

Original Article

<https://doi.org/10.12985/ksaa.2023.31.3.059>
ISSN 1225-9705(print) ISSN 2466-1791(online)

항공기 기상관측자료(AMDAR)를 이용한 인천국제공항 저고도 급변풍 예측시스템 검증

석재혁*, 최희욱**, 김근희***, 이상삼****, 이용희*****

Verification of Low-Level Wind Shear Prediction System Using Aircraft Meteorological Data Relay (AMDAR)

Jae-Hyeok Seok*, Hee-Wook Choi**, Geun-Hoi Kim***, Sang-Sam Lee****, Yong Hee Lee*****

ABSTRACT

In order to predict low-level wind shear at Incheon International Airport (RKSI), a Low-Level Wind Shear prediction system (KMAP-LLWS) along the runway take-off and landing route at RKSI was established using Korea Meteorological Administration Post-Processing (KMAP). For the performance evaluation, the case of low-level wind shear cases calculated from Aircraft Meteorological Data Relay (AMDAR) from July 2021 to June 2022 was used. As a result of verification using the performance evaluation index, POD, FAR, CSI, and TSS were 0.5, 0.85, 0.13, and 0.34, respectively, and the prediction performance was improved by POD, CSI, and TSS compared to the Low-Level Wind Shear prediction system (LDPS-LLWS) calculated using the Korea Meteorological Administration's Local Data Assimilation and Prediction System (LDAPS). This means that the use of high-resolution numerical models improves the predictability of wind changes. In addition, to improve the high FAR of KMAP-LLWS, the threshold for low-level wind shear strength was adjusted. As a result, the most effective low-level wind shear threshold at 8.5 knot/100 ft was derived. This study suggests that it is possible to predict and respond to low-level wind shear at RKSI. In addition, it will be possible to predict low-level wind shear at other airports without wind shear observation equipment by applying the KMAP-LLWS.

Key Words : Korea Meteorological Administration Post Processing(고해상도 규모상세화 수치자료 산출체계), Aircraft Meteorological Data Relay(항공기 기상관측자료), Low-Level Wind Shear(저고도 급변풍), Incheon International Airport(인천국제공항)

Received: 10. Jul. 2023, Revised: 18. Jul. 2023,

Accepted: 24. Jul. 2023

* 국립기상과학원 기상응용연구부 연구원

연락처 E-mail : hyeoks@korea.kr

연락처 주소 : 제주도 서귀포시 서로북로 33

** 국립기상과학원 기상응용연구부 연구사

*** 국립기상과학원 기상응용연구부 연구원

**** 국립기상과학원 기상응용연구부 연구관

***** 국립기상과학원 기상응용연구부 부장

1. 서 론

급변풍(Wind Shear)은 상승·하강 기류를 포함하여 공간에서 풍속 및 풍향 변화를 뜻하며, 운항 중인 항공기의 성능과 안전비행에 잠재적인 악영향을 미칠 수 있다. 급변풍은 대기 중 모든 고도에서 발생할 수 있지만, 약 500m(1,600ft) 이하에서 발생하는 저고도 급변풍은 항공기 이·착륙에 매우 중요하다(ICAO, 2005). 비행중

상승(Climb-out) 및 접근(Approach) 단계에서 항공기의 속도와 고도는 매우 중요한 요인이며, 급변풍이 발생할 경우 이·착륙이 어려워지고 항공기의 복행, 회항, 지연, 결항으로 연결되어 항공안전 위협 및 경제적 손실, 승객 불편을 초래한다(ICA0, 2005; Kessler, 1990; Kim et al., 2021). 따라서 급변풍으로 인한 피해를 줄이기 위해 급변풍 발생 원인과 분석, 급변풍 탐지 및 예측 등에 관한 다양한 연구가 진행되고 있다.

먼저 복잡지형으로 인해 급변풍이 자주 발생하는 홍콩 국제공항의 경우, TDWR(Terminal Doppler Weather Radar), 윈드프로파일러, LIDAR, 지상관측자료, 해상부이 등을 이용하여 저고도 급변풍 탐지 및 대응하기 위해 다양한 시도들이 이루어지고 있다(Chan, 2017). Tse et al.(2014)는 뇌우(thunderstorm)에 의한 항공기 복행사례에 대해 TDWR과 지상관측장비를 이용하여 분석하고, 실시간 관측·예보의 한계와 예측모델의 필요성에 대해 고찰하였다. Chan(2017)은 TDWR, LIDAR, 지상관측 장비 등을 활용하여 개발된 홍콩 국제공항 급변풍·난류 경고 시스템(Wind Shear and Turbulence Warning system, WTWS)과 조종사 보고자료(Pilot Report, PIREP)를 이용하여 심각한 수준의 급변풍 발생사례를 분석하고, PIREP의 주관적인 급변풍 강도에 대한 불확실성을 고찰하였다. Tse et al.(2019)는 TDWR을 이용하여 열대성 저기압에 의한 급변풍 및 마이크로버스트 발생특징을 조사하고 탐지성능을 평가하였다.

수치모델을 활용하여 저고도 급변풍 예측을 위한 연구도 진행되고 있다. Carruthers et al.(2014)은 FLOWSTAR 모델을 활용하여 홍콩 국제공항 남쪽 산악지형을 넘어오는 강풍으로 인한 급변풍을 실시간 예측할 수 있음을 확인하였다. Chan and Hon(2016)은 홍콩 천문대에서 개발한 고해상도 항공기상 예측모델(Aviation Model, AVM)을 이용하여 핀(foehn)현상과 산악파(mountain wave)에 의해 발생한 홍콩 국제공항의 급변풍 발생사례를 재현하고, AVM 모델이 사례의 주요 특징들을 잘 예측하는 것을 확인하였다. 이후 Hon(2020)은 2년간 AVM 모델 예측자료를 PIREP 자료로 검증하였고, 급변풍 예측을 위해서는 수치예측모델의 시간적·공간적 해상도 개선이 필요함을 강조하였다.

그 외 공항에서도 저고도 급변풍 탐지 및 예측에 관한 연구가 진행되어왔다. Zhang et al.(2019)은 베이징 수도 국제공항의 PCDL(Pulse Coherent Doppler LiDAR)을 활용하여 급변풍 탐지시스템을 구축하고 PIREP을 통해 검증하였다. Keller et al.(2015)은 250m 수평해상도

수치모델을 활용하여 2008년 덴버 국제공항에서 발생한 항공기 활주로 이탈사고에 대해 당시 기상 상황을 재현하였으며, 지형에 의한 지상풍을 사전에 예측할 수 있었음을 고찰하였다. 반면, 3km 수평해상도 수치모델은 지상풍을 명시적으로 예측하지 못했음을 확인하였다.

