

Decommissioning Cost Estimation of Kori Unit 1 Using a Multi-Regression Analysis Model

회귀 분석 모델을 이용한 고리 1호기 해체 비용 추정

Han Young Joo, Jae Wook Kim, So Yun Jeong, and Joo Hyun Moon*

Dankook University, 119, Dandae-ro, Dongnam-gu, Cheonan-si, Chungcheongnam-do, Republic of Korea

주한영, 김재욱, 정소윤, 문주현*

단국대학교, 충청남도 천안시 동남구 단대로 119

(Received February 3, 2020 / Revised April 8, 2020 / Approved August 11, 2020)

A multi-regression model was developed to estimate the decommissioning cost for Kori unit 1 using foreign nuclear power plant (NPP) decommissioning cost data. First, the decommissioning cost data were collected for 13 boiling water reactors and 16 pressurized water reactors and converted into the values as of November 2019. Then, for the regression model, the decommissioning cost was chosen as the dependent variable, and two variables were selected as independent variables: a contamination factor that was designed to reflect the operational characteristics of the decommissioned NPP and the decommissioning period. A statistical package in the R language was used to derive the regression model. Finally, the regression model was applied to estimate the decommissioning cost for Kori unit 1. The estimated decommissioning cost for Kori unit 1 was 663.40~928.32 million US dollars (782,812~1,095,418 million Korean won).

Keywords: Regression model, Nuclear power plant, Decommissioning cost, Kori unit 1, R language

* Corresponding Author.

Joo Hyun Moon, Dankook University, E-mail: jhmoon86@dankook.ac.kr, Tel: +82-41-550-3513

ORCID

Han Young Joo

<http://orcid.org/0000-0001-5021-9391>

Jae Wook Kim

<http://orcid.org/0000-0002-0815-3197>

So Yun Jeong

<http://orcid.org/0000-0002-8398-6308>

Joo Hyun Moon

<http://orcid.org/0000-0003-3814-6294>

본 논문에서는 고리 1호기 해체 비용 추정을 위해 외국 원자력발전소 해체 비용 데이터를 현가화한 후 원자력발전소 해체 비용 추정 회귀 분석모델을 개발하였다. 이 모델 개발에 사용된 데이터는 해체 또는 진행 중인 BWR 13기, PWR 16기의 해체 비용 데이터이다. 회귀 분석모델 도출을 위해, 해체 비용을 종속변수로 정하고, 해체 원전의 운전 특성을 반영할 수 있게 고안된 Contamination factor와 해체 기간을 독립변수로 선정하였다. 빅데이터 분석 도구인 R language의 통계패키지를 이용하여 회귀 분석모델을 도출하였다. 이 회귀 분석 모델을 적용하여 고리 1호기 해체 비용을 예측한 결과, 미화 663.40~928.32 백만 달러, 한화 약 7,828.12억~1조 954.18억 원이 소요될 것으로 예측되었다.

중심단어: 회귀모델, 원자력발전소, 해체 비용, 고리1호기, R언어

1. 서론

“해체”는 원자력안전법에 따라 허가 또는 지정을 받은 시설의 운영을 영구적으로 정지한 후, 해당 시설과 부지를 철거하거나 방사성오염을 제거함으로써 원자력안전법 적용대상에서 배제하기 위한 모든 활동을 말한다[1]. 원자력발전소 영구정지 사유로는 경제성 저하, 정치적 판단, 중대사고 등이 있으며, 일반적으로 원전 노후화에 따른 경제성 상실이 가장 큰 이유다.

Fig. 1은 현재 전 세계에서 운영 중인 원자력발전소를 가동 연수에 따라 구분된 것이다. IAEA PRIS에 따르면, 2019년 12월 현재 449기가 운영 중이며, 운영 중인 원자력발전소 가운데 30년 이상 장기 운전 중인 원자력발전소는 278기, 40년 이상은 72기이며, 50년 이상은 5기이다[2].

우리나라는 40년간 운전한 고리 1호기를 해체하기 위해 영구정지 상태로 전환하였으며, 해체 계획이 승인되고 사용후핵연료 반출이 완료되는 대로 해체를 추진할 것으로 보인다. 이 이외에도 30년 이상 운전된 가압 경수로(PWR)와 가압중수로(PHWR)의 설계수명이 연장되지 않을 경우, 2029년까지 총 12기의 원자력발전소 해체가 추진될 것으로 예상된다.

원자력발전소 해체는 해체 작업 수행과 자원관리를 병행한다. 해체 비용 추산을 위해서는 일반적으로 WBS (Work Breakdown Structure) 및 ISDC를 이용해 만들어진 해체 비용 평가 프로그램을 이용하여 평가한다[3]. 미국은 해체 비용 코드로 CECP (PNL), DECAS (AVZ), DECCER (TRG), CAT (RSCS) 등을 개발하였다. 일본 JAERI는 JPDR 해체 경험을 기반으로 COSMARD을 개발하였다. 슬로바키아 SLOVAK ELECTRIC는

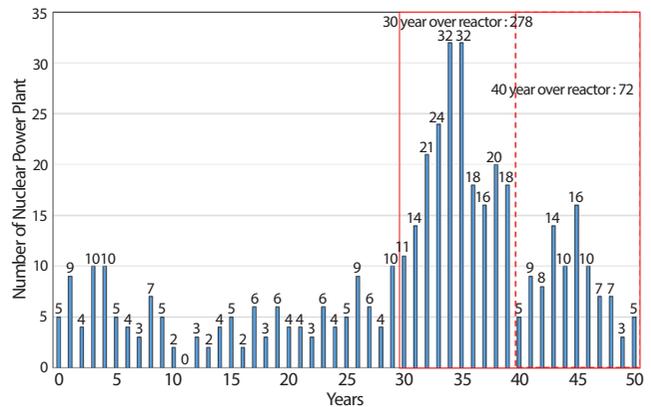


Fig. 1. Number of Reactors in Operation by Age.

OMEGA를, 영국 UKAEA는 PRICE를 개발하였다[4].

