

## 남한지역 PM<sub>10</sub> 관측자료의 공간 보간법에 대한 비교 분석

강정혁<sup>1</sup>, 이서연<sup>1</sup>, 이승재<sup>1\*</sup>, 이재한<sup>2</sup>

<sup>1</sup>국가농림기상센터, <sup>2</sup>국립원예특작과학원

(2021년 11월 15일 접수; 2021년 12월 13일 수정; 2022년 6월 2일 수락)

## Comparative analysis of spatial interpolation methods of PM<sub>10</sub> observation data in South Korea

Jung-Hyuk Kang<sup>1</sup>, Seoyeon Lee<sup>1</sup>, Seung-Jae Lee<sup>1\*</sup>, Jae-Han Lee<sup>2</sup>

<sup>1</sup>National Center for AgroMeteorology, Seoul, Korea

<sup>2</sup>National Horticultural and Herbal Science, Wanju, Korea

(Received November 15, 2021; Revised December 13, 2021; Accepted June 2, 2022)

### ABSTRACT

This study was aimed to visualize the spatial distribution of PM<sub>10</sub> data measured at non-uniformly distributed observation sites in South Korea. Different spatial interpolation methods were applied to irregularly distributed PM<sub>10</sub> observation data from January, 2019, when the concentration was the highest and in July, 2019, when the concentration was the lowest. Four interpolation methods with different parameters were used: Inverse Distance Weighted (IDW), Ordinary Kriging (OK), radial base function, and scattered interpolation. Six cases were cross-validated and the normalized root-mean-square error for each case was compared. The results showed that IDW using smoothing-related factors was the most appropriate method, while the OK method was least appropriate. Our results are expected to help users select the proper spatial interpolation method for PM<sub>10</sub> data analysis with comparative reliability and effectiveness.

**Key words:** PM<sub>10</sub>, Spatial interpolation, Inverse distance weighted, Ordinary kriging, Radial base function, Scattered interpolation



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

## I. 서 론

우리나라의 미세먼지는 1차 발생원과 2차 발생원으로부터 발생하고, 국지적 발생과 외부 유입에 의한 기여가 있으며, 일변동성과 계절성을 보인다. 최근 미세먼지가 사람의 인체에도 유해한 영향을 준다는 연구가 꾸준히 증가하는 추세이다. Choi *et al.*(2020)은 직경 10 $\mu$ m 이하의 미세먼지(PM<sub>10</sub>)와 호기산화질소(FeNO) 농도 분포 값의 상관관계에 관한 연구를 통하여 PM<sub>10</sub> 농도가 높은 날에는 기도염증을 유발하는 FeNO 값 또한 높게 관측이 된다는 사실을 밝혀냈다. PM<sub>10</sub> 농도를 줄이는 방법에 관한 연구도 진행되었다. Park and Lee(2020)은 도시 안의 숲 지역에서 PM<sub>10</sub> 농도가 이외의 지역보다 더 낮게 나타나 도심의 숲을 적절히 조성하고 관리하면 고농도 PM<sub>10</sub>을 완화할 수 있다고 보고하였다.

PM<sub>10</sub> 농도의 시공간 분포를 정확히 아는 것은 매우 중요하다. 이 때, 다양한 보간 방법이 지구 온도, 강수량 분포, 디지털 고도 또는 물리적 양의 관측 또는 계산 값을 내외삽 하기 위해 사용된다. 미세먼지 데이터는 주로 관측소가 밀집되어 있는 장소를 기준으로 보간 처리를 하여 사용되고 있다. 그러나 관측소가 밀집되어 있지 않은 장소를 분석할 때는 적절한 보간 처리를 선정해야 한다. Tombette *et al.*(2009)은 최적 내삽법을 사용하여 유럽 전역의 PM<sub>10</sub> 자료동화 연구를 하였다. 사용된 자료가 측정된 지역에서만 보간 처리 결과의 집중도가 높아지는 경향이 있어서 그 외의 지역에 대한 결과가 안 좋아지고, 사용된 자료 간 차이도 작아서 결과 논의에 어려움이 있다. Cho and Jeong(2009)은 서울시 PM<sub>10</sub> 관측소 자료를 토대로 공간 보간을 적용한 연구를 하였다. 2000~2005년 자료를 가지고 공간 보간 기법 중 local trend surface model, IDW, Radial Basis Function (RBF), 그리고 Kriging 방법에 대한 정확도 조사를 진행하여 RBF가 가장 정확도가 높다고 밝혔다(Cho and Jeong, 2009). 2010~2011년도 PM<sub>10</sub> 자료에 Inverse Distance Weighted (IDW)를 적용하여, 겨울(여름)에 상대적으로 높은(낮은) 농도 분포를 보이는 것과 교통인구 밀집 지역과 대규모 공사장에서 PM<sub>10</sub> 농도가 높게 나타나는 것도 보고되었다(Jeong, 2014). 서울시에는 관측소가 밀집되어 있으므로, 밀집되지 않은 지역에 대해서는 정확도가 높다고 할 수 없다.

