홍수피해 감소를 위한 지역규모 기상모델의 적용성 분석

Analysis of Regional-Scale Weather Model Applicabilities for the Enforcement of Flood Risk Reduction

정 용* · 백종진** · 최민하***

Jung, Yong · Baek, JongJin · Choi, Minha

Abstract

To reduce the flood risk caused by unexpected heavy rainfall, many prediction methods for flood have been developed. A major constituent of flood prediction is an accurate rainfall estimation which is an input of hydrologic models. In this study, a regional-scale weather model which can provide relatively longer lead time for flood mitigation compared to the Nowcasting based on radar system will be introduced and applied to the Chongmi river basin located in central part of South Korea. The duration of application of a regional weather model is from July 11 to July 23 in 2006. The estimated rainfall amounts were compared with observations from rain gauges (Sangkeuk, Samjook, and Sulsung). For this rainfall event at Chongmi river basin, Thomson and Kain-Frisch Schemes for microphysics and cumulus parameterization, respectively, were selected as optimal physical conditions to present rainfall fall amount in terms of Mean Absolute Relative Errors (MARE>0.45).

Keywords : flood mitigation, regional-scale weather model, precipitation estimation, mid-size watershed

요 지

기후변화로 증가하는 홍수피해를 대처하기 위해 여러 예측 방법들이 개발되고 있다. 홍수예측의 가장 핵심 요소는 홍수에 측을 위한 수문모델의 입력자료로 사용하는 강우에 대한 정확하고 신속한 예측이다. 기존의 레이더 강우를 이용한 Nowcasting 보다 더 많은 대응시간을 확보할 수 있는 중소규모의 기후모델인 WRF(Weather Research Forecast)-ARW(Advanced Research WRF)를 소개하고, 이를 한반도 중부지방의 청미천 지역에 적용하려 한다. WRF-ARW의 적용기간은 2006년 7월 11일부터 7월 23일까지이며 이 결과를 청미천 유역에 있는 강우 관측소들(생곡, 삼죽, 설성)의 실제 강우 관측소의 관측 값과의 비교에 의해 이 강우 사상에 대해 Thomson scheme(미세물리)와 Kain-Frisch scheme(적운형 매개변수)의 조합이 청미천유역에서 가장 적합한 기후물리 조합이며 Mean Absolute Relative Error를 통해 세 개의 강우관측지점이 0.45 이상의 값을 나타내었다.

핵심용어 : 홍수피해 감소, 지역규모 기후모델, 강우 예측량 산정, 중소규모 유역

1. 서 론

기후변화에 대응하기 위해 WMO(World Meteorological Organization)는 세계기상 감지, 세계기후 프로그램, 수문학 및 수자원 관리 프로그램 등 기술협력을 도모해 오고 있다. 이를 위해, 많은 연구자들은 여러 부분에서 기후·기상에 대해 이해하고 예측하기 위해 다양한 기후예측모델들, MM5(Pennsylvania State University/National Center for Atmospheric Research 5th generation Mesoscale Model), WRF(Weather Research Forecast), ECMWF(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts), RUC(Rapid Update Cycle), RegCM2(Development of a Second Generation Regional Climate

Model), ARPS(Advanced Regional Prediction)등을 개발 발전시켰다.

대한민국 기상청에서 기상모델로 주요하게 사용하는 WRF 모델은 기존의 MM5를 대체한 모델이다. WRF는 이전 모델인 MM5에 비해 예측모델로서의 물리적 특성인 질량, 운동량, 엔트로피 등을 보존하는 기능을 지니고 있다(Pattanayak 외, 2008). 날씨 예측 모델로서의 다양한 모델들(MM5, WRF, RUC and ETA)을 실험한 Sousounis 외(2004)은 WRF와 MM5가 다양한 물리적 구성의 가능성을 제공하여 다른 모델들에 비해 더욱더 탁월한 날씨 예측이 가능하다고 결론짓고 있다. 더욱이 WRF 모델은 다른 모델에서 보여 줄 수 없었던 더욱 미세한 격자로 모델을 가용할 수 있어서 더욱더 현

*정회원 · 건설기술연구원 연구원 (E-mail : gp10126@gmail.com)

