

무선인지기능 무전기의 적정 재고수준 산정 모형에 관한 연구

A Model to Calculate the Optimal Level of the Cognitive Radiotelegraph

김영목* 최경환** 윤봉규**
Young-Mook Kim Kyung-Hwan Choi Bong-Kyoo Yoon

Abstract

Cognitive Radio(CR) is the technology that allocates the frequency by using dynamic spectrum access. We proposed a model to calculate the optimal level of the cognitive radiotelegraph, where secondary users opportunistically share the spectrum with primary users through the spectrum sensing. When secondary user with cognitive radio detects the arrival of a primary user in its current channel, the secondary user moves to the idle channel or be placed in the virtual queue. We assume that the primary users have finite buffers and the population of secondary users is finite. Using a two-dimensional Markov model with preemptive priority queueing, we could derive the blocking and waiting probability as well as the optimal level of cognitive radiotelegraph under a various range of parameter circumstances.

Keywords : Cognitive Radio(무선인지), Priority Queueing(우선순위 대기행렬), 2-dimensional Markov Process(2차원 마코프 과정), Spectrum Sharing(스펙트럼 공유)

1. 서론

미래전은 실시간으로 음성, 동영상, 사진 등의 자료를 주고, 받으며 작전을 해야 한다. 이런 환경에서는 통신소요 및 요구 데이터 변화량이 급증하는 반면 무선 주파수 채널은 한정되어 있기 때문에 고정적으로 주파수를 할당하는 방식으로는 증가하는 통신 소요를

충족시킬 수 없다. 이런 문제를 해결하기 위한 주파수 공유방법 중의 하나가 무선인지(Cognitive Radio, 이하 CR)기능이다. 이 기능은 해당 대역에서 시간, 공간적으로 이용하지 않고 있는 주파수를 실시간으로 탐색하고 지능적으로 판단하여 적절한 주파수를 선택해서 통신하는 방법이다^[1]. 따라서 CR시스템에는 기존의 고정적인 방법으로 주파수를 할당받아 사용하는 Primary User와 CR기능이 있는 Secondary User가 동시에 존재해서 유연하게 주파수를 공유하게 된다.

CR기능은 Mitola(1999)^[2]가 처음으로 제안하였고, 이후 미국방부의 고등연구기획청(DARPA : Defense Advanced Research Project Agency)에서 xG project로 연

† 2012년 4월 24일 접수~2012년 7월 13일 게재승인

* 육군 3사단 정보통신대대(Army)

** 국방대학교(Korea National Defense University)

책임저자 : 윤봉규(bkyoon1@gmail.com)

구가 본격화된 이래 유럽, 일본 등 많은 국가에서 관련 연구를 수행해 왔다. 우리나라에서도 2010년 6월 한국전자통신연구원(ETRI)에서 채널 관리의 효율성 향상을 위한 특허기술을 개발하는 등 기술적으로는 세계적인 수준인 반면 운용적인 측면의 연구는 미비한 실정이다.

CR기능의 운용적인 측면에 대한 국외연구는 다음과 같다. Beibei(2007)^[3]는 연속시간 마코프 체인을 활용하여 최적 수준을 달성하기 위한 다양한 주파수 공유정책을 분석했다. Zhu et al.(2007)^[4]은 마코프 체인을 이용하여 Secondary User의 Blocking 확률과 연결이 강제로 종료될 확률의 상쇄관계(Tradeoff)를 이용하여 여분의 채널을 할당하는 방식을 연구했다. Heo et al.(2008)^[5]은 Secondary User의 트래픽 특성을 우선순위를 고려하여 실시간, 비실시간 데이터로 구분하여 채널을 효과적으로 운용할 수 있는 방안을 수리적으로 분석했다. 여기서 비실시간 데이터는 시스템에서의 체류시간을, 실시간 데이터는 Blocking 확률과 서비스가 강제로 종료될 확률을 성능척도로 분석했다. Tang and Mark(2007, 2008)^[6,7]의 논문에서는 2차원 마코프 과정을 이용하여, Blocking 확률과 재 연결될 확률 등의 성능척도를 분석했다. 하지만 실시간 데이터만을 고려했다는 점에서 비실시간 데이터가 공존하는 현실을 적합하게 묘사하지 못한 한계가 있다.

