

# 관측자 척도를 이용한 원전 운전절차서의 적합성 평가

장통일 · 이용희\* · 임현교\*\*

충북대학교 대학원 · \*한국원자력연구소 · \*\*충북대학교 안전공학과

## 1. 절차서 평가의 접근방법

원전에서 운전절차서는 운전수행시 해당 운전원에게 요구되는 세부적인 작업내용이 명시되어 있다. 특히, 비상운전절차서는 비상상황에서 운전원의 주관적 판단을 최대한 배제하고 안전해석에 의해 안전성이 검증된 작업만이 수행되도록 더욱 철저하게 안전성 중심으로 준비되어 있다. 이러한 운전절차서에 있어서 가장 중요한 요소는 발전소의 안전성을 유지할 수 있는 안전해석 결과를 정확히 준수하는 것이다. 그러나, 절차서에 따라 작업을 수행하는 것은 운전원이기 때문에 절차의 구성이나 절차서의 문서적 표현도 중요한 안전성 관련 요소가 된다. 절차서에 대한 이러한 인적요소의 고려가 미약하였을 경우에는 운전원들에게 작업부하 및 혼동의 요소가 개입되어 결국 전체 시스템에 바람직하지 못한 결과를 초래하는 인적오류를 범하게 될 가능성이 있다. 최근 원전 운전경험을 통하여 인적요소에 대한 고려의 미흡함으로 인한 문제점이 확인되고 있다[4]. 특히, 절차서의 구성형식이나 세부요소에서의 사소한 문제점으로 인하여 절차서 수행시 작업부하 및 오류가 야기된 경우가 발생하였고, 작업에 사용되는 기기와의 상호작용과정에서 매우 다양한 요소들이 수행 내용에 영향을 미치기 때문에 이에 따른 시스템적인 오류 가능성에도 대비해야 한다.

원자력 분야에서는 작업부하나 오류가능성을 평가하기 위하여 THERP나 ASEP(Accident Sequence Evaluation Program)과 같은 신뢰성 평가기법을 주로 이용해 왔고, 최근에는 인지적인 측면을 고려할 수 있는 CREAM이나 착오수행(EOC: Error Of Commission) 가능성을 추가로 평가할 수 있는 ATHEANA 등이 개발되고 있다 [1,2]. 그러나, 기존의 기법들은 운전절차의 구성이나 절차서의 품질을 면밀하게 고려하지 못하며, 새로운 기법들을 실제 적용하기 위해서는 실무적으로 부담이나 전제조건이 많다. 따라서 절차서 평가에서는 전통적인 점검표(checklist) 기반의 방법론이 아직도 유효하며[4], 최근에는 FMEA 기법을 응용하여 점검표 기반 평가를 보완한 방식으로 오류 가능성을 분석한 사례도 있다[3,5].

인적요소에 대한 이러한 분석적인 방법들이 효과적이지만 기초자료의 수집이나 분석 결과를 객관적으로 검증하기 위해서는 반드시 실험적인 과정이 필요하다. 하지만, 실제 원전의 운전원들이 드러내는 오류는 매우 드문 희귀사건(rare events)이기 때문에 실험적인 평가가 쉽지 않다. 따라서 본 연구에서는 실험적 기법을 도입하고, 관측자가 운전원의 직무수행에 필요한 정보를 획득할 수 있도록 새롭게 개발된 관측척도를 이용하여, 절차서로 주어진 직무를 수행하는 운전원이 경험하는 작업부하 및 오류가능성을 평가하였다. 원전의 절차서를 평가하기 위해 개발된 관측자 척도가 운전원의 작업부하 및 오류가능성을 평가하여 절차서를 개선하는 데에 유효한지를 확인하고자 하였다.

## 2. 평가척도

위에서 언급하였던 바와 같이 분석적 기법에 의한 분석결과는 근본적으로 실제 데이터가 필요하거나 현장에서 검증되어야 한다. 본 연구에서는 절차서의 인적요소에 대한 실험평가 방법을 개발하고, 이러한 한계를 보완하기 위한 방법을 제시하고자 하였다. 그러나, 절차서의 수행오류가 매우 낮은 수준의 고신뢰이기 때문에 오류에 대한 실험판측이 어렵고, 포괄적인 실험계획수립이나 통계적 유의성 확보가 어렵다. 따라서 절차의 수행과정에서 오류가능성과 관련된 것으로 추정되는 요소들에 대한 관측자 척도와 수행자들의 주관적 평가를 통하여 절차서의 오류가능성을 검출하는 방식을 제시하였다. 이 결과는 절차서의 오류 가능성에 대한 점검표 기반의 평가에서 도출된 결과들을 확인하거나 세부 내용을 보완하는 데에 활용할 수 있다.

