

동아시아 상세실황분석장(KAS) 기반 위성 구름모의영상 및 구름물리변수 특성 분석: 여름철 사례를 중심으로

김보람* · 이병일 · 조창범 · 강기룡
기상청 국가기상위성센터

(접수일: 2026년 1월 22일, 수정일: 2026년 3월 5일, 게재확정일: 2026년 3월 22일)

Simulated Satellite Imagery and Cloud Microphysical from the Korea Analysis System (KAS) over East Asia: A Summer Case Study

Boram Kim*, Byung-il Lee, Changbeom Cho, and KiRyong Kang

National Meteorological Satellite Center, Korea Meteorological Administration, JinCheon, Korea

(Manuscript received 22 January 2026; revised 5 March 2026; accepted 22 March 2026)

Abstract East Asia's summer weather variability driven by the monsoon circulation, the western North Pacific subtropical high, tropical cyclones, and quasi-stationary fronts requires kilometer-scale three-dimensional analyses for high-impact weather monitoring. This research assesses cloud microphysical fields from the Korea Analysis System (KAS) and their consistency with RTTOV-simulated GK2A/AMI infrared imagery using two precipitation events: 30 July 2025, 0300 UTC (typhoon-related widespread cloud system) and 28 August 2025, 0000 UTC (synoptic trough-associated rainband). KAS analysis fields are used in RTTOV to simulate brightness temperatures for the GK2A/AMI 10.5 μm infrared window channel, and are compared with GK2A observations. Cloud fraction (CF), cloud liquid water content (CLWC), and cloud ice water content (CIWC) are evaluated against LEO microwave 1D-var hydrometeor profile retrievals (NOAA-20/ATMS and Metop-B/AMSU) and the ERA5 (the fifth-generation ECMWF reanalysis) after temporal collocation and nearest-neighbor mapping onto the 28 KAS pressure levels. The simulated imagery reproduces the large-scale morphology of precipitating clouds but shows a faint brightness temperature contrast between cloudy and clear regions. KAS tends to show cloud structures to be relatively concentrated around 300 hPa in both cases, and CF is generally larger than in the reference datasets. CLWC exhibits concentrated biases and RMSE in the lower troposphere, whereas the structural agreement improves somewhat in the mid-troposphere. For CIWC, case-dependent differences are evident: in one case the spatial distribution of ice differs from that of the reference datasets, while in the other case the spatial patterns are similar but noticeable differences in ice amount remain.

Key words: Kore Analysis System, GK2A/AMI, RTTOV, Cloud microphysics, LEO-microwave

*Corresponding Author: Boram Kim, National Meteorological Satellite Center, Korea Meteorological Administration, 64-18 Guam-gil, Gwanghyewon-myeon, Jincheon-gun 27803, Korea.
Phone: +82-70-7850-5923, Fax: +82-43-717-0250
E-mail: boram3316@korea.kr

1. 서 론

동아시아는 여름철 몬순·아열대고기압·태풍·장마전선 등이 시기별로 번갈아 영향을 주면서, 한 시기 안에서도 강한 비와 가뭄이 교차하는 복잡한 기상·기후 변동을 보이는 지역이다(Do et al., 2023; Moon et al., 2023; Katzenberger et al., 2024; Wie et al., 2024). 한 해 동안 장마전선 정체에 따른 장기간 강수, 짧은 시간에 집중되는 호우와 돌풍, 태풍에 동반된 광역 강수, 반대로 돌발가뭄과 같은 현상이 잇따라 나타나고 있다(Park et al., 2021; Kim et al., 2024; Lee et al., 2024). 이에 따라 구름의 3차원 구조와 수증기 분포가 크게 변화하고, 이러한 배경에서 동아시아 전역을 대상으로 한 고해상도 입체 분석장은 재해성 강수·바람 뿐 아니라 가뭄 감시와 에너지·수자원 분야까지 포함한 다양한 응용에서 점점 더 중요해지고 있다(Kim and Lee, 2022; Yin et al., 2023; Jahanshahi et al., 2024).

한반도는 동아시아 지역 안에서도 다양한 형태의 지형적 조건이 더해져 보다 미세한 규모의 기상현상이 두드러지는 영역이다(Ha et al., 2007). 동일한 강수계 안에서도 지형과 해발고도에 따라 강수 강도와 구름 높이가 크게 달라지거나(Park et al., 2004) 해안·내륙·분지에 따라 안개와 돌풍이 국지적으로 발생하여 예보 현장에서는 수 km 수준의 상세한 분석 정보가 요구된다(Lee et al., 2010; Shim and Lee, 2017; Kim et al., 2023). 이때 기상현상을 일으키는 구름의 운량과 수적·빙정과 같은 수상체의 연직 분포는 단순한 강수 유무를 넘어 위험기상 감시, 위성·레이더 영상 해석, 복사량 산출 등에 직접적인 영향을 미친다(Yoshida and Asano, 2005; Choi et al., 2010). 그럼에도 재분석을 포함한 고해상도 분석장에서 산출되는 구름물리변수가 관측 기반 자료와 어느 정도 정합성을 가지는지에 대한 평가는 여전히 어렵고 제한적이며, 기존 연구에서도 지역·고도에 따라 상당한 불일치가 보고되고 있다(Li et al., 2018; Yao et al., 2020; Xue et al., 2025).

상세실황분석장(Korea Analysis System, KAS)은 이러한 요구를 반영해 구축된 고해상도 3차원 기상 분석체계이다. 2022년부터 체계 개발을 시작하여 2024년 5월부터 현업운영을 시작하였다(KMA, 2022). 기상청 한국형 지역예보모델(KIM-Regional)을 기반으로, 수치예보모델 결과에 다양한 관측종을 융합하여 동아시아 영역의 3차원 상세 분석장을 매시간 제공한다. 예보 현장에서는 KAS를 통해 중규모 강수계의 발달과 이동, 상·하층의 유동 구조, 온·습도 분포 등을 파악하여 위험기상 발생 이전에 핵심 지표를 선제적으로 활용한다. 그러나 내부에서 사용되는 구름 관련 물리변수의 품질과 특성은 주로 강수 검증이나 위성 구

름모의영상과의 비교와 같은 간접적인 지표를 통해서만 확인되어 왔다. 구름 및 수상체 분포는 모수화 설정에 민감하고 수치모델마다 표현 방식이 다르기 때문에, 단일 분석장만으로 신뢰도를 판단하기보다는 위성·재분석 및 다른 수치모델과의 비교를 통해 구조적인 편차를 진단할 필요가 있다.

Radiative Transfer for TOVS (RTTOV) 기반 위성 구름모의영상은 이러한 진단을 돕기 위한 수단으로, 분석장에 포함된 운량(cloud fraction, CF), 수적량(cloud liquid water content, CLWC)·빙정량(cloud ice water content, CIWC) 정보를 복사량 형태로 변환해 실제 정지궤도 위성영상과 직접 비교할 수 있도록 해준다(Saunders et al., 1999). KAS 자료를 입력자료로 한 구름모의영상을 활용하면 구름대의 위치와 범위, 상층 두께, 맑은 영역을 직관적으로 확인할 수 있지만 모의영상 자체만으로는 고도별 수상체 분포나 편차의 원인을 정량적으로 파악하기 어렵다. 구름모의영상의 해석과 개선을 위해서는 CF·CLWC·CIWC와 같은 구름물리변수의 연직구조를 저궤도 위성 산출물과 재분석·수치예보모델과 함께 비교하는 진단이 병행되어야 한다.

본 연구에서는 수적·빙정에 민감한 KAS 기반 구름모의영상을 활용하여, 동아시아 영역에서의 고도별 구름물리변수(CF, CLWC, CIWC) 특성을 사례 중심으로 분석하고자 하였다. 먼저 여름철 태풍 및 기압골 사례를 대상으로 산출된 RTTOV 구름모의 영상을 위성 실황 관측과 비교하여 KAS의 구름모의 특성을 일차적으로 파악하였다. 이를 바탕으로 저궤도위성, ERA5 (the fifth-generation reanalysis produced by the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)의 구름물리변수와 비교함으로써 KAS 구름의 연직구조와 편차 패턴을 정성·정량적으로 진단하였다. 이러한 분석 결과는 KAS 기반 위성 구름모의 영상 해석에 필요한 기초 정보를 제공함과 동시에, 향후 KAS의 구름 표현 및 활용을 개선하기 위한 참고 자료로 활용될 수 있을 것이다.

2. 자료 및 방법

2.1 대상 및 사례

본 연구는 KAS에 포함된 구름물리변수의 특성을 여름철 강수구름 사례를 통해 진단하였다. 분석 시점은 태풍에 동반된 광역 강수구름이 한반도와 일본 남쪽 해상에 걸쳐 발달한 2025년 7월 30일 0300 UTC의 제 8호 태풍 ‘꼬마이(CO-MAY)’와 기압골에 동반된 강수구름대가 한반도와 중국 동북부, 러시아 연해주 부근에 형성된 2025년 8월 28일 0000 UTC 두 시각이다. 두 사례는 동아시아 영역에서 중·상층 강수구

름, 저층 층운, 주변 맑은 영역이 동시에 존재하여 KAS 구름장의 연직구조와 구름모의영상의 특성을 함께 살펴보기에 적합하다고 판단하였다.

