기상레이더 자료를 이용한 단시간 강우예측모형 개발

Development of a Short-term Rainfall Forecasting Model Using Weather Radar Data

김 광 섭* / 김 종 필**

Kim, Gwangseob / Kim, Jong Pil

Abstract

The size and frequency of the natural disaster related to the severe storms are increased for recent decades in all over the globe. The damage from natural disasters such as typhoon, storm and local severe rainfall is very serious in Korea since they are concentrated on summer season. These phenomena will be more frequent in the future because of the impact of climate change related to increment of CO₂ concentration and the global warming. To reduce the damage from severe storms, a short-range precipitation forecasting model using a weather radar was developed. The study was conducted as following four tasks: conversion three-dimensional radar data to two-dimensional CAPPI(Constant Altitude Plan Position Indicator) efficiently, prediction of motion direction and velocity of a weather system, estimation of two-dimensional rainfall using operational calibration. Results demonstrated that two-dimensional estimation using weather radar is useful to analyze the spatial characteristics of local storms. If the precipitation forecasting system is linked to the flood prediction system, it should contribute the flood management and the mitigation of flood damages.

keywords : rainfall forecasting, weather radar, CAPPI, motion vector

요 지

최근 몇 년간 전 세계에 걸쳐 폭풍우와 관련한 자연재해는 그 규모와 빈도에 있어서 상당히 증가하고 있는 추세다. 특히, 우리나라는 강수의 대부분이 여름철에 집중되어 있어 이러한 태풍, 폭우 그리고 국지성 집중호우 등과 같은 자연재해로 인한 피해가 더욱 심각하다. 이러한 현상은 대기 중 이산화탄소 농도의 증가로 인한 지구온난화와 엘니뇨 등으로 인하여 앞으로도 더욱 빈번해질 것으로 전망된다. 따라서 이와 같은 폭풍우로 인한 피해를 줄이기 위하여 본 연구에서는 기상레이더를 이용한 단시간 강우예측 모형을 개발하였다. 본 연구는 3차원으로 생산되는 레이더 자료를 2차원 CAPPI(Constant Altitude Plan Position Indicator)로 변환, 강우의 이동방향과 이동속도 예측, 현업보정을 이용한 2차원 강우량 산정으로 구성되어 있다. 연구결과 기상레이더를 이용한 국지성 호우의 단시간 강우예측 가능성을 제시하였으며 향후 홍수 예·경보시스템과 연계한다면 홍수 관리 및 피해 경감에 기여할 것으로 판단된다.

핵심용어 : 강우예측, 기상레이더, CAPPI, 이동벡터

* 교신저자, 경북대학교 공과대학 건축토목공학부 부교수

Associate Prof., Dept. of Civil Eng., Kyungpook National Univ., Daegu 702-701, Korea
(e-mail: kings@knu.ac.kr)

** 경북대학교 대학원 건축토목공학부 석사

Master, Dept. of Civil Eng., Kyungpook National Univ., Daegu 702-701, Korea

1. 서론

최근 우리나라뿐만 아니라 전 세계는 국지성 집중호우 및 태풍으로 많은 인명피해와 재산피해를 입고 있다. 특히, 우리나라는 강수의 대부분이 여름철에 집중되어 있어 폭풍우를 동반한 태풍이나 작은 국지성 집중호우로 인한 침수, 매몰 등으로 인한 피해가 심각한 실정이다. 우리나라 집중호우의 특징은 주로 여름철에 국지적으로 급격히 발달하며 지속시간이 짧은 대류성 구름으로 인한 호우이며, 강수구역이 작아서 중관기상관측 체계에 의한 강수의 분석 및 예보에 큰 어려움이 따른다. 그럼에도 불구하고 기상레이더 등 관측시스템의 발달과 예보기술의 향상으로 이러한 문제점을 극복할 수 있는 가능성은 점차 높아져 가고 있다. 기상레이더는 끊임없이 변화하는 기상현상을 연속적이고 광범위하게 추적하여 많은 양의 시공간 기상정보를 제공해줄 뿐만 아니라 정찰비행기, 지상우량계 등에 의한 관측의 제약을 극복할 수 있는 중요한 관측 수단이다. 이러한 기상레이더를 이용하여 강수의 이동방향 및 이동속도를 추정함으로써 이동하는 강수를 미리 예측하고 나아가 홍수, 범람 등의 자연재해 예방에 활용할 수 있을 것이다.

