

위험도 감시의 개발 및 활용에 대한 규제요건 연구

A Study on the Regulatory Requirements for the Development and Applications of Risk Monitoring

김민철, 성계용, 이창주

한국원자력안전기술원
대전광역시 유성구 구성동 19

요 약

2001년 발표된 원자력발전소에 대한 중대사고 정책에 따라 원전 사업자인 한수원에서는 위험도 감시 이행을 포함한 중대사고정책 이행계획을 마련·시행하고 있다. 위험도 감시 이용의 주목적은 발전소 안전성 확보를 위하여 발전소 배열을 관리하는 것이다. 위험도 감시의 국내도입에 따라 PSA 모델 개발, 발전소 배열에 따른 위험도의 관리 등 위험도 감시와 관련된 적절한 규제요건이 개발되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 국내·외 문헌들을 조사하여 위험도 감시의 도입에 따른 기본 규제 요건들을 도출하였다.

Abstract

Korea Hydro-Nuclear Power Co. is developing the Risk Monitoring System(RMS) as one of the implementation program for the Severe Accident Management Plan which was published by the regulatory body in 2001. The main objective of the RMS is to control the plant configuration for the improvement of operational safety. The regulatory requirements related to the RMS have to be developed before the application of the RMS to the domestic nuclear power plants. In this study, the basic regulatory requirements on the RMS have been developed through the survey of literature regarding risk monitoring.

1. 서론

1.1 배경

전세계적으로 확률론적안전성평가(Probabilistic Safety Assessment, PSA) 방법

및 결과를 원자력발전소 운영 및 안전규제에 적용하기 위한 노력은 꾸준히 진행되고 있다. 이러한 개념의 변화는 국내 원전 운영 및 안전규제 방법론에 영향을 끼쳤으며, 이러한 분위기에서 중대사고정책에 대한 논의가 진행되었다.

중대사고정책에 대한 규제기관과 사업자간의 협의를 거쳐 확률론적안전성평가 방법 및 결과를 원자력발전소 안전운영과 안전규제에의 적용을 점차 확대해 나간다는 동의가 이루어졌으며, 이 일환으로 사업자는 중대사고정책 이행 계획에서 위험도 감시의 이행을 명시하였다.

하지만 PSA에서 평가되는 노심손상빈도(Core Damage Frequency, CDF)는 평균 위험도 값이기 때문에 기기·계열·계통들이 시험 또는 정비를 위해 분리되었을 때는 위험도가 크게 증가하고 운영기술지침서만으로는 발전소 배열 관리(Plant Configuration Control)를 수행하기 어렵다는 연구결과[1]와 같이 발전소 배열 관리를 위해서는 기존의 PSA를 그대로 활용할 수 없을 뿐만 아니라 위험도 감시와 같은 발전소 배열 관리 방법이 필요하다. 또한 현재까지 발전소 배열 관리를 위한 구체적인 방법과 요건이 마련되지 않은 상태이다. 따라서 발전소 배열 관리를 위한 위험도 감시의 도입과 관련하여 이를 위한 PSA 모델 개발, 발전소 배열에 따른 위험도의 관리 등 적절한 요건이 개발되어야 한다.

이와 같은 내용에 대하여 합리적이고 객관성 있는 요건을 개발하기 위해서 국내·외 문헌들을 조사하여 위험도 감시의 도입에 따른 기본 요건들을 도출하고자 하였다.

1.2 연구수행 방법

본 연구의 목적인 위험도 감시의 기본요건들을 도출하기 위해서는 위험도 감시를 어떤 분야에 활용할 것인가를 결정하여야 한다. 활용분야에 따라서 그와 상응하는 요건들이 개발되어질 것이다. 이와 같은 기본 개념을 바탕으로 본 연구에서는 그림 1에 나타낸 바와 같이 위험도 감시의 국내 적용 근거를 분석하여 국내 도입의 기본 목적과 기본 방향을 도출하고, 이를 바탕으로 위험도 감시의 활용 및 연계 분야를 도출하였다. 마지막으로 도출된 위험도 감시의 활용분야에 따른 기본요건들을 도출하였다.

2. 위험도 감시 국내적용 기본방향

위험도 감시에 대한 규제요건 도출을 위해서는 위험도 감시를 어떠한 분야에 활용할 것인지를 분명하게 할 필요가 있다. 위험도 감시에 대한 IAEA의 정의[2]에서도 알 수 있듯이(발전소 상태변화에 따른 위험도를 실시간으로 분석할 수 있는 위험도 감시 프로그램을 이용하여 운전 중에 있어서의 의사결정 수단으로 사용할 수 있

음) 활용 가능한 분야는 매우 많다. 그만큼 규제요건의 범위도 넓어질 수밖에 없다. 그러나 현 국내상황을 고려하였을 때 구체적으로 활용 분야를 명시할 수는 없다. 따라서 위험도 감시의 현 상황을 고려하여 대략적인 기본 목적 및 기본 방향을 설정하고, 그것을 기반으로 활용분야를 도출코자 한다.