2.2 자료

2.2.1 상세실험분석장(KAS)

KAS는 KIM-Regional의 배경장에 위성, 레이더, 지상 및 고층 관측 자료를 동화하여 동아시아 영역의 3차원 기상장을 1시간 간격으로 제공하는 고해상도 분석 시스템이다. 본 시스템의 설계 및 상세 구성은 KMA (2024)에 상세히 기술되어 있다. KAS 분석장의 수평해상도는 3 km이며, 연직층은 총 28개 층으로 구성된다. 연직 격자는 최상층 50 hPa에서 700 hPa까지는 50 hPa 간격, 700 hPa 이상에서는 대류권 및 하층의 정밀 분석을 위해 25 hPa 간격으로 구성되어 있다. 분석은 매시 15분에 수행되며, 약 40분의 처리 과정을 거쳐 자료가 제공된다. 본 연구에서는 KAS에서 제공되는 28개 등압면 연직 구조를 그대로 활용하여 구름물리변수(CF, CLWC, CIWC)의 연직 분포 특성을 분석하였으며, 이를 저궤도 위성 및 재분석 자료와의 비교 및 해석에 활용하였다. 정성적 공간분포 결과는 상·중·하층의 특성을 직관적으로 비교하기 위해 300, 500, 925 hPa에서 제시하였다.

2.2.2 정지궤도 위성 관측 및 KAS 구름모의영상

KAS 구름장의 공간 구조를 정지궤도 위성 영상과 직접 비교하기 위해, 천리안위성 2A호(GEO-KOMPSAT-2A; GK2A)/Advanced Meteorological Imager (AMI)의 적외 대기창 채널(10.5 μm)을 사용하였다. 두 사례에 대해 동아시아 영역에서의 실제 강수구름 분포, 상·하층 구름 구조, 주변 맑은 영역의 배치를 파악하는 기준 자료로 활용하였다.

KAS 구름모의영상은 KAS 분석장에 포함된 온·습도장과 구름 관련 물리량(CF, CLWC, CIWC)을 입력값으로 RTTOV를 적용하여, GK2A/AMI적외 대기창 채널에 대응하는 모의 휘도온도 영상을 생성한 것이다. 비교를 위해 GK2A 관측영상을 KAS 분석 영역에 맞추어 동일 도메인에서 비교·분석을 수행하였으며, 사례별 구름대의 공간적 분포와 연직 발달 구조에 대한 KAS의 재현 특성을 정성적으로 진단하였다. 이러한 정성 평가는 이어지는 연직 프로파일의 정량적 비교 분석 결과와 연계하여 해석하였다.

2.2.3 저궤도위성 기반 수상체 산출물 및 ERA5

KAS 구름물리변수의 연직구조를 진단하기 위해, 기상청 국가기상위성센터에서 직수신·처리하는 저궤도(low earth orbit, LEO) 마이크로파 관측 위성(Low Earth Orbit) 기반 수상체 산출물과 ERA5를 참조자료

로 사용하였다.

LEO-SAT 구름수상체 산출물은 NOAA-20 위성의 Advanced Technology Microwave Sounder (ATMS)와 Metop-B 위성의 Advanced Microwave Sounding Unit (AMSU) 밝기온도를 입력으로 하는 1차원 변분(1D-Var) 역산 알고리즘에서 산출된 구름 CLWC 및 CIWC 프로파일로서, 국가기상위성센터에서 시험운영중인 산출물이다. 해당 산출물은 약 6 km 해상도에서 54개 연직 레벨의 정보를 제공하여 KAS (28개 연직층) 보다 세분화된 연직 구조를 갖는다.

이러한 저궤도 수상체 산출물은 GK2A 구름물리량의 시·공간적 제약을 보완하기 위해 도입되었다. 정지궤도 기반의 구름물리변수는 주간에만 2차원 분포 위주로 생산되어 구름의 입체구조를 파악하는 데 한계가 있다. 반면 마이크로파 기반 저궤도 수상체 산출물은 궤도 및 유형에 따른 민감도 차이와 산출 불확실성이 존재하지만, 구름의 연직 구조 및 구름 내부 정보를 제공할 수 있다.

ERA5는 전지구 대기 재분석자료로서, 구름 및 수상체 관련 변수를 포함한 3차원 대기장을 제공하며, 본 연구에서는 KAS 구름물리변수의 연직 분포 특성과 편차를 해석하기 위한 보조 참조장으로 활용하였다. ERA5는 0.25° 수평해상도를 갖는다. 연직해상도는 137개층의 하이브리드 시그마-압력좌표를 사용하며, 각 층의 경계면 압력은

$$p_{k+1/2} = a_{k+1/2} + b_{k+1/2}p_s \quad (1)$$

로 주어진다. 식(1)에서 a_k , b_k 는 모델이 제공하는 층별 고정 계수이고, p_s 는 ERA5로부터 계산되는 지표면압력이다. 이러한 연직구조는 하층의 지형 효과와 상층 대기 표현을 동시에 확보할 수 있다는 특성이 있다(Simmons and Burridge, 1981).

본 연구에서는 저궤도 구름물리변수와 ERA5를 절대적인 기준장이 아닌 상호 보완적인 관측·재분석 참조장으로 간주하고, KAS 구름물리변수의 상대적인 연직 분포 특성과 편차를 중심으로 진단하고자 하였다.

2.3 방법

본 연구는 KAS 구름물리변수의 연직 구조를 정량적으로 평가하기 위해, 사례별 저기압 중심(사례 1: 30.5°N, 122.1°E, 사례 2: 45.0°N, 126.0°E)을 기준으로 반경 200 km 이내 영역을 분석 대상으로 설정하였다. 먼저 KAS 반경 내 격자점 자료를 최근접 격자 매칭 방법(nearest-neighbor method)으로 기준자료와 공간일치 하였다. CLWC와 CIWC의 단위가 자료별로 상이하므로 g m^{-3} 로 단위를 통일하였다. KAS 기압면을 중심으로 ± 25 hPa 범위에서 값을 계산하고, 연직 대표성 오차 완화를 위해 필요 시 가우시안 가중($\sigma =$

25 hPa)을 적용하여 동일 압력면에서의 프로파일을 구성하였다. 통계지표는 참조자료와의 고도별 평균오차(bias), 평균제곱근편차(RMSE), 상관계수(pearson correlation)를 산출하였다.

본 연구의 결과 항목은 (1) KAS 기반 구름모의영상 정성 진단과 (2) CF, (3) CLWC, (4) CIWC의 연직프로파일 결과 및 대표 기압층의 공간분포 결과를 기본으로 구성하였다.

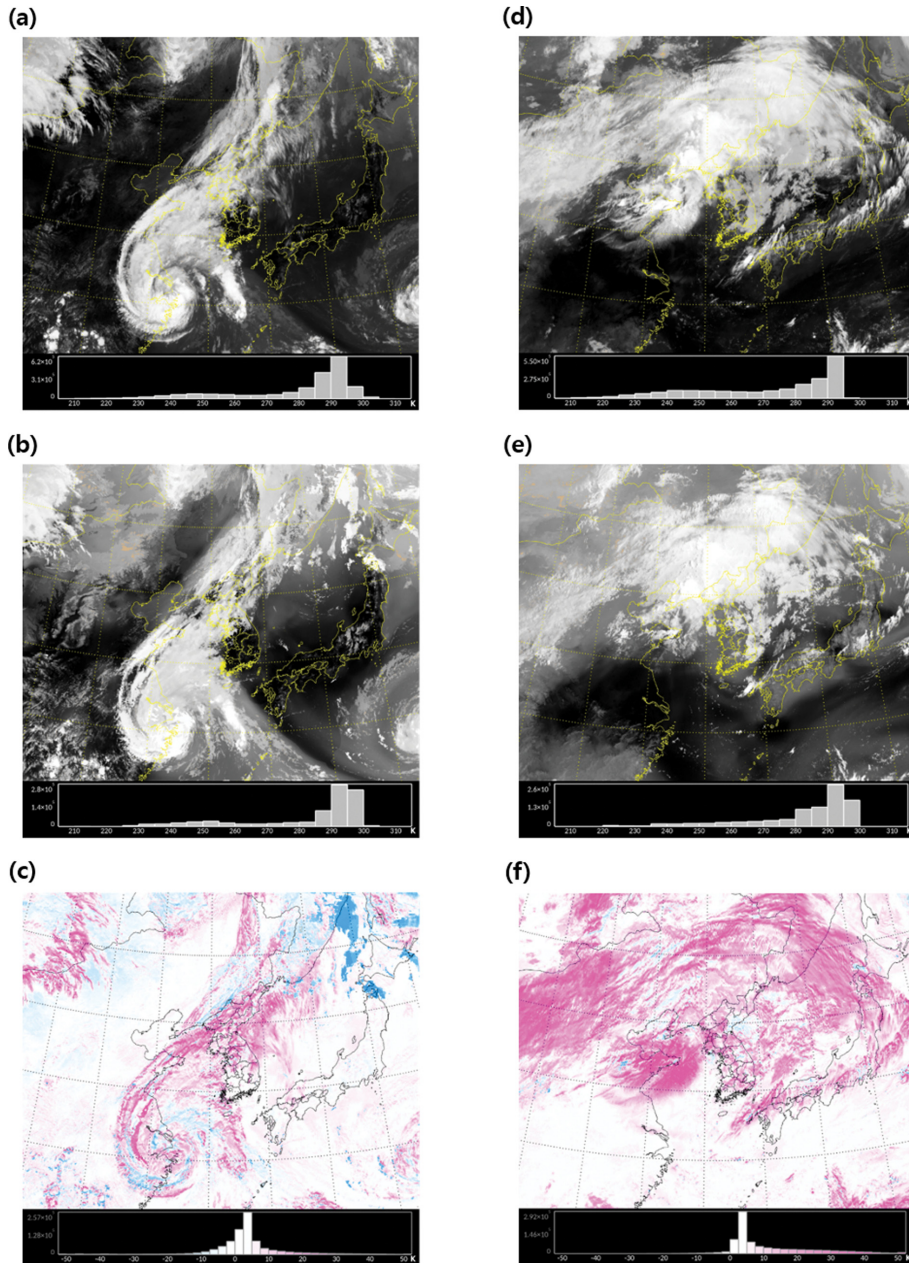


Fig. 1. Observed GK2A/AMI 10.5 μm brightness temperature (T_b ; K), KAS-based RTTOV-simulated T_b (K), and their difference (Sim - Obs; K). (a-c) Case 1 (30 July 2025 0300 UTC): observed T_b , simulated T_b , and Sim - Obs. (d-f) Case 2 (28 August 2025 0000 UTC): observed T_b , simulated T_b , and Sim - Obs. Shading indicates T_b (K) in (a, b, d, e) and T_b difference (K) in (c, f).

