

# 광대역 스펙트럼 인지 무선망에서 동적 스펙트럼홀 그룹핑에 의한 자원이용률 향상 Improvement of Resource Utilization by Dynamic Spectrum Hole Grouping in Wideband Spectrum Cognitive Wireless Networks

이진이

청운대학교 전자공학과

Jin-yi Lee

Department of Electronic Engineering, Chungwoon University, Incheon, 22100, Korea

## [요 약]

본 논문에서는 광대역 스펙트럼 인지 무선망에서 인지사용자의 요구자원의 크기에 따라 스펙트럼 홀의 그룹핑 범위를 변화시키는 동적 스펙트럼 홀 그룹핑 방식을 제안하고, 광대역 인지사용자의 서비스를 위한 채널할당에 적용한다. 제안한 동적 스펙트럼 홀 그룹핑 방식은 인지사용자의 요구자원의 크기를 예측하여 필요한 양 만큼 주사용자의 스펙트럼 홀을 그룹핑함으로써 기존의 정적 스펙트럼 홀 그룹핑에 의해 발생 할 수 있는 스펙트럼 자원의 낭비를 개선 할 수 있다. 시뮬레이션을 통하여 동적 스펙트럼 홀 그룹핑 방식과 기존의 정적 스펙트럼 홀 그룹핑 방식에 의한 채널할당의 자원이용률을 비교하여, 허용할 수 있는 인지사용자의 서비스 성능에서 자원이용률을 크게 향상시킬 수 있음을 보인다.

## [Abstract]

In this paper, we propose a dynamic spectrum hole grouping method that changes the grouping range of spectrum hole according to the resources amount required by secondary users in wideband spectrum cognitive wireless networks, and then the proposed method is applied to channel allocation for the secondary user service. The proposed method can improve waste of resources in the existing static spectrum hole grouping in virtue of grouping dynamically as much the predicted spectrum holes resources as secondary users require. Simulation results show that channel allocation method with the proposed dynamic grouping outperforms that with the static grouping method in resources utilization under acceptable secondary user service performance.

**Key words** : Resources utilization, Dynamic spectrum hole grouping, Channel allocation, Wideband spectrum cognitive wireless networks.

<https://doi.org/10.12673/jant.2020.24.2.121>



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

Received 10 March 2020; Revised 11 March 2020

Accepted (Publication) 20 April 2020 (30 April 2020)

\*Corresponding Author; Jin-yi Lee

Tel: +82-32-770-8221

E-mail: jinyi@chungwoon.ac.kr

## I. 서론

무선통신 기술의 급속한 발전은 스펙트럼 자원의 수요를 크게 증가시키고 있어, 제한된 스펙트럼 자원의 효율적인 사용을 요구하고 있다. FCC 보고에 따르면 기존의 고정스펙트럼 할당 방식은 할당된 스펙트럼이 대부분 사용되고 있지 않는 문제점을 갖고 있어, 이 사용되지 않고 있는 스펙트럼을 재사용할 수 있는 기술로서 등장한 것이 인지 라디오 (CR; cognitive radio) 기술이다[1]. CR기술에서는 기존 사용자에게 간섭을 주지 않고 새로운 사용자가 기존 사용자의 스펙트럼을 기회적으로 이용하며, 기존 사용자의 스펙트럼 사용패턴에 따라 시공간적 스펙트럼의 복잡한 변화를 정확히 분석하여 새로운 사용자가 기존 사용자의 스펙트럼을 이용하게 된다. 기존 사용자를 주사용자 (PU; primary user), 새로운 사용자를 인지사용자 (SU; secondary user)라고 한다. 인지사용자가 주사용자의 스펙트럼을 이용하는 과정은 순차적으로 이루어지게 되는 데, 먼저 스펙트럼 센싱(spectrum sensing)을 통하여 스펙트럼 상에서 주사용자의 유무를 감지하고, 스펙트럼 관리 (spectrum management)를 통해 가장 유용한 채널을 액세스하게 된다. 이때는 다른 인지사용자들과 스펙트럼 액세스 조정이 필요하며, 이를 통해 인지사용자들 간의 스펙트럼 공유 (spectrum sharing)가 이루어지고, 주요한 기능은 스펙트럼 할당기술 (spectrum allocation)이다. 스펙트럼 할당을 통해 인지사용자는 주사용자에게 간섭을 주지 않고 사용하지 않은 스펙트럼 (spectrum hole)을 이용하여 데이터를 전송한다.

