

국내 원자력발전소의 비계획정지 성능지표 연구

강대일 · 박진혁 · 김길유 · 황미정 · 양준언 · 성계용*

한국원자력연구소 · *한국원자력안전기술원

1. 서 론

원자력발전소의 산업계와 규제기관에서는 원자력발전소의 성능(performance)수준 향상과 대 국민 알권리 충족, 규제업무 효율화를 위하여 정량적인 성능지표를 개발하여 사용해왔다. 국내의 원자력 규제 기관인 한국원자력안전기술원은 WANO (world association of nuclear operators)와 미국 핵규제위원회(NRC)의 발전소 종합성능평가(reactor oversight process)에서 사용하는 성능지표를 토대로 국내 원자력발전소 성능지표를 개발하여 사용 중이다 [1]. 개발된 국내 원자력발전소의 성능지표는 초기사건, 안전계통 신뢰도, 방사선 안전 등 11개 지표로 이루어졌다. 각 지표별 등급을 4개(녹색, 하늘색, 노랑색, 주황색)로 나누어 알기 쉽게 표시하였다.

국내 원자력발전소의 초기사건 성능지표에는 원자로 비계획정지(unplanned plant scram)와 출력변동이 있다. 원자로 비계획정지는 말 그대로 원치 않은 발전소 정지를 가져오는 사건으로서 원자력발전소 사업자나 규제자 모두가 원자력발전소의 성과와 안전성 측면에서 제일 많은 관심을 갖는 항목이다. 그러나, 국내 원자력발전소의 초기사건 성능지표에서 등급을 4가지로 나타내는 경계치(threshold value)는 국내 원자력발전소 운전 경험과 확률론적안전성평가 결과가 충분히 반영되어 있지 않다 [1].

원자로 비계획정지 사건 성능지표의 기본, 즉 녹색 등급, 경계치의 설정은 국내 원자력발전소의 비계획정지 사건만을 토대로 설정하지만 하늘색, 노랑색, 주황색 등급의 경계치 설정은 확률론적 안전성평가 결과를 이용하여 설정한다 [2]. 비계획정지 사건에 대한 기본 등급 경계치를 설정하기 위해서는 국내 원자력발전소의 비계획정지 사건의 평균 값을 구하고 각각의 원자력 발전소 비계획정지 사건 평균 값과 비교를 하여야 한다. 평균 비계획정지 사건 수가 경계치로서 의미를 가지려면 일정시간 동안 발생한 연간 평균 비계획정지사건 수는 일정해야 한다. 전체 원자로 비계획정지 사건수를 단순 평균하여 경계치로 사용할 경우, 지나치게 높거나 낮은 경계치를 사용하게 되어 성능 향상 도모나 성능 감시를 제대로 할 수가 없어 경계치로서의 의미를 가질 수 없기 때문이다. 연간 비계획정지사건 수가 일정한가 여부를 판단하는 방법에는 수집된 데이터를 그래프 등으로 나타내는 방법이 있지만 통계적인 방법으로는 카이스퀘어 검정, 라플라스 시험, 역배열시험 등이 있다 [3, 4]. 또 고장율이 일정치 않을 경우 고장율의 추세분석 방법으로는 회귀분석방법과 시계열 분석 방법 등이 있다.

본 논문에서는 원자로 비계획정지(unplanned reactor scram) 초기사건의 기본 경계치 설정을 위한 예비작업으로서 비계획정지 사건의 추세(trend)를 파악하기 위해 국내 원자력발전소의 비계획정지 이력을 검토하고 카이스퀘어 검정과(chi-square test), 역배

열시험(reverse arrangement test)을 수행하였다. 또 회귀분석을 수행하여 기본 경계치를 예비적으로 설정하였다. 2장에서는 분석방법을, 3장에서는 분석 결과를, 4장에서는 결론을 기술하였다.

2. 분석방법

이 장에서는 평균 비계획정지사건 수의 일정여부를 판단하는 통계적인 방법인 카이스퀘어 검정과 역배열시험 방법을 기술하였다. 추세분석 방법으로서 선형 회귀분석 방법을 기술하였다.

2.1 카이스퀘어 검정

카이스퀘어 검정은 서로 다른 고장 사건들의 데이터원(sources)에 대해 고장율이 일정한가를 시험하는 방법이다. X 가 다음과 같을 경우,

$$X^2 = (n_j - e_j)^2 / e_j \dots \dots \dots (식1)$$

n_j : 관측치, e_j : 예상치

X^2 은 카이스퀘어 $\chi^2(v)$ 분포를 따른다. 이때 $v = c-1$ 자유도이고, c 는 표(table)에서 열(column)의수이다. H_0 를 고장율이 일정하다는 귀무 가설(null hypothesis)이라고 할 경우, 만일 크기 인 검정은 $X^2 > x^2_\alpha$ 이면 H_0 가 거짓이라는 증거가 된다. 예측치가 너무 작으면 카이스퀘어 검정은 추천되지 않는다. 그럴 경우 두개의 데이터 원을 합한다. 필요 데이터인 관측치의 수와 열의 관계에 대해서는 참고문헌 [4]에 기술이 되어 있다.

