초단기 레이더 강우 예측 초기장 고도화 시스템 검증: 2016년 태풍 차바 사례를 중심으로

Verification of Initial Field of Very Short-Term Radar Rainfall Forecasts using Advanced System: A Case Study of Typhoon CHABA in 2016

장상민* · 윤선권** · 박경원***

Jang, Sangmin*, Yoon, Sunkwon**, and Park, Kyungwon***

Abstract

In this study, initial field improvement study was conducted to improve the accuracy of radar-based very short-term forecasting systems for heavy rainfall. We estimated the radar rainfall using stratiform, convection, tropical and classified Z-R relationship and it was used as initial field of very short term forecasting systems. The accuracy of estimated and forecasted rain was also evaluated qualitative and quantitative by comparison of the observed rain on the case of torrential rain by Typhoon Chaba on October 5, 2016. The correlation coefficient (CORR) and the root mean square error (RMSE) of the composite type Z-R relationship were greatest at 0.8207, 9.22, and 0.8001, 10.53 for Biseulsan radar (BSL) and Myeonbongsan radar (MYN), respectively. As a result of the analysis of rainfall forecasts, the distribution of rainfall intensity and the pattern of movement for the severe rainfall cases were generally well simulated, with 0.97 or higher in POD and 0.21 or less than in FAR. Quantitative assessment has shown a relatively good correlation, with CORR greater than 0.545 for BSL and greater than 0.379 within 60 minute and differences of CORR in Z-R relational types were found to be small. For RMSE, it was confirmed that the tropical and classified Z-R relationship was highly accurate. The results of this study identified the potential for improvement in radar-based very short-term forecasting systems by improving the initial field accuracy, and efforts are needed to improve the rainfall estimation and forecasting algorithms through ongoing case studies and verification in the future.

Key words : Radar Rainfall Estimate, Z-R Relationship, Initial Field, Very Short-Term Forecast

요 지

본 연구에서는 집중호우에 대한 레이더기반 초단기 강우 예측 시스템의 정확도를 향상시키기 위해 초기장 개선 연구를 수행하였다. 집중호우에 적합한 강우를 추정하기 위해 층운형, 대류형, 열대형의 Z-R관계식과 반사도 조건에 따라 층운형과 대류형을 구분하여 Z-R 관계식을 적용하였으며, 이를 초단기 강우 예측 시스템의 초기장으로 활용하였다. 또한 2016년 10월 5일 태풍 차바(Chaba)에 의한 집중호우 사례에 대해 지상관측 강우자료와 레이더 추정 및 예측 강우자료와의 비교를 통해 정확도를 정성적·정량적으로 평가하였다. 레이더 강우 추정에 대한 분석 결과, 복합형 타입의 Z-R 관계식의 상관계수와 평균제곱근오차가 비슬산레이더의 경우 각각 0.8207, 9.22 mm/hr, 면봉산 레이더의 경우 각각 0.8001, 10.53 mm/hr로 가장 좋은 성능을 보였다. 강우 예측에 대한 분석 결과, 집중호우 사례에 대해 강우강도 공간분포 및 이동 패턴은 평균적으로 잘 모의하였으며, 초단기 강우 예측 결과의 평균적으로 POD는 0.97 이상, FAR는 0.21 이하로 다소 정확하게 예측하는 것으로 분석되었다. 정량적 평가 결과, 비슬산 레이더의 경우 상관계수가 예측시간 60분까지 0.545 이상, 면봉산 레이더의 경우 0.379 이상으로 비교적 좋은 상관성을 보였으며, Z-R 관계식 유형에 따른 차이는 작은 것으로 확인되었다. 평균제곱근오차의 경우 열대형과 복합형의 Z-R관계식이 높은 정확도를 가지는 것으로 확인되었다. 본 연구 결과, 초기장 정확도의 개선을 통한 레이더 기반 초단기 강우 예측 모형의 정확도 개선 가능성을 확인할 수 있었으며, 향후 지속적인 사례연구 및 검증을 통하여 강우 추정 및 강우 예측 알고리즘 개선의 노력이 필요하다.

핵심용어 : 레이더 강우 추정, Z-R 관계식, 초기장, 초단기 강우 예측

*정회원, APEC 기후센터 기후사업본부 융합기술팀 박사후연구원(E-mail: smjang@apcc21.org)

Member, Post Doctor, Integrative Climate Research Team, APEC Climate Center

**교신저자, 정회원, APEC 기후센터 기후사업본부 융합기술팀 팀장(Tel: +82-51-745-3990, Fax: +82-51-745-3999, E-mail: skyoon@apcc21.org)

Corresponding Author, Member, Team Leader, Integrative Climate Research Team, APEC Climate Center

***APEC 기후센터 기후사업본부 융합기술팀 선임연구원

Research Fellow, Integrative Climate Research Team, APEC Climate Center

1. 서 론

최근 이상기상현상과 기후변화로 인하여 국지적인 집중호우의 빈도 및 규모가 증가하고 있으며, 이로 인한 도시지역의 돌발 홍수피해가 증가하고 있다. 도시에서는 중소하천과 배수로의 유출응답이 매우 빠른 특성을 가지므로, 도시형 수재해의 발생을 예측하고 침수피해를 최소화하기 위해서는 위험기상에 대한 사전에 모니터링과 초단시간의 정량적 강수예측이 중요하다. 그러나 현재 정량적 강수예측의 정확도는 충분하다고 말할 수 없다(Kato et al., 2009).

일반적으로 강우 예측 모델에는 발달된 강우에 대한 외삽법(Extrapolation), 강우의 발달 및 소멸에 대한 개념모델, 수치모델 등이 있으며(Wilson et al., 1998), 이 중 도시형 수재해와 같이 강우에 대한 시간응답이 빠른 재해를 위한 강우 예측모델로써는 레이더 자료기반의 외삽에 의한 강우 예측이 유용하다고 알려져 있다(Jang et al., 2016; Kim et al., 2015; Thorndahl and Rasmussen, 2013; Yoon et al., 2017). 레이더기반 초단기예측 모델의 오차는 다음과 같이 강우장의 발달에 대한 오차, 이동벡터의 추정오차, 레이더 반사도를 이용한 강우 추정의 오차 등으로 크게 3가지로 나눌 수 있으며(Seed, 2003), 본 연구에서는, 초기자료의 오차 개선을 통해 강우 예측의 정확도 향상시키고자 하였다.

