

5G NSA 무선 통신 기반 자율이동로봇의 제조 공정 적용 및 통신 성능 실증

Application and Performance Evaluation of 5G NSA-Based Wireless Communication for Autonomous Mobile Robots in Manufacturing Processes

도경환¹·우종운[†]

KyungHwan Do¹, Jongwoon Woo[†]

Abstract: This study presents the implementation and performance evaluation of a commercial 5G NSA-based wireless communication system for autonomous mobile robots (AMRs) in smart manufacturing environments. A testbed was established using 3.5 GHz NSA networks, industrial 5G routers, and AMRs operating under real factory conditions. Key performance metrics such as latency, jitter, and throughput were measured repeatedly and evaluated against industrial communication standards, including 3GPP TR 22.804. The results showed an average latency of 24.6 ms and jitter of 1.1 ms, with both upload and download speeds exceeding the required thresholds. These findings demonstrate that commercial 5G NSA infrastructure is suitable for AMR-based process automation and real-time monitoring. However, the NSA architecture is limited in supporting ultra-low latency applications (1-10 ms), which are crucial for high-precision control and synchronized operations. Future studies will focus on 5G Standalone (SA) and private network environments to overcome these constraints and enhance wireless performance for industrial robotics.

Keywords: 5G NSA, Autonomous Mobile Robot, Smart Manufacturing, Wireless Communication

1. 서 론

1.1 연구 배경

스마트 제조와 인더스트리 4.0의 본격적인 도입은 제조 환경에서의 디지털 전환을 가속화하고 있으며, 이에 따라 고신뢰·저지연 특성을 갖춘 무선 통신 인프라에 대한 수요가 급격히 증가하고 있다. 특히 다품종 소량생산 체제로의 전환은 생산 유연성을 필수 요소로 만들었으며, 이에 따라 자율이동로봇(AMR) 및 모바일 매니플레이터와 같은 이동형 로봇의 도입은 스마트

제조 환경에서 선택이 아닌 필수적인 구성 요소로 자리잡고 있다^[1]. 이러한 이동형 로봇의 효과적인 운영을 위해서는 유연한 통신 환경이 뒷받침되어야 하며, 이에 따라 유선 중심의 기존 통신 인프라에서 무선 중심의 인프라로의 전환이 요구되고 있다. 현재 산업 현장에서 널리 사용되는 무선 통신 기술은 Wi-Fi 기반 방식으로, 낮은 구축 비용과 접근 용이성 덕분에 다수의 환경에서 활용되고 있다. 하지만 Wi-Fi는 비면허 대역을 활용하기 때문에 외부 간섭에 취약하며, 다수 장비가 밀집한 제조 현장에서 실시간 통신의 안정성과 보안성 확보에 어려움이 있다^[2,3].

이와 같은 한계를 극복하기 위한 대안으로 5세대 이동통신(5G) 기술이 주목받고 있다. 5G는 초고속(eMBB), 초저지연(URLLC), 초연결(mMTC) 특성을 갖춘 차세대 무선 통신 기술로, 제조 로봇 제어, 실시간 공정 감시, 원격 운영 등 다양한 응용에 적합하다^[4].

국내 5G 인프라는 현재 통신 3사를 중심으로 전국적으로 상용망(Public 5G)이 보급되어 있으며, 대부분은 기존 LTE 코어

Received : May. 30. 2025; Revised : Jul. 14. 2025; Accepted : Jul. 17. 2025

※ This work was supported by Robot Industry Technology Development Program (P0014166) funded by the KIAT and 2025 Intelligent Robot Distribution and Expansion Project by the MOTIE of Korea.

1. Senior Researcher, Manufacturing Robot Department, KIRIA, Daegu, Korea (dkk6386@kiria.org)

† Team Leader, Corresponding author: Manufacturing Robot Department, KIRIA, Daegu, Korea (woon@kiria.org)

망을 기반으로 한 NSA (Non-Standalone) 구조를 따르고 있다. 이러한 구조는 초기 투자 비용이 낮고 넓은 커버리지를 제공하는 장점이 있으나, 전용 코어망을 기반으로 하는 SA (Standalone) 방식에 비해 지연 시간 및 품질 보장 측면에서는 제약이 있다. 또한, 산업 맞춤형으로 설계되는 5G 특화망(Private 5G)은 국내에서 아직 상용화 초기 단계로, 실제 제조 현장에 즉시 적용하기에는 한계가 있다.

이러한 상황에서, 제조 현장의 통신 무선화를 실현하기 위한 실질적이고 현실적인 방안은 현재 활용 가능한 상용망 기반 5G 기술을 적용하여 실증을 수행하는 것이다. 특히 이동형 로봇의 운영 신뢰성과 실시간 통신 요구를 만족시키는 수준의 성능을 확보할 수 있는지를 현장에서 실측하고 분석하는 것이 필요하다.

