

# The Analysis of an Opportunistic Spectrum Access with a Strict T-preemptive Priority Discipline

Kilhwan Kim<sup>†</sup>

Department of Management Engineering, Sangmyung University

## 엄격한 T-축출 우선순위 대기행렬을 이용한 기회 주파수 접근 방식의 성능 분석

김 길 환<sup>†</sup>

상명대학교 경영공학과

We propose a new priority discipline called the strict T-preemptive priority discipline, and derive the waiting time distributions of each class in the strict T-preemptive priority M/G/1 queue. Using this queueing analysis, we evaluate the performance of an opportunistic spectrum access in cognitive radio networks, where a communication channel is divided into time slots, a licensed primary user is assigned to one channel, and multiple unlicensed secondary users may opportunistically exploit time slots unused by the primary user. We also present a numerical example of the analysis of the opportunistic spectrum access where the arrival rates and service times distributions of each users are identical.

**Keywords :** Priority Queues, Strict T-Preemptive Priority Discipline, Opportunistic Spectrum Access, Cognitive Radio Networks

### 1. 서 론

광대역 무선 네트워크에서 주파수는 희소한 자원이다. 현재 광대역 무선 네트워크에서는 인가된 주 사용자에게 고정된 주파수를 할당한다. 그런데 이러한 체계는 비효율적이다. 왜냐하면 특정 시간대에 인가된 주 사용자의 주파수 이용률이 낮더라도 유휴한 주파수를 활용할 수 없기 때문이다[2, 4]. 이러한 주파수 이용의 비효율성은 새로운 변조나 코딩 방법이 도입되더라도 해결될 수 없는 문제로, 주파

수의 공유 및 풀링(pooling) 등을 통해서만 해결될 수 있다.

이러한 주파수 이용의 비효율성을 개선하기 위해 제안된 방식이 인지 라디오 네트워크(cognitive radio networks)에서 기회적 주파수 접근(opportunistic spectrum access) 방식이다. 통신 채널이 인가된 주 사용자에게 할당된다는 것은 기존의 방식과 동일하다. 그러나 주 사용자에게 할당된 통신 채널이 이용되지 않는 동안에 인가되지 않은 부 사용자에게 주파수를 이용할 수 있는 기회를 제공한다. 따라서 기회적 주파수 접근 방식에서는 평균 주파수 이용률이 향상되게 된다.

통신 채널을 인가된 주 사용자에게 배타적으로 할당하는 경우에 비해서, 기회적 주파수 접근 방식에는 통신 시스템 운영에 새로운 문제를 제기한다. 인가되지 않은 부 사용자는 인가된 주 사용자의 서비스를 최대한 방해하지 않아야 할 것이다. 인지 라디오 네트워크 도입에 따른 주 사용자의 서비스 성능 저하를 최대한 방지하기 위

Received 5 November 2012; Accepted 5 December 2012

<sup>†</sup> Corresponding Author : khkim@smu.ac.kr

© 2012 Society of Korea Industrial and Systems Engineering

This is Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>).

해서는 주 사용자의 서비스 요청 시 기회적으로 주파수를 이용하고 있던 부 사용자는 즉시 통신 채널에서 떠나야 한다. 하지만 주 사용자 도착할 때마다 부 사용자를 통신 채널에서 즉각적으로 축출하면 부 사용자의 서비스 성능이 크게 저하될 수 있고 전체 시스템의 효율도 낮아질 수 있다. 또한, 주 사용자와 부 사용자 간의 통신 채널 이용의 즉각적인 스위칭을 위해서는 별도의 시그널링이 요구될 수 있어서, 주 사용자와 부 사용자가 각각 독립적으로 통신 채널을 이용하는 것과 같은 환경을 제공하기 어렵다. 반대로 부 사용자의 서비스가 종료될 때까지 주 사용자가 기다려야 한다면, 부 사용자의 서비스 시간이 길거나 변동성이 커지면 주 사용자의 서비스 성능이 심각하게 저하될 수 있다. 따라서 주 사용자의 서비스 성능 저하를 최소화 하면서 부 사용자에게 적절한 서비스 성능을 보장할 수 있는 ‘부 사용자의 채널 축출 메커니즘’과 이에 따른 성능분석이 수반되어야 한다.

하지만 기존의 인지 라디오 네트워크의 성능분석과 관련된 연구의 대부분은 주 사용자가 부 사용자를 ‘즉시 축출(preemptive)’하거나 또는 부 사용자의 서비스 종료 때까지 ‘비축출(non-preemptive)’하는 극단적인 경우를 가정하여 수행되었다[5, 6, 8, 9].

반면 Kim[3]은 최근 축출 및 비축출 우선순위 규칙을 혼합하는 ‘T-축출 우선순위 규칙’을 새롭게 제안하고 이를 인지 라디오 네트워크의 기회적 주파수 접근 방식에 대한 성능분석에 적용하였다.

이 논문에서는 Kim[3]에서 제안한 ‘T-축출 우선순위 정책(T-preemptive priority discipline)’의 변종인 ‘엄격한 T-축출 우선순위 정책(strict T-preemptive priority discipline)’을 제안하고 이를 인지 라디오 네트워크의 기회 스펙트럼 접근 방식의 성능 분석에 적용한다. 새로운 변종 우선순위 규칙을 제안하는 이유는, ‘엄격한 T-축출 우선순위 규칙’이 기존의 ‘T-축출 우선순위 규칙’에 비해 동일 시간 간격으로 시분할되어 이용되는 통신 채널에 대한 분석에 좀 더 적합하기 때문이다. 본 논문에서는 Kim[3]에서 제시한 분석방법을 ‘엄격한 T-축출 우선순위 대기행렬 모형’에 적용하여 성능분석 결과를 얻은 후 Kim[3]에서 수행하지 않았던 시분할 환경의 통신 채널에서의 기회적 주파수 접근에 대한 성능 분석을 수행하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제 2장에서는 ‘엄격한 T-축출 우선순위 규칙’과 이를 적용한 대기행렬 모형에 대하여 정의한다. 제 3장에서는 ‘엄격한 T-축출 우선순위 대기행렬 모형’의 대기시간 분석을 시도한다. 제 4장에서는 제 3장의 분석 결과를 이용하여 시분할 통신채널 환경에서의 기회적 주파수 접근 방식의 성능 분석의 예를 제시한다. 마지막으로 제 5장에서는 논문의 의의를 밝히고 향후 연구 가능성을 타진해 본다.