기상레이더를 이용한 정량강수량 추정에 관한 연구는 기상분야에서 상당히 많이 수행되어져 왔다. 1948년 Marshall and Palmer이 강우입자의 직경분포를 이용하여 레이더 반사도 인자(Z)와 지상우량계로 관측된 강우강도(R) 사이의 관계식 $Z=aR^b$ 를 처음으로 제시(이하 M-P관계식)하였으며, 그 후 여러 연구자들이 강우형태에 따른 Z-R관계식을 제시하였다(Austin, 1987; Rosenfeld *et al.*, 1993; Atlas *et al.* 1999). 또, 일본 건설성에서 운영하는 레이더 시스템은 일정한 Z-R관계식을 사용하는 것이 아니라 실시간으로 Z-R관계식을 산정하여 사용하였으며(Kotarou *et al.*, 1995), Fujiwara (1965), 정성화 등(2005), Suk *et al.*(2008)도 실시간 Z-R관계식에 대하여 비슷한 연구를 수행하였으며 지상우량계로 관측된 자료와 상당히 잘 일치하는 결과를 보여주었다. 기상레이더 영상의 상관법을 이용한 단시간 예보에 관한 연구는 Hilst and Russo(1960), Kessler and Russo(1963) 등에 의해서 시작되었으며, 당시 전체 강우 시스템의 이동방향을 결정하는데 이용되었다. 그 후 고해상도의 레이더 자료를 이용하기 시작하면서 강우 시스템 내부에 셀의 운동까지도 분석할 수 있게 되었다(Rinehart and Garvey, 1978; Tuttle Foote, 1990; Tuttle Gall, 1999). 또한, Li *et al.*(2004)은 기상레이더 자료의 통계적 외삽법을 이용하여 단시간 강우예측기법을 개발하였다. 이렇게 산정된 기상레이더 정량강우는

분포형 수문모형을 연계하여 그 적용성을 분석하는데 이용되었다(Ogden Julien, 1994; Vieux, 2004). 국내에서는 최규현 등(2005)이 태풍 “루사”의 기상레이더 합성 CAPPI와 지상 강우관측망 자료 및 geostatistic 기법을 이용하여 2차원 정량강우를 산정하고 감천유역 등의 홍수유출 및 범람해석을 수행했던 사례가 있다. 본 연구에서는 기상레이더를 활용한 2차원 정량강수량 예측을 위하여 3차원의 구면좌표계로 이루어진 원시 레이더 자료를 신속하고 효율적으로 원하는 고도 및 공간분해능의 2차원 CAPPI(Constant Altitude Plan Position Indicator) 자료로 변환하기 위한 CAPPI 산출 프로그램을 작성하였으며, 산출된 연속 CAPPI 자료를 이용하여 강수의 이동방향과 이동속도를 분석하고 이를 외삽함으로써 단시간 강우의 변화를 예측하였다. 또한, 여기서 산출된 CAPPI 예측장으로 현업보정 기법을 이용하여 2차원 정량강수량을 산정하였다. 이렇게 산정된 단시간 강우예측 자료는 보다 정확한 강우유출분석 및 예측을 가능하게 할 것으로 기대한다.

2. 연구내용

2.1 기상레이더를 이용한 단시간 강우예보

대기는 수 m에서 수백 km의 범위에 이르는 기상현상의 광대한 스펙트럼을 가지고 있으며, 기상현상의 규모가 작으면 작을수록, 수명은 짧아지고 시공간 변화특성이나 생성·성장·소멸 등을 예측하기에 더 많은 어려움을 가지게 된다. 또한, 중규모 기상현상을 예측함에 있어서 수치예보(NWP; Numerical Weather Prediction)는 2~3시간 이후부터 신뢰할 만한 결과를 얻을 수 있으며, 2~3시간 이전까지는 외삽법에 의한 예보방법이 예측오차가 오히려 더 작으며 적용성이 높다(Li *et al.*, 2004). 따라서 규모가 작고 수명이 짧은 중규모 기상현상은 수치예보기법이 개선된 예측을 할 수 있는 시간대까지 예보 취약성을 보완할 단시간 예보기법이 요구된다. 지금까지 지상에 위치한 기상레이더 자료는 중규모 기상현상을 감시함에 있어 중요한 역할을 해오고 있다. Kitzmiller(1996)은 외삽 통계 기법을 이용하여 레이더 관측반경내에 대한 1시간 강우예측 모형을 개발하였다. 뿐만 아니라 Li *et al.*(2004)도 외삽 통계 기법을 이용한 단시간 강우 예측 모형을 개발하여 홍콩지역 강우예보에 활용하였다. 본 연구에서는 호우를 발생시키는 중규모 및 그 이상의 이동 강우현상의 단시간 예측을 하기 위해서 기상청에서 운영하는 기상레이더 관측망으로부터 수집된 레이더 반사도 자료와 지상 기상관측망 자료 및 통계기법을 이용하였다.

2.2 레이더 자료의 처리

2.2.1 레이더 자료의 구조 및 특성

기상레이더를 이용한 강우의 지상관측 형태는 Fig. 1에서 제시한 바와 같이 여러 관측 고도각에 대하여 기록된다. 생산되는 원시자료는 UF(Universal Format)형식의 구조로 몇 가지의 헤더정보가 기록된 부분과 반사도 자료가 기록된 부분으로 구성되어 있다. 헤더부분은 레이더의 특성, 관측시간, sweep 수, ray 수, 고도각, 방위각 등의 정보를 기록하는 부분, 자료의 종류(반사도, 시선속도 등)와 자료의 위치(고도각, 방위각, 레이더로부터의 경사거리 등)를 기록하는 부분. 또, 빔의 폭, nyquist 속도, 편파기능 유무, bin 수, scale factor 등의 정보를 기록하는 부분으로 나뉜다. 레이더 자료는 그림에서 나타난 바와 같이 관측 고도각에 따라 관측 범위가 다르므로 강수가 형성되고 이동하는 대표 고도에 대한 반사도 값을 원하는 공간분해능을 가진 자료로 변환하는 작업을 필요로 한다.

