

원전의 ASP 분석 및 적용 연구

A Study on Accident Precursor Sequence Analysis and Its Application

박진희, 한상훈,
한국원자력연구소
대전시 유성구 덕진동 150

초 록

ASP 분석은 미국에서 시작이 되어 세계 여러국가들이 자국의 원자력발전소에서 발생한 사건에 대해 확률론적인 방법론을 이용하여 Risk를 평가하는 연구이다. 미국에서는 WASH-1400 (Reactor Safety Report) 발간 후에 실제 발전소에서 발생한 사건을 대상으로 확률론적 방법론을 이용하여 Risk를 평가하기 시작하였다. 1982년 최초 보고서를 발간한 후 현재까지 보고서를 매년 발간하고 있으며 분석 모델에 대한 수차례의 개정이 있었다. 미국에서는 ASP 분석 결과를 이용하여 새로운 기기나 계통을 추가하거나 발전소 운전 및 비상절차서를 개정하여 발전소의 안전성을 향상시키고 있으며 ASP 결과를 ROP에 적용을 시도하고 있다. 본 연구에서는 ASP 분석에 대한 전반적인 방법론을 검토하고 국내 발전소에서 발생한 사건을 이용하여 ASP를 시범적으로 수행하고 그 적용가능성을 검토해 보았다.

Abstract

The ASP analysis started from U.S. is the risk evaluation program and many countries in the world have performed that analysis to assess the risk for their own operational events using the probabilistic method. In U.S., the risk evaluation program for operational events started using the probabilistic method since WASH-1400 was published. Up to now, ASP reports have been published every year since the first ASP Report was published in 1982. The several times modification for the ASP methodology have been performed. In U.S., using the ASP analysis result, they installed the new systems or components and procedure that provided additional protection against core damage and have tried to apply the ASP result for ROP. In this study, to obtain insight from ASP analysis, we reviewed ASP status and methodology and to check its application, performed several sample cases ASP study for domestic operational events.

1. 서론

현재 국내에서는 수행되고 있는 원전의 Risk 평가는 설계중인 발전소와 일부 운전 중인 발전소를 대상으로 확률론적안전성분석(Probabilistic Safety Analysis, PSA)을 수행하여 각 발전소에서 연중 발생할 수 있는 평균적인 Risk 발생에 대한 분석을 수행하고 있다. 그러나 이 분석 만으로는 국내 원전에서 발생한 사건, 발생 가능성이 있는 사건들에 대한 현실적인 Risk 평가를 통한 고유 Risk 발생에 관한 정보 및 국내 위험도기반 적용(Risk Informed Application) 등을 위한 지식을 축적하기에는 한계가 있다.

미국을 비롯한 외국에서는 자국에서 발생한 사건사고를 대상으로 확률론적인 방법론을 적용하여 Risk를 평가하고 발전소 안전성에 미치는 영향이 큰 사건들을 파악하여 대안을 수립하고 발생추이를 파악하여 추후 설계 및 운전성능 향상을 위한 지식을 습득하기 위한 노력을 기울이고 있다. 특히, 미국에서는 1979년부터 ASP(Accident Sequence Precursor) 분석 프로그램이라는 이름으로 자국내 원전에서 발생한 사건/사고를 대상으로 Risk를 평가하여 안전성 향상을 위한 노력을 계속 하고 있으며 최근에는 ASP 분석 결과를 미 NRC의 새로운 규제 수단인 ROP(Reactor Oversight Process)의 한 항목으로 확대하고있다.

국내에서도 국내원전에서 발생한 사건들의 Risk 추세 등을 파악하여 재발방지를 위한 대안수립 혹은 운전원들에게 해당 사건이 발전소 안전성에 미칠 수 있는 심각성 등에 대한 정보제공 등을 할 수 있는 종합적이고 체계적인 Risk 관점의 사건분석절차의 확립이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 미국에서 수행되고 ASP 프로그램에 대한 전반적인 상황과 분석 모델의 개선을 위한 노력을 요약하고, 최근까지의 분석결과를 검토하였으며, 국내 발전소 운전경험을 이용한 예제분석을 통하여 국내 적용방안을 점검해 보았다.

2. 미국의 ASP 분석

미국에서 수행되고 있는 ASP 분석 프로그램은 미국 내 상업운전 중인 원전에서 실제 발생하는 사건이나 발전소 이상 상태를 대상으로 확률론적 방법론을 적용하여 Risk를 평가하여 잠재적으로 중대 노심손상을 일으킬 가능성이 있는 사건들을 확인하고 관리를 위한 체계적인 사건분석 절차이다.

2.1 미국 ASP 분석 배경

미국에서 수행되고 있는 ASP 분석은 원자력 발전소를 대상으로 최초로 종합적인 PSA 수행보고서인 WASH-1400(Reactor Safety Study)이 발간된 후, 미 원자력규제위원회(Nuclear Regulatory Commission)에서는 이 보고서의 독립적인 검토를 위해 1978년에 구성된 Risk Assessment Review Group(Lewis Committee) [NUREG/CR-0400]에서 제기된 몇 개의 추천사항 중에서 실제 발전소에서 발생한 사건/사고들을 확률론적 방법론을 이용하여 각 사건에 대한 Risk를 평가하라는 추천사항을 받아 들여 1979년부터 분석이 시작이 되어 최초 보고서인 NUREG/CR-2497을 1982년에 발행한 이후로 1997년 LER을 대상으로 한 ASP 분석보고서인 NUREG/CR-4674, Vol 26을 포함하여 현재까지 총 16건의 보고서를 발간하였으나 911이후로는 분석보고서는 공개되지 않고 분석결과 만이 SECY형태의 문서로 공개되고 있다. 미국에서 수행되는 ASP 분석은 각 원전에서 발생한 사건들중 기존 PSA에서 노심손상 사고를 야기할 수 있는 초기사건이나, 안전계통의 고장 혹은 발전소 이상상태 등이 분석대상에 포함된다. 분석대상에 포함된 사건들은 확률론적 방법론을 적용하여 노심손상빈도를 정량화하여 일정수준 이상의 노심손상 확률을 갖는 사건들을 Precursor로 선정하여 중요도에 따라 순위화한다. 또한 현재 미국의 ASP 분석은 그동안의 축적된 자료와 분석 수행중에 얻은 지식을 바탕으로 미 NRC의 새로운 규제 수단인 ROP(Reactor Oversight Process)의 한 항목으로 확대되어 다양한 규제활동을 지원하기 위하여 기존 ASP 모델을 확대 개선하여 미국 내 발전소들의 종합적인 Risk 모델, 즉 SPAR(Standardize Plant Analysis Risk) 모델을 구축하기 위한 노력을 병행하고 있다.

2.2 미국 ASP 분석 절차

미국에서 수행되고 있는 ASP 분석은 원자력규제위원회에서 관장하고 실제 업무는 미 국립연구소인 ORNL의 NOAC에서 수행하고 있다. ASP 분석 절차는 예비분석절차와 이 결과를 해당 발전소와 독립검토기관에 보내 검토를 받는 검토절차로 이루어져있다. 예비 분석절차에서는 미국내 원

