

## 정량적 인적오류 분석에서 수행도형성인자를 고려하기 위한 방법

### A Method for Considering Performance Shaping Factors in Quantitative Human Error Analysis

정 광 태\*

Kwang-Tae Jung

(1996년 8월 6일 접수, 1997년 3월 28일 채택)

#### ABSTRACT

Human reliability attempts to make precise quantitative analyses and predictions of the performance of human-machine(or product) systems. In order to yield more precise human error analysis, precise human error probabilities(HEPs) must be used in the analysis. However, because human behavior is influenced by factors that are called performance shaping factors(PSFs), the effects of PSFs must be considered to obtain precise HEPs. These are called basic HEPs or situation-specific HEPs.

This paper presents a theoretical method for obtaining basic HEPs (i.e., considering PSFs) in quantitative human error analysis. In this method, the weight which characterizes the degree of importance of several PSFs is obtained by the analytic hierarchy process. The quality scores of PSFs in the task situation are obtained by percentile concept. These scores are used in conjunction with the relative importance weights of PSFs to compute the composite quality percentile score of PSFs in the task situation. Then, a new mapping method of the composite quality percentile score of PSFs into a situation-specific basic HEP is proposed with a numerical example.

#### 1. 서 론

인적오류는 많은 대형 사고의 주원인이다<sup>8)</sup>. 이러한 사실은 여러 분야에서의 사고에 대한 분석결

과로부터 알 수 있는데, TMI(Three Mile Island, 1979), 체르노빌(1986) 원전에서의 사고 등이 대표적인 예들이다. 1987년 미국 상업원전에서의 사고에 대한 NRC(Nuclear Regulatory Committee)의

\* 한국기술교육대학교 산업디자인공학과

분석결과를 보면 인적오류에 기인한 사고가 전체 사고의 65% 정도를 차지하였다<sup>1)</sup>. 그리고 Rouse & Rouse<sup>9)</sup>는 항공, 전력생산 및 공정작업에서 인적오류는 모든 주요 사고의 60%에서 90%의 원인을 제공한다고 하였고, Dhillon<sup>3)</sup>은 항공시스템 고장의 50%에서 60%, 미사일 시스템 고장의 20%에서 53%가 인적오류에 의하여 유발된다고 하였다. 이외에도 여러 연구자들이 주요사고의 상당비율이 인적오류에 기인한다고 주장한 바 있고, 국내에서도 여러 사고에 대한 정확한 분석결과는 없지만 사고의 상당부분이 인적오류에 의하여 발생되었으리라 추정된다<sup>1)</sup>.

따라서, 시스템의 안전한 운영을 위하여 작업수행시 인적오류의 발생 가능성을 줄이는 것이 필요하고, 이러한 목적을 달성하기 위해서는 분석작업에 대한 정확한 인적오류분석이 필요하다. 또한, 인적오류 분석은 시스템의 안전성 평가에서 뿐만 아니라 제품 설계의 사용성(usability) 및 안전성(safety) 평가에서도 중요한 과정이다. 제품 사용과정 중에 사용자가 많은 오류를 범한다는 것은 그만큼 나쁘게 설계된 것이고, 제품 사용중에 많은 안전 사고를 유발할 수 있기 때문이다.

하지만, 정량적 인적오류분석에서 부딪히는 가장 큰 어려움은 분석될 작업에 대한 자료가 부족하다는 것이다<sup>8,11)</sup>. 이러한 문제를 극복하기 위한 가장 일반적인 방법은 Swain & Guttman<sup>11)</sup>에 의하여 정리된 인적오류 자료은행(human error data bank)의 자료를 사용하는 것이다<sup>2)</sup>. 하지만, 자료은행에 열거된 자료는 작업상황이 고려되지 않은 명목 HEP(nominal HEP)인데 인간의 행위는 작업상황을 특징짓는 여러 요인들(이들 요인들을 수행도 형성 인자라고 한다)의 영향을 받기 때문에, 분석에 사용할 오류데이터에 이들 요인들의 영향을 고려하여야 한다. 이와 같이 수행도 형성 인자(performance shaping factors; PSFs)가 고려된 HEP를 기본 HEP(basic HEP)라고 하고, 이들은 THERP(Technique for Human Error Rate Prediction)와 같은 기법을 이용한 정량적 인적오류 분석에서의 기본적인 자료이다<sup>11)</sup>.

하지만, 이러한 필요성에도 불구하고 정량적 인적오류분석에서 기본 HEP를 사용하는 문제, 즉 분석에 사용될 HEP에 PSF의 영향을 고려하는 문제는 상대적으로 무시되어 왔다. 이것의 주요한

이유중의 하나는 기본 HEP를 구하기 위한 적당한 방법이 없다는 것이다. 따라서, 본 연구에서는 정량적 인적오류 분석에서 기본적인 입력자료로 사용되는 기본 HEP를 구하기 위한 방법, 즉 작업상황을 고려한 HEP를 구하기 위한 방법을 제시하고자 한다.

