

# LTE 시스템에서 양방향 지연을 고려한 전력절감 방식

최 현 호\*

## Power-Saving Mechanism Considering Round-Trip Delay in LTE Systems

Hyun-Ho Choi\*

요 약

본 논문에서는 Long-Term Evolution (LTE) 시스템에서 사용자 단말과 통신하는 상대노드 사이에 발생하는 양방향 지연을 고려하여 새로운 전력절감 알고리즘을 제안한다. 제안하는 전력절감 알고리즘은 양방향 지연을 겪는 트래픽 발생 패턴에 맞추어 기존 LTE 시스템의 전력절감 알고리즘에서 사용하는 단말 상태 천이 순서를 반대로 적용한다. 발생하는 양방향 지연을 수학적으로 모델링한 후 제안 전력절감 방식의 성능을 단말의 에너지 소비량과 패킷의 버퍼링 지연 관점에서 분석한다. 운용 파라미터의 변화에 따라 이들 성능을 에너지-지연 트레이드오프 곡선으로 특성화하고 이를 통해 제안하는 전력절감 방식이 기존 LTE 표준의 전력절감 방식과 비교하여 에너지와 지연 성능 모두를 효과적으로 향상시키고 있음을 확인한다.

**Key Words** : power-saving mechanism, energy-delay tradeoff, sleep interval, long-term evolution (LTE)

### ABSTRACT

In this paper, we propose a new power-saving mechanism (PSM) for Long-Term Evolution (LTE) systems by considering a round-trip delay between a user equipment (UE) and its correspondence node. The proposed PSM changes the order of the operational procedures of the legacy LTE PSM by taking the traffic arrival pattern suffering the round-trip delay into account. After modeling the round-trip delay, we numerically analyze the proposed PSM with respect to energy consumption and buffering delay. Then, we characterize these performances by employing a simple energy-delay tradeoff (EDT) curve according to the operational parameters. The resulting EDT curve clearly shows that the proposed PSM outperforms the legacy LTE PSM in terms of both the energy consumption and buffering delay.

### I. 서 론

3GPP Long-Term Evolution (LTE) 표준은 단말의 전력절감(power-saving)을 위해 비연속적 수신(discontinuous reception; DRX)에 관한 동작을 규정하고 있다<sup>1)</sup>. DRX 동작은 소모되는 전력량에 따라 active와 sleep의 두 가지 동작 상태로 나뉠 수 있다. Active 상태의 사용자 단말(user equipment; UE)은

지연 없이 패킷을 송수신하기 위해 무선 송수신기를 항상 켜놓는 반면, sleep 상태의 UE는 송수신 모듈을 꺼놓은 상태에서 패킷 도착 여부를 확인하기 위해 가끔씩 활성화된다. Active 상태의 UE는 마지막 패킷을 송수신한 후에 더 이상의 패킷 송수신이 없다고 판단되면 일정 시간 동안 기다렸다가 sleep 상태로 천이한다. 이때 일정 시간을 기다리는 이유는 다음 패킷이 곧 도착할 수도 있기 때문이다. 이러한 기다리는 시간

※ 이 논문은 2013년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(2011-0025424)

\* First Author : 국립환경대학교 전기전자제어공학과, hhchoi@hknu.ac.kr, 정회원

논문번호 : KICS2013-10-443, 접수일자 : 2013년 10월 14일, 심사일자 : 2013년 12월 2일, 최종논문접수일자 : 2013년 12월 10일

은 비활성 타이머(inactivity timer)에 의해 결정되며 비활성 타이머가 만료 되면 단말은 active에서 sleep으로 상태를 변경한다. 반면 sleep 상태의 단말은 정해진 DRX 주기에 따라 주기적으로 깨어나면서 자신에게 전달되는 트래픽 알림(traffic indication) 메시지가 있는지를 확인한다. 트래픽 알림이 있는 경우에는 UE가 수신해야 할 데이터가 있음을 의미하므로 UE는 바로 sleep 상태에서 active 상태로 천이한다. 또한 상향링크로 전송해야 할 데이터가 발생하면 트래픽 알림 여부에 상관없이 UE는 sleep 상태를 중단하고 active 상태로 천이한다. 이와 같은 DRX 동작은 sleep과 active 상태에서 송수신 모듈을 켜다 켜다 함으로써 UE의 사용 전력을 크게 절약 할 수 있지만 sleep 상태에서 단말의 불연속적인 수신으로 인해 패킷지연이 발생하게 된다.

기본적으로 UE의 전력절감과 패킷지연 성능 간에는 트레이드오프(tradeoff)가 존재한다. 대표적으로 UE의 에너지 소모량과 다운링크에서 발생하는 패킷 버퍼링 지연간의 트레이드오프가 있다. 이는 UE가 sleep 상태에 머무는 시간이 길어질수록 더 많은 에너지가 절약되지만 다운링크 패킷이 기다려야 하는 시간이 증가하기 때문에 발생한다. [2]에서는 LTE 환경에서 소모 에너지와 버퍼링 지연 간의 트레이드오프 성능을 분석하여 지연 요구사항을 보장하는 한도 내에서 에너지를 소비를 최소화하는 sleep 간격(즉, DRX 주기)을 결정하는 알고리즘을 제안하였다. [3]에서는 무선랜 프로토콜에서 sleep과 active 상태를 고려하여 버퍼링 지연을 최소화하기 위한 sleep 상태의 최적 시작시간과 길이를 도출하였다. [4]에서는 에너지와 패킷지연 간의 트레이드오프 관점에서 IEEE 802.16e 표준의 전력절감 방식(power-saving mechanism; PSM)을 분석하고 개선하는 알고리즘을 제안하였다.

