

# 원자력발전소 비상상황 시 운전원의 부적절한 개입조치 사건의 분석 방법

김재환 · 정원대 · 박진균

한국원자력연구소

## 1. 서 론

원자력발전소의 안전성을 평가하는 확률론적안전성평가(PSA) 기법 내에서 인간신뢰도분석(HRA: Human Reliability Analysis)은 파악된 사고경위 중 부적절한 인적행위 사건에 대한 분석 및 평가를 담당하고 있다. 여러 HRA 전문가들이 제기하고 있는 기존 PSA HRA의 개선점 중 정성적 분석 관점에서 중요하게 고려되는 사항을 정리하면 다음과 같다. 첫째, 운전원의 진단 및 상황판단 또는 의사결정 단계에서의 특정한 오류 유발상황(error producing conditions or error forcing context)을 분석할 수 있는 방법이 필요하며, 둘째, 다양한 인적오류사건의 고려이다. 기존 HRA 방법의 경우, 운전원의 인지과정이 단순화되고 정량적인 평가를 위한 공학적 모형 정도의 수준이었다. 또한, 기존 HRA에서 고려하고 있는 인적오류사건은 주로 시스템에 의해 운전원에게 요구되는 기능을 요구되는 수행도로 달성하지 못하는 경우만을 다루어 왔다. 그러나, TMI-2 (1979), Davis-Besse (1985), Fort-calhoun (1992), North-Anna 2 (1993) 등의 원전 사건/사고에서 드러난 것과 같이<sup>1)</sup>, 운전원이 상황에 적절하지 않은 조치(EOC: Errors of Commission)를 취함으로써 원전 안전성을 저해시키거나 주요 안전계통을 비가용 상태로 둘 수 있음을 보여주었다. 앞에서 열거한 원전 사건/사고에서 발생한 운전원의 EOC 사건의 직접적 원인 및 상황을 유형별로 정리하면 다음과 같다.

1. 물리적 상황전개가 복잡하고 빠른 동적특성을 보이는 상황에서의 운전원 상황판단 실패와 이로 인한 EOC 사건의 유발 (TMI-2, Fort-calhoun)
2. 조치의 부적절한 수행으로 인해 시스템의 기능상실을 유발시킬 수 있는 부적절한 MMI 설계 (Davis-Besse)
3. 발전소별 운전원의 안전규칙에 대한 인지도 및 운전 관행 (North-Anna 2)

위 유형 중, 본 논문에서는 원전 운전원의 사고진단, 상황판단 및 의사결정 단계의 부적절성으로부터 유발될 수 있는 EOC 사건을 다룬다. 원전 비상 시나리오 시의 운전원 EOC 분석에 관한 연구는 Julius<sup>2)</sup>, Dang<sup>3)</sup>, USNRC<sup>4)</sup> 등이 수행되었다. 그러나, 이 방법들은 원전 비상사고 시나리오의 상황적 정보(Context)를 방법 상에서 체계적으로 제시하고 있지 못하거나, 다른 한편으로는 원전 위험도 분석 범위를 넘어서는 상세한 분석을 요구하는 방법으로 평가되고 있어, 원전 위험도 분석 체계 내에서 고려할 수 있는 적절한 수준의 EOC 사건을 적절한 분석자원으로 분석할 수 있는 새로운 분석체계

및 방법이 필요하다.

본 연구에서는 원전 운전원의 의도형성 오류로 인해 유발될 수 있는 EOC 사건의 도출과 관련 상황정보를 체계적으로 분석할 수 있는 분석 체계를 제안한다.

## 2. 방법

본 체계에서는 발생사건에 대한 운전원의 진단 가능성을 분석대상 초기사건에 대한 오진단 가능성과 초기사건 발생 후 전개되는 사건진행 중에 새로이 유발되는 사건에 대한 오판단 가능성 등에 대해 분석함으로써 특정 상황에서의 EOC 조치 가능성을 분석하는 방법을 기본구조로 한다. 초기사건 및 유발사건의 발생과 진단 가능성에 따른 사고경위의 분류를 도식적으로 표현하면 그림 1과 같다.