본 논문은 스펙트럼 할당기술에 관한 내용으로, 인지 라디오 망에서 스펙트럼 할당과 관련된 주된 연구들은 다음과 같은 것들이 있다. [2]에서는 인지 라디오망의 주요기술인 주사용자에게 간섭을 주지 않고 스펙트럼 사용률을 높이기 위한 채널할당, 스펙트럼 관리, 스펙트럼 선택과 할당, 동적 스펙트럼 관리와 인지 라디오 기술을 업그레이드하기 위한 스펙트럼 특성분석, 사용자의 스펙트럼 이용형태와 이용우선순위, 유용한 스펙트럼폭을 얻기 위한 스펙트럼조각기(fragmentation), 사용자들의 통신환경에 적응하는 적응 알고리즘 등을 언급하고 있다. [3] 논문에서는 게임 모델을 플레이어(player)간 협력을 바탕으로 하는 경우와 그렇지 않는 비협력적인 방법으로 나누고, 제시한 게임모델을 기존의 여러 스펙트럼 할당기법들에 적용하였다.

한편, 인지 라디오망에서 여러 개의 채널을 하나의 채널로 통합하는 채널통합(aggregation)기술은 데이터 전송률을 높이기 위한 방법으로 MAC프로토콜 층에서 이루어진다. [4]에서 제시한 채널 통합방법은 greedy한 방법과 동적인(dynamic)방법인데, 새로운 SU(new call)가 도착했을 때 빈 채널이 없으면 서비스 진행 중인 SU(ongoing call)가 점유한 채널을 공유할 수 있게 하여, 그리드한 방법보다 좀 공정한 자원할당을 실시한다.

통신망에서 자원할당을 위해 예측이론을 도입하는 경우가 있는데, [5]에서는 이동통신망에서 사용자가 요구하는 자원의 양을 예측하였고, [6]에서는 인지라디오망에서 스펙트럼 홀의

크기를 예측하였다. [7]에서는 예측된 스펙트럼 홀들을 모두 그룹핑하는 정적 스펙트럼 홀 그룹핑(static spectrum hole grouping)방식을 제안하여 광대역 SU를 서비스하였다.

본 논문에서는 광대역 인지 라디오 망에서 기존의 정적 스펙트럼 홀 그룹핑 방법에 의해 발생하는 자원의 비효율적인 사용을 개선하여 스펙트럼 자원의 이용률을 향상시킬 수 있는 동적 스펙트럼 홀 그룹핑 방법을 제안한다. 제안한 방법은 SU 호가 요구하는 스펙트럼 자원의 요구량을 예측하여, 예측된 양에 따라 스펙트럼 홀 자원을 동적으로 그룹핑하여 SU 호에 할당함으로써, 정적 스펙트럼 홀 그룹핑의 자원낭비를 줄여 자원의 이용률을 향상시킨다. 2장에서는 시스템 모델링을 위한 몇가지 전제와 광대역 인지망의 스펙트럼 구조, 인지사용자의 스펙트럼 자원 지원방법, 위너 예측이론에 의한 인지사용자가 요구하는 자원의 크기 예측방법에 대해 기술한다. 3장에서는 본 논문에서 제안하는 동적 스펙트럼 홀 그룹핑 방법, SU 호 서비스를 위한 그룹핑한 스펙트럼 자원의 할당 알고리즘에 대해 기술한다. 4장에서는 시뮬레이션을 통하여 제안한 동적 스펙트럼홀 그룹핑 방법과 기존의 정적 스펙트럼홀 그룹핑 방법에 의한 자원의 이용률과 인지사용자의 서비스 성능과의 관계를 보이고, 동적 스펙트럼 홀 그룹핑 방식에 의한 자원할당이 허용할 수 있는 인지사용자의 성능에서 자원이용률이 크게 개선됨을 보인다. 5장에서는 본 논문의 결론과 향후 연구내용에 대해 기술한다.