2.2.2 레이더 반사도 보간법을 이용한 CAPPI의 산정

전술한 바와 같이 레이더로부터 생산된 반사도는 구면좌표계의 UF형식으로 이루어져 있다. Fig. 1에 나타난 레이더 관측 자료를 이용하여 특정 고도의 반사도 정보를 분석하기 위해서는 3차원 구면좌표계로 이루어진 레이더 반사도 정보를 2차원 직교좌표계로 변환하는 과정을 반드시 거쳐야 한다. 본 연구에서는 Mohr and Vaughan(1979)이 제안한 방법을 사용하여 CAPPI 산출 프로그램을 구축하였으며, 개발한 QPF(Quantitative Precipitation Forecasting) 모형의 적용성 확장을 위하여 유역 특성과 분포형 모형의 특성에 따른 필요가 예상되는 다양한 공간 분해능의 자료를 획득할 수 있게 하였으며, 강우의 특성을 잘 반영할 수 있는 다양한 고

도의 반사도 자료를 생산할 수 있도록 작성하였다. 연구에서는 481×481개의 배열로 구성된 1km 공간해상도의 CAPPI 자료를 생산하였다. 먼저 481×481개의 격자점으로 구성된 직교좌표계 (x, y, z) 를 만들고, 이를 관계식을 이용하여 구면좌표계 (R, θ, ϕ) 로 변환한다.

$$R = (x^2 + y^2 + z^2)^{1/2} \quad (1)$$

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{x}{y}\right) \quad (2)$$

여기서, R 은 레이더로부터 각 격자점까지의 시선거리이며, θ 는 방위각이다.

지구의 곡률과 빔 굴절을 반영하기 위하여 고도각 ϕ 의 계산에서 기준 조정을 하게 된다. 일반적으로 레이더와 동일한 고도에서 수평으로 레이더 빔을 송출하더라도 240km를 진행하는 동안 수직거리로 약 3.4km의 오차가 발생한다. 따라서 빔 굴절에 대한 보정은 필수적이라 하겠다. 레이더의 감지 수평면(z_h) 위에 주어진 점 (x, y, z) 의 표고는 다음 식으로부터 계산한다.

$$z_h = z + \frac{x^2 + y^2}{iD} \quad (3)$$

여기서, i 는 대류권 영역 내에서의 레이더 빔 굴절에 대한 표준보상계수(Standard Compensating Factor; Battan, 1973)이며, D 는 레이더 지점에서의 지구의 지름이다(한반도 영역에서의 지구의 지름은 약 12,740km이다). 또, ϕ 는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\phi = \sin^{-1} \frac{z_h}{R} \quad (4)$$

Fig. 1. Principles of Volume Scan

Fig. 2. Schematic Diagram of CAPPI Interpolation

이렇게 정의된 직교좌표계의 모든 격자점이 구면좌표계로 변환된 다음 레이더 관측 자료로부터 각 좌표 (R, θ, ϕ) 의 고도각 ϕ 에 위아래로 인접한 고도각을 산출한다. 각 고도각에 대해서 Fig. 2(a)와 같이 시선방향과 방위각에 대하여 인접한 4개의 관측치로부터 Eq. (5)를 이용하여 추정치를 구한다. 그리고 이 값을 Eq. (6)에 대입하여 Fig. 2(b)와 같이 고도각에 따라 보간하여 최종 추정치를 구한다.

$$Z_e(R, \theta) = \frac{1}{\Delta R \Delta \theta} [(R - R_i) \{ (\theta - \theta_j) Z_e(i+1, j+1) - (\theta - \theta_{j+1}) Z_e(i+1, j) \} - (R - R_{i+1}) \{ (\theta - \theta_j) Z_e(i, j+1) - (\theta - \theta_{j+1}) Z_e(i, j) \}] \quad (5)$$

$$Z_e(R, \theta, \phi) = \frac{1}{\Delta \phi} \{ (\phi - \phi_k) Z_e(R, \theta, \phi_{k+1}) - (\phi - \phi_{k+1}) Z_e(R, \theta, \phi_k) \} \quad (6)$$

레이더 반사도를 보간하여 CAPPI를 산정할 때 유의해야 할 점은 기상레이더마다 생산되는 자료의 특성이 다르다는 점이다. 진도 침찰산 S밴드 레이더의 경우 생산되는 자료는 총 9개의 sweep과 240개의 bin 그리고 360개의 ray로 이루어져 있다. 하지만 서울 관악산 C밴드 레이더의 경우 총 8개의 sweep과 240개의 bin 그리고 379개의 ray로 이루어져 있다(본 연구에서 사용된 2003년 자료에 한함). 또한, 레이더마다 그 고도각이 서로 다르다는 점에 주의해야 한다. 따라서 CAPPI 산정시 대상 레이더의 특성을 반드시 고려하여야 한다. Fig. 3은 CAPPI 산정과정을 나타내는 흐름도이다.

