

# 저궤도 군집 위성 간 통신 현황 및 주요 기술 동향

차 홍 설\*, 김 종 민\*, 임 병 주\*\*, 이 주 형\*\*\*, 고 영 채°

## A Survey on Inter-Satellite Links for Low-Earth Orbit Satellite Networks

Hong-Seol Cha\*, Jong-Min Kim\*, Byungju Lim\*\*, Ju-Hyung Lee\*\*\*, Young-Chai Ko°

### 요 약

기존의 위성 시스템들은 통신서비스를 제공하기 위하여 주로 고비용의 정지궤도 위성 시스템을 이용하였기 때문에, 저비용의 이동통신 서비스를 제공하는 데에는 여러 가지 한계점이 존재해 왔다. 그러나 최근 위성 발사 기술발전으로 다수의 위성을 저비용으로 운용할 수 있음에 따라, 위성 통신이 개인 무선통신 서비스까지 지원할 수 있을 것으로 전망되고 있다. 특히 저궤도 (Low Earth Orbit, LEO)에 수만 대의 위성을 배치하여 전 지구적 범위로 통신 네트워크를 제공하는 방식이 차세대 통신 분야로 여겨지고 있으며, 이를 LEO 군집 위성 통신 시스템이라고 한다. 해당 LEO 군집 위성 통신 시스템은 크게 위성-지상 간 통신과 위성-위성 간 통신으로 나누어 볼 수 있는데, 이미 성숙기에 접어든 위성-지상 간 통신 기술과는 달리, 위성-위성 간 통신 (Inter Satellite Link, ISL) 기술은 선도국인 미국을 포함해 전 세계적으로 아직 태동기이다. ISL 기술은 통신 지연시간을 최소화하고 초고속 데이터 통신을 실현하기 위해 필수적인 기술이다. 본 논문에서는 해당 ISL 기술을 구현하기 위한 필수 요소 기술들과 기술 현황을 요약하여 국내 위성 통신 기술 개발에 참고가 되고자 한다.

**키워드 :** 무선 광통신, 저궤도 위성, 위성 간 연결

**Key Words :** Free Space Optical Communication (FSO), Low-Earth Orbit (LEO) Satellite Inter-Satellite Link (ISL)

### ABSTRACT

Traditional satellite communication was limited to specific services such as military communication or broadcasting due to the cost and technical complexity issues. However, thanks to the recent development of satellite launch technology, it is envisaged that future satellite communication supports broadband internet services by deploying tens of thousands of satellites in Low Earth Orbit (LEO). The mega-constellation of the LEO satellite communication system consists of satellite-to-ground communication and satellite-to-satellite communication. In particular, inter-satellite link (ISL) technology for satellite-to-satellite communication is in the early stage, while satellite-to-ground communication technology is relatively mature. Thus, many countries have been getting attention to this ISL technology to accomplish low-latency and high-rate LEO satellite communication. In this paper, we summarize the current status of LEO satellite communication technology, focusing on the ISL technology while providing its future direction.

※ 본 연구는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (2021-0-00260, 저궤도 군집 소형 위성 간 통신 기술 개발)

• First Author : School of Electrical Engineering, Korea University, chahongseol@korea.ac.kr, 학생회원

° Corresponding Author : School of Electrical Engineering, Korea University, koyc@korea.ac.kr, 종신회원

\* School of Electrical Engineering, Korea University, botboy0441@korea.ac.kr, 학생회원

\*\* School of Electrical Engineering, Tufts University, byungju.lim@tufts.edu, 정회원

\*\*\* School of Electrical Engineering, University of Southern California, leejhyung@korea.ac.kr, 학생회원

논문번호 : 202203-047-A-RN, Received March 29, 2022; Revised May 17, 2022; Accepted June 6, 2022

## I. 서 론

위성 통신에 활용할 수 있는 위성 종류에는 대표적으로 정지궤도 (Geostationary Orbit, GEO) 위성, 중궤도 (Medium Earth orbit, MEO) 위성, LEO 위성으로 나누어 구분 짓는다. GEO 위성은 36,000 km 상공에 위치한 위성이며, 지구의 자전 주기와 위성의 공전 주기가 같아 지구에서 바라보면 위성이 정지한 것처럼 보인다. GEO 위성은 지상으로부터의 거리가 멀어 통신 지연시간이 500 ms로 가장 길고, 넓은 통신 가용범위 (Coverage) 덕분에 단 3대의 GEO 위성으로 전 지구적 범위에 통신 서비스를 지원할 수 있다. MEO 위성은 고도 1,500-36,000 km 부근에 위치하여 140 ms 수준의 통신 지연시간을 가지는 위성으로, MEO 위성의 통신 가용범위는 GEO 위성보다 좁아 전 지구를 지원하려면 최소 6대의 MEO 위성이 필요하다. GEO, MEO 위성과 다르게, LEO 위성은 가장 낮은 고도인 300-1,500 km 상공에 위치하는 위성으로 지상으로부터의 거리가 가장 짧아 25 ms 수준의 짧은 통신 지연시간을 가진다. 따라서 세 종류의 위성 가운데, LEO 위성을 기반으로 한 위성 통신 기술을 차세대 개인 무선통신 서비스에 접목한다면 지상망으로 서비스가 되지 않은 넓은 지역에 서비스를 제공하는 등 지상망의 한계를 극복하면서도, 기존의 GEO 위성 시스템의 전파지연시간을 크게 단축할 것으로 전망된다. 다만 LEO 위성은 낮은 고도에 위치하여 강한 중력을 받기 때문에 최소 7.8 km/s의 빠른 속력을 유지하며 공전해야 하고, LEO 위성 한 대당 지원하는 통신 가용범위가 작기 때문에 전 지구적 통신 서비스를 제공하기 위해서 수백~수천 대의 LEO 위성이 필요하다는 문제점이 있다<sup>1)</sup>.

