

## MODIS 구름 산출물을 이용한 영동대설 관련 구름 특성의 분석

안보영\* · 권태영\*<sup>†</sup> · 조구희\*\* · 이정순\* · 이규태\*

\*강릉대학교 대기환경과학과, \*\*강원지방기상청 기후정보과

### Analysis of Cloud Properties Related to Yeongdong Heavy Snow Using the MODIS Cloud Product

Bo-Young Ahn\*, Tae-Yong Kwon\*<sup>†</sup>, Kuh-Hee Cho\*\*, Jeong-Soon Lee\*, and Kyu-Tae Lee\*

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

\*\*Climate Information and Technology Division, Gangwon Regional Meteorological Administration

**Abstract :** In this study, 14 heavy snow events in Yeongdong area which are local phenomena are analyzed using MODIS cloud products provided from NASA/GSFC. The clouds of Yeongdong area at observed at specific time by MODIS are classified into A, B, C Types, based on the characteristic of cloud properties: cloud top temperature, cloud optical thickness, Effective Particle Radius, and Cloud Particle Phase. The analysis of relations between cloud properties and precipitation amount for each cloud type show that there are statistically significant correlations between Cloud Optical Thickness and precipitation amount for both A and B type and also significant correlation is found between Cloud Top Temperature and precipitation amount for A type. However, for C type there is not any significant correlations between cloud properties and precipitation amount. A-type clouds are mainly lower stratus clouds with small-size droplet, which may be formed under the low level cold advection derived synoptically in the East sea. B-type clouds are developed cumuliform clouds, which are closely related to the low pressure center developing over the East sea. On the other hand, C-type clouds are likely multi-layer clouds, which make satellite observation difficult due to covering of high clouds over low level clouds directly related with Yeongdong heavy snow. It is, therefore, concluded that MODIS cloud products may be useful except the multi-layer clouds for understanding the mechanism of heavy snow and estimating the precipitation amount from satellite data in the case of Yeongdong heavy snow.

**Key Words :** MODIS, Cloud Top Temperature, Cloud Optical Thickness, precipitation amount, Yeongdong heavy snow.

**요약 :** 본 연구는 NASA/GSFC에서 제공하는 MODIS 구름 산출물 자료를 활용하여 국지적 현상으로 나타난 영동지역의 14개 대설 사례를 분석하였다. MODIS에 의해 특정시간에 관측된 영동지역의 구름은 운정 온도(CTT), 광학 두께(COT), 유효 입자 반경( $r_e$ ), 입자상(CP)과 같이 구름 내 속성의 특징에 따라 A, B, C 형으로 분류하였다. 각각의 구름 형태에 대한 강수량과 구름의 속성 사이의 연관성 분석에서 COT는 A와 B형에서 상당히 높은 통계적으로 유의한 관계성을 보였으며, CTT는 A형에서만 높은 상관성을 보였다. 그

렇지만, C형에서는 통계적으로 유의한 관계성이 구름의 특성물에 대해 나타나지 않았다. A형 구름은 작은 크기의 물방울과 함께 주로 낮은 층운형 구름으로 구성되어 있으며, 동해에서 종관적으로 유도된 하층 한기 이류 하에서 발생할 수 있다. B형 구름은 발달하는 적운형 구름과 관련되어 있으며, 이러한 구름은 동해상에서 발달하는 저기압 중심과 밀접하게 관련되어 있다. 그렇지만, C형 구름은 다층 구름들로서 영동대설과 직접적으로 관련된 하층 구름을 상층구름이 덮고 있어 위성 관측이 어렵다. 따라서 MODIS 구름 산출물은 영동대설의 경우에 다층 구름을 제외하고 위성 자료로부터 강수량 추정과 대설 기작을 이해하는데 도움이 될 수 있다고 결론지을 수 있다.

## 1. 서론

인간 활동에 많은 영향을 미치는 겨울철 기상재해로 대설현상과 한파 등을 들 수 있다. 특히 대설현상이 점차 국지적인 형태로 발생함에 따라 국민 생활과 산업 경제 활동에 미치는 영향도 증가하는 경향을 보이고 있다(정성훈 등, 2006). 강원도 영동지역에서 발생하는 대설현상은 호남 서해안 지역에서 발생하는 대설현상과는 다른 특성을 갖고 있다(류찬수와 정병옥, 1995). 영동 대설은 서해안 지역에 비해 적설량에서 차이가 많이 난다. 그리고 서해안 지역의 적설은 공간적 분포가 비슷하지만, 영동지역은 산악지형이라 공간적인 분포가 큰 변동을 보인다. 또한 대설현상을 유발하는 기상 조건이 동해상에서 유입되는 형태이기 때문에 해상의 관측 자료가 없어 예보에 큰 어려움을 겪고 있다. 이러한 환경을 극복하기 위하여 레이더, 수직측풍장비, 위성 등 원격탐사 자료를 활용할 필요성이 있다.

특히, 지역적인 대설 현상을 이해하기 위해서는 적설량의 공간적 분포에 대한 관측 자료가 우선적으로 필요하지만 이러한 자료 획득에는 현실적인 어려움이 있다. 예를 들어, 강원도의 경우 강수량 관측은 77개의 무인자동관측시스템(AWS)이 설치·운영되고 있으며 실시간으로 바람, 기온과 함께 자료가 수집되어지고 있다. 그러나 겨울철의 경우 적설에 의한 강수량 자료는 결빙 때문에 AWS로는 제대로 수집할 수 없다. 따라서 적설량과 강수량은 유인관측에 의해서만 얻어지고, 3시간 누적 강수량 자료로만 수집하고 있는 실정이다. 이런 문제점을 극복하기 위하여 기상청에서는 2002년부터 영상적설관측시스템을 구축하여 현재 14개소를 운영하고 있지만, 제한적인 관측위치와 정량적 적설량 자료 획득에는 여전히 어려움이 있다.

대설현상에 대한 지상관측 자료 수집의 어려움과 함

게 강수를 유발하는 눈구름에 대한 특성 정보(형태, 분포, 높이, 구름입자정보, 수분량 등) 분석도 매우 부족하다. 이러한 정보를 얻을 수 있는 지상 관측 장비로 도플러기상레이더를 들 수 있다. 강원도에는 동해와 광덕산에 각각 1대의 기상레이더가 설치되어 있다. 그러나 동해기상레이더는 서쪽으로 태백산맥에 막혀 제한적인 정보를 제공하고 있으며 광덕산 기상레이더의 경우도 태백산맥에 의해 강원도 영동지방의 하층 구름을 분석하기가 어려운 실정이다.

최근 미항공우주국(National Aeronautics and Space Administration, NASA)에서는 지구관측시스템(Earth Observing System, EOS) 계획의 일환으로 1999년 12월과 2002년 5월에 각각 발사한 저궤도 지구관측위성 Terra와 Aqua 위성을 운용하고 있다. 이 위성에 탑재된 MODIS(MODERate resolution Imaging Spectroradiometer) 센서는 36개의 광학스펙트럼 채널과 세 가지의 공간해상도의 그룹별로 지구 관측 자료를 생산한다. 이 센서로부터 구름산출물(구름의 운정온도, 구름의 광학두께, 구름입자의 유효반경, 구름 입자상) 자료가 제공되고 있다. 이 위성자료들을 이용하여 강원도 영동지역의 강수량 추정을 시도하였다. 그리고 대설 사례를 통한 구름 특성을 분석하여 대설 기작의 이해와 예보에 도움을 주고자 한다.

지형적인 영향에 의해 발생하는 기상현상을 규명하기 위하여 원격탐사를 활용한 국외 사례들을 살펴보면, Carpenter(1993), Nakai and Endoh(1995) 등이 있다. 이들 연구에서는 산악 또는 호수에 의해 발생하는 국지적인 현상에 대하여 객관적 분석 결과를 얻어내고자 하였다. Carpenter(1993)는 Utah에 위치한 Great Salt Lake(GSL)의 연안을 따라 발생한 대설 중 지형적인 영향에 의해 발생한 28개의 대설 사례를 지상관측자료, 상층 일기도 및 정지위성 자료를 이용하여 분석하였

다. 이 연구에서 700 hPa과 GSL의 온도 차이가 적어도 17°C의 차이를 보일 때 대설일 경우가 많았으며, 700 hPa의 풍향을 분석함으로써 대설 발생 지역을 예측하였다. Nakai and Endoh(1995)는 도플러레이더와 레인존데를 이용하여 산악지형에 영향을 받는 강설구름의 특징을 분석한 결과, 강설구름의 이동은 낮은 산악지형에서 기류에 의해 크게 영향을 받는다고 하였다. 이러한 지형적인 영향에 관한 연구는 산악지역에서 폭설에 의해 야기되는 재난을 예방하는데 중요한 참고 자료가 될 것이라고 보고하였다.

국내에서는 영동대설과 관련하여 주로 종관 분석을 통하여 서고동저형과 북고남저형의 기압 패턴에서 영동지역에 발생하는 대설 유형 분류와 특성을 조사하였다(최만규, 1994; 최만규, 1998). 그리고 이재규(1999)는 강릉과 대관령의 강설량을 비교하여 유형을 구분하였고 수치모의를 통하여 역전층의 고도, 상승·하강 구역, 그리고 저기압의 발달을 조사하였다. 정광범 등(2004)은 영동지역 대설과 관련된 강수유형의 특성에 대하여 영동지역의 겨울철 강수량과 하층 대류권 바람과의 관계성을 분석하였다. 영동지역에서 발생하는 겨울철 강수는 대부분 종관 규모에 기인한 동풍과 관련되어 있다고 보고하였다. 이를 바탕으로 하층 대류권의 바람 성분에서 산악형, 한기해안형, 난기형으로 영동지역 대설 유형을 분류하였다. 조구희 등(2004)은 겨울철 영동지역 대설 유형과 관련된 기단의 특성을 분석하여 영동지역 겨울철 강수와 종관 기상 패턴과의 연관성을 규명하였으며, 특징적인 종관 기상요소와 강수량과의 지수화를 모색하였다. 김지언 등(2005)은 1995년부터 2001년까지 7년 동안에 관측된 19개의 영동지역 겨울철 강수 사례를 정광범 등(2004)과 조구희 등(2004)에 의해 분류된 세 가지 유형으로 분류하였고 이와 관련된 현열속과 잠열속의 분포를 분석하였다. 분석 결과 동해상에서의 현열속과 잠열속의 기상 성분별 편차 값이 대설 유형에 따라 뚜렷한 특징을 보인다고 보고하였다.

그러나 대부분의 연구들은 종관자료에 의존해 대설 유형 분류와 특성 조사에 한정되어 있었고, 주로 모델 결과를 이해하는데 집중하였다. 그러나 지형적인 영향으로 영동 지역에서 생산되는 관측 자료(Radar, AWS 등)의 부족은 생산된 모델 결과물을 이해하기에는 어려움이 많다. 따라서 이런 어려움을 해결하기 위하여 관측

장비의 확충, 수직측풍장비와 레디오존데를 활용한 연직 바람장 분석, 위성자료동화 등의 방법이 있을 수 있으며, 본 연구에서 논의되는 위성자료의 활용도 여러 방법 중 하나가 될 것이다.

