

겨울철 한반도 중부지역 중층 강수 현상의 특성과 위험성 연구

한광희 · 김백민* · 노남규 · 성현준 · 최지은
부경대학교 지구환경시스템과학부 환경대기과학전공

(접수일: 2024년 11월 14일, 수정일: 2024년 11월 19일, 게재확정일: 2024년 11월 20일)

Characteristics and Risk Assessment of Winter Mid-level Precipitation Events in Central Korean Peninsula

Kwang-Hee Han, Baek-Min Kim*, NamKyu Noh, Hyun-Joon Sung, and Jieun Choi

*Division of Earth and Environmental System Sciences, Major of Environmental Atmospheric Sciences,
Pukyong National University, Busan, Korea*

(Manuscript received 14 November 2024; revised 19 November 2024; accepted 20 November 2024)

Abstract This study investigates the meteorological characteristics of mid-level precipitation during winter in the central Korean Peninsula, focusing on both their formation mechanisms and potential hazardous outcomes. Using ERA5 reanalysis and KMA observational data from 2000 to 2023, we first identified 18 reference events of mid-level precipitation provided by KMA for the period 2017~2023. Based on these reference events, we established objective criteria for mid-level precipitation and subsequently selected 100 additional cases from 2000~2023 that met these criteria. The analysis revealed distinct synoptic-scale pressure patterns, characterized by a westward-tilting system with mid-upper level (700-500 hPa) troughs west of the Korean Peninsula and surface lows developing in the initial stage. The vertical structure showed a clear contrast between dry lower layers (below 700 hPa) and moist mid-upper layers, with strong ascending motion observed between 700-300 hPa. Surface precipitation was recorded in only 36% of cases, with an average of 1.3 mm. Pattern correlation analysis between composite and individual cases showed high similarities (> 0.9) at 700-500 hPa levels, confirming the consistency of synoptic patterns. With mean 925 hPa temperature at -0.4°C , freezing rain potential was particularly high near mountainous regions, including Mt. Jiri and Sobaek Mountains. This first systematic analysis of mid-level precipitation characteristics contributes to improving winter weather forecasting accuracy and establishing effective disaster prevention systems, particularly for transportation infrastructure vulnerable to freezing rain conditions.

Key words: Mid-level precipitation, Freezing rain, Synoptic patterns, Extreme weather

1. 서 론

한반도의 겨울철 평균 강수량은 84 mm로 연평균 강수량(1,305 mm)의 6%에 해당하며 계절별 강수량

중 가장 적은 값이다(KMA, 2022). 그러나 적은 강수량에도 불구하고 겨울철 강수 현상은 그 형태나 종류에 따라 심각한 재해로 이어질 수 있다. 행정안전부 재해연보(MOIS, 2023)에 따르면 2013~2022년 강설로 인한 연평균 피해액은 109억 원으로 전체 자연재해 피해액 중 세 번째로 많았다. 또한 액체형 강수가 과냉각 과정을 거쳐 지표면이나 구조물에 접촉 시 급격한 결빙을 일으키는 어는비(freezing rain; Brooks, 1920; Penn, 1957; Mahaffy, 1961; Stewart and King, 1987;

*Corresponding Author: Baek-Min Kim, Division of Earth and Environmental System Sciences, Major of Environmental Atmospheric Sciences, Pukyong National University, 45, Yongso-ro, Nam-gu, Busan 48513, Korea.
Phone: +82-51-629-6641, Fax: +82-51-629-6638
E-mail: baekmin@pknu.ac.kr

Martner et al., 1993; Rauber et al., 1994; Thomas, 1995; Zerr, 1995, 1997; Park and Byun, 2015) 현상은 항공기 착빙, 식목의 결빙, 전선 절단 등의 피해와 도로 표면에 극히 얇은 얼음막을 형성하는 이른바 ‘블랙아이스(black ice)’를 유발하여 심각한 사회적 문제를 초래한다(Kwon et al., 2015; Park et al., 2017). 한국도로교통공단(KoROAD)의 통계에 따르면 도로 결빙에 인한 사고발생률은 연간 지속적으로 증가하는 추세이다. 또한, 도로 결빙에 의한 사고발생률은 강설에 의한 사고 발생률의 약 2.15배에 달하고 인명 피해 측면에서도 연평균 55명의 사상자가 발생하여 강설 관련 사고보다 4배 높은 치명도를 가진다. 이렇듯 겨울철 강수 현상은 사회기반시설의 기능 저하, 교통체계의 마비 등 광범위한 사회경제적 과급효과를 유발하며, 특히 교통 인프라 분야에서 심각한 피해를 야기한다(Ho et al., 2023).

겨울철 강수로 인한 피해를 저감하기 위해 다방면으로 많은 연구가 수행되어 왔다. 특히 강설 발생 메커니즘의 근간이 되는 중관규모 기압계 패턴을 분석하고 이에 따른 지역별 강설 특성 및 발생 과정에 대한 연구가 광범위하게 진행되었다(Jhun et al., 1994; Cheong et al., 2006; Lee and Kim, 2008; Park et al., 2009; Lee et al., 2012; Nam et al., 2014; Lee and Min, 2018; Kim et al., 2019; Kim et al., 2021; Han et al., 2022; Ahn and Lim, 2023). 이와 더불어, 수치 모델을 활용한 강설 현상의 정량적 분석 및 예측성 향상을 위한 연구도 활발히 수행되었다(Lee and Lee, 2003; Lee and Kim, 2008; Choi and Lee, 2015; Lee and Min, 2018; Yeon et al., 2022).

한반도의 겨울철 강수에 대한 기존 연구들은 주로 지형 효과나 지상 기압계의 중관 패턴에 기인한 강수 현상 분석에 집중되어 있으며 대기 중층에서 발생하는 강수 현상에 대한 연구는 상대적으로 미진한 실정이다. 중층 강수는 일반적인 강수 현상과는 다른 독특한 메커니즘을 가진 현상이다. 중층 강수 현상은 대기 중층의 기압계 영향으로 발생하며, 지상이나 대기 하층에는 뚜렷한 강수 시스템이 존재하지 않으나 대기 중층에서 상층으로 형성된 구름에서 강수가 발생하는 특징을 보인다(KMA, 2020). 이러한 특이성에도 불구하고 중층 강수에 대한 학술적 연구는 매우 제한적이다. 현재까지 기상청에서 발행한 『Why? How! 겨울 예보』 가이드에서 중층 강수에 대한 정의와 사례 분석 이외에 체계적인 연구는 거의 수행되지 않았다.

중층 강수는 그 특성상 지상 관측에서 여러 제약이 따른다. 강수량이 5 mm 미만으로 미미하거나 지상 관측소에서 관측되지 않는 경우가 빈번하며(KMA, 2020), 대기 중층에서 발생하는 현상의 특성상 기존의 지상 관측망으로는 그 실체를 정확히 포착하기 어렵

다. 이러한 관측의 한계는 중층 강수 현상에 대한 체계적인 연구와 예보 정확도 향상에 상당한 제약으로 작용해 왔다. 그러나, 중층 강수가 야기할 수 있는 잠재적 위험성은 주목할 만하다. 평지나 도시 지역에서는 그 영향이 제한적일 수 있으나, 산간도로나 고지대에서는 심각한 기상재해로 이어질 수 있다. 특히 겨울철 기온 조건하에서는 어느비로 발달할 가능성이 있으며, 이러한 현상은 산간 지역이나 고도가 높은 지역에서 더욱 빈번하게 발생할 수 있다. 따라서, 중층 강수 현상에 대한 체계적인 연구는 단순히 강수 예보의 정확도 향상을 넘어, 겨울철 위험기상 예측과 효과적인 방재 시스템 구축을 위한 과학적 기반을 제공한다는 점에서 중요한 의미를 지닌다.

본 논문은 겨울철 중층 강수의 기상학적 특성을 규명하고자 두개의 중층 강수 그룹을 선정하여 분석하였다. 첫 번째 그룹은 기상청으로부터 제공받은 최근 중층 강수 사례이며, 두 번째 그룹은 첫 번째 그룹을 기준으로 선정한 과거 사례이다. 이러한 분석을 위해 본 논문 다음과 같이 구성된다. 2장에서는 연구에 사용된 자료와 중층 강수에 대한 객관적인 기준을 수립하여 과거 발생했던 중층 강수 사례를 체계적으로 선정한다. 3장에서는 선정된 중층 강수 사례를 분석하여 중층 강수 발생 시의 기압계 구조와 대기 연직 구조의 특징을 고찰하고자 한다. 또한 중층 강수가 어느비와 같은 겨울철 위험기상으로 발달할 수 있는 가능성을 평가한다. 4장에서는 전체적인 연구 내용을 요약하고 연구의 결론을 제시한다. 이러한 연구는 기존에 주목받지 못했던 중층 강수의 특성을 체계적으로 분석함으로써, 겨울철 위험기상 예보의 정확도 향상과 효과적인 방재 시스템 구축에 기여할 것으로 기대된다.