국내에서도 저고도 급변풍 예보를 위해 공항 관측장비를 활용한 급변풍 탐지와 수치모델을 활용한 예측을 위한 연구들이 활발히 이루어지고 있다. Hong(2006)은 제주 국제공항의 LLWAS(Low-Level Windshear Alert System)를 활용하여 계절별 급변풍 발생 원인과 특성에 대해 정리하였으며, Cho and Baik(2021)은 제주국제공항의 항공기 복행사례 PIREP을 이용하여 급변풍 발생유형별로 구분하고 유형별 미치는 영향을 설명하였다. Min et al.(2020)은 고해상도 수치모델을 활용하여 제주공항 착륙경로에서 급변풍 예측시스템을 개발하고 항공기 기상관측자료(Aircraft Meteorological Data Relay, AMDAR)를 이용하여 검증한 결과, 단순히 연직방향으로 계산된 급변풍 산출방식보다 예측성능이 향상됨을 보였다. 또한, Kim et al.(2021)은 고해상도 수치모델을 활용하여 LLWAS 알고리즘을 적용한 급변풍 예측체계를 구축하고, 공항 중심으로 북동풍과 남동풍이 수렴하는 현상을 잘 모의함을 확인하였다. 이처럼 국내·외 공항들에서 저고도 급변풍 예측을 위한 노력을 기울이고 있으며, 공항·공역의 고해상도 관측자료와 고해상도 수치모델 활용이 강조되고 있다.

한편 인천국제공항은 동북아시아 허브 공항일 뿐 아니라 수도권 항공운송 수요를 분담하고 있는 공항으로서, 항공 교통량이 점차 증가할 것으로 예상됨에 따라 항공기와 승객의 안전을 위한 대비책이 필요하다. 저고도 급변풍 탐지를 위해서 TDWR, LLWAS 등을 활용하고 있지만, 조기 제공되지 못하는 한계가 있어 급변풍 예측방안이 필요한 실정이다.

이에 본 연구에서는 인천국제공항을 대상으로 고해상도 규모상세화 수치자료 산출체계(Korea Meteorological Administration Post processing, KMAP)를 활용하여 저고도 급변풍 예측시스템을 구축하고, 성능검증 및 평가를 위해 2021년 7월부터 2022년 6월까지 AMDAR 자료를 활용하였다. 2장에서는 활용한 자료와 분석방법을 기술하고, 3장에서는 저고도 급변풍 예측시스템의 검증결과를 분석하였으며, 4장에서는 요약 및 결론을 제시하였다.

II. 자료 및 방법

2.1 항공기 기상관측자료(AMDAR)

AMDAR는 항공기에 장착된 기상센서를 통해 기상 자료를 수집하고, 이를 실시간으로 기상관측 네트워크에 공유하는 시스템 체계를 의미한다. 세계기상기구(World Meteorological Organization, WMO)의 권고 아래 전 세계 40여개 항공사가 참여 중이며, 국내에서는 대한항공과 아시아나항공이 참여하고 있다. AMDAR 관측 체계는 위치 및 시간정보와 함께 기온, 풍속, 풍향 등에 대해 매일 800,000개 이상의 고품질 관측을 수행하며 습도 및 난기류 측정까지 확대되고 있다(WMO, 2020). AMDAR는 운항 중인 항공기에 의해 직접 관측되기 때문에, 별도의 인력 없이 자동 관측되는 장점이 있다. 반면, 시·공간 해상도가 일정하지 않으며, 기상악화, 전염병 등으로 인해 항공기가 운항하지 못하면 관측 공백이 발생하는 한계점도 분명하다.

Fig. 1은 2021년 7월부터 2022년 6월까지 인천국제공항의 3,000ft 이하 저고도 영역에서 수신된 AMDAR 분포이며 검색 점은 관측지점, 흰색 실선은 활주로 말단으로부터 3,000ft 고도까지의 연장선이다. 저고도 영역에서는 고고도 영역과 달리 항공기 이·착륙을 위해 일정한 경로로 운항하는 것을 확인하였다. 이러한 특징을 활용하여 본 논문에서는 3,000ft 이하 저고도 영역에서 관측·수신된 AMDAR를 사용하였으며, 활주로 연장선 경로를 벗어난 자료는 품질관리를 통해 제외하였다.

Fig. 2는 2021년 7월부터 2022년 6월까지 1년간 3,000ft 이하 인천국제공항 공역에서 수신된 AMDAR의 일평균 빈도를 시간별로 나누어 나타낸 그림이다. 총 1,158개 운항사례가 수신되었으며, 일평균 3.17회 수신되었다. 인천국제공항의 경우 다른 국내공항에서 관측할 수 없는 시간대인 15~21UTC(universal time coordinated)의 관측자료도 수신된 것을 알 수 있다. 그 이유는 다른 공항에서는 야간에 항공기 운항이 없지만, 인천국제공항은 국외 항공기(여객, 화물) 운항이 이루어지고 있기 때문이다.

2.2 저고도 급변풍 예측시스템

저고도 급변풍 예측시스템(KMAP-LLWS)은 국립기상과학원에서 개발한 고해상도 규모상세화 수치자료 산출체계(KMAP)에서 생산되는 바람변수(u , v)를 이용하여 항공기 이·착륙 경로에서 발생하는 저고도 급변풍의 세기 및 위치(고도)를 산출하고 예측정보를 제공하는 시스템이다. 실제 항공경로를 고려하여 급변풍 발생을 예측하는 특징을 가지며, 제주국제공항의 착륙 경로상 급변풍 예측을 위해 처음 개발되었다(Min et al., 2020). 이후, 공항의 추가 확대적용을 통해 전국 15개 공항에 적용되어 항공기상청에서 현업 운영 중이다(NIMS, 2021).

항공기는 활주로에 착륙하기 위해 활주로 말단으로부터 연장선을 따라 3,000ft 고도 인근의 포인트머지(point merge)를 통과한 후, 활주로별 착륙접지대(TouchDown Zone, TDZ)로 하강한다(Fig. 1). 이때, 대부분 항공기의

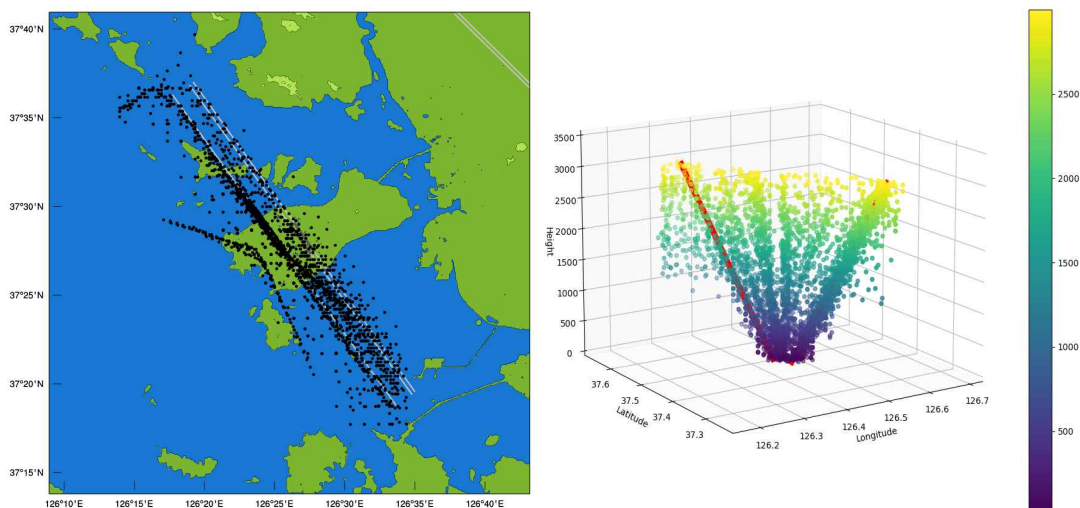


Fig. 1. Distribution of AMDAR in the low-level area of RKSJ observed from July 2021 to June 2022

