

원자력발전소의 저출력/정지 확률론적 안전성 평가를 위한 인간신뢰도분석 절차서 개발

강대일, 성대용, 김길유
한국원자력연구소

1. 서론

지금까지 수행되었던 원자력발전소의 확률론적 안전성 평가(Probabilistic Safety Assessment; PSA) 결과, 노심손상 빈도의 30% - 70%가 인간행위와 관련이 있는 것으로 밝혀져 PSA에서 인간행위를 적절히 다루는 것은 매우 중요하다. 특히 원자력발전소의 정지운전인 경우에는 자동으로 작동하는 계통이 거의 없어 고장수목(fault tree)과 사건수목(event tree)의 모델링에 많은 운전원 행위가 포함되기 때문에 노심손상 빈도와 관련이 있는 인간행위는 전출력 운전(full power operation)에 대한 PSA 결과의 경우보다 많은 것으로 나타났다. PSA에서 인간신뢰도분석(human reliability analysis)은 PSA의 논리구조인 고장수목과 사건수목에 모델링될 인간행위를 파악하고 정량화하는 것이다. 현재 인간신뢰도분석은 인간행위에 대한 데이터의 부족과 인간행위 자체의 다변성(variability)으로 인해 분석에 어려움이 있고 분석자의 주관성이 개입될 여지가 많은 실정이며, 이에 따라 분석 결과에는 많은 불확실성을 내포하게 된다[1].

인간신뢰도분석에 많이 사용되는 THERP(technique for human error rate prediction)[2] 등의 인간신뢰도분석 방법론은 전출력(full power)으로 운전되는 원자력발전소의 상황을 그 배경으로 하고 있다. 인간신뢰도분석 관점에서 볼 때 원자력발전소의 저출력/정지 운전의 상황은 전출력 운전(full power operation)의 상황에 비해 여러가지 다르다[3, 4]. 첫 번째로, 발전소 이상 사태 발생시 이에 대처하는 운전원 행위에 대한 절차서가 제대로 마련돼 있지 않다. 두 번째로, 정지운전 중에는 발전소의 이상 사태에 대처하는 계통의 대부분을 운전원이 수동으로 작동해야 한다. 세 번째로, 저출력/정지운전 중의 이상 사태 발생시 감소된 잔열때문에 운전원은 노심손상까지 상대적으로 긴 운전원 여유시간을 갖는다. 또한 적은 수의 계통이 운전 중에 있기 때문에 감시해야 할 정보나 지시계 등의 숫자가 적어 운전원의 스트레스나 인지적 부담(cognitive burden)은 적어지지만 특별한 경우에는 수위지시계 등의 불명확성으로 인해 스트레스와 인지적 부담이 증가할 수 있다. 위에서 언급한 저출력/정지운전 상황의 대부분은 발전소의 이상사태에 대응하는 운전원 행위인 유형 C 행위와 관계가 있다.

이러한 저출력/정지운전의 특성을 반영하고 원자력발전소의 운전원 직무구조와 운전원이 사용하는 절차서를 파악하여 가압 경수로의 저출력/정지운전 PSA를 위한 인간신뢰도분석 절차서를 개발하였다. 개발된 인간신뢰도분석 절차서는 인간신뢰도분석 절차인 SHARP(systemtic human action reliability procedure)[5]와 분석방법인 THERP(technique for human error rate

prediction)를 토대로 하고 있다. 인간신뢰도분석 절차서 개발 과정에서 표(work sheet)를 만들어 인간행위 정량화 과정에 대한 타당성 및 신뢰성을 제고 시키도록 하였다. 또한 결정수목(decision tree)을 만들어 분석자가 유형 C 인간행위의 인간신뢰도분석 수행시 발생 가능한 분석자의 주관성 개입을 배제하고 일관된 인간신뢰도분석 수행을 할 수 있게 하였다.

