

미래 인트라-튜브 초고속 모빌리티를 위한 무선통신 기술 연구

이영석, 김효일*, 정방철

아주대학교, *울산과학기술원

youngseoklee@ajou.ac.kr, *hkim@unist.ac.kr, bcjung@ajou.ac.kr

Research on Interdisciplinary Wireless Communication Technology for Future Intra-Tube High-speed Mobility

Young-Seok Lee, Hyoil Kim*, Bang Chul Jung

Ajou University, *Ulsan National Institute of Science and Technology

요약

본 논문에서는 미래 초고속 모빌리티 구현을 위한 인트라-튜브 무선통신 기술의 필요성과 기존 기술의 한계를 분석한다. 또한, 도파관 및 준자유공간 기반의 새로운 통신 환경을 정의하고, 튜브 구조 및 모빌리티 특성을 반영한 원천기술 개발 방향을 제시한다. 본 연구는 통신-인프라 통합 설계를 위한 기반을 마련하며, 글로벌 모빌리티 산업 전반에 기여할 수 있는 기술적 토대를 제공할 것으로 기대된다.

I. 서론

미래 사회의 중·단거리 및 장거리 초고속 모빌리티 수요에 대응하기 위해, 전 세계적으로 다양한 형태의 모빌리티 기술이 활발히 개발되고 있다. 특히, 직경 수 미터에서 수십 미터에 이르는 대형 원통형 튜브 내에서 고속으로 주행하는 하이퍼루프(Hyperloop)와 유사한 밀폐형 이동 시스템은 차세대 초고속 운송 수단으로 주목받고 있다 [1]. 그러나 이러한 튜브 기반 구조물은 외부 환경과 원천적으로 차단되어 있거나 깊은 지하에 설치되는 경우가 많아, 기존 지상 무선통신 인프라의 서비스 범위를 벗어나게 된다. 이에 따라, 튜브 내부에서도 안정적이고 고신뢰성의 통신이 가능하도록 하는 새로운 형태의 무선통신 기술개발이 필수적이다 [2].

II. 차세대 인트라-튜브 무선통신 기술의 필요성과 개발 방향

미래형 인트라-튜브 초고속 모빌리티 시스템은 본질적으로 폐쇄된 튜브 내부에서의 고신뢰 무선통신 기술을 필요로 한다. 이러한 인트라-튜브 무선통신은 주행 중 탑승객의 안전 확보와 지속적인 인터넷 연결성 제공에 있어 핵심적인 역할을 수행하며, 나아가 튜브 내에 설치된 다양한 사물인터넷(Internet-of-Things: IoT) 센서들과 제어 센터 간의 실시간 정보 교환 수단으로도 활용될 수 있다.

기존 인트라-튜브 환경에서 주로 활용되어 온 무선통신 방식은 leaky feeder로 알려진 동축 케이블(coaxial cable)을 튜브 내부에 설치하는 방식이다. 이 기술은 케이블의 특정 구간에 의도적인 노출부를 형성함으로써, 내부 전자파를 외부로 방사하거나 외부 신호를 수신하는 양방향 통신 기능을 제공하며, 전체 시스템은 일종의 확장된 선형 안테나처럼 동작한다. 그러나 케이블 길이가 길어짐에 따라 신호 누설(leakage)에 의한 손실을 보상하기 위해 다수의 리피터(repeater)를 연속적으로 설치해야 하므로, 초장거리 튜브 환경에 직접 적용하기에는 구조적·경제적 한계가 존재한다. 더욱이, 해당 케이블은 구조적으로 수직 방향으로만 전자파를 방사(또는 커플링)하는 고정된 전파 특성을 갖기 때문에, 튜브의 형상, 재질, 모빌리티 주행 경로 등에 따라 동적으로 최적화된 전파 제어나 적응형 안테나 설계를 적용하기 어려운 제약이 있다.

따라서, 초장대 거대 인트라-튜브 환경에서의 무선통신 기술은 아직 확립된 표준이나 검증된 원천기술이 부재한 초기 연구 단계에 머물러 있다. 특히, 튜브 구조는 직선형 또는 곡선형 등 다양한 형상뿐만 아니라, 금속, 콘크리트 등 이질적인 재질로 구성될 수 있으며, 내부를 주행하는 이동체의 형태, 크기, 밀도 또한 시나리오에 따라 상이하다. 이러한 이질적 특성은 기존 통신 기술의 일괄적 적용을 어렵게 하며, 각 모빌리티 시나리오에 특화된 최적의 무선통신 방식 및 관련 원천기술의 개발이 필수적이다. 거시적인 관점에서 볼 때, 초장

대 튜브 내부 통신 환경은 전자파의 파장이 구조적 경계면에 의해 제약을 받는 도파관(waveguide) 기반 통신 환경으로 해석될 수도 있고, 반사 및 산란 현상이 존재하는 준자유공간(quasi-free-space) 기반 통신 환경으로도 간주될 수 있다. 그러나 이 두 환경 모두에 대해 실효성 있는 무선통신 원천기술은 아직 충분히 발굴되지 않았으며, 새로운 이론적 접근과 실용적 설계 기반의 기술 개발이 요구된다.

III. 결론

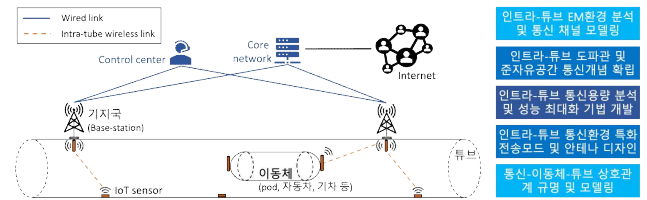


그림 1. 인트라-튜브 통신망 개념도 및 필수 통신 원천기술.

그림 1에 도시된 바와 같이, 본 연구를 통해 인트라-튜브 통신 체계 개발에 필수적인 다양한 원천기술을 확보할 수 있으며, 이는 향후 인트라-튜브 기반 초고속 모빌리티 시스템 구축을 위한 핵심 기술적 기반으로 활용될 수 있다. 특히, 튜브 내부에서의 전자파(electromagnetic wave) 전파 특성은 튜브의 형상 및 재질뿐만 아니라, 이동체의 재질, 형태, 크기 등의 다양한 요소에 따라 크게 달라질 수 있다. 따라서, 튜브 규격을 설계하는 초기 단계에서부터 인트라-튜브 통신 특성과 성능을 통합적으로 고려하는 것이 매우 중요하다. 본 연구에서 도출될 성과들은 국내 인트라-튜브 시스템 개발을 넘어, 향후 글로벌 초고속 모빌리티 산업 전반에서 핵심 기술로 활용될 수 있다.

ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) through the Korean Government (MSIT) under Grant No. RS-2024-00420013.

참고문헌

- [1] W. Hedhly, O. Amin, B. Shihada, and M. -S. Alouini, "Hyperloop communications: Challenges, advances, and approaches," IEEE Open J. Commun. Soc., vol. 2, pp. 2413-2435, Oct. 2021.
- [2] J. Kim, H. Kim, and K.J. Han, "Hyperloop communications: Unveiling electromagnetic propagation in the hyperloop tube," IEEE Veh. Technol. Mag., vol. 17, no. 3, pp. 65-74, Sep. 2022.