Journal of RADIATION INDUSTRY
Vol. 19, No. 2, pp. 159-165, 2025
https://doi.org/10.23042/radin.2025.19.2.159

Original article

3D-BIM 기반 원자력이용시설 작업자 선량평가 프로그램 개발

곽동규[1] · 이대호[1] · 이동규[1] · 김주영[1] · 김광표[1,*]

[1]경희대학교 원자력공학과

Development of a 3D-BIM Based Dose Assessment Program for Nuclear Facility Workers

Dong Gyu Kwak[1], Dae Ho Lee[1], Dong Gyu Lee[1], Ju Young Kim[1], and Kwang Pyo Kim[1,*]

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

ABSTRACT Workers in nuclear facilities perform diverse tasks and are exposed to various radiation sources. Effective management of worker's radiation exposure requires comprehensive consideration of source characteristics and shielding effects. In particular, nuclear power plant workers perform tasks in numerous areas, making it difficult to model every work space for dose assessment. By applying a Building Information Modeling file which integrates structural geometry and material information, it is possible to perform dose assessments that reflect the worker's path and the shielding effects. The objective of this study is to develop a three-dimensional Building Information Modeling based worker dose assessment program. To achieve this objective, three-dimensional Building Information Modeling module was first designed, and previously developed algorithms were analyzed to develop the dose assessment module. The two modules were then integrated to create a complete program. Dose assessment procedure of the developed program is composed of three main steps 1) importing Building Information Modeling file, 2) acquiring input parameters, 3) performing dose assessment. In the importing Building Information Modeling step, three-dimensional Building Information Modeling module visualizes the imported file. In the acquiring input parameters step, dose assessment module receives the required information and, in conjunction with the three-dimensional Building Information Modeling module, displays the worker's path and measurement points on the three-dimensional drawing. Finally, in the performing dose assessment step, shielding thicknesses along the paths are first derived from the imported Building Information Modeling file and the worker's path. Dose assessment module then evaluates radiation dose rates and cumulative doses along the worker's path and outputs the results at specified time intervals. The program accepts spatial information of nuclear power plants through the Building Information Modeling file and performs dose assessments corresponding to the worker's path. By three-dimensional modeling of spatial information, it shortens planning time for shielding design and dose simulation, supporting efficient decision-making. Results of this study are expected to contribute to optimizing worker radiation exposure in nuclear power plants and to establishing work plans that adhere to the As Low As Reasonably Achievable (ALARA) principle.

Key words: Nuclear facilities, BIM, Dose assessment, Workers, Program development

1. 서 론

원자력발전소 내 작업자는 계획예방정비, 핵연료 교체 등 다양한 작업을 수행하며 여러 방사선원에 노출된다. 국제연합방사선영향과학위원회(United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation; UNSCEAR), 국제원자력기구(International Atomic Energy Agency; IAEA), 국제방사선방호위원회(International Commission on Radiological Protection; ICRP)를 비롯한 다수의 국제기구에서는 원자력발전소 내 작업자의 피폭선량 관리를 권고하고 있다[1-3]. 또한, IAEA는 피폭선량 관리 시 3D 모델링을 통해 차폐 구조와 선량 분포를 시각화함으로써, 작업자 피폭을 저감하고 작업을 신속히 수행할 수 있음을 강조한

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 16 May 2025 **Revised** 24 June 2025 **Accepted** 24 June 2025

바 있다[4,5]. 이에 따라 3D 모델링과 작업자 선량평가를 수행할 수 있는 다양한 선량평가 프로그램이 개발되었다.

벨기에 원자력연구센터(SCK·CEN)에서는 3D 기하 구조와 물질 및 방사선학적 정보를 활용해, 방사선관리구역 내 여러 작업 시나리오별 선량평가를 수행할 수 있는 VISIPLAN 프로그램을 개발하였다[6]. 노르웨이 에너지기술연구소(Institute for Energy Technology; IFE)에서는 3D 모델링과 방사선장 시각화를 통해 작업자 선량평가를 수행할 수 있는 VRdose 프로그램을 개발하였다[7]. 또한, 원자력발전소 내 다양한 작업의 복잡한 작업공간 모사를 위해 BIM (Building Information Modeling)을 활용한 다수의 연구가 수행되었다. BIM은 3D 모델을 기반으로 건축물의 형상 정보, 물질 정보 등의 다양한 정보를 통합 관리하는 기술이다. Liang 등은 원자력발전소 운전 및 유지보수 과정에서 BIM을 활용해 안전 관리, 화재 안전성 분석 등을 통합한 운영 관리 시스템을 개발하였다[8]. 정성관 등은 BIM 기반 3D 모델링과 방사선원 정보, 과거 피폭 기록을 통합하여 원자력발전소 방사선 작업 종사자의 피폭선량을 예측하는 데이터기반 피폭선량 예측 관리시스템(DoseSim)을 개발하였다[9]. Jung 등은 BIM을 원자력발전소 해체 물량 산출에 활용할 수 있는 방안을 제시하였다[10]. Daniška 등은 BIM을 통해 해체 비용·폐기물·작업 일정 정보를 통합 관리해 해체 작업의 효율을 향상시키는 방안을 제시하였다[11]. Chen 등은 레이저 스캔을 통해 해체 구조물을 BIM 파일로 구현하고, 오염 측정 결과를 활용해 방사성 오염 분포를 시각화·연동하는 방법론을 제시하였다[12].

