

차세대 무선 통신 네트워크 연구 동향

박 윤 수¹ · 이 기 성² · 박 동 회³ · 신 예 성³ · 박 호 현^{4*}

¹MKS 특허경영 전문위원

²중앙대학교 인공지능인문학연구소 조교수

³중앙대학교 전자전기공학과 연구원

⁴중앙대학교 전자전기공학부 교수

Research Trends for Next-generation Radio Access Networks

Younsoo Park¹ · Kiseong Lee² · Donghee Park³ · Yeseong Shin³ · Ho-Hyun Park^{4*}

¹Research Fellow, More than Korean Standard (MKS) Patent Management, Seoul 06800, Korea

²Assistant Professor, AI Humanities Research Institute, Chung-Ang University, Seoul 06974, Korea

³Researcher, Department of Electrical and Electronics Engineering, Chung-Ang University, Seoul 06974, Korea

⁴Professor, Department of Electrical and Electronics Engineering, Chung-Ang University, Seoul 06974, Korea

[요 약]

무선 접속 네트워크(RAN; Radio Access Networks)는 이동 통신의 핵심 개념으로, 사용자 단말(UE; User Equipment)을 코어 네트워크(CN; Core Network)로 연결하는 네트워크를 의미한다. 네트워크 트래픽이 급격하게 증가함에 따라서 이를 수용하기 위한 차세대 무선 통신 기술의 수요가 증가하고 있다. 특히, 가상화와 클라우드 기반 서비스, 지능형 기술의 도입 등을 통해 네트워크 리소스를 최적화하고, 효율성과 신뢰성, 처리 성능을 개선하기 위한 기술 수요가 증가하였다. 이에 2018년 O-RAN Alliance가 설립되었고, 이후로 차세대 네트워크에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 그러나 아직까지 국내에서는 O-RAN에 대한 소수의 연구만 확인된다. 이에 본 연구에서는 WoS(Web of Science)에서 RAN과 관련된 연구 문헌의 키워드를 추출하여 네트워크 분석을 수행하였고, O-RAN의 지능형 요소인 RIC(RAN Intelligent Controller) 연구 사례를 리뷰하였다.

[Abstract]

Radio access networks (RANs), referring to networks that connect user equipment (UE) to a core network (CN), are core concepts in mobile communications. With the rapid increase in network traffic, the demand for next-generation wireless communication technologies to accommodate this growth has been rising. There is a growing need to optimize network resources and enhance efficiency, reliability, and processing performance through virtualization, cloud-based services, and intelligent technologies. In response to these demands, the O-RAN Alliance was established in 2018, and research on next-generation networks has been actively conducted. However, only a limited number of studies on O-RAN have been identified in Korea. In this study, we extracted keywords from research literature related to RANs from the Web of Science (WoS) for network analysis and reviewed research cases on the RAN Intelligent Controller (RIC), which is an intelligent component of O-RAN.

색인어 : 개방 무선 접속 네트워크, 연구 동향, 키워드 분석, 5G 네트워크, 6G 네트워크

Keyword : Open Radio Access Networks, Research Trends, Keyword Analysis, 5G Networks, 6G Networks

<http://dx.doi.org/10.9728/dcs.2025.26.3.799>



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 05 January 2025; **Revised** 03 February 2025

Accepted 13 March 2025

***Corresponding Author; Ho-Hyun Park**

Tel: +82-2-820-5345

E-mail: hohyun@cau.ac.kr

1. 서론

대규모 온라인 동영상 서비스, 소셜 네트워크 서비스 플랫폼의 활성화, 그리고 인공지능, 확장현실, 자동화, 디지털 트윈 등 기술 혁신으로 인해 전 세계적으로 인터넷 트래픽이 폭발적으로 증가하는 추세이다. 대표적으로, 2023년의 전 세계 인터넷 트래픽은 2022년 대비 23% 증가했으며, 2030년까지 연평균 22~25% 성장할 것으로 전망된다[1],[2]. 이에 따라 차세대 네트워크는 보다 많은 데이터 트래픽을 수용하고, 효율성을 향상하는 한편, 밴드 종속성을 제거하고, 구축과 운영 비용을 최소화할 수 있는 기술 개발이 요구되고 있다. O-RAN (open radio access network)은 이와 같은 수요를 충족할 수 있는 개념으로, 2020년대 후반 또는 2030년으로 예상되는 6G 상용화를 위한 핵심 기술이다.

O-RAN은 개방형 아키텍처, 가상화, 클라우드 기반의 서비스와 인공지능 기반의 서비스를 지향하는 차세대 네트워크 개념이다[3]. O-RAN은 밴드 종속성을 제거함으로써 네트워크 구축 및 운영의 비용 효율성을 향상하고, 지능형 구성요소의 도입을 통해 네트워크 자원의 효율성을 개선하기 위한 기술 개발이 이루어지고 있다.

O-RAN의 주요 구성요소는 SMO (service management orchestration) 프레임워크와 RIC (RAN intelligent controller), O-CU (O-RAN central unit), O-DU (O-RAN distributed unit), O-RU (O-RAN radio unit), O-Cloud (O-RAN cloud)와 이들을 연결하는 인터페이스로 구성된다(그림 1)[4]. 그림 1은 O-RAN Alliance에서 명시하고 있는 O-RAN의 아키텍처로, O-RAN 서비스의 핵심 구성요소와 인터페이스를 설명하고 있다.

O-Cloud는 클라우드 기반의 컴퓨팅 플랫폼을 서비스하는 구성요소로, RIC, O-CU, O-DU와 같은 기능을 호스팅 한다[3]. O-CU와 O-DU는 3GPP 표준의 NG-RAN (next generation RAN)으로부터 파생된 구성요소이다.

O-CU는 제어 평면(O-CU-CP; O-RAN central unit control plane)과 사용자 평면(O-CU-UP; O-RAN central unit user plane)으로 분리된다. O-CU-CP는 RRC (radio resource control)와 PDCP (packet data convergence protocol)의 제어 평면 부분을 호스팅 하는 논리적 노드로, 연결 설정, 핸드오버, QoS (quality of service) 정책, 보안 기능 등 네트워크 연결 제어 및 관리 기능을 제공한다[5]. O-CU-UP는 PDCP와 SDAP (service data adaptation protocol)의 사용자 평면 부분을 호스팅 하는 논리적 노드로, 사용자 데이터 암호화, 재정렬, 중복 제거, 데이터 흐름관리 등 사용자 데이터 트래픽 처리 기능을 제공한다[5]. 결과적으로, O-CU는 제어 평면과 사용자 평면으로 분리되어 프로토콜을 관리하고, 네트워크 연결 관리, 트래픽 관리 및 QoS 등을 담당하는 O-RAN의 구성요소이다.

O-RU는 저레벨 물리 계층(low-physical layer)과 무선

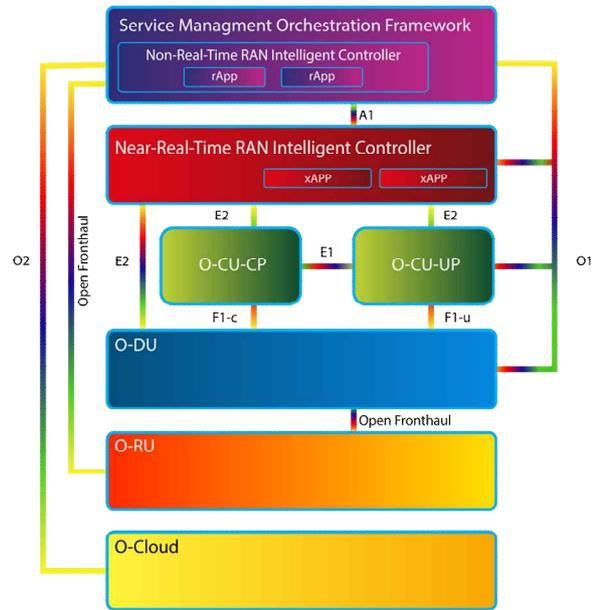


그림 1. O-RAN 아키텍처
Fig. 1. O-RAN architecture

주파수 처리 기능을 제공하는 논리적 노드로, 3GPP의 TRP (transmission reception point), RRH (remote radio head)와 유사하지만, 저레벨 물리 계층에 대한 기능을 보다 광범위하게 포함하는 구성요소이다[5].

O-DU는 하위 계층 기능 분할을 기반으로 RLC (radio link control), MAC, 고수준 물리 계층(high physical layer)을 호스팅 하는 논리적 노드이다. O-DU는 O-CU와 O-RU를 연결하는 중간 구성요소 기능을 제공하고, Fronthaul 인터페이스 관리, 실시간 데이터 처리, 자원 관리 기능을 제공하는 핵심 구성요소이다[5].

RIC는 근실시간 RIC (near-real time RIC)와 비실시간 RIC (non-real time RIC)로 구분되는 지능형 구성요소로, 비실시간 RIC는 SMO 프레임워크에 내재화되어 있다. 근실시간 RIC는 E2 인터페이스를 통해 세분화된 데이터 수집과 작업을 수행하고, O-RAN의 구성요소와 자원을 제어 및 최적화한다[5]. 비실시간 RIC는 구성요소(element)와 자원(resource)의 제어 및 최적화(optimization), 모델 학습 및 업데이트를 포함하는 AI/ML 워크플로우(AI/ML workflow including model training and updates), 애플리케이션 기능에 대한 정책 기반 가이드 제공(policy-based guidance of applications/features in near-RT RIC) 등의 기능을 제공하는 구성요소이다[5]. rAPP은 비실시간 RIC에서 실행되는 애플리케이션을 의미하며, xApp은 근실시간 RIC에서 실행되는 애플리케이션으로, 독립적인 소프트웨어이다[5].

SMO 프레임워크는 O-RAN의 네트워크 관리와 서비스 오케스트레이션을 담당하는 핵심 구성요소로, 네트워크 관리, 자원 할당 기능을 제공한다[5].

