

한반도 지형이 대상수렴운의 생성에 미치는 영향에 관한 WRF 민감도 실험

김유진 · 이재규*

강릉원주대학교 대기환경과학과

(접수일: 2014년 11월 11일, 수정일: 2014년 12월 16일, 게재확정일: 2014년 12월 31일)

WRF Sensitivity Experiments on the Formation of the Convergent Cloud Band in Relation to the Orographic Effect of the Korean Peninsula

Yu-Jin Kim and Jae Gyo Lee*

Department of Atmospheric and Environmental Sciences, Gangneung-Wonju National University, Gangneung, Korea

(Manuscript received 11 November 2014; revised 16 December 2014; accepted 31 December 2014)

Abstract This study was conducted to perform various sensitivity experiments using WRF (Weather Research and Forecasting) model in order to determine the effects of terrains of the Korean Peninsula and the land-sea thermal contrast on the formation and development of the convergent cloud band for the cases of 1 February 2012. The sensitivity experiments consist of the following five ones: CNTL experiment (control experiment), and TMBT experiment, BDMT experiment and ALL experiment that set the terrain altitude of Taebaek Mountains and Northern mountain complex as zero, respectively, and the altitude of the above-mentioned two mountains as zero, and LANDSEA experiment that set to change the Korean Peninsula into sea in order to find out the land-sea thermal contrast effect. These experiment results showed that a cold air current stemming from the Siberian high pressure met the group of northern mountains with high topography altitude and was separated into two air currents. These two separated air currents met each other again on the Middle and Northern East Sea, downstream of the group of northern mountains and converged finally, creating the convergent cloud band. And these experiments suggested that the convergent cloud band located on the Middle and Northern East Sea, and the cloud band lying on the southern East sea to the coastal waters of the Japanese Island facing the East Sea, were generated and developed by different dynamical mechanisms. Also it was found that the topography of Taebaek Mountains created a warm air advection region due to temperature rise by adiabatic compression near the coastal waters of Yeongdong Region, downstream of the mountains. In conclusion, these experiment results clearly showed that the most essential factor having an effect on the generation and development of the convergent cloud band was the topography effect of the northern mountain complex, and that the land-sea thermal contrast effect was insignificant.

Key words: The convergent cloud band, WRF (Weather Research and Forecasting) model, sensitivity experiments, Taebaek mountains, Northern mountain complex

*Corresponding Author: Jae Gyo Lee, Department of Atmospheric and Environmental Sciences, Gangneung-Wonju National University, Gangneung 210-702, Korea.
Phone : +82-33-643-2322, Fax : +82-33-643-2320
E-mail : ljgyoo@gwnu.ac.kr

1. 서 론

대상수렴운(Convergent Cloud Band)은 일본 열도 쪽으로 저기압이 통과하면서 대륙성 고기압이 동해상으로 세력을 확장할 때 나타나는 대륙성 구름으로 기단 변질과 수렴에 의해 생성된다. 즉, 중관 규모 시스템에 의해 개마고원, 함경산맥, 백두산 등을 포함하는 고산 지대인 북쪽 산맥군으로 북서 계열의 기류가 유입되면서, 북쪽 산맥군의 지형에 의해 기류가 둘로 분리된다. 그리고 이 두 기류는 풍하측에서 합류됨에 따라 강한 하층 수렴역이 조직적으로 형성되며, 이로 인하여 대류운이 강하게 발달하게 되어 띠 모양의 대상수렴운이 발달하고 조직화된다(Uemura, 1981; Hozumi and Magono, 1984; Yagi, 1985; Asai, 1988; Nagata, 1991; Kim and Lee, 2014).

대상수렴운의 형성에 영향을 미칠 수 있는 여러 요인으로는 1) 태백산맥 및 북쪽 산맥군의 지형 효과, 2) 대륙에서 따뜻한 해상으로 거처오는 거리에 따른 기단변질 효과, 3) 육지와 해양의 열적 특성의 차이들을 들 수 있다(Asai, 1965; Magono et al., 1966; Yagi, 1985; Nagata et al., 1986; Yagi et al., 1986; Nagata, 1987). Yagi et al. (1986)의 연구에 따르면 한반도 북부의 산악 지대가 한기를 저지하고 우회시켜 풍하측으로 저압부와 수렴역을 형성하며, 여기에 강한 대류가 발생하여 대상수렴운이 형성된다고 하였다. Nagata et al. (1986)은 한반도의 지형이 1) 평야 또는 산악 지형이 있는 지표, 2) 매끄럽거나 울퉁불퉁한 지표, 그리고 3) 육지를 해양으로 변경한 수치모의 실험을 수행하였다. 그 결과, 한반도를 지나는 차가운 기류는 차가운 지표로부터 적은 열과 수증기를 공급받는 반면, 동해를 지나는 기류는 따뜻한 해수면으로부터 많은 양의 열과 수증기를 공급받기 때문에, 한반도의 끝 남동쪽 경계에 중규모 고기압을 발생시켜, 동해 해상에서 수렴역을 형성하고, 강수밴드를 조직화한다고 하였다. 그리고 한반도 북쪽 산맥 지형에 대해 풍하측인 원산만 부근에서는 단열 압축으로 기온은 상승하고 기류가 약화되며, 반면에 블라디보스톡 남쪽으로는 차가운 기류의 유입으로 기온이 하강하여 동해 북부 해상에 열적 대비를 형성시켜 하층 수렴을 가진 저압부가 생성되어 대상수렴운을 강화시킨다고 하였다. 즉, 강수밴드(수렴역)의 형성을 이끄는 요소는 거칠기 또는 한반도의 지형이 아니라 한반도와 동해 사이의 열적 대비임을 보였다.

한편, Nagata (1991)는 하부 경계 강제력[육지-해양의 열적 대비, 중규모 산악 지형의 블로킹 효과(blocking effect), SST (Sea Surface Temperature) 분포 특성]이 대상수렴운의 형성에 기여하는 정도와 한반도의 북쪽 산악 지형에 의해 하층 수렴역이 생성되는 원인을 파

악하고자 수치모의 실험을 수행하였다. 그 결과, 북쪽 산악 지형에 의한 성층 유체의 차단 및 한기 이류 저지가 발생하면서 동해 북부 해상으로 국지적인 경압대와 북동-남서 방향으로의 기온 경도가 형성되어, 북쪽 산악 지형이 대상수렴운을 형성하는데 육지-해양의 열적 대비보다 중요한 역할을 하는 것으로 수정하여 언급하였다. 또한, 이 연구에서 Nagata et al. (1986)의 실험 결과에 대한 논의에서 한반도 산악 지형의 지형 효과가 다소 과소평가 되었다고 언급하였으며, 그 이유로 1) 산악 지형에 의해 생성된 교란이 풍하측까지 도달하기에는 적분 시간(12 hr)이 짧았고, 2) 한반도에서의 하층 경계 요소를 실험할 때, 한반도의 북쪽 산악 지형을 포함하지 않고 단순히 한반도 내의 산악 지형을 제거하였으며, 3) Nagata (1991)에서 사용된 적운 모수화 기법(Kuo-type scheme; Geleyn, 1985)과 Nagata et al. (1986)에서 사용된 적운 모수화 기법(Kurihara's moist convective adjustment; Kurihara, 1973)이 다르기 때문이라고 설명하였다. 즉, Nagata et al. (1986)에서 사용된 적운 모수화 기법은 겨울철 따뜻한 해수면에서 약간 과도한 잠열을 방출하도록 하여, 바다에서 이 과도한 순 가열은 바다와 육지 사이의 차등 비단열 가열로 과대모의 할 수 있다고 하였다.

한편, Asai (1988)는 동해상에서 발달한 대상수렴운 또는 그 주변 영역을 가리켜 E(J)PCZ [the East (Japan) Sea Polar air-mass Convergence Zone]이라고 명하였다. Yosizaki et al. (2004)은 WMO-01 [Winter MCSs (Mesoscale Convective Systems) Observations over the Japan Sea in 2001] 관측 기간 동안에 한반도에서 일본의 산인과 후쿠리쿠 지역 쪽으로 형성되는 구름밴드에 대해 관측된 자료와 수치모의 실험을 수행하여, 열과 수분 수지와 관련된 E(J)PCZ의 특징을 연구하였고, Ohigashi and Tsuboki (2007)는 시베리아 고기압이 확장할 때, E(J)PCZ에 대해 CRESS (Cloud Resolving Storm Simulator) 모델을 이용하여 상층 대기의 변화가 E(J)PCZ에 미치는 영향을 연구하였으며, E(J)PCZ는 중층 대기의 중규모 한기핵이 E(J)PCZ로부터 떨어질 때, 남쪽으로 이동하면서 약화된다고 하였다. Ohtake et al. (2009)은 일본 북부 해안 지역에 폭설을 내리는 구름대와 관련하여 홋카이도와 러시아의 시호테알린산맥을 중심으로 민감도 실험을 수행하였으며, 시호테알린산맥의 지형이 북 또는 북서 기류를 형성하여 구름대의 형성 및 강화에 영향을 주는 것을 확인하였다. Eito et al. (2010)은 2001년 1월 14일 관측된 카사만(Wakasa Bay) 부근의 E(J)PCZ 구름대의 일부인 Transversal Cloud Band에 대해 관측 자료와 수치모의 결과를 분석하여, Transversal Cloud Band의 간격, 연직 크기 및 방향, 운동학적 및 열역학적 구조, 그리고 형성 메커니즘 등 분석된 내용을

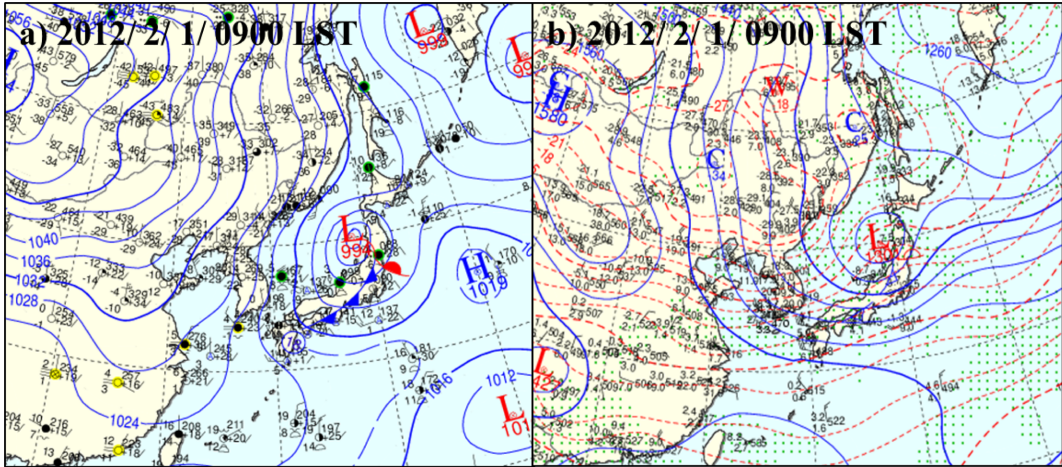


Fig. 1. (a) Surface synoptic chart and (b) 850 hPa synoptic chart at 0900 LST 1 February 2012.

