2003 춘계 학술발표회 논문집
한국원자력학회

정지/저출력 확률론적안전성평가에서의 국내 표준 인간신뢰도분석 절차 개발을 위한 원인기반 결정수목 방법 검토

Review of Cause-Based Decision Tree Approach for the Development of Domestic Standard Human Reliability Analysis Procedure in Low Power/Shutdown Operation Probabilistic Safety Assessment

강대일 · 정원대
한국원자력연구소

요 약

국내에서 개발하고 있는 정지/저출력 확률론적안전성평가의 표준 인간신뢰도분석 절차에 원인기반 결정수목 방법을 포함할 것인지를 결정하기 위해 동 방법을 검토하였다. 이를 위해 본 논문에서는 원인기반결정수목 방법을 소개하고 동 방법에 의한 인적오류 평가, 그리고 기존에 사용했던 THERP와의 비교를 통해 동 방법의 장점과 단점을 파악하였다. 검토 결과, 원인기반결정수목 방법이 THERP와 마찬가지로 인간신뢰도분석 분석자의 주관적 판단을 필요로 하는 부분이 많아 정지/저출력 확률론적 안전성평가의 표준 인간신뢰도분석 절차 개발에 동 방법의 포함은 어려울 것으로 판단된다. 하지만 표준 인간신뢰도분석 절차 개발에 인간신뢰도분석 정량화 결과의 비교만을 목적으로 하는 동 방법의 포함은 상세 절차 개발에 대한 부담을 없애고 인간신뢰도분석 정량화 결과의 일관성 유지 확보에 도움을 줄 것으로 판단된다.

Abstract

We review the cause-based decision tree (CBDT) approach to decide whether we incorporate it or not for the development of domestic standard human reliability analysis (HRA) procedure in low power/shutdown operation probabilistic safety assessment (PSA). In this paper, we introduce the cause based decision tree approach, quantify human errors using it, and identify merits and demerits of it in comparision with previously used THERP. The review results show that it is difficult to incorporate the CBDT method for the development of domestic standard HRA procedure in low power/shutdown PSA because the CBDT method need for the subjective judgment of HRA analyst like as THERP. However, it is expected that the incorporation of the CBDT method into the development of domestic standard HRA procedure only for the comparision of quantitative HRA results will relieve the burden of development of detailed HRA procedure and will help maintain consistent quantitative HRA results.

1. 서론

지금까지 수행되었던 많은 원전의 확률론적안전성평가(probabilistic safety assessment: PSA) **결과에 의하면 인적오류가 안전성에 가장 큰 영향을 미치는 요인 중 하나로 나타났고 실제적으로**

발생된 대형사고 대부분은 인적오류와 밀접히 관련이 있는 것으로 밝혀졌다[1]. 인간신뢰도분석(Human Reliability Analysis: HRA)은 인간 행위를 기기처럼 생각하여 원전 안전성에 중요한 초기사건 이전 행위나 초기사건이후 인간행위를 파악/ 정량화하여 PSA 논리구조인 사건.계통 수목이나 사고경위 단절집합에 포함시키는 것이다. 하지만 인적오류에 대한 HRA 수행시 인적오류의 모델링 어려움과 데이터의 부족, 분석시 분석자의 주관성 개입 등을 이유로 PSA의 어느분야 보다도 HRA 수행결과에는 많은 불확실성이 있다. 같은 HRA 방법을 사용할지라도 HRA 수행시 분석자의 판단이 개입되는 부분이 많기 때문에 HRA 분석 결과는 상이하게 나타날 수 있다. 이러한 HRA 분석자의 불확실성을 일정 부분 해결하려는 노력의 일환으로 최근에는 국.내외에서 표준 HRA 절차와 계산기를 개발 하고 있다[2,3]. 미국에서는 미국 전력 연구소의 주관으로 PSA에서 일반적으로 사용하고 있는 ASEP(accident sequence evaluation procedure) HRA 방법[4], THERP(technique for human error rate prediction) [5], HCR/ORE(human cognitive reliability/operator reliability experiment) [6], CBDT(cause based decision tree) [6]의 방법에 대해 표준화된 절차를 개발하여 전산화하려고 있다. 국내에서도 HRA 수행시 나타나는 분석자의 주관성 개입을 최소화하기 위해 국내에서 사용했던 HRA 방법인 ASEP과 THERP 방법을 기반으로 표준화된 HRA 절차를 개발 중에 있다.

