WRF Model의 초기 및 경계조건 개선이 태풍 강우량 모의에 미치는 영향

Effect of Improvement of Initial and Boundary Conditions in WRF Model on Simulating Typhoon Rainfall

최정현* · 이정훈** · 정현교*** · 장주형**** · 김상단*****

Choi, Jeonghyeon*, Lee, Jeonghoo**, Jeong, Hyeon-gyo***, Jang, Juhyoung****, and Kim, Sangdan*****

Abstract

In this study, it is analyzed that the influence of the improvement of the initial and boundary conditions in Weather Research and Forecast (WRF) model on reproducing typhoon rainfall. After WRF model for typhoon MAEMI is constructed and its initial and boundary conditions are improved by various methods, the results of the typhoon rainfall simulation by each improvement method are compared. The application of the typhoon initialization technique had the greatest effect on the reproduction of the typhoon path. In the sense of the accumulated rainfall depth, the application of the typhoon initialization technique had a lot of influence on the spacial distribution. In addition, the adjustment of the relative humidity among various boundary conditions had the greatest effect on the cumulative rainfall depth, and building a WRF model including the regional data in addition to the global data significantly contributed to the reproduction of the local rainfall field. When all the improvement methods were applied, it could be said that the spatially averaged hourly rainfall pattern of the typhoon MAEMI was better reproduced.

Key words : Initial and Boundary Condition, Typhoon MAEMI, Typhoon Rainfall, WRF Model

요 지

본 연구에서는 Weather Research and Forecast(WRF) 모델의 초기조건 및 경계조건의 개선이 태풍에 의한 강우량 모의에 미치는 영향을 분석하였다. 이를 위하여 태풍 매미를 대상으로 WRF 모델을 구축하고, 다양한 방법으로 초기조건 및 경계조건을 개선한 후 각각의 개선방법별로 모의된 결과를 비교하였다. 태풍 경로의 재현에 가장 큰 영향을 주는 개선방법은 태풍초기화기법의 적용으로 나타났다. 누적강우량의 재현의 경우 태풍초기화기법을 적용하였을 때 강우의 공간적인 분포 형태에 영향을 미쳤다. 또한, 다양한 경계조건 중에서 상대습도의 조정이 누적강우량에 가장 큰 영향을 미치고 있었으며, 전 지구자료에 덧붙여 지역 관측 자료를 포함하여 WRF 모델을 구축하는 것이 지역적인 강우량 분포패턴의 재현에 유의하게 도움을 주는 것으로 나타났다. 또한 모든 개선방법을 적용할 경우, 태풍 매미의 공간평균 시간강우량이 더 잘 재현되는 것을 살펴볼 수 있었다.

핵심용어 : 초기 및 경계조건, 태풍 매미, 태풍 강우량, WRF 모델

*정회원, 부경대학교 지구환경시스템과학부 환경공학전공 석사과정(E-mail: jeonghyeon202@naver.com)

Member, Graduate Student, Division of Earth Environmental System Science(Major of Environmental Engineering), Pukyong National University

**정회원, 부경대학교 환경연구소 전임연구원(E-mail: bravo281@hanmail.net)

Member, Researcher, Institute of Environmental Research, Pukyong National University

***정회원, 한강홍수통제소 수자원정보센터 연구사(E-mail: flood@korea.kr)

Member, Researcher, Water Resources Information Center, Han River Flood Control Office, Ministry of Land, Infrastructure and Transport

****정회원, 국립환경과학원 물환경평가연구과 전문위원(E-mail: jangjhy@korea.kr)

Member, Researcher, Water Quality Assessment Research Department, National Institute of Environmental Research

*****교신저자, 정회원, 부경대학교 환경공학과 교수(Tel: +82-51-629-6529, Fax: +82-51-629-6523, E-mail: skim@pknu.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Professor, Department of Environmental Engineering, Pukyong National University

1. 서 론

지난 수 십 년간 지구의 평균기온이 점차적으로 증가해왔으며, 지구온난화 또한 어느 때보다 심화되었다(IPCC, 2014). 이에 따라 전 세계적으로 이상기후현상 및 자연재해의 발생이 증가하고 있으며, 이로 인한 피해 또한 증가하고 있다. EM-DAT(Emergency Events Database)에 따르면 1975년부터 2008년까지 전 세계적으로 재해 발생 건수는 약 4.5배, 연간 피해액은 약 10배 증가한 것으로 나타나고 있다. 또한, 지구온난화가 지속될 경우 서태평양에서 발생하는 태풍의 강도가 점차 증가할 것이라는 연구 결과가 최근 보고되고 있다(NIMR, 2009; WMO, 2012; Laliberte et al., 2015; Tsuboki, 2015). 실제로 서태평양에서 발생하여 2013년 11월 필리핀에 상륙한 태풍 하이옌(HAIYAN)은 순간 최대 풍속 105 m/sec을 기록하며 필리핀에 많은 인명·재산 피해를 발생시켰다. 또한 2016년에는 태풍 네파탁(NEPARTAK) 및 메란티(MERANTI)와 같이 슈퍼태풍에 근접한 태풍이 서태평양지역에서 다수 발생하여 인접국가에 큰 피해를 입혔다. 참고로, 미국합동태풍정보센터(Joint Typhoon Warning Center, JTWC)는 순간 최대 풍속이 65 m/sec 이상인 열대성 저기압을 슈퍼태풍으로 정의하고 있다.

