

## 가동중 정비를 위한 Risk Monitor 개발

김길유, 한상훈, 김태운  
한국원자력연구소

### 1. 서론

미국에서는 모든 원전(원자력발전소)에서 확률론적 안전성 평가(PSA)를 실시하여 각 원전의 취약점 등을 파악하고 취약한 부분의 보강에 힘써 왔다. 근래에는 PSA나 개별원전평가(IPE)에서 구축한 각 원전의 PSA 모델, 즉, 고장수목(FT)이나 사건수목(ET)등을 원전의 운전, 정비, 규제 등에 활용하기 위한 연구 및 실제 활용이 활발하다. 우리나라는 확률론적 안전성 평가(PSA)를 고리 3,4호기, 영광 3,4호기 등 여러 원전에서 실시하여 가동중인 원전에서는 취약한 부분을 찾아내어 보완하였으며, 건설 중인 원전의 경우에는 설계 개선에 이바지 하여 왔다. 그러나 많이 기구축된 원전의 PSA 모델을 미국처럼 원전의 운전, 정비, 규제에 활용하여 원전의 경제성 및 안전성을 제고하려는 노력 및 연구는 미약하였다. 본 논문은 국내에서 취약한 PSA의 원전 운전 및 정비에의 활용으로서 risk monitor 개발 및 가동중 정비(on-line maintenance)에 관한 연구이다.

risk monitor는 원전의 기기 운영 상태 (= 기기 배열) 변경에 따른 원전의 안전성(또는 위험도)를 감시하는 시스템이다. 예를들면, 정비에 의해 어떤 펌프, 밸브 등이 이용 불가능하면 그만큼 원전의 위험도는 증가하게 되는데 얼마만큼 위험도가 증가하는지 보여 주는 시스템이 risk monitor이다. risk monitor는 약 10년 전부터 영국 Nuclear Electric의 ESSM (Essential Systems Status Monitor)[1]과 미국의 PRISIM[2]을 필두로 개발되기 시작하였으며 7년전에 우리 연구소에서도 Prototype인 PEPSI[3]를 개발한 바 있다. 그러나 risk monitor의 활용 및 필요성이 3년전까지도 그다지 심각하지 않았으나 최근 2,3년 사이에 미국에서는 가동중 정비시의 활용 및 규제요건에 의하여 많은 곳에서 설치되어 활용되기 시작했다. 한국원자력연구소에서도 2년 동안 Risk Monster라는 이름으로 risk monitor를 본격적으로 개발 하였으며 이에 관하여 다음 2절에 기술하였다.

가동중 정비는 연차보수 중에 하던 안전계통 예방 정비를 가동중 (= 출력 운전 중)에 실시하는 것으로 가동중 정비를 실시하면 연차보수 중의 정비업무가 줄어들어 연차보수 기간을 줄일 수가 있어서 경제적으로 막대한 이익을 볼 수 있다. 따라서 미국의 많은 원전에서는 기술 사양서(Technical Specification)를 위반하지 않는 범위에서 안전계통 기기의 가동중 정비를 실시하고 있다. 그러나 이러한 경제적

이득이 있는 가동중 정비를 실시 하기 전에 안전성을 검토하여야 하는데 기술 사양서를 위반하지 않고 가동중 정비를 실시할 지라도 안전성이 크게 우려 될 경우도 있기 때문이다.

국내 원전 기기 중 가동중 정비 기기를 선정할 때, 우선 고려 한 것이 현 기술사양서를 위반하지 않으면서 가동중 정비가 가능한 기기였으며 또 원전에서 가동중 정비의 필요성이 있는 기기였다. 본 논문에서는 필수냉각수 계통(ESW; Essential Service Water) 펌프 한대를 가동중 정비 기기로 선정하여 4절에서 ESW 펌프 한대를 수리중 일때도 원전을 계속 운전하는 것이 안전한 것인가를 검토하였으며 5절에서 ESW 펌프 한대의 가동중 정비 타당성을 계산하였다.

ESW 계통은 두개의 독립된 train으로 구성되어 있으며 원전 운전 중에 기기 냉각 계통(CCW)의 열 교환기에 바닷물을 공급하여 기기 냉각 계통의 열을 흡수하여 바다로 버리는 역할을 한다.