3. 결 과

3.1 KAS 기반 구름모의영상(10.5 μm) 정성 진단

KAS 분석장을 입력으로 RTTOV를 적용하여 생성한 GK2A/AMI 10.5 μm 모의 휘도온도 영상은 두 사례 모두에서 실황영상과 비교하여 구름대의 광역적 위치와 형태를 전반적으로 잘 재현하였다. 태풍 사례(2025년 7월 30일 0300 UTC)는 Fig. 1a와 b에서 보듯이, 태풍 중심을 따른 구름 구조와 구름대 위치가 실황과 대체로 일치하였고, 기압골 강수 사례(2025년 8월 28일 0000 UTC)에서도 Figs. 1d, e에서 강수 구름대의 광역적 분포와 배치가 전반적으로 유사하게 나타났다.

반면 두 사례 모두에서 KAS 기반 모의영상의 구름역과 청천역 간 밝기온도 대비가 실황에서 보여지는 것보다 작게 나타났다. Figures 1c와 f의 ‘KAS (모의)-

GK2A (실황)’ 차이 영상에서 청천역 편차는 거의 흰색으로 0 K 부근에 분포하는 반면, 구름대 내부 및 주변 상층운에서 양의 편차가 넓은 범위에 걸쳐 나타났다. 이는 해당 영역에서 모의 휘도 온도가 실황보다 상대적으로 높게 산출되었음을 의미한다. 그 결과, 구름 영역의 경계가 모의영상에서는 실황 대비 완만하게 표현되는 경향이 확인되었다. 또한 모의영상은 일부 맑은 영역에서도 열은 중·상층 구름 신호를 비교적 넓게 모의하여, 실황 대비 맑음-구름 경계가 선명하지 않은 구간이 나타났다.

사례별로는, 태풍 사례에 대한 모의영상에 일본 남동쪽 해상 및 중국 내륙의 맑은 영역에서 얇은 구름이 실황보다 넓게 분포하는 경향이 두드러졌고, 일본 북부-오호츠크해 부근의 구름역에서는 음의 편차가 국지적으로 크게 나타나는 영역도 확인되었다. 기압골 강수 사례에서는 한반도 북서쪽 해상과 중국 내륙의

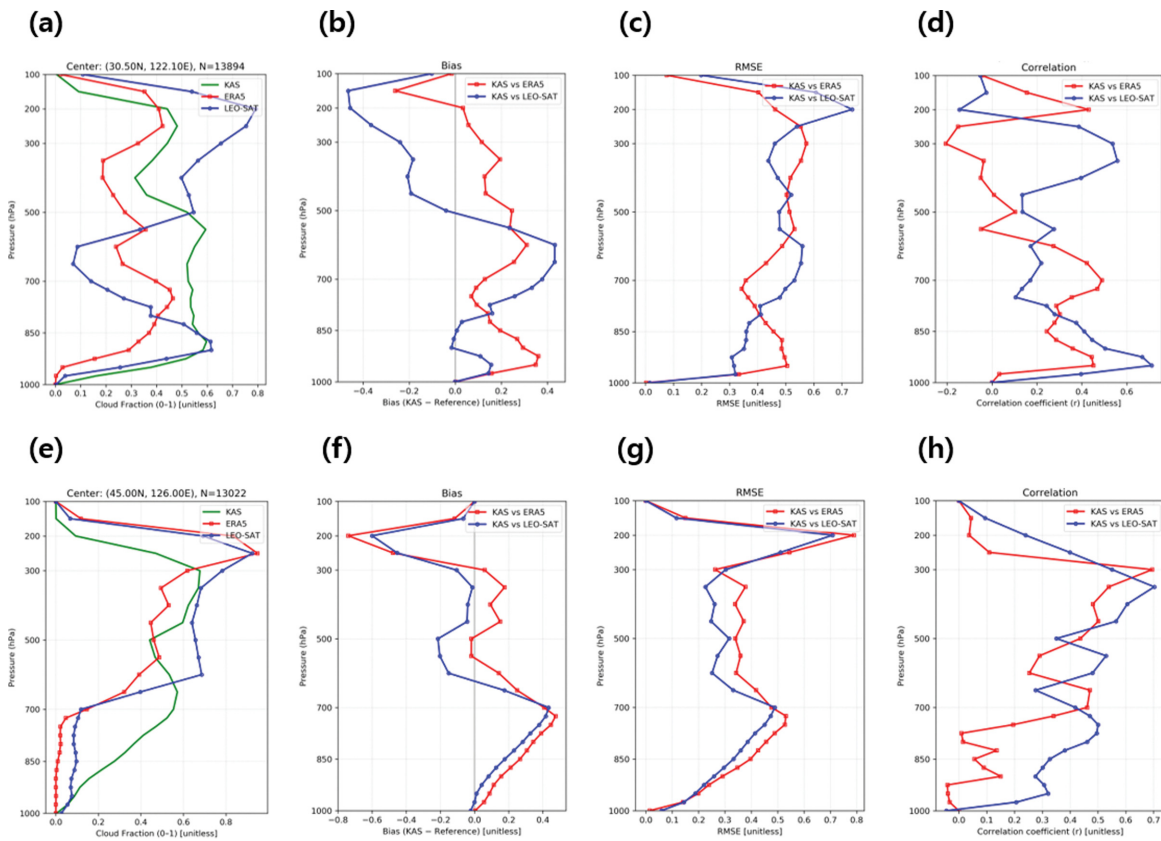


Fig. 2. Vertical profiles of cloud fraction (CF) within a 200 km radius of the analysis center for two precipitation cases. (a) Mean CF profile from KAS, ERA5, and LEO-SAT, (b) Bias (KAS - reference), (c) RMSE, and (d) correlation coefficient between KAS and the reference datasets for Case 1 (30 July 2025, 0300 UTC). (e)-(h) Same as (a)-(d), but for Case 2 (28 August 2025, 0000 UTC). Green lines indicate the original KAS CF profile, while red and blue line consistently represent ERA5- and LEO-SAT-based quantities, respectively, both the mean profiles and the statistical comparisons with KAS.

일부 구름 분포가 실황 대비 모의영상에서 상대적으로 좁은 범위에 국한되어 나타났으며, 동일 영역에서 양의 편차가 크게 나타났다.

3.2 CF

Figure 2는 두 강수 사례에 대한 KAS와 참조자료(ERA5와 LEO-SAT) 간 CF의 연직 평균 프로파일과 통계 분포를 나타낸다. Bias는 KAS와 참조자료 간

의 차이를 의미하며, 빨간색 선이 ERA5, 파란색 선이 LEO-SAT과의 비교 결과이다. 사례 1 (Figs. 2a-d)에서 850 hPa를 기준으로 KAS와 저궤도위성(LEO-SAT)의 CF 프로파일이 대체로 일치하는 경향을 보이다가 크게 달라지는 경향을 확인할 수 있으며, 중층의 KAS CF가 참조자료 대비 특히 큰 것을 확인할 수 있다. 또한, ERA5 대비 상층(200 hPa 이하)에서 음의 편차, 850 hPa 이상의 하층에서는 양의 편

