2012년 겨울철 특별관측자료를 이용한 강수현상 시 대기 연직구조와 민감도 실험

이상민¹⁾ · 심재관¹⁾ · 황윤정²⁾ · 김연희^{2)*} · 하종철¹⁾ · 이용희¹⁾ · 정관영¹⁾

¹⁾기상청 국립기상연구소 예보연구과

²⁾응용기상연구과

(접수: 2013년 1월 25일, 수정: 2013년 3월 21일, 게재확정일: 2013년 4월 8일)

Vertical Atmospheric Structure and Sensitivity Experiments of Precipitation Events Using Winter Intensive Observation Data in 2012

Sang-Min Lee¹⁾, Jae-Kwan Sim¹⁾, Yoon-Jeong Hwang²⁾, Yeon-Hee Kim^{2)*},
Jong-Chul Ha¹⁾, Yong-Hee Lee¹⁾, and Kwan-Young Chung¹⁾

¹⁾Forecast Research Division, National Institute of Meteorological Research, KMA

²⁾Applied Meteorology Research Division, National Institute of Meteorological Research, KMA

(Received: 25 January 2013, Revised: 21 March 2013, Accepted: 8 April 2013)

Abstract This study analyzed the synoptic distribution and vertical structure about four cases of precipitation occurrences using NCEP/NCAR reanalysis data and upper level data of winter intensive observation to be performed by National Institute of Meteorological Research at Bukgangneung, Incheon, Boseong during 63days from 4 JAN to 6 MAR in 2012, and Observing System Experiment (OSE) using 3DVAR-WRF system was conducted to examine the precipitation predictability of upper level data at western and southern coastal regions. The synoptic characteristics of selected precipitation occurrences were investigated as causes for 1) rainfall events with effect of moisture convergence owing to low pressure passing through south sea on 19 JAN, 2) snowfall events due to moisture inflowing from yellow sea with propagation of Siberian high pressure after low pressure passage over middle northern region on 31 JAN, 3) rainfall event with effect of weak pressure trough in west low and east high pressure system on 25 FEB, 4) rainfall event due to moisture inflow according to low pressures over Bohai bay and south eastern sea on 5 MAR. However, it is identified that vertical structure of atmosphere had different characteristics with heavy rainfall system in summer. Firstly, depth of convection was narrow due to absence of moisture convergence and strong ascending air current in middle layer. Secondly, warm air advection by veering wind with height only existed in low layer. Thirdly, unstable layer was limited in the narrow depth due to low surface temperature although it formed, and also values of instability indices were not high. Fourthly, total water vapor amounts containing into atmosphere was small due to low temperature distribution so that precipitable water vapor could be little amounts. As result of OSE conducting with upper level data of Incheon and Boseong station, 12 hours accumulated precipitation distributions of control experiment and experiments with additional upper level data were similar with ones of observation data at 610 stations. Although Equitable Threat Scores (ETS) were different according to cases and thresholds, it was verified positive influence of upper level data for precipitation predictability as resulting with high

*Corresponding Author: Yeon-Hee Kim, 460-18, Shindaebang,
Dongjak-gu, Seoul 156-720, Korea.
Phone : +82-70-7850-6804, Fax : +82-2-834-5922
E-mail : kyh@kma.go.kr

improvement rates of 33.3% in experiment with upper level data of Incheon (INC_EXP), 85.7% in experiment with upper level data of Boseong (BOS_EXP), and 142.9% in experiment with upper level data of both Incheon and Boseong (INC_BOS_EXP) about accumulated precipitation more than 5 mm / 12 hours on 31 January 2012.

Key words: Intensive observation, Radiosonde, High impact weather, Observing system experiment

1. 서 론

지상 관측자료에 비해 상대적으로 공백이 많은 해상과 고층 관측자료의 이용은 태풍과 집중호우 등 위험기상의 발생과 발달에 대한 수치모델의 예측 성능을 향상시키고, 강수 구조의 역학적 메커니즘을 규명하는데 도움을 준다. 이에 따라 세계기상기구는 1일에서 2주의 시간 규모로 발생하는 위험기상 예측성 향상을 위한 THORPEX (The Observing system Research and Predictability EXperiment) 프로그램을 통해 고층 특별관측과 예측성 실험 연구를 주도하고 있으며, 지역적으로도 T-PARC (THORPEX Pacific Area Regional Campaign), TCS-08 (Tropical Cyclone Structure 2008), DOTSTAR (Dropwindsonde Observations for Typhoon Surveillance near the TAIwan Region), Palau 프로그램 등 북서 태평양을 중심으로 활발한 관측 프로그램을 통해 실험 및 연구들이 진행 중에 있다.

관측 프로그램들을 통해 관측된 고층 관측자료들은 자료동화 방법에 의해 수치모델에 적용하여 태풍의 진로와 강수 예측, 그리고 강수 구조의 역학적 메커니즘을 규명하는 데 사용되어 왔으며, 계절 별 위험기상을 예측하는데 있어 지금까지 많은 향상된 예측 결과를 얻었다. 최근 관측시스템 실험 (Observing System Experiment, OSE) 연구가 활발히 진행되고 있으며, 수치모델에서 고층 관측자료의 유무에 따른 예측강수량을 비교하는 방법으로, 고층 관측자료의 동화효과가 수치모델의 강수 예측에 미치는 영향을 검증할 수 있다 (Arnold and Dey, 1986; Hirschberg *et al.*, 2001). T-PARC 2008 기간 동안 일본 기상청은 태풍 Sinlaku에 대해 관측 시스템 실험을 수행하였으며, 태풍의 진로를 예측한 결과, 태풍이 전향하기 전 0~12시간 동안 20~30%, 전향 후 60~84시간 동안 10%가 향상되는 결과를 보였다 (Yamashita *et al.*, 2010). Chou *et al.* (2011)은 2008년 DOTSTAR과 T-PARC의 드롭윈드존데 자료를 이용하여 NCEP 모델을 통해 태풍의 경로 예측을 수행한 결과, 평균적으로 1~5일 경로예측 오차가 10~20% 감소하는 결과를 보였다. 또한 Wu *et al.* (2012)은 T-PARC 2008의 고층 자료를 이용하여 앙상블 칼만 필터를 적용한 WRF 모델을 통해 태풍 Sinlaku의 눈벽을 모의하였으며, 그 결과 구체적인 눈벽의 역학적 형성과 진행과정의 모의가 가능하였다. Chen (2011)은 DOTSTAR의 드롭윈드존데 자료를 이용하여 WRF 모델을 통한 2004년 태풍

Nida의 경로 예측에서 개선한 결과를 얻었다.