그림 1. 위험도 감시 기본요건 개발을 위한 연구수행 방법

위험도 감시 프로그램을 개발하려는 동기는 기본적으로 PSA를 이용하여 원자력 발전소의 운전안전성을 실시간으로 관리하기 위한 정보 제공 수단을 보유하고자 하는 개념이 바탕이 되고 있다.[3] 이러한 개념은 위험도감시에 대한 IAEA의 정의에서 잘 나타나고 있는데, 다음 세가지로 요약할 수 있다: 1) a plant specific real-time analysis tool, 2) based on the actual status, 3) used by the plant staff in support of operational decisions. 시각을 활용측면으로 돌려 다시 살펴보면, 위험도 감시는 발전소 상태변화에 따른 위험도를 실시간으로 분석할 수 있고, 이를 바탕으로 운전 중에 있어서의 의사결정 수단으로 사용할 수 있음이 IAEA 정의에 내포되어 있다.

미국 NRC는 가동중 원전에 대한 위험도 감시를 정비규정(Maintenance Rule)[4]에서 포괄적으로 명시하고 있다. 현재 구체적인 위험도 감시에 대한 요건을 도출하고 있지는 못하지만 위험도 평가 및 관리에 대해 명확히 규제하고 있기 때문에 자연스럽게 사업자들은 이에 대한 이행을 위해 위험도 감시 프로그램을 개발·이행하

고 있다.

국내에서는 2001년 “원자력발전소 중대사고 정책”[5]을 발효하면서, 위험도 감시에 대하여 언급은 하였지만, 미국 NRC와 같이 명확히 규제하고 있지 않고 위험도 감시에 대한 정의만을 명시하고 있다. 하지만 중대사고 정책에 대한 사업자와의 협의과정에서 원전의 위험도를 가능한 한 낮출 수 있는 방안을 찾기 위해 PSA 결과의 확대적용에 대한 많은 논의가 있었고, 그 일환으로 위험도 감시 프로그램의 이행에 대해 규제기관과 사업자와의 협의가 이루어졌다.

그러나, 미국과는 다르게 위험도 감시를 위한 PSA 모델과 운영체제의 설치, 관련 지침 마련 등 활용보다는 체제 마련에 초점이 맞추어져 있다. 이에 따라 사업자인 한수원(주)에서도 PSA 및 위험도 감시의 이행 등에만 국한하여 “원자력발전소 중대사고 정책에 따른 확률론적안전성평가 수행 등 세부 수행계획”을 수립하였다.[5]

현재 사업자는 중대사고 정책에 명시된 위험도 감시에 대한 정의 및 협의 내용을 바탕으로 발전소 계통이나 부품의 상태 변화에 따라 실제 운전상황에 따른 순간적인 발전소 위험도를 계산하고 이를 예측, 평가, 감시할 수 있는 위험도 감시 프로그램을 개발중에 있다.

표 1. 위험도 감시 도입의 기본 목적 및 기본방향

구 분	내 용
기본 목적	원전의 위험도를 확률론적인 방법으로 평가
기본 방향	실제 운전상황에 따른 위험도를 예측, 평가, 감시

이러한 상황을 고려할 때 표 1에 정리한 것처럼 위험도 감시의 기본 목적은 원전의 위험도를 확률론적인 방법으로 평가할 수 있는 수단 확보라 할 수 있고, 이를 추진하기 위한 기본방향은 계통 및 기기 등의 상태 등 실제 운전상황(발전소 배열, Plant Configuration)에 따른 위험도를 예측, 평가, 감시라 둘 수 있다.

3. 위험도 감시의 활용 및 연계

3.1 위험도 감시의 활용

발전소 배열(Plant Configuration)에 있어서 전통적인 결정론적 원칙에 확률론적 원칙을 추가하려는 추세에 따라 많은 국가에서 위험도 감시 프로그램을 설치·활용 또는 활용하려 하고 있다. 이러한 위험도 감시의 활용분야는 다음과 같다[7].

- 1) on-line use: 발전소 배열(configuration)에 따른 위험도(risk) 감시(monitor) 및 관리(control)

- 2) maintenance planning: 보수에 따른 위험도의 집중을 방지하기 위한 보수계획 최적화
- 3) off-line uses: 주기적으로 위험도 분포(risk profile)를 생산하여 발전소를 관리하고, 위험도를 추적하여 위험도 집중의 재발 방지, 기기 고장으로 인해 야기되는 사건의 분석
- 4) use as a PSA tool: PSA 기반 사건분석, 위험도 정보에 활용
- 5) training aid: 보수 등의 행위가 어떻게 발전소에 영향을 끼치는지를 명확하게 보여주기 때문에 훈련에 사용될 수 있음. 또한 안전문화를 증진시킬 수 있음

중대사고정책 내용과 그간의 사업자와의 협의과정에서 위험도 감시의 주목적 및 방향은 발전소 배열에 따른 위험도의 예측, 평가, 감시임을 앞서 설명하였다. 이러한 국내적용 목적 및 방향을 토대로 활용분야를 살펴보았을 때, 위 다섯 가지 항목 중에 상위 세 가지가 해당된다 할 수 있다. 물론 향후 네 번째와 다섯 번째의 활용 분야에도 관심을 갖고 추진해야 하지만, 본 연구에서는 제외하였다.