2.2 역 배열시험

역배열시험(reverse arrangement test)은 고장율이 증가하면 고장사이의 시간이 짧아진다는 경향에 근거한다 [3]. 이 시험은 시간순서로 고장시간을 순서화 시킴으로써 역 배열 횟수를 고려하여 수행한다. n 개의 도착시간이 연속으로 발생한다고 다음과 같이 가정한다:

$$X_1, X_2, X_3, \dots, X_j, \dots, X_n$$

왼쪽에서 시작하여 역 배열은 다음과 같은 식이 성립시 발생한다:

$$X_i < X_j (i < j)$$

여기서, $i = 1, 2, 3, \dots, n-1, \quad j = i+1, i+2, \dots, n$

R 이 전체 역배열 횟수라면, R 의 작은 값은 고장율이 증가한다는 것을, R 의 큰 값은 고장율이 감소한다는 것을 의미한다. n 개의 사건에 대해 역 배열의 최소 횟수는 0이고 최대 횟수는 $n(n-1)/2$ 이다. Kendall(1938)은 n 개의 사건에 대해 역배열 수 (R)의 평균과 분산은 다음과 같음을 보였다 [3]:

$$\text{평균} = E(R) = n(n-1)/4 \dots\dots\dots (\text{식2})$$

$$\text{분산} = \text{variance}(R) = (2n^3 + 3n^2 + -5n) / 72 \dots\dots\dots (\text{식3})$$

또한 n 이 증가함에 따라 역배열 수 R 은 정규분포를 따르고, 아래의 식 z 은 표준정규분포를 따른다는 것을 보였다.

$$z = (R + 0.5 E(R)) / \sqrt{\text{var}(R)} \dots\dots\dots (\text{식4})$$

n 이 12보다 작은 경우는 참고문헌 [3]에서 제시한 값을 사용한다.

2.3 회귀분석

시간에 따른 고장율이 일정치 않을 경우 고장율이 운전시간과 일정 함수관계에 있다고 가정하여 시간에 따른 고장율 함수 관계식을 구하게 된다. 이러한 관계식을 구하는 방법에는 회귀분석과 시계열분석 등이 있는데 기본적인 원리는 동일하다. 단순 선형 회귀분석일 경우 고장율 $\lambda(t)$ 은 다음과 같이 나타낼 수 있다;

$$\lambda(t_i) = a + bt_i ; i = 1, 2, \dots, n \dots\dots\dots (\text{식5})$$

여기서, a, b 는 미지의 모수이며, n 은 관측 수이다. 미지의 모수 a 와 b 는 관측된 추정치 t_i 와 $\lambda(t_i)$ 로부터 구하게 된다. a 와 b 의 추정치를 각각 \hat{a}, \hat{b} 라고 표시할 경우, $\lambda(t_i)$ 의 추정치 $\hat{\lambda}(t_i)$ 는 다음과 같이 표시된다:

$$\hat{\lambda}(t_i) = \hat{a} + \hat{b}t_i \dots\dots\dots (\text{식6})$$

(식5)에서의 실제 값 $\lambda(t_i)$ 과 (식6)의 추정치 $\hat{\lambda}(t_i)$ 와의 차이를 잔차라고 하는데 이 잔차의 제곱을 최소화시키는 최소사승법을 사용하여 \hat{a} 와 \hat{b} 를 추정한다. (식5)의 a 와 b 는 (식6)의 추정치 \hat{a} 와 \hat{b} 를 이용하여 구한다. 상세한 사항은 일반적인 통계 참고문헌에 잘 나타나있다. (식5)와 (식6)의 단순 선형분석 대신 대수 선형분석식을 이용하여 분석할 경우가 있는데, 그럴 경우 (식5)와 (식6)은 다음과 같이 표현된다;

$$\text{LN} [\lambda(t_i)] = a + bt_i ; i = 1, 2, \dots, n \dots\dots\dots (\text{식7})$$

$$\text{LN} [\hat{\lambda}(t_i)] = \hat{a} + \hat{b}t_i \dots\dots\dots (\text{식8})$$