Wong *et al.*(2004)은 PM<sub>10</sub>과 O<sub>3</sub>와 같은 대기질 데

이터를 보간 처리하는 spatial averaging, nearest neighbor, IDW, Kriging 네 가지 가중평균법(weighted average methods)을 사용하여 각 방법에 대해서 비교하고 해석하는 연구를 진행하였다. Narushige and Shino(2011)은 네트워크에 알려지지 않은 값을 예측하기 위해, 네트워크 기반의 IDW와 Ordinary Kriging (OK) 방법을 사용하여, 교차검증을 진행하였다. 네트워크 기반의 OK가 좋은 결과를 보여줬으나, 큰 차이를 보여주지는 않았다. Lee *et al.*(2021)은 Cressman 분석 기법을 기반으로 한 GrADS 내장 내삽법을 사용하여 PM<sub>10</sub> 공간분석을 수행하였다.

앞서 진행된 공간 보간 처리 연구들은 IDW와 Kriging 두 방법이 주로 사용되었고 최소오차(Min Error), 최대오차(Max Error), 평균 제곱오차(RMSE, Root Mean Square Error)를 가지고 결과를 해석하였다. 본 연구에서는 공간 보간 처리 연구에 주로 사용된 두 방법을 채택하고 추가적으로 RBF, Scattered Interpolant (SI) 방법을 이용하여 PM<sub>10</sub> 자료의 공간 보간을 진행하고 Normalized Root Mean Square Error (NRMSE)를 통해 각 방법에 대해서 비교분석 한다. 기존의 연구들은 보통 자료가 밀집되어 있는 곳을 확인했으나, 본 연구에서는 자료가 밀집된 지역뿐만 아니라 자료가 밀집되어 있지 않은 곳도 포함하여 보간 처리를 진행하였다.

PM<sub>10</sub> 농도 분포를 전체적으로 관찰하기 위해서는 자료에 맞는 적절한 보간 처리가 필요하다. 모델 값과 관측 값의 오차를 구하는 경우와 같이 격자의 배열 및 크기가 동일해야 비교가 가능한 경우에도 보간 처리를 통하여 같은 크기의 자료로 맞춰 줄 수 있다. 따라서 모델이나 재분석자료와 남한 전역에서 자료에 관한 비교할 수 있도록 범위를 확장하여 남한의 내륙에서의 PM<sub>10</sub> 분포를 관찰하고 임의로 지정한 배열의 크기에 맞추어 보간 처리를 하고 각 방법에 대해 교차검증을 통해서 비교하고자 한다.

## II. 재료 및 방법

### 2.1. 관측자료

연구에 사용한 데이터는 AirKorea와 기상청에서 관측한 2018년 12월부터 2019년 11월까지의 시간별 자료를 사용하였다(KMA Weather Data Service/Open Data Portal, 2021; Korea Environment Corporation, 2021).

Fig. 1에 표시된 관측 지점의 자료로부터 월별 평균을 계산하여 각 보간 방법을 적용했고, 자료에 적합한 보간 방법을 찾기 위해 두 개의 월을 선택해서 비교하였다.

남한에서는 겨울철 1월에 바렌츠해의 해빙 손실에 의하여, 미세먼지 농도가 증가한다(Kim, 2019). 여름에는 강우 지속으로 인해 미세먼지 농도가 감소한다(Park *et al.*, 2020). 따라서 이러한 계절성을 바탕으로 미세먼지 편차가 큰 1월과 편차가 작은 7월 데이터의 월평균을 분석도구인 MATLAB의 입력 자료로 사용하였다. 앞 부분은 2018년 12월부터 2019년 11월 기간에서 월평균 분포를 관찰하고 결정을 하였다.