지금까지의 연구들은 대관령과 강릉 등 소수의 유인 관측 자료를 활용했기 때문에 강수량과 적설량에 대한 공간적 분석이 매우 어려웠다. 이러한 어려움을 해결하기 위하여 비록 지상 관측 자료에 비해 정확도가 높은 자료가 아님에도 불구하고 현재 우리의 연구 상황을 본다면 MODIS의 구름 산출물 자료 분석은 영동 대설 연구에 상당한 도움을 줄 것이다. 따라서 MODIS 구름 산출물 자료를 사용하여 겨울철 영동대설 사례에 있어 구름의 광학적 열역학적 속성을 분석하고 이들 속성과 강수량 사이의 관계성을 조사한다. 또한 영동 대설의 기작을 이해하기 위하여 이와 관련된 종관장의 특성을 분석한다. 이를 위하여 MODIS 자료를 이용하여 분류한 구름 유형과 정광범 등(2004)과 조구희 등(2004)에 의해 분류된 영동지역의 대설 유형과의 비교를 시도한다. 이러한 분석 결과는 영동대설의 경우 위성의 구름 속성자료로부터 강수량의 추정을 가능하게 할 것이며 또한 영동대설현상의 기작을 이해하는데 도움이 될 것이다.

## 2. 자료와 방법

이 연구는 영동대설 사례에 대하여 구름의 특성을 분석하고, 이들 구름 특성과 지상 강수량과의 관계를 조사하였다. 이를 위하여 MODIS 구름 산출물과 강원 지역 유인 관측소 지점의 3시간 누적 강수량 자료를 사용하였다. 그리고 MODIS 구름 산출물에 나타난 특성을 이해하기 위하여 이들 구름 특성과 대설 유형과의 관계성을 조사하였다. 대설 유형 분류에 사용된 자료는 대관령과 강릉에서 관측된 바람과 강수량, NCEP/NCAR (National Center for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research) 재분석 자료(Kalnay and Coauthors, 1996)의 해면기압과 온도, 속초 고층 관측 바람 자료이다.

구름 특성 분석을 위하여 MODIS 구름 산출물 자료를 사용하였다. 이 자료는 구름의 물리적 특성을 결정하기 위하여 적외 영역과 가시 영역에서 관측된 복사휘도

(radiance) 자료를 이용하여 계산한 값이며, 이 자료는 미국 NASA에서 웹 페이지를 통해 제공되고 있다. 구름 운정 온도(Cloud Top Temperature, CTT)는 적외 채널을 이용하여 계산한 자료이며, 구름 광학 두께(Cloud Optical Thickness, COT)와 유효 입자 반경(Effective Particle Radius,  $r_e$ )은 0.664  $\mu\text{m}$ 와 3.75  $\mu\text{m}$  채널 자료를 사용하여 추정되었다(Nakajima and King, 1990). 구름 입자상(Cloud Particle Phase, CP)은 0.645  $\mu\text{m}$ 와 1.64  $\mu\text{m}$ 에서 구름의 반사율의 차이 값을 통해 얼음(ice), 물(water), 혼합(mixed) 그리고 불확실(uncertain)로 나누어진다(Hansen and Pollack, 1970; Curran and Wu, 1982; Pilewskie and Twomey, 1987).

지상 강수량 자료는 강원지역 9개 지점(강릉, 대관령, 동해, 속초, 원주, 태백, 영월, 홍천, 인제)의 3시간 누적 관측 강수량을 사용하였다. 강원지역 내에 많은 관측 장비가 설치되어 운영되고 있으나, 자동 관측 장비의 경우 겨울철 결빙으로 인하여 강수량 자료를 사용하기 어려우므로 유인관측 지점 자료를 사용하였다. 또한 유인 관측 지점이라도 춘천과 철원 지점은 영동지역으로부터 먼 거리에 위치하고 있기 때문에 연구에서 제외하였다. 연구 영역은 강원지역과 인근 동해를 포함하는 위도 37°~39°N, 경도 127°~130°E 지역이다.

연구에 사용한 사례는 최근 5년(2001년부터 2005년) 동안 겨울철(12, 1, 2, 3월)에 나타난 강수 사례 가운데 영동대설로 23개의 사례를 선정하였다. 사례의 선정 기준은 대관령과 강릉에서 관측한 사례 누적 강수량이 5 mm 이상이다. 그 이유는 대관령과 강릉이 상대적으로 오랜 관측 기록을 보유하고 있으며 산악과 해양지역을 대표할 수 있는 지역이기 때문이다. 또한 5 mm 강수량은 적설량으로 환산할 때 대략 5 cm에 해당되며 이러한 적설량은 대설로 간주하기에는 낮은 수치이다. 그러나 우리나라 기상청은 24시간 신적설이 5 cm 이상 예상될 때 대설 주의보를 발표하며, 사례수를 늘리기 위하여 누적 강수량을 낮게 선정하였다. 그리고 강수량은 비와 눈 모두를 포함하기 때문에 대설을 판단하기에는 적합지 않으나 산악에는 눈, 해안에는 비가 오는 경우를 고려하기 위해서 사례선정의 기준으로 사용하였다. 연구에 사용된 Terra와 Aqua 위성은 하루에 밤과 낮 두 번 관측하지만, 가시영역의 자료를 이용한 MODIS 구름 산출물의 야간 자료는 사용하기 어려우므로 낮 시간에 관측

한 자료만 사용하였다. 따라서 이 연구에 사용된 사례는 야간에 대설이 있는 경우와 주간에 대설이 있더라도 MODIS 주관 관측시간에 벗어나는 사례를 제외한 14개 사례이다.

영동대설 사례에서의 구름의 특성을 분석하기 위하여 MODIS 구름 산출물 자료를 이용하였다. 구름 산출물 자료 중 CTT, COT,  $r_e$ , 그리고 CP를 조사하였다. CTT는 구름의 최상층의 온도를 알려줌으로써 구름의 높이를 추정할 수 있다. COT는 구름의 광학 두께를 나타내며 이 값은 총 누적 수분 양과 밀접하게 연관되어 있다.  $r_e$ 는 구름 입자의 유효반경을 나타내며 구름 입자의 크기 분포를 알 수 있다. CP는 구름 입자상으로 물, 얼음, 혼합 그리고 불확실로 나누어진다. 따라서 이들 자료를 이용하여 구름의 높이, 구름의 총 누적 수분양, 구름 입자의 크기 그리고 구름 입자상의 분포를 조사할 수 있다. 여기서 분석된 사례별 구름 특성의 특징으로부터 유사한 특징을 보이는 사례를 A, B, C 형으로 분류하였다. 즉, 영동지역을 중심으로 CTT의 높고 낮음, 그리고 COT의 크고 작은 특징을 바탕으로 분류하였다.

앞에서 분석한 구름 특성 자료와 강수량과의 관계성을 조사하기 위하여 MODIS 구름 산출물 자료 중 COT와 CTT 그리고 강원 지역 유인 관측소 지점의 강수량 자료를 비교하였다. 비교에 사용된 MODIS 구름 산출물 자료와 지상 강수량에 있어 MODIS 구름 산출물 자료는 강수 기간 동안 특정 시각의 강수현상과 관련된 자료인 반면 유인 관측소의 강수량 자료는 겨울철의 경우 3시간 누적 강수량 자료이다. 따라서 강수량 자료와 MODIS 구름 산출물을 비교할 때 MODIS 관측 시각 이후에 가장 근접한 3시간 누적 강수량을 사용하였다. 또한 위성이 지상의 강수현상과 관련이 없는 권운을 탐지하였을 경우 강수량과의 관계성을 연관 짓기 어려우므로 이 분석에서 제외하였다. 이를 위하여 적외 영역 파장의 흡수율 차이를 이용한 분리대기창(split window) 기법을 통해 권운이 통과한 사례를 제외하였다. 권운이 통과하지 않은 사례에 대하여 구름 특성에 따라 분류된 유형별로 CTT와 강수량 그리고 COT와 강수량과의 관계성을 분석하였다.

영동대설에 나타난 국지적인 구름 특성을 이해하기 위하여 이와 연관된 종관장과의 관련성에 대한 이해가 필요하다. 이를 위하여 구름의 광학적 열역학적 속성에 따라

분류된 A, B, C형의 종관적인 특징을 살펴보고, 종관장의 특징을 중심으로 분석한 정광범 등(2004)과 조구희 등(2004)의 대설 유형과의 관계성을 조사하였다. 이들이 분석한 지상과 상층의 바람장의 특징을 살펴보기 위하여 강릉과 대관령의 풍향, 강수량 자료 그리고 속초의 고층 관측 바람 자료를 사용하였다. 또한 한반도 주변의 기압패턴과 한기이류의 특징을 살펴보기 위하여 NCEP/NCAR 재분석 해면 기압과 온도장을 사용하였다.

### 3. 구름 자료의 특성

강수를 일으키는 구름은 주로 적운형 구름으로 키가 크고 많은 양의 수분을 포함하는 구름이다. 영동대설 사례의 경우 이러한 구름이 주로 영동지역에 분포 할 것으로 예상할 수 있다. 구름 특성 자료로 본다면 낮은 CTT와 큰 COT 즉, 구름의 키가 크고 수분양이 많은 구름이다. 또한  $r_e$ 는 강수가 있는 구름이므로 중간 크기인 20  $\mu\text{m}$  이상으로 나타날 것이며, 대설 사례이므로 CP 또한 얼음으로 예상하였다. 이렇게 예상된 구름 특성을 바탕으로 앞에서 선정된 14개 사례를 살펴보면 다음과 같다. CTT가  $-40^\circ\text{C}$ 이하로 낮은 경우 즉, 구름의 키가 큰 경우는 14개 사례 중 8개 사례이며, 이 구름은 주로 강원 지역에 분포하는 것으로 나타났다. 이 사례들의 COT는

40 이상으로 크게 나타났으며, 이 중 4개 사례는 영동과 해안지역에만 큰 COT가 분포하는 것으로 나타났다. 그리고 나머지 4개 사례는 영동대설 사례이지만 강원 전역에 높은 COT가 분포하는 특징을 보였다. 또한  $r_e$ 의 경우 약 20~35  $\mu\text{m}$ 로 중간 크기 정도의 입자 크기를 보이며, CP는 주로 얼음으로 나타났다.

영동대설 사례로 선정된 14개 사례와 MODIS 관측 시간을 Table 1에 나타내었다. 또한 영동지역에 위치한 강릉과 대관령 그리고 영서지역에 위치한 원주의 사례 강수량과 적설량을 나타내었다. 강릉은 14개 사례 중 12개 사례가 사례 강수량이 10 mm 이상으로 많은 강수를 보였다. 또한 강릉에서 14개 사례 중 4개 사례가 강설이 없었다. 대관령의 경우 14개 사례 모두 강수량과 적설량이 기록되었다. 영서지역에 위치한 원주는 사례 강수가 5 mm 이하인 사례가 6개이며, 강수가 없는 사례 또한 4개로 대부분 강수가 약하거나 없는 것으로 나타났다.