우리나라의 경우 자연재해로 인한 전체 피해 중 태풍으로 인한 피해의 비중이 가장 큰 것으로 나타나고 있다(Lee and Chang, 2009; Ryu and Cho, 2010). 최근 태풍의 한반도 출현빈도는 평년과 비교하여 뚜렷한 변화를 보이지는 않았지만, 한반도 주변 수역 해수 온도가 증가하면서 특히 가을철 태풍의 강도가 더욱 강해졌고 그에 따른 피해도 증가한 것으로 보고되고 있다(NIMR, 2009). 다행히 아직까지 우리나라에는 앞서 언급한 해외 사례와 같은 슈퍼태풍이 상륙하지는 않았으나, 우리나라 또한 슈퍼태풍으로부터 안전지대라고는 할 수는 없다. 과거 2000년대 이후 우리나라에 상륙했던 태풍 중에서 가장 슈퍼태풍에 근접했던 태풍은 2003년 9월 한반도에 상륙한 태풍 매미(MAEMI)로 알려져 있다. 당시 평년보다 높은 해수면 온도의 영향을 받아, 태풍 매미는 우리나라 역대 1위인 최대순간풍속 60 m/sec를 기록하며 슈퍼태풍에 근접한 위력을 지닌 채 상륙하여 막대한 피해를 발생시켰다. 이와 같이 지구온난화에 의한 한반도 주변해역의 열용량의 증가와 해수면 상승은 태풍의 에너지 공급원을 증가시킬 가능성이 있기 때문에, 제 2의 태풍 매미 또는 태풍 하이옌과 같은 슈퍼태풍이 한반도에 상륙할 잠재적 위험성을 무시할 수 없다(Kim et al., 2014).

따라서 향후 이전보다 강력한 태풍에 의해 발생하는 재난 피해를 예방 또는 저감하기 위한 대비가 필요할 것이다. 국외에서는 최근 이러한 기후변화에 따른 기존보다 강력한 자연재해, 즉 거대재난을 대비하기 위한 연구가 활발히 진행되어오고 있으며 이를 정책 또는 실무에 적용하고자하는 움직임을 보이고 있다. 우리나라에서는 이와 관련한 학술적

인 연구는 일부 진행되고 있지만, 정책적으로 반영하고자하는 실무적인 움직임은 많이 미흡한 실정이다.

해외 동향을 살펴보면 기후변화를 고려하여 슈퍼태풍과 같은 거대호우를 동반한 태풍을 예측하고 대비하기 위해, 물리기반의 수치 기상 모델을 이용하여 거대호우 시나리오를 생성하는 연구가 수행되었다. Ohara et al.(2011)와 Ishida et al.(2015)은 수치 기상 모델인 the Fifth-Generation NCAR/Penn State Mesoscale Model, MM5 (Grell et al., 1994)를 이용하여 과거의 태풍을 재현하고 주변기상조건들을 변경시켜 최대가능강수량(Probable Maximum Precipitation, PMP)을 산정하는 방법을 연구하였다. Dettinger et al.(2012)은 WRF(Weather Research and Forecast) 모델을 이용하여 과거 발생한 극한호우 사상 2개를 연쇄적으로 발생시켜 피해를 극대화시키는 거대호우 시나리오를 생성하였다. 해당 연구에서 생성된 시나리오는 U.S. Geological Survey's (USGS's) Multihazard Demonstration Project의 일환으로 실제 거대재난 대비를 위한 실무적인 자료로 사용한다. 우리나라도 최근 태풍 루사(RUSA)를 대상으로 WRF 모델을 이용하여 태풍의 최대화를 통해 PMP를 산정하는 연구가 수행된 바 있다(Lee et al., 2017a).

이러한 국내외 연구들을 살펴보면 수치기상모델을 이용하여 거대호우 시나리오를 생성하기 위해서는 우선적으로 과거 태풍을 재현할 필요가 있다. 이는 과거에 발생한 극한호우에 기초함으로써 과학적 타당성 및 정책 구현 시 일반 대중들에게 거대재난 시나리오를 보다 이해하기 쉽게 설명하는 것이 가능하기 때문이다(Dettinger et al., 2012). 수치기상모델을 이용할 경우 모의결과는 모델에 사전 입력되는 초기 및 경계조건의 영향을 크게 받는다. WRF 모델의 경우 일반적으로 National Centers for Environmental Prediction (NCEP)에서 제공하는 NCEP Final Operational Global Analysis data (이하 FNL 자료)를 이용하여 초기 및 경계조건을 생성한다. 하지만 Lo et al.(2008)의 연구에서는 순수하게 NCEP FNL 자료를 이용한 결과가 상대적으로 좋지 않은 결과를 나타낼 가능성이 있는 것으로 나타났으며, 특히 태풍 모의 시 FNL 자료만으로 태풍을 재현하기에는 한계가 있어 이를 개선하기 위한 다양한 연구들이 진행이 진행되고 있다(Cha and Wang, 2013; Lee, 2015).

따라서 본 연구에서는 수치기상모델의 하나인 WRF 모델을 이용하여 초기 및 경계조건의 개선이 태풍 모의에 미치는 영향을 분석하고자 한다. 분석 대상 태풍은 우리나라에 발생한 태풍들 중 슈퍼태풍에 가장 근접하였던 것으로 평가되는 태풍 매미이다. 초기 및 경계조건 개선방법에는 FNL 자료를 기초로 추가적인 관측 자료의 적용, 태풍 초기화 기법 도입, 경계조건들 중 상대습도의 조정 등이 적용되며, 이러한 개선방법을 다양하게 조합하여 태풍의 경로 및 태풍에 의해 발생하는 강우량의 시공간적인 패턴을 살펴보고자 한다.

