

인천 공항 주변 고해상도 항공기 추적 정보 기반의 바람 관측자료 생산 및 품질 검증

김정민 · 김정훈*

서울대학교 지구환경과학부

(접수일: 2022년 9월 8일, 수정일: 2022년 11월 3일, 게재확정일: 2022년 12월 12일)

Retrieval and Quality Assessment of Atmospheric Winds from the Aircraft-Based Observation Near Incheon International Airport, Korea

Jeongmin Kim and Jung-Hoon Kim*

School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, Seoul, Korea

(Manuscript received 8 September 2022; revised 3 November 2022; accepted 12 December 2022)

Abstract We analyzed the high-resolution wind data of Aircraft-Based Observation from the Mode-Selective Enhanced Surveillance (Mode-S EHS) data in Korea. For assessment of its quality, the Mode-S wind data was compared with the ECMWF ReAnalysis 5 (ERA5) reanalysis and Aircraft Meteorological Data Relay (AMDAR) data for more than 3-months from 7 May 2021 to 24 August 2021 near Incheon International Airport, Korea. Considering that the AMDAR reports are not provided by all commercial aircraft, total number of the Mode-S derived wind data with a second sampling rate was about twice larger than that of available AMDAR wind data. After the quality control procedures by removing erroneous samples, it was found that the root mean square errors (RMSEs) of the Mode-S retrieved winds are similar to that from the AMDAR winds. In particular, between 550 and 650 hPa levels, RMSE of the Mode-S (AMDAR) zonal wind against ERA5 data was about 2.3 m s^{-1} (1.9 m s^{-1}), and those increased to 3.3 m s^{-1} (2.4 m s^{-1}) in 200~500 hPa levels. A similar trend was found in the meridional wind, but a distinct positive mean bias of 2.16 m s^{-1} was observed between 875 and 1,000 hPa levels. Winds retrieved from the Mode-S also showed a good agreement directly with AMDAR data. As the Mode-S provides a large amount of data with a reliable quality, it can be useful for both data assimilation in the numerical weather prediction model and situational awareness of wind and turbulence for aviation safety in Korea.

Keywords: Aircraft-based observation, Wind measurement, Mode-Selective Enhanced Surveillance (Mode-S EHS), Aircraft Meteorological Data Relay (AMDAR), Quality assessment

1. 서 론

민간 항공기에서 관측되는 기상 정보는 항공 운항 중

위험 요소인 대기 중 난류의 객관적 위치 및 강도를 추정하는데 필수적인 관측 자료이며(Kim and Chun, 2011, 2012; Trier et al., 2012; Trier and Sharman, 2018; Kim et al., 2020; 2021; 2022), 수치모델 자료동화를 통한 초기 자료의 품질 향상 및 단기 예측성 향상에 중요한 역할을 한다. 특히 ACARS (Aircraft Communication Addressing and Reporting System)와 AMDAR (Aircraft Meteorological Data Relay) 자료는 대표적인 WMO

*Corresponding Author: Jung-Hoon Kim, School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, 1 Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul 08826, Korea.
Phone: +82-2-880-6718, Fax: +82-2-883-4972
E-mail: jhkim99@snu.ac.kr

(World Meteorological Organization) 주관의 세계적인 항공기 기상 관측 시스템으로 하루에 700,000개 이상의 온도, 바람, 습도 및 기압에 대한 관측 자료를 생산하고 있다. 민간 항공기를 통해 이루어지는 난류 관측은 조종사의 주관적인 경험으로 얻어지는 조종사 기상보고(Pilot Weather Reports, PIREPs) 자료를 통해 정기적으로 얻어지는 관측과, AMDAR 자료에 포함된, *In-situ* 관측을 통해 얻어진 EDR [$\epsilon^{1/3}$; 난류 소산률(ϵ)의 세제곱근으로 정의되며, eddy dissipation rate로 명명함; Sharman et al., 2014] 관측이 대표적으로 존재한다(Sharman et al., 2006; 2014). 1957년부터 대한민국에서 발생한 기상 관련 항공 사고의 24%에서 난류를 조우했다는 사실에서(Kim and Chun, 2011), 난류와 관련된 기상정보를 관측을 통해 확인하고 정량적으로 분석할 수 있는 것은 중요하다. 한편, 유럽중기예보센터(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)는 더 많은 항공기 관측자료를 현업 자료동화 시스템에 적용하였고, 그 결과 상층 제트기류의 예보 정확도 향상은 물론 단기 예보와 중기 예보 성능 또한 향상되었다(Cardinali et al., 2003). 또한 Petersen (2016)은 항공기 관측 자료는 단기 전구 수치 예보 모델에서 세 번째로 영향력 있으며, 지역 모델에서는 가장 중요한 단일 자료라고 밝혔다.

지난 수십 년 동안 미국과 유럽 등지에서는 항공 교통 관리(air traffic management)의 일환으로 ADS-B (Automatic Dependent Surveillance-Broadcast) 장치를 비롯한 항공 감시 기술(air surveillance technology)들이 정착되었다. 일차적인 항공 감시 기술의 목표는 항공기의 기술적인 상태를 정확하고 신속하게 보고할 수 있게 하는 것이다. 아시아 태평양 지역의 많은 국가에서도 ADS-B 장치를 설치하고 운용 중에 있다. ADS-B 장치는 1,090 MHz의 Mode-S (Mode-Selective) 데이터 링크를 사용하여 데이터를 송수신한다. 기본적인 Mode-S에서 확장된 Mode-S EHS (Mode-Selective Enhanced Surveillance)는 비행 상태벡터까지 실시간으로 전송함으로써 대기 중 바람 정보를 계산할 수 있다. Mode-S EHS에 기반한 기상 자료 생산 연구는 2007년 KNMI (The Royal Netherlands Meteorological Institute)로부터 시작하였다(de Haan et al., 2013). 선행연구에서는 Mode-S EHS 자료를 이용해 계산한 바람 및 온도 정보가 기존 항공기 관측 자료와 비교하여도 품질이 좋다고 밝혔다(de Haan, 2011; de Leege et al., 2013; Stone and Kitchen, 2015).

본 연구에서는 항공기상청에서 제공한 ADS-B 자료(2021년 5월 7일~2021년 8월 24일)를 통하여 바람 정보를 유도하였다. 해당 자료에 기반한 새로운 품질검사(Quality Control, QC)를 제안하였고, 유도된 기상 정보를 ERA5 (ECMWF ReAnalysis 5) 재분석 자료 및 AMDAR

자료와 삼중 비교를 통하여 데이터의 정합성을 검증하였다(de Haan and Stoffelen, 2009).

2. 자료 및 방법

2.1 민간 항공기 관측

2.1.1 AMDAR (Aircraft Meteorological Data Relay)

WMO의 AMDAR 자료는 실시간 상공 대기 관측을 위해 상업용 항공기에 기존 기상 장비와 데이터링크(ACARS)를 사용하며 수집되기 시작되었다(WMO AMDAR Panel, 2007). AMDAR 자료는 시간, 위치, 고도, 온도와 바람 정보를 포함하고 있으며(WMO, 2003), 일부 보고는 상대 습도를 포함한다. 관측 품질의 보장 및 데이터 전송 비용 절감을 위하여 AMDAR 자료는 특정 시간 동안의 평균 값을 보고하는데, 비행 상태에 따라 약 30초에서 10초 간의 평균 값이 보고된다(WMO, 2003). AMDAR 자료 저장에 사용되는 소프트웨어에 대한 두 기준(Stickland, 1998)에 따르면, 평균을 취하는 과정에서 시간과 위도, 경도에 대해 초 단위 이하의 정보를 제거하는 절차가 포함된다(WMO, 2003). 현업에서의 AMDAR 자료 품질관리 과정은 사용하는 모델 배경장과의 차이에 기반하여 필수적으로 진행되며(Drue et al., 2008), 그 차이는 보통 작다(Cardinali et al., 2003). AMDAR 자료는 수치예보 모델의 자료동화를 위해 주로 사용되고는 한다(Moninger et al., 2003).

AMDAR 자료 생산 및 관리에 엄격한 규정이 적용되고 있기 때문에(Kemp, 1968; Huntley et al., 1995), AMDAR 시스템에 대한 견고함은 의심의 여지가 없다. 하지만 AMDAR 자료의 정확성은 비행 운항 측면에서의 필요에 의해 유지되기 때문에 기상학적인 측면에서는 불확실성이 존재할 수 있다. 그것은 관측 장비에 의한 오차 이외에도, 비행기의 기동 시 공중 속도나 방향의 불규칙한 변화로 인해 발생할 수 있는 것으로 알려져 있다(Drue and Heinemann, 2001; WMO, 2003). 이러한 관측 시스템에서의 오차는 타 관측 및 수치예보 모델과 비교하였을 때 무작위 오차(random error)보다는 체계적 오차(systematic error)를 더욱 포함하는 것으로 알려져 있으며(Drue et al., 2008; 2010; Ballish and Kumar, 2008), 비행기 기체의 종류 혹은 계절적인 특징에 의해 영향을 받는다(Ballish and Kumar, 2008). AMDAR 자료에 대한 불확실성은 항공기의 동적 상태 혹은 고도에 따라 값이 달라질 수 있으며, 자료를 활용하는 각 기관들은 각자의 방식으로 품질 검증 과정을 수행하고 있다.

2.1.2 Mode-S

Mode-S 시스템을 포함하고 있는 항공 감시 기술은 감

시 장비의 설치 위치에 따라 일차적으로 구분된다. 감시 장비가 항공기에 설치되어 있는 경우 항공 감시(airborne surveillance), 지상에 설치되어 있는 경우 지상 감시(ground surveillance)로 구분된다. 항공 감시의 경우, 수신하는 파동의 근원에 따라 지상 레이더 안테나에서 방출한 전자파가 반사된 반사파를 수신하여 표적을 획득할 경우 일차감시레이더(primary surveillance radar), 항공기에 설치된 트랜스폰더가 지상 레이더의 질문기(interrogator)에 응답함으로써 표적을 추적하는 경우의 이차감시레이더(Secondary Surveillance Radar, SSR)로 구분된다.

레이더 기반 감시 시스템은 구축 및 운용 유지에 많은 인력과 비용이 소요되고 정밀도가 낮기 때문에 1992년 ICAO 제29차 총회에서 국제표준항행시설로 CNS/ATM (Communication, Navigation, Surveillance/Air Traffic Management)가 국제표준항행시설로 승인되고, 2010년 이후 국제표준시스템으로 전환 운용이 계획되고 수립되었다. CNS/ATM의 기본적인 장비로서는 항공기에 탑재되어 있는 GNSS (Global Navigation Satellite System) 항법장치를 기본으로 하는 자동종속감시-방송(ADS-B)이 도입되었다.