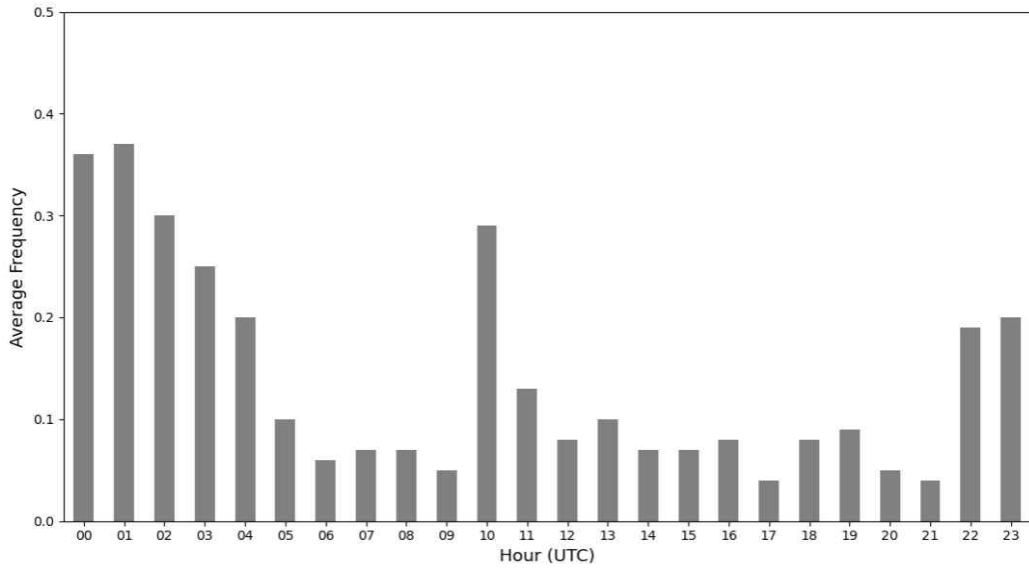


Fig. 2. Average number of observations per day classified by time of AMDAR from July 2021 to June 2022

이동경로는 같으며, 해당 경로를 항공기 이·착륙 경로로 정의하였다. 항공정보간행물(Aeronautical Information Publication, AIP)에서는 항공기의 안전착륙을 위해 3°의 진입각(착륙각)을 유도하고 있으며, 공항별 주변여건(지형, 건축물 등) 및 기상상황에 따라 6° 이상 이륙각을 권고하고 있다. 이를 바탕으로 KMAP-LLWS에서는 착륙시 3°, 이륙시 6°의 활공각이 각 활주소에 적용되고 있다.

Fig. 3은 이·착륙하는 항공기의 이동거리 및 활공각을 나타낸 모식도이다. Fig. 3(a)는 포인트 머지에서부터 착륙접지대로 3°의 활공각으로 착륙하는 항공기의 이동거리를 나타낸 그림이며, Fig. 3(b)는 6°의 활공각으로 이륙하는 항공기의 이동거리를 나타낸 그림이다. 항공기가 100ft 상승(하강)할 때, 약 290m(581m) 이동하므로 현실적인 급변풍 탐지 및 예측을 위해서는 수평해상도 300m 이하의 고해상도 수치모델이 요구된다. 이에 100m 수평해상도를 가진 KMAP 연직 예측자료가 사용되며(NIMS, 2017), KMAP-LLWS는 입력자료의 특성에 따라 일 4회(00, 06, 12, 18 UTC) 48

시간 급변풍 예측정보가 1시간 단위로 산출된다.

급변풍 계산은 국제민간항공기구(International Civil Aviation Organization, ICAO)에서 제안한 방법(Eq. 1)을 활용하여, 두 지점의 바람 변화 크기를 100ft 간격으로 환산하여 산출하였다(ICA0, 2005). Eq. 1에서 u 와 v 는 각각 동서, 남북간 바람을 의미하며, z 는 고도를 나타낸다. 속도의 단위는 knot, 길이의 단위는 ft(feet)를 사용하며, A와 B는 항공 경로상 고도가 다른 두 지점을 의미한다(Fig. 3).

계산된 급변풍 강도는 Fifth Air Navigation Conference(ICA0, 1967)에서 제안한 급변풍 등급표(Table 1)를 기준으로 약한강도(Light), 중간강도(Moderate), 강한강도(Strong), 극심한강도(Severe)로 분류된다.

$$\text{Wind Shear}(\text{knot}/100\text{ft}) = \frac{\sqrt{(u_A - u_B)^2 + (v_A - v_B)^2}}{|z_A - z_B|} \times 100 \quad (1)$$

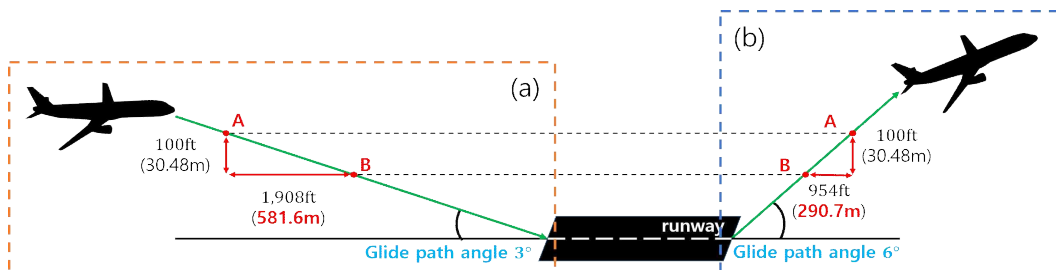


Fig. 3. Glide angle and glide distance according to take-off and landing

Table 1. Wind shear intensity proposed by the Fifth Air Navigation Conference (ICAO, 1967)

Intensity	Light	Moderate	Strong	Severe
Wind shear scale (knot/100ft)	$0 \leq WS < 5$	$5 \leq WS < 9$	$9 \leq WS < 12$	$12 \leq WS$

인천국제공항에 적용된 KMAP-LLWS는 2021년 기준 인천국제공항 AIP 정보를 바탕으로 3개 활주로(15L-33R, 15R-33L, 16-34)에 구축되었으며, 각 활주로를 이·착륙 경로별로 나누게 되면 12개 경로로 분류할 수 있다(Fig. 4). 12개 이·착륙 경로별 활주로 말단으로부터 3,000ft까지 100ft 당 급변풍이 계산된다. 예를 들어 15LA는 15L 활주로에 착륙경로를 의미하며, 33RD는 33R 활주로는 이륙경로를 의미한다.