본 연구는 국내 상용 5G 네트워크(NSA 기반, 3.5 GHz 대역)를 활용하여, 스마트 제조 환경 내 자율이동로봇(AMR)의 무선 통신 품질을 실증적으로 계측하고, 상용망 기반 무선 통신이 제조 공정의 실시간 모니터링 및 로봇 운영에 적합한지를 분석하고자 한다.

이를 위해 본 연구에서는 5G 상용망에 연동된 통신 장비와 이동형 로봇으로 구성된 테스트베드를 구축하고, 실제 환경에서 전송 지연, 지터 등 주요 통신 성능 지표를 반복 계측하였다. 측정 결과는 국제표준 문서에서 제시하는 산업용 통신 기준과 비교되었으며, 이를 통해 상용망 기반 5G 통신의 제조 환경 적용 가능성을 실증적으로 평가하였다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 제2장에서는 실증 테스트베드의 구성과 측정 환경을 설명하고, 제3장에서는 측정된 통신 지표에 대한 분석 결과를 제시한다. 제4장에서는 연구의 시사점과 한계, 그리고 향후 연구 방향을 논한다.

1.2 선행 연구 및 유사 사례 고찰

최근 5G 이동통신 기술의 발전에 따라 제조 및 로봇 분야에서도 해당 기술의 적용 가능성에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 특히, 4.7 GHz 이상의 고주파 대역을 활용한 5G SA (Standalone) 통신 환경은 기존 5G NSA (Non-Standalone) 방식에 비해 더 낮은 지연과 높은 안정성의 통신 성능을 제공함으로써, 모바일 엣지 컴퓨팅(MEC), 실시간 제어, 자율 이동 로봇(AMR) 운영 등 고도화된 응용 기술 개발에 적극 활용되고 있다^{5,6)}. 국가별로 5G SA의 상용화 수준이나 주파수 정책에는 차이가 있으나, 각국에서 관련 기술 개발 및 서비스 제공을 위한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 아직 SA가 상용화되지 않은 지역에서는 여전히 5G NSA 기반 환경에서의 활용 가능성에 대한 실증적 접근이 요구되고 있다. 또한, 5G NSA 통신 성능으로 충분히 구현 가능한 경우를 검증하여 불필요한 5G망 구축 사례를 방지하는 데 그 의의가 있다.

무선 통신 성능은 적용 환경에 따라 크게 좌우되며, 특히 제조 공정과 유사한 산업 환경에서는 네트워크 지연, 지터(jitter), 패킷 손실률 등 다양한 요소들이 로봇 제어의 신뢰성과 안전성에 직접적인 영향을 미친다. 따라서, 한국과 같이 NSA 기반 5G 상용망이 주로 사용되는 환경에서는 제조 공정 조건을 반영한 실제 통신 성능을 정량적으로 검증하고, 산업 현장에서의 활용 가능성을 평가하는 연구가 필요하다. 이는 제조 현장 내 자율이동로봇이나 원격제어 시스템을 도입하고자 하는 기업에 기술적 판단 기준을 제공할 수 있다. 또한, 3GPP TR 22.804 국제 표준을 기준으로 한 통신 성능 평가 지표를 적용하여, 측정된 수치가 기술적 요구 조건을 만족하는지를 분석함으로써, 평가의 객관성과 신뢰성을 높이고자 한다.

예를 들어, 상용 5G NSA 통신망 환경에서 모바일 로봇의 영상 전송 및 제어 명령 송수신 기능을 활용하여 원격조작 시스템을 구성하고, 통신 지연 성능을 실측 기반으로 분석하였다⁷⁾. 이 연구에서는 무선 통신 성능은 평균 40 ms의 지연과 9 ms ~ 10 ms의 지터를 관측하였으며, WebRTC 기반의 영상 스트리밍에서는 End-to-End 지연이 약 347 ms로 측정되어 원격 제어에 실질적으로 적용 가능한 수준임을 보였다. 이러한 결과는 5G NSA 기반의 상용 환경에서도 제조 공정 조건에서 AMR 운영이 실현 가능함을 시사하는 중요한 선행 사례이다. 본 논문에서는 한국의 5G NSA 통신망에서 실제 제조 환경을 모사한 테스트베드에서 측정된 성능 평가 결과를 기반으로 5G NSA 통신의 실효성과 산업적 활용 가능성을 입증하고자 한다.