O-RAN의 구성요소를 연결하는 인터페이스는 A1, E1,

E2, F1 (F1-c, F1-u), O1, O2, Open Fronthaul (O-FH)로, 3GPP와 호환 가능하도록 설계되었으며, 벤더 종속성을 제거하기 위한 목적으로 논의되고 있는 O-RAN의 핵심 구성 요소이다[3]. O1 인터페이스는 근실시간 RIC, O-CU-UP, O-DU, SMO 프레임워크를 연결하여 네트워크 기능 관리 및 오케스트레이션을 지원하는 인터페이스고, O2 인터페이스는 SMO 프레임워크와 O-Cloud를 연결하는 인터페이스이다. E1 인터페이스는 O-CU-CP와 O-CU-UP를 연결하는 인터페이스고, E2 인터페이스는 근실시간 RIC를 O-CU와 O-DU에 연결하여 원격으로 트래픽을 모니터링하고, 근실시간 제어를 가능하게 하는 인터페이스이다. A1 인터페이스는 근실시간 RIC와 비실시간 RIC를 연결하여 RIC의 정책, 가이드라인, 모델 배포 등을 지원하고, O-FH는 SMO 프레임워크와 O-RU, O-RU와 O-DU를 연결하는 인터페이스이다.

O-RAN은 O-RAN Alliance를 비롯한 다수의 기관에 의해 체계적이고 구체적으로 검증 및 개발이 이루어지고 있다. 구체적으로 O-RAN의 개발은 O-RAN Alliance가 주도하고, 3GPP (3rd Generation Partnership Project), ETSI (European Telecommunications Standards Institute), ITU (International Telecommunication Union), TIP (Telecom Infra Project), IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), NGMN (Next Generation Mobile Networks) Alliance와 같은 국제 표준화 기관을 비롯하여 다수의 산업체, 대학 및 연구소가 참여하고 있다 [5]-[11].

O-RAN Alliance는 기술 작업 그룹(WG; technical Work Groups), 포커스 그룹(FG; focus groups), 연구 그룹(RG; research groups)으로 기능과 역할을 분리하여 기술 개발을 주도하고 있다. 이에 O-RAN Alliance에서 정의한 그룹별 기능을 표 1에 정리하였다[4].

세계적으로 O-RAN에 대한 연구개발이 활발하게 이루어지고 있다. 2024년 기준 국내에서도 주요 전기통신사업자 3사가 O-RAN Alliance의 이사회원(operator member)으로 활동하고 있으며, 연구기관도 학술적으로 기여하고 있다 [12]. 이에 따라, 다수의 콘퍼런스와 전문학술지에 O-RAN 관련 연구가 발표되고 있다. 반면, 국내에서는 아직까지 출연 연구소와 대학을 중심으로 소수의 연구 문헌만이 확인된다.

이에 본 연구에서는 해외 O-RAN을 비롯한 5G 및 6G RAN 연구 동향을 분석하고, 그중에서도 O-RAN 연구 문헌을 리뷰함으로써 국내 O-RAN 연구자들에게 새로운 인사이트를 제공하고자 한다. 이를 위해 WoS (web of science)에서 ‘Open Radio Access Network’, ‘5G Radio Access Network’, ‘6G Radio Access Network’를 키워드로 선정하여 검색하였고, 각각 513건, 6,692건, 1,159건의 문헌 정보를 확보하였다[13]. 해당 문헌 정보 중 언어(language) 필드가 영어(English)로 작성된 저널 또는 콘퍼런스에서 발표된 문헌 중 키워드가 존재하는 문헌 정보를 추출한 결과, 각각 441건, 5,755건, 1,056건이 확인되었다. 해당 문헌 정보

표 1. O-RAN의 기술 작업 그룹(WG), 포커스 그룹(FG), 연구 그룹(RG)의 기능

Table 1. Functions of O-RAN's technical work groups (WGs), focus groups (FGs), and research group (RG)

Groups	Functions
WG1	Use Cases and Overall Architecture Work Group
WG2	The Non-Real-Time RAN Intelligent Controller and A1 Interface Work Group
WG3	The Near-Real-Time RIC and E2 Interface Work Group
WG4	The Open Fronthaul Interfaces Work Group
WG5	The Open F1/W1/E1/X2/Xn Interface Work Group
WG6	The Cloudification and Orchestration Work Group
WG7	The White-box Hardware Work Group
WG8	Stack Reference Design Work Group
WG9	Open X-haul Transport Work Group
WG10	OAM Work Group
WG11	Security Work Group
SDFG	Standard Development Focus Group
IEFG	Industry Engagement Focus Group
OSFG	Open Source Focus Group
TIFG	Testing and Integration Focus Group
SuFG	Sustainability Focus Group
nGRG	next Generation Research Group

로부터 키워드를 추출하고, 키워드 네트워크 분석을 수행함으로써 최신 RAN 연구개발 동향을 고찰하였다. 또한, 분석 결과를 바탕으로 O-RAN의 지능형 구성요소인 RIC에 대한 연구 사례를 리뷰함으로써 O-RAN 연구자와 개발자들에게 인사이트를 제공하는 것을 목표로 연구를 수행하였다.

본 연구를 수행하기 위해 II절에서는 연구 방법과 데이터 분석 방법에 대해서 고찰한다. III절에서는 O-RAN, 5G RAN, 6G RAN 키워드로 검색된 결과에 대해서 키워드 네트워크 분석을 수행하고, 결과를 고찰한다. IV절에서는 III절에서 분석한 결과를 참고하여 RIC 연구 사례를 중심으로 리뷰하고, 5절에서는 국내 O-RAN 연구가 추구해야 할 방향성에 대해서 고찰한다.

II. 연구 방법

본 연구는 O-RAN, 5G RAN, 6G RAN 등 차세대 네트워크와 관련된 핵심 기술에 대한 해외 연구 동향을 분석하고, 국내 연구자와 개발자들에게 새로운 인사이트를 제공하는 것을 목표로 한다. II절에서는 WoS가 제공하는 문헌 정보를 확보하고, 해당 문헌 정보로부터 추출한 키워드에 대하여 네트워크 분석을 수행함으로써 차세대 네트워크 연구의 키워드를 분석하고자 한다(그림 2).

데이터 확보를 위해 연구 문헌을 검색할 키워드를 ‘Open

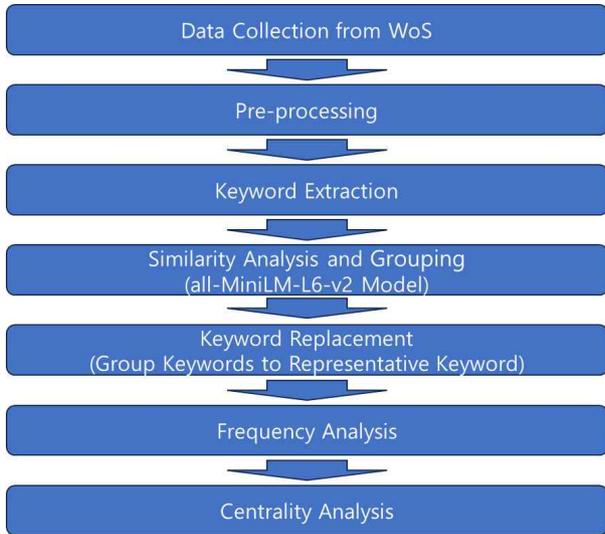


그림 2. 연구 방법
Fig. 2. Research methods

Radio Access Network’, ‘5G Radio Access Network’, ‘6G Radio Access Network’로 선정하였고, 해당 키워드로 WoS에서 O-RAN, 5G RAN, 6G RAN 관련 연구 문헌을 검색하였다.

검색된 문헌 정보에서 학술 연구 동향을 분석하기 위해 저널 또는 컨퍼런스에 출판되었거나 출판 예정인 연구 문헌으로 범위를 한정하였고, 키워드가 확인되지 않는 연구 문헌은 제외하였다. 그 결과, O-RAN, 5G RAN, 6G RAN 관련 문헌 정보를 각각 441건, 5,755건, 1,056건 추출하였다. O-RAN은 O-RAN Alliance가 출범한 2018년 이후 집중적으로 연구되어 온 점을 고려할 시 상대적으로 5G RAN과 6G RAN 연구 문헌보다 그 수가 적은 편이다.

해당 연구 문헌 데이터는 Author Keywords 컬럼과 Keywords Plus 컬럼에 키워드를 포함하고 있다. 다만, Keywords Plus 컬럼은 일부 튜플만 키워드를 포함하고 있어 분석에 사용하기 어렵다고 판단하였다. 이에 Author Keywords 컬럼을 대상으로 분석하였다. 해당 컬럼은 키워드가 콤마(,) 또는 세미콜론(;)으로 구분되어 있고, 일부 문헌의 키워드는 방점(.)으로 구분된 경우도 있다. 다만, 키워드가 방점을 포함하는 경우도 있으므로, 방점을 구분자로 사용할 수 없다. 따라서 키워드의 구분은 콤마와 세미콜론으로 하고, 방점으로 구분된 경우에는 직접 수정하였다. 분석 작업은 Ubuntu 22.04 버전의 Python 3.12 환경에서 수행하였다.

Author Keywords 컬럼에서 키워드를 추출하고, 이를 바탕으로 키워드 네트워크 분석을 수행하기 위해서는 연구 문헌별로 고유번호가 부여되어야 한다. 따라서 연구 문헌별로 고유번호를 부여하고, 추출된 키워드와 함께 <연구 문헌의 고유번호, 키워드> 쌍으로 추출하였다.

상기의 과정으로 추출된 영문 키워드는 대문자와 소문자가 혼용되어 표기되거나 소문자만으로 표기된 경우, 대문자만으로

Keywords Network Graph ordered by Degree Centrality

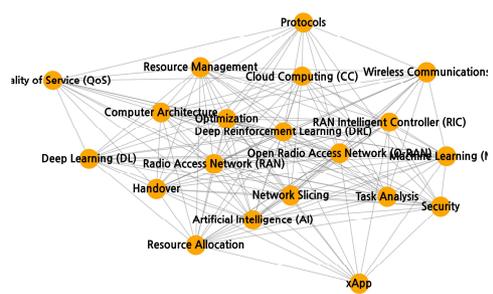


그림 3. 키워드 네트워크 그래프 예시
Fig. 3. Example of Keyword Network Analysis Results

표현된 경우, 약어로 표현된 경우 등 동일하거나 유사한 개념을 표현하는 데 있어서 일관성이 유지되지 않는 문제점이 있다. 이에 키워드 간 유사성을 분석하고, 그룹화한 후 해당 키워드들을 대표 키워드 한 개로 통일하는 과정이 필요하다.