2.3 AMDAR 자료의 품질관리 및 검증방법

본 연구에서는 세계 기상자료 통신망(Global Telecommunication System, GTS)에서 수집된 AMDAR 자료를 활용하였다. 수집된 AMDAR 자료는 관측시간과 위치정보(위도, 경도, 고도), 항공기 식별번호, 기온, 풍향, 풍속 등의 정보를 포함하고 있다.

인천국제공항 KMAP-LLWS의 검증자료로 활용하기 위해, 2021년 7월부터 2022년 6월까지 1년간의 AMDAR 자료를 수집하고 품질관리를 통해 운항사례를 선별하였다. Fig. 5는 수집된 AMDAR의 품질관리 및 운항사례 선별 흐름도이다. 기간 내 3,700건의 운항사례가 수집되었으며, 3,000ft 이상 사례 제거, 물리적 한계 검사, 1개 관측점만 있는 사례 제거, 중복검사, 정각 기준 ± 10 분 사례 선별, 이착·륙 경로를 벗어난 사례

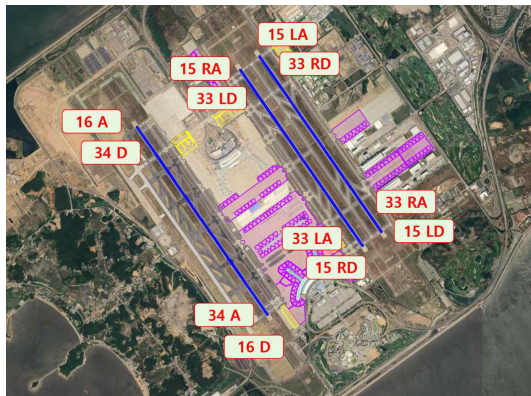


Fig. 4. Runway characteristics of RKSI input to KMAP-LLWS. The figure panel is derived from AIM (aim.koca.go.kr)

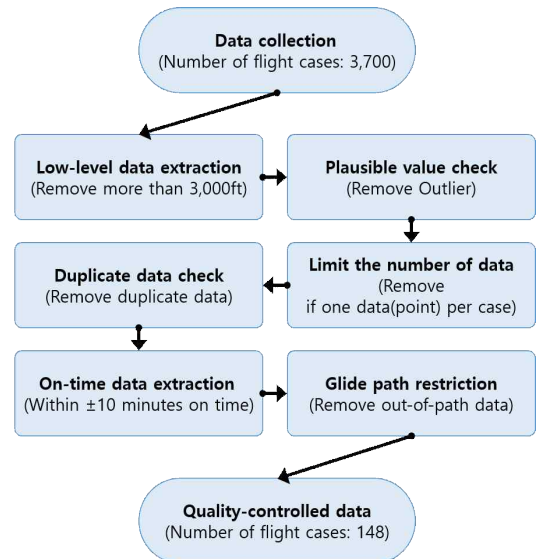


Fig. 5. Quality control and operation case selection process of AMDAR

제거 등의 과정을 거쳐 148건의 품질관리된 자료를 선별하였다. 1개 관측점만 있는 사례는 급변풍 산출에 어려움이 있으므로 제거하였고, 정각 기준 사례를 선별한 이유는 1시간(정시) 단위로 산출되는 KMAP-LLWS 예측자료와 비교하기 위함이다. 또한, 관측시간이 지남에 따라 고도가 상승하면 이륙, 하강하면 착륙사례로 분류하였다. 선별된 사례의 급변풍 계산은 KMAP-LLWS와 마찬가지로 Eq. 1을 활용하여 산출하였으며, 급변풍 발생사례는 Table 1을 참조하여 중간강도(5knot/100ft) 이상일 경우 급변풍 발생사례로 분류하였다.

선별된 AMDAR 운항사례는 사례별 가장 근접한 이·착륙 경로로 분류하였고, 이는 KMAP-LLWS의 동일한 경로의 급변풍 예측자료 검증을 위해 활용된다. 또한, 정량적 검증을 위해 양방향 분할표(two-way contingency table) 분석(Table 2)을 수행하고, 4가지 성능평가지수(Eq. 2, Eq. 3, Eq. 4, Eq. 5)를 산출하였다. POD(Probability of Detection)는 급변풍이 발생한 사례 중 급변풍을 예측한 비율을 의미하고, FAR(False Alarm Ratio)는 급변풍이 예측되었으나 실제 발생하지 않은 비율을 나타낸다. CSI(Critical

Table 2. Contingency table between observation and forecast data

Contingency table		Event observed	
		Yes	No
Event forecast	Yes	TP	FP
	No	FN	TN

Success Index)는 급변풍 발생사례와 예측한 사례 중 일치하는 사례의 비율을 의미하며, TSS(True Skill Score)는 급변풍이 발생한 사례와 발생하지 않은 사례를 각각 얼마나 잘 예측했는지를 나타낸다. 각각의 지수는 0에서 1사이 값을 나타내며 POD, CSI, TSS는 1에 가까울수록 예측성능이 좋으며, FAR은 0에 가까울수록 오경보가 낮다.

$$POD = \frac{TP}{TP + FN} \quad (2)$$

$$FAR = \frac{FP}{TP + FP} \quad (3)$$

$$CSI = \frac{TP}{TP + FP + FN} \quad (4)$$

$$TSS = POD + \frac{TN}{TN + FP} \quad (5)$$

III. 결 과

3.1 인천국제공항 KMAP-LLWS 검증 결과

인천국제공항 KMAP-LLWS 성능검증을 위해 수집된 AMDAR 자료와 동일한 기간인 2021년 7월부터 2022년 6월까지 1년간 저고도 급변풍 예측자료를 산출하고 성능평가지수를 활용하여 검증하였다. 검증에는 AMDAR 운항사례의 관측시간을 기준으로 6시간 이내 예측자료를 사용하였다. 활주로 말단으로부터 연장선을 따라 3,000ft 고도 선상에서 5knot/100ft 이상의 급변풍이 관측되었을 때, 동일한 이·착륙 경로에서 5knot/100ft 이상 급변풍이 예측된다면 예측에 성공한 것으로 분류하였다.

기간 내 AMDAR 자료에서 선별된 운항 사례수는 148건으로, 이륙사례 27건, 착륙사례 121건으로 나타났다. 이륙사례 중 급변풍 발생사례는 1건, 착륙사례 중 급변풍 발생사례는 7건으로 나타났다(Table 3). 이륙사례가 착륙사례보다 현저히 적은 현상은 이륙하는 항공기에서 수집된 자료들의 위치정보(위도, 경도)의 오류가 빈번하기 때문이다. 이는 이륙단계에서 가속도

Table 3. A case of low-level wind shear at RKSI calculated from AMDAR from July 2021 to June 2022

Flight state	Run way	Date (UTC)	Altitude (ft)	Wind shear (knot/100ft)
Take-off	16	2021090701	2,004	6.8
Landing	34	2021081711	86	10.1
Landing	15R	2021091611	2,896	5.0
Landing	16	2021101310	1,660	8.5
Landing	34	2021120420	248	7.1
Landing	16	2022062410	2,351	6.9
Landing	16	2022062804	2,234	12.3
Landing	15L	2022062811	2,940	6.4

로 인해 관측이 불안정한 것으로 판단된다.

