Journal of Radiation Industry 15(4) : 243~250(2021) https://doi.org/10.23042/radin.2021.15.4.243

다중회귀분석을 이용한 원전해체 방사성폐기물 발생량 예측 식 개발에 관한 연구

손 유 화[1,*] · 하 재 철[1] · 조 천 형[1]

[1]한국원자력환경공단

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

Yu-Hwa Son[1,*], Jae-Chul Ha[1] and Chun-Hyung Cho[1]

[1]*Korea Radioactive Waste Agency, 174, Gajeong-ro, Yuseong-Gu, Daejeon 34129, Republic of Korea*

Abstract - In order to reduce the cost of radioactive waste disposal and to manage it efficiently, it is necessary to estimate the amount of radioactive decommissioning waste from nuclear power plant. In this paper a predictive model was developed by a multi-regression analysis using R statistics package with reference to previous research. Decommissioning waste amount data for 12 pressurized water reactors, 4 pressurized heavy water reactors and 3 boiling water reactors were collected for a sample of multi-regression model. In regression analysis, amount of estimated radioactive decommissioning waste was set as the dependent variable, and design net capacity, effective age, decommissioning strategy were selected as independent variables through three variable selection methods. Test statistics: determination coefficient, adjusted determination coefficient, p-value, variance inflation factor of regression analysis were checked to verify significance of derived predictive model. It is expected that a more accurate predictive model can be developed by obtaining additional decommissioning data of nuclear power plants.

Key words : Radioactive waste, Decommissioning, Predictive model, Multi-regression analysis, R language

서 론

한국원자력환경공단은 방사성폐기물(방폐물) 처분시설 종합개발계획을 수립하면서 방폐물 발생량 자료와 가정사항을 토대로 200 L 드럼 71만 분량의 처분 방폐물이 발생할 것으로 예측하였다. 전체 방폐물 71만 드럼 중 원전해체 방폐물은 43만 5천 드럼이며, 원자력발전소(원전) 한 호기당 발생량을 14,500 드럼으로 가정하였다.

원전해체 방폐물의 정확한 발생량을 예측하기 위해서는 개별 원전에 대한 선원항 평가가 필요하다. 국내에서는 한국수력원자력이 국가 연구과제를 통해 고리1호기, 월성1호기의 선원항 평가를 수행한 바 있다. 선원항 평가에서 원전 건설·사고자료 분석, 구역별 방사능 측정, 방사화 모델링 등을 수행하였고 DeCat 해체비용 계산프로그램을 통해 최종 원전해체 방폐물을 계산하였다. 해체전략, 대형폐기물 처리방법, 감용 여부에 따라 다른 예상 발생량을 산출하였으며,

* Corresponding author: Yu-Hwa Son, Tel. +82-42-601-5352, Fax. +82-42-601-5387, E-mail. slowstrider@korad.or.kr

감용·처리 후 원전해체 방폐물 발생량 추정치를 Table 1에 정리하였다(한국전력기술 2016).

Table 1에서 알 수 있듯 원전특성과 해체 방법에 따라 원전해체 방폐물 발생량 추정치는 확연한 차이를 나타낸다. 따라서 모든 원전이 같은 양의 원전해체 방폐물이 발생한다는 예측은 실제발생량과의 차이가 클것으로 예상되므로, 원전특성과 해체 전략의 반영을 통해 방폐물 발생량 예측 방법을 고도화할 필요가 있다. 경제협력기구/원자력기구(OECD/NEA), 미국원자력규제위원회(U.S. NRC), 조선대학교에서 수행한 선행연구에서는 원전 고유특성을 반영한 원전해체 방폐물 예측 식을 개발하고자 하였다.

OECD/NEA는 2003년에 회원국을 대상으로 방폐물 발생량과 해체비용에 대한 설문조사를 실시하였고 그 결과를 보고서로 정리하였다. OECD/NEA는 대상 원전의 발전용량에 따라 원전해체 방폐물 발생량이 결정되며, 원전별 발생량이 원전 발전용량과 Table 2의 원자로 종류별 가중치의 곱일 것으로 예측하였다(OECD/NEA 2003).

U.S. NRC는 미국 해체 원전의 가압경수로와 비등경수로 압력용기를 분석하여 2004년 작성한 보고서에서 원전에서 발생하는 금속 방폐물의 무게를 예측하는 식을 개발하였다. 이 예측 식의 모형은 식(1)과 같으며 M_r은 기준 원자로의 금속 방폐물 무게, P_r은 기준 원자로의 발전용량, P는 예측하고자 하는 원전의 발전용량을 의미한다(U.S. NRC 2004).

$$Generated\ Waste = M_r \cdot \left(\frac{P}{P_r}\right)^{\frac{2}{3}} \quad (1)$$

조선대학교의 송종순 등이 수행한 연구에서는 방폐물의 평가자료를 바탕으로 로그평균을 적용하여 원전해체 방폐물 발생량 예측 식을 도출하였다. Table 3은 예측 식 도출에 활용한 국가별 원전해체 방폐물 평가자료이고 식(2)는 조선대학교에서 도출한 원전해체 방폐물 발생량 예측 식이다. M_{ref}은 참조 원전의 금속방폐물 무게를, P_{ref}은 참조 원전의 발전용량을, P는 예측하고자 하는 원전의 발전용량을 의미한다(송 등 2015).

