Journal of RADIATION INDUSTRY
Vol. 18, No. 3, pp. 223-226, 2024
https://doi.org/10.23042/radin.2024.18.3.223

Original article

원전 고피폭 작업의 예측 피폭선량 정확도 개선을 위한 전산코드 시나리오 보정인자 도출 방법론

송창주[1] · 공태영[1,*] · 김지웅[1] · 박재옥[1] · 조승호[1] · 김희근[2] · 김용권[3]

[1]조선대학교 원자력공학과, [2]위덕대학교 에너지전기공학부, [3](주)뉴케어

Methodology for Calculating Correction Factors to Improve the Accuracy of Radiation Dose Predictions for High-Exposure Tasks in Nuclear Power Plants Using Computational Scenarios

Changju Song[1], Tae Young Kong[1,*], Jiung Kim[1], Jaeok Park[1], Seungho Jo[1], Hee Geun Kim[2], and Yongkwon Kim[3]

[1]Department of Nuclear Engineering, Chosun University, 10, Chosundae 1-gil, Dong-gu, Gwangju 61452, Republic of Korea
[2]Devision of Energy & Electrical Engineering, Uiduk University, 261, Donghaedaero, Gangdong, Gyeongju, Gyeongbuk 38004, Republic of Korea
[3]Nucare Inc., 41, Uiryodanji-gil, Osong-eup, Heungdeok-gu, Chungju-si, Chungbuk 28161, Republic of Korea

ABSTRACT It is essential to precisely evaluate the expected dose (collective dose) before performing high-exposure tasks in nuclear power plants because those have a high potential to cause significant radiation exposure to workers. A dose evaluation method is to design the scenarios of high-exposure tasks using computational codes, which allows for the calculation of the expected collective dose. Although these computational scenarios are useful for estimating the expected radiation dose and establishing radiation protection plans, the calculated doses may not perfectly match the actual doses that workers receive during tasks due to differences between the scenario and the actual circumstances in the radiation fields. Therefore, this study presents a methodology for calculating correction factors to improve the accuracy of dose predictions from computational scenarios. This approach aims to make the predicted collective dose before the task closer to the actual dose received by workers, thereby enhancing radiation safety for personnel performing high-exposure tasks. Additionally, these correction factors will help accurately predict doses under various working conditions in the future, contributing to minimizing radiation exposure risks for nuclear power plant workers.

Key words: Nuclear power plants, High-exposure tasks, Computational scenarios, Correction factors

1. 서 론

현재 국내 원전종사자의 유효선량한도로 연간 50 mSv와 5년간 100 mSv을 모두 적용 중에 있다. 이러한 피폭선량 규제는 원전종사자에게 나타나는 확률론적 영향과 결정론적 영향을 방지하는 중요한 역할을 한다. 낮은 피폭선량에도 불구하고 원전종사자는 확률론적 영향에 의한 방사선 위험에 노출되어 있다. 특히, 피폭선량이 증가함에 따라 이러한 확률론적 영향의 발생 가능성도 높아지게 된다. 그러므로, 원전종사자가 유효선량한도 이하의 선량을 받고 있다고 하더라도, 상대적으로 높은 선량을 받는 고피폭 작업에 대해서는 꾸준한 방사선피폭 관리가 필요하다. 국내 경수로 원전에서 수행되는 고피폭 작업으로는 증기발생기 노즐댐 작업, 와전류탐상검사(Eddy current testing: ECT), Man-way 작업이 포함된다 [1].

이러한 고피폭 작업은 높은 피폭선량을 유발할 가능성이 높기 때문에, 작업을 수행하기 전에 예상 피폭선량(집단선량)을 철저히 평가(예측)하는 것이 필수적이다. 이러한 평가 방법 중 하나로, 작업 전산코드 시나리오를 활용하여 고피폭 작업을 설계하고, 이를 통해 예상 집단선량을 계산할 수 있다. 대표적인 시나리오 전산코드로는 VRDose와 VISIPLAN이 있다. VRDose는 일본 Nuclear Cycle Development Institute와 노르웨이의 Halen Virtual Reality Center가 공동으로 개발한 가상현실 기술 기반의 공정 시