### 1.1 정량적 인적오류 분석 (Quantitative Human Error Analysis)

인적오류 분석은 크게 정성적 분석과 정량적 분석으로 구분할 수 있다. 정성적 분석에서는 인적오류의 분류, 원인의 규명, 대응방안 수립 등의 분석을 수행하게 되고, 정량적 분석에서는 특정 작업에서의 인적오류 발생확률을 구하는 문제를 다루게 된다.

특정 작업에 대한 정량적 인적오류분석은 보통 Fig. 1의 절차를 통하여 수행된다<sup>11)</sup>.

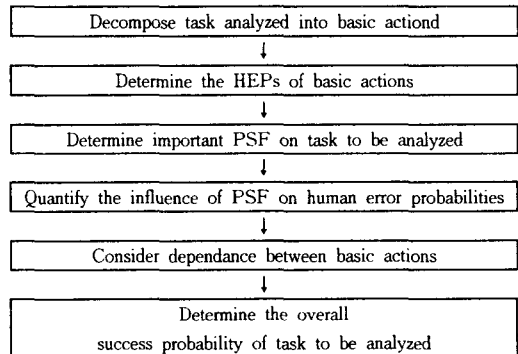


Fig. 1 Procedure of quantitative human error analysis

본 연구에서 다루는 내용은 세 번째와 네 번째 절차에 해당하는 문제이다. 위에 언급한 절차를 보면 인적오류분석에서 사용되는 세가지의 중요한 HEP가 있는데, 그것은 명목 HEP, 기본 HEP, 조건부 HEP이다. 두 번째 단계에서 결정되는 기본행위의 HEP는 보통 인적오류 자료은행을 이용하여 결정되는데, 이 단계에서의 HEP는 작업상황이 고려되지 않은 명목 HEP이다<sup>11)</sup>. 그리고, 네 번째 단계에서 결정되는 기본 HEP는 PSF의 효과는 고려되었지만, 행위 사이의 종속성은 고려되지 않은 HEP이다. 다섯 번째 단계에서 결정되는 조건부 HEP는 기본 HEP에 행위사이의 종속성

지 고려한 HEP이다<sup>8,11)</sup>. 분석에서 최종적으로 사용되는 HEP는 조건부 HEP이다.

Swain & Guttman<sup>11)</sup>은 행위사이의 종속성에 따라 기본 HEP로부터 조건부 HEP를 구하기 위한 명확한 방법을 제시하였지만, 명목 HEP로부터 기본 HEP를 구하기 위한 방법에 대해서는 개념만 언급하였다. 따라서, 본 연구에서는 정량적 인적오류분석의 전체적 과정을 지원하기 위하여 Swain & Guttman<sup>11)</sup>이 언급한 개념에 근거한 기본 HEP를 구하는 방법을 제시하였다.

### 1.2 PSF에 관한 이전의 연구

인간의 행위는 일반적으로 많은 요인들, 예를 들어, 육체적, 심리적, 생리적, 환경적 요인 등에 의하여 영향을 받는데, 이들 요인들을 PSF라 부른다. PSF는 Swain & Guttman<sup>11)</sup>에 의하여 처음으로 구체화되고 체계적으로 분류되었는데, Gertman & Blackman<sup>6)</sup>는 작업수행의 성공여부에 영향을 주는 요인들과 그들의 적합성 여부를 평가할 수 있는 질문을 Table 1과 같이 정리하였다.

Table 1 Commonly referenced PSF and typical questions addressing their effect on performance<sup>6)</sup>

Performance Shaping Factors	Definition
Operator experience	What characterizes the experience of the crew?
Time to perform	How much time is required to perform the task?
Time available	During what period is performance of the task relevant or viable?
Stress	What stress is being experienced by the task performer?
Quality of interface	What is the quality of the control and instrumentation? Do they meet basic ergonomic standards? Do they provide the necessary information?
Type of instrument/control	What is the type of instrument or control? Is it a CRT display, a rotary control trackerball, keyboard, switch, etc.?
Feedback to operator action	What type of feedback does the operator receive after a control action? Does the operator know that a valve is closed? If so, how so?
Procedure required	Is a procedure required to be followed by the operator?
Action covered by procedure	Does the procedure cover the action?
Procedure well written	Does the Procedure conform to acceptable procedure writing standards? Is it complex? Are there many branch points? What is the associated reading level?
Procedure understood	Is the procedure understood by the operator? What is the level of cognitive behavior required by the procedure?
Procedure practiced	Is the procedure practiced by the staff?
Recovery actions	Are any actions possible that would aid in the operator recovering from an error, i.e., a second independent check on his or her work, an alarm?
Tasks dynamic aspects	Is the task performed concurrently with other tasks or is it performed independently, step by step?
Task dependency	Does the correct performance of this task depend on the performance of another task? On other individuals?
Tagging	Is tagging involved in performance of the task?
Local versus remote control	Is the task performance in the control room or locally, at a valve perhaps?
Clothing/tools required	What special tools, equipment, or clothing are required to complete the task and are they available and ready for use?
Environment	What parameters, such as temperature, radiation level, etc., may affect performance?