Table 4는 AMDAR 운항사례와 KMAP-LLWS의 예측자료의 검증 결과를 나타낸다. 이륙사례에서는 POD, FAR, CSI, TSS는 각각 1.0, 0.5, 0.5, 0.96으로 나타났고, 착륙사례에서는 각각 0.43, 0.88, 0.11, 0.24로 나타났다. 이륙사례는 수가 현저히 적기 때문에 착륙사례와 비교는 어렵지만, Miss가 없고, False 비율이 착륙사례보다 낮다는 점에서 예측성능이 더 높은 것으로 판단된다. 전체사례의 POD, FAR, CSI, TSS는 각각 0.5, 0.85, 0.13, 0.34로 나타났다.

인천국제공항 KMAP-LLWS의 객관적인 검증 결과를 판단하기 위해, 기상청 현업 국지예보모델(Local Data Assimilation and Prediction System, LDAPS)을 활용하여 인천국제공항의 저고도 급변풍 예측시스템을 구축하고 KMAP-LLWS와 비교하였다. LDAPS는 현업 예측모델 중 가장 고해상도인 1.5km 수평해상도를 지니며, KMAP의 규모상세화 입력자료로 사용되고 있다. Table 5는 검증기간 내 LDAPS를 이용하여 구축한 인천국제공항 저고도 급변풍 예측시스템(LDPS-LLWS)의 검증 결과를 나타낸 표이다. 148개 사례에서 POD, FAR, CSI, TSS는 각각 0.25, 0.82, 0.12, 0.19으로 나타났다. KMAP-LLWS와 비교하였을 때, KMAP-LLWS가 POD, CSI, TSS에서 0.25, 0.01, 0.15 더 높은 결과를 보였으며, FAR도 0.03 더 높게 나타났다(Fig. 6). False 비율은 근소한 차이로 높아졌지만, 예측성은 더 향상된 것으로 보인다. 이는 100m 해상도의 고해상도 상세모델을 활용함에 따라 바람변화에 대한 예측성이 향상된 것으로 사료된다. 또한, 항공기 경로 내 100ft 당 급변풍 산출을 위해서는 고해상도 모델이 더욱 효과적인 것임을 나타낸다.

Table 4. Results of contingency table between AMDAR and KMAP-LLWS, and predictive performance evaluation index

Total 148 All case		AMDAR	
		TRUE	FALSE
KMAP	TRUE	4	22
LLWS	FALSE	4	118

Total 27 Take-off case		AMDAR	
		TRUE	FALSE
KMAP	TRUE	1	1
LLWS	FALSE	0	25

Total 121 Landing case		AMDAR	
		TRUE	FALSE
KMAP	TRUE	3	21
LLWS	FALSE	4	93

POD	FAR	CSI	TSS
0.5	0.85	0.13	0.34

POD	FAR	CSI	TSS
1.0	0.5	0.5	0.96

POD	FAR	CSI	TSS
0.43	0.88	0.11	0.24

Table 5. Results of contingency table between AMDAR and LDPS-LLWS, and predictive performance evaluation index

Total 148		AMDAR	
		TRUE	FALSE
LDPS	TRUE	2	9
LLWS	FALSE	6	131

POD	FAR	CSI	TSS
0.25	0.82	0.12	0.19

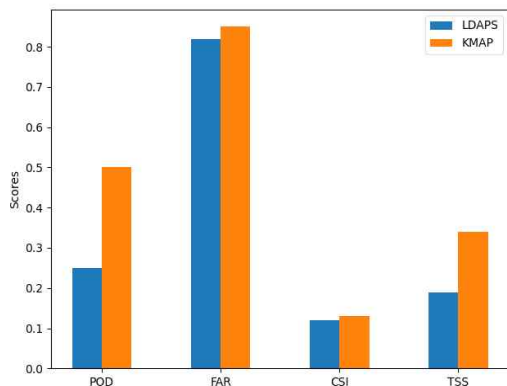


Fig. 6. Performance comparison of wind shear prediction system with KMAP-LLWS and LDPS-LLWS

전체사례에서 FAR이 높게 나타난 것은 실제 급변풍이 발생하지 않았지만, 급변풍으로 예측한 사례가 많음을 나타내며, AMDAR로 산출된 급변풍 값보다 KMAP-LLWS에서 예측된 급변풍 값들이 과대모의 하는 것을 의미한다.

Fig. 7은 전체사례 양방향 분할표 분석에서 나타난 Hit, False, Miss, C.N.(Correct Negative) 사례에 대한 예측결과를 나타낸 그림이다. Fig. 7에서 왼쪽은 운항사 레벨 AMDAR 관측지점의 수평 분포도를 나타내며, 오른쪽은 AMDAR와 KMAP-LLWS 예측결과와의 연직단면도를 함께 표현하였다. 검정색 점은 관측된 고도별 급변풍 강도를 나타내고, 빨간색 점선은 예측된 고도별 급변풍 강도를 의미한다. Fig. 7(a)는 Hit 사례로 2021년 9월 7일 01 UTC에 16 활주로 이륙사례를 나타낸 그림이다. 연직단면도에서 관측된 급변풍과 예측된 급변풍 강도가 일치하며, 고도별 강도 변화 또한 비슷하였다. Fig. 7(b)는 False 사례로 2022년 3월 17일 22 UTC에 15L 활주로 착륙사례를 나타낸 그림이다. 급변풍이 발생하지 않았지만, 예측 결과에서는 1,800ft 부근에서 5knot/100ft 이상 값이 나타났다. 이는 입력모델에서 1,700~1,800ft 구간의 풍향·풍속 차이가 큰것으로 보여진다. 반면, 나머지 관측지점에서는 급변풍 강도가 일치하였다. Fig. 7(c)는 Miss 사례로 2021년 9월 16일 11 UTC에 15R 활주

