

관측 및 예보 분과 / 관측 및 예보 4-1

영동지역 Seeder-Feeder 효과가 발생한 강설 사례의
눈결정 특성 분석박석우¹, 김병곤¹, 김예지¹, 김지혜¹, 장기호², 임병환², 이규원³¹국립강릉원주대학교 대기환경과학과²국립기상과학원³경북대학교 대기원격탐사연구소

영동지역은 태백산맥의 지형적 효과와 동해효과(ES)로 인해 매년 빈번하게 폭설이 발생한다. 이러한 전형적인 동해효과 강설 이외에 대설을 유발하는 메커니즘으로 Seeder-Feeder(SF) 효과가 있다. 차가운 북동풍이 따뜻한 동해 위를 지나면서 형성되는 하층 구름(Feeder)은 영서지방으로부터 동진하는 상층 구름(Seeder)과 상호작용하여 Seeder-Feeder 효과를 유발한다. 영동지역에서의 SF 효과는 강설강도를 증가시키고 눈결정의 습성에도 영향을 미친다. SF 효과는 크게 혼합형(Merged)과 분리형(Separated)으로 나눌 수 있으며 2018 ~ 2025년 동안 관측된 SF 강설사례 12개 중 대부분이 혼합형으로 나타났다. SF 강설사례는 ES 강설사례의 강수강도 및 가강수량이 약 2배 정도 높은 수치를 보였으며 다수의 사례에서 강수 발생 초기 얼음싸라기(Ice Pellet, IP)가 관측되었다. SF 강설사례의 눈결정 특성 분석을 위해 SF에서 ES로 전환된 두 사례[2018년 3월 8~9일, 2021년 3월 1~2일]를 선정하여 집중 분석하였다. 두 사례는 유사한 구름구조를 가졌으며 두 사례 모두 SF 구름이 체계적으로 성장하였을 때 강수량 및 적설량이 크게 증가하였다. 두 사례의 눈결정 또한 바늘형 및 장구형 입자가 지상에서 관측되었으며 이는 일반적인 ES 강설사례에서 잘 관측되지 않는 눈결정 습성이다. 반면 850hPa 고도의 기온은 ES 강설 사례보다 다소 높은 수준을 보였으며 이는 눈결정의 녹은 정도에 영향을 미쳤을 것으로 보인다. MASC 분석 결과, SF 강설사례의 눈결정이 ES 강설사례 눈결정 보다 다소 어두운 경향이 나타났으며 이는 눈결정의 일부가 녹았음을 의미한다. 두 메커니즘의 눈결정 습성은 확연한 차이를 보였는데 SF 강설사례의 경우 AG(aggregate)의 비율이 높았으며 ES의 경우 GR(graupel)이 대부분을 차지하였다. 관측된 눈결정의 개수 또한, SF 강설사례가 ES 강설사례보다 크게 증가하였다. 두 메커니즘간의 눈결정 특성 비교를 위해 낙하속도, 크기(Dmax), 유효반지름(req), 복잡도 등을 분석하였으며 대부분의 특성에서 SF 강설사례가 더 높은 값을 나타냈다. 이상의 예비 분석결과 SF 효과 강설은 전형적인 ES 강설과 달리, 눈결정과 강설의 정량적 특성에서 뚜렷한 차이를 보이고 있었다. 향후 지속적으로 SF 효과 강설량 및 눈결정 성상에 미치는 정량적 연구를 수행할 계획이다.

Keywords: 영동지역, 동해효과, Seeder-Feeder effect, MASC, 눈결정

※ 이 연구는 강원영동 복잡지형이 반영된 대설 및 강풍 개념모델 개발·개선(Ⅱ) 사업(2024080028) 및 실용적 인공증우량 확보기술 및 실험효과 종합분석 연구(2025080237-1)의 지원으로 수행되었습니다.

멀티존데 관측과 WRF 모델을 활용한 강원 영동 호우 사례분석

전혜림, 김유진, 이진화, 김건태, 임병환

국립기상과학원 예보연구부

최근 우리나라에서는 기후변화로 대기 중 수증기가 증가하면서 집중호우 발생 빈도가 증가하고 있다. 집중호우는 시·공간적 변동성이 커 예측이 어렵고, 도시 침수 및 인명피해 등 사회적 영향도 확대되고 있다. 집중호우 발생 과정을 이해하고 예측 성능을 높이기 위해서는, 중규모 대류계의 시간 규모를 반영한 집중관측이 필요하다.

