

ADS-B 데이터를 이용한 서울 TMA에서의 DAA Well Clear 기반 위험도 분석

Risk Analysis of Aircraft Operations in Seoul TMA Based on DAA Well Clear Metrics using Recorded ADS-B Data

이 학 태* · 이 현 웅

인하대학교 항공우주공학과

Hak-Tae Lee* · Hyeonwoong Lee

Department of Aerospace Engineering, Inha University, Incheon, 22212, Korea

[요 약]

인천국제공항과 김포국제공항을 포함하는 서울 접근 관제 구역은 하루 1,000여 대의 항공기가 운용되어 혼잡할 뿐만 아니라 북쪽으로 공역이 제한되어있기 때문에, 항공기 간의 적절한 분리 유지를 통한 안전관리가 까다롭고 관제사의 업무 부하가 높은 편이다. 본 연구에서는 최근 3년간의 ADS-B (automatic dependent surveillance-broadcast) 항적 데이터를 기반으로, 관제사의 백터링이 추가되지 않은 원래 비행계획 상의 항로와 절차를 예측하고, 이를 이용하여 서울 접근 관제 구역 내 항공기 운용의 구조적인 안전도를 분석하였다. 안전 지표로서는 대형 무인항공기의 탐지 및 회피 시스템에 적용하기 위해 개발된 DWC (detect and avoid well clear) 지표가 사용되었으며, 이를 통하여 가장 위험도가 높은 지역들을 판별하였다. 활주로 방향에 무관하게 인천국제공항의 서쪽 지역을 사용하는 이/착륙 절차 주변이 가장 위험도가 높게 나타났다. 이외에 도착 절차들의 합류 지점과 출/도착 절차들의 교차 지점이 상대적으로 위험도가 높게 나타났다.

[Abstract]

Seoul terminal maneuvering area (TMA) that includes Incheon International Airport (ICN) and Gimpo International Airport is a very congested airspace with around 1,000 daily flights and the airspace blocked at the boundary between Incheon flight information region (FIR) and Pyongyang FIR. Consequently, with frequency radar vectorings, separation assurance in this airspace is complicated thus resulting in higher controller workload. In this paper, the conflict and collision risks in Seoul TMA are analyzed using recorded ADS-B data for past three years. Using the recorded trajectories, original flight plan procedures and routes are reconstructed and the risks are quantified using detect and avoid well clear (DWC) metric that is developed for large unmanned aircraft system. The region west of ICN was found to be the highest risk area regardless of the runway directions. In addition, merge and crossing points between procedures displayed relatively high risks.

Key word : Risk analysis, ADS-B data, DAA well clear, Seoul TMA, Flight plan.

<https://doi.org/10.12673/jant.2020.24.6.527>



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 2 December 2020; Revised 9 December 2020

Accepted (Publication) 21 December 2020 (30 December 2020)

*Corresponding Author; Hak-Tae Lee

Tel: +82-32-720-9017

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

I. 서론

인천국제공항과 김포국제공항을 포함하는 서울 접근 관제 구역은 하루에 약 1,000여 대의 항공기가 운용되는 혼잡한 공역이다. 게다가 불과 40 km 북쪽 휴전선이 인천 비행정보구역의 북방 한계이고, 이를 넘어 평양 비행정보구역에서의 비행이 불가능하므로 북쪽으로는 항공기들이 기동할 수 있는 구간이 매우 협소하다. 지속적으로 교통량이 증가하고 있는 상황에서 기존의 비행 데이터를 통하여 공역 내에서 잠재적으로 안전 문제가 대두될 수 있는 영역을 파악하고 이에 대한 대책을 강구할 필요가 있다.

