

## 능동기기 경년열화 평가를 위한 성능기준 설정 Determination of Performance Criteria for Evaluating Active Component Aging

한상길, 김병섭, 김주택

한국수력원자력(주) 원자력환경기술원

### 요 약

원자력발전소 주기적안전성평가를 위한 주요 수행업무 중의 하나인 주요기기 경년열화평가는 크게 피동형기기 평가와 능동형기기 평가로 대별된다. 이 중 능동형기기는 발전소 수명기간 중 기기의 주기적인 점검, 정비, 교체 등으로 인하여 피동형기기의 평가방법과는 달리 경년열화의 주요 기구인 침식, 부식, 마모 등의 평가방법 만으로는 적절하지가 않다고 판단되며 확률론적 평가방법론을 응용한 성능기준 설정평가 기법을 국내원전의 능동기기 경년열화 평가의 한 방편으로 적용해 보았다.

### Abstract

One of the major tasks in Periodic Safety Review(PSR) of nuclear power plants is Aging Management Evaluation of plants' SSC(System, Structure, Components). The evaluation can be mostly categorized by two parts, Passive components and Active components. In contrast with the Passive components, Active components are periodically maintained and replaced by new components, so the conventional aging mechanisms related to passive components such as erosion, corrosion, etc. are not proper for evaluating active components of nuclear power plant. In this paper, Performance Criteria evaluation based on the probability risk assessment methodology has been applied in active components of domestic nuclear power plant.

### 1. 서 론

원자력법 시행령 제42조의3(주기적안전성평가의 내용) 및 시행규칙 제19조의2(주기적안전성평가의 세부내용)에 따르면 원전의 안전과 관련된 주요 기기에 대하여 물리적 상태를 확인하고 운전경험 및 연구결과를 활용하여 경년열화를 평가하도록 되어있다. 주요 기기 중 피동형기기는 규제요건에서 요구하는 유효한 기술기준을 조사하여 그 요건을 만족하고 침식, 부식 등 기기별 해당 경년열화기구가 적절하게 유지 관리되고 있는지를 확인하고 향후에도 기기의 고유기능을 유지하고 안전하게 운영될 수 있는지를 확인하기 위해 운전, 시험, 정비 등 경년열화관리 프로그램이 적절한지를 검토하고 개선방향을 도출하는 절차를 따르면 된다. 그러나 발전소 수명기간 중 주기적으로 질차서 등에 따라 정비되고 시험점검되고 필요시 새로운 부품으로 기기교체가 일어나는 능동형기기

에 대해서는 통상적인 위의 방법만으로는 충분히 경년열화평가가 되었다고 할 수 없다. 능동형 기기에 대한 경년열화평가는 해당 계통/기기/구조물의 성능기준을 설정하고 성능을 유지할 수 있는 적절한 정비계획이 수립되고 이행되는 지를 확인하며 건전성 확인을 위해 정비상태를 확인하는 방법이 효과적이다. 규제기관에서 요구하는 평가기준으로 유효한 기술기준을 조사하고 능동형 기기가 관련 요건을 만족하고 적절하게 유지 관리되고 있는지를 확인하고 또한, 능동형 기기들이 향후에도 기능과 성능을 유지하고 안전하게 운영될 수 있는지를 확인하기 위해 성능기준을 설정하고 성능평가 및 감시계획을 수립하여 현재의 운전, 시험, 정비 등 경년열화관리 프로그램이 적절한지를 검토하고 개선방안을 도출하는 절차가 바람직할 것이다. 본 고에서는 확률론적인 평가방법론을 고리3,4호기 잔열제거펌프 성능기준 설정에 시범적으로 적용 평가해 보았다.

## 2. 능동형기기 주기적안전성평가 개요

주기적안전성평가의 능동형 기기에 대한 경년열화 평가는 미국의 정비규정 방법을 활용하여 안전 관련 계통, 기기, 구조물(SSC) 중 능동형 기기에 대해서 성능기준을 설정하고 정비이력을 분석하여 효율적인 정비가 수행되는지를 확인하므로써 안전운전을 위한 권고사항을 도출하는 것이다. 이로부터 각 SSC가 고유의 설계 기능을 실패 없이 수행하도록 하고, 비안전관련 SSC의 고장으로 인한 안전관련 SSC의 사용을 불가능하게 하는 사건을 최소화시키도록 한다. 이와 같이 적절한 성능기준 설정 및 정비경험 분석 등을 통하여 발전소의 안전 기능이 상실되는 것을 방지하고 기기 건전성과 성능 유지를 위하여 다음과 같이 평가범위를 선정하고 평가방법을 제시한다.

