

## 정량·정성적 위험성평가에 있어서 인적 오류 분석을 위한 접근방법

고재선, 김 효

서울시립대학교 화학공학과

Approaching methods for the analysis on human errors in quantitative and qualitative risk estimations

**Ko Jae-Sun, Kim Hyo**

*Department of Chemical Engineering University of Seoul*

### 1. 서론

인적 오류(human error)는 공장 설비의 설계, 제작, 건설, 운전, 폐쇄 등 모든 단계에서 발생할 수 있는데, 지금까지 발생한 크고 작은 사건, 사고의 대부분이 직, 간접적으로 인적 오류의 영향과 연관되어 있음은 잘 알려져 있는 사실이다. 통계적으로 화학공장과 같은 시설물의 경우, 인적 오류가 관여된 사고가 전체사고의 80%이상을 차지하고 있는 것으로 지적되어 왔다. 그러나 사고의 직, 간접적인 원인을 좀더 심도 있게 분석한다면 불시의 지진이나 태풍, 홍수, 화재 등 외부사건(external event)에 의한 사고를 제외하고는 거의 모든 사고에 인적 요인이 개입되어 있다고 할 수 있으며, 설비를 설계, 제작, 건설하고 운영하는 주체가 사람이라는 점을 감안하면 의미가 있는 주장이다. 사고의 주원인인 사람의 잘못에 대한 분석은 가능한 사고를 예측하고 방지방안을 극대화 시킨다는 의미에서 매우 필요하다. 사고통계에 의하면 사고를 유발한 사람의 실수, 즉 그 개인의 심신상태 또는 부주에 의한 것은 불과 전체의 10%정도 이다. 대부분의 경우 인간실수의 근원적인 원인은 개인적이라기 보다는 외부적인 요인, 즉 절차서의 결함, 부적절한 교육훈련, 규정과 실무 사이의 불일치, 의사소통상의 문제, 사람 기계 인터페이스에 대한 이해부족, 인력 부족 등 적절치 못한 작업여건에 있다. 이러한 외부적인 요인들은 인적 측면의 다른 요인과 서로 맞물려 있으며 결국 대상설비에 대한 관리시스템(management system)에 관련된 사항으로 연결된다. 따라서 본 연구에서는 최근 국내에서도 도입, 시행하고 있는 공정안전관리(Process Safety Management)제도 중 인적 오류의 유형, 인적오류분석의 예, 정성적, 정량적 위험성 평가시의 인적 오류 분석 접근방법 등을 소개 하고자 한다.

## 2. 본론

최근의 여러 사고경험을 통한 교훈과 이에 따른 안전관련법령은 산업현장에서 발생하는 사고의 방지를 위하여 인적 오류에 대한 부분을 한층 조직적으로 고려할 것을 요구하고 있다. 미국 노동부 주관 하에 연방법으로 시행 중인 "유독화학물질에 대한 공정안전관리(Process Safety Management of Highly Hazardous Chemicals, 40CFR1910.119)는 조항 (e)(3)(vi)에서<sup>(1)</sup>, 환경부 주관의 "위험관리프로그램(Risk Management Program, 40CFR68.24)은 조항 (2)에서 인적 오류를 고려할 것을 권장하고 있다. Table 1은 사람이 산업현장에서 취하는 행위로서 그 행위 시기에 따라 분류한 것이다.

**Table 1.** Classifications into the human behaviors during the working time in the industrial sites

분 류	내 용
시스템 고유의 일상적 행위	설비가 정상적으로 운영되고 있는 가운데 일상적으로 수행되는 행위(일상적인 점검 또는 주기적인 검사, 보수작업)
절차에 따른 직무수행 활동	특정 사고의 발생시 해당절차에 따라 조치하는 경우
회복조치	설비의 고장 / 사고가 발생하였을 때 이를 복구기 위한 활동

이와 같은 산업현장에서의 사람의 행위에 있어서 발생할 수 있는 오류는 분석의 관점에 따라 다르지만 크게 두 가지 유형으로 분류될 수 있다. 동적 오류(active error)와 잠재 오류(latent error)로 구분되는데<sup>(2)</sup> 첫째 동적 오류는 주어진 임무를 수행하는 과정에서의 실수를 의미하며 실수의 파급효과가 즉시 나타나서 사고 또는 고장을 유발하는 것을 의미한다. 회복조치의 경우에는 사고 또는 고장에 대한 복구조치를 성공적으로 수행하지 못함을 의미한다. 두 번째는 잠재 오류로서 사람의 실수가 사고 또는 고장으로 즉시 나타나지는 않지만 실수의 영향이 잠재되어 있다가 다른 추가적인 원인과 결부되어 사고 또는 고장을 발생하는 경우를 의미한다.

