

ADS-B out을 사용하기 위한 행정 절차 분석과 이를 이용한 소형 무인항공기의 충돌회피 시험

Overview of the Administrative Process of Using ADS-B out and Flight Test Results

박정환 · 류재영 · 김태영 · 이석환 · 박민균 · 이학태*
인하대학교 항공우주공학과

Jung-Hwan Park · Jae-Young Ryu · Tae Young Kim · SeokHwan Lee · MinKyun Park · Hak-Tae Lee*
Department of Aerospace Engineering, Inha University, Incheon, 22212, Korea

[요 약]

일반적으로 자동종속감시시설-방송 송출(ADS-B out) 장비는 유인항공기에 탑재되어 기체의 위치 및 상태 정보를 주기적으로 송출함으로써 지상의 레이더 감시 시스템을 보완할 수 있고, 항공기 간에도 충돌 위험을 줄여줄 수 있는 차세대 시스템이다. 본 논문에서는 무인항공기를 위해 개발된 소형 통합 ADS-B out/트랜스폰더 장비의 신고, 허가, 및 검사 절차를 거치는 과정에서의 주요 유의 사항들을 정리하였다. 또한 소형 드론에 ADS-B 송출 장비를 장착하여 도달 거리를 측정하고, ADS-B 수신 설비와 결합하여, 기존 유인항공기에 대한 레이더 관제와 동일한 방식으로 충돌 회피가 이루어질 수 있음을 실험적으로 입증하였다.

[Abstract]

Generally, commercial transport aircraft are quipped with automatic dependent surveillance – broadcast (ADS-B) out that broadcast its position and other state information at a regular interval via transponder. This system can supplement the ground radar surveillance system and also can be used to mitigate the airborne collision risk. In this paper, the process of formally registering an ADS-B out/transponder integrated equipment for a small drone is outlined. In addition, the reception range are measured and conflict detection and resolution test are performed with a small drone equipped with the ADS-B out and ground-based ADS-B receiver stations. The study experimentally confirmed that it is possible to control a small drone similar to the radar separation between commercial aircraft traffic.

Key word : ADS-B out, Conflict detection and resolution, Air traffic control, Spectrum analysis.

<http://dx.doi.org/10.12673/jant.2024.28.6.844>



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Received 27 November 2024; Revised 26 December 2024
Accepted (Publication) 30 December 2024 (31 December 2024)

*Corresponding Author ; Hak-Tae Lee

Tel: +82-32-720-9017

E-mail: haktae.lee@inha.ac.kr

I. 서론

미 연방항공국의 규정 FAR (federal aviation regulation) part91.113에서는 비가 오지 않는 기상 상황에서 항공기를 운항할 때의 원칙을 정의하고 있다[1]. 특히 주목할 점은 일반적인 항공기는 see and avoid 방식으로 서로 회피하고 있다. 이 원칙은 항공안전에 매우 중요한 요소이고, 조종사는 이를 숙달하기 위해 훈련을 거치고, 운항 중 철저한 주의를 기울인다[2].

최근 무인항공기가 개발과 활용이 활발해짐에 따라 무인항공기의 운항 방식에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다[16]. 무인항공기의 안전한 운행을 위해 유인 항공기의 see and avoid와 비슷한 DAA(detect and avoid)기술이 연구되고 있고[3]-[9], 대부분 전방에 레이더를 장착하는 방안을 채택하고 있다[10]-[12].

그러나 레이더는 고주파 신호를 강하게 방사하고 반사되는 신호를 측정하므로 여러 방향으로 연속적으로 사용하게 되면 전력 소모가 크다. 전방에 큰 안테나를 장착하면 동체의 단면적이 증가하며 항공기의 성능에 치명적일 뿐만 아니라, 안테나의 방향을 회전할 공간이 요구되는 등 항공기에 부정적인 영향이 있다.

유인 항공기는 이를 해결하기 위해 자신의 위치와 속도, 방향을 제공하는 2차 감시레이더 트랜스폰더 신호를 송신한다. 또한 이 신호를 감지하여 공중출동을 막을 수 있는 ACAS(airborne collision avoidance system) 장비를 탑재하고 있으며, 조종사는 이 장비가 제공하는 경고 신호와 조언에 따라 회피 기동을 수행하여 항공사고를 방지한다.

무인항공기에도 2차 감시레이더 트랜스폰더를 적용해 공중 충돌 방지 알고리즘[13]과 그 운용 방안[14]-[17]을 연구하고자 하나 무인항공기에서 트랜스폰더를 사용할 법적 근거가 부족한 상황이다. 또한 트랜스폰더 사용에 적용되는 항공안전법과 전파법은 관할 부처가 달라 2개 부처에서 모두 허가받아야 실질적인 연구가 진행가능하기 때문에, 관련 연구는 주로 컴퓨터 시뮬레이션에 머물러 있다[18],[19].

본 연구에서는 무인항공기에서 트랜스폰더를 사용할 수 있도록 하는 법적 절차에 대하여 설명하고, 해당 법적 절차를 완료하여 모드 S 2차 감시레이더 트랜스폰더의 ADS-B 신호를 합법적으로 송출하고, 수신할 수 있음을 확인하였다. 또한 획득한 ADS-B 신호를 기반으로 ADS-B 수신 및 모의 관제 시스템상에 실제 무인항공기와 가상 무인항공기의 조우 상황을 만들고, 관제사가 이를 안전하게 분리하는 관제를 수행하였다.

조우 상황을 인지하고 안전하게 분리 관제하기 위해 관제시스템에 DAA화면을 추가하였고, 그 안에는 NASA에서 개발한 DAIDALUS알고리즘을 탑재하여 관제 시 방향, 속도 및 고도에 대한 조언을 제공하도록 하였다. 추가로, ADS-B 신호의 도달 거리를 확인하기 위하여 장거리에서 신호를 송출하고, 수신 여부를 확인하였다.

II. ADS-B 사용절차

유인항공기는 등록번호가 발급되면 이를 바탕으로 전자주소(ICAO address)와 무선국 호출번호가 발급되기 때문에 ADS-B를 사용하려면 항공기 등록번호가 필수적이다. 그러나 드론은 항공기 등록번호가 발급되지 않기 때문에 ADS-B를 사용하기 위해 전자주소 발급과 무선국 허가를 따로 진행하였다.

2-1 항공기 고유 번호

그림 1과 같이 사업용으로 등록된 항공기에는 다음과 같은 다섯 가지 고유 번호가 부여된다. 첫 번째는 제작번호(MSN; manufacturer's serial number)로 제조사에 의해 부여되는 고유 식별번호로써 항공기의 생산 연월, 정비 주기 등 항공기의 주요 특성을 파악하는데 중요한 번호이다.