신뢰성 있는 해체 비용을 추산하기 위해서는 여러 가지 구체적인 데이터가 다수 필요하다. 하지만 해체를 결정한 시점이나 초기 진행단계에서는 데이터 부족으로 정확한 해체 비용 추산이 어렵다. 전 세계적으로 원자로 특성, 즉, 출력, 운영기간, 규제 기준 등이 상이하어, 해체 비용을 정확히 예측하기 쉽지 않다. 하지만 각국은 해체 비용 추당 근거를 마련하기 위해, 원자력발전소 특성에 기반하여 해체 비용을 추산하고 있다. 프랑스는 전세계 원자력발전소 호기당 평균 해체 비용을 6,546억원으로 추정하였다[5]. 우리나라는 원자력발전소 해체 비용 추당금을 매 2년마다 검토하여 고시하고 있는데, 최근 고시한 2019년 기준 해체 비용은 8,129억원이다. 이는 2017년 고시한 7,515억원 대비 8.1% 인상된 금액이다[6].

본 논문에서는 최근 우리 정부가 고시한 원자력발전소 해체 비용이 고리1호기 해체하는데 충분한지를 확인하고자,

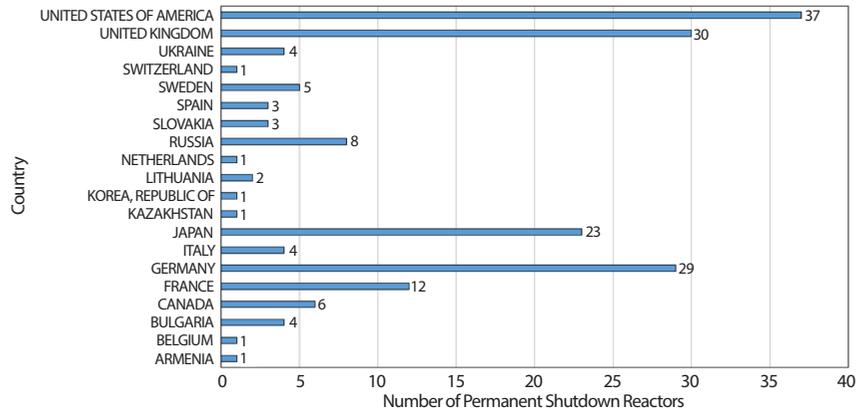


Fig. 2. Number of Nuclear Reactors in Permanent Shutdown by Country.

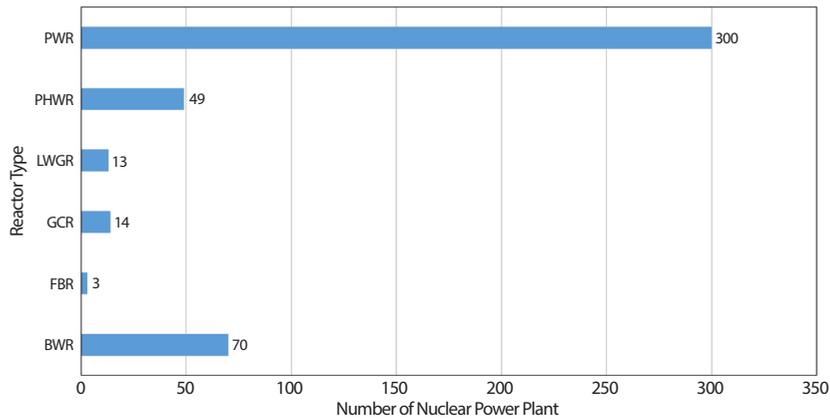


Fig. 3. Number of Nuclear Reactors in Operation by Reactor Type.

전 세계 해체 완료 또는 진행 중인 원자력발전소 해체 비용 데이터를 현가화하고 통계분석 프로그램 R을 이용해 회귀 분석하여 해체 비용 추산 모델을 개발하였다.

2. Analysis Method and Procedure

2.1 Nuclear Power Plant Data

IAEA PRIS에 개시 기준으로 2019년 12월 현재 영구 정지된 원전은 Fig. 2에서 보듯이, 전 세계 20개 국가에 총 178기이다. 미국이 37기로 가장 많으며 영국과 독일이 그 뒤를 따르고 있다. 하지만 노형에 따라 해체 소요 기간과 전략이

차이가 난다. 특히 영국이 다수 보유한 가스 냉각로(Gas Cooled Reactor)는 감속제로 사용된 흑연 방사화로 인해 즉시 해체 대신 지연 해체 전략을 적용하고 있어, 실제 해체가 지는 장시간이 걸릴 것으로 예상된다. Fig. 3과 4는 PRIS의 데이터 중 현재 운전 중 및 영구 정지된 원자로 수를 노형별로 정리한 것이다. 가압경수로와 비등경수로가 다수를 차지하고 있음을 알 수 있다.

Table 1은 PRIS에 12월 현재 전 세계적으로 해체 완료 또는 예정된 원전 중 해체 비용이 산출된 원전들의 소유 국가, 원자로형, 상업운전 개시일 및 영구정지일과 출력을 정리한 것이다. 이 중 Sweden의 Oskarshamn 1,2, 미국의 Oyster Creek, Vermont Yankee, Indian Point 3 등은 해체가 진행 또는 계획 중으로 해당 금액은 추산 금액이다.

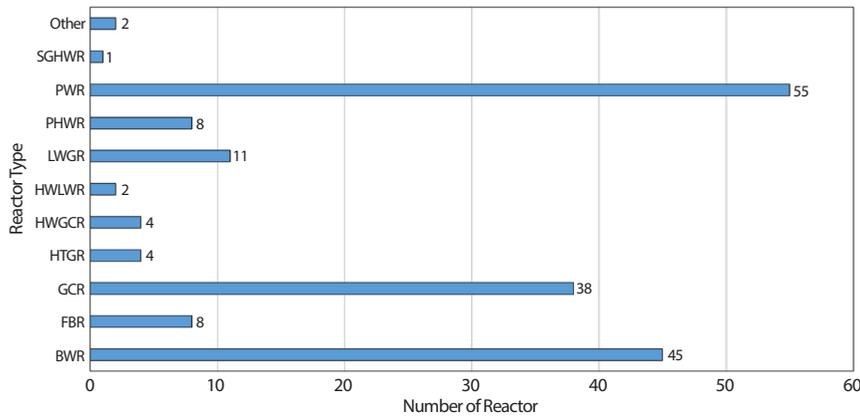


Fig. 4. Number of Nuclear Reactors in Permanent Shutdown by Reactor Type.