## 2.2. 공간 내삽법

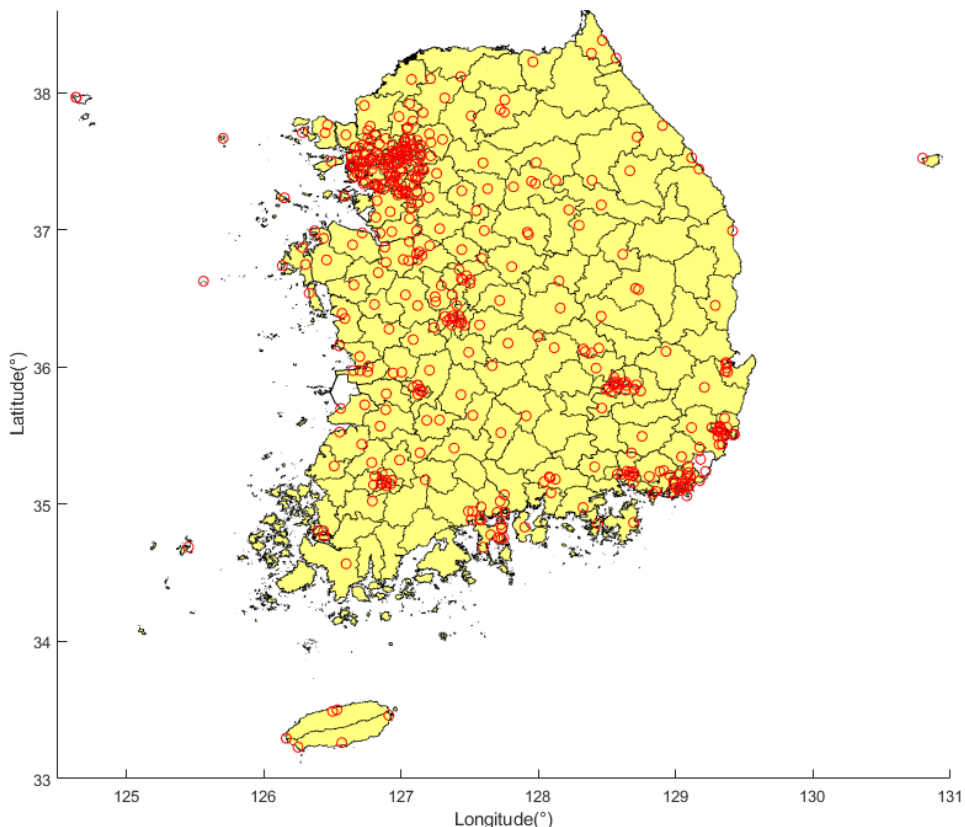
### 2.2.1. IDW

역거리가중법인 IDW는 가까운 지점 사이에는 영향이 크며, 멀어질수록 영향이 감소된다고 가정한다

(Cho and Jeong, 2009). 본 연구에 사용된 IDW는 사용되는 값을 지정할 수 있게 하는 radius와 그 값들의 영향력을 지정하는 p (power)를 이용자가 정해줘야 한다. 사용된 함수는 Tovar(2016)가 제작한 IDW를 사용했고, radius의 값은 0.5로 고정하고, p는 1, 1.5, 2 등 3가지 방법으로 검증을 진행하였다. 값들을 임의로 고정한 이유는 보간 처리를 하고 등고선으로 나타냈을 때, 시각적으로 표현이 가능한지 여부를 보고 지정하기 위함이다.

### 2.2.2. Kriging

크리깅(Kriging)은 모르는 지점의 값을 이미 알고 있는 주위 지점의 값들을 가중선형조합으로 추정하는 방법으로서, 가장 널리 사용되는 지리통계학적 방법 중 하나이다(Cho and Jeong, 2009). 여기서 공간적 상관성은 일반적으로 아래와 같이 베리오그램을 통해 크리깅에 반영된다(Park, 2011).



**Fig. 1.** The distribution of stations Korea where PM<sub>10</sub> is measured in South Korea (427 sites; shown in red open circles).

$$2\gamma(h) = E[(z(x) - z(x+h))^2] \quad (\text{Eq. 1})$$

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n [z(x_i) - z(x_i+h)]^2 \quad (\text{Eq. 2})$$

