

지상과 레이더 자료를 이용한 LAMP 우박 예측 성능의 정성적 검증

이재용¹, 이승재^{1*}, 심교문²

¹국가농림기상센터, ²국립농업과학원 기후변화평가과
(2021년 11월 15일 접수; 2022년 4월 20일 수정; 2022년 4월 26일 수락)

Qualitative Verification of the LAMP Hail Prediction Using Surface and Radar Data

Jae-yong Lee¹, Seung-Jae Lee^{1*}, and Kyo-Moon Shim²

¹National Center for Agro-Meteorology, Seoul, Korea

²National Institute of Agricultural Sciences, Wanju, Korea

(Received November 15, 2021; Revised April 20, 2022; Accepted April 26, 2022)

ABSTRACT

Ice and water droplets rise and fall above the freezing altitude under the effects of strong updrafts and downdrafts, grow into hail, and then fall to the ground in the form of balls or irregular lumps of ice. Although such hail, which occurs in a local area within a short period of time, causes great damage to the agricultural and forestry sector, there is a paucity of domestic research toward predicting hail. The objective of this study was to introduce Land-Atmosphere Modeling Package (LAMP) hail prediction and measure its performance for 50 hail events that occurred from January 2020 to July 2021. In the study period, the frequency of occurrence was high during the spring and during afternoon hours. The average duration of hail was 15 min, and the average diameter of the hail was 1 cm. The results showed that LAMP predicted hail events with a detection rate of 70%. The hail prediction performance of LAMP deteriorated as the hail prediction time increased. The radar reflectivity of actual cases of hail indicated that the average maximum reflectivity was greater than 40 dBZ regardless of altitude. Approximately 50% of the hail events occurred when the reflectivity ranged from 30~50 dBZ. These results can be used to improve the hail prediction performance of LAMP in the future. Improved hail prediction performance through LAMP should lead to reduced economic losses caused by hail in the agricultural and forestry sector through preemptive measures such as net coverings.

Key words: Hail, NCAM-LAMP, Radar reflectivity, Hail prediction performance



* Corresponding Author : Seung-Jae Lee
(sjlee@ncam.kr)

I. 서 론

하늘의 얼음 폭탄이라 불리는 우박은 눈 결정 또는 수적이 강한 상승 기류에 의하여 빙결 고도 이상에서 상승과 하강을 반복하여 얼음덩어리로 성장 후 지상으로 낙하하는 현상을 말한다. 우박은 단기간 내 국지적인 영역에서 발생함에 따라 관측과 예측에 어려움을 겪는 위험 기상 중 하나이다(Snook *et al.*, 2016). 우박 발생은 대기 상층과 하층의 기온 차이가 크게 나타나는 봄과 가을철에 주로 나타난다(Jin *et al.*, 2017). 한반도 내 우박의 직경은 평균 0.6 cm로 보고되었지만(Im *et al.*, 2000), 경우에 따라 직경이 크게 변화할 수 있으며, 최대 10 cm 크기의 우박도 관측된 바 있다.

우박 현상은 다양한 분야에서 피해를 일으키지만 주로 봄과 여름철에 발생 빈도가 높음에 따라 특히 농림업 분야에 되돌릴 수 없는 큰 피해를 입히고 있다. 2017년 5월 말에는 국지적으로 발생한 우박에 의해 농작물 재배지 약 8,000 ha에 달하는 면적에 피해가 발생한 바 있으며, 농업 분야의 우박에 의한 피해(Martius *et al.*, 2018)가 뉴스 등으로 매년 발표되고 있다. 이러한 농작물에 대한 우박 피해 복구 정책으로서 정부의 재해복구비 지원과 보험 회사의 보험금 지급이 있지만, 농작물재해보험에서 일부 농작물을 제외하고는 보험 가입이 저조하여 우박 피해 발생시 결국 농가와 정부가 큰 부담을 안게 되는 구조이다.

우박은 대류운의 급격한 발달 과정에 수반되어 나타나는 경우가 많기 때문에 시공간적인 관측과 예측의 어려움이 존재한다. 미국 해양대기청의 경우, 폭풍예측센터에서 폭풍과 더불어 우박에 대한 확률 분포를 도시하고 대류 전망을 통보한다. 폭풍예측센터에서 우박 예측은 하루 단위로 이틀 예측을 수행하여 통보문과 확률 분포를 도시화하여 제공 중에 있다. 우박 확률은 특정 지점의 반경 40 km 이내에 우박 발생 가능성을 제공하며, 지점 수는 691개를 사용 중에 있다. 중국 기상청의 경우 대류운에 대한 예보를 수행 중이며 이 가운데 우박 발생 가능 지역에 대한 영역을 제공한다. 일본 기상청의 경우 폭우와 침수 등 호우에 대한 예보 자료를 제공하고 있으나, 우박에 관련된 예보는 제공하지 않고 있다. 우리나라 기상청에서는 2019년부터 레이더 우박 자료를 실황 자료로 제공 중이며(KMA, 2019), 총 19곳에서 예보관이 단기예보(오늘, 내일, 모레) 통보문을 통해 도 단위로 우박 발생 유무를 예보하고 있다.