2. 자료 및 사례 선정

2.1 자료

본 연구는 유럽중기예보센터(European Center for Medium-range Weather Forecasts; ECMWF)에서 제공하는 ERA5 (ECMWF Reanalysis v5) 재분석 자료를 주 분석 자료로 활용하였다(Hersbach et al., 2020). ERA5는 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 의 공간 해상도와 37개 등압면의 연직 해상도를 제공하며 1시간 간격의 시간 해상도를 가진다. 관측자료로는 기상청 제공의 중관일기도와 지상 관측망 자료를 활용하였다. 지상 관측 자료는 중관기상관측장비(Automated Synoptic Observing System; ASOS)수집된 자료이다. 또한 기상레이더센터에서 제공하는 Constant Altitude Plan Position Indicator (CAPPI) 영상을 통해 강수 시스템의 구조를 분석하였다.

2.2 중층 강수 사례 선정

2.2.1 기준사례 및 중층 강수 임계값 산출

중층 강수 현상은 강수 현상의 하나의 메커니즘으로 관측시에는 일반 강수 현상과 구분하여 기록되지 않는다. 또한, 강수량이 적거나 지상 관측소에서 강수가 관측되지 않기도 한다. 이러한 특징으로 인해 관측표를 활용하여 과거 중층 강수 사례를 직접 식별하고 분석하기에는 상당한 어려움이 있다. 본 연구에서는 이러한 한계를 극복하기 위해 중층 강수 연구의 기본 사례로 2017년~2023년 사이 서울 및 경기 지역에서 발생한 겨울철 중층 강수 사례(이하 기준사례; reference cases)를 기상청으로부터 제공받아서 연구를 시작하였다. 먼저 기준사례의 수도권 중층 강수 발생 시간을 선정하였다. 발생 시간은 레이더 CAPPI 영상을 기반으로 서울 및 경기지역(37:38°N, 126.25:127.5°E)에 CAPPI 3.0 (3 km)에 강수 에코가 처음으로 탐지되는 시간으로 하였다. 이후 기준사례를 기반으로 중층 강수의 객관적인 기준을 수립하고 임계값을 산출하여 과거 사례를 체계적으로 선정하였다. 중층 강수 임계값은 기상청에서 제공해준 기준사례의 표준등압면(925, 850, 700, 600, 500, 400, 300 hPa)의 층 별로 계산된 온도-이슬점온도차($T - T_d$)인 습수를 기반으로 산출하였다. 임계값 산출 과정은 다음과

같다: 1) 임계값은 경기지역에 대해 공간 평균된 표준등압면의 층별 습수를 기준으로 선정한다. 2) 습수 계산에는 ERA5 재분석 자료를 기초 데이터로 활용한다. 3) 각 등압면에서 얻어진 기준사례의 습수 분포를 박스플롯(box plot)으로 분석한다(Fig. 1). 4) 박스플롯의 최소값과 최대값 사이의 범위를 중층 강수의 임계값으로 정한다. 선정 기준은 7개의 표준등압면 모두에서 습수가 임계값(최솟값~최댓값)에 포함되면 중층 강수로 선정한다. 5. 중층 강수의 특징인 대기 하층의 건조 조건을 고려하기 위해 925 hPa 고도에서의 습수 분포의 최소값을 3으로 조정하였다(Fig. 1b). 본 연구에서 사용한 박스플롯의 최대값과 최소값은 제2사분위수(Q2)와 제3사분위수(Q3)를 기준으로 사분위수 범위(InterQuartile Range; IQR)의 1.5배에 해당하는 범위 내에서 가장 근접한 값으로 설정하였다(Fig. 1a). IQR의 1.5배를 기준으로 사용한 것은 Tukey (1977)가 제안한 방법으로, 정규분포를 따르는 데이터의 약 99.3%를 포함하는 통계적으로 유의미한 범위에 해당한다. 이러한 과정을 통해 산출된 각 표준등압면 고도별 중층 강수 임계값은 Table 1에 제시하였다. 이 임계값은 중층 강수 사례 선정을 위한 객관적 기준으로 활용되었다.

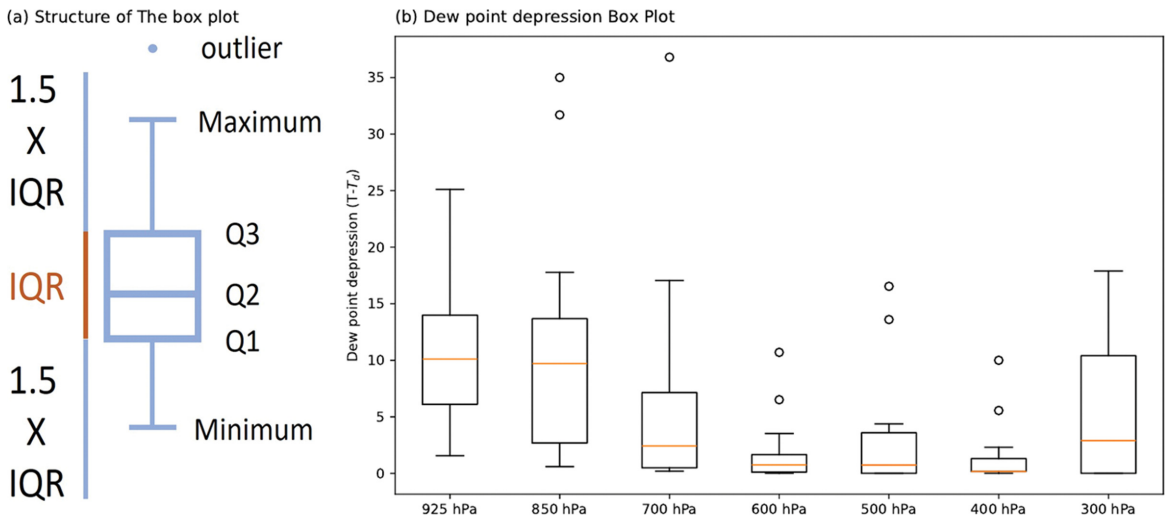


Fig. 1. (a) Structure of the box plot and (b) box plot of mid-level precipitation cases at Standard pressure Levels derived from reference cases. The minimum and maximum values of the box plot represent the threshold criteria at each height.

Table 1. Threshold values by layer for mid-level precipitation cases derived from reference cases.

	925 hPa	850 hPa	700 hPa	600 hPa	500 hPa	400 hPa	300 hPa
Minimum	1.55->3.0	0.60	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00
Maximum	25.10	17.78	17.05	3.53	4.37	2.30	10.40

2.2.2 확장사례

중층 강수의 두 번째 그룹은 확장사례(extended cases)이다. 이는 기준사례를 기반으로 생성된 중층 강수 임계값을 활용하여 선정하였다. 본 연구의 중층 강수 사례 선정은 다음과 같은 방법으로 수행되었다. 1) 분석 기간은 2000년부터 2023년까지의 겨울철(12월, 1월, 2월; DJF)이며 분석 기간에 대해 1시간 간격으로 사례를 선별하였다. 2) 선별에는 ERA5 재분석 자료를 기초로 자료를 활용하였다. 3) 1시간 단위로 경기지역에 대해 공간 평균된 표준등압면 층별 습수를 계산하였다. 4) 앞서 산출한 중층 강수 임계값을 기준으로 7개의 층 모두에서 표준등압면의 습수가 임계값 내에 포함되는 경우를 중층 강수 사례로 선정하였다. 5) 24시간 이내에 중복으로 발생한 사례의 경우, 최초 발생한 사례만을 분석 대상으로 채택하였다.

선정된 중층 강수 사례의 타당성을 검증하기 위해 경기지역 관측소의 구름 관측 자료를 활용하였다. 검증에는 서울(108), 동두천(98), 파주(99), 인천(112), 수원(119), 이천(203) 등 6개 관측소의 ASOS 관측자료가 사용되었다. 중층 강수 사례로 선정된 시점을 기준으로 전후 3시간 이내에 해당 관측소들 중 어느 한 지점에서 중·하층 운량이 4옥타(okta) 이상으로 관측되지 않은 경우 해당 사례는 분석 대상에서 제외되

었다. 이는 중층 강수 현상이 실제로 발생했는지를 객관적으로 확인하기 위한 과정으로 사례 선정의 정확도를 높이기 위해 적용하였다. 기준사례의 합성장과 개별 확장사례 간의 기압계에 대해 pattern correlation 분석을 수행하여 두 그룹 간의 유사성을 정량적으로 평가하였다. pattern correlation은 피어슨 상관계수(Pearson correlation coefficient)를 기반으로 한 통계적 지표로, 두 공간장 간의 선형적 유사성을 나타낸다. 이를 통해 본 연구에서 설정한 임계값의 타당성과 사례 선정의 적절성을 검증하였다.

