

방사성 폐기물 작업 중의 피폭선량 예측 프로그램 개발*

박원만** · 김윤혁** · 황주호***

Development of Exposure Level Prediction Program in Radioactive Waste Work

Won Man Park**, Yoon Hyuk Kim **, Jooho Whang ***

ABSTRACT

In spite of the importance of nuclear power as one of major electric energies in Korea, the nuclear safety has become the most serious social issue in the operation of the nuclear power plant. In this paper, a virtual work simulation program was developed to predict exposure dose during radiation work in radwaste storage. The work simulation program was developed using JavaTM applet and VRML-virtual reality modeling language. A numerical algorithm to find the optimal work path which minimize exposure dose during the given work, was developed and exposure dose on the optimal work path was compared with that on the shortest path. Comparing with the shortest path for the given work, the predicted optimal path consumed longer work time by 11% but reduced total exposure dose by 46%. The simulation result showed that the exposure dose depended on not only work time, but also the distance between the worker and the radiation source. The developed simulation program could be a useful tool for the planning of radioactive waste work to increase the radiation safety of workers.

Keyword: Radiation safety, Exposure dose, Work planning, Work simulation, Virtual reality

1. 서 론

1978년 고리 1호기로 시작된 우리나라 원자력 발전은 현재 국내 총 전기 생산의 40%를 차지할 만큼 국가적으로 중요한 위치에 있다. 그럼에도 불구하고 '방사선'이라는 위험으로 인하여 원자력은 다른 에너지원에 비해 안전성 측면에서 상대적으로 불리한 위치에 있으며, 일반 국민들의 원자력 발전소에 대한 막연한 불안과 의혹이 존재하게 되었다. 또한 2003년 ICRP(International Commission of Radiological Protection, 국제방사선방호위원회) Publication 60(이하

ICRP-60)의 도입 완료에 따라 강화된 방사선 규정을 준수하게 되어, 안전한 방사선 방호를 위한 정확한 방사선 피폭량에 대한 예측의 중요성이 증가하고 있다.

정확한 방사선 예측은 안전한 작업계획 수립의 바탕이 된다. 현재 원자력 발전소 방사선 작업계획 수립 시 방사선 피폭 예측량은 작업공간의 선량률이 동일하다고 가정하여 선량률과 작업시간의 곱으로 계산된다. 이 예측량은 작업자의 작업 위치 및 이동경로와 시간 등이 명확히 고려되지 않은 예측 선량으로 작업자의 실제 피폭선량을 예측함에 다소 어려움이 있으며, 잘못된 작업계획 수립의 위험을 초래할 수 있다. 방사선 피폭량은 선원의 종류에 따라 주어지는 특정감

*이 논문은 산업자원부에서 시행한 전력산업 인프라구축 지원사업으로 수행된 논문입니다.

경희대학교 테크노공학대학, *경희대학교 원자력공학과

교신저자: 김윤혁

주 소: 449-701 경기도 용인시 기흥읍 서천리 1, 전화: 031-201-2028, E-mail: yoonhkim@khu.ac.kr

마선과 작업자와 선원 사이의 거리의 함수로 작업시간에 비례하고 선원과 작업자 사이의 거리의 제곱에 반비례한다. 그렇기 때문에 같은 작업 장소라 하더라도 위치에 따라 피폭선량이 달라질 수 있고, 단일 피폭선량과 작업시간의 곱으로 계산된 예상 피폭선량과 실제 피폭선량간의 오차가 발생하게 된다.

한편, 컴퓨터 하드웨어 및 소프트웨어의 발달로 공학 분야에서 컴퓨터 시뮬레이션 기술을 이용한 연구 결과에 대한 신뢰도가 증가하고 있다. 또한 시뮬레이션 기술은 비용 및 시간의 절감효과를 가져오고 실험이 불가능한 상황에서의 모의실험을 가능하게 하여 기계, 전자, 건축 등 많은 공학 분야에서 필수 실험 도구로 사용되고 있다. 특히 가상현실을 이용한 그래픽 시뮬레이션은 현실과 유사한 시각적 효과로 시뮬레이션 수행자로 하여금 문제점 파악을 용이하게 하고, 전문적인 내용을 일반인이 알기 쉽게 설명할 수 있도록 한다. 따라서 방대한 그래픽 자료처리과정으로 인한 계산 시간의 증가에도 불구하고, 많은 분야의 시뮬레이션 프로그램들이 그래픽 가시화에 중점을 두고 있다(Wang et al., 2004; Lin et al., 1999; Moore et al., 1999). 이에 따라 원자력 분야에서도 방사선 작업의 효율 증진을 위하여 원자력 분야에 컴퓨터 시뮬레이션을 적용하는 연구들이 발표되고 있다(Fumi-zawa et al., 2003; Hornaas et al., 2001).

