2000 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

비상운전절차서 단계 복잡도 평가 척도의 적합성 평가에 관한 연구

A Study on the Appropriateness Evaluation of the Step Complexity Measure for Emergency Operating Procedures

박진균 [1], 정원대 [2], 김재환 [3], 하재주 [4], 신영화 [5]
1~4. 대전 유성우체국 사서함 150 한국원자력연구소, 종합안전평가팀
1. e-mail: kshpjk@kaeri.re.kr
2. e-mail: wdjung@kaeri.re.kr
3. e-mail: jhkim4@kaeri.re.kr
4. e-mail: jjha@kaeri.re.kr
5. 전남 영광군 홍농읍 계마리 514 번지 한국전력공사 영광원자력본부
e-mail: shinyh@dava.kepco.co.kr

요 약

본 연구에서는 기존에 제시된 절차서 단계 복잡도 평가척도의 적합성을 검증하기 위해, 수리적으로 예측된 단계 복잡도 값과 full-scope simulator 에서 얻은 비상운전 절차단계의 평균 수행시간을 비교/분석하였다. 분석 결과, 절차서 단계 복잡도 값은 평균 수행시간과 잘 일치하는 경향을 보였고 통계적으로도 충분한 의미를 가지고 있었다. 따라서 제안된 절차서 단계 복잡도 평가척도는 비상운전절차서의 복잡도를 평가하고 검증하는 정량적 분석방법으로 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

ABSTRACT

In this study, to verify the appropriateness of step complexity (SC) measure, estimated SC values for steps in emergency operating procedures are compared with averaged step performance time data. According to the results of this comparison, since estimated SC values are reasonably accordance with averaged step performance time data, it is concluded that SC measure can be used to quantify the degree of complexity of steps included in emergency operating procedures.

I. 서 론

현재 가동중인 원자력 발전소의 경우 많은 종류의 증상기반 비상운전절차서(symptom-based emergency operating procedure)가 사용되고 있다. 이 증상기반 비상운전절차서는 비상상태시 급격히 증가할 수 있는 운전원들의 작업부하(workload) 감소를 통해 원자력

발전소의 안전성을 향상시키는데 그 목적이 있기 때문에, 비상시 운전원이 수행해야 하는 직무들이 일련의 절차서 단계(procedure step 또는 단순히 step 이라고도 표기한다) 형태로 운전원들에게 제공된다. 그러나 이러한 증상기반 비상운전절차서는 원자력 발전소의 필수안전기능(critical safety function)들을 운전원의 단계 수행과 동시에 감시하도록 요구하고 있기 때문에, 비상시 운전원들은 절차서에 기술된 단계를 이해한 후 이들을 수행해야 할 뿐 아니라 필수안전기능들의 위반 여부를 동시에 감시해야 한다. 따라서 현재 사용중인 비상운전절차서의 경우 운전원들의 작업부하가 과중하게 될 수 있는 가능성을 여전히 포함하고 있다 [1-2].

이러한 이유로 인해, 비상운전절차서의 개발 및 개선에 있어서 "비상운전절차서는 그 내용을 운전원이 쉽고 명확히 이해할 수 있도록 구성되어야 한다" 또는 "비상운전절차서는 운전원들이 주어진 직무를 적절한 작업부하 및 직무수행시간 안에서 수행할 수 있도록 구성되어야 한다" 등과 같은 요건들이 강조되고 있다 [4, 5].

