JOURNAL OF RADIATION INDUSTRY

Original article

17(3) : 275-282 (2023)
https://doi.org/10.23042/radin.2023.17.3.275

Point-kernel 방법론 기반 임의 형태 방사선원에 대한 외부피폭 방사선량 평가 알고리즘 개발

김주영[1], 김민성[1], 김지우[1], 김광표[1,*]

[1]경희대학교 원자력공학과

Development of Radiation Dose Assessment Algorithm for Arbitrary Geometry Radiation Source Based on Point-kernel Method

Ju Young Kim[1], Min Seong Kim[1], Ji Woo Kim[1] and Kwang Pyo Kim[1,*]

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

Abstract Workers in nuclear power plants are likely to be exposed to radiation from various geometrical sources. In order to evaluate the exposure level, the point-kernel method can be utilized. In order to perform a dose assessment based on this method, the radiation source should be divided into point sources, and the number of divisions should be set by the evaluator. However, for the general public, there may be difficulties in selecting the appropriate number of divisions and performing an evaluation. Therefore, the purpose of this study is to develop an algorithm for dose assessment for arbitrary shaped sources based on the point-kernel method. For this purpose, the point-kernel method was analyzed and the main factors for the dose assessment were selected. Subsequently, based on the analyzed methodology, a dose assessment algorithm for arbitrary shaped sources was developed. Lastly, the developed algorithm was verified using Microshield. The dose assessment procedure of the developed algorithm consisted of 1) boundary space setting step, 2) source grid division step, 3) the set of point sources generation step, and 4) dose assessment step. In the boundary space setting step, the boundaries of the space occupied by the sources are set. In the grid division step, the boundary space is divided into several grids. In the set of point sources generation step, the coordinates of the point sources are set by considering the proportion of sources occupying each grid. Finally, in the dose assessment step, the results of the dose assessments for each point source are summed up to derive the dose rate. In order to verify the developed algorithm, the exposure scenario was established based on the standard exposure scenario presented by the American National Standards Institute. The results of the evaluation with the developed algorithm and Microshield were compare. The results of the evaluation with the developed algorithm showed a range of 1.99×10^{-1}~9.74×10^{-1} μSv hr^{-1}, depending on the distance and the error between the results of the developed algorithm and Microshield was about 0.48~6.93%. The error was attributed to the difference in the number of point sources and point source distribution between the developed algorithm and the Microshield. The results of this study can be utilized for external exposure radiation dose assessments based on the point-kernel method.

Key words: Point-kernel method, Arbitrary geometry radiation source, Dose assessment, External exposure

http://www.ksri.kr/

Copyright © 2023 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 7 September 2023 **Revised** 15 September 2023 **Accepted** 20 September 2023

1. 서 론

원자력발전소 내 작업종사자의 경우 여러 작업 상황에서 다양한 형태의 방사선원에 의한 외부피폭이 발생할 수 있으며 이에 대한 피폭 수준을 파악해야 한다[1]. 작업자가 피폭하는 방사선량은 선원 형태, 작업 환경 내 구조물, 작업 동선 등 여러 요인에 따라 상이하게 나타날 수 있으며, 평가 환경이 복잡할수록 평가 시 상당한 시간이 소요될 수 있다[2]. 따라서 신속하고 정확하게 작업자 방사선량을 평가하기 위해 적절한 평가 방법론을 선정하여 평가를 수행해야 한다. 다양한 형태의 방사선원에 대한 선량평가를 수행할 수 있는 대표적인 방법론으로 Point-kernel 방법론과 Monte Carlo 방법론이 있다[3]. Point-kernel 방법론은 결정론적 방법론으로 선원을 점선원 집합(point kernels)으로 분할하여 방사선량을 근사적으로 계산할 수 있다[4]. Monte Carlo 방법론은 확률론적 방법론으로 높은 정확성을 가지고 있으나 Point-kernel 방법론에 비해 다소 긴 계산시간이 소요된다[5]. 현재 선량평가 수행 시 평가의 신속성이 요구될 경우, Point-kernel 방법론을 주로 활용하고 있다.

이와 관련하여, Chao 등은 다양한 형태의 선원을 공간분할법을 통해 복셀화한 후 선량평가를 수행할 수 있는 Point-kernel 방법론 기반의 평가 방법론을 개발하였다[6]. Liu 등은 여러 형태의 선원을 Boolean operation을 통해 모사한 후 이를 복셀화하여 선량평가를 수행할 수 있는 Point-kernel 방법론 기반의 평가 방법론을 개발하였다[7]. Xu 등은 3차원 입체 형상을 통해 선원의 메쉬 정보를 이용하여 복셀화한 후 선량평가를 수행할 수 있는 Point-kernel 방법론 기반의 평가 방법론을 개발하였다[8]. Yang 등은 임의 형태 선원에 대한 CAD 형식의 3차원 입체 형상 정보를 기반으로 선원을 복셀화한 후 선량평가를 수행할 수 있는 방법론을 개발하였다[9]. 강상호 등은 수학적 모델로 표현된 선원에 대한 Point-kernel 방법론 기반의 선량평가 프로그램을 개발하였다[10].

