

## 핵종 재고량 평가 프로그램(RADMAN) 연계 중저준위 방사성폐기물 복합처분시설 폐쇄후 안전성 평가체계 개발

김석훈<sup>1,\*</sup>, 하병혁<sup>1</sup>, 김혜진<sup>1</sup>, 박동규<sup>1</sup>

<sup>1</sup>(주)미래와도전

### Development of the Post-closure Safety Assessment Framework for the LILW Complex Disposal Facility Linking with RADMAN (RADionuclide inventory MANagement program)

Sukhoon Kim<sup>1,\*</sup>, Byeong-hyeok Ha<sup>1</sup>, Hyejin Kim<sup>1</sup> and Tongkyu Park<sup>1</sup>

<sup>1</sup>FNC Technology Co., Ltd., 32F, 13, Heungdeok 1-ro, Giheung-gu, Yongin-si 16954, Republic of Korea

**Abstract** Until now, for the purpose of setting-up criteria on radionuclide inventory and radioactivity concentration for the disposal facility of LILW (Low- and Intermediate-Level radioactive Waste), the post-closure safety assessment was iteratively conducted by trial-and-error approach using input file for radiation source term manually generating based on MS-excel files. Accordingly, not only was reliability of assessment results insufficient due to frequent errors, but it was not possible to respond quickly to changes in external circumstances. In this study, to resolve this problem, we established the safety assessment framework linking with nuclide inventory estimation and waste emplacement scheme through improving RADMAN (RADionuclide inventory MANagement program). As part of this, the necessary functions were assigned to 'Emplacement scheme' window in RADMAN to automate or easily perform some processes required for setting up both the number of packages to be disposed of in each disposal unit and the source term model by package type. MS-excel file generated by using the corresponding function can be directly applied as input file for the GoldSim-based post-closure safety assessment tool, which contains the radionuclide inventory data by disposal unit and deterioration type of package. Through performing a case study for normal scenario of the first stage rock-cavern disposal facility on the basis of a specific emplacement scheme, it was confirmed that a series of linkage processes shown in Fig. 1 were properly implemented in this study. The assessment framework linking with RADMAN proposed in this paper can be applied to both individual and complex disposal facility for LILW, and it is expected to be utilized for more diverse purposes provided that it is improved and/or upgraded by reflecting the requirements of the end-user, Korea Radioactive Waste Agency (KORAD), in the future.

**Key words:** Post-closure safety assessment, LILW disposal, Waste emplacement scheme, GoldSim modeling, RADMAN program

## 1. 서론

중·저준위 방사성폐기물(Low- and Intermediate-Level radioactive Waste, LILW)은 자체처분 허용농도, 저준위 농도 제한치 등의 방사능 농도를 기준으로 구분되며, 각 분류별 처분방식도 별도로 규정되어 있다[1]. 경주 방사성 폐기물 처분장 부지에는 현재 1단계 동굴처분시설이 운영 중이며, 다양한 준위로 구성된 200 L 드럼 71만 개 분량[2]의 방사성폐기물을 처분하기 위해 향후 표층 및 매립처분시설 등이 단일 부지 내에 공존하는 복합처분시설로 개발될 예정이다.

방사성폐기물 처분시설에 대해서는 인간 건강 및 환경 보호를 위해 선량 또는 위험도 형태의 성능목표치가 설정되며, 이에 따라 폐쇄후 정상적 자연현상 또는 인간침입으로 인한 방사선 영향은 결정집단의 개인 유효선량 또는 일반인에 대한 선량한도 이하로 제한되어야 한다[3]. 처분시설의 건설·운영 인허가 획득, 장기 종합관리계획 수립 등을 위해서는 해당 시설이 폐쇄후 성능목표를 충족함을 입증해야 하며, 이는 일반적으로 수학적 예측모델 기반의 안전성 평가를 통해 확인할 수 있다. 이러한 결과의 신뢰도 향상을 위해 방사선원항(즉, 방사성핵종 재고량), 방사성물질 누출 메커니즘, 수송 및 피폭 매체·메커니즘 등을 규명하여 적절한 방법으로 모델링에 반영해야 한다.

방사성폐기물은 내용물 및 포장물 유형에 따라 특성이 상이하며, 폐쇄후 방사선 영향은 필연적으로 선원항, 포장물 및 시설의 누출 특성, 포장물의 위치 등에 좌우된다. 원론적으로, 각각의 방사성폐기물 드럼은 운영 및 폐쇄후 안전성 관점에서 사용자가 정의하는 목적함수(연간선량, 위험도 등)를 최적화할 수 있는 위치에 정치해야 하며, 이론 및 이상적으로는 특정 시설에 처분되는 모든 드럼 및 주변 환경의 특성이 명확하게 규명되어 있는 경우 최적 위치를 도출할 수 있다. 그러나, 배치 조합에 대한 방대한 경우의 수, 대상 드럼의 비동시적 처분, 입력변수의 불확실성 등으로 인해 개별 또는 전체 방사성폐기물 드럼의 최적 정치방안을 도출하는 것은 현실적으로 불가능하다.

처분시설 인허가 또는 운영 등을 위해 핵종 재고량 기준 및 처분농도 제한치 등을 수립해야 하는 경우 필연적으로 처분대상 폐기물의 다양한 정치방안을 고려하여 다수의 안전성 평가를 수행해야 한다. 현재까지 이러한 평가에서는 방사성폐기물 발생기관이 처분 의뢰과정에서 제공하는 포장물 입력데이터 등을 토대로 다수의 엑셀

(Excel) 파일을 조합하여 포장물당 방사능량 및 전체 처분시설 핵종 재고량을 산출한 후 임의의 정치계획에 따라 방사선원항 입력파일을 수작업으로 생성하여 활용하였다. 즉, 평가조건이 일부만 변경되는 경우에도 안전성 평가용 방사선원항 입력파일을 생성하기 위해서는 수작업을 통해 관련된 모든 엑셀파일을 새롭게 가공 또는 수정해야 한다. 안전성 평가용 최종 입력파일을 생성하는 일련의 절차가 수작업으로 복잡하게 수행됨에 따라 오류 유발요인이 다수 내재되어 있을 뿐만 아니라 실제 오류가 발생하는 경우에도 근본적인 원인을 파악하기가 어려워 평가결과의 신뢰성이 저해될 가능성이 높다. 또한, 동 절차는 사용자 편의성이 매우 부족하여 상업용 원전 해체(운영 전주기 동안 발생하는 양의 10배~200배 발생 예상[4]) 등과 같이 비교적 단기간에 다양한 특성을 갖는 방사성폐기물이 다량 발생되거나, 새로운 유형의 방사성폐기물 또는 포장물을 고려해야 하는 상황에 대한 신속한 대응이 제한적이다.