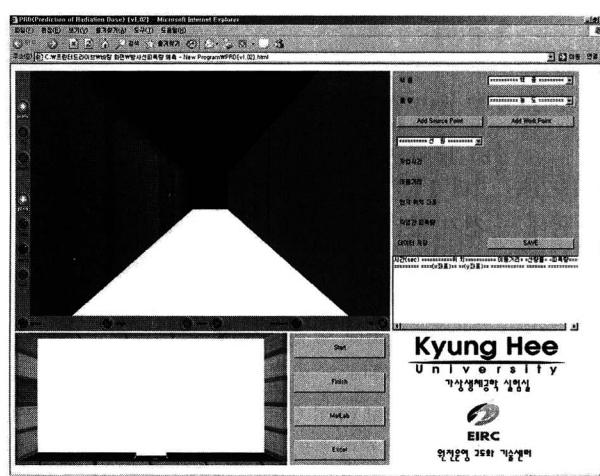
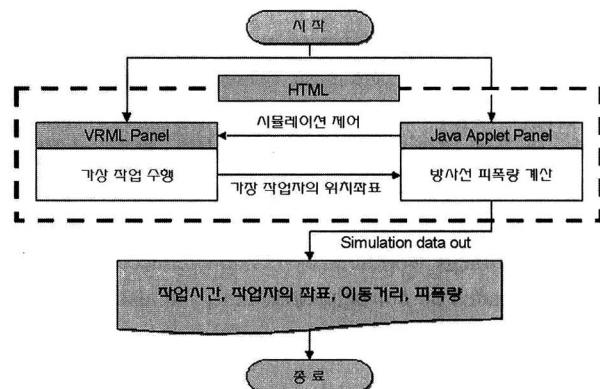
원자력공학 분야는 방사선 피폭의 위험성으로 인해 실제 실험보다는 가상 작업 시뮬레이션을 이용하는 연구가 적합한 분야이다. 이러한 이유로 본 연구에서는 방사선 작업 종사자의 안전성 확보를 위하여, 3차원 그래픽 시뮬레이션을 이용한 방사선 피폭량 예측 시뮬레이션 프로그램을 개발하였다. 개발한 프로그램을 이용하여 가상공간에 다양한 작업환경을 조성하고, 정해진 임무를 시뮬레이션으로 수행함으로써 작업 중 방사선 피폭량을 예측할 수 있도록 하였다. 이때 작업 공간은 방사성 폐기물 저장 시설로 한정하였다. 개발한 프로그램을 이용하여 몇 가지 2-D 예제 시뮬레이션을 수행함으로써 프로그램의 타당성을 조사하였다. 방사선 작업 시뮬레이션 프로그램 개발과 함께, 주어진 작업환경에서 최적의 작업 경로 계획을 수립할 수 있는 수치해석 방법을 개발하였다.

작업자의 안전은 원자력 발전소 운영에 가장 중요한 요소로서, 본 연구에서 개발한 프로그램과 수치해석 방법은 기존의 원자력 발전소 작업계획에 비해 보다 안전한 작업계획을 수립하는데 기여할 것으로 보인다. 또한 본 연구에서 개발한 방법들을 이용하여 작업자의 안전을 충분히 고려함과 동시에, 보다 효율적인 작업계획을 수립할 수 있을 것으로 생각한다. 본 연구는 안전하고 효율적인 방사선 작업계획 수립을 위한 새로운 방법을 제시하고, 서로 다른 작업 동선에서의 방사선 피폭량을 정량적으로 비교함으로써 기존 방사선 작업계획의 한계를 극복하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 시뮬레이션 프로그램 개발