기반으로 모식도를 제시한 바 있다.

Nagata et al. (1986)과 Nagata (1991)의 연구 이후, 대상수렴운의 형성 메커니즘에 있어 주요 요인이 한반도 북쪽 산악 지형에 의한 효과인지, 한반도와 동해사이의 열적 대비에 의한 효과인지에 대해서는 더 이상 논의가 이루어지지 않았으며, 더구나 태백산맥이 대상수렴운의 생성에 어떠한 영향을 미치는지에 관한 논의가 없었다. 따라서 본 연구의 기본 목적은 대상수렴운의 생성에 있어 잠재적으로 중요한 요인이라고 여겨지는 북쪽 산맥군의 지형, 태백산맥의 지형 그리고 바다와 열적으로 대비되는 한반도의 존재 중에서 가장 중요한 요인이 무엇이며, 그리고 한반도와 동해 사이의 열적 대비가 어떠한 역할을 하는지 등을 WRF (Weather Research and Forecasting) 민감도 수치실험을 통해 밝히고자 한다.

이 연구를 위해 정상적인 지형 정보를 포함한 기준 실험(CNTL 실험), 태백산맥의 지형 고도를 0으로 한 실험(TBMT 실험), 북쪽 산맥군의 지형 고도를 0으로 한 실험(BDMT 실험), 그리고 위의 두 산악 지형 고도를 0으로 한 실험(ALL 실험), 마지막으로 육지와 해양의 열적 대비 효과를 보기 위해 한반도를 바다로 바꾸어 설정한 실험(LANDSEA 실험)을 수행하고자 한다. 참고로 이 수치실험과 기존의 수치실험과의 큰 차이는 첫째, 기존의 수치실험에서 사용된 모델의 격자간격이 ~42 km인 반면에, 이 연구에서 사용된 WRF 수치모델의 격자간격은 ~0.667 km(최대 분해능)로 분해능이 더 좋은 점과 둘째, 기존의 실험에서는 태백산맥의 존재가 대상수렴운의 생성에 미치는 영향에 관한 실험은 없었으나 이 연구에서는 태백산맥의 존재가 대상수렴운의 생성에 미치는 영향에 관한 실험을 추가로 수행한 점이다.

수치모의 실험을 위하여 선정된 사례는 2012년 2월 1일 사례로 위성 영상 자료와 ASCAT (Advanced Scatterometer) 해상풍 영상 자료에서 동해 중·북부 해상에 대상수렴운이 뚜렷이 확인되는 사례이다. 그리고 이 사례는 Kim and Lee (2014)의 수치모의 연구 사례와 동일하다. 2절에서는 연구 사례에 대한 관측 분석을, 3절에서는 연구에서 사용된 수치모델과 실험 방법을, 4절에서는 수치실험의 결과를, 마지막으로 5절에서는 요약 및 결론을 제시한다.

2. 사례의 관측 분석

2.1 일기도 및 위성 영상 분석

대상수렴운이 발달한 2012년 2월 1일 0900 LST(Fig. 1a)의 지상일기도를 보면, 바이칼호 부근에 위치한 대륙성 고기압(1064 hPa)의 세력이 중국 화중과 동북 지역으로 뻗고 있으며, 일본 혼슈 연안에는 전선을 동반한 저기압 중심(996 hPa)이 위치하여, 서고동저 형태의 기압 배치임을 알 수 있다. 이에 따라 동해상으로는 북동 계열의 기류가 유입될 수 있는 조건이 형성되었다. 동 시간대의 850 hPa 상층 일기도(Fig. 1b)를 보면, 중국 동북 지역에 한기핵(-34°C)이 위치하며, 이 한기핵에서 뻗어 나온 온도골이 동해상으로 뻗고 있어 이 해역에서는 남북 간의 기온 경도가 강하다. 동해상으로 놓인 등고도선의 방향을 볼 때, 지균적으로 북풍 계열의 기류가 지배적임을 알 수 있다. 따라서 동해상으로는 강한 한기 이류가 일어나고 있음을 알 수 있다.

Figure 2는 TERRA/MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) 위성 영상 자료(Fig. 2a)와 ASCAT 해상풍 영상 자료(Fig. 2b)이다. TERRA/

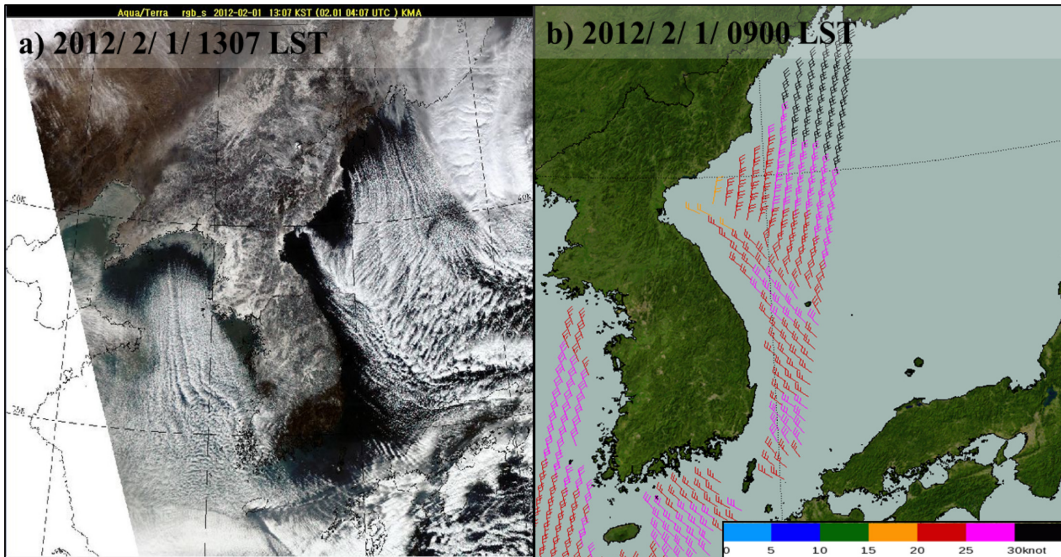


Fig. 2. (a) The TERRA/MODIS satellite RGB composite image at 1307 LST 1 February 2012 and (b) The ASCAT/Ocean wind satellite composite image at 0900 LST 1 February 2012.

MODIS 위성 영상 자료는 2012년 2월 1일 1307 LST의 영상 자료이며, 해상풍 영상 자료는 2012년 2월 1일 0900 LST에 해당하는 영상 자료이다. 해상풍 영상 자료의 경우, 풍속은 풍향 깃대의 색으로 구분하며, 검정색이 가장 강한 풍속을 나타낸다.

먼저, 위성 영상 자료(Fig. 2a)를 보면, 함경남도 앞바다 부근으로는 구름이 없는 역삼각형 모양의 지역이 있으며, 동해 북부 해상에서 중부 해상에 이르기까지 북서-남동 방향으로 형성된 발달한 대상수렴운이 뚜렷하게 보인다. 이 수렴운을 중심으로 남쪽으로는 지상 바람 방향에 평행하게 형성된 L 모드(Longitudinal mode)의 운역이, 북쪽으로는 지상 바람 방향에 수직하게 형성된 T 모드(Transverse mode)의 운역이 위치하며, 이러한 운역의 분류는 선행된 기존의 연구들(Yagi et al., 1986; Asai, 1988; Masayuki et al., 1993; Satoh et al., 2002; Yosizaki et al., 2004; Yoshinori et al., 2010; Kim and Lee, 2014)에서 언급된 바 있다.

해상풍 영상 자료(Fig. 2b)를 보면, 동한만에서 시작하여 강원도 앞바다에 이르는 해상에서는 북서 계열의 바람이 지배적이며, 풍속은 최대 약 25 knots 정도이다. 함경남도 앞 바다와 먼 바다에서는 주로 북풍 계열의 바람이 불며, 최대 약 20 knots의 풍속이 불고 있다. 이 두 바람은 동해 북부 해상에서 만나 수렴역을 이루는데, 이 위치는 위성 영상 자료(Fig. 2a)에서 나타난 대상수렴운의 위치와 잘 일치한다.

한편, 한·러 국경의 앞바다 부근으로는 북 또는

북북동 계열의 바람이 불고 있으며, 풍속이 약 30 knots 이상으로 강하게 나타난다.

3. WRF 수치모델 설정 및 실험 설계

이 실험에서 사용된 수치모델은 WRF V3.2 중규모 수치모델(Skamarock et al., 2008)이다. Figure 3은 대상수렴운이 나타난 동해를 중심(132.0°E, 40.0°N)으로 4개의 영역(D1~D4)과 언급할 북쪽 산맥군의 위치(붉은색 타원 영역)를 보여 준다. 각 도메인의 연직 층수는 31층으로 구성되었고, 모델 상한은 50 hPa로 설정하였다. 각 영역(D1~D4)의 수평 격자 수는 각각 120(동서)×120(남북), 232(동서)×241(남북), 547(동서)×586(남북), 832(동서)×1006(남북)으로 구성하였고, 격자 간격은 각각 18, 6, 2, 0.667 km의 양방향 등지 격자(two way nested grid)로 구성하였다. 모델의 초기 자료와 경계 자료는 격자 간격 1°×1°인 NCEP(National Centers for Environmental Prediction)의 FNL(Final analyses)을 사용하였다. 적분 시간은 2012년 2월 1일 0300 LST부터 2012년 2월 2일 0300 LST까지 24시간이다.

모든 수치실험에서 사용된 물리과정은 다음과 같다. 구름물리 과정은 WSM(WRF Single Momentum) 6 Class 기법(Hong and Lim, 2006)이며, 적운 대류 모수화 과정은 new Kain-Fritsch 기법(Kain, 2004)을 선택하였고, 격자 간격이 6 km 이상인 경우(D1과 D2)에서만 사용하였다. 복사 모수화 방안으로는 장파복사

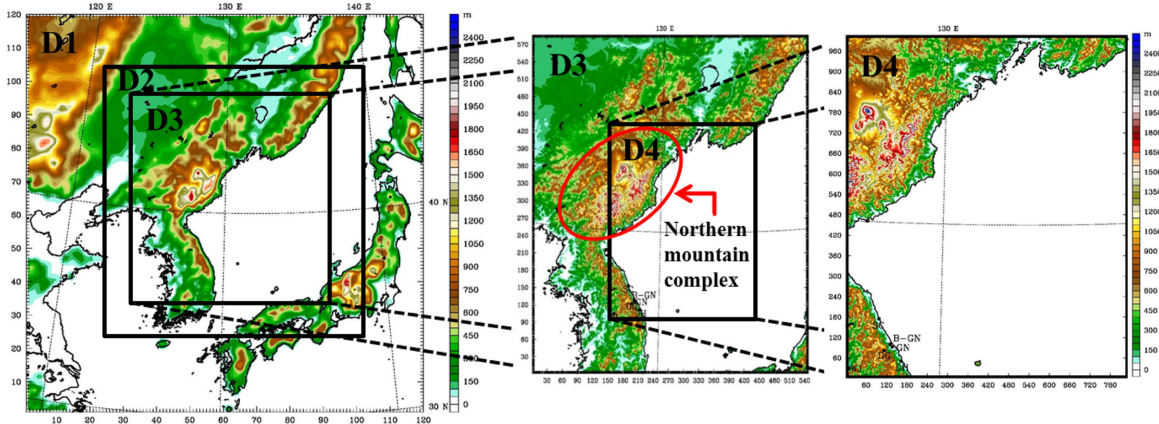


Fig. 3. Geographic representation of domain1 (D1), domain2 (D2), domain3 (D3), and domain4 (D4) for the WRF sensitivity experiments (from Kim and Lee, 2014, their Fig. 1). Topography is represented with shading based on the scale (m) right of figure. The oval of red line in D3 indicates Northern mountain complex.