### 가. 평가범위

평가의 적용 대상은 발전소의 안전 운전에 직접적인 영향을 주는 SSC나 안전기능에 영향을 줄 수 있는 비안전 관련 SSC 중 능동형 기기를 대상으로 한다. 이러한 평가대상 기기 선정기준은 ANSI/ANS51.1, ASME Section III, 품질보증절차서 등을 참조하여 안전성 품질등급(Q), 안전성 영향 품질등급(T)을 평가 대상기기 선정기준으로 설정한다.

- 안전성 등급(safety-related class, Q등급)
  - 원자로냉각재압력경계의 건전성을 보증해야 하는 설비로서 원자로를 안전정지시킨 후 계속적인 안전 유지 기능을 가진 설비와 10CFR100에 서술된 소외 주민 피폭선량 초과를 유발할 수 있는 심각한 사고를 완화, 방지하는 기능을 가진 설비의 등급
- 안전성 영향등급(safety-impact class, T등급)
  - 원자로발전소의 안전정지 및 정상운전중에 원자로 안전 및 전력생산에 직접적인 영향은 없으나 해당 설비 및 품목의 고장으로 인하여 안전성 설비의 기능을 안전기준 이하로 저하시킬 수 있는 품목의 등급
- 신뢰성 등급(reliability-critical class, R등급)
  - 원자로발전소의 전력생산을 위해 필수적인 기능을 수행하는 설비로서 고장 또는 결함발생시 전력설비 운영에 영향을 주거나 대규모의 복구작업이 필요한 품목의 등급

경년열화평가 대상 설비 평가범위로는 Q, T 등급에 해당하는 기기와 R 등급 중 일부를 평가대

상으로 선정한다.. 상기 선정기준으로 활용한 품질등급에서 정의하는 안전성등급과 안전성 영향등급은 LR규정(10CFR54.4)[2]에서 언급하고 있는 안전성 및 비안전 계통·기기·구조물과 내용이 동일하다. 각 계통별로 평가대상 능동형기기로 도출된 기기는 대표적으로 펌프(케이싱 제외), 밸브(모터구동 밸브), 전기기기, 디젤발전기 등이 해당된다.

## 나. 평가방법

### 1) 평가절차

능동형기기 경년열화 평가 수행 절차를 정리하면 다음과 같다.

- 평가 대상 SSCs 선정
- 위험도 평가(위험도에 미치는 영향이 큰 SSC 선정)
  - 계통별 기능 검토
  - 분석대상 기능 도출
  - 중요 계통 기능 선정
  - 감시수준 결정
  - 해당 기능별 관련 능동형 기기 도출
- 위험도에 미치는 영향에 따른 성능기준 설정
- 성능기준 결과 분석 및 정비경험 분석

### 2). 상세절차

#### 2.1 적용대상 SSC 선정

해당발전소 전체 계통, 기기 목록으로부터 안전관련 계통, 기기 여부를 판단한 후 능동형 기기를 도출한다. 선정된 능동형 기기는 위험도 분석과 성능기준 설정을 위해 기능에 따라 분류한다.

#### 2.2 위험도 평가

위험도 평가의 목적은 SSC별 감시수준을 결정하기 위한 것으로 평가 대상 SSC 중 고위험도(Risk significant) 또는 저위험도(Non-Risk significant) 분류하는 것이다. 고위험도 대상은 계열 성능기준 설정 대상이 되며 저 위험도 대상은 발전소 수준 성능기준 설정 대상이 된다.

위험도에 미치는 영향이 큰 SSC를 선정하기 위해 전체 계통 목록을 기준으로 각 계통별 기능을 FSAR 등을 이용하여 정리한다. 각 계통별 기능중에서 안전관련 SSC 또는 비안전이나 안전에 영향을 주는 SSC와 관련 있는 기능을 판단한다. 이때 판단 기준은 다음과 같다.