둘째는 항공기 등록기호(ARM; aircraft registration marks)로 항공기 등록 시, 국토교통부에서 부여하는 번호이다. 대한민국의 경우 'HL1234'와 같이 2자리 국적기호 'HL'과 4자리 숫자 등록기호로 구성된다. 자가용 항공기의 경우는 ICAO Annex 10 Volume II의 "5.2.1.7.2 Radiotelephony call signs for aircraft"규정에 따라 항공기의 호출번호로 사용된다[20].

셋째는 무선국 호출번호로 무선국을 신고하면 전파관리소에서 발급하는 번호이다. 예를 들어 KBS 제1라디오의 AM 라디오를 청취 중에 'HLKA'라고 송출하는데 이것과 유사하게 항공기도 무선국 호출번호가 발급된다. 항공기국의 호출번호는 항공기 등록기호와 동일하게 부여된다.

넷째는 전자주소(ICAO address)인데, 총 24비트로 구성된 고유번호로, 대한민국의 경우 항공기 등록기호의 영문 2자리를 2진수 '0111000011'로 변환하고, 숫자 4자리는 2진수로 변형하여 사용하는 규칙이 있다. 다만, 전자주소 두 번째 숫자가 3비트로 구성되므로 '0~7'까지의 값만 가질 수 있다는 점에 유의해야 한다. 더 다양한 나라의 국적기호는 ICAO Annex 10, Volume III, Part I, Chapter 9에서 확인할 수 있다[21].

5번째 번호는 항공편 식별번호로 정기 항공기의 노선과 스케줄을 ICAO에 제출해 등록된 번호로, 'Radiotelephony call signs for aircraft'규정의 Full call sign type C에 따라 주로 사업용 항공기의 관제 호출번호로 사용된다. 이 번호는 항공편의 노선에 따라 매번 변경되며, 자가용 항공기의 경우는 별도로 부여

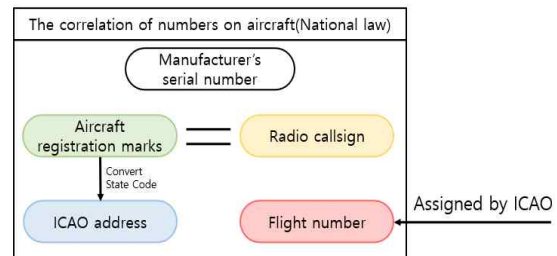


그림 1. 항공기가 가진 5가오유번호
Fig. 1. The 5 numbers of an aircraft.

되지 않고 앞서 설명한 것과 같이 등록기호를 사용한다[20].

2-2 무인항공기용 ADS-B 송수신기 사용 절차

국내에서 유인항공기에 항공기용 트랜스폰더를 사용하기 위해서는 전자주소(ICAO address)와 무선국 신고가 필요하며, 그 과정은 그림 2와 같이 항공기 신규등록 절차를 통해 이루어진다.

우선, 항공기의 등록 12개월 전 항공기의 등록기호가 발급되고, 이를 기반으로 전자주소를 배정하고, 무선국 신고를 진행하게 된다. 그림 2와 같이 항공기 등록기호를 발급받은 후, 트랜스폰더를 사용하기 위한 절차를 진행해야 하며, 이는 150 kg 이상의 무인항공기에도 동일하게 적용된다.

그러나 150 kg 이하의 무인항공기는 유인항공기의 등록 절차에 해당하는 드론신고만으로 전자주소 배정과 무선국 신고가 진행되지 않는다. 따라서, ADS-B 신호를 송출할 수 있는 트랜스폰더를 사용하려면 별도 전자주소 배정과 무선국 허가를 진행해야 한다. 해당 절차는 그림 3과 같다.

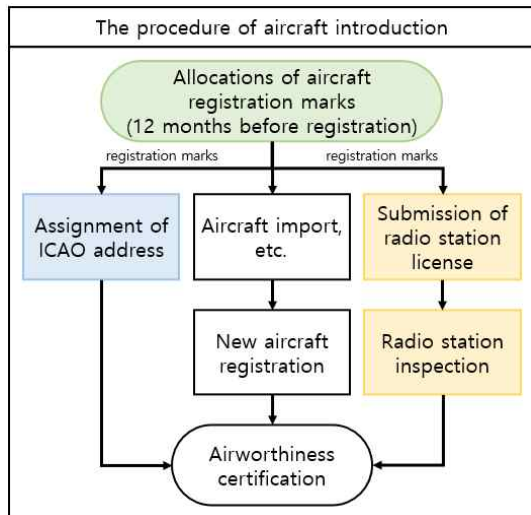


그림 2. 항공기 도입절차
Fig. 2. The procedure of aircraft introduction.

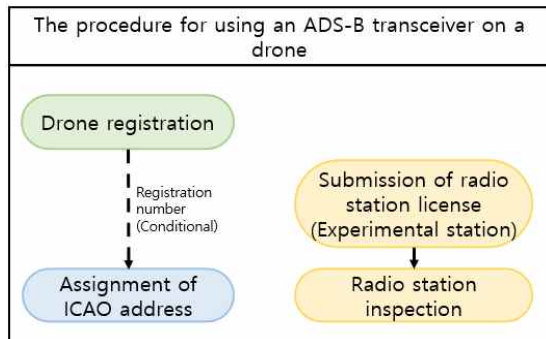


그림 3. 드론 ADS-B 송수신기 사용절차
Fig. 3. The procedure for using an ADS-B transceiver on a drone.

우선, 드론을 신고하여 신고번호를 발급한 후 이를 바탕으로 전자주소를 배정하여야 한다. 그러나 본 연구에서 사용된 2 kg 미만 비사업용 드론의 경우는 드론 신고 절차는 없고 전자주소만 배정된다.

항공기국의 경우 전과법에 따라 사용 용도와 그 기술기준이 정해져 있어 신고를 통해 무선국 개설이 가능하다. 하지만 드론에 다른 고출력 전과장비를 장착하는 것은 법적인 사용용도나 그 기술기준이 정해져 있지 않으므로 신고 대상이 아닌 허가 대상이다. 따라서 실험국으로 허가 절차를 진행하였다.

결과적으로 국토교통부를 통해 항공안전법에 따라 트랜스폰더 전자주소 배정을 신청하였고, 과학기술정보통신부에 민원을 제기하여 실험국을 개설하기 위한 무선국 허가 절차를 완료하였다.

