

고정형 이물질(FOD) 자동 탐지 시스템과 이동형 이물질 자동 탐지 시스템의 성능 비교 및 시험

Performance Comparison and Test of Fixed FOD Automatic Detection System and Moving FOD Automatic Detection System

김성희¹·홍재범²·박광근³·최인규³·홍교영^{2*}

¹한서대학교 대학원 항공시스템공학과

²한서대학교 항공전자공학과

³(주)웨이브텍

Sung-Hee Kim¹ · Jae-Beom Hong² · Kwang-Gun Park³ · In-Kyu Choi³ · Gyo-Young Hong^{1,2*}

¹Department of Aircraft System Engineering, Hanseo University, Chungcheongnam-do 31962, Korea

²Department of Avionics, Hanseo University, Chungcheongnam-do 31962, Korea

³Wave Tech, Gyeonggi-do 13906, Korea

[요 약]

FOD (foreign object debris)는 각종 금속 및 비금속 이물질 및 항공기 운항에 잠재적 위험요소를 가진 물질을 총칭한다. 항공기 이동지역에서 사람이 직접 FOD 탐지 및 수거를 하던 방식은 효율성 및 경제성 또한 매우 낮기 때문에 국내환경에 적합한 FOD 자동 탐지 시스템 개발이 필수적으로 요구된다. 본 논문에서는 한서대학교 태안비행장에서 EO/IR카메라 및 레이더를 이용한 고정형 이물질 자동 탐지 시스템과 이동형 이물질 자동 탐지 시스템을 이용하여 100 m이상 최적탐지시간과 90% 탐지 정확도의 복합운명을 위한 두 시스템의 성능비교 실험 결과이다. 지속적인 연구개발을 통하여 FOD를 무인력으로 수행 할 수 있을것으로 기대된다.

[Abstract]

Foreign object debris (FOD) is a generic term for various metals and non-metal foreign object and materials with potential hazards to aircraft operations. Since the method of manual FOD detection and collection in the aircraft moving area is very low in efficiency and economic efficiency, it is essential to develop to FOD automatic detection system suitable for domestic environment. This paper is the result of the performance comparison test results of the two systems for the combined operation of each optimal detection time and 95% accuracy above 100 m for complex operation using the fixed FOD automatic detection system and the mobile FOD system using EO/IR camera and radar at Taean Airfield Hanseo University. It is expected that FOD can be performed unattended through continuous R & D.

Key word : Foreign object debris, Fixed automatic detection, Electro-optic/Infrared laser light camera, Statory radar, Mobile radar.

<https://doi.org/10.12673/jant.2019.23.6.495>



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 22 November 2019 Revised 23 November 2019

Accepted (Publication) 28 December 2019 (30 December 2019)

*Corresponding Author, Gyo-young Hong

Tel: +82-41-671-6232

E-mail: kiathgy@hanseo.ac.kr

I. 서론

활주로 이물질 (foreign object debris)은 항공기 안전에도 직접적으로 영향을 미치지만 안전 외에 경제적 손실도 함께 발생한다. FOD 검출 시스템은 활주로, 유도로, 정비시설 등과 같은 항공기 이동지역에서 발생하는 항공기의 안전에 치명적인 위험을 내재하고 있다. FOD는 활주로 및 공항운영과 같은 특성을 반영해야하며, 주야간이나 강우, 안개와 같은 악기상에 관계없이 실시간으로 FOD 발생을 정확하게 탐지해야 한다 [1]. 대표적인 FOD 사고사례는 2000년 7월 25일에 발생한 파리 샤를 드골 공항에 추락했던 에어프랑스의 콩코드 항공기 사고를 꼽을 수 있다. 선행하는 항공기의 금속 파편으로 인하여 이륙하던 콩코드기의 연료탱크가 파손되어 113명의 사망자가 발생하였던 사건이었다. 또한, 운항 제트엔진에 의해 FOD 물질이 날아가면서 항공기 비행에 지장을 주거나 주변 시설 또는 주변 작업자에게 날아가 피해를 줄 수 있는 잠재적 위험성을 지니고 있다[2]. 국내공항에서는 FOD로 인한 피해 사례가 없지만 앞으로 발생하지 않는다는 보장을 할 수 없기 때문에 FOD 자동탐지시스템 개발을 위하여 노력하고 있다.