인하대학교에서는 2017년부터 ADS-B (automatic dependent surveillance-broadcast) 수신기를 설치하여 항적 데이터를 수집하였으며, 이를 통하여 위험도 분석에 관한 연구를 수행해오고 있다. [1]은 대형 무인항공기의 공역 통합에 관한 연구로, 위험도 분석을 위해, 항공기 사이의 분리 거리만을 이용하는 conflict intrusion parameter와 무인항공기의 운용을 위해 새로 제시된 DWC (detect and avoid well clear)라는 지표를 비교하였고 [2], DWC가 관제사가 느끼는 위험도와 상관관계가 높음을 밝혔다. [3]에서는 당시까지 수집된 ADS-B 데이터를 기반으로 하루 기준으로 서울 접근 관제 구역 내에서 위험도가 높은 지역들을 판별하였으며, 특히 인천공항과 김포공항으로 진입 및 진출하는 항공기들간의 항로가 교차하는 지점에서 위험도가 높게 나온다는 결론을 도출하였다. 그러나, 기록된 ADS-B 데이터는 관제사의 관제 명령이 반영된 항적이기 때문에, 이미 항공기 사이의 분리 거리가 관리된 상태이고, 따라서 이를 이용하여 실제로 위험한 상황이 발생할 가능성이 큰 장소를 예측하는 데에는 한계가 있다. [4]는 기록된 항적 데이터와 기존에 존재하는 절차, 항로 정보를 이용하여 원래 비행계획을 추정하고 관제사가 개입한 부분을 찾아내서 삭제할 수 있는 알고리즘을 제시하였다.

본 연구는 지난 3년간의 기록된 ADS-B 데이터 중 교통량이 많고 수신 품질이 좋은 100일 치의 데이터를 선정하고, 이를 활주로 방향별로 구분한 후, [4]와 [5]의 알고리즘을 이용하여 관제사의 벡터링을 제거한 항적으로 재구성하였다. 이를 이용하여 기존의 항로에서 사용하기 위해 개발되었던 DWC phase 1 [6] 지표와 최근 접근 관제 공역을 위해 새로 개발되고 있는 DWC phase 2 [7] 지표를 활용하여 위험도를 분석하였다. 활주로 방향별, 그리고 고도별로 위험도가 높은 영역을 판별하였다.

2장에서는 ADS-B 데이터와 비행계획 찾기 알고리즘에 대하여 설명하고, DWC 지표에 관하여 설명한다. 3장에서는 위험도를 분석한 결과를 제시한다. 4장에서는 결론을 내리고, 본 연구를 바탕으로 향후 연구의 나아갈 방향을 제시한다.

II. 데이터와 지표

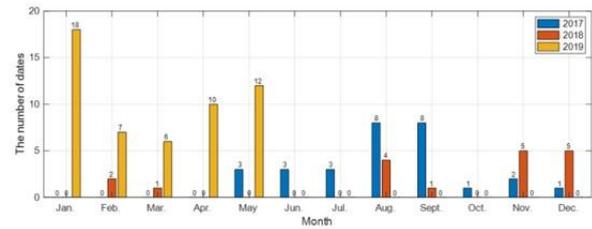


그림 1. 2017년부터 2019년까지 3년간의 ADS-B 데이터 중 분석에 사용된 날의 월별 분포

Fig. 1. Number of days in each month from the ADS-B from 2017 to 2019 used for the risk analysis.

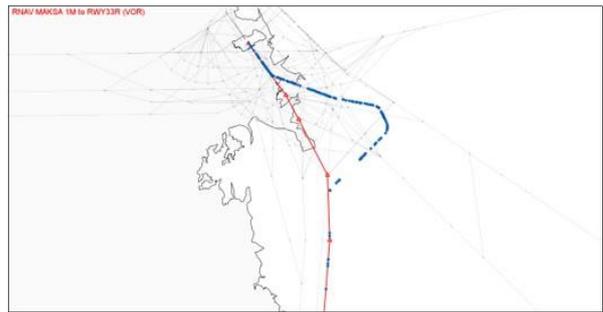


그림 2. 남동방향으로 이착륙 시 DWC phase 2 기준 위험도

Fig. 2. Risk for southeast flow with DWC phase 2 metric.

