

선형회귀분석기법을 이용한 영광 원자력발전소 3호기
사용후핵연료 저장조 냉각 및 정화계통의 Inventory 평가 및 예측

The Estimation and Prediction of the Inventories for the Spent Fuel
Pool Cooling and Cleaning Systems in Yonggwang Nuclear Power
Plant #3 Using the Linear Regression Analysis

김주연, 정제호, 신창호, 김종경, 이재기
김순영*
한양대학교 원자시스템공학과
방사선안전신기술연구센터*
서울특별시 성동구 행당동 산17번지

요 약

영광 원자력발전소 3호기의 가동년수에 따른 사용후핵연료 저장조 냉각 및 정화계통에 대한 inventory의 변화추이 및 향후 예상되는 inventory의 값을 선형회귀분석기법에 의거하여 분석하였다. 평가 결과 가동년수에 따른 inventory의 값은 선형적으로 증가하였으며 최종안전성분석보고서에서 제시하고 있는 값에 비해 충분히 적게 평가되었다. 이러한 사실은 최종안전성분석보고서가 작성될 당시의 평가체계에 보수성이 존재하며 이 분야에 대한 개선의 여지가 존재함을 시사한다.

Abstract

The variation transitions of the inventories were analyzed by linear regression analysis methodology for the spent fuels pool cooling and cleaning systems and their predictive values according to the operation histories of Yonggwang nuclear power plant #3. The results show that the variation transitions of the inventories for those systems are linearly increasing according to the operation histories but the inventories are considerably lower than the values based on the final safety analysis report (FSAR) suggestions. It is, therefore, considered that a conservativeness is presented

in the estimation methodology in preparing stage of FSAR and necessary to be a margin for improvement in the inventory estimation.

1. 서론

원자력발전소 설계시 많은 인자에 대한 평가가 이루어지지만 가장 핵심이 되는 평가는 발전소 본래의 목적인 전기생산을 위한 부분과 최소발생을 지향하는 방사선 부분이다. 이러한 이유로 최종안전성분석보고서¹⁾ 제11장에서는 방사성폐기물 계통에 대한 inventory를 평가하고 있지만 실제로 발전소를 가동해 보기 전까지 inventory를 정확히 평가한다는 것은 불가능에 가깝다.

현재 국내 원전의 경우 가동년수에 따른 inventory 자료는 충분히 축적되어 있지만 이의 체계적인 자료구축 및 분석은 이루어지지 못한 상태이다. 이러한 이유로 축적된 inventory 자료를 최종안전성분석보고서가 작성될 당시에 측정된 방사능과 비교 분석하고 가동년수에 따른 변화를 분석하여 신뢰성있는 참고자료로 확보하는 것이 필요하다. 이러한 측면에서 inventory 평가는 원전의 방사선 건전성 확보뿐만 아니라 환경방사선 평가에도 중요한 정보를 제공할 것이다.

본 연구에서는 이러한 작업의 일환으로 영광 원자력발전소 3호기를 참조원전으로 선정하여 최종안전성분석보고서 제11장에서 제시하고 있는 inventory 평가 계통 중 사용후핵연료 저장조 냉각 및 정화계통 (SFPCCS)에 대한 inventory 자료를 수집하였고, 이를 선행회귀분석기법²⁾에 의거하여 가동년수에 따른 변화추이 및 향후 예측치를 살펴보고자 하였다. 평가대상 계통으로 선정된 사용후핵연료 저장조 냉각 및 정화계통은 사용후핵연료 저장조의 온도를 일정하게 유지하고 저장조 내의 부식생성물이나 핵분열생성물을 제거하는 역할을 하기 때문에 가동년수에 따라 보관되는 사용후핵연료가 증가하면 본 계통 내의 inventory의 값도 당연히 증가할 뿐만 아니라 계통의 건전성 여부에 따라 저장조 내의 방사능 준위에도 큰 영향을 미치게 되므로 본 연구의 평가에 적합한 계통으로 판단되었다.