### 2.1 관측자 척도

현재 발전소에서 운전을 하고 있는 운전원들이 참가하여 선정된 절차서를 단계별로 검토하면서, 절차서를 수행할 때에 발생할 수 있는 오류의 가능성과 작업부하를 운전원들과의 질의 응답 및 평가자의 주관적 관측을 통하여 직접 평가하였다. 본 연구에서 사용된 관측자 척도는 정보획득수준, 직무경로, 집중도, 시행착오수준 등 절차서의 평가와 관련된 4가지이며, 각각에 대한 의미와 관측자의 평가내용은 다음과 같다.

- 정보획득 요구 (IGA : Information Gathering Action required) 수준 : IGA는 직무 수행을 완료하기 위한 운전원의 모든 정보획득 관련 행위(이동, 시도, 조치 및 의사소통 포함)이며, 행동수행 이전의 시각적 이동과 운전원들 간의 의사소통, 개인의 조치 행동의 정도를 포함한다.
- 직무경로 부담 (TT : Task Trajectory) 수준 : 직무경로는 직무수행을 위한 운전원의 수행방식이 나타내는 경로 특성, 수행과정의 복잡성, 이동 및 조치에 대한 시간적 혹은 공간적인 경로의 크기를 의미한다.
- 요구 집중도 (TCR : Task Concentration Requirements) 수준 : 직무 요구 집중도는 운전원의 개인 혹은 팀이 절차서 상의 특정한 직무(단계) 수행에 요구되는 수행 집중도로서, 수행시 참고의견이나 전혀 다른 가능성 등에 대한 외부의 개입을 수용할 수 있는 가능성에 의하여 역으로 판단한다.
- 시행착오 (TM : Trial for MMI) 수준 : 시행착오 수준은 절차서의 수행을 위한 기본 요구사항으로 관련 계기들을 제어반 상에서의 위치를 파악 및 확인하는 데 필요한 시행착오의 정도를 나타낸다.

본 실험에 사용된 관측자 척도 평가양식은 표 1과 같다. 평가 양식을 사용하여 절차서의 각 단계별로 실시되는 운전원들의 인터페이스 상에서의 확인동작이나, 실험자와 나누는 대화 등을 관찰하여 관측자가 개별 척도에 대해 단계별로 평가하도록 하였다.

표 1 관측자 척도 평가를 위한 평가표 양식의 예시

절차서 단계 번호	절차서 단계 (절차서의 내용)	수행업무 내용	IGA (정보 획득) 업무수준	MMI 확인 시행착오수준	관측된 요구 집중도 수준	직무경로 부담 수준
비상-1 7.0	Phase A 및 리세트한다	Phase B를	상 중 하	상 중 하	상 중 하	상 중 하
⋮	⋮	⋮	상 중 하	상 중 하	상 중 하	상 중 하
⋮	⋮	⋮	상 중 하	상 중 하	상 중 하	상 중 하

### 2.2 주관적 척도

주관적 평가는 실험 후 관측자 척도에 의한 평가결과와 비교하기 위하여 실시하였으며, 표 2와 같이 절차서의 각 단계를 수행하면서 주관적으로 느끼게 되는 작업부하 및 오류의 가능성을 관측자 척도와 마찬가지로 3가지 수준으로 분류하여 평가하였다.

표 2 주관적 척도 평가를 위한 평가표 양식 (예시)

절차서 단계 번호	절차서 단계 (절차서의 내용)	수행업무내용 (운전원 행위내용)	사용된 주요 MMI	작업부하	오류가능성
비상-1 7.0	Phase A 및 리세트한다	Phase B를		상 중 하	상 중 하
⋮	⋮	⋮		상 중 하	상 중 하
⋮	⋮	⋮		상 중 하	상 중 하

### 2.3 오류가능성의 상관관계 도출

본 실험에서 도입된 4가지의 관측자 척도값은 작업부하(WL: Work Load) 및 인적오류(HE: Human Error)의 가능성을 판단하는 데 각각 서로 다른 기여도를 지닌다. 따라서, 아래와 같은 함수관계에 의해 각 항목간의 구체적인 기여도를 평가할 수 있다.