전의 Precursor를 분석하기 위해서 미국의 모든 발전소 운전이력에서 발전소 안전에 영향을 줄 수 있는 사건들을 선별한 후 정량화를 수행한다. 1차 선별과정에서는 미국의 발전소 운전이력인 LER에서 노심손상을 야기할 가능성이 있는 초기사건이나 발전소 보호 및 사고발생시에 사고를 완화하는 기능을 제공하는 기기의 고장 등을 사전 선별하며 LER 이외에 미 원자력규제위원회에서 주요 사건이 발생한 경우에 현장에 파견된 팀(Augmented Inspection Team과 Incident Investigation Team)들의 보고서와 성능감시 프로그램에서 중요하게 분석된 사건 등도 검토하여 필요시에는 상세분석 대상사건에 포함시키고 있다. 1차 선별된 사건들은 원전의 안전에 잠재적으로 중요한 영향을 미치거나 상세분석이 필요한 사건들을 재선정하여 예비정량화를 수행하여 조건부 노심손상확률이 1.0×10^{-6} 을 넘는 사건을 예비 Precursor로 지정하게 된다. 이결과는 해당 발전소, 미 원자력규제위원회 분석 담당자와 관련기관 전문가에게 전달되어 독립검토를 받게 된다. 예비정량화 결과에 대한 검토 요청을 받은 해당 발전소에서는 분석 모델의 기술적인 정확성과 해당 발전소 기기 및 성능 모델에 대한 검토의견을 의무적으로 제출하여야 한다. 각 검토기관의 검토의견을 받은 후 필요한 경우에는 분석모델에 검토의견을 반영하여 다시 정량화를 수행한 후에, 조건부 노심손상확률이 1.0×10^{-6} 이상이 되는 사건을 최종 Precursor로 결정후 최종 ASP 분석결과를 문서화하게된다. 미국의 ASP 분석방법은 실제발전소에서 발생했던 사건들 중에서 예비 선별절차를 거쳐 Precursor로 최종 선정된 사건을 PSA 분석모델에 적용하여 각 사고경위에 대한 조건부 노심손상확률을 평가한다. 현재까지 미국 발전소에서 발생한 사건 중에 TMI 사고를 제외하고 노심손상을 초래한 사건은 없었다. ASP 분석을 위한 모델 작성에서 실제 발전소에서 발생한 사건을 이용하여 실제 발전소 운전상황과 동일하게 고장으로 판명된 계통이나 기기만을 “고장”으로 반영하고 나머지 작동에 성공한 기기나 계통을 “성공”으로 설정하여 사고경위에 대한 정량화를 수행한다면 노심손상 사고경위에 대한 조건부 노심손상확률을 구할 수 없게 된다. 따라서 ASP 분석에서는 해당 발전소 Precursor 분석모델에 분석대상 Precursor와 관련된 사건 수목이나 고장수목의 표제식이나 정점사상 만을 “Fail”로 설정한다. 그 외에 실제 발전소에서 Precursor 발생 상황에서 운전이 성공한 계통 및 기기라 할지라도, ASP 분석모델에서는 기존 PSA 방법론에서 사용하는 잠재적인 고장확률을 반영하여, 해당 Precursor 발생조건에서의 노심손상에 도달할 수 있는 사고경위에 대한 조건부 노심손상확률을 정량화한다. 현재 미국 ASP에서 취급하고 있는 Precursor는 소외전원상실사고나 냉각재상실사고와 같이 기존 PSA 분석에서 초기사건으로 취급되는 사건과 일정시간 계속되는 계통 및 기기의 고장으로 인한 사건 두가지 유형으로 나눌 수 있으며 각 유형별 분석방법을 아래의 그림 1의 예제 사건수목을 이용하여 분석과정을 설명하였다.

그림 1은 초기사건 I 와, 노심손상을 방지 혹은 사고를 완화하는 기능을 가진 4개의 계통으로 이루어진 간단한 사고경위 정량화를 보여주기 위한 예제 사건수목이다. 그림 1의 사건수목에서는 사고경위 #3, #6과 #7이 노심손상을 야기할 수 있는 사고 경위이다. 기존 PSA에서는 사고경위를 정량화하기 위해서는 초기사건 발생빈도와 기기고장확률을 적용하여 노심손상빈도를 계산하게 된다. 예제 사건 수목의 정량화를 위한 확률 값은 초기사건 발생빈도는 0.1/yr, 초기사건이 발생한 후의 계통 A의 이용불능확률은 0.003, 초기사건이 발생한 후의 계통 A가 이용불능 상황일 경우의 계통 B의 이용불능확률은 0.01, 초기사건이 발생한 후의 계통 C의 이용불능확률은 0.05와 초기사건이 발생한 후의 계통 C가 이용불능 상황일 경우의 계통 D의 이용불능확률을 0.1로 가정하여 노심손상 사고경위를 정량화한 결과는 아래와 같다.

$$\begin{aligned}
 & 0.1/\text{yr} \times (1-0.003) \times 0.05 \times 0.1(\text{사고경위 \#3}) + \\
 & 0.1/\text{yr} \times 0.003 \times (1-0.01) \times 0.05 \times 0.1(\text{사고경위 \#6}) + \\
 & 0.1/\text{yr} \times 0.003 \times 0.01(\text{사고경위 \#7}) \\
 & = 4.99 \times 10^{-4}/\text{yr}(\text{사고경위 \#3}) + 1.49 \times 10^{-6}/\text{yr} + 3.00 \times 10^{-6}/\text{yr}(\text{사고경위 \#7})
 \end{aligned}$$

$$= 5.03 \times 10^{-4}/\text{yr}$$

기존 PSA에서는 사고경위 #3을 주요 사고경위로 평가하지만 ASP 분석에서는 주어진 사건에 따라 초기사건 빈도나 계통 고장을 다르게 평가하므로 위에서 계산한 값과 다른 값이 도출된다. 위와 동일한 사건수목을 이용하여 초기사건과 기기고장을 Precursor로 가정하여 모델에 반영하여 계산을 수행한 결과는 다음과 같다.

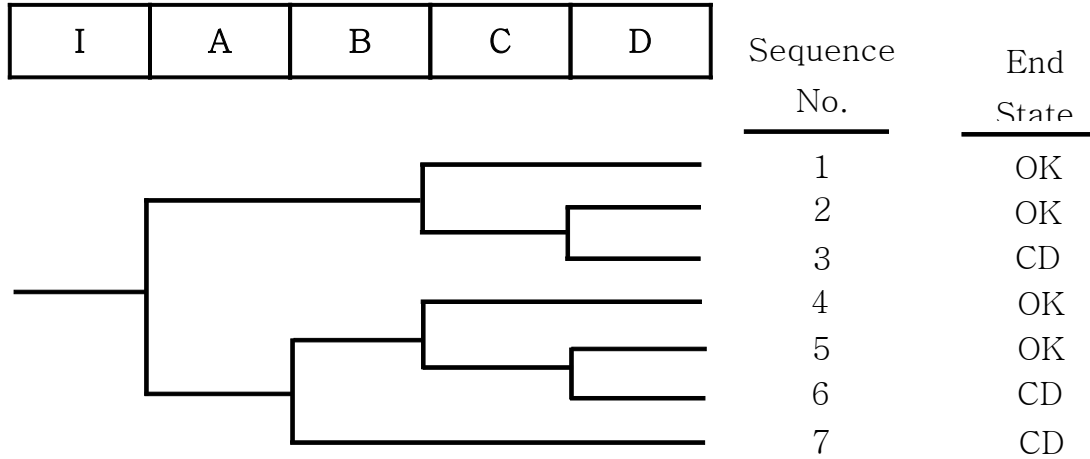


그림 1 예제 사건수목

초기사건을 Precursor로 가정한 경우

초기사건 I가 발생하였다고 가정하고, 이를 Precursor로 지정하고 이를 모델에 반영하여 사고경위를 정량화 하였다. 초기사건 발생기간에 계통 A, B 및 C는 운전 성공하여 D는 운전 요구가 없었다고 가정하였다. 초기사건이 발생한 빈도를 “1”로 가정하고, 네 가지 계통의 이용불능도는 모두 잠재적인 고장을 고려하여 위의 PSA 모델에서 이용한 값을 동일하게 이용하여 정량화를 수행하여 얻을 수 있는 조건부 노심손상확률은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 & 1.0 \times (1-0.003) \times 0.05 \times 0.1(\text{사고경위 \#3}) + \\
 & 1.0 \times 0.003 \times (1-0.01) \times 0.05 \times 0.1(\text{사고경위 \#6}) + \\
 & 1.0 \times 0.003 \times 0.01(\text{사고경위 \#7}) \\
 & = 5.03 \times 10^{-3}
 \end{aligned}$$

만일 초기사건 I가 발생하고 계통 B가 운전 실패할 경우를 가정한 조건부 노심손상확률은 다음과 같다.

$$1.0 \times (1-0.003) \times 0.05 \times 0.1(\text{사고경위 \#3}) + 1.0 \times 0.003 \times 1.0 = 7.99 \times 10^{-3}$$

이 계산 결과에서는 계통 B의 고장확률을 “1”로 가정하였고 사고경위 #6은 발생하지 않는 것으로 가정하였다.

