영동지역의 극한 대설에 대한 위성관측으로부터 구름 추적

조영준* · 권태영**†

*국립기상연구소 예보연구과, *연세대학교 대기과학과, **강릉원주대학교 대기환경과학과

Cloud-cell Tracking Analysis using Satellite Image of Extreme Heavy Snowfall in the Yeongdong Region

Young-Jun Cho* and Tae-Yong Kwon**†

*Forecast Research Laboratory, National Institute of Meteorological Research, KMA

*Department of Atmospheric Sciences, Yonsei University

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

Abstract : This study presents spatial characteristics of cloud using satellite image in the extreme heavy snowfall of the Yeongdong region. 3 extreme heavy snowfall events in the Yeongdong region during the recent 12 years (2001 ~ 2012) are selected for which the fresh snow cover exceed 50 cm/day. Spatial characteristics (minimum brightness temperature; T_{min} , cloud size, center of cloud-cell) of cloud are analyzed by tracking main cloud-cell related with these events. These characteristics are compared with radar precipitation in the Yeongdong region to investigate relationship between cloud and precipitation. The results are summarized as follows, selected extreme heavy snowfall events are associated with the isolated, well-developed, and small-scale convective cloud which is developing over the Yeongdong region or moving from over East Korea Bay to the Yeongdong region. During the period of main precipitation, cloud-cell T_{min} is low ($-40 \sim -50^{\circ}\text{C}$) and cloud area is small ($17,000 \sim 40,000 \text{ km}^2$). Precipitation area ($\geq 0.5 \text{ mm/hr}$) from radar also shows small and isolated shape ($4,000 \sim 8,000 \text{ km}^2$). The locations of the cloud and precipitation are similar, but in there centers are located closely to the coast of the Yeongdong region. In all events the extreme heavy snowfall occur in the period a developed cloud-cell was moving into the coastal waters of the Yeongdong. However, it was found that developing stage of cloud and precipitation are not well matched each other in one of 3 events. Water vapor image shows that cloud-cell is developed on the northern edge of the dry(dark) region. Therefore, at the result analyzed from cloud and precipitation, selected extreme heavy snowfall events are associated with small-scale secondary cyclone or vortex, not explosive polar low. Detection and tracking small-scale cloud-cell in the real-time forecasting of the Yeongdong extreme heavy snowfall is important.

Key Words : Yeongdong extreme heavy snowfall, Cloud-cell Tracking, East Korea Bay

접수일(2013년 11월 20일), 수정일(1차 : 2013년 12월 24일), 게재확정일(2014년 1월 13일).

† 교신저자: 권태영(tykwon@gwnu.ac.kr)

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited

요약: 본 연구에서는 겨울철 영동지역에서 2001 ~ 2012(12년) 동안 일신적설 50 cm 이상의 3개 극한 대설사례를 선정하여 위성에서 관측된 구름을 추적하여 공간적 특성을 분석하였다. 그리고 그 특성을 레이더 강수와 비교하였다. 이 연구에서 선정된 영동지역 극한 대설사례는 영동지역(영동 앞바다)에서 발생하여 발달하거나 동한만 부근에서 발생하여 영동지역으로 이동해 들어오는 독립되고 잘 발달된 그리고 크기가 작은 대류형 구름과 관련이 있다. 주강수 시기의 이 구름덩어리의 최저휘도온도는 $-40 \sim -50^{\circ}\text{C}$ 로 낮고, 휘도온도 -35°C 혹은 -40°C 이하의 구름 크기는 약 $17,000 \sim 40,000 \text{ km}^2$ 로 중규모 대류복합체(-52°C 이하 구름 크기 $50,000 \text{ km}^2$)보다 작은 크기이다. 이 때 레이더의 강수면적(0.5 mm/hr 이상)도 약 $4,000 \sim 8,000 \text{ km}^2$ 로 작고 독립된 강수 형태를 보인다. 위성의 구름영역과 레이더 강수영역은 영동 앞바다에 비슷하게 위치하였으나 레이더 강수의 중심이 상대적으로 영동 해안에 인접해 위치하였다. 또한 구름이 발달하는 과정에서 구름의 극값과 강수의 극값이 일치하지 않는 경우도 나타났다. 그러나 모든 사례에서 주강수 시기에 구름은 영동 앞바다에 위치하였다. 따라서 구름덩어리의 위치가 극한 대설에 있어 무엇보다 중요한 요소인 것으로 판단된다. 수증기 영상은 건조구역(압역)의 가장자리 북쪽에서 구름덩어리가 발달함을 보여주었다. 따라서 위성관측의 구름영상과 지상 레이더에 의한 강수관측 값과 비교하여 보았을 때, 위에 선정된 극한 대설 사례는 부저기압 혹은 소용돌이의 발달과 관련되어 있는 것으로 생각된다. 영동지역 극한 대설에 대한 초단기 예보에 있어 초기에 동한만 혹은 영동지역에서 작고 발달된 대류형 구름을 탐지하고 추적하는 것이 중요하다.

1. 서론

영동지역의 대설현상은 영서지역과 비교할 때 뚜렷한 대비를 보인다. 영동지역의 속초(89.6 cm), 강릉(77.7 cm), 대관령(92.0 cm), 그리고 동해(70.2 cm)의 역대 최심신적설량은 평균적으로 약 82 cm에 달하는 수치이고, 원주, 영월, 춘천 등 영서지역의 역대 최심신적설량이 20.3, 21.4, 29.1 cm인 것에 반해 약 3배 정도로 강한 수치이다(KMA, 2012). Lee *et al.*(2011)은 2005 ~ 2011년 동안 신적설이 일 20 cm 이상(대설경보)의 대설 발생빈도는 전국적으로 약 90%가 영동지역에 집중되어 있음을 보고하였다. 겨울철 영동지역은 다른 지역에서 경험하기 힘든 일 50 cm 이상의 극한 대설이 종종 발생하여 도로 교통 마비, 주거지역 고립, 그리고 건축물 붕괴 등 사회 시스템 기능마비는 물론 재해기상 사전대비 및 피해복구가 늦어 막대한 피해를 겪어 왔다. 이러한 극한 대설은 영동지역에서 빈번히 볼 수 있는 특이한 현상으로 이러한 강수 현상을 이해하는 것은 극한기상 예측 및 재해기상 대응에 있어 필요한 부분이다.

영동지역에서 극한 대설을 유발하는 강수 현상은 동해상에서 국지적으로 발생하고 폭발적으로 성장하는 중규모 저기압(meso-scale low) 혹은 부저기압(secondary cyclone)과 관련된 것으로 보고되고 있다(Ahn and Jeong, 1984; Lee *et al.*, 1998; Heo *et al.*, 2005; Kwon *et al.*, 2013).

부저기압의 발생은 일반적으로 높은 산맥의 풍하측 지역에서와 같이 지형의 영향으로 발생하는 경우와 주저기압(primary cyclone) 후면에서 상층의 한랭공기가 위치할 때 발생하는 것으로 나누어진다. 세계적으로 록키, 안데스, 알프스, 그리고 동아시아 지역에 위치한 산맥들 풍하측은 저기압 발생 지역으로 잘 알려져 있다. 이러한 지형의 영향과 관련된 저기압 발생 연구는 풍하측에서의 저기압 발생빈도 조사 그리고 관측자료 및 수치모델 연구 등 다양하게 수행되어져 왔다(Chung *et al.*, 1976; Bleck, 1977; Lee *et al.*, 1998). 주저기압 후면에서 발생한 부저기압 연구는 알래스카 만, 노르웨이 해, 미 동부해안 대서양을 중심으로 수행되어 왔다(Miller, 1946; Reed and Duncan, 1987; Ford and Moore, 1990).

Lee *et al.*(1998)은 1995년 1월 29일 사례에서 동해상의 부저기압 발달과 관련하여 수치실험을 수행하였다. 이 연구에서 높은 시·공간 분해능의 위성영상을 통하여 한반도 북동쪽에 위치한 높은 산악지역(Korean Mountain Complex, KMC)의 풍하측 동한만에서 meso- β 규모의 소용돌이가 발생된다는 것을 확인하였다. 이러한 소용돌이의 발생과 meso- α 규모로의 저기압 발달과정에서 산악효과와 하층 경압 불안정, 그리고 상층 한기가 중요한 역할을 한다고 보고하였다. 또한 동해상의 초기 소용돌이의 발생과 발달에서 관측자료의 부족으로 인해 과거 연구와 예보에서 KMC 효과의 중요성이 간과되어 왔음

을 지적하였다.

겨울철 동해상에서 급격히 발달하는 중규모 저기압은 한반도뿐만 아니라 동쪽으로 이동·발달하면서 일본에도 강한 대설을 유발한다. Asai(1988)는 1983~1984년 동안 직경이 약 200 km 혹은 그 보다 작은 meso- β 규모의 소용돌이가 동해상에서 빈번히 발생함을 수치적으로 보였다. Nagata(1993)는 공간해상도 6 km의 고해상도 정역학 수치모델을 통해 동해상에서 meso- β 규모의 소용돌이의 발달을 모의하고, 이 소용돌이의 발달 과정을 연구하였다. 모의된 결과를 통해 순압 충밀립 불안정(barotropic shear instability)이 meso- β 규모의 소용돌이 성장 과정에서 중요한 요소로 작용됨을 보였다. 그러나 한반도 북동쪽 산맥의 효과로 발생된 풍하측 meso- β 규모 소용돌이 발생은 동해상의 관측 부족으로 향후 연구가 더 필요하다고 하였다.

이동하는 극저기압(polar low)이 동해상에서 급격히 발달하는 연구로 Ahn and Jeong(1984)은 가용위치에너지와 운동에너지 수치(budget) 관계를 이용하여 1981년 1월 2일 동해상에서 급격히 발달하는 저기압 사례에 대해 연구하였다. 동해상에서 급격히 발달하는 저기압은 해양에서의 열, 수증기의 공급과 지형에 의한 하층 경압성 증가로 야기된다고 설명하였다. 하층 경압성 강화는 육지와 바다의 온도차이로 인해 발생하고, 한랭전선 후면으로 상층 한기이류와 와도이류가 경압성을 급격하게 발달시킨다고 하였다. Lee *et al.*(2001; 2002)은 중위도 지역 저기압 발달에서 경압 불안정이 주된 요인으로 인식되고 있으나 상부 대류권과 하부 성층권 사이의 상호작용과 같이 다른 물리적 작용이 존재할 수 있음을 제기하였다. 또한 한반도 겨울철 극한기상 연구는 주로 사례 연구 중심 그리고 수치모델 중심으로 이루어져 왔음을 지적하고, 대류권계면 접힘(tropopause folding), 대류권계면 파상운동, 그리고 상층 위치 소용돌이도 이상 등 대류권과 하부 성층권 사이의 상호작용에 관한 연구를 수행하였다.