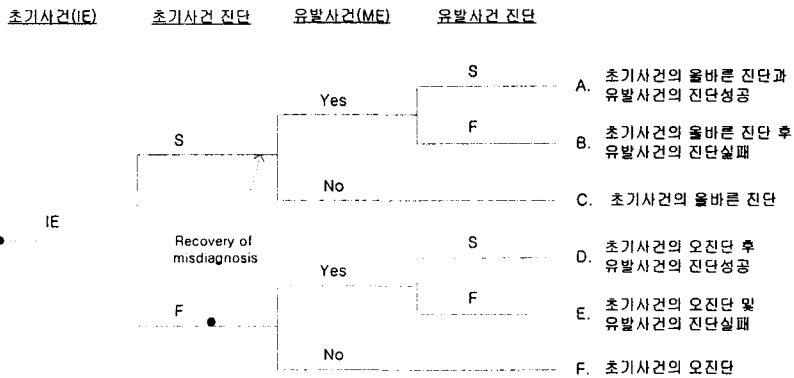


그림 1. 초기사건 및 유발사건의 발생과 진단 가능성에 따른 사건의 분류

위 그림 1에 따라, 주어진 초기사건의 비상조치 시 발생 가능한 운전원의 부적절한 조치 가능성의 분석은 다음과 같이 세 가지 항목의 평가 및 파악과 함께 이루어진다.

- 1) 초기사건의 오진단 가능성 평가
- 2) 유발사건이 발생 가능한 사고경위의 파악
- 3) 유발사건의 진단 가능성 평가

초기사건의 오진단 가능성은 초기사건 간 물리적 동특성의 유사성으로 인해 사고진단 절차서를 이용한 사건진단 수행 중 다른 사건으로 진단할 가능성이 존재하는 사건에 대하여 고려하며, 유발사건은 초기사건으로 인한 사고진행 중 시스템의 물리적 동특성 또는 주요 계통/기기(system/component)의 기능상실로 인해 추가적으로 발생하는 사건을 말한다.

이에 따라, 본 방법에서는 주어진 초기사건의 사고경위를 유발사건의 발생 가능성이 존재하는 경위와 그렇지 않은 경위로 별도 구분하여 각각에 대하여 운전원의 부적절한

조치 가능성을 분석하게 된다. 이것은 앞에서 기술한 바와 같이, 유발사건이 발생한 경우, 그에 따른 발전소 상황에 대한 새로운 진단 및 상황파악이 요구되기 때문이며, 만약 이 새로운 사건에 대한 진단이 적절히 이루어지지 않는다면 그 후 전개되는 발전소 동적 거동에 대한 부적절한 해석으로 부적절한 조치를 취할 가능성이 존재하기 때문이다. 이에 따라, 본 방법에서는 주어진 초기사건에 따른 사고경위 상에서의 부적절한 조치 가능성을 다음과 같은 세 가지 경우로 분류하여 분석한다.

- CASE 1: 초기사건(initiating event)의 오진단(misdiagnosis)으로 인한 EOC 가능성
- CASE 2: 초기사건의 올바른 진단 후 주어진 초기사건과 관련된 절차서 수행 중 발생 가능한 EOC 가능성
- CASE 3: 초기사건으로 인한 원자로 정지 이후 사건진행 과정에서 새롭게 유발될 수 있는 사건으로 인한 EOC 가능성

기본적으로CASE 1과 CASE 3는 발전소의 상황판단 실패를 기저로 하여 발생할 수 있는 EOC 사건을 분석하기 위한 체계이며, CASE 2는 초기사건의 진단은 성공했으나 정확한 상황모형이 형성되지 않은 경우와 절차서 수행 중 발생할 수 있는 국부적인 EOC 발생 가능성을 다룬다. 이 세 가지 유형은 한 초기사건에 대해 서로 독립적이며 한 초기사건에 모든 경우를 포함한다.