국내에 발생한 우박에 대하여 Im *et al.*(2000)은 우박의 평균 직경은 0.6 cm이고 계절에 따라 직경이 달라지며, 서해안과 남부 내륙 그리고 대관령 부근에서 우박이 주로 관측된다고 보고하였다. Jin *et al.*(2017)은 월별 우박 발생일에서 4월과 11월 우박 발생 빈도가 가장 높았으며, Bulk wind shear와 빙결 고도의 위치에 따라 연간 우박 일수가 달라진다고 보고하였다. 또한 기상청 관측기사와 신문기사 DB를 이용해 우박 발생 빈도와 심각성을 시공간적으로 분석한 Kim *et al.*(2020)은 앞선 분석과 유사하게 봄철과 가을철 우박의 빈도가 가장 높다고 보고하였다. 국내에서 우박에 관련된 연구는 부족하지만 관측에 기반한 우박 발생 조건과 기후 등의 분석을 수행한 일부 연구는 존재한다. 그러나 여전히 우박에 대한 예측과 검증을 시도하고 개선하는 연구는 매우 저조한 실정이며, 수치모델링을 통한 우박 예측 또는 위험 정보 제공을 위한 연구가 필요한 실정이다.

본 연구에서는 국가농림기상센터에서 구축하여 운영 중인 지면대기모델링패키지(LAMP: Land-Atmosphere Modeling Package)의 Weather Research and Forecasting (WRF) 우박 예측 성능을 확인하고자 한다. 우박 예측 성능을 검증하기 위하여 2020년 1월부터 2021년 7월까지 발생한 우박 사례를 조사하고 관측된 우박 정보와의 비교를 통해 LAMP 우박 예측 탐지율 성능을 평가하고자 한다. 추가적으로 우박 사례에 대한 레이더 반사도 자료를 수집하여 LAMP 우박 예측에 사용해진 반사도 문턱값(Threshold value)의 적정성을 검토하고자 한다.

II. 재료 및 방법

2.1. 관측 자료

본 연구에서는 LAMP의 우박 예측 성능을 검증하기 위하여 우박 관련 정보를 수집하였다. 2020년 1월부터 2021년 7월까지의 기상청 관측기사란 자료를 수집하고 이 가운데 우박 사례를 추출하였다. 기상청 관측기사란 자료는 목측과 신문기사 자료를 병합한 자료이며 목측 지점에서 발생한 기상 현상 정보와 시작과 종료 시점을 기입하여 제공한다. 이러한 관측기사란 자료를 이용하여 우박(Hail)과 싸락우박(Graupel)이 나타난 사례를 조사하고 우박 사례의 정보를 표로 정리하였다.

앞서 수집한 관측기사란 자료 이외에도 기상청에서

운용하는 S밴드 기상 레이더 자료를 활용하였다. 기상청의 S밴드 레이더는 이중 편파 레이더이며 백령도, 관악산, 오성산, 진도, 고산, 성산, 구덕산, 면봉산, 강릉 그리고 광덕산 지점으로 총 10개소 운용 중에 있으며, 5분 간격으로 관측을 수행 중에 있다. 이러한 각 지점별 레이더 자료에서 우박 사례 기간에 대한 레이더 자료를 수집하였다. 수집된 자료는 5분 간격의 UF (Universal Format) 형식의 레이더 자료와 레이더 강우 강도와 대기 수상체 분류를 수행한 레이더 우박 이미지 자료이다.

2.2. LAMP의 우박 예측 기법

국가농림기상센터(NCAM)에서는 농림축산분야의 기상기후정보 수요자를 위한 맞춤형 서비스를 제공하기 위하여 전용 수치모델링시스템인 LAMP 버전 1을 구축하고 현재까지 운영 중에 있다(Lee et al., 2016). 본 연구에서 이용될 LAMP 자료는 LAMP를 구성하는 한 축인 WRF/Noah-MP 기반 중기기상예측 수치모델이다. 이 모델은 동아시아를 포함하는 어미 도메인에 약 800 m의 최고 수평해상도를 갖는 동지 도메인들로 구성되어 있다. 배포되는 WRF모델에 기본적으로 들어있는 지형고도 및 토지피복 자료 대신에 우리나라 국토교통부의 지형고도 자료와 환경부의 토지피복 자료를 사용하고 농림축산 분야 지원을 용이하게 하기 위하여 Noah 지면모델 대신에 Noah-MP 지면모델을 채택하고 있다. LAMP WRF의 물리과정 등 더욱 상세한 정보에 대해서는 Lee et al.(2016)에 기술되어 있다.

LAMP에서는 농림업 분야에서의 우박에 의해 발생하는 농작물 피해 방지를 위하여 우박 발생 가능 지역

을 예측할 수 있다. LAMP의 우박 예측 기법은 크게 두 가지에 기반을 둔다. 먼저 기상청 예보관들이 사용하는 우박 판단 가이드를 활용해 대기 중층 및 상층의 기온 구조를 파악한다. 기상청의 우박 판단 가이드는 (1) 대기 중층인 500 hPa 기압면의 온도가 -8°C 이하로 낮고, (2) 500 hPa과 400 hPa 두 등압면의 기온 차이가 클 때 우박을 예상하며, 강수가 발생할 것으로 예상되는 지역에 한하여 적용하고 있다. 그 다음으로 Stoelinga et al.(2018)의 레이더 우박 반사도 산출값을 활용한다. (3) 850 hPa에서의 기온과 기압 그리고 대기 수상체의 혼합비를 이용하여 계산된 레이더 반사도가 30 dBZ 이상인지를 파악한다. 여기서 대기 수상체는 각각 수증기(Vapor), 비(Rain), 눈(Snow), 얼음알갱이(Graupel)을 의미하며, 현재 반사도의 문턱값으로 30 dBZ를 설정하고 있다. 이상의 (1)~(3)의 세 조건이 모두 만족하는 경우는 중층에서 한기가 강하게 발달하여 대기 불안정이 크게 증가함에 따라 대류운 발생 가능성이 높고, 계산된 반사도가 30 dBZ 이상으로 해당 지역에 강한 강수 현상이 존재하는 경우를 의미한다. 따라서 이러한 기상 조건을 만족하는 격자점 지역에 우박이 내릴 것으로 예측하고 있다(Table 1).

