

UMTS 상태 천이 방식에서 에너지 소비와 활성화 지연간의 트레이드오프 성능 분석

최 현 호*

Performance Analysis of Tradeoff between Energy Consumption and Activation Delay in UMTS State Transition Mechanism

Hyun-Ho Choi*

요 약

이동통신 시스템은 무선 자원과 배터리 전력을 효율적으로 관리하기 위해 사용자 상태 천이 방식을 정의하고 있다. 이러한 상태 천이 방식에서는 에너지 소비가 많은 상태가 기본적으로 짧은 접속 지연을 제공하므로 에너지와 지연 성능 사이에 트레이드오프 관계가 존재한다. 본 논문에서는 이동 응용 서비스의 트래픽 속성을 고려하여 UMTS 시스템의 사용자 상태 천이 방식을 분석한다. 상태 천이 방식의 마르코프 모델링을 통하여 에너지 소비량과 활성화 지연을 수학적으로 도출하고 운용 파라미터에 따라 이들의 트레이드오프 관계를 파악한다. 분석 결과로 도출된 에너지-지연 트레이드오프 곡선은 주어진 상태 천이 방식이 달성 가능한 성능 한계를 보여주며 지연 요구 사항을 보장하면서 에너지 소비를 최소화하는 최적 운용 전략을 제시한다.

Key Words : energy-delay tradeoff, user state transition, power-saving, UMTS, 에너지-지연 트레이드오프, 사용자 상태 천이, 전력 절감

ABSTRACT

Mobile communication systems define user state transition mechanisms in order to manage radio resources and battery power efficiently. In the state transition mechanism, a state with a higher energy consumption inherently offers a shorter access delay, so there is a tradeoff between the energy and delay performances. In this paper, we analyze the user state transition mechanism of UMTS by considering the bursty traffic attributes of mobile applications. We perform a numerical evaluation for both the energy consumption and the activation delay by Markov modeling of the state transition mechanism, and investigate their tradeoff relationship as functions of operational parameters. The resulting energy-delay tradeoff curves clearly show an achievable performance bound of the user state transition mechanism and also offer an optimal operation strategy to minimize the energy consumption while guaranteeing the delay requirement.

I. 서 론

모바일 서비스 사용자는 새로운 페이지가 얼마나 빨리 다운로드되며 배터리 충전 없이 얼마나 오래

쓸 수 있는지에 매우 민감하다. 따라서 이러한 사용자 경험 측면에서 가장 중요한 성능요소는 서비스 지연과 배터리 생존시간이라 할 수 있다^[1]. 일반적으로 이동통신시스템에서 서비스 지연 및 에너지

* 이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(2011-0025424)
• 주저자 : 국립한경대학교 전기전자제어공학과, hhchoi@hknu.ac.kr, 정희원
논문번호 : KICS2012-09-449, 접수일자 : 2012년 9월 21일, 최종논문접수일자 : 2012년 11월 26일

성능은 시스템에서 정의하고 있는 상태 천이 방식과 밀접한 관련이 있다. 기본적으로 사용자 단말(user equipment, UE)의 상태 천이는 무선 자원과 배터리 전력을 효율적으로 관리하기 위함인데, 이를 위해 사용자 데이터 발생 시에는 전용 또는 공용으로 무선 채널을 할당하여 신속한 데이터 전송을 수행하고, 일정 시간 동안 전송할 트래픽이 없을 때에는 단말의 무선 모듈을 끄고 전력 소모를 최소화한다^{2,3}. 송수신 모듈을 끈 power-off 상태에서는 에너지 사용이 최소화 되지만 다시 상향링크 데이터를 전송하기 위해서는 랜덤접속 및 연결설정과 같은 시그널링 절차를 수행해야 하므로 활성화 지연(activation delay)이 증가한다. 활성화 지연이란 사용자 상태에 따라 결정되는 주된 지연 요소로 UE에서 상향링크 패킷이 발생한 시점부터 이 패킷이 기지국(base station, BS)에 도착하는데 까지 걸리는 시간으로 정의된다. 반면 송수신 모듈을 켜 power-on 상태에서는 데이터 전송을 위해 위와 같은 시그널링 절차가 필요 없으므로 활성화 지연이 매우 짧아진다. 따라서 이동통신시스템의 사용자 상태 천이 방식은 태생적으로 단말의 에너지 소비와 활성화 지연 간에 트레이드오프(tradeoff) 관계를 갖는다.

웹 서핑, 소셜 네트워킹, 이메일 등과 같이 널리 사용되는 모바일 응용 서비스는 그림 1과 같은 공통된 트래픽 속성을 갖는다⁴. 먼저 작은 크기의 요청(request) 패킷이 상향링크로 콘텐츠 다운로드를 위해 전송된다. 이에 대한 콘텐츠 서버의 응답으로 해당 정보를 담고 있는 다양한 크기를 갖는(bursty) 데이터 패킷이 다운링크로 전달된다. 이후 사용자가 다운로드 받은 콘텐츠 정보를 읽는 일정 시간(reading time)이 지난 후에 다음 요청 패킷이 또 발생된다. 따라서 한 페이지의 다운로드는 기본적으로 하나의 요청 및 응답 패킷 쌍의 송수신으로 이루어지며 이는 사람과의 상호작용으로 세션이 끝날 때까지 지속적으로 발생한다.