Fig. 3. Flowchart of Generating CAPPI(E.L. 1.5km)

2.3 강우의 이동방향 및 이동속도 산정

2.3.1 TREC(Tracking Radar Echoes by Correlation) 기법의 적용

기상 레이더를 이용한 레이더 반사도의 추적을 위해서 TREC 기법에 대한 연구가 수행되어 왔다. TREC 기법은 처음에 전체 기상 시스템의 이동방향을 결정하는데 사용되었다(Hilst Russo, 1960; Kessler Russo, 1963). 레이더 기기의 발달과 함께 고해상도의 반사도 자료를 이용하게 되면서, 점차 기상 시스템 내부 셀의 개개의 운동특성까지도 분석할 수 있게 되었다(Rinehart Garvey, 1978; Tuttle Foote, 1990). Tuttle and Gall(1999)은 태풍 Andrew and Hugo에 대해서 WSR-57 기상 레이더의 반사도 자료를 이용하여

TREC 기법을 적용하였으며, 이는 비행기에서의 관측 자료와 상당히 잘 일치하였다.

TREC 기법은 일정한 시간간격으로 제공되는 레이더 반사도 자료에 대하여 설정된 두 윈도우 사이의 상관계수의 최대치를 찾아냄으로써 반사도 즉 강우의 이동방향과 이동속도를 파악할 수 있다. 상관계수를 이용한 방법의 장점은 하나의 레이더로부터 생산되는 연속된 두 시점의 레이더 영상만 있으면 된다는 것이다. 이 기법을 통해서 계산된 이동벡터장이 수평방향 성분만으로 구성되어 있어, 대류성 구름체계에서 발생하는 연직방향의 운동특성을 묘사할 수는 없지만, 단시간에 대해서는 강우의 이동특성을 예측하기에 충분하다고 할 수 있다(Li *et al.*, 2004). Fig. 4는 이동벡터를 구하는 방법을 개략적으로 나타낸 것으로 특정 위치에서 상관계수를 계산할 윈도우의 크기와 이동속도를 고려한 추적반경을 설정하고 추적반경내에 대하여 최대 상관계수를 가진 윈도우의 위치를 찾는다. 여기서, 시점 $T_2 (= T_1 + \Delta T)$ 에서 상관계수가 가장 높은 윈도우의 중심좌표는 이동벡터의 종점이 되고, T_1 에서 윈도우의 중심좌표는 이동벡터의 시점이 된다.

Fig. 4. Schematic Diagram of Calculating Motion Vectors

윈도우의 크기를 너무 작게 설정하면 상관계수를 구하기에 자료의 수가 너무 적게 되어 이동벡터가 불규칙적으로 형성되게 되며, 너무 크게 설정하면 공간적으로 넓은 규모에서 일반적이고 평균적인 흐름만을 묘사하게 된다(Tuttle and Foote, 1990). 그렇기 때문에 우선 다양한 크기의 윈도우를 비교하여 가장 최적의 윈도우 크기를 결정해야 하며 그 크기를 결정함에 이동벡터의 정확도와 이에 따르는 계산시간도 반드시 고려되어야 한다. 또한 추적반경은 강우의 최대 이동속도를 반영하기 때문에 중관기상체계의 이동에 있어 물리적인 의미를 만족시키는 범위 내에서 결정되어야 한다. Fig. 5는 서로 다른 윈도우 크기와 추적반경을 가지는 경우에 대해서 형성된 이동벡터장을 보여주고 있다. 그림에서 보는

바와 같이 윈도우 크기 11km와 추적반경 3km인 경우 (Fig. 5(a))보다 윈도우 크기 21km와 추적반경 7km인 경우(Fig. 5(b))에 대해서 전자의 경우 이동벡터의 방향이 매우 불규칙하게 나타남을 볼 수 있으며, 후자의 경우 이동벡터의 방향이 비교적 규칙적으로 특정 방향을 향하는 것을 볼 수 있다. 이는 윈도우 크기와 추적반경이 작은 경우 기상시스템의 난류특성을 잘 반영하고 있지만 강우시스템의 전반적인 이동특성은 잘 묘사하지 못함을 보여준다. 기상시스템의 이동속도는 한랭전선인 경우 약 45km/hr이고 온난전선인 경우 약 25km/hr이므로 이동 강우의 운동방향 및 이동속도를 잘 묘사하기 위해서 기상시스템의 한 시간 최대 진행거리를 약 40km로 가정하여 추적반경을 7km로 선정하였으며 너무 큰 추적반경은 계산시간의 증가를 야기하고 비효율적이므로 타당한 연산시간과 기상 시스템의 이동 균일성 반영정도를 고려하여 윈도우 크기를 21km로 가정하였다.

2.3.2 Semi-Lagrangian 외삽을 이용한 예측

윈도우 크기와 추적반경이 결정된 후 산출된 이동벡터장은 여전히 물리적 의미가 결여되는 즉 Fig. 6(a)와 같이 전체적인 흐름과 다른 방향의 벡터들을 포함하고 있다. 이동벡터장이 연속방정식이나 운동량방정식과 같은 완전한 물리적 범위에서 계산된 것이 아니라 상관성 해석에 의한 통계학적인 방법 즉 최대 상관계수에 기초하여 계산되었기 때문에 발생한 결과라 하겠다. 이러한 벡터들은 Fig. 6(b)와 같이 연속성을 가지는 이동벡터장을 구하기 위하여 그 벡터 주변 값을 이용한 일치성 검사과정을 거쳐서 보정하였다.