복합처분시설의 단계별 개발과정에서는 방사성폐기물의 인도·인수계획을 고려한 핵종 재고량 평가 및 폐기물 정치계획과 연계된 처분 안전성 평가 수요가 현재에 비해 상당히 증가할 것으로 예상된다. 이러한 상황에서 일련의 수작업으로 이루어지는 현행 평가체계를 활용하는 경우, 오류 발생이 더욱 빈번해지거나 외부환경 변화에 대한 대처가 지연됨으로 인해 각 처분시설을 적기에 확보하지 못할 가능성이 높으므로 이러한 문제점을 보완 또는 해결할 수 있는 대책 수립이 시급한 실정이다. 이에 본 연구에서는 최근 한국원자력환경공단에서 개발된 RADMAN 프로그램(RADionuclide inventory MANagement program)[5]의 개선을 통해 핵종 재고량 평가 및 폐기물 정치계획이 연계된 방사선원항 정보 생성과정의 일부를 자동화하고, 이러한 결과를 활용하여 중·저준위 방사성폐기물 복합처분시설의 폐쇄후 안전성 평가를 수행할 수 있는 체계를 개발하였다.

본 논문에서는 해당 평가체계를 구성하는 RADMAN 프로그램과 골드심(GoldSim) 기반 처분 안전성 통합 평가도구[6]에 대한 개요, 프로그램간 연계사항 도출 및 구현 등에 관한 내용을 정리하였다. 또한, 개발된 연계 평가체계의 유효성을 확인하기 위해 1단계 동굴처분시설을 대상으로 사례연구를 수행하였으며, 그 내용에 대해서도 기술하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 처분시설 핵종 재고량 평가 프로그램 (RADMAN)

RADMAN 프로그램은 방사성폐기물 발생기관이 제공한 포장물 자료를 데이터베이스(DB)에 저장한 후 이에 대한 전처리 과정을 거쳐 핵종 재고량 및 폐기물 발생량을 분석하고, 이를 토대로 정치계획의 수립을 지원하기 위한 목적으로 개발된 소프트웨어이다. 이를 위해 동 프로그램은 크게 ‘DB 입·출력 모듈’, ‘분석 모듈’, ‘설정 모듈’로 구성되며, DB 정보를 활용하여 계산 및 분석을 수행하기 위해 ‘비방사능 평가 프로세스’, ‘포장물 준위별 분류 프로세스’, ‘폐기물 그룹별 대표 방사능량 계산 프로세스’, ‘통계처리 및 출력 프로세스’, ‘정치계획 프로세스’가 구현되어 있다.

본 논문에 기술한 연계 평가체계 수립을 위한 핵심요소인 분석 모듈은 3개의 하위모듈 즉, ‘폐기물 분석 모듈’, ‘발생현황 모듈’ 및 ‘정치계획 모듈’로 세분되며, 이 중 본 논문에 기술한 연계 평가체계 수립을 위한 핵심적인 모듈에 대한 보다 자세한 내용을 이하에 기술하였다.

#### 2.1.1. 폐기물 분석 모듈

‘폐기물 분석 모듈’에서는 DB 자료를 호출하여 우선적으로 포장물을 기준에 따라 분류하고, 각 범주별 수량을 분석한다. 이후 ‘비방사능 평가 프로세스’를 통해 핵종별 비방사능을 산출하여 ‘포장물 준위별 분류 프로세스’를 통해 포장물 단위의 방사능 준위를 평가한다. 마지막으로, ‘폐기물 그룹별 대표 방사능량 계산 프로세스’를 통해 준위별 수량, 핵종별 비방사능 및 폐기물 중량 정보에 따라 각 그룹별로 대표 방사능량 계산이 완료되면 분석이 종료된다. 이러한 계산결과는 데이터 테이블 형태(‘폐기물 분석결과 DB’)로 프로그램 내에 임시 저장된다.

#### 2.1.2. 정치계획 모듈

‘정치계획 모듈’은 사용자가 정치계획을 용이하게 수립할 수 있도록 지원하는 기능으로 해당 모듈에서는 우선적으로 ‘폐기물 분석 모듈’의 실행결과인 ‘폐기물 분석결과 DB’를 호출하여 폐기물 그룹별(발생지 - 폐기물 종류 - 용기 종류 - 처리방법-준위 조합) 수량 및 대표 방사능량을 화면에 출력한다. 사용자가 이러한 정보를 토대로 폐기물

드럼 정보 수정 및 향후 발생분 추가를 완료하고 각 사일로·처분고별로 정치수량을 임의로 입력하는 경우 ‘정치계획 프로세스’를 통해 해당 수량에 따른 처분 현황이 실시간으로 계산되어 화면에 반영된다. 사용자는 단계별 또는 사일로·처분고별로 화면에 표시되는 적용수량 및 잔여수량, 처분부피 등을 참고하여 정치계획을 변경 또는 수립할 수 있으며, 최종 설정결과는 ‘정치계획 DB’에 저장된다.

### 2.2. 골드심 기반 폐쇄후 처분 안전성 평가도구

(주)미래와도전에서는 한국원자력환경공단이 주관기관으로 수행 중인 “복합처분시설 건설·운영 최적화 기술 개발 과제”를 통해 경주 방사성폐기물 처분장 단일 부지 내에 4개의 처분시설(즉, 1단계 동굴처분시설, 2단계 표층처분시설, 3단계 매립처분시설, 4단계 표층처분시설)이 존재하는 상황을 전제로 폐쇄후 안전성 평가를 수행하기 위한 목적으로 부지 내 연계사항을 고려하여 골드심 기반의 종합개발계획 처분 안전성 통합 평가도구를 개발하였다[6].

각 시설로부터 누출된 방사성핵종은 지질계-생태계 접점(Geosphere-Biosphere Interface, GBI)까지 이동하는 것으로 모델링하였으며, GBI로부터 인간 피폭까지의 이동은 가능한 모든 피폭경로(Table 1)를 고려하여 최종적으로 결정집단의 피폭선량을 계산하도록 구성하였다. 이를 위해 동 프로그램은 크게 ‘입력 모듈’, ‘계산 모듈’, ‘출력 모듈’로 구성되며, 이 중 본 논문에 기술한 연계 평가체계 수립을 위한 핵심적인 모듈에 대한 보다 자세한 내용을 이하에 기술하였다.

#### 2.2.1. 입력 모듈

‘입력 모듈’은 현 시점에서 복합처분시설의 개발단계별로 확정되지 않은 정보를 향후 유연하게 적용할 수 있도록 사용자에게 의해 골드심 내에서 입력 및 수정이 가능한 형태로 개발되었다. 각 변수값은 사용자가 프로그램 구성 화면에서 직접 입력하거나 엑셀파일 형식의 DB를 연동하여 호출할 수 있으며, 필요에 따라 DB 자체를 수정할 수도 있다.