3. 결 과

3.1 중층 강수 Case Study

Figure 2는 2019년 1월 12일 0300 KST에 발생한 수도권 중층 강수 사례의 일기도이다. 해당 사례는 중층 강수의 기준사례에 대한 종관 분석 결과 중 중층 강수의 종관 기압계 배치와 강수 특징이 명확하게 나타나는 사례이다. 해당 사례의 500 hPa의 일기도에서 한반도를 기준으로 서쪽 지역인 요동반도와 발해만을 지나 동중국 연안으로 기압골이 위치하고, 한반도 동해안에 기압능이 위치한다(Fig. 2a). 700 hPa에서는 기압골이 요동반도와 산둥반도 동쪽으로 위치하며, 기

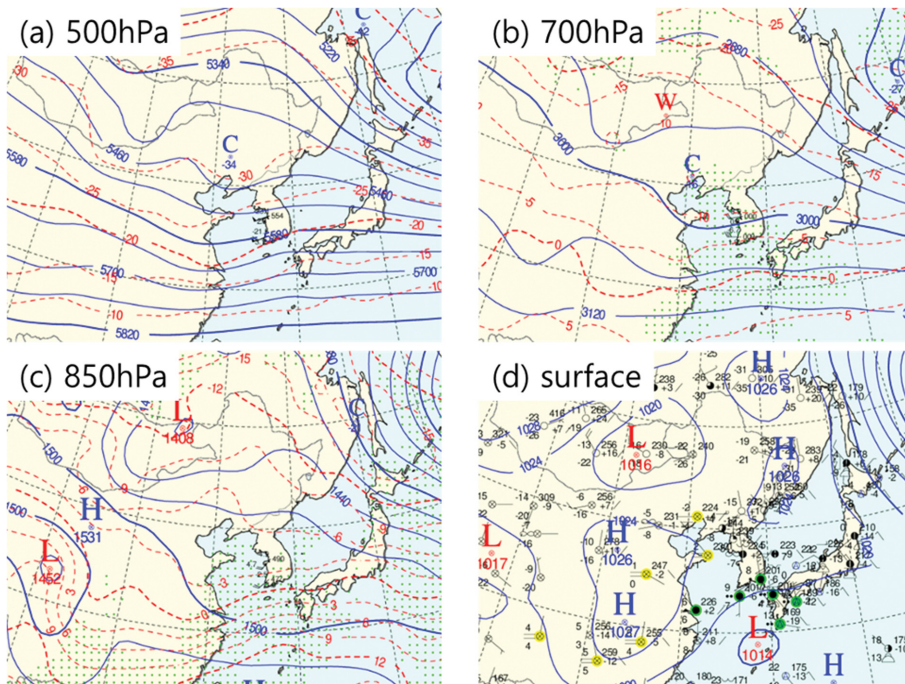


Fig. 2. Synoptic charts over East Asia at the time of mid-level precipitation on 0300 KST, January 12, 2019. (a) 500 hPa, (b) 700 hPa, (c) 850 hPa, and (d) surface chart.

Korea Meteorological Administration

Skew T - Log P DIAGRAM

Issued at 18UTC 11 Jan 2019
Valid : 03KST 12 Jan 2019

OBS ANALYSIS

2019.01.11.21KST		2019.01.12.03KST	
1000 hPa Air-mass	1000 hPa Air-mass		
Temp. 2.4 °C	Temp. 2.2 °C		
Humi. 44 %	Humi. 47 %		
Wind. 355/006 KT	Wind. 000/000 KT		
FL (gpm) 579	FL (gpm) 735		
850EQT (K) 287	850EQT (K) 287		
T/P (gpm) 9978	T/P (gpm) 13579		
LCL (gpm) 860	LCL (gpm) 744		
CCL (gpm) 2690	CCL (gpm) 2069		
LFC (gpm) ----	LFC (gpm) ----		
HEL (gpm) ----	HEL (gpm) ----		
M/W (gpm) 11206	M/W (gpm) 12283		
SSI(850-500) 16.3	SSI(850-500) 15.0		
SSI(925-500) 19.2	SSI(925-500) 16.6		
SSI(925-700) 9.2	SSI(925-700) 10.0		
LI (000-500) 20.1	LI (000-500) 18.4		
LI (925-500) 19.2	LI (925-500) 16.7		
K-Index -11	K-Index 8		
TT-Index 22	TT-Index 32		
SRH (m2/s2) 149	SRH (m2/s2) 178		
CAPE (m2/s2) ----	CAPE (m2/s2) ----		
CIN (m2/s2) ----	CIN (m2/s2) ----		
TPW(mm) 7.4[152%]	TPW(mm) 10.2[209%]		
Cloud BKN	Cloud BKN		
Upper 361 4	Upper 449 3		
Middle 633 2	Middle 674 1		
Lower 889 6	Lower 850 5		
THCKN (10-7) 2821	THCKN (10-7) 2805		
CVT Temp. 18.4	CVT Temp. 12.6		
Max Temp. 12.5	Max Temp. 9.3		
Min Temp. 0.6	Min Temp. -2.4		

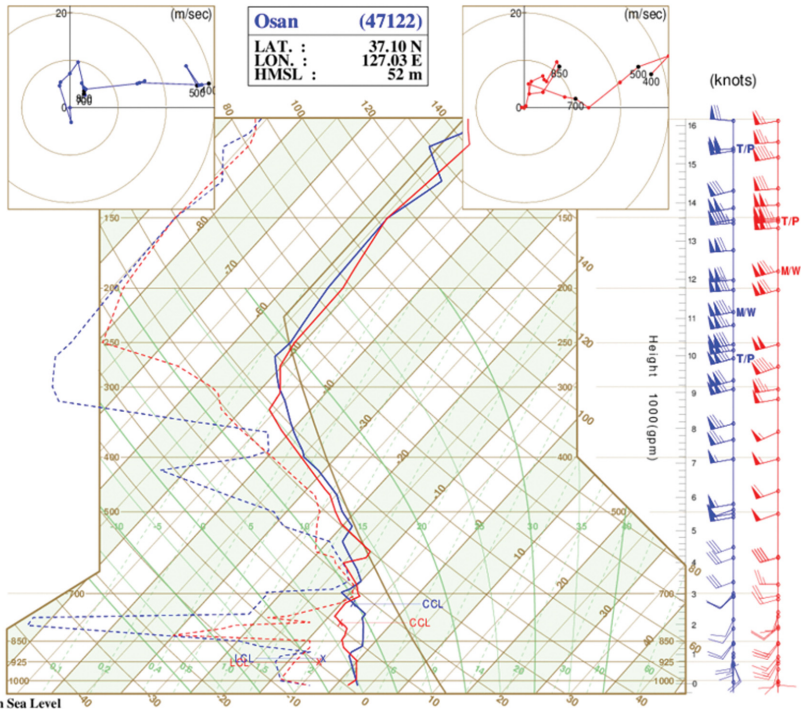


Fig. 3. Skew-T log-P diagram for Osan at the time of mid-level precipitation on 0300 KST, January 12, 2019. The red solid line represents the temperature at 0300 KST, and the red dashed line indicates the dew point temperature. The blue lines represent data from 6 hours earlier.

압능은 동해상에 위치한다(Fig. 2b). 850 hPa의 기압 골은 화중 지역 동쪽으로 위치하며, 한반도 상공에는 500 hPa와 700 hPa에 비해 기압골이 약하게 발달하였다(Fig. 2c). 지상 일기도에서는 한반도 기준 먼 남쪽해상인 오키나와 부근에 저기압이 위치한다(Fig. 2d). 이러한 중관 기압계 구조 하에서 한반도 남부 지역은 지상 저기압의 직접적인 영향권에 들어 강수 현상이 발생하였다. 반면 서울 및 경기 지역의 경우 지상 저기압의 영향권 외곽에 위치하고 850 hPa의 기압골 또한 약하게 발달함에 따라 하층의 강제력은 제한적이었다. 대신 700 hPa와 500 hPa 고도의 중상층 기압골이 주요한 강제력으로 작용하여 중층 강수가 발생할 수 있는 중관 패턴이 형성되었다.

중층 강수 사례의 중관 특성은 대기의 연직 구조에서도 뚜렷하게 확인된다. Figure 3은 2019년 1월 12일 0300 KST의 단열선도로 대기 연직 구조를 보여준다. 지상부터 700 hPa 고도까지의 하층대기에서는 큰 습수값이 관측되어 건조한 상태를 나타내는 반면, 700-600 hPa 구간과 500 hPa 부근에서는 뚜렷한 습윤층이 형성되어 있다. 이러한 연직 분포는 중·상층 기압

골의 영향권 내에 위치하고 있음을 시사한다.

레이더 관측 자료에서도 중층 기압골의 영향은 명확히 확인된다. Figure 4는 2019년 1월 12일 0300 KST의 레이더 CAPPI 영상으로, 700 hPa에 근접한 3,000 m 고도에서 서울 및 경기 중부지역에 걸쳐 넓은 지역으로 에코가 관측되었다(Fig. 4a). 반면, 고도가 낮은 2,000 m와 1,400 m에서는 해당 지역의 에코 분포가 현저히 줄어드는 특징을 보인다(Figs. 4b, c). 또한, 인천-창현을 연결하는 연직 단면도에서도 에코의 분포가 2-4 km 고도대에 집중되어 있음이 확인된다(Fig. 4d).

해당 관측 자료들은 본 사례가 전형적인 중층 강수 현상의 특징을 보여주고 있음을 나타낸다. 하층 기압계의 영향이 미약한 상황에서 중층 기압골의 영향으로 대기 중층에서 강수가 발생하는 독특한 강수 메커니즘이 작동하고 있음을 확인할 수 있다.

