

상세화 기법을 통한 한반도 공간 강우장 분석 Analysis of Spatial Precipitation Field Using Downscaling on the Korean Peninsula

조 헤 린* / 황 석 환** / 조 용 식*** / 최 민 하****
Cho, Herin / Hwang, Seokhwan / Cho, Yongsik / Choi, Minha

Abstract

Precipitation is one of the important factors in the hydrological cycle. It needs to understand accurate of spatial precipitation field because it has large spatio-temporal variability. Precipitation data obtained through the Tropical Rainfall Monitoring Mission (TRMM) 3B43 product is inaccurate because it has 25 km space scale. Downscaling of TRMM 3B43 product can increase the accuracy of spatial precipitation field from 25 km to 1 km scale. The relationship between precipitation and the normalized difference vegetation index(NDVI) (1 km space scale) which is obtained from the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometers (MODIS) sensor loaded in Terra satellite is variable at different scales. Therefore regression equations were established and these equations apply to downscaling. Two renormalization strategies, Geographical Difference Analysis (GDA) and Geographical Ratio Analysis (GRA) are implemented for correcting the differences between remote sensing-derived and rain gauge data. As for considering the GDA method results, biases, the root mean-squared error (RMSE), MAE and Index of agreement (IOA) is equal to 4.26 mm, 172.16 mm, 141.95 mm, 0.64 in 2009 and 17.21 mm, 253.43 mm, 310.56 mm, 0.62 in 2011. In this study, we can see the 1km spatial precipitation field map over Korea. It will be possible to get more accurate spatial analysis of the precipitation field through using the additional rain gauges or radar data.

Keywords : TRMM, NDVI, Spatial Precipitation Field, Downscaling

요 지

강우는 수문 순환에서 중요한 요소 중에 하나로 시·공간적 변동성이 크므로 정확한 공간 강우장의 파악이 요구된다. 열대강우 관측 위성(Tropical Rainfall Monitoring Mission, TRMM)에서 제공하는 3B43 월 누적 강우량 자료는 25 km의 공간 해상도를 갖고 있어 공간 강우장의 정확성을 높이기 위해 상세화 기법을 적용하여 1 km의 공간 해상도로 생성하였다. Terra 위성에 탑재된 MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometers) 센서가 제공하는 정규식생지수 (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI) (공간 해상도 1 km)와 강우 자료의 관계성을 회귀식으로 나타냈고 상세화 기법에 적용하였다. 이에 따른 결과를 지점과 위성 강우 자료와의 차이를 통해 보정하는 방법인 GDA (Geographical

* 한양대학교 공과대학 건설환경공학과 석사과정 (e-mail: hrcho@hanyang.ac.kr)

Graduate Student Department of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University

** 한국건설기술연구원 수자원연구실 (e-mail: sukany@kict.re.kr)

Water Resources Research Division, Korea Institute of Construction Technology

*** 한양대학교 공과대학 건설환경공학과 교수 (e-mail: ysc59@hanyang.ac.kr)

Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University

**** 교신저자, 한양대학교 공과대학 건설환경공학과 조교수 (e-mail: mchoi@hanyang.ac.kr, Tel: 02-2220-4324)

Corresponding Author: Assistant Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University, 17 Haengdang-dong, Seongdong-gu, Seoul 133-791, Korea

Difference Analysis)와 지점과 위성 강우 자료와의 비율로 편차를 보정하는 GRA (Geographical Ratio Analysis) 상세화 기법을 사용하여 공간 강우장을 나타내었다. 우리나라의 공간 강우장 결과를 지점 자료를 기준으로 비교 검증 실시하였다. 그 결과 GDA 상세화 기법의 경우가 2009년(Bias=4.26 mm, RMSE=172.16 mm, MAE=141.95 mm, IOA=0.64), 2011년(Bias=17.21 mm, RMSE=253.43 mm, MAE=310.56 mm, IOA=0.62)으로 가장 잘 맞는 것으로 나타났다. 이를 바탕으로 우리나라의 공간 강우장을 1 km의 공간 해상도로 파악할 수 있었으며, 더 나아가 지점의 수를 늘려 보정을 정밀하게 하거나, 강우 레이더 자료를 가지고 상세화 기법을 적용한다면 더욱 정확한 공간 강우장을 파악할 수 있을 것이다.

핵심용어 : TRMM, NDVI, 공간 강우장, 상세화 기법

1. 서 론

강우는 물의 순환 과정에서 중요한 역할을 하는 구성 요소 중 하나이며 시·공간적으로 변동이 큰 특징을 갖기 때문에 복잡한 자연 현상 중의 하나로 대표된다. 최근 기후변화와 지구온난화의 영향으로 돌발성 집중호우 및 홍수, 태풍 등의 형태로 발생하여 사회·경제적으로 피해가 증가하고 있다. 강우에 의한 피해를 줄이기 위해 강우의 정밀 관측 및 정확한 공간 분포 특성 파악이 요구되고 있다. 전 세계적으로 강우 관측은 현재까지도 주로 지상 관측에 의해서 이루어졌지만 관측 장비의 오작동이나 고장으로 인한 자료의 소실 및 오류 자료의 존재, 산간이나 도서 지역에서의 장비 관리의 어려움 등으로 인해 시·공간적으로 균일하지 않은 자료가 주를 이루고 있다. 이에 관측 자료를 시·공간적으로 균일하게 격자화하는 여러 가지 방법들이 제안되었다. 네 개의 점이 평면을 이루고 있을 때 그 안에 임의의 위치에서의 값을 계산해내는 방법인 이중선형(Bilinear) 보간법, 거리에 따른 가중치를 부여하여 값을 알고 있는 지점에서 일정거리에 존재하는 지점들에 대해 평균화하는 역거리가중법(Invert Distance Weighted, IDW)이 있다. 그리고 복잡한 통계적 방법을 사용하여 특정 지점의 자료를 조합해 주변 자료를 추정하는 크리깅(Kriging) 방법 등이 대표적으로 사용된다. 지상 관측 자료(점 관측)만으로 산정한 격자화 자료는 이론적 공간 내에서 고밀도의 강우 관측소가 설치되어 있을 때 정확성이 높지만 관측소가 공간적으로 비균질하게 분포되어 있거나, 사회·경제적 여건의 문제들과 물리적인 요소가 포함되지 않아 생기는 오차들로 인해 정확하게 나타내기에는 한계점이 존재한다. 이 문제들의 해결 방안으로 짧은 시간 간격의 고해상도 강우 자료를 얻기 위해 기상 레이더와 인공위성을 활용한 연구의 진행이 요구되었다.

기존의 강우 관측망이 제공하지 못했던 면적강우자료와 강우의 이동 등을 나타낼 수 있는 기상 레이더의 경우

에는 강우를 직접 측정하는 것이 아닌 대기 중 물방울에 대한 반사도를 측정하기 때문에 정확한 강우량 보다는 상대적인 강우량을 나타낸다. 두 자료 역시 관측하는 방식이 다르기 때문에 서로의 장점만을 취합한 면적강우자료 산출을 통해 서로의 단점을 보완·향상시킬 수 있다. Sinclair and Pegram (2005)에서는 지상 우량계와 레이더에서 얻은 강우 자료를 합성하여 공간 분포를 나타냈을 때가 지상 우량계만을 가지고 나타낸 것보다 훨씬 향상된 결과 값을 나타냈다. Kim et al. (2007)은 기상청(Korea Meteorological Administration, KMA), 무인자동기상관측장비(Automatic Weather System, AWS), 건설교통부(Minister of Land, Infrastructure and Transport, MOCT)에서 관측한 지상 강우 자료와 보정된 레이더 강우의 통계치 및 우량 추상도 등을 비교하여 보정된 자료의 타당성을 검토하였다. Parameter-elevation Regressions on Independent Slopes Model (PRISM)에 기초하여 우리나라에 맞게 Korea (K)-PRISM (Hong, 2007)을 개발하여 사용하거나, AWS를 기반으로 한 격자 강우량에 대해 레이더 자료를 합성하여 정확도를 높이는 등의 연구가 진행되었지만, 국내에서 전반적인 연구 인프라 부족 및 기상 레이더의 중요성을 크게 인식하지 못해 활발히 진행되고 있지는 않다. 한정된 지역 및 국가에서 벗어나 넓은 지역에서의 강우를 관측하기 위해 1960년대부터 인공위성 정보를 이용한 강우 추정연구가 지속되었다. 1960년에 처음으로 기상위성인 Television Infra-Red Observation Satellite (TIROS 1)이 발사되었고, 1966년에는 ESSA-1와 ATS-1가 발사되어 현재까지 많은 기상위성이 발사되었다. 그중 1997년에 발사된 열대강우 관측위성(Tropical Rainfall Measuring Mission, TRMM)은 1997년 11월 28일에 미국의 National Aeronautics and Space Administration (NASA)와 일본의 Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA)에서 공동 프로젝트의 일환으로 발사된 위성이다. TRMM 위성은 약 400 km의 저궤도로 약 96분 주기로 지구를 돌면서

