

수치모델 강우 및 토양수분 자료의 공간보간 처리환경의 비교

이승민¹, 최성원¹, 이승재^{1*}, 김만일²

¹국가농림기상센터, ²산림조합중앙회 산림공학연구소

(2022년 11월 29일 접수; 2022년 12월 29일 수정; 2022년 12월 29일 수락)

Comparison of Spatial Interpolation Processing Environments for Numerical Model Rainfall and Soil Moisture Data

Seung-Min Lee¹, Sung-Won Choi¹, Seung-Jae Lee^{1*}, Man-Il Kim²

¹National Center for AgroMeteorology,

²Forest Engineering Research Institute, National Forestry Cooperative Federation

(Received November 29, 2022; Revised December 29, 2022; Accepted December 29, 2022)

ABSTRACT

For data such as rainfall and soil moisture, it is important to obtain the values of all points required as geostatistical data. Spatial interpolation is generally performed in this process, and commercial software such as ArcGIS is often used. However, commercial software has fatal drawbacks due to its high expertise and cost. In this study, R, an open source-based environment with ArcGIS, a commercial software, was used to compare the differences according to the processing environment when performing spatial interpolation. The data for spatial interpolation was weather forecast data calculated through Land-Atmosphere Modeling Package (LAMP)-WRF model, and soil moisture data calculated for each cumulative rainfall scenario. There was no difference in the output value in the two environments, but there was a difference in user interface and calculation time. The results of spatial interpolation work in the test bed showed that the average time required for R was 5 hours and 1 minute, and for ArcGIS, the average time required was 4 hours and 40 minutes, respectively, showing a difference of 7.5%. The results of this study are meaningful in that researchers can derive the same results in a commercial software environment and an open source-based environment, and can choose according to the researcher's environment and level.

Key words: ArcGIS, R, Spatial interpolation, IDW, LAMP



* Corresponding Author : Seung-Jae Lee
(sjlee@ncam.kr)

I. 서 론

강우 자료는 산사태를 예측하기 위해 사용되는 핵심적인 입력 자료이다. 집중 호우로 인한 토층내 습윤대 형성은 산사태와 직접적으로 연결되는 변수(Kim and Shin, 2016; Kwak *et al.*, 2018)로 사용된다. 강우 자료는 공간상에서 국지성을 띠며 분포하는 지구통계자료(Geostatistical data)로 볼 수 있으며, 수요자가 필요로 하는 모든 지점 및 시점에 대해 정확한 값을 얻는 것이 중요하다. 하지만 비용과 시간 문제로 모든 지점에 대해 원하는 강우 자료를 얻는 것은 현실적으로 불가능하다. 따라서 기 구축된 지점의 값을 이용해 미관측 지점의 값을 추정하는 공간보간(spatial interpolation)을 사용하는 경우가 많다(Cho and Jeong, 2006; Jang *et al.*, 2015).

공간보간은 강우 자료뿐만 아니라 기온, 미세먼지, 토양수분 등 여러 지구통계자료에서 사용되어 왔다(Matejicek, 2005; Vizcaino and Pistocchi, 2014; Ristanović *et al.*, 2019; Kang *et al.*, 2022). 공간보간 기법의 종류는 역 거리 가중치 방법(inverse distance weighting, IDW), 다항식(polynomial) 방법, Kriging 방법과 같은 전통적인 보간 방법을 위주로 하여 점 데이터를 공간 분포로 변환하는 데 널리 사용되어 왔다. IDW 방법과 다항식 방법은 다른 공간보간 기법에 비해 상대적으로 빠르고 계산하기 쉬운 기본적인 공간보간 방법으로 사용된다(Lu and Wong, 2008).

농림기상 유관기관에서는 지도 및 지리 정보를 작업하기 위한 지리정보 처리 체계로서 ArcGIS (ESRI, Redlands, California, USA)를 많이 활용하고 있다(So *et al.*, 2020). ArcGIS와 같은 상용 소프트웨어에서는 GIS 기반의 데이터 처리 도구로 NetCDF 포맷 데이터의 사용과 변환이 용이하다. 하지만 상용 소프트웨어의 운용은 높은 전문성과 막대한 비용을 요구하므로 라이선스 구매에 신중해야 한다(Friedrich, 2014).

본 연구에서는 상용 소프트웨어의 공간보간 처리 환경 및 결과와 오픈 소스 기반 R 환경의 공간보간 처리 환경 및 결과를 사용자 인터페이스와 함께 비교 분석하여 이용자들의 선택과 보간 작업에 실질적인 도움을 제공하고자 하였다.