### 2.1 정성적 위험성평가에서의 인적 오류

앞서 기술되었듯이 인적 오류의 직, 간접영향이 사고발생에 많은 기여를 한다는 것을 고려 한다면 인적 오류가 고려되지 않은 위험성평가는 그 완전도(completeness) 관점에서 매우 부족하다. 본 연구에서는 여러 정성적 기법 중 비교적 많이 활용되는 Checklist 방법과 HAZOP에 대하여 인적 측면을 도입하는 것을 예로 들고자 한다.

#### 2.1.1 Checklist 방법

Checklist방법은 성격상 인적 오류의 규명, 결과의 파급 효과 등을 논리적으로 분석한다기 보다는 주로 사람, 기계관계(man-machine interface)의 효율성에 대한 질문으로 국한되는 한

계가 있다. Table 2은 Checklist에 포함할 수 있는 전형적인 인적측면에 관한 질문의 예이다.

**Table 2.** Examples of questions for close examination of human errors

구분	질문 예
일반적 질문	- 작업자의 교육, 훈련의 수준이 담당할 직무와 비교해서 충분하며 직무로 인하여 정신적 압박을 받을 가능성은 있는가
작업환경 관련 질문	- 작업장의 주변온도, 분진, 소음 등 일반적인 환경이 직무수행에 영향을 미치 는가
장치의 인식 용이도	- 주요 장치, 설비(압력용기, 배관, 밸브, 계장, 설비 등)가 이해하기 쉽고 알기 쉽게 표시되었는가
계측기를 포함한 장치의 작동 용이도	- 일상, 비상 작업수행에 필요한 보호장비가 상비 되었으며, 각종 공구가 필요한 만큼 충분하게 정돈되었는가
제어의 용이도	- 공정의 정상, 비정상상태가 제어실에서 이해하기 쉽게 표시되는가

### 2.1.2 HAZOP 분석방법

HAZOP분석방법에 인적 요인을 도입하기 위해서는 작업자 오류의 근원적인 원인(root cause)을 창의적인 사고(brainstorming)을 통해서 찾는 과정이 요구된다. 예를 들어 유량을 제대로 판단하지 못하고 적절한 조치를 취하지 못한 인적 오류가 원인이라면 그의 근원적인 원인에는 유량계의 부적당한 위치 때문에 발생한 오독(reading error), 운전원의 경험 부족으로 인한 오독, 이미 고장난 상태에서 유량계를 신뢰한 오독, 절차서의 유량점점 단계를 수행하지 않은 누락 등 여러 가지 배경이 되는 원인을 추리할 수 있다. HAZOP 분석 수행 중 인적 측면의 원인, 근원적인 원인을 찾는데 Table 3과 같은 내용을 참고로 하여 오류의 종류와 오류를 발생하게 한 배경을 조합하면 도움이 된다.

**Table 3.** Examples of close examinations for basic causes induced from human errors.

오류의 종류	배경이 되는 원인(underlying causes)
누락오류	심리, 육체적 문제, 집중력부족 등 개인적 문제
실행오류	교육 / 훈련상의 문제
과잉행위	감독 소홀
순차오류	부적절한 절차서 또는 절차서 부재
시간오류	과도한 작업량 또는 부족한 수행시간, 사람 기계의 인터페이스 문제, 작업환경상의 문제, 인간공학(Ergonomics)측면의 문제

## 2.2 정량적 위험성 평가에서의 인적 오류 고려<sup>(7)</sup>

화학공장 시설물에서의 인적 오류에 대한 정량분석의 절차를 간단히 나타내면 Fig 1과 같다.(3) 먼저 분석대상 인적 오류에 대한 정의를 검토하여 그 대상 시설물, 해당 수행절

차, 오류의 유형 등에 대하여 명확히 파악한 후 각 인적 오류에 대한 오류 가능성을 보수적으로 평가한 결과를 근거로 대상 시설물의 위험도 관점에서 검토한다(선별분석). 선별분석과 대상시설물의 위험도 관점에서 중요한 것으로 판명된 인적 오류에 대해서는 상세분석을 수행하게 된다. 중요 인적 오류에 대한 상세분석을 위하여 먼저 대상행위를 모델화 하는 것이 필요한데 그 모델기법은 인적 오류 유형에 따라 선정된다. 선정된 기법에 따라 모델화 되면 필요한 데이터를 구해 모델에 입력함으로써 대상 인적 오류의 가능성을 정량화 한다. 마지막으로 선별분석과 상세분석에 있어서의 분석방법, 가정사항, 분석내용, 데이터 등을 정리하여 문서화 한다.

