

ORIGINAL ARTICLE

지형 강제력과 하층제트 변화가 한반도 남동 지역 국지 강수에 미치는 영향 분석 연구

채다은 · 김은지 · 김지선 · 이순환^{1)*}

부산대학교 지구과학과, ¹⁾부산대학교 지구과학교육과

Impact of Topographic Forcing and Variation of Lower-level Jet on Local Precipitation in Southeast Region of Korean Peninsula

Da Eun Chae, Eun Ji Kim, Ji Seon Kim, Soon-Hwan Lee^{1)*}

Department of Earth Science, The Graduate School Pusan National University, Busan 46241, Korea

¹⁾Department of Earth Science Education, Pusan National University, Busan 46241, Korea

Abstract

Recently, a heavy rainfall with high spatial variation occurred frequently in the Korean Peninsula. The meteorological event that occurred in Busan on 3 May 2016 is characterized by heavy rain in a limited area. In order to clarify the reason of large spatial variation associated with mountain height and location of low level jet, several numerical experiments were carried out using the dynamic meteorological Weather Research and Forecasting (WRF) model. In this case study, the raised topography of Mount Geumjeong increased a barrier effect and air uplifting due to topographic forcing on the windward side. As a result, wind speed reduced and precipitation increased. In contrast, on the downwind side, the wind speed was slightly faster and since the total amount of water vapor is limited, the precipitation on the downwind side reduced. Numerical experiments on shifting the location of the lower jet demonstrated that if the lower jet is close to the mountain, its core becomes higher due to the effect of friction. Additionally, the water vapor convergence around the mountain increased and eventually the precipitation also increased in the area near the mountain. Hence, the location information of the lower jet is an important factor for accurately predicting precipitation.

Key words : Heavy rainfall, WRF, Topography effect, Low level jet, Numerical experiments, Busan

1. 서론

최근 한반도에 집중호우가 빈번하게 발생했으며 이로 인해 많은 재산 및 인명피해를 입었다. 한반도 남동 지역에 위치한 부산, 창원에서는 2014년 8월 25일에 시간당 50 mm의 집중호우가 발생함에 따라 각각 115.0 mm,

243.5 mm의 많은 강수가 기록되었다. 또한 2017년 7월 16일과 23일 동안 발생한 국지성 호우로 인해 청주 290.1 mm, 천안 232.7 mm의 강수량이 기록되었으며, 2018년 8월 5일, 6일에는 강원 영동 지방(강릉 258 mm, 고성 275 mm, 동해 105.5 mm)에서 많은 양의 강수가 내렸다.

Received 27 July, 2019; Revised 30 September, 2019;

Accepted 19 November, 2019

*Corresponding author: Soon-Hwan Lee, Department of Earth Science Education, Pusan National University, Busan 46241, Korea
Phone : +82-51-510-2706
E-mail : withshlee@pusan.ac.kr

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.

© 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.

일반적으로 한반도의 강수는 동아시아 지역의 몬순 순환의 영향으로 주로 여름철에 집중되는 특징을 가지고 있다. 그러나 최근에는 6~8월 이외의 기간에도 많은 강수가 발생하는 경향을 보이며 국지적인 강수 편차도 크게 나타나고 있다(Jung et al., 2014; Woo et al., 2017). 이러한 집중호우에 영향을 주는 원인으로는 종관 기상 패턴, 지형효과, 습윤한 공기를 가진 하층제트의 유입, 불안정한 기단, 해수온도 등이 있으며(Rebora et al., 2013), 이와 같은 원인들이 집중호우에 미치는 영향에 대해 많은 연구들이 수행되었다. Xia et al.(2006)는 경계층 내의 강한 풍속을 가진 바람에 대한 연구를 통해 하층제트의 수렴은 2005년 6월 중국 남쪽에서 발생한 폭우 형성에 중요한 역할을 했다는 사실을 밝혔다. Flesch et al.(2012)는 로키산맥이 캐나다 알버타 지역에 발생한 홍수에 어떠한 영향을 주는지 알아보기 위해서 산악의 높이를 감소시키는 민감도 실험을 수행하여 산을 낮추었을 때 최대 강수량이 감소하고 강수 지속시간이 연장됨을 알아냈다. Wang et al.(2013)은 하층제트와 강수의 연관성을 알아보기 위해 2000년부터 2009년까지의 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 의 해상도를 가진 NCEP FNL (National Centers for Environmental Prediction Final Operational Global Analysis data) 자료와 동일 기간 동안 724개 지점에서 관측한 일 강수 데이터를 분석하여 하층제트의 강도와 강수가 높은 상관관계를 가진다는 결론을 얻었다. 또한, Chen et al.(2010)은 민감도 실험을 통하여 산악 지형이 강수량을 증가시킨다는 결과를 얻었고 Ting and Wang(2005)은 지형과 하층제트가 강수에 영향을 미친다는 사실을 밝혔다.

국내에서도 집중호우의 원인을 밝히고 그 원인들이 강수에 어떠한 영향을 주는지에 대한 연구들이 많이 진행되었다(Jeong et al., 2008). Park et al.(1983)은 국내에서 처음으로 하층제트에 초점을 맞추어 호우사례를 분석하였고, 이후 Hwang and Lee(1993)는 한반도에서 발생한 호우와 하층제트의 관련성에 관한 연구를 수행하여 호우 발생 시 대부분 하층제트가 존재한다는 사실을 밝혀냈다. 또한 Park et al.(2003)은 지형과 하층제트가 집중호우 발생 메커니즘에 미치는 영향에 대해 수치모의하여 지형의 고도를 낮추었을 때 강수량이 크게 감소하고 하층제트 풍속 감소는 강수 발생 위치를 변화시킨다는 결과를 알아냈다. 이외에도 Hong and Lee(2009)는 한

반도의 산악을 제거하는 민감도 실험을 통하여 한반도에 존재하는 산악 지형이 강수를 약 20%까지 증가시킨다는 사실을 알아냈고 Kim and Lee(2016)는 집중호우 사례일에 수치 실험을 수행하여 하층제트와 산악 효과가 강수를 증가시킨다는 사실을 밝혔다. 또한 Park(2000)은 한반도 남부지방에서 발생하는 집중호우에 대해 연구하였고 가장 중요한 변수로 지형효과와 하층제트를 언급하였다.

그러나 앞서 언급한 이러한 연구들은 한반도 전체를 대상으로 한 종관 규모의 연구가 대부분이며, 민감도 실험에서 규모가 큰 산악을 다루고 있다. 특히 부산 서부 지역과 같이 산악의 규모가 크지 않고 복잡한 경우, 산악 지형과 하층 제트가 집중호우에 미치는 영향이 복잡하게 나타날 가능성이 있다. 기존의 선행 연구에서 지형의 효과에 대한 연구는 높이 1 km 이내인 부산의 산과 달리 1~2 km의 대규모 산악에 대한 연구가 대부분이며, 단순한 종관 분석적 접근을 하였다.

본 연구는 부산 지역에서 발생한 집중호우를 대상으로 고도 1 km 이하의 비교적 낮은 산악지역에서 나타나는 지형과 하층제트의 변화를 수치실험을 통하여 분석하였다. 이를 통하여 낮은 산악으로 구성된 복잡한 지형의 지형 강제력 및 하층 제트의 위치가 국지 수렴에 따른 집중호우에 미치는 영향을 정량적으로 살펴보았다.

2. 재료 및 방법

2.1. 연구 대상 지역 및 사례일

본 연구는 2016년 5월 3일 부산 지역에 발생한 집중호우를 대상으로 하였다. 2016년 5월 3일 부산 지역에 집중호우가 발생하였고 부산시 내에서 최대 강수량을 기록한 금정구와 다른 지역들 사이의 일강수량 차이는 최소 23 mm(금정구, 기장)에서 최대 60 mm(금정구, 영도)로 크게 나타났다. 이날 강수는 새벽 3시부터 시작되어 오전 8시에서 9시 사이에 강수가 집중되었는데 이때 금정구 지역의 시간당 강수량은 약 45 mm로 가장 높은 강수를 기록했다.

