

이류모델을 활용한 초단시간 강우예측의 적용성 평가**The Applicability Assessment of the Short-term Rainfall Forecasting Using Translation Model**

윤성심* / 배덕효**

Yoon, Seong Sim / Bae, Deg-Hyo

Abstract

The frequency and size of typhoon and local severe rainfall are increasing due to the climate change and the damage also increasing from typhoon and severe rainfall. The flood forecasting and warning system to reduce the damage from typhoon and severe rainfall needs forecasted rainfall using radar data and short-term rainfall forecasting model. For this reason, this study examined the applicability of short-term rainfall forecast using translation model with weather radar data to point out that the utilization of flood forecasting in Korea. This study estimated the radar rainfall using Least-square fitting method and estimated rainfall was used as initial field of translation model. The translation model have verified accuracy of forecasted radar rainfall through the comparison of forecasted radar rainfall and observed rainfall quantitatively and qualitatively. Almost case studies showed that accuracy is over 0.6 within 4 hours leading time and mean of correlation coefficient is over 0.5 within 1 hours leading time in Kwanak and Jindo radar site. And, as the increasing the leading time, the forecast accuracy of precipitation decreased. The results of the calculated Mean Area Precipitation (MAP) showed forecast rainfall tend to be underestimated than observed rainfall but the correlation coefficient more than 0.5. Therefore it showed that translation model could be accurately predicted the rainfall relatively. The present results indicate that possibility of translation model application of Korea just within 2 hours leading forecasted rainfall.

Keywords : radar rainfall, short-term rainfall forecasting, translation model

요 지

기후변화로 인해 태풍과 집중호우의 빈도 및 규모가 증가하고 있으며, 이로 인한 피해 역시 증가하고 있다. 태풍과 집중호우로 인한 피해를 줄이기 위한 홍수 예·경보 시스템에는 단시간 강우예측모델과 레이더 자료를 이용하여 산정된 예측강우가 필요하다. 이를 위하여 외국의 경우 단시간 강우예측 모델을 개발하여 레이더 자료를 이용한 강우예측을 수행하고 이를 수문모형과 연계하여 그 적용성을 분석하거나 홍수예보의 활용성을 평가하는 연구를 활발히 진행하고 있다. 이에 본 연구에서는 홍수예보를 위한 단시간 예측강우의 활용 측면에서 기상레이더 정보와 결합된 이류모델을 활용한 초단시간 강우예보의 국내 적용성을 평가하고자 한다. 이를 위해 최소자승법(Least-square fitting) 기법으로 레이더 강우를 추정하고, 추정된 강우를 이류모델의 초기장으로 활용하였다. 또한, 레이더 예측강우와 지상관측강우의 비교를 통해 레이더 예측강우의 정확도를 정성적·정량적으로 평가하고, 도시홍수예보의 활용 측면을 고려하여 중랑천 유역을 대상으로 초단시간 예측강우의 유역평균강우량을 산정하여 평가하였다. 연구 결과, 관악산 레이더와 진도 레이더 대부분의

* 세종대학교 토목환경공학과 박사수료 (e-mail: lome970303@paran.com)

Ph.D Candidate Student, Dept. of Civil and Environmental Engrg., Sejong Univ, Seoul 143-747, Korea

** 교신저자, 세종대학교 물자원연구소·토목환경공학과 교수 (e-mail: dhbae@sejong.ac.kr)

Corresponding Author, Prof., Dept. of Civil and Environmental Engrg., Sejong Univ, Seoul 143-747, Korea

사례에서 선행시간의 증가에 따라 예측강수의 정확도가 감소하지만 정성적 평가 측면에서 예측강수는 0.6 이상의 높은 정확도를 나타내었으며, 정량적 측면에서 예측강수와 관측강수와의 상관계수는 평균적으로 선행시간 1시간 이내에서 대부분 0.5 이상의 비교적 좋은 상관성을 보였다. 예측 유역평균강수의 평가 결과 관측강수에 비해 과소추정하는 경향이 있으나 평균적으로 상관계수 0.5 이상으로 비교적 정확하게 강수를 예측하는 것을 확인할 수 있었다. 이를 통해 레이더 자료와 이류모델을 통해 산정한 초단시간 예측강수의 활용성을 확인할 수 있었다.

핵심용어 : 레이더 추정강우, 초단시간 강우예측, 이류모델

1. 서 론

최근 전세계적으로 기후변화로 인한 태풍의 강도 및 국지적인 집중호우의 빈도 증가로 매년 돌발홍수가 발생하여 인명 및 재산에 큰 피해를 주고 있다. 특히 도시유역의 경우 하천 홍수위 상승에 의한 외수피해와 순간적인 집중호우에 의해 도로 노면수의 배수불량에서 기인하는 내수피해가 결합되어 홍수피해가 더욱 가중되고 있는 실정이다. 이에 대한 효율적인 조기 대응책으로 수문기상 현상의 변화 및 현황을 파악하여 홍수로 인한 인명 및 재산피해를 최소화 할 수 있는 적절한 홍수 예·경보 시스템의 구축을 들 수 있다. 이러한 홍수 예·경보시스템을 구축하기 위해서는 선행시간이 충분히 확보된 정확한 예측강우 정보가 필수적으로 요구된다. 이를 위하여 선진 외국의 경우 기상전문가에 의한 집중호우 현상규명 및 사전예보 기법 확립과 수자원 전문가에 의한 이들 예보자료를 활용한 특정지역의 홍수피해 유무를 사전에 예측하는 기상과 수자원의 학제간 연구가 활발히 진행되고 있다.

현재 국외의 레이더 자료를 이용한 단시간 강우예측에 관한 연구는 최초로 1978년 Bellon and Austin에 의해서 SHARP (SHORT-TERM Precipitation Forecasting Procedure)라는 단시간 강우예측모델이 개발된 이후로 상당히 많이 수행되어져 왔다. 각 국가별로 적합하게 개발되어 사용되고 있는 단시간 강우예측모델로는 통계적 외삽법을 이용한 WDSS (Warning Decision Support System), CARDS (Canadian Radar Processing and Decision System), SWIRLS (Short-range Warning of Intense Rainstorms in Localized System), TIFS (Thunderstorm Identification and Forecasting System)이 있으며, 수치예보모형과 외삽법을 혼합한 단시간 강우예측모델로는 VSRF (Very Short Range Forecast in Japan), NIMROD (Nowcasting and Initialization for Modeling using Regional Observation Data), GANDOLF (Generating Advanced Nowcasts for Deployment in Operational Land-surface Flood Forecasts), SCAN (Severe Convection Analysis and Nowcasting)이 있다. 또한 스펙트럴

도메인 분석기법 및 여타기법들을 이용한 S-PROG (Spectral PROGNosis), STEPS (Stochastic Ensemble Prediction System), MAPLE (McGill Algorithm for Precipitation Nowcasting by Lagrangian Extrapolation), AutoNowcaster, OPIC (Convective Objects for Nowcasting), SIGOONS (SIGNificant weather Object Oriented Nowcasting System) 등의 단시간 강우예측 모델이 개발되어 활용되고 있다 (Mecklenburg et al, 2005). 또한, 이들 단시간 강우예측 모델 결과를 수문모형과 연계하여 그 적용성을 분석하거나 홍수예보의 활용성을 평가하는 연구도 활발히 진행되고 있다 (Ogden, 1994; Vieux, 2004; Cranston and Black, 2006). 그러나 국외의 단시간 강우예측 모델 중 통계적 외삽법을 사용한 모델은 레이더 자료를 이용하여 선형 외삽으로 예측강수를 추정하는 형태로 강우의 발달과 쇠퇴 과정에 대한 분석이 힘들다는 한계를 가지고 있다. 이를 보완하기 위해 VSRF, NIMROD, GANDOLF 등과 같이 수치예보자료를 혼합하는 강우예측 모델에 관한 연구가 계속되고 있으나 수치예보자료의 단시간 예보의 한계와 예측 수행과정의 실시간성 결여 등으로 여러 한계가 존재한다. 단시간 강우예측을 위한 국외의 연구사례에 비해 국내에서는 국외의 단기강우 예측기술을 도입하여 운영한 사례에 국한되어 있어 독자적인 단시간 강우예측 모델 개발에 관한 연구는 미흡한 실정이다. 기상연구소에서는 TITAN (Thunderstorm Identification, Tracking, Analysis and Nowcasting)을 연구용으로 활용한 바 있으며, 현재 VSRF와 SCAN (The System for Convection Analysis and Nowcasting, 대류성 호우 추적 및 예측 시스템), KLAPS (The Korea Local Analysis and Prediction System) 등을 현업에서 운영 중이며, 새로운 기술로써 VDRAS (The Variational Doppler Radar Assimilation System)가 도입 추진 중에 있다 (이지윤 등, 2008). 또한, 수문학적 측면에서는 2008년과 2009년 김광섭 등이 TREC 모형을 이용하여 기상레이더를 이용한 국지성 호우의 단시간 강우예측 가능성 및 강우의 발달과 쇠퇴를 고려하지 못하는 한계를 제시한 것 외에는 단시간 강우예측 관한 연구를 수행한 사례가 드물다 (김광섭과

김종필, 2008; 2009). 특히, 예측 강우를 활용한 홍수예보에 관한 연구는 미진한 상태로 홍수예보와 같은 수문학적 활용 측면에서 레이더와 같은 기상 정보를 활용한 강우선행시간 확보에 관한 연구가 요구된다.