2장에서는 위험도 분석에 사용된 원본 데이터, 처리 방법, 그리고 위험도 지표에 대하여 설명한다.

2-1 ADS-B 데이터

2016년부터 2019년까지 3년간 기록된 데이터에서 그림 1과 같이 수신 품질이 좋고 교통량이 많은 100일간의 데이터를 식별하였다. 그림 1은 선별된 데이터의 월별 분포를 보여준다.

2-2 비행계획 찾기 알고리즘

AIP 문서에 제시된 항로와 절차를 이용해서 두 경로점 사이의 직선 경로상에 상하좌우로 경계 영역을 설정한다. 이 영역에 들어오는 ADS-B 항적 데이터 좌표의 숫자를 세는데, 경계의 영역을 줄여가면서 식 (1)과 같이 더해 나가는 방식으로 점수를 부여한다. 가장 점수가 높은 절차와 항로를 기록된 항적에 대한 원 비행계획으로 간주한다 [4].

$$S = \sum_i \frac{N(L_i)}{L_i^2}, L_{i+1} = \frac{L_i}{5} \quad (1)$$

그림 2는 기록된 항적을 이용하여 원래 비행계획을 찾는 예시로써 파란색 점은 ADS-B로부터 얻은 항공기의 위치이고, 붉은색 선과 점은 찾아낸 비행계획이다. 이는 관제사가 다른

항공기와와 분리 또는 활주로 분리 때문에 원래 비행하고 있던 항로와 착륙 절차에서 잠시 벗어났다가 다시 돌아온 것을 볼 수 있다 [4]. [4]의 알고리즘을 적용하여 기록된 항적으로부터 비행계획을 추출하고, 이를 단순화된 동역학 모델과 BADA (base of aircraft data) 데이터에 기반한 궤적 생성 알고리즘의 입력으로 하여 궤적을 재생성하였다 [5],[8].

2-3 위험도 지표

유인항공기에서는 조종사의 시각에 의존하여 충돌을 방지하는 규정을 “See and avoid”라고 하여 CFR Title 14 Part 91 [9]에는 다른 항공기와 분리 거리가 “Well clear” 상태를 유지해야 한다고 규정되어 있다. 그러나 무인항공기와와의 통합 운용의 문제가 대두되면서 Well clear의 정량적 정의가 필요하게 되었다. 2017년에 처음으로 발간된 DAA MOPS (minimum operational performance standards) [6]에서 기존의 충돌 방지 시스템인 TCAS (traffic collision avoidance system) [10]에서 사용하는 개념과 유사한 방식으로 Well clear와 부수적인 경보 단계를 정의하게 되었다. 초기의 DWC 정의는 phase 1이라고 하여 일반 비행 공역, 또는 항로상의 비행 중인 항공기들을 대상으로 제정된 것이고, 이후 2020년에 개정된 phase 2 MOPS [7]에서 접근 관제 공역에 대한 좀더 완화된 기준을 제정하였다.

표 1. DWC phase 1의 기준 값
Table 1. DWC phase 1 threshold values.

Threshold	Preventive Alert	Corrective Alert	Warning Alert	Loss of Well Clear
τ_{mod}^*	35 sec	35 sec	35 sec	35 sec
HMD*	4,000 ft	4,000 ft	4,000 ft	4,000 ft
d_h^*	700 ft	450 ft	450 ft	450 ft
Time of Alert	55 sec	55 sec	25 sec	0 sec

표 2. DWC phase 2의 기준 값
Table 2. DWC phase 2 threshold values.

Threshold	Preventive Alert	Corrective Alert	Warning Alert	Loss of Well Clear
τ_{mod}^*	-	0 sec	0 sec	0 sec
HMD*	-	1,500 ft	1,500 ft	1,500 ft
d_h^*	-	450 ft	450 ft	450 ft
Time of Alert	-	55 sec	25 sec	0 sec

표 3. 이착륙 방향에 따른 활주로
Table 3. Runways depending on the flow direction.