상기 서술된 일관성 문제를 해결하기 위해 본 연구에서는 all-MiniLM-L6-v2 모델을 사용하였다[14]. all-MiniLM-L6-v2 모델은 Sentence Transformers 라이브러리의 사전 학습된 언어 모델 중 하나로, 영문 키워드 간 의미적 유사도 분석 성능이 우수하고, 경량화된 모델이며, 사용 편의성 등의 이점이 있기 때문에 주로 텍스트 유사도 계산, 클러스터링 등의 작업에 활용된다. 다만, 해당 모델은 한글 키워드를 처리하기에는 정확도가 낮아 적합하지 않은 것으로 알려져 있다.

이를 참고하여 <대표 키워드, 그룹화된 키워드 리스트> 형태로 표현하는 프로그램을 작성하였다. 이 과정은 일부 자동화가 가능하지만, 유사도가 높은 키워드라 하더라도 동일한 개념을 의미하지 않는 단어가 동일 그룹으로 묶일 수 있다. 한편, 하나의 그룹으로 병합된 키워드 중 대표 키워드의 선정은 분석 과정에서 가장 먼저 그룹으로 포함된 키워드가 포함되도록 프로그램을 작성하였다. 여기서 그룹을 판단하는 기준은 코사인 유사도 0.9 이상으로 하였다[14].

이와 같이 표현된 <대표 키워드, 그룹화된 키워드 리스트>의 예시는 <Anomaly Detection, Anomaly Detection, Anomaly detection, anomaly detection>의 형태로 표현된다. 해당 리스트에서 가장 앞에 위치한 Anomaly Detection 키워드가 대표 키워드이며, 이후 이어지는 Anomaly Detection 키워드부터 anomaly detection까지가 그룹화된 키워드를 의미하도록 프로그램을 작성하였다.

키워드 간 유사도 계산을 통한 그룹화 이후로는 대응되는 키워드를 대표 키워드로 대체하는 작업을 수행하고, 빈도수와 중심성을 분석하였다. 빈도수 분석과 중심성 분석 방법은 논문 주제 분석, 연구 동향 분석, 마케팅 분석, 미디어 콘텐츠 분석, 소셜 네트워크 분석 등의 분야에서 활용되는 분석 방법으로, 데이터가 포함하고 있는 핵심 주제와 키워드를 추출하고,

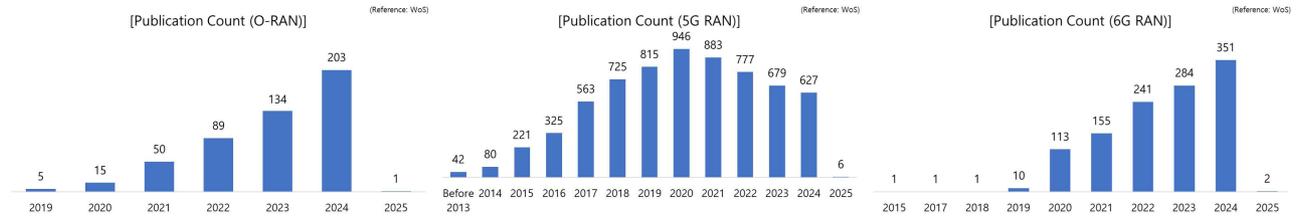


그림 4. 키워드별 연간 출판 문헌수 집계 결과 (O-RAN, 5G RAN, 6G RAN)
Fig. 4. Annual publication counts by keyword (O-RAN, 5G RAN, 6G RAN)

이를 바탕으로 한 키워드 간 관계를 시각화하기 위한 분석 기술이다.

키워드 네트워크 분석에서 중심성 분석은 단어 간 관계와 핵심 키워드를 파악하기 위한 분석 방법으로, 중심성 분석을 위해서는 키워드를 노드(node)와 엣지(edge)로 구성된 네트워크 그래프로 표현해야 한다. 예를 들어, 그림 3에서 네트워크 그래프에서 키워드는 노드로 표현되고, 연구 문헌의 고유 번호가 동일한 문헌에서 특정 키워드 A와 B가 존재할 때 키워드 A와 B의 연결이 있는 것으로 판단하여, 이를 그림 3에서 표현된 선(line)과 같이 엣지로 표현한다.

중심성 분석은 연결중심성(degree centrality), 매개중심성(betweenness centrality), 근접중심성(closeness centrality), 위세중심성(eigenvector centrality) 분석을 통해 키워드 간 관계를 파악한다.

연결중심성은 하나의 키워드를 담고 있는 노드가 다른 노드와 연결된 연결의 수를 기준으로 산출하는 지표이다. 연결중심성의 산출은 해당 노드가 가진 연결의 수를 전체 연결의 수로 나누어 산출하며, 0~1 사이의 값을 가진다.

매개중심성은 노드가 포함하고 있는 정보의 흐름을 증가하거나 중간자 노드로써 연결하는 수준을 표현하는 지표이다. 네트워크 그래프상 어떤 노드 A와 B 사이에 존재하는 최단 경로 중 특정 노드 C가 포함된 비율을 의미한다. 따라서 매개중심성의 계산은 특정 노드 C가 포함된 최단경로의 수를 전체 최단 경로의 수로 나누어서 산출한다. 여기서 어떤 노드 A와 B는 키워드 네트워크로 표현되는 모든 노드를 의미한다.

근접중심성은 특정 노드가 키워드 네트워크상 존재하는 모든 노드와의 거리 평균으로 산출하는 지표이다.

연결중심성은 하나의 노드에 연결된 연결의 수를 바탕으로 산출하지만, 위세중심성은 연결된 노드의 영향력까지 반영한 지표로, 연결중심성과 마찬가지로 특정 노드가 가진 연결의 수가 많다면 위세중심성도 증가한다. 그러나 어떤 노드 A와 B에 연결된 연결의 수가 같다면 연결중심성은 동일하게 산출될 수 있지만, 연결된 노드의 영향력에 따라서 위세중심성은 다르게 나타날 수 있다.

III. 키워드 네트워크 분석

WoS에서 O-RAN, 5G RAN, 6G RAN 키워드로 검색한

결과를 연도별로 집계하여 그림 4에 표현하였다.

O-RAN 키워드로 2024년 12월 5일 검색 기준 검색한 결과, 2019년 5건을 시작으로, 2020년 15건, 2021년 50건으로 빠르게 증가하였고, 2024년 203건, 2025년은 Early Access 1건이 출판되었다.

5G RAN 키워드로 검색한 결과는 2013년 이전에는 42건의 문헌이 출판되었고, 2014년 80건을 시작으로 2020년 946건까지 급격히 증가하였다. 이후 2021년 883건을 시작으로 2024년 627건까지 지속 감소했으며, 2025년은 Early Access 6건이 출판되었다.

6G RAN 키워드로 검색한 결과는 2015년, 2017년, 2018년 각각 1건씩 출판되었고, 2019년 10건을 시작으로 2020년 113건, 2024년 351건까지 증가하였으며, 2025년은 Early Access 2건이 출판되었다.

상기 3개 키워드 관련 문헌의 출판 현황을 고려할 시 5G RAN 관련 연구 문헌은 2020년 이후로 감소하고 있고, 2019년부터 O-RAN과 6G RAN 관련 문헌의 출판수가 증가하고 있다.

O-RAN과 5G RAN, 6G RAN 키워드에 대한 빈도수 분석 결과를 <표 2>, <표 3>, <표 4>에 나열하였다. 전처리 과정에서 O-RAN 키워드 관련 문헌으로부터 441건의 문헌에 대해서 2,274건의 키워드를 추출하였고, 5G RAN 키워드 관련 문헌으로부터 5,755건의 문헌에 대해서 29,697건의 키워드를 추출하였다. 6G RAN 키워드 관련 문헌으로부터는 1,056건의 문헌에 대해서 6,603건의 키워드를 추출하였다.

O-RAN과 5G RAN, 6G RAN 키워드 관련 문헌에서 공통으로 빈도수가 높은 키워드는 Artificial Intelligence (AI), Computer Architecture, Deep Learning (DL), Deep Reinforcement Learning (DRL), Internet of Things (IoTs), Machine Learning (ML), Network Slicing, Open Radio Access Network (O-RAN), Optimization, Quality of Service (QoS), Radio Access Network (RAN), Resource Allocation, Resource Management로 분석되었다.