이들 PSF가 인적오류의 발생에 중요한 영향을 준다는 사실은 여러 연구자들이 주장하였다. 특히, Swain & Guttman<sup>11)</sup>은 PSF가 HEP의 주요한 결정자들이기 때문에, 인적오류 분석에서 반드시

고려되어야 한다고 주장하였다. 그리고, Dhillon<sup>3)</sup>은 인적오류 발생의 몇가지 이유로서 작업분야에서의 부적당한 조명, 관련된 인력의 부적당한 훈련이나 기술, 잘못된 장비설계, 작업장에

서의 높은 소음수준, 부적당한 작업배치, 동기결여, 부적절한 도구, 작업복감성 등 부적절하게 설계된 PSF들을 언급하였다.

이러한 개념에 의하여 여러 연구자들이 인적오류의 연구에서 PSF를 사용하였는데, 특히, Embrey, et al.<sup>4)</sup>는 이 개념을 사용하여 SLIM (Success Likelihood Index Method)을 제안하였다. SLIM은 PSF를 이용하여 인적오류확률을 추정하기 위한 방법으로, 기본 가정은 어떤 작업의 성공가능성은 환경, 현재의 연습이나 기술의 상태, 그리고 시간 제한과 같은 PSF 집단의 결합된 영향에 의존한다는 것이다. SLIM은 주관적 점수를 객관적 HEP로 변환하기 위하여 오류확률이 알려진 두 작업을 요하고, 또한 변환된 값이 1.0을 넘을 수 있다는 단점이 있다.

Gertman, et al.<sup>5)</sup>은 PSF의 개념을 사용함으로써 의사결정 오류에 관한 확률들을 추정하는 방법을 제안했다. 그들은 의사결정 오류 확률들이 대수정규분포를 따른다는 가정을 이용하였다. 그리고, Lin, et al.<sup>7)</sup>은 원전의 비상상태하에서 인적오류를 정량화하기 위한 대수선형 모형을 제안했다. 이 모형에서는 중요한 PSF가 독립변수로 활용되는데, 이 모형은 오류확률의 추정뿐 아니라 인적오류의 발생을 이끄는 요인들을 발견하기 위한 근거도 제공한다.

Zimolong<sup>12)</sup>은 기존에 개발된 HEPs를 추정하기 위한 세가지 기법: SLIM, THERP, Ranking Method들의 우수성을 실험적으로 비교하기 위하여 몇 개의 PSF를 사용하였다. 즉, PSF를 독립변수로 활용하여 PSF의 각 조건에서 어떠한 기법을 사용할 때 더 정확한 오류확률을 추정할 수 있는지를 평가하였다.

이외에도 여러 연구자들이 인적오류분석에서 PSF의 개념을 도입하였고, 인적오류분석에서 PSF의 중요성이 입증되었다.

## 2. 분석계층기법에 의한 PSF의 중요도 평가

### 2.1 기본개념

특정 작업의 수행에 있어 PSF의 중요성을 평가하는 문제는 인적오류 연구에 있어 중요한 문제중의 하나이다<sup>6,11)</sup>. PSF의 중요도를 파악하는 것은

시스템 설계의 단계에서, 그리고 인적오류 분석의 단계에서 모두 중요하다.

시스템 설계의 입장에서 본다면, 시스템 설계자는 PSF의 중요도를 고려하여 시스템을 설계함으로써 시스템의 성능을 높일 수 있다. 예를들어 특정 작업의 수행에 중요한 요인이 부적절하게 설계된다면 시스템에서 인간수행도(human performance)는 나빠질 것이다. 따라서, 해당 작업의 수행에 중요한 요인들 부터 시스템 설계단계에서 최적화하도록 노력한다면 시스템의 성능은 높아질 것이다<sup>6)</sup>.

인적오류 분석의 입장에서 본다면, PSF의 중요도는 정성적 분석과 정량적 분석 모두에서 중요한 자료로 활용된다. 정성적 분석에서 특정 작업의 수행에 대한 오류율이 높다면, 먼저 작업의 수행에 중요한 요인들 부터 조사를 행한다면 효과적으로 오류의 원인을 발견할 수 있을 것이다<sup>6)</sup>.

정량적 분석에서 PSF의 중요도는 SLIM<sup>4)</sup>과 같은 전문가 판단을 이용한 HEP의 추정에서 중요한 입력자료로 활용된다. 사실, 아직까지의 정량적 인적오류 분석 방법에서는 PSF의 영향을 효과적으로 고려하지 못하였다. 그것은 PSF의 중요도를 구하는 것의 어려움 때문이었다<sup>6)</sup>.