‘메인화면 입력 모듈’에서는 평가기간 설정, 몬테카를로 계산 옵션 및 시나리오 선택 등이 가능하다. 메인화면에서 각 시설 명칭을 선택하면 표시되는 ‘시설별 입력 모

**Table 1.** Summary of exposure pathways considered for calculating the exposure dose of the critical group in the GoldSim-based post-closure safety assessment tool

	Exposure pathway	No.	Considerations	Assumption	
External exposure	Cloudshine	①	• Noble gas		
	Groundshine	②	• Soil contaminated by irrigation water	• Leakage not taken into account • Irrigation water supply for entire period	
	Shoreline sediment	②	• Radioactive contaminated shoreline sediment		
	Marine activity	③	• Swimming and boating		
Internal exposure	Inhalation	④	• Resuspended soil particle	• Leakage not taken into account • Irrigation water supply for entire period	
	Ingestion	Drinking water	⑤-(1)	• Well water	
		Aquatic products	⑤-(2)	• Fish, invertebrates, crustaceans, algae	• 100% contamination of livestock feed and drinking water
		Agricultural products	⑤-(3)	• Grain, fruit, roots, leafy vegetables	• Soil-crop transfer coefficient • Fodder-livestock coefficient • Irrigation water supply for entire period
		Livestock products	⑤-(4)	• Meat, milk	• ⑤-(5) is included in ⑤-(1) to ⑤-(4).
		Others	⑤-(5)	• Tritium	

돌'의 경우 선원항, 근계·원계영역, 지하수 유동, 생태계 입력자료 등 대부분의 고정 변수는 DB 파일에서 로딩되며, 향후 평가목적 및 설계 진행상황에 따라 가변적인 변수는 사용자가 화면에서 직접 수정할 수 있도록 구성하였다. 또한, '복합처분시설 입력 모듈'에서는 우물 시나리오에 대한 평가 시 각 시설로부터 우물까지의 지하수 유동 거리를 설정할 수 있도록 하였다.

### 2.2.2. 계산 모듈

'계산 모듈'에서는 처분시설별 근계·원계영역에서 지하수 유동에 따른 방사성핵종의 거동 양상, 생태계 등을 모델링하였다. 처분용기 부식 이전에는 사일로 및 처분고 내부에서 확산현상만 일어나는 것으로 가정하였다. 동굴 처분시설의 경우, 처분용기 부식 이후 방사성핵종이 지하수 유동에 따라 사일로 내부에서 공학적 방벽, 뒤채움재, 처분용기, 뒤채움재, 공학적 방벽 순으로 이류현상에 의해 사일로 외부로 유출된다. 표층 및 매립처분시설의 경우, 처분용기 부식 이후부터 방사성핵종이 강수 침투에 따른 이류현상에 의해 하부 뒤채움재, 하부 공학적 방벽, 불포화대, 균열암반으로 이동하며, 폐기물로부터 발생된 기체가 상부 뒤채움재, 상부 공학적 방벽, 처분덮개를 거쳐 대

기로 확산되는 현상도 고려하였다.

각 시설로부터 지하수 유동을 따라 이동하는 방사성핵종은 정상 시나리오의 경우 해안 부근에서 하나의 유동로로 합류하여 균열암반을 거쳐 해양까지 이동하며, 우물 시나리오의 경우 일부 지하수는 유동로 합류지점 이후에 개발된 우물을 통해 양수되고 나머지 지하수는 균열암반을 거쳐 해양까지 이동한다. 생태계는 경수로형 원전 규제지침[7]에 제시된 피폭경로 및 각 경로에 대한 피폭선량 평가방법을 시설별로 동일하게 적용하여 모델링하였으며, 최종적으로 GBI(즉, 해양 및 우물)에서의 핵종별 농도를 입력으로 하여 주민 피폭선량이 계산된다.

## 2.3. 프로그램 연계체계

### 2.3.1. 연계방안 수립

처분시설 폐쇄후 방사선 영향은 필연적으로 처분대상 방사성폐기물의 방사선원항, 포장물 및 시설의 누출 특성, 정치되는 사일로 또는 처분고 위치 등에 좌우된다. 이에 따라 복합처분시설의 단계별 개발과정에서 핵종 재고량 평가 및 폐기물 정치계획과 연계된 처분 안전성 평가를 수행하기 위해서는 사일로 또는 처분고별 처분용기 열

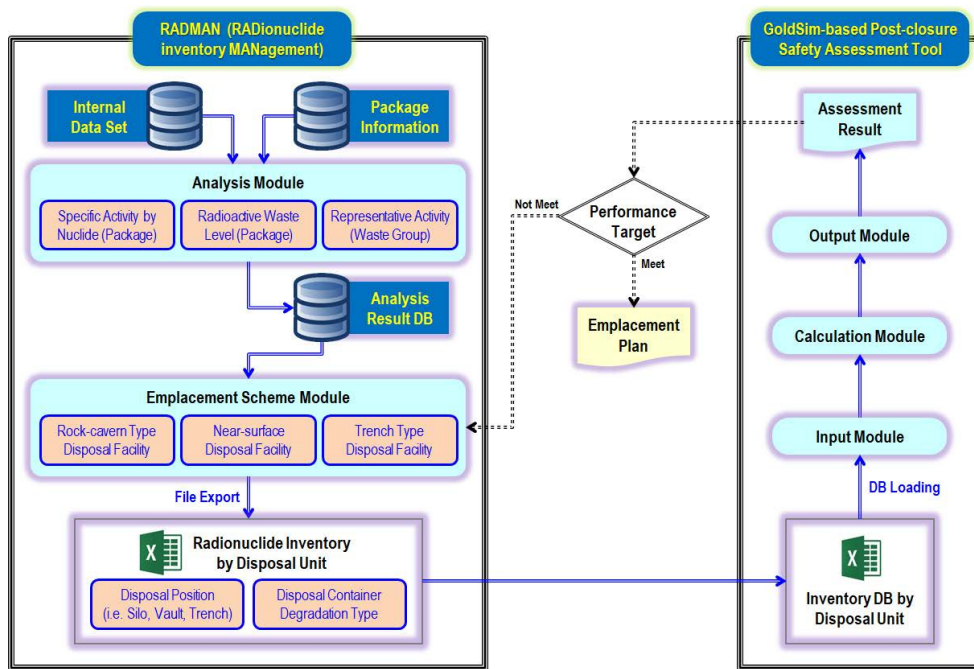


Fig. 1. Flow diagram of linkage between RADMAN program and GoldSim-based post-closure safety assessment tool.