- Q1. 원자로냉각재 압력경계 유지를 위한 안전관련 SSC
- Q2. 원자로의 안전정지 유지를 위한 안전관련 SSC
- Q3. 10CFR100 기준에 상응하는 소외피폭을 유발하는 사고를 방지하고 완화하는데 필요한 안전관련 SSC
- Q4. 사고 또는 과도상태를 완화시키거나 발전소 비상절차서에서 사용되는 비안전관련 SSC
- Q5. 고장이 발생할 경우 안전관련 SSC의 기능을 저해할 수 있는 비안전관련 SSC

Q6. 고장이 발생할 경우 원자로의 정지 또는 안전계통의 작동이 유발되는 비안전관련 SSC

상기 6개 항목중 어느 하나라도 만족하면 분석 대상 기능에 포함시킨다.

상기 절차에서 선정된 기능중 감시 수준을 결정하기 위해 중요 계통기능 여부를 판단하기 위해 PSA 결과나 Delphi 방법 등을 적용할 수 있다. 본 평가에서는 분석 대상 기능에 대해서 다음 두 사항에 해당되는 지 여부를 판단하였다.

Q7. PSA 결과로부터 안전성 영향이 큰 SSC (RRW>1.005)

Q8. 대기중인 SSC

상기 2개 항목중 어느 하나라도 만족하면 계열기준 성능기준(이용불능도 및 신뢰도 성능기준) 설정 대상이 되며 그렇지 않은 경우 발전소 수준의 성능기준을 설정한다.

상기에 제시한 위험도 평가는 객관적 타당성을 증대시키기 위해 PSA 분석결과인 중요도 분석결과를 기반으로 전문가 패널을 통해 분류하거나, 정량적인 평가 방법을 사용하여 위험도에 미치는 영향을 결정할 수 없는 경우에는 전문가 위원회(Expert Panel)에서 Delphi 방법 같은 정성적 평가 방법을 이용하여 위험도에 미치는 영향을 평가할 수 있다. PSA 분석결과가 존재하는 경우는 PSA 평가대상 계통(기기 포함)별 중요도 결과가 존재하는 경우로서 각 계통, 기기별 중요도 결과를 전문가 패널들이 검토하여 고위험도 또는 저위험도로 분류한다.

PSA 분석 결과를 사용하지 않고 위험도에 미치는 영향이 큰 계통 및 기기를 선정하기 위해 고려할 사항은 다음과 같다.

- 사고 방지 또는 완화 측면에서 위험도에 미치는 영향이 큰 SSCs
- 초기사건을 유발할 가능성이 큰 SSCs
- 위험도에 미치는 영향이 큰 피동 기기
- 계통 기능이 사고를 방지 또는 완화하는데 사용되거나 기기를 보조하는 SSC
- 계통 설명서와 도면을 통해 분석한 결과, 위험도에 미치는 영향이 큰 기기를 가진 계통을 보조하는 계통인지 여부

### 2.3 성능기준 설정

위험도에 미치는 영향 정도에 따라 SSC를 분류하여 영향이 큰 SSC에 대해서는 계열 기준 성능기준을 설정하고, 위험도에 미치는 영향이 적은 SSC는 발전소 전체 수준의 성능기준을 설정한다. 계열 기준 성능기준으로 사용되는 값은 일반적으로 이용도(availability)와 신뢰도(reliability)이다. 그러나, SSC 특성상 기기 상태(condition)를 계열수준 성능기준으로 설정하는 경우도 있다.

- 계열 기준 성능기준 : 위험도에 미치는 영향이 큰 SSC에 대해서는 계열기준 성능기준을 설정하여야 하며 이 경우는 이용불능도 성능기준과 신뢰도 기준 성능기준을 모두 도출하여야 한다. 이는 발전소 운전 2주기 정도 동안의 고장이력을 검토하여 설정하거나, 운전 이력이 짧은 발전소에 대해서는 편의상 PSA에서 사용된 가정이나 유사 발전소의 운전이력을 참고로 하여 성능기준을 설정할 수도 있다.
- 발전소 전체를 대상으로 한 성능기준 : 위험도에 미치는 영향이 작은 SSC에 대해서는 발전소 전체를 대상으로 한 성능기준을 설정한다.

성능기준 설정시는 반드시 필요한 경우에만 SSC 기능 실패 허용 수 또는 이용불능도로 성능기준을 설정한다. 이 때 성능기준이 발전소의 안전에 큰 영향을 미치지 않도록 발전소의 안전에 미치는 영향을 고려하여 기준을 설정한다.