## 2. 엄격한 T-축출 우선순위 정책 및 대기행렬 모형

### 2.1 엄격한 T-축출 우선순위 정책

가장 기본적인 우선순위 정책은 고전적 ‘축출(preemptive)’ 우선순위 정책과 ‘비축출(non-preemptive)’ 우선순위 정책이다(Takagi[7]의 chapter 3, 참조). 이 두 우선순위 정책은 시스템이 시스템 상태를 점검하는 방식의 관점에서 양 극단의 정책이라 할 수 있다. 왜냐하면 고전적 축출 우선순위 규칙에서는 시스템이 현재 서비스 받는 고객보다 상위 우선순위 고객이 도착하면 현재의 고객을 축출하기 위해 ‘지속적으로’ 시스템 상태를 파악하고 있어야 한다. 반면 비축출 우선순위 규칙은 서비스 중에는 시스템 상태를 ‘결코’ 파악하지 않으며 축출도 하지 않는다.

그러나 현실에서는 시스템이 시스템의 상태를 파악하는 데 무시할 수 없는 시간과 비용이 발생할 수 있으므로, 시스템의 상태를 ‘지속적으로’ 점검하는 것은 가능하지도 않고 바람직한 방법이 아니다. 특히 본 논문의 분석 대상인 무선 네트워크 환경처럼 시스템의 상태 정보가 분산되어 있고 이에 대한 정보를 시스템이 파악하기 위한 처리 시간이 필요한 경우는 고전적 축출 우선순위 정책을 이용한 분석 모델은 현실적인 모델이 되기 어렵다. 반면 비축출 우선순위 정책은 하위 우선순위 고객의 서비스 중 결코 시스템의 상태를 파악하지도 않으며 축출도 하지 않으므로, 하위 우선순위 고객의 서비스 시간이 길거나 변동성이 커지면 상위 우선순위 고객의 서비스 성능의 심각한 저하가 발생하게 된다. 따라서 인지 라디오 네트워크처럼 서비스 우선순위가 높은 주 사용자의 서비스 안정성이 보장되어야 하는 시스템에 적용하는 데 한계를 가진다.

이러한 이유로 Kim[3]은 고전적 축출 및 비축출 우선순위 정책의 혼합형 정책인 ‘T-축출 우선순위 정책’을 제안하였다. T-축출 우선순위 정책 하에서는 서비스를 받는 고객은 매 T 시간마다 서비스를 중지하고 각 클래스의 고객의 대기열 상태 점검을 시작한다. 각 클래스의 ‘대기열 점검 수행시간’은 클래스 별로 다르다. 만약 현재 서비스 받는 고객보다 상위 고객이 대기열에 있으면 현재 서비스 받는 고객의 서비스는 축출되고 상위 고객의 서비스가 시작된다. 그렇지 않은 경우에는 ‘대기열 점검 수행시간’이 종료된 후 다시 서비스를 재개한다.

‘T-축출 우선순위 정책’에서는 대기열 점검 주기 T는 의사결정 변수이다. T가 작아질수록 고전적 축출 정책과 같아져 상위 고객의 서비스 성능이 개선되고, T가 커질수록 비축출 정책과 같아져 하위 고객의 서비스 성능이 개선된다. 또한, 현실 문제에서 발생할 수 있는 ‘대기열

점검 수행시간'이 고려되고 있으므로 실제 시스템에서 발생하는 시간을 모델링 할 수 있고 이에 따라 서비스 성능에 미치는 영향을 파악할 수 있다.

하지만 'T-축출 우선순위 규칙'은 현실 시스템에 적용 시 한 가지 단점을 가지고 있다. 'T-축출 우선순위 규칙'에서는 현재 서비스 받고 있는 고객이 대기열 점검 주기인 T시간이 되기 전에 잔여 서비스 시간이 경과하여 서비스가 종료되면, 시스템의 유휴 시간을 줄이기 위해 즉시 시스템에게 서비스 종료료를 알리고 즉시 다음 대기열 점검 수행이 이루어지도록 가정하고 있다[3]. 그런데 이러한 가정은 실제 시스템 적용 시 두 가지 문제를 발생시킬 수 있다. 첫째, 고객 서비스가 대기열 점검 주기 전에 종료되는 경우의 처리 메커니즘(서비스 종료 통보 및 대기열 점검 수행 시작 메커니즘)이 필요하다. 이는 서비스 운영의 복잡성을 야기할 수 있다. 특히 무선 통신 시스템처럼 동일한 시간 간격으로 시분할하여 시스템을 동기화하여 운영·관리하는 것이 용이한 시스템의 경우 예외적인 시간 간격의 발생은 시스템 운영 효율의 저하를 가져올 수 있다. 둘째, 대기열 점검 주기가 등간격이 아니므로 성능분석 및 수치적 계산의 복잡성이 발생한다.

이러한 'T-축출 우선순위 정책'의 현실 적용성의 한계를 개선하기 위해 본 논문에서는 '엄격한 T-축출 우선순위 정책'을 제안한다. 모든 가정이 'T-축출 우선순위 정책'과 동일하나 대기열 점검 주기가 항상 T로 유지되어, 대기열 점검 주기 전에 잔여 서비스 시간이 모두 경과하여 서비스가 종료되더라도 다음 대기열 점검 주기까지 시스템이 유휴 상태로 대기한다는 점만이 다르다. 이에 따라 'T-축출 우선순위 정책'에 비해 '엄격한 T-축출 우선순위 정책'을 적용하면 시스템이 포화상태일 때 시스템 유휴율이 증가하지만 시간의 동기화에 따른 시스템 구현의 단순성이 보장되고, 분석의 단순함에 따른 성능분석의 용이성이 이러한 시스템 유휴 시간 증가에 따른 비용을 상회하리라 예상된다.

## 2.2 엄격한 T-축출 우선순위 M/G/1 대기행렬 모형

본 논문에서는 다음과 같은 M/G/1 우선순위 대기행렬 모형을 고려한다.  $P \geq 2$ 클래스의 고객이 시스템에 도착한다. 클래스  $j, j=1, \dots, P$ , 고객은 도착률  $\lambda_j$ 인 포아송 프로세스에 따라 시스템에 도착한다.  $k < j$ 이면 클래스  $k$  고객은 클래스  $j$  고객보다 높은 서비스 우선순위를 가진다. 클래스  $j$  고객의 서비스 시간  $S_j$ 는 독립이고 동일한 분포를 가지는 확률변수이며, 임의의 일반 분포 함수  $S_j(x)$ 을 가지고, Laplace-Stieltjes Transform(LST)  $S_j^*(s)$ 을 갖는다.