Artificial Intelligence (AI), Deep Learning (DL), Machine Learning (ML) 키워드는 네트워크 관리, 네트워크 트래픽 모니터링 및 예측, 네트워크 자원관리 및 최적화 기술 관련 키워드이고, Deep Reinforcement Learning (DRL) 키워드는 네트워크 슬라이싱, 주파수 스펙트럼 할당, 최적화 등에 활용되는 기술 관련 키워드이다. 즉, 기계 학습, 인공지능,

표 2. 빈도수 분석 결과 (O-RAN)

Table 2. Results of frequency analysis (O-RAN)

Keywords	Count	Keywords	Count
Open Radio Access Network (O-RAN)	118	Ultra-reliable and Low Latency Communications (URLLC)	16
Deep Reinforcement Learning (DRL)	65	Federated Learning (FL)	16
Radio Access Network (RAN)	49	Cloud Computing (CC)	16
Computer Architecture	47	Handover	14
Network Slicing	46	Task Analysis	14
Machine Learning (ML)	46	Deep Learning (DL)	13
Artificial Intelligence (AI)	40	Virtualized RAN (vRAN)	13
Resource Management	38	Unmanned Aerial Vehicles (UAV)	12
RAN Intelligent Controller (RIC)	37	Virtualization	12
Resource Allocation	31	Protocols	12
Optimization	31	Functional Split	11
Security	30	Network Function Virtualization (NFV)	10
xApp	27	Servers	10
Quality of Service (QoS)	20	Digital Twin	10
Energy Efficiency	17	Internet of Things (IoTs)	10

표 3. 빈도수 분석 결과 (5G RAN)

Table 3. Results of frequency analysis (5G RAN)

Keywords	Count	Keywords	Count
Radio Access Network (RAN)	465	Long Term Evolution (LTE)	196
Network Slicing	351	Software Defined Networks (SDNs)	188
Resource Management	322	Massive MIMO	155
Millimeter Wave (mmWave)	312	Fronthaul (FH)	151
Internet of Things (IoTs)	301	Throughput	151
Resource Allocation	301	Computer Architecture	148
Quality Of Service (QoS)	290	Interference	140
Machine Learning (ML)	244	Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)	135
Energy Efficiency (EE)	243	New Radio (NR)	125
Deep Reinforcement Learning (DRL)	241	Heterogeneous Networks	123
Cloud Radio Access Network (Cloud RAN)	239	Open Radio Access Network (O-RAN)	122
Wireless Communication	239	Beamforming	120
Cognitive Radio (CR)	215	Radio Frequency (RF)	117
Optimization	211	Spectrum Sharing	115
Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA)	203	Artificial Intelligence (AI)	115

표 4. 빈도수 분석 결과 (6G RAN)

Table 4. Results of frequency analysis (6G RAN)

Keywords	Count	Keywords	Count
Resource Management	102	Security	49
Radio Access Network (RAN)	93	Network Slicing	47
Wireless Communication	84	Resource Allocation	41
Machine Learning (ML)	82	Cognitive Radio (CR)	37
Internet of Things (IoTs)	76	Throughput	36
Artificial Intelligence (AI)	69	Deep Learning (DL)	34
Deep Reinforcement Learning (DRL)	68	Unmanned Aerial Vehicle (UAV)	33
Radio Frequency (RF)	63	Reliability	33
Optimization	62	Sensor	32
Quality Of Service (QoS)	61	Uplink	32
Millimeter Wave (mmWave)	59	Reconfigurable Intelligent Surface (RIS)	32
Computer Architecture	55	Wireless Networks	32
Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA)	55	Interference	30
Energy Efficiency (EE)	51	Ultra-Reliable Low-Latency Communication (URLLC)	29
Open Radio Access Network (O-RAN)	50	Terahertz (THz)	27

강화 학습 관련 키워드 빈도수가 높은 점은 Network Slicing, Optimization, Resource Allocation, Resource Management 키워드의 빈도수가 높은 점을 설명한다.

한편, Quality of Service (QoS) 키워드의 빈도수가 높은 점은 RAN 관련 일부 연구가 서비스 품질에 집중되어 있음을 의미한다.

지능형 IoTs는 기존 IoT에 인공지능, 블록체인, 에지 컴퓨팅, 양자 통신, 촉각 인터넷 등의 기술이 융합을 넘어 퓨전된 기술이라 할 수 있다[15]. Internet of Things (IoT) 키워드 빈도수가 높은 점은 일부 연구가 차세대 네트워크에서 지능형 IoTs와 같이 IoTs를 지원하기 위한 기술 개발에 대해서 다루고 있기 때문으로 풀이된다.

그 외에도 Energy Efficiency (EE), Reliability, Security, Throughput 키워드의 빈도수가 높은 것으로 분석되었다. 상기 키워드는 성능을 의미하는 키워드로, 이들의 빈도수가 높은 것으로 분석된 점은 상당수의 연구 문헌에서 목표하는 것이 에너지 효율성, 서비스 품질과 관련된 신뢰성, 보안성과 처리량을 주제로 하고 있음을 의미한다.

상기 연구 문헌에 대한 중심성 분석 결과, 모든 키워드에 대한 분석 결과를 하나씩 나열하기는 어려운 편이다. 이에 각 중심성 분석 결과 중 중요도가 높은 것으로 분석된 상위 10개 키워드만 요약하였다.

O-RAN 관련 연구 문헌으로부터 중복을 제거하여 949건의 키워드를 추출하였다. 이에 대한 연결중심성 분석 결과, 평균은 0.0130으로 분석되었고, Open Radio Access Network (O-RAN) 0.3064, Computer Architecture 0.2298, Radio Access Network (RAN) 0.1872, Resource Management 0.1862, Machine Learning (ML) 0.1777, Network Slicing 0.1723, Optimization 0.1702, Artificial Intelligence (AI) 0.1681, Deep Reinforcement Learning (DRL) 0.1617, Security 0.1149 순으로 분석되었다. 이는 네트워크 아키텍처, 자원 관리 관련 키워드와 인공지능 관련 키워드의 연결중심성이 높은 점을 의미하며, 상당수 연구에서 해당 키워드를 주제로 연구하고 있거나 간접적으로 관련이 있는 연구를 수행하고 있음을 의미한다.

매개중심성 분석 결과, 평균은 0.0016이고, Open Radio Access Network (O-RAN) 0.1915, Computer Architecture 0.0884, Radio Access Network (RAN) 0.0827, Deep Reinforcement Learning (DRL) 0.0704, Machine Learning (ML) 0.0703, Network Slicing 0.0616, Optimization 0.0560, Artificial Intelligence (AI) 0.0521, Resource Management 0.0455, RAN Intelligent Controller (RIC) 0.0402 순으로 분석되었다. 연결중심성 분석 결과와 대부분 일치하지만, O-RAN의 주요 구성요소인 RIC의 매개중심성이 높은 점은 RIC를 매개로 한 O-RAN 연구가 적지 않다는 것을 의미한다. 따라서 RIC를 직접 연구하지 않더라도 O-RAN의 다른 구성요소 또는 성능을 연구함에 있어서 RIC를 매개로 한 연구가 수행될 가능성이 높다.

근접중심성 분석 결과, 평균은 0.3063이고, Open Radio Access Network (O-RAN) 0.5326, Computer Architecture 0.4986, Radio Access Network (RAN) 0.4859, Network Slicing 0.4805, Resource Management 0.4802, Machine Learning (ML) 0.4776, Artificial Intelligence (AI) 0.4750, Optimization 0.4707, Deep Reinforcement Learning (DRL) 0.4679, RAN Intelligent Controller (RIC) 0.4618 순으로 분석되었다. 연결중심성, 매개중심성 분석결과와의 큰 차이점은 보이지 않는다.

위세중심성 분석 결과, 평균은 0.0179이고, Open Radio Access Network (O-RAN) 0.2608, Computer Architecture 0.2216, Resource Management 0.2020, Radio Access Network (RAN) 0.1894, Optimization 0.1800, Network Slicing 0.1788, Artificial Intelligence (AI) 0.1742, Deep Reinforcement Learning (DRL) 0.1700, Machine Learning (ML) 0.1680, RAN Intelligent Controller (RIC) 0.1332 순으로 분석되었다. 앞서 분석한 중심성 분석 결과와 큰 차이점을 보이지는 않지만, 연결중심성에서는 등장하지 않았던 RIC 관련 키워드의 중요도가 높은 것으로 분석되었다. 즉, RIC 키워드와 연결된 키워드는 상대적으로 중요도가 높고, RIC와 연결된 키워드의 중요도까지 고려했을 때, RIC는 O-RAN 연구에 있어서 핵심 키워드로 판단할 수 있다.

5G RAN 관련 연구 문헌으로부터 중복을 제거하여 8,093건의 키워드를 추출하였다. 이에 대한 연결중심성 분석 결과, 평균은 0.0021이고, Radio Access Network (RAN) 0.1509, Wireless Communication 0.1133, Internet of Things (IoT) 0.1128, Millimeter Wave (mmWave) 0.1052, Quality Of Service (QoS) 0.0998, Resource Management 0.0996, Long Term Evolution (LTE) 0.0939, Machine Learning (ML) 0.0918, Resource Allocation 0.0845, Energy Efficiency (EE) 0.0802 순으로 분석되었다. IoTs의 연결중심성이 높은 점은 5G 관련 연구에 있어서 IoTs를 지원하기 위한 네트워크 기술 개발 관련 주제가 상당수 존재하기 때문으로 해석할 수 있다. 그 외에도 O-RAN 관련 연구 문헌의 분석 결과와 유사하게 인공지능 관련 키워드의 연결중심성이 높고, 효율성, 자원관리에 집중된 경향을 보인다.

매개중심성 분석 결과, 평균은 0.0002이고, Radio Access Network (RAN) 0.0787, Millimeter Wave (mmWave) 0.0603, Internet of Things (IoT) 0.0511, Long Term Evolution (LTE) 0.0414, Wireless Communication 0.0396, Network Slicing 0.0344, Machine Learning (ML) 0.0344, Quality Of Service (QoS) 0.0340, Cloud Radio Access Network (Cloud RAN) 0.0334, Resource Allocation 0.0324 순으로 분석되었다. 연결중심성 분석 결과와 차이를 보이는 부분은 네트워크 슬라이싱과 Cloud RAN에 대한 부분이다. 5G RAN은 클

라우드 기반의 서비스 제공을 지향하고 있는 점을 반영하고 있다고 할 수 있고, Cloud RAN은 다른 키워드를 연결하는 핵심키워드임을 의미하며, Cloud RAN를 매개로 한 연구가 상당수 수행되었으므로 판단할 수 있다.

근접중심성 분석 결과, 평균은 0.3122이고, Radio Access Network (RAN) 0.5006, Internet of Things (IoTs) 0.4882, Wireless Communication 0.4876, Millimeter Wave (mmWave) 0.4857, Resource Management 0.4831, Quality Of Service (QoS) 0.4808, Long Term Evolution (LTE) 0.4780, Machine Learning (ML) 0.4775, Optimization 0.4743, Resource Allocation 0.4737, Energy Efficiency (EE) 0.4736 순으로 분석되었다. 앞서 분석한 연결중심성, 매개중심성에서의 차이점은 최적화 관련 키워드인 Optimization이 등장한 점이다.