이에 본 연구에서는 홍수예보를 위한 단시간 예측강우의 활용 측면에서 강우의 발달쇠약을 고려할 수 있는 기상레이더 정보와 결합된 이류모형을 활용하여 초단시간 강우예보의 국내 적용성을 평가하고자 한다. 2절에서는 본 연구에서 적용한 이류모형의 레이더 강우예측 방법과 초기장으로 사용한 실험강우 산정 방법 및 평가 방법을 정리하였으며, 3절에서는 강우예측의 사례연구 결과를 제시하고 정확도를 평가하였으며, 결론 및 향후과제는 4절에 제시하였다.

2. 기상레이더를 이용한 예측강우 산정 방법

2.1 최소자승법을 이용한 레이더 강우 산정

본 연구에서는 이류모형의 초기장으로 활용되는 레이더 강우 산정을 위해 각 호우사상별 반사도 $Z(\text{mm}^6/\text{m}^3)$ 자료와 강우강도 $R(\text{mm}/\text{h})$ 자료 사이의 관계식을 구하였다 (Krajewski and Smith, 2002; Morin et al., 2003). 기존의 레이더 강우산정에 관한 연구들에서는 일반적으로 다음 Eq. (1)과 같이 Z 와 R 의 관계를 멱급수의 관계로 정의하였다.

$$Z = aR^b \quad (1)$$

Eq. (1)과 같이 레이더 반사도로부터 강우강도를 계산하기 위해서는 경험적 매개변수 a 와 b 를 결정해야 하며, 통상 a 는 20~1000, b 는 1~3 범위 값을 갖는다 (Smith and Krajewski, 1993). 이들 a , b 를 결정하는 방법에는 구름속 물방울의 직경분포 (Drop Size Distribution)를 이용하는 방법과 지상의 우량계 관측값을 이용하는 방법이 있다. 본 연구에서는 후자의 방법을 이용하였으며, 최소자승법 (Least-square fitting)을 이용하여 Z - R 관계식을 산정하였다.

$$a = 10 \frac{1 \sum_{i=1}^n \log(R_i) DbZ_i - \sum_{i=1}^n \log(R_i) \sum_{i=1}^n DbZ_i}{\left(\sum_{i=1}^n \log(R_i) \right)^2 - \sum_{i=1}^n (\log(R_i))^2} \quad (2)$$

$$b = \frac{1}{10} \left(\sum_{i=1}^n DbZ_i - 10 \log(a) \sum_{i=1}^n \log(R_i) \right) \quad (3)$$

2.2 이류모형

이류모형은 강우예보의 선행시간 확보를 위해 Shiiba et al. (1984)에 의해 일본에서 개발된 모델로써 Nakakita et al. (1996)과 Sugimoto et al. (2001)에 의해 개선되어 활용되는 모델이다. 이류모형은 연속적인 시계열 레이더 격자자료를 외삽하여 강우강도 분포를 이류벡터에 따라 이동시키면서 강우의 발달쇠약·회전 등을 고려하여 강우를 예측하는 모형이다. 이류모형에서는 수평면상에 발달된 직교좌표계를 x , y 로 하여, 지점 (x, y) 의 시간 t 일 때의 강우강도를 $z(x, y, t)$ 로 한다. x , y 축에 수직인 z 축을 취했을 때, $z=z(x, y, t)$ 는 시간을 고정시키면 1개의 곡면으로 나타낼 수 있으며, 이 곡면을 강우강도면이라고 한다.

강우예측이란 이 강우강도면의 변화 예측이라 할 수 있으며, 이류모형에서는 다음 Eq. (4)와 같은 형태를 갖는 강우강도변화의 지배방정식을 강우모형로 사용하였다.

$$\frac{\partial z}{\partial t} + u \frac{\partial z}{\partial x} + v \frac{\partial z}{\partial y} = w \quad (4)$$

여기서, 강우의 이동 및 강우량에 직접적인 영향을 미치는 요소는 이류벡터 (u, v) 와 발달쇠약항 w 이다. 본 이류모형에서 평행이동은 제한이 없다. 강우역은 변형을 파악할 수 있도록 하기 위해 선형최소자승추정문제로 계산할 수 있도록 하기 위해서 다음 Eqs. (5)~(7)과 같이 u , v , w 를 위치좌표의 1차식으로 쓸 수 있다.

$$u = C_1x + C_2y + C_3 \quad (5)$$

$$v = C_4x + C_5y + C_6 \quad (6)$$

$$w = C_7x + C_8y + C_9 \quad (7)$$

여기서, $C_1 \sim C_9$ 는 연산을 통해 추정되는 매개변수이다. Eqs. (5)~(7)을 이용하여 강우역의 각속도 w_{yx} , 전단변형속도 r_{yx} , x 축 방향의 변형속도 e_x , y 축 방향의 변형속도 e_y 를 다음 Eqs. (8)~(11)로 표현할 수 있다.

$$w_{yx} = (-C_2 + C_4)/2 \quad (8)$$

$$r_{yx} = C_2 + C_4 \quad (9)$$

$$e_x = C_1 \quad (10)$$

$$e_y = C_5 \quad (11)$$

물론 실제 강우역의 변형은 Eqs. (4)~(7)로 표현되는 것보다도 복잡하나 이것 이상의 강우역 변형을 고려해 넣는 것은 매개변수의 분류·예측에 필요한 계산시간을 증대시키는 것으로, 실시간 예측이라고 하는 관점에서는 장점이라고 말할 수 없으므로 이를 반영하지 않았다. 우선,

매개변수 산정을 위해 레이더의 관측범위에 포함되는 장방형 영역을 취해 그것을 $\Delta x \cdot \Delta y$ 의 장방형 격자로 분할하며, 이를 표현하면 다음 Eqs. (12)~(14)로 정리할 수 있다.

$$x_i = (i-1/2)\Delta x, \quad i=1, \dots, M \quad (12)$$

$$y_j = (j-1/2)\Delta y, \quad j=1, \dots, N \quad (13)$$

$$t_k = k\Delta t, \quad k=1, \dots, K-1 \quad (14)$$

여기서, Δt 는 시간간격이며, M, N은 각각 x방향, y방향의 격자수, $(K+1)\Delta t$ 는 매개변수 계산에 사용하는 과거의 데이터 길이이다. 좌표 (x_i, y_j) 는 장방형 영역내의 식에서 아래 단부터 j행을 고려한 격자의 중심점 좌표이다.

격자점 (x_i, y_j) 와 시간 t_k 에 대해 편미분을 취하면, 다음 Eqs. (15)~(17)로 나타낼 수 있다.

$$\left[\frac{\partial z}{\partial t} \right]_{ijk} = \frac{z(x_i, y_j, t_{k+1}) - z(x_i, y_j, t_{k-1})}{2\Delta t} \quad (15)$$

$$\left[\frac{\partial z}{\partial x} \right]_{ijk} = \frac{z(x_{i+1}, y_j, t_k) - z(x_{i-1}, y_j, t_k)}{2\Delta x} \quad (16)$$

$$\left[\frac{\partial z}{\partial y} \right]_{ijk} = \frac{z(x_i, y_{j+1}, t_k) - z(x_i, y_{j-1}, t_k)}{2\Delta y} \quad (17)$$

이를 다시 근사시키면, 다음 Eq. (18)이 된다.

$$v_{ijk} = - \left[\frac{\partial z}{\partial t} \right]_{ijk} - \{ (C_1 x_i + C_2 y_j + C_3) \left[\frac{\partial z}{\partial x} \right]_{ijk} + (C_4 x_i + C_5 y_j + C_6) \left[\frac{\partial z}{\partial y} \right]_{ijk} - (C_7 x_i + C_8 y_j + C_9) \} \quad (18)$$

이 때, 매개변수 $C_1 \sim C_9$ 는 v_{ijk} 를 0으로 등치하여 얻어지는 연립1차방정식을 이용하여 다음 Eq. (19)의 J_c 를 최소가 되도록 하여 산정할 수 있다.

