

5G URLLC 트래픽의 적시성을 보장하기 위한 Configured-Grant 스케줄링 기법

김지수*, 김범수[°]

A Configured-Grant Scheduling Method for Ensuring Data Freshness under 5G URLLC Scenarios

Ji-Su Kim*, Beom-Su Kim[°]

요약

5G의 주요 응용 시나리오 중 하나인 URLLC(Ultra-Reliable and Low-Latency Communications)에서는 사용자 트래픽이 최대 1ms 이내로 처리되어야 한다. 이를 만족하기 위해 기존 연구들은 Configured-Grant 스케줄링 방식을 통해 주기적으로 발생하는 URLLC 트래픽에 대해 상향링크 자원을 사전에 할당함으로써 초저지연 서비스를 효과적으로 제공해왔다. 그러나 이러한 방식은 throughput, delay, fairness와 같은 전통적인 메트릭에 초점을 맞추어 시스템 성능을 최적화하기 때문에 긴급 데이터의 적시성을 충분히 보장하지 못하는 한계가 있다. 이를 해결하기 위해, 본 논문에서는 데이터의 신선도를 평가하는 AoI(Age of Information)와 패킷의 우선순위를 반영한 W-AoI(Weighted-AoI) 메트릭을 활용하여 URLLC 트래픽의 적시성을 보장하는 새로운 Configured-Grant 스케줄링 기법을 제안한다. 제안된 스케줄러는 NS-3 네트워크 시뮬레이터의 5G-Lena 모듈을 확장하여 구현되었으며, 성능 평가 결과 기존 스케줄링 방식 대비 1ms 전송 주기에서 시스템 평균 AoI를 최대 16.4% 감소시켜 데이터 적시성을 효과적으로 개선할 수 있음을 입증하였다.

키워드 : 5G, OFDM, URLLC, 저지연, 비 승인기반 스케줄링, 각종 정보의 신선도

Key Words : 5G, OFDM, URLLC, low latency, grant-free scheduling, weighted age of information

ABSTRACT

One of the key application scenarios of 5G, URLLC (Ultra-Reliable and Low-Latency Communications), requires user traffic to be processed within 1 ms. To meet this requirement, prior studies have employed Configured-Grant scheduling methods, which allocate uplink resources in advance for periodically generated URLLC traffic, enabling efficient provision of ultra-low-latency services. However, these conventional Configured-Grant scheduling approaches primarily optimize system performance based on traditional metrics such as throughput, delay, and fairness, making it challenging to guarantee the timeliness of urgent data. To address this limitation, this paper proposes a novel Configured-Grant scheduling algorithm that ensures the timeliness of a URLLC traffic by incorporating AoI (Age of Information), a metric representing data freshness, combined with packet priority into the W-AoI (Weighted-AoI) metric. The proposed scheduler is implemented

* 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, logjs@gnu.ac.kr, 학생회원

° Corresponding Author : Gyeongsang National university Department of Computer Science and Engineering, bbk5391@gnu.ac.kr, 종신회원

논문번호 : 202501-017-B-RN, Received January 14, 2025; Revised February 4, 2025; Accepted February 17, 2025

by extending the 5G-Lena module of the NS-3 network simulator. Performance evaluations demonstrate that the proposed approach achieves up to a 16.4% reduction in the average system AoI at a 1 ms transmission period compared to conventional scheduling methods, effectively improving data timeliness.

I. 서 론

5G NR(New Radio)은 초연결, 저지연, 초고속의 특징을 갖고 이를 기반으로 3GPP(Third Generation Partnership Project)는 eMBB(enhanced Mobile Broadband), URLLC(Ultra-Reliable and Low-Latency Communications), mMTC(massive Machine-Type Communications)의 세 가지 서비스를 제시하였다. 국제전기통신연합(International Telecommunication Union (ITU))에서도 주요 사용 시나리오로 정의하였다^[1]. 특히, URLLC 시나리오의 경우 매우 높은 수준의 신뢰성과 낮은 지연 시간을 가진 통신 서비스를 제공해야 한다. 4차산업혁명의 주요 분야인 원격 의료와 자율주행 차량(Autonomous Driving Vehicle, (ADV)), 드론제어, 스마트 공장 등과 같은 응용 분야는 QoS(Quality of Service) 우선순위가 높고, 지연율이 낮은 애플리케이션을 지원하도록 설계되었다.

기존의 셀룰러 시스템의 액세스 기법은 기지국(Base Station, BS)과 패킷 전송 이전에 UE(User Equipment)에게 채널을 액세스할 수 있는 권한을 설정하는 Grant-Based 방식으로 사용되었다. GBA(Grant-Based Access)는 BS와 UE 간의 패킷 전송 이외의 추가적인 통신으로 오버헤드가 증가하고 높은 지연율을 보이는 handshake 스케줄링이다. 그러나, URLLC 시나리오에서 UE의 플레이어 지연 시간은 최대 1ms 내로 처리가 되어야 하고, 32바이트 전송률이 99.999% 이상이어야 한다^[1,2]. 이러한 조건을 달성하기 위해 UE에게 채널을 액세스하는 권한을 주는 과정을 사전에 구성하여 지연 시간을 줄일 수 있는 CGA(Configured-Grant Access) 기법이 제안되었다^[3].

CGA의 대표적인 스케줄링 방식은 RR(Round Robin)과 PF(Proportional Fair)가 있다. RR 방식의 스케줄링은 셀 내 UE의 채널 상태와 관계없이 패킷 처리를 순차적으로 처리한다. 이 스케줄링 방식은 모든 UE에 대해 균등한 기회를 제공하므로 특정 UE가 RB(Resource Block)를 독점하지 않도록 한다. PF 방식의 스케줄링은 UE의 채널 상태와 요구를 고려하여 RB를 분배하므로 RR과 대비해서 전체 RB의 효율성이나 통신 품질을 보장할 수 있지만, 동적 환경 대응이 힘들고 오버헤드 증가 등의 문제가 있다. 최근 두 스케줄링

방식을 응용하여 비경쟁 기반(Contention-Free, CF) 전송 방식과 경쟁 기반(Contention-Based, CB) 전송 방식으로 나누어 다양한 스케줄링 방식이 연구되고 있다^[4-10].

