

5G Cloud RAN에서 네트워크 공평성 향상을 위한 계층적 적응 스펙트럼 관리 방법

조오현

충북대학교 소프트웨어학과 교수

Hierarchical Dynamic Spectrum Management for Providing Network-wise Fairness in 5G Cloud RAN

Ohyun Jo

Professor, Department of Computer Science, Chungbuk National University

요약 본 논문에서는 셀 간 정보의 공유를 통한 협력이 가능한 연결된 네트워크 구조를 갖는 5G Cloud RAN 네트워크에 적용이 가능한 새로운 자원 관리 알고리즘을 제안한다. 제안 알고리즘은 네트워크 협력의 이점을 활용하여 공정성과 처리량을 동시에 증가시킨다. 이러한 네트워크 성능 최적화는 허용이 가능한 양의 신호 처리 오버헤드 및 계산 복잡도 내에서 달성될 수 있으며 시뮬레이션 결과는 셀 외곽 사용자에게 대한 네트워크 용량이 기존의 방법 대비 40% 가량 향상되었으며 사용자간 공정성 또한 Jain의 공평성 지수를 기준으로 약 23% 향상되었음을 확인하였다.

주제어 : 5G 네트워크, 협력 네트워크 구조, 적응 스펙트럼 관리, QoS, Cloud RAN

Abstract A new resource management algorithm is proposed for 5G networks which have a coordinated network architecture. By sharing the control information among multiple neighbor cells and managing in centralized structure, the proposed algorithm fully utilizes the benefits of network coordination to increase fairness and throughput at the same time. This optimization of network performance is achieved while operating within a tolerable amount of signaling overhead and computational complexity. Simulation results confirm that the proposed scheme improve the network capacity up to 40% for cell edge users and provide network-wise fairness as much as 23% in terms of the well-known Jain's Fairness Index.

Key Words : 5th Generation network, Coordinated architecture, Dynamic Spectrum Management, QoS, Cloud RAN

1. 서론

최근 몇 년 동안 적응 스펙트럼 관리 (DSM, Dynamic Spectrum Management) 알고리즘은 5G 네트워크의 매우 높은 데이터율과 서비스 품질을 보장하기 위한 핵심

적인 요소 기술로서 많은 관심을 받아왔다. DSM이라는 용어로 일반적으로 더 잘 알려져 있는 적응 스펙트럼 관리 기법은 전통적으로는 매우 정적인 채널 환경을 갖는 유선 네트워크에 실제적으로 적용이 되어 왔다[1]. 그 이유는 동적으로 채널 환경에 따라서 스펙트럼 관리

This work was supported by the National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Korea government (MSIT) (No. NRF-2018R1C1B5045013). And this work was supported by the research grant of the Chungbuk National University in 2018.

*Corresponding Author : Ohyun Jo (ohyunjo@chungbuk.ac.kr)

Received April 19, 2020
Accepted July 20, 2020

Revised May 13, 2020
Published July 28, 2020

를 수행하기 위해서는 알고리즘 계산을 위한 연산량이 높을 뿐만 아니라 지속적으로 각 사용자의 채널 환경에 대해 실시간적으로 적응을 해야 하기 때문에 무선 네트워크와 같이 채널 환경이 매우 빠르게 변하는 환경에서는 이러한 방법을 직접 적용하는데 한계가 존재하였다. 이러한 적응 스펙트럼 관리 기법이 실제 무선 네트워크에 적용을 고려하기 시작한 것은 비교적 매우 최근이며 최근까지 상용 네트워크에 적용이 된 사례는 아직 전무하다.

