

## Planning of Optimal Work Path for Minimizing Exposure Dose During Radiation Work in Radwaste Storage

Yoon Hyuk Kim<sup>\*</sup> · Won Man Park<sup>†</sup> · Kyungsoo Kim<sup>‡</sup> · Jooho Whang<sup>§</sup>

<sup>\*</sup>College of Advanced Technology, Kyung Hee University, Corresponding author

<sup>†</sup>College of Advanced Technology, Kyung Hee University

<sup>‡</sup>Impedance Imaging Research Center, Kyung Hee University

<sup>§</sup>Dept. of Nuclear Engineering, Kyung Hee University

### 방사성 폐기물 저장시설에서의 방사선 작업 중 피폭선량 최소화를 위한 최적 작업경로 계획

김윤혁<sup>\*</sup> · 박원만<sup>†</sup> · 김경수<sup>‡</sup> · 황주호<sup>§</sup>

<sup>\*</sup>경희대학교 테크노 공학대학, 교신저자

<sup>†</sup>경희대학교 테크노 공학대학

<sup>‡</sup>경희대학교 임피던스 영상 신기술 연구센터

<sup>§</sup>경희대학교 원자력 공학과

(2004년 9월 29일 접수, 2005년 2월 22일 채택)

**Abstract** - Since the safety of nuclear power plant has been becoming a big social issue, the exposure dose of radiation for workers has been one of the important factors concerning the safety problem. The existing calculation methods of radiation dose used in the planning of radiation work assume that dose rate does not depend on the location within a work space, thus the variation of exposure dose by different work path is not considered. In this study, a modified numerical method was presented to estimate the exposure dose during radiation work in radwaste storage considering the effects of the distance between a worker and sources. And a new numerical algorithm was suggested to search the optimal work path minimizing the exposure dose in pre-defined work space with given radiation sources. Finally, a virtual work simulation program was developed to visualize the exposure dose of radiation during radiation works in radwaste storage and provide the capability of simulation for work planning. As a numerical example, a test radiation work was simulated under given space and two radiation sources, and the suggested optimal work path was compared with three predefined work paths. The optimal work path obtained in the study could reduce the exposure dose for the given test work. Based on the results, the developed numerical method and simulation program could be useful tools in the planning of radiation work.

**Key words** : Exposure dose, Work path, Numerical analysis, Computer Simulation, Space discretization

**요약** - 원자력 발전의 안정성이 사회적 문제로 제기된 이후 작업종사자에 대한 작업 중 방사선 피폭량에 대한 관심이 높아지고 있다. 현재의 방법에 의하면 방사선 작업 계획의 수립 시 작업 공간 내 선량률이 일정하다는 가정 하에 피폭선량을 예측하므로, 작업 경로에 따른 피폭선량의 변화에 대한 고려가 이루어 지지 않고 있다. 본 연구에서는 작업자와 선원과의 거리가 고려된 수정된 방사선 피폭량 계산식을 이용하여 방사성 폐기물 저장시설에서의 작업 중 작업경로 변화에 따른 방사선 피폭량을 계산하였다. 이 계산식을 이용하여 주어진 작업 공간과 선원 조건하에서 작업 중 방사선 피폭량을 최소로 하는 최적 작업경로를 탐색할 수 있는 수치해석 알고리즘을 제안

하였다. 이를 위하여 2차원 작업공간에서 무한개의 작업경로를 유한개의 경로로 근사화하고 근사화된 모든 작업경로 중 피폭선량이 최소가 되는 작업경로를 탐색하였다. 또한, 3차원 그래픽 기술과 Java 프로그래밍을 이용한 가상작업 시뮬레이션 프로그램을 개발하고 작업 공간의 선량률 가시화 및 가상 작업 시뮬레이션을 수행하여 방사선 작업 계획의 수립을 위한 도구로서의 가능성을 검토하였다. 수치해석 계산과 시뮬레이션 과정을 통하여 최적 작업경로는 작업자와 선원과의 거리를 증가시키고 작업 시간을 단축시킬 수 있는 경로로 제시되었고, 이를 바탕으로 방사선 피폭량은 작업시간뿐만 아니라 작업자와 선원간의 거리에 영향을 받음과 최적화된 방사선 방호를 위해 작업경로가 고려되어야 함을 확인하였다.