Eq. 1에서,  $\gamma(h)$ 는 경험 베리오그램으로서, 두 지점  $x$ 와  $x+h$ 의 값 차이를 제공한 기댓값  $E$ 이다. 자료의 개수가  $n$ 개이고, 어떤 관측 값을  $z(x_i)$ 라고 할 때,  $h$  만큼 떨어진 관측 값  $z(x_i+h)$ 를 이용하여 Eq. 2와 같이 계산된다. 본 연구에서는 기댓값이 일정하다고 가정하여 OK를 적용하였다. 코드는 Schwanghart (2010)가 만든 Kriging 함수가 사용되었는데, 이 함수는 사용한 자료에 맞춰서 베리오그램을 생성하고 range와 sill 등 적절한 Kriging 파라미터들을 지정한다. 사용된 이론 베리오그램 모델은 가우스형이 적용되었다. Schwanghart가 만든 MATLAB의 OK는 사용되는 자료를 입력하면, variogram 함수를 통해서 1차적으로 베리오그램을 생성하고, 그 뒤에 variogramfit 함수를 통하여 우리가 Kriging에 입력할 range, sill, nugget 등 파라미터들의 값을 적절히 자동으로 지정해 준다. 여기서 사용된 variogramfit 함수는 가우스형으로 만들어져 있다. OK를 사용한 실험은 200회 진행되었으며, 매 횟수 마다 베리오그램이 다시 생성되고 파라미터 값이 최적화되는 방식으로 진행되었다. 이후 Kriging 함수에 variogramfit의 결과와 자료의 좌표, 관측값, 표시할 전체적 테이블을 입력하여 시각화하였다.

### 2.2.3. RBF

방사형기저함수인 RBF는 추정값들로 이뤄진 표면의 곡률합이 최소가 되도록 미관측 지점의 값을 추정하는 방법이다. IDW와 비교했을 때, IDW는 관측값의 최대와 최소를 벗어나지 못하는 반면, RBF는 관측값의 최대와 최소를 벗어날 수 있다(Baram, 1984). Chirokov (2006)가 만든 함수를 사용했고, 지정 함수로 linear, cubic, gaussian 등 여러 가지로 표현이 가능하나, 본 연구에서는 linear가 사용되었다. 다른 방법으로 사용했을 때, 외곽 지역에 큰 오실레이션이 발생하므로 linear를 채택하였다. 사용된 MATLAB의 RBF 중 rbfcreeate 함수에서 노드 간의 근사적인 평균 거리를 지정하는 RBFconstant라는 변수가 존재하며, 0.1부터 3까지 7가지 경우를 실험한 결과(부록 A) 가장 신뢰도가 높은 RBFconstant가 1.5인 경우를 선택하였다. 그 뒤 rbfindterp 함수를 통하여 자료에 맞게 격자가 생성되고 추가적으로 reshape 처리를 통하여 원하는 격자 체계로

변경하였다.

### 2.2.4. SI

SI는 비확률적인 방법이며, Scattered Data Spatial Interpolation의 약어이다. Delaunay 삼각측량을 수행한 다음, 삼각형 내부의 위치를 찾아서, 원하는 그리드의 점으로 출력한다(Gan *et al.*, 2020). 본 연구는 Delaunay를 사용하지 않고 Voronoi Tessellation이 사용된 Natural method를 사용하였다. 기존의 삼각측량과 다른 점은 각각의 데이터 한 점을 포함하는 폴리곤을 생성하는 차이가 있다(Igbatowicz and Morency, 2017). 이 방법은 MATLAB에 내장되어 있는 함수이며, 여러 가지 SI 방법으로 처리한 결과를 비교했을 때, 가장 시각적으로 평활화 된 결과를 보여준 위 방법을 선택하였다.