II. 자료 및 방법

2.1. 대상 지역

2011년 집중호우로 인한 우면산 산사태는 도심지

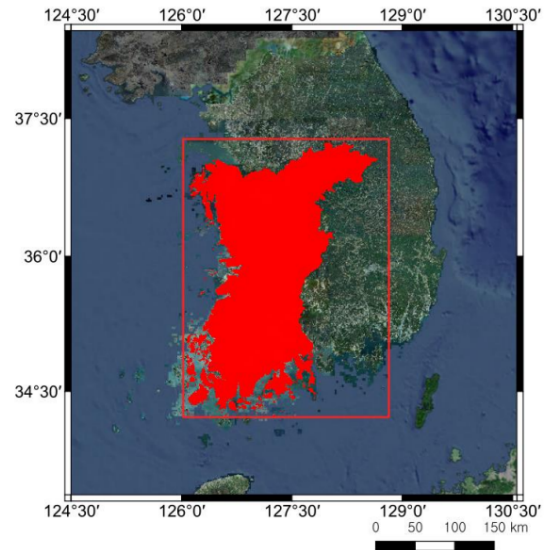


Fig. 1. Geographical location of the experimental area (South Korea).

주변에서 발생했던 사례로, 큰 인명 및 재산 피해를 야기하여 사회적 관심을 끌었다(Ko *et al.*, 2014; Lee and Lee, 2017). 집중호우 시, 도심지와 산림지가 공존하는 지역은 국지 규모에서 산사태 피해가 발생할 수 있기 때문에, 공간보간을 통한 고해상도 강우 및 토양수분 자료가 더욱 필요하다. 따라서 본 연구에서는 도심지와 산림지가 공존하고 있는 남한 서부권역의 충청도와 전라도 일대를 연구 대상으로 선정하였다(Fig. 1).

2.2. 수치모델 자료

본 연구에서는 NCAM-LAMP (Land-Atmosphere Modeling Package) WRF 수치모델에서 제공하는 누적강우 자료와 토양수분 자료를 사용하였다. LAMP는 국가농림기상센터에서 시간에 따른 고해상도 다차원 모델링을 수행할 수 있는 지면-대기 모델링패키지로, WRF/Noah-MP 결합시스템과 오프라인 1차원 Noah-MP 지면모델로 구성되어 있다(Lee *et al.*, 2016). LAMP WRF는 810 m의 고해상도 중기예측 강우 자료를 산출물로 생산하고 있으며, 대기 변수, 식생 변수, 4계층으로 이루어진 토양 변수 등을 최장 12일까지 1시간 단위로 제공한다.

산림청에 따르면, 국내 산사태위험경보는 연속강우량이 200 mm 이상, 1일 강우량이 150 mm 이상, 1시간 강우량이 30 mm 이상일 때 발동된다. 따라서 본

Table 1. Data source and information of LAMP

Data format		NetCDF
Variable	RAINNC (Grid-scale rainfall), SMOIS(Grid-scale soil moisture) 1~4	
Resolution	810 m / Pixel	
Range	Row: 128 pixels, Column: 128 pixels, Total: 16,289 pixels	
Time	00:00 LST 05 Sep~23:00 LST 17 Sep in 2020 (12 days) 00:00 LST 20 Jun~23:00 LST 02 July in 2021 (12 days)	
Description	- It targets the period when cumulative precipitation equals or exceeds 150 mm. - Soil moisture consists of four layers: the SMOIS 1 is 10 cm, the SMOIS 2 is 30 cm, the SMOIS 3 is 1 m, and the SMOIS 4 is 2 m.	

연구에서는 증기예측 자료 중에서 산사태 위험경보에 이르는 두 가지 시점의 자료를 사용하였다(Table 1).

2.3. 공간보간 기법

공간보간 기법은 결정론적 공간보간 기법과 지구통계학적 공간보간 기법의 두 가지 주요 방법으로 분류할 수 있다(Kablouti et al., 2012). 결정론적 공간보간 기법은 기지점과 미지점 사이의 공간적인 유사성이나 평활도(degree of smoothing)에 의해 결정되는 방법들이며, IDW, Spline 방법 등이 있다. 지구통계학적 공간보간 기법은 확률론적 공간보간 기법이라고도 불리며, 기지점 사이의 공간 상관관계를 활용하여 단순히 거리를 매개체로 예측하지 않고, 기지점 사이에 공간 자기상관함수를 구현한다. 지구통계학적 공간보간 기법으로는 Kriging과 같은 방법이 있다.

