

5G 망에서 정보의 적시성을 보장하기 위한 Grant 기반의 상향 링크 스케줄링 기법

김 영 진*, 김 범 수^o

A Grant-Based Uplink Scheduling Algorithm for Ensuring Data Freshness in 5G Networks

Yeong-Jin Kim*, Beom-Su Kim^o

요 약

5G 3대 시나리오 중 하나인 mMTC(massive machine-type communications)에서는 1개의 gNB가 최대 10^6 개의 디바이스 연결을 지원하는 초연결성을 실현해야 하며, 동시에 연결된 디바이스의 QoS를 보장해야 한다. 최근 연구에서는 이러한 요구를 신속히 처리하기 위해 Grant-Free 방식의 상향 링크 처리 기법이 제안되었으나, 매우 이질적인 트래픽 환경을 갖는 mMTC 환경에서 한계를 가진다. 또한, 기존 스케줄링 기법은 Throughput 및 Delay 위주의 네트워크 성능을 평가하기 때문에 데이터의 적시성을 보장하기 어렵다. 이러한 문제를 해결하기 위해, 본 논문에서는 정보의 신선도를 나타내는 척도인 AoI와 데이터 전송 성공률을 나타내는 WMA를 결합한 가중합 메트릭 및 스케줄링 결정 알고리즘을 제안한다. AoI는 데이터 패킷이 생성된 시점과 gNB에서 데이터 패킷을 수신한 시간의 차이로 계산되며, WMA는 데이터 전송 성공 시 카운트한다. ns-3 네트워크 시뮬레이터에서 제안하는 스케줄링 결정 기법을 도입하였으며, 기존 스케줄링 기법 대비 유사한 Throughput 및 Delay 수치를 보이고 최대 44.27%의 시스템 평균 AoI 감소율을 보여 정보의 신선도를 보장할 수 있음을 증명하였다.

키워드 : 5G, 대규모 사물인터넷, Grant 기반 상향 링크 스케줄링, 정보의 신선도

Key Words : 5G mMTC, Grant based Uplink Scheduling, Age of Information

ABSTRACT

In massive machine-type communications (mMTC), one of the top three 5G scenarios, a single gNB needs to realize hyper-connectivity to support up to a maximum of device connections, while ensuring the QoS of the connected devices. In recent research, grant-free uplink processing techniques have been proposed to expedite these needs, but they are limited in mMTC environments with highly heterogeneous traffic environments. In addition, existing scheduling techniques evaluate network performance based on throughput and delay, which makes it difficult to guarantee the timeliness of data. To address these issues, this paper proposes a weighted sum metric and scheduling decision algorithm that combines AoI, a measure of information freshness, and WMA, a measure of data transmission success rate. AoI is calculated as the difference between the time when a data packet is

* 본 연구는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다(No. RS-2024-00333695).

• First Author : Gyeongsang national university Department of Computer Science and Engineering, kimyeongjin9060@gmail.com, 학생회원

^o Corresponding Author : Gyeongsang national university Department of Computer Science and Engineering, bbk5391@gnu.ac.kr, 종신회원

논문번호 : 202411-301-B-RN, Received November 26, 2024; Revised January 13, 2025; Accepted January 23, 2025

generated and the time when the data packet is received by the gNB, while WMA counts the successful data transmission. We introduce the proposed scheduling decision technique in the ns-3 network simulator, and demonstrate that it can guarantee the freshness of information by showing similar throughput and delay figures compared to the existing scheduling techniques and reducing the system average AoI by up to **44.27%**.

I. 서론

3GPP(Third Generation Partnership Project) 5G NR(New Radio) standard에서 제시하고 있는 mMTC(massive machine-type communications)는 5G 3대 시나리오 중 하나로써, 1개의 gNB(gNodeB)가 $1km^2$ 당 최대 10^6 개의 UE(User Equipment) 연결을 위한 초연결성의 실현이 중요하게 여겨지고 있다^[1]. 예를 들어 스마트 시티 환경에서 gNB에 연결된 수만개의 IoT(Internet of Things) 디바이스 혹은 UE는 각 센서를 통해 데이터 패킷을 만들어내고 gNB로 전송한다. 이러한, mMTC의 중요한 목표인 초연결성을 보장함과 동시에 효율적인 상향 링크 자원을 지원하기 위해 최근 연구에서는 Grant-Free 기반의 상향 링크 스케줄링이 제안되고 있다.

Grant-Free 기반의 상향 링크 스케줄링은 gNB에 연결된 각 UE의 상향 링크 자원 요청 메시지인 Scheduling Request(SR) 요청과 그 응답 과정을 거치지 않는다^[2]. 이는, 사전에 정해진 자원 예약 방식에 의해 데이터 패킷을 전송하는 방식을 사용하여 UE의 자원 할당 과정을 생략하기 때문에 시스템상의 제어 오버헤드를 크게 감소시킬 수 있다. 대규모 IoT 환경에서 제어 오버헤드의 감소는 디바이스의 배터리 수명을 증가시키고 에너지 효율을 높일 수 있다. 또한, 사전에 예약해 놓은 자원에 의해서 버퍼에 쌓여있는 데이터 패킷을 스케줄링 방식에 맞추어 gNB에게 전송하면 자원이 낭비될 일이 없어 효율적이다.

하지만, mMTC의 특성상 하나의 셀이 수만개의 UE 트래픽을 다루고 있고, 모든 UE의 트래픽 패턴 주기를 예측할 수 없다. 예를 들어 스마트 시티 시나리오를 가정했을 때, 대규모 디바이스들이 항상 정해진 주기로 데이터 패킷을 생성해 gNB에 전송하는 것은 매우 이상적인 상황이다. 만약, 특정 헬스케어 디바이스가 센서를 통해 사용자의 응급 신호 데이터를 수집하여 gNB에게 데이터 패킷을 전송해야 할 때, Grant-Free 기반의 상향 링크 스케줄링은 사전에 예약한 자원만 지원하므로 동적으로 변하는 긴급한 데이터 패킷을 높은 우선순위의 QoS(Quality of Service)로 보장할 수 없다. 이처럼 실제 mMTC 환경은 매우 이질적인(heterogeneous) 환경

이므로 Grant 기반의 상향 링크 스케줄링이 많이 사용되고 있다.