3D 모델링 기반 선량평가 프로그램 활용 시 관련지식이 부족한 비전문가 또한 손쉽게 선량평가를 수행할 수 있고, 작업환경에 대한 높은 가시성을 확보할 수 있다. 하지만 비전문가의 경우 선량평가 시, 원전 내 복잡한 작업공간의 기하학적 구조를 모사하는데 어려움이 존재할 수 있다. 이 경우 건물의 형상 정보, 물질 정보를 포함하는 BIM 파일을 연동한 선량평가 프로그램 활용 시 손쉽게 작업공간을 모사할 수 있다. 또한 내장 물질 정보에 기반한 차폐 영향 평가를 통해 용이한 선량평가를 수행할 수 있다. 기존 연구에서는 BIM 파일을 활용하여 해체 작업의 안전성을 향상시키거나, 측정값을 기반으로 선원 위치 추정 및 구조물 모델링을 수행하는 데 중점을 두었다. 하지만 BIM 파일을 원자력발전소 작업자 동선과 연동하여 선량평가를 수행하는 프로그램을 개발한 사례는 부족한 실정이다. 이에 따라 BIM 파일을 통해 작업공간의 형상 및 물질 정보를 입력받고, 입력받은 정보를 기반으로 선량평가를 수행하여 3D 모델링할 수 있는 선량평가 프로그램 개발이 필요하다.

본 연구의 목적은 3D-BIM 기반 작업자 선량평가 프로그램을 개발하는 것이다. 이를 위해 프로그램 내 3D-BIM 모듈을 구현하고, 기개발된 선량평가 알고리즘을 분석하여 선량평가 모듈을 구현하였다. 최종적으로 선량평가 고려 인자 데이터베이스를 구축하고, 3D-BIM 모듈과 선량평가 모듈을 통합하여 3D-BIM 기반 작업자 선량평가 프로그램을 개발하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 3D-BIM 모듈 설계

본 연구단계에서는 BIM 파일을 입력받아, 시각화하는 3D-BIM 모듈을 설계하였다. 또한, 선량평가 수행 시 선원 위치와 평가 지점 간의 직선 경로를 파악하고, 경로상의 차폐체 투과 두께를 산출하도록 설계하였다. 3D-BIM 모듈은 1) 상단 툴바, 2) 메인 패널, 3) BIM 카탈로그로 구성하였다. 상단 툴바는 주요 기능을 아이콘 형태로 제공하여 사용자가 신속하게 원하는 기능에 접근할 수 있도록 하였다. 메인 패널은 연동된 BIM 파일을 CAD 형태로 변환하여 가시화하도록 하였다. BIM 카탈로그는 연동된 BIM 파일 구성요소를 목록화하고, 이를 기반으로 검색 기능을 제공하도록 설계하였다.

2.2. 선량평가 모듈 설계

본 연구단계에서는 선량평가 모듈을 구현하기 위해 선행 연구에서 개발한 바 있는 선량평가 알고리즘을 분석하였다[13,14]. 첫 번째로, 측정값을 기반으로 선원 강도를 추정하는 알고리즘을 분석하였다. 두 번째로, Point-kernel 방법론을 기반으로 외부피폭 선량평가를 수행하는 알고리즘을 분석하였다.

2.2.1. 선원 강도 추정 알고리즘 분석

측정값을 기반으로 선원 강도를 추정하는 알고리즘을 분석하였다[15]. 해당 알고리즘은 외부피폭 선량평가 수식을 기반으로 연립방정식을 수립한 후 측정값에 대해 역산을 수행하여 선원 강도를 추정한다. 연립방정식은 선원 강도를 미지수로 설정하여 식 (1)과 같이 구성된다. 선원 강도 추정 시, Gauss-Jordan 소거법을 통해 도출한 초기 선원 강도 추정값을 연립방정식에 대입하여 반복계산을 수행한다. 반복 계산 수행 시 각 단계에서 추정된 선원 강도를 통해 예상 선량률을 계산하고, 이를 실제 측정값과 비교하여 오차를 산출하게 된다. 해당 알고리즘은 오차가 허용 범위 이내로 수렴하거나 최대 반복 횟수에 도달할 때까지, 선원 강도 추정값을 갱신하여 최종 선원 강도를 도출한다.

