

저출력/정지시 인적오류 평가 체계, SEPLOT의 개발

김윤익, 정창현

서울대학교

재무성

한성대학교

요 약

저출력/정지시의 사고가 노심손상에 미치는 영향이 작지 않은데 비하여, 그 영향에 대한 평가 체계는 확립되어 있지 않다. 특히 인적오류가 차지하는 비중이 크며 이에 따라 인적오류를 평가할 수 있는 절차를 마련하여야 한다. 본 논문에서는 전출력시의 체계를 기반으로 저출력/정지시의 특성을 고려하여 인적오류를 평가할 수 있는 체계인 SEPLOT (Systematic Evaluation Procedure for LP&S Operation Tasks)을 개발하였다. SEPLOT에서는 영향도(Influence Diagrams)를 이용하여 인적오류에 영향을 주는 수행특성인자들을 동시에 고려함으로써 수행특성인자들 사이의 의존성 평가를 가능하게 하였고, 저출력/정지시의 특성을 반영할 수 있도록 절차서의 질, 인간-기계 연계, 다중 인간행위 사이의 의존성 등의 수행특성인자들이 중요하게 고려되도록 하였다. 이를 이용하여 참조 원전의 저출력/정지시 대표적 인 작업인 소외전원상실사고 대응 작업 중 하나인 일차 충전 및 유출 운전(Primary Feed and Bleed)에 대하여 평가함으로써, 저출력/정지시 다른 여러 가지 수행작업들에 대한 인적오류에도 개발된 체계가 적용 가능함을 보여 주었다.

1. 서론

최근의 PSA와 원전 운전경험 등의 분석 및 검토 결과, 저출력/정지시(LP&S, Low Power and Shutdown) 야기될 수 있는 사고가 위험도에 중요한 기여를 할 수 있다는 것이 파악되었다^[1,2]. BNL과 SNL에 의해 각각 Surry (PWR)와 Grand Gulf (BWR)의 각 발전소 운전상태에 대해 그 위험성이 평가되었다. 특히, 부분중수운전(Mid-Loop Operation)시 내부 사건들에 기인한 Surry 발전소의 평균 노심손상 빈도는 $5 \times 10^{-6}/\text{yr}$ 로써 NUREG-1150의 전출력 운전시의 내부 사건들에 의한 평균 노심 손상 빈도 $4 \times 10^{-5}/\text{yr}$ 에 비교해 볼 때 작은 값이 아님을 보여주었다^[2]. 따라서, 저출력/정지 운전시의 인적오류 평가방법을 확립하기 위한 실제적인 절차를 마련할 필요가 있다. 그러나, 저출력/정지시의 계통 구성 상태는 전출력에서와는 매우 다르다. 정지냉각계통은 정상적으로 작동되지만 그 외의 안전계통을 포함한 대기 계통(Standby Systems)은 작동될 수 없도록 격리되어 있다. 특히 부분중수운전시에는 원자로 냉각재 수위가 낮으므로 정지냉각계통의 부주의한 운전시 잔열제거기능을 상실할 가능성이 많다. 그리고 정지냉각기능 상실의 경우, 초기 사건인 정지냉각펌프의 흡입 유량 상실에 대한 운전원의 부적절한 판단과 조치에 의해 노심 손상까지 초래할 수 있다. 즉, 저출력/정지시에는 인간 요소는 훨씬 전출력시에 비해 큰 역할을 하게 되는 반면에, 그러한 인간의 작업 거동을 상세히 평가할 수 있는 체계가 마련되어 있지 않은 상황이다. 결국 인간 조치의 역할의 증가로 인하여 인적오류 가능성이 증대되므로 인간

작업의 거동을 더 정확히 모델링할 수 있도록 새로운 저출력/정지시의 인적오류 평가 체계가 개발되어야 한다. 이 때 평가절차에 대한 연구는 기존의 연구결과를 검토하고 새로운 평가 체계를 개발하는 방향으로 진행되어야 한다.