$$J_c = \sum_{k=K}^{-1} \sum_{i=2}^{M-1} \sum_{j=2}^{N-1} v_{ijk}^2 \quad (19)$$

산정된 매개변수 $C_1 \sim C_9$ 가 2~3시간 동안 지속된다고 가정하고 앞으로의 강우강도 예측을 수행한다. 예측계산은 특성곡선의 역추적법을 이용한다. 이류모델 Eqs. (4)~(7)의 특성곡선을 따라서 미분방정식을 취하면, 다음 Eqs. (20)~(22)로 정리할 수 있으며, 이를 해석적으로 풀어 해를 계산할 수 있다.

$$\frac{dx(t)}{dt} = C_1 x(t) + C_2 y(t) + C_3 \quad (20)$$

$$\frac{dy(t)}{dt} = C_4 x(t) + C_5 y(t) + C_6 \quad (21)$$

$$\frac{dz(t)}{dt} = C_7 x(t) + C_8 y(t) + C_9 \quad (22)$$

우선 Eqs. (20) and (21)을 연립시켜 얻을 수 있는 해는 다음 Eq. (23)과 같은 형태로 정리된다.

$$\begin{bmatrix} x(t) \\ y(t) \end{bmatrix} = R(t-s; C_1, \dots, C_6) \begin{bmatrix} x(s) \\ y(s) \\ 1 \end{bmatrix} \quad (23)$$

여기서, $R(t-s; C_1, \dots, C_6)$ 은 $t-s, C_1, \dots, C_6$ 라고 결정되는 (2×3) 행렬이다. 또한, $z(x(t), y(t), t) - z(x(s), y(s), s)$ 는 Eqs. (22) and (23)을 이용하여 Eq. (24)의 형태로 쓸 수 있다.

$$z(x(t), y(t), t) - z(x(s), y(s), s) = S(t-s; C_1, \dots, C_9) \begin{bmatrix} x(s) \\ y(s) \\ 1 \end{bmatrix} \quad (24)$$

여기서, $S(t-s; C_1, \dots, C_9)$ 는 $t-s, C_1, \dots, C_9$ 에서만 결정되는 3차의 행벡터이다.

현재 시간을 $t=t_0$, 예측의 선행시간을 τ 라고 할 때, 예측치를 얻는 시간 $t_0+\tau$ 를 s 로 표시할 수 있는데, 이 때, $x(s)=x_i, y(s)=y_j$ 로 쓰고, $t-s=-\tau$ 로 쓸 수 있기 때문에 Eqs. (23) and (24)을 다음 Eqs. (25) and (26)으로 쓸 수 있다.

$$z(x_i, y_j, t_0 + \tau) = z(x(t_0), y(t_0), t_0) - S(-\tau, C_1, \dots, C_9) \begin{bmatrix} x_i \\ y_j \\ 1 \end{bmatrix} \quad (25)$$

$$\begin{bmatrix} x(t_0) \\ y(t_0) \end{bmatrix} = R(-\tau, C_1, \dots, C_6) \begin{bmatrix} x_i \\ y_j \\ 1 \end{bmatrix} \quad (26)$$

이에 의해 시간 $t_0+\tau$ 에서의 (x_i, y_j) 의 예측치 $z(x_i, y_j, t_0+\tau)$ 가 얻어진다. 강우강도는 분할된 격자의 중심점의 값으로 주어진다. Eq. (26)에 의해 얻어진 $(x(t_0), y(t_0))$ 를 포함한 격자의 중심점 좌표 (x_{i_0}, y_{j_0}) 를 이용하면 다음 Eq. (27)로 근사화 할 수 있으며, 이를 이용하여 Eq. (25)를 계산하여 선행시간에 따른 예측치를 산정할 수 있다.

$$z(x(t_0), y(t_0), t_0) \cong z(x_{i_0}, y_{j_0}, t_0) \quad (27)$$

2.3 예측강우 평가방법

본 연구에서는 매칭된 레이더 강우예측치와 관측치 사이의 양적 관계와 품질을 평가하기 위해 현업에서 사용하고 있는 강우예보모델의 검증기법을 적용하였다(최지혜 등, 2005). 이를 위해 레이더 추정 강우량 자료와 해당 시간에 관측된 자동기상관측장비시스템(Automatic Weather Stations, AWS) 강우량자료의 품질을 비교하여 레이더 추정강우의 정확도를 평가하고자 한다. 평가는 얼마나 맞았는가를 판단하는 정성적인 평가와 얼마나 정확한가를 판단할 수 있는 정량적 평가로 나눌 수 있으며, 이 두 방법 모두 오차에 대한 정보를 제공한다. 본 연구에서는 정성적

인 평가 항목으로 정확도 (forecast accuracy, ACC), 편이 (Bias score, BIS), 강우감지확률 (Probability of Detection, POD), 오보율 (False Alarm Ratio, FAR), 임계성공지수 (Critical Success Index, CSI), 정량적인 평가 항목으로는 평균제곱근오차 (Root Mean Square Error, RMSE), 상관 계수 (Correlation coefficient, CORR)를 사용하였다.

2.3.1 정성적 평가방법

강우의 정성적인 평가는 추정강우와 관측강우 존재 유무의 행렬로 이루어진 강우분할표 (Rain Contingency Table)에 기초한다. Table 1은 모형의 추정 능력과 추정에서 발생하는 오차의 종류를 알려준다. N (total numbers)은 추정 강우 총 수로 $Z+H+M+F$ 이다. 강우분할표는 다음의 4개의 조합으로 구성된다.

ACC는 강우의 추정을 강우 유/무로 했을 경우 실제관측이 적중한 경우와 그렇지 못한 경우에 대한 적중한 비율이다. 0에서 1의 값을 가지며 완벽한 값은 1이다.

$$ACC = \frac{\text{correct radar rain}}{\text{total rain}} = \frac{Z+H}{N} \quad (28)$$

ACC는 Z의 값에 영향을 많이 받으므로 무강우 일이 많은 경우에 적중률이 좋아지기 때문에 정확한 추정강우의 적중률을 평가하는데 어려움이 있다.

BIS는 정확도와는 상관없이 관측강우와 추정된 유강우수의 경우를 비교하는 것으로 0에서 무한대의 값을 가진다. BIS가 만약 1의 값을 가지면 추정강우의 범위는 관측과 동일하지만 관측과 같은 장소 및 동일시간에 강우가 발생했는지에 대해서는 알 수 없다. BIS가 1보다 작은 경우에는 추정시스템이 과소추정경향을 1보다 큰 경우에는 시스템이 과대추정경향을 갖는다고 말한다.

$$BIS = \frac{\text{rain radar}}{\text{rain observation}} = \frac{F+H}{M+H} \quad (29)$$

POD는 관측강우에 대한 유강우 예측의 정확도 비율을 의미하는 것으로 그 범위는 0에서 1이며 완벽한 값은 1이다. 만약 모형에서 강우 현상의 빈도를 과대 추정하는 경향이 있다면 POD의 값은 좋게 나오므로 이러한 결점을 보완하기 위해 FAR과 함께 고려해야 한다.

$$POD = \frac{\text{correct rain radar}}{\text{rain observation}} = \frac{H}{M+H} \quad (30)$$

FAR은 유강우 예측 중 틀린 경우의 비율을 의미하며 그 범위는 0에서 1이며, 1에 가까울수록 예측강우의 정확도가 낮다는 의미이다.

$$FAR = \frac{\text{false alarm}}{\text{rain radar}} = \frac{F}{F+H} \quad (31)$$

CSI는 정확히 예측했던 사건 수를 예보이거나 관측이던 간에 사건 발생과 관련된 총 수를 합하여 나눈 것이다. CSI는 사건이 발생하지 않는다고 예보했고 실제 발생하지 않은 경우의 수에 영향을 받지 않는다. 따라서 사건의 빈도수에 따라 좌우되는 경향이 있다.

$$TS = CSI = \frac{H}{H+M+F} \quad (32)$$

2.3.2 정량적 평가방법

강우의 정량적인 평가는 강우의 정확한 위치와 강우량 추정 능력의 척도로 사용되며 본 연구에서는 RMSE, 상관계수를 사용하였다. RMSE는 추정치와 관측치의 차이를 제곱근하여 평균을 취한 것으로 편이 (bias), 해상도 (resolution), 불확실도 (uncertainty)에 따라 좌우되는 강우추정 정확도의 척도로 가장 많이 사용되는 요소이다. RMSE는 작은 오차보다 큰 오차에 더 큰 영향을 미친다. 0에서 ∞의 값을 가지며 완벽한 값은 0이다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (R_i - O_i)^2} \quad (33)$$

상관계수는 추정치와 관측치 간의 차이의 일치성을 측정하는 계수이며, -1에서 1의 값을 가지며 완벽한 값은 1이다. 본 연구에서는 상관계수를 이용한 정확도 평가 기준은 기상청 (류상범, 2002)의 일반적인 기준을 따랐다.

