

국내 원자력발전소 정지 이력에 근거한 초기사건빈도 분석

이윤환, 정원대, 박진희, 진영호
한국원자력연구소

1. 서론

원자력발전소(이하 원전)는 안전이 특별히 강조되는 설비로서 다양하고 중복적인 안전설비와 운전체계를 갖추고 있다. 이런 설계 및 운전개념으로 인하여 조그마한 이상 징후에도 보수적 관점에서 원자로를 정지시키게 된다. 따라서 원자로의 정지는 원전의 안전조치 중 가장 기본적인 반응 결과라 할 수 있다.

원전의 안전성 평가 방법 중 하나로 확률론적 안전성평가(Probabilistic Safety Assessment : PSA)가 있는데, 분석 과정 중 하나로서 노심 손상을 초래하는 모든 중요 사고 시나리오를 파악하고 그 발생빈도를 추정하는 단계가 있다. 이를 위해서는 원자로 정지를 유발하는 초기사건과 그 발생빈도를 알아야 하는데, 이제까지는 국내 설계 중인 원전의 PSA를 위해서 주로 ALWR URD[1], NUREG[2] 자료 등 국외 데이터베이스를 사용하였다. 그러나 초기사건빈도가 안전성평가 결과에 미치는 영향이 매우 크기 때문에 국내 원전의 고장이력을 사용한 분석이 시급한 형편이었다[3].

본 논문에서는 1997년 말까지 국내에서 가동 중인 10기의 가압경수로형 원전에서 발생된 총 발전정지 현황 및 관련 초기사건을 분석하였다.

2. 국내 원전 발전정지 현황

1978년 4월 국내 최초의 원전인 고리1호기가 상업운전을 개시한 이래 21년째인 1998년 현재 울진3호기 및 월성 2호기를 포함하여 총 13기의 원전이 상업운전 중에 있으며, 가압경수로형 11기 및 가압중수로형 2기로 구성되어 있다. 1997년 말까지 가압경수로형 10호기의 운전이력을 보면, 405건의 발전정지가 있었으며 이를 유형별로 보면 정기 계획예방정비를 위한 정지가 77건, 운전 중 발생된 기기 등의 결함을 정비하기 위한 간이 계획정비가 35건, 급전계획정지 1건, 그리고 운전 중 발생한 분시 고장정지가 292건이었다[4].

정기 계획예방정비를 위한 원자로 정지를 제외한 연도별 발전정지 건수는 표1에 나타난 바와 같다. 연도별로 불시 발전정지 건수와 운전 중인 원자로 수, 평균 불시 발전정지 건수를 정리하였다. 전체적으로 감소 추세에 있으며, 다른 나라의 평균 불시 발전정지 건수가 년 3회 정도임을 감안 할 때 90년대 이후 국내 원전의 정지 건수는 상대적으로 적음을 알 수 있다.

표 1 국내 가압경수로형 원전 불시 발전정지 건수

연도	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	계
정지수	17	13	8	7	4	14	12	30	30	30	12	16	23	26	16	16	7	12	12	23	328
호기수	1	1	1	1	1	2	2	3	5	6	7	8	8	8	8	8	8	9	10	10	107
평균	17	13	8	7	4	7	6	10	6	5	17	2	29	29	2	2	09	13	12	23	3.1

3. 초기사건 분석

발전소의 불시적인 원자로 정지를 초래하는 초기사건은 기본적으로 원자로냉각재상실과 과도사건으로 구분할 수 있다. 원자로냉각재상실사고는 파손 부위의 크기나 위치 혹은 방사성 물질의 격납건물 밖으로의 누출 가능성에 따라서 다시 몇 가지 세분화된 초기사건으로 구분되며, 과도사건은 이자축 혹은 보조계통의 사용여부에 따라 몇 개의 보다 세분화된 초기사건으로 구분된다[5].

세부적인 초기사건을 결정하기 위해서 주 논리도를 통해 개념적인 내부 초기사건의 범주를 결정하고, 이들 일반 범주 각각에 대해서 가능한 모든 초기사건을 도출하여 총 58개의 예비 초기사건 유발인자 목록을 개발하였다. 마지막으로 원자로를 안전하게 정지시키기 위해 필요한 안전계통의 기능적 대응에 근거하여 유사한 패턴을 보이는 초기사건을 그룹화하였다. 국내 설계 중인 원전 PSA를 위해서 다음과 같이 총 16개의 초기사건이 선정되었다[3].