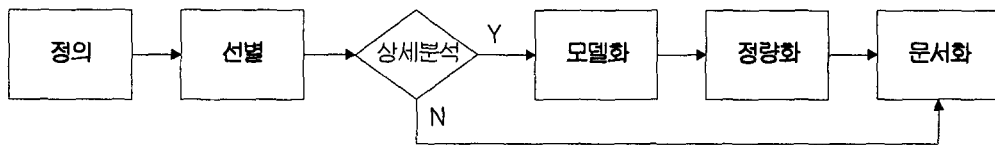


Fig. 1. Quantitative analysis procedures of human errors

2.2.1 인적 오류 분석의 접근방식

대상 인적 오류의 정의를 검토해 보았을 때 주어진 수행과제가 "A"와 "B"의 두 가지 행위단위로 이루어져 있고, 행위단위 "A"가 먼저 수행되고 그 다음으로 행위단위 "B"가 수행되는 경우라면 각 분자의 오른쪽은 행위단위의 실패를 나타내면서 대문자 A, B로 표기되고, 왼쪽분자는 행위단위의 성공을 나타내면서 소문자 a, b로 표기된다. 행위단위 A와 B가 모두 성공해야만 과제가 성공인 경우에는 그 성공확률 Ps는

$$P_s = P(a)P(b/a) \tag{1}$$

와 같고 행위단위 "A", "B"중 하나의 행위단위가 성공하면 과제가 성공인 경우에 그 성공확률Ps는

$$P_s = P(a)P(b/a) + P(A)P(B/a) + P(A)P(b/B) = 1 - P(A)P(B/A) \tag{2}$$

와 같다.

그리고 과제실패의 확률 Pf = 1- Ps 의 식으로 구할 수 있다. 그리고 각 분자의 오른쪽과 왼쪽, 즉 실패와 성공확률의 합은 항상 1 이 된다.

이제 P(A, P(B/a)), P(B/A)등 각 분자의 오류확률(HEP : Human Error Probability)을 평가한다. 평가요소로는 기본 오류 확률(BHEP, Basic HEP), 수행특성인자(PSF, Performance Shaping Factor), 종속성(dependency), 회복효과(recovery factor)가 있으며 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$HEP_i = (BHEP)_i \times (PSF)_i \times (DEP)_i \times (REC)_i \tag{3}$$

**Table 4. Estimation guideline for Performance Shaping Factor**

긴장도	작업성격 / 숙련도	숙련	미숙련
극히 낮음	일상적	2	2
	동적	2	2
낮음	일상적,	1	1
	동적	1	2
보통	일상적	2	4
	동적	5	10
높음	일상적	5	10
	동적	(BHEP)* (PSF)=0.25	(BHEP)* (PSF)=0.5

Table 4는 수행특성인자를 나타낸 것으로 인적오류분석시 수행특성인자는 사람의 행위에 미치는 영향을 의미하는데 작업의 성격, 작업자의 경력, 작업자의 긴장도 등을 검토한 후 Table 4와 같은 지침에 따라 평가 한다.<sup>(2)</sup> 여기서 긴장도는 작업자가 평소에 받고 있는 스트레스를 의미한다. 작업성격에서 일상적 작업이란 절차서에 따라 평상시 과제를 수행하는 것과 같이 단순하고 반복적인 작업을 수행하는 것을 뜻하며 동적 작업이란 설비의 상황에 따라 작업원의 행위가 결정되는 보다 복잡한 행동으로 의사결정, 기능의 결과 추적, 기능의 제어 또는 이들의 조합을 수행하는 것을 뜻한다. 그리고 숙련도의 구분에서는 대체로 6개월 이상의 경력을 지닌 작업자를 숙련원, 그 이하의 경력자는 미숙련원으로 정의한다. Table 4에서 알 수 있듯이 작업자의 긴장도가 매우 낮을 경우 오류의 가능성이 약간 커지는데 작업의 성격이 일상적이든 동적이든, 숙련원이든 비숙련원이든, 약 2정도의 인자를 적용한다. 긴장도가 클수록 또한 미숙련 작업원 일수록 수행특성인자가 커지게 되며 이에 따라 오류확률이 커진다. 그리고 긴장도가 높은 상태에서의 동적인 작업인 경우 오류의 확률이 매우 크기 때문에 수행특성인자를 별도로 구하지 않고 숙련원이면 약 0.25, 미숙련이면 0.5의 오류확률을 적용한다.

