

스마트폰 네트워크 사용 경향성을 활용한 네트워크 Tail 에너지 최적화 기법

(A Personalized Network Tail Energy Optimization
Technique Based on Smartphone Network Usage Behavior)

김 예 성 [†] 송 옥 [†] 김 지 흥 ^{**}
(Yeseong Kim) (Wook Song) (Jihong Kim)

요 약 스마트폰은 배터리를 사용하는 기기이기 때문에 전력 최적화가 매우 중요한 사안이다. 최근 스마트폰의 전체 에너지 소모 중 약 30% 정도가 3G 네트워크 인터페이스에서 소모된다. 특별히, 재 접속 지연을 최소화 하기 위하여 높은 전력 상태로 대기하는 구간인 Tail에서 많은 네트워크 에너지가 낭비된다. 기존의 연구들은 제한된 가정하의 응용들에 대해서만 사용 가능하기 때문에 실제 시스템에 적용하는데 한계가 존재한다. 본 논문에서는, 사용자의 다양한 응용 별 네트워크 사용 경향성을 이용한 새로운 에너지 최적화 기법을 제안한다. 본 기법은 사용자의 네트워크 사용 경향성을 분석하여, 응용 별로 서로 다른 Tail 지속 시간을 선택함으로써 많은 에너지를 최적화 할 수 있다. 본 기법을 적용하였을 때, 10% 이내의 지연으로, 평균 34%의 네트워크 에너지를 줄일 수 있었다.

키워드 : 3G 네트워크, 전력 모델, Tail 구간

Abstract Optimizing energy consumption of smartphones is an important design requirement. For most recent smartphones, a network interface is responsible for a large portion (e.g., about 30%) of the total smartphone energy consumption. Among the high network energy consumption, a significant amount is wasted during 'tail time' at which a high-power network connection is maintained to minimize reconnection delay. Although several techniques were proposed to save wasted energy in tail times, most existing techniques are not applicable for general-purpose network usage cases, limiting their applicability to a few specialized applications. In this paper, we propose a novel network energy optimization technique based on personalized network usage characteristics of each application. Unlike existing techniques, our proposed technique can work with any network usage patterns. Furthermore, by intelligently adapting tail times of the network interface for various applications based on each user's network usage behavior, our proposed technique achieves a high energy saving. Our experimental results show that our proposed technique can save on average 34% of the network energy consumption with a less than 10% increase in the network re-connection delay.

Key words : 3G Network, Power Model, Tail Time

· 이 연구를 위해 연구장비를 지원하고 공간을 제공한 서울대학교 컴퓨터 연구소에 감사드립니다. 본 논문은 BK21사업에 의하여 지원되었으며, 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국 과학 재단의 지원을 받아(R33-10095, No.2012-0006417) 수행되었습니다.

· 이 논문은 2012 한국컴퓨터종합학술대회에서 '네트워크 사용 경향성을 활용한 스마트폰 네트워크 에너지 최적화 기법'의 제목으로 발표된 논문을 확장한 것임

[†] 비 회 원 : 서울대학교 컴퓨터공학부
myshepherd@davinci.snu.ac.kr
answer03@davinci.snu.ac.kr

^{**} 종신회원 : 서울대학교 컴퓨터공학부 교수
jihong@davinci.snu.ac.kr
(Corresponding author)

논문접수 : 2012년 7월 5일

심사완료 : 2012년 9월 3일

Copyright©2012 한국정보과학회 : 개인 목적이나 교육 목적인 경우, 이 저작물의 전체 또는 일부에 대한 복사본 혹은 디지털 사본의 제작을 허가합니다. 이 때, 사본은 상업적 수단으로 사용할 수 없으며 첫 페이지에 본 문구와 출처를 반드시 명시해야 합니다. 이 외의 목적으로 복제, 배포, 출판, 전송 등 모든 유형의 사용행위를 하는 경우에 대하여는 사전에 허가를 얻고 비용을 지불해야 합니다.