3. 분석 결과

3.1 국내 비계획정지 사건 이력

한국원자력연구소에서는 국내 원자력발전소의 정지사건에 관한 데이터베이스를 구축하였다 [5]. 구축된 데이터베이스에는 1978년 상업운전을 시작한 고리 1호기부터 최근의 울진 3호기와 월성 3호기를 포함하여 모두 14개 호기의 원자력발전소 정지사건이 수록되어 있다. 1999년 12월 현재 이들 14개 원자력발전소의 총 운전연수는 약 111,535 Reactor Years이며 이 기간동안 발생한 비계획정지 사건 수는 367건이다. 현재 원자력연

구소에 구축된 데이터베이스에는 년도별로 비계획정지 사건이 수록되어 있지 않고 핵연료 재장전 주기별로 수록되어 있다. 표 1에는 주기별 운전 연수와 비계획정지 사건 수가 수록되어 있다.

표 1. 국내 원자력발전소의 주기별 비계획정지 사건 발생 수

주기	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
사건수	82	58	41	24	23	25	26	26	14	13
운전연수	11.243	9.666	8.458	8.717	7.678	8.159	8.84	10.146	10.309	8.029
평균(/연)	7.29	6.00	4.85	2.75	3.	3.06	2.94	2.56	1.36	1.62
주기	11	12	13	14	15	16	17	18	19	전체합
사건수	3	10	11	7	2	2	0	0	0	367
운전연수	6.355	4.514	2.579	2.1	1.015	1.191	0.843	0.871	0.822	111.54
평균(/연)	0.47	2.22	4.27	3.33	1.97	1.68	0	0	0	3.29

앞의 2장에서 언급한 의미있는 통계분석을 하기위해 이들 데이터를 다시, 적절히 취합하였다. 표 1의 11주기와 12주기의 데이터를 합했고, 13주기에서 19주기까지의 데이터들을 합하였다. 표 2에는 수정된 주기별 비계획정지 사건 발생 수가 나타나 있다. 표 2를 보면 운전 초기에는 비계획정지 사건 수가 많다가 점차 운전주기가 증가하면서 비계획정지사건 수가 감소되는 것을 알 수가 있다. 하지만 비계획정지 사건수는 5주기, 6주기에서는 4주기보다 증가하였고, 10주기에서는 9주기보다, 12주기에서는 11주기보다 증가하였다.

표 2. 국내 원자력발전소의 수정된 주기별 원자로 비계획정지 사건 발생 수

주기	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	총계
사건수	82	58	41	24	23	25	26	26	14	13	13	22	367
운전연수	11.24	9.67	8.46	8.72	7.68	8.16	8.84	10.15	10.31	8.03	10.87	9.42	111.535
평균(/연)	7.29	6.00	4.85	2.75	3.	3.06	2.94	2.56	1.36	1.62	1.2	2.34	3.29

3.2 카이스퀘어 검정, 역배열시험, 회귀분석 결과

카이스퀘어 검정 결과

앞의 2장에서 언급했듯이 각 주기별 비계획정지사건 수가 일정한가 여부에 대해 카이스퀘어 검정을 수행하였다. 귀무가설 H_0 를 비계획정지 사건수가 일정하다고 가정한다. (식 1)을 이용한 $X^2=121$ 이다. 셀 수는 12이므로 자유도 11일 경우, 카이분포 99.5%는 26.76이다. 이는 X^2 이 x^2_{α} 보다 매우 크므로 비계획정지 사건수가 일정하다는 가정은 거짓이라는 강력한 증거이다. 연간 정지 사건 수가 매우 큰 1주기와 2주기의 데이터를 제외시키더라도

도 X^2 이 x^2_0 보다 매우 크다.

역배열 시험 결과

역배열시험은 표 2의 각 주기에서 발생하는 비계획정지 사건 발생시간을 구해 수행하였다. (식2)와 (식3)을 이용한 역배열 수 평균과 분산은 각각 33과 53.166이다. 실제 역배열 수는 58이다. 실제 역배열 수가 평균 역배열 수보다 크므로 시간 당 발생하는 비계획정지 사건 수는 점차 작아짐을 나타낸다. 표본 크기가 12이므로 참고문헌 [3]의 표 11.2에 따라 사건수가 12일 경우, 단측 상한 1% 유의수준(one-sided significance level of 1%)이 50임으로 실제 역배열 수 58은 시간당 비계획정지사건 수가 점차 작아지고 있음을 나타낸다.