원자력 분야의 안전성 제고와 경제적인 운영을 향상시키려는 위험도정보활용(risk-informed) 적용분야가 확대됨에 따라 위험도정보활용 적용에 토대가 되는 PSA의 품질을 확보하기 위해 전 출력운전 PSA에 대한 ASME PRA Standard[7]와 NEI PRA Peer Review Guideline[8]이 미국에서 발간되었다. 이에 미국 원자력학회(ANS)에서도 정지/저출력 운전 PSA에 대한 PRA standard 초안[9]을 발간하였다. 이 지침서에서는 기존의 ASEP, THERP, HCR 방법 등이 정지/저출력 운전 상황을 반영하여 사용할 수 있다고 언급하면서 고전적인 HRA 방법 중에 CBDT 방법이 정지/저출력 운전 PSA 상황을 가장 잘 반영 할 수 있을 것이라고 언급하고 있다. 하지만, 국내에서는 아직까지 CBDT 방법이 사용되지는 않았다.

국내에서 정지/저출력 운전 PSA의 HRA에서 사용된 방법은 THERP와 ASEP이었는데, HRA 분석자들은 ASEP과 THERP 방법을 정지/저출력 운전 상황을 반영하여 HRA 수행을 하였다 [10, 11]. 차세대 원전 PSA의 HRA에서는 [10] 선별 분석시 ASEP 방법을, 상세분석에는 THERP를 사용하였고 영광 5&6 PSA의 HRA에서는[11] THERP를 사용하였다. 경험적 측면에서 영광 5&6 PSA의 HRA를 토대로 한 THERP 사용시 나타난 문제점은 다음과 같다:

- 탐지.진단.의사 결정시의 인적오류 정량화 결과에 대해 일관성 유지 어려움.
  - THERP를 이용한 인지적(cognitive) 측면에서의 인간오류 정량화 결과는 운전원 여유시간에 대한 의존성이 크기 때문에 운전원 여유시간이 지나치게 짧거나 길경우에의 오류 확률 차이는 크게 나타난다.
  - 또한 절차서에 없는 인간행위 평가시에도 정량화 결과에 대한 일관성 유지 어려움은 나타난다.
- 사고경위상의 다수 인간행위에 대한 의존성 평가의 어려움: 자동으로 작동되는 계통이 많은 전출력 운전 PSA의 사고경위와는 다르게 수동으로 작동하는 계통이 많기 때문에 사고경위에

많은 인간행위가 나타남

본 논문에서는 국내에서 개발하고 있는 정지/저출력 PSA의 표준 HRA 절차에 CBDT 방법을 포함할 것인지를 결정하기 위해 동 방법을 검토하였다. 이를 위해 본 논문에서는 CBDT 방법을 소개하고 동 방법에 의한 인적오류 평가, 그리고 기존 정지/저출력 PSA에 사용했던 THERP 방법과의 비교를 통해 동 방법의 장점과 단점을 파악하였다. 2장에서는 CBDT 방법을 소개하고, 동 방법을 이용한 HRA 수행 결과를 기술하였다. 3장에서는 영광 5&6 정지/저출력 PSA의 HRA에서 사용한 THERP와의 비교와 표준 HRA 절차에 CBDT 방법을 포함할 것인지를 논의하였다. 끝으로 4장에서는 결론을 기술하였다.

2. CBDT 방법 소개와 정량화

이 장에서는 CBDT 방법의 [6] 일반적인 사항과 동 방법을 이용한 영광 5&6 정지/저출력 PSA의 HRA에서 고려한 대표적인 인적 오류에 대한 정량화 결과가 기술되어 있다.