또한 운전원들의 오류(error)를 유발하는 많은 원인들 중 절차서가 주된 원인으로 부각됨에 따라 [6, 7] 위의 요건들을 정성적으로 평가하기 위한 많은 방법들이 제안되었고, 이들 중 주로 사용되는 방법이 checklist 를 사용하여 절차서의 문제점을 평가하는 방법이다 [8-10]. 그러나 이러한 checklist 를 통한 평가는 사용하기 쉽다는 장점에도 불구하고 평가자의 경험이나 지식수준에 따라 그 결과가 매우 주관적일 수 있다는 점과 평가를 수행하더라도 비상운전절차서가 위의 요건에 합당하도록 개발되었는지 확신할 수 없다는 문제점을 가지고 있다. 따라서 이러한 checklist 평가의 단점을 보완하기 위해, "비상운전절차서의 적합성은 mock-up test 나 발전소 실사(walk-through)를 통해 증명되어야 한다"와 같은 요건이 추가적으로 요구되지만, 이러한 방법들은 본질적으로 많은 시간/인력 및 비용이 투입되어야 하기 때문에 여러 번 또는 상세한 평가가 매우 어려운 상황이다. 따라서 운전원들이 수행해야 하는 단계에 대한 복잡도(즉, 복잡한 단계일수록 운전원의 작업부하 및 단계 수행시간이 증가할 것이기 때문에)를 개략적으로나마 평가할 수 있는 방법이 있다면, 본격적인 mock-up 또는 발전소 실사 전에 이를 적용하여 시간, 인력 및 비용 등을 크게 절약할 수 있을 것이다.

이러한 문제를 해결하기 위해, 엔트로피 (entropy) 개념을 사용하여 비상운전절차서의 단계 복잡도 (step complexity; SC)를 정량적으로 평가할 수 있는 평가척도가 제안되었다 [11]. 제안된 단계 복잡도 평가척도는 절차단계의 수행을 위해 필요한 정보의 양, 절차단계의 수행논리의 복잡도 및 절차단계에서 요구하는 운전원 조치사항들의 양을 평가하는 세가지 하부 평가척도 (sub-measure)로 구성되고, 이때 각 하부 평가척도들에 대해 전문가들의 판단으로 결정된 상대적인 중요도 (weighting factor)를 사용한 공간적 크기 (Euclidean norm)로 단계 복잡도 값을 정의하고 있다.

본 연구에서는 단계 복잡도 평가 척도의 적합성을 검증하기 위해, 임의의 단계에 대해 예측된 단계 복잡도 값들과 full-scope simulator 에서 얻은 비상운전 절차단계의 평균 수행시간을 이용하여 회귀분석을 수행하였다. 또한 단계 복잡도의 하부 평가척도에 대한 중요도 값의

적합성을 평가하기 위해, 평균 수행시간에 대한 non-linear curve fitting을 수행하여 각 하부 평가척도에 대한 중요도 값을 얻었다.

이러한 분석의 결과, 임의의 단계에 대해 예측된 단계 복잡도 값들은 평균 수행시간과 잘 일치하는 경향을 보였고 통계적으로도 충분한 의미를 가지고 있었기 때문에, 단계 복잡도 평가척도는 비상운전절차서에 포함된 단계의 복잡도를 정량화 하기위한 방법으로 사용될 수 있다고 판단된다.

II. 비상운전절차서의 특성을 고려한 단계 복잡도 평가척도 (SC)의 도입

현재 사용중인 증상기반 비상운전절차서의 일반적인 특성은 크게 1) 전체적인 비상운전절차서의 구조, 2) 단계의 수행 논리 및 3) 계속수행단계(continuous action step) 또는 비순차적 단계(floating step)로 구분될 수 있고, 이들에 대한 상세한 설명은 참고문헌 [11]에 기술되어 있다. 이러한 특징들로 이한 인자들 이외에, 지금까지의 경험이나 연구결과들을 바탕으로 볼 때, 단계 복잡도에 영향을 줄 수 있는 주요 인자들은 표 1과 같이 정리될 수 있다.