초단기 예측 모델에 관한 연구의 대부분은 Z-R 관계식으로 추정된 강우정보를 초기자료로 이용하여 예측자료를 생산하므로, 초단기 강우 예측 정보의 정확도는 추정된 레이더 강우의 정확도에 지배적인 영향을 받는다. 기상레이더의 강우강도는 대기 중 강수입자에 대한 레이더 반사도(Z)와 강우강도(R)의 Z-R 관계식으로 추정되기 때문에, 강우 추정 과정에는 다양한 불확실성이 포함되어 있다(Bringi and Chandrasekar, 2001; Jung et al., 2005; Jensen, 2012; Kim et al., 2013). 특히, 우리나라의 여름철 한반도의 집중호우는 층운형 강우와 함께 대류형 강우가 동반되는 복합적인 강우 시스템에서 자주 발생하지만, 레이더 강우는 일반적으로 단일 강우시스템에 대한 고정된 Z-R 관계식으로 추정하므로, 이러한 현상에 대해 과대 추정 혹은 과소 추정이 발생한다(NIMS, 2003).

레이더 강우강도 추정의 정확도를 향상시키기 위한 방법으로 지상우량계에서 관측된 강우강도와 우량계에 근접한 지점의 레이더 반사도를 대응시켜 확률밀도함수(probability density function)로 재산정하여 Z-R 관계식을 결정하는 WPMM (Window Probability Matching Method) 기법과 지상우량계에서 관측된 강우강도를 활용하여 레이더로 추정된 강우강도 조정하는 Mean Field Bias (MFB), Gauge to Radar Ratio (G/R), 국지우량계보정(Local Gauge Correction, LGC) 기법 등에 대한 연구가 수행되었다(Rosenfeld et al., 1993; Kitchen and Blackall, 1992; Borga et al., 2000; Morin et al., 2005; Kim et al., 2014). WPMM의 경우 1개의 Z-R관계

식을 도출하므로 여름철 발생하는 혼합형 강우시스템의 강우장을 정확하게 추정하는데 한계를 가지고 있다. 이러한 문제점을 보완하기 위하여 현재 기상청에서는 WPMM 이론을 기반으로 하여 구간별로 Z-R 관계식을 추정하는 이중분할 피팅 방법이 적용된 레이더-AWS 강우강도(Radar-AWS Rainrate, RAR) 산출 시스템을 구축하여 운영하고, RAR에서 산출된 강우자료에 대해 지상우량계자료를 이용하여 보정하고 있다(Cha et al., 2013; Lee et al., 2014). 그리고 MFB 기법은 관측영역에 대해서 지상우량계의 강우강도와 레이더로 추정된 강우강도의 보정계수를 계산하여 레이더 강우자료에 동일하게 적용하여 보정하므로, 각각의 지상강우의 오차특성을 반영하는 문제점이 존재한다. Ware (2005)에 의해 제안된 LGC 방법은 각각의 지상우량계의 오차특성을 반영하여 레이더 강우강도를 조정할 수 있으나, 역거리가중(Inverse Distance Weighting, IDW)을 위한 유효반경을 결정하는데 많은 시간이 소요되는 단점이 있으며, 이에 대해 LGC 주요 매개 변수를 설정하고 최적화하여 계산시간을 줄이기 위한 연구가 수행된 바 있다(Kim et al., 2014).

본 연구에서는 도시지역 실시간 홍수 예·경보 시스템의 입력 자료로써 활용하기 위해 강우 추정 및 강우 예측 과정에서 계산시간의 최소화 및 효율성을 고려하여 NASA에서 제공하는 Radar Software Library (RSL)를 적용하여 레이더기반 초단기 강우 예측 시스템을 개발하였다. 집중호우에 적합한 강우 추정을 위해 다양한 형태의 강우 유형의 Z-R 관계식을 적용하여 그 성능을 확인하였다. 또한 복합적인 강우시스템에 대한 강우 추정의 정확도를 확보하기 위해 층운형과 적운형에 따라 Z-R 관계식을 적용하여 레이더 강우강도 자료를 산출하였으며, 이를 초단기 강우 예측모델의 입력 자료로 활용하여 집중호우 사례를 대상으로 강우를 예측하고, 지상 강우자료를 이용하여 정성적·정량적으로 정확도를 평가하였다.

2. 대상 사례 및 방법

2.1 2016년 태풍 차바(Chaba) 사례

본 연구에서는 2016년 10월 5일 제 18호 태풍 차바에 의한 집중호우 사례를 대상으로 하였다. 태풍 차바는 이례적으로 강력했던 10월 태풍으로, 제주와 남부지방 곳곳에서 10월 최대 순간 풍속과 10월 하루 강수량 기록이 경신되었다. 태풍 차바의 최대 순간 풍속은 초속 56.5 m (제주 고산 기준)로 2003년 태풍 매미(60 m) 등에 이은 역대 4위, 시간당 104.2 mm와 116.7 mm의 폭우가 쏟아진 울산과 서귀포는 1시간 강수량 역대 1위, 부산과 포항, 창원 등은 10월 1시간 강수량 역대 1위를 기록하였다. 제주 산간지역에는 누적 500 mm 이상, 울산 매곡과 삼동면에서도 누적 374 mm와 319 mm 이상의 강우가 관측되는 등 제주와 남부지방을 중심으로 많은 비를 내렸으며, 지역적인 편차가 크게 나타났다.

다. 특히 울산지역은 오전 8시부터 12시까지 약 4시간 동안 지속된 집중호우와 바다 만조 시간과 겹쳐 침수 및 범람으로 인한 큰 피해가 유발되었다. Fig. 1은 태풍 차바의 이동경로를 나타낸 그림이다.