$$Generated\ Waste = W_{ref} \cdot \left(\frac{P}{P_{ref}}\right)^{0.6} \quad (2)$$

세 가지 선행연구를 살펴보았지만 선행연구에서 도출한 예측 식은 원전 발전용량 또는 원자로 노형을 제한적으로 고려하여 원전해체 방폐물 발생량을 예측하고 있다는 한계를 가진다. 본 연구에서는 원전 발전용량 외에도 원전해체 방폐물 발생량에 미치는 영향이 클 것으로 판단되는 '원자로 노형', '운영기간', '가동률', '해체전략' 인자를 고려하였고 다양한 예측변수를 예측 식에 반영하기 위해 다중회귀분석을 사용하였다. 별도의 기준을 통해 국내외 해체폐기물 발생량 자료를 정리하여 다중회귀분석을 적용하였고 원전

Table 1. Amount of radioactive waste of Kori-1 and Wolsung-1

Plant	Dismantling strategy	Large component treatment	Amount of radioactive waste (200 L drum)
Kori-1	Immediate	Cut	10,578
		Preserve	15,517
	Deferred	Cut	9,737
		Preserve	14,676
Wolsung-1	Immediate	Cut	11,736
		Preserve	17,220
	Deferred	Cut	6,645
		Preserve	13,486

Table 2. Radioactive waste weight by reactor type

Reactor type	Radioactive Waste weight ($t \cdot MWe^{-1}$)
PWR	10
BWR	10
PHWR/CANDU	13
VVER	17
GCR	100

Table 3. Radioactive waste weight by reactor type

Reactor type	Radioactive Waste weight ($t \cdot MWe^{-1}$)
PWR	10
BWR	10
PHWR/CANDU	13
VVER	17
GCR	100

해체 방폐물 발생량에 유의한 영향 인자만을 예측변수로 하는 원전해체 방폐물 발생량 예측 식을 개발하였다.

재료 및 방법

1. 원전해체 방폐물 자료

본 연구에서는 원전해체 방폐물 자료를 국가별 해체계획서와 IAEA PRIS (International Atomic Energy Agency Power Reactor Information System)로부터 수집하였다. 국가별 해체계획서로 미국 License Termination Plan, Post-Shutdown Activity Report 캐나다는 Preliminary Decommissioning Plan 스웨덴은 Decommissioning Study 등을 작

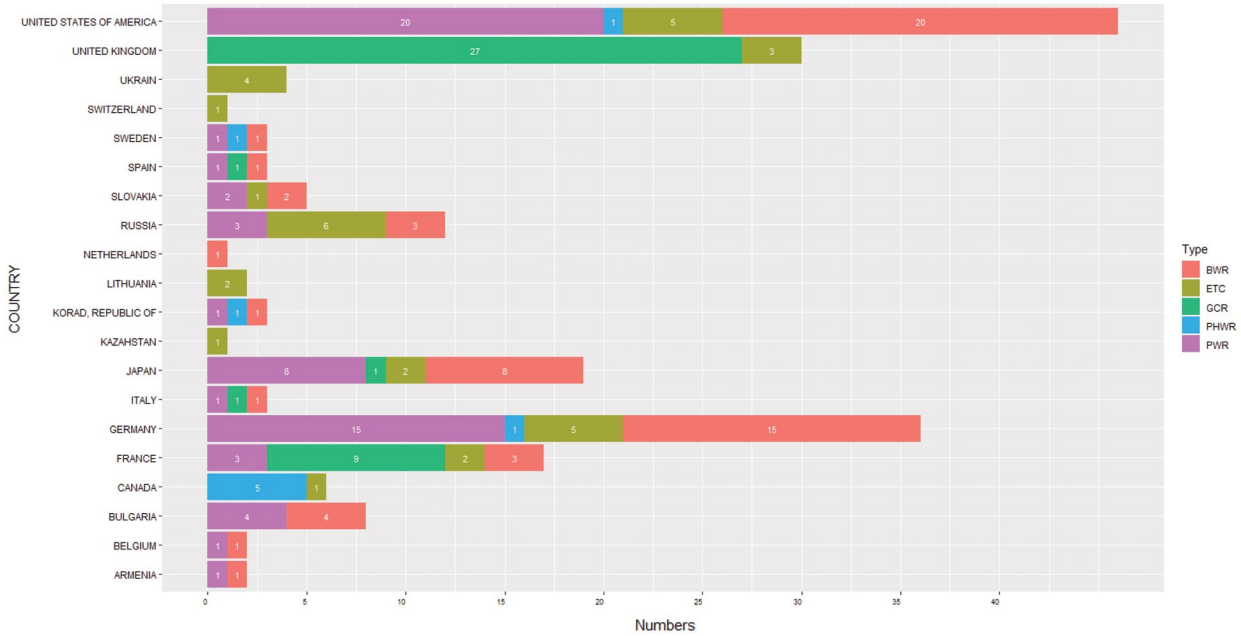

Fig. 1. The number of nuclear reactor shutdowns by country.