그림 1과 같이 인명피해를 줄이기 위해서 현재 공항에서는 FOD를 육안으로 식별하고 있으나 악기상 상황처럼 불리한 조건에서는 FOD를 식별하기 힘들뿐더러 활주로의 모든 구간을 육안으로 점검하는 것은 시간이 많이 소요되기 때문에 환경적 제약이 없는 전천후 탐지시스템 구축이 필요하다. 이에 본 논문에서는 한서대학교 태안비행장에서 EO (electro-optic) / IR (infra-red) laser light 카메라 및 레이저 센서를 이용한 이물질 자동 탐지 실험을 진행하였고, 활주로 상의 FOD 탐지에 사용하는 고정형 FOD 자동 탐지 시스템과 이동형 이물질 자동 탐지 시스템 비교 및 시스템의 요구조건을 분석하였다 [3],[4].



그림 1. 인력에 의한 FOD 탐지
Fig. 1. FOD detection by the manpower.

II. FOD자동 탐지 시스템 구성

2-1 고정형 FOD 자동 탐지 시스템

고정형 이물질 탐지 시스템은 탐지하고자 하는 활주로의 길이에 따라 고정형 플랫폼의 수가 결정되며, 표 1과 같이 기술에 적합한 radar 와 optical camera를 플랫폼 상단에 각종 탐지 센서들을 장착하고, 각 플랫폼 별로 이물질을 탐지한다. 한서대학교 태안비행장에 설치되어 있는 고정형 플랫폼은 그림 2와 같이 레이더 센서와 EO/IR센서, 제어모듈, 광 switch hub, 전원장치로 구성되어 있다. EO/IR센서의 경우 주간에는 광학, 야간 및 악시정에 IR 센서를 사용하여 주야간 및 악기상과 관계없이 사용이 가능하다. EO/IR 센서는 기본적으로 장거리에서 고해상의 목적으로 촬영한 후 영상자료를 지상에 실시간으로 전송하는 목적으로 운용된다. 시스템 설계 시 운용 환경이 열악한 경우 시스템 설계시 환경규격은 중요한 요소이다 [1],[6]. 그림 3과 같이 고정형 플랫폼의 경우에는 좌표값이 고정되어서 RTK(real time kinematic)값을 한번만 저장한다. 레이더 센서는 크게 레이더 스캐닝 유닛과 레이더 인터페이스 유닛으로 분류할 수 있다. 레이더 스캐닝 유닛은 태양열 차단과 GPS안테나, 파형발생기, RF송수신기 레이더 센서 프로세서로 구성된 베이스플레이트 어셈블리로 구성되어 있다. 짧은 파장의 밀리미터파를 사용해 주야간 및 눈, 비와 같은 악기상에서도 cm의 크기인 이물질을 탐지할 수 있다. 레이더 센서를 통하여 활주로 상의 이물질을 탐지하고, RTK를 통해 얻은 정확한 위치를 이용하여 EO/IR카메라로 이물질을 탐지 및 확인하여 FOD 탐지 확률을 높인다[1],[5].

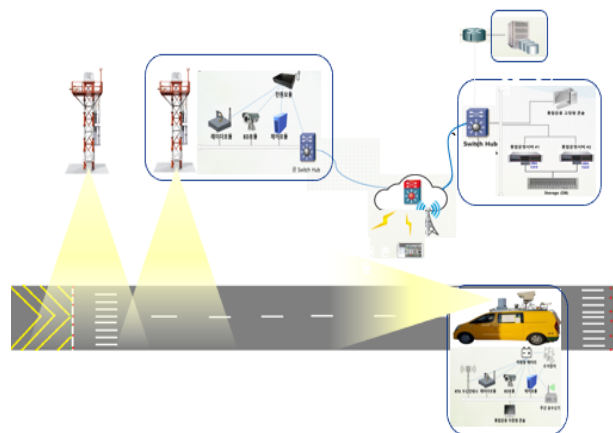


그림 2. FOD 자동 탐지 시스템 운영 개념도
Fig. 2. Conceptual diagram of automatic FOD detection system operation.

표 1. 고정형 이물질 자동 탐지 시스템 기술비교

Table 1. Comparison of automatic transparent material detection system.

