Journal of RADIATION INDUSTRY
Vol. 19, No. 1, pp. 55-61, 2025
https://doi.org/10.23042/radin.2025.19.1.55

Original article

Kriging 보간법 기반 작업자 피폭방사선량 예측평가 알고리즘 개발

이대호[1] · 김주영[1] · 한창희[1] · 김광표[1,*]

[1]경희대학교 원자력공학과

Development of Worker Radiation Dose Prediction and Assessment Algorithm Based on Kriging Interpolation Method

Dae Ho Lee[1], Ju Young Kim[1], Chang Hee Han[1], and Kwang Pyo Kim[1,*]

[1]Department of Nuclear Engineering, Kyung Hee University, 1732 Deokyoungdae-ro, Giheung-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do 17104, Republic of Korea

ABSTRACT In the emergency situations at nuclear power plants, the radiation dose of emergency workers should be analyzed to optimize their radiation dose. However, there may be limitations in obtaining all the necessary information for dose assessment during an emergency. In such cases, spatial interpolation can be used to perform a dose assessment using relatively easy-to-obtain dose rate measurements. Kriging interpolation is a representative spatial interpolation method that is known to be relatively high accuracy. The purpose of this study is to develop the dose assessment algorithm based on Kriging interpolation method. For this purpose, the Kriging interpolation method was analyzed and the algorithm was developed based on it. The dose assessment results of the developed algorithm were then compared with those of the Microshield computer code for algorithm validation. The assessment procedure of the developed algorithm is divided into three steps: 1) experimental variogram evaluation, 2) theoretical variogram derivation, and 3) performing interpolation. In the experimental variogram evaluation step, the experimental variogram is evaluated using the distance between measurements and the value differences. The variogram is normalized by smoothing the distances between measurements. In the theoretical variogram derivation step, a Gaussian model is used to fit the experimental variogram. In the interpolation step, both the variogram values between measurements and those between unknown points and measurements are identified. Weight factors for unknown points are derived based on them, and a weighted average is performed. When deriving weight factors, the algorithm minimizes the bias of the predicted values. The error of dose assessment result of algorithm for Microshield was of 5.24%. The error was relatively high in area where the dose rate was close to zero. The results of this study can be utilized for dose assessment of emergency workers in nuclear power plants.

Key words: Nuclear power plants, Spatial interpolation method, Dose assessment, Emergency workers, Algorithm development

1. 서 론

원자력발전소 내에서 종사하는 작업자는 다양한 상황에서 방사선원에 노출되며 이로 인한 피폭이 발생할 수 있다. 특히 방사선 비상 시 투입되는 긴급작업자의 경우 상대적으로 높은 수준의 피폭을 받을 것으로 예상되며, 이에 따라 피폭방사선량 최적화가 요구된다[1]. 피폭방사선량 최적화를 위해서는 작업자 선량평가를 사전에 수행하고 이를 기반으로 최적화된 작업계획을 수립해야 한다. 하지만 원전 비상 시 선원정보 등 선량평가에 필요한 정보가 부재할 개연성이 있으며, 이를 모두 확보하는 것은 한계가 존재할 수 있다[2]. 이러한 경우 공간보간법을 활용하여 상대적으로 확보가 용이한 측정 방사선량률 정보를 기반으로 작업자에 대한 선량평가를 신속히 수행할 수 있다[3]. 공간보간법이란 공간 내 이미 알고 있는 지점의 값을 통해 데이터가 존재하

ISSN 1976-2402 http://www.ksri.kr/

Copyright© 2025 by Korean Society of Radiation Industry

*Corresponding author: Kwang Pyo Kim
Tel: +82-31-201-2560, Fax: +82-31-273-3592, E-mail: kpkim@khu.ac.kr

Received 22 January 2025 Revised 19 March 2025 Accepted 21 March 2025

지 않는 지점의 값을 보간, 예측하는 방법이다[4-6]. 공간보간법에는 IDW (Inverse Distance Weighting), RBF (Radial Baisis Function), Kriging 보간법 등 다양한 방법론들이 존재한다. 그 중 Kriging 보간법은 통계학적 모델을 활용해 데이터 간 공간적 상관관계를 분석하여 보간을 수행하는 대표적인 확률론적 보간법이다. 해당 보간법은 데이터 간 거리만을 고려하여 보간지점의 값을 계산하는 결정론적 방식의 보간법에 비해 비교적 높은 정확성을 가진다는 장점이 존재한다[7].