3.2 기준사례에서의 중층 강수 특징

Figure 5는 18건의 기준사례의 합성장이다. 이는 기준사례의 수도권 중층 강수 발생 첫 시간을 기준으로

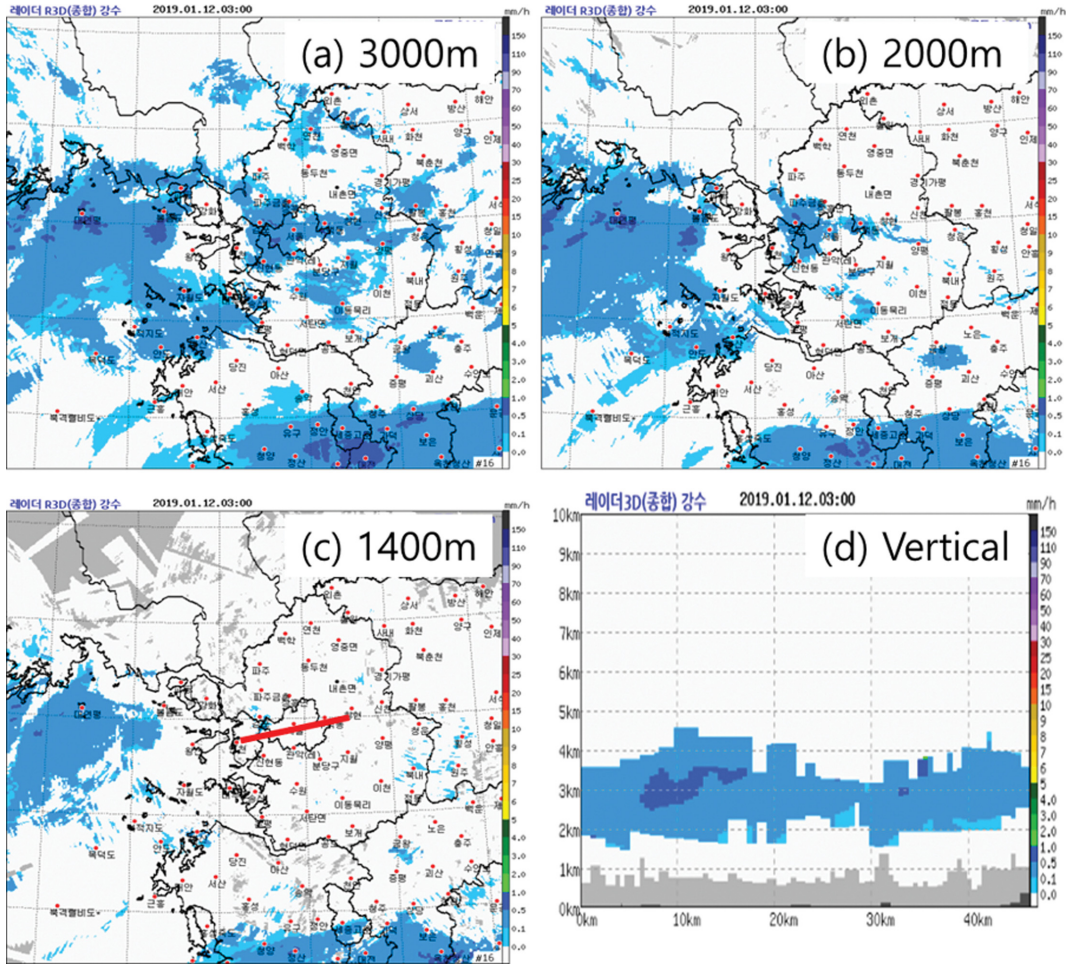


Fig. 4. CAPPI radar images at various altitudes at the time of mid-level precipitation on 0300 KST, January 12, 2019. (a) 3,000 m, (b) 2,000 m, (c) 1,400 m, and (d) vertical cross-section along the red line from Incheon to Changhyeon in (c).

합성하였다. 500 hPa 에서는 발해만 인근에 기압골이 위치하며 그 전면인 동해상에 기압능이 발달해 있다 (Fig. 5a). 700 hPa에서는 산둥반도와 요동반도를 걸쳐 기압골이 위치하고 동해상에 기압능이 자리잡고 있다. 700 hPa 기압계는 500 hPa의 기압계보다 동쪽에 위치하며 기압골은 더욱 남쪽으로 깊게 발달한 특징을 보인다(Fig. 5b). 500 hPa과 700 hPa 고도에서 한반도는 양의 소용돌이도 이류(Positive Vorticity Advection; PVA) 구역에 위치하여, 서울-경기 지역이 중층 기압골의 직접적인 영향권에 놓여있다. 반면, 850 hPa 고도에서는 중국 화중 지역에 뚜렷한 기압골이 있으며 동해와 일본 열도에 기압능이 위치한다. 이 기압골은 500 hPa과 700 hPa의 기압골보다 남동쪽에서 형성되어 한반도 중부지방보다 낮은 위도대에 위치한다. 특히 한반도 중부지방 부근에서는 지위고도 등고

선 간격이 넓어 기압 경도력이 약화되고 기압골의 영향이 미미한 특징을 보인다(Fig. 5c). 925 hPa 고도에서는 한반도 상공에 820 gpm 등고선을 기준으로 형성된 두 고기압 사이의 변형장이 위치한다. 이러한 변형장은 구름 발달을 촉진할 수 있으나 뚜렷한 기압골 발달과는 차별되는 특징을 보인다(Fig. 5d). 기준사례의 합성장에서 나타나는 연직 기압계 구조는 하층에서 상층으로 갈수록 북서쪽으로 치우쳐 있으며 서쪽 편향(westward tilting) 패턴을 보인다. 편향된 기압계 구조는 저기압 발달의 초기 단계에서 특징적으로 나타나는 구조이다. 지상에서는 상층 기압골의 남동쪽인 한반도 남쪽 해상에 저기압이 위치한다. 하지만, 발달 초기 단계로 인해 그 강도가 약해 한반도 남부와 일본 규슈 지방에만 제한적인 강수를 유발할 수 있는 구조이다. 따라서 서울 및 경기를 포함한 한반

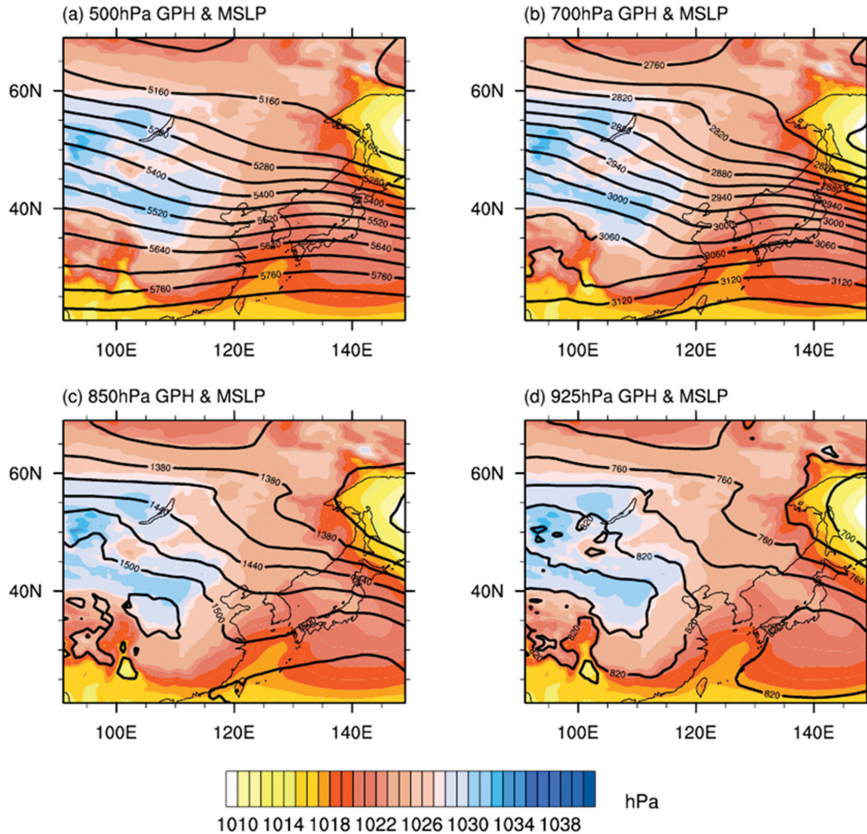


Fig. 5. Composite geopotential height and mean sea level pressure (MSLP) fields for mid-level precipitation reference cases. (a) 500 hPa geopotential height, (b) 700 hPa geopotential height, (c) 850 hPa geopotential height, and (d) 925 hPa geopotential height. The contours in each panel represent the geopotential height, and the shading corresponds to the MSLP.

도 중부지역은 지상 저기압의 직접적인 영향권 밖에 위치하며, 이는 앞서 분석한 2019년 사례와 동일하게 700 hPa과 500 hPa의 중층 기압골이 주요한 강제력으로 작용하고 있음을 시사한다.