**한양대학교 건설환경공학과 석사과정 (E-mail : jbaek@hanyang.ac.kr)

***정회원 · 교신저자 · 한양대학교 건설환경공학과 조교수 (E-mail : mchoi@hanyang.ac.kr)

실에 가까운 시뮬레이션이 가능하며 해상풍, 기온, 태풍의 이동경로, 토양수분, 바람장, 황사 등과 같은 다양한 기상연구에 활용되고 있다. 그 중 바람에 대한 연구는 지표와 대기의 안정도 등이 해상풍에 영향을 주기 때문에 WRF를 이용한 다각도의 영향들에 대한 연구들이 이루어지고 있으며, 박순영 외(2011)은 해안선과 지형 분포 다양성에 따른 대기경계층의 영향을 파악하고 해풍이 내륙의 기상에 미치는 영향에 대해서 연구를 하였다. 기후에 대한 연구로는 안중배 외(2010a, 2010b)이 2002년부터 2008년까지의 한반도의 농업기후지수를 산정하는 연구를 하였으며, WRF를 연결하여 지구온난화에 따른 식물기간과 작물기간의 농업기후지수와 관계변화를 살펴보았다. 또한 WRF 모델을 이용하여 태풍의 이동 및 예측에 대해서 연구가 대기과학 분야를 중심으로 연구가 진행되고 있다. 박종임 외(2010)은 WRF 모델과 자료동화를 이용한 태풍 우콩(2006년 10월)의 예측을 연구하였으며, 노영경(2010)은 2009년에 발생한 제 11호 태풍 크로반의 사례를 통하여 미세물리 변화를 중심으로 수치 모의의 정확성을 검증하였다. 또한 기존 모델인 MM5와 WRF 모델을 비교하는 연구들이 이루어 졌는데, 김유근 외(2006)은 2004년 5월 28일~5월 31일을 사례기간으로 설정하고, MM5와 WRF를 이용해 대기오염확산 추정 및 풍력 포텐셜 활용에 대한 연구를 실시하였다. 대기모델로서의 WRF는 황사에 대한 연구에도 사용되고 있는데 이승환 외(2007)은 2006년 3~6월의 기간에 대해 MM5와 WRF를 이용 서울지역의 황사와 농도 미세먼지에 대해서 연구를 하였다. 이처럼 WRF는 여러 분야에서의 활용 가능성을 보여주고 있으나 강수량을 연계한 수자원 분야에서의 활용은 쉽게 찾아볼 수가 없다(이지우 외, 2006; 변재영 외, 2007). 간혹, WRF가 아닌 다른 모형의 수자원분야 연계활용을 찾아볼 수가 있는데 Jasper 외(2002)은 Ticino-Verzasca-Maggia 유역을 대상으로 SM(Swiss model, Switzerland), MESO-NH(Meso-scale Non-Hydrostatic model, France), BOLAM3(Boligna Limited Area Model version 3, Italy), MC2(Mesoscale Compressible Community model, Canada), ALADIN(Aire Limitee Adaption DYNa-mique-joint international development) 5개의 다른 기상모델을 이용하여 분포형 지표 모델인 WaSiM-ETH(employed Water Flow and Balance Simulation Model)의 적용을 통해 유출에 대한 검증 비교를 실시하였다. 본 연구에서는 WRF모델에 대해 소개하고 기상학적 인자를 통해 WRF 모델의 강우 예측 능력을 평가하여 홍수피해 저감을 위한 기상모델을 이용한 중단기 홍수 발생 예측 가능성을 분석하려 한다.

2. 모델 소개

2.1. Weather Research Forecast (WRF)

WRF는 V2.0으로 처음 일반에 소개 되었으며, beta 버전인 V1.0의 후속으로 만들어진 것이다. WRF는 완전 압축형 비정수계를 기본으로 사용한다. 또한, 완벽한 coriolis와 만곡에 관한 표현을 하고 있으며, 한 방향 또는 쌍 방향의 Nesting 방법을 지니고 있다. WRF에서 사용된 평면 수평 격자는 Arakawa C 격자체계이며 지형의 높이에 따라 달라

지는 Eulerian 질량 좌표계가 사용 되고 있다. 수치해석 방법으로는 Runge-Kutta 2차와 3차 옵션을 가지고 있으며, 현재로는 WRF V3.3까지 일반에 제공되고 있다. 이번 지역규모의 강수량을 산정하기 위한 방법으로 사용되어진 WRF 버전은 V3.1로 USGS(United State Geological Survey)에서 제공하는 기존의 토지이용 분류체계를 개선하여 인공위성 영상자료(MODIS: Moderate Resoulution Imaging Spectrometer)를 통한 토지이용 분류를 사용하였고, 토양수분과 온도의 값들을 3차원의 공간에 분포 시키며, 고정된 내삽법을 도입하였다.