SSR에 이용할 목적으로 Mode-A와 Mode-C 트랜스폰더가 개발되었으며, 각각 항공기 ID와 기압고도 정보를 포함한다. 각각의 트랜스폰더를 장착한 항공기의 경우 두 항공기가 인접해 있을 경우, 응답이 서로 간섭하여 상호 간섭을 일으키는 문제점이 발생하였다. 이를 해결하기 위해서 Mode-S 기술이 개발되었으며, 이 기술은 항공기마다 24비트 주소를 할당하여 질문 신호에 항공

기 주소를 추가하여 질문함으로써 해당하는 항공기만 응답하여 항공기를 식별한다.

Mode-S는 항공기 ID와 호출 부호(callsign)만 전송하는 ELS (Elementary Surveillance) 또는 비행 상태벡터까지 전송하는 EHS (Enhanced Surveillance)로 나뉘며, 최근에는 질문기에 동기되지 않고 위치정보를 랜덤하게 방송하는 ES (Extended Squitter)로 발전되어 왔다. SSR/Mode-S ES를 일반적으로 1090ES라고 일컫고 이를 ADS-B 신호로 활용한다.

ADS-B 메시지는 DF (Downlink Format)에 따라 그들이 가지고 있는 정보가 다르기 때문에 각 메시지의 첫 5비트로 DF 종류를 구분한다. Table 1에 상세한 DF에 따른 정보 종류가 기술되어 있다. 각각의 정보들은 고유한 BDS (Binary Data Store) 번호가 있으며 Comm-B 형식 자료 중 BDS4,0, BDS5,0, BDS6,0은 EHS 서비스에 속한다.

본 연구의 목표인 바람 벡터의 산출을 위해서는 TTA (True Track Angle), GS (Ground Speed), TAS (True Air speed), MHED (Magnetic Heading)의 정보가 필요하다. BDS5,0이 TTA, GS, TAS를 포함하고 있으며, BDS6,0과 BDS0,9가 MHED에 대한 정보를 각각 포함하고 있다. BDS6,0이 포함하는 마하 수(Mach number) 정보를 통해 기온 또한 도출할 수 있으나(de Haan, 2011), 본 연구에서는 바람 벡터만을 생산하여 검증하였다. 본 연구에 사용한 Mode-S EHS 정보는 항공기상청을 통해 얻어졌다.

2.1.2.1 바람 벡터 계산

바람 벡터는 고정된 지점에서 관측한 비행기의 이동

Table 1. Relationship of Message type, Mode-S downlink formats, and different information.

Message type	Downlink format	Information
ADS-B (56 bits)	DF0	Short air to air message
	DF4	Altitude surveillance
	DF5	Identity surveillance
	DF11	Mode-S only all call
ADS-B ES (112 bits)	DF17	Airborne position (BDS0,5) Surface position (BDS0,6) Message identification (BDS0,7) Aircraft identification and category (BDS0,8) Airborne velocity (BDS0,9)
Mode-S EHS	DF20	Altitude replies: (BDS4,0/5,0/6,0)
	DF21	Identity replies: (BDS4,0/5,0/6,0)

ADS-B, Automatic Dependent Surveillance-Broadcast; ES, Extended Squitter; Mode-S EHS, Mode-Selective Enhanced Surveillance; DF, Downlink Format; BDS; Binary Data Store.

속도 벡터(\vec{v}_a)와 이동하는 비행기의 관점에서 관측한 비행기의 이동 속도 벡터(\vec{v}_g)의 차이로 계산한다. \vec{v}_a 는 TAS, \vec{v}_g 는 GS를 뜻한다.

$$\vec{v} = \vec{v}_g - \vec{v}_a$$

계산에 사용된 항공기 고도는 관측된 기압 정보로부터 계산되며, ISA (International Standard Atmosphere)에서 제안한 기압-고도 관계식을 따른다. 본 연구에서 사용한 자료는 수신기를 통해 수신 받은 자료 중 패킷 조합 시간(packet assembly time)이 초과된 행을 제거한 파싱 필터링(parsing filtering)이 수행된 자료이다.

2.1.2.2 자료 전처리

제공 받은 자료는 QC를 위한 전처리 과정을 거쳤다. 범위 QC, 정적값 QC, 일시적 변동 값 QC가 진행되었으며, 각각의 기준들은 WMO에서 제공하는 항공기 기반 관측 변수의 QC 기준을 따르며 Table 2에 나타냈다(WMO, 2017).

범위 QC는 각 변수가 실제 가질 수 있는 범위의 값을 벗어나거나, 지구 대기에서 관측되기 힘든 범위의 값을 가질 때 그 값을 오류로 판단하여 제거하는 QC이다. 정적값 QC는 각 변수의 값이 시간에 따라 변하지 않을 경

우 그 값을 오류로 판단하는 QC로, 5초 동안 값이 일정할 때 그 값을 제거하게 된다. 일시적 변동 값 QC는 주어진 연속성 체크 조건의 값보다 변수의 변화량이 클 경우 그것을 오류로 판단하는 QC이다. 세 가지 QC의 모든 기준은 Table 2에 명시된 조건을 따른다.

정적값 QC와 일시적 변동 값 QC를 진행하기 위해서는 수신된 자료가 실제 연속적인 자료로부터 왔다는 것에 대한 검증이 필요하다. 하지만 제공 받은 자료의 원본 형태로는 항공기 ID와 호출 부호에 따른 분류와 정렬 없이 구분되어 있고, 따라서 이를 동일한 항공편으로 분류하고 정리하는 작업이 필요하다.

이때 단지 자료를 호출 부호에 따른 기준으로 분류하게 되면 두 가지 문제가 발생하게 된다. 첫 번째는 다른 항공편이 하루 동안 같은 호출 부호를 부여 받았을 때, 그리고 동일한 항공편의 호출 부호가 비행 중간에 바뀌었을 때 문제가 생긴다. 그래서 적당한 시간 간격(e.g., 15분)마다 데이터를 잘라서 그 시간 간격 안에서 유지된 호출 부호를 연속된 비행이라고 간주하는 것이 적당하다고 사료된다.

2.1.2.3 추가적인 QC (Quality Control)

보유한 Mode-S 자료의 특성에 기반한 추가적인 QC가 이루어졌다. 자료의 풍속 값이 비현실적으로 400 kts

Table 2. ABO variables and quality control test information, adapted from the Table A1 on the Guide to Aircraft-based Observation in WMO (2017).

Variable	Unit	Range	Apply static value check (Y/N)	Apply temporal variation check (Y/N)	Threshold for temporal variation check
Pressure altitude	Feet [ft]	-1,000 to 50,000	Y	Y	5,000 ft min ⁻¹
	Meter [m]	-330 to 17,000			
Static air temperature	°C	-99 to 99	Y	Y	20°C min ⁻¹
Wind direction	Degrees from true North	1 to 360	Y	Y	180° min ⁻¹
Wind speed	Knot [kts]	0 to 800	Y	Y	50 kts min ⁻¹
	m s ⁻¹	0 to 400			
Latitude	Degree: Minute	90°00'S to 90°00'N	N	Y	0.5° min ⁻¹
Longitude	Degree: Minute	180°00'W to 180°00'E	N	Y	5° min ⁻¹
Time (UTC)	Hour:Minute:Second	00:00:00 to 23:59:59	Y	N	N/A

ABO, Aircraft-Based Observation; WMO, World Meteorological Organization.

를 넘어가는 사례들의 경우 MHED의 값이 모두 0°로 존재하였기 때문에, MHED에 대해서 값이 0°일 경우 제거하는 절차를 추가하여 자료를 정제했다. TAS에 대해서도 동일한 절차를 진행하였다. 가까운 다른 신호들과 비교하였을 때 관측된 항적 정보의 값이 0을 가리키는 경우 그것을 null 값으로 판단하는 것은 상식적인 QC 과정이다.

또한, WMO의 지침과 일관성을 잃지 않기 위하여, 바람 벡터 계산에 영향을 미치는 네 가지 항적 정보들(TAS, MHED, TTA, GS)의 일시적 변동 값에 대해서도 연속성 체크를 진행하였으며, 그 기준은 Table 3과 같다.

2.1.2.4 Heading Angle 분석

Heading Angle 값의 신뢰성에 대한 문제는 Mode-S EHS 기반 바람 정보 산출에 있어서 중요하다. 하지만 de Haan (2011)에서 드러나듯 비행기마다 고유한 관측 오차로 인하여 그 값은 달라질 수 있다. 따라서 인천국제공항에서 활용 중인 활주로의 방위각이 고정되어 있는 것을 이용하여 비행기 개체가 가지고 있는 Heading Angle의 잠재적인 오차를 검증하고, 나아가 보정하는 과정을 거칠 수 있다.

그 과정으로 우선 Mode-S 자료에서 포함하고 있는 항공기 ID와 일대일 대응되는 항공기 기체를 찾는다(e.g., ‘484CBC’: ‘Boeing 777-300ER’, ‘3C4589’: ‘Boeing 777F’ ...). 그 후 보유한 Mode-S 자료에서 인천국제공항의 이착륙 지점에 해당하는 위경도와 고도(37.4°~37.5°, 126.4°~126.5°, 고도 1 km 이하)에 대한 자료들을 선별한다. 이 공간적 범위에 해당하는 자료가 30개 이상인 비행기 종류에 한정하여 인천국제공항의 활주로 방위각인 153°와 MHED 값이 일치하는지 통계적으로 검증하여 신뢰할 수 있는 항공기 기체를 찾는다.

이 과정에서 자료가 충분히 많은(검증 대상 범위 내 30개 이상) 비행기 기종 모두에 대해서는 MHED 값의 기종에 따른 오차가 있다고 말하기 어려웠다(신뢰 수준 1%, H0: MHED = 153°). 따라서, 해당 기종들에 대하여

별다른 Heading Angle에 대한 보정 없이 바람 자료의 계산을 진행하였다.

본 연구에 사용된 Mode-S EHS 자료는 항공기상청에서 인천공항에 최초로 설치한 ADS-B 수신기로부터 수신된 원시 자료를 1차적으로 선별하여 저장된 자료를 사용했다. 이 자료가 가질 수 있는 문제로, 원시 자료의 저장과정에서 발생한 TTA의 범위 문제가 있다. Mode-S 자료 통신 규격에 따르면 TTA의 각도는 0°에서 360°의 범위 내에 존재하도록 하였으나, 자료 수집 단계에서 -180°에서 180°의 범위 내에 존재하도록 하는 과정에서 180°에서 360° 범위의 자료가 누락되는 문제가 발생하였다. 해당 문제는 항공기 운항 경로의 지리적 특성 상 전체적인 자료의 신뢰성 관점에서는 사소하나, 공항 근처 저고도에서 바람 자료의 편향에 기여할 수 있다는 점에서 주의가 필요하다.

2.2 ERA5 (ECMWF ReAnalysis 5)

ERA5는 2017년 ECMWF에서 생산한 5세대 재분석 자료로, 1시간 간격으로 제공되고 있으며, 수평 공간 해상도는 0.5° × 0.5°이고, 연직 대기층은 1,000 hPa부터 1 hPa까지 37개의 층으로 이루어져 있다. 이 고해상도의 재분석 자료는 통합 수치예보 모델인 IFS (Integrated Forecasting System) cycle 41r2에 기반하여 생산된다(Hersbach et al., 2020).