중심어 : 방사선 피폭량, 작업경로, 수치해석, 시뮬레이션, 공간이산화

## 서론

천연자원이 부족한 국내 현실에서 원자력 발전은 국가의 안정적인 에너지 공급원으로서 그 필요성을 인정받고 있다. 그러나 방사선에 대한 막연한 두려움으로 인하여 원자력 발전소에 대한 부정적 인식이 존재하는 것 또한 현실이다. 이러한 원자력 발전소에 대한 부정적 인식의 극복과 원자력 발전을 통한 안정적 전력 공급을 위하여 원자력 발전소 내 방사선 방호 문제가 매우 중요하게 되었다. 1990년 작업종사자 및 일반인에 대한 새로운 방사선량 제한치를 구체적으로 제시한 ICRP(International Commission of Radiological Protection, 국제방사선방호위원회)의 ICRP Publication 60(이하 ICRP-60) 발표 이후 대부분의 국가가 ICRP-60 권고안을 도입하였거나 도입을 위한 연구가 진행 중이다. 국내에서도 이 권고안을 1998년부터 받아들이기 시작하여 2003년 도입을 완료하였으며, 그 결과 방사선 작업종사자의 경우 선량한도가 연간 50 mSv에서 5년간 100 mSv(연평균 20 mSv)로, 일반인은 연간 5 mSv에서 1 mSv로 각각 하향 조정되었다. 이러한 방사선 방호 규정을 준수하며, 최적화된 방사선 방호를 위해서는 정확한 방사선 피폭량의 예측이 선행되어야 할 것이다.

현재 방사선 작업 계획 수립 시 방사선 피폭 예측량은 작업지역에서 측정된 조사선량률을 바탕으로 작업공간의 선량률이 동일하다고 가정하여 선량률과 작업시간의 곱으로 계산된다. 이 예측량은 작업자의 작업 위치, 경로 등이 명확히 고려되지 않은 예측 선량으로 작업자의 실 피폭선량을 과대 혹은 과소평가할 수 있다. 선량률은 선원의 종류에 따라 주어지는 특정감마선과 작업자와 선원 사이의 거리의 함수로 작업 시간에 비례하고 선원과 작업자 사이의 거리의 제곱에 반비

례한다. 그렇기 때문에 같은 작업 장소라 하더라도 작업자의 위치에 따라 피폭선량이 달라질 수 있고, 단일 피폭선량과 작업시간의 곱으로 계산된 예상 피폭선량과 실제 피폭선량간의 오차가 발생하게 된다.

본 연구에서는 작업자의 작업 시간과 위치 등을 고려한 방사선 피폭량 계산식을 구성하고 수치해석 방법을 이용하여 작업 중의 방사선 피폭량을 계산하였다. 또한, 구성된 방사선 피폭량 계산식과 공간이산화 방법을 이용하여 방사선 피폭량을 최소로 하는 최적 작업경로를 구하였다. 마지막으로, 가상 작업 시뮬레이션 프로그램을 개발하여 가상현실 환경에서의 방사선 작업을 통한 방사선 피폭량을 예측하였다. 본 연구에서는 작업 공간을 방사성 폐기물 저장시설로 한정하였으며, 정확한 선원정보를 안다고 가정하였다. 또한 주어진 선원 이외에 작업자의 방사선 피폭을 발생하는 물질이 없다고 가정하였다.

## 재료 및 방법

### 작업 공간 정의

최적 작업경로의 설정을 위한 가상 작업공간을 그림 1과 같이 정의하였다. 가로 31 m, 세로 15 m의 2차원 공간에 두 개의 동일한 점 등방 선원(그림 1의 선원 1, 선원 2)을 가정하였다. 시작점(그림 1의 위치 1)에서 출발하여, 두 점(그림 1의 위치 2, 위치 3)을 거쳐 다시 시작점으로 돌아오는 작업경로를 가정하였다. 이 때, 작업자의 부피를 무시하고 하나의 점으로 가정하였고, 작업자의 이동속도는 일정하다고 가정하였다.

그림 1의 각 작업경로(경로 1 : 위치 1 → 위치 2, 경로 2 : 위치 2 → 위치 3, 경로 3 : 위치 3 → 위치 1)는 서로에 대해 영향을 미치지 않으므로,

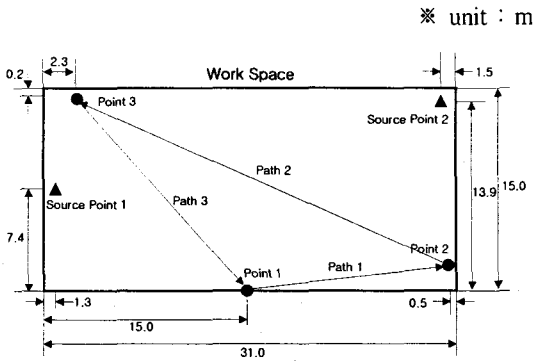


Fig. 1. A virtual work space with two radiation sources on three predefined work paths.

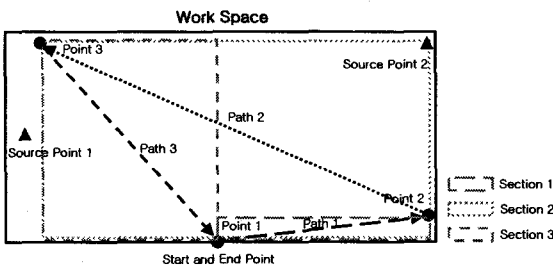


Fig. 2. The subsections of the virtual work space to define the optimal work path.