버퍼링 지연 성능 외에도 [5]와 [6]에서는 전력 소비와 종단 간 지연(end-to-end delay) 사이의 트레이드오프 관계를 고려하여 종단 간 지연 요구사항을 만족시키면서 전력 소비를 최소화하도록 sleep 전환 임계치(threshold)와 sleep 간격이 조절하였다. [7]에서는 단말의 에너지 소비량과 깨어나서 전송하는데 까지 걸리는 시간(wake-up delay)간의 트레이드오프 문제를 제시하고, 더 깊은 sleep 상태에 있는 단말의 경우 더 적은 에너지를 소비하나 깨어나는 과정에서 더 많은 지연과 에너지 비용을 발생시킴을 보였다. [8]에서는 3G, EDGE, WiFi의 다중 인터페이스를 갖는 스마트폰에 대해서 에너지 소비량과 접속 지연 간의 트

레이드오프 관계를 밝혔다. 여기에서는 저전력으로 통신할 수 있는 WiFi와 연결할 수 있을 때까지 최대한 데이터 전송을 늦춤으로써 접속 지연에도 불구하고 스마트폰의 배터리 생존시간을 최대한 늘리는 방식을 따른다. 아울러 [9]와 [10]에서는 3GPP UMTS 표준에서 규정하는 사용자 상태 천이 방식을 모델링하여 에너지-지연 간의 트레이드오프 분석을 수행하고 전송 트래픽 속성에 따라 최적의 운용 시나리오를 제시하였다.

지금까지의 PSM에 대한 연구는 다양한 에너지와 지연 성능간의 트레이드오프 관계에 따라 sleep 상태를 어떻게 최적으로 운영할지에 대해 주로 초점을 맞추어 왔다. 따라서 sleep 간격의 제어 및 sleep 상태의 시작과 종료에 대한 다양한 알고리즘이 제안되었다<sup>[2-7]</sup>. 이에 반해 본 논문에서는 active 상태의 운용 방법에 초점을 맞추어 트래픽 발생 패턴에 따라 단말의 전력절감 성능을 극대화하기 위한 active 상태에서 sleep 상태로의 전환 방법을 다룬다. 이를 위해 UE와 상대 노드(correspondence node; CN) 사이에 발생하는 양방향 지연(round-trip delay)을 고려하여 active에서 sleep 상태로 전환시 사용하는 비활성 타이머의 효과적인 적용 방법을 제안한다.

또한 기존 대부분의 연구에서는 송수신할 패킷이 존재하지 않는 트래픽 오프(traffic-off) 기간을 단순한 지수 분포(exponential distribution)로 모델링 하였다<sup>[2-6]</sup>. 하지만 본 논문에서는 UE와 CN 사이에 존재하는 양방향 지연을 고려하여 트래픽 오프 기간을 새롭게 모델링한다. 새로운 트래픽 도착 패턴에 따라 기존 LTE 표준의 PSM 방식과 제안하는 PSM 방식을 수학적으로 분석하고 UE의 에너지 소비량과 전송 패킷의 버퍼링 지연 성능을 비교 분석한다. 아울러 분석 결과로 얻어진 에너지 소비량과 버퍼링 지연 성능을 에너지-지연 트레이드오프(energy-delay tradeoff; EDT) 곡선으로 특징지어 나타냄으로써 운용 파라미터와 양방향 지연 정도에 따라 PSM의 성능 변화를 파악한다.

논문의 나머지 구성은 다음과 같다. II 장에서는 UE와 CN 간의 패킷 송수신시 발생하는 양방향 지연에 대해 모델링한다. III장에서는 기존 LTE PSM 방식과 제안 PSM 방식을 상세히 비교 설명한다. IV 장에서는 버퍼링 지연 및 에너지 소비량의 관점에서 PSM의 성능을 수학적으로 분석한다. V 장에서는 분석 및 시뮬레이션 결과를 보여주고 VI 장에서 본 논문에 대한 결론을 맺는다.

## II. 양방향 지연 모델링

LTE 시스템의 주요 어플리케이션인 웹 브라우징이나 이메일 동기화 같은 서비스는 UE의 요청(request)과 CN의 응답(response)에 의해 트래픽이 발생한다. 그림 1은 이와 같은 응답-요청 기반의 응용서비스에서 발생하는 양방향 지연을 보여준다. UE는 기지국(base station; BS)과 유선 네트워크상의 라우터를 거쳐 CN에게 요청 패킷을 전달하고, CN은 이에 대한 응답 패킷을 역으로 UE에게 전달하게 된다. 여기에서 고려하는 양방향 지연은 기지국이 요청 패킷을 전달한 시점부터 CN으로부터 응답 패킷을 받을 때까지의 시간으로 정의된다.