현재 전출력시의 인적오류 평가 절차로는 THERP (Technique for Human Error Rate Procedure)^[3], ASEP (Accident Sequence Evaluation Program)^[4], SHARP (Systematic Human Action Reliability Procedure)^[5] 등이 적용되어 왔으며, 이러한 전출력시의 인적오류 평가 체계를 기반으로 하여 저출력/정지시의 특성을 고려할 수 있는 인적오류 평가 절차를 개발하고자 하였다. 이에 따라 영향도(Influence Diagrams)를 도입하여 직무 수행시의 수행특성인자들을 동시에 고려함으로써 수행특성인자들 사이의 의존성 평가를 어느 정도 가능하게 하였다. 또한 저출력/정지의 경우 절차서의 질(QP, Quality of Procedure), 다중 인간행위 사이의 의존성(DA, Dependency between Actions), 인간-기계 연계(MMIS, Man-Machine Interface State)를 중요하게 고려되어야 하는 수행특성인자들로 규정하였다. 그 이유는 저출력/정지시의 사고 경위상의 단절집합들에는 다중 인간 행위(Multiple Human Actions)로 구성된 경우가 많으므로, 그 다중 인간행위 사이의 의존성 평가가 전출력시에 비해 중요해지기 때문이다. 그리고, 저출력/정지시, 특히 부분충수운전(Mid-Loop Operation)시 주제어실과 현장 직원들 사이의 Communication이 중요하게 되며, 전출력시와 달리 저출력/정지시 운전에 대한 적합한 절차서가 마련되어 있지 않은 경우가 있고, 절차서가 마련되어 있다고 하더라도 세부 항목까지 언급되어 있는 수준 높은 절차서는 아닌 경우가 많기 때문에 여러 수행특성인자들 중 DA, MMIS, QP 등에 대해서 더욱 중요하게 고려해야 한다고 판단된다. 이와 같은 특성을 반영할 수 있도록 본 논문에서는 저출력/정지시의 인간오류 평가 절차인 SEPLOT (Systematic Evaluation Procedure for LP&S Operation Tasks)을 개발하여 이를 저출력/정지시 대표적인 작업 중 하나인 소외전원상실사고 대응시의 일차 충전 및 유출운전(Feed and Bleed) 평가에 적용하였으며, 아울러 분류 방법에 대한 민감도 계산을 수행하였다.

2. SEPLOT 체계

SEPLOT은 전출력시 평가 절차의 기본 체계는 유지될 수 있도록 하되 저출력/정지시의 특성에 기반한 절차가 되도록 하였으며, 영향인자 규정 단계에서 고려하는 수행특성인자들 중 특히 다중 인간행위들 사이의 의존성, 절차서의 질, 인간-기계 연계를 나타내는 인자들을 중요하게 평가하도록 하였고, 모델화 단계에서 영향도 기법을 도입하여 수행특성인자들 사이의 의존성을 일부 고려하도록 하였다. 그림 1에 SEPLOT 체계를 나타내었으며, 각 단계에 대하여 각각 그 목적, 수행업무, 그리고 결과물을 아래에 요약하였다.

2.1 단계 1: 인간 작용 양식 규정

단계 1의 목적은 중요한 인간 작용이 계통 분석의 논리 구조에 포함되도록 하고자 함이다. 그 입력물로는 초기 사건들, 이미 구성되어 있는 사건수목과 고장수목을 들 수 있으며, 단계 1에서의 수행업무는 다음과 같다: (1) 구성되어 있는 사건수목에서 인간 수행 기능 규정. (2) PSA에서 모델화된 인간 작용 양식(예를 들어, 초기사건 이전, 발생시, 이후)을 기술하기에 적합한 분류체계 선택. 분류체계 사용하여 중요한 인간 작용 규정(즉, 각 인간 작용 양식에 대해 각각의 고장수목 평가). (3) 부가적인 정보(예를 들어, 비상 절차서, 보수/시험 운전, 사고 기사, 기존의 PSA, 시뮬레이터 훈련으로부터의 보고서/자료, 발전소 종사자 면담)에 대한 고찰을 통해 다른 핵심 인간 작용들을 검토함으로써 규정된 인간 작용 양식 점검.

이러한 업무를 수행함으로써 인간 작용에 대한 상세한 기술을 수반하는 임시 논리 구조(사건/고장수목과 같은)를 얻게 된다.