유형 1과 관련된 분석과정을 간략히 기술하면 다음과 같다. 초기사건의 오진단 가능성은 오진단 확률과 효과 측면이 모두 해당되는 초기사건에 한하여 분석의 필요가 요구된다. 즉, 다음 두 가지 조건을 모두 만족하는 사건에 대해 분석이 요구된다.

- 1) 초기사건 간 유사한 물리적 특성으로 인한 다른 사건으로의 오진단 가능성이 존재하는 사건
- 2) 부적절한 절차서의 선택으로 말미암은 운전원의 조치가 해당 초기사건에 대하여 발전소의 안전상태에 부정적인 영향을 주는 경우

이에 따라, 본 경우의 분석은 크게 두 단계로 구분되어 분석된다. 첫번째 단계는 주어진 초기사건의 다른 사건으로의 오진단 가능성을 분석하는 과정이며, 두번째 단계는 오진단으로 인한 부적절한 절차서 선택 후 이로 인해 발생할 수 있는 부적절한 조치를 파악하는 과정이다. 운전원의 오진단 가능성 분석은 초기사건의 물리적 특성과 현 발전소의 비상운전절차서(EOP)의 진단 절차를 기반으로 하여 분석된다. 본 연구에서는 운전원의 오진단 원인으로 다음과 같이 세 가지 요인을 고려하였다.

- 물리적 특성이 애매한 경우 (PD: Plant Dynamics)
- 운전원 오류 가능성 (HE: Human Error)
- 계측기 오작동 (IF: Instrumentation Failure)

위 세 가지 요인을 바탕으로 오진단수목분석(MTA: Misdiagnosis Tree Analysis)을 이용함으로써 오진단 사건을 분석할 수 있다<sup>5)</sup>.

유형 2와 관련된 EOC 사건도출 및 분석은 다음의 3단계로 요약된다.

- 단계 1: 초기사건과 관련된 시스템의 기능상실을 유발하는 EOC 사건의 도출
- 단계 2: EOC를 유발하는 상황조건의 분석
- 단계 3: 회복 가능성 평가.

유형 3에 대한 간략화된 EOC 유발 상황분석 절차는 다음과 같다.

- 단계 1: 발전소의 물리적 동특성 또는 특수한 상황으로 인한 운전원의 EOC 조치 가능성 평가
- 단계 2: 새로운 사건 도입에 대한 절차서의 진단능력 평가
- 단계 3: 주요 계측기 오작동 모드를 포함한 복합상황의 고려와 EOC 조치 가능성 평가
- 단계 4: EOC 조치의 회복가능성 평가

### 3. 적용 및 결과

본 연구에서 제안한 EOC 분석체계를 영광 2발 호기의 전출력 운전 중 비상 시나리오 시에 발생 가능한 EOC 사건의 분석에 적용하였다. 표 1은 발생가능한 EOC 사건을 각 유형별로 정리한 것이다.

유형 1의 초기사건 오진단 가능성 분석을 위해서 원자로 정지를 유발하는 초기사건을 영광 2발의 비상운전절차서(EOP)에 따라 ATWS, LOOP, SBO, LOAF, LOCA, SGTR, ESDE, General Transients 등으로 구분하고, 발전소의 물리적 반응 특성상 혼동 가능성이 있는 LOCA, SGTR, ESDE 등 세 사건 간의 오진단 가능성을 분석하였다.

