'97 추계학술대회발표논문집
대한인간공학회

원자력발전소 사고관리 방안의 인간 신뢰도 분석 및 오류 가능성 도출

이용희

한국원자력연구소

요 약

본 논문은 원자력발전소 사고관리 방안의 평가를 위하여 인간 신뢰도 분석(Human Reliability Analysis: HRA)을 수행하고, 그 문제점을 보완하기 위하여 가능한 오류에 대한 정성적인 인적오류 분석(Human Error Analysis: HEA) 과정을 추가하였다. 인적오류 분석의 기본 체계(framework)를 기법들을 검토하여 사고관리 방안 평가에서 인적오류의 가능성을 분석하는 절차와 대표적인 사례에 대한 분석 결과를 예시하였다.

1. 서론

원자력발전소의 안전성 확보를 위하여 중대사고시의 대응 방안을 개발하고 있다. 가상 사고 경위를 평가하여 절차서 및 지침서 개발, 소요 정보 분석, 보조 도구와 훈련 프로그램 개발, 조직 구성 등 사고관리 체계(Accident Management Framework) 구축하고 있다. 사고관리 방안의 평가에는 사고관리 방안의 정효과와 부작용 및 수행 가능성 등에 대한 평가가 필요하다. 운전원 행위 및 작업 내용 (task), 기존 절차서와의 양립성(compatibility), 사고관리 방안 수행 관련 필요한 정보 (information needs), 필요한 정보 규정 및 제공 계측기의 역량, 관련 설비의 불이용도 (unavailability), 방안 수행에 필요한 설비 및 인원 동원 조건 등을 고려한 효과 정도(effectiveness)에 대한 평가가 제시된 방안의 수행 가능성 평가에 필요하다.

사고관리 전략의 평가에 확률론적 안전성 평가(Probabilistic Safety Assessment : PSA)를 적용하면, 각 방안을 통하여 원자로의 안전성을 유지할 수 있는 가능성을 평가할 수 있다. PSA 에서는 인간 실수와 기계 고장의 조합으로 안전성 확보에 실패할 수 있는 시나리오를 도출하고 각 시나리오의 확률을 계산한다. 그러나, 중대사고의 대응은 극도의 스트레스 상태이며 단순히 준비된 절차를 수행할 수 없을 것으로 보이므로, 운전원 혼란, 인지적 자원 분산, 부적절 상황 조래 가능성, 운전원에게 미칠 위험 등 수행 가능성을 위협하는 인적요인에 대해서는 보다 면밀한 검토가 필요하다. 본 논문에서는 사고관리 방안에 대한 수행 가능성을 작업 수행 신뢰도를 기반으로한 성공 확률로 평가하였다. 또한, 인적요인에 대한 신뢰도 분석의 문제점을 보강하고자 기존의 인적오류 분석 기법을 검토하고 인적오류 가능성의 정성적인 분석 방법을 제시하여 사례에 적용하였다.

2. 사고관리 방안의 인간 신뢰도 평가

2.1 수행 가능성 평가의 구조

사고관리 방안의 수행 가능성은 방안의 실행과 관련된 인적 자원, 관련 기기와 정보 가용성을 포함하여,

'허용된 시간 내에', '주어진 기기 및 장비를 이용하여', '성공적으로 완료' 할 가능성을 의미한다. 허용 시간이란 원자로가 노심 손상, 노심 낙하, 원자로 용기 파손, 격납건물 파손 등 중대손상 상태에 도달하기 전까지의 시간을 의미하며, 실패의 요인으로는 운전원 오류, 기기 고장, 시간 지연 등이 포함된다. 그림 1 은 사고관리 방안의 수행 가능성을 검토하기 위한 일반적인 사건 수목 구조를 나타낸 것이다.