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

Copyright© 2024 by Korean Society of Radiation Industry

*Corresponding author: Tae Young Kong
Tel: +82-62-230-7158, E-mail: tykong@chosun.ac.kr

Received 10 September 2024 Revised 12 September 2024 Accepted 12 September 2024

뮬레이션 전산코드이다. VRDose는 작업 시나리오에 기반을 두고 작업종사자의 방사선 피폭선량을 예측하기 위한 도구로서, 미리 설정한 작업 시나리오에 따라 산출된 피폭선량을 검토하고 방사선방호 측면에서 이를 개선(피폭저감)하기 위한 방안을 도출하기 위해 활용된다[2]. VISIPLAN은 벨기에의 SCK·CEN에서 개발한 전산코드로서, 원자력 시설의 해체 과정중의 ALARA 문제를 평가하고 최적화하기 위하여 3차원 가상환경에서의 피폭선량 산출 및 작업 시뮬레이션을 수행한다. 또한, VISIPLAN은 피폭선량 산출뿐만 아니라, 특정지점의 공간선량률을 활용하여 해당선원의 방사능을 계산할 수 있는 기능이 추가되어 있다[2]. 이러한 작업 시나리오 전산코드들은 고피폭 작업의 예상 피폭선량(집단선량)을 산출하고 방사선방호 계획을 수립하는데 활용되고 있다. 그러나, 설계된 시나리오가 실제 작업과 완벽히 동일하지 않기 때문에 산출된 예상 집단선량이 실제 작업에서 받은 작업종사자의 집단선량과 일치하지는 않는다. 따라서, 본 연구에서는 전산코드를 통해 개발된 작업 시나리오 집단선량 예측 정확성을 높이기 위해 보정인자를 도출하는 방법론을 제시하고자 한다. 이를 통해 작업 전 예측된 집단선량이 실제 작업종사자의 집단선량에 더욱 근접하도록 하여, 고피폭 작업을 수행하는 작업종사자의 방사선안전성을 향상시키는데 기여하고자 한다. 또한, 이러한 보정인자를 통해 향후 다양한 작업 조건에서의 집단선량을 더욱 정확하게 예측할 수 있도록 지원하고, 원전종사자의 피폭 위험을 최소화하는데 도움을 주고자 한다.

2. 재료 및 방법

본 연구에서는 국내 원전의 방사선관리연보를 활용하여 고피폭 작업의 집단선량 데이터를 수집하고 분석하였다. 집단선량 데이터를 분석하는 것은 각 작업의 피폭선량 변동성을 이해하고, 이를 바탕으로 전산코드 시나리오 보정인자를 도출하기 위해 매우 중요하다. 이러한 데이터를 통해, 특정 작업에서 시나리오 코드로 계산된 예상 피폭선량과 실제 작업에서 원전종사자가 받는 피폭선량 간의 차이를 체계적으로 분석할 수 있다[3,4,5-14].

집단선량 데이터 분석 과정에는 정규화가 필요하다. 고피폭 작업시나리오를 통해 도출되는 주요 변수는 인원수, 작업시간 및 집단선량이며, 실제 고피폭 작업에서도 이러한 변수들에 의해 집단량이 결정된다. 이러한 변수들을 각각 비교하는 대신, 정규화를 통해 하나의 요소로 통합함으로써, 전산코드 시나리오 보정인자를 도출할 때 계산을 단순화하고, 보다 일관된 결과를 얻을 수 있다[1,2].

먼저, 와전류탐상검사, Man-way 작업 등 주요 고피폭 작업에 대해, 각각 전산코드 시나리오로 예상 집단선량을 도출한다. 이후, 각 작업에 대해 지난 10년간 실제 집단선량 데이터와 비교하여 작업별로 10개의 연도별 보정인자를 도출한다. 보정인자 도출 과정은 다음과 같이 진행된다. 각 작업에 대해 연도별로 실제 집단선량을 전산코드 시나리오 예상 집단선량과 비교하여 보정인자 K_i를 계산한다.