오진단 원인을 고려하여 영광 2발 EOP의 사고진단절차인 우선-02를 토대로 구성된 초기사건 LOCA, SGTR, ESDE의 오진단 수목(Misdiagnosis Tree)을 작성함으로써 오진단 가능성 분석을 수행하였다. LOCA의 경우, GTRN과 ESDE로 오진단할 가능성이 진단절차 단계 상의 특정한 원인으로 2회 또는 3회의 부적절한 경로선택으로 발생 가능함을 보여주었으며, SGTR인 경우는 2차측 방사능 경보가 실패할 경우 LOCA(1회), GTRN(2회), ESDE(3회)로 오진단할 가능성이 있으며, ESDE인 경우 LOCA(1회), GTRN(2회)으로 오진단할 가능성이 각각 존재하는 것을 보여 주었다. SGTR의 다른 사건으로의 오진단 가능성은 반드시 다수의 2차측 방사능 경보의 실패를 포함하게 되므로 발생 확률은 매우 낮을 것으로 추정되며, ESDE의 오진단 가능성은 하나 또는 다수의 정보계측기 실패를 전제로 하여 발생가능하며, LOCA로의 오진단 시에도 원전 안전성 관점에서는 큰 영향이 없을 것으로 판단된다.

유형 2에 해당하는 사고경위는 다음과 같다. 1) SBO \* RT \* TDAFW \* PSV 개방 고착 \* 전원복구, 2) (Transients/SLOCA) \* MFW/AFW \* MSSV Stuck-open, 3) (Transients) \* LOFW \* LOAFW, 4) ATWS \* MTC (OK) \* PSV 개방 고착, 5) ATWS \* MTC (OK) \* CSGTR.

첫 번째 사고경위인 'SBO \* RT \* TDAFW \* PSV 개방고착 \* 전원복구' 사고경위

의 경우, 절차서 상으로 PSV 개방고착 가능성에 대한 운전원의 특별한 주의나 대비가 되어있지 않은 상태이므로, 만약 관련 계기가 오작동 상태이거나 신뢰성이 떨어지는 것이라면 가용한 여유시간이 20분 이내이므로 EOC 가능성이 존재한다. 두 번째 경위인 MSSV 개방고착 사건이 발생한 경우, 일시적으로 증기발생기 수위가 저하되므로 증기발생기 주입유량을 증가시킬 수 있다. 그러나, 과도사건 시 이로 인한 원자로심에 미치는 영향은 상세한 노심반응 해석이 필요하다. 세 번째 경위인 완전급수상실 사건 발생의 경우에는 물리적 특성으로 인한 EOC 가능보다는 '방출 및 주입 운전'으로 인한 발전소에 미치는 부정적 효과와 급수계통의 회복 가능성에 대한 기대로 인한 'HPSI 계통의 사전 차단' 가능성이 발생할 수 있다. 네 번째 사건인 ATWS 시 PSV 개방고착인 경우, 절차서의 수준과 강화된 HPSI 종결조건 등을 고려할 때 EOC 유발 가능성은 매우 낮다. 마지막으로 다섯 번째 사건인 ATWS 시 결과적 SGTR (CSGTR)이 발생한 경우, 해당 절차서인 '회복-01' 중 'RCS 노심열제거(SIS 운전)' 부분에 SGTR 진단절차가 마련되어 있으나, 해당 절차서의 진입조건이 대부분 만족되어 관련 절차를 이용하지 않을 수 있다. 사고전개 도중 SGTR 발생으로 관련 경보가 발생되지만, 비상상황 대응 중 경보는 운전원에 의해 잘 인식되지 않을 수 있으므로 적절한 절차서 상의 반영이 필요한 것으로 평가된다.