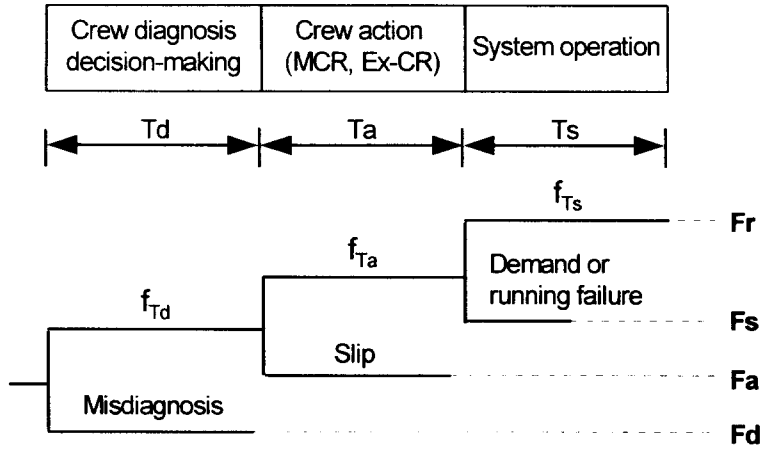


그림 1. 사고관리 방안의 일반적인 사건 수목 구조

그림에서 보듯이 방안의 수행 가능성은 운전원 진단 및 의사결정 오류 확률(P_{Fd}), 운전원 수행 실패 확률(P_{Fa}), 관련 기기 실패 확률(P_{Fs}), 수행시간 지연으로 인한 가용 시간 초과 확률(P_{Fr}) 에 대한 평가로 귀결된다. 각 사건이 독립적이라고 가정하면, 전체 수행 실패 확률(Non-Success probability: P_{NS})은 $P_{NS} = (P_{Fd} + P_{Fa}) + P_{Fs} + P_{Fr}$ 이다.

첫째, 진단 및 의사결정 오류 확률(P_{Fd})과 운전원 수행 실패 확률(P_{Fa})은 인적오류 확률이다. 운전원 진단 및 의사결정 오류는 시간관계 곡선(Time Correlation Curve)과 운전원 진단 가용시간으로부터 인간오류 확률 추정하며, 운전원 수행 오류 가능성도 Swain HRA-Handbook 으로부터 계산하였다.

둘째, 작동 기기의 고장 확률(P_{Fs})은 고장 모드별 기기 신뢰도 자료를 활용하여 평가하였다. 고장모드에는 요구시 고장(Failure on Demand)과 운전중 고장(Failure during Operation)이 있는데, 사고관리 관련 기기의 운전중 기능 상실의 확률은 거의 무시할 수 있는 수준이므로 요구시 고장을 중심으로 평가한다.

세째, 가용시간 초과 확률(P_{Fr})은 각 시간 요소에 대해 별도로 분석하였다. 가용시간내에 방안을 완료하지 못할 확률 P_{Fr}= Pr(총 방안수행시간 > 전체 가용시간)에서, 전체 가용시간은 어떤 방안도 수행되지 않았을 때 노심노출로부터 노심낙하까지 열수력 분석 결과시간이다. 총 방안수행시간(Tr)은 기기의 완료 시간(Ts)에 운전원의 진단시간(Td)과 수행시간(Ta)을 합한 값이다. 전체 가용시간과 운전원 반응 실소요 시간 및 기기 조치 완료 시간의 확률분포를 비교하여 시간 초과 가능성을 계산하였다. 시간 분포는 이변수 와이블을 사용하였다.

2.2 사례 분석 : 전원상실시 원자로 공동 충수 방안의 신뢰도 평가

전원상실 사고시 운전원이 노심출구 온도 계측기(Core Exit Thermocouple)를 이용하여 노심노출을 감지하고, 격납건물 살수계통(CSS) 이용 용융노심 낙하전 원자로 공동에 물을 공급하여 원자로 공동을 범람 또는 충수시킴으로, 침수된 원자로 하단부를 통하여 원자로 외부로 열전달하고 원자로 파손을 방지하거나 파손 시점을 지

연시키는 방안이다.

