

연속 CAPPI 자료를 이용한 단기강우예측모형 개발

Development of a Short-term Rainfall Forecast Model Using Sequential CAPPI Data

김광섭* · 김종필**

Kim, Gwangseob · Kim, Jong Pil

Abstract

The traditional simple extrapolation type short term quantitative rainfall forecast can not realize the evolution of rainfall generating weather system. To overcome the drawback of the linear extrapolation type rainfall forecasting model, the history of a weather system from sequential weather radar information and a polynomial regression technique were used to generate forecast fields of x-directional, y-directional velocities and radar reflectivity which considered the nonlinear behavior related to the evolution of weather systems. Results demonstrated that test statistics of forecasts using the developed model is better than that of 2-CAPPI forecast. However there is still a large room to improve the forecast of spatial and temporal evolution of local storms since the model is not based on a fully physical approach but a statistical approach.

Keywords : *rainfall forecasting, weather radar, sequential CAPPI, rainfall evolution*

요 지

선형외삽법에 기초한 전형적인 단시간 강우예측모형은 호우를 발생하는 강우시스템의 발달과정을 모의하지 못하는 한계를 내포하고 있다. 본 연구에서는 이러한 한계를 극복하기 위하여 기상레이더로 획득할 수 있는 여러 시간대의 반사도 정보로부터 획득한 정보변화 과정과 다항 회귀식을 이용하여 x방향과 y방향의 전파속도의 성장과정과 레이더 반사도의 성장과정 모의에 기초한 단시간 강우예측 모형을 개발하였다. 검정통계량이 제시한 결과는 2-CAPPI를 이용한 기존의 단시간 강우예측모형보다 개선된 결과를 보여주었다. 그럼에도 불구하고 본 모형이 완전한 물리적 모형이 아니라 자료사이의 상관성과 다항 회귀식을 이용한 통계적인 방법에 기초하였으므로 강우의 성장과 소멸과정을 구현과 예측성 개선에도 한계가 있음을 보였다.

핵심용어 : 강우예측, 기상레이더, 연속 CAPPI, 강우 성장

1. 서 론

강우의 시공간 분포를 잘 구현하는 2차원 정량강우 단시간 예측값을 획득하기 위하여 기상 레이더자료를 이용한 예측모형에 관한 연구가 수행되어져 왔다. 기존의 레이더 자료를 이용한 초단시간 예보모형은 일반적으로 이송 호우의 위치를 선형 외삽법을 이용하여 추정하는 형태로 이루어져 왔으며 단시간 강우 예측에 있어서 강우의 성장과 소멸 과정에 대한 정보를 획득하는 것은 매우 어려운 일로 여전히 많은 연구가 수행되어야 할 과제이다. 지금까지 강우의 성장과 소멸에 대한 정보는 일반적으로 수치예보모형을 활용하여 얻어 왔다. 그럼에도 불구하고 수치예보모형의 단시간 정량강우 예측의 한계와 정보 획득의 실시간성 결여 등 여러 한계를 내포하고 있다. 이를 극복하기 위하여 수치예보모형의 자료로부터 생산된 예보자료와 기상 레이더로부터 생산된 초단기 예보자료를 통합하는 접근법 등의 적용이 이루어지고

있다.

지난 수십년간 기상레이더 정보를 활용한 초단시간 예보 모형의 개발과 적용 사례는 다음과 같다. Auto-Nowcast System(AN)은 NCAR(National Center for Atmospheric Research)에서 개발된 강우추정모형으로 WSR-88D 레이더와 GEOS 위성자료 및 지상 관측망, sounding 및 번개관련 자료를 이용한다. 본 모형은 적운의 성장과 GEOS의 적외선 및 근적외선 채널 자료를 사용하여 구름 유형을 판정하고, 적운 발생지역에서 적외선 온도의 변화 정보를 이용하여 수직 발달과정을 판정한다. 수렴대의 탐지와 외삽을 통하여 60분 정도의 강우예측을 제공한다(Mecklengurg, 2000; Saxen 등, 1999). CARDS(CANadian Radar Decision System, operationally run by Environment Canada)는 메소사이클론, 악기상, 뇌우를 동반한 강한 하강기류, 우박 등 여러 기상상태에 따른 기상 모듈을 개발하고 호우시스템의 이동과 관련된 정보는 상관계수에 기초하여 강우예측모형을 제시하였다

*정회원 · 경북대학교 공과대학 토목공학과 부교수 (E-mail : kimgs@knu.ac.kr)
**교신저자 · 경북대학교 공과대학 토목공학과 BK21 연구원 (E-mail : jpkim@knu.ac.kr)

(Donalson 등, 2001). GANDOLF는 영국 기상청과 환경청의 공동노력으로 비전선 이송 강우의 단시간 예측개선을 위하여 개발되었다. 이 시스템은 위성영상과 신경망 모형을 이용하여 이송강우를 판정하고 기상레이더 자료를 이용하여 이송 강우의 성장과정을 모의하기 위하여 물리적 현상에 기초한 개념적 호우시스템의 수명 모델을 도입하였다(Pierce 등, 2000). NIMROD(Nowcasting and Initialization for Modeling using Regional Observation Data)는 FRONTIERS의 후속 모델로 1995년 이후로 영국 기상청에서 운영되어오고 있다. 이 시스템은 기상레이더 자료와 위성영상 자료 및 지상관측망 자료뿐만 아니라 중규모 수치모형의 예측장 자료를 이용하여 강우를 포함한 여러 기상변수의 분석과 단시간 예측에 활용하고 있다(Golding, 1998).