Fig. 1은 한국 기상청(Korea Meteorological Administration)에서 제공한 연구 대상일의 지상과 500 hPa 고도의 기상장을 나타낸 것이다. 종관 기상을 분석해 보면 500 hPa 상층에 한기를 품은 기압골이 한반도 북서쪽에

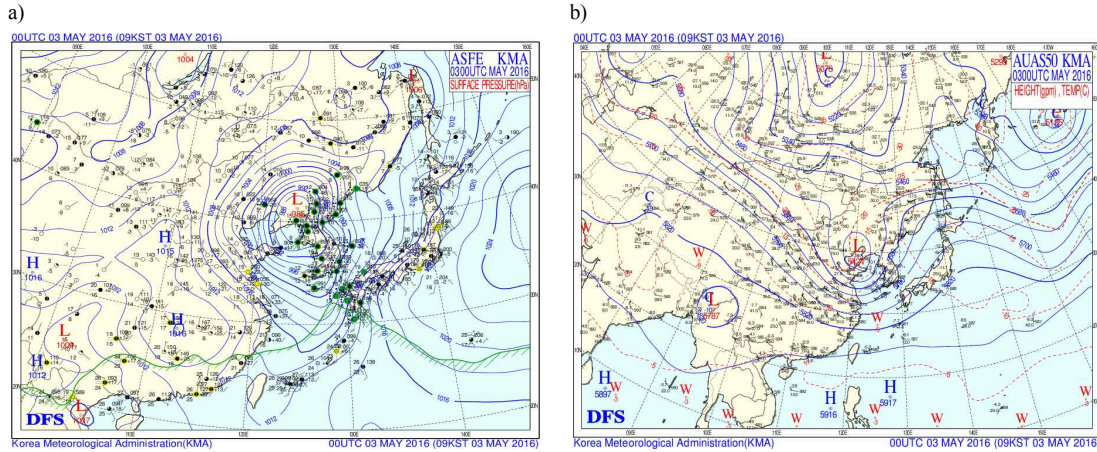


Fig. 1. Synoptic charts provided by KMA at a) surface and b) 500 hPa height at 0900LST 3 May 2016.

강하게 형성되어 있다. 그리고 지상에는 상층 기압골의 오른쪽에 세력이 매우 강한 저기압이 있으며 일본열도 동쪽에 고기압이 위치해있다. 따라서, 저기압의 반시계 방향과 고기압의 시계 방향의 기압 배치 흐름에 따라 동중국해에서 온난 습윤한 공기가 한반도 남동쪽으로 유입되고 있다. 850 hPa에서의 유선, 등풍속도를 분석한 결과 한반도에 12.5 m/s를 초과하는 바람이 발생했음을 확인하였으며, 한반도 남동쪽 해안 부근에 25 m/s의 더 강한 풍속을 가진 바람이 불고 있음을 알 수 있었다. 즉, 한반도 전역에 강한 세력의 저기압과 한반도 남동 지역에 나타난 강한 하층제트는 부산 지역에 강한 강수가 발생할 가능성이 있는 종관환경을 나타낸다.

부산 지역의 지형은 낮은 산악이 복잡하게 나타난다. 부산의 북동쪽에 위치한 양산지역은 영남 알프스라 불리는 고도 1 km 이상의 높은 산악이 위치하지만, 부산 지역은 대부분 고도 400~800 m의 비교적 높지 않은 구릉성 산지가 많이 분포한다. 많은 산악 중 금정산은 부산 지역에서 가장 높은 산으로 801 m의 높이를 가지고 있다. 또한 남서-북동 방향의 낮은 골짜기가 부산 지역 중심을 통과하는 구조를 가진다. 따라서 상대적으로 높은 금정산이 위치한 금정구 주변 지역은 강수가 발생하였을 때 지형 상승에 따른 강수 강화 효과를 받을 가능성이 높다.

Fig. 2는 본 연구에서 사용한 수치 모델 영역과 지형 그리고 부산 유인 기상 관측 지점(■) 및 AWS 분석 지점(★)을 나타낸 것이다. 금정산(▲)을 중심으로 한 사각형

은 연직 분석에 사용된 영역을 의미한다. 그리고 분석에 적용한 양산지역 모델지점(●)을 나타낸다. 앞서 설명한 바와 같이 부산 서부 지역은 금정산이 남서-북동으로 자리하고 있으며, 중간에 낮은 골짜기 지형을 이룬다. 연구 대상일 종관 형태와 지형적 특성에 따른 골짜기 지역의 강수 특성을 분석하였다.

Fig. 3은 연구 대상일인 2016년 5월 3일 0900LST의 구덕산 레이더에서 관측한 CAPPI (Constant Altitude Plan Position Indicator) 영상이다. 한반도 동부 해안 지역에 강한 강수가 나타나고 있으며, 부산 지역에서는 금정산을 중심으로 한 산악 지역에 강수가 집중된 것을 볼 수 있다. 해당 사례 일에 최대 풍속은 19.3 m/s로 강한 바람이 불어 강풍 경보가 내렸고, 한반도 전역에 하층제트가 발생하였다. 또한 경상남도 해안지역을 따라서 지속적인 강수가 나타났으며, 한반도 남동 해상에서도 강한 강수대가 보인다. 따라서 2016년 5월 3일 부산에 집중호우가 발생한 날에 가장 높은 산이 존재하는 금정구 주변 일대의 국지적인 강수량은 산악과 한반도 남부의 하층제트와 관련성이 있음을 유추할 수 있다.

2.2. 수치 모델 설정

본 연구에서는 지형과 하층제트의 변화가 강수에 미치는 영향을 알아보기 위해서 수치실험을 실시하였다. 실험에 사용된 중규모 기상 수치 해석 모델은 WRF (Weather Research and Forecasting) 이다. WRF 모델은 현재 한국을 비롯한 많은 나라의 현업 모델로 사용되는 3차원

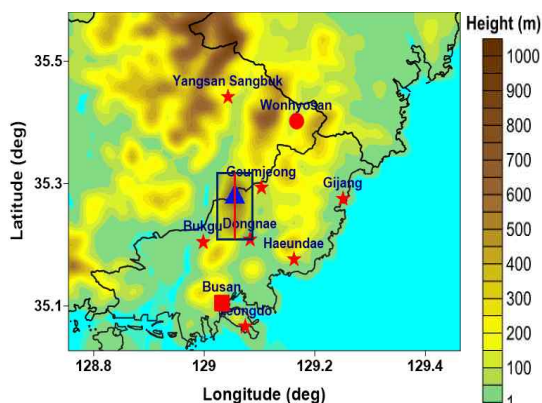


Fig. 2. Topography of Busan and the location of observation and model station. (red star: AWS station, red square: ASOS station, red circle: model station, blue triangle: Mt. Geumjeong, blue square: modified terrain, red line: vertical cross-section line).

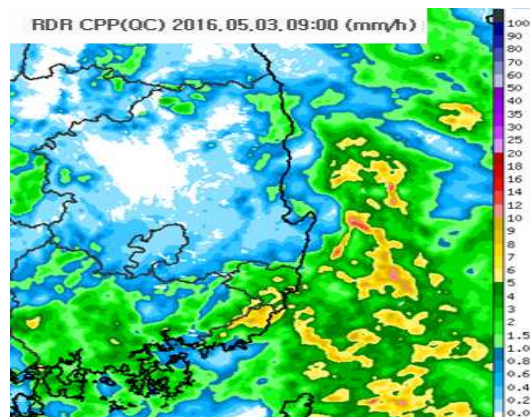


Fig. 3. The radar image of CAPPI for 0900LST on May 3, 2016, provided by Korea Meteorological Administration.