성하고 있으며 보고서에서 해체 비용과 방폐물 발생량을 제시하고 있다. Fig. 1은 전 세계 원전 중 영구정지된 원전을 국가별로 정리한 표이며, 가장 많은 영구정지 원전을 보유한 미국의 해체 사례를 가장 많이 확보하였다 (IAEA PRIS 2021).

미국, 캐나다 등의 국가에서는 원전해체 방폐물은 처리·감용 절차에 감용비가 낮은 제염·감용 방식이나 폐자재 재활용을 제한적으로 적용하고 있다. 이는 해당 국가의 처분단가가 낮기 때문이며 국내 사례와 비교하여 수집된 원전해체 방폐물 발생량 추정치를 감용·처리를 적용하지 않은 원전해체 방폐물 발생량으로 가정하였다. 국내 원전해체 방폐물 자료는 선원항 평가 결과 중 감용전 방폐물 발생량 예상치를 사용하였다. 해체보고서에서는 원전해체 방폐물을 무게발생량(Ton)과 부피발생량(m^3)으로 제시하고 있으나 원전특성 정보 획득이 쉬운 부피발생량을 폐기물 자료로 활용하였다 (EPRI 2015).

IAEA PRIS는 전 세계 원전에 대한 기본적인 정보를 웹사이트를 통해 공개하고 있다. IAEA PRIS에서 열람 가능한 원전 기본정보와 원전별 해체전략(Strategy)을 원전해체 방폐물 발생량 추정치와 함께 Table 4에 정리하였다. 해체전략 정보는 해체 방폐물이 발생하지 않는 차폐격리(Entombment)를 제외한 즉시해체(Immediate Dismantling), 지연해체(Deferred Dismantling) 두 가지 경우에 대해 정리하였으며, 미국 해체보고서 용례를 따라 즉시해체와 지연해체를 각각 DECON (Decontamination)과 SAFSTOR (Safe storage)으로 표기하였다. 캐나다 원전은 현재 운영 중으로 해체보고서에서 예상 영구정지 연도를 별도로 표시하였다 (OECD/NEA 2003; U.S. NRC 2004; YAECY 2004; Dominion Energy Kewaunee 2013; Edison 2014; TLG Services 2014; EPRI 2015; Ontario Power Generation 2016a; Ontario Power Generation 2016b; Exelon Generation 2018; ZION SOLUTIONS 2018; Exelon Generation 2019; HOLTEC 2019).

Table 4. The amount of decommissioning waste estimated by international

Orgar/nation	Generated Radioactive Decommissioning waste (200 L drum)
IAEA, OECE/NEA	14,000
Germany	6,600~17,500
France	35,100
Japan	12,400~31,000
Canada	14,500

2. 분석방법

본 연구에서는 다중회귀 분석을 통한 원전해체 방폐물 발생량 예측 식을 개발을 위해 다음과 같은 분석 절차를 적용하였다.

2.1. 예측변수 결정

원전해체 방폐물 자료 중 원전해체 방폐물 발생량에 대한 영향이 클 것으로 판단되는 인자로 발전용량과 노형, 운영기간, 가동률, 해체전략을 선정하였다. 선정한 영향 인자들

의 예측변수 사용 가능 여부는 별도의 분석방법을 통해 판별이 필요하다. 운영기간은 원전의 상업일자와 영구정지 일자를 기준으로 전체기간만을 고려하여 산출하였으며, 캐나다 원전은 장기간 운전정지를 고려하여 계산하였다. 캐나다 원전의 경우 해체보고서에서 가정한 예상 영구정지 연도를 적용하였다. 운영기간 인자와 관련하여 필요한 예측변수의 개수를 최소화하고자 운영기간과 운영률을 식(3)과 같이 곱하여 유효운영기간(Effective Age)이라는 새로운 인자를 도입하였다. 유효운영기간 변수의 계산식은 식(3)과 같으며, 유효운영기간은 원전 운영기간 동안 원자로가 가동된 실제 시간을 의미한다.

$$\text{유효운영기간}(Eff\ Age) = \text{운영기간} \times \text{운영률} \tag{3}$$

유효운영기간을 포함하여 네 가지 영향 인자의 유의성을 판별하기 위해 단계적 회귀(Stepwise regression) 방법을 적용하였다. 단계적 회귀는 복수의 예측변수로부터 서로 다른 예측변수를 가지는 회귀모형의 AIC(Akaike Information Criterion) 값을 비교하여 더 작은 AIC 값을 가지는 회귀모형을 선택함으로써 유의한 예측변수만을 선택해나가는 변수 최적화 방법이다. 예측변수의 도입순서에 따라 전진(forward) 방법, 후진(backward) 방법, 단계별(stepwise) 방법으로 구분되고 본 연구에는 보수적으로 세 가지 단계적 회귀 방법을 모두 적용하였다. AIC는 식(4)로부터 도출할 수 있다. 여기서 n은 모형의 표본 수이고 ln은 자연로그, SSE는 오차 제곱 합, k는 예측변수의 개수이다(Field *et al*. 2019).