영동대설 사례로 선정된 14개의 사례 중 주목할 만한 특징 중 하나는 CTT가 높은 구름 즉, 키가 낮은 층운형 구름에서 강수가 있었다는 것이다. 14개 사례 중 6개 사례는  $-5^\circ\text{C}$ ~ $-15^\circ\text{C}$  사이의 높은 CTT를 보였다(Table 2). 이러한 구름은 주로 영동지역에만 분포하며 COT 또한 40 이상의 큰 값을 나타냈다.  $r_e$ 는 약 5~20  $\mu\text{m}$  사이에 분포하며 상대적으로 작은 크기의 입자가 분포하는 것을 알 수 있다. CP는 주로 물로 나타났지만 대관령에서는

Table 1. Heavy snowfall events used in this study.

Events (LST)	MODIS Obs. (LST)	Event precipitation amount					
		Gangneung		Daegwallyeong		Wonju	
		Rain (mm)	Snow (cm)	Rain (mm)	Snow (cm)	Rain (mm)	Snow (cm)
2001. 02. 06. 03 ~ 24	1120	22.8	2.1	4.2	5.5	0.0	0.0
2001. 02. 23. 09 ~ 24	1200	28.6	2.8	50.4	46.5	7.5	4.3
2002. 12. 05. 09 ~ 24	1405	17.5	0.0	6.1	2.4	0.0	0.0
2002. 12. 07. 06 ~ 24	1040	28.0	0.2	29.0	30.0	0.2	0.0
2002. 12. 08. 03 ~ 24	1120	30.2	9.2	45.2	48.9	7.5	3.2
2002. 12. 22. 03 ~ 15	1135	7.0	0.0	4.1	5.8	0.0	0.0
2002. 12. 25. 03 ~ 18	1340	18.8	18.0	18.7	25.7	2.3	2.8
2003. 01. 14. 09 ~ 21	1315	26.5	36.8	10.5	18.5	0.0	0.0
2003. 01. 23. 06 ~ 21	1135	13.8	13.2	17.6	23.2	0.2	0.0
2003. 02. 22. 03 ~ 24	1145	41.0	0.0	37.0	40.5	28.0	0.0
2004. 02. 22. 03 ~ 24	1250	8.5	0.0	10.2	1.1	19.0	0.0
2005. 01. 16. 03 ~ 15	1105	22.4	20.3	37.0	37.1	0.0	0.0
2005. 02. 16. 03 ~ 24	1200	51.5	2.9	48.7	37.5	13.0	0.9
2005. 03. 04. 03 ~ 24	1200						
2005. 03. 05. 00 ~ 21	1340	38.5	59.0	55.0	79.4	2.0	2.8

Table 2. Cloud properties (cloud top temperature (°C), cloud optical thickness, cloud particle effective radius (μm), and cloud particle phase) of each event.

Type	Event	CTT	COT	r <sub>e</sub>	CP	Remark
A	2001. 02. 06	low CTT	YD > 40	small size (5~10 μm)	water	cirrus pass cirrus pass
	2002. 12. 05	high CTT	YD > 40	medium size (20~30 μm)	ice & water	
	2002. 12. 22	low CTT	YD > 40	small size (5~20 μm)	ice	
	2003. 01. 14	low CTT	YD > 15	medium size (20~30 μm)	mixed & uncertain	
	2003. 01. 23	low CTT	YD > 40	small size (5~15 μm)	water & uncertain	
	2005. 02. 16	low CTT	YD > 40	small size (5~15 μm)	water	
B	2002. 12. 08	high CTT	YD > 40	medium size (YD; 20~35 μm)	water	cirrus pass
	2005. 01. 16	high CTT	YD > 40	medium size (YD; 25~35 μm)	ice (GW)	
	2005. 03. 04	high CTT	YD > 40	medium size (20~35 μm)	ice	
C	2001. 02. 23	high CTT	YD > 45	medium size (20~35 μm)	ice	Unclassified
	2002. 12. 07	high CTT	YD > 45	medium size (20~35 μm)	water & uncertain	
	2003. 02. 22	high CTT	YD > 15	medium size (15~30 μm)	mixed & water	
	2004. 02. 22	high CTT	YD > 45	medium size (25~35 μm)	ice	
	2002. 12. 25	high CTT	Scattered	Complicated	mixed & uncertain	

\* YD : Yeong-dong region, GW : Gangwon region

모든 사례에서 눈으로 나타났으며, 강릉의 경우 6개 사례 중 4개 사례에서 눈이 관측되었다. 따라서 이 연구에서는 이러한 특징을 바탕으로 3가지 유형으로 분류하였다. 높은 CTT를 나타내며 영동지역과 연안지역에서 큰 COT를 보이는 사례를 A형, 낮은 CTT를 보이면서 영동 지역에 제한적으로 큰 COT를 보이는 사례는 B형 그리고 낮은 CTT를 나타내면서 강원지역 전역에서 큰 COT를 나타내는 사례를 C형으로 분류하였다.

위성 자료의 단점 중 하나는 다층 구름인 경우 위성에서 관측한 자료와 지상에서 나타나는 기상현상을 연관 짓기 어렵다는 것이다. 예를 들어 지상에 비를 내리는 낮은 구름 위로 권운이 지나가는 경우, 위성 자료는 권운에 대한 정보만 제공하게 된다. 따라서 이 연구에서는 이러한 사례를 배제하기 위하여 적외 영역 채널 중 10.7 μm와 12.0 μm의 차이를 이용한 "분리대기창(split window)" 기법을 사용하였다(Inoue, 1987; Prata, 1989; Ellrod, 2004). 이 기법은 파장별 투과율을 활용하는 방법으로 수증기 인 경우 10.7 μm의 투과율이 12.0 μm의 투과율에 비해 상대적으로 높다. 즉, 얇은 구름인 경우 지표에서 방출되는 복사 에너지 중 10.7 μm 파장대의 일부가 통과하므로 12.0 μm 보다 구름 밝기 온도가 높게 관측된다. 그러나 적외 또는 두꺼운 층운과 같이 광학적으로 불투명한 구름은 두 채널에서 거의 같은 온도 값을 나타낸다. 따라서 이 두 채널의 구름 밝기 온도의 차이는 얇은 구름과 두꺼운 구름을 식별하는 지

표로 활용할 수 있다. Starabala *et al.*(1994)은 10.7 μm와 12.0 μm의 밝기 온도의 차이가 5 K 이상인 경우 얇은 권운이라고 보고하고, 이러한 결과로부터 구름 밝기 온도 차이 값이 0에 가까울수록 두꺼운 구름임을 알 수 있다.

영동 대설 사례에서 지상의 강수현상과 관련이 없는 구름을 탐지 했을 경우를 배제하기 위하여 정지궤도 위성인 GMS-5와 GOES-9 자료를 사용하였다. MODIS 자료는 극궤도 위성 자료이므로 하루에 한번 자료를 제공하지만, 매시간 자료를 제공하는 정지궤도 위성자료는 구름의 연속적 흐름을 분석하기 용이하다. 이 중 CTT가 낮은 사례는 키가 큰 구름일 수도 있지만, 하층운 위로 얇은 권운이 지나가는 경우일 수도 있다. 따라서 이 연구에서는 CTT가 낮은 사례의 IR1 (10.7 μm)과 IR2 (12.0 μm)의 차이 값이 0에 가까운 사례는 키가 큰 구름이 발달한 사례로 보았으며, 차이 값이 2 K 이상인 경우는 다층 구름 즉, 대설 현상과 관련 없는 얇은 권운이 있는 것으로 가정하였다. 다음은 MODIS 관측시각 전후로 권운이 지나간 사례를 제외 하였을 때 유형별 대표 사례를 바탕으로 각 유형별 구름 산출물의 특징을 설명하였다.

Fig. 1은 A형 사례 중 하나인 2001년 2월 6일 사례에 대한 구름 산출물의 분포를 나타낸 것이다. 이 사례의 경우 CTT가 -5°C~-15°C 사이에 균질하게 분포하며 이로부터 층운형 구름이 분포하고 있음을 알 수 있다.

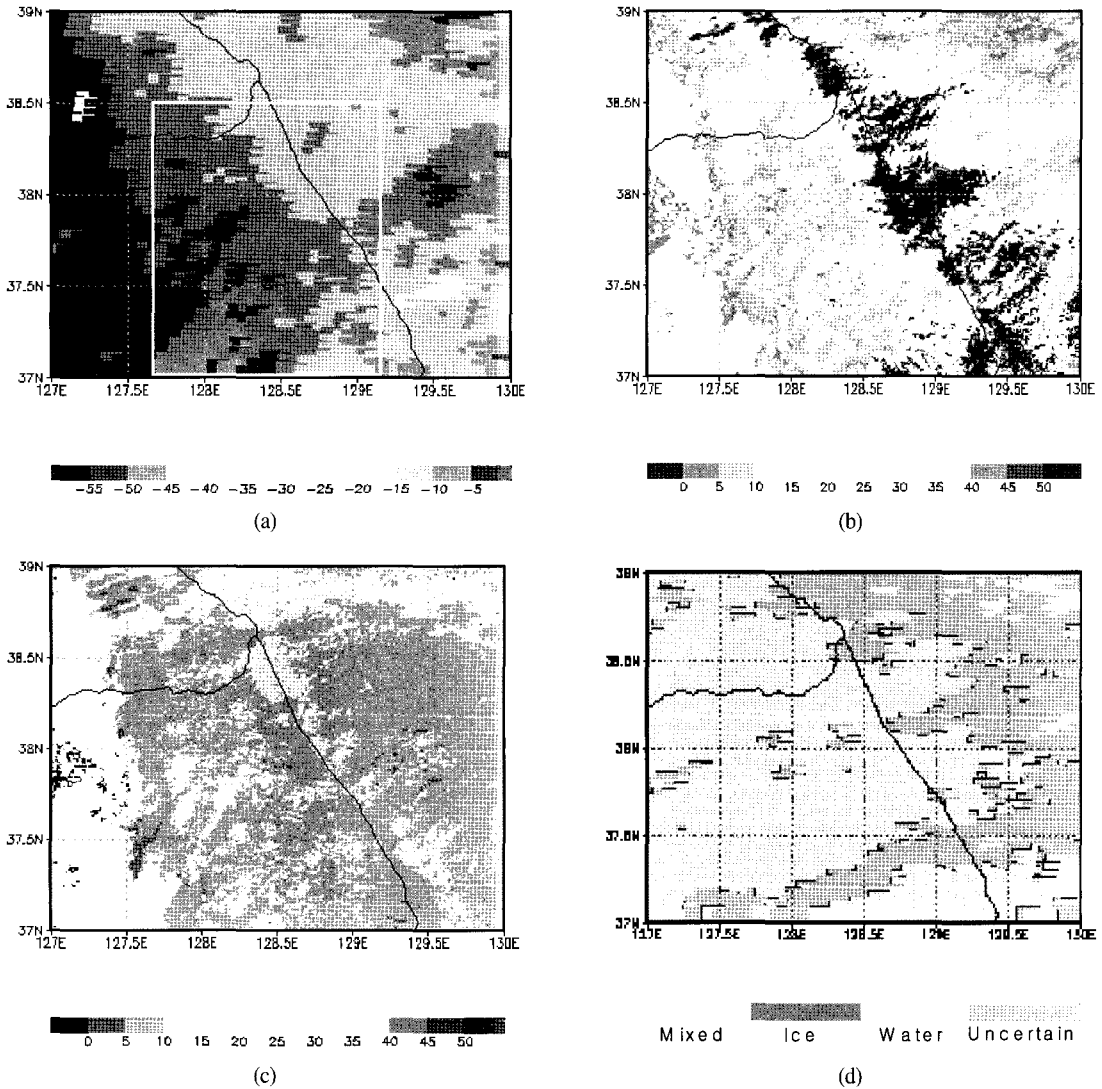


Fig. 1. Distribution of the (a) cloud top temperature ( $^{\circ}\text{C}$ ), (b) cloud optical thickness, (c) cloud effective particle radius ( $\mu\text{m}$ ), and (d) cloud particle phase for 1120 LST 6 Feb. 2001 from MODIS cloud product.