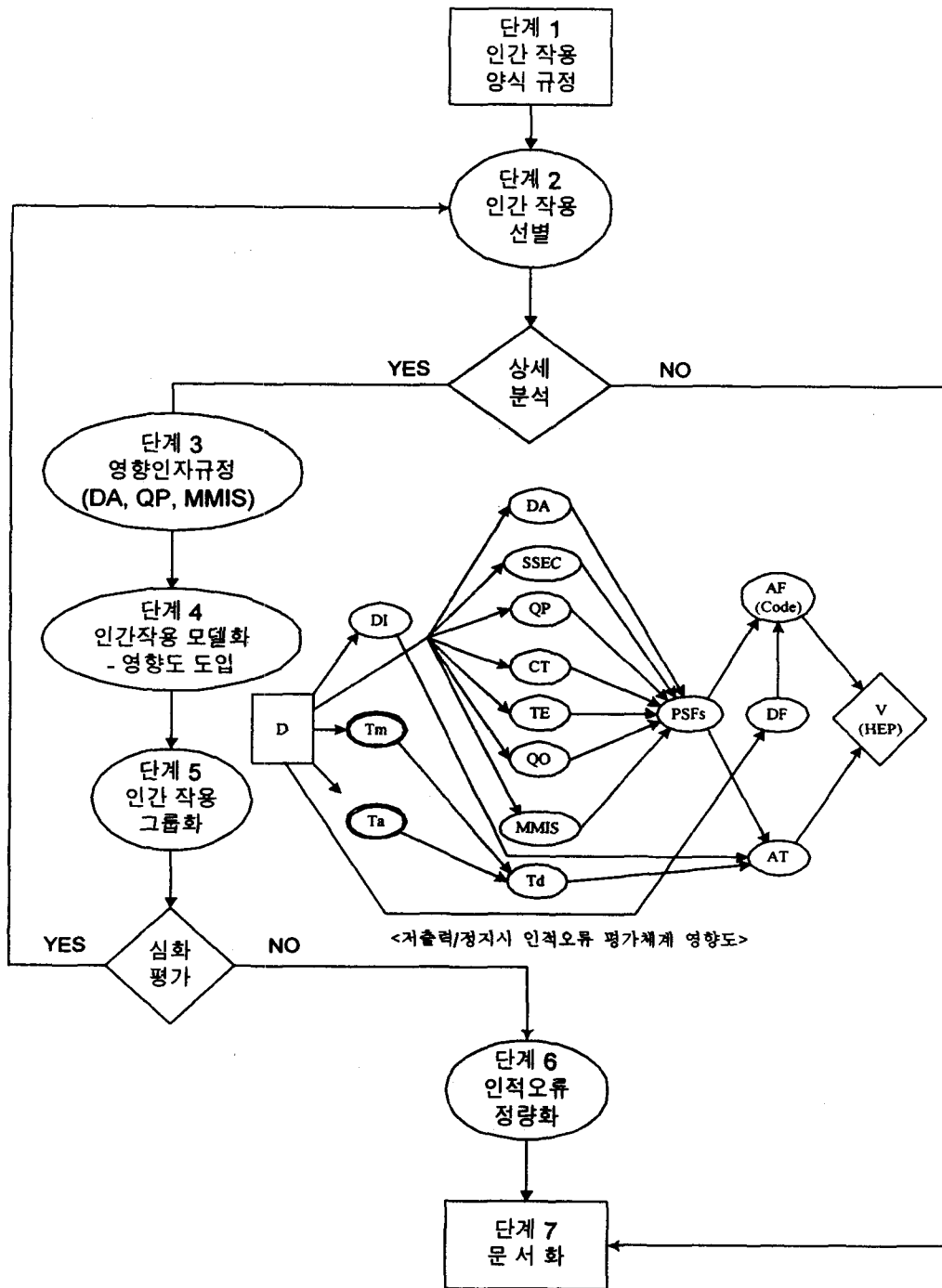


그림 1. 개발된 저출력 정지시 인적오류 평가를 위한 SEPLLOT 체계.

2.2 단계 2: 인간 작용 선별

단계 2의 목적은 선별 기법을 적용함으로써 분석 대상 인간 작용 수를 줄여, 보다 상세한 분석을 수행토록 하고자 함이다. 그 수행업무는 다음과 같다: (1) 상세분석을 위한 핵심 인간 작용들을 선택, 그 등급을 부여할 수 있는 선별 기법을 확립. 일반적으로 사용될 수 있는 기법; ① 판단(예를 들면, 논리 수목에서의 위치 선정), ② 대강의 선별(예를 들어 기준값(Cut-off Value) 상한에 의한 선별), ③ 상세한 선별(가령, 일반적인 하드웨어 고장과 행동 양식에 기반한 인간 작용들 모두를 정량화하는 것). (2) 단계 1을 거친 발전소 논리 모델에 선택된 선별 기법 적용. (3) 초기의 선별 기법(예를 들면, 사건 발생 빈도에 미치는 1%의 영향, 다른 인간 작용들의 1%보다도 작은 상대적 확률값, 혹은 노심 손상에 영향을 미칠 수 있는 가능성이 작다고 판단된 경우)을 포함할 수 있도록 선별 기준을 선정, 이를 만족시키지 못하는 혹은 만족시키지 못하는 작용들 분류.