본 논문에서는 기존 연구와 달리 균의 작전 주파수 환경에 적합한 모형이 되도록 Primary User에 버퍼가 존재하면서 실시간, 비실시간 데이터를 동시에 고려하고, Secondary User의 수는 유한한 모형을 분석했다. 모형에서 채널이 모두 바쁜 경우에 도착하는 Primary User중 비실시간 데이터가 버퍼에서 대기할 수 있는 것은 민간 무선 트래픽에 음성(실시간)과 데이터(비실시간)의 혼용되어 있는 현실을 반영한 것이다. 분석 방법은 축출-계속(Preemptive Resume) 우선순위를 고려한 2차원 마코프 과정을 이용했으며, Linear Level Reduction 알고리즘을 이용하여 안정 상태 확률 값을 구했다. 구한 값으로 다양한 통신환경을 고려한 CR기능 무전기의 적정 대수를 산정했다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 2장에서는 CR시스템을 모형화하였고, 3장에서는 다양한 성능척도와 CR무전기의 적정 재고수준을 산정하였으며, 4장에서는 결론 및 향후 연구방향을 제시했다.

2. CR시스템의 모형화

가. CR시스템

미국 연방통신위원회(FCC)에서 실제로 분배된 주파수의 이용 효율을 측정된 결과 Fig. 1과 같이 시간에 따라 편차가 심하게 발생했다. 따라서 이용하지 않는 주파수 자원을 효율적으로 활용함으로써 주파수 부족 현상을 해결할 수 있는 대책 중의 하나는 CR기능을 활용하는 것이다.

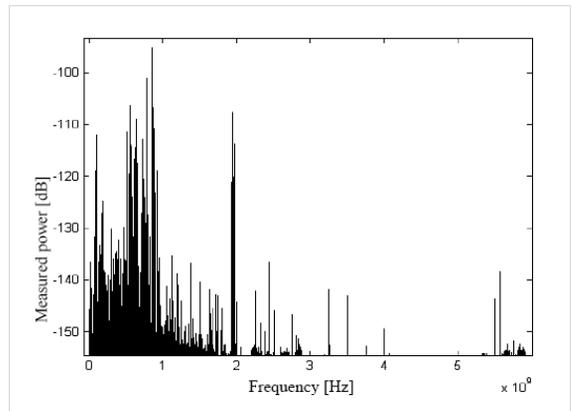


Fig. 1. Spectrum Utilization

CR은 스펙트럼 이용 효율을 향상시키기 위하여 SDR (Software Defined Radio : 광범위한 주파수 대역에 걸쳐 광대역 신호처리를 할 수 있는 하드웨어를 토대로 소프트웨어를 다운로드 받아서 다양한 기능을 수행하는 기술) 기술을 발전시킨 개념으로, 기존의 주파수 사용 방식에서 벗어나 지역과 시간에 따라 사용하지 않는 주파수를 자동으로 검색해 동적으로 주파수 사용을 가능하게 하는 전파 통신 분야의 신기술이다.

CR기능의 활용개념은 Fig. 2와 같이 처음에 빈 주파수를 사용하다가 해당 채널의 Primary User가 도착한 경우 이를 감지하여, 사용하지 않는 채널(Spectrum Hole)로 이동한 후 계속해서 서비스를 받을 수 있도록 하는 것이다. 즉, CR기능이 있는 Secondary User는 우선권이 있는 Primary User의 도착에 의해 서비스 도중에 축출될 수 있다. 이 경우 Secondary User는 다른 빈 채널로 이동하여 서비스를 이어서 받거나, 빈 채널이 없을 경우에는 가상의 대기 공간에서 최대 시간 동안 대기하고 시스템을 떠나게 되는 것이 CR시스템이다.