Kriging 보간법 기반 선량평가와 관련된 다양한 연구가 수행되어 왔다. West 등은 비상 시 긴급작업자의 선량평가를 위해, 이동형 로봇에 의한 측정값을 기반으로 Kriging 보간법을 활용하여 TRIGA Mark II 원자로 홀 내 선량지도를 도출하였다[8]. Khuwaileh 등은 방사선 감시기에 의한 측정값을 기반으로 Kriging 보간법을 활용하여 중성자 발생장치 실험실 내 공간선량률을 평가하였다[9]. Awokoya 등은 휴대용 계측기에 의한 측정값을 기반으로 Kriging 보간법을 활용하여 나이지리아 Oyo지역의 공간선량률을 평가하였다[10]. Idris 등은 휴대용 계측기에 의한 측정값을 기반으로 Kriging 보간법을 활용하여 말레이시아 Sarawak 지역의 공간선량률을 평가하였다[11]. Warnery 등은 프랑스 전역의 지상 공간선량률 데이터를 기반으로 Kriging 보간법을 활용하여 프랑스 전역의 선량지도를 도출하였다[12]. Yesilkanat 등은 터키 Artvin 지역 방사능 관측소의 측정값을 통해 Kriging 보간법을 활용하여 해당 지역의 공간선량률을 평가하였다[13]. Takahiro 등은 일본 후쿠시마현 방사능 관측소의 측정값을 기반으로 Kriging 보간법을 활용하여 해당 지역의 공간선량률을 평가하고 이를 실제 관측값과 비교하였다[14].

기존 연구에서는 Kriging 보간법을 활용해 선량평가를 수행하고 이를 실측값과 비교, 분석한 바 있다. Kriging 보간 수행 시 다양한 평가 모델, 인자들이 활용될 수 있으며, 활용하는 모델 및 인자에 따라 보간 결과가 상이하게 나타날 수 있다[15]. 그러나 비전문가의 경우 이를 모두 고려하여 신속하게 선량평가를 수행하는데 어려움이 존재할 수 있다. 따라서 긴급작업자에 대한 선량평가 시 신속성을 확보할 수 있는 Kriging 보간법 기반 선량평가 알고리즘의 개발이 필요하다. 그러나 현재 Kriging 보간법을 기반으로 한 선량평가 알고리즘의 개발에 관한 연구는 미미한 실정이다.

따라서 본 연구의 목적은 Kriging 보간법을 기반으로 한 작업자 피폭방사선량 예측평가 알고리즘을 개발하는 것이다. 이를 위해 Kriging 보간법에 대해 분석하였으며, 해당 방법론을 기반으로 작업자 피폭방사선량 예측평가 알고리즘을 개발하였다. 그리고 알고리즘 검증을 위해 알고리즘의 평가 결과와 Microshield 전산코드의 평가 결과를 비교, 분석하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. Kriging 보간법 기반 작업자 피폭방사선량 예측평가 알고리즘 개발

본 연구단계에서는 알고리즘 개발에 앞서 Kriging 보간법에 대해 분석하였다. Kriging 보간법은 측정값 간의 공간적인 상관관계 통계학적으로 분석하고, 이를 기반으로 측정값별 가중치를 도출하여 보간을 수행하는 방법론이다[16]. Kriging 보간법은 아래 식을 통해 미지지점의 값을 예측할 수 있다.

$$z(x_i) = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i z(x_i)$$

$z(x_0)$ = 미지지점의 값
λ_i = i 번째 측정값의 대한 가중치
$z(x_i)$ = i 번째 측정지점의 값
n = 측정값의 개수

보간 수행을 위해 측정값별 가중치를 도출해야 하며, 이는 공간 내 존재하는 두 임의 지점 간 상관관계를 나타내는 베리오그램을 통해 도출할 수 있다[17]. 베리오그램은 기존에 확보한 데이터, 즉 측정값을 활용해 도출한다. 먼저 측정값 간 거리와 값의 차이를 이용해 베리오그램을 평가한다. 그리고 평가한 베리오그램을 통계학적 모델에 대해 피팅하여 최종적으로 베리오그램을 도출한다. 마지막으로, 도출한 베리오그램을 통해 보간지점-측정값 간 상관관계를 식별하여 각 측정값에 대한 가중치를 도출할 수 있다.

2.2. Kriging 보간법 기반 작업자 피폭방사선량 예측평가 알고리즘 검증

2.2.1. 평가상황 설정

Fig. 1에 알고리즘 검증을 위한 가상의 평가상황을 나타내었다. 선원의 경우 500 MBq의 ^{60}Co과 1,000 MBq의 ^{137}Cs을 고려하였다. 차폐물질의 경우 납과 콘크리트를 고려하였다. 납으로 이루어진 두 개의 정육면체 방사성동위원소 보관함 내 점선원이 각각 보관되어 있으며, 두께가 20 cm인 콘크리트 차폐벽이 존재하는 작업공간을 가정하였다. 측정값의 경우 작업공간 내 랜덤한 지점에 대해 총 50개를 확보한 상황이라고 가정하였다. 측정값으로 실측값을 활용하는데 한계가 존재함에 따라, 본 연구에서는 측정지점에 대한 방사선량률을 Microshield 전산코드로 평가하고 이를 측정값으로 활용하였다.