비록 ERA5의 기본 뼈대는 ECMWF의 현업 전구 예보 시스템인 IFS Cy41r2 예보장이지만, 2019년 1월 기준 하루 2,400만 개의 관측 자료가 4D-Var를 통해 자료 동화되고 있다. 상층 대기의 바람, 온도, 습도 관측은 조종사 기상 보고(PIREP), 라디오존데, 드롭존데, 항공기 관측으로 구성된다. AMDAR를 비롯한 항공기 관측은 전통적인 관측으로 분류되어, ECMWF의 이전 버전 재분석 자료인 ERA-Interim에서 사용한 방법과 동일하게(Dee et al., 2011) 온도, 바람, 절대 습도에 대해 자료동화 되고 있다. 따라서 본 연구에서 진행될 Mode-S EHS와 AMDAR 자료와의 삼중 비교에 있어서 Mode-S EHS와 ERA5 자료와 편차에 비해 AMDAR와 ERA5 자료와의 편차가 작을 수밖에 없을 것이라는 것을 예상할 수 있으며, 추후 라이다 자료 등과 같은 독립적인 자료를 이용한 삼중 비교를 추가로 진행할 필요성이 있다.

Table 3. Additional quality test information for the airborne variables.

Variable	Unit	Threshold for temporal variation check
True air speed	kts s ⁻¹	50 kts s ⁻¹
Magnetic heading	° s ⁻¹	10° s ⁻¹
True track angle	° s ⁻¹	10° s ⁻¹
Ground speed	kts s ⁻¹	10 kts s ⁻¹

3. 검증 결과

3.1 자료 개수 비교

Figure 1은 2021년 5월 7일부터 2021년 8월 24일까지, 약 4개월 동안 한반도 근처에서 수집된 Mode-S EHS 기반 자료와 AMDAR 자료의 시간별 자료 개수를 직접 비교한 막대그래프이다. 지역 시간(+09 UTC)으로

생각하였을 때 주간에 항공기 교통량이 많아짐에 따라 자료 개수가 많은 반면, 야간에는 자료 개수가 적은 특징을 양 자료에서 모두 확인할 수 있다. Figure 2는 양 자료를 월별로 분류하여 비교한 막대그래프이다. Mode-S EHS 자료의 경우, 6월 8~20일 자료가 존재하지 않는 공백 기간이 존재하며, 따라서 해당 2021년 6월 한 달 동안 타 기간에 비해 Mode-S EHS 자료와 AMDAR 자료와의 개수 차이가 적다. 비교 기간 동안 Mode-S EHS 기반 자료의 개수는 총 1,375,549개였으며, 반면 AMDAR 자료의 수는 총 703,510개로, AMDAR에 비해 약 1.95 배 많은 자료 개수를 보였다(Table 4). Mode-S EHS의 자료가 없는 기간을 생각하면 하루 당 자료의 수는

AMDAR에 비해 Mode-S EHS 자료가 훨씬 많아지는데, AMDAR 자료는 하루에 약 6,400개의 자료를 제공함에 비해 Mode-S EHS 자료는 하루에 약 14,200개의 자료를 제공하여 약 2.2배 많은 자료를 제공한다.

Figure 3은 비교 기간 동안의 Mode-S EHS 기반 바람 자료의 수평 분포로, 색깔은 해당 지역의 가장 낮은 고도를 뜻한다. Figure 3의 상단과 우측에는 각각 위도와 경도에 따른 자료 분포의 히스토그램이 로그 스케일로 그려져 있다. 수신기가 설치된 인천공항을 중심으로 방사형으로 자료가 수집되었고, 북한지역의 자료는 수집되지 않았음에 주의한다. 수신기에서 멀어질수록 저고도의 자료가 수집되지 않았는데, 이는 Mode-S EHS의 레이더 신호가 지형적인 원인에 의해 공간적인 범위의 한계를 갖는다고 해석되며, 한반도 전 영역에 걸친 자료 수집을 위해서는 더 다양한 지역에 수신기가 설치되어야 함을 의미한다. 특히 영동 지방의 경우 실제 수평 거리는 남해안보다 수신기와 가깝지만 자료가 수집되지 않았고, 이는 항공편의 개수 차이도 있겠지만, 태백산맥의 지리적인 영향이 크다고 해석된다. 인천 앞바다에서의 자료의 높은 밀도와 산동 반도와 인천 사이 자료의 존재가 특징적이며, 수도권 및 서해안에서의 많은 바람 자료 수집은 궁극적으로 단기 예보에 활용된다면 긍정적인 효과를 기대할 수 있다.

주어진 Mode-S EHS 기반 바람 자료의 특징은 인천 공항 근처의 저고도 자료에 대한 해상도가 높다는 것에 있다. Figures 4a, b는 각각 Mode-S EHS와 AMDAR 자료의 인천 공항 근처의 자료 분포와 위경도별 개수 히스토그램이다. Mode-S EHS 신호를 통해 수신된 자료의 공간해상도와 밀집도가 확연히 AMDAR에 비해 좋은 것을 확인할 수 있으며, 특히 강화도 옆 서해안 지역과 영종도 앞바다에 대한 자료 밀도가 특히 높아진 것을 확인할 수 있다. 서해 및 경기만 지역은 서울 및 수도권 지역의 풍상측에 위치하므로, 수도권 지역의 단기 예보에 대해 Mode-S EHS 자료가 동화되어 예보에 활용되었을 때 현실적인 관측 값을 반영할 수 있을 것이란 기대

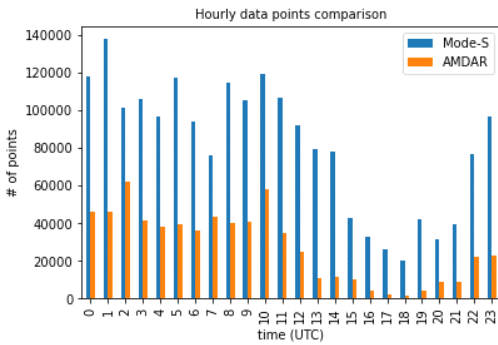


Fig. 1. Hourly counts of sampled Mode-S EHS and AMDAR from 7 May to 24 August 2021. Mode-S EHS, Mode-Selective Enhanced Surveillance; AMDAR, Aircraft Meteorological Data Relay.

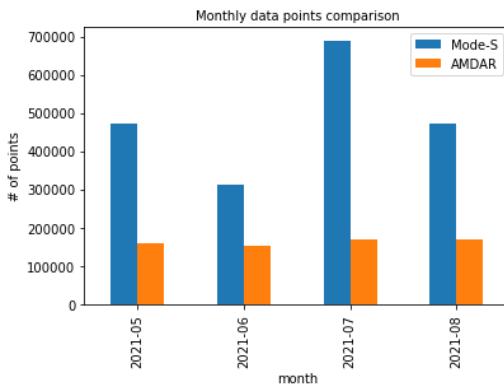


Fig. 2. Monthly counts of sampled Mode-S EHS and AMDAR (Same period with Fig. 1). Mode-S EHS, Mode-Selective Enhanced Surveillance; AMDAR, Aircraft Meteorological Data Relay.

Table 4. Number of observations of AMDAR and Mode-S EHS before and after QC.

	AMDAR		Mode-S EHS	
	Before QC	After QC	Before QC	After QC
Total		703,510	2,456,338	1,375,549
Per grid (triple collocation)		2.4		14.2

AMDAR, Aircraft Meteorological Data Relay; Mode-S EHS, Mode-Selective Enhanced Surveillance; QC, Quality Control.

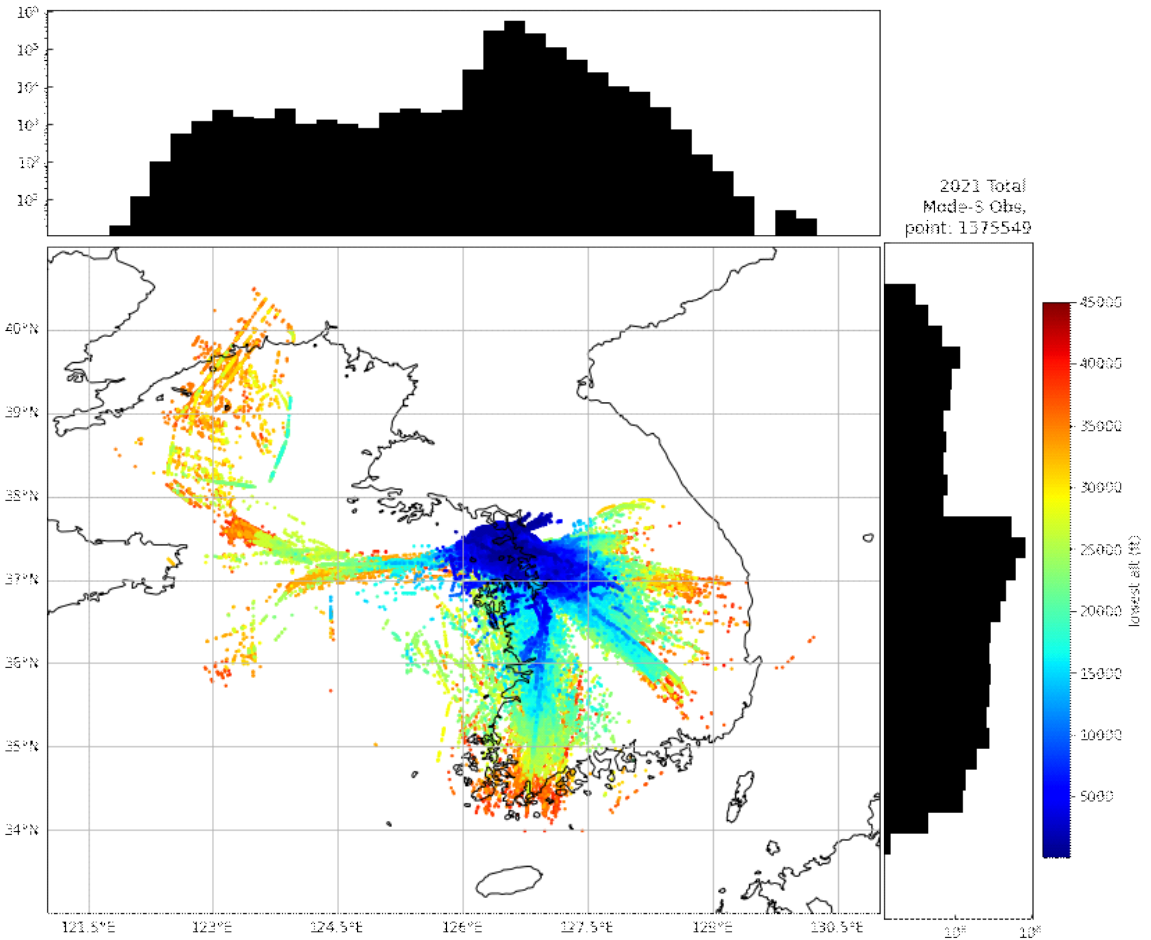


Fig. 3. Horizontal coverage of Mode-S EHS data in the domain of Korean peninsula during the sample period. Colorbar represents the lowest altitude of data. Mode-S EHS, Mode-Selective Enhanced Surveillance.