Fig. 1. Typhoon Chaba (2016) Track

2.2 레이더 및 지상 우량계 자료

기상청과 국토교통부에서 제공되는 레이더 자료 중 차바로 인해 큰 피해를 입은 영남 지역을 관측할 수 있는 레이더는 구덕산, 면봉산, 비슬산 레이더 자료이며, 이중 구덕산 레이더는 당시에 단일편파레이더에서 이중편파레이더로 교체 중이어서, 구덕산 레이더는 제외하고 면봉산과 비슬산 레이더 자료만 이용하였다(Fig. 2).

면봉산 레이더의 주요 제원은 S-band 이중편파레이더로서, 해발고도 518 m에 위치하고 있으며, 관측반경은 약 240 km이다. 또한 관측 고도각은 총 10개로 설정되어 있으며, 최저 고도각은 약 0.0도, 최고 고도각은 약 10.8도이다. 본 연구에서는 복잡한 지형과 건물 등의 영향으로 발생할 수 있는 지형에코(ground echo)가 광범위하게 발생할 수 있는데, 이러한 지형에코는 강우예측에 있어서 심각한 오차를 발생시킬 수 있으므로, 지형에코를 제거한 CZ (corrected reflectivity) 자료를 사용하였다. 비슬산 레이더는 면봉산 레이더와 같이 S-band 이중편파 도플러 레이더이며, 해발고도 1085 m에 위치하고 관측반경은 150 km이다. 비슬산 관측 고도각은 총 6개로 설정되어 있으며, 최저 고도각은 약 -0.5도, 최고 고도각은 약 1.6도이다. 두 레이더 모두 UF (Universal Format) 형태로 자료를 제공한다.

레이더 자료 처리를 위해 NASA에서 제공하고 있는 Radar Software Library (RSL)를 이용하여, 레이더 반사도 자료를 수평으로 1 km의 분해능을 가지는 1.5 km CAPPI (Constant Altitude Plan Position Indicator) 자료로 변환하였다. 면봉산 레이더의 경우 관측 고도각이 조밀하게 구성되어 1.5 km CAPPI 자료를 생성하는데 문제가 없으나, 비슬산 레이더의 경우, 관측 고도각이 6개로 작고 지형 클러스터나 빔 차폐 등으로 인해 1.5 km CAPPI 자료 생성시 자료가 오염되는 문제가 발생한다. 따라서 비슬산 레이더는 빔 차폐의 영향을 고려하여 0.5도 PPI 자료를 1 km의 분해능을 가지는 직교좌표계 자료로 변환하여 초단기 예측 모델의 입력 자료로 이용하였다.

레이더 추정 강우와 초단기 강우 예측의 정량적 및 정성적인 정확도를 분석하기 위해 Fig. 2와 같이 각 레이더 지점으로부터 공통적으로 100 km 이내에 위치하고 있는 기상관측소와 자동기상관측소(Automatic Weather System, AWS) 등 총 72개 지점의 자료를 이용하였다. 레이더는 10분 간격으로 시간당 강우강도 자료를 생성하므로, AWS에서 1분 간격으로 관측되는 강우자료를 10분 누적하고, 이를 시간당 강우강도로 환산하여 사용하였으며, 지상 관측 지점의 연직 상방에 있는 격자점과 인접한 8개 지점(3 km×3 km 이내)의 레이더 강우자료를 평균하여 비교하였다.

Fig. 2. Location of Study Area. Biseulsan radar (BSL) and Myeonbongsan radar (MYN) radar are indicated black square and red star, respectively. The small circles show location of ASOS and AWS

2.3 레이더 강우량 산출 방법

일반적으로 레이더를 이용한 강우량 산정 방법은 레이더 반사도와 강우강도사이의 경험적인 관계식($Z=aR^b$)을 이용한다. 이러한 정량적 강우 추정에 대한 연구는 Marshall and Palmer (1948)가 $a=200$, $b=1.6$ 을 제안한 바 있으며, 그 이후로 여러 연구자들이 다양한 강우형태에 따른 관계식

을 제안해왔다(e.g. Blanchard, 1953; Jones, 1956; Joss et al., 1970; Calheiros and Zawadzki, 1987; Steiner and Houze, 1993; Fulton et al., 1998; Atlas et al., 1999; Gochis et al., 2015). 본 연구에서는 도시지역의 집중호우에 적합한 Z-R 관계식을 추정하기 위하여, Table 1과 같이, $Z=200R^{1.6}$ (층운형 강수: R-a) 관계식과 미국 기상레이더센터(Nation Weather Service, NWS)에서 사용하고 있는 $Z=300R^{1.4}$ (대류형 강수: R-b), Atlas et al. (1999)이 제안한 $Z=334R^{1.19}$ (대류형 강수: R-c), $Z=32R^{1.65}$ (열대형 강수: R-d) 등 기존의 제안된 강수 유형에 따른 Z-R 관계식을 태풍 차바 사례에 적용하여 레이더 강수량을 추정하여 비교·검토하였다. 태풍 차바 사례의 경우, 눈의 벽(eyewall)과 주변 rainband에서 발생한 강수량의 차이가 크게 나타나므로 강우형태에 따른 Z-R 관계식의 강우 추정 성능을 시험하기에 적당하다고 판단하였다.

또한 층운형 강수와 대류형 강수가 동반되는 혼합형 강수에 대한 보다 정확한 강수량을 추정하기 위하여, Steiner et al. (1995)가 제안한 운형 구분 알고리즘을 간략화하여 적용하였다. Steiner et al. (1995)는 볼륨 스캔한 레이더 관측 자료를 3차원 직교좌표계로 변환하고, 고도 1.5 km 또는 3.0 km에서 39 dBZ 이상의 반사도 크기와 주변 반사도보다 평균적으로 크기가 명확하게 구별되는 영역을 대류형 구름으로 구분하였다. 그리고 본 연구에서는 레이더 반사도가 39 dBZ 이상인 경우에는 열대형 강수 형태(R-d)를 적용하고 그 이하에서는 층운형 강수 형태(R-a)를 적용하여 층운형과 열대형의 관계식을 결합한 형태의 Z-R 관계식(R-n)을 이용하여 강우강도를 추정하였으며, Z-R 관계식으로 추정된 강우 추정 자료는 초단기 강우 예측 모델의 초기장으로 활용하였다. 1.5 km CAPPI 반사도 자료를 이용하므로 구름의 유형을 구분할 때, 반사도의 연직적인 구조는 고려하지 않았다.