Heo *et al.*(2005)은 부산지역에 37.2 cm 적설량을 기록한 2005년 3월 5일 폭설사례에서 종관 및 지역예보시스템(Regional Data Assimilation and Prediction System, RDAPS) 10 km 분석장 자료를 사용하여 폭설현상의 원인을 규명하였다. 폭설의 원인은 한반도 남쪽으로 저기압 통과 후 남동해안에 발생한 부저기압이 부산으로 접근하면서

온난습윤한 공기의 수렴이 남하하고, 상층에 한기가 자리하여 불안정을 야기시켰다고 보고하였다. 특히 부산 앞바다에 발달된 조건부 대칭불안정(Conditional Symmetric Instability, CSI)이 형성되어 습윤공기를 800~750 hPa 고도층으로 유입시킨 것을 주된 원인으로 뽑았다. 이러한 특징은 영동지역에서 지형효과로 인한 강설 현상과는 매우 다른 강설현상인 것으로 보인다고 하였다. Kwon *et al.*(2013)은 영동지역에서 2001~2012년 기간 동안 신적설이 일 50 cm 이상인 4개의 극한대설 사례를 선정하였고, RDAPS 10 km와 30 km 그리고 영국 통합모델(Unified Model, UM) 자료의 몇 가지 진단변수를 이용하여 종관규모의 역학장 특성을 분석하였다. 분석 결과, 영동지역의 극한 대설 사례에서 한반도 상공 500 hPa 고도에 뚜렷한 기압골이 위치하고, 영동 혹은 인접한 동해상에 좁은 띠 모양으로 500 hPa 고도에서 -10 ~ -20°C/12 hr의 강한 한기이류가 존재한다. 또한 최대 강수 시각의 6~12시간 전부터 20 m/s 이상의 절대소용돌이도가 700~500 hPa 고도에서 나타나고, 한반도 서쪽에 중심을 둔 위치소용돌이도(Potential Vorticity, PV)가 영동부근 상층에서 500~600 hPa 고도까지 1~2 PVU(Potential Vorticity Unit) 값이 하강하는 것을 확인하였다. 이 연구를 통하여 극한 대설 사례의 종관환경의 특성을 요약하였고, 이러한 특성이 한반도 북동쪽에 위치한 높은 산맥 풍하측과 일본열도에 위치한 주저기압 후면에서 발생하는 부저기압 발달과 관련되어 있음을 유추하였다. 그러나 이러한 자료로부터 부저기압의 발달위치와 그 강도와의 관련성을 찾는 데는 어려움이 있다고 보고하였다.

동해상에서 발생, 급격히 발달하는 중규모 저기압과 관련된 연구는 동해상의 관측자료의 부족으로 인해 제한적으로 이루어져 왔다. 이것은 종관 일기도 상에서 직경이 200 km 혹은 이보다 작은 meso- β 규모 소용돌이의 발생을 예측하거나 발생되더라도 발생위치를 정확히 확인하기에는 어려움이 있기 때문이다. 따라서 동해상에서 폭발적으로 성장하는 저기압의 발달을 이해하기 위하여 관측 공백지역에 대해 상시 관측이 가능하고, 구름의 성장과정을 파악할 수 있는 기상위성 및 레이더 등 원격탐사 자료의 활용이 요구된다. 현재 천리안 위성(혹은 통신해양기상 위성; Communication, Ocean and Meteorological Satellite, COMS)과 지상 레이더의 시·공

간 관측분해능은 각각 15분 간격, 5 km(가시 채널은 1 km) 그리고 10분 간격, 1 km이다. 이러한 관측자료를 통하여 동해상에서 발생하는 소용돌이의 관측과 이동경로 그리고 발달과정에 따라 변화하는 구름의 특성과 강수강도 변화 등을 분석할 수 있다. Evans *et al.*(1994)는 1970-1980년대 동안 50개의 폭발적인 저기압 생성사례를 위성의 가시와 적외 영상을 통하여 분석하였다. 이 연구를 통하여 급격히 발달하는 저기압 생성 사례들을 4개의 형태 (Emerging cloud head, Comma cloud, Left exit, Instant occlusion)로 분류하는 기법을 개발하였다. 또한 위성의 수증기 채널에서 관측된 중상층의 건조구역(암역) 정보는 위치소용돌이도(PV)를 유추할 수 있어 지상 저기압의 발달을 예측할 수 있는 정보로 활용될 수 있다 (Young, 1987; Mansfield, 1996; Kim *et al.*, 2012). 그리고 2000년대부터 관측을 수행하고 있는 속초 radiosonde, 강릉·울진 wind profiler, 그리고 동해 부이(buoy) 관측자료와의 병행 분석을 통해 시간에 따라 급격히 진화하는 동해상의 저기압 발달과정을 이해할 수 있을 것으로 기대된다.

과거 연구에서는 단순히 위성영상만을 이용하여 동해상에 존재하는 중규모 저기압을 확인하는데 그쳤고, 아직까지 부저기압과 관련된 직접적인 원격탐사 활용 연구는 미흡한 실정이다(Lee *et al.*, 1998; Ahn *et al.*, 2007). 이 연구에서는 높은 시·공간 분해능을 지닌 정지궤도 위성 관측자료를 이용하여 영동지역에 극한 대설을 유발시킨 구름덩어리(cloud-cell)를 탐지하였고, 30분 간격으로 이동을 추적(tracking)하여 구름덩어리의 진화과정 동안 변화하는 구름덩어리의 특성을 조사하였다. 2장에서는 연구에 사용된 자료 및 연구방법을 기술하였고, 3장에서는 구름을 탐지를 위한 휘도온의 분포를 조사하고 고정된 영역에서의 구름특성을 분석하였다. 4장에서는 구름덩어리를 추적하며 발생위치, 이동, 최저휘도온도, 구름 크기(화소수, pixel number) 등 구름의 특성을 면밀히 조사하였다. 5장에서는 레이더 강수자료를 이용하여 강수 강도, 면적의 변화를 조사하고 위성의 구름특성과 비교·분석하였다. 6장에서는 결과를 요약하였고, 이렇게 분석된 결과는 동해상에서 발생하여 폭발적으로 발달하는 저기압과 연관된 극한 대설의 초단기 예보 가이던스 및 재해기상 사전대비 자료로 활용하고자 한다.

2. 연구자료 및 방법

겨울철 영동지역에서 극한 대설을 발생시킨 구름의 특성을 분석하기 위하여 지난 12년(2001 ~ 2012년) 동안 신적설이 일 50 cm 이상인 4개 극한 대설사례를 선정하였다. Table 1은 영동지역에서 발생한 4개 극한 대설사례의 사례기간 동안에 신적설량, 강수량, 강수지속시간, 최대 시간강수량 등 강수에 대한 관측결과이다. 속초, 강릉, 북강릉, 그리고 동해는 영동 해안지역을 대표하는 기상관측소 지점이고, 대관령은 산악지역을 대표하는 기상관측소로 구분된다. 해안지역의 최대 시간강수량은 기상관측소 중 가장 강한 지점의 강수량만을 표기하였다. 강수 지속시간과 최대 시간강수량은 1, 2, 4번 사례와 3번 사례 사이에서 뚜렷한 차이를 보인다. 강수 지속시간의 경우 1, 2, 4번 사례는 약 20 ~ 40시간 지속되었고, 3번 사례의 경우 약 100시간으로 다른 사례에 비해 상대적으로 2.5 ~ 5배 정도 길게 지속되었다. 최대 시간강수량 또한 3번 사례는 5.3 mm/hr인 반면 1, 2, 4번 사례는 3시간 이내에 시간 당 10 mm 이상의 강한 강수를 기록하였다. 이 값을 강수 지속시간과 같이 비교하였을 때, 3번 사례는 긴 강수시간 동안 약한 강수가 지속적으로 있었음을 의미하고, 그 외 사례는 짧은 시간 동안 강한 강수 현상이 있었음을 의미한다. Kwon *et al.*(2013)의 연구에서도 이러한 강수차이를 보고하였고, 특히 3번 사례에서는 700 hPa 고도의 연직 속도에서 영동과 동해 지역에 뚜렷한 상승류가 나타나지 않았기 때문에 다른 과정에 의한 강수 현상으로 판단하여 연구에서 제외하였다.

선정된 4개 사례들은 Kwon *et al.*(2013)에 의해 수치모델 자료를 사용하여 역학장 특성이 분석되었고, 연구결과, 3번 사례(2010년 2월 9-12일)를 제외한 모든 사례들에서 동일하게 지상저기압 발달 조건과 연관된 500 hPa의 한기이류, 양의 위치소용돌이도와 더불어 영동지역과 동해상에 뚜렷한 상승류를 확인하였다. 그러나 원격탐사자료 보다 상대적으로 낮은 수치모델 자료의 시·공간 분해능으로 인해 세부적인 분석에 한계가 있음을 지적하였다. 따라서 이 사례 기간 동안 30분 간격, 5 km 해상도의 기상위성과 10분 간격, 1 km의 기상레이더 자료를 활용하여 부저기압에 동반된 구름덩어리의 중심위치, 이동 등 구름덩어리의 특성과 강수강도의 변화 등 세부적인 분석을 시도하였다. 두 자료는 기상청으로부터

Table 1. Precipitation characteristics of the extreme heavy snowfall events in the Yeongdong region selected in this study. Sockcho, Gangneung(N. Gangneung), and Donghae are the weather station representing coastal region and Daegwallyeong represents mountain region

Case	Date	Weather station	Total amount of fresh snow cover & precipitation (cm/mm)	Duration of precipitation(hr)	Maximum hourly precipitation (weather station)
1	2005. 3. 4	Sokcho	54.0 / 41.1	18	11.5 mm/3hr (Donghae)
		Gangneung	44.2 / 26.1	24	
		Donghae	62.5 / 43.6	24	
		Daegwallyeong	59.4 / 45.6	21	19.3 mm/3hr
2	2008. 12. 22	Sokcho	73.5 / 75.0	25	15.0 mm/hr (N. Gangneung)
		N. Gangneung	57.0 / 66.0	24	
		Gangneung	- / 53.0	27	
		Donghae	25.1 / 34.0	24	
		Daegwallyeong	20.4 / 14.8	28	2.2 mm/hr
3	2010. 2. 11	Sokcho	52.2 / 74.3	86	5.3 mm/hr (Donghae)
		N. Gangneung	76.3 / 110.4	98	
		Gangneung	- / 90.6	87	
		Donghae	57.0 / 92.5	98	
		Daegwallyeong	99.6 / 85.5	95	3.0 mm/hr
4	2011. 2. 11	Sokcho	42.5 / 43.2	38	14.5 mm/hr (N. Gangneung)
		N. Gangneung	89.8 / 101.7	34	
		Gangneung	- / 72.5	37	
		Donghae	100.8 / 101.9	38	
		Daegwallyeong	63.5 / 47.4	40	7.5 mm/hr

Missing values are presented as “-” symbol

수집되었고, 기상위성 자료는 Geostationary Operational Environmental Satellite-9(GOES-9), Multi-Functional Transport Satellite(MTSAT)-1R, MTSAT-2의 적외1(MTSAT, 10.3~11.3 μm ; GOES-9, 10.2~11.2 μm)과 수증기(6.5~7.0 μm) 채널 자료이고, 기상레이더는 1.5 km 등고도평면위치지시기(Constant Altitude Plan Position Indicator, CAPPI) 합성자료이다.

