

원자력발전소에서 작업 절차서의 인간공학적 평가를 위한 점검표(checklist) 개발

김수진·장통일·민유종·이용희

한국원자력연구소, 계측제어·인간공학 연구부

1. 배경 및 필요성

원자력발전소(이하, 원전)에서는 운전, 보수, 점검, 검사, 변경 등 모든 활동을 절차서 형태로 정의하고 있으므로, 절차서는 원전운영의 안전성을 유지하기 위한 핵심적인 수단이다. 따라서, 원전에서 절차서는 신기술 및 설계, 설비 변경 결과를 반영하여 주기적으로 검토 보완되고 있다. 절차서의 내용은 안전성 측면에서 철저한 확인을 거쳐 작성된다. 그러나, 절차 및 절차서의 인적요소는 그러한 기술적인 측면을 무력화시킬 수 있으므로 별도로 관리되어야 한다. 절차서의 평가에서는 절차 내용의 기술적인 타당성과 함께 인적요소를 평가하여 안전성에 부정적인 영향이 없는지를 확인하고 있다.

절차서의 인적요소 평가는 절차 자체의 완수 여부만으로 만족되지 않으며, 작업부하(workload) 혹은 인적오류 가능성(human error potential)을 야기하는 요소들을 파악하여 절차서를 개선하려는 것이다. 접근 방법은 크게 요소별 평가와 종합적 평가로 양분할 수 있다. 요소별 평가란 절차서의 구성 및 세부 요소가 타당한지 개별적인 평가 기준에 의하여 확인하는 것이며, 종합적 평가는 실제 수행 내용에 의해 절차서를 평가하는 것이다. 요소별 평가는 평가의 점검 항목과 평가 대상 요소가 너무 많아 실무적으로 실현 불가능한 경우가 많다. 따라서, 평가자의 시각에 따라 임의로 일부분에 집중하여 평가하는 경우가 많고, 개별적인 의견들로부터 종합적인 의견을 도출하기 어렵다. 반면, 종합적 평가는 대부분 실제 수행과정에 대한 실험으로 확인하기 때문에 실험계획의 부담이 너무 크고 실험에서 포함할 수 있는 시나리오에 한계가 있다는 단점이 있다. 따라서, 종합 평가는 특정한 현안에 대한 집중 평가가 수행되며, 실무에서는 요소별 평가를 수행한 후 제시된 주요 현안에 대해 실험적으로 확인 검토하는 것이 보통이다.

본 논문에서는 원전에서 작업절차서의 인간공학적 평가를 효과적으로 수행하기 위해 절차서의 요소별 평가에 사용되는 실무적인 세부 점검표(checklist)를 제시하였다. 요소별 평가의 주요 문제점인 점검 항목의 과다를 해결하기 위하여 평가대상을 사전에 분석하여 해당 점검항목 및 요소별 기준을 선별하여 별도의 점검표를 개발하였다.

2. 점검표 기반의 절차서 평가 절차

점검표를 개발하기 위하여 원전의 절차서와 관련된 인간공학적 기준을 설정하였다.

적용된 세부 기준으로는 USNRC, IAEA는 물론 국내의 비상운전절차서 개발 표준화 지침 등 다양한 요건과 지침이 가용하다. 그중에서 1979년 TMI 사고 이후, 원전의 안전성 향상과 사고 발생시 비상대응 능력을 향상시키기 위한 비상운전절차서에 많은 법적인 요건이 정의되었다(표 1 참조). 국내에서는 이들 요건을 그대로 적용하여 일부 원전의 비상운전절차서 인적요소 점검을 수행하였다. 하지만, 아직 국내 원전에 적합한 절차서 평가 기준 및 도구가 정리되거나 평가 범위가 합의되지 않은 상태이다.

