

인간신뢰도분석에서의 인간행위 의존성 평가: 암모니아 저장시설의 누출사고 평가 예

강대일, 이윤환, 진영호

dikang@nanum.kaeri.re.kr, yhlee3@nanum.kaeri.re.kr, yhj@nanum.kaeri.re.kr

한국원자력연구소

1. 서론

확률론적 안전성 평가(Probabilistic Safety Assessment: PSA)나 정량적인 위험도 평가(Quantitative Risk Assessment: QRA)에서 인간신뢰도분석(human reliability analysis)은, 인간행위를 기기처럼 생각하여 전체 시스템의 안전성에 중요한 초기사건(initiating event) 이전이나 초기사건 이후 또는 초기사건을 유발하는 인간행위를 파악하고 정량화하여, 확률론적 평가의 논리구조인 사건 및 고장수목(event tree 및 fault tree)이나 사고경위 단절집합 (accident sequence cutsets)에 포함시키는 것이다. 인간신뢰도분석 방법론이 많이 개발되어왔지만, 인간행위의 모델링이 어렵고 데이터가 부족하다는 이유 등으로 인해 뚜렷한 분석 방법론이 없는 실정이다[1, 2]. 현재 PSA나 QRA분야에서 많이 사용하고 있는 인간신뢰도분석 방법론은 THERP(Technique for Human Error Rate Prediction)[3], HCR(Human Cognitive Reliability)[4], SLIM(Successive Likelihood Index Methodology)[5] 등이다. 하지만 이러한 인간신뢰도분석 방법론 역시 인간의 인지오류 분석(cognitive error analysis) 측면에서 한계점을 갖고 있어, 최근에는 이러한 한계점을 극복하기 위해 CREAM(Cognitive Reliability and Error Analysis Method)[6]과 ATHENA(A Technique for Human Error Analysis)[7] 등의 새로운 방법론이 개발되었다.

인간신뢰도분석 수행시 단위 행위(action)를 이루고 있는 세부행위들(activities) 사이, 행위 수행 참여자 사이 등에는 인간행위의 공통적인 요인 때문에 의존성이 존재한다[3, 8]. 이러한 의존성을 인간신뢰도분석시 제대로 평가하지 않으면, 지나치게 낙관적이거나 보수적인 인간신뢰도분석 결과를 얻게 되어 대형 시스템인 원자력발전소나 화학 플랜트의 정량적인 안전성 평가 결과를 왜곡되게 할 수 있다. 또한 대형시스템의 중대사고 시나리오(사고경위)와 사고 빈도를 파악하고 안전성이나 위험도 관리 측면에서 이에 대처하는 방안을 마련하기 위해 수행되는 정량적 안전성 평가 목적이 상실될 수 있다. 이에 본

논문에서는 정량적 안전성 평가 수행에 도움을 주기 위하여, 인간신뢰도분석 분야에서 많이 사용되고 있는 THERP의 방법론을 중심으로 인간행위의 의존성 평가 방법과 실제적인 평가 예를 소개하고자 한다.

2. 인간행위의 의존성 평가

2.1 의존성의 형태

인간신뢰도분석에서 인간행위의 의존성은 크게 동일행위의 수행과 관계된 작업자들 사이, 한 행위(action)를 이루고 있는 세부행위들(activities) 사이, 인간행위에 공통으로 영향끼치는 수행특성인자들(performance shaping factors) 사이에서 발생할 수 있다.

동일행위를 수행하는 작업자들 사이의 의존성이란 작업자 팀원 사이 즉, 운전원과 선임 운전원 등에 존재하는 의존성을 말한다. 행위를 이루는 세부행위들 사이의 의존성이란 계통을 이루고 있는 기기들과 관련된 세부행위들 사이에 존재하는 의존성을 말한다. 수행특성인자들의 의존성이란 한 인간행위에 대한 수행특성인자들내의 의존성과 고장수목과 사건수목에 모델링된 다수의 운전원 행위들에 대한 수행특성인자들의 의존성을 말한다. 수행특성인자들 사이에 존재하는 의존성의 예로서는 절차서와 훈련 사이의 관계이다. 다수 운전원 행위들에 대한 수행특성인자 사이의 의존성에 대한 예로서는 지시계나 경보 등의 고장이나 운전원들의 편향된 사고로 다수 행위의 실패를 가져오는 것이다.

