

중앙 제어형 수중 인지 음파 네트워크를 위한 공평도 최적화 기반 채널 할당 방법

윤 창 호[◦]

Fairness Optimized Channel Allocation for Centralized Underwater Cognitive Acoustic Networks

Changho Yun^{*}

요 약

간섭원들과의 충돌을 회피하여 협대역의 수중 음파 대역을 효율적으로 활용하기 위해 수중 인지 음파 네트워크 기술이 개발되고 있다. 수중 음파 대역은 오픈 스펙트럼으로 다양한 자연적, 인위적 간섭원들이 무작위로 발생하여, 인지 사용자들(cognitive users; CUs)이 경험하는 채널의 가용성이 서로 비대칭적이다. 본 논문에서는 가용 채널의 비대칭성을 고려하여 인지 사용자들의 채널 할당 공평도를 최적화시키는 Fairness Optimized Channel Allocation (FOCA) 방법을 제안한다. FOCA에서 인지 사용자들의 채널 할당은 Integer Linear Programming (ILP)로 포물레이션된다. 모의시험을 통해, 수중 인지 음파 네트워크를 위해 제안되었던 기존의 경험적인 채널 할당 방식들과 FOCA의 성능을 공평도, 할당 채널의 수, 충돌율, 드롭율 측면에서 서로 비교 분석한다. 모의시험 결과, FOCA가 공평도 뿐만 아니라 채널 할당 수, 드롭율 측면에서도 경험 기반의 채널 할당 방식들에 비해 성능이 우수함을 확인하였다.

키워드 : 인지 사용자, 채널 할당, 간섭원, 수중 음파 주파수 대역, 수중 인지 음파 네트워크

Key Words : Cognitive user, Channel allocation, Interferers, Underwater acoustic frequency band, Underwater cognitive acoustic network

ABSTRACT

Underwater cognitive acoustic network (UCAN) technologies are developing in order to efficiently utilize narrow underwater acoustic frequency band while avoiding collisions with several interferers. The underwater acoustic frequency band is an open spectrum where a variety of natural and artificial interferers occur randomly, resulting in asymmetric availability of channels experienced by cognitive users. In this paper, Fairness Optimized Channel Allocation (FOCA) is proposed to optimize the fairness of channel allocation among cognitive users, taking into account the asymmetry of available channels. In FOCA, the way to assign channels into cognitive users is formulated as an Integer Linear Programming (ILP). Via simulations, the performance of FOCA is analyzed and compared with existing heuristic channel allocation methods proposed for UCANs in terms of fairness, the number of allocated channels, collision rate, and drop rate. The simulation results confirm that FOCA is not only fair, but also outperforms heuristic channel allocation methods in terms of the number of allocated channels and drop rate.

^{*}본 연구는 선박해양플랜트연구소의 주요사업인 “다개체 해양 로봇의 협력 항법 및 수중 무선 인지 네트워크 핵심 기술 개발”에 의해 수행되었습니다(PES4810).

[◦] First and Corresponding Author : Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering (KRISO), sgn0178@kriso.re.kr, 정회원
 논문번호 : 202304-084-B-RN, Received April 21, 2023; Revised June 22, 2023; Accepted July 5, 2023

1. 서 론

음파 통신은 전자기와 통신과 광 통신에 비해 수중에서 더 멀리 안정적으로 정보를 전송할 수 있어 가장 많이 사용되고 있는 수중 무선 통신 방법이다^[12]. 그러나 수중에서 음파를 생성하는 소나 장비, 선박, 수중 포유류 등의 간섭원들과의 빈번한 통신 충돌은 수중 음파 주파수 대역의 효율적 사용을 방해하고 있다^[3,4].

기존의 수중 음파 통신에서는 간섭원의 유무를 고려하지 않고 주로 고정된 주파수를 사용하였다^[5]. 고정 주파수의 사용은 모뎀의 복잡도를 낮출 수 있지만, 간섭원이 빈번하게 발생하는 동안에는 그 주파수를 사용할 수 없게 된다. 이 경우 주파수 이용률이나 수율(throughput)이 현격히 감소할 수 있다. 따라서 육상과 같이 수중 음파 대역의 센싱(sensing)을 통해 간섭원을 회피하고, 가용한 주파수들 중 최적의 주파수를 선택하는 수중 인지 음파 네트워크 기술이 필요하다^[6,7]. 수중 인지 음파 네트워크 기술은 육상의 인지 무선 통신 기술에 비해 아래와 같은 차별성을 고려하여 개발되어야 한다.

- 육상의 인지 무선 통신에서는 널리 알려진 채널 모델이 있지만, 수중 인지 음파 네트워크에서는 예측하기 어려운 다중 경로와 다양한 소음의 존재로 채널 모델을 정의 및 예측하기 어렵다^[8,9].
- 인지 무선 통신에서는 주파수 대역이 분할되어, 각 대역에는 중심 주파수, 채널 번호, 대역폭을 포함한 규격화된 채널 계획이 존재한다. 그러나 수중 음파 대역은 규격화된 채널 계획이 없어, 주파수의 중복 사용이 불가피하다. 이러한 상황에서, 그림 1에서 보는 것과 같이 다양한 간섭원들이 100 Hz부터 100 kHz 이상의 대역에서 무질서하게 존재한다^[10,11].
- 인지 무선 통신에서는 라이선스 정책에 의해 주사용자(Primary User; PU)와 부사용자(Secondary User; SU)가 명확하게 구분되지만, 수중 인지 음파 네트워크

에서는 주사용자와 부사용자가 명확하지 않다^[12].

- 인지 무선 통신에서는 규격화된 신호 형식으로 인해 주사용자 뿐만 아니라 부사용자도 수신 신호를 해석할 수 있다. 반면, 수중 인지 음파 네트워크에서는 규격화된 신호 형식이 없어, 수신 신호의 대부분을 해석할 수 없다^[13].

[14]에서 수중 인지 통신의 중요성이 소개된 이후로, 수중 인지 음파 네트워크 기술들은 주로 스펙트럼 또는 에너지 효율적인 자원 할당 방법 위주로 개발되어 왔다. [12]의 2장에서는 현재까지 개발된 수중 인지 음파 네트워크의 다양한 자원 할당 기술이 잘 요약되어 있다. 이 논문에서는 자원 할당 기술을 채널, 전력, 전송률 등 한 종류의 자원을 인지 사용자에게 할당하는 방식과 두 개 이상의 자원들을 인지 사용자에게 할당하는 기술로 구분된다.

수중 인지 음파 네트워크를 이용하는 사용자를 인지 사용자(cognitive user; CU), 간섭원들을 비인지 사용자(non-cognitive user; NCU)라 정의한다. 현실적으로 비인지 사용자들이 발생하는 신호를 분석할 수 없고, 신호의 발생이 무작위이며, 그 신호의 발생을 통제할 수 없다. 따라서 수중 인지 음파 네트워크에서는 비인지 사용자들이 수중 음파 대역에서 공존하고 그들과의 충돌을 방지하기 위해 비인지 사용자들이 발생하는 주파수 대역을 회피하는 인터위브(Interweave) 채널 공유 방식이 고려되어야 한다^[16]. 본 논문에서는 수중 인지 음파 네트워크에서 인지 사용자가 비인지 사용자들이 발생한 채널을 사용하지 않으면서 효율적으로 채널을 할당하는 방법에 집중하고자 한다.