각각의 경로에 대한 최적 작업경로를 찾고 이 경로들을 연결하면 전체 작업공간에서 최적 작업경로가 된다고 가정하였다. 구성된 작업공간을 경로에 따라 영역 1, 영역 2, 영역 3의 세부분으로 구분하였다(그림 2). 이때, 각각의 최적 작업경로는 구분한 영역의 범위 안에 있다고 가정하였다. 영역의 구분은 계산의 수행 범위를 한정시켜 계산 속도 및 효율을 높이기 위함이다.

### 작업경로 근사화

2차원 평면 공간 내에서 한 지점에서 다른 지점까지의 이동은 무한개의 경로를 통해 가능하다. 따라서 모든 경로에 대한 방사선 피폭량을 계산하고 그 값을 최소로 하는 최적 작업경로를 찾기 위하여 무한개의 작업경로를 부분선형 근사화법을 이용하여 유한개의 작업경로로 근사화하였다.

먼저 주어진 영역을 그림 3에서와 같이  $(n+1)$  개의 가로 방향 직선( $h_0, h_1, \dots, h_n$ )과  $(m+1)$  개의 세로 방향 직선( $v_0, v_1, \dots, v_m$ )을 이용하여 가로×세로를  $m \times n$  개인 영역으로 나누고, 각 직선의 교점을 절점으로 정의하였다. 본 연구에서는  $m=8, n=8$ 이고, 가로 방향 직선의 간격과 세로

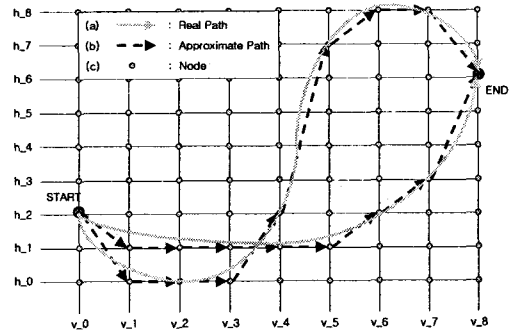


Fig. 3. Discretization of work paths based on a space discretization method.

방향 직선의 간격이 각각 일정하다고 가정하였다. 시작점에서 종착점에 이르는 임의의 경로가 주어졌을 때(그림 3의 (a)), 세로 방향 선분과 경로의 교점에서 동일 직선상의 가장 가까운 절점들을 찾는다. 이 절점들을 선분으로 연결하여 주어진 경로에 대한 근사 경로(그림 3의 (b))를 구할 수 있다. 이와 같은 방법으로 시작점에서 종착점에 이르는 임의의 경로를  $(n+1)^{(m-1)}$  개의 부분 선형 근사 경로 중의 하나로 표시할 수 있다.

### 방사선 피폭량 계산

경로에 따른 이동 중의 방사선 피폭량은 선원과 작업자간의 거리에 따른 선량률( $E$ )의 시간에 대한 적분으로 계산된다[4].

$$\text{선량률} : E = \sum_T w_T H_T \quad (1)$$

$$\text{피폭선량} : E = \int_0^{t_0} E dt \quad (2)$$

이때,  $T$ 는 조직(tissue),  $H_T$ 는 등가 선량률,  $w_T$ 는 조직 가중치,  $t_0$ 는 경로를 이동하는 동안 걸린 시간을 각각 의미한다.

등가선량  $H_T$ 는 다음과 같이 표현된다[4].

$$H_T = \sum_R w_R D_{T,R} \quad (3)$$

여기서  $w_R$ 은 방사선 가중치이고,  $D_{T,R}$ 은 조직  $T$ 의 특정위치에서의 방사선  $R$ 의 흡수선량이다.

선원으로부터의 거리  $r$ 에서 조직  $T$ 의 흡수선량률은

$$D_{T,R} = 0.877 \cdot \frac{(\mu/\rho)_T}{(\mu/\rho)_{air}} \cdot \frac{\Gamma \cdot S}{r^2} \quad (4)$$

로 주어진다[5]. 이때  $(\mu/\rho)_T$ 는 조직감쇠계수,  $(\mu/\rho)_{air}$ 는 공기에 의한 감쇠계수,  $\Gamma$ 는 특정감마상수,  $s$ 는 방사능 그리고  $r$ 은 선원과 작업자와의 거리이다. 따라서 등가선량률( $H_T$ )는

$$H_T = \sum_R w_R \cdot 0.877 \frac{(\mu/\rho)_T}{(\mu/\rho)_{air}} \cdot \frac{\Gamma \cdot s}{r^2} \quad (5)$$