2.4 초단기 강우 예측 방법

본 연구에서는 레이더 자료로부터 초단기 강우 예측을

위하여, 외삽기법을 이용한 TREC (Tracking Radar Echoes by Correlation) 방법을 적용하였다. TREC 방법은 연속된 두 레이더 반사도 자료로부터 특정 크기의 윈도우에 대해 최대 상관계수를 갖는 윈도우를 찾아내어 그 중심을 연결하는 방법으로, 두 레이더 반사도 시간차와 중심거리 차로부터 이동속도를 결정하는 방법이다(Rinehart and Garvey, 1978). 강우시스템의 이동속도와 이동벡터 계산시간을 고려하여 Kim and Kim (2009)의 연구에서 제시된 값을 반영하여, 윈도우의 크기를 21 km로, 계산 반경의 크기는 7 km로 설정하였다. 상관계수로부터 산출된 이동벡터장은 불연속적이고 물리적 의미가 결여되어 있는 이동벡터들을 포함할 수 있으므로, Cressman (1959)가 제시한 가중합수를 적용하여 주변 격자의 이동벡터들의 가중평균을 구하고, 이를 활용하여 보정하였다.

이동벡터가 각 격자별로 산출되면 이동벡터와 Z-R 관계식으로 추정된 강우강도를 이용하여 이류 예측장을 생성하였다. 강우시스템의 비선형적인 이동에 대한 예측 능력을 향상시키기 위해서 Semi-Lagrangian 방법을 적용하였으며, Semi-Lagrangian 방법은 흐름방향의 회전력을 고려하여 강우시스템을 이동시킬 수 있는 장점이 있다(Germann and Zawadzki, 2002). Fig. 3은 레이더 자료의 전처리, 초단기 강우예측 및 정량 강수량 추정 등의 과정에 대한 흐름도를 나타낸다.

2.5 강우 추정 및 초단기 강우 예측 검증

초단기 강우 예측모델에 대한 정성적인 검증(qualitative verification)은 예측강수와 유무행렬로 이루어진 강수분할표(rain contingency table)를 기초로 하였다(Table 2). 강수분할표는 초단기 강우 예측모델의 예측 능력과 예측에서 발생하는 오차의 종류를 나타내며, 모델예측 결과, 강수가 발생한다고 예측 하였을 때, 실제 관측에서 강수가 기록되면 H (Hits)이고 기록되지 않으면 F (False Alarms)를 나타낸다. 또한 강수가 없음으로 예측모델에서 예측하였을 때, 관측결과 강수가 발생하면 M (Misses), 강수가 없으면 C (Correct Negatives)를

Table 1. Various Z-R Relationships by Precipitation Type and Their Parameters

Classification	a	b	Precipitation type
R-a (Marshall and Palmer, 1948)	200	1.6	Stratiform
R-b (Fulton et al., 1998)	300	1.4	Convective
R-c (Atlas et al., 1999)	334	1.19	Convective
R-d (Gochis et al., 2015)	32	1.65	Tropical
*R-n (In this study)	-	-	Classified (R-a if 39 dBZ < Z, R-d, if 39 dBZ ≥ Z)

Fig. 3. Flowchart of Very Short-Term Radar Rainfall Forecasts

의미한다. 총 4 개의 조합으로 이루어지며, N (total numbers) 은 예측강수 총 수로 $H + M + F + C$ 이다.

Table 2. Rain Contingency Table

Observation	Forecast	
	Yes	No
Yes	H (hits)	F (false alarms)
No	M (misses)	C (correct rejections)
$N = H + F + M + C$		

초단기 예측 모델의 정성적인 검증을 위해 탐지확률 (POD: probability of detection), 오보율(FAR: false alarm ratio), 임계성공지수(CSI: critical success index), 공정임계성 공지수(ETS: equitable threat score) 등을 고려하였다.

POD는 관측강우에 대한 예측강우의 정확도 비율을 의미한다. POD의 범위는 0에서 1사이이며, 1일 때가 완벽한 예보이다. POD는 예측모델에서 강우 현상의 빈도를 과대 추정하는 경향이 높을수록 증가하여, 성능이 좋은 것으로 나올 수 있다. 이러한 결점을 보완하기 위해서 FAR를 함께 고려해야 한다.

$$POD = \frac{\text{correct rain radar}}{\text{rain observation}} = \frac{H}{M+H} \quad (1)$$

FAR은 강우 예측 중 틀린 경우의 비율을 의미하며 그 범위는 0에서 1 사이이다. 0 일 때가 완벽한 예보를 나타내며,

과소예보 경우가 늘수록 증가하는 경향이 있다.

$$FAR = \frac{\text{false alarm}}{\text{rain radar}} = \frac{F}{F+H} \quad (2)$$

CSI는 정확히 예측했던 사건 수를 사건 발생과 관련된 총 수를 합하여 나눈 것으로, 0에서 1의 값을 가지며, 1에 가까울수록 완벽한 예보를 의미한다. CSI는 POD와 FAR에 비해 F와 M 모두에 민감하기 때문에, 사건의 수가 작은 경우에도 보다 실질적인 정도를 제공할 수 있다. 그러나 예보오차의 원인을 구별할 수 없는 단점이 있으며, 무작위 (random hit)로 맞힌 경우가 있더라도 구별할 수 없으므로, 사건의 빈도수에 의존하는 경향이 나타난다.

$$CSI = \frac{H}{H+M+F} \quad (3)$$

ETS는 CSI의 분모, 분자에 각각 무작위로 맞힌 경우를 제외한 것으로, CSI보다 더 공정한 지표라고 간주된다.

$$ETS = \frac{H - H_{\text{random}}}{H + M + F - H_{\text{random}}} \quad (4)$$

where $H_{\text{random}} = \frac{1}{N}(\text{observed yes} \times \text{forecast yes})$

또한 강수량 추정 및 예측강수량에 대한 정량적인 평가를 위해서 상관계수(CORR: correlation coefficient)와 평균제곱

근오차(RMSE: root mean square error)를 이용하였으며, 산출식은 다음과 같다.

$$CORR = \frac{\sum (F_i - \bar{F})(O_i - \bar{O})}{\sqrt{\sum (F_i - \bar{F})^2} \sqrt{\sum (O_i - \bar{O})^2}} \quad (5)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (F_i - O_i)^2} \quad (6)$$

여기서, F_i 와 O_i 는 각각 레이더와 관측에서 산출된 강우강도를 나타내며, $\bar{F}$ 와 $\bar{O}$ 는 각 변수에 대한 평균값, 그리고 N 은 자료의 개수를 의미한다.