LEO 위성을 활용한 저지연 통신 서비스에 대한 기대에도 불구하고, 과거에는 위성 발사에 소요되는 비용이 천문학적으로 높아 대부분의 위성 기술 개발은 주로 정부 주도하에 이루어졌다. 그러나 최근에는 미국의 SpaceX, Amazon, 영국의 OneWeb 등의 민간 기업이 우주 위성 기술 개발에 앞다퉈 뛰어들었으며, 그 결과 위성 발사 비용에 획기적인 절감이 이루어졌다. 특히 미국의 SpaceX에서는 위성 발사의 비용 절감을 위하여 로켓 추진체 재사용에 성공하였으며, 하나의 발사체에 여러 개의 인공위성을 실어 쏘아 올리는 소형위성승차공유 (Small Sat Ride share, SSR) 시스템을 사용하여 로켓 하나에 LEO 위성 88개를 탑재할 수 있음을 보였다<sup>3)</sup>. 위성 발사 비용의 절감은 수만 대의 LEO 위성을 실제 궤도에 안착시키기 위한 기반

표 1. GEO, MEO, LEO 비교<sup>2)</sup>  
Table 1. Comparison of GEO, MEO, LEO<sup>2)</sup>

	GEO	MEO	LEO
Altitude(km)	36,000	1,500 - 36,000	300 - 1,500
Orbital Period(min)	1,440	127-1,440	88-127
Propagation delay(ms)	500	140	25
Satellite Life(year)	10 - 15	10 - 15	3 - 7
Satellite weight(kg)	3,500	700	150
Number of satellites to cover the earth	3	6	hundreds to thousands

을 마련하였으며, 앞으로 LEO 위성을 활용한 저지연 통신 네트워크망은 개개인도 누릴 수 있는 통신 서비스 품질의 향상을 불러올 것으로 기대된다.

이러한 흐름에 발맞추어 3GPP (3rd Generation Partnership Project)에서도 LEO 위성 기반 통신 네트워크와 관련된 표준화 작업을 2017년도부터 진행하고 있으며, 유럽 연합(EU)은 우주산업을 위하여 68억 달러를 투자할 예정이라 밝혔다<sup>4,5)</sup>. 또한, 중국의 Beijing Commsat은 2021년도에 우주 통신 사업 개발을 위해 45억 달러 이상의 투자를 이미 받았고 향후 100억 달러를 더 투자받을 예정이라 밝혔다<sup>6)</sup>. 2022년 2월 기준 미국의 SpaceX는 상공 550 km에 1,879대의 LEO 위성을 궤도에 안착시켜 위성 통신 베타 서비스를 시행하고 있으며, 앞으로 총 42,000대의 위성을 궤도에 안착시키는 것을 목표로 하고 있다<sup>7)</sup>. 더불어 중국의 China Telecom은 2020년도에 향후 5-10년 이내에 LEO 위성 10,000대를, 중국의 CASC (China Aerospace Science and Technology Corporation)는 2021년도에 귀왕 (Guowang, GW)이라는 저궤도 군집 위성 프로젝트로 13,000대의 위성 발사를 목표로 하고 있다고 발표하였다<sup>8,9)</sup>. 해외 각국은 LEO 위성 통신을 미래의 전도유망한 기술로 그 가치를 평가하고 투자를 활발히 진행하고 있다. 그림 1은 LEO 위성 서비스를 제공하는 해외 각국의 기업을 보여준다.

해외뿐만 아니라 국내에서도 위성 통신 분야의 투자가 정부 주도로 이루어지고 있는데, 과학기술정보통신부는 2031년까지 총 14대의 LEO 위성을 발사하고<sup>10)</sup> 저궤도 위성을 포함한 10대 전략기술에 2025년까지 2,000억 원을 투자한다고 발표하였으며, 한화시스템은 2030년 이후 2,000대 이상의 저궤도 위성을 활용한 사업을 추진하겠다고 발표하였다<sup>10,11)</sup>. 우주 공



그림 1. 각국의 LEO 위성 서비스 현황  
Fig. 1. Companies providing LEO satellite services in each country

간은 선착순의 원칙이 적용됨에 따라, 한국이 LEO 위성 통신의 후발주자로서 해외 선도국을 뒤따르고 함께하기 위해서는 정부 주도로 장기 연구 로드맵을 세우고 미래를 위한 과감한 재정 투자가 필요한 상황이다.

수만 대의 LEO 위성을 활용한 통신 네트워크망 개발을 위해서 위성-위성 간 통신을 일컫는 ISL 기술발전이 동반되어야 한다. ISL 기술은 인접한 위성 간 충돌 방지 및 편대 비행을 위해 활용되고, 최적의 통신 경로를 찾아내어 지상에서 대륙 간 장거리 통신의 지연시간 단축을 위하여 사용될 수 있다. 예를 들어, 현존하는 광케이블을 사용하여 런던과 뉴욕을 연결한다면 76 ms 가량의 통신 지연시간이 발생하며, 두 지역을 최단 거리로 잇는 광케이블을 설치하더라도 약 55 ms의 통신 지연시간이 계산된다. 그러나 그림 2와 같이 ISL을 활용하지 않는 벤트-파이프 구조(Bent-pipe)와 ISL이 활용된 재생 구조(Regenerative)의 통신 지연시간을 비교하였을 때, 통신 지연시간이 각각 약 48 ms, 43 ms임이 확인되었다<sup>12-14)</sup>. 따라서, ISL을 활용함으로써 통신 지연시간의 단축을 확인할 수 있으며, 더불어 벤트-파이프 구조를 위해 필요한 지상 기지국의 수를 줄일 수 있다는 점을 확인할 수 있고, LEO 위성 통신 분야에서 ISL에 관한 연구가 반드시 병행되어야 함을 알 수 있다.

LEO 위성 기반 ISL 통신을 위하여 RF (Radio Frequency) 통신과 무선 광통신 (Free Space Optical, FSO 통신) 두 가지가 고려되고 있다. FSO 통신은 기존 RF 통신과 달리 직진성이 강한 nano-meter ( $10^{-9}$  m) 단위의 짧은 파장을 사용하여 높은 전력 효율을 보이며,  $10^{12}$  헤르츠(또는 THz) 단위의 넓은 대역폭을 사용한다. 또한, 요구되는 안테나의 크기가 RF 통신 대비 상대적으로 작아, 적은 무게와 부피를 가진다. 이를 활용하여, 대용량의 데이터를 빠르게 주변 위성에 전송할 수 있으며, 경량화된 소형 송수신기를 활용

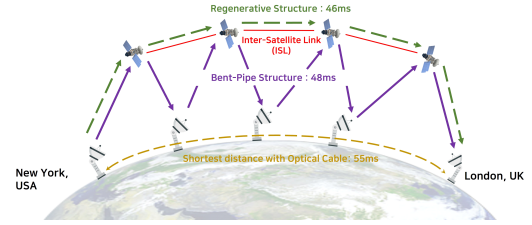


그림 2. 지상 광케이블, 벤트-파이프 구조, 재생 구조 통신의 지연시간 비교  
Fig. 2. Comparison of communication latency between ground-based optical cables, Bent-pipe structure, and regenerative structure

하여 위성 제작 및 발사 비용을 절감할 수 있다. 이러한 장점을 바탕으로 ISL 통신에서는 RF 통신보다 FSO 통신을 사용하는 방안이 제안되고 있다. 실제 SpaceX에서는 2020년도 9월에 궤도에 안착한 LEO 위성을 사용하여 FSO 통신 기반 ISL 성능을 시험하였고 2021년도에 FSO 통신 기반 ISL 성능이 탑재된 위성을 출시하였으며, 2022년도에 Starlink 프로젝트에 FSO 통신 기반 ISL을 탑재하는 것을 목표로 하고 있다고 발표하였다<sup>15,16)</sup>.

