

'97 춘계 학술발표회 논문집  
한국원자력학회

## 월성 2,3,4 호기 확률론적 안전성 평가의 인간오류에 대한 민감도분석

강대일, 양준언, 박진희, 황미정

한국원자력연구소

김명기

한국전력연구원

### 요약

WASH-1400[1]이 발간된 이후 수행되었던 많은 확률론적 안전성 평가 결과를 보면 노심손상빈도를 나타내는 사고경위 중 많은 부분이 인간행위와 관련이 있는 것으로 밝혀져 확률론적 안전성 평가에서 인간행위를 다루는 것은 매우 중요하게 되었다. 그러나 인간신뢰도분석은 인간행위의 다변성(variability)으로 인해 인간행위의 모델링이 어렵고 데이터가 부족해 뚜렷한 방법론이 없어 분석시 분석자의 주관성이 개입될 여지가 있고 분석결과에는 많은 불확실성을 포함하고 있다. 노심손상빈도를 나타내는 사고경위에는 다수 인간행위가 있는 포함돼있는 단절집합을 얻게되는데 이러한 인간행위들 사이에는 기기의 공통원인 고장처럼 의존성이 존재한다. 이러한 의존성의 평가방법 또한 뚜렷하게 설정되지 않은 형편이다. 이에 본 논문에서는 월성 2,3,4 호기 확률론적 안전성 평가 모델에 고려되었는 인간행위들의 인간오류 확률 값과 의존성 수준의 변화에 대한 민감도분석을 수행하였다. 분석결과 초기사건 이후의 인간행위가 노심손상빈도 변화에 크게 기여하는 것이 밝혀졌고, 다수 인간행위들 사이의 의존성 수준변화가 노심손상빈도 변화에 큰 영향을 준다는 것이 밝혀졌다.

### 1. 서론

확률론적 안전성 평가(Probabilistic Safety Assessment: PSA)에서 인간신뢰도분석(human reliability analysis)은 인간행위를 기기처럼 생각하여 발전소 안전성에 중요한 초기사건(initiating event) 이전 즉, 보수·시험·보정과 관련된 인간행위나 초기사건 이후 발전소 이상 사태 발생시 이에 대처하는 인간행위를 파악하고 정량화하여 PSA 논리구조인 사건·계통 수목이나 사고경위(accident sequence) 단절집합에 포함시키는 것이다. 인간신뢰도분석은 사건·고장수목의 검토와 이를 분석자와의 면담, 절차서와 운전원 조직의 검토, 운전원과 보수·시험 요원들과의 면담, 모의제어반 실험(simulator experiment), 평가대상 인간행위에 대한 수행장소 및 시간 파악 등의 많은 정보를 필요로 한다.

인간신뢰도분석에서 많은 방법론이 개발되었지만[2] 인간행위의 다변성으로 인해 인간행위 모델링의 어려움과 데이터의 부족으로 인해 뚜렷한 분석 방법론이 없는 실정이다. 이러한 인간신뢰도분석의 특성은 분석시 분석자의 주관성 개입을 어느정도 허용하게되고 분석결과에 많은

불확실성을 포함하게된다[2,3]. 노심손상을 나타내는 사고경위의 단절집합 중에는 둘 이상의 인간행위로 이루어진 단절집합이 나타나게되는데 이러한 둘 이상의 인간행위들 사이에는 기기의 공통원인 고장(common cause failure)처럼 인간행위의 목적의 동일성과 사용 절차서의 공통성 등으로 인해 의존성(dependency)이 존재하게 된다[3,4]. 이러한 의존성 평가 역시 뚜렷한 방법이 설정돼 있지않기 때문에 많은 불확실성을 내포하고 있다. 규제기관인 안전기술원은 월성 2,3,4 호기 인간실헤도분석의 수행오류 평가시 사용했던 ASEP(accident sequence evaluation program)[5]을 분석자가 자의적으로 해석하여 3번째 운전원까지 고려를 했다고 언급하면서 수행오류 평가시 2번째 운전원만 고려를 하여 인간오류 확률과 노심손상빈도를 재 평가하라고 요구했다.

이에 본 논문에서는 위의 사항에 대하여 현재 월성 2,3,4 호기 PSA 모델에 고려돼있는 인간행위에 대한 인간오류 확률값과 의존성 수준들을 변화시키며 이에 따른 노심손상빈도를 정량화했다.