2. 재료 및 방법

최종안전성분석보고서에서 제시하는 다양한 계통내의 inventory 값은 보수성이 충분히 반영된 설계기준을 제시하며 기존 다른 발전소 운영을 통해 얻은 자료나 시험운전 중 평가한 자료에 의거하여 설계기준을 만족함을 보임으로써 운영허가를 위한 기술적 근거로 삼고 있다. 이러한 inventory는 원전의 운영 중 핵연료 및 증기발생기 U-tube의 건전성 상실로 핵분열생성물이 2차 계통으로 유출되면 증가할 가능성이 존재한다. 또한 원전은 장주기로 운전되는 추세를 보이고 있기 때문에 현재 상기의 계통에서 측정된 inventory의 값이 최종안전성분석보고서의 설계기준보다 높은 방사능을 띄게 될 가능성이 충분하

며 가동년수에 따라 계통내의 방사능은 증가할 것으로 판단된다. 이러한 가동년수에 따른 계통 내 inventory의 관계는 선형회귀분석기법에 의거하여 유용하게 설명할 수 있으며 평가대상 계통에 대한 설명과 더불어 아래에 제시하였다.

1) 사용후핵연료 저장조 냉각 및 정화계통

사용후핵연료 저장조 냉각 및 정화계통³⁾은 열교환기를 통하여 사용후핵연료 저장조의 물을 냉각시키며 여과기와 탈염기를 통과시킴으로써 부식 생성물 및 핵분열생성물을 제거하는 역할을 수행하며 사용후핵연료 저장조 냉각계통, 사용후핵연료 저장조 정화계통 및 원자로 캐비티 여과계통으로 나누어진다. 본 연구에서는 관심의 대상인 사용후핵연료 저장조 냉각 및 정화계통을 중심으로 서술하고자 한다.

사용후핵연료 저장조 냉각계통은 두 개의 100 % 용량을 가진 냉각계열로 구성되어 사용후핵연료 저장조에 저장되어 있는 조사된 핵연료로부터 생성되는 붕괴열을 제거한다. 각각의 냉각계열은 한 대의 수평형 원심펌프, 한 대의 수평형 열교환기, 한 개의 스트레이너, 수동조작 밸브 및 계통운전에 필요한 계기들로 구성되어 있다. 이 계통의 정상적인 열부하는 원자로에서 새로 꺼낸 1/3 노심으로부터의 열부하와 지난 10회의 핵연료 재장전에 의하여 발생한 $10 \times (1/3)$ 노심으로부터 발생하는 열부하를 합한 것이다. 이 열은 열교환기를 통하여 사용후핵연료 저장조 냉각계통에서 기기냉각수 계통으로 전달된다.

사용후핵연료 저장조 정화계통은 한 대의 원심펌프, 여과기 및 스트레이너로 구성되어 있으며 사용후핵연료 저장조, 핵연료 재장전 수조, 연료 이송수로 및 핵연료 재장전수 저장탱크내의 물을 정화한다. 이 계통 중 정화계통 흡입관은 열교환기 후단에서 사용후핵연료 저장조 냉각계통과 상호 연결되어 있으며, 탈염기에서는 이온화된 부식생성물과 핵분열생성물이 제거된다. 여과기는 입자 물질을 제거하기 위해서 설치되어 있으며 탈염기의 후단에 있는 스트레이너는 수지층으로부터 방출되는 수지입자를 제거한다.

이러한 계통에서의 방사능 시료채취 및 분석은 관련 절차서^{4,5)}에 의거하여 여과기 전단에서는 1회/주, 탈염기 전단 및 후단에서는 1회/분기의 주기로 수행하고 있으며 본 연구에서는 참조 원전의 시험운전부터 현재까지 생성된 측정자료를 취득하여 관련 계통의 inventory를 선형회귀분석 방법에 의거하여 평가하였다.