3. 분석 결과

3.1 정량 강수추정 결과

Figs. 4와 5는 비슬산 레이더와 면봉산 레이더에 대하여 각각의 Z-R관계식별로 2016년 10월 5일 10시에 대해 AWS에서 관측된 강우강도와 레이더로 추정된 강우강도를 나타낸 것이며, Figs. 6과 7은 10월 5일에 대한 AWS와 레이더의 일누적 강수량 분포를 나타낸 것이다.

시간당 강우강도 공간분포를 비교한 그림에서 부산·경남지역의 100 mm/hr 이상의 집중호우에 대해서 비슬산레이더 자료의 경우 R-c, R-d와 R-n 타입의 Z-R 관계식이 상대적으로 성능이 우수함을 확인할 수 있으나, R-d의 경우 부산·경남 지역을 제외하고 작은 양의 강수가 기록된 영역에서는 과대추정하는 것으로 나타났다. 일누적 강우 분포를 비교한 그림에서도 R-c와 R-n의 Z-R관계식은 AWS 관측 결과와 상당히 유사한 결과가 나타났으나, R-d는 넓은 영역에 대해서 약 80 mm 이상 과대추정하는 것을 확인할 수 있으며, 이는 작은 양의 강수가 내리는 영역에서도 R-d 타입의 Z-R 관계식을 일괄적으로 적용함으로써 발생하는 과대추정 효과가 중첩되어 나타난 것으로 판단된다. R-a와 R-b의 타입의 Z-R 관계식은 대부분의 영역에서 과소추정하였다.

면봉산 레이더의 경우 레이더 설치 지점에서부터 50 km 반경 이내에서 빙 부분차폐로 인해 과소추정되는 영역이 넓게 나타났으며, 부분적으로는 일부 방위각 전체에 대해서 과소추정되는 구역이 나타났다. 빙 부분차폐로 인한 오염되는 영역을 제외하고는 비슬산 레이더와 마찬가지로 R-c와 R-n의 Z-R 관계식이 상대적으로 좋은 성능을 보였다.

Fig. 8은 울산(ID:152)과 삼동(ID:854)지점에 대해 Z-R 관계식에 따른 강우강도와 누적강우량의 시계열 분포를 나타낸 결과이다. 두 레이더 모두에 대해서 R-a 관계식은 AWS에서 관측된 강우강도가 20 mm/hr 이하의 강수일 때, 강우강도 크기와 분포는 유사하게 추정했으나, 20 mm/hr 이상의 강한 강수가 내릴 때에는 70 % 이상 과소 추정하였다. R-d의 경우 20 mm/hr 이하의 강수가 내릴 때 과대 추정하였

으며, 20~100 mm/hr 의 강수에서는 비교적 정확하게 추정하였다. 그러나 100 mm/hr 이상의 강수가 내릴 때에는 10~20 % 정도 과소 추정하였다. R-n 경우, 레이더반사 39 dBZ를 기준으로 R-a와 R-d를 결합한 형태이므로 R-a와 R-d의 관계식에 비해 전반적인 강수량변화 경향은 상당히 잘 추정하였으나, 100 mm/hr 이상의 기록적인 강수가 내릴 때에는 여전히 과소추정하는 경향이 나타났다.

Figs. 9(a)와 9(b)는 각각의 레이더에 대해 Z-R 관계식으로 추정된 강우강도와 AWS에서 관측된 강우강도의 상관도를 나타낸 것이며, Table 3에 정량적 검증결과를 나타내었다. 비슬산 레이더의 경우 R-n의 CORR은 0.8207, RMSE는 9.22 mm/hr로 모든 부분에서 가장 좋은 성능을 나타내었으며, CORR에 대해서는 R-c가 0.7262로 두번째로 높은 정확도를 보였으며, RMSE에 대해서는 R-d가 상대적으로 좋은 성능을 보였다. 면봉산 레이더의 경우에도 R-n의 CORR은 0.8001, RMSE는 10.53 mm/hr으로 다른 ZR 관계식보다 우수한 성능을 나타내었으나, 비슬산 레이더와 비교할 때, 면봉산레이더 자료의 정확도가 상대적으로 낮은 것으로 분석되었다.

3.2 정량 강수예측 결과

강수가 집중적으로 내린 2016년 10월 5일 0800 LST부터 1250 LST까지 약 5시간에 대하여 각 유형별 Z-R 관계식을 이용하여 추정된 강우자료를 입력자료로 활용하여 초단기 강우 예측 모형을 수행하고, 강우 예측 결과에 대한 정량적·정성적 정확도 검증을 수행하였다. Fig. 10은 비슬산레이더를 이용하여 2016년 10월 5일 1000 LST를 기준으로 강우강도를 예측한 결과를 AWS관측 자료와 예측 시간별로 비교하여 나타낸 것이다. 동일한 이동벡터를 이용하여 시간외삽하여 이동시켜 예측하므로, 예측강우량의 분포는 동일하게 나타난다. Fig. 10과 같이 전체적인 강수시스템은 북동쪽으로 이동하였으며, 부산, 울산 및 경남 지역에서 관측된 집중호우에 대해 강우강도의 크기와 공간분포 패턴을 대체적으로 잘 모의하였다. 그러나 R-a는 집중호우가 발생한 지역에서 60분 예측시간까지 계속적으로 과소추정하는 경향이 지속되었으며, R-d의 경우 상대적으로 강수가 작은 영역에서 과대추정하는 경향이 뚜렷하게 나타났다. R-n의 경우, 타 Z-R관계식 보다 상대적으로 실제 관측값에 유사한 결과를 나타내었다.