각 부처에 따른 행정 절차와 본 연구에서의 소요 기간은 그림 4에 정리되어 있다.

Ministry of land, infrastructure and transport		Ministry of science and ICT	
Drone registration		Radio station license	
Authority	Korea transportation safety authority	Authority	Seoul radio management service
Output	Certificate of drone registration	Output	Radio station license
Application window	drone.onestop.go.kr	Application window	emsit.go.kr
Result	Unnecessary (non-commercial, Under 2kg)	Result	Grant of license (take 5 months)
Allocations of ICAO address		Radio station inspection	
Authority	MoLIT air navigation satellite policy division	Authority	Korea communications agency
Output	Assignment of ICAO address	Output	Inspection certificate
Application window	docu.gdoc.go.kr	Application window	rsi.kca.kr
Result	Assigned (take 20 days)	Result	Certificated (take 2 months)

그림 4. ADS-B 송수신기 행정 절차
Fig. 4. ADS-B transceiver administrative procedures and time taken.

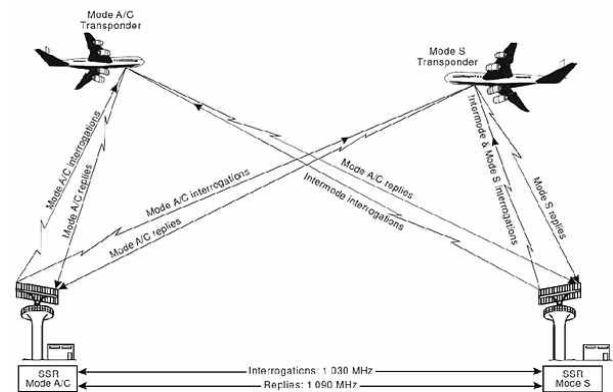


그림 5. SSR 모드/A/C/S의 통신도[22]
Fig. 5. Compatibility of SSR mode A/C and mode S[22].

Mode S Squitter (56 bits) – transmitted every second



Extended-Squitter (112 bits)



그림 6. 스퀘터와 확장 스퀘터 포맷[23]

Fig. 6. Format of squitter and extended squitter messages[23].

III. ADS-B 무선국 검사

트랜스폰더는 공항에 접근 중인 항공기를 식별하기 위해서 사용되는 SSR(secondary surveillance radar) 신호에 응답하는 항공기 측 장비로, 응답 수준에 따라 그림 5와 같이 모드 A, C, S로 분류된다.

모든 트랜스폰더는 질문 신호를 받으면 항공기의 식별정보와 간단한 정보만 회신하지만 ADS-B는 이 모드 S 신호에 그림 6과 같이 추가로 항공기의 자세한 정보와 상태를 질문 신호와 관계 없이 일정 주기마다 송출한다. 이를 1090ES라고 하고, 본 연구에서는 ADS-B 송수신기로 명명하였다.

ADS-B 신호는 모든 항공기가 같은 주파수를 사용하므로 혼신이 발생할 우려가 있다. 이를 해결하기 위해 multi access 프로토콜이 사용되고, ADS-B에는 random access 프로토콜이 적용되어 있다[24].

Random access 프로토콜을 혼신을 회피하기 위하여 정해진 시간 간격 안의 임의의 시간을 선정하여 메시지를 보낸다. 메시지를 송출해야 하는 시간 간격은 RTCA DO-242A의 Chapter 3.3.3 ‘ADS-B data exchange requirements’에 정의되며, 메시지의 종류와 운용 도메인과 장비 클래스에 따라 적게는 1.5초, 많게는 24초 이내에 메시지를 송출하도록 정의되어 있다[25].

ADS-B 송출 신호의 전파학적 특성은 모드 S 트랜스폰더의 전파적 특성과 같으므로 표 3과같이 정리할 수 있다.

3-1 무선국 검사


표 1. ADS-B 신호의 전파적 특성

Table 1. Radio characteristics of ADS-B signals.

Parameter	Description
Frequency	1,090MHz
Bandwidth	2MHz
RF output power	Below 27dBW
Protocol	Random access, PPM
PPM pulse width	0.5 us
Message size	56~112 us
Period	1.5 Second or more (depend on message type, domain, equipment class)

표 2. ADS-B 송수신기 사양

Table 2. ADS-B transceiver specification.

Pictures	Parameter	Description
	Model	TR-1A
	Manufacturer	Aerobits
	Country	Poland
	Frequency	1,090 MHz
	Sensor	GNSS, barometer
	RF output power	0.25/0.5/1 W
	Weight	14g
	Input power	5V

본 연구에 사용된 ADS-B 송수신기의 사양은 표 4와 같다. ADS-B 송수신기의 신호는 파장이 짧은 전파로 이루어져, 무선국 검사를 위해 고성능 스펙트럼 분석기나 네트워크분석기가 필요하다. 또한 안정적인 출력 신호를 획득하기 위해서는 환경요건 고려해야 한다. 2-4 장에서는 준공 검사 중 발생한 문제와 이를 해결하여 최종 합격한 검사 방법을 제시한다.

3-1-1 환경의 영향

1차 무선국 준공검사는 실외에서 진행하였다. 그러나 검사를 진행하는 ADS-B 송수신기에서 신호 발생이 불규칙하게 이루어졌다. 원인은 검사가 진행된 인천 송도지역 주변에 항공기가 많아, random access 프로토콜의 특성상 혼신의 영향이 있었기 때문이다. 따라서 공역이 혼잡한 지역에서는 측정의 반복성을 확보하기 위해 실내에서 준공검사를 진행하는 것이 적합하다.


무선국 검사는 안테나를 통해 무선으로 진행할 수도 있지만, 혼신을 방지하고 보다 정확한 측정을 위해 본 연구에서는 유선 연결방식을 채택하여 1 W의 신호를 전송하였다. 사용된 스펙트럼 분석기의 사양은 2 W까지 신호를 전송하여도 문제가 없으나, 계측기 보호를 위하여 30 dB 감쇠기를 설치하여 신호를 송출하였다.

3-1-2 측정 장비의 영향

준공검사서 대역폭과 출력을 검사하기 위해 스펙트럼 분석기가 필요하다. 스펙트럼 분석기에는 빠르게 지나간 신호를 확인하기 위해 측정된 신호의 최대값을 저장하여 표시하는 기능이 있는데 이를 maxhold기능이라 한다. 본 ADS-B 송수신기의 경우에도 불규칙하고 빠른 신호를 송출하므로 이 기능을 사용하였다.

