

'96추계학술발표회 논문집

한국원자력학회

비상디젤발전기의 信賴度 推定에서 Bayes方法의 適用

류 부 형 · 심 규 박

동국대학교 자연과학대학

경북 경주시 석장동 707

윤 원 영 · 오 성 현 · 임 장 현

한국원자력안전기술원

대전광역시 유성구 구성동 19

요 약

본 논문은 그 동안 원자력발전소 비상디젤발전기(Emergency Diesel Generator : EDG)의 신뢰도 계산에 사용되어 온 Wyckoff 방법의 문제점을 지적하고, 새롭게 Parametric Empirical Bayes(PEB) 방법의 적용을 제안하고자 한다. Wyckoff 방법은 단순히 성공률을 계산하여 그 값을 EDG의 신뢰도로 간주하고 있어 많은 모순점을 내포하고 있다고 지적되어 오고 있다. Martz에 의해 제안된 PEB 방법은 과거의 경험적 자료를 신뢰도 분석에 이용함으로써 계산된 신뢰도의 精度를 높이는 새로운 계산법이라 할 수 있다. 따라서, 본 논문에서는 국내에서 취득한 EDG 운전자료들을 이용하여 Wyckoff 방법과 PEB 방법에 의한 신뢰도를 계산하고 그 결과를 비교하여 PEB 방법의 효용성을 검토하였다.

I. 서 론

운전중인 원자력 발전소에서 취득한 자료로부터 EDG 신뢰도를 계산하는 방법에는 여러 가지가 있으나 현재까지는 Wyckoff 가 제안한 방법이 가장 널리 사용되고 있다.[1] 그가 제안한 방법은 운전횟수에 대한 운전성공의 비율을 근거로 신뢰도를 계산하는 것이다. 최근 국내에서도 전체 전력공급능력에 대하여 원자력 발전소가 차지하는 비중이 높아지고 있는 가운데 원전의 안전성에 관한 관심도 점차 높아지고 있으며, 이에 따라 노심손상 방지와 격납용기 건전성 유지를 위한 비상교류전원인 비상디젤발전기의 신뢰도 평가 및 개선에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다. 예를 들면, 최근 몇 년 동안 일어난 국내 전체 원자력 발전소의 소외전원 상실사건에 대한 분석과 함께 고리 원자력 3,4호기 EDG의 신뢰도를 계산한 연구[2], 또는 EDG의 공용화에 따른 안전성 분석[3] 등이 진행되었으며, 이들 보고서에서도 역시 Wyckoff 의 방법에 의해 EDG의 신뢰도를 계산하였다. 최근 Martz 는 EDG의 신뢰도 계산에 Bayes 이론을 도입하여 기계가 가지는 경험적 특성을 반영하는 새로운 방법인 Parametric Empirical Bayes(PEB) 추정법을 제안하였다.[4] 이 방법은 단순히 운전성공률을 신뢰도로 정의한 기존의 방법과는 달리 성공률을 이항모

수로 하고 이를 추정하기 위해 Beta 분포를 사전분포로 하여 얻은 새로운 사후분포로부터 추정량을 계산하는 방법으로 EDG 신뢰도 계산시에 精度를 높일 수 있는 방법이라 할 수 있다. 따라서, 본 논문에서는 국내 원전에 설치, 운전되고 있는 EDG의 신뢰도 계산시 신뢰도 추정치의 精度를 높이기 위해 기존에 제안된 방법인 Wyckoff 방법의 문제점을 고찰하고, Martz 가 제안한 PEB 방법을 적용하여 국내 원전의 EDG 신뢰도를 새로 계산하고 그 결과로부터 PEB 방법의 효용성을 검토하였다.

II. 신뢰도 추정방법의 비교

2.1. Wyckoff의 신뢰도 추정방법(MLE추정법)

Wyckoff 는 EDG의 기동상태와 부하운전상태에서 발생할 수 있는 각각의 고장(Failure) 즉, 기동을 시작할 때 발생하는 기동고장(Start Failure)과 부하운전중 발생하는 부하운전고장(Load-run Failure)에 대하여 고장률(Failure Rate)을 계산하여 이를 신뢰도 계산에 이용하였다. 기동상태와 부하운전상태에 대한 분류기준은 각 발전소에 따라 다르지만 Wyckoff 는 기동을 시작할지 10분 이내의 상태를 기동상태라 하고 10분을 초과하면 부하운전상태라 정의하였다. 기동상태와 부하운전상태가 결정되면 이들의 성공 비율은 아래 방법으로 구할 수 있으며, 이와 같이 구한 총 기동(또는 부하운전)요구 횟수에 대한 성공(또는 실패)횟수의 비율을 최우추정량(Maximum Likelihood Estimator)이라 하고 최우추정량을 이용하여 EDG의 신뢰도를 계산하는 방법을 MLE(Maximum Likelihood Estimation)추정법이라 한다.[4]