적도 지역의 강우의 관측 및 변화를 측정하며, 5개의 관측 기기 중 강우 관측을 위한 3개의 관측 센서가 있다. 3개의 센서로는 강우 레이더(Precipitation Radar, PR), 마이크로파 영상기(TRMM Microwave Imager, TMI), 가시 적외 스캐너(Visible Infrared Scanner, VIRS)가 있으며 이중 강우 레이더인 PR은 육지와 해양에서의 강우 관측을 주요 목적으로 하는 세계 최초로 인공위성에 탑재된 능동형 강우 레이더이다(Kozu et al., 1998). TRMM 위성은 전 세계적으로 기후변화, 강수 형태, 강수량 관측 등 다양한 연구에 활용되고 있다. 현재 우리나라에서 TRMM 관측 자료를 이용한 연구는 활발하게 이루어지지 않은 상태이다. 하지만 최근 인공위성에 대한 인식이 생기면서 점차 연구가 진행되고 있다. Park et al. (2000)은 TRMM 위성의 PR을 이용해 1998년과 1999년에 한반도에서의 여름철 호우의 특성을 관측했다. Jang (2002)는 TRMM 위성 자료를 이용하여 우리나라의 용담댐 유역의 강우 분포와 지상관측 AWS 자료와의 비교를 통해 강우 특성을 조사하였으며, TRMM 자료가 지상 관측치에 비해 적게 추정됨을 밝혔다. Duan and Bastiaanssen (2013)에서는 TRMM 3B43 강우 자료와 Satellite Pour l'Observation de la Terre (SPOT) Vegetation (VGT)-S 정규식생지수(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)의 공간 해상도 차이를 가지고 회귀분석과 상세화 기법을 적용했을 때 강수량 측정값이 향상된 것을 확인하였다. 다른 관련 연구에서도 인공위성의 강우 자료와 지상 강우계의 자료를 합성 했을 때 강우 측정값의 정확성이 더 향상되었다(Boushaki et al., 2009; Li and Shao, 2010). 하지만 위에 언급된 한계점을 해결하기 위한 방편으로 강우에 대한 시·공간적으로 균일하면서도 고해상도 자료의 필요성이 요구되었다.

상세화 기법(Downscaling)은 그 중에 하나의 방편으로 볼 수 있다. 상세화 기법이란 단독으로 사용되는 자료를 이용하는 것보다 원격탐사 기반의 저해상도 인공위성 자료와 지상 자료 및 기상모델자료와 같은 자료동화(Data assimilation) 자료들의 융합을 통해 향상된 정보를 나타내는 방법이다. 상세화 기법에는 통계적 상세화 기법(Statistical Downscaling)과 역학적 상세화 기법(Dynamical Downscaling)이 있다. 통계적 상세화 기법은 일기도 분류법(Weather typing), 일기상발생기(Weather generator), 회귀분석을 이용하는 방법으로 분류할 수 있으며, Global Climate Model (GCM) 해상도의 기후와 지역 기후 사이의 실제 통계학적 관계를 활용한 방법이다. 역학적 상세화 기법은 GCM 내에서 고해상도로 생산되는 기후 자료를 바탕으로 지역 기후 모델에 적용할 때 사용된다. Kim et

al. (2012)은 Modified Korean (MK)-PRISM을 개발하여 12 km 해상도의 인공위성 자료를 지상 관측 자료들을 이용해 1 km 해상도의 격자자료로 추정하였지만 아직까지는 단점을 보완하고 개선하는 연구개발이 진행 중이며 추후 우리나라의 기후변화 시나리오를 자료를 추정할 수 있음을 시사하였다. Choi and Hur (2012)에서는 Advanced Microwave Scanning Radiometer E (AMSR-E) 위성의 토양 수분 자료를 Terra와 Aqua 위성에 탑재된 Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) 센서에서 제공하는 반사도, NDVI, 지표면 온도 자료들을 이용해 회귀분석으로 상관성을 밝힌 다음 공간 해상도를 25 km에서 1 km로 상세화 기법을 시도했다. 상세화 기법을 통해 재 산출된 토양 수분의 경향성은 지상 관측 자료와 시·공간적 변화를 비교적 뚜렷하게 제시하였다.

본 연구에서는 Version 7의 TRMM 3B43 월 누적 강우 자료를 상세화 기법을 적용하여 공간해상도를 25 km에서 1 km로 상세화 시켰으며, 이를 통하여 우리나라의 공간 강우장의 정확성을 살펴보고자 하였다. 이를 위해, NDVI와 강우의 상관성을 회귀분석 후 상세화 기법에 적용하였으며, 지점 자료를 활용한 GDA와 GRA 상세화 기법을 적용하여 비교 및 보정을 통해 정확도를 분석하였다. 이 연구를 통해 우리나라의 강우와 NDVI의 상관관계를 알아보았으며, 공간 강우장을 산정함으로써 수자원 관리를 위한 상세화 기법의 적용성 및 활용 가능성을 살펴 보았다.

2. 연구 지역 및 자료

2.1. 연구 지역

연구 지역은 한반도 전역을 대상으로 실시하였다. 기상청에서는 종관기상관측장비(Automated Synoptic Observing System, ASOS)와 AWS를 이용해 지상에서의 기상 관측을 시행하며, 전국적으로 ASOS 80개, AWS는 468개가 운영되고 있다(<http://www.kma.go.kr>). 본 연구에서는 TRMM 위성으로 측정된 강우량이 유효한지 비교 및 검증하기 위해 ASOS가 설치 되어있는 80개의 지점 중 자료가 존재하는 73개의 지점에서 관측된 강우량을 활용하였다(Fig. 1). 선택한 73개의 지점에 대한 정확한 위치 및 정보는 Table 1에 자세하게 나타냈다. 한반도는 위도 상 아시아 대륙의 북반구, 대략 북위 33~38°, 동경 124~131°에 위치하고 있기 때문에 사계절이 뚜렷하게 나타난다. 우리나라의 우기는 6~9월이며, 약 4개월 동안 연강우량의 60% 이상의 강우가 내린다. 이는 물론 기후대에 속한 우리나라

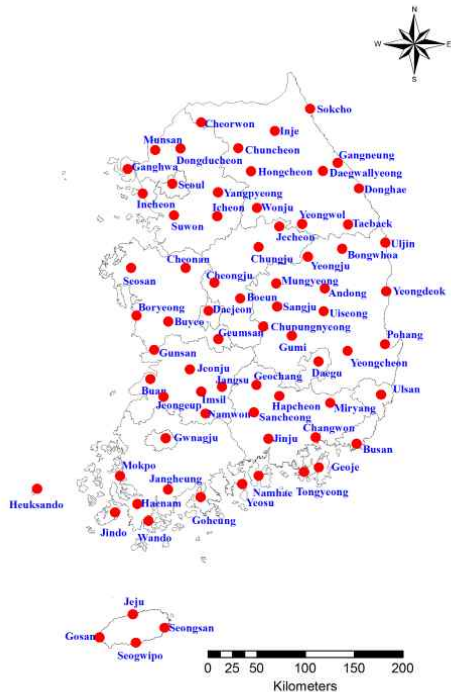


Fig. 1. Study Area

라는 여름철에 태평양에서 불어오는 남동 및 남서 계절풍과 장마 전선의 정체, 열대성 저기압의 통과로 인해서 강우가 집중되기 때문이다(Ho and Kang, 1988). 따라서 강우 집중시기와 성장기를 고려하여 2007~2011년의 5~9월 자료를 활용하였다.