본 논문은 차세대 저지연 초고속 통신을 위한 LEO 위성 기반 ISL 기술의 중요성을 설명하고, 그중에서도 ISL을 위한 FSO 통신 기술의 중요성에 대해 살펴보고자 한다. 논문의 2장에서는 LEO 위성 통신 시스템을 이해하기 위해서 위성의 궤도와 궤도면에 대한 정의를 소개하고, 3장에서는 한 대의 LEO 위성을 운행하기 위해 고려되어야 하는 ISL 종류를 소개하려 한다. 이후 4장에서는 FSO 통신 기반 ISL이 RF 통신과 비교하였을 때 더 주목받는 이유를 알아보고 FSO 통신의 현 기술 동향 및 앞으로 나아갈 방향을 기술하고자 한다. 끝으로 본 논문을 통하여 LEO 위성 통신을 위한 ISL 기술 개발의 필요성을 밝히고, 특히 FSO 통신 기반 ISL의 중요성을 강조하며 결론 맺고자 한다.

## II. 위성의 궤도와 궤도면

LEO 위성 통신 시스템을 이해하기 전에 먼저 위성의 궤도와 궤도면을 설명하려 한다. 그림 3은 두 위성의 관계에 따른 위성의 궤도와 궤도면을 보여준다. 두 개 이상의 위성 간 위치 관계를 정의할 때, 동 궤도란 두 위성의 공전 궤도가 같음을 의미한다. 또한, 동 궤도면이란, 각 위성의 공전 궤도를 포함하는 평면이 서로 같음을 의미하며, 고도가 다르더라도 같은 궤도면에 있을 수 있다. 그림 3(a)에서 궤도 1과 2는 궤도

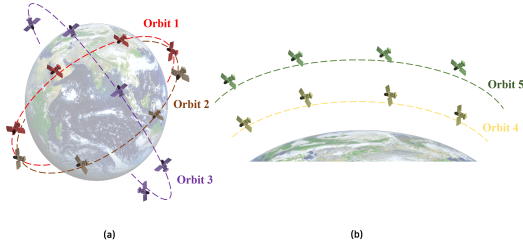


그림 3. 위성의 궤도 및 궤도면  
Fig. 3. Orbit and orbital plane of the satellite

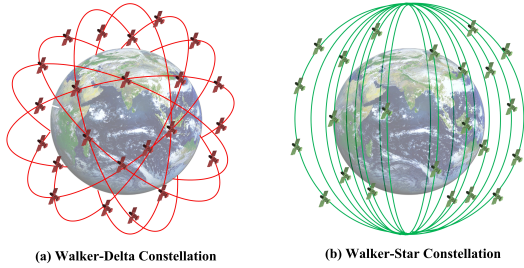


그림 4. 군집 유형  
Fig. 4. Constellation types for LEO satellite

면이 경도가 다른 나란한 궤도로 정렬되었으며, 궤도 3과 서로 교차하는 다 궤도면 관계에 있다. 그림 3(b)의 궤도 4와 5는 같은 궤도면 위에서 움직이지만 두 위성의 고도가 다른 다 궤도 위성으로 정의할 수 있다.

LEO 위성을 어떤 궤도와 궤도면에 배치하느냐에 따라 다양한 군집 유형 (Constellation)을 가지게 되는데, 이는 LEO 위성 통신 시스템의 성능을 결정하는 중요한 요소가 된다. 그림 4는 LEO 위성 군집 유형의 두 가지 예시를 보여주고 있다. 그림 4(a)는 워커 델타 군집 유형(Walker Delta constellation)으로 궤도면의 기울기를 조절하여 상대적으로 통신 수요가 적은 극지방보다 적도지방에 위성이 더 밀집해 배치되도록 설계되었다. 그림 4(b)는 워커 스타 군집 유형(Walker Star constellation)으로 모든 궤도 및 궤도면이 남극과 북극을 잇는 방향을 띤다. 위성의 궤도가 균일한 간격으로 배치되어 고위도에서 통신 가용범위 문제가 발생하는 단점이 있지만, 위성 간 연결이 쉽다는 장점이 있는데 그 이유는 3장에서 설명될 예정이다<sup>17)</sup>.

### III. LEO 위성을 위한 ISL 종류

다양한 LEO 위성 군집 유형에서 발생할 수 있는 ISL의 종류는 그림 5처럼 위성의 위치 관계에 따라 크게 3가지로 나누어 정의할 수 있다. 첫째는 동일 궤

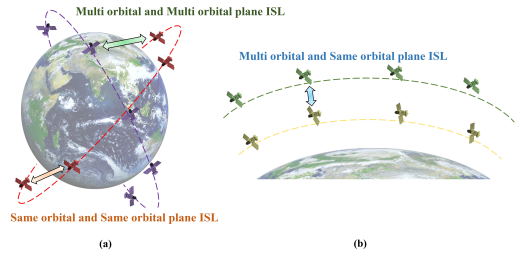


그림 5. ISL 종류  
Fig. 5. The types of ISL

도 및 동 궤도면 ISL, 둘째는 다 궤도 및 동 궤도면 ISL, 셋째는 다 궤도 및 다 궤도면 ISL이다. 그림 5(a)처럼 동일 궤도 및 동 궤도면 ISL은 같은 궤도 및 궤도면 위에서 같은 속력으로 비행하는 위성 간 연결을 의미한다. 이 경우 두 위성이 같은 경로를 앞뒤로 나란히 움직여서 ISL 통신 연결이 비교적 쉽다. 다 궤도 및 다 궤도면 ISL은 서로 다른 궤도면 위를 움직이는 위성 사이의 연결을 의미하며, 나란한 방향을 따라 움직이는 위성의 공전 방향이 서로 같은 경우와 다른 경우 모두 포함한다. 그림 5(b)처럼 다 궤도 및 동 궤도면 ISL은 같은 궤도면 위에서 움직이고 있으나 고도가 다른 두 궤도를 비행하는 위성 사이의 연결을 의미하며, 마찬가지로 두 위성의 공전 방향은 다를 수 있다. 위성들의 궤도가 서로 다르더라도 워커 스타 군집 유형과 같이 동일한 방향으로 공전하면 동일 궤도 및 동 궤도면 ISL처럼 나란히 움직여 ISL 연결이 상대적으로 쉽다. 그러나 워커 델타 군집 유형과 같이 궤도면이 교차하는 상황에서는 LEO 위성 간 상대속도가 커져 정교한 실시간 빔 추적 기술이 뒷받침되어야만 ISL 통신이 안정적으로 동작할 수 있다. 각 궤도와 궤도면이 가지는 장단점을 이해하면 LEO 위성의 군집 유형을 설계할 때 원하는 통신 목적에 맞는 최적의 궤도를 결정할 수 있다.