$$AIC = n ln\left(\frac{SSE}{n}\right) + 2\mathrm{K} \tag{4}$$

2.2. 다중회귀분석

단계적 회귀를 통해 도출된 예측변수와 원전해체 방폐물 자료에 대하여 다중회귀분석 방법을 적용하여 방폐물 발생량 예측모형을 개발하였다. 다중회귀는 단순회귀를 예측변수가 여러 개인 상황에 맞게 논리적으로 확장한 분석방법이고 다중회귀 분석 모형은 식(5)와 같다. 식에서 Y는 결과변수이고 $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \cdots, \beta_p$은 회귀계수, $X_1, X_2, \cdots, X_n$은 예측변수이며, ϵ은 오차이다. 다중회귀모형을 만족하는 계수는 최소제곱법(method of least square)을 통해 구할 수 있다(Field *et al*. 2019).

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \cdots + \beta_n X_i + \epsilon_i \tag{5}$$

선행연구에서는 원전해체 방폐물 발생량과 발전용량의 관계식을 멱함수 형태로 도출하였다. 본 연구에서도 동일하게 원전해체 방폐물 발생량과 발전용량이 멱함수 관계를 갖는 것으로 가정하였다. 따라서 다중회귀 분석 모형을 식(6)과 같이 멱함수로 변형하여 회귀분석을 적용하였으며, 발전용량 외 예측변수들에 대해서도 동일하게 적용하였다. 식(7)에서 $\hat{y}_t$는 모형을 통한 예측값, $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \cdots, \beta_p$는 회귀계수, $X_1, X_2, \cdots, X_n$은 예측변수이다. 멱합수는 식(6)와 같이 선형화하여 사용할 수 있다.

$$\hat{y}_t = b_0 \cdot X_{1i}^{b_1} \cdot X_{2i}^{b_2} \cdots X_{pi}^{b_i} \cdot, \ i = 1,2,\cdots n \tag{6}$$

$$\log_{10}\hat{y}_i = \log_{10} b_0 + b_1 \log_{10} X_{1i} + b_2 \log_{10} X_{2i} + \cdots + b_{plog_{10}} X_{pi}, \quad i = 1,2,\cdots,n \tag{7}$$

다중회귀분석을 수행할 수 있는 코드로 Excel, R, SASS, Matlab, SAS, Python 등이 있으나, 이 중 R을 사용하여 회귀분석을 수행하였다. R은 통계 계산과 그래픽에 특화된 오픈소스(Open source) 언어로 다른 사용자가 소스코드에 접근하여 제작한 패키지를 통해 최신 분석방법을 쉽게 적용 가능하다는 장점이 있다(이 2016).

2.3. 발생량 예측 식 유의성 검증

다중회귀분석을 통해 도출한 예측 식의 통계적 유의성 검증을 위해 통계검정량을 비교하였다. 유의성 검증에 활용된 통계검정량은 유의확률(probability value)과 수정결정계수(Adjusted R^2), 분산팽창인자(Variance Inflation Factors, VIF)이다. 각 통계검정량의 정의와 유의성 판별 방법은 다음과 같다.

유의확률이란 귀무가설을 따르는 표본에서 극단적인 통계치가 관측될 확률을 말한다. 정규분포를 따르는 모집단으로부터 추출한 크기가 n인 표본의 신뢰구간은 식(8)과 같이 나타낼 수 있다. 여기서 $\overline{X}$는 표본의 평균이고 σ는 모분산, α는 유의확률, Z는 Z 통계량으로 식(9)와 같이 표본평균을 표준화하여 구할 수 있다. 본 연구에서는 95% 신뢰수준을 기준으로 유의성을 검증하였고 이는 유의확률로는 0.05에 해당한다(Andy Field *et al*. 2019).

$$P = \left(\mu - Z_{\frac{\alpha}{2}} \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \le \overline{X} \le \mu + Z_{\frac{\alpha}{2}} \frac{\sigma}{\sqrt{n}}\right) = 1 - \alpha \tag{8}$$

$$Z = \frac{\overline{X} - \mu}{\sigma/\sqrt{n}} \tag{9}$$

결정계수(R^2)는 전체 분산 중 회귀모형이 설명하는 분산의 비율을 의미한다. 회귀모형에 대한 결정계수는 식(10)과 같이 정의되며 SS_T는 실제 자료점 제곱의 총합, SS_m 모형을 통한 예측 점의 제곱 합 SS_R은 잔차의 제곱을 의미한다. 결정계수가 표본으로부터 얻은 회귀모형의 예측 설명률에 대한 값이라면 수정결정계수는 표본을 얻은 모집단으로부터 회귀모형을 유도했을 때 그 모형의 예측 설명률을 나타내는 값이다. 수정결정계수에 대한 식은 식(11)과 같고 식(11)에서 n은 표본의 개수 p는 예측변수의 개수이다. 수정결정계