#### A. 이용불능도 성능기준 설정

과거에 발생했던 사건이 미래에 발생할 사건과 연관이 많을 것이라는 가정 하에, 최근 2주기 동안의 고장이력으로 정비 이용불능도를 평가하여 이용불능도 성능기준을 설정한다. 위험도에 미치는 영향이 큰 것으로 선정되는 각 계통기능에 대한 이용불능도 성능기준을 PSA에서 가정한 이용불능시간과 최근 2주기(정비규정 감시기간) 동안에 발견되는 단위 최대 이용불능 시간을 비교하여 결정한다. 이때, 최근 2주기 동안의 이용불능도는 간단히 기기의 이용불능시간 (Out of Service Time ; OOS Time)을 계산한 것이다. 최근 2주기 동안의 이용불능도 성능기준이 PSA에서 가정한 이용불능 시간보다 작으면 더 이상의 분석이 필요 없이 도출된 이용 불능도를 그대로 성능기준으로 사용하고, 이용불능도 성능기준이 PSA에서 사용한 이용불능시간보다 크면, 민감도 분석을 수행하여 노심손상 빈도에 미치는 영향을 파악하고 이 성능기준이 허용 가능한 지를 판단한다.

### B. 신뢰도 성능기준 설정

신뢰도 성능기준을 설정하기 위해 사용되는 방법은 다음의 세 가지 방법이 있다.

- 프로그램 감시기간 동안의 실제 실패율 계산
- 허용 가능한 기능 실패수 계산
- Bayesian Approach를 이용한 계산

최근 약 2주기 정도의 감시 기간 동안 운전자료를 수집하여 그 기간 동안의 실패율을 정하고, 이를 신뢰도 성능기준으로 정하는 방법을 사용한다. 허용가능 실패수 계산은 요구기준 및 시간기준 실패율을 동시에 고려할 수 있는 식 (III.1-1)의 Poisson 확률밀도함수식을 적용할 수 있다.

$$P(n) = \frac{(\lambda \times T)^n}{n!} e^{-\lambda T}$$

여기서,  $\lambda$ 는 기간기준 실패율, T는 작동시간, n은 요구기준 실패수이다. 식에서 P(n)이 5% 이상, 누적확률밀도함수값이 95% 이상인 n 값을 허용가능 실패수로 정의한다. 실패 추정치 합계가 상기 식의  $(\lambda \times T)$ 에 해당되며 이는 아래와 같이 계산할 수 있다.

$$(\lambda \times T) = \sum \{ (\text{기동요구 또는 시간당 고장률}) \times (\text{요구 또는 작동시간 추정치}) \times \text{총 계열수} \}$$

### C. 발전소 수준의 성능기준 설정

발전소 수준의 성능기준은 개별적인 성능기준을 설정하지 않는 모든 적용 대상에 적용된다. NUMARC 93-01[5]에서는 발전소 수준의 성능기준을 7000시간 동안에 예기치 않게 자동으로 발전소가 정지된 사건 수, 예기치 않게 출력(Capability)을 상실하는 사건 수 또는 예기치 않은 안전 계통의 작동 건수로 정할 것을 권고하고 있다. 또한, 이 외에도 규제기관이나 산업체가 인지하는 다른 사건 수로도 성능기준을 정할 수 있다.

또한 INPO 자료[6]에 의하면 발전소 성능기준을 아래와 같이 제시하고 있으며 본 평가에서는 이를 적용한다.

- ≤ 2 unplanned manual or automatic reactor trip per 2 yrs
- ≤ 2 unplanned safety system actuation per unit 2 yrs
- ≤ 4 unplanned power changed greater than 20% per unit 2 yrs
- ≤ 4% loss of capability(mega watts) unit per month

#### D. 성능기준 설정에 필요한 자료

각 해당 원전에 대한 이용불능도 및 신뢰도 성능기준 설정을 위해서는 해당 원전의 고장확률을 구하기 위해 각 기기별 정비이용 불능시간, 가동중 고장횟수, 기동시 기동 실패 횟수, 기기 작동시간, 기기작동 요구횟수 등의 자료와 PSA 고장확률에 대한 Generic data가 필요하다.