그림 6은 한 대의 LEO 위성을 운행하기 위해 고려되어야 할 ISL 종류와 개수를 나타낸다. 앞서 언급한 세 가지 ISL을 모두 고려할 때 원활한 LEO 위성 통신 서비스를 제공하기 위하여 하나의 위성은 주변의 위성 5대와 독립적인 ISL 연결이 필요하다. 동 궤도 위를 움직이는 위성 간의 ISL (Intra-orbital plane ISL) 연결, 같은 고도지만 다 궤도면 위를 움직이는 위성 간의 ISL (Inter-orbital plane ISL) 연결, 다른 고도와 다른 궤도면 위를 움직이는 위성 간의 ISL (Inter-orbital ISL) 연결을 보여주고 있다. 하나의 위성은 먼저 동 궤도 및 동 궤도면 내에서 앞서 움직이는 위성과 뒤따라 움직이는 위성과의 ISL 연결 두 개

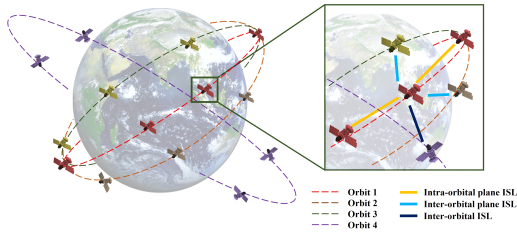


그림 6. 하나의 LEO 위성에 필요한 ISL 종류  
Fig. 6. The required ISL types in a LEO satellite

가 필요하다. 또한, 인접한 동 고도 다 궤도면 위의 위성과의 연결이 필요하며, 원편의 궤도면을 따라 움직이는 위성과 오른편 궤도면을 따라 움직이는 위성, 즉 두 개의 ISL 연결이 더 필요하다. 마지막으로, 교차하는 궤도면을 따라 이동하는 위성과 ISL 연결이 필요하며, 결과적으로 하나의 LEO 위성은 최소 5개의 서로 다른 LEO 위성과 ISL 연결이 필요함을 알 수 있다<sup>18)</sup>. SpaceX에서는 이 개념을 5 ISLs라 칭하고 Starlink 프로젝트에 활용할 것이라 밝혔다. 그러나 반드시 5개의 ISL 연결이 존재하는 것은 아니며, 예를 들어 위커 스타 군집 유형에서는 다 고도 다 궤도면 위성이 존재하지 않으므로 inter-orbital plane ISL을 제외한 4개의 ISL만 연결하여 LEO 위성 통신 시스템을 구축할 수 있다. 독일 TESAT의 FSO 장비인 ConLCT의 경우 15 kg 정도의 무게를 가져 장착하는 데 문제가 없으나, 궤도면에서 설명하였듯이 연결 안정성에 문제가 발생하므로 이를 해결하기 위한 연구가 필요하다. 결국, 차세대 군집 ISL 통신의 핵심은 빠르게 공전하는 LEO 위성 간 5 ISLs 통신의 연결 성능 향상과 안정성 확보에 있다고 말할 수 있다.

#### IV. FSO 통신 기반 ISL

##### 4.1 FSO 통신 기반 ISL (FSO-ISL)의 필요성

군집 위성 네트워크에서 위성 간 연결을 이루는 ISL에는 RF 통신과 FSO 통신 방식을 사용할 수 있다. 이 중 FSO 통신 방식은 nano-meter 수준의 짧은 파장의 레이저 빔을 통신 수단으로 활용한다. 전자기파는 파장이 짧을수록 직진성이 강해지는데, FSO 통신에 사용되는 레이저 빔은 RF 신호에 비하여 1,000배가량 짧은 파장을 가져, 그 결과 1,000배가량 좁은 방사각을 가진다. 표 2에는 FSO 통신과 RF 통신 방식 간의 차이를 비교 및 정리하였다.

Tbps 수준의 초고속 통신을 요구하는 차세대 위성 통신에서는 주파수 자원의 한계와 우주 공간의 채널

표 2. FSO 통신과 RF 통신 비교<sup>[18]</sup>  
Table 2. Comparison of FSO and RF communications<sup>[18]</sup>

	FSO Communication	RF Communication
Wavelength	in nm	수 km-수 mm 대역
Bandwidth	in THz	in kHz-GHz
Antenna size	smaller	bigger
Beam spread	about $10^{-3}$ rad	about 1 rad or more
Power consumption	higher	lower
Spectrum allocation	unlicensed	licensed
Security	very difficult to intercept due to high directivity	easy to intercept
Line-of-sight obstructions	severely impact performance	severely impact performance at mm-wave band

특성으로 성능 열화를 겪는 기존의 RF 통신 방식 대신, 최근 빠른 기술발전을 이루고 있는 FSO 통신 방식이 활용될 것으로 기대되고 있다. ISL에서, FSO 통신 방식은 RF 통신에 비해 송수신 전력 효율이 높으며, 제3의 사용자가 통신 신호를 중간에 도청 또는 간섭 (Jamming)하기 어려워 보안성이 높다. 더불어, FSO 통신 송수신기에 필요한 안테나의 크기는 RF 통신의 경우보다 작아서 수십 cm<sup>3</sup> 수준의 소형 위성에도 탑재할 수 있다. 이는 LEO 위성 발사 비용 절감을 위해 위성을 소형화하는 현재 추세에서 중요한 장점이다. 이와 같이 RF 통신 방식에 비해 여러 장점을 가진 FSO 통신은 LEO 위성 수가 증가함에 따라 폭발적으로 증가하는 ISL 통신량 수요에 대응할 수 있는 미래 핵심기술이다.