$$CORR = \frac{\sum (R - \bar{R})(O - \bar{O})}{\sqrt{\sum (R - \bar{R})^2} \sqrt{\sum (O - \bar{O})^2}} \quad (34)$$

Table 1. Rain Contingency Table

Verifying Analysis		Radar Rainfall	
		No Rain (=0)	Rain (> 0)
Observed Rainfall	No Rain (=0)	Z (zero)	F (false)
	Rain (> 0)	M (miss)	H (hit)

3. 적용 및 평가

3.1 기본자료 및 적용

본 연구에서는 레이더 자료와 결합한 이류모델을 통해 산정된 예측강우의 적용성 평가를 위한 입력자료로 3개의 호우사상을 선정하였다. 각 호우사상은 2003년 7월 9일~10일 (Case I), 2004년 7월 3일~4일 (Case II), 2006년 7월 18일 (Case III)이다. 2003년 7월 9~10일의 호우사상은 장마기간 동안 전선의 이동으로 발생한 층상우 형태의 호우이며, 2004년 7월 3일~4일의 호우사상은 태풍 민들레에 의해 발생한 대류성 호우로 남부 일부와 강원 영동지역에 많은 비가 내린 사상이다. 2006년 7월 18일의 호우사상은 북태평양 고기압의 확장과 태풍 빌리스와 태풍 개미에 의한 수증기유입으로 장마전선이 정체·활성화되어 발생한 호우사상이다. 본 연구에서 레이더 강우추정을 위해 사용한 자료는 기상청에서 운영 중인 관악산 (KWK) 레이더와 진도 (JNI) 레이더에서 관측된 레이더 반사도 자료 (UF 형식)와 각 레이더 관측반경에 존재하는 613개 AWS를 통해 관측된 1분 강우강도자료이다. 신뢰도 높은 AWS 관측자료의 이용을 위해 배덕효 등 (2009)이 제안한 품질검사 절차에 따라 상관계수가 0.3 이상, 강우감지 조건부확률이 0.2 이상인 AWS가 레이더와 AWS 관측치 사이의 일치성을 갖는다고 판단하여 이상의 값을 갖는 AWS를 선정하였으며, 이를 이용하여 각 호우사상별, 기상레이더 종류별 이류모델의 적용을 통해 호우특성 및 기상레이더 특성에 따른 예측 정확도에 대한 분석을 가능하도록 하였다.

이류모델을 이용하여 예측강우를 산정하는 절차는 다음 Fig. 1과 같다. 우선 10분 UF 자료를 통해 10분 CAPPI

자료를 구하고, 1분 강우강도의 AWS 자료를 구축한다. 산정된 AWS와 레이더 반사도 자료 중 품질검사를 통해 보다 정확한 Z-R 관계식 산정을 위해 강우계와의 상관계수가 0.3보다 작고 CPRD가 0.2보다 작은 지점자료는 제외하였다. 이들 자료를 통해 최소자승법을 이용하여 매 10분마다 Z-R 관계식을 산정하고, 산정된 관계식을 적용하여 실시간 레이더 강우를 산정한다. 이렇게 매 10분간 산정된 레이더 강우결과를 이류모델의 입력자료로 넣어 주면 30분 간격으로 30분에서 4시간까지 선행하여 강우를 예측한다 (배덕효, 2007).

다음 Figs. 2 and 3은 Case I 사례의 관악산 레이더와 진도 레이더의 레이더 관측강우와 선행 1시간 예측강우이다. 여기서 레이더 관측강우는 최소자승법으로 산정된 Z-R 관계식으로 레이더 반사도 자료를 강우강도로 환산한 결과이며, 예측강우는 이류모델을 통해서 30분 단위로 산정된 선행 30분부터 4시간까지의 예측강우 중 선행 1시간 예측강우 결과이다.

3.2 적용결과 및 평가

3.2.1 정성적 평가 결과

이류모델을 통해 산정된 레이더 예측강우의 성능을 검증하기 위해 2절에서 제시한 정성적 및 정량적 평가 방법에 따라 AWS 관측강우와 레이더 예측강우를 비교하였다. 또한, 본연구에서는 이류모델로 산정된 예측강우 적절성을 평가할 때 평가결과에 영향을 미칠 수 있는 레이더 관측반경으로 인한 감쇄 등의 오차요인을 배제할 수 있도록 관악산과 진도 레이더 자료의 유효관측반경을 120 km 이내로 고려하여 선행시간이 30분~4시간인 이류모델의