최초 준공검사 시, 검사관이 사용한 휴대용 스펙트럼 분석기로 측정하였을 때 측정 결과가 일정하지 않았다. maxhold기능을 사용하였음에도 일부 주파수에서는 전파강도가 장시간 동안 측정되지 않아, 대역폭을 정확히 평가할 수 없는 스펙트럼이 나타났다.

표 3. 준공검사 불합격 시 사용한 스펙트럼 분석기
Table 3. The spectrum analyzer when the inspection failed.

Pictures	Parameter	Description
	Model	FieldFox
	Manufacturer	Keysight
	Frequency	~6.5 GHz

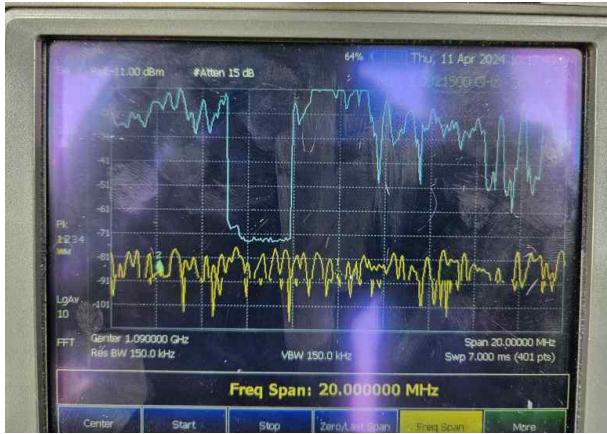



그림 7. FieldFox로 측정한 ADS-B out 스펙트럼
Fig. 7. ADS-B out spectrum measured with FieldFox.

표 4. 2차 시험 시 사용한 스펙트럼 분석기
Table 4. The spectrum analyzer when the second test.

Pictures	Parameter	Description
	Model	N1996A CSA
	Manufacturer	Agilent technologies
	Frequency	~6 GHz

두 종류의 스펙트럼 분석기를 사용하여 max hold 기능으로 획득한 스펙트럼은 그림 8, 그림 9와 같다. 계측기 화면에서 노란색 선은 실시간(maxhold off) 측정 결과이고, 시안색은 maxhold기능을 이용한 측정결과이다. 측정 조건은 중심 주파수 1,090MHz, 스캔 20MHz로 측정하였으며, 약 5분 동안 측정을 진행한 결과를 비교하였다.

N1996A CSA를 사용하여 측정 시, 스펙트럼이 불규칙하게 나타나 대역폭과 출력을 정확히 측정할 수 없었으며, 결과가 일관되지 않았다. 반면에 N9030 PXA를 사용하여 측정하였을 때, 비교적 안정적인 결과를 획득할 수 있었으며, 재시험 시에도 동일한 결과가 관찰되었다. 이에 따라 N9030 PXA를 활용하여 실험을 진행하였다.

N9030 PXA는 대전테크노파크에서 장비를 보유한 장비로, 대전연구장비정보망(DEPS; daejeon equipment portal system)을 통해 예약 및 사용이 가능하고, 사용 후 요금을 지불하였다.



그림 8. N1996A CSA로 측정한 ADS-B out 스펙트럼
Fig. 8. ADS-B out spectrum measured with N1996A CSA.

표 5. 준공검사 합격 시 사용한 스펙트럼 분석기
Table 5. The spectrum analyzer when passing the inspection.


Pictures	Parameter	Description
	Model	N9030B PXA
	Manufacturer	Keysight
	Frequency	2~50 GHz

표 5은 이 때 사용된 스펙트럼 분석기이고, 그림 7은 측정된 스펙트럼 결과이다. 그래프의 노란색 선은 실시간(maxhold off) 측정결과, 시안색 선은 maxhold기능을 이용한 측정결과이다.

문제를 해결하기 위하여 2가지 스펙트럼 분석기를 추가로 측정해본 결과, 고성능 스펙트럼 분석기인 N9030 PXA를 통해 정확한 측정이 가능함을 확인하였다. 사용된 스펙트럼 측정기의 사양은 표 6, 표 7와 같다.

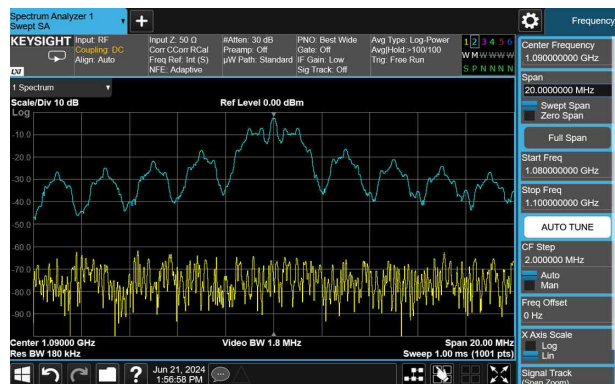


그림 9. N9030 PXA로 측정한 ADS-B out 스펙트럼
Fig. 9. ADS-B out spectrum measured with N9030 PXA.

3-2 최종 시험환경

최종시험을 위하여 그림 10과같이 실내에 구성된 시험환경에서 ADS-B 송수신기를 유선으로 연결하였고, 검교정이 완료된 N9030 PXA 장비를 사용하여 5회 이상의 시험을 진행하였다. 이 과정에서 대역폭과 출력을 확인하였다.

30 dB 감쇠기를 설치하여 계측기를 보호하였으며, USB로 연결된 PC를 통해 전원을 공급하였다. ADS-B 송수신기의 출력을 1 W로 설정하였다. 또한 메시지의 출력을 확인하기 위하여 PC로 ADS-B의 신호가 정상적으로 송출되는지 확인하였으며, 실내 환경에서 진행된 시험이므로 GPS 신호 값이 모두 0으로 나타나는 것을 확인하였다.

스펙트럼 분석기 화면에서 노란색 선은 실시간 측정 결과, 시안색 선은 maxhold기능을 이용한 측정 결과이다. 측정된 대역폭은 다음 그림 11과 같다. 전파의 -3 dB에 해당하는 대역폭은 60 kHz로 나타났으며, 출력은 0 dBm으로 측정되었다. 변조에 의한 peak는 각각 ± 1 MHz 대역에서 그림 12와 같이 측정되었고, 전체 대역폭은 2 MHz로 확인되었다. 신청 출력 1 W를 만족함을 확인하였다.