3차원 그래픽 언어인 VRML(Virtual Reality Modeling Language)을 이용하여 가상 작업환경을 구성하고 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션의 제어와 시뮬레이션 수행에 따른 피폭량 예측 등을 위하여 Java™ 기반 프로그램을 개발하였다. VRML과 Java™의 연계를 위하여 Java EAI(External Authoring Interface)기술을 이용하였으며, Web 언어인 HTML 파일로 각각의 언어들을 통합함으로써 방사선 피폭량 예측 시뮬레이션 프로그램을 완성하였다(그림 1). 시뮬레이션의 수행은 VRML 패널에서 이루어지며, Java Applet에서는 시뮬레이션의 시작 및 종료, 작업환경 구축을 제어한다. 이와 같이 구성된 시뮬레이션 프로그램을 이용하



(b) 시뮬레이션 프로그램의 주화면

그림 1. 방사선 작업 시뮬레이션 프로그램

여 가상 작업 수행 중 작업자의 위치 정보를 이용하여 선원과의 거리 및 작업시간에 따른 방사선 피폭량을 계산하였다.

주어진 작업공간 안에 최대 20개의 선원을 시뮬레이션 수행자가 원하는 위치에 삽입하여 작업환경을 설정할 수 있도록 하였다. 작업환경으로 삽입하는 선원은 ^{66}Sb , ^{137}Cs , ^{51}Cr , ^{60}Co , ^{131}I , ^{192}Ir , ^{226}Ra , ^{24}Na 등 8가지 방사성 물질이, 방사능은 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40 Ci의 8개 값이 각각 적용 가능하도록 하였다. 이 방사능 값을 각각의 선원에 서로 다르게 입력 가능하도록 하여 작업공간의 방사선 분포를 다양하게 할 수 있도록 하였다. 삽입한 선원의 방사선 정보는 Java Applet 패널을 통해 확인할 수 있도록 하였다. 선원의 모델을 노란색 드럼통으로 하여 작업공간에 위치시킬 수 있도록 하였으며, 미니맵을 통하여 선원 주위의 방사선 분포를 기시화하여 시뮬레이션 수행자가 보다 안전한 작업경로를 찾을 수 있도록 하였다.

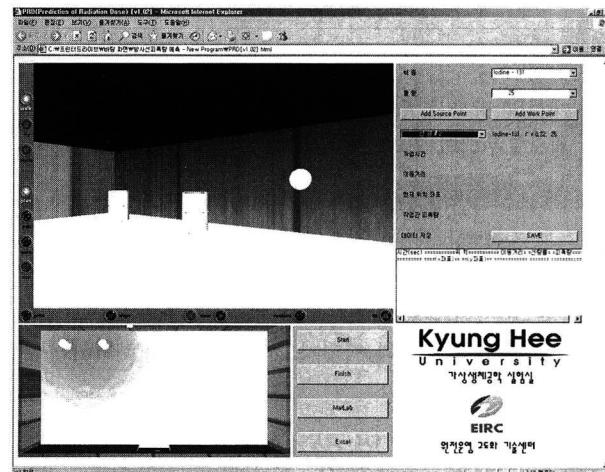
최대 5개의 작업 지점을 시뮬레이션 수행자가 임의 선택하여 작업계획을 수립할 수 있도록 하였다. 작업 지점들은 노란색 둥근 원판으로 표시되었으며, 작업 수행자가 작업을 완료 하였을 때 붉은 색으로 변하도록 구성하였다. 작업 지점들은 작업공간을 구성하는 벽면에 설치되도록 하였다. 시뮬레이션에서의 가상 작업은 정해진 작업 위치를 경유하는 이동으로 단순화되었다. 따라서 작업자가 작업 지점에 도달하였을 때 표시한 작업 지점이 붉게 변하도록 하였다.

작업 시뮬레이션을 위한 가상 작업자의 이동 과정은 마우스의 드래그 및 키보드의 방향키를 이용하여 가능하도록 하였다. 하지만, 본 연구에서는 이동속도를 일정하게 하기 위하여 키보드만을 사용하여 시뮬레이션 하였다. 전체 작업 공간에서 가상 작업자의 위치는 미니맵을 통하여 확인될 수 있도록 하였다. 파란색 박스로 단순화되어 나타나는 작업자의 위치를 통해 현재 위치에서의 선량률을 기시적으로 파악할 수 있도록 하였다. 작업 시뮬레이션 수행동안 작업시간, 이동거리, 현재위치, 방사선 피폭량 등의 작업 결과 데이터들은 실시간으로 화면을 통해 출력되도록 하였으며, 작업 종료 후에는 텍스트 파일로 저장할 수 있는 기능을 추가하였다.