를 할 수 있다. Figure 5는 고도별 Mode-S EHS 자료의 분포와 AMDAR 자료의 분포를 (a) 인천공항 근처와 (b) 한반도 주변 전 영역에 대해 나타낸 그림이다. 앞서 언급했듯 인천 공항 근처 저고도에서의 연속적으로 자료 개수가 크게 증가함을 Fig. 5a에서 확인할 수 있으며, 공항 근처 전 범위에 걸쳐 자료 개수가 크게 증가한 사실이 드러난다. 반면 Fig. 5b에서는 전 고도에서 AMDAR 자료의 개수가 비교적 증가하고 저고도에서의 자료 개수 차이 또한 줄어들었는데, 이는 본 연구에 사용된 Mode-S EHS 자료가 인천공항 오직 한 곳에서만 수신되었기 때문에 갖는 공간 해상도의 한계로 해석된다.

3.2 삼중 비교

새로운 관측 자료의 검증은 기존 관측 자료, 수치예

보 모델 결과 자료, 그리고 재분석 자료와 같은 다양한 자료들과의 비교를 통해 이루어질 수 있다. Stoffelen (1998)에서는 새로운 고해상도의 관측 자료의 검증 방법으로 새로운 관측 자료와 기존 관측 자료를 수치예보 모델 결과 자료와 비교하는 방법을 제안하였다. 삼중 비교를 위해 상대적으로 고해상도의 관측 자료들의 경우 수치예보 모델 격자의 시간간 해상도에 맞게 평균값을 비교에 사용하였다. Mode-S 자료를 생산하고 평가한 de Haan (2011) 및 기타 선행연구들에서도 위 방법론을 따랐으며, 본 연구에서도 선행연구를 따라 인천국제공항 근처 Mode-S EHS 자료로부터 생산된 바람 자료에 대해 삼중 비교를 수행하고자 한다. Mode-S EHS 자료에 기반하여 계산된 바람 자료는 동일한 시간대의 AMDAR, ERA5 자료와 비교한다. 비교할 공간 좌표와 시간대는

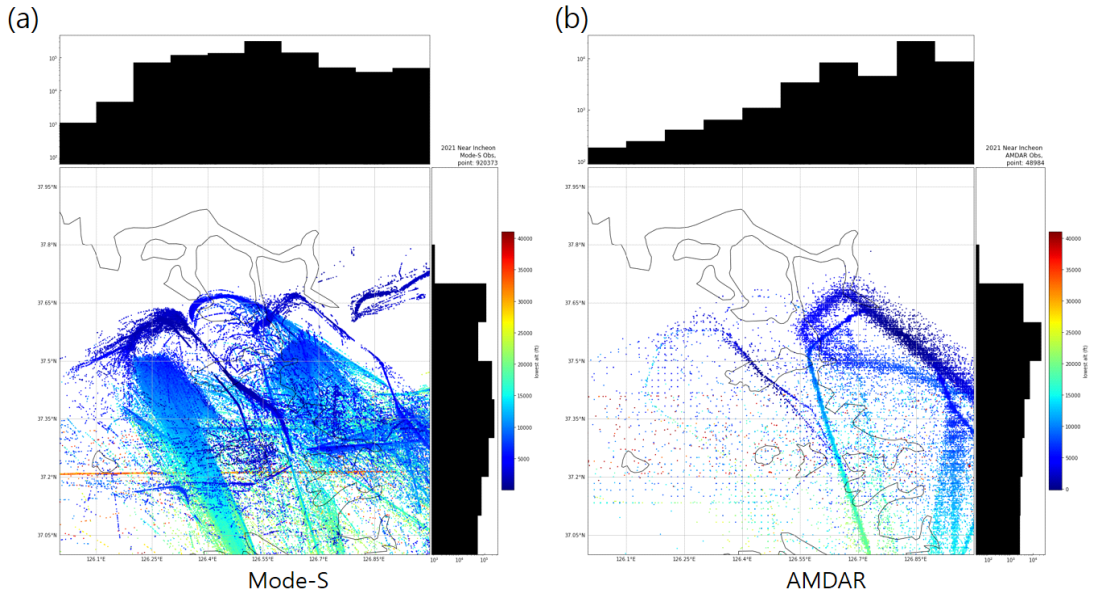


Fig. 4. Horizontal coverage of Mode-S EHS data (a) and AMDAR (b) near the Incheon Airport. Mode-S EHS, Mode-Selective Enhanced Surveillance; AMDAR, Aircraft Meteorological Data Relay.

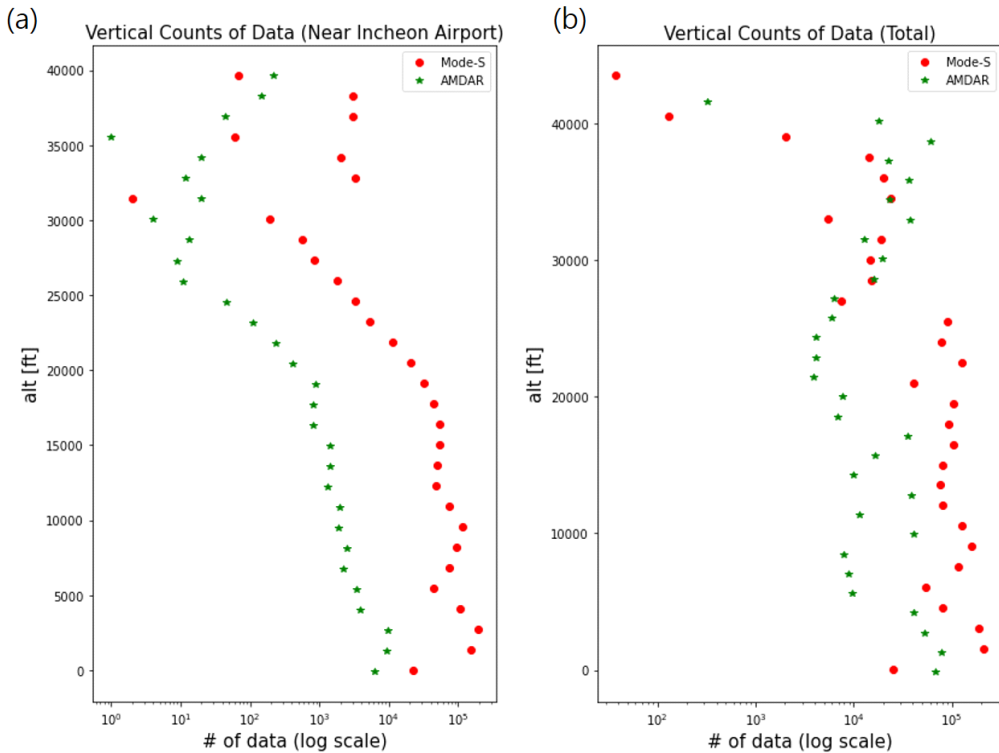


Fig. 5. Vertical counts of Mode-S EHS data and AMDAR near the Incheon Airport (a) and the whole comparison area (b). Mode-S EHS, Mode-Selective Enhanced Surveillance; AMDAR, Aircraft Meteorological Data Relay.

ERA5의 해상도에 맞추어 평균 되었으며($0.25^\circ \times 0.25^\circ$, 1시간 간격), 고도는 연직 기압 좌표로 통일되어 1,000~750 hPa, 250~225 hPa 구간은 25 hPa 간격, 750~250 hPa 구간은 50 hPa 간격마다 비교되었다.

Mode-S EHS 자료는 ft 단위의 고도로 연직 고도 값이 주어졌기 때문에 상호 비교를 위하여 기압 좌표로의 변환이 필요하였다. 미국 연방항공국(Federal Aviation Administration, FAA)에 의하여 항공 관측 정보는 국제 표준 대기(ISA)를 상징하고 항공기에서 측정된 기압으로부터 고도를 산출하기 때문에, 이를 통해 ISA 기준에 따라 정적인 변환과정을 수행하였다.

삼중 비교에서 제안될 수 있는 AMDAR - ERA5, Mode-S EHS - ERA5, Mode-S EHS - AMDAR의 모든 묶음으로 서로 동일한 시공간 격자에서의 풍속, 풍향, 동서바람, 남북바람 값을 비교하였다. 특정 시공간 격자의 근처에 AMDAR 자료와 Mode-S EHS 자료가 평균을 내기에 충분히 존재할 때, 그 격자에서의 값을 비교하였다.

Figure 6은 ERA5 격자에 맞추어서 삼중 비교된 자료의 수평 분포이다. 두 항공기 관측 자료에 비해 상대적으로 시공간 해상도가 낮은 재분석 자료 격자에 맞추어 비교된 탓에, 비교된 격자 점의 개수가 3,459개로 원 테

이터에 비해 상대적으로 적어졌다. 격자 점마다의 자료 개수는 AMDAR 자료가 평균 2.4개 사용된 데에 비해 Mode-S EHS 자료는 14.2개 사용되어, Mode-S EHS에서 훨씬 더 많은 자료를 사용한 것으로 드러난다(Table 4).

AMDAR, ERA5와 Mode-S EHS 동서바람, 남북바람 관측 자료가 삼중 비교되었으며, 평균 오차(Mean Bias Error, MBE), 평균 절대 오차(Mean Absolute Error, MAE)와 평균 제곱근 오차(Root Mean Squared Error, RMSE)가 Mode-S EHS에 대한 QC 전후로 계산되었다. QC를 적용하면 Mode-S EHS의 타 자료에 대한 RMSE가 선행 연구(de Haan, 2011; de Haan et al., 2013)와 같이 대부분의 고도에서 3 m s^{-1} 미만으로 줄어들며 편향도 개선되었다.