$$K_i = \frac{\text{실제 피폭선량}_i}{\text{예상 피폭선량}}$$

여기서 K_i는 전산코드 시나리오 보정인자이며, i는 연도를 나타낸다. 이러한 과정을 10년간의 데이터를 통해 반복하여 각 작업에 대한 보정인자들의 평균값을 도출한다. 이러한 평균 보정인자 $\overline{K}$는 해당 작업에 대한 전산코드 시나리오의 집단선량 예측결과의 정확도를 향상시키는 데 사용될 수 있다. 이를 통해 각 작업의 전산코드 시나리오 예상 집단선량과 실제 집단선량 간의 편차를 줄이고, 향후 다양한 작업 조건에서의 보다 정확한 집단선량 예측을 가능하게 한다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 국내 경수로 원전에서 수행된 고피폭 작업에 대해 실제 집단선량과 전산코드 시나리오로 예측된 예상 집단선량을 비교하여 보정인자를 도출하는 방법을 제시하고자 한다. 보정인자를 도출하는 이유는 전산코드 시나리오의 예측 정확도를 향상시키기 위한 것으로, 이를 통해 방사선 피폭관리의 신뢰성과 효율성을 높일 수 있기 때문이다. 보정인자 도출 과정은 다음과 같은 단계로 진행된다.

첫째, 지난 10년간의 와전류탐상검사, 노즐댐 작업, Man-way 작업 3가지 고피폭 작업에 대한 실제 집단선량 데이터를 수집하고, 전산코드 시나리오를 이용하여 각 작업에 대한 예상 집단선량을 도출한다. 둘째, 실제 집단선량과 예상 집단선량 데이터를 단위시간당 방사선량으로 정규화하여, 작업 간 비교가 용이하도록 한다[1]. 셋째, 각 연도에 대해 실제 피폭선량과 예상 피폭선량 간의 비율을 계산하여 보정인자 K_i를 도출한다. 예를 들어, 2012년 와전류탐상검사의 정규화된 실제 피폭선량이 0.0253 mSv h^{-1}였고, 전산코드 시나리오를 통해 정규화된 예상 피폭선량이 0.0300 mSv h^{-1}이다면, 해당 연도의 와전류탐상검사에 대한 보정인자 $K_{\text{ECT, 2012}}$는 다음과 같이 계산 된다.

$$K_{\text{ECT,2012}} = \frac{0.0253\ \text{mSv/h}}{0.0300\ \text{mSv/h}} = 0.8421$$

이와 같은 방식으로, 모든 작업에 대해 각 연도별로 정규화된 실제 피폭선량과 정규화된 예상 피폭선량의 비율을 계산하여 보정인자를 도출한다. 이러한 보정인자는 전산코드 시나리오의 예측값을 실제 작업 상황에서 발생하는 피폭선량 값에 보정하기 위해 사용된다. 보정인자가 1보다 큰 경우, 전산코드 시나리오의 예상치보다 실제 피폭선량이 더 높았음을 의미하며, 반대로 보정인자가 1보다 작은 경우, 예상치보다 실제 피폭선량이 더 낮았음을 의미한다. 넷째, 각 작업에 대해 도출된 연도별 보정인자들의 평균

값을 계산한다. 평균 보정인자 $\overline{K}$는 전산코드 시나리오의 예측 정확도를 개선하는 데 사용될 수 있으며, 이는 다음의 수식을 통해 구할 수 있다.

$$\overline{K} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} Ki$$

여기서 $\overline{K}$는 특정 작업에 대한 보정인자의 평균값을 의미하며, K_i는 각 연도에 도출된 개별 보정인자를 의미한다. n은 연도의 수를 의미한다.

보정인자의 평균값만 사용할 경우 예측의 정확도가 개선되지만, 변동성이나 불확실성을 충분히 반영하지 못할 수 있다. 이를 보완하기 위해 보정인자의 표준편차를 함께 활용하여 예측의 신뢰성을 높이는 접근이 가능하다. 예를 들어, 와전류탐상검사의 보정인자 평균값 $\overline{K}_{ECT}$와 표준편차 σ_{ECT}를 계산하여 신뢰 구간을 설정할 수 있다.