Key specification comparison	FAA recommended circulation/level of lead technology	Development technology level
A production company	Stratech/QinetiQ	Wave tech
Operational sensor	radar, optical camera	radar + optical camera
Maximum detection range	400 mm [Stratech] 1.5 km [QinetiQ]	450 m
Detection probability	90%~	95%~
Radar minimum detection RCS	-20 dBsm	-30 dBsm
Camera minimum detection size	Operate for identification	2 cm X 2 cm
Detection time	3 minutes	1.2 seconds
Detection location accuracy	~5 m	~1 m
Interlinked operation of navigation system and flight information management system in airports	-	possibility

2-2 이동형 FOD 자동 탐지 시스템

이동형 이물질 자동 탐지 시스템은 표 2와 같이 제작하여 이동할 수 있는 플랫폼의 상단에 센서들을 장착하여 탐지하며, 특정 원하는 시간대에 활주로 전체를 빠르게 스캔할 수 있다는 장점이 있다. 그림 4는 현재 대안비행장에서 활주로를 이동하면서 사용중인 이동형 이물질 자동 탐지 시스템 플랫폼이다. 이는 고정형 이물질 자동 탐지 시스템을 이용하기 어려운 계류장이나 복잡한 유도도로 등에서 이용할 수 있다. 하지만 항공기로 인한 이물질 발생 시 즉각적으로 탐지 및 수거가 불가능하기 때문에 항공 안전운항 보장에 제약사항으로 작용할 수 있다. 이동형 무인 자동 탐지 시스템의 기술에 대한 전망은 있으나, 문제 발생시 대형사고로 이어질 수 있기 때문에 도입에는 어려움이 있다. 또한, 군 공항에서는 빠르게 활주로 전체를 스캔할 수 있는 시스템을 요구하고 있는 실정으므로 향후 더 빠른 속도에서 이물질 탐지가 이루어질 수 있는 기술 개발이 필요할 것으로 요구된다. 이동형 FOD 자동 탐지 시스템의 구성은 EO/IR lighting 센서 모듈, 레이더 센서모듈, 서치라이트, 후방 카메라 등으로 구성되어 있다[1]-[3].

최대 탐지 120 m거리조건에서 95%이상 탐지확률을 보이고 있다. 이동형 플랫폼은 이동형 레이더 센서 모듈, 이동형 EO센서 모듈, 이동형 제어모듈, 통합운영 이동형콘솔, 이동형 전원공급모듈, 이동형 플랫폼, 이동형 배터리팩, 이동형 수거장치로 구성되어 있다. 이동형 FOD 자동 탐지 시스템은 레이더의 경우 FMCW 레이더 방식을 이용하며, RTK값을 고정형과는 다르게 위치값이 고정되어있지 않기 때문에 실시간 RTK의 정보가 필요하고, 고정형과 동일하게 95%이상의 탐지확률을 보이고 있다.



그림 3. Stratech/Qinetiq & 웨이브텍 제작 고정형 플랫폼
Fig. 3. Stratech/Qinetiq & Wave Tech production fixed platform.



그림 4. Trex Enterprises & 웨이브텍 제작 이동형 플랫폼
Fig. 4. Trex Enterprises & Wave Tech production mobile platform.

표 2. 이동형 이물질 자동 탐지 시스템 기술비교
Table 2. Comparison of automatic transparent material detection system.

Key specification comparison	FAA recommended circulation/level of lead technology	Development technology level
A production company	Trex Enterprises	Wave tech
Operational sensor	radar	radar + optical camera
Maximum detection range	180 m	120 m
Detection probability	90%~	95%~
Radar minimum detection RCS	-20 dBsm	-30 dBsm
Camera minimum detection size	-	2 cm
Detection time	2 seconds	1.2 seconds
Detection location accuracy	~5 m	~1m
Vehicle movement speed	48 km/h	60 km/h
Interlinked operation of navigation system and flight information management system in airports	-	possibility

III. 고정형/이동형 레이더 및 EO센서

3-1 레이더 규격 비교 및 분석

활주로 FOD는 고정형과 이동형의 자동 탐지 시스템에서 정밀한 위치 신호를 받는다. 그림 5와 같이 고정형 FOD 자동 탐지 시스템과 이동형 FOD 자동 탐지 시스템의 공통적인 레이더 규격은 FMCW 레이더의 방식을 사용한다. FMCW 레이더는 진폭 변조 (amplitude modulation) 및 주파수 변조 (frequency modulation)을 사용한다. 위성용 레이더 등 다양한 분야에서 적극적으로 활용중이다 [7]. 또한, 95% 이상의 탐지확률을 나타내고 출력주파수에 관해 75 ~ 81 GHz를 사용하고 있다. 1 m 이내의 위치정확도와 최소 RCS (radar cross section)는 -30 dBsm이다. 이때 이동형 이물질 자동 탐지시스템은 고정형보다 탐지거리가 280 m 작지만, 출력전력은 10 mW이고 탐지시간은 2 초 이내로 사용된다. 레이더 전방탐지거리 100 m 이상, 이동속도는 60 km/h 이상이다. 탐지는 실시간으로 처리되어 보여진다. 고정형 이물질 자동 탐지 센서모듈은 멀티미터파와 레이더를 사용하여 일반적인 레이더보다 짧은 파장의 멀티미터파를 사용해 악기상에도 cm 크기의 이물질 탐지가 가능하다 [1].