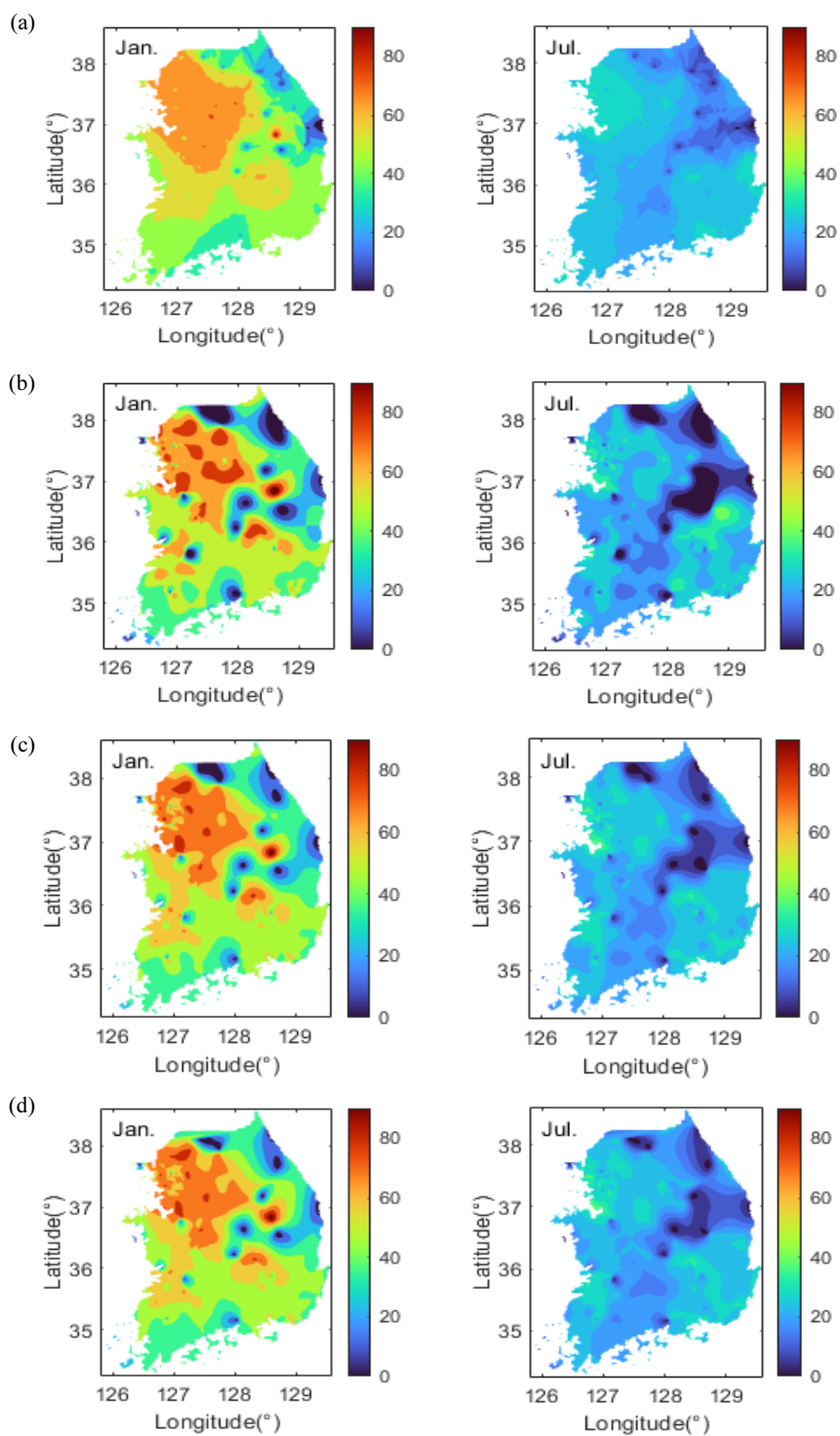
## III. 결과 및 토의

위의 4가지 방법은 모두 MATLAB을 통해 구현되었으며, 각 방법과 데이터를 사용해서 Fig. 2에 시각화하였다. IDW는  $p=1$ 로 등치선을 평활화시켜, 특정 지점에 값이 돋보이지 않게 적용하였다. Kriging의 경우 경험 베리오그램을 계산하고, 이론 베리오그램을 모델링해서 구하게 된 베리오그램을 반영시켰다(Jeong *et al.*, 2021). 나머지 두 방법은 매우 유사하게 표현이 되었고, SI 방법만 한반도 군사 분계선 주변의 값들이 잘 표현되지 않았다.

각 방법에 대해 hold out 교차 검증을 이용하고 train set과 test set의 비율을 9:1 그리고 7:3로 지정하였다. 매 반복 마다 집합을 결정하는 자료는 바뀌고, 최소오차, 최대오차, RMSE, 그리고 NRMSE를 Table 2, 3, 4, 5에 나타냈다. Table 2, 4는 1월 평균에 대한 결과이고 Table 3, 5는 7월 평균에 대한 결과이다. 본 연구에서 NRMSE는 다음과 같이 정의된다.

$$\text{NRMSE} (\%) = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i} \times 100 \quad (\text{Eq. 3})$$

여기서  $\hat{y}_i$ 는 예측값,  $y_i$ 는 측정값,  $n$ 은 자료의 개수이다. NRMSE는 RMSE를 측정값의 평균으로 나눈 뒤 100을 곱해서, %단위로 표시한 값이다(Gan *et al.*, 2020).



**Fig. 2.** Monthly average PM<sub>10</sub> distribution in January and July when (a) inverse distance weighted (IDW), (b) Ordinary Kriging (OK), (c) radial base function (RBF), and (d) scattered interpolation (SI) methods were used.