2. 실증 테스트베드 및 통신의 구성

2.1 테스트베드 구성

본 연구는 이동형 로봇 기반의 스마트 제조 환경에서 5G 상용망의 통신 성능을 실증적으로 평가하기 위해, [Fig. 1]과 같이 구축된 한국로봇산업진흥원에 구축된 ‘5세대 통신망 첨단 제조 실증환경 테스트베드’를 활용하였다. 이 테스트베드는 실제



[Fig. 1] 5G Advanced manufacturing substantiation Test bed

제조 현장의 동작 특성을 반영하여 설계된 스마트 팩토리 규모의 실환경 플랫폼으로, 첨단 제조로봇, 이동형 로봇, 공정 제어 장비, 통신 인프라를 통합적으로 구성하고 있다.

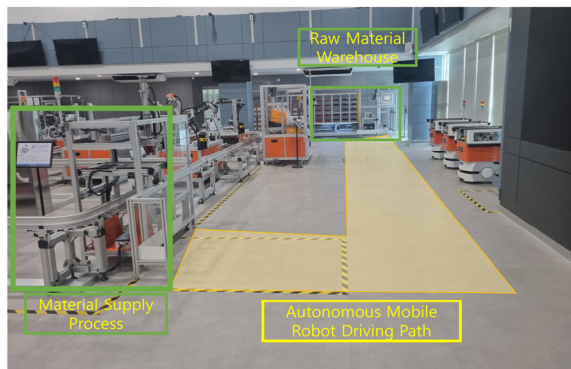
테스트베드에는 총 18종 28대의 로봇 및 자동화 장비가 포함되며, 협동로봇 시스템, 모바일 매니플레이터, 비전 검사기, 드릴 및 조립 장비, 팔레타이징 시스템 등 다양한 제조 장비가 포함된다. 각 로봇 장비는 제어기 및 PLC와 연결되며, 상위 5세대 통신망 실증환경 통합관계 시스템과 OPC UA (Open Platform Communications Unified Architecture) 통신 프로토콜을 통해 연동된다.

이 연구에서는 첨단제조로봇 활용 공정에서 이동 로봇의 5G 무선 통신 성능을 통합적으로 평가하는데 초점을 두었다. [Fig. 2]와 같이 이동 로봇은 원자재 및 공정 완료 결과물을 창고 또는 후속 공정으로 이송하는 역할을 수행한다. 이에 따라 실제 공정 흐름에 투입된 자율이동로봇(AMR)의 이동 구간을 중심으로 통신 지연시간, 전송속도, 지터 등의 주요 네트워크 성능 지표를 실시간으로 계측하고 분석하였다. 실험은 반복 측정을 통해 정량적 지표를 확보할 수 있도록 설계되었으며, 측정된 결과는 국제표준에서 제시하는 통신 요구조건과 비교하여 평가하였다.

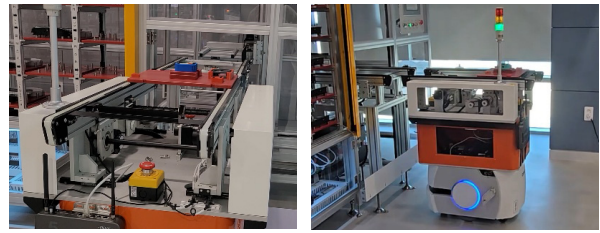
본 실험에서 [Fig. 3]와 같이 사용된 자율이동로봇은 원자재



[Fig. 2] Transportation process of autonomous mobile robot within the test bed



[Fig. 3] Autonomous Mobile Robot Driving Path



[Fig. 4] Autonomous Mobile Robot Raw Material Tray Loading

창고와 조립 공정 간을 반복적으로 이동하였다. [Fig. 4]와 같이 원자재 창고 컨베이어 있는 원자재를 자율이동로봇에 적재하고, 이를 자재 공급 공정의 컨베이어에 원자재를 이송한다. 이때 AMR의 주행 속도는 약 1.1 m/s 속도로 주행하였으며, 5G 라우터(MXR-5Gax)는 로봇 후방 상단에 위치하여 통신이 원활하도록 설계되었다.

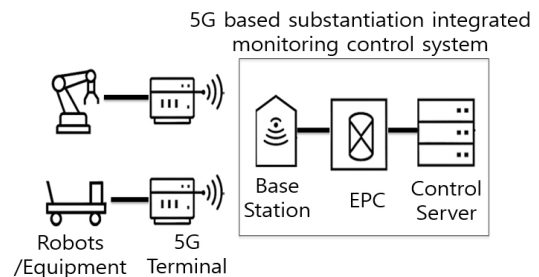
2.2 네트워크 환경 구성

본 절에서는 네트워크 실증환경은 로봇·설비 간 통신을 무선 통신으로 구성하는 것을 목표로 한다. AMR 및 모바일 매니플레이터와 같은 이동형 로봇의 운영 과정에서 발생하는 다양한 통신 시나리오를 고려하였다. 예를 들면 공정 상태 피드백, 제어 명령 전송, 센서 데이터 수집 등 무선 기반으로 구성하고, 이에 대한 통신 품질을 계측할 수 있도록 테스트베드를 구성하였다.