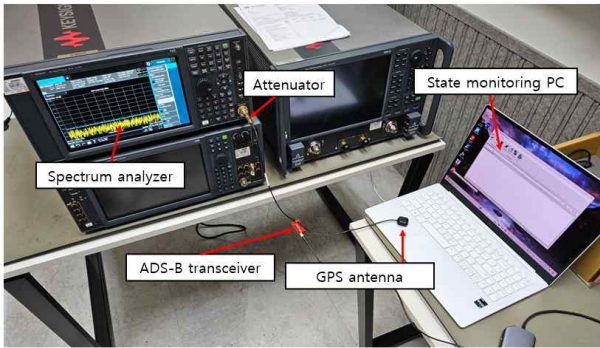


그림 10. 스펙트럼 분석 시험환경
Fig. 10. Spectrum analysis test environment.



그림 11. Peak에서부터 -3dB 확인지점
Fig. 11. -3dB measured point from the peak.



그림 12. PPM 변조로 발생한 peak 지점
Fig. 12. Peak caused by PPM modulation.

IV. ADS-B 시험

허가 및 검사가 완료된 ADS-B 송수신기의 신호가 정상적으로 송출되는지 확인하기 위하여 아래와 같은 ADS-B 수신 및 현시 시스템을 사용하였다[26]. 시스템의 구성도는 그림 13과 같다. 인하대학교 항공우주융합캠퍼스 옥상에 설치된 ADS-B 수신기 안테나는 항공기의 ADS-B 메시지를 수신하며, 수신된 데이터는 ADS-B data center로 전송되어 저장 및 시각화된다.

ADS-B 송수신기는 그림 16과 같이 상용 DJI 매빅 프로 드론에 마운트를 제작하여 설치되었다. 안테나는 송신 성능을 최적화하기 위하여 최대한 높은 곳에 장착하였고, 별도 5 V, 3 000 mAh LiPo 배터리를 장착하여 송수신기를 독립적으로 사용할 수 있도록 구성하였다. GPS 또한 ADS-B 송수신기에 내장되어 있어 별도의 안테나를 부착하였다.

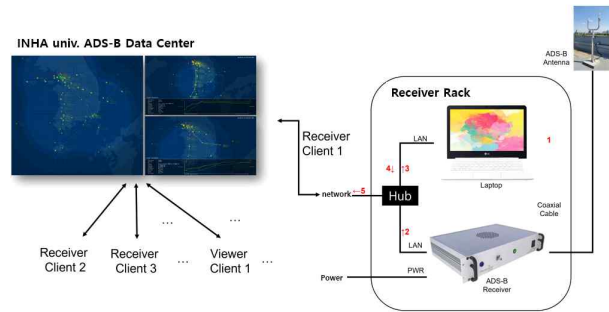


그림 13. ADS-B 데이터 센터 모식도
Fig. 13. ADS-B data center schematic.

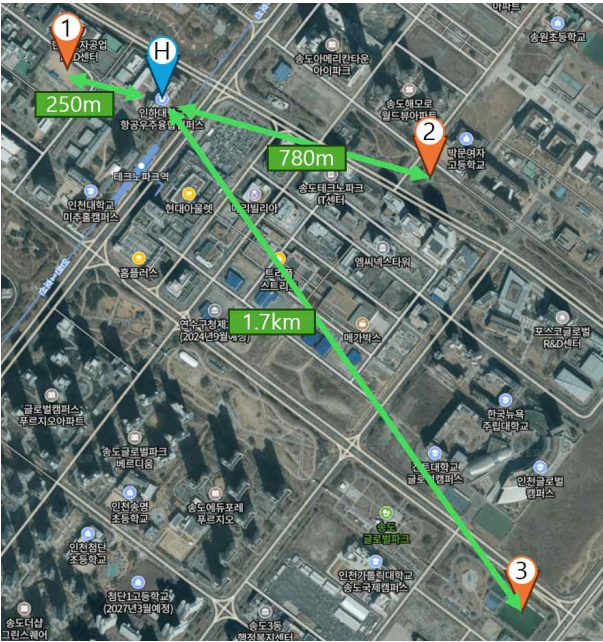


그림 14. 송도 도심 ADS-B out 통신 시험지점
 Fig. 14. ADS-B out urban range test point in Songdo.

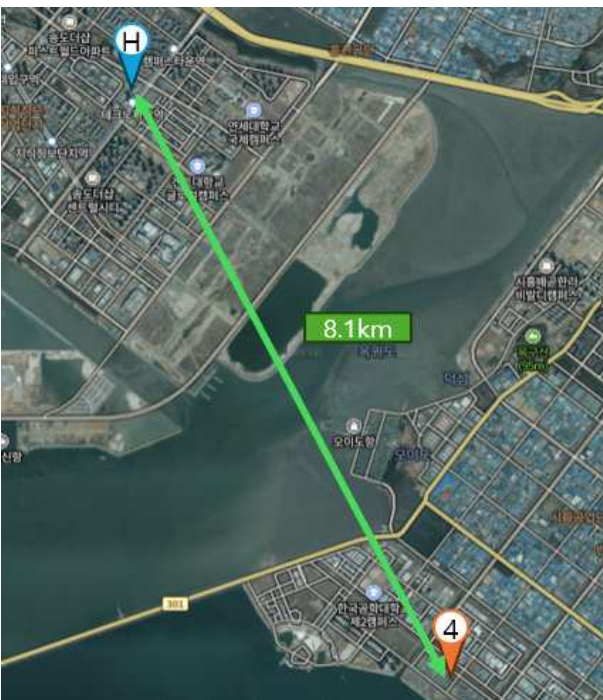


그림 15. 장거리 ADS-B out 통신 시험지점
 Fig. 15. ADS-B out long-range test point.

4-1 ADS-B 신호 송출 및 수신 거리 측정

비행장소는 인하대학교 항공우주융합캠퍼스를 중심으로



그림 16. DJI 메빅 프로 드론에 부착한 ADS-B 송수신기
 Fig. 16. ADS-B transceiver equipped to DJI Mavic pro.

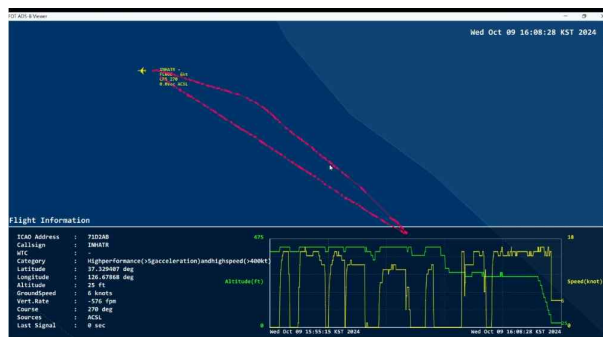


그림 17. 장거리 통신 시험 시, 드론의 궤적
 Fig. 17. Drone's trajectory during long-range test.