2. 인간신뢰도분석 절차

인간신뢰도분석 절차는 평가 대상인 인간행위 종류에 따라 달리 수행하지만 기본적으로는 크게 선별분석과 상세분석 순으로 수행한다. 상세 정량화가 필요한 행위는 정량화에 사용했던 여러가지 정보들을 수록하고 정량화 과정의 투명성과 추적을 쉽게 하기 위해 표(work sheet)를 사용해 수행한다. 개발된 표에는 크게 분석대상 인간행위에 대한 정보를 나타내는 "사건정보(event information)"와 인간오류 정량화 결과에 영향을 끼치는 요인들인 "수행특성인자(performance shaping factors)", 그리고 인간오류 확률 계산과정을 나타내는 "정량화(quantification)"로 구성되었다. 유형 C 행위를 상세 정량화하기 위한 표(work sheet)의 한 예가 표 1에 나타나있다.

SHARP는 PSA 분야에서 인간신뢰도분석 수행시 오랫동안 사용되왔던 절차서로서 일종의 인간신뢰도분석 업무에 관한 지침서이다. 개발된 절차서에서의 인간신뢰도분석 업무는 크게 PSA 논리구조인 고장.사건 수목에 모델링될 인간행위의 파악, 상세분석할 인간행위의 수를 줄이기 위한 선별분석, 상세분석, 문서화이다. 구체적인 인간신뢰도분석 절차는 인간행위 종류마다 다르다.

THERP는 일반적인 인간행위 정량화 방법으로서 분석대상 행위를 단위행위로 나누어 평가한다. THERP에서는 인간행위 종류마다 고려되는 인간오류가 다르다. 초기사건 이전 즉 계통의 보수나 시험 등과 관련된 유형 A의 인간행위 정량화에 고려되는 인간오류는 수행오류(error of execution)이다. 발전소의 이상사태 발생시 대응하는 운전원 행위인 유형 C 행위를 정량화할 경우에는 진단오류(error of diagnosis)와 수행오류를 고려한다. 수행오류에는 절차서의 항목을 빠뜨리는 누락오류(error of omission)과 특정 기기(component)를 작동하는데 실패하는 조치오류(error of commission)가 있다. 진단오류는 발전소에 이상사태가 발생할 경우 이것을 운전원이 감지, 분별, 해석, 진단, 의사결정(perception, discrimination, interpretation, diagnosis, decision-making)하는 과정에서 발생하는 오류 모두를 말한다. THERP의 방법에 따라 인간행위를 정량화할 경우 매우 많은 인력의 투입이 예상되어 THERP의 방법을 크게 벗어나지 않는 범위에서 인간신뢰도분석에 소요되는 인력을 줄이기 위해 THERP 사용에 대한 가정사항을 다음과 같이 하였다;

- 1) 인간오류를 정량화 할때 THERP에서 사용을 권하는 인간신뢰도분석 사건수목(human reliability analysis event tree) 대신에 단순히 고장수목 방식으로 인간행위를 나타내어 정량화 한다.
- 2) 분석대상 행위의 단위절차(step)사이의 의존성은 완전 의존 또는 완전 독립이라 평가한다.
- 3) 수행오류 평가시 기본적으로 누락오류 만을 고려하고 조치오류는 고려하지

않는다. 다만 유형 A 인간행위의 보정작업과 같이 어렵고 복잡한 과제와 관련된 행위나 유형 C의 인간행위인 동적인(dynamic) 행위와 제어실밖에 서 수행되는 행위에 대해서는 조치오류를 고려한다.

- 4) 유형 C 인간행위를 정량화 할때 누락오류는 계통운전에 대한 절차서 전체를 누락하는 오류만을 고려한다. 다만 제어실 밖의 조치오류나 복잡한 기기에 대한 누락오류에 대해서는 단위 절차별로 인간오류를 평가한다.

유형 A 인간행위는 일반적으로 정기보수나 기기 고장시 수행되는 보수 작업, 각종 계측기기에 대한 보정작업, 그리고 계통의 성능들을 시험하는 정기적,주기적 시험 작업과 관련이 있다. 유형 A의 인간신뢰도분석은 선별 분석, 수행장소 등의 상황과 세부행위 파악, 단위행위 사이의 의존성 파악, 발생한 오류에 대한 회복효과 파악, 냉각재 상실사건을 유발할 수 있는 초기사건 유발 가능성 파악, THERP의 이용불능도 식을 이용한 정량화 순으로 수행한다.

