

영동대설 사례에 대한 MM5 강수량 모의의 통계적 검증

이정순^{1,*} · 권태영¹ · 김덕래²

¹강릉대학교 대기환경과학과

²국립환경과학원 지구환경연구소

(2006년 5월 10일 접수; 2006년 6월 23일 승인)

Statistical Verification of Precipitation Forecasts from MM5 for Heavy Snowfall Events in Yeongdong Region

Jeong-Soon Lee^{1,*}, Tae-Yong Kwon¹ and Deok-Rae Kim²

¹Department of Atmospheric and Environmental Sciences, Kangnung National University, Gangneung, Korea

²National Institute of Environmental Research, Global Environment Research Center

(Manuscript received 10 May 2006; in final form 23 June 2006)

Abstract

Precipitation forecasts from MM5 have been verified for the period 1989-2001 over Yeongdong region to show a tendency of model forecast. We select 57 events which are related with the heavy snowfall in Yeongdong region. They are classified into three precipitation types; mountain type, cold-coastal type, and warm type. The threat score (TS), the probability of detection (POD), and the false-alarm rate (FAR) are computed for categorical verification and the mean squared error (MSE) is also computed for scalar accuracy measures. In the case of POD, warm, mountain, and cold-coastal precipitation type are 0.71, 0.69, and 0.55 in turn, respectively. In aspect of quantitative verification, mountain and cold-coastal type are relatively well matched between forecasts and observations, while for warm type MM5 tends to overestimate precipitation. There are 12 events for the POD below 0.2, mountain, cold-coastal, warm type are 2, 7, 3 events, respectively. Most of their precipitation are distributed over the East Sea nearby Yeongdong region. These events are also shown when there are no or very weak easterlies in the lower troposphere. Even in the case that we use high resolution sea surface temperature (about 18 km) for the boundary condition, there are not much changes in the wind direction to compare that with low resolution sea surface temperature (about 100 km).

Key words: Yeongdong region, heavy snowfall, precipitation type, statistical verification, MM5

1. 서론

영동지역은 태백산맥의 영향으로 비교적 짧은 거리에서도 서로 다른 기상현상을 보인다. 여름철 집중호우뿐만 아니라 겨울철 대설 또한 지점 차이가 큰 것을 관측 자료로부터 알 수 있다. 한 예로 1998년 1월 14일에서 16일 동안에 관측된 강수량을 살펴보면, 대관령

과 강릉이 각각 100.5 mm와 42.7 mm로 관측되었다. 대관령과 강릉 사이의 거리는 15 km 내외로 비교적 짧은 거리임에도 불구하고, 강수량이 두 배 이상 차이는 것을 알 수 있다. 이와 같이 수십 킬로미터 이내에서 큰 강수량 차이를 보이는 현상은 종관 규모의 기상 예측과 비교하여 시간 및 공간 규모가 훨씬 작아 예측성이 떨어지므로, 중·소규모에 대한 연구 및 예측이 필수적이다.

대설에 대한 수치모델 연구를 살펴보면, 전종갑 등 (1994)이 Pennsylvania State University/National Center for Atmospheric Research (PSU/NCAR)의 중 규모 모델을 개선하여 60km, 20km 격자에 대한 대설사례 모의 연구가 있다. 이 실험에서는 상대적으로 20 km

*Corresponding Author: Jeong-Soon Lee, Dept. of Atmospheric and Environmental Sciences, Kangnung National University, Gangneung, Gangwon 210-702.
Phone : +82-33-640-2323, Fax : +82-33-640-2320
E-mail: jslee98@kangnung.ac.kr

격자에 대한 모의 결과가 실제 대기의 상태와 강우량을 더 잘 나타낸다고 보고 하였다. 또한 이재규 (2001)는 Advance Regional Prediction System (ARPS)의 수평 격자 간격을 4km로 하여 모의 하였을 때, 종관 관측에서는 잘 분석할 수 없었던 중간 규모적인 기상 현상의 변화를 잘 모의하였다고 보고하였다. 국외 연구에서 Colle *et al.* (1999)은 미국 북서부 지역에서 겨울철 PSU/NCAR의 5th generation mesoscale model (MM5)와 National Centers for Environmental Prediction (NCEP)의 Eta 모델의 강수량 예보 결과를 검증하였다. 이들은 모델 영역을 수평 격자를 세분화함에 따른 모의 결과를 분석하였는데, MM5의 경우 12 km 격자 간격의 예보 결과가 36 km 예보보다 더 향상된 것으로 나타났다. Gaudet and Cotton (1998)은 Regional Atmospheric Modeling System (RAMS)를 이용하여 미국 콜로라도 산악 지형에서 예보된 강수량과 관측 강수량을 비교하여 구름 미세 물리 과정이 강수량 예보를 개선하였음을 보였다.

영동지역 겨울철 강수 특징을 살펴보기 위해 정광범 등 (2004)은 영동지역 겨울철 강수는 대관령 동풍과 연관되어 있으며, 이러한 대관령 동풍은 종관규모의 바람에 강한 영향을 받는다고 보고하였다. 이를 바탕으로 영동지역 겨울철 강수를 하층 대류권의 바람에 따라 산악형, 한기해안형, 난기형으로 분류하여 강수 유형에 따른 영동지역 겨울철 강수와 관련된 하층 바람의 특성을 연구하였다. 또한 조구희 등 (2004)은 영동지역의 겨울철 강수가 종관 기상패턴과 밀접하게 연관되어 있음을 보이고, 특징적인 종관 기상 요소를 지수화 함으로서 영동지역에서 발생하는 겨울철 강수의 유형 및 강수량 예보의 가능성을 보여주었다. 김지연 등 (2005)은 영동지역 겨울철 강수 특성을 이해하기 위해 강수 유형에 따른 현열·잠열 편차장의 합성도를 분석하였다. 또한 각각의 강수 유형에 대해 현열과 잠열 편차를 기상 성분별 (바람, 온도, 비습) 편차 값으로 나누어 분석함으로서 강수 유형과 관련된 기상 성분의 특성을 분석하였다. 이들에 의해 분석된 영동지역 겨울철 강수의 유형별 특징을 살펴보면 다음과 같다.

산악형 강수는 지상관측 바람 자료와 하층 대류권 바람에서 모두 북동풍이 나타났으며, 북해도 북쪽지역의 강한 고기압 (한기이류)과 일본 남부를 통과하는 저기압 (난기이류)의 영향을 받는다. 현열속과 잠열속의 분포는 모두 동해 남서부지역에서 뚜렷한 양의 편차 분포를 보였다.

한기해안형 강수는 지상관측 바람 즉, 대관령과 강릉에서 각각 북동풍과 북서풍이 관측되었고, 하층 대류권 바람에서 지상과 850 hPa 각각 북동풍과 북북동풍-북서풍을 보였다. 현열속과 잠열속을 살펴보면, 동해 북부 해상에서 현열속이 뚜렷이 높게 나타나며, 동해 중북부 해상에서 잠열속이 높게 나타났다. 특히 현열 편차 분포는 동해 북부 해상에서 남부 해상으로 내려오면서 값이 감소하는 경향을 나타내는데, 이는 만주지역으로 장출하는 고기압 즉, 한기의 장출과 관련되어 있다고 설명하였다.

난기형 강수는 대관령과 강릉 각각 남동풍과 남서풍이 관측되었고, 하층 대류권 바람에서 지상과 850 hPa 각각 북동-남동풍과 남남동풍-남서풍을 보였다. 또한 난기형 강수는 한반도 남쪽지역에 위치한 저기압의 영향을 받으나, 한반도 남쪽지역의 기압, 기온 편차와 뚜렷한 관계성은 보이지 않았다. 현열속과 잠열속은 음의 편차 값을 나타냈으며, 이는 대기와 해양의 상호 작용보다는 대기 내부 과정에 기인하는 것으로 보고하였다.

영동 대설과 관련된 수치모델 연구는 과거 몇 가지 사례에 국한 되어 이루어져 왔다. 그러나 이 연구에서는 1989년부터 2001년 동안 57개 사례의 모의를 통한 통계적 검증을 시도 하였다. 또한 이러한 사례 검증은 강수 유형 (산악형, 한기해안형, 난기형)에 따라 이루어졌으며, 양적 검증과 공간적 검증을 통한 다양한 검증 방법을 시도 하였다. 이를 위해 현재 강원지방기상청에서 중·소규모 악기상의 예측을 위하여 운영하고 있는 단시간 예측 시스템의 환경과 유사한 환경에서 모의하였다. 과거 사례에 대한 모의이므로 자료동화 부분은 제외되었으며, 초기장은 NCEP/NCAR 재분석 자료를 사용하였다. 또한 수치예보에 의한 겨울철 강수 예측은 강설예보가 중요하지만, 수치모형은 강설량에 대한 예측을 생산하지 않고 있으며, 강설 또는 강우 여부판정, 강설량 과대 혹은 과소 예측 등의 불확실성을 내포하고 있다 (이태영 등, 2003). 따라서 이 연구에서는 강수량을 중심으로 통계적 검증을 시도하였다.