국내에서도 KORMEX (KORea Monsoon EXperiment), KEOP (Korea Enhanced Observing Program), ProbeX (PRedictability and OBServation EXperiment) 등 2000년 이후부터 지금까지 특별 고층관측과 예측성 실험 연구가 지속적으로 수행되고 있으며, 이를 이용한 다양한 연구가 진행 중에 있다. 전은희 등 (2009)과 Kim *et al.* (2010)은 태풍 Sinlaku와 Jangmi에 대해 드롭윈드존데 자료를 이용하여 태풍의 진로와 중심 기압을 예측하는데 있어 높은 향상률이 나타났고, Hwang *et al.* (2011)은 ProbeX 프로그램을 통해 수집된 해상관측 공백지역인 남, 서해상 관측자료를 이용한 OSE 연구에서 KLAPS-WRF 및 3DVAR-WRF 시스템을 통하여 초단기 및 단기의 강수 예측 성능이 향상됨을 보였다. 또한 여름철 강수 사례 분석 (김기훈 등, 2006), 장마철 강수 형태의 분류 (Won *et al.*, 2006), 2010년 호우 시스템의 대기 연직구조 (Kim *et al.*, 2012a)와 도시화 효과에 관한 연구 (Kim *et al.*, 2012b) 등 고층 관측자료를 활용한 위험기상 발생 메커니즘 연구도 활발히 진행되고 있다.

현재 국립기상연구소에서는 계절별로 발생하는 위험기상에 대한 예측성 향상을 위해 특별 고층관측을 주기적으로 수행하고 있으며, 2012년에도 1월 4일부터 3월 6일까지 겨울철 특별 고층관측을 실시하였다. 지금까지 고층 자료를 이용한 연구들은 강수와 태풍 등 여름철 위험기상에 관한 예측성 실험과 메커니즘을 분석하는데 초점이 맞추어져 있으며, 겨울철 대설이나 강수의 예측성 향상에 서, 남해안 고층관측 자료의 영향을 분석한 연구는 찾아보기 어렵다. 따라서 본 연구는 북강릉, 인천, 보성 지점의 고층관측 자료를 이용하여 겨울철에 발생한 강수사례의 종관 분포와 연직 구조를 분석하고 또한 서해안과 남해안 고층관측자료가 고해상도 수치모델의 겨울철 강수 예측성능 향상에 미치는 영향을 분석하기 위해 3DVAR-WRF 시스템을 구축하여 OSE를 수행하였다.

2. 특별 관측기간과 분석 방법 및 수치실험 설계

2.1. 2012년 겨울철 특별 관측

2012년 겨울철 특별관측은 Table 1과 같이 1월 4일부터 3월 6일까지 63일간 수행되었으며, 본 연구는 3

Table 1. Descriptions of winter intensive observation in 2012.

Station number	Station name	Winter intensive observation period	Observation time	Observation number	Missing number
47104	Bukgangneung	04 January ~ 06 March, 2012 (63 days)	0000, 0600, 1200, 1800 UTC	108	18
47112	Incheon			109	17
47258	Boseong			115	11

개 지점 (북강릉, 인천, 보성)의 라디오존데 자료를 이용하였다. 사용된 변수는 존데의 상승에 따른 고도 별 온도, 기압, 노점온도, 상대습도, 풍향, 풍속자료가 사용되었다. 관측주기는 일 2회를 기본으로 위험기상 발생 시 관측주기는 6시간 간격으로 관측되었다. 본 연구에서는 일 2회 (0000, 1200 UTC) 자료만을 이용하였으며, 총 126회 관측을 기준으로 지점별 결측 일을 제외하면 북강릉, 인천, 보성의 관측횟수는 각각 108, 109, 115회이다.

2.2. 수치실험 설계

고층 관측자료를 이용하여 관측시스템 실험을 수행하기 위해 WRF/ARW 3.1.1 버전을 이용하였다. 수치적분 및 예측시스템의 계산 영역은 한반도 중심의 영역으로 동서와 남북으로 격자 141×161 의 12 km 해상도이며 연직으로는 40층으로 모형의 꼭대기 층은 50 hPa 이다 (Table 2). 경계층 물리과정은 YSU (Yonsei University) 방법 (Hong and Pan, 1996), 격자규모 구름물리 방법은 WSM 6-class graupel (Hong and Lim, 2006) 방법, 적운대류 모수화는 Kain and Fritsch (Kain, 2004) 방법, 그리고 복사는 RRTM (Rapid Radiative Transfer Model) 모수화 방법 (Mlawer *et al.*, 1997)을 이용하였다. 관측자료의 동화를 위해서 WRFDA (WRF Data Assimilation) 3.1.1 버전의 3DVAR (3D Variational Data Assimilation) 방법을 이용하였다. 실험의 배경장은 기상청 현업 전지구 통합 모델 UM (Unified Model)

분석장이 이용되었으며, 기본 관측자료는 GTS (Global Telecommunication System)를 통해 들어오는 지상과 상층 관측자료, 위성자료 등으로 기상청 현업에서 사용되는 것과 동일하다.

3DVAR-WRF 시스템은 UM 자료를 초기 및 경계장으로 이용하여, WRF를 6시간 동안 적분하여 생산된 예보장을 배경장으로 관측 자료와 섞어 분석장을 생산하였다. 이 분석장을 초기자료로 사용하고 UM 자료를 경계자료로 사용하여 다시 72시간 동안 WRF로 예측하고 그 중에서 6시간 예측장을 그 다음 6시간 3DVAR 분석을 위한 초기 추정치로 이용하는 방법으로 6시간 간격의 분석 및 예측 시스템을 구축하였다. 배경오차 공분산은 KWRF 모델에 사용되는 자료 (2011년 12월과 2012년 1월의 2개월 자료)를 이용하였다.

2.3. 사용된 자료 및 산출 방법

본 연구에서는 한국 기상청 88개 관측지점의 시간당 강수량 자료와 (Fig. 1), NCEP/NCAR 재분석 자료의 고도별 (1000-300 hPa) 온도, 지위고도, 상대습도, 오메가, 바람 자료를 사용하였다. 또한 라디오존데 자료를 이용하여 산출된 가강수량과 불안정 지수가 이용되었다.

가강수량은 지표면에서 대류권 꼭대기 층까지의 모든 수증기가 응결하여 비로 내렸을 때의 양으로, Eq. (1)과 같이 고도별 비습의 합으로 표현된다.

Table 2. Descriptions of WRFDA v3.1.1 and WRF/ARW 3.1.

Data Assimilation System WRFDA v3.1.1		Forecast Model WRF/ARW 3.1	
Method	3DVAR	Resolution	12 km (141×161)
Resolution	12 km (141×161)	Forecast time	72 hours
Assimilation window	3 hours	Initial & boundary condition	UM Forecast field
		Microphysics scheme	WSM6
		Radiation scheme	Dudhia/RRTM
		Physical Process	Cumulus parameterization
			Kain-Fritsch
			Land-surface model
			Noah LSM
			PBL scheme
			YSU

Fig. 1. Distribution of 88 observation stations in Korea Meteorological Administration. Closed circles denote radiosonde observation stations during winter intensive observation period in 2012.

$$PW = \frac{1}{g} \int_0^{p_s} q \, dp \quad (1)$$

여기서, PW는 가강수량, g (9.8067 m/s^2)는 중력가속도, q 는 비습, p_s 는 존데의 마지막 관측 고도이다. 라디오존데 자료를 이용하여 가강수량을 계산할 경우는 Eq. (2)와 같이 사다리꼴 원칙 (trapezoidal rule)으로 계산할 수 있다.