2. 연구방법

2.1 대상 태풍 선정

본 연구에서는 역대 가장 슈퍼태풍과 근접했던 태풍 매미를 대상으로 연구를 진행하였다. 태풍 매미는 2003년 9월에 발생한 태풍으로, 우리나라에 영향을 미친 대부분의 태풍과는 달리 태풍생애주기 상에서 최대강도의 위력을 유지한 채 한반도에 상륙하였다. 북태평양고기압의 영향으로 태풍이 느리게 북상하면서 평년보다 높은 수온의 해수에서 지속적으로 많은 에너지를 공급받아 영남지역을 통과함으로써 기록적인 폭우와 강풍을 동반하였다. 특히, 비교적 짧은 시간 한반도에 영향을 주었음에도 불구하고 영남 지역에 100 mm에서 450 mm의 기록적인 강우가 발생하였다. 이로 인해 수도권을 제외한 전국 대부분의 지역이 특별재해지역으로 선포되었으며, 전체 사망·실종자 131명의 엄청난 인명피해와 약 4조 2천억 원의 막대한 재산피해가 발생하였다(GRMA, 2013).

Fig. 1은 태풍 매미의 관측 경로 및 총 526개 지점의 자동기상관측시스템(Automatic Weather System, AWS) 자료와 종관기상관측시스템(Automated Synoptic Observing System, ASOS) 자료로부터 얻은 2003년 9월 11일 0시부터 14일 0시(UTC 기준)까지의 시간강우자료를 kriging 기법을 통해 공간적으로 분포시킨 결과이다. 태풍 경로를 따라 호남 남해안 지역부터 경상도 및 강원 영동지방에 걸친 강우 분포 형태를 보이고 있다. 참고로, AWS 및 ASOS의 자료는 기상청의 기상자료개방포털(data.kma.go.kr)에서 제공하는 자료를 이용하였다.

Fig. 1. Observed Typhoon Path and Accumulated Rainfall Depth

2.2 WRF 모델의 구성

태풍 모의를 위해 본 연구에서는 WRF V3.6.1 중규모 수치기상모델을 사용하였다. WRF 모델은 크게 두 단계의 과정을 거쳐 구동된다. 우선 WRF Pre-processing System (WPS)에서는 모의 대상 지역 및 도메인을 설정하고, 해당 도메인에 대한 지형, 기상 및 지상의 정보를 결합하여 입력 자료를 생성한다. 그 후, Advanced Research WRF (ARW)에서 WPS에서 생성된 입력 자료를 이용하여 초기조건 및 경계조건을 생성하고 이를 이용하여 태풍을 모의한다(Fig. 2).

Fig. 2. WRF Modeling Flowchart

본 연구에서는 모델의 도메인은 Fig. 3과 같이 30.0 °N, 125.5 °E를 중심으로 남해안에 초점을 맞추어 3개의 영역으로 설정하여, 등지격자기법을 적용하여 모의를 수행하였다. 도메인 1 (D01)은 태풍의 진행을 고려하여 동중국해를 중심으로 설정하였으며, 도메인 2 (D02)와 도메인 3 (D03)은 주요 피해지역인 남해안을 중심으로 설정하여 태풍 모의 결과를 살펴보고자 하였다. 태풍 매미는 UTC 기준 2003년 9월 12일에 한반도에 상륙하여 9월 13일에 동해상으로 진출하였으며, 강우의 경우 9월 11일 12시부터 9월 13일 0시 사이에 대부분의 강우가 발생하였다. 본 연구에서는 모의되는 태풍의 충분한 스핀-업과 모의 시 태풍의 지체현상을 고려하기 위하여 실제로 영향을 미친 시간보다 확장하여 UTC 기준 2003년 9월 11일 0시부터 14일 0시까지로 설정하였다.

Fig. 3. Configuration of WRF Model Domain

태풍 모의 시 물리옵션조합의 선택은 태풍의 경로와 강우의 생성에 큰 영향을 미친다. 특히, 미세물리(microphysics), 적운모수화(cumulus parameterization), 그리고 행성경계층(planetary boundary layer) 옵션은 강수에 많은 영향을 미치는 것으로 알려져 있다(Hong and Lee, 2009; Jankov et al., 2007; Lee and Sung, 2013; Lee et al., 2015; Lee et al., 2017a; Lee et al., 2017b). 따라서 본 연구에서는 사전에 D01에 대하여 강우에 영향을 미치는 미세물리, 적운모수화, 그리고 대기경계층 옵션에서 선택 가능한 다양한 scheme에 대해 조합별로 수십 차례의 수치실험을 수행하여 태풍 매미의 강우량을 가장 잘 재현하는 것으로 판단되는 최적 물리옵션별 scheme을 선택하였다. 선택된 물리옵션별 scheme 및 WRF 모델 구성에 대한 정보를 Table 1에 나타내었다.