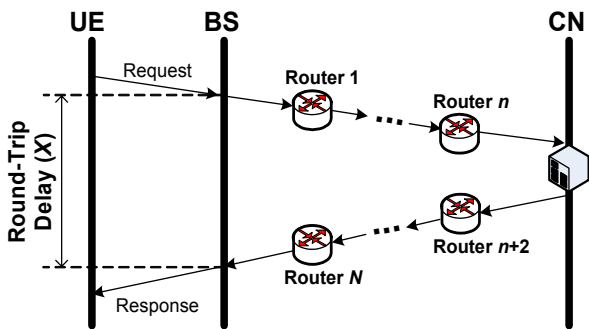


그림 1. 고려하는 네트워크 양방향 지연  
Fig. 1. Considered round-trip delay on network

양방향 지연은 전송 경로의 각 홉에서 발생하는 지연들의 합으로 결정되며, 각 홉에서의 지연은 기본적으로 발생하는 최소 네트워크 지연(minimal network delay)과 큐잉 지연(queueing delay)으로 구성된다<sup>6, 11</sup>. 최소 네트워크 지연은 5 μs/km 수준의 전파 지연(propagation delay), 패킷 크기와 링크 전송률에 의해 결정되는 전송 지연(transmission delay), 경로 탐색(lookup)으로 인한 라우터의 프로세싱 지연(processing delay)으로 구성되는데, 이들 지연의 총합은 각 라우터에서 발생하는 큐잉 지연 값에 비해 상대적으로 작아 고정된 작은 값으로 설정된다. 반면 각 라우터에서 발생하는 큐잉 지연은 네트워크 지연을 발생시키는 주요 원인으로 일반적으로 지수 분포(exponential distribution)로 모델링된다<sup>6, 12</sup>.

따라서 양방향 지연 값을 확률변수  $X$ 라 하면 다음과 같이 표현된다.

$$X = \sum_{n=1}^N (X_n + a_n) = \sum_{n=1}^N X_n + a \quad (1)$$

여기에서  $N$ 은 기지국과 CN 사이에 존재하는 전체

라우터의 개수이며,  $a_n$ 은 각 라우터에서의 고정된 최소 네트워크 지연 값이고, 전체 고정 지연 성분은

$$a = \sum_{n=1}^N a_n \text{ 로 주어진다. 따라서 네트워크 양}$$

방향 지연  $X$ 는  $N$ 개의 지수분포의 합으로 구성된 hypoexponential 분포를 따르며  $X$ 의 확률 밀도 함수(probability density function; pdf)는 다음과 같이 주어진다<sup>13</sup>.

$$f_X(t) = \begin{cases} \sum_{n=1}^N C_n \lambda_n e^{-\lambda_n(t-a)} & \text{if } t \geq a \\ 0 & \text{if } t < a \end{cases} \quad (2)$$

여기에서  $\lambda_n$ 은 각 라우터가 갖는 지수 분포의 rate 파라미터를 나타내며,  $C_n$ 은 상수 값으로

$$\prod_{m \neq n} \lambda_m / (\lambda_m - \lambda_n) \text{ 로 주어진다. 또한 양방}$$

향 지연  $X$ 의 누적 분포 함수(cumulative distribution function; cdf)는 다음과 같이 주어진다.

$$F_X(t) = \begin{cases} 1 - \sum_{n=1}^N C_n e^{-\lambda_n(t-a)} & \text{if } t \geq a \\ 0 & \text{if } t < a. \end{cases} \quad (3)$$

### III. 제안하는 전력절감 방식

그림 2는 네트워크 양방향 지연이 존재하는 트래픽 환경에서 기존 LTE 표준의 전력절감 방식과 제안하는 전력절감 방식의 동작을 보여준다. 먼저 UE에서 발생한 REQ(request) 패킷은 기지국과 네트워크 라우터를 통해 CN에게 전달된다. 이때 기지국은 REQ 패킷 수신에 대한 ACK(acknowledgement) 패킷을 UE에게 보내준다. CN은 REQ 패킷을 수신하면 이에 대한 RES(response) 패킷을 만들어 해당 기지국으로 전송한다. 최종적으로 RES 패킷을 수신한 기지국은 이를 UE에게 전달한다. 이때 기지국이 REQ 패킷을 보낸 시점부터 RES 패킷을 수신할 때까지 양방향 지연이 발생한다. 양방향 지연은 II장에서 모델링한 것과 같이 일정 고정 지연을 갖는 hypoexponential 분포를 따르며 그림 2에서 보듯이 긴 꼬리를 갖는 비대칭 (heavy-tailed asymmetric) 모양의 pdf를 갖는다. RES 패킷은 이 pdf에 따라 확률적으로 도착한다.

기존 PSM 방식은 UE가 기지국으로부터 ACK 패킷을 수신한 후에 설정한 비활성 타이머( $T_{ina}$ )가 만료되면 sleep 상태로 천이하게 된다. 즉, 기존 방식은 양방향 지연을 고려하지 않고 일반적으로 다음 패킷이 바로 발생하는 상황을 고려하여 일정 시간동안 active