$$PW = \frac{1}{2g} \sum_{i=1}^{n-1} (q_i + q_{i+1})(p_i - p_{i+1}) \quad (2)$$

$$q = \frac{\alpha}{1 + \alpha} \quad (3)$$

$$\alpha = \varepsilon \frac{e}{p - e} \quad (4)$$

$$e = e_s \times rh \quad (5)$$

$$e_s = 6.11 \times 10^{\frac{aT}{T+b}} \quad (6)$$

여기서, q 는 비습, p 는 기압 (hPa), α 는 혼합비, e 와 e_s 는 각각 현재수증기압과 포화수증기압, rh 는 상대습도를 나타내고, a (7.45)와 b (235)는 상수이다. 포화수증기압은 Tetens의 경험식에 따라 기온과 Eq. (6)과 같은 관계를 가진다 (Tetens, 1930). 라디오존데는 10 hPa까지 비양하나 대류권 꼭대기 층의 경우 수증기량이 매우 희박하고, 습도 관측 센서는 -40° 이하에서 실제적으로 신뢰성이 낮으므로 (Elliot and Gaffen, 1991) 본 연구에서는 상층을 300 hPa까지로 제한하였다.

불안정 지수는 Cross Totals (CT), Total Totals (TT), Severe Weather Threat (SWEAT)로 3개의 지수가 이용되었으며 각각 지수 별 정의와 계산식은 다음과 같다. CT는 Eq. (7)과 같이 계산이 되며, 하층 수증기와 중층 기온으로 만들어진 지수로 뇌우를 예측할 수 있는 간단한 지수이다 (Miller, 1967).

$$CT = T_{850} - T_{500} \quad (7)$$

T_{850} 은 850 hPa 노점온도이고, T_{500} 은 500 hPa 온도를 나타낸다. TT는 하층 대기의 기온이 고려되지 않는 CT를 보완하여 뇌우의 범위와 강도를 예측하기 위해 개발된 지수로 (Miller, 1972) Eq. (8)과 같고, 850 hPa와 500 hPa의 기온차이가 추가되어 대기 중, 하층 불안정 판단이 가능하다.

$$TT = VT + CT \quad (8)$$

$$VT = T_{850} - T_{500} \quad (9)$$

T_{850} , T_{500} 은 각각 850, 500 hPa 온도를 나타낸다. SWEAT는 Eq. (10)과 같이 계산되며, 뇌우 발달과 관련된 CT와 TT를 개선한 지수로, 평범한 뇌우보다는 격렬한 폭풍과 토네이도를 예상하기 위해 고안되었다. 850 hPa와 500 hPa 풍속 향을 추가하여 대기 중, 하층 풍속 차이와 바람시어가 고려되어 뇌우와 함께 돌풍을 예상할 수 있다 (기상청, 2011a).

$$SWEAT = 12 \times T_{850} + 20 \times (TT - 49) + 2 \times V_{850} + V_{500} + 125m(\sin(\Delta V_{850-500}) + 0.2) \quad (10)$$

T_{850} 은 850 hPa 노점온도, V_{850} , V_{500} 은 850, 500 hPa 풍속, $V_{500-850}$ 은 500, 850 hPa 풍향의 차이를 나타낸다. 각각 불안정 지수 별 뇌우 발생에 대한 강도 분류는

Table 3. Intensity classification of thunderstorm occurrence in three stability indices.

INDEX	Intensity of Thunderstorm			
	Possible TS	Slight chance of severe TS	Moderate chance of severe TS	Strong chance of severe TS
CT	16~18	18~22	≥ 22	
TT	42~48	48~54	54~60	≥ 60
SWEAT	-	≥ 250	≥ 300	≥ 400

Table 3와 같다.

3. 강수 현상 시 종관 분포와 연직 구조

3.1. 위험기상 사례 선정과 지점별 일강수량 분포

특별관측기간 동안 발생한 강수 사례들 중에서 강수량이 많거나 강설이 발생한 4개의 사례를 선정하고 강수 발생 시 종관 분포와 연직 구조를 분석하였다. 선정된 4개 사례들은 Table 4와 같이 1월 19, 31일, 2월 25일, 3월 5일이다. 각각 사례의 88개 지점 별 강수 분포를 보면 (Fig. 2), 첫 번째 사례 (1월 19일)는 경기도와 일부 지역을 제외하고 강수가 관측되었으며, 특히 동해안을 중심으로 강수량이 많았다. 눈은 대관령지역에서만 관측되었다. 두 번째 사례 (1월 31일)는 경남 지역을 제외하고 전국적으로 강수가 발생했으며, 서해, 경기, 동해안 지역에는 눈이 관측되었다. 세 번째 사례 (2월 25일)는 경기, 경남 지역을 제외하고 강수가 발생했으며, 강원도 일부 지역에서는 눈이 관측되었다. 네 번째 사례 (3월 5일)는 전국적으로 강수가 발생했으며, 4개 사례 중 가장 많은 강수량 분포를 보였다. 그러나 눈은 대관령지점에서만 관측되었다. 특별관측지점의 강수량 분포는 북강릉지점의 경우 사례 3에서 14.0 cm의 눈이 관측되었고, 인천지점은 사례 2에서 눈이 4.6 cm 관측되었으며, 보성지점은 사례 4에서 강수량 19.5 mm로 가장 많은 강수가 관측되었다 (Table 4).

3.2. 강수 현상 시 종관 분포

선정된 4가지 강수 사례들에 대한 종관분석을 위해, Fig. 3에 6시간 간격의 지위고도 (1000, 500 hPa)와 300 hPa u-성분 풍속을, Fig. 4에 35°N 기준으로 850과 500 hPa 고도의 상대습도와 오메가 (상승속도)의 Hovmoller plot을, Fig. 5에 127.5°E 기준 1200 UTC 수증기 수렴과 온도의 연직 분포, 그리고 Fig. 6에 850, 500 hPa 유선도를 각각 나타내었다.

3.2.1. 1월 19일 강수사례

첫 번째 사례에 해당하는 Fig. 3의 (a)~(d)를 보면,

Fig. 2. Distribution of daily precipitation at 88 stations of four precipitation events during winter intensive observation period in 2012. Opened and closed circles indicate precipitation (unit: mm) and snow (unit: cm), respectively. (a) 19 January, (b) 31 January, (c) 25 February and (d) 5 March.

우리나라 남쪽에 기압골이 위치하며, 이 기압골 상층으로 300 hPa 제트기류가 위치하고 있다. 시간이 지남에 따라 이 기압골은 폐곡선을 가진 저기압으로 발달하였고, 이로 인해 우리나라는 동풍계열의 바람이 지속적으로 유입되었다. 850 hPa Hovmoller Plot (Fig. 4a)을 보면 남동쪽에서 유입되는 수증기에 의해 이날을 중심으로 상대습도가 90% 이상인 습윤한 대기 상

Table 4. Date of selected four cases and daily precipitation of three stations. Units of precipitation and snow are 'mm' and 'cm', respectively.