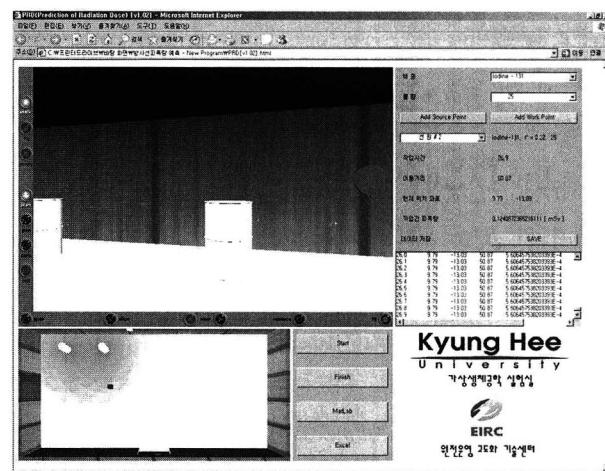
2.2 작업공간 및 환경 정의

작업공간은 가로 30m, 세로 15m의 직사각형공간으로 설정되었다. 설정된 작업공간의 바닥면에 선원을 삽입하고, 작업공간을 구성하는 벽면에 작업 지점을 설정함으로써 작업 환경을 조성할 수 있도록 하였다. 작업공간으로 진입하는 문에는 VRML의 'Touch' 센서를 적용함으로써 시뮬레이션 수행자가 문을 열고 작업공간으로 진입할 수 있도록 구성되었다. 작업공간을 구성하는 사방의 벽과 진입문은 완전 차폐되었다고 가정하여, 작업공간 이외에서의 방사선 피폭을 배제

하였다. 선원은 삽입된 드럼통의 바닥 면 중심에 위치하는 점 등방선원으로 가정되었다. 작업공간은 3차원으로 구성되었으나, 선원 삽입에 따른 방사선 분포는 2차원 평면으로 가정하였다(그림 2).



(a) 선원 및 작업 지점의 추가



(b) 작업 중의 화면

그림 2. 작업 지점과 선원의 추가 기능 화면

2.3 방사선 피폭량 계산

경로에 따른 이동 중의 방사선 피폭량은 선원과 작업자간의 거리에 따른 선량률(\dot{E})의 시간에 대한 적분으로 계산된다(ICRP-60, 1990).

$$\text{선량률} : \dot{E} = \sum_r w_r \dot{H}_r \quad (1)$$

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

이때, T 는 조직(tissue), H_T 는 등가선량률, w_T 는 조직 가중치, t_0 는 경로를 이동하는 동안 걸린 시간을 각각 의미한다. 등가선량 H_T 는 다음과 같이 표현된다(ICRP-60, 1990).

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

여기서 w_R 은 방사선 가중치이고, $D_{T,R}$ 은 조직 T 의 특정 위치에서의 방사선 R 의 흡수선량률이다.

선원으로부터의 거리 r 에서 조직 T 의 흡수선량률은

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

로 주어진다(Lamarsh, 1983). 이때 $(\mu/\rho)_T$ 는 조직감쇠계수, $(\mu/\rho)_{air}$ 는 공기에 의한 감쇠계수, Γ 는 특정감마상수, s 는 방사능 그리고 r 은 선원과 작업자와의 거리이다. 따라서 등가선량률(\dot{H}_T)은

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

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

$$E = \int_0^t \dot{E} dt = \sum_T w_T \int_0^t \dot{H}_T dt \quad (6)$$

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

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

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

가 된다. 인체인 경우 $(\mu/\rho)_T / (\mu/\rho)_{air} \approx 1.1$ 이며, 총 조직가중치 $\sum_T w_T = 1$, 총방사선 가중치 $\sum_R w_R = 1$ 로 가정하였다.

따라서 방사선 피폭량(E)은

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

가 된다. (식 10)은 하나의 선원으로부터 받는 방사선 피폭량이므로 작업공간에 설치된 전체 선원으로부터의 방사선 피폭량(E_T)은

$$E_T = E_1 + E_2 + \dots + E_n = \sum_{n=1}^n E_n \quad (11)$$

가 된다. 이때 n 은 방사선원의 수이다.