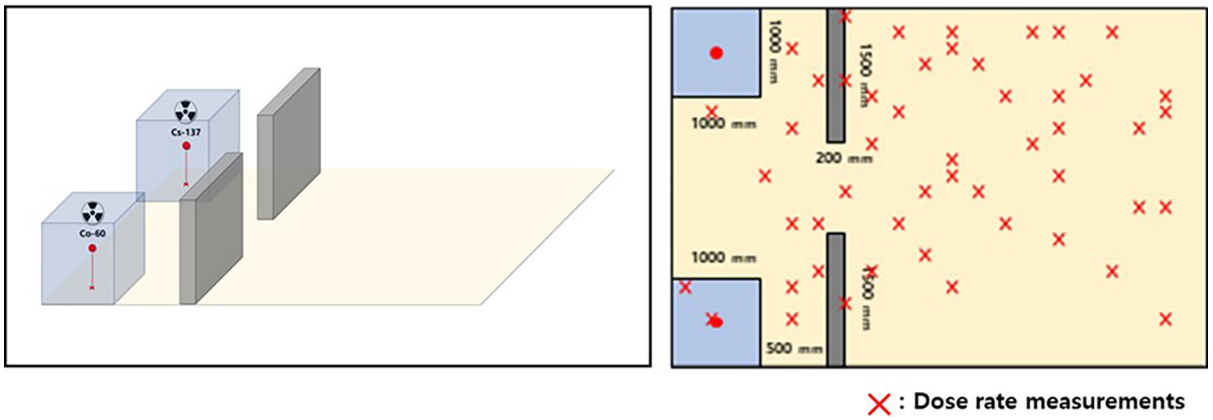

Fig. 1. Assessment scenario for algorithm validation.

2.2.2. 타 전산코드 기반 알고리즘 검증

알고리즘 검증을 위해 알고리즘의 평가 결과와 타 전산코드의 평가 결과를 비교하였다. 선량평가 시 작업공간을 일정한 크기의 격자로 분할 후 각 격자의 중심을 평가지점으로 활용하였다. 전산코드로는 외부피폭 선량평가 시 널리 활용되고 있는 대표적인 전산코드인 Microshield를 활용하였다. Microshield와 알고리즘의 평가 결과 비교 시, 작업공간 전체에 대한 오차 수준을 평가하기 위해 최소자승법을 기반으로 각 평가지점에 대한 오차율을 합산하여 작업공간 전체에 대한 오차율을 도출하였다[18]. 아래 식에 최소자승법을 활용한 오차율 도출 식을 나타내었다.

$$\overline{f} = \frac{\sqrt{f_1^2 + f_2^2 + \cdots f_N^2}}{\sqrt{N}}$$

$\overline{f}$ = 작업공간 전체에 대한 오차율(%)
f_i = i 번째 보간지점의 오차율(%)
N = 보간지점의 개수

3. 결과 및 고찰

3.1. Kriging 보간법 기반 작업자 피폭방사선량 예측평가 알고리즘 개발

Fig. 2에 개발 알고리즘의 평가 절차를 나타내었다. 본 연구단계에서는 Kriging 보간법 기반 작업자 피폭방사선량 예측평가 알고리즘을 개발하였다. 알고리즘의 평가 절차는 크게 1) 실험적 베리오그램 평가, 2) 이론적 베리오그램 도출, 3) 공간보간 수행 단계로 구분할 수 있다.

3.1.1. 실험적 베리오그램 평가

알고리즘의 첫 번째 단계는 실험적 베리오그램을 평가하는 단계이다. 실험적 베리오그램은 측정값 간 거리와 값의 차이를 이용해 평가하며, 측정값 간 거리 편차를 x축, 베리오그램 값을 y축으로 하는 그래프를 생성한다. 아래 식에 실험적 베리오그램 평가 수식을 나타내었다.

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

$r(h)$ = 거리 h에 대한 실험적 베리오그램 값
$z(x_i)$ = i번째 측정값
$z(x_i + h)$ = i번째 측정값으로부터 거리 h만큼 떨어진 측정값
h = 측정값 간 거리
n = 측정값의 개수

평가한 베리오그램의 경우 측정값 간 거리는 0에서부터 공간영역의 최대 길이까지 나타나며, 이에 따라 다양한 분포를 보이게 된다. 해당 분포는 확보한 측정값의 개수가 많을수록 더욱 복잡해지며, 피팅 수행 시 측정값 간의 공간적인 상관관계를 적절히 반영하지 못할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 측정값 간 거리를 완화시켜 실험적 베리오그램을 정규화하도록 알고리즘을 개발하였다. 측정값 간 거리가 h−Δh보다 크고, h+Δh보다 작은 거리에 해당하는 베리오그램 값은 같은 거리를 가진다고 가정하여 평균한다. 또한 전 구간 내에서 누락되는 베리오그램이 없도록 하기 위해 Δh를 h의 50%로 설정하였다[19]. Fig. 3에 실험적 베리오그램 정규화 전후의 모습을 나타내었다.

