

2001 추계학술발표회 논문집

한국원자력학회

정지 PSA에서의 인간오류 의존성
Dependency of Human Errors in Shutdown PSA

성태용 강대일

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150

서미로

진력연구원

대전광역시 유성구 문지동 103-16

요약

본 논문에서는 정지 PSA에서 나타나는 다수 인간오류 간의 의존성을 다루는 전반적인 방법을 정지/저출력 PSA 수행 경험에 근거해 기술하였다. 인간신뢰도분석 관점의 인간오류 간의 의존성 평가 방법과 PSA 수행 과정에서 의존성을 적절히 고려할 수 있도록 인간오류를 사고경위에 모델링하고, 정량화하는 방법을 기술하였다. 원전 정지 운전 중에는 운전원이 안전계통 대부분을 수동으로 작동해야 하기 때문에 정지 PSA 모델에는 많은 인간행위가 모델링되며, 노심 손상 빈도에 미치는 영향도 크다. 특히 단일 사고경위 단절집합 내에 나타나는 다수 인간 행위 간의 의존성을 적절히 평가해야 타당한 정량화 결과를 얻을 수 있게 된다.

Abstract

This paper describes the overall methods to handle the dependencies between human errors showed in shutdown PSA based on the insights from low power and shutdown PSA. This paper includes an evaluation method of human dependencies in the context of human reliability analysis and how to model them in accident sequence analysis and quantify them. Many human actions are modeled in shutdown PSA because almost safety systems are manually operated during shutdown. Those human actions greatly affect the core damage frequency. In particular, it is very important to treat properly the dependencies of multiple human errors in the cutest level in the shutdown PSA.

1. 서론

원자력 발전소는 정지 이후에도 잔열이 계속 발생하여 이를 적절히 제거해야만 안전성이 확보된다. 80년대 전반기까지는 원전의 정지/저출력 운전 중의 위험도가 낮다고 인식되어 왔다. 그러나 노심손상을 초래할 가능성이 있는 사건들이 원자로 정지 중에 빈번하게 발생하는 사례를 경험하게 되면서 정지/저출력 운전 중의 안전성에 대한 연구가 정지냉각 기능 상실에 초점을 맞추어 80년대 중반부터 수행되었다[1]. 특히 1990년 프랑스가에서 수행한 표준 원전에 대한 확률론적 안전성 평가(Probabilistic Safety Assessment; PSA) 결과 정지/저출력 시의 노심손상빈도가 총 노심손상빈도의 32-56%를 차지하는 것으로 나타난 이후 정지/저출력 운전 모드에 대한 안전성 문제가 더욱 부각되었다[2, 3]. 이후 세계 각국에서 정지/저출력 운전 모드에 대한 안전성을 평가하기 위하여 많은 노력을 기울이고 있다. 국내에서도 현재 신규 건설 중이거나 설계중인 원전에 대해 정지/저출력 PSA를 수행하고 있다.

현재 정지/저출력 PSA에 대한 방법론은 세계적으로 완전히 확립되어 있지 않아 여러 부분에 대한 연구가 진행되고 있으며, 특히 정지/저출력 PSA의 인간신뢰도분석 방법도 중요한 연구 분야 중 하나이다. 정지 PSA에서는 발전소 이상 상태 시 작동되어야 하는 안전 계통 대부분을 운전원이 수동으로 작동해야 하기 때문에 전출력 PSA보다 많은 인간행위가 모델링되며, 노심 손상 빈도에 미치는 영향이 매우 크다. 따라서 정지 PSA에서는 체계적이고 적절한 인간신뢰도 분석이 매우 중요하다. 정지 운전 시에는 전출력 운전과는 다르게 긴 운전원 여유시간과, 불명확하거나 부족한 절차서, 그리고 다수의 인간행위(multiple human actions in accident sequences) 등과 같은 정지운전 고유의 특성으로 인해 전출력 PSA에서 사용하던 인간신뢰도 분석 절차와 방법을 정지 PSA에 직접 적용하는 데에는 문제점이 있다.