2.2 TRMM 3B43 월 누적 강우량

열대 강우량 관측 위성인 TRMM은 1997년에 발사된 이후로 1998년부터 지금까지 50°S~50°N 적도 주변 영역을 관측하는 저궤도위성으로 열대지방과 아열대지방의 강우량을 파악하는 목적으로 사용되고 있다. 열대지방과 아열대지방의 강우량은 전 지구 강우량의 3분의 2 이상을 차지하며, 대기·열 순환의 중심부에 포함되므로 강우 관측이 각광받고 있다. TRMM의 강우 레이더는 강우의 3차원 구조를 얻을 수 있으며, 그 외에도 새로운 종류의 데이터를 산출이 가능하여 세계적으로 주목받고 있다. TRMM 위성 자료(2B31, 2A12)와 다른 다양한 위성(SSM/I, AMSR, AMSU)들과 지상 관측 장비들을 이용해서 측정된 강우 자료들을 통합하여 매 관측 시간에 관측된 각 격자마다의 가장 좋은 강우 측정값을 내는 작업을 편하게 TRMM Multi-satellite Precipitation Analysis (TMPA)라 부른다(Huffman et al., 2007). 본 연구에서 사용된 자료는 전 세계의 강우 정보가 들어있는 TMPA에서 제공하는 TRMM 3B43 V7의 월 누적 강우량 자료이며, 25 km의 공간 해상

도로 제공된다. 이 월 누적 강우량 자료는 <http://disc.sci.gsfc.nasa.gov>에서 HDF 형태로 받을 수 있으며 자료의 특징을 Table 2에 나타냈다. TRMM 3B43 자료는 위경도 좌표계(Geographic latitude and longitude) 형태로 되어 있다. 이를 연구에 적합하게 우리나라에서 대표적으로 사용하는 평면직각좌표계(Transverse Mercator, TM)로 기하 보정을 실시하였으며, 연구지역에 해당하는 강우 자료만을 추출하기 위해 한반도 지역에 subset 하였다. 한반도 지역에 대한 강우 자료는 성장기에 맞춰 누적시킨 강우 자료로 만들었으며, 각 연도별로 하나씩의 누적 강우 자료가 생성됐다.

2.3 정규식생지수(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)

NASA에서 개발한 지구관측 위성(Earth Observation System, EOS)으로 육상 및 대기 관측을 위한 MODIS-Terra (1999년 12월에 발사)와 해양 관측을 위한 MODIS-Aqua (2002년 5월에 발사)가 있다. 고분해능 기상 센서인 MODIS는 Terra (EOS AM)와 Aqua (EOS PM) 극궤도 위성에 탑재 되어있으며 총 36개의 밴드가 있고 250 m에서 1 km에 이르는 다양한 공간 해상도를 갖는다. 본 연구에서는 MODIS 육상 자료(MOD13)에서 제공하는 16일 간격의 1 km 공간 해상도를 갖는 정규식생지수(NDVI) 자료를 사용하였다. MODIS 관련 자료는 <http://ladsweb.nas.nasa.gov/>에서 HDF 형태로 제공된다.

3. 연구 방법

강우는 일반적으로 수문순환의 핵심 인자로 인식되고 있으며, 유역 및 국가단위의 정확한 산정을 위한 중요한 인자로 대표되고 있다. 현재 대부분의 수문 및 기상 모델을 구동하기 위해서 제한된 강우자료로부터 정확한 격자 자료가 요구되고 있다(Immerzeel et al., 2009). 이러한 문제를 개선하기 위해 하나의 접근방법으로 상세화 기법이 거론되어 왔다. 강우는 여러 수문기상학적 인자들 간의 연관성을 통해서 발생한다. 본 연구에서는 MODIS 기반의 NDVI 값과 TRMM 3B43 월 누적 강우량과의 상관관계를 이용한 상세화 기법을 통해 25 km 공간 해상도의 강우 자료를 1 km 공간 해상도로 상세화시켜 공간적 정확성을 향상시켰다.

3.1 Relationship between Rainfall and NDVI (TRMM-NDVI)

Immerzeel et al. (2009), Jia et al. (2011), Duan and Bastiaanssen, (2013)에서 강우와 NDVI와의 관계성을 상

세화 기법에 적용시켰다. TRMM 3B43 V7의 월 누적 강우량 자료는 월 단위 누적 값이며, 본 연구에서는 생장기에 속하는 월 누적 강우량을 각 연도별 누적시킨 값을 사용하였다. NDVI 값이 모두 강우와 관계가 있는 것은 아니므로 0 이하의 값은 TRMM-NDVI의 회귀식 산출 과정에서

제외하였으며, 미측정 지역(바다)은 배제하고 상세화 기법을 적용하였다. 회귀분석을 통한 상세화 기법 과정은 아래와 같다.

- 1) Version 7 TRMM 3B43의 월 누적 강우량을 생장기(5~9월)에 맞게 누적시켜 누적강우량 자료를 각 연

Table 1. Description of Study Stations

No.	Site No.	Station	Start Period	Lat.	Long.	No.	Site No.	Station	Start Period	Lat.	Long.
1	90	Sokcho	1968.01.01	38.2648	128.5814	38	188	Seongsan	1971.01.01	33.3868	126.8802
2	95	Cheorwon	1988.01.01	38.1479	127.3042	39	189	Seogwipo	1961.01.01	33.2461	126.5653
3	98	Dongducheon	1998.02.01	37.9018	127.0607	40	192	Jinju	1969.03.01	35.1638	128.0400
4	99	Munsan	2000.12.01	37.8859	126.7665	41	201	Ganghwa	1971.01.01	37.7074	126.4463
5	100	Daegwallyeong	1971.07.11	37.6772	128.7183	42	202	Yangpyeong	1971.02.01	37.4886	127.4945
6	101	Chuncheon	1966.01.01	37.9026	127.7357	43	203	Icheon	1971.01.01	37.2640	127.4842
7	105	Gangneung	1911.10.01	37.7515	128.8910	44	211	Inje	1971.09.01	38.0599	128.1671
8	106	Donghae	1992.05.01	37.5071	129.1243	45	212	Hongcheon	1971.07.01	37.6836	127.8804
9	108	Seoul	1907.10.01	37.5714	126.9658	46	216	Taebaek	1985.09.01	37.1703	128.9893
10	112	Incheon	1904.04.01	37.4776	126.6244	47	221	Jecheon	1971.01.01	37.1593	128.1943
11	114	Wonju	1971.09.01	37.3376	127.9466	48	226	Boeun	1971.06.16	36.4876	127.7341
12	119	Suwon	1964.01.01	37.2728	126.9856	49	232	Cheonan	1971.01.01	36.7767	127.1192
13	121	Yeongwol	1995.01.01	37.1812	128.4575	50	235	Boryeong	1971.12.10	36.3272	126.5574
14	127	Chungju	1971.01.01	36.9704	127.9527	51	236	Buyeo	1971.01.01	36.2724	126.9208
15	129	Seosan	1968.01.01	36.7766	126.4939	52	238	Geumsan	1971.07.01	36.1056	127.4817
16	130	Ulsin	1971.01.01	36.9918	129.4128	53	243	Buan	1969.05.11	35.7295	126.7166
17	131	Cheongju	1967.01.01	36.6392	127.4407	54	244	Imsil	1969.05.11	35.6123	127.2856
18	133	Daejeon	1969.01.01	36.3720	127.3721	55	245	Jeongeup	1969.05.11	35.5632	126.8661
19	135	Chupungnyeong	1935.09.01	36.2202	127.9946	56	247	Namwon	1971.01.01	35.4054	127.3330
20	136	Andong	1982.04.06	36.5730	128.7073	57	248	Jangsu	1988.01.01	35.6570	127.5203
21	137	Sangju	2002.01.01	36.4084	128.1574	58	260	Jangheung	1971.01.01	34.6887	126.9195
22	138	Pohang	1943.01.01	36.0326	129.3796	59	261	Haenam	1971.02.01	34.5536	126.5690
23	140	Gunsan	1968.01.01	36.0053	126.7613	60	262	Goheung	1971.01.01	34.6182	127.2757
24	143	Daegu	1907.01.07	35.8852	128.6190	61	271	Bongwhoa	1988.01.01	36.9436	128.9145
25	146	Jeonju	1918.05.15	35.8215	127.1550	62	272	Yeongju	1971.01.01	36.8719	128.5170
26	152	Ulsan	1931.07.01	35.5601	129.3203	63	273	Mungyeong	1971.01.01	36.6273	128.1488
27	155	Changwon	1985.07.01	35.1702	128.5729	64	277	Yeongdeok	1971.12.01	36.5333	129.4094
28	156	Gwangju	1938.10.01	35.1729	126.8916	65	278	Uiseong	1971.01.01	36.3561	128.6886
29	159	Busan	1904.04.09	35.1047	129.0320	66	279	Gumi	1971.01.01	36.1306	128.3205
30	162	Tongyeong	1967.01.01	34.8455	128.4356	67	281	Yeongcheon	1971.01.01	35.9774	128.9514
31	165	Mokpo	1904.04.01	34.8169	126.3812	68	284	Geochang	1971.01.01	35.6712	127.9110
32	168	Yeosu	1942.04.01	34.7393	127.7406	69	285	Hapcheon	1971.01.01	35.5650	128.1699
33	169	Heuksando	1997.01.01	34.6872	125.4510	70	288	Miryang	1971.01.01	35.4915	128.7441
34	170	Wando	1971.05.01	34.3959	126.7018	71	289	Sancheong	1971.01.01	35.4130	127.8791
35	175	Jindo	2001.11.01	34.4721	126.3238	72	294	Geoje	1971.01.01	34.8882	128.6045
36	184	Jeju	1923.05.01	33.5141	126.5297	73	295	Namhae	1971.01.01	34.8166	127.9264
37	185	Gosan	1988.05.01	33.2938	126.1628						