## 2. 연구수행과정

본 연구 수행과정이 그림 1에 나타나있다. 먼저 월성 2,3,4 발전소의 PSA모델에서 모델링된 인간행위들을 검토하여 민감도분석 항목들을 선정하였다. 선정된 항목들과 관련된 인간행위들을 분류하여 분류된 인간행위들의 인간오류 확률값을 변경하거나 의존성 수준을 변화시켰다. 세번째로는 전체 노심손상빈도를 구하는 과정과 동일하게 계통고장과 사고경위를 나타내는 최소단절집합을 다시 구해 전체 노심손상빈도를 평가하였다. 노심손상빈도 계산시 사용한 전산코드는 KIRAP이다[6].

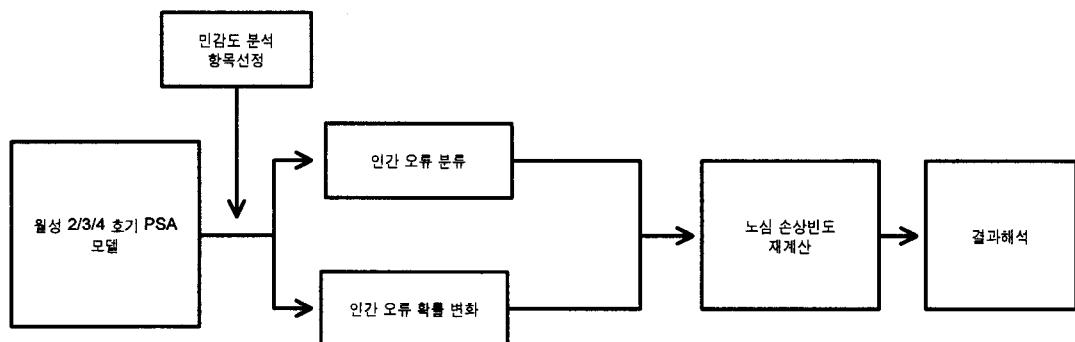


그림 1. 민감도분석 연구 수행과정

월성 2,3,4 호기 PSA의 인간실헤도분석은 크게 선별분석과 상세분석 2단계로 나누어 수행하였다[7]. 선별분석은 보수적인 인간오류 확률값을 사용하여 사고경위에 중요한 인간행위를 파악하기 위해 수행하였다. 상세분석은 ASEP[5]을 주로 사용하였으며 THERP(technique for human error rate prediction)[3]는 다수인간행위의 의존성평가시 보조적으로 사용하였다. 월성 2,3,4 호기 PSA 모델링에 고려된 인간행위의 수는 대략 200여개이다. 그 중 계통의 시험·보수·보정 등의 과정과 관련있는 초기사건이전 인간행위는 약 120개이다. 발전소의 이상사태나 사고 발생시 대처하는 초기사건 이후의 인간행위의 수는 절차서에 따른 행위와 회복행위를 포함하여 75개 정도이다. 사고경위 정량화시 이들

초기사건 이후의 인간행위들은 그들사이의 의존성을 고려해 단일 행위로 나타냈다. 모든 인간행위의 인간오류 확률은 1.0E-5보다 크다고 가정하였다. 인간오류 확률이 변함에 따라 다수인간행위의 의존성을 나타내는 인간행위의 오류 확률도 재 평가하였다.

인간오류 확률 변화에 따른 노심손상빈도 변화는 아래의 식으로 나타냈다[8,9]:

$$\text{변화비(Ratio of Changed Value:RCV)} = \frac{\text{인간오류확률 변화에 따른 노심손상빈도 (계통이용불능도)}}{\text{기본안 경우의 노심손상빈도(계통 이용불능도)}}$$

만일 분석대상 발전소의 노심손상빈도 변화비가 다른 발전소의 것보다 크다고하면 분석대상 발전소의 노심손상빈도는 비교 대상 발전소의 노심손상빈도보다 인간오류 확률에 더 민감하다는 것을 의미한다. 인간오류 확률에 더 민감하다는 것은 다시 다음과 같은 세 가지의 의미로 해석할 수 있다. 첫째, 노심손상을 나타내는 사고경위의 최소 단절집합에 다수의 인간행위가 존재한다는 의미이다. 둘째, 인간신뢰도분석자가 같은 인간신뢰도분석 방법을 두 발전소의 PSA에 사용했다면 변화비가 큰 발전소는 비교대상 발전소에 비해 자동화가 덜 돼있다는 것을 의미한다. 셋째, 만일 사용된 인간신뢰도분석 방법이 상이하다면 변화비가 큰 발전소에 사용된 인간신뢰도 분석 방법이 변화비가 작게 나타난 인간신뢰도분석 방법보다 상대적으로 더 보수적이라는 의미를 내포하고 있다. 노심손상빈도가 인간오류 확률에 민감한 정도는 사고경위를 나타내는 사건수목 구성방식에 따라 달라질 수도 있다.