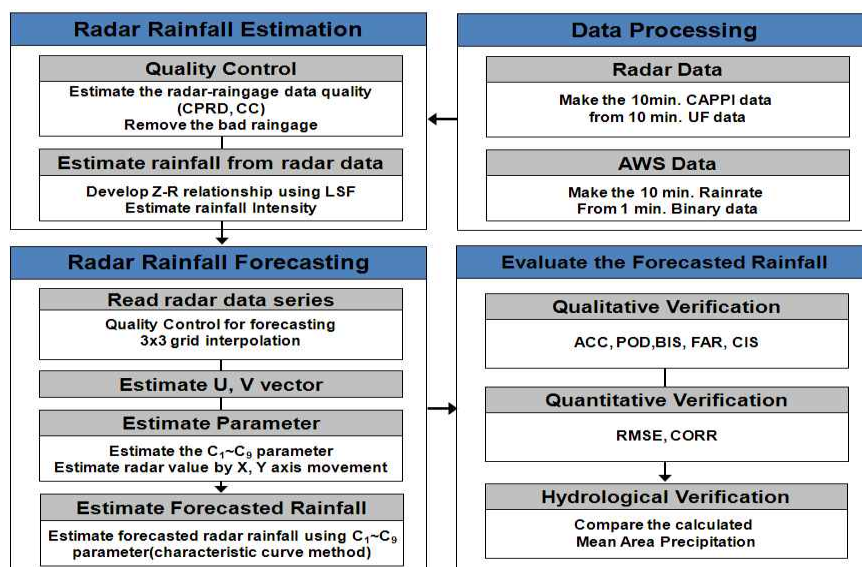


Fig. 1. Diagram for Radar Rainfall Forecasting and Evaluation

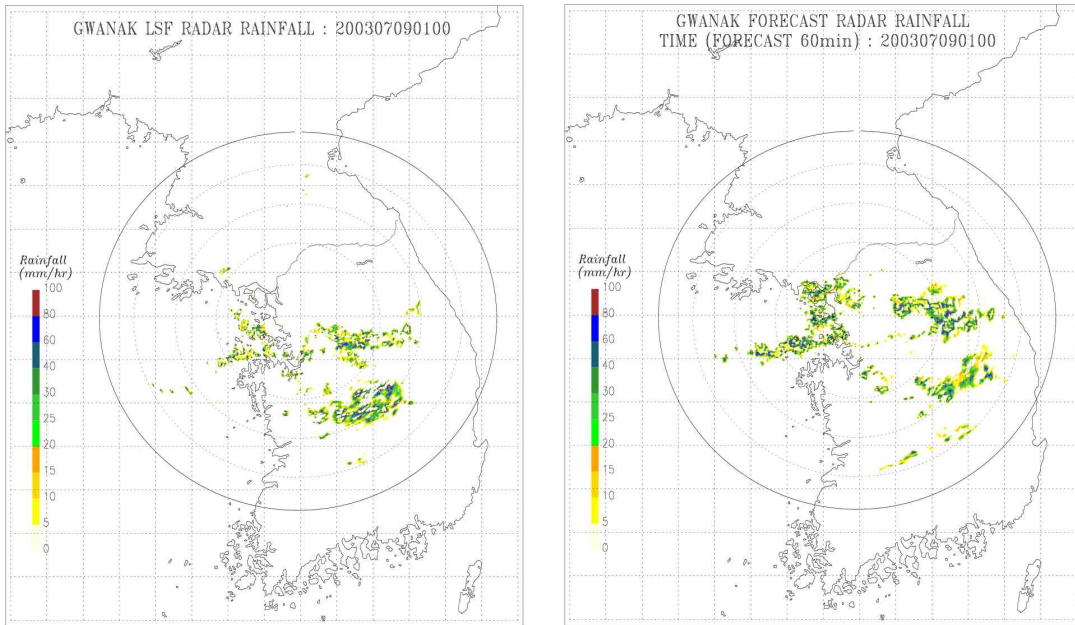


Fig. 2. Examples of Forecasted Radar with Observed Radar at KWK Site

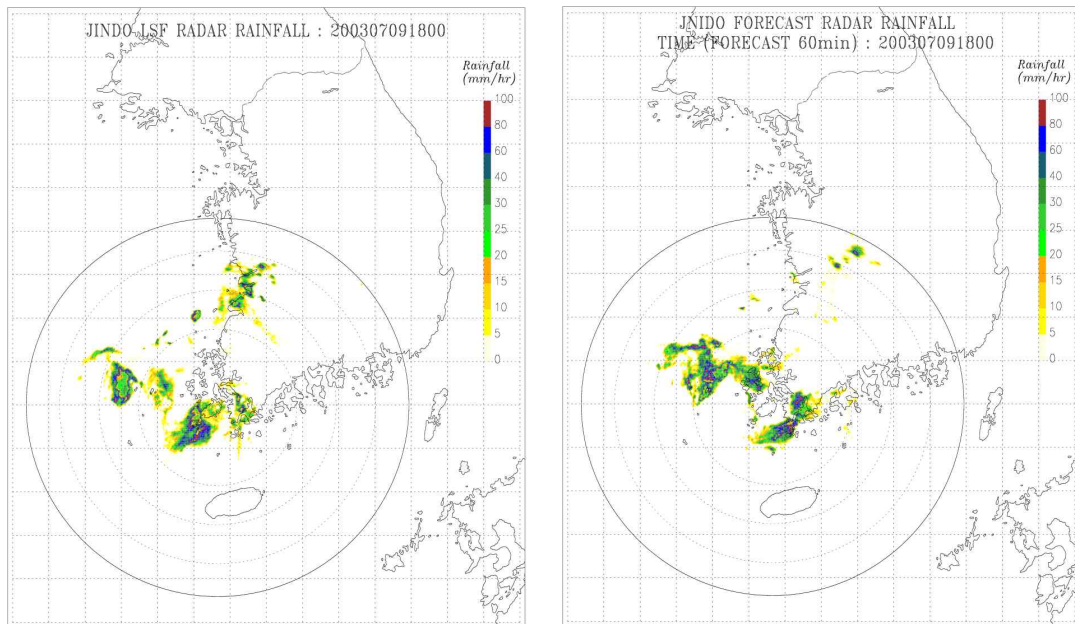


Fig. 3. Examples of Forecasted Radar with Observed Radar at JNI Site

레이더 예측강우를 정성적으로 평가하였다. 다음 Figs. 4 and 5, Tables 2 and 3은 반경 120km 내의 AWS 관측강우강도(mm/hr)와 이에 대응되는 레이더 격자지점의 예측강우를 비교하여 수행된 정성적 평가 결과이다.

우선 관악산 레이더의 각 사례에 대한 ACC를 살펴보면, 대부분의 사례에서 2시간 이내의 예측강우는 0.6 이상의 높은 정확도를 나타내었으며, 예측시간이 경과함에 따라 정확도가 낮아지는 경향을 보였다. BIS는 S-band로 교체된 후의 관악산 레이더 관측자료를 활용한 Case III

을 제외하고 대체적으로 과다 모의 경향을 보였다. POD는 과다 모의된 Case I, II의 경우 0.6 이상으로 높게 나타났는데 이는 강한 강우강도를 갖는 호우사상의 특성과 이류모델의 강우현상 빈도 과다추정 경향이 POD에도 영향을 준 것으로 판단된다. 또한 분석오류를 보완하기 위해 FAR을 함께 고려한 결과, 평균적으로 2시간 이내에서 0.35 이하로 나타나 ACC와 POD와 유사하게 강한 강우빈도를 갖는 강우 현상에 대한 예측을 다소 정확하게 예측하는 것을 알 수 있었으며, 예측시간이 경과함에 따라

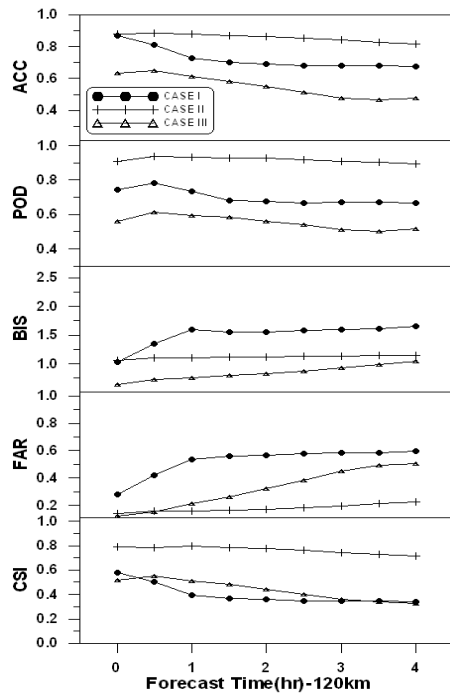


Fig. 4. Qualitative Verification of KWK

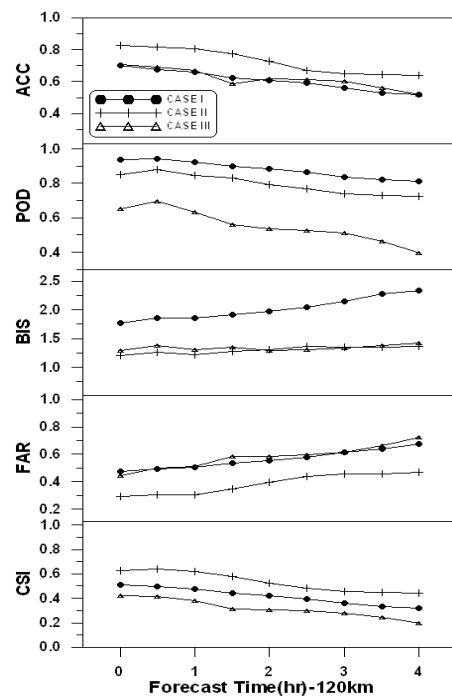


Fig. 5. Qualitative Verification of JNI

Table 2. Qualitative Verification Result of KWK in 120 km Radar Range

Fest time	Case I					Case II					Case III				
	ACC	POD	BIS	FAR	CSI	ACC	POD	BIS	FAR	CSI	ACC	POD	BIS	FAR	CSI
0hr	0.87	0.74	1.03	0.28	0.58	0.88	0.91	1.05	0.14	0.79	0.64	0.56	0.64	0.12	0.52
0.5hr	0.81	0.78	1.35	0.42	0.50	0.89	0.94	1.10	0.16	0.78	0.65	0.61	0.72	0.15	0.55
1hr	0.73	0.74	1.59	0.54	0.40	0.88	0.93	1.11	0.16	0.79	0.62	0.59	0.75	0.21	0.51
1.5hr	0.70	0.68	1.55	0.56	0.37	0.87	0.93	1.11	0.17	0.79	0.58	0.58	0.79	0.26	0.48
2hr	0.69	0.68	1.55	0.57	0.36	0.87	0.93	1.12	0.17	0.78	0.55	0.56	0.83	0.32	0.44
2.5hr	0.68	0.67	1.58	0.58	0.35	0.85	0.92	1.12	0.18	0.76	0.51	0.54	0.88	0.39	0.40
3hr	0.68	0.67	1.60	0.58	0.35	0.84	0.91	1.13	0.20	0.74	0.47	0.51	0.93	0.45	0.36
3.5hr	0.68	0.67	1.62	0.59	0.35	0.83	0.90	1.15	0.21	0.73	0.46	0.50	0.98	0.49	0.34
4h	0.68	0.67	1.65	0.60	0.34	0.82	0.90	1.15	0.22	0.71	0.48	0.52	1.05	0.50	0.33

Table 3. Qualitative Verification Result of JNI in 120 km Radar Range

Fest time	Case I					Case II					Case III				
	ACC	POD	BIS	FAR	CSI	ACC	POD	BIS	FAR	CSI	ACC	POD	BIS	FAR	CSI
0hr	0.70	0.94	1.78	0.47	0.51	0.83	0.85	1.20	0.29	0.63	0.70	0.65	1.28	0.44	0.42
0.5hr	0.68	0.94	1.85	0.49	0.50	0.82	0.88	1.26	0.30	0.64	0.69	0.69	1.38	0.50	0.41
1hr	0.66	0.93	1.86	0.50	0.48	0.81	0.85	1.21	0.30	0.62	0.67	0.63	1.30	0.51	0.38
1.5hr	0.63	0.90	1.92	0.53	0.44	0.78	0.83	1.27	0.35	0.58	0.59	0.56	1.35	0.58	0.31
2hr	0.61	0.89	1.98	0.55	0.42	0.73	0.79	1.31	0.39	0.52	0.62	0.54	1.29	0.58	0.31
2.5hr	0.59	0.86	2.05	0.58	0.40	0.67	0.77	1.36	0.44	0.48	0.61	0.53	1.31	0.60	0.30
3hr	0.56	0.84	2.15	0.61	0.36	0.65	0.74	1.35	0.45	0.46	0.60	0.51	1.34	0.62	0.28
3.5hr	0.53	0.82	2.28	0.64	0.33	0.64	0.73	1.35	0.46	0.45	0.56	0.46	1.38	0.67	0.24
4h	0.52	0.81	2.34	0.68	0.32	0.64	0.73	1.36	0.47	0.44	0.52	0.39	1.43	0.72	0.19

FAR이 증가하여 예측의 정확도가 감소하는 것을 확인하였다.