	Incheon Intl' Airport	Gimpo Intl' Airport
Northwest	33L, 33R, 34	32L, 32R
Southeast	15L, 15R, 16	14L, 14R

위험도 계산에 필요한 수식은 MOPS [6], [7], 그리고 기타 참고문헌에 자세하게 설명되어 있다 [2]-[4]. 표 1과 표2는 본 연구에서 사용한 phase 1과 phase 2의 기준값들을 제시한다.

DWC는 무인항공기를 위하여 제정된 지표이긴 하나, [1]과 [2]의 관제사가 참여한 시뮬레이션 연구를 통하여 관제사가 실제로 체감하는 위험도와 상관관계가 높은 것이 입증되었다.

추가적으로 preventive alert, corrective alert, warning alert, 그리고 LoWC (loss of well clear), 이렇게 4단계로 정량적으로 위험 단계를 구분할 수 있어서 본 연구에서 위험도 지표로 사용하였다.

III. 위험도 분석 결과

서울 접근 관제 구역 내의 항공기 이동 패턴은 가장 크게는 활주로의 방향에 따라 달라지기 때문에, 북서 방향 이착륙과 남동 방향 이착륙으로 구분하여 분석하였다. 방향별 사용 활주로는 표 3에 정리되어 있다.

3-1 수평면 상에서의 위험 분포

위도는 36.4°부터 37.8°까지, 경도는 125.2°부터 128°까지 각각 0.04° 간격으로 격자를 생성하고, 각 격자 내에서 경보가 발생했을 경우 경보가 유지된 시간의 총합으로 각 격자의 위험도를 정의하였다. 그림 3은 북서 방향 이착륙시 phase 1 기준의 위험도 분포를 보여준다. 인천국제공항에서 이륙 직후 바로 좌선회를 하는 RNAV BOPTA 1L 절차주변으로 위험도가 가장 높게 나타남을 볼 수 있다. 다른 영역에서는 교차로와 같은 모습을 보이는 부분이 다수 존재한다. 인천 송도 상공 부근에서는 RNAV CUN 1P, MAKSA 1M, BIKSI 1M, GONAV 1M 4 개의 착륙절차가 하나로 모이는 곳으로, 추후 더 정밀한 분석이 필요하다고 여겨지는 지점이다. 인천국제공항과 김포 국제공항의 중간 지점 부근의 교차로 패턴은 인천 출발인 EGOBA 1G 절차와 김포 출발인 BULTI 1X가 교차하는 지점인데, 절차상으로 고도 분리가 되어 있어서 간섭이 일어날 가능성은 적다. 하지만 레이더 벡터링을 통해 고도를 변경할 경우, 위험도가 높아질 가능성이 있는 지역이다. 김포공항 활주로 남동쪽으로 30 km 정도에서 나타나는 교차로 패턴은 다수의 김포 도착 절차가 모이는 구간으로 역시 유의가 필요하다.

그림 4은 남동 방향 이착륙시 Phase 1 기준의 위험도 분포를 보여준다. 이 경우는 우선회를 통해 인천국제공항으로 진입하는 착륙절차 부근이 가장 위험도가 높은 것으로 나타났다. 인천국제공항 남동쪽 20 km 지점에서 RNAV KARBU 1N, RNAV GUKDO 1N, RNAV OLMEN 1N, 3개의 절차가 하나로 합류하면서부터 교통량이 많아지고 따라서 상대적으로 위험도가 증가함을 볼 수 있다. 북서 방향의 이착륙에 비해서는 덜 뚜렷하지만, 교차로 패턴이 관찰되는 지역들은 모두 고도 분리가 이루어진 출도착 절차가 교차하는 지점이다.