정보과학회논문지: 시스템 및 이론 제39권 제6호(2012.12)

1. 서론

스마트폰은 일반 사용자에게까지 널리 보급되며 최근 새로운 생활 환경의 핵심 장치로 부상하고 있다. 이러한 모바일 장치는 이동성을 위해 전력원으로 배터리를 사용하기 때문에, 효율적인 배터리 관리에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이런 맥락에서 디스플레이 장치 다음으로 약 30%의 많은 전력이 소모되는 네트워크 장치에 대한 전력 연구가 매우 시급한 실정이다[1].

특별히, 3G나 4G가 소모하는 전력이 Wifi에 비해 크기 때문에, 이러한 라디오 환경이 소모하는 전력의 특성을 밝히고 이를 줄이기 위한 연구가 활발히 진행되어 왔다. 이를 통해 3G 네트워크 장치에서 소모하는 대부분의 전력은 데이터 전송 때문에 발생하는 것이 아니라, 접속 지연을 감소시키기 위하여 다음 전송을 기다리는 구간인 Tail에서 소모된다는 것이 밝혀졌다[2]. 이런 문제를 해결하기 위하여 TailEnder[3]나, TOP[4]와 같은 연구가 진행되었으나, 어떠한 전송들은 미룰 수 있다는 가정을 하거나, 응용이 직접 힌트를 주어야 한다는 전제를 하고 있다. 따라서, 사용자가 사용하는 다양한 응용들에 대해, 어떤 방식으로 관리해야 접속 지연 증가를 막으면서 에너지 이득을 얻을 수 있는지에 대한 직관이나 기법을 제공해주지 못하므로, 실제 시스템에 직접 적용하는 데는 한계가 있다.

본 논문에서는 3G 네트워크 전송의 경향성을 응용 별로 분석하여 각 응용에 대하여 유지해야 할 최적의 Tail 지속 시간을 결정하고 에너지를 줄일 수 있는 새로운 최적화 기법을 제안한다. 여기서는 실측된 자료를 바탕으로 국내 망 환경에서 적용 가능한 3G 네트워크의 에너지 모델과 응용 별 에너지 분석 방법에 대하여 제시한다. 이를 통해, 같은 응용이라 할지라도 각 사용자 별로 획득 가능한 에너지 이득과 최적화를 위한 Tail 지속 시간이 서로 다르다는 것을 밝힌다. 더불어, 사용자 별 전송 정보를 통해 지연과 에너지 간의 교환 모델을 구성하고, 주어진 조건하에서 최적의 Tail 지속 시간을 선택하여 에너지 소모를 줄이는 최적화 기법을 제안한다. 실험 결과, 제안하는 기법을 사용했을 때 지연 증가 비율을 10%로 유지하면서 평균 34%의 네트워크 에너지 이득을 얻을 수 있음을 확인하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 본 연구의 배경 지식과 관련 연구의 한계에 대해 살펴보고, 3장에서는 실측한 자료를 바탕으로 사용자의 응용 별 네트워크 사용 경향성을 분석하며, 지연 증가를 허용할 임계값을 준수하면서 Tail 지속 시간을 선택하는 에너지 최적화 기법을 제안한다. 4장에서는 제안한 기법의 성능을 분석하고, 마지막으로 5장에서는 본 논문의 결론과 향후 연구에 대하여 논의한다.