로 표현될 수 있다. 어떤 시점  $t$ 에서의 선원과 작업자와의 거리  $r$ 을  $r(t)$ 로 가정하고, 식 (1)과 식 (5)를 이용하여 식(2)를 정리하면

$$E = \int_0^{t_0} E dt = \sum_T w_T \int_0^{t_0} H_T dt \quad (6)$$

$$= \sum_T w_T \int_0^{t_0} (\sum_R w_R \cdot 0.877 \frac{(\mu/\rho)_T}{(\mu/\rho)_{air}} \cdot \frac{\Gamma \cdot s}{r(t)^2}) dt \quad (7)$$

$$= \sum_T w_T \sum_R w_R \cdot 0.877 \frac{(\mu/\rho)_T}{(\mu/\rho)_{air}} \Gamma \cdot s \int_0^{t_0} \frac{1}{r(t)^2} dt \quad (8)$$

$$= 0.877 \frac{(\mu/\rho)_T}{(\mu/\rho)_{air}} \Gamma \cdot s \sum_T w_T \sum_R w_R \int_0^{t_0} \frac{1}{r(t)^2} dt \quad (9)$$

가 된다. 인체인 경우  $(\mu/\rho)_m / (\mu/\rho)_a \cong 1.1$ 이며, 총조직가중치  $\sum_T w_T = 1$  총방사선 가중치

$\sum_R w_R = 1$ 로 가정하였다. 따라서 방사선 피폭량( $E$ )은

$$E = 0.965 \cdot \Gamma \cdot s \int_0^{t_0} \frac{1}{r(t)^2} dt \quad (10)$$

가 된다.

**최적 작업경로 탐색**

방사선 피폭량 계산식 (10)을 이용하여 최적 작업경로를 찾는 수치해석 알고리즘을 제안하였다(그림 4). 방사선 피폭량 계산을 위해 선원으로 192Ir 20 Ci를 가정하고, 이에 따른 감마상수( $\Gamma$ )로 0.48 [ $(R m^2) \cdot (hr Ci)^{-1}$ ], 방사능( $s$ )으로 20 Ci를 각각 입력하였다[6]. 이동속도는 3.7 ms<sup>-1</sup>로 하여 각 절점 사이의 이동 시간을 구하였다. 작업경로 근사에 의한  $(n+1)^{(m-1)}$ 개의 모든 경로에서 방사선 피폭량을 계산하여 비교하고, 이를 최소로 하는 작업경로를 구하였다. 이 경로가 구하고자 하는 최적 작업경로라고 정의하였다.

최적 작업경로가 이동 중 방사선 피폭량을 최소로 함을 확인하기 위하여, 세 가지 임의의(최단거리이동, 수직이동, 혼합이동) 작업경로에서 방사선 피폭량을 구하고 최적 작업경로에서의 방사선 피폭량과 비교하였다.

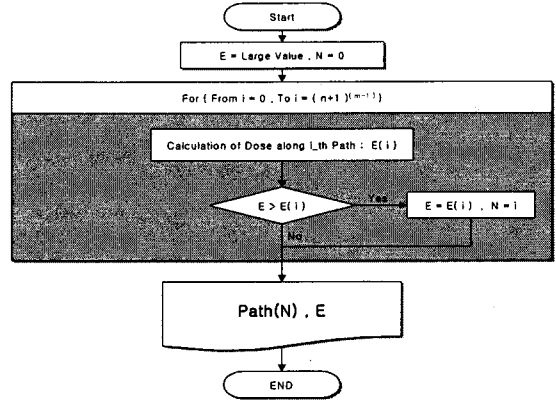


Fig. 4. A heuristic optimal path algorithm.