최초로 네트워크에서 적용된 DSM 알고리즘은 IWF (Iterative Water Filling)[2] 알고리즘이며 이를 개선한 MIWF (Modified Iterative Water Filling)[3] 알고리즘이 제안된 바 있다. IWF 알고리즘은 완전히 분산적 동작 방법을 나타낸다. 다시 말하면, 사용자 간에 각자의 채널 정보와 같은 컨트롤 정보를 전혀 교환하지 않고 각 시스템이 측정 가능한 정보만을 이용하여 네트워크를 최적화하는 방법이다. 따라서 IWF 알고리즘은 빠르고상대적으로 쉽게 구현이 가능하다. 하지만 개별 시스템 내에서의 자체적인 최적화만이 가능하고 전체 네트워크 관점의 최적화를 수행하는 것은 불가능하다. 이러한 기존의 IWF 알고리즘의 한계점을 극복하기 위하여 MIWF 알고리즘은 중앙집중식 동작 방법을 나타낸다. MIWF 알고리즘은 사용자 간, 시스템 간의 컨트롤 정보를 서로 교환하고 공유하는 동작을 포함한다. 이를 통하여 인접 셀에서 발생하는 간섭의 크기를 고려하여 네트워크 관점의 최적화가 가능해진다. 하지만 컨트롤 정보의 교환에 의해서 오버헤드가 발생하고 또한 무선 네트워크와 같이 채널 환경이 매우 빠르게 변하는 환경에서는 정보의 교환이 매우 빈번하게 이루어져야 하기 때문에 구현 복잡도와 난이도가 높아지는 단점이 있다.

한편, 5G 네트워크를 위한 기술 연구가 매우 활발하게 진행되고 있는 현재의 시점에서 위와 같은 적응 스펙트럼 관리 기법을 적용할 수 있는 새로운 네트워크 구조들이 제안되었다 [4,5]. 이러한 향상된 네트워크 구조들은 적응 스펙트럼 관리 기법과 같이 성능 향상을 위해 필수적인 알고리즘이 구현될 수 있는 기반이 된다. 예를 들면 5G Cloud RAN 네트워크 구조에서는 각 기지국(Base Station)들이 서로 모두 연결되어 컨트롤 정보까지를 모두 공유함으로써 하나의 코디네이터에 의해 무선 자원 관리를 실시간으로 받을 수 있다 [8-12]. 기존의 이동통신 네트워크에서는 각 기지국마다 개별적인 스케줄러가 존재하여 하나의 셀 내에서의

최적화만이 이루어질 수 있었다.

이러한 최신의 향상된 네트워크 구조에 기반하여 셀 간에 협력을 통해 네트워크 관점의 성능을 향상시킬 수 있는 계층적 적응 스펙트럼 기법을 제안한다.

2. 계층적 적응 스펙트럼 관리 기법

2.1. 협력 네트워크 토폴로지 (Coordinated Network Topology)

협력 네트워크 토폴로지(Coordinated Network Topology)를 사용하여 자원 관리의 효율성을 향상시킬 수 있다. 협력 네트워크 구조에서는 두 종류의 컨트롤러 관리 장치가 존재한다. 첫 번째는 기지국 컨트롤러(BS controller)이고 두 번째는 네트워크 코디네이터(Network Coordinator)이다. 기지국 컨트롤러는 각 기지국에 존재하여 분산적인 방법으로 자원을 관리하며 네트워크 코디네이터는 기지국 외부에 개별 관리 장비로 존재하여 중앙집중식 메커니즘에 의해 동작한다. 따라서 네트워크 코디네이터와 기지국 컨트롤러의 기능을 하이브리드한 방식으로 적용하여 네트워크 사용자들의 계층(hierarchy)에 따라 단 계적이고 차별적인 알고리즘을 적용할 수 있다.

2.2. 네트워크 구조에 따른 기하학적 그룹 형성 (Geometrical Grouping)

계층적 자원관리를 위하여, 제안 방법에서는 인접 셀에서 미치는 간섭과 영향의 크기에 따라서 사용자들의 계층을 구분한다. 이는 사용자들의 SINR (Signal to Interference and Noise Ratio)에 따라 구분될 수 있으며 본 논문에서는 계층적 스펙트럼 관리 기법의 적용 및 성능 평가를 위하여 네트워크 구조에 따른 기하학적 그룹을 형성하는 기법을 적용하였다. 특정 셀 내의 사용자는 해당 셀의 기지국과 인접 셀의 기지국의 위치에 따라 계층적 기법을 달리 적용한다. 해당 사용자가 소속된 셀의 기지국의 좌표를 (x, y) 라 하고, 인접 셀의 기지국들의 좌표를 각각 (x_1, y_1) , (x_2, y_2) 라고 하였을 때, 각 기지국간의 거리를 a, b, c 라고 정의하는 경우, a, b, c 는 각각 다음과 같이 계산된다.