Table 1. WRF model configuration

Base	Domain			
	D01	D02	D03	D03 - Case_LLJ
Date	2016.5.1.00LST ~ 2016.5.4.00LST			
Horizontal grid	211×175	154×154	124×124	136×130
Resolution	9 km	3 km	1 km	1 km
Physical process	WSM 6-class graupel scheme			
	Kain-Fritsch (new Eta) scheme			
	YSU scheme			
	RRTMG scheme			
Initial data	Dudhia scheme			
	NCEP FNL Operational Global Analysis data			
SST data	RTG SST data			

대기 역학 수치 모델이다. Table 1은 연구에 적용된 WRF 모델 격자 및 물리 옵션 설정을 나타낸 것이다. 도메인은 총 3개의 도메인을 사용하였고 각 도메인의 격자 수는 첫 번째 도메인은 211×175, 두 번째 도메인은 154×154, 마지막 도메인은 124×124이다. 수평격자 해상도는 각각 9 km, 3 km, 1 km로 하였다. 본 연구에서는 부산 지역의 상세 강수 형태를 파악하기 위하여 최고 해상도를 가진 세 번째 도메인의 결과를 바탕으로 분석하였다. Fig. 4는 모델 도메인과 분석에 사용된 세 번째

도메인에 대한 지형을 나타낸 것이다. Fig. 4(a)는 WRF 모델 도메인 영역을 나타낸 것이며 Fig. 4(b)는 마지막 도메인에 대한 지형을 나타낸 것으로 해당 영역에 분포한 자동 기상 관측 지점의 자료들은 모델 검증에 위해 사용되었다. 지형은 앞서 설명한 바와 같이 연구 대상인 금정산(▲)을 중심으로 낮은 산악이 남서-북동으로 나타나며, 북쪽 양산 지역에 높은 산악이 위치하고 있다.

계산에 적용된 물리 옵션에는 미물리 과정은 WRF single-moment six-class scheme을 사용하였고, 적운

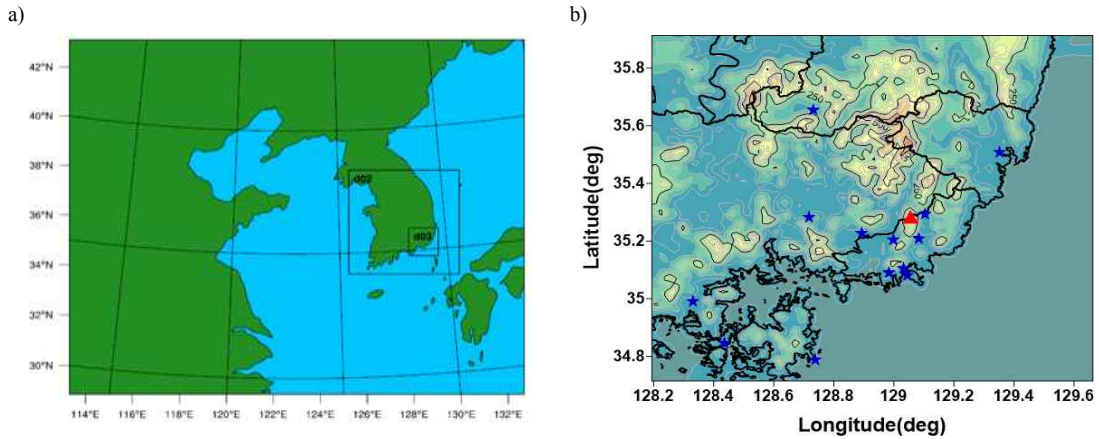


Fig. 4. The domain area of WRF model used in this study. a) domain of WRF model, b) 3rd domain (triangle: Mt. Geumjeong, star: observation station).

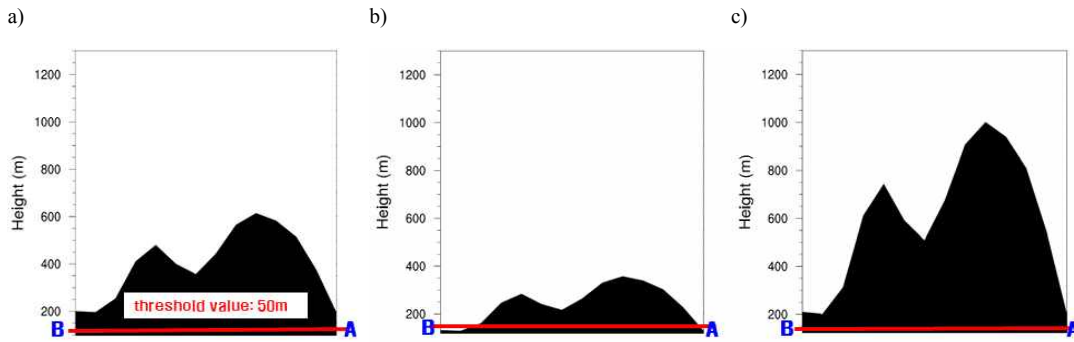


Fig. 5. The vertical cross-section of terrain height from the actual(a), reduced(b) and increased(c) mountain.

대류는 Kain-Fritch (new Eta) scheme, 경계층 모수화는 YSU (Yonsei University scheme) scheme을 적용하였다. 초기 및 경계 입력장은 6시간의 시간 해상도와 1°×1°의 공간 해상도를 가지는 NCEP FNL (Final) Operational global analysis data를 사용하였다. 해안 지역에서는 해수면 온도가 강수에 영향을 미친다는 선행 연구(Rebora et al., 2013)를 기반으로 RTG SST (Real-Time Global Sea Surface Temperature) 해수면 온도 자료를 사용하였다.

2.3. 실험 설계

본 연구에서는 지형과 하층제트가 강수에 미치는 영향을 알아보기 위해서 민감도 실험을 진행하였다. 기존

의 연구는 대부분 고도 1 km 이상의 높은 산악을 중심으로 이루어졌다면 본 연구는 모델 고도 600 m 정도의 상대적으로 낮은 산악과 하층제트의 위치 변화에 따른 강수량 영향에 주목하였다.

지형 높이 변화 실험은 금정산의 높이가 변화했을 때의 강수 변화를 보기 위한 실험이므로 해당 연구에서 지형의 높이 변화 범위는 금정산을 중심으로 Fig. 2 중앙의 사각형 영역을 대상으로 하였고 실제 지형을 Base, 금정산의 높이를 낮춘 실험을 M_Down, 높은 실험을 M_Up으로 정하였다. 그리고 산의 높이를 조절할 때는 지형을 변화시킬 대상 지역의 임계값을 50 m로 정하여 그보다 높은 지형에 대해서만 임계값 초과 높이의 50%를 바꾸었다. 그 결과 실제 지형 614 m에서 357 m(M_Down),

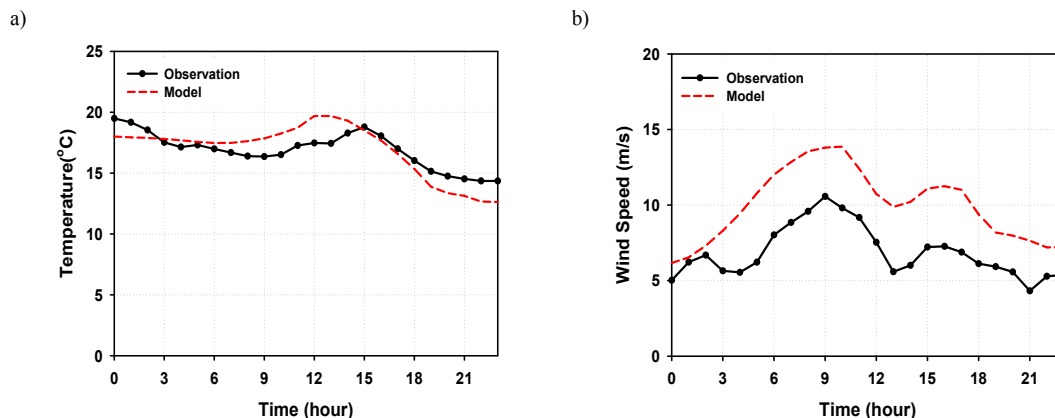


Fig. 6. The time series of temperature(a) and wind speed(b) on May 3, 2016.