2. 실험 내용

현재 강원청에서는 기상청 수치예보과에서 제공하는 지역 예보 시스템 (Regional Data Assimilation and Prediction System, RDAPS) 자료와 기상연구소의 단시간 분석·예보 시스템의 자료를 활용하여 강원지방

대설예보지원시스템을 시험 운영하고 있다. 이 시스템은 RDAPS 자료를 이용하여 종관장 예측에 활용하고, 단시간 분석·예보 시스템의 자료를 활용하여 국지장 예측, 강수적설예측 그리고 검증 부분에 활용되고 있다. 강원지방 대설예보지원시스템은 다년간의 연구결과를 바탕으로 이루어졌으며, 폭설이라는 단일 기상예보를 위한 지원시스템이다. 또한 영동 대설을 바람, 기압, 그리고 동해상 현·잠열의 특징을 통하여 판단할 수 있는 개념 모델을 추구하는 지원시스템이다. 이 연구에서는 대설예보지원시스템에서 활용하고 있는 단시간 분석·예보 시스템 자료의 이해를 돕고자 하였다. 이를 위해 단시간 분석·예보 시스템과 유사한 환경에서 강수유형에 따라 분류된 영동대설 사례를 모의하였으며, 다양한 방법으로 검증을 시도하였다. 현재 운영되고 있는 단시간 분석·예보 시스템과 차이가 있으나 여러 사례를 바탕으로 하는 통계검증은 이 시스템의 자료를 이해하는데 도움을 줄 수 있을 것으로 생각된다.

기상연구소에서 운영하는 단시간 분석·예보 시스템은 중·소규모 악기상의 예측을 위하여 리눅스 기반의 클러스터 시스템이다. 이 시스템은 기본적으로 간헐적 자료동화 (intermittent data assimilation) 체계로서 매 6시간 간격으로 각종 관측 자료를 이용하여 3차원 분석이 이루어지고, 분석장에 기반을 두어 중규모 모델을 이용한 예측이 수행된다. 따라서 시스템은 분석시스템과 모델로 구성되어 있으며 4차원 자료동화 체계를 갖고 있다. 분석은 한반도 국지규모 기상자료 분석 시스템 (Korea Local Analysis and Prediction System, KLAPS) 을 이용하고, 중규모 예측은 PSU/NCAR의 MM5 를 이용하고 있다 (김용상 등, 2002; 장동언 등, 2005).

이 연구에서는 단시간 분석·예측 시스템과 유사한 환경에서의 모의를 시도하였다. 따라서 모델의 수평해상도는 18 km, 6 km, 2 km로써 1차 등지 격자 내삽 (one-way nesting) 기법을 사용하였다. 모델 영역은 각각 아시아, 한반도, 그리고 영동지역에 초점을 맞추었다 (Fig. 1). 연직층은 지형을 따르는 시그마 면상에서 35층으로 정의되었으며 연직 상단은 50 hPa 이다. 행성 경계층은 MRF PBL (Hong and Pan, 1996)을 사용하였고, 복사과정은 rapid radiative transfer model (RRTM) 장파 복사과정 (Mlawer *et al.*, 1997)이 사용되었다. 모델 설계 내용에서 단시간 분석·예측 시스템과의 차이점은 미세물리 과정이다. 단시간 분석·예측 시스템은 graupel을 포함한 Reisner 미세 물리 과정

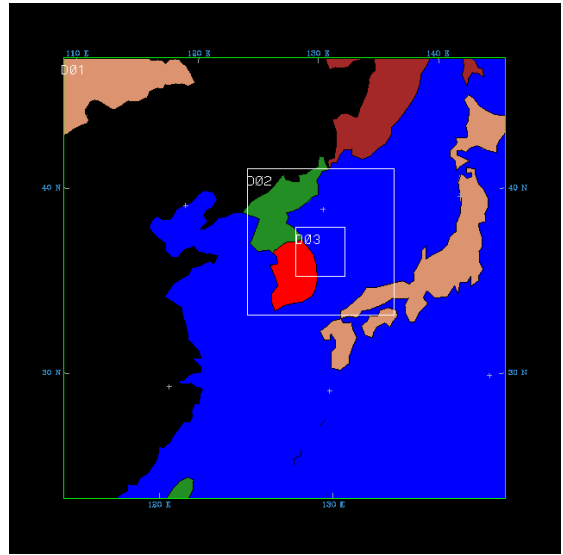


Fig. 1. The model domains for 18 km, 6 km, and 2 km.

(Reisner *et al.*, 1998)을 사용하였으나, 이 연구에서는 적분 시간을 줄이기 위해 Simple-ice 방법 (Dudhia, 1989)을 사용하였다 (Table 1).

단시간 분석·예측 시스템의 분석장은 종관 및 비종관 자료를 이용하여 지상 및 3차원 바람, 온도, 습도, 구름, 강수, 토양의 분석과정을 통해 3차원 기상 분석장을 산출하게 된다. 이 자료는 예보 모델의 초기장으로 사용되고 있으며, 모델의 측면경계조건은 기상청 전구모델의 예보장을 이용하여 6시간 간격으로 제공되고 있다 (장동언 등, 2005). 그러나 이 연구에서 KLAPS 부분은 자료수집의 제한으로 제외되었고, 기상청 전구모델의 예보장에는 과거사례가 없으므로 모델 초기장 및 측면경계 자료는 NCEP/NCAR 재분석 6시간 간격 자료 ($2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$)를 이용하였다.

해수면 온도는 가장 보편적으로 사용하는 National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)에서 산출된 주평균 Optimal Interpolation Sea Surface Temperature (OISST)의 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 자료를 사용하였다 (Reynolds and Smith, 1994). 공간적 검증을 위해 사용된 고해상도 해수면 온도자료는 National Oceanic and Atmospheric Administration/Advanced Very High Resolution Radiometer (NOAA/AVHRR) 주평균 자료를 사용하였다. 이 자료는 JPL (Jet Propulsion Laboratory)의 PODAAC (Physical Oceanography Distributed Active Archive Center)에서 인터넷 웹사이트 (<http://>

Table 1. Configuration of MM5 for the three different spatial domains.

	Domain 1	Domain 2	Domain3
Horizontal grid spacing	18 km	6 km	2 km
Dimension	148×148×35	148×130×35	130×130×35
Time step (s)	54	18	6
Vertical layers/Model top	35 Sigma layer / 50 hPa		
Nesting initialization	1-way interaction		2-way interaction
Lateral boundary condition	Relaxation		Time-dependent
Explicit moisture	Simple-ice		
Cumulus parametrization	Kain-Fritsch2	None	None
Shallow convection	No	No	No
Planetary boundary layer	MRF		
Radiation	RRTM longwave		

/podaac.jpl.nasa.gov)를 통해 제공하는 Multi-Channel Sea Surface Temperature (MCSST) 자료이며 해상도는 $0.18^\circ \times 0.18^\circ$ 이다 (권태영 등, 2001).

3. 자료와 방법

정광범 등 (2004)과 조구희 등 (2004)은 영동지역 겨울철 강수를 하층 대류권의 바람에 따라 산악형, 한기해안형, 난기형으로 분류하였으며, 각각의 강수 유형과 관련된 기단의 특성을 분석하였다. 본 연구에서는 이들에 의한 분류 방법으로 1989년부터 2001년 동안 대관령 또는 강릉의 사례 강수량이 5 mm 이상인 사례를 선정하였다. 이들 사례 중 모의한 강수 사례는 57개이며, 유형별로 산악형 13개, 한기해안형 20개, 난기형 24개이다. 모의 강수량 검증을 위해 사용된 관측 자료는 강릉, 대관령, 속초, 동해, 태백 5개 지점 자료이다. 강원 지역의 국지기상망은 예전보다 많이 강화되었지만, 자동 관측 장비 (AWS)에서 관측된 강수자료는 관측기기의 겨울철 강수 관측의 문제점으로 인하여 사용에 어려움이 있다. 겨울철 강수 관측 자료는 3시간 누적자료이므로, 모의된 강수량의 1시간자료를 합하여 사용하였다. 동해 지점의 관측 자료는 1992년부터 사용되었으며, 이전 결과에 대한 검증은 동해를 제외한 4지점에 대해 이루어졌다.