2. 배경 지식

3G 네트워크 인터페이스가 소모하는 에너지는, 전송이 일어날 때보다 전송이 일어난 후의 대기 지속 시간에 크게 좌우된다. 그림 1은, 서울시에서 측정한 3G 네트워크 인터페이스가 소모하는 전류와 그 때 전송된 패킷을 나타낸다. 이 그래프에서, 전송이 발생하는 시점에 네트워크 장치가 켜져서 전력을 소모한 후, 패킷 전송이 종료 되었음에도 불구하고 오랜 시간 동안 약 210mA의 전력 상태에서 대기하다가, 약 100mA의 전력 상태를 거쳐 비로소 전력 소모가 없어지는 것을 확인할 수 있다. 일반적으로 가장 큰 전력 소모 상태를 DCH, 중간 정도의 소모 상태를 FACH, 소모가 없는 상태를 IDLE이라고 부른다. 이는 네트워크 접속을 위해 IDLE에서 DCH 상태로 전이할 때 몇 초의 지연과 네트워크 망의 부하가 발생하기 때문에, 다른 전송이 곧 발생하는 경우를 위해 일정한 시간을 DCH, FACH를 거쳐 대기하여 발생하는 현상이다. 이 지속 구간을 Tail이라고 부르며, 이 지속 시간은 단말과 연결된 RNC라고 부르는 무선망 서버의 Inactivity Timer에 의하여 제어된다[2]. 이로 인해 많은 네트워크 에너지가 낭비되게 되는 것으로 알려져 있으며[1], 직접 분석한 결과에서도 평균 50% 가량의 네트워크 에너지가 Tail로 인해 소비되는 것을 확인하였다. 더불어 4G에서도 비슷한 특징이 있는 것으로 알려져 있다[4].

Tail 에너지를 줄이기 위해 제안된 주요 연구로는 TailEnder[3]가 있다. 이 연구에서는 전자 메일 송신과 같은 전송은 미룰 수 있다고 가정하고, 이런 패킷들을 이후에 발생하는 다른 패킷과 함께 모아 나중에 보내서, Tail의 횟수를 줄이는 기법을 제안하였다. 또 다른 주요 접근 방법으로는 TOP[4]가 있다. 최근 3GPP에서는 Fast dormancy[5]라는 새로운 표준 프로토콜이 제안되었는데, 단말 장치가 직접 요청함으로써 Tail을 바로 중단할 수 있게 해준다. TOP에서는 각 응용이 다음 전송이 언제 일어날지에 대한 힌트를 준다는 가정하에, 이를 취합하여 다음 전송이 일어나지 않는다고 판단될 때 Fast

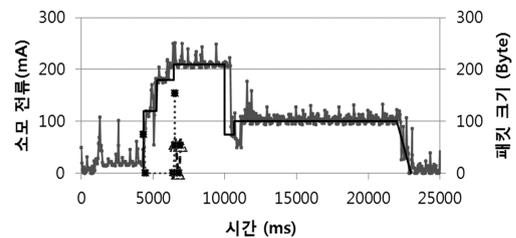


그림 1 3G 네트워크 장치의 소모 전류

Dormancy를 이용해서 에너지를 줄이는 기법을 제안하였다. 그러나, 해당 연구들에서는 예측 방법이나 Tail 지속 시간을 얼마나 조절해야 하는지에 대해 논하지 않고 있고, 사용자나 응용의 네트워크 전송 특성에 대한 고려 없이 각 가정이 성립할 때의 방법론만을 제시하고 있어, 현 시스템에 적용하는 데는 한계가 있다.

이러한 이유와 같이 Fast Dormancy를 적용하는데 남아 있는 문제들과 한계가 있기 때문에, 현재 많은 네트워크 사업자는 Fast Dormancy를 제공하지 않고 있다. 일부 네트워크 사업자는 Fast Dormancy를 실제로 사용할 수 있게 하였으나, 고정된 시간으로만 Tail 길이를 조정한다. 이러한 정책 하에서는, 단말을 사용하는 각 사용자 및 응용의 특성에 대한 고려가 없기 때문에, 빈번히 전송이 발생하는 응용들에 대해서는 불필요한 추가 지연이 빈번히 발생하게 된다. 이 경우 모바일 단말을 사용하는 사용자는 긴 지연 시간을 경험하며, 3G 네트워크 사업자는 네트워크 망의 부하를 감수해야 한다. 따라서, 지연 부하를 최소화 시키면서 에너지 이득을 얻기 위해 적절히 Fast Dormancy를 사용하는 방법에 대한 연구가 필요하다. 4G LTE에서는 Fast Dormancy를 아직 표준으로 채택하고 있지 않으나, Tail에 의한 에너지 낭비는 동일하게 발생하기 때문에 Fast Dormancy와 같은 프로토콜이 필요하며, 이를 어떻게 효과적으로 적용할 것인가가 여전히 해결해야 할 핵심 문제 중 하나이다[6].