Grant 기반의 상향 링크 스케줄링은 4세대 이동통신인(LTE)에서부터 주로 사용된 방식이다. 대표적인 Grant 기반의 상향 링크 스케줄링 알고리즘은 gNB에 연결된 UE에게 채널 품질 지표에 상관없이 순차적으로 RB(Resource Block)를 할당하는 RR(Round-Robin) 방식, 현재 채널 품질 지표와 이전 슬롯의 평균 비트 전송률을 사용한 메트릭 구성으로 RB를 할당하는 PF(Proportional Fair) 방식이 있다^[3]. 또한, 5G 표준 목표에 따른 다양한 시나리오에서 요구되는 QoS에 따라서 더욱 향상된 스케줄링 기법들이 연구되고 있다^[1,5-7].

하지만, Grant 기반의 상향 링크 스케줄링 연구들은 정보의 신선도를 나타내는 척도인 AoI(Age of Information)를 거의 고려하지 않았다. AoI는 수신 측에서 데이터를 받은 시간과 해당 데이터 생성 시간의 차로 정의되며, 데이터의 평균 AoI를 최소화하는 방식으로 정보의 신선도를 유지할 수 있다^[8]. 최근 mMTC 시나리오는 실시간으로 데이터를 주고받는 고밀도 UE 네트워크 환경이다. 특히, 스마트 시티에서 교통 신호 제어와 같은 데이터 송수신 빈도가 높고 신뢰성 있는 데이터를 처리하는 것이 중요한 환경에서는 생성 시간이 오래된 데이터의 의미가 퇴색될 수 있다. 따라서 데이터의 신뢰성과 유효성 측면에서 적시에 데이터를 처리하는 것이 중요한 문제로 대두되고 있다^[10].

이러한 문제를 해결하기 위해서 본 논문에서는 평균 AoI를 성능 평가 메트릭으로 사용한 새로운 상향 링크 스케줄링을 제안한다. 제안하는 스케줄러는 각 Time Slot에서 스케줄링 결정을 내리는데, 높은 AoI를 가진 UE에게 우선으로 자원을 할당한다. 하지만, 이러한 방식은 동적 채널 환경에 의한 데이터 전송 실패로 성능 저하를 초래할 수 있다. 따라서 동적 채널 상태를 스케줄링 결정에 통합하기 위한 방안으로 이전 채널 통계를 이용한 스케줄링 알고리즘을 통해 유연하게 자원 할당 결정을 진행하고자 한다. 이전 채널 통계를 WMA(Weighted Moving Average)라는 데이터 전송 성공 지표에 따라 계산하며 이를 통해 적응적으로 스케줄링 결정을 조정하고자 한다.

II. 관련 연구

Grant 기반의 상향 링크 스케줄링은 UE가 gNB에게 SR 요청을 한 후, SR에 대한 응답으로 DCI(Downlink Control Indicator) 메시지를 전달한다. DCI 메시지에는 하향 링크 Grant 정보, 상향 링크 Grant 정보를 포함하는데, UE는 DCI 메시지를 수신한 후에 승인된 자원 만큼 데이터 패킷을 보낼 수 있다. gNB는 DCI 메시지를 통해 실시간으로 변하는 UE의 동적인 QoS 요구사항을 맞추어 줄 수 있기 때문에, 각 시나리오에 따라 더욱 효율적으로 자원을 할당하기 위한 Grant 기반의 상향 링크 스케줄링 알고리즘이 연구되고 있다.

논문[4]에서는 어느 특정 IP에서 다량의 데이터가 유입되어 서버의 과부하 및 데이터 손실이 발생하는 경우, 전체적인 네트워크 지연에 대한 해결 기법으로 기존 RR 스케줄링과 실시간 모니터링을 통한 IP 식별을 통해 임의의 서버를 1:1로 매핑시키는 기법을 제안하였다^[4]. 이를 통해 데이터 패킷 처리에 대한 대기시간을 최대 36.4% 단축시켰다. 논문[5]에서는 다수의 UE가 연결되었을 때, 기존의 복잡한 PF 스케줄링에서 매트릭 계산 증가로 인해 자원 할당이 되지 않는 문제를 해결하기 위해 평균 처리량(Throughput) 연산을 간소화하는 PF 스케줄링을 제안하였다^[5]. 이를 통해 PF 스케줄링에 비해 최대 대략 93.6%의 연산 시간을 줄였고, UE수에 따라 줄어든 RB 할당률을 높여 시스템 성능을 개선시켰다. LTE에서 사용된 Grant 기반 스케줄링 기법인 RR, PF 외에도 5G NR 표준에 맞추어 다양한 스케줄링 연구가 진행되고 있다.

논문[6]에서는 대용량 트래픽이 부하 되는 스트리밍 환경에서 D2D(Device to Device) 스트리밍의 끊김 현상을 완화하기 위해 트래픽 스트림의 구성 비율을 고려하여 스트림의 특성과 타입을 분석 후 스케줄링하는 TOSS 기법을 제안하였다^[6]. 트래픽 타입 분류에 따라서 유튜브 동영상 시청과 같은 동적인 트래픽 환경에서 active stream-scheduling 알고리즘을 적용하고 이미지 및 텍스트와 같은 정적인 트래픽 환경에서는 Non active stream-scheduling 알고리즘을 적용한다. 트래픽 분류를 통해 대용량 트래픽에서 채널 대역폭의 재할당률을 높이고 동영상 시청에서 연속성을 유지할 수 있게 되면서, 시스템 전체적으로 PSNR(Peak Signal to-Noise Ratio), ASECR(Average Stream Error Control Rate)의 지표상에서 기존 스트리밍 대비 성능이 우수함을 보였다.

논문[7]에서는 다양한 요구사항을 갖는 서비스 만족을 위해 기존의 매크로셀과 더불어 높은 데이터 전송률

요구 서비스를 지원하기 위한 스몰 셀이 공존하는 이질적인 네트워크(heterogeneous network) 환경임을 고려하였다^[7]. 스몰 셀의 넓은 대역폭을 통해 높은 처리량(throughput)을 요구하는 단말들이 특정 스몰 셀에 부하가 몰리는 현상으로 인한 성능 저하를 해결하기 위한 기존의 UA(user association) 알고리즘은 max-CI 스케줄링 알고리즘과 같이 채널 상태가 좋은 사용자들이 자원을 독점하는 MRP(maximum received power)기반의 UA 알고리즘을 사용하여 자원 할당 불균형이 발생했다. 이를 해결하기 위해 스몰 셀에 연결된 사용자들 중 낮은 처리량을 받을 것으로 예측되는 cell edge user들의 처리량을 증가시키는 MCTS(Monte Carlo tree search)기반의 UA 알고리즘을 제시하였다. 제시한 알고리즘으로 cell edge user 측면에서 상당한 성능 개선을 보이고 cell edge user의 비율을 높일수록 평균 처리량이 증가하였다. 이는 기존 MRP 방식의 높은 채널 품질을 가진 UE가 독점하던 자원이 고르게 잘 분배되었음을 의미하며 최대 15%까지의 처리량 증가를 보였다.