일부 연구 사례에서 개발한 임의 형태 선원에 대한 외부피폭 방사선량 평가 알고리즘의 경우 3차원 입체 형상 정보를 기반으로 복셀화한 선원을 통해 선량평가를 수행한다. 선원을 복셀화하기 위해서는 평가자가 직접 복셀 수를 선정하거나, 분할할 복셀의 크기를 설정해야 한다. 하지만 일반인이 직접 복셀 수를 선정하거나 분할할 복셀의 크기를 설정할 경우, 정확한 선량평가를 수행하는 데 있어 한계가 존재하며 평가에 과도한 시간이 소요될 수 있다. 따라서 평가상황에 따라 최적화된 선원 분할 수를 자동적으로 도출하며, 임의 형태 방사선원에 대하여 선량평가의 신속성과 정확성을 확보할 수 있는 외부피폭 방사선량 평가 알고리즘의 개발이 필요하다.

본 연구의 목적은 Point-kernel 방법론을 기반으로 하는 임의 형태 방사선원에 대한 외부피폭 방사선량 평가 알고리즘을 개발하는 것이다. 이를 위해 Point-kernel 방법론을 분석하였으며, 해당 방법론을 기반으로 임의 형태 선원에 대한 외부피폭 방사선량 평가 알고리즘을 개발하였다. 그리고 Microshield 전산코드의 평가 결과와 비교하여 개발 알고리즘을 검증하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 임의 형태 방사선원에 대한 외부피폭 방사선량 평가 알고리즘 개발

2.1.1. Point-kernel 방법론 분석

본 연구에서는 임의 형태 방사선원에 대한 외부피폭 방사선량 평가 알고리즘을 개발하기 위한 평가 방법론으로 Point-kernel 방법론을 선정하였다. Point-kernel 방법론 기반 선량평가 수행 시 선원의 형태가 점선원이 아닌 경우, 해당 선원을 점선원 집합으로 분할하여 평가해야 한다.

기개발된 Point-kernel 방법론 기반 선량평가 프로그램에서는 다양한 방법론을 통해 점선원 집합을 생성하고 있다. 대표적으로 1) 등분할 방법론, 2) 몬테카를로 기반 분할 방법론, 3) 선원과 평가지점 간 거리에 따른 선원 분할 방법론을 통해 점선원 집합을 생성할 수 있다. 등분할 방법론은 설정한 분할 수를 통해 선원의 가로, 세로, 높이, 반지름, 원주 등 길이 성분을 일정한 간격으로 분할하는 방법론이다[11]. 몬테카를로 기반 분할 방법론은 난수 생성을 통해 선원 내 점선원의 위치를 도출하여 점선원 집합을 생성하는 방법론이다[12]. 선원과 평가지점 간 거리에 따른 분할 방법론은 선원과 평가지점 간 거리가 선원 크기보다 특정 배수 이상 클 경우 선원을 점선원으로 가정하여 점선원 집합을 생성할 수 있는 방법론이다[13].

2.1.2. 피폭방사선량 평가를 위한 주요 인자 선정

본 연구에서 개발한 알고리즘을 통해 선량평가 수행 시

필요한 주요 인자를 선정하였다. Point-kernel 방법론 기반 피폭방사선량 평가 시 차폐체로 인한 영향, 단위 환산 등을 고려하여 다양한 인자를 평가식에 가중할 수 있다. 차폐체로 인한 영향을 나타내는 인자로서 질량감쇠계수, 축적인자를 평가식에 가중할 수 있다. 그리고 평가한 플루언스율을 선량으로 환산해 주기 위한 선량환산인자를 가중할 수 있다.