표 1. 비상운전절차서 관련 주요 요건 문서

년도	주요 issue
1979	(TMI Accident)
1980	- NUREG-0600, TMI Action Plan, Item I.C.1 issued - NUREG-0737, Item I.C.1 issued
1982	- NUREG-0899 issued - NUREG-0737, Supp.1, Item I.C. 1 issued
1986	- Temporary Instruction 2515/79 issued - Information Notice 86-64 issued
1987	- Information Notice 86-64. Supp. 1, issued
1988	- EOP-1 inspections begun - Temporary Instruction 2515/92 issued - EOP-2 inspections begun - EOP-3 inspections begun
1989	- NUREG-5228 issued - NUREG-1358 issued - NUMARC/NSSS workshops conducted - EOP followup inspections begun
1991	- Inspection Procedure 9900 issued - Inspection Procedure 42001 issued
1992	- NUREG-1358 Supplement 1. issued

본 연구에서는 이러한 NUREG-1358 Supplement 1. 등 요건 문서의 기준을 포함하는 한편, KINS AR-516, IAEA TECDOC-1058 등 국내외에서 제시된 기술 기준들을 참고하고 현장 수행자들의 의견을 반영하여 자체적으로 고유한 절차서 점검표를 개발하였다. 절차서의 포괄적인 인간공학적 평가를 위해 국내외 기준 및 최신연구 등에서 제시된 절차서 관련 인적요소 기준을 수집한 결과, 실무적인 문제점이 있었다. 우선, 동시에 평가해야할 기준 항목이 많고, 평가의 만족 수준이 다양하며, 평가 요소들 간에 존재하는 상호 연계성을 고려하기가 어려웠다. 따라서, 평가해야할 절차서의 수가 방대한 상황에서 기존의 점검항목 그대로는 실무상으로 평가 자체가 불가능한 상황이었다.

그러므로, 우선 평가해야할 절차서를 유형별로 구분하여 그 유형의 절차서에서 필수적으로 검토해야할 세부 인적요소 항목을 도출하였다(그림 1. 참조). 우선 절차서의 유형별로 그 구성을 구분한 다음, 각 구성 부분별 세부 요소로는 용어, 기호, 단위, 배열, 주의사항, 번호체계 등을 도출하였다. 기존의 요건 문서를 통하여 각 세부요소별로 점검 항목에 적용될 인간공학적 기준을 결정하여, 이를 기준으로 개별적인 요건 만족여부를 평가하는 전문가 방식을 채택하였다. 평가 전에 도출된 세부 요소 및 평가 항목에

대해서는 현장의 절차서 수행자 그룹의 의견을 반영하였다.

전문가 평가에서는 절차서의 기능적인 측면과 독립적인 세부 요소들에 대해서는 분야별 전문가의 독립적인 검토를 수행하였다. 모든 평가 결과는 현안의 해소가 확인되는 시점까지 독립적으로 관리하였으나, 최종적으로 관련 전문가들의 패널(review panel)을 활용하여 검토의견을 조율하였다. 검토 패널의 조율과정에서 안전성 관련 중요도를 기준으로 검토의견에 대한 선별(screening) 및 우선순위 평가를 수행하였다.

그림 1. 작업 절차서의 구성(예시)

3. 절차서의 인적요소 점검표 개발

절차서의 유형은 현장의 각 기술 분야에 따라 그 특성이 반영되고 구분되는 것으로 보였다. 우선, 절차서의 인간공학적 타당성에 대한 공통적인 요건은 명확성 측면을 핵심평가 점검 기준으로 보고, 크게 절차서 구성 및 형식의 타당성과 세부 요소의 적합성으로 평가 측면을 양분하였다. 구성 및 형식의 타당성과 세부요소의 적합성을 평가하기 위한 주요 관점은 크게 사용적합성과 운전 적합성으로 구분하였다. 사용적합성이란 구성 및 형식의 상세 정도, 서술의 상세 정도 및 이해 가능성을 의미하며, 운전 적합성은 발전소 설비와의 일치성 및 개별 직무에서의 적합성을 의미한다. 이들은 문서적인 측면은 물론 문서로 표현된 절차 자체의 기능적인 수행 적합성을 내포하는 것이다.

1) 구성 및 형식의 타당성

절차서의 구성 및 형식의 타당성 평가는 절차서의 구성 및 형식이 직무 수행에 과도한 부담을 주거나 혼동을 줌으로써 인적 오류를 야기할 우려가 있는지를 평가하는 것이다. 판독의 명료성, 절차서 형식의 일관성, 정보 식별 및 작성의 적합성, 기술 정보의

정확성 등을 고려하여 사용자 및 전문가의 참여로 안전성 관련 검토항목을 도출하였다. 원전의 절차서에 대해 다음과 같이 12종의 주제와 관련된 총 84개의 세부 점검 항목을 도출하였다.