계통 거동에 대한 가정	계통 변수에 대한 가정
■ 노심 노출 발생 이전에 전원이 회복된다 ■ 운전원이 참조할 관련 절차서가 마련되어 있다 ■ CSS 물이 공동과 썸프를 동시에 손실없이 채운다.	■ 두 대의 CSP 가용 ■ CSP 최대 펌프 유량 : 4,000 gpm ■ 공동 체적 : 164,830 gallon ■ 총 썸프 체적 : 187,420 gallon ■ RWT 가용 물공급원 : 600,000 gallon

(1) 가용 시간 초과 확률(P_{Fr})

- MAAP code 에 의한 노심의 용융 낙하 시간(Core Slumping Time) : 평균 μ 96.4 , 표준편차 σ 20.2

$$f_{Tw}(t) = (0.053)(t/104.4)^{4.5}\exp\{-(t/104.4)^{5.5}\}$$

- 운전원 수행시간 : 평균 10 분, 표준편차 4 분

$$f_{Ta}(t) = (0.24)(t/11.25)^{1.70}\exp\{-(t/11.25)^{2.70}\}$$

- 총 방안수행시간 분포(f_{Tr}) : 공동범람 소요시간 =(총체적 /CSP 유량률):

$$f_{Tr}(t) = (0.24)(\frac{t-88}{11.25})^{1.70}\exp\{-(\frac{t-88}{11.25})^{2.70}\} \qquad t \geq 88 \text{ , 한 트레인만 동작 시}$$

-> 실패확률(P_{Fr}^{2csp}): $P_{Fr}^{2csp} = (9.82E-1) * \Pr(T_r > T_w) = (9.82E-1) * (0.028) = 2.750E-2$

$$f_{Tr}(t) = (0.24)(\frac{t-44}{11.25})^{1.70}\exp\{-(\frac{t-44}{11.25})^{2.70}\} \qquad t \geq 44 \text{ , 두 트레인 동작 시}$$

-> 실패 확률(P_{Fr}^{1csp}): $P_{Fr}^{1csp} = (1.71E-2) * \Pr(T_r > T_w) = (1.71E-2) * (0.51) = 8.721E-3$

- 최종 가용시간 초과 확률 : $P_{Fr} = P_{Fr}^{1csp} + P_{Fr}^{2csp}$ = 8.721E-3 + 2.750E-2 = 3.62E-2.

(2) 관련 기기 실패 확률(P_{Fs})

- 작동중 기기 고장 발생 확률 : 10^{-5}~10^{-6} 이하로 거의 무시할 정도
- CSS 주입 모드 요구시 고장/실패 확률 : P_{Fs} = 1.142E-3(두 트레인 모두 기동 실패)

(3) 인적오류 확률

- 진단 오류 확률 : P_{Fd}= 1E-3 (Swain HRA Handbook :진단 및 의사결정 가용시간 30 분 이상)
- CSAS 수동 발생 수행 오류 : 5E-2 (ASEP : Step-by-step, Extremely High Stress)

(4) 수행 가능성 평가 종합

- CSS 를 이용한 공동범람 방안의 실패 확률(P_{NS}) : $P_{NS} = P_{Fd} + P_{Fa} + P_{Fs} + P_{Fr}$ = 8.834E-2
- 성공 확률(P_S) : $P_S = 1 - P_{NS} = 0.912$

2.3 신뢰도 분석의 검토

사고관리 방안에 대하여 평가 결과를 통해 얻을 수 있는 의미를 해석하기 위하여 민감도 분석을 수행하였다. 운전원 수행시간 분포(f_{Ta})에 따른 민감도 분석 결과, 평균 수행시간 6~ 20 분, 표준편차 2 ~ 10 분의 범위에서 운전원 수행시간의 변화로 인한 시간 지연에 의한 실패 확률 P_{Fr} 은 70 ~ 250 % 까지 변화하지만, 전체 성공

확률 P_S 은 10 % 이내의 변화를 보이므로 수행 시간이 전체 성공 확률에 미치는 영향은 적다. 진단 오류 확률 P_{Fd}는 전체 실패확률에서 비중이 작으며, 가용 시간에 대한 전체 성공확률의 민감도도 급격하지 않다. ASEP 으로 평가된 운전원 수행 실패 확률 P_{Fa} 는 직무 유형과 스트레스 수준에 따라 전체 성공확률에 큰 영향을 미친다.