본 연구는 2024년 9월 20일 강원 영동에서 발생한 부저기압 동반 집중호우 사례를 대상으로, 6시간 간격의 특별관측보다 조밀한 1시간 간격의 멀티존데 활용 집중관측을 수행하고 WRF 모의 결과와 비교하여 호우 발생 메커니즘과 전조 지표 가능성을 분석하였다. 멀티존데는 StreamSondeRS(Skyfora사, Finland)로 8채널 FM 수신기(StreamRX8)를 기반으로 최대 8대의 레윈존데를 동시 비양할 수 있어, 시간적 고해상도의 고층기상 관측자료 생산이 가능하다.

분석 결과, WRF 모의는 실황에서 나타난 강원 영동 남측의 하층제트와 북측의 한기 유입에 따른 동풍성 수렴대의 형성, 부저기압의 생성·이동, 그리고 이에 수반된 강수 패턴을 유사하게 재현하였다. 멀티존데 관측에서는 강수 개시 시점 KI의 급등, CAPE의 점진적 약화와 함께 지위경향(700, 500hPa)의 급락이 나타났고, 특히 강수 직전(약 1시간 전)에는 CIN이 일시적으로 심화(-21.9Jkg⁻¹)된 뒤 급격히 약화되고 지위경향이 일시적으로 증가(23.7m 이상)하였다. 이는 동풍 수렴대 전면에서 북측 한기 유입이 CIN을 일시적으로 강화하였다가, 남측 온난·습윤한 공기가 이어서 유입되면서 수렴강화로 LFC는 하강, CIN은 급격히 약화되어 대류가 발달한 것으로 해석된다. WRF 모의에서는 KI와 CAPE의 변화의 경우 관측과 유사했으나 지위경향의 단시간 변화는 미약하였다. 이 차이는 시간적 고해상도의 멀티존데 집중관측이 기존 특별관측이나, 수치모델로 확인하기 어려운 단시간 규모의 연직구조 전이를 포착함을 보여준다.

연구 결과는 멀티존데의 활용이 단기 호우 예측 의사결정 지원에 기여할 수 있으며, 향후 다양한 사례 축적과 멀티존데 자료의 WRF 자료동화 적용을 통해 예측 성능 향상 효과를 정량적으로 평가할 예정이다.

Keywords: 레윈존데, 멀티존데, 집중관측, 호우, 자료동화

※ 이 연구는 국립기상과학원 「기상업무지원기술개발연구」 사업의 ‘재해기상 목표관측·분석·활용기술 개발 (과제번호:KMA2018-00123)’의 지원으로 수행되었습니다.

여름철 중규모대류계의 발달과 강수 집중 구역의 하향전파

강혜미, 우재훈, 변가영, 이상우, 이창재, 임윤진, 인희진

기상청 예보국

최근 해수면 온도가 상승하고 대기 중 수증기 함량이 증가하면서 우리나라 주변으로 중규모대류계(MCS)의 발달이 빈번해지고 있으나, 이에 대한 예측은 불확실성이 매우 크다. 중규모대류계는 자체적인 급격한 발달뿐만 아니라 그 이후 발생하는 유출류로 인한 2차적인 수렴 및 정체 등으로 인해 강수대가 재편되는 과정을 거치게 되므로 강수 집중 구역 변경 및 극한 강수 발생 가능성 크기 때문에 이를 예보에 직접 활용하기 위한 기술 개발은 필수적이다.

본 연구에서는 중규모대류계(MCSs)의 발생 가능성을 판단하기 위해 기존에 주로 활용하던 하층제트(LLJ) 뿐만 아닌 절대습윤불안정층(MAUL)의 구조를 함께 분석하여 2025년 여름철에 적용한 사례 분석을 소개하고자 한다. 2025년 여름철에는 중규모대류계(Mesoscale Convective Systems, MCSs)이 지속적으로 발달하며, 시간당 100mm 이상의 매우 강한 강수가 총 4일이나 나타났다. 이러한 중규모대류계들은 수치모델의 결과와 다르게 모델이 생산될 때마다 위치가 달라지는 경향이 있었다. 실황에서 중규모대류계(MCSs)는 스콜 선(squall lines), 활 에코(bow echoes), 중규모대류복합체(MCC) 등으로 현상은 각기 다르게 나타나지만 모두 대류계에 의해 강수 구역이 초기 예상보다 남쪽에 형성되는 특징을 보였다. 또한 규모는 더 작지만 다운버스트(Downburst)에서 유출류에 의해 강수대가 남쪽에 재편되었고, 모두 강한 대류가 지상의 콜드풀(cold pool)을 강화시켜 강수대가 북상하지 못하고 남쪽에서 형성되는 경향을 보이고 있었다.