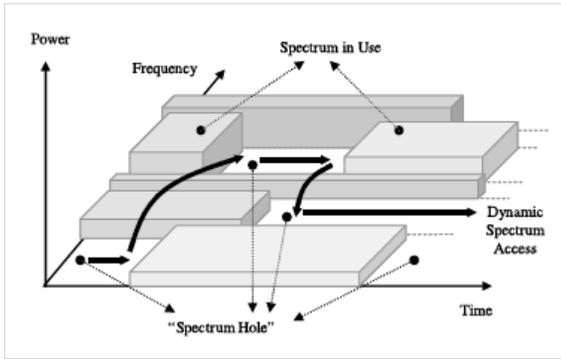


Fig. 2. The Concept of Spectrum Hole and CR

나. 모형 및 가정사항

현대전은 전·후방 구분이 없고, 민간 지역에서 시가전의 형태로 작전이 일어나는 경우가 많다. 특히, 평화 유지 임무 수행시에는 민간지역 작전이 압도적으로 많아진다. 민간지역 작전의 경우 통신시스템은 최소한 주파수 자원의 특성으로 인해 군이 배타적으로 사용하기 어려우며, 이런 상황에 대한 해결책이 주파수 공유(CR)가 된다. 이 때, 민간 통신기기는 Primary User가 되며, CR기능이 있는 군 통신 장비는 Secondary User가 된다. Primary User는 주파수를 할당받아 정해진 대역만을 사용하는 반면 Secondary User는 Primary User가 사용하지 않는 주파수 대역을 감지하여 사용할 수 있다. 두 종류의 User는 같은 주파수 대역을 공유하여 서비스를 받는다. Primary User는 선매권(Preemptive)이 있어 Secondary User가 주파수를 사용 중이라도 Secondary User를 축출하고, 자신이 먼저 서비스를 받을 수 있다. 이런 경우 Secondary User는 다른 빈 채널로 이동해서 서비스를 계속 받거나(Preemptive Resume), 빈 채널이 없을 경우 최대 대기 시간(exp(r)) 동안 대기한 후 시스템을 떠나게 된다.

본 모형에서 사용하는 용어는 다음과 같이 정의한다.

< Notation >

- N : 채널의 수
- K : Secondary User의 수
- λ_1, μ_1 : Primary User의 도착 및 서비스율
- λ_2, μ_2 : Secondary User의 도착 및 서비스율
- r : 최대 대기율
- p : 도착한 Primary User가 비실시간 데이터일 확률
- b : Primary User의 버퍼 수

Primary User와 Secondary User의 도착 및 서비스시간, 대기시간은 모두 지수분포라고 가정했다. 두 User는 한 개의 채널만을 이용하여 서비스를 받는다. Primary User의 고객 수는 무한인 반면, Secondary User의 고객 수는 유한한 K 개 이고, 채널의 수보다는 작다($N > K$).

Secondary User는 CR기능이 있어 채널의 상태를 감지할 수 있다. 따라서 채널이 모두 바쁠 때(사용되고 있을 때) 서비스 요청이 있는 경우는 Blocking된 것으로 가정한다. 또한, Primary User의 도착으로 Secondary User가 다른 채널로 옮기는데 소요되는 시간은 발생하지 않는다고 가정한다.

다. 전이율 다이어그램과 전이율 행렬

시간 t 에서 Primary User의 수를 $X_1(t)$, Secondary User의 수를 $X_2(t)$ 라고 하면, $(X_1(t), X_2(t))$ 는 2차원 마코프 과정이 된다. $X_1(t)$ 가 n_1 에서 (n_1+1) 로의 전이하는 비율은 λ_1 이고, n_1 이 N 보다 작을 때까지 전이한다. n_1 이 N 과 같거나 큰 경우의 전이율은 $\lambda_1 p$ 이다. n_1 에서 (n_1-1) 로 전이하는 것은 n_1 이 N 보다 작은 경우에는 $n_1 \mu_1$ 로, N 보다 큰 경우에는 서비스를 받는 고객과 대기 중인 고객의 대기율 r 을 곱한 것의 합으로 표현된다. $X_2(t)$ 가 n_2 에서 (n_2+1) 로의 전이는 Secondary User의 수가 한정되어 있으므로 n_2 가 하나씩 증가함에 따라 전이율은 $(K-n_2)\lambda_2$ 만큼 감소한다. 채널이 모두 바쁜 경우에 도착하는 Secondary User는 Blocking 된다. n_2 에서 (n_2-1) 로의 전이율은 우선순위가 고려된 모형이기 때문에 현재 서비스를 받고 있는 고객의 수에 영향을 받는다. Primary User와 Secondary User의 합이 N 보다 작은 경우에는 바로 서비스를 받으므로 전이율이 $n_2 \mu_2$ 가 된다. 하지만 시스템에 있는 고객의 수가 N 보다 큰 경우의 전이율은 서비스를 받고 있는 Secondary User가 서비스를 받고 떠나거나, 대기하다가 이탈하는 경우의 합이므로 $(N-n_1)\mu_2 + (n_1+n_2-N)r$ 로 나타낼 수 있고, n_1 이 전체 채널 수보다 많고, n_2 가 K 보다 작거나 같으면 $n_2 r$ 로 대기하게 된다. (n_1, n_2) 에서 전이하는 상태 변화를 나타내는 전이율 표는 Table 1과 같다.

이상에서 설명한 전이율을 바탕으로 $N = 5, K = 3, b = 2$ 인 경우의 전이율 다이어그램은 Fig. 3과 같다.