<표 1. 단계 복잡도에 영향을 주는 인자>

참고 문헌	복잡도 인자	분야
[12, 13]	• 단계 수행을 위해 필요한 정보의 양	원자력 발전소 운전 경험
[14, 15]	• 단계 수행논리의 복잡성/부적절성	
[8]	• 단계 수행을 위해 필요한 정보의 양 • 단계에 포함된 운전원 조치사항들의 수	
[16]	• 단계 수행을 위해 필요한 정보의 양 • 단계 수행논리의 복잡성/부적절성	
[17]	• 단계에 포함된 운전원 조치사항들의 수 (the number of check items)	항공 산업
[18]	• 단계에 포함된 운전원 조치사항들의 수 (the depth due to sub-tasks included in a given task)	화학 공장

표 1에서 볼 수 있는 바와 같이, 단계 수행을 복잡하게 하는 주요 인자들은 크게 단계 수행에 필요한 정보의 양이나 단계 수행논리 복잡성 및 단계에 포함된 운전원 조치사항들의 수 등을 들 수 있고, 이들은 모두 증상기반 비상운전절차서의 특성에 밀접한 관련을 갖고 있을 뿐 아니라 유사한 인자들이 원자력 발전소 이외의 화학 및 항공 산업분야에서도 보고되고 있기 때문에, 단계 수행을 복잡하게 하는 일반적인 인자들로서 고려할 수 있을 것이다.

표 1과 같이 단계 복잡도에 영향을 미치는 세가지 주요 인자들에 대해, 이들을 정량적으로 표현하고 평가할 수 있는 평가척도가 제안되었다 [11]. 즉, 단계의 복잡도는 정보의 양, 논리의 복잡성 및 운전원 조치사항들의 수에 따라 영향을 받기 때문에, 단계 복잡도(step complexity; SC)는 세 가지 요인이 결합되어 평가되어야 한다. 따라서 제안된 단계 복잡도 평가척도는 단계의

난이도를 아래와 같이 정보의 양, 논리의 복잡성 및 운전원 조치사항들의 수에 대한 하부 평가척도를 모두 포함하는 공간적 크기(Euclidean norm)로 설정하고 있다.

$$SC = \sqrt{(\alpha \cdot SIC)^2 + (\beta \cdot SLC)^2 + (\gamma \cdot SSC)^2}$$

여기에서, α, β, γ 및 SIC, SLC, SSC에 대한 의미는 표 2와 같고, 이들에 대한 계산 방법은 참고문헌 [11]에 자세히 설명되어 있다.

<표 2. 단계 복잡도 평가척도에 포함된 하부 평가척도 및 상대적 중요도>

항목	의미
SIC (Step Information Complexity)	주어진 단계를 수행하기 위해 운전원이 감시해야 하는 정보들의 양으로 인해 발생하는 복잡도
SLC (Step Logic Complexity)	단계의 수행 순서로 인해 발생하는 복잡도
SSC (Step Size Complexity)	단계에 포함된 운전원 조치사항들의 수로 인해 발생하는 복잡도
α = 0.38	SC 에 대한 SIC 의 중요도 (SIC 가 단계 복잡도에 미치는 상대적인 중요도)
β = 0.32	SC 에 대한 SLC 의 중요도
γ = 0.30	SC 에 대한 SSC 의 중요도

표 2에서, SIC, SLC 및 SSC는 비상운전절차서에 포함된 각 단계들의 분석을 통해 얻을 수 있고, SIC, SLC 및 SSC가 단계 복잡도에 미치는 상대적인 영향을 의미하는 α, β 및 γ의 중요도 인자 값은 발전소 운전경험이 풍부한 전문가들의 의견을 AHP (Analytic Hierarchy Process) 방법으로 분석하여 얻어진 값(0.38, 0.32 및 0.30)이 제시되었다.

III. 단계 복잡도 평가 척도의 적합성 검증

단계 복잡도 평가 척도의 적합성을 검증하기 위해 고려될 필요가 있는 항목들은 다음과 같이 생각할 수 있다.

- 단계 복잡도 평가척도로 예측된 값에 비례하여 운전원 직무부하가 증가하는가?
- 단계 복잡도 평가 척도에 포함되어 있는 중요도 인자 값은 적합한가?