## II. 시스템 모델링과 알고리즘

본 논문의 광대역 무선 인지 통신망 모델링을 위한 스펙트럼 구조, 스펙트럼 인지기술, 시스템 동작에 대한 가정, 동적 스펙트럼 홀 그룹핑에 의한 인지사용자의 서비스 지원방법과 인지 사용자가 요구하는 대역폭의 크기 예측방법을 기술한다.

### 2-1 시스템 모델링과 가정

무선 인지망 사용자는 주사용자와 인지사용자로 구분하고, 주사용자에게 할당되어 있는 주파수 대역을 주사용자가 사용하지 않을 때, 인지사용자는 그 주파수 대역을 사용할 수 있게 한다. 주사용자의 주파수 대역은  $C$ 개의 채널로 구성되고, 주사용자 채널에서 발생한 스펙트럼 홀 자원을 인지사용자의 예측된 요구량에 따라 동적으로 그룹핑(dynamic spectrum hole grouping)하여 인지사용자의 서비스를 지원한다. 스펙트럼 홀 자원의 그룹핑은 인접채널이 될 수도 있고 분리된 채널이 될 수도 있다. 스펙트럼 구조는 일렬(overlaying)구조와 중첩(underlaying)구조 중 일렬구조를 사용하며, 본 논문에서는 인지사용자망이 주사용자의 비트율(bit rate)보다 훨씬 큰 광대역 서비스를 요구할 경우를 고려한다. 스펙트럼 구조는 그림 1에 나타난다. 주사용자의 주파수 채널  $C$ 개 중에서 발생된 스펙트럼 홀 채널을 인지사용자가 사용하고, 주사용자가 나타날 때는 즉시 사용하던 주파수 대역을 비워 주어야 한다.

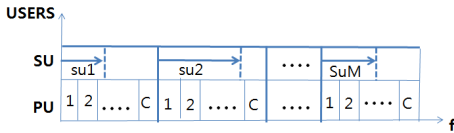


그림 1. 광대역 인지망의 일렬 스펙트럼 구조

Fig. 1. Overlaying spectrum structure for wideband cognitive radio network.

인지사용자 호는 서비스 진행중인 호와 처음 서비스를 시도 하는 새로운 호로 구분한다. 인지사용자가 주사용자의 스펙트럼 사용여부를 감지하는 센싱 에러 (sensing error)는 없는 것으로 하며, 스펙트럼 홀 그룹핑에 의한 지연시간(latency)은 인지사용자의 서비스에 영향을 주지 않는 것으로 한다.

2-2 인지 사용자의 자원 지원 방법

본 논문에서 제안하는 인지사용자의 서비스를 위한 동적 스펙트럼 홀 그룹핑에 의한 자원(대역폭, 채널)지원 알고리즘은 스펙트럼 센싱단계, 스펙트럼 홀 그룹핑 단계, 인지사용자 호가 요구하는 자원의 크기 예측단계, 그룹핑된 스펙트럼 홀 채널 할당단계로 구성되며 그림 2에 나타낸다.

2-3 위너예측에 의한 인지 사용자 호의 요구자원의 크기 예측

인지사용자 호가 요구하는 대역폭 자원의 크기를 예측하는데 위너예측알고리즘을 사용한다. 위너예측 알고리즘은 식 (1),(2),(3)으로 구성된다. 여기서  $R$ 는 요구자원의 크기를,  $\Delta t$ 는 예측간격을 나타낸다.  $\Delta t$ 동안 요구자원의 크기의 변화량은 서로 독립된 값을 갖고 랜덤변수로 모델링된다.  $\mu\Delta t$ 는 랜덤변수의 평균,  $\delta\sqrt{\Delta t}$ 는 표준편차,  $\alpha$ 는 표준정규랜덤변수를 나타낸다.

$$\Delta R(t) = R(t) - R(t - \Delta t) = \mu\Delta t + \alpha\delta\sqrt{\Delta t} \quad (1)$$

$\mu$ 와  $\delta$ 값은 다음과 같이 추정된다.

