2003 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

선형회귀분석기법을 이용한 액체, 기체방사성폐기물계통의 Inventory 평가 및 예측

The Estimation and Prediction of the Inventories for the Liquid and Gaseous Radwaste Systems Using the Linear Regression Analysis

김주연, 신창호, 김종경, 이재기, 박용집*
한양대학교 원자시스템공학과
방사선안전신기술연구센터*
서울특별시 성동구 행당동 산 17번지

요 약

영광 원자력 제2발전소의 가동년수에 따른 액체방사성폐기물계통 및 격납용기내 기체방사성폐기물 방출로 인한 inventory의 변화추이 및 향후 예상되는 inventory의 값을 선형회귀분석기법에 의거하여 분석하였다. 평가 결과 가동년수에 따른 inventory의 값은 선형적으로 증가하였으며 연간 환경으로 방출되는 inventory의 값은 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 for the liquid radwaste system and the radioactive gas have being released in containment, and their predictive values according to the operation histories of Yonggwang(YGN) 3 & 4 were analyzed by linear regression analysis methodology. The results show that the variation transitions of the inventories for those systems are linearly increasing according to the operation histories but the inventories released to the environment are considerably lower than the recommended values based on the FSAR suggestions. It is considered that some conservations were presented in the estimation methodology in preparing stage of FSAR.

1. 서 론

원자력발전소 설계시 많은 인자에 대한 평가가 이루어지지만 가장 핵심이 되는 평가는 발전소 본래의 목적인 전기생산을 위한 부분과 최소발생을 지향하는 방사선 부분이다. 이러한 이유로 최종안전성분석보고서[1] 제11장에서는 방사성폐기물에 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 가동연수에 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 원자력 제2발전소를 선정하여 액체방사성폐기물계통 및 기체방사성폐기물계통 중 격납용기내의 기체방출에 대한 inventory 자료를 수집하여 선형회귀분석기법[2]에 의거하여 가동년수에 따른 변화추이 및 향후 예측치를 살펴보고자 하였다. 아울러 검증을 위해 동일 모델인 울진 원자력 제2발전소의 inventory 값과 비교하였다.

2. 재료 및 방법

최종안전성분석보고서에 제시된 방사성폐기물계통내 inventory의 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 운영중 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 띠게 될 가능성이 충분하며 가동년수에 따라 계통내의 방사능은 증가할 것으로 판단된다. 이러한 관계는 선형회귀분석기법에 의거하여 유용하게 설명할 수 있으며 각 계통에 대한 설명과 더불어 아래에 제시하였다.

1) 액체방사성폐기물 관리계통

액체방사성폐기물의 근원은 핵분열생성물과 방사화생성물을 포함하는 냉각재이다. 영광 원자력 제2발전소의 경우 액체방사성폐기물 관리계통은 일차화학제어계통, 사용후핵연료

냉각 및 저장계통, 방사성 물질 배수계통, 세탁계통 및 액체방사성폐기물 처리계통으로 구성되어 있다[3]. 액체방사성폐기물 관리계통의 기능은 원전의 운영과정에서 생성되는 액체 폐기물중에 포함되거나 포함될 가능성이 있는 방사능을 처리하고 소내에서 재활용이 가능하도록 액체 폐기물을 수집하고 처리된 액체를 환경으로 방출하는 것이다.

액체방사성폐기물에는 입자나 이온형태의 방사성 물질뿐만 아니라 붕산도 다량 포함되어 있으므로 여과기 및 붕산 증발기 등의 붕산회수설비를 이용하여 붕산은 재사용하며 이 과정에서 붕산과 함께 있던 방사성 물질은 걸러진다. 이러한 처리과정을 거쳐 방사능이 대부분 제거된 액체는 소내에서 재사용하거나 방사선감시기를 통해 환경으로 방출된다.

액체방사성폐기물 방출은 과학기술부고시[4]에 규정되어 있는 수중에서의 방사성 물질의 최대허용농도를 초과하지 않으며 이로 인한 발전소 인근 주민의 연간 피폭선량한도를 초과하지 않는 범위내에서 방출되도록 관리하고 있다.

2) 기체방사성폐기물 관리계통

일반적으로 기체방사성폐기물관리계통은 방사성폐기물 기체 및 잠재성 방사성폐기물 기체를 수집하고 처리한다. 기본적으로 수소 및 질소를 포함하고 있는 기체는 저압, 상온 활성탄 지연이온교환기에서 지연되며 제논을 77일간, 그리고 크립톤은 6일간 지연시킬 수 있다[1,3]. 활성탄 지연이온교환기를 통과한 기체는 고효율입자 여과기를 통과하고 방사선감시기를 지나 방사성폐기물건물 배기구에서 방출되며 방사능 방출은 배기 및 대기감시기에 의해 통제되고 감시된다.