$$a = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \quad (1)$$

$$b = \sqrt{(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2} \quad (2)$$

$$c = \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2} \quad (3)$$

이 때 사용자는 인접 셀의 기지국과의 연결선을 기준으로 각 도 α 의 내에 영역을 MIWF 영역으로 정의하고 그 외의 영역을 nonMIWF영역으로 정의한다. 특정 사용자가 MIWF 영역에 있는 경우 해당 사용자는 인접 셀들의 간섭의 영향은 많이 받는 MIWF 영역 사용자로 분류하며, 그렇지 않은 경우에는 nonMIWF 영역의 사용자로 분류한다.

$$\alpha = \cos^{-1}\left(\frac{c^2 - a^2 - b^2}{2bc}\right) \quad (4)$$

이렇게 두 영역으로 사용자의 계층을 구분하는 이유는 서두에 설명한 바 있는 MIWF 알고리즘의 특성과 관련이 있다. 일반적으로 MIWF 알고리즘은 셀 간 간섭이 그 이외의 자연 발생 노이즈 신호보다 훨씬 극심한 환경에서 효과적으로 동작한다. 반대로 SINR이 매우 높은 사용자들은 상대적으로 셀 간 간섭의 영향을 덜 받으며 이런 사용자들의 환경은 Fig. 1에 잘 나타나있다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 높은 SINR을 갖는 사용자들의 경우에는 셀 간 간섭을 고려하였을 때 채널 간에 자원 할당의 변화가 상대적으로 심하지 않다. 이러한 점에 착안하여 다음 절에서 계층적 자원 할당 방법을 제안한다.

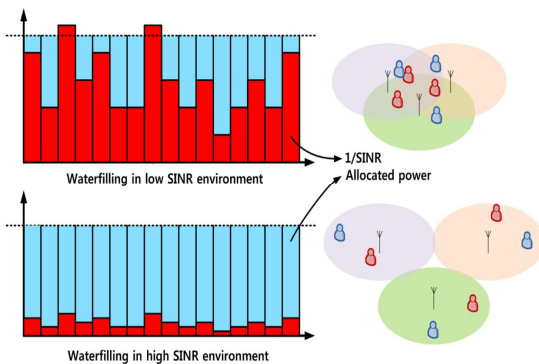


Fig. 1. User Resource Allocation in 5G Cloud RAN Network with low/high SINR

2.3. 계층적 자원 할당 과정 (Resource allocation)

MIWF 영역에서는 중앙집중식 MIWF 알고리즘을 네트워크 코디네이터가 수행한다. 반면, nonMIWF 영역에서는 분산방식 IWF 알고리즘을 기지국 컨트롤러가 수행한다. 이러한 방식에 의해 자원을 할당 한 후, 제안 기법의 다음 절차에서는 채널 n 의 기지국 k 에서의 전송 용량 c_n^k 을 다음과 같이 추정한다.

$$c_n^k = B \log_2\left(\frac{p_n^k h_n^k}{\sum_{j \neq k} p_n^j h_n^j + P_N}\right) \quad (5)$$

여기서 p_n^k 는 기지국 k 에서 채널 n 에 할당된 파워이며, h_n^k 는 기지국 k 에서 채널 n 에 대한 사용자의 채널 이득값을 나타낸다. 또한, P_N 은 각 채널에서의 자연 발생 노이즈의 크기를 나타낸다.

이 때, MIWF 영역 사용자들의 전송용량의 합 C_{MIWF} 과 nonMIWF 영역 사용자들의 전송용량의 합 C_{non} 을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$C_{MIWF} = \sum_k \sum_{n \in N_{MIWF}} c_n^k \quad (6)$$

$$C_{non} = \sum_k \sum_{n \in N_{non}} c_n^k \quad (7)$$

2.4. 네트워크 관점의 공평성 제공 (Providing Network-wise Fairness)

제안 기법에서는 앞서 구한 MIWF 영역 사용자들의 전송용량 C_{MIWF} 과 nonMIWF 영역 사용자들의 전송용량 C_{non} 을 이용하여 네트워크 공평성을 향상을 위하여 Fig.2에 나타나는 바와 같은 수행 절차를 갖는다.