이들 관측 지점의 자료를 이용하여 수치 모의 결과값을 검증하는데 사용된 통계방법은 두 가지로 분류된다. 하나는 카테고리 예보 정확도 측정 방법으로 threat score (TS), probability of detection (POD), false-alarm rate (FAR)를 사용하였다 (Wilks, 1995). Fig. 2

는 이들 방법을 계산하기 위해 사용된 것이다. 모델이 강수를 예보하였을 때, 강수가 관측되었을 경우는 A, 관측되지 않았을 경우는 B에 대한 빈도수가 각각 하나씩 증가하는 것이다. 반대로 모델이 강수를 예보하지 않았을 때, 강수가 관측되면 C, 관측되지 않으면 D의 경우의 수가 증가한다. 여기서 예보와 관측 강수는 0.1 mm/3hr 이상인 경우를 사용하였다. TS는 강수를 예보하거나 강수가 관측된 모든 경우의 수에 대해 예보가 맞은 경우의 수에 대한 비를 나타낸 것이며, 식(1)과 같이 계산한다.

$$TS = \frac{A}{A+B+C} \quad (1)$$

POD는 강수가 관측되었을 때, 예보가 맞을 확률을 나타낸 것이다. Fig. 2에 의한 식 (2)와 같이 정의되며, 이 연구에서는 강수사례를 선정하여 검증하였으므로

		Observation	
		Yes	No
Forecast	Yes	A	B
	No	C	D

Fig. 2. Relationship between counts of forecast/event pairs for the dichotomous categorical verification situation as displayed in a 2×2 contingency table (From Wilks, 1995).

POD를 중심으로 살펴보았다.

$$POD = \frac{A}{A+C} \quad (2)$$

TS와 POD는 예보가 맞을 확률을 나타낸 경우라면, FAR은 예보가 틀릴 확률을 나타내는 지수이다. 즉, 모델이 강수를 예보하였으나, 강수가 관측되지 않을 확률에 대한 비를 나타내는 값이다.

$$FAR = \frac{B}{A+B} \quad (3)$$

TS, POD, 그리고 FAR 값의 범위는 0에서부터 1까지이며, TS와 POD는 클수록 예보 정확도가 높으며, FAR는 낮을수록 예보 정확도가 높다.

다른 하나는 Scalar 정확도 측정 방법으로 mean squared error (MSE)를 계산 하였다 (Wilks, 1995). MSE는 예측 강수량과 관측 강수량 차이를 제공하여 평균을 계산하는 것으로 다음과 같이 정의한다.

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - O_i)^2 \quad (4)$$

여기서, Y_i 와 O_i 는 각각 예보와 관측의 i 번째 강수량 자료를 의미하며, n 은 자료 수를 나타낸다. MSE는 예측 강수량 오차에 대한 민감도를 살펴볼 수 있다.

수치 모의 결과에 대하여 양적인 검증과 공간적인 검증을 시도하였다. 먼저 양적 검증을 위하여 probability matching method (PMM)을 사용하였다. PMM은 모의 강수량과 관측 강수량을 각각 크기 순으로 정렬하여 비교하는 방법이다. 이러한 비교는 유형별 그리고 유형에 따른 지역별로 이루어졌으며, 모의 강수량의 정량적인 예측 정확도를 알 수 있다. 공간적 검증을 위해 POD가 0.2이하인 사례 중 강수가 영동지역과 가까운 동해상에 분포하는 사례에 대해 MCSST (약 18 km)를 처방하여 OISST (약 100 km)를 처방한 결과와 비교하였다.

4. 모의 강수량 검증 결과

겨울철 영동지역 강수유형에 따라 MM5 강수량 예측의 특징을 살펴보기 위해 사례별, 유형별, 그리고 지역별 예측 정확도를 분석하였다. Table 2는 사례별 예측 정확도와 모의 강수량과 관측 강수량 각각의 사례 총 강수량을 나타낸 것이다. 사례를 강수 유형별로 분류하여 표시하였으며, 날짜는 강수가 시작된 날로 표시하였다. 예측 정확도가 낮은 사례 즉, POD가 0.2 이하인 사례는 음영으로 표시하였다. 예측 정확도가 낮은 사례의 경우는 다음 절에서 살펴보고자 한다. 이러한 사례를 제외한 사례별 정확도를 살펴보면, 산악형의 경우 TS는 0.35-0.80 사이에 분포하며, 한기해안형 0.23-0.69, 난기형 0.17-0.89로 난기형의 변화폭이 상

Table 2. Measured accuracy of precipitation forecast (mm/3hr) with all events (2 km).

Precipitation type	Accuracy measures					Total precipitation of event	
	Event	TS	POD	FAR	MSE	MM5	OBS
Mountain (13)	1989-02-24	0.54	1.00	0.46	58.20	371.30	161.40
	1992-01-08	0.39	0.64	0.50	14.20	75.14	38.60
	1992-01-12	0.35	0.71	0.59	53.40	169.00	75.30
	1993-01-13	0.00	0.00	1.00	27.48	0.50	301.60
	1994-01-10	0.43	0.61	0.39	29.87	202.91	86.50
	1994-01-16	0.03	0.03	0.75	10.68	2.98	84.30
	1998-01-07	0.78	1.00	0.22	11.01	147.04	170.60
	1998-01-13	0.63	0.94	0.35	8.51	248.96	243.10
	1998-02-26	0.48	0.80	0.46	6.82	75.00	68.80
	2001-01-06	0.66	1.00	0.34	15.79	268.54	282.60
	2001-01-24	0.43	0.92	0.55	6.92	133.25	54.40
	2001-02-23	0.80	0.85	0.07	11.74	204.40	165.80
	2001-12-24	0.45	1.00	0.55	26.29	114.40	91.40

Table 2. Continued.

Precipitation type	Accuracy measures				Total precipitation of event		
	Event	TS	POD	FAR	MSE	MM5	OBS
Cold-coastal (20)	1989-01-13	0.18	0.18	0.00	32.35	5.74	88.60
	1990-02-03	0.66	0.84	0.24	62.62	246.71	59.30
	1991-12-06	0.15	0.16	0.25	49.68	24.70	215.40
	1991-12-18	0.35	0.50	0.46	31.18	58.91	27.70
	1992-12-01	0.39	0.70	0.53	3.97	29.44	19.50
	1995-02-08	0.00	0.00	1.00	21.85	27.19	16.10
	1995-02-18	0.23	0.23	0.00	13.42	33.62	107.60
	1995-12-10	0.48	1.00	0.52	20.86	102.63	27.10
	1996-02-14	0.04	0.04	0.00	49.62	0.24	118.30
	1996-02-16	0.68	0.85	0.23	18.12	166.82	224.10
	1997-01-06	0.56	0.86	0.39	14.91	116.37	91.20
	1997-02-02	0.14	0.17	0.60	9.58	8.82	64.20
	1997-02-25	0.00	0.00	1.00	1.30	8.00	11.30
	1997-12-19	0.56	0.90	0.41	6.58	242.20	92.40
	1998-02-02	0.51	0.91	0.46	3.70	84.39	41.20
	1998-11-30	0.62	0.65	0.07	17.63	108.05	114.30
	2000-01-16	0.52	0.85	0.42	5.74	75.23	49.50
	2000-01-24	0.10	0.10	0.00	47.51	1.34	116.70
	2000-01-25	0.30	0.73	0.67	7.29	53.62	31.30
	2001-02-05	0.33	0.49	0.50	2.40	52.52	63.20
Warm (24)	1989-02-07	0.04	0.05	0.88	0.50	3.38	11.60
	1990-01-09	0.53	1.00	0.47	24.53	105.59	52.20
	1990-02-09	0.57	0.75	0.29	5.71	39.18	24.60
	1990-02-17	0.49	0.72	0.39	14.28	117.18	74.30
	1991-02-09	0.33	0.55	0.54	27.32	73.97	58.30
	1992-01-05	0.17	0.25	0.67	4.63	34.83	47.10
	1993-02-15	0.65	0.94	0.32	92.33	462.20	196.70
	1993-02-20	0.67	0.80	0.20	12.04	76.70	89.80
	1993-12-09	0.19	0.23	0.50	2.87	4.23	20.10
	1995-01-21	0.19	0.21	0.29	10.45	7.05	62.70
	1995-02-24	0.05	0.06	0.67	3.29	1.83	22.80
	1995-02-27	0.09	0.09	0.33	17.22	1.10	67.20
	1996-01-04	0.39	0.68	0.52	1.42	28.81	23.60
	1996-01-13	0.65	1.00	0.35	6.93	65.72	43.60
	1996-01-14	0.58	0.75	0.29	5.45	27.11	63.00
	1996-12-03	0.58	0.83	0.34	9.49	67.29	60.40
	1997-01-04	0.52	0.66	0.28	19.87	60.82	94.00
	1997-02-24	0.66	0.95	0.32	5.86	30.09	67.40
	1997-12-05	0.82	0.92	0.12	27.29	377.66	210.60
	1998-02-18	0.71	1.00	0.29	101.19	679.02	118.80
	1999-02-23	0.70	0.82	0.18	0.70	32.57	29.70
	2000-01-04	0.70	0.82	0.16	19.07	171.08	77.70
	2000-01-11	0.52	0.74	0.37	6.16	105.47	77.10
	2001-02-26	0.89	0.94	0.06	3.63	35.44	48.90

대적으로 가장 크게 나타났다. POD의 분포를 살펴보면 산악형은 0.61 이상의 값을 보이며, 한기해안형의 경우 대부분 0.5 이상 값을 보인다. 난기형 또한 대부분 0.55 이상의 값을 나타낸다.