중층 기압골의 영향은 Fig. 6에 제시된 서울 및 경기지역의 합성 단열선도에서 습윤층의 형태로 확인된다. 연직 기온 및 이슬점온도의 특징은 700 hPa을 경계로 상층과 하층에 뚜렷한 차이를 보인다. 700 hPa

이하의 하층대기에서는 습수가 3°C 이상인 건조층이 지배적이며 이는 하층 기압골이 한반도 중부지방보다 남쪽에서 형성됨에 따라 하층 대기의 발달이 제한적임을 반영한다. 반면, 700 hPa부터 300 hPa에 이르는 중·상층 대기에서는 습수가 3°C 이하인 습윤층이 관측된다. 이러한 중·상층의 습윤층 형성은 앞서 종관 분석에서 확인된 중층 기압골의 영향으로 이 고도대에서 강수 발달이 집중될 수 있는 구조임을 보여준다.

Table 2. Mean and standard deviation of pattern correlation and RMSE between the composite pressure patterns of reference cases and individual extended cases.

		500 hPa	700 hPa	850 hPa	925 hPa	MSLP
Pattern Correlation	Average	0.96	0.94	0.82	0.64	0.58
	Standard Deviation	0.03	0.05	0.16	0.25	0.20
RMSE	Average	85.64	58.78	52.28	54.04	8.08
	Standard Deviation	21.54	15.64	13.46	13.67	2.20

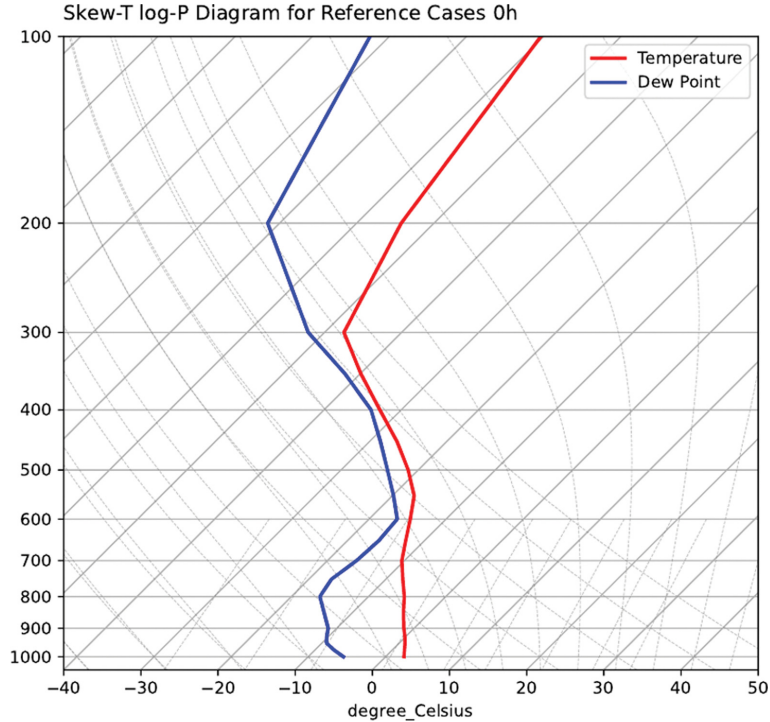


Fig. 6. Composite Skew-T log-P diagram for the Gyeonggi region based on mid-level precipitation reference cases. The red line represents the temperature, and the blue line represents the dew point temperature.

3.3 확장사례에서의 중층 강수 특징

중층 강수 임계값을 적용하여 2000년부터 2023년의 DJF 기간 동안 총 100건의 확장사례가 선정되었다. Table 2는 기준사례의 합성장과 100건의 확장사례 간 고도별 지위고도와 지상 기압계의 pattern correlation 및 RMSE의 통계값을 제시한다. 이는 임계값으로 선정된 확장사례(100건)가 기준사례(18건)로 분석된 중층 강수의 종관 특징을 잘 포함하고 있는지 검증하기 위한 자료이다. 500 hPa와 700 hPa 고도에서의 pattern correlation은 평균 0.9 이상, 표준편차 0.05 이하로 나타나 기준사례의 합성장과 매우 높은 일치도를 보였다. 850 hPa와 925 hPa 고도에서도 각각 평균 0.82(표준편차 0.16)와 0.64(표준편차 0.25)의 높은 상관성을 나타냈다. 해면기압의 경우 상층에 비해 다소 낮은 수준이나, 평균 0.58(표준편차 0.20)의 높은 상관성을 보였다. 이는 중층 강수 현상이 발생할 때 하층 기압계의 구조와 배치 등 특징도 중요하지만, 중층 기압계의 구조가 더 중요함을 의미한다. RMSE 분석에서 각층별로 50~80 범위의 값을 가진다. 이를 통해 두 패턴 간의 높은 유사성을 정량적으로 확인할 수 있다(Table 2). 이러한 통계적 검증 결과는 중층 강수 사례를 확장하는데 임계값은 적절한 기준

이 되며, 임계값을 통해 선정된 확장사례들이 기준사례의 종관 패턴과 중층 강수의 특징적인 기압계 구조를 잘 반영하고 있음을 시사한다.

Figure 7은 2000~2023년 DJF기간의 확장사례 100건에 대한 시간 단계별 합성장이다. 각 고도별 기압계의 시간 별 발달 양상을 중층 강수 발생 12시간 전(a, d, g, j), 발생 시점(b, e, h, k), 발생 12시간 후(c, f, i, l)로 구분하여 분석하였다. 500 hPa 합성장에서 중층 강수 발생 12시간전 중국 화북지방에 상층 기압골이 위치하며, 발생 시점과 12시간 이후에는 발해만 서쪽까지 기압골이 동진한다. 기압골의 강도는 약하며 이동 또한 비교적 느린 특징을 보인다. 기압능은 한반도 상공에서 점진적으로 동해상으로 이동하며, 한반도가 기압골과 기압능 사이에 위치하게 된다(Figs. 7a-c). 700 hPa 고도의 기압계는 500 hPa와 유사한 패턴을 보이나, 공간적으로 더 동쪽에 위치하며 남북 방향으로 더 깊게 발달한 특징을 보인다. 기압골은 발생 12시간 전 중국 화북지역에서 위치한다. 발생 시점에는 산둥반도 부근으로 이동하고 12시간 후에는 더욱 동진하여 발해만-중국 동안에 위치한다. 이때 전면의 기압능은 한반도에서 동해상으로 이동한다. 발생 시점에 500 hPa와 700 hPa 모두 한반도는 서쪽의

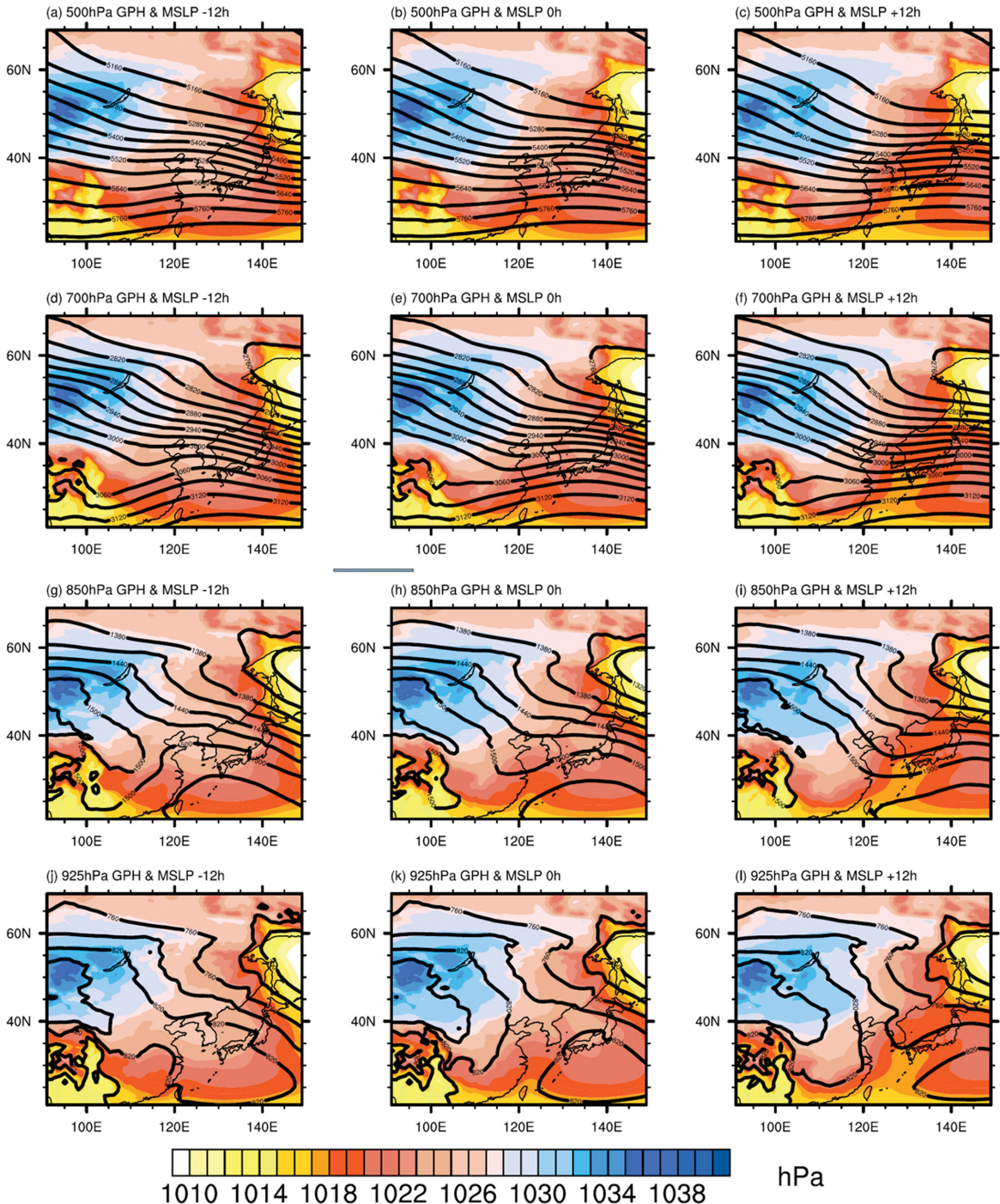


Fig. 7. Same as in Fig. 5, but for composite data of extended cases. The composite data are shown for 12 hours before the precipitation event (a, d, g, j), at the time of the event (b, e, h, k), and 12 hours after the event (c, f, i, l).