2.2 의존성의 정성적 평가

THERP에서는 의존성을 완전 의존(complete dependence), 높은 의존(high dependence), 중간 의존(medium dependence), 낮은 의존(low dependence), 독립 의존(zero dependence) 5가지로 나누었다.

THERP의 방법론에 따라 인간오류를 진단오류(diagnosis error)와 수행오류(execution error) 두가지로 분류할 경우, 진단오류들 사이의 의존성 수준이 수행오류들 사이의 의존성 수준보다 높다. 여기서 진단오류란 대형시스템의 이상사태를 감지, 파악, 진단, 의사 결정 등 인간의 인지적 측면과 관련된 행위의 오류를 말한다. 수행오류는 진단이 이루어진 후에 수행되는 행위이거나 진단이 필요없는 행위와 관련된 오류이다. 수행오류는 다시 절차서에 기술된 내용을 빠뜨리는 누락오류(omission error)와 특정 기기 등을 작동할 경우 발생할 수 있는 조치오류(commission error)로 이루어졌다. 오류 특성상 누락오류들 사이의 의존성 수준이 조치오류들 사이의 의존성 수준보다 높다.

의존성 평가에 대한 THERP의 지침은 다음과 같다;

- 1) 이전행위의 성공이나 실패의 영향을 평가한다.
- 2) 두가지의 의존성 수준에서 어떤 의존성 수준을 적용할지 모르는 경우에는 높은 의존성을 사용한다.
- 3) 모든 운전원 행위에 대해 공간과 시간관계를 평가한다.
- 4) 운전원 행위 사이에 기능적 관계를 평가한다.
- 5) 의존성은 스트레스가 높아지면 증가한다.
- 6) 운전원 사이의 의존성은 지위, 훈련, 책임감, 사회적이고 심리적인 요인의 유사성 정도에 따라 달라진다.
- 7) 한 사람에게 의해 수행되는 전체 인간오류 확률이 $1.0E-5$ 보다 낮거나 두사람 이상에 의해 수행되는 인간오류 확률이 $1.0E-6$ 보다 낮게 평가됐다면 의존성 수준을 재평가한다.

2.3 의존성의 정량적 평가

두 행위 “A”와 “B”에서 선행행위는 “A”, 후속행위는 “B”라고 할 때, 선행행위 “A”가 실패시 후속행위 “B”도 실패하는 조건부 확률은 THERP의 방법에 따르면 표 1과 같다. 표 1에 나타나 있듯이 후속행위의 실패확률이 0.01보다 작은 값이면 일정한 값에 수렴하는 경향이 있다. 두가지 이상 행위들 사이에 대한 의존성 평가의 식은 그 행위와 관계된 고장수목이나 사건수목 등에서 제시하는 인간행위의 성공기준에 따라 다르다.

두 행위 “A”와 “B” 모두가 성공이어야 전체 행위가 성공인 인간행위의 실패 확률에 대한 의존성 평가는 “A”와 “B”의 실패 확률이 아닌 성공확률을 평가함으로써 이루어진다. 두 행위 “A”와 “B” 사이의 의존성 수준이 높을수록 전체적으로 실패할 확률은 감소한다. 실무적으로는 보수적으로 의존성을 독립으로 평가한다.

또 다른 예로서 두 행위 “A”와 “B”중 한가지가 성공이면 전체 행위가 성공인 인간행위의 실패 확률은 두 행위 “A”와 “B” 사이의 의존성 수준이 높을수록 실패할 확률은 증가한다. 이러한 경우의 의존성 수준을 제대로 바르게 평가하지 않으면 지나치게 낙관적인 결과를 얻을 수가 있다.