Table 5. Summary of nuclear power plants and estimated decommissioning waste amount

Country	Name	Waste volmue (m^3)	Power (MWe)	Type	Commercial operation date	Permanent shutdown date	Operation factor	Strategy
U.S.	Indian Point2	38,744	1,067	PWR	1974.08.01	2020.04.30	0.78	DECON
	Indian Point3	61,964	1,085	PWR	1976.08.30	2021.04.30	0.74	DECON
	Kewaunee	3,854	595	PWR	1974.06.16	2013.05.07	0.85	SAFSTOR
	Main Yankee	91,520	900	PWR	1972.12.28	1997.08.01	0.73	DECON
	Oyster Creek	16,012	652	BWR	1969.12.01	2018.09.17	0.78	SAFSTOR
	Pilgrim-1	7,530	711	BWR	1972.12.01	2019.05.31	0.76	SAFSTOR
	Rancho Seco	17,341	917	PWR	1975.04.17	1989.06.07	0.46	SAFSTOR
	San Onofre-2	52,261	1,127	PWR	1983.08.08	2013.06.07	0.77	DECON
	San Onofre-3	51,885	1,127	PWR	1984.04.01	2013.06.07	0.78	DECON
	TMI-1	9,898	880	PWR	1974.09.02	2019.09.20	0.77	SAFSTOR
	Yankee Rowe	18,321	635	PWR	1961.07.01	1991.10.01	0.86	DECON
	Zion-1	166,324	1,040	PWR	1973.12.31	1998.02.13	0.64	SAFSTOR
	Zion-2		1,040	PWR	1974.09.17	1998.02.13	0.64	SAFSTOR
	Vermont Yankee	18,879	180	BWR	1972.11.30	2014.12.29	0.77	DECON
Canada	Dalington-1	9,790	878	PHWR	1992.11.14	(2049)*	0.89	SAFSTOR
	Dalington-2	9,651	878	PHWR	1990.10.09	(2052)*	0.74	SAFSTOR
	Dalington-3	9,638	878	PHWR	1993.02.14	(2053)*	0.88	SAFSTOR
	Dalington-4	9,627	878	PHWR	1993.06.14	(2055)*	0.88	SAFSTOR
	Pickering-1	6,938	515	PHWR	1971.06.29	(2022)*	0.69	SAFSTOR
	Pickering-2	6,086	515	PHWR	1971.12.30	2007.05.28 (1997)	0.63	SAFSTOR
	Pickering-3	6,086	515	PHWR	1972.06.01	2008.10.31 (1997)*	0.71	SAFSTOR
	Pickering-4	6,934	515	PHWR	1973.06.17	(2022)*	0.71	SAFSTOR
	Pickering-5	6,100	516	PHWR	1983.05.10	(2024)*	0.78	SAFSTOR
	Pickering-6	6,096	516	PHWR	1984.02.01	(2024)*	0.81	SAFSTOR
	Pickering-7	6,096	516	PHWR	1985.01.01	(2024)*	0.81	SAFSTOR
	Pickering-8	6,100	516	PHWR	1986.02.28	(2024)*	0.79	SAFSTOR
Korea	Kori-1	12,525	558	PWR	1972.04.29	2017.06.18	0.80	DECON
	Kori-1	10,039	558	PWR	1972.04.29	2017.06.18	0.80	SAFSTOR
	Wolsung-1	14,593	629	PHWR	1983.04.22	2019.12.24	0.69	DECON
	Wolsung-1	10,696	629	PHWR	1983.04.22	2019.12.24	0.69	SAFSTOR

*Estimated Permanent Shutdown date

수가 결정계수와 유사하다면 회귀모형이 일반화된 것으로 판단할 수 있다. 수정결정계수와 결정계수의 유사기준은 오차범위 10% 이내로 결정하였다.

$$R^2 = \frac{SS_m}{SS_T} = 1 - \frac{SS_R}{SS_T} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y}_i)^2} \quad (10)$$

$$Adjusted\ R^2 = 1 - \frac{n-1}{(n-p-1)(1-R^2)} \quad (11)$$

다중공선성 판별을 위한 통계검정량으로 분산팽창인자(variance inflation factor, VIF)를 사용하였다. 다중공선성은 예측변수들 사이의 강한 상관관계가 존재하는 것으로 다중공선성이 있을 시 예측 식이 유의하다 판별할 수 없다. VIF에 대한 식은 식(12)와 같고 일반적으로 VIF가 10보다 크면 다중공선성이 있는 것으로 판단한다(Field *et al*. 2019).

$$VIF_i = \frac{1}{1 - R_i^2} \quad (12)$$

결 과

다중회귀분석을 적용할 수 있도록 원전해체 방폐물 자료를 원전해체 방폐물 발생량과 4가지 영향 인자인 발전용량,

Table 6. Summary of dependent and independent variables for multi-regression analysis