선정된 4개소에서 시험을 진행하였다. 그 위치는 그림 14, 그림 15와 같다. 드론 조종자가 이륙 장소로 직접 이동하여 드론을 이륙시킨 후, 조종자의 가시권이 유지되는 반경 500m, 고도 150 m 이내에서 비행을 유지하였다.

이때, 조종자는 데이터 센터와 교신하며 비행 기록이 정상적으로 저장되는지 확인하였다. 드론의 고도가 150 m에서 비행할 때, 그림 17과 같이 8.1 km 지점에서 ADS-B 신호가 수신국에 안정적으로 수신되는 것을 확인하였다. 이를 통해 DAA 시험에 충분한 전파 도달 거리가 확보되었음을 입증하였다.

4-2 관제 및 조우 시뮬레이션

최종적으로 DAA 조우 시뮬레이션을 위하여, 그림 18과 같이 관제 시뮬레이션 시스템을 [27] 수정 하였다. 기존 의사조종사 디스플레이에 연결되어 있던 DAA화면을 관제사 레이더 디스플레이에서 사용할 수 있도록 했으며, ADS-B 데이터 센터와 관제사 디스플레이의 연동을 통하여 시뮬레이션된 가상 항공기와 ADS-B 데이터 센터를 통해 수신되는 실시간 항공기를 모두 표시할 수 있게 하였다. DAA 알고리즘은 NASA에서 개발한 DAIDALUS 알고리즘을 이용하였다[28].

조우 시나리오는 정지된 실시간 드론에 가상 무인항공기가 접근하는 상황으로 그림19와 같이 구성되었으며, 시뮬레이션

시작 약 2분 후 두 항공기가 교차하도록 구성하였다. 시나리오는 2개로 첫 번째는 가상 무인항공기가 회피하여 상황이 해소되는 상황, 정지된 실시간 드론이 회피하여 상황이 해소되는 상황이다. 가상 무인항공기의 속도는 23 m/s로 설정하였다.

1) 시나리오 1. 가상 무인항공기 회피 결과

가상 무인항공기가 23 m/s의 속도로 정지된 드론에 접근하는 상황에서, 시스템은 2단계 경보를 발효하였다. 이후 관제사의 명령에 따라 무인항공기 조종자가 북쪽으로 회피 기동을 시도하였으며, 그 결과 그림 20과 같이 조우 상황이 성공적으로 해소되었음을 확인하였다.

2) 시나리오 2. 실제 드론 회피 결과

정지된 드론에 23 m/s의 속도로 접근하는 가상 무인항공기를 확인한 시스템이 1단계 경보를 발효하였다. 이후 관제사의 명령에 따라 드론 조종자가 북쪽으로 전속력으로 회피를 시도하였으며, 이때 드론의 속도는 약 9 m/s로 측정되었다. 그러나 시도 결과, 그림 21과 같이 조우 상황이 해소되지 않았음을 확인하였고, 경고 수위가 높아짐에 따라 시험을 종료하였다.

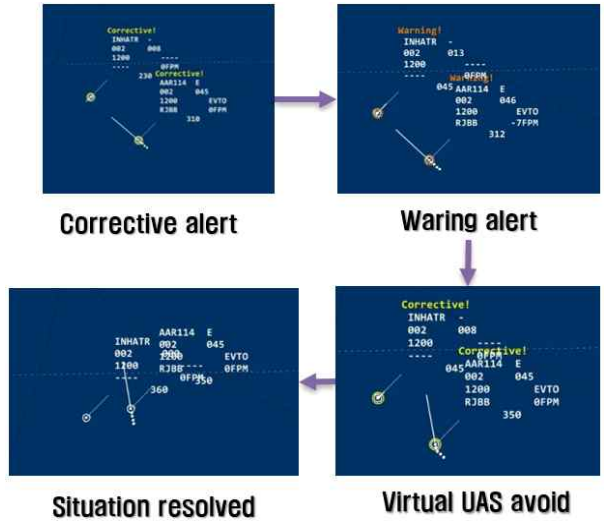


그림 20. 가상 무인항공기 회피와 상황 해소
Fig. 20. Virtual aircraft avoidance and situation resolved.

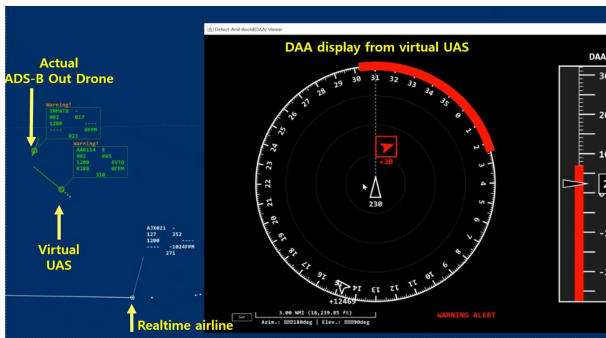


그림 18. 시뮬레이션 화면의 교통상황과 DAA 화면
Fig. 18. Traffic and DAA display on simulation.

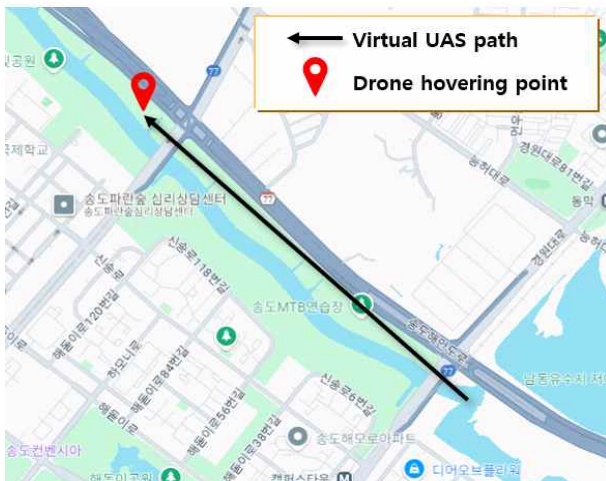


그림 19. 시나리오 1,2의 가상항공기 조우 시나리오 궤적
Fig. 19. Virtual aircraft encounter scenario trajectory for scenarios 1 and 2.