진도 레이더의 각 사례에 대한 정성적 평가 결과를 살펴보면, 모든 사례에서 2시간 이내의 예측강우는 0.6 이상의 높은 정확도를 나타내었으며, 예측시간이 경과함에 따라 정확도가 낮아지는 경향을 보였다. BIS는 1.0 이상으로 모든 사례에 대해 과다 모의 경향을 보였다. POD는 강한 강우사상인 경우 S-band 진도 레이더가 강우에 대한 감쇠영향을 크게 받지 않는 특성에 따라 Case I, II가 0.7 이상으로 높게 나타났으며, Case III의 경우 선행 1시간 이후는 0.6 이하의 결과를 나타냈다. 이는 Case III의 경우 태풍의 소강 이후의 약한 강우사상이므로 레이더의 강우 감지가 약화되는 경향이 발생한 것으로 판단된다. FAR은 평균적으로 2시간 이내에서 0.5 이하로 나타났으며, 예측시간이 경과함에 따라 FAR이 증가하여 예측의 정확도가 감소하는 것을 확인하였다. 마지막으로 CSI는 평균적으로 0.32~0.52 범위 내에서 예측시간이 증가함에 따라 감소하는 것을 확인하였다.

특히, 관악산 레이더와 진도 레이더 모두 태풍 민들레

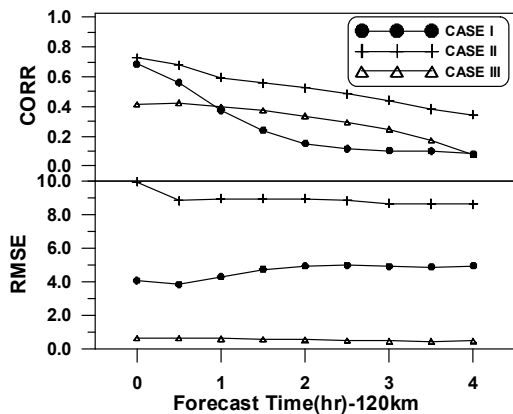


Fig. 6. Quantitative Verification of KWK

의 호우사상인 Case II에서 정성적인 평가 결과가 다른 호우 사상보다 좋은 것을 확인할 수 있는데, 이는 열대 저기압과 같은 공기덩어리가 수평으로 이동하는 이류 과정이 절대적인 기상 상황에 대해 이류모델을 통해 산정된 예측강우가 신뢰성이 있는 결과를 나타내는 것으로 판단된다.

3.2.2 정량적 평가 결과

관악산과 진도 레이더의 각 사례에 대한 정량적 평가 결과는 다음 Figs. 6~7 및 Table 4와 같다. 관악산 레이더와 진도 레이더의 대부분 사례에서 예측 강우량과 관측 강우량의 공간분포 일치정도를 나타내는 상관계수가 예측시간에 따라 감소하는 것을 볼 수 있었다. 관악산 레이더의 세 강우사상에 대한 예측강우와 AWS 관측강우와의 상관계수는 평균적으로 선행 1시간 0.55에서 선행 4시간 0.17로 감소하였다. 진도 레이더의 세 강우사상의 평균 상관계수는 선행 1시간은 0.57에서 선행 4시간 0.09로 감소하였다. 또한 RMSE는 관악산 레이더와 진도 레이더 모두 관측 강우량에 비해 크게 산출되었으며, RMSE의 선

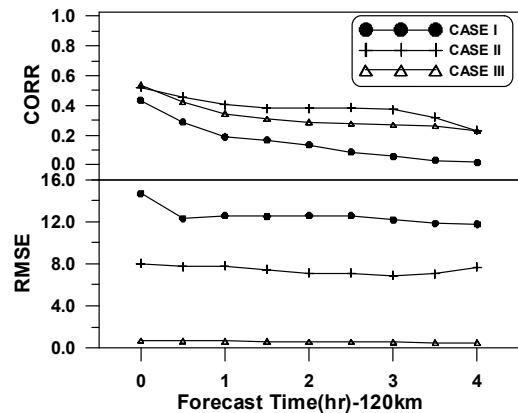


Fig. 7. Quantitative Verification of JNI

Table 4. Quantitative Verification Result in KWK and JNI Radar Site

Fcst time	KWK-120 km						JNI-120 km					
	Case I		Case II		Case III		Case I		Case II		Case III	
	CORR	RMSE	CORR	RMSE	CORR	RMSE	CORR	RMSE	CORR	RMSE	CORR	RMSE
0hr	0.68	4.07	0.73	8.93	0.42	5.43	0.61	7.93	0.78	5.11	0.48	3.68
0.5hr	0.56	3.84	0.68	8.83	0.43	5.87	0.54	8.24	0.74	5.47	0.44	3.58
1hr	0.37	4.30	0.60	8.92	0.40	5.69	0.34	9.00	0.55	6.51	0.45	3.17
1.5hr	0.24	4.74	0.56	8.93	0.37	5.75	0.20	9.46	0.45	7.12	0.43	3.63
2hr	0.15	4.93	0.53	8.94	0.34	5.83	0.12	9.59	0.37	7.78	0.41	3.08
2.5hr	0.12	4.97	0.48	8.83	0.30	6.00	0.05	9.60	0.25	8.43	0.37	3.16
3hr	0.10	4.91	0.44	8.64	0.25	6.14	0.00	10.00	0.25	8.43	0.32	3.26
3.5hr	0.10	4.88	0.38	8.63	0.17	6.15	-0.02	10.09	0.12	9.09	0.26	3.30
4h	0.08	4.95	0.34	8.63	0.08	6.20	-0.02	9.91	0.08	9.41	0.20	3.43

행시간에 따른 증가율이 평균적으로 관악산 레이더는 0.8 mm 이상, 진도 레이더는 3.9mm 이상 증가하는 경향을 보였다.

특히 대부분의 예측강우의 상관계수는 이류모델의 초기장으로 활용되는 레이더 실황강우의 평균 상관계수 0.61(관악산 레이더), 0.63(진도 레이더) 이하의 결과를 나타냈다. RMSE 역시 평균 18.43 mm(관악산 레이더), 16.72 mm(진도 레이더) 이상의 결과를 나타냈다. 이는 레이더 예측강우 정확도의 절대적인 수치는 초기장인 실황강우의 정확도에 의존하며 향후 예측강우의 정확도 개선을 위해서는 필수적으로 실황강우의 정확도 개선이 요구됨을 알 수 있다.

또한, AWS와 레이더 강우의 비교를 통해 발생할 수 있는 자료관측 특성 및 분해능으로 인한 평가결과의 오차를 최소화하고자 동일한 시공간 분해능을 갖는 레이더 예측강우와 동일 시간에 해당되는 실제 레이더 실황강우를 비교하였으며, 그 결과는 다음 Figs. 8 and 9와 같다. 비교결과, 관악산 레이더와 진도 레이더 예측강우는 1시간 이내의 예측에서 평균적으로 상관계수와 정확도 모두 0.5 이상

의 결과를 나타내어 레이더 예측강우의 활용 가능성을 확인할 수 있었으며, 예측시간에 따른 RMSE 증가 추세를 AWS 비교 결과보다 명확하게 확인할 수 있었다. 각 레이더 사이트별로 동일한 강우사상을 적용하였으나 레이더 사이트별로 직접적인 영향을 미친 호우의 형태 및 특성이 달라 본 분석을 통해서서는 C-band와 S-band 기상레이더 관측의 기계적인 특성차이를 뚜렷이 확인할 수는 없었다.