2.2.1 5G 통신망 구성

본 연구에서 사용한 5G 무선 통신 네트워크 인프라는 국내 이동통신사의 상용 5G 네트워크(NSA 기반, 3.5 GHz 대역)를 기반으로 구성하였다. NSA 구조는 기존 EPC (Evolved Packet Core)와 연동되어 5G 기지국을 통해 서비스를 제공하는 방식으로, 비교적 낮은 초기 인프라 투자로도 안정적인 커버리지를 확보할 수 있다는 장점이 있다. 이러한 특성은 실제 제조 환경에 5G 기술을 신속히 적용하기 위한 현실적인 대안으로 평가된다.

실증 테스트베드에는 5G 무선 통신을 위해 산업용 5G 라우터(MXR-5Gax)를 설치하였으며, 이는 자율이동로봇(AMR), 공정 설비 등 무선 통신이 필요한 주요 장비에 직접 연결되어 있다. [Fig. 5]와 같이 네트워크 경로는 로봇/설비 → 5G 라우터



[Fig. 5] 5G wireless communication network diagram

[Table 1] 5G-NSA network configuration

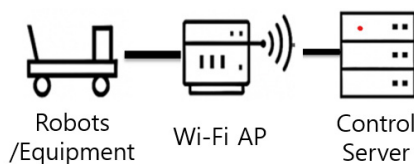
Item	Spec.
Frequency Band	3,500 MHz ~ 3,700 MHz
System Bandwidth	100 MHz
gNB antenna configuration	4Tx4R
Networking	Intra-frequency
MODULATION	256 QAM
Multiple Division	TDD
UL/DL configuration	9:1
UE Tx power	23 dBm
NR Tx power	- 5G antenna (2 Layer) : 4 pcs * 11.9 dBm x 2 pcs, 8.9 dBm x 2 pcs

(단말) → 기지국 → EPC → 방화벽 → 통합관제 서버순으로 구성하였다.

모든 라우터는 실제 제조 현장에서 사용되는 고정 IP를 기반으로 설정하였으며, NAT (Network Address Translation) 및 포트 포워딩(Port Forwarding) 기능을 통해 데이터 송수신 경로가 구현하였다. 이를 통해 다수의 이동형 장비를 단일 5G 상용망 환경에서 안정적으로 운용할 수 있도록 하였으며, 네트워크 성능 측정의 반복성과 계속 재현성을 확보할 수 있도록 설계하였다. 본 테스트베드의 5G 무선통신 사양은 [Table 1] 표와 같다.

2.2.2 Wi-fi 통신망 구성

본 연구에서 사용한 Wi-Fi 통신 네트워크 인프라는 IEEE 802.11ac (2.4 GHz 대역)를 기반으로 구성하였다. Wi-Fi 구조는 유선 백본과 연동되어 무선 공유기(AP)를 통해 서비스를 제공하는 방식으로, 비교적 낮은 초기 구축 비용과 유연한 설치 특성으로 인해 소규모 또는 임시 제조 환경에서 널리 활용된다. 이러한 특성은 기존 통신 인프라가 제한적인 제조 공정 현장에 Wi-Fi 기술을 단기간 내 적용할 수 있는 현실적인 대안으로 평가된다. 실증 대상의 자율주행로봇(AMR)에 Wi-Fi 공유기(IPTime, A2004S, 802.11ac 지원)를 설치하였으며, 실제 제조 환경에서 주로 구성되는 네트워크 구성을 고려하여, [Fig. 6]와 같이 로봇/설비 → Wi-Fi 공유기(AP) → 관제 서버 순으로 구성하였으며, Wi-Fi 무선통신 사양은 [Table 2] 표와 같다.



[Fig. 6] Wi-Fi wireless communication network diagram

[Table 2] Wi-fi (802.11ac) network configuration

Item	Spec.
Frequency Band	5,150 MHz ~ 5,725 MHz
System Bandwidth	20 ~ 80 MHz
gNB antenna configuration	2Tx2R
Networking	CSMA/CA
MODULATION	Up to 256 QAM
NR Tx power	5dBi x 2pcs

2.3 산업용 응용을 위한 통신 성능 기준

스마트 제조 환경에서 자율이동로봇(AMR)이나 모바일 매니플레이터와 같은 이동형 로봇의 도입은 필수적으로 고성능성과 초저지연 통신 특성을 보장할 수 있는 네트워크 환경을 요구한다. 특히 로봇 제어 및 공정 자동화와 같은 미션 크리티컬한 응용에서는 URLLC 특성이 핵심 기술요소로 간주된다. 이에 본 연구는 5G 상용망을 기반으로 한 통신 환경에서의 지연 특성(latency)을 중점적으로 계속하고, 이를 국제 산업 기준과 비교함으로써 실효성을 검증하고자 한다.