계통 B의 고장을 Precursor로 가정한 경우

계통 B가 월간 정기 시험 중에 실패로 판정된 사건을 Precursor로 선정하고 ASP 분석에 대한 정량화 과정을 기술하였다. 앞에서 기술한 것과 같이 이와 같은 경우에 고장지속 시간은 계통 B의 시험주기를 30일로 가정하였을 경우에 시험 주기의 1/2인 360시간으로 가정하고 정량화를 수행하였다. 고장지속시간 내에서 초기사건이 발생할 빈도를 시간단위로 계산하면 $0.1/\text{yr} \div (8760\text{h}/\text{yr} \times 0.7) = 1.63 \times 10^{-5}/\text{h}$ 로 계산되며, 이 계산에서 0.7은 발전소가 1년 중 출력운전에 있을 확률이다.

앞의 예제에서와 같이 만일 초기사건 I가 발생하는 경우에 B계통이 항상 운전을 요구받는 계통이라고 할 때 B계통의 고장 중에 I가 발생할 확률은 다음과 같다.

$$1 - e^{-1 \text{ 발생빈도} \times \text{고장지속시간}} = 1 - e^{-1.63E-5 \times 360} = 5.85 \times 10^{-3}$$

위에서 계산된 값과 B계통의 이용불능도에 “1”을 적용하여 Precursor B가 발생한 경우에 대한 조건부 노심손상확률을 계산하면 아래와 같다.

$$\begin{aligned} & 5.85 \times 10^{-3} \times (1 - 0.003) \times 0.05 \times 0.1 (\text{사고경위 \#3}) + \\ & 5.85 \times 10^{-3} \times 0.003 \times 1.0 (\text{사고경위 \#7}) \\ & = 4.67 \times 10^{-5} \end{aligned}$$

이 계산 결과는 B 계통의 고장이 지속된 360 시간 동안의 조건부 노심손상확률을 나타낸다. 주요 노심손상 사고경위는 사고경위 #3이며 이 사고경위로 인한 조건부 노심손상확률은 2.92×10^{-5} 이고, 이는 B계통의 고장과는 관련이 없고 계통 C와 D의 잠재적인 고장이 주요 인자이다. 이 계산결과에서 B계통의 고장으로 인한 영향을 평가하기 위해서는 기존 PSA와 동일하게 중요도 (importance measure) 계산을 하여야한다. 이 예제에서의 중요도는 risk achievement worth와 유사한 값을 이용하게 된다. 위의 예제에서는 B계통의 고장으로 인한 노심손상 증가는 아래와 같이 B의 고장으로 인한 노심손상확률에서 총 노심손상확률에서 빼주면 계산이 가능하다.

$$p(\text{cd} | \text{B}) - p(\text{cd}) = \nabla \text{CDP.}$$

예제에서의 계산은 B 고장으로 인한 조건부 노심손상확률에서 앞에서 계산한 Precursor와 관련 없는 노심손상확률을 고장지속 시간인 360시간으로 바꾼 계산을 적용하여 계산한다.

$$4.67 \times 10^{-5} - 2.95 \times 10^{-5} [(5.03E-4/8760 \times 360)/0.7] = 1.74 \times 10^{-5}$$

ASP 분석에서 Precursor로 지정된 사건으로 인한 조건부 노심손상확률을 위와 같이 대상 Precursor의 중요도를 판단하는데 이용할 수 있다. 그러나 Precursor로 지정된 계통이 1차적인 사고완화계통이 아닐 경우에는 다른 계통의 잠재적인 고장으로 인한 조건부 노심손상확률이 Precursor로 지정된 사건으로 인한 조건부 노심손상확률보다 큰 경우도 있을 수 있다.

2.3 미국 ASP 분석 모델

미국의 ASP 분석 초기모델은 원전을 PWR과 BWR 두개의 유형으로 분석이 시작되었으나 분석이 진행되면서 각 발전소별 설계 및 운전 특성을 반영하기 위하여 수 차례의 분석모델을 개정하였다. 또한 현재 미국의 ASP 분석을 위한 모델은 ASP 분석외에 위험도기반 규제(Risk-informed regulation) 등을 수행하고 미국내 각 발전소별로 적용되는 위험도기반 적용(Risk-informed application)에 대한 평가 및 인허가를 위한 새로운 발전소 Risk 평가 모델의 필요성을 인식하여 SPAR(Standardize Plant Analysis Risk) 모델이라는 이름으로 기존의 ASP 분석 모델을 확대하여 구축하고 있으며 각 단계별 모델에 대한 주요 수정사항은 다음과 같다.

초기 분석인 1969-79년, 1980-81년에 발생한 사건을 대상으로 수행된 ASP 분석 모델은 선정된 잠재적인 노심손상을 야기할 수 있는 사고경위를 정량화하기 위하여 미국내 발전소들의 고유특성 등을 무시하고 모든 발전소를 PWR과 BWR 두개의 유형으로만 나누어 ASP 정량화 모델을 구성하였다. 이 초기 모델은 PWR과 BWR 두개의 발전소 유형만을 대상으로 주급수 상실 사건(Loss of Feed Water), 소외전원상실 사건(Loss of Off-site Power), 소형 냉각재상실사건(Small Loss of Coolant Accident) 및 주증기관 파단사고(Main Steam Line Break)의 4가지의 초기사건을 고려한 사고경위 정량화를 위한 표준 사건수목을 작성하였다. 초기 ASP 모델은 각 발전소별로 서로 다르게 설치된 사고완화계통에 따라 각 발전소별로 사고후 발전소 사고완화 운전이 다르게 나타날 수 있는 등의 고유 특성을 반영한 모델이 아니고 원전에서 사고발생후 사고를 완화하기 위해 취할 수 있는 일반적인 사고 완화 기능만을 사건수목에 반영하여 모델하였다. 이 초기 ASP 분석 모델은 각 사건수목의 표제, 즉 사건수목의 실패 Branch의 확률값은 미국내 원전의 각 초기사건 발생빈도 및 기기고장확률에서 도출된 사전에 계산된 값을 이용하여 정량화를 수행하였으며

고장수목이 모델에 적용하기 전까지는 계속 사용되었다.

1985년에는 초기의 두개의 발전소 유형만을 고려한 표준화 모델의 한계를 인식하여 미국내 발전소의 설계 차이점 등을 좀더 잘 반영할 수 있는 모델로 변경을 수행하였다. 1985년에 새롭게 구성된 표준모델은 미국내 모든 발전소를 대상으로 원전들이 갖고 있는 노심손상을 방지하기 위한 안전기능을 수행하는 기기를 파악한 후에 각 안전기능을 수행하는 기기가 동일한 기능을 수행하고 동일 형태의 기기를 사용할 경우에는 각 발전소별로 기기의 설계상의 차이점을 무시하고 같은 유형의 발전소로 분류하였다. 이같은 분류결과로 BWR은 3개의 발전소 유형, PWR은 5개의 발전소 유형으로 나누었다.

1987년에는 발전소 유형을 다시 세분화 하고 분석대상 Precursor를 선별하기 위한 LER을 검색을 SCSS(Sequence Coding and Search System)을 이용하기 시작하였으며 최초로 정량적인 판정 기준을 적용하여 조건부 노심손상확률이 1×10^{-6} 이상인 사건만을 Precursor로 판정하기 시작하였으며, 발전소 정전사고중의 축전지 방전시간과 격납용기에 대한 모델을 추가하였으며 ASP 모델에 적용이 불가능한 사건들도 Precursor로 보고서에 기술하기 시작하였다. 1988년에는 발전소 유형을 BWR은 3개 PWR은 5개 총 8개의 발전소 유형으로 재 분류하였으며 기존 사건수목의 종결조건(end-state)으로 정의되었던 Core vulnerable을 세분하여 노심손상과 성공(core damage and success)으로 구체화하였으며 Seal LOCA를 모델에 추가하였다.