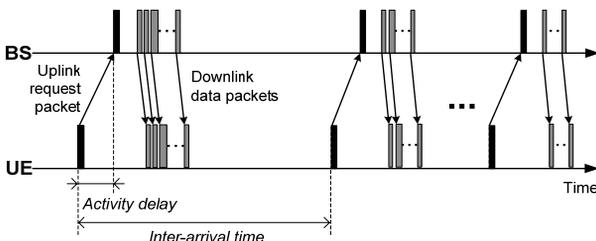


그림 1. 고려하는 모바일 응용 서비스의 트래픽 속성
Fig 1. Traffic attributes of considered mobile applications

본 논문에서는 모바일 응용 서비스의 bursty한 트래픽 속성을 고려하여 3G (Third Generation) UMTS (Universal Mobile Telecommunications System)에서 규정하는 사용자 상태 천이 방식에 대한 수학적 분석을 수행한다. 수학적 분석을 통해 에너지 소비량과 활성화 지연 성능을 closed-form으로 구하고, 이들 성능을 에너지-지연 트레이드오프(energy-delay tradeoff) 곡선으로 특성화함으로써 운용 파라미터에 따라 상태 천이 동작방식의 한계와 특성을 한눈에 보여준다. 이러한 에너지-지연 트레이드오프 분석을 통해 사용자의 서비스 지연 및 에너지 소비 요구를 보장하면서 단말의 에너지 소비를 최소화하는 최적 운용 전략을 제시한다.

논문은 다음과 같이 구성된다. 2장에서는 에너지와 지연간의 트레이드오프 성능을 분석한 기존 연구를 소개하고 본 연구와의 차별 점을 설명한다. 3장에서는 UMTS 표준의 사용자 상태 천이 방식의 동작을 자세히 설명하고 기본적인 트레이드오프 발생 문제에 대해 언급한다. 4장에서 UMTS 상태 천이 방식의 성능을 에너지 소비량과 활성화 지연 측면에서 수학적으로 분석한다. 5장에서는 수학적 분석 결과를 바탕으로 에너지-지연 트레이드오프 성능을 보여주고, 6장에서 본 논문에 대한 결론을 맺는다.

II. 관련 연구

UE의 에너지 절감과 전송 패킷의 지연 성능 간에는 기본적으로 트레이드오프가 존재하는 것으로 알려져 있다. 그중에서 에너지 소비량과 다운링크 패킷 버퍼링 지연간의 트레이드오프가 많이 연구되어 왔다⁵⁻⁸. 이러한 트레이드오프는 UE가 IDLE 상태에 머무는 시간이 증가할수록 더 많은 전력을 절약할 수 있지만 이는 추가적으로 버퍼링 지연을 증가시키기 때문에 발생한다. [5]에서는 에너지-지연 트레이드오프 특성을 고려하여 지연 요구사항을 보장하는 sleep 간격(interval) 결정 알고리즘을 제안하였다. [6]에서는 무선랜 환경에서 sleep과 awake 상태를 고려하여 버퍼링 지연을 최소화하기 위한 sleep 상태의 최적 시작 시간과 길이를 도출하였다. [7]과 [8]에서는 에너지-지연 트레이드오프 관점에서 IEEE 802.16e와 IEEE 802.16m 표준의 sleep 모드를 분석하고 이를 통해 각 표준의 전력 절약 방식(power-saving mechanism)을 개선하는 알고리즘을 제안하였다.

또한 [9], [10]에서는 전력 소비와 중단 간 지연

(end-to-end delay) 사이의 트레이드오프를 고려하여 지연 제약사항을 만족시키면서 전력 소비를 최소화하도록 sleep 임계치(threshold)와 sleep 간격(interval)이 조절하였다. [11]에서는 에너지 소비와 wake-up 지연간의 트레이드오프 문제를 제시하고, 더 깊은 sleep 상태에 있는 노드의 경우 더 적은 에너지를 소비하나 깨어날 때는 더 많은 지연과 에너지 비용을 발생시킴을 보였다. [12]에서는 3G, EDGE, WiFi의 다중 인터페이스를 갖는 스마트폰에 대해서 에너지-지연 트레이드오프를 조사하였다. 이러한 스마트폰은 저전력 WiFi 연결이 가능해질 때까지 UE가 데이터 전달을 미룸으로써 에너지 소비와 접속 지연 간에 트레이드오프를 발생시킨다. 아울러 [13], [14]에서는 UMTS 사용자 상태 천이 방식을 on/off 상태로 모델링하여 에너지 소비량과 접속 지연 측면에서 성능 분석을 시도하였다.