특히 다수의 인간행위로 인해 나타나는 인간 행위간의 의존성을 적절히 평가하는 것이 매우 중요하다. 정지 운전 중의 발전소 이상 상태 발생시 사건의 완화가 대부분 운전원의 수동 조치에 의해 이루어진다. 따라서 사고경위 정량화 결과 하나의 단절 집합에 여러 개의 인간오류 사건이 나타날 수 있다. 이러한 동일 사고경위에 나타나는 다수의 인간오류 간의 의존성을 적절히 다루어야 인간신뢰도 분석의 신뢰성이 확보되고 타당한 PSA 결과를 얻을 수가 있다.

본 논문에서 소개되는 방법은 한국원자력연구소에서 수행한 원자력 중장기연구개발사업에 의해 개발되었으며, 영광 5,6호기 정지/저출력 PSA에서 사용되었다. 본 논문에서는 2장에서는 인간 신뢰도분석 관점에서 인간오류 의존성 평가방법에 대해 기술하였고 이를 적절히 반영할 수 있는 사고경위 정량화 과정에서 인간오류 모델링 방법과 정량화 방법에 대해 3장에서, 마지막으로 결론을 기술하였다.

2. 인간오류 의존성 평가

PSA에서 인간오류 의존성이란 어떤 특정한 인간오류 확률이 다른 인간오류 확률에 영향을 끼치는 것으로서 이를 적절히 다루어야 인간신뢰도 분석의 신뢰성이 확보되고 타당한 PSA 결과를 얻을 수 있다.

2.1 인간오류 의존성

정지 PSA에서 노심손상을 나타내는 사고경위의 단절집합 중에는 둘 이상의 인간행위가 포함될 수 있다. 이러한 둘 이상의 인간행위들 사이에는 기기의 공통원인 고장(common cause failure)과 같이 인간행위 목적의 동일성(예; 펌프나 증력을 이용한 냉각재 주입과 관련된 인간행위), 또는 사용 절차서의 공통성 등으로 인해 의존성이 존재하게 된다.

이러한 사고경위 상의 다수 인간행위 사이에 존재하는 의존성을 제대로 평가하지 않으면 사고경위 빈도가 낮게 평가돼 낙관적인 결과를 얻게 된다. 이러한 의존성을 적절히 평가하기 위해서는 단절집합 내 다수 인간행위 간의 관계를 적절히 해석하여야 한다. 사고경위 상에 두 인간행위 A와 B를 나타내는 단절집합 $A * B$ 가 있을 때, 단순히 인간행위 A와 B가 독립적으로 실패했다고 해석하여 두 사건의 발생확률의 곱을 사용하는 것은 인간 행동의 특성을 간과하는 것이다. 여러 가지 사고경위의 정황 및 인간오류 발생원인 등을 고려하여 이들 다수의 인간행위 사이의 의존성을 고려해야 한다.

현재 인간신뢰도분석에서 많이 사용 중인 THERP(Technique for Human Error Rate Prediction) [4]와 ASEP(Accident Sequence Evaluation Procedure)[5]에서는, 행위(task 또는 action)를 이루고 있는 세부행위(sub-task 또는 activities)와 운전원들 간에 대해서만 의존성 평가 기준을 제시하고 있다. 즉 사고경위 상의 다수의 인간 행위들 사이에 나타나는 의존성에 대해서는 구체적인 평가방법을 제시하지 않고 있다. 이에 본 연구에서는 현존하는 의존성 평가 방법 등을 검토하여 의존성 수준을 평가할 수 있는 기준 및 의존성이 있는 인간오류 확률 평가 방법을 설정하였다.

2.2 인간오류 의존성 평가

1.2.1 의존성 평가 기준

의존성에는 여러 가지가 있지만 크게 i) 행위(과제)를 이루는 세부 행위(세부 과제) 사이의 의존성, ii) 운전원 사이의 의존성, iii) 동일 사고경위에 나타나는 여러 운전원 행위 사이의 의존성이 있다.