1992년에는 ASP 분석과 관련있는 기관들이 분석목적에 좀 더 부합되는 방법론, 모델, data에 대한 논의를 수행하기 위한 workshop을 개최하여 Integrated ASP Program Plan을 마련하여 각 발전소의 기기 및 운전특성을 반영할 수 있는 발전소 고유의 고장수목을 추가하는 것을 골자로 하는 Level 1 모델을 작성하는 Revision 1 SPAR 모델을 구축하는 계획을 세웠다. 1992년과 1993년에는 Revision 1 SPAR 모델 개발 계획에 따라 발전소에서 새롭게 노심손상을 막을 수 있는 대체 수단 및 기기에 대한 모델을 추가하였으며 분석대상 Precursor가 발생한 발전소의 사업자가 ASP 분석 결과를 보고서가 발간하기 전에 검토를 수행하기 시작하였으며, 이 절차는 현재는 사업자가 의무적으로 수행해하는 절차로 정착되었다.

1994년부터는 ASP 분석용으로 만든 SAPHIRE(NRC 1995) 전산 코드를 이용하여 ASP 분석을 수행하기 시작하였으며 증기발생기 세관파열사고와 정지불능 사고에 대한 사건수목을 추가하였으며 각 사건수목을 발전소 간의 특성을 고려하여 상세한 수준으로 재작성하여 총 75개의 발전소 고유 모델이 작성되었다. 또한 이시점부터는 ASP 정량화 결과를 각 해당하는 연도별로 보고서를 작성하기로 하였으며 정지 운전중에 발생한 사건은 정지 운전중 ASP 모델을 이용하여 분석을 시작하였으며 격납건물과 관련된 사건, 흥미있는 사건(interesting events) 및 확률론적 방법론으로 평가가 불가능하지만 안전성에 미치는 영향이 큰 심각한 사건들을 보고서에 따로 기술하기 시작하였다.

1998년에는 각계의 전문가, ASP 분석자 혹은 기존 분석모델로부터 도출된 문제점등을 종합하여 각 발전소의 Risk를 좀더 상세히 모델된 새로운 "2QA" SPAR 모델이 제시되었다. 1999년에는 ASP 분석과 다른 위험도 기반 규제(Risk-informed regulatory)를 위한 모델을 개선하기 위한 미원자력규제위원회 산하의 Office of Nuclear Reactor Regulation, Nuclear Regulatory Research와 NRC 지역 사무소의 담당자들로 구성된 SPAR 모델 사용자그룹이 결성되었다(SPAR Model User Group : SMUG). 2000년에 SMUG는 SMUG 멤버들의 필요성과 위험도기반 규제를 위한 새로운 SPAR 모델을 구축하기로 합의하고정기적인 모임을 통해서 모델 개선을 위한 기술적

인 지침을 제공하고 있으며 2002년도를 기준으로 SPAR 모델 작성을 위해 수행된 각 항목별 수행사항은 다음과 같다.

Level 1: internal events during full power operation

- 현재의 위험도 기반 규제활동을 위한 업무수행을 위해 이용되고 있는 2QA SPAR 모델에서 모델되지 않았던 발전소 특징을 추가하고 오류를 개선하는 수준에서 2QA SPAR 모델을 유지하며 33개의 3i SPAR 모델의 각 발전소별 SD 계획을 위한 Notebook상의 벤치마킹 시험을 거쳐 각 발전소별 품질검증(onsite quality assurance)을 완료. 이 검증 업무는 각 발전소 PSA 담당자와 SPAR 모델과 PSA 모델을 비교 검토하는 과정으로 72개 모델 중에 53개에 대한 검증 작업중임.

Level 1 : internal events during low-power and shutdown operations

- PWR 정지/저출력 모델 구성을 위하여 선도 발전소인 Byron 1 & 2 및 Millstone 3 발전소의 중간단계의 정지/저출력 SPAR 모델구성을 완료(발전소별 품질검증은 받지 않은 상태임)

Level 2 : Large early release frequency(LERF)

- 위험도기반 규제를 위한 수행되는 업무와 향후의 기반구축을 위한 Level 2 LERF의 사고 경위를 위한 모델 구축을 위한 기반 조성을 시작하고 승인된 LERF SPAR 모델 개발계획에 따른 large dry containment type PWR 선도 발전소를 대상으로 적용 시작

2.4 미국 ASP 분석 결과

미국에서 1987년도부터 2000년도까지 수행된 ASP의 결과를 최근 SECY 문서에 언급된 주요 항목별로 분석된 결과를 살펴보았다.

Industry Trend

미 원자력규제위원회에서는 원전의 안전성을 유지하기 위한 전략계획(Strategic Plan)의 다섯 가지 척도중에 하나로 “no statistically significant adverse industry trends in safety performance”라는 성능 목표를 확인하기 위하여 ASP 분석을 통하여 도출된 연도별 Precursor의 발생 추이를 감시한다. 그림 2에 1988년부터의 Precursor 발생빈도 추이를 나타냈으며 Precursor 발생횟수가 점차 줄어드는 경향을 보이고는 있으나 앞에서 언급했듯이 ASP 분석 모델이 수차례에 걸쳐 개정이 되어 이 숫자를 직접 비교하기는 무리가 있다.

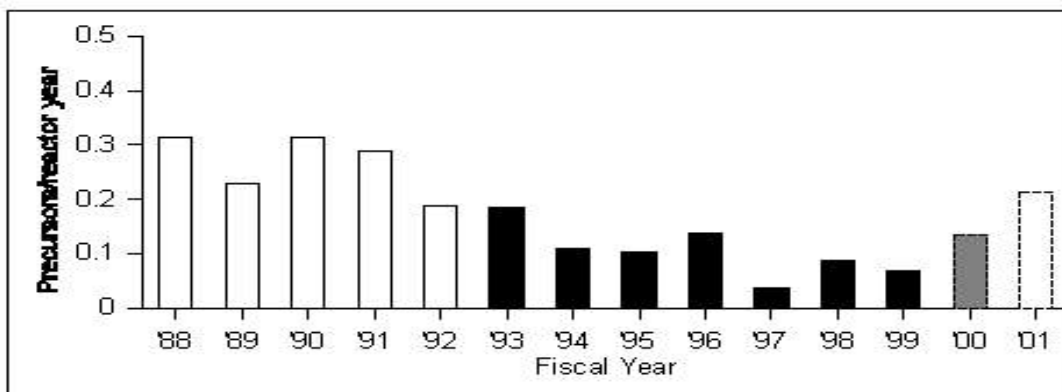


그림 2 연도별 Precursor 발생 빈도

조건부 노심손상확률로 본 Precursor 발생빈도 평가

각 Precursor의 발생 빈도를 조건부 노심손상확률의 크기에 따라 4가지($\geq 10^{-3}$, 10^{-4} , 10^{-5} ,

10^{-6} 의 범주로 나누어 1993년도부터의 발생빈도에 따라 그림 3, 4, 5 & 6에 나타냈으며 조건부 노심손상확률이 10^{-4} 와 10^{-5} 보다 큰 사건만이 발생빈도가 줄어드는 추세를 보이고 있다.