Figure 7에서는 삼중 비교에 사용된 AMDAR, ERA5, Mode-S EHS의 동서바람, 남북바람, 풍속 관측 자료의 일대일 비교를 2D Histogram으로 나타내고, MBE 및 MAE와 RMSE를 계산하였으며, 주로 MAE와 RMSE 위주로 설명하였다. AMDAR와 ERA5 비교에서는 동서바람 간의 MAE값은 1.551 m s^{-1} 이며, RMSE값은 2.124 m s^{-1} 이다. 남북바람간의 MAE값은 1.592 m s^{-1} , RMSE

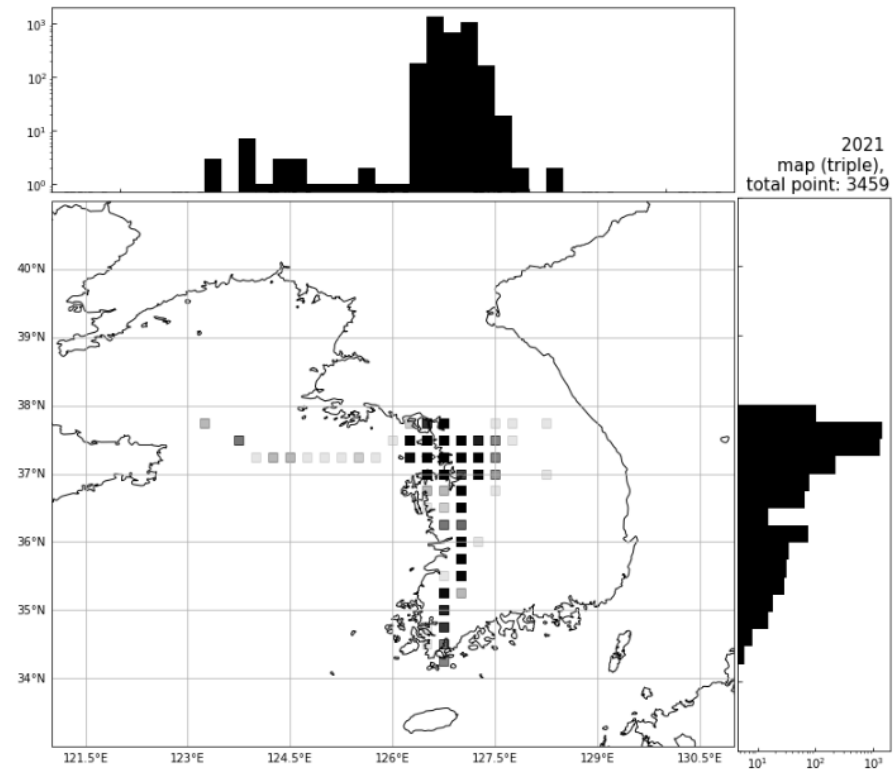


Fig. 6. Horizontal distribution of the grid points where the triple comparison was conducted.

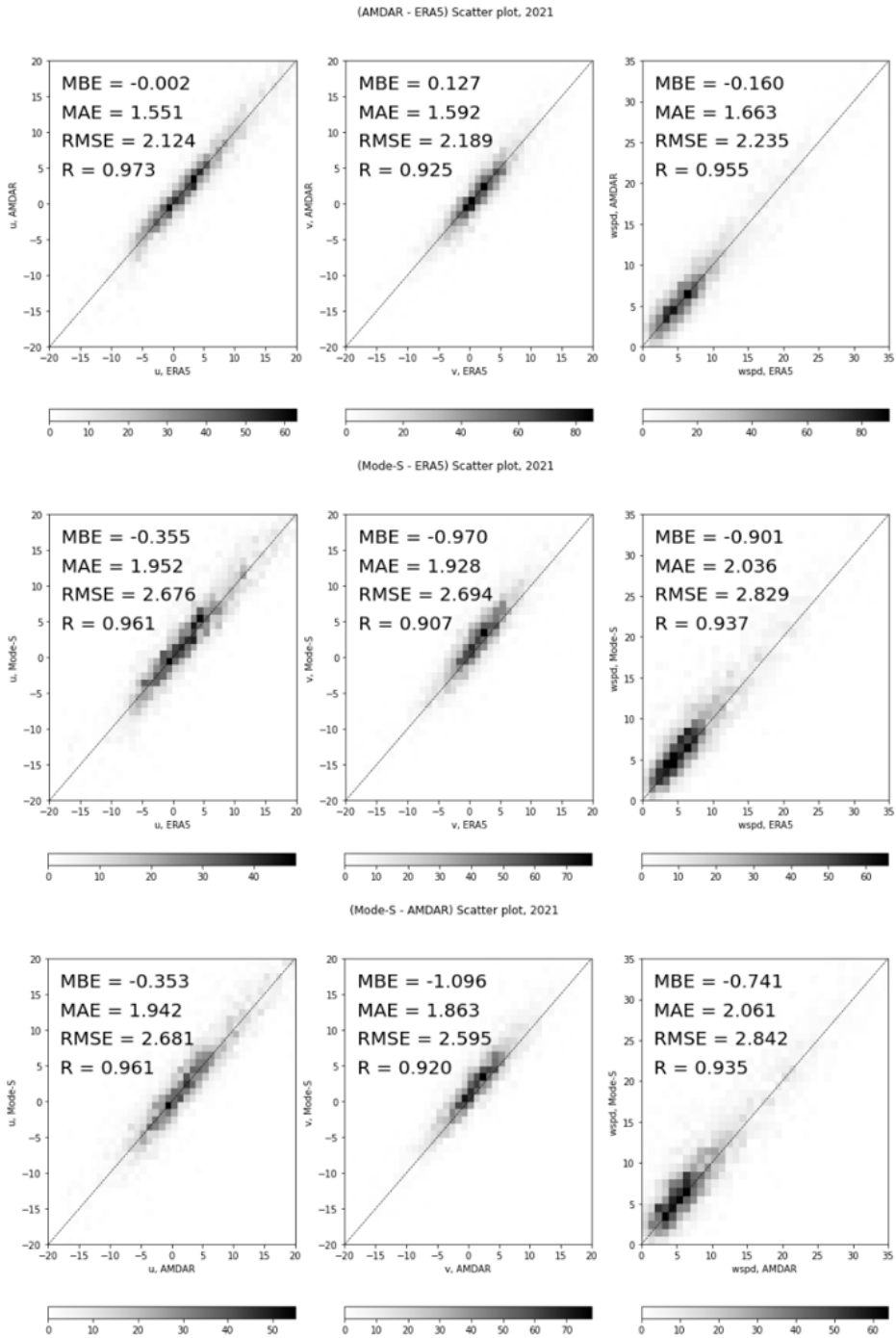


Fig. 7. 2D density plots of wind data from different sources. Compared variables are zonal wind, meridional wind, and wind speed each from left to right, compared pairs are (AMDAR - ERA5), (Mode-S EHS - ERA5), (Mode-S EHS - AMDAR) from top to bottom. AMDAR, Aircraft Meteorological Data Relay; ERA5, ECMWF ReAnalysis 5; Mode-S EHS, Mode-Selective Enhanced Surveillance.

값은 2.189 m s^{-1} 로 큰 차이가 없는 것으로 드러난다. 풍속은 MAE값 1.663 m s^{-1} , RMSE값 2.235 m s^{-1} 로 역시 큰 차이가 없는 결과이다. Mode-S EHS와 ERA5를 비교하였을 때, 동서바람 간의 MAE 값은 1.952 m s^{-1} , RMSE 값은 2.676 m s^{-1} 으로 AMDAR와 ERA5를 비교한 것에 비하여 MAE가 약 0.4 m s^{-1} , RMSE가 약 0.6 m s^{-1} 증가하였다. 남북바람의 경우 MAE값은 1.928 m s^{-1} , RMSE 값은 2.694 m s^{-1} 로 역시 MAE가 약 0.3 m s^{-1} , RMSE가 약 0.5 m s^{-1} 증가하였다. 풍속도 역시 Mode-S EHS와 ERA5를 비교하였을 때 AMDAR와 ERA5를 비교한 것에 비하여 MAE가 약 0.4 m s^{-1} , RMSE가 약 0.6 m s^{-1} 증가하였다. 한편, 항공기 관측인 Mode-S EHS와 AMDAR를 상호 비교하였을 때, 동서바람 간의 MAE값은 1.942 m s^{-1} , RMSE값은 2.681 m s^{-1} , 남북바람 간의 MAE값은 1.863

m s^{-1} , RMSE값은 2.595 m s^{-1} 로 Mode-S EHS와 ERA5를 상호 비교한 수치와 비슷하였다.

2D Histogram에서 각 편향의 분포를 보면 AMDAR와 ERA5의 동서바람, 남북바람 및 풍속 값은 합의를 이루지만, 남북바람에 대하여 Mode-S EHS가 더 큰 경향이 보인다. 하지만 RMSE값을 보았을 때 Mode-S EHS 기반 바람 자료의 RMSE 값이 ERA5 자료와 비교했을 때 전체적으로 AMDAR와 비슷한 수준의 품질을 갖게 되었다.

Figures 8, 9는 위에서부터 순서대로 200~500 hPa, 550~650 hPa, 700~850 hPa, 875~1,000 hPa로 나눈 고도 범위에 따라 나눠서 확인한 삼중 비교 결과 중 각각 AMDAR - ERA5와 Mode-S EHS - ERA5 자료 간의 일대일 비교이다. 각각의 경우에 대하여 MAE와 RMSE

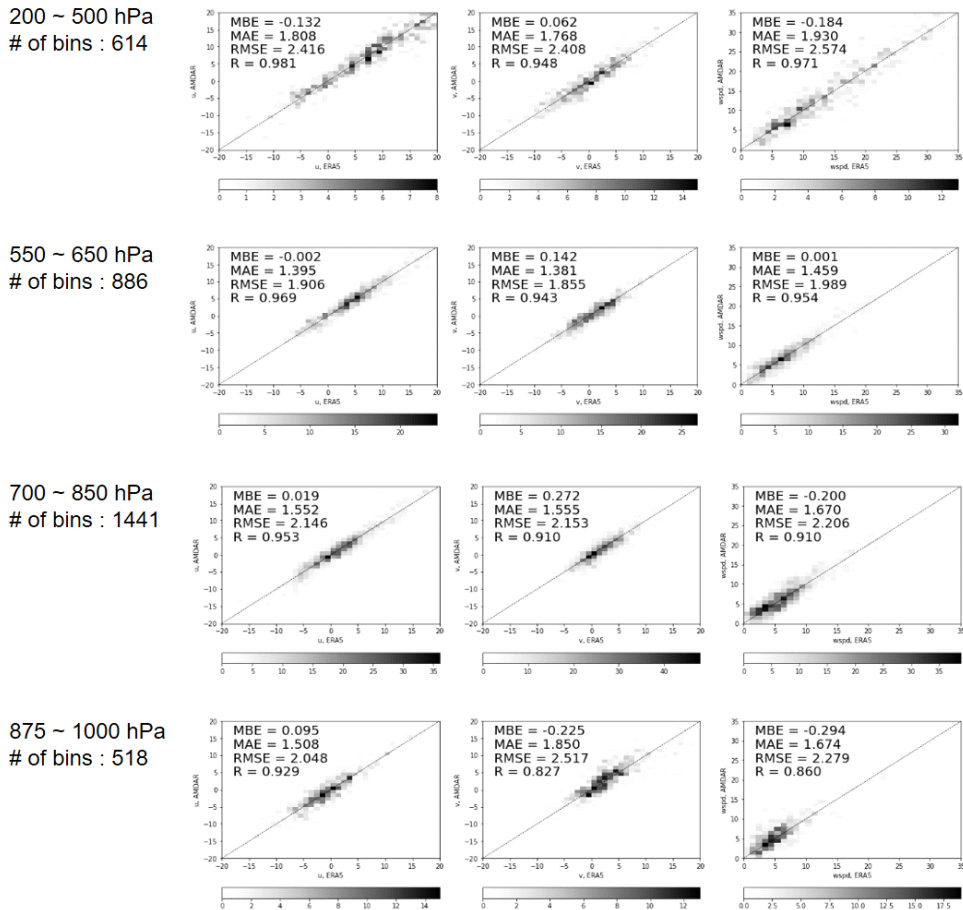


Fig. 8. 2D density plots of the zonal wind (left), meridional wind (center), wind speed (right) from ERA5 and AMDAR. Comparison was subdivided by its altitude from top to bottom. ERA5, ECMWF ReAnalysis 5; AMDAR, Aircraft Meteorological Data Relay.