Table 2. The statistics of observation and simulated values

	Temperature	Wind Speed
Mean (Obs.)	16.9 °C	6.85 m/s
RMSE	1.25 °C	3.31 m/s
IOA	0.87	0.61

1020 m(M_Up)로 산 정상 높이가 변형되었다(Fig. 5).

하층 제트의 중심 위치 변화에 따른 영향을 분석하기 위한 수치 실험도 실행되었다. 기존의 선행 연구에서의 하층제트는 700~850 hPa 부근에서 풍속이 최대 풍속이 나타나며 그 풍속이 12.5 m/s를 초과하는 바람이라고 정의한다.(Park et al., 2003; Chakraborty et al., 2009).

하층제트 위치를 변경하는 실험은 실제 기상장을 옮기는 것이 동지 격자의 경계 문제로 복잡하기 때문에 단순히 지형을 옮기는 방법을 선택하여 하층제트가 집중호우에 미치는 영향에 대해 분석해 보았다. 본 사례의 경우 하층제트가 부산의 해안에 위치하는데 지형을 옮기게 되면 도메인의 가장자리로 금정산이 옮겨지게 된다. 하층제트 실험에서는 도메인 3의 수평 격자를 124×124에서 136×130으로 넓혀서 진행하였다(Table 1). 하층제트가 산과 멀리 떨어져 있는 실제 상태를 Base, 지형을 동쪽으로 30 km 옮겨 하층제트가 금정산의 부근에 근접하게 위치하도록 설정한 실험을 Case_LLJ로 정하여 두 개의 실험에 대해 풍속, 수렴 및 발산, 강수량 등을 분석해 보았다.

3. 결과

3.1. 수치모델 결과 검증

대기 역학 수치모델의 정확도를 파악하기 위해 Fig. 4 (b)에 표시된 13개의 자동기상관측 지점의 관측 자료를 이용하여 모델 검증을 진행하였다. 모델 검증은 연구 대상 지역 내 13개 지점의 관측 자료를 통계 분석하여 제시하였다. 통계 분석 요소는 평균, 표준편차 그리고 IOA이다. 특히 IOA는 관측값과 계산치의 시간적인 발생 일치성을 제시하는 값으로 수치모델 결과 검증에 유용하게 사용된다. 기온, 풍속, 강수의 평균 관측값과 모델값의 시계열을 비교하여 Fig. 6에 나타냈고, 통계 분석 결과를 Table 2에 나타냈다.

먼저 기온의 경우 관측값과 모델값이 큰 일변화를 가지지 않지만 전체적으로 변화추이는 일치하고 있다. 그러나 저녁 18시부터 새벽 3시까지는 모델이 과소모의하고 있고 오전 6시부터 오후 15시에는 모델이 과대모의하는 경향을 보였지만 그 차이는 크지 않다(Fig. 6 (a)). 이는 통계 자료에서도 잘 나타나는데, 기온의 IOA는 0.87로 매우 높은 일치성을 보여준다. 반면 풍속의 경우 모델의

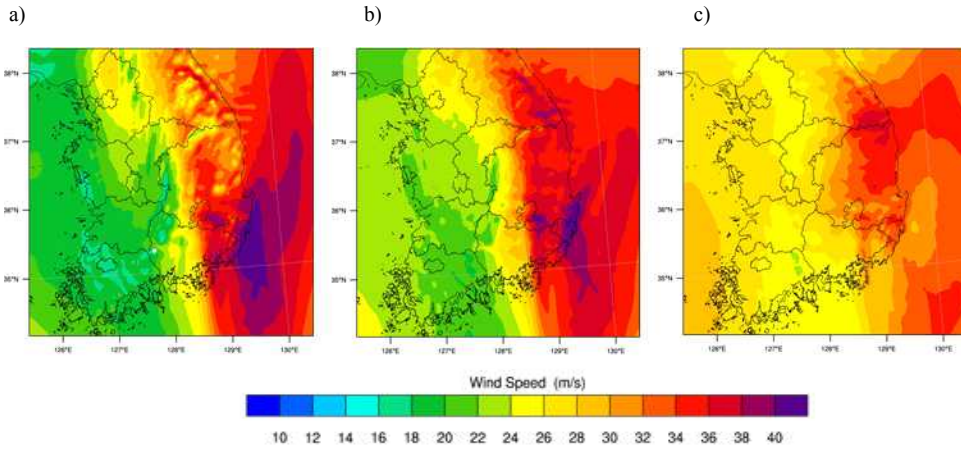


Fig. 7. The horizontal wind speed fields of upper wind at 1000LST (a: 850 hPa, b: 800 hPa, c: 700 hPa).

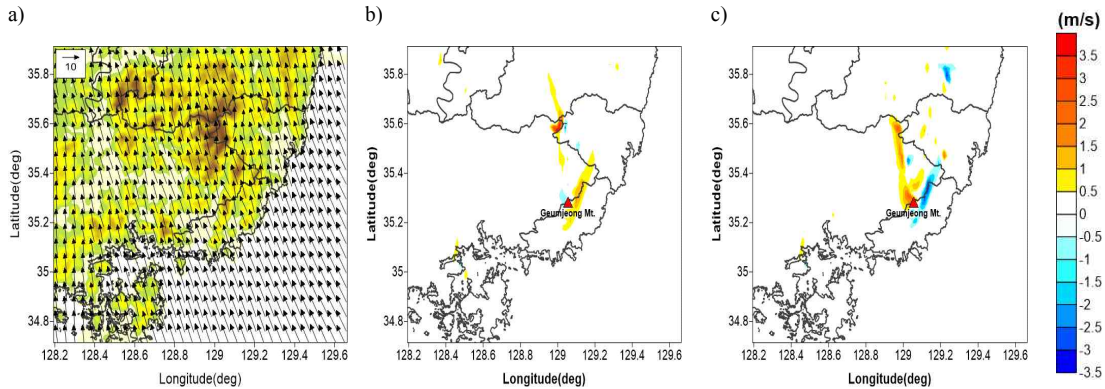


Fig. 8. The horizontal wind vector field(a) and the differences of wind speed between M_Down and Base(b), between M_Up and Base(c) at 1000LST.

RMSE (Root Mean Square Error)값이 3.31 m/s로 과대모의하고 있다. 그러나 풍속의 패턴은 관측과 유사하게 나타나고 있음을 확인할 수 있다(Table 2, Fig. 6 (b)). 모델 검증 통계 결과는 풍속의 IOA가 0.61로 제시되었다. 일반적인 수치모의에서 기온보다 풍속의 재현성이 떨어지고, 강수를 동반한 중관장에서 잠열 방출과 관련된 바람 예측의 어려움을 감안하면 충분히 타당한 수치라고 판단된다. 또한 지형적으로 매우 복잡한 해안에서의 관측 자료와의 비교라는 측면에서 Table 2에 제시된 값들은 수치모델의 정확성을 나타내는데 충분하다고 판단된다.