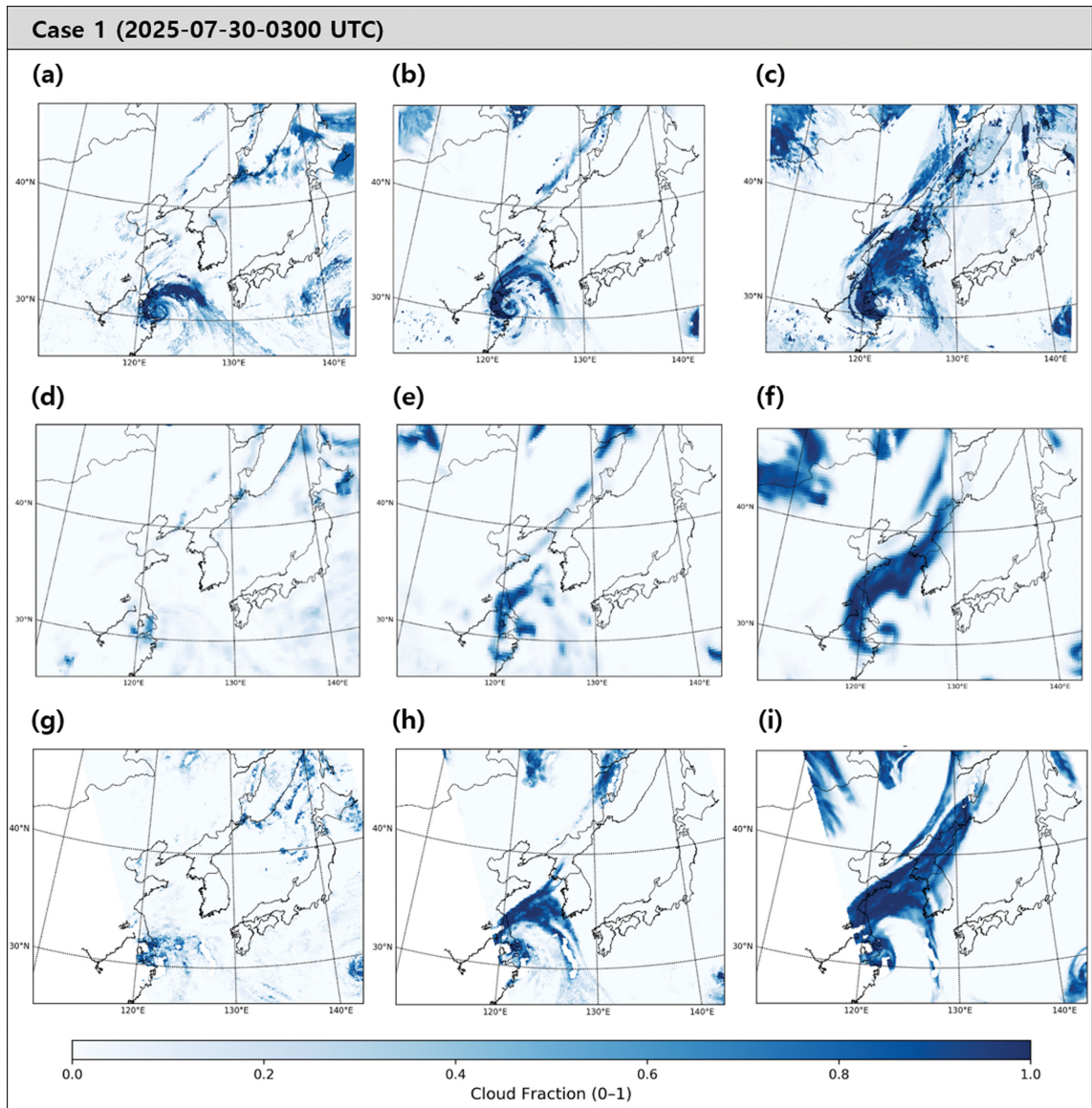


Fig. 3. Horizontal distributions of cloud fraction (CF) at 925, 500, and 300 hPa for Case 1 (30 July 2025 0300 UTC) and Case 2 (28 August 2025 0000 UTC), shown over the same geographic extent as the KAS domain: (a-c) KAS, (d-f) ERA5, (g-i) LEO-SAT retrieval. The color scale is common to all panels and ranges from 0 to 1.

차가 두드러지게 나타났으며, RMSE도 상·하층에서 크게 산출되었다. 상관계수는 200 hPa과 700 hPa 부근에서 비교적 높은 값을 보이며, 600-300 hPa의 중·상층 구간에서는 상대적으로 낮은 값을 나타냈다. 한편 KAS와 저궤도위성(LEO-SAT) 비교에서는 925 hPa 하층과 300 hPa 부근에서 상관이 상대적으로 높게 나타나, 대류성 상층 구름 구조의 공간적 위치는 위성 기반 자료와 비교적 일관되게 재현되는 경향을 보였다. 사례 2 (Figs. 2e-h)에서 Bias의 경우 상층에서 음의 편차, 중·하층에서 양의 편차가 뚜렷하게 나

타나고, RMSE 역시 상층(200 hPa)에서 최대를 보이며, 두 참조장과의 비교결과가 고도별로 일관적인 오차 패턴을 갖는 특징을 보였다. 상관계수는 사례 1과 마찬가지로 ERA5 대비 LEO-SAT 비교에서 상대적으로 높게 나타났다. 종합하면, 두 사례 모두에서 KAS는 ERA5와 저궤도위성 대비 200 hPa의 이하의 상층 CF의 오차가 크고, 바로 이어진 300 hPa 이하에서는 상대적으로 오차가 줄어든 경향을 보여 준다. 이는 200-300 hPa를 경계로 구름 상부고도 부근에서 나타나는 CF의 수직구조 변화와 자료간 운

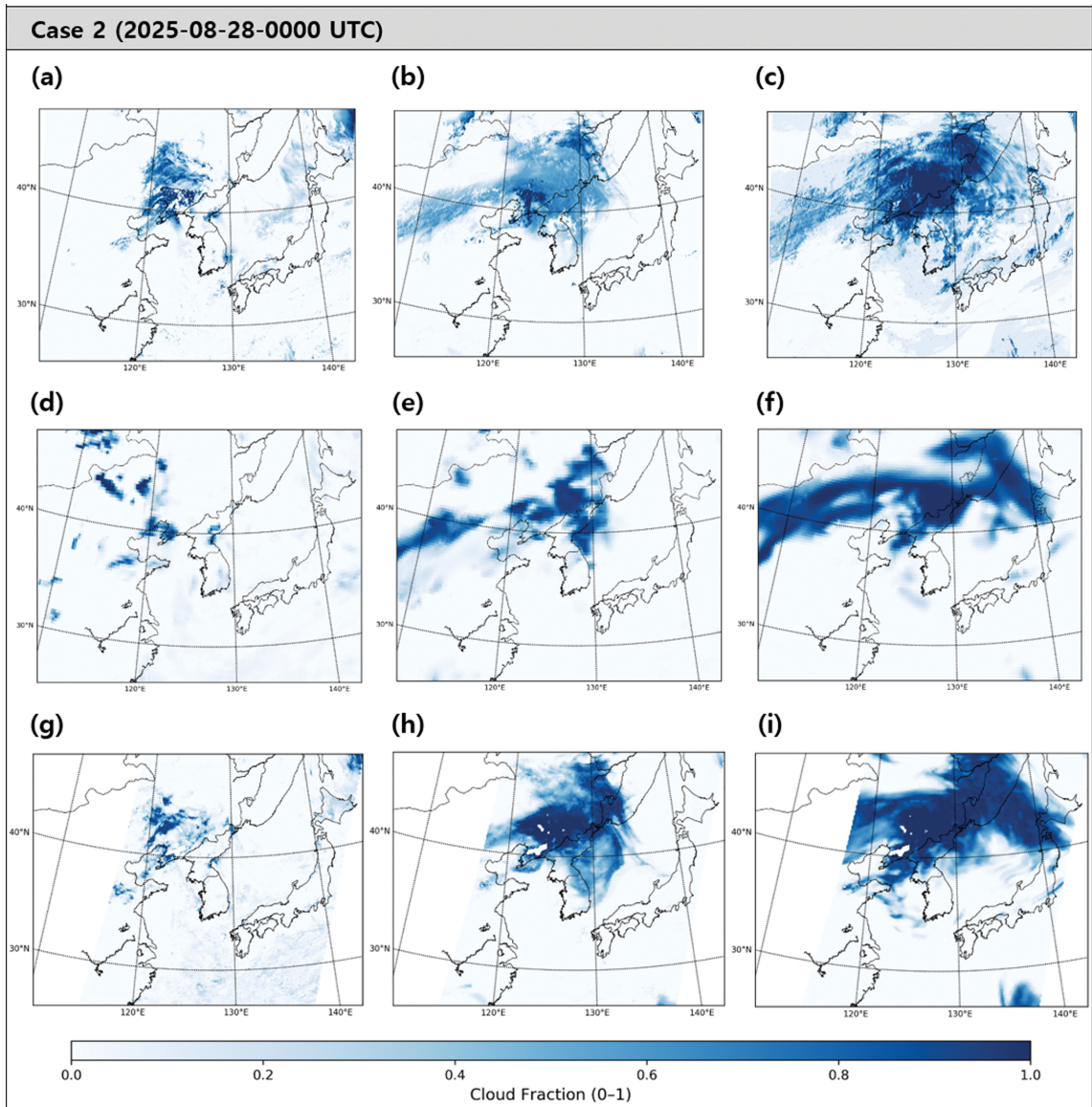


Fig. 3. Continued.

정고도 차이가 반영된 결과로 해석된다. 참조장과 층별 CF 분포 특성은 차이를 보이지만, 저궤도위성의 일치도가 ERA5보다 높게 나타났다. 또한 중층에서의 상관도는 상·하층의 특정 고도에 비해 상대적으로 낮은 결과를 보였다. Figure 3은 대표 기압면별 (925, 500, 300 hPa) 두 사례의 CF 결과를 보여준다. 두 사례의 공통적인 특징으로는 KAS의 CF는 참조장과 달리 전 층에 약 ~0.1 수준의 저운량 배경값이 존재하고, 3 km 고해상도 특성에 따라 CF 분포의 세밀한 공간구조가 표현되었다는 것이다. 재분석 및 저궤도위성 참조장이 비교적 연속적인 띠 구조와 넓고 부드럽게 이어지는 분포를 나타내는 반면, KAS CF는 인접 격자 간 값 차이가 상대적으로 크게 나타나 국지적인 고운량 및 저운량 영역이 세분화되어 분포하는 경향을 보였다.