SCIT(Storm Cell Identification and Tracking)은 패턴인식기법을 적용하여 WSR-88D를 이용한 호우인식 알고리즘을 개선한 모형으로 기존의 단일 분류 기준 보다 다양하게 호우 무게중심 반사도 값에 따른 호우상태를 다양하게 분류하는 기법을 적용하였다. SCIT는 호우를 판정하기 위한 좋은 접근법이며 보다 큰 강우영역의 추적이 요구될 때 면적 기준 추적 알고리즘이 보다 효과적일 것이다(Mecklenburg, 2000). SPROG(Spectral PROGnosis)는 오스트랄리아의 기상청에서 운영하는 모형으로 기상레이더 자료를 다양한 스케일의 강우정보를 생산하고 자기회귀모형을 이용하여 강우의 성장과정을 모형하였다(Seed와 Keenan, 2001). TITAN(Thunderstorm Identification, Tracking, Analysis and Nowcasting) 모형은 상관계수기법과 호우 무게 중심 접근법의 장점을 이용하기 위하여 최적화 기법을 적용하여 두 기법을 통합하고 두 호우시스템의 통합과 분리를 모형화하는 기법을 연계하여 호우의 위치와 크기를 예측한다(Mecklenburg, 2000). TRACE3D 모형은 극좌표계의 입체 자료를 사용하여 호우셀의 판정과 추적하는 두단계로 이루어져 있다. 반사도 임계값을 사용하여 호우를 판정하고 추적과정 중에 호우의 분리와 통합과정을 모형화하고 이동속도를 산정하였다(Handwerker, 2002). TREC(Tracking Radar Echo by Correlation)모형은 연속 레이더 반사도장 자료 사이의 상관계수 정보를 사용하여 호우의 이동정보를 획득한다. 본 모형은 상관성을 모형화할 윈도우 크기의 변화와 일치성 검사와정을 통하여 보다 물리적으로 타당한 이송속도장을 획득한다. TREC 모형에 의하여 계산된 이동벡터장이 물리적 타당성을 받아내는 경우를 극복하기 위하여 2차원 연속방정식과 연계한 COTREC(Continuity of TREC vectors)모형이 개발되었다(Li 등, 1995). VSRF(Very-Short-Range Forecast of Precipitation) 모형은 일본 기상청에서 개발되어 공간해상도 약 5km, 예측 선행시간 최대 6시간에 대한 강우 예측장을 제공한다. 예측시간 3시간까지 레이더 자료를 이용한 외삽을 실시하고 중규모 수치모형자료를 이용하여 6시간 예측을 수행한다(Kunitsugu 등, 2001). 이외에도 홍콩기상대에서 개발한 단시간 강우예측모형(Li 등, 2004)과 FMI(Finish Meteorological Institute)모형 등 여러 기관과 연구소에서 강우레이더를 사용한 다양한 단시간 모형을 제시하고 있다.

국내에서는 강우레이더 자료를 이용한 강우예측보다 강우레이더와 지상 관측망 자료를 이용한 정량강우 산정과 이를

이용한 수문학적 활용과 관련한 연구가 수행되었다(김경준 등, 2008; 김병식 등, 2007; 배덕효 등, 2005; 최규현 등, 2006). 단순외삽법을 이용한 예측모형으로는 Kitzmiller (1996)는 외삽 통계 기법을 이용하여 레이더 관측반경내에 대한 1시간 강우예측 모형을 개발하였으며 국내에서는 김광섭 등(2008)이 두 개의 연속 레이더 자료를 활용하여 선형적으로 외삽하는 단시간 강우 예보모형을 제시하였다. 기상레이더 자료의 시간분해능과 같은 10분 최대 이동거리에 해당하는 영향반경을 설정하고 강우의 이동경향을 묘사할 수 있는 동질성을 가지는 윈도우 크기를 설정하여 통계기법 즉 연속되는 2-CAPPI 자료 사이의 최고 상관성을 가지는 지점을 이용하여 강우의 움직임을 파악하는 기법으로 앞에서 제시한 바와 같이 예측계산 소요시간이 짧고 계산이 간단한 장점을 가지고 있음에도 불구하고 강우의 성장과정을 고려할 수 없는 한계를 가진다.

본 연구에서는 기상레이더와 지상 우량계 네트워크 자료를 활용한 단시간 2차원 정량강우 추정 시 연속된 두개의 CAPPI자료를 활용한 강우예측 모형의 한계를 극복하기 위하여 연속된 여러 시간대의 CAPPI자료로부터 획득한 강우 변화정보를 사용하여 강우의 강도변화, 이동속도의 변화 정보를 획득할 수 있다는 가정하에 여러 시간대의 연속 CAPPI자료 활용한 단시간 강우예측 모형을 개발하였다.

2. 개발모형 이론

Fig. 1(a)는 2개의 연속시간 CAPPI 자료를 이용한 선형 외삽법과 4개의 연속시간 CAPPI 자료와 다항회귀분석 기법을 활용한 비선형 외삽을 이용한 단시간 강우예측 모형의 개념도를 나타낸다. 강우레이더를 이용한 전형적 단시간 강우 예측 모형은 2개의 연속된 CAPPI 자료로부터 대상 윈도우 사이의 상관특성을 이용하여 이동벡터를 산정하고 이를 이용한 단순 외삽기법을 이용한다. 이러한 접근법은 계산 소요시간이 비교적 짧고 계산과정이 간단한 장점을 가지에도 불구하고 강우의 성장과정 즉 이동방향의 변화와 강우강도의 변화를 모의하지 못하고 직선적 움직임만 모의하는 단점을 내포하고 있다. 그러나 강우의 강도나 이동방향과 이동속도 등 많은 요소들은 매우 복잡한 요소들로 이를 직선적인 움직임으로 가정하고 강우를 예측하기에는 초 단시간 예보를 제외하고는 무리가 있다. 이러한 한계를 개선하기 위한 방법의 일환으로 여러 시간대의 연속 CAPPI 자료를 이용한 단시간 강우예측 모형을 제시하였다. 본 연구에서는 최소 4개의 연속된 과거 시간 CAPPI 자료의 변화과정을 이용할 경우 x방향과 y방향의 이동속도 변화 과정이나 강우강도의 변화 과정 모의가 가능하다. Fig. 1(b)는 상관계수에 기초한 각 픽셀의 강우 이동속도와 강우강도 변화 개념도를 나타내는 것으로 2개의 연속된 CAPPI자료를 이용한 예측시 선형 외삽만 가능한 반면 4개 이상의 연속된 CAPPI자료를 활용한 예측 시 강우 정보는 직선 혹은 포물선 형태의 변화를 나타낼 것이며 변화에 따른 예측값의 범위는 물리적으로 의미를 가지는 상한 및 하한값 경계 내에서 변화하는 것으로 가정하여 산정하였다.