##### 4.2 FSO-ISL 통신 기술 동향

###### 4.2.1 국내/외 연구기관 및 기업의 기술 수준

최근 10년간, 미국을 비롯한 해외의 다양한 연구팀에서는 FSO 통신 관련 하드웨어 기반 실측 연구를 진행하였다. 예를 들어, 사우디아라비아의 KAUST 대학 연구팀과 일본의 미쓰비시전기연구소를 포함한 다수의 연구기관에서는 100-200 m 통신거리에서 수십 Tbps 수준의 통신 속도를 실험적으로 선보였다<sup>19-22)</sup>. 국내에서는 2020년부터 한국연구재단의 기초연구실 지원 사업의 일환으로 고려대학교 통신시스템 연구실에서 지상 네트워크 기반 FSO 통신에 관한 연구를 수

행하고 있으며<sup>[23]</sup>, 지금까지 해외 저명학회 INFOCOM에 FSO 실측 연구 논문을 발표하는 학문적 연구성과를 이루었다<sup>[24]</sup>. 또한, 2021년에는 과학기술정보통신부 산하 고려대학교 전파연구센터 연구팀이 1초당 수십 기가비트 ( $10^9$  bits, Gbps) 전송률의 100 m FSO 통신 송수신 테스트베드를 설계하였고 그림 7에서 실제 시연 사례를 확인할 수 있다. 국내 연구기관이 단기간 높은 수준의 FSO 통신 기술 구현을 이룬 것은 분명하지만, 해외 연구기관의 최신 기술 수준과 비교해 FSO 통신 관련 기술 격차는 10년 이상으로 예상된다.

수천 킬로미터 단위의 통신거리를 지원하는 LEO 위성용 FSO-ISL 통신 장비를 제작하는 해외 기업이 공격적으로 사업을 진행 중이다. 대표적으로, 독일의 TESAT, Mynaric, 미국의 General Atomics가 있다. 그림 8에는 TESAT이 2021년도에 발표한 위성 간 FSO 통신 장비 Con LCT와 SMART LCT를 예시로 첨부하였다<sup>[25]</sup>. TESAT은 Con LCT가 LEO 위성 간 통신을 위해 8,000 km 거리에서 10 Gbps의 전송 속도를 지원한다고 주장하였으며, SMART LCT는 LEO 위성과 GEO 위성 사이 통신을 위해 최대 45,000 km 거리에서 1.8 Gbps 전송 속도를 지원한다고 발표하였

다. 경쟁사인 Mynaric과 General Atomics는 2021년 기준 MEO 및 LEO 위성 간 통신을 위해 최대 10,000 km, 5,000 km 거리에서 2.5 Gbps, 5 Gbps의 전송 속도를 지원하는 FSO 통신 단말기를 개발하였다고 주장하였다<sup>[26-28]</sup>. 해당 회사들은 한 쌍의 LEO 위성과 통신하거나 LEO 위성과 주변 MEO, GEO 위성 사이 통신 연결을 위하여 약 1,000 km부터 80,000 km 거리까지 지원하는 FSO 통신 단말기를 목적에 맞게 제작하고 있으며, 실제 위성에 설치해 우주 공간에서의 실험을 진행하고 통신 성능을 검증하는 중이다. 국외 기업들의 공격적인 LEO 위성 FSO-ISL 통신 장비 개발 동향과 달리, 현재 국내에서는 관련 제작 및 개발 기업이 부재한 실정이다.

#### 4.2.2 FSO 통신을 위한 송수신 기법

이론적으로 FSO 통신은 THz 이상의 넓은 대역폭을 이용하여 초고속 통신을 지원할 수 있다. 그러나 현실적으로 샘플링 (Sampling) 속도가 높은 디지털 장비는 하드웨어 구현 복잡도가 높고 비용이 고가이다. 이 문제는 위성에 FSO 통신 단말기를 탑재할 때 치명적인 단점이 되는데, 이를 해결하려면 여러 개의 데이터 스트림을 동시에 생성하고 채널당 대역폭을 좁히는 다중화 기법이 필요하다.

FSO 통신에서 최근 널리 사용되는 다중화 기법은 WDM (Wavelength Division Multiplexing)이다. WDM 기법은 송수신기가 단일 파장의 빔을 사용하는 대신 여러 파장의 빔을 생성하여 다수의 데이터 스트림을 전송한다. 본래 WDM 기법은 유선 광케이블 통신에서 널리 사용되던 기법으로, WDM 기법이 FSO 통신에서도 정상적으로 동작함이 다수의 실험적 연구에서 확인되었다<sup>[29,30]</sup>. 다만 WDM 기법은 여러 파장을 동시에 사용하므로 파장 사이 간격이 넓을수록 송수신 렌즈에서 발생하는 색수차 (Chromatic aberration)의 영향을 크게 받는다. 색수차란 파장에 따른 굴절률 차이로 발생하는 물리적 초점 변화 현상

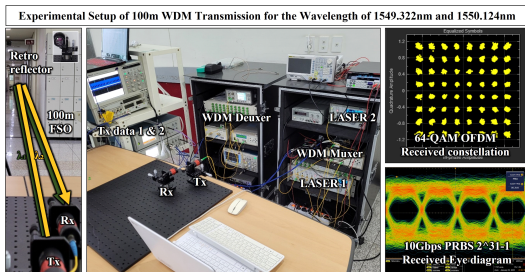


그림 7. 국내 FSO 송수신기 시연 사례 (과학기술정보통신부 산하 고려대학교 전파연구센터)  
Fig. 7. Experiment of FSO communication in Korea University (Radio Research Center under the ministry science and ICT)

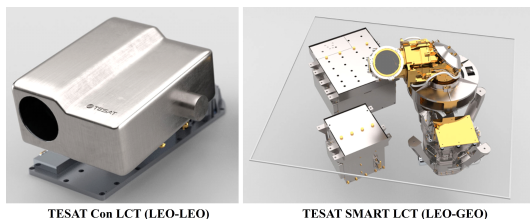


그림 8. TESAT에서 제작한 위성 탑재 FSO 단말기<sup>[25]</sup>  
Fig. 8. Satellite-mounted FSO terminal manufactured by TESAT<sup>[25]</sup>

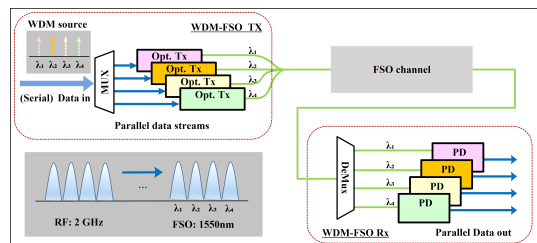


그림 9. WDM 사용한 FSO 통신의 블록선도  
Fig. 9. Block diagram of FSO communication using WDM

으로, 색지움 렌즈 (Achromatic lens)를 사용해 신호 왜곡을 바로잡으면 일정부분 극복할 수 있다. 현지점에서는 WDM 기술이 FSO 통신으로부터 얻을 수 있는 가장 이상적인 통신 성능을 만족시키는 방안으로 인정받고 있다. 그림 9에는 WDM 기법을 이용한 FSO 통신 송수신기의 블록선도를 간략히 나타내었다.