2.1 방법론

CBDT 방법은 기존의 HCR 방법 단점을 보완하기 위해 Parry 등에 의해 개발되었고 현재 미국 등지의 많은 원전 PSA에서 사용되고 있지만 국내에는 아직 사용된 예가 없다. 기존의 HCR(human cognitive reliability) 방법론은 모의제어반 데이터를 이용해 운전원의 정보처리 과정상의 인적오류 평가를 시도하였다. 모의 제어반을 사용한 운전원 성능 관련 데이터는 제한적이고, 운전원 여유시간이 긴 경우에는 모의 제어반을 통해 얻은 시간반응 곡선(time response curve: TRC)을 외삽(extrapolation)해야 하기 때문에 HCR 방법은 많은 한계점을 갖게 되었다. 이러한 한계점을 개선하기 위해 개발된 것이 CBDT 방법이다. HCR 방법이나 THERP 방법이 인적오류 원인에 의문을 갖지않는 경험적인 방법에 비해, CBDT 방법은 인적오류의 원인과 그 영향인자를 이해하려는 시도에 기반한 해석적인 방법이다. 사고후 인적오류는 아래의 식으로 평가한다:

$$P = P_C + P_E - P_C * P_E \quad \text{.....(식 1)}$$

P: 초기사건후 인적오류 확률

P_C: 올바른 반응 실패오류 확률- 탐지, 진단, 의사결정시의 오류

P_E: 필요 반응 수행 오류

인지관련 오류인 P_C는 8가지 결정수목을 사용하여 평가한다. 표 1은 8가지 인지오류 고려사항이 나타나있다. 그림 1은 표 1의 절차서의 관련 단계 누락(P_C^a)을 나타내는 결정수목의 한가지 예이다. 고려되는 인지오류들은 크게 발전소 정보와 운전원 연계관련 오류와 운전원과 절차서 연계 관련 오류 두 가지로 나눈다. 첫번째 오류는 운전원이 올바른 반응을 시도하는데 필요한 정보 취득과 관련이 있고, 두번째 오류는 작성된 절차서를 올바르게 해석하는데 실패한 것이다. 이 두가지의 상위수준 고장모드를 유발시키는 여러가지 고장기제가 있는데 이를 고려한 인적오류 확률은 다음과 같이 표시가 가능하다:

$$P_c = \sum_{i=1,2} \sum_j P_{ij} P_{nr}^{ij} \quad \text{.....(식 2)}$$

P_{ij}: 고장모드 i의 원인 j확률

P_{nr}: 고장모드 i의 원인 j확률 회복못할 확률

각 고장모드의 고장기제는 서로 독립이라는 가정아래 P_c의 값은 각 구성 고장기제의 합

표 1. CBDT 방법에서 고려하는 운전원 오류의 고장모드와 고장기제

고장모드 1: 발전소 정보와 운전원 연계 관련 실패		고장모드 2: 운전원과 절차서 연계 관련 실패	
P_c^a	필요 자료가 제어실에서 물리적으로 이용가능 하지 않음	P_c^e	절차서의 관련 단계 누락
P_c^b	자료가 이용가능 그러나 주목되지 않음	P_c^f	지침해석에 오류 유발
P_c^c	자료가 이용가능, 그러나 잘 못 읽히거나 잘 못된 의사소통 이루어짐	P_c^g	진단논리 해석에 오류 유발
P_c^d	이용가능 정보가 오해 유발	P_c^h	운전원이 고의로 절차서 위배