구름의 총 누적 수분량을 나타내는 COT는 영동지역에서만 40 이상으로 크게 나타났다.  $r_e$ 는 연구영역 전역에  $5\sim 15\ \mu\text{m}$ 로 상대적으로 작은 입자가 분포하는 것을 알 수 있으며 CP는 대부분 물로 나타났다. CTT가 높은 것은 상대적으로 키가 작은 층운형 구름이 강원지역에 균질하게 분포하는 것을 알 수 있다. 또한 CP와  $r_e$ 로부터 구름은 주로 과냉각 수적으로 이루어져 있으며, 입자 크기가 상대적으로 작은 입자로 이루어졌음을 알 수 있다. 따라서 이 구름은 발달된 적운으로 보기 힘들며 무강수의 층운형 구름으로 볼 수 있다. 그러나 영동지역에서

COT가 크게 나타나므로 A형 사례의 구름은 영동지역에 구름 입자의 밀도가 높거나 혹은 구름의 상층은 작은 입자로 구성되어 있으나 구름의 하층은 큰 입자로 구성되어 있을 가능성이 있다. 따라서 A 사례의 강수는 이러한 구름 상태에서 일어났을 것으로 추정된다.

Fig. 2는 B형 사례를 나타낸 것이다. 이 사례는 강원지역에서 CTT가  $-45^{\circ}\text{C}$  이하로 구름의 키가 크며, 영동지역에서만 COT가 45 이상으로 큰 값을 나타냈다.  $r_e$ 는 영동지역에서  $25\sim 35\ \mu\text{m}$ 로 태백산맥과 영서 지역에서 나타나는  $15\sim 25\ \mu\text{m}$  보다 상대적으로 크게 나타났

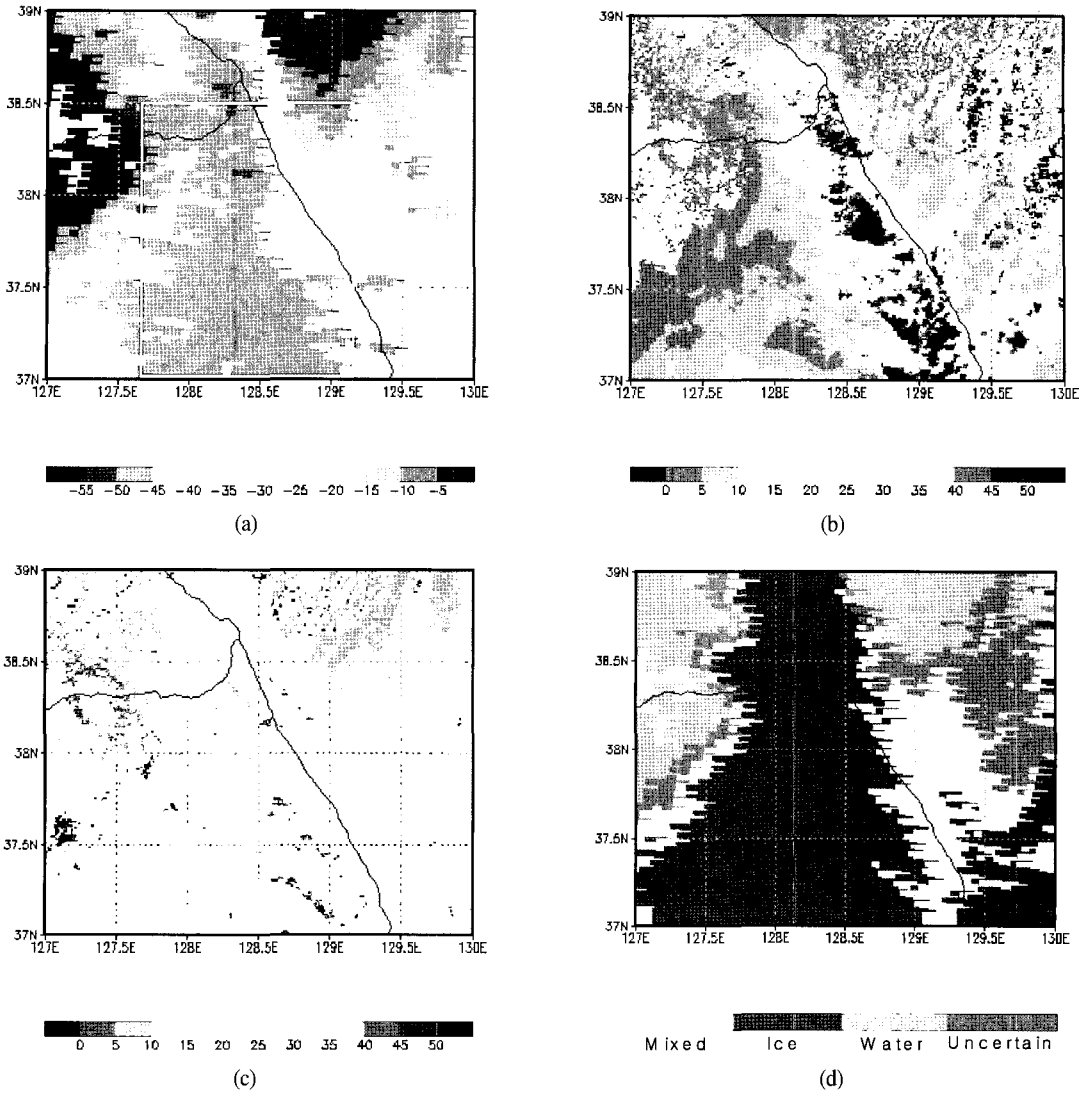


Fig. 2. Same as Fig. 1 except for 1105 LST 16 Jan. 2005.

다. 또한 CP의 경우 모두 얼음으로 나타나는 것을 볼 수 있다. 이것은 두꺼운 적운형 구름에서 강수가 있었음을 알 수 있으며, 수분 함량이 많고 키가 큰 구름이 영동지역에 분포함을 알 수 있다. 그러나 영서지역의 경우 키가 큰 구름이지만 상대적으로 수분함량이 적고 구름 입자도 작은 구름이 분포하고 있음을 알 수 있다. 구름의 수분함량이 강수량과 밀접한 관련을 가진다고 가정한다면, 영동지역이 영서지역에 비하여 강수 확률이 높은 것으로 추정할 수 있다. 또는 영동지역과 영서지역의 구름의 높이는 같으나 구름 바닥의 고도가 다르다고 판단할 수 있다. 그리고 태백산맥과 영서지역에 대해서는 CTT

가 낮더라도 총 누적 수분 양을 나타내는 COT가 작고 구름 입자도 작으므로 강수확률이 낮은 구름이 분포함을 알 수 있다.

C형 사례 중 하나인 2001년 2월 23일 사례는 Fig. 3에 나타내었다. CTT는 강원 지역과 동해상에서  $-40^{\circ}\text{C} \sim -50^{\circ}\text{C}$  사이의 값을 보이며 키가 큰 구름이 분포한 것을 알 수 있다. COT의 경우 강원 지역과 동해상에서 45 이상의 두꺼운 구름이 분포하는 것으로 나타났다. 그러나 낮은 CTT와 큰 COT의 분포지역이 일치하는 것은 아니다. CTT는 B형과 유사하지만, COT가 강원지역 전반에 걸쳐 크게 나타나는 유형이다.  $r_e$ 는 강원 북부 지



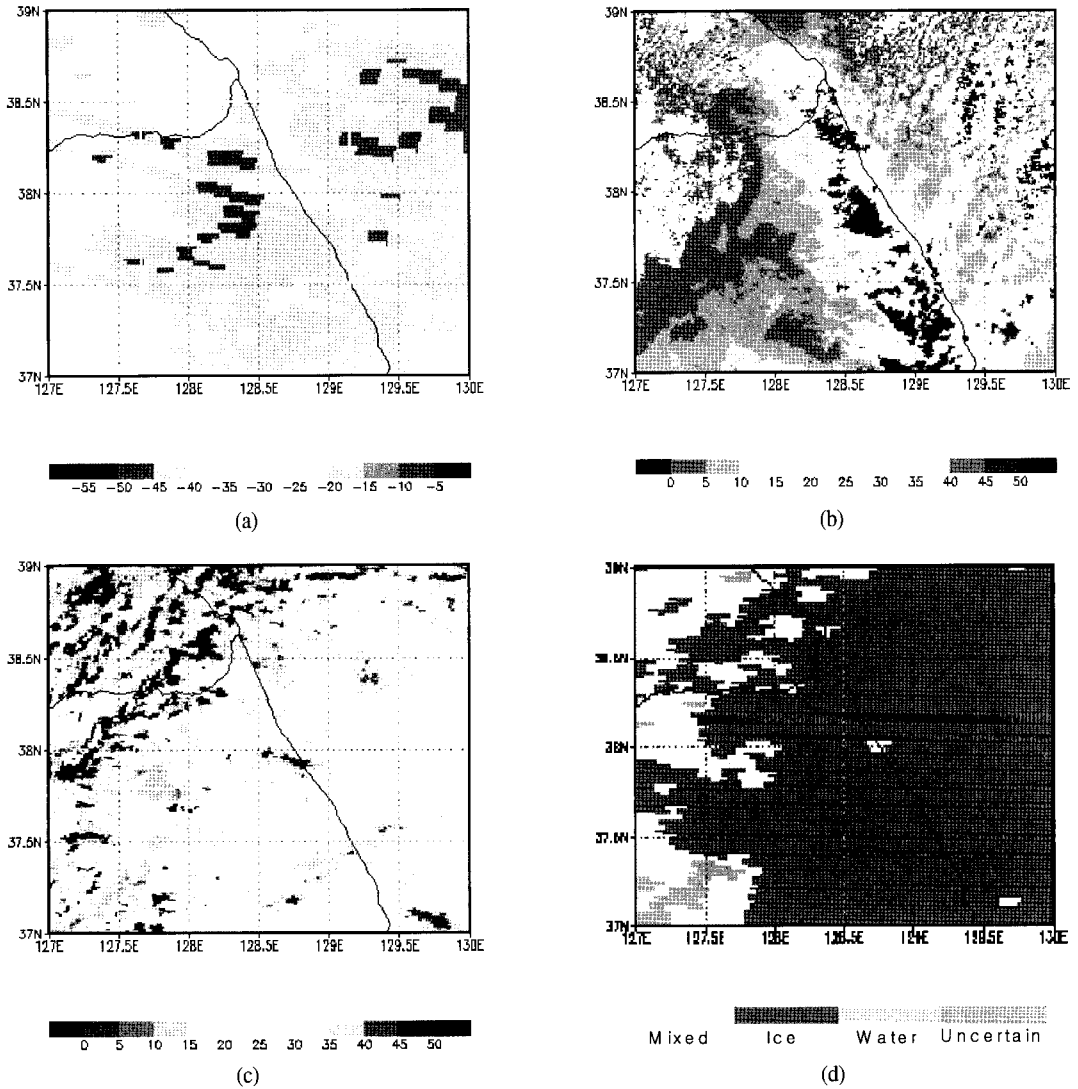


Fig. 3. Same as Fig. 1 except for 1105 LST 16 Jan. 2005.