$$\text{기동성공율} = \frac{\text{기동성공횟수}}{\text{총 기동요구횟수}}, \quad \text{부하운전성공율} = \frac{\text{부하운전성공횟수}}{\text{총 부하운전요구횟수}}$$

Wyckoff 는 위에서 계산한 기동성공율과 부하운전성공율을 각각 EDG의 기동신뢰도와 부하운전신뢰도라 정의 하였으며, 위의 결과를 이용하여 EDG의 신뢰도를 아래와 같이 계산하였다.[3]

$$\text{EDG 신뢰도} = (\text{EDG 기동신뢰도}) \times (\text{EDG 부하운전신뢰도}) \quad \dots(2-1)$$

2.2. Martz의 PEB추정법

최근 Martz 는 Parametric Empirical Bayes(PEB) 추정법을 이용하여 63개 미국 원자력 발전소에 대하여 부하운전 시험에 따른 EDG 신뢰도를 계산하였다. 미국내 63개 원자력 발전소에 설치되어 있는 195개의 EDG를 대상으로 1988년부터 1991년까지 4년동안 실시한 총 19,520회의 운전 및 시험자료를 사전 정보화하여 신뢰도를 계산하기 위한 새로운 모형으로 PEB추정법을 제안 하였으며, 가설검정을 실시하여 제안된 모형의 타당성을 증명하였다. PEB추정량은 어떤 모집단(예를 들면, 전체 발전소 집단 등)으로부터 얻은 자료에 대해, 관심있는 미지 모수들이 미지의 상대빈도들을 사전분포로 하는 모형에 따른다고 가정하는 상황에서 계산할 수 있다. 따라서, Martz는 PEB추정법에서 사전분포로 Beta(a, b)분포를 사용하였다.[5] 이 때, 모수 a 와 b 는 운전 및 시험자료로부터 추정할 수 있으며, 다른 자료로 인해 그 값이 개선되었다고 하면 추정의

精度를 위해 개선된 값으로 교환할 수도 있다. Beta(a, b)를 사전분포로 가졌을 때 사전평균은 $E(p) = a / (a + b)$ 가 되고 $a = x_i, b = n_i - x_i$ 라 하면, 표본수(Sample Size)와 생존수(Number of Survivors)가 각각 n_i 와 x_i 로 주어진 상황하에서는 해당 발전소내의 전체 비상디젤발전기 신뢰도의 평균값을 나타내는 이항모수 p 의 사후분포의 확률함수는 아래와 같으며 여기서 모수 $\hat{a} + x_i$ 는 결합생존수(Combined Number of Survivors), $\hat{a} + \hat{b} + n_i$ 는 결합표본수(Combined Sample Size)의 합을 나타낸다.

$$f(p|x_i, a^*, b^*) = \frac{\Gamma(\hat{a} + \hat{b} + n_i)}{\Gamma(\hat{a} + x_i) \Gamma(\hat{b} + n_i - x_i)} \cdot p^{(\hat{a} + x_i) - 1} \cdot (1 - p)^{(\hat{b} + n_i - x_i) - 1}, 0 < p < 1 \quad \dots(2-2)$$

식(2-2)의 사후평균은 식(2-3)과 같이 구해지며, 이 값을 이항모수 p 의 점추정값 \hat{p} 로 사용할 수 있다.

$$E(p|x_i, a^*, b^*) = \frac{\hat{a} + x_i}{\hat{a} + \hat{b} + n_i} \quad \dots(2-3)$$