### 3. 인간오류 확률 변화에 따른 노심손상빈도 비

#### 3.1 전체 인간오류 확률 변화

본 분석에서는 전체 인간오류 확률을 10배로 증가시킨 경우와 1/10배로 감소시킨 경우에 따른 노심손상빈도 변화를 분석하였다. 전체 인간오류 확률의 변화에 따른 노심손상빈도 변화비가 표 1에 나타나 있다. 표 1에 나타났듯이 인간오류 확률을 10배로 증가시켰을 경우에는 월성 2,3,4의 노심손상빈도비는 9.96으로 Oconee의 222보다는 작았지만 Surry와 LaSalle보다는 크게 나타났다[8,9]. 이렇게 월성 2,3,4 호기의 노심손상빈도가 크게 나타난 것은 선별분석시 보수적으로 높은 인간오류 확률을 사용했기 때문이다. 인간오류 확률을 1/10배로 감소시켰을 때 월성 2,3,4 호기의 노심손상빈도 비는 0.434로 Oconee와 LaSalle보다는 크지만 Surry 보다는 작게 나타났다. 전체적인 노심손상빈도 변화비를 보면 Surry와 LaSalle와 유사하게 나타나 월성 2,3,4 호기 PSA의 인간신뢰도분석 방법이 지나치게 보수적이거나 낙관적이 아니란 것이 밝혀졌다.

#### 3.2 초기사건이전 인간오류와 이후 인간오류 확률 변화

계통들의 보수나 시험 그리고 보정과 관련된 초기사건 이전의 인간행위에 대한 인간오류 확률과 발전소의 이상사태나 사고시에 대처하는 행위와 관련된 인간오류 확률을 10배와 1/10배로 변화시켜

노심손상빈도를 분석하였다. 초기사건 이후의 인간행위에는 절차서에 따른 행위와 회복행위도 포함되었다.

초기사건 이전과 이후의 인간오류 확률변화에 대한 노심손상빈도비가 표 2에 나타나있다. 다른 발전소의 PSA결과[8,9]와 마찬가지로 초기사건이전 인간오류는 인간오류 확률 변화에 따라 전체 노심손상빈도 변화에 영향을 크게 안 주는 것으로 나타났다. 초기사건 이후 인간행위의 인간오류 확률 변화는 표 2에서 나타났듯이 노심손상빈도 변화에 크게 영향을 주는 것으로 밝혀졌다.

### 3.3 다수 인간행위사이의 의존성 수준 변화

현재 사고경위에서 나타나는 다수인간행위에 대한 의존성평가는 현재 뚜렷하게 통일된 방법론이 없기에 이에 대한 민감도분석을 수행하였다. 월성 2,3,4 호기의 인간신뢰도분석에서는 THERP에 따라 다수 인간 행위들 사이의 의존성 수준을 완전, 높은, 중간, 낮은 의존성으로 평가하였다. 의존성 평가시 고려했던 요인들로는 허용시간, 절차서 구조, 두행위를 구별시켜주는 징후이었다. 발전소의 이상사태에 대응하는 운전원의 행위를 진단행위와 수행행위 두가지로 구분하여 정량화하였고 진단행위들사이에는 수행행위들 사이 보다 인간행위의 목적지향성때문에 더 높은 의존성이 있다고 평가하였다.

원자력발전소의 PSA에서 다수 인간행위에 대한 의존성을 제대로 평가하지 않으면 매우 낙관적인 결과를 얻게된다. 일부 인간신뢰도분석자는 인간행위는 목적지향적이기 때문에 다수 인간행위 사이의 의존성은 인지적 측면 즉, 진단오류 사이에만 의존성이 존재하지 수행오류 사이에는 존재하지 않는다고 주장하고 있다. 한편, PSA를 규제의 수단으로 사용하려고 하는 미국의 원자력규제위원회[10]에서는 다수의 인간행위에 대해 인간오류 확률 제한치를 설정하고 있다. 이것은 다수 인간행위의 인간신뢰도분석시에는 의존성을 고려해야한다는 의미이다. 현재의 월성 2,3,4 호기 PSA 모델에서는 다수인간행위들 사이의 진단오류와 수행오류 모두에 대해 의존성을 고려하였다. 본 분석에서 의존성평가의 민감도분석에서 고려한 항목은 다음과 같다;