2) 선형회귀분석 방법론

일반적으로 n 개의 측정치 $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$ 에 대한 관계를 설명해 주기 위해서는 식 (1)이 타당하며 이를 도출하기 위해서는 최소자승법에 의한 선형회귀분석기법이 유용한 것으로 알려져 있다.

$$Y = b_0 + b_1 X \quad (1)$$

최소자승법에 의한 선형회귀분석은 다음과 같다. 상기의 측정치가 식 (1)에 근사하기 위해서는 식 (2)의 ϵ_i 가 최소가 되어야 하며 이러한 관계를 식 (3) 내지 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$y_i = b_0 + b_1 x_i + \epsilon_i \quad (2)$$

$$F = \min \sum_{i=1}^n (b_0 + b_1 x_i - y_i)^2 \quad (3)$$

$$\frac{\partial F}{\partial b_0} = 2 \sum_{i=1}^n (b_0 + b_1 x_i - y_i) = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial F}{\partial b_1} = 2 \sum_{i=1}^n (b_0 + b_1 x_i - y_i) x_i = 0 \quad (5)$$

최종적으로 식 (4)와 식 (5)에서 미지의 상수 b_0, b_1 에 대해 방정식을 풀게 되면 식 (6)과 식 (7)을 얻게 되며 이를 식 (1)에 대입하게 되면 n 개의 측정치에 대한 상관관계를 얻을 수 있다.

$$b_1 = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2} \quad (6)$$

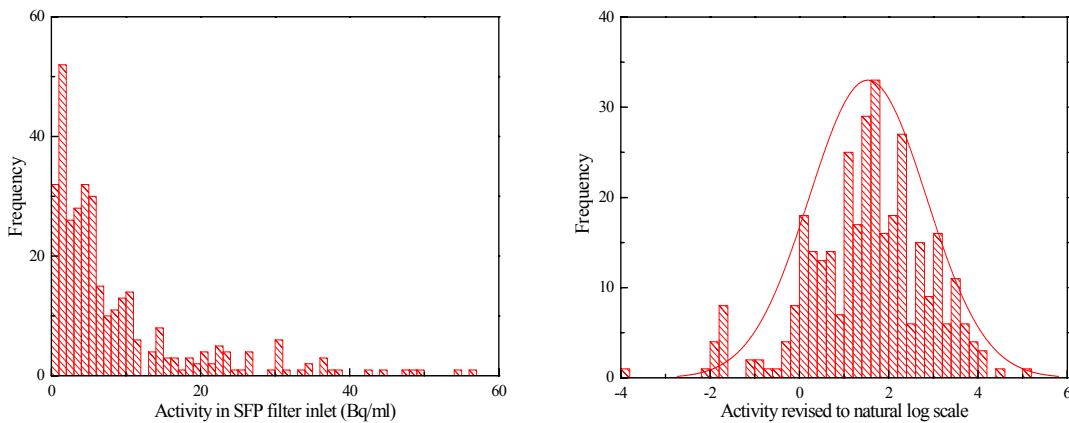
$$b_0 = \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n y_i - b_1 \sum_{i=1}^n x_i \right) \quad (7)$$

3. 결과 및 토의

영광 원자력발전소 3호기의 가동년수에 따른 사용후핵연료 냉각 및 정화계통내에서의 inventory의 변화추이를 선형회귀분석기법에 의거하여 도출하였다. 참조원전의 절차서에 의거하여 시험운전부터 현재 운영 중까지 여과기 전단, 탈염기 전단 및 후단에서 수행된 측정자료를 수집한 후 계획예방정비기간을 제외한 정상운전에 대한 전방사능의 평가를 수행하였다.