3. 실제적인 의존성 평가 예

암모니아 저장시설의 암모니아 누출사고에 대한 진영호의 연구[9]에 의하면 암모니아 누출빈도가 1.2×10^{-3} (년간)이었으며, 누출사고 시나리오의

대부분이 인간오류로 밝혀졌다. 주요 누출사고 시나리오는 암모니아 운반 차량으로부터 저장시설로의 암모니아 이송작업후 직렬로 연결된 저장시설의 밸브들을 닫지않고 플랜지 해체 작업을 할 경우이다.

인간오류 정량화는 THERP를 이용하였으며, 인간신뢰도분석시 사용한 가정사항은 다음과 같다;

- 1) 이 작업은 1달에 2번씩 수행하므로 저장시설의 운전원과 탱크 로리차의 운전원 모두가 작업수행에 익숙하고, 안전에 대한 제반 규정을 준수하며 작업수행시 서로의 작업내용을 확인한다.
- 2) 플랜지 해체작업은 탱크 로리차의 운전원이 수행하고 저장시설의 밸브를 잠그는 작업은 저장시설의 운전원이 수행한다.
- 3) 2개의 밸브를 잠그는 작업과 관련된 주요오류는 누락오류이고 이 오류들 사이는 완전 의존성으로 가정한다. 저장시설의 운전원이 밸브를 잠그는 행위를 실패하는 오류와 탱크 로리차의 운전원이 이들 밸브가 잠겨 있는 것을 확인하는 행위를 실패하는 오류 사이의 의존성 수준은 독립 의존성으로 가정한다.
- 4) 탱크 로리차 운전원이 플랜지 해체작업을 무시하고 출발하는 것은 고려하지 않았다.

위의 가정을 토대로 한 인간행위 정량화 결과가 표 2에 나타나 있다. 표2의 데이터에서 표 20-7과 20-22는 각각 THERP의 표를 말한다. 저장시설의 운전원과 탱크 로리차 운전원 사이의 의존성 수준은 관련 운전원들의 태도와 습관에 따라 달리 평가될 수 있다.

표 2의 세부적인 인간행위들 중 “2개 밸브의 폐쇄 행위”에서의 의존성과 “2개 밸브 폐쇄행위”와 “운전원의 확인행위” 사이의 의존성 수준을 달리 평가할 경우의 암모니아 누출빈도가 표 3에 나타나 있다. 표 3의 수치들은 중앙값(median)을 나타낸 것으로 평균을 알기 위해서는 불확실성 분석이 필요하다. 표 3에서 이태릭체로 쓴 것은 현재의 평가 결과보다 낮게 나타난 것이고 볼드체로 쓴 것은 높게 나타난 것이다. 인간행위의 의존성 평가 수준에 따라 암모니아 누출빈도는 최대 1.2×10^{-2} /(년간), 최소 1.2×10^{-6} /(년간)로 나타나 그 최소 대 최대의 비는 10,000배이었다.

인간행위의 의존성을 제대로 평가하기 위해서는 무엇보다도 평가대상 인간행위의 성공기준과, 발생 가능한 주요 오류 특성 등 여러가지 사항을 파악하여야 한다. 또한 분석을 수행하는 담당자에게는 정량적 안전성 평가와

인간행위에 대한 기본적인 지식과 함께 이에 대한 어느 정도의 경험을 필요로 한다.

4. 결론

인간신뢰도분석 수행시 인간행위들 사이에 나타나는 의존성을 제대로 평가하지 않으면 지나치게 낙관적이거나 보수적인 인간신뢰도분석 결과를 얻게 되어 정량적인 안전성 평가의 결과가 왜곡될 수 있고 그 평가 목적이 상실될 수 있다.

이에 본 논문에서는 정량적 안전성 평가 수행시 도움을 주고자 의존성의 형태와 의존성의 정성적, 정량적 평가 방법 등을 THERP를 중심으로 소개하였다. 또한 의존성 수준에 따라 정량적인 안전성 평가 결과가 크게 차이가 난다는 것을 보이면서 인간행위의 의존성 수준을 제대로 평가하는 것이 중요하다는 것을 밝혔다.