이때, 식(3-4)은 i 번째 발전소인 해당발전소에 설치된 EDG의 PEB추정량이 되며 이 식에서 \hat{a} 와 \hat{b} 를 Beta(a, b)분포의 모수 a, b 의 추정치라 하면, 식(2-4)와 (2-5)를 연립하여 구한 a 와 b 값을 각각의 모수에 대한 추정치로 사용한다.[4]

$$\sum_{j=1}^N \sum_{i=0}^{x_j-1} \left(\frac{1}{a+i} \right) - \sum_{j=1}^N \sum_{i=0}^{n_j-x_j-1} \left(\frac{1}{b+i} \right) = 0 \quad \dots(2-4)$$

$$\sum_{j=1}^N \sum_{i=0}^{n_j-x_j-1} \left(\frac{1}{b+i} \right) - \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^{x_j} \left(\frac{1}{a+b+i} \right) = 0 \quad \dots(2-5)$$

여기서 N : 그룹의 수, x_j : 각 그룹당 기동성공횟수

n_j : 각 그룹당 기동요구횟수이다.

따라서, Martz의 PEB추정법을 사용한 EDG 신뢰도 추정에서는 기동상태와 부하운전상태에 대한 자료로부터 각각에 대한 Beta분포 모수의 추정치를 구하고 이를 이용하여 기동성공에 대한 PEB추정량 즉, 기동신뢰도 추정치와 부하운전 신뢰도 추정치를 구할 수 있으므로 이 값들을 식(2-1)에 대입하여 EDG 신뢰도를 계산할 수 있다.

2.3. Wyckoff의 추정법(MLE)과 Martz의 추정법(PEB)의 비교

Wyckoff의 ML추정법은 총 기동(또는 부하운전)요구 횟수에 대한 성공(또는 실패)횟수의 비율을 산술적으로 계산한 최우추정량(Maximum Likelihood Estimator)을 이용하여 EDG의 신뢰도를 계산하는 방법으로 EDG의 신뢰도 평가시 규제지침으로 적용되는 추정방법[6]이지만 일정기간의 자료만을 대상으로 신뢰도를 추정하기 때문에 다음과 같은 취약점을 갖게 되고 이로 인해 신뢰도

추정치의 精度가 상대적으로 낮아지게 된다.

1) 기계가 가지는 경험적 특성을 반영하기 어려울 뿐만 아니라 극단값(Outlier)을 자료로 가질 때에는 신뢰도 추정치의 精度에 확신을 가질 수 없다.

2) 산술적으로 계산한 성공율이 지니는 원천적 최적값(Optimum Inherent)을 제거해 줄 수 없으므로 이로 인한 오차를 제거할 수 없다.

3) 추정치의 변이성이 높으므로 90% 신뢰구간의 폭이 상대적으로 넓어지는 경향이 있다.

이에 비하여 Martz의 PEB추정법은 성공과 실패의 횟수를 이항분포로 정의하고 이때의 이항모수 p 를 기계가 가지는 과거의 경험적 자료를 토대로 추정하는 방법이므로, 추정치의 변이성이 낮고 ML추정량이 지니는 원천적 최적값(Optimum Inherent)을 제거해 주는 효과가 있으며 극단점의 영향을 받지 않는다는 장점이 있다. 따라서, Wyckoff의 ML추정법이 가지는 위와 같은 취약점으로 인해 신뢰도 추정치의 精度가 낮아지게 되는 단점을 보완할 수 있고 특히 실제의 운전 경험 자료가 확보되지 않은 EDG(예를 들면, 건설예정 발전소)의 경우에도 설치할 EDG와 유사하거나 동일한 기종의 운전자료를 확보할 수 있으면 매우 높은 精度를 가진 신뢰도를 추정할 수 있으며 동일한 발전소 내에서도 연도별 자료를 사전 정보로 하여 신뢰도를 추정할 수 있다.