단계 2를 통해 상세 분석을 위해 필요한 선별 과정을 거쳐 파악된 핵심 인간 작용들 목록을 얻을 수 있게 되며, 기존의 인간 신뢰도 데이터 베이스나 자료 분석을 사용하여 수행된다.

2.3 단계 3: 영향인자 규정

단계 3의 목적은 직무와 부직무별로 핵심 인간 작용을 각각 상세하게 기술하고 영향 인자를 규정하고자 함이다. 그 수행업무는 다음과 같다: (1) 인간 작용 양식을 특정 기기나 절차서에 관련된 특정 직무와 부직무로 분해. (2) 이러한 직무와 부직무에 대한 운전 경험(예를 들면, 발전소 고유 사건 기록, 운전원 사건 보고서, 다른 발전소에서의 사건)을 면밀히 조사하여 올바른 조치 수행 파악. (3) 적절한 영향 인자들(절차서의 질, 다중 인간행위 사이의 의존성, 인간-기계 연계, 행동 양식, 탐지 방법, 허용 시간, 가용 정보, 조치 피드백, 스트레스 정도, 조직 구성 상태, 직무 자체의 복잡성, 경험과 훈련 정도)을 규정함으로써 직무/부직무에 대한 기술을 보강하여 해당 인간 작용을 모델화할 수 있는 기반 확립. (4) 저출력/정지시의 특성이 반영되는 DA, MMIS, QP의 영향 중요하게 고려.

단계 3을 수행하여 각 인간 작용을 직무/부직무와 영향 인자들로 구성된 행렬 형태를 얻을 수 있다.

2.4 단계 4: 인간 작용 모델화

단계 4의 목적은 사건/고장수목 상에서 정량화와 영향 평가를 위해 핵심 인간 작용을 모델화하고자 함이다. 그 수행업무는 다음과 같다: (1) 각 인간 작용에 대한 모델(예를 들면, THERP, OAT 등) 선택. (2) 적용 가능 자료 결정. 가능한 경우, 선택된 모델 보충을 위해 전문가 의견 도입. 적용 가능한 자료가 없을 경우, 다른 모델 고려. (3) 수행특성인자 사이의 의존성이 존재하는 경우, 이를 평가할 수 있도록 영향도 작성(2.4.1 참고). (4) 선택된 모델을 적용, 인간 작용에 대한 명확한 설명 제시.

단계 4를 통해 수행특성인자 사이의 의존성을 고려한 인간 작용의 성공/실수를 기술하는 모델을 얻을 수 있다.

2.4.1 영향도(그림 1)

영향도는 의사결정 노드(D: Decision)와 확률 노드로 구성되어 있는 주로 의사결정 도구로 사용되는 평가체계이다^{6,7}. SEPLOT에서는 이 영향도를 이용하여 저출력/정지시 인적오류와 관련된 수행특성인자를 도식화하여 평가하는 체계를 도입하였다.

구성된 영향도의 각 성분에 대한 설명은 다음과 같다. 먼저 수행특성인자 중 조치들 사이의 의존성(Dependency between Actions)을 나타내는 DA 노드는 다중 인간행위 사이에 존재하는 의존성 정도를 나타낸다. SSEC 노드는 상황이나 환경 조건에 기인하는 스트레스(Stress due to Situation and Environmental Conditions)를 나타내며 운전원의 심리적인 조건과 인식 조건에 영향을 미친다. QP 노드는 절차서 지침 마련 정도(Quality of Procedure)로서 절차서 수준이 인적오류에 미치는 영향을 나타낸다. 노드 CT는 자원, 배치, 그리고 위치에 관한 직무의 복잡성(Complexity of the Task relative to resources, coordination, and location)을 나타내며 이것은 노드 QP와 함께 직무 자체에 대한 요구 사항과 관련된 요소

이다. 노드 TE는 조치에 관한 훈련과 경험(Training and Experience relative to the action)으로 역시 운전원의 심리적인 조건과 인식 조건에 영향을 주는 수행특성인자이다. 노드 QO는 조직 구성 상태(Quality of Organization)로서, 원전 안전성에 영향을 미치는 효과적인 조직 구성 정도를 나타낸다. 마지막으로 노드 MMIS는 인간-기계 연계(Man-Machine Interface State)이며, 계통 내의 인간과 하드웨어/소프트웨어 구성요소 사이의 연계 정도(인간과 인간 의사 소통 정도 포함)를 나타낸다. 이러한 수행특성인자들은 진단 과정(DF)과 조치 수행 과정(AF)에 모두 영향을 준다.