화 메커니즘에 따라 구분된 방사선원항 정보가 요구된다. 이를 위해 본 연구에서는 RADMAN 프로그램에서 관리되는 포장물의 핵종 재고량 정보를 기반으로 폐기물 정치계획을 반영하여 사일로·처분고 및 누출특성에 따른 방사선원항 파일을 생성한 후 이를 이용하여 복합처분시설의 폐쇄후 안전성 평가를 수행할 수 있는 체계를 수립하였다. RADMAN 프로그램과 처분 안전성 평가도구의 연계방안을 도식화하면 Fig. 1과 같다. 해당 방안의 구축을 위한 연계사항 도출 및 구현결과는 이하에 보다 자세히 기술하였다.

### 2.3.2. 연계사항 도출 및 구현

Fig. 1에 제시한 연계방안의 구축을 위해서는 핵종 재고량 평가 및 폐기물 정치계획이 연계된 방사선원항 정보 생성과정의 일부를 자동화할 수 있도록 RADMAN 프로그램의 ‘정치계획 모듈’에 대한 개선이 필요하다. 앞서 기술한 바와 같이, RADMAN 프로그램의 ‘정치계획 모듈’은 ‘폐기물 분석 모듈’의 실행결과인 폐기물 그룹별 수량 및 대표 방사능량을 토대로 사용자가 단계별 또는 사일로·처분고별 처분수량을 직접 설정하여 처분 현황을 실시간으로 확인할 수 있는 기능으로 동 프로그램의 ‘정치계획’ 메뉴를 통해 접근할 수 있다.

이에 따라, 처분단위별 정치수량 설정 및 포장용기 유형별 선원항 모델 설정과정에서 요구되는 일부 기능을 자동화 또는 용이하게 수행할 수 있도록 Fig. 2와 같이 RADMAN 프로그램의 ‘정치계획’ 메뉴 표시화면에 2개의 버튼(‘Quantity’ 및 ‘Deterioration’)을 추가적으로 배치하여 필요기능을 할당하였다.

#### 2.3.2.1. 처분단위별 정치수량 설정

Fig. 2의 하단에서 ‘Quantity’ 버튼을 클릭하면 Fig. 3 좌측 상단의 ‘정치수량 설정’ 창을 표시하여 사일로 또는 처분고에 정치되는 폐기물 드럼 수량을 일괄적으로 수정할 수 있도록 구성하였다. 해당 창의 상단에는 ‘제외대상 포장용기 선택’ 버튼 및 ‘분배비율 설정’ 버튼을 배치하였고, 중간에는 발생 폐기물 리스트 및 각 폐기물별 전체 수량이 표시되며, 하단에는 ‘초기화(모든 수량 값을 0으로 변경)’, ‘확인(설정결과 반영 및 창 종료)’, ‘취소(설정결과 무시 및 창 종료)’ 버튼이 존재한다. ‘제외대상 포장용기 선택’ 버튼 및 ‘분배비율 설정’ 버튼의 기능을 보다 자세히 기술하면 다음과 같다.

#### 제외대상 포장용기 선택

중·저준위 방사성폐기물은 방사능 농도를 기준으로 분



**Figure 3**

- Selection of package type to be excluded
- Setup of allocation ratio by disposal unit

**Figure 4**

- Setup of deterioration type by package
- Setup of fraction by nuclide constituting 'gross-alpha'

**Fig. 2.** Display window of ‘Emplacement scheme’ in RADMAN program (Details of sub-windows for ‘Quantity’ and ‘Deterioration’ buttons are shown in Figs. 3 and 4, respectively).

류되는 폐기물 준위에 따라 일부 처분방식을 적용할 수 없다고 규정되어 있다[1]. 처분시설 정치계획 입력시 이러한 처분방식 제한 규정을 우선적으로 고려해야 하며, 해당 과정에서 입력 오류 가능성을 배제하기 위해 ‘제외대상 포장용기 선택’ 버튼 및 화면을 구성하였다.

Fig. 3 좌측 상단의 ‘정치수량 설정’ 창에서 ‘제외대상 포장용기 선택’ 버튼(A)을 클릭하면 해당 시설 내 처분 대상에서 제외하고자 하는 포장용기를 선택할 수 있는 창이 새롭게 표시된다. 해당 창에는 발생지, 폐기물종류, 용기종류, 처리방법에 따라 포장용기 발생 목록이 생성되고, 각 포장용기에 대해 극저준위, 저준위, 중준위 항목을 선택 또는 해제하여 처분시설에서 제외 여부를 결정할 수 있다. 선택된 항목의 경우 ‘정치수량 설정’ 창에서 처분시설에 적용되는 수량이 0으로 변경되면서 수정이 불가능해진다. 일례로, 2-1단계 시설(표층처분 방식)의 경우 처분방식 제한 규정에 따라 초기값으로 중준위에 대한 체크박스가 모두 선택되어 있으며, 해제가 불가능하도록 설정

되어 있다. 또한, 창 하단에 위치한 ‘전체 선택’ 및 ‘전체 해제’ 버튼을 통해 일괄적으로 선택/해제할 수 있으며, 선택 완료 후 ‘확인’ 버튼을 클릭하면 결과가 반영된다.

**분배비율 설정**

기존 RADMAN 프로그램의 ‘정치계획’ 메뉴 화면에서는 포장용기 유형별로 각 사일로 또는 처분고에 정치되는 수량을 개별적으로 입력하도록 되어 있어 데이터 설정에 많은 시간이 소요될 뿐만 아니라 오류 가능성을 배제하기 어려웠다. 이에 따라 처분단위별 정치수량을 일괄적으로 입력할 수 있도록 ‘분배비율 설정’ 버튼 및 화면을 구성하였다.

Fig. 3 좌측 상단의 ‘정치수량 설정’ 창에서 ‘분배비율 설정’ 버튼(B)을 클릭하면 폐기물 유형별 수량을 각 처분 위치(즉, 사일로 또는 처분고)에 일정한 비율로 일괄 처리할 수 있는 창이 새롭게 표시된다. 해당 창에서 사용자는 각 처분위치별 비율을 임의로 입력하거나 하단에 위치한