3. 네트워크 사용 경향성을 활용한 에너지 최적화 기법

3.1 전력 모델 구성 및 네트워크 사용 내역 수집

전력 모델을 구성하기 위하여 안드로이드 참조 폰인 Nexus S에 3.7V 고정 전압을 준 상태에서 소모하는 전류를 Agilent 34410A를 이용하여 측정하였다. 전력 모델 구성 방법은 타 논문[3]과 비슷한 방법을 이용하였다. 먼저 원하는 시점에 전송을 발생 시킬 수 있는 마이크로 벤치 마크 프로그램을 개발하였다. 이 벤치 마크 프로그램은 작동시켰을 때 화면 및 다른 장치는 꺼둔 상태에서 지속적으로 100mA의 고정 전류가 소모됨을 확인하였으며, 입력이나 CPU 연산에 의한 전력 오차를 제거할 수 있는 충분한 시간을 기다린 후 전송이 발생하도록 구현되었다. 다음으로 네트워크 패킷을 발생시켰을 때의 전류를 측정하였다. 일반적으로 스마트폰에서 소모되는 전력은 화면 장치나 네트워크 장치, CPU, GPS 등 각 구성요소가 소모된 전력의 합으로 구할 수 있다고 알려져 있으므로, 측정된 전류 값에서 고정 소모 전류인 100mA를 제외했을 때의 전류 값을 네트워크에서 소모된 전력으로 계산하였다. 측정된 전류의 형태는

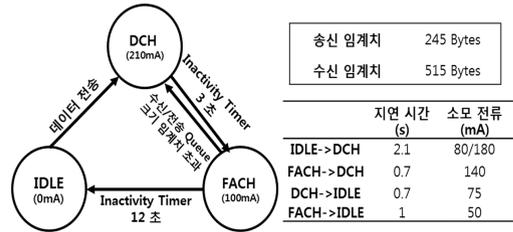


그림 2 서울시 3G 네트워크 전력 모델

다른 논문에서 제시되었던 3G 네트워크 전력 소모 형태와 뚜렷하게 일치함을 확인하였다.

위와 같은 절차를 통하여 서울시에서의 3G 전력 모델을 그림 2와 같이 구성하였다. 본 3G 전력 모델의 정확성을 알아보기 위하여, 마이크로 벤치 마크를 통해 다양한 형태의 패킷들을 발생시킨 실험 및 십여 개의 네트워크를 발생시키는 다른 응용을 이용한 실험에서, 실측치와 비교하여 평균 20mA 내의 오차 안에서 본 모델이 정확히 동작함을 확인하였다.

다음으로 사용 경향성 분석을 위해 각 응용 별로 사용한 패킷 전송 내역에 대해 실시간으로 수집하는 도구를 개발하였다. 본 도구는 리눅스 proc 파일들에 기록되는 프로세스 별 TCP, UDP 정보를 이용하여, 어떤 응용에서 네트워크 전송이 얼마나 발생하였는지를 지속적으로 관찰하여 기록한다. 기록된 파일로부터 패킷 헤더와 푸터 길이를 고려하면 전체 전송된 데이터 양 및 시간을 구할 수 있다. 동일한 조건에서 본 프로그램을 탑재한 경우와 탑재하지 않은 경우에서 소모된 에너지 소모량을 계산하였을 때, 매우 적은 부하에서 수집이 가능함을 확인하였다.