연속적이고 물리적 의미에 부합하는 벡터장을 구하기 위해서 수정 Cressman 가중합수를 이용한 객관분석을 적용하였다. 계산된 이동벡터장으로부터 (i, j) 에 위치한 이동벡터의 임의의 축방향 성분을 $u(i, j)$ 라 하고, 첫 번째 추정된 성분을 $u_0(i, j)$ 라 하면, 객관분석을 통해서 보정된 벡터의 축방향 성분 $u^*(i, j)$ 는 다음과 같은 관계로부터 구할 수 있다.

$$u^*(i, j) = u_0(i, j) + \frac{\sum_{k=1}^n w(i, j, k) \times \Delta u(k)}{\sum_{k=1}^n w(i, j, k)} \quad (7)$$

여기서, n 은 영향반경 내의 격자점의 수이고, $\Delta u(k)$ 는 k 번째 격자점에서 u 와 u_0 사이의 차이이다. $w(i, j, k)$ 는 격자점 k 에 대하여 점 (i, j) 에서의 수정 Cressman 가중합수이다.

(a) Window size = 11km, Search Radius = 3km (b) Window size = 21km, Search Radius = 7km
Fig. 5. Sample Decision Process of the Window Size and the Search Radius Size

(a) Before consistency check (b) After consistency check

Fig. 6. Sample of Consistency Check

수정 Cressman 가중함수는 기준이 되는 격자점과 계산될 격자점 사이의 거리에 대한 함수로서, 타원형의 가중함수이며, 등방형의 가중함수(Cressman, 1959)보다 기준 격자점에 가까울수록 더 큰 가중치를 할당하게 된다. Benjamin과 Seaman은 정방형 Cressman 가중함수와 비슷한 형태의 적용성 높은 가중함수를 제안했다.

$$w(i,j,k) = \frac{R^2 - D_n^2}{R^2 + D_n^2} \quad \text{단, } D^2 < R^2 \quad (8)$$

여기서, R 은 영향반경이며, D_n 는 기준 격자점과 계산될 격자점 사이의 거리를 의미한다.

이상의 과정으로 구해진 벡터장으로부터 semi-Lagrangian 개념을 이용한 외삽을 통하여 예측장을 구하였다. 산출된 이동벡터장은 각 격자점에서 10분간의 이동방향과 이동변위를 포함하고 있다. 또한 이 벡터장

을 통하여 각각의 격자점에 대하여 2차원으로 반사도가 이동할 도착점까지의 변위가 결정된다. 이 도착점은 출발점에서 반사도의 공간적 위치를 반영한다. 반복된 과정에 의해서 이러한 반사도의 변위량이 계산된다. 이렇게 각 반사도의 도착점을 계산한 뒤, 각 도착점으로부터의 보간에 의해서 다음 시간에서의 격자점에 대한 새로운 벡터가 계산된다. 여기서 계산된 벡터를 이용하여 이전 시간에서 반사도의 출발점을 알 수 있다. Fig. 7은 이동벡터의 결정, 객관분석, 외삽을 통한 예측까지 개발된 단시간 강우예측 모형의 전체적인 계산과정을 나타내는 흐름도이다.

2.4 기상레이더자료를 이용한 2차원 정량 강우 산정

기상 레이더와 지상강우계를 이용한 실시간 강우산정기법은 전형적인 M-P관계식을 이용한 방법, geo-statistic 접근법을 이용한 방법, 회귀분석에 의한 방법,

Kalman filter를 이용한 방법 및 현업보정을 통한 실시간 보정 기법 등 여러 형태가 존재한다. 기상레이더를 이용하여 실시간으로 강우를 산정하기에 적합한 기법으로는 전형적인 Z-R 관계식을 이용한 강우추정방법과 현업보정을 통한 실시간 Z-R 관계식을 이용한 강우추정방법이 있다.

2.4.1 Z-R 관계식을 이용한 강우량 추정

기상레이더로부터 관측된 레이더 반사도를 이용하여 지상의 강우강도를 추정할 수 있다. 레이더 반사도는 강우입자 등에 부딪혀서 되돌아온 반사도 인자(Z)를 나타내는 것으로서, 그 단위는 dBZ 다. dBZ 는 단위체적(m^3)당 직경 1 mm인 물방울 1개를 기준으로 하는 레이더 반사도를 의미한다. 또, 반사도 인자(Z)는 $1 m^3$ 에 들어있는 강우입자의 직경 D 를 6제곱하여 더한 값이다(박균명 등, 2005). Eq. (9)와 같이 레이더 반사도와 강우강도 사이에 공통적인 관계를 이용하여 레이더 반사도 인자로부터 강우량을 추정할 수 있다.

$$Z(mm^6/m^3) = aR^b \quad (9)$$

여기서, Z 는 레이더 반사도 인자이며 레이더 반사도($dBZ = 10 \log Z$)와 구별된다. 또, R 은 지상의 강우강도(mm/hr) 그리고 a 와 b 는 경험을 통하여 얻어진 경험적 상수이다.