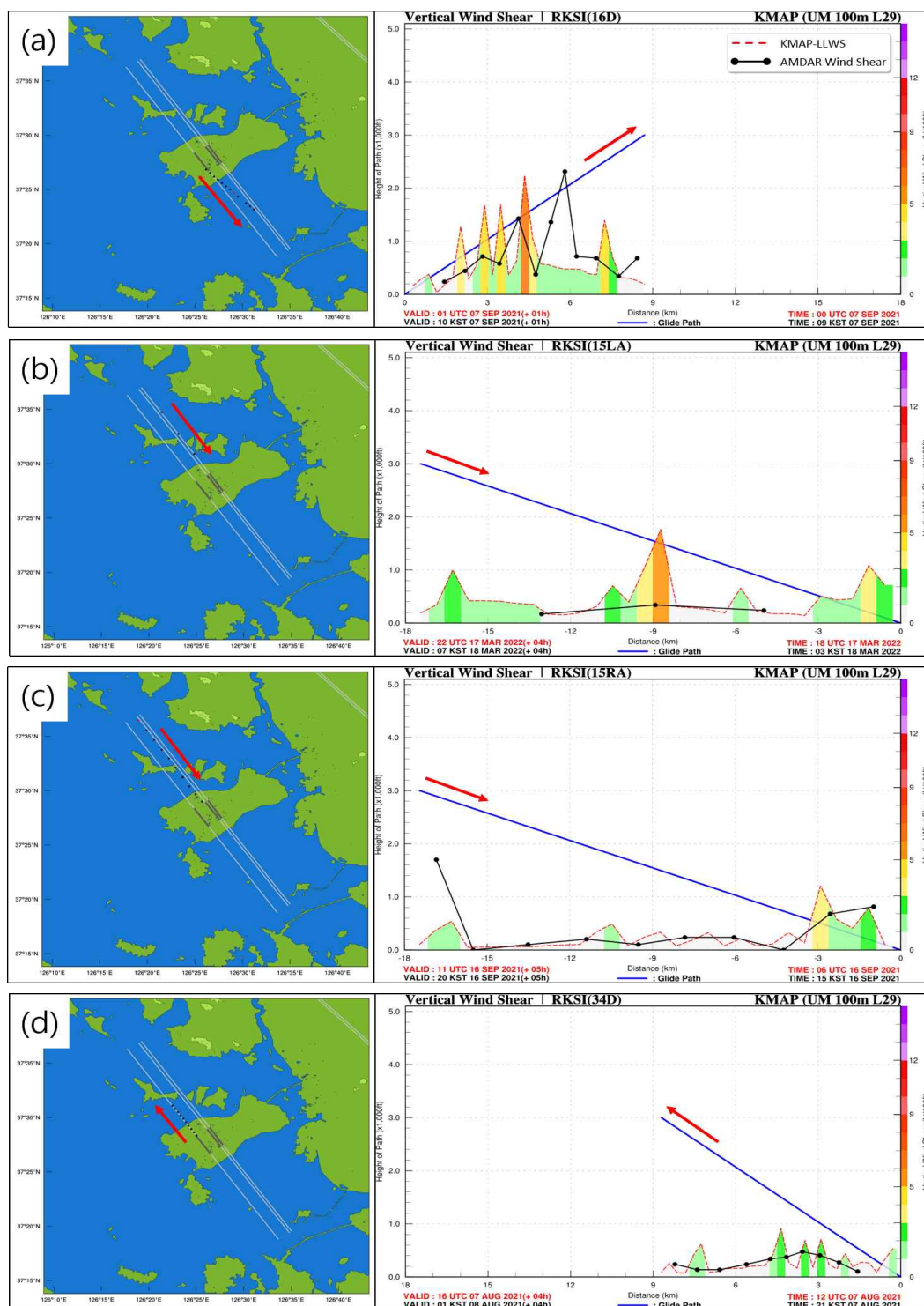


Fig. 7. AMDAR horizontal distribution and vertical cross-sectional plot by case for verification of AMDAR and KMAP-LLWS, (a) is a Hit case at 01 UTC on Sep 7, 2021, (b) is a False case at 22 UTC on Mar 17, 2022, (c) is a Miss case at 11 UTC on Sep 16, 2021, and (d) is Correct Negative case at 16 UTC on Aug 7, 2021

로 착륙사례를 나타낸 그림이다. 2,900ft 부근에서 약 5knot/100ft 강도의 급변풍이 발생하였으나 예측 결과는 약 2knot/100ft 강도로 과소모의하였다. 반면, 나머지 관측지점에서는 고도별 급변풍 강도 및 변화를 잘 예측한 것으로 나타났다. Fig. 7(d)는 C.N 사례로 2021년 8월 7일 16 UTC에 34 활주로 이륙사례를 나타낸 그림이다. 급변풍이 발생하지 않았지만, 고도별 급변풍 강도 변화를 잘 예측하는 것으로 나타났다.

3.2 KMAP-LLWS 임계값 개선 결과

인천국제공항 KMAP-LLWS의 검증 결과는 LDPS-LLWS보다 좋은 성능을 보였다. 하지만, FAR 지수가 여전히 높기 때문에, 급변풍 발생을 과대모의하고 있음을 알 수 있다. 따라서 POD, CSI, TSS 성능을 크게 떨어트리지 않으며, FAR을 낮출 수 있는 방안이 필요하다. 본 연구에서는 AMDAR 사례와 KMAP-LLWS의 급변풍 산출결과를 활용하여 다양한 통계적 실험을 통해 급변풍 예측에 효과적인 임계값을 살펴보았다.

Fig. 8은 AMDAR 사례의 급변풍 산출결과와 KMAP-LLWS의 확률밀도함수(Probability Density Function, PDF)와 누적분포함수(Cumulative Distribution Function, CDF)를 나타낸 그림이다. 파란색, 초록색 실선은 각각 AMDAR 사례의 급변풍 산출결과와 90, 95%ile 값을 나타낸 것이고, 보라색, 빨간색 점선은 KMAP-LLWS의 90, 95%ile 값을 나타낸 것이다. 또한 AMDAR 사례의 급변풍 산출결과와 평균강도는 1.86knot/100ft이며, KMAP-LLWS의 평균강도는 3.81knot/100ft로

나타났다. 따라서 이들의 평균 편향오차(mean bias error)는 1.95로 나타났으며, 전체적으로 AMDAR 사례의 급변풍 산출결과보다 KMAP-LLWS이 더 높은 강도를 나타낸다. 이는 예측자료에서 바람의 변화를 과대 모의하는 것으로 판단되며, 예측자료를 활용하여 급변풍 강도를 판단할 경우 임계값을 상향조정할 필요가 있을 것으로 보여진다.

Fig. 9는 KMAP-LLWS의 임계값을 0.1부터 10까지 0.1씩 변화해가며 예측성능 평가지수(POD, FAR, CSI, TSS)를 산출하고 그래프로 나타낸 그림이다. POD는 임계값이 높아질수록 낮아지는 특징을 보이며, FAR 또한 임계값이 높아질수록 낮아지다가 강도 8.5 부근에서 최저점을 찍고 다시 상향되는 것을 확인하였다. CSI, TSS는 임계값이 높아질수록 높아지다가 FAR

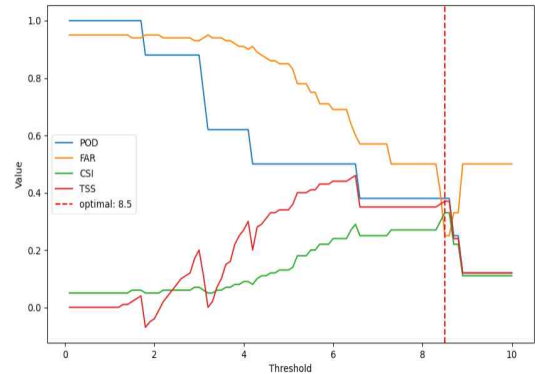


Fig. 9. Predicted performance evaluation index graph according to KMAP-LLWS threshold change