● 보수계획에 활용

발전소의 안전한 운전을 위하여 한 주기 동안의 보수계획 수립시 위험도 감시를 사용하여 보수에 따른 위험도의 집중을 방지하고 전체적인 위험도를 높지 않게 분산시키는데 사용 가능하다. 발전소 가동중 실시간 배열 제어의 효율성 및 효과성을 높이기 위해, 예방정비기간 중에 위험도 감시를 이용하여 차주기 보수계획을 수립할 수 있다. 이 때, 위험도 집중이 발생할 수 있는 상황을 제거하고, 전체적인 위험도 분포를 낮게 유지하며, 사전에 주요 보수작업시의 중요기기를 선별한다.

● on-line 사용

발전소 운전 중에는 보수계획 수립시 예상하지 못했던 상황이 발생할 수 있다. 특정 기기의 성능 저하로 계획에 없던 보수의 수행, 계획되어 있지만 상황에 따라 미리 또는 지연 실시 등의 내부환경의 변화와 태풍 또는 지락과 같은 발생가능한 외부환경의 변화에 따라 발전소의 위험도는 변화하게 되고, 이러한 상황을 고려하여 실시간으로 발전소의 위험도를 예측, 평가, 감시하는데 이용할 수 있다.

● off-line 사용

위험도의 집중을 방지하여 한 주기 동안의 보수계획을 수립하였으나 내부환경과 외부환경의 변화에 따라 예상치 못한 위험도의 집중이 발생할 수 있다. 따라서 이러한 위험도를 추적하여 위험도 집중 발생원인을 밝혀내고 재발을 방지하기 위한 대책을 수립하는데 활용할 수 있다. off-line에서 분석한 위험도 집중 원인은 재발 방지 차원에서 on-line과 보수계획에서 재 활용될 수 있다.

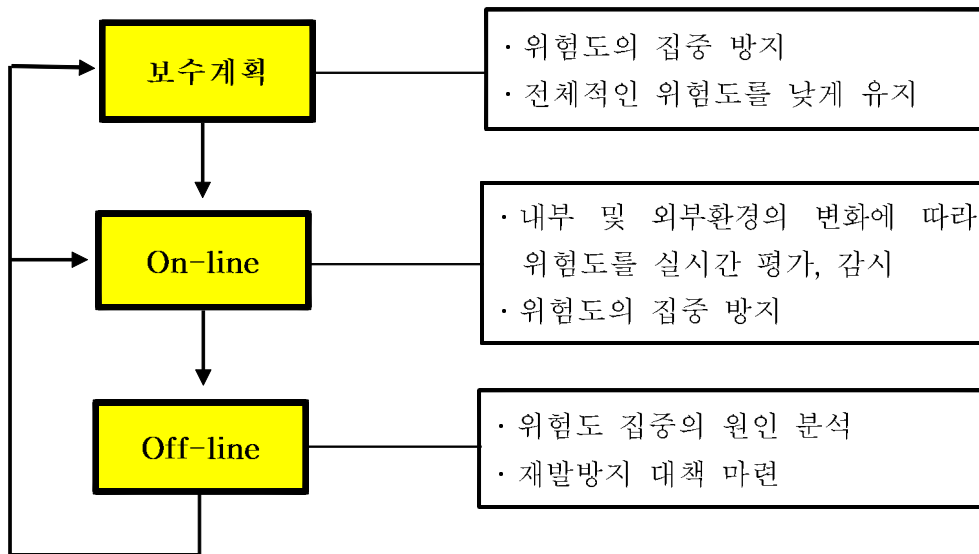


그림 2. 위험도 감시의 활용

그림 2에 이러한 위험도 감시의 활용을 나타내었다. 그림 2에서는 보수계획, on-line 사용, off-line 사용을 순차적으로 나타내었지만, 보수계획과 off-line 사용은 on-line 사용에 집중되어질 것이며 보수계획 및 off-line 사용의 결과는 on-line 사용에서 반영될 것이다.

3.2 위험도 감시의 연계분야

위험도 정보 규제 및 적용(Risk-Informed regulation & application)의 한 분야인 위험도 감시의 이행은 기본적으로 발전소의 위험도를 정량적으로 평가하여 그 결과를 발전소의 안전한 운전에 활용하려 하는 체제로써, 그 활용의 목적으로 인해 발전소 배열 제어, 위험도의 정량화, 기존 PSA 모델의 활용 등과 연관이 있기 때문에 위험도 감시 이외의 위험도 정보 규제 및 적용 체제와 연계되어질 수 있고, 기존의 결정론적 원칙에 따른 체제와 중복 또는 연계되어질 수 있다. 표 5에 위험도 감시 체제 이행에 따라 연계 또는 중복 될 수 있는 분야를 정리하였다. 이에 대해서는 다음 절에서 자세하게 설명하였다.