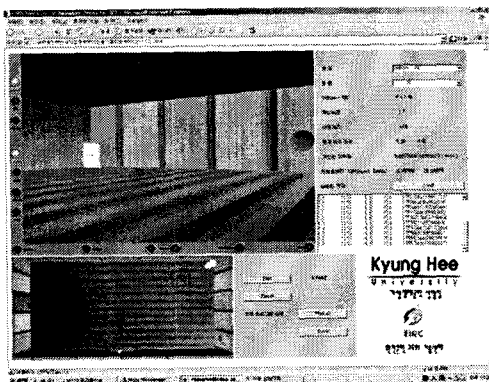
**선량률 가시화 및 가상 작업 시뮬레이션 프로그램 개발**

최적 작업경로 및 경로 변화에 따른 피폭량의 변화를 검증하기 위한 가상 작업 시뮬레이션 프로그램을 개발하였다(그림 5). 이는 단순 피폭량의 변화를 검증할 뿐만 아니라 작업공간의 선량률을 가시화함으로써 시각적으로 방사선 방호에 유리한 경로를 예측하고, 가상공간에서 시뮬레이션 수행자 임의의 작업경로에 따른 방사선 피폭량을 계산하기 위해 개발되었다. 시뮬레이션 프로그램은 Web 기반 3차원 그래픽 언어인 VRML(Virtual Reality Modeling Language)과 Java™를 사용하였다. 가상현실 기술을 이용하여 작업자가 가상공간에서 작업을 수행하는 동안의 방사선 피폭량 및 작업시간, 이동거리 등을 구하도록 개발하였으며, 시뮬레이션 결과데이터를 Java EAI(External Authoring Interface)를 통하여 화면 및 데이터 파일로 출력하도록 개발하였다. 시뮬레이션 프로그램에서 선원은 <sup>122</sup>Sb, <sup>137</sup>Cs, <sup>51</sup>Cr, <sup>60</sup>Co, <sup>131</sup>I, <sup>192</sup>Ir, <sup>226</sup>Ra, <sup>24</sup>Na 등 8가지 방사성 물질이, 방사능은 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40 Ci의 8개 값이 각각 적용 가능하도록 하였으며, 이 값들은 두 개의 점 등방선원에 동시에 적용된다. 그림 5의 (a), (b)는 가상작업공간에서의 작업 및 이동 중 방사선 피폭량을 계산하기 위한 시뮬레이션 프로그램의 초기화면과 시뮬레이션 수행중의 화면이며, 키보드의 방향키 및 간단한 마우스 조작을 통해 시뮬레이션이 가능하도록 개발되었다.

선원의 선택 시 특정감마선에 따른 단위 시간당 방사선 피폭량을 계산하고, 이에 따라 선량률을 가시화하여 시뮬레이션 수행자가 시각적으로 방사선 방호가 유리한 지점을 확인할 수 있도록 그림 5의 (b)의 하부 화면과 같이 선원을 중심으



(a) Initial Scene.



(b) Simulation Scene.

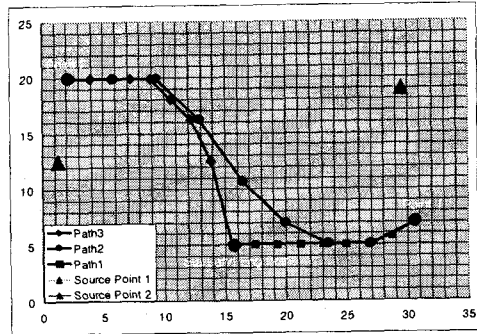
Fig. 5. A developed simulation program for visualization of dose rates & work path simulation.

로 하는 동심원 군을 표시하였다. 방사선 피폭 데이터의 입력 기능과 함께 시뮬레이션 종료 후, Microsoft® Excel(Microsoft Corp. USA) 등의 프로그램을 이용하여 시뮬레이션 결과를 확인할 수 있도록 시뮬레이션 프로그램을 개발하였다. 본 연구에서는 작업공간을 둘러싸고 있는 벽과 작업 공간으로 진입하는 문은 완전 차폐되었다고 가정하여 작업 공간에서의 방사선 피폭만을 고려하였다.

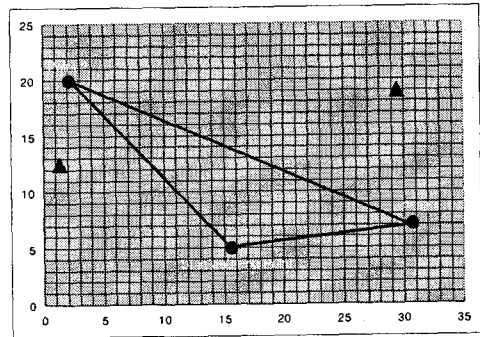
### 결과 및 고찰

#### 최적 작업경로 선택

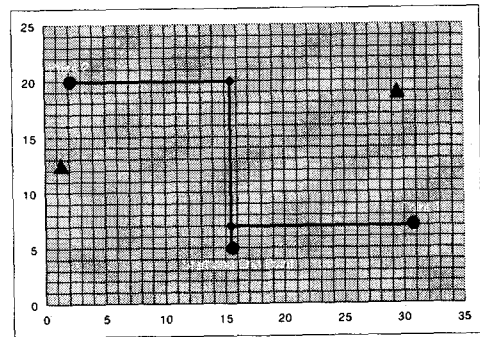
그림 2의 영역 1, 영역 2, 영역 3에서 방사선 피폭량을 최소로 하는 각각의 최적 작업경로를 구하고, 이를 연결하여 전체 가상 작업 공간에 대한 최적 작업경로를 구하였다(그림 6 (a)). 방사선 피폭량( $E$ )은



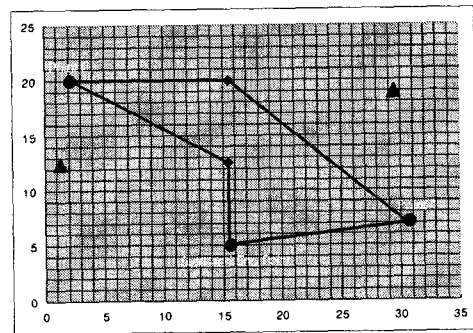
(a) Case 1 (Suggested optimal path).



(b) Case 2 (The shortest path).



(c) Case 3 (Rectangular path).



(d) Case 4 (Hybrid path).