표 2. 성공 확률(P_S)의 민감도 분석

		P_{Fd}	P_{Fa}	P_{Fs}	P_{Fr}	P_{NS}	P_S
performance time (μ, σ) in min	Optimal case(6, 2)	-	-	-	2.51E-02	7.724E-02	0.923
	Base case(10, 4)	-	-	-	3.62E-02	8.834E-02	0.912
	Worst case(20, 10)	-	-	-	9.42E-02	14.62E-02	0.854
available diagnosis time in min	T=10	0.1	-	-	-	18.73E-02	0.812
	T=20	0.01	-	-	-	9.734E-02	0.910
	T=30	0.001	-	-	-	8.834E-02	0.912
	T=60	0.0001	-	-	-	8.744E-02	0.913
task/ stress	Dynamic/extremely high	-	0.25	-	-	28.83E-02	0.712
	Step-by-step/extremely high	-	0.05	-	-	8.834E-02	0.912
	Step-by-step/moderately high	-	0.02	-	-	5.834E-02	0.942

그러나, 다양한 경우에 대한 확률 계산 결과의 차이가 의미있는 정보를 제공하지 못한다. 모든 상황이 최악일 경우를 가정하면, 성공확률은 0.56 까지 떨어지지만, 실제로 각 확률 항목은 독립적이지 않고 다른 영향이 많으므로 사고관리 방안의 구성요소와 영향요인들의 선택에 의미가 없다. 확률 차이보다는 시스템에 나쁜 결과를 끼칠 수 있는 오류의 원인과 그 조합을 검토해야 한다. 계측기 가용도, 사고 현상에 대한 지식 정도, 절차서 유무, 훈련 정도, 구성 조직, 진단 및 의사결정 지원 시스템, 가용 시간 배분, 제어실 설계, 절차서의 구성 등에 인적오류를 야기할 수 있는 영향 인자가 존재하는지 여부와 오류방식에 대한 분석이 필요하다.

PSA 에서 HRA 는 단위 작업의 신뢰도를 확률적으로 계산하여 전체 시스템의 안전 확률을 평가하는 방식으로, 각 시나리오에서 인간에게 요구되는 직무의 수행 가능성을 확률로 계산하여 인적오류 확률을 제공하는 것이다. 이러한 정량적 필요로 인해 THERP, HCR, SLIM, ASEP 등 현재 PSA 에서 사용되는 HRA 기법의 대부분이 오류의 내용(mechanism)과 원인(cause)보다는 형태(type)와 수량(quantity) 파악에 치중되어 있다. 그러나, 인적요소의 평가 이후에 필요한 것은 오류 감소 방안이다. 오류 감소 방안은 오류의 형태나 수량 보다는 원인과 그 구성을 통하여 도출되는 것이므로, 기존의 HRA 로는 구체적인 오류 감소 방안을 제시하는데 한계가 있다.

3. 인적오류 가능성 분석 : 기법 및 사례

3.1 인적오류 분석 기법의 검토

사고관리 방안의 인적오류 평가를 위하여 본 연구에서는 전체적으로 다음과 같이 분석을 진행하였다.

1. 오류의 형태와 원인에 대한 분석
2. 가능 오류의 brainstorming 방식 열거 :
3. 제시된 오류의 타당성에 대한 상대적 평가 :
4. 제시된 오류들에 의한 가능한 사고 진행 경위 구성 :
5. 각 시나리오의 전체적인 타당성 평가 :

본 논문에서는 둘째 단계에서의 결과를 제시하였다. 일반적으로 언급된 많은 가능한 오류 형태와 사고관리

방안의 설계요소를 기준으로, 발생 가능한 보다 다양한 오류 내용을 열거하였다. 가능한 오류를 발견하는 체계적인 방법이 사고관리 평가를 위한 인적오류 분석 기법의 핵심적인 내용이다. 이를 위하여 현재까지 개발된 인적오류 분석 (HEA) 기법중 GEMS(Generic Error Modelling System), SHERPA(Systematic Human Error Reduction and Prediction Approach), PHECA(Potential Human Error Cause Analysis), Murphy Diagram, CADA (Critical Action and Decision Approach), HRMS(Human Reliability Management System), COSFAH(Computerized Support For Analyzing Human-errors), CREAM(Cognitive Reliability and Error Analysis Method) 등에 대해서 검토하였다.

