving client energy consumption in 802.16m", C80216m-09_0107r2, IEEE 802.16m WiMAX2, 2009.
- [26] H. Scheck, "Power consumption and energy efficiency of fixed and mobile telecom networks", In ITU Symposium on ICTs and Climate Change, 2008.
- [27] M. Etoh, T. Ohya, and Y. Nakayama, "Energy consumption issues on mobile network systems", In International Symposium on Applications and the Internet, 2008.
- [28] S. Liu and J. Virtamo. "Inter-cell coordination with inhomogeneous traffic distribution", In Next Generation Internet Design and Engineering Conference, 2006.
- [29] B. Rengarajan and G. de Veciana, "Architecture and abstractions for environment and traffic aware systemlevel coordination of wireless systems", submitted to IEEE/ACM Trans. Networking, 2009.



이지형

2009 KAIST 전기및전자공학과 학사
 2009~현재 KAIST 전기및전자공학과 석사과정
 재학 중
 관심분야: 유무선 광대역 네트워크, 그린 네트워킹
 E-mail: jhlee@lanada.kaist.ac.kr



윤동규

2009 KAIST 전기및전자공학과 학사
 2009~현재 KAIST 전기및전자공학과 석사과정
 재학 중
 관심분야: 네트워크 가상화, 그린 네트워킹
 E-mail: gue821@kaist.ac.kr



이 융

1997 서울대학교 컴퓨터공학부 학사
 1999 서울대학교 컴퓨터공학부 석사
 2006 The University of Texas at Austin 전기 및 컴퓨터공학과 박사
 2006~2008 Princeton University 전자공학과 박사
 후 연구원
 2008~현재 KAIST 전기 및 전자공학과 교수
 관심분야: 컴퓨터 네트워크의 설계 및 분석, 무선 네트워크에서의 자원 할당, 인터넷 혼잡 제어
 E-mail : yiyung@ee.kaist.ac.kr