진단 과정은 수행특성인자 외에 올바른 탐지(Detection) 여부에도 영향을 받지만 충분한 계측기의 정보로 인하여 문제 탐지의 오류가 거의 없다고 가정하였다. 그러나 진단 오류는 중요하며 진단 오류 확률은 최대 허용 시간(T_m), 작업 예상 시간(T_a), 진단 허용 시간(T_d)에 영향을 받는다. 진단 허용 시간 T_d 는 최대 허용 시간과 작업 예상 시간의 차이이다. 그림 1에서와 같이, 이 진단 허용 시간은 진단뿐만 아니라 조치 수행에도 영향을 미친다. 특히 저출력/정지시에는 허용 시간이 전출력시에 비해 상대적으로 길기 때문에 전출력시와는 달리 평가해야 할 필요성이 존재하게 된다. 이와 같이 방법으로, 최종적인 인적오류확률값(노드 V)은 진단 오류 확률값(노드 DF)과 수행 오류 확률값(노드 AF)의 함수로 구해질 수 있으며, 단계 6에서 정량화된다. 한편 노드 DI (Detection of Initiation)는 탐지를 나타내고, 노드 AT (Action Type)는 작업 양식을 나타낸다.

2.5. 단계 5: 인간 작용 그룹화

단계 5의 목적은 인간 작용 분석 모델에서 규정된 영향들을 평가하고 통합하고자 함이다. 그 수행업무는 다음과 같다: (1) 초기 사건, 공통 원인 고장, 계통 신뢰도, 사건수목 논리, 사고 경위 정량화에 미치는 인간 작용의 영향 측면에서 모델화된 인간 작용을 평가하여 개선별 작업과 그룹화 작업을 위해 인간 작용 분류. (2) 단계 1과 단계 2에서의 선별 기법을 적용하여 도출된 인간 작용의 영향을 분석하여, 기기 신뢰도, 다중 계통 부품들 사이의 의존성, 초기사건 그룹화, 그리고 사건수목 연결에 영향을 미치는 인간 작용들에 대한 그룹화, 선별 작업. (3) 도출된 인간 작용들의 정량화를 위한 그룹화 작업 수행(가령, 결과에 미치는 영향에 따라 여러 행위들을 몇 개로 통합).

단계 5를 수행함으로써, 핵심 인간 작용들을 포함하도록 개선된 정량화 작업을 수행할 수 있는 고장수목구조를 구성할 수 있게 된다.

2.6. 단계 6: 인적오류 정량화

단계 6의 목적은 인간 작용의 성공/실패 확률을 도출하고자 함이다. 수행업무는 다음과 같다: (1) 단계 4, 5에서 규정된 핵심 인간 작용들에 가장 적절한 데이터베이스(가령, 시간-신뢰도 곡선, 직접적인 사건 자료, 공인된 인간 오류 자료, 전문가 의견)를 선택하여 인적오류 확률 정량화. (2) 영향 인자 분석과 모델화 결과에 기반하여 핵심 의존성, 불확실성, 민감성 기술.

이 업무를 수행함으로써 불확실성과 민감성을 포함한 인적오류확률값을 얻을 수 있다.

2.7. 단계 7: 문서화

단계 7의 목적은 정량적 평가 과정에 대해 상세히 기술된 문서를 제공하고자 함이다. 그 수행업무로는 다음과 같은 것들이 있다; 각 사건수목에 대하여: (1) 자료, 가정, 영향 인자, 모델 기록. (2) 의사 결정, 정량화, 조치 시간 등과 관련된 중요한 의존성과 민감성 목록 작성. (3) 노심 손상 빈도에 미치는 인간 영향의 정량적 기술.

단계 7을 통해 PSA에서 모델화된 인간 작용들에 대한 상세한 기록을 얻을 수 있다.