하지만, 개선된 방식의 CGA 상향링크 스케줄링 기법은 정보의 적시성, 즉 AoI(Age of Information)를 고려하지 않고 있다. AoI는 데이터가 생성된 시간으로부터 목적지에 도달하기까지의 경과 시간으로 정의되며, 데이터의 신선도를 평가하는 중요한 지표로 활용된다. 특히, URLLC 시나리오에서는 오래된 데이터일수록 우선적으로 전송하여 AoI를 줄이는 것이 중요하다. 예를 들어, 재난 관리 시스템에서 센서가 초기 지진 진동 데이터를 감지했을 때, 생성된 시간이 오래된 데이터는 해당 지진의 발생 시점을 정확히 파악하는 데 필수적이다. 그러나, AoI를 고려하지 않고 단순히 현재의 지연 시간만을 기준으로 스케줄링할 경우, 오래된 데이터가 우선순위에서 밀려 실시간 데이터를 처리하는 데 필요한 중요한 맥락을 제공하지 못할 수 있다. 이러한 상황은 잘못된 의사결정으로 이어질 가능성이 크다. 따라서 URLLC 시나리오에서는 오래된 데이터를 신속히 전송하여 AoI를 최소화하고 정보의 적시성과 신뢰성을 보장하는 것이 필수적이다.

이러한 문제를 해결하기 위해, 본 논문에서는 AoI를 반영한 CG(Configured Grant) 방식의 UL(Uplink) 스케줄링 방식을 5G NR URLLC 시나리오에 적용하는 것을 목표로 한다. 제안된 스케줄링 기법의 목표는 시스템 전체의 가중 평균 AoI를 최소화하는 것으로, 이를 통해 URLLC의 높은 신뢰성과 초저지연 요구사항을 충족하고 데이터의 적시성을 확보하고자 한다. 이를 위해 각 데이터 패킷의 생성 시점과 네트워크 장비에서 데이터를 수신한 시점을 기준으로 AoI를 계산하고, 긴급한 데이터를 전송하는 사용자 단말에는 높은 우선순위를 부여한다. 스케줄링 과정에서는 높은 AoI 값을 가진 패킷이 우선적으로 처리될 수 있도록 설계되었으며, 패킷의 우선순위에 따라 가중치를 추가로 반영한 W-AoI(Weighted-AoI) 모델을 활용하여 긴급 데이터가 신속히 전송되도록 한다. 이러한 방식은 전체 시스템의 AoI를 효과적으로 줄이고, 정보의 적시성과 신뢰성을 동시에 보장하는 데 기여할 수 있다.

II. 관련 연구

2.1 기존 5G 스케줄링 기법

GBA 스케줄링은 4G LTE(Long Term Evolution) 네트워크에서 UE의 UL 전송을 위해 데이터 전송 전에 SR(Scheduling Requests)을 교환하는 방식으로 1ms의 TTI(Transmission Time Interval)와 10ms의 SR 주기성을 가지므로 최대 11.5ms의 평균 지연이 발생한다. 5G NR의 시스템 요구를 만족시키기 위해 제안된 CGA 스케줄링은 UE가 BS에게 SR을 송신하지 않고 예약된 RB를 직접 활용하여 종단 간 지연 시간을 큰 폭으로 감소시켰다^[3]. CGA 방식 중 CB의 전송 기법으로는 SA(Slotted ALOHA), NOMA(Non-Orthogonal Multiple Access), CS(Compressive Sensing) 기법들이 있다^[4]. CB의 CGA 기법들은 RB를 미리 할당하지 않기 때문에 효율성이 크지만, 채널을 다수의 UE 동시에 접근으로 인한 충돌이 발생하고 이에 따른 백오프 시간이 늘어남에 따라 지연 시간이 증가하는 한계를 지닌다.

그러나, 최근 연구에서 URLLC 환경에서 NOMA 기반의 스케줄링을 개선하기 위해 심층 강화 학습(Deep Reinforcement Learning, DRL)을 활용하는 방법이 제안되었다. CG 기반의 NOMA-URLLC 네트워크에서 UL 스케줄링을 최적화하기 위해 부분 관찰 마르코프 결정 과정(POMDP)를 기반으로 PRO(Proximal Policy Optimization) 알고리즘을 적용하여 신뢰성과 지연 성능을 개선하였다. 특히, DRL을 활용하여 UE의 전송 정책을 최적화함으로써 전통적인 NOMA 대비 패킷 전송률을 향상시키고, 신뢰성과 지연을 동적으로 조정하는 것을 제안한다^[10].

한편, 이러한 CB-CGA 방식의 문제점을 보완하기 위해 채널 충돌을 완화할 수 있는 NORA(Non-Orthogonal Random Access) 기술을 CG와 결합한 CG-NORA를 제시했다. NORA는 같은 대역을 사용하는 UE가 상이한 코드를 통해 패킷을 전송하는 방식인 Code domain이 있고, 동일한 주파수를 이용하는 UE의 전력 수준을 조절하여 다중 접속을 관리하는 방식인 Power domain으로 나눌 수 있다. Code domain CG-NORA의 한 연구 기법은 기존의 기법과 비교하여 Q-learning 기반의 알고리즘을 제시하여 각 UE가 무선 환경을 고려하여 UL을 위한 RB 선택을 학습한 후 패킷 전송 성공률을 증가시켰다^[5]. 또한, 한 프리앰뷸을 둘 이상의 UE가 활용하게 함으로써 기존의 한정적인 직교 프리앰뷸을 지원으로 인한 충돌을 완화하는 결과를 보였디^[6]. Power domain CG-NORA에서도 기존의 기법 대비 Q-learning 기반의 알고리즘을 제안하여 각 UE가

무선 환경을 고려하여 전력 수준을 학습한 후 패킷 전송 성공률을 높였고, 프리앰뷸의 수를 조절하여 기존의 시스템 모델과 비교하여 적절한 프리앰뷸 개수를 분석하여 패킷 전송 성공률을 증가시켰다^[7,8].