$$\hat{\mu} = \frac{\sum_{i=0}^{k-1} (r(t-i\tau) - r(t-i\tau-\tau))}{k\tau} = \frac{r(t) - r(t-k\tau)}{k\tau} \quad (2)$$

$$\hat{\delta} = \frac{1}{\sqrt{\tau}} \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{k-1} (r(t-i\tau) - r(t-i\tau-\tau) - \hat{\mu}\tau)^2}{k}} \quad (3)$$

인지사용자 호가 이전에 사용한  $k$ 개의 자원의 크기에 의해  $\mu$ 와  $\delta$ 값을 추정하여, 요구자원의 크기를 예측한다.  $r(t)$ 는 채널수로 표시되는 요구자원 크기의 샘플값을 나타내며,  $\tau$ 는 샘플간격을 나타낸다.

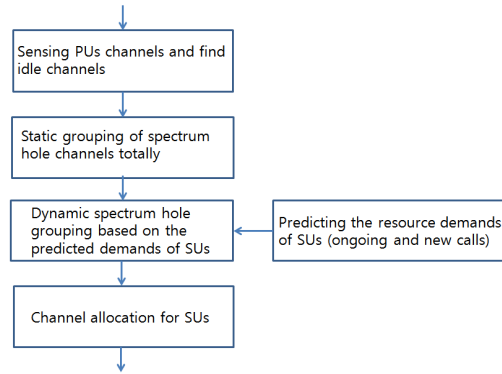


그림 2. 동적 스펙트럼 홀 그룹핑에 의한 인지사용자 호의 자원 지원 절차

Fig. 2. Resource supplying procedure for SUs by dynamic spectrum hole grouping.

III. 동적 스펙트럼 홀 그룹핑에 의한 채널할당

제안하는 동적 스펙트럼 홀 그룹핑 방법, 그룹핑한 자원을 할당하는 방법, 이들 방법들에 의한 인지사용자 호의 서비스를 지원하는 전체 알고리즘에 대해 기술한다.

3-1 동적 스펙트럼 홀 그룹핑 방법

스펙트럼 홀의 동적 그룹핑 방법은 스펙트럼 홀을 모두 그룹핑 하지 않고 인지사용자가 요구하는 예측된 채널의 크기만큼 그룹핑하여 지원함으로써 스펙트럼 자원의 낭비를 줄여 스펙트럼의 이용률을 높인다. 그림 3은 기존의 정적 스펙트럼 홀 그룹핑 방법과 제안한 동적그룹핑하는 모양을 나타낸 것이다. 동적 그룹핑은 예측된 자원의 요구량의 크기에 따라 그룹핑 크기가 조정이 되지만 정적 스펙트럼 홀 그룹핑은 발생된 모든 스펙트럼 홀을 그룹핑한다.  $T$  [sec]는 스펙트럼 센싱의 주기를 나타낸다.

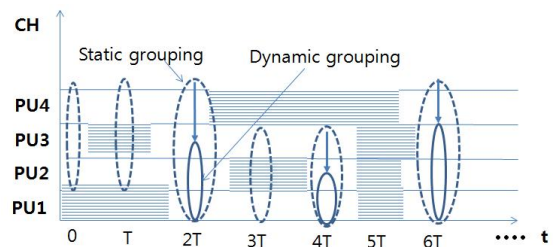


그림 3. 정적 스펙트럼 홀 그룹핑과 동적스펙트럼 홀 그룹핑

Fig. 3. Static & Dynamic spectrum hole grouping.

### 3-2 스펙트럼 홀 채널 할당

그림4는 동적 스펙트럼 홀 그룹핑에 의한 스펙트럼 자원을 인지사용자 호에 할당하는 방법을 나타낸다. 서비스 진행중인 인지사용자 호(ongoing SU)에 우선적으로 할당하여 지속적인 서비스를 보장하고, 나머지 자원으로 새로 발생한 호(new SU)의 서비스를 지원한다.

그림5는 인지사용자 호를 지원하기 위한 전체 알고리즘을 나타낸다. 여기서,  $C_s$ ,  $C_d$ ,  $PB_u$ 는 각각 정적, 동적 그룹핑 된 자원의 양, 예측된 요구자원의 양을 나타낸다.