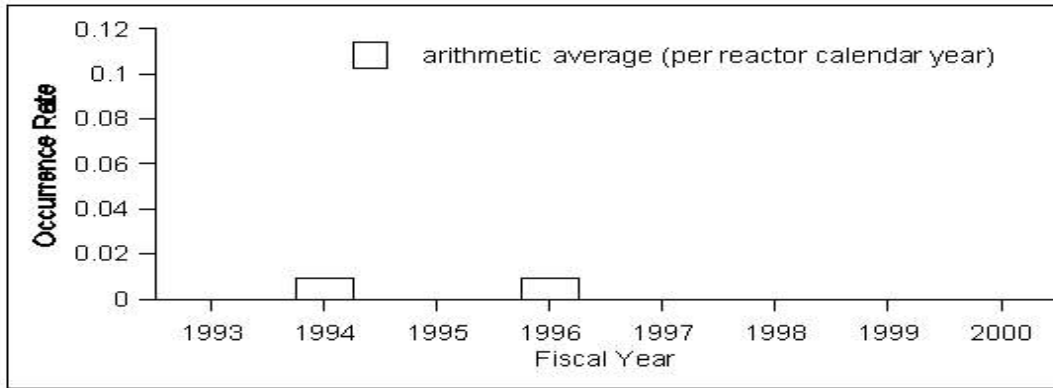


그림 3 조건부 노심손상확률이 10^{-3} 이상인 Precursor 발생빈도

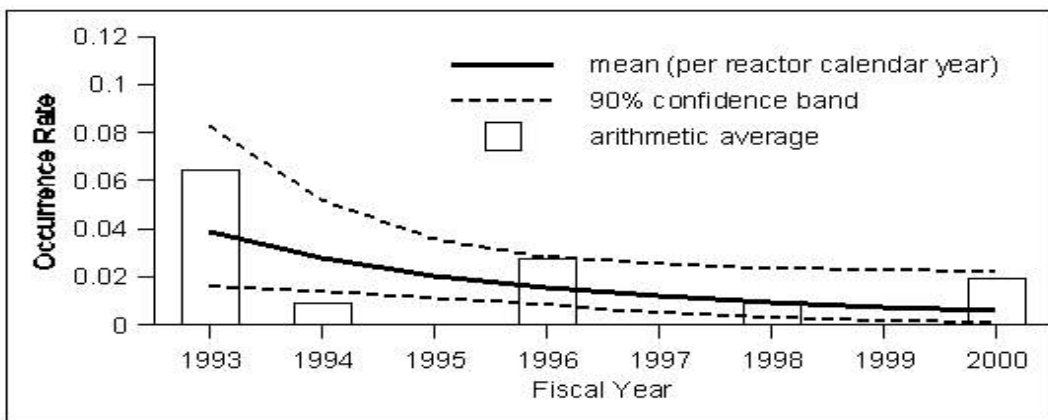


그림 4 조건부 노심손상확률이 10^{-4} 이상인 Precursor 발생빈도

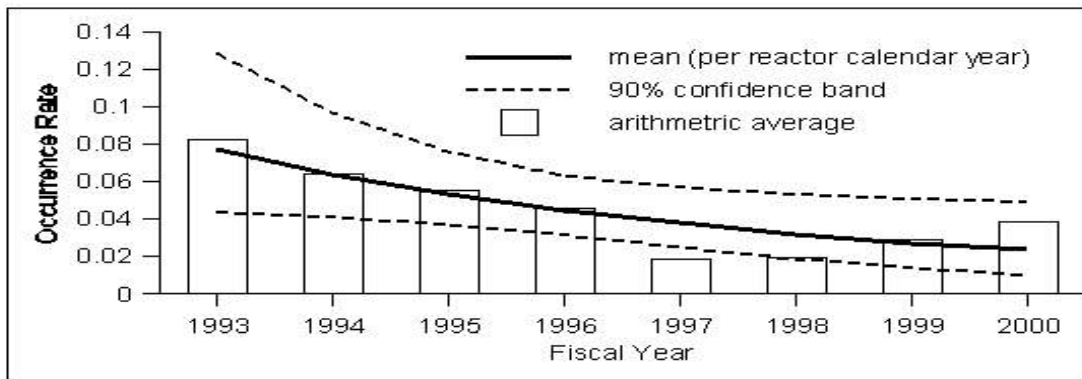


그림 5 조건부 노심손상확률이 10^{-5} 이상인 Precursor 발생빈도

안전에 미치는 영향이 심각한(Significant) Precursor

ASP 분석은 미 원자력규제위원회의 Strategic Plan의 성능목표의 하나인 “ No more than one event per year identified as a significant precursor of a nuclear accident”의 감시 수단으로도 쓰이고 있으며 Significant Precursor는 조건부 노심손상확률이 10^{-3} 을 넘는 사건으로 판정된다. 1997년부터 최근까지의 ASP 분석결과 이 범주에 포함되는 사건발생은 없었으며 경험적으로 평균 4, 5년에 한번씩 발생하는 것으로 평가하고있다.

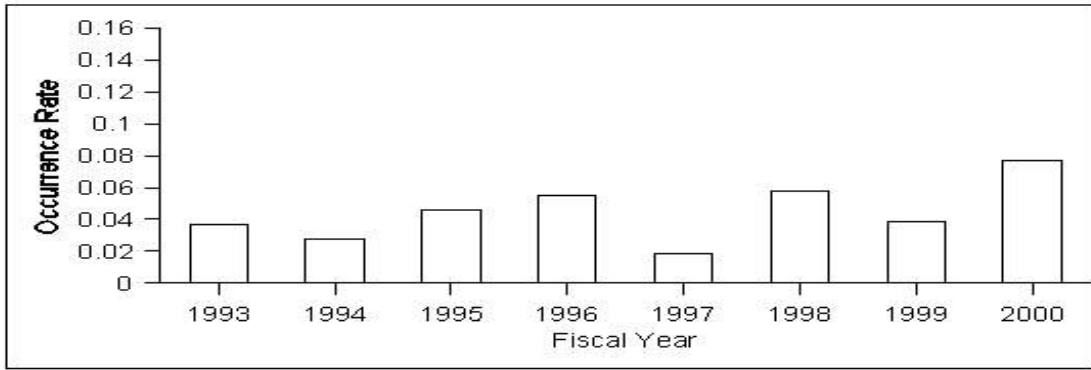


그림 6 조건부 노심손상확률이 10^{-6} 이상인 Precursor 발생빈도

중요한(Importance) Precursor

미 ASP 분석에서는 조건부 노심손상확률이 1.0×10^{-4} 보다 큰 Precursor로 취급된다. 1993년도부터 2000년도까지 총 16건의 중요한 Precursor가 발생했으며 이중 소의전원상실 초기사건으로 인한 비율이 38% 정도 차지하는 것으로 나타났으며 연도별 발생빈도는 아래 그림 7과 같다. 이 범주에 속하는 Precursor는 앞에서 진술했듯이 발생빈도가 줄어드는 추세를 보이고 있다고 판단하고 있다.

각 사건 유형별 Precursor 발생

1993년도부터 2000년도까지의 각 유형별 Precursor 발생은 비율은 기기고장 유형이 64% 초기사건유형이 36%로 기기고장 유형으로 인한 발생빈도가 높았으며 그림 8과 그림 9에 각 유형별 발생빈도를 나타냈다. 1993년도부터 2000년도까지의 추이를 살펴보면 초기사건 유형의 Precursor 발생빈도는 낮아지는 추세를 보이고 있으나 기기고장 유형의 Precursor 발생빈도 변화는 없는 것으로 판단했다.