행위(과제)를 이루는 세부 행위(세부 과제) 사이의 의존성은 독립이나 완전 의존으로 평가한다.

예를 들면 정지냉각 기능 복구 운전원 행위는 정지냉각계통 운전 조건 확인, 관련 밸브 정렬, 펌프 기동 등 여러 가지의 세부 행위로 이루어지며, 이들 간의 의존성은 독립 또는 완전 의존으로 평가된다. 운전원 사이의 의존성은 수행오류(execution error)의 회복 오류 정량화 과정에서 고려 되며, 분석 대상 행위의 수행 시간과 운전원 상호간의 관계(운전원과 발전 과장 또는 안전과장)를 고려 그림 1의 결정수목에 근거하여 의존성 수준을 평가한다.

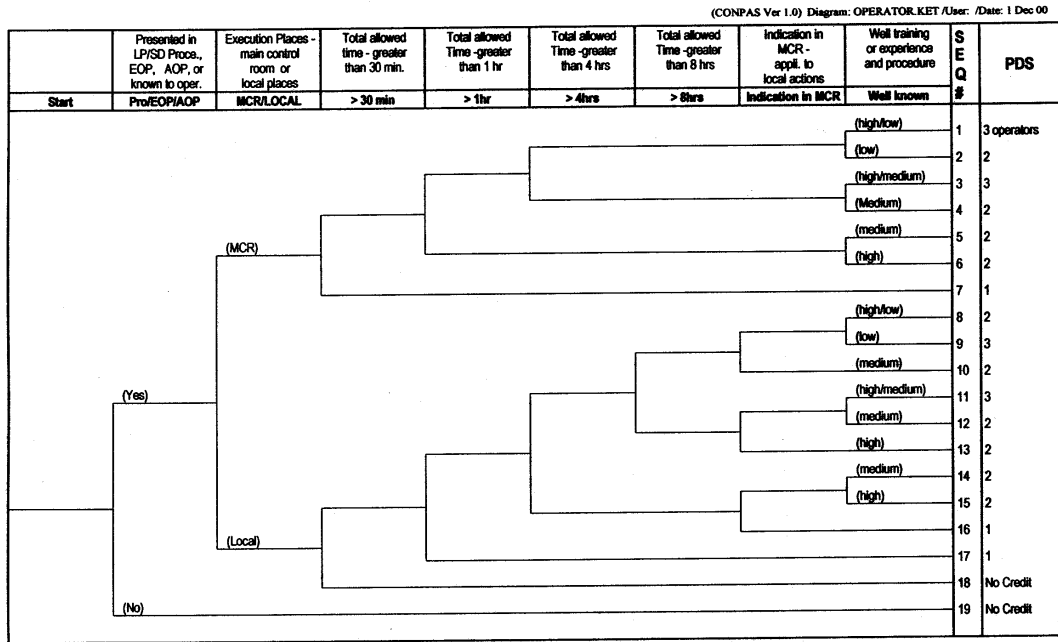


그림 1. 운전원 수와 운전원 사이의 의존성 결정수목

동일 사고경위 상의 다수 인간행위 간에는 인간행위 목적의 동일성과 사용 절차서의 공통성 등으로 인해 의존성이 존재하게 된다. 이는 마치 다중 트레인으로 구성된 계통의 기기들 사이에 존재하는 공통 원인 고장과도 유사하다. 이러한 인간행위의 의존성은 진단오류와 수행오류 모두에 존재한다. TMI와 같은 경험적인 사고나 사건들을 검토해 볼 경우 진단오류 사이의 의존성이 수행오류 사이의 의존성보다 인간오류의 특성상 높은 경향이 있다. 수행오류 사이 의존성의 예는 정지운전 시 냉각수 보충(RCS makeup)에 대한 운전원 행위들 간에 나타난다. 사고경위에 나타나는 여러 운전원 행위 사이 의존성은 행위 사이를 구별시켜주는 단서(cues), 절차서 구조, 허용시간 등에 따라 평가된다.