2.3 초기 및 경계조건 개선

일반적으로 WRF 모델 구동을 위해 입력되는 초기 및 경계조건을 생성하기 위해서 NCEP에서 제공하는 6시간의 시간 해상도 및 1°도 간격의 공간 해상도의 전 지구 분석 자료인 FNL 자료를 이용한다. 해당 자료에는 기온, 기상수분 정보, 토지이용, 피복상태, 풍속 및 풍향 등의 정보가 제공되며, WRF 모델의 pre-processor인 WPS를 통해 도메인 내의 지형정보와 결합하여 초기 및 경계조건을 생성한다. 하지만, 전술한 바와 같이 순수하게 NCEP FNL 자료만을 이용하여 생성된 초기 및 경계조건을 이용하여 태풍에 의해 발생한 강우량을 재현하기에는 한계가 있을 것으로 판단되었기에 본 연구에서는 아래와 같은 방법을 이용하여 초기 및 경계조건을 개선하였다.

2.3.1 관측 자료 추가

보다 개선된 초기 및 경계조건을 생성하기 위하여 NCEP FNL 자료에 해상 및 지상 관측 자료를 추가적으로 입력하여 초기 및 경계조건을 새롭게 생성하였다. 해상의 경우 WPS 과정에서 NCEP FNL 자료와 함께 NCEP에서 제공되는 Real-time, global, sea surface temperature (RTG_SST_HR) analysis 자료를 사용함으로써 해수면온도가 포함된 입력 자료를 생성하였다. 지상의 경우 별도로 객관분석기법(Objective

Analysis technique)을 이용하여 관측 정보를 추가함으로써 초기 및 경계조건을 개선하고자 하였다. D01과 D02의 초기 및 경계조건에는 3시간 간격의 자료로 제공되는 NCEP ADP Global Surface Observational Weather Data 자료를 추가하여 기압, 기온, 이슬점온도, 풍향 및 풍속 정보를 개선하였다. D03에 대해서는 기상청에서 제공하는 526개 지점의 ASOS 및 AWS 관측 자료를 추가하여 기온, 강우량, 해면기압, 상대습도, 풍향 및 풍속에 대해 공간적 해상도를 개선하였다.

2.3.2 태풍초기화기법 적용

NCEP FNL 자료의 경우 해상 관측소에서 관측된 자료를 이용하여 생성되지만, 해상의 관측지점의 수는 지상에 비해 상대적으로나 절대적으로 부족하다. 따라서 주로 해상에서 발달하여 북상하는 태풍의 정확한 구조와 정보를 상세히 표현하기에는 한계가 있다(Cha and Wang, 2013). 이에 WRF 모델에서 기본적으로 제공하고 있는 태풍초기화기법인 Tropical Cyclone(TC) Bogussing 기법을 이용하여 초기조건인 태풍을 개선하였다. TC bogussing 기법은 초기조건인 불완전한 태풍정보를 보완하기 위하여 사용자가 실제 태풍의 위치, 최대풍속, 태풍반경 등의 정보를 직접 입력하여 실제 태풍과 유사한 태풍을 새롭게 생성하는 기법이다. 태풍 초기화 기법에 사용된 태풍 매미의 정보는 일본기상청(Japan Meteorological Agency, JMA) 및 JTWC에서 제공되는 기상 자료를 참고하였다.

2.3.3 상대습도 경계조건인 조정

해상관측소의 부족은 태풍경로 및 강우생성에 직접적인 영향을 미치는 주변 해상의 기상상태를 정확하게 표현하는데도 영향을 미칠 것으로 판단된다. 이에 본 연구에서는 D03의 경계조건 중 태풍이 에너지를 제공받는 하단 경계의 상대습도(RH)를 조정하였다. 상대습도 변경을 위해 D01과 D02를 우선적으로 모의한 후 D02의 모의 결과 중 상대습도를 일부 변경한 후 이를 D03의 경계조건으로 사용하였다. 최종적으로 Table 2와 같이 2003년 9월 11일 6시부터 18시까지의 경계 조건은 기존보다 상대습도를 10% 증가시켰으며, 그 후 12일 6시까지의 경계 조건은 상대습도를 15% 증가시켰다.

Table 1. Summary of WRF Model Configuration

Model	WRF V3.6.1		
Domain	D01	D02	D03
Horizontal grid size	27 km	9 km	3 km
Dimension	98×127×31	208×211×31	256×292×31
Microphysics	Ferrier (new Eta) microphysics, operational High-Resolution Window		
Cumulus parameterization	Betts-Miller-Janjic scheme		
Planetary boundary layer	Yonsei University scheme		
Land surface model	Noah land surface model		
Integration period	0000 UTC 11 ~ 0000 UTC 14 September 2003		

Table 2. Relative Humidity Bottom Boundary Condition Modification Sequence

Time	0000 UTC 09/11/2003	0600 UTC 09/11/2003	1200 UTC 09/11/2003	1800 UTC 09/11/2003	0000 UTC 09/12/2003	0600 UTC 09/12/2003	1200 UTC 09/12/2003
RH	-	+10%	+10%	+10%	+15%	+15%	-
Time	1800 UTC 09/12/2003	0000 UTC 09/13/2003	0600 UTC 09/13/2003	1200 UTC 09/13/2003	1800 UTC 09/13/2003	0000 UTC 09/14/2003	-
RH	-		-	-	-	-	-

2.4 태풍모의

본 연구에서 적용된 개별적인 초기 및 경계조건의 개선방법이 WRF 모델의 태풍 강우량 모의에 어떠한 영향을 주는지 알아보기 위하여, 각각의 개선방법별 조합을 구성하여 모의된 태풍의 경로, 누적강우량의 공간분포, 권역별 누적강우량 및 시간강우량을 비교하였다. 이를 위하여 Table 3과 같이 총 8개의 조합을 구성하여 태풍모의를 수행하였다.