WRF는 크게 3개의 구조 WRF Pre-processing System (WPS), WRF model과 Post-processing으로 나뉘어져 있으며 WRF모델을 수행하기 위한 Grib data sets이 WRF를 구동하기 위한 필수자료 이다. Grib(Gridded Binary) data는 과거자료와 가까운 미래 예측자료를 포함하고 있다. WRF Pre-processing System(WPS)에는 본격적인 모의실험을 위한 입력데이터를 준비하는 단계로 세 가지의 프로그램들 (geogrid, ungrib, 그리고 metgrid)이 그 안에 있다. 이 세 가지 프로그램을 제어하기 위한 매개변수는 namelist.wps 파일에 입력되어진다. 매개변수를 입력하는 입력파일 이외에도 GEOGRID.TBL, METGRID.TBL과 Vtable이 이 WPS 단계에서의 세 프로그램을 더욱더 자세히 제어하는 정보 제공원으로 사용되어진다. WPS를 위한 각각의 프로그램을 설명하면 geogrid는 모델의 도메인을 확인하고 모든 격자에 지리학적인 자료들을 내삽하는 작업을 한다. 즉 위도, 경도, 그리고 지도의 스케일 등을 각각의 격자에 맞게 계산하고 그 위에 맞게 토양의 분류에 대한 내삽자료와 지리적 높이, 토양의 평균온도, 매달마다의 식물분류와 알베도 값 등을 내삽한다. geogrid 프로그램을 위한 지리적 요소의 매개변수들은 namelist.wps의 geogrid 섹션에서 수정이 가능하며 내삽방법에 사용되는 지리적 정보는 GEOGRID.TBL에 포함되어 있다. geogrid.log와 geo_em.d01.nc는 geogrid가 안전하게 시행 되었을 때 생성되어지는 부산물들이다. 두번째 프로그램으로, ungrib은 GRIB(Gridded Binary) data의 binary 포맷을 기상자료 모의실험을 위한 형태에 맞게 해석한다. ungrib을 실행하는 동안 Vtable(variable table)은 GRIB data로 부터 관심지역 자료를 추출하고 WRF 실행을 목적으로, 초기작업을 위한 해석적 형태를 생성한다. ungrib이 성공적으로 시행 되었을 때에는 binary자료를 모의실험에 맞게 여러 시간적 정보와 함께 여러 파일들을 형성한다(e.g. FILE:2011-12-06_00, FILE:2011-12-06_03, ..., FILE:2011-12-10_00). Pre-processing을 위한 마지막 작업으로 metgrid를 운용한다. metgrid는 geogrid와 ungrib에서 제공 되어지는 초기 기상입력 자료들과 모델 내의 격자위치 자료를 수평적으로 겹치거나 내삽하는 작업을 한다. METGRID.TBL은 각각의 기상학 분야에 쓰이는 내삽방법을 제공하며, namelist.input 파일은 기능적인 매개변수와 모의실험의 시간적인 요소들에 대해서 정의하고 있다. Metgrid는 WRF모델의 pro-cesing 사전에 작업한 geogrid와 ungrib에서 얻어낸 부산물들을 혼합하여 Met_em.d01.2011-12-06_00:00:00.nc 등과 같은 최종 파일을 형성한다. 이 metgrid 프로그램 실행이 끝이 나면 본격적인 wrf 작업을 실시하기 위한 기초 작업이 대부분 마무리 된다. 실제적인 wrf 프로그램을 실행하기 위

Fig. 1 Flow chart of WRF simulation

해서는 수직적 내삽작업이 남아 있는데 이는 real이라는 프로그램으로 실행된다. 이 real은 WPS작업으로 얻어 낸 기상학 자료들을 수직적으로 재배치하는 작업을 하는 것이다. 이를 마치면 최종단계의 wrf를 실행할 수 있다. wrf를 실행한 이후에 생성되는 파일의 형태는 namelist.input의 io_form_history에서 정할 수 있다. 본 연구에서는 netCDF(network common data form)으로 생성하였으며 생성된 데이터들의 이름은 wrfout_d01_2011-12-06_00:00:00으로 나타낸다. Post-processing은 wrf로부터 얻어진 데이터 파일들을 시각적으로 표현해주는 세가지의 도구, NCL(NCAR Command Language), RIP 4(Read/Interpolate/Plot), 그리고 ARWpost가 사용되고 있다. Fig. 1은 WRF 작업을 위한 구조적인 모식도이다.