통신 성능 기준은 3GPP (3rd Generation Partnership Project) TR 22.804 및 5G-ACIA (Alliance for Connected Industries and Automation) White Paper를 주요 기준으로 삼았으며, 이들 문헌은 산업용 응용 시나리오에 대해 지연 시간, 지터, 전송속도 등의 기준을 정의하고 있다^{18,9)}. 특히 본 논문과 관련하여 이동로봇의 주요 통신 성능 기준은 [Table 3] 표와 같다:

이 기준에 따르면, 100 ms 이하의 지연 성능은 비정밀 제어, 원격 감시, 운영 관리 등의 응용에서 실질적으로 활용 가능한 수준으로 간주된다. 반면, 1-10 ms의 초저지연 성능은 현재 상용망(NR NSA) 환경보다는 특화망(Private 5G) 또는 네트워크 슬라이싱이 적용된 URLLC 구조에서 달성 가능한 수준으로 평가된다.

따라서 본 연구는 현재 국내에서 활용 가능한 상용 5G 인프라가 실제 제조 환경에서 어느 수준의 통신 품질을 제공할 수 있는지 실측을 통해 검증하고, 그 한계와 향후 개선 방향을 논의할 수 있는 근거 자료를 마련하고자 한다.

[Table 3] Communication Performance Indicators for Mobile Robots (3GPP TR 22.804)

Item	Spec.	
Latency	Motion Control	1 ms ~ 10 ms
	Vision-Based Control	10 ms ~ 100 ms
	Operation & Management	40 ms ~ 500 ms
Jitter	Less than 50% of the cycle time	
Data Rate	≥ 10 Mbit/s	

3. 통신 성능 측정 및 분석

본 장에서는 자율이동로봇(AMR)이 운용되는 제조 공정 내 이동 경로를 중심으로, 5G 상용망(NSA)과 Wi-Fi 무선 통신을 통해 측정된 통신 성능 결과를 제시하고, 이를 산업용 요구 성능 기준과 비교하여 분석한다. 측정 항목은 전송 지연(Latency), 지터(Jitter), 전송 속도(Throughput)이며, 각 항목은 반복 실험을 통해 정량화되었으며, 실제 제조 환경에서의 활용 가능성을 검토하는 근거로 활용되었다.

3.1 측정 환경 및 시나리오

통신 성능 측정은 한국로봇산업진흥원의 실증 테스트베드 내에서 수행되었으며, 이동형 로봇이 실제 공정 흐름에 따라 재창고에서 공정에 사용될 재료를 이송하여 조립 공정으로 이송하는 시나리오를 기반으로 구성되었다. 측정 대상 라우터는 이동형 로봇에 직접 부착된 5G 라우터이며, 통신 경로는 2.2절에 기술한 무선 통신망 구조를 따른다. 각 실험은 총 11회 반복 측정되었으며, 계측도구는 통합관제 서버와 연동된 통신 성능 측정 시스템을 사용하였다. 그 결과는 [Table 4] 및 [Table 5] 표와 같다.

3.2 항목별 분석

3.2.1 5G 무선 통신 전송 속도(Throughput)

[Table 6] 표와 같이, 평균 다운로드 전송 속도는 약 815.7 Mbps로 나타났으며, 최소 677.4 Mbps에서 최대 935.9 Mbps까지 분포하였다. 이는 3GPP에서 제시하는 산업용 요구 기준인 10 Mbps를 크게 상회하는 수치로, 고해상도 영상 데이터의 실

[Table 4] Communication Performance of Mobile Robots Based on 5G-NSA Networks

Trial No.	Download Speed (Mbps)	Upload Speed (Mbps)	Latency (ms)	Jitter (ms)
1	935.9	119.8	25	0
2	843	113.8	23	1
3	687.1	117.5	26	0
4	916.9	116.3	24	3
5	726.6	117.7	29	0
6	677.4	115.1	26	1
7	862.9	116.6	23	0
8	727.7	115.1	25	1
9	934.6	117.6	25	1
10	882.1	116.9	23	1
11	778	112.1	22	4
Average value	815.7	116.2	24.6	1.1