Fig. 2는 연속 CAPPI를 이용한 단시간 강우 예측 모형의

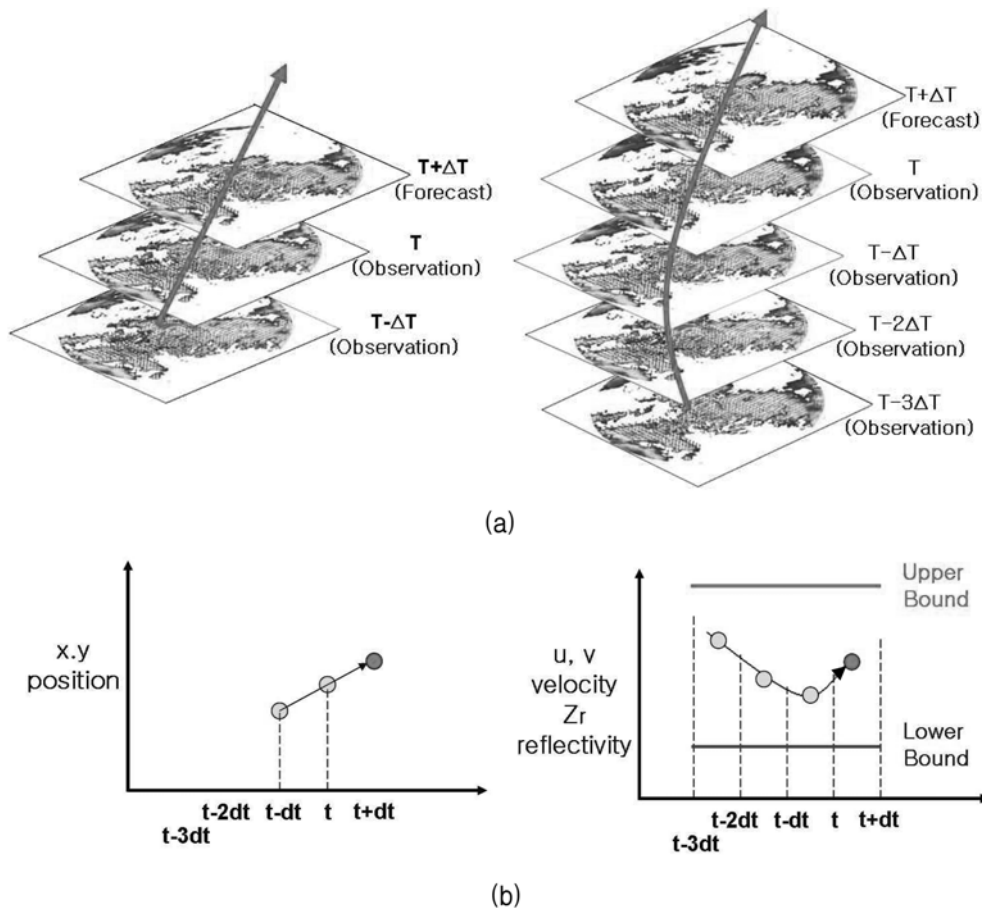


Fig. 1 Conceptual diagram of rainfall forecast using 2 CAPPI & multi-sequential CAPPI data

흐름도를 나타낸다. 먼저 강우레이더로부터 획득한 원시자료를 활용하여 강우형성 및 이동을 대표할 수 있는 1.5 km 고도의 CAPPI 자료를 산정한다. 산정된 과거 시간대에 대한 CAPPI 자료 중 현재 시점으로부터 $3\Delta t$ 선행 시점 자료까지 즉 t , $t-\Delta t$, $t-2\Delta t$, $t-3\Delta t$ 시간대의 CAPPI 자료(이후로 연속 CAPPI로 표현)가 계산에 참여하였다. 강우 픽셀의 이동과정을 모의하기 위하여 상관계수에 기초한 이동벡터를 산정하였다. 본 연구에서 사용된 이동벡터 산정기법은 일정한 시간 간격에 대하여 산정된 레이더 반사도 CAPPI 자료에 대하여 강우이동을 재현할 것으로 판단되는 본 연구에서 설정한 윈도우의 크기에 따라 연속한 두 윈도우 사이의 상관계수를 산정하고 물리적으로 이동 가능한 범위내의 상관계수 최대 값을 가지는 픽셀을 찾는다. 두 픽셀 사이의 이동거리를 시간 간격으로 나눔으로서 강우의 이동벡터를 구한다. 이는 이송 확산 방정식과 같은 완전한 물리적인 지배방정식을 이용하여 구한 이동벡터가 아님에도 불구하고 이송강우의 움직임을 파악할 수 있다. 동일한 계산과정을 현재 시점으로부터 $3\Delta t$ 시점의 자료까지 반복하여 강우의 이동 과정 정보를 획득한다. 비록 이 기법을 이용하여 산정한 강우 이동장이 대류성 구름체계에서 발생하는 강한 수직 활동을 구현하지 못하고 수평방향의 2차원 거동만을 제시하는 한계를 가지고 있지만 호우 이동의 비선형성을 구현하기 위하여 x방향 이동속도의 변화과정과 y방향 이동속도의 변화과정을 분리하여 모의하였으므로 단시간의 강우 이동 예측에 유용하다.