위세중심성 분석 결과, 평균은 0.0045이고, Radio Access Network (RAN) 0.1527, Wireless Communication 0.1415, Resource Management 0.1386, Internet of Things (IoTs) 0.1319, Quality Of Service (QoS) 0.1283, Machine Learning (ML) 0.1219, Optimization 0.1208, Millimeter Wave (mmWave) 0.1195, Long Term Evolution (LTE) 0.1130, Throughput 0.1112, Energy Efficiency (EE) 0.1097 순으로 분석되었다. 차이점은 연결중심성, 매개중심성, 근접중심성 분석 결과에는 상대적으로 중요도가 낮았던 처리량 관련 키워드인 Throughput 키워드의 중요도가 높게 나타난 점이다.

6G RAN 관련 연구 문헌으로부터 중복을 제거하여 6,602건의 키워드를 추출하였다. 이에 대한 연결중심성 분석 결과, 평균은 0.0064이고, Wireless Communication 0.1759, Resource Management 0.1739, Radio Frequency (RF) 0.1554, Internet of Things (IoTs) 0.1535, Radio Access Network (RAN) 0.1461, Machine Learning (ML) 0.1411, Millimeter Wave (mmWave) 0.1202, Artificial Intelligence (AI) 0.1194, Optimization 0.1175, Computer Architecture 0.1090 순으로 분석되었다. 자원 관리와 인공지능, 최적화, 아키텍처 관련 키워드의 연결중심성이 높은 것으로 분석되었다. 5G RAN 분석 결과와 일부 다른 점은 서비스 품질 관련 키워드보다는 최적화 관련 키워드의 중요도가 상대적으로 높게 분석된 점이다.

매개중심성 분석 결과, 평균은 0.0007이고, Wireless Communication 0.0706, Radio Access Network (RAN) 0.0675, Internet of Things (IoTs) 0.0636, Resource Management 0.0579, Radio Frequency (RF) 0.0574, Machine Learning (ML) 0.0549, Millimeter Wave (mmWave) 0.0516, Deep Reinforcement Learning (DRL) 0.0380, Artificial Intelligence (AI) 0.0359, Energy Efficiency (EE) 0.0316 순으로 분석되었다. 앞서 분석한 연결중심성 분석 결과와의 차이점은 DRL의 매개중심

성 지수가 높은 점이다.

근접중심성 분석 결과, 평균은 0.3188이고, Resource Management 0.5004, Wireless Communication 0.4979, Internet of Things (IoTs) 0.4924, Machine Learning (ML) 0.4904, Radio Access Network (RAN) 0.4876, Radio Frequency (RF) 0.4865, Artificial Intelligence (AI) 0.4809, Optimization 0.4785, Millimeter Wave (mmWave) 0.4744, Energy Efficiency (EE) 0.4726 순으로 분석되었다. 연결중심성 분석 결과와 매개중심성 분석 결과와의 큰 차이점은 없다.

위세중심성 분석 결과, 평균은 0.0098이고, Resource Management 0.1825, Wireless Communication 0.1808, Internet of Things (IoTs) 0.1604, Machine Learning (ML) 0.1551, Radio Frequency (RF) 0.1536, Radio Access Network (RAN) 0.1479, Optimization 0.1426, Artificial Intelligence (AI) 0.1405, Millimeter Wave (mmWave) 0.1297, Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) 0.1296 순으로 분석되었다. 앞서 중심성 분석 결과와의 차이점은 NOMA의 중심성이 높은 것으로 분석된 점이다. 이는 3G부터 발전되어 온 OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)으로부터 벗어나 새로운 방식을 추구하고 있다는 점을 의미한다.

상기 중심성 분석 결과를 바탕으로 O-RAN, 5G RAN, 6G RAN의 핵심 키워드를 산출하기 위해 연결중심성, 매개중심성, 근접중심성, 위세중심성 상위 30개 키워드를 추출한 결과를 표 5에 나열하였다.

O-RAN, 5G RAN, 6G RAN 분석 결과에서 공통적으로 중요한 것으로 분석된 키워드는 Deep Reinforcement Learning (DRL), Machine Learning (ML), Network Slicing, Optimization, Quality of Service (QoS), Radio Access Network (RAN), Resource Allocation, Resource Management으로, 인공지능 중에서도 DRL에 대한 연구가 상당수 수행되었으며, 네트워크 슬라이싱, 최적화와 자원 할당이 세 연구 분야에 집중되고 있음을 의미한다.

반면, LTE 키워드의 경우 5G RAN 관련 연구에서 상대적으로 중요한 것으로 분석되었고, 6G RAN 관련 연구에서는 Reliability, Sensor, Terahertz (THz) 키워드의 중요도가 높은 것으로 분석되었다. Terahertz (THz) 키워드는 5G RAN에서 6G RAN으로 관심사가 이동함에 따라서 일부 연구 주제가 고주파 대역에 집중된 것으로 해석되고, Sensor 키워드는 6G RAN 관련 연구 일부가 센서 네트워크에 집중되어 있음을 의미하며, Reliability 키워드는 성능 지표 중에서도 신뢰성에 특히 초점을 맞추고 있는 것으로 해석된다.

5G RAN과 6G RAN 연구 문헌에서 공통적으로 중요한 키워드로 인식된 키워드는 Millimeter Wave (mmWave), Internet of Things (IoTs), Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA)로, O-RAN 연구에서와는 달리 5G RAN과 6G RAN은 보다 광범위한 영역을 연구 주제로 선정하고 있

표 5. 중심성 분석 결과를 고려한 핵심 키워드

Table 5. Core keywords considering centrality

O-RAN	5G RAN	6G RAN
Artificial Intelligence (AI)	Cellular Networks	Artificial Intelligence (AI)
Cloud Computing (CC)	Cloud Radio Access Network (Cloud RAN)	Computer Architecture
Computer Architecture	Cognitive Radio (CR)	Deep Learning (DL)
Deep Learning (DL)	Deep Reinforcement Learning (DRL)	Deep Reinforcement Learning (DRL)
Deep Reinforcement Learning (DRL)	Energy Efficiency (EE)	Energy Efficiency (EE)
Edge Computing	Interference	Interference
Energy Efficiency	Internet of Things (IoTs)	Internet of Things (IoTs)
Handover	Long Term Evolution (LTE)	Machine Learning (ML)
Machine Learning (ML)	Machine Learning (ML)	Millimeter Wave (mmWave)
Network Slicing	Millimeter Wave (mmWave)	Network Slicing
Open Radio Access Network (O-RAN)	Network Slicing	Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA)
Optimization	Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA)	Optimization
Quality of Service (QoS)	Optimization	Quality Of Service (QoS)
Radio Access Network (RAN)	Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)	Radio Access Network (RAN)
RAN Intelligent Controller (RIC)	Quality Of Service (QoS)	Radio Frequency (RF)
Resource Allocation	Radio Access Network (RAN)	Reliability
Resource Management	Radio Frequency (RF)	Resource Allocation
Security	Resource Allocation	Resource Management
Unmanned Aerial Vehicles (UAV)	Resource Management	Security
Wireless Communications	Throughput	Sensor
xApp	Wireless Communication	Terahertz (THz)
	Wireless Networks	Throughput
		Unmanned Aerial Vehicle (UAV)
		Wireless Communication
		Wireless Networks

기 때문에 나타나는 특징으로 해석된다. 그 외에도 O-RAN에 서만 등장한 키워드는 Cloud Computing (CC), Edge Computing, Energy Efficiency, Handover, RAN Intelligent Controller (RIC), xApp로 분석되었다. 이를 바탕으로 판단할 시 O-RAN 연구가 상대적으로 클라우드 기반의 서비스에 집중된 경향이 있는 것으로 해석할 수 있다. RIC, xApp은 O-RAN에서 정의된 핵심 구성요소이고, 중심성 분석 결과에 따르면 해당 키워드가 다른 키워드를 연결하거나 중요도가 높은 키워드와 연결되어 있어 중요도가 높은 키워드임이 분석 결과를 통해 설명되고 있다.

표 5에 기술된 키워드 네트워크 분석 결과를 요약한다면 다음과 같다. 차세대 네트워크는 지능형 요소의 도입을 통해 자원 관리의 최적화, 트래픽 예측 및 관리, 네트워크 슬라이싱, 빔포밍 등 성능 향상을 통해 운영 비용을 절감하고, 서비스 품질 향상을 기대하고 있고, 이는 중심성 분석 결과에서 나타나고 있다.

5G RAN에서는 상대적으로 QoS에 대한 키워드의 중요도가 높은 반면, 6G RAN에서는 Optimization 관련 키워드의 중요도가 높은 것으로 분석되었다. 또한, 5G RAN은 Cloud RAN을 매개로 한 연구가 상당수 수행된 것으로 판단되고, 6G RAN과 O-RAN은 5G RAN에서 개발된 클라우드 기반의 인프라를 배포하고 있으므로 다른 키워드와 비교했을 때 상

대적으로 중요도가 낮은 것으로 분석되었다.

한편, 6G RAN과 O-RAN 연구에서는 3G부터 발전되어 온 OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 으로부터 벗어나 새로운 방식에 대한 연구도 수행되고 있으며, 지능형 구성요소인 RIC에 대한 연구가 상당수 진행되고 있다. 특히, O-RAN 키워드 네트워크 분석 결과에 따르면, RIC 자체의 중요도 또한 높지만, RIC를 매개로 한 연구도 상당수 진행되고 있는 것으로 해석된다. 앞서 기술한 바와 같이 근실시간 RIC와 비실시간 RIC는 O-RAN의 성능을 결정할 수 있는 다양하고 핵심적인 기능을 모두 수행하는 구성요소임을 고려할 시 중심성 분석 결과가 이를 일부 반영하고 있는 것으로 판단된다. 따라서 IV절에서 RIC 관련 연구 문헌 리뷰를 통해 RIC 연구 사례를 살펴보고자 한다.