Table 2. Characteristics of Version 7 TRMM 3B43 Monthly Data (<http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/>)

Version 7 TRMM 3B43 Monthly Characteristics	
Temporal Coverage	Start Date : 1998 -01-01 Stop Date : Recently
Geographic Coverage	Latitude : 50°S - 50°N Longitude : 180°W - 180°E
Temporal Resolution	Monthly
Horizontal Resolution	25 km × 25 km, nlat=400, nlon=1440
File Type	HDF

도별로 생성한다(*i.e.* $P_{(i,j)TRMM}^{Uncal-25km}$).

- 2) 각 연도별로 성장기에 속하는 1km NDVI 자료를 평균을 내어 하나의 값($NDVI_{(i,j)}^{1km}$)으로 산출한 후 공간 해상도를 1km에서 25km로 확대화한다(*i.e.* $NDVI_{(i,j)}^{25km}$) (Eq. (1)).

$$NDVI_{(i,j)}^{25km} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m NDVI_{ij}^{1km}}{mn} \quad (1)$$

- 3) $NDVI_{(i,j)}^{25km}$ 와 $P_{TRMM(i,j)}^{Uncal-25km}$ 의 관계성을 회귀 분석을 통해 식으로 나타낸다. 다양한 회귀식(1차, 2차, 지수 함수 등)을 시험해 보고 상관계수(R) 값이 가장 큰 회귀식을 특정 연도의 연구 지역에 대해 산출한다.
- 4) $NDVI_{(i,j)}^{25km}$ 를 (3) 단계에서 구한 회귀식에 넣고 25km의 공간 해상도를 갖는 강우량을 산정한다(*i.e.* $P_{(i,j)}^{NDVI25km}$) (Eq. (2)). 회귀식에서 α , β , γ 는 식 유도과정에서 나오는 상수이다.

$$P_{(i,j)NDVI}^{25km} = \alpha * (NDVI_{(i,j)}^{25km})^2 + \beta * (NDVI_{(i,j)}^{25km}) + \gamma \quad (2)$$

- 5) 초반의 $P_{(i,j)TRMM}^{Uncal-25km}$ 와 (4) 단계에서 산정된 $P_{(i,j)NDVI}^{25km}$ 값의 차이를 통해 잔량을 구한다(*i.e.* $P_{(i,j)res}^{25km}$). P_{res}^{25km} 는 회귀식을 통해서 예상하지 못한 성장기 강우량에 대한 값을 보정할 수 있다(Eq. (3)).

$$P_{(i,j)res}^{25km} = P_{(i,j)TRMM}^{uncal-25km} - P_{(i,j)NDVI}^{25km} \quad (3)$$

- 6) $P_{(i,j)res}^{25km}$ 를 3차 상승 보간법(Cubic Convolution Interpolation)을 통해 1km의 공간 해상도로 분할한다(*i.e.* $P_{(i,j)res}^{1km}$). 3차 상승 보간법은 출력 픽셀을 생성하기 위해 이웃한 16개의 픽셀을 고려하여 보간하는 방법이다. 이 방법은 가중치를 양방향으로 줄 수 있어 오차가 다른 보간법에 비해 줄어드는 장점이 있다.
- 7) (3) 단계에서 구한 회귀식에 공간 해상도가 1km인 $NDVI_{(i,j)}^{1km}$ 를 대입하여 성장기에 해당하는 강우량을 계산한다(*i.e.* P_{NDVI}^{1km}) (Eq. (4)).

$$P_{(i,j)NDVI}^{1km} = \alpha * (NDVI_{(i,j)}^{1km})^2 + \beta * (NDVI_{(i,j)}^{1km}) + \gamma \quad (4)$$

- 8) 최종 상세화 된 강우량을 구하기 위해 $P_{(i,j)NDVI}^{1km}$ 값에 (6) 단계에서 구한 $P_{(i,j)res}^{1km}$ 를 더해준다(*i.e.* $P_{(i,j)TRMM}^{Uncal-1km}$). 잔량을 합하여 보정하는 과정은 회귀식을 통해 구할 수 없던 강우량에 대해 더 정확한 산정을 해 주므로 중요한 과정이다(Eq. (5)).

$$P_{(i,j)TRMM}^{Uncal-1km} = P_{(i,j)res}^{1km} + P_{(i,j)NDVI}^{1km} \quad (5)$$

3.2 GDA과 GRA 보정 상세화 기법

3.2.1 Geographical Differential Analysis (GDA) method

Cheema and Bastiaanssen (2012)에 의해서 제안된 Geographical Differential Analysis (GDA)는 3.1절에서 최종적으로 구한 $P_{(i,j)TRMM}^{Uncal-1km}$ 자료를 연구 지역의 지점 관측소에서 측정된 강우량과의 차이를 통해 보정하는 방법이다.