No	Country	Name	Waste volmue (m^3)	Power (MWe)	Type	Effage (year)	Strategy
1	U.S.	Indian Point2	38,744	1,067	PWR	35.7	DECON
2		Indian Point3	61,964	1,085	PWR	32.6	DECON
3		Kewaunee	3,854	595	PWR	33.2	SAFSTOR
4		Main Yankee	91,520	900	PWR	18.3	DECON
5		Oyster Creek	16,012	652	BWR	38.3	SAFSTOR
6		Pilgrim -1	7,530	711	BWR	35.6	SAFSTOR
7		Rancho Seco	17,341	917	PWR	11.1	SAFSTOR
8		San Onofre -2	52,261	1,127	PWR	23.9	DECON
9		San Onofre -3	51,885	1,127	PWR	23.5	DECON
10		TMI-1	9,898	880	PWR	34.7	SAFSTOR
11		Yankee Rowe	18,321	635	PWR	36.2	DECON
12		Zion1&2 (average)	83,162	1,040	PWR	16.0	SAFSTOR
13		Vermont Yankee	18,879	180	BWR	23.2	DECON
14	Canada	Danlington (average)	9,677	878	PHWR	51.2	SAFSTOR
15		Pickering (average)	6,305	516	PHWR	28.9	SAFSTOR
16	Korea	Kori-1	12,525	558	PWR	31.0	DECON
17		Kori-1	10,039	558	PWR	31.0	SAFSTOR
18		Wolsung-1	14,593	629	PHWR	24.7	DECON
19		Wolsung-1	10,696	629	PHWR	24.7	SAFSTOR

Table 7. Result of a variable selection

Method	Selected variables
Forward	Power, Effective age, Strategy
Backward	Power, Effective age, Strategy
Stepwise	Power, Effective age, Strategy

노형, 유효운영기간, 해체전략에 대해 재정리하였다, 미국 Zion 원전과 캐나다 Dalington, Pizckering 원전은 평균값을 적용하였으며 최종적으로 가압경수로(PWR) 13기, 가압중수로(PHWR) 4기, 비등경수로(BWR) 3기의 원전해체 방폐물 자료를 정리한 결과를 Table 6에 나타내었다.

Table 7 원전해체 방폐물 자료에 단계적 회귀분석을 세 가지를 각각 적용하였으며 그 결과를 Table 7에 정리하였다. 단계적 회귀분석 세 가지 모두 발전용량, 유효운영기간, 해체전략 예측변수가 유의하다고 분석하였으며 노형 영향 인자는 예측변수에서 제외하였다.

최종적으로 종속변수(Y)로 원전해체 방폐물 발생량 추정치를 예측변수(X_i)로 발전용량, 유효운영기간, 해체전략을 선정하여 원전해체 방폐물 자료에 대한 다중회귀분석을 수행하였다. 다중회귀분석에 사용되는 분석 모형은 멱함수를 사용하였으며, 식(6)의 선형화된 멱함수와 R 프로그램의 다중회귀분석 통계패키지를 활용하였다. 다중회귀분석 결과는 Table 8과 Table 9에 정리하였다.

예측 식 개발을 위해 Table 8의 회귀계수를 식(5) 회귀모형에 적용하였고, 개발한 예측 식을 Table 10에 정리하였다. Fig. 2에는 해체원전의 방폐물 발생량과 예측 식을 통한 해체원전 발생량 예측 결과를 비교하여 나타내었다.

예측 식의 통계검정량을 비교하여 예측 식을 검증하였고 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다, 우선 예측변수별 유의확률(p-value)을 비교를 통해 예측 식이 원전해체 방폐물 발생량을 충분히 모사하고 있음을 확인하였다. Table 8에서 확인할 수 있는 발전용량, 유효운영기간, 해체전략-즉시해체, 해체전략-지연해체에 대한 p-값은 각각 0.00781, 0.02285, 0.01012, 0.00176이다. 유의성 판단 기준인 0.05와 비교하면 매우 작은 것을 알 수 있다. 따라서, 유의확률 비교 결과 극단적인 통계치가 발견될 확률이 비교 기준인 5%보다 충분히 낮으므로 예측 식이 적합한 것으로 판단할 수 있다.

결정계수(R^2)와 수정결정계수(*Adjusted* R^2)의 비교를 통해 예측 식이 일반화된 것을 확인하였다. 예측 식의 결정계수와 수정결정계수는 Table 10에 정리되어 있으며 각각 0.6875, 0.6249이다. 두 값을 비교했을 때 오차범위는 10% 이내로 결정계수와 수정결정계수가 충분히 유사한 것으로 판단할 수 있고 원전해체 방폐물 발생량 예측 식이 일반화된 것으로 판단할 수 있다.