질량감쇠계수의 경우 미국국가표준협회(ANSI, American National Standards Institute)의 ANSI/ANS-6.4.3 문헌에서 제시하고 있는 질량감쇠계수를 선정하였다[14]. 축적인자는 수식을 이용하여 근사적으로 평가할 수 있으며, 방사선의 에너지와 물질별로 제시하고 있는 수식의 매개변수를 통해 도출할 수 있다. 축적인자의 경우 미국국가표준협회의 ANSI/ANS-6.4.3 문헌에서 제시하고 있으며, 평가 수식인 G-P form (Geometric Progression fitting formula)을 통해 평가할 수 있다[14-17]. 선량환산인자의 경우 국제방사선방호위원회(ICRP, International Commission on Radiological Protection)의 ICRP 74 문헌에서 제시하고 있는 선량환산인자인 $H^*(10)/\Phi$을 선정하였다[18]. 아래에 Point-kernel 방법론 기반 선량평가 시 주요 인자가 가중된 평가식을 나타내었다.

$$\dot{D}(r,E) = \frac{S \times e^{-\mu(E)\times t}}{4\pi r^2} \times DCF(E) \times B(E,t)$$

- r = 점선원과 평가지점 사이의 거리(m)
- S = 평가 대상 선원의 방사선 방출률(sec^{-1})
- t = 차폐체에 대한 관통두께(m)
- μ(E) = 에너지 E에 대한 차폐체 선감쇠계수(m^{-1})
- DCF(E) = 에너지 E에 대한 선량환산인자
- B(E,t) = 에너지 E에 대한 차폐체의 축적인자

2.2. 전산코드를 이용한 개발 알고리즘 검증

2.2.1. 개발 알고리즘 검증을 위한 평가상황 선정

Fig. 1에 개발 알고리즘 검증을 위한 평가상황을 나타내었다. 평가상황은 미국국립표준협회의 ANSI/ANS-6.6.1 문헌에서 제시하고 있는 표준 평가상황을 기반으로 설정하였다[19]. 선원의 형태는 균질한 원기둥 선원으로 설정하였으며 방사선의 에너지는 0.8 MeV의 감마선으로 설정하였다. 선원 강도는 4.203×10^9 sec^{-1}로 설정하였으며 선원의 높이와 반지름은 각각 10.67 m, 1.83 m로 설정하였다. 평가지점은 0.91 m 높이에 설정하였으며, x축 거리는 6.096~15.24 m 범위에서 1.524 m 간격으로 7개 지점을 설정하였다. 차폐체의 경우, 선원의 자기차폐를 고려하며 원기둥 선원의 차폐 물질은 물로 설정하였으며, 빈 공간은 공기로 설정하였다.

2.2.2. 개발 알고리즘 검증을 위한 전산코드 선정

본 연구에서 개발한 알고리즘의 검증 수행을 위해 Microshield 전산코드를 활용하였다. Microshield 전산코드는 2007년 미국의 Grove Software Inc.에서 개발되었으며, Point-kernel 방법론을 기반으로 피폭방사선량 평가 및 방

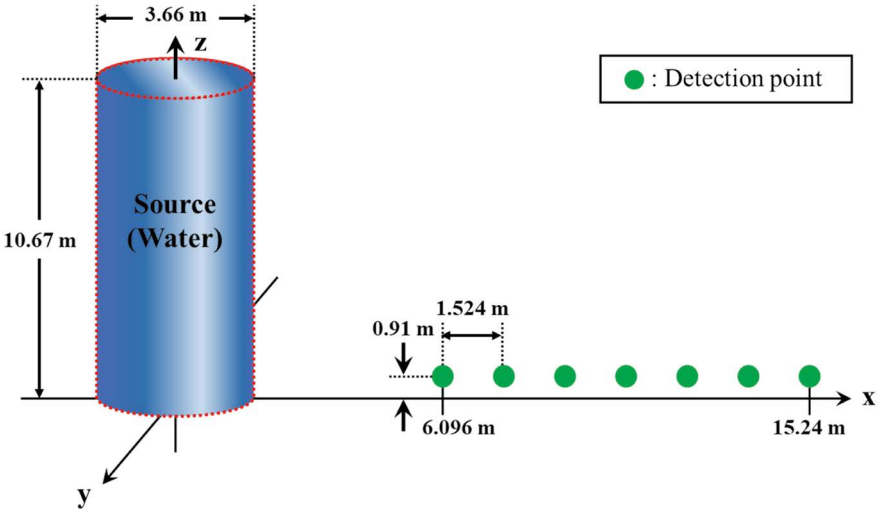

Fig. 1. Exposure scenario based on ANSI/ANS-6.6.1 reference problem.

사선 차폐 분석을 수행할 수 있다[20]. Microshield 전산코드는 등분할 방법론을 활용하며, 각 길이 성분에 대한 점선원 분할 수를 평가자가 설정할 수 있다. 해당 전산코드에서는 검증을 위해 ANSI/ANS-6.6.1 표준 평가상황에 대해 평가한 바 있다. 개발 알고리즘 검증 시 해당 평가 결과를 활용하였으며, 평가된 플루언스율에 대하여 개발 알고리즘과 동일한 선량환산인자를 가중하였다. 그리고 도출한 값을 개발 알고리즘으로 평가한 결과 값과 비교·검증하였다.