이처럼 5G 시나리오에서 발생하는 다양한 문제를 해결하기 위해서 Grant 기반의 스케줄링 알고리즘이 연구되었지만, 대부분이 정보의 신선도를 나타내는 척도인 AoI를 고려하지 않았다. 이에 논문[8]에서는 최근 정보화 시대에 있어서 실시간 상태 업데이트의 중요도가 점차 커지는 것을 고려하여 AoI를 통해 실시간 상태를 업데이트를 지원하는 시스템을 설계하였다^[8]. AoI가 수신 측의 최신 업데이트 시점이 t 일 때, 해당 업데이트가 생성된 시점 $u(t)$ 간의 시간 차이로 정의하고 시스템 성능을 평가하는 일반적인 방법을 제시하며, 환경 센서를 통한 산발 예측 및 통계 시스템 등과 같은 실시간 데이터 전송이 중요한 시스템 대부분에서 도움을 줄 수 있음을 예상하였다.

이에 AoI 최소화를 위한 많은 스케줄링 연구가 진행되고 있다^[11,12]. 논문 [11]에서는 최대 AoI 임계값(MAT) 문제에 집중하여 소스 노드에 해당하는 MAT 벡터가 스케줄링이 가능한지에 대한 여부를 결정하는 것에 기여하였다^[11]. 실현 가능한 스케줄러를 찾기 위해 소규모 네트워크의 경우 순환 스케줄러 탐지(CSD) 절차를 제안하였고, 대규모 네트워크의 경우, 가상 다항식 매핑(FPM)이라는 저복잡성 절차를 제시하여 AoI 기반의 스케줄링 문제를 해결하기 위한 이론적 기반과 실용적 방법론을 제공하였다.

또한, 논문[12]에서는 차량-사물 간(V2X) 통신에서 Semi-Persistent Scheduling(SPS) 알고리즘이 안전 메

시지(BSM)의 QoS를 만족하지 못할 수 있음을 고려하여 각 리소스 예약 간격에 대한 BSM AoI를 분석하였다^[12]. 결과적으로 시뮬레이션을 통해 차량 밀도에 따른 차량 네트워크의 예상 AoI를 최소화하는 SPS의 최적 리소스 예약 간격을 얻을 수 있음을 보였다.

논문[4],[5],[6],[7]이 제안하는 스케줄링 알고리즘 연구들은 네트워크의 Throughput, Delay, Error Throughput 등과 같은 네트워크 지표를 중점적으로 다루었다^[4-7]. 또한, 시기적절한 최신 정보를 필요로 하는 다양한 네트워크 애플리케이션에서 정보의 적시성에 대한 중요성이 더욱 커짐에 따라 논문 [11],[12]와 같은 AoI 관련 연구들이 많이 늘어나고 있다^[10-12]. 하지만, 앞선 연구들은 예측할 수 없는 5G 환경에서 데이터 전송 성공률 지표를 활용하고 있지 않다. 데이터 드랍을 고려했을 때, 데이터를 성공적으로 자주 전송한 UE에게 우선으로 자원을 할당하고 동시에 AoI를 함께 고려하면 낭비를 최소화하는 자원 분배를 기대할 수 있다. 이에 본 논문에서는 AoI 메트릭과 데이터 전송 성공률을 함께 고려한 Grant 기반 상향 링크 스케줄링 기법을 적용하고자 한다.

III. 연구 목표

3.1 네트워크 모델

본 시스템은 5G 3GPP 표준 3대 시나리오 중, 대규모 디바이스 연결을 위한 초연결성을 다루며 $1km^2$ 당 최대 10^6 개의 UE 연결을 구성하는 mMTC를 가정한다. [그림 1]과같이 1개의 gNB와 N개로 구성된 UE를 설정하고, 이를 $1km^2$ 범위 안에서 구성한다. 또한, 동적으로 변하는 연결된 수많은 UE들의 상향 링크 요구 사항을 충족시켜야 하므로 Grant 기반으로 스케줄러를 구성

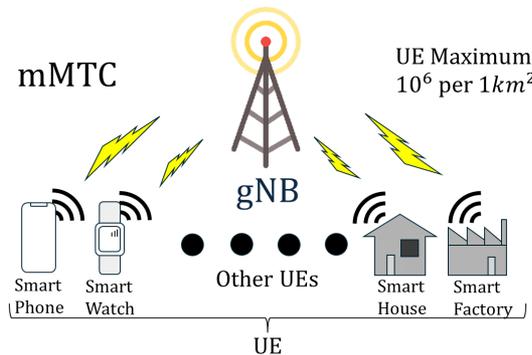


그림 1. 5G mMTC 네트워크 토폴로지
Fig. 1. 5G mMTC network topology

하여 UE의 상향 링크 요구 변화를 실시간으로 스케줄러가 보장하는 것을 목표로 한다.

3.2 상향 링크 스케줄링 모델

5G NR은 Numerology 개념을 도입한 OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiplexing Access) 방식으로 채널 액세스를 허용한다. OFDM은 데이터열을 여러 개의 subcarrier로 나눠 전송하는 특징을 가지며 5G NR에서는 이를 numerology μ 에 따라 Time Slot 길이와 subcarrier가 사용하는 대역폭 SCS(subcarrier spacing) 크기를 가변적으로 조정함으로써 사용자의 QoS를 만족시킨다^[9]. Time Slot 길이가 변하는 것은 5G가 가변적인 TTI(Transmit Time Interval) 처리가 가능함을 의미하며, TTI는 gNB 스케줄러가 작업을 수행하는 시간 단위로 사용된다. 따라서 본 시스템의 채널 액세스 방식은 OFDMA로 설정하여 numerology에 따른 가변적인 TTI와 SCS에 맞추어 상향 링크 스케줄링을 수행하도록 한다.