마지막으로 예측변수 간의 다중공선성이 없는 것을 확인하였다. 예측변수별 분산팽창인자는 Table 8에 정리되어 있으며 발전용량, 유효운영기간, 해체전략에 대한 분산팽창인

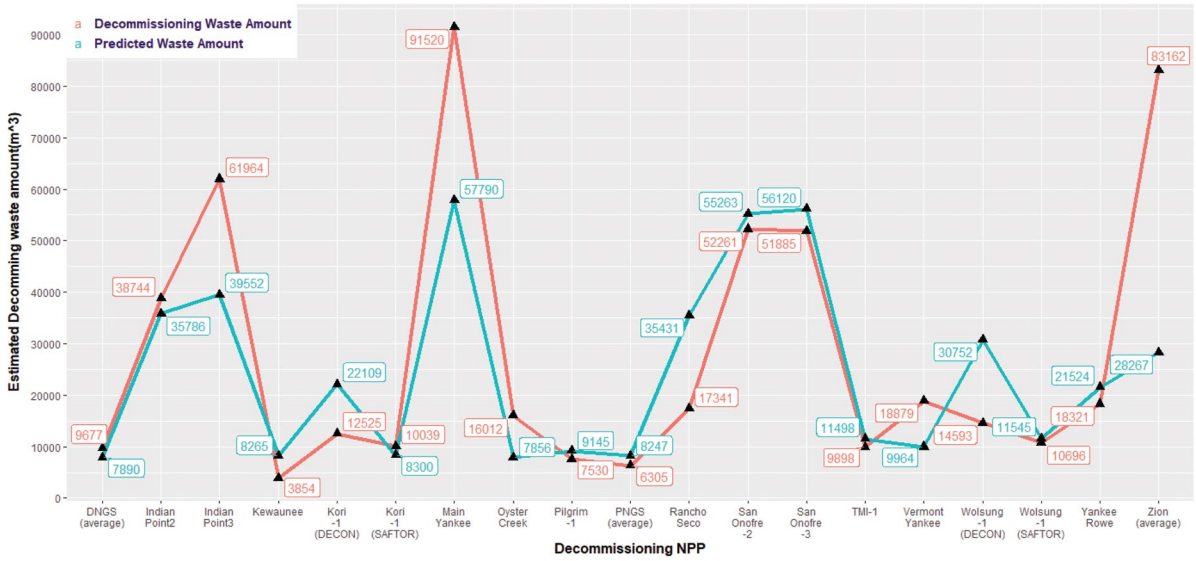

Fig. 2. Comparison between analyzed data and multi-regression model prediction.

Table 8. Result of a multi-regression analysis

	Coefficient (β_i)	Std. error	t-value	p-value	VIF
Strategy-DECON	3.1653	1.0763	2.941	0.01012	–
(Power)	0.9493	0.3094	3.068	0.00781	1.0067
(Effective age)	−0.9570	0.3774	−2.535	0.02285	1.0104
Strategy-SAFSTOR	−0.4255	0.1122	−3.794	0.00176	1.0037

Table 9. Summary of statistic tests of a multi-regression model

R^2	Adjusted	RMSE	MAE	Std. Error
0.6875	0.6249	0.2165	0.1736	0.2437

Table 10. Summary of multi-regression models

Strategy	Waste predictive equation (m^3)
DECON	$1463.2 \times P^{0.949} \times A_{eff}^{-0.957}$
SAFSTOR	$549.3 \times P^{0.949} \times A_{eff}^{-0.957}$

자는 각각 1.0067, 1.0104, 1.0037이다. 세 가지 예측변수 모두 분산팽창인자 값이 다중공선성 판단 기준인 10에 미달하므로 예측변수들 사이의 다중공선성은 없는 것으로 판단가능하다.

고 찰

검정 통계량 비교 결과를 통해 원전해체 방폐물 발생량 예측 식이 충분히 유의한 것으로 확인하였지만 일부 해체 원전의 경우 Fig. 2 결과 비교에서 발생량 예측 결과와 자료 값이 차이를 보였다. 특히 Zion 원전과 월성1호기 원전에서 두 배 이상의 차이를 나타냈으며, 다음과 같은 원인을 생각해볼 수 있다. Zion 원전은 Energy Solution이 해체사업을 맡아 1호기와 2호기를 동시에 해체하고 있는 원전이다. 해체보고서에서는 1호기와 2호기의 원전해체 방폐물 발생량을 합산하여 제시하고 있으나, 본 연구에서는 Zion 원전 전체 발생량의 평균을 1호기 또는 2호기의 발생량으로 가정하였다. 그러나 전체시설 해체 시에는 부대시설이 포함되므로 평균값과 호기당 발생량은 같다고 보기 어려울 것이다. 또한 Zion 원전은 제어봉 인출 사고이력이 있는 원전이며, 이로인해 영구정지가 결정되었다. 원전해체 방폐물 발생량이 타 원전에 비해 높을 것으로 예상되나 본 연구를 통해 개발된 예측 식은 사고이력을 반영하지 않으므로 예측값이 과소 평가된 것으로 추측된다. 월성1호기의 경우 즉시해체의 경우에만 예측 발생량과 실제 발생량이 차이나 나는 것으로 확인되었고 고리1호기에서도 즉시해체 사례에서만 차이를 보였다. 이는 해외원전 사례는 토양폐기물을 포함하여

원전해체 방폐물 발생량을 추정하였으나 국내 사례는 제외하였기 때문으로 판단된다. 상대적으로 토양폐기물이 적게 발생하는 지연해체 사례에서는 예측값이 발생량과 유사하였다.