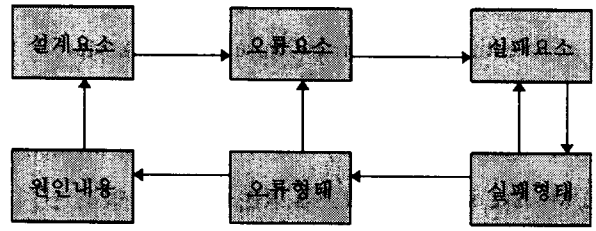
GEMS 는 오류를 Slip, Lapse, Mistake 로 구분하고, SB, RB, KB 등 작업의 인지적 제어 수준에 따라 가능한 오류를 모두 열거하였다. SHERPA 는 직무들이 명백히 정의되어 있는 상황에 정보처리 방식에 따라 직무를 계층적으로 분류하고, SB 처리 방식, RB 진단 처리 방식, RB 행위 처리 방식, KB 처리 방식등 네가지 처리 방식에 따라 오류를 분류하였다. 적용한다. PHECA 는 오류 원인이 수행중인 직무의 형태, 반응형태 (response type), 오류 형태에 의존하고 있다는 가정하에, 일반적 직무 형태(generic task type) 7 가지, 반응형태 7 가지, HAZOP 에서 사용된 오류 형태 10 가지로 분류하였다. Murphy Diagram 은 8 단계 의사결정 단계에서의 오류 모드와 그와 관련된 오류 원인을 표현하기 위한 도구로, 각 단계에서 오류의 간접 원인을 나타내는 Proximal Source, 직접 원인이나 심리적 요인을 나타내는 Distal Source 등으로 표현한다. CADA 는 Murphy Diagram 을 토대로 오류 가능성 검사 질의서를 제공하여 실제 작업을 수행하는 운전원들로부터 분석한다. HRMS 는 SRK 모델과 GEMS 모델을 기반으로 EEM, PEM, PSFs 분류 체계를 가지고 있으며, 먼저 예상되는 EEM 을 밝힌 후, EEM 을 유발시킬 수 있는 가능한 PEM 을 찾는다. EEM 의 분류 체계는 Rasmussen 의 Step Ladder 모형의 단계별로 제공하고 있으며, 각 단계별로 약 70 개 정도의 PEMs 을 제공하고 있다. COSFAH 는 인적오류를 포함한 작업의 인지적 수행 단계를 역추적하여 인지적 오류 원인을 분석한다. 작업의 내용을 역추적하는 기반으로 간략화된 인지단계 모형을 사용하고 있으며, 단계별로 오류의 형태와 원인을 연결하는 동적 분류 체계로 오류의 원인을 분석한다.

인적오류분석의 일환으로 일반성을 가진 범용의 분류체계가 많이 제안되어 있다. 오류의 형태와 원인에 대한 분류체계들은 적용 범위, 분석 구조, 분석 대상, 오류 분석 범위, 기반 모델 등에 제약이 많고 촛점이 달라서 사고관리 방안 평가에 사용이 어렵다. 또한, CREAM 과 같이 분류의 일반성이나 인지적 원인을 추적하기 위한 복잡한 논리보다는 COSFAH 와 같이 특정 응용 목적에 사고관리 방안 평가에 집중된 분류체계가 효과적이다.