그림 1(a)은 여과기 전단에서 측정된 자료의 전방사능에 대한 분포함수를 도시한 것이다. 나타난 바와 같이 log-normal 분포를 나타내고 있음을 알 수가 있으며 방사능에 자

연로그를 취하게 되면 log-normal 분포 특성에 의거하여 그림 1(b)와 같은 정규분포를 따르게 된다. 본 연구에서는 이러한 정규분포를 토대로 해서 95 % 신뢰구간을 도출하였으며 이 구간을 벗어나는 측정치는 선형회귀분석의 적용 시 배제하였다. 사용후핵연료 저장조 탈염기 전단 및 후단의 측정치도 그림1과 같은 log-normal 분포를 보여주고 있었으며 상기와 같은 동일한 자료처리과정을 적용하였다.



(a) 방사능의 분포

(b) 수정된 방사능의 분포

그림 1. 사용후핵연료 저장조 여과기 전단에서의 방사능 분포

그림 2 내지 그림 3에 각 측정치에 대한 변화추이를 나타내었다. 영광 원자력발전소 3호기의 경우 여과기 전단 및 탈염기 전단에서의 측정치는 가동년수에 따라 inventory의 값이 완만하게 선형적으로 증가하고 있음을 알 수가 있다. 이러한 사실은 현재의 운전패턴이 계속 유지된다고 가정할 때 향후 본 계통에서 inventory의 값을 예측하는 것이 가능함을 시사한다. 표 1에 본 연구의 분석기법에 의거한 영광 원자력발전소 3호기의 가동년수에 따른 사용후핵연료 저장조 여과기 전단, 사용후핵연료 저장조 탈염기 전단에서의 inventory의 예측치를 제시하였다.

한편, 탈염기 후단에서의 측정치에 대한 변화추이는 전반적으로 감소하는 경향을 나타내고 있는데 일반적으로 가동년수에 비례하여 계통 중의 방사능이 증가할 것이라는 판단과는 다른 결과를 제시하고 있다. 이는 이온교환수지 성능, 운전초기의 관련 계통 내 방사능의 일시 증가 등과 같은 원인에서 그 이유를 찾을 수 있을 것으로 판단된다. 그러므로, 운전초기 방사능의 일시 증가와 같은 영향을 배제하기 위해서는 신뢰구간을 68 %로 하여 재평가를 수행하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

이러한 평가절차에 의거하여 사용후핵연료 저장조 냉각 및 정화계통 내에 존재하는 방사능은 참조원전의 최종안전성분석보고서에서 제시하고 있는 설계치 이내를 충분히 만족

하고 있음을 알 수 있다. 이러한 사실은 최종안전성분석보고서에서 제시된 값에 보수성이 존재하며 이에 대한 개선의 여지가 존재함을 의미한다.

원전은 운영과정에서 예기치 못한 변수가 발생하여 계통내의 방사능이 증가할 가능성이 충분하며 아울러 현재 국내 원전은 방사선 및 방사성폐기물의 감축을 위한 운영절차를 반영하는 추세이므로 이러한 사항들을 고려하면 향후 inventory의 변화추이가 현재의 패턴을 유지한다고 단정할 수는 없다. 그럼에도 불구하고 이러한 연구를 통해 가동년수에 따른 inventory의 값을 평가하고 예측하는 것은 원전의 방사선 건전성 확보에 기틀을 제공할 것이다.