본 연구에서는 결정론적 공간보간 기법인 IDW 방법을 사용하였다. IDW는 1970년 발표된 Tobler의 제1 법칙을 기반으로 1972년 미국 국립기상청(U.S. National Weather Service)에서 개발된 결정론적 공간보간 방법이다(Chen and Liu, 2012). IDW는 입력된 기지점들로부터 미지점까지의 거리에 대한 역함수가 가중치를 부여하여 값을 추정한다. 따라서 미지점의 값은 공간상으로 가까운 곳에 위치한 기지점 값과 유사하다는 특징을 가지고 있다. IDW는 다음과 같이 Eq. 1과 Eq. 2로 구성된다.

$$\hat{R}_p = \sum_{i=1}^N \omega_i R_i \tag{Eq. 1}$$

$$\omega_i = \frac{d_i^{-\alpha}}{\sum_{i=0}^N (d_i^{-\alpha})} \tag{Eq. 2}$$

Eq. 1에서 \hat{R}_p 는 미지점의 누적강우량, R_i 는 기지점의 누적강우량, N 은 공간보간에 사용된 기지점의 수, ω_i 는 두 지점 간의 거리에 따라 부여되는 가중치를 각각 의미한다. Eq. 2에서 d_i 는 각 기지점으로부터 미지점까지의 거리를 나타내며, α 는 IDW에서 일반적으로 사용되는 제어 변수, 즉 Power 이다. Power 변수는 Eq. 2에서 나타낸 것과 같이 값이 0일 경우 거리에 따른 감소가 없고, 값이 커질 경우 먼 거리의 미지점 값에 대한 가중치가 감소한다. 본 연구의 Power 값은 2로 설정하였으며, 계산에 사용될 기지점의 수를 나타내는 N 에 12를 적용하였다.

2.4. 자료 처리 방법

자료 처리의 흐름은 Fig. 2와 같다. 오픈 소스의 환경에서 공간보간을 수행하기 위해 R을 사용하였다. R에서 수행하는 작업은 원하는 알고리즘의 변수들을 가장 하위의 단계부터 조정할 수 있다는 장점이 있다. 또한, 여타 다른 프로그래밍 언어와 같이 일부 작업 과정에서 입력 변수만 변경되고 동일한 작업을 수행할 때, 간단한 코드의 수정으로 수행할 수 있다는 장점이 있다. 무엇보다 R은 오픈 소스 기반이기 때문에 누구나 방대한 커뮤니티에서의 정보와 다양한 패키지 지원을 받을 수 있다는 장점이 존재한다. 하지만 R은 기본적으로 프로그래밍 지식이 필요하기 때문에 사용해 본 경험이 없는 사용자들에게는 접근성이 낮다. 이로 인해 R은 상용 소프트웨어에 비해 상대적으로 많은 코딩 능력이 요구된다.

R 환경에서는 데이터의 전처리 과정을 통해 LAMP에서 추출된 NetCDF 포맷의 누적강우 데이터를 좌표계를 포함하고 있는 SpatialDataFrame 포맷으로 변환하였다. 이 과정에서는 R 3.6.3 버전에서 제공하는