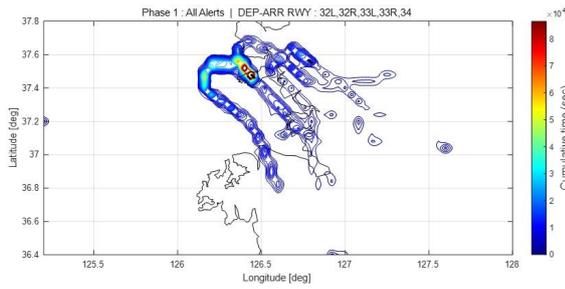


그림 3. 북서 방향으로 이착륙 시 DWC Phase 1 기준 위험도 분포

Fig. 3. Risk distribution for northwest flow with DWC Phase 1 metric.

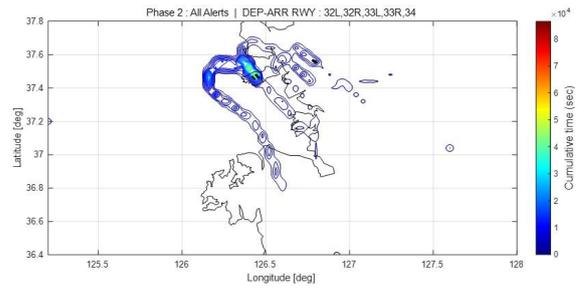


그림 5. 북서 방향으로 이착륙 시 DWC Phase 2 기준 위험도 분포

Fig. 5. Risk distribution for Northwest flow with DWC Phase 2 metric.

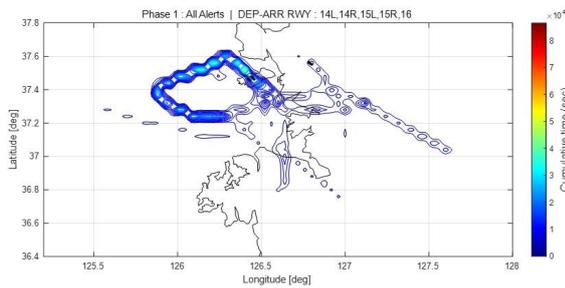


그림 4. 남동 방향으로 이착륙 시 DWC Phase 1 기준 위험도 분포

Fig. 4. Risk distribution for southeast flow with DWC Phase 1 metric.

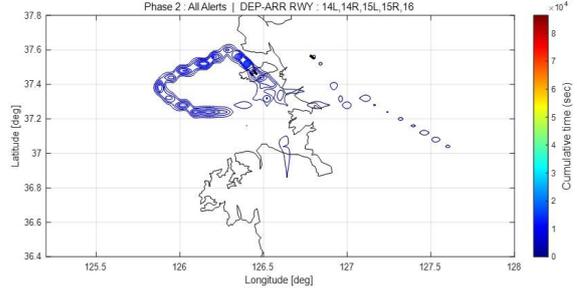


그림 6. 남동 방향으로 이착륙 시 DWC phase 2 기준 위험도 분포

Fig. 6. Risk distribution for southeast flow with DWC phase 2 metric.

표 4. DWC phase 1 기준 활주로 방향별, 경보 단계별 누적 시간 (1,000 초)

Table 4. Total duration for flow directions and alert levels with DWC phase 1 metric (1,000 seconds).

Level	Northwest	Southeast	Change direction	Total
Preventive Alert	237	112	1.9	352
Corrective Alert	153	96.6	1.6	251
Warning Alert	156	89.6	1.5	248
LoWC	1412	1034	1.8	2449
All Alerts	1959	1333	6.8	3299

활주로 방향과 무관하게, 공항의 북서쪽이 위험도가 높은 지역으로 파악이 되었고, 공역이 북쪽에서 제한된 것이 큰 요인으로 작용하는 것으로 보인다.

그림 5와 그림 6은 상대적으로 경보 기준이 완화된 phase 2 기준을 적용한 결과이다. 가장 위험도가 높은 지역은 동일하게 나타났으나, 북서 방향 이착륙 시 인천 출발인 EGOBA 1G 절차와 김포 출발인 BULTI 1X가 교차하는 지점을 제외하고는 교차로 패턴이 드러나지 않는다.

표 5. DWC phase 2 기준 활주로 방향별, 경보 단계별 누적 시간 (1,000 초)

Table 5. Total duration for flow directions and alert levels with DWC phase 2 metric (1,000 seconds).