Keywords: 여름, 중규모대류계, 중규모저기압, 남편향, 하향전파, 호우

위성 및 지질 합성자료를 활용한 실시간 산사태 위험 조기경보

권민재, 최용상

이화여자대학교 기후에너지시스템공학과

산사태는 단시간 내에 일어나는 파괴력이 강한 재해로, 매년 많은 인명, 재산 및 인프라 손실을 초래한다. 산사태 위험 예측 시스템의 구축은 산사태 위험지역에 위험정보를 미리 알림으로써 재난으로 인한 손실을 예방할 기회를 제공한다.

산사태는 산지의 자연사면에서 강우, 지진 또는 중력작용으로 사면의 붕괴, 지반침식 및 토석류가 한꺼번에 많은 흙과 돌이 빠른속도로 사면 아래로 이동하는 현상이다. 즉, 산사태는 지면의 물리적인 특성에 의해 발생하는 자연 재해이다. 산사태의 위험성을 평가하기 위해 산사태 영향 요인으로 고려되는 변수로는 지표정보인 EVI(Enhanced Vegetation Index), land cover, 지질정보인 soil moisture, lithology, 그리고 지형정보인 elevation, slope gradient의 총 6가지가 사용된다.

각 산사태 영향 요인과 산사태 발생 빈도의 관계를 분석하기 위해 과거 산사태 발생 목록으로 NASA(National Aeronautics and Space Administration)의 Global Landslide Catalog(GLC)를 사용하였다. 특히, 강하고 지속적인 강우가 산사태의 주요 원인으로 지목되며 실시간 예측이 가능하므로 강우 관련 요인에 의해 발생한 사례만 이용하였으며, 이는 발생 원인이 확인된 사례 전체의 93.64%를 차지한다. 짧은 시간규모로 발달하는 강우의 특성 상 강우에 취약한 지역에 대한 사전 파악을 바탕으로 실시간 모니터링 지원이 필수적이다 (Khan et al. 2022). 이에 강우구름의 발달과 이동을 실시간으로 넓은 관측영역에 대해 파악할 수 있는 정지궤도 위성자료 활용이 유리하다. 따라서 본 연구에서는 최신 정지궤도위성인 GEO-KOMPSAT-2A(GK2A)를 사용한다. GK2A는 fulldisk 영역 기준 공간해상도 2km, 시간해상도 10분으로 자료를 제공하며, level1B 적외채널을 이용 시 야간에도 탐지가 가능하다.

본 연구에서는 빈도비(Frequency Ratio, FR)를 적용하여 6개의 서로 다른 인자를 병합하여 하나의 최종 산사태 위험도 지도를 작성한다. FR은 이변량 통계 방법으로 각 인자와 발생사례가 필요하다. 본 연구에서 고려한 산사태 유발 인자는 6가지이며 각각 1915년부터 2022년까지 강우 관련 요인으로 발생한 산사태 목록을 포함하는 NASA GLC 자료와 결합한다. 각 인자와 산사태 발생의 FR을 총 FR로 합하여 산사태 최종 경보 지역을 결정한다. 마지막으로 경보 대상지역 조건은 폭우가 예상되는 고위험 지역으로 정의한다. 본 연구에서는 GK2A L1B 자료를 이용하여 발달 중인 구름이나 성숙한 구름을 탐지하여 빠르고 가까운 실시간 정보를 제공함으로써 호우 가능성을 판단한다.