강수 유형별 특징을 살펴보기 위해 유형별 예측 정확도 측정값을 Table 3에 제시하였다. 강수를 예보하였거나 강수가 관측되었을 경우 예보가 맞을 확률을 나타내는 TS는 난기형 0.53, 산악형 0.48, 한기해안형은 0.41로 나타났다. 강수가 관측되었을 경우, 모델이 강수를 예보할 확률을 나타내는 POD는 난기형 0.71, 산악형 0.69, 한기해안형이 0.55 순으로 나타났다. 또한 모델이 강수를 모의 하였으나 강수가 관측되지 않은 비율을 나타내는 FAR는 산악형 0.40, 한기해안형 0.39, 난기형 0.32로 나타났다. 모의 강수량과 관측 강수량의 차이를 제곱하여 평균한 MSE는 난기형이 24.21로 상대적으로 크게 나타났으며, 산악형과 한기

해안형은 각각 19.84와 19.64로 나타났다. 이것으로부터 난기형은 강수 유무에 대한 예측 정확도가 상대적으로 높으나 강수량의 정량적 예측 정확도가 낮음을 알 수 있다.

지역적인 특징을 살펴보기 위하여 강수 유형에 따른 지역별 예측 정확도를 Table 4에 나타내었다. 예측 정확도를 계산한 지점은 속초, 대관령, 강릉, 동해, 태백 5개 지점이다. 강원 지역의 관측망이 예전보다 많이 강화되었지만, AWS 강수자료는 관측기기의 겨울철 (12, 1, 2월) 강수 관측의 문제점으로 인하여 유인관측소 자료를 사용하였다. 산악형의 경우 TS는 대관령과 강릉이 각각 0.54와 0.53 그리고 속초, 동해, 태백이 각각 0.41, 0.43, 0.44로 나타났다. POD는 태백이 0.85로 가장 높게 나타났으나, FAR 역시 0.55로 상대적으로 높은 값을 보였다. 이것은 태백은 강수를 예보하였으나 강수가 관측되지 않은 빈도수가 다른 지역에 비해

Table 3. Measured accuracy of precipitation forecast (mm/3hr) in the 3 precipitation types (2 km).

Precipitation type	Accuracy measures			
	TS	POD	FAR	MSE
Mountain (13)	0.48	0.69	0.40	19.84
Cold-coastal (20)	0.41	0.55	0.39	19.64
Warm (24)	0.53	0.71	0.32	24.21

Table 4. Measured accuracy of precipitation forecast (mm/3hr) in the 3 precipitation types at each station (2 km).

Precipitation type	Station	Accuracy measures			
		TS	POD	FAR	MSE
Mountain (13)	Sokcho	0.44	0.65	0.42	17.19
	Daegwallyeong	0.54	0.66	0.27	23.01
	Gangneung	0.53	0.71	0.32	25.28
	Donghae	0.43	0.64	0.43	12.48
	Taebaek	0.41	0.85	0.55	19.75
Cold-coastal (20)	Sokcho	0.46	0.58	0.29	35.02
	Daegwallyeong	0.43	0.53	0.30	9.81
	Gangneung	0.45	0.56	0.30	23.08
	Donghae	0.42	0.59	0.42	19.29
	Taebaek	0.20	0.43	0.72	3.63
Warm (24)	Sokcho	0.56	0.73	0.29	16.83
	Daegwallyeong	0.59	0.66	0.15	37.96
	Gangneung	0.55	0.68	0.26	16.93
	Donghae	0.59	0.77	0.28	22.17
	Taebaek	0.36	0.74	0.59	25.43

상대적으로 많은 것을 알 수 있다. 강릉과 대관령의 POD는 각각 0.71과 0.66으로 나타났으며, MSE 25.28과 23.01로 다른 지점에 비해 상대적으로 높게 나타났다. 이것은 산악형에서 강릉과 대관령은 강수유무에 대한 예측 정확도는 높지만, 다른 지역에 비해 예측 강수량 또한 큰 것으로 보인다.

한기해안형에서 TS는 태백이 0.2로 상대적으로 낮게 나타났으며, 그 외의 지역에서는 0.42-0.46의 유사한 분포를 보였다. POD도 유사하게 속초, 대관령, 강릉, 동해에서는 0.53-0.59의 분포 값을 나타내며, 태백은 0.43으로 상대적으로 낮은 값을 보였다. 강수를 모의하였으나 강수가 관측되지 않은 비율은 태백이 0.72로 상당히 높은 값을 보였으며, 다른 지역의 경우 0.29-0.42의 분포를 나타냈다. 유형별 특징에서 살펴본 것과 같이, 한기해안형의 경우 강수 유무에 대한 예측 정확도가 상대적으로 낮은 것을 볼 수 있었다. 강수량에 대한 오차를 나타내는 MSE의 경우 속초와 강릉이 각각 35.02와 23.04로 다른 지점에 비해 상대적으로 크게 나타났으나 태백은 MSE가 3.63으로 작은 값을 보였다. 특히 태백의 FAR가 높고, MSE가 작은 것은 한기해안형에 해당하는 20개 사례 중 7개 사례만이 5mm 이상으로 나타나 다른 관측 지점에 비하여 관측 강수량이 작기 때문인 것으로 생각된다.

난기형에서 TS는 0.55-0.59로 유형별 특징과 일관되게 상대적으로 높은 정확도 값을 보였다. 또한 POD도 동해가 0.77로 가장 높은 값을 보이며, 태백과 속초가 각각 0.73과 0.74, 그리고 강릉과 대관령이 각각 0.68과 0.66의 값으로 다른 유형에 비해 상대적으로 높은 것으로 나타났다. 태백은 산악형과 한기해안형에서와 유사하게 FAR (0.59)가 상대적으로 높은 값을 보였으며, 다른 지역은 0.15-0.29의 분포를 보였다. MSE는 대관령이 37.97, 동해와 태백 또한 각각 22.17과 25.43으로 다른 유형에 비해 상대적으로 높은 값을 보였으며, 속초와 강릉은 16.83과 16.93으로 상대적으로 낮게 나타났다. 따라서 난기형의 경우 강수 유무에 대한 예측은 상대적으로 잘 이루어졌으나, 강수량을 조금 과대 모의함을 알 수 있다.

MM5 예측 강수에 대한 정확도를 살펴보기 위해 모의된 강수량을 양적 측면과 공간적 측면으로 살펴보았다. 앞서 살펴본 MSE의 경우 강수량에 대한 오차는 알 수 있으나, 강수량의 과대 혹은 과소 모의하는 경향을 파악하기 어렵다. 따라서 양적인 검증을 위해 PMM을 사용하였다. 이를 위해 5개 지점 (속초, 대관령, 강릉,

동해, 태백)의 3시간 누적 강수량 관측 자료와 MM5 모의 강수량 자료의 누적 빈도 분포를 Figs. 3-5에 나타내었다. 산악형에서 약 5 mm/3hr 이하에 대해서는 관측값과 모델값이 잘 일치하는 것으로 나타났으나, 약 5-15 mm/3hr 사이의 강수에 대해서는 모델이 조금 과대 모의하는 경향을 보였다 (Fig. 3). 지역적으로 조사해 보면 대관령의 경우 약 20 mm/3hr 사이의 강수량에 대해서는 과대 모의하는 경향을 보였다. 그러나 강릉은 약 8 mm/3hr 이하의 경우 과소 모의하는 특징을 보였다 (Fig. 6).