수중 인지 음파 네트워크를 위한 채널 할당 방식 설계 시 우선적으로 고려해야 할 요소는 인지 사용자들이 센싱한 가용 채널들의 유무이다. 가용 채널이란 인지 사용자가 센싱 이후 비인지 사용자들이 미 발생된 채널을 의미한다. 수중에서 발생하는 비인지 사용자들은 시간, 주파수, 공간적 영역에서 무작위로 발생하므로, 인지 사용자들은 비인지 사용자들이 언제, 어디서, 어느 주파수 대역에서 발생하는지 예측하기가 어렵다. 비인지 사용자들의 무작위적 발생으로 인지 사용자들이 체크하는 가용 채널의 정보는 서로 비대칭적이다. 즉, 한 인지 사용자의 가용 채널의 인덱스와 가용 채널의 수가 다른 인지 사용자와 서로 다를 수 있다.

또한, 전반적인 네트워크의 성능을 향상시키기 위해서는 특정 인지 사용자에게 채널 할당이 집중되기 보다는 가능한 인지 사용자에게 할당되는 채널의 수가 공평하도록 설계되어야 한다. 채널 할당의 공평성이 보장되

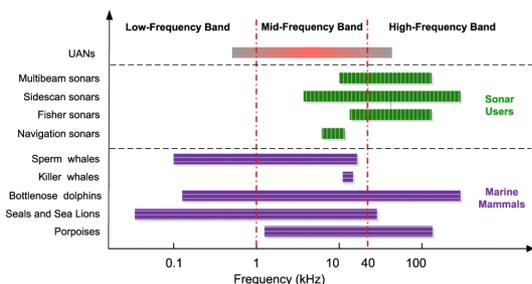


그림 1. 주파수 대역 대 자연적, 인위적 간섭원[15].
Fig. 1. Artificial and natural interferers according to acoustic frequencies.

지 않는 경우, 채널 할당에서 소외된 인지 사용자들이긴 데이터 전송 시간과 더불어 많은 데이터들이 드롭이 되는 것을 감수해야 한다. 이상의 요소들을 반영하여, 본 논문에서는 가용 채널의 비대칭성을 고려하여 채널 할당의 공평도를 최적화시키는 채널 할당 방식인 Fairness Optimized Channel Allocation (FOCA)을 제안한다. FOCA에서는 인지 사용자들이 할당받는 채널의 수를 Jain's fairness index (이하, 간단하게 공평도라고 함)로 도출하고, 이 공평도가 최대가 되도록 채널을 할당 한다¹⁷⁾. 특정 인지 사용자의 특정 채널에 대한 할당 유무를 이진 변수 (binary variable)로 정의하여 FOCA의 채널 할당 문제를 Integer Linear Programming (ILP)로 포몰레이션한다¹⁸⁾. 이 때, 가용 채널의 비대칭성을 고려한 제한조건 (constraints)들을 고려한다.

현재까지 FOCA와 같이 수중 인지 음파 네트워크에서 가용 채널의 비대칭성을 고려하여 공평도를 최적화시키는 채널 할당 방식은 제안된 적이 없다. 따라서 본 논문에서 제안한 FOCA는 협대역의 수중 음파 대역을 인접 간섭원의 상태를 현실적으로 반영하면서 인지 사용자들에게 공평하게 채널을 할당하는데 적용할 수 있을 것이라 사료된다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 2장에서는 네트워크 구조, 시간 및 주파수 영역 분할, 채널 공유 프로세스를 포함한 수중 인지 음파 네트워크를 설명한다. 3장에서는 관련 파라미터 정의, 최적화 가정 및 문제 정의를 포함한 FOCA를 설명한다. 4장에서는 모의시험 조건과 결과를 상세히 기술한다. 마지막으로, 5장 결론에서 본

논문을 마무리한다.

II. 시스템 모델

2.1 네트워크 구조 및 구성

그림 2는 3차원의 중앙 제어형 수중 인지 음파 네트워크의 구조를 보여준다. 중앙 제어형 구조를 고려하는 이유는 인지 사용자들로부터 센싱된 채널 상태 정보들을 중앙 제어국 (central entity)에서 통합하여, 보다 정확한 채널 상태 정보를 반영하여 채널을 할당하기 위함이다.

수중 인지 음파 네트워크는 그림 2에서 보는 것과 같이 중앙 제어국, 다수의 인지 사용자들로 구성된다. 또한, 다수의 비인지 사용자들이 네트워크 내에 무작위로 존재한다. 특히, 중앙 제어국은 인지 사용자들로부터 수신한 센싱 정보들을 모아서, 인지 사용자들의 QoS (Quality of Service)에 부합하도록 채널을 할당하는 역할을 수행한다. 중앙 제어국은 수중 기지국 (underwater base station), 싱크 노드, 클러스터 헤드 등이 될 수 있다. 중앙 제어국은 그림 2의 반구 R1의 중심에 위치하고, 인지 사용자들은 중앙 제어국의 통신 거리 r 내에 (즉, R1) 존재한다. 반면 비인지 사용자들은 R2 내에 존재함을 고려한다. 이는, 네트워크의 엣지에 위치한 인지 사용자는 R1을 벗어나지만 R2 내에 존재하는 비인지 사용자도 센싱할 수 있기 때문이다.

2.2 시간 및 주파수 영역 분할

주파수 영역에서 비인지 사용자들의 활동 상태 (예를 들어, 신호 세기, 발생 채널, 발생 시간, 발생 위치

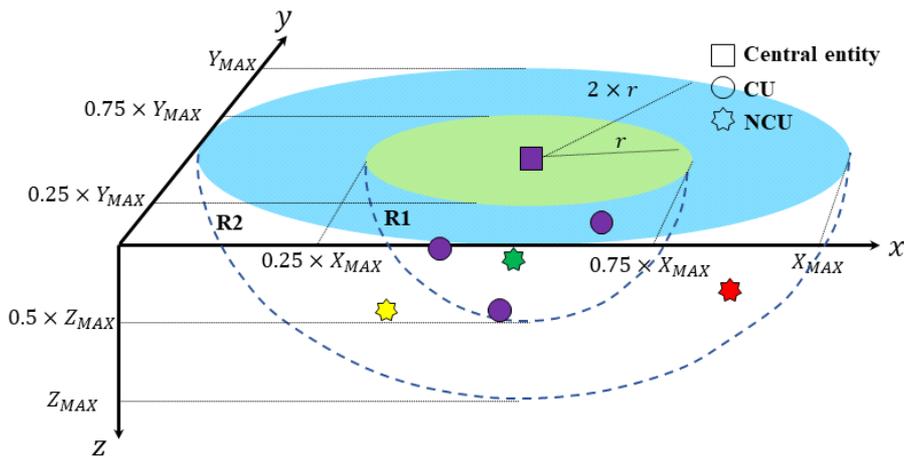


그림 2. 중앙 제어형 수중 인지 음파 네트워크의 구조.
Fig. 2. A topology of a centralized underwater cognitive acoustic network.

등)를 파악하고, 그들과의 충돌을 회피하여 주파수를 사용하기 위해서는 그림 3의 y축과 같이 동기화된 주파수 체계가 필요하다. 즉, ITU에서 정의하는 것과 같이 수중 음파 대역 주파수 체계도 채널 대역폭, 채널 번호, 중심 주파수의 정의가 포함되어야 한다¹⁹⁾. 따라서 본 연구에서는 수중 음파 대역을 K 개의 채널로 분할한다.