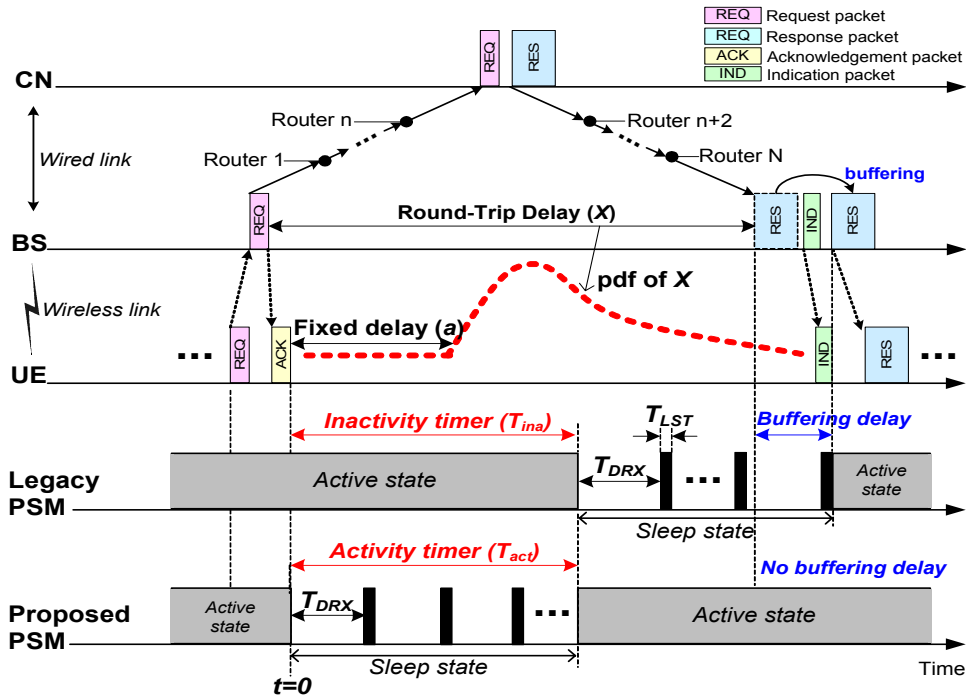


그림 2. 기존 및 제안하는 전력절감 방식의 동작  
Fig. 2. Operation of legacy and proposed PSMs

상태를 유지시킨다. Sleep 상태에서는 DRX 주기 ( $T_{DRX}$ ) 동안 파워를 끄고 있다가 트래픽 알림 메시지를 확인하기 위해  $T_{LST}$  기간 동안 잠시 수신(listening) 상태를 유지한다. 트래픽 알림이 없으면 다시 sleep 상태를 유지하고 트래픽 알림이 있으면 active 상태로 천이하여 해당 RES 패킷을 기지국으로부터 수신한다. 이때 UE의 주기적인 sleep으로 인해 RES 패킷이 기지국에 도착한 시점과 UE가 RES 패킷을 수신하는 시점이 달라지며 이로 인해 버퍼링 지연이 발생하게 된다.

제안하는 PSM 방식은 패킷의 양방향 지연을 고려하여 BS가 REQ 패킷을 전송한 후 일정 시간 동안에는 패킷 도착 확률이 매우 적다는 사실에 의거한다. 따라서 기존방식이 REQ 패킷을 송신한 후에 일정 시간 동안 active 상태를 유지하다가 sleep 상태로 천이하는 것과는 반대로, 제안 방식은 바로 sleep 상태로 천이했다가 일정 시간이 지난 후에 active 상태를 유지한다. 이는 UE가 사용 중인 요청-응답 서비스의 트래픽 속성을 정확히 반영하는 PSM 동작으로 트래픽이 발생 확률이 낮은 구간에서는 sleep하여 사용 전력을 절감할 수 있으며, 트래픽 발생 확률이 높은 구간에서는 active 상태를 유지하여 패킷 버퍼링을 막을 수 있다.

제안 방안의 구체적인 운용 흐름도는 그림 3과 같

다. UE는 REQ 패킷 전송 후 이에 대한 ACK 패킷을 수신하면 바로 sleep 상태로 천이한다. 기존 방식이 비활성 타이머를 사용하여 active 상태의 유지 시간을 제어한 것과 유사하게 제안 방식은 활성 타이머 (activity timer,  $T_{act}$ )를 정의하여 sleep 상태의 유지 시간을 제어한다. 즉, sleep 상태로 천이한 후에 활성 타이머를 가동한 후 활성 타이머가 만료될 때 active 상태로 천이한다. 이때 활성 타이머 값  $T_{act}$ 는 발생하는 양방향 지연 수준에 따라 적절히 결정해야 할 운용 파라미터가 된다. 기존 방식과 마찬가지로  $T_{act}$  길이의 sleep 기간 동안 UE는  $T_{DRX}$ 마다 트래픽 알림 메시지를 통해 트래픽 발생이 있는지를 확인하고 만약 트래픽 발생이 확인되면 바로 active 상태로 천이한다. 이와 같은 경우에는 트래픽 도착 시점과 트래픽 전달 시점에 차이가 날 수 있으므로 버퍼링 지연이 발생하게 된다. 하지만 그림 3에서 보듯이 제안 방안은 RES 패킷이 도착할 때 즈음에 활성 타이머가 만료되도록 하여 UE가 active 상태에서 버퍼링 지연 없이 바로 패킷을 수신할 수 있게 만든다. 이와 같이 제안 방안은 패킷 송수신 간에 발생하는 네트워크 양방향 지연을 고려하여 기존 LTE 표준의 방식에 간단한 상태 천이의 변화를 줌으로써 효과적으로 UE의 에너지를 절감하면서 동시에 패킷의 버퍼링 지연도 줄일 수 있다.