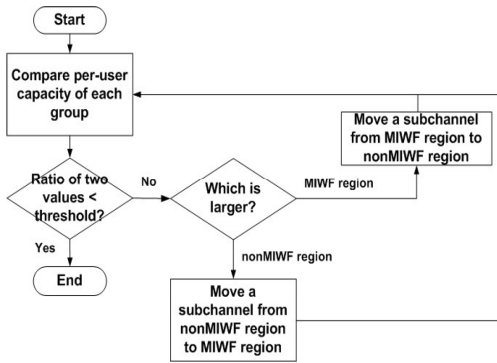


Fig. 2. Compensation procedure for hierarchical resource allocation

사용자 공평성 문제는 네트워크 성능의 우수성을 증명하기 위한 매우 중요한 척도이다. 하지만 기존의 자원 할당 방식에서는 네트워크 관점의 사용자 공평성을 고려할 수 없었고 단일 셀 내에서의 사용자 성능 최적화만이 가능하였다. 본 연구에서는 공평성의 문제를 네트워크 전체로 확장을 하기 위하여 Fig.2에 정의된 보상 과정을 추가하였다. 이를 위한 보상 과정은 MIWF 영역의 사용자와 nonMIWF 영역의 사용자들의 사용자 당 전송용량 (per-user capacity)인 c'_{MIWF} 와 c'_{non} 을 다음과 같이 구한다.

$$c'_{MIWF} = \frac{C_{MIWF}}{n_{MIWF}} \quad (8)$$

$$c'_{non} = \frac{C_{non}}{n_{non}} \quad (9)$$

여기서 n_{MIWF} 와 n_{non} 은 각각 MIWF 영역의 사용자 수와 nonMIWF 영역의 사용자 수이다.

먼저, 네트워크 공평성을 제공하기 위한 Fig2의 과정에서는 계층적 자원 할당을 위한 기하학적 그룹을 형성하여 각 그룹에 속한 사용자들의 사용자 당 전송용량 (per-user capacity)를 계산한다. 즉, MIWF 영역과 non-MIWF 영역의 사용자들을 구분하게 되는데 MIWF 영역의 전체 용량과 non-MIWF 영역의 전체 용량을 MIWF 영역의 사용자 수와 non-MIWF 영역의 사용자 수로 나누어서 비교를 할 수 있다. 그리고 더 큰 사용자 당 전송용량 (per-user capacity)을 갖는 영역의 서브채널을 더 작은 사용자 당 전송용량

(per-user capacity)을 갖는 영역으로 반복적으로 이동시켜가면서 두 영역의 사용자 당 전송용량 (per-user capacity)의 차이가 특정 임계치보다 작아지도록 조절하는 과정을 거친다. 이를 통해 각 단계마다 c'_{MIWF} 와 c'_{non} 을 비교하여 셀 외곽의 사용자와 셀 중심부의 사용자들의 공평성을 향상시킬 수 있는 반복적인(Iterative) 적응 보상과정을 거친다.

3. 성능분석

본 장에서는 제안 기법의 효율성을 보이기 위한 시스템 레벨의 성능 평가를 수행하였다. 5G Cloud-RAN 네트워크 구조를 반영한 실제적인 협력 네트워크 토폴로지를 고려하였으며 이러한 환경을 MATLAB을 이용하여 구현하고 시뮬레이션 하였다. 첫째로 사용자들의 실제 전송용량의 향상 정도를 보이기 위해 네트워크 용량을 측정하였으며, 또한 네트워크 관점의 공평성 향상 정도를 측정하기 위해 Jain의 공평성 인덱스(Jain's Fairness Index)를 도입하여 네트워크의 사용자 공평성을 측정하였다.

시뮬레이션 환경은 다음과 같다. 사용자가 사용하는 중심주파수는 3.5Ghz를 사용하였으며, 사용 가능한 대역폭(Bandwidth)은 상용 시스템서 사용하는 일반적인 수치를 따라 10MHz로 설정하였다. 또한 사용자의 송신파워는 일반적으로 실제 시스템에서 사용하는 값인 100mW이며 사용자들의 채널 이득값을 모델링하기 위한 채널 모델로는 가장 널리 사용되는 채널모델인 Okumura-Hara 모델을 사용하였다 [6][7]. 협력 네트워크 구조에서는 3개의 기지국과 각 셀 기지국 당 10명의 사용자를 고려하였다. 각 계층적 영역에 속하는 사용자들의 분포가 성능에 영향을 미칠 수 있기 때문에 사용자들의 상대적인 거리에 따른 성능을 분석하였다. 또한, 3개 이상의 다수의 존재하는 환경에서도 각 기지국은 인접한 셀 간에 기하학적인 그룹을 형성하여 동일한 알고리즘을 각자 수행할 수 있다. 5G Cloud RAN 네트워크는 실내 환경에 도입을 고려하고 있는 점을 감안하여 실내 환경의 일반적인 셀 반경인 20m를 기준으로 하였다.