또한, 시간 영역도 그림 3의 x축과 같이 특정 시간 단위(unit)로 쪼개어 사용되어야 한다. 이는 한 번의 수중 음파 대역 센싱으로는 무작위적인 비인지 사용자들의 활동에 대응할 수 없어, 반복적인 센싱이 필요하기 때문이다. 본 논문에서는 단위 시간을 프레임 단위로 분할하고, 한 프레임은 다시 센싱 시간 (sensing time)과 비센싱 시간 (non-sensing time)으로 구성된다. 센싱 시간은 인지 사용자들이 주어진 채널들에 발생하는 비인지 사용자들의 활동 상태를 센싱하고 유희한 채널을 파악하는 시간이다. 비센싱 시간은 센싱 시간을 제외한 채널을 획득, 사용하는데 소요되는 시간을 의미한다. 따라서 비센싱 시간은 채널 접속, 센싱 정보 공유, 데이터 전송, 전파 지연, 전송 지연, 가드 시간 (guard time)을 포함한 시간이다.

그림 3과 같이, 주파수 영역과 시간 영역의 분할로 비인지 사용자를 센싱하는 경우 세 가지 케이스가 존재할 수 있다. 첫 번째는 특정 채널에서 센싱 시간 동안 비인지 사용자가 발생하지 않아 해당 채널이 가용하다고 판단하는 케이스이다. 두 번째는 특정 채널에서 센싱 시간 동안 비인지 사용자가 발생하여 해당 채널이 가용하지 않다고 판단하는 케이스이다. 세 번째는 비센싱

시간동안 특정 채널에 비인지 사용자가 발생하여 해당 채널을 유희하다고 잘못 판단할 수 있는 케이스이다. 세 번째 케이스에서 비센싱 시간에 비인지 사용자가 발생한 채널을 인지 사용자가 할당받는 경우, 통신 충돌을 피할 수 없게 된다.

2.3 채널 공유 프로세스

수중 인지 음파 네트워크에서 인지 사용자들이 채널을 할당받아 사용하는 전반적인 과정을 채널 공유라고 한다. 채널 공유는 1) 대역 센싱, 2) 센싱 정보 수집, 3) 채널 할당, 4) 채널 사용의 과정으로 구성된다¹²⁾. 각 과정은 아래와 같이 정리한다.

- 대역 센싱은 인지 사용자가 각 채널별로 비인지 사용자의 활동 상태를 확인하는 과정이다. 이 정보는 중앙 기지국이 채널 할당 결정 시 고려된다.
- 센싱 정보 수집은 중앙 제어국이 인지 사용자들로부터 대역 센싱 정보를 수신하여 수집 및 채널 상태를 분석하는 과정이다.
- 채널 할당은 중앙 기지국이 인지 사용자들로부터 수신한 정보를 기반으로 인지 사용자들에게 적절한 채널을 결정하고 할당하는 과정이다. 채널 결정 및 할당은 주어진 채널 할당 방법에 따라 목표 성능을 향상시키는 방향으로 수행된다. 본 논문에서 제안하는 FOCA가 이 과정에 포함된다.
- 채널 사용은 인지 사용자가 주어진 채널 접속 방식을 기반으로 할당된 채널을 통해 다른 인지 사용자 또는 중앙 제어국 데이터를 전송하고 수신하는 과정이다. 중앙 제어국-인지 사용자간 통신이나 중앙 제어국의

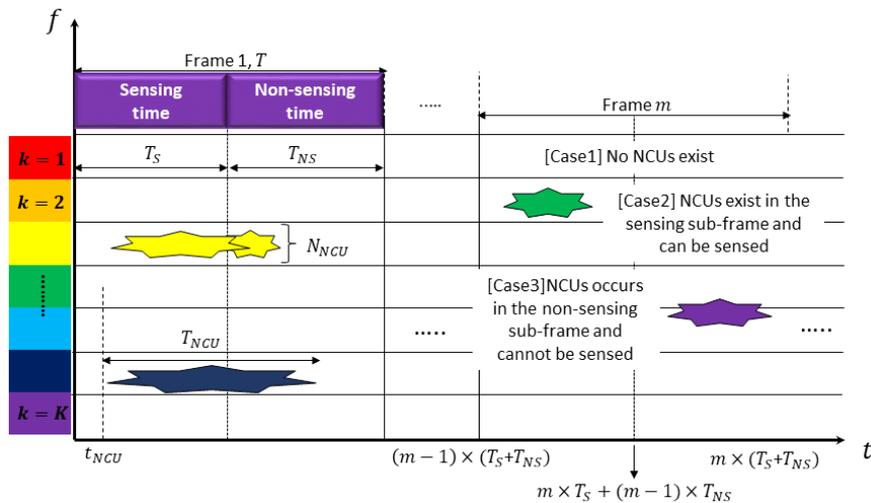


그림 3. 수중 인지 음파 네트워크를 위한 시간 및 주파수 영역 분할¹²⁾.
Fig. 3. The fragmentation of the time and frequency domains for a UCAN.

중계를 통한 인지 사용자간 통신과 다르게, 인지 사용자간 직접 통신은 사용 가능한 채널 정보가 서로 다르므로 'hidden-node' 문제가 발생할 수 있다. 따라서 본 연구의 채널 할당 방식의 적용 시 이 문제를 해결할 수 있는 채널 접속 방식이 적용되어야 한다. 중앙 제어국은 실시간으로 채널 사용을 모니터링하고 필요한 경우 채널 할당을 조정할 수 있다. 예를 들어, 잡음 또는 인지 사용자의 이동으로 인해 할당된 채널에서의 통신 장애가 발생할 때, 인지 사용자는 중앙 제어국에게 채널 변경을 요청한다.

이상의 네 과정은 순차적으로 진행될 수 있고, 병렬적으로 진행될 수 있다.

III. FOCA

이 장에서는 시나리오, 최적화 문제 모델링을 포함하여 FOCA에 대해 설명한다. 표 1은 FOCA에 관련된 파라미터들을 정리한 것이다.

3.1 시나리오 및 가정

시간 및 주파수 영역에서 비인지 사용자의 무작위 발생으로 인해, 인지 사용자들의 가용 채널의 수 및 가용 채널 인덱스들은 서로 다를 수 있다 (즉, ACL_{im}). 그림 4는 네 인지 사용자들이 일곱 개의 채널이 있는 상황 ($N_{CU}=5, K=7$)에서 발생할 수 있는 가용 채널의 비대칭성 예제를 보여준다. 그림 4의 인지 사용자

표 1. FOCA 관련 파라미터 정의

Table 1. Definition of parameters corresponding to FOCA.