Date	Bukgangneung		Incheon		Boseong	
	Precipitation	Snow	Precipitation	Snow	Precipitation	Snow
19 January	11.5	-	-	-	4.0	-
31 January	3.3	-	3.0	4.6	1.5	-
25 February	14.1	14.0	-	-	-	-
05 March	19.0	-	7.0	-	19.5	-

Fig. 3. Synoptic distribution of geopotential height at 1000 (black line), 500 hPa (blue line) and wind speed (shaded) more than 50 kts at 300 hPa with 6 hour interval. (a) ~ (d) 0000 ~ 1800 UTC 19 January, (e) ~ (h) 0000 ~ 1800 UTC 31 January, (i) ~ (l) 0000 ~ 1800 UTC 25 February and (m) ~ (p) 0000 ~ 1800 UTC 5 March.

태가 나타난다. 오메가 분포에서는 1월 19일 0000 UTC, 130°E 오른쪽에 가장 낮은 음의 값이 존재하여 850 hPa 남동쪽을 중심으로 상승기류가 나타나고 (Fig. 4a) 500 hPa에서도 상승기류는 남동쪽에서만 유지된다 (Fig. 4b). 1200 UTC 이후 500 hPa 층에서는 상대 습도 50% 이하로 건조한 경향이 나타나고, 하강기류의 중심이 우리나라에 위치하고 있다. 수증기 수렴의 연직분포 (Fig. 5a)를 보면 약 900 hPa까지 약하게 수증기가 수렴하고 있으나 36°N, 700 hPa를 중심으로 수증기 발산이 지배적으로 나타나 하층에서만 수증기의 수렴이 약하게 나타난다. 지표 부근 기온은 약 40°N

까지 영상의 분포를 보인다. 19일 0000 UTC 850 hPa 유선 분포도 (Fig. 6a)에서도 남~동풍 계열 바람이 우세하고, 1200 UTC (Fig. 6b)에는 우리나라 전역에 동풍계열의 바람이 우세하다.

3.2.2. 1월 31일 강수사례

두 번째 사례 (Figs. 3e~h)는 차가운 기단 내 더 차가운 공기의 파동에 의해 발생하는 중규모 저기압이 중북부 지역을 이동하는 사례로, 시베리아 고기압에서 변질된 이동성 고기압이 중국 남동부 지역에 위치하고, 중층 대기 한랭한 공기를 동반한 단파 골이 접

Fig. 4. Hovmoller plot of relative humidity (shaded) and omega (line) at 850 and 500 hPa in 35°N of before and after one day of four precipitation events. (a) 850 hPa, (b) 500 hPa on 19 January, (c) 850 hPa, (d) 500 hPa on 31 January, (e) 850 hPa, (f) 500 hPa on 25 February, (g) 850 hPa and (h) 500 hPa on 5 March.

근하면서, 서해상 해기 차로 생성된 눈 구름이 유입되는 우리나라 전형적인 대설 유형 중 하나인 발해만

저기압 형과 유사하다 (기상청, 2011b). Hovmoller Plot (Fig. 4c)을 보면, 850 hPa에서 서쪽으로부터 수증기가

Fig. 5. Cross Section of moisture convergence and temperature along 127.5°E of four precipitation events. Shaded areas and lines indicate moisture convergence and temperature, respectively. (a) 19 January, (b) 31 January, (c) 25 February and (d) 5 March, 2012.

Fig. 6. Streamline at 850 (dashed line) and 500 (gray line) hPa at 0000, 1200 UTC of selected four cases. (a), (b) 19 January, (c), (d) 31 January, (e), (f) 25 February and (g), (h) 5 March, 2012.

유입되어 습윤해지기 시작하고 1월 31일 0000~1200 UTC를 중심으로 상승기류가 강해졌다. 지상 저기압 이동하고 후면으로 확장하는 시베리아 고기압과 500 hPa 단과 골이 접근하면서 850 hPa 유선 분포 (Fig. 6d)에서 나타나듯이 북서풍 계열의 바람이 지속되어 매우 건조한 경향을 보이고, 500 hPa Hovmoller Plot (Fig. 4d)에서도 우리나라 상층은 하강기류가 우세하다. 수증기 수렴의 연직 분포 (Fig. 5b)는 중부지방을 지나는 저기압의 영향으로 37°N를 기준으로 이남에서는 약 900 hPa까지, 이북에서는 약 700 hPa까지 수증기 수렴이 나타나고 더 높은 고도에서는 수증기 발산이 우세하다. 기온 (Fig. 5b)은 약 37°N 이북에서 영하의 기온을 보인다.

3.2.3. 2월 25일 강수사례

세 번째 사례 (Figs. 3i~l)는 지상 시베리아 고기압의 확장하고 있으며 일본 남해상에는 저기압이 위치하여 전형적인 대설 유형인 동해안 형과 유사하다 (기상청, 2011b). 그러나 한반도는 북서쪽에서 남동쪽으로 약한 기압골이 형성되어 있고 풍향은 북서풍계열로 동해안 형과는 다소 차이를 보인다. 850 hPa Hovmoller plot 분포 (Fig. 4e)를 보면 수증기의 중심은 동쪽에 위치하고 있으며 우리나라는 약한 기압골의 영향으로 동쪽이 습윤한 상태를 보이지만 전체적으로 50% 이하의 상대습도를 보여 건조한 상태이고 상승기류는 존재하지 않는다. Fig. 4f의 500 hPa 0000 UTC 오메가 분포를 보면 상층 기압골 전면에서 약한 상승기류가 나타나지만, 1200 UTC 이후에는 상층 기압골 후면에

들어 하강기류가 우세하다. 수증기 수렴의 연직분포 (Fig. 5c)에서도 500 hPa 이하 대부분의 고도에서 수증기의 발산이 우세하다. 지상의 온도 (Fig. 5c)는 약 36.5°N 이북에서 영하의 분포를 보인다.

3.2.4. 3월 5일 강수사례

네 번째 사례 (Figs. 3m~p)는 0000 UTC에 일본 남부 지역에 저기압이 위치하고 있으며 1200 UTC에 발해만 부근에 저기압이 형성되었다. 850 hPa Hovmoller plot (Fig. 4g)을 보면 하루 전날부터 습윤한 상태가 유지되다가 3월 5일 0000 UTC부터 상대습도는 90% 이상으로 높고 강한 상승기류가 나타난다. 500 hPa (Fig. 4h)에서도 습도는 1200 UTC까지 90% 이상을 유지하고 있으며, 강한 상승기류가 나타난다. 수증기 수렴도 (Fig. 5d)에서는 약 750 hPa까지 나타나며 4개 사례 중 가장 넓은 영역에 분포한다. 850 hPa 유선 분포 (Figs. 6g and 6h)를 보면 우리나라 전역에서 남풍계열의 바람이 우세하여 남쪽으로부터 습윤한 공기의 유입이 나타난다. 지표 기온 (Fig. 5d)은 대부분 지역에서 영상의 분포를 보인다.