NORA를 통한 충돌 방지는 높은 전송 성공률에 초점을 두고 있으나 대부분 다중 연결에 집중하여 지연 시간은 크게 고려하지 않으므로 NORA 이외의 방식이 URLLC에 요구된다. GBA와 SPS(Semi-Persistent Scheduling)방식은 eMBB 시나리오에 적합하고, CGA가 URLLC에 적합한 사용 방법이라는 것을 설명하며, CGA에서 나타나는 충돌 문제를 해결할 수 있는 K-repetitions, HARQ 기법을 채택한 모델을 제시함으로써 URLLC의 저지연과 고신뢰성을 충족하고, 동시에 다른 시나리오인 eMBB의 전송 속도를 최대화하는 방법을 제시한다^[9]. Best CQI와 PF 스케줄링 알고리즘의 장점을 결합하여 간단한 스케줄링 기법을 제안함으로써 URLLC와 eMBB의 요구사항을 충족하고, 다른 복잡한 알고리즘보다 실시간 애플리케이션에 대응할 수 있는 최적에 가까운 성능을 효율적으로 얻을 수 있는 것을 보였다.

신행 연구에서는 기존의 SPS 방식의 한계를 극복하기 위해 SSPS(Smart Semi-Persistent Scheduler)와 ASPS(Adaptive Semi-Persistent Scheduler) 두 가지 기법을 제안한다. SSPS는 시스템의 전체 매개변수를 알고 있는 환경을 전제로 동작하고, ASPS는 네트워크 상태를 실시간으로 분석하여 자원을 동적으로 할당하는 적응형 접근법을 적용한다. 특히, ASPS는 트래픽의 시공간적 상관관계를 고려하여 자원 할당을 최적화를 통한 비주기적 트래픽 환경에서도 높은 성능을 보여 기존 SPS 방식 대비 초기지연을 효과적으로 만족시키며, 시스템의 자원 활용도가 향상됨을 보였다^[14].

기존 연구에서 CG 스케줄링으로 사전에 할당된 자원을 사용하여 실시간과 충돌이 없도록 보장하고 주기적인 트래픽 전송으로 CF-CGA를 다루고 있다^[11]. 주기적인 트래픽을 사용하는 CG에서 모든 트래픽 흐름의 적시성을 만족시키는 스케줄링을 보장하기 위해 두 가지 방법을 제시한다. 첫 번째 방식은 CG의 구성을 수학적으로 구현하여 충돌이 없도록 하는 스케줄링 방식인 SMT(Satisfiability Modulo Theory)이고, 두 번째 방식은 각 CG의 오프셋을 선택하고 충돌 그래프를 생성하여 자원 충돌 관계를 시각화한 후 다중 색칠 알고리즘을 적용하여 RB를 CG에 할당함으로써 대규모 시스템을 효율적으로 처리할 수 있는 그래프 기반의 휴리스틱 방법이 있다. SMT 방식은 정확한 솔루션을 제공하지만 지연 시간이 높을 수 있고, 반면에 그래프 기반의 휴리-

스택 방법은 대규모 네트워크에서 효율적인 성능을 보였으며, SMT 방식과 대비하여 낮은 지연 시간과 더 높은 확장성을 나타냈다.

2.2 AoI의 개념 및 중요성

AoI는 기존의 스케줄링이 처리량과 지연에만 초점을 두는 것에서 나아간 개념으로 데이터가 생성된 시점부터 경과된 시간을 의미하며 데이터가 수신 측에서 개신될 때까지 증가하므로 실시간 데이터 통신이 필요한 여러 분야에서 데이터의 신선도를 측정하는 척도로 이용된다^{[1][2]}. AoI 값의 증가는 실시간 데이터 통신에서 신체 센서나 자율 주행 차량, 자동화 공장 등의 환경에서 QoS가 높은 패킷들에 심각한 악재로 작용할 수 있으므로 이를 최소화하기 위한 스케줄링 알고리즘을 고안하는 연구가 진행되고 있다^{[1][3]}.

III. 시스템 모델 및 문제 정의

3.1 네트워크 모델

본 논문에서 제안하는 네트워크 모델은 ITU에서 5G NR의 주요 시나리오로 채택한 URLLC를 가정한다. 그림 1은 5G NR에서 사용되는 BS인 gNB(next Generation Node B) 기지국이 고정된 위치에 설정되고, 여러 개의 UE가 gNB와 연결될 수 있는 범위 내에서 무작위의 위치에서 생성된 후 연결되는 것을 나타낸다. 휴대전화와 ADV 등의 UE는 고정된 것이 아니라 움직임이 있는 단말들이므로 이동성을 반영하기 위해 휴대전화를 들고 있는 사람의 속도를 최솟값으로 설정하고, 도심 구간의 ADV의 속도를 최댓값으로 설정한다. gNB와 UE는 주기적으로 통신하고, UE가 연결된 gNB 셀의 범위를 벗어나 연결을 끊고 근처의 다른 gNB로 넘어가거나 4G LTE 등의 다른 통신으로 연결되는 handover가 발생하지 않도록 설정한다.

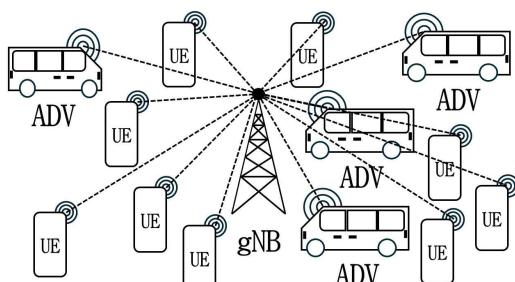


그림 1. gNB에 여러 개의 UE가 연결된 도식
Fig. 1. Schematic with multiple UEs connected to a gNB