Table 1. Transition Rate from State(n_1, n_2)

구분	상태	전 이 율	
PU 도착	$(n_1 + 1, n_2)$	λ_1	$0 \leq n_1 < N$
	$(n_1 + 1, n_2)$	$\lambda_1 p$	$n_1 \geq N$
PU 서비스	$(n_1 - 1, n_2)$	$n_1 \mu_1$	$0 \leq n_1 \leq N$
	$(n_1 - 1, n_2)$	$N\mu_1 + (n_1 - N)r$	$N < n_1 \leq N + b$
SU 도착	$(n_1, n_2 + 1)$	$(K - n_2)\lambda_2$	$0 \leq n_2 \leq K - 1$ $n_1 + n_2 < N$
SU 서비스	$(n_1, n_2 - 1)$	$n_2 \mu_2$	$0 \leq n_1 + n_2 \leq N$
	$(n_1, n_2 - 1)$	$(N - n_1)\mu_2$ $+ (n_1 + n_2 - N)r$	$n_1 + n_2 > N,$ $n_1 < N$
	$(n_1, n_2 - 1)$	$n_2 r$	$N < n_1 \leq N + b$ $0 \leq n_2 \leq K$

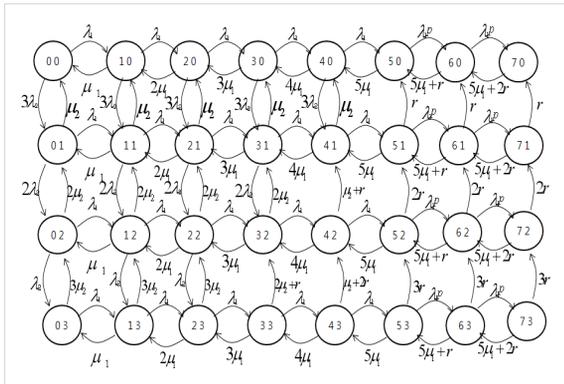


Fig. 3. Transition Rate Diagram for $N=5, K=3, b=2$

Fig. 3에서 Primary User는 우선권이 있기 때문에 Primary User의 수가 채널수보다 많은 경우에는 Secondary User는 서비스를 받지 못하고, Primary User 만 서비스 받을 수 있다((5,1), (5,2) 등). 서버가 모두 바쁜 경우 Secondary User의 도착은 일어나지 않고, (5,0)에서 (6,0)으로의 전이율은 비실시간 데이터만 버퍼에서 대기할 수 있기 때문에 $\lambda_1 p$ 가 된다. 상태가 (3,3)인 경우에는 Secondary User 중의 하나는 Primary User의 도착에 의해 쫓겨나서 대기하고, 나머지 둘은 서비스를 받고 있는 상태이다. 따라서 (3,3)에서 (3,2)로의 전이율은 $2\mu_2 + r$ 이 된다.

위의 전이율 다이어그램에서 바쁜 채널의 수가 5개

이상일 경우에는, Secondary User의 서비스 요청이 있어도 서비스를 받을 수 없는 Blocking이 발생한다. 또한, Secondary User의 수가 한 개 이상이고, 바쁜 채널의 수가 5개 이상인 경우에는 서비스 도중 Primary User의 도착으로 인해 강제로 서비스가 중단된 Secondary User는 지수분포 $\exp(r)$ 를 따르는 최대 대기 가능시간 동안 대기한다.

Table 1의 전이율을 전이율 행렬로 표현하면 아래 식 (1)과 같은 행렬 Q 를 얻을 수 있다.

$$Q = \begin{bmatrix} B_0 & A_1 & 0 & \dots & 0 \\ A_{-1} & A_0 & A_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & A_{-1} & A_0 & A_1 \\ 0 & 0 & 0 & A_{-1} & B_M \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서,

$$B_0 = \begin{bmatrix} -\lambda_1 - (K - n_2)\lambda_2 & \lambda_1 & \dots & 0 & \dots \\ \mu_1 & \ddots & \ddots & 0 & \dots \\ 0 & \ddots & \ddots & \lambda_1 p & \dots \\ 0 & 0 & \ddots & \ddots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & N\mu_1 + r & \ddots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix}$$

$$A_0 = \begin{bmatrix} -\lambda_1 - (K - n_2)\lambda_2 - n_2\mu_2 & \lambda_1 & \dots & 0 & \dots \\ \mu_1 & \ddots & \ddots & 0 & \dots \\ 0 & \ddots & \ddots & \lambda_1 p & \dots \\ 0 & 0 & \ddots & \ddots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & N\mu_1 + r & \ddots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix}$$

$$A_1 = \begin{bmatrix} (K - n_2)\lambda_2 & 0 & 0 & \dots \\ \vdots & \ddots & \vdots & \dots \\ 0 & 0 & (K - n_2)\lambda_2 & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix}$$

$$A_{-1} = \begin{bmatrix} n_2\mu_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots \\ 0 & 0 & (N - n_1)\mu_2 + (n_1 + n_2 - N)r & 0 & 0 & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & n_2 r & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix}$$