- 1) 수행오류(execution error)에 전혀 의존성이 없는 경우
- 2) 모든 행위에 의존성이 없는 경우

수행오류에 의존성이 없는 경우의 노심손상빈도비는 0.909로 기본안경우의 노심손상빈도보다 약 9%감소한 것으로 나타났다. 전체 인간행위에 의존성이 없는경우의 노심손상빈도비는 0.725로 기본안경우의 노심손상빈도보다 약 27% 감소한 결과로 나타났다. 전체 인간오류에 의존성이 없는 경우, 다수 인간행위에 대한 최소 인간오류 확률의 제한치는 설정하지 않았다.

### 3.4 수행오류 평가시 3번째 운전원을 고려하지 않았을 경우

월성 PSA의 인간신뢰도분석에서 수행오류 평가에 3번째 운전원을 고려한 경우는 현재 작성중인 여러가지의 이상운전 절차서(abnormal operating procedure:AOM)[11]에서 자주 언급되며 경수로의 징후기반 절차서와 유사한 필수안전 변수 감시 절차서(critical safety parameters monitoring procedure)에 기술되었는 행위이거나 상대적으로 여유시간이 긴 경우이다. 제어실안에서 이루어지는 행위들 대부분은 팀 단위로 이루어고 절차서에 자주 언급된 행위들 대부분은 발전소 정상운전중의 시험과 정지운전시에 수행되는 과정들이어서 발전과장, 1.2차측 운전원과 안전과정이 어느정도 암기하거나 그 과정들을 알고 있을것으로 판단하여 수행오류 평가에 3번째 운전원을 고려 한 것이다. THERP나

ASEP에서 인간신뢰도분석시 사용하라고 제시하는 진단오류 확률 표에는 이미 이들 운전원들, 즉 3번째 운전원까지 고려를하여 진단오류 확률에 포함하고있다[3,5].

안전기술원에서는 월성 2,3,4호기의 인간신뢰도분석시 3번째 운전원을 고려한 것은 분석자가 ASEP 절차서를 너무 자의적으로 해석한 것이라 언급하면서 현재 월성 2,3,4호기 PSA에 모델링된 인간행위에 대해 3번째 운전원을 고려하지 말고 인간오류확률과 노심손상빈도를 재계산하라고 요청을 하였다. 이에 3번째 운전원을 고려하지 않고 인간오류 확률을 재계산하고 아울러 의존성의 변화에 따른 인간오류 확률과 노심손상빈도를 재계산하였다.

3번째 운전원을 수행오류 평가시 고려하지 않았을 경우와 이의 의존성 변화에 대한 계산결과가 표 5에 나타나있다. 3번째 운전원을 고려하지 않았을 경우와 수행오류에 의존성이 없다고 한 경우의 노심손상빈도비는 1.63과 1.07로 그리고 모든 인간오류에 의존성이 없다고 한경우에는 0.888로 나타났다. 3번째 운전원을 고려하지 않았을때의 노심손상빈도를 기본값으로 보고 수행오류에 의존성이 없을때와 전체 인간오류에 의존성이 없을때의 노심손상빈도비는 각각 0.657, 0.545로 나타났다. 3번째 운전원을 고려하지 않았을때의 노심손상빈도는 기본안 경우의 노심손상빈도보다 63% 증가했다. 그러나 운전원 행위에 대한 수행오류 사이의 의존성과 전체 인간행위사이의 의존성을 고려하지 않았을 경우의 노심손상빈도는 기본적인 노심손상빈도와 유사한 값이거나 오히려 감소된 노심손상빈도 값을 얻게되었다. 3번째 운전원을 고려하지 않았을 경우의 노심손상빈도 값을 기본으로하여 수행오류와 전체 인간오류에 의존성이 없다고한 경우 노심손상빈도는 크게 감소하였다. 이러한 결과를 얻게된 이유는 월성 2,3,4 호기 PSA 모델에서 수행오류평가시 3번째 운전원을 고려하지 않았을 경우 인간오류 확률 값은 증가했고 그 증가된 인간오류 확률 값의 대부분은 수행오류 확률이 차지하기 때문이다.