시스템은 시간을 간격  $T$ 의 시간 슬롯(time slot)으로

시분할 한다. 시간 슬롯 시작 시점이 되면 서버는 유휴상태가 되며 -즉, 서비스 받던 고객이 있으면 서비스는 중지된다- 다음 시간 슬롯에 어떤 고객을 서비스 할 것인지를 결정하기 위해 시간 슬롯 시작 시점에 각 클래스의 대기열 상태 점검을 요청한다. 각 클래스의 대기열은 서버가 요청한 시각의 대기열 상태 정보를 일정 시간 경과 후 클래스의 우선순위 순서에 따라 차례로 서버에 전송한다. 즉, 서버가  $t$ 시점에 대기열 상태 점검을 요청하였다면, 클래스  $j$ 대기열의  $t$ 시점의 상태가  $t+Y_j$ 시점에 서버에 알려진다. 단,  $0 \leq Y_1 \leq \dots \leq Y_P < T$ 인 상수들이다. 서버는 대기열 상태 점검 중에 고객을 발견하지 마자 대기열 상태 점검을 종료하고 고객이 발견된 클래스에 대한 서비스를 수행한다. 같은 클래스의 고객에 대한 서비스는 선입선출(FIFO : First-In First-Out) 방식으로 수행된다.

대기열 상태 점검을 마지막 클래스까지 수행하였는데도 고객을 발견하지 못하면 다음 시간 슬롯 시작 시점까지 서버는 유휴상태를 유지한다. 시간 슬롯 중간에 고객이 도착하더라도 서버는 항상 시간 슬롯 시작 시점의 대기열 상태 정보를 받게 되므로 서버는 시간 슬롯 중에 도착한 고객에 대한 서비스는 해당 시간 슬롯에 수행하지 않는다.

또한 엄격한 T-축출 우선순위 정책에서는 해당 시간 슬롯 동안 서비스 받는 고객이 시간 슬롯 종료 전에 서비스가 종료되면 해당 시간 슬롯의 잔여 시간 동안 유휴상태에 들어가게 된다. 즉,  $t$ 시점에서 서버가 유휴상태가 되어서 대기열 상태 점검을 시작하여서  $t+Y_j$ 시점에 클래스  $j$ 고객을 발견하여 이 고객에 대한 서비스를 시작하였다면, 서버는  $t+T$ 시점까지 그 고객에 대한 서비스를 지속시킬 수 있다. 만약  $t+Y_j$ 시점의 그 고객의 잔여 서비스 시간  $U_j$ 가  $T-Y_j$  보다 작다면 서버는 그 고객에 대한 서비스를  $t+U_j$ 시각에 완료하고 다음 시간 슬롯 시작 시점인  $t+T$ 시점까지 유휴상태가 된다. 만약  $t+Y_j$ 시점에 서비스가 시작(재개)된 고객의 잔여 서비스 시간  $U_j$ 가  $T-Y_j$ 를 초과한다면,  $t+T$ 시점에 그 고객은 서버에서 축출되고 서버는 다시 대기열 상태 점검을 수행한다. 만약  $t+T$ 시점에 상위 클래스 고객이 없었다면  $t+T+Y_j$ 시점에 다시 그 클래스  $j$ 고객에 대한 서비스가 재개될 것이다.

## 3. 엄격한 T-축출 우선순위 M/G/1 대기행렬의 대기시간 분석

본 논문에서는 특정 클래스  $j$ 를 중심으로 분석을 수행하기 위해 클래스 1부터  $j$ 까지의 고객을 클래스  $j^+$ 고객

이라 칭하고 클래스  $j+1$ 부터  $P$ 까지의 고객을 클래스  $j^-$ 고객이라 칭한다.  $\lambda_j^+ = \sum_{i=1}^j \lambda_i$ 라 하고  $\lambda_j^- = \sum_{i=j+1}^P \lambda_i$ 라 하면 포아송 프로세스의 중첩 속성에 의해 클래스  $j^+$ 고객과 클래스  $j^-$ 고객의 도착과정은 각각 도착율  $\lambda_j^+$ 와  $\lambda_j^-$ 를 가지는 포아송 프로세스가 된다.

### 3.1 서비스 시간 구조의 분석

클래스  $j$ 고객의 관점에서 다음의 3가지 확률변수를 실제적인 클래스  $j$ 고객의 서비스 시간이라고 할 수 있다.

첫 번째 확률변수는 총 서비스 시간  $G_j$ 로 하나의 클래스  $j$ 고객에 대한 서비스가 수행되는 시간 슬롯들의 시간의 합이다. 이 시간은 클래스  $j$ 고객의 서비스 시간  $S_j$ 와 클래스  $j$ 고객이 서비스 받기 위해 이용된 총 대기열 점검 시간( $Y_j \times$ [총 소요된 time slot 수])과 마지막 시간 슬롯에서 서비스 종료 후 서버가 유휴한 시간을 모두 포함한다.

두 번째 확률변수는 서비스 완료 시간  $C_j$ 로 임의의 클래스  $j$ 고객의 서비스가 시작된 시간 슬롯의 시작시점부터 그 클래스  $j$ 고객의 서비스가 종료된 시간 슬롯의 종료시점까지이다. 따라서,  $G_j$ 가 하나 이상의 시간 슬롯으로 구성되면 클래스  $j$ 고객의 서비스 중 도착한 상위 클래스 고객에 대한 서비스가 수행될 수 있으므로  $C_j$ 는  $G_j$ 와 클래스  $j$ 고객의 서비스가 상위 클래스 고객의 서비스를 위해 중단되어진 시간 슬롯들의 합으로 구성된다.

세 번째 확률변수는 서비스 주기 시간  $R_j$ 로 임의의 클래스  $j$ 고객의 서비스가 시작된 시간 슬롯의 시작시점부터 (대기열에 있었다면) 다음 클래스  $j$ 고객의 서비스가 다시 시작될 수 있는 시간 슬롯의 시작시점까지이다. 따라서  $R_j$ 는  $C_j$ 와  $C_j$  종료 후 시스템에 있는 클래스  $j$ 보다 상위 고객들이 모두 서비스 받고 나간 첫 번째 시간 슬롯의 시작 시점까지가 된다.

클래스  $j$ ,  $j^+$ ,  $j^-$ 고객에 의한 제공부하(offered load)를  $\rho_j$ ,  $\rho_j^+$ ,  $\rho_j^-$ 라 하면 다음이 성립한다.

$$\begin{aligned}\rho_j &= \lambda_j E[G_j] \\ \rho_j^+ &= \sum_{i=1}^j \rho_i \\ \rho_j^- &= \sum_{i=j+1}^P \rho_i\end{aligned}$$

$\eta_j$ 를 임의의 클래스  $j$ 고객의 서비스가 수행되는 총 시간 슬롯의 수라고 정의하자. 클래스  $j$ 고객의 서비스가 수행된 시간 슬롯은 대기열 점검 시간  $Y_j$ 를 제외하면  $T - Y_j$ 만큼만 클래스  $j$ 고객의 서비스에 이용될 수 있으므로 다음의 관계가 성립한다.