Table 1. Configuration of the WRF model used in the simulations for this study (from Kim and Lee (2014), their Table 1).

Model	WRF V3.2			
	Domain 1	Domain 2	Domain 3	Domain 4
Domains	Domain 1	Domain 2	Domain 3	Domain 4
Horizontal grid spacing	18 km	6 km	2 km	0.667 km
Dimension	120 × 120 × 31	232 × 241 × 31	547 × 586 × 31	832 × 1006 × 31
Vertical layers/Model top	31 Eta layers / 50 hPa			
Grid nesting	Two-way			
Lateral boundary condition	Specified zone = 1, Relaxation zone = 4			
Initial condition	NCEP FNL (6-hourly 1° × 1°)			
Bulk microphysics	WSM 6 scheme			
Planetary Boundary Layer	YSU PBL			
Cumulus parameterization	Kain-Fritsch (new Eta)		Not used	
Land-Surface Model	Noah Land Surface Model			
Longwave radiation scheme	RRTM			
Shortwave radiation scheme	Dudhia			

에 대해서는 RRTM (Rapid Radiation Transfer Model) (Mlawer et al., 1997)을, 단파복사에 대해서는 simple shortwave radiation 방안(Dudhia, 1989)을 사용하였다. 지표 모델로는 Noah Land Surface Model을 사용하였다. 기본적으로 Kim and Lee (2014)의 수치모델 설정과 동일하다(Table 1).

민감도 실험을 위해 설정한 실험은 기준 실험인 CNTL 실험, FLAT 실험(TBMT 실험, BDMT 실험, 그리고 ALL 실험), 그리고 LANDSEA 실험이다. CNTL 실험의 지형 자료는 위·경도 30초 해상도의 USGS

(United States Geological Survey) 지형 자료를 사용하여 모델 격자로 내삽하였다. 기준 실험에서 2 km 격자에 내삽된 한반도 지형을 보면(Fig. 3) 실제로 가장 높은 산맥의 봉우리인 백두산과 영동 지역의 고산 지대인 대관령은 각각 2750 m, 832 m의 높이인데, 수치 모델에서는 각각 2438 m, 781 m 높이로 실제와 근접함을 알 수 있다. 여기서 CNTL 실험의 수치모델의 결과는 Kim and Lee (2014)의 연구결과를 인용하였다.

FLAT 실험은 설정 영역 내의 지형 고도를 0으로 한 하층 경계 조건으로 WRF 모델을 구동하여 산악

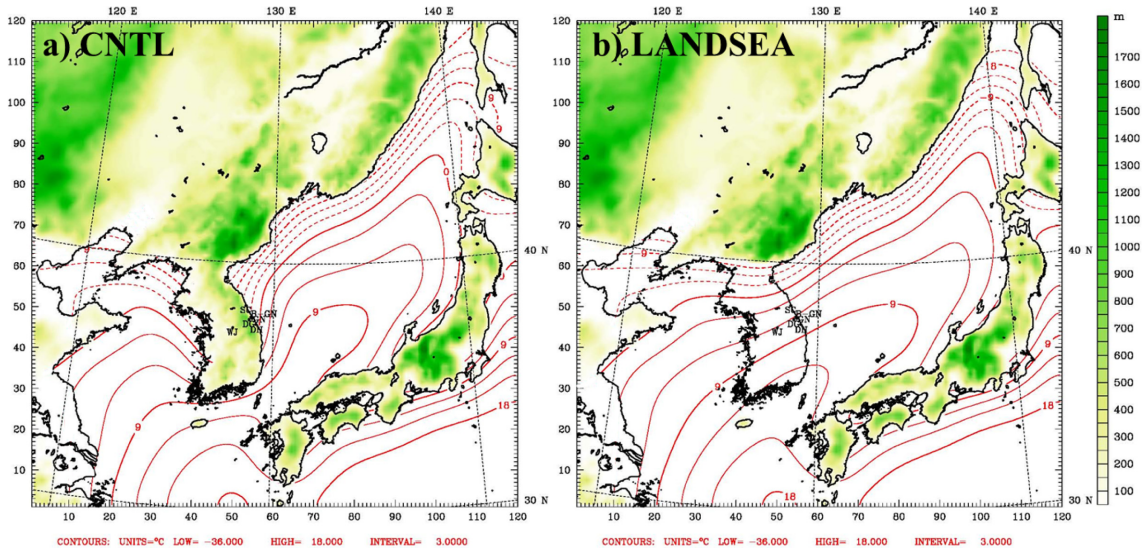


Fig. 4. Spatial distribution of sea surface temperature ($^{\circ}\text{C}$) used in (a) CNTL and (b) LANDSEA experiments. The solid lines are positive and the dashed lines are negative, respectively.

효과가 대상수렴운의 생성에 미치는 영향을 살펴보고자 하였다. FLAT 실험 중에서 TBMT 실험의 경우, 태백산맥 영역에 해당되는 위도 $36\sim 39.5^{\circ}\text{N}$, 경도 $124\sim 129.6^{\circ}\text{E}$ 영역 내의 지형 고도를 0으로 설정하여 WRF 모델을 구동한 실험이다. BDMT 실험은 북쪽 산맥군 영역에 해당되는 위도 $40\sim 46^{\circ}\text{N}$, 경도 $122\sim 132^{\circ}\text{E}$ 영역 내의 지형 고도를 0으로 설정하여 WRF 모델을 구동한 실험이며, ALL 실험은 북쪽 산맥군 영역과 태백산맥 영역을 모두 포함하는 위도 $36\sim 46^{\circ}\text{N}$, 경도 $122\sim 132^{\circ}\text{E}$ 영역 내의 지형 고도를 0으로 설정하여 구동한 실험이다. 이러한 수치실험들을 통하여 북쪽 산맥군과 태백산맥이 대상수렴운의 생성과 발달에 미치는 영향을 조사하고자 한다.

또한 LANDSEA 실험은 한반도 영역($34\sim 40^{\circ}\text{N}$, $124.5\sim 131^{\circ}\text{E}$) 내의 육지를 바다로 설정하여 WRF 모델을 구동하였다. SST 분포는 바다로 바뀐 한반도 영역의 경계 부분의 SST 값을 선형적으로 내삽하였으며, LANDSEA 실험에 사용된 SST 분포는 Fig. 4에 CNTL 실험에 사용된 SST 분포와 함께 제시하였다. 기존의 연구[Nagata et al. (1986)과 Nagata (1991)]에서 육지와 해양의 열적 대비가 대상수렴운의 생성에 미치는 영향에 관한 평가가 다소 달랐으므로 LANDSEA 실험을 통하여 육지와 해양의 열적 대비가 대상수렴운의 생성과 발달에 어떠한 영향을 주는지 알아보하고자 하였다. Figure 5는 위에서 언급한 민감도 실험의 영역을 보여주며, Table 2는 요약된 실험 구성을 보여준다.

4. 수치모의 실험 결과 분석

4.1 CNTL 실험 결과

4.1절에서는 먼저 기준 실험인 CNTL 실험의 수치모의 능력을 확인하며, 4.2절에서는 여러 민감도 실험들과의 상호 비교를 통하여 하층 경계면의 조건 변화에 따라 대상수렴운의 생성과 발달에 미치는 영향을 분석하고자 한다.

Figure 6은 CNTL 실험의 수치모의 결과이며, 2012년 2월 1일 0900 LST의 D1 영역의 지상 기압장(Fig. 6a)과 2012년 2월 1일 1300 LST의 D3 영역의 컬럼 누적 강수 대기 수증(colum integrated precipitation hydrometeors) 분포도(Fig. 6b), 지상 바람장(Fig. 6c), 그리고 지상 유선 및 등풍속도(Fig. 6d)이다. 여기서 컬럼 누적 강수 대기 수증 분포도를 제시한 이유는 이 분포도가 대상수렴운의 위치와 그 주위의 운열 형태를 뚜렷하게 잘 나타내었기 때문이다(Kim and Lee, 2014).

먼저, CNTL 실험의 수치모의 능력을 알아보하고자 CNTL 실험의 지상 기압장(Fig. 6a)과 기상청에서 제공된 지상 일기도(Fig. 1a)를 비교·분석하였다. 지상 일기도(Fig. 1a)에서 일본 혼슈의 서쪽 해상에 위치한 저기압과 한반도를 중심으로 북동-남서 방향으로 기울어진 등압선 패턴을 볼 수 있으며, CNTL 실험의 지상 기압장에서도 일본 혼슈의 서쪽 해상에 중심을 둔 저기압이 위치하며, 등압선의 패턴도 지상 일기도와 유사하게 나타나 WRF 모델이 중관 배경장을 잘 모의하고 있음을 알 수 있다.