Table 1. Summary of Nuclear Reactors on Decommissioning or Decommissioned in the World

Country	Name	Reactor type	Commercial Operation date	Permanent Shutdown date	Thermal Power (MWt)	Electric Power (MWe)	Gross Capacity (MWe)
United State	Big Rock Point	BWR	1963.03.29	1997.08.29	240	72	71
	Fort St. Vrain	HTGR	1979.07.01	1989.08.29	842	330	342
	Haddam Neck	PWR	1968.01.01	1996.12.05	1,825	582	603
	Maine Yankee	PWR	1972.12.28	1997.08.01	2,630	825	900
	Milestone	BWR	1971.03.01	1998.07.01	2,011	660	684
	Rancho Seco	PWR	1975.04.17	1989.06.07	2,772	918	917
	Trojan	PWR	1976.05.20	1992.11.09	3,411	1,130	1,155
	Three Mile Island 1	PWR	1974.09.02	2019.09.20	2,568	819	880
	Yankee Rowe	PWR	1961.07.01	1991.10.01	600	175	180
	San Onofre 1	PWR	1968.01.01	1992.11.30	1,347	436	456
	Oyster Creek	BWR	1969.12.01	2018.09.17	1,930	650	652
	Vermont Yankee	BWR	1972.11.30	2014.12.29	1,912	514	635
	Zion 1	PWR	1973.12.31	1998.02.13	3,250	1,040	1,085
	Zion 2	PWR	1974.09.17	1998.02.13	3,250	1,040	1,085
	Shoreham	BWR	1986.08.01	1989.05.01	2,436	809	849
	Humboldt Bay	BWR	1963.08.01	1976.07.02	220	65	65
	Pilgrim	BWR	1972.12.01	2019.05.31	2028	655	711
	Crystal river 3	PWR	1977.03.13	2013.02.05	2568	825	890
	Fort Calhoun 1	PWR	1973.09.26	2016.10.24	1500	478	512
	Kewaunee	PWR	1974.06.16	2013.05.07	1772	535	595

United State	Indian Point 1	PWR	1962.10.01	1974.10.31	615	265	277
	Indian Point 2	PWR	1974.08.01	2020.04.30	3216	873	1067
	Indian Point 3	PWR	1976.08.30	2021.04.30*	3216	965	1085
Germany	Niederaichbach	HWGCR	1973.01.01	1974.07.31	321	100	106
	Wuergassen	BWR	1975.11.11	1994.08.26	1,912	640	670
Spain	Jose Cabrera 1 (Zorita)	PWR	1969.08.13	2006.04.30	510	153	150
	Santa Maria de Garona	BWR	1971.05.11	2013.07.06 (Long term shutdown) 2017.08.02 (Permanent shutdown)	1,381	440	466
Japan	Tokai 1	GCR	1966.07.25	1998.03.31	587	159	166
	Tsuruga 1	BWR	1970.03.14	2015.04.27	1,070	341	357
	Mihama 1	PWR	1970.11.28	2015.04.27	1,031	320	340
	Genkai 1	PWR	1975.10.15	2015.04.27	1,650	529	559
	Ikata 1	PWR	1977.09.30	2016.05.10	1,650	538	566
	Shimane 1	BWR	1974.03.29	2015.04.30	1,380	439	460
Lithuania	Ignalina1	LWGR	1985.05.01	2004.12.31	4,800	1,500	1,300
	Ignalina2	LWGR	1987.12.01	2009.12.31	4,800	1,500	1,300
Sweden	Oskarshamn1	BWR	1972.02.06	2017.06.19	1,375	440	492
	Oskarshamn2	BWR	1975.01.01	2016.12.22	1,800	580	661
Switzerland	Muehleberg	BWR	1972.11.06	2019.12.20	1,097	306	390
Netherlands	Dodewaard	BWR	1969.03.26	1997.03.26	183	54	60
Italy	Enrico Fermi (Trino)	PWR	1965.01.01	1990.07.01	870	247	270
	Caorso	BWR	1981.12.01	1990.07.01	2,651	840	882
	Garigliano	BWR	1964.06.01	1982.03.01	506	150	160

Table 1에서 보면, 42기의 원자력발전소가 해체가 진행 중이거나 완료되었으며, 이 중 BWR과 PWR은 각각 17, 20기이다. 본 논문에서는 이 중 BWR 13기, PWR 16기에 대한 해체 비용 데이터를 활용하였다.

2.2 Method

원자력발전소 해체 비용은 WBS, ISDC 또는 각국이 개발한 프로그램을 이용하여 산출할 수 있다. 본 논문에서는 기존

방법과 달리 해체 비용 데이터를 회귀 분석하여 해체 비용 산정 회귀 분석모델을 개발하였다. 일반적으로 SPSS, SAS, SYSTAT, R, MATLAB 등을 데이터 통계 분석에 이용한다. 이 중 R은 빅데이터 분석 도구이자, 통계 계산과 시각화에 특화된 프로그래밍 언어이다. 본 논문에서는 R의 통계 패키지를 이용하여 통계분석을 수행하였다.

본 논문은 원자력발전소 해체 비용과 원자력발전소 해체 관련 변수 사이에 어떤 관계가 있는지를 확인하기 위해 회귀 분석을 적용했다. 회귀 분석은 변수 사이의 관계를 파악한다는

부분에서는 상관 분석과 유사하지만, 상관 분석이 두 변수 사이의 관계 정도만을 나타내지만 회귀 분석은 독립변수와 종속변수 사이의 인과관계를 수학적인 함수식으로 표현하여, 독립변수에 원하는 값을 대입하여 종속변수의 값을 추정할 수 있게 해준다[7].

회귀 분석은 종속변수에 영향을 주는 독립변수의 수에 따라 단일 회귀 분석과 다중회귀 분석으로 나눌 수 있으며, 회귀 분석모형은 아래의 식 (1)과 같이 표현할 수 있다[8,9].