라. 안정상태 확률

매트릭스의 사이즈가 크거나 non-homogeneous QBD

(Quasi-Birth and Death) 등에서 행렬이 유한인 경우에는 Linear Level Reduction^[8] 알고리즘을 이용하면 비교적 간단히 안정상태 확률을 구할 수 있다. 위의 식 (1)과 같은 유한 QBD 전이율 행렬 Q 에서 매트릭스 C_i 는 식 (2)와 같이 정의할 수 있다. 여기서 C_i 는 레벨 i 에서 시작해서 레벨 $i+1$ 에 가기 전에 레벨 i 로 돌아올 확률을 의미하며, 이를 이용하여 C_M 을 구한다.

$$\begin{aligned} C_0 &= B_0 \\ C_i &= A_0 + A_{-1}(C_{i-1})^{-1}A_1 \quad 1 \leq i \leq M-1 \\ C_M &= B_M + A_{-1}(-C_{M-1})^{-1}A_1 \end{aligned} \quad (2)$$

아래 식 (3)의 첫 번째 식과 전이율 행렬의 마지막 열 원소를 1로 바꾼 후 바뀐 행렬의 역행렬을 이용하여 π_M 을 구할 수 있다. 두 번째 식을 이용하여 순차적으로 $\pi_{M-1}, \pi_{M-2}, \dots, \pi_1, \pi_0$ 를 구한 후 확률의 합은 1이라는 특성을 이용하여 각 원소를 행렬의 원소 전체의 합으로 나누어 주면(normalization) 전체 시스템의 안정 상태 확률을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \pi_M &= \pi_M C_M \\ \pi_i &= \pi_{i+1} A_{-1}^{(i)} (-C_i)^{-1}, \quad 1 \leq i \leq M-1 \\ \sum_{0 \leq i \leq M} \pi_i &= 1 \end{aligned} \quad (3)$$

Linear Level Reduction 알고리즘에 대한 자세한 내용은 Latouche and Ramaswami(1999)^[8]를 참고하기 바란다.

마. 도착시점확률과 성능척도

본 연구에서 상태 (n_1, n_2) 에 도착은 포아송과정이 아니다. 왜냐하면 Primary User의 버퍼 수와 Secondary User의 수에 따라 도착률이 달라지기 때문이다. 이러한 경우에는 도착하는 고객이 보는 고객수 확률과 임의시점에서의 고객수 확률이 같다는 PASTA(Poisson Arrivals See Time Average)가 성립하지 않는다. 즉, 임의의 고객이 도착하면서 n 명의 고객을 볼 개수평균확률은 임의시점에서 외부인이 n 명을 보는 시간평균확률과 다르다. 따라서 본 연구의 Secondary User와 Primary User의 도착시점확률 $\bar{\pi}_{n_1, n_2}$ 와 $\tilde{\pi}_{n_1, n_2}$ 를 각각 식 (4), (5)와 같이 구했다.

$$\bar{\pi}_{n_1, n_2} = \frac{\lambda_2(K-n_2)\pi_{n_1, n_2}}{\lambda_2(K - \sum_{n_2=0}^K n_2\pi_{n_1, n_2})} \quad (4)$$

식 (4)에서 Secondary User의 도착시점확률 ($\bar{\pi}_{n_1, n_2}$)은 총 Secondary User 도착 고객수 중 특정시점에 (n_1, n_2) 명을 보고 도착한 고객수이다. 식 (4)의 분모는 Primary User가 n_1 명일 때 주파수를 이용하지 않고 있는 Secondary User의 평균에 도착률 λ_2 를 곱한 것이므로 Primary User가 n_1 명일 때 도착한 Secondary User의 평균수가 되며, 분자는 (n_1, n_2) 명 보고 도착한 Secondary User의 평균수가 되어 식 (4)는 도착하는 Secondary User가 (n_1, n_2) 명 볼 확률이 된다. 이 때, 분모에 나타나는 총 Secondary User 도착 고객수는 Secondary User의 수에서 서비스 받고 있는 평균 Secondary User의 수를 제외한 것을 의미한다.