회귀분석

회귀분석은 단순 선형 회귀분석과 단순 대수 선형분석을 수행하였다. 위의 표 2의 자료로부터 참고문헌 [1]에서 정의한 원자로 비계획정지 사건 성능지표로 바꾸어 분석을 하였다. 비계획 원자로정지는 다음과 같이 정의된다 [1]:

$$\begin{aligned} \text{비계획 원자로정지} &= \text{원자로 정지횟수} \times 7000(\text{시간}) / \text{원자로 임계(운전)시간(시간)} \\ &= \text{연간 평균 정지횟수} \times 0.799 (\text{년})\dots\dots\dots(\text{식9}) \end{aligned}$$

엑셀 프로그램을 이용한 단순/대수 선형 회귀분석 결과가 표 3에 나타나 있다. 표본자료로부터 추정된 회귀선이 그 측정자료에 어느 정도 적합한가를 측정하는 척도인 결정계수 (coefficient of determination)는 단순 선형분석이 0.7349, 대수 선형분석이 0.7664 , 대수 선형분석이 측정자료에 더 적합한 것을 알 수 있었다.

표 3. 원자로 비계획정지 사건에 대한 단순/대수 회귀분석 주요 결과

	결정계수		계수	표준 편차	하위 95%	상위 95%
단순 선형	0.7349	a(y축 절편)	4.969724	0.508	3.837829	6.10162
		b(기울기)	-0.03941	0.007487	-0.0561	-0.02273
대수 선형	0.7664	a(y축 절편)	1.711146	0.176879	1.317036	2.105257
		b(기울기)	-0.01494	0.002607	-0.02075	-0.00913

표 2의 각 주기별 연간 평균 비계획정지 사건 수가 정규분포를 따른다고 가정시 (식9)을 이용한 기본 경계치는 2.594로 나타났다. 회귀분석 결과를 이용한 기본 경계치는 단순 선형분석이 0.57, 대수 선형분석이 1.06으로 나타났다. 그러나 통상 경계치 설정은 95퍼센타일(percentile) 값을 이용하여 설정하므로[2], 이를 이용하여 경계치를 설정하면 단순 평균 사건수가 정규분포를 따른다고 할 경우 기본 경계치는 5.06, 단순 선형 회귀분석일 경우에는 2.78, 대수 선형 회귀분석일 경우에는 2.25로 나타났다. 표 3에서 신뢰도구간 상위 95% 값을 이용하면 단순 선형 회귀분석 일 경우에는 3.56, 대수 선형 회귀분석은

2.965로 나타났다. 회귀분석을 통해 얻은 경계치가 원자력발전소의 최근 운전이력을 잘 반영하고, 대수 선형분석이 실제 발생한 정지사건 관측치와 잘 부합되므로 기본 경계치를 3으로 설정한다. 한국원자력안전기술원에서 현재 사용 중인 원자로 비계획정지 사건 기본 경계치도 3으로 설정되어 있어 본 연구 결과와 일치됨을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

국내 원자력발전소의 정량적 성능지표 가운데 하나인 원자로 비계획정지 사건 계치를 설정하기 위해 비계획정지 사건 추세를 파악하였다. 이를 위해 국내 원자력발전소의 비계획정지 이력을 검토하고 카이스퀘어 검정과 역배열시험, 회귀분석을 수행하였다. 카이스퀘어 검정시험 결과 국내 원자력발전소의 년도별 원자로 비계획정지 사건수는 일정치 않음을 확인할 수 있었고, 역배열시험 결과 정지 사건 수가 점차 감소됨을 알 수 있었다. 회귀분석 결과 단순 선형회귀분석 보다 대수 선형 회귀분석이 실제 발생한 정지건수에 더 적합하다는 것이 나타났다. 대수 선형회귀분석을 이용한 예비적인 원자로 비계획정지 기본 경계치는 3으로 설정하였다. 본 논문에서 분석한 원자로 비계획정지 사건은 주기별로 수집된 데이터를 사용했기에 일정부분 한계점이 있다. 추후 원자로 비계획정지 사건에 대해 연도별로 수집·정리된 데이터와 각 발전소별 데이터를 이용한 분석이 필요하리라 판단된다. 또한 비균질 포아송 과정 (non-homogeneous Poisson process: NHPP)에서 고장을 추정에 대한 연구도 더 필요하리라 판단된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발 사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1]. KINS-AR/802 국내 원전 성능지표 분석, KINS, 2002
- [2]. SECY-99-007, Recommendations for Reactor Oversight Process Improvements, NRC, 1999
- [3]. Paul A. Tobias and David C. Trindade, "Applied Reliability", Van Nostrand Reinhold, 2nd edition, 1995
- [4]. NUREG/CR-XXXX, "Handbook of Parameter Estimation for Probabilistic Risk Assessment", Draft, 2002
- [5]. KAERI-TR/2131-2002 국내 원자력발전소의 정지사건 데이터베이스 시스템의 구축에 관한 연구
- [6]. 이기훈, "Excel을 이용한 통계학", 자유아카데미, 2판, 1999