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_p X_p + \varepsilon, \varepsilon \sim N(0, \sigma^2) \quad (1)$$

이 때, 식은 $Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_p X_p$ 에 해당하는 함수와, ε 에 해당하는 확률적 오차로 구분된다. 즉, 회귀 분석모형은 데이터를 통해 얻어지는 함수 부분과 오차 부분이 결합된 형태이다. 이 회귀 분석모형을 바탕으로 다중선형회귀식을 추정하기 위해, p개의 설명 변수를 고려한 다중 선형 회귀 분석모형은 다음 식 (2)와 같다.

$$E(Y_i) = \beta_0 + \beta_1 X_{1i} + \beta_2 X_{2i} + \dots + \beta_p X_{pi}, \quad i = 1, \dots, n \quad (2)$$

이때, $E(Y_i)$ 는 Y_i 의 기대값이면서 회귀식으로 표현할 수 있으며 추정값은 다음과 같은 식 (3) 형태로 표현할 수 있다.

$$\hat{y}_i = b_0 + b_1 X_{1i} + b_2 X_{2i} + \dots + b_p X_{pi}, \quad i = 1, \dots, n \quad (3)$$

여기서 $b_0, b_1, b_2, \dots, b_p$ 는 설명변수의 계수인 $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_p$ 의 추정값이며, 최소제곱추정법으로 추정할 수 있다. 최소제곱추정법은 $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_p$ 의 추정값인 $b_0, b_1, b_2, \dots, b_p$ 를 $\sum_{i=1}^n \epsilon_i^2$ 가 최소화되도록 β_0 를 선택하는 방법으로 β_0 는 j번째 설명변수 x_j 를 제외한 나머지 설명변수($X_1, \dots, X_{j-1}, X_{j+1}, \dots, X_p$)들이 고정되어 있다고 가정하였을 때, X_j 가 1단위 변화할 때 종속변수 Y의 변화량이다.

이렇게 추정된 다중선형회귀식은 유의성 검정을 위하여 오차제곱합 SSE (Sum of Squares due to Error)을 사용하는 데, 이는 다음 식 (4)와 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} SSE &= \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \\ &= \sum_{i=1}^n (y_i - b_0 - b_1 x_{1i} - b_2 x_{2i} - \dots - b_p x_{pi})^2 \end{aligned} \quad (4)$$

최종적으로 설명변수들이 반응변수를 선형적으로 얼마나 잘 반영하고 있는지 표현하는 결정계수(Coefficient of determination, R^2)는 다음 식 (5)와 같이 정의한다.

$$R^2 = \frac{SSR}{SST} = 1 - \frac{SSE}{SST} = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (5)$$

이 때, SSR ($\sum_{i=1}^n \hat{u}_i^2$)은 residual sum of squares, 즉 잔차의 제곱의 합으로 회귀식으로 설명이 되지 않는 변동의 합을 의미한다. SST ($\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$)는 total sum of squares, 즉, Y의 편차의 제곱으로 전체 변동의 합이다. SSE ($\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$)은 회귀식으로 추정한 Y의 편차 제곱의 합으로, 회귀 분석모형으로 설명이 가능한 부분이다. R^2 의 범위는 $0 < R^2 < 1$ 이며, 1에 가까울수록 추정된 회귀 분석모형이 총변동량의 많은 부분을 설명할 수 있음을 의미한다. 하지만 R^2 는 독립변수 수가 증가할수록 커지는데, 종속변수의 변동을 반영하지 못하는 변수가 추가되더라도 결정계수의 값이 증가할 수 있기 때문에 이러한 문제를 보정하고자 고려되는 것이 수정 결정계수(Adjusted coefficient of determination, Adjusted R^2)으로 표본의 크기와 독립변수의 수를 고려하여 다음 식 (6)과 같이 표현할 수 있다.

$$\text{Adjusted } R^2 = 1 - \frac{n-1}{(n-p-1)(1-R^2)} \quad (6)$$

이 때, $n-p-1$ 은 자유도로 n 은 표본의 수이며, p 는 독립변수의 수이다.

본 논문에서는 PWR과 BWR 해체 비용을 종속변수(Y)로, 원자력발전소 해체 비용에 영향을 주는 운전 특성 변수를 독립변수(X)로 두어 회귀식을 도출하였다. 이 때, 회귀 분석모형으로 계산된 해체 비용 적합도를 평가하기 위해 R^2 , Adjusted R^2 과 Root mean square error (RMSE)를 활용하였다. 동시에 통계적 유의성을 확인하기 위해 가설에 대한 p-value 값 확인, t 검정, 분산팽창요인(Variance Inflation factor, VIF)를 활용하였다.

영가설(H_0)에 대한 검증을 위해서는 p-value의 값에 따라, H_0 에 대한 기각 여부를 결정할 수 있다. 이때 신뢰구간을 구하기 위해서는 다음의 가정을 따른다. 모수를 Θ 로 하는 밀도함수 $f(x;\Theta)$ 인 모집단으로부터 크기가 n인 확률표본을 x_1, x_2, \dots, x_n 이라고 할 때, 주어진 유의수준 값 $0 < \alpha < 1$ 에 대해 신뢰하한 $\Theta_L = \hat{\phi}_L$ 과 신뢰상한 $\Theta_H = \hat{\phi}_H$ 은 $P(\hat{\theta}_L < \Theta < \hat{\theta}_H)$

= 1 - α를 만족하고, $\Theta_L < \Theta_H$ 일 때, 구간 $[\Theta_L, \Theta_H]$ 는 모수 Θ 에 대한 (1 - α)100% 신뢰구간이라고 하며, 1 - α를 신뢰수준이라고 한다. 이때 구하고자 하는 데이터들의 분포가 정규분포를 따른다면, 신뢰구간은 다음 식 (7)과 같이 표현할 수 있다.

$$P = (-Z_{\frac{\alpha}{2}} < \frac{\bar{X} - \mu}{\frac{\sigma}{\sqrt{n}}} < Z_{\frac{\alpha}{2}}) = 1 - \alpha \quad (7)$$

여기서 \bar{X} 는 표본의 평균, σ 는 분산, α는 유의수준을 의미한다

t 검정(t-test)는 데이터 분석에서 기본적으로 수행되는 평균분석으로 두 데이터 세트에서 평균과의 유의미한 차이가 존재하는지 분석하는 것으로 다음 식 (8)을 통해 구할 수 있다.

$$t = \frac{\bar{d} - d_0}{s_d \sqrt{n}} \quad (8)$$

이 때, \bar{d} 는 관측값 차이의 평균, d_0 는 각 데이터 세트 사이의 평균차, n은 해당 데이터 세트의 표본수를 의미한다.