기존 연구에서는 sleep/awake 상태 또는 on/off 상태와 같이 두 개의 단순한 상태 천이 동작만을 주로 고려한 반면, 본 연구에서는 UMTS 표준에서 정의된 4개의 모든 가능한 사용자 상태를 고려하여 상태 천이 동작의 성능 분석을 시도한다. 아울러 기존 연구에서는 에너지와 지연 성능을 단순 분석한 반면, 본 연구에서는 두 성능 지표사이의 트레이드오프 관계를 하나의 특성 곡선으로 나타냄으로써 UMTS 상태 천이 방식의 한계와 최적 운용 전략을 쉽게 파악할 수 있게 해준다.

III. UMTS 상태 천이 방식

그림 2는 본 논문에서 고려하는 3G 이동통신 시스템의 사용자 상태 천이 방식을 보여준다[15]. 크게 휴지(idle) 모드와 연결(connected) 모드로 나뉘며 각 모드 내부에 세부 상태가 추가 정의된다. UE는 처음에 전원을 켜면 휴지모드의 IDLE 상태로 들어간다. IDLE 상태에서 UE는 네트워크와 연결되어 있지만 데이터 전송을 할 수 없으며, 만약 전송할 패킷이 발생하면 UE는 무선 연결설정을 통해 연결모드로 들어간다. 연결모드에는 Cell_DCH (Dedicated channel), Cell_FACH (Fast Access channel), Cell_PCH (Paging channel), URA_PCH (UTRAN Registration Area Paging channel)의 4가지 상태가 존재한다. Cell_DCH 상태에서는 일반 크기의 사용자 데이터가 DCH를 통해 전송되며, Cell_FACH 상태에서는 작은 크기의 데이터가 공용 채널을 통해 전송되는데, 하향링크의 경우에는

FACH, 상향링크의 경우에는 RACH가 사용된다. Cell_PCH 또는 URA_PCH 상태에서는 UE가 데이터 전송을 하지 않고 기지국으로부터 수신해야 할 데이터의 존재 유무만을 확인하기 위해 주기적으로 PCH 만을 수신한다. 어떤 PCH 상태에 있느냐에 따라 위치 갱신(location update) 조건이 달라지는데, URA_PCH 상태의 UE는 여러 개의 셀 집합으로 구성된 URA가 변경되었을 때에만 위치 정보를 갱신하는 반면, Cell_PCH 상태의 UE는 연결된 셀이 변경될 때마다 위치 정보를 갱신해야 한다. 따라서 일반적으로 UE는 이동성이 큰 경우에 URA_PCH를 선택한다. 본 논문에서는 사용자 이동성을 고려하지 않으므로 이후부터는 모든 상태 명에서 Cell 또는 URA와 같은 접두사를 생략하고 사용한다.

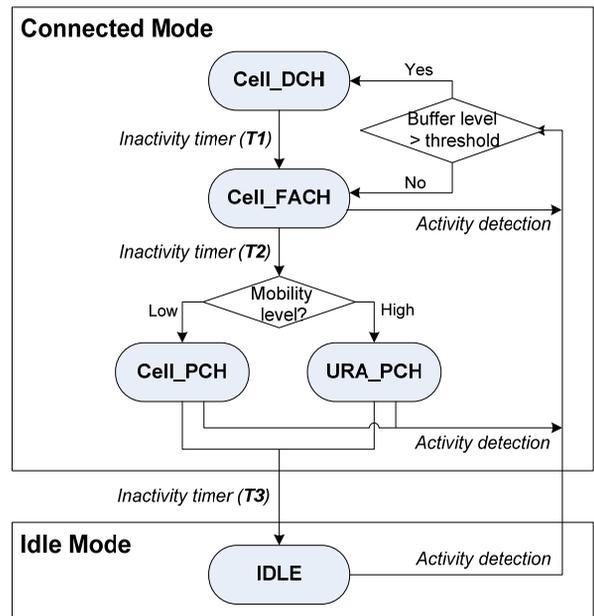


그림 2. UMTS의 사용자 상태 천이 방식
Fig. 2. User state transition mechanism of UMTS

상태 천이는 버퍼 점유율(buffer occupancy level)과 비활성 타이머(inactivity timer)에 의존한다. 그림 2에서 낮은 상태로의 천이는 버퍼 점유율이 0 이면서 비활성 타이머가 만료 되었을 때 발생한다. 정의되는 비활성 타이머 T1, T2, T3은 각각 DCH에서 FACH로, FACH에서 PCH로, PCH에서 IDLE 상태로의 천이에 관계된다. 반대로 FACH, PCH 또는 IDLE 상태에서부터 DCH나 FACH 상태로의 천이는 사용자의 요청 패킷이 발생할 때 (즉, activity detection 이벤트의 발생) 일어난다. 이러한 상태 천이 시 DCH와 FACH 중의 선택은 전송해야 할 데이터양에 따라 달라지는데, 버퍼 점유율이 일정 문

턱값(threshold)을 넘어서는 경우에 DCH를 선택한다.

상태 천이 방식은 사용자의 전력소비와 지연 성능에 직접적인 영향을 준다. 배터리 생존시간은 단말이 IDLE 상태에 머물 때 가장 길며, 단말이 PCH, FACH, DCH 상태로 올라갈수록 전력 소모량이 증가한다. 반면 IDLE 상태에서 단말은 가장 긴 활성 지연 시간을 가지며 상태가 위로 올라갈수록 활성 지연시간은 감소한다. 따라서 상태 천이 동작 방식에서는 UE가 윗 상태에 오래 머물수록 전력소모는 증가하지만 지연은 짧아지는 에너지-지연 트레이드오프 상황이 존재함을 알 수 있다.