Marshall and Palmer(1948)는 강우입자의 직경분포

를 이용하여 레이더 반사도 인자(Z)와 지상 강우강도(R) 사이의 관계식 $Z = aR^b$ 를 처음으로 제시하였다. M-P관계식을 이용한 방법은 $Z = 200R^{1.6}$ 으로 모든 강우현상에 대하여 적용되어 왔으며, 우리나라 기상청과 공군에서도 M-P관계식을 사용하고 있다. 하지만 실제로는 시간에 따라 강우의 성질이 변화하거나, 대류형과 층상형 강우가 공존하기도 한다. 또한 하나의 강우 시스템 내에서도 시간에 따라 강우입자의 크기 분포가 변하며, 지상으로 낙하하는 도중 강우입자의 증발이나 충돌로 인하여 강우입자의 분포가 변화하기도 한다(정성화 등, 2005). 따라서 모든 강우현상에 대하여 M-P관계식을 이용하는 것은 바람직하지 못하다. 이런 이유로 인하여 기상레이더 분야에서는 보다 정확한 강우강도의 추정을 위하여 강우형태에 따라 다양한 Z-R관계식을 제시하고 있다. 본 연구에서는 다양한 강우형태와 강우시스템의 성장 등을 통한 시간적 변화를 고려하기 위하여 일정한 Z-R관계식을 사용하기보다 실시간으로 관계식을 보정하는 기법을 채택하였다.

2.4.2 현업 보정을 통한 실시간 Z-R 관계식

현업 보정은 지상의 우량계로 관측된 강우강도를 이용하여 레이더 강우강도를 보정하는 기법이다. 이 기법은 Kotarou *et al.*(1995)이 일본의 건설성에서 운영하는 레이더 시스템을 위하여 제안하였으며, 강우현상이 시간적 연속성을 가지며, 지상 우량계 강우강도와 레이더 강우강도가 서로 선형적인 관계를 가진다는 두 가지 가

Fig. 7. Principle of Forecasting CAPPI using TREC Technique

정을 전제로 한다. 임의의 시간 t 와 지상 우량계 지점 i 에 대해서 지상 우량계 강우강도와 레이더 강우강도는 서로 선형적인 관계를 가진다는 가정을 통해 시점 t 에서 지점 i 의 보정계수 $f_i(t)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$f_i(t) = \frac{R_G^i(t)}{R_R^i(t)} \quad (10)$$

여기서, $R_R^i(t)$ 와 $R_G^i(t)$ 는 각각 시점 t 에서 지점 i 의 레이더 강우강도와 지상 우량계 강우강도를 나타낸다.

이렇게 보정계수가 결정되고 Δt 시간 후에 레이더 반사도 CAPPI 자료가 산출되면 M-P관계식을 적용하여 레이더 강우강도 $R_R^i(t+\Delta t)$ 를 구한다. 그런 다음 보정계수 $f_i(t)$ 를 이용하여 시점 $(t+\Delta t)$ 에서의 보정된 강우강도 $R_C^i(t+\Delta t)$ 를 다음과 같이 구하게 된다.

$$R_C^i(t+\Delta t) = f_i(t) \times R_R^i(t+\Delta t) \quad (11)$$

이러한 방식으로 시간을 진행시키면서 동일한 과정을 반복 수행하여 보정된 레이더 강우강도를 Δt 시간 간격으로 계산한다.

3. 단시간 강우예측 모형 적용

본 연구를 통해서 개발한 단시간 강우 예측 모형의

적용성을 검증하기 위하여 2003년 9월 발생한 태풍 “매미” 사상에 대하여 관악산 기상레이더 (KWK: 37° 26' 29'N, 126° 57' 58'E, 해발고도 637m)와 진도 기상레이더 (JNI: 34° 28' 19'N, 126° 19' 25'E, 해발고도 494m) 자료를 사용하였다. 관악산 기상레이더는 243km의 관측 반경을 가지며 C밴드 레이더로 호우에 대한 감쇄영향이 크게 나타나는 단점을 가진다. 진도 기상레이더는 240km의 관측 반경을 가지며 S밴드 레이더로 C밴드 레이더에 비하여 호우에 의한 감쇄가 적은 장점을 가진다. 또한 적용사상은 2003년 9월 12일 15시경부터 관악산 기상레이더에서 관측된 전선형 강우사상과 2003년 9월 12일 17시 20분경부터 진도 기상레이더에서 관측된 원형의 형태를 가지는 태풍사상에 대한 강우 예측을 실시하였다. 이는 강우 형태와 강우 레이더 특성에 따른 예측성에 대한 분석을 가능케 하였다. Fig. 8은 본 연구를 통하여 개발한 CAPPI 산출 프로그램을 이용하여 2003년 9월 12일 00:00경부터 같은 날 21:00경까지 관악산 기상레이더로 관측된 태풍 “매미”를 CAPPI로 산출한 샘플 결과를 나타낸다. 또한 Fig. 9(a)는 2006년 9월 12일 12:00과 12:10, Fig. 9(b)는 12일 22:00과 22:10의 자료를 이용하여 구한 이동벡터장 샘플을 나타낸 것이다. 자료의 공간해상도는 1km이지만 산출된 이동벡터장의 공간해상도는 10km이다. 만약, 1km 해상도로 이동벡터를 구하게 되면 반복된 계산수행으로 인하여 예측시간보다 계산시간이 더 길어질 수도 있다. 또, 부분적으로 이동벡터가 존재하지 않는 부분은 상관계수

Fig. 8. Samples of KWK Radar CAPPIs

(a) 2003/09/12 12:00,12:10

(b) 2003/09/12 22:00,22:10

Fig. 9. Motion Vector Fields using TREC Technique

Table 1. Correlation Coefficient and Root Mean Square Error for Different Lead-Time