Keywords: 산사태, 위험지도, 정지궤도위성, 재난, 조기경보

한반도 22년 장기간 낙뢰 자료 특성 및 지형과 LLJ와 관계연구

박준석, 김정훈

서울대학교 지구환경과학부

기상청은 2001년 1월부터 2015년 9월까지 시간 도달차 방식과 자기 방향탐지 방식을 결합한 KLDN 시스템을 운용하였으며, 2015년 9월부터 현재까지 시간 도달차 방식만을 사용하는 LINET 시스템을 운용하여 낙뢰의 위치를 탐측하고 있다. 본 연구에서는 상이한 두 기상청 낙뢰 관측망에서 탐측된 번개 자료를 유사한 품질을 가지도록 품질 관리하여, 최근 22년(02' ~ 23') 동안의 한반도와 그 인근 해상(33-39°N, 120-130°E)에서 번개의 장기간 특성에 대해 분석하였다. 22년 평균 낙뢰 밀도는 내륙의 경우 태백산맥과 소백산맥의 풍상측에서, 그리고 125.5°E를 따른 서해상에서 높게 나타났으며, 해발고도 750 m 미만의 분지나 낮은 산지 등 수렴이 용이한 지역에서 낙뢰 밀도가 높게 나타났다. 또한, 낙뢰 밀도가 높은 지역들의 낙뢰 일들에 대해 ERA5 재분석자료를 이용하여 하층제트(low level jet: LLJ)의 분포를 구하였으며, 충청도와 경상도는 LLJ의 주된 입사 방향이 산맥에 평행하게 입사하여 지형에 의한 강제 상승보다는 LLJ의 출구에서 지형에 의한 수렴으로 인해 대류계가 발생·발달하는 것으로 판단되었다. 연도별로는 분석 영역 전체, 남한내륙, 해양에서 모두 낙뢰 빈도가 시간에 따라 점차 감소하는 경향을 보였으며, 월별로는 4월부터 8월에 비교적 완만하게 증가하여 8월 달에 Peak를 보이고 9월부터 급격히 감소하는 하나의 최빈값을 가지는 비대칭적인 분포를 보여주어, 두 최빈값을 가지는 강수량의 월별 분포와는 매우 상이한 결과를 가졌다. 시간적으로는 낙뢰 빈도가 두개의 최빈값을 가졌으며 그중 오전 0500-0600 KST의 최빈값은 서해와 남해에서, 오후 1600-1700 KST의 최빈값은 내륙지역에서 발생하였다. 서해상과 내륙서편에서 낙뢰의 전파 경향을 분석하고자 일 낙뢰빈도를 기준으로 95-99 백분위수의 날들을 선정하여 경도-시간 홀물러선도를 분석하였으며, 6, 8월과는 달리 7월 오전에만 서해에서 내륙 서편으로 전파되는 낙뢰 특성이 나타났다. 이에 대한 원인을 분석하고자 ERA5 재분석자료를 이용하여 850 hPa의 하층 바람과 1000-700 hPa의 하층의 통합된 수증기 수송(integrated water vapor transport: IVT)를 계산하였으며, 7월의 오전에만 동중국으로부터 한반도 내륙 서편까지 길게 이어지는 LLJ와 그 경로상의 높은 IVT가 존재하여, 야간 고층 대류로 인한 대류계가 형성되고, 형성된 대류계가 내륙서편까지 전파되기 용이한 환경임을 시사하였다. 이와 같은 한반도의 낙뢰밀도 및 분포에 대한 연구는 향후 한반도에서의 중규모 대류계의 낙뢰 발생 기작에 대한 분석과 기후 변화에 따른 장기적 변화 가능성을 탐색하는 후속 연구의 토대를 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

Keywords: 장기간 한반도 낙뢰 밀도, 지형효과, LLJ, IVT

※ 이 연구는 기상청 「위험기상 선제대응 기술개발사업」 (RS-2023-00233640)의 지원으로 수행되었습니다.

관측 및 예보 분과 / 관측 및 예보 4-6

BBMEX-Wind 캠페인 기간 동안 도로협곡 내와 외의 바람과 난류의 구조

박문수¹, 백기태¹, 김석철¹, 강민수¹, 나성준²

¹세종대학교 기후환경융합학과
²(주)동녘

도시의 도로협곡 내와 외의 바람과 난류의 구조를 관측하기 위해 BBMEX-Wind 캠페인을 2023년과 2025년 5월에 서울의 강남대로에서 수행하였다. 강남대로는 50m의 폭과 약 70m 건물 높이, 그리고 3 km의 길이를 가진 잘 발달된 도로협곡 구조이다. 도로 중앙의 버스정류장에 윈드라이다를 설치하여 40m부터 350m까지 3방향의 바람을 약 1초마다 관측하였으며, 2025년은 2km까지 관측을 수행하였다. 윈드라이다 자료를 이용하여 10분 평균의 난류운동에너지와 마찰속도와 같은 난류 변수를 계산하였다. BBMEX-Wind 기간 중에 도로협곡 내에서 바람의 wake와 channel flow가 관측되었으며, 220m 이내의 하층에서 부는 강풍도 관측되었다. 지상에는 바람이 거의 없으나 500m 이상 고도에서는 10m/s 이상의 강풍이 부는 사례와 해륙풍이 나타난 사례도 관측되었다. 주간과 야간으로 나누어 난류 변수의 평균값과 중앙값의 프로파일을 비교하였다. 주간 난류 변수의 평균값은 야간에 비해 약 2배 컸으며, 중앙값은 약 2배 이상 큼을 확인하였다. 도로협곡 위에서 관측된 평균 풍속의 프로파일에 Monin-Obukhov 상사이론을 적용하여 지면거칠기길이를 계산하였다. 지면거칠기길이는 매우 넓은 범위에서 결정되었으나, 주간에는 약 8m, 야간에는 6m에 가장 많은 값을 보였다. BBMEX-Wind 자료는 향후 UAM의 안전한 운항과 빌딩풍과 같은 강풍에 의한 피해를 저감에 활용 가능할 것이다.

Keywords: BBMEX-Wind, 도로협곡, 윈드라이다, 난류, 빌딩풍, UAM

※ This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Education (2021R1I1A2052562).