4. 결과 분석 및 고찰

본 제안 방법을 적용한 협력 네트워크 토폴로지 상

에서의 전송용량을 측정하기 위하여 기지국으로부터 사용자의 상대적인 거리를 0.5부터 0.9까지 변경하여 측정을 하였다.

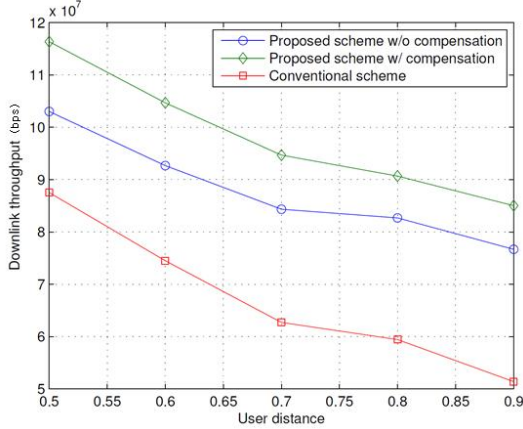


Fig. 3. Network Throughput in the coordinated network topology according to the user distance

Fig. 3에서 사용자 거리(User Distance)는 셀 반경 (20m)을 기준으로 셀 내에서의 기지국으로부터 상대적인 거리를 나타낸다. 즉, 해당 값이 1이면 사용자가 셀의 가장자리 경계 지점에 위치하는 경우이다. Fig. 3에서 보는 바와 같이 제안 기법은 기존의 셀 단위의 자원 할당 방법에 기반하여 기존의 싱글 셀 기반의 자원할당 방법 [1]에 대비하여 전구간에서 우수한 성능을 나타내었다. 이것은 셀 간섭이 심각한 위치에서 중앙집중식 MWF 알고리즘이 성능향상에 기여했기 때문으로 생각할 수 있다. 따라서, 사용자들이 셀의 외곽지역에 위치할수록, 즉 사용자 거리의 값이 커질수록 상대적인 네트워크의 향상도도 증가하는 것을 확인할 수 있다. 성능 평가 결과 이러한 환경에서 최대 40%의 성능이득을 나타내었다.

또한, Table. 1은 네트워크 공평성에 대한 결과를 보여준다. 공평성 향상을 위한 보상 과정을 추가함으로써 전체네트워크의 공평성을 Jain의 공평성 인덱스를 기준으로 하여 23%가 향상이 되었음을 확인하였다. 보상 과정 전과 후의 전체 capacity는 거의 변동이 없었다.

Table. 1. Improvement of network-wise fairness

	Before compensation	After Compensation
Total capacity	9.56E+07	9.15E+07
c'_{MWF} (bps)	1.15E+07	0.94E+07
c'_{non} (bps)	0.87E+07	0.95E+07
Jain's Fairness index	0.748095345	0.919975899

Jain의 공평성 인덱스 μ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\mu(c_1, \dots, c_n) = \frac{(\sum_{i=1}^n c_i)^2}{n \sum_{i=1}^n c_i} \quad (10)$$

n 명의 사용자가 있을 때 i 번째 사용자의 용량을 c_i 라고 정의하면 위의 정의식에 의하여 공평성 인덱스가 1보다 작거나 같은 범위의 값을 갖게 된다. 공평성 인덱스가 1인 경우는 모든 사용자의 용량이 동일한 경우이며, 가장 공평한 경우를 나타낸다. 만약 n 명의 사용자 중 m 의 사용자에게만 균일하게 전송량이 할당되고 나머지 사용자들은 할당받지 못하였다면 Jain의 공평성 인덱스는 $\frac{m}{k}$ 의 값을 갖게 된다.