3.1.2. 이론적 베리오그램 도출

두 번째 단계는 이론적 베리오그램을 도출하는 단계이다. 실험적 베리오그램의 경우 거리에 따른 점 그래프 형태로 나타나며, 목표하는 미지지점에 따라 가중치를 구하지 못할 수 있다. 따라서 피팅 모델을 기반으로 실험적 베리오그램에 대해 피팅을 수행하여 측정값 간 상관관계를 연속적으로 나타내야 한다. 피팅 수행 시 Quadratic 모델, Spherical 모델, Gaussian 모델 등 다양한 통계학적 모델이 활용될 수 있다[20]. 본 연구에서

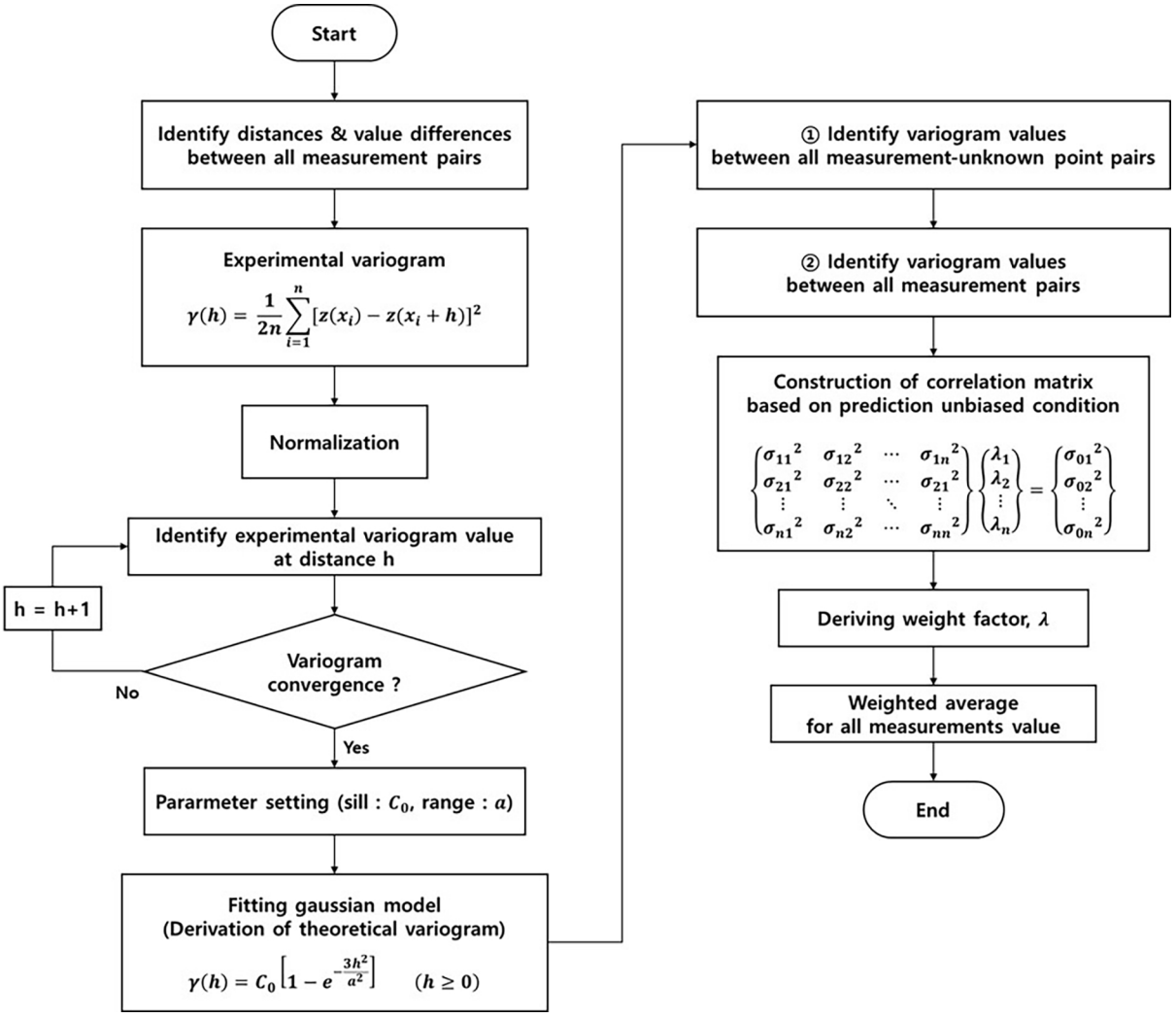

Fig. 2. Dose assessment procedure of developed algorithm.