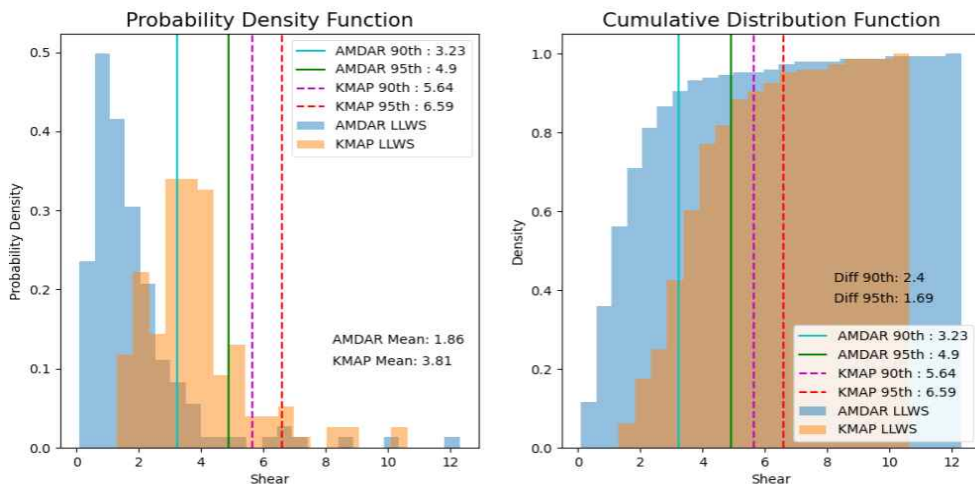


Fig. 8. Probability density function and cumulative distribution function for wind shear strength of AMDAR and KMAP-LLWS

과 마찬가지로 강도 8.5 부근에서 하향하는 것으로 나타났다. 성능평가지수 4가지를 고려했을 때, 강도 8.5에서 POD, CSI, TSS가 FAR보다 높게 나타나는 것을 확인하였다.

앞서 살펴본 PDF, CDF 및 임계값 변화에 따른 성능평가지수 그래프 결과를 바탕으로 임계값 개선을 위해 고려해볼 수 있는 5가지 실험목표를 선정하였다. Table 6은 KMAP-LLWS의 급변풍 발생 임계치 조정을 위한 실험목표를 나타낸 표이다. Exp. 1과 Exp. 2는 각각 KMAP-LLWS 급변풍 산출결과와 95%ile 값과 90%ile 값을 임계값으로 설정하는 것이고, Exp. 3은 AMDAR 임계값(5knot/100ft)에서 평균 편향오차(1.95)를 더한 값을 임계값으로 설정하는 것이다. Exp. 4는 AMDAR 급변풍 산출결과에서 임계값 5knot/100ft에 해당하는 백분위값을 찾고 KMAP-LLWS 급변풍 산출결과에 적용한 임계값을 설정하는 것이다. AMDAR 급변풍 산출결과에서 5knot/100ft에 해당하는 백분위 값은 95.27%ile로 나타났으며, KMAP-LLWS의 95.27%ile 값을 임계값으로 설정하였다. Exp. 5는 임계값 변화에 따른 성능평가지수 그래프 결과에서 최적의 임계값으로 나타난 8.5를 실험 임계값으로 설정하였다.

각 실험기준에 따라 산출된 KMAP-LLWS의 급변풍 임계값 및 예측성능평가 결과를 Table 7에 나타내었다. POD는 Exp. 2에서 가장 높은 0.5로 나타났고, FAR은 Exp. 5에서 가장 낮은 0.25로 나타났다. CSI는 Exp. 5

에서 가장 높고, TSS는 Exp. 2에서 가장 높았다. 양방향 분할표 결과를 살펴보면, Exp. 2는 POD, TSS가 가장 높고 FAR이 기준(0.85)보다 낮지만, 여전히 False가 다른 실험결과에 비해 월등히 높게 나타났기 때문에 오경보를 예측할 경우가 여전히 높다고 보여진다. 따라서 False가 가장 낮은 Exp. 5의 임계값(8.5knot/100ft)이 급변풍 예측성능이 가장 뛰어난 것으로 사료된다. 실제 급변풍이 발생하였으나 모의하지 못함을 나타내는 Miss는 실험 결과에 따라 큰 변동이 없었다. 이는 짧은 시간 사이 항공기에 전달되는 갑작스러운 바람변화를 시간당 산출되는 수치자료로 완벽히 모의하지 못하는 한계로 보인다.

IV. 요약 및 결론

본 연구에서는 인천국제공항 저고도 급변풍 예측시스템의 성능평가를 위해 2021년 7월부터 2022년 6월까지 항공기 기상관측자료(AMDAR)로부터 계산된 급변풍 사례로 검증하였다.

인천국제공항을 대상으로 구축한 저고도 급변풍 예측시스템(KMAP-LLWS)은 고해상도 규모상세화 수치자료 산출체계(KMAP)의 바람변수(u, v)를 이용하여 활주로 별 이·착륙 경로에서 발생하는 저고도 급변풍의 세기 및 위치를 산출하고, 예측자료를 생산하는 시스템으로서, 실제 항공경로를 고려하여 급변풍을 예측하는 특징

Table 6. Description of the threshold value adjustment experiment

Exp No.	Explanation (AMDAR Threshold: 5knot/100ft)
Exp 1.	KMAP-LLWS's 95 percentile value
Exp 2.	KMAP-LLWS's 90 percentile value
Exp 3.	AMDAR threshold + Mean Bias Error
Exp 4.	Find a percentile corresponding to 5 in AMDAR and apply it to KMAP threshold
Exp 5.	Optimal thresholds for evaluation index graphs

Table 7. Predicted performance evaluation results based on experiments

Exp No.	Thresholds (knot/100ft)	Index				Contingency table			
		POD	FAR	CSI	TSS	TP (Hit)	FP (False)	FN (Miss)	TN (C.N)
Control	5	0.5	0.85	0.12	0.34	4	22	4	118
Exp 1.	6.59	0.38	0.62	0.23	0.34	3	5	5	135
Exp 2.	5.64	0.5	0.73	0.21	0.42	4	11	4	129
Exp 3.	6.95	0.38	0.57	0.25	0.35	3	4	5	136
Exp 4.	6.62	0.38	0.57	0.25	0.35	3	4	5	136
Exp 5.	8.5	0.38	0.25	0.33	0.37	3	1	5	139

을 가진다. 검증에 활용된 AMDAR 자료는 세계 기상자료 통신망(GTS)으로부터 수집된 자료로서, 품질관리를 통해 148건의 운항사례를 선별하였다. 선별된 운항사례의 관측시간을 기준으로 6시간 이내 급변풍 예측자료로 검증을 수행하였으며, 성능평가를 위해 POD, FAR, CSI, TSS 지수를 산출하였다. 또한, 검증결과를 바탕으로 임계값 조정을 통해 인천국제공항 활주로 내 급변풍 탐지에 효과적인 임계값을 살펴보았다.