3. 결 과

3.1. 임의 형태 방사선원에 대한 외부피폭 방사선량 평가 알고리즘 개발

Fig. 2에 개발 알고리즘의 피폭방사선량 평가절차 및 평가지점까지 거리에 따른 분할 예시를 나타내었다. Point-kernel 방법론 기반 선량평가 시 선원을 점선원으로 분할하기 위해 선원과 평가지점 간 거리에 따른 분할 방법론을 선정하였다. 개발 알고리즘의 평가절차는 1) 경계 공간 설정, 2) 선원 격자 분할, 3) 점선원 집합 생성, 4) 피폭방사선량 평가 순서로 구성하였다.

경계 공간 설정 단계에서는 선원 격자 분할에 앞서 선원이 차지하고 있는 공간에 대한 경계를 설정한다. 경계 공간은 3차원 공간 내에서 선원이 차지하고 있는 공간을 의미한다. 선원을 여러 개의 격자로 분할하기 위해 경계 공간은 직육면체로 설정하며, 선원의 최대 가로, 세로, 높이 길이를 통해 설정한다.

선원 격자 분할 단계에서는 앞서 설정한 선원의 경계 공간을 여러 개의 격자로 분할한다. 선원 격자 분할 시 점선원 가정 여부 평가를 위해 공간의 중심과 평가지점 간 거리, 공간의 대각선 길이를 이용한다. 일반적으로 점선원 가정 여부 평가 시 평가지점까지 거리가 공간의 대각선 길이의 10배 이상일 경우, 해당 공간을 점선원으로 가정할 수 있다[21]. 이를 통해 평가지점까지 거리가 공간의 대각선 길이의 10배 이하일 경우, 가로, 세로, 높이 중심에 대해서 해당 공간을 격자로 분할한다. 동일한 절차로 분할한 격자에 대해 점선원 가정 여부를 평가하며 최종적으로 더 이상 분할할 공간이 없을 때까지 반복적으로 평가를 수행한다.

점선원 집합 생성 단계에서는 피폭방사선량 평가를 위한 점선원 집합을 생성한다. 점선원 집합은 선원 내부와 경계에 위치한 격자에 대해서 점선원 좌표를 도출하여 생성한다. 그리고 격자별 점선원 좌표는 해당 격자 내에 선원이 차지하고 있는 비중을 고려하여 도출한다. 선원이 차지하고 있는 비중은 격자 내에 미소 점선원을 생성하여 고려한