[Table 5] Communication Performance of Mobile Robots Based on Wi-Fi Networks

Trial No.	Download Speed (Mbps)	Upload Speed (Mbps)	Latency (ms)	Jitter (ms)
1	659.9	473.0	4	0
2	681.1	561.1	6	0
3	680.4	554.0	6	0
4	667.6	545.9	5	0
5	644.5	500.1	3	0
6	425.6	418.9	3	1
7	633.2	524.1	3	1
8	644.9	406.7	6	0
9	682.6	532.1	4	0
10	378.9	354.5	4	0
11	654.3	428.4	3	0
Average value	613.9	481.7	4.3	0.2

[Table 6] Communication Data Rates of Mobile Robots over 5G-NSA Networks

Metric	Average	Minimum	Maximum
Downlink Data Rate	815.7 Mbps	677.4 Mbps	935.9 Mbps
Uplink Data Rate	116.2 Mbps	112.1 Mbps	119.8 Mbps

시간 스트리밍, 공정 상태 모니터링, 센서 융합 기반 제어 등 대용량 트래픽이 요구되는 응용에도 충분히 대응할 수 있는 수준이다. 특히, 대다수 측정 구간에서 800 Mbps 이상의 전송 속도가 확보되었으며, 이는 5G 상용망 환경에서도 로봇 기반 제조 응용에 충분한 전송 성능을 제공할 수 있음을 시사한다.

업로드 속도의 경우 평균 116.2 Mbps로 측정되었으며, 측정값의 편차도 상대적으로 작아 모든 측정에서 112.1 Mbps 이상을 유지하였다. 이는 공정 중 발생하는 센서 데이터 업링크, 제어기 상태 보고, 클라우드 서버와의 실시간 상호작용 등의 응용에서 요구되는 상향 트래픽을 안정적으로 지원할 수 있는 성능이다. 업로드와 다운로드 모두에서 전송 속도 성능 유지가 안정적으로 확인되었다는 점은 AMR의 연속적 운용 환경에서 긍정적으로 평가된다.

3.2.2 Wi-Fi 무선 통신 전송 속도(Throughput)

[Table 7] 표와 같이, Wi-Fi 환경에서 측정된 평균 다운로드 속도는 약 613.9 Mbps로 나타났으며, 최대값은 682.6 Mbps, 최

[Table 7] Communication Data Rates of Mobile Robots over Wi-Fi Networks

Metric	Average	Minimum	Maximum
Downlink Data Rate	613.9 Mbps	378.9 Mbps	682.6 Mbps
Uplink Data Rate	481.7 Mbps	354.5 Mbps	561.1 Mbps

소값은 378.9 Mbps로 분포되었다. 이는 3GPP TR 22.804에서 제시하는 산업용 통신 기준인 10 Mbps를 크게 상회하는 수준이며, 중간 수준의 영상 스트리밍이나 공정 상태 모니터링 등 다수의 일반적 스마트 제조 응용에 충분히 대응 가능한 성능이다. 그러나 일부 측정값에서는 400 Mbps 이하의 간헐적인 속도 불안정 현상이 계측되었다.

3.2.3 5G 무선 통신 전송 지연(Latency)

[Table 8] 표와 같이, 5G 상용망을 통해 측정된 평균 전송 지연은 24.6 ms로, 3GPP TR 22.804에서 정의한 운영 관리(40~500 ms) 및 영상 기반 제어(10~100 ms) 기준 내에 안정적으로 수렴하였다.

3.2.4 Wi-Fi 무선 통신 전송 지연(Latency)

[Table 9] 표와 같이, Wi-Fi 환경에서의 평균 전송 지연은 4.3 ms로 측정되었으며, 최소 3 ms, 최대 6 ms 범위 내에서 분포되었다. 이는 수치상으로는 5G NSA 대비 짧은 지연 특성을 보이며, 일부 실시간 반응 응용에 적합할 수 있는 성능을 나타낸다.

해당 실험 결과는 3GPP TR 22.804에서 정의한 기계 제어(1~10 ms)를 만족하며, 영상 기반 제어(10~100 ms) 지연 기준을 충분히 만족하고 있다.

3.2.5 5G 무선 통신 지터(Jitter)

[Table 10] 표와 같이, 지터(Jitter)는 평균 1.1 ms로 측정되었으며, 최소 0 ms에서 최대 4 ms 범위 내에서 변화하였다. 지터는 패킷 간 도착 시간의 변동성을 의미하며, 지연의 일관성 확보에 중요한 지표이다. 본 실험에서 측정된 지터는 본 시스템의 주기 시간(100 ms)의 50% 미만인 50 ms 이내 기준을 충분히 만족하며, 통신 과정에서 데이터 수신 간 시간 변동이 매우 작음을 보여준다. 이는 로봇의 제어 명령 수행 시 시간 불일치 현상을 최소화할 수 있는 기반을 제공하며, 제조 공정의 실시간 제어 신뢰성을 높이는 요소로 작용한다.