본 연구에서 사용된 계산 윈도우의 크기는 다음의 두 가지 사항을 고려하여 결정하였다. 윈도우의 크기가 너무 작으

면 상관계수를 구하기에 자료의 수가 너무 적게 되어서 안정적인 이동벡터를 산정하기 힘들게 되며, 윈도우 크기가 너무 크면 넓은 지역의 평균적인 흐름만을 구현하게 된다. 본 연구에서는 다양한 크기의 윈도우를 적용하고 이동벡터의 정확도와 이에 따르는 계산시간을 고려하여 최적의 윈도우 크기를 결정하였으며 윈도우 크기를 21 km로 설정하였다. 이동벡터를 잘 구현하는 윈도우 크기가 결정되면 상관계수를 산정할 계산반경을 결정하여야 한다. 너무 큰 계산반경은 계산시간의 증가를 야기하고 비효율적이므로 계산반경은 이송 강우의 예상 최대속도를 반영하기 때문에 중규모 이송 강우나 중관기상체계의 이동에 있어 물리적인 의미를 만족시키는 범위 내에서 결정되어야 한다. 이러한 조건을 만족하는 계산반경을 정함에 있어서도 윈도우가 작고 계산반경이 작은 경우 기상 시스템의 난류 특성을 나타내고 이동 강우시스템의 전반적인 이동을 잘 묘사하지 못하게 되므로 상관계수를 산정하는 윈도우 크기와 상관성을 고려하여야 한다. 본 연구에서 사용한 계산반경은 Δt 가 10분이라는 점과 전선들의 평균이동속도 즉 온난전선인 경우 평균이동 속도가 약 25 km/hr이며 한랭전선인 경우 평균이동 속도가 약 45 km/hr이라는 점을 고려하여 이동 강우의 운동 방향 및 이동 속도의 산정에 타당하다고 판단되는 기상 시스템의 한 시간 최대 진행 거리를 약 40 km로 가정하여 계산반경을 7 km로 선정하였다.

산정된 이동벡터장은 상관계수에 기초한 이동벡터장이므로 물리적 의미가 결여된 이동벡터가 존재할 수 있다. 이러한 경우를 수정·보완하기 위하여 주변 이동벡터의 가중 평균

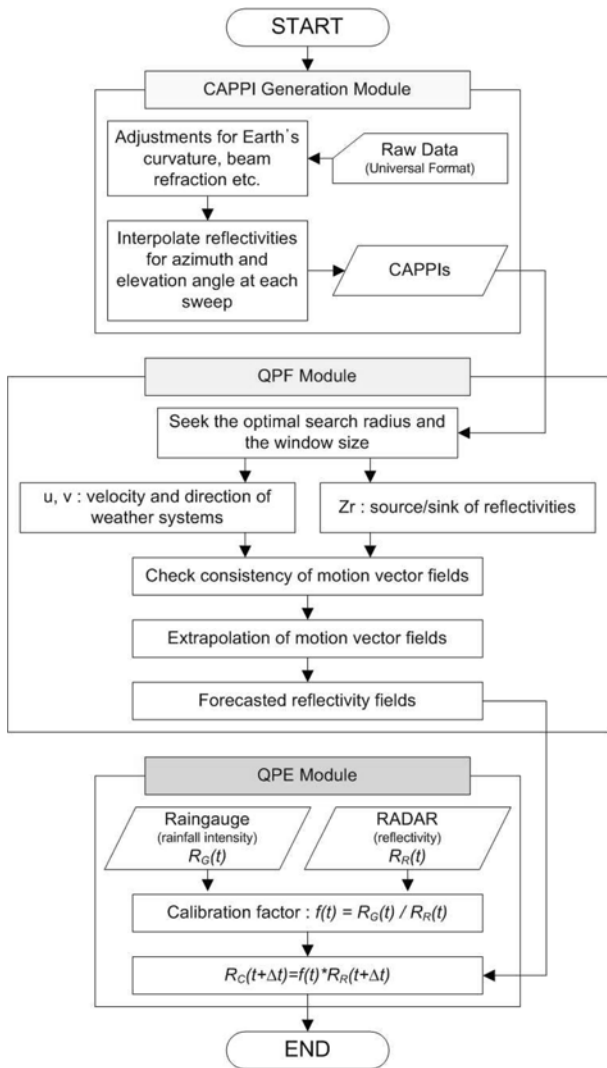


Fig. 2 Flow diagram of quantitative rainfall forecast using multi-sequential CAPPI data

을 이용하여 산정된 평균 이동벡터와 비교하여 물리적 의미가 결여된 이동벡터를 가중 평균 이동벡터로 수정하는 일치성 검사와정을 수행하였다. 본 연구에서는 Benjamin and Seaman(1985)이 제시한 등방형의 Cressman 가중함수와 유사한 형태의 수정 Cressman 가중함수를 적용하였다. 본 연구에서는 이동벡터의 방향을 결정하기 위하여 주변 25개 격자의 방향 평균과 비교하여 이보다 60도 이상의 편향을 보인다면 이러한 경우 물리적 의미를 상실한 것으로 판단하고 주위값으로부터 계산된 가중 평균 이동벡터로 보정하였다.

강우 예측장 모의에 참여한 $t, t-\Delta t, t-2\Delta t, t-3\Delta t$ 에서의 반사도 자료를 이용하여 산정한 이동 벡터장을 역추적하여 t 시간대의 자료 픽셀의 이동경로를 구하고 이동경로에 따른 정보를 이용하여 Fig. 1(b)에서 제시한 바와 같이 x 방향과 y 방향의 이동속도 변화 과정이나 강우강도의 변화 과정에 대하여 식 (1)에서 제시한 바와 같이 다항회귀분석을 실시하여 강우의 이동속도와 강우 강도의 성장과정을 구현하고자 하였다. 다항회귀분석을 이용하여 계산되어진 각 방향 이동속도와 반사도 예측 벡터장을 구하였다. 산출된 벡터장은 각 격자점에서의 10분간 이동한 위치와 반사도 정보를 포함하고 있다. 이러한 계산 과정을 목표로 하는 예측실행에 대하여 반복 수행한다.

$$y_i = \alpha + \beta_1 x + \beta_2 x^2 + \beta_3 x^3 \quad i=1,2,3 \quad (1)$$

여기서 x 는 시간을 나타내고 y_1 은 x 방향 속도이며 y_2 는 y 방향의 이동속도, y_3 는 반사도를 나타낸다. $t, t-\Delta t, t-2\Delta t, t-3\Delta t$ 에서의 반사도 정보를 이용하여 세 변수에 대하여 각각 주어진 다항 회귀식을 만족하는 $\alpha, \beta_1, \beta_2, \beta_3$ 등 계수값을 산정하고 이를 이용하여 각 변수에 대한 예측장을 구하였다.