또한, 본 시스템은 동적으로 변하는 상향 링크 요구 사항을 충족시키기 위해 Grant 기반 스케줄링 모델을 사용하며, [그림 2]와 같이 UE는 상향 링크 자원 할당 요청 정보인 SR을 gNB로 전송한다. SR을 받은 gNB는 연결된 UE들의 자원 할당 요청을 매 TTI마다 MAC(Medium Access Control) 계층의 스케줄링 알고리즘으로 결정하고, 스케줄링 결정에 따른 UE의 자원 할당 우선순위에 따라 PHY 계층을 통해 DCI 메시지 형태로 전달하도록 한다. gNB에게 상향 링크 승인을 받은 UE는 비로소 버퍼에 저장한 상향 링크 데이터를 전송할 수 있게 된다.

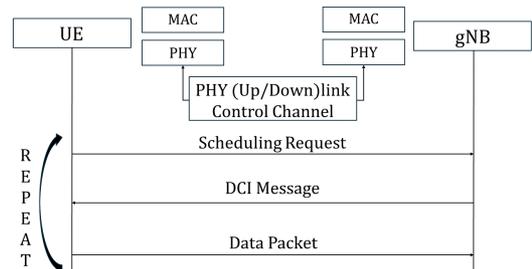


그림 2. Grant 기반의 상향 링크 스케줄링 과정
Fig. 2. Grant-based uplink scheduling process

3.3 문제 정의

최근 연구되고 있는 기존의 Grant 기반의 상향 링크 스케줄링 방식은 Throughput 향상 및 Delay 감소 등에 초점을 두어 성능평가를 진행하였다. 하지만, 기존의 성

능평가 지표만으로는 데이터 패킷의 신선도 유지와 정보의 적시성을 보장하지 못해, 오래된 데이터 패킷을 계속 묵혀두거나 중요한 최신 정보를 빠르게 반영하지 못하는 문제가 발생한다. 이에 논문[8]에서는 정보의 최신성을 보장하기 위해 AoI를 시스템에 도입했으며 수식(1)에 따라 계산된다^[8].

$$AoI_{UE} = Time_{gNB} - Time_{UE} \quad (1)$$

[그림 3]과 같이 데이터 패킷이 생성된 시점에서, gNB에서 해당 패킷을 수신하기 전까지 생성된 패킷의 AoI가 계속해서 상승한다. 패킷을 수신에 성공하면, 패킷의 AoI가 초기화되고 다음 패킷을 생성하면 AoI가 다시 상승하는 과정을 반복한다. 정보의 신선도 측면에서 스케줄러가 패킷의 AoI 상태를 모니터링하여 파라미터로 사용해서 스케줄링 결정을 내리면 시스템 상에서 효과적으로 정보의 신선도를 유지할 수 있다. 따라서 AoI가 높은 데이터를 우선으로 자원을 할당하는 AoI 기반의 스케줄링 알고리즘을 고안하였다.

하지만 위와 같은 스케줄링 알고리즘은 실제 mMTC 환경의 동적인 채널 품질 변화에 취약하다는 문제가 있다. 예를 들어 높은 AoI 값을 가진 UE를 우선으로 스케줄링 결정을 내릴 경우, 채널 품질 저하로 인해 데이터 전송에 실패할 수 있다. 이때, AoI 기반의 스케줄링 결정은 자원을 할당받은 UE가 데이터 전송에 계속해서 실패하게 되었을 때, 시스템 전체적으로 성능이 계속해서 떨어지게 된다.

이러한 문제를 해결하기 위해 본 논문에서는 데이터 전송을 수행한 UE의 성공 카운터 지표인 WMA를 도입해 개선된 방식의 스케줄링 알고리즘을 제안한다. 제안하는 알고리즘은 스케줄러가 UE의 AoI와 WMA를 함께 고려한 가중합 방식으로 메트릭을 계산해 스케줄링 결정을 내린다. 이를 통해 AoI가 높은 UE에게 우선

적으로 자원을 할당할 때 발생하는 낭비 문제를 해결하여 유연하게 스케줄링 결정을 내리도록 한다.

IV. 제안하는 스케줄링 기법

4.1 제안하는 가중합 메트릭의 기본 동작

제안하는 스케줄링 결정에서 사용하고자 하는 메트릭은 가중합 방식인 WSE(Weighted Sum Equation)로 UE의 AoI 값, WMA를 통합한 형태로 가중치를 부여한 형태로 계산되며 TTI마다 스케줄링 알고리즘을 통해서 자원을 할당한다. WSE에서 사용하는 변수인 AoI와 WMA는 각각 gNB에서 [그림 4]과같이 테이블로써 관리한다. AoI는 수식(1)을 따라 계산되고 WMA는 UE가 데이터 전송을 수행할 때 성공 카운터 형태로 증가 및 유지된다. 테이블에서 가져온 변수를 통해 WSE는 수식(2)과 같이 계산된다.

$$WSE_{UE} = x * AoI_{UE} + (1 - x) * WMA_{UE} \quad (2)$$

수식(2)와 같이 계산된 WSE_{UE} 는 gNB의 스케줄링 알고리즘에 의해 자원 할당 우선 순위가 결정되며, 이를 통해 자원을 할당하도록 한다. 스케줄러를 통해 [그림 2]와 같이 DCI 메시지를 받아 UL Grant된 UE는 gNB에게 데이터를 전송하고 성공 여부에 따라 AoI 및 WMA를 테이블에서 업데이트한다.