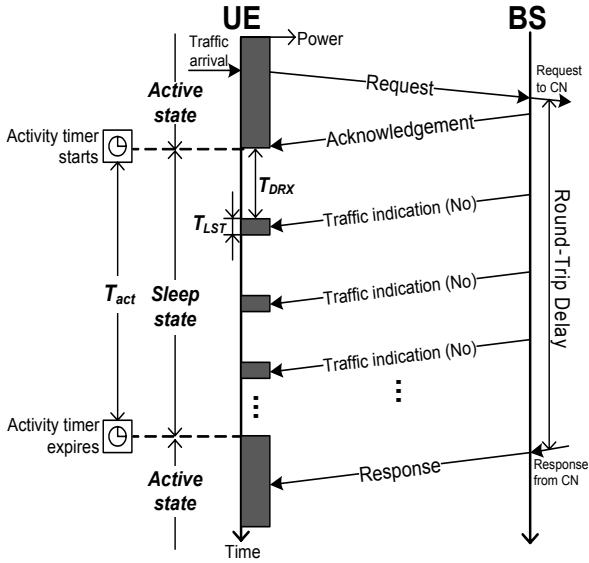


그림 3. 제안하는 전력절감 방식에서의 UE와 BS간의 운용 흐름도  
 Fig. 3. Operational flow between UE and BS in the proposed PSM

제안 방식의 동작을 위해 표준 상에서 변경되어야 할 부분을 살펴보면, 먼저 단말의 MAC 프로토콜은 각 스트림 별로 송수신 패킷을 관리하여 전송된 REQ 패킷에 대한 ACK 패킷의 수신을 확인해야 한다. ACK 패킷을 수신한 후에는 UE가 sleep 상태로 천이하도록 만들며 사전에 결정된 활성 타이머를 가동시키고 활성 타이머가 만료되면 active 상태로 천이하도록 한다. 이를 제외한 나머지 부분은 기존 PSM 방식에 관한 표준의 내용을 그대로 따른다.

### IV. 수학적 분석

본 장에서는 기존 LTE 시스템의 PSM 방식과 제안 PSM 방식의 수학적 분석을 통해 평균 패킷 버퍼링 지연과 UE의 에너지 소비량에 대한 성능을 도출한다. 수학적 분석은 [6]에서 사용한 분석 프레임워크를 기반으로 한다.

#### 4.1. 패킷 버퍼링 지연

그림 2에 표시한 것과 같이 PSM 동작이 시간  $t=0$ 에서 시작한다고 할 때,  $k$ -번째 수신(listening) 시점  $T_k$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$T_k = T_{ina} + kT_{DRX} + (k-1)T_{LST} \quad (4)$$

여기에서  $T_{ina}$ 는 비활성 타이머의 길이이고,  $T_{DRX}$

는 DRX 주기의 길이이며,  $T_{LST}$ 는 listening 간격의 길이이다. 또한 BS에 도착하는 RES 패킷이  $k$ -번째 sleep 간격에 도착할 확률을  $P_k$ 라고 하면  $P_k$ 는 다음과 같이 구해진다.

$$P_1 = \int_{T_{ina}}^{T_{ina}+T_{DRX}} f_X(t) dt, \quad (5)$$

$$P_k = \int_{T_{ina}+(k-1)T_{DRX}+(k-2)T_{LST}}^{T_{ina}+kT_{DRX}+(k-1)T_{LST}} f_X(t) dt \quad \text{for } k \geq 2. \quad (6)$$

아울러  $S_k$ 를  $k$ -번째 sleep 간격과  $k$ -번째 listening 간격을 합한 구간이라고 하면  $S_k$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$S_1 = [0, T_1), \quad (7)$$

$$S_k = [T_{k-1}, T_k) \quad \text{for } k \geq 2. \quad (8)$$

패킷이  $S_k$  동안에 도착한다는 가정 하에 발생하는 버퍼링 지연을  $D_k$ 라 하면 이는 다음과 같이 표현된다.

$$D_k = \sum_{i=1}^k T_i - X. \quad (9)$$

이때  $X$ 가  $S_k$ 내에서 발생할 때(즉, 패킷이  $S_k$  동안에 도착할 때)  $X$ 의 조건부(conditional) pdf는 다음과 같이 주어진다.

$$f_{X|S_k}(t) = P[X=t | X \in S_k] = \frac{P[X=t, X \in S_k]}{P[X \in S_k]} = \begin{cases} \frac{f_X(t)}{P[X \in S_k]}, & \text{if } t \in S_k \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (10)$$

따라서 기존 PSM에서의 평균 버퍼링 지연은 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} E[D] &= \sum_{k=1}^{\infty} E[D_k | X \in S_k] P[X \in S_k] \\ &= \sum_{k=1}^{\infty} E\left[\sum_{i=1}^k T_i - X | X \in S_k\right] \cdot P_k \\ &= \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{i=1}^k T_i P_k - \sum_{k=1}^{\infty} E[X | X \in S_k] P_k. \end{aligned} \quad (11)$$

여기에서  $P_k=P[X \in S_k]$ 와  $E[X|X \in S_k]$ 는 각각 다음과 같이 주어진다.