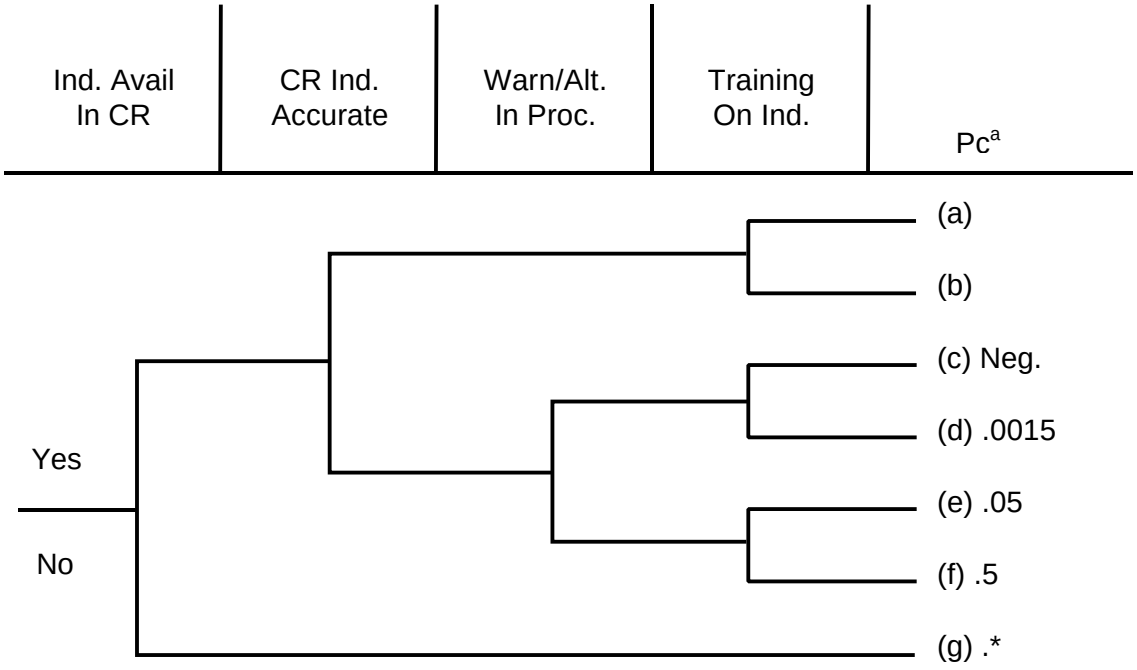

그림 1. 오류기제 a의 결정수목, 데이터 이용

오류 기제 a: 자료 이용불능

1) indication avail in CR: 필요 지시계가 제어실에서 이용가능한지 여부 ?
2) CR indication accurate: 이용가능 지시계 정확 또는 부정확한 것으로 알려져 있는지 ?
3) Warning/alternate in procedure: 통상적인 지시 정보가 신뢰할 수 없다면 절차서에 대용 정보로 경보나 주석이 있는지 ?
4) Training on indicators: 운전원이 필요정보 해석이나 취득에 훈련을 받는지 ?

CBDT를 사용하는 인간오류 정량화 절차는 다음과 같다:

1) 오류기제 집합을 결정함으로써 결정수목 설정.
2) 오류기제 발생 우도에 영향주는 주요 영향인자 파악
3) 결정수목의 종말 점에 대한 확률 척도 설정
4) 회복인자 파악과 회복인자에 값 할당
5) 최종 정량화한 결과를 표로 문서화

결정수목 사용에 대한 효율적인 방법은 운전원과의 면담과 모의 제어반 실험 관찰인데, 인간신뢰도분석자의 주관적인 판단을 많이 필요로 한다.

2.2. CBDT 방법에 의한 인적오류 평가

. 표 2에 평가의 한 예로 운전모드 3에서 운전중인 정지냉각계통 상실시 대기중인 계통의 기동에 대한 상세 평가 결과가 나타나 있다. 표 2의 초기사건은 발전소 운전모드: POS 3(발전소 정지후 정지냉각운전 진입상태)에서 정지냉각계통의 기계적 고장으로 인한 정지냉각 상실이다. 운전원 여유시간이 10분 미만이기 때문에 회복인자는 고려하지 않았다. CBDT에서는 운전원 여유시간이 15분 이상이어야 회복인자를 고려할 수 있다.