$$\Pr[\eta_j = k] = \Pr[(k-1)(T - Y_j) < S_j \leq k(T - Y_j)] \quad (1)$$

$$= S_j(k(T - Y_j)) - S_j((k-1)(T - Y_j))$$

단,  $k=1, 2, \dots$ . 따라서  $G_j$ 의 LST를  $G_j^*(s)$ 라고 하면 다음을 얻는다.

$$\begin{aligned}G_j^*(s) &= E[e^{-\eta_j T s}] \\ &= \sum_{k=1}^{\infty} \{S_j(k(T - Y_j)) - S_j((k-1)(T - Y_j))\} \cdot e^{-k T s}\end{aligned} \quad (2)$$

$R_j$ 와  $C_j$ 를 분석하기 위해 클래스  $(j-1)^+$  바쁜 기간  $B_{j-1}^+$ 를 정의하자.  $B_{j-1}^+$ 는 시스템이 한 명의 클래스  $(j-1)^+$  고객만을 가진 시간 슬롯 시작 시점부터 시스템에 처음으로 클래스  $(j-1)^+$ 이 없는 시간 슬롯 시작 시점까지의 기간이라 정의한다.  $B_{j-1}^+$ 의 LST를  $B_{j-1}^{+*}(s)$ 라고 정의하자. 그런데, 총 서비스 시간  $G_j$ 는 어떤 클래스의 도착 과정이나 고객 간의 서비스 순서에 무관하게 일정하다.  $G_j$ 는 오직  $S_j$ ,  $T$ ,  $Y_j$ 에만 종속적이다. 따라서, 한번 어떤 클래스  $(j-1)^+$  고객에 대한 서비스가 시작되면 그 고객의 서비스가 끝날 때까지 클래스  $(j-1)^+$  고객은 우선순위와 무관하게 서비스 종료 시점까지 연속적으로 서비스가 수행된다고 가정하더라도  $B_{j-1}^+$ 는 원래의 엄격한 T-우선순위 대기행렬의  $B_{j-1}^+$ 와 확률적으로 동일하다. 따라서,  $B_{j-1}^{+*}(s)$ 는 서비스 시간의 LST가  $G_{j-1}^{+*}(s) = \sum_{i=1}^j \lambda_i G_i^*(s) / \lambda_{j-1}^+$ 인 M/G/1 대기행렬의 바쁜 기간과 같아지므로 다음을 얻는다.

$$B_{j-1}^{+*}(s) = G_{j-1}^{+*}(\phi_{j-1}^{+*}(s)) \quad (3)$$

단,  $\phi_{j-1}^{+*}(s) = s + \lambda_{j-1}^+ - \lambda_{j-1}^+ B_{j-1}^{+*}(s)$  (Takagi [7]의 p 18-22, 참조).

그런데 임의의 클래스  $j$ 고객의  $G_j$ 동안 도착한 클래스  $(j-1)^+$ 고객은 우선순위에 의해 대기열의 다음 클래스  $j$ 고객이 서비스 받기 전에 모두 서비스가 완료되어야 하며,  $G_j$ 동안 도착한 클래스  $(j-1)^+$  각 고객은 자신만의  $B_{j-1}^+$  기간을  $R_j$ 동안 만들어 낸다. 따라서 우리는  $R_j$ 에 대한 다음과 같은 관계식을 갖는다.

$$R_j^*(s) = E[e^{-G_j^* \{s + \lambda_{j-1}^+ - \lambda_{j-1}^+ B_{j-1}^{+*}(s)\}}] = G_j^*(\phi_{j-1}^{+*}(s)) \quad (4)$$

마찬가지로  $C_j$ 도 비슷한 방법으로 구할 수 있는데 다만  $G_j$ 의 마지막 시간 슬롯에서 클래스  $j$ 고객이 서비스 받고 나가므로  $G_j$ 의 마지막 시간 슬롯에 도착한 클래스  $(j-1)^+$  고객에 의한  $B_{j-1}^+$  기간은 제외되어야 한다. 따라서, 우리는 다음 관계식을 얻는다.

$$C_j^*(s) = E[e^{-T(s + \lambda_{j-1}^+ - \lambda_{j-1}^+ B_{j-1}^+(s))} e^{-Ts}] \quad (5)$$

$$= e^{-Ts} \sum_{k=1}^{\infty} \{S_j(k(T - Y_j)) - S_j((k-1)(T - Y_j))\}$$

$$\times e^{-(k-1)T\phi_{j-1}^+(s)}$$

$G_j, C_j, R_j$ 의 주요 모멘트는 <Table 1>과 같다.

<Table 1> The Moments of Key Random Variables

$E[\eta_j^n] = \sum_{k=1}^{\infty} k^n \{S_j(k(T - Y_j)) - S_j((k-1)(T - Y_j))\}$	(6)
$E[G_j^n] = T^n E[\eta_j^n]$	(7)
$E[R_j] = \frac{E[G_j]}{1 - \rho_{j-1}^+}$	(8)
$E[R_j^2] = \frac{E[G_j^2]}{(1 - \rho_{j-1}^+)^2} + \frac{E[G_j] \sum_{i=1}^{j-1} \lambda_i E[G_i^2]}{(1 - \rho_{j-1}^+)^3}$	(9)
$E[R_j^3] = \frac{E[G_j^3]}{(1 - \rho_{j-1}^+)^3} + \frac{E[G_j] \sum_{i=1}^{j-1} \lambda_i E[G_i^3] + 3E[G_j^2] \sum_{i=1}^{j-1} \lambda_i E[G_i^2]}{(1 - \rho_{j-1}^+)^4}$	(10)
$\quad + \frac{3E[G_j] \left\{ \sum_{i=1}^{j-1} \lambda_i E[G_i^2] \right\}^2}{(1 - \rho_{j-1}^+)^5}$	
$E[C_j] = T + \frac{T \cdot E[\eta_j - 1]}{1 - \rho_{j-1}^+}$	(11)
$E[C_j^2] = T^2 + \frac{2T \cdot E[\eta_j - 1]}{1 - \rho_{j-1}^+} + \frac{T^2 \cdot E[(\eta_j - 1)^2]}{(1 - \rho_{j-1}^+)^2}$	(12)
$\quad = \frac{T \cdot E[\eta_j - 1] \sum_{i=1}^{j-1} \lambda_i E[G_i^2]}{(1 - \rho_{j-1}^+)^3}$	
$E[W_j^Q] = \frac{T}{2(1 - \rho_{j-1}^+)} + \frac{\sum_{i=1}^j \lambda_i E[G_i^2]}{2(1 - \rho_{j-1}^+)(1 - \rho_j^+)}$	(13)
$E[(W_j^Q)^2] = \frac{T^2}{3(1 - \rho_{j-1}^+)^2} + \frac{\sum_{i=1}^j \lambda_i E[G_i^3]}{3(1 - \rho_{j-1}^+)(1 - \rho_j^+)}$	(14)
$\quad + \left\{ \frac{\sum_{i=1}^j \lambda_i E[G_i^2]}{(1 - \rho_{j-1}^+)(1 - \rho_j^+)} + \frac{\sum_{i=1}^{j-1} \lambda_i E[G_i^2]}{(1 - \rho_{j-1}^+)^2} \right\} E[W_j^Q]$	
$E[W_j] = E[W_j^Q] + E[C_j]$	(15)
$E[W_j^2] = E[(W_j^Q)^2] + 2E[W_j^Q] \cdot E[C_j] + E[C_j^2]$	(16)

### 3.2 지체 사이클을 이용한 대기시간의 분석

Conway et al.[1]의 지체 사이클 분석(delay cycle analysis)을 이용하여 엄격한 T-우선순위 대기행렬의 대기 시간의 LST를 구한다.