$$P_k = P[X \in S_k] = P[T_{k-1} \leq X < T_k]$$

$$= \begin{cases} F_X(T_k), & \text{if } T_{k-1} < a \leq T_k \\ F_X(T_k) - F_X(T_{k-1}), & \text{if } T_{k-1} \geq a \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$= \begin{cases} 1 - \sum_{n=1}^N C_n e^{-\lambda_n(T_k-a)}, & \text{if } T_{k-1} < a \leq T_k \\ \sum_{n=1}^N C_n e^{-\lambda_n(T_k-a)} \cdot (1 - e^{-\lambda_n(T_k-T_{k-1})}), & \text{if } T_{k-1} \geq a \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (12)$$

$$E[X | X \in S_k] = \int_{T_{k-1}}^{T_k} t f_{X|S_k}(t) dt$$

$$= \begin{cases} \frac{\sum_{n=1}^N C_n \left\{ \left( a + \frac{1}{\lambda_n} \right) - \left( T_k + \frac{1}{\lambda_n} \right) e^{-\lambda_n(T_k-a)} \right\}}{1 - \sum_{n=1}^N C_n e^{-\lambda_n(T_k-a)}}, & \text{if } T_{k-1} < a \leq T_k \\ \frac{\sum_{n=1}^N C_n e^{-\lambda_n(T_{k-1}-a)} \left\{ \left( \frac{1}{\lambda_n} + T_{k-1} \right) (1 - e^{-\lambda_n(T_k-T_{k-1})}) - T_k e^{-\lambda_n(T_k-T_{k-1})} \right\}}{\sum_{n=1}^N C_n e^{-\lambda_n(T_{k-1}-a)} (1 - e^{-\lambda_n(T_k-T_{k-1})})}, & \text{if } T_{k-1} \geq a \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (13)$$

제안 방식은 기존 방식과 정확히 반대의 동작을 따르므로 제안 PSM의 버퍼링 지연은 식 (4)를  $T_k = kT_{DRX} + (k-1)T_{act}$ 로 재설정 한 후 식 (5)-(13)을 다시 계산함으로써 구할 수 있다.

#### 4.2. 에너지 소비량

기존 LTE 표준의 PSM 방식에서 RES 패킷이 active 상태와 sleep 상태에서 도착할 확률은 각각 다음과 같이 계산된다.

$$P_{act} = \int_0^{T_{ina}} f_X(t) dt = \sum_{n=1}^N C_n \{1 - e^{-\lambda_n(T_{ina}-a)}\} \quad (14)$$

$$P_{slp} = \int_{T_{ina}}^{\infty} f_X(t) dt = 1 - P_{act} \quad (15)$$

또한 응답 패킷이 active 상태나 sleep 상태에 도착한다고 할 때 양방향 지연의 조건부 평균은 다음과 같이 계산된다.

$$\bar{D}_{act} = E[X | X \leq T_{ina}]$$

$$= \int_0^{T_{ina}} \frac{t f_X(t)}{P\{t \leq T_{ina}\}} dt = \int_0^{T_{ina}} \frac{t f_X(t)}{P_{act}} dt, \quad (16)$$

$$\bar{D}_{slp} = E[X | X > T_{ina}]$$

$$= \int_{T_{ina}}^{\infty} \frac{t f_X(t)}{P\{t > T_{ina}\}} dt = \int_{T_{ina}}^{\infty} \frac{t f_X(t)}{P_{slp}} dt. \quad (17)$$

$E_{act}$ 와  $E_{slp}$ 를 UE가 active 상태와 sleep 상태에 머물 때 드는 단위 시간당 에너지 소비량이라고 하면, 식 (16)과 (17)을 이용하여 기존 PSM 방식의 단위 시간당 소비되는 평균 에너지 소비량을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\bar{E}_{legacy} = \frac{P_{act} E_{act} \bar{D}_{act} + P_{slp} \{E_{act} T_{ina} + E_{slp} (\bar{D}_{slp} - T_{ina})\}}{\sum_{n=1}^N 1/\lambda_n + a} \quad (18)$$

제안 방식은 기존 방식과 정확히 반대 동작을 취하므로 제안 PSM의 에너지 소비량은 식 (18)에서  $E_{act}$ 와  $E_{slp}$ 를 서로 교환함으로써 다음과 같이 구해진다.

$$\bar{E}_{prop} = \frac{P_{act} E_{slp} \bar{D}_{act} + P_{slp} \{E_{slp} T_{act} + E_{act} (\bar{D}_{slp} - T_{act})\}}{\sum_{n=1}^N 1/\lambda_n + a} \quad (19)$$

### V. 분석 결과 및 고찰

표 1은 결과 도출을 위해 사용한 파라미터의 설정 값을 보여준다. 여기에서는 LTE 표준에서 제시하는 파라미터 중  $T_{DRX}=1280$  ms와  $T_{LST}=2$  ms를 사용한다<sup>[1]</sup>. 또한 active와 sleep 상태에서의 상대적인 에너지 소비량을  $E_{act}=20$ 과  $E_{slp}=1$ 로 설정한다<sup>[14]</sup>. 아울러 각 라우터의 고정 지연 값  $a_n$ 을 10 ms로 평균 큐잉 지연 값  $1/\lambda_n$ 을 100 ms로 설정하고<sup>[6]</sup> 라우터의 개수(N)와 타이머 값( $T_{ina}$ 와  $T_{act}$ )을 적절한 범위에서 다양하게 변경한다.