그리고 회귀 분석모형의 적합성 판단에 분산팽창요인 (Variance inflation factor, VIF)을 사용할 수도 있다. 회귀 분석모형에 사용되는 독립 변수간 상관 관계를 가지는 것을 다중공선성(Multicollinearity)이라 하는데, 이때 다중공선성을 가질 경우 부정확한 회귀결과를 갖게 된다. 이를 확인하기 위해 VIF를 사용하며, 다음 식 (9)을 통해 계산할 수 있다.

$$VIF_i = \frac{1}{1 - R_i^2} \quad (9)$$

다중 회귀 분석 $Y = X_1 + X_2 + \dots + X_p$ 을 할 때 i번째 독립 변수에 대한 다중 회귀 분석 $X_i \leftarrow X_1 + \dots + X_{i-1} + X_{i+1} \dots + X_p$ 의 중회귀계수를 R_i^2 라 한다. i번째 독립변수에 대한 VIF_i가 1인 경우 변수 간의 관련이 없으며, 10 이상인 경우 변수 사이의 다중공선성을 가질 가능성이 높다고 볼 수 있다[10].

2.3 Consideration of Independent variable (X_i)

회귀 분석모형 도출을 위해, 종속변수(Y)를 해체 비용으로, 독립변수(X_i)를 BWR과 PWR 해체 비용에 영향을 미칠 것으로 예상하는 원자력발전소 특성으로 선정하였다. 특히, 원자력발전소 해체 비용 중 큰 비중을 차지하는 폐기물 비용과

노동비용을 반영할 수 있는 인자를 고려하였다.

폐기물 비용은 원자력발전소 오염 정도에 따라 증가하고, 이는 원자력발전소 가동 기간에 비례하여 증가할 것이다. 이러한 원전의 운전특성을 반영하면서, 회귀 분석모형에 사용될 수 있도록 식 (10)과 같은 형태의 변수를 도입하였다.

$$\text{Contamination factor} = \text{Operation period} \times \ln(\text{MWT}) \times \text{Operation factor}/100 \quad (10)$$

이 때, Operation factor는 국제원자력기구 PRIS에서 제공하는 값으로 총 가동가능 시간 중 실제 가동한 시간 비율이다.

원자력발전소 해체기간 중에도 부지 및 시설 관리비용, 작업자 인건비 등이 발생하므로, 해체기간이 해체 비용에 영향을 줄 것이다. 해체 완료된 원자력발전소는 실제 해체 기간을 변수로 선정하였으며, 계획 중인 원전의 경우 추진 중인 해체 기간을 변수로 선정하였다.

최종적으로 회귀 분석 모형은 종속변수(Y)를 해체 비용으로 선정하였으며, 독립변수(X_i)는 운전특성을 반영한 Contamination factor와 해체기간으로 구성하였다. 아울러 회귀 분석 모형에 대한 H₀은 원자력발전소 해체 비용은 운전기간, 열출력, Operation factor을 반영해 계산한 Contamination factor와 해체 기간이 연관성이 없는 것으로 설정하였다. H₁은 원자력발전소 해체 비용은 Contamination factor 및 해체기간과 연관이 있는 것으로 설정하였다.

3. Results and Discussion

해체가 진행 또는 완료된 BWR 13기를 Table 2에, PWR 16기를 Table 3에 정리하였다. 해체 비용의 경우 해체 비용 산정 시점이 상이하여 현재 가치를 직접 비교하기 어렵기 때문에, 미국 노동통계국(Bureau of Labor Statistics)에서 제공하는 소비자 물가지수(Consumer price index)를 이용하여 현재 가치(2019.11 기준)로 환산하였다[11].

운영 기간은 해당 원전의 상업운전 일자와 영구정지 일자를 기준으로 운영정비 기간에 대한 고려 없이 전체 기간만을 고려하였다. 해체과정 중 방사성 오염 사건·사고 발생

Table 2. Summary of BWR under Decommissioning or Decommissioned [13-19]

Country	Name	Operating period [Year]	Thermal capacity [MWt]	Operation factor [%]	Contamination factor	Decommissioning period [Year]	Cost [M US \$]	Present value [M US \$] *Nov, 2019
United State	Big Rock Point [13]	34	240	73.0	136.03	9	420	455.17
	Milestone 1 [14]	27	2011	69.2	142.12	60	422	457.33
	Oyster Creek [14]	48	1930	78.2	283.97	18	627	668.19
	Vermont Yankee [14]	42	1912	86.3	273.87	15	561	597.85
	Humboldt bay [15]	13	220	NC*	49.08	12	727	828.24
	Pilgrim [16]	47	2028	76.0	272.00	60	1661	1695.34
Netherlands	Dodewaard [17]	28	183	86.0	125.44	8	133	185.41
Italy	Caorso [17]	8	2651	43.5	27.43	32	480	669.16
	Garigliano [17]	17	506	44.8	47.42	27	263	366.64
Spain	Santa Maria de Garona [18]	42	1381	81.6	247.81	16	308	340.08
Switzerland	Muhleberg [17]	47	1097	90.4	297.43	15	178	249.50
	Oskarshamn1 [19]	45	1375	65.0	213.236	10	114	125.87
	Oskarshamn2 [19]	42	1800	75.8	238.64	10	137	151.27
Average		33.9	1333.4	72.29	181.11	22.5	463.9	522.3

* Cumulative values not calculated when more than 50% of required data is missing in PRIS. Then its value assumes at 70%.

여부는 실제 해체 비용에 영향을 주는 인자이지만, 본 논문에서는 해당 인자에 대한 고려는 제외하였다.

Table 2에서 보듯이, 해체가 완료 또는 진행 중인 BWR로서 해체 비용이 확정 또는 추산이 완료된 원자력발전소는 전 세계 6개국 13기으로, 평균 33.9년 운전되었으며, 평균 522.3 백만달러의 해체 비용이 발생하였다.