3.3. 강수 현상 시 연직 구조

사례 별 시간당 강수량과 온도, 노점온도의 시계열 (Fig. 7)을 통해 강수 발생 시간과 지표의 습윤 상태를 분석하고, 라디오존데 자료를 이용한 Skew T-log P 단열선도 (Fig. 8)를 통해 대기의 연직 분포를 조사하였다. 단열선도는 라디오존데 관측 자료 중 10 hPa 간격으로 가장 유사한 고도의 온도, 노점온도, 풍향, 풍속 값을 이용하여 그렸다. 또한 불안정 지수 값을 이

Fig. 7. Timeseries of hourly precipitation, temperature and dew-point temperature. (a) Bukgangneung in 19 January, (b) Incheon in 31 January, (c) Bukgangneung in 25 February and (d) Boseong in 5 March.

Fig. 8. SkewT-logP diagram of four precipitation events. Black lines and red lines indicate temperature and dew-point temperature, respectively. (a) 0000 UTC, (b) 1200 UTC at Bukangneung in 19 January, (c) 0000 UTC, (d) 1200 UTC at Incheon in 31 January, (e) 0000 UTC, (f) 1200 UTC at Bukangneung in 25 February and (g) 0000 UTC, (h) 1200 UTC at Boseong in 5 March.

용하여 사례 별 안정도 (Fig. 9)를 분석하고, 강수 형태 구분을 위해 1000-850 hPa 층후 값 (Fig. 10)이 분석에 이용되었다. 또한 관측기간 동안의 지점별 상대

Fig. 9. Timeseries and inter-quartile range (IQR) distribution of 12-hourly Cross totals (CT), Total totals (TT), and Severe weather threat indices (SWEAT) at three stations (104: Bukgangneung, 112: Incheon and 258: Boseong) during winter intensive observation period in 2012. (a) IQR distribution of three stations, the upper and lower ends of the box are drawn at the quartiles, and the bar through the box is drawn at the median. The whiskers extend from the quartiles to the maximum and minimum data values. Circles indicated outliers (upper and lower 10% of all data). (b) Bukgangneung, (c) Incheon and (d) Boseong.

습도의 연직분포의 시간에 따른 변화도 (Fig. 11), 가 강수량의 연직분포의 시간에 따른 변화도 (Fig. 12) 그리고 12시간 간격의 가강수량의 시계열과 Inter-Quartile Range (IQR) 분포도 (Fig. 13)가 분석에 이용되었다.

3.3.1. 1월 19일 북강릉지점 강수현상

Figure 7a를 보면, 1월 19일 북강릉지점은 24시간 동안 지속적으로 강수가 관측되었으며, 1100 KST에 가장 많은 2.5 mm의 강수가 내렸다. 지상의 기온은 영상의 분포를 보였으며 습수는 약 2도 이하로 습윤한 대기상태가 지속되었다. 0000, 1200 UTC 단열선도 (Figs. 8a and 8b)와 Fig. 11a의 상대습도 분포에서도 나타나듯이 전 층에서 상대습도는 90% 이상으로 매우 습윤한 상태였으며 이날 가강수량 (Fig. 13a)은 약 15 mm로 (평균 가강수량 약 3배) 관측기간 동안 가장 많은 양이었다. Fig. 10a의 1000-850 hPa 층후 값은 기상청의 눈과 비 기준 층후 값에 의해 0000 UTC에 진 눈개비, 1200 UTC에 비로 강수형태는 구분되었으며 강설현상은 나타나지 않았다. 풍향의 변화는 600 hPa

Fig. 10. Timeseries of 12-hourly 1000-850 hPa thickness, precipitation and snow at three stations during winter intensive observation period in 2012. (a) Bukgangneung, (b) Incheon and (c) Boseong.

이하의 하층에서 동풍계열에서 서풍계열로 순전 (Figs. 8a and 8b)하여, 남해상을 지나는 저기압에 의해 온난하고 습윤한 기류가 유입됨을 보여준다. 또한 1200 UTC 단열선도 (Fig. 8b)에서, 1000-900 hPa 사이의 고도에 따른 기온 변화율은 건조 단열 기온감율과 거의 같아 불안정한 상태를 보여 주었다. 이날 북강릉 지점의 불안정 지수 CT, TT, SWEAT는 모두 관측기간 중 상위 10%에 포함되어 (Figs. 9a and 9b), 불안정한 대기 상태를 뒷받침하며, 이날 북강릉 지점의 일 강수량은 11.5 mm를 기록하였다 (Table 4).

3.3.2. 1월 31일 인천지점 강수현상

Figure 7b를 보면, 1월 31일 인천 지점은 1400-1700 KST를 제외하고 지상의 기온이 영하의 분포를 보이고 1600-2000 KST 동안 신적설이 관측되었다. 습수는 신적설이 관측된 시간 동안 약 0도에 가까워 매우 습윤한 지표 상태를 보였다. Fig. 4c를 보면, 저기압이 통과하는 0000 UTC보다 저기압 통과 후 시베리아 고기압이 확장하는 1200 UTC에 더 습윤한 상태를 보인다. 이는 1000-850 hPa 하층 풍향의 변화에서 나타나는 순전에 의한 온난이류 때 보다 반전에 의한 한랭이류 때 대기는 더 습윤해진 것을 의미한다. 즉, 시베리아 고기압이 확장하면서 서해상의 해기차로 하층에 대류운이 발생했으며, 이로 인해 강설현상이 인천지역에서 관측된 것으로 분석된다. 1000-850 hPa 층 후 값도 눈 기준 층후 값 (1297 gpm)보다 낮아 강수 형태는 눈으로 구분된다 (Fig. 10b). 그러나 이날 가 강수량은 하층에 소량 존재하고, 총량도 10 mm 이하로 작아 강수량은 많지 않았다 (Figs. 12b and 13a).

Fig. 11. Vertical distribution of 12-hourly relative humidity with 10 hPa interval from 1000 to 300 hPa during intensive observation period in 2012. (a) Bukgangneung, (b) Incheon and (c) Boseong.

1200 UTC 단열선도 (Fig. 8c)에서 1000-900 hPa 사이의 고도에 따른 기온 변화는 불안정한 상태를 보여 주었고, 900-800 hPa 층은 등온층에 가까워 불안정한 대기가 최하층으로만 존재하였다. 이날 인천지점 불안정 지수 분포에서도 CT 24, 21, TT 48, 44, SWEAT 204, 228로 관측기간 중 가장 큰 값을 보여 가장 불안정한 날로 구분되었다 (Figs. 9a and 9c).

3.3.3. 2월 25일 북강릉지점 강수현상

2월 25일 북강릉지점은 1000 KST부터 강설현상이

Fig. 12. Same as figure 11, but for precipitable water calculated with radiosonde data.

Table 5. Periods of observing system experiment in precipitation cases.