한편 격납용기내의 기체방사성폐기물 방출은 원전의 경상운전시 격납용기내의 압력조절 목적에 의한 방출과 계획예방정비시 작업자에 대한 쾌적한 작업환경 확보를 목적으로 주로 수행된다. 발전소 정지, 기동 또는 정격 열출력의 15 % 초과 시 냉각재내의 ^{131}I의 방사능이 3배 이상 증가하고 격납용기 배기감시기에 지시된 불활성기체의 방사능이 3배 이상 증가하는 경우에 대해 격납용기내 기체방사성폐기물의 시료채취 및 분석을 수행하게 된다. 기체방출은 주로 저유량 배기팬을 통해 외부로 방출되며 방출팬 전단에는 미립자와 방사성 옥소를 제거할 수 있는 공기조화설비가 설치되어 있고 방출 중에는 격납용기 배기감시기 및 대기감시기를 통해 통제 및 감시된다.

기체방사성폐기물 방출도 동일하게 과학기술부고시[4]에 규정되어 있는 공기중 방사성 물질의 최대허용농도를 초과하지 않으며 이로 인한 발전소 인근 주민의 연간 피폭선량한도를 초과하지 않는 범위내에서 방출되도록 관리하고 있다.

3) 선형회귀분석 방법론

일반적으로 n개의 측정치 $(x_1,y_1),(x_2,y_2),\cdots,(x_n,y_n)$에 대한 관계를 설명해 주기 위해

서는 식 (1)이 타당하며 이를 도출하기 위해서는 최소자승법에 의한 선형회귀분석기법이 유용한 것으로 알려져 있다.

$$Y=b_0+b_1X \tag{1}$$

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

$$y_i=b_0+b_1x_i+\varepsilon_i \tag{2}$$

$$F=\min\sum_{i=1}^{n}(b_0+b_1x_i-y_i)^2 \tag{3}$$

$$\frac{\partial F}{\partial b_0}=2\sum_{i=1}^{n}(b_0+b_1x_i-y_i)=0 \tag{4}$$

$$\frac{\partial F}{\partial b_1}=2\sum_{i=1}^{n}(b_0+b_1x_i-y_i)x_i=0 \tag{5}$$

최종적으로 식 (4)과 (5)에서 미지의 상수 b_0, b_1에 대해 방정식을 풀게 되면 식 (6)와 식 (7)을 얻게 되며 이를 식 (1)에 대입하게 되면 n개의 측정치에 대한 상관관계를 얻을 수 있다.

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

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

3. 결과 및 토의

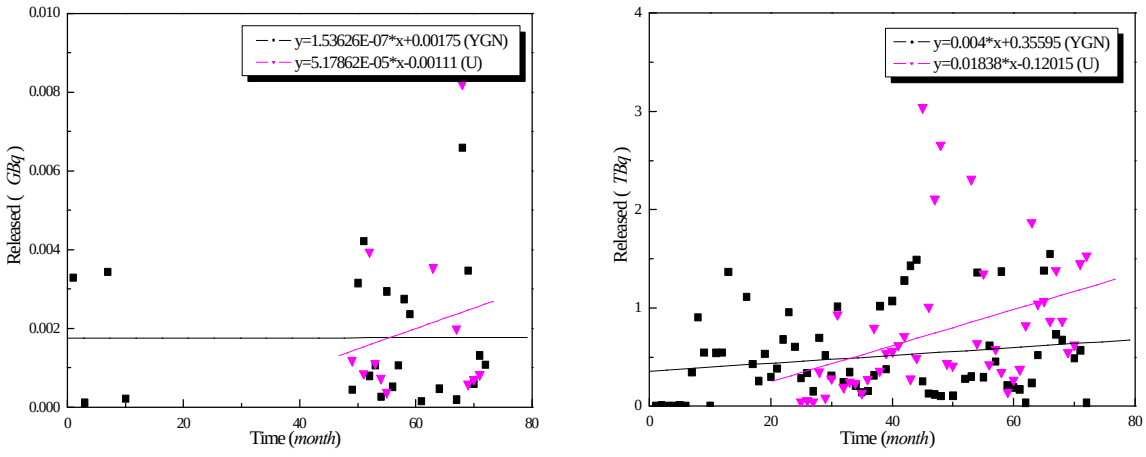
영광 원자력 제2발전소의 가동년수에 따른 액체방사성폐기물계통 및 격납용기내의 기체방사성폐기물 방출에 대한 inventory의 변화추이를 선형회귀분석기법에 의거하여 도출하였다. 참조원전의 방사선관리자료[5] 등을 참고하여 각 방사성폐기물계통에 대한 inventory를 삼중수소 및 ^{3}H를 제외한 전방사능에 따라 구분하였으며 오차를 줄이기 위해 95 %

신뢰구간을 벗어나는 측정치 및 검출하한치(LLD) 미만의 측정치는 평가에서 배제하였다. 아울러 변화추이의 비교를 위해서 동일한 모델인 울진 원자력 제2발전소에 대한 측정치를 수집하여 도시하였다.