$$\text{신뢰 구간} = \overline{K}_{ECT} \pm Z_{\alpha/2} \times \sigma_{ECT}$$

여기서 나타난 $Z_{\alpha/2}$는 원하는 신뢰도에 해당하는 Z-score값이다. 이 신뢰 구간은 예상 피폭선량의 변동 범위를 제공하여, 예측값이 어느 정도 범위 내에서 변동할 수 있는지를 나타낸다. 예를 들어, 와전류탐상검사의 보정인자 평균값 $\overline{K}_{ECT}$가 1.1338이고, 표준편차 σ_{ECT}가 0.2145로 계산되었다고 가정한다. 이를 바탕으로 신뢰수준이 95%인 신뢰구간을 설정하면 다음과 같은 보정인자의 신뢰구간(하한값과 상한값)을 얻을 수 있다.

$$\text{신뢰 구간} = 1.1338 \pm 1.96 \times 0.2145 = [0.7135, 1.5541]$$

이러한 신뢰구간은 전산코드 시나리오에서 계산된 예상 피폭선량이 어느 범위 내에서 변동할 수 있는지를 나타낸다. 예를 들어, 전산코드 시나리오를 통해 도출된 와전류탐상검사 작업의 예상 피폭선량이 0.0300 mSv h^{-1}라고 가정했을 때, 표준편차를 적용한 보정된 실제 피폭선량(신뢰수준 95%)은 다음과 같다.

보정된 실제 피폭선량(상한) = 0.0300 × 1.5541 = 0.0466 mSv/h
보정된 실제 피폭선량(하한) = 0.0300 × 0.7135 = 0.0214 mSv/h

표준편차를 적용하면 보정된 실제 피폭선량이 0.0214 mSv h^{-1}에서 0.0466 mSv h^{-1} 사이에 있을 것으로 예상할 수 있다. 이렇게 얻은 보정인자의 상한값과 하한값은 향후 전산코드 시나리오를 개선하여 예상 피폭선량 값이 변경이 될 때 그에 따른 선량 값