표 2. CBDT 방법에 의한 인지오류 상세 평가 결과

WORKSHEET FOR CALCULATION OF P_C				
Scenario:	SCS fail during shutdown cooling operation			
HI:	Restart Standby SCS pumps			
Cue(s):	Alarm for SYSTEM TRN A/C, B/D INOP, Alarm for LPSI PUMP 01A/01B DISCH FLOW LO or LO-LO			
Duration of time window available for action (T_W): 10min.			600 seconds	
Approximate start time for T_W:		t=0 (time at which IE occurs)		
Procedure and step governing HI:		Ulchin AOM-33,		
A. Initial Estimate of P_C				
P_C Failure Mechanism		Branch	HEP	Reduce T_W by
P_c^a	Availability of information	A	Neg.	- min.
P_c^b	Failure of attention	A	Neg.	N/A
P_c^c	Misread/miscommunicate data	B	0.003	~ min.
P_c^d	Information misleading	A	Neg.	N/A
P_c^e	Skip a step in procedure	D	0.01	~min.
P_c^f	Misinterpret instruction	A	Neg.	N/A
P_c^g	Misinterpret decision logic	L	Neg..	N/A
P_c^h	Deliberate violation	A	Neg.	N/A
Initial P_C = 1.3E-2, Effective T_W =5 min.			1.3E-2	5min.
Check here if recovery credit claimed ( )				
Notes: no recovery factor due to short available time				

영광 5&6 정지/저출력 확률론적 안전성 평가에서 모델링된 대표적인 행위들의 인지오류에 대해 CBDT 방법을 이용한 평가 결과가 표 3에 나타나 있다. 표 3에서 기본 인간행위 1은 표 2와 동일하고 기본 인간행위 2는 기본 인간행위 1과 같지만 운전원 여유시간이 다르다. 절차서에 없는 4가지 행위 모두는 정지/저출력 운전 관련 절차서에 명시적으로 언급되어 있지는 않다. 이들 행위 모두는 정지냉각운전 기동 또는 이차측을 이용한 모든 행위가 실패시 수행하는 행위이다. 절차서에 없는 행위 1과 2, 그리고 3과 4는 각각 서로 동일한 행위이지만 운전원

여유시간만 다르다. 수위지시계 부정확 관련 행위는 정지냉각 운전중 수위 지시계를 정확히 읽지 못해 과 배수 사건 발생한 초기사건에 대처하는 행위이다.

표 3에 나타나 있듯이 운전원 여유시간이 매우 짧은 기본 인간행위 1과 절차서에 없는 행위 4를 제외하고 CBDT로 평가한 인간오류 확률이 THERP를 이용해 평가한 결과 보다 높게 나타났다. 기본 인간행위 2는 기본 인간행위 1과 동일한 상황인데 CBDT 방법에 의한 평가결과가 THEPR 방법보다 보수적으로 평가되었다. 기본 인간행위 1은 반대로 THERP 방법이 보수적으로 평가되었다. 이는 CBDT 방법이 THERP 방법보다 운전원 여유시간에 크게 의존하지 않는다는 것을 보여주고 있다. 절차서에 없는 인간행위에 대해 CBDT를 이용한 정량화 결과는 10^{-1} ~10^{-3}인데 비해, THERP를 이용한 정량화 결과는 10^{-2}~10^{-4}로 나타나 절차서가 없는 행위에 대해 CBDT를 이용한 정량화 결과가 보수적임을 나타내고 있다.