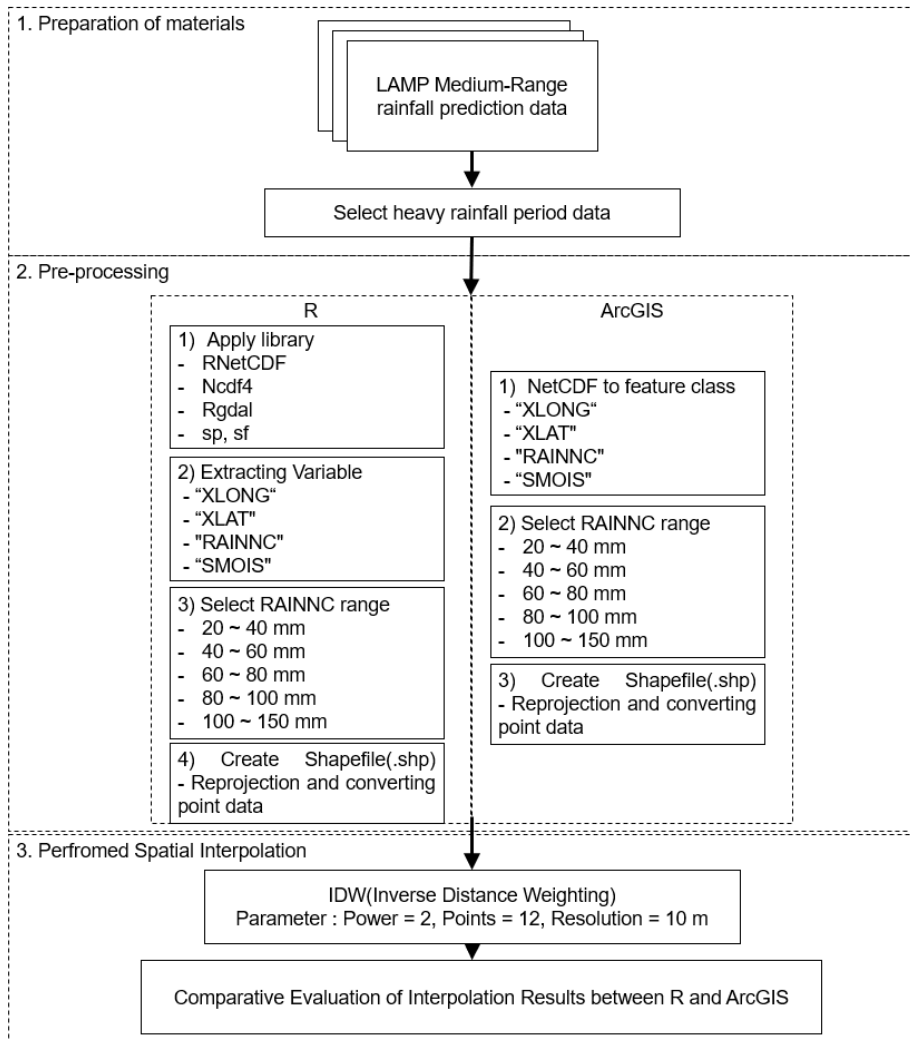


Fig. 2. Flowchart showing overall methodology for spatial interpolation in R and ArcGIS.

RNetCDF 패키지를 사용하여 속성 정보를 추출하고 rgdal 및 sf 패키지를 사용하여 포인트 형태의 데이터를 생성하였다. 이 때 데이터는 별도의 저장 과정 없이 직접 변수로 사용가능하다. 공간보간 과정에서는 gstat 패키지에서 제공되는 IDW 보간 알고리즘을 사용하였다. gstat 패키지를 통해 IDW를 구현하기 위해서는 종속 변수와 독립 변수를 정의해야 하며 formula 매개 변수를 통해 정의할 수 있다. 거리에 따른 가중치를 결정하는 Power는 idp라는 변수를 통해 지정할 수 있으며, 계산에 사용될 미지점의 수는 nmax를 통해 결정된다. 이때 maxdist 변수를 통해 미지점 검색 반경을 결정할 수 있으며, 검색 반경내에 속하는 미지점의 수

가 nmax보다 적을 경우 가용 가능한 최대치로 자동 설정된다. R 환경에서 수행할 경우의 가장 큰 이점은 각 단계마다 데이터를 출력하여 저장할 필요없이 최종 단계까지 수행할 수 있다는 점이다.

한편, 상용 소프트웨어의 환경에서 공간보간을 수행하기 위해서 ArcGIS를 사용하였다. 상용 소프트웨어인 ArcGIS를 이용하여 작업을 할 경우, 별도의 코딩 작업을 거치지 않더라도 ‘모델 빌더’ 기능을 활용하여 최초의 입력자료로부터 최종 결과물까지 하나의 일관된 작업 흐름을 유지할 수 있으며, 직관적으로 결과가 표출되어 원하는 작업이 성공적으로 수행되었는지를 확인할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 모델 빌더를

통해 원하는 결과를 얻기 위해서는 사용되는 개별 도구들의 쓰임새를 정확히 알고 선택 사양들의 세부적인 기능 차이를 잘 파악하고 있어야 하므로 사용자의 숙련도가 매우 중요하며, 기본적으로 제공되는 기능 이외에 사용자가 자체적으로 적용하고자 하는 변동 사항이 있다면 이를 바로 적용하기 어려운 측면이 있다.

ArcGIS 환경에서는 동일 작업의 반복 수행을 지원하는 모델 빌더를 기반으로 다양한 지오프로세싱 도구들을 사용하였다. ArcGIS에서는 NetCDF를 직접 읽고 쓰는 기능을 지원하지 않기 때문에 Shape 포맷의 데이터로 변환시키는 과정이 먼저 수행되어야 한다. 포맷 변경 과정은 지오프로세싱 도구 중 MakeNetCDFFeatureLayer 도구를 통해 이루어진다. 이후 좌표 체계 변환 및 IDW 보간은 모델 빌더에 데이터 관리 도구상자의 Project 도구와 공간분석 도구상자의 IDW 도구를 결합하여 일괄적으로 반복 수행하였다. IDW 도구 매개 변수로 미지점의 가중치를 정하는 Power와 사용되는 미지점을 결정하는 검색 반경이 존재한다. 검색 반경은 사용되는 미지점을 개수를 반경 범위 또는 개수로 결정할 수 있다. ArcGIS는 각 단계별로 직관적이며 간편하게 작업할 수 있다는 장점이 있지만, 매 단계마다 데이터를 출력하고 저장한 후 다시 데이터를 불러오는 방식을 사용해야 한다.

본 연구에서는 누적강우량이 특정한 값에 도달할 때마다 해당 시점의 토양수분의 값을 확인하기 위해 5가지 시나리오를 상정하였다. 누적강우가 20 mm에 도달했을 경우 시나리오 1, 40 mm는 시나리오 2, 60 mm는 시나리오 3, 80 mm는 시나리오 5, 150 mm 이상일 경우 시나리오 5로 상정하였다. 공간보간 결과물의 수평 해상도는 10m로 선정하였으며, 최종적으로 R과 ArcGIS에서 수행된 산출물 제작 소요시간과 결과값을 비교하였다. 산출물의 수평 해상도가 수치모델에 비해 높기 때문에 상당한 시간이 소요된다. 산출물 제작 소요시간은 NetCDF 포맷에서 Shapefile 포맷으로 바꾸는 과정을 포함한 전처리 과정과 공간 보간을 수행하는 과정으로 나누었으며, 작업 수행 시 편차가 발생할 수 있으므로 총 3회에 걸쳐서 동일한 작업을 수행하여 평균 소요 시간을 비교하였다.