Parameters	Description
N_{CU}	The number of CUs
K	The number of channels
i	An index of a CU ($1 \leq i \leq N_{CU}$)
m	An index of a frame ($m \geq 1$)
ACL_{im}	A set of available channels for CU i at the m th frame
$UACL_m$	A union of ACL_{im} at the m th frame
L_m	The length of $UACL_m$ ($L_m \leq K$)
j	An index of $UACL_m$ ($j=1, \dots, L_m$)
$UACL_m(j)$	The j th channel index of $UACL_m(j)$
n_{CHim}	The number of allocated channels for CU i at the m th frame
f_m	The Jain's fairness index at the m th frame

은 1, 4, 7의 채널에서 비인지 사용자들을 감지하였다. 따라서 인지 사용자 1의 가용 채널은 $ACL_{1m} = [2,3,5,6]$ 으로 나타난다. 같은 방법으로 인지 사용자 2, 3, 4의 가용 채널들로 그림 4의 표에서처럼 도출된다. 네 인지 사용자들의 ACL_{im} 의 합집합은 $UACL_m = [2,3,4,5,6,7]$ 로 나타나며, 전체 채널 중 여섯 개가 가용 채널로써 인지 사용자들에게 할당될 수

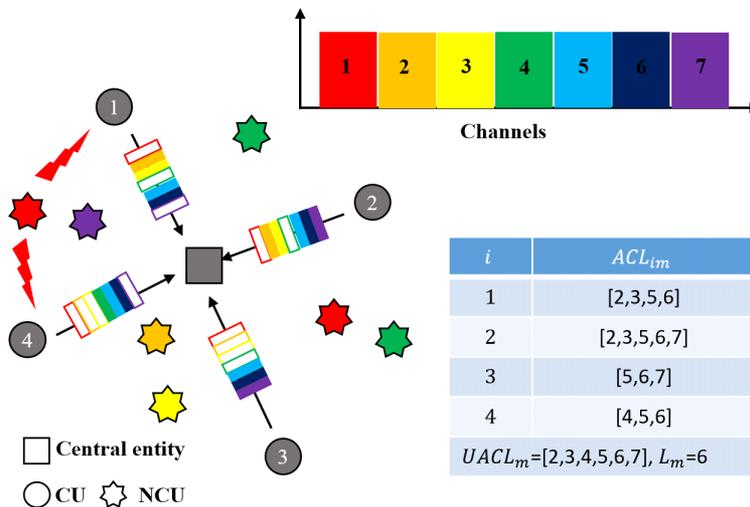


그림 4. 수중 인지 음파 네트워크의 가용 채널의 비대칭성 설명.
Fig. 4. An illustration of the asymmetry of available channels in UCANs.

있다 ($L_m = 6$). 따라서 $UCAL_m$ 이 할당 가능한 채널이며, 인지 사용자들은 자신의 ACL_{im} 에 포함되는 가용 채널들만 할당받을 수 있다.

그림 3에서 보듯이 매 프레임마다 인지 사용자들이 센싱한 결과를 중앙 제어국에게 전송하고, 센싱 정보를 기반으로 중앙 제어국이 ACL_{im} , $UACL_m$, L_m 값을 도출하여 인지 사용자들에게 채널을 할당한다. 이 때, 중앙 제어국은 인지 사용자들에게 할당하는 채널의 수 n_{CHim} 의 차이가 최소가 되도록 채널을 할당한다.

FOCA의 채널 할당 시 아래와 같은 가정을 고려한다.

- 수중 인지 음파 네트워크 내의 인지 사용자는 주어진 음파 대역을 센싱할 수 있는 장치를 보유한다.
- 인지 사용자들은 자신의 통신 반경 내에서 주어진 음파 대역에 발생하는 간섭원들을 센싱한다. 이 센싱을 통해 통신 시스템의 복잡도와 에너지 소비가 증가할 수 있다.
- 현실적으로 수중 음파 채널은 송수신 실패가 빈번하게 일어날 수 있다. 그러나 본 논문에서는 채널 할당 방식에 집중하기 위해 사용자들의 센싱 결과는 에러 없이 중앙 제어국에 전송됨을 가정한다. 에러가 발생하는 상황에서는 간섭원의 센싱 정확도가 떨어지고 가용 채널의 수가 감소하여 결과적으로 인지 사용자에게 할당되는 채널의 수가 감소할 수 있다.
- 중앙 제어국의 채널 할당 결과는 에러 없이 인지 사용자들에게 전송된다.

3.2 최적화 문제 정의

비대칭성을 고려한 인지 사용자들의 채널 할당 문제는 Integer Linear Programming (ILP)로 포물레이션된다. 이 때, 결정 변수 (decision variable)는 한 인지 사용자의 특정 채널 할당 유무를 나타낸다. m 번째 프레임에서 인지 사용자 i 가 채널 $UACL_m(j)$ ($UACL_m(j) \in ACL_{im}$)를 할당받는지 여부를 알 수 있는 이진 결정 변수를 x_{ijm} 라 정의한다. 인지 사용자 i 가 $UACL_m(j)$ 을 할당받으면 '1', 그렇지 않은 경우 '0'이다 ($1 \leq i \leq N_{CU}$, $j = 1, \dots, L_m$).

이진 결정 변수를 이용하여 m 번째 프레임에서 인지 사용자 i 가 할당받는 채널의 수는 수식 (1)과 같이 정의된다.

$$n_{CHim} = \sum_{j=1}^{L_m} x_{ijm} \quad (1)$$

n_{CHim} 의 정의를 이용하여, m 번째 프레임에서 인지 사용자들의 공평도 f_m 은 수식 (2)과 같이 나타난다^[7].

$$f_m = \frac{\left(\sum_{i=1}^{N_{CU}} n_{CHim} \right)^2}{N_{CU} \times \sum_{i=1}^{N_{CU}} n_{CHim}^2} = \frac{\left[\sum_{i=1}^{N_{CU}} \sum_{j=1}^{L_m} x_{ijm} \right]^2}{N_{CU} \times \left(\sum_{i=1}^{N_{CU}} \sum_{j=1}^{L_m} x_{ijm} \right)^2} \quad (2)$$

또한, 공평도를 최적화시키기 위해서는 아래의 제한 사항들 (constraints)을 고려한다.

- 한 인지 사용자는 자신의 ACL_{im} 에 포함되지 않는 채널은 할당받을 수 없다.
- $UACL_m$ 내의 채널들은 중복 없이 하나의 인지 사용자에게만 각각 할당된다.
- 둘 이상의 인지 사용자들은 같은 채널을 할당받지 못한다.
- $|ACL_{im}| \neq 0$ 이면, 인지 사용자는 적어도 하나의 채널을 할당받는다.
- 모든 인지 사용자들의 채널 할당 수는 총 합은 L_m 이다.

수식 (2)과 위의 제한사항들을 적용하여, m 번째 프레임에서 N_{CU} 개의 CU들이 L_m 개의 채널을 할당받을 때, 공평도를 최적화 문제는 표 2와 같이 표현된다.

표 2와 같이 비대칭성을 고려한 인지 사용자들의 채널 할당 문제는 ILP 기반의 최적화 문제로 포물레이션된다. 즉, 식 (2)의 목적 함수 f_m 는 가능한 영역 내의 임의의 두 점에 대해, 그리고 0과 1 사이의 임의의 값에 대해 볼록성 (convexity)을 만족하여 최적해를 도출할

표 2. FOCA 공평도 최적화 문제 도출

Table 2. Derivation of fairness optimization problem in FOCA.

<p>maximize f_m</p> <p>subject to</p> <ul style="list-style-type: none"> - $x_{ijm} = 0$ for any $UACL_m(j)$ not in ACL_{im} where $i = 1, \dots, N_{CU}$ - For $UACL_m(j)$, $\sum_{i=1}^{N_{CU}} x_{ijm} = 1$ where $j = 1, \dots, L_m$ - If $x_{ijm} = 1$, $x_{kjm} = 0$ where $i \neq k, j = 1, \dots, L_m, i, k = 1, \dots, N_{CU}$ - If $ACL_{im} \neq 0$, $n_{CHim} \geq 1$ where $i = 1, \dots, N_{CU}$ - $\sum_{i=1}^{N_{CU}} n_{CHim} = L_m$

수 있는 선형 함수이다.

주어진 다양한 제한 사항들을 고려하여 보다 정확한 최적해를 효율적으로 탐색하기 위해 ILP 기반의 최적화 문제는 Matlab의 ‘intlinprog’ 함수, Gurobi, CPLEX, SCIP와 같은 다양한 ILP solver들을 적용한다. 따라서 본 논문에서는 Matlab의 ‘intlinprog’ 함수를 적용하여 최적화 문제를 해결한다.