$$WL = f[IGA(x_1), TT(x_2), TCR(x_3), TM(x_4)] = ax_1 + bx_2 + cx_3 + dx_4$$

$$HE = f[IGA(x_1), TT(x_2), TCR(x_3), TM(x_4)] = a'x_1 + b'x_2 + c'x_3 + d'x_4$$

작업부하와 오류가능성에 대하여 a, b, c, d 및 a', b', c', d'의 계수에 의해서 각 관측 척도들의 가중치가 결정되는 것이다. 따라서, 각각의 관측자 척도에 대한 가중치를 부여하고 그러한 가중치들의 합으로 종합하기 위하여 계층적 구조 분석(AHP : Analytic Hierarchy Process) 기법을 이용하였다. AHP를 이용한 관측자 척도의 각 항목에 대한 가중치 계산 결과는 표 3과 같다. 작업부하의 경우, IGA와 TT는 0.35이고, TCR은 0.2, TM은 0.1로 평가되어 작업부하를 판단하는 데에 IGA와 TT가 많은 영향을 미친다는 것을 알 수 있다. 또한, 인적오류는 IGA가 0.1, TT는 0.2, TCR과 TM은 각각 0.3과 0.4로 평가되어 인적오류의 가능성을 판단하는 데는 TM이 가장 큰 영향을 미치는 것으로 평가되었다.

표 3 작업부하 및 인적오류가능성에 대한 관측자 척도 각각의 가중치

	IGA	TT	TCR	TM
Workload (WL)	0.35	0.35	0.20	0.10
Human Error (HE)	0.10	0.20	0.30	0.40

### 3. 절차서 적합성의 실험적 평가

#### 3.1 평가방법

국내 원전의 운전원들을 대상으로 하여 운전절차서의 인적요소를 평가하고, 관측자 척도에 대한 평가의 유효성을 검증하기 위하여 시뮬레이션 실험을 실시하였다. 실험에 참가한 피실험자는 현재 국내의 원전에서 직접 운전중인 운전조이며, 특별한 질환이나 시각적인 문제가 없었다. 평가자는 실험을 진행하는 실험진행자 1명과 관측자 척도에 대한 평가를 하는 3명의 전문가로 구성되었다. 실험진행자는 실제 10년 이상 발전소를 운전한 경력이 있고, 절차서 평가에 충분한 경험이 있는 전문가이고, 관측자는 인간공학 분야에 5년 이상의 경험을 가진 전문가들로 구성되었다. 실험 평가를 위하여 선정된 시나리오는 안전성 관련 우선순위에 따라 약 8개의 절차서가 관련된 총 2개의 시나리오를 선정하였다. 그리고 절차서 진행시 운전원들이 조작해야 할 주제어반 (MCB: Main Control Board)의 각 계기들은 paper Mock-up으로 제작하였다.

시나리오를 진행하면서 점검표 등과 같은 분석적 방법을 통하여 이미 문제점이 제시되었던 단계에 대해서는 실험진행자의 판단에 의하여 실험진행 중간에 그 단계에 대한 문제점의 내용을 확인하였다. 피실험자는 절차서를 진행하면서 각 단계에 해당하는 작업부하 및 오류가능성을 이미 제시한 평가표 양식에 기입하도록 하였으며, 관측자들도 동일한 방법으로 평가표에 단계별로 각 척도에 대한 평점을 기입하도록 하였다.

실험종료 후에는 수행된 시나리오에 해당하는 절차서에 대하여 실험중간에 관측된 의견 및 실험자에 의하여 도출된 의견을 피실험자들과 재확인(Debriefing)하는 과정을 거쳐, 발전소의 현장사정이나 개인적 운전경험을 반영한 최종의견을 도출하였다.