III. 결과 및 고찰

LAMP 자료로부터 집중호우가 발생한 기간을 선정하기 위해 누적강우를 박스 플롯으로 표현하였다(Fig. 3). Fig. 3(a)는 2020년 9월 5일부터 9월 17일까지 생산된 LAMP 누적강우 자료를 박스플롯으로 나타낸 것이다. 2020년 9월 5일 5시부터 9월 7일 6시까지의 누

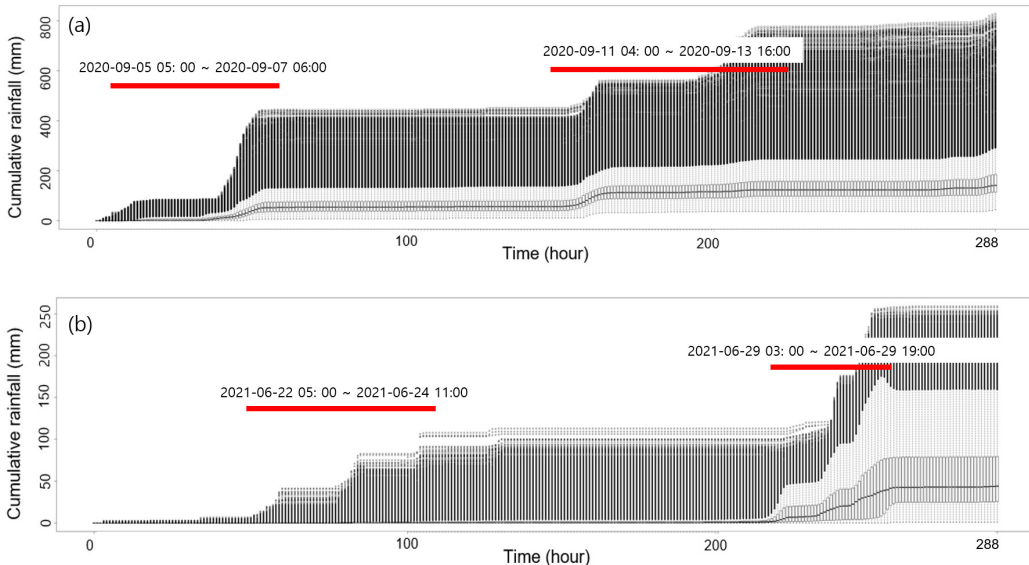


Fig. 3. Time series of cumulative rainfall during the study period. (a) 00:00 LST 05 Sep to 23:00 LST 17 Sep in 2020 cumulative rainfall box plot. (b) 00:00 LST 20 Jun to 23:00 LST 2 July in 2021 cumulative rainfall box plot. The red line refers to the period during which the rainfall occurred.