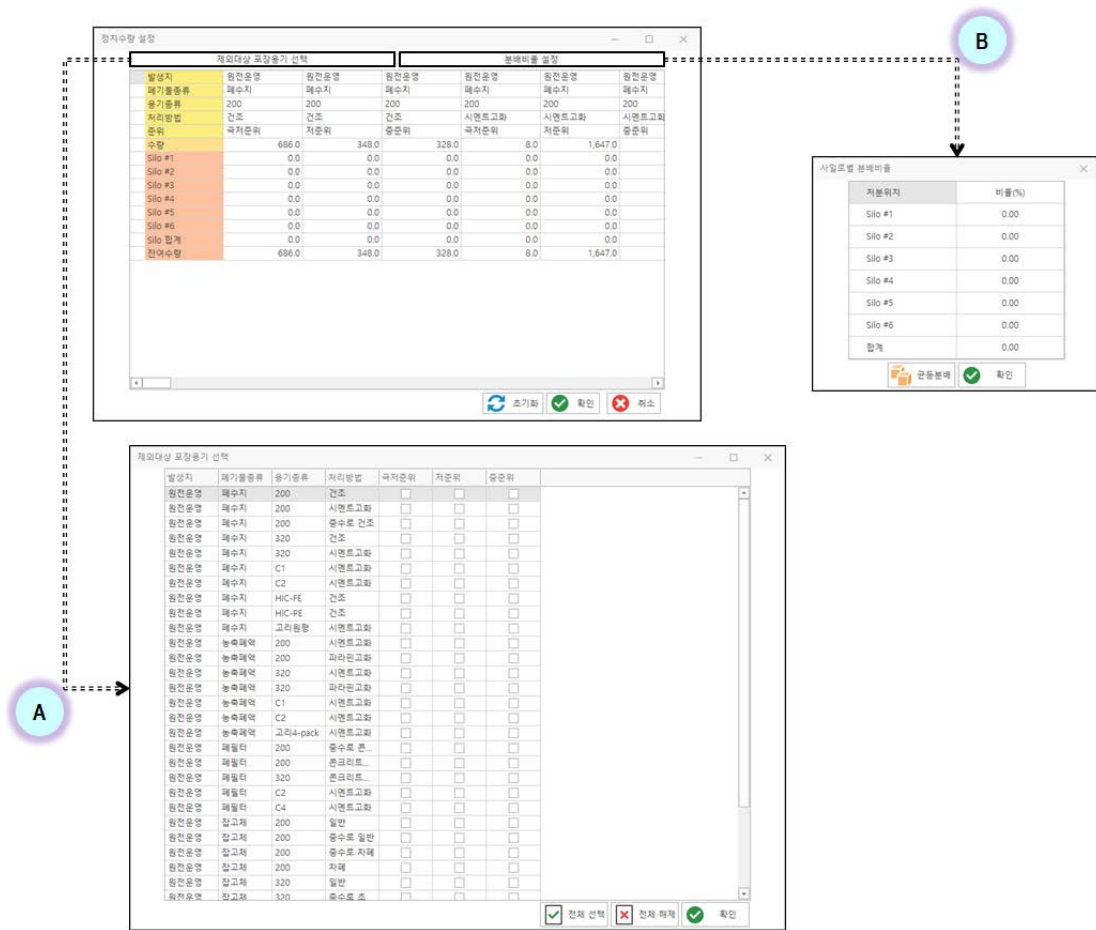


Fig. 3. Window for setting up the number of packages to be disposed of in each disposal unit, which is displayed by clicking ‘Quantity’ button in Fig. 2 (‘A’ and ‘B’ are sub-windows for selecting ‘package type to be excluded from emplacement’ and setting up ‘allocation ratio by disposal unit’, respectively).

‘균등분배’ 버튼을 클릭하여 동일 비율로 설정할 수 있으며, 입력결과에 따른 합산값이 ‘합계’ 행에 자동 업데이트 된다(합계가 100%를 초과하는 경우 경고창 표시). 입력 종료 후 ‘확인’ 버튼을 클릭하면 ‘제외대상 포장용기 선택 결과 반영 수량’에 ‘분배비율’을 곱한 결과(모든 계산값은 버림 처리)가 ‘정기수량 설정’ 창의 각 처분위치에 반영되며, 합계 및 잔여수량이 자동으로 계산된다. 반영된 이후에도 사용자는 수량을 자유롭게 수정할 수 있으나 정기수량 ‘합계’가 ‘수량’ 행의 값보다 클 경우 잔여수량이 적색 음수로 표시되며 ‘확인’ 버튼을 클릭하더라도 반영되지 않고 해당 셀에 대한 경고창이 표시되도록 구현하였다.

### 2.3.2.2. 포장용기 유형별 선원항 모델 설정

Fig. 2 하단에서 ‘Deterioration’ 버튼을 클릭하면 Fig. 4 좌측 상단의 ‘포장용기 유형별 선원항 모델’ 창을 표시하

여 핵종 재고량을 처분단위(사일로 또는 처분고) 및 포장용기 유형에 따라 계산할 수 있도록 구성하였다. 해당 창의 상단에는 ‘포장용기 열화 유형 설정’ 버튼 및 ‘전알파 핵종별 분율 설정’ 버튼을 배치하였고, 중간에는 처분위치 및 포장용기 유형에 따라 계산된 결과가 표시되며, 하단에는 ‘엑셀 저장(계산결과를 엑셀파일로 저장)’ 및 ‘취소’ 버튼이 존재한다. ‘포장용기 열화 유형 설정’ 버튼 및 ‘전알파 핵종별 분율 설정’ 버튼의 기능을 보다 자세히 기술하면 다음과 같다.

### 포장용기 열화 유형 설정

RADMAN 프로그램에서는 포장용기의 누출특성을 별도의 관리항목으로 고려하지 않고 있으나, 처분 안전성 평가에서는 사일로 또는 처분고별 처분용기의 열화 메커니즘에 따라 구분된 방사선원항 정보가 요구된다. 이에