4. 위험도 감시 개발 및 활용시 요구조건 분석

4.1 보수계획 수립

그림 2와 같이 첫 번째 활용분야는 위험도의 집중을 방지한 한 주기 동안의 ‘보수

계획 수립'이다. 위험도 감시 도입 기본 목적 및 방향을 고려하였을 때, 이를 위해서는 다음 세가지 기본요건이 충족되어야 할 것이다: 1) 실제 운전상황 반영, 2) 위험도 평가, 3) 위험도 예측

보수계획 수립시 위험도 감시를 활용하는 것은 발전소 운전중(on-line) 사용에 초점을 맞추어야 할 것이다. 즉, 발전소 운전에 앞서 계획된 보수에 따른 위험도를 전체적으로 평가하고 그 결과를 이용하여 위험도 집중을 미연에 방지하고 보수에 의한 전체적인 위험도를 낮추는 방향으로 보수계획을 수정하며, 발전소 운전중 평가에 필요한 정보들을 사전에 도출하는 것이다.

따라서 내·외부 환경 등 실제 운전상황을 반영한 PSA 모델을 사용하여야 한다. 이러한 위험도 감시를 위한 PSA 모델을 개발할 때, 반영할 기기 및 계통 등의 범위를 결정하여야 하는데, 이는 평균 위험도 개념의 PSA 모델을 순간적인 위험도 개념으로 바뀌어야 하기 때문이다. 평균위험도 개념에서는 중요하지 않으며 고려대상에 포함되지 않은 기기 및 계통이 특정 발전소 배열에서는 발전소 안전에 무시하지 못할 정도의 영향을 끼칠 수 있다. 따라서 순간위험도 평가를 위해서는 기존의 PSA 모델에서 제외되었던 기기 및 계통들에 대한 재평가가 필요하다.

개발된 모델을 이용하여 계획하고자 하는 보수에 따라 위험도를 평가하여야 한다. 평가된 위험도가 특정 기간동안에 집중될 경우에는 계획을 변경하여야 할 것이다. 이를 위해서는 평가를 위한 기준이 필요하며, 심층방어(defense-in-depth) 등 결정론적 원칙과의 관계 역시 고려되어야 한다. 그리고, 실제 발전소 운전중에 어떠한 사건 또는 사고가 발생할지 모르며 예상치 못한 정비가 발생할 수 있기 때문에 주요 정비기간(상대적으로 위험도가 높게 평가된 정비기간) 동안에 상대적으로 발전소 안전에 미치는 영향이 큰 계통 및 기기에 대한 정보를 제공하는 등의 위험도 예측이 필요하다. 앞서 설명한 바와 같이 이러한 일련의 모든 조치 및 그에 따른 요건들은 다음에 설명할 on-line 사용을 전제로 고려되어야 한다.

4.2 on-line 사용

그림 2에 나타내었듯이 두 번째 활용분야는 발전소 가동중 배열에 따른 위험도 감시(monitor) 및 관리(control)를 위한 'on-line 사용'이다. 앞서 설정한 국내 위험도 감시의 기본 목적과 방향에 따라 이를 위해서는 표 2에 나타내었듯이 다음 네가지 기본요건이 충족되어야 할 것이다: 1) 실제 운전상황 반영, 2) 위험도 평가, 3) 위험도 예측, 4) 위험도 감시.

전 세계적으로 위험도 감시를 사용하려는 이유는 발전소 가동중 실시간 위험도 평가라 할 수 있다. 즉, 여타 다른 활용분야들 보다 on-line 사용에 보다 더 많은 관심을 갖고 살펴보아야 한다는 것을 의미한다고 할 수 있다. 그동안 운전중 발전소의 안전성 보장을 위해 안전계통의 다양성 및 다중성 확보 등 심층방어 개념을

포함한 결정론적 원칙을 적용하여 왔다. 이에 따라 기본적으로는 발전소의 안전성을 확보할 수 있었다. 그럼에도 불구하고 운전중 정비, 약천후 등 내·외부 환경의 변화는 발전소 안전에 영향을 끼칠 수가 있으며 경우에 따라서 사고로 확대되어질 수도 있다. 이러한 내·외부 환경 변화가 발전소에 얼마만한 영향을 미치는 가를 정량적으로 평가할 수 있는 분석도구로써 위험도 감시가 활용될 수 있다. 이를 위해서는 다음과 같은 요소들이 만족되어야 할 것이다.