$$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & \cdots & A_{1n} \\ A_{21} & A_{22} & & A_{2n} \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ A_{m1} & A_{m2} & \cdots & A_{mn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ \vdots \\ S_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_m \end{bmatrix} \quad (1)$$

A_{mn}: m번째 측정지점 정보에 대한 선원 n의 영향을 평가하는 계수(μSv h^{-1} Bq^{-1})

S_n: 선원 n의 강도(Bq)

b_m: m번째 측정지점의 측정 선량률(μSv h^{-1})

2.2.2. Point-kernel 기반 선량평가 알고리즘 분석

다양한 형태의 선원에 대한 선량평가를 수행할 수 있는 Point-kernel 기반 선량평가 알고리즘을 분석하였다[16]. Point-kernel 방법론은 선원을 점선원 집합으로 단순화하고, 각 점선원이 평가 지점에 기여하는 선량을 합산하는 방법론이다. 해당 방법론은 복잡한 형태의 선원을 점선원 집합으로 근사하여 신속하게 선량평가를 수행할 수 있다는 장점이 있다.

Point-kernel 기반 선량평가 알고리즘은 선원 체적을 격자로 분할한 뒤 점선원의 집합으로 나타내고, 각 점선원에 의한 선량을 합산하여 전체 선량을 계산한다. 해당 과정에서 격자 분할은 Scale factor를 기준으로 수행한다. Scale factor는 선원 격자의 최대 길이와 선원 격자 및 측정지점 간 길이의 비로 정의되며, 선원 분할 여부를 결정하는 기준값이다. 알고리즘은 격자의 최대 길이와 측정지점까지의 거리 비율이 Scale factor보다 작아질 때까지 선원을 반복적으로 분할한다. 이후 각각의 격자를 점선원으로 가정하고, i번째 점선원에 의한 외부피폭 선량을 식 (2)와 같이 평가한다. 외부피폭 선량평가 수행 시, 전체 선원 체적 대비 분할 격자 내 포함된 선원 체적의 비율(ω_i)을 고려하여 각 점선원별 방사능 보정인자를 가중한다.

$$\dot{D}_i = \omega_i \times \frac{S}{4\pi r_i^2} \times y \times e^{-\sum_{j=0}^{k} \mu_j t_j} \times B_j \times DCF \times 10^{-6} \times 3{,}600 \quad (2)$$

$\dot{D}_i$: i번째 점선원에 대한 작업자 선량률(μSv h^{-1})
ω_i: i번째 점선원에 대한 방사능 보정인자(–)
S: 선원강도(Bq)
y: 방사선 방출율(decay^{-1})
r_i: i번째 점선원-평가지점간 거리(cm)
μ_j: 차폐체 j의 선감쇠계수(m^{-1})
t_j: 경로상 차폐체 j의 투과두께(m)
B_j: 차폐체 j의 축적인자(–)
DCF: 선량환산인자(pSv cm^2)
10^{-6}: 단위환산인자(μSv pSv^{-1})
3,600: 단위환산인자(sec h^{-1})

2.3. 통합 프로그램 설계

본 연구단계에서는 3D-BIM 모듈과 선량평가 모듈을 통합하고, 선량평가를 위한 데이터베이스를 구축하여 3D-BIM 기반 작업자 선량평가 프로그램을 통합 설계하였다. 선량평가 수행 시 통합 프로그램은 3D-BIM 모듈과 선량평가 모듈을 통해 정보를 입력받고, 해당 정보를 통해 선량평가를 수행하도록 하였다. 또한, 선량평가 수행 시 데이터베이스는 통합 프로그램과 연동되어 필요한 정보를 주고받도록 설계하였다.

Fig. 1에 통합 프로그램의 선량평가 절차를 나타내었다. 선량평가 절차는 1) BIM 파일 입력, 2) 입력인자 확보, 3) 선량평가 수행의 단계로 설계하였다. BIM 파일 입력 단계에서는 BIM 파일을 입력받고, 입력받은 BIM 파일을 3D-BIM 모듈을 통해 시각화한다. 입력인자 확보 단계에서는 선량평가 모듈을 통해 필요한 정보를 입력받고, 이를 3D-BIM 모듈과 연동하여 작업자 동선, 측정지점 등을 3D 도면 위에 나타내도록 설계하였다. 선량평가 수행 단계에서는 먼저 입력받은 BIM 파일과 작업자 동선을 통해 차폐체 투과두께를 도출하도록 하였다. 이후 선량평가 모듈을 통해 작업자 동선에 따른 선량평가를 수행하고, 작업자의 시간대별 선량률 및 누적선량을 출력하도록 설계하였다.