2.4 가상 작업 시뮬레이션의 수행 및 최적 작업경로 계획 환경 설정

가상 작업 시뮬레이션을 수행하기 위하여 다음과 같은 작업환경을 설정하였다(그림 3). 방사선원으로 서로 다른 방사능을 가지는 3개의 ^{60}Co , 각각 한 개씩의 ^{35}Cs 와 ^{20}Ir 를 삽입하였으며, 총 3개의 작업 지점을 삽입하였다. 이렇게 구성된 작업공간에서, 설치된 게이트(시작 & 도착)를 통과하여 작업 지점 1, 작업 지점 2, 작업 지점 3을 거쳐 다시 게이트를 통해 나오는 시뮬레이션 작업을 수행하였다. 이 때 작업 지점에 머무르는 시간동안의 방사선 피폭량은 무시하고, 작업경로를 따라 이동할 때의 피폭량만을 고려하였다.

시작점에서 작업 지점 1에 이르는 경로를 경로 1, 작업 지점 1에서 작업 지점 2에 이르는 경로를 경로 2, 같은 방법으로 경로 3, 경로 4라고 할 때, 시작점과 도착점이 정해져 있기 때문에 각 경로는 서로의 경로 설정에 영향을 미치지 않는다. 따라서 각각의 최적 경로를 서로 연결시키면 전체 작업공간에서의 최적 작업경로를 만들 수 있음을 알 수 있다. 이를 위해 주어진 작업공간을 각 출발점과 도착점에 따라 세부 작업공간으로 구분하였다. 즉, 출발점에서 위치 1까지 이르는 작업구간에 대하여 영역 1을 만들고 이 공간에 대한 최적의 작업경로를 구하였다. 마찬가지로 작업 지점 1에서 작업 지점 2에 이르는 공간과 작업 지점 2에서 3, 작업 지점 3에서 도착점에 이르는 구간에 대해서 각각의 세부 영역을 구분하였다. 이 때 각 영역은 일부 혹은 전체가 중복될 수 있도록 하였다.

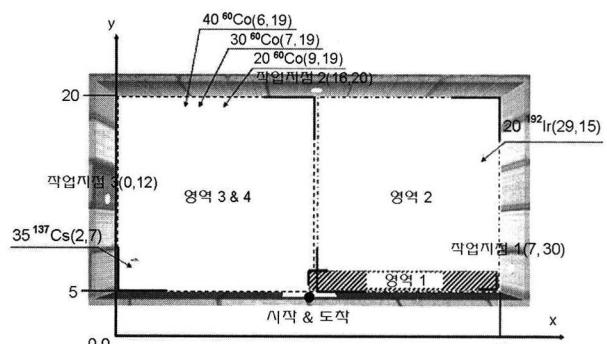


그림 3. 가상 작업 시뮬레이션용 작업장의 개략도

2.5 작업경로 근사화 및 최소 피폭을 위한 작업경로 탐색 알고리즘

본 연구에서는 작업 시뮬레이션 프로그램을 이용한 작업경로 계획 과정에서 방사선 피폭량이 최소가 되는 작업경로

를 예측하기 위한 수치적 방법을 제시하였다. 먼저, 2차원 평면 공간에서 한 지점으로부터 다른 지점으로 향하는 무한개의 작업경로를 부분선형 근사화 과정을 이용하여 유한개의 작업경로로 근사화하였다. 그 결과 출발점으로부터 도착점에 이르는 모든 경로는 그림 4와 같이 부분 선형화 근사화될 수 있다.

그림 4와 같이 출발점과 도착점을 포함하는 작업공간을 가로 H개, 세로 V개의 구간으로 나눌 수 있다. 이때 각 구간을 나누는 직선의 교점을 절점이라 정의하였다. 작업경로는 시간의 흐름에 따라 출발점에서 도착점까지 가로방향으로 한 단계(Step)씩 진행하며, 각 단계의 수직선 위 임의의 한 절점을 지난다고 가정하였다. 이에 따라 무한개의 경로는 $(V+1)^{(H-1)}$ 개의 유한 경로로 근사되었다. 수치해석 방법을 통한 최적 작업경로 설정을 위하여 앞에서 설명한 시뮬레이션 작업환경과 동일하게 작업환경을 설정하였다. 또한 최적 경로에서의 방사선 피폭량과 최단 작업경로에서의 방사선 피폭량을 각각 구하여 비교하였다. 본 연구에서는 각각의 경로에 따른 영역을 8×8 개의 구간으로 나누어 작업경로를 근사화하였다.