RADAR	Test S.	10 분	20 분	30 분	40 분	50 분	60 분
KWK (관악산)	C.C.	0.7453	0.7004	0.6537	0.6062	0.5318	0.5255
	R.M.S.E.	6.0582	6.7243	7.2524	7.8320	8.5804	8.4648
JNI (진도)	C.C.	0.9079	0.9133	0.8949	0.8757	0.8614	0.8458
	R.M.S.E.	6.4401	6.2272	6.9086	7.5611	8.0269	8.4932

산정 시 유효범위를 설정하였기 때문에 상관계수가 유효범위를 벗어나는 부분에서는 이동벡터가 산정되지 않는다. 따라서 산출된 이동벡터들을 다시 보간하여 공간 해상도를 높이는 과정을 거쳐야 한다.

Figs. 10(a) and 10(b)는 각각 관악산 기상레이더(전성형 호우사상)와 진도 기상레이더(태풍 “매미”)의 반사도 자료를 이용하여 산출된 예측 CAPPI와 레이더로 관측된 실제 CAPPI를 비교한 것이며, Table 1은 예측시간에 따른 모형의 검정통계량으로 상관계수(C.C.; Correlation Coefficient)와 RMSE(Root Mean Square Error)를 나타낸 것이다. 예측시간은 2003년 9월 12일 14시 50분부터 15시 40분까지 총 60분이다. 검정 통계량을 통해서 진도 기상레이더 관측자료를 이용한 단시간 강우예측이 관악산 기상레이더를 사용한 강우예측보다 매우 양호한 결과를 보여주었다. 이는 S밴드 기상레이더 호우 관측이 C밴드 기상레이더 관측보다 정확하다는 기상레이더의 기계적인 특성차이 뿐만 아니라 예측 강우형태에 따른 예측성의 차이를 보여주는 것으로 판단된다. 그럼에도 불구하고 가용자료의 한계로 인하여 호우 형태별, 기상레이더 특성별 예측성에 대한 정

량적 분석에는 한계를 가지며 이는 차후 연구에서 수행되어야 할 것으로 판단된다.

TREC 기법을 이용한 예측방법은 두 연속 CAPPI만을 입력자료로 사용하며 사용된 기법의 간편성 등 적용을 위한 여러 장점을 가지는 동시에 처음 산출된 이동벡터장을 계속해서 이용하기 때문에 예측시간이 길어질수록 그 정확도는 떨어지게 되는 한계도 가지고 있다. 또한, 정보의 생성과 소멸이 없이 모든 정보를 그대로 표현하고, 정보가 유입되는 경계면에 계속된 정보의 유입이 없기 때문에 시간이 지남에 따라서 정보가 유입되는 경계면 부근에 정보가 존재하지 않는 영역이 점점 더 커지는 양상을 보이는 한계를 가진다. 그러므로 강우의 생성 및 소멸 특성을 반영하고 경계면에서의 정보 취득한계 극복을 위한 다양한 연구가 계속되어야 할 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 단시간 강우의 공간적 변화특성을 분석하기 위하여 강우의 이동방향과 이동속도를 산정하였으며, 기상레이더로부터 생산된 반사도 자료와 지상 우

Fig. 10(a). Comparison of Forecasted CAPPIs with Observed CAPPIs at KWK Radar Site

량계 자료를 조합하여 보다 정확한 2차원 단시간 강우 예측 모형을 개발하였다. 먼저 기상레이더에서 생산되는 3차원 공간의 구면좌표계로 이루어진 원시자료를 원하는 고도의 대상 공간분해능에 적합한 2차원 직교좌표계로 이루어진 CAPPI 자료로 신속하고 효율적으로 변환하기 위한 시스템을 구축하였으며, 이렇게 산출된 연속된 2개의 CAPPI 자료를 이용하여 TREC 기법을 적용함으로써 이동벡터장을 구하였다. 이 벡터장을 이용하여 Semi-Lagrangian 외삽법을 적용하여 예측 CAPPI를 산정하였다. 기상시스템의 타당한 이동 경향을 산정하기 위하여 우리나라 기상시스템의 이동속도의 평균적 이동속도(한랭전선인 경우 약 45km/hr, 온난전선인 경우 약 25km/hr)에 기초하여 이동 기상 시스템의 한 시

간 최대 진행 거리를 약 40km로 가정하여 추적반경을 7km로 선정하였으며 계산시간의 효율성과 기상 시스템의 이동 균일성 반영 정도를 고려하여 윈도우 크기를 21km로 가정하였으며 예측 결과는 타당한 이동장을 보여주었다. 본 모형은 물리적인 방정식 틀 안에서 계산된 이동벡터가 아니라 상관성 해석에 의한 통계학적 방법에 기초하여 강수의 이동 경로를 분석한 결과이기 때문에 발생 가능한 물리적 의미가 결여되는 이동벡터를 보정하기 위한 일치성 검사를 실시하였다. 또한, 지상 우량계 강우강도와 레이더 강우강도를 사이의 관계를 이용한 실시간 Z-R관계식을 적용하여 한 가지 Z-R관계식을 사용함으로써 나타나는 단점을 보완하였다. 본 모형은 2003년 9월 발생한 태풍 “매미” 사상에 대하여