- 절차서의 내용 : 기술적인 내용/정확성, 어휘/술어/두문어(약어), 비상운전절차서의 명쾌성, 절차서의 전환
- 절차서의 각 페이지의 내용 및 구성
- 운전종사자 조치
- 단계별 조치 사항
- 논리 단계
- 참조 및 분기
- 주의 사항 및 주해
- 보조 자료 및 부록
- 용어
- 문법 및 구두점
- 단위, 숫자, Symbol 및 발전소 용어
- 보고서 체계

2) 세부요소의 적합성

절차서 세부 요소의 적합성은 절차서의 문서적인 요소에 대하여 집중하였다. 표시, 용어 및 약어 사용, 절차서 내용표현에 대하여 사용자의 이해도, 변경 수행 가능성 등을 고려하여 검토항목을 도출하였다. 세부 점검항목은 절차서의 유형별로 기본 구성형식에 따라 표지, 목차, 본문, 붙임으로 분류하였고, 현장 작업자 및 전문가의 참여로 총 145개의 안전성 관련 세부 점검항목을 도출하였다.

- 보고서 체계
- 표지 - 배열, 표/그림/차트, 선/구분선, 번호
- 목차 - 배열, 번호
- 본문 - 용어/약어, 표/그림/차트, 문장, 숫자/단위, 선/구분선, 논리기호/부호, 동사/어휘/기기/용어, 배열, 분기표시/종결표시, 강조/Symbol, 진입조건, 주의/참조/노트, 기타 일반사항
- 부록(붙임, 그림) - 용어/약어, 표/그림/차트, 문장, 숫자/단위, 선/구분선, 배열, 강조/Symbol, 주의/참조/노트

3) 점검표 실무양식

또한 문서기반 평가는 물론 원전에서 실무적용을 위해 현장 작업에 적합한 점검표 양식을 제시하였다(그림 2 참조). 미리 선정된 작업 절차서 유형에 따라 점검 항목의

해당 여부와 만족여부를 평가하여 독립적으로 검토의견을 작성하도록 하였다.

분류	점검항목	점검내용	해당여부		만족여부		검토비고	비고
			Y	N	Y	N		
1. 절차서의 내용	기술적인 내용/정확성	1) 절차서 진입조건 및 정황점이 명확한가?						
		2) 조치내용의 순서, Note 및 주의사항이 정확한가?						
		3) 문헌출처자에게 정확하고 논리적으로 문헌절차를 제시하고 있는가?						
		4) 절차적용을 결정하는데 있어서 기준이 적절한가?						
		5) 절차서 사용에서 수리 계산이 포함되어 있다면, 계산 과정에서 어려움이 있는가?						
		6) 최소한의 수학적인 변환 혹은 특별한 계산이 포함된 곳이 있는가?						
		7) 수리적인 계산이나 변환이 필요할 경우, 충분한 여백이 제공되고 있는가?						
2. 어휘/술어/부록어(약어)	(약어)	1) 절차서에서 사용되는 술어들은 지시기/제어어 일치하며 완전한가?						
		2) 절차서에서 사용되는 단어가 주제어 및 기기와 일치성이 유지되는가?						
		3) 사용되는 용어들은 분명한가?						
		4) 약자 및 부록어의 사용이 명확하고 일관되게 사용되었는지?						
3. 비상문헌절차서(EOP)의 명료성		1) 비상문헌절차서(EOP) 내용에서 명확하게 이해하지 못하는 부분이 있는가? 표지사항, 주의사항, Note, 논리어, 도표 및 그림, 어휘, 약자 등						

그림 2. 작업절차서 평가 실무 점검표 (부분 예시)

4. 점검표의 활용 및 평가 결과

본 논문에서 제시된 절차서 평가를 위한 인적요소의 점검표를 국내 원전의 주기적 안전성 평가(PSR)에 적용하였다. 현장의 각 부서 절차서를 각각 독립적인 유형으로 인정하여 총 12종의 절차서 유형에 대하여 개별적인 점검표를 개발하였다. 유형별 점검표는 구성형식에 대한 84개의 점검 항목 및 세부요소에 대한 145개의 점검 항목을 기준으로 해당 절차서에 필수적인 항목만을 선별한 것이다. 절차서 평가에서 점검표의 활용 방식은 우선 각 항목의 해당여부를 확인한 다음, 만족여부는 별도로 평가하였다. 만족여부의 평가에서는 별도로 제공되는 사례 혹은 세부 만족기준을 참고하여 전문가 판단에 의존하였다.