인간신뢰도분석에서 나타나는 특성 및 한계점 등은 인간오류의 의존성 평가시에도 동일하게 나타난다. 따라서 좀 더 객관화된 의존성 평가를 수행하기 위해서는 실제적인 사건이나 사고 데이터의 수집과 이에 대한 면밀한 분석 및 검토가 필요한 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발 사업의 일환으로 수행 되었습니다.

참고문헌

1. E.M. Dougherty and J.R. Fragola, "Human Reliability Analysis: A System Engineering Approach with Nuclear Power Plant Applications". SAIC. John Wiley & Sons, 1988
2. Principle Working Group, "Critical Operator Actions – Human Reliability Modeling and Data Issues", NEA/CSNI/R(98)1, Feb. 1998, OECD Nuclear Energy Agency
3. 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, 1983
4. G.W.Hanaman et al., "Human Cognitive Reliability Model for PRA Analysis". NUS-4531, NUS Corporation, 1984

5. D.E.Embrey, "SLIM-MAUD: An Approach to Assessing Human Error Probabilities Using Structured Expert Judgement", NUREG/CR-3518, 1984
6. Erik Hollnagel, "Cognitive Reliability and Error Analysis Method", Elsevier Science Ltd., 1998
7. S. E. Cooper et al., "A Technique for Human Error Analysis(ATHENA) – Technical Basis and Methodology Description", NUREG/CR-6350, NRC, 1996
8. 강대일 외, "확률론적 안전성평가의 인간신뢰도분석에서 다수 인간행위의 의존성평가에 대한 연구", KAERI/TR-820/97, 한국원자력연구소, 1997
9. 진영호 외, "환경 위해도 평가 방법론 개발 및 적용", KAERI/RR-1574/95, 1995

표 1. 의존성 수준에 따른 조건부 확률 평가 식

의존성 수준	조건부 확률식	P(B)가 0.01보다 작을 경우의 근사치
독립 의존	$P(B/A)=B$	B
낮은 의존	$P(B/A)=(1+19B)/20$	0.05
중간 의존	$P(B/A)=(1+6B)/6$	0.15
높은 의존	$P(B/A)=(1+B)/2$	0.5
완전 의존	$P(B/A)=1.0$	1

표 2. 암모니아 누출 사고와 관련된 인간행위 정량화 결과

세부 행위	확률	데이타 (THERP)	오류
2 밸브중 1개이상의 밸브 폐쇄 실패	1.0×10^{-3}	표 20-7 항목 1	누락오류
탱크 로리 차 운전원 확인 실패	1.0×10^{-1}	표 20-22 항목 1	누락오류
플랜지 해체 작업중 누출 탐지 실패	5.0×10^{-1}	공학적 판단	
탱크 로리 차의 연간 작업 횟수	24 (/년간)	운전 이력	
암모니아 누출빈도(/년간)	1.2×10^{-3} (/년간)	증양 값	

표 3. 인간행위의 의존성수준에 따른 암모니아의 연간 누출 빈도

밸브 폐쇄 확인 실패	독립 의존	낮은 의존	중간 의존	높은 의존	완전 의존
독립 의존	1.2×10^{-6}	6.12×10^{-5}	1.73×10^{-4}	6.0×10^{-4}	1.2×10^{-3}
낮은 의존	1.74×10^{-6}	8.87×10^{-5}	2.51×10^{-4}	8.7×10^{-4}	1.74×10^{-3}
중간 의존	2.75×10^{-6}	1.4×10^{-4}	3.96×10^{-4}	1.37×10^{-3}	2.29×10^{-3}
높은 의존	5.5×10^{-6}	3.37×10^{-4}	9.50×10^{-4}	3.3×10^{-3}	5.5×10^{-3}
완전 의존	1.2×10^{-5}	6.12×10^{-4}	1.73×10^{-3}	6.0×10^{-3}	1.2×10^{-2}