한기해안형 강수 유형은 약 10 mm/3hr 이하에 대해 과대 모의하는 경향을 보이지만, 그 차이는 다른 유형에 비해 상대적으로 작게 나타났다 (Fig. 4). 대관령 지점은 상대적으로의 강수량 모의가 잘 이루어진 것으

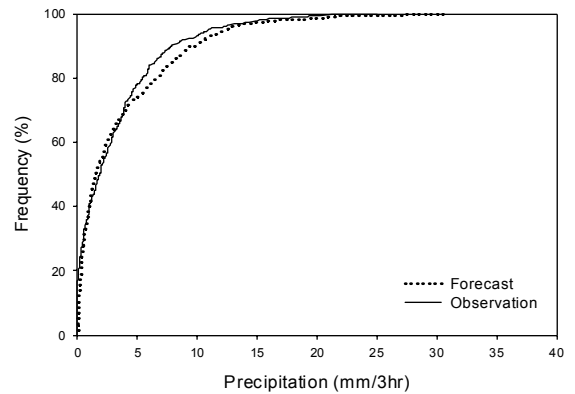


Fig. 3. Cumulative frequency (%) distribution of mountain type precipitation (mm/3hr).

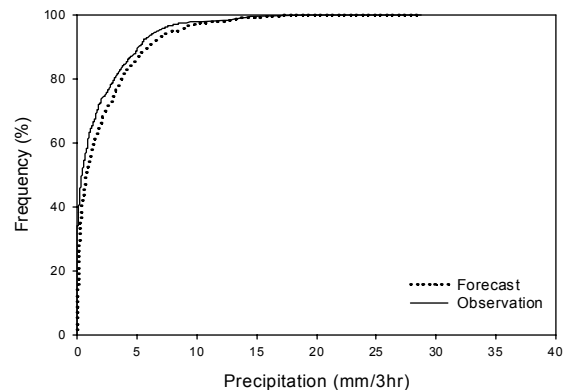


Fig. 4. Same as Fig. 3 except for cold-coastal type.

로 보이며, 이것은 대관령이 한기해안형인 경우 다른 유형에 비해 상대적으로 MSE가 낮은 것과도 잘 일치하는 것으로 보인다. 다른 유형에 비해 상대적으로 MSE가 컸던 한기해안형은 강수량 예측 경향 분석에도 그 특징이 잘 나타났다 (Fig. 7). 난기형은 약 5 mm/3hr 이상인 경우 상대적으로 강수량을 과대 모의하는 경향을 보였다 (Fig. 5). 또한 지역별 분석에서 약 5 mm/3hr 이하에 대한 모의는 잘 이루어 졌으나, 그 이상의 경우는 모든 지역에서 과대 모의하는 것으로 나타났다 (Fig. 8). 이것은 난기형은 한반도 남쪽 지역에 위치한 저기압의 영향으로 인해 난기가 유입되어 상대적으로 따뜻한 공기의 유입에 의한 유형으로 설명하고 있으며

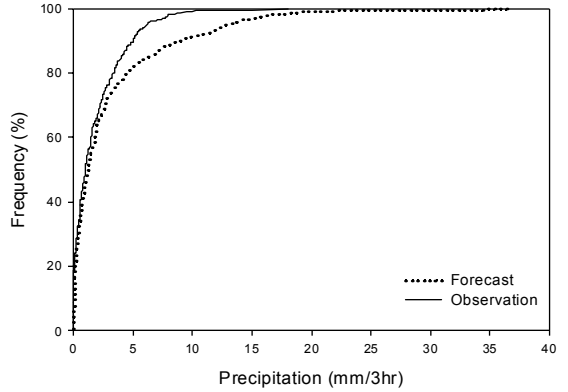


Fig. 5. Same as Fig. 3 except for warm type.

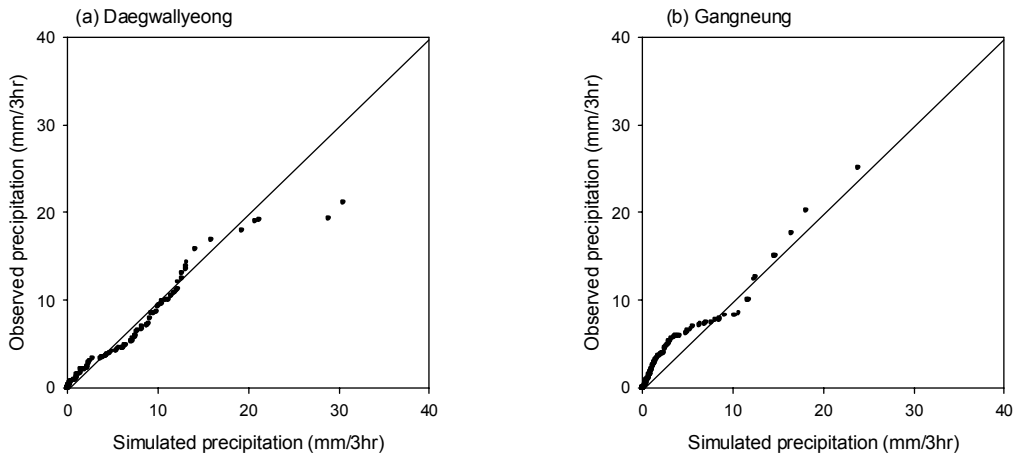


Fig. 6. Scatter plots of observed and simulated precipitation (mm/3hr) at (a) Daegwallyeong and (b) Gangneung for mountain precipitation type.

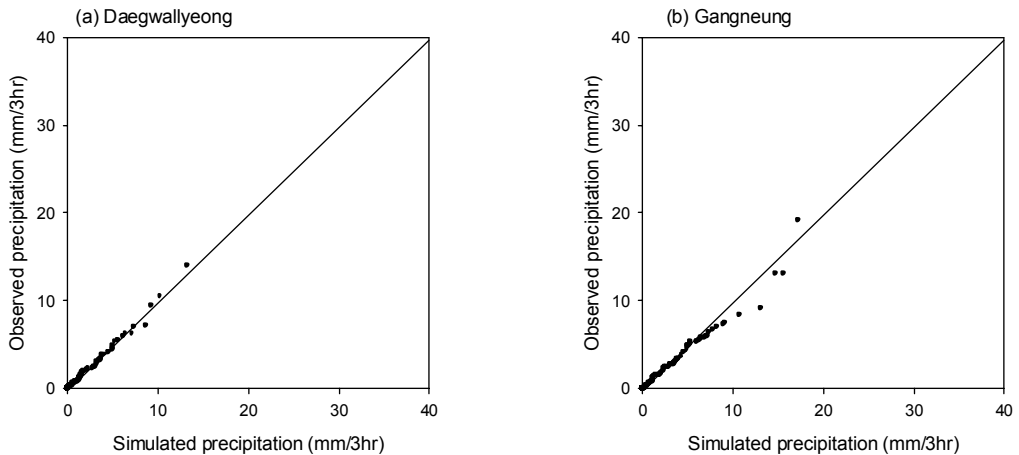


Fig. 7. Same as Fig. 6 except for cold-coastal type.

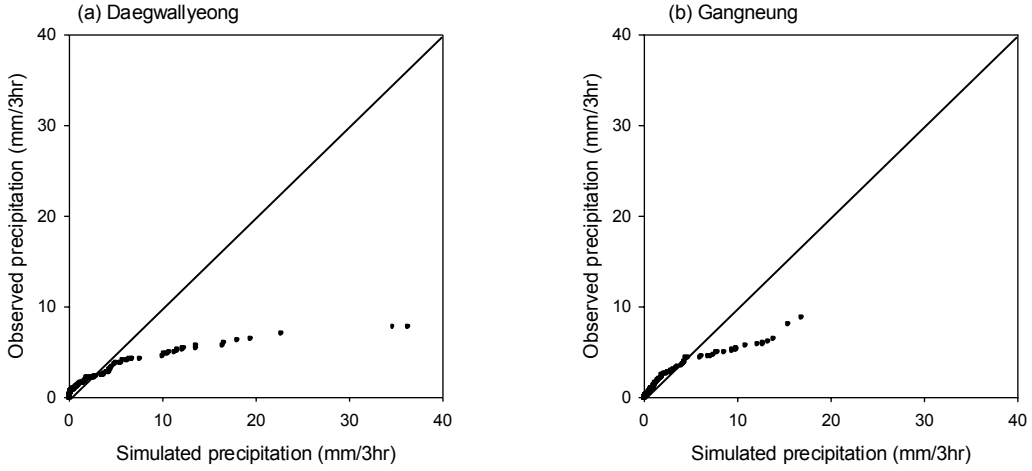


Fig. 8. Same as Fig. 6 except for warm type.