IV. 성능 분석

UMTS 사용자 상태 천이 방식에 대한 수학적 분석을 수행한다. 그림 2의 상태 천이 동작 방식에서 설명했듯이 상태 천이는 타이머의 만료나 패킷 도착에 의해 발생한다. 일반적으로 비실시간 응용서비스에서 요청 패킷 발생은 평균 $1/\lambda$ 을 갖는 지수분포(exponential distribution)를 따르므로 상태 천이 방식은 그림 3과 같이 이산시간 마르코프 체인(discrete-time Markov chain, DTMC)으로 모델링된다^[16]. 여기에는 DCH, FACH, PCH, IDLE의 4가지 상태가 존재하며, PA, B는 상태 A에서 상태 B로의 천이 확률을 나타낸다. 모든 오른쪽으로의 상태 천이는 비활성 타이머의 만료에 의해 발생하며, 모든 왼쪽으로의 상태 천이는 요청 패킷의 발생에 의해 생긴다.

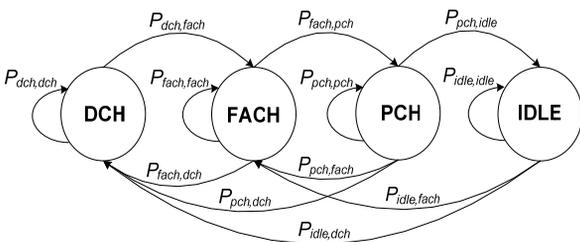


그림 3. UMTS 상태 천이 방식의 이산시간 마르코프 체인 모델
Fig. 3. Discrete-time Markov chain (DTMC) model of UMTS state transition mechanism

먼저 타이머 만료에 의한 상태 천이 확률 ($P_{dch,fach}$, $P_{fach,pch}$, $P_{pch,idle}$)을 구하기 위해 DCH, FACH, PCH, IDLE 상태 중 임의로 선택된 두 상태를 A와 B라 가정한다. 또한 T_u 를 상태 천이

동작에서 트래픽 발생 유무를 판단하는데 사용되는 가장 작은 시간 단위인 타임슬롯(timeslot)이라 하자. 이때 T 를 A에서 B로의 상태 천이를 위한 비활성 타이머라고 하면, 양의 정수 n 에 대해 이 타이머 값은 $T = nT_u$ 로 표현된다. 상향링크 요청 패킷이 없을 때 이 타이머가 만료되면 UE는 상태 A에서 B로 천이하게 된다. 지수분포를 갖는 트래픽 발생 간격을 고려할 때 타임슬롯 T_u 시간 동안 요청 패킷이 발생할 확률과 발생하지 않을 확률은 각각 다음과 같다.

$$P_\alpha = \Pr\{\text{packet arrival during } T_u\} = \int_0^{T_u} f(x)dx = 1 - e^{-\lambda T_u} \tag{1}$$

$$P_\beta = \Pr\{\text{no packet arrival during } T_u\} = 1 - \int_0^{T_u} f(x)dx = e^{-\lambda T_u} \tag{2}$$

여기에서 $f(x)$ 는 요청 패킷의 발생간격(inter-arrival time)의 확률밀도함수로 평균 $1/\lambda$ 을 갖는 지수분포를 따르므로 $f(x) = \lambda e^{-\lambda x}$ 로 주어진다.

이제 상태 A에서 B로의 천이 확률을 구하기 위해 다음과 같은 파라미터를 정의한다.

- N : 전체 세션 기간에 해당하는 타임슬롯의 개수
- N_A : 전체 타임슬롯 개수 N 중에서 UE가 상태 A에 있는 타임슬롯의 총 개수
- $N_{A,B}$: UE가 상태 A에서 상태 B로 변경을 수행하는 타임슬롯의 총 개수

이와 같은 정의에 의해 상태 A에서 B로의 천이 확률은 다음과 같이 구해진다.

$$P_{A,B} = P(B|A) = \frac{P(A \cap B)}{P(A)} = \frac{N_{A,B}}{N_A} = \frac{N(1 - e^{-\lambda T_u})e^{-\lambda n T_u}}{N(1 - e^{-\lambda n T_u})} = \frac{(1 - e^{-\lambda T_u})e^{-\lambda T}}{1 - e^{-\lambda T}} \tag{3}$$

여기에서 상태 A에 있을 때 $T = nT_u$ 시간 내에 패킷이 발생하면 상태가 변하지 않고 유지되므로 평균적으로 상태 A에 머물게 확률은 $1 - e^{-\lambda n T_u}$ 가 된다. 따라서 전체 N 슬롯 중에서 UE가 상태 A에 있는

타임슬롯의 개수 N_A 는 $N(1-e^{-\lambda n T_u})$ 로 결정된다. 또한 상태 A에서 B로 천이하게 될 확률은 하나의 패킷이 발생하여 상태 A에 들어간 후 T 기간 동안 패킷이 발생하지 않을 확률이 된다. 이 확률은 $(1-e^{-\lambda T_u})e^{-\lambda n T_u}$ 로 계산되며 따라서 $N_{A,B}$ 는 $N(1-e^{-\lambda T_u})e^{-\lambda n T_u}$ 로 표현된다.