정지궤도 기상위성의 적외1 채널은 대기의 창(atmospheric window) 영역에 해당되는 파장대로 이 영역의 복사에너지는 수증기, 오존, 이산화탄소 등 대기 중에 존재하는 미량기체(trace gases)들의 영향을 비교적 적게 받으며 지표에서 우주로 방출된다. 따라서 구름을 흑체(blackbody)로 가정하고 구름의 고도가 높을 때, 구름 상부에서 적외선을 흡수하는 미량기체가 적다고 가정하면 위성에서 관측된 복사에너지는 휘도온도(밝기온도)로 변환되고, 이 온도는 운정온도(Cloud Top Temperature, CTT)로 볼 수 있다. 휘도온도는 구름의 높이와 직접적

으로 연관이 있기 때문에 위성에서 관측된 휘도온도의 분포와 시간적 변화를 통해 구름의 영역, 운정온도 그리고 운정고도 변화 등 구름의 성장과 관련된 정보를 높은 시·공간 분해능으로 조사할 수 있다. Kim *et al.*(2012)은 높은 시·공간 분해능의 위성 적외자료에서 하층운의 발달, 이동, 소산을 통해 하층의 한기·난기 이류를 분석하여 영동지역 위험기상의 초기 발달 징후의 하나가 될 수 있음을 제시하였고, 동해상에서 병합하면서 발달하는 대류성 구름이 영동지역 강수와 밀접한 연관성이 있음을 보였다.

수증기 흡수대인 수증기 채널은 대기 중상층에 분포하는 수증기를 탐지할 수 있어 적외영상에서 판단하기 어려운 중상층의 대기흐름을 분석할 수 있다. 또한 건조구역(암역) 위치 분석을 통하여 위치소용돌이도(PV) 그리고 제트기류의 위치를 간접적으로 유추할 수 있다. 이러한 정보는 지상저기압의 발달을 예측하는데 활용될 수 있다. Gurka *et al.*(1995)은 수증기 영상을 통하여 1988

~ 1990년 동안 16개의 폭발적인 저기압 생성 사례에서 건조구역(암역)의 강화가 나타났음을 보였다. Beckman (1987)은 수증기 영상에서 “고리(Hook)” 패턴은 강한 소용돌이도의 중심을 나타낸다고 하였고, Weldon(1985)은 500 hPa 기압골 안에서의 건조구역(암역)은 500 hPa 최대풍속 지역과 관련이 있음을 보였다. Kim *et al.*(2012)은 수증기 영상을 통하여 건조구역(암역)의 위치는 500 hPa 위치소용돌이도의 중심, 300 hPa 제트축과 대략적으로 일치하였음을 보였고, 영동지역 위험기상 초기 발달 징후로 활용될 수 있음을 제시하였다.

이 연구에서는 영동지역에 극한 대설을 유발시킨 구름덩어리의 특성을 분석하기 위해 구름덩어리를 탐지하였고, 30분 간격으로 이동을 추적하며 구름덩어리 일생 전반에 대해 분석을 수행하였다. 영동지역 강수현상과 관련된 구름의 휘도온도는 강수형태에 따라 다양한 휘도온도의 분포를 보인다. Ahn *et al.*(2007)은 3개의 서로 다른 강수유형(한기해안형, 산악형, 난기형)을 선정하여 각 사례별 운정온도의 분포를 조사하였다. 이 연구결과, 강수사례에 따라 운정온도의 분포는 $-5 \sim -50^{\circ}\text{C}$ 로 넓게 분포하고 있음을 확인하였다. 구름 탐지를 위한 임계값 선정을 위해 4개 사례에서 관측된 적외1 휘도온도의 빈도분포(histogram)를 조사하였다. 조사영역은 영동지역(산악과 해안)과 일부 동해상을 포함하는 위도 $37.0 \sim 39.0^{\circ}\text{N}$, 경도 $128.0 \sim 131.0^{\circ}\text{E}$ 영역으로 선정하였고, 조사영역을 육지와 바다로 나누어 휘도온도의 빈도분포

를 분석하였다(Fig. 1). 또한 구름 유무에 따른 휘도온도의 차이를 조사하기 위하여 구름이 없는 맑은 시간과 구름이 많은 강수 시간으로 나누어 휘도온도의 분포를 조사하였다. 맑은 시간은 강수 종료 후 대기가 건조하고 구름이 가장 적은 하나의 영상으로부터 휘도온도의 빈도분포를 구하였고, 반면 강수 시간은 최대 강수 시각에서 전후 ± 1 시간 내의 4~6개 영상으로부터 빈도분포를 구하였다.

적외1 휘도온도의 분포를 통하여 임계값을 선정하고, 임계값보다 낮은 값을 강수구름으로 구분하였다. 임계값으로 탐지된 강수구름은 고정된 영역분석에서 구름덩어리의 일생을 이해하는 데에는 한계가 있기 때문에 강수사례별로 발생부터 소멸까지 구름덩어리의 이동을 추적하였다. 고정된 영역에서 구름특성을 분석하는 방법과 구름덩어리를 추적하며 분석하는 방법에는 분석 관점에 따라 차이를 갖는다. 고정된 영역에서의 분석은 특정 관심지역, 예를 들어 강수가 강하게 나타나는 관심지역 상으로 통과하는 구름의 변화를 조사하는 데에는 적합한 방법일 것이다. 그러나 이러한 방법은 연구영역 외 지역에서 유입해 들어오는 구름의 발생위치, 이동하며 변화하는 구름의 특성, 구름의 병합 및 분리, 그리고 구름의 소멸 등 구름일생의 진화과정을 유추하는 데에는 한계가 있을 것이다. 따라서 이러한 구름덩어리들의 초기 생성위치, 이동변화, 그리고 상호연관성을 분석하기 위해 생성 초기부터 이동을 추적하며 분석하는 기법

Fig. 1. Study area(lat.: $37.0 \sim 39.0^{\circ}\text{N}$, lon.: $128.0 \sim 131.0^{\circ}\text{E}$) for regional analysis.

이 요구될 것이다. 이 연구에서는 이동하는 구름덩어리를 추적하면서 중심위치, 최저휘도온도, 그리고 구름 크기를 분석함으로써 변화하는 구름덩어리의 특성을 조사하였다. 또한 동일 시간대에 대응되는 구름덩어리의 발달과 관련된 수증기 영상에 나타난 건조구역(암역)의 위치 및 강도의 특징을 분석하였다. 그리고 구름과 강수의 관계성을 조사하기 위하여 레이더로부터 분석된 강수강도 및 영역은 위성에서 분석된 구름특성과 비교·분석하였다.

3. 구름탐지 및 구름의 영역분석(Regional analysis)

1) 구름탐지

맑은 시간의 휘도온도 분포를 조사하여 보면 육지에서의 휘도온도는 $-5 \sim -15^{\circ}\text{C}$ 사이에 위치하고, 바다에서는 $0 \sim 10^{\circ}\text{C}$ 사이에 위치한다. 바다와 육지의 휘도온도 차이는 약 15°C 로 육지가 상대적으로 더 낮은 값을 보인다(Fig. 2). 세부적으로 사례별 바다에서의 휘도온도 분

포는 1(2005년 3월)과 2번(2008년 12월) 사례에서 $5 \sim 10^{\circ}\text{C}$ 에서 최대빈도를 보이고, 3(2010년 2월)과 4번(2011년 2월) 사례는 각각 $0 \sim 5^{\circ}\text{C}$ 그리고 $0 \sim -5^{\circ}\text{C}$ 에 최대빈도를 보인다. 몇몇 사례에서는 맑은 시간에 매우 작은 구름이 존재해 있어 -15°C 이하에서 휘도온도 값이 분포한다. 실제 국립수산물과학원에서 관측된 1, 2, 3, 그리고 4번 사례에 해당하는 동해 월평균 해수면온도는 7.66°C , 11.84°C , 6.03°C , 그리고 3.42°C 로 최대빈도의 휘도온도 값과 유사한 수치를 보이거나 동해 해수면온도가 휘도온도보다 상대적으로 조금 높은 수치를 보인다.

Fig. 3 a-d는 각 사례별 구름이 많은 강수 시간의 육지와 바다에서의 휘도온도 분포를 보여준다. 1, 2, 4번 사례의 휘도온도 분포를 보면 육지와 바다에서 대부분의 휘도온도가 넓은 범위에서 분포하고 있음을 알 수 있다. 또한 휘도온도의 최소값은 1, 4번 사례는 $-45 \sim -50^{\circ}\text{C}$ 그리고 2번 사례는 $-35 \sim -40^{\circ}\text{C}$ 사이에 위치한다. 그러나 3번 사례의 경우 바다와 육지 모두 약 70~80%의 휘도온도가 $-15 \sim -20^{\circ}\text{C}$ 에 집중되어 분포하고 있고, 최소값은 $-20 \sim -25^{\circ}\text{C}$ 에 위치하고 있어 1, 2, 4번 사례에 비해 상대적으로 $15 \sim 25^{\circ}\text{C}$ 높은 수치를 보인다. 이러한 결과를 토대로 1,

Fig. 2. Frequency distribution of IR1 brightness temperature for (a) case 1, (b) case 2, (c) case 3, and (d) case 4 over the study area at the clear sky time. Black and gray bar indicate over land and sea, respectively.

Fig. 3. Same as Fig. 2 except for the maximum precipitation period.

2, 4번 사례의 구름은 공간적으로 매우 비균질적이고 연속적으로 발달된 대류형 구름이 분포하고 있다는 것을 알 수 있고, 반면 3번 사례의 경우, 공간적으로 매우 균질한 층운형 구름이 분포하고 있는 것을 알 수 있다. 1, 2, 4번 사례의 휘도온도의 고도를 비교하였을 때, 속초 단열선도에서 휘도온도에 해당하는 고도는 1과 4번 사례의 경우 약 6 ~ 7 km이고, 2번 사례는 약 5 km로 1과 4번 사례의 구름이 2번 사례에 비해 연속적으로 더욱 발달한 구름이다. 또한 1과 4번 사례의 구름은 육지와 바다에서의 차이가 크지 않는 것에 반해서 2번 사례는 육지에 비해 바다에서 더욱 발달된 구름이 분포한다는 것을 알 수 있다.

3번 사례는 1, 2, 4번 사례와는 다른 강수과정 상에서 발생된 구름일 가능성을 시사한다. Kwon *et al.* (2013)의 연구에서도 3번 사례의 경우 다른 사례들과는 다르게 여러 진단변수(상승류, 수렴·발산, 절대와도, 상대와도 등)에서 뚜렷한 특징이 나타나지 않았음을 보고하였다. 따라서 본 연구에서는 3번 사례를 제외한 1, 2, 4번 사례에 대해 연구를 수행하였다. 구름이 없는 맑은 시간과 구름이 많은 강수 시간의 휘도온도 분포를 높은 순으로 볼 때, 휘도온도는 맑은 시간(바다 > 육지) > 강수 시간(3번 > 2번 > 1, 4번 사례) 크기순으로 나타난다. 또한 3번 사

례와는 구분되게 다른 세 개 사례는 -25°C 이하에서 휘도온도의 분포가 높게 나타나는 특징을 보인다. 따라서 강한 강수구름을 탐지하기 위한 휘도온도 임계값은 휘도온도가 낮고, 연속적으로 매우 발달된 대류형 구름을 분석하기 위하여 -30°C로 매우 제한적인 임계값을 설정하여 분석을 시도하였다.

2) 구름의 영역분석(Regional analysis)

Fig. 4는 3개 사례에 대한 연구영역 내 육지와 바다에서의 구름 크기 시계열 변화를 보여준다. 여기서 구름 크기 계산은 임계 휘도온도를 -30°C로 적용하여 연속적으로 발달된 강수구름을 집중적으로 분석하였다. 즉, 휘도온도가 -30°C 이하인 화소수를 계산하여 구름의 공간적 크기를 조사하였고, 또한 최저휘도온도를 구하여 구름의 최대 고도를 조사하였다. 여기서 구름 크기는 육지와 바다를 구분하여 계산하였고, 육지와 바다 면적 각각에 대한 구름의 비율을 계산하였다. 2번 사례의 육지와 바다에서 각각 12월 21일 1833 Korean Standard Time(KST)와 2033 KST까지는 상층운의 통과로 분석에서 제외하였다. 시간에 따른 구름 크기 변화는 1과 4번 사례에서 하나의 뚜렷한 극값을 갖는 형태를 보이나 2번 사례는 이 두 사례와 뚜렷한 차이를 보인다. 그것을 요약하면 다

Fig. 4. Time series of cloud pixels(%) for (a) case 1, (b) case 2, and (c) case 4, in which threshold brightness temperatures is -30°C . “↓” symbol indicates maximum hourly precipitation time.