그림 4는 타이머 값과 라우터의 수(N)에 따른 기존과 제안 PSM의 에너지 소비량과 버퍼링 지연 성능을 보여준다. 보논바와 같이 파라미터 변화에 따라 에너지 소비량과 버퍼링 지연 사이에 트레이드오

표 1. 파라미터 설정  
Table 1. Parameter Setup

Parameter	Value
$T_{DRX}$	1280 ms
$T_{LST}$	2 ms (duration of one frame)
$E_{act}$	20
$E_{slp}$	1
$a_n$	10 ms
$1/A_n$	100 ms
$N$	1-10
$T_{ina}, T_{act}$	0-5 second

프 관계가 존재한다. 즉, 기존 방안의 경우 타이머 값  $T_{ina}$ 가 작아지고 라우터의 개수  $N$ 이 커질수록 에너지 소비량이 작아지는 반면 버퍼링 지연은 커지게 된다. 제안 방안의 경우 타이머 값  $T_{act}$ 가 작아지고 라우터의 개수  $N$ 이 커질수록 에너지 소비량이 커지는 반면 버퍼링 지연은 작아지게 된다. 이와 같이 두 PSM 방식은 에너지와 지연 사이에 트레이드오프 관계를 보이면서 그 성능 양상은 서로 반대가 되는데, 이는 제안 방안과 기존 방안이 서로 정반대의 상태 천이 동작을 따르기 때문이다. 하지만 제안 방안의 경우 양방향 지연을 고려한 트래픽 발생 패턴에 따라 상태 천이를 수행하므로 기존 방안과 비슷한 버퍼링 지연 성능을 가지면서도 현저히 줄어든 에너지 소비량을 보여준다.

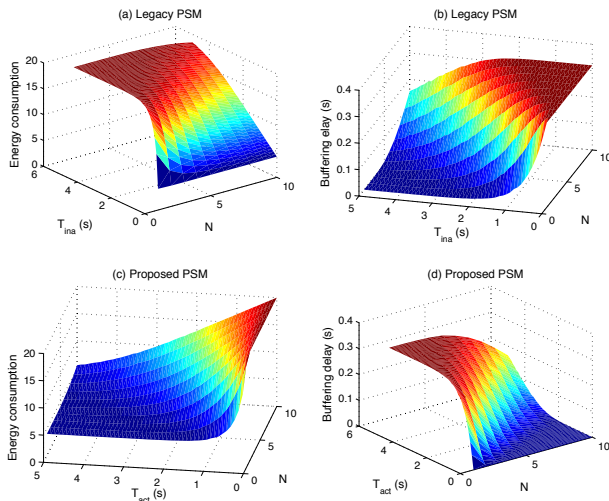


그림 4. 타이머 값과 라우터의 개수에 따른 에너지 소비량과 버퍼링 지연 성능  
Fig. 4. Energy consumption and buffering delay vs. timers and number of routers

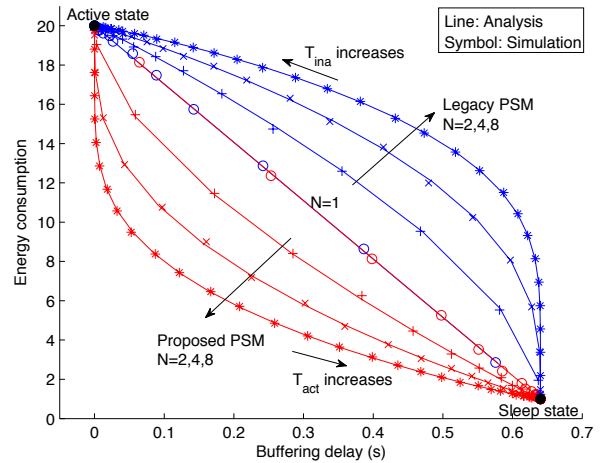


그림 5. 라우터 수에 따른 에너지-지연 트레이드오프 곡선  
Fig. 5. Energy-delay tradeoff curves according to the number of routers

그림 5는 라우터 수( $N$ )에 따른 에너지 소비량과 버퍼링 지연 간의 트레이드오프 성능을 보여준다. 에너지-지연 트레이드오프(energy-delay tradeoff; EDT) 곡선은 에너지 소비량과 버퍼링 지연을 각 축으로 잡아 둘 사이의 관계 변화를 알기 쉽게 나타낸 것이다. 각 EDT 곡선은 active와 sleep 상태에서의 에너지와 지연 비용에 해당하는 두 점을 연결한 형태를 갖는다. 각 EDT 곡선 위의 모든 점은 비활성 타이머나 활성 타이머 값을 조정하여 얻을 수 있는데, 기존 PSM의 경우 비활성 타이머  $T_{ina}$ 가 증가할수록 에너지 소비는 커지고 지연은 작아지는 active 상태의 성능으로 수렴하고 제안 PSM의 경우 활성 타이머  $T_{act}$ 가 증가할수록 에너지 소비는 작아지고 지연은 커지는 sleep 상태의 성능으로 수렴한다. 이러한 EDT 곡선은 주어진 지연 요구사항을 만족시키면서 에너지 소비를 최소화하는 최적 타이머 값을 도출하는데 활용할 수 있다. 아울러 곡선이 원점에 가까울수록 에너지와 지연 성능이 동시에 좋아지므로 제안 PSM 방식이 기존 PSM 방식보다 더 좋은 에너지와 지연 성능을 가짐을 알 수 있다. 라우터의 개수  $N=1$  일 때는 기존 및 제안 방식의 EDT 곡선이 두 상태의 에너지-지연 비용 점을 연결하는 직선이 되면서 서로 일치하는데, 이는  $N=1$ 인 경우에는 고려하는 양방향 지연이 단순히 지수 분포를 따르기 때문이다. 하지만  $N$ 이 증가함에 따라 제안 PSM의 EDT 곡선은 안으로 볼록해지면서 에너지와 지연 성능이 둘 다 좋아지는 반면, 기존 PSM의 EDT 곡선