III. 국내 원자력발전소의 운전자료를 이용한 검증 결과

PEB추정법을 사용한 비상디젤발전기 신뢰도 추정의 효용성을 검증하기 위해서 운전중인 국내 원자력발전소 중 비상디젤발전기의 운전 및 시험자료의 확보가 비교적 양호한 월성원자력발전소 1호기의 예비 및 비상디젤발전기 운전자료를 이용하여 기동신뢰도를 Wyckoff의 추정법(MLE)과 Martz의 추정법(PEB)을 사용하여 각각의 방법에서의 기동신뢰도인 기동성공율과 기동성공에 대한 PEB추정량을 계산하고 그 결과를 비교, 검토하였다. 월성원자력 발전소에는 2대의 예비디젤발전기(SDG)가 설치되어 소의전원상실시 비상교류전력원으로 사용하고 있다. 예비디젤발전기는 내진설계가 안되어 있는 점을 제외하고는 가압경수형발전소의 EDG와 같은 기능을 수행하고 있다. 이외에도 예비디젤발전기가 운전불가능할 경우를 대비하여 비상노심냉각계통(ECCS) 및 비상냉각수공급계통(EWS)에만 한정하여 전력을 공급할 수 있도록 비상전력공급계통(EPSS), 즉 EDG 2대가 더 설치되어 있다. 표 (3-1)에 나타난 예비디젤발전기의 연도별 운전자료를 사전정보화하여 Beta모수를 구하여 보면 SDG 1호기의 경우 $\hat{a} = 153.45928$, $\hat{b} = 2.54072$ 를 얻을 수 있고, SDG 2호기의 경우 $\hat{a} = 287.904$, $\hat{b} = 11.996$ 을 구할 수 있다. 표(3-1)의 연도별 자료를 이용하여 MLE추정법에 의한 SDG 1, 2호기의 기동성공율과 기동성공에 대한 PEB추정량을 구하여 보면 표(3-2)와 같다. 표 (3-2)에 나타난 결과를 보면 기동성공율의 경우 고장이 나지 않은 해의 신뢰도는 1.0000으로 계산되며, 고장이 나지 않은 해와 그렇지 않은 해 사이의 신뢰도의 편차가 매우 크다. 그러나, 기동성공에 대한 PEB추정량은 해마다 다소 차이는 있으나 전체 평균값을 중심으로 대체로 고른 값으로 계산되었다. 한편, 표 (3-3)에 나타난 비상디젤발전기의 연도별 운전자료를 사전정보화하여 Beta모수를 구하여 보면 EDG 1호기의 경우 $\hat{a} = 287.59067$, $\hat{b} = 12.309328$ 을 얻을 수 있고, EDG 2호기의 경우 $\hat{a} = 99.42029$, $\hat{b} = 0.579701$ 을 구할 수 있

다.

표 3-1. 월성1호기 예비디젤발전기
연도별 기동실패횟수

년 도	예비디젤 1호기		예비디젤 2호기	
	기동수	실패수	기동수	실패수
1985	35	1	34	2
1986	28	0	30	1
1987	32	1	23	0
1988	34	2	32	1
1989	30	0	30	0
1990	33	0	37	1
1991	41	0	44	3
1992	45	0	35	0
1993	29	1	35	4
합 계	307	5	300	12

표 3-2. 월성1호기 예비디젤발전기
연도별 기동실패횟수

년 도	예비디젤1호기		예비디젤2호기	
	기동 성공율	PEB 추정량	기동 성공율	PEB 추정량
1985	0.9714	0.9815	0.9412	0.9581
1986	1.0000	0.9862	0.9667	0.9606
1987	0.9697	0.9812	1.0000	0.9628
1988	0.9444	0.9761	0.9687	0.9608
1989	1.0000	0.9863	1.0000	0.9636
1990	1.0000	0.9866	0.9730	0.9614
1991	1.0000	0.9871	0.9318	0.9564
1992	1.0000	0.9874	1.0000	0.9642
1993	0.9667	0.9809	0.8857	0.9522
합 계	0.9837	0.9837	0.9600	0.9600

표 3-3. 월성1호기 비상디젤발전기
연도별 기동실패횟수

년 도	비상디젤 1호기		비상디젤 2호기	
	기동수	실패수	기동수	실패수
1985	25	3	113	0
1986	26	1	23	0
1987	24	0	26	0
1988	26	0	29	0
1989	31	0	32	0
1990	28	0	32	1
1991	33	0	32	0
1992	37	4	32	0
1993	38	3	29	1
합 계	268	11	355	2

표 3-4. 월성1호기 비상디젤발전기
연도별 기동실패횟수

년 도	비상디젤1호기		비상디젤2호기	
	기동 성공율	PEB 추정량	기동 성공율	PEB 추정량
1985	0.8800	0.9529	1.0000	0.9973
1986	0.9615	0.9592	1.0000	0.9953
1987	1.0000	0.9620	1.0000	0.9954
1988	1.0000	0.9622	1.0000	0.9955
1989	1.0000	0.9628	1.0000	0.9955
1990	1.0000	0.9625	0.9688	0.9880
1991	1.0000	0.9630	1.0000	0.9956
1992	0.8919	0.9516	1.0000	0.9956
1993	0.9211	0.9547	0.9655	0.9878
합 계	0.9590	0.9590	0.9944	0.9944