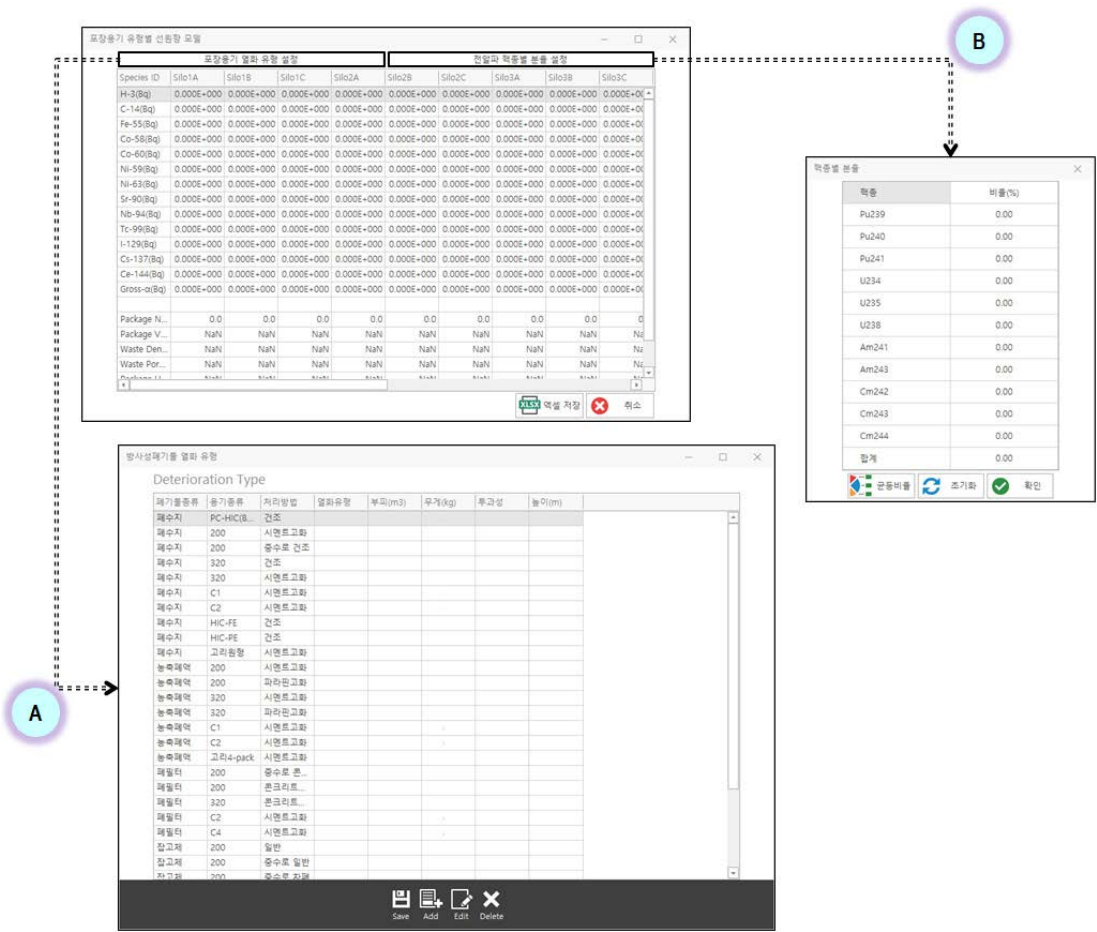


Fig. 4. Window for setting up the source term model by package type, which is displayed by clicking ‘Deterioration’ button in Fig. 2 (‘A’ and ‘B’ are sub-windows for setting up ‘deterioration type by package’ and ‘fraction by nuclide constituting gross-alpha’, respectively).

따라 처분 안전성 평가에 적용되는 포장용기 열화 유형과 관련된 정보를 입력·관리할 수 있도록 ‘포장용기 열화 유형 설정’ 버튼 및 화면을 구성하였다.

Fig. 4 좌측 상단의 ‘포장용기 유형별 선원항 모델’ 창에서 ‘포장용기 열화 유형 설정’ 버튼(A)을 클릭하면 [폐기물종류-용기종류-처리방법]에 따라 분류된 포장용기 범주에 따라 열화 유형 및 처분 안전성 평가 시 필요한 기타 물리적 특성(부피, 무게, 투과성, 높이) 정보를 처리할 수 있는 창이 새롭게 표시된다. 포장용기의 열화 메커니즘은 다음 3가지 유형으로 분류하였으며, RADMAN 프로그램에서 취급되는 각 포장용기에 대해 한국원자력환경공단을 통해 입수한 정보를 초기값으로 적용하였다.

- 유형 A: 단순 침출모델(처분시설 폐쇄 직후 100% 열화)
- 유형 B: 300년 후 열화모델(처분시설 폐쇄후 300년 경과시점에 100% 열화)

- 유형 C: 용해도 제한모델(처분시설 폐쇄 직후부터 연간 3% 비율로 열화)

특정 행을 더블클릭하면 별도의 창에 개별 포장용기에 대한 정보가 일괄적으로 표시되며, 각 구성항목은 향후 필요에 따라 수정 가능하도록 구성하였다. 수정을 완료한 후 최종적으로 창 하단에 배치된 저장(Save) 버튼을 클릭하면 ‘Deterioration Type’ 데이터 테이블이 DB에 저장되고, 각 범주에 대해 자동으로 방사능량이 계산되어 적용된다.

전알파 핵종별 분율 설정

RADMAN 프로그램에서는 ‘Gross-α (전알파)’ 재고량으로 통합 관리되고 있으나, 처분 안전성 평가도구에서는 이를 개별 핵종으로 세분하여 재고량을 입력하도록 되어 있다. 이에 따라 RADMAN 프로그램에서 단일 범주로 고



려되는 방사능량을 개별 핵종으로 구분하여 설정할 수 있도록 ‘전알파 핵종별 분율 설정’ 버튼 및 화면을 구성하였다.

Fig. 4 좌측 상단의 ‘포장용기 유형별 선원항 모델’ 창에서 ‘전알파 핵종별 분율 설정’ 버튼(ⓑ)을 클릭하면 전알파 구성핵종별 분율을 일괄적으로 설정할 수 있는 창이 새롭게 표시된다. 해당 창에서 사용자는 용해도, 분배계수, 선량환산인자 등에 따른 피폭선량 기여도를 종합적으로 고려하여 선정된 11개의 각 핵종별 구성분율을 임의로 입력하거나 하단에 위치한 ‘균등비율’ 버튼을 클릭하여 동일한 값으로 설정할 수 있으며, 입력결과에 따른 합산값이 ‘합계’ 행에 자동 업데이트된다. ‘초기화’ 버튼 클릭 시 모든 핵종에 대한 값이 0%로 초기화되며, ‘확인’ 버튼을 클릭하면 분율 설정결과에 따라 ‘Gross-α 재고량’에 ‘핵종별 분율’을 곱한 결과가 ‘포장용기 유형별 선원항 모델’ 창의 각 처분위치에 개별 핵종별로 구분·반영된다(합계가 100%가 아닌 경우 경고창 표시).

2.3.2.3. 처분 안전성 평가도구 선원항 입력파일 생성

처분단위별 정치수량 및 포장용기 유형별 선원항 모델 설정을 완료한 후 ‘포장용기 유형별 선원항 모델’ 창 하단의 ‘엑셀 저장’ 버튼을 클릭하면 Fig. 5와 같은 양식의 엑셀파일이 생성되며, 이전 단계에서 전알파 핵종별 분율을 설정하지 않은 경우 경고창이 표시된다. 생성된 엑셀파일은 폐기물 정치계획을 반영한 처분단위(사일로 또는 처분

고)에 따른 처분용기 열화 유형별(A~C) 핵종 재고량 정보를 포함하며, 이를 처분 안전성 평가도구의 입력파일의 일부(방사선원항 워크시트)로 직접 적용할 수 있다.