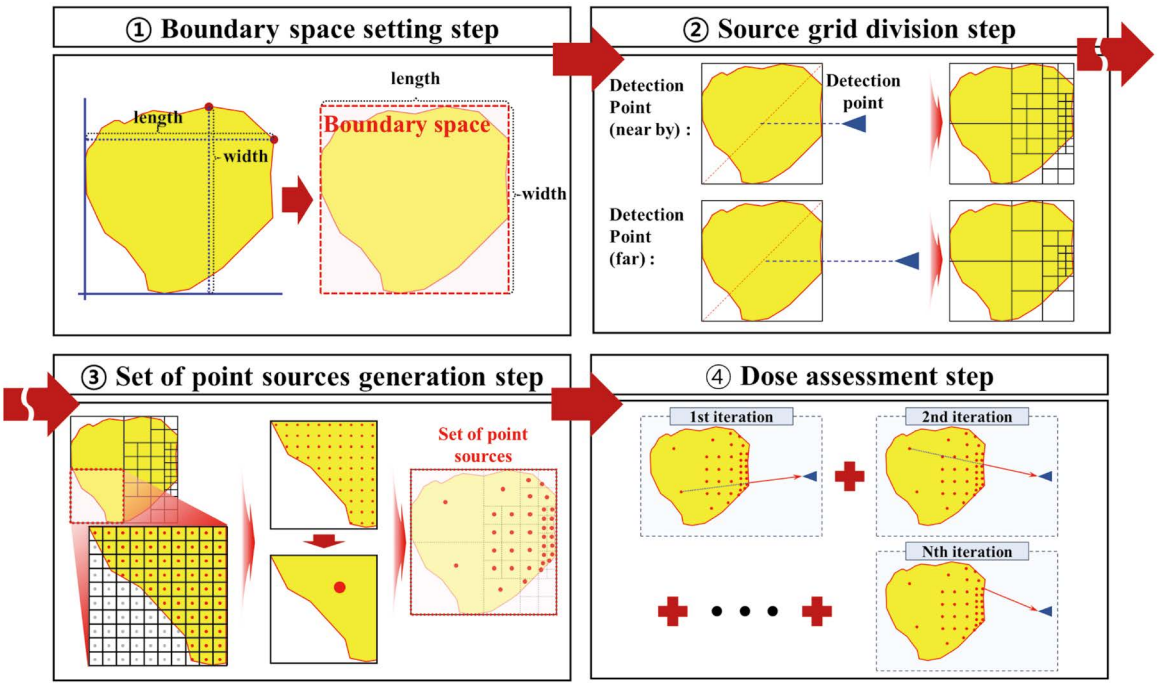

Fig. 2. Dose assessment procedure of developed algorithm.

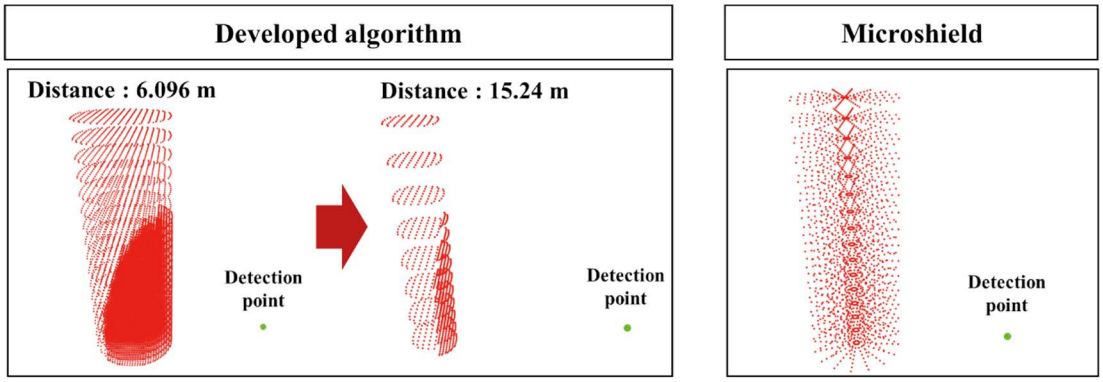

Fig. 3. Generation results of set of point sources according to assessment tool.

다. 미소 점선원은 격자별로 선원이 차지하고 있는 크기를 고려하기 위해 설정하는 가상의 점선원이다. 미소 점선원은 가장 크기가 작은 격자의 각 모서리를 10등분한 길이로 모든 격자를 미소 격자로 분할한 후 해당 격자 중심에 생성한다. 그리고 생성한 미소 점선원 중 선원 외부에 존재하는 점선원은 제거한다. 각 격자별 점선원 좌표는 선원 내부에 존재하는 미소 점선원의 좌표 평균값으로 설정한다.

피폭방사선량 평가 단계에서는 점선원 집합에 의한 피폭방사선량률을 평가하였다. 최종 피폭방사선량률은 평가지점에 대한 점선원별 선량평가 결과를 합산하여 평가한다. 점선원별 피폭방사선량률 평가 시 각 점선원이 대표하는 격자 내 선원의 크기에 따라 방사능을 상이하게 고려해야 한다. 이에 따라 방사능 보정인자를 가중하여 보정한 방사능을 통해 점선원별 피폭방사선량률을 평가한다. 방사능 보정인자는 각 점선원별로 평가하며, 선원 전체 미소 점선원 수에 대한 각 격자별 미소 점선원 수의 비로 나타난다.

3.2. 전산코드를 이용한 개발 알고리즘 검증

Fig. 3에 개발 알고리즘과 Microshield 전산코드의 점선원 집합 생성 결과를 3차원 공간에 나타내었다. 본 단계에서는 개발 알고리즘을 이용하여 ANSI/ANS-6.6.1 문헌에서 제시하고 있는 원기둥 선원 표준 평가상황에 대해 평가지점별로 피폭방사선량률을 도출하였다. 평가에 앞서 선원에 대한 점선원 집합을 생성하였으며, 개발 알고리즘의 경우 거리에 따라 996~13,440개의 점선원으로 분할하는 것으로 나타났다. Microshield 전산코드의 경우 모든 거리에 대해서 4,096개의 점선원으로 분할하는 것으로 나타났다.

Fig. 4에 개발 알고리즘과 Microshield 전산코드의 선량평가 결과를 나타내었다. 개발 알고리즘을 통해 평가한 결과는 평가지점에 따라 1.99×10^{-1}~9.74×10^{-1} μSv hr^{-1}로 나타났다. Microshield 전산코드를 통해 동일한 평가상황에 대해서 평가한 결과는 평가지점에 따라 2.13×10^{-1}~9.58×10^{-1} μSv hr^{-1}로 나타났다.