2.3. 우박 예측 성능의 검증

2.3.1. 우박 예측 탐지율

수치모델을 이용한 강수 현상 예측은 일반적으로 다른 기상 요소에 비하여 정확도가 낮다. 특히 우박의 경우에는 수치 모델이 자체적으로 가지는 불확실성과 미세물리과정에서의 매개 변수화 그리고 대류운의 급격한 발달 모사의 어려움으로 인하여 다른 강수 현상의

Table 1. Variables and thresholds used to predict hail occurrence in the WRF modeling system of NCAM-LAMP. T500 (T400) and R850 mean air temperature at 500 hPa (400 hPa) and radar reflectivity at 850 hPa, respectively. The radar reflectivity is the equivalent reflectivity factor (in dBZ) at each model grid point assuming spherical particles of constant density with an exponential size distribution (see dbzcalc.f in RIP by Stoelinga (2005) for more information).

Variables	Criteria	References	Remarks
T500	$\leq -8^{\circ}\text{C}$	KMA (2012)	Middle atmosphere
T500 - T400	$\geq 6^{\circ}\text{C}$	KMA (2012)	Inflow of cold air in the upper-middle atmosphere, i.e. large temperature change near middle atmosphere
Radar reflectivity at 850 hPa	≥ 30 dBZ	NCAM (this study)	Precipitating area with vertical motions
Surface precipitation	> 0	NCAM (this study)	Hail falling to the ground

비해 예측 정확도가 더욱 낮은 실정이다(Danielsen, 1977; Snook *et al.*, 2016). 이러한 문제점으로 인하여 우박에 대한 예측을 수행한 연구에서는 우박 예측의 정확도를 검사하기 위해 우박 발생 정보를 기반으로 전후 3시간 그리고 최대 100 km 이내의 반경에 우박에 대한 예측이 존재하는 경우 우박 예측에 성공하였다고 보았다(Labriola *et al.*, 2017). 따라서 본 연구에서는 우박 예측의 어려움이 존재함에 따라 우박 발생 위치로부터 반경 100 km 이내, 우박 발생 시점 전후 3시간 이내에 대하여 우박 예측 성능을 확인하였다.

국외 연구에서는 우박에 대한 수치 모델, 레이더, 기계 학습 등 다양한 방법을 이용하여 우박을 예측하고 검증을 수행했다(Marzbán and Witt, 2001; Loftus and Cotton, 2014; Labriola *et al.*, 2017). 특히 우박의 발생 유무와 예측 유무를 이용한 Categorical 검증 방법을 주로 사용하였다. 그러나 본 연구에서는 실제 우박이 나타난 경우에 한하여 검증을 수행하기 때문에 Categorical 검증 방법에서 탐지 확률(Probability of Detection; POD)만을 계산하여 예측 성능을 평가했다(Lukach *et al.*, 2017). 탐지 확률을 계산하기 위한 식은 다음과 같다.

$$POD = \text{Hit} / (\text{Hit} + \text{Miss}) \quad (\text{Eq. 1})$$

여기서, Hit는 실제 우박이 나타나고 LAMP에서 우박을 예측한 경우, Miss는 실제 우박이 나타났지만 LAMP에서 우박을 예측 못한 경우이다.

2.3.2. 우박 사례에 대한 레이더 반사도 자료

현재 LAMP에서는 기온과 기압 그리고 대기 수상체

의 혼합비를 이용하여 반사도를 계산함으로써 격자 내 강수 발생 유무와 동시에 강수의 강도를 예측할 수 있다. 특히 우박의 경우 강한 강수를 동반하는 경우가 지배적이기 때문에 LAMP에서는 격자 내 대기 중층에 한기와 대기 불안정이 동반되며 계산된 반사도가 30 dBZ 이상으로 강한 강수가 예상되는 경우 해당 지역에 우박이 내릴 것으로 판단한다. 그러나 국외에서는 우박 사례에 대한 레이더 반사도가 40 dBZ 이상이라는 보고도 다수 존재한다. 이러한 연구 결과는 LAMP의 우박 예측에서 오탐지가 다수 발생하여 예측 성능 저하가 발생할 수 있음을 의미한다. 이에 따라 본 연구에서는 추가적으로 실제 우박 사례에 대하여 기상청에서 운영하는 레이더의 반사도 분포를 살펴보고 우박 사례에서 발생한 고도별 반사도의 통계 분석을 통해 현재 LAMP 우박 예측에서 사용 중인 반사도 문턱값이 적정인지 확인하였다.