5. 결론

본 논문에서는 5G 네트워크 구조에 적용할 수 있는 계층적 자원 관리 기법을 제안하고 성능을 평가하였다. 협력 네트워크 구조를 이용하여 네트워크의 스펙트럼 자원은 계층구조를 갖는 2개의 영역으로 구분하여 관리하며, 이 때의 관리 주체는 각각 기지국 컨트롤러와 네트워크 코디네이터가 되며, 이들은 중앙집중식 혹은 분산식 알고리즘을 환경에 맞게 선택적으로 적용한다. 제안 기법은 기존 셀 단위의 자원 관리 기법 대비 네트워크 전체의 성능을 향상 시켰을 뿐만 아니라 네트워크 관의 공평성을 향상시켰으므로 실제 환경에서의 적용 가능성을 더욱 높였다. 성능의 평가를 위해 시스템 레벨의 시뮬레이션을 수행하였다.

REFERENCES

- [1] J. Lee, R. V. Sonalkar & J. M. Cioffi. (2005). A multi-user power control algorithm for digital subscriber lines. *IEEE Communications Letters*, 9(3), 193-195. DOI : 10.1109/LCOMM.2005.030004
- [2] W. Yu, G. Ginis & J. M. Cioffi. (2002). Distributed multiuser power control for digital subscriber lines. *IEEE Journal on Selected areas in*

Communications, 20(5), 1105-1115.
DOI : 10.1109/JSAC.2002.1007390

- [3] W. Yu. (2007). Multiuser water-filling in the presence of crosstalk. In *2007 Information Theory and Applications Workshop* (pp. 414-420). IEEE.
- [4] V. Jungnickel, K. Manolakis, W. Zirwas, B. Panzner, V. Braun, M. Lossow & T. Svensson. (2014). The role of small cells, coordinated multipoint, and massive MIMO in 5G. *IEEE communications magazine*, 52(5), 44-51.
DOI : 10.1109/MCOM.2014.6815892
- [5] P. K. Agyapong, M. Iwamura, D. Staehle, W. Kiess & A. Benjebbour. (2014). Design considerations for a 5G network architecture. *IEEE Communications Magazine*, 52(11), 65-75.
DOI : 10.1109/MCOM.2014.6957145
- [6] Y. Okumura. (1968). Field strength and its variability in VHF and UHF land-mobile radio service. *Rev. Electr. Commun. Lab.*, 16, 825-873.
- [7] M. Hata. (1980). Empirical formula for propagation loss in land mobile radio services. *IEEE transactions on Vehicular Technology*, 29(3), 317-325.
- [8] J. Tang, T. Q. Quek, T. H. Chang & B. Shim. (2019). Systematic resource allocation in cloud RAN with caching as a service under two timescales. *IEEE Transactions on Communications*, 67(11), 7755-7770.
DOI : 10.1109/TCOMM.2019.2934854
- [9] S. Mosleh, L. iu, J. D. shdown, E. errins & K. Turck. (2019). Content-based user association and MIMO operation over cached Cloud-RAN networks. *arXiv preprint arXiv:1906.11318*.
- [10] L. Gavrilovska, V. Rakovic & D. Denkovski. (2020). From Cloud RAN to Open RAN. *Wireless Personal Communications*, 113, 1523-1539.
DOI : 10.1007/s11277-020-07231-3
- [11] A. K. Bashir, R. Arul, S. Basheer, G. Raja, R. Jayaraman & N. M. F. Qureshi. (2019). An optimal multitier resource allocation of cloud RAN in 5G using machine learning. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, 30(8), e3627.
- [12] S. Matoussi, I. Fajjari, N. Aitsaadi, R. Langar & S. Costanzo. (2019). Joint Functional Split and Resource Allocation in 5G Cloud-RAN. In *ICC 2019-2019 IEEE International Conference on Communications (ICC)* (pp. 1-7). IEEE.

조오현(Ohyun Jo)

[정회원]



- 2005년 2월 : 한국과학기술원 전기 및전자공학(학사)
- 2007년 8월 : 한국과학기술원 전기 및전자공학(석사)
- 2011년 2월 : 한국과학기술원 전기 및전자공학(박사)

- 2011년 4월 ~ 2016년 2월 : 삼성전자 DMC 연구소
- 2016년 3월 ~ 2017년 7월 : 한국전자통신연구원
- 2017년 8월 ~ 2018년 2월 : 육군사관학교 조교수
- 2018년 3월 ~ 현재 : 충북대학교 소프트웨어학과 조교수
- 관심분야 : IoT 융합, 정보통신 및 네트워크, 기계학습
- E-Mail : ohyunjo@chungbuk.ac.kr