결 론

원전해체 방폐물 발생량 예측의 정확도 향상을 위해 원전 특성을 고려한 원전해체 방폐물 발생량 예측 식을 개발하였다. 발생량 예측 식은 원전해체 방폐물 발생량 예측에 참고자료로 활용할 수 있을 것으로 기대되며, 예측 식의 사용성 향상을 위해 다음과 같은 연구를 고려할 수 있을 것으로 생각된다.

첫 번째, 원전해체 방폐물 발생량 자료를 추가확보하여 데이터표본을 개선한다. 예측변수의 수를 k라 했을 때 통계학적으로 권장되는 다중회귀분석 표본의 수는 50 + 8k이다. 표본의 수가 많을수록 예측 식에 대한 특이점의 영향이 적어 예측결과가 왜곡되지 않는다. 국가별 해체보고서 공개기준이 달라 권장표본 수만큼의 원전해체자료 확보가 어려울 것으로 예상되나 세계해체시장이 활발해짐에 따라 자료의 확보도 용이해질 것으로 기대된다.

두 번째, 원전해체 방폐물 발생량 예측 식에 예측변수를 추가한다. 발전용량, 유효운영기간, 해체전략 예측변수 외에도 새로운 영향 인자를 예측변수로 고려할 수 있다. 예측 식을 통한 발생량 예측결과가 원전해체 방폐물 자료와 차이가 발생하는 이유는 원전별 특성이 다르기 때문이다. 예측변수가 추가될수록 최대한 다양한 원정특성을 고려할 수 있어 예측 식의 정확도가 향상될 것이다.

세 번째, 원전해체 방폐물 발생량 예측 식에 적합한 회귀분석모형을 재검토한다. 본 연구에서는 선행연구사례를 따라 멱함수 형태의 회귀분석모형을 사용하여 예측 식을 개발하였다. 실제로는 멱함수 외에 더 적합한 회귀분석모형이 존재할 수 있으며, 예측변수별로 다른 회귀분석모형이 고려될 수 있다.

본 연구를 통해 개발한 발생량 예측 식이 추가 연구를 통해 충분히 보완된다면 원전해체 방폐물 발생량 예측 방법 확립에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

사 사

본 논문은 에너지기술평가원(KETEP)에서 주관하는 방폐물관리기술개발 “처분시설 건설·운영 최적화 기술개발” 과제(과제번호: 20193210100060)의 일환으로 작성되었습니다.

참 고 문 헌

송종순, 김영국, 이상헌. 2015. 신 분류기준을 적용하기 위한 원전 해체폐기물량 및 처분 비용 산정에 대한 사전 연구. 방사성폐기물학회지. **13**(1):45-53.

이윤환. 2016. R통계분석. 한빛아카데미.

한국원자력환경공단. 2020. 중·저준위 처분시설 종합개발계획 로드맵(안).

한국전력기술. 2016. 경수로형 및 중수로형 원전 해체 선원항 및 폐기물량 평가보고서.

Dominion Energy Kewaunee. 2013. Kewaunee Power Station Post-shutdown Decommissioning Activities Report, Rev0.

Edison. 2014. San Onofre Nuclear Generating Station, Unit 2 and 3 Site Specific Decommissioning Cost Estimate.

EPRI. 2015. Review of Waste Management Best Practices During Nuclear Plant Decommissioning.

Exelon Generation. 2018. Oyster Creek Nulclear Generating Station - Post Shutdown Decommissioning Activities Report, Rev0.

Exelon Generation. 2019. Three Mile Island Nuclear Station, Unit1 Post-shutdown Decommissioning Activities Report, Rev0.

Field A, Miles J and Field Z. 2012. Discovering Statics Using R. SAGE publications.

HOLTEC Decommissioning International. 2019. Indian Point Unit1, 2 and 3 Post-Shutdown Decommissioning Activities Report.

IAEA Power Reactor Information System. https://pris.iaea.org/PRIS/About.acpx. The Database on Nuclear Power Reactors.

OECD/NEA. 2003. Decommissioning Nuclear Power Plants: Politics, Strategies and Costs. Nuclear Development. OECD Publications.

Ontario Power Generation. 2016a. Preliminary Decommissioning Plan - Dalington Nuclear Generating Satation.

Ontario Power Generation. 2016b. Preliminary Decommissioning Plan - Pickering Nuclear Generating Satations A&B.

TLG Services. 2014. Vermont Yankee Nuclear Power Station Post-shutdown Decommissioning Activities Report, Rev0.

U.S. NRC. 2004. Radiological Assessment for Clearance of Material from Nuclear Facilities. NUREC-1640.

YAECY. 2004. Yankee Rowe Nuclear Plant Station License Termination Plan.

ZION SOLUTIONS. 2018. Zion Nuclear Power Station, Unit 1 and 2 License Termination Plan. Rev2.

Received: 18 October 2021
Revised: 1 December 2021
Revision accepted: 1 December 2021