Fig. 6. Four Pre-defined different cases for comparison of exposure dose.

$$\text{피폭량}(E) \propto \frac{\text{작업시간}}{\text{선원으로부터의 거리}^2} \quad (11)$$

이므로 최적 작업경로는 두 개의 선원과 거리는 멀고, 작업시간을 줄일 수 있는 곡선 형태로 나타났다.

최적 작업경로가 이동 중의 최소 방사선 피폭량을 확인하기 위하여, 최단거리 이동(그림 6 (b)), 수직 이동(그림 6 (c)), 두 가지 이동의 혼합형(그림 6 (d))에서의 방사선 피폭량을 계산하고 최적 작업경로에서의 피폭량과 비교하였다(표 1).

세 가지 작업경로(그림 6 (b), (c), (d))에서의 방사선 피폭량은 최적 작업경로에 비해 10% 이상 높게 나타났다. 특히 최단 거리로 이동한 Case 2의 경우 작업 시간은 최적 작업경로의 작업시간 보다 10%이상 짧았지만, 방사선 피폭량은 최적 작업경로에 비해 약 18% 높게 나타났다. 이는 작업 중 이동에 있어, 작업시간만을 고려하는 현재 방사선 작업 계획 수립에 사용되는 계산

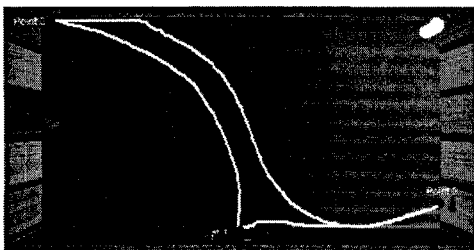
식과 다른 결과이며, 방사선 피폭은 시간과 경로에 복합 영향을 받음을 알 수 있었다.

**가상 작업 시뮬레이션 수행**

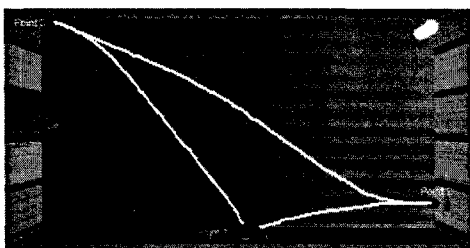
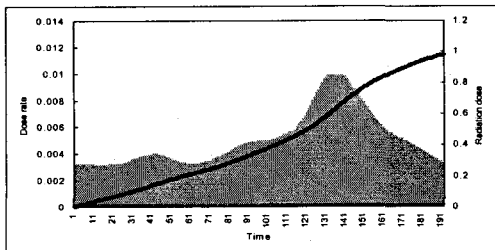
선량을 가시화 및 가상 작업 시뮬레이션을 통하여 선량을 분포에 따른 각각의 경로에서의 피폭량을 분석하고, 작업경로에 따른 방사선 피폭량 변화를 확인하였다. 이를 위해 시뮬레이션 프로그램에서 선원과 방사능으로 <sup>192</sup>Ir, 20 Ci를 각각 선택하고, 가상 작업공간에서 작업자가 문을 통해 작업공간에 진입하여 그림 6에서 주어진 4개의 경로를 따라 정해진 두 지점(위치 2 & 위치 3)을 거쳐 다시 문을 통해 외부로 나오는 이동 시뮬레이션을 수행하였다. 이때, 이동속도가 일정하도록 프로그램을 개발하였으나, 그래픽 처리 속도로 인해 부분적으로 이동속도의 차이가 발생하였다. 아래의 그래프들은 각각 다른 경로로 이동한 시뮬레이션 동안 작업자의 작업경로(左)와 작업 간 방사선 피폭량 및 선량률(右)이다.

Table 1. Exposure dose during movement along the four different cases.

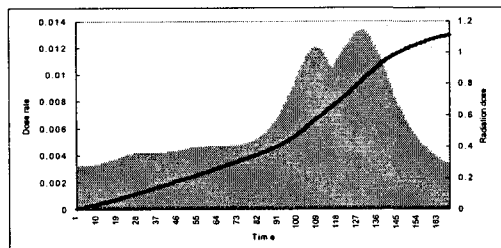
Case No.	Time [sec]	Movement [m]	Velocity [ms <sup>-1</sup> ]	Dose(E) [mSv]	$E - E_{Case1}$	$\frac{E}{E_{Case1}}$
1	20.00	74.0	3.70	$5.22 \times 10^{-1}$	$0.00 \times 10^0$	1.00
2	17.80	66.0	3.70	$6.25 \times 10^{-1}$	$9.35 \times 10^{-2}$	1.18
3	23.20	86.0	3.70	$5.76 \times 10^{-1}$	$5.45 \times 10^{-2}$	1.11
4	19.10	70.8	3.70	$5.82 \times 10^{-1}$	$6.00 \times 10^{-2}$	1.15