[그림 4]에서 명시한 테이블에서 AoI는 UE가 데이터 패킷을 생성한 시점에서부터 스케줄링 결정이 이루어지는 단위인 TTI마다 1씩 증가하게 되고 데이터 전송에 성공하면 1로 초기화하며 실패할 시 계속 증가한다. 본 논문에서 다루는 시스템은 mMTC 환경이므로 수많은 UE들의 데이터 생성 주기가 이질적인 환경임을 고려해야 한다. 따라서 초기화된 AoI는 UE가 다음으로

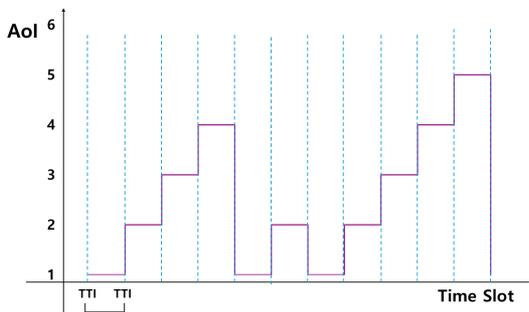


그림 3. 패킷 생성 및 처리에 대한 AoI 흐름.
Fig. 3. AoI flows for packet generation and processing

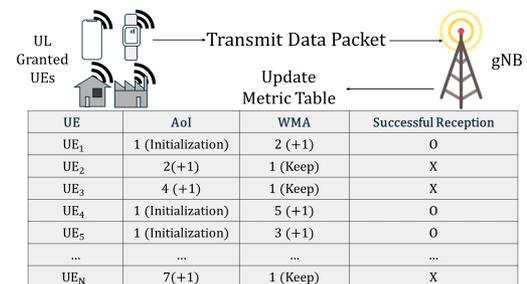


그림 4. 그데이터 전송 성공 유무에 따른 테이블 변수 업데이트
Fig. 4. Update table variables based on successful or unsuccessful data transfer

보낼 데이터 패킷이 생성되기 전까지 1로 유지한다. WMA도 데이터 전송에 성공하면 1을 증가시키고 실패할 시 그대로 유지한다.

4.2 제안하는 스케줄링 결정 메커니즘

본 논문에서 제안하는 상향 링크 스케줄링 기법은 WSE 값이 높은 UE에게 자원 할당 우선순위를 부여하는 메커니즘이 필수적이다. 따라서 스케줄러는 연결된 UE들의 AoI 및 WMA에 대한 2차원 테이블을 구성해 초기화 및 업데이트를 수행하도록 한다. 또한, TTI마다 높은 WSE 값에 대한 스케줄링 결정을 내려야 하므로 Greedy 결정 메커니즘을 제안한다. Mechanism 1은 제안하는 스케줄링 알고리즘을 pseudo code 형태로 나타낸 것이다.

표 1. 메커니즘 1
Table 1. Mechanism 1

Machanism 1. AoI-based Scheduling Algorithm	
Initialization:	
1:	number_of_UE <- . . .
2:	Metric_Table <- Create 2D array with [number_of_UE][2] // [0] <- AoI // [1] <- WMA
3:	WSE_Table <- Create array with [number_of_UE]
4:	x <- . . . // Initialized weighted
5:	for i = 1 to number_of_UE do
6:	Metric_Table[i][0] <- 1
7:	Metric_Table[i][1] <- 1
8:	WSE_Table[i] <- 1
9:	endfor
Function CalculateWSE (UE_index, x):	
1:	return x * Metric_Table[i][0] + (1-x) * Metric_Table[i][1]
Function SortWSE ():	
1:	Sort WSE_Table in descending order
Function UpdateAoIandWMA(UE_index, success):	
1:	if success data transmission then
2:	Metric_Table[UE_index][0] <- 1 // aoi <- 1
3:	Metric_Table[UE_index][1] <- WMA + 1
4:	else // Fail data transmission
5:	Metric_Table[UE_index][0] <- Increasing AoI
6:	endif
7:	WSE_Table[UE_index] <- CalculateWSE(UE_index, x)

제안하는 Mechanism 1의 핵심은 스케줄러가 각 UE의 AoI (**Metric_Table[UE_index][0]**) 및 WMA (**Metric_Table[UE_index][1]**) 값을 수식(2)에 맞추어 계산하여 WSE 테이블 (**WSE_Table[UE_index]**)을 구성하고, 메트릭 값이 높은 UE부터 자원 할당 우선순위를 부여하는 것이다. **CalculateWSE**에서 계산된 각 UE의 WSE 값은 **SortWSE**에서 내림차순으로 정렬되며 해당 순서대로 자원을 할당한다. 또한, UL Grant된 UE의 데이터 전송 시, 성공 여부에 따라 테이블 업데이트를 진행한다.

V. 성능 평가

제안하는 상향 링크 스케줄링 기법은 RR, PF와 같은 기존 스케줄링 알고리즘과 비교해 성능평가를 진행하며, 5G 환경을 지원할 수 있는 C++ 기반의 네트워크 시뮬레이터인 NS-3를 사용한다. RR은 연결된 모든 UE에게 순서대로 자원을 할당하는 매우 공평한 스케줄링 알고리즘으로 특정 사용자에게 자원이 집중적으로 할당되는 문제를 해결할 수 있으며 구현이 간단하지만 각기 다른 UE의 QoS 요구사항을 충족시키기 부적합한 알고리즘이다. PF는 UE의 현재 데이터 전송률과 이전 슬롯들의 평균 데이터 전송률에 대한 비율을 메트릭으로 구성하여 가장 큰 가중치를 가진 UE에게 우선적으로 자원을 할당하는 알고리즘이다. 이전 슬롯의 평균 데이터 전송률이 낮을수록 높은 가중치를 가지므로 QoS 요구사항과 자원 집중 문제를 균형적으로 해결할 수 있지만 복잡한 메트릭 계산과정으로 시스템에 많은 부하가 발생할 수 있다.

5.1 시뮬레이션 환경 정의

본 시스템은 mMTC 환경을 가정하므로 초연결성의 보장이 필수적이다. 따라서 Numerology 값을 0으로 설정해 많은 수의 UE 연결을 극대화시킨다. 하지만 초연결성이 지향하는 하나의 gNB가 1km²당 처리할 수 있는 최대 UE 개수를 시뮬레이션 환경에서 완전히 구현하는데 한계가 있다.

따라서 주파수 범위 및 기지국 처리 반경을 mMTC 시나리오에서 구축할 수 있는 UE 밀도의 근사치로 시뮬레이션 환경을 설정하였다. UE 개수 100개에 맞추어 축소된 파라미터 설정값은 [표 2]과 같으며, 이질적인 트래픽 환경을 고려하기 위해, 패킷 생성 주기와 패킷 크기를 파라미터 범위 내에서 랜덤한 값을 부여하도록 설정하였다.

또한, 항상 1개의 gNB가 연결할 수 있는 최대의 UE

표 2. 시뮬레이션 파라미터 (공통)
Table 2. Simulation Parameter (Common)

Parameter	Value
Numerology	0
Bandwidth	1 MHz
Number of gNB	1
Area	100 m ²
Number of UE	30, 60, 100
Packet Size	10 ~ 500 bytes
Packet Period	10 ~ 5000 ms

에 대한 부하를 처리하지 않으므로 여러 UE 밀도에 대한 AoI 상태를 확인할 수 있도록 UE 개수를 30, 60, 100개로 설정하여 비교 진행하며, 랜덤 시드를 바꾼 시뮬레이션 결과에 대한 수치를 기록하여 랜덤 값 부여에 대한 오차를 줄이도록 10회 반복 설정하였다.