[Table 8] Communication Latency of Mobile Robots over 5G-NSA Networks

Metric	Average	Minimum	Maximum
Transmission Latency	24.6 ms	22 ms	29 ms

[Table 9] Communication Latency of Mobile Robots over Wi-Fi Networks

Metric	Average	Minimum	Maximum
Transmission Latency	4.3 ms	3 ms	6 ms

[Table 10] Jitter Performance of Mobile Robots over 5G-NSA Networks

Metric	Average	Maximum
Jitter	1.1 ms	4 ms

[Table 11] Jitter Performance of Mobile Robots over Wi-Fi Networks

Metric	Average	Maximum
Jitter	0.2 ms	1 ms

3.2.6 Wi-Fi 무선 통신 지터(Jitter)

[Table 11] 표와 같이, Wi-Fi 환경에서 측정된 지터는 평균 0.2 ms, 최대 1 ms, 최소 0 ms로 나타났다. 이는 매우 안정적인 결과로, 3GPP TR 22.804에서 제시한 “주기 시간의 50% 이하”라는 지터 기준(예: 100 ms 주기 시스템 기준 시 ≤ 50 ms)을 여유 있게 만족하는 수준이다.

3.3 종합 해석

본 연구에서 수행한 통신 성능 측정 결과는 5G NSA 및 Wi-Fi 기반 무선 통신 모두에서 전송 속도, 지연 시간, 지터 항목이 3GPP TR 22.804에서 제시한 산업용 응용 기준을 충족하거나 상회함을 확인하였다. 특히 5G NSA 기반 환경에서는 평균 815.7 Mbps의 다운로드 속도와 116.2 Mbps의 업로드 속도, 평균 24.6 ms의 지연, 1.1 ms의 지터가 측정되어, 고속 데이터 전송과 실시간 공정 모니터링, 피드백 제어와 같은 스마트 제조 시나리오에 적용 가능한 수준의 통신 품질을 입증하였다.

5G NSA에서 업로드 속도가 상대적으로 낮게 측정된 것은, 본 테스트베드의 운용 목적에 따라 QoS 설정이 다운로드 중심으로 구성되었기 때문이며, 이는 실제 산업 현장에서의 관제 명령 수신 및 영상 기반 피드백 우선 순위를 고려한 설정이다. 반면, Wi-Fi 환경에서는 QoS 기반의 트래픽 우선순위 설정이 지원되지 않거나 제한적이기 때문에, 목적 중심의 통신 최적화에 구조적 제약이 존재할 수 있다.

Wi-Fi 기반 통신 역시 평균 613.9 Mbps의 다운로드 속도와 4.3 ms의 지연, 0.2 ms의 지터 등 우수한 수치를 기록하였다. 그러나 Wi-Fi는 비면허 대역을 사용하며 CSMA/CA 기반의 공유 채널 구조 특성상, 실제 제조 환경과 같은 다수 장비 밀집, 실시간 동시 전송이 빈번한 상황에서는 지연 및 지터의 일관성을 보장하기 어렵다. 동일 조건의 경로 구성을 가정할 경우, Wi-Fi의 지연 시간은 실제보다 증가할 가능성이 있으며, 5G의 일정한 지연과 QoS 확보를 위한 산업적 요구에 더 적합하다.

지터 측면에서는 양 기술 모두 주기 시간의 50% 이하 기준을 충족하였으나, 5G는 제어 신호 간 도달 시간의 일관성 측면에서 더 안정적인 성능을 보였다.

4. 결론

본 연구는 상용 5G 무선 통신 인프라(NSA 기반, 3.5 GHz 대역)를 활용하여, 스마트 제조 환경 내 자율이동로봇(AMR)의

통신 성능을 예측하고, 산업용 응용 기준(3GPP TR 22.804)과의 비교를 통해 적용 가능성을 검토하였다. 실증 테스트베드는 실제 공정 흐름을 모사한 시나리오와 반복 측정 기반의 계측 시스템으로 구성되었으며, 전송 속도, 지연 시간, 지터 항목에 대해 정량적으로 분석하였다.

실험 결과, 5G NSA 환경은 전송 속도(평균 다운로드 815.7 Mbps, 업로드 116.2 Mbps), 지연(평균 24.6 ms), 지터(평균 1.1 ms)에서 모두 산업 기준을 만족하였으며, 로봇 기반 공정 자동화 및 실시간 원격 제어 응용에 필요한 통신 품질을 확보할 수 있음을 입증하였다. Wi-Fi 환경 역시 평균 다운로드 613.9 Mbps, 지연 4.3 ms, 지터 0.2 ms로 우수한 수치를 보였으며, 제한된 테스트 조건에서는 산업용 기준을 충분히 만족하였다.