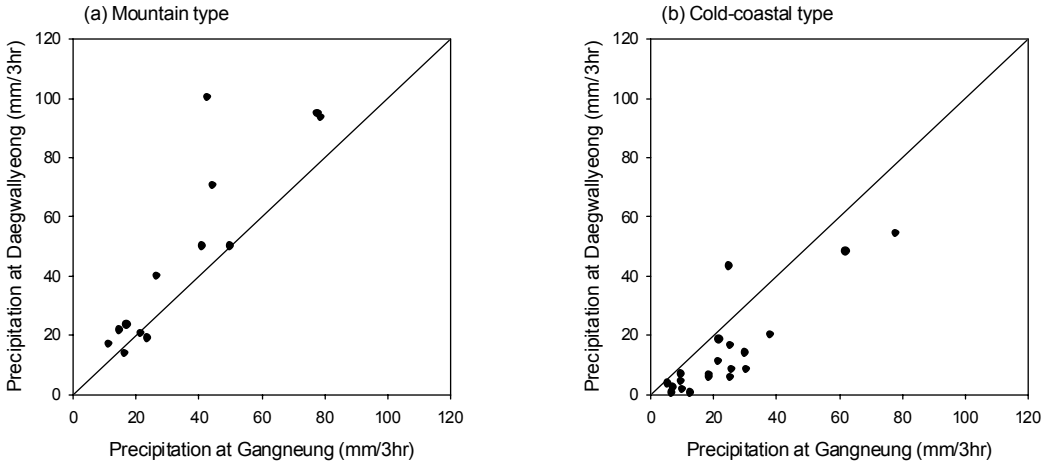


Fig. 9. Scatter plots of the observed precipitation (mm/3hr) on (a) mountain (13) and (b) cold-coastal (20) precipitation type at Gangneung and Daegwallyeong.

로 0°C 이하는 모두 빙적으로 가정하는 Simple-ice 방법의 사용에 기인하는 것으로 사료된다.

영동지역 겨울철 강수 유형의 특징 중 하나는 산악형은 산악지역에 강수량이 많으며 한기해안형은 해안지역에 강수량이 많은 경향을 보이는 것이다 (정광범 등, 2004). 이러한 경향을 모델이 잘 모의하는지를 살펴보기 위해 대관령과 강릉의 사례 총 강수량을 비교하고자 한다. 대관령과 강릉은 관측 자료가 충분하고, 또한 비슷한 위도대에 있어 산악과 해안 지역의 강수 현상 비교가 용이하여 산악지역과 해안지역의 대표 지점으로 사용하였다 (정광범 등, 2004). Fig. 9는 관측

강수량에 대한 대관령과 강릉의 강수량 분포를 나타낸 것이며, Fig. 10은 예측 강수량에 대한 것이다. 예측된 사례 총 강수량은 산악형과 한기해안형 강수 유형의 특징을 상대적으로 잘 모의하는 것으로 나타났다. 즉, 산악형의 경우 대관령에 강수량이 많으며, 한기해안형의 경우 강릉에 강수량이 많은 특징을 보였다.

5. 예측 정확도가 낮은 사례의 분석

MM5에 의해 모의된 사례는 강수가 있는 사례이므로, 강수가 관측되었을 때 예보가 맞을 확률을 나타내

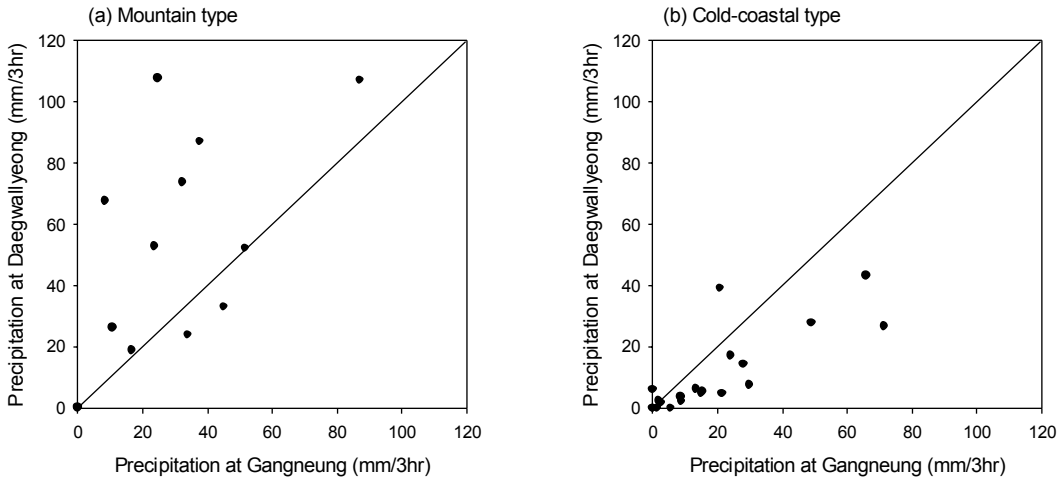


Fig. 10. Same as Fig. 9 except for simulated precipitation.

는 POD가 0.2 이하인 사례를 예측 정확도가 낮은 사례로 정의하였다. 예측 정확도가 낮은 사례는 전체 57개 사례 중 12개이며, 한기해안형 7개, 난기형 3개, 산악형 2개 순으로 나타났다. 관측 자료에서 한 사례의 5개 지점 강수를 모두 합하여 나타낸 사례 누적 강수량이 약 23 mm 이하인 사례는 4개이며, 나머지 8개 사례는 약 60-300 mm 사이의 분포를 보였다 (Table 2). 관측 강수량이 상대적으로 많은 후자 사례는 모두 영동지역과 가까운 동해상에 주로 강수가 분포하는 것을 볼 수 있었다. 따라서 강수대가 영동지역까지 유입되지 못하여 예측 정확도가 낮은 것으로 생각된다. 관측 강수량이 상대적으로 적은 4개 사례 중 2개 사례는 모의 강수량과 관측 강수량이 비슷한 분포를 보였다. 그러나 나머지 2개 사례는 동해상의 강수가 분포하는 것으로 나타났다. 따라서 공간적 검증은 영동지역과 가까운 동해상에 강수가 분포하는 10개 사례에 대해 시도 하였으며, 이들 사례는 대부분 한기해안형에서 나타났다. 모의 강수량과 관측 강수량이 유사하나 예측 정확도가 낮은 2개의 사례는 공간적 검증에서 제외하였다.

수치모델의 초기 및 경계 자료의 분해능에 대한 민감도 실험에서 분해능이 약 55 km인 GDAPS의 초기 및 경계 자료를 사용한 경우가 약 250 km인 NCEP/NCAR 초기 및 경계 자료를 사용한 경우보다 bias와 RMSE에 있어 더 좋은 결과를 보여 주었다 (이재규 2006, personal communication). 또한 영동대설 사례

를 대상으로 해수면 온도에 따른 중규모 대기 모형의 반응을 실험하여 해수면 온도의 적절한 처방이 중요함을 안중배와 조익현 (1998)이 밝힌바 있다. Lee *et al.* (2001)는 MM5를 이용하여 고해상도 해수면 온도 (GMS SST, 18km) 처방의 경우가 NOAA OISST (약 100 km) 처방의 경우와 비교하여 기온 예측 능력이 향상되었음을 보였다. 이러한 선행 연구결과를 바탕으로 볼 때, 예측 정확도가 낮은 사례는 12개 중 10개 사례가 동해상 강수 분포가 나타나는 특징을 보이는 것은 해수면 온도의 낮은 해상도 또는 초기장의 낮은 해상도에 기인하는 것으로 추정된다.

이 연구에서는 강수 영역이 동해상에 발생한 사례의 경우는 고해상도 해수면 온도 처방으로 인해 강수 예측 능력이 향상될 수 있을지에 대한 의문을 해결하기 위해 약 18 km 해상도의 MCSST를 처방하여 비교하였다. MCSST는 위성 관측 자료이므로 구름이 있는 날의 관측율은 맑은 날의 관측율 보다 낫다. 따라서 관측되지 못한 지점은 관측된 지점의 자료를 바탕으로 내삽하여 계산하므로, 자료에 대한 신뢰도가 낮아진다. 따라서 동해를 포함하는 128-140°E, 35-44°N 영역내의 관측 비율이 35% 이상인 자료를 사용하였다. 또한 MCSST (약 18 km) 자료는 OISST (약 100 km)와 동일하게 주평균 자료이다. 사례 기간 중 MCSST의 관측율이 낮은 경우, 전후 일주 자료를 사용하였으나, 1995년 사례의 경우 해수면 온도자료가 없어 제외하였다. MCSST 처방의 경우, 동해상의 강수량은

OISST 처방의 경우보다 상대적으로 강수량이 증가하는 것으로 보였다 (Fig. 10). 그러나 강수 분포에 대한 차이는 나타나지 않았다. 즉, 동해상에 분포한 강수대가 내륙으로 유입되지 않은 것으로 보였다. 따라서 중규모 모델에서 고해상도 해수면 온도 처방이 강수 예측 정확도를 향상 시키지 않는 것으로 보인다.