Cases	Experiment period
19 January, 2012	14 ~ 21 January
31 January, 2012	26 January ~ 1 February
25 February, 2012	21 ~ 26 February
05 March, 2012	29 February ~ 06 March

나타났으며 2400 KST까지 지속되었다 (Fig. 7c). 이날 신적설은 총 14.0 cm를 기록하였다 (Table 4). 습도는 1400 KST 이후부터 매우 습윤한 지표 상태를 보였다. 상대습도의 연직분포 (Fig. 11a)는 약 750 hPa 이하 층에서만 90% 이상으로 습윤한 분포가 나타나고, 단열선도 (Figs. 8e and 8f)에서도 약 750 hPa 이하 층에서 매우 습윤한 대기 상태를 보인다. 총 가강수량 (Fig. 13a)은 약 10 mm로 관측 기간 동안 평균의 약 2 배 정도로 나타났다. 이날 1000-850 hPa 층후 분포 (Fig. 10a)는 눈 기준 층후 값과 유사한 분포를 보였다. 단열선도 (Figs. 8e and 8f) 상에서 불안정이 심한 고도는 나타나지 않으며 불안정 지수 분포 (Fig. 9b)에서도 뇌우 발생 기준 값보다 낮은 수치를 보인다. 따라서 이날 북강릉지점은 일본 남해상을 지나는 저기압의 영향으로 우리나라에 형성된 약한 기압골에 의해 하층은 습윤한 상태이고 시베리아 고기압 확장에 따른 상층 기압골의 영향으로 상층 차고 건조한 공기가 유입되었으나 강한 불안정 현상은 나타나지 않았다.

3.3.4. 3월 5일 보성지점 강수현상

3월 5일 보성지점은 24시간 동안 강수 현상이 나타났으며 (Fig. 7d), 총 강수량은 19.5 mm로 4개 강수사

Fig. 13. (a) Timeseries and (b) IQR distribution of 12-hourly total precipitable water at three stations (IC: Incheon, BS: Boseong and BGN: Bukgangneung) during winter intensive observation period in 2012. Mean indicated daily average of total precipitable water at 0000 and 1200 UTC during intensive observation period per station.

례 중 가장 많은 강수량을 기록하였다 (Table 4). 이날 지상 습수는 2도 이하로 습윤한 상태였으며, 단열선도 (Figs. 8g and 8h)에서도 전 층에서 매우 습윤한 대기 상태를 보인다. 상대습도의 연직 분포도 (Fig. 11c) 전 층에서 90% 이상으로 매우 습윤한 상태를 보였다. 총 가강수량은 약 35 mm로 겨울철 평균에 비해 높은 분포를 보이고 (Fig. 13a), 가강수량의 최대치는 약 800 hPa 부근에서 나타났다 (Fig. 12c). Fig. 8g의 5일 0000 UTC의 단열선도를 보면 약 950-850 hPa 층에 역전층이 존재하고 있어 지표 기온이 상승할 경우 많은 양의 강수가 예상되었으나 1200 UTC (Fig. 8h)에도 지표 기온은 상승하지 못하고 안정층은 그대로 남아있는 상태이다. 불안정 지수 분포 (Fig. 9d)는 CT 19, 22, TT 39, 45, SWEAT 245, 130으로 대기 불안정도는 높게 나타나며, 1000-850 hPa 층후 값은 비 기준 층후 값보다 높아 강수형태는 비로 구분된다 (Fig. 10c).

4. 관측시스템 실험을 통한 민감도 실험

특별관측기간 동안 인천과 보성지점 고층자료의 강수 민감도 실험을 위해 관측시스템 실험을 수행하여 4개 강수사례에 대한 강수 예측성을 분석하였다. 강수 사례 발생일 1200 UTC를 기준으로 UM모델 예측장을 배경장으로 3DVAR-WRF를 이용하여 6시간 간격으로 72시간까지 12시간 누적강수량을 모의하였다. 첫 번째 실험은 GTS 고층관측망 자료만을 사용한 실험이고 (Control run, CNTL), 두 번째는 동일기간 동안 Probex-2012 자료 중 인천 고층관측 자료를 추가한 실험 (INC_EXP)이고, 세 번째는 보성 고층관측 자료를 추가한 실험 (BOS_EXP)이고, 네 번째는 인천과 보성 두 지점의 고층관측 자료를 추가한 실험 (INC_BOS_EXP)이다. 강수 사례별 실험 기간은 Table 5와 같다. 또한 수행된 전체 실험에 대해 강수 예측성능 향상률을 분석하기 위해 ETS를 계산하였다.

Fig. 14. Surface pressure and 12 hours accumulated precipitation simulated (a) CNTL, (b) INC_EXP, (c) BOS_EXP, (d) INC_BOS_EXP, (e), (f) and (g) difference of CNTL from three experiments, respectively, at 1200 UTC 19 January, 2012.

4.1. 3DVAR-WRF를 이용한 강수 예측성 실험

Figure 14는 1월 19일 발생한 강수 사례를 대상으로 각 실험별로 3DVAR-WRF를 수행하여 얻어진 12시간 누적강수량을 나타낸 그림으로, Fig. 14a는 UM 분석장을 배경장으로 1200 UTC에 예측된 12시간 누적강수량을 나타내고 (CNTL), Figs. 14b~d는 INC_EXP, BOS_EXP, INC_BOS_EXP의 12시간 누적강수량 예측 분포를, 그리고 Figs. 14e~g는 CNTL과의 차이를 각각 나타낸다. 1월 19일은 동해안을 중심으로 많은 강수가 발생한 날로, 중부 내륙에는 약한 강수 현상이 있었다. 기준실험에서도 동해안을 중심으로 강

수가 집중되는 유사한 분포가 나타난다. 고층 자료가 추가된 실험의 경우 INC_EXP는 기준 실험에 비해 동해안에 더 많은 강수량을 모의하고 있으나, 중부내륙 지역은 강수량이 적게 모의되었다. BOS_EXP는 INC_EXP에 비해 경북지역의 강수량을 적게 모의하고 있으며, INC_OBS_EXP는 중부내륙 지역에서 더 많은 강수량을 모의한다. 1월 31일 강수사례의 경우, INC_EXP (Fig. 15e)는 기준실험에 비해 서해상에 중심을 둔 강수대가 북쪽으로 이동한 분포를 보인다. 그러나 BOS_EXP (Fig. 15f)와 INC_BOS_EXP (Fig. 15g)는 강수대의 중심이 기준실험에 비해 남쪽으로 이동하여 충

Fig. 15. Same as Fig. 14, except for 1200 UTC 31 January, 2012.

남지역 강수를 약하게 모의한다. 또한, 남해안 고층자료가 추가된 실험의 경우, CNTL에 비해 남해상에서의 강수가 약하게 모의되는 경향을 보인다. 2월 25일의 경우, 1200 UTC 12시간 누적강수량의 지상관측 분포는 강원도 동해안을 중심으로 많았으며, INC_EXP의 경우 동해안에 더 많은 누적 강수량을, BOS_EXP와 INC_BOS_EXP의 경우, 동해안에 상대적으로 적은 누적 강수량을 모의 한다 (그림 생략). 3월 5일 사례에서 INC_EXP의 경우 동해안 지역에서 강수가 과대모의되는 것을 제외하고는 내륙지역에서의 누적 강수량 분포는 기준실험과 유사하다. 그러나 BOS_EXP의 경우, 제주도 위치한 남서해상에서 누적 강수량을 과소모의한다. INC_BOS_EXP는 BOS_EXP의 결과와 유사하나

동해안에 더 많은 강수를 모의한다 (그림 생략).