- 원자로냉각재상실사고 : 대형냉각재상실, 중형냉각재상실, 소형냉각재상실, 증기발생기세관파단, 저압경계부냉각재상실, 원자로용기파손
- 과도사건 : 대형이자축파단, 주급수상실, 복수기진공상실, 기기냉각수상실, 4.16KV 교류모선상실, 125V 직류모선상실, 소외전원상실, 발전소정전, 일반과도사건, 정지불능과도사건

4. 국내 원전의 정지이력에 근거한 초기사건 빈도

4.1 초기사건 분류

총 319건의 발전소 정지이력 중 정지 원인 및 관련 계통, 조치 내용 등의 분석을 통하여 초기사건을 분류하였다. 319건의 정지이력에는 계획예방정지를 제외한 자동 및 수동 원자로 정지 등 모든 원자로 정지이력이 포함된다. 여기에는 원자로의 전출력 운전시 발생한 원자로 정지만이 해당하며, 원자로 저출력 운전시 발생한 원자로 정지는 전출력 PSA에 해당되지 않으므로 제외하였다. 여기서 자동 및 수동 원자로 정지는 계획된 것이 아닌 불시정지라 할 수 있으며, 이는 기기 혹은 계통의 이상이나 인간행위 등으로 인해 정상 운전 중인 발전소가 불시에 정지되는 것을 말한다. 불시정지란 앞에서 언급한 것처럼 계통이나 기기 이상사원자로의 보호 및 방사능 누출과 같은 큰 사고를 비연에 방지하기 위한 기본적인 안전조치다.

앞에서 언급한 것처럼 58개의 초기사건 유발인자가 정의되어 있다. 즉 모든 원자로 정지사건은 이 58개 유형 중 하나로 분류할 수 있으며, 이는 최종적으로 16개 초기사건의 하나로 정의된다. 총 319개 불시정지이력을 분석한 결과, PSA를 위해 정의된 16개의 초기사건 중 국내에서는 주급수상실, 복수기진공상실, 기기냉각수상실, 소외전원상실, 일반과도사건 등 5개 초기사건이 발생하였다. 나머지 11개 초기사건은 국외 데이터베이스에 나타난 바와 같이 그 발생빈도가 매우 작아 원전의 운전이력이 약 90년 밖에 안 되는 국내의 원전에서는 발생한 적이 없는 사고에 해당한다. 표 2는 호기별 초기사건 발생 이력을 보여주고 있다.

4.2 초기사건 빈도

초기사건빈도를 산출하기 위해서는 운전시간이 필요하다. 본 분석에서 대상으로 하는 10기 가압경수로형 원전의 운전이력은 1997년 말까지 운전시간 중 실제 운전시간 총 31,572시간, 정기 계획예방정지시간 5,607시간 그리고 원자로 운전 년수로는 총 86.5년에 달한다.

발전소 정지횟수 총 319회 중 87.5%인 279회가 일반과도사건으로 1년에 약 3.2회 정도 발생하는 것으로 나타났다. 일반과도사건이란 급수계통의 기능에 심각한 영향을 주지 않으면서, 원자로 정지를 유발시키는 사건을 의미한다. 주급수상실로 인한 원자로 정지는 총 18회이었으며, 그 중 모든 급수펌프의 정지로 인한 주급수상실은 6건, 급수배관 밸브의 닫힘으로 인한 주급수상실은 9건 등으로 분석되었다. 복수기 진공상실로 인한 원자로 정지는 총 16회이었으며, 그

중 13건이 복수기 저진공으로 인한 원자로 정지로 밝혀졌다. 물론 각 발전소별로 발전소 설계상의 차이점 등이 있을 수 있겠으나, 표 2의 호기별 초기사건 발생 이력을 보면 복수기 진공상실로 인한 원자로 정지는 동해안에 위치한 고리 및 울진 발전소에서 집중적으로 발생한 것으로 나타났다. 소외전원상실로 인한 원자로 정지는 총 4회이었으며, 이 역시 동해안에 위치한 고리 및 울진 발전소에서 발생한 것으로, 태풍과 폭설 등 기상과 약천후에 기인해 발생한 것이었다. 표3에 국내 원전의 불시정지이력에 근거한 초기사건 빈도를 정리하였다.