IV. 성능분석

이 장에서는 모의시험을 통해 도출된 FOCA의 성능을 분석한다. 이를 위해, 고려된 성능 파라미터들을 정의하고, 모의시험 조건 및 가정을 설명한 후, 최종적으로 모의시험 결과들을 분석한다.

4.1 성능 파라미터 정의

FOCA의 성능을 분석하기 위해 본 논문에서는 네 개의 성능 파라미터를 고려한다. 첫째, 할당 채널의 수 N_O 는 인지 사용자에게 평균적으로 할당되는 채널의 수를 의미한다. 모의시험 동안 총 N_{SF} 프레임이 진행된다면, 모의시험 동안 인지 사용자가 평균적으로 할당받은 채널의 수는 $N_O = \frac{1}{N_{SF}} \sum_{m=1}^{N_{SF}} \frac{1}{N_{CUi=1}} \sum n_{CHm}$ 로 표현된다. 공평도 역시 수식 (2)을 이용하여 모의시험 동안의 평균을 $f = \frac{1}{N_{SF}} \sum_{m=1}^{N_{SF}} f_m$ 와 같이 정의할 수 있다.

드롭률(drop rate)은 입력 데이터 대비 큐에서 드롭되는 데이터의 비율이다. m 번째 프레임에서 인지 사용자 i 의 큐에서 입력되는 데이터와 드롭되는 데이터의 양을 각각 N_{Im} , N_{Dm} 라고 할 때, 인지 사용자 i 의 드롭률 DR_{im} 은 $\frac{N_{Dm}}{N_{Im}}$ 으로 정의된다. 모의시험 동안의 모든 인지 사용자들의 드롭률 평균을 DR 라고 하면

$$DR = \frac{1}{N_{SF}} \sum_{m=1}^{N_{SF}} \frac{1}{N_{CUi=1}} \sum DR_{im}$$

로 정의된다.

충돌률(collision rate)은 할당받은 채널의 수 대비 비인지 사용자와 충돌이 발생한 채널의 수의 비율을 의미한다(그림 3의 세 번째 케이스). m 번째 프레임에서 인지 사용자 i 가 할당받은 채널들 중 미검출된 비인지 사용자와 충돌이 발생하는 채널의 수를 N_{Cim} 이라고 할 때, 인지 사용자 i 의 충돌률 CR_{im} 은 $\frac{N_{Cim}}{n_{CHm}}$ 으로 정의된다. 모의시험 동안의 모든 인지 사용자들의 충돌률

평균을 CR 이라고 하면 $CR = \frac{1}{N_{SF}} \sum_{m=1}^{N_{SF}} \frac{1}{N_{CUi=1}} \sum CR_{im}$ 로 정의된다.

4.2 비교 채널 할당 방법

FOCA와 성능을 비교하기 위해, [12]에서 제안한 두 가지의 경험적인 채널 할당 방법을 고려한다. 첫 번째는 No Priority-Multi Round Channel Allocation (NP-MRCA)이다. NP-MRCA에서는 다중 라운드를 수행하고, 한 라운드에서는 하나의 인지 사용자에게 한 개의 채널만 할당한다. 이 때, 인지 사용자를 선택하는 방식은 우선순위를 고려하지 않고, 랜덤(random)하게 선택한다. 다중 라운드는 가용 채널이 소진될 때까지 수행된다.

Low Channel Allocation Priority (LCAP) 기반 MRCA (LCAP-MRCA) 방식은 NP-MRCA 방식과 채널 할당 방식이 다중 라운드를 수행하는 점에서는 동일하나, 각 라운드마다 인지 사용자를 선택하는 방식이 다르다. 즉, 이 방식에서는 공평도를 높이기 위해 현재까지 할당된 채널의 수가 가장 낮은 인지 사용자에게 채널 할당 우선순위를 가장 높게 부여한다. 만약, 우선순위가 동일할 경우에는 그 인지 사용자들 사이에서 무작위로 결정된다. 이 방식은 FOCA 방식과 공평도를 고려하여 채널을 할당한다는 개념은 유사하다. 그러나 이 방식은 매 라운드마다 할당 채널의 수를 고려하여 인지 사용자에게 채널을 할당하는 경험적인 방식으로, 공평도를 최적화시키는 알고리즘이 반영되지 않은 점에서 FOCA와 차별적이다.

4.3 모의시험 조건 및 가정

모의시험을 위해 아래와 같은 조건을 고려한다.

- 모의시험은 센싱 정보를 기반으로 중앙 제어국이 인지 사용자들의 채널을 할당하는 단계까지만 고려한다.
- 그림 2와 같이 네트워크에는 하나의 중앙 제어국과 N_{CU} 의 인지 사용자들이 존재한다. 또한, 채널의 수는 $K=50$ 을 고려한다. N_{CU} 에 대한 FOCA의 성능을 분석하기 위해 N_{CU} 값은 [5, 10, 25, 50]으로 주어진다.
- 인지 사용자들의 위치는 고정이고, 그림 2에서 r 은 5,000 미터, Z_{max} 는 1,000 미터로 주어진다. 즉, 인지 사용자들의 고정 위치는 그림 1의 R1 지역에서 초기에 랜덤하게 설정된다.
- 그림 3과 같이 모의시험은 프레임 단위로 수행된다.

한 프레임의 길이는 센싱 시간과 비센싱 시간으로 구성된다. 센싱 시간과 비센싱 시간의 비율을 α , 비센싱 시간을 T_{NS} 라고 하면, 프레임의 길이는 $(1+\alpha) \times T_{NS}$ 로 주어진다. [20]에서는 센싱 시간과 비센싱 시간의 비율을 5.0 이상이어야 비인지 사용자를 센싱하는 일정한 센싱율이 보장됨을 확인하여, 이 모의시험에서도 $\alpha = 5.0$ 을 사용하고, T_{NS} 는 10 초로 설정한다.

- 비인지 사용자들의 발생 위치, 발생 시간 및 기간은 무작위이다. 비인지 사용자의 발생 위치는 그림 2의 R2 지역 내에 분포하도록 랜덤하게 설정된다. 발생 시간은 매 프레임 동안 랜덤하게 설정된다. 발생 기간도 최대 한 프레임 이상 되지 않도록 무작위로 설정된다. 또한, 채널별로 발생하는 비인지 사용자들의 수는 평균이 λ_{NCU} 인 푸아송(Poisson) 분포를 가진다. λ_{NCU} 에 대한 FOCA의 성능을 분석하기 위해 λ_{NCU} 값은 1.0:1.0:5.0으로 주어진다.
- 큐(queue)는 QL 인 최대 길이를 가지고, 현재 큐의 길이가 QL 을 벗어나면 드롭이 발생한다. 모의시험에서 최대 큐의 길이는 $QK = 10 \times K$ 로 설정한다. 또한, 한 프레임당 버스트 트래픽이 들어와서, 버스트 트래픽이 서비스 되는 큐잉 모델을 고려한다.
- 큐에 입력, 출력, 드롭되는 데이터의 크기는 각각 채널의 수와 매칭된다. 즉, 입력, 출력, 드롭되는 데이터의 크기는 채널의 수로 표현된다. 입력 트래픽 (N_{lm})은 $[1, \frac{2K}{N_{CU}} - 1]$ 사이에서 uniform 분포를 가지고, 출력 트래픽은 인지 사용자가 할당받는 채널의 수에 매칭된다 (즉, n_{CHm}).
- 모의시험은 Matlab 기반 시뮬레이터로 수행된다. FOCA와 비교 채널 할당 방식은 채널 할당 알고리즘을 제외하고 동일한 조건에서 성능이 도출된다. 특히, FOCA의 채널할당 방식은 Matlab optimization tool box의 'intlinprog' 함수를 적용하여 공평도 값이 최대일 때의 인지 사용자별 채널을 할당하는 결과를 도출한다. 또한, 모의시험에서는 N_{SF} 의 프레임 동안, 비인지 사용자와 인지 사용자에게 트래픽을 매 프레임동안 무작위로 발생시켜, 모의시험 동안의 평균 성능을 도출한다. N_{SF} 는 10^6 으로 주어진다.
- 모의시험의 가변 조건은 채널당 발생하는 비인지 사용자들의 수 (λ_{NCU})와 인지 사용자의 수 (N_{CU})이며, 이 변수들을 각각 가변하여 FOCA와 비교군의 성능을 분석한다.