3. 예제 문제: 일차 충전 및 유출 운전(Feed and Bleed)

저출력/정지시의 여러 조치들 중 소의전원상실사고 대응시의 일차 충전 및 유출 운전을 본 논문에서 제시한 저출력/정지시 인적오류 평가 절차의 예제 문제로 사용하였다. 이를 위해 “가압경수로의 부

분충수운전 중 소외전원 상실사고에 대한 확률론적 안전성 평가¹⁸⁾에서 사용한 열수력적 분석 결과를 이용하였으며, 세부 절차는 다음과 같다.

소외전원 상실사고가 발생하게 되면 이로 인해 가동이 정지된 정지냉각 펌프를 재기동시키는 정지냉각기능 회복작업이 수행된다. 이 작업이 실패하였을 경우에 수행되는 작업이 일차 충전 및 유출 운전이며, 이를 통해 냉각재를 보충하게 된다. 참조 원전 절차서¹⁹⁾에 따르면 고압안전주입계통을 이용하여 재장전수 탱크의 물을 저온관으로 강제 주입하도록 권장되어 있기 때문에 우선적으로 고압안전주입펌프 등의 다양한 수단을 이용한 강제 냉각재 보충을 표제로 선정하였다. 참조 원전의 현재 운전 방식에 따르면 냉각계통의 냉각재를 배수하는 운전 중에는 가압기의 작업자 출입구를 개방하도록 되어 있기 때문에 운전원 행위의 성공 기준은 고압안전주입펌프, 충전펌프, 또는 저압안전주입펌프를 이용하여 냉각재를 보충하는 것이다. 이 운전원 행위는 원자로의 노심 노출시간 전인 1.5 시간 이내에 이루어져야 한다. 각 계통의 운전원 수행시간과 노심 노출까지의 시간에 대한 제약성을 고려하여, 이용할 수 있는 계통 및 운전순위는 차례로 고압안전주입펌프 기동과 충전펌프 기동이라 가정하였다. 두 계통에 대한 운전원 행위사이에는 짧은 여유시간과 운전원 행위의 특성 때문에 서로 높은 의존성이 있다고 가정하였고, 동적인 조치(Dynamic Action)로 상정하였다.

일차 충전 및 유출 운전 실패(O-P-F&B 1)에 대해 고려한 수행특성인자들은 다음과 같다; (1) DA: 고압안전주입펌프 기동 실패(O-HPSI)와 화학 및 체적제어계통펌프 기동 실패(O-CVCS) 사이에는 높'은 의존성이 존재한다. (2) SSEC: O-HPSI의 경우 스트레스 수준이 낮은 반면, O-CVCS의 경우에는 조치 수행 실패에 대한 스트레스 수준이 높다. (3) QP: 적절히 마련되어 있으며, 잘 정리된 절차서가 있다. (4) CT: 그림 2.(c)의 F의 직무를 제외하면, 직무 수행에 미치는 영향이 작다. (5) TE: 운전원은 모의 실험을 통해 사건 경위에 대해 훈련을 하며, 그 이전의 부분충수운전 동안에 충전 및 유출 운전하는 경험을 얻게 되어 상황을 잘 이해하고 조치 행위를 숙지하고 있다. (6) QO: 잘 되어 있는 편이다. (7) MMIS: 잘 되고 있다.

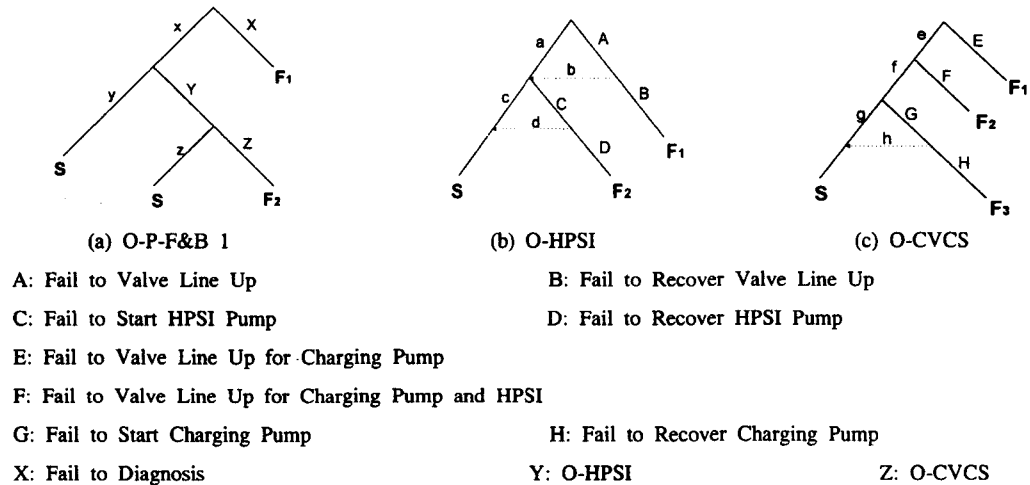


그림 2. 일차 충전 및 유출 운전에 대한 HRA 사건 수목(Event Tree).