표 2 호기별 초기사건 발생 이력

구분 호기	주급수 상실	복수기 진공상실	기기냉각 수상실	소외전원 상실	일반 과도사건	계	원자로 운전년수
고리1	5	3	0	2	98	108	15.9
고리2	2	4	0	0	41	47	12.6
고리3	2	1	1	1	29	34	10.2
고리4	2	2	1	0	27	32	9.9
영광1	1	0	0	0	25	26	9.8
영광2	3	0	0	0	21	24	8.9
영광3	1	0	0	0	4	5	2.3
영광4	1	0	0	0	6	7	1.6
울진1	0	3	0	0	17	20	8.1
울진2	1	3	0	1	11	16	7.2
계	18	16	2	4	279	319	86.5

표 3 국내 원전의 정지이력에 근거한 초기사건 빈도

초기사건	발생 횟수	발생횟수(%)	발생빈도(/yr)
주급수상실	18	5.6	2.08E-01
복수기 진공상실	16	5.0	1.85E-01
기기냉각수상실	2	0.6	2.31E-02
소외전원상실	4	1.3	4.62E-02
일반과도사건	279	87.5	3.23E+00

4.3 기존의 초기사건 빈도와의 비교 평가

표 4에 국내 발전정지 이력에 근거하여 분석된 5개의 초기사건 빈도와 국내 설계 중 원전의 PSA 수행시 사용한 초기사건 빈도를 비교 정리하였다. 표 4에 나타난 바와 같이 4개의 초기사건 빈도가 두 경우 거의 차이가 없는 것으로 나타났다. 기기냉각수상실사고의 경우에만 약 10배 정도의 차이를 보이고 있으나, 기기냉각수상실로 인한 원자로 정지는 단 2건 밖에 안되므로 두 경우 중 어떠한 값이 타당하다고 결정하기에는 많은 불확실성을 갖고 있다. 86.5년의 원전 운전년수 동안 발생한 원자로 정지건수 총 319건을 분석한 결과는 전반적으로 국외 데이터베이스의 초기사건 빈도와 매우 유사하였다. 앞으로 국내 원전의 운전경험이 늘어나면 보다 더 의미 있는 결과를 얻을 수 있으리라 판단된다.

표 4 초기사건 빈도 비교

초기사건	국내 자료 (빈도)	국외 자료 (빈도)
주급수상실	2.08E-01	5.40E-01
복수기 진공상실	1.85E-01	2.36E-01
기기냉각수상실	2.31E-02	1.60E-01
소외전원상실	4.62E-02	6.20E-02
일반과도사건	3.23E+00	3.00E+00

5. 결론

본 논문에서는 1997년 말까지 국내에서 가동 중인 10기의 가압경수로형 원전에서 발생한 불시정지 현황과 관련 초기사건을 분석하고 초기사건빈도를 산출하였다. 이제까지는 국내 설계 중인 원전의 PSA를 위해서 국외 데이터베이스를 사용하였으나, 초기사건 빈도가 안전성평가 결과에 미치는 영향이 매우 크기 때문에 국내 원전의 운전 자료를 사용한 빈도 분석이 시급한 형편이었다.

총 86.5 원자로 운전년수 동안 319개 불시정지가 있었으며, 이에 대한 초기사건 분석 결과 총 16개의 초기사건 유형 중 5개 초기사건의 발생 경향이 있었다. 5개 초기사건은 주급수상실, 복수기진공상실, 기기냉각수상실, 소외전원상실 및 일반과도사건이며, 발생빈도는 국외 데이터베이스의 초기사건 빈도와 유사한 것으로 평가되었다. 앞으로 원전의 운전경험이 늘어나면서 국내 운전이력에 근거한 초기사건 빈도는 보다 더 의미 있는 결과를 얻을 수 있을 것이며, 원인 분석과 경향 분석 등 다양한 운전 자료 분석이 가능할 것이다.

참고문헌

1. **Advanced Light Water Reactor Requirement Document Vol II : Utility Requirements for Evaluatory Plants Appendix A to Chapter 1 ; PRA Key Assumption and Ground Rules, Rev.0, EPRI, February 1990**
2. **Development of Transient Initiating Event Frequencies for Use in Probabilistic Safety Assessment, NUREG/CR-3862, May 1985**
3. **Final Probabilistic Safety Assessment Report for Ulchin Units 3 and 4, KEPCO, 1998**
4. 원자력 발전년보, 한국전력공사, 1997
5. **Procedures for Conducting Probabilistic Safety Assessment of NPPs (Level 1), IAEA, 1992**