유형 C의 인간행위는 이상사건의 경보 발생 후 운전원에 의해 수행되는 행위로서 일반적으로 주제어실 안의 운전원에 의해 수행되지만 상황에 따라 현장 운전원에 의해 수행된다. 유형 C의 인간신뢰도분석은 크게 선별 분석, 회복행위와 사고경위상의 인간행위들 의존성 파악, 사고경위 파악, 절차서 검토, 분석대상 행위의 수행장소, 수행시간 등의 파악, 훈련과 연습 수준 파악, 스트레스 수준 파악, 진단오류 정량화, 수행오류 정량화, 전체오류 정량화 순으로 수행한다. 원자력발전소의 PSA 결과인 노심손상빈도와 관련이 있는 행위 대부분이 유형 C 행위이다.

3. 결정수목을 이용한 유형 C 인간행위의 정량화

유형 C 인간행위의 인간신뢰도분석을 수행할 경우 정량화 결과에 중요한 영향을 주고 분석자의 판단이 필요한 부분에서는 인간신뢰도분석을 일관되게 하고 발생가능한 분석자의 주관성 개입을 줄일 수 있는 결정수목을 사용한다. 결정수목은 진단오류 평가에서의 상한 값, 규정값, 하한값 결정과 운전원이 받는 스트레스 결정, 수행오류에 대한 회복오류 평가에서의 운전원 수와 의존성 수준 결정을 하기위해 사용한다.

3.1 진단오류 평가

진단오류는 THERP에 따라 진단을 위한 노심손상까지의 여유시간과 운전원의 훈련 정도에 따라 달리 평가한다. 정지운전중일 경우에는 특수한 경우를 제외하고 운전원의 인지적 부담이 적기 때문에 기본적으로 운전원 훈련이 잘 돼 있다고 가정한다. 기본적인 진단오류 확률은 노심손상까지의 여유시간에 따라 달리 평가되는데 그 값의 상한 값이나 규정 값 또는 하한 값은 THERP의 지침과 아래의 기준을 갖고 평가한다;

- 1) 절차서에 분석대상 행위가 기술돼 있지 않더라도 일부 운전원이 그 행위의 조건과 절차를 알고 있으면 성공가능성을 고려한다. 진단오류 확률은 THERP에서 제시하는 규정 값의 상한 값을 할당해 평가한다.
- 2) 운전원이 꺼림을 갖고 있으면 진단오류 확률을 상한 값으로 할당해 평가한다.
- 3) 정지운전과 관련된 인간행위가 정지 운전과 비정상운전 절차서 모두에 기술

돼있지 않고 비상운전 절차서에만 기술되어 있을 때, 비상운전 절차서가 잘 작성되어 있다고 판단될 경우에는 규정 값을 할당하고 절차서가 보통 수준일 경우에는 상한 값을 할당해 평가한다.

3.2 수행오류 평가

수행오류는 절차서에 기술된 단위 절차수와 스트레스 수준, 과제 형태 등 여러가지 요인에 따라 달리 평가한다. 정지운전의 특수한 경우로서 특수한 경우로서 수위지시계의 불안정으로 인해 판단을 잘 못하는 조치오류 (commission error)가 있는데 이러한 인간오류는 현재 연구중[6]에 있기 때문에 고려하지 않는다. 수행오류는 다음과 같이 평가한다;

수행오류 확률 = 기본인간오류 확률(basic human error probability) x 중앙 값을 평균값으로 바꾸는 증배계수(multiplier) x 스트레스 효과와 과제형태를 고려한 보정계수(modifier) x 첫번째 운전원의 실패에 대한 다른 운전원들의 회복 못할 오류 확률