비슬산 레이더와 면봉산 레이더를 기반으로 한 예측 결과와 기상청에서 운영 중인 MAPLE (McGil Algorithm for Precipitation Nowcasting by Lagrangian Extrapolation)의 예측결과에 대한 정성적 및 정량적 검증 수행 결과를 비교하여 Fig. 11에 나타내었다. POD의 경우, 초단기 강우 예측 결과가 MAPLE보다 상대적으로 높은 탐지율을 기록하였으나, FAR에 대해서는 MAPLE이 근소하게 우수한 성능을 가지는 것으로 나타났으며, 이는 본 연구에서 활용된 초단기 예측 모델이

Fig. 4. Comparison of Spatial Rainrate Distribution Between AWS and BSL using Different Z-R Relationships at 1000 LST on 5 October 2016. (a) Shows AWS observations, (b) to (f) show stratiform, convective, tropical, classified Z-R relations, respectively

Fig. 5. Comparison of Spatial Rainrate Distribution Between AWS and MYN using Different Z-R Relationships at 1000 LST on 5 October 2016. (a) Shows AWS observations, (b) to (f) show stratiform, convective, tropical, classified Z-R relations, respectively

Fig. 6. Comparison of Spatial Accumulated Rainfall Distribution Between AWS and BSL using Different Z-R Relationships on 5 October 2016. (a) Shows AWS observations, (b) to (f) show stratiform, convective, tropical, classified Z-R relations, respectively

Fig. 7. Comparison of Spatial Accumulated Rainfall Distribution Between AWS and MYN using Different Z-R Relationships on 5 October 2016. (a) Shows AWS observations, (b) to (f) show stratiform, convective, tropical, classified Z-R relations, respectively

Fig. 8. Time Series of AWS and Estimated Rainfall from Radar. (a) shows Ulsan AWS station (ID:152) and (b) shows Samdong AWS station (ID:854), respectively

Fig. 9. Comparison of Guage and (a) BSL, (b) MYN Radar Rainrate

Table 3. Quantitative Verification of Z-R Relationships

Type	BSL		MYN	
	CORR	RMSE	CORR	RMSE
R-a	0.7094	14.84	0.6981	15.64
R-b	0.7206	14.41	0.7067	15.49
R-c	0.7262	12.59	0.7100	14.09
R-d	0.7063	11.87	0.6956	11.75
*R-n (In this study)	0.8207	9.22	0.8001	10.53

Fig. 10. Comparison of Spatial Forecasted Rain Distribution Between AWS and BSL using Different Z-R Relationships for Read Times of 20, 40, 60 minutes (predicted at 1000 LST, 5 Oct. 2016)

강우 예측을 맞추는 비율도 높으나, 그만큼 예측이 틀리는 빈도가 높다는 것을 의미한다. 이는 단일 레이더를 기반으로 한 초단기 예측모델의 특성과 비슬산레이더와 면봉산레이더 반경 100 km 이내에서 공통적으로 위치하고 있는 72 개의 지상관측 자료만을 검증에 활용함으로써 발생한 것으로 판단된다. 강수시스템의 이동속도가 빠른 경우, 실제 지상강우는 기록되었으나 단일 레이더에 의해 예측된 강우 시스템은 검증영역 밖으로 이동하여 탐지가 안 된 것으로 기록될 수 있다. 또한 CSI와 ETS의 경우, 20분 이전까지는 초단기 예측 모델의 성공지수가 높은 것으로 나타났으나, 20분 이후부터는 MAPLE의 성공지수가 더 높은 것으로 나타나는 원인에도 기여하는 것으로 판단된다. 예측강우 자료에 대한 정량적인 평가 결과, 비슬산 레이더 자료를 이용하여 예측한 경우, CORR은 예측시간이 증가함에 따라 Z-R관계식의 유형과 관계없이 0.717 ~ 0.545의 범위에서 분포하였으며, 예측시간이 길어짐에 따라 감소하는 경향을 나타내었으며, R-n이 근소하게 우수한 성능을 나타내었다. RMSE의 경우에는 R-d의 Z-R 관계식을 적용할 때, 가장 좋은 결과를 나타내었으며, R-n의 관계식은 두번째로 높은 성능을 나타내었다. 면봉산 레이더를 이용하여 예측한 경우, 예측 시간에 따라 CORR은 0.715 ~ 0.379의 범위에서 분포

하였으며, Z-R 관계식에 따른 CORR의 차이를 찾기 어려우나, 비슬산의 예측 결과에 비해 급격히 감소하는 경향이 나타났다. RMSE의 경우, 비슬산 레이더 자료를 이용한 것과 같이 R-d가 가장 정확한 것으로 분석되었으며, R-n은 두번째로 높은 정확도를 가지는 것으로 나타났다. Z-R 관계식 유형에 관계없이 대체적으로 MAPLE에 비해서 비교적 정확도가 높았으며, 집중호우가 내리는 영역에 대해서 60분까지는 R-d와 R-n의 관계식을 이용하여 예측한 결과의 신뢰도가 높은 것으로 판단된다.

4. 결론 및 토의

본 연구에서는 실시간 홍수 예·경보 시스템의 입력 자료로써 활용하기 위해 레이더 기반의 초단기 강우 예측 시스템의 초기장을 개선하고자 하였다. 도시지역의 집중호우에 적합한 강우를 추정하기 위해 층운형, 대류형, 열대형의 Z-R관계식을 적용하여 성능을 시험하고, 복합적인 강우시스템에 대한 강우 추정의 정확도를 확보하기 위해 반사도 조건에 따라 층운형과 적운형을 구분하여 Z-R 관계식을 적용하였다. 또한 강우 추정 및 강우 예측 과정에서의 계산시간의 최소화 및 효율성을 확보하기 위해 RSL을 이용하여

Fig. 11. Qualitative and Quantitative Verification Result: (a) POD, (b) FAR, (c) CSI, (d) ETS, (e) CORR, (f) RMSE

레이더 반사도 자료를 수평으로 1 km의 분해능을 가지는 1.5 km CAPPI 자료를 생성하여 입력자료로 활용하였다. 비슬산 레이더와 면봉산 레이더에 공통적으로 관측반경에 속한 지상관측강우자료 이용하여 2016년 10월 5일 제 18호 태풍 차바(CHABA)를 대상으로 레이더 추정강우와 강우 예측의 정확도를 예측시간별 정성적·정량적으로 평가하고, MAPLE의 예측 결과와 비교·분석 하였으며, 주요 결과

는 다음과 같다.