표 (3-3)의 자료를 이용하여 EDG 1, 2호기의 기동성공율과 기동성공에 대한 PEB추정량을 구하여 보면 표(3-4)와 같다. 표 (3-4)에 나타난 결과를 보면 기존의 방법을 사용할 경우 고장이 나지 않은 해의 신뢰도는 1.0000 으로 계산되며, 고장이 나지 않은 해와 그렇지 않은 해 사이의 신뢰도의 편차가 매우 크다. 그러나, PEB추정법을 사용한 경우 예비디젤발전기에 대한 계산 결과와 마찬가지로 해마다 다소 차이는 있으나 전체 평균값을 중심으로 대체로 고른 값으로 계산되었다.

V. 결 론

EDG의 신뢰도를 추정하기 위해 적용되는 Wyckoff의 MLE추정법과 Martz의 PEB추정방법을

비교, 검토하고 운전중인 국내 원자력발전소의 운전자료를 사용하여 MLE추정법과 PEB추정방법에 의한 기동신뢰도를 계산하여 그 결과를 근거로 PEB추정법에 의한 비상디젤발전기 신뢰도 추정의 효용성을 검증하였으며, 이와 같은 검토 및 검증 결과를 근거로 아래의 결론을 얻었다.

1) 기존의 추정방법은 당해년도에 취득한 자료 그 자체에 대한 성공비율을 계산한 것이므로 기계가 가지는 경험적 특성을 반영하기 어려울 뿐 아니라 극단값(Outlier)을 자료로 가질 때에는 그 精度에 의문을 가질 수 있다. 예를 들어, 기존의 방법인 기동성공비율을 신뢰도로 하면 월성 1호기의 EDG 1호기의 경우 1991년도의 신뢰도는 100%인 반면 다음 해인 1992년에는 89.19%가 되어 신뢰도 자체에 대한 신뢰성의 문제가 제기된다.

2) PEB추정량은 성공과 실패의 횟수를 이항분포로 정의하고 이때의 이항모수 p 를 과거의 경험적 자료를 토대로 신뢰도를 추정하는 방법이므로 운전 자료가 확보되지 않은 건설예정 발전소의 경우에도 설치할 EDG와 유사하거나 동일한 기종의 운전자료를 확보할 수 있으면 매우 높은 精度를 가진 신뢰도를 추정할 수 있다. 그리고, 동일한 발전소 내에서도 연도별 자료를 사전 정보로 하여 신뢰도를 추정할 수 있다.

3) PEB추정법에 의한 신뢰도 추정 결과는 극단점에 영향을 받지 않는다는 장점이 있다. 예를 들어, PEB추정량을 신뢰도로 하면 월성 1호기의 EDG 1호기의 경우 1991년도의 신뢰도는 96.3%이고 다음 해인 1992년에는 95.16%가 된다.

4) PEB추정법에 의한 신뢰도 추정에서는 운전실패가 없는 원자력 발전소의 경우에도 신뢰도값이 1.0인 경우는 존재하지 않으며, 이는 산술적으로 계산한 성공율인 ML추정량이 지니는 원천적 최적값(Optimum Inherent)을 제거해 주는 효과가 있음을 보여준다

참 고 문 헌

- [1] H. Wyckoff, "The Reliability of Emergency Diesel Generators at U.S. Nuclear Power Plants", NSAC-108, EPRI, (Sept. 1986)
- [2] 김태운 외, "국내 원전 소의전원 상실 사건 및 고리 3,4호기 비상디젤발전기 신뢰도 조사 및 분석", KAERI/TR-363/93, 한국원자력연구소, (1993. 5)
- [3] 원자력연구실 원전설비개선 연구팀, "비상디젤발전기 공용화에 따른 안전성 분석", 한전기술연구원, (1994)
- [4] F. M. Martz, H. K. Kvam, and L. R. Abramson, "Empirical Bayes Estimation of the Reliability of Nuclear-Power-Plant Emergency Diesel Generators", *Technometrics*, **38**(1), pp.11-24, (1996)
- [5] R. E. Kass and D. Steffey, "Approximate Bayesian Inference in Conditionally Independent Hierarchical Models(Parametric Empirical Bayes Models)", *Journal of the American Statistical Association*, **84**, pp.717-726, (1989)
- [6] "Station Blackout", Reg. Guide 1.155, U.S. NRC, (June 1988)