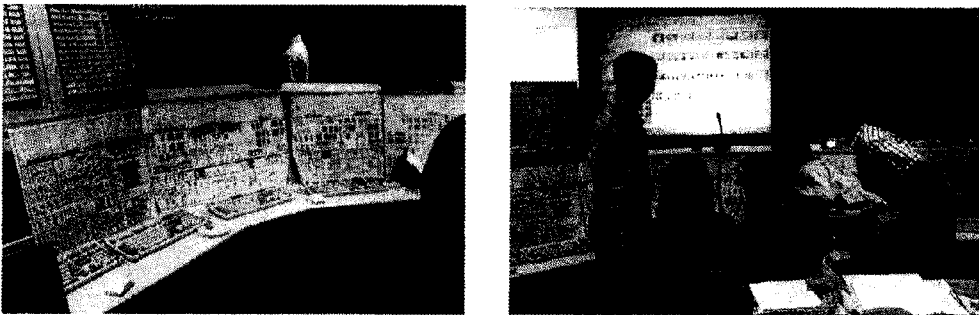


그림 1 Mock-up에 의한 실험수행

#### 3.2 평가결과 및 토의

관측자에 의해 평가된 상, 중, 하의 평점에 각각 3, 2, 1의 점수를 부여하고, 위에 제시하였던 식과 같이 가중치와 평점을 곱하여 합을 구하면 절차서의 각 단계별 작업부하 및 인적오류가능성에 대한 평점을 구할 수 있다. 이렇게 평점이 구해지면, 절차서의 각 단계별로 운전원들이 평가하였던 주관적 척도에 의한 작업부하도 마찬가지로 상, 중, 하로 평가된 것에 각각 3, 2, 1의 평점을 부여한다. 이렇게 관측자 척도에 의한 평점과 주관적 평점을 비교하여 서로 유사하거나 상이한 경우에 대해 분석하였다.

작업부하의 경우, 운전원들이 평가하였던 “상”, 즉 3으로 평가된 것을 기준으로 하여 2가지 방법으로 관측자 척도와 비교하였다. 첫 번째는 작업부하에 대한 관측자 척도가 운전원들이 평가한 평점과 근사하다고 판단되는 2이상의 평점결과에 대하여 비교하였고, 두 번째는 이와는 반대로 운전원들에 의한 평가결과는 3이지만, 관측자 척도는 이와 많은 차이가 나는 2이하의 평점결과에 대하여 비교하였다.

표 4는 작업부하에 대한 운전원들의 주관적 평점과 관측자 척도가 근사하는 절차서의 단계 및 절차 내용을 예시한 것이다. 운전원들의 평가와 관측자의 평점이 근사한 결과에 대한 절차서 단계의 내용을 보면, 다른 단계들에 비하여 확인해야 할 물리량 및 계기류가 많은 것을 알 수 있는데, 이는 운전원들로 하여금 관련된 자료를 얻기 위하여 다수의 IGA를 취하게 할 뿐만 아니라, 직무경로도 더욱 복잡해지기 때문에 이로 인한 작업부하가 높을 것으로 평가된다. 또한, 운전원이 직접 계기의 압력을 지속적으로 확인해야 하고, 특정 조건이 만족될 때까지 운전원이 직접 모든 것을 제어해야 하는 경우에 작업부하가 높은 것으로 나타났다.

표 5 작업부하의 주관적 평점과 관측자 척도가 근사하는 절차 및 내용(예시)

절차서 및 단계번호	운전종사자들의 주관적 평점	관측자 척도 평점
비상-1 2.1	3.00	2.35
비상-1 16.1-3	3.00	3.00
부수-1.1 21.3	3.00	3.00
비상-3 28.2	3.00	2.55
비상-3 30.0	3.00	2.20
비상-3 30.1	3.00	2.65
부수-3.1 13.1	3.00	2.90

절차서 및 단계번호	절차서 단계 (절차서의 내용)	수행업무 내용 (운전종사자행위내용)
부수-1.1 21.3	<p>아래의 조건이 만족할 때까지 RCS를 감압한다 :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 노심 출구 T/C 온도를 근거한 RCS 과냉각 : &lt;불임-1&gt;의 과냉각 ~ &lt;불임-3&gt;의 과냉각 [C/V내 비정상시 : &lt;불임-1&gt;의 비정상시 과냉각 ~ &lt;불임-3&gt;의 비정상시 과냉각] 사이 유지</li> <li>- 또는 -</li> <li>○ PZR 수위 : 76% 이상 [C/V내 비정상시 : 68% 이상]</li> </ul>	<p>만약 RCS 과냉각이 &lt;불임-1&gt;의 과냉각 미만 [C/V내 비정상시 : &lt;불임-1&gt;의 비정상시 과냉각 미만] 이면, RCS 과냉각을 복구하기 위해 필요한 만큼 RCS 보충유량을 증가시킨다.</p>

한편, 운전원들에 의한 평가결과와 관측자 척도의 평점 사이에 차이가 많이 나는 절차들을 보면, 절차단계가 비교적 간단한 직무이지만 절차단계의 검토의견에서 운전원들은 인터페이스의 일관성 부족, 절차서와 실제 주제어반에 명시된 태그(tag)명 불일치, 부적절한 색채의 사용 등으로 인하여 부가된 작업부하가 크다고 언급하였다. 따라서, 이와 같이 비교적 간단한 직무임에도 불구하고 인터페이스와 절차서의 사소한 문제로 인하여 큰 작업부하가 발생할 수 있기 때문에 보완이 필요하다.