표 3. 영광 5&6 정지/저출력 PSA에서 고려된 대표적 행위들의 CBDT 평가 결과

종류	설명	운전원 여유시간	절차서, 훈련/경험	평가결과(인지)	
				CBDT	THERP
정지운전 기본 인간행위 1	대기중인 SCS 기동 (POS3)	10분	잘되어 있음,	1.3E-2	6.07E-2
정지운전 기본 인간행위 2	대기중인 SCS 또는 CSS 기동(POS4A)	90분	잘되어 있음,	1.1E-4	2.82E-5
절차서에 없는 행위* 1	HPSIS 또는 LPSIS 이용 충전 및 방출 운전(POS4B)	130분	잘 안되어 있음	9.76E-3	1.94E-3
절차서에 없는 행위* 2	HPSIS 또는 LPSIS 이용 충전 및 방출 운전(POS12A)	480분	잘 안되어 있음	1.46E-3	7.7E-4
절차서에 없는 행위* 3	CVCS 이용 충전 및 방출 운전(POS4B)	120분	전혀 안되어 있음	1.54E-1	7.32E-2
절차서에 없는 행위* 4	CVCS 이용 충전 및 방출 운전 (POS12A)	480분	전혀 안되어 있음	2.36E-2	2.81E-2
수위 지시계 부정확	HPSIS 또는 LPSIS 이용 냉각수 보충(POS5)	120분	잘되어 있음	9.08E-4	6.5E-4

SCS: 정지냉각계통, CSS: 격납용기살수계통, HPSIS: 고압안전주입계통,
LPSIS: 저압안전주입계통, CVCS: 화학체적제어계통
*절차서에 없는 인간행위 1,2,3,4는 지식기반행위(knowledge-based action)로 일부 운전원이 이 행위 요건을 알고 있다고 가정

CBDT 방법을 이용한 사고경위상의 다수 인간행위에 대한 의존성 평가는 수행하지 않았다. 다만 많은 결정수목의 사용과 인적오류 원인의 고려로 THERP 방법을 사용할 경우보다 다소 어려움이 더 많고 시간이 더 소요될 것이라는 판단이다. CBDT 방법을 소개한 참고문헌 [6]에서도 의존성 평가에 대한 명확한 지침은 없다.

3. 정지/저출력 HRA 관점에서의 CBDT 방법 검토

이 장에서는 기 수행한 영광 5&6 PSA의 HRA에서 사용한 THERP를 토대로 CBDT 방법의 장.단점을 파악하고, 동 방법의 표준 HRA 절차에 포함시킬 것인가 여부를 검토하였다. 이해를

돕기 위해 영광 5&6 정지/저출력 PSA에서 사용한 THERP 방법을 개략적으로 소개한다. THERP 방법은 사고후 인적오류를 크게 진단오류와 수행오류로 구분하여 평가한다:

- 진단오류확률 = 기본 진단오류확률 (진단여유시간) X 보정 인자 (factors)
- 수행오류확률 = Σ [세부직무 기본오류확률 X 보정 인자]

진단오류의 기본 진단오류확률은 진단 여유시간에 따라 다르다. 영광 5&6 PSA의 HRA에서는 평가시 보정인자로서 절차서 수준, 운전원의 꺼리김(hesitancy) 여부, 운전원 경험/훈련 정도를 고려하였다. 수행오류 확률은 다시 절차서를 누락하는 오류와 기기 등을 직접 작동하는 조치오류로 이루어졌다. 조치오류는 제어실 밖 행위나 수행직무 특성이 동적인 행위로 판단될 경우만 고려하였다. 수행오류 확률 평가에서 기본오류 확률은 절차별 직무 유형, 스트레스 수준 등에 의해 결정하고 보정인자는 타인에 의한 복구 등을 고려하였다. 절차별 직무 유형과 스트레스 수준 결정시 고려한 인자는 냉각수 수위, 초기사건이후 진행시간, 수행 직무 친숙도와 환경조건, 운전원 여유시간과 기존 인적오류 존재 등이었다. 보정인자 결정시 고려한 인자로는 절차서 수준, 직무 수행장소, 운전원 여유시간, 지시계 상태, 운전원 훈련 등이었다.