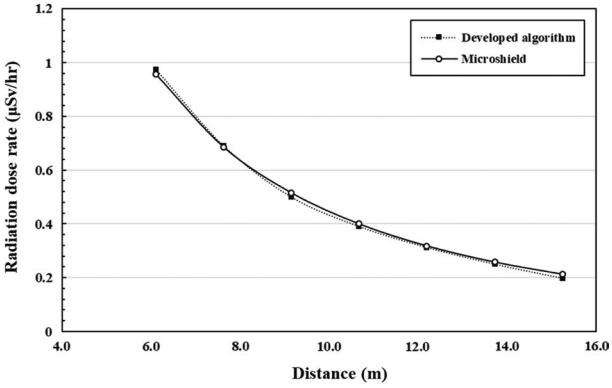

Fig. 4. Dose assessment results of each detection point according to the assessment tool.

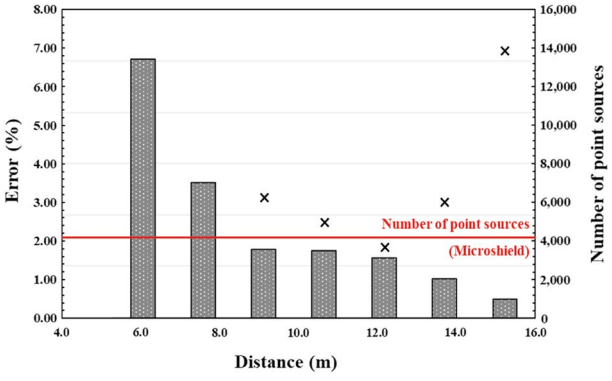

Fig. 5. Error and number of point sources according to the distance.

Fig. 5에 개발 알고리즘의 평가지점별 점선원 분할 수와 전산코드와의 오차율을 나타냈다. Microshield 전산코드와 비교한 결과, 평가지점별로 전산코드와 약 0.48~6.93% 수준의 오차율이 나타났다. 개발 알고리즘의 점선원 분할 수가 Microshield 전산코드와 유사하거나 많은 지점에서 오차율은 5% 미만 수준으로 나타났다. 그리고 점선원 분할 수가 급격하게 감소하는 지점에서 오차율이 크게 증가하는 것으로 나타났다.

4. 고 찰

본 연구에서 개발한 알고리즘의 평가 결과와 Microshield 전산코드의 평가 결과를 비교·분석하였다. 평가지점까지 거리가 가까운 경우 개발 알고리즘의 평가 결과가 상대적으로 높게 나타났으나, 평가지점까지 거리가 9.14 m 이상인 경우 전산코드로 평가한 결과보다 낮게 나타났다. 평가지점까지 거리가 증가할수록 오차율은 증가하며 최대 약 6.93% 수준의 오차가 발생하는 것으로 나타났다. 이는 평가지점별로 피폭방사선량률 평가 시 개발 알고리즘과 Microshield 전산코드의 점선원 분할 수와 점선원의 분포가 상이하기 때문인 것으로 판단된다.

점선원 분할 수와 점선원의 분포가 상이할 시 차폐체에 대한 점선원별 관통두께 또한 차이가 발생할 수 있다. 이로 인해 차폐체로 인한 감쇠효과와 축적효과가 상이하게 고려될 수 있으며, 선량평가 결과에 오차가 발생할 수 있다. 이에 따라 개발 알고리즘과 Microshield 전산코드를 비교한 결과, 점선원 분할 수가 더 많을수록 Microshield 전산코드보다 높은 선량률이 나타나며, 점선원 분할 수가 적을수록 낮은 선량률이 나타났다. 그리고 점선원 분할 수가 급격히 감소하는 지점에서 오차율이 다른 평가지점에 비해 높게 나타났다. 이는 Microshield 전산코드에 비해 점선원 분할 수가 많을수록 상대적으로 감쇠효과가 적게 고려되어 높은 선량률 값이 나타났으며, 분할 수가 적을수록 감쇠효과가 크게 고려되어 낮은 선량률 값이 나타난 것으로 판단된다.