다음으로 지점별 강수량에 대해 관측값과 모델값을

비교하였다. 강수량은 부산의 자동기상관측지점 중 부산 기상대, 금정구, 동래, 해운대 지점에 대해서 살펴보았다 (Fig. 2). 관측값과 모델값을 비교해 본 결과 모든 지점에서 모델이 과소모의하였으며 최대 강수 시간대가 관측보다 1~2시간 정도 늦게 나타났다. 선행 연구들을 살펴보면 일반적으로 수치모델이 강수를 과소모의하는 사실을 알 수 있으며 모델의 경우 구름을 모수화하는데 있어서 불확실성을 가지고 있으므로 강수가 관측값보다 낮게 나타난다(Lowrey and Yang, 2008). 그렇지만 강수 최대 지점이 나타나는 패턴은 관측과 유사하게 나타났으며 강수 시작 시간과 끝나는 시간이 일치하였다. 따라서 앞에서 실시한 기온과 풍속의 모델 검증 수치가 높다는 것을

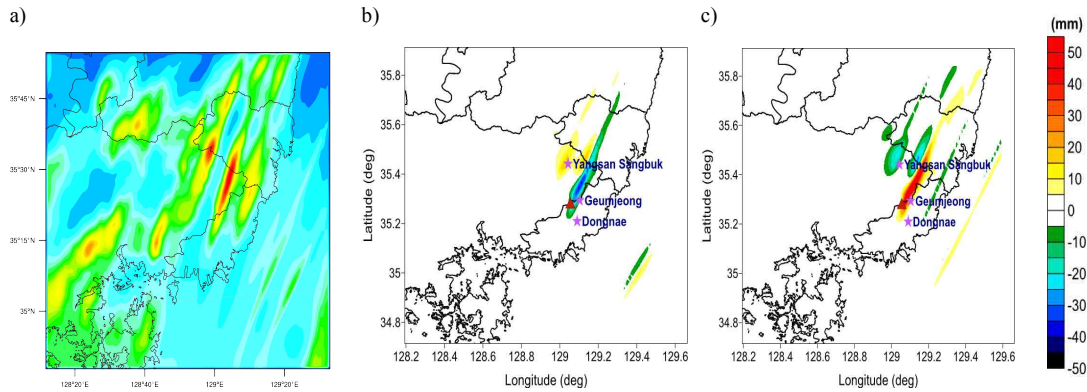


Fig. 9. The distribution of accumulative rainfall estimated by case Base(a) on May 3, 2016 and its differences of b) case Base and M_Down, and c) case Base and M_Up.

고려한다면 강수 또한 모델 검증에 있어 어느 정도 정확성을 가지고 있다고 생각할 수 있다.

사례일의 기상조건으로 모의하였을 때 수치모델에서도 하층제트가 나타나는지 확인하기 위해서 고도별 풍속 수평 분포를 분석해 보았다. Fig. 7은 모델상에서 강수가 최대로 발생한 1000LST의 850 hPa, 800 hPa, 700 hPa에서 나타난 풍속 수평 분포이다. 고도별 풍속 분포를 보면 전체적으로 고도가 증가하면서 풍속이 증가하고 있다. 그러나 한반도 남동 해안의 풍속이 35 m/s 이상인 고풍속 지역의 경우 고도가 높아질수록 풍속이 느려지는 것을 볼 수 있다. 따라서 수치모의를 하여 얻은 결과에서 하층제트가 발생함을 확인할 수 있다. 하층제트는 한반도 남동 해안 지역에 남북으로 분포하고 있으며 특히 부산 지역의 850 hPa 상공에서는 40 m/s를 초과하는 강한 하층제트가 강수 사례일에 존재하고 있다. 이러한 강한 하층제트는 지상 바람의 수렴에 중요한 역할을 할 것으로 판단된다.

3.2. 낮은 산악에 의한 영향 분석

수치 실험을 통하여 복잡한 지형 분포를 가진 한반도 남동 지역의 낮은 산악과 850 hPa 고도에서 발생한 강한 하층제트 위치 변화가 국지적인 강수에 미치는 영향을 살펴보았다.

먼저 Fig. 5에서 제시한 지형 높이와 같이 금정산의 고도를 변형시켰을 때의 결과를 살펴보았다. Fig. 8은 2016년 5월 3일 1000LST의 Base 실험의 바람장과 산

높이를 변화시킨 사례와의 풍속 차이를 나타낸 것이다. 1000LST 이전에는 남풍에 가까운 바람이 불고 1000LST가 되면서 강한 남동풍이 불게 되면서 산의 측면을 돌아가는 바람이 약하게 나타난다(Fig. 8). M_Down과 Base 실험의 풍속 차이를 보면 산 높이가 낮아지면서 산에 의한 저지효과가 줄어들기 때문에 풍상측에서 풍속이 빨라지고 풍하측에서 풍속이 느려지는 현상을 확인할 수 있다(Fig. 8 (b)). 반대로 지형을 높인 M_Up 실험의 경우 풍상측에서 풍속이 느려지고 풍하측에서 풍속이 빨라졌음을 확인할 수 있다(Fig. 8 (c)). 이는 남동쪽에서 불어오는 바람이 북동-남서로 뻗어 있는 금정산에 수직으로 부딪혀 풍상측에서 저지효과가 증가하기 때문이라고 생각되며 풍하측에서는 금정산을 돌아가는 바람이 후면에서 수렴하여 풍속이 빨라지게 되는 것으로 판단된다. 특징적인 것은 풍상측의 풍속저지(M_Up 실험) 및 강화(M_Down 실험)가 금정산 뿐 아니라 주변의 북동-남서 방향의 골짜기 지형을 따라 나타난다는 점이다. 이는 독립적인 산악 지역의 바람 변화가 주변으로 옮겨갈 수 있음을 의미한다. 따라서 비록 낮은 지형이라 하여도 주변 지역과 상호 관련되어 바람장이 변화할 수 있고 이들 바람장은 광범위한 지역의 강수 변화를 유도할 수 있다.

Fig. 9는 Base 실험에서 산출된 일 누적 강수량과 지형을 변화시킨 사례와의 차이를 나타낸 것이다. 강수량의 경우 0700LST부터 점점 많아져 1000LST에 가장 많은 강수가 발생하였으며 사례별 차이도 뚜렷하게 나타났다. M_Down 실험의 경우에는 풍상측에서 강수가 최대

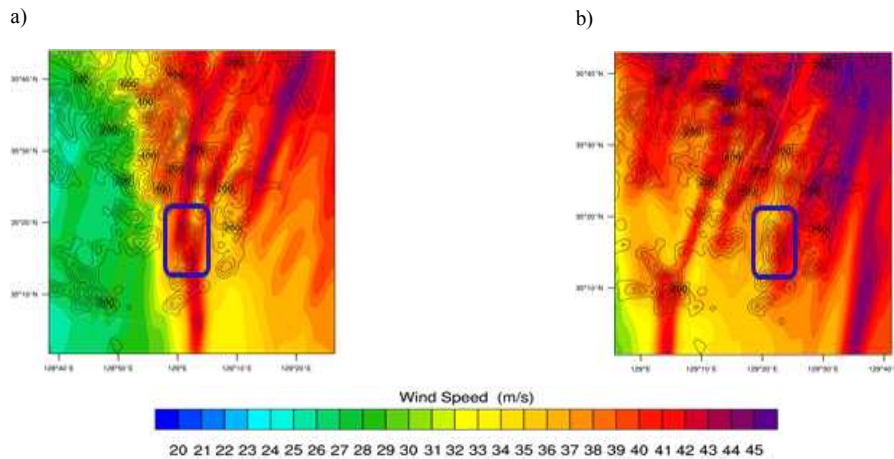


Fig. 10. The distributions of wind speed on a) Base experiment and b) Case_LLJ experiment at 800 hPa height on 1100LST and blue square indicates Mt. Geumjeong area.