역에서  $35 \mu\text{m}$  이상의 큰 입자가 분포하지만, 영동지역과 동해상에서  $25\sim 35 \mu\text{m}$  사이의 크기 분포를 보인다. 영동대설 사례의 경우 일반적으로 영동지역에 키가 크고 많은 양의 수분을 포함하며 구름 입자 또한 큰 구름이 분포할 것으로 예상할 수 있다. 그러나 C형의 경우 CTT, COT 그리고  $r_e$  모두 영동지역에 대한 뚜렷한 특징을 나타내지 않았다. 따라서 C형의 경우 영동대설을 MODIS에서 관측한 구름과 직접적으로 관련되어 있다고 보기는 어렵다.

위에서 설명된 유형별 특징을 정리하면 다음과 같다 (Table 3). A형은 영동지역에서 CTT가  $-5^\circ\text{C}\sim -15^\circ\text{C}$ 로

낮은 층운형 구름이 분포하며, 구름의 총 누적 수분 양을 나타내는 COT가 영동지역에만 크게 나타나는 특징을 보인다. 이것은 일반적으로 강수를 나타내는 CTT가  $-40^\circ\text{C}$  이하인 경우를 고려한다면, 낮은 층운형 구름에서 나타난 강수는 주목할 만하다. B형의 경우 강원지역에서 CTT가  $-40^\circ\text{C}$  이하인 키가 큰 구름이 분포하며, COT는 영동지역만 크게 나타났다. 이러한 특징은 수분 양이 많은 키가 큰 적운형 구름이 영동지역에 분포하고 있는 반면, 영서지역에는 구름의 키는 크지만 광학적으로 얇은 구름이 분포하고 있음을 알 수 있다. C형은 강원지역에서 낮은 CTT를 보이며, COT 분포 또한 강원

Table 3. Cloud properties (cloud top temperature (°C), cloud optical thickness, cloud particle effective radius (μm), and cloud particle phase) of each type except for events with cirrus cloud.

Type	CTT (°C)	COT	r <sub>c</sub> (μm)	CP
A	low cloud top (-15 ~ -5°C)	YD > 40	small size (5~10 μm)	water
B	high cloud top (GW < -40°C)	YD > 40	medium size (YD; 20~35 μm)	ice
C	high cloud top (GW < -40°C)	GW > 40	medium size (YD; 20~35 μm)	ice

\* YD : Yeong-dong region, GW : Gangwon region

지역에 넓게 퍼져서 나타나는 특징을 보였다. 연구에 사용된 사례가 영동 대설 사례임에도 불구하고 C형의 경우 영동지역에 뚜렷한 구름 특성이 나타나지 않았다.

#### 4. 구름 자료와 강수량의 관계

영동대설 사례와 관련된 구름의 광학적 열역학적 속성과 강수량의 관계를 살펴보기 위하여 MODIS 구름 산출물 자료 중 CTT와 COT를 지점 강수량 자료와 비교하였다. 강수량은 구름 내의 수분분포 그리고 구름의 키와 밀접한 관련을 가질 것으로 보기 때문이다. 따라서 구름의 키를 예측할 수 있는 CTT와 총 누적 수분 양을 나타내는 COT를 사용하였다. MODIS 자료는 연구 영역을 특정 시각에 통과하는 스냅샷(snap shot) 자료이다. 다시 말해, MODIS 구름 산출물로 강수량을 추정하는 경우 MODIS 추정 강수량은 순간 강수량인 반면 관측된 강수량 자료는 3시간 누적된 자료이다. 따라서 이 두 자료의 비교를 위해서는 3시간 동안 강수가 균일하게 나타났다는 가정이 필요하다. 그리고 비교에 사용된 관측 강수량 자료는 영동 대설이 발생하는 동안 Terra와 Aqua 위성이 연구 영역을 지나가는 시각과 가장 가까운 시각의 3시간 누적 강수량 자료이다.

구름 자료와 강수량과의 관계성 분석에서 권운이 통과한 사례는 지상의 강수현상과 연관 짓기 어려우므로 관계성 분석에서 제외 하였다. 또한 구름 속성 분석에서 A, B 형으로 구분 짓기 어려운 한 사례도 관계성 분석에서 제외하였다. 이러한 경우를 제외하고 구름 특성을 바탕으로 분류된 유형별로 분석하였다. 분류된 사례는 A, B, C형 각각 3개, 2개, 4개이며, 관계성 분석에서 사용된 지점 수는 9개이므로 상관분석에 사용된 자료 수는 기본적으로 A, B, C형 각각 27개, 18개, 36개이다. 그러나 B형의 한 사례는 사례기간이 2일이었으며 구름 속

성 자료 중 4개 지점에서 결측이 발생하여 실제 사용된 자료 수는 23개이다. Fig. 4는 A형 사례에 대하여 CTT와 강수량 그리고 COT와 강수량과의 관계성을 나타낸 것이다. A형의 경우 CTT와 강수량은 음의 상관관계를 보이며, 상관계수는 -0.53으로 유의수준 1%에 해당하는 값을 보였다. 이것은 CTT가 낮을수록 강수량이 많다는 것을 나타낸다. 다시 말해 구름의 키가 클수록 강수량이 많다는 의미이다. COT 또한 강수량과 밀접한 상관관계를 보이며, 0.50(유의 수준 1%)의 상관계수를 보

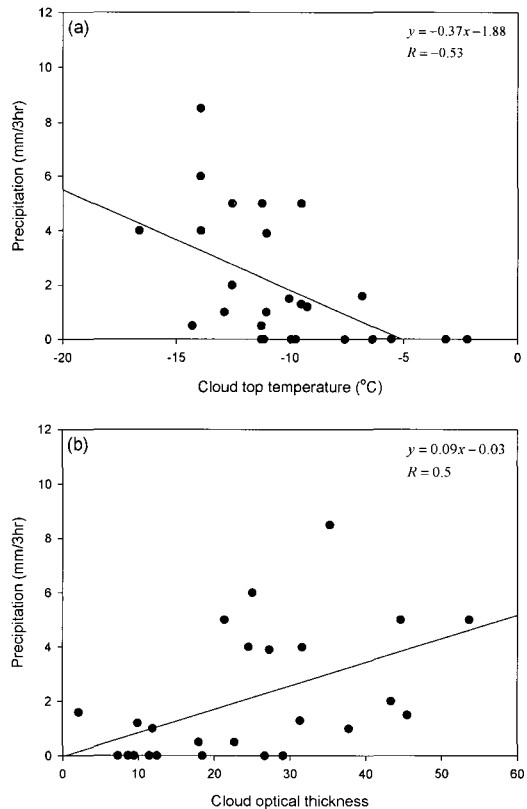


Fig. 4. Relationship between (a) observed precipitation (mm/3hr) and cloud top temperature (°C) and (b) cloud optical thickness for A type.

었다. 이러한 관계는 구름내의 수분양이 많을수록 강수량이 많다는 것을 의미한다. 따라서 A형 사례의 경우 CTT와 COT로부터 강수량 추정이 가능할 것으로 생각된다.

B형의 경우는 2개 사례이며, CTT와 강수량의 관계성 분석에서 상관계수가  $-0.30$ 으로 밀접한 관련성을 보이지 않았으나, COT와 강수량은 양의 상관관계를 보이며, 상관계수가  $0.54$ 로 1%의 유의 수준을 보이며 밀접한 관련성을 보였다(Fig. 5). 이것은 CTT로부터 강수량을 유추하기는 어려우나, COT로부터는 강수량 추정이 가능하다는 것을 의미한다. 이러한 관계는 COT가 높을수록 강수량이 많다는 것을 나타낸다. 또한 COT와 강수량과의 관련성을 설명하기 위해서는 구름이 단일층이라는 가정이 필요할 것이다. 따라서 B형의 경우 CTT로부터 강수량을 추정하기는 어려우나, COT의 경우 강수량 추정이 가능하다고 판단된다.

Fig. 6은 C형 4개 사례에 대한 관계성을 나타낸 것이

다. 이 유형의 경우 CTT와 강수량은 상관계수가  $-0.11$ 로 낮은 관계성을 보였으며, COT와 강수량 또한 밀접한 관계성을 보이지 않았다. 따라서 C형의 경우 CTT와 COT로부터 강수량을 추정하기는 어려울 것으로 생각된다. 한편, 2002년 12월 25일 사례의 경우 발해만에서 발달한 저기압이 한반도를 통과하면서 중부지역에 강수를 유발하였으며, 영동지역은 이 저기압의 가장자리에서 6시간 동안 상당한 강수가 있었다.