WRF-ARW의 역학적 해설은 압축성을 포함한 비정역학 Euler식에 근거하고 있다. Eulerian 질량 좌표계는 지형의 모양을 따라 움직이는 질량을 수직으로 나타내며 이를 기준으로 공기의 흐름방정식들이 구현되고 있다. 수직좌표의 구성은 Fig. 2에서 잘 표현되고 있다. 이를 수식으로 표현하면 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\eta = (p_h - p_{ht}) / \mu \quad (1)$$

where $\mu = p_{hs} - p_{ht}$

p_h : 정수압력

p_{hs} : 지표면의 정수압력

p_{ht} : 정상의 정수압력

이 수직좌표를 중심으로 공기의 흐름을 나타내기 위한 변수들은 $V = \mu V = (U, V, W)$, $\Omega = \mu \dot{\eta}$, $\Theta = \mu \theta$ 등이 있는데 x, y, z 방향의 공변속도는 $V = (u, v, w)$ 로 나타내며 $w = \dot{\eta}$ 는 공변의 수직속도, $\mu(x, y)$ 는 (x, y) 위치에서 단위면적당 공기의 질량이다. 이곳에서 θ 는 잠재열을 의미한다. 이들을 이용해

Fig. 2 WRF-ARW Vertical Coordinate (Skamarock et al., 2005)

서 Euler식에 근거한 공기흐름에 대한 기본 식들을 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\partial_t U (\nabla \cdot V_u) - \partial_x (p \partial_\eta \phi) + \partial_\eta (p \partial_x \phi) = F_U \quad (2)$$

$$\partial_t V + (\nabla \cdot V_v) - \partial_y (p \partial_\eta \phi) + \partial_\eta (p \partial_y \phi) = F_V \quad (3)$$

$$\partial_t W + (\nabla \cdot V_w) - g (\partial_\eta p - \mu) = F_W \quad (4)$$

$$\partial_t \Theta + (\nabla \cdot V \Theta) = F_\Theta \quad (5)$$

$$\partial_t \mu + (\nabla \cdot V) = 0 \quad (6)$$

$$\partial_t \phi + \mu^{-1} [(V \cdot D \phi) - g W] = 0 \quad (7)$$

여기에 사용된 $\phi = gz$ 는 지오폠펜셜이고, p 는 압력을 나타낸다. F_U, F_V, F_W, F_Θ 는 각 방향에 대한 힘을 나타내며 대기 중에 작용하는 힘들은 모델의 물리, 난류의 혼합, 천체의 힘, 그리고 지구의 자전에 의해 주어지는 힘들로 표현된다. 역 밀도를 위한 진단관계식은 $\partial_\eta \phi = -\alpha \mu$ 로 나타낼 수 있으며 상태방정식은 $p = p_0 (R_d \theta / p_0 \alpha)^\gamma$ 이다. $\gamma = C_p / C_v$ 는 마른 공기의 열 보전량의 비이며 R_d 는 마른공기의 기체 상수를 나타낸다.

2.2 강우에 대한 매개변수

WRF-ARW는 여러 가지 물리적 선택권(미세물리: microphysics, 적운모수화: Cumulus Parameterization, 지표 경계면: Planetary Boundary Layer, 지표모델: land-surface model과 복사에너지: radiation)들이 주어진다. 그 물리적 변수들을 속도의 성분들과 잠재열, 그리고 습윤 상태들을 계산한다. 이중 강우에 대해 가장 직접적인 영향을 미치는 매개변수는 미세물리와 적운모수화이다. 미세물리는 물의 증기와 구름, 비의 생성과정을 표현한다.