4.4 모의시험 결과

이 장에서는 FOCA, LCAP-MRCA, NP-MRCA의 성능을 공평도, 할당 채널의 수, 충돌율, 드롭율 측면에서 각각 비교 분석한다.

4.4.1 공평도

λ_{NCU} 가 클수록 한 채널에 발생하는 비인지 사용자의 수가 증가한다. 비인지 사용자의 증가는 인지 사용자들의 가용채널의 비대칭성을 더 증가시킬 수 있다. 즉, 인지 사용자 마다 가용 채널의 수와 가용 채널 인덱스 차이가 더 커지는 것이다. 그림 5와 같이, 증가된 가용 채널의 비대칭성은 인지 사용자들간 채널 할당 공평도 성능도 열화시키는 것을 알 수 있다. 즉, 최적화 또는 공평하게 채널을 할당하도록 우선순위를 적용하여도 가용채널의 비대칭성이 증가하면, 공평도가 낮아질 수 있다는 것이다. 그림 5에서 보듯이, NP-MRCA, LCAP-MRCA보다 FOCA의 공평도가 조건에 상관없이 더 좋거나 같음을 확인할 수 있다.

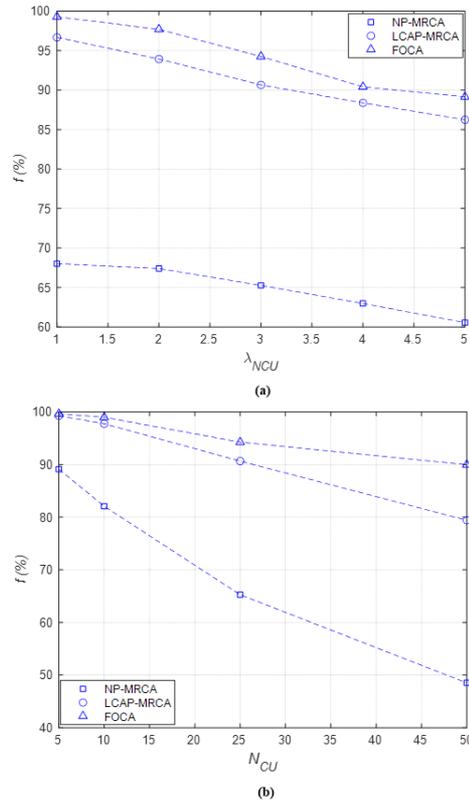


그림 5. 공평도 성능. (a) $N_{CU} = 25$ 일 때 λ_{NCU} 에 따른 f 성능. (b) $\lambda_{NCU} = 3.0$ 일 때 N_{CU} 에 따른 f 성능.
Fig. 5. Fairness. (a) f according to λ_{NCU} at $N_{CU} = 25$. (b) f according to λ_{NCU} at $\lambda_{NCU} = 3.0$.

제한된 채널의 수(K)에서 N_{CU} 가 증가할수록 인지 사용자들이 할당받을 수 있는 채널의 수의 upper limit 가 감소한다 ($\frac{K}{N_{CU}}$). 가용채널이 비대칭적인 상황에서 할당 채널의 수의 감소는 인지 사용자들간 할당된 채널의 수 차이를 증가시킬 수 있다. 이는 모의시험 결과를 통해서 확인할 수 있다. λ_{NCU} 의 영향 분석과 같이 NP-MRCA는 가능 낮은 공평도를 보이며, LCAP-MRCA는 FOCA에 근접한 공평도 성능을 보인다.

이상의 결과 분석을 통해, 공평성을 고려한 우선순위 방식을 고려할수록 FOCA와 공평도 성능이 근접함을 확인할 수 있다.

4.4.2 채널 할당 수

λ_{NCU} 가 증가할수록 가용채널의 수가 감소하여, 평균적으로 할당받는 채널의 수는 감소한다. 그림 6에서

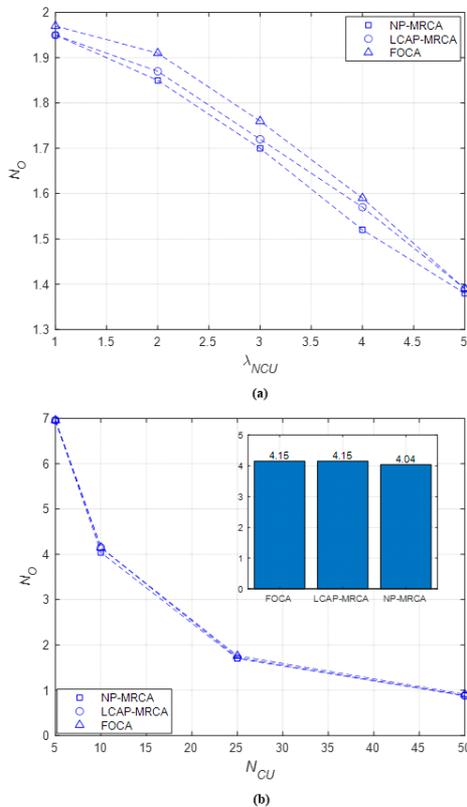


그림 6. 할당 채널의 수. (a) $N_{CU} = 25$ 일 때 λ_{NCU} 에 따른 N_O 성능. (b) $\lambda_{NCU} = 3.0$ 일 때 N_{CU} 에 따른 N_O 성능.
 Fig. 6. The number of allocated channels. (a) N_O according to λ_{NCU} at $N_{CU} = 25$. (b) N_O according to λ_{NCU} at $\lambda_{NCU} = 3.0$.

보듯이, 할당 채널의 수 역시 큰 차이가 나지는 않지만, 공평도 성능이 높을수록 더 많은 채널을 할당받음을 알 수 있다. 즉, FOCA > LCAP-MRCA > NP-MRCA의 순으로 할당 채널이 수 성능이 나타난다. 그러나 세 채널 할당 방식 모두 근소한 할당 채널의 수를 보이며, 이는 할당방식에 상관없이 인지 사용자들이 거의 동일하게 채널을 할당받을 수 있음을 의미한다.

제한된 채널의 수(K)에서 N_{CU} 가 증가할수록 인지 사용자들이 할당받을 수 있는 채널의 수의 upper limit 가 감소한다 ($\frac{K}{N_{CU}}$). 따라서 실제로 할당받는 채널의 수도 감소함을 확인할 수 있다. λ_{NCU} 가 고정되었을 때, 세 채널 할당 방식들 모두 유사한 할당 채널의 수 성능을 보인다.