데이터베이스는 1) 핵종 데이터베이스, 2) 물질별 감쇠계수 데이터베이스, 3) 축적인자 데이터베이스, 4) 선량 환산계수 데이터베이스로 구성하였다. 핵종 데이터베이스는 ICRP 107 보고서를 기반으로 핵종별 고유 반감기, 붕괴 에너지 등의 정보를 포함하도록 구축하였다[17]. 물질별 감쇠계수 데이터베이스는 미국 국립표준기술연구소(National Institute of Standards and Technology, NIST)의 NISTIR 5632의 에너지별 선감쇠계수를 기반으로 구축

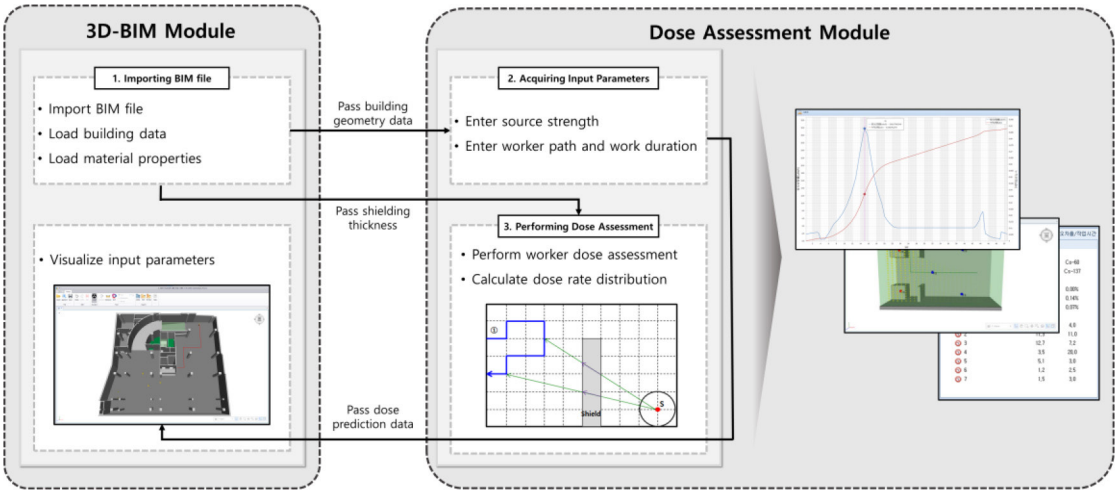

Fig. 1. Dose assessment procedure of integrated program.

하였다[18]. 축적인자 데이터베이스는 미국 국립표준협회(American National Standards Institute, ANSI)의 ANSI/ANS-6.4.3 문헌을 기반으로, G-P (Geometric Progression) form 매개변수를 포함하도록 구축하였다[19]. 선량 환산계수 데이터베이스는 ICRP 74 보고서의 $H^*(10)$ 선량 환산계수를 기반으로 구축하였다[20].

3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 C# 프로그래밍 언어를 사용하여, 3D-BIM 모듈과 앞서 분석한 선량평가 알고리즘을 구현하고, 이를 통합하여 3D-BIM 기반 작업자 선량평가 프로그램을 구현하였다. C#은 Microsoft 사가 개발한 객체 지향적 프로그래밍 언어로 웹, 모바일 프로그래밍 등 다양한 영역에서 활용되고 있다. C#은 개발 속도가 빠르고, 프로그래밍 시 오류가 적어 3D-BIM 기반 작업자 선량평가 프로그램 개발 언어로 선정하였다.

3.1. 3D-BIM 모듈 구현

Fig. 2에 3D-BIM 모듈의 인터페이스를 나타내었다. 본 연구단계에서는 BIM 파일을 입력받고, 3D 모델링을 수행하는 3D-BIM 모듈을 구현하였다. BIM 파일은 상단 툴바의 "Open 버튼"을 통해 입력하도록 구현하였다. 인터페이스 중앙에 위치한 메인 패널은 입력한 BIM 파일을 CAD 형태로 변환하고, 이를 3D 모델링하여 사용자가 건축 정보를 확인할 수 있도록 구현하였다. 또한 작업공간을 회전, 확대/축소, 이동할 수 있는 제어 기능을 구현하였다. 인터페이스 우측에 위치한 BIM 카탈로그는 작업공간 및 전체 구조물을 목록화하여 특정 공간이나 구조물을 선택할 수 있도록 구현하였다. 또한 사용자가 찾고자 하는 구조물의 이름, 구성물질 등의 정보를 검색하고, 해당 물질의 정보를 확인·수정할 수 있도록 구현하였다.

3.2. 선량평가 모듈 구현

Fig. 3에 본 연구에서 구현한 선량평가 모듈의 평가 절차를 나타내었다. 본 연구단계에서는 앞서 분석한 선원 강도 추정 알고리즘과 Point-kernel 기반 선량평가 알고리즘을 통합하여, 선량평가 모듈을 구현하였다. 선량평가 모듈은 1) 입력인자 확보, 2) 선원 강도 추정, 3) 선량 도출의 절차로 선량평가를 수행하도록 구현하였다.