3.3 CLWC

Figure 4는 CLWC에 대한 연직 평균 및 통계 프로파일 결과를 보여준다. 두 사례 모두에서 CLWC의 편차는 하층(약 1,000-900 hPa)에서 참조자료와의 차이가 가장 크게 나타났다. ERA5와의 비교에서는 대체로 양의 편차를 보이며 KAS가 CLWC를 다소 크게 산출하는 경향이 확인되었으나, 저궤도위성의 특정고도에서는 음의 편차를 보이며 고도와 참조자료에 따라 다른 결과가 진단되었다. RMSE 역시 두 사례 모두 하층에서 가장 크게 나타났으며 상층으로 갈수록 감소하는 경향을 보였다. 상관계수는 중층 일부 구간을 제외하면 전반적으로 작고, 300 hPa 이하의 상층에서 참조자료의 CLWC는 거의 사라지고, ERA5의 통계값도 제한적으로 나타나는 것을 확인할 수 있다. Figure 5에서 두 사례 모두 CLWC은

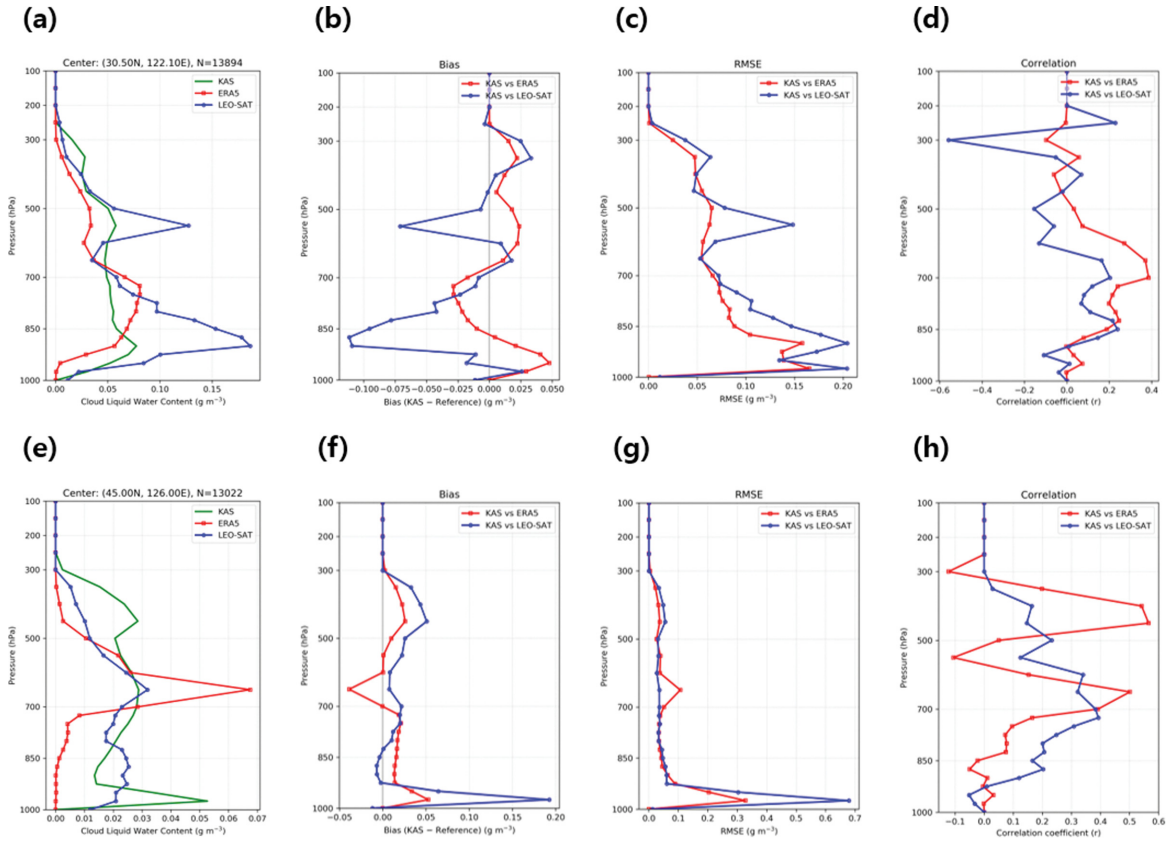


Fig. 4. Vertical profiles of cloud liquid water content (CLWC) within a 200 km radius of the analysis center for two precipitation cases. (a) Mean CLWC profile from KAS, ERA5, and LEO-SAT, (b) Bias (KAS - reference), (c) RMSE, and (d) correlation coefficient between KAS and the reference datasets for Case 1 (30 July 2025, 0300 UTC). (e)-(h) Same as (a)-(d), but for Case 2 (28 August 2025, 0000 UTC). Green lines indicate the original KAS CLWC profile, while red and blue line consistently represent ERA5- and LEO-SAT-based quantities, respectively, both the mean profiles and the statistical comparisons with KAS.

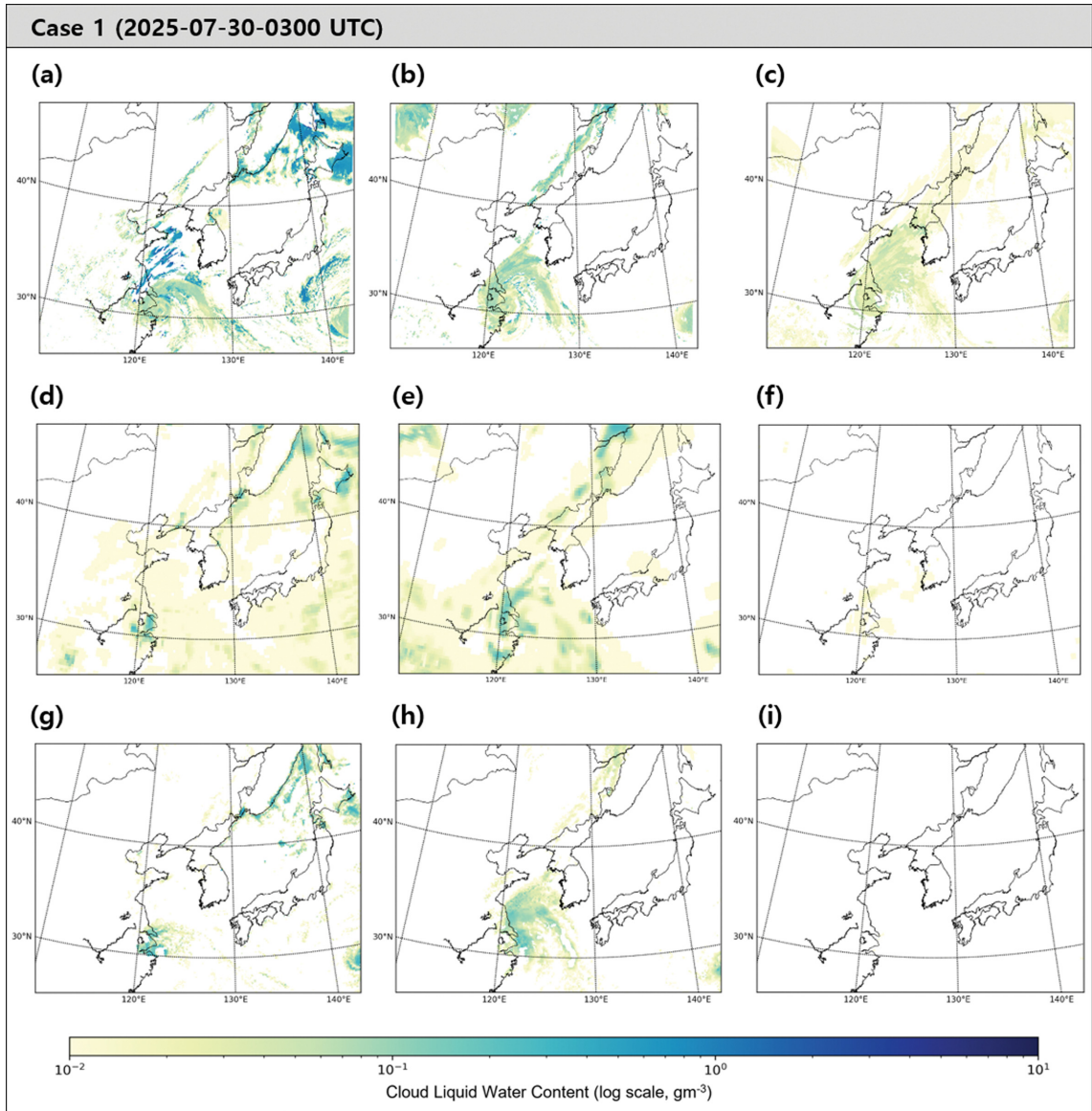


Fig. 5. Horizontal distributions of cloud Liquid Water Content (CLWC) at 925, 500, and 300 hPa for Case 1 (30 July 2025 0300 UTC) and Case 2 (28 August 2025 0000 UTC), shown over the same geographic extent as the KAS domain: (a-c) KAS, (d-f) ERA5, (g-i) LEO-SAT retrieval. The color scale is common to all panels and ranges from 10^{-2} to 10^1 g m^{-3} .

주로 중·하층에 집중되고, 상층으로 갈수록 감소하는 공통된 연직 구조가 나타내며 연직 프로파일과 같은 결과를 보였다. 전반적으로 KAS는 연속적이고 두꺼운 수직층을, ERA5는 상대적으로 얇고 넓게 퍼진 CLWC 분포를 보이며 공간 표현 특성의 차이가 나타났다. 300 hPa에서는 두 사례 모두에서 CLWC이 전반적으로 크게 적어졌지만, 상층 CLWC 표현에서 자료 간 차이가 확인되었다. ERA5와 LEO-SAT은

300 hPa 이상의 상층에서 CLWC이 거의 존재하지 않는 반면, KAS는 일부 영역에서 적은 CLWC이 산발적으로 남아 상층 CLWC의 존재 여부 및 연직 상한 표현에서 차이를 보였다. 종합하면, KAS CLWC은 중·하층(500-925 hPa)에서 ERA5와 유사한 분포 구조를 보이면서도, 상층에서는 KAS에만 적은 CLWC가 잔류하는 경향이 나타나 연직 상한 표현의 차이가 확인되었다.