## V. 군집 위성 ISL 관련 필요 기술

### 5.1 송수신기 빔 정렬 기술 (Acquisition Tracking Pointing, ATP)

빠른 속력으로 공전하는 LEO 위성 간 ISL 연결을 위해서는 고도의 ATP 기술 개발이 필요하다. 현재 독일의 TESAT은 자사의 CubeLCT 모델에 intra-orbital plane ISL 통신을 위한 ATP 기술을 도입하였다<sup>31)</sup>. 해당 CubeLCT는 본 위성과 추적하려는 상대 위성의 궤도를 얻기 위하여 SGP4 (Simplified General Perturbation 4) 모델, GNSS (Global Navigation Satellite System) 센서, 위성 간의 비콘 신호를 이용한다. 해당 세 가지 정보를 이용해, 본 위성은 칼만 필터 (Kalman Filter) 기반 ATP 알고리즘을 수행하고 실시간으로 상대 위성의 궤도를 업데이트한다.

그러나 해당 기술은 intra-orbital plane ISL에서만 활용 가능한 기술이며, inter-orbital plane/orbit ISL에서 동작하는 기술은 여전히 개발단계이다. Inter-orbital plane/orbit ISL 통신에서는 통신하고자 하는 각 위성이 빠른 상대속도를 가지는 상황에서 서로를 실시간으로 추적해야 한다. 이러한 제약조건을 극복하며 위성 간 송수신기는 정확한 빔 정렬을 이루어야 하므로, 더욱 정밀하고 효과적인 자동화된 ATP 시스템 기술 개발이 요구된다.

### 5.2 다중입출력 (Multiple Input Multiple Output, MIMO) 시스템

FSO 통신 성능을 개선하기 위해서 대형 안테나 하나 대신 여러 개의 소형 안테나를 사용한 MIMO-FSO 통신 시스템 개발이 필요하다. 그림 10에 MIMO-FSO 시스템에 대한 개요도를 소개하였다. 미국 MIT 대학의 링컨연구소에서는 단일입력 다중출력 (Single Input Multiple Output, SIMO) FSO 통신의 지상 시연을 통해 다중 수신 FSO 통신 시스템의 다이버시티 (Diversity) 이득 증가를 실험적으로 검증하였다<sup>32)</sup>. 여러 개의 소형 안테나는 채널의 다양성을 늘려 FSO 통신 시스템의 다이버시티 이득을 높인다. 또한, 여러 개의 레이저 빔을 병렬로 방사하면 송수신기의 진동

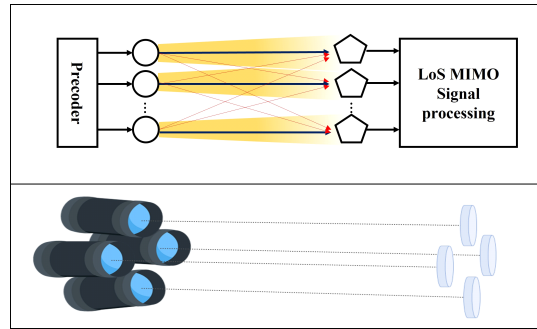


그림 10. MIMO-FSO 시스템  
Fig. 10. MIMO-FSO system

에 의한 빔 조준 오류 (Pointing error)가 보정되고 통신 연결 두절 확률 (Outage Probability)이 낮아진다. 하드웨어 측면에서 바라보면, FSO 통신에서 안테나의 역할을 하는 렌즈가 커질수록 중심이 두꺼워져 무게가 무겁고 제작비용이 비싸지므로 장치 유지 보수에 어려움을 겪는다. 따라서 단일 대형 렌즈를 대신하는 다수의 소형 렌즈를 선택하여 LEO 위성 발사의 비용을 절감할 수 있다. 즉, 미래의 FSO-ISL 통신에서는 MIMO-FSO 기법을 적용하여 통신 신뢰도가 높은 저비용 단말기를 제작할 수 있을 것으로 기대된다.

### 5.3 차세대 ISL 통신 네트워크 프로토콜

미래에 군집화된 LEO 위성의 ISL 통신에서는 두 통신 사용자 간 최적의 라우팅 경로를 생성하고 네트워크 흐름을 원활히 하는 차세대 네트워크 라우팅 프로토콜이 개발되어야 한다. 5 ISLs 통신의 경우 하나의 LEO 위성이 5개의 다른 위성과 연결될 수 있으므로 같은 시간에 사용할 수 있는 통신 채널의 개수가 제한적이다. 제한적인 ISL 링크 내에서 하나의 LEO 위성과 인접한 다른 위성 사이에서 시시각각 변하는 ISL 연결을 안정적으로 지원하는 새로운 라우팅 (Routing) 기술 개발이 필요하다. 또한, 지상-위성 통신에 사용되는 통신 단말기와 위성-위성 통신에 사용되는 통신 단말기 간 네트워크 속도 차에 따른 접속 지연 (Queuing delay)을 최소화하는 최적의 위성 네트워크 프로토콜을 설계해야 한다.

### 5.4 셀 경계가 없는 (Cell-Free) 네트워크망 형성 및 핸드오버 (Hand-over) 기술

LEO 위성의 ISL 기술이 확보되어 안정적인 위성 간 연결성이 확보되면, 그림 11처럼 다수의 LEO 위성을 하나의 독립적인 클러스터로 구성할 수 있다. 이를 Cell-Free LEO 구조라 한다<sup>33)</sup>. 각각의 위성이 클러스

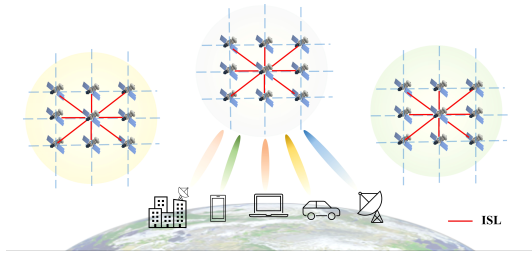


그림 11. Cell-Free LEO 위성의 클러스터 구조  
Fig. 11. Cluster structure of Cell-Free LEO satellite

터 단위로 동작하는 덕분에, 지상 사용자의 통신 서비스 시간이 더 늘어나며, 다음 시간에 연결될 클러스터의 가장자리 LEO 위성이 지상 사용자가 송출하는 파일럿 신호를 먼저 감지해 더 빠르게 다음 핸드오버 절차를 진행할 수 있다. 이때, 클러스터 단위로 구성된 다수의 LEO 위성들을 서로 협력적인 형태로 운용하기 위해서 더욱 정교한 핸드오버 기술이 필요하다. 즉, ISL 링크 연결 기술 개발에 발맞추어 최적의 ISL-핸드오버 기술 개발 또한 요구된다.