**Table 1.** Time taken to produce the monthly average PM<sub>10</sub> distributions in January and July in Fig. 2

	IDW	Kriging	RBF	SI
Time (sec)	1.896	6.322	0.226	0.633

**Table 2.** 7:3 cross-validation of the January average of PM<sub>10</sub>

Method	Iteration	Max Error	Min Error	RMSE	NRMSE
IDW (p=2)	100	83.13	0.11	17.73	31.17
IDW (p=1.5)	100	80.87	0.10	17.57	30.99
IDW (p=1)	100	78.74	0.13	16.69	29.41
OK	50	89.62	0.13	20.49	35.95
SI	100	77.71	0.13	17.91	31.52
RBF	100	77.16	0.10	18.07	31.75

**Table 3.** 7:3 cross-validation of the July average of PM<sub>10</sub>

Method	Iteration	Max Error	Min Error	RMSE	NRMSE
IDW (p=2)	100	30.87	0.07	8.00	30.71
IDW (p=1.5)	100	30.45	0.06	7.72	29.73
IDW (p=1)	100	30.11	0.06	7.56	29.11
OK	50	32.15	0.06	9.57	36.77
SI	100	31.65	0.08	8.67	33.50
RBF	100	31.28	0.07	8.56	33.06

**Table 4.** 9:1 cross-validation of the January average of PM<sub>10</sub>

Method	Iteration	Max Error	Min Error	RMSE	NRMSE
IDW (p=2)	100	62.89	0.27	17.32	30.76
IDW (p=1.5)	100	64.69	0.29	16.80	29.50
IDW (p=1)	100	60.69	0.45	15.66	27.78
OK	50	65.54	0.33	19.88	35.29
SI	100	64.13	0.34	17.68	31.46
RBF	100	61.68	0.31	17.52	31.16

**Table 5.** 9:1 cross-validation of the July average of PM<sub>10</sub>

Method	Iteration	Max Error	Min Error	RMSE	NRMSE
IDW (p=2)	100	26.69	0.20	7.89	30.59
IDW (p=1.5)	100	24.90	0.18	7.17	27.86
IDW (p=1)	100	25.17	0.15	7.41	28.89
OK	50	29.42	0.18	9.66	37.52
SI	100	26.47	0.19	8.31	32.12
RBF	100	26.28	0.16	8.49	32.86

Table 1은 사용된 자료 전체를 처리해서 1, 7월 PM<sub>10</sub> 평균 결과를 얻기까지 걸린 시간을 보여준다. 계산 처리는 동일한 컴퓨터 환경(CPU: i7-8700k, RAM: 32GB, OS: Windows10 64bit)에서 MATLAB을 통해서 진행되었다. OK가 가장 시간이 오래 소요되었고, RBF가 가장 적은 시간이 소요되었다. 기본적으로 각 방법의 교차검증 반복횟수를 100으로 잡고, OK의 경우 시간이 매우 오래 소요되었으므로 반복횟수를 50으로 지정하였다.

Table 2, 3, 4, 5에는 최소오차, 최대오차, RMSE, 그리고 NRMSE를 표기하였다. 전반적으로 1월과 7월 결과를 비교할 때, 미세먼지 편차가 적은 7월이 모든 오차가 더 적게 나타났다. 같은 월에 대한 보간 결과를 서로 비교했을 때, 전체적으로 오차가 비슷하지만 OK의 오차가 크게 나타났다.

NRMSE로 확인했을 때, 각 교차검증마다 보간 방법의 결과가 유사하게 나왔다. OK 방법이 가장 높게 나왔고, IDW에서 가장 낮게 나왔다. Mueller *et al.*(2004)는 보통 OK가 더 좋은 추정치를 보여준다고는 하나 예외의 경우가 존재한다고 보고하였다. Narushige and Shino(2011)도 OK가 더 좋은 결과를 보여주었으나, 큰 차이를 보여주지는 않았다고 하였다. 현재 관측소 지점에 대한 데이터로는 IDW를 사용하는 것이 가장 좋은 방법이고, OK를 사용하면 관측 공백 지점의 값을 추정할 때 오차가 가장 크게 나타났다.

기존의 미세먼지의 공간 보간 처리 연구는 관측소가 밀집되어 있는 지역에서 진행되었다. 본 연구는 관측소가 밀집되어 있지 않은 지점도 포함하고 밀집되어 있는 지역도 여러 지역을 포함시켰다. 각 방법의 신뢰도를 파악하기 위해서 결과를 NRMSE로 나타냈으며, 상황마다 각 방법에 대해서 유사하게 나타나 신뢰도를 파악할 수 있다. 이상의 연구 결과는 독자가 산개형 미세먼지 자료의 전체적 공간 분포를 추정할 때 적용할 방법 선택에 도움이 될 것이다. 향후 초미세먼지나 다른 기상변수의 관측자료에 대해서, 그리고 월평균이 아닌 시간 공간분포에 대해서도 각 보간법의 성능을 조사할 필요가 있다. 또한 이를 바탕으로 농림지와 도심지에서 관심변수의 공간분포 특성을 비교연구하는데 참고할 수 있을 것이다.