3.2 상향링크 스케줄링 모델

본 논문에서 제안하는 UL 스케줄링 알고리즘은 CGA 방식을 기반으로 한다. CGA 방식에서 UE는 전송 버퍼에 항상 데이터가 존재하는 full buffer model을 가정하며, 각 UE는 스케줄링 된 슬롯에서 버퍼에 저장된 가장 최신의 데이터를 전송한다. gNB 스케줄링 요청 및 승인 과정을 초기에 설정하고 UE에게 사전에 RB를 할당하며, gNB에서 각 빔 내의 UE에게 RB를 분배하는 방식은 OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 기술을 사용하여 주파수 자원을 여러 UE에게 직교방식으로 나누어 주고 ISI(Inter-Symbol Interference)를 최소화하여 패킷 전송을 효율적으로 한다. 구체적으로, 제안하는 스케줄링 기법은 각 심볼에서 사용자마다 다른 수의 RBG(Resource Block Group)를 할당하는 RB-OFDMA 방식의 스케줄링 모델을 기반으로 동작한다. RB 할당 이후 gNB는 UE 식별자, 심볼, 할당된 RBG 등의 정보가 포함된 UL DCI(Downlink Control Information) 메시지를 셀 내에 브로드캐스팅 함으로써 UL 스케줄링 정보를 UE에게 전파한다.

3.3 문제 정의: 스케줄링 목표

URLLC 시나리오의 목표를 달성하기 위해 최근 연구들은 기존의 CGA UL 스케줄링 방식은 높은 신뢰성과 초저지연을 구현하는 것에 초점을 두고 이를 기반으로 연구의 성능 평가를 위한 패킷 손실률, 비트 오류율, 종단 간 지연 등을 주요 파라미터를 설정했다. 그러나, 이러한 성능 평가 파라미터는 데이터가 생성되고 실제 정보가 반영되기까지를 고려하지 않으므로 URLLC의 높은 신뢰성과 초저지연을 달성하더라도 궁극적으로 심장박동과 같은 신체 데이터나 복잡한 도심 환경을 주행하는 ADV의 데이터의 적시성 보장이 어려운 문제가 나타난다. 데이터의 적시성을 평가하기 위해, 본 연구에서는 AoI 개념을 적용한다. UE가 n번째 데이터를 생성한 시각을 GT(Generate Time)로 설정하고, gNB가 해당 데이터를 수신한 시각을 RT(Receive Time)로 정의한다. 특정 UE가 n번째 생성한 데이터의 Age 값은 수식 1과 같이 설정한다.

$$Age_n = RT_n - GT_n \quad (1)$$

수식 (1)을 통해 산출한 N개의 Age 값은 gNB에서 수행되는 UL 스케줄링 모델의 추가적인 파라미터로 활용됩니다. 스케줄러는 주기적으로 패킷을 전송하는 UE들의 Age 값을 합산하고, 평균을 최소화하도록 설정하면 데이터의 적시성을 보장할 수 있다. AoI 기반 스케줄

링을 적용하기 위해, Age 값이 큰 패킷을 우선적으로 처리하는 Greedy 결정 방식으로 채택하여 평균 Age 값의 최소화를 달성한다. 하지만, 단순히 AoI만을 UL 스케줄링의 파라미터로 추가하는 것은 긴급한 데이터가 처리되는 데는 효과가 크지 않다. 이를 해결하기 위해, 긴급한 데이터를 전송하는 UE가 패킷에 우선순위를 포함하여 gNB에 전송한다. 또한, AoI 파라미터에 추가적인 기중치(Weighted)를 부여하는 W-AoI 방식을 적용하여, 긴급한 데이터가 높은 Age 값으로 설정되도록 조정한다. 이를 통해 스케줄러의 Greedy 결정 과정에서 긴급 데이터가 우선적으로 처리될 확률이 높아지며, 높은 적시성이 요구되는 데이터를 효과적으로 보장할 수 있다.

IV. 제안하는 스케줄링 알고리즘

4.1 제안하는 UL 스케줄링 알고리즘

제안하는 기법의 기본 아이디어는 CGA 기반의 UL 스케줄링 RB-OFDMA 모델에 gNB와 연결된 각 UE 패킷에 AoI 값을 적용하기 위해 gNB 스케줄러의 파라미터에 Age 값을 수식 1과 같이 생성한다. UE가 패킷을 생성한 시점인 GT로부터 TTI 주기가 지날 때마다 해당 패킷의 Age 값도 1만큼 증가시킨다. 이러한 방식으로 증가하는 Age 값은 해당 패킷이 스케줄러에 의해 성공적으로 처리된 시점까지 증가하고 전송이 완료되면 해당 UE의 Age는 초기 설정값인 1로 설정된다.

스케줄러는 AoI 값이 적용된 새로운 파라미터가 추가되며 전체 UE의 Age 값의 평균을 줄이기 위해 처리 순서를 조정한다. 또한, gNB와 연결된 모든 UE가 다른 QoS를 가지므로 일반적인 데이터와 시급하게 처리되어야 하는 데이터의 처리 순서의 차등을 두기 위해 패킷의 우선순위에 따른 기중치를 설정하는 것을 도입한다. 그림 2와 같이 UE가 gNB로 패킷을 전송하면 순서도의 과정을 거치며 Age 값에 기중치를 설정하고 이를 반영한 W-AoI 테이블을 생성하여 Age와 기중치를 수식 (2)와 같이 계산하여 W-AoI 값을 산출한다.

$$W-AoI_n = \begin{cases} Age_n + 1 * T & (W=1) \\ (Age_n * W) + 1 * T & (W \neq 1) \end{cases} \quad (2)$$

최종적으로 스케줄러는 W-AoI 값의 평균을 최소화하기 위해 처리 순서를 조정한다. 위 과정을 통해 각 UE의 패킷은 스케줄링이 될 때까지 우선순위를 반영한 기중치를 곱하여 각 패킷의 Age 값을 계산한다. 또한, 스케줄러가 패킷을 처리할 때까지 소모된 TTI만큼 Age

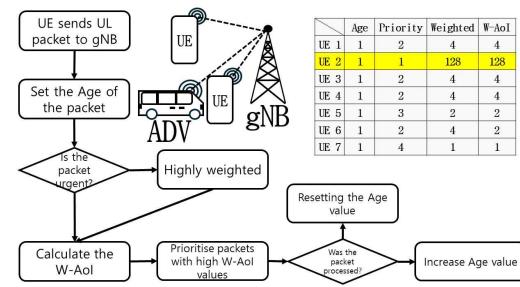


그림 2. W-AoI가 계산되는 과정 순서도와 W-AoI 예시 테이블

Fig. 2. Flowchart showing how W-AoI is calculated and example W-AoI table

값을 증가시킨다. 따라서, AoI 값을 반영하지 않은 기존 스케줄링 방식과 비교했을 때 Greedy 방식으로 높은 AoI 값을 우선 처리할 수 있고, 전체적인 AoI 값을 감소시킨다. Algorithm 1은 이러한 W-AoI 기반 스케줄링 방식을 pseudo code로 나타낸 것이다.