#### 4. 결론

월성 2,3,4 호기의 PSA 모델에 고려돼있는 인간오류에 대한 민감도분석을 수행한 결과 다음과같은 결론을 얻었다;

- 1) 월성 2,3,4 호기 PSA 모델에 사용된 인간신뢰도분석 방법론은 지나치게 보수적이거나 낙관적이 아니라는 것이 밝혀졌다.
- 2) 초기사건 이전 인간행위보다 초기사건 이후 인간행위가 노심손상빈도에 더 큰 영향을 미친다는 것이 밝혀졌다.
- 3) 사고경위상의 다수 인간행위에 대한 의존성 고려유무는 노심손상빈도 변화에 영향을 크게 미친다는 것이 밝혀졌다.
- 4) 수행오류 평가시 3번째 운전원을 고려하지 않았을 경우 노심손상빈도는 크게 증가하였다. 그러나 노심손상빈도변화에 더 큰 영향을 주는 것은 단일 인간행위의 오류 확률값에 영향을 주는 3번째운전원의 고려유무보다 사고경위상의 다수 인간행위들 사이에 존재하는 의존성의 고려유무인 것으로 밝혀졌다.

인간신뢰도분석은 인간행위의 모델링의 어려움과 데이터의 부족으로 뚜렷하게 설정된 방법이 없어 분석시 분석자의 주관성이 개입되고 분석결과에는 많은 불확실성을 내포하게된다. 이러한 불확실성의 일정부분을 해결하도록 실제적인 인간오류에 대한 데이터를 수집하고 분석하여 인간신뢰도분석에 반영하는 연구가 필요할 것으로 생각한다.

#### 참고문헌

1. *Reactor Safety Study: An Assessment of Accidents in US Commercial Nuclear Power Plants*, USNRC, WASH-1400, 1975
2. B.O.Y.Lydell, *Human Reliability Methodology. A Discussion of the State of the Art*, Reliability Engineering and System safety, Vol. 36 1992
3. A.E.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
4. Kang Dae IL and et al., *A Study on the Dependency Evaluation for Multiple Human Actions in Human Reliability Analysis of Probabilistic Safety Assessment*, KAERI/TR-820-97, KAERI, 1997
5. A.E.Swain, *Accident Sequence Evaluation Program Human Reliability Analysis Procedure*, NUREG/CR-4772, S.N.L, Feb., 1987
6. S.H. Han, *KAERI Integrated Reliability Analysis KIRAP Package*, KAERI-PSA-002, KAERI, 1989
7. 가압 중수로 원전 2단계 확률론적 안전성 평가 KEPRI-93N-J10, 출간예정 1997
8. S. Wong and J. Higgins, *Comparison of Risk Sensitivity to Human Errors in the Oconee and La Salle PRAs*, BNL-NUREG-45370, B.N.L, 1991
9. Robert L. Palla Jr. and Adel El-Bassioni, *An Assessment of the Risk Significance of Human Errors in Selected PSAs and Operating Events*, BNL-NUREG-46451, 1991
10. “Regulatory Review Group Report”, NRC, 1994
11. K.W Lee and et. al., *Wolsong 2 Abnormal Operating Manual*, Rev. P0, 1995, AECL/KAERI, issued for the comment of WS NPP Operator

표 1 전체 인간오류 확률 변화 경우

발전소	전체 인간오류 확률 10배일 때의 노심손상빈도 변화비	전체 인간오류 확률 1/10배일 때의 노심손상빈도 변화비
월성 2,3,4	9.96	4.34E-1
Oconee	222.22	3.33E-2
Lasalle	5.00	3.00E-1
Surry	5.00	6.25E-1

표 2 초기사건 이전과 이후의 인간오류 확률 변화 경우

인간행위	인간오류 확률 10배일 때의 노심손상빈도 변화비	인간오류 확률 1/10배일 때의 노심손상빈도 변화비
모든 행위	9.96	4.28E-1
초기사건이전 행위	1.16	9.95E-1
초기사건이후 행위	9.73	4.45E-1

표 3. 수행오류 사이 의존성 없는 경우와 모든 인간오류들사이 의존성이 없는 경우

수행오류사이 의존성 없는 경우의 노심손상빈도 변화비	모든 인간행위에 의존성 없는 경우 노심손상빈도 변화비
9.09E-1	7.52E-1

표 4. 수행오류 평가시 3번째 운전원을 고려하지 않았을 경우

3번째 운전원 고려 안할 경우의 노심손상 빈도 변화비	수행오류에 의존성 없는 경우 (3번째 운전원 고려 안할 경우)의 노심손상 빈도 변화비	모든 인간행위에 의존성 없는 경우(3번째 운전원 고려 안할 경우 기준)의 노심손상 빈도 변화비
1.63	1.07( 0.657)	8.88E-1( 0.545)