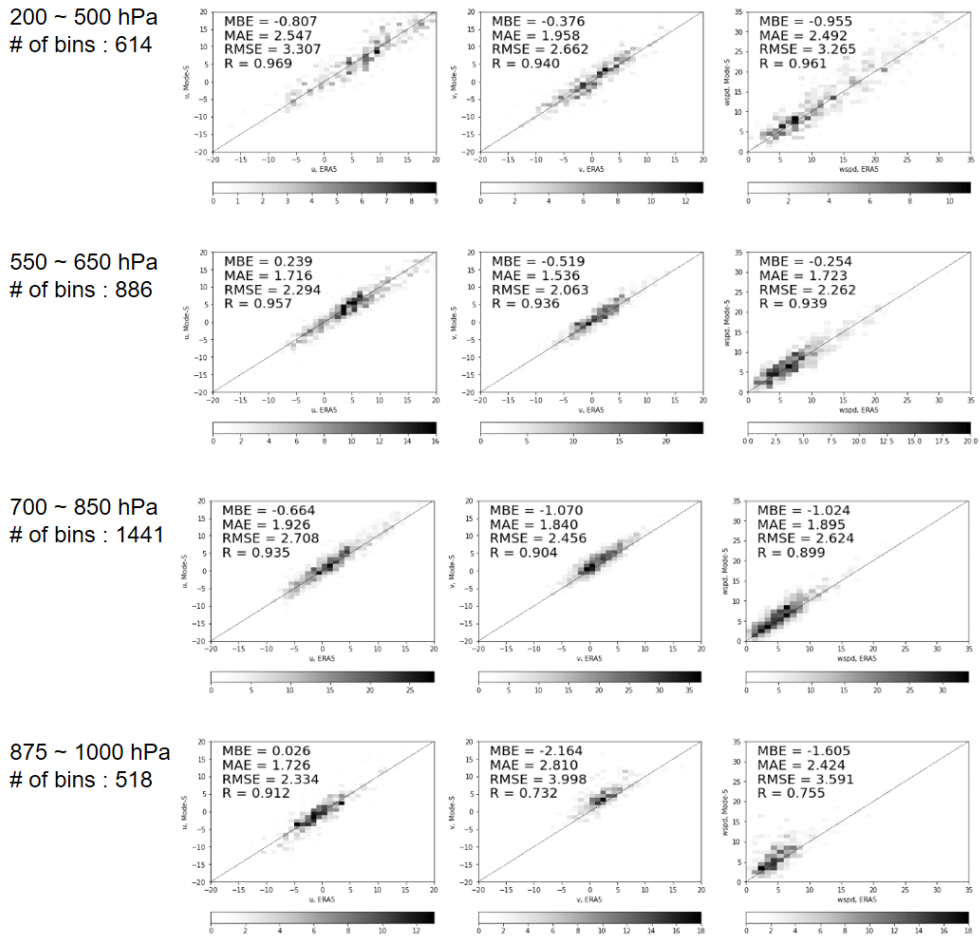


Fig. 9. Same figure with Fig.12 but it is comparison of Mode-S EHS and ERA5. Mode-S EHS, Mode-Selective Enhanced Surveillance; ERA5, ECMWF ReAnalysis 5.

및 R 값들을 계산하였고 이들을 Table 5에 정리하였다.

동서바람, 남북바람, 풍속 모두 전체적으로 양 비교에서 서로 일치하며 자료 간의 편향이 존재하지 않았다. 550~850 hPa 구간에서 특히, AMDAR와 ERA5를 비교한(AMDAR - ERA5) RMSE 값은 1.855~2.206 m s^{-1} (Fig. 8), Mode-S EHS와 ERA5를 비교한(Mode-S EHS - ERA5) RMSE 값은 2.063~2.708 m s^{-1} (Fig. 9)로 합의를 잘 이루었다. 하지만 가장 낮은 875~1,000 hPa 구간에서의 Mode-S EHS와 ERA5 간 비교의 RMSE 값이 남북바람에서 최대 3.998 m s^{-1} 로 상대적으로 큰 RMSE 값을 보이고 있으며, MBE를 통해 양의 편향을 확인하였다(Fig. 9의 가장 아래 가운데 그림). 이 편향의 추이는 고도별로 확인한 바람 편차의 남북-동서 성분 2차원 결합 밀도 함수 그림에서도 확인된다(Fig. 10). Figure

10에서는 고도별로 AMDAR - ERA5, Mode-S EHS - ERA5, Mode-S EHS - AMDAR 각 비교에서 계산된 바람 벡터의 차이에 대해 동서바람, 남북바람 성분으로 나눠 이차원 평면에 결합 밀도 함수를 그렸다. AMDAR와 ERA5는 편차의 분포가 동서바람 성분과 남북바람 성분 모두 0을 중심으로 하며, 상층(좌측 두 그림)에서는 세 비교 모두 비슷한 이차원 밀도 함수를 가지지만, 저고도에서(우측 두 그림) 확실히 Mode-S EHS와 타 자료들의 비교에서 Mode-S EHS의 남풍편향 분포가 확인된다.

전체적으로, 저층에서의 패턴을 제외하면 양 비교 모두에서 평균적으로 영의 평균 편차를 갖는 것을 확인할 수 있다. 반면, 900 hPa 근처에서 Mode-S EHS와 ERA5를 비교하였을 때 남북방향에서 뚜렷한 편향이 발견된다. 전체적인 관점에서 Mode-S EHS 기반 바람 자료의

Table 5. MAE, RMSE and R values of the comparisons for zonal wind, meridional wind and wind speed for triple collocation (Unit: $m s^{-1}$).

		AMDAR – ERA5			Mode-S EHS – ERA5			Mode-S EHS – AMDAR		
		U	V	wspd	U	V	wspd	U	V	wspd
200~500 hPa	MAE	1.808	1.768	1.930	2.547	1.958	2.492	2.292	1.625	2.223
	RMSE	2.416	2.408	2.574	3.307	2.662	3.265	3.155	2.231	3.080
	R	0.981	0.948	0.971	0.969	0.940	0.961	0.972	0.959	0.964
550~650 hPa	MAE	1.395	1.381	1.459	1.716	1.536	1.723	1.631	1.495	1.657
	RMSE	1.906	1.855	1.989	2.294	2.063	2.262	2.225	2.060	2.240
	R	0.969	0.943	0.954	0.957	0.936	0.939	0.959	0.940	0.943
700~850 hPa	MAE	1.552	1.555	1.670	1.926	1.840	1.895	1.977	1.850	2.070
	RMSE	2.146	2.153	2.206	2.708	2.456	2.624	2.750	2.394	2.791
	R	0.953	0.910	0.910	0.935	0.904	0.899	0.933	0.925	0.878
875~1,000 hPa	MAE	1.508	1.850	1.674	1.726	2.810	2.424	1.961	2.812	2.533
	RMSE	2.048	2.517	2.279	2.334	3.998	3.591	2.586	3.984	3.529
	R	0.929	0.827	0.860	0.912	0.732	0.755	0.894	0.713	0.747
Total	MAE	1.551	1.592	1.663	1.952	1.928	2.036	1.942	1.863	2.061
	RMSE	2.124	2.189	2.235	2.676	2.694	2.829	2.681	2.595	2.842
	R	0.973	0.925	0.955	0.961	0.907	0.937	0.961	0.920	0.935

MAE, Mean Absolute Error; RMSE, Root Mean Square Errors; AMDAR, Aircraft Meteorological Data Relay; ERA5, ECMWF ReAnalysis 5; Mode-S EHS, Mode-Selective Enhanced Surveillance.

값을 신뢰할 수 있고, 비교 대상 샘플의 수가 적은 상층에서의 편향과 비교하여, 비교 격자도 100개가 넘는 충분한 개수를 고려할 때 이착륙 시 생길 수 있는 편향의 가능성도 염두에 두어야 한다. 한편으로는 해당 고도가 행성경계층(planetary boundary layer)의 상층 경계 부분이며 고도에 따른 바람 벡터 변화가 상대적으로 큰 지역이기 때문에 AMDAR 자료의 개수가 Mode-S 자료의 개수보다 적은 상황에서 관측 개수에 따른 오차의 가능성도 염두해야 한다. 또한, 2.1.2.4에서 언급한 TTA의 샘플 범위 오류에 따른 편향의 가능성 역시 제기될 수 있다.

한반도 집중호우는 북태평양 고기압 가장자리를 따라 남서쪽에서 하층제트로 인한 수증기가 공급되는 가운데, 한반도 북서쪽에 한랭건조한 공기가 유입되어 대류불안정이 강화되며, 상층제트의 발산으로 인한 이차순환이 강화되는 환경에서 발생하는 것으로 이해되고 있다(Park et al., 1986; Lee et al., 1998). 이러한 중관적 상황 속에서 남북 방향으로의 바람 성분의 관측은 한반

도에 유입되는 수증기량에 영향을 미치고, 나아가 내륙에서의 연직 구름 생성 및 발달 과정에 중요한 영향을 미치게 되므로 국지적인 모델의 초기장으로 고려되었을 때 그 오차가 강수량 예측에도 큰 영향을 미치게 된다.

3.3 AMDAR 단일 비교

0.25° × 0.25°의 격자 및 1시간 간격인 ERA5 자료와 비교하여 AMDAR는 시공간적으로 고해상도의 관측자료이기 때문에 (1', 1분 단위) Mode-S EHS 관측 자료와 더 직접적인 비교가 가능하다. 2분의 시간 격자와 0.1° × 0.1°의 위경도 격자 내에 존재하는 AMDAR 자료와 Mode-S EHS 기반 바람 자료의 평균 값에 대한 상호 비교를 진행하였다.