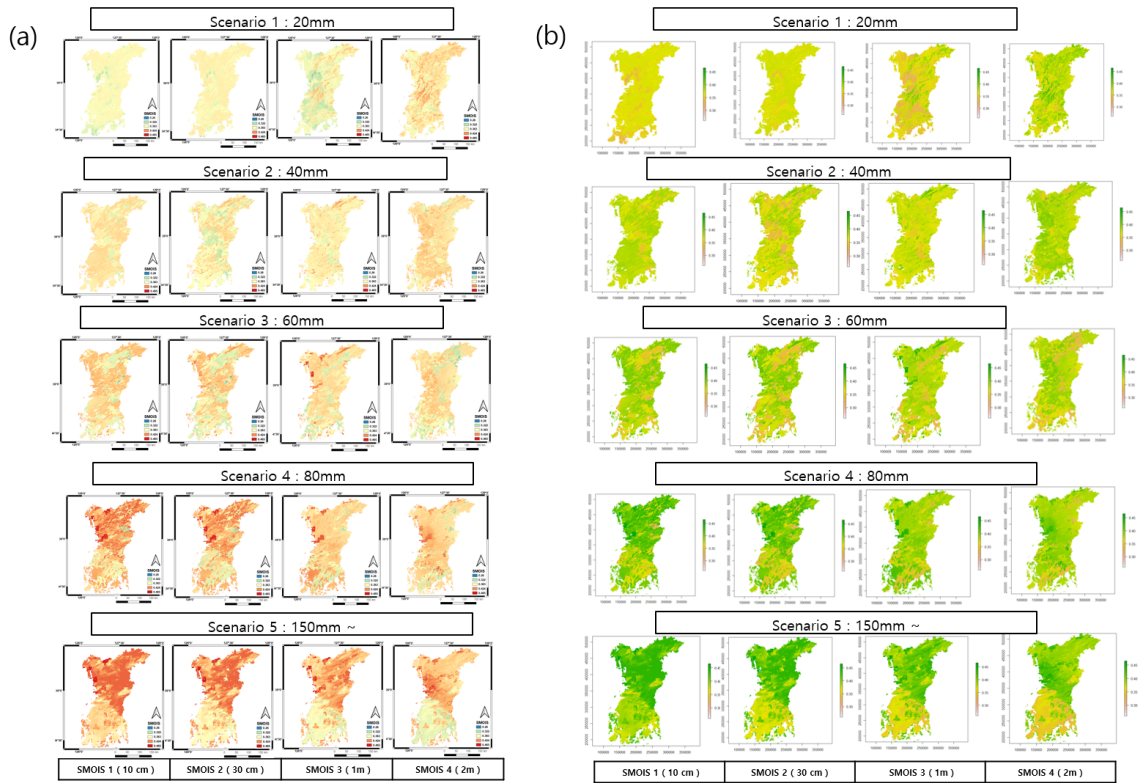


Fig. 4. IDW interpolation result for 4 soil moisture layers by cumulative rainfall scenario. (a) Interpolation results performed on ArcGIS (b) Interpolation results performed on R.

적강우가 약 400 mm에 도달한 지역이 나타난다. 또한, 2020년 9월 11일 4시부터 9월 13일 16시까지 약 200 mm 이상의 추가 누적강우가 발생한 지역이 존재한다. Fig. 3(b)는 2021년 6월 20일부터 7월 2일까지 생산된 LAMP 누적강우 자료를 박스플롯으로 나타낸 것이다. 2021년 6월 22일 5시부터 6월 24일 11시까지 약 100 mm의 누적강우가 발생한 지역이 나타난다. 또한, 2021년 6월 29일 3시부터 6월 29일 19시까지 100 ~ 200 mm 이상의 추가 누적강우가 발생한 지역도 존재한다. 누적강우가 증가하지 않은 나머지 기간은 강우

에 의한 토양수분의 영향이 발생하지 않을 것으로 판단되어 제외되었다.

토양수분 자료는 누적강우 박스플롯에서 확인된 강우 발생 기간만 추출하여 앞의 2.2절에서 언급된 것과 같은 누적강우 시나리오를 작성하고, 각 시나리오별로 4개층의 토양수분 자료를 구축하였다. Fig. 4는 누적강우 시나리오별 4개층 토양수분 자료에 대한 보간 결과를 나타낸 것이다. Fig. 4(a)는 ArcGIS에서 IDW 보간 방법을 사용하여 생성된 결과이다. 강우 시나리오가 높아짐에 따라 토양수분도 높아지는 경향을 보인다. 하지

Table 2. Turnaround time according to the processing environment

	R			ArcGIS		
	1st	2nd	3rd	1st	2nd	3rd
Pre-processing (.nc to .shp)	25 min	21 min	22 min	36 min	34 min	35 min
Spatial interpolation	4 h 42 min	4 h 37 min	4 h 38 min	4 h 7 min	4 h 2 min	4 h 6 min
Turnaround time	5 h 6 min	4 h 58 min	5 h	4 h 43 min	4 h 36 min	4 h 41 min
Average turnaround time		5 h 1 min			4 h 40 min	

만, 80mm 이상의 누적강우인 시나리오 4와 150mm 이상의 누적강우인 시나리오 5에서 전라도 지역이 다른 지역에 비해 낮은 토양수분을 보였다. Fig. 4(b)는 R에서 IDW 보간방법을 사용하여 생성된 결과이다.

공간보간 처리에 소요된 시간은 Table 2에 표현하였다. 전처리 단계에서는 R이 ArcGIS보다 약 10분가량 빠른 속도로 처리되는 것을 확인할 수 있었다. 하지

만 공간보간을 수행하는 과정은 ArcGIS가 R보다 빠른 속도로 처리되었다. 최종적으로 ArcGIS의 경우 평균 소요시간이 4시간 40분, R의 경우 평균 소요시간이 5시간 1분이 소요되어, ArcGIS가 약 21분(7.5%) 빠르게 처리되는 결과를 보였다.