Table 3은 영구정지 중인 PWR에 대한 것으로서, 미국과

스페인의 원자로 16기가 해체 완료 또는 진행 중에 있다. 스페인은 Jose Cabrera (Zorita) 원전을 해체하고 있다. 대부분 원전이 20년 이상 운전하였으며, 해체 비용은 763.7 백만 달러가 발생하였다.

Table 2,3 중 Humboldt Bay와 Indian Point unit 1의 Operation factor는 PRIS에서 제공하지 않아 70%로 가정하였다.

Table 3. Summary of PWR under Decommissioning or Decommissioned [20-24]

Country	Name	Operating period [Year]	Thermal capacity [MWt]	Operation factor [%]	Contamination factor	Decommissioning period [Year]	Cost [M US \$]	Present value [M US \$] *Nov, 2019
United State	Haddam Neck [14]	28	1825	76.0	159.79	10	819	872.80
	Maine Yankee [13]	24	2630	73.0	137.96	8	592	641.57
	Rancho Seco [13]	14	2772	46.4	51.05	20	466	504.02
	Three Mile Island 1 [20]	45	2568	76.7	272.03	62	1228	1255.43
	Trojan [13]	16	3411	57.9	75.49	13	429	600.04
	Yankee Rowe [13]	30	600	77.4	147.76	15	608	658.91
	Zion 1 [13]	24	3250	63.9	124.21	10	500	540.80
	Zion 2 [13]	24	3250	65.9	128.09	10	500	540.80
	San Onofre 1 [13]	24	1347	55.1	95.11	32	622	674.08
	Crystal river 3 [21]	36	2568	66.9	189.36	56	895.9	945.16
	Fort Calhoun 1 [22]	43	1500	77.3	242.14	48	1213	1240.30
	Kewaunee [23]	39	1772	85.1	247.96	62	919	11084.60
	Indian Point 1 [24]	12	615	NC*	53.94	10	598	598.0
	Indian Point 2 [24]	46	3216	77.1	286.41	11	701	701.82
	Indian Point 3 [24]	45	3216	73.7	267.83	12	1002	1002.38
Spain	Jose Cabrera 1 (Zorita)	36	510	78.9	177.30	11	341	358.3
Average		30.4	2190.6	70.08	166.03	24.4	714.7	763.74

* Cumulative values not calculated when more than 50% of required data is missing in PRIS. Then its value assumes at 70%.

Table 4. Multi-regression Analysis Results for BWR Data

	Coefficient (β_i)	Std. error	t value	p-value	VIF
(Constant)	113.608	246.028	0.462	0.654	-
Contamination factor	0.389	1.016	0.383	0.710	1.002
Decommissioning period	15.196	5.621	2.703	0.022	1.002

Table 5. Statistic Test Results for BWR Data

R ²	Adjusted R ²	RMSE	MAE	Std. Error
0.4248	0.3097	302.3423	247.3839	344.7233

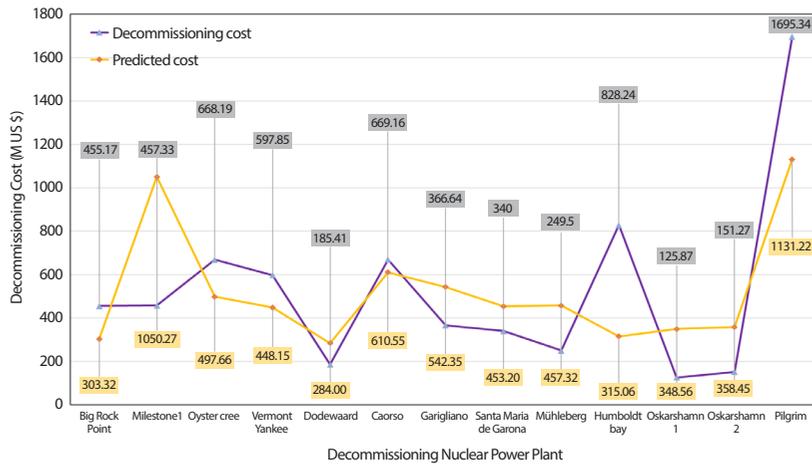


Fig. 5. Comparison of the real decommissioning costs and the predicted costs for BWR.

Table 6. Multi-regression Analysis Results for PWR Data

	Coefficient (β_i)	Std. error	t value	p-value	VIF
(Constant)	329.853	89.876	3.670	0.003	-
Contamination factor	1.533	0.550	2.786	0.015	1.264
Decommissioning period	7.347	2.104	3.492	0.004	1.264

Table 7. Statistic Test Results for PWR Data

R ²	Adjusted R ²	RMSE	MAE	Std. Error
0.7372	0.6968	134.2286	106.3934	148.9133

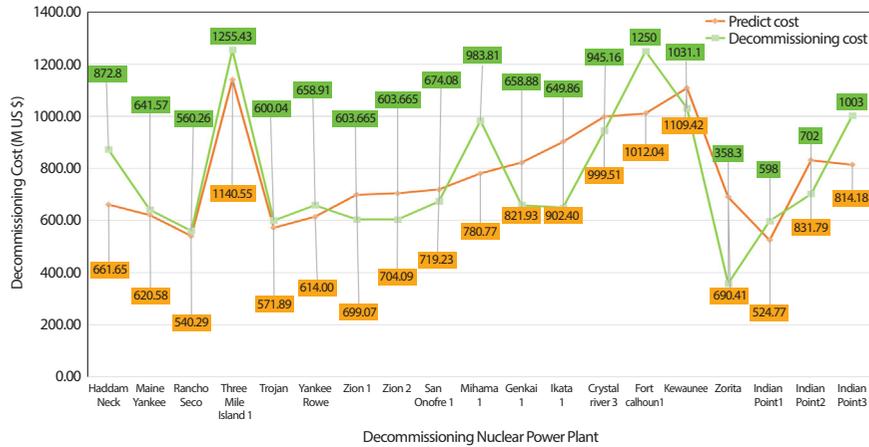


Fig. 6. Comparison of the real decommissioning costs and the predicted costs for PWR.