다만, Wi-Fi는 비면허 대역 기반의 공유 채널 구조와 QoS 설정 한계로 인해, 간섭이 빈번하게 발생할 수 있는 실제 산업 환경에서는 통신 품질의 일관성에 제한적이며, 이에 대한 실제 제조 환경에서의 추가적인 검증이 요구된다. 본 연구에서는 실증 테스트베드 내에서 비교적 간섭 요소가 제한된 조건이었기 때문에, 향후에는 다양한 통신 간섭, 부하 조건, 다중 장비 운용 환경에서의 성능 안정성을 평가할 필요가 있다.

따라서 상용 5G NSA는 특화망(SA)이나 전용망 환경 이전에 실용적으로 활용 가능한 현실적 대안으로 평가될 수 있으며, 기계 제어, URLLC 응용 등 고신뢰 통신이 요구되는 영역에서는 SA 기반 5G 특화망 도입이 필요하다. 향후 연구에서는 복수 로봇 운용, 실시간 부하 환경을 반영한 실측 확장 등 추가적인 연구가 요구된다.

References

- [1] A. Kusiak, "Smart manufacturing," *International Journal of Production Research*, vol. 56, no. 1-2, pp.508-517, 2018, DOI: 10.1080a/00207543.2017.1351644.
- [2] J. Ansari, C. Andersson, P. de Bruin, J. Farkas, L. Grosjean, J. Sachs, J. Torsner, B. Varga, D. Harutyunyan, N. König, and R. H. Schmitt, "Performance of 5G trials for industrial automation," *Electronics*, vol. 11, no. 3, Jan., 2022, DOI: 10.3390/electronics11030412.
- [3] European Telecommunications Standards Institute (ETSI), "Security for industrial automation and control (IAC) systems; security requirements for wireless industrial applications," ETSI TS 103 458 V1.1.1, Jun., 2018, [Online], https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/103400_103499/103458/01.01.01_60/ts_103458v010101p.pdf.
- [4] S.-Y. Lee, "Private 5G (e-Um 5G) trend and promotion policy," *J. Korean Inst. Electromagn. Eng. Sci.*, vol. 33, no. 7, pp. 531-540, Jul., 2022, DOI:10.5515/KJKIEES.2022.33.7.531.
- [5] J.-M. Moon, "Performance enhancement techniques for headless driving robot systems: from the perspective of 5G mobile edge computing and local dynamic map platforms," M.S. thesis, Konkuk Univ., Seoul, Republic of Korea, 2025, [Online], https://www.riss.kr/search/detail/DetailView.do?p_mat_type=be54d9b8bc7cdb09&control_no=4fbc69fd9b510be6ffe0bdc3ef48d419, Accessed: May 22, 2025.
- [6] P. Sossalla, J. Rischke, G. T. Nguyen, and F. H. P. Fitzek, "Off-loading robot control with 5G," *2022 IEEE 19th Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC)*, Las Vegas, USA, pp. 461-464, 2022, DOI: 10.1109/CCNC49033.2022.9700709.
- [7] T. B. Levin, J. M. Oliveira, R. B. Sousa, M. F. Silva, B. S. Parreira, H. M. Sobreira, and H. S. Mendonça, "Image and command transmission over the 5G network for teleoperation of mobile robots," *2024 7th Iberian Robotics Conference (ROBOT)*, Madrid, Spain, pp. 1-8, DOI: 10.1109/ROBOT61475.2024.10797434.
- [8] 3rd Generation Partnership Project (3GPP), "Study on Communication for Automation in Vertical Domains," 3GPP TR 22.804 V16.2.0, Dec., 2018, [Online], https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/22_series/22.804/22804-g20.zip.
- [9] 5G Alliance for Connected Industries and Automation (5G-ACIA), *5G for Connected Industries and Automation*, White Paper, Feb., 2019, [Online], https://5g-acia.org/wp-content/uploads/2021/04/WP_5G_for_Connected_Industries_and_Automation_Download_19.03.19.pdf.



도 경 환

2016 경북대학교 전자공학부(학사)
2016~현재 한국로봇산업진흥원 선임연구원

관심분야: 첨단제조로봇, 5G, 로봇 통신, 지능형 로봇



우 종 운

2002 울산대학교 전기전자및자동화공학부(학사)
2006 울산대학교 전기전자정보시스템공학과(석사)
2020 울산대학교 전기전자컴퓨터공학과(박사 수료)

2008~2015 지능형자동차부품진흥원 선임연구원(팀장)
2015~2018 한국로봇산업진흥원 팀장
2018~2019 한국로봇산업진흥원 센터장
2019~2022 한국로봇산업진흥원 단장
2023~현재 한국로봇산업진흥원 수석연구원

관심분야: 자율주행, 지능형 로봇, 서비스 로봇, 첨단제조로봇