Fig. 5는 R과 ArcGIS상에서 수행된 IDW 보간 결과 간의 차이를 확인하기 위해 이미지 매칭을 한 것이

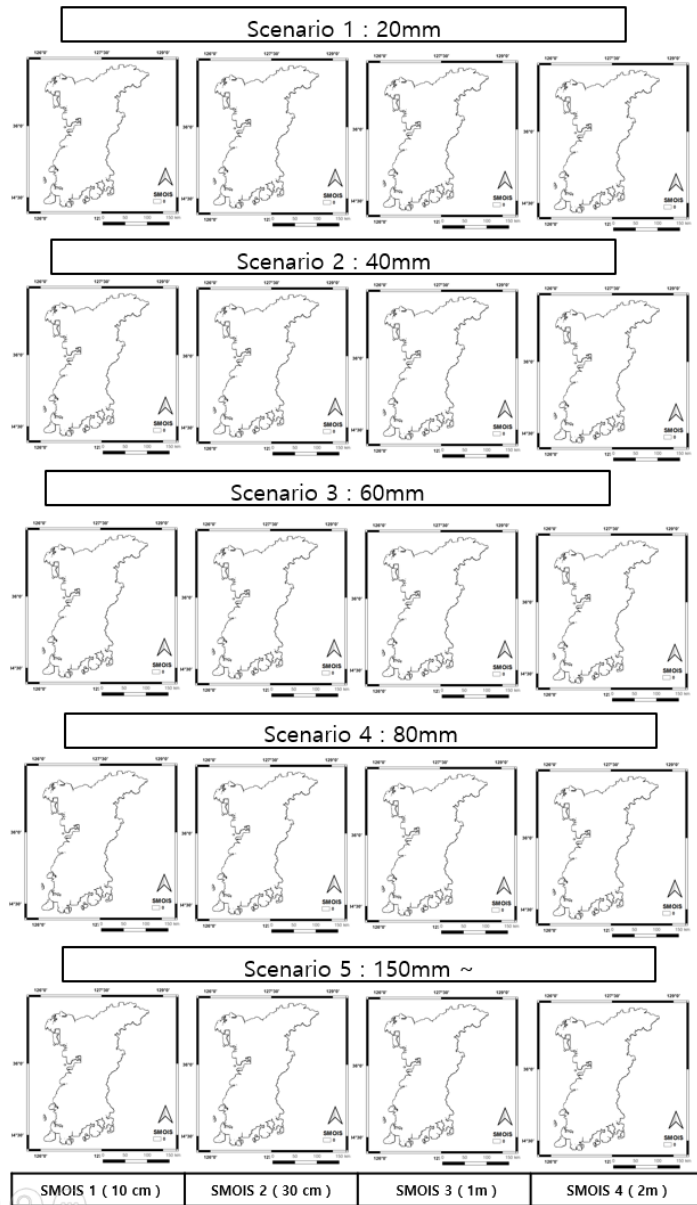


Fig. 5. Difference map between IDW interpolation results performed in R and ArcGIS

다. 이미지 매칭 결과, 전 구간에서 픽셀 값이 0으로 나타났으며, 이는 서로 다른 두 환경에서 처리한 보간 결과 간의 차이가 사실상 없다는 것을 확인시켜 주는 것이다.

IV. 결 론

본 연구에서는 서로 다른 공간보간 처리 환경에 따른 차이를 정성적 정량적으로 비교하기 위하여 상용 소프트웨어인 ArcGIS와 오픈 소스 기반인 R에서 수치 모델의 누적강우 시나리오별 토양수분 데이터를 IDW로 보간하여 비교 분석하였다. 두 가지 환경에서의 활용도를 비교하기 위해 보간 방법은 물론 누적강우 기간을 확인하고 자료를 추출하는 과정을 동일하게 하였다. 두 가지 환경에서 제작된 산출물을 이미지 매칭한 결과, 모든 구간에서 동일한 픽셀 값을 나타냄이 확인되었다. 그러나 계산 처리 속도에는 약 7.5%의 차이가 발생함을 보여주었다.

본 연구는 연구자가 오픈 소스기반의 R 환경에서도 상용 소프트웨어와 사실상 동일한 자료 처리 과정과 결과를 얻을 수 있으며, 이 때 사용자의 능력과 경험과 기호와 전산 환경 등에 따라 사용자 인터페이스와 처리 환경을 선택해야 함을, 시공간적으로 고해상도이면서도 비균질성이 매우 큰 수치모델 강우 및 토양수분 자료를 이용하여 실제 작업 예시로 보여준 데 의의가 있다.

상용 소프트웨어는 접근성이 용이하고 사용자에게 편리하며 효율적인 인터페이스를 즉시 제공하지만, 데이터 처리 도구 및 과정이 복잡하고 쓰임새를 파악해야 하며 비용이 크게 발생하는 단점이 존재한다. 반면에 오픈 소스 환경은 사용자 인터페이스가 간단하고 사용자에게 프로그래밍 지식과 스크립트 코딩과 같은 전문성과 숙련도를 요구하지만, 데이터 처리 과정을 사용자가 원하는 대로 조정할 수 있고 비용이 발생하지 않는 장점이 존재한다. 그러므로, 연구자들은 공간 보간 작업 이전에 이러한 요소들을 최소한 감안하여야 할 것이며, 자신에게 맞춤형 데이터 처리 작업을 선정하고 수행해야 할 것이다.

적 요

강우와 토양수분과 같은 자료는 지구통계자료로서, 필요로 하는 모든 지점의 값을 구하는 것이 중요하다.