반면 요청 패킷 발생에 의한 상태 천이 확률은 기본적으로 패킷 발생확률, $P_a=1-e^{-\lambda T_u}$ 와 같다. 하지만 상태 천이시 두 DCH와 FACH 상태 중 하나의 선택은 하향링크 트래픽의 양과 관련되므로 우리는 발생하는 트래픽 양이 정해진 버퍼 임계치를 넘어서는 확률 값으로 w 를 정의한다. 따라서 임의의 상태에서 새로운 패킷이 발생할 때 w 의 확률로 DCH 상태로 천이하고 $(1-w)$ 의 확률을 가지고 FACH로 천이하게 된다. 따라서 각 상태에서 상태 천이 확률은 다음과 같이 정리된다. w 값은 버퍼 임계치에 따라 결정되는 파라미터로 실제 시스템에서는 버퍼 임계치를 결정함으로써 w 값이 결정된다.

- DCH 상태에서

$$P_{dch,fach} = \frac{(1-e^{-\lambda T_u})e^{-\lambda T_1}}{1-e^{-\lambda T_1}} \quad (4)$$

$$P_{dch,dch} = 1 - P_{dch,fach} \quad (5)$$

- FACH 상태에서

$$P_{fach,pch} = \frac{(1-e^{-\lambda T_u})e^{-\lambda T_2}}{1-e^{-\lambda T_2}} \quad (6)$$

$$P_{fach,dch} = w(1-e^{-\lambda T_u}) \quad (7)$$

$$P_{fach,fach} = 1 - P_{fach,dch} - P_{fach,pch} \quad (8)$$

- PCH 상태에서

$$P_{pch,idle} = \frac{(1-e^{-\lambda T_u})e^{-\lambda T_3}}{1-e^{-\lambda T_3}} \quad (9)$$

$$P_{pch,dch} = w(1-e^{-\lambda T_u}) \quad (10)$$

$$P_{pch,fach} = (1-w)(1-e^{-\lambda T_u}) \quad (11)$$

$$P_{pch,pch} = 1 - P_{pch,idle} - P_{pch,dch} - P_{pch,fach} \quad (12)$$

- IDLE 상태에서

$$P_{idle,dch} = w(1-e^{-\lambda T_u}) \quad (13)$$

$$P_{idle,fach} = (1-w)(1-e^{-\lambda T_u}) \quad (14)$$

$$P_{idle,idle} = 1 - P_{idle,dch} - P_{idle,fach} \quad (15)$$

여기에서 T_1, T_2, T_3 은 각각 DCH에서 FACH로, FACH에서 PCH로, PCH에서 IDLE로의 상태 천이와 관련된 비활성 타이머 값을 나타낸다. 따라서 그림 3의 상태 천이 행렬은 다음과 같이 표현된다.

$$M = \begin{bmatrix} P_{dch,dch} & P_{dch,fach} & 0 & 0 \\ P_{fach,dch} & P_{fach,fach} & P_{fach,pch} & 0 \\ P_{pch,dch} & P_{pch,fach} & P_{pch,pch} & P_{pch,idle} \\ P_{idle,dch} & P_{idle,fach} & 0 & P_{idle,idle} \end{bmatrix} \quad (16)$$

이 상태 천이 행렬로부터 나오는 균형 방정식을 품으로써 정상 상태확률이 다음과 같이 도출된다.

$$\pi_{dch} = \frac{w(1-e^{-\lambda T_1})}{w + (1-w)e^{-\lambda T_1}} \quad (17)$$

$$\pi_{fach} = \frac{e^{-\lambda T_1}(1-e^{-\lambda T_2})}{w + (1-w)e^{-\lambda T_1}} \quad (18)$$

$$\pi_{pch} = \frac{e^{-\lambda(T_1+T_2)}(1-e^{-\lambda T_3})}{w + (1-w)e^{-\lambda T_1}} \quad (19)$$

$$\pi_{idle} = \frac{e^{-\lambda(T_1+T_2+T_3)}}{w + (1-w)e^{-\lambda T_1}} \quad (20)$$

E_i 를 UE가 상태 i 에 머물 때 소비되는 에너지량이라고 하면 전체 세션 길이(N) 중에서 UE가 상태 i 에 머무는 타임슬롯(N_i)을 고려하면 단위시간당 UE의 평균 에너지 소비량은 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} \bar{E} &= \frac{N_{dch}E_{dch} + N_{fach}E_{fach} + N_{pch}E_{pch} + N_{idle}E_{idle}}{N} \\ &= \frac{N\pi_{dch}E_{dch} + N\pi_{fach}E_{fach} + N\pi_{pch}E_{pch} + N\pi_{idle}E_{idle}}{N} \\ &= \pi_{dch}E_{dch} + \pi_{fach}E_{fach} + \pi_{pch}E_{pch} + \pi_{idle}E_{idle} \end{aligned} \quad (21)$$