기본인간 오류 확률은 누락 오류일 경우와 조치오류일 경우 달리 평가한다. 중앙 값(median)을 평균 값(mean)으로 바꾸는 증배계수는 통계식에서 유도된 것이다. 스트레스 효과와 과제형태를 고려한 보정계수는 일종의 인간행위에 영향을 끼치는 수행특성인자(performance shaping factors)을 고려한 계수이다. 과제형태가 동적인(dynamic) 행위로 평가되면 운전원이 받는 스트레스가 중간이상인 조건에서 보정계수 5를 할당해 평가한다. THERP에서는 운전원의 스트레스 정도를 평가하는 기준이 추상적으로 제시되고 있는데 개발된 절차서에서는 ASEP[7]에서 고려하는 스트레스 인자들과 정지운전의 상황을 고려해 평가한다. 초기사건 발생후 운전원이 받는 스트레스는 기본적으로 높다고 가정한다. 운전원의 회복오류 확률은 위의 기본적인 인간오류 확률에 의존성 정도를 고려해 평가를 한다. 의존성 정도 및 운전원 수는 절차서기술 정도, 수행행위 장소, 노심손상까지의 여유시간 정도에 따라 달리 평가한다. 정량적인 의존성의 평가는 THERP에서 제시한 식을 이용해 평가한다;

3.3 모델링 및 의존성 평가

저출력 운전과 관련된 인간행위의 인간신뢰도분석은 저출력 운전 상황이 전출력 운전 상황과 유사하기 때문에 인간행위에 대한 별도의 모델링 및 의존성 평가 방법은 불필요하다.

현재 대부분의 전출력 운전에 대한 PSA에서 인간행위는 단일 사건으로 모델링을 한다. 정지운전의 인간신뢰도분석 수행시 인간행위를 전출력과 마찬가지로 단일 사건으로 모델링을 하면 사고경위의 단절집합에 둘 이상의 인간행위가 나타난다. 그래서 이들 행위에 대한 단절집합의 해석이 곤란해지고 또한 의존성평가에 많은 인력을 투입해야한다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 정지 운전중 이상 사태 발생에 관련된 인간행위는 진단행위 사건과 수행행위 사건으로 나누어 모델링한다. 또한 분석 대상 행위들의 과제특성이 서로 긴밀한 행위들 사이에는 진단행위가 동일하다 보고 동일 진단행위 사건으로 모델링한다. 정지 운전 중의 의존성 평가는 다음과 같은 기준을 두고 평가한다;

- 1) 수행오류들 사이의 의존성은 동일 진단오류의 사건 이름을 사용하는 오류들 사이에만 고려한다. 사용 진단오류에 대한 사건 이름이 틀리면 서로 독립이라 가정한다. 그러나 모델링의 편의상 다른 이름의 진단오류 사건으로 모델링 할지라도 과제의 특성상 긴밀하게 연관되어 있으면 독립으로 평가하지 않는다.
- 2) 정지운전 절차서나 비정상 운전절차서에 따른 진단행위와 절차서에 없는 진단행위 사이에는 완전 의존으로 평가한다.

4. 결론

원자력발전소의 저출력/정지 운전에 대한 많은 경험적인 사건으로 말미암아 저출력/정지 운전시의 안전성도 저출력 운전 못지 않게 중요하게 인식되었다. 이에 여러 나라에서는 저출력/정지 운전에 대한 안전성 연구와 PSA가 수행 중에 있으며 국내에서도 영광 5,6호기 저출력/정지 PSA가 수행 중에 있다.

본 연구에서는 저출력/정지 운전의 특징적인 상황을 반영하여, 인간신뢰도분석 절차인 SHARP와 인간행위 정량화 방법인 THERP를 토대로 가압 경수로의 저출력/정지운전의 PSA를 위한 인간신뢰도분석 절차서를 개발하였다. THERP 방법을 크게 벗어나지 않는 가운데 인간신뢰도분석자의 THERP 사용에 대한 시간소요를 줄이기 위해 타당성있는 가정사항을 세웠다. 개발된 인간신뢰도분석 절차서의 주요 사항은 다음과 같다;

- 1) 원자력발전소의 이상사태에 대응하는 운전원 행위는 두 개의 기본사건인 진단실패와 수행실패 사건으로 모델링한다.
- 2) 절차서에 없는 행위라도 일부 운전원이 그 행위에 대한 절차와 조건을 알고 있으면 그 행위에 대해 성공가능성을 고려한다.
- 3) 인간신뢰도분석시 본 연구에서 개발된 표(work sheet)의 사용으로 인간행위 정량화 과정에 대한 타당성 및 신뢰성을 제고시키고 정량화 과정을 쉽게 추적할 수 있다.
- 4) 인간신뢰도분석자의 판단이 필요한 부분에 결정수목을 사용하기 때문에 인간신뢰도분석시 개입될 수 있는 분석자의 주관성을 일정부분 배제할수 있고 일관된 인간신뢰도분석을 수행할 수 있다.