클래스  $j^+$ 관점에서 전체 사이클을 살펴보면 시간은 크기  $T$ 인 시간 슬롯으로 분할되어 있고, 클래스  $j^-$ 고객을 서비스하거나 유휴상태인 시간 슬롯이 연속적으로 나타나다가 클래스  $j^+$ 고객이 도착하면 클래스  $j^+$ 고객이 시스템에서 없을 때까지 클래스  $j^+$ 고객을 서비스하는 시간 슬롯이 연속적으로 나타나고, 다시 클래스  $j^-$ 고객을 서비스하거나 유휴상태인 시간 슬롯이 연속적으로 나타나는 것을 반복함을 알 수 있다. 따라서, 전체 사이클은 클래스  $j^+$ 관점에서는 크기가  $T$ 인 지체 기간과 지체 기간 동안 도착한 클래스  $j^+$ 고객들에 의해 시작되는 클래스  $j^+$  고객의 바쁜 기간으로 구성된 ‘클래스  $j^+$ 의  $T$ 지체 사이클’로만 구성되어 있다고 할 수 있다.

‘클래스  $j^+$ 의  $T$ 지체 사이클’을 클래스  $j$ 고객의 입장에서 보면 초기 지체  $T$ 와 초기 지체 기간 동안 도착한 클래스  $(j-1)^+$ 고객이 서비스 받기 시작해서 시스템에 클래스  $(j-1)^+$ 고객이 없을 때까지 기간이 끝난 뒤에야 클래스  $j$ 고객이 서비스를  $R_j$ 간격으로 받는 기간이 시작된다.

$T_{j-1}^+$ 를 초기 지체  $T$ 와 초기 지체 기간 동안 도착한 클래스  $(j-1)^+$ 고객을 서비스를 시작하여 클래스  $(j-1)^+$ 가 시스템에 처음으로 없는 시간 슬롯의 시작 시점까지의 기간이라고 하자.  $T_{j-1}^+$ 는 초기 지체  $T$ 와 초기 지체 기간 동안 도착한 클래스  $(j-1)^+$ 고객을 서비스에 의해 시작되는 각각의  $B_{j-1}^+$ 로 구성된다. 따라서  $T_{j-1}^+$ 의 LST  $T_{j-1}^{+*}(s)$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$T_{j-1}^{+*}(s) = e^{-T\phi_{j-1}^+(s)} \quad (17)$$

$W_j^Q$ 를 임의의 클래스  $j$ 고객이 도착해서 처음으로 서비스 받기 시작하는 시간 슬롯의 시작 시점 전까지의 대기 시간이라 정의하고  $W_j^Q(s)$ 를  $W_j^Q$ 의 LST라고 하자. 그러면, ‘클래스  $j^+$ 의  $T$ 지체 사이클’에 도착하는 클래스  $j$ 고객은  $T_{j-1}^+$ 지체 후에  $R_j$ 간격으로 서비스 받으므로, 지체 사이클 분석의 결과를 이용하면  $W_j^Q(s)$ 를 다음과 같이 구할 수 있다(Conway et al.[1]의 p 155 참조).

$$W_j^Q(s) = \frac{(1 - \lambda_j E[R_j])(1 - T_{j-1}^{+*}(s))}{E[T_{j-1}^+]\{s - \lambda_j + \lambda_j R_j^*(s)\}} \quad (18)$$

시스템 체류 시간  $W_j$ 를 임의의 클래스  $j$ 고객이 도착

한 후 시스템에서 떠나는 시간 슬롯의 종료 시점까지라고 정의하자(실제는 시스템을 떠나는 시간 슬롯의 중간에 떠나지만 계산의 편의상 위와 같이 정의한다). 그러면 정의에 의해 다음이 성립한다.

$$W_j^*(s) = W_j^{Q*}(s) \cdot C_j^*(s) \quad (19)$$

식 (1)~식 (7)까지의 결과를 이용하면 <Table 1>과 같이 시스템 체류 시간에 대한 1, 2차 모멘트를 구할 수 있다.

#### 4. 시분할 통신채널에서의 기회적 주파수 접근 방식에 대한 성능분석

본 논문에서는 다음과 같은 인지 라디오 네트워크 모델의 기회적 주파수 접근 방식을 고려한다. 통신 채널이 주 사용자에 의해 시분할되어 이용되고, 동일 시각에 하나의 통신 채널에는 인가된 하나의 주 사용자만 배정된다. 주 사용자가 이용하지 않는 시간 슬롯을 다수의 부 사용자가 기회적으로 채널을 이용한다. 이 때 다수의 부 사용자는 서로 다른 우선순위가 부여되고 최대  $P-1$ 개의 부 사용자까지 한 채널에 배정할 수 있다. 주 사용자에게 우선순위 클래스 1을 부여하고 부 사용자에게 우선순위 클래스  $j$ ,  $2 \leq j \leq P$ 를 부여한다.  $k < j$ 이면 클래스  $k$ 고객은 클래스  $j$ 고객보다 높은 서비스 우선순위를 가진다.

시간 슬롯의 시작시점에 채널 컨트롤러는 주사용자와 모든 부사용자에게 시간 슬롯의 시작을 알린다. 주 사용자인 클래스 1 사용자는 전송할 패킷이 있으면 시간 슬롯 시작 시점부터 다음 시간 슬롯 시작 시점까지, 즉  $T$ 시간 동안 패킷을 전송한다. 반면 클래스 2 부사용자는 주사용자의 패킷 전송을 방해하지 않기 위해서 주 사용자의 패킷 전송 가능 시점부터  $Y$ 시간 동안 채널을 감지한다. 채널이 그 동안 유히 상태이면 시간 슬롯 시작 후  $Y$ 시간 후부터 다음 시간 슬롯 시작 시점까지, 즉  $T-Y$ 시간 동안 패킷을 전송한다. 마찬가지로 클래스  $j$ ,  $2 \leq j \leq P$ , 부사용자는 자신보다 우선순위가 한 단계 높은 사용자인 클래스  $j-1$  사용자가 해당 시간 슬롯에 전송을 하는지를 알기 위해 클래스  $j-1$  사용자의 전송 가능 시작 시점 후  $Y$ 동안 채널 감지를 더 수행한다. 그 동안 아무도 그 시간 슬롯을 이용하지 않으면 해당 시간 슬롯 시작 후  $(j-1) \cdot Y$ 시간 경과 후부터 다음 시간 슬롯 시작 전까지, 즉  $T-(j-1) \cdot Y$ 시간 동안 패킷을 전송할 수 있다. 만약 어떤 시간 슬롯 동안 모든 사용자가 보낼 패킷이 없으면 그 시간 슬롯은 이용되지 않는다.