Level	Northwest	Southeast	Change direction	Total
Preventive Alert	-	-	-	-
Corrective Alert	168	100	1.2	269
Warning Alert	170	100	0.4	270
LoWC	481	358	0.0	839
All Alerts	819	557	1.6	1378

표 4는 활주로 방향별로 phase 1 기준 각 경보 단계에 따라 머문 시간의 총합을 보여준다. 단위는 1,000 초이다. 모든 경보 단계에서 북서 방향이 더 위험도가 높음을 보여준다.

표 5는 활주로 방향별로 phase 2 기준 각 경보 단계에 따라 머문 시간의 총합을 보여준다. Phase 1과 비교했을 때 사전 경보에 해당하는 corrective alert과 warning alert의 총 시간은 크게 변화가 없으나, 가장 위험한 단계인 LoWC는 phase 2 기준으로 대폭 감소했음을 볼 수 있다.

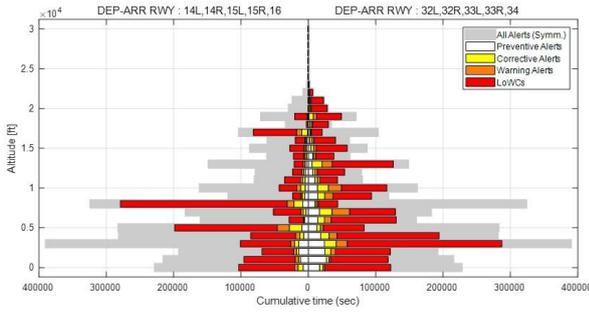


그림 7. DWC phase 1 기준 경보별 고도 분포
 Fig. 7. Altitude distribution for alerts with DWC phase 1 metric.

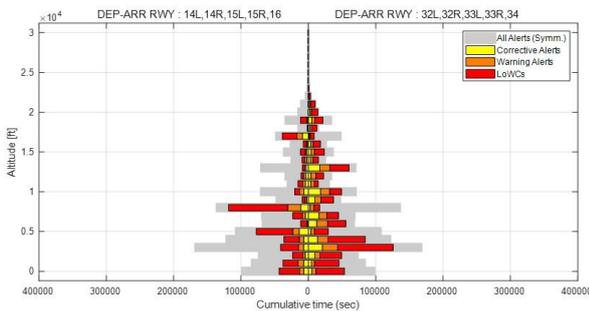


그림 8. DWC phase 2 기준 경보별 고도 분포
 Fig. 8. Altitude distribution for alerts with DWC phase 2 metric.

이는 접근관제구역 기준으로 phase 2의 기준이 더 적합함을 나타낸다. Phase 2 기준의 경우 경보 단계가 3단계로 단순화되어, phase 1의 preventive alert은 포함되지 않는다.

3-2 고도별 위험도 분포

그림 7은 phase 1 기준으로 고도별 경보의 분포를 나타낸다. 우측이 북서 방향 이착륙에 대한 경보의 고도 분포이고 좌측이 남동 방향 이착륙에 대한 분포이다. 북서 방향의 경우 3,000 ft와 4,000 ft가 가장 위험도가 높은 고도로 나타났으며, 남동 방향의 경우는 5,000 ft와 8,000 ft가 가장 위험도가 높은 고도로 나타났다. 이는 해당 절차에 제시된 고도의 차이 때문으로 사료된다.

그림 8은 phase 2 기준 분포이다. 앞에서 기술한 것과 같이 LoWC 경보가 대폭 감소하여 전반적인 경보의 수가 감소한 것을 확인할 수 있으나, 경향성은 phase 1의 기준과 같다.

IV. 결 론

본 연구는 인천국제공항과 김포국제공항 주변에서 위험도가 높을 가능성이 있는 지역을 판별하는 기법을 제시하고 축적

된 실제 데이터를 통하여 분석하였다.