$$\begin{aligned} \tilde{\pi}_{n_1, n_2} &= \frac{\lambda_1\pi_{n_1, n_2}}{\sum_{n_1=0}^{N-1} \lambda_1\pi_{n_1, n_2} + \sum_{n_1=N}^{n+b} \lambda_1 p \pi_{n_1, n_2}}, \quad 0 \leq n_1 \leq N-1 \\ &= \frac{\lambda_1 p \pi_{n_1, n_2}}{\sum_{n_1=0}^{N-1} \lambda_1 \pi_{n_1, n_2} + \sum_{n_1=N}^{n+b} \lambda_1 p \pi_{n_1, n_2}}, \quad N \leq n_1 \leq N+b \end{aligned} \quad (5)$$

식 (5)도 식 (4)와 유사하게 유도할 수 있다. 식 (5)의 분자는 단위시간당 도착하는 Primary User의 평균수이다. 채널이 모두 사용되고 있지 않을 때에는 $(n_1 \leq N-1)$, Primary User는 모두 서비스를 받으므로 (n_1, n_2) 명 보고 도착하는 수는 $\lambda_1\pi_{n_1, n_2}$ 가 되며, 채널이 모두 사용되고 있을 때에는 $(n_1 \geq N)$ 비실시간 데이터만 서비스를 받을 수 있으므로 (n_1, n_2) 명 보고 도착하는 수는 $\lambda_1 p \pi_{n_1, n_2}$ 가 된다.

성능척도는 모든 서버가 바쁜 경우 Secondary User가 서비스를 받지 못하는 Blocking 확률과 Primary User가 도착하면서 Secondary User가 서비스를 중단하고 대기할 확률을 구했다. 모든 서버가 바쁜 경우 Secondary User의 서비스 요청이 있어도 서비스를 받지 못하는 Blocking이 발생한다. 이 경우의 확률 P_1 은 식 (6)과 같이 표현된다.

$$P_1 = \sum_{n_1=N-K+1}^{N+b} \sum_{n_2=\max(0, N-n_1)}^{K-1} \bar{\pi}_{n_1, n_2} \quad (6)$$

또한, Secondary User가 1개 이상 있으면서 채널이 모두 사용되고 있을 때는 Primary User가 도착하면 Secondary User는 서비스를 중단하고 대기하게 된다. 이 경우의 확률 P_2 는 식 (7)과 같이 표현된다.

$$P_2 = \sum_{n_2=1}^K \sum_{n_1=N-n_2}^{N-1} \tilde{\pi}_{n_1, n_2} \quad (7)$$

3. CR기능 무전기의 적정 재고수준 분석

가. 변수설정

CR무전기의 적정 재고수준 분석을 위해 다양한 통신 환경을 분석하였다. 분석에 사용된 변수들은 Tang and Mark(2008)^[7]의 논문에서 사용한 값($N = 16, \mu_1 = 10, \mu_2 = 20, r = 10$)을 사용하였고, Primary User의 도착률은 60에서 100까지, Secondary User의 수는 5에서 10까지 변화시키며 분석했다. 도착한 Primary User가 비실시간 데이터일 확률 p 는 0.6으로 가정했다. CR무전기의 적정 대수를 결정하는 기준은 Blocking 확률을 0.05이하로 하는 최대 무전기 대수로 하였고, 그 때의 Blocking 확률과 서비스 도중 Primary User의 도착으로 중단 후 대기할 확률을 구했다.

나. 결과 분석

1) 최적 Primary User의 버퍼 수

Secondary User의 Blocking 확률이 일정하게 될 때 최적 Primary User의 버퍼 수를 산정할 수 있다. 이때 Primary의 도착률은 80으로 고정하고 분석했다. Secondary User의 Blocking은 시스템에 있는 고객의 수가 N 명 이상일 경우 일어나게 된다. 따라서 식 (6)을 이용하여 Primary User의 버퍼 수에 따른 Secondary User의 Blocking 확률을 Table 2와 같이 구했다.

Primary User의 버퍼 수가 증가함에 따라 Secondary User의 Blocking 확률은 증가한다. 그러나 일정 수준 이상에서는($b = 5$) 그 수가 증가하더라도 Secondary User의 Blocking 확률이 동일하게 유지됨을 알 수 있었다. 이는 고객도착확률과 서비스율에 따라 버퍼 용량의 증가가 Blocking 확률에 미치는 영향이 달라지는 현상

때문이다. 즉, M/M/1/K에서 K의 용량이 어느 수준을 넘어가면 M/M/1과 성능척도가 유사하게 되는 현상과 동일한 효과이다.