표 1. 알고리즘 1
Table 1. Algorithm 1

Algorithm 1 AoI-based CG scheduling	
Initialization:	
1:	Age $\leftarrow 1$
Function: GetWAge(UE)	
1:	Age $\leftarrow RT-GT$
2:	if Priority == 1
3:	W-Age \leftarrow Age
4:	else then
5:	W-Age \leftarrow Age * Priority * W
Function: CompareUEAoI(Lue, Rue)	
1:	if Lue.W-Age + 1*TTI > Rue.W-Age + 1*TTI
2:	AllocateRB \leftarrow Lue
3:	else then
4:	AllocateRB \leftarrow Rue

V. 성능 평가

제안하는 5G NR UL Greedy 스케줄링 기법의 성능 평가를 위해, 5G NR을 환경을 제공하는 5G-Lena를 C++ 기반의 네트워크 시뮬레이터인 NS-3를 사용한다. 네트워크의 URLLC 시나리오에서 ADV들이 주기적인 통신을 하고 여러 개의 ADV나 UE의 긴급 상황이 발생한 시나리오 환경하에서 기존의 CGA UL 스케줄링 기

법과 제안한 W-AoI를 접목한 UL 스케줄링 기법의 성능을 비교 분석하였다.

5.1 실험 환경 정의

5G NR의 URLLC의 초저지연을 위한 UE와 gNB의 CG 구성을 위해 UE의 UL 버퍼는 full buffer model로 설정하며 각 UE의 UL 패킷은 주기적인 시간에 생성되고 gNB로 전송되는 것으로 설정한다. 시뮬레이션의 영역은 1개의 gNB와 37개의 UE가 생성되고, 각 UE는 $10m^2$ 의 영역에서 랜덤하게 배치된 후 전체 영역 크기인 $100m^2$ 범위 내에서 할당된 속도로 움직이도록 한다. 각 UE에게 할당된 속도는 보행자가 걷는 속도인 최소 $1m/s$ 부터 도심 환경에서 차량이 움직이는 속도인 $14m/s$ 까지 설정된다. gNB는 3개의 Cell 영역 중 1개의 Cell 영역에만 UE가 연결될 수 있도록 설정한다. UE의 전송 주기마다 기중 AoI 값 설정을 위한 각 패킷의 긴급도를 8단계로 나누어 설정한다. UE의 배치 및 속도, 패킷의 긴급도는 설정하는 시드에 따라 변경된다. 패킷의 생성 주기는 $1ms$ 와 $10ms$ 가 있고 패킷 전송 주기에 따라서 설정한다. 표 2는 시뮬레이션에서 사용하는 기본적인 파라미터와 제안하는 스케줄링 알고리즘에 사용한 우선순위로 구성하였다. 본 시뮬레이션은 10초 동안 스케줄러마다 총 10번 시행되었으며, 총 95%의 신뢰구간을 가집니다.

5.2 실험 결과

전체적인 성능 평가 결과, 전통적인 네트워크 스케줄링 기법인 RR과 PF 대비 제안한 스케줄링 기법인 AG(AgeGreedy)이 정보의 적시성을 나타내는 AoI 값이 $10ms$ 의 전송 주기에서 최대 46.2% 감소하는 것을 보였다. 특히 전송 주기가 짧은 URLLC와 같은 경우에도 전송 주기를 $1ms$ 로 설정하였을 때 최대 16.4% 감소

표 2. 시뮬레이션 파라미터
Table 2. Simulation parameters

Parameter	Value
Number of gNB	1
Number of UE	37
Numerology	1 - 2
Bwp	20MHz
Frequency Band	3.55GHz
UE Speed	1 - 14 m/s
Packet Size	10bytes
Packet Generation Period	1, 10 ms
Priority	1 - 8

하였으며 제안하는 기법이 URLLC 환경에서도 제안하는 기법이 AoI 값이 낮은 것을 확인할 수 있었다.

구체적으로, 그림 3과 같이 UE가 패킷을 $10ms$ 주기로 생성하고 gNB로 전송하는 시나리오 1에서는 제안하는 스케줄링 기법은 UE가 생성한 데이터 패킷의 Age 값을 활용하여 처리 순서를 결정하기 때문에 패킷의 긴급도가 반영된 W-AoI 값이 높은 데이터를 우선하여 처리한다. 이에 따라 전통적인 스케줄링 기법인 RR 알고리즘 대비 44.59% 낮은 평균 AoI 수치를 보이며, PF 알고리즘 대비 15.69% 낮은 평균 AoI 값을 보였다.

그림 4와 같이, $10ms$ 의 전송 주기인 시나리오 1에서 제안하는 스케줄링 기법이 시스템에서 높은 Age 값을 우선하여 처리하므로 전통적인 스케줄링 기법 대비 최소 AoI 수치도 낮은 값을 보였다. PF 알고리즘은 10번의 시뮬레이션 동안 낮은 최소 AoI 값을 보였지만, 채널 환경이 좋지 않을 경우 처리에 시간이 소요되어 RR 알고리즘과 비교하였을 때 더 높은 최소 AoI 값을 확인할 수 있었다.