- (1) 비슬산 레이더와 면봉산 레이더 자료를 이용하여 생산된 강우 추정 특성 분석 결과, 100 mm/hr 이상의 집중호우가 발생한 영역에 대해서 두 레이더 모두 R-c (대류형), R-d (열대형), R-n (복합형) 타입의 Z-R 관계식의 성능이 상대적으로 성능이 우수한 것으로 나타났으며,

작은 양의 강수가 내리는 영역에서 R-d는 과대추정하는 것으로 나타났다. R-a와 R-b는 대부분의 영역에서 과소추정하였다. 또한 정량적 분석결과, 비슬산 레이더의 경우 R-n의 CORR은 0.8207, RMSE는 9.22 mm/hr, 면봉산 레이더의 경우 R-n의 CORR은 0.8001, RMSE는 10.53 mm/hr로 모든 부분에서 가장 좋은 성능을 나타내었다.

- (2) 강우 예측에 대한 분석 결과, 집중호우 사례에 대해 강우강도 공간분포 및 이동 패턴은 평균적으로 잘 모의하였으나, Z-R관계식의 유형에 따라 과소 및 과대 추정하는 경향이 지속되었다. R-n의 경우, 타 Z-R관계식 유형보다 실제 관측값에 유사한 결과를 나타내었다. 정성적 평가 결과, 초단기 강우 예측 결과의 평균적으로 POD는 0.97 이상, FAR는 0.21 이하로 다소 정확하게 예측하는 것으로 분석되었으나, POD와 FAR 모두 MAPLE 보다 상대적으로 높은 것으로 나타났다. CSI와 ETS의 경우, 예측시간 20분 이전에는 MAPLE 보다 높게 나타났으나, 그 이후에는 MAPLE 보다 낮은 것으로 확인되며, 이는 예측된 강우시스템의 이동속도와 정성적 검증에 활용된 자상강우 관측 지점의 위치에 따른 영향으로 인해 발생한 것으로 판단된다.
- (3) 정량적 평가 결과, 비슬산 레이더의 경우 예측 강우와 관측 강우의 CORR이 예측시간 60분까지 0.545 이상, 면봉산 레이더의 경우 0.379 이상으로 MAPLE에 비해 비교적 좋은 상관성을 보였으며, Z-R 관계식 유형에 따른 차이는 작은 것으로 나타났다. RMSE의 경우, R-d와 R-n이 높은 정확도를 가지는 것으로 분석되었다. 종합적으로 집중호우가 내리는 영역에 대해서 예측시간 60분까지는 R-d와 R-n의 관계식이 신뢰성 있는 결과를 나타내는 것으로 판단되었다.

본 연구에서는 사례연구 및 평가결과 분석을 기반으로 초기 장 정확도의 개선을 통한 레이더 기반 초단기 강우 예측 모형의 정확도 개선 가능성을 확인할 수 있었으며, 예측 선행시간이 짧은 경우, 우수한 성능을 보임을 확인하였다. 다만 향후 보다 많은 사례 연구 및 검증을 통하여 강우 추정 및 강우 예측 알고리즘 개선의 노력이 필요하다. 또한 본 연구의 결과는 초단시간(1~2시간)에 발생할 수 있는 도시침수에 대하여 선행시간 확보에 활용할 수 있으며, 레이더를 이용한 보다 신뢰성 있는 초단기 강우 예측 정보 생산을 통한 도시 유역의 홍수 예·경보 및 실시간 수문자료 확보에 활용 가능할 것이다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 물관리연구사업의 연구비지원(13AWMP-B066744-01)에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

References

- Atlas, D., Ulbrich, C., Marks, F.D. Jr., Amitai, E., and Williams, C.R. (1999) Systematic Variation of Drop Size and Radar-rainfall Relations. *J. Geophys. Res. Atmos.*, Vol. 104, No. D6, pp. 6155-6169.
- Blanchard, D.C. (1953) Raindrop Size-Distribution in Hawaiian Rains. *J. Meteor.*, Vol. 10, pp. 457-473.
- Borga, M., Anagnostou, E.N., and Frank, E. (2000) On the Use of Real-time Radar Rainfall Estimates for Flood Prediction in Mountainous Basins. *J. Geophys. Res. Atmos.*, Vol. 105, No. D2, pp. 2269-2280.
- Calheiros, R.V., and Zawadzki, I. (1987) Reflectivity-rain Rate Relationships for Radar Hydrology in Brazil. *J. Appl. Meteorol. Climatol.*, Vol. 26, pp. 118-132.
- Cha, J.W., Lee, J.K., Park, H.S., Park, J.S., and Kim, K.H. (2013) Improvement of the Radar-AWS Rain rate Calculation System Using the Local Gauge Correction (LGC) method. *Proceedings of the 2013 Spring Meeting of Korea Meteorological Society*, pp. 104-105. (in Korean)
- Cressman, G.P. (1959) An Operational Objective Analysis System. *Mon. Weather Rev.*, Vol. 87, No. 10, pp. 367-374.
- Fulton, R.A., Breidenbach, J.P., Seo, D.J., Miller, D.A., and O'Bannon, T. (1998) The WSR-88D Rainfall Algorithm. *Weather Forecast.*, Vol. 13, No. 2, pp. 377-395.
- Germann, U., and Zawadzki, I. (2002) Scale-Dependence of the Predictability of Precipitation from Continental Radar Images. Part I: Description of the Methodology. *Mon. Weather Rev.*, Vol. 130, No. 12, pp. 2859-2873.
- Gochis, D., Schumacher, R., Friedrich, K., Doesken, N., Kelsch, M., Sun, J., Ikeda, K., Lindsey, D.T., et al. (2015) The Great Colorado Flood of September 2013. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, Vol. 96, No. 9, pp. 1461-1487.
- Jang, S.M., Park, K.W., and Yoon, S.K. (2016) A Multi-sensor based Very Short-term Rainfall Forecasting using Radar and Satellite Data: A Case Study of the Busan and Gyeongnam Extreme Rainfall in August, 2014. *Korean J. Remote Sens.*, Vol. 32, No. 2, pp. 155-169. (in Korean)
- Jones, D.M.A. (1956) *Rainfall Drop Size Distribution and Radar Reflectivity*. Research Report, No. 6, U.S. Army Contract DA-36-039 SC-64723, Illinois State Water Survey, Urbana, pp. 1-20.
- Joss, J., and Waldvogel, A. (1970) A Method to Improve the Accuracy of Radar Measured Amounts of Precipitation. *14th Radar Meteorology Conference*,