- 9) 8) 단계에서 구한 $P_{(i,j)TRMM}^{Uncal-1km}$ 자료에서 연구 지역에 대한 값들을 산출한다. 그 후 각각의 같은 지점 강우 관측소($P_{(i,j)Point}$)와의 차이를 산출한다(*i.e.* $P_{(i,j)Error}^{Point}$) (Eq. (6)).

$$\Delta P_{(i,j)Error}^{Point} = P_{(i,j)TRMM}^{Uncal-1km} - P_{(i,j)Point} \quad (6)$$

- 10) Eq. (6)에서 산정된 지점의 $P_{(i,j)Error}^{Point}$ 값들을 Nalder and Wein (1998), de Amorim et al. (2013), Aalto et al. (2013)에서 나타낸 것들과 같이 역거리가 중법을 이용하여 1km의 격자(*i.e.* $P_{(i,j)Error}^{IDW-1km}$)로 분포 시킨다(Eq. (7)). IDW는 거리가 가까운 실측 값에 가중치를 부여하여 보간하는 방법으로 강수량의 변이성을 간편하고 빠르게 구할 수 있는 장점이 있다(Erxleben et al., 2002; Hwang et al., 2010).

$$\Delta P_{(i,j)Error}^{IDW-1km} = \Delta P_{(i,j)Error}^{Point} \quad (7)$$

- 11) Eq. (7)을 통해 구해진 $P_{(i,j)Error}^{IDW-1km}$ 자료를 $P_{(i,j)TRMM}^{Uncal-1km}$ 과 합성하여 산출한다(*i.e.* $P_{(i,j)Cal-GDA}^{1km}$) (Eq. (8)). 이 과정을 통하여 지점과 인공위성으로 산출된 자료간의 지점-공간 상관관계를 보정할 수 있다.

$$P_{(i,j)Cal-GDA}^{1km} = P_{(i,j)TRMM}^{Uncal-1km} - \Delta P_{(i,j)Error}^{IDW-1km} \quad (8)$$

3.2.2 Geographical Ratio Analysis (GRA) method

Geographical Ratio Analysis (GRA)는 인공위성과 지점 강우관측소 자료간의 편차를 보정하는 가장 보편적인 방법으로 세부 순서는 다음과 같다.

- 12) Eq. (9)에서와 같이 8) 단계에서 구한 $P_{(i,j)TRMM}^{Uncal-1km}$ 자료와 이에 대응되는 지점 값(P_{point})의 비($P_{(i,j)ratio}^{point}$)로 산정한다.

$$P_{(i,j)ratio}^{point} = P_{point} / P_{(i,j)TRMM}^{Uncal-1 km} \quad (9)$$

13) Eq. (10)에서 각 지점에서 산출된 비($P_{(i,j)ratio}^{point}$)를 IDW 방법을 사용하여 $P_{(i,j)TRMM}^{Uncal-1 km}$ 와 같은 공간 해상도인 1km의 격자($P_{(i,j)ratio}^{1 km}$)로 분포시킨다. 분포시킨 자료와 $P_{(i,j)TRMM}^{Uncal-1 km}$ 자료는 GRA 방법을 통해서 지점 자료로 보정된 강우 값($P_{(i,j)Cal-GRA}^{1 km}$)을 얻을 수 있다(Eq. (10)).

$$P_{(i,j)Cal-GRA}^{1 km} = P_{(i,j)TRMM}^{Uncal-1 km} \times P_{(i,j)ratio}^{1 km} \quad (10)$$

3.3. 통계학적 분석

73개의 지점 강우 자료와 TRMM 3B43 V7의 월 누적 강우 자료(위성 자료), 상세화 기법을 적용한 강우 자료들의 공간적 상관성을 파악하기 위해 기본적인 통계학적 분석을 수행하였다. 통계학적 분석으로는 Bias, 평균 제곱근 오차(Root Mean Square Error, RMSE), 평균 절대 오차(Mean Absolute Error, MAE), 일치도(Index Of Agreement, IOA)를 사용했다. Bias는 지점 자료와 위성 및 상세화 기법으로 얻은 자료를 비교하여 오차를 나타낸다(Eq. (11)). RMSE와 MAE는 0에 가까울수록 지점 자료와 상세화 기법을 통한 위성 자료간의 유사성을 나타낸다(Eqs. (12) and (13)). 일치도는 위성 자료와 지점 자료간의 얼마만큼 일치하는지를 판단한다(Eq. (14)). 일치도는 1에 가까울수록 위성 자료와 지점 자료 사이의 유사성을 나타낸다(Baek et al., 2013).

$$Bias = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - M_i) \quad (11)$$

$$SE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - M_i)^2} \quad (12)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |P_i - M_i|}{n} \quad (13)$$

$$IOA = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - M_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - \bar{P}| + |P_i - \bar{M}|)^2} \quad (14)$$

P는 위성 및 상세화 기법을 통해 측정된 강우량 중에서 73개 지점에 대한 각 지점 강우량 자료를 추출하여 나타냈다. M은 73개의 지점에서 지상 관측된 강우량, \bar{P}, \bar{M} 은 각각 자료 P와 M의 평균을 나타내며, n은 지점의 개수를

의미한다.

4. 연구 결과 및 토의

4.1. 강우와 NDVI의 관계성

우리나라의 연 평균 강우량은 대략 1200~1500 mm이며, 성장기에 내리는 강우량은 연 평균 강우량의 60~70%를 차지한다. 그러나 Fig. 2의 본 연구결과, TRMM 3B43 V7기반 성장기 누적 강우량은 400 mm 이하로 과소 측정되었다. 이는 Jang (2002)와 Xue et al. (2013)에서 TRMM 관측치가 지상 관측에 비해 전반적으로 과소 측정되었다는 결과와 일치한다. Prakash and Gairola (2013)에서는 강우 레이더의 측정값 보다 TRMM의 측정값이 과소 측정 혹은 손실된 결과가 도출되었다.

Immerzeel et al. (2009)에서는 위성 TRMM의 강우 자료가 0.25~1.25°의 다양한 공간 해상도 중에서 0.75°의 해상도에서 NDVI 자료와 관계성이 가장 뚜렷함을 밝혔다. Duan and Bastiaanssen (2013)에서는 TRMM의 연 누적 강우 자료(0.25°)와 연평균 NDVI 자료(1 km)의 관계성을 증명하였지만, 두 자료간의 관계성은 시간과의 연관성이 작아질수록 경향성이 뚜렷하지 않은 결과를 보였다. 본 연구에서는 연구기간인 2007년부터 2011년에서 각 연도의 성장기에 속하는 평균 NDVI와 누적 강우량의 관계성이 잘 나타난 연도를 선택하여 Fig. 2에 산포도로 나타내었다. 여러 회귀식(1차, 2차, 3차, 지수 등)을 도출한 결과, NDVI와 강우와의 결정계수(R^2) 값이 가장 크게 나타나는 2차 회귀식을 채택하였다. Fig. 2에서 보듯이 2차 회귀곡선 형태고 누적 강우량이 증가할수록 NDVI 값도 증가됨을 확인할 수 있다. 하지만 누적 강우량이 200 mm 이하일 때 NDVI 값은 0에서 0.4 사이에 분산 되어있고, 200 mm 이상일 때 NDVI 값은 0.4 이상에서 밀집되어 있는 것을 파악할 수 있다.

Table 3에 각 연도별로 누적 강우량과 NDVI의 관계성을 나타내는 결정계수(R^2)와 2차 회귀곡선을 정리하였다. 2009년도 결정계수가 0.39로 다른 연도에 비해 가장 높았으며, 그 다음으로는 2011년, 2008년, 2007년 순으로 결정계수의 크기가 높음을 확인할 수 있다.