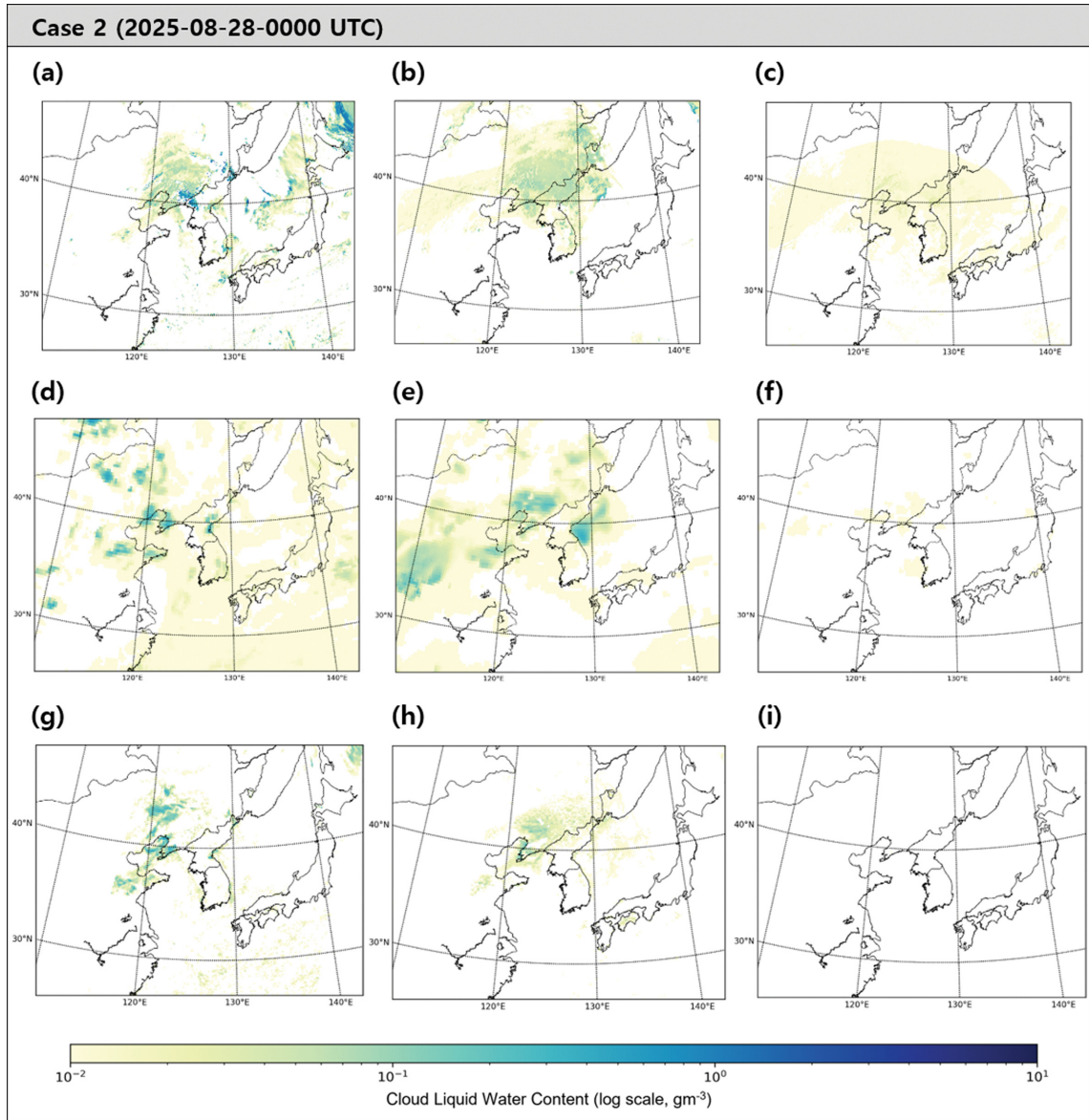


Fig. 5. Continued.

3.4 CIWC

Figure 6의 CIWC 통계 프로파일 결과에서 사례 1 과 2 모두 참조자료 대비 약 250-300 hPa의 부근에서 양의 편차가 크게 나타나 KAS가 상층 CIWC를 상대적으로 크게 산출하는 경향이 확인되었다. 또한 200-300 hPa 사이에서 통계값이 급격히 변하는 양상은 상층 CIWC 분포의 수직경계가 해당 고도대 부근에 위치할 가능성을 시사한다. 반면 300-700 hPa의 중·상층에서는 음의 편차가 우세하여, 이 고도대에서는

참조자료가 KAS보다 상대적으로 많은 CIWC를 산출하는 경향이 나타났다. 중층 이하에서는 CIWC 자체가 매우 작거나 발생빈도가 낮아 유효표본이 제한되며, 그 결과 편차 및 상관통계가 안정적으로 산출되지 않아 뚜렷한 차이를 해석하기 어려웠다. 한편 KAS와 LEO-SAT 간 상관계수는 상층 일부 구간에서 낮거나 음의 값을 보이며, 대류성 사례에서 상층 CIWC의 공간분포 일치도가 감소하는 특징이 나타났다. Figure 7의 공간분포에서 KAS는 두 사례 모두 300

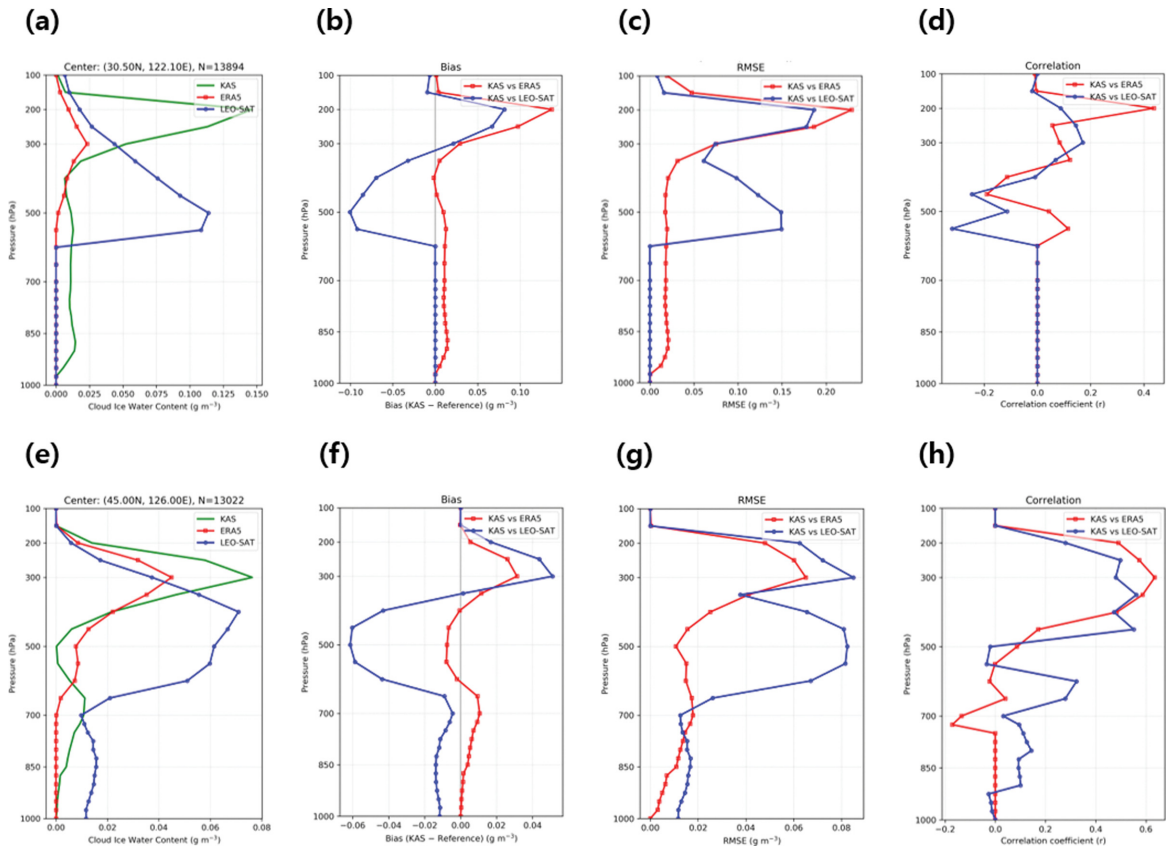


Fig. 6. Vertical profiles of cloud ice water content (CIWC) within a 200 km radius of the analysis center for two precipitation cases. (a) Mean CIWC profile from KAS, ERA5, and LEO-SAT, (b) Bias (KAS - reference), (c) RMSE, and (d) correlation coefficient between KAS and the reference datasets for Case 1 (30 July 2025, 0300 UTC). (e)-(h) Same as (a)-(d), but for Case 2 (28 August 2025, 0000 UTC). Green lines indicate the original KAS CIWC profile, while red and blue line consistently represent ERA5- and LEO-SAT-based quantities, respectively, both the mean profiles and the statistical comparisons with KAS.

hPa 부근에 CIWC가 상대적으로 집중되는 구조를 보였다. ERA5는 500-300 hPa 구간에서 비교적 넓고 연속적인 CIWC 분포를 보이는 반면, KAS는 300 hPa에 부근에 국한된 분포가 두드러져 상층에서의 수평적 확장성이 상대적으로 제한된 특성이 확인되었다. 또한 하층(약 925 hPa)에서는 KAS와 LEO-SAT에서 국지적으로 0이 아닌 CIWC가 나타난 반면, ERA5에서는 해당 결과가 거의 나타나지 않아, 자료 간 차이가 확인되었다. 전반적으로 ERA5는 500-300 hPa에서 CIWC가 완만하게 확장되는 형태를 보이는 반면, KAS는 300 hPa에서 과도하게 집중되는 형태로 나타나 중·상층 CIWC 구조 재현에서 차이가 두드러졌다.