은 바깥으로 블록해지면서 두 성능이 나빠지게 된다. 이는  $N$  값이 증가함에 따라 양방향 지연이 길어지고 이로 인해 트래픽 오프 기간이 증가하게 되어 제안 방식이 기존 방식보다 sleep 할 수 있는 기간이 더 늘어나기 때문이다.

## VI. 결 론

본 논문에서는 요청 및 응답 서비스 트래픽에서 발생하는 네트워크상의 양방향 지연 특성을 고려하여 기존 LTE PSM의 상태 천이 순서를 반대로 적용한 새로운 PSM을 제안하였다. 수학적 분석을 통해 제안 PSM의 에너지 소비량과 버퍼링 지연 성능을 도출하고 EDT 곡선의 형태로 나타냄으로써 트레이드오프 특성 및 파라미터에 따른 성능 변화를 파악하였다. EDT 곡선은 양방향 지연이 증가함에 따라 제안 방식이 기존 방식 대비 에너지 소비량과 버퍼링 지연 성능을 동시에 개선시킴을 효과적으로 보여 주었다. 제안 PSM 방식은 현재 LTE 표준의 방법과 호환성을 유지하면서 이를 수정하는 형태로 구현 가능하며 사용 서비스 별로 양방향 지연의 발생 유무에 따라 선택적으로 사용될 수 있으리라 기대한다.

## References

- [1] C. S. Bontu and E. Illidge, "DRX mechanism for power saving in LTE," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 47, no. 6, pp. 48-55, June 2009.
- [2] S. Jin and D. Qiao, "Numerical analysis of the power saving in 3GPP LTE advanced wireless networks," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 61, no. 4, pp. 1779-1785, May 2012.
- [3] M. Sarkar and R. L. Cruz, "Analysis of power management for energy and delay trade-off in a WLAN," in *Proc. Conf. Inform. Sci. Syst.*, pp. 1-6, Princeton, U.S.A., Mar. 2004.
- [4] 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. Electron.*, vol. 53, no. 4, pp. 1339-1347, Nov. 2007.
- [5] S.-B. Jang and Y.-G. Kim, "Power saving and delay reduction for supporting WLAN-based fixed-mobile convergence service in smart phone," *IEEE Trans. Consum. Electron.*, vol. 56, no. 4, pp. 2747-2755, Nov. 2010.
- [6] 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. Electron.*, vol. 55, no. 3, pp. 1537-1545, Aug. 2009.
- [7] 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.
- [8] M.-R. Ra, J. Paek, and A.-B. Sharma, "Energy-delay tradeoffs in smartphone applications," in *Proc. Conf. Mobile Syst., Applicat., Services (MobiSys 2010)*, pp. 255-270, San Francisco, U.S.A., June 2010.
- [9] H.-H. Choi, "Performance analysis of tradeoff between energy consumption and activation delay in UMTS state transition mechanism," *J. Korean Inst. Commun. Inform. Soc. (KICS)*, vol. 37A, no. 12, pp. 1085-1092, Dec. 2012.
- [10] J.-H. Yeh, C.-C. Lee, and J.-C. Chen, "Performance analysis of energy consumption in 3GPP networks," in *Proc. IEEE Wireless Telecommun. Symp.*, pp. 67-72, Pomona, U.S.A., May 2004.
- [11] B. Kao, H. Garcia-Molina, and D. Barbara, "Aggressive transmissions of short messages over redundant paths," *IEEE Trans. Parallel Distrib. Syst.*, vol. 5, no. 1, pp. 102-109, Jan. 1994.
- [12] T. Yensen, J. P. Lariviere, I. Lambadaris, and R. A. Goubran, "HMM delay prediction technique for VoIP," *IEEE Trans. Multimedia*, vol. 5, no. 3, pp. 444-457, Sep. 2003.
- [13] R. E. Walpole, et al., *Probability and Statistics for Engineers and Scientists*, 9th Ed, Pearson, 2011.
- [14] GSM Association, *Network Efficiency Task Force Fast Dormancy Best Practices*, ver. 1.0, Retrieved May, 26, 2010, from <http://www.gsma.com>.



최 현 호 (Hyun-Ho Choi)



2001년 2월 KAIST 전기 및  
전자공학과 졸업

2003년 2월 KAIST 전기 및  
전자공학과 석사

2007년 2월 KAIST 전기 및  
전자공학과 박사

2007년 3월~2011년 2월 삼  
성종합기술원 전문연구원

2011년 3월~현재 국립한경대학교 전기전자제어공  
학과 조교수

<관심분야> 매체접속제어, 분산자원관리, 저전력 프  
로토콜, 생체모방 알고리즘, 차세대 무선통신시스  
템