정지 운전 중에는 발전소 물리적 변수, 즉 원자로 온도와 압력 등이 서서히 변하기 때문에 운전원 행위 사이의 의존성 수준이 작아질 수 있다. 또한 가동 중인 계통이 적고 공학적 안전설비 작동 계통과 발전소보호계통 등이 작동하기 않기 때문에 전출력에 비해 상대적으로 운전원이 감시해야 될 계통과 지시계, 경보기 등의 수가 감소하여 운전원의 인지적 부담이 줄어들 수도 있다. 그러나 부적절한 절차서나 훈련 등의 다른 측면에서 보면 발생한 진단 오류에 대해 회복할 수 있는 기회가 그만큼 줄어들게 되어 다수 인간행위 사이의 의존성 수준은 전출력 운전에 비해 상대적으로 커질 수 있다.

정지 PSA에서 인간행위 사이 의존성은 정지운전의 특성을 고려하여 다음과 같은 기준으로 평가된다;

- 1) 수행오류 사이의 의존성은 동일한 진단오류가 포함되는 인간오류 사건 사이에만 고려한다.
- 2) 독립 의존성:
 - 선행 행위가 암기된 행위일 때
 - 성공적인 운전원 행위를 포함하는 사고경위에서 후속 운전원 행위
 - 한 행위의 실패가 후속 행위의 성공 가능성을 증가시킬 때
- 3) 낮은 의존성:
 - 같은 시간대이지만 다른 징후에 반응하거나 다른 운전원에 의해 지시받을 때
- 4) 중간 의존성:
 - 높은 스트레스에 있지만 시간적으로 분리되고 뚜렷한 징후가 있는 운전원 행위들 사이
 - 단절집합상의 3번째 행위에 대해 증가된 스트레스와 과도한 진단 부담으로 다른 규칙을 적용할 수 없을 때
- 5) 높은 의존성:
 - 선행 운전원 행위가 후속 운전원 행위에 대한 여유시간을 상당한 정도로 감소시킬 때
 - 높은 작업부하에 있고 두 행위가 밀접한 시간대에 있거나 모호한 징후가 있으며 이전 행위의 직접적인 결과로 수행되는 행위
 - 절차서의 공통 항목에 따라 거의 비슷한 시간대에 지시를 받아 수행되는 행위들
 - 단절 집합상의 4번째 행위에 대해 증가된 스트레스와 과도한 진단부담으로 다른 규칙을 적용할 수 없을 때
- 6) 완전 의존:
 - 두개 트레인으로 이루어진 한 계통 내의 각 트레인 기기에 대한 운전원 행위 사이
 - 노심 손상까지 허용시간이 4시간 이내이며, 절차서의 공통 항목에 따르고 두 행위의 시작을 구별해 주는 뚜렷한 구분이 없는 두 행위의 진단 오류 사이
 - 분석 대상 행위들의 과제특성이 서로 긴밀한 행위들 사이 (예; 펌프를 이용하거나 증력을 이용한 RCS 보충과 같이 동일 목적이며, 동일 절차서의 항목에 따라 수행되는 행위들의 진단행위 사이)

2.2.2 의존성의 정량적 평가

위의 정성적인 의존성 평가 기준에 따라 인간오류 사건간의 의존성 수준이 평가되면 THERP에서 제시하는 식에 따라 정량화된다. 두 과제 A와 B가 있고 과제 A, B 순으로 수행된다고 할 경우 과제간의 의존성을 고려한 $P_{b/a}$ 즉, 과제 A실패 시 과제 B도 실패할 조건부 확률은 다음과 같이 표시될 수 있다.

$$P_{b/a} = [1 + (n-1) \times P_b] / n = \beta + (1 - \beta) \times P_a$$

여기서 β 는 $= 1/n$ 로 의존성 정도를 나타내는 인자이며, P_a 는 과제 A가 독립적으로 실패할 확률을, P_b 는 과제 B가 독립적으로 실패할 확률을 나타낸다. 이들 과제간의 의존성 관계를 나타내는 n 값은 THERP에서 제시한 정량화 방법에 따라 5개로 분류되며 다음과 같다