Table 2. Secondary User's Blocking Probability depending on the Buffer Size of the Primary User

N	b	Secondary User의 수		
		5	7	10
		Secondary User의 Blocking 확률		
16	0	0.0305	0.0529	0.1022
	1	0.0327	0.0550	0.1042
	2	0.0336	0.0559	0.1051
	3	0.0340	0.0563	0.1055
	4	0.0341	0.0564	0.1056
	5	0.0342	0.0565	0.1057
	6	0.0342	0.0565	0.1057
	...	이하동일	이하동일	이하동일

2) 서비스 중단 후 대기할 확률

CR기능을 가진 무전기는 서비스가 시작되었다고 하더라도, 우선권이 있는 Primary User의 도착으로 서비스가 중단될 수 있다. 서비스가 중단되었을 때 비어있는 채널이 있는 경우에는 그 채널로 이동하여 계속 서비스를 받을 수 있지만 Primary User의 도착에 의해 채

Table 3. Service Termination and Waiting Probability of the Secondary User

N	K	Primary User의 도착률(λ_1)		
		60	80	100
		서비스 중단 후 대기할 확률		
16	5	0.0221	0.0271	0.0860
	6	0.0240	0.0370	0.1103
	7	0.0266	0.0488	0.1371
	8	0.0301	0.0627	0.1663
	9	0.0346	0.0791	0.1978
	10	0.0404	0.9783	0.2313

널을 이동해야 하는 순간에 모든 서버가 사용중이라면 서비스를 받지 못하고 대기공간에서 대기할 해야 한다. 따라서 식 (7)을 이용하여 Secondary User가 서비스를 받다가 Primary User의 도착으로 서비스가 중단되어 대기할 확률을 Table 3과 같이 구했다.

Primary User의 도착률(λ_1)과 Secondary User의 수(K)가 증가할수록 서비스를 받다가 중단 후 대기할 확률이 증가함을 알 수 있었다. 또한, Secondary User의 수 보다는 Primary User의 도착률이 Secondary User의 서비스 중단 후 대기할 확률에 더 큰 영향을 미친다는 것을 확인할 수 있다.

3) CR무전기의 적정대수 선정

Blocking 확률을 적정 수준 이하로 하는 CR무전기의 적정 대수를 구하기 위해 Primary User의 도착률의 변화에 따른 Secondary User의 Blocking 확률을 살펴 보았다. Primary User의 버퍼 수는 Secondary User의 Blocking 확률이 일정했던 5로 고정하여 분석하였고, 결과는 Table 4와 같다.

Table 4. Blocking Probability with the Arrival Rate of Primary User and the Number of Secondary User

N	K	Primary User의 도착률(λ_1)		
		60	80	100
		Secondary User의 Blocking 확률		
16	5	0.0041	0.0342	0.1293
	6	0.0061	0.0445	0.1547
	7	0.0087	0.0565	0.1818
	8	0.0122	0.0706	0.2109
	9	0.0168	0.0869	0.2419
	10	0.0226	0.1057	0.2748

Secondary User의 Blocking 확률 역시 Secondary User의 수(K)보다는 Primary User의 도착률(λ_1)에 더욱 민감하였다. 또한, Secondary User의 수가 증가할수록 Blocking 확률도 증가하고 있기 때문에 Blocking 확률을 적정 수준 이하로 낮출 수 있는 K 를 정하는 것이 중요하다.

CR기능 무전의 적정대수는 전파가 도착했을 때 바로 서비스를 받지 못하고 Blocking될 확률을 0.05 이하를 기준으로 판단하였다. 또한, Primary User의 도착률의 변화는 60~100까지 각 단계별로 20씩 차이를 두어 분석을 하였고, 채널의 개수는 16개로 하여 적정 CR무전기 대수를 Table 5와 같이 산정했다.

Table 5. Optimal Level of the CR with Blocking Probability under 0.05

전체 채널 수	Primary User의 도착률(λ_1)		
	60	80	100
16	12대 (0.0391) <0.0386>	6대 (0.0445) <0.0370>	1대 (0.0510) <0.0127>

* () : Blocking 확률
< > : 서비스 중단 후 대기할 확률

Primary User의 도착률에 따라 Secondary User의 Blocking 확률을 0.05 이하로 하는 CR무전기의 소요 대수에 많은 차이가 있다. 그리고 채널이 16개이고, Primary User의 도착률이 100일 경우에는 Secondary User의 Blocking될 확률 0.05 이하를 만족시킬 수 있는 적정 CR기능 무전기 대수는 없다.