III. 결과 및 토의

3.1. 우박 사례 분석

Table 2는 2020년 1월부터 2021년 7월까지 나타난 50개의 우박 사례에 대한 우박의 직경, 지속 시간, 계절과 시간대의 특징을 정리한 표이다. Table 2을 살펴보면 총 50개의 우박 사례가 가운데 3월부터 5월까지 32개의 우박 사례가 나타남에 따라 주로 봄철에 우박이 발생한다는 선행 연구 결과와 일치하는 모습(Jin *et al.*, 2017; Kim *et al.*, 2020)을 보였다. 우박의 지속 시간은 사례에 따라 최소 1분에서 최대 100분까지 나타났으며 우박의 평균 지속 시간은 15분으로 나타났다. 싹락 우박을 제외한 우박의 직경은 0.5~2.0 cm로 나타났으며

Table 2. Characteristics of the hail events used in this study

(a) Duration and Size						
	Duration (minute)			Size (cm)		
Minimum	1			0.5		
Maximum	100			2.0		
Mean	15			1.0		
(b) Season and Time						
	Season				Time (LST)	
	Spring (Mar-May)	Summer (Jun-Aug)	Fall (Sep-Nov)	Winter (Dec-Feb)	A.M.	P.M.
Occurrence percentage	64%	22%	6%	8%	38%	62%

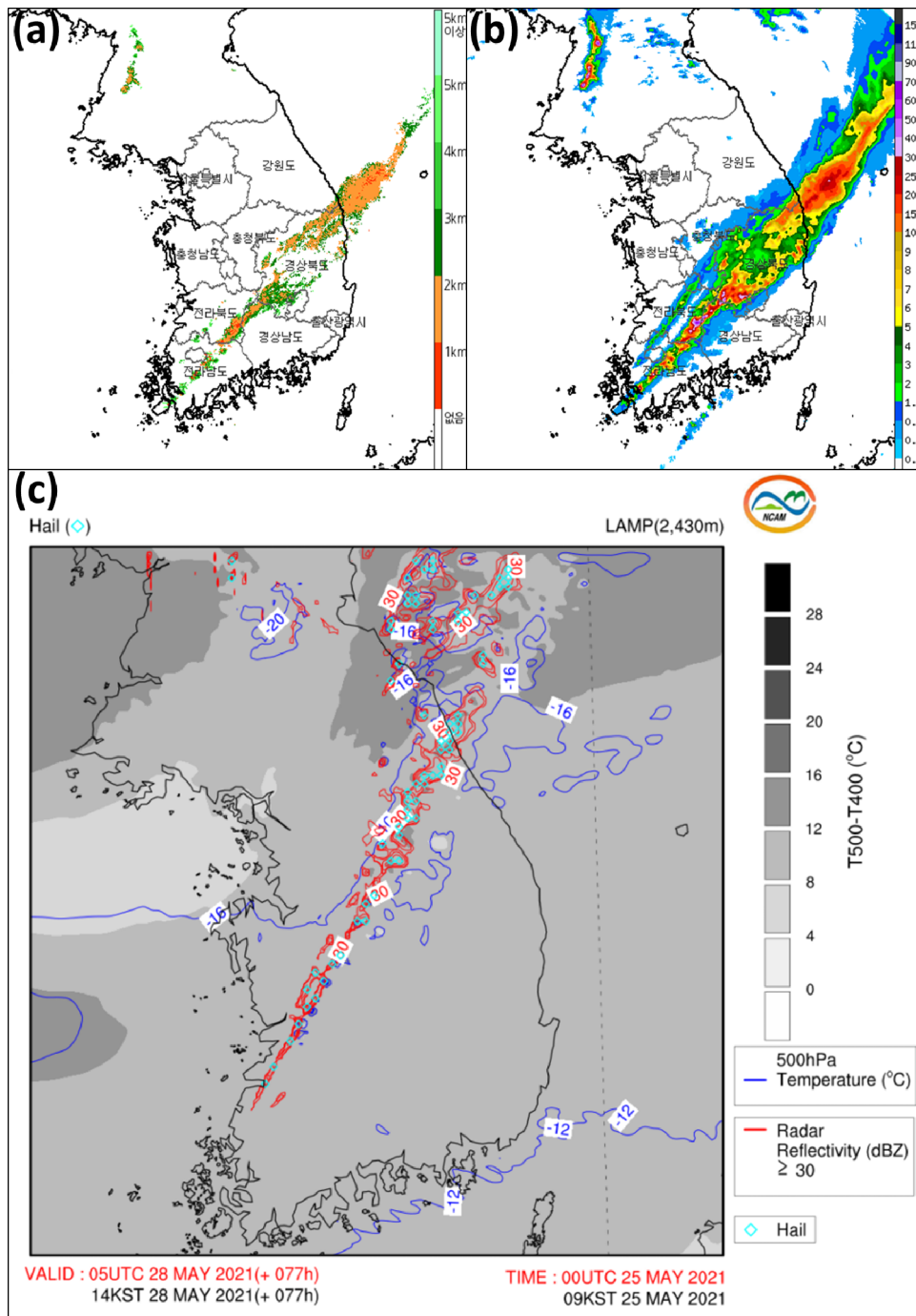


Fig. 1. Distribution map of radar and LAMP hail prediction at 14:00 LST on May 28, 2021. (a) Rainfall rate from KMA radar data (magnitude shown by color). (b) Estimated hail from KMA radar data (estimated altitude shown by color). (c) LAMP hail prediction map with predicted data after 77 hours from the initial time. Shading indicates the 500–400 hPa temperature difference, the red contour indicates calculated reflectivity of 30 dBZ or more, and the blue line is the 500 hPa temperature.