이상의 결과 분석을 통해, 할당 채널의 수 영향은 λ_{NCU} , N_{CU} 가 증가할수록 감소하며 세 가지의 채널 할당 방식들의 성능 차이가 크지 않음을 알 수 있다. 또한,

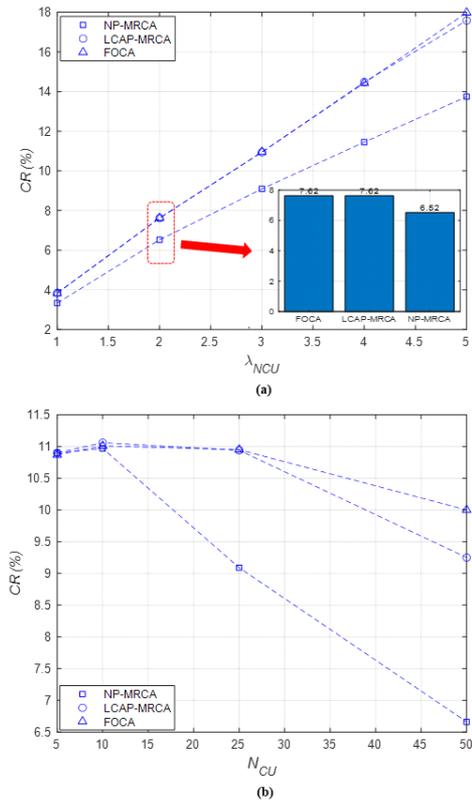


그림 7. 충돌율. (a) $N_{CU} = 25$ 일 때 λ_{NCU} 에 따른 CR 성능. (b) $\lambda_{NCU} = 3.0$ 일 때 N_{CU} 에 따른 CR 성능.
 Fig. 7. Collision rate. (a) CR according to λ_{NCU} at $N_{CU} = 25$. (b) CR according to λ_{NCU} at $\lambda_{NCU} = 3.0$.

할당 채널의 수 성능은 할당방식 보다는 비인지 사용자
의 분포와 N_{CU} 값에 더 큰 영향을 받음을 알 수 있다.

4.4.3 충돌율

λ_{NCU} 가 증가할수록 비인지 사용자가 증가하므로 당
연히 충돌율이 증가함을 알 수 있다. 그러나 공평도와
할당 채널의 성능과 달리, 세 가지의 채널 할당 방식
중에는 NP-MRCA가 가장 낮은 충돌율을 보인다. 이는
근소한 차이이지만, 랜덤성이 강한 채널 할당 방식일수
록 채널 할당의 수가 감소하고, 채널 할당의 수가 작기
때문에 해당 채널에서 충돌이 발생할 확률이 낮아지는
것이다.

그림 7에서 보듯이, N_{CU} 가 증가할수록 인지 사용자
들이 할당받은 채널의 수가 감소하여 충돌율이 감소함
을 알 수 있다. λ_{NCU} 의 영향과 같이 N_{CU} 에 따른 충돌
율 성능은 무작위성이 가장 큰 NP-MRCA가 가장 충돌
율 성능이 좋음을 알 수 있다.

4.4.4 드롭율

드롭율 성능은 현재 큐에 쌓인 데이터가 현재 큐 길
이 (QL)를 초과할 때, 드롭되는 확률이다. 드롭율은 인
지 사용자가 공평하게 채널을 할당받을수록 특정 인
지 사용자가 입력 트래픽을 드롭할 확률이 낮아진다. 즉,
공평도가 좋을수록 드롭율이 감소할 수 있는 것이다.

λ_{NCU} 가 증가할수록 비인지 사용자가 증가하므로 할
당받은 채널의 수가 줄어들어 입력 트래픽을 처리하지
못해 드롭율이 증가할 수 있다. 따라서 그림 8에서 보듯
이 공평도가 좋은 FOCA가 LCAP-MRCA와
NP-MRCA보다 낮은 드롭율을 보인다.

K 가 고정된 상태에서 N_{CU} 가 증가할수록 입력 트래
픽의 상한 값이 감소한다. 즉, N_{CU} 가 증가할수록 입력
트래픽이 감소하여 전반적으로 드롭율이 감소한다.
 λ_{NCU} 에 대한 영향과 같이, 드롭율 측면에서도 공평도
성능이 좋은 FOCA가 LCAP-MRCA와 NP-MRCA보
다 드롭율 성능이 더 좋음을 알 수 있다.

V. 결 론

간섭원의 유무를 고려하여 유휴한 채널을 할당하는
수중 인지 음파 네트워크에서는 무작위성을 가지는 간
섭원의 발생으로 인지 사용자마다 채널 센싱의 결과가
비대칭적이다. 즉, 특정 프레임에서 채널 센싱 후 인지
사용자들의 가용채널의 수, 그 가용채널이 중복성이 서
로 다르게 나올 수 있다. 이러한 가용채널의 비대칭성은
수중 인지 음파 네트워크에서 인지 사용자간 채널 할당
의 공평성에 큰 영향을 줄 수 있다.

본 연구에서는 수중 인지 음파 네트워크의 채널 할당
시 Jain's fairness index를 최적화시키기 위해, 인지 사
용자들의 채널 할당수의 차이가 최소가 되도록 공평도
를 최적화하는 채널 할당 방식인 FOCA를 제안하였다.
이를 위해, 한 인지 사용자가 채널을 할당받는지 여부를
이진변수로 정의하여 ILP 기반의 최적화 문제로 도출
하였다.

FOCA의 성능을 분석하기 위해 3차원의 수중 네트
워크 토폴로지를 고려하여, 채널당 발생하는 간섭원의
수, 인지 사용자들의 수를 변경하여 모의시험을 수행하
였다. 모의시험 결과, [12]에서 제안한 경험적인 방법
들에 비해 FOCA는 공평도 뿐만 아니라, 할당 채널의
수와 드롭율 성능도 향상됨을 확인할 수 있다. 특히,
FOCA의 드롭율 향상 결과를 통해, 인지 사용자들의
채널할당이 공평할수록 특정 인지 사용자에서 트래픽
이 드롭될 확률이 떨어질 수 있음을 알 수 있었다.

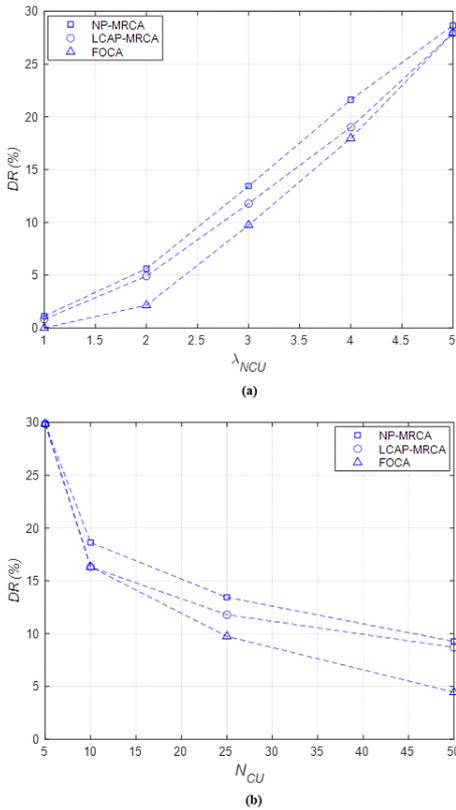


그림 8. 드롭율. (a) $N_{CU} = 25$ 일 때 λ_{NCU} 에 따른 DR 성
능. (b) $\lambda_{NCU} = 3.0$ 일 때 N_{CU} 에 따른 DR 성능.
Fig. 8. Drop rate. (a) DR according to λ_{NCU} at
 $N_{CU} = 25$. (b) DR according to λ_{NCU} at $\lambda_{NCU} = 3.0$.