제안하는 스케줄러는 가중치 값을 통해 UE의 AoI와 WMA의 비중을 수식(2)와 같이 조절할 수 있다. 가중치 값 증가는 AoI 비중의 증가를 의미하고, 가중치 값 감소는 WMA 비중의 증가를 의미한다. 채널 상태가 Stable한 UE의 경우 가중치 값이 낮추어 WMA 비중을 증가시키면 자원을 우선적으로 자주 할당할 수 있다. 하지만 모든 UE는 동일한 가중치를 가지며, 이 경우 채널 상태가 Unstable한 UE는 높은 WMA 비중으로 인한 페널티가 부여된다. 따라서 본 시뮬레이션 환경에서는 AoI와 WMA의 비중을 동일하게 유지하기 위해 가중치 값을 0.5로 설정한다. 스케줄러가 파라미터로 받는 AoI 단위는 ms로 설정하고, WMA는 데이터 전송 성공에 대해서 정수 단위로 저장하도록 스케줄링 파라미터를 구성하였다.

5.2 실험 결과

실험 결과, mMTC를 가정한 본 시뮬레이션 환경에서 RR, PF이 제안하는 스케줄러 대비 최대 110.09% 높은 AoI를 가지고 있음을 확인할 수 있었다.

먼저, [그림 5]는 단일 AoI 스케줄링 기법과 제안하는 스케줄링 기법을 비교한 결과를 나타낸다. 단일 AoI 메트릭 스케줄러는 평균 AoI를 효과적으로 낮출 수 있

표 3. 스케줄링 파라미터
Table 3. Scheduling Parameter

Parameter	Value
x	0.5
Age of Information	Unit = ms
WMA	Unit = Integer

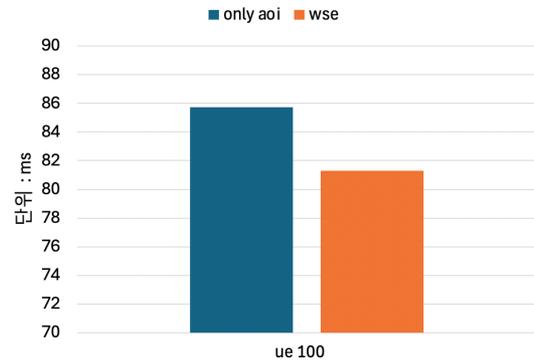


그림 5. UE 100 기준 단일 AoI 스케줄러와 제안하는 스케줄링 기법의 평균 AoI
Fig. 5. Average AoI for single AoI scheduler and proposed scheduling technique on 100 UEs

는 기법이지만, 링크 품질에 따른 AoI 상승을 발생시킨다. 이로 인해 제안하는 기법 대비 5.48% 높은 평균 AoI 수치를 보였다. 따라서 제안하는 스케줄링 기법이 링크 품질을 고려하였을 때, 단일 AoI 스케줄링 기법보다 더 안정적으로 평균 AoI를 낮출 수 있음을 확인할 수 있었다.

또한, 제안하는 스케줄링 결정 메커니즘이 높은 AoI를 가진 UE에게 자원을 우선으로 부여하도록 설정되었기 때문에 오래된 데이터를 최대한 빠르게 처리한다. 따라서, [그림 6]과 같이 제안하는 스케줄러가 시스템 평균 AoI가 RR 대비 평균 44.27%의 AoI 감소율을 보이며, PF 대비 평균 38.56%의 AoI 감소율을 보임을 확인할 수 있었다.

평균 AoI 감소를 통해 정보의 신선도를 유지하는 것은 중요한 평가 지표이지만, 기존 네트워크 평가 지표도 동시에 고려해야 한다. 따라서 gNB에서 처리한 UE의 평균 Throughput을 비교하여 각 스케줄러의 성능을 확인하였다. 제안하는 스케줄러는 [그림 7]과 같이 RR

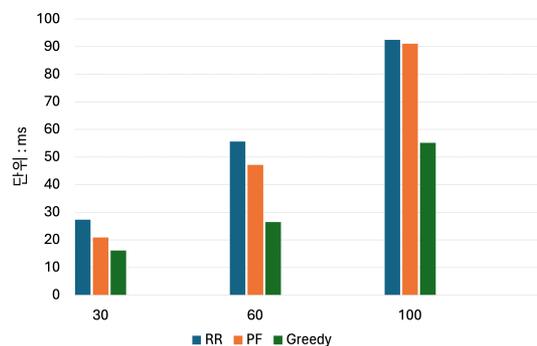


그림 6. UE 개수에 따른 각 스케줄러의 평균 AoI
Fig. 6. Average AoI for each scheduler by number of UEs

대비 **0.83%**의 평균 Throughput 감소율을 보이고 PF 대비 **0.41%**의 평균 Throughput 감소율을 보였다. 이를 통해 제안하는 스케줄러가 평균 Throughput 관점에서 기존 기법 대비 유사한 성능을 나타냄을 확인할 수 있었다.

이어서, 각 스케줄러의 Delay를 측정하기 위해 gNB 최상위 계층(PDCP)에서 처리한 데이터들의 평균을 측정하여 비교하였다. [그림 8]에서는 PF 기법이 현재 데이터 전송률과 이전 슬롯의 평균 전송률의 비율로 계산되기 때문에 현재 채널 상태가 좋은 UE와 동시에 자원을 적게 할당받은 UE에게도 우선으로 자원을 할당하여 RR 대비 낮은 Delay 수치를 보였다. 하지만, 제안하는 기법은 WMA 메트릭을 통해 데이터 전송 성공률이 높은 UE에게만 우선으로 자원을 할당하기 때문에 채널 품질이 좋은 UE가 낮은 Delay로 패킷을 자주 전송할 수 있게 된다. 이에 제안하는 스케줄러가 RR 대비 **9.71%**의 평균 Delay 감소율을 보였고, PF 대비 **2.03%**의 평균 Delay를 감소율을 보였다. 이를 통해 제안하는 스케줄러가 평균 Delay 관점에서 기존 기법 대비 더 좋은 성능을 보임을 확인할 수 있었다.