4. 결과

일차 충전 및 유출 운전에 대한 HRA 수목을 구성하면 그림 2과 같다. F는 E에 중간의존성을 가지고 있으며, 그 밖의 부직무들은 서로 독립적이다.

개발된 절차에 따라 O-P-F&B 1, O-HPSI, O-CVCS를 검토하고, “영향도를 이용한 저출력/정지시 인적오류 평가 방법^[10]”을 이용하여 인적 오류를 평가하였다. 즉 수행특성인자들의 영향을 동시에 고려하여 PSFs 등급화에 따라 각 직무를 그룹화하고 각 그룹에 대한 확률값을 부여하여, 영향도에 따라 최종적인 인적오류확률값을 구하였다. 그리고 본 논문에서 제시한 방법의 적절성을 검증해보기 위해 PSFs 사이의 의존성을 고려하지 않았을 경우에 대하여 계산해봄으로써 민감도 분석을 수행하였다. 우선, 진단시 인적오류를 평가하기 위한 진단허용시간(Td)은 25분으로, 이 경우 ASEP 표8-2로부터 $HEP = 7.45 \times 10^{-3}$, $EF = 10$ 이다. 조치 수행과 회복조치의 경우에 대한 인적오류확률값을 구하여 표 1에 나타내었다.

THERP Handbook의 표로부터 도출된 각 단위동작의 인적오류확률값은 모두 대수정규분포를 하고 있다. 따라서 인적오류를 계산하기 위해서는 HRA 수목상의 확률값들에 대하여 불확정성 분석을 수행해야 하며, 이를 통해 최종적인 인적오류확률값을 계산해낼 수 있다. 그 계산 과정은 다음과 같다; 진단과 수행 모두 성공해야 Success Criteria를 만족하기 때문에 전체 인적오류확률값은 다음과 같이 구해진다.

$$F_T = 1 - (1 - P_d)(1 - P_a) = P_d + P_a - P_d P_a \quad (1)$$

표 1. O-P-F&B1 사건수목의 각 단계에서의 확률값과 최종인적오류확률값

TASK	BHEP	EF	DESCRIPTION	HEP	
				SEPLOT	PSFs 의존성 고려하지 않을 경우
A	0.02	5	-	0.02	0.02
B	0.2	5	회복 조치	0.2	0.2
C	0.02	5	-	0.02	0.02
D	0.2	5	회복 조치	0.2	0.2
E	0.25	5	-	0.25	0.02
F	0.05	10	중간의존성	0.04286	0.01714
G	0.25	5	-	0.25	0.02
H	0.2	5	회복 조치	0.2	0.2
X	7.45×10^{-3}	10	진단	7.45×10^{-3}	7.45×10^{-3}
Y	2.08×10^{-2}	6.8	-	2.08×10^{-2}	2.08×10^{-2}
Z	5.84×10^{-1}	6.89	고의존성	8.24×10^{-1}	5.35×10^{-1}
F _T	-	7.40	최종인적오류확률값	1.09×10^{-1}	8.96×10^{-2}

식 (1)의 불확실성 분석을 통해 최종적으로 F_T 의 확률 분포를 구하여야 한다. 그럼 1의 영향도에 서 노드 V값을 계산하는 과정은 다음과 같다.

$$\alpha_{F_T} = \overline{P_d} + \overline{P_a} - \overline{P_d} \overline{P_a} \quad (2)$$

$$\beta_{F_T}^2 = \beta_{P_d}^2 + \beta_{P_a}^2 - \beta_{P_d P_a}^2 \quad (3)$$

식 (2), (3)의 α_{F_T} , β_{F_T} 는 대수정규분포이므로 아래 식에 의해 전체 인적오류확률(F_T) 분포를 구할 수 있다.