GMS-5와 GOES-9의 연속적인 적외 영상에서 C형의 경우, MODIS 관측 시각 전에 높은 구름이 한반도 서쪽 지역에서 형성되어 동쪽으로 이동하는 것을 볼 수 있다. 즉 C형은 서쪽에서 이동해 오는 구름과 관련이 있다고 볼 수 있다. 또한 이 구름은 COT가 높은 상당히 두꺼운 구름이다. 그러나 A형과 B형 구름은 대부분 동해에서부터 형성되어 영동지역 쪽으로 이동해 들어오는 구름이다. 따라서 이러한 구름은 MODIS에서 탐지한 구름과 지상에서 강수를 일으키는 구름과 동일한 것으로

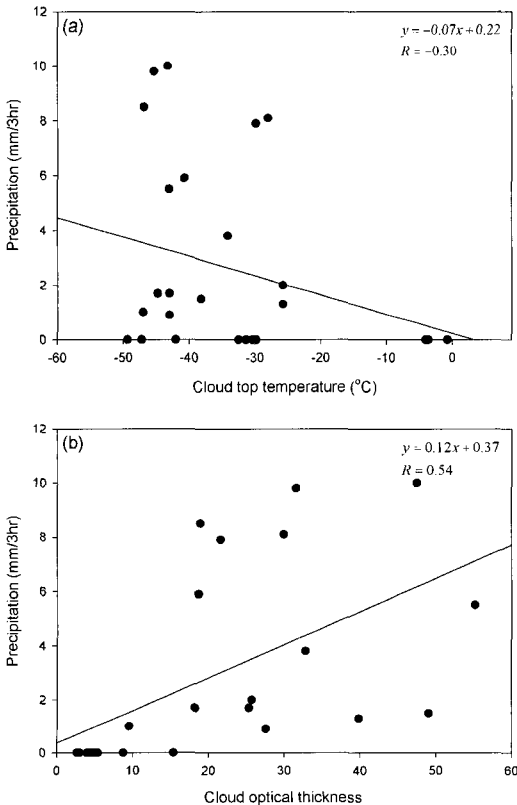


Fig. 5. Same as Fig. 4 except for B type.

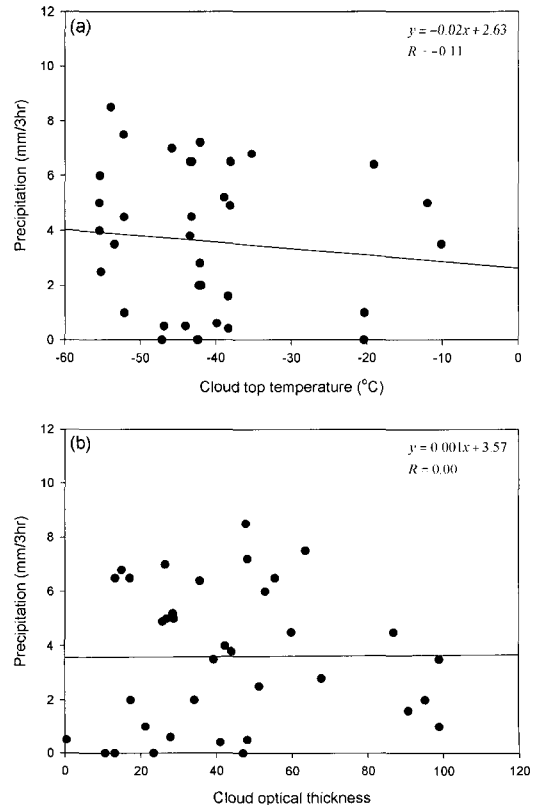


Fig. 6. Same as Fig. 4 except for C type.

생각할 수 있다. 즉, 구름 특성과 강수량과 직접적인 연관성을 갖는다고 볼 수 있다. 반면 C형의 경우는 서쪽에서 이동해 오는 구름이 강원지역을 통과하면서 나타나는 강수이며, 이 경우 MODIS가 관측하는 구름은 지상 하층 구름과 다른 다층 구름의 구조를 가질 수 있다. 즉 MODIS 관측 자료는 영동대설을 일으키는 구름이 아니라 그 위층에 분포하는 상층 구름과 연관성이 있는 것으로 판단된다. 이러한 경우 CTT와 COT로부터 강수량을 추정하기에는 어려움이 있다.

### 5. 구름 자료의 특성과 대설 유형과의 관련성

영동지역의 대설현상과 같이 국지적으로 발생하는 기상현상을 이해하고 예측하기에는 어려운 측면이 있다. 그렇지만 이러한 국지적 현상이 발생하는데 필요한 환경이 종관장에 영향을 받을 수 있다. 따라서 영동대설과 관련된 종관장의 특징 분석은 국지 현상을 이해하는데 많은 도움을 줄 것이다. 이 장에서는 영동대설 사례에 대한 국지적 특성을 이해하기 위하여 이와 관련된 종관장의 특징을 분석하였다. 이를 위하여 MODIS 구름 산출물 자료 분석을 통하여 얻어진 A, B, C형에 포함되

어 분석된 10개 사례에 대하여 (상층운이 통과하는 것은 제외) 각각의 종관적인 특징을 살펴보았다. 종관장 특징 분석을 위하여 정광범 등(2004)과 조구희 등(2004)이 분석한 영동지역 대설 유형과의 연관성을 살펴보았다. 이 연관성 조사에 사용된 기상요소는 강릉과 대관령에서 관측된 3시간 누적 강수량 자료, 매시간 풍향자료이며 상층 바람장 분석을 위하여 속초의 레디오존데 자료를 사용하였다. 또한 대설유형에 따른 기단의 특징을 분석하기 위하여 NCEP/NCAR 재분석 자료 중 해면기압과 850 hPa 온도장을 분석하였다.

MODIS의 구름 산출물 자료 분석을 통하여 분류한 A형의 사례 중 권운 계열의 높고 얇은 구름 통과와 관련성이 없는 3개의 사례에 대한 종관적인 특징을 Table 4A에 요약하였다. 사례기간동안 강릉에서 관측된 누적 강수량은 대관령보다 많았으나 적설은 대관령이 많게 나타났다. 사례기간 중 3시간 누적 강수량이 가장 많았던 시간의 바람을 살펴보면 세 사례 모두 대관령에서는 동풍이 관측되었고 강릉에서는 북서풍의 바람이 관측되었다. 속초의 레디오존데 자료의 경우 2001년 6월부터 관측이 시작되어 이전 사례를 제외한 두 사례만 살펴보았다. 두 사례의 경우 지상에서 925 hPa까지 동풍 계열의 바람이 관측되었으며 그 이상의 고도에서는 서풍이

Table 4. The summary of synoptic characteristics to each event.

Type	Synoptic Characteristics	Precipitation Type
A	2001.02.06. 1120 Greater precipitation amount at Gangneung than Daegwallyeong	Cold-Coast
	2003.01.23. 1135 Northeasterly at Daegwallyeong and Northwesterly at Gangneung	
	2005.02.16. 1200 High pressure expansion and Cold core at the Littoral Province and Manchuria	
B	2005.01.16. 1105 Greater precipitation amount at Daegwallyeong than Gangneung	etc
	2005.03.04. 1200 Northly at Gangneung and Easterly at Daegwallyeong Low pressure center at East Sea	
	2005.03.05 1340 Northeasterly at Sokcho to the level of 700hPa	
C	2001.02.23. 1200 Greater precipitation amount at Daegwallyeong than Gangneung	Mountain
	2002.12.07. 1040 High pressure expansion and Low pressure center at South Japan	
	2003.02.22. 1145 Easterly at Daegwallyeong Low pressure center at Southern part of Korea Northeasterly at Sokcho to the level of 850hPa	Warm
	2004.02.22. 1250 Low Pressure Center going through Korean Peninsula	

부는 것으로 나타났다. 이것은 동풍이 낮은 고도에서 영동지역으로 유입되고 있음을 의미한다. 지상 기압장에서는 세 사례 모두 바이칼 호 서쪽 부근(위도 50N°, 경도 95E°)에 위치하며 중심기압이 1040 hPa 이상의 시베리아 고기압이 한반도 북쪽으로 확장하는 모습을 나타내었으며 일본 남부지역에 저기압의 중심이 위치하고 있었다. 시베리아 고기압의 확장으로 850 hPa의 온도가 -15°C 이하인 차가운 공기가 연해주 지역 주변에 위치하고 있었다.

A형의 사례 중 대표적인 사례로 분석된 2001년 2월 6일 사례의 3시간 누적 강수량, 지상바람, 해면기압을 Fig. 7에 나타내었다. 강릉의 3시간 누적 강수량은 지속적으로 3~5 mm 이상의 강수를 보였으나, 대관령은 2 mm 내외의 강수량을 보였다. 또한 사례 기간 총 누적 강수량도 강릉은 22.8 mm로 대관령의 4.2 mm 보다 많은 것으로 관측되었다. 이 기간 중 3시간 누적 강수량이 가장 많았던 시간의 지상 관측 바람은 대관령에서 동북동풍의 바람이 관측되었으며 강릉에서는 서풍 계열의 바람이 관측되었다. 바이칼 호 서쪽 부근 (위도 50N°, 경도 90E°)에 중심을 둔 고기압은 한반도 북쪽 만주지역 뿐만 아니라 한반도와 일본 남부까지도 크게 확장하는 모습을 보여주었다. 한편 850 hPa 온도장에서는 연해주 지역(위도 48N, 경도 135E)에 -30°C 이하의 강한 한기 중심이 위치하고 있는 것으로 나타났다. 따라서 MODIS의 구름 산출물 자료를 이용하여 분류한 A형의 종관적인 특징은 정광범 등(2004)과 조구희 등(2004)에서 분류된 한기 해안형 강수의 특징과 유사한 연관성을 보였으며, 나머지 2개 사례들도 이와 유사한 종관적인 특징을 보여주었다.

MODIS 구름 산출물 자료 분석에서 B형으로 분류한 3개 사례의 특징을 위와 같은 방법으로 분석하여 Table 4B에 요약하였다. B형으로 분류된 사례 모두 누적 강수량과 적설이 강릉보다 대관령에서 많게 나타났다. 사례 기간 중 3시간 누적 강수량이 가장 많았던 시간의 지상 바람은 대관령에서 동풍계열의 바람이 관측되었으며 강릉에서는 북서풍이 관측되었다. 속초의 레디오존데 자료에서는 두 사례에서 지상에서부터 700 hPa까지 북동풍의 바람이 관측되었으며 나머지 한 사례는 자료 수신이 되지 못하였다. 지상기압은 모든 사례에 걸쳐 서고동저형의 기압배치를 하고 있었으며, 특히 저기압은 한반

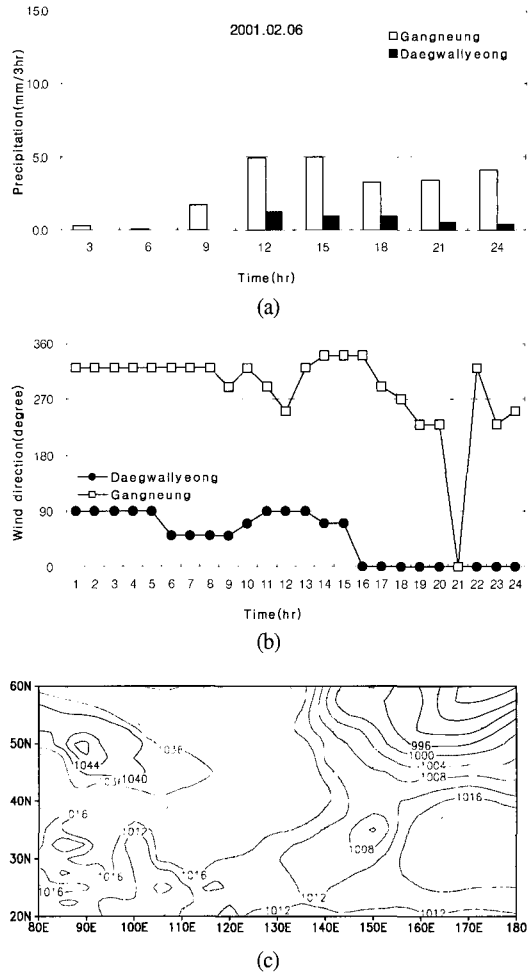


Fig. 7. Time series of (a) precipitation and (b) wind direction at Gangneung and Daegwallyeong for 6 Feb 2001 and distribution of (c) sea level pressure for 1500 LST 6 Feb 2001.