기압골과 동쪽의 기압능 사이에 위치하여 PVA 구역에 놓이게 된다(Figs. 7d-f). 850 hPa 고도의 기압골은

상층에 비해 현저히 남쪽에 위치한다. 발생 12시간 전에는 기압골이 뚜렷하게 발달하지 못하였고 한반도는

오히려 기압능의 영향권에 있다. 발생 시점에서 850 hPa 기압골은 양쯔강 부근에 위치하고 한반도 중부지방은 그 직접적인 영향권 밖에 위치한다. 발생 12시간 후에는 기압골이 한반도 상공의 북동에서 남서방향으로 형성되어 있다(Figs. 7g-i). 925 hPa 고도에서는 발생 12시간 전 한반도를 덮고 있던 고기압이 발생 시점에 일본 열도로 이동하면서 한반도 상공에는 변형장이 형성된다(Figs. 7j-l). 지상 기압계는 북서 편향된 상층 기압골의 전면에서 저기압이 발달하는 패턴을 보인다. 발생 12시간 전 대만에서 약하게 형성된 저기압은 시간 경과에 따라 점차 발달하며 오키나와를 거쳐 한반도 남쪽으로 북상한다. 이후 동해상을 지나 일본 열도로 이동하면서 더욱 발달된 저기압으로 강화되는 특징을 보인다. 이러한 중관 특징은 확장사례와 기준사례에서 거의 동일한 구조로 기압계 배치와 이동으로 나타난다. 해당 기압계 배치에서 중부지방은 하층 기압골의 영향은 적으며 중층 기압골이 주도하는 메커니즘의 강수가 발생한다.

Figure 8은 확장사례의 시간 흐름에 따른 경기지역 단열선도를 중층 강수 발생 전후 12시간 간격으로 분석한 결과이다. 발생 12시간 전의 대기 연직 구조는 500-300 hPa 사이인 상층으로 낮은 습수값이 관측되거나 하층 대기에서는 습수가 10 이상인 건조층이 존재한다(Fig. 8a). 발생 시점에서는 대기 중·상층으로 습윤역이 강화되어 700-300 hPa 구간에서 습수가 0에 근접한 포화 상태로 분석된다. 그러나 하층 대기 특히 800 hPa 부근에서는 습수가 여전히 10에 달하는 매우 건조한 조건이 지속되어 상·하층으로 뚜렷한 차이를 보인다(Fig. 8b). 발생 12시간 후에는 대기 전 층

에 걸쳐 고도별 습수 차이가 감소하는 특징이 나타난다(Fig. 8c). 이러한 연직 구조의 변화는 여러 역학 과정이 복합적으로 작용한 결과이다. 지상 저기압이 발달하며 접근함에 따라 하층 대기가 습윤화 되고, 중층에서 발생한 강수가 낙하 과정에 증발하여 하층으로 수증기를 공급한다. 또한, 기압골 후면에서 유입되는 한랭 건조한 공기로 인해 중·상층 대기의 습수가 증가하게 된다.

Figure 9는 확장사례의 중층 강수 발생 전후 24시간 동안의 경기지역 합성 연직 시계열(1,000-100 hPa) 분석 결과를 나타낸다. 표준화된 지위고도 아노말리의 시계열(Fig. 9a)에서는 전체 분석 기간 동안 500 hPa 이상에서 지속적인 양의 아노말리가 관측된다. 이는 겨울철 일반적으로 나타나는 시베리아 고기압과 같은 키 작은 고기압의 영향이 아닌 중층 기압골이 유입되기 이전에 기압골 전면에 발달한 기압능의 영향으로 분석된다. 600 hPa 이하에서는 시간 경과에 따라 하층에서부터 저기압성 아노말리가 점진적으로 강화되는 특징이 나타나며 이는 앞서 확인된 서쪽 편향 기압계의 이동 특성과 일치한다. 기온 아노말리 시계열(Fig. 9b)에서는 두 가지 주목할 만한 특징이 관찰된다. 첫째, 300 hPa를 경계로 상층의 음의 기온 아노말리와 하층의 양의 기온 아노말리가 뚜렷이 구분된다. 이는 기압골 유입 이전 발달한 기압능에 동반된 남풍계열의 온난 이류에 기인하는 것으로 해석된다. 둘째, 중층 강수 발생 시점을 기준으로 하층 대기의 현저한 기온 하강이 관측되는데 이는 기압골의 최근접 시점 이후 그 후면에서의 한랭한 북서기류의 유입을 반영한다. 연직운동의 시계열 분석(Fig. 9c)에서

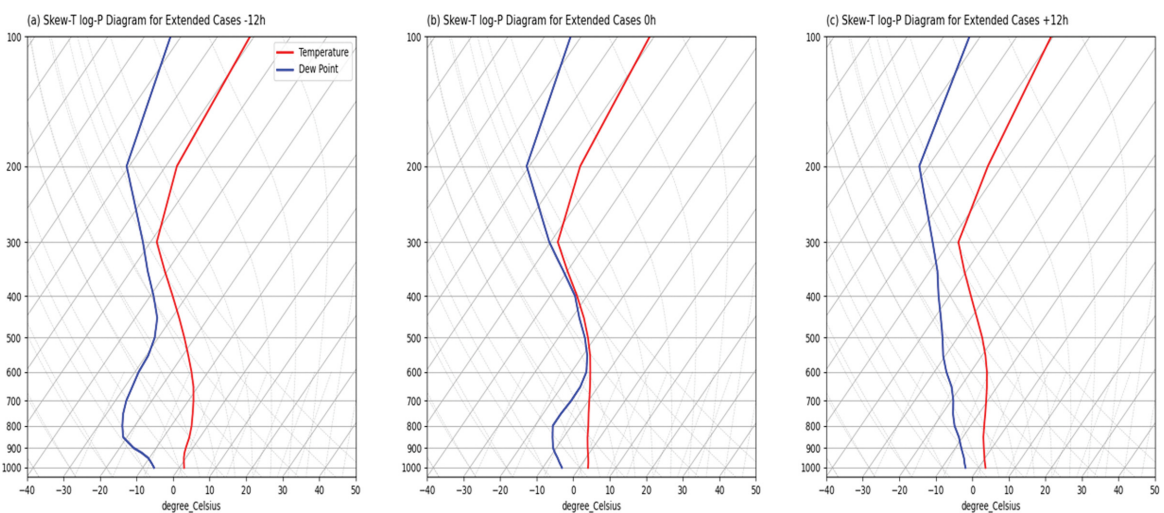


Fig. 8. Same as in Fig. 5, but for composite data of extended cases. The vertical composite data are shown for 12 hours before the precipitation event (a), at the time of the event (b), and 12 hours after the event (c).