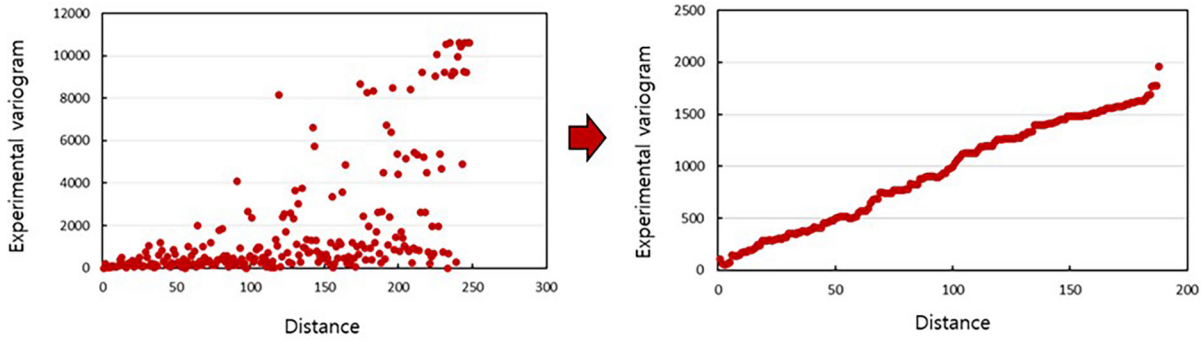

Fig. 3. Normalization of experimental variogram.

는 선량률의 경우 인근값 간 연속성이 강할 것으로 판단됨에 따라 Gaussian 모델을 선정하였다[21]. 아래 식에 Gaussian 모델을 통한 이론적 베리오그램 도출식을 나타내었다.

$$r(h) = C_0\left[1 - \exp\left(-\frac{3h^2}{a^2}\right)\right] \quad (h \geq 0)$$

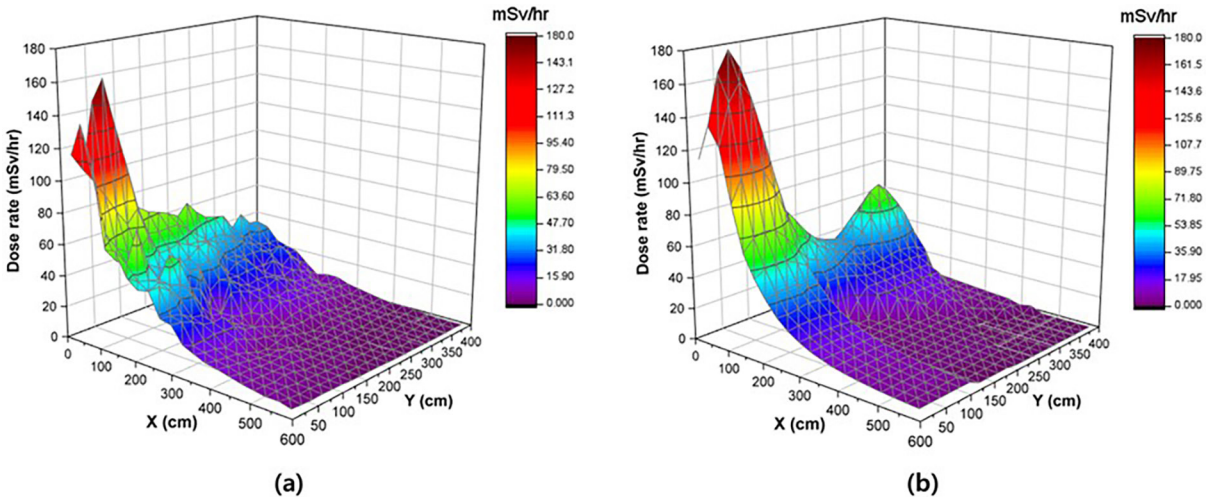

Fig. 4. Dose assessment results of each assessment tool. (a) developed algorithm (b) Microshield computer code