미세물리로 사용되는 인자들은 Kessler scheme, Purdue Lin scheme, WRF Single-Moment 3-class(WSM3) scheme, WSM5와 WSM6 schemes, Eta Grid-scale Cloud and Precipitation scheme, Thomson et al. scheme, Goddard Cumulus Ensemble Model scheme, 그리고 마지막으로 Morrison et al. 2-Moment scheme이 있다. Kessler scheme은 Kessler(Kessler, 1969)에 의해서 개발된 것으로 단순한 형태의 scheme으로 따뜻한 구름 scheme이라고도 한다. 이는 비의 생성과 낙하 그리고 증발을 포함하며, 비구름의 확대와 변환, 응축으로 부터의 구름비의 생성을 모의 한다. Purdue Lin scheme은 Kessler scheme과는 다르게 응결구름과 눈, 그리고 싸락눈까지 고려한다. Lin 외(1983)은 여러 번의 변환, 즉 포화상태의 변환과 얼음의 침전을 개선하였다. WRF Single-Moment 3, 5, 6-class schemes(WSM-3, 5, 6)은 시리즈로 Hong 외(2004)에 의해 개발된 WSM-3을 기본으로 개선되었다. WSM-3은 얼음의 침전을 나타내면서 또 다른 얼음 성상의 매개변수화를 도모했다. WSM-3은 단순 얼음 scheme으로도 불린다. WSM-5는 구름속의 물의 성상을 다섯 가지(증기, 비, 눈, 얼음구름, 물구름)로 나타 낸 것이 WSM-3와의 다른 점이다. WSM-6은 5가지 성상에서 한가지(싸락눈)를 더 포함한다. Eta Grid-scale Cloud and Precipitation scheme은 각각의 수문 기상장을 계산 통합하

여 전체를 표현하는 방법을 사용한다. 이 scheme은 물구름과 비, 얼음구름, 얼음비상태에서의 물의 증발과 응축에 대해서 예측한다. 대량 미세물리 매개변수화(bulk microphysical parameterization, BMP)의 새로운 방법으로 Thomson et al. scheme을 들 수 있다. 이는 기존의 단일모멘트 BMP로부터 여러 부분, 즉 물리적 현상과 프로그램자체에서 개선점을 나타내었다. 눈의 입자 크기는 얼음과 물의 양과 온도에 의해서 정해지며 그는 지수분포나 감마 분포로 표현된다. Goddard Cumulus Ensemble Model scheme은 단일모멘트 BMP의 일종으로 여러 부분에서 개선이 이루어졌다. 가장 눈에 띄는 변화는 세 번째 객체로서의 얼음을 싹타눈과 우박으로 구분하는 것이다. 이는 그들의 구성에서의 밀도차이를 고려한 것이다. 그리고 포화상태의 정도를 조금 더 세분화하여 초과포화상태까지 나타내는 변화가 있다. Morrison 등 2-moment scheme은 예측변수에 농도수와 여러 성상의 눈과 비 그리고 싹타눈의 혼합비율을 나타내는 10가지의 변수들을 가지고 있다.

적운모수화(Cumulus Parameterization)는 하위격자 크기의 대류적인 좁은 형태의 구름의 생성의 효과를 모의 한다. 그러므로 이들 다양한 scheme들은 상승효과와 하강효과에 영향을 받는 수직적인 공기의 흐름을 나타낸다. 그러므로 이들 scheme들은 각각의 기둥 안에서 일어나는 수직적 열전달과 수증기의 운곽을 포함한다. 모든 scheme들은 표면강우의 대류적 요소를 내포하고 있다. Kain-Fritsch scheme은 Kain과 Fritsch(1990)에 의해 개발된 것을 Kain(Kain, 2004)에 의해 개선된 scheme이다. 이는 상승기류와 하강기류를 포함한 단순한 구름모델로 흡착 및 탈착을 내포하고 있다. Betts-Miller-Janjic scheme은 Betts-Miller convective adjustment scheme(Betts, Miller., 1986)을 Janjic(1994)이 개선한 scheme이다. 이는 깊은 대류의 운곽과 이완작용의 시간이 매개변수이며 이는 구름의 효과에 의존한다. 더욱이 이 변수들은 대류현상을 좌우하는 변수로 쓰인다. 구름의 효과는 엔트로피의 변화와 강우 그리고 구름의 평균온도에 영향을 받는다. Grell-Devenyi ensemble scheme은 2002년에 Grell과 Devenyi에 의해서 소개되어진 앙상블 모델로 여러 가지의 적운형 매개변수모델을 각각의 좌표 내에서 운용하여 그의 결과를 평균하고 도시 모델과 결과를 재검토하는 방법을 사용하는 방법이다.