- 독립일 경우; $n = \infty (\beta = 0)$
- 저 의존성 경우; $n = 20 (\beta = 0.05)$
- 중간 의존성 경우; $n = 7 (\beta = 0.143)$
- 고 의존성 경우; $n = 2 (\beta = 0.5)$
- 완전 의존성 경우; $n = 1 (\beta = 1)$

인간행위 A가 선행 행위이고 B가 후행 행위일 경우 의존성을 고려하면 두 사건이 동시에 발생할 수 있는 확률은 $HEP_A * HEP_{B-DE}$ 로 표시된다. 이때 HEP_{B-DE} 는 $P_{b/a}$ 와 같은 의미를 갖는다. 사고경위에 나타나는 인간행위 간 의존성 평가는 진단오류와 수행오류로 나누어 평가한다. 이때, 두 인간행위의 진단오류 간에는 의존성이 있고, 수행오류 사이 및 진단오류와 수행오류 사이에는 의존성이 없다고 가정하면 HEP_{B-DE} 는 다음과 같이 정량화 될 수 있다.

$$HEP_{B-DE} = (HEP_{A-d} * (HEP_{B-d-DE} + HEP_{B-e}) + HEP_{A-e} * HEP_B) / HEP_A$$

$$HEP_A = HEP_{A-d} + HEP_{A-e}$$

$$HEP_B = HEP_{B-d} + HEP_{B-e}$$

여기서,

HEP_A, HEP_B = 인간행위 A, B의 인간오류 확률,

HEP_{A-d}, HEP_{B-d} = 인간행위 A, B의 진단오류 확률,

HEP_{A-e}, HEP_{B-e} = 인간행위 A, B의 수행오류 확률을 나타낸다.

3. 의존성 모델링 및 정량화

정지 운전에 대한 PSA 수행 시에는 많은 수의 운전원 행위가 모델되기 때문에 의존성 수준평가 및 정량화와 함께 PSA 전반적인 수행과정에서 의존성을 적절히 평가할 수 있도록 인간오류 사건을 모델하고 정량화하는 것이 필요하다.

3.1 의존성을 고려한 인간오류 모델링

본 절에서는 의존성 평가를 포함한 인간신뢰도 분석의 효율성을 고려한 사고경위분석에서 인간오류 사건 모델링 방법에 대해 기술한다. 정지운전 중에 발생하는 초기사건에 대한 사건수목은 일반적으로 전 출력 운전 PSA에서 사용하는 계통 사건수목이 아닌 안전기능 사건수목 (그림2)으로 모델되며, 각 안전기능 표제 (heading)에 대해서는 발전소 운전조건에 따라 요구되는 운전원 조치와 사용되는 계통의 정점사건 (top event)으로 구성된 보조 고장수목을 구성한다.

사고 경위는 초기사건에 대한 발전소 거동 및 운전원 조치를 나타내며, 초기사건과 초기사건의 완화를 위한 발전소 및 운전원 대응을 나타내는 표제들의 논리적 모델인 사건수목으로 구성된다. 이때 표제는 절차서 등에 나타난 초기사건에 대한 주요 안전 조치들을 중요도 순서 또는 시간적 순서에 따라 모델링한다. 표제는 초기사건 완화를 위한 사고 완화 안전 기능의 실패나, 특정 계통의 작동 실패로 나타낼 수 있으며, 사건수목 구성 시 어떤 표제를 사용하느냐에 따라 안전기능 사건수목과 계통 사건수목으로 구분된다.