표 2. 위험도 감시 활용분야별 필요요건

활용분야	목 적	기 본 요 소 ¹⁾	상 세 요 소
보수계획	위험도의 집중을 방지한 한 주기 동안의 보수계획 수립	· 실제 운전상황 반영	· 기기·계통 등 적용범위 설정 · PSA 모델 변경
		· 위험도 평가	· 위험도기준 설정 · 결정론적 원칙과의 관계
		· 위험도 예측	· 정비기간별 중요기기에 대한 정보 제공
on-line 사용	발전소배열에 따른 위험도 감시(monitor) 및 관리(control)	· 실제 운전상황 반영	· 기기·계통 등 적용범위 설정 · PSA 모델 변경
		· 위험도 평가	· PSA 비전문가의 사용 가능 · 위험도관리방안 마련 → 위험도기준 설정 → 보수전 위험도 평가·예측 → 기준초과시 위험도집중 방지 방안
		· 위험도 예측	· PSA 비전문가의 사용 가능 · 내부 및 외부환경 변화 및 보수수행전 위험도 평가 가능 · 정비기간별 중요기기에 대한 정보 제공
		· 위험도 감시	· 실시간 운영 · 결정론적 원칙 (defense-in-depth)과의 관계
off-line 사용	위험도집중의 발생원인 분석, 재발방지 대책 마련	· 실제 운전상황 반영	· 기기·계통 등 적용범위 설정 · PSA 모델 변경 · 실제 운전상황을 제대로 반영하였는지에 대한 재평가 가능
		· 위험도 평가	· 위험도분포 검토 주기 설정 · 사건분석을 포함한 위험도 집중의 원인 분석 / 결과의 재활용 체계 수립

1) 위험도 감시 국내도입의 기본목적 및 기본방향 측면에서 각 활용분야별 분석한 필요요소

1) 실제 운전상황 반영

운전중 발전소의 안전성을 평가하려는 시점의 내·외부 환경을 정확하게 반영한 PSA 모델을 사용하여야만 발전소의 상태를 제대로 평가할 수 있고, 그 결과를 이용하여 결정론적 접근방법과 함께 발전소 안전성 확보를 위한 의사결정 수단으로 활용 가능하다.

이를 위해서는 기기 및 계통 등에 대한 적용범위를 재평가하고, 이들을 포함하며 발전소 내·외부 환경의 변화를 정확하게 반영할 수 있는 PSA 모델이 필요하다. 이는 위험도 감시에 있어서 가장 기본적인 요건이라 할 수 있다.

기존의 PSA에서는 연간 평균위험도의 관점에서 기여도가 작거나 분리해서 자세하게 평가하지 않아도 영향이 작은 기기 및 계통, 초기사건들을 여러 가정들을 통해 분석에서 제외하거나 그룹화하여 분석하고 있다. 그러나 그러한 것들 중에는 발전소 배열에 따른 순간위험도에 많은 영향을 끼치는 것들이 있을 수 있다. 발전소 배열에 따른 순간위험도를 평가하는 위험도 감시 PSA에서는 이러한 기존의 PSA에서 정의한 가정들을 재평가하고 순간위험도에 영향이 있을 경우에는 이를 위험도 감시 PSA 모델에 반영하여야 한다.

위험도 감시 PSA에서는 평가 목적이 연간 평균에서 순간 위험도로 전환되어야 하므로 기존의 PSA와는 다른 가정을 세워야 한다. 이러한 가정은 기존의 PSA와 유사한 메카니즘으로 순간 위험도 평가를 위해 불필요하거나 기여도가 작은 요소들을 제외 또는 그룹화하여야 할 것이다.

예를 들어 울진 5,6호기에 대한 PSA 분석시 “원자로 냉각재계통 저온관 파단은 원자로냉각재계통 1A내 원자로냉각재펌프 하단에서 일어나며, 이 루프를 통한 안전주입유량은 노심내에 도달하기 전에 파단부위를 통해 빠져나간다”와 같이 가정하고 있다.[8] 이러한 모델링은 냉각재상실사고(Loss of Coolant Accident)에 대해 특정 계열은 항상 안전주입이 되지 않는 것으로 모델링되며, 해당 계열의 정비에 따른 순간 위험도 평가는 제대로 수행되지 않게 된다. 또한 다른 계열의 정비시에도 정확한 평가는 불가능하게 된다. 따라서 위험도 감시를 위한 PSA 모델을 개발할 때는 이러한 부분에 대해 정확하게 모델링해야 한다.

기존의 PSA 모델을 이용하여 실제 운전상황을 반영한 위험도 감시 PSA 모델을 개발하기 위해서는 표 3과 같이 기존 PSA의 가정에 대한 검토, 중요도분석을 이용한 검토, 기본사건에 대한 검토가 수행되어야 할 것이다.

2) 위험도 평가

실제 운전상황이 반영된 PSA 모델을 활용한 위험도 감시 프로그램은 발전소 배열에 따라 실시간으로 순간 위험도를 평가하여야 한다. 이러한 평가를 위해서는 표 2에 명시한 것처럼 다음 두가지 요소를 고려하여야 할 것이다: 1) 실시간 위험도 감

시 프로그램의 이용은 PSA 전문가가 아닌 발전소 운전원이 사용가능 해야함, 2) 위험도 기준 설정 등 위험도 관리방안이 마련되어야 함.