이를 위해, 본 연구에서는 영광 훈련센터에서 운전원들의 교육을 목적으로 실시하는 비상운전 실습훈련을 비디오 테이프에 녹화한 후, 이들을 분석하여 비상운전절차서에 포함된 각 단계의 평균 수행시간 자료를 얻었다. 자료의 취득은 2000 년 1 월부터 6 월 사이에 수행된 실습훈련을 대상으로 하였고, 이때의 훈련 시나리오는 냉각재 상실사고(loss of coolant accident; LOCA) 및 증기과잉방출사고(excess steam dump event; ESDE)로서 각각 18 회씩 수행되었으며

이들이 모두 비디오로 녹화되었다. 녹화된 자료들의 분석을 통해, LOCA 절차서에 포함된 17 개 단계 및 ESDE 절차서에 포함된 15 개 단계에 대한 평균 수행시간을 얻을 수 있었다. 또한 원자로가 트립되어 비상운전절차서에 진입하면 LOCA 나 ESDE 와 같은 구체적인 절차를 수행하기 전에 반드시 "원자로 트립 후 우선조치 (Standard Post Trip Action; SPTA)" 절차를 수행해야 하기 때문에, 비디오 분석을 통해 원자로가 트립된 후 LOCA 나 ESDE 절차에 진입하기 전에 수행된 SPTA 단계의 평균 수행시간을 얻을 수 있었다. 표 3 은 분석을 통해 얻어진 각 단계들에 대한 단계 복잡도 값 및 평균 수행시간을 정리하여 보여준다.

< 표 3. 비상운전절차서에 포함되어 있는 단계들에 대한 단계 복잡도 값 및 평균 수행시간 >

ESDE 절차서			LOCA 절차서			SPTA 절차서		
Step	SC[1)]	Time[2)]	Step	SC[1)]	Time[2)]	Step	SC[1)]	Time[2)]
ESDE-1	1.0300	13.10	LOCA-1	1.0300	9.00	SPTA-1	1.0601	16.61
ESDE-2	1.0300	11.40	LOCA-2	1.0300	8.00	SPTA-2	1.2470	10.46
ESDE-3	1.0300	3.36	LOCA-3	1.0300	6.29	SPTA-3	1.3300	18.35
ESDE-4	1.5071	18.33	LOCA-4	1.0300	6.75	SPTA-4	1.4060	13.33
ESDE-5	1.5214	27.60	LOCA-5	1.3811	21.40	SPTA-5	1.5920	22.13
ESDE-6	1.5214	10.00	LOCA-6	1.4852	18.25	SPTA-6	1.6550	20.20
ESDE-7	1.6150	24.00	LOCA-7	1.5071	31.50	SPTA-7	1.7220	32.64
ESDE-8	1.6810	23.33	LOCA-8	1.5214	16.67	SPTA-8	2.0943	42.72
ESDE-9	1.6948	45.25	LOCA-9	1.5214	37.83	SPTA-9	2.2063	59.31
ESDE-10	1.7894	35.60	LOCA-10	1.5214	12.00	SPTA-10	2.2381	62.62
ESDE-11	1.8175	40.38	LOCA-11	1.6150	38.36	SPTA-11	2.3570	75.86
ESDE-12	1.9096	42.50	LOCA-12	1.6948	20.00			
ESDE-13	1.9408	61.13	LOCA-13	1.6948	42.00			
ESDE-14	2.1582	63.43	LOCA-14	1.8175	24.20			
ESDE-15	2.1906	60.50	LOCA-15	1.9096	40.55			
			LOCA-16	1.9135	55.33			
			LOCA-17	2.8570	121.67			

1) 단계 복잡도 값을 계산하기 위해 사용된 중요도 값은 α = 0.38, β = 0.32 및 γ = 0.3 이다.
2) 각 단계에 대한 평균 수행시간을 의미하고, 단위는 sec 이다.