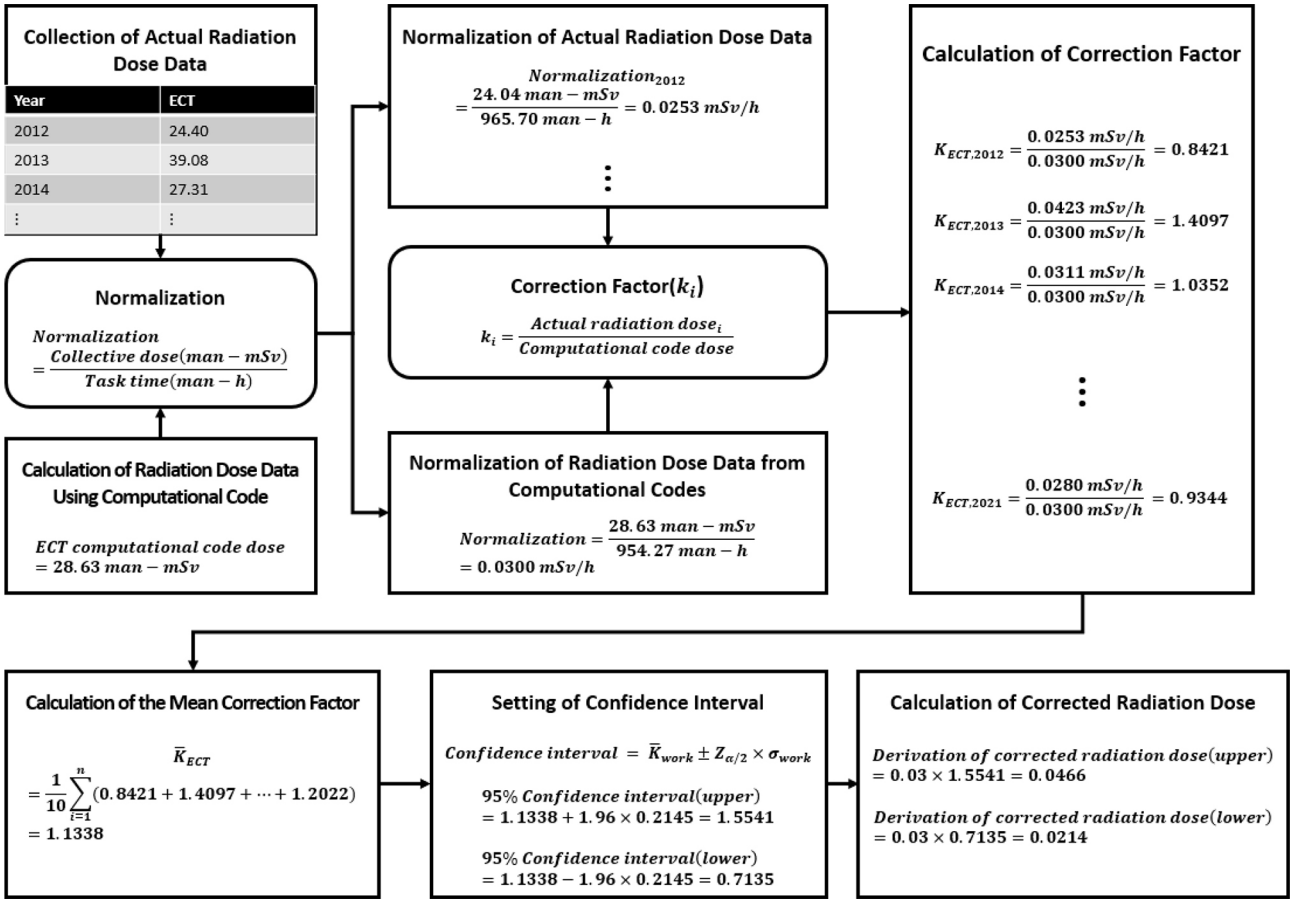

Fig. 1. Methodology for Calculating Correction Factors

을 예측하는데 유용하게 적용될 수 있다. 전산코드 시나리오 보정인자 도출과정을 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 1은 와전류탐상검사 고피폭 작업에 대해 보정인자 도출 과정의 각 단계를 예시를 통해 나타내고 있으며, 실제 피폭선량 데이터 수집부터 정규화, 보정인자 계산, 평균값 도출, 신뢰구간 설정, 보정된 실제 피폭선량 도출까지의 계산 과정을 명확하게 보여준다.

추가로, 보정인자의 정확성을 더욱 높이기 위해서는 매년 비교하는 것보다 원자로 특정 호기별로 비교하는 것이 더욱 유리하다. 이는 원자로 호기마다 운영환경에 따른 방사선학적 특성이 다르기 때문에, 호기별 보정을 통해 더욱 정확한 예측 결과를 얻을 수 있기 때문이다. 원자로 운영환경에 따른 방사선학적 특성과 작업환경은 방사선 피폭선량에 큰 영향을 미치며, 동일한 작업이라도 원자로 호기에 따라 피폭선량이 다르게 나타날 수 있다. 따라서, 원자로 호기별로 보정인자를 도출하면, 각 호기의 고유한 방사선 환경과 작업 조건을 더욱 정확하게 반영할 수 있다. 이와 같은 방법은 보정인자의 정확도를 높여 궁극적으로 원전 종사자의 방사선 안전성을 강화하는 데 중요한 기여를 할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 국내 원전에서 수행되는 고피폭 작업에 대해 방사선 피폭선량 데이터를 분석하고, 전산코드 시나리오(VRDose, VISIPLAN 등)를 활용하여 예상 피폭선량과 실제 피폭선량 간의 차이를 체계적으로 평가하는 방법론을 제시하였다. 특히, 고피폭 작업에 대한 보정인자 K_i를 도출하고, 평균 보정인자 $\overline{K}$와 표준편차 σ를 활용하여 전산코드 시나리오의 예측 정확도를 높이는 방법론을 제시하였다.

연구의 주요 결과로, 각 작업별 보정인자 K_i를 도출하고, 연도별 평균값과 표준편차를 계산하여 전산코드 시나리오의 예측 정확도를 개선할 수 있는 방법을 제시하였다. 보정인자의 평균값 $\overline{K}$는 실제 피폭선량과 예측 피폭선량 간의 편차를 줄이는데 효과적이며, 표준편차 σ를 고려하여 신뢰 구간을 설정함으로써 예측 모델의 신뢰성을 더욱 높일 수 있다. 이러한 결과는 방사선 피폭 관리에 있어 전산코드 시나리오의 활용 가능성을 증대시키고, 원전 종사자의 방사선 안전성을 향상시키는 데 중요한 기여를 할 수 있음을 시사한다.