또한 D_i 를 UE가 상태 i 에서 요구되는 활성 지연 비용이라고 하면, 평균 활성 지연 시간은 패킷이 발생하는 순간 UE가 어떤 상태에 머물고 있는지에 의존하므로 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} \bar{D} &= \frac{N_{dch}P_{\alpha}D_{dch} + N_{fach}P_{\alpha}D_{fach} + N_{pch}P_{\alpha}D_{pch} + N_{idle}P_{\alpha}D_{idle}}{NP_{\alpha}} \\ &= \frac{N\pi_{dch}P_{\alpha}D_{dch} + N\pi_{fach}P_{\alpha}D_{fach} + N\pi_{pch}P_{\alpha}D_{pch} + N\pi_{idle}P_{\alpha}D_{idle}}{NP_{\alpha}} \\ &= \pi_{dch}D_{dch} + \pi_{fach}D_{fach} + \pi_{pch}D_{pch} + \pi_{idle}D_{idle}. \end{aligned} \tag{22}$$

V. 분석 결과 및 고찰

결과 도출을 위해 표 1과 같은 에너지 소비와 활성 지연 비용(cost)을 사용하였다. 이들 비용 값은 [1]에서 언급한 상태별 상대적인 에너지 소비량과 [17]에서 실측한 상태별 지연 값에 기반을 둔다. 우리는 T_u 값을 100 ms로 설정하고 평균 패킷 발생 간격($1/\lambda$)을 1~30초 범위에서 가변한다^{[2],[6]}. 파라미터 w 의 기본 값은 0.5로 설정되어 패킷 발생시 DCH 또는 FACH로의 상태 천이가 똑같은 확률로 이루어지도록 하였다. 성능 평가를 위해 표 2에 나타낸바와 같이 6가지의 가능한 시나리오를 상정하는데, 각 시나리오는 각 비활성 타이머 값을 0이나 무한대로 설정함으로써 가능하다. 또한 수학적 분석을 검증하기 위해 100,000 패킷 발생에 대한 Monte-Carlo 시뮬레이션을 병행하였다.

표 1. 상태별 에너지 소비와 활성 지연의 비용
Table 1. Costs for energy consumption and activation delay

State	Energy consumption(E)	Activation delay(D)
DCH	100	0.150 s
FACH	40	0.48 s
PCH	2	1 s
IDLE	1	2 s

표 2. 고려하는 상태 천이 시나리오
Table 2. Considered state transition scenarios

Scenario	T_1	T_2	T_3	Related states
1	variable	variable	variable	DCH-FACH-PCH-IDLE
2	variable	variable	∞	DCH-FACH-PCH
3	variable	0	0	DCH-IDLE
4	variable	0	∞	DCH-PCH
5	variable	∞	n/a	DCH-FACH
6	0	variable	∞	FACH-PCH

그림 4와 5는 각각 시나리오 1(DCH-FACH-PCH-IDLE 사용)과 시나리오 2(DCH-FACH-PCH 사용)에서 비활성 타이머와 패킷 발생 간격($1/\lambda$)에 따른 평균 에너지 소비량과 활성 지연을 보여준다. 타이머 값이 증가하고 발생 간격이 감소함에 따라 에너지 소비는 증가하고 활성 지연은 감소함을 볼 수 있다. 즉, 에너지와 지연은 서로 트레이드오프 관계를 갖고 있음을 볼 수 있다. 이는 타이머 값이 증가하고 패킷 발생 간격이 감소함에 따라 UE는 DCH나 FACH와 같은 상위 상태에 있으려 하기 때문에 에너지 소비가 증가하고 대신 활성 지연은 감소하기 때문이다. 시나리오 1과 2는 비슷한 에너지-지연 트레이드오프 성능 양상을 보이지만 이들 트레이드오프 관계가 차지하는 성능 범위는 서로 다르다. 즉, 두 경우 에너지 소비 성능의 범위는 서로 비슷하지만 활성 지연의 성능 범위는 시나리오 2의 경우에 현저히 줄어든다. 이는 시나리오 2가 약간의 에너지 소비 증가를 감수하면서 높은 지연 비용을 갖는 IDLE 상태를 배제하고 있기 때문이다. 이러한 맥락에서 주어진 에너지 소비와 지연에 대한 요구 사항에 따라 적절한 시나리오를 사용하는 것이 트레이드오프 성능에 좋은 영향을 미침을 알 수 있다.