3. 연구방법 및 모델 적용

3.1 실험설계

WRF 모델 적용 지역은 한반도 중부지방에 위치한 청미천 유역이다. 청미천 유역은 경기도 여주군과 충청북도 음성군에 위치하고 있다. 이 지역은 남한강의 제1지류유역이며 위치는 동경 127° 20'~127° 44', 북위 36° 56'~37° 13'사이이다. 이 지역의 유역크기는 596.2 km²이고 하천길이는 60.8 km이며 그의 평균 폭은 9.53 m, 가장 높은 곳의 해발고도는 676 m이다. Fig. 3은 청미천 지역을 나타내 주고 있으며 Fig. 4는 WRF-ARW모델을 위한 3개의 Nested 도메인을 나타낸다. 첫 번째 도메인은 36 km의 격자크기를 지니고 있으며 두 번째는 12 km, 마지막으로 4 km의 격자 크기

Fig. 3 Chongmi watershed with three rainfall observation locations

Fig. 4 WRF-ARW three nested domains

(45×45 격자 수)로 격자 크기가 줄어들어 더 세밀한 강우정보를 획득할 수 있다. 이번 모델 적용에서는 강우에 대한 매개변수 중 고정된 지표 경계면은 YSU scheme으로 고정하고 이를 바탕으로 미세물리 변수와 적운모수화의 조합에 대한 검증으로 각 지역에서의 최적의 매개변수의 조합을 산정한다. 이 곳에서 사용된 미세물리 변수는 Lin et al., scheme, Thompson scheme과 WSM-6 scheme을 사용하였고 적운형 매개변수화는 Betts-Miller-Janjic scheme, Grell 3D ensemble scheme과 Kain-Fritsch scheme의 조합으로 사용되었다(이후로 조합의 첫 머리 글자를 차용해 9개의 조합(LB, LG, LK, TB, TG, TK, WB, WG와 WK)을 사용하도록 한다(예: LB=Lin et al. scheme과 Betts-Miller-Janjic scheme)). 중소규모 날씨 모델의 수행 기간은 2006년 7월 9일부터 7월 23일 까지이며, 그중 7월 11일부터 7월 23일까지의 강우 데이터를 청미천 지역 내의 3개 지역(설성, 삼죽, 생곡)의 관측 강우치와 비교 분석하였다. 13일간의 강우자료를 추출하기위해 WRF-ARW를 Spin-up 하는 기간으로 초반 이틀을 강우자료에서 고려하지 않았다.

3.2 WRF 모델 강우 비교

WRF에 의해 생산된 강우자료(3시간 단위 강우 모의 결과)를 세 개의 강우관측소(설성, 삼죽, 생곡)에서 얻어진 측정 강우자료와의 비교를 위해 두 데이터의 평균치 비교 검증을 독

Fig. 5 MARE results based on nine parameter combinations for rainfall simulations

립표본 t-test를 이용해 실시하였다. 95%의 신뢰구간 (Confidence Interval)을 선정하였으며 귀무가설은 두 데이터의 평균값의 차이가 없다는 것으로 WRF-ARW의 모의가 홍수추적의 한 방법으로서의 가능성을 측정하고 있다. 각각 9개의 parameter의 조합과 관측지역 3곳에 대해 t-test는 유의수준($p > 0.05$)에서 귀무가설(영가설)이 모두 적합함을 보였다. WRF-ARW의 모든 parameter들의 조합은 청미천 지역의 홍수를 예측하고 이를 이용하는 것에 대한 타당성을 증명하였다. 최적의 매개변수 조합을 선정하기 위해 MARE (Mean Absolute Relative Error)를 활용하였다. MARE는 평균절대상대오차로 실측값과 예측값의 괴리 정도를 의미하는 것으로 오차의 비율을 분석하며 일반적으로 오차율로 표

현된다. 아래 식 (8)은 MARE를 나타낸다. 이에 대한 계산 값은 Fig. 5에서 나타내고 있다.

$$MARE = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \frac{|R_{est,k} - R_{real,k}|}{R_{real,k}} \quad (8)$$