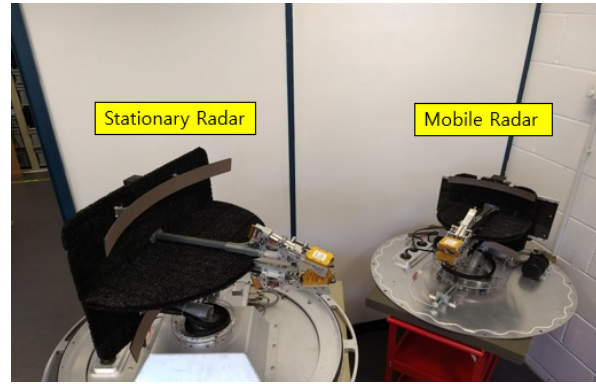


그림 5. 고정형 레이더 & 이동형 레이더
Fig. 5. Stationary & Mobile radar.

3-2 EO 센서 규격 비교 분석

고정형 EO/IR laser light 모듈은 고정형 이물질 자동탐지시스템 철골 구조물 상부 펜스에 설치된다. 그림 6과 같이 EO/IR 카메라와 EO/IR laser light 모듈은 시스템 랙에 착장되어 획득한 영상을 분석하고 활주로 내 FOD를 탐지하는 EO 센서 프로세서로 전송한다. 이후 제어 및 조회 등의 외부 인터페이스를 적용하여 획득한 영상에서 이물질을 탐지한다. EO 센서 카메라는 광신호를 감지하는 촬상소자, 광신호를 전기신호로 변환하는 신호변환부, 영상신호를 압축하여 IP모듈로 구성되어 있다 [1]. EO 센서의 경우 카메라는 1920*1080 (FHD)의 유효화소와 0.01 Lux를 최저조도를 사용 중이다. PTZ (pan-tilt-zoom) 카메라의 Pan은 최대 초당 12도, Tilt는 최대 초당 9도를 사용하고 있다. 눈, 비, 안개 등 악기상에도 FOD를 탐지하기 위해 806 nm ~ 860 nm의 파장투과 필터를 사용하고 light를 설계하여 악기상에 제약을 받지 않도록 설정한다.

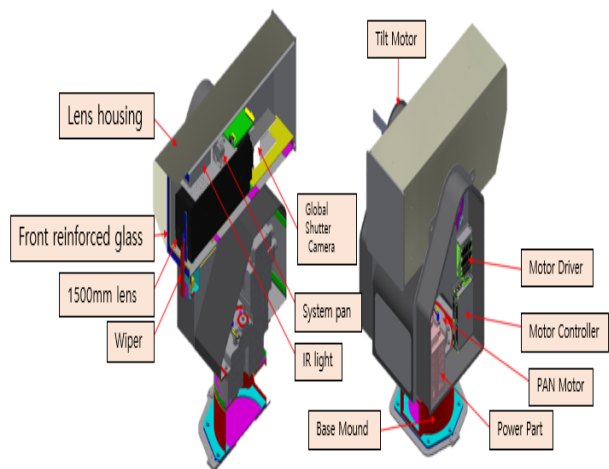


그림 6. EO 센서
Fig. 6. EO sensor.