도의 동쪽해상에 중심을 두고 분포하였다.

Fig. 8은 B형의 대표적인 사례였던 2005년 1월 16일의 3시간 누적강수량, 바람 및 해면기압을 보여준다. 사례기간 동안의 누적강수량을 살펴보면 강릉에서는 22.4 mm 대관령에서는 37.0 mm로 관측되었으며 두 지역 모두 대부분 적설로 나타났다. 3시간 누적 강수량이 많았던 시간대의 바람은 대관령에서 북동풍이 관측되었고 강릉에서는 북서풍이 관측되었다. 해면기압 분포를 살펴보면 동해상(위도 37.5N°, 경도 135E°)에 저기압이 위치하고 있으며, 강원도 영동지역은 이 저기압의 영향권에서 강수가 발생한 것으로 판단된다. 따라서 B형으로 분류된 사례의 경우 정광범 등(2004)과 조구희 등

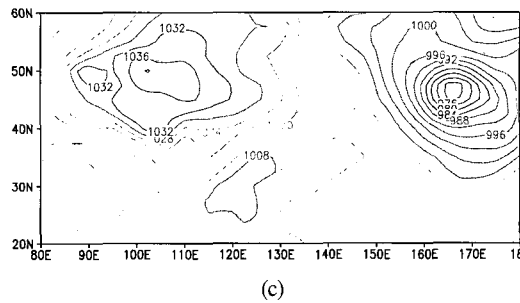
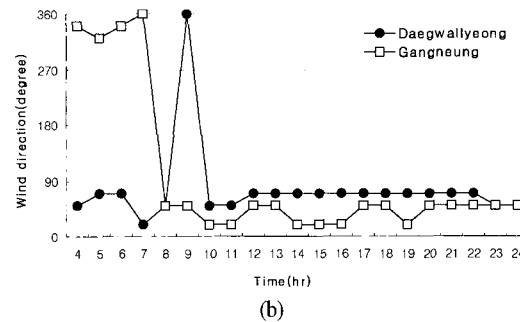
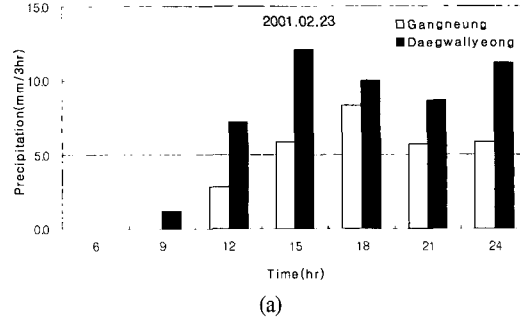
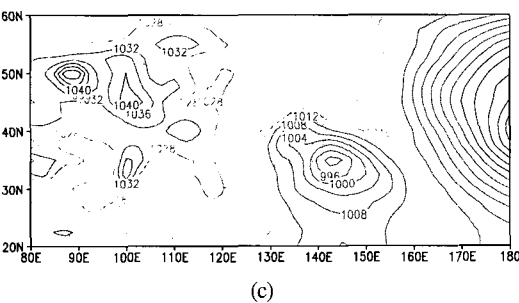
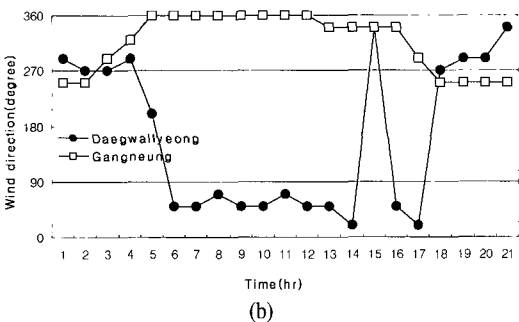
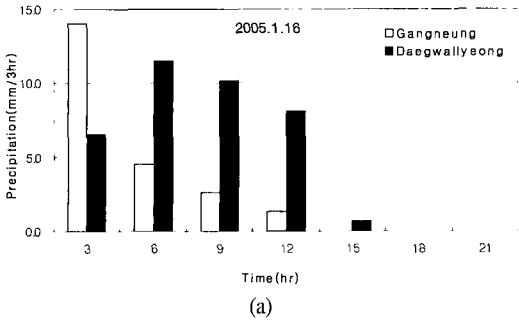


Fig. 8. Same as Fig. 7 except for 0900 LST 16 Jan 2005.

Fig. 9. Same as Fig. 8 except for 1500 LST 23 Feb 2001.

(2004)에서 분류한 3가지 영동지역 대설 유형에는 속하지 않았다. 그러나 B형의 사례에서 나타난 종관장의 특징은 동해상에 상대적으로 강한 저기압이 위치하여 발달하면서 강원도 영동지역에 동풍이 불어 대설현상을 일으킨 것으로 판단된다. 따라서 이 유형은 정광범 등(2004)과 조구희 등(2004)의 분류에서 사례가 드물게 나타나 기타 사례로 분류한 유형의 종관적 특징과 유사하였다.

마지막으로 분류된 C형은 A, B형과는 달리 서쪽에서 이동해 오는 높고 두꺼운 구름과 관련이 있는 사례들로 각 사례별 특징을 Table 4C에 요약하였다. 누적 강수량은 대체적으로 강릉보다 대관령에서 많았다. 또한, 강릉에서는 강수가 대부분 비로 관측되었으나 대관령에서는 적설로 나타나는 경우가 많았다. 지상 바람의 경우 대관령에서는

4개 사례 모두 동풍계열의 바람이 두드러졌으며, 강릉에서는 두 사례에서 북동풍이 나타났으며 나머지 사례에서는 서풍 계열의 바람이 나타났다. 속초의 레디오존데 자료에서 관측개시 이전의 사례를 제외한 두 사례에서는 850 hPa까지 북동풍 계열의 바람분포를 보였으며, 나머지 한 사례는 서풍계열의 바람이 나타났다. 지상기압분포에서는 두 사례에서 시베리아 고기압의 확장으로 일본 남부지역에 저기압이 위치하는 형태를 보였다. 나머지 사례는 저기압의 중심이 한반도 남쪽 지역에 위치하고 있었다.

C형의 사례 중 대관령과 강릉에서 많은 강수를 보였던 2001년 2월 23일의 누적강수량, 바람 및 해면기압의 특징은 다음과 같다(Fig. 9). 누적강수량을 살펴보면 강릉에서는 28.6 mm, 대관령에서는 50.4 mm의 많은 강수가 관측되었으며, 3시간 누적 강수량은 두 지역 모두

5 mm 이상의 강수를 보였다. 또한 강릉에서는 대부분 비로 관측되었고 대관령에서는 적설로 나타났다. 사례 기간 동안 바람은 대관령과 강릉 모두 북동풍이 지속적으로 유입되었다. 해면기압 분포를 살펴보면 바이칼 호 남쪽(위도 48N°, 경도 108E°) 부근에 강한 고기압의 확장으로 일본 남부지역에 저기압(위도 33N°, 경도 130E°)이 위치함으로써 한반도에 영향을 미치는 것으로 판단된다. 이러한 종관적인 특징은 정광범 등(2004)과 조구희 등(2004)에서 분류된 산악형 강수와 유사한 연관성을 보였다. 한편 다른 C형 사례의 경우 한반도 남쪽해상(대한해협)을 통과하는 저기압의 영향을 주로 받는 난기형 강수의 형태를 보이기도 하였다.

지금까지의 분석을 정리해 보면, A형의 강수사례는 한기 해안형 대설 유형으로 만주지역으로 장출하는 고기압 및 연해주 지역에서의 한기 장출과 밀접하게 연관되어 있다. 만주지역으로 장출하는 고기압의 영향으로 동해상에 낮은 층운형 구름이 형성되고, 형성된 구름은 영동지역으로 이동되어 오면서 태백산맥에 부딪혀 돌아오는 바람과 연안지역에서 수렴되어 강수를 유발하는 형태이다. 이러한 현상은 MODIS 구름 산출물 자료 분석에서 낮은 층운형 구름들이 분포하며 해안과 연안지역에 누적 수분량이 집중되어 있는 분포를 보인 것과 잘 일치한다. 또한, 강수 형태는 집중적으로 강하게 나타나는 것이 아니라 지속적으로 나타나는 경향을 보인다. 반면 B형은 동해상에서 발달한 저기압이 적운형 구름을 형성하고 발달된 적운형 구름이 영동지역으로 이동해 오면서 강수를 일으키는 기작이다. 이러한 경우 COT에 의해 강수 특징을 파악할 수 있다. C형은 산악형과 난기형 두가지 유형이 함께 나타나는 형태를 보였다. 종관장 분석에서 영동대설현상이 발생하기 전에 한반도 서부지역에서 구름이 형성되어 영동지역으로 이동하면서 강수가 나타나는 형태였다. 또한, 영동지역의 하층 동풍에 의해서 발달한 구름이 상층 구름에 덮혀 가려진 형태를 보였다. 이러한 경우는 MODIS 위성이 영동대설과 관련된 하층운을 관측하는 것이 아니라 하층운을 덮고 있는 상층운을 관측한 경우이다. 따라서 A와 B형의 경우 MODIS 구름 산출물 자료 분석으로부터 영동대설의 국지적인 특성분석에 도움을 받을 수 있으나, C형의 경우 상층운에 의해 하층 구름 특성을 파악할 수가 없어 영동대설과 관련된 하층운의 기작을 이해하기에는 어려울

것으로 판단된다.

## 6. 요약 및 결론

이 연구에서는 Terra와 Aqua 위성에 탑재된 MODIS 구름 산출물 자료를 이용하여 겨울철 영동대설 사례에 있어 구름의 광학적 열역학적 속성을 분석하고 이들 속성과 강수량과의 관계성을 조사하였다. 이를 위하여 최근 5년(2001년~2005년)동안 겨울철에 발생한 영동대설 23개 사례 가운데 MODIS 구름 산출물 자료를 얻을 수 있는 14개 대설사례에 대하여 CTT, COT, CP,  $r_e$ 에 대하여 구름 특성을 분석하였다. 그리고 사례별 구름 산출물 자료의 특성을 기준으로 A, B, C형으로 분류하였으며 각 유형별 구름 특성 자료(CTT, COT)와 강원지역 유인관측소의 3시간 누적 강수량과 관계성을 조사하였다. 또한 분류된 유형의 기작을 이해하기 위하여 이와 관련된 종관장의 특성을 분석하였다. 이를 위하여 MODIS 자료를 이용하여 분류한 구름 유형과 정광범 등(2004)과 조구희 등(2004)에 의해 분류된 영동지역의 대설 유형을 비교하였다. 이러한 분석에서 얻어진 통한 결과를 요약하면 다음과 같다.