3.2 오류분석 방식과 분류 체계

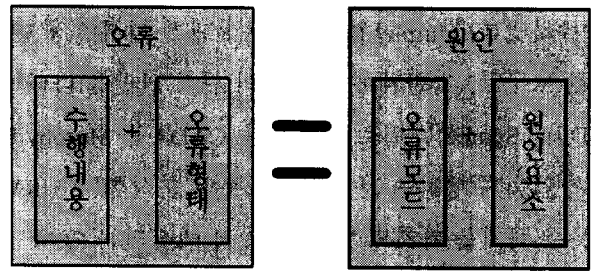
인적오류 분석은 오류의 형태 (type), 원인 (cause), 발생 과정 (error mechanisms)을 밝혀내는 것이다. 그러나, 분석의 목적에 따라 이미 발생한 오류에 대하여 원인을 파악하는 회고적 분석(retrospective analysis)과 발생 가능한 오류 내용을 도출하려는 예견적 분석(prospective analysis)로 구분할 수 있다. 사고관리 방안의 평가에 필요한 인적오류 분석은 물론 예견적 분석으로, 오류확률을 예측하는 HRA 도 이 목적에 사용될 수 있다. 예견적 분석은 그림과 같이 원인 요소로부터 발생 가능한 오류의 형태를 도출하는 전향적(forward) 분석 과정을 요구한다. 그러나, 가능한 오류의 모든 조합을 도출하는 것은 불가능하고 불필요하므로, 전체 시나리오의 결과가 바람직하지 않은(undesirable) 유의한 사고 경위를 구성하는 오류들을 도출하는 방법론이 필요하다. 본 논문에서는 유의한 사고 경위를 구성하는 오류원인을 도출하기 위하여 그림과 같이 양방향적인 분석과정을 설정하

였다. 예견적 분석의 전향적인 과정으로 도출되는 결과를 필요에 따라 결과로부터 원인요소를 역추적하여 확인하는 후향적인 과정(backward process)을 추가하는 방식이다.



→ : 오류 원인 요소와 형태간의 관계 및 분석방향

오류 분류체계의 구성은 오류의 외부적인 형태와 내부적인 원인을 연결짓는 구조에 있다. 외부적인 오류 형태는 수행 내용과 오류 형태의 조합으로 정의되며, 원인은 원인요소와 원인요소의 오류모드로 정의된다.



오류분류체계의 기본적인 구성

외부적인 오류 형태의 세부적인 분류에서 수행내용을 분류하는 방법에는 다양한 직무분석 기법의 적용이 가능하지만 가장 간단한 S-O-R 구조를 도입하여 '감지/관측-의사결정-실행-확인'으로 결정하였다. 오류 형태에는 대표적으로 널리 알려져 있는 Swain 분류 체계와 유사하게 간략한 분류체계를 적용하였다. 원인의 분류체계는 원인요소와 원인요소들의 오류모드로 정의하였다. 원인요소는 실제 설계대상들이 모두 포함될 수 있으나 현재의 설계된 수준에 따라 그 상세 정도가 변화된다. 원인요소를 열거한 후에 이들의 속성(attribute)과 속성값(attribute value)으로부터 다양한 오류요소를 정의할 수 있다. 오류요소 정의에 적용된 모드는 대상(object), 시간(time), 순서(sequence), 방식(method)등이다. 다음 표는 분류체계의 구성에 도입된 기본 항목이다.

수행 내용	오류 형태	오류 모드	원인 요소
감지/관측	하지 않음(EOO)	대상 없음	계통 및 기기
의사결정	다른 것 수행(EOC)	불필요한 대상	표시 및 제어기
실행	잘못 수행	시간 부정확	절차서
확인		순서 부적합	운전원 개인
		방식 부정확	조직
		방식 불완전	훈련

3.3 사례 분석

사고관리 방안의 대표적인 사례로 앞에서 분석한 '정전사고시 원자로 용기의 파손 방지를 위한 공동범람 방안'에는 노심상태 진단을 위한 수위 측정 계측기 (Reactor Vessel Level Monitoring System) 및 노심출구 온도 계측기만이 알려져 있으며, 수행에 필요한 운전원의 작업도 다음과 같이 매우 단순하다.