IV. 고정형/이동형 플랫폼의 FOD 탐지 결과

한서대학교 태안비행장에서 고정형 FOD 자동 탐지 시스템 실험과 이동형 FOD 자동 탐지 시스템 실험을 진행하였다. RTK로 고정형과 이동형 플랫폼의 위치정보를 획득하였다. FAA 권고회람에서 언급된 이물질 분류를 고려하여 총 12개의 시험용 이물질을 선정하였다. 대표적으로 그림 7과 같은 35 mm 금속 구(metal sphere)를 사용하여 고정형과 이동형 플랫폼의 FOD 탐지 시험하였다. 고정형 이물질 자동 탐지 시스템 성능평가 시험에서 0.66 m 탐지 정확도와, 이동형 이물질 자동 탐지 시스템 성능평가 시험에서 0.69m 탐지 정확도를 보였다. 주간에 광학을 사용하여 실험하였고, 야간 및 악기상은 EO/IR을 사용하여 FOD를 탐지 하였다. 이동형 FOD 자동 탐지 시스템의 경우 최대 100 m 이상의 탐지가능하며, 최소 탐지 RCS는 고정형 플랫폼과 동일하게 -30 dBsm이하로 나타난다. 그림 8과 같이 같은 금속 구를 사용하여 체계 통합 시험을 통하여 탐지 정확도를 알아볼 수 있었고 표 3과 같이 각각의 플랫폼 탐지결과에서 0.05 m와 0.16 m의 정확도가 나타났다. 고정형과 이동형 플랫폼에서 탐지 거리는 100 m 이상 정확도를 보였다. 또한 탐지거리, 위치 정확도, 최소 탐지 RCS, 탐지 확률 결과와 목표시험 결과가 일치함을 확인했다.

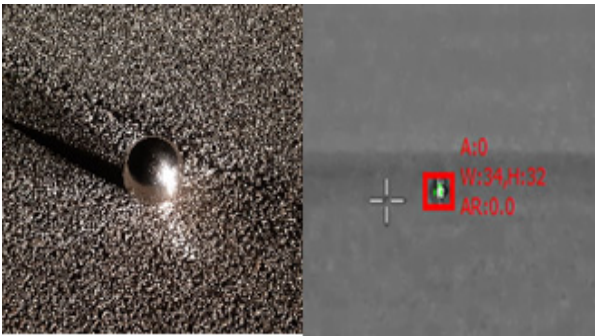


그림 7. 사용한 이물질
Fig. 7. Foreign object used.

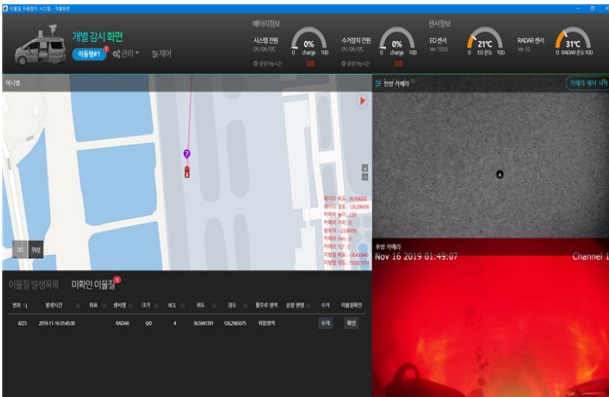


그림 8. 이동형 플랫폼의 금속 구 35 mm 탐지 UI 감시화면
Fig. 8. Metal sphere 35 mm detection UI surveillance screen on mobile platform.

표 3. 고정형/이동형 자동탐지시스템 체계통합 연동시험결과
Table 3. System integration test results for fixed/mobile automatic detection system.

	The fixed detection system detection and position accuracy	The moving detection system detection and position accuracy
Metal sphere	0.05 m	0.16 m
Plastic	0.64 m	0.52 m
A glass bottle	0.56 m	0.62 m
A gas cap	0.44 m	0.61 m
Contrit	0.27 m	0.32 m
Socket	0.18 m	0.51 m
A piece of metal	0.16 m	0.43 m
Nut	0.13 m	0.51 m
Tire	0.1 m	0.36 m
Hydraulic line	0.16 m	0.46 m
Spanner	0.15 m	0.51 m

V. 결론

FOD 탐지에 의한 경제적 손실을 최소화하려는 연구가 진행되고 있다.본 논문에서는 한서대학교 태안비행장에서 이물질 자동 탐지 시스템에 대한 개발 및 실험을 진행하였다. 현재 통합운영 콘솔을 사용하여 고정형과 이동형의 1 m이하 위치정확도와 -30 dBsm의 최소 탐지 RCS를 통하여 검증하였다. EO/IR 카메라 및 레이더를 사용하여 악기상에서도 24시간 탐지가 가능하며, 주야간 테스트를 통해 FOD 탐지가 가능한 것을 확인하였다. 지속적인 실험을 통하여 과거에는 고정형은 400 m 최대탐지거리에서 현재 450 m까지 탐지가 검증되었으며, 자체개발된 이동형은 120 m탐지가 가능하였다. FAA 권고회람에서 언급된 이물질 분류를 고려하여 선정하였다. 치명적인 사고를 예방하기 위하여 고정형 FOD 자동 탐지 시스템과 이동형 FOD 자동 탐지 시스템의 체계통합 연동시험을 시행한 결과, 이물질에 대한 GPS좌표와 탐지 좌표의 위도, 경도를 비교하여 탐지 정확도를 측정하였다. 고정형은 1분 이내 최적 탐지시간과 이동형은 2초 이내 최적 탐지시간 효과값을 얻을 수 있었으며, 고정형 FOD 자동 탐지 시스템과 이동형 FOD 자동 탐지 시스템의 병립사용은 100 m 이상 탐지거리와 95% 이상 탐지 능력이 가능함을 본 실험에서 확인할 수 있었다. 지속적인 연구개발을 통하여 FOD를 무인력으로 수행 할 수 있을것으로 기대된다.