분석의 용이성을 위해 모든 부사용자는 다른 사용자의 채널 사용에 대한 완전한 감지를 할 수 있다고 가정한다.

또한 모든 사용자는 해당 시간 슬롯에 패킷을 전송할지를 시간 슬롯 시작 시점에 결정한다고 가정한다. 따라서 클래스  $j$  사용자의 패킷이 해당 시간 슬롯의 시작 시점에서 클래스  $j$  사용자의 채널 감지 기간인  $(j-1) \cdot Y$ 시간 동안 패킷이 도착하더라도 이 패킷은 다음 시간 슬롯부터 전송이 시도된다.

#### 4.1 수치 예제-동일 도착과정 및 서비스 시간 분포를 가진 경우의 성능 분석

이제부터 제 3절에서 논의된 엄격한 T-추출 대기행렬 모델의 분석결과를 이용하여 시분할 통신 채널에서의 다음과 같은 인지 라디오 네트워크 모형에 대한 성능 분석을 수행한다. 주 사용자와 각 클래스의 부 사용자 모두 동일한 도착율  $\lambda$ 인 포아송 과정으로 시스템에 도착한다. 즉,  $\lambda_j = \lambda$ ,  $1 \leq j \leq P$ . 또 모든 사용자의 패킷 길이는 동일한 일반분포  $S(x)$ 을 가진다. 또한, 임의의 사용자의 패킷 길이를  $S$ 라고 정의하고, 채널 감지 기간의 길이  $Y$ 와 시간 슬롯의 길이  $T$ 의 비율을  $\tau = T/Y$ ,  $\tau > P$ 라 정의한다.

우리는 식 (6)~식 (16)의 결과를 이용하면 각 클래스 고객의 대기시간의 일, 이차 모멘트를 정확히 계산할 수 있다. 그러나, 식 (6)에서 보는 바와 같이 이와 같은 계산은 무한급수를 수치적으로 계산해야 하므로 수치적 계산이 간단치 않다. 따라서, 본 분석에서는 수치적 계산의 용이성을 도모하기 위해 각 클래스 고객의 대기시간의 기대치에 대한 상위 및 하위 바운드(upper and lower bounds)를 먼저 고려한다. 또한, 이러한 대기시간의 기대치의 상위 및 하위 바운드는 사용자의 패킷 길이의 분포와 무관한(일, 이차 모멘트에만 영향을 받는) 결과를 얻으므로 패킷의 길이의 분포를 쉽게 결정하기 힘든 경우에 매우 유용하다.

먼저  $G_j$ 의 모멘트에 대한 상위 및 하위 바운드(upper and lower bounds)를 먼저 고려한다. 식 (1)에 의해 우리는 다음을 얻는다.

$$(\eta_j - 1)(\tau - j + 1)Y < S_j \leq \eta_j(\tau - j + 1)Y \quad (20)$$

식 (20)에  $T$ 를 곱한 후 기대치를 취해서 (7)의 결과를 이용하여 정리하면 다음을 얻는다.

$$\left(\frac{\tau}{\tau - j + 1}\right)E[S_j] \leq E[G_j] < \left(\frac{\tau}{\tau - j + 1}\right)E[S_j] + \tau Y \quad (21)$$

마찬가지로 식 (20)의 각 항을 제곱하여  $T^2$ 을 곱한 후 기대치를 취해서 식 (7)의 결과를 이용하여 정리하면 다음을 얻는다.

$$\left(\frac{\tau}{\tau-j+1}\right)^2 E[S_j^2] \leq E[G_j^2]$$

$$E[G_j^2] < \left(\frac{\tau}{\tau-j+1}\right)^2 E[S_j^2] + 2\tau Y \left(\frac{\tau}{\tau-j+1}\right) E[S_j] + \tau^2 Y^2 \quad (22)$$

모든 클래스 사용자의 패킷 길이는  $S$ 로 확률적으로 동일하므로 식 (21)에 의해 클래스  $j^+$ 고객의 제공부하에 대한 다음의 관계식을 얻을 수 있다.

$$\lambda E[S] \sum_{i=1}^j \frac{\tau}{\tau-i+1} \leq \rho_j^+ < \lambda E[S] \sum_{i=1}^j \frac{\tau}{\tau-i+1} + j\lambda\tau Y$$

또한  $\tau/(\tau-x+1)$  함수는  $0 \leq x < \tau$  구간에서 양의 값을 가지는 단조 증가 함수이므로 다음이 성립한다.

$$\int_0^j \frac{\tau}{\tau-x+1} dx \leq \sum_{i=1}^j \frac{\tau}{\tau-i+1} \leq \int_0^j \frac{\tau}{\tau-x} dx$$

따라서 위의 두식에 의해 클래스  $j^+$ 고객의 제공부하에 대한 다음과 같은 간단한 상위 및 하위 바운드를 얻는다.

$$\rho_j^{+,L} \leq \rho_j^+ < \rho_j^{+,U}$$

단,

$$\rho_j^{+,L} = \lambda E[S] \tau \ln \frac{\tau+1}{\tau-j+1} \quad (23)$$

$$\rho_j^{+,U} = \lambda E[S] \tau \ln \left(\frac{\tau}{\tau-j}\right) + j\lambda\tau Y \quad (24)$$

마찬가지 방법으로 식 (13), 식 (22)와 위의 결과에 의해 클래스  $j$ 고객의 서비스 시작 시점까지의 평균 대기시간의 상위 및 하위 바운드를 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$W_j^{QL} \leq E[W_j^Q] < W_j^{QU}$$

단,

$$W_j^{QL} = \frac{\tau Y}{2(1-\rho_{j-1}^{+,L})} + \frac{\lambda E[S^2]}{2(1-\rho_{j-1}^{+,L})(1-\rho_j^{+,L})} \times \frac{j\tau^2}{(\tau+1)(\tau-j+1)} \quad (25)$$

$$W_j^{QU} = \frac{\tau Y}{2(1-\rho_{j-1}^{+,U})} + \frac{\lambda E[S^2]j\tau}{\tau-j} + \frac{2\tau Y\rho_j^{+,U} - \lambda j\tau^2 Y^2}{2(1-\rho_{j-1}^{+,U})(1-\rho_j^{+,U})} \quad (26)$$