약 40 mm 감소하였고, 풍하측에서 강수가 15 mm 증가하였다(Fig. 9b). 이는 지형을 낮추었을 때 풍상측에서 저지효과가 줄어들어 풍속이 빨라지고 지형에 의한 강제력 또한 줄어들기 때문인 것으로 판단된다. 또한 이러한 영향은 지형을 변화시킨 지역 뿐 아니라 전체적인 지형을 따라 북동쪽으로 길게 나타나고 있다.

반면 M_Up 실험에서는 금정산을 기준으로 강수가 풍상측에서 최대 50 mm 정도 증가하였고 풍하측에서 25 mm 감소하였음을 확인할 수 있다(Fig. 9c). 지형을 높였을 경우에 Fig. 8에서 보았듯이 풍상측에서 풍속이 느려졌고 이와 더불어 산에 의한 강제력이 증가하였으므로 풍상측에 강수가 증가한 것으로 보인다. 그리고 수증기의 총량은 보존되기 때문에 풍상측 강수 증가의 영향을 받아 풍하측에서는 강수가 감소한 것으로 해석된다. 따라서 복잡한 지형 내의 높이 낮은 산악의 존재는 바람의 공간 분포 뿐 아니라 강수량의 공간 분포에도 영향을 미칠 수 있다. 또한 지형 변화의 영향이 그 지역 뿐 아니라 주변 지역까지 광범위하게 나타날 수 있다.

3.3. 하층제트의 변화에 따른 영향 분석

하층제트는 하층 대기의 수렴에 영향을 미치기 때문에 이들의 위치 변화는 강수량 변위에 중요한 요인으로 작용한다. 하층제트의 변화에 따른 강수량 변화를 수치 실험을 통하여 분석하였다. 먼저 하층제트의 위치에 따른 금정산 상공의 풍속 변화를 분석하였다.

Fig. 10은 강수가 가장 활발한 1100LST의 a) Base 실험과 b) Case_LLJ 실험에서 산출된 800 hPa의 풍속 분포를 나타낸 것이다. 하층제트의 풍속은 1000LST부터 서서히 강화되어 1100LST에 최대로 나타난다. 1000LST에는 두 실험 모두 850 hPa에서 하층제트가 발생하였고 고도에 따른 풍속 차이가 크지 않았다. 하지만 1100LST 되면서 두 실험 사이에 차이점이 나타났다. Base 실험의 경우 하층제트가 발생한 부분이 금정산에서 50 km 이상 떨어진 동쪽 해안에 위치한다. 그러므로 하층제트에 작용하는 산악에 의한 마찰 강제력이 Case_LLJ 보다 크게 나타나지 않고 풍하측으로 풍속이 유지 또는 강화하는 역할을 한다. 반면 Case_LLJ 실험의 경우에는 하층제트 지역이 금정산 근처에 넓게 분포해 있으나, 850 hPa 고도의 금정산 풍하측에서 약한 풍속대가 나타난다. 이것은 금정산에 의한 마찰 강제력이 하층제트에 영향을 줄 수 있음을 의미한다. 즉 하층제트의 위치에 따라 금정산 주변의 풍속 분포가 변화할 수 있음을 알 수 있다. 이 경우 하층제트의 코어가 나타나는 고도가 높아질 수 있다.

이러한 지형에 따른 하층제트의 풍속 변화는 강수량에도 영향을 미친다. 강수 특성의 변화를 보기 위해서 고도에 따른 시간별 수증기의 수렴·발산도와 시간에 따른 강수 분포를 분석하였다. Fig. 11은 1100LST의 Base 실험과 Case_LLJ 실험에 대해서 고도에 따른 수증기의

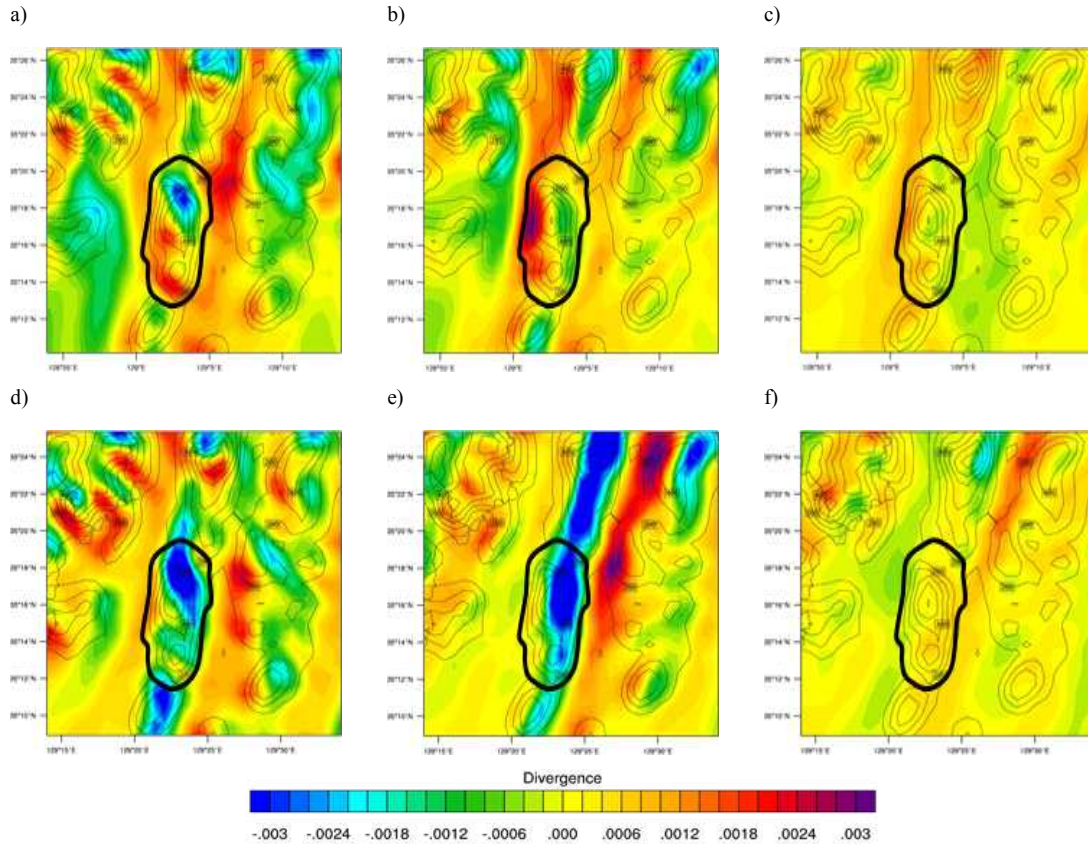


Fig. 11. The distributions of convergence and divergence according to altitude on Base experiment(a, b, c) and Case_LLJ experiment(d, e, f) at 1100LST (a, d: 850 hPa. b, e: 800 hPa, c, f: 700 hPa, black lines: terrain height, shaded: convergence(-) and divergence(+), thick black lines: Mt. Geumjeong).

수렴·발산을 나타낸 것이다. 1000LST부터 하층제트가 강화되면서 Case별 차이가 뚜렷하게 나타나기 시작하며 두 실험 모두 금정산 근처에 수렴이 발생한다. 그러나 Base 실험의 경우 금정산 후면에 약하게 나타나지만, 금정산 오른쪽에 하층제트가 위치한 Case_LLJ 실험에서는 금정산 후면에 수렴이 강하게 나타난다. 이러한 특성은 850 hPa 고도에서 더욱 뚜렷한데, Base 실험에서는 금정산 후면의 수렴이 뚜렷하지 않지만 Case_LLJ 실험에서는 지형을 따라 강한 수렴대가 나타난다. 이는 앞서 설명한 바와 같이 넓은 하층 제트의 마찰로 강한 수렴이 나타난 것으로 판단된다. 따라서 하층 수렴대가 위치한 경우 금정산 지역은 마찰에 따른 수렴 강도가 강해지는 것을 알 수 있다. 반면 700 hPa에서는 두 사례의 차이가

크지 않고 수렴·발산이 뚜렷하지 않다. 이것은 하층제트에 의한 영향이 700 hPa의 하층에 집중된다는 것을 의미한다.