III. 1. 단계 복잡도로 예측된 값과 평균 단계 수행시간 비교

이미 잘 알려진 바와 같이, 운전원들이 복잡한 직무나 어려운 직무를 수행할 때는 상대적으로 높은 직무 부하로 인해 직무수행 시간이 증가하게 된다. 따라서 각 절차서에 포함된 단계들에 대해 예측된 단계 복잡도 값에 비례하여 운전원의 평균 단계 수행시간이 증가한다면 단계 복잡도 평가 척도의 적합성이 증명될 수 있을 것이다. 이를 위해, 표 3 에 정리된 자료들에 대한 회귀분석이 수행되었고 그림 1 은 그 결과를 보여준다.

그림 1 에서 볼 수 있는 바와 같이, 단계 복잡도 값이 증가함에 따라 평균 수행시간도 뚜렷하게 증가하는 경향을 보이고 있다 (R = 0.904). 또한 분산분석(analysis of variance; ANOVA)을 수행한 결과, 단계 복잡도로 예측된 값은 평균 수행시간에 대해 통계적으로 충분한 의미를 가지고 있었다 ($F_{0.01}(1, 41) = 7.269 < F(1, 41) = 183.34$). 이러한 결과를 놓고 볼 때, 단계 복잡도로 예측된 값은 운전원의 평균 수행시간 변화를 잘 설명할 수 있기 때문에, 단계

복잡도 평가척도는 비상운전절차서에 포함된 단계의 복잡도를 적절히 나타낼 수 있는 척도라고 판단된다.

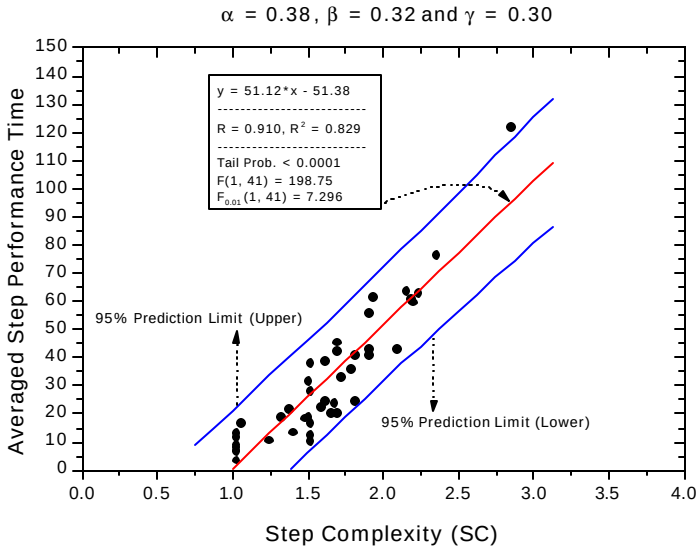

그림 1. 단계 복잡도에 대한 평균 수행시간의 회귀분석 결과

III. 2. 단계 복잡도에 사용된 중요도 인자의 적합성 평가

앞에서 설명한 바와 같이, 단계 복잡도는 주어진 단계에 대한 SIC, SLC 및 SSC 값을 얻은 후 각각에 대한 중요도 인자인 α, β 및 γ 값을 곱하여 계산하게 된다. 따라서 단계 복잡도의 계산시 SIC, SLC 및 SSC 에 대한 중요도 인자의 값에 따라 단계 복잡도의 결과 값이 영향을 받을 수 있기 때문에 평가척도의 적합성을 검증하기 위해서는 이러한 중요도 인자의 적합성이 반드시 고려되어야 한다.