3.1 Application of Regression Analysis to Decommissioning Cost Data

3.1.1 Analysis for BWR Decommissioning Cost Data

BWR에 대한 회귀 분석 결과는 Table 4와 5에 정리해 놓았다. Fig. 5에서 실제 비용과 본 논문에서 추정된 값 사이의 차이를 확인할 수 있다. 본 논문에서 BWR 해체 비용 추정에 사용된 회귀 분석모형은 다음 식 (11)과 같다.

$$\text{Cost} = 113.608 + 0.389 \times \text{Contamination factor} + 15.196 \times \text{Decommissioning period} \quad (11)$$

해체 비용은 Contamination factor, 해체(예상)기간에 대한 β_i 는 양의 값의 가지고 있었으나, BWR 회귀식에 대한 $R^2 = 0.4248$, p-value는 0.063으로 이 회귀식으로 설명할 수 있는 부분이 적고, $p < 0.05$ 으로 귀무가설 H_0 을 기각할 수 없다. 따라서 대안가설 H_1 을 채택할 수밖에 없으므로, 식 (11)은 BWR 해체 비용 추정 회귀식으로 부적합하다. 또한 변수 중 Contamination factor의 p-value는 0.05 이상으로 적합한 변수로서 판단할 수 없다.

3.1.2 Analysis for PWR Decommissioning Cost Data

PWR에 대한 다중 회귀 분석 결과는 Table 6과 7에 정리

하였다. Fig. 6에서 실제 비용과 본 논문에서 추정된 값 사이의 차이를 확인할 수 있다. 본 논문에서 PWR 해체 비용 추정에 사용된 회귀식은 다음 식 (12)와 같이 구할 수 있다.

$$\text{Cost} = 329.853 + 1.533 \times \text{Contamination factor} + 7.347 \times \text{Decommissioning period} \quad (12)$$

PWR에 대한 회귀식에 대한 $R^2 = 0.7372$, Adjusted $R^2 = 0.6968$ 이다. 해당 회귀식의 적합도를 확인하기 위한 p-value는 0.0001이며, 회귀식의 각 변수의 p-value 역시 0.05 보다 작아 PWR은 해당 회귀모델에 대한 H_0 을 기각 후 H_1 을 채택할 수 있다. 즉, 식 (12)를 PWR 해체 비용 추정 회귀 분석 모형으로 사용 가능하다.

3.2 Analysis for Sensitivity of regression model

민감도 분석은 모형을 이용한 현상 해석과 예측 결과에 대한 불확실성을 정량적으로 판단하기 위한 방법이다. 합리적 모형 구축이나 신뢰성 있는 시나리오 분석을 위해서는 모형의 매개변수나 입력 데이터 특성에 따른 모형의 민감도를 분석할 필요가 있다. 이를 위한 방법으로 Monte Carlo 분석, LH-OAT (Latin-hypercube one factor at a time) 분석 방법 등이 있다. 본 논문에서는 LH-OAT를 이용해 민감도 분석을 수행하여, 독립변수의 해체 비용에 대한 영향을 평가하였다.

Table 8. Sensitivity Analysis results for PWR

Ranking No.	Parameter Name	Relative Importance	Fraction [%]
1	Decommissioning period	22.3062	52.18
2	Contamination factor	20.4424	47.82

Table 9. Variables for cost Estimation of Kori 1 decommissioning by the Regression Model

Operating period [Year]	Thermal Power (MWt)	Operation factor	Contamination factor	Estimated Decommission period	Cost [M US \$]
39.194	1729	79.5%	232.30	15	795.86

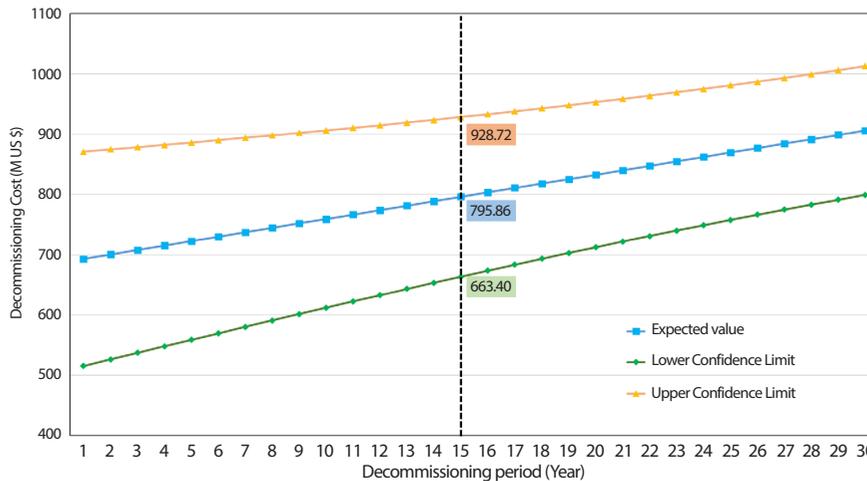


Fig. 7. 95% confidence intervals of estimated decommissioning cost for Kori 1 with change in decommissioning period.

회귀 분석모형이 부적합한 것으로 판명된 BWR에 대한 회귀 분석모형에 대해서는 민감도 분석을 수행하지 않았다. PWR에 회귀 분석모형에 대한 민감도 분석 결과는 Table 8에 정리하였다. PWR의 해체 비용을 영향을 미치는 2가지 변수인 해체 기간과 Contamination factor에 대한 민감도는 거의 유사한 것으로 확인되었다.

3.3 Application of Regression Model to Kori 1

현재 영구정지 상태인 고리 1호기는 PWR이므로, 본 논문에서 도출된 PWR 회귀분석모형을 적용해 해체 비용을 추산할 수 있다. Table 9에는 회귀식에서 사용된 인자와 해체

비용 추산금액을 정리하였다.

그리고 R 패키지 중 [Predict]를 이용하여 고리 1호기 해체 비용 구간을 추산하였다. 회귀변수 중 해체 기간을 15년으로 고정하지 않고 0~30년까지 변화시켜가며 고리 1호기 해체 비용 범위를 추산하였다. 해체 기간에 따른 고리 1호기 해체 비용을 회귀 분석 모형에 대하여 95% 신뢰구간을 적용하여 하한과 상한값, 평균을 구해 Fig. 7과 같이 표시하였다.