따라서, 본 연구에서는 PSF가 분석 작업의 수행에 얼마나 많은 영향을 주는지에 대한 상대적 중요도를 효과적으로 구하기 위하여 분석계층기법 (Analytic Hierarchy Process; AHP)를 적용하였다. AHP는 인간의 상대판단을 이용한 의사결정 방법으로, PSF의 중요도를 구하는 문제와 같이 평가자체가 모호한 문제에는 SLIM<sup>4)</sup>에서 사용된 절대평가의 방법보다 효과적이다.

AHP에서 각 요인들의 상대적 중요성에 대한 쌍대비교(pairwise comparison)에서 사용된 척도는 Table 2와 같다.

### 2.2 실제문제에의 적용

본 연구에서는 원전의 정상운전 중에 한계표시(limit mark)가 없는 “아날로그 미터의 check-reading 작업”에 대한 PSF의 상대적 중요도 가중치를 구하기 위하여 AHP를 적용하였다. Check-reading은 특정한 목적을 위하여 단순히 아날로그 미터의 지침이 허용한계 내에 있는지를 체크하는 것이다. 여기서 구한 중요도 가중치는 이 작업의

Table 2 Scale used in pairwise comparison

Intensity of importance	Definition
1	Factor i and factor j are equally important.
3	Factor i weakly more important than factor j.
5	Factor i strongly more important than factor j.
7	Factor i is demonstrably or very strongly more important than factor j.
9	Factor i is absolutely more important than factor j.
2, 4, 6, 8	Intermediate values between adjacent scale values
Reciprocal of above nonzero	If factor i has one of the above nonzero numbers assigned to it when compared with factor j, then j has the reciprocal value when compared with i.

Table 3 Comparison matrix of PSF on "the check-reading of analog meter"

i \ j	interface factor	task criticality	task load	task speed	fatigue	experience
interface factor	1	1/3	3	1/3	3	2
task criticality	3	1	5	1	5	5
task load	1/3	1/5	1	1/5	1/2	1/2
task speed	3	1	5	1	7	5
fatigue	1/3	1/5	2	1/7	1	1/2
experience	1/2	1/5	2	1/5	2	1

작위오류(commission error)에 대한 기본 HEP를 구하기 위하여 사용된다.

"아날로그 미터의 check-reading 작업"에서의 중요한 PSF의 선정과 중요도 평가는 이 작업을 잘 이해하고 있는 한 명의 평가자에 의하여 수행되었다. 이 작업의 수행에 중요한 영향을 주는 PSF들로 인터페이스 요인(interface factor), 직무위급도(task criticality), 작업부하(task load) 또는 스트레스(stress), 작업속도(task speed), 피로(fatigue), 경험(experience)을 선정하였는데, 이것은 평가자의 전문적 지식에 근거한 것이다.

Table 3은 "아날로그 미터의 check-reading 작업"의 수행에 대한 PSF의 상대적 중요도를 평가한 쌍대비교행렬이다. 행렬의 각 원소는 j번째 PSF의 중요성에 대한 i번째 PSF의 상대적 중요

성의 평가 결과이다. 이후의 일련의 계산과정은 Visual Basic으로 작성된 프로그램을 통하여 수행되었는데, 그 결과는 Table 4와 같다.

Table 4 Importance weights of selected PSFs

PSFs	Interface factor	Task criticality	Task load	Task speed	Fatigue	Experience
weight	0.137	0.329	0.049	0.347	0.058	0.081

C. I. = 0.0312

평가결과로부터 "아날로그 미터의 check-reading 작업"에서 작업속도와 직무위급도가 중요한 요인으로 취급되는 것을 알 수 있다. 이러한 사실은 기본 HEP를 구하는 문제외에도 시스템 및 작업을 설계하는 과정에서 중요한 결과로 사용될 수 있다. 즉, 중요한 요인들을 가능한 더 최적화하도록 시스템을 설계해야 할 것이다. 평가결과와 일관성지수(consistency index; C. I.)는 0.0312로서 0.1보다 작으므로 평가자의 결과는 일관성을 유지하고 있음을 알 수 있다.

### 3. PSF 점수에 의한 HEP의 수정

#### 3.1 기본개념

인적오류 자료은행에 열거된 인적오류 자료들은 사실 특정 분야에서 구한 정확한 자료가 아니라, 여러 산업분야, 전문가의 판단, 외삽법(extrapolation) 등에 의하여 구한 것이다<sup>8,11)</sup>. 따라서 각각의 HEP에는 HEP가 구해진 작업상황의 차이, 추정의 부정확성 등에 의한 상당한 불확실성이 포함되어 있는데, 이런 문제를 해결하기 위하여 각 HEP에 대한 분포를 가정하였다. Swain & Guttmann<sup>11)</sup>은 HEPs의 분포로 대수정규분포(lognormal distribution)를 제안했다.