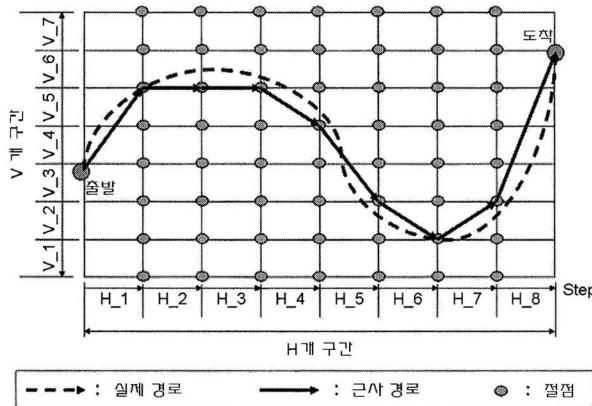


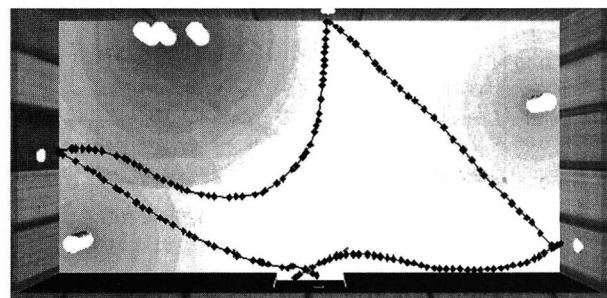
그림 4. 작업경로 근사화 과정

3. 결 과

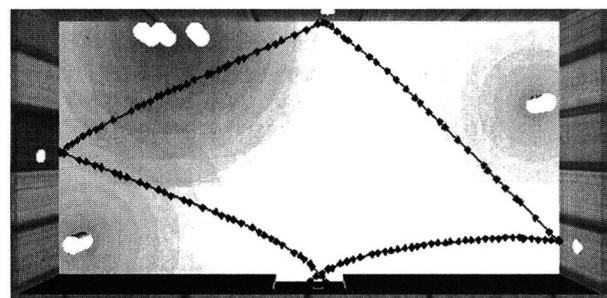
3.1 가상 작업 시뮬레이션

최적 작업경로 탐색 알고리즘을 이용하여 예측한 최적 작업경로를 바탕으로 방사선 폐기물 작업 시뮬레이션을 수행하였다. 작업 시뮬레이션 결과에 의하면 최적 작업경로는 가시화된 선량률의 명암이 낮은 부분을 이은 경로와 유사함을 알 수 있었다(그림 5, (a)). 또한 작업공간의 선량률이 일정하다고 가정하여 방사선 피폭을 선량률과 작업시간의 곱으로

계산하는 기준의 방사선 피폭량 예측방법과 비교하기 위하여, 최단경로에 따른 시뮬레이션을 수행하였다(그림 5, (b)).