4. 토 의

본 연구에서 KAS 기반 구름모의영상은 주요 강수

시스템 주변에서 상층운이 상대적으로 넓게 나타나고 얇은 상층운의 세밀한 구조가 약화되는 경향을 보였다. 이러한 특성은 KAS 분석장의 구름물리변수가 연속적이고 약한 신호를 표현하는 방식과 관련될 가능성이 있다. 프로파일 분석 결과에서도 KAS 구름물리 변수는 고도에 따라 특징적인 분포를 나타냈다. CF는 전층에서 참조자료에 비해 상대적으로 큰 값을 보이며 배경에 적은 CF가 존재함을 확인하였고, 이는 약한 구름 신호가 넓은 영역에 걸쳐 지속적으로 포함되는 특성과 관련될 가능성이 있다. 또한 CLWC과 CIWC는 서로 다른 고도에서 편차 특성을 보였으며, 특히 CIWC는 두 사례 모두에서 약 300 hPa 부근에서 상대적으로 큰 값이 나타나 상층에 집중되는 구조가 확인되었다. 한편 925 hPa 부근의 하층에서는 ERA5와 달리 KAS와 LEO-SAT에서 국지적으로 CIWC가 0이 아닌 영역이 확인되었다. 그러나 해당 고도의 온도는

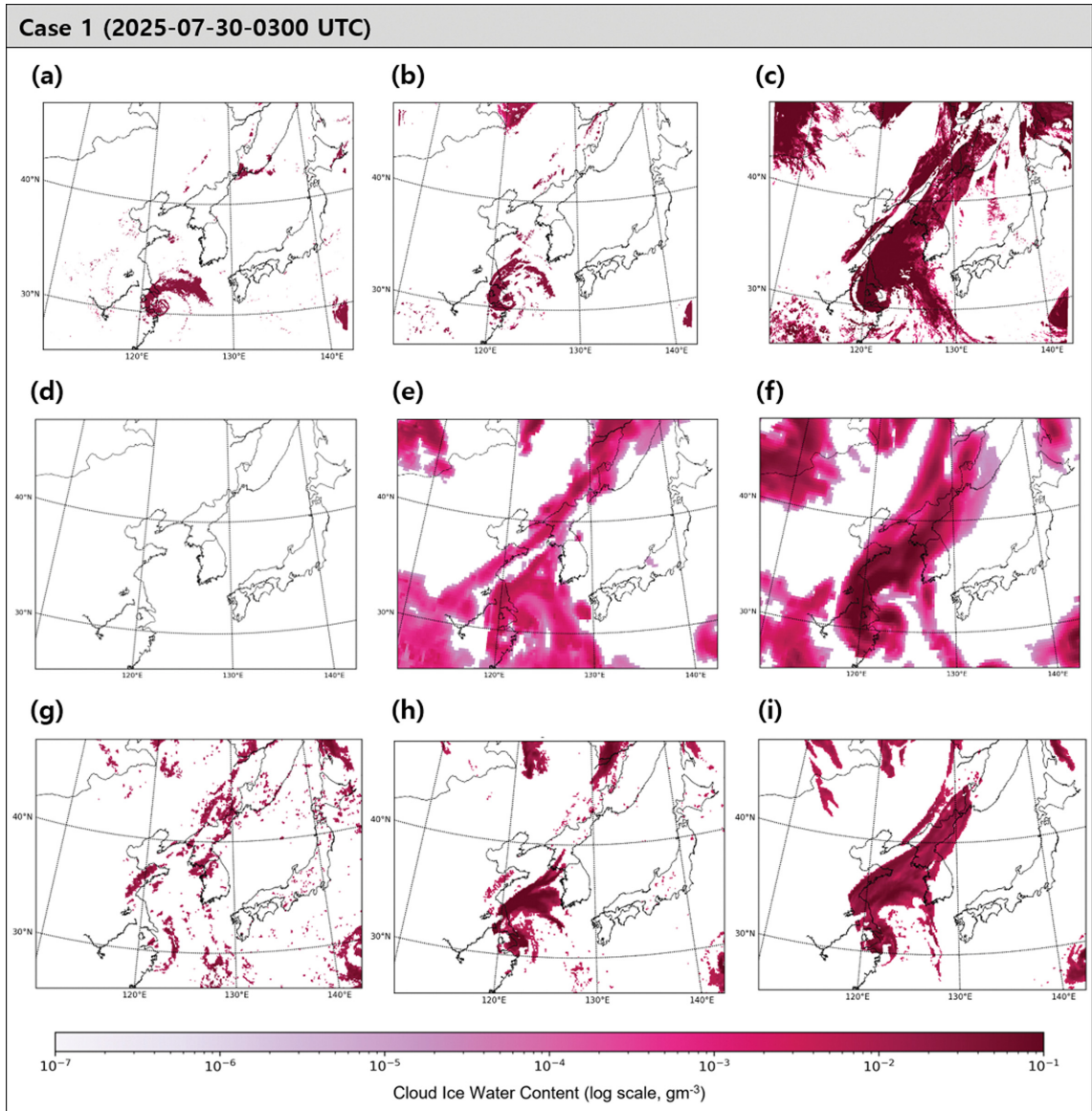


Fig. 7. Horizontal distributions of cloud Ice Water Content (CIWC) at 925, 500, and 300 hPa for Case 1 (30 July 2025 0300 UTC) and Case 2 (28 August 2025 0000 UTC), shown over the same geographic extent as the KAS domain: (a-c) KAS, (d-f) ERA5, (g-i) LEO-SAT retrieval. The color scale is common to all panels and ranges from 10^{-7} to 10^{-1} g m^{-3} .

약 영상 15°C 수준으로, 빙정이 존재하기 어려운 조건이다. 또한 동일 고도에서 CLWC가 CIWC에 비해 상대적으로 크게 나타나는 점을 고려하면, 이러한 결과를 물리적인 구름 상태로 해석하기에는 한계가 있다. 또한 LEO-SAT 산출물은 1D-Var 기반의 추정 과정에서 모델 배경장을 활용하기 때문에, 관측 민감도가 낮은 고도에서는 배경장의 빙정 구조가 일부 반영될 가능성도 있다. 따라서 이와 같은 하층 CIWC는

실제 빙정이라기보다는, 산출 과정에서의 상(phase) 분류 오류나 연직 배치 문제에 의해 발생했을 가능성이 있으며, 산출 알고리즘의 한계 또는 오류와 관련될 수 있다. 종합적으로, 본 결과는 KAS 구름물리 변수의 활용 시 고도별로 신뢰 구간과 해석에 유의점을 구분하고, 특히 상층의 얇은 구름 및 하층 혼합상 표현에 대해서는 추가적인 검증과 개선이 요구됨을 시사한다.

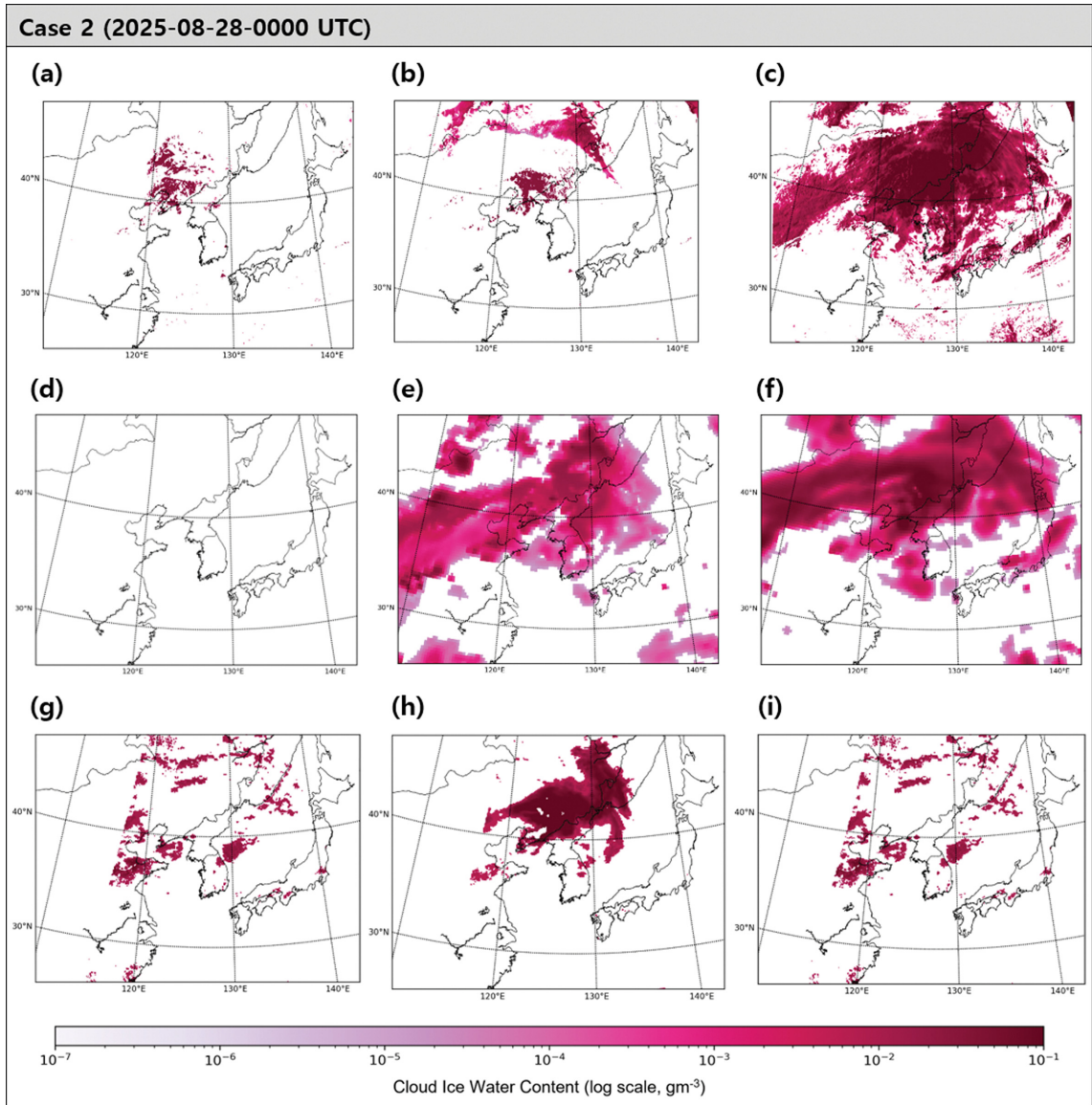


Fig. 7. Continued.