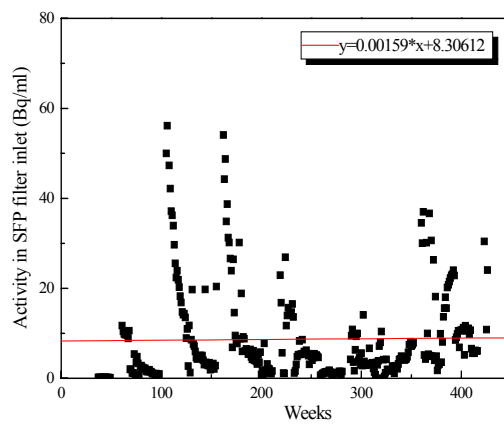
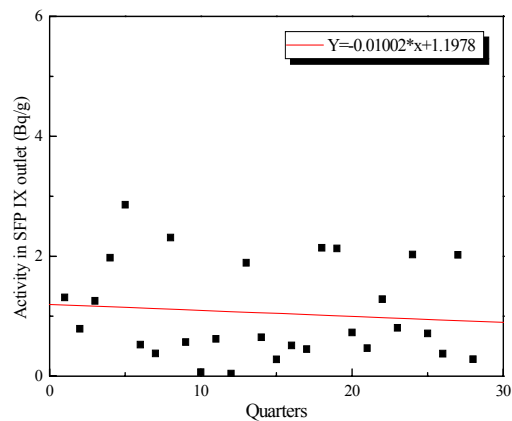
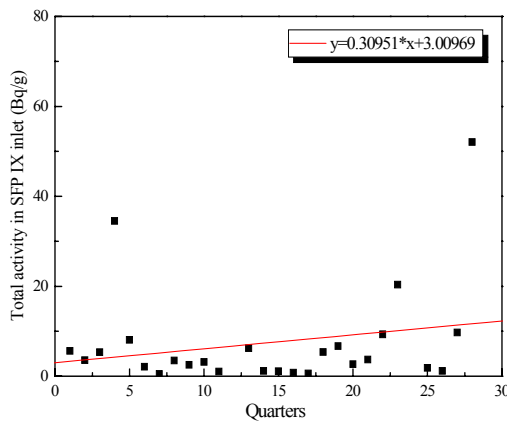


그림 2. 사용후핵연료 저장조 여과기 전단에서의 inventory 변화추이



(a) 사용후핵연료 저장조 탈염기 전단

(b) 사용후핵연료 저장조 탈염기 후단

그림 3. 사용후핵연료 저장조 탈염기에서의 inventory 변화추이

표 1. 영광 3호기 가동년수에 따른 inventory 예측치

System	Type	10 yr	15 yr	20 yr	25 yr	30 yr
SFP filter inlet	gross $\beta\text{-V}$ (Bq/ml)	9.13	9.55	9.96	10.37	10.79
SFP IX inlet	gross $\beta\text{-V}$ (Bq/g)	15.39	21.58	27.77	33.96	40.15

4. 결 론

영광 원자력발전소 3호기의 가동년수에 따른 사용후핵연료 저장조 냉각 및 정화계통 내 inventory의 변화추이를 선형회귀분석기법에 의거하여 분석하였으며, 참조원전의 운영이 현재의 패턴을 유지한다고 가정할 때 향후 예상되는 inventory의 값을 예측하였다. 평가 결과 가동년수에 따른 inventory의 값은 선형적으로 증가하였으며 최종안전성분석보고서에서 제시하고 있는 값과 비교해 볼 때 충분히 적은 것으로 평가되었다. 이러한 사실은 최종안전성분석보고서가 작성될 당시의 평가체계에 보수성이 존재하며 이 분야에 대한 개선의 여지가 존재함을 시사한다. 또한 가동년수에 따른 inventory의 값을 평가하고 예측하는 것은 원전의 방사선 건전성 확보 및 방사선 방호측면에서 중요한 자료를 제공할 것이다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 원자력중장기연구개발사업 및 방사선안전신기술연구센터의 지원과 한국수력원자력(주)의 협조에 의하여 수행되었습니다.

참고문헌

1. Korea Electric Power Corporation, "Yonggwang Units 3 & 4 Final Safety Analysis Report,".
2. Norman R. Draper, Harry Smith, "Applied Regression Analysis," 3rd ed., A Wiley-Interscience Publication, 1998.
3. 한국전력공사 원자력교육원, "원자로보조설비," 1998.
4. 영광 제 2 발전소 운영절차서, "방사능 측정," 화학-23.
5. 영광 제 2 발전소 운영절차서, "1차 계통 시료 채취," 화학-26.