3. 결과 및 고찰

본 연구를 통해 수립한 RADMAN 프로그램 연계 처분 시설 폐쇄후 안전성 평가체계의 유효성을 확인하기 위해 현재 운영 중인 1단계 동굴처분시설을 대상으로 사례연구를 수행하였다. 해당 시설은 포장물 단위(200 L 드럼 기준) 10만 개의 폐기물을 처분할 수 있는 6개의 사일로로 구성되며, 처분용기 유형별 수량 및 열화 메커니즘 등에 따라 폐쇄후 처분 안전성 평가결과가 필연적으로 상이할 것으로 예상된다. RADMAN 프로그램의 기본 DB로 관리되고 있는 약 13만 3천 개의 (주)한국수력원자력 발생 포장물(2014년말 기준) 중에서 중준위폐기물 전체가 1단계 동굴처분시설에 처분된다는 가정하에 골드심 기반으로 개발된 처분 안전성 평가도구에 다음 입력자료를 포함하는 엑셀파일을 연동·호출하여 정상 시나리오를 대상으로 결정집단의 개인에 미치는 피폭선량을 평가하였다.

- 선원항 관련: 핵종, 처분용기 열화 유형별 핵종 재고량 등
- 폐기물 관련: 처분용기별 폐기물 밀도·공극률·부피 등
- 근계영역 관련: 포화도, 사일로 구조 및 특성, 공학적 방

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	
1	Species ID	Silo 1A	Silo B	Silo C	Silo 2A	Silo 2B	Silo 2C	Silo 3A	Silo 3B	Silo 3C	Silo 4A	Silo 4B	Silo 4C	Silo 5A	Silo 5B	Silo 5C	Silo 6A	Silo 6B	Silo 6C	
2	H-3(Bq)																			
3	C-14(Bq)																			
4	Fe-55(Bq)																			
5	Co-58(Bq)																			
6	Co-60(Bq)																			
7	Ni-59(Bq)																			
8	Ni-63(Bq)																			
9	Sr-90(Bq)																			
10	Nb-94(Bq)																			
11	Tc-99(Bq)																			
12	I-129(Bq)																			
13	Cs-137(Bq)																			
14	Ce-144(Bq)																			
15	Pu239(Bq)																			
16	Pu240(Bq)																			
17	Pu241 (Bq)																			
18	U234(Bq)																			
19	U235(Bq)																			
20	U238(Bq)																			
21	Am241(Bq)																			
22	Am243(Bq)																			
23	Cm242(Bq)																			
24	Cm243(Bq)																			
25	Cm244(Bq)																			
26																				
27	Package Number																			
28	Package Volume(m3)																			
29	Waste Density(kg/m3)																			
30	Waste Porosity																			
31	Package Height(m)																			

Fig. 5. Format of MS-excel file containing inventory data by disposal unit and deterioration type, which is generated for the 1<sup>st</sup> stage rock-cavern disposal facility using RADMAN program (1 to 6 and A to C in each row represent sequential number of silo and deterioration type of package, respectively).

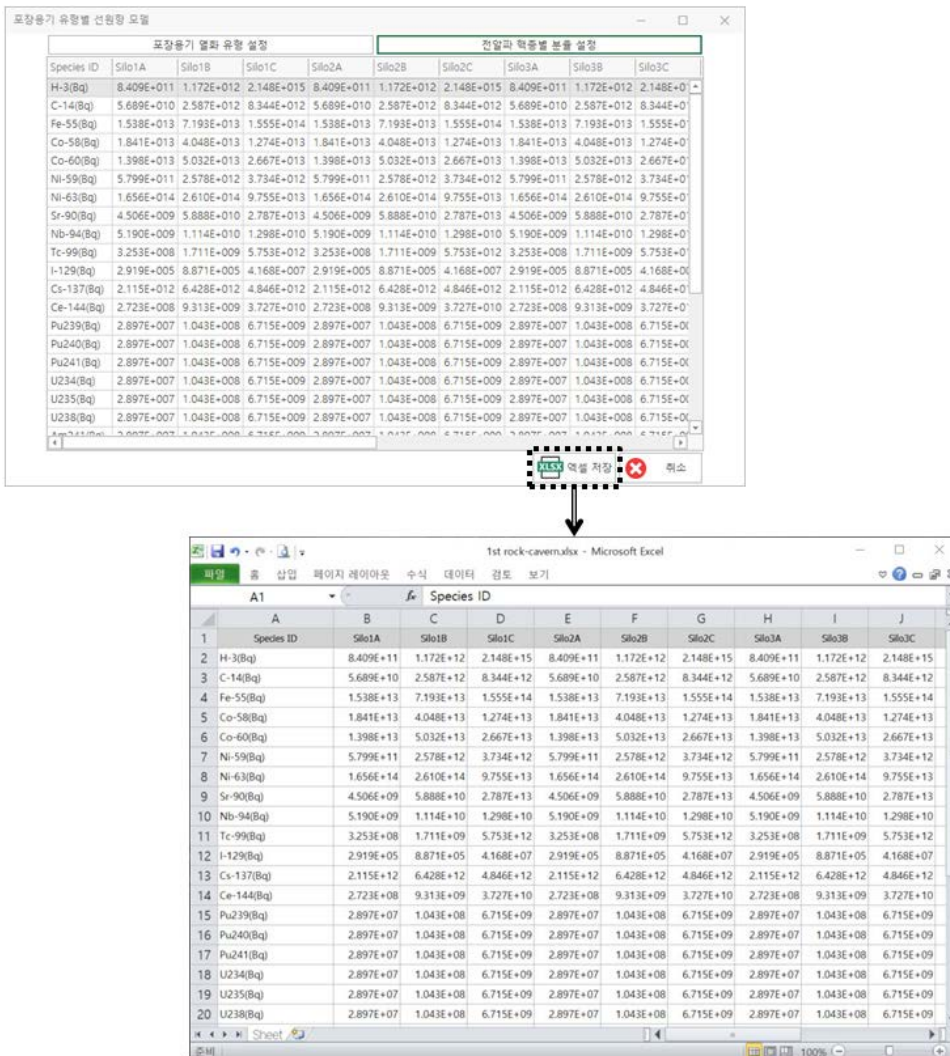


Fig. 6. RADMAN window (upper part) and MS-excel file (lower part) containing inventory data by disposal unit and deterioration type, which is generated for a case study of the 1<sup>st</sup> stage rock-cavern disposal facility (1 to 6 and A to C in each row represent sequential number of silo and deterioration type of package, respectively).