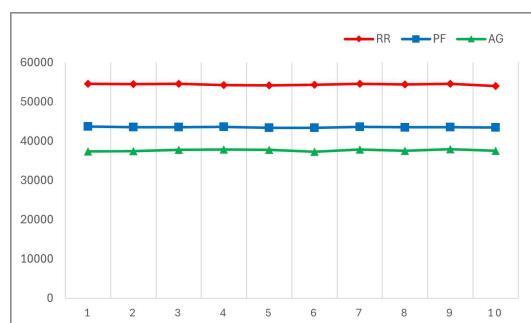


그림 3. 전통적인 방식의 스케줄링과 제안한 스케줄링의 $10ms$ 전송 주기의 평균 AoI 값

Fig. 3. Average AoI values for the traditional scheduling and $10ms$ transmission cycles of the proposed scheduling

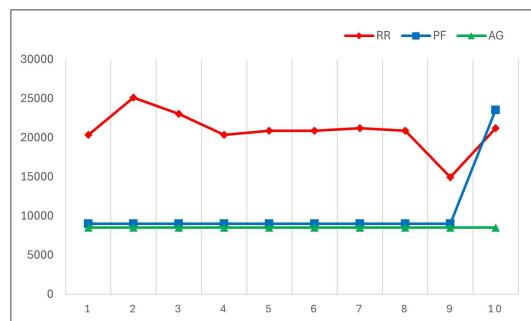


그림 4. 전통적인 방식의 스케줄링과 제안한 스케줄링의 $10ms$ 전송 주기의 최소 AoI 값

Fig. 4. Minimum AoI value of the $10ms$ transfer cycle for traditional scheduling and proposed scheduling

그림 5는 URLLC의 짧은 지연 시간을 충족하기 위해서 Numerology 값을 1에서 2로 변경한 시나리오 2에서는 전통적인 스케줄링 기법과 제안하는 스케줄링의 평균 AoI 값을 나타낸다. Numerology가 2가 됨에 따라 하위 반송파 간격이 30 kHz에서 60 kHz로 두 배가 되어 더 많은 데이터를 빠르게 처리할 수 있지만, 3.55GHz 주파수 대역에서는 간섭으로 인해 PF 알고리즘이 높은 AoI 수치를 보였다. 제안하는 스케줄링 기법은 PF 대비 평균적으로 28.96% 낮은 AoI 값을 보였고, RR 대비 15.39% 낮은 평균 AoI를 확인할 수 있다.

또한, UE가 패킷을 1ms 주기로 생성하고 gNB로 전송하는 시나리오 3에서는 전송 주기가 짧으므로 성능 확인을 위해 패킷을 생성 시간을 기준 ms에서 μ s 단위로 기록하고 Age 값과 AoI 값을 μ s를 기반하여 계산 한다. 그림 6과 같이, 제안하는 스케줄링 기법은 짧은 전송 주기에도 RR 대비 약 4%의 낮은 평균 AoI 값을 보였고, PF 대비 약 12%의 낮은 평균 AoI 값을 나타냈다.

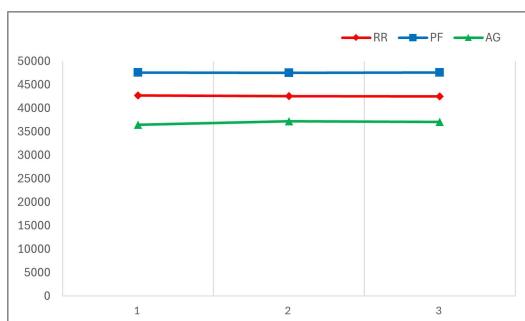


그림 5. 전통적인 방식의 스케줄링과 제안한 스케줄링의 numerology 2 적용 10ms 전송 주기의 평균 AoI 값
Fig. 5. Average AoI value of 10ms transmission cycle applying numerology 2 to traditional scheduling and proposed scheduling

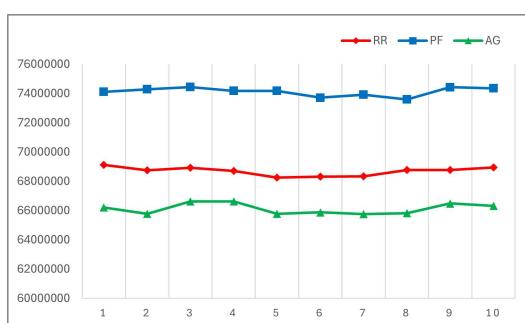


그림 6. 전통적인 방식의 스케줄링과 제안한 스케줄링의 1ms 전송 주기의 평균 AoI 값
Fig. 6. Average AoI values of 1ms transmission cycle of the traditional scheduling and the 1ms transmission cycle of the proposed scheduling

그림 7과 같이, 시나리오 3에서는 전통적인 스케줄링 방식과 제안하는 스케줄링 기법과 최소 AoI 수치가 차이가 큰 폭으로 벌어지는 경우도 보였고, 작은 폭을 보이기도 했다. PF 스케줄링 기법은 채널 환경에 따라서 최소 AoI 값의 변동 폭이 가장 큰 것을 볼 수 있고, RR 스케줄링 기법과 제안하는 스케줄링 기법은 PF 대비 비교적 안정적인 최소 AoI 값을 나타내는 경향을 확인할 수 있다.

그림 8은 Numerology 값을 2를 적용한 시나리오 2에서 전통적인 스케줄링 기법과 제안하는 스케줄링 기법의 평균 AoI 값을 비교한 결과를 나타낸다. 하위 반송파의 간격 증가로 PF는 간섭의 영향으로 높은 평균 AoI를 보였고, RR는 Age 값을 고려하지 않은 균등 배분으로 높은 평균 AoI를 나타냈다. 반면, 제안하는 스케줄링 기법은 데이터의 긴급도를 반영하여 RR 대비 15.38% 낮은 AoI를 나타내고, PF 대비 22.23% 낮은 AoI 값을 보였다.