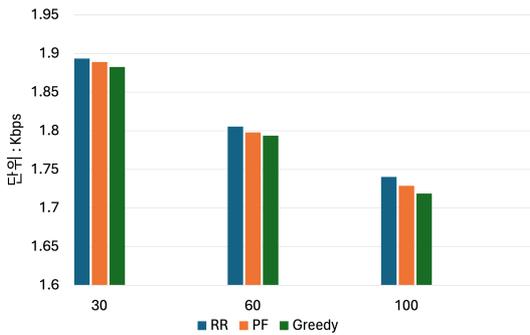


그림 7. UE 개수에 따른 각 스케줄러의 평균 Throughput
Fig. 7. Average Throughput for each scheduler by number of UEs

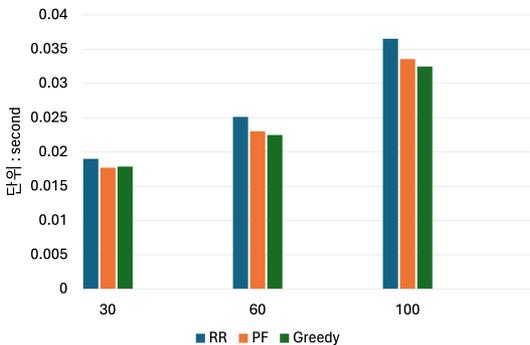


그림 8. UE 개수에 따른 각 스케줄러의 평균 Delay
Fig. 8. Average AoI for each scheduler by number of UEs

또한, 각 스케줄러는 자원 할당 알고리즘의 차이로 인해 시뮬레이션 시간 동안 처리한 데이터 패킷 개수의 차이를 보였다. 이를 측정하기 위해, gNB에서 처리한 패킷 개수를 카운트한 뒤 자원 할당 효율성을 비교 분석하였다. [그림 9]과 같이 RR은 가장 많은 데이터를 처리했지만, [그림 7]과 같이 각 스케줄러가 유사한 Throughput을 보이므로 이는 자원 할당 비효율성을 나타낸다. PF는 메트릭으로 채널 상태를 고려하므로 RR 대비 효율적인 자원 할당을 보였다. 제안하는 스케줄러는 AoI가 높은 패킷에 자원을 할당을 집중시키므로 처리한 패킷 개수는 가장 적지만, 정보의 신선도를 유지하면서 불필요한 네트워크 부하를 줄일 수 있음을 확인할 수 있었다.

자원 할당의 공평성과 정보의 적시성의 관계를 분석하기 위해 RR과 제안하는 스케줄러의 UE 평균 AoI의 최댓값을 비교하였다. [그림 10]에서 RR이 제안하는

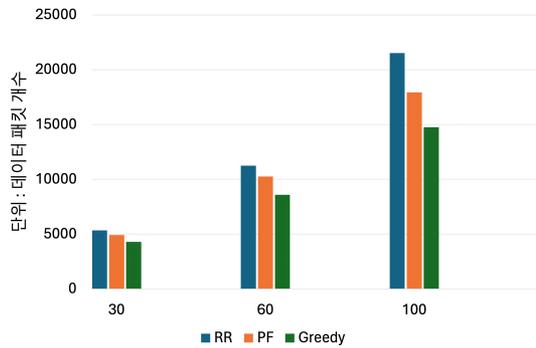


그림 9. UE 개수에 따른 각 스케줄러가 처리한 데이터 패킷의 수
Fig. 9. Number of data packets processed by each scheduler by number of UEs

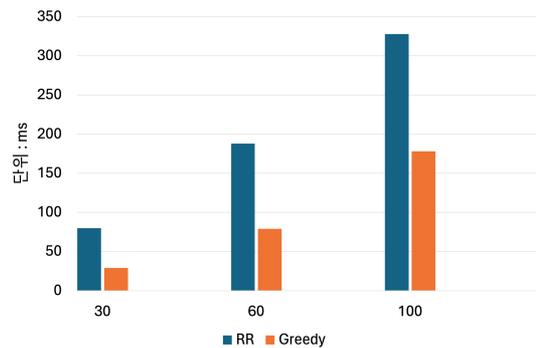


그림 10. UE 개수에 따른 RR 스케줄러와 제안하는 스케줄링 기법에서 처리한 UE의 가장 높은 AoI 수치 비교
Fig. 10. Comparison of the highest AoI numbers for UEs handled by RR scheduler and the proposed scheduling technique, based on the number of UEs

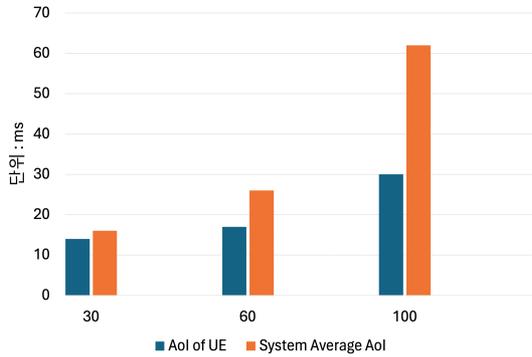


그림 11. UE 개수에 따른 최대 WMA 값을 가진 UE의 평균 AoI와 시스템 평균 AoI의 비교
 Fig. 11. Comparison of the average AoI of UEs with the maximum WMA value by number of UEs versus the system average AoI

스케줄러 대비 UE 평균 AoI의 최댓값이 **108.39%** 높음을 보였다. 이를 통해 가장 공평하게 자원을 할당하는 RR 방식이 정보의 신선도를 유지하기에 부적합한 스케줄링 알고리즘임을 확인할 수 있었다.

마지막으로, [그림 11]에서 제안하는 스케줄러가 가중합 메트릭을 통해 AoI 값과 WMA 값을 반영함으로써, AoI 기반 스케줄러의 자원 낭비 문제를 해결할 수 있음을 확인할 수 있었다. 최대 WMA 값을 가진 UE의 평균 AoI는 시스템 평균 AoI 대비 낮은 수치를 기록함을 볼 수 있었고, mMTC 환경에서 제안하는 스케줄러가 UE의 이전 채널 상태 정보를 정확하게 반영하고 있음을 보였다.