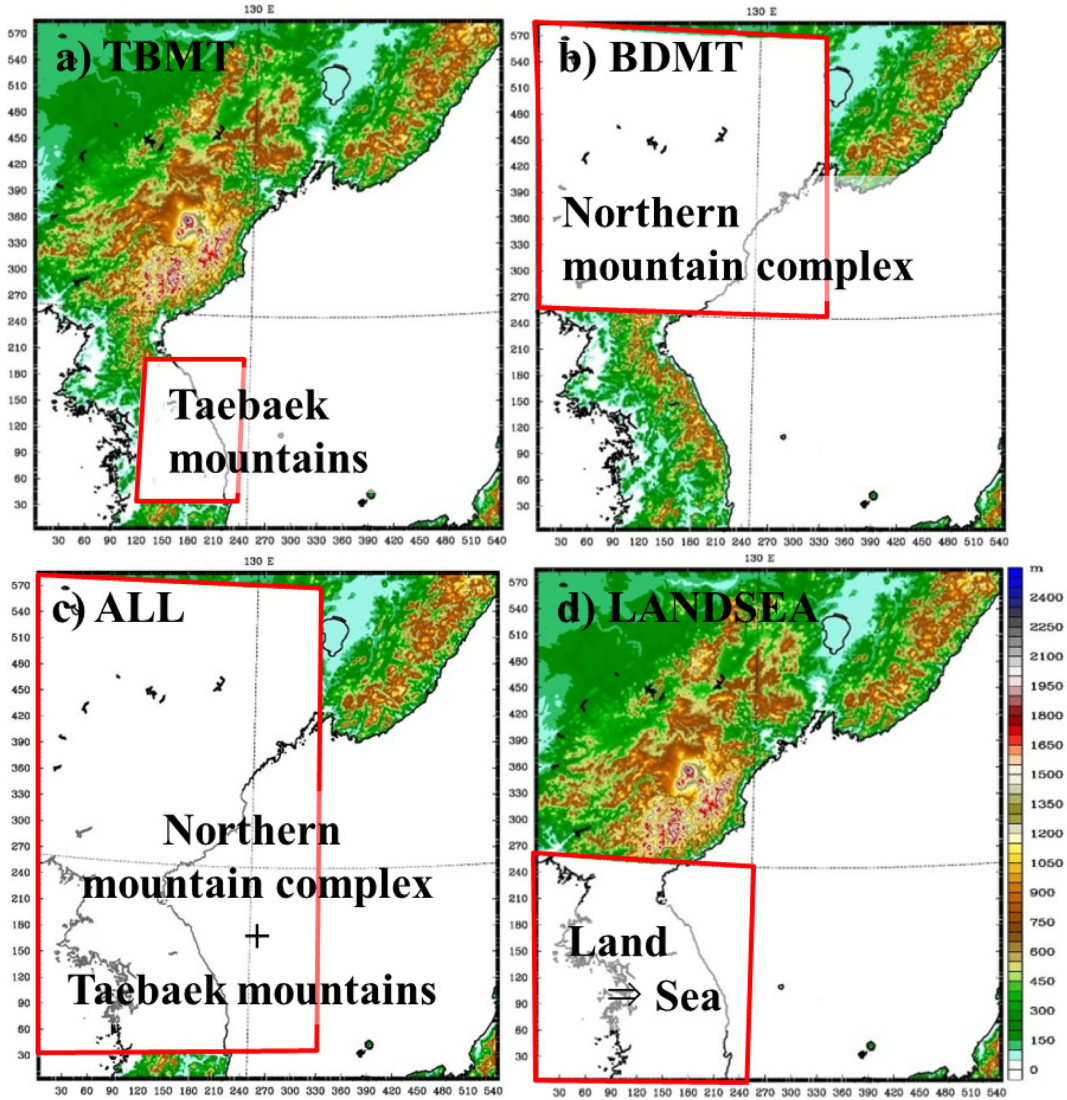


Fig. 5. The open rectangle with red in D3 indicates the area where the height of the surface is set to be zero for (a) TBMT, (b) BDMT, (c) ALL, and (d) LANDSEA experiments. In addition the land in (d) is replaced with the sea. Topography is represented with shading based on scale right of Fig. 5d.

Table 2. The sensitivity experiments in relation to the effect of the low-level boundary of the Korean Peninsula.

Exp.	Surface conditions		
	Northern Mountains	Taebaek Mountains	Land or Sea
CNTL	Included	Included	Land
TBMT	Included	Removed	Land
BDMT	Removed	Included	Land
ALL	Removed	Removed	Land
LANDSEA	Included	Removed	Sea

컬럼 누적 강수 대기 수증 분포도(Fig. 6b)와 위성 영상 자료(Fig. 2a)를 비교하면, CNTL 실험의 경우, 동해 중·북부 해상에 걸쳐 북서-남동 방향으로 길게 뻗은 수렴운의 위치와 그 주위의 운열 형태가 위성 영상 자료에서 나타난 수렴운의 위치와 그 주위의 운열 형태와 거의 일치한다.

또한, CNTL 실험의 바람장과 유선도(Figs. 6c, d)를 보면, 동한만 부근에서부터 강원도 연안을 따라 북서 계열의 바람이, 동해 북부 먼 바다 부근에서는 북풍 계열의 바람이 불고 있으며, 이 두 바람은 동해 중·

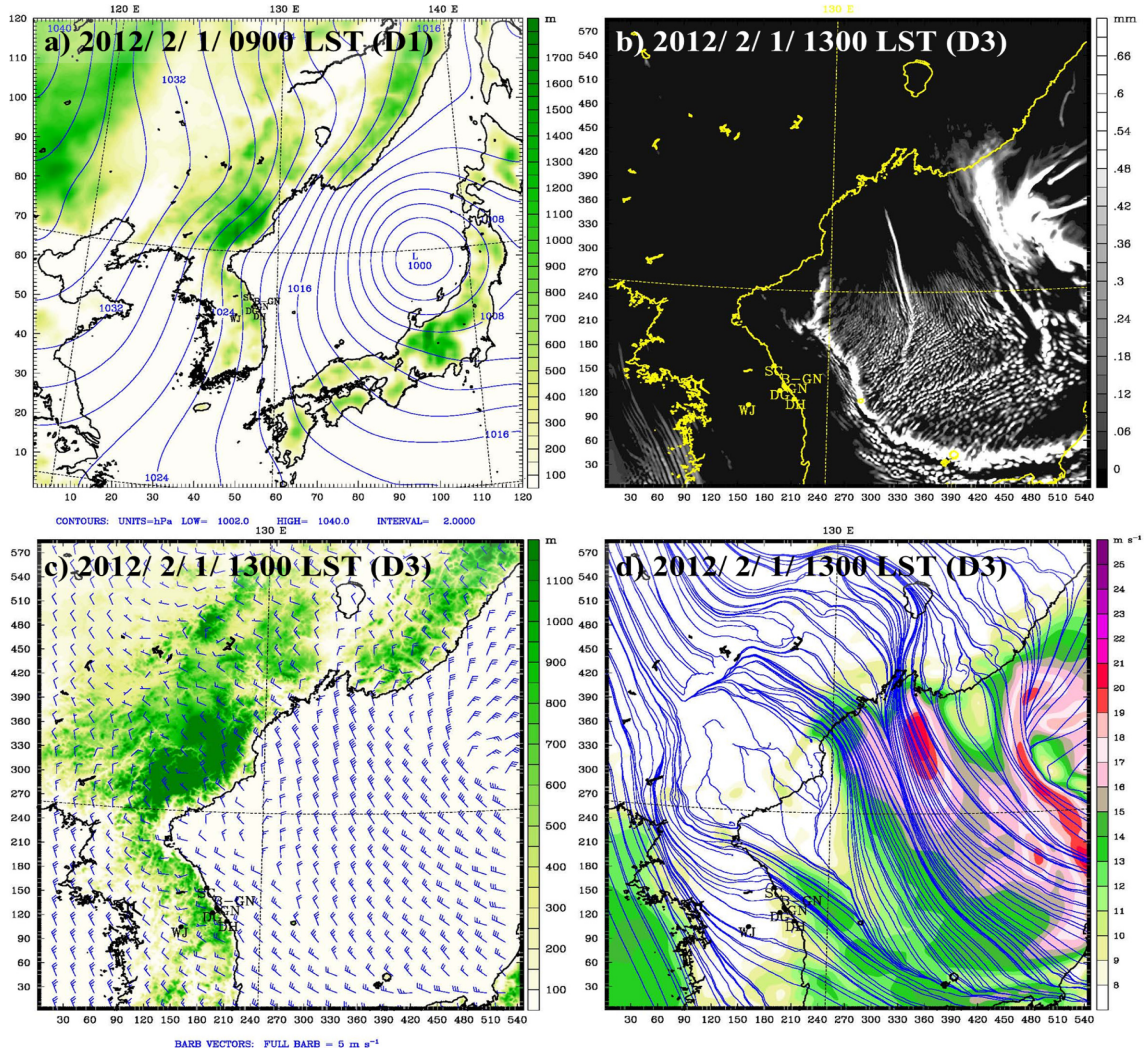


Fig. 6. The simulated (a) sea level pressure valid at 0900 LST 1, (b) column integrated precipitation hydrometeors (Qrain, Qsnow, Qgraupel) field, (c) surface wind field (full barbs = 5 m s^{-1}), and (d) surface streamline and wind speed field valid at 1300 LST 1 February 2012, from the CNTL experiments (results from Kim and Lee, 2014). The topography (m), precipitation hydrometeors (mm), and wind speed (m s^{-1}) are represented with color shading based on scale at right of the figures, respectively.

북부 해상에서 만나 수렴역을 이루고 있다. 또한, 한·러 국경의 앞바다 부근에서는 북 또는 북북서 계열의 바람이 불며, 가장 강한 풍속역(약 40 kts)이 위치한다. 이러한 특징은 ASCAT 해상풍 영상 자료(Fig. 2b)에서 보여준 바람의 분포와 유사하다. 따라서 CNTL 실험이 바람장과 대상수렴운 및 그 주위의 운열들의 특징들을 잘 모의하였음을 알 수 있다.

4.2 민감도 실험 결과

이 절에서는 CNTL 실험, FLAT 실험(TBMT 실험,

BDMT실험, 그리고 ALL 실험) 그리고 LANDSEA 실험의 결과를 서로 비교하였으며, 대상수렴운이 가장 뚜렷하게 나타나는 시간인 2012년 2월 1일 1300 LST를 중심으로 분석하였다.

4.2.1 컬럼 누적 강수 대기 수상(column integrated precipitation hydrometeors) 분포 분석

Figure 7은 FLAT 실험인 TBMT 실험, BDMT 실험, 그리고 ALL 실험과 LANDSEA 실험에 대한 D3 영역의 컬럼 누적 강수 대기 수상 분포도이다. 먼저, 비