대수정규 분포는 일반적인 인간수행도 자료의 특성을 가장 잘 나타내고, 계산적으로 단순하다는 장점을 가지고 있다. 그리고, 높은 기술수준을 요하는 작업에서 작업자가 오류를 범할 확률을 아주 작기 때문에 HEP도 작은 값 근처에 몰려있게 되는데, 이러한 특성을 가장 잘 반영하는 분포가 대수정규 분포이다<sup>5,11)</sup>.

분포에서의 산포는 중앙치(median)에 대한 불확실성 한계(uncertainty bounds, UCBs)에 의하여 결정된다. UCBs에서 하한은 대수정규 분포에서

HEP의 5백분위수를 나타내고, 상한은 95백분위수를 나타낸다. 대수정규 분포의 중앙치는 작업상황이 고려되지 않은 HEP로, 평균적인 산업조건에서 구한 HEP이다<sup>11)</sup>.

따라서, 하한 UCB는 최상의 작업상황(모든 가능한 PSF가 최적인 경우)에서의 HEP에 대응하고, 상한 UCB는 최악의 작업상황(모든 PSF가 심각하게 부적절한 경우)에서의 HEP에 대응한다<sup>5)</sup>. 이 개념에 근거하여 본 연구에서는 기본 HEP를 구하기 위한 이론적인 방법을 제시하였다.

### 3.2 수정방법론

본 절에서는 PSF 점수에 의하여 기본 HEP를 구할 수 있는 이론적 방법을 제시한다. 기본 HEP는 통합품질 백분위수 점수에 의하여 변환되는데, 통합 품질 백분위수 점수는 각 PSF의 점수를 PSF의 상대적 중요도에 의하여 가중평균함으로써 구해진다. 그리고 각 PSF의 품질 점수를 구하기 위하여 백분위수의 개념을 적용한다.

본 절에서 사용되는 기호는 다음과 같다.

**[기 호]**

- HEP<sub>basic</sub> : 기본 인적오류확률
- P : HEP, 확률변수,
- n : 분석에서 선정된 PSF의 수,
- w<sub>i</sub> : i번째 PSF의 상대적 중요도 가중치(i=1, 2, ..., n),
- %<sub>i</sub> : i번째 PSF의 품질 백분위수 점수(0 ≤ %<sub>i</sub> ≤ 100)(i=1, 2, ..., n),
- % : 통합품질 백분위수 점수,
- UB : HEP의 불확실성의 상한(95%점),
- LB : HEP의 불확실성의 하한(5%점),
- μ : lnP의 평균,
- σ : lnP의 표준편차.

PSF의 통합품질 백분위수 점수에 의하여 기본 HEP를 구하기 위한 대응 규칙(mapping rule)의 기본적 개념은 특정한 작업상황에서 어떤 PSF의 품질이 나빠질수록, 작업의 HEP는 더 높아진다는 것이다<sup>5,11)</sup>.

PSF의 ‘품질’은 PSF의 조건이 분석될 작업의 수행을 위하여 얼마나 적당하게 설계되었는가를 나타낸다. PSF의 조건은 품질 백분위수 점수(quality percentile score)로 나타낸다. 백분위수 점수를 사용하는 이유는 상위 몇 %에 포함될 것인

가를 평가하는 것이 절대적 방법에 의하여 점수를 부여하는 것 보다는 평가자의 부담을 줄일 수 있고 보다 정확한 평가치를 얻을 수 있기 때문이다.

특정한 작업상황에서 i번째 PSF의 품질 백분위수 점수는 i번째 PSF에 대해 더 좋은 품질 수준을 갖는 유사한 상황들의 백분율이다. 작업의 수행에 알맞게 설계된 PSF는 낮은(좋은) 백분위수 점수를 갖는다. 예를 들어, 분석하고자 하는 작업상황에서 “직무위급도”의 품질 백분위수 점수가 15%라면, 그것은 유사한 작업상황들 중 15%만이 분석하고자 하는 작업상황에서의 “직무위급도”보다 더 낮은(더 좋은) 점수를 갖는다는 것을 의미한다. (같은 방법이 어떤 학급에서 우수한 학생의 평가에 대해서 적용된다: 예를 들어, 어떤 학생이 상위 5%로 평가되었다면, 그보다 더 우수한 학생은 학급의 5%가 된다.)

PSF의 상대적 중요도 가중치는 PSF의 품질 백분위수 점수들로부터 통합품질 백분위수 점수를 계산하기 위하여 사용된다. 그러나, 스트레스 또는 작업부하의 경우에 그것은 가장 적당한 조건으로 설계되었다고 가정되므로<sup>11)</sup>, 최적 수준은 50%로 평가된다는 것을 주목해야 한다.

어떤 작업상황에서 PSF의 통합품질 백분위수 점수는

$$\% = \sum_{i=1}^n w_i \cdot \%_i$$

이다.