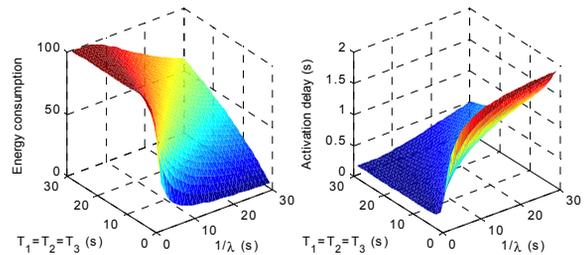


그림 4. 시나리오 1에서 비활성 타이머와 패킷 발생간격에 따른 에너지 소비와 활성 지연
Fig. 4. Energy consumption and activation delay vs. inactivity timer and packet inter-arrival time in scenario 1

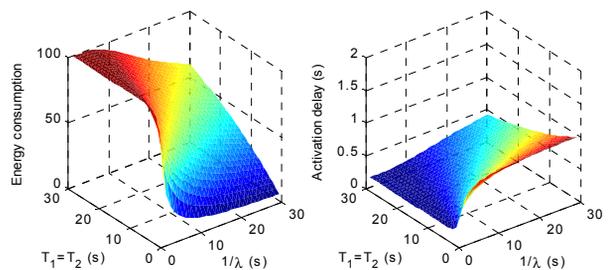


그림 5. 시나리오 2에서 비활성 타이머와 패킷 발생간격에 따른 에너지 소비와 활성 지연
Fig. 5. Energy consumption and activation delay vs. inactivity timer and packet inter-arrival time in scenario 2

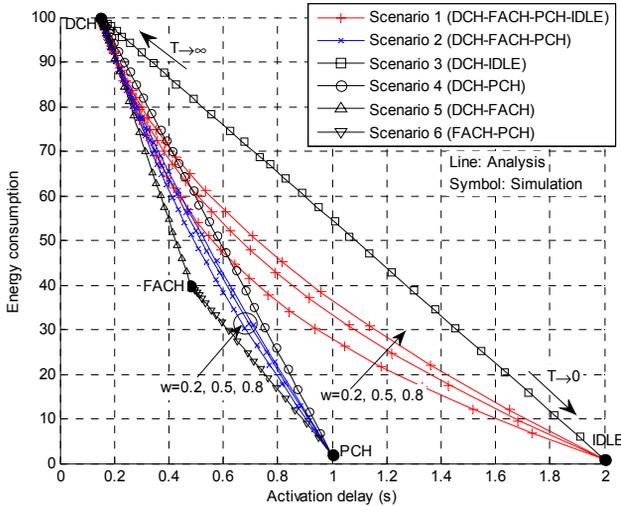


그림 6. 에너지-지연 트레이드오프 곡선 ($1/\lambda=10$ 초)
Fig. 6. Energy-delay tradeoff curve when $1/\lambda=10$ s

그림 6은 $1/\lambda$ 가 10초 일 때 모든 시나리오의 에너지-지연 트레이드오프 곡선을 보여준다. 그래프 상에 표시된 검은 점은 각 상태의 에너지-지연 비용 (energy-delay cost)을 나타낸다. 특별히 두 개의 상태로만 운용되는 시나리오의 경우 트레이드오프 곡선은 두 상태의 에너지-지연 비용을 연결하는 직선으로 결정되는 것을 볼 수 있다. 각 곡선 상의 모든 점은 비활성 타이머 값의 조절에 의해 달성 가능하다. 즉, 타이머 값이 증가함에 따라 활성 지연은 감소하며 에너지 소비는 증가한다. 또한 안쪽에 위치한 곡선이 더 좋은 에너지 소비와 활성 지연을 보여주므로 더 좋은 트레이드오프 곡선이 된다. 따라서 DCH와 IDLE 상태를 사용하는 시나리오 3이 가장 나쁜(worst) 성능 한계가 되며, DCH와 FACH를 사용하는 시나리오 5와 FACH-PCH를 사용하는 시나리오 6이 가장 좋은(best) 성능 한계가 된다. 기존 방식의 경우 sleep/awake와 같이 단순히 두 개의 상태만을 사용하므로 시나리오 3과 4에 해당되며, 이와 비교하면 UMTS 시스템에서는 FACH 상태를 추가적으로 사용함으로써 트레이드오프 성능이 개선됨을 알 수 있다. 아울러 3개 이상의 상태를 사용하는 시나리오 1과 2는 아래쪽으로 볼록한 모양을 보여주는데 이들은 파라미터 w 가 감소함에 따라 성능이 좋아지는 특성을 갖는다. 즉 전송 데이터량이 작은 경우에는 DCH 대신 FACH를 선택하도록 해주는 것이 트레이드오프 성능에 더 좋은 영향을 미침을 알 수 있다.

도출된 트레이드오프 곡선은 주어진 지연 값의 제약에 따라 어떻게 상태 천이 방식을 최적으로 운

영할 수 있는지를 쉽게 알려주는데, 예를 들어 활성 지연 값이 0.48초 보다 작게 요구된다면 에너지 소비를 최소화하는데 시나리오 5가 가장 좋다는 것을 알 수 있다. 만약 요구되는 활성 지연 값이 0.48초 보다 크다면 시나리오 6을 사용하는 것이 최적이 된다. 이렇게 활용 가능한 최적 시나리오를 선택한 후에 주어진 에너지-지연 트레이드오프 곡선을 이용하여 주어진 지연 요구사항을 만족시키는 관련된 비활성 타이머 값을 쉽게 결정할 수 있다.