음과 같다.

1번 사례에서 구름 크기의 최대값은 육지와 바다에서 각각 92.45% 그리고 74.88%로 육지가 더 높은 수치를 보이고, 최대를 보인 시각은 3월 4일 1101 KST 그리고 1001 KST로 바다에서 먼저 최대를 보인 후 한 시간 뒤에 육지에서 최대를 보인다. 4번 사례에서는 구름 크기의 최대값과 시각이 육지와 바다에서 99.67%(2월 12일 0400 KST) 그리고 85.2%(2월 12일 0100 KST)로 육지에서 바다보다 더 높은 수치를 보이고, 바다에서 최대를 보

인 후 3시간 뒤에 육지에서 최대를 보인다. 이것을 요약 하면 1과 4번 사례에서는 구름 크기에서 뚜렷한 극값을 보이고, -30°C 이하의 구름 크기 최대 비율은 바다보다 육지가 더 높고, 최대가 나타나는 시각은 바다가 육지보다 1 ~ 3시간 빠르게 나타난다. 반면 2번 사례는 1과 4번 사례와 비교할 때, 구름 크기의 최대 비율이 육지와 바다에서 각각 약 20과 40%로 매우 낮고, 뚜렷한 극값을 가지 않는(완전히 증가하여 감소하는) 특징을 보인다.

또한 구름의 최대 고도의 변화를 조사하기 위하여 연

Fig. 5. Time series of minimum brightness temperature(°C) for (a) case 1, (b) case 2, and (c) case 4. “↓” symbol indicates maximum hourly precipitation time.

구영역 내 육지와 바다에서의 최저휘도온도 시계열 변화를 조사한다(Fig. 5). 1과 4번 사례의 최저휘도온도의 변화는 초기 최저휘도온도가 점차 낮아져 최소값을 기록하고 이후 증가하는 경향을 보인다. 반면 2번 사례는 이미 초기부터 -35°C 이하로 낮은 휘도온도에서 시작하여 최소값을 기록한 후 증가하는 경향을 보인다. 최저휘도온도의 시계열에서 휘도온도의 최소값은 1번과 4번 사례에서는 약 -47°C(3월 4일 1201 KST) 그리고 약 -45°C(2월 12일 0200 KST)를 보이고, 반면 2번 사례의 경우 12

월 21일 2200 KST에 약 -38°C로 1, 4번 사례에 비해 상대적으로 높은 수치를 보인다. 이러한 특징은 모든 사례에서 바다와 육지 모두 유사한 특징을 보인다. 구름 크기의 최대값과 휘도온도의 최소값이 나타난 시각을 비교해 보았을 때, 1번 사례를 제외하고 2와 4번 사례는 육지와 바다 모두 휘도온도의 최소값이 나타난 이후 약 2~3시간 후에 구름 크기의 최대값을 보인다. 그러나 1번 사례에서는 휘도온도의 최소값이 구름 크기의 최대값이 나타난 1~2시간 이후에 육지와 바다 모두에서 나타난다.

Fig. 6. Infrared(IR1) satellite images for (a) case 1, (b) case 2, and (c) case 4 at initial stage.

사례별로 시간강수량과 휘도온도의 최소값 그리고 구름 크기를 각각 비교하여 보았을 때, 1과 4번 사례는 휘도온도의 최소값이 최대 시간강수량 보다 3시간 전에 나타난다. 즉, 1번 사례에서는 3월 4일 09시에 대관령에서 19.3 mm/3hr(2005년은 3시간 간격으로 관측을 수행함)를, 그리고 4번 사례에서는 2월 11일 23시에 북강릉에서 14.5 mm/hr의 최대 시간강수량을 기록하였다. 반면 2번 사례는 휘도온도의 최소값이 나타난 시각에서 6시간 후인 12월 22일 04시에 북강릉에서 15.0 mm/hr의 최대 시간강수량을 기록하였다. 또한 구름 크기의 최대값과 비교하여 보았을 때, 1과 4번 사례에서는 각각 구름 크기의 최대값이 나타난 시각에서 2시간 그리고 5시간

전에 최대 시간강수량을 기록한 반면 2번 사례에서는 3시간 후에 최대 강수량을 기록하였다.

4. 구름덩어리의 추적분석(Tracking analysis)

3장에서는 고정된 연구영역 내에서 나타나는 육지와 바다의 지역별 구름특성을 분석하였다. 이 결과에서 특징적인 것은 2번 사례를 제외한 모든 사례에서 최대 강수시간대와 휘도온도의 최소값, 그리고 구름 크기가 최대가 나타난 시간대와 잘 일치하였다. 그러나 고정된 영역분석에서 구름덩어리의 일생을 이해하는 데에는 한

계가 있었다. 특히 1, 2번 사례의 경우 초기 구름덩어리의 위치는 고정된 연구영역에서 벗어난 동한만 남동쪽 그리고 함경남도 해안가에 -25°C 이하의 구름덩어리가 생성되어 위치한다(Fig. 6a, b). 이 구름 덩어리는 남진 혹은 남동진하여 영동지역으로 이동하여 극한 대설을 유발시켰다. 또한 4번 사례의 경우, 초기 영동지역에 뿐만 아니라 울릉도 북동쪽에 $-20 \sim -25^{\circ}\text{C}$ 의 휘도온도를 보이는 독립된 형태의 구름덩어리가 위치한다(Fig. 6c). 울릉도 근해에 위치해 있던 구름덩어리는 서진하여 영동지역의 구름덩어리와 병합한다. 따라서 이동하며 변화하는 구름덩어리의 특성을 조사하기 위해 고정영역에 대한 분석에서 벗어나 구름덩어리를 추적하며 분석하는 것이 필요하다.

이러한 구름의 추적을 위해 사례에 따라 가변적이고 광범위한 연구영역을 설정하였다. 극한 대설과 관련된 구름덩어리 선정을 위하여 -30°C 임계 휘도온도를 적용해 탐지된 여러 구름덩어리 중 주된 구름덩어리를 선정하였다. 선정된 구름덩어리는 그 이동을 추적하며 구름의 진화과정에서 초기, 분리, 병합, 쇠퇴기, 쇠퇴기 등 특징적인 부분을 구분하여 분석하였고, 구름덩어리의 중심위치, 이동, 최저휘도온도, 그리고 구름 크기 등 변화하는 구름의 특성을 조사하였다. 위성에서 나타난 구름의 변화를 이해하기 위해서 구름덩어리의 중심위치 이동에 따라 지상관측 강수량과 바람의 특징을 분석하였다. 또한 구름덩어리의 발달과 관련된 수증기 채널 영상에 나타난 건조구역(암역)의 위치 및 강도의 특징을 분석하였다.

1) 2005년 3월 4일(1번 사례)

3월 4일(1번 사례) 극한 대설사례는 3월 2025 KST 일 본열도에 휘도온도가 매우 낮은 구름대가 위치해 있고, 동한만 남동쪽에 -25°C 이하의 독립된 구름덩어리가 생성되어 위치하고 있다(Fig. 6a). 이 구름덩어리는 최저휘도온도가 -25.33°C 이고, -20°C 이하의 휘도온도를 갖는 구름 크기는 약 $3,000 \text{ km}^2$ 크기를 보인다. 이 구름덩어리는 발달하는 가운데 남진하여 영동지역에 최대 신적설 62.5 cm (동해)의 극한 대설을 유발하였다. Fig. 7은 3월 4일 극한 대설사례에서 발생한 구름덩어리의 크기, 최저휘도온도, 중심위치의 시계열 변화를 보여준다. 이를 위하여 임계 휘도온도를 -30°C 로 적용하여 극한 대설과 관

련된 하나의 주된 구름덩어리를 선정하였고, 이 구름덩어리를 30분 간격으로 약 15시간 동안 추적하며 구름의 크기, 최저휘도온도, 중심위치(1시간 간격)를 조사하였다. 중심위치는 주된 구름덩어리 내에서 휘도온도의 최소값으로 정의하였고, 구름 크기는 화소수에 25 km^2 (적외1 공간해상도 5 km)를 곱하여 계산하였다.

시간에 따른 구름 크기 변화는 약 15시간 동안 하나의 뚜렷한 극값을 갖는 형태를 보인다. 휘도온도가 -30°C 이하인 구름 크기는 3월 4일 0025 KST에 약 $3,000 \text{ km}^2$ 를 보이고, 9시간 뒤인 4일 0925 KST에 약 $93,000 \text{ km}^2$ 로 최대값을 보인다. 휘도온도가 -40°C 이하인 구름 크기는 약 $17,000 \text{ km}^2$ 로 4일 1201 KST에 최대값을 보인다. 이후 구름 크기는 급격히 감소하여 6시간 뒤인 4일 1501 KST에 약 700 km^2 (-30°C 이하) 이하로 나타난다(Fig. 7a). 그리고 최저휘도온도의 변화는 4일 0025 KST에 -37.03°C 에서 점차 감소하여 0713 KST에 -47.85°C 를 기록하고, 이후 약 5시간 동안 약 1°C 변동폭에서 최저휘도온도가 유지된다. 그리고 최소값은 1201 KST에 -48.14°C 를 보인다(Fig. 7b). 최저휘도온도와 구름 크기의 변화경향을 비교하여 보았을 때, 구름 크기가 최대인 0925 KST는 최저휘도온도가 매우 낮게 나타나는 시간대(0713~1201 KST) 내에 위치한다. 따라서 비록 구름 크기가 최대로 나타난 시각과 최저휘도온도의 최소값이 나타난 시각이 약 3시간 차이를 보이지만 전체적인 증가와 감소 경향은 서로 일치함을 알 수 있다.

구름덩어리의 중심위치는 3일 2025 KST 동한만 남동쪽 해상에 위치하고, 4일 0113 KST까지 정체하며 위치한다. 이후 서진하여 약 2시간 동안(0225 ~ 0401 KST) 영동북부 고성 앞바다로 이동하여 위치한다. 0501 ~ 0825 KST 동안에는 구름덩어리의 중심위치가 동한만 북쪽, 함경남도 신포 남동해상으로 빠르게 이동하여 약 4시간 동안 위치하는 특징을 보인다. 다시 구름덩어리의 중심이 빠르게 남진하여 영동북부 고성 앞바다로 이동하고 약 5시간(0901 ~ 1425 KST) 동안 위치한다. 이 이동 과정에서 구름덩어리의 급격한 이동의 특징은 한 구름덩어리 내에 작은 덩어리의 세분화가 나타나고, 이들 세분화된 구름덩어리 가운데 주된 덩어리는 신포 남동해상과 영동북부 고성 앞바다에서 병합, 발달, 소멸한다. 이러한 이유로 중심위치의 급격한 이동이 발견되었다. 이 시간대에서는 세분화된 구름덩어리가 매우 가깝게 위치하

고 또한 병합과 분리가 급격하게 이루어져 구름덩어리를 추적하는데 어려움이 있었다. 1501 KST 이후 구름덩어리의 중심 위치는 영동남부 지역으로 빠르게 이동한다(Fig. 7c).