하층제트의 위치에 따라 수증기의 수렴 및 발산이 달라졌고 이러한 영향은 강수 분포의 특징에 그대로 반영된다. Fig. 12는 1100LST의 강수 분포와 Case별 강수량 차이에 대하여 나타낸 것이다. 시간에 따른 강수 분포를 분석해보면 1000LST에 Base 실험에서는 하층제트가 금정산 북동쪽에 멀리 떨어져 위치하고, Case_LLJ 실험에서는 하층제트가 금정산 동쪽에 가까이 있다. 따라서 금정산 북쪽에 위치한 원효산에서는 Base 실험에서 약 20 mm 더 많은 강수가 발생하였지만 금정산 오른쪽 부근과 남쪽에서는 Case_LLJ 실험이 최대 10 mm

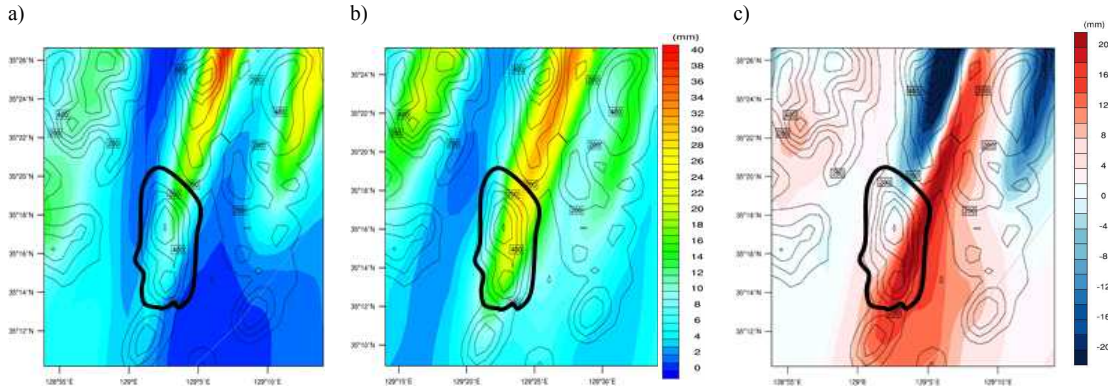


Fig. 12. The distributions of rainfall (a: Base, b: Case_LLJ, black lines: terrain height, shaded: rainfall, thick black lines: Mt. Geumjeong) and the difference of rainfall between Base and Case_LLJ at 1100LST(c).

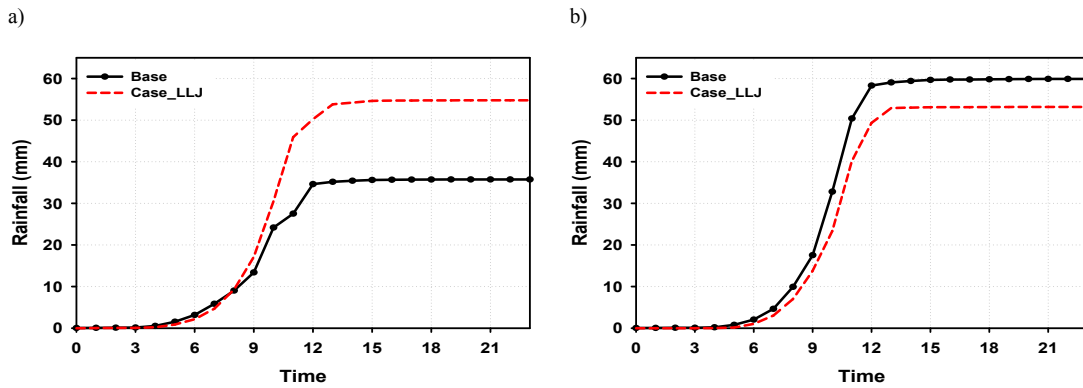


Fig. 13. The time series of accumulative rainfall on May 3, 2016 (a: Geumjeong, b: Wonhyosan).

정도 많은 비가 발생하였다. 1100LST가 되면서 Base 실험에서는 하층제트가 더 북동쪽으로 이동하여 금정산과 더욱 멀어진 반면, Case_LLJ 실험에서는 하층제트가 더 강해지고 금정산에 가까이 위치해 있다. 따라서 Case_LLJ 실험에서는 1000LST 보다 더 많은 강수가 발생하였고(Fig. 12 (b)), 특히 금정산 부근에서 Base 실험보다 약 20 mm 많은 강수가 발생하였음을 확인할 수 있다.(Fig. 12 (c)).

금정산 주변의 하층제트로 인한 수렴, 발산이 강수에 미치는 영향을 보다 자세히 분석해 보기 위해서 수렴과 발산이 일어난 지점을 선택하여 시간별 강수량과 일 누적 강수량을 살펴보았다. 지점은 수렴이 발생한 금정구와 모델 결과에서 발산이 강하게 나타난 구역을 선택하여 원효산 지점이라고 하였다. Fig. 13은 두 지점에 대한

일 누적 강수량의 시계열을 나타낸 것이다. 두 지점에서 일 누적 강수량을 살펴본 결과 금정구는 하층제트를 금정산 가까이로 옮긴 Case_LLJ 실험에서 강수량이 많이 증가하였고 원효산 지점의 경우에는 Base 실험에서 조금 더 많은 강수가 발생하였음을 확인할 수 있었다. 금정구(Fig. 13 (a))의 경우 일 누적 강수량을 보면 Case_LLJ 실험이 Base 실험보다 강수량이 약 20 mm 더 많이 내렸다. 그러나 원효산 지점(Fig. 13c)의 경우에는 금정구 지점과는 반대로 Base 실험에서 강수량이 약 10 mm 정도 더 많았다.

본 연구에서는 지형의 높이 변화와 하층제트 위치가 집중호우에 미치는 영향을 보기 위해서 수치 실험을 실시하였다. 실험 결과 지형의 높이가 변하였을 때 산의 저지효과로 인해 풍속 차가 사례별로 풍상, 풍하측에 다르게

나타났으며 이와 더불어 산의 강제력이 작용하여 각 사례별 강수량 차이가 발생하였다. 또한 하층제트 위치 변화 실험에서는 하층제트가 지형이 있는 곳에 발생하였을 때에는 지형의 마찰로 인해 해안에서 발생한 제트보다 상층에서 코어가 발생한다는 사실과 하층제트의 위치 변화가 수증기의 수렴 및 발산과 강수량에 큰 영향을 미친다는 결과를 확인할 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 장마 기간과 태풍 발생일을 제외한 집중호우 발생일 중 2016년 5월 3일을 사례일로 정하여 부산 지역 증가장 비가 많이 내린 금정구 주변을 대상으로 국지성 강수의 원인 및 지형과 하층제트가 집중호우에 미치는 영향을 알아보기 위해서 기상 수치 해석 모델인 WRF를 사용하여 수치 실험을 진행하였다.