기존의 연구에서는 AHP (Analytical Hierarchy Process) 방법을 사용하여 가중치를 결정하였다 [11]. 가중치 결정에 사용된 AHP 방법은 여러명의 평가자들에 의해 수행되는 다기준 결정(multi-criteria decision making)에 있어서 각 기준에 대한 상대적인 중요도를 결정하기위해 제안된 방법으로, 공학 전반 및 경영학 분야에서 자주 사용되는 방법들 중 하나이다 [19]. 또한 중요도 결정에 참가한 평가자들은 모두 주제어실 운전경험이 10 년 이상이고 SRO 자격을 가진 전문가들로 구성되어 있었고, 이들에 의해 결정된 중요도 인자의 값은 $\alpha = 0.38$, $\beta = 0.32$ 및 $\gamma = 0.3$ 이었다.

그러나 전문가들의 경험에 의한 중요도 결정은, 비록 많은 운전경험을 바탕으로 결정한 것이라 할 지라도, 실제 운전원들이 느끼는 것과 차이가 있을 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 전문가들에 의해 결정된 중요도 인자 값의 적합성을 검증하기 위해 표 3 의 단계들에 대한 SIC, SLC 및 SSC 값을 사용하여 non-linear curve fitting 을 수행하였다. 표 4 는 이러한 분석의 결과를 보여주고, 그림 2 는 새롭게 결정된 중요도 인자를 사용하여 계산된 단계 복잡도 및 평균 단계 수행시간과의 회귀 분석결과를 보여준다.

< 표 4. Non-linear curve fitting 결과 >

Fitting equation: $\text{Averaged Time} = p_1 \cdot \sqrt{(p_2 \cdot SIC)^2 + (p_3 \cdot SLC)^2 + (p_4 \cdot SSC)^2} + p_5$				
Parameter	Value	New α, β and γ	Old α, β and γ (from AHP)	% of Difference
P_1	50.3	-	-	-
P_2	-48.4	-	-	-
P_2	0.27	0.27	0.38	30%
P_3	0.29	0.29	0.32	10%
P_4	0.44	0.44	0.30	48%
χ^2 for fitting equation = 91.80				