좀 더 긴 예측 시간에 대한 강수 민감도를 조사하기 위해 1월 31일 사례에 대해 72시간까지 예측된 12시간 누적 강수량 분포를 기준실험과 비교하였다. 그 결과, INC_EXP (Figs. 16d-f)는 24시간 예측장 이후 36~72시간 까지 내륙에서는 기준실험과 차이가 거의 나타나지 않았다. 그러나, BOS_EXP (Figs. 16g-i)는 24시간 예측장부터 중부내륙과 서해안을 중심으로 강수의 과대 모의가 나타나고, 남해상에서는 강수의 과소 모의가 나타나는 특징을 보인다. 특히, 남해상 강수의 과소 모의는 예측기간이 늘어날수록 더 넓은 영역에서 과소 모의가 나타난다. INC_BOS_EXP (Figs. 16j-l)는 BOS_EXP와 거의 유사한 분포를 보인다.

Fig. 16. Difference of 12 hours accumulated precipitation between CNTL(a, b, c) and INC_EXP(d, e, f), BOS_EXP(g, h, i), INC_BOS_EXP(j, k, l) of 24, 48 and 72hours forecast times at 1200 UTC 31 January, 2012.

따라서 서·남해상 고층 관측자료를 추가한 실험과
규준실험을 비교한 결과, 강수량과 그 분포는 거의 유

사하게 나타나는 결과를 보인다. 또한 사례 별로 차이
는 있으나 평균적으로 서해안 고층 자료를 추가한 실험

험은 동해 남부와 북부해안 지역에 강수를 과대 모의하는 경우가 많았으며, 남해안 고층자료를 추가한 실험은 남해상에서의 강수를 과소 모의하는 경향을 보였다.

4.2. 강수 예측능력 향상을 평가

남·서해안 고층자료의 유무에 따른 정량적인 강수 예측성능의 차이를 분석하기 위해 12시간 누적 강수에 대해 Equitable Threat Score (ETS)를 계산하였다. 강수 검증을 위해 관측강수는 610개의 AWS 자료를 사용하였고, CNTL 실험과 INC_EXP, BOS_EXP, INC_BOS_EXP 실험의 강수예측 결과에 대해 12시간 누적 강수를 5개 임계치 1.0, 2.5, 5.0, 7.5, 10.0 mm/12 hours 이상일 때로 구분하여 예보시간 별로 계산하였다. ETS는 결정론적 예보를 검증하는 방법으로 예보의 우연성을 배제한, 예측한 사건에 대한 관측과 예측의 비로 Table 6으로부터 Eq. (11)과 같이 계산된다.

$$ETS = \frac{H - H_{\text{random}}}{H + M + F - H_{\text{random}}} \quad (11)$$

$$\text{여기서, } H_{\text{random}} = \frac{(H+F)(H+M)}{H+M+F+C} \quad (12)$$

Table 6. Contingency tables for verification of the precipitation.

		Forecast	
		Yes	No
Observation	Yes	H (hits)	M (misses)
	No	F (False alarms)	C (correct rejection)

Figure 17은 강수 사례별로 발생일 1200 UTC를 기준으로, 예측 72시간 전부터 12시간 전까지 6시간 간격으로 11번의 12시간 누적강수량에 대한 임계값별 평균 ETS 값을 나타낸다. 1월 19일의 경우 INC_EXP는 CNTL보다 모든 임계치 범위에서 큰 ETS를 가져 고층자료를 추가한 실험에서 예측 성능이 향상된 결과를 보인다. 그러나 BOS_EXP는 CNTL보다 더 낮은 ETS 분포를 보인다. 1월 31일은 2.5, 5 mm 이상의 누적강수 범위에서 INC_EXP와 BOS_EXP는 CNTL보다 향상된 예측성능이 나타난다. 2월 25일은 7.5 mm 이하 임계치에서 INC_EXP는 CNTL보다 높은 향상률이 나타나고, 3월 5일은 INC_EXP의 경우 CNTL보다 1 mm 임계치를 제외하고 CNTL보다 더 높은 ETS를 가지나, BOS_EXP는 5.0 mm 이상의 임계치에서는 낮은 수치를 보인다. 음의 ETS 값을 가진 사례에 대해서는 추가적인 조사가 필요할 것으로 판단된다.

따라서 1월 19일과 3월 5일 강수 사례의 경우 인천 고

Fig. 17. Mean Equitable Threat Scores of CNTL, INC_EXP, BOS_EXP and INC_BOS_EXP for accumulated precipitation more than 1.0, 2.5, 5.0, 7.5 and 10.0 mm / 12 hours thresholds for 4 cases during 72 hours forecast times.

층자료가 추가됨에 따라 예측 성능이 향상되는 결과를 보이고, 1월 31일 강수 사례의 경우 2.5, 5.0 mm / 12 hours에서 높은 예측 향상률이 나타난다. 특히 이날 5.0 mm / 12 hours 임계치에서 인천은 약 33.3%, 보성은 85.7%의 향상률을 보인다. 인천과 보성 두 지점의 고층자료가 추가된 실험의 경우에도 이날에 가장 높은 예측 성능향상의 결과를 보인다 (약 142.9%). 겨울철 강수 사례는 남쪽의 수증기 유입에 의해 강수가 발생하는 경우가 드물고, 북서쪽에서 확장하는 시베리아 고기압 또는 발해만 저기압에 의한 강수현상이 많아 남쪽에 위치한 보성지점 고층자료의 효과가 낮게 나타난 것으로 판단되지만, 전반적으로 고층관측 자료의 동화 효과가 예측 성능을 향상시키는 결과를 확인하였다.

5. 요약 및 결론

본 연구는 2012년 1월 4일부터 3월 6일까지 국립기상연구소에서 수행한 겨울철 특별관측을 통해 얻어진 북강릉, 인천, 보성 고층자료와 NCEP/NCAR 재분석 자료를 이용하여 기간 중 발생한 4개 강수 사례의 종관 분포와 연직 구조를 분석하고, 관측시스템 실험을 통해 고층관측 자료가 단기간 강수 예측에 미치는 영향을 조사하였다.

선택된 강수 사례의 종관 분포는 남해상을 지나는 저기압의 영향으로 수증기 수렴에 의한 강수현상 (1월 19일), 중북부 중규모 저기압 통과 후 시베리아 고기압의 확장에 따른 서해상 수증기 유입에 의한 강설현상 (1월 31일), 서고동저형 기압배치에서 약한 기압골에 의한 강수현상 (2월 25일), 발해만과 남동쪽에 위치한 저기압에 따른 수증기 유입에 의한 강수현상

(3월 5일)으로 분석되었다. 강수 발생일의 연직 구조는 1) 중층대기 수증기 수렴현상과 강한 상승류의 부재로 대류층의 두께는 좁고, 2) 순전에 의한 온난이류는 하층에서만 존재하고, 3) 대기 불안정층이 존재하더라도 지표기온이 낮아 그 두께는 좁고, 불안정도 낮으며, 4) 낮은 기온 분포로 대기층에 포함된 수증기량은 적고 평균 가강수량도 소량으로 나타나 풍부한 수증기와 깊은 대류 층으로 강한 불안정을 가지는 여름 호우 시스템과는 다른 특징을 확인하였다.