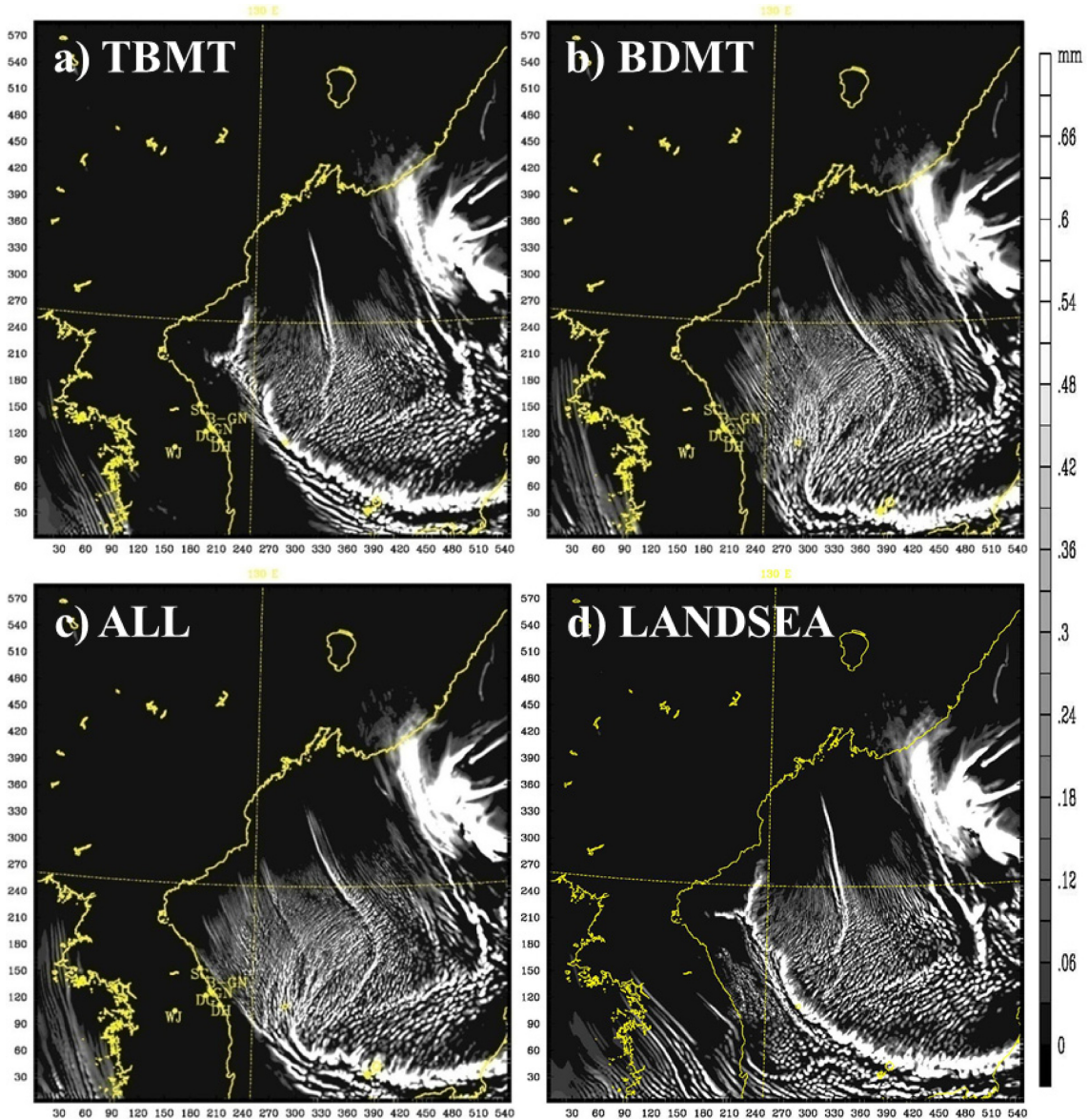


Fig. 7. The simulated column integrated precipitation hydrometeors (Q_{rain} , Q_{snow} , Q_{grapel}) distributions valid at 1300 LST 1 February 2012, from the (a) TBMT, (b) BDMT, (c) ALL and (d) LANDSEA experiments. The shading denotes integrated precipitation hydrometeors based on the scale (mm) right of figures.

교를 위해 CNTL 실험에 대한 컬럼 누적 강수 대기 수상 분포도(Fig. 6b)를 보면, 동해 북부 해상에서 시작하여 동해 남부 해상 및 동해를 마주하는 일본 열도 앞바다까지 이어지는 기다란 대상수렴운과 그 주변에 L 모드 운역, T 모드 운역이 각각 위치하고 있음을 알 수 있다.

Figure 7a의 태백산맥의 지형을 제거한 실험(TBMT 실험)의 컬럼 누적 강수 대기 수상 분포도에서는 CNTL

실험과 유사한 위치에 발달한 대상수렴운이 존재하여 CNTL 실험과 큰 차이가 없으며, 약간의 차이는 대상수렴운을 중심으로 남쪽에 위치한 L 모드 운역의 운열이 CNTL 실험의 경우보다 더 뚜렷하게 나타난 점이다. 이는 태백산맥이 제거되면서 영동 해안 앞바다 쪽으로 북서 계열의 바람이 보다 강화되었기 때문이다. 한편, 북쪽 산맥군의 지형을 제거한 실험(BDMT 실험)의 경우(Fig. 7b), 동해 중·북부 해상에 존재하

있던 발달한 대상수렴운은 보이지 않으며, 주로 L 모드 형태의 운열과 T 모드 형태의 운열이 위치하고, 동해 남부 해상 및 동해를 마주하는 일본 열도 앞바다까지 이어지는 대상수렴운만 존재한다. 이러한 결과를 CNTL 실험과 같이 비교하여 해석하면, 북쪽 산맥군에 의해 동해 중·북부 해상에 걸쳐 대상수렴운이 생성되어지나, 동해 남부 해상 및 동해를 마주하는 일본 열도 앞바다까지 이어지는 대상수렴운의 생성에는 북쪽 산맥군이 직접적인 영향을 거의 미치지 못한다고 할 수 있다.

Figure 7c는 북쪽 산맥군과 태백산맥의 지형을 모두 제거한 실험(ALL 실험)의 결과로, BDMT 실험의 경우와 유사하게 동해 중·북부 해상에 존재하던 대상수렴운은 보이지 않고 동해 남부 해상 및 일본 열도 앞바다까지 이어지는 대상수렴운만 존재한다. 그리고 영동 앞바다 쪽으로 BDMT 실험에 비해 보다 발달한 L 모드 운열이 위치하고 있다. Figure 7d는 한반도 지역을 육지에서 바다로 대체한 실험(LANDSEA 실험)으로, 대상수렴운이 동해 중·북부 해상에서 시작하여 동해 남부 해상 및 일본 열도 앞바다까지 길게 형성되어 있다. 작은 차이점은 대상수렴운의 바로 남서쪽에 위치한 L 모드 운열은 CNTL 실험의 L 모드 운열보다 길고 뚜렷하며, 바다로 바뀐 한반도 영역에서는 북서풍에 평행한 L 모드 형태의 운열들이 산재해 있는 정도이다. 즉, 한반도를 바다로 대체하여 육지와 해양의 열적 대비 효과를 제거했으나 CNTL 실험과 큰 차이 없이 대상수렴운이 뚜렷하게 잘 모의되었다. 이러한 결과는 한반도의 지형 효과보다는 한반도와 동해 사이의 육지와 해양의 열적 대비가 대상수렴운의 생성에 중요한 역할을 한다는 연구결과(Nagata et al., 1986)와는 대치되는 것이다.

정리하면, 북쪽 산맥군의 지형이 존재하는 CNTL 실험과 TBMT 실험, 그리고 LANDSEA 실험의 경우, 약간의 차이는 있지만 동해 중·북부 해상에 시작하여 동해 남부 해상 및 동해를 마주하는 일본 열도 앞바다까지 이어지는 대상수렴운을 잘 모의하였다. 한편, 북쪽 산맥군의 지형이 제거된 BDMT 실험과 ALL 실험의 경우, 동해 중·북부 해상의 대상수렴운을 모의하지 못하였으나 동해 남부 해상 및 일본 열도 앞바다까지 이어지는 대상수렴운은 잘 모의하였다. 이것은 동해 중·북부 해상에 위치한 대상수렴운과 동해 남부 해상 및 일본 열도 앞바다에 위치한 대상수렴운의 생성 메커니즘은 서로 다름을 잘 보여주는 것이다.

4.2.2 지상 유선 및 등풍속도 분석

앞의 컬럼 누적 강수 대기 수상 분포도 분석에서 북쪽 산맥군 지형의 존재 유무에 따라 대상수렴운의

형성에 상당한 차이를 보였으며, 그 원인을 파악하고자 지상 유선 및 등풍속도를 분석하였다.

Figure 8은 민감도 실험들의 결과로, 대상수렴운이 발달된 시각인 2월 1일 1300 LST의 지상 유선 및 등풍속도이며, 음영부분은 풍속을 나타낸다. 음영의 색이 녹색에서 붉은색으로 갈수록 풍속이 강함을 의미한다. CNTL 실험(Fig. 8a)의 경우에는 높은 산악 지형인 북쪽 산맥군에 의해 분리된 두 기류를 볼 수 있으며, 북쪽 산맥군의 풍상측에서 오른쪽으로 우회하여 원산 앞바다 부근으로 빠져나오는 북서 계열의 기류와 북쪽 산맥군의 풍상측에서 왼쪽으로 우회하여 청진 앞바다로 빠져나오는 북풍 계열의 기류가 동해 중·북부 해상에서 만나 수렴역을 형성한다. 이 수렴역의 위치는 대상수렴운의 위치와 잘 일치한다.

태백산맥의 지형을 제거한 TBMT 실험(Fig. 8b)에서도 북쪽 산맥군을 우회하여 흐르는 두 가지의 큰 기류를 볼 수 있으며, 북쪽 산맥군의 풍하측인 동해 중·북부 해상에서 수렴역을 이룬다. 다만, CNTL 실험에서는 북쪽 산맥군의 풍상측에서 오른쪽으로 돌아와 상대적으로 지형이 낮은 원산 앞바다 부근으로 집중되어 빠져나오는 북서 계열의 기류가 많았지만, TBMT 실험에서는 강원지역의 지형들이 편평해져 이 지역에서는 북서풍이 균일하게 불며, 강원 앞바다까지 풍향 변화가 없는 것을 볼 수 있다.

BDMT 실험(Fig. 8c)의 경우, 북쪽 산맥군의 지형이 제거되면서 북쪽 산맥군을 우회하여 흐르던 두 가지의 큰 기류가 사라졌으며, 북쪽 산맥군의 풍상측에서 불어오던 북서 계열의 바람은 중국 화북지역에서부터 동해상으로 풍향 변화 없이 그대로 유입되면서, 우회하던 기류가 사라져 집중된 수렴역이 형성되지 않았다.

그리고 태백산맥과 북쪽 산맥군의 산악 지형들이 모두 제거된 ALL 실험(Fig. 8d)에서는 BDMT 실험처럼 북쪽 산맥군을 우회하는 기류가 없으며, 북서 계열의 기류가 풍향 변화 없이 동해상으로 그대로 유입되어 집중된 수렴역이 형성되지 않았다. 한편, LANDSEA 실험(Fig. 8e)의 경우, CNTL 실험의 경우와 유사하게 북쪽 산맥군을 양쪽으로 우회하여 흐르는 두 기류가 동해 중·북부 해상에서 만나 수렴하는 것을 잘 볼 수 있다. 특히 LANDSEA 실험의 경우, 바다로 바뀐 한반도 영역에서는 경기 북부와 황해도 지역에 해당되는 해상에서 풍속이 약 17 m s^{-1} , 이외의 중부 지역에 해당되는 해상에서도 풍속이 약 15 m s^{-1} 로 CNTL 실험의 해당 영역에 비해 훨씬 풍속이 큼을 알 수 있다. 이는 육지가 바다로 대체되면서 거칠기 감소에 따른 마찰력 감소와 산악 지형이 없어지면서 기준 실험에 비해 풍속이 증가되었기 때문이다.