표 3. 위험도 감시 PSA 모델에서 실제 운전상황 반영시 고려사항

구 분	내 용
가정에 대한 검토	높은 신뢰도, 안전기능 수행 방법의 다양성 등으로 인해 제외되거나 그룹화된 사항 재검토
중요도분석을 이용한 검토	년간 평균위험도 개념의 중요도 우선순위와 정비기간별 순간 위험도 개념의 중요도 우선순위와의 비교를 통한 재검토
기본사건에 대한 검토	정비수행 수준(level)에 대한 확인을 통해 기본사건에 대한 확장여부 재검토 공통원인고장, 인간오류 등 발전소 실제상황에 민감한 기본사건 재검토

발전소 운전 중 위험도 감시 프로그램은 자원을 고려하여 PSA 전문가가 아닌 운전원이 사용하게 된다. 즉, 발전소 순간위험도 평가시 PSA 전문가가 아닌 운전원이 사용 가능하도록 개발되어야 한다. PSA 전문가가 아닌 발전소 운전원이 사용가능 하려면, 기기·계통 등 발전소 정보에 대한 입력 및 결과 표현이 PSA 전문용어가 아닌 운전원에게 친숙한 실제 용어를 사용되어야 할 것이다.[3]

앞서 설명한 것처럼 위험도 감시를 활용한 ‘보수계획’(위험도 집중을 미연에 방지)에 따라 발전소 운전 중 특이한 상황이 발생하지 않은 경우에는 위험도 관점에서 발전소를 안전하게 유지할 수 있으나, 기기의 예상하지 못한 성능저하로 인한 기기·계통의 고장과 사건 발생 등 발전소 운전 중에는 계획하지 않았던 일들이 다수 발생한다. 위험도 감시 PSA 모델이 실제 운전상황을 제대로 반영하고 있다면, 이와 같은 예상치 못한 상황에 따른 발전소의 순간 위험도는 정확하게 평가될 것이며, 정량적으로 평가된 위험도는 다시 발전소가 어떠한 상태에 있다라고 재해석되어야 하는데, 이 때 필요한 것이 위험도 평가 기준이다. 참고문헌[3]을 보면 아래 그림 3과 같이 위험도 평가 기준과 설정치를 네가지 영역으로 나누고 있다.

여기에서 ‘Average CDF’는 기존의 PSA를 이용하여 평가된 CDF 값을 의미하며, ‘Baseline CDF’는 위험도 감시에서 고려되는 모든 기기들이 정상운전이 가능하다는 가정하에 평가된 CDF 값을 의미한다.

발전소 운전 중에 위험도 감시를 활용하고 그 결과를 이용하여 발전소 안전성 확보에 사용하려면 위에서 설명한 것과 같은 일련의 위험도 관리 방안을 마련해야 할 것이다.

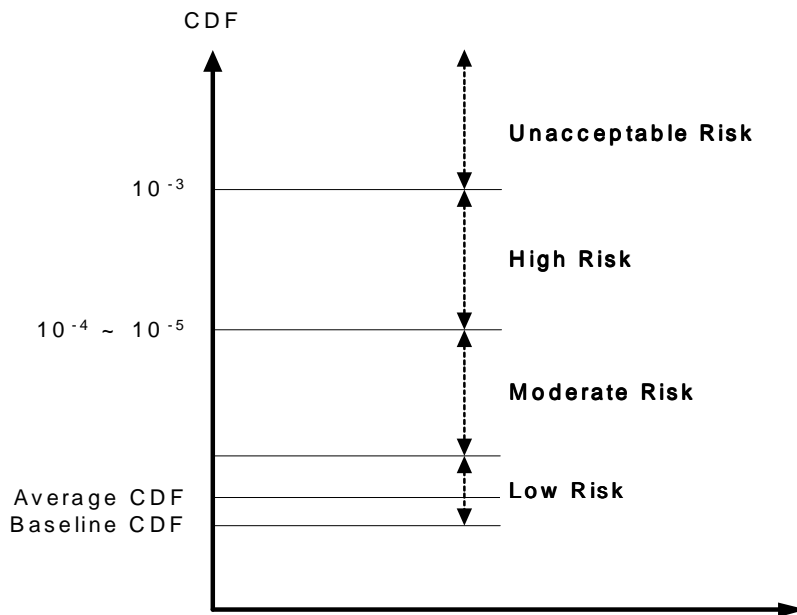


그림 3. 위험도 감시 기준 설정치[3]

3) 위험도 예측

발전소 배열에 따른 실제 발전소 상황을 반영한 PSA 모델을 이용하여 발전소의 순간위험도를 평가하는 것과 동시에 발전소의 안전성 확보를 위해서는 해당 발전소 상황에서 운전원이 가장 주의깊게 살펴보아야 하는 기기·계통에 대한 정보와 보수 중인 기기·계통들 중에서 발전소 안전성 관점에서 유사시 가장 빠르게 복귀시켜야 하는 기기·계통들에 대한 정보를 제공할 수 있어야 한다. 이는 예상하지 못한 상황이 발생했을 때 발전소를 보다 안전한 방향으로 유도하기 위한 운전원의 조치 방안을 결정하는 데 도움을 줄 수 있기 때문이다.

발전소 안전성 관점에서 상황에 따른 중요한 기기·계통에 대한 정보를 제공하는 것은 바꾸어 설명하면 이상상황시 해당 기기·계통의 운전가능성을 확보해야 한다는 것을 의미하며, 또한 해당 기기·계통의 운전이 불가능할 경우 발전소의 위험도는 크게 증가한다는 것을 의미하므로 위와 같은 일련의 요건들을 위험도 예측을 위한 요건이라 할 수 있다.