비교적 낮은 높이를 가진 금정산의 지형을 높은 경우 풍상측에서 산악 저지효과와 지형 강제력이 증가하여 풍속이 느려지고 강수는 증가함을 확인할 수 있었으며 풍하측에서는 풍속이 약간 빨라지고, 수증기의 총량이 보존되기 때문에 강수가 줄어들었다. 지형을 낮춘 경우에는 이와 반대의 결과가 나타났다. 비록 높이는 높지 않으나 지형의 높이 변화는 풍속과 강수량에 영향을 주었으며, 복잡 지형의 경우 산이 존재하는 지역뿐 아니라 그 주변 지역까지 넓게 영향을 미친다는 사실을 확인하였다.

하층제트의 위치를 변경하는 실험에서는 Case_LLJ 실험의 경우 하층제트가 지형에 의한 마찰 영향을 받아 하층제트 코어가 850 hPa에서 800 hPa로 높아졌다. 또한 하층제트 위치는 수증기의 수렴, 발산과 강수 분포에도 영향을 미쳤다. 하층제트가 강하게 발달하였을 때 Base 실험에서는 금정산과 하층제트가 멀리 떨어져 있어서 수렴이 거의 발생하지 않아 금정산에 강수가 많이 내리지 않았다. 하지만 Case_LLJ 실험에서는 하층제트가 금정산 바로 동쪽에 근접해 있기 때문에 금정산 주변으로 수증기의 수렴이 강하게 발생하였고 그로 인해서 금정산 주변에 강수가 Base 실험보다 약 20 mm 더 많이 기록되었다.

하층제트로 인해 발생한 수증기의 수렴과 발산이 강수에 미치는 영향을 보기 위해서 수렴, 발산이 일어난 지점을 정하여 강수량에 대해 비교해 보았다. 그 결과 수증

기 수렴 지역에 위치해 있던 금정구의 경우에는 Case_LLJ 실험에서 강수량이 20 mm 상승하였다. 하지만 수증기가 강하게 발산하는 지역에 위치한 원효산 지점은 반대로 Base 실험에서 강수량이 약 10 mm 많이 기록되었다. 따라서 하층제트의 위치를 옮긴 민감도 실험을 통하여 하층제트가 지형 위에 존재하면 마찰의 영향을 받기 때문에 하층제트 코어가 더 높아진다는 사실을 알 수 있었다. 또한 하층제트가 산의 동쪽에 가깝게 나타났을 때 그 주변으로 수증기 수렴이 증가하고 그로 인해 산과 근접해 있는 지역에서 강수가 증가하였음을 확인하였다.

본 연구에서는 지형과 하층제트가 강수에 미치는 영향을 알아보기 위해 수치 실험을 진행하였다. 지형의 높이를 변화시키고 하층제트의 위치를 옮기는 두 가지의 실험을 통하여 고도 1 km 이내의 소규모 산악과 하층제트의 위치가 강수에 많은 영향을 미친다는 사실을 확인하였고 그 영향은 산이 존재하는 곳뿐만 아니라 산 주변 지역까지 넓게 나타남을 알 수 있었다. 따라서 집중호우에 영향을 미치는 많은 요인들 중에서 산악이 있는 지역에서 하층제트가 산악 가까이에서 발생한다면 그 영향은 더 클 것으로 예상된다.

다만 강수의 경우 모델이 구름을 모수화하는데 불확실성을 가지고 있기 때문에 통상 관측값보다 과소모의하고, 이와 더불어 수치 모델을 이용하여 지형을 모의할 때 지형 자료의 해상도 문제로 인해 모델에서 금정산의 높이가 실제보다 낮게 나타났다. 따라서 모델의 불확실성 개선 및 향상된 구름 모수화 방안이 마련되고 더 높은 해상도의 지형 자료를 사용한다면 강수를 모의하는데 있어서 더 높은 정확도를 가지게 될 것으로 생각된다.

감사의 글

본 연구는 부산녹색환경지원센터의 지원으로 이루어졌습니다.

REFERENCES

- Chakraborty, A., Nanjundiah, R. S., Srinivasan, J., 2009, Impact of African orography and the Indian summer monsoon on the low-level Somali jet, *Int. J. Climatol.*, 29, 983-992.
- Chen, C. S., Lin, Y. L., Peng, W. C., Liu., C. L., 2010,

- Investigation of a heavy rainfall event over southwestern Taiwan associated with a subsynoptic cyclone during the 2003 Mei-Yu season, *Atmos. Res.*, 95(2-3), 235-254.
- Flesch, T. K., Reuter, G. W., 2012, WRF model simulation of two Alberta flooding events and the impact of topography, *J. Hydrometeor.*, 13(2), 695-708.
- Hong, S. Y., Lee, J. W., 2009, Assessment of the WRF model in reproducing a flash-flood heavy rainfall event over Korea, *Atmos. Res.*, 93(4), 818-831.
- Hwang, S. O., Lee, D. K., 1993, A Study on the relationship between heavy rainfalls and associated low-level jets in the Korean Peninsula, *J. Korean Meteor. Soc.*, 29(2), 133-146.
- Jeong, G. Y., Ryu, C. S., 2008, The synoptic characteristic of heavy rain in South Korea, *J. of the Chosun Natural Science*, 2(1), 89-114.
- Jung, S. P., Kwon, T. Y., Han, S., O., 2014, Thermodynamic characteristics associated with localized torrential rainfall events in the middle west region of Korean Peninsula, *J. Korean Meteor. Soc.*, 24(4), 457-470.
- Kim, A. H., Lee, T. Y., 2016, A Study of a heavy rainfall event in the middle Korean Peninsula in a situation of a synoptic-scale ridge over the Korean Peninsula, *J. Korean Meteor. Soc.*, 26(4), 577-598.
- Kim, S., H., 2014, Topography of Busan. http://busan.grandculture.net/Contents?local=busan&dataType=01&contents_id=GC04213428.
- Lowery, M. R. K., Yang, Z. L., 2008, Multiscale convective overturning in mesoscale convective systems: reconciling observations, simulations, and theory, *Wea. Forecasting*, 23, 1102-1126.
- Park, C. H., 2000, The effect of low-level jet and topography associated with heavy rainfalls occurred over southern Korea, M. A. Dissertation, Pusan University.
- Park, C. H., Lee, H. W., Jung, W. S., 2003, The effects of low-level jet and topography on heavy rainfall near Mt. Jirisan, *J. Korean Meteor. Soc.*, 39(4), 441-458.
- Park, S. U., Kim, S. S., Lim, G. H., 1983, Low level jets associated with severe storms over Korea, *J. Korean Meteor. Soc.*, 19(2), 20-36.
- Rebora, N., Molini, L., Casella, E., Comellas, A., Fiori, E., Pignone, F., Siccardi, F., Silvestro, F., Tanelli, S., Parodi, A., 2013, Extreme rainfall in the Mediterranean: What can we learn from observation?, *J. Hydrometeor.*, 14(3), 906-922.
- Ting, M., Wang, H., 2005, The role of the north American topography on the maintenance of the Great Plains summer low-level jet, *J. Atmos. Sci.*, 63, 1056-1068.
- Wang, D., Zhang, Y., Huang, A., 2013, Climatic features of the south-westerly low-level jet over Southeast China and its association with precipitation over East China, *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, 49(3), 259-270.
- Woo, S., H., Yim, S., Y., Kwon, M., H., Kim, D., J., 2017, Decadal change in rainfall during the changma period in early-2000s, *J. Korean Meteor. Soc.*, 27(3), 345-358.

-
- Graduate student. Da-Eun Chae
Department of Earth Science, The Graduate School Pusan National University
coekdms@pusan.ac.kr
 - Graduate student. Eun-Ji Kim
Department of Earth Science, The Graduate School Pusan National University
eunzeel024@pusan.ac.kr
 - Graduate student. Ji-Seon Kim
Department of Earth Science, The Graduate School Pusan National University
jssk@pusan.ac.kr
 - Professor. Soon-Hwan Lee
Department of Earth Science Education, Pusan National University
withshlee@pusan.ac.kr