4.2 상세화 기법 적용 결과 분석

상세화 기법을 적용하여 산정된 성장기 누적 강우량 추정 값의 유효성을 검증하기 위해 2009년과 2011년도의 언급한 73개의 지점에 대한 강우 자료와 비교해보았다(Fig. 3). Fig. 3(a)는 2009년에 대한 그래프로 원 TRMM 자료

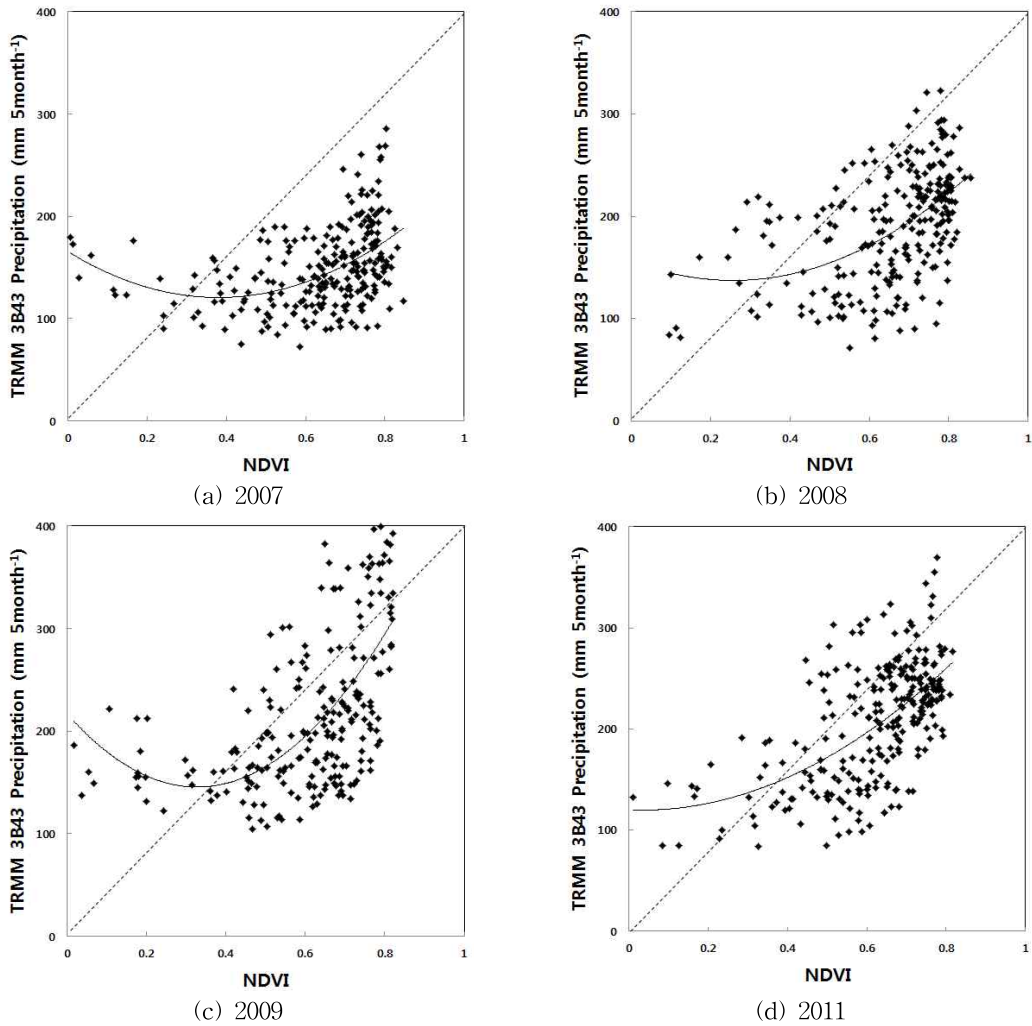


Fig. 2. Regression between NDVI and TRMM 3B43 V7 Precipitation

Table 3. Regression Equations between NDVI and TRMM 3B43 V7 Precipitation

Year	R ²	Regression Equation (x: NDVI, y: Precipitation)
2007	0.21	$y = 311.11x^2 - 236.47x + 165.38$
2008	0.25	$y = 291.62x^2 - 150.13x + 156.65$
2009	0.39	$y = 667.90x^2 - 437.31x + 216.91$
2011	0.37	$y = 236.71x^2 - 14.509x + 119.98$

와 TRMM-NDVI 상세화 기법을 통해 추정된 강우량은 추세선 아래에 존재함을 볼 때 과소 추정됐음을 알 수 있다. TRMM-NDVI의 값을 지점 자료를 통해 보정한 GDA와 GRA 상세화 기법으로 산정한 강우량의 경우 추세선의 경향을 따라가는 것을 보였으며, 이는 지점 자료와 비슷한 경향을 따른다는 것을 나타낸다. Fig. 3(b)는 2011년에 해당하는 그래프이다. 이 그래프에서도 원 TRMM 자료와 TRMM-NDVI 상세화 기법을 통해 추정된 강우량

은 과소 추정됐음을 알 수 있다. GDA와 GRA 상세화 기법을 실시한 경우 추세선에 근접하였으며, 전반적으로 지점 자료와 비교했을 때 강우 값이 보정되었음을 확인할 수 있었다.

Table 4에 각각의 측정 자료에 대한 통계값을 분석하여 정리하였다. 원 TRMM 자료와 TRMM-NDVI 상세화 기법의 경우 평균적으로 약 900 mm의 강우량이 과소 추정된 것으로 나타났다. GDA 상세화 기법의 경우 2009년에는

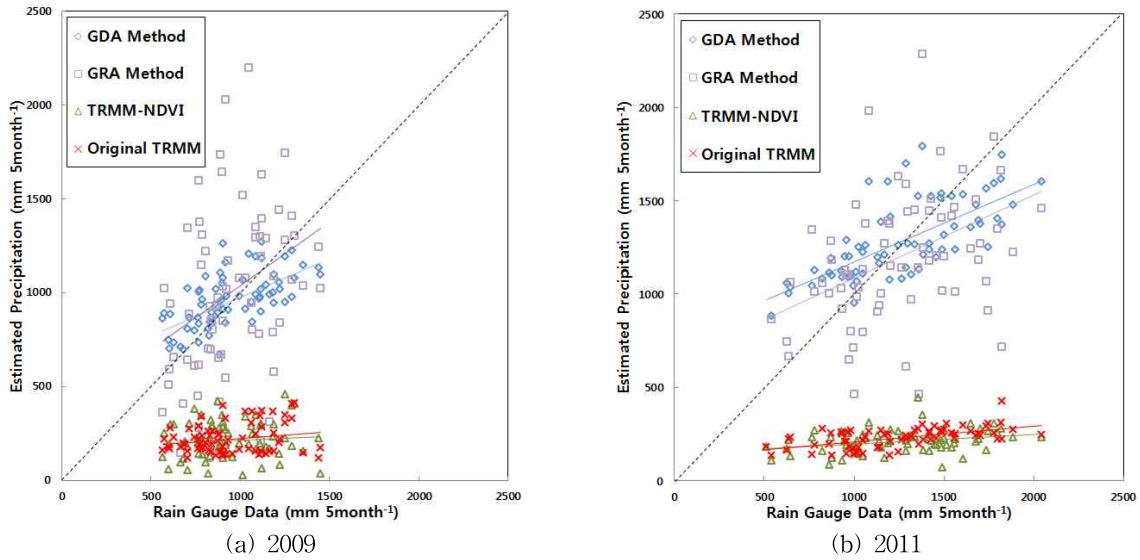


Fig. 3. Scatter Plot of the eSTIMATED PRECIPITATION from 73 Validation Rain Gauge Sites Versus the Estimated Precipitation from Original TRMM 3B43 Product (Original TRMM), Downscaled (TRMM-NDVI), Calibrated Downscaled using GDA Method (GDA Method) and using GRA Method (GRA Method) for 2009, 2011 for Study Area

Table 4. Statistical Analysis of Validation Results using 73 Rain Gauge Sites

Year	Data Type	Bias (mm)	RMSE (mm)	MAE (mm)	IOA	R ²
2009	Original TRMM	-725.85	756.97	725.85	0.09	0.04
	TRMM-NDVI	-731.28	767.40	731.28	0.13	0.01
	GDA Method	4.26	172.16	141.95	0.64	0.38
	GRA Method	52.88	464.81	341.55	0.77	0.10
2011	Original TRMM	-1028.45	1079.35	1028.45	0.01	0.34
	TRMM-NDVI	-1035.15	1088.99	1035.15	0.02	0.08
	GDA Method	17.21	253.43	310.56	0.62	0.49
	GRA Method	-61.97	398.46	217.03	0.72	0.17

약 5mm, 2011년에는 약 20mm가 과대 추정되었다. GRA 상세화 기법의 경우 2009년에는 약 50mm 정도 과대 추정되었으며, 2011년에는 약 60mm가 과소 추정되었다. RMSE와 MAE의 경우 2009년, 2011년 모두 GDA 상세화 기법이 적은 수치를 보였다. 결정계수는 2009년과 2011년 모두 GDA 상세화 기법의 값이 가장 크게 나타나 지점 자료와의 상관성이 높음을 보였다. 일치도의 경우 GRA 상세화 기법이 2009년에는 0.77, 2011년에는 0.72로 자료간의 유사성이 제일 높음을 확인할 수 있었다. TRMM 3B43 월 강우 자료는 지점 자료와 유사성이 2009년에는 0.09, 2011년에는 0.01로 제일 낮게 나왔음을 확인하였다.