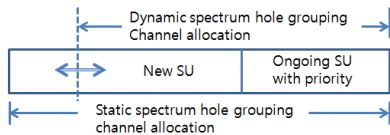


그림 4. 인지사용자 호 지원을 위한 스펙트럼 홀 채널할당  
 Fig. 4. Spectrum hole channel allocation priority for SU calls.

```

/*Sensing phase*/
{ find iBu ; /*idle bandwidth units*/ }
/*Static spectrum hole grouping phase*/
{  $C_s = \sum iBu$  ;
   $C_d = 0$  ; }
/*prediction phase*/
{  $PBu\_ongoing \leftarrow Bu\_ongoing$  ;
   $PBu\_new \leftarrow Bu\_new$  ; } /* Wiener predictor */
/*Dynamic spectrum hole grouping phase*/
{ if  $C_s \geq \max\{PBu\_ongoing, PBu\_new\}$ 
   $C_d = \max\{PBu\_ongoing, PBu\_new\}$  ;
  else
   $C_d = C_s$  ;
}
/* Channel allocation phase*/
{ if (su==ongoing call)
  if ( $C_d \geq Bu\_ongoing$ )
    accept an ongoing call ; /*channel allocation*/
  else
    drop the call;
  else /* new call*/
     $A = C_d - Bu\_ongoing$  ;
    if ( $A \geq Bu\_new$ ) ;
      accept a new call; /*channel allocation*/
    else
      block the call;
}
    
```

그림 5. 인지사용자 호의 서비스 알고리즘  
 Fig. 5. SUs service algorithm.

### IV. 시뮬레이션

본 논문에서 제안한 동적 스펙트럼 홀 그룹핑에 의한 자원 할당의 성능을 보이기 위해, 시뮬레이션에 사용된 광대역 인지 사용자 망의 트래픽특성은 다음과 같다. 주사용자 채널의 용량은  $C=14[Bu]$ , 사용자 호의 도착과정은 포아송 도착, 호의 서비스시간은 지수함수분포를 한다. 4개의 PU채널을 고려하고, PU1,PU2,PU3,PU4의 채널점유 트래픽 특성은 각각 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= 0.1 \text{ numbers/sec}, \mu_1 = 0.08 \text{ 1/sec}, \\ \lambda_2 &= 0.2 \text{ numbers/sec}, \mu_2 = 0.07 \text{ 1/sec}, \\ \lambda_3 &= 0.3 \text{ numbers/sec}, \mu_3 = 0.06 \text{ 1/sec}, \\ \lambda_4 &= 0.4 \text{ numbers/sec}, \mu_4 = 0.05 \text{ 1/sec}, \end{aligned}$$

하나의 주사용자 호는 1[Bu]채널을 사용한다. 서비스 진행중인 인지사용자 호와 새로 발생한 인지사용자 호는 동일 2[Bu]의 주파수 대역을 사용하고, 호 도착확률은 0.5로 동일하다. 인지사용자의 트래픽은 주사용자의 특성과 같이 포아송 호 도착 ( $\lambda = 1, 2, 3, 4, 5, 6$  [numbers/sec])과 지수함수적 분포의 서비스시간( $\mu = 0.82$  1/sec)을 갖는다.

그림6은 4개의 PU 채널 상에서 발생한 트래픽의 채널점유상태를 나타낸다. 채널 상의 트래픽 밀도는 PU1, PU2, PU3,PU4 순서로 증가한다.

그림7은 4개의 PU 채널상에 나타난 스펙트럼 홀의 크기를 나타낸다. 스펙트럼 홀의 크기는 PU4, PU3, PU2, PU1 순서로 증가한다.

그림8은 위너예측의 성능을 나타내기 위하여, SU호가 요구하는 자원의 실제크기와 예측한 크기를 비교한 것이다. 예측한 자원의 크기는 예측간격 $\Delta t$ 와 자원의 샘플간격  $\tau$ 를 매초 간격으로 하고, 예측차수  $k = 25$  samples 일 때 위너예측한 것이다.