5. 결 론

본 연구는 여름철 두 강수 사례(태풍, 기압골 강수)에 대해 KAS 기반 10 μm 구름모의영상과 구름물리변수(CF, CLWC, CIWC)의 고도별 분포특성을 분석하고, ERA5와 ID-Var 기반 저궤도위성 산출물과의 연직 프로파일 비교를 통해 그 특성을 진단하였다. 분석 결과, KAS 기반의 모의영상과 CF는 강수 구름대의 위치·형태 등 광역적 공간 구조를 전반적으로 잘 재현하였고, CLWC는 중·하층에서 주요 분포 구조가

ERA5와 대체로 일치했으나, 300 hPa에서는 KAS에 잔류 CLWC가 확인되었다. CIWC는 300 hPa 부근에 많이 집중되는 경향과 함께, ERA5에서 보이는 상층의 넓고 완만한 CIWC 확장(얇은 빙정/권운) 표현이 상대적으로 부족하였다. 또한 ERA5에서는 925 hPa 고도에서 CIWC가 나타나지 않은 반면 KAS와 LEO-SAT에서 국지적 CIWC이 진단되어, 하층 혼합상 또는 잔류 얼음성분의 표현차이가 존재할 가능성이 시사되었다. 이러한 결과는 KAS 구름물리변수를 활용한 구름구조 해석 시 고도별 표현 특성과 해석상의

유의점을 함께 고려할 필요가 있으며, 향후에는 사례와 기간을 확장한 통계 검증, 상·하층의 혼합상(상층 수직 및 하층 얼음성분) 원인 분석, 다중 참조자료를 활용한 추가 검증을 통해 KAS 구름물리변수의 표현 특성과 진단 활용성을 보다 체계적으로 평가할 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 기상청 국가기상위성센터가 지원하는 “기상위성 운영 및 활용 기술개발” 사업의 “기상재해 대응 위성활용 현업지원 기술개발”(KMA2025-00121) 과제의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Choi, Y. S., R. S. Lindzen, C.-H. Ho, and J. Kim, 2010: Space observations of cold-cloud phase change. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, **107**, 11211-11216, doi:10.1073/pnas.1006241107.
- Do, H.-S., J. Kim, E.-J. Cha, E.-C. Chang, S.-W. Son, and G. Lee, 2023: Long-term change of summer mean and extreme precipitation in Korea and East Asia. *Int. J. Climatol.*, **43**, 3476-3492, doi:10.1002/joc.8039.
- Ha, K.-J., E.-H. Jeon, and H.-M. Oh, 2007: Spatial and temporal characteristics of precipitation using an extensive network of ground gauge in the Korean Peninsula. *Atmos. Res.*, **86**, 330-339, doi:10.1016/j.atmosres.2007.07.002.
- Jahanshahi, A., S. H. Roshun, and M. J. Booij, 2024: Comparison of satellite-based and reanalysis precipitation products for hydrological modeling over a data-scarce region. *Clim. Dyn.*, **62**, 3505-3537, doi:10.1007/s00382-023-07078-x.
- Katzenberger, A., and A. Levermann, 2024: Consistent increase in East Asian summer monsoon rainfall and its variability under climate change over China in CMIP6. *Earth Syst. Dyn.*, **15**, 1137-1151, doi:10.5194/esd-15-1137-2024.
- Kim, E., S. Y. Park, J. W. Yoo, and S. H. Lee, 2023: Fog type classification and occurrence characteristics based on fog generation mechanism in the Korean Peninsula. *J. Environ. Sci. Int.*, **32**, 883-898, doi:10.5322/JESI.2023.32.12.883.
- Kim, M., and E. Lee, 2022: Validation and comparison of climate reanalysis data in the East Asian monsoon region. *Atmosphere*, **13**, 1589, doi:10.3390/atmos13101589.
- Kim, Y.-H., M. Lee, S.-K. Min, D.-S. R. Park, D.-H. Cha, Y.-H. Byun, and J. Heo, 2024: Global warming-induced warmer surface water over the East China Sea can intensify typhoons like Hinnamnor. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **105**, E1416-E1421, doi:10.1175/BAMS-D-23-0240.1.
- KMA, 2022: *Development of numerical weather prediction and data application techniques: Development of technologies for supporting and utilizing numerical weather prediction (Final report)*. Korea Meteorological Administration Numerical Modeling Center, 79-84 pp.
- , 2024: *Manual for Operation and Diagnostic System of the Korea Analysis System (KAS)*. Publication Registration No. 11-1360709-000111-01, Korea Meteorological Administration Numerical Modeling Center, 77 pp.
- Lee, H.-J., W.-H. Nam, J. A. Otkin, Y. Zhong, X. Zhang, and M. D. Svoboda, 2024: Evaluation of flash drought characteristics using satellite-based soil moisture product between North and South Korea. *J. Korea Water Resour. Assoc.*, **57**, 509-518, doi:10.3741/JKWRA.2024.57.8.509.
- Lee, Y. H., J.-S. Lee, S. K. Park, D.-E. Chang, and H.-S. Lee, 2010: Temporal and spatial characteristics of fog occurrence over the Korean Peninsula. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **115**, D14117, doi:10.1029/2009JD012284.
- Li, J.-L. F., S. Lee, H.-Y. Ma, G. Stephens, and B. Guan, 2018: Assessment of the cloud liquid water from climate models and reanalysis using satellite observations. *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, **29**, 653-678, doi:10.3319/TAO.2018.07.04.01.
- Moon, S., N. Utsumi, J.-H. Jeong, J.-H. Yoon, S.-Y. S. Wang, H. Shiogama, and H. Kim, 2023: Anthropogenic warming induced intensification of summer monsoon frontal precipitation over East Asia. *Sci. Adv.*, **9**, eadh4195, doi:10.1126/sciadv.adh4195.
- Park, C., S.-W. Son, J. Kim, E.-C. Chang, J.-H. Kim, E. Jo, D.-H. Cha, and S. Jeong, 2021: Diverse synoptic weather patterns of warm-season heavy rainfall events in South Korea. *Mon. Wea. Rev.*, **149**, 3875-3893, doi:10.1175/MWR-D-20-0388.1.
- Park, S. K., E. Lee, D.-E. Chang, and L. Leslie, 2004: *Orographic effect on heavy rainfall in the east coast of the Korean Peninsula induced by a tropical cyclone*. Preprints, *84th AMS Annual Meeting*, Paper P1.5, 3 pp.
- Saunders, R., M. Matricardi, and P. Brunel, 1999: An improved fast radiative transfer model for assimilation of satellite radiance observations. *Quart. J. Roy.*

- Meteor. Soc.*, **125**, 1407-1425, doi:10.1002/qj.1999.49712555615.
- Shim, H.-N., and Y.-H. Lee, 2017: Influence of local wind on occurrence of fog at inland areas. *Atmosphere*, **27**, 213-224, doi:10.14191/Atmos.2017.27.2.213.
- Simmons, A. J., and D. M. Burridge, 1981: An energy and angular-momentum conserving vertical finite-difference scheme and hybrid vertical coordinates. *Mon. Wea. Rev.*, **109**, 758-766, doi:10.1175/1520-0493(1981)109<0758:AEAAMC>2.0.CO;2.
- Wie, J., J.-Y. Byon, and B.-K. Moon, 2024: Characteristics of the East Asian summer monsoon using GK2A satellite data. *Atmosphere*, **15**, 543, doi:10.3390/atmos15050543.
- Xue, Y., J. Yu, M. Cai, Z. Chen, L. Yang, and J. Li, 2025: On the inconsistency of cloud liquid water between reanalyses and satellite observations over East Asia. *J. Meteor. Res.*, **39**, 1025-1038, doi:10.1007/s13351-025-4195-1.
- Yao, B., C. Liu, Y. Yin, Z. Liu, C. Shi, H. Iwabuchi, and F. Weng, 2020: Evaluation of cloud properties from reanalyses over East Asia with a radiance-based approach. *Atmos. Meas. Tech.*, **13**, 1033-1049, doi:10.5194/amt-13-1033-2020.
- Yin, J., and Coauthors, 2023: East Asia reanalysis system (EARS). *Earth Syst. Sci. Data*, **15**, 2329-2346, doi:10.5194/essd-15-2329-2023.
- Yoshida, Y., and S. Asano, 2005: Effects of the vertical profiles of cloud droplets and ice particles on the visible and near-infrared radiative properties of mixed-phase stratocumulus clouds. *J. Meteor. Soc. Japan*, **83**, 471-480, doi:10.2151/jmsj.83.471.