Fig. 4에 대표적인 예로 2011년에 73개의 지점 관측 자료를 역거리가중법을 적용하여 나타낸 자료, 원 TRMM

3B43 V7 강우량 자료, TRMM-NDVI 회귀식 상세화 기법을 적용해 구한 자료, GDA, GRA 보정 상세화 기법을 적용한 자료에 대해서 한반도 전 지역에 대해 공간 강우장을 나타내었다. NDVI는 육상 자료이기 때문에 바다에서는 값이 존재하지 않는다. 이에 NDVI 값이 적용된 Fig. 4(c), (d), (e)에서 볼 수 있듯이 바다에서는 강우량이 측정되지 않은 것으로 나타났다. Fig. 4를 보면 강우량의 범위가 다르게 나타나있다. 이는 (b)와 (c)의 경우 TRMM으로 관측한 강우량이 과소 추정되었기 때문에 강우량의 범위를 0에서 500mm로 나타낸 것이고, (a), (c), (d)의 경우 지점 자료를 사용하여 보간 및 보정했기에 강우량의 범위가 0에서 2,000mm로 표현한 것이다. Fig. 4의 (a)는 73개의 지점 관측 자료를 역거리가중법을 적용하여 나타낸 그림

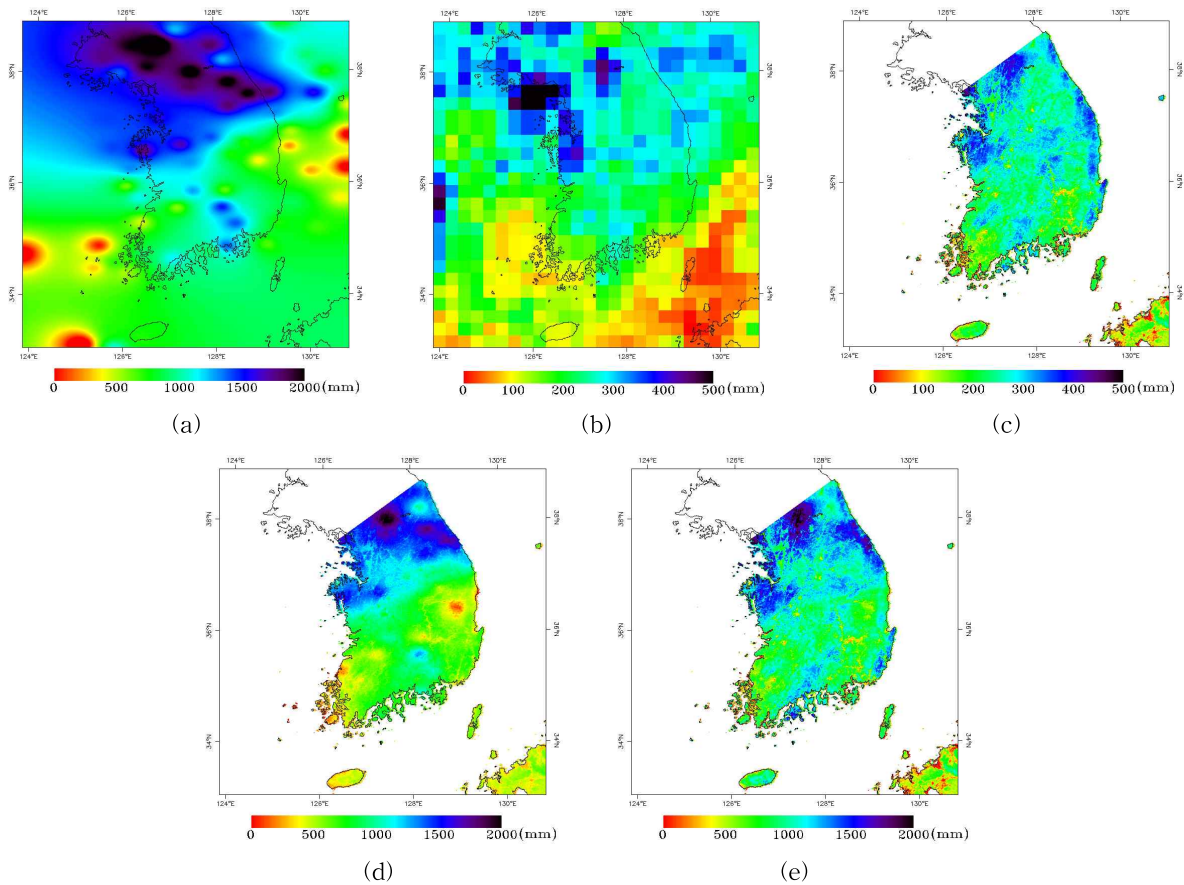


Fig. 4. Precipitation of the South Korea May to September in 2011. (a) Mapping of 73 rain gauge sites using IDW method, (b) Original TRMM 3B43 V7 Data, (c) Downscaled precipitation with TRMM-NDVI regression, (d) Downscaled precipitation with GDA method, (e) Downscaled precipitation with GRA method

으로 중부지역을 기점으로 북쪽은 강우량이 평균적으로 1,200 mm 이상으로 나타났으며, 남쪽은 강우량이 평균적으로 700 mm로 측정되었다. 상세화 기법 중 GDA 방법을 이용한 Fig. 4의 (d)와 원 TRMM(b)를 비교하면, GDA 상세화 기법으로 보정하여 얻은 중부지역의 강우량이 과대 추정되었음을 알 수 있다. 또한 경상북도 지역에서 과소 추정되었다. GRA 상세화 기법으로 보정한 Fig. 4(e)는 (b)에 비해 다소 과대 추정된 지역이 많이 나타났으며, 중부 지역에서 가장 두드러졌다. GDA와 GRA 상세화 기법의 경우 지점 자료의 수를 증가시켜 보정한다면 지점 관측 자료와 비교했을 시 오차가 적어질 것이다.

5. 결 론

기후변화로 인해 한반도 내에서의 강우사상에 대한 시·공간적 변동성이 가속화되어, 이에 따른 실현 가능한 대책 마련이 시급하다. 지상 관측을 통한 자료만을 이용

하게 되면, 시간적인 면에서는 대표성을 갖지만, 공간에 대해서는 지형 및 기상학적 조건을 고려하지 못해 대표성이 떨어진다. 이를 극복하기 위해서는 시공간적인 제약이 없는 원격탐사기법을 대안으로 인공위성 및 레이더를 활용한 연구가 진행되어야 한다.

본 연구에서는 2007~2011년의 생장기에 속하는 강우 자료를 갖고 상세화 기법을 사용하여 우리나라 생장기의 공간 강우장을 정밀하고 정확하게 나타내고자 했다. 공간 해상도가 25 km인 TRMM 3B43 월 누적 강우량 자료를 바탕으로 NDVI와의 관계성을 이용한 회귀분석을 하여 상관성을 분석하였으며, GDA, GRA 상세화 기법들을 사용하여 공간 해상도를 1 km로 상세화 시켰다. Fig. 2에서와 같이 강우와 NDVI의 상관성은 2차 회귀식을 통한 결과 값이 가장 잘 나타난 것을 알 수 있었으며, 생장기에 대하여 연구를 진행하였으므로 NDVI가 0.5 이상인 값들에 대한 강우량이 다수 분포하는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 3에서는 GDA와 GRA 상세화 기법을 통해 보정한 공

간 강우장의 결과는 73개의 지점 자료와 뚜렷한 상관성을 보임을 확인하였다. Table 4에서 TRMM에서 측정된 강우량은 우리나라에 대해 과소 추정되는 경향이 나타나 지상 관측 자료와 통계분석을 진행 했을 때 오차가 크게 발생하였다. 이를 위해 TRMM이 과소 추정되는 원인을 찾아 보정을 통해 지상 관측 자료와의 오차를 줄이는 방안 에 대한 연구가 진행 되어야 할 것이다.