입력인자 확보 단계에서는 선원 강도 추정 및 작업자 선량평가 시 활용할 입력인자를 확보하도록 하였다. 입력인자에는 선원 정보, 작업 정보와 3D-BIM 모듈이 산출한 경로상의 차폐체 투과두께 등이 포함된다. 선원 강도 추정 단계에서는 선원을 점선원 집합으로 분할하고, 앞서 분석한 선원 강도 추정 알고리즘을 활용하여 각 점선원 강도를 추정하도록 구현하였다. 선량 도출 단계에서는 선량평가를 수행하기에 앞서 작업자의 동선에 따라 평가 지점을 선정하고 각 지점에서의 체류시간을 식별하도록 하였다. 이후 각 지점에서 앞서 분석한 Point-kernel 기반 선량평가 알고리즘을 통해 선량을 도출하도록 구현하였다. 선량 도출 시 3D-BIM 모듈을 통해 식별한 차폐체 투과두께, 물질 정보를 통해 방사선의 감쇠 및 축적 효과를 반영하도록 하였다.

Fig. 4에 선량평가 모듈의 인터페이스를 나타내었다. 선량평가 모듈은 1) 상단 툴바, 2) 메인 입력창, 3) 입출력 정보 요약창, 4) 결과창으로 구성하였다. 상단 툴바는 선량평가 모듈의 주요 기능을 배치하여 사용자가 직관적으로 각 기능을 수행할 수 있도록

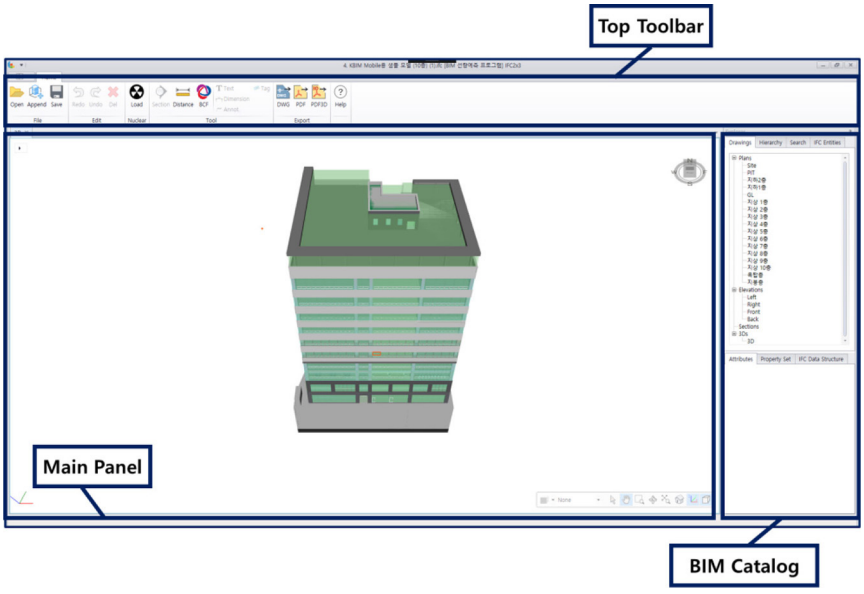

Fig. 2. 3D-BIM module interface.