예측 정확도가 높은 사례 즉, POD가 0.2 이상인 사례의 경우 동풍이 유입되는 시각과 강수가 있는 시각이 밀접한 연관성을 나타냈다. 이러한 결과는 정광범 등 (2004)이 영동 지역 겨울철 사례 강수가 3 mm 이상인 사례의 경우 90% 이상이 대관령 동풍과 관련되어 있다는 결과와 잘 일치하는 것으로 생각된다. Fig. 11은 예측 정확도가 낮은 사례 중 2000년 1월 24일-25일 사이의 사례의 연직 바람 분포를 나타낸 것이다. 대관령과 강릉 지점에 대하여 1000-700 hPa 사이의 풍향과 풍속 시간 변화를 나타낸 것이며, 동풍일 경우 색으로 표시하였다. 대관령의 경우 850-700 hPa 사이 자료

이며, 시간 간격은 1시간이다. 700 hPa에서는 대부분 서풍 또는 북서풍 계열의 바람을 나타내며, 1000-850 hPa 사이에서 또한 700 hPa가 유사한 분포를 보이거나, 약한 동풍을 나타냈다. 동풍을 나타낸 사례의 경우라도 풍속이 상대적으로 약하며, 지속시간도 3-4시간 정도로 짧은 것으로 나타났다. 따라서 영동 해안 지역의 바람, 특히 동풍류의 유무와 풍속의 강도 그리고 지속 시간은 영동지역 강수와 밀접하게 연관되어 있음을 알 수 있다.

Table 5는 POD가 0.2 이하인 사례를 제외하였을 경우 강수 유형별 정확도를 나타낸 것이다. TS는 0.05-0.09정도의 차이를 보이며, 난기형 0.58, 산악형 0.56, 한기해안형 0.50 순으로 나타났다. POD는 산악형 0.89, 난기형 0.78, 한기해안형 0.72로, 제외하지 않은 경우보다 산악형과 한기해안형의 증가 값이 각각 0.2와 0.17로 난기형 0.07에 비해 상대적으로 많이 증가하는 것으로 나타났다. FAR는 산악형 0.39, 한기해안

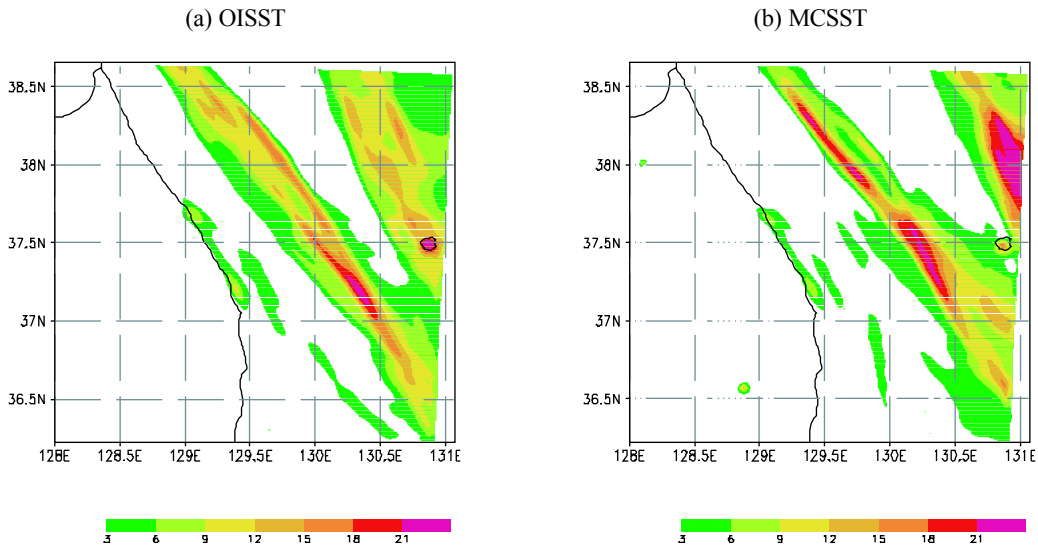


Fig. 11. Accumulated precipitation of model simulation for (a) OISST and (b) MCSST treatment from 06UTC 24 to 12UTC 25 January 2000.

Table 5. Measured accuracy of precipitation forecast (mm/3hr) in the 3 precipitation types (2km). (Except for events with low accurate prediction)

Precipitation type	Accuracy measures			
	TS	POD	FAR	MSE
Mountain (11)	0.56	0.89	0.39	19.34
Cold-coastal (13)	0.50	0.72	0.38	15.97
Warm (21)	0.58	0.78	0.31	27.14

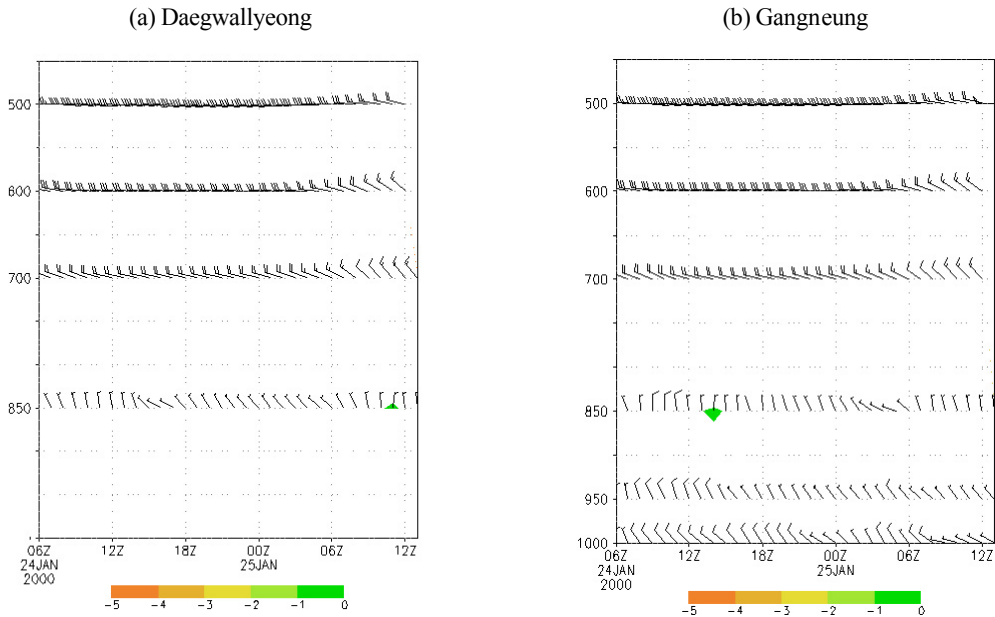


Fig. 12. Time series of vertical wind profile at (a) Daegwallyeong and (b) Gangneung for 30 hours from 06UTC 24 to 12UTC 25 January 2000.

형 0.38, 난기형 0.31로 POD가 0.2 이하인 사례를 제외하였음에도 0.01 정도로 큰 차이를 보이지 않는 것으로 나타났다. 이것은 모델이 강수를 예측했으나 강수가 관측되지 않은 비율을 나타내는 FAR를 계산하는데 제외된 사례가 거의 영향을 미치지 않는 것으로 볼 수 있다. MSE는 산악형과 한기해안형은 감소하는 반면, 난기형은 오히려 증가하는 것으로 나타났다. 이것은 난기형의 경우 제외된 사례의 MSE 값이 작기 때문이다. 즉, 총 합계는 변화가 거의 없는 반면, 사례 수가 줄어들기 때문이다.

6. 요약 및 토의

이 연구에서는 1989년부터 2001년 동안 57개 사례의 모의를 통한 통계적 검증을 시도 하였다. 또한 이러한 사례 검증은 강수 유형 (산악형, 한기해안형, 난기형)에 따라 이루어졌으며, 양적 검증과 공간적 검증을 통한 다양한 검증 방법을 시도하였다. 이를 위해 현재 강원지방기상청에서 중·소규모 약기상의 예측을 위하여 운영하고 있는 단시간 예측 시스템의 환경과 유사한 환경에서 모의하였다. 과거 사례에 대한 모의이므로 자료동화 부분은 제외되었으며, 초기장은 NCEP/

NCAR 재분석 자료를 사용하였다. 이 연구는 수치모의 결과에 대한 통계적 검증과 강수 특징에 따른 강수 유형 분류를 바탕으로 검증을 시도하였다.