방안 내용	작업 내용

전원상실시 공동충수방안	● 노심 상태에 관한 정보의 지속적 관찰 :
	● 전원 회복 확인 및 CSS 기동 공동 충수 의사결정
	● 적절한 시점에서 CSS 강제 기동
	  ● 관련 절차서의 참조
	  ● 해당 기기 제어 판넬로의 이동
	  ● 제어 판넬 조작
	● 확인

그러므로, 오류 분류체계의 초안을 다음 표와 같이 제시하고 신뢰도 분석한 사례에 적용하여 오류가능성을 검토하였다. 분류체계에서 전체적인 방안의 수행 단계를 분류하는 것은 간단하다. 보다 신중한 검토가 필요하면 각 단계에 대하여 반복적으로 수행 세부 내용을 분류하거나, 인지적 오류의 세분이 필요하면 라스무센 모형과 같은 인지단계 모형을 수행내용에 적용하면 의사결정 단계에 따른 다양한 형태의 오류 분석이 가능하다.

표 3. 사고관리 방안의 오류 분류 체계 (초안)

수행 단계	오류의 형태(Type)	오류모드에 따른 문제 형태	원인요소(Cause)
감지/관측 (Detection/ Observation)	● 감지 못함 ● 발생하지 않은 것 오인 ● 관측 않음/무시 ● 관측 정보 잘못된 판독 ● 관측 정보 잘못된 판정	● 지시 및 절차 부적합 ● 근무 상태 불량 ● 외부 상황에 의한 주의력 감쇠 ● 시스템 지식 ● 훈련 부족 ● 방해 물리적 환경의 존재 ● 감각(시각/청각) 장애 ● 단순 혼동/망각/실수/기억착오 ● 지시/규정된 절차 불충실 ● 잘못된 가정/예측 의존 ● 시간 부족/관측량 과다 ● 기기/계기 비정상 동작	● 절차 ● 지시 ● 교육/훈련 ● 조직 ● 의사소통 ● 작업공간 구성 ● 기기/계기 ● 운전원

의사결정 (Decision Making)	● 상태오인/진단실패
	  ● 이상 -> 정상
	  ● 이상 -> 다른 이상
	  ● 정상 -> 이상
	● 의사결정의 지연
	● 파악 불충분
	● 목표의 비설정
	● 불필요 목표 설정
	● 잘못된 목표 설정
		● 부적절한 관측치 종합
		● 일부 무시
		● 관측치로 명확한 상태파악 불능
		● 파악 자체의 인지적 어려움
		● 시스템 지식 부족
		● 훈련 부족
		● 지시 및 절차 불충실
		● 목표 설정 자체의 인지적 어려움
		● 시스템 지식 및 훈련 부족
		● 단순 혼동/망각/실수/기억착오	

실행 (Execution)	● 일부 누락 ● 불필요한 작업 첨가 ● 대상 부적합 ● 순서 잘못 ● 시간적 부적합 ● 정량적 결함 ● 수행 방법의 잘못	● 목표 불합치 작업 내용 구성 ● 일부 부적절 작업 내용 구성 ● 시스템 지식 부족 ● 훈련 부족 ● 외부 상황에 의한 주의력 감쇠 ● 기기의 식별/동작 불량 ● 단순한 혼동 또는 부주의 ● 판단의 잘못	● 절차 ● 지시 ● 교육/훈련 ● 조직 ● 의사소통 ● 작업공간 구성 ● 기기/계기 ● 운전원
확인 (feedback)	● 확인 못함 ● 다른 것 확인 ● 불완전 확인	● 확인 수단 없음 ● 확인 절차/지시 혼란 ● 확인 기준 부적절 ● 확인 동기 없음	

표 4. 원자로 용기 파손 방지 CSS 이용 공동충수방안의 수행 실패 요인(1 차 분석 결과)