본 연구에서 개발한 알고리즘의 경우 선원 분할 시 직교좌표계 공간 내에서 선원을 격자로 분할하여 점선원 집합을 생성한다. Microshield 전산코드의 경우 반지름, 원주, 높이를 길이 성분으로 하는 원통좌표계에서 선원을 분할한다. 이로 인해 점선원 집합 생성 시 개발 알고리즘과 Microshield 전산코드의 점선원 분포는 상이하게 나타날 수 있다. 이에 따라 점선원별 관통두께 또한 차이가 발생할 수 있으며 차폐체로 인한 감쇠효과와 축적효과가 상이하게 고려될 수 있다. 개발 알고리즘과 Microshield 전산코드를 비교한 결과, 점선원 분할 수가 유사함에도 오차가 발생하는 구간이 존재하는 것으로 나타났다. 이는 개발 알고리즘과 Microshield 전산코드의 점선원의 분포 차이로 인해 감쇠효과가 상이하게 고려되었기 때문인 것으로 판단된다.

본 연구에서 개발한 알고리즘은 특정 작업공간 내 방사선작업종사자에 대한 선량평가를 목적으로 개발되었다. 작업자가 선원이 존재하는 공간에서 작업 수행 시 대부분의 작업은 선원과 인접한 근거리에서 작업이 수행될 것으로 판단된다. 따라서 개발한 알고리즘의 경우 선원과 가까운 구간에서 상대적으로 낮은 오차율을 나타내므로 향후 작업자 선량평가 수행 시 적절히 활용 가능할 것으로 판단된다. 또한, 평가자가 임의로 선원 분할 수, 격자의 크기를 입력하지 않고 선원의 크기와 평가지점 간 거리를 통해 선원을 분할하기 때문에 사용자 친화적인 선량평가를 수행할 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 임의 형태 선원에 대한 Point-kernel 방법론 기반의 외부피폭 방사선량 평가 알고리즘을 개발하였다. 이를 위해 첫 번째, 선원과 평가지점 간 거리에 따른 분할 방법론을 기반으로 점선원 집합을 자동적으로 생성하여 선량평가를 수행할 수 있는 알고리즘을 개발하였다. 두 번째, 국외·국제기구에서 제시하고 있는 문헌을 통해 피폭방사선량 평가를 위한 주요 인자를 선정하였다. 세 번째, 국외 문헌에서 제시하고 있는 표준 평가상황을 기반으로 개발 알고리즘 검증을 위한 평가상황을 설정하였다. 네 번째, 개발 알고리즘을 통해 평가한 결과를 Microshield 전산코드로 평가한 결과와 비교·검증하였다.

본 연구에서 개발한 알고리즘은 총 4단계의 절차를 통해 선량평가를 수행할 수 있게끔 구성하였다. 개발 알고리즘의 선량평가 절차는 1) 경계 공간 설정, 2) 선원 격자 분할, 3) 점선원 집합 생성, 4) 피폭방사선량 평가로 구성하였다. 경계 공간 설정 단계에서는 선원이 차지하고 있는 공간

에 대한 경계를 설정하였다. 선원 격자 분할 단계에서는 앞서 설정한 경계 공간을 여러 개의 격자로 분할하였다. 점선원 집합 생성 단계에서는 분할한 격자별로 선원이 차지하고 있는 비중을 고려하여 점선원의 좌표를 설정하였다. 최종적으로 피폭방사선량 평가 단계에서는 각 점선원별 선량평가 결과를 모두 합하여 선원에 의한 피폭방사선량률을 도출하였다.

개발 알고리즘 검증을 위해 Microshield 전산코드를 통해 평가한 결과를 비교하였다. 평가상황은 ANSI/ANS-6.6.1 문헌에서 제시하고 있는 표준 평가상황을 기반으로 설정하였다. 개발 알고리즘을 통해 평가한 결과, 평가지점에 따라 1.99×10^{-1}~9.74×10^{-1} μSv hr^{-1}로 나타났다. Microshield 전산코드를 통해 평가한 결과, 평가지점에 따라 2.13×10^{-1}~9.58×10^{-1} μSv hr^{-1}로 나타났으며, 평가지점별 오차율은 약 0.48~6.93% 수준으로 나타났다. 비교 결과 가까운 평가지점에서는 개발 알고리즘의 평가 결과가 상대적으로 높게 나타났으나, 평가지점까지 거리가 9.14 m 이상인 구간에서는 낮게 나타났다. 그리고 평가지점까지 거리가 증가할수록 오차율 또한 증가하는 것으로 나타났다. 이는 피폭방사선량률 평가 시 개발 알고리즘과 Microshield 전산코드의 점선원 분할 수와 점선원의 분포가 상이하기 때문인 것으로 판단된다.