$r(h)$ = 거리 h에 대한 이론적 베리오그램 값
C_0 = 베리오그램의 문턱값
a = 베리오그램의 상관거리

피팅 수행을 위한 모델 내 문턱값과 상관거리 등 고려 인자를 설정하였다. 실험적 베리오그램은 측정값 간 거리가 일정 이상의 크기를 가질 경우 지점 간 공간적 상관관계가 약화되어 일정한 값으로 포화되는 경향을 나타낸다. 따라서 특정 거리 이상을 갖는 지점 간 상관관계는 없는 것으로 판단하여 보간 시 고려하지 않을 수 있다. 문턱값이란 베리오그램이 포화되는 위치의 베리오그램 값을 의미하며, 상관거리란 지점 간 상관관계를 보일 수 있는 최대 거리를 의미한다. 본 연구에서는 문턱값 설정 시 실험적 베리오그램에서 인접한 두 지점 간 기울기를 모두 식별하고, 0.01 이하의 기울기가 연속 두 번 나온 경우 이를 문턱값으로 설정하였다. 상관거리의 경우 해당 지점의 x축(거리) 값으로 활용하였다[22].

3.1.3. 공간보간 수행

세 번째 단계는 이론적 베리오그램을 기반으로 측정값별 가중치를 도출하여 보간을 수행하는 단계이다. 앞서 도출한 이론적 베리오그램은 측정값을 통해 공간상 존재하는 데이터 간 상관관계를 나타내며, 거리에 따른 함수로서 도출된다. 미지지점과 측정값의 상관관계 정도는 거리에 따라 상이하게 나타나며, 이에 따라 측정값에 대한 가중치는 미지지점과 측정값 간 거리에 해당하는 베리오그램의 값을 통해 도출할 수 있다. 상관거리 내에 위치한 측정값에 해당되는 각각의 베리오그램을 분율로써 가중하여 합산한 후 그 평균값으로 미지지점의 값을 예측할 수 있다. 아래 식에 가중치를 도출하기 위한 식을 나타내었다. 이때 예측값의 편향정도를 최소화하기 위해, 본 연구에서는 가중치의 총합이 1이 되는 조건을 만족하도록 알고리즘을 설계하였다.

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11}^2 & \cdots & \sigma_{1n}^2 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \sigma_{n1}^2 & \cdots & \sigma_{nn}^2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \vdots \\ \lambda_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_{01}^2 \\ \vdots \\ \sigma_{0n}^2 \end{bmatrix}$$

$$1 = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i$$

λ_i = i번째 측정값의 대한 가중치
σ_{ij} = i번째 측정값과 j번째 측정값 간 거리에 해당하는 베리오그램 값
σ_{0i} = 미지지점과 i번째 측정값 간 거리에 해당하는 베리오그램 값

3.2. Kriging 보간법 기반 작업자 피폭방사선량 예측평가 알고리즘 검증

Fig. 4에 개발 알고리즘과 Microshield 전산코드의 선량평가 결과를 나타내었다. 설정한 평가상황에 대해 개발 알고리즘과 Microshield 전산코드를 기반으로 선량평가를 수행하고, 그 결과를 비교 분석하였다. 평가 결과, 개발 알고리즘과 Microshield의 공간선량률은 유사한 경향성을 나타내었다. 개발 알고리즘은 0.20~158.74 mSv hr^{-1}의 수준인 것으로 나타났으며 Microshield는 0.22~179.47 mSv hr^{-1}의 수준인 것으로 나타났다. 작업공간 전체에 대한 오차율은 5.24%인 것으로 나타났다. 이러한 결과는 선량평가에 필요한 인자가 부재한 상황 속에서 측정값만으로 수행한 평가 결과임을 감안하면, 개발 알고리즘이 다소 낮은 오차율을 나타낸 것으로 판단된다.

Fig. 5에 Microshield에 대한 알고리즘 평가 결과의 오차율 분포를 나타내었다. 주로 차폐벽 뒤쪽 영역 내 선원과 거리가 충분

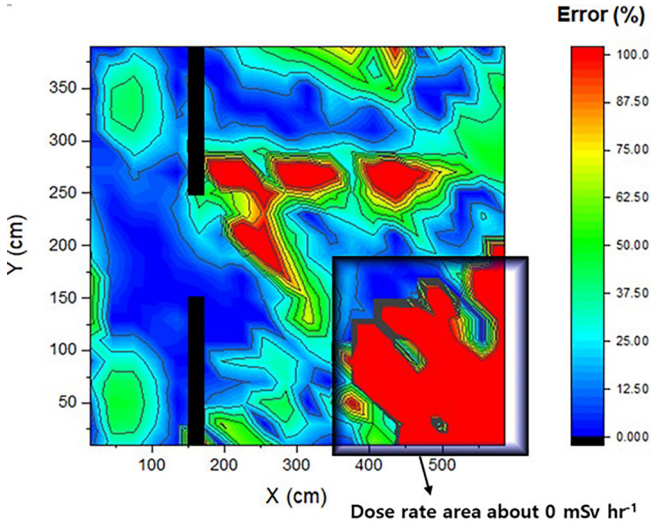

Fig. 5. Error distribution of dose assessment results of algorithm for Microshield computer code.