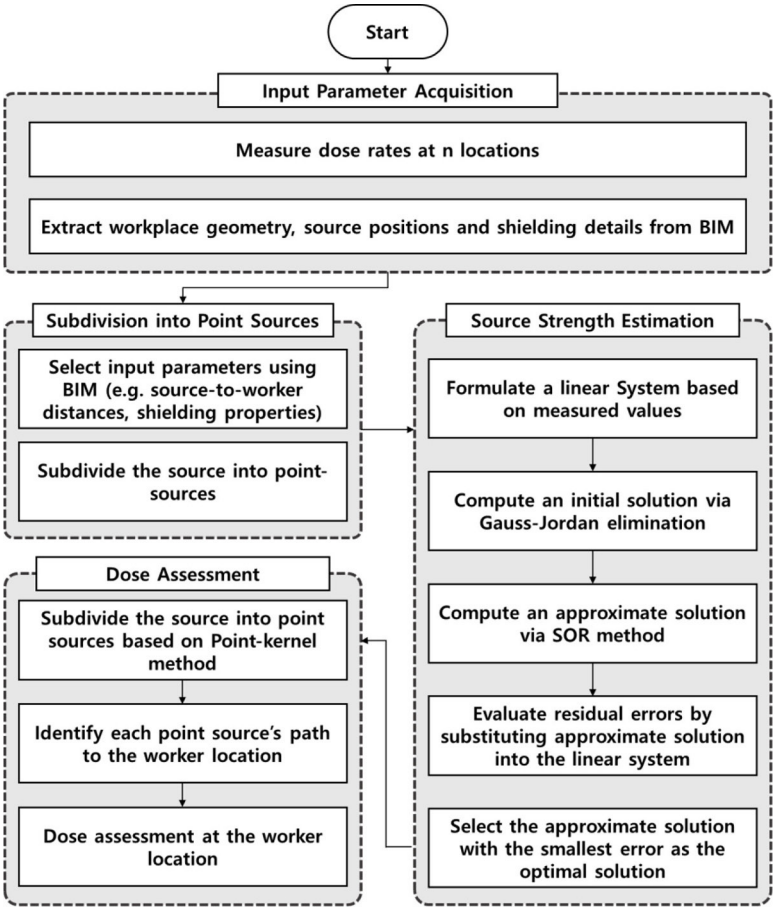

Fig. 3. Assessment procedure of dose assessment module.

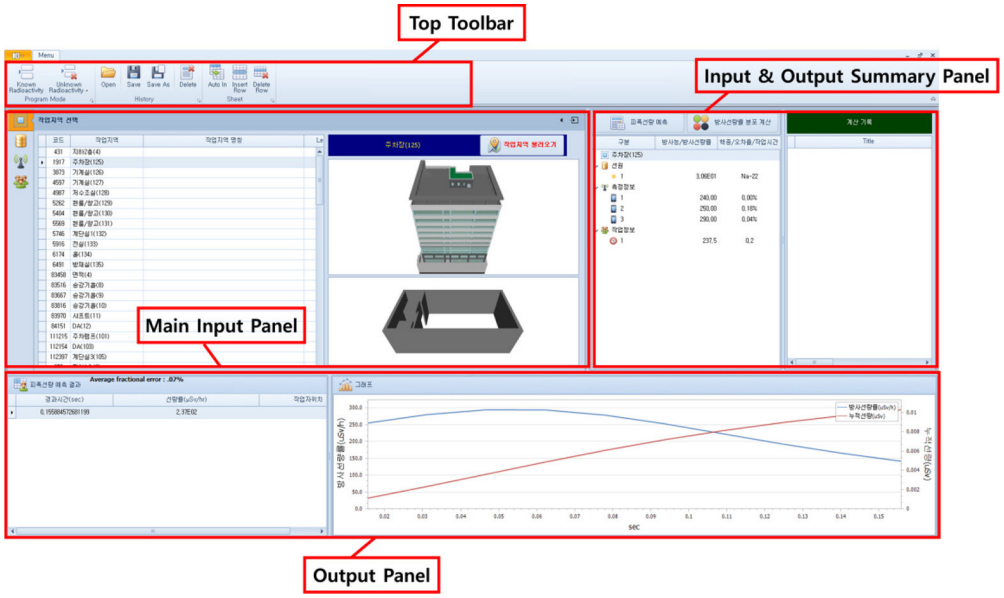

Fig. 4. Dose assessment module interface.

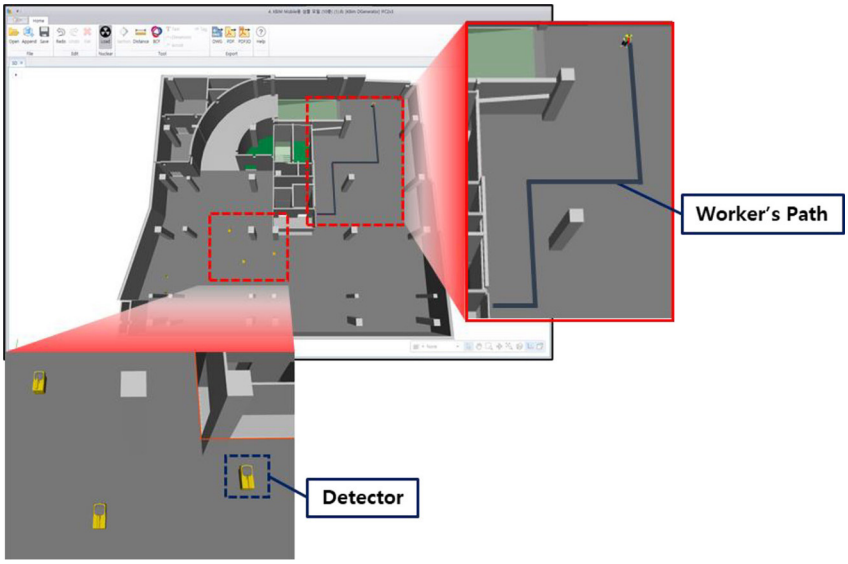

Fig. 5. 3D-BIM module interface for entering measurement and work information.