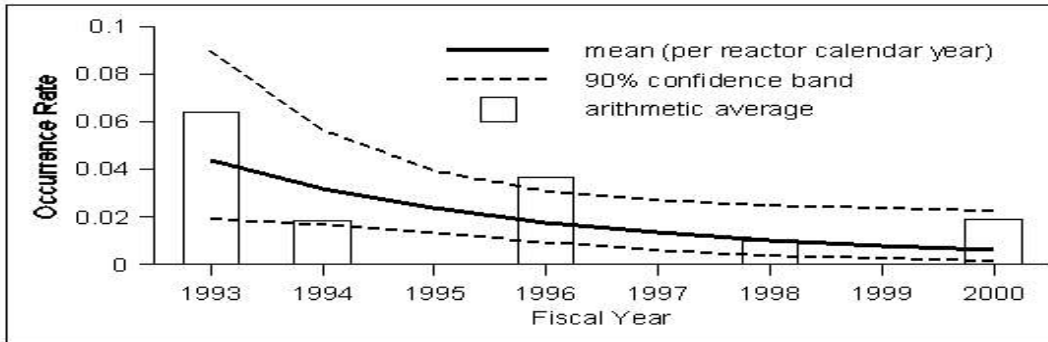


그림 7 연도별 중요한 Precursor 발생 빈도

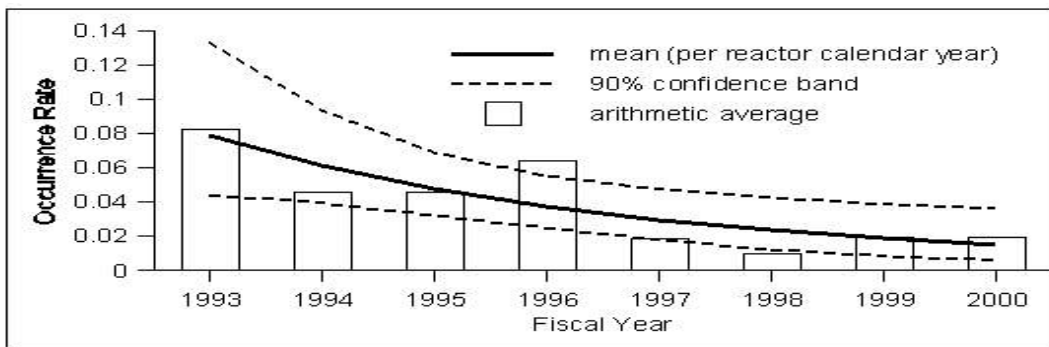


그림 8 연도별 초기사건 유형의 Precursor 발생빈도

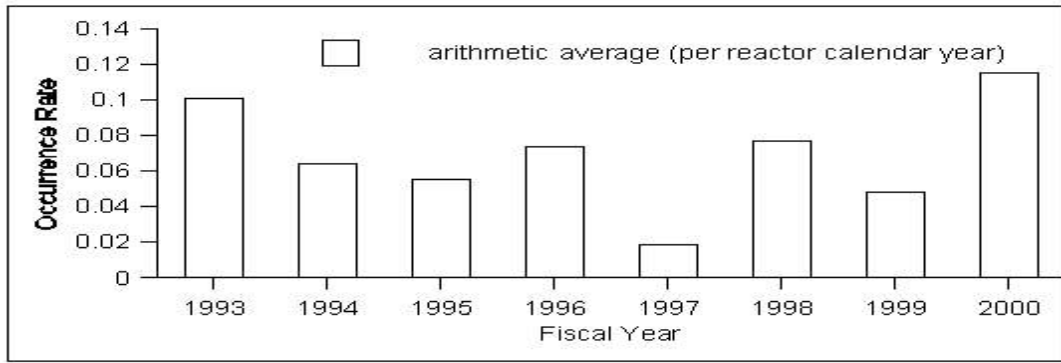


그림 9 연도별 기기고장 유형의 Precursor 발생빈도

소외전원상실(Loss of Off-site Power) 사고와 관련된 Precursor

그리고 그림 10에는 1993년도부터 2000년도까지의 소외전원상실 사고와 관련된 Precursor 들의 발생빈도를 나타냈다. 1993년도부터 2000년도까지 발생한 소외전원상실 Precursor 중에 38%는 조건부 노심손상확률이 1×10^{-4} 보다 큰 중요한 Precursor로 선정되었다. 또한 이 기간에 발생한 15건의 소외전원상실 사고유형의 Precursor 중에 3건은 비상전원공급계통의 고장을 동반한 사건들이었으며 2건은 조건부 노심손상확률이 1×10^{-4} 보다 큰 중요한 Precursor 였다. 전체적인 ASP 분석 결과 소외전원상실 사고관련 Precursor 발생빈도는 점차 줄어드는 추세를 보이고 있다.

발전소 안전관련계통과 관련된 Precursor 발생

미국내 원전에서 발생하는 Precursor의 대부분은 안전관련계통의 고장과 관련이 되어있다. 이러한 고장들은 BWR 발전소의 경우에는 1993년도부터 2000년도까지 Precursor 발생이 11건으로 발생빈도가 너무 적어 안전계통과 관련된 추이를 판단하기에는 무리가 있다. PWR의 경우에는 발생한 Precursor중에 안전관련 고압 및 저압안전주입계통의 이용불능과 관련된 것은 총 Precursor 발생중에 64%를 차지하는 것으로 나타났다. 이들 중에 원인별로는 비상안전주입계통 고장은 33%, 비상전원공급계통 고장은 27% 및 비상주입계통의 기기 및 구조와 보조계통과 관련된 고장은 25%를 차지하는 것으로 나타났다.

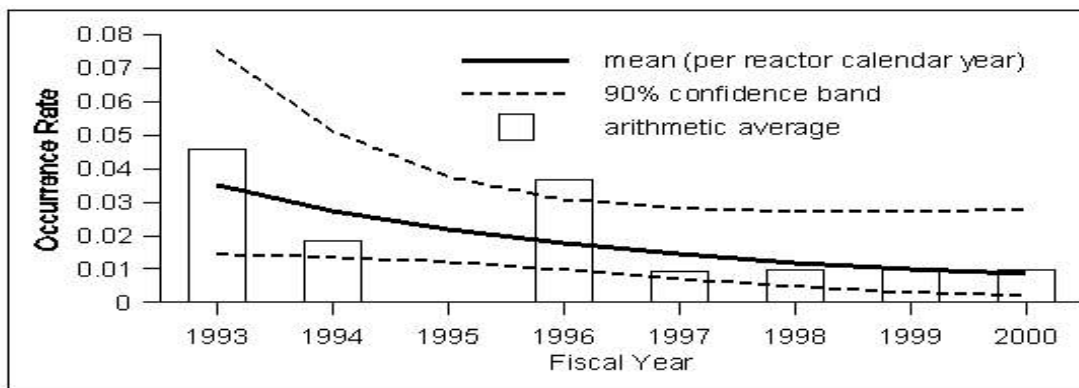


그림 10 연도별 소외전원상실로 인한 Precursor 발생빈도

연간 ASP Index

미 원자력 규제위원회에서는 연간 ASP Index 라는 지표를 설정하여 매년 변화량을 주시하고 있다. ASP Index는 PSA 혹은 IPE에서 평가하는 평균 노심손상빈도를 ASP 결과에서 도출하는 것이다. 각 회계연도별 ASP Index는 ASP 결과에서 나온 조건부 노심손상확률을 당해연도 원자로

운전연수(Reactor year)로 나눈 값이다. 아직 ASP 결과를 이용해 조건부 노심손상확률에서 노심손상빈도를 평가하는 것은 몇 가지 제약에도 불구하고 ASP 결과를 연간 ASP Index라는 이름으로 매년 평가하고 있으며 1993년도부터 2000년도까지의 평가 결과는 다음과 같다.

Fiscal Year	Annual ASP Index(/yr)
1993	1.4×10^{-5}
1994	3.1×10^{-5}
1995	2.1×10^{-6}
1996	2.9×10^{-5}
1997	4.5×10^{-7}
1998	5.9×10^{-6}
1999	9.6×10^{-7}
2000	1.1×10^{-5}
Average	1.2×10^{-5}

3. 국내 원전의 Precursor 시범분석

국내 원전에서 발생한 사건 사고에 관한 ASP 시범분석을 위하여 국내 운전이력을 선별하여 분석을 수행하였다. 국내 ASP 시범분석을 위하여 국내 발전소의 운전 이력 중에서 초기사건의 1건, 기기고장을 1건과 국내 원전중 표준형 원전의 1년간의 운전이력을 참고하여 선별한 4건의 분석대상 Precursor로 선정하여 미국의 ASP 분석방법과 유사한 분석을 수행하였다.