인천국제공항 KMAP-LLWS의 검증결과, POD, FAR, CSI, TSS가 각각 0.5, 0.85, 0.13, 0.34로 나타났다. FAR이 높게 나타난 것은 실제 급변풍이 발생하지 않았지만 급변풍으로 예측한 사례가 많음을 의미하며, KMAP-LLWS에서 예측된 급변풍 값들이 과대모의하는 것으로 볼 수 있다. 보다 객관적인 평가를 위해 기상청 현업 국지예보모델(LDAPS)을 활용하여 저고도 급변풍 예측시스템(LDPS-LLWS)을 구축하고 AMDAR 자료로 검증한 결과를 KMAP-LLWS와 비교하였다. 그 결과, LDPS-LLWS보다 KMAP-LLWS의 FAR이 0.3 높게 나타났지만, POD, CSI, TSS에서 각각 0.25, 0.01, 0.15 더 높은 예측성능을 나타냈다. 이는 고해상도 수치모델을 활용함에 따라 바람변화에 대한 예측성이 향상된 것을 사료된다. 또한, 100ft당 급변풍 산출을 위해 고해상도 모델이 필수적임을 의미한다. 고해상도 모델 활용으로 예측성능은 향상되었지만 FAR(오보율) 지수는 높게 나타남에 따라 오보율을 감소할 수 있는 임계값 조정 방안을 모색하였다. 확률밀도함수(PDF), 누적분포함수(CDF), 임계값별 성능평가지수 그래프를 검토하여 임계값 개선을 위한 다양한 실험을 수행한 결과, 8.5knot/100ft 임계값에서 예측성능이 가장 좋은 것으로 나타났으며, False 또한 가장 낮은 수치를 보였다. Miss는 실험 결과에 따라 큰 변동이 없었는데, 이는 짧은 시간에 항공기가 느끼는 바람변화를 수치자료에서 완벽히 모의하지 못하는 한계로 보인다. 이를 개선하기 위해서는 수치자료의 시간해상도 개선, 변수의 정확도 개선 등이 수행되어야 할 것으로 사료된다.

본 연구결과는 인천국제공항의 급변풍을 사전 예측이 가능함을 시사한다. 또한, 급변풍 관측장비가 없는 다른 공항에서도 공간적 제약이 없는 저고도 급변풍 예측시스템 적용을 통해 급변풍 예측이 가능할 것이다. 한편, 검증자료로 사용된 AMDAR 자료의 경우 기상악화(급변풍, 강풍, 태풍, 시정악화 등) 발생 시 항공기 운항이 없기 때문에 수집할 수 있는 급변풍 발생사례가 다양하지 못한 한계가 있다. 향후, TDWR, 공항

LIDAR 등 다양한 관측자료를 바탕으로 급변풍 발생사례별 심층연구와 개선된 임계값에 대한 검증이 수행된다면, 인천국제공항 저고도 영역의 안전항행에 기여할 수 있을 것으로 사료된다.

사 사

이 연구는 기상청 국립기상과학원 「수요자 맞춤형 기상정보 산출기술 개발 연구」(KMA2018-00622)의 지원으로 수행되었습니다.

References

1. ICAO, "Manual on Low-Level Wind Shear First Edition", International Civil Aviation Organization, 2005, p.10.
2. Kessler, E., "Low-level windshear alert systems and doppler radar in aircraft terminal operations", Journal of Aircraft, 27(5), 1990, pp. 423-428.
3. Kim, G. H., Choi, H. W., Seok, J. H., and Kim, Y. H., "Prediction of low level wind shear using high resolution numerical weather prediction model at the Jeju International Airport", J. Korean Soc. Aviat. Aeronaut, 29, 2021, pp.88-95.
4. Chan, P. W., "Severe wind shear at Hong Kong International Airport: Climatology and case studies", Meteorological Applications, 24(3), 2017, pp.397-403.
5. Tse, S. M., Chan, P. W., and Wong, W. K., "A case study of missed approach of aircraft due to tailwind associated with thunderstorms", Meteorological Applications, 21(1), 2014, pp.50-61.
6. Tse, S. M., Hagio, M., and Maeda, Y., "Wind-shear detection by terminal Doppler weather radar during tropical cyclone Mujigae in 2015", Meteorological Applications, 26(4), 2019, pp.620-631.
7. Carruthers, D., Ellis, A., Hunt, J., and Chan, P. W., "Modelling of wind shear downwind

- of mountain ridges at Hong Kong International Airport”, *Meteorological Applications*, 21(1), 2014, pp.94-104.
8. Chan, P. W., and Hon, K. K., “Performance of super high resolution numerical weather prediction model in forecasting terrain-disrupted airflow at the Hong Kong International Airport: Case studies”, *Meteorological Applications*, 23(1), 2016, pp.101-114.
 9. Hon, K. K., “Predicting low-level wind shear using 200-m-resolution NWP at the Hong Kong International Airport”, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 59(2), 2020, pp.193-206.
 10. Zhang, H., Wu, S., Wang, Q., Liu, B., Yin, B., and Zhai, X., “Airport low-level wind shear lidar observation at Beijing Capital International Airport”, *Infrared Physics & Technology*, 96, 2019, pp.113-122.
 11. Keller, T. L., Trier, S. B., Hall, W. D., Sharman, R. D., Xu, M., and Liu, Y., “Lee waves associated with a commercial jetliner accident at Denver International Airport”, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 54(7), 2015, pp.1373-1392.
 12. Hong, K. D., “A study on the low level wind-shear around Jeju International Airport”, M.S. Thesis, Cheju National University, Jeju-do, June 2006.
 13. Cho, J. H., and Baik, H. J., “A study on the characteristics of low-level wind shear at Jeju International Airport from go-around flight perspective”, *J. Korean Soc. Aviat. Aeronaut*, 29(1), 2021.
 14. Min, B. H., Kim, Y. H., Choi, H. W., Jeong, H. S., Kim, K. R., and Kim, S. B., “Low-Level Wind Shear (LLWS) forecasts at Jeju International Airport using the KMAPP”, *Atmosphere*, 30(3), 2020, pp.277-291.
 15. WMO, “WMO and IATA Agree to Improve Aircraft Meteorological Reporting”, WMO Press release, October 2020, Available: <http://public.wmo.int/en/media/press-release/wmo-and-iata-agree-improve-aircraft-meteorological-reporting>
 16. NIMS, “Development of Analysis and Forecasting Technologies on Urban and Aviation Meteorology”, National Institute of Meteorological Sciences, 2021, pp.14-29.
 17. NIMS, “Korea Meteorological Administration Post Processing (KMAPP) User Manual”, NIMS Tech. Rep., 2017, pp.14.
 18. ICAO, “The further development of specifications aimed at improving the safety and efficiency of international air operations in the approach, landing and take-off phases including the missed approach”, 5th the Air Navigation Conferences, Montreal, 1967.