기존 원전의 절차서에 대한 평가 결과, 구성형식에서 안전성 관련 문제점은 없었으며 별도로 규정된 구성 형식의 일관성이 철저하게 유지되었음을 확인하였다. 그러나, 다수의 부분적인 누락을 검출할 수 있었다. 특히, 운전절차서의 경우, 문서상 절차를 표현하는 기본형식으로 흐름도(flowchart), Two-column 방식, 단계식 서술절차 등에 대한 상대적인 비교 혹은 종합 활용에 대한 검토가 필요하다.

평가 결과 만족여부에 대한 각 검토의견은 만족사항은 조기에 정리하고 불만족의 경우에 별도로 검토의견을 정리하여 현안의 해소가 확인될 때까지 추적 관리하였다. 절차서 검토는 초기에는 평가 전문가들에 의해 상당히 많은 수의 검토의견이 도출되었으나, 현장의 실무자들과의 협의과정에서 간단히 수정함으로써 해결할 수 있었다. 안전성과 관련된 일부 검토항목에 대하여 상충 혹은 상이한 검토의견도 포함되어 있었으나, 수행 내용에 대한 현장 실사 및 협의를 통하여 대부분의 검토항목에 대한 해결방안이 도출될 수 있었다. 일부 잔여 현안들은 대부분 특정한 절차서나 해당 원전의 문제가 아니라

전체적인 기준과 관련된 문제이며, 별도의 상세검토 및 이행계획 수립이 필요하다. 점검표 기반 평가에서 절차서의 유형과 평가 대상 요소별로 맞추어진 평가 기준을 활용하였으므로, 실무의 효율성을 크게 높일 수 있었다.

5. 결 론

원전에서 절차서의 인간공학적 평가를 위하여 인적요소의 점검표를 제시하고, 원전의 주기적 안전성 평가에서 점검표 기반의 평가를 통하여 제시된 점검표의 실무 가능성을 확인할 수 있었다. 본 점검표는 그동안 절차서 평가에 적용된 다수의 기준들이 가진 중복성을 배제하도록 해당 절차서에 맞추어 선별된 실무기준들이므로, 그동안 장벽으로 여겨졌던 보다 포괄적인 절차서 평가의 실무를 가능하게 할 수 있었다.

그러나, 적용되는 절차서의 종류 및 유형이 달라지면 일부 항목이나 만족여부의 확인 방식을 보완할 필요가 있고, 또한 자원이 가용할 경우에는 전적으로 전문가 평가에 의존하는 평가 절차도 일부 보완할 필요가 있다. 이는 절차서 평가의 세부 요소들에 대하여 객관적으로 정리된 항목 및 항목의 범위에 대한 연구 및 각 요소들의 평가에 적합한 방법론 선정이 과감되어야 할 것이다. 또한, 본 논문에서 인간공학적 평가를 위해 제시된 점검표의 타당성은 절차서들의 실험 평가에 의해 최종적으로 검증되어야 할 것이다.

본 연구에서 제시한 점검표의 실무적인 효과를 타산업 부문에서 절차서 평가에 적용하기 위해서는 절차서의 유형에 따른 일부 평가항목의 보완은 물론 적용되는 안전성 관련 요건의 강도에 따라 만족 기준을 조정해야 할 것이다.

참고문헌

- [1] NUREG-1358 Supplement 1., Lessons learned from the special inspection program for emergency operating procedures, 1992.
- [2] IAEA TECDOC-1058, Good Practice with respect to the Use and the Development of Procedures, 1998.
- [3] M. Yun and Y.H. Lee, Development of a systematic checklist for the human factors evaluation of the operator aiding system in a nuclear power plant, Int. J. of Industrial Ergonomics, Vol.25, Issue 6, pp 597-609, 2000.
- [4] KINS AR-516, 비상운전절차서 특별점검 결과 보고서, 원자력안전기술원, 1996.
- [5] 97본사(단)-244, 비상운전절차서 개발 계획서 표준화지침, 한국전력공사 원자력발전처, 1997.