마찬가지로 식 (11), 식 (15)와 식 (20)에 의해서 다음을 얻는다.

$$W_j^L \leq E[W_j] < W_j^U$$

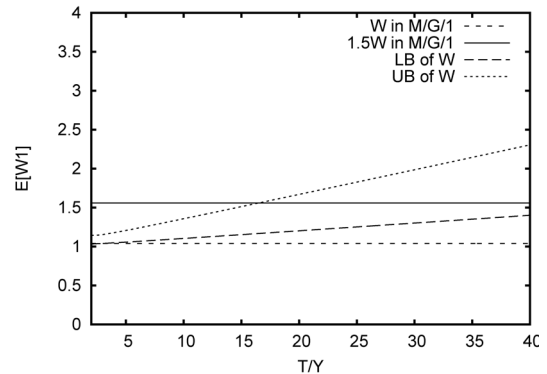
단,

$$W_j^L = W_j^{QL} - \frac{\tau Y \rho_{j-1}^{+,L}}{1-\rho_{j-1}^{+,L}} + \frac{E[S]}{1-\rho_{j-1}^{+,L}} \left(\frac{\tau}{\tau-j+1}\right) \quad (27)$$

$$W_j^U = W_j^{QU} + \tau Y + \frac{E[S]}{1-\rho_{j-1}^{+,U}} \left(\frac{\tau}{\tau-j+1}\right) \quad (28)$$

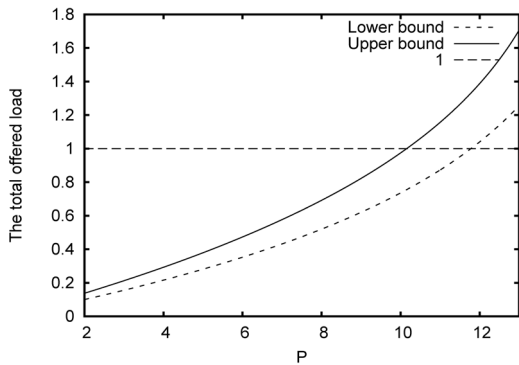
구체적 수치에 대해 위의 상위 및 하위 바운드를 시스템 분석에 어떻게 이용하는지를 보이기 위해 다음과 같은 경우를 고려한다. 각 클래스 고객은  $\lambda_j = \lambda = 1/20$ ,  $1 \leq j \leq P$ 으로 시스템에 도착한다. 각 클래스의 패킷 길이의 일차, 이차 모멘트는 다음과 같이 동일하다.  $E[S_j] = E[S] = 1$ ,  $E[S_j^2] = E[S^2] = 3/2$  채널 감지 기간의 길이  $Y$ 는 평균 패킷 길이의 2%라고 하자. 즉,  $Y = 1/50$ 이다.

먼저 우리는 주사용자의 대기시간의 기대치가 혼자 채널을 사용하는 것보다 일정비율 이상 나빠지지 않는 것을 보장하기 위해서  $T$ 의 값, 즉,  $Y$ 대비  $T$ 의 비율  $\tau = T/Y$ 를 얼마로 하여야 하는가를 결정한다. 주사용자가 홀로 전용 채널을 점유하고 있다면 표준 M/G/1의 대기시간의 기대치  $E[S^2]/2(1-\lambda E[S]) + E[S]$ 을 시현하게 될 것이다. 만약 우리가 주사용자의 대기시간의 기대치가 전용 채널을 이용하는 것 보다 50% 이상 늘어나지 않도록 한다고 하자. 주사용자의 대기시간의 상위 바운드가 전용 채널의 대기시간의 기대치의 1.5배를 넘지 않는  $\tau$ 의 구간을 구하면 적어도 이 구간에서는 주사용자의 대기시간의 증가가 50% 이상 이루어지지 않는 것을 보장할 수 있다. <Figure 1>은 주 사용자의 대기시간의 기대치의 상위 및 하위 바운드를 보여주고 있다. 수평선은 각각 주사용자가 전용 채널을 이용할 때의 대기시간의 기대치의 1배, 1.5배를 나타내고 있다. <Figure 1>에서 볼 수 있는 바와 같이  $\tau$ 의 값이 16보다 작으면 대기시간의 기대치의 상위 바운드가 전용 채널의 대기시간의 기대치의 1.5배를 넘지 않음을 알 수 있다.

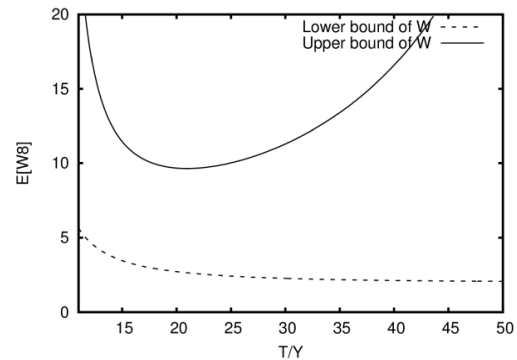
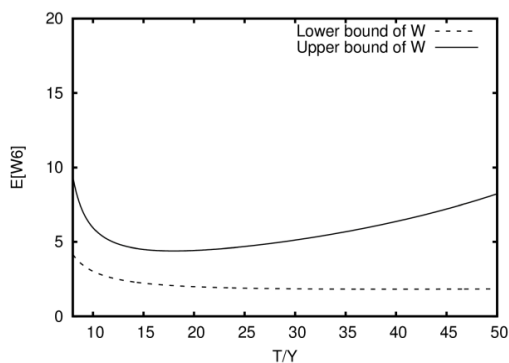
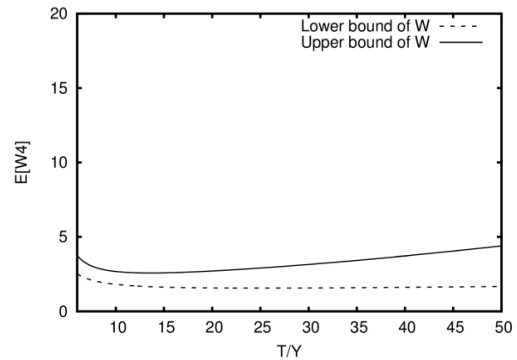
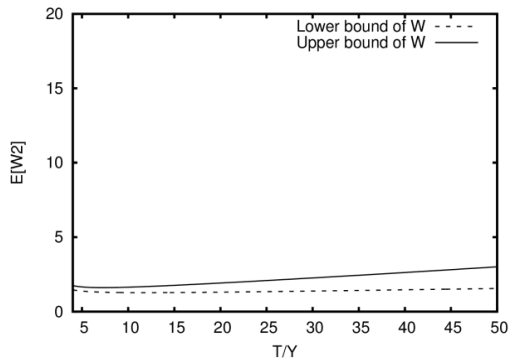