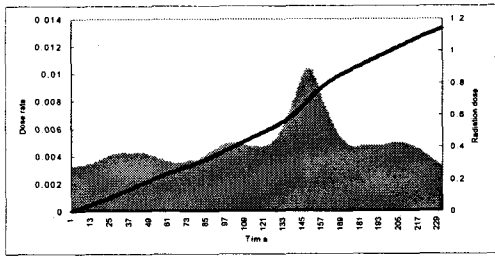
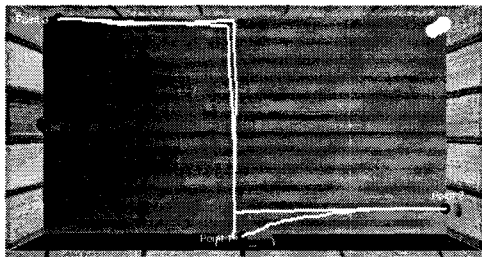


(a) Case 1 (Suggested optimal path).

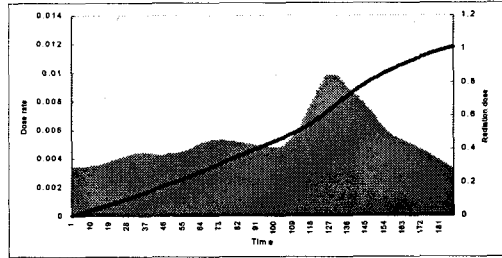
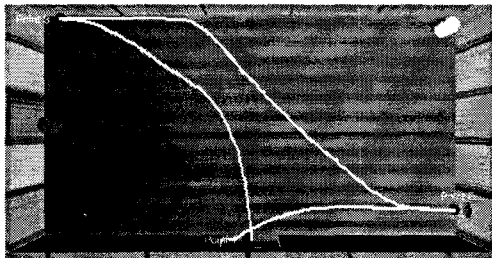


(b) Case 2 (The shortest path).





(c) Case 3 (Rectangular path).



(d) Case 4 (Hybrid path).

Fig 7. Virtual Simulation result of dose variation by four different cases.

Table 2. Exposure dose during movement along four different cases in virtual simulation.

Case No.	Time [sec]	Movement [m]	Velocity [ms <sup>-1</sup> ]	Dose(E) [mSv]	$\frac{E}{E_{Cosa}}$
1	19.10	69.9	3.66	$9.81 \times 10^{-1}$	1.00
2	16.70	65.7	3.93	$1.11 \times 10^0$	1.13
3	23.00	80.3	3.49	$1.14 \times 10^0$	1.16
4	18.60	70.2	3.77	$1.01 \times 10^0$	1.03

개발된 시뮬레이션 프로그램을 통하여 수치해석 계산 결과와 같이 최적경로에서의 방사선 피폭량이 최소가 됨을 확인하였다. 표 2에서 나타난 바와 같이 이동속도에 다소 차이가 있지만, 방사선 피폭량은 최적 작업경로(Case 1)를 기준으로 최대 0.16 mSv, 16%의 차이를 보인다. 작업 시간을 줄이기 위한 최단거리 이동(Case 2)에서는 이동거리와 작업 시간을 줄일 수 있었으나, 이동 중 선원과 근접하게 되어 최적 작업경로에 비해 상대적으로 높은 방사선 피폭량을 기록하였다. 또한 선원과의 거리에 중점을 둔 수직·수평이동(Case 3)에서는 작업시간의 증가로 인해 높은 피폭선량을 나타냈다.

가상 작업시뮬레이션 프로그램에서 선원을 중심으로 하는 동심원으로 선량률을 가시화하였다. 이때 각각의 선량률 동심원은 명암에 차이를 두어 선량률의 높고 낮음을 시각적으로 구분 가능

하도록 하였고, 선량률 동심원과 작업경로에 따른 방사선 피폭량의 변화를 고찰하였다. 그 결과 그림 7 (a)와 같이, 방사선 피폭량을 최소로 하는 최적 작업경로는 선량률 동심원의 명암이 낮은 부분을 연결한 경로와 유사함을 보였다.

작업 중 받는 피폭선량은 작업시간, 작업경로에 따른 작업자와 선원사이의 거리 등 복합적 요소에 의해 결정되는 값으로, 단순히 작업 시간의 단축만이 피폭선량을 작게 만드는 것은 아니다. 즉, 원자력 발전소 작업 중 피폭선량 평가에 있어 작업경로는 현재 중요한 작업설계 인자가 아니라고 인식되어 있지만, 본 연구를 통해 확인한 바와 같이, 방사선 피폭에 영향을 미치는 중요한 요소로써 최적의 방사선 방호를 위한 작업 계획수립에 있어 필수 고려요소라고 생각한다. 따라서 선원으로부터의 거리를 고려한 적절한 작업경로 선택에 의한 작업계획 수립으로 최적

의 방사선 방호체계를 확립할 수 있을 것이다.