## 적 요

불균일한 미세먼지 관측값으로부터 남한 전체에 대

한 공간적 분포를 추정하기 위해서는 적절한 보간 처리가 필수이다. 본 연구에서는 2019년도에 미세먼지 농도가 높았던 1월달과 농도가 낮았던 7월달의 전국의 기상청 및 AirKorea 측정소 자료를 이용하여 IDW, OK, SI, RBF 총 4가지 보간법을 테스트하였다. 각 보간 방법별 세부 인자를 고려한 총 6가지 경우에 대해 보간 처리 및 교차 검증을 진행하였다. 자료 처리 속도는 SI, RBF, IDW, OK 순으로 빠르게 나타났다. 교차 검증의 결과, IDW가 상대적으로 제일 낮은 NRMSE 결과를 보였고 OK방법이 가장 큰 NRMSE를 보였다. 이러한 연구의 결과는 사용자가 남한 지역에서 불균일한 미세먼지 관측 자료를 사용하여 전체 수평 공간을 보간할 때 적합한 방법을 단기간에 선택하고 신뢰성과 효과성 있는 분석을 실시하는데 도움이 될 것으로 기대된다.

## 감사의 글

본 연구는 농촌진흥청 연구사업 ‘미세먼지에 의한 농 작물 생산피해 예측 및 평가기술 개발(세부과제번호: PJ014189032021)의 지원을 받아 이루어진 것입니다.

## REFERENCES

- Baram, Y., 1984: On two-dimensional data representation by radial base functions. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing* **32**, 163-164.
- Chirokov, A., 2006: available at: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/10056-scattered-data-interpolation-and-approximation-using-radial-base-functions> : MATLAB Central File Exchange
- Cho, H.-I., and J.-C. Jeong, 2009: The distribution analysis of PM<sub>10</sub> in Seoul using spatial interpolation methods. *Journal of Environmental Impact Assessment* **18**(1), 31-39.
- Choi, J., J.-K. Sim, J.-Y. Oh, Y.-S. Lee, G.-Y. Hur, S.-Y. Lee, J.-J. Shim, J.-Y. Moon, and K.-H. Min, 2020: Relationship between Particulate Matter (PM<sub>10</sub>) and airway inflammation measured with exhaled nitric oxide test in Seoul, Korea. *Canadian Respiratory Journal* **2020**, 1823405.
- Gan, C., W.-H. Cao, K.-Z. Liu, and M. Wu, 2020: Spatial estimation for 3D formation drillability field: A new modeling framework. *Journal of Natural Gas Science and Engineering* **84**, 103628.