참고문헌

- [1] E.M. Dougherty & J.R. Fragola, "Human Reliability Analysis: A System Engineering Approach With Nuclear Power Plant Applications", SAIC, John Wiley & Sons, 1988
- [2] 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
- [3] 강대일 외 " 원자력발전소의 저출력/정지 확률론적 안전성평가에서의 인간신뢰도분석에 대한 현황분석", KAERI/AR-458/97, 한국원자력 연구소, 1997
- [4] 강대일 외, "가압 경수로의 저출력/정지운전 확률론적 안전성평가를 위한 인간신뢰도분석 절차서 개발", KAERI/TR-913/97, 한국원자력연구소, 1997
- [5] G.W, Hanaman et al., "Systematic Human Action Reliability

Procedures(SHARP)", EPRI/NP-3583, 1984

[6] M.T.Barriere, "Multidisciplinary Framework for Human Reliability Analysis with an Application to Errors of Commission and Dependencies", NUREG/CR-6265, B.N.L Jul. 1995

[7] A.D.Swain, "Accident Sequence Evaluation Program Human Reliability Analysis Procedure", NUREG/CR-4772, S.N.L, Feb. 1987

표 1 유형 C 인간행위의 인간신뢰도분석을 위한 표(work sheet)

I. Event Inform.	1. Event Name: O-MKUP 2. Modeling Locations: POS (5) ET: Loss of Shutdown Cooling, Heading: MKUP, FT: MKUP 3. Description: operator fails to perform RCS mskeup 4. Success Criterion: align valves of LPSI or CSS pump line from RWT to RCS 5. Related Procedure: AOM-45 6. Accident Sequences: IE-SDC * MKUP 7. Cues and Alerted Time for Operator Action: Cues - failure of shutdown cooling Alerted Time - within 2 minutes after I.E S&C:
II. Perfor. Shaping Factors	8. Procedure: a. Covered in LP/SD pro.(o), AOP(o), EOP(), not covered (), known() b. Well (o), Average(), Poor(), S&C: 9. Critical Human Actions(working place, environmental condition, execution time) < activities > <places/ conditions> < perfor. Time > a. align related valves for LPSI pump line MCR /Good < 10 min. b. align related valves for CSS pump line MCR /Good < 10 min. S&C: 10. Time a total allowed Time(80) min. S&C: b. total execution Time (30) min., moving time(< 2) min., performance time(< 15) min., S&C: total execution time include F&B operation c. available time for diagnosis:(50) min. S&C: 11. Type of Task: step by step(o) or dynamic - more than one task at a time() S&C: 12. Hesitancy (x) S&C: 13. Experience/Training: a. including(o), not (), known() b. Well(o), Average(), Poor() S&C: 14. Stress Level: a. more than 2 hrs after initiating events(x) b. before Large LOCA recirculation at low power POS(x) c. makeup failure at mid-loop POS(x) d. more than 2 safety system fails at low power POS(x) e. familiar with tasks - more than average Items 8 or 13 (o) f. environmental factors - No(o), radiation(), heat(), others() g.limited allowed time(< 30 min.) and existence of human error(x) h. extreme(), high(o), optimum(), low() S&C:
III. Quant.	15. HEP of Diagnosis Error: 5.32E-5(lower bound, 50 min) S&C: 16. HEP of Execution Error: 2.71E-5 <Bas. HEP><Table Source><Multip.><Modif.><2nd opera.><3rd opera. ><sub-total> a. 3.0E-3 Item 2 of T20-7 1.25 2 5.0E-1 1.43E-1 5.36E-4 b. 3.0E-3 Item 2 of T20-7 1.25 2 5.0E-1 1.43E-1 5.36E-4 low dependency between item "a" and "b", conditional HEP of item "b" = 0.05 +(1-0.05)x5.36E-4 = 5.505E-2 total HEP of exe. error = 5.36E-4 x 5.05E-2 = 2.71E-5 S&C:

POS: Plant Operation State, S&C: Source & Comment, HEP:Human Error Probability,

Table Source: Table in THERP