Table 3. Case of Improvement Method of Initial · Boundary Conditions

CASE	Description
FNL exp.	Only use NCEP FNL data
SO exp.	Add surface observed data
TC exp.	Apply TC bogussing scheme
RH exp.	Modify relative humidity of the bottom of boundary conditions
SOTC exp.	SO exp. + TC exp.
SORH exp.	SO exp. + RH exp.
TCRH exp.	TC exp. + RH exp.
SOTCRH exp.	SO exp. + TC exp. + RH exp.

3. 연구결과 및 분석

3.1 태풍경로에 미치는 영향

한반도가 태풍 매미의 직접적인 영향권에 들어간 기간인 2003년 9월 12일 0시부터 14일 0시까지 3시간 간격으로 각각의 개선방법별로 모의된 태풍중심의 위치를 관측된 태풍경로와 비교하였다(Fig. 4).

Fig. 4(a)에 나타낸바와 같이, 일반적인 NCEP FNL 자료를 사용한 경우(FNL exp) 실제 태풍경로(Observed path)보다 북서쪽으로 치우친 경로를 나타냈으며, 시간별 태풍의 위치 및 진행간격 또한 실제 태풍의 위치와 상이하게 나타났다. SO exp, RH exp, SORH exp의 경우에도 태풍경로에 큰 변화 없이 실제 태풍경로보다 북서쪽으로 치우친 FNL exp과 유사한 경로를 나타냈으며, 시간별 태풍의 위치 및 진행간격 또한 약간의 차이를 보일 뿐 실제 관측 태풍을 재현하지 못하였다. 이는 관측 자료의 추가와 경계조건의 상대습도 조정은 태풍의 경로에 큰 영향을 미치지 않는다는 것을 의미한다.

반면에 TC exp, SOTC exp, TCRH exp, SOTCRH exp의 경우(Fig. 4(b)), 다소 남동쪽으로 치우친 결과를 나타내고 있지만, 태풍초기화기법이 적용되지 않은 경우와 비교하여

Fig. 4. Comparison of Observed and Simulated Typhoon Paths

상대적으로 실제 태풍의 경로와 매우 유사하게 모의되었으며, 시간별 태풍의 위치 및 진행간격 또한 매우 개선된 것을 확인할 수 있다.

3.2 누적강우량 모의에 미치는 영향

각각의 초기 및 경계조건 개선방법조합들이 강우량에 미치는 영향을 분석하기 위하여, 누적강우량의 공간분포도와 각 권역별 공간평균 누적강우량을 함께 비교하였다. Table 4에 개선방법별로 모의된 권역별 공간평균 누적강우량을 나타냈으며, 개선방법별 누적강우량의 공간분포는 Fig. 5에 도시하였다. 권역의 경우 영남, 경기·충청, 호남, 강원권으로 구분하였다.

NCEP FNL 자료만을 이용하여 모의한 FNL exp의 경우, 관측된 누적강수량(OBS)과 비교하였을 때 경기·충청권을 제외하고 모두 관측 값과 큰 차이를 나타낸다. 특히, 주요피해 지역인 영남권에서의 공간평균 누적강우량은 196.6 mm으로 관측되었지만, 모의 결과는 87.1 mm로 관측강우의 50%에도 미치지 못하는 강우가 모의되었다. 이에 반해, 강원권의 경우는 약 20% 정도 과대모의 하는 것으로 나타났다. 또한, Fig. 5(b)에 나타난 바와 같이 강원권을 중심으로 한 분포형태를 나타내고 있어, 관측 공간분포(Fig. 5(a))와 차이를 보이고 있음을 확인할 수 있다. 따라서 FNL 자료만을 이용하였을 경우에는 실제 태풍에 의해 발생한 강우량을 올바르게 구현하는데 역부족인 것으로 판단된다.

관측 자료를 추가한 경우, 추가 전과 비교하여 누적강우량에 미미한 변화가 나타나는 것을 확인할 수 있다. Table 4의 FNL exp과 SO exp의 결과를 비교하였을 때, 과대모의되던 FNL exp의 강원권 누적강우량 문제가 관측 자료의 추가로 대부분 해소되었으며, 이와 반대로 과소모의 되는 호남권의 누적강우량도 제대로 구현되고 있음을 확인할 수 있다. 하지만, 경기·충청 및 영남권의 경우 누적강우량 변화는 매우 적은 것으로 나타났다. TC exp과 SOTC exp 또는 RH exp과 SORH exp을 비교하였을 때, 권역별 누적강

우량의 변화는 관측 자료 추가 유무에 따라 일반적인 경향성을 나타내지는 않는다(Table 4). 하지만 누적강우량의 공간적인 분포형태에는 관측 자료의 추가에 따른 개선효과가 분명히 있음을 확인할 수 있다. Figs. 5(d)와 (f), Figs. 5(e)와 (g)의 비교로부터 관측 자료 추가 전 과대모의 또는 과소모의되던 지역이 관측 자료의 추가에 의해서 부분적으로 개선되었음을 살펴볼 수 있다.