결론적으로, 본 연구는 고피폭 작업에서의 방사선 피폭선량 예측의 정확도를 높이기 위한 체계적인 방법론을 제공하며, 이를 통해 원전 종사자의 방사선 안전성을 강화하는 데 기여할 수 있을 것으로 기대된다. 향후 연구를 통해 본 연구의 결과를 더욱 심화하고, 다양한 작업 환경에서도 적용할 수 있는 방사선 방호 전략을 개발하는 것이 중요하다고 판단된다.

사 사

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. RS-2022-00144506).

참고문헌

1. Song C, Kong TY, Kim S, Son J, Kim H, Kim J, Park J, Kim HG, Kim Y. 2024. High-radiation-exposure work in Korean pressurized water reactors. *Nuclear Engineering and Technology* **56**(5):1874-1879. https://doi.org/10.1016/j.net.2023.12.048
2. Choi BS, Kim GH, Kim SH, Kim IJ, Kim CH, Moon JG, Seo YC, Shin HC, Eom HS, Lee SW, Lee JH, Jeong GM, Jeong GS, Choi Y, Choi YS, Hyun DJ. 2014. Development of the Integrated Assessment System and Remote Control Technology for Decommissioning Process. Korea Atomic Energy Research Institute, KAERI/RR-3941/2014. https://doi.org/10.23000/TRKO201800009460
3. Song C, Kong TY, Kim S, Son J, Kim H, Kim J, Kim HG. 2023. Classification of Radiation Work in Korean Nuclear Power Plants. *Journal of Radiation Industry* **17**(3):239-256. https://doi.org/10.23042/radin.2023.17.3.239
4. Song C, Kong TY, Kim S, Son J, Kim J, Park J, Kim HG, Kim Y, Jung H. 2024. Dose Reduction Factors for High-Exposure Tasks at Korean Pressurized Water Reactors. *Journal of Radiation Industry* **18**(1):100-110. https://doi.org/10.23042/radin.2024.18.1.23
5. Korea Hydro and Nuclear Power. Annual Report of Occupational Exposure in Nuclear Power Plants, KHNP, Gyeongju, Korea, 2012 ([in Korean]).
6. Korea Hydro and Nuclear Power. Annual Report of Occupational Exposure in Nuclear Power Plants, KHNP, Gyeongju, Korea, 2013 ([in Korean]).
7. Korea Hydro and Nuclear Power. Annual Report of Occupational Exposure in Nuclear Power Plants, KHNP, Gyeongju, Korea, 2014 ([in Korean]).
8. Korea Hydro and Nuclear Power. Annual Report of Occupational Exposure in Nuclear Power Plants, KHNP, Gyeongju, Korea, 2015 ([in Korean]).
9. Korea Hydro and Nuclear Power. Annual Report of Occupational Exposure in Nuclear Power Plants, KHNP, Gyeongju, Korea, 2016 ([in Korean]).
10. Korea Hydro and Nuclear Power. Annual Report of Occupational Exposure in Nuclear Power Plants, KHNP, Gyeongju, Korea, 2017 ([in Korean]).
11. Korea Hydro and Nuclear Power. Annual Report of Occupational Exposure in Nuclear Power Plants, KHNP, Gyeongju, Korea, 2018 ([in Korean]).
12. Korea Hydro and Nuclear Power. Annual Report of Occupational Exposure in Nuclear Power Plants, KHNP, Gyeongju, Korea, 2019 ([in Korean]).
13. Korea Hydro and Nuclear Power. Annual Report of Occupational Exposure in Nuclear Power Plants, KHNP, Gyeongju, Korea, 2020 ([in Korean]).
14. Korea Hydro and Nuclear Power. Annual Report of Occupational Exposure in Nuclear Power Plants, KHNP, Gyeongju, Korea, 2021 ([in Korean]).