PSF의 상대적 중요도 가중치들은 구간 [0, 1]에서의 값을 갖고 그들의 합은 1이다. 이들 가중치들은 앞절에서 설명한 것처럼 AHP를 이용하여 효과적으로 구할 수 있다.

PSF의 통합품질 백분위수 점수를 획득한 후에, 기본 HEP는 다음의 수식을 HEP<sub>basic</sub>에 관하여 정리함으로써 구하여지는데, 이 수식은 PSF의 통합품질 백분위수 점수와 HEP와의 관계로부터 유도된 것이다.

$$P \{ P \leq HEP_{basic} \} = \% / 100 \dots\dots\dots (1)$$

즉, 이 수식은 %가 작다면(좋다면) HEP<sub>basic</sub>은 작은 값을 가진다는 사실을 HEP의 분포와 품질점수의 백분위수 개념을 적용하여 표현한 것이다. 여기서, HEP의 확률변수 P는 대수 정규분포를 따르므로, 대수정규분포와 정규분포의 관계로부터 lnP는 정규분포를 따른다.

그러므로, 정규분포를 표준화함으로써,  
 $\Phi \left\{ \frac{\ln(\text{HEP}_{\text{basic}}) - \mu}{\sigma} \right\} = \% / 100 \dots\dots\dots (2)$

여기서,  $\Phi$ 는 표준 정규 누적 분포함수이다. 이 식을  $\text{HEP}_{\text{basic}}$ 에 관하여 정리함으로써  $\text{HEP}_{\text{basic}}$ 는 다음의 식 (3)에 의하여 구해진다.

$$\text{HEP}_{\text{basic}} = \exp[\mu + \sigma \cdot \Phi^{-1}(\% / 100)] \dots\dots\dots (3)$$

만약 확률변수 P의 대수-평균 와 대수-표준편차  $\sigma$ 를 알 수 없다면, 이들은 다음 식 (4)에 의하여 구해진다.

$$\begin{aligned} \mu &= (\ln \text{LB} + \ln \text{UB}) / 2 = \ln \sqrt{\text{LB} \cdot \text{UB}}, \\ \sigma &= (\ln \text{UB} - \ln \text{LB}) / 3.290 = \ln(\text{UB} / \text{LB}) / 3.290 \end{aligned} \dots\dots\dots (4)$$

명목 HEP는 대수 정규분포의 중앙치이므로<sup>11)</sup>,  $\mu$ 는  $\ln \text{HEP}_{\text{basic}}$ 와 같다. 따라서

$$\text{HEP}_{\text{nominal}} = e^{\mu} = \sqrt{\text{LB} \cdot \text{UB}} \dots\dots\dots (5)$$

식 (4)에서 추정된 대수-평균과 대수-표준편차를 식 (3)에 대입함으로써,  $\text{HEP}_{\text{basic}}$ 는 다음 식에 의하여 구해진다.

$$\text{HEP}_{\text{basic}} = \exp[\ln \sqrt{\text{LB} \cdot \text{UB}} + \ln(\text{UB} / \text{LB}) / 3.290 \cdot \Phi^{-1}(\% / 100)] \dots\dots\dots (6)$$

만약 모든 PSF의 품질 백분위수 점수가 50%라면 (즉, 스트레스는 최적이고, 모든 다른 조건들은 평균인 경우),  $\text{HEP}_{\text{basic}}$ 는 명목 HEP와 같아야 한다. 그것은 다음과 같이 증명된다.

모든 PSF 품질 백분위수 점수들이 50%이라면, 통합품질점수는 50%이다. 그때 식 (6)에서  $\Phi^{-1}(\% / 100)$ 는 0이다. 그러므로,

$$\begin{aligned} \text{HEP}_{\text{basic}} &= \exp[\ln \sqrt{\text{LB} \cdot \text{UB}}] \\ &= \sqrt{\text{UB} \cdot \text{LB}} \end{aligned}$$

그런데, 식 (5)에서  $\sqrt{\text{LB} \cdot \text{UB}} = \text{HEP}_{\text{nominal}}$ 이므로  $\text{HEP}_{\text{basic}} = \text{HEP}_{\text{nominal}}$ 을 만족한다.

이상의 대응방법에 근거하여 기본 HEP를 구하는 절차는 다음과 같다.

〈단계 1〉 분석작업에 중요한 영향을 주는 PSF를 결정한다.

〈단계 2〉 선정된 PSF의 상대적 중요도 가중치들을 구한다.

〈단계 3〉 각 PSF의 품질 백분위수 점수를 구한다.

〈단계 4〉 분석될 작업상황에서 PSF의 통합품질 백분위수 점수를 구한다.

〈단계 5〉 대응규칙에 의하여 기본 HEP를 구한다.