Acknowledgments

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로

수행 되었습니다. (과제번호: 15ATRP-C108046-01)

References

[1] J. B Hong, M. S. Kang, Y. S and G. Y. Hong, "Experiment on automatic detection of airport debris (FOD) using EO/IR cameras and radar," *The Journal of Advanced Navigation Technology*, Vol. 22, No. 6, pp. 522-529, 2018.

[2] H. S. Shin, G. Y. Hong, J. B. Hong, Y.S. Choi, and Y. S. Kim, "Automatic FOD detection test using EO/IR laser light camera" *The Journal of Advanced Navigation Technology*, Vol. 21, No. 6, pp. 638-642, 2017.

[3] S. H. Kim, M. K. Park and G. Y. Hong, J. S. So, S. K. Kim, and U. E. Kim, "Analysis for FOD automatic detection system," *The Journal of Advanced Navigation Technology*,

Vol. 20. No. 3, pp.210-217, 2016.

[4] K. B. Lee, A Study for Efficient foreign object debris detection on runways, Ph D. dissertation, Incheon University, Incheon, Korea, March, 2014.

[5] K. B. Lee, FOD automatic detection system a study on the development direction for localization, Ph.D. dissertation, Incheon University, Incheon, Korea, July 2014.

[6] J. Huh and C.W. Kim, "A study of laboratory measurement of EO GRD resolution for airborne EO/IR sensor," *Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology*, Vol. 17, No. 6 pp. 793-799, 2014.

[7] J. S. Koo, An analysis of amplitude and frequency modulation in FMCW radar, Ph D. dissertation, The Graduate School of Seoul National University, Seoul, Korea Feb, 2017.



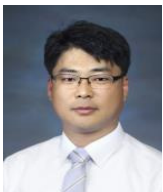
김 성 희 (Sung-Hee Kim)

2015년 3월 ~ 2019년 2월 : 한서대학교 항공전자학과 (공학사)
2019년 3월 ~ 현재 : 한서대학교 대학원 항공기 시스템학과
※ 관심분야 : 항공기 시스템, 비행시험, FOD



홍 재 범 (Jae-Beom Hong)

2012년 3월 ~ 2018년 9월 : 한서대학교 항공전자학과 (공학사)
2018년 9월 ~ 현재 : 한서대학교 대학원 항공기 시스템학과
※ 관심분야 : 항공기 시스템, 비행시험, FOD



박 광 군 (Kwang-Gun Park)

2011년 : 경기대학교 전자학과 (공학사)
2014년 : 성균관대학교 이동통신학과 (공학석사)
2014년 ~ 2017년 : 한국단자공업(주) 선임연구원
2017년 ~ 2018년 : ㈜피플웍스 책임연구원
2018년 ~ 현재 : ㈜웨이브텍 SI사업부 수석연구원
※ 관심분야 : C/X/Ku/Ka/E band PA/MM wave & Radar SI



최 인 규 (In-Kyu Choi)

2011년 : 두원공과대학 정보통신과 (전문학사)
2011년 ~ 2013년 : 레이스스테크놀로지 연구원
2013년 ~ 2015년 : 브로던 연구원
2015년 ~ 2017년 : 유니맥스정보시스템 주임연구원
2017년 ~ 현재 : ㈜웨이브텍 SI사업부 선임연구원
※ 관심분야 : H/W 설계 및 개발



홍 교 영 (Gyo-Young Hong)

1993년 3월 ~ 2001년 : 대한항공 항공기술연구소 선임 연구원
2001년 9월 ~ 현재 : 한서대학교 항공전자공학과 교수
※ 관심분야 : 비행시험, 항공통신, 항공기 시스템