검증 결과 개발 알고리즘과 Microshield 전산코드 평가 결과 간 오차는 6.096~15.24 m 구간에서 최대 6.93%로 나타났으며, 이에 따라 개발 알고리즘의 선량평가 방법론은 적절한 것으로 판단된다. 본 연구의 결과는 향후 임의 형태 선원에 대한 외부피폭 방사선량 평가 시 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

사 사

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

참고문헌

1. Lindell B. 1996. The History of Radiation Protection. *Radiat. Prot. Dosimetry* **68**(1-2):83-95.
2. Vermeersch F. 2005. ALARA Pre-Job Studies Using the VISIPLAN 3D ALARA Planning Tool. *Radiat. Prot. Dosimetry* **115**(1-4): 294-297. https://doi.org/10.1093/rpd/nci115
3. Briesmeister JF. 2000. MCNP - A General Monte-Carlo N-Particle Transport Code. LA-13709-M.
4. Prokhorets IM, Prokhorets SI, Khazhmuradov MA, Rudychev EV and Fedorchenko DV. 2007. Point-Kernel Method for Radiation Fields Simulation. *Probl. At. Sci. Technol.* **48**(5):106-109.
5. Vela Ó, Burgos E and Pérez JM. 2006. Dose Rate Assessment in Complex Geometries. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **53**(1):304-311. https://doi.org/10.1109/TNS.2006.869831
6. Chao N, Liu YK, Xia H, Ayodeji A and Bai L. 2018. A Dose Assessment Method for Arbitrary Geometries with Virtual Reality in the Nuclear Facilities Decommissioning. *Radiat. Phys. Chem.* **144**(5): 238-247. https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2017.08.020
7. Liu YK, Chen ZT, Chao N, Peng MJ and Jia YH. 2022. A Dose Assessment Method for Nuclear Facility Decommissioning Based on the Combination of CAD and Point-Kernel Method. *Radiat. Phys. Chem.* **193**:109942. https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2021.109942
8. Xu ZH, Li MK, Zou BW and Yang M. 2023. A GPU-Based Point Kernel Gamma Dose Rate Computing Code for Virtual Simulation in Radiation-Controlled Area. *Nucl. Eng. Technol.* **55**(6):1966-1973. https://doi.org/10.1016/j.net.2023.03.018
9. Yang LK, Liu YK, Peng MJ and Li MK. 2019. A Gamma-Ray Dose Rate Assessment Method for Arbitrary Shape Geometries Based on Voxelization Algorithm. *Radiat. Phys. Chem.* **158**(5):122-130. https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2019.02.015
10. Kang SH, Lee SG, Chung CY, Lee CY and Lee JK. 2001. Development of Point Kernel Shielding Analysis Computer Program Implementing Recent Nuclear Data and Graphic User Interfaces. *J. Radiat. Prot.* **26**(3):215-224.
11. Wallace OJ. 1996. The Selection of Fixed-Order Quadratures in Point-Kernel Shielding Calculations. *Nucl. Technol.* **113**(1):112-122.
12. SCK · CEN. 2004. VISIPLAN 3D ALARA Planning Tool, Calculation Method & Velidation Tests. Belgian Nuclear Research Centre. NS/FVe/IDPBW/04-505.
13. Teofilo Molto Caracena TM, Eduardo Vendrell Vidal EV, Gonçalves JGM and Peerani P. 2017. A KD-Trees Based Method for Fast Radiation Source Representation for Virtual Reality Dosimetry Applications in Nuclear Safeguards and Security. *Prog. Nucl. Energy* **95**:78-83. https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2016.12.001
14. ANSI. 1991. Gamma Ray Attenuation Coefficient and Buildup Factors for Engineering Materials. ANSI/ANS-6.4.3.
15. JAERI. 1986. Applicability of Geometrical Progression Approximation (G-P Method) of Gamma-Ray Buildup Factors. Japan Atomic Energy Research Institute. JAERI-M-86-071.
16. Harima Y. 1983. An Approximation of Gamma-Ray Buildup Factors by Modified Geometrical Progression. *Nucl. Sci. Eng.* **83**(2): 299-309. https://doi.org/10.13182/NSE83-A18222

17. Harima Y, Sakamoto Y, Kurosawa N and Shimizu A. 2009. Improvement of the Geometric-Progression Formula for Approximating Gamma-Ray Buildup Factors Up to Depths of 100 mfp. *Nucl. Technol.* **168**(3):861-866. https://doi.org/10.13182/NT09-A9319
18. ICRP. 1996. Conversion Coefficients for Use in Radiological Protection against External Radiation. ICRP Publication 74. Ann. ICRP 26(3-4).
19. ANSI. 1987. Calculation and Measurement of Direct and Scattered Gamma Radiation from LWR Nuclear Power Plants. ANSI/ANS-6.6.1.
20. Grove Software Inc. 2007. Microshield User's Manual Version 7.
21. IFE. 2012. New Computational Model for Areal and Personal Monitoring in Nuclear Environments. HWR-1030.