Table 3. LAMP hail prediction performance for hail events

Date (year month day)	Station number	LAMP hail prediction (Hit or Miss)
20200117	115	Miss
20200217	184	Miss
20200314	115	Miss
20200314	115	Miss
20200412	104	Hit
20200412	104	Hit
20200412	104	Hit
20200417	112	Hit
20200417	112	Hit
20200417	119	Hit
20200417	119	Hit
20200417	131	Hit
20200417	146	Miss
20200427	115	Miss
20200505	143	Hit
20200529	136	Miss
20200606	146	Hit
20200606	146	Hit
20200606	152	Miss
20200606	156	Hit
20200908	146	Miss
20200909	108	Hit
20201127	115	Hit
20201208	115	Miss
20201210	102	Miss
20210417	152	Hit
20210418	115	Hit
20210418	115	Hit
20210429	104	Hit
20210429	136	Hit
20210429	138	Hit
20210429	143	Hit
20210429	143	Hit
20210430	115	Hit
20210507	93	Hit
20210507	112	Hit
20210507	131	Hit
20210507	177	Hit
20210525	146	Miss
20210525	156	Miss
20210528	131	Hit
20210528	133	Hit
20210528	156	Hit
20210622	127	Hit
20210622	131	Hit
20210622	136	Hit
20210622	146	Hit
20210622	221	Hit
20210710	136	Miss
20210710	136	Miss

직경의 평균은 1.0 cm로 나타났다. 또한 우박의 발생 시간은 12시 이전에 19 사례가 발생하였고 12시 이후에 31 사례가 발생하였다. 특히 13시에 가장 많은 우박이 발생하였는데 이러한 결과는 오후 시간대 지표 부근의 복사 가열에 의해 대기 불안정이 강화됨에 따라 우박 발생에 도움을 준 것으로 생각되며 일반적으로 알려진 우박 발생 시간대와 잘 일치했다(Tuovinen *et al.*, 2009; Li *et al.*, 2018). 추가로 50개의 사례 가운데 2021년 6월 22일 충북 지역에서 발생된 사례의 경우 우박 지속

시간이 100분으로 기존 우박의 지속 시간에 비해 매우 이례적으로 장시간 지속되었으며 우박 직경 또한 2 cm로 다소 큰 우박에 해당되었다.

3.2. LAMP 우박예측 기법의 성능

2021년 5월 28일 한랭전선의 형태로 북동에서 남서로 길게 분포된 강수 영역이 한반도를 가로지르며 시간이 지남에 따라 점차 남하하는 형태를 보였다. 이러한 가운데 11 LST 이전 청주와 대전 지역에 5분간

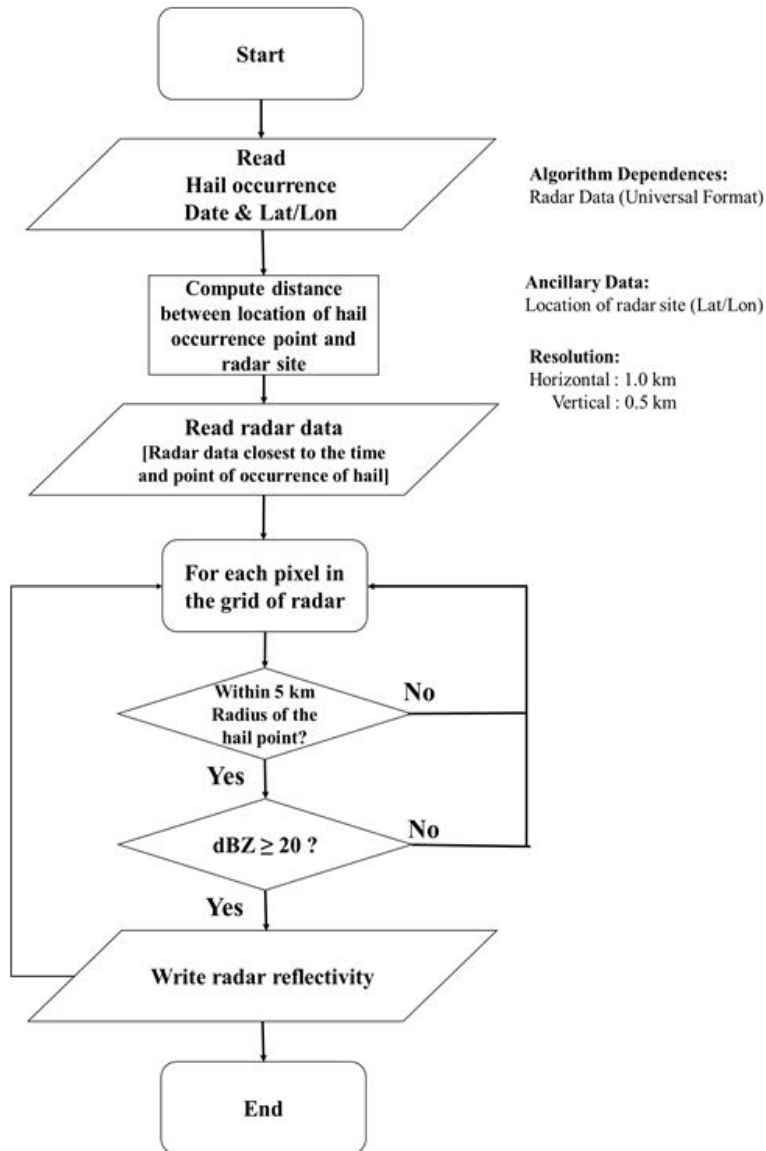


Fig. 2. Flowchart of radar reflectivity extraction procedure for hail events used in this study.