(a) 시뮬레이션에서 사용된 최적 작업경로



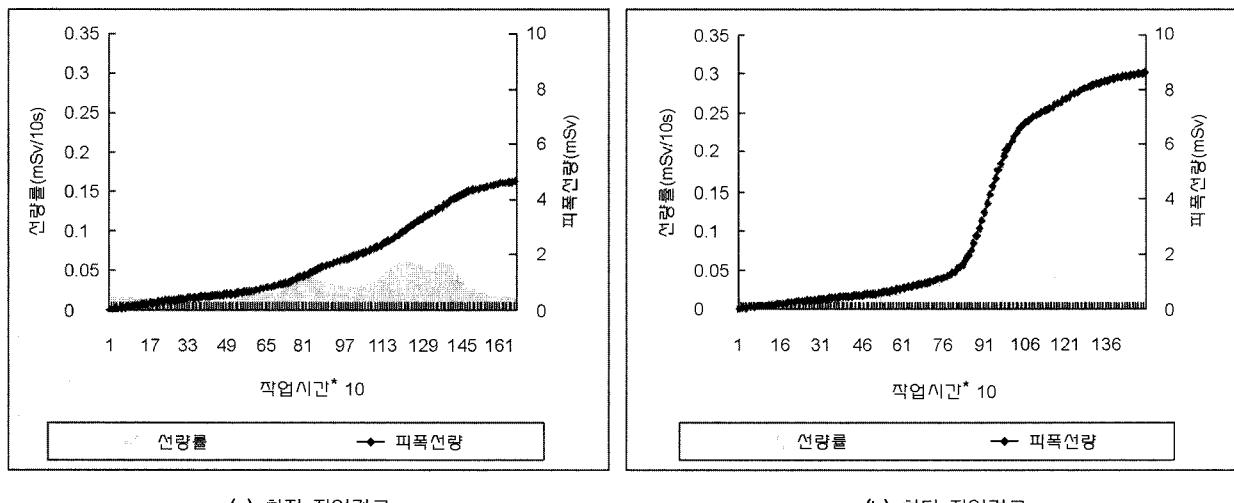
(b) 시뮬레이션에서 사용된 최단 작업경로

그림 5. 주어진 작업환경에서의 최적 작업경로와 최단 작업경로

각각의 수행된 시뮬레이션 결과는(그림 6, 표 1)과 같다. 이때 순수 이동만을 고려하기 위하여 가장 작업자의 정지 상태에서의 방사선 피폭량을 배제하였다. 또한 시뮬레이션 프로그램에서 이동속도는 동일하게 가정하였으나, 그래픽 처리 문제로 인하여 차이가 발생하였다. 최적 작업경로에서의 작업시간은 최단 작업경로에 비해 11.3% 높게 나타났으나 방사선 피폭량은 오히려 3.9[mSv] 낮게 나타났다. 최적 작업경로에서의 방사선 피폭량은 최단 경로의 방사선 피폭량의 55%에 해당하는 값으로, 방사선 피폭량을 동일한 선량률과 작업시간의 곱으로 계산하는 현재 방사선 피폭량 예측과는 다른 결과를 나타내고 있다. 이는 방사선 피폭량은 작업시간 뿐 아니라 선원과의 거리에 밀접한 관계를 가지기 때문에 나타나는 현상이다.

3.2 수치해석을 이용한 최적 작업경로에서의 방사선 피폭량 계산

수치해석 방법을 이용한 최적 작업경로의 계산에는 1900



(a) 최적 작업경로

(b) 최단 작업경로

그림 6. 작업 시뮬레이션 수행 후 시간에 따른 선량률과 방사선 누적 피폭량

표 1. 작업 시뮬레이션 프로그램을 이용한 최적 작업경로와 최단 작업경로의 비교

영역	작업시간 (sec)	이동거리 (m)	이동속도 (m/s)	피폭선량 (E) (mSv)		$E_s - E_0$ (mSv)	$\frac{E_0}{E_s} \times 100$ (%)
				선량률 (mSv/10s)	피폭선량 (mSv)		
최적 경로	1	4.7	16.44	3.50	0.53	3.94	54.2
	2	3.2	19.52	6.10	0.65		
	3	5.3	24.16	4.56	2.29		
	4	3.5	17.11	4.89	1.19		
Total		16.7	77.23	4.62	4.66		
최단 경로	1	4.9	15.18	3.10	0.56	3.94	54.2
	2	2.8	19.01	6.79	0.66		
	3	3.8	17.37	4.57	6.12		
	4	3.5	17.65	5.04	1.26		
Total		15.0	69.21	4.61	8.60		

※: E_s : 최단경로에서의 피폭선량, E_0 : 최적경로에서의 피폭선량

만 번(영역 하나당 연산회수 × 총 영역수 = $9^7 \times 4$)의 연산이 수행되었으며, 이때 걸린 시간은 약 7분이다. 그림 3에서 세분화한 각 영역에서 일정한 속도로 이동하기 위하여 최적 작업경로에서는 3.2[m/s]로 이동속도를 조정하였다. 수치해석적 방법을 이용하여 구한 최적 작업경로에서의 방사선 피폭량은 5.8[mSv]로 계산되었다. 시뮬레이션 프로그램과 동일 속도로 가정한다면 방사선 피폭량은 4.03[mSv]가 되며, 이는 시뮬레이션 결과값의 86.6%이다. 즉, 시뮬레이션 프로그램과 수치해석 계산은 13.4%의 오차를 나타내고 있으며, 이는 작업 시뮬레이션에서 가상 작업자의 이동 시 발생하는 가속도와 그래픽 처리로 인한 이동속도의 변화에 기인하는 것으로 보인다.

4. 고찰 및 결론

본 연구에서는 방사선 작업 종사자의 안전성 확보를 위하여, 방사선 폐기물 처리 작업 동안의 방사선 피폭량을 예측할 수 있는 프로그램을 개발하였다. 또한 방사선 피폭량을 최소로 하여, 가장 안전한 작업경로인, 최적 작업경로의 확보 방법을 제시하였다. 방사선 피폭량은 작업시간에 비례하고 작업자와 선원 사이 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 예측 방법을 통하여 작업공간의 선량률이 동일하다고 가정하는 기준의 방사선 피폭량 예측 방법의 개선 가능성을 확인하였다.