- Tucson, Arizona, American Meteorological Society, pp. 237-238.
- Jung, S.H., Kim, K.E., and Ha, K.J. (2005) Real-time Estimation of Improved Radar Rainfall Intensity using Rainfall Intensity Measured by Rain Gauges. *J. Kor. Meteor. Soc.*, Vol. 41, pp. 751-762. (in Korean)
- Kato, A., Maki, M., Iwanami, K., Misumi, R., and Maesaka T. (2009) Nowcasting of Precipitation Based on Complementary Application of X-band Polarimetric Radar and C-band Conventional Radar. *J. Japan Soc. Hydrol. and Water Resour.*, Vol. 22, No. 5, pp. 372-385.
- Kim, G.S., and Kim, J.P. (2009) Development of a Short-term Rainfall Forecast Model Using Sequential CAPPI Data. *J. Korean Soc. Civ. Eng.*, Vol. 29, No. 6B, pp. 543-550. (in Korean)
- Kim, J.P., Yoon, S.K., Kim, G.S., and Moon, Y.I. (2015) Application of Very Short-Term Rainfall Forecasting to Urban Water Simulation using TREC Method. *J. Korea Water Resour. Assoc.*, Vol. 48, No. 5, pp. 409-423. (in Korean)
- Kim, K.H., Kim, M.S., Lee, G.W., Kang, D.H., and Kwon, B.H. (2013) The Adjustment of Radar Precipitation Estimation Based on the Kriging Method. *J. Korean Earth Sci. Soc.*, Vol. 34, No. 1, pp. 13-27. (in Korean)
- Kim, K.H., Lee, G.W., Kang, D.H., Kwon, B.H., and Han, K.Y. (2014) Adjustment of Radar Precipitation Estimation Based on the Local Gauge Correction Method. *J. Korean Earth Sci. Soc.*, Vol. 35, No. 2, pp. 115-130. (in Korean)
- Kitchen, M., and Blackall, R.M. (1992) Representativeness Errors in Comparisons Between Radar and Gauge Measurements of Rainfall. *J. Hydrol.*, Vol. 134, No. 1-4, pp. 13-33.
- Lee, J.K., Kim, J.H., Park, H.S., and Suk, M.K. (2014) Development of Radar-Based Multi-Sensor Quantitative Precipitation Estimation Technique. *Atmosphere*, Korean Meteorological Society, Vol. 24, No. 3, pp. 433-444. (in Korean)
- Marshall, J.S., and Palmer, W.McK. (1948) The Distribution of Raindrops with Size. *J. Meteor.*, Vol. 5, No. 4, pp. 165-166.
- Morin, E., Maddox, R.A., Goodrich, D.C., and Sorooshian, S. (2005) Radar Z-R Relationship for Summer Monsoon Storms in Arizona. *Weather Forecast.*, Vol. 20, No. 4, pp. 672-679.
- NIMS (National Institute of Meteorological Sciences) (2003) Application of the Z-R Relationship Respect with the Type of Prediction Using Radar of Jindo, National Institute of Meteorological Sciences in Gwangju, KMA [C1-7], pp. 1-83. (in Korean)
- Rinehart, R.E., and Garvey, T. (1978) Three Dimensional Storm Motion Detection by Conventional Weather Radar. *Nature*, Vol. 273, pp. 287-289.
- Rosenfeld, D., Wolff, D.B., and Atlas, D. (1993) General Probability-matched Relations Between Radar Reflectivity and Rain Rate. *J. Appl. Meteor.*, Vol. 32, pp. 50-72.
- Seed, A.W. (2003) A Dynamic and Spatial Scaling Approach to Advection Forecasting. *J. Appl. Meteor.*, Vol. 42, pp. 381-388.
- Steiner, M., and Houze, R.A.Jr. (1993) Three-dimensional Validation at TRMM Ground Truth Sites: Some Early Results from Darwin, Australia. *26th Inter. Conf. Radar Meteor.*, American Meteor Society, Norman, OK, USA.
- Steiner, M., Houze, R.A.Jr., and Yuter, S.E. (1995) Climatological Characterization of Three-dimensional Storm Structure from Operational Radar and Rain Gauge Data. *J. Appl. Meteor.*, Vol. 34, pp. 1978-2007.
- Thorndahl, S., and Rasmussen, M.R. (2013) Short-term Forecasting of Urban Storm Water Runoff in Real-time Using Extrapolated Radar Rainfall Data. *J. Hydroinform.*, Vol. 15, No. 3, pp. 897-912.
- Ware, E.C. (2005) *Corrections to Radar-estimated Precipitation Using Observed Raingauge Data*. Master's thesis, Cornell University, NY, USA.
- Wilson, J.W., Crook, N.A., Mueller, C.K., Sun, J., and Dixon, M. (1998) Nowcasting Thunderstorms: A Status Report. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, Vol. 79, pp. 2079-2099.
- Yoon, S.S. (2017) Development of Radar-based Quantitative Precipitation Forecasting using Spatial-scale Decomposition Method for Urban Flood Management. *J. Korea Water Resour. Assoc.*, Vol. 50 No. 5, pp. 335-346. (in Korean)

Received	February 19, 2018
Revised	February 21, 2018
Accepted	March 21, 2018