연구에 사용된 모델 초기장은 NCEP/NCAR 재분석 6시간 간격 자료 (2.5°×2.5°)를 이용하였다. 해수면 온도는 가장 보편적으로 사용하는 NOAA에서 산출된 주평균 OISST (1°×1°)를 사용하였다. 수치 모의 결과 값을 검증하는데 사용된 방법은 TS, POD, FAR이며, 강수량의 정량적인 검증을 위한 MSE를 계산하였다. 또한 모의된 강수의 검증을 위해 양적 측면과 공간적 측면으로 살펴보았다. 양적 검증을 위해 사용된 방법은 PMM 방법이며, 공간적 검증을 위해 예측 정확도가 낮은 사례에 대해 MCSST (약 18 km) 자료를 처방하여 OISST (약 100 km)를 처방한 결과와 비교하였다.

예측 정확도 분석에서 강수가 관측되었을 경우, 예보가 맞을 확률을 나타내는 POD는 난기형 0.71, 산악형 0.69, 한기해안형 0.55 순으로 나타났다. 모델이 강수를 예보하였을 경우, 강수가 관측되지 않을 확률을 나타내는 FAR는 난기형 0.32, 한기해안형 0.39, 산악형 0.40순으로 나타났다. 예측 강수량과 관측 강수량의 차이를 제공한 평균을 나타내는 MSE는 다른 유형보다 난기형이 상대적으로 크게 나타났다. 그러나 MSE는 모델

의 과대 혹은 과소 모의 경향을 살펴 볼 수 없으므로, 누적 빈도 분포를 통하여 양적인 측면을 살펴보았다.

양적인 검증에서 강수 유형별로 살펴보았을 때, 산악형과 한기해안형은 상대적으로 잘 일치하는 것으로 나타났으나, 지역적으로는 조금 과소 혹은 과대 모의하는 경향이 있었다. 한편, 난기형은 약 5 mm/3hr 이상인 경우 상대적으로 강수량을 과대 모의하는 경향을 보였다. 이러한 경향은 지역별 조사에서도 동일하게 나타났다. 따라서 MM5 모의 결과에서 난기형의 경우 강수 유무에 대한 예보 정확도는 높으나, 강수량에 대한 정량적 예보의 정확도는 낮은 것으로 나타났다. 반면, 한기해안형의 경우 강수 유무에 대한 예보 정확도는 낮으나, 강수량에 대한 정량적 예보의 정확도는 높게 나타났다. 그러나 산악형의 경우는 강수 유무에 대한 예보 정확도와 강수량에 대한 정량적 예보 둘 다 높은 것으로 나타났다. 따라서 MM5 모의 결과를 이용하는 예보자는 난기형의 경우 강수량 예보에 유의해야 하며, 한기해안형의 경우는 강수 유무 예보에 주의할 필요가 있다.

POD가 0.2 이하인 12개의 사례 중 10개 사례가 영동지역과 가까운 동해상에 강수대가 분포하는 특징을 보였으며, 이들 사례는 대부분 한기해안형에서 나타났다. 이 사례들에 대한 공간적인 검증을 위해 고해상도 해수면 온도를 처방하였다. 이 처방에서 동해상 강수가 조금 증가하는 경향은 보이나, 동해상에 분포한 강수대가 영동지역으로 유입되지는 않았다. 이것은 중규모 모델에서 고해상도 해수면 온도 처방이 영동 지역 겨울철 강수 예보의 개선에 크게 영향을 미치지 않는다는 것을 의미한다. 또한 예측 정확도가 높은 즉, POD가 0.2 이상인 사례들의 경우 동풍이 유입되는 시각과 강수가 있는 시각이 밀접한 연관성을 보였다. 그러나 예측 정확도가 낮은 사례의 경우는 동풍이 없거나 있더라도 풍속이 매우 약하며 지속 시간도 짧은 것으로 나타났다. 따라서 한기해안형의 경우 수치모의 결과에서 영동지역과 가까운 동해상에 강수대가 분포할 경우 영동지역의 관측 바람장 뿐만 아니라 종관 예측장을 참고하여 동풍의 유무를 조사할 필요가 있다. 특히 10분마다 관측이 이루어지는 강릉대학교의 윈드 프로파일러 자료가 유용할 것으로 생각된다.

영동 대설과 관련된 수치모델 연구는 과거 몇 가지 사례에 국한 되어 이루어져 왔으나 이 연구에서는 57개의 사례를 모의함으로써 통계적 신뢰도를 검증하였다. 또한 이러한 검증은 영동지역 겨울철 강수 유형

(산악형, 한기해안형, 난기형)에 따라 이루어졌으며, 양적 검증과 공간적 검증을 통한 검증 방법을 시도 하였다. 특히 공간적 검증에서 자료의 고해상도 해수면 온도만을 처방하여 실험하였으나, 다른 변수들의 고해상도 초기장에 대한 실험 또한 도움이 될 것으로 생각된다. 이러한 과거 사례에 대한 검증은 자료의 제한점과 검증에 사용된 관측 자료가 부족하긴 하지만, 수치 예보 결과를 이용하여 영동대설을 예보하는 예보자에게 도움을 줄 것이다.

감 사

이 연구는 기상청에서 수행하는 기상지진기술개발 사업의 하나인 “국지기상 예측기술 개발/강원지방 폭설 예측기술개발” 과제에서 수행된 것이며, 이 논문을 심사하여 주시고 많은 조언을 해주신 심사위원들께 감사드립니다.

참고문헌

- 권태영, 이방용, 이정순, 2001: 동해지역 NOAA/AVHRR 고해상도 주평균 해수면 온도의 통계적 분석: 지역적 변동성과 엘니뇨/남방진동과의 관계성. *한국해양연구원*, **23**, 361-376.
- 김용상, 박옥란, 황승언, 2002: 기상연구소의 국지규모 기상 분석 및 예측 시스템(KLAPS)의 실시간 운영. *한국기상학회지*, **38**, 1-10.
- 김지연, 권태영, 이방용, 2005: 영동대설 사례와 관련된 동해상의 현열과 잠열 분포. *한국해양연구원*, **27**, 237-250.
- 안중배, 조익현, 1998: 한반도 주변 해수면 온도에 따른 중규모 대기 모형 반응. *한국기상학회지*, **34**, 643-651.
- 이재규, 2001: 영동해안 대설사례의 수치모의 연구. *한국기상학회지*, **37**, 1-12.
- 이태영, 변건영, 신철수, 2003: *강설예보를 위한 수치 예측 활용 연구*. 연세대학교, 44pp.
- 장동언, 장태규, 이용희, 조천호, 안명환, 2005: 단시간 수치예보를 위한 ATOVS 산출 온도 자료의 활용. *한국기상학회지*, **41**, 599-613.
- 전종갑, 이동규, 이현아, 1994: 우리나라에서 발생한 대설에 관한 연구. *한국기상학회지*, **30**, 97-117.
- 정광범, 김지연, 권태영, 2004: 영동지역 겨울철 강수와 관련된 하층 바람의 특성. *한국기상학회지*, **40**, 369-380.
- 조구희, 조영준, 권태영, 2004: 겨울철 영동지역 강수 사례와 관련된 기단의 특성. *한국기상학회지*, **40**, 381-393.
- Colle, B. A., K. J. Westrick, and C. F. Mass, 1999: Evaluation of MM5 and Eta-10 precipitation forecasts over the pacific northwest during the cool season. *Wea. Forecasting*, **14**, 137-154.

- Dudhia, J., 1989: Numerical study of convection observation observed during the winter monsoon experiment using a meso scale two-dimensional model. *J. Atmos. Soc.*, **46**, 3077-3107.
- Gaudet, B., and W. R. Cotton, 1998: Statistical characteristics of a real-time precipitation forecasting model. *Wea. Forecasting*, **13**, 966-982.
- 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.
- Lee, Y.-H., and M.-H. Ahn, 2001: The impact of high resolution SST on the performance of temperature prediction in a short-range prediction. *J. Kor. Meteor. Soc.*, **37**, 607-619.
- 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**, 16663-16682.
- Reisner, J., R. M. Rasmussen, and R. T. Bruintjes, 1998: Explicit forecasting of supercooled liquid water in winter storms using the MM5 mesoscale model. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **124**, 1071-1107.
- Reynolds, R. W., and T. M. Smith, 1994: Improved global sea surface temperature analysis using optimum, interpolation. *J. Climate*, **7**, 929-948.
- Wilks, D., 1995: *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences: An Introduction*. Academic Press, 467 pp.