VI. 결론

우리는 UMTS 시스템의 사용자 상태 천이 방식을 수학적으로 분석하여 에너지-지연 트레이드오프 관계를 특성화하였다. 분석결과 UMTS 상태 천이 방식의 다양한 운용 시나리오에 대해서 에너지 소비량과 활성 지연 간에 트레이드오프 성능이 존재함을 알 수 있었다. 주목할 만한 것은 임의의 두 상태만을 사용하여 운용할 경우에 얻을 수 있는 에너지와 지연 성능은 두 상태의 에너지-지연 비용을 연결하는 직선으로 간단하게 결정된다는 점으로 이로 인해 관련 에너지-지연 트레이드오프 성능 파악이 용이해진다. 이와 같이 도출된 에너지-지연 트레이드오프 곡선은 네트워크 운영자가 사용자 서비스 질(quality of service, QoS)을 보장하는데 있어 관련 운용 시나리오 및 파라미터의 최적화에 쉽게 이용 가능하리라 기대한다.

References

- [1] Network Efficiency Task Force Fast Dormancy Best Practices, GSM Association, v1.0, May 2010, from : <http://www.gsm.com>.
- [2] 3GPP TS 25.331 (6.2.0), Radio Resource Control (RRC) protocol specification, Dec. 2008.
- [3] J. H. Lee, K. Hur, and D. S. Eom, "An enhanced theory for reducing energy consumption and end-to-end delay in stationary wireless sensor network," *J. KICS*, vol. 35, no. 10, pp. 949-959, Oct. 2010.
- [4] Z. Youzhi, P. Tingrui, W. Yalan, and G. Dezhi, "On modeling of WWW wireless traffic in UMTS," in *Proc. Chinese Control*

- Conference, pp. 553-556, Zhangjiajie, Sep. 2007.
- [5] J. R. Lee and D. H. Cho, "Performance evaluation of energy saving mechanism based on probabilistic sleep interval decision in IEEE 802.16e," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 56, no. 4, pp. 1773-1780, Jul. 2007.
- [6] M. Sarkar and R. L. Cruz, "Analysis of power management for energy and delay trade-off in a WLAN," in *Proc. Conf. Inform. Sci. Systems*, Princeton, New Jersey, Mar. 2004.
- [7] D. T. T. Nga, M. G. Kim, and M. Kang, "Delay-guaranteed energy saving algorithm for the delay-sensitive applications in IEEE 802.16e systems," *IEEE Trans. Consum. Electr.*, vol. 53, no. 4, pp. 1339-1347, Nov. 2007.
- [8] J. Y. Choi, "Power saving mechanism for advanced mobile station in IEEE 802.16m," *J. KICS*, vol. 36, no. 12, pp. 959-965, Dec. 2011.
- [9] S. B. Jang and Y. G. Kim, "Power saving and delay reduction for supporting WLAN-based fixed-mobile convergence service in smartphone," *IEEE Trans. Consum. Electr.*, vol. 56, no. 4, pp. 2747-2755, Nov. 2010.
- [10] H. H. Choi, J. R. Lee, and D. H. Cho, "On the use of a power-saving mode for mobile VoIP devices and its performance evaluation," *IEEE Trans. Consum. Electr.*, vol. 55, no. 3, pp. 1537-1545, Aug. 2009.
- [11] C. F. Chiasserini and R. R. Rao, "Improving energy saving in wireless systems by using dynamic power management," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 2, no. 5, pp. 1090-1100, Sep. 2003.
- [12] M. R. Ra, J. Paek, A. B. Sharma, R. Govindan, M. H. Krieger, and M. J. Neely, "Energy-delay tradeoffs in smartphone applications," in *Proc. Conf. Mobile Systems, Appl., and Services (MobiSys)*, pp. 255-270, San Francisco, Jun. 2010.
- [13] Y. W. Chung, D. K. Sung, and A. H. Aghvami, "Steady state analysis of user equipment state transitions for universal mobile telecommunication systems," in *Proc. IEEE PIMRC*, pp. 2034-2038, Lisbon Portugal, Sep. 2002.
- [14] J. H. Yeh, C. C. Lee, J. C. Chen, "Performance analysis of energy consumption in 3GPP networks," in *Proc. IEEE Wireless Telecom Symposium*, pp. 67-72, Pomona, CA, May 2004.
- [15] H. Holma and A. Toskala, *WCDMA for UMTS*, John Wiley & Sons Ltd., pp. 136-137, 2000.
- [16] *IEEE 802.16m-08/004r5, IEEE 802.16m Evaluation Methodology Document (EMD)*, Jan. 2009.
- [17] P. H. J. Perala, A. Barbuizi, G. Boggia, and K. Pentikousis, "Theory and practice of RRC state transitions in UMTS networks," in *Proc. IEEE Globecom*, Nov. 2009.

최 현 호 (Hyun-Ho Choi)



2001년 2월 KAIST 전기및
전자공학과 졸업

2003년 2월 KAIST 전기및
전자공학과 석사

2007년 2월 KAIST 전기및
전자공학과 박사

2007년 3월~2011년 2월 삼
성종합기술원 전문연구원

2011년 3월~현재 국립한경대학교 전기전자제어공
학과 조교수

<관심분야> 저전력 프로토콜, 매체접속제어, 분산자
원관리, Beyond 4G 시스템