IV. O-RAN 연구 사례 분석

표 1에 정리된 O-RAN Alliance 작업 그룹의 기능 및 역할에서 WG1은 아키텍처 및 사용 사례 연구, WG2와 WG3는 RIC 연구, WG4, WG5, WG9, WG10은 인터페이스 연구, WG6는 클라우드 및 오케스트레이션 연구, WG7, WG8은 레퍼런스 디자인 및 프로토콜 스택에 대한 연구, WG11은 보안

연구 등으로 분류할 수 있다. 앞서 III절의 키워드 네트워크 분석 결과로 판단할 시 O-RAN의 성능 개선과 지능형 구성 요소에 대한 연구가 다수 확인되며, 특히 지능형 요소를 제어하는 RIC에 대한 연구가 상당 수준 진행되고 있는 것으로 파악된다. 따라서 4절에서는 RIC를 중심으로 연구 사례를 리뷰하고자 한다.

Lee 외 4인은 Acumos AI, ONAP (open network automation platform), O-RAN SC를 이용하여 WG2의 AI/ML 사양으로 구현된 AI/ML 워크플로를 제안하였다[16].

Acumos AI는 AI 애플리케이션을 구축하고 배포하는 플랫폼으로, 일반적인 AI 환경을 운영하는 데 필요한 인프라 스택 및 구성요소를 표준화할 수 있는 틀을 제공한다[17]. ONAP은 물리적 네트워크와 가상 네트워크 기능의 오케스트레이션, 관리 및 자동화를 위한 오픈 소스 플랫폼으로, 차세대 네트워크 서비스를 위한 자동화 및 라이프사이클 관리를 제공하는 오픈소스 소프트웨어 플랫폼이다[18]. O-RAN SC는 ONAP 기반의 SMO를 구현할 수 있도록 Git 저장소에서 O-RAN 중앙 유닛(O-CU)과 O-RAN 분산 유닛(O-DU), RIC 플랫폼 및 샘플 RIC 애플리케이션에 대한 참조 코드를 제공하는 커뮤니티이다[19].

Lee 외 4인은 해당 틀을 이용하여 Acumos를 사용한 ML 패키지 생성, Near-RT RIC에서 워크플로우 운영, ONAP을 이용한 모니터링 부분으로 나누어서 구현하였으며, ML application 호스팅을 간소화하고 RIC의 성능을 개선하는 방법을 제시하였다[16]. Lee 외 4인이 제안한 개선안은 O-RAN SC의 ML xApps를 변형하여 메시지 디코딩, 추적, 디버깅 등의 유용한 기능을 제공하는 xApps 프레임워크의 사용, 시계열 데이터 처리와 메시지 큐 도입을 통한 메시지 관리 방법, RIC 메시징 라우터의 메시지 처리 방법과 공유 데이터 라이브러리를 이용한 확장성 확보, 온라인 학습과 강화 학습, 연합 학습 등 AI 알고리즘의 개선 등의 성능 개선을 제공한다.

Adamczyk 외 1인은 RAN control decision 과정에서 근실시간 RIC의 xApps 또는 비실시간 RIC의 rApps에서 충돌이 발생할 수 있다고 기술하였다[20]. 근실시간 RIC 간 또는 비실시간 RIC 간 일어나는 충돌을 예시로 들어, 동등한 수준에서 일어나는 충돌을 수평적 충돌(horizontal conflict)로, 서로 다른 수준에서 일어나는 충돌을 수직적 충돌(vertical conflict)로 구분하였고, 수평적 충돌을 최소화하기 위한 CMF (conflict mitigation framework)를 제안하였다.

Adamczyk 외 1인이 제안한 CMF는 direct conflict와 indirect conflict, implicit conflict를 탐지할 수 있도록 설계되었다. CMF에서 direct conflict는 DCD (direct conflict detection)를 통해서 탐지하고, indirect conflict는 ICD (indirect conflict detection)를 통해서 탐지한다. implicit conflict의 탐지는 구현 난이도가 가장 높은 부분으로, RAN의 주요 성능 지표(KPIs)를 PMon (performance monitoring)을 통해서 모니터링하고, 이상이 탐지되었을 때

ICD를 통해서 implicit conflict를 최종 탐지한다. 또한, Adamczyk 외 1인은 시뮬레이션을 통해 CMF의 유무가 근실시간 RIC에서 표준화된 충돌로 인한 부정적인 영향을 경감할 수 있음을 입증하였다.

한편, Adamczyk는 또 다른 문헌에서 이와 같은 충돌을 경감할 수 있는 supervision and adaptation (S&A)과 conflict detection and resolution (CD&R) control loops를 제안하였다[21].

Wang 외 6인은 근실시간 RIC와 비실시간 RIC 간의 요청을 최적화하여 서비스 지연 시간을 최소화하는 강화 학습 기반 자원 할당 방법을 제안하였다[22]. 이를 위해서 Double DQN 이용하여 서비스 요청이 근실시간 RIC 또는 비실시간 RIC에서 처리될지를 결정하고, 근실시간 RIC 자원을 할당하여 요청을 처리한다. 또한, RIC로 요청되는 광범위한 유형의 요청을 처리하기 위해 캐시의 유무에 따른 Double DQN 알고리즘을 도입하여 지연 시간 및 수락된 요청 수 측면에서 성능이 향상되었음을 실험을 통해 입증하였다.

Almeida 외 6인은 근실시간 RIC의 개별 구성요소를 cloud-edge continuum에 분배 및 배치할 수 있는 전략을 제안하고, 근실시간 RIC 구성요소를 지연 요구 시간 내에 할당하고 모니터 할 수 있는 RIC-O를 제안하였다[23]. RIC-O는 근실시간 RIC 구성 요소를 cloud-edge continuum에 배치하면서 전체 비용을 최소화하며, O-RAN의 운영에 있어서 유연성과 효율성 개선을 위한 구성요소의 재배치 전략을 사용한다.

O-RAN Alliance는 네트워크 슬라이싱을 O-RAN 아키텍처의 중요한 기술 및 사용 사례로 기술하고 있다[24]. 이에 다수의 연구 문헌을 검토한 결과 네트워크 슬라이싱을 제어하기 위한 xApps 연구 사례가 다수 확인되며[25]-[28], 복잡한 네트워크 슬라이싱 및 자원 할당 정책을 적용하기 위해 DRL을 사용하는 경우도 확인된다[25],[28]. 따라서 본 절에서는 xApps가 근실시간 RIC에서 실행되는 O-RAN을 구성하는 주요 구성요소인 점을 감안하여 몇 가지 연구 사례에 대해서 고찰하고자 한다.

Ahmed 외 1인은 multi-slice RAN을 위한 지능형 제어 scheme인 ICRAN을 제안하였다[29]. ICRAN은 RAN 네트워크의 시나리오에 따라서 자원 활용을 개선하고, SLA (service level agreement) violation을 최소화하는 전략을 제공하며, 중앙집중형(ICRAN-C)과 분산형(ICRAN-D) 두 가지 모드로 동작한다. 중앙집중형 모드는 단일 컨트롤러가 모든 기지국 구성을 최적화하고, 분산형 모드는 개별 기지국이 컨트롤러를 보유하고 있어, 네트워크 트래픽의 상황에 따라서 최적의 방식으로 동작한다. Ahmed 외 1인의 scheme은 OpenAI Gym 프레임워크와 ns-3 시뮬레이터를 사용하여 구현되었다[30],[31]. 또한, ICRAN은 네트워크가 로드되었을 때, 일정 용량에 도달했을 때, 과부하 상태일 때 등의 상황에서 효과적으로 동작하며, 상세한 요구사항을 가진 슬라이스에 대한 SLA 위반 수를 최대 세 배까지 줄일 수 있음을 실험

을 통해서 입증하였다.

Ahmed 외 1인의 연구는 DRL을 이용하여 멀티-슬라이스 RAN을 구현하고, 성능 개선에 대한 실험을 수행했다는 점에서 의미가 있으며, 연구자들로 하여금 후속연구를 수행할 수 있도록 구현과 관련된 가이드와 자료를 제공하였다[29].

Polese 외 4인은 O-RAN 프레임워크에서 대규모의 시뮬레이션 데이터를 생성하고, ML 훈련 및 테스트를 수행할 수 있는 CoIO-RAN 프레임워크를 제안하였다[25]. CoIO-RAN은 Bonati 외 3인이 제안한 Softwarized RAN 프레임워크(SCOPE)와 대규모 무선 네트워크 에뮬레이터인 Colosseum을 결합하여 구현되었다[32],[33]. CoIO-RAN은 RF 실험 환경에서 ML 훈련을 위한 대규모 데이터셋을 생성하고, O-RAN 인터페이스를 통해 데이터 수집한다. 폐쇄 루프 제어(closed loop control)를 위해 RAN 노드에 연결된 근실시간 RIC에 xApp으로 배포하여, 가상화된 O-RAN 환경에서 ML 솔루션을 배포할 수 있도록 설계되었다. 또한, Polese 외 4인은 DRL 에이전트의 온라인 훈련을 위한 세 가지 xApp(sched-slicing xApp, sched xApp, online-training xApp)을 제안하였다.

Polese 외 4인은 실험결과를 바탕으로 엔드 투 엔드(end to end) 실험 프레임워크의 중요성, 정적 설정을 넘어선 영역에서의 적응 제어 정책의 효과성, DRL 에이전트의 설계 선택이 엔드 투 엔드 네트워크 성능에 미치는 영향, 무선 환경에서 온라인 DRL 훈련과 관련된 트레이드오프를 O-RAN의 성능을 결정하는 중요한 요인으로 제시하였다[25]. 특히, Slicing이 O-RAN의 성능을 결정짓는 주요 요인으로 판단하고, 별도의 슬라이싱 xApp을 제안했다는 측면에서 Polese 외 4인의 연구는 의미가 있다.