### 3.3 적용예

본 연구에서 제안한 방법론을 설명하기 위하여 “아날로그 미터의 check-reading”에 대한 기본 HEP를 구하는 문제에 적용하였다. 분석 작업이 행하여지는 두 개의 작업상황; Plant ‘A’와 Plant ‘B’가 가설적으로 설정되었다.

분석에 사용될 중요 PSF와 각 PSF의 중요도 가중치는 이미 2절에서 전문가의 판단을 통하여 구하였다. 하지만, 실제 작업상황을 다루고 있지 않기 때문에 각 작업상황에서의 PSF의 점수는 가설적으로 설정되었다. Table 5는 그 결과를 제시하고 있다.

Table 5 Derivation of basic HEP

PSFs	Weights	Quality percentile score of Plant ‘A’	Quality percentile score of Plant ‘B’
Interface factor	0.137	20	40
Task criticality	0.329	40	80
Task load	0.049	60 <sup>†</sup>	50 <sup>†</sup>
Task speed	0.347	15	70
Fatigue	0.058	30	20
Experience	0.081	30	10
Composite score		28.2	60.5
basic HEP		0.0024	0.0036

<sup>†</sup>Optimal stress level is 50%.

“아날로그 미터의 check-reading” 작업의 명목 HEP는 인적오류 자료은행으로부터 0.003(불확실성 범위는 0.001—0.009)이다<sup>11)</sup>. 각각의 작업상황에서 PSF의 통합품질 백분위수 점수는 각 PSF의 중요도 가중치와 각 작업상황에서의 백분위수 점수의 가중평균으로부터 계산되는데, 그 결과는 Plant ‘A’와 Plant ‘B’에서 각각 28.2와 60.5이다. 따라서, 식 (6)으로 부터, PSF의 영향이 고려된 HEP(즉, 기본 HEP)는 각각 다음과 같다.

Plant ‘A’ :

$$\begin{aligned} \text{HEP}_{\text{basic}} &= \exp[2.197 \cdot \Phi^{-1}(0.282) / 3.290 - 11.618 / 2] \\ &= \exp(-6.196) \\ &= 0.0020 \end{aligned}$$

Plant ‘B’ :

$$\begin{aligned} \text{HEP}_{\text{basic}} &= \exp[2.197 \cdot \Phi^{-1}(0.605) / 3.290 - 11.618 / 2] \\ &= \exp(-5.632) \\ &= 0.0036 \end{aligned}$$

Plant 'A'와 Plant 'B'에서의 결과를 보면, Plant 'A'에서의 결과는 명목 HEP인 0.003보다 작는데(좋은데), 그 이유는 Plant 'A'에서의 통합 품질 백분위수 점수가 평균조건인, 50%보다 작기(좋기) 때문이다. 반면, Plant 'B'에서의 결과는 명목 HEP보다 높는데, 그 이유는 그 작업상황에서의 통합 품질 백분위수 점수가 평균조건보다 크기 때문이다. 따라서 이 결과들은 PSF가 평균조건보다 나쁘게 설계되면 HEP는 명목 HEP보다 커지고, 좋게 설계되면 작아진다는 일반적인 사실에 부합된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 인적오류 분석에서 PSF의 영향을 고려하기 위한 방법, 즉 기본 HEP를 구하기 위한 방법을 제시하였다. 기존의 인적오류 자료은행에 열거된 자료를 사용하여 분석을 수행하는 경우, 자료은행에 열거된 자료들은 분석하고자 하는 작업상황, 즉 PSF의 영향을 고려하지 않은 수치들이기 때문에 보다 현실적인 분석을 수행하기 위하여 분석에 사용될 HEPs에 PSF의 영향을 고려하여야 한다.

본 연구에서 제시된 방법의 기본적 개념은 Swain & Guttman<sup>11)</sup>이 주장한, PSF는 인적오류의 주요 결정자이고 PSF가 나쁘게 설계될수록 HEP의 수치는 높아진다는 사실에 근거한 것이다. 즉, 그들에 의하여 언급된 개념과 여러 가지 이론적 배경에 근거하여 기본 HEP를 구할 수 있는 이론적 방법을 제시하였다.

본 연구에서 제시된 방법론은 세부분으로 구성되어 있는데; PSF의 중요도를 구하는 문제, 각 PSF의 점수를 구하는 방법, 그리고 통합 품질 백분위수 점수에 의하여 기본 HEP를 구하는 문제로 구분된다.

먼저, 분석 작업에 대한 PSF의 상대 중요도 가중치를 구하는 문제는 AHP를 사용하여 해결하였다. AHP는 의사결정에 있어 인간의 상대판단을 이용하는 방법으로 각 PSF의 중요도 가중치를 효과적으로 구할 수 있었다.

고려된 작업상황에서의 PSF 품질을 평가하는 문제는 백분위수 개념을 사용하였다. 이것은 백분위수 개념을 사용함으로써 PSF의 품질을 평가하

는데 있어서 평가자의 부담을 줄이고 보다 정확한 주관적 추정치를 얻어내기 위한 것이다.