태풍초기화기법을 적용한 경우, 적용 전과 비교하여 영남권을 제외한 모든 지역에 대해 대부분 과소 모의된 결과가 나타났다(Table 4). NCEP FNL 자료에 태풍초기화기법만을 적용한 TC exp의 경우, FNL exp과 비교하여 영남을 제외하고 모든 지역의 누적강수량이 오히려 절반 이하로 감소하여 관측 값과 더욱 큰 차이를 나타냈다. 하지만 Fig. 5(d)를 살펴보면 누적강우량의 분포형태의 측면에서는 오히려 관측된 분포형태(Fig. 5(a))를 더 잘 구현하고 있음을 확인할 수 있다. 태풍초기화기법이 적용된 SOTC exp, TCRH exp, SOTCRH exp 또한 마찬가지로 개선효과를 보이고 있다(Figs. 5(f), (h), (i)). 이는 태풍초기화기법을 적용함으로써 태풍경로를 더 잘 구현하고 있음에 따른 결과인 것으로 판단된다.

상대습도 경계조건을 조정하였을 경우 전체적인 강우발생이 증가하는 것을 확인할 수 있다. RH exp의 경우 FNL exp과 비교하여 모든 지역의 누적강우량이 증가하였으며, 이에 따라 과소 모의되던 영남 및 호남지역의 누적강우량은 관측 자료와 유사하게 모의되었다(Table 4). 하지만 경기·충청 및 강원지역의 누적강우량은 매우 과대 모의되고 있으며, Fig. 5(e)에 나타난 바와 같이 강우분포형태의 변화보다는 우리나라 전체적으로 강우량을 증가시키고 있음을 살펴볼 수 있으며, 이는 SO exp과 SORH exp(Figs. 5(c)와 (g)) 또는 TC exp과 TCRH exp(Figs. 5(d)와 (h))을 비교하였을 때에도 마찬가지로 현상이 나타남을 살펴볼 수 있다. 따라서 상대습도 경계조건을 조정은 전체적인 누적강우량 총량 자체를 구현하는데 유용하게 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

Table 4. Comparison of Observed and Simulated Space-averaged Accumulated Rainfall Depth

Region	Space-averaged accumulated precipitation (mm)			
	Youngnam	Gyeonggi · Chungcheong	Honam	Gangwon
OBS	196.6	48.3	123.4	125.4
FNL exp.	98.0	44.2	100.2	167.9
SO exp.	104.8	58.4	130.9	131.6
TC exp.	93.6	18.7	36.5	80.2
RH exp.	240.4	134.1	213.4	262.7
SOTC exp.	98.9	28.0	31.3	82.6
SORH exp.	242.7	141.9	177.0	263.0
TCRH exp.	173.3	78.9	67.6	191.4
SOTCRH exp.	190.3	40.1	74.8	182.4

Fig. 5. Comparison of Observed and Simulated Total Accumulated Rainfall Depth

종합하여보면 누적강수량을 재현하기 위해서는 앞선 세 가지 방법 모두 중요한 것으로 판단된다. 태풍초기화기법의 적용 시 강우분포의 형태는 관측 강우분포형태와 유사하게 나타나지만 총 강우 발생량이 감소하는 경향이 있으며, 상대 습도 경계조건의 조정은 총 강우량을 일괄적으로 증가시킨다. 또한 관측 자료의 추가는 총 강우량이나 공간분포 등에는 확연하게 큰 영향을 미치지 못하지만 지역적인 강우분포를 개선하는 효과가 있으므로 각각의 방법을 적절하게 조합할 필요가 있을 것으로 판단된다.

3.3 시간강수량 모의에 미치는 영향

본 절에서는 초기 및 경계조건의 개선을 통한 공간평균 시간강수량 모의결과를 분석하여 WRF 모델의 시간강수량 재현에 미치는 영향을 살펴보고자 하였다. 3.2절의 결과에 따라, 누적강수량이 올바르게 재현되지 않는 개선방법별 조합의 결과를 분석하는 것은 무의미한 것으로 판단하였다.

이에 누적강수량의 공간분포 및 영남권의 누적강수량을 가장 유사하게 모의하고 있는 SOTCRH exp의 결과를 관측 값 및 FNL exp 결과와 비교하였다(Fig. 6).

영남권의 공간평균 시간강수량을 비교하였을 때, SOTCRH exp은 FNL exp과 비교하여 시간적인 거동을 관측 값과 매우 유사하게 재현하고 있는 것으로 나타났다(Fig. 6(a)). 특히, FNL exp에서는 거의 모의되지 않는 11일 10시부터 12일 6시 사이의 강우를 유사하게 모의하고 있다. 또한 관측 자료에서 확인 할 수 있는 두 개의 피크(9.9 mm/hr, 18.8 mm/hr)가 각각 9.0 mm/hr, 14.8 mm/hr로 모의되어 FNL exp과 비교하여 재현성능이 상당히 개선되었음을 살펴볼 수 있다. 반면 강우량이 상대적으로 적게 발생한 경기·충청권의 경우에는 오히려 SOTCRH exp이 FNL exp 결과보다 좋지 않은 결과를 나타내고 있으며(Fig. 6(b)), 호남권의 경우에도 초기 및 경계조건의 개선에 의해 공간평균 시간강수량의 거동이 일부 변화되기는 하였으나 FNL exp의 결과와 비교할 때

재현능이 개선되었다고 보기 어려운 결과가 도출되었다 (Fig. 6(c)). 또한, 강원권의 경우에는 FNL exp와 SOTCRH exp의 결과가 유의한 차이를 나타내지 않는 것을 확인할 수 있었다.