## 결 론

본 연구를 통해 작업자의 위치 변화에 따른 방사선 피폭량 계산방법과 최적 작업경로의 산출방법을 제시하였다. 방사선 피폭량의 예측을 위하여 주어진 공간과 방사선원에서 작업시간과 작업경로에 따른 방사선 피폭량 근사계산법을 제시하였다. 공간 유한 근사화 및 수치해석 방법을 이용하여 방사선 피폭량을 최소로 하는 근사화된 최적 작업경로 계산 알고리즘을 제시하였으며, 다양한 경로에서의 방사선 피폭량을 비교하였다. 또한 가상 작업시뮬레이션 프로그램을 개발하여 작업공간에서 선량률의 차이를 가시화하고, 가상 작업시의 방사선 피폭량을 분석하였다.

방사선 피폭량은 시간에 비례하고 거리의 제곱에 반비례하므로, 방사선 피폭량을 최소로 하는 최적 작업경로는 작업시간과 작업자와 선원간의 거리에 동시에 영향을 받으며, 그 결과 작업경로에 따라 피폭량의 차이가 있음을 알 수 있었다. 따라서 본 연구에서 제안한 방사선 피폭량 계산식을 통하여 작업공간의 선량률이 동일하다고 가정하는 기존 계산방법에 비해 신뢰성 있는 피폭량 예측이 가능하였다.

가상 작업시뮬레이션 프로그램을 통하여 최적 작업경로에서의 방사선 피폭량이 최소가 됨을 확인하였다. 가상현실 기술을 이용한 작업 시뮬레이션 프로그램은 시뮬레이션 수행자의 조작에 따라 자유로운 이동이 가능하므로 보다 현실적인 방사선 피폭량을 예측할 수 있었다. 또한 구해진 최적 작업경로는 가상 작업시뮬레이션 프로그램의 작업창에 나타나는 선량률 동심원의 명암이 옅은 부분을 지나는 경로와 유사함을 보였다.

본 연구에서는 작업공간을 방사성 폐기물 저장시설로 작업공간을 한정하였으며, 두 개의 동일한 선원에 대하여 최적 작업경로를 구하였다. 만약 실제 작업 환경의 선원의 종류와 방사능을 정확하게 파악할 수 있다면, 본 연구의 방법을 이용하여 방사선 피폭량을 최소로 하는 최적 작업경로를 구할 수 있을 것이다. 즉, 방사성 폐기물 저장시설에서 방사성 폐기물 고화체 내 선원향에 대한 정확한 정보를 확보할 수 있다면, 컴퓨터 시뮬레이션을 이용한 방사선 피폭량 예측

이 가능할 것이라 생각한다. 또한, 작업공간을 더욱 정밀하게 유한 근사화하고 전체최적화 알고리즘 이론, 퍼지 알고리즘 이론, 유전자 알고리즘 이론 등을 도입한다면 보다 효율적으로 최적 작업경로를 구할 수 있을 것이라 기대한다.

## 감사의 글

이 논문은 산업자원부에서 시행한 전력산업 인프라구축지원사업으로 수행된 논문입니다.

## 참고문헌

1. VRML 97, International Specification ISO/IEC IS 147772-1, <http://www.vrml.org>(1997)
2. Java Development Kit 1.4.2, <http://java.sun.com/j2se/1.4.2>
3. Java Development Kit(JDKTM) .1.x-Signed Applet, <http://java.sun.com/security/>
4. ICRP, Recommendations of the ICRP, ICRP pub.60, Pergamon Press(1991)
5. John R. Lamarsh, Introduction to nuclear engineering, 2nd Ed, pp. 438~442, Addison Wesley(1983)
6. RG Jaeger, Engineering Compendium on Radiation Shielding, Vol 1, pp. 21~30, Springer-Verlag, New York(1968)
7. M. Fumizawa, A. Kameda, T. Nakagawa, W. Wu and H. Yoshikawa, "Development of Simulation-based Evaluation System for Iterative Design of Human-machine Interface in Nuclear Power Plant-Application for Reducing Workload", Nuclear Technology, 141(1), 78-87(2003)
8. A. Hornaes, J. E. Hulsund, J. Végh, C. Major, C. Horváth, S. Lipcsei and G. Kapocs, "The EOP Visualization Module Integrated into the Plasma On-Line Nuclear Power Plant Safety Monitoring and Assessment System", Nuclear Technology, 135(2), 123-130 (2001)
9. P. Wang, I. A. Kreutzer, R. Bjärnemo and R. C. Davies, "A Web-based cost-effective training tool with possible application to brain injury rehabilitation", Computer Methods and Programs in Biomedicine,



- 74(3), 235-243(2004)
10. K. Moore, J. Dykes and J. Wood, "Using Java to interact with geo-referenced VRML within a virtual field course", *Computers & Geosciences*, 25(10), 1125-1136(1999)
  11. H. Lin, J. Gong and F. Wang, "Web-based three-dimensional geo-referenced visualization", *Computers & Geosciences*, 25(10), 1177-1185 (1999)
  12. 국가 방사선 작업 종사자 안전 관리 센터, <http://kisoe.kins.re.kr/>