A형으로 분류된 유형은 영동지역에서 CTT가  $-5^{\circ}\text{C}$  ~  $-15^{\circ}\text{C}$ 로 낮은 층운형 구름이 분포하였으며, 구름의 총 누적 수분 양을 나타내는 COT가 영동지역에서만 40 이상으로 높게 나타나는 특징을 보였다.  $r_e$ 는 연구영역에서  $5\sim 15\ \mu\text{m}$ 로 상대적으로 작은 입자들로 분포하였으며 CP는 대부분 물로 나타났다. B형의 경우 강원도 지역에서 CTT가  $-40^{\circ}\text{C}$  이하인 키가 큰 구름이 분포하는 반면, COT는 영동지역에서만 높게 나타났다.  $r_e$ 는 영동지역에서  $25\sim 35\ \mu\text{m}$ 로 영서지역에서의  $15\sim 25\ \mu\text{m}$ 보다 상대적으로 크게 나타났으며 CP는 대부분 얼음으로 나타났다. 이러한 특징은 영서지역의 경우 구름의 키는 크지만 광학적으로 얇은 구름이 분포하고 있음을 알 수 있었다. 그러나 영동지역에서는 수분함량이 많고 키가 큰 구름이 분포하는 것으로 나타나 영서지역에 비하여 강수 확률이 높을 것으로 추정할 수 있다. C형은 강원도 전역에서 낮은 CTT를 보이며, COT분포 또한 강원지역에 넓게 분포되어 나타나는 특징을 보였다.  $r_e$ 는 영동지역과 동해상에서  $25\sim 35\ \mu\text{m}$  사이의 크기 분포를

보였다. 영동대설 사례의 경우 일반적으로 영동지역에 키가 크고 많은 양의 수분을 포함한 구름 분포를 예상할 수 있지만, C형의 경우 사례기간동안 영동지역에 대설 현상이 발생했음에도 불구하고 대설현상과 관련한 뚜렷한 구름 특성이 나타나지 않았다.

유형별 MODIS 구름 산출물 자료와 강수량과의 관계성 분석에서, A형의 경우 CTT와 강수량이  $-0.60$ 으로 높은 상관계수를 보였으며 COT와 강수량은  $0.47$ 의 상관계수를 보여 두 경우 모두 상관관계가 높은 것으로 나타났다. B형의 경우 CTT와 강수량의 상관계수는  $-0.12$ 로 낮은 값을 보였으나 COT와 강수량은  $0.51$ 로 1%의 유의수준을 보이며 밀접한 관련성을 보여주었다. C형의 경우는 CTT와 COT 모두 강수량과의 관계성 분석에서 매우 낮은 상관관계를 보였다. 따라서 A형의 경우 영동지역 대설시 강수량 추정을 위하여 COT와 CTT가 도움이 될 것으로 사료되며 B형의 경우는 CTT로부터 강수량을 추정하기는 어려우나 강수량 추정에 COT의 활용은 가능할 것으로 판단된다. 그러나 C형의 경우 CTT와 COT 모두 강수량 추정에는 도움을 주기 어려운 것으로 판단된다.

A형 사례의 종관장 분석에서는 사례기간 누적 강수량이 대관령보다 강릉에서 많은 것으로 나타났다. 지상 바람은 강릉에서 북서풍이 관측되었으며 속초의 레디오존데 자료 분석에서도 지상에서 925 hPa 까지 동풍 계열의 바람이 나타났다. 지상기압장에서는 시베리아 고기압이 만주지역까지 확장하고 있으며 한기의 중심은 연해주 부근에 위치하고 있었다. 이러한 종관적 특징은 정광범 등(2004)과 조구희 등(2004)에서 분류된 대설유형에서 한기 해안형 강수의 특징과 유사한 연관성을 보였다. B형 사례는 앞선 연구의 대설유형과 종관적 특징의 연관성을 찾을 수 없었다. 그러나 B형에서 나타난 종관장의 특징은 원산만 또는 동해상에서 상대적으로 강한 저기압이 위치하여 발달하면서 강원도 영동지역에 동풍이 불어들어 오면서 대설현상을 유발하는 것으로 나타났다. 그러나 이러한 동풍이 일부 태백산맥을 넘어 영서지역까지 영향을 미치지만 많은 강수를 유발하지는 않았다. C형 사례의 특징은 강릉에서는 강수가 비로 관측되었으나 대관령에서는 적설로 나타났다. 강릉에서 관측된 지상바람을 살펴보면 두 사례는 북동풍이 나머지 사례에서는 서풍계열의 바람이 관측되었다. 지상기

압에서는 시베리아 고기압의 확장과 일본 남부지역에 저기압의 중심이 위치하는 사례와 한반도 남부 또는 대한해협을 통과하는 사례들로 구분되었다. 이러한 특징은 정광범 등(2004)과 조구희 등(2004)의 산악형과 난기형 강수와 유사한 형태를 보였다.

앞에서 언급된 대설 유형별 기작을 정리해 보면, A형은 한기 해안형 대설 유형으로 만주지역으로 장출하는 고기압과 연해주 지역에 중심을 둔 한기와 밀접하게 연관되어 있다. 이와 같은 종관적인 환경에서 고기압 장출에 의해 발생한 동해상의 낮은 층운형 구름이 영동지역으로 이동해 오면서 태백산맥에 부딪혀 돌아 나오는 하층 바람과 연안지역에서 수렴되어 강수를 유발하는 형태이다. B형은 동해상에서 발달한 저기압이 적운형 구름을 형성하고, 발달된 적운형 구름이 영동지역으로 이동해 오면서 강수를 일으키는 기작이다. 이러한 구름의 일부는 태백산맥을 넘어 영서지방까지 유입되지만 많은 강수를 유발하지는 않는다. C형은 산악형과 난기형 대설 유형으로 판단되나 MODIS 구름 산출물 자료 분석에서 상층운에 의해 하층 구름의 특성을 파악할 수 없어 영동대설과 관련된 하층운의 기작을 이해하기에는 어려울 것으로 사료된다.

이상의 연구에서 나타난 것과 같이 MODIS 구름 산출물 자료를 이용하여 영동지역에서 발생하는 대설유형과 이에 따른 강수 기작의 이해와 추정의 가능성을 확인하였다. 그러나 낮 시간에 한차례 한반도 주변을 지나가는 MODIS 구름 산출물 자료를 사용하여 이러한 대설현상을 규명하기에는 생산되는 자료가 매우 제한적이였다. 따라서 영동지역에서 발생하는 대설 현상의 이해와 강수 추정을 보다 구체화하기 위하여 연속적인 구름 특성 자료의 생산과 분석이 필요할 것으로 사료된다. 이를 위하여 GOES나 MTSAT 등과 같은 정지궤도 위성을 활용할 수 있다.

## 사 사

이 연구는 기상청/기상연구소의 "COMS 기상 자료처리 시스템 개발 사업"의 지원으로 수행되었습니다. 그리고 MODIS, GMS 등 위성자료를 제공해 준 기상청과 논문의 원고를 상세하게 심사해 주시고 많은 부분을 지



적해 주신 심사위원들께 감사를 드립니다.

## 참고문헌

- 김지언, 권태영, 이방용, 2005. 영동대설 사례와 관련된 동해상의 현열속과 잠열속 분포 특성, 한국해양연구원, 27: 237-250.
- 류찬수, 정병욱, 1995. 호남 서해안 지방과 영동지방의 강설특성에 관한 비교 연구, 조선대학교 자연과학연구, 19( '96.4): 131-158.
- 이재규, 1999. 대관령과 강릉지역의 강설량 차이를 일으키는 종관 구조: 사례 연구, 한국기상학회지, 35(3): 319-334.
- 정광범, 김지언, 권태영, 2004. 영동지역 겨울철 강수와 관련된 하층 바람의 특성, 한국기상학회지, 40: 369-380.
- 정성훈, 변건영, 이태영, 2006. 발생기구에 근거한 한반도 강설의 유형 분류, 대기지, 16(1): 33-18
- 조구희, 조영준, 권태영, 2004. 겨울철 영동지역 강수 사례와 관련된 기단의 특성, 한국기상학회지, 40: 381-393.
- 최만규, 1994. 동해상의 한기남하에 따른 영동지방의 대설, 강원기상청, 1-4.
- 최만규, 1998. 영동산간과 해안지방 대설 생성의 구조적 특성, 강원기상특성집 제 VII 권: 373-395.
- Ana P. Barros and Robert J. Kuligowski, 1997. Orographic Effects during a severe Wintertime rainstorm in the appalachian Mountains, *Mon. Wea. Rev.*, 126: 2648-2672.
- Curran, R. J. and M. L. C. Wu, 1982. Skylab near-infrared observations of clouds indication supercooled liquid water droplets, *J. Atmos. Sci.*, 39: 635-647.
- David M. Carpenter, 1993. The Lake Effect of the Great Salt Lake: Overview and Forecast Problems, *Weather and Forecasting*, 8: 181-193.
- Ellrod, G. P., 2004. 2004: Loss of the 12  $\mu\text{m}$  "Split Window" band on GOES-M: Impacts on volcanic ash detection, *J. Volc. Geothermal Res.*, 135(1-2): 91-103.
- Hansen, J. E. and J. B. Pollack, 1970. Near-infrared light scattering by terrestrial clouds, *J. Atmos. Sci.*, 27: 265-281.
- Inoue, T., 1987. An instantaneous delineation of convective rain-fall area using split window data of NOAA-7 AVHRR, *J. Meteor. Soc. Japan*, 65: 469-481.
- Kalnay, E. and Coauthors, 1996. The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77: 437-471.
- Nakai S. and T. Endoh, 1995. Observation of snowfall and airflow over a low mountain barrier, *J. Meteor. Soc. Japan*, 73: 183-199.
- Nakajima, T. and M. D. King, 1990. Determination of the optical thickness and effective particle radius of clouds from reflected solar radiation measurements. Part I: Theory, *J. Atmos. Sci.*, 47: 1878-1893.
- Pilewskie, P. and S. Twomey, 1987. Cloud phase discrimination by reflectance measurements near 1.6 and 2.2  $\mu\text{m}$ , *J. Atmos. Sci.*, 44: 3419-3420.
- Prata, A. J., 1989. Observations of volcanic ash clouds in the 10-12  $\mu\text{m}$  window using AVHRR/2 data, *Int. J. Remote Sens.*, 10: 751-761.
- Strabala, K. I., S. A. Ackerman, and W. P. Menzel, 1994. Cloud properties inferred from 8-12  $\mu\text{m}$  data, *J. Appl. Meteor.*, 22: 212-229.