그림9(a), 9(b)는 SU호의 도착율과 서비스시간 분포에 따른 자원요구량과 예측된 크기를 비교한 것이다.

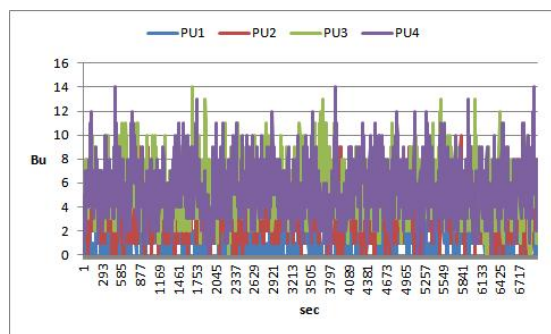


그림 6. PU 채널의 트래픽 분포  
 Fig. 6. PU channels traffic distributions.

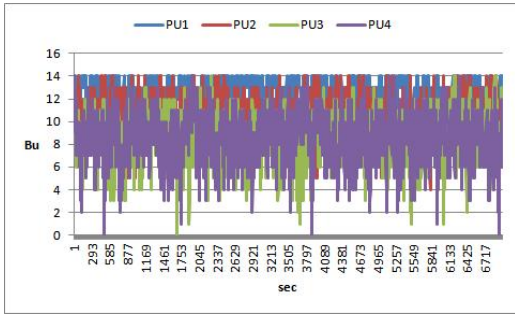


그림 7. PU채널의 스펙트럼 홀의 크기  
 Fig. 7. The amount of spectrum hole in PU channels.

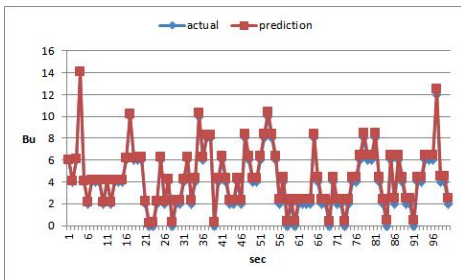


그림 8. SU호가 요구하는 자원의 크기와 예측한 자원의 크기  
 Fig. 8. The amount of resources requested by su call: actual versus prediction ( $\lambda = 1, \mu = 0.82$ ).

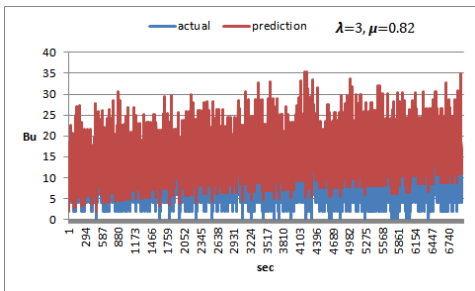


그림 9(a). SU호가 요구하는 자원의 요구량과 예측량  
 Fig. 9(a). The amount of channels requested by SU call : actual versus prediction ( $\lambda = 3, \mu = 0.82$ ).

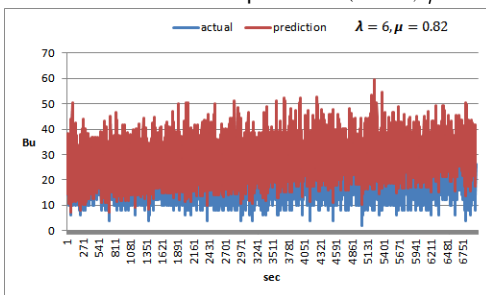


그림 9(b). SU호가 요구하는 자원의 요구량과 예측량  
 Fig. 9(b). The amount of channels requested by SU call : actual versus prediction ( $\lambda = 6, \mu = 0.82$ ).

그림10은 PU채널상의 모든 스펙트럼 홀을 그룹핑한 정적 그룹핑과 SU호가 요구하는 자원의 양을 예측한 크기에 따라 동적 그룹핑한 스펙트럼 홀의 크기를 비교한 것이다. Dynamic grouping-1은  $\lambda = 1, \mu = 0.82$  일 때, Dynamic grouping-2 와 -3은  $\lambda = 3, \mu = 0.82$ 와  $\lambda = 5, \mu = 0.82$  일 때, 스펙트럼 홀 자원을 동적 그룹핑한 크기를 나타낸다. SU호가 요구하는 예측된 자원의 크기에 따라 스펙트럼 홀의 그룹핑 범위를 동적으로 변화시킴으로써 정적 그룹핑에서 발생하는 필요이상의 과도한 자원 그룹핑으로 발생하는 자원낭비를 방지하고, 그룹핑된 자원을 모두 사용할 수 있어 자원이용률을 높일 수 있게 된다.