그림1과 그림2에 영광 및 울진원전에 대한 변화추이를 나타내었다. 평가대상 원전인 영광 원자력 제2발전소의 경우 가동년수에 따라 inventory의 값이 완만하게 선형적으로 증가하고 있으며 이는 울진 원자력 제2발전소의 경우에도 동일하게 적용된다. 이러한 사실은 현재의 운전패턴이 계속 유지된다고 가정할 때 향후 예상되는 inventory의 값을 예측하는 것이 가능함을 시사한다. 표1에 본 연구의 분석기법에 의거한 영광 원자력 제2발전소의 운전이력에 따른 inventory의 예측치를 제시하였다.

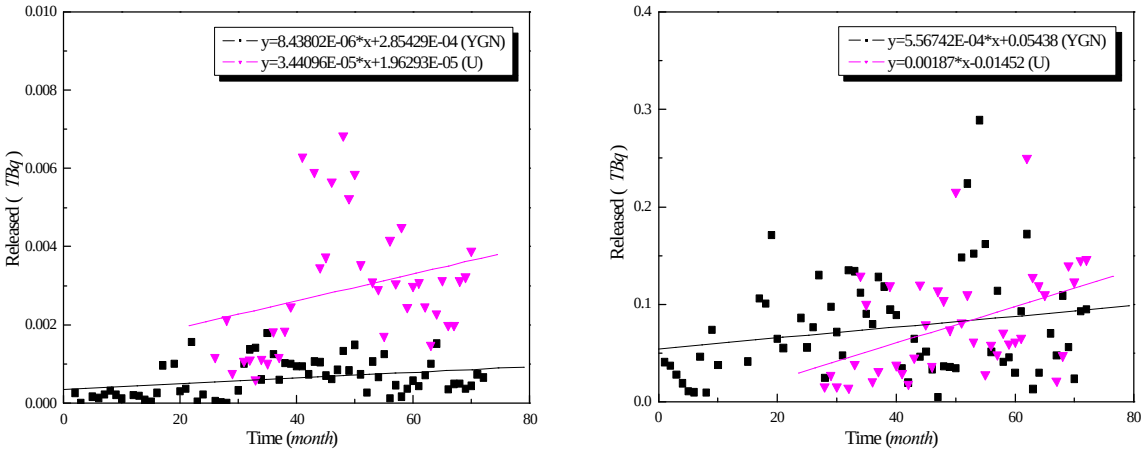
이러한 액체 및 격납용기내 기체방사성폐기물 계통에 내재하는 방사능은 최종적으로 환경으로 방출되며 참조원전의 연간 예상 방출농도 설계치와 비교해 보면 ^{3}H를 제외한 전 방사능에 대해서 기체의 경우 최대 1.9%, 액체의 경우 0.3% 정도에 불과하며 ^{3}H에 대해서도 기체의 경우 최대 23.7%, 액체의 경우 14.3% 정도로 설계치 이내를 충분히 만족하고 있음을 알 수 있다. 이러한 사실은 최종안전성분석보고서에서 제시된 값에 보수성이 존재하며 이에 대한 개선의 여지가 존재함을 의미한다.

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.



(a) gross β-γ. (b) tritium.

Fig 1. Inventories variation in liquid radwaste.



(a) gross β-γ. **(b) tritium.**

Fig 2. Inventories variation in gaseous radwaste.

Table 1. The predictive values according to the operation histories for YGN.

System	Type	10 yr	15 yr	20 yr	25 yr	30 yr
liquid radwaste	gross β-γ (GBq)	1.768E-03	1.778E-03	1.787E-03	1.796E-03	1.805E-03
	tritium (TBq)	0.835	1.076	1.316	1.556	1.796
gaseous radwaste	gross β-γ (TBq)	1.298E-03	1.604E-03	2.310E-03	2.817E-03	3.323E-03
	tritium (TBq)	0.121	0.154	0.188	0.221	0.255

4. 결 론

영광 원자력 제2발전소의 가동년수에 따른 액체 및 격납용기내의 기체방사성폐기물 방출계통 inventory의 변화추이를 선형회귀분석기법에 의거하여 분석하였다. 아울러 동일한 모델인 울진 원자력 제2발전소에 대한 inventory의 변화추이와 비교하였으며 운전이 현재의 패턴을 유지한다고 가정할 때 향후 예상되는 inventory의 값을 예측하였다. 평가 결과 가동년수에 따른 inventory의 값은 선형적으로 증가하였으며 환경으로 방출되는 inventory의 값은 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. 또한 본 연구의 결과를 토대로 원전주변 환경평가(ODCM)를 별도로 수행함으로써 원전의 안전성을 입증토록 해야 할 것이다.

감사의 글

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

참고문헌

1. Korea Electric Power Corporation, "Yonggwang Units 3 & 4 Final Safety Analysis Report,"
2. Norman R. Draper, Harry Smith, "Applied Regression Analysis," 3-rd ed., A Wiley-Interscience Publication, 1998.
3. 한국전력공사 원자력교육원, "원자로보조설비," 1998.
4. 과학기술부, "방사선방호 등에 관한 기준," 과학기술부고시 제2002-23호, 2003.
5. 한국수력원자력(주), "원자력발전소 방사선관리 연보," 1996-2002.