정지 중에는 원자로냉각재계통 등 주요 계통의 온도 압력이 낮으며, 잔열 발생량도 시간에 따라 감소하여 동일 안전기능에 대해 사용할 수 있는 계통이 다양하다. 예를 들어 그림 2에 표시된 냉각재 보충 (inventory makeup)에 대한 안전기능을 수행하기 위해서는 주입 수단으로 중력 주입이나 펌프를 이용할 수 있으며, 주입 유로도 저온관, 고온관 또는 정지냉각 흡입배관 등을 이용할 수 있어 많은 안전기능 수행 수단이 존재하게 된다. 이러한 다양한 안전기능을 회복하기 위한 수단들은 절차서에도 기술되어 있다[6].

전출력 PSA의 일반적인 사고경위 분석에서는 안전기능을 회복시킬 수 있는 각 수단을 계통별로 사건수목에 표제로 모델하고 각 완화 수단을 정점사건으로 하는 고장수목을 구성하여 논리적인 모델을 구성한다. 만일 운전원 조치가 요구되는 완화 조치가 있다면 인간오류 사건은 고장수목 내에 모델된다. 이런 모델 방법은 초기사건 발생 이후 대부분의 주요 완화 기능들이 자동으로 작동되고 일부만이 운전원에 의해 수행되는 전출력 운전 PSA에서는 타당성을 갖는다.

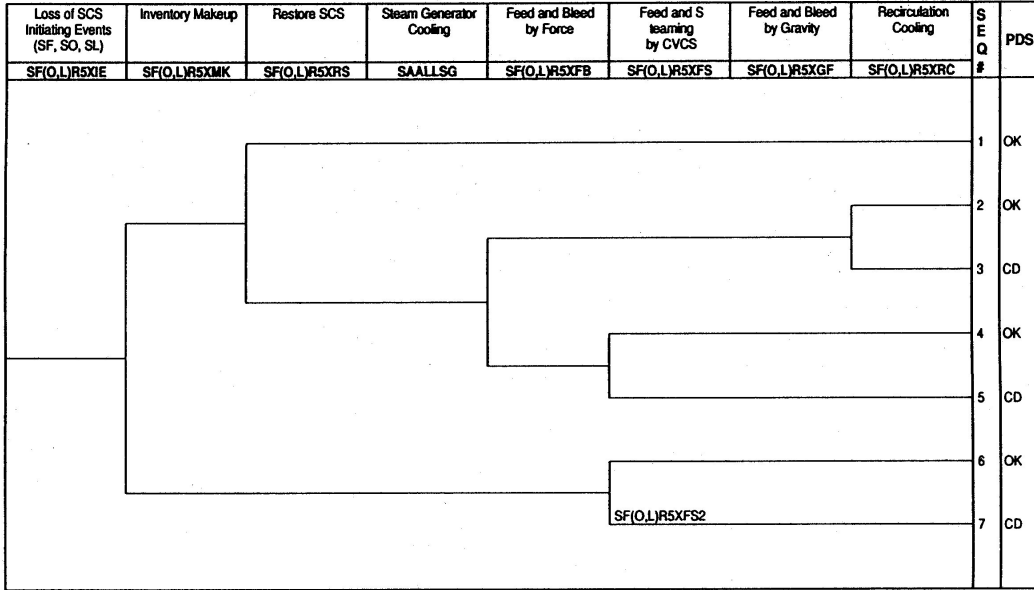


그림 2. 부분 증수운전에 대한 정지냉각 기능상실 사건수목

그러나 정지 운전중 발생하는 초기사건에 대한 사건수목 표제에 완화기능을 계통별로 모델하면 운전원의 수동운전이 요구되는 각 완화기능에 대한 고장수목에 모두 인간오류 사건이 모델된다. 이때에는 많은 수의 동일 안전기능에 관련된 인간오류 사건들이 단절집합에 나타나게 되어 의존성평가 등 해석에 어려움을 초래하며, 정량화 과정에서도 과도한 복잡성을 유발하게 된다. 따라서 정지 PSA에서는 이러한 문제점을 피하기 위하여 사건수목 구성 시 그림 2와 같이 사고 완화기능을 표제로 사용하는 안전기능 사건수목을 사용한다.