$$\sigma_{F_T}^2 = \ln \left[\frac{\beta_{F_T}^2}{\alpha_{F_T}^2} + 1 \right] \quad (4)$$

$$\mu_{F_T} = \ln \alpha_{F_T} - \frac{\sigma^2}{2} \quad (5)$$

식 (4), (5)로부터 중간값, $X_{50} = e^{\mu_{F_T}} = 5.18 \times 10^{-2}$, 5% 하한값, $X_{05} = \exp(\mu_{F_T} - 1.645\sigma_{F_T}) =$

6.99×10^{-3} , 95% 상한값, $X_{95} = \exp(\mu_{F_r} + 1.645\sigma_{F_r}) = 3.83 \times 10^{-1}$, 분산도, $EF = \sqrt{\frac{X_{95}}{X_{05}}} = 7.40$, 최종 인적오류확률값, $\alpha_{F_r} = X_{50} \cdot \exp\left[\frac{1}{2}\left(\frac{\ln EF}{1.645}\right)^2\right] = 1.09 \times 10^{-1}$ 의 계산 결과를 도출해내고 그 결과를 표 1에 나타내었다. 민감도 계산 수행 결과, 이 인적오류확률값은 PSFs 의존성을 고려하지 않았을 경우의 확률값보다 약 20% 증가된 값을 알 수 있다.

5. 결론

저출력시의 인적오류 평가 절차를 기반으로 해서 저출력/정지시의 특성을 고려하여 평가할 수 있도록 중요한 수행특성인자들(PSFs)을 규정하고, 영향도(Influence Diagrams)를 도입하여 저출력/정지시의 인적오류 평가 절차, SEPLOTT (Systematic Evaluation Procedure for LP&S Operation Tasks)을 개발하였다. 영향도는 수행특성인자 사이의 의존성을 평가할 수 있는 의사 결정 도구이다. 저출력/정지시에는 특히, 운전원의 역할이 커지므로 인적오류의 위험도 기여분이 커지게 되는데, 개발된 체계는 이와 관련된 인간 작업 수행시 여러 상황들을 반영하는 수행특성인자를 파악하고 그 의존성을 고려하여 인적오류를 체계적으로 평가할 수 있도록 하였다. 저출력/정지시 대표적인 작업의 하나인 일차 충전 및 유출 운전(Feed and Bleed)에 대하여 개발된 절차에 따라 인적오류를 평가하여 그 확률값을 계산하였다. 민감도 계산의 결과, PSFs 의존성을 고려하지 않았을 경우보다 약 20% 증가된 확률값임을 확인하였고, 이는 본 논문에서 제시된 체계가 변별력을 가지고 있음을 알 수 있다. 또한 개발된 체계가 저출력/정지시의 여러 가지 다른 작업들에 대해서도 적용할 수 있음을 보여주었다.

참고문헌

1. U.S. NRC, "Severe Accident Risks: An Assessment for Five U.S. Nuclear Power Plants," NUREG/CR-1150, December, 1990.
2. Evaluation of Potential Severe Accidents During Low Power and Shutdown Operations at Surry Unit 1, NUREG/CR-6144, June, 1994.
3. Swain and Guttman, "Handbook of Human Reliability Analysis with Emphasis on Nuclear Power Plant Applications," NUREG/CR-1278, June, 1983.
4. Alan D. Swain, "Accident Sequence Evaluation Program Human Reliability Analysis Procedure," NUREG/CR-4772, February 1987.
5. G.W. Hannaman, A.J. Spurgin, "Systematic Human Action Reliability Procedure," EPRI NP-3583, June 1984.
6. M.S. Jae, A.D. Milici, W.E. Kastenber, and G.E. Apostolakis, "Sensitivity and Uncertainty Analysis of Accident Management Strategies Involving Multiple Decisions," Nuclear Technology Vol. 104, Oct. 1993.
7. M.S. Jae, and G. Apostolakis, "The Use of Influence Diagrams for Evaluation Severe Accident Management Strategies," Nuclear Technology, Vol. 99, pp. 142~156, 1992.
8. "가압경수로의 부분충수운전중 소외전원 상실사고에 대한 확률론적 안전성평가," 한국원자력연구소, 1996.9.
9. 한국전력공사, "RCS 배수 및 노즐 부분충수운전, 종합-06, 개정 1," 영광 제 2 발전소 운영절차서, 한국전력공사 영광원자력본부, 1996.1.
10. 김윤익, 정창현, 제무성, "영향도를 이용한 저출력/정지시 인적오류 평가 방법 개발," '96추계 학술발표회논문집, 원자력학회, 1996.11.