이러한 구름덩어리의 중심위치와 최저휘도온도 그리고 구름 크기를 비교하여 세부적으로 살펴보면 다음과 같다. 영동지역에 극한 대설을 유발시킨 구름덩어리는 4일 0401 KST에 영동북부 고성 앞바다에서 발달하기 시작하여 0713 ~ 1201 KST 시간대에 최저휘도온도의 최소값을 보인다. 이 시간대는 구름덩어리의 중심위치에 따라 두 개의 시간대로 구분되어 나타난다. 하나는 구름덩어리가 신포 남동해상에 위치한 전반부 시간대(3시간: 0501 ~ 0825 KST)이고, 다른 하나는 중심위치가 고성 앞바다에 위치한 후반부 시간대(5시간: 0901 ~ 1425 KST)이다. 이 시간대에서 최저휘도온도는 약 1°C 이내에서 비슷한 값을 보이고, 이 값은 최저휘도온도의 최소값과 비슷하다. -30 °C이하의 구름 크기가 최대값을 보인 0925 KST는 구름덩어리의 중심이 신포 남동해상에서 고성 앞바다로 급격히 이동하는 시각이다. 이러한 변화로부터 0925 KST에 구름 크기가 최대로 나타난

것은 세분화된 구름덩어리 중 신포 남동해상의 구름덩어리와 고성 앞바다의 구름덩어리가 하나의 구름덩어리로 분류한 것으로 유추할 수 있다. 1501 KST 시간에 구름덩어리의 중심위치는 영동남부 지역으로 이동하여 최저휘도온도는 증가하고 구름 크기는 감소하여 소멸한다.

위에서 분석된 구름덩어리의 특성과 강릉 수직측풍 장비 바람 및 지상 강수를 비교하여 분석하였다. 구름덩어리가 영동북부 고성 앞바다에 위치한 4일 0301~0401 KST 시간대에는 강릉 수직측풍장비에서 대기 하층에 북서풍이 관측되었고, 이후 북동풍이 나타나기 시작했다. 이 시간대의 강수는 영동 해안을 중심으로 약한 강수가 관측되었다. 구름덩어리가 신포 남동해상에 위치한 전반부 시간대(0501 ~ 0825 KST)에서의 강릉 수직측풍 장비 바람은 약 15 m/s의 강한 북동풍이 4 km 고도까지 관측되었고, 구름덩어리가 신포에서 영동북부 고성 앞바다로 빠르게 이동한 후반부 시간대(0925 ~ 1401 KST)는 풍향이 변화하여 2.5 km 고도까지 약 5 m/s의 주로 북풍계열의 바람이 우세하였다. 전반부 시간대의 지상 강수량은 영동북부 속초에서 4일 06 KST에 16.5 mm/3hr,

Fig. 7. (a) Cloud area, (b) minimum brightness temp.(°C), (c) center of cloud-cell obtained from tracking analysis for case 1(□: 0005. 3. 4. 0025~0401 KST, ▲: 0501~0825 KST, ●: 0901~1425 KST, +: 1501~1601 KST). "↓" symbol indicates maximum hourly precipitation time.

그리고 영동산악 대관령에서 4일 09 KST에 19.3 mm/3hr로 매우 강한 강수가 기록되었고, 후반부 시간대의 지상 강수량은 12 ~ 15 KST에 영동해안 동해에서 10.0 ~ 11.5 mm/3hr로 관측되었다. 1501 KST 이후 북풍계열의 바람은 약해져 고도도 낮아지고, 강수 또한 약해져 소멸한다. 강수와 관련된 비교는 다음 장에서 레이더 강수를 이용하여 자세히 논의한다.

2) 2008년 12월 22일 사례(2번 사례)

12월 22일(2번 사례) 극한 대설사례는 21일 1133 KST 시각에서 함경남도 신포 해안에 -30°C 이하의 독립된 구름덩어리가 발생되어 위치하고, 울릉도 근해에도 휘도온도가 매우 낮은 구름대가 위치해 있다(Fig. 6b). 신포 부근의 구름덩어리는 최저휘도온도가 -32.86°C 이고, -30°C 이하의 휘도온도를 갖는 구름 크기는 약 2,300 km^2 를 보인다. 이 구름덩어리는 약 24시간 남진하여 영동 지역에 최대 신적설 73.5 cm(속초)의 극한 대설을 유발하였다. 초기 함경남도 해안가에 위치한 구름덩어리는 북한 자강도에 위치한 구름덩어리와 병합한 후 뚜렷한 구름덩어리의 모습이 아닌 산발적인 형태를 보여 구름 추적에 어려움이 있었다. 따라서 이 사례에서는 하나의

구름덩어리로 구분되는 12월 21일 2000 KST부터 약 15시간 동안 분석을 수행하였다.

시간에 따른 구름 크기 변화는 1번 사례와는 다르게 하나의 뚜렷한 극값을 갖는 형태가 아닌 초기 최대값에서 점차 감소하는 형태를 보인다. 휘도온도가 -30°C 이하인 구름 크기는 21일 2000 KST에 약 140,000 km^2 로 최대를 보이고 이후 급격히 감소하여 약 11시간 뒤인 22일 0633 KST에는 약 700 km^2 이하로 나타난다(Fig. 8a). 그리고 약 16시간 동안 최저휘도온도의 변화는 2200 KST에 -44.68°C 로 최소값을 기록하고, 이후 점차 증가하는 형태를 보인다(Fig. 8b). 또한 최저휘도온도의 극값을 자세히 조사하기 위하여 2000 KST 이전 4시간 동안의 최저휘도온도를 조사한 결과, 2200 KST에 나타난 최소값은 극값임을 판단할 수 있다. 그러나 극값 전후 2시간 사이의 최저휘도온도의 변화가 약 2°C 이하로 극값 주변에 최저휘도온도 변화가 완만함을 알 수 있다.

12월 22일(2번 사례) 극한 대설사례와 관련된 신포 부근에 위치한 최초의 구름덩어리는 21일 2000 KST에도 여전히 동일한 위치에 존재하고, 22일 0000 KST까지 약 4시간(21일 2000 ~ 22일 0000 KST) 동안 정체하며 위치한다. 이후 빠르게 남진하여 영동 앞바다로 이

Fig. 8. Same as Fig. 7 except for the case 2($\square$: 2008. 12. 21. 2000~22. 0000 KST, $\bullet$: 0100~0700 KST, $+$: 0800~1000 KST).

동하고 약 6시간(22일 0100 - 0700 KST) 동안 위치한다. 이 구름덩어리의 중심위치가 급격히 이동하는 과정을 자세히 조사해 보면 22일 0000 KST에 하나의 구름덩어리에서 두 개의 구름덩어리로 분리되는 특징을 보인다. 분리된 두 개의 구름덩어리는 신포 부근과 동한만 남쪽해상에 중심을 두고 각각 위치한다. 신포 부근의 구름덩어리는 발달 후 소멸하고, 동한만 남쪽해상의 구름덩어리는 분리되어 남진한다. 이러한 이유로 22일 0100 KST에 중심위치의 급격한 이동이 발견되고, 이 분리된 과정에서 동한만 남쪽해상의 구름덩어리를 추적하여 분석한다. 이후 구름덩어리의 중심위치는 영동 앞바다에서 약 6시간 동안 정체한 후 영동남부 지역으로 빠르게 이동한다(Fig. 8c).

구름덩어리의 중심위치와 최저휘도온도 그리고 구름 크기를 비교하여 세부적으로 살펴보면 다음과 같다. 영동지역에 극한 대설을 유발시킨 구름덩어리는 중심위치에 따라 두 개의 시간대로 구분할 수 있다. 하나는 구름덩어리가 신포 부근에 위치한 21일 2000 ~ 22일 0000 KST 시간대(약 4시간)이고, 다른 하나는 중심위치가 영동 앞바다에 위치한 22일 0100 ~ 0700 KST 시간대(약 6시간)이다. 최저휘도온도의 최소값과 구름 크기의 최대값이 나타난 시각은 각각 2200 KST 그리고 2000 KST로 구름덩어리의 중심위치가 신포 부근에 위치한 시간대에 극값을 기록한다. 극값을 보인 이후 구름덩어리는 두 개의 구름덩어리로 분리되고, 신포 부근에 위치한 구름덩어리는 이후 소멸한다. 반면 동한만 남쪽해상에 위치한 구름덩어리는 영동 앞바다에 위치한다. 이 구름덩어리는 영동 앞바다에서 약 7시간 동안 정체하면서 최저휘도온도는 약 7시간 동안 약 -43°C 에서 약 -30°C 로 증가하고, 구름 크기 또한 $80,000\text{ km}^2$ 에서 700 km^2 로 감소한다. 이후 구름덩어리의 중심위치는 영동남부 지역으로 이동하여 최저휘도온도는 -30°C 이상으로 증가하고, 구름 크기는 700 km^2 이하로 감소하여 소멸한다.

위의 구름덩어리의 특성과 관련된 북강릉 수직층풍장비 바람과 지상 강수를 비교하여 분석하면 다음과 같다. 구름덩어리가 신포 부근에 위치한 21일 2000 ~ 22일 0000 KST(약 4시간) 시간대에는 북강릉 수직층풍장비에서 약 2 km 이하 고도에서 약한 동풍계열의 바람이 관측되었고, 지상 강수는 영동해안과 산악에서 약 5

mm/hr 이하로 관측되었다. 구름덩어리가 영동 앞바다에 위치한 시간대(22일 0100-0700 KST, 약 6시간)에서의 북강릉 수직층풍장비의 바람은 북풍에서 북북서풍 계열의 바람으로 고도와 풍속 또한 점차 증가하여 약 15 ~ 20 m/s 바람이 약 3 km 고도까지 관측되고 지속되었다. 그리고 이 시간대의 최대 시간강수량은 영동해안(속초, 북강릉, 강릉, 동해) 지역에서 약 6 ~ 15 mm/hr로 매우 강하게 관측되었고, 최대 시간 강수량은 북강릉에서 22일 04 KST에 15 mm/hr를 기록하였다. 반면 영동산악(대관령) 지역에서는 1 mm/hr 이하로 매우 약한 강수가 관측되었다. 이러한 강한 강수경향은 7시간 동안 지속되었다. 0700 KST 이후 북풍계열의 바람은 약해져 고도 또한 낮아지고, 강수는 약해져 소멸한다.

3) 2011년 2월 11일 사례(4번 사례)

최대 신적설 100.8 cm(동해)를 유발시킨 극한 대설과 관련된 구름덩어리는 11일 1433 KST에 뚜렷이 구분되는 -25°C 이하의 두 개의 구름덩어리로 영동산악 지역과 울릉도 북동쪽에 위치한다(Fig. 6c). 영동산악과 울릉도 북동쪽에 위치한 구름덩어리의 최저휘도온도는 각각 -26.41°C 그리고 -25.2°C 이고, -25°C 이하의 구름 크기는 두 구름덩어리 모두 약 200 km^2 를 보인다. 영동지역의 구름덩어리는 약 15시간 동안 동일 지역에서 정체·발달하면서 서진하는 울릉도 구름덩어리와 병합하고, 이후 영서지역으로 이동하여 소멸하는 형태를 보인다. 이 사례에서는 영동대설과 직접적으로 관련이 있는 영동지역 구름덩어리만을 추적하여 분석하였다. 또한 사례 기간(21일 2200 KST)중 포항 앞바다에 발달된 구름덩어리가 영동지역 구름덩어리에 인접하여 위치한다. 따라서 이 두 구름덩어리를 구분하기 위하여 임계 휘도온도를 1, 2번 사례보다 더 낮은 -40°C 로 극하게 적용하였다.