위험도 예측을 위해 위험도 감시 프로그램은 표 2에 나타내었듯이 발전소 운전원이 용이하게 사용할 수 있어야 하며, 발전소가 특정 배열상태로 전환되기 전에 관련 배열에 따른 순간위험도를 미리 평가하여 발전소 배열에 따른 중요 기기·계통에 대한 정보를 제공할 수 있어야 한다.

4) 위험도 감시

위에서 설명한 위험도의 평가와 예측을 가능하게 하기 위해서는 실시간으로 위험도를 감시할 수 있어야 할 것이다. 또한 발전소 배열에 대한 관리(control)는 확률론적 원칙으로만 수행되는 것이 아니므로 기술지침서(Technical Specification)와 같은 결정론적 원칙을 이용한 관리기법을 동시에 사용하여야만 한다. 따라서 위험도 감시에 대한 상세요건은 표 3에 나타난 것처럼 실시간으로 평가할 수 있어야 하며, 결정론적 원칙과의 관계 및 정보를 제공할 수 있어야 하는 것이라 할 수 있다.

4.3 off-line 사용

그림 2와 같이 세 번째 활용분야는 발전소 운전 중 발생한 위험도집중의 원인과 보수계획 수립시 예상하지 못했던 상황들을 분석하고, 재발방지 대책을 마련하기 위한 ‘off-line 사용’이다. 이를 위해서는 표 2에 나타내었듯이 다음 두가지 기본요건이 충족되어야 할 것이다: 1) 실제 운전상황 반영, 2) 위험도 평가.

보수계획 수립과 마찬가지로 위험도 감시의 off-line 사용은 발전소 운전중(on-line) 사용에 초점을 맞추어야 할 것이다. 즉, 발전소 운전 중에 예상하지 못했던 위험도 집중의 원인을 분석하고, 이에 대한 재발방지대책을 수립하여 발전소의 안전성 확보를 도모하고, 정비·사건 등의 발전소 운전 중 현상들에 대한 이해도를 높여 발전소 운전 중 평가 및 보수계획 수립시 필요한 정보들을 도출하는 것이다. 따라서 앞선 활용분야와 마찬가지로 순간 위험도 관점에서 발전소 환경의 변화를 정확하게 반영한 PSA 모델을 사용하여야 한다.

off-line 사용을 위해서는 다른 무엇보다도 특히 실제 발전소 운전상황을 정확하게 반영하여 위험도를 평가하였는지에 대한 재평가를 수행할 수 있어야 한다. 위험도 감시를 이용한 발전소의 순간위험도 평가 결과에 대한 검토는 표 4과 같이 기본적으로 위험도 감시 목적, 방향, 활용분야에 초점이 맞추어져야 할 것이다.

표 4. 위험도 감시를 이용한 발전소 위험도 평가결과의 적합성 평가 요소

구분	검토 필요 사항
실제 운전상황 반영	- 기존 PSA 변경사항의 타당성 - 위험도 감시 PSA 모델의 적합성
위험도 평가	- 신뢰도 데이터의 적절성 - PSA 비전문가의 사용 적합성 - 위험도 관리방안의 적절성
위험도 예측	- 실시간 위험도 평가 시기의 적절성 - 중요기기에 대한 정보의 타당성
위험도 감시	- 결정론적 원칙과의 관계 설정의 적절성

도입 초기에는 이러한 위험도 감시의 적합성 평가요소들 중에 위험도 감시의 근

간을 이루고 있는 실제 운전상황 반영의 평가요소에 더 많은 관심을 가져야 할 것이다. 실제 운전상황이 제대로 반영되었다는 것을 입증하지 못한다면 위험도 감시 프로그램과 그 결과의 적절성이 보장되지 않기 때문이다.

4.4 연계분야

앞에서도 언급하였지만 발전소 배열관리는 전통적으로 결정론적 원칙에 따라 수행되었고, 지금까지 발전소 배열을 통제하는 수단으로써 심층방어(defense-in-depth)를 바탕으로 작성된 기술지침서를 이용하여왔다. 따라서 위험도 감시의 도입은 기술지침서와 중복되어질 가능성이 높다. 실제로 정비규정(Maintenance Rule)을 바탕으로 위험도 감시를 수행하고 있는 미국의 경우 기술지침서와의 중복으로 인해 중복규제에 대한 문제가 제기되었다. 이러한 중복규제를 피하기 위해서 미국 NRC에서는 Regulatory Guide 1.182[11]에 다음과 같이 명시하고 있다.

“Performing the assessment of Section 11¹⁾ does not relieve the licensee from compliance with its license (including technical specifications) and applicable regulations. The intent of certain phrases in this guide is to eliminate overlapping requirements for assessments that could be considered to exist under”[11]

이와 마찬가지로 국내에서 위험도 감시를 수행함에 있어서 기술지침서와의 중복이 문제가 될 소지가 있기 때문에 위험도 감시의 이행에 있어서 고려되어야 한다.