3.1 해양 생물 유입으로 인한 발전소정지 예제분석

국내 원전 중 동해에 인접한 해변에 위치한 발전소에서 빈번히 발생하고 있는 순환수계통의 스크린으로 유입된 새우, 해파리 또는 큰 가시고기와 같은 해양생물이 해수취수계통에 설치된 스크린에 부착됨으로써 순환수의 유입을 막아 발전소가 정지되는 사건을 Precursor 분석대상 사건으로 선정하고 분석을 수행하였다. 이 사건은 불시에 해양생물이 취수구에 유입되어 모든 순환수펌프의 운전을 불가능하게 만들고 있으며 이를 복구시간에도 상당한 시간이 소요되고 있다. 그리고 취수구를 공유하는 두 개의 발전소에 동시에 영향을 미치는 경우도 종종 발생하고 있다. 현재까지 국내 원전의 경험상으로 해양생물이 유입된 경우 순환수의 상실로 발전소가 정지되어 안정화되었던 사건이지만 ASP 분석을 위하여 실제 발전소에서 영향을 받아 정지된 순환수계통 이외에, 동일한 취수구나 인접한 다른 취수구에서 동시에 취수되는 1차 기기냉각해수계통의 상실사건을 가정하여 Precursor 분석을 수행하였다. 본 분석에서는 해양생물이 유입될 경우에 1차 기기냉각 해수냉각수의 상실확률을 1/100(Case 1)과 1/1000(Case 2)을 가정하여 정량화를 수행하였다. 분석결과 Case 1의 경우 조건부 노심손상확률이 1.722×10^{-4} 로 나타났으며 이는 미국 ASP 분석 선정기준과 비교해 볼 때 중요한 Precursor(Important precursor)로 선정될 수 있다. Case 2에 대한 정량화 결과 조건부 노심손상확률은 1.722×10^{-5} 로 나타났으며 미국 ASP 분석 결과 Precursor로 선정될 수 있다. 그러나 현재까지 해양생물 유입으로 인하여 이 사건으로 인한 발전소의 노심냉각이 장애를 받는 등의 사건이 발생하지는 않았지만 발생빈도도 높고 해양생물 유입으로 인한 1차 기기냉각수 상실 가능성도 있고, 이러한 사건발생시 사고완화를 위한 절차 등이 준비되어 있지 않아 사고가 발생할 경우에는 심각한 노심손상을 초래할 가능성이 있다.

3.2 기기고장 관련 Precursor 예제분석

국내 표준형 발전소의 소내 전원공급계통의 하나인 비상디젤 발전기와 교류대체전원 발전기의 기능저하를 Precursor 대상사건으로 선정하여 분석을 수행하였다. 이 분석은 국내 표준원전의 기기

신뢰도 데이터베이스 수집중에 도출된 비상 디젤발전기의 고장율을 이용하여 분표준형발전 PSA 모델에 반영하여 분석을 수행하였으며 사용된 기기고장확률과 분석결과는 아래 표 1과 같다. 분석결과 비상디젤 발전기의 고장으로 인한 노심손상확률 변화는 약 2.0×10^{-6} 으로 나타났으므로 이 경우도 디젤 발전기의 기능 저하로 인한 Precursor로 선정될 수 있다.

표 1 기기고장으로 인한 Precursor 분석에 사용된 디젤발전기 고장율

정점사상	영광 5,6 PSA 기기고장율	Precursor 분석에 이용된 기기고장율	비 고
D/G Fail to Start	1.40 E-2	3.13E-2	
D/G Fail to Run	5.76 E-2	5.76 E-2	
D/G unavailable due to Maintenance	2.63 E-3	2.63 E-3	
AAC D/G Fail to Start	1.4 E-2	3.13E-2	
D/G Fail to Run	5.76 E-2	5.76 E-2	
D/G unavailable due to Maintenance	4.1 E-2	0.5	
노심손상 빈도	7.433 E-6	9.388 E-6	

3.3 국내 표준형 발전소의 1년간 전출력 운전이력을 이용한 시범 분석

국내 원전에서 발생할 수 있는 Precursor를 분석하기 위하여 미국의 ASP 분석과 유사하게 국내 표준형 발전소의 1 년간 운전이력을 입수하여 분석을 수행하였다. 분석 절차는 미 ASP 분석에서 수행하는 1차 예비 정량화 분석 과정까지 만을 수행하였다.

초기사건 유형 분석

해당 연도의 운전이력중에 발생한 소내보조변압기의 이상과 전원절체 실패를 동반한 발전정지 1건을 선별하여 과도사건 수목에 반영하여 초기사건빈도는 '1'을 반영하였고 유발한 소내 보조변압기와 모선간의 절체실패를 고장수목에 논리에 반영하여 고장확률을 '1' 즉 논리적으로 'true'를 적용하여 정량화를 수행하였다. 이 대상사건을 분석에서 영향을 받는 완화계통은 비안전모선으로부터 전원을 공급받는 전동기 구동 주급수계통 및 복수계통 한계열이 정량화 과정에서 제외되었으며 복구조치는 고려하지 않았다. 분석결과는 해당 초기사건으로 인한 조건부 노심손상확률은 1.142×10^{-7} 을 얻었다.

기기고장 유형 분석

기기고장 유형의 Precursor 분석을 위하여 수집된 운전이력에서 계획예방정비 기간을 제외한 기간에 발생한 모든 고장이력중에 국내 표준형 원전의 PSA에서 모델된 기기들의 조방이력중에서 4 건의 기기고장을 선별하여 국내 표준형 발전소 PSA 모델에 반영하여 정량화를 수행하였다.

예제 1

국내 표준형 발전소 PSA에서 주급수계통의 보조로 사고완화에 이용된 기동용급수펌프가 계획예방정비에 시험을 위하여 기동했으나 기동에 실패한 사건을 대상사건으로 선정하였다. 본 분석에서는 미국의 ASP분석과 동일한 방법으로 기기고장을 PSA 모델에 적용하기 위하여 기동용 급수펌프의 고장지속시간을 시험주기를 1년으로 가정하여 고장지속 시간은 시험주기의 반인 0.5년으로 가정하였다. 이 가정을 이용하여 국내 표준형발전소 PSA를 이용하여 분석을 수행하기 위하여 고장지속시간인 0.5년을 적용하여 모든 초기사건의 연중 발생빈도의 1/2로 가정하였고 이기간 동

안에 기동용 급수펌프의 고장확률에 '1'을 적용하여 국내 표준형원전의 PSA 반영하여 정량화를 수행한 결과 조건부 노심손상확률이 3.785×10^{-6} 을 얻었다. 미국의 ASP 분석과 동일한 방법으로 노심손상확률의 변화량을 계산하여 고장 지속 시간의 노심손상확률 변화량은 6.0×10^{-8} 으로 계산되었다.

예제 2

국내 표준형 발전소 터빈구동 보조급수계통 펌프의 주기시험 중에 증기공급밸브의 개방실패(fail to open)로 인하여 펌프의 기동이 실패한 사건을 대상사건으로 선정하였다. 본 분석에서도 위에서 언급한 기동용 급수펌프의 고장과 유사하게 보조급수 펌프의 고장지속 시간은 시험주기의 반인 1080(1/2 x 90day x 24hrs/day)시간과 고장보고서에 기술되어 있는 총 수리시간인 41시간의 합인 1121시간을 가정하였다. 이 가정을 이용하여 국내 표준형발전소 PSA를 이용하여 정량화를 수행하기 위하여 고장지속 시간인 1121시간을 적용하여 모든 초기사건의 연중 발생빈도에 고장 지속을 적용하여 환산하여 가정하였고 이 기간동안에 고장난 터빈구동 보조급수펌프의 고장확률에 '1'을 적용하여 분석결과 조건부 노심손상확률이 1.044×10^{-6} 을 얻었다. 이 결과를 미국의 ASP 분석과 동일하게 고장이 지속된 1121시간 동안의 노심손상확률의 변화량은 0.1×10^{-6} 으로 계산되었다.

예제 3

국내 표준형 발전소 비상 디젤발전기의 주기시험 중에 두 번의 기동실패(fail to start)를 분석대상 사건으로 선정하였다. 이 분석에서도 고장지속 시간은 시험주기의 반인 360(1/2 x 30day x 24hrs/day)시간과 고장보고서에 기술되어 있는 총 수리시간인 40 시간의 합인 400 시간을 가정하였다. 이 가정을 이용하여 국내 표준형발전소 PSA를 이용하여 정량화를 수행하기 위하여 고장 지속시간인 400 시간을 적용하여 모든 초기사건(16개 초기사건)의 연중 발생빈도를 고장지속에 발생할 수 있는 빈도로 환산하여 정량화에 적용하였고 이 기간동안에 고장난 비상 디젤발전기의 고장확률은 '1'을 적용하였다. 분석결과 조건부 노심손상확률이 1.2794×10^{-6} 을 얻었다. 이 결과를 미국의 ASP 분석과 동일하게 가정이 작용된 고장이 지속된 400시간 동안의 노심손상확률의 변화량은 0.9×10^{-6} 으로 계산되었다.

국내 Precursor 시범 분석 결과

국내에서 발생한 사건 사고중에서 두 건의 개별사건과 국내 원전 한개 호기 1년간의 운전이력을 이용하여 Precursor 분석을 수행하였다. 두 건의 개별사건은 모두 미국의 ASP 분석과 유사한 방법으로 분석을 수행하여 중요한 Precursor로 선정될 수 있다는 결론을 도출하였다.