인천국제공항의 서쪽을 사용하는 절차들에서 가장 위험도가 높게 나타났으며 이는 북쪽으로 공역이 막혀있다는 것이 큰 요인으로 작용한 것으로 판단된다. 이외에도, 착륙 절차들이 모이는 지점, 또는 이착륙절차들의 교차지점이 위험 상황이 발생할 가능성이 높은 것으로 밝혀졌다.

추후에는 데이터 자체의 품질 향상, 데이터 량의 증대를 통한 신뢰성 향상, 그리고 단순한 활주로 방향의 구분이 아닌 보다 세분화된 구분을 통하여 더 구체적이고 실제 운용에 참고가 될 수 있는 결과를 도출하는 연구를 진행할 예정이다.

Acknowledgement

본 연구는 국토교통부의 ‘빅데이터 기반 항공안전관리 기술 개발 및 플랫폼 구축 (20BDAS-B158275-01)’ 연구의 지원에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사드립니다.

References

- [1] H. J. Oh, J. S. Kang, K. Y. Choi, and H. T. Lee, “Human-in-the-loop simulation analysis of integrated rpas operations in trajectory based operations environment,” *International Journal of Aeronautical and Space Science*, Vol. 17, No. 4, pp. 604-613, Dec. 2016.
- [2] J. S. Kang, H. W. Lee, H. J. Oh, K. Y. Choi, H. T. Lee, H. J. Hong, and S. H. Kim, “Safety and workload assessment of lost c2 link on seoul-jeju route,” *Journal of Aerospace Information Systems*, Vol. 16, No. 4, pp. 120-131, Apr. 2019.
- [3] H. W. Lee, B. S. Park, and H. T. Lee, “Analysis of ads-b trajectories in the republic of korea with daa well clear metrics,” in *Proceeding of the 37th IEEE/AIAA Digital Avionics System Conference*, London: UK, pp.1-6, Sep. 2018.
- [4] H. W. Lee, B. S. Park, and H. T. Lee, “Analysis of alerting criteria and daa sensor requirements in terminal area,” in *Proceeding of the 38th IEEE/AIAA Digital Avionics System Conference*, San Diego: CA, pp. 1-9, Sep. 2019.
- [5] B. S. Park, and H. T. Lee, “Simple model for aircraft trajectory generation using bada,” in *Proceeding of 2016 The Korean Navigation Institute Conference*, Seoul: Korea, Vol. 20, pp. 190-193, 2016.
- [6] DO-365: Minimum operational performance standards (mops) for detect and avoid (daa) systems, RTCA Special Committee 228, 2017.

- [7] DO-365A: Minimum operational performance standards (mops) for detect and Avoid (daa) systems, RTCA Special Committee 228, 2020.
- [8] EUROCONTROL, Base of Aircraft Data(BADA) Aircraft Performance Modelling Report, EUROCONTROL, 2009
- [9] ECFR, CFR Title 14 Part 91 [Internet]. Available:

- <https://www.ecfr.gov/cgi-bin/text-idx?SID=44203211af02440a7e8936706ab4fe5e&mc=true&node=pt14.2.91&rgn=div5>
- [10] DO-185B: Minimum operational performance standards for traffic alert and collision avoidance system II, RTCA Special Committee 147, 2008.



이 학 태 (Hak-Tae Lee)

2006년 1월 : Dept. of Aeronautics and Astronautics, Stanford University 공학 박사
2006년 12월 ~ 2013년 8월 : 미국 NASA Ames 연구소 연구원
2013년 9월 ~ 현재 : 인하대학교 항공우주공학과 교수
※관심분야 : 항공교통관리, 무인항공기, 항공기 설계



이 현 응 (Hyeonwoong Lee)

2016년 2월 : 인하대학교 항공우주공학과 (공학사)
2018년 8월 : 인하대학교 항공우주공학과 (공학석사)
2018년 9월 ~ 현재 : 인하대학교 항공우주공학과 박사과정
※관심분야 : 항공교통, M&S