## 2. Risk Monster

한국원자력연구소에서 개발한 risk monitor인 Risk Monster는 크게 발전 운영용과 보수 계획용 으로 나뉘어 활용된다. 발전운영용 화면에서 '+' 기호를 선택하면 정비할 기기를 선택할 수가 있고, '-' 기호를 선택하면 기기가 정비되어 다시 활용할 수 있는 상태가 되었다는 것을 나타내며, 'CDF 평가계산' 단추를 선택하면 새로운 기기 배열을 고려한 새 CDF를 계산해준다. 그림 1의 보수계획용 화면은 3개의 칸으로 구분하여 첫째 칸은 보수작업별 스케줄이고 둘째칸은 그 보수작업에 따른 이용 불능 계통 또는 train을 표시해 주고, 셋째칸은 그 보수작업 스케줄에 따른 원전 위험도를 보여준다. 만일 어떤 기간에서 위험도가 기준치 보다 높게 나타나면 그 기간의 보수작업을 위험도가 낮게 나오는 기간으로 분산 배치 시키고자 하는 것이 Risk Monster의 보수계획시의 활용이다. 위험도 계산시 최소단절군(minimal cutset)을 구하는 프로그램으로는 KIRAP[4]을 이용하며, 위험도 계산 방법에는 1)구해 놓은 최소단절군 활용, 2) PSA모델 부터 재계산, 3) McFarm [5] 알고리즘 이용이 있다.

## 3. 안전성 기준

PSA 응용 지침을 미국 EPRI(Electric Power Research Institute)가 PSA Applications Guide [6] 로 제시 하였는데 이 지침서의 CDF(Core Damage Frequency, 노심손상빈도) 증가 허용 기준을 미국 규제기관인 NRC (Nuclear Regulatory Commission)에서 목인을 해주고 있기 때문에 미국 원전에서는 이 CDF 증가 허용 기준을 이용하여 가동중 정비

등을 실시하고 있다. 본 연구에서도 ESW 펌프의 가동중 정비 중의 안전성 여부를 이 지침서 기준을 따라 검토하였기 때문에 이를 간략히 소개하면 다음과 같다.

위해도 증가는 영구적 위해도 증가와 일시적 위해도 증가를 구분하여 각각의 허용 기준을 정하였으며 영구적 위해도 증가는 CDF 증가율을 기준으로 그림 2 처럼, 일시적 위해도 증가는 CDP (Core Damage Probability = CDF \* 기간 ; 노심손상확률) 증가치를 기준으로 그림3처럼 허용 범위를 정하고 있다.

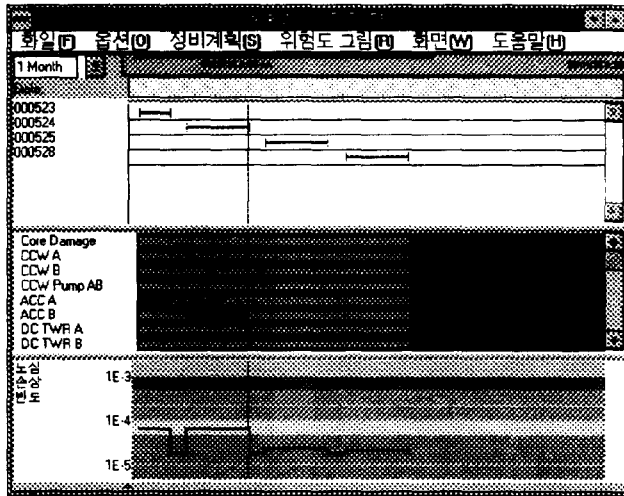


그림 1 보수계획용 화면

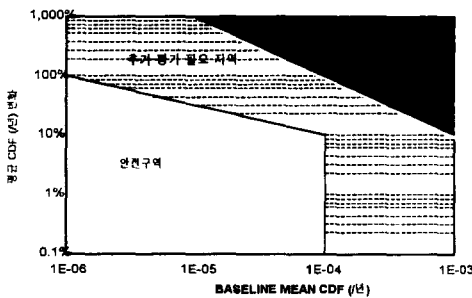


그림 2. 영구적 CDF 증가 허용 기준

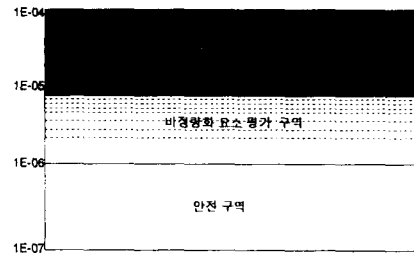


그림 3. 일시적 CDP 증가 허용 기준

#### 4. 계속 운전의 타당성 분석

이번 절에서는 울진 3,4 호기의 ESW 펌프 한대가 고장 수리 중임에도 불구하고 원전을 계속 운전함이 타당한가 또는 그 위험성이 얼마나 되나 살펴 본다.