마지막으로, 유형 3과 관련된 EOC 사건분석 결과는 다음과 같다. 각 초기사건의 반응 특성에 따라 요구되는 시스템 기능이 서로 상이할 수 있으나, 대체로 LOCA 사고의 경우 안전주입, 노심냉각 및 감압 기능이 요구되고, SGTR이나 LSSB 사고의 경우 안전주입과 격리, 노심냉각 및 감압 기능 등이 요구되고, 기타 과도사건 시에는 노심냉각 및 감압 기능이 주로 요구된다. 모든 초기사건에 대한 분석 결과, LOCA 시에 HPSI의 부적절한 종결 사건과 SGTR 시 파열 증기발생기의 이른 격리 등이 발생 가능한 EOC 사건으로 분석되었다. LOCA 시 HPSI의 부적절한 종결 사건은 PSV LOCA 발생과 이에 대한 사건진단은 성공하였으나, PSV LOCA에 대한 정확한 발전소의 상황판단 문제로 인해 충분한 가압기 수위가 유지될 경우 HPSI의 이른 종결 조치가 발생할 수 있다. SGTR 시 파열 증기발생기의 이른 격리 조치는 비록 절차서 상으로는 노심냉각 조건 (RCS Th < 287 °C)이 만족할 경우 격리하도록 되어 있으나, SGTR의 뚜렷한 증상으로 긴급한 조치로 이른 조치를 취할 가능성이 존재한다.

표 1. 영광 2발 원전에 대한 유형별 EOC 분석결과

유형	사고경위	가능한 EOC 사건
유형 1	LOCA -> GTRN, ESDE: LOCA * HPSI	- Inappropriate termination of HPSI - Isolation of the Intact SG
유형 2	SBO * RT * TDADF * PSV Stuck-open * AC Recovery	- Inappropriate termination of HPSI
	(Transients/SLOCA/SGTR) * AFW * ADV/ MSSV Stuck-open	- Increase AFW flowrate (EOC)

	(Transients/SLOCA/SGTR) * LOFW * LOAFW	- Inappropriate isolation of HPSI (EOC)
유형 3	PSV LOCA (MLOCA/SLOCA) * HPSI	- Inappropriate termination of HPSI (EOC)
	SGTR	- Isolation of the fault SG too early (EOC)

#### 4. 결 론

원전에서의 EOC 사건은 TMI-2 사건이후 타 원전에서도 지속적으로 유발되어 왔다. 기존의 PSA에서는 원전 운전원에 의해 유발될 수 있는 EOC 사건을 고려하지 않았으며, 단지 시스템의 안전기능을 위해 요구되는 운전원 행위만을 평가대상으로 고려하여 왔다. 그러나, 기발생한 원전의 사건/사고에서 보는 바와 같이, 원전의 안전성에 영향을 줄 수 있는 EOC 사건이 실제 원전 운전에서 발생하고 있음을 볼 수 있다. 이에 본 연구에서는 현 원전의 출력운전 중에 특정 초기사건의 발생 후 운전원의 사고대응 과정 중에 원전 안전성에 영향을 줄 수 있는 주요 EOC 사건의 유형과 유발상황을 분석할 수 있는 분석체계를 제시하고, 국내 발전소인 영광 3&4호기에 시범 적용함으로써 제안한 방법의 적용가능성을 제시하였다.

#### 감사의 글

본 연구는 과학기술부의 중장기 연구개발사업의 지원으로 수행되었음.

#### 참고문헌

- 1) 김재환 외, 비상사고 시 운전원의 부적절한 조치 가능성에 대한 사례검토 및 분석 방향, KNS 추계학술발표회, 2002.
- 2) Julius J, et al. A procedure for the analysis of errors of commission in a probabilistic safety assessment of a nuclear power plant at full power. Reliability Engineering and System Safety 1995; 50: 189-201.
- 3) Dang, V., Reer, B, Hirschberg, S., Analysing errors of commission: identification and a first assessment for a swiss plant, OECD/NEA Workshop on Building the New HRA: Errors of Commission from Research to Application, Rockville, MD, May 7-9, 2001.
- 4) USNRC, Technical basis and implementation guidelines for a technique for human event analysis (ATHEANA), NUREG-1624, Rev. 1, 2000.
- 5) 김재환 외, 원자력발전소 비상사고 시 운전원의 부적절한 개입조치 사건에 관한 연구: 분석 방법의 개발과 적용, KAERI/TR-2458, 2003.