정리하면, 북쪽 산맥군의 지형을 제거하였을 경우, 북쪽 산맥군을 우회하는 기류들이 사라지면서 동해상

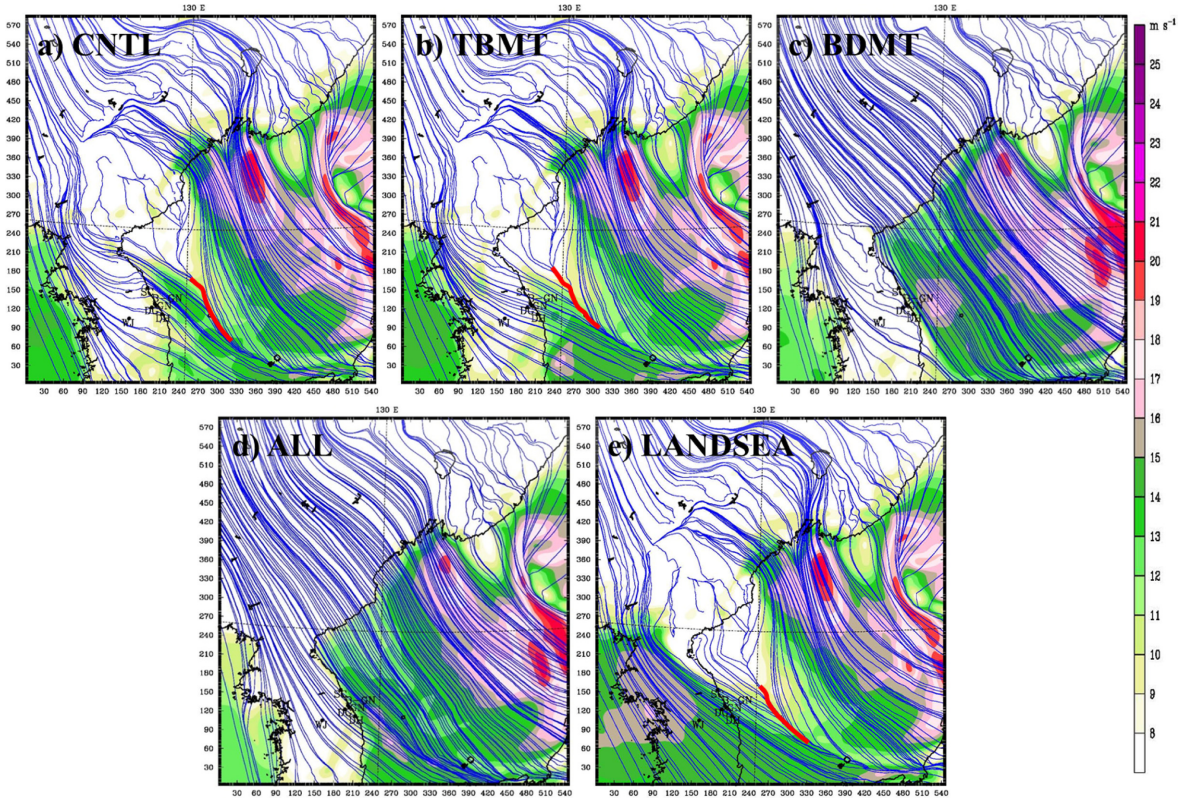


Fig. 8. The simulated surface streamline and wind speed field valid at 1300 LST 1 February 2012, from the (a) CNTL, (b) TBMT, (c) BDMT, (d) ALL, and (e) LANDSEA experiments. The bold red lines indicate main convergence zones in relation with the convergent cloud band. The colored shading denotes wind speed (m s^{-1}) based on scale right of the figure.

에서는 대상수렴운이 뚜렷하게 형성되지 않았다. 반면에 북쪽 산맥군의 지형이 유지되면서 태백산맥 지형을 제거한 경우와 한반도를 바다로 대체한 경우 모두, 북쪽 산맥군 지형을 우회하는 두 기류에 의해 강한 수렴역이 형성되고, 이에 따라 연직 상승운동이 활발해져 대상수렴운이 형성되었다. 이러한 결과는 태백산맥의 지형 효과와 육지와 바다의 열적 대비 효과는 대상수렴운의 생성에 큰 영향을 미치지 못함을 잘 보여주는 것이다.

4.2.3 발산장 분석

Figure 9는 D4 영역의 지상 발산장이다. 붉은색은 발산을, 푸른색은 수렴을 각각 의미한다. CNTL 실험 (Fig. 9a)의 경우, 대상수렴운이 위치한 부근에 수렴역 (최대 약 $70 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$)이 위치하고 있다. TBMT 실험 (Fig. 9b)의 경우, CNTL 실험의 경우보다 약간 약화되었지만 동해 중·북부 해상으로 수렴역(최대 약 $60 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$)이 형성되어 있다. 그러나 BDMT 실험 (Fig. 9c)의 경우에는 동해상으로 뚜렷한 수렴역이 나

타나지 않았으며, ALL 실험(Fig. 9d)에서도 동해 중·북부 해상이나 동해상으로는 수렴역이 형성되지 않았다. 한편, 한반도를 육지에서 바다로 대체한 LANDSEA 실험(Fig. 9e)에서는 함경남도 앞바다 부근에서 북서-남동 방향으로 길게 뻗은 수렴역(최대 약 $50 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$)이 존재하며, 한반도 영역에서는 육지가 바다로 대체되면서 지형적인 영향과 지면 거칠기에 의해 발생하였던 수렴과 발산의 크기가 매우 감소하였다.

이 지상 발산장 분석에서도 지상 유선 및 등풍속도 분석에서와 같이 북쪽 산맥군의 지형이 유지된 실험의 경우에는 동해 중·북부 해상으로 수렴역이 형성되었으며, 북쪽 산맥군의 지형이 제거된 경우에는 동해 북부 해상에 수렴역이 형성되지 않았다. 대륙성 고기압에서 불어나온 차가운 기류가 북쪽 산맥군의 존재로 두 기류로 분리되며 이렇게 분리된 두 기류는 북쪽 산맥군의 풍하측인 동해 중·북부 해상에서 만나 발달된 수렴역을 형성하였고, 이러한 수렴에 의해 연직 운동이 활발해지면서 대상수렴운이 형성되었음을 잘 보여준다.

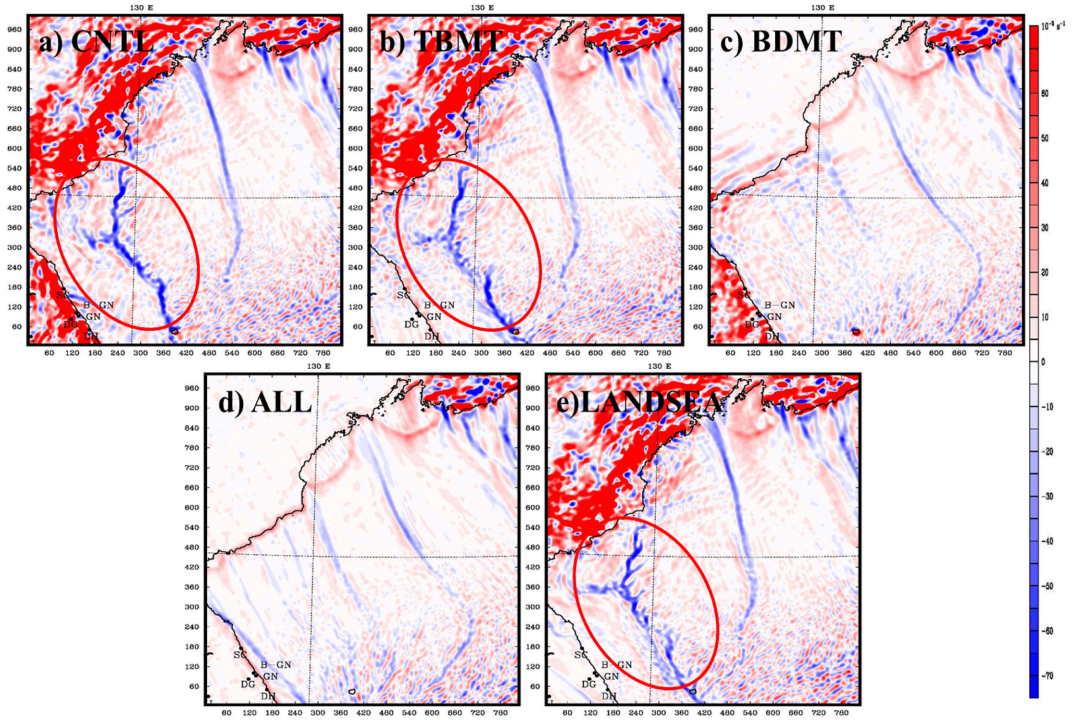


Fig. 9. Same as Fig. 8, except for the surface divergence field (10^{-5} s^{-1} , scale at right). Red colors indicate divergence and blue colors indicate convergence. The oval of red line indicates the area where the convergent cloud band was generated and well developed.

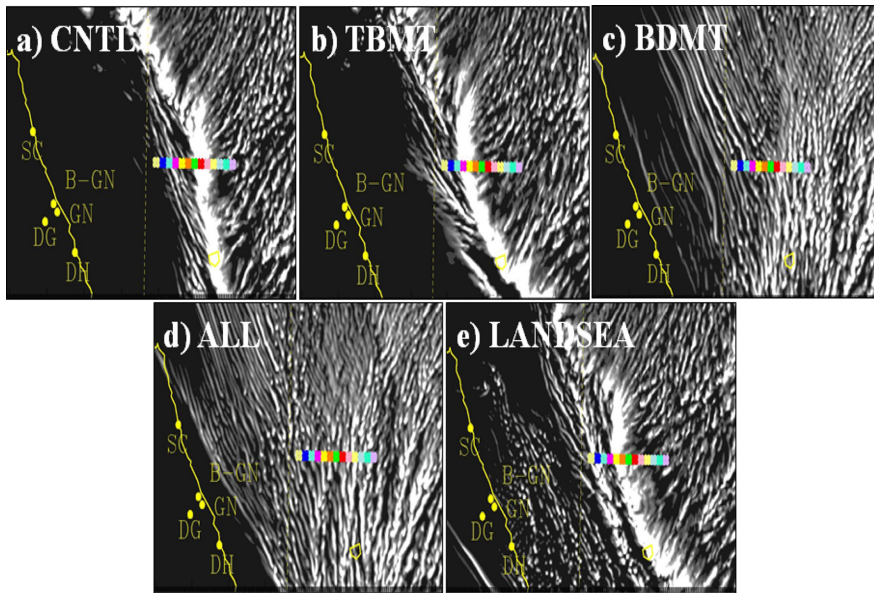


Fig. 10. The colored small boxes indicate the areas where total precipitation hydrometeor mixing ratios and equivalent potential temperatures from sensitivity experiments are averaged (See the text for details). The background images are magnified simulated column integrated precipitation hydrometeors distributions in Fig. 7.