다항회귀식의 외삽에 있어 이동속도와 반사도 값을 물리적으로 타당한 범위 내에서 선택하기 위하여 이동속도의 상한과 하한값을 ± 40 km/hr로 설정하였다. 반사도값의 상한과 하한값으로는 층상운에 대한 전형적인 Z-R관계식인 $Z=200R^{1.6}$ 과 이송후에 대한 Z-R관계식인 $Z=300R^{1.35}$ 를 적용하여 반사도(dBZ)값이 강수를 발생하는 시스템의 반사도값이 물리적으로 타당하게 설정될 수 있는 범위를 10dBZ의 하한값 10과 상한값 60으로 설정하였다.

층상운에 대하여 Marshall과 Palmer(1948)가 제시한 Z-R 관계식(이하 M-P 관계식)은 $Z=200R^{1.6}$ 으로 우리나라에서는 일반적으로 모든 강우현상에 적용을 하고 있다. 그러나 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-P 관계식을 이용하는 것은 바람직하지 못하다. 이러한 이유로 기상레이더 분야에서는 보다 정확한 강우강도의 추정을 위하여 강우형태와 산악효과 등을 고려한 다양한 Z-R관계식을 제시하고 있다. 그럼에도 불구하고 단순 Z-R관계식으로 모든 강우형태를 구현하는데는 한계가 있다.

강우현상이 시간적 연속성을 가지며, 지상 우량계 강우강도와 레이더 강우강도가 서로 선형적인 관계를 가진다는 두 가지 가정을 전제로 하여 지상의 우량계로 관측된 강우강도를 이용하여 레이더 강우강도를 보정하는 기법을 Kotarou 등(1995)이 일본의 건설성에서 운영하는 레이더 시스템을 위하여 제안하였다. 지상 우량계 강우강도와 레이더 강우강도는 서로 선형적인 관계를 가진다는 가정을 통해서 다음과 같이 보정계수 C 로 이용하여 나타낼 수 있다.

$$R_g = C \cdot R_r \quad (2)$$

여기서, R_g 는 지상 우량계 강우강도, R_r 은 레이더 강우강도, C 는 보정계수이다.

Marshall과 Palmer가 제시한 기본적인 Z-R관계식 형태인 $Z=aR^b$ 와 식 (2)를 이용하여 레이더 반사도 Z 에 대해서 정리하면 다음과 같다.

$$Z = \left(\frac{a}{C^b}\right) \cdot R_g^b \quad (3)$$

여기서 실시간 보정계수 C 가 시간에 대한 변수이기 때문에 실시간으로 보정계수 C 를 다시 구하여 적용해야 한다. 현업 보정의 방법은 임의의 시간 t 와 임의의 지상 우량계의 지점 i 에 대하여 지상 우량계의 강우강도 $R_g^i(t)$ 와 레이더

반사도로 산정된 강우강도 $R_r^i(t)$ 사이의 보정계수 $C^i(t)$ 를 다음과 같은 관계를 이용하여 구한다.

$$C^i(t) = \frac{R_g^i(t)}{R_r^i(t)} \quad (4)$$

그런 다음 Δt 시간 후에 레이더 반사도의 CAPPI 자료가 산출되면 M-P관계식을 적용하여 레이더 강우강도 $R_r^i(t+\Delta t)$ 를 구한다. 그리고 보정계수 $C^i(t)$ 와 레이더 강우강도 $R_r^i(t+\Delta t)$ 를 이용하여 보정된 강우강도를 다음과 같이 구하게 된다.

$$R_c^i(t+\Delta t) = R_r^i(t+\Delta t) \times C^i(t) \quad (5)$$

이러한 방식으로 시간을 증가시키면서 동일한 과정을 반복

수행하여 보정된 레이더 강우강도를 Δt 시간 간격으로 생산한다.

3. 단시간 강우예측 모형의 적용

본 연구를 통하여 개발한 연속 CAPPI를 사용한 단시간 강우예측모형의 적용성을 검증하기 위하여 2003년 9월 12일 00:00경부터 같은 날 21:00경까지 관악산 기상레이더로 관측한 태풍 “매미” 사상에 대하여 모의를 실시하였다. 관악산 기상레이더는 현재 S밴드 시스템으로 관측이 수행되고 있으나 본 연구에서 사용된 2003년 “매미” 사상은 시스템 교체 이전의 C밴드 관측 자료를 사용하였다. 획득한 강우레이더 원시 UF(Universal Format) 자료는 구면좌표계상의 여러 층