고리 1호기에 대한 해체 기간을 15년으로 했을 때, 해체 비용 기대값(평균)은 약 795.86 백만 US 달러, 한화로 9,391.14 억원(1\$ = 1,180원, 2020년 1월 29일 기준)이며, 95% 신뢰구간은 663.40 백만 US 달러(7,828.12억원)~928.32 백만 US 달러(1조 954.18억원)로 추산되었다.

4. Conclusions

이 논문에서는 R을 이용해 BWR과 PWR 해체 비용 데이터를 회귀 분석하여 해체 비용 추정 회귀 분석 모형을 개발하였다. 원자력발전소 운영 기간, 열출력, Operation factor를 결합한 Contamination factor와 해체기간을 독립변수로 선정하여 다중 회귀 분석 모형을 도출하였다. PWR에 대해 산출된 회귀 분석모형은 해체 비용 추정모형으로 적합했으나, BWR에 대해 산출된 회귀 분석 모형은 추정모형으로서 적합하지 않다. 이 논문에서 도출된 PWR 회귀 분석 모형을 PWR인 고리 1호기에 적용하여 추산한 해체 비용 기대값(해체기간 15년 가정)은 9,391.14억 원으로, 2019년 고시된 호기 당 해체 비용(8,129억 원) 대비 15.5% 많았다.

해체 비용 예측 회귀 분석모형의 정확도를 높이기 위해서는 회귀 분석모형에 적합한 회귀 변수 개발과 실제 해체 비용 데이터의 지속적 축적이 필요하다. 본 논문에서 제시된 BWR 해체 비용 회귀 분석 모형의 신뢰성을 높이기 위해서는 회귀 분석 모형에 적용 가능한 회귀 변수 도출이 필요하며, 35기 BWR 운영 또는 해체를 계획 중인 일본 등의 실제 해체 비용 데이터를 확보하여 이를 회귀 분석 모형에 반영할 필요가 있다.

Acknowledgements

This work was supported by the National Research Foundation of Korea grant NRF-2017M2B2A9A02049319 and NRF-2020M2D2A2062436 funded by the Korean Government.

REFERENCE

- [1] Nuclear Safety and Security Commission (NSSC), Nuclear Safety Act (2020).
- [2] IAEA, Dec. 23 2019. PRIS - World Statics. Accessed Dec. 23 2020. Available from: <https://pris.iaea.org/PRIS/WorldStatistics/OperationalReactorsByCountry.aspx>.
- [3] D.B. Monteiro, J.M. Moreira, and J.R. Maiorino, "A new management tool and mathematical model for decommissioning cost estimation of multiple reactors site", *Prog. Nucl. Energy*, 114, 61-83 (2019).
- [4] C.R. Kim, T.H. Sung, S.Y. Yoon, and S.Y. Kim. Development of regulation technology for decommissioning and decontamination of nuclear power plants, Nuclear Safety and Security Commission, 38-41, TRKO201800042525 (2018).
- [5] Cour des Comptes, The costs of the nuclear power sector, Cour des Comptes - Thematic public report, 84-115 (2012).
- [6] Ministry of Trade, Industry and Energy, Regulation on Estimation of Management Cost of Radioactive Waste and Management Share of Spent Fuel, MOTIE Notice No. 2019-217 (2019).
- [7] J.H. Kim, *Environmental Statistics & Data Analysis*, 205-269, Hannarae, Seoul (2018).
- [8] S.H. Kang, *Introductory statistic*, 456-494, Free academy, Paju (2012).
- [9] H.G Kang, *Statistical methods for health care research*, 6th ed., 315-344, Koonja, Paju (2017).
- [10] D.M. Levine, *Statistics for managers using Microsoft Excel*, 5th ed., 613-644, Pearson Prentice Hall, New Jersey (2008).
- [11] U.S. Bureau of Labor Statistics, Nov. 30 2019. US BLS – Inflation and Price Accessed Jan. 30 2020. Available from: <https://data.bls.gov/cgi-bin/cpicalc.pl?cost1=33929&year1=198205&year2=201911>.
- [12] International Atomic Energy Agency, Release of sites from regulatory control on termination of practice, IAEA Safety Guide, IAEA Safety Standards WS-G-5.1 (2006).
- [13] Organization for Economic Cooperation and Development Nuclear Energy Agency, The practice of cost estimation for decommissioning of nuclear facilities, OECD/NEA report, 59-60, NEA No. 7237 (2015).
- [14] Organization for Economic Cooperation and Development Nuclear Energy Agency, Costs of decommissioning

- nuclear power plants, OECD/NEA report, 59-77, NEA No. 7201 (2016).
- [15] Pacific Gas and Electric Company, Humboldt Bay Nuclear Power Station Post-Shutdown Decommissioning Activities Report, Rev. 0, 4-5 (2018).
- [16] Energy Nuclear Operation, Pilgrim Nuclear Power Station Post-Shutdown Decommissioning Activities Report, Rev. 4, 1-7 (2013).
- [17] Organization for Economic Cooperation and Development Nuclear Energy Agency, Decommissioning nuclear power plants: Policies, strategies and Costs, OECD/NEA report, 53-65, NEA No. 3590 (2003).
- [18] K. Kim and R. McGrath, "Factors Impacting Decommissioning Costs", Proc. of the Waste Management 2013 Conference, WM-13576, February 24-28, 2013, Phoenix, Arizona.
- [19] H. Larsson, Å. Anunti, and M. Edelborg, Decommissioning Study of Oskarshamn NPP, Svensk Kärnbränslehantering AB Report, SKB R-13-04 (2013).
- [20] Exelon Generation Company, Decommissioning Cost Analysis Report, Rev. 0, 19-23 (2019).
- [21] Duke Energy Florida LLC, Crystal River Unit 3 Nuclear Generating Plant Site Specific Decommissioning Cost Estimate, Rev. 0, Sec 6 4-5 (2018).
- [22] Omaha Public Power District, 2019 Annual Decommissioning Funding/Irradiated Fuel management Status Report, 2-3 (2018).
- [23] Dominion Energy Kewaunee, Kewaunee Power Station Post-Shutdown Decommissioning Activities Report, No. 13-064, 30-31 (2013).
- [24] Holtec Decommissioning International, Indian Point Energy Center Indian Point Units 1,2 and 3 Post-Shutdown Decommissioning Activities Report, Rev. 0, 17-18 (2019).