이 사례에서 시간에 따른 구름 크기 변화는 1번 사례와 유사하게 하나의 뚜렷한 극값을 갖는 형태를 보인다. 휘도온도가 -40°C 이하인 구름 크기는 11일 2033 KST부터 증가하여 약 5시간 뒤인 12일 0200 KST에 약 $23,000\text{ km}^2$ 로 최대값을 보인다. 이후 구름 크기는 약 2 ~ 3시간 동안 급격히 감소한다(Fig. 9a). 최저휘도온도의 변화는 11일 1800 KST에 -31.71°C 에서 점차 감소하여 12일 0200 KST에 -44.92°C 로 최소값을 보이고, 이후 증가한다(Fig.

Fig. 9. Same as Fig. 7 except for the case 4(□: 2011. 2. 11. 1533~1800 KST, ▲: 11. 1900~2200 KST, ●: 11. 2300~12. 0100 KST, +: 12. 0200~0400 KST).

9b). 또한 극값이 나타난 시각 부근에서 약 4시간(11일 2333 ~ 12일 0333 KST) 동안 1°C 변동폭에서 최저휘도온도가 유지된 것을 알 수 있다. 최저휘도온도와 구름 크기의 변화경향을 비교해 보면, 구름 크기가 최대가 나타난 시각과 최저휘도온도의 최소값이 나타난 시각은 동일하고, 전체적인 증가와 감소 경향은 서로 일치함을 알 수 있다.

2월 11일(4번 사례) 극한 대설사례와 관련된 구름덩어리의 중심은 초기 영동산악, 영동북부 해안, 영동남부 해안, 그리고 영서 지역 순으로 이동한다. 최초의 구름덩어리는 약 3시간(11일 1533 ~ 1800 KST) 동안 영동산악 지역에 위치해 있다. 이 구름덩어리는 영동북부 해안으로 이동하여 11일 1900 ~ 2200 KST까지 약 3시간 동안 위치한 후 영동남부 해안으로 이동하여 약 2시간(11일 2300 ~ 12일 0100 KST) 동안 위치한다. 영동북부에서 영동남부 해안으로 이동하는 과정에서 초기(11일 1433 KST) 울릉도 근해에 위치해 있던 구름덩어리는 서진하여 11일 2300 KST에 영동지역 구름덩어리와 병합하는 특징을 보인다. 병합된 구름덩어리는 12일 0100 KST까지 영동남부 해안에 중심을 두고 위치한다. 이후 구름덩

어리의 중심 위치는 영서 지역으로 이동하고 12일 0400 KST부터 급격히 소멸한다(Fig. 9c).

초기 약 3시간(11일 1533 ~ 1800 KST) 동안 영동산악에 위치한 구름덩어리는 최저휘도온도가 점차 감소하여 발달한다. 그러나 아직까지 -40°C 이하의 구름 화소는 탐지되지 않은 상태이다. 영동북부 해안에 구름덩어리의 중심을 둔 11일 1900 ~ 2200 KST(약 3시간) 시간대에서는 최저휘도온도는 -43.07°C이고, 구름 크기(-40°C 이하)는 약 8,000 km²이다. 구름덩어리의 중심위치가 영동북부 해안에서 영동남부 해안으로 이동하는 시간대(11일 2300 ~ 12일 0100 KST, 약 2시간)에서는 최저휘도온도가 점차 감소하고 구름 크기(-40°C 이하)는 급격히 증가한다. 이 시간대에서 특징적으로 2300 KST에 울릉도 근해에 위치한 구름덩어리와 영동해안에 위치한 구름덩어리의 병합이 나타난다. 이 후 구름덩어리의 중심 위치는 영서 지역으로 이동하고, 12일 0200 KST에 최저휘도온도와 구름 크기(-40°C 이하)는 각각 -44.68°C 그리고 약 23,000 km²로 극값이 나타난다. 그러나 최저휘도온도의 최소값은 11일 2333~12일 0333 KST까지 약 4시간 동안 1°C 변동폭 내에서 유지된다. 이후 이 구름덩어

Fig. 10. Infrared(IR1) and water vapor(WV) satellite images before mature stage for (a, b) case 1, (c, d) case 2, and (e, f) case 4.

리는 급격히 쇠퇴하여 소멸한다.

구름덩어리가 영동산악에 위치한 시간대(11일 1533 ~ 1800 KST, 약 3시간)에는 북강릉 수직측풍장비에서 약 1.5 km 이하 고도에서 동풍이 바람이 약하게 관측되었고, 지상 강수는 영동해안과 산악에서 약 5 mm/hr 이하로 관측되었다. 구름덩어리가 영동북부 해안으로 이동한 11일 1900 ~ 2200 KST(약 3시간) 시간대에서의 바람은 동풍에서 남동풍, 그리고 북동풍으로 급변하였다. 이때 지상 강수는 22 KST에 북강릉과 대관령에서 각각 11.2 mm/hr와 1.2 mm/hr를 기록하였다. 구름덩어리의 중심위치가 영동북부 해안에서 영동남부 해안으로 이동하여 위치한 11일 2300~12일 0100 KST(약 2시간)에는 주로 북풍이 우세하고, 풍속은 약 10 ~ 15 m/s로 약 3 km 고도까지 관측되었다. 이 시간대의 최대 시간강수량은 영동해안 지역에서 최대 14.5 mm/hr(북강릉)로 매우 강하게 관측되었고, 반면 영동산악(대관령) 지역에서는 3 mm/hr 이하로 매우 약한 강수가 관측되었다. 12일 0200 KST 이후에는 2.5 km 고도 이상에서 약 20 m/s의 남동풍이 나타나고, 구름덩어리의 중심위치는 영서지역으로 이동한다. 그러나 이 때 동해에서만 02 KST에 10.6 mm/hr를 기록하였다. 이후 강수는 급격히 약해지고, 북풍은 존재하나 풍속은 약해진다.

Fig. 10은 영동지역에 극한 대설을 유발시킨 구름덩어리가 발달했을 때의 사례별 적외1 영상과 수증기 영상이다. 구름덩어리의 위치와 수증기 영상에서 건조구역(암역)의 위치를 비교하여 분석하면, 1과 4번 사례는 한반도 남쪽으로 약 -25℃의 건조구역이 위치해 있고, 건조구역 북쪽으로 발달된 구름덩어리가 위치해 있다. 반면 2번 사례의 경우, 약 -30℃의 건조구역이 서해상에 중심을 두고 위치해 있고, 건조구역 중심 가장자리로 좁은 건조구역이 한반도 중부지역 및 영동지역을 통과하여 동해상까지 자리 잡고 있다. 발달된 구름덩어리는 이 좁은 건조구역 북쪽 함경남도 해안을 중심으로 위치한다. Kwon *et al.*(2013)의 영동지역 극한 대설현상의 종관 규모 역학장 분석에서 대설사례는 위치소용돌이도 중심 가장자리에서 1 ~ 1.5 PVU가 상층에서 중층으로 이동하는 것이 나타나는 것으로 보고하였다. 이 연구에서 나타나는 강수구름 주변의 건조구역(암역)은 상층 위치소용돌이도의 수직적 이동과 관련되어 있는 것으로 볼 수 있다.

5. 구름과 강수와의 관계성

이 장에서는 위성관측에서 나타난 구름의 강수 유무를 파악하고, 구름의 변화와 강수의 관련성을 조사하기 위하여 위성에서 분석된 구름덩어리의 특성(중심위치, 최저휘도온도, 구름 크기)과 레이더 강수의 중심위치, 강수면적 등 레이더 강수의 특성을 비교·분석하였다. 이러한 분석을 위하여 10분 간격의 레이더 관측자료를 이용하였다. 사용된 레이더 관측자료는 위성 관측 시간에서 가장 가까운 매시 00분과 30분 자료이고 레이더 자료는 지형클러터(ground clutter)의 영향을 최소화 하기 위해 1.5 km CAPPI 합성자료를 사용하였다. 레이더 반사도(reflectivity, dBZ)에서 강수량으로의 환산은 $Z=aR^b$ 방정식(Z-R 방정식)을 사용하였고, a와 b 계수는 강수타입에 따라 다양하게 적용되지만 이 연구에서는 단순히 강수의 변화경향을 조사하기 때문에 Marshall-Palmer의 $a=200$, $b=1.6$ 계수를 적용하여 사용하였다. 여기서 R은 강수율이고, Z는 반사도 인자(reflectivity factor)로 $Z=10^{(dBZ/10)}$ 이다(Marshall and Palmer, 1948). 1번 사례는 QC(Quality Control)된 레이더 합성자료가 2006년 3월 1일부터 제공되기 때문에 강수분석에서 제외하였다. 영동지역과 동해상의 강수 관측을 수행하는 기상레이더는 2010년 5월 동해에서 강릉으로 위치를 이전하였다. 따라서 2번 사례의 레이더 합성자료는 동해레이더 자료를 포함하는 반면에 4번 사례는 이 대신 강릉레이더 자료를 포함한다.

레이더 강수의 영역, 중심위치, 그리고 강수변화를 분석하기 위하여 사례별로 주된 강수 구역을 선정하였고, 임계값을 0.5 mm/hr로 사용하여 임계값 이상의 강수값이 나타나는 화소수를 구하였다. 그리고 이 화소수로부터 레이더 공간해상도인 1 km² 곱하여 강수면적을 계산하였다. 레이더 강수의 중심위치는 강수영역 내에서 레이더 강수를 가중치로 주어 계산한 강수구역의 공간 중심(가중치 중심, weighted center)이다. 이것은 중심위치를 레이더 강수의 최대값으로 결정할 경우, 지형클러터와 같이 강수는 없지만 레이더 반사도가 강한 비기상 반사도의 영향으로 중심위치의 오류가 유발될 수 있기 때문이다. 가중치 중심의 위·경도는 다음 식으로 계산한다.

$$\text{Latitude of weighted center} = \frac{\sum_{i=1}^n (R_i \times \text{Lat}_i)}{\sum_{i=1}^n (R_i)}$$

$$\text{Longitude of weighted center} = \frac{\sum_{i=1}^n (R_i \times \text{Lon}_i)}{\sum_{i=1}^n (R_i)}$$

여기서 R_i 는 레이더 강수량(mm/hr)이고, Lat_i 와 Lon_i 는 위도와 경도이다. 또한 강수변화를 조사하기 위해서는 위와 같은 오류를 고려하여 레이더 체적강수(volumetric precipitation; mm*km²/hr)를 계산한다. 체적강수는 다음과 같은 식으로 계산한다.

$$\text{Volumetric Precipitation} = \sum_{i=1}^n (R_i)$$

또한 강한 강수를 분석하기 위하여 임계값을 3.0 mm/hr로 적용하여 다시 위의 과정을 수행한다.