**Table 5. Estimation guideline for dependency & recovery factor**

종속성	종속성인자 (*) (DEP)	(예) P=0.01일 경우(*)		가용시간	작업원 수	
		(DEP)	P*(DEP)		1 명	2명 이상
무종속성	1	1	0.01	< 5분	1.0	1.0
저종속성	(1+19P)/20P	5.95	0.059	5분 10분	0.25	0.125
중종속성	(1+6P)/7P	15.14	0.1514	10분 20분	0.10	0.05
고종속성	(1+P)/2P	50.5	0.505	20분- 30분	0.05	0.025
절대종속성	1/P	100	1.0	30분- 60분	0.03	0.015
				> 60분	0.01	0.005

\*P = [BHEP \* (PSF)]

Table 5의 왼쪽은 종속성 평가지침으로서 종속성이란 행위단위 "A" 와 "B" 사이의 상

호의존성을 의미하는데 "A"의 성공 또는 실패의 결과가 "B"의 성공 / 실패 가능성에 영향을 미치는 정도를 무 종속성(0%), 저 종속성(5%), 중종속성(15%), 고종속성(50%), 절대종속성(100%)의 5단계로 나누어 평가 한다.<sup>(2)</sup> Table 5에서 보여주듯이 무 종속성이란 두 개의 행위단위에 의존성이 전혀 없어 선행행위의 성공/실패결과가 후행행위의 결과에 아무런 영향을 주지 않는 것을 의미한다. 그리고 절대 종속성이란 선행행위가 성공하게 되면 후행행위가 성공하게 되고 선행행위가 실패하게 되면 후행행위도 따라서 실패한다는 의미이다. 일반적으로 동일한 작업원이 여러 가지 작업을 순서대로 수행할 경우 선행행위와 후행행위는 종속성을 가지게 되며 작업의 성격, 시간 등을 검토하여 서로의 종속성을 무 종속성과 절대 종속성 사이 중에서 적절한 단계를 선택하여 적용한다. Table 5의 오른쪽은 회복인자 평가지침으로서 회복인자는 인적 오류로 인한 사건발생의 진행을 저지, 방지하고 그 영향을 완화시킬 수 있는 요인을 의미하는데 작업원의 수, 작업가용시간 등을 검토한다.<sup>(2)</sup> 여기서 2명 이상의 작업원이 있을 경우 1명의 작업원이 있는 것보다 회복효과가 더 커진다.

### 2.2.2 인적 오류분석의 한계

인적 오류 분석에는 분석모델링과 데이터 적용 측면에서 한계가 있다. 사람의 행위는 기계부품과는 달리 부품신뢰도 평가에 사용되는 것과 같은 단순한 모델로 충분히 표현되기 어렵고, 모델 구성작업에 있어서 분석 담당자의 주관적인 판단에 의존하는 경우가 많기 때문에 분석의 불확실성이 존재한다. 그리고 국내 화학공장에서 운전원, 보수원 등 운영요원의 실수에 관련된 실제 데이터가 거의 없기 때문에 각 행위단위의 기본 오류 확률을 추정하는데 외국의 문헌 및 전문가의 공학적 판단이 이용된다.

## 3. 결론

현재까지 화학공장에서 이러한 인적 오류 분석 및 인간공학연구에 거의 무관심하였으나 각종 사고의 원인 중 사람의 실수로 인한 것이 지대함을 인식하고 앞으로 이 분야에 대한 연구와 투자가 필요하다. 또한 인적 오류 분석은 위험성평가의 일부로 수행되어야 할 뿐만 아니라 각종 운전절차서, 비상조치절차서의 작성 및 적절성 분석에도 고려되어야 하는 중요한 측면이다. 더 나아가서 화학공장 제어실의 설계, 현장 장치의 설치, 배관의 배열에도 인적 요인을 반영한다면 안전성 제고에 효과를 크게 기대할 수 있다.

## 참고문헌

1. Federal Register, 6404-6405, 1992.
2. Swain, A.D. and Guttman, H.E., "Handbook of Human Reliability Analysis with Emphasis on Nuclear Power Plant Application", NUREG/CR-1278, 1983.
3. Hannaman, G.W., "Systematic Human Action Reliability Procedure (SHARP)", EPRI

- NP-3583, 1984.
4. Spurgin, A.J., "Operator Reliability Experiments Using Power Plant Simulations", EPRI NP-6937, 1990.
  5. Meshkati, N., "Human Factors in Process Plant and Facility Design",1994.
  6. "Guidelines for Hazard Evaluation Procedures", Center for Chemical Process Safety AICHE, 1992.
  7. Loss Prevention in the Process Industries, Frank P. Lees, 2nd ed., 1996.