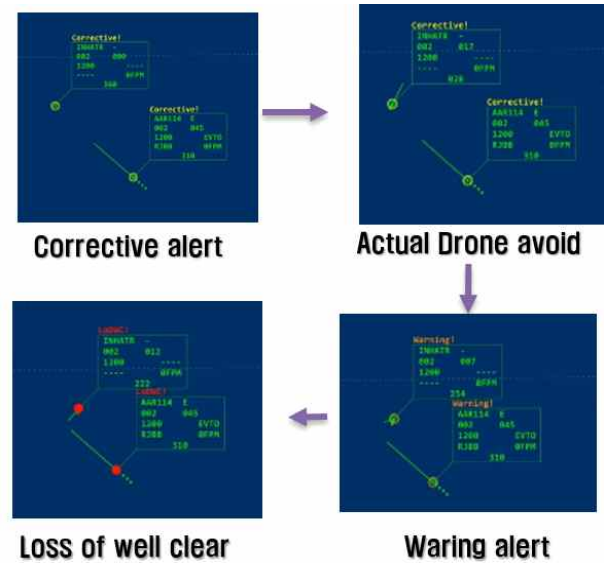


그림 21. 실제 드론의 회피와 loss of well clear
Fig. 21. Actual drone avoidance and loss of well clear.

V. 결론

본 연구는 국내 항공안전법과 전파법에 따라, 송수신기를 실험국으로 개설하였다. 개설 과정에서 취합된 자료들을 정리하고 준공검사 시 필요한 시험 환경과 및 측정 장비 및 설정 관련 유의사항을 제시하였다.

허가가 완료된 ADS-B 송수신기의 전파 도달 거리를 시험한 결과, 8.1 km 지점까지 안정적으로 신호를 수신할 수 있음을 확인하여, DAA시험에 충분한 전파 도달 거리가 확보되었음을 입

증하였다.

DAA시험에 사용할 관제시스템과 연동을 확인하기 위하여 관제시스템에 DAA화면을 추가하고, 그 안에 DAIDALUS 알고리즘을 적용하였다. 이를 통해 실시간 드론과 가상 무인항공기 간의 상호작용이 원활하게 이루어짐을 확인하였다.

향후에는 다양한 추가 시나리오를 구성하고 추가 ADS-B 송수신기의 허가를 획득하여 가상항공기와 실제 비행하는 드론과의 충돌 회피 시험 뿐만 아니라 실제 비행하는 드론 간의 회피 시험도 실시할 계획이면 충돌 회피 알고리즘도 NASA의 DAIDALUS 뿐만 아니라, 한국항공우주연구원에서 개발한 DAS(detect and avoid software)도 테스트할 계획이다.

Acknowledgments

본 연구는 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원의 ‘eVTOL 비행안정성 운용성 실증시험평가 및 충돌회피처리 기술 개발 (과제번호 : 20016463)’ 과 국토교통부의 ‘빅데이터 기반 항공안전관리 기술 개발 및 플랫폼 구축 (과제번호 : RS-2020-KA158275)’ 연구의 지원으로 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사드립니다.

스펙트럼 시험 간 시험장비의 사용과 시험장소를 협조해 주신 대전테크노파크의 지원에 감사드립니다.

References

[1] FAA, CFR Part 91.113: Right-of-way rules:Except water operations, 1989.

[2] FAA, Advisory Circular (AC) 90-48D CHG 1: Pilots’ role in collision avoidance, 2016

[3] A. Mcfadyen and L. Mejias, “A survey of autonomous vision-based see and avoid for unmanned aircraft systems,” *Progress in Aerospace Sciences*, Vol. 80, pp. 1-17, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2015.10.002>

[4] S. P. Bharati, Y. Wu, Y. Sui, C. Padgett and G. Wang, “Real-time obstacle detection and tracking for sense-and-avoid mechanism in UAVs,” *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, Vol. 3, No. 2, pp. 185-197, June 2018. DOI: 10.1109/TIV.2018.2804166.

[5] Y.-C. Lai, and T.-Y. Lin. “Vision-based mid-air object detection and avoidance approach for small unmanned aerial vehicles with deep learning and risk assessment,” *Remote Sensing*, Vol. 16, No. 5: 756. 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs16050756>.

[6] G. Fasano, D. Accado, A. Moccia, and D. Moroney, “Sense and avoid for unmanned aircraft systems,” *IEEE Aerospace*

and Electronic Systems Magazine, Vol. 31, No. 11, pp. 82-110, November 2016. DOI: 10.1109/MAES.2016.160116

[7] O. Shakernia, W.-Z. Chen, S. Graham, J. Zvanya, A. White, N. Weingarten, and V. Raska, “Sense and avoid (SAA) flight test and lessons learned,” AIAA 2007-3003. in *AIAA Infotech@Aerospace 2007 Conference and Exhibit*. Rohnert Park: CA, May 2007. DOI: <https://doi.org/10.2514/6.2007-3003>.

[8] C. Karch, J. Barrett, J. Ellingson, C. K. Peterson, and V. M. Contarino, “Collision avoidance capabilities in high-density airspace using the universal access transceiver ADS-B messages,” *Drones*, Vol. 8, No. 3, Article No: 86, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/drones8030086>

[9] X. Prats, L. Delgado, J. Ramirez, P. Royo, and E. Pastor, “Requirements, issues, and challenges for sense and avoid in unmanned aircraft systems,” *Journal of Aircraft*. Vol. 49, No. 3, pp. 677-687, 2012. DOI: <https://doi.org/10.2514/1.C031606>

[10] D. Shim, H. Chung, H.-J. Kim, and S. Sastry, “Autonomous exploration in unknown urban environments for unmanned aerial vehicles,” AIAA 2005-6478. *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit*. San Francisco: CA, August. 2005. DOI: <https://doi.org/10.2514/6.2005-6478>

[11] D. H. Shim and S. Sastry, “An evasive maneuvering algorithm for UAVs in see-and-avoid situations,” in *2007 American Control Conference*, New York: NY, pp. 3886-3891, 2007. DOI: 10.1109/ACC.2007.4283147.

[12] D. Accardo, G. Fasano, L. Forlenza, A. Moccia, and A. Rispoli, “Flight test of a radar-based tracking system for UAS sense and avoid,” *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 49, No. 2, pp. 1139-1160, Apr. 2013. DOI: 10.1109/TAES.2013.6494404.