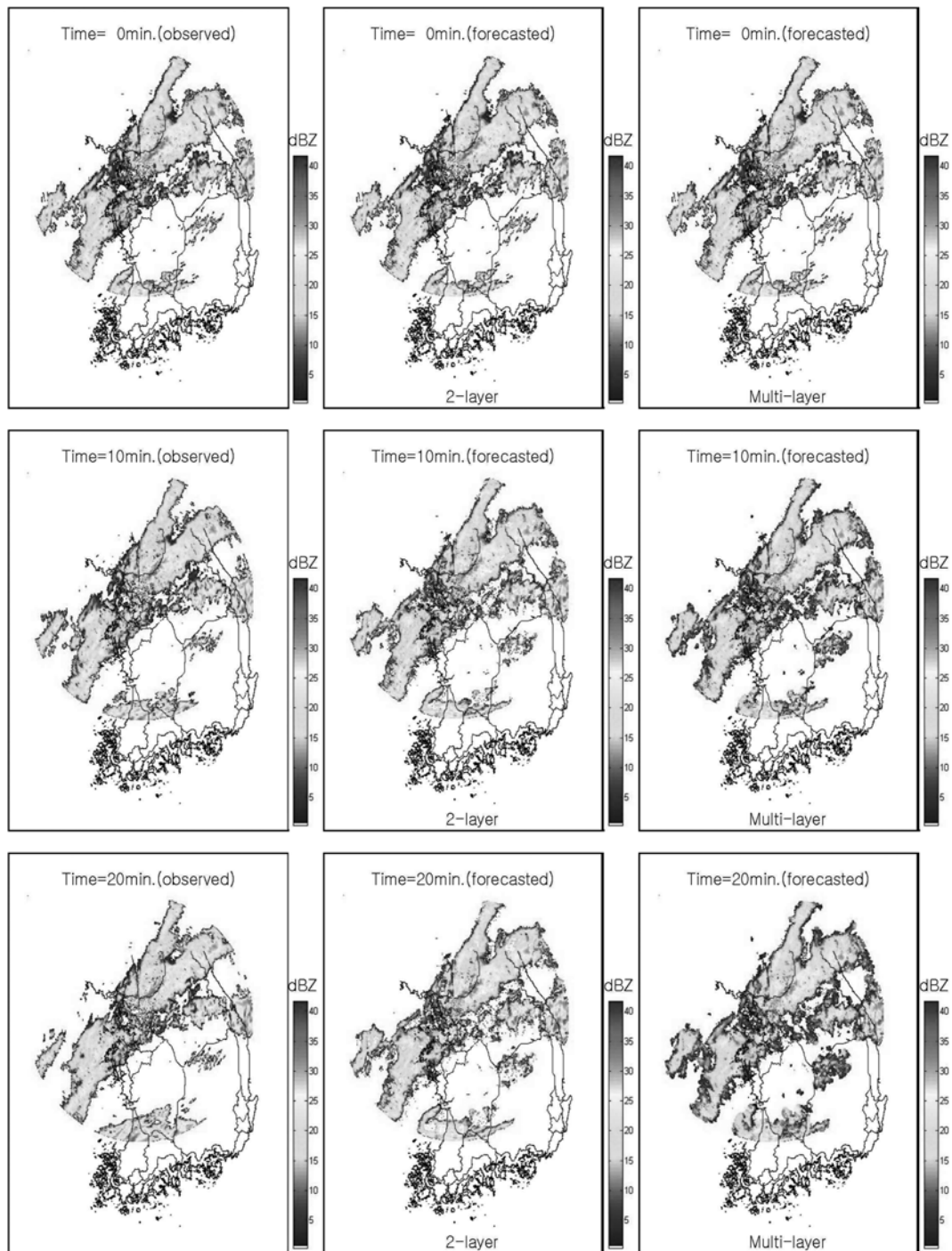


Fig. 3 Comparison between forecasts (using 2 CAPPI and 4 sequential CAPPI data) and observations