히 멀어 선량률이 0에 가까운 구역에서 75% 이상의 비교적 높은 오차율을 나타내었다. 개발 알고리즘의 경우 보간 수행 시 예측값의 편향정도를 최소화하는 조건을 가짐에 따라, 큰 값은 과소평가되고 작은 값은 과대 평가되는 경향을 나타낼 수 있다. 그리고 방사선량률 자체가 매우 낮을 경우 방사선량률의 작은 차이가 상대 오차에 큰 영향을 미칠 수 있다. 따라서 선량률이 0에 가까운 구역에서 비교적 높은 오차율을 나타낸 것으로 판단된다. 하지만 이러한 위치에서 작업자의 피폭방사선량은 주요한 영향을 미치지 못할 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 Kriging 보간법 기반 작업자 피폭방사선량 예측평가 알고리즘을 개발하였다. 이를 위해 Kriging 보간법에 대해 분석하고, 해당 방법론을 기반으로 알고리즘을 개발하였다. 그리고 알고리즘 검증을 위해 타 전산코드의 평가 결과와 알고리즘의 평가 결과를 비교하였다.

개발 알고리즘의 선량평가 절차는 크게 1) 실험적 베리오그램 평가, 2) 이론적 베리오그램 도출, 3) 공간보간 수행 단계로 구분된다. 실험적 베리오그램 평가 단계에서는 측정값 간 거리와 값의 차이를 이용해 베리오그램을 평가하며, 측정값 간 거리를 완화시켜 베리오그램을 정규화시킨다. 이론적 베리오그램 도출 단계에서는 Gaussian 모델을 기반으로 실험적 베리오그램에 대해 피팅을 수행하여 연속적인 그래프의 베리오그램을 생성한다. 공간보간 수행단계에서는 앞서 도출한 이론적 베리오그램을 기반으로 1) 미지지점-측정값, 그리고 2) 측정값 간 거리에 따른 베리오그램 값을 모두 식별한다. 그리고 측정값별 가중치를 도출, 가중평균을 수행한다. 가중치 도출 시에는 예측값의 편향정도가 최소화되는 조건을 만족하도록 가중치를 도출한다. 가상의 평가상황에 대해 알고리즘 검증을 수행하였다. 검증 결과, Microshield에 대한 알고리즘의 평가 결과 오차율은 5.24%인 것으로 나타났다. 선량률이 0에 가까운 구역에서 비교적 높은 오차율을 나타냈으며, 이는 개발 알고리즘의 경우 예측값의 편향정도를 최소화하도록 가중치를 도출했기 때문인 것으로 판단된다.

원자력발전소 비상 시에는 선량평가에 필요한 정보가 부재할 수 있으며, 이를 모두 확보하기에 시간적, 경제적으로 한계가 존재할 수 있다. 따라서 상대적으로 확보가 용이한 측정값을 기반으로 작업자의 피폭방사선량을 신속하게 예측할 수 있는 알고리즘을 활용하여 자원을 절약할 수 있을 것으로 예상된다. 본 연구 결과는 향후 원자력발전소 비상 시 긴급작업자 피폭방사선량 최적화를 위한 선량평가 시 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행한 가동원전 안전성 향상 핵심기술개발사업의 연구결과입니다(No. RS-2022-00143994).

참고문헌

1. ICRP. 2009. Application of the Conmmision`s Recommendations for the Protection of People in Emergency Exposure Situations. ICRP publication 109. Ann. ICRP 39(1).
2. Wang Zhenyu, Wang Zungang, Sun J, Li Z, Xi S, Wei X, Huang W and Zhou C. 2024. Surrogate Model of Solved Poisson Kriging Method for Radiation Field Reconstruction. *Nucl. Eng. Technol.* **211**(2):1-12. https://doi.org/10.1080/00295450.2024.2325751.
3. Bleher M, Gering F, Stohlker U, Karhumen T, Nalbandyan-Schwarz A, Woda C and Mafodda A. 2020. Reduction of uncertainties in exposure assessment based on environmental monitoring data. *Radioprotection.* **55**(HS1):S81-S88. https://doi.org/10.1051/radiopro/2020016.
4. Li J and Heap AD. 2014. Spatial Interpolation Methods Applied in the Environmental Sciences: A Review. *Environ. Modell. Softw.* **53**:173-189. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.12.008.
5. Comber A and Zeng W. 2019. Spatial Interpolation Using Areal Features: A Review of Methods and Opportunites using new forms of data with coded illustrations. *Geogr. Compass.* **13**(10):1-23. https://doi.org/10.1111/gec3.12465.
6. Johnston K, Jay M. Hoef V, Krivoruchko K and Lucas N. 2003. ArcGIS: Using ArcGIS Geostatistical Analyst. 281pp. ESRI press, New York.
7. Al-Shboul KF, Alali AE, Al-Shurafat AW, Arrasheed AA and Al-Shboul SA. 2018. Spatial evaluation of radionuclide concentrations and the associated radiation hazards using the Kriging method. *J. Radioanal. Nucl. Chem.* **317**(3):1285-1297. https://doi.org/10.1007/s10967-018-6015-x.
8. West A, Tsitsimpelis I, Licata M, Jazbec A, Snoj L, Joyce MJ and Lennox B. 2021. Use of Gaussian process regression for radiation mapping of a nuclear reactor with a mobile robot. *Sci Rep* **11**(1):1-