해양생물에 의한 발전정지 사고는 국내에서 자주 발생하고 있고 2001년에도 울진 부지에서 2회가 발생하여 발전소가 정지되는 사고를 경험하였으며 최근에도 유사한 경험이 있으므로 해양생물의 유입으로 인하여 발전소 정지사건은 발생빈도도 무시할 수 없는 수준이고 유입되는 해양생물의 양이나 복구에 걸리는 시간 및 절차 등을 검토해 볼 때 1차 기기냉각해수계통에 영향을 줄 가능성은 무시할 수 없는 수준이다.

국내 표준형 발전소의 소내 전원공급계통의 하나인 비상디젤 발전기와 교류대체전원 발전기의 기능저하를 대상사건으로 분석을 수행한 결과도 수집된 자료가 기기고장 일자나 기기고장 지속시간에 대한 정보가 부족하여 정확한 분석은 아니나 Precursor로 선정될 만한 사건이었다. 최근 미국 동부 및 캐나다에서 발생한 정전사고와 국내 원전의 태풍과 같은 이상기후로 인한 소외전원 상실 사고의 위험성이 상존하므로 각 원전에 설치된 비상 디젤발전기의 안정적인 유지보수가 필요하다.

국내표준 원전의 1년간의 운전자료를 이용한 Precursor 분석은 초기사건 유형의 사건 1건과 기기고장 유형의 4건의 대상사건의 분석 결과 Precursor 분석 대상 사건은 발생하지 않은 것으로 판단된다. 그러나 이 사건이력에는 중요기기의 기능 고장, 계획예방정비 중의 기기고장 이력이나 기기 정비중에 발견되는 심각한 고장 및 징후 등에 대한 정보가 부족하고 대상원전의 PSA에 모델되지 않은 기기의 고장이 제외되어 정확한 분석이 될 수 없었다.

4. 결론

본 연구에서는 PSA를 기반으로 한 사건분석의 하나로 미국에서 수행되고 있는 ASP 분석에 관한 전반적인 분석체계를 살펴보고 국내에서 발생한 사건을 국내 PSA에 반영하여 시범분석을 수행하였다.

미국은 1982년부터 현재까지 미국의 운전이력인 LER을 검토하여 발전소 안전성에 중요한 영향을 미칠 수 있는 사건을 선별하여 이 사건을 대상으로 확률론적인 방법론을 적용하여 Risk를 평가하는 ASP 분석을 수행해오고 있다. 미국에서는 이 분석을 통하여 발전소 안전성을 향상시킬 수 있는 새로운 기기의 설치나 각종 절차서의 개선을 수행하여 Precursor의 발생횟수를 대폭 줄였다. 그리고 현재까지 발전소에서 발생하는 모든 사건이력과 발생추이를 감시하고 그 영향을 평가함으로써 추후 발전소 설계나 새로운 규제나 제도를 설정하기 위한 수단으로 ASP 분석을 수행하고 있다. 최근 미국에서는 ASP 결과를 이용하여 위험도기반 규제인 ROP 상의 성능감시 수단과 각종 위험도 기반 규제 업무에 ASP 결과나 방법론과 SPAR 모델의 사용은 계속해서 확대될 전망이다. 이러한 목표를 위하여 수년전부터 기존의 ASP 분석에 이용되는 각종 data의 보완과 함께 미국내 발전소의 특징 들을 정확하게 반영하여 다양한 분야에 이용될 수 있는 표준 모델인 SPAR 모델의 구성을 위한 장기적인 계획을 수립하여 단계별로 개선하고있다.

국내에서 발생한 사건에 대한 Precursor 분석결과에서는 발전소 취수구로의 해양생물의 유입과 디젤발전기의 기기고장율을 이용한 Precursor 분석이 Precursor로 선정이 가능한 사건으로 분류할 수 있다. 이중 해양생물의 유입으로 인한 사건은 조건부 노심손상확률이 크게는 1×10^{-4} 에서 작게는 1.0×10^{-5} 정도로 분석되었다. 이 사건은 과거 발전소 취수구로의 해양생물 유입으로 인한 발전소 정지사건 경험을 검토해볼 때 발생빈도도 높고 취수구를 공용으로 이용하는 호기에 동시에 영향을 미치는 경우도 자주 발생하고 있어 재발방지나 1차 기기냉각해수계통의 상실에 대비한 대책 마련이 시급한 사건으로 판단된다. 비상 디젤발전기의 기능저하로 인한 Precursor 분석은 최근 미국 및 캐나다에서 발생한 정전사태나 국내에서 발생한 태풍으로 인한 발전소정지사건을 고려해 볼 때 비상디젤 발전기의 신뢰도를 좀더 높은 수준에서 유지하여야 할 것으로 판단된다.

국내 표준형 발전소 한 호기 1년간의 운전이력을 대상으로 수행된 시범분석에는 Precursor로 선정된 사건은 없었지만 국내 모든 원전의 안전성을 강화하기 위해서는 주요 안전기기를 비롯한 사고완화 기기의 신뢰도를 계속적으로 감시하고 평가해볼 필요가 있을 것으로 판단된다. 그 외에 본 분석에서는 제외되었지만 정지저출력 운전중에 붕괴열제거에 영향을 줄 수 있는 초기사건이나 정비중에 발견되는 각종 기기의 고장 또는 PSA에 모델이 불가능 하지만 안전성에 영향을 줄 수 있는 사건들에 대한 분석도 국내 원전의 안전성을 높이기 위해서는 각 사건별로 정확한 Risk 평가를 통한 안정성확보 방안이 마련되어야 한다.

따라서 국내에서도 국내원전에서 운전이력들을 대상으로 국내 고유의 Risk 발생 추이를 파악하여

재발방지나 조만간 국내에 도입될 것으로 보이는 위험도 기반 규제나 적용을 위한 발판을 마련하기 위해서는 ASP 분석과 같은 종합적인 Risk 평가를 위한 지속적인 관리체계가 시급하다. 이를 위해서는

- 미국의 LER 과 같은 국내원전의 운전이력을 정기적으로 수집할 수 절차와
- 국내 원전별 설계 및 운전특성이 반영된 고유의 ASP 분석 모델
- ASP 분석을 계속해서 수행할 수 있는 제도적 장치 및 지원

이 필요하다.

참고문헌

1. "Reactor Safety Study" : An Assessment of Anticipated Risks in U.S. Commercial Nuclear Power Plants," WASH-1400, October 1975.
2. J.W. Minarick and C.A. Kukielka, Union Carbide Corp., Nuclear Div., Oak Ridge Natl. Lab.; and Science Applications, Inc., Precursors to Potential Severe Core Damage Accident:1969-1979, A Status Report, USNRC Report NUREG/CR-2497 (ORNL/NSIC-182/V1 and V2), June 1982.
3. R.J. Belles, J.W. Cletcher, D.A. Copinger, B.W. Dolan, J.W. Minarick, and M.D. Muhlheim, Lockheed Martin Energy Systems, Inc., Oak Ridge Natl. Lab.; and Science Applications International Corp., Precursors to Potential Severe Core Damage Accidents: 1995, A Status Report, USNRC Report NUREG/CR-4674 (ORNL/NOAC-232, Vol. 23), April 1997.
4. Risk Assessment Group Report, USNRC Report NUREG/CR-0400, September .
5. 원전 저층취수와 해양생물 유입 방지 효과, 한국전력공사 월성원자력본부 제2발전소, 장태희, 1998.
6. 영광 5,6 PSA, 한국전력공사 전력연구원.
7. SECY-97-296, SECY-98-298, SECY-99-289, SECY-01-0034, SECY-01-0041, SECY-03-0049, Status Report on Accident sequence Program and Related Initiatives.
8. KINS/RR-191, 위험도 정보의 규제활용을 위한 기술 기반 조사, 한국원자력안전기술원, 2003. 4.
9. KAERI/TR-2120/2002, ASP 분석 및 적용 연구, 한국원자력연구소, 2002. 3.