## VI. 결 론

본 논문에서는 군집 위성 간 통신을 소개하고 미래의 ISL 통신이 나아가야 할 방향에 대하여 살펴보았다. LEO 위성의 발사 비용감소로 수년 내에 수천~수만 대의 LEO 위성이 발사될 예정인 가운데, LEO 위성들을 서로 연결하는 ISL 통신은 핵심 네트워크 기술로 주목받고 있다. 5 ISLs 통신은 궤도에 따라 2개의 intra-orbital plane ISL, 2개의 inter-orbital plane ISL, 하나의 inter-orbit ISL로 구성되며, 해당 5 ISLs 연결에 성공하면 LEO 위성의 군집 유형이 효율적인 네트워크를 형성해 지상망의 성능을 뛰어넘는 통신 속도를 달성할 수 있다. 특히, ISL 통신에 FSO 통신 방식을 적용하면 높은 전력 효율을 얻고, 위성의 경량화, 소형화가 가능하다. 또한 FSO 통신의 넓은 대역폭으로 Tbps 급 우주 통신을 지원할 수 있어 저비용 고성능으로 LEO 위성 기반 네트워크망을 구축할 수 있다. 군집 LEO 위성 네트워크는 지구 어느 곳에서나 초고속 초저지연 통신을 지원하는 글로벌 네트워크로의 역할을 수행할 것이다. 이를 위해, 세계적 통신 강국인 대한민국이 위성 통신 기술의 선도국인 미국, 유럽을 따라 우위에 서려면 정부의 적극적인 재정지원과 연구 인프라 확보가 수반되어야 한다. 선착순의 원칙을 따르는 우주 통신 분야를 선점하기 위한 신속한 결단이 필요하며, 향후 10년이 미래의 한국 우주 통신

기술력 수준을 평가할 수 있는 갈림길이 될 것이다.

## References

- [1] X. Lin, et al., “On the path to 6G: Embracing the next wave of low Earth orbit satellite access,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 59, no. 12, pp. 36-42, Dec. 2021. (<https://doi.org/10.1109/MCOM.001.2100298>)
- [2] Joint with relevant ministries such as the Ministry of Science and ICT, Development of Micro-satellite and 6G Satellite Communication Technology(2021), accessed Mar., 1, 2022, from <https://www.korea.kr/news/pressReleaseView.do?newsId=156457266>
- [3] Y.-J. Song, *Mathematics flows into space*, Bright, pp. 335-336, 2021.
- [4] Document TR 38.913, “*Study on Scenarios and Requirements for Next Generation Access Technologies*,” V14.2.0, Release 14, 3GPP, 2017.
- [5] “*EU Lays Out \$6.8 Billion Satellite Communication Plan in Space Race*,” News18, last modified Feb. 15, 2022, accessed Mar. 1, 2022, <https://www.news18.com/news/tech/eu-lays-out-6-8-billion-satellite-communication-plan-in-space-race-4776278.html>
- [6] “*Commsat Gets Tens of Millions of Dollars From Stat-Owned Fund as China Backs Satellite Internet*,” YicaiGlobal, last modified Feb. 3, 2021. accessed Mar. 1, 2022, <https://www.yicaiGlobal.com/news/commsat-gets-tens-of-millions-of-dollars-from-state-owned-fund-as-china-backs-satellite-internet>
- [7] “*SpaceX passes 2,000 Starlink satellites launched*,” Spacenews, last modified Jan. 18, 2022, accessed Mar. 3, 2022, <https://space news.com/spacex-passes-2000-starlink-satellites-launched/>
- [8] “*China Plans To Launch 10,000 Satellites To Compete With Elon Musk’s SpaceX*,” Euriantimes, last modified Nov. 19, 2020, accessed Mar. 1, 2022, <https://eurasantimes.com/china-plans-to-launch-10000-satellites-to-compete-with-elon-musks-spacex/>



- [9] “China is developing plans for a 13,000-satellite megaconstellation,” Spacenews, last modified Apr. 21, 2021, accessed Mar. 1, 2022, <https://spacenews.com/china-is-developing-plans-for-a-13000-satellite-communications-megaconstellation/>
- [10] “Ministry of Science and Technology invests 200 billion won in top 10 6G strategic technologies by 2025,” newsis, last modified Jun. 23, 2021, accessed Mar. 1, 2022, [https://www.newsis.com/view/?id=NISX20210622\\_0001485590](https://www.newsis.com/view/?id=NISX20210622_0001485590)
- [11] “Establishment of 14th satellite network to verify 6G low-orbit satellite communication by 2031... Hanwha System promotes the 2000th satellite network after 2030,” dongascience, last modified Jun. 9, 2021, accessed Mar. 1, 2022, <https://www.dongascience.com/news.php?idx=47171>
- [12] “Accelerate Global Broadband Internet Competition”, Science Times, last modified Jul. 1, 2019, accessed Mar. 3, 2022, <https://www.sciencetimes.co.kr/news/%ea%b8%80%eb%a1%9c%eb%b2%8c-%ea%b4%91%eb%8c%80%ec%97%ad-%ec%9d%b8%ed%84%b0%eb%84%b7-%ea%b2%bd%ec%9f%81-%ea%b0%80%ec%86%8d%ed%99%94/>
- [13] “Starlink Simulation Shows Low Latency Without Inter-Satellite Laser Links,” CircleID, last modified Dec. 31, 2019, accessed Mar. 3, 2022, [https://circleid.com/posts/20191230\\_starlink\\_simulation\\_low\\_latency\\_without\\_intersatellite\\_laser\\_links](https://circleid.com/posts/20191230_starlink_simulation_low_latency_without_intersatellite_laser_links)
- [14] M. Handley, “Using ground relays for low-latency wide-area routing in megaconstellations,” in *Proc. 18th ACM Workshop Hot Top. Netw.*, pp. 125-132, 2019. (<https://doi.org/10.1145/3365609.3365859>)
- [15] “Latest Starlink Satellites Equipped with Laser Communications, Musk Confirms,” Via Satellite, last modified Jan. 25, 2021, accessed Mar. 7, 2022, <https://www.satellitetoday.com/broadband/2021/01/25/latest-starlink-satellites-equipped-with-laser-communications-musk-confirms/>
- [16] “Next Starlink Satellites Will Have Inter-Satellite Links, Shotwell Says,” Via Satellite, last modified Aug. 26, 2021, accessed Mar. 7, 2022, <https://www.satellitetoday.com/broadband/2021/08/26/next-starlink-satellites-will-have-inter-satellite-links-shotwell-says/>
- [17] Y. Su, et al., “Broadband LEO satellite communications: Architectures and key technologies,” *IEEE Wirel. Commun.*, vol. 26, no. 2, pp. 55-61, Apr. 2019. (<https://doi.org/10.1109/MWC.2019.1800299>)
- [18] A. U. Chaudhry and H. Yanikomeroglu, “Free space optics for next-generation satellite networks,” *IEEE Consum. Electron. Mag.*, vol. 10, no. 6, pp. 21-31, Nov. 2021. (<https://doi.org/10.1109/MCE.2020.3029772>)
- [19] E. Ciaramella, et al., “1.28-Tb/s (32×40Gb/s) Free-Space Optical WDM Transmission System,” *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 21, no. 16, pp. 1121-1123, Aug. 2009. (<https://doi.org/10.1109/LPT.2009.2021149>)
- [20] M. A. Esmail, A. Ragheb, H. Fathallah, and M. S. Alouini, “Experimental demonstration of outdoor 2.2 Tbps super-channel FSO transmission system,” in *Proc. IEEE Int. Conf. Commun. Wkshps.*, 2016. (<https://doi.org/10.1109/ICCW.2016.7503783>)
- [21] M. A. Esmail, A. Ragheb, H. Fathallah, and M. Alouini, “Investigation and demonstration of high speed full-optical hybrid FSO/Fiber communication system under light sand storm condition,” *IEEE Photonics J.*, vol. 9, no. 1, Feb. 2017. (<https://doi.org/10.1109/JPHOT.2016.2641741>)
- [22] K. Matsuda, et al., “Demonstration of a real-time 14 Tb/s multi-aperture transmit and single-aperture receive FSO system with class 1 eye-safe transmit intensity,” *J. Light. Technol.*, vol. 40, no. 5, pp. 1494-1501, Mar. 2022. (<https://doi.org/10.1109/JLT.2021.3132306>)
- [23] J.-M. Kim and Y.-C. Ko, “Experimental results of 100m indoor and outdoor FSO testbed employing 64-QAM OFDM,” *J. KICS*,