11. https://doi.org/10.1038/s41598-021-93474-4.
9. Khuwaileh BA and Metwally WA. 2020. Gaussian Process Approach for Dose Mapping in Radiation Fields. *Nucl. Eng. Technol.* **52**(8):1807-1816. https://doi.org/10.1016/j.net.2020.01.013.
10. Awokoya SO, Ayanlola PS, Olatunji A, Ojeniyi FA, Agbelusi OI, Orodiran OT and Isola GA. 2024. Application of Geostatistical Kriging Model in Assessing Exposure to Background Ionizing Radiation and its Radiological Hazard Indices. *Malaysian Journal of Science and Advanced Technology* **4**(4):464-471. https://doi.org/10.56532/mjsat.v4i4.381.
11. Idris HN, Sanusi MSM, Ramli AT, Hassan W, Solleh MRM, Yahaza F, Ya'cob MZ and Siong WB. 2024. Dose rate predictive model of terrestrial gamma radiation based on Superficial-weathered soil and rocks: case study in Sarawak, Malaysia. *Nuclear Science Journal of Malaysia* **36**(1):62-80.
12. Warnery E, Ielsch G, Lajaunie C, Cale E, Wackernagel H and Debayle C. 2015. Indoor terrestrial gamma dose rate mapping in France: a case study using two different geostatistical models. *J. Environ. Radioact.* **139**:140-148. http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvrad.2014.10.002.
13. Yesilkanat CM, Kobya Y, Taskin H and Cevik U. 2015. Dose Rate Estimates and Spatial Interpolation Maps of Outdoor Gamma Dose Rate with Geostatistical Methods; A case study from Artvin, Turkey. *J. Environ. Radioact.* **150**:132-144. https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2015.08.011.
14. Takahiro O, Kunihiko T, Ayano T and Mari A. 2019. Comparison of Spatial Interpolation Methods based on Exposure Assessments of Air Pollutants: A Case Study on Nuclear Substances in Fukushima. *12th International Joint Conference on Biomedical Engineering Systems and Technologies* **5**:415-421. https://doi.org/10.5220/0007523604150421.
15. Oliver MA and Webster R. 2015. Basic Steps in Geostatistics: The Variogram and Kriging. 30-42pp. Springer, New York.
16. Zhang B, Cao J, Lin S, Li X, Zhang Y, Zheng X, Chen W and Song Y. 2023. Optimized inverse distance weighted interpolation algorithm for γ radiation field construction. *Nucl. Eng. Thechnol.* **56**(1):160-166. https://doi.org/10.1016/j.net.2023.09.020.
17. Idris HN, Sanusi MSM, Ramli AT, Solleh MRM, Yahaza F, Ya'cob MZ and Siong WB. 2024. Isodose mapping of terrestrial gamma radiation in Sarawak-Borneo: Insights from surface-weathered soil analysis. *Appl. Radiat. Isot.* **209**:111327. https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2024.111327.
18. Yesilkanat CM, Kobya Y, Taskin H and Cevik U. 2017. Spatial Interpolation and Radiological mapping of Ambient Gamma Dose Rate by Using Neural Networks and Fuzzy Logic Methods. *J. Environ. Radioact.* **175-176**:78-93. https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2017.04.015.
19. Woo KS, Park JH and Lee HJ. 2008. Sensitivity Analysis of Ordinary Kriging Interpolation According to Different Variogram Models. *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea.* **21**(3):295-304.
20. Diggle PJ and Ribeiro Jr PJ. 2006. Model-based Geostatistics. 107-112pp. Springer, New York.
21. Kim SJ. 2023. A Study on the Prediction of Wind Power Generation Using Kriging Interpolation Method [master's thesis]. 9pp. Department of Mechanical Engineering. Jeju National University, Jeju-si, Republic of Korea.
22. Kim JW. 2024. Development of NPP worker radiation dose prediction and assessment program based on spatial interpolation method [master's thesis]. Department of Nuclear Engineering. Kyunghee University, Yongin-si, Republic of Korea.