표 5에 나타내었듯이 이 이외에도 Living PSA, 정비규정, 그리고 사업자의 운전 중 정비 확대 등과 연계되어질 수 있다.

위험도 감시에 대한 요건은 다른 연계분야를 고려하여 도출되어야 한다. 현실적으로 연계되는 분야에 있어서 서로 다른 원칙이 적용되면 안되기 때문이다. 예를 들어 현재 진행중인 그리고 미래에 수행될 수 있는 많은 위험도 정보 규제 및 적용에서 개별적으로 위험도 평가 기준을 설정한다면 많은 혼란을 야기시킬 것이다. 그러므로 위험도 감시 체제 수립시 필요한 위험도 평가 기준의 설정은 다른 분야와 동일한 철학과 원칙이 적용되어야 한다.

1) 10CFR50.65(a)(4)에 언급된 정비전 위험도를 평가해야 한다는 규정을 이행키 위해 미국 사업자 측에서는 기존의 정비규정 이행과 관련된 NUMARC 93-01에 11장을 추가하여 위험도 감시와 관련된 이행을 명시하였다.

표 5 위험도 감시의 연계분야

구 분	연계분야	연계내용
결정론적 원칙	기술지침서	발전소 배열 제어
	심층방어	기술지침서 이외의 인허가 분야와의 관계
확률론적 원칙	PSA의 품질보증 (Living PSA 포함)	운영허가 신청시 제출하는 PSA 보고서와의 관계
	정비규정	미국 정비규정의 국내 이행 결정에 따라 정비규정 이행시, 현 중대사고정책 이행에 따른 위험도 감시와의 관계
	위험도 평가 기준	모든 위험도 정보 규제 및 적용 분야에서 설정되어야 하는 위험도 기준과의 관계
	기타 위험도 정보 규제 및 적용 분야	데이터 베이스, Accident Sequence Precursor 등
기 타	사업자의 운전 중 보수 확대	실시간 위험도 평가·감시에 따라 기존의 AOT, SR등의 변경요구와 유사하게 운전 중 보수 확대 요구 예상

5. 결론

앞에서도 언급하였듯이 본 연구는 위험도 감시의 활용분야에 따라 위험도 감시의 규제요건이 개발되어야 한다는 기본개념을 바탕으로 다음과 같은 방법에 따라 위험도 감시의 구체적 요건 마련을 위한 기본요건을 도출하였다: 1) 위험도 감시의 기본 목적 및 방향 도출, 2) 위험도 감시의 활용 및 연계분야 도출, 3) 위험도 감시의 활용 및 연계분야에 따른 위험도 감시의 개발 및 활용시의 기본 요구조건 도출.

이를 위해 위험도 감시의 국내적용 근거를 분석하여 위험도 감시의 기본 목적 및 방향을 도출하였고, 국내·외 문헌을 분석하여 도출된 기본 목적 및 방향에 부합하는 위험도 감시의 활용분야를 설정하였다. 그리고, 설정된 활용분야에 따라 위험도 감시의 구체적 요건 마련에 앞서 표 2과 같이 고려되어야 하는 사항들을 도출하였다.

또한 위험도 감시는 전세계적으로 연구개발중인 위험도 정보 규제 및 활용의 한 분야로써 위험도 감시 이외의 다른 분야와 많은 연관성을 갖고 있다. 따라서 표 5와 같이 연관된 분야를 도출하였고, 향후 구체적 요건 개발시 이러한 연관된 분야를 고려하여 개발되어야 할 것이다.

참고문헌

- [1] P. K. Samanta, W. E. Vesely, and I. S. Kim, "Study on operational risk-based configuration control", NUREG/CR-5641, 1991.
- [2] International Atomic energy Agency, "Living probabilistic safety assessment(LPSA), IAEA-TECDOC-1106, 1999.
- [3] OECD/NEA WG and IAEA, "RISK MONITORS - a report on the state of the art in their development and use", 2002.
- [4] US NRC, "Maintenance Rule", 10CFR50.65(a)(4).
- [5] 과학기술부, 원자력발전소 중대사고정책, 2001.
- [6] 한수원(주), 중대사고정책 이행계획, 2001.
- [7] C. Shepherd, "RISK MONITORS - the State of the Art in their Development and Use", INTERNATIONAL WORKSHOP ON USE AND DEVELOPMENT OF RISK MONITORS, 18 November 2002.
- [8] 울진 5,6 Probabilistic Safety Assessment Report.
- [9] M. Modarres, M Kaminskiy, and V. Krivtsov, "Reliability Engineering and Risk Analysis - A Practical Guide", Marcel Dekker, Inc., 1999.
- [10] 영광 5,6 Final Safety Analysis Report.
- [11] US NRC, "Assessing and Managing Risk Before Maintenance Activities at Nuclear Power Plants", Regulatory Guide 1.182.
- [12] International Atomic energy Agency, "Applications of probabilistic safety assessment for nuclear power plant", IAEA-TECDOC-1200, 2001.
- [13] Nuclear Energy Institute, "Industry Guidelines for Monitoring the Effectiveness of Maintenance at Nuclear Power Plants", NUMARC 93-01, Section 11.