구현하였다. 인터페이스 좌측에 위치한 메인 입력창은 왼쪽 탭을 통해 입력받을 정보인 선원 정보, 측정 정보, 작업 정보, 작업 지역을 선택할 수 있도록 하였다. 각 정보는 사용자 편의성을 고려하여 시트 형식으로 입력할 수 있도록 하였다. 선원 정보의 경우 상단 툴바에서 "Known Radioactivity 버튼"을 통해 선원 정보 입력 시트를 생성할 수 있도록 하였다. 인터페이스 우측에 위치한 입출력 정보 요약창에서는 선원 정보, 측정 정보, 작업 정보를 유형별로 구분하여 나타내어 사용자가 입력한 정보를 검토할 수 있도록 구현하였다. 인터페이스 하단에 위치한 결과창은 경과시간(sec)과 선량률(μSv h^{-1}) 두개의 열로 구성하여 작업별 행을 따라 선량평가 결과를 확인할 수 있도록 구현하였다. 그래프는 시간대별 선량률 및 누적선량을 나타내어 사용자가 직관적으로 데이터를 파악할 수 있도록 구현하였다.

3.3. 통합 프로그램 구현

본 연구단계에서는 3D-BIM 모듈과 선량평가 모듈을 연동하고, 선량평가 시 필요한 데이터베이스를 구축하여, 통합 프로그램을 구현하였다. 통합 프로그램 실행 시 3D-BIM 모듈의 상단 툴바 "Open 버튼"을 통해 먼저 BIM 파일을 입력받도록 구현하였다. 불러온 BIM 파일은 3D-BIM 모듈을 통해 3D 및 2D 도면 등 다양한 형태로 변환되어 건물의 형상 및 재료를 확인할 수 있도록 하였다. 이후 상단 툴바의 "Load 버튼"을 통해 선량평가 모듈 인터페이스로 전환하여 선량평가를 수행할 수 있도록 구현하였다.

Fig. 5에 측정 정보와 작업 정보 입력 시 3D-BIM 모듈 인터페이스를 나타내었다. 3D-BIM 모듈은 선량평가 모듈과 연동하여 입력받은 정보를 모델링한 BIM 파일 도면 위에 나타내어, 평가 상황을 쉽게 파악할 수 있도록 하였다. 선량평가 모듈을 통해 입력받은 측정 정보는 3D-BIM 모듈과 연동하여 BIM 파일 도면 위에 계측기 아이콘으로 표현하도록 하였다. 또한 작업 정보는 3D-BIM 모듈과 연동하여 BIM 파일 도면 위에 작업자 동선을 남색으로 나타내어 직관적으로 작업자의 동선을 확인할 수 있도록 구현하였다.

본 프로그램은 BIM 파일을 활용해 작업자 동선에 따른 차폐체 영향을 실시간으로 연계·분석할 수 있으며, 신속한 선량평가를 수행할 수 있을 것으로 예상된다. 또한, 선량평가 결과를 3D-도면 위에 시각화하여 작업 동선 수립 등 피폭선량 최적화 달성에 기여하여, ALARA (As Low As Reasonably Achievable) 원칙을 만족시키는데 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 해당 프로그램은 향후 방사선 모니터링 기기의 측정 정보와 연동을 통해 실시간 선량평가 또한 수행할 수 있을 것으로 기대된다.

4. 결 론

본 연구에서는 BIM 파일을 입력받고 이를 기반으로 선량평가를 수행하는 3D-BIM 기반 작업자 선량평가 프로그램을 개발하였다. 이를 위해 첫 번째, BIM 파일을 입력받고, 3D 모델링을 수행하는 3D-BIM 모듈을 구현하였다. 두 번째, 기개발된 알고리즘을 분석하여 선원 강도 부재 시 측정값을 기반으로 선원 강도를 추정하고, 선원을 점선원 집합으로 단순화하여 선량평가를 수행하는 선량평가 모듈을 구현하였다. 세 번째, 3D-BIM 모듈과 선량평가 모듈을 통합하고, 데이터베이스를 구축하여 3D-BIM 기반 작업자 선량평가 프로그램을 개발하였다.

본 연구에서 개발한 프로그램은 총 3단계의 절차를 통해 선량평가를 수행할 수 있도록 개발하였다. 개발 프로그램의 선량평가 절차는 1) BIM 파일 입력, 2) 입력인자 확보, 3) 선량평가 수행의 단계로 설계하였다. BIM 파일 입력 단계에서는 BIM 파일을 입력

받고, 입력받은 BIM 파일을 3D-BIM 모듈을 통해 시각화하도록 하였다. 입력인자 확보 단계에서는 선량평가 모듈을 통해 필요한 정보를 입력받고, 이를 3D-BIM 모듈과 연동하여 작업자 동선, 측정 지점 등을 BIM 도면 위에 나타내도록 하였다. 선량평가 수행 단계에서는 먼저 입력받은 BIM 파일과 작업자 동선을 통해 차폐체 투과두께를 도출하도록 하였다. 이후 선량평가 모듈을 통해 작업자 동선에 따른 선량평가를 수행하고, 작업자의 시간대별 선량률 및 누적선량을 출력하도록 개발하였다.