사고후 인적오류 평가에 대해 CBDT 방법과 THERP 방법론의 기본적인 정량화 접근법은 동일하다.두 방법론의 정량화 방법 특성 및 사용 세부적인 사항이 표 4에 나타나 있다. CBDT 방법의 장점과 단점을 살펴보면 다음과 같다:

- 운전원 여유시간에 대한 의존성이 THERP 방법에 비해 크지 않아 정량화 결과에 대한 일관성 유지가 THERP에 비해 용이
- 인적오류 원인을 폭 넓게 반영할 수 있어 모의 제어반 실험과 운전원 면담 결과, 제어반 지시계 등의 발전소 상황 반영이 상대적으로 용이
- ASME PRA standard의 HRA 요건에서 언급하고 있는 사항을 결정수목(decision tree) 사용시 고려해야 하기 때문에 ASME PRA standard 만족이 상대적으로 용이
- 많은 결정수목의 사용으로 초심자는 어렵고, 여러 가지 항목을 고려해야 하기 때문에 분석시 기준되는 규칙 적용에 대한 일관성 유지가 어렵고 시간이 상대적으로 많이 소요된다는 측면이 있음.
- THERP와 마찬가지로 분석자의 주관적 판단을 필요로 하는 부분이 많아 상세한 분석 절차가 마련되어 있지 않으면 분석 결과 (회복 오류, 사고경위상의 의존성 평가)에 불확실성 커질 우려가 있음

CBDT 방법이 국내 정지/저출력 PSA의 HRA에서 사용되었던 ASEP과 THERP에 비교해 상대적으로 정량화 결과에 일관성 유지가 용이하고 발전소 상황(모의 제어반 실험, 운전원 면담, 제어반 상황)을 잘 반영하는 장점이 있지만 THERP와 마찬가지로 분석자의 주관적 판단을 필요로 하는 부분이 많아 정지/저출력 PSA의 표준 HRA 개발에 동 방법의 포함은 어려울 것으로 판단된다. THERP와 ASEP 사용시에도 분석자의 주관적 판단이 많이 개입되어 있지만 동 방법의 사용에는 국내 HRA 분석자들의 경험이 풍부하고 익숙해 있기 때문에 별 어려움 없이 동 방법을 기반으로 하는 표준 HRA 절차를 개발할 수 있을 것으로 예상된다. 하지만 CBDT 방법은 국내에

한번도 적용되지 않았고, CBDT 방법 사용에 대한 국내 전문가가 없기 때문에 상세 HRA 수행절차 개발은 어려울 것으로 판단된다. 다만 앞의 2.2절의 표 3에 나타나 있듯이 ASEP과 THERP 방법을 이용한 정량화 결과를 CBDT를 이용한 분석 결과와 비교하는 목적으로 CBDT 방법을 표준 HRA 절차 개발에 포함하는 것은 바람직한 것으로 판단된다. 정량화 결과의 비교만을 목적으로 CBDT 방법을 표준 HRA 절차에 포함시키면 상세 절차 개발에 대한 부담을 없애고 ASEP과 THERP 방법을 이용한 정량화 결과에 대한 일관성 유지를 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다. 현재 개발중인 국내 표준 HRA 절차는 상세 HRA 수행절차 개발과 함께 PSA에 어느 정도 경험이 있는 전문가가 쉽게 HRA를 수행할 수 있도록 전산화할 예정이다. 표준 HRA 절차 개발에 비교를 목적으로 한 CBDT 방법을 포함시키는 구체적인 업무는 CBDT 방법을 전산화하는 일이 될 것이다.