[13] V. Di Vito and G. Torrano, “RPAS automatic ADS-B based separation assurance and collision avoidance system real-time simulation results,” *Drones*, Vol. 4, No. 4, Article No: 73, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/drones4040073>

[14] A. Novák, K. Kováčiková, F. Chodelka, and P. Vel’ký, “Analyzing ADS-B systems and channel occupancy: Enhancing UAV control and aviation safety through airspace management,” in *2023 New Trends in Aviation Development*, Stary Smokovec: Slovakia, Nov. 2023. DOI: 10.1109/NTAD61230.2023.1038018.

[15] N. Ruseno, C.-Y. Lin, and S.-C. Chang, “UAS traffic management communications: The legacy of ADS-B, new establishment of remote ID, or leverage of ADS-B-like systems?,” *Drones*, Vol. 6, No. 3, Article No: 57, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/drones6030057>.

- [16] S. Bijjhalli, A. Gardi, S. Hilton, and R. Sabatini, "A novel detect-and-avoid approach for UAS in urban environments," in *32nd Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences*, Shanghai: China, September 2021. DOI: https://www.icas.org/ICAS_ARCHIVE/ICAS2020/data/papers/ICAS2020_0970_paper.pdf
- [17] C.-S. Yoo, "Current status of the ADS-B technology application to UAV collision avoidance," *Current Industrial and Technological Trends in Aerospace*, Vol. 13, No. 2, pp. 63-71. 2015. Retrieved from https://www.kari.re.kr/cop/bbs/BBSMSTR_000000000063/selectBoardArticle.do?nttId=5353
- [18] L. Tong, X. Gan, Y. Wu, N. Yang, and M. Lv, "An ADS-B information-based collision avoidance methodology to UAV," *Actuators*, Vol. 12, No. 4, Article No: 165, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/act12040165>
- [19] K. J. Matheou, R. D. Apaza, A. N. Downey, R. J. Kerczewski, and J. Wang, "ADS-B mixed SUAS and NAS system capacity analysis and DAA performance," in *2018 Integrated Communications, Navigation, Surveillance Conference (ICNS)*, Herndon: VA, pp. 2B3-1-2B3-11, 2018. DOI: 10.1109/ICNSURV.2018.8384838
- [20] ICAO, Annex 10 Aeronautical telecommunications Volume II Communication procedures including those with PANS status, 6th edition, October 2001.
- [21] ICAO, Annex 10 Aeronautical telecommunications Volume III Communication systems, 2nd edition, July 2007.
- [22] C. Koh, Development of an algorithm for correlation of aircraft positioning data from radar and ads-b sensors, Thesis for: Master degree of software engineering, University of Malaya, Malaysia, 2019. Retrieved from <https://www.researchgate.net/publication/331033102>
- [23] G. Santos, C. Müller, R. Eller, and P. Porto, "Limits and future GNSS solutions for aircraft landing in low visibility conditions," *Journal of the Brazilian Air Transportation Research Society*, Vol. 9, No. 1, pp. 37-45, 2013. DOI: <https://www.researchgate.net/publication/265085540>
- [24] J.-H. Song, K.-R. Oh, J.-C. Kim, and J.-Y. Lee, "Implementation of aeronautical surveillance transceiver using AIS based on ADS-B concepts," *Journal of Navigation and Port Research*, Vol. 33, No. 10, pp. 685-690. 2009. DOI: <https://doi.org/10.5394/KINPR.2009.33.10.685>
- [25] RTCA Inc, RTCA DO-242A Minimum aviation system performance standards for automatic dependent surveillance broadcast(ADS-B), June 25, 2002.
- [26] J.-S. Kang, H.-J. Oh, K.-Y. Choi, H.-T. Lee, "A study on utilization of an air traffic control simulator with an ADS-B receiver," in *2015 KSAS Fall Conference*, JeJu: Korea, pp. 2,132-2,135, Nov. 2015. Retrieved from <https://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE06768501>
- [27] J.-Y. Ryu, M.-K. Park, S.-H. Lee, J.-H. Park, and H.-T. Lee, "Development of an airborne collision simulation using real-time ADS-B data," in *2024 KSAS Fall Conference*, Jeongseon: Korea, pp. 830-831, Nov. 2024.
- [28] C. Muñoz, A. Narkawicz, G. Hagen, J. Upchurch, A. Dutle, and M. Consiglio, *DAIDALUS: Detect and avoid alerting logic for unmanned systems*, 2015 *IEEE/AIAA 34th Digital Avionics Systems Conference (DASC)*, Prague: Czech Republic, 2015, pp. 5A1-1-5A1-12, doi: 10.1109/DASC.2015.7311421.



박 정 환 (Jung-Hwan Park)

2017년 2월 : 인하대학교 항공우주공학과 (공학사)
 2019년 2월 : 인하대학교 항공우주공학과 (공학석사)
 2019년 8월 ~ 2021년 12월 : 베셀에어로스페이스 주식회사 대리
 2022년 1월 ~ 2023년 5월 : 주식회사 에어로솔루션즈 대리
 2023년 9월 ~ 현재 : 인하대학교 항공우주공학과 박사과정
 ※ 관심분야 : 항공교통, 시스템 공학



류 재 영 (Jae-Young Ryu)

2020년 8월 : 인하대학교 항공우주공학과 (공학사)
 2022년 8월 : 인하대학교 항공우주공학과 (공학석사)
 2022년 9월 ~ 현재 : 인하대학교 항공우주공학과 박사과정
 ※ 관심분야 : 항공교통, M&S



김 태 영 (Tae Young Kim)

2017년 2월 : 인하대학교 항공우주공학과 (공학사)
2019년 2월 : 인하대학교 항공우주공학과 (공학석사)
2024년 2월 ~ 현재 : 인하대학교 항공우주공학과 박사과정
※관심분야: 항공교통, 항공기 공력 설계



이 석 환 (SeokHwan Lee)

2023년 2월 : 인하대학교 항공우주공학과 (공학사)
2023년 3월 ~ 현재 : 인하대학교 항공우주공학과 석사과정
※관심분야: 항공교통, 항공기 공력 설계



박 민 균 (MinKyun Park)

2024년 2월 : 인하대학교 항공우주공학과 (공학사)
2024년 3월 ~ 현재 : 인하대학교 항공우주공학과 석사과정
※관심분야: 항공교통, M&S



이 학 태 (Hak-Tae Lee)

2006년 1월 : 미국 스탠포드대학교 항공우주공학과 (공학박사)
2013년 9월 ~ 2017년 8월 : 인하대학교 항공우주공학과 조교수
2017년 9월 ~ 2022년 9월 : 인하대학교 항공우주공학과 부교수
2022년 9월 ~ 현재 : 인하대학교 항공우주공학과 정교수
※관심분야: 항공교통, 항공기 공력 설계