본 연구에서 3D-BIM 기반 작업자 선량평가 프로그램을 개발하였다. 개발 프로그램은 BIM 파일을 통해 원자력발전소의 공간 정보를 입력받고, 작업자 동선에 따른 선량평가를 수행할 수 있다. 또한 공간 정보를 3D 모델링하여 차폐 설계와 선량 시뮬레이션의 계획 시간을 단축하고, 효율적 의사결정을 수행할 수 있다. 본 연구 결과는 원자력발전소 내 작업자 피폭선량 최적화 및 ALARA 원칙에 따른 작업 계획 수립에 기여할 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. UNSCEAR. 2022. Evaluation of Occupational Exposure to Ionizing Radiation. UNSCEAR 2020/2021 Report Volume IV.
2. IAEA. 2014. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards. IAEA Safety Standards Series No. GSR Part 3.
3. ICRP. 2007. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. Ann. ICRP 37(2-4).
4. Donovan J. 2023. Robots, AI and 3D Models: How High-tech Breakthroughs Help Nuclear Decommissioning. IAEA Bulletin 64(1). https://www.iaea.org/bulletin/robots-ai-and-3d-models-how-high-tech-breakthroughs-help-nuclear-decommissioning.
5. Watson N. 2022. Digital Tools, Virtual Reality and Robots to Help in Accelerating Dismantling of Retired Nuclear Facilities, IAEA Survey Shows. IAEA News. 01 Feb 2022. https://www.iaea.org/newscenter/news/digital-tools-virtual-reality-and-robots-to-help-in-accelerating-dismantling-of-retired-nuclear-facilities-iaea-survey-shows.
6. SCK·CEN. 2004. Visiplan 3D ALARA Planning Tool Version 4.0 Calculation Method&Validation Tests.
7. IFE. 2012. New Computational Model for Areal and Personal Monitoring in Nuclear Environments. HWR-1030.
8. Liang W, Yang J, Liu X, Wei J and Zhang D. 2019. Research and Development of BIM Operation and Maintenance System in Nuclear Power Plant. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 310. https://doi.org/10.1088/1755-1315/310/3/032051.
9. Jung S, Kang S, An K. 2025. Development of a Radiation Dose Prediction and Management System for Enhancing the Safety of Radiation Workers. *Journal of Radiation Industry* **19**(1):81-90. https://doi.org/10.23042/radin.2025.19.1.81.
10. Jung IS, Won JS. 2015. Plan of BIM-based Quantity Take-off for Nuclear Power Plant Decommissioning. *Journal of Korea Academia-Industrial cooperation Society* **16**(9):6297-6304. http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2015.16.9.6297.
11. Daniška D and Vrban B. 2023. Decommissioning Planning: Empowering Efficiency through BIM Modeling and a Single-Source-of-Truth Framework. Nuclear Engineering and1 Design. 414. https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2023.112617.
12. Chen Z and Gentes S. 2021. From Point Cloud to as-built BIM: Semi-automated Wall Reconstruction for Dismantling of Nuclear Power Plants.
13. Ahnesjö A and Aspradakis MM. 1999. Dose calculations for external photon beams in radiotherapy. *Physics in Medical & Biology*. **44**(11):99-155. https://doi.org/10.1088/0031-9155/44/11/201.
14. Liu YK, Chen ZT, Chao N, Peng MJ, Jia YH. 2022. A dose assessment method for nuclear facility decommissioning based on the combination of CAD and point-kernel method. *Radiation Physics and Chemistry* 193. https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2021.109942.
15. Lee DH, Kim JY, Han CH, Kim KP. 2025. Development of Worker Radiation Dose Prediction and Assessment Algorithm Based on Kriging Interpolation Method. *Journal of Radiation Industry* **19**(1):55-61. https://doi.org/10.23042/radin.2025.19.1.55.
16. Kim JY, Kim MS, Kim JW and Kim KP. 2023. Development of Radiation Dose Assessment Algorithm for Arbitrary Geometry Radiation Source Based on Point-kernel Method. *Journal of Radiation Industry* **17**(3):275-282. https://doi.org/10.23042/radin.2023.17.3.275.
17. ICRP. 2008. Nuclear Decay Data for Dosimetric Calculations. ICRP Publication 107. Ann. ICRP 38(3).
18. Hubbell J, Seltzer S. 1987. Tables of X-RAY Mass Attenuation Coefficients and Mass Energy Absorption Coefficients 1 keV to 20 MeV for Elements Z = 1 to 92 and 48 Additional Substances of Dosimetric Interest. NISTIR 5632.
19. ANSI. 1991. Gamma Ray Attenuation Coefficient and Buildup Factors for Engineering Materials. ANSI/ANS-6.4.3.
20. ICRP. 1996. Conversion Coefficients for Use in Radiological Protection against External Radiation. ICRP Publication 74. Ann. ICRP 26(3-4).