<Figure 1> The Upper and Lower Bounds of the Expected Waiting Time of the Class-1 Customers

다음으로 주사용자의 대기시간의 기대치의 증가가 전용 채널 이용 시보다 50% 이상 증가하지 않는 구간에서 부사용자를 몇 명이나 수용할 수 있는지를 계산하도록 한다. 위의 분석에서 우리는 채널 감지 시간  $Y=1/50$ 의 15 배로  $T=15/50$ 의 값을 결정하였다고 하자. 채널에 수용되는 부 사용자가 안정적으로 서비스 받기 위해서는 주사용자 및 부사용자들의 제공부하의 합이 1을 넘지 않아야 한다. <Figure 2>는 부사용자가 증가함에 따라 전체 제공부하의 상위 및 하위 바운드를 보여주고 있다. <Figure 2>에서 볼 수 있듯이 클래스 10까지는 제공부하의 상위 바운드가 1을 넘지 않으므로 적어도 9번째 부사용자까지는 대기시간의 기대치가 유한한 값이 될 것이다.



<Figure 2> The Total Offered Load



<Figure 3> The Upper and Lower Bounds of the Expected Waiting Times

<Figure 3>은 부사용자 중 우선순위가 1, 3, 5, 7인 고객, 즉 클래스 2, 4, 6, 8 고객(클래스 1은 주사용자)의 대기시간의 기대치의 상위 및 하위 바운드를 보여주고 있다.  $\tau$ 가 1에 가까울 때는, 즉  $T$ 가 채널 감지시간  $Y$ 에 가까우면, 대부분의 시간이 채널 감지에 이용되므로 모든 클래스의 대기시간이 커진다. 그러다,  $\tau$ 가 커지면서, 즉  $T$ 가 커지면서, 모든 클래스의 대기시간의 기대치의 상위 바운드가 조금씩 감소한다. 그러다 다시  $\tau$ 가 커지면서, 즉  $T$ 가 커지면서 다시 대기시간의 기대치의 상위 바운드가 계속 증가하게 된다. 이는  $T$ 가 커져 평균 패킷 길이에 근접할 수록 고객의 마지막 서비스 시도 때 패킷이 이미 모두 전송되었더라도  $T$ 구간이 끝날 때까지 채널이 점유되어 낭비되는 효과가 커지기 때문이다. 또한 채널이 유희상태일 때 도착하였을 때 패킷 전송이 개시될 때까지 대기해야 할 평균 시간이 증가하여 대기시간의 기대치를 증가시키는 효과도 발생한다.

또한 <Figure 3>을 보면 하위 클래스일수록 대기시간의 바운드의 최소값인  $\tau$ 의 값이 더 커짐을 알 수 있다. 이는 상위 클래스일수록  $T$ 값이 작아야 하위 클래스가 서비스 중일 때 적은 대기시간으로 서비스를 시작할 수 있고, 하위 클래스일수록  $T$ 값이 커야 상위 클래스가 도착하더라도 호출되기 전에 보장받는 서비스 시간이 길어지는 효과가 있기 때문이다.



## 5. 결 론

본 논문에서는 ‘엄격한 T-축출 우선순위 정책’을 제시하고 ‘엄격한 T-축출 우선순위 대기행렬 모델’의 대기시간을 분석하였다. 또한 ‘엄격한 T-축출 우선순위 대기행렬 모델’의 대기시간을 분석을 이용하여 시분할 채널 환경에서의 인지 라디오 네트워크의 기회적 주파수 접근 방식의 성능 분석을 수행하였다.

제 4장의 분석에서 볼 수 있는 바와 같이 ‘엄격한 T-축출 우선순위 대기행렬 모델’을 이용하면 시분할 채널 환경에서의 기회적 주파수 접근 방식의 주요 성능지표에 대한 상위 및 하위 바운드를 쉽게 구할 수 있다. 이러한 상위 및 하위 바운드는 일, 이차 모멘트가 같으면 패킷 길이의 분포에 독립적이다. 또한 주사용자의 서비스 성능을 보장할 수 있는 시분할 간격에 대한 의사결정에 활용하거나, 채널 이용이 안정적인 수 있는 부사용자 고객수의 결정 등에 이용할 수 있음을 예시하였다.

본 연구는 한 채널에서의 기회적 주파수 이용의 성능 분석만을 다루고 있으나, 향후 본 연구에서 제시된 한 채널에서의 성능 분석 결과를 이용하여 다수 채널에서의 기회적 주파수 이용에 대한 성능 분석으로 확장할 수 있으리라 판단된다.

## Acknowledgement

This study has been accomplished by 2012 year's school research fund of Sangmyung University.

## References

- [1] Conway, R.W., Maxwell, W.L., and Miller, L.W., *Theory of scheduling*. Reading : Addison-Wesley, 1967.
- [2] Haykin, S., Cognitive radio : brain-empowered wireless communications. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2005, Vol. 23, No. 2, p 201-220.
- [3] Kim, K., T-preemptive priority queue and its application to the analysis of an opportunistic spectrum access in cognitive radio networks. *Computers and Operations Research*, 2012, Vol. 39, No. 7, p 1394-1401.
- [4] Sankaranarayanan, S., Papadimitratos, P., Mishra, A., and Hershey, S., A bandwidth sharing approach to improve licensed spectrum utilization. *New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, 2005. DySPAN 2005. 2005 First IEEE International Symposium on*, 2005, p 279-288.
- [5] Shiang, H.P. and van der Schaar M., Queuing-based dynamic channel selection for heterogeneous multimedia applications over cognitive radio networks. *Multimedia, IEEE Transactions on*, 2008, Vol. 10, No. 5, p 896-909.
- [6] Suliman, I. and Lehtomaki, J., Queueing analysis of opportunistic access in cognitive radios. *Cognitive Radio and Advanced Spectrum Management, 2009. CogART 2009. Second International Workshop on*, 2009, 153-157.
- [7] Takagi, H., *Queueing analysis*. Amsterdam: North-Holland, 1991.
- [8] Tran, H., Duong, T.Q., and Zepernick, H.J., Average waiting time of packets with different priorities in cognitive radio networks. *Wireless Pervasive Computing (ISWPC), 2010 5th IEEE International Symposium on*, 2010, 122-127.
- [9] Zhang, C., Wang, X., and Li, J., Cooperative cognitive radio with priority queueing analysis. *Communications, 2009. ICC'09. IEEE International Conference on*, 2009, 1-5.