3.2.3 수문학적 활용성 평가

홍수예보의 활용을 위한 유역기반의 예측강우 활용성을 평가하고자 중랑천 유역을 대상으로 초단시간 예측강우의 유역평균강우량을 산정하였다. 이를 위해 관악산 레이더 자료를 사용하여 레이더 사이트 반경을 중심으로 계산된 예측강우와 레이더 실황강우 자료에서 중랑천 유역에 해당되는 지점을 추출하였다. 다음 Figs. 10~12는 중랑천 유역의 레이더 실황 및 예측강우를 도시한 것으로 예측시간에 따라 강우가 이동하는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 13은 최소자승법으로 산정된 레이더 실황강우를

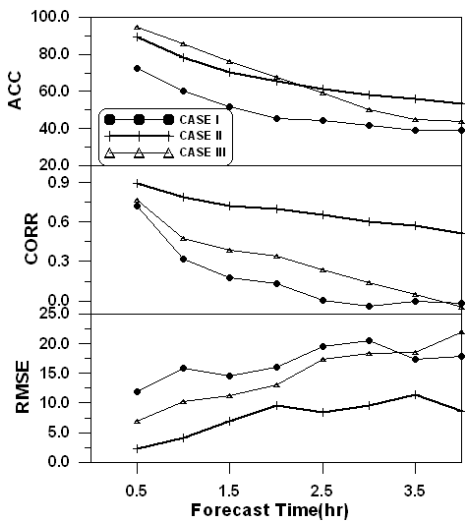


Fig. 8. Verification of Different Lead Time in KWK

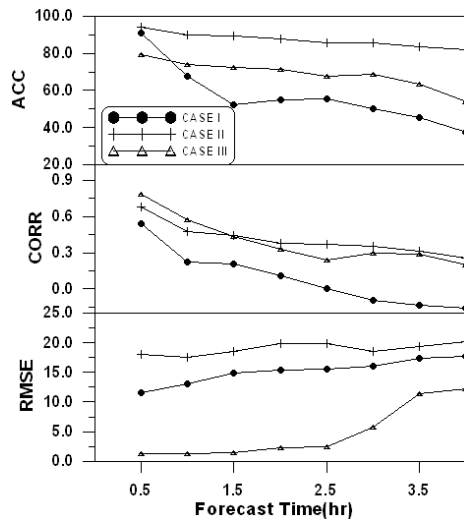


Fig. 9. Verification of Different Lead Time in JN1

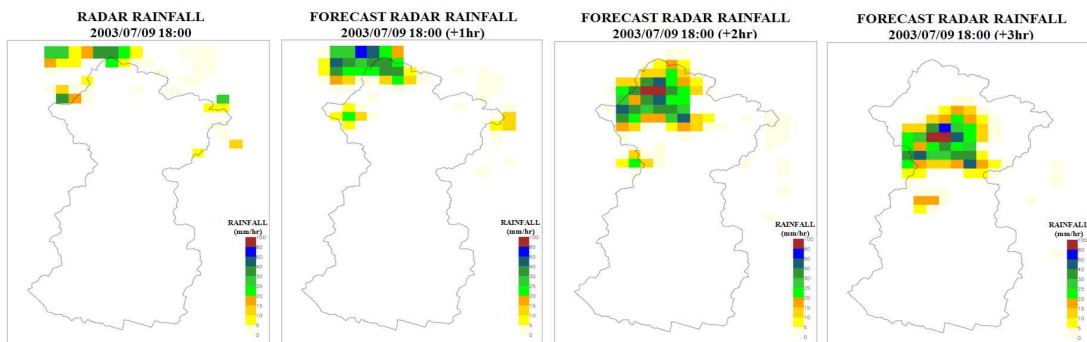


Fig. 10. Radar Rainfall Field over Jung-rang Watershed (Case I)

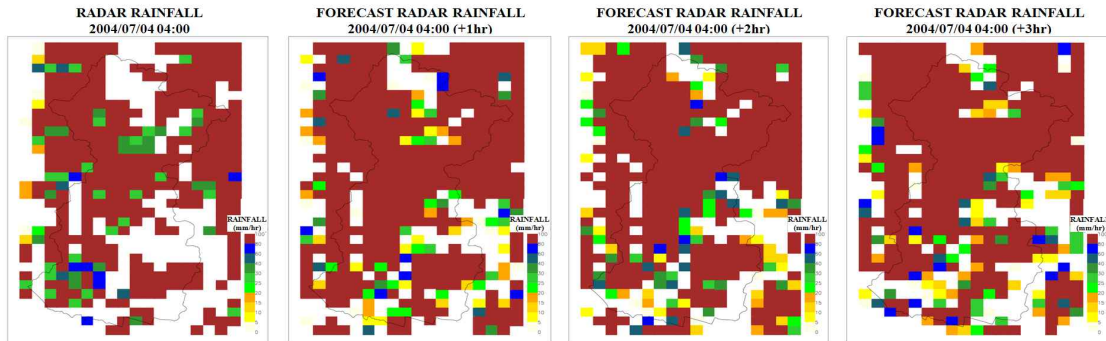


Fig. 11. Radar Rainfall Field over Jung-rang Watershed (Case II)

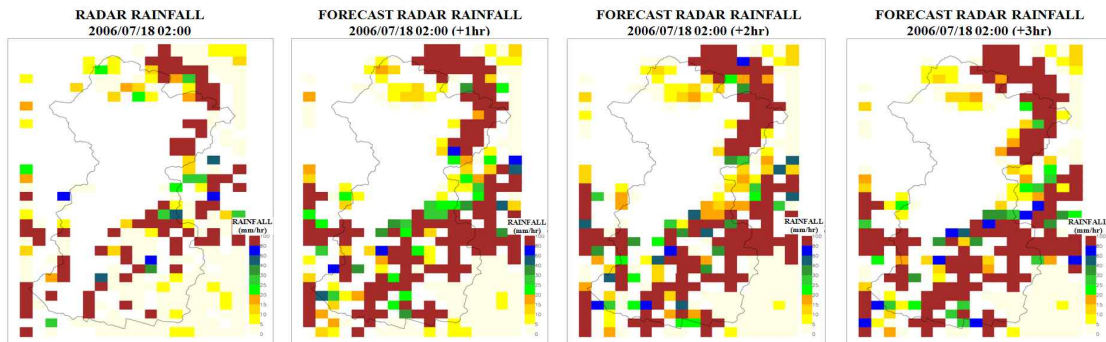
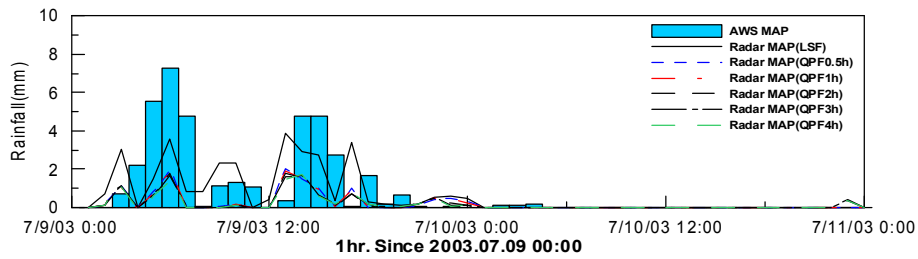
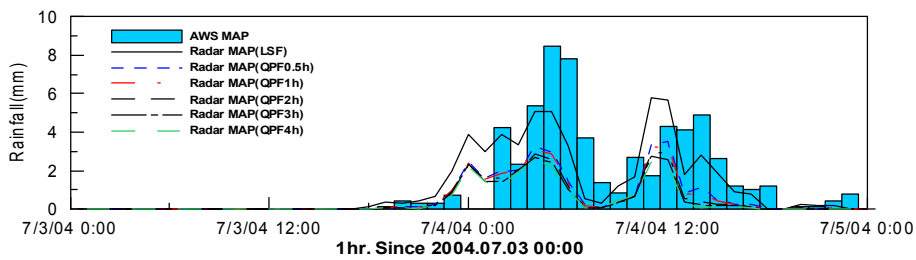


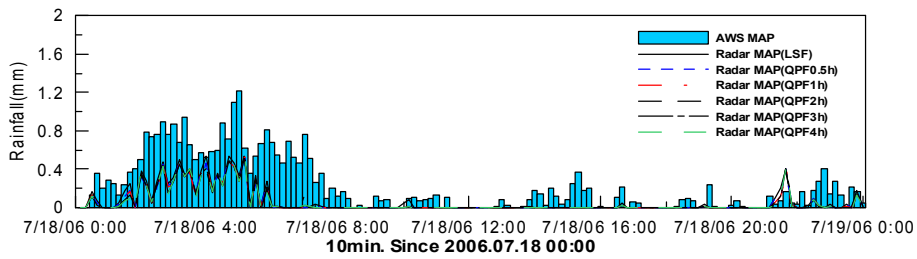
Fig. 12. Radar Rainfall Field over Jung-rang Watershed (Case III)



(a) Case I



(b) Case II



(c) Case III

Fig. 13. Mean Areal Precipitation of Forecasted Radar Rainfall in Jung-rang Watershed