우박이 발생하고 14 LST 이전 시간대에 광주 지역에 우박이 3분 지속되었다. Fig. 1은 2021년 5월 28일 14시의 기상청 레이더의 강우 강도와 우박으로 분류된 수상체 분포도와 LAMP 예측 분포도이다. 레이더의 강우 강도를 살펴보면 전선 형태로 길게 이어진 강수 영역이 존재하고 전선의 중심에 가까워질수록 강우 강도가 강해지는 것을 보였으며 레이더 우박 또한 강한 강우강도 영역과 유사한 영역에 대부분 2 km의 고도에 우박이 분포함을 보였다. LAMP 우박 예측에서는 레이더의 강우 영역보다 남북 방향으로 편향되어 있지만 전선 형태로 30 dBZ 이상의 강한 반사도와 함께 우박 영역을 모의하여 레이더 관측 자료와 유사함을 확인하였다. 그러나 레이더 우박 분포와 LAMP 우박 예측에서 공통적으로 우박이 내리는 영역을 과대하게 탐지하여 오탐지가 다수 나타남을 확인하였다. 그럼에도 불구하고 중기 예측을 수행하는 LAMP에서 실제 강수 시스템을 유사하게 모의하고 실제 우박이 내린 지점과 시점을 예측함에 따라 위 사례는 우박 예측에 성공했다고 판단하였다.

앞서 2021년 5월 28일 사례를 포함하여 2020년 1월부터 2021년 7월까지 발생한 50개의 우박 사례에 대

하여 LAMP 우박 예측과 정성적 비교를 통하여 우박 탐지 유무를 확인했다(Table 3). 우박이 실제로 발생한 50개의 사례 가운데 LAMP에서는 35개의 사례에 대하여 우박 발생을 예측하여 70%의 탐지율을 보였다. 기존 선행 연구들은 레이더와 라디오존데 등 관측 자료를 활용한 우박 예측을 하거나 단기적인 측면에서의 수치 모델을 통한 우박 예측을 수행해 높은 탐지율을 보인다(López *et al.*, 2007; Lukach *et al.*, 2017; Labriola *et al.*, 2017). LAMP의 경우 주 2회 구동하여 예측 시간이 선행 연구들에 비하여 길어짐에 따라 탐지율이 낮아진 것으로 보이며 우박에 대한 단기 예측을 수행하는 경우 LAMP의 우박 예측 탐지율이 더욱 증가할 것으로 생각된다.

3.3. 우박 사례에 대한 레이더 반사도 특징

본 연구에서는 우박 사례에서 나타나는 반사도의 특징을 살펴보기 위해 Fig. 2와 같은 레이더 반사도 추출 알고리즘을 사용하였다. 위 알고리즘은 우박이 발생한 경우 우박 발생 위치 정보와 시간 정보를 활용하여 우박이 발생한 위치를 기준으로 우박이 지속된 시간 동안 5분 간격으로 반경 5 km 내 반사도 고도 0.5~3.0 km까

Table 4. Maximum radar rainfall rate and radar reflectivity by altitude around Gwangju at 13:30 LST on May 28, 2021

Altitude (km)	Maximum reflectivity (dBZ)	Maximum rainfall rate (mm/hour)
0.5	40.2	11.8
1.0	46.0	27.4
1.5	48.9	41.5
2.0	48.9	41.5
2.5	49.4	44.7
3.0	49.4	44.7

Table 5. Maximum radar reflectivity characteristics of hail events by altitude

Altitude (km)	Maximum Reflectivity (dBZ)				
	Mean	S.D.	Min.	Max.	Count(#)
0.5	39.8	12.0	20.5	59.7	147
1.0	42.7	11.4	20.2	60.9	101
1.5	42.6	11.0	20.8	62.3	138
2.0	40.9	11.5	21.1	63.4	143
2.5	42.1	11.5	20.6	67.5	136
3.0	40.6	10.5	22.4	61.9	131

지 0.5 km 간격으로 추출한다. 추출된 반사도 정보를 이용하여 고도별로 나타난 최대 반사도를 구하고 분석에 이용하였다.

Table 4는 광주 우박 사례 기간 가운데 2021년 5월 28일 13:30 LST에 레이더로 관측된 고도별 최대 강우 강도와 최대 반사도를 정리한 표이다. 레이더에서 강한 반사도가 관측되었으며 실제로 광주에 시간당 10 mm의 강수가 내렸다. 이 사례에서 레이더로 관측된 고도별 반사도를 살펴보면 최소 40 dBZ에서 고도가 증가함에 따라 2.5 km 이상에서 반사도가 49 dBZ로 강하게 나타남에 따라 선행 연구들의 연구와 유사함을 확인하였다. 위 방법을 본 연구에서 이용한 모든 사례에 적용해 우박이 나타났을 때의 레이더 반사도 특징을 살펴보고 있다.