관측된 시간강우량과 모의된 시간강우량의 상관성을 수치적으로 확인하기 위하여 권역별로 영남, 경기·충청, 호남, 강원권의 결정계수(R^2)를 산정한 결과, FNL exp의 경우 0.62, 0.66, 0.31, 0.68로 각각 나타났으며, SOTCRH exp의 경우 0.90, 0.16, 0.51, 0.73으로 나타났다. 경기·충청권을 제외한 권역에서 초기 및 경계조건 개선을 통해 시간강우량의 모의결과가 개선되었음을 살펴볼 수 있다. 그러나 경기·충청권은 실제 강우 발생이 적었기 때문에 거대호우 관점에서 볼 때 재현성 판단에 크게 영향을 미치지 않을 것으로 판단된다. 또한, SOTCRH exp의 결과에서 태풍 매미의 주요 피해지역인 영남권의 공간평균 강우량의 시간적인 거동과 최대 강우강도의 재현능이 개선되어 관측 값과 매우 유사하게 모의되었기에 본 연구에서 제시한 초기 및 경계조건 개선방법은 태풍 강우량 재현에 긍정적인 영향을 미치는 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 WRF 모델의 초기 및 경계조건 개선이 태풍 강우량 모의결과에 미치는 영향을 분석하고자, 태풍 매미를 대상으로 관측 자료의 추가, 태풍초기화기법의 적용,

상대습도 경계조건의 조정을 조합하여 초기 및 경계조건을 개선하고 이에 따른 태풍경로 및 강우량 모의결과를 비교하였다.

각 조합별로 모의를 수행한 결과 관측 자료를 추가한 경우 태풍경로에는 큰 영향을 미치지 못하였지만, 누적강우량의 공간적인 분포 및 권역별 누적강우량을 지역적으로 개선하는 것을 확인할 수 있었다. 반면, 태풍초기화기법의 적용은 태풍경로의 재현에 가장 큰 영향을 주는 것으로 나타났으며, 강우분포형태를 관측된 강우의 분포와 유사하게 모의하는 것에 도움이 되는 것으로 나타났다. 하지만, 전체적인 총 강우량이 과소 모의되는 단점이 있는 것으로 나타났다. 하단 경계조건의 상대습도를 조정하는 경우에는 태풍경로에 미치는 영향은 미미하였지만, 태풍에 에너지를 공급하는 상대습도를 직접적으로 변경함에 따라 전체적인 강우 발생량을 증가시켰다. 또한, 본 연구에서 제시된 모든 개선방법을 적용한 수치실험의 모의 결과, 일반적으로 적용되는 수치실험의 모의결과와 비교하여 태풍 매미의 주요 피해지역인 영남권 공간평균 시간강우량의 재현능이 개선되는 것을 확인할 수 있었다. 특히 영남권의 경우 시간적으로 두 개의 피크를 갖는 강우사상을 비교적 우수하게 재현할 수 있음에 따라, 우리나라와 같이 여러 개의 호우사상이 중첩되어 강우지속시간이 상대적으로 긴 대형 강우사상 시퀀스에 의한 피해가 잦은 지역의 거대호우 시나리오 생산에 도움을 줄 수 있을 것으로 판단된다.

관측 자료의 추가, 태풍초기화기법 적용, 상대습도 경계조

Fig. 6. Comparison of Observed and Simulated Spatially Averaged Rainfall Intensity

건의 조정을 통하여 개선한 초기 및 경계조건은 본 연구에서 최종적으로 목표하는 거대호우 시나리오 생성을 위한 과거 태풍의 재현에 있어서 긍정적인 영향을 미친 것으로 판단되었다. 복잡한 지형, 삼면의 바다, 좁은 면적을 지닌 우리나라를 대상으로 저해상도의 입력 자료를 이용하여 태풍에 의한 강우량을 재현하기 위해서는 모델의 초기 및 경계조건을 개선하는 것은 필수적일 것으로 생각된다. 이에 이러한 결과들은 WRF 모델의 태풍 강우량 재현능력을 향상시키는데 도움을 줄 것으로 기대되며, 나아가 거대호우 시나리오 생성을 위한 방법이 정립된다면 재현된 태풍을 이용하여 과학적으로 타당한 거대호우 모의에도 도움이 될 것으로 기대된다.

하지만 본 연구에서 제시된 초기 및 경계조건 개선방법을 적용하더라도 강우의 정확한 시간적인 거동 및 시간 강우량의 재현에는 여전히 한계가 있었으며, 이를 보완하기 위한 추가적인 연구가 필요할 것으로 생각된다. 여기에는 최근에 들어 우리나라 및 주변부를 대상으로 하는 기상관측성능의 개선도 도움이 될 것으로 판단된다. 또한 본 연구의 경우 태풍 매미에 한정된 결과이므로 각각의 개선방법의 영향을 모든 태풍에 대해 일반화하기에는 무리가 있을 것이다. 따라서 추후 다양한 태풍 및 집중호우사상의 사례에 적용하여 이를 비교할 필요가 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 정부(행정안전부)의 재원으로 재난안전기술개발 사업단의 지원을 받아 수행된 연구임[MOIS-재난-2015-03].

References

Cha, D., and Wang, Y. (2013) A Dynamical Initialization Scheme for Real-Time Forecasts of Tropical Cyclones Using the WRF Model. *Monthly Weather Review*, Vol. 141, No. 3, pp. 964-986.