그림11은 정적 그룹핑 방법과 동적 그룹핑 방법에 의해 얻어진 자원에 따라 진행중인 인지 사용자호의 손실확률(CDP: call dropping probability)을 비교한 것이다. 동적 그룹핑에 의한 호의 손실확률이 정적 그룹핑에 의한 것보다 증가함을 볼 수 있지만, 일반적으로 제한된 스펙트럼 자원의 이용률을 높이는 목적에서는 허용할 수 있는 호의 손실확률을 고려하여 자원을 할당하게 된다.

그림12는 정적 그룹핑 방법과 동적 그룹핑 방법에 의한 새로운 인지사용자 호의 차단확률 (CBP; call blocking probability)을 비교한 것이다. 정적 스펙트럼 홀 그룹핑에 의한 호의 차단확률이 작은 것은 과도한 스펙트럼 홀 자원의 할당에 의한 것으로 자원이용률의 저하를 초래한다.

그림13은 정적 그룹핑 방법과 동적 그룹핑 방법에 의한 스펙트럼 홀 자원의 사용효율을 비교한 것이다. 사용자가 요구하는 자원의 양을 예측하여 예측된 크기를 기준으로 필요한 자원의 양을 그룹핑하여 할당함으로써 자원의 이용률이 크게 향상됨을 보인다. 무선망의 스펙트럼 자원부족 현상을 고려하여 필요이상의 너무 많은 자원을 소모하면서 인지사용자 호의 손실확률과 차단확률을 낮추기 보다는 허용하는 성능내에서(주로 허용 손실확률)에서 자원의 효율적인 사용이 우선시 된다. 동적 그룹핑의 평균자원이용률은 98%이상을, 기존의 정적 그룹핑 방법은 57%의 자원이용률을 보인다.

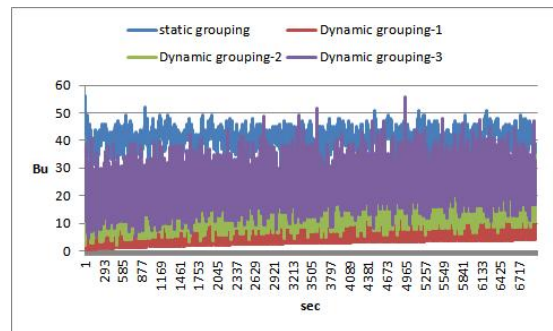


그림 10. 정적과 동적그룹핑 방법에 의한 자원의 크기 비교  
 Fig. 10. Comparison of resources amount by static and dynamic spectrum hole grouping.

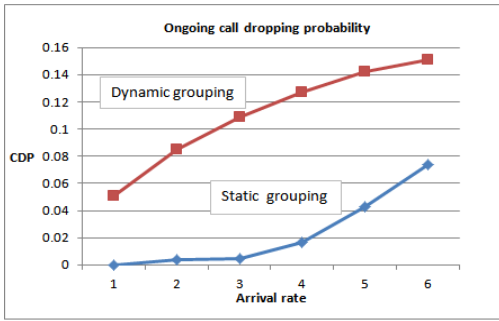


그림 11. SU호의 손실확률 비교

Fig. 11. Comparison of SU ongoing call dropping probability.

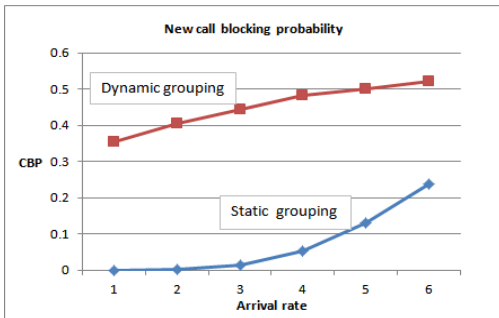


그림 12. SU호의 차단확률 비교

Fig. 12. Comparison of SU new call blocking probability.