Figure 11은 0.1° × 0.1° 격자에서 비교된 자료들의 수평 분포이다. 격자의 해상도는 높아졌지만, 비교가 허용되는 시간 오차가 1시간에서 2분으로 줄어들었으며, 공간적인 기준도 까다로워졌기 때문에 비교된 격자 점

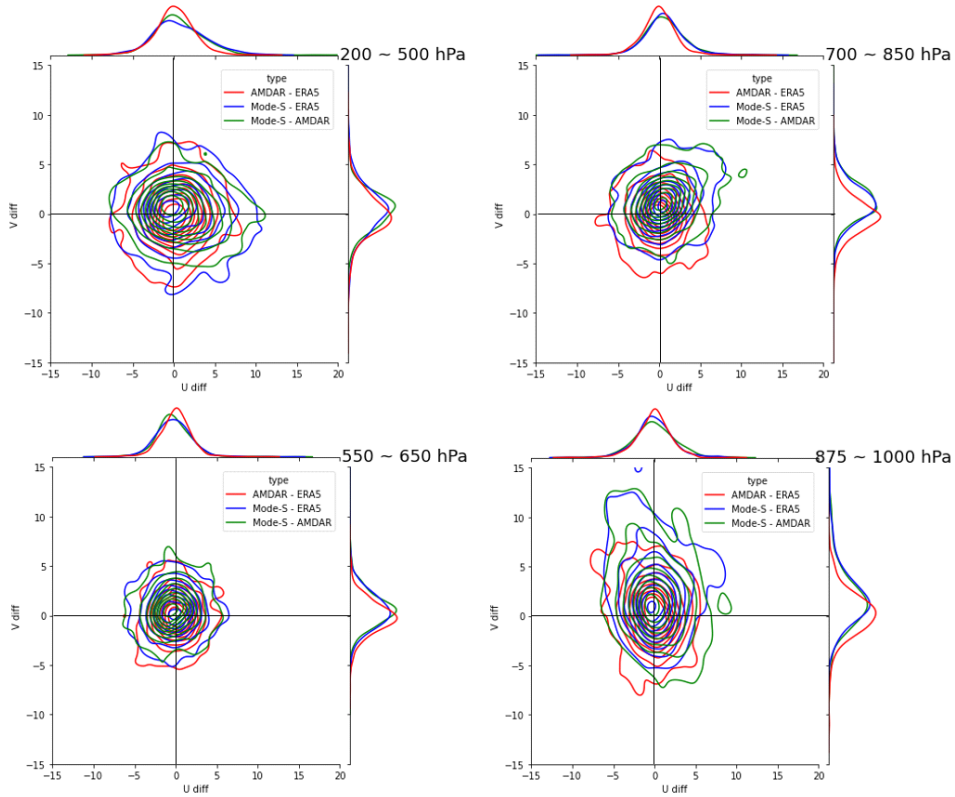


Fig. 10. 2D joint plots of the relationship between zonal and meridional wind speed difference subgrouped by altitude, for three groups of comparisons (AMDAR – ERA5, Mode-S EHS – ERA5, Mode-S EHS – AMDAR). The distributions show good agreement at a higher altitudes (left), but dislocation is shown for lower altitudes (right), especially the lowest altitudes. AMDAR, Aircraft Meteorological Data Relay; ERA5, ECMWF ReAnalysis 5; Mode-S EHS, Mode-Selective Enhanced Surveillance.

의 개수는 1,695개로 오히려 삼중 비교에 비해 적어졌음에 주의한다.

Figure 12는 Mode-S와 AMDAR 자료 간의 동서바람, 남북바람의 일대일 비교를 2D Histogram으로 나타내고 평균 절대 오차(MAE)와 평균 제곱근 오차(RMSE)를 계산하였다. Figure 7에서 나타난 삼중 비교에서의 Mode-S와 AMDAR 자료 간의 RMSE 값을 비교하면, 비교 격자 범위가 좁아짐에 따라 두 자료 간의 RMSE가 동서바람에 대해 2.681 m s^{-1} 에서 2.195 m s^{-1} 로 감소하였으며, 남북바람에 대해서도 2.595 m s^{-1} 에서 1.685 m s^{-1} 로 크게 감소하였다. 2D 히스토그램에서의 편향을 보았을 때, 동서바람의 경우 AMDAR에서 더 서풍으로 편향된 추세가 존재하고, 남북바람에서는 Mode-S 자료에서 더 남풍으로 편향된 추세가 존재하지만 그 차이는 앞선 삼중 비교에 비해 미미하며, 향후 가용 가능한 독립된 자료들을 통한 비교 연구가 필요한 부분이다.

4. 결 론

본 연구를 통해 Mode-S EHS 기반 바람 자료의 품질은 AMDAR 항공기 관측 자료, ERA5 재분석 자료와 삼중 비교되었다. 인천 국제 공항의 수신기를 통해 수집된 Mode-S EHS 신호를 통해 약 4개월 동안 하루 평균 14,200개의 바람 자료를 생산할 수 있었으며, 이는 동일한 영역과 기간 동안 수집된 AMDAR 자료에 비해 약 2.2배 많은 수치이다. Mode-S EHS 신호 중 항적 정보를 포함하는 BDS5.0과 BDS6.0 신호에서 TAS, TTA, GS, MHED의 정보를 통하여 바람 벡터를 계산할 수 있었다. WMO에서 제안하는 항공기 관측에 대한 QC 과정과 항적 정보에 대한 몇가지 QC를 거친 후에 자료의 품질이 WMO 기준 및 선행 연구 기준을 만족하는 수준으로 향상되었다.

Mode-S EHS 신호를 통해 계산된 바람 관측은

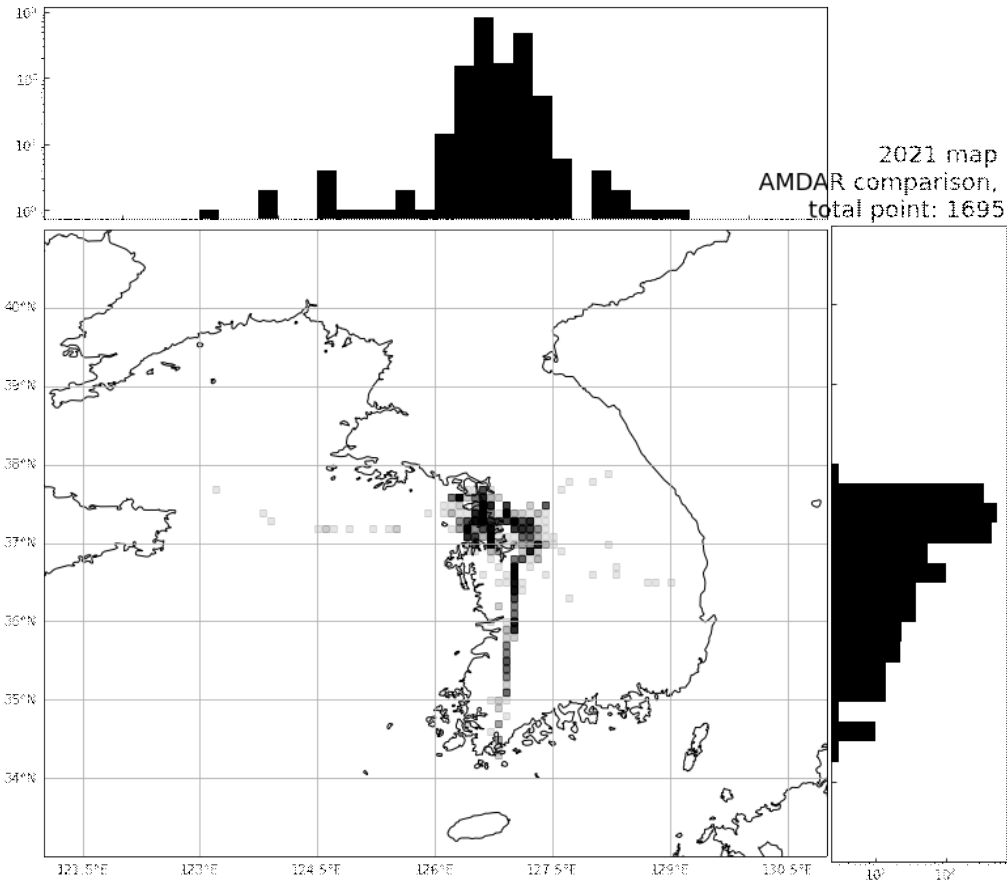


Fig. 11. Horizontal distribution of the grid points where the comparison of AMDAR and Mode-S EHS was conducted, the spatio-temporal resolution is higher than the triple comparison. AMDAR, Aircraft Meteorological Data Relay; Mode-S EHS, Mode-Selective Enhanced Surveillance.

AMDAR와 대비하여 ERA5 재분석 자료와 비교하였을 때 유사한 품질을 보였다. 전 고도에 걸친 풍속의 RMSE는 AMDAR와 ERA5를 비교하였을 때 약 2.2 m s^{-1} 였으며, Mode-S EHS와 ERA5를 비교하였을 때 약 2.7 m s^{-1} 이었다. 약 0.5 m s^{-1} 의 RMSE 증가가 있었지만, ERA5가 AMDAR 관측을 포함하는 자료임을 고려하였을 때 그 차이는 납득 가능하다. 게다가, AMDAR와 Mode-S EHS를 직접 비교하였을 때 동서바람과 남북바람에 모두 대해 크게 RMSE가 감소하였으며, 그 값은 각각 2.195 m s^{-1} 와 1.685 m s^{-1} 로, AMDAR와 ERA5를 비교하였을 때 계산된 RMSE보다 낮아졌다.

Mode-S EHS 기반 바람 자료가 본 연구에서 비교된 기존 항공기 관측(AMDAR) 및 재분석 자료와 갖는 가장 큰 차이점은 대류권 하부 경계층 고도에서의 뚜렷한 양의 편향이었다. 875 hPa와 1,000 hPa 사이의 고도에서

Mode-S EHS와 ERA5를 비교하였을 때 약 2.164 m s^{-1} 의 큰 편향이 관찰되었다. 이는 Mode-S EHS의 관측이 다른 관측들과 비교하여 행성경계층 근처 고도에서 더 남풍계열의 바람을 더 많이 관측했다는 것이며, 이는 향후 라이더 관측 등 가용 가능한 독립된 관측자료들과 비교를 통한 정확한 검증이 필요한 부분이다.

본 연구의 한계로서 ERA5 재분석 자료가 생산될 때 AMDAR 자료가 동화되기 때문에, 삼중 비교에 사용한 ERA5 재분석 자료와 AMDAR 관측 자료와의 종속성이 존재한다는 점이 존재한다. AMDAR 자료와 ERA5 상호 간 비교의 의미가 퇴색될 수 있으며, ERA5 재분석자료와의 비교를 통해 Mode-S EHS 자료의 잠재적 오류를 분석할 때 AMDAR 관측 자료의 잠재적 오류가 반영될 수 있다. 하지만 본 연구에 사용한 Mode-S EHS 자료 수집 기간 및 영역에 해당하는 고해상도의 바람 자료가 부

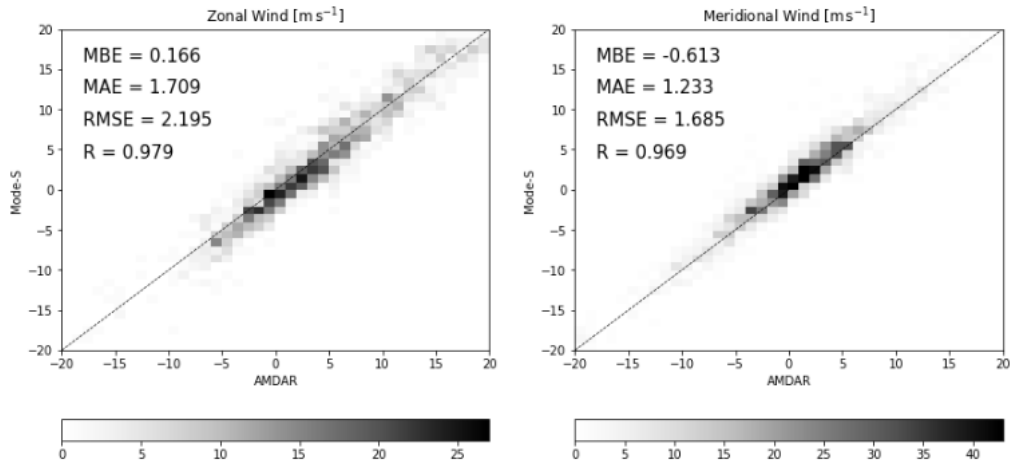


Fig. 12. 2D density plots of zonal and meridional wind from AMDAR and Mode-S EHS. AMDAR, Aircraft Meteorological Data Relay; Mode-S EHS, Mode-Selective Enhanced Surveillance.