앞에서 언급한 선행 연구사례에서 강우와 NDVI의 상관성이 높다는 것을 제시하였다. 하지만, 추후 연구를 통해 강우와 NDVI 외의 다른 인자들과의 상관성을 밝혀낸다면 보다 더 정확한 강우의 산출로 활용성이 높을 것으로 사료된다. 또한 TRMM 위성이 아닌 우리나라의 강우 레이더를 이용하여 시간 해상도를 월별이 아닌 시간 또는 일별로 줄여 상세화 기법을 적용한다면 더 정확하고 정밀한 공간 강우장을 알 수 있을 것이며 나아가 우리나라의 수자원 관리에 도움이 될 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원 주요(시드)사업(지역특성을 반영한 상세 격자강우량 생산기술 개발)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다. 중관기상관측장비(ASOS)의 관측 자료를 제공해 주신 기상청 관계자분들께 감사사를 전합니다.

References

Aalto, J., Pirinen, P., Heikkinen, J., and Venäläinen, A. (2013). "Spatial interpolation of monthly climate data for Finland: comparing the performance of kriging and generalized additive models." *Theoretical Applied Climatology*, Vol. 112, No. 1-2, pp. 99-111.

Baek, J.J., Byun, K.H., Kim, D.K., and Choi, M.H. (2013), "Assessment of Solar Insolation from COMS : Sulma and Cheongmi Watersheds." *Korean Journal of Remote Sensing*, Vol. 29, No. 1, pp. 137-150.

Boushaki, F.I., Hsu, K.L., Sorooshian, S., Park, G.H., Mahani, S., and Shi, W. (2009). "Bias Adjustment of Satellite Precipitation Estimation Using Ground-Based Measurement : A Case Study Evaluation over the Southwestern United States." *Journal of Hydrometeorology*, Vol. 10, No. 5, pp. 1231-1242.

Cheema, M.J.M., and Bastiaanssen, W.G.M. (2012).

"Local calibration of remotely sensed rainfall from the TRMM satellite for different periods and spatial scales in the Indus Basin." *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 33, No. 8, pp. 2603-2627.

Choi, M.H., and Hur, Y.M. (2012), "A microwave-optical/infrared disaggregation for improving spatial representation of soil moisture using AMSR-E and MODIS products." *Remote Sensing of Environment*, Vol. 124, pp. 259-269.

de Amorim, P.B., Franke, J., Tanaka, M., Weiss, H., and Bernhofer, C. (2013). "Spatial Interpolation of Climatological Information: Comparison of Methods for the Development of Precipitation Distribution in Distrito Federal, Brazil." *Atmospheric and Climate Sciences*, Vol. 3, No. 2, pp. 208-217.

Duan, Z., and Bastiaanssen, W.G.M. (2013). "First results from Version 7 TRMM 3B43 precipitation product in combination with a new downscaling-calibration procedure." *Remote Sensing of Environment*, Vol. 131, pp. 1-13.

Erxleben, J., Elder, K., and Davis, R. (2002). "Comparison of spatial interpolation methods for estimating snow distribution in the Colorado Rocky Mountains." *Hydrological Processes*, Vol. 16, No. 18, pp. 3627-3649.

Ho, C.H., and Kang, I.S. (1988). "The Variability of Precipitation In Korea." *Journal of Korean Meteorological Society*, Vol. 24, No. 1, pp. 38-48.

Hong, K.O., Suh, M.S., Rha, D.K., Chang, D.H., Kim, C., and Kim, M.K. (2007). "Estimation of High Resolution Gridded Temperature Using GIS and PRISM." *Korean Meteorological Society*, Vol. 17, No. 3, pp. 255-268.

Huffman, G.J., Adler, R.F., Bolvin, D.T., Gu, G., Nelkin, E.J., Bowman, K.P., Hong, Y., Stocker, E.F., and Wolff, D.B. (2007). "The TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA): Quasi-Global, Multiyear, Combined-Sensor Precipitation Estimates at Fine Scales." *Journal of Hydrometeorology*, Vol. 8, No. 1, pp. 38-55.

Hwang, Y.S., Jung, Y.H., Lim, K.W., and Heo, J.H. (2010). "Comparison of Daily Rainfall Interpolation Techniques and Development of Two Step Technique for Rainfall-Runoff Modeling." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 43, No. 12, pp. 1083-1091.

Immerzeel, W.W., Rutten, M.M., and Droogers, P. (2009).

- “Spatial downscaling of TRMM precipitation using vegetative response on the Iberian Peninsula.” *Remote Sensing of Environment*, Vol. 113, No. 2, pp. 362–370.
- Jang, C.H. (2002). Adjustment of TRMM/PR Data By Ground Observed Data and SCS Runoff Estimation: Yongdam-Dam watershed. Master dissertation, Konkuk University, pp. 23–54.
- Jia, S., Zhu, W., Lu, A., and Yan, T. (2011). “A statistical spatial downscaling algorithm of TRMM precipitation based on NDVI and DEM in the Qaidam Basin of China.” *Remote Sensing of Environment*, Vol. 115, No. 12, pp. 3069–3079.
- Kim, B.S., Hong, J.B., Kim, H.S., and Choi, K.H. (2007). “Combining Radar and Rain Gauge Rainfall Estimates for Flood Forecasting Using Conditional Merging Method.” *Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 27, No. 3B, pp. 255–265.
- Kim, J.P., Kim G.S., and Lee, W.S. (2012). “Estimation of Monthly Areal Precipitation using Daymet and PRISM.” *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 12, No. 5, pp. 83–90.
- Kozu, T., Iguchi, T., Meneghini, R., Awaka, J., and Okamoto, K. (1998). “Preliminary test results of a rain rate profiling algorithm for the TRMM Precipitation Radar.” *Microwave Remote Sensing of the Atmosphere and Environment*, Vol. 86, pp. 86–93.
- Li, M., and Shao, Q. (2010). “An improved statistical approach to merge satellite rainfall estimates and raingauge data.” *Journal of Hydrology*, Vol. 385, No. 1, pp. 51–64.
- Nalder, I.A., and Wein, R.W. (1998). “Spatial interpolation of climatic Normals: test of a new method in the Canadian boreal forest.” *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 92, No. 4, pp. 211–225.
- Park, H.S., Chung, H.S., and Noh, Y.J. (2000). “The Characteristics of Heavy Rainfall in Summer over the Korean Peninsula from Precipitation Radar of TRMM Satellite : Case Study.” *Journal of the Korean Society of Remote Sensing*, Vol. 16, No. 1, pp. 55–64.
- Prakash, S., and Gairola, R.M. (2013). “Validation of TRMM-3B42 precipitation product over the tropical Indian Ocean using rain gauge data from the RAMA buoy array.” *Theoretical and Applied Climatology*, pp. 1–10, Doi. 10.1007/s00704-013-0903-3.
- Sinclair, S., and Pegram, G. (2005). “Combining radar and rain gauge rainfall estimates using conditional merging.” *Atmospheric Science Letters*, Vol. 6, No. 1, pp. 19–22, Doi. 10.1002/asl.85.
- Xue, X., Hong, Y., Limaye, A.S., Gourley, J.J., Huffman, G.J., Khan, S.I., Dorji, C., and Chen, S. (2013). “Statistical and hydrological evaluation of TRMM-based Multi-satellite Precipitation Analysis over the Wangchu Basin of Bhutan: Are the latest satellite precipitation products 3B42V7 ready for use in ungauged basins?” *Journal of Hydrology*, Vol. 499, pp. 91–99.

논문번호: 13-068	접수: 2013.08.26
수정일자: 2013.10.16/10.21/11.13	심사완료: 2013.11.13