Dettinger, M.D., Martin, R.F., Hughes, M., Das, T., et al. (2012) Design and Quantification of an Extreme Winter Storm Scenario for Emergency Preparedness and Planning Exercises in California. *Natural Hazards*, Vol. 60, No. 3, pp. 1085-1111.

Gangwon Regional Meteorological Administration(GRMA) (2013) *Gangwon-do Typhoon White Paper*. Gangwon Regional Meteorological Administration.

Grell, G.A., Dudhia, J., and Stauffer, D. (1994) *A Description of the Fifth-Generation Penn State/NCAR Mesoscale Model (MM5)*. Mesoscale and Microscale Meteorology Division, National Center for Atmospheric Research: Boulder, CO, USA, p. 121.

Emergency Events Database(EM-DAT). Retrieved from

<http://www.emdat.be>

Hong, S.Y., and Lee, J.W. (2009) Assessment of the WRF Model in Reproducing a Flash-flood Heavy Rainfall Event Over Korea. *Journal of Atmospheric Research*, Vol. 93, No. 4, pp. 818-831.

Intergovernmental Panel on Climate Change(IPCC) (2014) *Climate Change 2014: Synthesis Report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC, Geneva, Switzerland.

Ishida, K., Kavvas, M.L., Jang, S., and Chen, Z.Q. (2015) Physically Based Estimation of Maximum Precipitation over Three Watersheds in Northern California: Atmospheric Boundary Condition Shifting. *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 20, No. 4, pp. 1-15.

Jankov, I., Schultz, P.J., Anderson, C.J., and Koch, S.E. (2007) The Impact of Different Physical Parameterizations and Their Interactions on Cold Season QPF in the American River Basin. *Journal of Hydrometeorology*, Vol. 8, No. 5, pp. 1141-1151.

Japan Meteorological Agency(JMA). Retrieved from <http://www.jma.go.jp>

Joint Typhoon Warning Center(JTWC). Retrieved from <http://www.usno.navy.mil/JTWC>

Kim, J., Son, C., and Moon, Y. (2014) Supertyphoon HAIYAN and Future Typhoon Forecast. *Water for Future*, Vol. 47, No. 2, pp. 49-54 (in korean).

Laliberte, F., Zika, J., Mudryk, L., Kushner, P.J., et al. (2015) Constrained Work Output of the Moist Atmospheric Heat Engine in a Warming Climate. *Science*, Vol. 347, No. 6221, pp. 540-543.

Lee, J. (2015) The Effects of Typhoon Initialization and Dropwindsonde Data Assimilation on Direct and Indirect Heavy Rainfall Simulation in WRF model. *Journal of Korean Earth Science Society*, Vol. 36, No. 5, pp. 460-475.

Lee, J., Choi, J., Lee, O., and Kim, S. (2017a) Estimation of Probable Maximum Precipitation in Korea using a Regional Climate Model. *Water*, Vol. 9, No. 4. Article No. 240, pp. 1-12.

Lee, J., Choi, J., Jeong, H., and Kim, S. (2017b) Preliminary Study for Physically Based Estimation of Maximum Precipitation Using the Regional Climate Model in Korea: Reconstruction of Typhoon RUSA Rainfall. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 17, No. 1, pp. 401-411 (in Korean).

Lee, J., Jang, S., and Kim, S. (2015) Evaluation of the WRF

- Model In Reproducing the Spatio-temporal Pattern of a Heavy Rainfall Event. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 15, No. 5, pp. 255-265 (in Korean).
- Lee, J.G., and Sung, H.M. (2013) A WRF Sensitivity Study in Precipitation Amount over Yeongdong Province to the Choice Of Nesting Methods: Case study. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 13, No. 1, pp. 105-119.
- Lee, S.S., and Chang, E.M. (2009) Application of GIS to Typhoon Risk Assessment. *The Journal of GIS Association of Korea*, Vol. 17, No. 2, pp. 243-249 (in Korean).
- Lo, J.C., Yang, Z., and Pielke, R.A. (2008) Assessment of Three Dynamical Climate Downscaling Methods Using the Weather Research and Forecasting (WRF) Model. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 113, No. D9, pp. 1-16.
- National Institute of Meteorological Research(NIMR) (2009) *Understanding Climate Chage II - Climate Change on the Korean Peninsula: Present and Future*. National Institute of Meteorological Research, pp. 46-69 (in Korean).
- Ohara, N., Kavvas, M.L., Kure, S., Chen, Z.Q., et al. (2011) Physically Based Estimation of Maximum Precipitation over American River Watershed, California. *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 16, No. 4, pp. 351-361.
- Ryu, M.H., and Cho, S.K. (2010) A Study on National Economic Impact by Natural Disaster -A case of typhoon. *Productivity Review*, Vol. 24, No. 3, pp. 273-290 (in Korean).
- Tsuboki, K., Yoshioka, M.K., Shinoda, T., Kato, M., et al. (2015) Future Increase of Supertyphoon Intensity Associated with Climate Change. *Geophysical Research Letters*, Vol. 42, No. 2, pp. 646-652.
- World Meteorological Organization(WMO) (2012) *The Second Assessment Report on the Influence of Climate Change on Tropical Cyclones in the Typhoon Committee Region*. ESCAP/WMO Typhoon Committee.

Received	September 4, 2017
Revised	September 5, 2017
Accepted	September 25, 2017