고층관측 자료가 단기간 강수 예측에 미치는 영향을 분석하기 위해 3DVAR-WRF 시스템을 구축하여 인천과 보성 고층자료에 대한 관측시스템 실험을 수행한 결과에서는, 기준실험과 고층자료를 추가한 실험의 12시간 누적 강수량 분포는 AWS 관측자료와 유사한 분포를 보였다. 그러나 지역에 따라 인천 고층자료를 추가한 실험은 기준실험에 비해 강수를 과대 모의하는 경향이, 보성 고층자료를 추가한 실험은 남해상에서 강수를 과소 모의하는 경향이 나타났다. 또한 1월 31일 사례에 대해 72시간까지 예측된 12시간 누적 강수량 실험에서는 기준실험에 비해 인천 고층자료를 추가한 실험은 24시간 이후 강수 분포의 차이가 거의 없으나 보성 고층자료가 추가된 실험은 24시간 예측장부터 중부내륙과 서해안을 중심으로 강수의 과대 모의가 나타나고, 남해상에서는 강수의 과소 모의가 나타나는 특징을 보였다. 12시간 누적 강수에 대해 ETS 지수를 통한 강수 예측 성능 결과에서는 강수 사례와 임계치에 따라 차이를 보이지만, 전반적으로 고층관측 자료의 동화 효과가 수치모델의 단기간 예측성 향상에 긍정적인 결과를 보였다. 따라서 향후 특별관측을 통한 지속적인 고층자료의 확보는 겨울철 위험기상의 예측성을 향상시키는 데 기여할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국립기상연구소 주요사업 ‘예보기술지원 및 활용연구 (NIMR-2013-B-1)’의 일환으로 수행되었습니다.

REFERENCES

기상청, 2011: 손에 잡히는 예보기술. 필수예보요소 활용법과 정의. 67 pp.
 —, 2011: 예보관 핸드북 시리즈 3. 알기쉬운 대설단판 가이드. 7 pp.
 김기훈, 원혜영, 남재철, 2006: 한반도 남서지역 집중관측 자료를 활용한 겨울철 강수 사례 분석. *한국기상학회 봄철 학술대회 논문집*, 292-293.
 전은희, 김연희, 장동언, 이희상, 이승우, 2009: T-PARC

2008 드롭존데 관측자료가 태풍 실라코(0813)와 장미(0815)의 진로예측에 미치는 영향. *한국기상학회 가을철 학술대회 논문집*, 12-13.
 Arnold, C. P. Jr., and C. H. Dey, 1986: Observing-systems simulation experiments: Past, present, and future. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **67**, 687-695.
 Chen, B. Y., 2011: Observation system experiments for typhoon Nida (2004) using the CNOP method and DOTSTAR data. *Atmos. Oceanic Sci. Lett.*, **4**, 118-123.
 Chou, K. H., C. C. Wu, P. H. Lin, S. D. Aberson, M. Weissmann, F. Harnisch, and T. Nakazawa, 2011: The impact of dropwindsonde observations on typhoon track forecasts in DOTSTAR and T-PARC. *Mon. Wea. Rev.*, **139**, 1728-1743.
 Elliott, W. P., and D. J. Gaffen, 1991, On the utility of radiosonde humidity archives for climate studies. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **72**, 1507-1520.
 Hirschberg, P. A., P. C. Shafran, R. L. Elsberry, and E. A. Ritchie, 2001: An observing system experiment with the West Coast Picket Fence. *Mon. Wea. Rev.*, **129**, 2585-2599.
 Hong, S. Y., and H. L. Pan, 1996: Nonlocal boundary layer vertical diffusion in a medium-range forecast model. *Mon. Wea. Rev.*, **124**, 2322-2339.
 —, and J. O. Lim, 2006: The WRF Single-Moment 6-class Microphysics Scheme (WSM6). *J. Korean Meteor. Soc.*, **42**, 129-151.
 Hwang, Y. J., J. C. Ha, Y. H. Kim, K. H. Kim, E. H. Jeon, and D. E. Chang, 2011: Observing System Experiments Using KLAPS and 3DVAR for the Upper-Air Observations over the South and West sea during ProbeX-2009. *Atmosphere*, **21**, 1-16. (In Korean with English abstract)
 Kain, J. S., 2004: The Kain-Fritsch Convective Parameterization: An Update. *J. Appl. Meteorol.*, **43**, 170-181.
 Kim, Y. H., E. H. Jeon, D. E. Chang, H. S. Lee, and J. I. Park, 2010: The Impact of T-PARC 2008 dropsonde observations on typhoon track forecasting. *Asia-Pacific J. Atmos. Sci.*, **46**, 287-303.
 Kim, D. W., Y. H. Kim, K. H. Kim, S. S. Shin, D. K. Kim, Y. J. Hwang, J. I. Park, D. Y. Choi, and Y. H. Lee, 2012: Atmospheric Vertical Structure of Heavy Rainfall System during the 2010 Summer Intensive Observation Period over Seoul Metropolitan Area. *Jour. Korean Earth Science Society*, **33**, 148-161. (In Korean with English abstract)
 —, Y. H. Kim, K. H. Kim, S. S. Shin, D. K. Kim, Y. J.

- Hwang, J. I. Park, D. Y. Choi, and Y. H. Lee, 2012: Effect of Urbanization on Rainfall Events during 2010 Summer Intensive Observation Period over Seoul Metropolitan Area. *Jour. Korean Earth Science Society*, **33**, 219-232. (In Korean with English abstract)
- Miller, R. C., 1967: Notes on analysis and severe storm forecast procedures of the military weather warning center. Tech. Rep. 200, U.S. Air Force Air Weather Service, Scott AFB, 170 pp.
- _____, 1972: Notes on analysis and severe storm forecasting procedures of the Air Force Global Weather Central. Tech. Rept. 200(R), Headquarters, Air Weather Service, USAF, 190 pp.
- Mlawer, E. J., S. J. Taubman, P. D. Brown, M. J. Iacono, and S. A. Clough, 1997: Radiative transfer for inhomogeneous atmosphere: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. *J. Geophys. Res.*, **102(D14)**, 1663-1668.
- Yamashita, K., Y. Ohta, K. Sato, and T. Nakazawa, 2010: Observing-system experiments using the operational NWP system of JMA. RSMC Tokyo-Typhoon Center Technical Review, 12, in press.
- Tetens, O., 1930: Uber einige meteorologische Begriffe (in German). *Zeitschrift fur Geophysik*, **6**, 297-309.
- Won, H. Y., C. H. Cho, and S. K. Baek, 2006: Classification of Precipitation Type Using the Wind Profiler Observations and Analysis of the Associated Synoptic Conditions: Years 2003-2005. *Atmosphere*, **16**, 235-246. (In Korean with English abstract)
- Wu, C. C., Y. H. Huang, and G. Y. Lien, 2012: Concentric eyewall formation in Typhoon Sinlaku (2008). Part I: Assimilation of T-PARC data based on the ensemble Kalman filter (EnKF). *Mon. Wea. Rev.*, **140**, 506-527.