모든 우박 사례에 대하여 5분 간격으로 최대 반사도를 추출하고 빈도 분포를 확인했다(Fig. 3). 최대 반사도의 최빈값은 40~44 dBZ 사이에 나타났으며 대부분의 최대 반사도가 30~50 dBZ로 나타났다. 특이한 점은 반사도가 30 dBZ 이하에 비교적 다수 존재함을 확인하였다. 이러한 결과는 우박 사례 가운데 직경 0.5 cm 미만의 싸락 우박 사례를 포함하고 우박 지속 시간이 1분 동안 발생함에 따라 레이더의 관측에 제대로 잡히지 못하여 발생한 것으로 생각된다. 추가로 고도별 최대 반사도의 통계값을 분석했다(Table 5). Table 5를 살펴보면 모든 고도에서 최대 반사도의 평균값이 약 40 dBZ 이상으로 나타나고 최대 반사도의 경우 약 60 dBZ로 나타났다. 표준편차의 경우 약 10 dBZ로 나타났는데 이는 대부분의 자료가 30~50 dBZ 사이에 분포

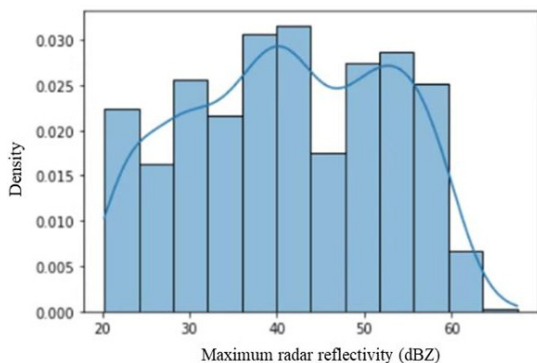


Fig. 3. Histogram of maximum reflectivity in the hail events. The blue line shows the kernel density estimation.

했으며, 본 연구에서 우박 사례에 싸락 우박이 나타난 사례를 포함하여 나타난 것으로 생각된다. 위 결과는 기존 LAMP 우박 예측에서 사용하던 계산된 반사도의 문턱값이 상대적으로 낮음을 의미하고 이로 인해 우박 예측에 오탐지가 다소 발생할 수 있음을 시사했다. 따라서 본 연구에서 살펴본 우박 사례에 대한 레이더 반사도의 통계 분석 결과를 바탕으로 향후 LAMP 우박 예측에서 이용 중인 계산된 반사도의 문턱값을 상향 조정할 예정이다.

IV. 결론

본 연구에서는 수치모델을 이용한 우박 예측의 성능을 정성적으로 검토하고자 우박 사례를 분류하고 지상 관측과 레이더 자료를 이용해 비교 분석하였다. 2020년 1월부터 2021년 7월까지 총 19개월 동안 50개의 우박 사례가 발생하였다. 단기간의 자료임에도 불구하고 주로 봄철인 4월과 5월에 우박이 다수 발생해 선행 연구 결과와 일치한 모습을 보였다. 또한 우박의 지속 시간은 1~100분의 분포를 나타내고 평균 지속 시간은 15분이었다. 우박의 크기의 경우 0.5~2.0 cm로 나타났으며 직경의 평균은 1.0 cm로 선행 연구의 결과에 비해 다소 크게 나타났으며 주로 오후 시간대에 우박의 발생 빈도가 가장 높게 나타났는데 이는 지표 부근의 복사 가열에 의해 대기 불안정의 강화로 판단된다.

LAMP의 우박 예측 성능을 지상 관측과 정성적으로 비교한 결과 50개의 사례 가운데 35개 사례에 대하여 예측에 성공하여 탐지율은 70%로 나타났다. 또한 지상 관측과 LAMP 우박 예측을 비교한 결과 오탐지가 다수 나타나는 문제점이 존재했지만, 레이더의 수상체 분류와는 다소 유사한 경향을 보였다. 이러한 결과는 선행 연구들의 결과에 비하여 낮은 예측 정확도에 속하지만 선행 연구에 비해 예측 시간이 길기 때문에 성능 저하가 발생한 것으로 생각되며 단기간에 대한 우박 예측을 수행하는 경우 예측 성능이 증가할 것으로 사료된다.

추가적으로, 실제 우박 사례들에 대하여 레이더로 관측된 반사도의 특징을 살펴보았다. 0.5~3.0 km까지 고도별 최대 반사도의 평균은 40 dBZ로 나타났으며 대부분 30~50 dBZ 사이에 분포하였다. 일부 우박 사례에서는 30 dBZ 미만의 반사도를 보였으며, 이는 우박 사례 가운데 싸락 우박이 포함됨에 따라 낮아진

것으로 사료된다. 기존의 LAMP 우박 예측에서 사용되는 반사도의 문턱값이 30 dBZ임에 따라 우박 발생에 대한 오탐지가 다소 발생될 것으로 생각되므로 위 결과를 바탕으로 문턱값을 40 dBZ로 증가시키는 보정을 할 계획이다. 향후에는 우박 미세물리과정 수치실험과 레이더 자료를 활용하여 우박 예측 성능을 지속적으로 개선하고, 더 나아가 식생별 생육단계 정보와 결합된 우박위험 정보를 생산 및 제공하여, 농림업 분야 우박 발생에 선제적으로 대응하고 그 피해 예방에 기여할 계획이다.