5.3 성능 결과 분석

시뮬레이션 결과를 통해, 제안하는 스케줄링 기법이 기존의 네트워크 성능평가 지표인 Throughput과 Delay 측면에서 RR, PF 기법과 유사한 수준의 성능을 유지하는 것을 확인하였다. 동시에 평균 AoI 감소를 통해 정보의 신선성을 효과적으로 보장함을 증명하였다. 또한, 가중합 결정 메트릭이 WMA 수치를 활용하여 AoI 기반의 우선순위 스케줄링에서 발생할 수 있는 자원 낭비를 방지할 수 있음을 볼 수 있었고, 이를 통해 제안하는 스케줄링 결정 기법이 mMTC 환경에서 효율적으로 자원을 관리함을 입증하였다.

VI. 결 론

본 논문에서는 기존의 Grant 기반 상향 링크 스케줄링 방식이 정보의 적시성을 보장하지 못하는 한계를 해결하기 위해 AoI와 데이터 전송 성공 카운터 지표인

WMA를 고려한 가중합 메트릭 도입 및 스케줄링 결정 알고리즘을 제안하였다. 제안된 스케줄링 기법을 통해 mMTC 환경에서 기존 기법과 유사한 수준의 성능을 유지함을 입증하고, 정보의 최신성 보장 및 AoI 기반 우선 순위 스케줄링에서 발생할 수 있는 자원 낭비 문제를 WMA를 통해 완화할 수 있음을 입증하였다. 시뮬레이션에서 가중합 결정 메트릭으로 AoI와 WMA의 비중을 균형 있게 조정하기 위해서 가중치 x 를 0.5로 설정하여 연구를 진행하였다. 하지만, 가중치 x 의 최적화 수치는 트래픽 패턴과 네트워크 환경에 따라 변화할 수 있는 수치이다. 따라서, 향후 연구에서는 강화학습 기반의 가중치 최적화를 목표로 하여 더욱 유연한 스케줄링 결정을 내리도록 하고자 한다.

References

- [1] B. Soret, A. D. Domenico, S. Bazzi, N. H. Mahmood, and K. I. Pedersen, "Interference coordination for 5G new radio," *IEEE Wireless Commun.*, vol. 25, no. 3, pp. 131-137, Jun. 2018. (<https://doi.org/10.1109/MWC.2017.1600441>)
- [2] H. G. Srinath, M. Rana, and N. M. Balasubramanya, "Grant-free access for mMTC: A performance analysis based on number of preambles, repetitions, and retransmissions," *IEEE Internet of Things J.*, vol. 9, no. 16, pp. 15169-15183, Aug. 2022. (<https://doi.org/10.1109/JIOT.2022.3149013>)
- [3] H. Yin, L. Zhang, and S. Roy, "Multiplexing URLLC traffic within eMBB services in 5G NR: Fair scheduling," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 69, no. 2, pp. 1080-1093, Feb. 2021. (<https://doi.org/10.1109/TCOMM.2020.3035582>)
- [4] J.-S. Kim and T.-W. Kwon, "A study on the efficient load balancing method considering real-time data entry form in SDN environment," *J. Korea Inst. Electr. Commun. Sci.*, vol. 18, no. 6, pp. 1081-1086, Dec. 2023. (<https://doi.org/10.13067/JKIECS.2023.18.6.1081>)
- [5] M. S. Yum, "Proportional fairness scheduling method for optimizing performance of 5G networks for multi users," M.S. Thesis,

Sungkyunkwan University, Seoul, Korea, 2020.
(<https://doi.org/10.23185/skku.000000159620.11040.0010795>)

- [6] C.-D. Lee, "Traffic-oriented stream scheduling for 5G-based D2D streaming services," *J. Korea Soc. Comput. and Inf.*, vol. 27, no. 10, pp. 95-103, Oct. 2022.
(<https://doi.org/10.9708/jksoci.2022.27.10.095>)
- [7] J.-S. Rhee, H.-M. Yoo, and E.-K. Hong, "User association algorithm for improving throughput of cell edge user," *J. KICS*, vol. 49, no. 3, pp. 385-392, 2024.
(<https://doi.org/10.7840/kics.2024.49.3.385>)
- [8] S. Kaul, R. Yates, and M. Gruteser, "Real-time status: How often should one update?," in *Proc. IEEE INFOCOM*, pp. 2731-2735, Orlando, FL, USA, Mar. 2012.
(<https://doi.org/10.1109/INFOCOM.2012.6195689>)
- [9] A. A. Zaidi, et al., "Waveform and numerology to support 5G services and requirements," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 54, no. 11, pp. 90-98, Nov. 2016.
(<https://doi.org/10.1109/MCOM.2016.1600336> CM)
- [10] S. R. Pookhrel, J. Ding, J. Park, O.-S. Park, and J. Choi, "Towards enabling critical mMTC: A review of URLLC within mMTC," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 131796-131813, 2020.
(<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3010271>)
- [11] C. Li, S. Li, Y. Chen, Y. Thomas Hou, and W. Lou, "AoI scheduling with maximum thresholds," in *Proc. IEEE INFOCOM 2020 - IEEE Conf. Comput. Commun.*, pp. 436-445, Toronto, ON, Canada, 2020.
(<https://doi.org/10.1109/INFOCOM41043.2020.9155514>)
- [12] L. Cao, H. Yin, R. Wei, and L. Zhang, "Optimize semi-persistent scheduling in NR-V2X: An age-of-information perspective," in *Proc. IEEE WCNC*, pp. 2053-2058, Austin, TX, USA, 2022.
(<https://doi.org/10.1109/WCNC51071.2022.9771765>)

김 영 진 (Yeong-jin Kim)



2024년 3월~현재 : 경상국립대학교 컴퓨터공학과 학사과정
<관심분야> 5G, 6G, open radio access networks (O-RAN), deep reinforcement learning
[ORCID:0009-0005-5688-1470]

김 범 수 (Beom-su Kim)



2009년 3월~2016년 2월 : 경상국립대학교 항공우주및소프트웨어공학과 (학사)
2016년 3월~2018년 2월 : 경상국립대학교 정보과학과 (석사)
2018년 3월~2022년 2월 : 충남대학교 컴퓨터공학과 (박사)
2022년 7월~2022년 12월 : 펜실베이니아 주립대학교 연수연구원
2023년 9월~현재 : 경상국립대학교 컴퓨터공학과 조교수
<관심분야> 5G/6G, 애드혹 네트워크, 사물인터넷, 기계학습
[ORCID:0000-0001-8035-1967]