vol. 47, no. 2, pp. 311-318, Feb. 2022.  
(<https://doi.org/10.7840/kics.2022.47.2.311>)

[24] J.-M. Kim, J.-H. Lee, and Y.-C. Ko, "Demo abstract: WLAN standard-based non-coherent FSO transmission over 100m indoor and outdoor environments," in *Proc. IEEE INFOCOM WKSHPs*, 2021.  
(<https://doi.org/10.1109/INFOCOMWKSHPs51825.2021.9484548>)

[25] Tesat-Spacecom GmbH & Co. KG, Products, Retrieved Mar., 7, 2022, <https://www.tesat.de/products>

[26] Mynaric, Products, Retrieved Mar. 31, 2022, <https://mynaric.com/products/space/>

[27] General Atomics, Products & Technology, Defense, Space systems, space technologies, Retrieved Mar. 31, 2022, <https://www.ga.com/space-systems/space-technologies#:~:text=GA%20DEMS'%20Optical%20Communication%20Terminals,orbit%20computing%20resources%20in%20space.>

[28] R. Li, B. Lin, Y. Liu, M. Dong, and S. Zhao, "A survey on laser space network: terminals, links, and architectures," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 34815-34834, 2022.  
(<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3162917>)

[29] Z. Zhao, Z. Zhang, J. Tan, Y. Liu, and J. Liu, "200 Gb/s FSO WDM communication system empowered by multiwavelength directly modulated TOSA for 5G wireless networks," *IEEE Photonics J.*, vol. 10, no. 4, Aug. 2018.  
(<https://doi.org/10.1109/JPHOT.2018.2851558>)

[30] W. Tsai, et al., "A 50-m/320-Gb/s DWDM FSO communication with afocal scheme," *IEEE Photonics J.*, vol. 8, no. 3, Jun. 2016.  
(<https://doi.org/10.1109/JPHOT.2016.2555618>)

[31] H. Yoon, "Pointing system performance analysis for optical inter-satellite communication on CubeSats," Ph.D Thesis, Massachusetts Institute of Technology, 2017.

[32] D. J. Geisler, et al., "Experimental demonstration of multi-aperture digital coherent combining over a 3.2-km free-space link," in *Proc. SPIE*, pp. 86-93, 2017.  
(<https://doi.org/10.1117/12.2256581>)

[33] M. Y. Abdelsadek, H. Yanikomeroglu, and G. K. Kurt, "Future ultradense LEO satellite networks: A cell-free massive MIMO approach," *IEEE ICC Wkshps.*, pp. 1-6, 2021.  
(<https://doi.org/10.1109/ICCWorkshops50388.2021.9473753>)

차 흥 설 (Hong-Seol Cha)



2020년 8월 : 고려대학교 전기  
전자공학부 학사  
2021년 3월~현재 : 고려대학교  
전기전자공학과 석박사통합  
과정  
<관심분야> 통신공학, 위성통  
신, 무선광통신

[ORCID:0000-0002-2353-4780]

김 종 민 (Jong-Min Kim)



2020년 2월 : 고려대학교 전기  
전자공학부 학사  
2020년 3월~현재 : 고려대학교  
전기전자공학과 석박사통합  
과정  
<관심분야> 통신공학, 위성통  
신, 무선광통신

[ORCID: 0000-0001-8990-3027]

임 병 주 (Byungju Lim)



2015년 2월 : 고려대학교 전기  
전자전파공학부 학사  
2021년 2월 : 고려대학교 전기  
전자공학과 박사  
2021년 3월~2022년 3월 : 고려  
대학교 연구교수  
2022년 3월~현재 : Tufts Uni-

versity, Postdoctoral Scholar  
<관심분야> 통신공학, 무선통신, 인공지능  
[ORCID:0000-0002-5155-392X]

이 주 형 (Ju-Hyung Lee)



2016년 2월 : 고려대학교 전기전  
자전파공학부 학사  
2021년 8월 : 고려대학교 전기전  
자공학과 박사  
2021년 9월~현재 : 고려대학교  
정보통신기술연구소 연구교수  
2022년 4월~현재: University of

Southern California 박사후연구원

<관심분야> 비지상망 네트워크, 무선광통신, 기계학습  
[ORCID:0000-0003-1947-0283]

고 영 채 (Young-Chai Ko)



1997년 2월 : 한양대학교 전자  
통신 학사  
1999년 5월 : University of Min-  
nesota, 전기공학 석사  
2001년 10월 : University of Min-  
nesota, 전기공학 박사  
2001년 3월~2004년 2월 : Texas

Instruments InC., San Diego, CA USA.

2004년 2월~현재 : 고려대학교 전기전자공학부 교수

<관심분야> 통신공학, 무선통신  
[ORCID:0000-0003-1043-9028]