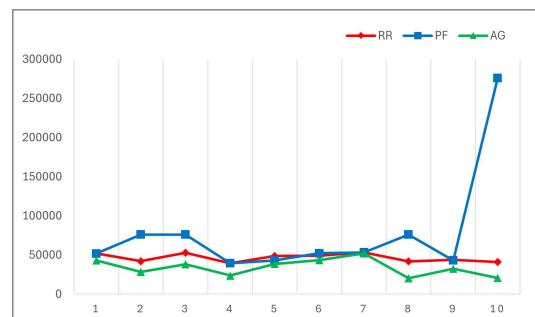


그림 7. 전통적인 방식의 스케줄링과 제안한 스케줄링의 1ms 전송 주기의 최소 AoI 값
Fig. 7. Minimum AoI value for the traditional scheduling and the 1ms transfer cycle of the proposed scheduling

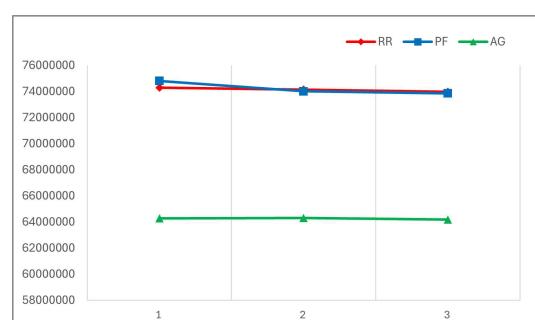


그림 8. 전통적인 방식의 스케줄링과 제안한 스케줄링의 numerology 2 적용 1ms 전송 주기의 평균 AoI 값
Fig. 8. Average AoI value of 1ms transmission cycle applying numerology 2 of traditional scheduling and proposed scheduling

5.3 결과 분석 및 논의

세 가지 스케줄러는 각기 다른 성능을 보인다. RR 스케줄러는 공정한 자원 분배를 보장하지만, 진급 데이터 처리가 비효율적이며, 정보의 적시성을 유지하기 어렵다. PF 스케줄러는 채널 상태를 고려하여 자원을 분배하지만, 낮은 채널 품질을 가진 UE의 데이터 전송이 지연될 가능성이 있어 AoI 최적화에 한계가 있다.

제안하는 W-AoI 기반 스케줄링 기법은 AoI를 최적화하면서 진급 데이터를 우선적으로 처리하여 기존 스케줄링 방식의 한계를 극복했다. 패킷 생성 시간과 진급도를 반영한 W-AoI 값을 이용해 네트워크 상에서 적시의 데이터 전송을 가능하게 하며, 실험을 통해 기존 방식 대비 평균 AoI를 최대 16.4% 감소시킬 수 있음을 보였다.

본 연구에서 제안한 기법은 이론적으로 우수한 성능을 보였지만, 실제 5G 네트워크 환경에서의 적용 가능성을 위해 먼저, 연산 복잡도 및 실시간 처리 가능성을 고려한다. W-AoI 기반 스케줄링은 각 UE의 패킷에 대한 AoI 및 진급도 가중치를 실시간으로 계산해야 하므로 기존 RR 스케줄링 대비 연산 부담이 증가할 수 있다. 그러나 본 연구에서는 복잡한 최적화 기법 대신 Greedy 기반의 알고리즘을 적용하여, 연산 오버헤드를 최소화하면서 실시간 스케줄링이 가능하도록 하였다. 이를 통해 URLLC 시나리오에서 요구하는 1ms 미만의 초저지연 트래픽 처리에도 적합하다.

또한, 본 연구에서 제안한 기법은 5G NR 표준과의 호환성 측면에서도 높은 가능성을 보인다. 3GPP에서 정의한 5G NR 스케줄링 표준에서는 기존의 GB 및 CG 스케줄링 기법이 활용되고 있다. 특히, CG 방식은 URLLC 지원을 위한 핵심 기술로 채택되고 있고, W-AoI 스케줄링 기법은 CG 스케줄링을 확장하는 방식으로 기존 5G NR 표준과의 호환성이 높아 실제 네트워크 환경에서도 적용 가능성이 있다.

이를 통해서 제안된 기법은 다양한 5G URLLC 응용 분야에서 정보의 적시성을 극대화할 수 있으며, 특히 자율주행 통신에서 효과적으로 활용될 수 있다. ADV는 주변 차량 및 도로 인프라와 실시간 데이터를 교환해야 하며, 지연이 발생하면 안전사고로 이어질 수 있다. W-AoI 기반 스케줄링 기법을 적용하면 충돌 감지 및 보행자 탐지 등 긴급한 센서 데이터를 우선 전송하여 차량 간 통신의 안전성을 향상한다.

또한, 원격 의료 및 응급 상황 대응에서도 본 연구의 기법이 적용될 수 있다. 원격 수술이나 응급 의료 서비스에서는 환자의 생체 신호 데이터를 실시간으로 전달하는 것이 중요하다. 기존 RR, PF 스케줄링은 정보의

적시성을 고려하지 않기 때문에 심박수, 혈압 등 중요한 생체 데이터의 전송이 지연될 가능성이 있다. W-AoI 스케줄링을 적용하면 생체 신호 데이터의 우선순위를 조정하여, 의료진이 빠르게 환자의 상태를 파악하고 응급 대응을 할 수 있도록 한다.

VI. 결 론

본 논문에서는 5G NR의 UL 스케줄링에서 정보의 적시성을 보장하기 위해 패킷의 진급도를 반영한 가중치를 고려하여, 시스템 평균 AoI를 Greedy 방식으로 최소화하는 스케줄링 기법을 제안하였다. 제안된 기법은 URLLC 환경에서 기존 스케줄링 방식과 유사한 자연 성능을 유지하면서도, 진급도가 높은 정보에 높은 가중치를 부여하여 시스템이 이를 우선적으로 처리하도록 설계되었다. 이를 통해 정보의 우선순위를 반영하면서 전체 시스템의 평균 AoI를 효과적으로 최소화할 수 있었다.

본 연구의 한계로는 가중치 값 w 가 전송 주기와 네트워크 환경에 따라 진급도가 낮은 데이터의 신선도에 영향을 미칠 수 있다는 점이 있다. 이를 해결하기 위해, 향후 연구에서는 강화 학습(Reinforcement Learning, RL)을 활용하여 가중치 w 를 동적으로 최적화하는 방안을 고려한다. 예를 들어, Deep Q-Network(DQN)과 같은 심층 강화 학습 기법을 활용하여 스케줄링을 Markov Decision Process(MDP)로 모델링한다. 이때 보상 함수를 AoI 최소화, 전송 실패 패널티 등을 반영하여, 네트워크 환경 변화에 가중치 w 를 실시간으로 조정하고 최적의 스케줄링 정책을 학습하도록 한다.