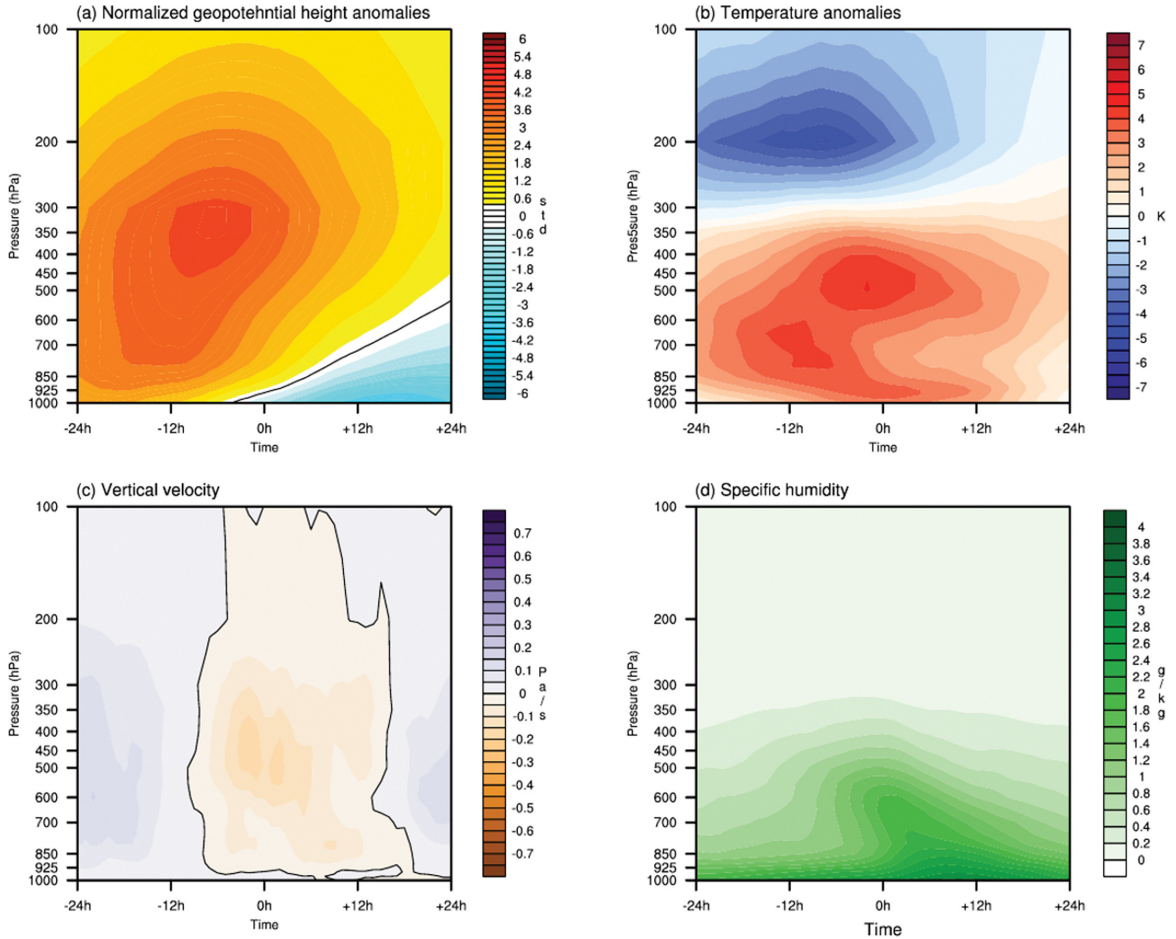


Fig. 9. Composite vertical time series for the Gyeonggi region based on extended cases. (a) Standardized geopotential height anomaly, (b) temperature anomaly, (c) vertical velocity (negative values indicate upward motion, and positive values indicate downward motion), and (d) specific humidity. The mean period for the geopotential height and temperature anomalies is 2000~2023.

는 기압골의 접근에 따른 상승운동의 발달과 후면에서의 하강운동으로의 전환이 뚜렷이 나타난다. 특히 700-300 hPa 고도대에서 강한 상승운동이 집중되는 것으로 이는 한반도 서쪽에 위치한 중·상층 기압골에 의한 PVA 지역에서의 강제상승을 반영한다. 비습 분석(Fig. 9d)에서는 중층 강수 발생 시점에 600 hPa 부근에서 높은 비습이 관측된다. 비폭 수평 이유에 대한 직접적인 정보는 제공하지 않으나 이러한 중층의 높은 수분 함량은 중층 기압골에 의한 불안정과 연관된 중층 강수 발생 메커니즘을 뒷받침한다.

기준사례와 확장사례의 종관 분석 결과는 중층 강수가 뚜렷한 종관규모 기압계 하에서 발생하는 특징적인 기상 현상임을 입증한다. 두 사례 그룹의 기압계 합성장은 매우 유사한 패턴을 보이며, 특히 대기

중층의 기압골이 핵심적인 강제력으로 작용하여 강수 현상을 유발하는 것으로 확인된다.

선정된 100건의 사례 중 경기지역 관측소 기준 36건에서 지상 강수가 관측되었으며 64건에서는 강수가 기록되지 않았다. 강수가 관측된 사례의 평균 강수량은 1.3 mm로 이는 매우 적은 수준의 강수량에 해당한다. 다만, 이러한 통계는 공식 기상관측소의 기록만을 반영한 것으로, 산간지역이나 관측망 외부에서 발생했을 가능성이 있는 강수는 포함하지 않은 제한적인 정보임에 유의할 필요가 있다.

3.4 중층 강수와 어는비

중층 강수의 적은 강수량에도 불구하고 특정 기온 조건하에서는 어는비로 발달하여 심각한 기상재해로

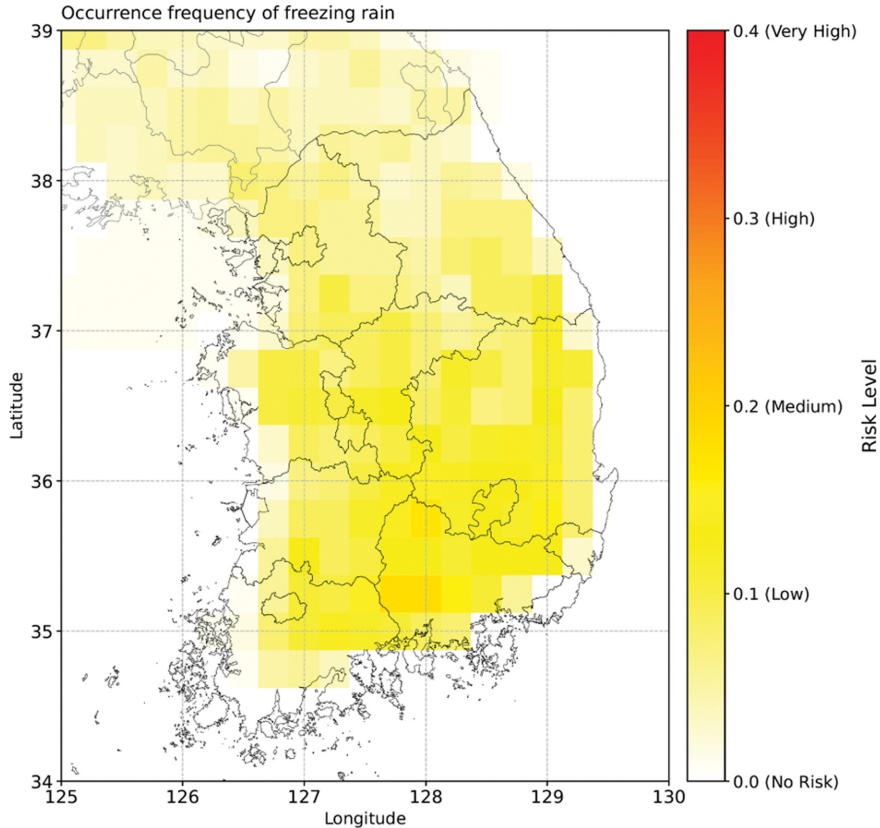


Fig. 10. Occurrence frequency of freezing rain in extended cases. The ratio represents the percentage of freezing rain occurrences among 100 mid-level precipitation cases at each grid point.

이어질 수 있다. 기상청의 어는비 예보 기준에 따르면 925 hPa에서 0°C 이상의 기온이 관측될 때 지상 기온에 따라 세 단계로 구분된다: 지상 기온 2°C 이하(1단계), 1°C 이하(2단계), 0°C 이하(3단계). 선정된 사례들의 경기지역 925 hPa 평균 기온은 -0.4°C로 나타났다. 이는 100건의 사례와 경기 지역 전체에 대한 평균값으로 개별 사례나 지역 별로는 0°C 이상의 기온 분포가 존재할 수 있어 어는비 발생 가능성이 있는 것으로 판단된다.

Figure 10은 기상청 어는비 예보 1단계 기준을 적용한 중층 강수 사례의 격자별 어는비 발생 빈도 분포를 나타낸다. 빈도 0.1은 100건의 사례 중 해당 격자에서 10회의 어는비 발생 조건이 충족되었음을 의미한다. 분석 결과, 중층 강수가 발생하면 남한 전역에 걸쳐 어는비 발생 가능성이 존재하며 특히 지리산 일대와 소백산맥 주변 지역에서 상대적으로 높은 발생 빈도가 관측되었다. 이는 중층 강수 현상이 단순한 강수로 그치지 않고 위험 기상으로 발달할 수 있음을 보여준다.