이동통신 네트워크에서 실행되는 서비스가 다양해지면서 서비스 가용성을 확보하기 위한 문제가 대두되고 있다. 일반적인 서비스 가용성 향상을 위한 접근 방식으로는 네트워크 계획, 최적화, 네트워크 트래픽 관리 등 네트워크 구성과 관련성이 높다. 그러나 서비스 중단은 종종 네트워크 구성과 관련이 없으며 다양한 유형의 악성 공격에서 기인한다. Xavier 외 5인은 셀룰러 네트워크에서의 보안과 프라이버시는 무선 인터페이스, 운영자의 내부 네트워크 및 운영자 간 링크에서 달성될 수 있고[34], 수동 공격은 종종 프라이버시 침해를 초래하며[35], 능동 공격은 서비스 중단을 초래한다는 점에 착안하여[36], 셀룰러 네트워크에서 능동 공격의 조기 탐지를 위한 근실시간 RIC를 개발하였다[37].

Xavier 외 5인은 시뮬레이션을 통해 95%의 정확도로 정상 트래픽과 악성 트래픽을 분류할 수 있음을 실험을 통해 입증하였으며, 악성 트래픽이 CU에 전달되기 전에 DU에서 탐지할 수 있음 또한 입증하였다.

Abdel-Rahman 외 6인은 C^3P^2 (robust static joint RIC placement and assignment scheme)를 제안하였다[38]. C^3P^2 는 각 RAN 노드의 응답 시간을 일정 수준 보장하면서도 RAN 노드의 수를 최소화할 수 있도록 하는 chance-

constrained stochastic programming이 적용되었고, 그 외에도 CPPA (robust joint RIC placement and adaptive assignment scheme)를 제안하였다. CPPA는 RAN 노드-RIC 할당 문제를 공식화하고, RAN 노드 요청의 변동에 맞춰 RIC를 할당하는 scheme으로, RIC의 수를 최소화하고, RAN 노드의 응답 시간을 최소화하기 위한 목적으로 개발되었다. C^3P^2 는 응답 시간이 6 ms를 초과할 확률이 β 를 초과하지 않으며, CPPA는 β 와는 별개로 동작하도록 설계되었다.

본 절에서 살펴본 바와 같이 RIC는 직접적인 연구 주제로 연구되고 있거나, RIC를 매개로 하여 새로운 시스템 또는 성능 분석, 시뮬레이션 등을 수행하는 연구가 다수 수행되고 있다. 그 외에도 DRL은 네트워크 슬라이싱을 비롯한 시뮬레이션 환경 개발에 있어서 주요 연구 주제로 연구되고 있으며 [25],[28],[29], OpenAI Gym 프레임워크, ns-3 시뮬레이터 등 프레임워크 개발을 지원하는 도구를 중심으로 한 연구도 수행되고 있다[30],[31].

V. 결 론

II 절에서 분석한 바와 같이 국내에서 차세대 네트워크에 관련 연구인 5G RAN과 6G RAN에 대한 연구가 다수 수행되었지만, 차세대 네트워크의 핵심 기술인 O-RAN에 대한 연구 결과는 소수만이 확인된다. 이에 본 연구에서는 차세대 네트워크에 대한 연구 동향을 분석하고, 이를 바탕으로 개발자와 연구자들에게 인사이트를 제공하고자 하였다.

이를 위하여 O-RAN, 5G RAN, 6G RAN 키워드를 선정하고, WoS에서 해외 연구 문헌에 대한 키워드 네트워크 분석을 수행하였다. 다만, 키워드 네트워크 분석은 연구 문헌에서 자주 등장하는 키워드, 특정 키워드를 매개로 하여 다른 키워드가 연결되는 정도, 네트워크 그래프로 표현했을 때 중심에 가까운 수준 등 제한적인 분석 결과만을 산출할 수 있다. 따라서 본 연구의 분석 결과 또한 차세대 네트워크 기술 동향 중에서도 중요 키워드를 산출하고, 해당 키워드와 관련된 연구를 리뷰함으로써 포괄적인 연구주제의 인사이트만을 제공할 수 있는 한계점을 가진다. 그에 따라서 과거에 다수 수행된 5G RAN, 6G RAN 연구 동향에 대한 기존 연구와의 차별적 인사이트를 도출하기는 어렵다. 다만, 본 연구에서 수행한 방법과 같이 O-RAN 연구 동향에 대한 국내 기존 연구는 아직까지 수행된 사례를 찾아보기 어렵고, 본 연구에서는 O-RAN에 대한 포괄적인 인사이트를 도출하였다고 판단되는 점은 기존 연구가 제시하였던 인사이트와는 비교되는 차별적 요소로 판단된다.

분석 결과에 따르면, O-RAN 관련 연구는 주로 지능형 요소를 제어하는 RIC에 집중되어 있으며, 주로 DRL에 대한 연구가 수행되고 있다. LTE 관련 기술은 5G RAN에서만 연구되고 있고, 5G와 6G 네트워크에서는 네트워크에 연결된 수많은 센서와 IoTs를 지원하기 위한 기술이 연구되고 있는 것

으로 파악된다. 또한, 3GPP와 LTE 기술의 핵심이라 할 수 있는 OFDM 기술로부터 탈피하고자 하는 기술개발 활동도 확인되며, 차세대 네트워크는 클라우드 기반의 높은 신뢰성과 최적화, 자원 관리 기술이 요구된다는 점을 분석 결과를 통해 도출하였다. 그 외에도 5G RAN의 연구까지는 클라우드 기반의 시스템 구축에 상당 부분 관심이 집중되었던 반면, 6G RAN, O-RAN은 기본적으로 클라우드 기반의 시스템을 가정하고 있으므로, 상대적인 중요도가 낮은 것으로 판단된다.

상기 분석 결과를 바탕으로 본 연구에서는 O-RAN의 지능형 구성요소인 RIC에 중점을 두고 Lee 외 4인의 연구, Adamczyk 외 1인의 연구, Wang 외 6인의 연구, Almeida 외 6인의 연구, Ahmed 외 1인의 연구, Polese 외 4인의 연구, Xavier 외 5인의 연구, Abdel-Rahman 외 6인의 연구 사례를 리뷰하였다. 해당 연구는 프레임워크의 제안, RIC 간 또는 RIC와 다른 구성요소 간 충돌 가능성에 대한 연구, 자원 관리, 네트워크 슬라이싱, 보안에 대한 연구로 분류할 수 있다. 또한, Acumos AI, ONAP, O-RAN SC와 같은 구현을 위한 오픈소스 라이브러리(커뮤니티)와 OpenAI사의 Gym 프레임워크, ns-3 시뮬레이터, Softwarized RAN 프레임워크(SCOPE), Colosseum과 같은 시뮬레이터 또는 프레임워크에 대한 기능에 대하여 설명하였다.

III절과 IV절의 문헌 리뷰 결과를 바탕으로 본 연구에서 도출한 분석 결과는 O-RAN 관련 해외 연구가 2018년 이후로 구체적이고 체계적으로 연구되고 있음을 보여준다.

그러나 국내에서는 6G 기술의 핵심인 O-RAN에 대한 연구가 저조한 실정이다. 예를 들어 2024년 12월 기준 학술지 인용색인(Korea Citation Index)에서 ‘Open Radio Access Network’로 검색한 결과 24건의 연구 문헌이 확인되고, 학술연구정보서비스에서는 49건의 연구 문헌만이 확인된다. 이들 중 실제 O-RAN과 직접 관련이 있는 연구 문헌은 소수로 파악되는바, 아직까지는 O-RAN 연구개발에 대한 관심과 지원이 적은 것으로 사료된다.

따라서 차세대 네트워크 기술의 확보를 위해서는 O-RAN에 대한 민간과 정부의 지원을 확대하는 한편, 기능적인 개선, 효율성 개선과 같이 기존기술을 일부 개량한 개량기술보다는 다수의 연구자가 후속 연구를 수행할 수 있는 시뮬레이션 환경 구축, 프레임워크의 개발, 연구개발 생태계 구축 등 원천기술 확보에 집중해야 할 필요가 있다는 점을 제언한다. 한편, O-RAN의 성능을 결정짓는 핵심구성요소가 RIC이고, 관련 연구가 다수 수행되고 있는 점을 고려하여 6G 상용화를 위한 기술개발에 대한 정책적 지원과 연구가 수행되어야 한다.

본 연구의 후속 연구에서는 아직까지 표준 제정이 논의되고 있는 O-RAN의 연구를 체계적으로 분류하고, 보다 구체적인 연구 방법으로 분석하여 차세대 네트워크 개발자 또는 연구자들에게 새로운 인사이트를 제공할 수 있기를 기대한다.

참고문헌

- [1] ZENET Korea. Data Traffic Expected to Grow at an Annual Rate of 25% by 2030: Nokia Traffic Report [Internet]. Available: <https://zdnet.co.kr/view/?no=20231114174317>.
- [2] Financial News. Global Internet Traffic Increases by 23%, Led by Big Tech [Internet]. Available: <https://www.fnnews.com/news/202301181417178001>.
- [3] M. Polese, L. Bonati, S. D’Oro, S. Basagni, and T. Melodia, “Understanding O-RAN: Architecture, Interfaces, Algorithms, Security, and Research Challenges,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, Vol. 25, No. 2, pp. 1376-1411, 2023. <https://doi.org/10.1109/COMST.2023.3239220>
- [4] O-RAN Alliance. O-RAN Technical Work Groups [Internet]. Available: <https://www.o-ran.org/about#technical-workgroup>.
- [5] O-RAN Software Community. O-RAN Architecture Overview [Internet]. Available: <https://docs.o-ran-sc.org/en/latest/architecture/architecture.html>.
- [6] 3GPP. Open RAN [Internet]. Available: <https://www.3gpp.org/news-events/3gpp-news/open-ran>.
- [7] ETSI. ETSI Releases First O-RAN Specification [Internet]. Available: <https://www.etsi.org/newsroom/press-releases/2120-2022-09-etsi-releases-first-o-ran-specification>.
- [8] ITU. Committed to Connecting the World [Internet]. Available: <https://www.itu.int/>.
- [9] Telecom Infra Project. OpenRAN [Internet]. Available: <https://telecominfraproject.com/openran/>.
- [10] IEEE Standards Association. Open RAN (Radio Access Network) [Internet]. Available: <https://standards.ieee.org/industry-connections/activities/open-ran/>.
- [11] NGMN. O-RAN [Internet]. Available: <https://www.ngmn.org/partner-and-members/o-ran.html>.
- [12] O-RAN Alliance. O-RAN Companies [Internet]. Available: <https://www.o-ran.org/membership>.
- [13] Clarivate. Web of Science [Internet]. Available: <https://www.webofscience.com/>.
- [14] N. Reimers and I. Gurevych, “Making Monolingual Sentence Embeddings Multilingual Using Knowledge Distillation,” in *Proceedings of the 2020 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing (EMNLP)*, Online, pp. 4512-4525, November 2020. <https://doi.org/10.18653/v1/2020.emnlp-main.365>
- [15] Public Procurement Technology Association. 6G Network from the Perspective of Intelligent IoT [Internet]. Available: https://ppta.or.kr/webzine/2022_03/a1.html.
- [16] H. Lee, J. Cha, D. Kwon, M. Jeong, and I. Park, “Hosting