3.2 네트워크 사용 경향성 분석

이 도구를 이용하여 스마트폰을 자주 사용하는 20대 남녀 Nexus S 사용자를 대상으로 일주일간 3G 네트워크 사용 내역을 수집하였다. 수집된 결과를 위에서 제안한 전력 모델을 이용하여 응용들이 네트워크에서 소모한 전력을 계산하였다.

그림 3은 각 사용자의 단말에서 각 응용이 소모한 3G 네트워크 에너지의 비율을 나타낸다. 이 결과는 모든 사용자가 카카오톡에서 많은 에너지 소모를 하고 있다는 특징이 있으나, 그 세부적인 구성을 보았을 때 사용자 별로 네트워크를 주도적으로 사용하는 응용 구성이 다르다는 것을 보여준다. 따라서 사용자의 다양한 응용을 포괄하는 에너지 관리 정책이 필요함을 알 수 있다.

그림 4는 3G 네트워크 에너지 소모 중, 불필요하게 Tail에서 낭비되는 에너지의 비율을 분석한 결과이다. 불필요하게 Tail에서 낭비되는 에너지는 Tail 구간 동안 다른 전송이 발생하지 않는 경우에 소모된 에너지로 정

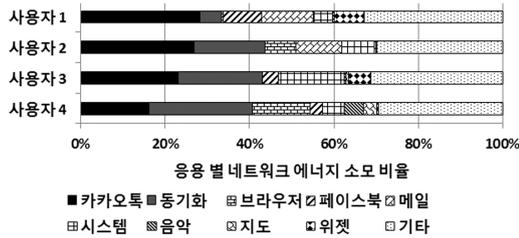


그림 3 응용 별 3G 네트워크 에너지 소모 비율

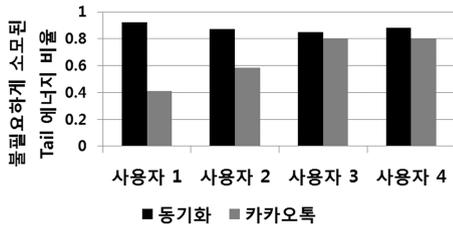


그림 4 불필요하게 소모된 Tail 에너지 비율

의하였다. 동기화 응용은 Tail이 낭비되는 경향성이 강하므로, Tail에서 소모되는 시간을 짧게 유지하는 것이 좋다고 할 수 있는 반면, 카카오톡은 사용자 별로 그 경향성이 다르므로, 각 사용자와 응용 별로 Tail 지속 시간을 다르게 조절해야 최적의 에너지 이득을 얻을 수 있음을 확인할 수 있다.

3.3 최적의 Tail 지속 시간 선택을 통한 에너지 최적화

한 사용자의 어떤 응용에 대한 이전의 전송 내역이 주어졌을 때, 위에서 구성한 전력 모델을 기반으로 Tail 지속 시간의 대부분을 차지하는 FACH Inactivity Timer를 기존 설정 값부터 0초까지 줄여가면, 그에 따라 변화하는 에너지와 IDLE에서 DCH상태로 전이했을 때의 지연 또한 함께 구할 수 있다. 이를 기존 설정의 Tail 지속 시간을 사용했을 때와 비교하면, 어떤 Tail 지속 시간을 이용했을 때 얻을 수 있는 에너지 이득과 지연 손해 각각의 비율을 계산할 수 있다. Tail 지속 시간은 연속적으로 변화하므로, 지연과 에너지 간의 연속적인 교환 모델을 얻을 수 있다.

여기에 지연 증가를 허용할 임계 값이 주어지면, 최적의 Tail 지속 시간을 계산할 수 있다. Tail 지속 시간을 줄이면 소모 에너지가 줄어드는 대신 지연은 증가하는 관계가 있으므로, 지연이 주어진 임계 값을 넘지 않으면서 최대의 에너지 이득을 얻을 수 있는 지점의 Tail 지속 시간을 교환 모델에서 선택한다. 허용할 지연 증가 임계 값은 0 이상의 비율을 다양하게 선택할 수 있다. 그러나 너무 큰 지연 증가 임계 값은 심각한 망의 부하를 발생시킬 수 있다. 따라서, 본 논문에서는 작은 값인 10%를 기준으로 하였다.