이 과정에서는 일반적으로 공간보간이 수행되며, ArcGIS와 같은 상용 소프트웨어를 이용하는 경우가 많다. 하지만 상용 소프트웨어는 높은 전문성과 비용으로 인한 치명적 단점이 존재한다. 본 연구에서는 공간보간을 수행하는데 있어서 처리환경에 따른 차이점을 비교하기 위해 상용 소프트웨어인 ArcGIS와 오픈소스 기반 환경인 R을 활용하였다. 공간보간에 사용된 자료는 LAMP WRF에서 생산된 기상예측 자료를 기반으로 누적강우 시나리오에 따라 산출된 토양수분 자료를 사용하였다. 두 가지 환경에서 산출물의 결과값의 차이가 없었지만 사용자 인터페이스와 계산소요 시간 등에 차이가 있었다. 테스트 베드에서의 공간보간 작업 결과는 R의 경우 평균 소요시간이 5시간 1분으로 나타났고, ArcGIS의 경우 평균 소요시간이 4시간 40분으로 각각 나타나서, 7.5%의 차이를 보였다. 본 연구의 결과는 연구자가 상용 소프트웨어 환경과 오픈소스 기반 환경에서 동일한 결과를 도출할 수 있으며, 연구자의 환경과 수준에 따라 선택해야 함을 실례를 들어 제시한 데 의의가 있다.

감사의 글

본 연구는 산림청(한국임업진흥원) 산림과학기술 연구개발사업 (2021341B10-2223-CD01)의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Chen, F. W., and C. W. Liu, 2012: Estimation of the spatial rainfall distribution using inverse distance weighting (IDW) in the middle of Taiwan. *Paddy Water Environ* **10**, 209-222.
- Cho, H. L., and J. C. Jeong, 2006: Application of spatial interpolation to rainfall data. *The journal of geographic information system association of Korea* **14**(1), 29-41.
- George, Y., D. Lu., and W. Wong, 2008: An adaptive inverse-distance weighting spatial interpolation technique. *Computers & Geosciences* **34**(9), 1044-1055
- Friedrich, C., 2014: Comparison of ArcGIS and QGIS for application of sustainable planning. Master of Sciences. University of Wien: <https://doi.org/10.25365/thesis.35758>
- Jang, H. S., N. R. Kang, H. S. Noh, D. R. Lee, C. H. Choi, and H. S. Kim, 2015: Applicability of spatial interpolation methods for the estimation of

- rainfall field. *Journal of Wetlands Research* **17**(4), 370-379.
- Kang, J. H., S. Lee, S.-J. Lee, and J. H. Lee, 2022: Comparative analysis of spatial interpolation methods of PM₁₀ observation data in South Korea. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **24**(2), 124-132.
- Kablouti, M., L. Ouerdachi, and H. Boutaghane, 2012: Spatial interpolation of annual precipitation in Annaba-Algeria - Comparison and evaluation of methods. *Energy Procedia* **18**, 468-475.
- Kwak, J. H., M.-I. Kim, and S.-J. Lee, 2018: Landslide susceptibility assessment considering the saturation depth ratio by rainfall change. *The Journal of Engineering Geology* **28**(4), 687-699.
- Kim, J.-W., and H.-S. Shin, 2016: Slope stability assessment on a landslide risk area in Ulsan during rainfall. *Journal of the Korean Geotechnical Society* **32**(6), 27-40.
- Ko, S. M., S. W. Lee, C. Y. Yune, and G. H. Kim, 2014: Topographic analysis of landslides in Umyeonsan. *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography* **32**(1), 55-62.
- Lee, S.-J., J. Song, and Y. J. Kim, 2016: The NCAM Land-Atmosphere Modeling Package (LAMP) version 1: Implementation and evaluation. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **18**(4), 307-319.
- Lee, S., and M.-J. Lee, 2017: Susceptibility mapping of Umyeonsan using Logistic Regression (LR) model and post-validation through field investigation. *Korean Journal of Remote Sensing* **33**(6_2), 1047-1060.
- Matejicek, L., 2005: Spatial modeling of air pollution in urban areas with GIS: a case study on integrated database development. *Advances in Geosciences* **4**, 63-68.
- Ristanović, B., M. Cimbaljević, Đ. Miljković, M. Ostojić, and R. Fekete, 2019: GIS application for determining geographical factors on intensity of erosion in Serbian river Basins. Case study: The river Basin of Likodra. *Atmosphere* **10**(9), 526.
- So, Y. Y., S. J. Lee, S. W. Choi, and S.-J. Lee, 2020: Construction of NCAM-LAMP precipitation and soil moisture database to support landslide prediction. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **22**(3), 152-163.
- Vizcaino, P., and A. Pistocchi, 2014: Use of a simple GIS-based model in mapping the atmospheric concentration of γ -HCH in Europe. *Atmosphere* **5**(4), 720-736.