- AI/ML Workflows on O-RAN RIC Platform,” in *Proceedings of 2020 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, Taipei, Taiwan, pp. 1-6, December 2020. <https://doi.org/10.1109/GCWkshps50303.2020.9367572>
- [17] W3C. Introduction To Acumos AI [Internet]. Available: https://www.w3.org/2018/Talks/web5g/W3C_Web5G_Da nD.pdf.
- [18] ONAP. ONAP Project a Series of LF Projects [Internet]. Available: <https://www.onap.org/>.
- [19] GitHub. O-RAN Software Community [Internet]. Available: <https://github.com/o-ran-sc>.
- [20] C. Adamczyk and A. Kliks, “Conflict Mitigation Framework and Conflict Detection in O-RAN Near-RT RIC,” *IEEE Communications Magazine*, Vol. 61, No. 12, pp. 199-205, December 2023. <https://doi.org/10.1109/MC OM.018.2200752>
- [21] C. Adamczyk, “Challenges for Conflict Mitigation in O-RAN’s RAN Intelligent Controllers,” in *Proceedings of 2023 International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM)*, Split, Croatia, pp. 1-6, September 2023. <https://doi.org/10.23919/SoftCOM58365.2023.10271688>
- [22] Q. Wang, Y. Liu, Y. Wang, X. Xiong, J. Zong, J. Wang, and P. Chen, “Resource Allocation Based on Radio Intelligence Controller for Open RAN toward 6G,” *IEEE Access*, Vol. 11, pp. 97909-97919, 2023. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3311888>
- [23] G. M. Almeida, G. Z. Bruno, A. Huff, M. Hiltunen, E. P. Duarte, C. B. Both, and K. V. Cardoso, “RIC-O: Efficient Placement of a Disaggregated and Distributed RAN Intelligent Controller with Dynamic Clustering of Radio Nodes,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 42, No. 2, pp. 446-459, February 2024. <https://doi.org/10.1109/JSAC.2023.3336159>
- [24] O-RAN Alliance. 69 New or Updated O-RAN Technical Documents Released since November 2023 [Internet]. Available: <https://www.o-ran.org/blog/69-new-or-updated-o-ran-technical-documents-released-since-november-2023>.
- [25] M. Polese, L. Bonati, S. D’Oro, S. Basagni, and T. Melodia, “ColO-RAN: Developing Machine Learning-Based xApps for Open RAN Closed-Loop Control on Programmable Experimental Platforms,” *IEEE Transactions on Mobile Computing*, Vol. 22, No. 10, pp. 5787-5800, October 2023. <https://doi.org/10.1109/TMC.2022.3188013>
- [26] M. Kouchaki and V. Marojevic, “Actor-Critic Network for O-RAN Resource Allocation: xApp Design, Deployment, and Analysis,” in *Proceedings of 2022 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, Rio de Janeiro, Brazil, pp. 968-973, December 2022. <https://doi.org/10.1109/GCWksh ps56602.2022.10008713>
- [27] C. V. Nahum, V. H. L. Lopes, R. M. Dreifuerst, P. Batista, I. Correa, K. V. Cardoso, ... and R. W. Heath, “Intent-Aware Radio Resource Scheduling in a RAN Slicing Scenario Using Reinforcement Learning,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Vol. 23, No. 3, pp. 2253-2267, March 2024. <https://doi.org/10.1109/TWC.2023.3297014>
- [28] F. Lotfi, O. Semiari, and F. Afghah, “Evolutionary Deep Reinforcement Learning for Dynamic Slice Management in O-RAN,” in *Proceedings of 2022 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, Rio de Janeiro, Brazil, pp. 227-232, December 2022. <https://doi.org/10.1109/GCWksh ps56602.2022.10008614>
- [29] A. H. Ahmed and A. Elmokashfi, “ICRAN: Intelligent Control for Self-Driving RAN Based on Deep Reinforcement Learning,” *IEEE Transactions on Network and Service Management*, Vol. 19, No. 3, pp. 2751-2766, September 2022. <https://doi.org/10.1109/TNSM.2022.3191746>
- [30] Github. OpenAI/Gym [Internet]. Available: <https://github.com/openai/gym>.
- [31] nsnam. ns-3 Network Simulator [Internet]. Available: <https://www.nsnam.org>.
- [32] L. Bonati, S. D’Oro, S. Basagni, and T. Melodia, “SCOPE: An Open and Softwarized Prototyping Platform for NextG Systems,” in *Proceedings of the 19th Annual International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services (MobiSys '21)*, Online, pp. 415-426, June-July 2021. <https://doi.org/10.1145/3458864.3466863>
- [33] L. Bonati, P. Johari, M. Polese, S. D’Oro, S. Mohanti, M. Tehrani-Moayyed, ... and T. Melodia, “Colosseum: Large-Scale Wireless Experimentation through Hardware-in-the-loop Network Emulation,” in *Proceedings of 2021 IEEE International Symposium on Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN)*, Los Angeles: CA, pp. 105-113, December 2021. <https://doi.org/10.1109/DySPAN53946.2021.9677430>
- [34] I. Bilogrevic, M. Jadliwala, and J.-P. Hubaux, “Security Issues in Next Generation Mobile Networks: LTE and Femtocells,” in *Proceedings of the 2nd International Femtocell Workshop*, Luton, UK, June 2010.
- [35] M. Nasr, R. Shokri, and A. Houmansadr, “Comprehensive Privacy Analysis of Deep Learning: Passive and Active White-Box Inference Attacks against Centralized and Federated Learning,” in *Proceedings of 2019 IEEE*

Symposium on Security and Privacy (SP), San Francisco: CA, pp. 739-753, May 2019. <https://doi.org/10.1109/SP.2019.00065>

- [36] J. A. Khan and M. M. Chowdhury, "Security Analysis of 5G Network," in *Proceedings of 2021 IEEE International Conference on Electro Information Technology (EIT)*, Mount Pleasant: MI, pp. 1-6, May 2021. <https://doi.org/10.1109/EIT51626.2021.9491923>
- [37] B. M. Xavier, M. Dzaferagic, D. Collins, G. Comarella, M. Martinello, and M. Ruffini, "Machine Learning-Based Early Attack Detection Using Open RAN Intelligent Controller," in *Proceedings of ICC 2023 - IEEE International Conference on Communications*, Rome, Italy, pp. 1856-1861, May-June 2023. <https://doi.org/10.1109/ICC45041.2023.10279349>
- [38] M. J. Abdel-Rahman, E. A. Mazied, F. Hassan, K. Teague, A. B. Mackenzie, S. F. Midkiff, ... and D. S. Nikolopoulos, "On Robust Optimal Joint Deployment and Assignment of RAN Intelligent Controllers in O-RANs," *IEEE Open Journal of the Communications Society*, Vol. 5, pp. 2358-2376, 2024. <https://doi.org/10.1109/OJCOMS.2024.3383607>



박윤수(Younsoo Park)

2014년 : 중앙대학교 전자전기공학부 (공학사)
 2016년 : 중앙대학교 대학원 전자전기공학과 (공학석사)
 2021년 : 중앙대학교 대학원 전자전기공학과 (공학박사)

2016.09~2020.08: 중앙대학교 다빈치교양대학, 강사
 2021.06~2021.12: 중앙대학교 인문콘텐츠연구소
 2022.02~2023.06: NICE평가정보 주식회사, 전문연구원
 2023.06~2024.06: 코데이터솔루션 주식회사, 과장
 2023.07~현 재: MKS특허경영, 전문위원
 ※ 관심분야 : O-RAN, 6G, B5G, Secure Wireless Protocols, PKC-based Authentication Protocols, Blockchain, Elliptic Curve Cryptography, AI Literacy, Computational Thinking, Data Valuation



이기성(Kiseong Lee)

2005년 : 성균관대학교 한문학과 (문학사)
 2011년 : 중앙대학교 컴퓨터공학과 (공학석사)
 2015년 : 중앙대학교 컴퓨터공학과 (공학박사)

2006년~2008년: (주)온네트 사원 (소프트웨어 엔지니어)
 2017년~2022년: 중앙대학교 다빈치교양대학 조교수
 2022년~현 재: 중앙대학교 인공지능인문학연구소 조교수
 ※ 관심분야 : 소프트웨어 저장소 마이닝, 인공지능 응용



박동희(Donghee Park)

2024년 : 한서대학교 항공보안학과 (공학사)

2024년~현 재: 중앙대학교 전자전기공학과 (석사과정)
 ※ 관심분야 : 빅데이터, 딥러닝, 머신 비전



신예성(Yeseong Shin)

2024년 : 한국외국어대학교 전자공학과 (공학사)

2024년~현 재: 중앙대학교 전자전기공학과 (석사과정)
 ※ 관심분야 : 채널코딩, Polar codes, MIMO



박호현(Ho-Hyun Park)

1987년 : 서울대학교 계산통계학과 (이학사)
 1995년 : KAIST 정보통신공학과 (공학석사)
 2001년 : KAIST 전자전산학과 (공학박사)

1987년~2003년: 삼성전자 수석연구원
 2003년~현 재: 중앙대학교 전자전기공학부 교수
 ※ 관심분야 : 빅데이터, 딥러닝, 머신 비전, 정보 보안, 실시간 시스템, 임베디드 시스템 등