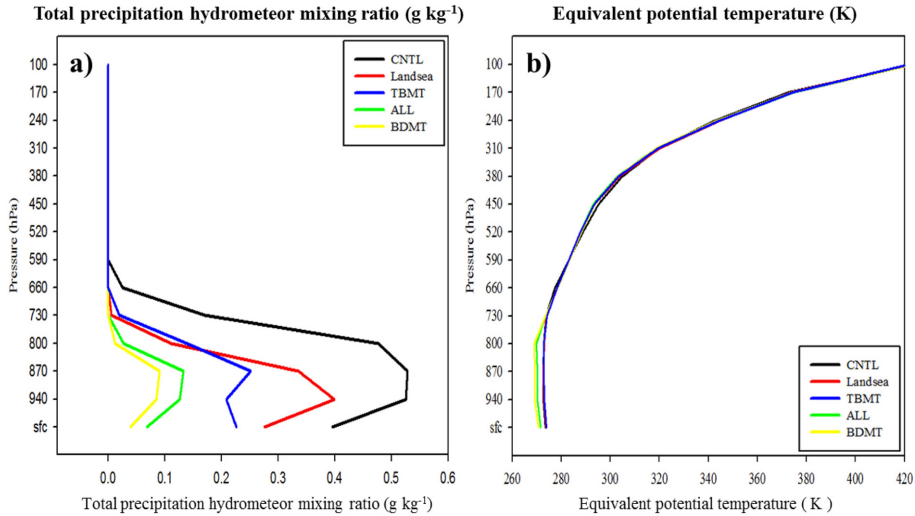


Fig. 11. The area averaged vertical profiles of (a) total precipitation hydrometeor mixing ratio and (b) equivalent potential temperature over the small boxes in Fig. 10 from the sensitivity experiments. The black, red, blue, green, and yellow solid lines in figures represent averaged vertical profiles from CNTL experiment, LANDSEA experiment, TBMT experiment, ALL experiment, and BDMT experiment, respectively.

4.2.4 연직 구조 분석

평균적인 연직 구조를 분석하기 위해 대상수렴운을 중심으로 총 52개의 지점(한 열은 26개의 지점으로 이루어져 있으며 각 지점간의 간격은 3.5 km이며, 총 2열로 이루어 짐)을 선정하였으며, 각 고도별로(10 hPa 간격), 각 지점에서의 강수 대기 수상 혼합비와 상당온위 값을 면적 평균하여 연직 프로파일(Fig. 11)을 만들었다. 이와 같은 과정은 모든 민감도 실험의 결과에 동일하게 적용되었으며, 선정된 52개의 지점들은 Fig. 10의 작은 box 내에 위치한다.

Figure 11은 2012년 2월 1일 1300 LST의 면적 평균된 강수 대기 수상 혼합비(Fig. 11a)와 상당온위(Fig. 11b)의 연직 프로파일이며, 검정색 실선은 CNTL 실험, 붉은색 실선은 LANDSEA 실험, 파란색 실선은 TBMT 실험, 녹색 실선은 ALL 실험, 그리고 노란색 실선은 BDMT 실험을 각각 나타낸다.

먼저, Fig. 11a의 강수 대기 수상 혼합비를 보면, CNTL 실험이 약 800 hPa 고도 이하의 대기 하층에서 혼합비를 가장 많이(최대 약 0.5 g kg⁻¹) 모의하였고, 그 다음으로는 한반도 지역을 육지에서 바다로 대체한 LANDSEA 실험이 CNTL 실험보다는 다소 낮은 850 hPa 고도 이하의 대기 하층에서 최대 약 0.4 g kg⁻¹ 이상의 혼합비를 모의하였다. 태백산맥을 제거한 TBMT 실험의 경우에는 LANDSEA 실험보다 혼합비가 적은 연직 분포(최대 약 0.3 g kg⁻¹)를 보였으며, 북쪽 산맥군이 제거된 BDMT 실험과 ALL 실험에서 가장 적은 혼합비(최대 약 0.1 g kg⁻¹)를 모의하였는데,

이는 선정된 지점에서의 수렴이 다른 실험에 비해 약하여 하층운의 생성이 미약했기 때문으로 보인다.

상당온위에 대한 연직 분포(Fig. 11b)를 비교해 보면, CNTL 실험의 경우, 지상에서 약 750 hPa 고도까지 중립 구조를 보이며, 다른 민감도 실험들도 CNTL 실험과 비슷한 연직 구조를 보인다. 다만, 북쪽 산맥군이 제거된 ALL 실험과 BDMT 실험의 경우, 지상에서 약 750 hPa 고도까지 나머지 다른 실험의 경우에 비해 온위가 평균적으로 약 1~2 K 정도 낮은 연직 구조를 보이는데, 이것은 북쪽 산맥군의 지형이 제거되면서 풍하층에서 일어나는 단열 압축에 따른 기온 상승 현상들이 사라지고 또한, 시베리아 부근의 찬공기가 그대로 남하하여 다른 실험들에 비해 상대적으로 온위가 낮아진 것으로 보인다.

4.2.5 수평 온도 이류도 분석

Figure 12는 2012년 2월 1일 1300 LST의 1000 hPa 고도에서의 수평 온도 이류(- $\vec{V} \cdot \vec{\nabla} T$)도이며, 붉은색 타원 영역은 대상수렴운이 위치한 영역을 나타낸다. CNTL 실험(Fig. 12a)의 경우, 대상수렴운이 위치한 곳을 중심(붉은색 타원 영역)으로 북동쪽 방향으로 강한 한기 이류역(최대 약 $-0.7 \times 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C s}^{-1}$)이 집중되어 있고, 남서쪽 방향으로 북동쪽 방향보다 약한 한기 이류역(최대 약 $-0.2 \times 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C s}^{-1}$)이 위치하고 있다. 또한, 영동 해안 앞바다 부근으로는 약한 난기 이류역(최대 약 $0.3 \times 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C s}^{-1}$)이 다소 넓게 나타난다. TBMT 실험(Fig. 12b)에서도 동해 중·북부 해상으로

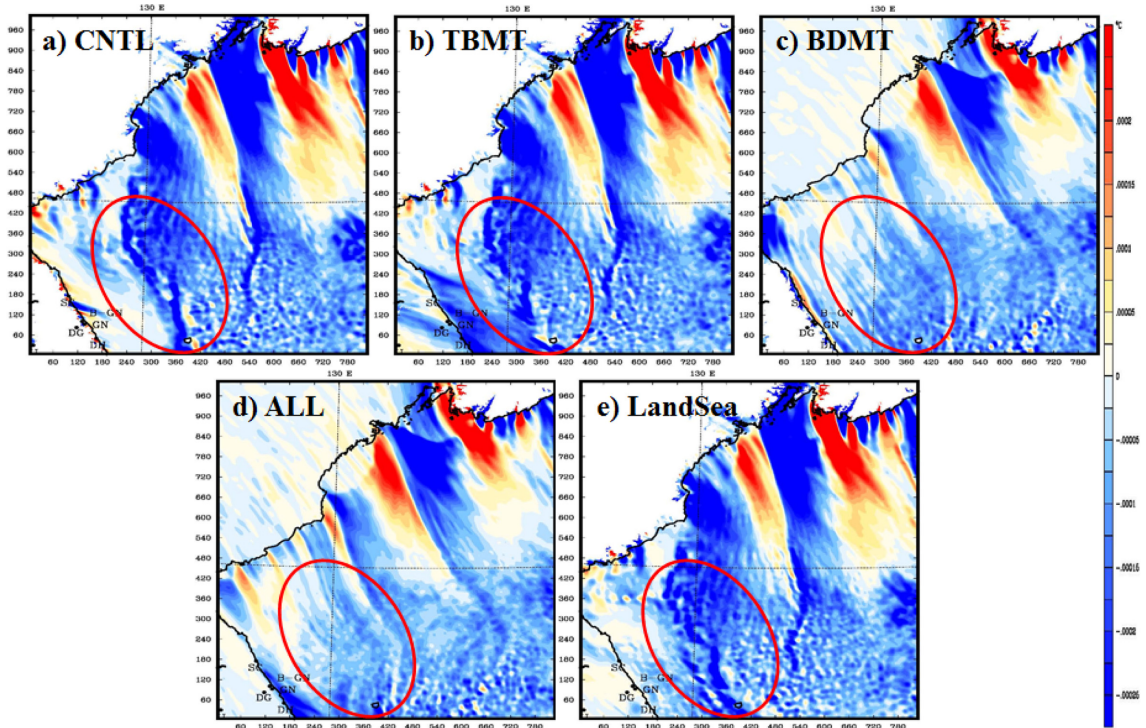


Fig. 12. Same as Fig. 8, except for the surface temperature advection field. The colored shading denotes the magnitude of surface temperature advection based on scale ($^{\circ}\text{C s}^{-1}$) right of the figure. Red colors and blue colors indicate warm advection and cold advection, respectively. The oval of red line denotes the area in which the convergent cloud band was generated and well developed.

로 한기 이류가 집중된 구역(최대 약 $-0.5 \times 10^{-4} \text{ }^{\circ}\text{C s}^{-1}$)이 나타나지만, CNTL 실험에 비해 크기는 다소 작은 편이며, CNTL 실험에서 약한 난기 이류가 나타났던 영동 해안 앞바다 부근으로는 한기 이류역(최대 약 $-0.3 \times 10^{-4} \text{ }^{\circ}\text{C s}^{-1}$)이 나타난다. 이러한 결과는 태백산맥 지형이 제거되면서 풍하측에서의 단열압축에 따른 기온상승 효과가 사라지고 또한, 강원 북부 쪽으로 차가운 공기가 그대로 유입되었기 때문에 동해 중·북부 해상으로 한기 이류가 강화된 것으로 보인다.

BDMT 실험(Fig. 12c)과 ALL 실험(Fig. 12d)의 경우, CNTL 실험과 TBMT 실험에서 나타나던 동해중·북부해상에서의 한기 이류 집중역이 사라졌으며, 대신에 약한 한기 이류역(약 $-0.2 \times 10^{-4} \text{ }^{\circ}\text{C s}^{-1}$ ~ $-0.3 \times 10^{-4} \text{ }^{\circ}\text{C s}^{-1}$)이 동해중·북부해상에서 다소 넓게 분포한 것을 볼 수 있다. LANDSEA 실험(Fig. 12e)의 경우, CNTL 실험처럼 동해 중·북부 해상에서 강한 한기 이류(최대 약 $-0.7 \times 10^{-4} \text{ }^{\circ}\text{C s}^{-1}$)가 집중된 영역이 나타나지만, 영동 앞바다 쪽으로는 CNTL 실험과는 달리 대부분 한기 이류역(최대 약 $-0.3 \times 10^{-4} \text{ }^{\circ}\text{C s}^{-1}$)이 위치하고 있다.

정리하면, 북쪽 산맥군의 지형이 제거된 실험의 경우에는 동해 중·북부 해상에 집중되었던 강한 한기 이류역이 사라졌는데 이것은 역으로 말하면, 북쪽 산맥군의 지형은 동해 북부 해상으로 한기 이류를 집중시키는 역할을 한다는 것을 의미한다. 태백산맥이 제거된 실험의 경우, 영동 해안 앞바다 부근의 난기 이류역이 사라지고, 대신에 한기 이류역이 분포하였는데, 이것은 태백산맥이 존재하는 경우, 북쪽 산맥군의 지형을 오른쪽으로 우회하는 기류가 태백산맥을 넘어 오면서 단열 압축되어 영동 해안 앞바다 부근으로 난기 이류역이 형성되었음을 의미한다.

5. 요약 및 결론

본 연구는 2012년 2월 1일 대상수렴운 사례를 대상으로 한반도 지형의 영향 및 육지와 해양의 열적 대비 효과를 알아보기 위하여 WRF모형을 이용하여 다양한 민감도 실험을 수행하였으며, 민감도 실험은 다음의 다섯 가지 실험으로 구성되었다. 즉, 기준 실험(CNTL 실험), 태백산맥의 지형을 제거한 실험(TBMT

실험), 북쪽 산맥군의 지형을 제거한 실험(BDMT 실험), 그리고 위의 두 산악 지형을 제거한 실험(ALL 실험), 마지막으로 육지와 해양의 열적 대비 효과를 보기위해 한반도를 바다로 대체한 실험(LANDSEA 실험)이다.