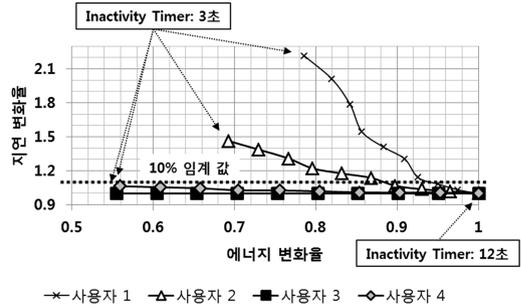


그림 5 사용자 별 카카오톡의 지연/에너지 교환 모델

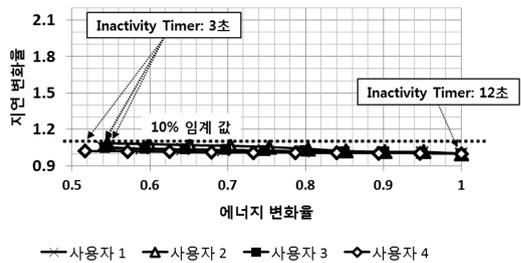


그림 6 사용자 별 동기화 응용의 지연/에너지 교환 모델

그림 5는 카카오톡에 대해 구성한 사용자 각각의 교환 모델을 나타낸다. X, Y축은 에너지 이득과 지연의 손해 비율이고, 각 점은 12초부터 3초까지 FACH Inactivity Timer를 줄였을 때를 오른쪽부터 나타낸다. 지연 증가를 허용할 임계 값이 10%로 주어졌을 때, 사용자 3과 4는 Tail 지속 시간을 3초 이하로 적용할 수 있으며, 사용자 1은 9.8초, 사용자 2는 8.5초가 최적의 Tail 지속 시간 값을 알 수 있다. 그림 6은 같은 실험을 동기화 응용에 대하여 동일한 실험을 하였을 때의 결과를 나타낸다. 이 실험에서는 사용자 모두 많은 양의 Tail 에너지가 낭비되기 때문에, 허용할 임계 값 10%에 대하여 3초 이하의 시간으로 Tail을 설정했을 때 최적의 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

사용자의 단말 상에서 응용 별로 이 교환 모델을 계속 갱신하면서, 계산된 Tail 지속 시간을 넘었을 때 Fast Dormancy를 사용하여 에너지 이득을 취할 수 있다. 서로 다른 응용에 의해 동시에 전송이 일어났을 때는 [5]에서 제시한 해법과 유사하게, 네트워크를 동시에 사용 중인 모든 응용이 Fast Dormancy를 사용하도록 요청했을 때 Tail을 종료하도록 하였다.

4. 실험 결과

기본적인 구현 및 실험 환경은 3.1에서 밝힌 바와 같다. 일주일 동안 Nexus S에서 전송 내역을 수집하면서, 응용이 시작할 때마다 응용 별로 Tail 지속 시간을 계

산하고 적용하도록 안드로이드 플랫폼을 수정하였다. 매 계산에 대한 성능 부하는 응용 별로 평균 10ms 미만이었다. 150 ms 미만의 시간은 사용자 경험에 영향을 주지 않는 것으로 알려져 있고[7], 모바일 장치에서 사용되는 CPU에 의한 전력 부하는 매우 작은 것으로 알려져 있으므로[1], 본 기법의 성능 및 전력에 대한 부하는 사용자와 시스템에 거의 영향을 주지 않는 것으로 예상 수 있다. 실제로 계산에 소모되는 에너지를 측정된 결과, 측정 오차 범위 이내의 매우 적은 에너지만이 응용 실행 시 추가로 소모되는 것을 확인할 수 있었다. 더불어 Fast Dormancy가 표준 프로토콜이지만, 실험이 진행된 국내 환경에서는 아직까지 단말 상에서 직접 사용할 방법이 없으므로, 전력 모델에 Fast Dormancy 동작을 추가하여 에너지 및 지연 변화를 시뮬레이션 하였다.