기술 사양서에는 한 train이 이용 불능이고 나머지 한 train 만 이용 가능 할 경우 72시간 안에 이용 불능 train을 이용 가능하도록 해야 하고 그렇지 못할 경우 6 시간 안에 고온대기(Hot Standby) 상태로 그리고 30시간 안에 냉온정지(Cold Shutdown) 상태가 되도록 명시하고 있다. 그러나 한 train에 두개의 펌프가 있으므로 한 펌프가 고장 나더라도 그 train은 이용 가능 하므로 기술 사양서를 위반하지 않고 원전을 계속 운전 할 수는 있다.

한 ESW 펌프 고장으로 일시적 CDF가 증가하기 때문에 그림 3의 일시적 CDP 증가 허용 기준을 적용하여야 하므로 ESW 펌프 수리 기간 중 증가된 CDP를  $\Delta CDP$ 라고 하면

$$\Delta CDP = \Delta CDF \times \text{정비기간} = (2.5 \times 10^{-7} / \text{년}) \times \text{정비기간} \ll 1 \times 10^{-6}$$

여기서  $\Delta CDF$  는 다음 5절의 표 1에 계산된 값이다. 위 식에서 정비 기간이 1년을 넘지 않으므로 (보통 펌프 수리 기간이 길어 바야 7~14일 걸림) ESW 펌프 수리 기간 중의 CDP 증가분은 CDP 증가 허용치  $1 \times 10^{-6}$  보다 훨씬 작으므로 ESW 펌프 한대 고장에도 불구하고 원전 운전을 계속 해도 안전하다.

#### 5. On-Line Maintenance

ESW 펌프 한대의 가동중 정비를 실시하기 전에 안전성 측면과 경제성 측면을 검토하였다.

- 안전성 측면 검토

- 일시적 CDF 증가

ESW 펌프 한대를 가동중 정비를 하는 것도 그 ESW 펌프를 이용하지 못하므로 4절의 ESW 펌프 한대 수리의 경우와 마찬가지로 되어 일시적으로 CDF가 증가하게 되며, 그로 인한 일시적 CDP 증가가 안전성에 위험을 초래하지 않는다는 것을 4절에서 살펴 보았다. 즉, ESW 펌프한대를 가동중 정비하고 원전을 계속 가동해도 안전하고 기술 사양서를 위반하는 것이 아니다.

- 영구적 CDF 증가

주기적으로 항상 EWS 펌프를 가동중 정비할 경우 CDF가 일시적으로 변하는 것이라기 보다 영구적으로 변한 것으로도 생각할 수 있다. 따라서 그림 2의 영구적 CDF 증가 허용 기준을 이용하여 안전성에 위배되는지 살펴 보았다. 올진 3,4 호기의 경우 CDF가  $8.29 \times 10^{-6} / \text{yr}$  이므로 그림 2의 영구적 CDF 증가 허용 기준에 의하면 허용  $\Delta \text{CDF} = 2.879 \times 10^{-6} / \text{yr}$  (= 올진 3,4 호기 CDF의 34.73 %)이므로 올진 3,4호기의 CDF가 영구적으로  $1.12 \times 10^{-5}$  까지 커지는 것도 허용이 된다.

올진 3,4 호기에서 FT 방법론을 이용하여 계산하면 Loss of a Component Cooling Water (LOCCW) 빈도는 0.153/yr 로 계산되었다. ESW계통의 train A 에서 하나의 펌프를 가동중 정비할 경우, 하나의 펌프가 이용불능 됨은 물론, LOCCW 빈도가 커지게 된다. ESW계통 트레인 A 에서 하나의 펌프가 이용불능 되면 LOCCW 빈도가 0.153/yr 에서 0.432/yr 로 약 3배정도 증가하게 되어, LOCCW 로 인한 CDF 도 약 3배로 커진다. 그러나 전체 CDF 에 대해서는 약 3% 정도 증가한다. 즉, ESW 펌프 한대의 가동중 정비에 의한 CDF 변화를 보면 가동중 정비하기 전의 CDF  $8.29 \times 10^{-6} / \text{yr}$  가  $8.54 \times 10^{-6} / \text{yr}$  으로 약 3% 증가 한다. 따라서  $\Delta \text{CDF}$  허용치 34.73 % 보다 적게 증가하므로 ESW 펌프 한대의 가동중 정비에 의해 영구적으로 CDF가 증가하더라도 안전하다. EWS 펌프 한대의 가동중 정비에 의한 영구적 CDF 증가 계산 결과를 표 1에 요약하였다.