특히, RL 기반 접근법을 적용하면 전송 실패한 패킷의 Age를 낮추기 위해서 w 를 조정하는 적응형 스케줄링이 가능하다. 동적인 네트워크 환경의 음영 지역, 채널 간섭, 네트워크 혼잡 등으로 인해 발생하는 패킷 전송 실패를 고려하여, 새로 생성된 패킷과 기존 패킷의 Age를 함께 최적화한다. 이를 통해, 다양한 네트워크의 동적인 조건에서도 W-AoI 기반 스케줄링의 성능을 유지할 수 있도록 발전시킬 예정이다.

References

- [1] Q. Liu, C. Li, S. Li, Y. Shi, B. Zhou, Y. T. Hou, and W. Lou, "Pistis: A Scheduler to achieve ultra reliability for URLLC traffic in 5G O-RAN," *IEEE Internet of Things J.*, vol. 11, no. 21, pp. 35405-35419, Nov. 2024.

- (<https://doi.org/10.1109/JIOT.2024.3437167>)
- [2] T. Yoshizawa, S. B. M. Baskaran, and A. Kunz, "Overview of 5G URLLC system and security aspects in 3GPP," *2019 IEEE Conf. Standards for Commun. and Netw. (CSCN)*, pp. 1-5, Granada, Spain, Oct. 2019.
(<https://doi.org/10.1109/CSCN.2019.8931376>)
- [3] M. C. Lucas-Estañ, J. Gozalvez, and M. Sepulcre, "On the capacity of 5G NR grant-free scheduling with shared radio resources to support ultra-reliable and low-latency communications," *Sensors*, vol. 19, no. 16, Aug. 2019.
(<https://doi.org/10.3390/s19163575>)
- [4] S. J. Moon and J. W. Lee, "Survey on the grant-free transmission schemes for the 5G communication systems," in *Proc. KICS Conf.*, pp. 1-2, Seoul, Korea, Nov. 2018.
(<https://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE07564962>)
- [5] J. Liu, Z. Shi, S. Zhang, and N. Kato, "Distributed Q-Learning aided uplink grant-free NOMA for massive machine-type communications," *IEEE J. Selected Areas in Commun.*, vol. 39, no. 7, pp. 2029-2041, July 2021.
(<https://doi.org/10.1109/JSAC.2021.3078496>)
- [6] J. Choi, J. Ding, N. P. Le, and Z. Ding, "Grant-free random access in machine-type communication: Approaches and challenges," *IEEE Wireless Commun.*, vol. 29, no. 1, pp. 151-158, Feb. 2022.
(<https://doi.org/10.1109/MWC.121.2100135>)
- [7] M. Fayaz, W. Yi, Y. Liu, and A. Nallanathan, "Transmit power pool design for grant-free NOMA-IoT networks via deep reinforcement learning," in *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 20, no. 11, pp. 7626-7641, Nov. 2021.
(<https://doi.org/10.1109/TWC.2021.3086762>)
- [8] 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>)
- [9] M. W. Nomeir, Y. Gadallah, and K. G. Seddik, "Uplink scheduling for mixed grant-based eMBB and grant-free URLLC traffic in 5G Networks," *2021 17th Int. Conf. Wireless and Mobile Comput., Netw. and Commun. (WiMob)*, pp. 187-192, Bologna, Italy, Oct. 2021.
(<https://doi.org/10.1109/WiMob52687.2021.9606298>)
- [10] B. M. Robaglia, M. Coupechoux, and D. Tsilimantos, "Deep reinforcement learning for uplink scheduling in NOMA-URLLC networks," *IEEE Trans. Machine Learn. in Commun. and Netw.*, vol. 2, pp. 1142-1158, Aug. 2024.
(<https://doi.org/10.1109/TMLCN.2024.3437351>)
- [11] T. Zhang, X. S. Hu and S. Han, "Contention-free configured grant scheduling for 5G URLLC traffic," *2023 60th ACM/IEEE Design Automation Conf. (DAC)*, pp. 1-6, San Francisco, USA, Jul. 2023.
(<https://doi.org/10.1109/DAC56929.2023.10247842>)
- [12] Y. P. Hsu, E. Modiano, and L. Duan, "Age of information: Design and analysis of optimal scheduling algorithms," *2017 IEEE Int. Symposium on Inf. Theory (ISIT)*, pp. 561-565, Aachen, Germany, Jun. 2017.
(<https://doi.org/10.1109/ISIT.2017.8006590>)
- [13] R. D. Yates, Y. Sun, D. R. Brown, S. K. Kaul, E. Modiano, and S. Ulukus, "Age of information: An introduction and survey," *IEEE J. Sel. Areas in Commun.*, vol. 39, no. 5, pp. 1183-1210, May 2021.
(<https://doi.org/10.1109/JSAC.2021.3065072>)
- [14] S. Cavallero, N. S. Grande, F. Pase, M. Giordani, J. Eichinger, and R. Verdone, "A new scheduler for URLLC in 5G NR IIoT networks with spatio-temporal traffic correlations," *ICC 2023 - IEEE Int. Conf. Commun.*, pp. 1010-1015, Rome, Italy, May 2023.
(<https://doi.org/10.1109/ICC45041.2023.10279558>)

김 지 수 (Ji-Su Kim)



2021년 3월~현재 : 경상국립대학교 컴퓨터공학과 학사과정
<관심분야> 5G/6G, open radio access networks (O-RAN), deep reinforcement learning

[ORCID:0009-0001-3309-0474]

김 범 수 (Beom-Su Kim)



2022년 2월 : 충남대학교 컴퓨터 공학과 박사
2022년 7월~2022년 12월 : 펜실 베이니아 주립대학교 연수연구원
2023년 9월~현재 : 경상국립대학교 컴퓨터공학과 조교수
<관심분야> 5G/6G, 애드혹 네트워크, 사물인터넷, 기계학습
[ORCID:0000-0001-8035-1967]