그러나 할당 채널의 수의 증가는 해당 채널에서 미션 실행된 비인자 사용자와 충돌할 확률이 높아짐을 의미한다. 따라서 FOCA는 NP-MRCA, LCAP-MRCA에 비해 높은 충돌율을 초래하였다. 이는 충돌율과 공평도, 할당 채널의 수, 드롭률 간의 trade-off를 보여준다.

본 논문에서 제안한 FOCA는 향후 협대역의 수중 음파 대역을 가용 채널의 비대칭을 반영하면서 인지 사용자들에게 공평하게 채널을 할당하는 어플리케이션 또는 네트워크에 적용할 수 있다.

References

- [1] M. Chitre, S. Shahabudeen, and M. Stojanovic, "Underwater acoustic communications and networking: Recent advances and future challenge," *Technol. Soc. J.*, vol. 42, no. 1, pp. 103-116, Mar. 2008. (<https://doi.org/10.4031/002533208786861263>)
- [2] F. Gazi, S. Misra, N. Ahmed, A. Mukherjee, and N. Kumar, "UnRest: Underwater reliable acoustic communication for multimedia," in *Proc. IEEE Global Commun. Conf.*, Taipei, Taiwan, Dec. 2020. (<https://doi.org/110.1109/GLOBECOM42002.2020.9348152>)
- [3] J. Liu, J. Wang, S. Song, J. Cui, X. Wang, and B. Li, "MMNET: A multi-modal network architecture for underwater networking," *Electronics*, vol. 9, no. 12, pp. 1-18, Nov. 2020. (<https://doi.org/10.3390/electronics9122186>)
- [4] J. Hildebrand, "Sources of anthropogenic sound in the marine environment," in Report to the Policy on Sound and Marine Mammals: An Int. Wkshps., London, UK, 2004. (<https://www.mmc.gov/wp-content/uploads/hildebrand.pdf>)
- [5] Y. Chen, X. Zhang, X. Sun, Y. Tao, and X. Xu, "MF-HER: Marine mammal-friendly based high spectral-efficient routing for underwater acoustic sensor networks," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 198624-198636, Nov. 2020. (<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3034314>)
- [6] A. Guqhaiman, O. Akanbi, A. Aljaedi, and C. E. Chow, "A survey on MAC protocol approaches for underwater wireless sensor networks," *IEEE Sens. J.*, vol. 23, no. 3, pp. 3916-3932, Sep. 2020. (<https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.3024995>)
- [7] L. Wei, Y. Guo, and S. Cai, "MAC protocol for underwater acoustic sensor network based on belied state space," *EURASIP J. Wirel. Commun. Netw.*, vol. 2018, no. 119, pp. 1-8, May 2018. (<https://doi.org/10.1186/s13638-018-1130-5>)
- [8] Q. Yang, Y. Su, Z. Jin, and G. Yao, "EFPC: An environmentally friendly power control scheme for underwater sensor networks," *Sensors*, vol. 15, no. 11, pp. 29107-29128, Nov. 2015. (<https://doi.org/10.3390/s151129107>)
- [9] B. Wang and K. Liu, "Advances in cognitive radio networks: A survey," *IEEE J. Sel. Top. Signal Process*, vol. 5, no. 1, pp. 5-23, Feb. 2011. (<https://doi.org/10.1109/JSTSP.2010.2093210>)
- [10] Z. Jiang, "Underwater acoustic network-Issues and solutions," *Int. J. Intell. Control Syst.*, vol. 13, no. 3, pp. 152-161, Sep. 2008. (<https://www.asmemesa.org/ezconf/IJICS/files/134/01-Zaihan-Jiang-IJCS-10pages.pdf>)
- [11] X. Li, Y. Guo, X. Fu, and M. Pan, "Dolphins first: Dolphin-aware communications with multi-hop underwater cognitive acoustic networks," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 16, no. 4, pp. 2043-2056, Nov. 2017. (<https://doi.org/10.1109/TWC.2016.2623604>)
- [12] C. Yun, "An underwater cooperative spectrum sharing protocol for a centralized underwater cognitive acoustic network," *Sensors*, vol. 22, no. 15, pp. 1-22, Aug. 2022. (<https://doi.org/10.3390/s22155754>)
- [13] D. J. Schott, A. Gabbrielli, W. Xiong, W. G. Fischer, F. Hoflinger, J. Wendeberg, C. Schindelhauer, and S. J. Rupitsch, "Asynchronous chirp slope keying for underwater acoustic communication," *Sensors*, vol. 21, no. 9, pp. 1-25, May 2021. (<https://doi.org/10.3390/s21093282>)

- [14] B. Mishachandar and S. Vairamuthu, “An underwater cognitive acoustic network strategy for efficient spectrum utilization,” *Appl. Acoust.*, vol. 21, no. 175, pp. 1-9, Jan. 2021. (<https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2020.107861>)
- [15] Y. Luo, L. Pu, M. Zuba, Z. Peng, and J. Cui, “Challenges and opportunities of underwater cognitive acoustic networks,” *IEEE Trans. Emerging Topics in Comput.*, vol. 2, no. 2, pp. 198-211, Jun. 2014. (<https://doi.org/10.1109/TETC.2014.2310457>)
- [16] D. B. Rawat, M. Song, and S. Shetty, *Dynamic spectrum access for wireless network*, Springer, 2015. (https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-15299-8_1)
- [17] I. Alfourzan and M. E. Woodward, “Load balancing—node transfer trade-off in reconfigurable WDM networks,” *IEE Proc. Commun.*, vol. 153, no. 3, pp. 469-474, Jun. 2006. (<https://doi.org/10.1049/ip-com:20050533>)
- [18] G. Lancia and P. Serafini, *Compact extended linear programming models*, Springer, Jan. 2018. (https://doi.org/10.1007/978-3-319-63976-5_4)
- [19] Y. Luo, L. Pu, H. Mo, Y. Zhu, Z. Peng, and J. Cui, “Receiver-initiated spectrum management for underwater cognitive acoustic network,” *IEEE Trans. Mob. Comput.*, vol. 16, no. 1, pp. 198-212, Jan. 2017. (<https://doi.org/10.1109/TMC.2016.2544757>)
- [20] C. Yun, A. Cho, and Y. Choi, “A comparative analysis of sensing rate of cooperative and non-cooperative sensing for underwater cognitive acoustic networks,” in *Proc. KICS Fall Conf.*, p. 502, Gyeongju, Korea, Nov. 2022.

윤창호 (Changho Yun)



1999년 2월 : 창원대학교 전자공학과 공학사

2004년 2월 : 광주과학기술원 정보통신공학과 공학석사

2007년 2월 : 광주과학기술원 정보통신공학과 공학박사

2007년~2008년 : North Carolina State Univ. 박사후연구원

2008년~현재 : 한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소 책임연구원

2009년 3월~2015년 2월 : 과학기술연합대학원대학교 해양정보통신공학과 겸임교원(부교수)

2015년 3월~2018년 : 과학기술연합대학원대학교 해양시스템공학과 겸임교원(부교수)

<관심분야> 해상 및 수중 네트워크 개발

[ORCID:0000-0002-9495-1282]