Fig. 10(b). Comparison of Forecasted CAPPIs with Observed CAPPIs at JNI Radar Site

관악산의 C밴드 기상레이더와 진도의 S밴드 기상레이더의 관측 사상에 적용하여 태풍, 국지성 집중호우 등에 대하여 기상레이더 반사도 자료와 지상 관측망을 활용한 강우 예측 가능성과 기상 시스템 형태 및 기상레이더 특성에 따른 적용성을 제시하였다. 그럼에도 불구하고 본 강우 예측모형이 상관분석에 따른 통계적인 방법을 이용하기 때문에 강우의 생성과 소멸 등을 예측하지 못하는 한계를 내포하고 있으며, 강우가 레이더 관측반경 내로 유입되는 경계면에서는 강우가 존재하지 않는 영역이 생기므로 수 시간 이상을 예측하기엔 한계가 있었다. 향후 지속적인 연구를 통하여 홍수 예·경보 체계와 연계하여 선행시간을 확보한 정확도 높은 홍수 정보시스템 구축에 기여할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행한 2003년도 건설기술혁신사업(03산학연C01-01)에 의한 도시홍수재해관리기술연구사업단으로부터 연구비를 지원받아 수행한 연구성과입니다.

참고 문헌

- 박균명, 정효상 (2005). 기상레이더 입문. 토파민, pp. 55.
- 정성화, 김정익, 하경자 (2005). “지상 우량계의 강우강도를 이용한 개선된 레이더 강우강도의 실시간 추정.” 한국기상학회지, 한국기상학회, 제41권, 제5호,

- pp. 751-762.
- 최규현 (2005). 레이더 정량강우와 연계한 홍수유출 및 범람해석 시스템 확립. 박사학위논문, 경북대학교.
- Atlas, D., Ulbrich, C., Marks, F.D. Jr., Amitai, E. and Williams, C.R., (1999). "Systematic variation of drop size and radar-rainfall relations." *Journal of Geophysical Research*, Vol. 104, pp. 6155-6169.
- Austin, A.M., (1987). "Relation between measured radar reflectivity and surface rainfall." *Monthly Weather Review*, Vol. 115, pp. 1053-1070.
- Battan, L.J. (1973). *Radar observation of the atmosphere*, rev. ed. The University of Chicago Press, pp. 324.
- Benjamin, S.G. and Seaman, N.L. (1985). "A simple scheme for objective analysis in curved flow." *Monthly Weather Review*, Vol. 113, pp. 1184-1198.
- Cressman, G.P. (1959). "An operational objective analysis system." *Monthly Weather Review*, Vol. 87, pp. 367-374.
- Fujiwara, M. (1965). "Raindrop-size distribution from individual storms." *Journal of Atmospheric Science*. Vol. 22, pp. 585-591.
- Hilst, G.R. and Russo, J.A. Jr. (1960). "An objective extrapolation technique for semi-conservative fields with an application to radar patterns." *Technical Memo*, No. 3, Travelers Weather Research Centre, Hartford, CT.
- Kessler, E. III. and Russo, J.A. Jr. (1963). "Statistical properties of weather echoes." *Preprints 10th Weather Radar Conference*, Washington, DC, AMS, pp. 25-33.
- Kitzmler, D.H. (1996). "One-hour forecasts of radar-estimated rainfall by an extrapolative-statistical method." *TDL Office Note* 96-1, National Weather Service, NOAA, U.S. Department of Commerce, p. 26
- Kotarou, T., Takumi, N. and Takaaki, Y. (1995). "Operational calibration of raingauge radra by 10-minute telemeter rainfall." *3rd International Symposium on Weather Radars*, Sao Paulo, Brazil, pp. 75-81.
- Li, P.W. and Lai, S.T. (2004). "Short-range quantitative precipitation forecasting in Hong Kong." *Journal of Hydrology*, Vol. 288, pp. 189-209.
- Marshall, J.S. and Palmer, W.Mck. (1948). "The distribution of raindrops with size." *Journal of Atmospheric Science*, Vol. 5, No. 4, pp. 165-166.
- Mohr, C.G. and Vaughan, R.L. (1979). "An economical procedure for Cartesian interpolation and display of reflectivity factor data in three-dimensional space." *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 18, pp. 661-670.
- Ogden, F.L. and Julien, P.Y. (1994). "Runoff model sensitivity to radar rainfall resolution." *Journal of Hydrology*, Vol. 158, pp. 1-18.
- 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 rainrate" *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 32, pp. 50-72.
- Suk, M.K., Chang, K.H., Nam, K.Y., Kim, K.L., You, C.H., Lee, J.H., Woo, D.M., Nam, H.W. and Kim, E.Y. (2008). "Real-time quantitative precipitation estimation using radar reflectivity over the Korean peninsula." ERAD 2008, *The Fifth European Conference on Radar in Meteorology and Hydrology*.
- Tuttle, J.D. and Foote, G.B. (1990). "Determination of the boundary layer airflow from a single Doppler radar." *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Vol. 7, pp. 218-232.
- Tuttle, J.D. and Gall, R. (1999). "A single-radar technique for estimating the winds in tropical cyclone." *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 65, pp. 653-668.
- 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, pp. 293.

(논문번호:08-43/접수:2008.03.19/심사완료:2008.08.28)