표 4. CBDT 방법과 THERP 방법과의 비교

	CBDT 방법	THERP 방법
사고후 인적오류 기본 정량화 모델	$P = P_c + P_E - P_c * P_E$ P_c: 올바른 반응 실패오류 확률- 탐지, 진단, 의사결정시의 오류 P_E: 필요 반응 수행 오류 • 절차서 누락오류가 인지오류에 포함 • 반응 수행오류가 THERP에서 조치 오류와 동일	$P = P_d + P_e - P_d * P_e$ P_d: 진단 오류 확률 P_e: 수행오류(절차서 누락 + 조치오류) 확률 • 절차서 누락오류가 수행오류에 포함 • 조치오류는 CBDT에서 반응 수행오류와 동일
인지오류 확률 평가시 특성	• 인지오류 관련 8개의 결정수목을 이용하여 평가 • 평가후 운전원의 여유시간과 평가 대상 행위의 특성에 따라 회복오류 고려 • 운전원 여유시간에 크게 영향받지 않음. • THERP나 HCR 방법에 비해 여유시간이 짧을 경우 비교적 낮은 확률, 여유시간이 길경우 비교적 높은 확률	• 운전원 여유시간과 절차서와 훈련/경험 등의 정도에 따라 평가, • 인지오류에 대해 별도의 회복오류 고려 안함 • 운전원 여유시간이 짧으면 비교적 높은 확률 여유시간이 길면 비교적 낮은 확률
사용 편리성과 분석자의 일관성 유지	• 국내 PSA 전문가들에게 익숙하지 않음 • 8개의 결정수목 사용으로 어려움 • 사용에서의 일관성 유지 상대적 어려움 → 정량화 결과는 반대	• 국내 PSA 전문가들에게 익숙 • 진단오류 자체 평가는 용이 • 사용에서의 일관성 유지 상대적 용이 → 정량화 결과는 반대
ASEM 등의 지침서 요건 반영	• 반영이 상대적으로 용이. • 인적오류 원인을 파악하기가 용이	• 반영이 CBDT 방법에 비해 상대적 어려움 • 인적오류 원인을 제대로 파악하기 힘들어

4. 결론

국내에서 개발하고 있는 정지/저출력 PSA의 표준 인간신뢰도분석 절차에 원인기반결정수목 방법을 포함할 것인지를 결정하기 위해 동 방법을 검토하였다. 이를 위해 본 논문에서는 원인기반결

정수목 방법을 소개하고 동 방법에 의한 인적오류 평가, 그리고 기존에 사용했던 THERP 방법과의 비교를 통해 동 방법의 장점과 단점을 파악하였다. 검토 결과, CBDT 방법이 국내 정지/저출력 PSA의 HRA에서 사용되었던 ASEP과 THERP에 비교해 상대적으로 정량화 결과에 일관성 유지가 용이하고 발전소 상황(모의 제어반 실험, 운전원 면담, 제어반 상황)을 잘 반영하는 장점이 있지만 THERP와 마찬가지로 HRA 분석자의 주관적 판단을 필요로 하는 부분이 많아 정지/저출력 PSA의 표준 HRA 개발에 동 방법의 포함은 어려울 것으로 판단된다. 하지만 표준 HRA 절차 개발에 HRA 정량화 결과의 비교만을 목적으로 하는 동 방법의 포함은 상세 절차 개발에 대한 부담을 없애고 HRA 정량화 결과의 일관성 유지 확보에 도움을 줄 것으로 기대한다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발 사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

[1] E.M. Doughtery & J.R. Fragola, "Human Reliability Analysis: A System Engineering Approach With Nuclear Power Plant Applications", SAIC, John Wiley & Sons, 1988
[2] 강대일, 정원대, "국내 인간신뢰도분석 표준화와 설계 중 원전 PSA에서의 인간신뢰도분석 경험", 2002. 추계 KNS 학회
[3]. EPRI, "HRA Calculator – seminar material", 2001
[4] A.D.Swain, "Accident Sequence Evaluation Program Human Reliability Analysis Procedure", NUREG/CR-4772, S.N.L, Feb. 1987
[5] 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
[6].G.W. Parry et al., "An Approach to the Analysis of Operator Actions in Probabilistic Risk Assessment", EPRI/TR-100259, 1992
[7]. ASME, "Standard for PRA for NPP Applications", Rev. 14A, 2001
[8]. NEI, "PRA Peer Review Process Guidance", NEI-00-02, Rev. A3, 2000
[9] ANS, "Low-Power Shutdown PRA methodology standard", Draft, 2002
[10] 한수원, "차세대 원전 PSA",
[11] 한수원, "영광 5&6 정지/저출 PSA"