- 이용불능도 성능기준 평가 필요 자료
  - 기기별 PSA 차원의 이용불능도(10년간 이력)
  - 고리 3, 4호기 기기별 현장자료
    - 연간 정비이용 불능시간
    - 운전제한조건 관련 자료 : FSAR 16장 기술지침서
    - Out of Service 자료 : TR(작업 의뢰서), 발전과장 일지, 기기이력 관리대장, 기기시험 및 점검, 검사기록 등
- 신뢰도 성능기준 평가 필요 자료
  - PSA 고장률(generic data)
  - 고리 3, 4호기 기기별 현장자료
    - 기기별 요구 또는 작동요구 시간
    - Out of Service 자료 : TR(작업 의뢰서), 발전과장 일지, 기기이력 관리대장, 기기시험 및 점검, 검사기록 등

### 3. 고리3,4호기 잔열제거펌프 성능기준 평가

능동형기기 성능기준설정 평가방법을 고리3,4호기의 잔열제거펌프에 적용해 보았다.

FSAR Ch.5.4.7 등을 참조하여 잔열제거펌프의 기능분류 결과, 동 기기는 아래와 같은 기능을 부여하였다.

- 기능번호(BC-01) : 발전소 냉각시 원자로냉각재 온도를 저온정지 수준으로 낮추기 위하여 원자로냉각재의 열을 기기냉각수계통으로 전달
- 기능번호(BC-02) : 사고시 비상노심냉각계통의 부분 역할 위의 기능에 대하여 다음과 같은 안전기능 여부가 판단되었다.
  - BC-01 : 원자로 안전정지 유지
  - BC-02 : 소외 방사능 누출사고 방지 및 완화

다음으로 고리3,4호기 확률론적안전성평가평가 도출된 결과를 반영한 위험도평가 결과, 잔열제거펌프는 RRW(Risk Reduction Worth) 가 1.024 으로서 높은 주요도를 가진 기기이고, 대기중인(standby) 기기로서 고위험도(High Risk Significance) 기기로 분류되어 계열수준의 성능기준 수립대상으로 판명되었다. 성능기준 설정을 위한 기본데이터는 아래와 같다.

- 잔열제거펌프(A-P024/B-P025)의 고장확률(일반데이터 기준)
  - 요구시 기동실패 =  $2.0E-3/d$
  - 운전중 고장이  $2.5E-5/h$
- 잔열제거펌프는 연간 4회씩의 기동요구가 있고 연간 펌프 운전시간은 약 1시간으로 가정
- 하나의 계열에서 2년간 발생하는 고장회수를 추정결과
  - 기동실패:  $2.0E-3/demand * 4demand/대 \cdot 년 * 2년 * 1대 = 0.016$
  - 운전고장:  $2.5E-5/hour * 1hour/대 \cdot 년 * 2년 * 1대 = 0.00005$
- 기동실패와 운전중 고장을 포함하여 2년간 총 고장횟수 = 0.016회
- 포와슨분포를 이용한 2년간 0회, 1회, 2회 등 고장이 발생할 확률

|       |   | (%)   | (%)    |
|-------|---|-------|--------|
| 0.016 | 0 | 98.41 | 98.41  |
|       | 1 | 1.57  | 99.99  |
|       | 2 | 0.01  | 100.00 |
|       | 3 | 0.00  | 100.00 |
|       | 4 | 0.00  | 100.00 |
|       | 5 | 0.00  | 100.00 |

○ 누적발생확률이 95%이상인 경우에 해당하는 고장횟수 = 0회  
결론적으로 잔열제거펌프의 성능기준은 0회이므로 “2년간 기동실패와 운전중 고장의 발생은 허용되지 않는 것으로 평가되었다.

#### 4. 결 론

원자력발전소의 능동형기기 평가를 효과적으로 수행하기 위해서 확률론적 평가방법을 국내원전 능동형기기에 시범적으로 응용해 보았다. 능동형기기 성능기준 평가방법은 기존의 피동형기기 경년열화평가 방법과 병행하여 수행될 것이며, 기기의 특성을 감안한 주기적안전성평가의 효과적인 접근방법이 될 것이며, 원전의 안전성을 보다 실질적으로 평가 제고할 수 있는 도구(Tool)로서 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

#### 참고 자료

1. 10CFR 50.65, Requirement for Monitoring the Effectiveness of Maintenance at Nuclear Power Plants, U.S. Nuclear Regulatory Commission, 1991.
2. 10CFR54, The License Renewal Rule, 2001, 4.
3. NEI, NEI 95-10, “Industry Guidelines for Implementing the Requirements of 10CFR54 - The License Renewal Rule”, 2000.
4. NUMARC 93-01, Industry Guide for Monitoring the Effectiveness of Maintenance at Nuclear Power Plants. Rev. 1, Nuclear Management and Resource Council, 1993. 5.