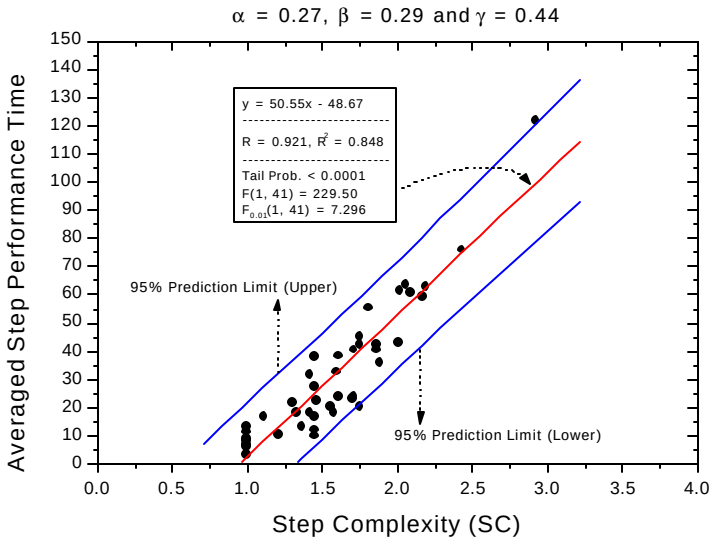

그림 2. 새로 얻어진 중요도 값을 사용한 단계 복잡도 및 평균 단계 수행시간의 회귀분석 결과

표 4 에서 볼 수 있는 바와 같이, 단계 평균 수행시간을 사용하여 얻어진 값들은 전문가들의 판단에 의해 결정된 중요도 값들에 비해 SLC 에 대한 부분을 제외하고는 비교적 큰 차이를 보이고 있다. 즉, 전문가들은 SIC (즉 단계를 수행하기 위해 운전원이 감시해야 하는 정보의 양으로 인한 복잡도)가 단계 복잡도에 가장 큰 영향을 미친다고 판단한 반면 실제로 수집된 단계 수행시간을 사용할 경우 단계 복잡도에 가장 큰 영향을 미치는 것은 SSC (즉 단계에 포함된 운전원 조치사항들의 수로 인한 복잡도)로 분석되었다. 또한 그림 2 에서 볼 수 있는 바와 같이 새롭게 결정된 중요도 인자를 사용할 경우 보다 단계 복잡도 및 단계 평균 수행시간에 대해 개선된 회귀분석 결과를 얻을 수 있었다 (R^2 = 0.829, F(1, 41) = 198.75 → R^2 = 0.848, F(1, 41) = 229.5).

IV. 토의 및 결론

지금까지 살펴본 바와 같이, 기존에 제안된 비상운전절차서에 포함된 단계들의 복잡도를 평가하기 위한 단계 복잡도(SC) 평가척도의 적합성을 확인하기 위해, 운전원들의 실습훈련을

비디오로 녹화/분석하여 단계별 평균 수행시간을 얻은 후 이들을 사용하여 단계 복잡도 평가척도의 적절성 및 단계 복잡도에 포함되는 하부 평가척도들에 대한 중요도 인자 값의 적절성을 평가하였다.

평가 결과, 단계 복잡도로 예측된 값은 운전원의 평균 수행시간 변화를 충분히 설명할 수 있기 때문에 단계 복잡도 평가척도는 비상운전절차서에 포함된 단계의 복잡도를 적절히 나타낼 수 있는 척도라고 판단된다. 따라서 제안된 단계 복잡도 평가척도는 비상운전절차서의 복잡도를 평가하고 검증하는 정량적인 분석 방법으로 사용될 수 있다고 판단된다.

그러나 단계 복잡도 평가척도에 포함되는 하부 평가척도들의 중요도 인자에 대해서는 전문가들이 결정한 값과 단계별 평균 수행시간 자료를 통해 얻어진 값들이 비교적 큰 차이를 보이고 있었다. 즉 전문가들의 입장에서는 단계 복잡도에 가장 큰 영향을 미치는 인자로서 단계를 수행하기 위해 운전원이 감시해야 하는 정보들로 인한 복잡도를 지적한 반면, 실제로 수집된 평균 단계 수행시간 자료에 의하면 단계 복잡도에 가장 큰 영향을 미치는 것은 단계에 포함된 운전원 조치사항들의 수로 인한 복잡도로 분석되었기 때문이다. 그러나 단계 복잡도와 비교된 것이 평균 단계 수행시간이라는 점을 고려해 볼 때, 전문가들의 판단이 부적절하다는 결론을 내리기는 아직 어렵다고 생각된다.

기존의 연구 결과에 의하면 동일한 직무에 대한 직무 난이도에 대해 운전경험이 많은 전문가와 실제로 현장에서 운전을 수행하는 운전원의 입장이 약간 차이가 난다는 것이 알려졌다 [20]. 이는 전문가의 입장에서는 인지적인 작업 (예를 들어 고장난 증기발생기의 판단이나 일차측 냉각 등)이 많을수록 어려운 직무라고 생각하는 반면 운전원의 입장에서는 실제로 수행해야 하는 조치사항들의 수가 많을수록 어려운 직무라고 생각하기 때문이다 (예를 들어 손상된 증기발생기의 격리나 가압기 수위 회복 등). 따라서 전문가들의 입장에서는 보다 인지적인 항목인 SIC 나 SLC 를 좀 더 중요하게 고려한 반면 실제로 수집된 평균 단계 수행시간 자료는 운전원이 실제로 수행해야 하는 조치사항들이 모두 완료하는데 걸리는 시간을 측정하였기 때문에 표 4 에 보여진 것과 같은 차이가 발생했다고 생각할 수 있다.