- Igbatowicz, K., and F. Morency, 2017: Numerical study of ice particle shedding: Interpolation methods and 2D trajectories. In *63<sup>rd</sup> Aeronautics Conference: AERO 2017* proceedings, Toronto, ON, Canada.
- Jeong, J.-C., 2014: A spatial distribution analysis and time series change of PM<sub>10</sub> in Seoul city. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* **17**, 61-69.
- Jeong, Y., S. Cho, Y. Youn, S. Kim, G. Kim, J. Kang, D. Lee, E. Chung, and Y. Lee, 2021: Kriging of daily PM<sub>10</sub> concentration from the air Korea stations nationwide and the accuracy assessment. *Korean Journal of Remote Sensing* **37**(3), 379-394.
- Karim, S. A. A., A. Saaban, V. Skala, A. Ghaffar, K. S. Nisar, and D. Baleanu, 2020: Construction of New Cubic Bezier-Like Triangular Patches with Application in Scattered Data Interpolation. *Advances in Difference Equations* **2020**(1), 1-22.
- Kim, J.-H., M.-K. Kim, C.-H. Ho, R. J. Park, M. J. Kim, J. Lim, S.-J. Kim, and C.-K. Song, 2019: Possible link between Arctic Sea ice and January PM<sub>10</sub> concentrations in South Korea. *Atmosphere* **10**, 619.
- Korea Environment Corporation, 2021: Available at [https://www.airkorea.or.kr/web/last\\_amb\\_hour\\_data?pMENU\\_NO=123](https://www.airkorea.or.kr/web/last_amb_hour_data?pMENU_NO=123)
- Lee, S., S.-J. Lee, J.-H. Kang, and E.-S. Jang, 2021: Spatial and temporal variations in atmospheric ventilation index coupled with particulate matter concentration in South Korea. *Sustainability* **13**(16), 8954. <https://doi.org/10.3390/su13168954>
- Mueller, T. G., N. B. Pusuluri, K. K. Mathias, P. L. Cornelius, R. I. Barnhisel, and S. A. Shearer, 2004: Map quality for Ordinary Kriging and Inverse Distance Weighted interpolation. *Soil Science Society of America Journal* **68**, 2042-2047.
- Narushige, S., and S. Shino, 2011: Street-level spatial interpolation using network-based IDW and Ordinary Kriging. *Transactions in GIS* **15**(4), 457-477.
- Park, H., M. Byun, T. Kim, J.-J. Kim, J.-S. Ryu, M. Yang, and W. Choi, 2020: The washing effect of precipitation on PM<sub>10</sub> in the atmosphere and rainwater quality based on rainfall intensity. *Korean Journal of Remote Sensing* **36**(6\_3), 1669-1679.
- Park, J., and P. S.-H. Lee, 2020: Relationship between remotely sensed ambient PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> and urban forest in Seoul, South Korea. *Forests* **11**, 1060.
- Park, N.-W., 2011: Integration of categorical data using multivariate kriging for spatial interpolation of ground survey data. *Korea Spatial Information Society* **19**(4), 81-89.
- Schwanghart, W., 2010: available at: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/29025-ordinary-kriging>: MATLAB Central File Exchange
- Tombette, M., V. Mallet, and B. Sportisse, 2009: PM<sub>10</sub> Data assimilation over Europe with the optimal interpolation method. *Atmospheric Chemistry and Physics* **9**, 57-70.
- Tovar, A., 2016: available at: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/46350-inverse-distance-weight-function>: MATLAB Central File Exchange
- Weather Data, K. M. A., and M. E. T. Service Open, 2021: available at: <https://data.kma.go.kr/data/climate/selectDustRltmList.do?pgmNo=68>: Data Portal
- Wong, D. W., L. Yuan, and S. A. Perlin, 2004: Comparison of spatial interpolation methods for the estimation of air quality data. *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology* **14**, 404-415.



## 부록 A

**Table A1.** 7:3 cross-validation of the January average of PM<sub>10</sub> using RBF

RBFconstant	iteration	Max Error	Min Error	RMSE	NRMSE
0.1	100	79.51	0.11	18.35	32.38
0.5	100	77.13	0.13	17.84	31.45
1	100	76.40	0.13	17.98	31.48
1.5	100	77.16	0.10	18.07	31.75
2	100	76.22	0.14	18.14	31.92
2.5	100	77.96	0.12	18.28	32.21
3	100	76.77	0.14	17.98	31.56

**Table A2.** 7:3 cross-validation of the July average of PM<sub>10</sub> using RBF

RBFconstant	iteration	Max Error	Min Error	RMSE	NRMSE
0.1	100	30.32	0.06	8.46	32.51
0.5	100	31.06	0.05	8.63	33.30
1	100	31.06	0.07	8.60	33.10
1.5	100	31.28	0.07	8.56	33.06
2	100	31.25	0.05	8.65	33.34
2.5	100	30.95	0.06	8.61	33.15
3	100	31.04	0.07	8.65	33.32

**Table A3.** 9:1 cross-validation of the January average of PM<sub>10</sub> using RBF

RBFconstant	iteration	Max Error	Min Error	RMSE	NRMSE
0.1	100	62.44	0.38	18.00	31.78
0.5	100	63.20	0.38	17.99	31.65
1	100	64.59	0.40	17.78	31.50
1.5	100	61.68	0.31	17.52	31.16
2	100	62.43	0.40	17.35	30.72
2.5	100	66.04	0.35	18.48	32.73
3	100	63.39	0.46	17.52	31.12

**Table A4.** 9:1 cross-validation of the July average of PM<sub>10</sub> using RBF

RBFconstant	iteration	Max Error	Min Error	RMSE	NRMSE
0.1	100	26.52	0.19	8.50	32.79
0.5	100	26.43	0.19	8.24	31.93
1	100	26.12	0.20	8.49	33.04
1.5	100	26.28	0.16	8.49	32.86
2	100	27.77	0.20	8.86	34.51
2.5	100	27.26	0.18	8.50	32.41
3	100	27.40	0.19	8.52	32.97