사건수목에 구성된 각 안전기능 표제는 특정한 안전기능을 수행하기 위한 운전원 행위와 사고완화에 사용되는 여러 개의 계통들을 포함하여야 한다. 이러한 안전기능 표제에 대한 논리는 안전기능을 수행하기 위한 한 개의 인간오류 사건과 여러 개의 계통 정점사상들로 그림 3과 같이 보조 고장수목에 모델링 된다.

이러한 안전기능 사건수목과 보조 고장수목을 이용하여 사고경위를 모델링함으로써 정량화 과정에서 인간신뢰도분석의 복잡성과 정량화 자체의 복잡성을 감소시킬 수 있으며 정량화 과정에서 유발될 수 있는 낙관적인 사고경위 해석 결과를 방지할 수 있게 된다.

3.2 의존성을 고려한 인간오류 정량화

본 절에서는 사고경위 정량화 과정에서 인간행위 간의 의존성을 평가하기 위한 절차를 기술한다. 사고경위 정량화는 먼저 각 표제에 대한 최소 단절집합을 구한다. 이때 구해지는 최소 단절집합은 표제의 정점사상을 유발하는, 즉 사고완화 실패를 유발시키는 최소한의 기본사건들의 집합이며, 발생 확률은 각 기본사건에 확률값을 주어 구하게 된다. 다음 단계에서는 사고경위의 노심 손상 논리에 따라 초기사건과 각표제의 최소 단절집합을 조합하여 노심 손상 경위에 대한 최소 단

절집합을 구한다. 각 사고경위 발생 빈도는 초기사건 발생빈도와 기본사건에 확률값을 대입하여 구한다.

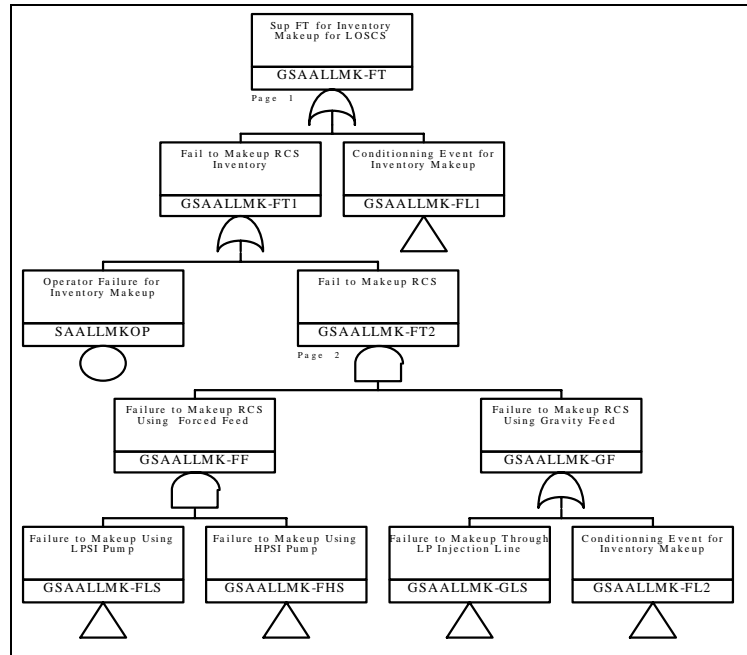


그림 3. 냉각재보충 표제에 대한 보조 고장수목

앞에서 설명한 바와 같이 정지 PSA의 정량화 결과 나타나는 노심손상 사고경위 단절집합에는 다수의 인간오류가 나타날 수 있으며, 정량화 과정에서 이를 적절히 다루지 않으면 낙관적인 결과를 얻게 될 수 있다. 인간오류들 간의 의존성을 평가하기 위해서는 먼저 노심손상 사고경위 단절집합을 검토하여 의존성이 있는 인간오류집합을 파악하고 이들 간의 의존성을 앞에서 설명한 방법으로 의존성 수준을 평가하고, 의존사건을 정량화하여 독립 인간오류 사건을 의존 인간오류 사건으로 대치한 후 사고경위 발생빈도를 재 정량화한다.