인적오류가능성의 경우, 운전원들의 주관적 평가는 행해지지 않았기 때문에 관측자 척도의 평가만으로 분석하였다. 관측자 척도의 평점결과가 2.3 이상에 해당하면, 인적오류의 가능성이 높은 것으로 평가하였다. 작업부하의 평가에서도 이미 언급한 것과 같이 다른 단계들에 비하여 확인해야 할 물리량 및 계기류가 많은 경우에 인적오류 가능성

이 높다고 판단된다. 한 예에서는 단계에 해당하는 세부조건 및 취해야 할 조치를 나타내는 별도의 표를 보면, PZR 수위에 대한 조건이 모두 4가지로 구분되어 있고, 이에 또 다른 상태조건이 3가지로 구분되어 있으며, 각각의 조건마다 운전원이 취해야 하는 조치가 모두 다르기 때문에, 이에 따른 인적오류의 가능성이 높을 것으로 예상된다.

본 연구의 관측자 척도는 작업부하나 오류가능성을 평가하는 데 절차서의 개선요소와 관련되면서 실험측정 과정에서 가장 민감도가 높을 것으로 예상되는 4개의 주관적 척도를 제시한 것이다. 따라서, 척도의 타당성에 대한 명시적인 근거로 본 연구결과는 충분하지 않다. 절차서 수행시의 작업부하나 오류가능성을 평가하기 위한 선행연구들은 주로 분석적인 방법이었음에 비하여 본 연구는 그 동안의 평가경험에서 도출된 4가지 척도가 유효할 것이라는 가설을 바탕으로 평가하였다. 실제 절차서를 수행하는 운전원들이 아닌 관측자에 의해서 평가됨으로써 관측자 척도의 타당성에 객관적인 한계가 있기 때문에 운전원들의 주관적 평가를 포함하여 비교하였다.

위의 결과에서 보는 바와 같이 운전원들의 주관적 평가 결과와 별도로 제시된 관측자 척도에 의한 평가 결과가 근사하게 접근하는 절차 단계를 도출할 수 있었다. 즉, 이것은 본 연구에 도입된 관측자 척도들이 작업부하 및 오류가능성의 평가에 어느 정도 유효한 결과를 제공할 수 있다는 것을 시사하는 것이다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 절차서 수행중에 발생할 수 있는 작업부하 및 인적오류의 가능성을 평가하기 위해 4가지 관측자 척도를 제시하고 원전의 운전절차서를 평가하였다. 관측자 척도에 의한 평가결과를 운전원들의 주관적 평가 결과와 비교하였을 때, 작업부하나 오류가능성이 높을 것으로 판단되는 단계에서 유사한 평가결과를 보여 본 연구에서 제시된 관측자 척도의 유효성을 확인할 수 있었다. 작업부하 및 인적오류의 가능성이 높다고 평가된 절차서의 각 단계들에 대하여, 인터페이스의 문제점이 아니라면 절차서 자체의 기술방식 및 내용을 등을 확인하는 과정은 필수적이다. 그러므로, 관측자 척도에서 절차서상으로 작업부하 및 인적오류의 가능성이 높다고 평가된 단계에서 해당 척도와 관련된 절차서의 세부 요소들을 개선해야 할 근거를 확인할 수 있었다. 또한, 점검표 등 분석적인 방법을 통해 얻은 평가 결과에 대한 실험적 확인으로 활용할 수 있다.

#### 참고문헌

- [1] Hollnagel, E., CREAM : Cognitive Reliability and Error Analysis Method, 1997.
- [2] U. S. NRC, Technical Basis and Implementation Guidelines for ATHEANA, NUREG-1624, 1998.
- [3] Yong H. Lee, Facilitating HRA through the Input from HSI Design, The 2nd OECD/NEA Workshop on Building the New HRA, 2002.
- [4] 한국원자력연구소, 고리1호기 절차서의 인간공학적 평가, KAERI/CR-134/02, 2002.
- [5] 이용희, 장통일, 임현교, 원자력발전소 주제어실 인터페이스 설계를 위한 인적오류 분석기법의 보완, 대한인간공학회지, Vol.22, No.1, pp.31-42, 2003.