족했으며, 따라서 ERA5 재분석 자료를 비교에 사용하였다.

현재, 본 연구진들은 전국(김포, 제주, 청주, 무안, 여수, 보성, 울산, 양양 8개 지점)으로 확대되어 설치된 ADS-B 수신기들로부터 더 긴 기간 동안(2020년 5월 8일~2022년 6월 23일) 수집된 Mode-S EHS의 원시 자료를 추가적으로 확보하였다. 이 자료에 대해 본 연구에서 제안된 QC 과정 및 방법론으로 분석한 결과, 2.1.2.4 섹션에서 언급된 TTA의 범위 문제를 해결하였으며, 저고도에서 본 연구에서 지적된 남북편향이 크게 나타나지 않음을 확인하였다. 한편, 최근 인천 공항 근처 항공기 상관측 테스트베드가 설치되고 라이더(Light Detection and Ranging, LIDAR), 윈드 프로파일러(wind profiler) 등 고해상도의 바람 관측 자료가 수집되는 만큼 향후 Mode-S EHS 자료의 객관적 검증에 사용할 수 있으리라 기대된다. 따라서, 더 많은 관측 지점에서 수집된 더 긴 기간과 더 넓은 영역의 Mode-S EHS 자료를 고해상도 관측 자료와 비교함으로써 현재 Mode-S EHS 기반 바람 자료의 객관적인 검증이 가능할 것이다.

Mode-S EHS 자료를 통해 얻은 공항 근처 지상 및 경계층에서의 대용량 고품질의 바람 자료는 시공간적으로 고해상도의 영역을 포함하고 있기 때문에 난류 정보 산출이 가능하다(Kim et al., 2020; 2021; 2022). 이를 통해 공항 근처 급변풍 및 저고도 시어 관측과 항공기상실황 정보 제공 분야에서의 활용이 기대된다. 나아가, 이 새로운 바람 관측 자료를 통해 공항 주변 고해상도 수치모델의 초기장 구축 및 자료동화 과정에 필요한 양질의 정보가 제공될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

이 연구는 기상청 「차세대 항공교통 지원 항공기상 기술개발(NARAE-Weather)」(KMI2022-00310)의 지원과 기상지진 See-At기술개발연구사업(KMI2020-01910)의 지원으로 수행되었습니다. ADS-B 자료 수신 및 저장과 관련해서 항공기상청 정보기술과의 정강아 팀장님과 차세대항공기상팀 안광득 과장님, 김진원 팀장님 및 ADS-B 자료 수집과 관련된 항공기상청 관계자분들께 감사드립니다.

REFERENCES

- Ballish, B. A., and V. K. Kumar, 2008: Systematic differences in aircraft and radiosonde temperatures: implications for NWP and climate studies. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, **89**, 1689-1708.
- Cardinali, C., L. Isaksen, and E. Andersson, 2003: Use and impact of automated aircraft data in a global 4DVAR data assimilation system. *Mon. Wea. Rev.*, **131**, 1865-1877.
- Dee, D. P., and Coauthors, 2011: The ERA-interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **137**, 553-597, doi:10.1002/qj.828.
- de Haan, S., and Stoffelen, A. High resolution temperature and wind observations from commercial aircraft. In: *Proceedings of the 8th International Symposium on Tropospheric Profiling*; 19-23 October 2009; Delft,

- Netherlands.
- _____, 2011: High-resolution wind and temperature observations from aircraft tracked by mode-S air traffic control radar. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **116**, D10111, doi:10.1029/2010JD015264.
- _____, M. de Haij, and J. Sondij, 2013: *The Use of a Commercial ADS-B Receiver to Derive Upper Air Wind and Temperature Observations from Mode-S EHS Information in The Netherlands*. Royal Netherlands Meteorological Institute (KNMI).
- de Leege, A. M. P., M. M. van Paassen, and M. Mulder, 2013: Using automatic dependent surveillance-broadcast for meteorological monitoring. *J. Aircr.*, **50**, 249-261, doi:10.2514/1.C031901.
- Drüe, C., and G. Heinemann, 2001: Airborne investigation of arctic boundary-layer fronts over the marginal ice zone of the Davis Strait. *Bound. Layer Meteorol.*, **101**, 261-292.
- _____, W. Frey, A. Hoff, and T. Hauf, 2008: Aircraft type-specific errors in AMDAR weather reports from commercial aircraft. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **134**, 229-239.
- _____, T. Hauf, and A. Hoff, 2010: Comparison of boundary-layer profiles and layer detection by AMDAR and WTR/RASS at Frankfurt airport. *Bound. Layer Meteorol.*, **135**, 407-432, doi:10.1007/s10546-010-9485-0.
- Hersbach, H., and Coauthors, 2020: The ERA5 global reanalysis. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **146**, 1999-2049, doi:10.1002/qj.3803.
- Huntley, M. S. Jr., J. W. Turner, C. S. Donovan, and E. Madigan, 1995: *FAA Aircraft Certification Human Factors and Operations Checklist for Standalone GPS Receivers (TSO C129 Class A)*. Federal Aviation Administration, 230 pp.
- Kemp, D. E., 1968: Federal aviation administration air safety program. *J. Air Law Commer.*, **34**, 363.
- Kim, J.-H., and H.-Y. Chun, 2011: Statistics and possible sources of aviation turbulence over South Korea. *J. Appl. Meteorol. Climatol.*, **50**, 311-324, doi:10.1175/2010JAMC2492.1.
- _____, and _____, 2012: A numerical simulation of convectively induced turbulence above deep convection. *J. Appl. Meteorol. Climatol.*, **51**, 1180-1200, doi:10.1175/JAMC-D-11-0140.1.x
- _____, J.-R. Park, S.-H. Kim, J. Kim, E. Lee, S.-W. Baek, and G. Lee, 2021: A detection of convectively induced turbulence using in situ aircraft and radar spectral width data. *Remote Sens.*, **13**, 726, doi:10.3390/rs13040726.
- Kim, S.-H., and H.-Y. Chun, 2016: Aviation turbulence encounters detected from aircraft observations: spatio-temporal characteristics and application to Korean aviation turbulence guidance. *Meteorol. Appl.*, **23**, 594-604, doi:10.1002/met.1581.
- _____, H.-Y. Chun, J.-H. Kim, R. D. Sharman, and M. Strahan, 2020: Retrieval of eddy dissipation rate from derived equivalent vertical gust included in aircraft meteorological data relay (AMDAR). *Atmos. Meas. Tech.*, **13**, 1373-1385, doi:10.5194/amt-13-1373-2020.
- _____, J. Kim, J.-H. Kim, and H.-Y. Chun, 2022: Characteristics of the derived energy dissipation rate using the 1 Hz commercial aircraft quick access recorder (QAR) data. *Atmos. Meas. Tech.*, **15**, 2277-2298, doi:10.5194/amt-15-2277-2022.
- Lee, D. K., H. R. Kim, and S. Y. Hong, 1998: Heavy rainfall over Korea during 1980~1990. *Korean J. Atmos. Sci.*, **1**, 32-50 (in Korean with English abstract).
- Moninger, W. R., R. D. Mamrosh, and P. M. Pauley, 2003: Automated meteorological reports from commercial aircraft. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, **84**, 203-216.
- Park, S. U., C. H. Joung, S. S. Kim, D. K. Lee, S. C. Yoon, Y. K. Jeong, and S. G. Hong, 1986: Synoptic-scale features of the heavy rainfall occurred over Korea during 1~3 September 1984. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **22**, 42-81.
- Petersen, R. A., 2016: On the impact and benefits of AMDAR observations in operational forecasting—part I: a review of the impact of automated aircraft wind and temperature reports. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, **97**, 585-602, doi:10.1175/BAMS-D-14-00055.1.
- Sharman, R., C. Tebaldi, G. Wiener, and J. Wolff, 2006: An integrated approach to mid- and upper-level turbulence forecasting. *Wea. Forecasting*, **21**, 268-287.
- _____, L. B. Cornman, G. Meymaris, J. Pearson, and T. Farrar, 2014: Description and derived climatologies of automated *in situ* eddy-dissipation-rate reports of atmospheric turbulence. *J. Appl. Meteorol. Climatol.*, **53**, 1416-1432, doi:10.1175/JAMC-D-13-0329.1.
- Stickland, J. J., 1998: *An Assessment of Two Algorithms for Automatic Measurement and Reporting of Turbulence from Commercial Public Transport Aircraft*. Bureau of Meteorology, 42 pp.
- Stoffelen, A., 1998: Toward the true near-surface wind speed: error modeling and calibration using triple collocation. *J. Geophys. Res. Oceans*, **103**, 7755-7766.
- Stone, E. K., and M. Kitchen, 2015: Introducing an approach for extracting temperature from aircraft GNSS

- and pressure altitude reports in ADS-B messages. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, **32**, 736-743, doi:10.1175/JTECH-D-14-00192.1
- Trier, S. B., R. D. Sharman, and T. P. Lane, 2012: Influences of moist convection on a cold-season outbreak of clear-air turbulence (CAT). *Mon. Wea. Rev.*, **140**, 2477-2496, doi:10.1175/MWR-D-11-00353.1.
- _____, and R. D. Sharman, 2018: Trapped gravity waves and their association with turbulence in a large thunderstorm anvil during PECAN. *Mon. Wea. Rev.*, **146**, 3031-3052, doi:10.1175/MWR-D-18-0152.1.
- World Meteorological Organization [WMO], 2003: *Aircraft Meteorological Data Relay (AMDAR) Reference Manual*. WMO, 80 pp.
- _____, 2017: *Guide to aircraft-based observations*. WMO, 132 pp. [Available online at https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=4120] (Accessed 7 Jun 2022).
- WMO AMDAR Panel, 2007: The international AMDAR program. *World Meteorol. Organ. Inf. Fly.*, 12, 141 pp.