따라서 단계 복잡도 평가척도를 사용하는 목적에 따라 서로 다른 중요도 인자 값을 사용해야 하는지 또는 중요도 인자 값의 차이를 보정할 수 있는 새로운 방법이 적용되어야 하는지에 대한 고려가 앞으로 연구되어야 할 부분이라고 판단된다.

감사의 글

이 논문은 대한민국 과학기술부에서 시행하는 원자력연구개발 중장기사업의 지원으로 수행되었습니다. Simulator 자료 수집에 적극적으로 지원해 주신 전력연구원과 영광 훈련센터에 감사드립니다.

참고 문헌

[1] Sato M and Tani M. Human factors considerations related to design and evaluation of PWR plant main control boards. In: Proceedings of an International Symposium on

Balancing Automation and Human Action in Nuclear Plants. Munich, July 1990. p. 369-376.

[2] Mitchell K and Fewins A. Balancing automation and human action through task analysis. In: Proceedings of an International Symposium on Balancing Automation and Human Action in Nuclear Plants, Munich, July 1990. p. 439-448.

[3] Sun B, *et al*. Human factored control room operator evaluation of an automated emergency operating procedure expert system. In: Proceedings of an International Symposium on Balancing Automation and Human Action in Nuclear Plants, Munich, July 1990. p. 507-515.

[4] USNRC. Human factors engineering program review model. NUREG/CR-0711. Washington, D.C. July 1994.

[5] Nuclear Energy Agency. Research strategies for human performance. NEA/CSNI/R(97)24, March 1998.

[6] Joos DW *et al*. Analysis of Gross Error Rates in Operation of Commercial Nuclear Power Stations. Nuclear Engineering and Design 1979;52. p. 265-300.

[7] Goodman PC and Dipalo CA. Human factors information system: tools to assess error related to human performance in U.S. nuclear power plant. In: Proceedings on Human Factors Society 35th Annular Meeting. San Francisco, October 1991. p. 662-665.

[8] USNRC. Guidelines for the preparation of emergency operating procedures. NUREG/CR-0899. Washington, D.C. August 1982.

[9] USNRC. Evaluation of emergency operating procedures for nuclear power plants. NUREG/CR-1875. Washington, D.C. 1981.

[10] USNRC. Checklist for evaluating emergency operating procedure used in nuclear power plants. NUREG/CR-2005, Washington, D.C. 1983.

[11] 박진균, 정원대, 김재환, 하재주. 엔트로피 개념을 사용한 비상운전절차서의 절차단계 복잡도 평가에 관한 연구. 한국원자력학회 춘계학술발표회, 한전원자력교육원, May 2000.

[12] Long AB. Computerized operator decision aids. Nuclear Safety 1984;25(4). p. 512-524.

[13] ABB-CE. Operating experience review for system 80+ MMI design. MPX80-IC-RR7-01, Revision 00. February 1992.

[14] Macwan A and Mosleh A. A methodology for modeling operator errors of commission in probabilistic risk assessment. Reliability Engineering and System Safety 1994;45. p. 139-157.

[15] USNRC. Lessons learned from the specific inspection program for emergency operating procedures. NRC information Notices 92-76. Washington D.C. November 1992.

[16] USNRC. Deficiencies in upgrading programs for plant emergency operating. NRC information Notices 86-64. Washington D.C. November 1987.

[17] Degani A and Wiener EL. Cockpit checklists: concepts, design and use. Human Factors 1993;35(2). p. 345-359.

[18] Peng CC and Hwang SL. The design of an emergency operating procedure in process control systems: a case study of a refrigeration system in an ammonia plants. Ergonomics 1994;37(4). p. 689-702.

[19] Saaty TL. The analytic hierarchy process. New York, McGraw-Hill. 1980.

[20] Anne E., Ola S. and Erik H. Difficulty and safety during the management of a severe incident management sequence. In: Proceedings of the Tenth European Conference on Cognitive Ergonomics. Sweden, August 2000, p.68-76.