실패유형	수행 실패 예상 요인	비고
진입실패 : 정확한 상황 판단(진단/의사결정) 실패	■ 내적인 요인 : 인지적 자원(주의력 등) 부족 ■ 자원 할당 실패 - 주의력 등 자원 부족, 예를 들면, 사고에서 운전원들의 관심이 다른 것에 집중되어서 공동충수 필요성과 가능성을 검토할 여유가 없음. ■ 잘못된 가설에 의한 편향 상태 : mind set-> tunnel vision, confirmation bias 등 ■ 관련 지식의 결함/누락 : 공동충수 필요조건/수행 내용 지식 없음 ■ 기타, 인지적 상태의 결함 : 동기 상실, 책임 오류, 심리적 충격 등 ■ 외적인 요인 : 정보 계측기 및 절차서 설계 요소 관련 ■ 필요한 정보의 망실 : 계측기의 비가용성 (고장 또는 기타 요인) 또는 정보차단 ■ 필요한 정보의 결함 : 상태 파악에 불충분한 정보 집합(노심 고온으로 인하여 RVLMS 나 Core exit thermocouple 등의 계측기가 오동작), 의사소통 문제 ■ 불필요한 정보의 입력 : ■ 부적절한 정보의 중요성 조정:외부 강요/지시등. 공동 충수 방안은 노심을 포기하는 것이므로 노심 노출 시점임에도 불구하고 상위 조직에 의해서 공동 충수 방안 필요성 인식 방해.	사고관리 방안에 진입하지 않거나 다른 곳으로 진입함.
수행 실패	■ 잘못된 수행 : 수행정도의 부적합(정량적인 결함), 이전 수행 내용과의 혼동 ■ 수행 누락 : 수행 절차 및 수행기기 지식 없음, 보조자료(절차서등) 없음, 지원기능 (기기 및 인력 포함) 없음. ■ 수행정보 결함 : 수행 절차 및 수행기기 지식 결함/누락, 보조자료(절차서등) 없음, 지원기능 (기기 및 인력 포함) 없음. ■ 수행기기의 결함 : 보전 오류, 작동 오류, 궤환정보 오류, 결함 회복 불가능 ■ 수행중 중지 :	
부적합한 조치로의 진행	■ SCS 에 의한 감압조치 및 다른 전략 선택 ■ 조치 수행의 capture error ■ 기타	
기기작동 실패	■ 선행 작업에 의한 충수 고갈 ■ 선행 작업에 의한 계통 구성의 이상 : 보수 및 시험 등 현장작업, 선행 HPSI 등, 전원 확보 조치 등	* 시나리오 관련
기기 가동 중 차단	■ 작동상태 인식 오류 : 궤환정보 오류(작동여부 정보 누락), ■ 잘못된 전환 : slip 에 의한 변경/ 차단, 상태 파악 오류, 잘못된 요구, 잘못된 의사소통	

4. 결론

사고관리 방안의 인적오류검토를 위하여 기존의 신뢰도 분석을 적용하여 수행 신뢰도를 계산하고, 신뢰도 분석에 미흡한 가능한 오류의 정성적인 도출을 위한 방법론을 제시하였다. 사례에서 보듯이 신뢰도 분석에서 미흡했던 오류요인 검토를 보강할 수 있는 기본 체계를 확보하였으나, 아직 특정한 사례 하나의 평가 단계에 국한된 분석이므로 불완전하다. 대상 사례에 적용을 반복하여 원자력발전소 사고관리에 적용 가능한 기법으로 확장해야할 것이다.

참고문헌

1. 김재환 등,인간 신뢰도 분석을 위한 인적오류 분석 기법 검토, 한국원자력학회'97 추계학술대회발표논문집.
2. A. Swain and H.E. Guttmann, Handbook of Human Reliability Analysis with Emphasis on Nuclear Power Plant Applications, NUREG/CR-1278, US NRC, USA, 1983.
3. B. Kirwan, Human Reliability and Safety Analysis Handbook, John Wiley & Sons, Inc., N.Y., 1994.
4. W.C. Yoon, Y.S. Kim and Y.H. Lee, A model-based and computer-aided approach to analysis of human errors in nuclear power plants, Reliability Engineering and System Safety, vol.51, pp.43-52, 1996.
5. E. Hollnagel, CREAM : Cognitive Reliability and Error Analysis Method,(draft), 1997