Fig. 11은 2008년 12월 22일 사례(2번 사례)의 강수면

적, 체적강수 그리고 강수의 중심위치(가중치 중심)를 보여준다. 여기서 임계값을 각각 0.5, 3.0 mm/hr로 사용하여 구한 결과를 한 그림에 표출하기 위해서 0.5 mm/hr 임계값의 강수면적과 체적강수에 0.1을 곱하였다. 이 사례에서는 22일 0200 KST 이전에 영동북부 해상, 그리고 영동산악에 다양한 강수세포(precipitation cell)들이 혼재하고 있어 주된 강수세포를 분석하는데 어려움이 있었다. 따라서 영동지역 주변에 뚜렷하게 하나의 강수세포가 탐지되는 22일 0200 ~ 0700 KST까지 분석하였다. 여기서 강수면적과 체적강수의 극값은 두 개의 임계값 모두에서 22일 0300 KST 부근에 나타난다. 이들 강수면적과 체적강수의 극값은 0.5 mm/hr 임계값에서 약 4,100 km² 그리고 4,500 mm*km²/hr를 보이고, 3.0 mm/hr 임계값에서는 약 100 km² 그리고 약 379 mm*km²/hr 수치를 보인다(Fig. 11a, b). 이들 값으로부터 0300 KST의 강수강도를 계산하면 임계값 0.5, 3.0 mm/hr에 대해서 각각 1.1 mm/hr, 3.8 mm/hr이다. 이 시간대에 레이더 강수의 중심위치는 큰 이동 없이 영동중부 해안 가까이 위치

Fig. 11. Time series of (a) number of precipitation pixels, (b) volumetric precipitation(mm*km²/hr), and (c) center of precipitation area for case 2. (●: 2008.12.22. 0200~0700 KST).

한다. 지상관측 강수량과 비교해 보면, 22일 02 ~ 07 KST 시간대에서 2~14.5 mm/hr로 주된 강수는 영동해안에 집중되었다. 약 10 mm/hr 이상의 강수는 22일 02 ~ 04 KST에 나타났고, 최대강수는 22일 04 KST에 북강릉에서 관측되었다. 따라서 레이더 추정 강수량은 지상관측 강수량에 비해 과소 추정하였으나, 유사한 변화경향을 보여주었다. 이러한 과소 추정은 Z-R 방정식의 a, b 계수가 층운형, 대류형 등 강수형태에 따라 다양하게 적용되고 또한 눈, 비 등 강수입자의 유형 따른 유전을 차이로 인해 기인된 것으로 생각된다(Rinehart, 2001).

위성에서 분석된 구름덩어리의 특성과 비교해 보면, 이 시간대(22일 0200 ~ 0700 KST)에 레이더 강수면적 및 체적강수는 최대를 보이고 있는 반면 오히려 위성에서의 최저휘도온도는 약 -37℃에서 약 -30℃로 증가하고 구름 크기(-30℃ 이하)는 54,000 km²에서 700 km²로 감소하는 특징을 보인다. 그러나 위성에서 분석된 구름덩어리의 중심위치는 함경남도 신포에서 이동하여 영동 앞바다에 머문다. 이 때, 위성에서 분석된 구름덩어리의 중심위치보다 레이더 강수의 중심위치는 상대적으로 영동중부 해안에 매우 가깝게 위치하고 있어 다소 거리의 차이를 보인다(Fig. 13a, b). 22일 0200 KST 이전에 영

동북부 해상 그리고 영동산악에 다양한 강수세포들이 혼재해 있다. 강수면적, 체적강수의 극값은 21일 2330 KST에 나타나고, 최대 강수위치는 영동북부 해상 그리고 일부는 영동산악에 위치한다. 이 때 속초에서 약 6 ~ 11 mm/hr의 강수가 기록되었다. 따라서 이러한 이유로 22일 0200 KST 이전은 강수세포들이 급격히 분리·병합·발달하기 때문에 이 시간대에서는 강수세포 분석을 생략하였다.

2011년 2월 11일 사례(4번 사례)에서 강수면적과 체적강수는 뚜렷한 극값이 나타나는 형태를 보인다(Fig. 12). 특히 3.0 mm/hr 임계값에서는 11일 2200 ~ 12일 0030 KST까지 극값이 유지되어 나타나는 것을 알 수 있다. 0.5 mm/hr 임계값에서 강수면적과 체적강수의 극값은 11일 2130 KST에 약 7,900 km², 약 10,600 mm³/km²/hr를 보이고, 3.0 mm/hr 임계값에서는 12일 2300 KST에 약 320 km² 그리고 약 1,200 mm³/km²/hr 수치를 보인다(Fig. 12a, b). 극값에서의 강수강도를 계산하면 0.5 mm/hr 임계값에서는 1.3 mm/hr이고, 3.0 mm/hr 임계값에서는 3.8 mm/hr이다. 레이더 강수의 중심위치는 초기 영동북부에 위치하고 이 후 점차 남진하여 강수면적과 체적강수가 최대인 시간대에 영동중부 해안에 매우 가

Fig. 12. Same as Fig. 11 except for the case 4(□: 2011.02.11. 1500~1800 KST, ●: 11. 1900~12. 0100 KST, +: 12. 0200~0400 KST).

Fig. 13. IR1 and radar precipitation images for (a, b) case 2, and (c, d) case 4 at maximum precipitation time.

깝게 위치한다. 지상관측 강수량과 비교해 보면, 강수면적 및 체적강수가 최대로 나타난 11일 2200 ~ 12일 0030 KST 시간대에 약 10 ~ 14.5 mm/hr의 강수를 기록하였고, 최대강수는 북강릉에서 22일 23 KST에 관측되었다. 레이더 추정 강수량은 2번 사례와 마찬가지로 지상관측 강수량에 비해 과소 추정하였으나, 변화경향은 매우 유사한 형태를 보였다.

강수면적과 체적강수가 최대를 보인 시간대(11일 2200 ~ 12일 0030 KST)에 위성에서 분석된 구름덩어리의 특성을 비교해 분석하면, 최저회도온도의 최소값이

유지되는 시간대와 일치하였고, 구름 크기 또한 급격히 증가하는 시간대와 잘 일치하였다. 구름덩어리와 강수의 중심위치 비교에서 구름덩어리는 영동북부 해안에서 영동남부 해안으로 이동하여 위치하는 반면 레이더 강수의 중심위치는 영동중부 강릉 앞바다에 정체하며 위치한다(Fig. 13c, d). 구름덩어리의 중심이 영서지역으로 이동한 22일 0200 KST 이후 레이더 강수의 중심위치는 영동내륙 산악지역에 위치한다. 이것은 영서지역으로 이동한 구름덩어리가 비록 최저회도온도 및 구름 크기가 최대를 보이지만 영서지역에 위치한 구름은 강수

를 포함하지 않은 구름인 것으로 유추할 수 있다. 이 시간대에 레이더 강수에서 강수영역이 영동지역과 포항 지역으로 분리되어 나타난다. 따라서 레이더 강수분석에서는 영동지역에 위치한 강수세포를 분리하여 분석하였다. 이것은 위성에서도 이 시간대에 포항 부근에 구름덩어리가 위치하지만 영동지역에 위치한 구름덩어리만 분리하여 분석하였다(Fig. 13c, d).

6. 요약 및 결론

본 연구에서는 겨울철 영동지역에서 2001 ~ 2012(12년) 동안 신적설이 일 50 cm 이상인 4개 극한 대설사례를 선정하여 위성에서 관측된 구름의 공간적 특성을 분석하였다. 선정된 사례의 총 신적설량은 약 60 ~ 100 cm로 매우 극한 적설량을 기록하였다. 강수 지속시간과 최대 시간강수량을 비교하면 1, 2, 4번 사례와 3번 사례 사이에서 뚜렷한 차이를 보인다. 강수 지속시간은 1, 2, 4번 사례의 경우 약 20 ~ 40시간인 반면 3번 사례는 약 100시간으로 다른 사례들에 비해 2.5 ~ 5배 정도 길게 지속되었다. 최대 시간강수량은 1, 2, 4번 사례는 3시간 이내에 시간당 10 mm 이상의 강한 강수를 기록하였고, 반면 3번 사례는 5.3 mm/hr를 기록하였다. 이 값을 강수 지속시간과 같이 비교하였을 때, 3번 사례는 긴 시간 동안 지속적으로 약한 강수가 있었고, 그 외 사례는 짧은 시간에 강한 강수현상이 나타났음을 알 수 있다.

구름탐지를 위한 임계값 선정을 위하여 구름이 없는 맑은 시간과 구름이 많은 강수 시간에 대해 적외1 휘도온도의 빈도분포 분석을 시도하였다. 분석결과, 맑은 시간의 육지와 바다의 휘도온도는 각각 -5 ~ -15℃ 그리고 0 ~ 10℃ 사이에 주로 분포한다. 사례별 구름이 많은 강수 시간에 대한 휘도온도의 분포를 요약하면 1, 2, 4번 사례는 휘도온도가 넓은 범위에서 분포하고 있고, 3번 사례는 -15 ~ -20℃ 사이에 집중되어 분포한다. 또한 휘도온도의 최소값은 1, 4번 사례에서는 -45 ~ -50℃ 그리고 2번 사례는 -35 ~ -40℃ 사이에 위치하고 3번 사례의 경우, -20 ~ -25℃에 위치한다. 이것은 1, 2, 4번 사례의 강수 구름은 공간적으로 매우 비균질적이고 연직적으로 발달된 대류형 구름인 것을 알 수 있고, 반면 3번 사례의 강수구름은 매우 균질한 층운형 구름인 것을 알 수 있다.

또한 3번 사례는 강수량의 지속시간, 강도 등을 비교해 볼 때, 1, 2, 4번 사례와는 다른 강수 조건에서 발생된 구름인 것을 시사한다. 3장 a절에서도 3번 사례는 종관적 진단변수에 뚜렷한 특징이 나타나지 않음을 보고하였다. 따라서 본 연구에서는 3번 사례를 제외하고 1, 2, 4번 사례에 대해서만 연구를 수행하였다. 빈도분포 분석을 통해 선정된 임계값은 3번 사례와는 구분되게 나머지 세 개 사례에서 -25℃ 이하의 휘도온도 분포가 높게 나타나기 때문에 연직적으로 발달된 대류형 구름을 분석하기 위하여 사례에 따라 임계값을 -30℃ 그리고 -40℃로 매우 제한적으로 설정하였다.

극한 대설을 유발시킨 구름의 특성을 분석하기 위해 임계값을 이용하여 주된 구름덩어리를 탐지하였고, 선정된 구름덩어리는 30분 간격으로 추적(tracking)하여 시간에 따른 구름덩어리의 크기, 최저휘도온도, 중심위치를 세부적으로 분석하였다. 또한 구름덩어리의 변화를 이해하기 위하여 지상관측 강수량과 바람의 특성을 비교·분석하였고, 구름덩어리의 발달과 관련된 수증기 채널 영상에 나타난 건조구역(암역)의 위치 및 강도의 특징을 분석하였다. 위성에서 분석된 구름의 특성과 세부적인 강수의 공간적 비교·분석을 위해서 레이더 강수를 이용하여 강수면적, 체적강수(volumetric precipitation), 강수의 중심위치(가중치 중심; weighted center)를 조사하였다.