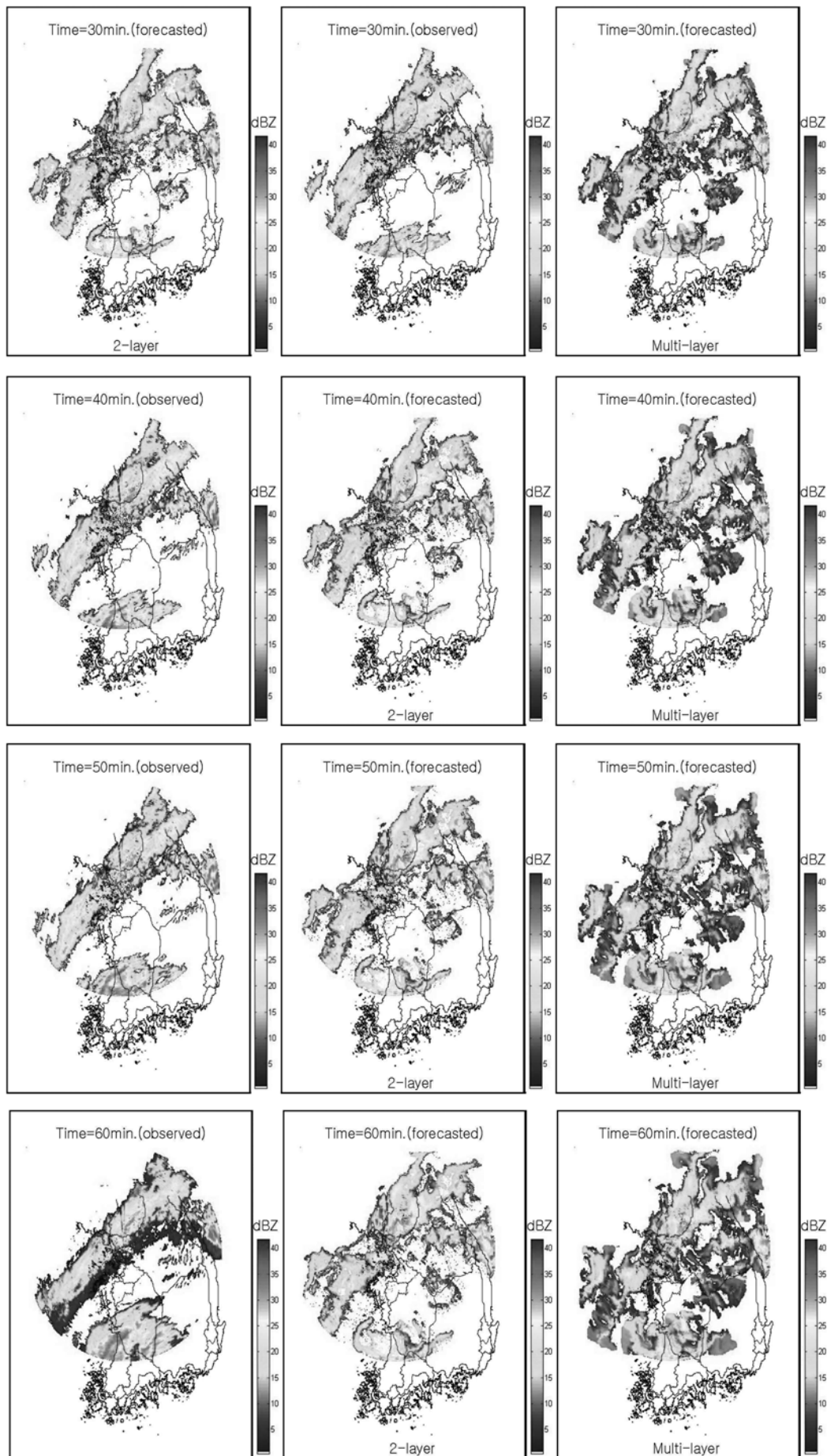


Fig. 3 Continued

에 대한 정보로 구성되어 있다. 관측 고도각에 따라 관측 범위가 다르므로 강우가 형성되고 이동하는 대표 고도에 대

한 반사도 값을 원하는 공간분해능을 가진 직교좌표계상의 자료로 변환하여 CAPPI 자료를 구축하는 과정을 수행한다.

Table 1. Comparison test statistics of 2 CAPPI forecasts and 4 sequential CAPPI forecasts

Test		Time					
		10 min.	20 min.	30 min.	40 min.	50 min.	60 min.
CC	2-CAPPI forecasts	0.8470	0.7666	0.6903	0.6266	0.5613	0.4576
	4-CAPPI forecasts	0.8512	0.7788	0.7200	0.6616	0.6043	0.5351
RMSE	2-CAPPI forecasts	4.7832	5.9849	6.8868	7.6523	8.3685	9.0765
	4-CAPPI forecasts	4.7017	5.9463	6.5041	7.2175	7.8508	8.2297

구축된 각 시간대별 CAPPI 자료를 사용하여 개발된 모형의 적용성을 비교·검토하기 위하여, 2개의 연속 CAPPI를 이용한 선형 외삽에 기초한 단시간 예측과 본 연구에서 개발한 4개의 연속 CAPPI자료와 다항회귀분석을 이용한 단시간 예측장을 관측자료와 비교하였다. 강우시스템의 변화 양상을 구현하기 위하여 장기간의 이동경로 파악과 변화과정 정보를 이용하여 예측할 수 있으나 예측에 소요되는 계산시간과 정보의 메모리 등을 고려하여 본 연구에서는 4개의 연속 CAPPI 자료를 사용한 예측을 실시하였다.

Fig. 3은 본 연구에서 이용한 강우사상의 관측치와 2개의 연속 CAPPI를 이용한 예측장과 4개의 연속 CAPPI를 이용한 예측장을 비교한 것이다. 총 예측시간은 60분으로 2003년 9월 12일 15시 00분부터 15시 50분까지의 CAPPI를 예측하였으며 시간간격은 10분 간격이다. Fig. 3의 첫 열은 관측자료이며 두 번째 열은 2개의 연속 CAPPI를 이용한 모형결과이고 세 번째 열은 4개의 연속 CAPPI를 이용한 결과를 나타낸다. 그림에서 제시한 바와 같이 적용 기법에 따른 예측장이 가시적인 차이를 확인하기는 힘들었으며 예측 기법사이의 정확도를 분석하기 위한 검정통계량으로 상관계수(Cross Correlation)와 평균제곱근오차(Root Mean Square Error)를 이용하였으며 비교·검토하였으며 결과는 아래에 나타난 Table 1과 같다. 단시간 예측은 비교적 단시간인 2~3시간의 강우를 예측하기 위함인데 본 연구에서 실시한 1시간의 예측에서 상관계수 수치가 2 CAPPI 자료를 이용한 경우 약 45% 정도의 수치가, 연속 CAPPI 자료를 이용한 경우 이보다는 조금 개선된 53%의 수치가 제시되었다. 강우레이더 반사도 예측장(dBZ)에 대한 평균제곱근 오차도 개발한 모형의 경과가 기존의 2 CAPPI 자료를 이용한 예측보다 다소 개선된 결과를 보였다. 본 연구를 통하여 설정한 기본 가정인 연속 CAPPI 자료를 이용한 강우의 이동과정을 역 추적하여 강우의 성장과 소멸과정을 구현하여 예측능력을 향상 할 수 있다는 사실은 확인하였으나 평균제곱근오차나 상관계수 등 검정 통계량의 급격한 개선이 이루어지는 않았다. 이는 개발모형이 완전한 물리 방정식에 기초하지 않은 것과 물리적 모형에 기초한 모델일지라도 강우의 성장과 소멸과정 자체가 구현하는데 어려움이 있는 등 다양한 한계가 있음을 보였다. 본 연구에서 예상했던 것과 같이 여러 과거 시간대의 연속 CAPPI 자료와 다항 회귀식을 이용하면 2 CAPPI 자료를 이용한 모형보다 예측능력이 향상되었다. 하지만 여기서 눈여겨 볼 것은 1시간 후의 강우예측에 있어서 그 상관계수 수치가 50%를 약간 상회하는 정도로 나타났으며 이 수치는 단시간 강우예측의 경우도 여전히 강우의 소멸과 성장 및 이동에 대한 정확한 예측을 위한 연구가 지속되어야 함을 보여준다.