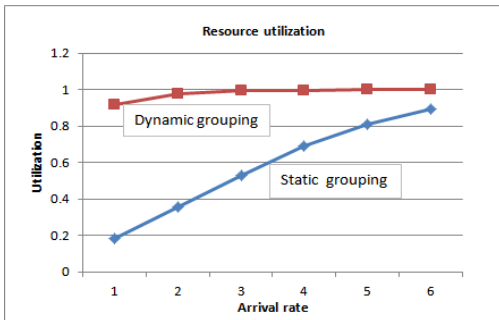


그림 13. 자원 이용률의 비교

Fig. 13. Comparison of resources utilization.

## V. 결론

본 논문에서는 광대역 무선 스펙트럼 인지망에서 스펙트럼 이용률을 향상시키기 위한 동적 스펙트럼 홀 그룹핑 방법을 제안하여, 인지사용자의 서비스를 위한 채널할당에 적용하였다. 제안한 동적 스펙트럼 홀 그룹핑 방법은 기존의 정적 스펙트럼 홀 그룹핑 방법과는 다르게 인지사용자가 필요로 하는 자원의

양을 예측하여 예측한 만큼 스펙트럼 홀 자원을 그룹핑 한다. 시뮬레이션을 통하여 제안한 방법은 기존의 방법에서 필요 이상의 과도한 자원의 그룹핑으로 인한 자원의 낮은 이용률을 개선하여, 원하는 인지사용자의 성능에서 자원이용률을 최대로 할 수 있음을 보였다. 향후 연구는 본 논문에서 제안한 동적 스펙트럼 홀 그룹핑 방법을 이용한 다중 클래스 호의 CAC와 셀룰러 인지 라디오망에서 자원이용률 향상을 위해 제안한 방법을 적용하는 것이다.

## References

- [1] I. F. Akyildiz, W. Y. Lee, M. C. Vuran, and S. Mohanty, "Next generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: a survey," *Computer Networks*, Vol. 50, pp. 2127-2159, 2006.
- [2] E. Z. Tragos, S. Zeadally, A. G. Fragkiadakis, and V. A. Siris, "Spectrum assignment in cognitive radio networks : a comprehensive survey," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, Vol. 15, Issue 3, pp. 1108-1135, January 2013.
- [3] Q. Ni, R. Zhu, Z. Wu, Y. Sun, L. Zhou, and B. Zhou, "Spectrum allocation based on game theory in cognitive radio networks," *Journal of Networks*, Vol. 8, No. 3, pp. 712-722, March 2013.
- [4] L. Jiao, F. Y. Li, and V. Pla, "Greedy versus dynamic channel aggregation strategy in CRN : Markov Models and performance evaluation," in *The International Conference on Research in Networking*, Prague : Czech Republic, pp. 21-31, 21-25 May 2012.
- [5] T. Zhang, E. Berg, J. Chennikara, P. Agrawal, J. C. Chen, and T. Kodama, "Local predictive resource reservation for handoff in multimedia wireless IP networks," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 19, No. 10, pp. 1931-1941, Oct. 2001.
- [6] J. Y. Lee, "A channel allocation scheme based on spectrum hole prediction in cognitive wireless networks," *The Journal of Korea Navigation Institute*, Vol. 19, No. 4, pp. 318-322, Aug. 2015.
- [7] J. Y. Lee, "Cognitive user's quality of service enhancement by using spectrum hole grouping in cellular cognitive radio networks," *The Journal of Korea Navigation Institute*, Vol. 23, No. 4, pp. 322-327, Aug. 2019.



**이 진 이** (Jin-Yi Lee)

1985년 : 숭실대학교 전자공학과 (공학사)

1988년 : 숭실대학교 전자공학과 (공학석사)

1994년 : 숭실대학교 전자공학과 (공학박사)

1995년 3월 ~ 현재 : 청운대학교 전자공학과 교수

※관심분야 : 광대역 무선통신 망, CNS/ATM