4. 결론 및 향후 연구방향

본 연구에서는 최근 증가하는 군의 민간지역에서의 작전 주파수 환경에 적합한 모형을 위해 우선순위를 고려한 2차원 마코프 과정을 이용하여 Primary User의 버퍼 수에 따른 Blocking 확률과 Primary User의 도착률과 Secondary User수에 따라 서비스가 중단되어 대기할 확률을 구하고, 최종적으로 작전 지역에서의 CR무전기의 적정 채고수준을 산정하였다.

본 연구를 통해 다음과 같은 결과를 도출하였다.

첫째, Primary User의 버퍼 수가 증가하면 Secondary User의 Blocking 확률은 증가하지만 일정 수준 이상이 되면 Blocking 확률은 일정해진다. 이는 대기행렬의 M/M/1/K 모형에서 K의 용량이 어느 수준이 되면 M/M/1과 동일한 성능척도를 보이는 현상과 동일하다. 둘째, Primary User의 도착률과 Secondary User의 수가

증가할수록 서비스가 중단 후 대기할 확률은 증가한다. 추가로 서비스가 중단 후 대기할 확률은 Secondary User의 수보다는 Primary User의 도착률에 더 큰 영향을 받는다는 것도 확인하였다. 셋째, Blocking 확률의 수준에 따른 Primary User의 도착률별 CR무전기의 적정 대수를 산출할 수 있다. 이를 통해 서비스의 중단은 적으면서 가장 경제적인 CR무전기 대수를 산정할 수 있다. 또한, 본 연구는 기존 연구에서 반영하지 못한 실시간 데이터와 비실시간 데이터를 동시에 고려한 미래의 군 작전 통신환경을 반영했다는 장점이 있다.

이러한 연구결과는 군뿐만 아니라 민간분야에 Primary와 Secondary로 구분이 가능한 대형마트에서 계산을 수행하는 종업원(Primary)과 창고에서 상품을 입고고하고 분류하는 종업원(Secondary)간의 최적의 종업원 인원을 결정하는 문제나 제조시스템에서 시장이나 상위단계(Upstream)의 수요를 처리하는 제조공간(Primary)과 제조에 소요되는 재료나 부품의 재고를 담당하는 창고(Secondary)의 수량과 위치를 결정하는 등의 문제를 해결하는데 효과적으로 활용할 수 있을 것이다.

차후 연구에서는 다양한 서비스의 요구에 따라 여러 개의 채널을 동시에 사용해야 하는 경우의 분석이 필요할 것이다. 또한, 실시간, 비실시간 데이터를 구분하여 서비스 시간이 다른 환경을 고려해 더욱 일반적인 경우에 대한 분석도 필요할 것으로 보인다.

References

- [1] Ian F. Akyildiz, Won-Yoel Lee, Mehmet C. Vuran, Shantidev Mohanty, "Next Generation/Dynamic Spectrum Access/Cognitive Radio Wireless Networks : A Survey", Computer Networks Vol. 50, 2127-59, 2006.
- [2] Mitola, J., Maguire, G. Q., "Cognitive Radio : Making Software Radios More Personal", Personal Communications, IEEE, pp. 13~18, 1999.
- [3] Beibei, W., Zhu, J., K. J. Ray Liu, "Primary-Prioritized Markov Approach for Dynamic Spectrum Access", In Proc. of 2nd IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, pp. 507~515, 2007.
- [4] Zhu, X., Lianfeng, S., Tak-Shing Peter Yum, "Analysis of Cognitive Radio Spectrum Access with Optimal Channel Reservation", IEEE Communications Letters. Vol. 11, No. 4, pp. 304~306, 2007.
- [5] Heo, J., Shin, J., Nam, Y., Lee, J., Park, G., Cho, H., "Mathematical Analysis of Secondary User Traffic in Cognitive Radio System", in Proceedings pp. 21~24, 2008.
- [6] _____, "Performance Analysis of a Wireless Network with Opportunistic Spectrum Sharing", in Proc. IEEE Globecom'07, Washington, D.C., USA, pp. 4636~4640, 2007.
- [7] Tang, S., Mark, B. L., "An Analytic Performance Model of Opportunistic Spectrum Access in a Military Environment", IEEE Communications Society Subject Matter Expert for Publication in the WCNC 2008 Proceedings., pp. 2681~2686, 2008.
- [8] G. Latouche, V. Ramaswami, "Introduction to Matrix Analytic Method in Stochastic Modeling", Siam, 1999.