적 요

우박은 강한 상승 기류에 의하여 빙결 고도 이상에서 수적이 상승과 하강을 반복함에 따라 얼음덩어리로 성장 후 지상으로 낙하하는 현상을 의미한다. 이러한 우박은 단기간 내 국지적인 영역에서 발생하여 농림업 분야에 큰 피해를 미치지만 우박에 대한 예측을 수행하는 국내 연구는 부족한 실정이다. 이에 본 연구에서는 국가농림기상센터 LAMP를 이용한 우박 예측을 소개하고, 2020년 1월부터 2021년 7월까지 발생한 50개의 우박 사례에 대하여 LAMP 우박 예측 성능을 측정하였다. 본 연구에서 조사된 우박 사례의 경우 봄철에 주로 오후 시간대에 발생 빈도가 높았고, 우박의 지속 시간은 평균 15분이었으며, 우박의 직경은 1 cm로 나타났다. LAMP의 우박 예측 성능을 정성적으로 평가한 결과 50개의 사례 가운데 35개 사례에 대하여 우박 예측에 성공하여 탐지율은 70%로 나타났다. LAMP의 우박 예측 성능은 우박을 예측하는 시간이 길어짐에 따라 저하된 것으로 사료된다. 실제 우박 사례에 대한 레이더 반사도를 조사한 결과, 고도에 무관하게 최대 반사도가 40 dBZ 이상이었으며, 우박 사례의 약 50%가 30~50 dBZ 사이로 나타났는데, 이러한 결과는 현재 LAMP의 우박 예측 성능을 향후 보완하기 위한 자료로 활용될 것이다. LAMP를 활용한 우박 예측 성능이 향상됨으로써 농림업 분야에서 망 피복 등의 선제적 조치를 통해 우박에 의한 경제적 손실이 줄어들 것으로 기대된다.

감사의 글

이 연구는 농촌진흥청 국립농업과학원 농업과학기술 연구개발사업(과제번호: PJ01487905)의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Danielsen, E. F., 1977: Inherent difficulties in hail probability prediction. In *Hail: A Review of Hail Science and Hail Suppression* (pp. 135-143). American Meteorological Society, Boston, MA. doi:10.1007/978-1-935704-30-0_6.
- Im, E. H., Y. S. Jeong, and J. C. Nam, 2000: Characteristics of hail occurred in the Korea Peninsular. *Journal of Korea Water Resources Association* **33**(2), 229-235. (in Korean with English abstract)
- Jin, H. G., H. Lee, J. Lkhamjav, and J. J. Baik, 2017: A hail climatology in South Korea. *Atmospheric Research* **188**, 90-99.
- Kim, S., S.-J. Lee, and K. M. Shim, 2020: Creating a South Korean hail risk map based on data fusion. In *AGU Fall Meeting Proceedings* **2020**, A214-0011.
- KMA (Korea Meteorological Administration), 2012: Hail determination guidance based on high-rise observation data. (in Korean)
- KMA (Korea Meteorological Administration), 2019: Weather Measures for Disaster Prevention in Summer. 97pp. (in Korean)
- Labriola, J., N. Snook, Y. Jung, B. Putnam, and M. Xue, 2017: Ensemble hail prediction for the storms of 10 May 2010 in south-central Oklahoma using single- and double-moment microphysical schemes. *Monthly Weather Review* **145**(12), 4911-4936.
- Lee, S.-J., J. A. Song, and Y. J. Kim, 2016: The NCAM Land-Atmosphere Modeling Package (LAMP) version 1: implementation and evaluation. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **18**(4), 307-319.
- Li, X., Q. Zhang, T. Zou, J. Lin, H. Kong, and Z. Ren, 2018: Climatology of hail frequency and size in China, 1980-2015. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* **57**(4), 875-887.
- Loftus, A. M., and W. R. Cotton, 2014: A triple-moment hail bulk microphysics scheme. Part II: Verification and comparison with two-moment bulk microphysics. *Atmospheric Research* **150**, 97-128.
- López, L., E. García-Ortega, and J. L. Sánchez, 2007: A short-term forecast model for hail. *Atmospheric Research* **83**(2-4), 176-184.
- Lukach, M., L. Foresti, O. Giot, and L. Delobbe, 2017: Estimating the occurrence and severity of hail based on 10 years of observations from weather radar in Belgium. *Meteorological Applications* **24**(2), 250-259.

- Martius, O., A. Hering, M. Kunz, A. Manzato, S. Mohr, L. Nisi, and S. Trefalt, 2018: Challenges and recent advances in hail research. *Bulletin of the American Meteorological Society* **99**(3), ES51-ES54.
- Marzban, C., and A. Witt, 2001: A Bayesian neural network for severe-hail size prediction. *Weather and Forecasting* **16**(5), 600-610.
- Snook, N., Y. Jung, J. Brotzge, B. Putnam, and M. Xue, 2016: Prediction and ensemble forecast verification of hail in the supercell storms of 20 May 2013. *Weather and Forecasting* **31**(3), 811-825.
- Stoelinga, M. T., 2005: Simulated equivalent reflectivity factor as currently formulated in RIP: Description and possible improvements. *White paper* **5**.
- Tuovinen, J. P., A. J. Punkka, J. Rauhala, H. Hohti, and D. M. Schultz, 2009: Climatology of severe hail in Finland: 1930-2006. *Monthly Weather Review* **137**(7), 2238-2249.