4. 요약 및 결론

본 연구는 한반도 겨울철 중층 강수의 기상학적 특성을 규명하기 위해 두 그룹의 사례를 분석하였다. 1) 2017~2023년 서울 및 경기지역에서 관측된 18건의 사례와 2) 이를 기반으로 도출된 임계값을 적용하여 2000~2023년 기간에서 선정된 100건의 사례이다. 두 사례 그룹 모두에서 일관된 종관 패턴이 확인되었으며, 이는 중층 강수가 특징적인 종관규모 기압계 하에서 발생하는 현상임을 입증한다. 주요 종관 특성으로는 대기 중층(700-500 hPa)에서 한반도 서쪽의 기압골과 동쪽의 기압능이 위치하지만 하층(850-925 hPa)에서는 기압골이 한반도 남쪽에 국한되어 중부지방에 대한 직접적인 영향이 제한되는 특징적인 기압 배치가 확인되었다. 전체적인 기압계는 서쪽 편향 구조를 보여 저기압 발달의 초기 단계임을 시사한다. 연직 구조 분석 결과 700 hPa를 경계로 상·하층의 특성이 뚜렷이 구분되었다. 중층 강수 발생 시 하층(700 hPa 이하)은 건조하고 중·상층(700-300 hPa)은 습윤한 특성

을 나타내는 독특한 구조가 관찰되었다. 특히 주목할 만한 점은 중층 강수가 겨울철 위험기상인 어느비로 발달할 수 있다는 것이다. 선정된 100건의 사례 중 36건에서 서울-경기지역 지상 관측소에 평균 1.3 mm의 강수가 기록되었으며 하층 기온 조건에 따라 어느비로 전이될 수 있음이 확인되었다. 본 연구의 의의는 기존에 체계적으로 연구되지 않았던 중층 강수의 특성을 중규모 기압계 패턴과 연직 구조 분석을 통해 명확히 규명하고 이와 연관된 어느비 발생 가능성을 정량적으로 제시했다는 점에 있다. 이러한 연구 결과는 겨울철 위험기상 예보 정확도 향상과 방재 시스템 구축을 위한 과학적 기반을 제공할 것으로 기대된다. 후속 연구에서는 중층 강수의 미세물리적 과정에 대한 심층 분석이 요구된다. 특히 중층에서 발생한 강수의 하층 건조 대기 통과 과정과 이에 따른 지상 강수 특성 변화에 대한 수치모델링 연구가 필요할 것으로 판단된다. 이를 통해 중층 강수의 발생 메커니즘과 예측 가능성에 대한 이해를 더욱 높일 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 논문의 개선을 위해 좋은 의견을 제시해 주신 두 분의 심사위원께 감사를 드립니다. 이 연구는 기상청 「위험기상 선제대응 기술개발사업」(RS-2023-00240346)의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Ahn, B.-Y., and B. Lim, 2023: A case study of snowfall event over Yeongdong region on March 1-2, 2021. *Atmosphere*, **44**, 119-134, doi:10.5467/JKES2023.44.2.119.
- Brooks, C. F., 1920: The nature of sleet and how it is formed. *Mon. Wea. Rev.*, **48**, 69-72, doi:10.1175/1520-0493(1920)48<69b:TNOSAH>2.0.CO;2.
- Cheong, S.-H., K.-Y. Byun, and T.-Y. Lee, 2006: Classification of snowfalls over the Korean peninsula based on developing mechanism. *Atmosphere*, **16**, 33-48.
- Choi, J.-W., and J.-G. Lee, 2015: A sensitivity study of WRF model simulations to nudging methods for A Yeongdong heavy snowfall event. *Atmosphere*, **25**, 99-115, doi:10.14191/ATMOS.2015.25.1.099.
- Han, K.-H., H.-Y. Ku, H.-J. Bae, and B.-M. Kim, 2022: Revisit the cause of the cold surge in Jeju Island accompanied by heavy snow in January 2016. *Atmosphere*, **32**, 207-221, doi:10.14191/Atmos.2022.32.3.207.
- Hersbach, H., and Coauthors, 2020: The ERA5 global reanalysis. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **146**, 1999-2049, doi:10.1002/qj.3803.
- Ho, C.-H., B.-G. Kim, B.-M. Kim, D.-S. R. Park, C.-K. Park, S.-W. Son, J.-H. Jeong, and D.-H. Cha, 2023: Review of the weather hazard research: Focused on typhoon, heavy rain, drought, heat wave, cold surge, heavy snow, and strong gust. *Atmosphere*, **33**, 223-246, doi:10.14191/ATMOS.2023.33.2.223.
- Jhun, J.-G., D.-K. Lee, and H.-A. Lee, 1994: A Study on the heavy snowfalls occurred in South Korea. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **30**, 97-115.
- Kim, B.-G., M.-G. Kim, T.-Y. Kwon, G.-M. Park, Y.-D. Han, S.-B. Kim, and K.-H. Chang, 2021: Observation and understanding of snowfall characteristics in the Yeongdong Region. *Atmosphere*, **31**, 461-472, doi:10.14191/ATMOS.2021.31.4.461.
- Kim, H.-M., S.-R. In, J.-H. Lee, C.-G. Park, and B.-J. Kim, 2019: Characteristics of meteorological elements change associated with heavy snowfall in the Yeongdong area, Gangwon province in the past five years. *J. Climate Change Res.*, **10**, 227-236, doi:10.15531/kscsr.2019.10.3.227.
- KMA, 2020: Why? How! Winter Weather Forecasting. Korea Meteorological Administration, 156 pp.
- KMA, 2022: Climatological Normals of Korea 1991-2020. Korea Meteorological Administration, 1080 pp.
- Kwon, H.-N., H.-R. Byun, and C.-K. Park, 2015: Case studies on freezing rain over the Korean peninsula using KLAPS. *Atmosphere*, **25**, 389-405, doi:10.14191/ATMOS.2015.25.3.389.
- Lee, J.-G., and J.-S. Lee, 2003: A numerical study of Yeongdong heavy snowfall events associated with easterly. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **39**, 475-490.
- _____, and Y.-J. Kim, 2008: A numerical simulation study using WRF of a heavy snowfall event in the Yeongdong coastal area in relation to the Northeastly. *Atmosphere*, **18**, 339-354.
- Lee, J.-G., and K.-H. Min, 2018: Analysis of the west coast heavy snowfall development mechanism from 23 to 25 January 2016. *Atmosphere*, **28**, 53-67, doi:10.14191/Atmos.2018.28.1.053.
- Lee, J.-H., S.-H. Eun, B.-G. Kim, and S.-O. Han, 2012: An analysis of Low-level stability in the heavy snowfall event observed in the Yeongdong region. *Atmosphere*, **22**, 209-219, doi: 10.14191/Atmos.2012.22.2.209.
- Mahaffy, F. J., 1961: The ice storm of 25-26 February 1961 at Montreal. *Weatherwise*, **6**, 241-244, doi:10.1080/00431672.1961.9930031.
- Martner, B. E., and Coauthors, 1993: A remote-sensing

- view of a freezing-rain storm. *Mon. Wea. Rev.*, **121**, 2562-2577, doi:10.1175/1520-0493(1993)121<2562:ARSSVOA>2.0.CO;2.
- MOIS, 2023: Disaster Yearbook 2022. Ministry of the Interior and Safety, 501 pp.
- Nam, H.-G., B.-G. Kim, S.-O. Han, C. Lee, and S.-S. Lee, 2014: Characteristics of easterly-induced snowfall in Yeongdong and its relationship to air-sea temperature difference. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **50**, 541-552, doi:10.1007/s13143-014-0044-3.
- Park, C.-K., and H.-R. Byun, 2015: Three cases with the multiple occurrences of freezing rain in one day in Korea. *Atmosphere*, **25**, 31-49, doi:10.14191/ATMOS.2015.25.1.031.
- Park, G.-Y., S.-H. Lee, E.-J. Kim, and B.-Y. Yun, 2017: A case study on meteorological analysis of freezing rain and black ice formation on the load at Winter. *J. Environ. Sci. Int.*, **26**, 827-836, doi:10.5322/JESI.2017.26.7.827.
- Park, J.-H., K.-E. Kim, and B.-H. Heo, 2009: Comparison of development mechanisms of two heavy snowfall events occurred in Yeongnam and Yeongdong regions of the Korean peninsula. *Atmosphere*, **19**, 9-36.
- Penn, S., 1957: The prediction of snow vs. rain. Forecasting Guide No. 2. *U.S. Weather Bureau*, 29 pp.
- Rauber, R. M., M. K. Ramamurthy, and A. Tokay, 1994: Synoptic and mesoscale structure of a severe freezing rain event: The St. Valentine's Day ice storm. *Wea. Forecasting*, **9**, 183-208, doi:10.1175/1520-0434(1994)009<0183:SAMSOA>2.0.CO;2.
- Stewart, R. E., and P. King, 1987: Freezing precipitation in winter storms. *Mon. Wea. Rev.*, **115**, 1270-1280.
- Thomas, M., and J. Marwitz, 1995: A procedure for inferring a detailed freezing rain sounding from NEXRAD and profiler data. *Preprints, 27th Conf. on Radar Meteorology, Vail, CO, Amer. Meteor. Soc.*, 351-352.
- Tukey, J. W., 1977: Exploratory Data Analysis. *Addison-Wesley, Reading, MA*, 688 pp.
- Yeon, S.-H., M.-S. Suh, J. Lee, and E.-H. Lee, 2022: Evaluation of predictability of Global/Regional Integrated Model System (GRIMs) for the winter precipitation systems over Korea. *Atmosphere*, **32**, 353-365, doi:10.14191/ATMOS.2022.32.4.353.
- Zerr, R. J., 1995: Wind and reflectivity signatures as obtained by a Doppler radar for a freezing-rain episode. *Preprints, 27th Conf. on Radar Meteorology, Vail, CO, Amer. Meteor. Soc.*, 414-415, doi:10.1175/1520-0450(1992)031<1350:DRWARS>2.0.CO;2.
- _____, 1997: Freezing rain: An observational and theoretical study. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **36**, 1647-1661, doi:10.1175/1520-0450(1997)036<1647:FRAOAT>2.0.CO;2.