그리고, 통합 품질 백분위수 점수에 따라 기본 HEP를 구하는 문제를 해결하기 위하여 Swain & Guttman<sup>11)</sup>에 의하여 언급된 개념에 근거한 새로운 대응규칙을 제안하였다. 본 연구에서는 이상의 방법론을 설명하고 이론적 타당성을 입증하기 위하여 특정 작업에 대한 기본 HEP를 구하는 문제를 두 개의 작업상황에 적용하였는데, 그 결과는 PSF와 HEP사이의 이론적 관계에 부합하였다.

본 연구내용 중에 특정 작업의 수행에 중요한 영향을 주는 PSF를 선정하는 것은 어려운 문제로 인식될 수도 있다. 하지만, 전문가의 입장에서 볼 때 이것은 별로 어려운 문제가 아니다. Embrey<sup>4)</sup>가 언급한 것처럼 특정 작업의 수행에 중요한 영향을 주는 요인들은 대부분의 경우 쉽게 찾을 수 있고 또한 소수에 지나지 않기 때문이다.

본 연구에서 아쉬운 점은 실제 작업현장에서의 자료를 통하여 모형의 검증을 수행하지 못하고, 가설적인 작업상황의 설정을 통하여 이를 수행하였다는 것이다. 저자의 입장에서는 인적오류를 연구하는 대부분의 사람들처럼 그러한 자료를 얻는다는 것이 쉽지 않았기 때문에 불가피하게 이론적 배경과 가설적 예제를 통하여 모형의 타당성을 설명할 수밖에 없었다. 그리고 본 연구에서는 한사람의 주관적 평가에 의하여 제안된 방법론을 설명하였는데, 실제 문제에서 좀 더 타당성 있는 분석 결과를 얻기 위해서는 여러명의 전문가에 의하여 평가하고 그들의 결과를 종합하여 사용하는 것이 좋을 것이다.

하지만, 본 연구는 아직까지 인적오류 분석에서 중요한 문제로 취급되어 온 PSF의 중요도를 구하는 문제와 정량적 분석에서의 PSF의 영향을 고려하는 문제를 이론적 관점에서 다루었고, 그에 대한 체계적인 방법을 제공하였다는 점, 그리고 보다 현실적인 분석방법을 제시하였다는 점에서 그 중요성을 찾을 수 있고, 이러한 결과는 시스템이나 제품의 안전성 평가 및 제품의 사용성 평가에서도 효과적으로 활용될 수 있을 것이다.

#### 참 고 문 헌

- 1) 원자력발전소 인적행위 개선 시스템(K-HP-



- ES) 개발( I ), Vol. 2, 한국전력공사 기술연구원, 1993.
- 2) G. E. Apostolakis, V. M. Bier and A. Mosleh, A Critique of Recent Models for Human Error Rate Assessment, Reliability Engineering and System Safety, Vol. 22, pp. 201~217, 1988.
  - 3) B. S. Dhillon, Human Reliability with Human Factors, Pergamon Press, 1987.
  - 4) D. E. Embrey, P. Humphreys, E. A. Rosa, B. Kirwan, and K. Rea, SLIM-MAUD : An Approach to Assessing Human Error Probabilities Using Structured Expert Judgement, Nuclear Regulatory Commission, NUREG/CR-3518, Washington, D. C., 1984.
  - 5) D. I. Gertman, H. S. Blackman, L. N. Haney, K. S. Seidleer, and H. A. Hahn, INTENT : a method for estimating human error probabilities for decisionbased errors, Reliability Engineering and System Safety, Vol. 35, pp. 127~136, 1992.
  - 6) D. I. Gertman, and H. S. Blackman, Human Reliability and Safety Analysis Data Handbook, John Wiley & Sons, INC., New York, 1994.
  - 7) Y. L. Lin, and S. L. Hwang, The application of the loglinear model to quantify human errors, Reliability Engineering and System Safety, Vol. 37, pp. 157~165, 1992.
  - 8) K. S. Park, Human Reliability : Analysis, Prediction, and Prevention of Human Errors, Advances in Human Factors/Ergonomics, 7, Elsevier, New York, 1987.
  - 9) W. B. Rouse and S. H. Rouse, Analysis and Classification of Human Error, IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics, Vol. 13, pp. 539~549, 1983.
  - 10) T. L. Saaty, Analytic Hierarchy Process, McGraw-Hill, 1980.
  - 11) A. D. Swain and H. E. Guttman, Handbook of Human Reliability Analysis with Emphasis on Nuclear Power Plant Applications, NUREG/CR-1278, US Nuclear Regulatory Commission, Washington, D. C., 1983.
  - 12) B. Zimolong, Empirical evaluation of THERP, SLIM and ranking to estimate HEPs, Reliability Engineering and System Safety, Vol. 35, pp. 1~11, 1992.