가상 작업시뮬레이션 프로그램을 이용하여 다양한 방사선 작업환경에서의 작업 종사자의 방사선 피폭량을 예측할 수 있었으며, 가시화된 선량률을 바탕으로 방사선 피폭량을 최소로 하는 최적의 작업경로를 구할 수 있었다. 가상현실 기술을 이용한 작업 시뮬레이션 프로그램은 시뮬레이션 수행자의 조작에 따라 자유로운 이동이 가능하므로, 개발한 프로그램을 이용하여 보다 현실적인 방사선 피폭량을 예측할 수 있었다. 이러한 방사선 피폭량의 예측과 최적 작업경로를 바탕으로 보다 안전한 작업계획을 수립할 수 있을 것이라 생각한다.

본 연구에서는 각각의 선원이 단일 핵종을 갖도록 설정하였으며, 방사선 분포를 2차원으로 가정하였다. 또한, 작업자의 부피를 무시한 하나의 질점으로 고려하였으며, 작업공간

을 방사성 폐기물 저장 시설로 한정하는 등 많은 부분 단순화하여 프로그램을 개발하였다. 하지만, 본 연구의 결과를 바탕으로 시뮬레이션 프로그램을 이용한다면 보다 정확한 방사선 피폭량의 예측이 가능하며, 이를 토대로 안전한 방사선 작업계획을 수립할 수 있음을 알 수 있었다. 향후 작업공간을 다양화하고 실제 방사선 분포를 적용한다면, 실제 방사선 작업계획에 방사선 피폭량 예측 시뮬레이션 프로그램으로 활용될 수 있을 것이다. 궁극적으로 이와 같은 시뮬레이션 프로그램을 이용한 방사선 피폭량 예측을 바탕으로, 안전한 방사선 작업을 위한, 최적화된 방사선 방호체계를 수립할 수 있을 것으로 기대한다. 마지막으로 최적 작업경로의 예측 알고리즘에서 전체최적화 알고리즘 이론, 퍼지 알고리즘 이론, 유전자 알고리즘 이론 등의 최신기법을 도입한다면 최적 작업경로의 예측시간을 줄일 수 있을 것이다.

참고 문헌

- ICRP, Recommendations of the ICRP, ICRP pub.60, Pergamon Press, 1991.
- Fumizawa, M., Kameda, A., Nakagawa, Wu, W. and Yoshikawa, H., Development of Simulation-based Evaluation System for Iterative Design of Human-machine Interface in Nuclear Power Plant- Application for Reducing Workload, Nuclear Technology, Volume 141, 78-87, 2003.
- Lamarsh, J. R., Introduction to nuclear engineering, Addison Wesley, Boston, 1983.
- Hornae, A., Hulsund, J. E., Végh, J., Major, C., Horváth, C., Lipcsei, S., Kapocs, G., The EOP Visualization Module Integrated into the Pla-

sma On-Line Nuclear Power Plant Safety Monitoring and Assessment System, Nuclear Technology, Volume 135, 123-130, 2001.

Wang, P., Ina Anna Kreutzer, Robert Bjärnemo, Roy C., Davies, A Web-based cost-effective training tool with possible application to brain injury rehabilitation, Computer Methods and Programs in Biomedicine, Volume 74, Pages 235-243, 2004.

Lin, H., Gong, J., Wang, F., Web-based three-dimensional geo-referenced visualization, Computers & Geosciences, Volume 25, Pages 1177 -1185, 1999.

Moore, K., Jason, D., Wood, J., Using Java to interact with geo-referenced VRML within a virtual field course, Computers & Geosciences, Volume 25, Pages 1125-1136, 1999.

● 저자 소개 ●

◆ 박 원 만 ◆

현재 경희대학교 테크노공학대학 석사과정
주요관심분야: 수치해석, 생체역학

◆ 김 윤 혁 ◆

현재 경희대학교 테크노공학대학 조교수
관심분야 : 생체역학, 그래픽 시뮬레이션

◆ 황 주 호 ◆

현재 경희대학교 원자력공학과 교수
관심분야 : 방사성 폐기물, 방사선 응용

논문 접수 일 (Date Received) : 2004년 10월 26일

논문 게재승인일 (Date Accepted) : 2005년 05월 19일