여기서, $MARE$: 평균절대상대오차

$R_{est,k}$: WRF-ARW로 산출된 값

$R_{real,k}$: 강우관측소의 실측치

n : 데이터의 수

생곡 관측소는 TK와 TB가 가장 낮은 MARE를 나타내고 있다. TK(미세물리: Thomson scheme, 적운형 매개변수: Kain-Frisch scheme)와 TB(미세물리: Thomson scheme, 적운형 매개변수: Betts-Miller-Janjic scheme)가 동일하게 0.47을 MARE값으로 나타내고 있다. 이에 공통적으로 들어가는 미세물리 Thomson scheme은 눈의 입자크기를 얼음과 물의 양과 온도에 정하여 지수나 감마분포로 표현하는 미세물리이다. 삼죽 지역도 TK가 눈에 띄게 가장 낮은 MARE 값(0.49)을 가지고 있다. 반면에 LG는 t-test는 통과를 했지만 청미천 지역에서 그의 MARE값이 너무 커(1.25) 실제적인 홍수 예측에 적용하기에는 무리가 있음을 볼 수가 있다. 마지막으로 설성지역은 WK(미세물리: WSM-6 scheme, 적운형 매개변수: Kain-Frisch scheme), WG(미세물리: WSM-6 Scheme, 적운형 매개변수: Grell 3D ensemble scheme), TB, TK가 보편적으로 좋은 MARE값을 보여 주고 있다. 그중에서도 다른 지역과 동일하게 TK가 가장 낮은 MARE값(0.57)을 보유하고 있다. 결론적으로 이곳에서 볼 수 있는 가장 최적의 미세물리와 적운형 매개변수의 조합은

a) 설성 관측소

b) 삼죽 관측소

c) 생곡 관측소

d) 생곡 관측소 hourly rainfall

Fig. 6 Rainfall comparisons at three rainfall observation locations in Chongmi river basin

Thomson scheme과 Kain-Frisch scheme으로 보인다. Fig. 6은 9가지 매개변수의 조합에 대한 WRF-ARW 강우 자료의 일별 분포자료이다. 이들은 현지 관측치와 일대일 비교로 나타내어지고 있다. 위 MARE에서도 표현되었듯이 TK는 세 관측소 모두에서 관측자료의 경향성을 아주 잘 따라 가는 것을 확인 할 수 있지만 단순히 육안으로 보기에는 TB가 조금 더 그 경향성을 잘 나타내는 것으로 보여진다. 또한 Fig. 6의 d)에서 생극에서 가장 좋은 결과를 보여준 TB를 이용한 모의를 관측치와 시간 단위 비교를 보여 주고 있는데 WRF를 이용한 모의가 실측 강우의 경향성을 보이고 있지만 대체적으로 과대 산정되는 것을 볼 수가 있으며 중소 하천의 홍수모의를 위해서는 WRF모의의 정확성을 증진시키기 위한 연구들이 더욱더 보강이 되어야 할 것이다.

4. 결 론

강우-유출에 대한 예측은 돌발 홍수나 중단기 홍수 예보의 핵심 사항이다. 이를 위해 다양한 강우 정보를 획득할 수 있는데, 최근에 가장 많이 사용하는 레이더 정보와 날씨 예측모델 등이 강우정보 제공원이다. 중단기 예측을 위해서는 날씨예측모델을 적용하여야 하며 이는 대략 수일정도의 여유시간을 제공할 수 있을 정도의 예측성을 지니고 있다. 중단기 예측을 위한 날씨 예측모델로 이번 연구에서는 WRF-ARW를 활용하였으며 그의 구조 및 역사를 서술하였다. 이번 연구에서 실시한 청미천 지역 2006년 강수에 대한 비교를 통해 이번 사상에 대해서는 TK(미세물리: Thomson scheme, 적운형 매개변수: Kain-Frisch scheme)가 가장 적합한 조합으로 나타났으며 그들의 MARE는 세 곳의 강우 관측소에 대한 MARE값이 각각 0.47(생극), 0.49(삼죽), 그리고 0.57(설성)으로 나타났다. 이번 연구를 통해 얻은 WRF-ARW의 특성은 아래와 같다.

첫째, 한반도 내에서 적용 가능한 초기 강우 및 경계조건을 제공받을 수 있다.

둘째, 지역마다의 기후 및 지형조건에 맞는 다양한 물리적 특성을 제공한다.

셋째, 전지구적인 날씨예측을 중심으로 지역에 맞는 강우 예측을 180시간까지 제공하여 수문학적인 연계를 통해 미래에 발생할 수 있는 홍수의 시간과 양을 예측 할 수 있다.

이 특성을 활용하여 한반도의 지역기상모델로서의 가능성 뿐만 아니라 수문학적 모델과의 연계가능성 또한 검토하는 연구가 지속적으로 이루어져 나가야 할 것이다.

감사의 글

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업지원금을 받아 수행된 것임(0002516).

참고문헌

김유근, 정주희, 배주현, 오인보, 권지혜, 서장원(2006) WRF 모형을 통한 복잡 연안지역에서의 해상풍 모의 개선. **한국대기환경학회지**, 한국대기환경학회, 제22권, pp. 309-323.