그림 7은 제안한 기법을 이용하여 10%를 허용할 지연 증가 임계 값으로 하였을 때, 카카오톡 응용에 대하여 지연 증가를 준수하면서 얼마나 네트워크 에너지를 줄일 수 있는지에 대하여 보여준다. 카카오톡은 각 사용자 별로 줄일 수 있는 에너지 양이 제한이 있기 때문에 서로 다른 결과를 보여주나, 모든 사용자의 경우에 대해서 에너지 감소효과가 있음을 볼 수 있으며 최대 50%에 근접하는 에너지 절감 효과가 있는 사용자도 있으며 확인할 수 있다. 또한 10% 지연 증가 또한 잘 지켜짐을 확인할 수 있다.

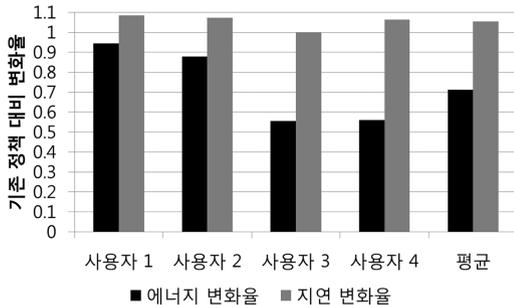


그림 7 카카오톡 응용에 대한 에너지와 지연 변화율 비교

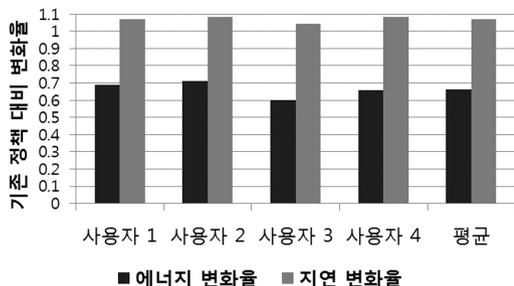


그림 8 전체 네트워크에 대한 에너지와 지연 변화율 비교

그림 8은 전체 네트워크 사용에 대하여, 제안한 기법을 활용하여 10%를 지연 증가를 허용할 임계 값으로 하였을 때, 각 사용자 별 네트워크 에너지 감소 비율과 지연 증가 비율을 나타낸다. 평균적으로 지연을 단지 7% 증가시키면서 34%의 네트워크 에너지에 대한 이득을 얻을 수 있었으며, 최대 40% 이상 에너지 이득을 얻은 사용자도 있었다.

이 두 결과로부터, 제안하는 기법이 네트워크 사용 경향성을 고려하여 다양한 각 응용들에 대한 Tail 길이를 최적의 값으로 조절한다는 것을 확인할 수 있다. 예를 들어, 그림 3에서 볼 수 있는 바와 같이 사용자 1의 전체 네트워크 에너지 중 약 25%가 카카오톡에 의하여 사용되었다. 이러한 상황에서 본 기법은 지연 증가를 줄이기 위해 카카오톡에 대해서는 보수적으로 약 8%의 에너지 이득만을 얻는다. 하지만, 지연 시간을 크게 증가시키지 않고 에너지 이득을 얻을 수 있는 다른 응용들에 대해서는 보다 공격적으로 Tail을 짧게 조절함으로써, 전체 네트워크 사용에 대해서는 30%가 넘는 에너지 이득을 얻을 수 있었음을 알 수 있다.

5. 결론 및 논의

기존의 Tail 에너지 최적화 기법은 응용의 전송 특성을 구분할 수 있다고 가정하거나, 예측할 수 있는 방법이 있다는 가정하에 연구가 진행되었다. 따라서 사용자와 응용의 특성에 대한 고려 없이 실 시스템에 적용은 어렵다는 한계를 지니고 있었다.