구름덩어리의 추적분석(tracking analysis)을 통해 정리된 결과는 Table 2에 요약하였다. 레이더 강수와 지상관측 강수량과는 변화경향에서 밀접한 연관성이 나타났다. 레이더 강수와 지상관측 강수량을 바탕으로 극한 대설의 초기와 주강수 시기를 구분하여 사례별로 위성에서 분석된 구름의 특성을 요약하면 다음과 같다. 초기 작은 크기의 구름덩어리는 1, 2, 4번 사례에서 각각 동한만 남동쪽, 함경남도 신포 해안, 그리고 영동지역에 위치하고, 구름덩어리의 최저휘도온도는 약 -25℃를 보인다. 이 구름덩어리는 1, 2번 사례의 경우 동한만 부근에서 영동지역으로 이동하면서 분리·발달하였고, 반면 4번 사례는 영동지역 부근에서 정체하며 울릉도에 위치한 구름덩어리와 병합하여 발달하였다. 주강수 시기에 위성에서 분석된 구름덩어리의 특성은 2번 사례를 제외하고 지상 강수 그리고 레이더 강수의 변화경향과 잘 일치하였다. 주강수 시기에 구름덩어리는 1, 2, 4번 사례 모두

Table 2. Features from satellite(IR1, WV) and radar associated with the extreme heavy snowfall in the Yeongdong region

			Case 1	Case 2	Case 4
IR1	Initial stage		South-eastern region of East Korea Bay	Northern region of East Korea Bay	Yeongdong region & the middle part of the East Sea
	Mature stage	Min. brightness temp.	~ -48°C	Increase from -40°C to -35°C	~ -45°C
		Cloud area	~ 17,000 km ² (≤ -40°C)	Decrease from 50,000 km ² to 4,000 km ² (≤ -30°C)	~ 23,000 km ² (≤ -40°C)
WV	Intensity & position of dry (dark) region		South of the Korean peninsula(-25°C)	West Sea(-30°C)	South of the Korean peninsula(-25°C)
Radar	Mature stage	Position	-	Precipitation center is located closely to the coast of the Yeongdong region	
		Precip. area	-	~ 4,000 km ² (≥ 0.5mm/hr)	~ 8,000 km ² (≥ 0.5mm/hr)
		Vol. precip.	-	~ 4,500 mm·km ² /hr	~ 10,000 mm·km ² /hr

Table 3. Forecasting guidance using satellite images for the extreme heavy snowfall in the Yeongdong region

Forecasting guidance		
Initial stage	IR1	Initiation of small-scale convective cell over the Yeongdong region or East Korea Bay - Minimum brightness temperature: ≤ -20~-25°C - Moving toward the coast of the Yeongdong region through separation, development, and merging
Mature stage	IR1	Development and movement of convective cloud-cell - Minimum brightness temperature: -40~-50°C - Cloud area (≤ -35~-40°C): 17,000~40,000 km ² (Precipitation center is located closely to the coast of the Yeongdong region. But relationship between brightness temp. and radar precipitation is different on each case)
	WV	Development of cloud-cell on the edge of the dry(dark) region - Dry(dark) region(-25 or -30 °C) is located over the south of the Korean peninsula or West Sea

영동 앞바다에 위치하였고, 구름덩어리의 최저휘도온도와 구름 크기(-40°C 이하)는 1번 사례에서 약 -48°C 그리고 약 17,000 km²로 나타났고, 4번 사례는 약 -45°C 그리고 약 23,000 km²로 극값을 기록하였다. 반면 2번 사례는 최저휘도온도가 약 -40°C에서 약 -35°C로 증가하고 구름 크기(-30°C 이하)는 약 50,000 km²에서 4,000 km²로 급격히 감소하였다. 또한 이 시기에 위성의 구름영역과 레이더 강수영역은 영동 앞바다에 비슷하게 위치하였으나 레이더 강수의 중심이 상대적으로 영동 해안에 인접해 위치하였다. 수증기 영상에서 건조구역(암역)의 특징으로는 건조구역 가장자리 북쪽에서 발달된 구름덩어리가 위치하였다. 이 결과를 바탕으로 영동대설 극한 대설 예보를 위한 위성 예측 가이드스를 Table 3과 같이 제시한다.

이 연구에서 선정된 영동지역 극한 대설사례는 영동 지역(영동 앞바다)에서 발생하여 발달하거나 동한만 부근에서 발생하여 영동지역으로 이동해 들어오는 독립되고 잘 발달된 그리고 크기가 작은 대류형 구름과 관련이 있다. 주강수 시기의 이 구름덩어리의 최저휘도온도

는 -40 ~ -50°C로 낮고, 휘도온도 -35°C 혹은 -40°C 이하의 구름 크기는 약 17,000 ~ 40,000 km²이다. 이러한 구름의 크기는 중규모 대류 복합체(Mesoscale Convective Complexes, MCC)에서 정의된 면적보다 작은 크기이다. 중규모 대류복합체는 구름의 면적이 50,000 km²(운정온도가 -52°C 이하) 이상인 구름으로 정의된다(Maddox, 1980). 이 때 레이더의 강수면적(0.5 mm/hr 이상)도 약 4,000 ~ 8,000 km²로 작고 독립된 강수 형태를 보인다. 또한 구름이 발달하는 과정에서 구름의 극값(최저휘도온도, 구름 크기)과 강수의 극값이 일치하지 않는 경우도 나타났다. 그러나 모든 사례에서 주강수 시기에 구름은 영동 앞바다에 위치하였다. 따라서 구름덩어리의 위치가 극한 대설에 있어 무엇보다 중요한 요소인 것으로 판단되고, 영동지역 극한 대설에 대한 초단기 예보에 있어 초기에 동한만 혹은 영동지역에서 작고 발달된 대류형 구름을 탐지하고 추적하는 것이 중요하다. 위성의 구름과 레이더 강수 분석결과를 보았을 때, 선정된 극한 대설 사례는 부저기압 혹은 소용돌이의 발달과 관련되어 있는 것으로 생각된다. 이것은 극저기압(polar low)상에서

매우 발달된 구름과는 구분된다. 따라서 부저기압 혹은 소용돌이와 연관된 대설현상을 이해하기 위해 영동지역 대설현상을 발생 과정에 따라 세분화하여 연구하는 것이 필요할 것이다. 이 연구에서는 일부 시간대에서 구름덩어리들이 매우 가깝게 위치하고 또한 병합과 분리가 급격하게 이루어져 구름덩어리를 추적하는데 어려움이 있었다.

사 사

본 연구에 사용된 자료는 기상청으로부터 제공받았고, 이 논문은 국립기상연구소 주요사업 '재해기상연구센터 설립·운영(사업관리번호: NIMR-2012-B-7)'과 강릉원주대학교 자연과학연구소의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

Reference

- Ahn, B.-Y., T.-Y. Kwon, K.-H. Cho, J.-S. Lee, and K.-T. Lee, 2007. Analysis of cloud properties related to Yeongdong heavy snow using the MODIS cloud product, *The Korean Journal of Remote Sensing*, 23(2): 71-87 (in Korean with English abstract).
- Ahn, J.-B. and C.-H. Jeong, 1984. The limited area energy budget associated with an extratropical cyclone developed over the Japan Sea, *Journal of Korean Meteorological Society*, 20(2): 22-34 (in Korean with English abstract).
- Asai, T., 1988. Meso-scale features of heavy snowfalls in Japan Sea coastal regions of Japan, *Tenki*, 35: 156-161 (in Japanese with English abstract).
- Beckman, S.K., 1987. *Operational use of water vapor imagery*, NOAA Tech. Memo. NWS CR-87, NOAA/NWS, Kansas City, MO, USA, pp.15.
- Bleck, R., 1977. Numerical simulation of lee cyclogenesis in the Gulf of Genoa, *Monthly Weather Review*, 105: 428-445.
- Chung, Y.-S., K.D. Hage, and E.R. Reinelt, 1976. On lee cyclogenesis and airflow in the Canadian Rocky Mountains and the East Asian Mountains, *Monthly Weather Review*, 104: 879-891.
- Evans, M.S., D. Keyser, L.F. Bosart, and G.L. Lackmann, 1994. A satellite-derived classification scheme for rapid maritime cyclogenesis, *Monthly Weather Review*, 122: 1381-1416.
- Ford, R.P. and G.W.K. Moore, 1990. Secondary cyclogenesis-Comparison of observation and theory, *Monthly Weather Review*, 118: 427-446.
- Gurka, J.J., E.P. Auciello, A.F. Gigi, J.S. Waldstreicher, K.K. Keeter, S. Businger, and L.G. Lee, 1995. Winter weather forecasting throughout the Eastern United States. Part II: An operational perspective of cyclogenesis, *Weather and Forecasting*, 10: 21-41.
- Heo, K.-Y., K.-J. Ha, and S.-H. Shin, 2005. On development mechanism of heavy snowfall event occurred in Busan on 5 March 2005, *Journal of Korean Meteorological Society*, 41(4): 547-556 (in Korean with English abstract).
- Kim, I.-H., T.-Y. Kwon, and D.-R. Kim, 2012. MTSAT Satellite image features on the severe storm events in Yeongdong region, *Atmosphere*, 22(1): 29-45 (in Korean with English abstract).
- Kwon, T.-Y., D.-H. Seo, and Y.-J. Cho, 2013. Synoptic Environment Associated with Extreme Heavy Snowfall Events in the Yeongdong Region, *Proc. of The 3rd Workshop for Forecast Technique Fusion Research*, Gangneung, Gangwon, Aug. 29-30, pp. 209-217 (in Korean).
- Lee, J.-G., T.-Y. Kwon, I.-U. Jeong, and B.-G. Kim, 2011. Development of the techniques for analyzing of severe weather meteorological variables in the Gangwon region I, *National Institute of Meteorological Research*, Seoul, South Korea: pp.802.
- Lee, H.-R., K.-I. Kim, J.-M. Yoo, and K.-D. Min, 2001. A study on a severe winter weather

- occurred in the Korean Peninsula by tropopause undulation, *Journal of Korean Meteorological Society*, 37(2): 195-224 (in Korean with English abstract).
- Lee, H.-R., K.-E. Kim, J.-M. Yoo, and W.-J. Lee, 2002. Tropopause undulation associated with explosive development of a cyclone, *Journal of Korean Meteorological Society*, 38(5): 431-463 (in Korean with English abstract).
- Lee, T.-Y., Y.-Y. Park, and Y.-L. Lin, 1998. A numerical modeling study of mesoscale cyclogenesis to the East of the Korean peninsula, *Monthly Weather Review*, 126: 2305-2329.
- Maddox, R.A., 1980. Meoscale Convective Complexes. *Bulletin American Meteorological Society*, 61: 1374-1387.
- Mansfield, D.A., 1996. The use of potential vorticity as an operational forecast tool, *Meteorological Applications*, 3: 195-210.
- Marshall, J.S. and W.M.K. Palmer, 1948. The distribution of raindrops with size, *Journal of Meteorology*, 5: 165-166.
- Miller, J.E., 1946. Cyclogenesis in the Atlantic coastal region of the United States, *Journal of Meteorology*, 2: 31-44.
- Nagata, M., 1993. Meso- β -scale vortices developing along the Japan-Sea Polar-Airmass Convergence Zone (JPCZ) cloud band: Numerical simulation, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 71(1): 43-57.
- Rinehart, R.E., 2001. *Radar for Meteorologists*, 3rd ed., Rinehart, pp.428.
- Reed, R.J. and C.N. Duncan, 1987. Baroclinic instability as a mechanism for the serial development of polar lows: a case study, *Tellus*, 39A: 376-384.
- Young, M.V., G.A. Monk, and K.A. Browning, 1987. Interpretation of satellite imagery of a deepening cyclone, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 113: 1089-1115.
- Weldon, R.B., 1985. *Conclusion and generalization: Water vapor image gray shades vs. moisture distribution*, Satellite Applications Laboratory, NOAA/NESDIS, World Weather Building, Washington, DC 20233, USA: pp.6.