Table 5. Hydrological Verification Result for Jungrang Watershed

Fcst Time	Case I			Case II			Case III		
	CORR	RMSE	Volume Error	CORR	RMSE	Volume Error	CORR	RMSE	Volume Error
0hr	0.583	1.460	-21.870	0.720	1.470	-9.380	0.519	1.690	-67.790
0.5hr	0.582	1.610	-71.560	0.666	1.740	-53.510	0.508	1.710	-72.030
1hr	0.578	1.620	-71.660	0.648	1.790	-56.160	0.502	1.710	-72.420
1.5hr	0.573	1.620	-71.960	0.628	1.830	-58.450	0.500	1.700	-72.480
2hr	0.573	1.630	-73.910	0.611	1.870	-60.430	0.496	1.690	-72.350
2.5hr	0.571	1.630	-75.220	0.595	1.900	-62.430	0.493	1.700	-72.750
3hr	0.563	1.630	-74.690	0.579	1.930	-63.960	0.486	1.710	-73.110
3.5hr	0.560	1.640	-74.670	0.569	1.950	-65.630	0.484	1.710	-73.170
4h	0.552	1.650	-75.540	0.560	1.980	-67.090	0.466	1.710	-73.080

활용하여 1시간, 2시간, 3시간, 4시간 선행예측된 유역평균강우량을 AWS 관측강우와 함께 도시한 것이다. Table 5는 중량천 레이더 예측 유역평균강우를 통계적으로 분석한 것으로 선행시간이 증가할수록 AWS 관측강우와의 정확도 및 상관성이 감소하고 양적 편차가 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 세 강우사상의 실험 유역평균강우의 AWS 관측 유역평균강우와의 평균 상관계수는 0.61, 예측 유역평균강우의 상관계수는 선행 예측시간이 증가할수록 0.58에서 0.52으로 감소하며, 평균적으로 RMSE는 1.54 mm에서 1.78 mm로 증가하였으며, 전체적으로 관측강우에 비해 과소추정하는 경향을 확인할 수 있었다.

본 결과를 통해 레이더 예측강우의 수문학적 활용성을 확정적으로 우수하다고 평가할 수는 없으나 예측강우의 상관계수를 포함한 정량적 통계치가 실제 호우 사상을 일부 구현할 수 있을 정도의 정확도를 갖는 것을 확인할 수 있었다. 특히, Figs. 10~12에서 보여준 것처럼 강우의 이동 및 공간분포를 예측할 수 있는 단시간 강우예측 결과는 분포형 수문모형과 결합하여 활용될 수 있으며, 추후 이와 관련한 다양한 사례연구를 통해 이류모델의 수문학적 측면의 정확도 평가가 보완되어야 할 것으로 사료된다.

4. 결론 및 향후과제

본 연구에서는 홍수예보와 같은 수문학적 활용 측면에서 요구되는 강우선행시간 확보를 위해 단시간 예측강우의 활용 측면에서 레이더 자료와 이류모델을 활용한 초단시간 강우예보의 적용성을 평가하였다. 이를 위해 최소자승법으로 레이더 강우를 추정하고, 추정된 강우를 이류모델의 초기장으로 활용하였다. 또한 레이더 예측강우와 지

상관측강우의 비교를 통해 레이더 예측강우의 정확도를 정성적·정량적으로 평가하고, 유역기반 홍수예보의 활용 측면을 고려하여 중량천 유역을 대상으로 단시간 예측강우의 유역평균강우량을 산정하여 평가하였다. 레이더 예측강우의 정성적 평가 결과, 각 호우사상의 특성별로 절대치의 차이가 있으나 관악산 레이더와 진도 레이더 대부분의 사례에서 예측강우는 평균적으로 0.6 이상의 정확도와 0.7 이상의 POD를 나타내었으며, CSI는 강한 강우사상인 경우 0.6 이상으로 높게 나타났으며, FAR는 3시간 이내에서는 0.4 이하로 나타나 다소 정확하게 예측하는 것을 알 수 있었다. 정량적 평가 결과, 예측강우와 AWS 관측강우와의 상관계수는 평균적으로 관악산 레이더와 진도 레이더의 선행 1시간 예측강우가 대부분 0.5 이상의 비교적 좋은 상관성을 보였다. 특히 열대 저기압 태풍 사상에 대한 예측강우의 평가결과가 다른 호우사상에 비해 높은 정확도를 나타냈는데 이는 열대 저기압과 같은 공기덩어리가 수평으로 이동하는 이류 과정이 절대적인 기상 상황에 대해 이류모델이 신뢰성이 있는 결과를 나타내는 것으로 판단되었다. 또한, 홍수예보의 활용을 위한 예측 유역평균강우의 평가 결과 관측강우에 비해 과소추정하는 경향이 있으나 평균적으로 상관계수 0.5 이상으로 비교적 정확하게 강우를 예측하는 것을 확인할 수 있었다.

본 연구에서는 사례연구 및 평가결과를 통해 레이더와 이류모델을 이용한 초단시간 예측강우의 국내 활용성을 확인할 수 있었다. 다만 향후 보다 다양한 사례연구 및 수문모형과 레이더 예측강우의 결합을 통하여 이류모델의 수문학적 측면의 평가가 보완되어야 하며, 초기장의 정확도에 의존하는 이류모델 예측강우의 정확도 개선을 위해 레이더 실험강우의 정확도 개선에 관한 지속적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시 행한 건설기술혁신사업 (08기술혁신F01)에 의한 차세대홍수방어기술개발연구단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- 김광섭, 김종필 (2008). “기상레이더 자료를 이용한 단시간 강우예측모형 개발.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제41권, 제10호, pp. 1023-1034.
- 김광섭, 김종필 (2009). “연속 CAPPI 자료를 이용한 단기 강우예측 모형 개발.” **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제29권, 제6B호, pp. 543-550.
- 류상범 (2002). 기상통계론, 기상연구소.
- 배덕효 (2007). 도시강우유출 실태 및 초단시간예보 결합 기술 개발, 도시홍수재해관리기술 연구단, 연차보고서.
- 배덕효, 트란 양 푸응, 윤성심 (2009). “수문학적 활용을 위한 레이더 강우의 정확도 평가 방법.” **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제42권, 제12호, pp. 1039-1052.
- 이지운, 정성훈, 한상욱, 이희상 (2008). “초단시간 기상예측을 위한 역학 모델의 도입 및 개선 계획.” **2008년도 한국기상학회 가을 학술대회 논문집**, 한국기상학회, pp. 56-57.
- 최지혜, 김영화, 오성남 (2005). “5대강 유역에 대한 초단시간 강우예보모델의 검증.” **한국기상학회지**, 한국기상학회, 제41권, 제3호, pp. 347-357.
- Bellon, A., and Austin, G.L. (1978). “The evaluation of two years of a real-time operation of a short-term precipitation forecasting procedure (SHARP).” *J Appl Meteor*, Vol. 17, pp. 1778-1787.
- Cranston, M.D., and Black A.R. (2006). “Flood warning and the use of weather radar in Scotland: a study of flood events in the Ruchill Water catchment.” *Meteorological Applications*, Vol. 13, pp. 43-52.
- Krajewski, W.F., and Smith, J.A. (2002). “Radar hydrology: rainfall estimation.” *Adv Water Resour*, Vol. 25, pp. 1387-1394.
- Mecklenburg, S., Jurczyk, A., Szturc, J., and Ośródk, K. (2005). “Quantitative precipitation forecasts (QPF) based on radar data for hydrological models.” *COST Publication Series*, EUR, 21525, p. 36.
- Morin, E., Krajewski, F.W., David C.G., Gao, X., and Soroosian, S. (2003). “Estimating radar intensities from weather radar data: The scale-dependency problem.” *J Hydrol*, Vol. 4, pp. 782-797.
- Nakakita, E., Ikebuchi, S., Nakamura, T., Kanmuri, M., Okuda, M., Yamaji, A., and Takasao, T. (1996). “Short-term rainfall prediction method using a volume scanning radar and grid point value data from numerical weather prediction.” *J Geophys Res*, Vol. 101, No. D21, pp. 26181-26197.
- Ogden, F.L., and Julien, P.Y. (1994). “Runoff model sensitivity to radar rainfall resolution.” *Journal of Hydrology*, Vol. 158, pp. 1-18.
- Sugimoto, S., Nakakita E., and Ikebuchi, S. (2001). “A stochastic approach to short-term rainfall prediction using a physically based conceptual rainfall model.” *Journal of Hydrology*, Vol. 242, pp. 137-155, 2001.
- Shiiba, M., Takasao, T., and Nakakita, E. (1984). “Investigation of short-term rainfall prediction method by a translation model.” *Proc. 28th Japanese Conf on Hydraulics*, JSCE, pp. 423-428 (in Japanese).
- Smith, J.A., and Krajewski, W.F. (1993). “A modeling study of rainfall rate-reflectivity relationships.” *Water Resources Research*, Vol. 29, pp. 2505-251
- Vieux, B.E. (2004). Distributed hydrologic modeling using GIS. ISBN 0-7923-7002-3, Kluwer Academic Publishers, Norwell, Massachusetts, Water Science and Technology Library, Vol. 48, p. 293.

논문번호: 09-143	접수: 2009.12.30
수정일자: 2010.04.01/07.30	심사완료: 2010.07.30