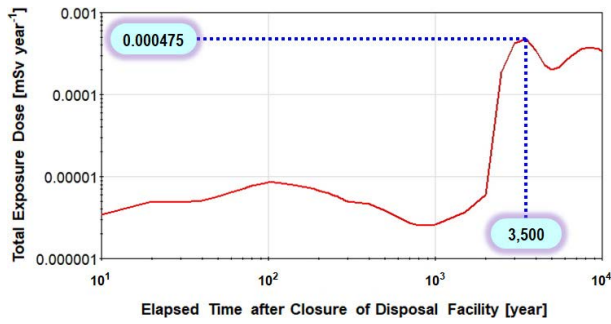
벽 구조 및 특성 등

- 원계영역 관련: 포화대 및 균열암반 구조 및 특성, 우물 양수율 등
- 지하수 유동 관련: 다르시 속도(Darcy Velocity) 등
- 생태계 관련: 선량환산계수, 생체축적인자, 전이계수, 생태계 특성자료 등
- 기타: 분배계수, 용해도, 기후자료 등

이 중 핵종 재고량 입력변수는 RADMAN 프로그램의 ‘정치계획’ 메뉴에서 처분단위별 정치수량 및 포장용기 유형별 선원량 모델을 다음과 같이 설정한 후 엑셀파일을 생성하여 적용하였다. Fig. 6은 RADMAN 프로그램 내 설

정결과 및 이에 대한 핵종 재고량 입력파일 생성결과를 예시한 것이며, 이를 통해 동 프로그램을 통해 처리된 정보가 오류 없이 출력되었음을 확인할 수 있다.

- ‘제외대상 포장용기 선택’ 창: 극저준위 및 저준위 포장용기 체크박스 모두 선택
- ‘분배비율 설정’ 창: 해당되는 모든 포장용기 유형별로 각 사일로에 균등분배
- ‘방사성폐기물 열화 유형’ 창: 각 포장용기 유형별 초기값을 그대로 적용
- ‘전알파 핵종별 분율 설정’ 창: 모든 핵종에 대해 균등분율



**Fig. 7.** Annual exposure dose (on a log-log scale) to members of critical group during the post-closure phase of a case study (i.e. normal scenario of the 1<sup>st</sup> stage rock-cavern disposal facility) using the inventory file generated by RADMAN program.

상기 사항을 반영하여 도출된 1단계 동굴처분시설의 정상 시나리오에 대한 결정집단 개인의 연간선량 변화 추이를 나타내면 Fig. 7과 같다. 해당 그림에 제시한 바와 같이 처분 안전성 평가기간은 처분시설 폐쇄후 10,000년으로 설정하였으며, 정상 시나리오 적용시 연간 총 피폭선량의 최대값은 3,500년 경과시점에  $4.75 \times 10^{-4}$  mSv yr<sup>-1</sup>로 나타났다. 이는 방사성폐기물 처분시설 폐쇄후 정상적 자연현상으로 인한 방사선 영향에 대해 설정되는 성능목표치[3]의 0.475% 수준에 해당한다.

이러한 사례연구 결과 처분단위별 정치수량 및 포장용기 유형별 선원항 모델 설정, 처분단위별 핵종 재고량 입력파일 생성 및 이를 적용한 처분 안전성 평가 수행 등 RADMAN 프로그램과 연계한 처분시설 폐쇄후 안전성 평가체계에 대한 일련의 이행과정(Fig. 1)이 본 연구를 통해 타당하게 구현된 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

방사성폐기물 처분시설의 인허가 획득, 장기 종합관리 계획 수립 등의 목적으로 핵종 재고량 기준 및 처분농도 제한치 등을 수립하는 과정에서 현재까지는 엑셀파일 기반으로 방사선원항 입력파일을 수작업으로 생성하여 안전성 평가를 수행하는 과정을 반복함에 따라 평가결과의 신뢰성이 부족할 뿐만 아니라 외부환경 변화에 신속하게 대응할 수 없었다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 본 연구에서는 RADMAN 프로그램의 개선을 통해 핵종 재고량 평가 및 폐기물 정치계획을 연계하여 중저준위 방사성 폐기물 처분시설의 폐쇄후 안전성 평가를 수행할 수 있는

체계를 Fig. 1과 같이 구축하였다.

이의 일환으로 우선적으로 처분단위별 정치수량 및 포장용기 유형별 선원항 모델 설정과정에서 요구되는 일부 기능을 자동화 또는 용이하게 수행할 수 있도록 Fig. 2와 같이 RADMAN 프로그램의 ‘정치계획’ 메뉴 표시화면에 ‘Quantity’ 및 ‘Deterioration’ 버튼을 추가적으로 배치하여 필요기능을 할당하였다. 해당 기능을 활용하여 폐기물 정치계획을 반영한 사일로·처분고 및 누출특성에 따른 핵종 재고량 정보를 포함하는 엑셀파일을 생성하여 처분 안전성 평가도구에 대한 입력파일의 일부로 직접 적용할 수 있다.

상기 연계방안의 유효성을 확인하기 위해 2014년말 기준 (주)한국수력원자력에서 발생한 포장물 중에서 중준위 폐기물 전체가 1단계 동굴처분시설에 처분된다는 가정하에 특정 정치계획을 설정하여 사례연구를 수행하였으며, 그 결과 Fig. 1에 제시한 바와 같은 일련의 연계과정이 본 연구를 통해 타당하게 구현된 것으로 판단된다.

본 연구를 통해 구축된 이러한 연계 평가체계는 개별 처분시설뿐만 아니라 단일 부지 내에 다양한 유형의 시설이 공존하는 복합처분시설에 대해서도 적용이 가능하며, 향후 최종 사용자인 방사성폐기물관리사업자의 요구사항 등을 반영하여 개선하는 경우 보다 다양한 목적으로 활용할 수 있을 것으로 예상된다.

#### 사 사

이 논문은 2021년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(20193210100110, 복합처분시설 건설·운영 최적화 기술 개발).

#### 참고문헌

1. 원자력안전위원회. 2020. 방사성폐기물 분류 및 자체처분 기준에 관한 규정. 원자력안전위원회고시 제2020-6호.
2. Son YH, Ha JC and Cho CH. 2021. A Study on the Development of a Predictive Model for the Amount of Radioactive Waste from Nuclear Power Plant Decommissioning Using a Multi-regression Analysis. *J. Radiat. Ind.* **15**(4):243-250. <https://doi.org/10.23042/radin.2021.15.4.243>

3. 원자력안전위원회. 2017. 중·저준위 방사성폐기물 처분시설에 관한 방사선 위해방지기준. 원자력안전위원회고시 제2017-62호.
4. Hong YJ, Jang WH, Kim JJ and Lee JW. 2018. A Case Study of Procedures and Methods for Self-Disposal of Radioactive Wastes Generated after Nuclear Research and Development. *J. Radiat. Ind.* **12**(3):239-247. <https://doi.org/10.23042/radin.2018.12.3.239>
5. 미래와도전. 2019. 처분시설 핵종재고량 평가 프로그램 개발 (용역 최종보고서). FNC1944-FR19-001.
6. 미래와도전. 2020. 종합개발계획 처분안전성 평가도구 개발 (복합처분시설 건설·운영 최적화 기술 개발 과제 2차년도 기술보고서). FNC1931-TR20-001.
7. 한국원자력안전기술원. 2016. 주민 피폭선량 평가. KINS/RG-N02.02. Revision 2.