먼저, WRF모델의 수치모델의 능력을 확인하고자, 관측 자료와 CNTL 실험을 비교·분석하였으며, CNTL 실험이 관측과 유사하게 동해 북부 해상에 위치한 대상수렴운 및 그 주변의 온열과 동해상의 바람 분포를 잘 모의함을 확인하였다.

민감도 실험의 컬럼 누적 강수 대기 수증 분포도를 분석한 결과는 다음과 같다. 북쪽 산맥군은 유지한 채 한반도를 바다로 대체하여 육지와 해양의 열적 대비 효과를 제거한 LANDSEA 실험의 경우, CNTL 실험과 큰 차이 없이 동해 중·북부 해상에서 시작하여 동해 남부 해상 및 동해를 마주하는 일본 열도 앞바다까지 이어지는 기다란 대상수렴운을 잘 모의하였다. 이러한 결과는 육지와 해양의 열적 대비 효과가 대상수렴운의 생성과 발달에 큰 영향을 미치지 못함을 보여 주는 것으로, “한반도의 지형 효과보다는 한반도와 동해 사이의 육지와 해양의 열적 대비가 대상수렴운의 형성에 중요한 역할을 한다”는 연구결과(Nagata et al., 1986)와는 크게 다른 것이다. 한편, 태백산맥은 제거하였으나 북쪽 산맥군이 존재하는 TBMT 실험의 경우, 동해 북부 해상에서 시작하여 동해 남부 해상 및 일본 열도 앞바다까지 이어지는 기다란 대상수렴운을 잘 모의하였다. 반면에 북쪽 산맥군이 제거된 BDMT 실험과 ALL 실험의 경우, 동해 중·북부 해상에 위치한 대상수렴운을 모의하지 못하고, 단지 동해 남부 해상 및 일본 열도 앞바다까지 이어지는 대상수렴운은 모의하였다. 즉, 북쪽 산맥군에 의해 동해 중·북부 해상에 걸쳐 대상수렴운이 생성되어지나, 동해 남부 해상 및 일본 열도 앞바다까지 이어지는 대상수렴운의 생성에는 북쪽 산맥군이 직접적인 영향을 거의 미치지 못함을 보여준다. 이것은 동해 중·북부 해상에 위치한 대상수렴운과 동해 남부 해상 및 동해를 마주하는 일본 열도 앞바다까지 이어지는 대상수렴운의 생성 메커니즘이 서로 다름을 보여 주는 것이다.

바람장 분석에서는 북쪽 산맥군이 존재하는 실험(TBMT 실험과 LANDSEA 실험)의 경우, 북쪽 산맥군을 오른쪽으로 우회하는 기류와 왼쪽으로 우회하는 기류가 북쪽 산맥군의 풍하측인 동해상에서 수렴하였으며, 북쪽 산맥군이 제거된 실험(BDMT 실험과 ALL 실험)에서는 기류가 분리되지 않아 동해상에서 체계적인 수렴역이 나타나지 않았으며, 발산장 분석에서도 이와 유사한 결과를 보여주었다. 이러한 실험 결과는, 시베리아 고기압에서 불어나온 차가운 기류가

지형 고도가 높은 북쪽 산맥군을 만나 두 기류로 나누어지며, 이렇게 나누어진 두 기류는 북쪽 산맥군의 풍하측인 동해 중·북부 해상에서 다시 만나 수렴되면서 대상수렴운이 생성되었음을 확인시켜 주었다.

1000 hPa 고도에서의 온도 이류도 분석에서는, 북쪽 산맥군의 지형이 존재하는 실험(TBMT 실험과 LANDSEA 실험)의 경우, 동해 북부 해상으로 한기 이류역이 집중되는 영역이 나타났으며, 그렇지 않은 실험(BDMT 실험과 ALL 실험)의 경우에는 한기 이류가 집중되지 않고 다소 균일하게 분포하였다. 특히, 북쪽 산맥군이 존재한 실험들(CNTL 실험, TBMT 실험, 그리고 LANDSEA 실험)을 상호 비교·분석한 결과, 태백산맥의 지형이 풍하측인 영동 앞바다 부근에서 단열 압축에 의한 기온 상승으로 난기 이류역을 형성시킨다는 것을 알 수 있었다. 그런데 Nagata et al. (1986)의 연구에서는 북쪽 산맥군의 오른쪽으로 우회하여 한반도를 지나는 한기가 차가운 지표로부터 적은 열과 수증기를 공급받기 때문에 북쪽 산맥군을 왼쪽으로 우회하는 기류보다 차가운 기류가 형성된다고 하였지만, 본 연구에서는 반대로 북쪽 산맥군의 오른쪽으로 우회하여 한반도를 지나는 한기가 태백산맥을 넘어가면서 단열 압축되어 풍하측인 영동 앞바다에서는 난기 이류역이 형성되는 결과를 보였다.

결론적으로 이러한 실험 결과들은 대상수렴운의 생성과 발달에 영향을 미치는 가장 핵심적인 요인은 지형 고도가 높은 북쪽 산맥군의 지형 효과이며, 육지와 해양의 열적 대비에 의한 효과는 미미함을 잘 보여주었다.

감사의 글

본 연구는 2012년 기상청 기상지진기술개발사업(CATER 2012-6100)의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Asai, T., 1965: A numerical study of the air-mass transformation over the Japan Sea in winter. *J. Japan Meteor. Soc.*, **43**, 1-15.
- _____, 1988: Meso-scale features of heavy snowfalls in Japan Sea coastal regions of Japan. *Tenki*, **35**, 156-161 (in Japanese).
- Dudhia, J., 1989: Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a meso-scale two-dimensional model. *J. Atmos. Sci.*, **46**, 3077-3107.
- Eito, H., M. Murakami, C. Muroi, T. Kato, S. Hayashi, H. Kuroiwa, and M. Yoshizaki, 2010: The structure and

- formation mechanism of transversal cloud bands associated with the Japan-Sea polar-airmass convergence zone. *J. Japan Meteor. Soc.*, **88**, 625-648.
- Geleyn, J.-F., 1985: On a simple, parameter-free partition between moistening and precipitation in the Kuo scheme. *Mon. Wea. Rev.*, **113**, 405-407.
- Hong, S.-Y., and J.-O. J. Lim, 2006: The WRF single-moment 6-class microphysics scheme (WSM6). *J. Korean Meteor. Soc.*, **42**, 129-151.
- Hozumi, K., and C. Magono, 1984: The cloud structure of convergent cloud bands over the Japan Sea in winter monsoon period. *J. Meteor. Soc. Japan*, **62**, 522-533.
- Kain, J. S., 2004: The Kain-Fritsch convective parameterization: An update. *J. Appl. Meteor.*, **43**, 170-181.
- Kim, Y.-J., and J. G. Lee, 2014: WRF numerical study on the convergent cloud band and its neighbouring convective clouds. *Atmosphere*, **24**, 49-68 (in Korean with English abstract).
- Kurihara, Y., 1973: A scheme of moist convective adjustment. *Mon. Wea. Rev.*, **101**, 547-553.
- Magono, C., K. Kikuchi, T. Kimura, S. Tazawa, and T. Kasai, 1966: A study on the snowfall in the winter monsoon season in Hokkaido with special reference to low land snowfall. *J. Fac. Sci.*, **2**, 287-308.
- Masayuki, M., S. Nakai, T. Yagi, and H. Nakamura, 1993: A case study of snowstorm gusts and blowing/drift-ing snow. *Ann. Glaciol.*, **18**, 142-148.
- Mlawer, E. J., S. J. Taubman, P. D. Brown, M. J. Iacono, and S. A. Clough, 1997: Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. *J. Geophys. Res.*, **102**, 16663-16682.
- Nagata, M., 1987: On the structure of a convergent cloud band over the Japan Sea in winter; A prediction experiments. *J. Japan Meteor. Soc.*, **65**, 871-883.
- _____, 1991: Further numerical study on the formation of the convergent cloud band over the Japan Sea in winter. *J. Japan Meteor. Soc.*, **69**, 419-428.
- _____, M. Ikawa, S. Yoshizumi, and T. Yoshida, 1986: On the formation of a convergent cloud band over the Japan Sea in winter; A numerical experiments. *J. Japan Meteor. Soc.*, **64**, 841-855.
- Ohigashi, T. and J. Tsuboki, 2007: Shift and intensification processes of the Japan-Sea polar-airmass convergence zone associated with the passage of a mid-tropospheric cold core. *J. Japan Meteor. Soc.*, **85**, 633-662.
- Ohtake, H., M. Kawashima, and Y. Fujiyoshi, 2009: The formation mechanism of a thick cloud band over the northern part of the Sea of Japan during cold air outbreaks. *J. Japan Meteor. Soc.*, **87**, 289-306.
- Satoh, S., H. Hiroshi, N. Katsuhiko, I. Toshio, N. Kenji, and T. Masanori, 2002: Airborne Multi-Parameter Precipitation Radar (CAMPR) observation of wind fields in snow clouds. *J. Commun. Res. Lab.*, **49**, 55-66.
- Skamarock, W. C., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, M. Duda, X.-Y. Huang, W. Wang, and J. G. Powers, 2008: A description of the advanced research WRF version 3. *NCAR Technical Note TN-475+STR*, 125 pp.
- Uemura, H. 1981: Mesoscale disturbances causing a heavy snowfall over the coastal area of the Sea of Japan. *Proceedings of an International Symposium*, Secretariat of the World Meteorological Organization, 17-21.
- Yagi, S., 1985: Large scale snow clouds with roll axes roughly perpendicular to the direction of winter monsoon burst: Observational studies of convective cloud roll axes and some theoretical consideration. *Tenki*, **32**, 27-39 (in Japanese).
- _____, T. Muramatsu, T. Uchiyama, and N. Kurokawa, 1986: Convergent and cloud' and 'Cb-Cu line' over Japan Sea affected by topographic features in the coast of the Asian continent. *J. Japan Meteor. Soc.*, **33**, 453-465 (in Japanese).
- Yoshinori, Y., M. Murakami, H. Mizuno, M. Maki, S. Nakai, and K. Iwanami, 2010: Kinematic and thermodynamical structures of Longitudinal-Mode snow bands over the Sea of Japan during cold-air outbreaks part I: Snow bands in large vertical shear environment in the band-transverse direction. *J. Japan Meteor. Soc.*, **88**, 673-718.
- Yoshizaki, M., T. Kato, H. Eito, and S. Hayashi, 2004: An overview of the field experiment "Winter Mesoscale Convective Systems (MCSs) over the Japan Sea in 2001", and comparisons of the cold-air outbreak case (14 January) between analysis and a non-hydrostatic cloud-resolving model. *J. Japan Meteor. Soc.*, **82**, 1365-1387.