● 경제성 측면 검토

ESW 펌프 한대를 가동중 정비하면 LOCCW에 의한 reactor trip 빈도가 0.153 /yr 에서 0.432 /yr 로 0.28/yr 증가한다 (표 1 참조). 기술사양서에서는 비록 이용불능 ESW train을 72시간 안에 이용 가능하게 한다면 shutdown 하지 않아도 된다고 하지만 ESW 한 train이 이용불능하면 원자로 냉각펌프 (Reactor Coolant Pump) seal 등이 냉각되지 않기 때문에 trip된다고 가정했다. 따라서 일부 분해 점검 등을 포함한 가동중 점검을 1년에 14일 동안 실시한다고 가정하면

$$\Delta \text{LOCCW에 의한 연간 reactor trip 발생 수} = 0.28/\text{yr} \times 2\text{주} = 0.011$$

즉, LOCCW에 의한 reactor trip이 1년에 0.011 번 더 일어 나게된다. 보통 원전의 불시정지는 1년에 한번 일어난다고 가정하면 1년에 0.011번 더 일어나는 결과는 미미한 것으로 판단된다. 한편, 가동중 정비 실시로 이득을 보는 부분은 재장전 기간중에 실시하던 정비기간이 단축되는 것이고 그 밖에 정비 인력이 재장전 기간 중에 과도하게 집중되는 것을 줄일 수 있는 정비인력 효율적 사용

효과가 있다. 따라서 ESW 펌프 한대의 가동중 정비의 경제성 평가는 더 검토가 필요하나 상당한 경제성이 있는 것으로 판단된다.

표 1 가동중 정비에 의한 CDF 변화

	Normal	One ESW Pump OOS
LOCCW Frequency	0.153 / yr	0.432 / yr
CDF due to LOCCW	9.72e-8 / yr	3.11e-7 / yr
CDF	8.29e-6 / yr	8.54e-6 / yr
CDF Increase (%)		2.5e-7 / yr (3%)

## 6. 결론

PSA 결과의 원전 운전, 정비 및 규제 응용 연구의 일환으로 Risk Monster라는 risk monitor를 개발하였으며 이를 이용하여 울진 3.4 호기의 ESW 펌프 한대의 가동중 정비의 타당성을 연구 하였다. 그 결과 안전성 면에서는 위험하지 않았으며 경제성 여부는 더 검토 해야 하나, 상당한 경제성이 있는 것으로 판단된다. 또, ESW 펌프 한대의 수리 중에도 원전을 계속 운전 하는 것은 기술사양서를 위반하는 것이 아니고 안전성에도 문제가 없다. 이러한 원전의 risk monitor 기술은 화학 설비 등 비원전 설비에서도 기기 배열에 따른 위험도를 감시할 수 있으므로 비원전 설비의 안전성 제고에 활용 할 수 있다.

## 7. 참고문헌

- [1] B.E.Horne, "Introduction of Probabilistic Evaluations Into the Operation of CEGB NPP Using ESSM Facility", ANS/END, Inter. Topic Meeting on PSA and Risk Management, Zurich, Switzerland, Sept. 1987
- [2] J.Q. Kirman, et al, "PRISIM at Arkansas Nuclear One-Unit, Daily in Plant Use of PRA Information", Reliability Engineering and System Safety, Vol. 22, 1988
- [3] S.C. Chang, et al., "Development of Dynamic PSA Tool (PEPSI) for the Risk Management of NPP", IAEA TCM on Numerical Safety Indicator, Vienna, Austria, Nov. 1990.
- [4] S.H.Han, et al, "KIRAP Release 2.0 User's Manual", KAERI/TR-361/93, 1993
- [5] Kilyoo Kim, et al., " A Missing Cutsets Finding Algorithm for Risk Monitor(McFarm)", PSA '96, Set. 29 - Oct 3, 1996, Park City, Utah, USA
- [6] EPRI " PSA Applications Guide" EPRI-TR-105396, Aug. 1995