본 논문에서는 실제 사용자의 응용에 대하여 네트워크 사용 특성을 분석하고, 사용자 별로 서로 다른 경향성을 가짐을 확인하였다. 또한, 분석된 경향성을 활용하여, 허용 가능한 지연 임계 값을 넘지 않는 최적의 Tail 지속 시간을 계산하고, 이를 통해 에너지 최적화를 할 수 있었다.

본 논문에서 논의한 사용자와 각 응용의 네트워크 사용 경향성은, 일반화한 모델로 확장 개발될 수 있다. 이러한 모델은 Tail 에너지 최적화 문제뿐 아니라, 모바일 시스템에서 발생 가능한 다른 문제를 해결하는데 새로운 접근 방식으로 활용될 수 있다. 더불어, 본 논문의 접근 방법을 확장하여, 응용 내부의 전송 상태 관찰을 통해 전송을 예측하고, 한 응용에 대해서도 Tail 지속 시간을 가변적으로 조절하는 최적화 연구를 진행할 계획이다.

참고 문헌

- [1] A. Pathak, Y. Charlie Hu, M. Zhang, P. Bahl, and Y. Wang, "Fine-grained power modeling for smart-phones using system call tracing," in *Proc. of the*

- 6th Conference on Computer systems (EuroSys '11)*, 2011.
- [2] F. Qian, Z. Wang, A. Gerber, Z.M. Mao, S. Sen, and O. Spatscheck, "Characterizing radio resource allocation for 3G networks," in *Proc. of the 10th ACM SIGCOMM Conference on Internet Measurement Conference (IMC '10)*, pp.137-150, 2010.
- [3] N. Balasubramanian, A. Balasubramanian, and A. Venkataramani, "Energy consumption in mobile phones: a measurement study and implications for network application," in *Proc. of the 9th ACM SIGCOMM Conference on Internet Measurement Conference (IMC '09)*, 2009.
- [4] F. Qian, Z. Wang, A. Gerber, Z.M. Mao, S. Sen, and O. Spatscheck, "TOP: tail optimization protocol for cellular radio resource allocation," in *Proc. of the 18th IEEE International Conference on Network Protocols (ICNP '10)*, 2010.
- [5] The 3rd Generation Partnership Project, "Configuration of fast dormancy in release 8. 3GPP discussion and decision notes RP-090960," http://www.3gpp.org/ftp/tsg_ran/tsg_ran/TSGR_45/Documents, 2009.
- [6] J. Huang, F. Qian, A. Gerber, Z.M. Mao, S. Sen, and O. Spatscheck, "A close examination of performance and power characteristics of 4G LTE networks," in *Proc. of the 10th International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services (MobiSys '12)*, 2012.
- [7] N. Tolia, D. G. Andersen, and M. Satyanarayanan, "Quantifying Interactive User Experience on Thin Clients," *IEEE Computer*, 2006.



김 지 홍

1986년 서울대학교 계산통계학과 학사
1988년 University of Washington 컴퓨터과학과 석사. 1995년 University of Washington 컴퓨터과학 및 공학과 박사. 1995년~1997년 미국 Texas Instruments 선임연구원. 1997년~현재 서울대학교 컴퓨터공학부 교수. 관심분야는 임베디드 소프트웨어, 저전력 시스템, 멀티미디어 시스템, 컴퓨터 구조



김 예 성

2011년 서울대학교 컴퓨터공학부 학사. 관심분야는 모바일 시스템, 임베디드 소프트웨어, 저전력 시스템



송 욱

2007년 성균관대학교 정보통신공학부 학사. 2009년 서울대학교 컴퓨터공학부 석사. 2009년~현재 서울대학교 컴퓨터공학부 박사과정. 관심분야는 임베디드 소프트웨어, 모바일 시스템, 멀티 프로세서 아키텍처