- 박종인, 김현미(2010) 앙상블 칼만 필터를 이용한 태풍 우강(200610) 예측과 앙상블 민감도 분석. **대기, 한국기상학회**, 제20권 제3호, pp. 287-306.
- 노영경(2010) **태풍 크로반(KROVANH)의 전향점에 기여하는 미세 물리 방안에 대한 고찰**. 석사학위논문, 이화여자대학교.
- 박순영, 이화운, 이순환, 이귀옥, 지효은(2011) 해안지형의 복잡성에 따른 해풍침투 변화가 대기경계층에 미치는 영향 분석. **한국환경과학회지**, 한국환경과학회, 제20권, pp. 275-289.
- 변재영, 원혜영, 조천호, 최영진(2007) WRF 모델에서 모의된 2005년 장마 기간 강수의 동조성 연구. **Atmosphere**, 대한대기학회, 제17권 제2호, pp. 115-123.
- 안중배, 허지나, 심교문(2010a) 수치예보모형을 이용한 역학적 규모측소 기법을 통한 농업기후지수 모사. **한국농림기상학회지**, 한국농림기상학회, 제12권, pp. 1-10.
- 안중배, 홍자영, 심교문(2010b) 대기-해양-지면-해빙 결합 대순환 모형으로 모의된 이산화탄소 배증시 한반도 농업기후지수 변화 분석. **한국농림기상학회지**, 한국농림기상학회, 제12권, pp. 11-22.
- 이승환, 문운섭(2007) 대기질예보모델의 입력량으로서 MM5 및 WRF 최신 모델의 기상예보 정확도에 관한 연구. **한국대기환경학회 2007년 환경공동학술대회 초록집**, 한국대기환경학회, pp. 1558-1560.
- 이지우, 홍서유(2006) WRF 모형을 이용한 한반도 집중 호우에 대한 지형 효과의 수치 모의 연구. **Atmosphere**, 대한대기학회, 제16권 제4호, pp. 319-332.
- Betts, A. and Miller, M. (1986) A new convective adjustment scheme. Part II: Single column tests using GATE wave, BOMEX, ATEX and arctic air mass data sets. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, Vol. 112, pp. 693-709.
- Hong, S.Y., Dudhia, J. and Chen, S.H. (2004) A revised approach to ice microphysical processes for the bulk parameterization of clouds and precipitation. **Monthly weather review**, Vol. 132, pp. 103-120.
- Janjic, Z.I. (1994) The step-mountain eta coordinate model: Further developments of the convection, viscous sublayer, and turbulence closure schemes. **Monthly Weather Review**, Vol. 122, pp.927-945.
- Jasper, K., Gurtz, J., and Lang, H. (2002) Advanced flood forecasting in Alpine watersheds by coupling meteorological observations and forecasts with a distributed hydrological model. **Journal of hydrology**, Vol. 267, pp. 40-52.
- Kain, J. (2004) The Kain-Fritsch convective parameterization: an update. **J. Appl. Meteorol**, Vol. 43, pp. 170-181.
- Kain, J.S. and Fritsch, J.M. (1990) A one-dimensional entraining/detraining plume model and its application in convective parameterization. **Journal of Atmospheric Sciences**, Vol. 47, pp. 2784-2802.
- Kessler, E. (1969) On the distributed and continuity of water substance in atmospheric circulation. **Meteor. Monogr.**, Vol. 32, pp. 84.
- Lin, Y., Farley, R.D., and Orville, H.D. (1983) Bulk parameterization of the snow field in a cloud model. **Journal of Climate and Applied Meteorology**, Vol. 22, pp. 1065-1092.
- Pattanayak, S. and Mohanty, U. (2008) A comparative study on performance of MM5 and WRF models in simulation of tropical cyclones over Indian seas. **Current Science**, Vol. 95, pp. 923-936.
- Skamarock, W.C., Klemp, J.B., Dudhia, J., Gill, D.O., Barker, D.M., Wang, W., Powers, J.G., MESOSCALE, N.C.F.A.R.B.C., DIV., and M.M. (2005) A description of the Advanced Research WRF Version 2. **NCAR TECHNICAL NOTE**.
- Web site : www.ncdc.noaa.gov

(접수일: 2012.4.25/심사일: 2012.6.28/심사완료일: 2012.8.29)