의존성이 있는 사건의 경우 단절집합 발생빈도는 재 정량화 전 값보다 증가하게 되어 의존성 평가를 위한 특별한 고려없이 정량화를 수행하면 의미있는 단절집합을 얻을 수 없어 낙관적인 결과를 얻게 된다. 즉 복수개의 인간오류 사건에 대해 의존성 평가 이전 발생확률을 적용하면 낮은 발생 빈도를 갖게 되어 정량화 시 적용되는 절삭치 의해 이들 사건이 포함되는 단절집합이 나타나지 않을 수 있게 된다. 이들 의존성 있는 단절집합이 초기 정량화 과정에서 삭제되면 의존성 평가 자체가 불가능하게 된다.

본 방법에서는 이러한 부적절한 단절집합의 삭제를 방지하기 위하여 초기 정량화 시 원래의 인간오류 확률보다 높은 선별치를 사용하여 최소 단절집합을 도출한다. 도출된 최소 단절집합을 검토하여 다수의 인간오류 사건이 존재하는 최소 단절집합 중에서 인간오류 간에 의존성이 있는 단절집합을 구한다. 의존성이 있는 인간오류 간의 의존성을 평가한 후, 원래의 독립 인간오류 사

건을 의존성 인간오류 사건으로 대치하고 의존성 인간 오류와 원래의 독립 인간오류 확률값을 적용하는 재정량화를 수행한다. 본 연구에서는 초기 정량화 시 모든 인간오류 기본사건 값에 0.1의 선별치를 사용하여 최소 단절집합을 구한 후 의존성 평가를 수행하였다.

4. 결론 및 토의

본 논문에서는 정지 PSA에서 수행되는 인간오류 간의 의존성을 적절히 평가할 수 있는 절차에 대해 설명하였다. 정지 PSA에서는 다수의 인간행위로 인해 나타나는 인간 행위간의 의존성을 적절히 평가하는 것이 매우 중요하다. 이를 평가하기 위해서는 먼저 이를 적절히 고려할 수 있도록 인간 오류를 사고경위에 모델하는 것이 필요하며, 지금까지 제시된 전출력 PSA에서 사용되는 일반적인 의존성평가 방법과 다른 정지 PSA 특성 의존성 평가 기준이 필요하다. 또한 이들 의존성이 반영된 타당한 사고경위 단절집합을 구하기 위해서는 정량화 과정에서도 특별한 고려가 필요하다.

그러나 향후에도 긴 운전원 조치 여유시간과 절차서가 제대로 갖추어져 있지 않은 이유 등으로 정지 중 발생하는 사건의 인간오류 의존성 평가 방법에 대한 지속적인 연구가 필요하다. 또한 이러한 사고 완화 시 발생하는 운전원 간의 의존성이나 인간행위 간의 의존성을 고려한 정지운전에 대한 운전 절차서 개발도 필요하다고 판단된다.

참고문헌

- [1] US NRC, "Loss of Residual Heat Removal (RHR) While the Reactor Coolant System (RCS) is Partially Filled", GL88-17, Jul. 1987.
- [2] CEA/IPSN, "Probabilistic Safety Study on French 900 MWe Plant, EPS 900", 1990.
- [3] EdF, "Probabilistic Safety Study on French 1300 MWe Plant", EPS 1300, 1991.
- [4] A.D.Swain and H.E.Guttman, "Handbook of Human Reliability Analysis with Emphasis on Nuclear Power Plant Applications", NUREG/CR-1278, S.N.L, Aug. 1983
- [5] A.D.Swain, "Accident Sequence Evaluation Program Human Reliability Analysis Procedure", NUREG/CR-4772, S.N.L, Feb. 1987.
- [6] 한국전력, "정지냉각계통 상실시 조치", 울진 제 2발전소 운영절차서 비정상-33, 1997.