4. 결 론

본 연구에서는 기존의 선형 외삽기법에 기초한 단시간 강우예측 모형이 강우시스템의 성장과정을 반영하지 못하는 한계를 극복하고, 예측 정도를 개선하기 위하여 기상레이더로 획득할 수 있는 여러 과거 시간대의 반사도 정보로부터 강우의 강도변화, 이동속도의 변화 정보를 얻을 수 있어 강우의 성장 및 소멸과정을 반영할 수 있다는 가정하에 여러 과거 시간대의 기상 레이더 반사도자료와 다항 회귀식을 이용하여 x방향과 y방향의 전파속도의 성장과정과 레이더 반사도의 성장과정 모의에 기초한 단시간 강우예측 모형을 개발하였다. 상관계수와 평균제곱근오차와 같은 검정통계량을 이용하여 예측장과 관측장을 비교한 결과는 개발된 모형이 기존의 선형 외삽에 기초한 단시간 강우예측보다 개선된 예측 결과를 보여줌에도 불구하고, 본 모형이 완전한 물리적 모형이 아니라 자료사이의 상관성과 다항 회귀식을 이용한 통계적인 방법에 기초하여 강우의 성장과 소멸과정을 구현함에 있어 한계가 있음을 보였다. 뿐만 아니라 강우가 레이더 관측반경 내로 유입되는 경계면에서는 강우가 존재하지 않는 영역이 생기므로 수 시간 이상을 예측하기엔 한계가 있었다. 또한, 지상 우량계 강우강도와 레이더 강우강도를 사이의 관계를 이용한 실시간 Z-R관계식을 적용하여 한 가지 Z-R관계식을 사용함으로써 나타나는 단점을 보완하였다. 이러한 연구를 통하여 태풍, 국지성 집중호우 등에 대하여 기상레이더 반사도 자료의 활용 가능성을 볼 수 있었다. 개발된 모형을 이용하여 산정된 단시간 강우예측 자료는 강우의 생성 및 발달과정의 표현과 강우예측 정도 향상의 가능성을 보였다. 향후 지속적인 연구를 통하여 홍수 예·경보 체계와 연계하여 선행시간을 확보한 정확도 높은 홍수정보시스템 구축에 기여할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 2003년도 건설기술혁신사업(산학연C01-01)에 의한 도시홍수재해관리기술연구사업단의 연구성과입니다.

참고문헌

- 김광섭, 김종필(2008) 기상레이더 자료를 이용한 단시간 강우예측모형 개발, 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 제41권, 제10호, pp. 1023-1034.
- 김경준, 최정호, 유철상(2008) 연속수정법을 이용한 레이더 자료와 지상 강우자료의 합성, 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 제41권, 제7호, pp. 681-692.

- 김병식, 홍준범, 김형수, 최규현(2007) 조건부 합성방법을 이용한 레이더 강우와 지상강우자료의 조합, *대한토목학회논문집*, 대한토목학회, 제27권, 제3B호, pp. 255-265.
- 배덕효, 김진훈, 윤성섭(2005) 레이더 추정강우의 수문학적 활용 (I): 최적 레이더 강우 추정, *한국수자원학회논문집*, 한국수자원학회, 제38권, 제12호, pp. 1039-1049.
- 정성화, 김경익, 허경자(2005) 지상 우량계의 강우강도를 이용한 개선된 레이더 강우강도의 실시간 추정, *한국기상학회지*, 한국기상학회, 제41권, 제5호, pp. 751-762.
- 최규현, 한건연, 김광섭, 이창희(2006) 레이더 정량강우와 연계한 홍수유출 및 범람해석 시스템 확립 II. Cokriging을 이용한 2차원 정량강우 산정, *한국수자원학회논문집*, 한국수자원학회, 제39권, 제4호, pp. 335-346.
- 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.
- Golding, B.W. (1998) Nimrod: A system for generating automated very short range forecasts, *Meteorol. Appl.*, Vol. 5, pp. 1-16.
- Handwerker, J. (2002) Cell Tracking with TRACE3D -- a new algorithm, *Atmos. Research*, Vol. 61, pp. 15-34.
- 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, pp. 26.
- Kotarou, T., Takumi, N., and Takaaki, Y. (1995) Operational calibration of rain gauge radar by 10-minute telemeter rainfall, *3rd International Symposium on Weather Radars*, Sao Paulo, Brazil, pp. 75-81.
- Kunitsugu, M., Makihara, Y., and Shinpo, A. (2001) Nowcasting system in JMA, *Fifth International Symposium on Hydrological Application of Weather Radar "Radar Hydrology"*, Proceedings, November 19-22, 2001, Heian-Kaikan, Kyoto, Japan, pp. 267.
- Li, L., Schmid, W., and Joss, J. (1995) Nowcasting of motion and growth of precipitation with radar over a complex orography, *J. Appl. Meteor.*, Vol. 34, pp. 1286-1300.
- Li, P.W. and Edwin, S.T. Lai. (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.
- Mecklenburg, S., Joss, J., and Schmid, W. (2000) Improving the nowcasting of precipitation in an Alpine region with an enhanced radar echo tracking algorithm, *J. Hydrol*, Vol. 239, pp. 46-68.
- Pierce, C.E., Collier, C.G., Hardaker, P.J., and Haggett, C.M. (2000) GANDOLF: a system for generating automated nowcasts of convective precipitation, *Met. Apps.*, Vol. 7, pp. 341-360.
- Saxen, T.R., Mueller, C.K., Jameson, T.C., and Hatfield, E. (1999) Determining key parameters for forecasting thunderstorms at white sand missile range, *Preprints 29th Conf. on Radar Meteorology*, Montreal, Canada, Amer. Meteor. Soc., pp. 9-12.
- Seed, A.W. and Keenan, T. (2001) A dynamic and spatial scaling approach to advection forecasting, *Preprints 30th International Conference on Radar Meteorology*, July, Munich, Germany, pp. 492.

(접수일: 2009.7.28/심사일: 2009.9.13/심사완료일: 2009.9.13)