

## 반도체공장의 위험물 교체작업시 인적과오에 대한 정량적 분석

### A Quantitative Analysis on Human Errors in Shifting Hazardous Materials of Semiconductor Plants

임 현 교\*

Hyeon-Kyo Lim

(1997년 7월 15일 접수, 1997년 12월 12일 채택)

#### ABSTRACT

Most plants producing semiconductors use a lot of chemicals, hazardous materials, and explosive gases. Though those materials are hazardous too much, some works still have to be done manually by human workers. However, according to a historical survey, more than half industrial accidents of those plants resulted from human errors or malfunctions.

Thus, this research aimed 1) to diagnose shifting hazardous materials of semiconductor plants, 2) to estimate failure probability of human workers through human reliability analysis, and 3) to find out the tasks on which educational emphasis should be put.

Through personal interview and visiting working spots, shifting tasks were analyzed, and modelled into a 24-step work, and after that, THERP and ETA was applied.

During the shifting work, estimated human failure probability under the assumption of independency,  $2.3004E-05$ , underestimated that probability  $8.1008E-05$  which could be calculated under the assumption of dependency. And this analysis showed that gas leakage from an old cylinder occupies 78.27% in the case of independent failures whereas gas leakage from a new cylinder occupies 75.06% in the case of dependent failures. So it was concluded that dependency assumption may gloss real situations.

In addition, confirming gauge of regulators and closing valves turned out to be the most important tasks than purge tasks.

---

\* 충북대학교 공과대학 안전공학과

## 1. 서론

반도체의 생산공정은 생산제품의 특성상 많은 종류의 위험물과 가스를 이용하는 것이 보통이며, 그 이용량 또한 상당하기 때문에 하루에도 몇 번씩 가스나 위험물질을 교체하는 작업이 이루어진다. 그러나 이러한 작업은 자동화가 이루어진 대부분의 작업공정과는 달리, 작업자의 노동에 의해 이루어지는 것이 보통이다.

이 때 작업자의 사소한 실수나 과오로 인해 일단 누출 등의 사고가 발생하면, 취급물질 자체의 위험성으로 인해 인명 피해, 화재 및 폭발 등의 2차 대형재해를 초래할 수 있기 때문에, 반도체 공장의 어느 누구도 그 위험성에 대해 과소평가하지 않는 것이 현실이다.

실제 화학장치산업에서 발생하는 사고 원인에 대하여 미국 보험협회가 조사한 바에 따르면, 작업자의 오조작 및 취급물질의 위험성에 대한 불충분한 인식에 의한 경우가 전체 사고의 1/3이 넘는 37.2%로 보고되어 있어, 작업자의 과오가 얼마나 큰 비중을 차지하는가를 쉽게 알 수 있다<sup>1,2)</sup>. 그러므로 최근까지도 기계의 고장확률은  $10^{-8}$  정도인데 비하여, 인간의 과오확률은  $10^{-4}$  정도로 무려 1,000배 내지 10,000배나 높은 현상을 보이고 있다.

이러한 상황에서 반도체 공장의 폭발사고를 예방하기 위해서는 작업자의 과오가 발생할 가능성이 높은 작업을 선정하여 집중적으로 관리하지 않으면 안 되는 물론이다.

만약 작업 수행과정중에서 어떤 부분이 특히 과오에 취약한가를 정확히 사전에 파악할 수만 있다면, 효과적인 교육이나 관리를 통한 재해예방효과가 높아지게 될 것은 자명한 일이다. 또한 그 요인들의 상대적 영향력이나 위중성이 정량적으로 평가되고 비교될 수만 있다면, 안전관리나 교육이 우선적으로 집중되어 재해예방효과를 극대화할 수 있을 것이다.

이런 필요성에 따라 본 연구에서는, 반도체 공장장에서 가장 위험하다고 판단되는 수작업인 폭발성 가스실린더의 교체작업을 대상으로 인간 신뢰성분석을 행하여, 작업자의 과오확률을 구하고, 안전관리 및 교육의 중점사항을 파악하고

자 하였다.

## 2. 연구추진방법

어떠한 사상 연쇄에서 불안전 행동이나 재해를 초래하게 되는 작업요소를 분석하는 데에는 직무분석(Task Analysis)으로부터 접근하는 방법이 가장 일반적이다<sup>3,4)</sup>. 이 방법은 수행하고자 하는 작업을 더욱 상세하게 몇 개의 단위작업들의 연속으로 이해하여, 전체적인 작업수행의 성공, 실패에 크게 영향을 미치는 작업요소의 특성을 파악하는 것이다. 본 연구도 이러한 과정을 따라 수행되었다.

## 3. 인간과오의 연구경향

인간의 과오로 인한 위험성을 정량적으로 평가하고자 하는 공학적인 접근방법은 시대적인 추세로 널리 받아 들여지고 있으며, 그 연구도 활발하다<sup>5~9)</sup>.

이 중에서 가장 널리 알려진 기법은 THERP이다. Swain과 Guttman<sup>3)</sup>은 Three Mile Island의 원자력 발전소 사고를 계기로 인간과오의 종속성 모형(Dependence Model)을 제시하였는데, 그들은 인간의 과오 형태를 1) 생략과오(errors of omission), 2) 수행과오(errors of commission), 3) 순서과오(sequence errors), 4) 시간과오(timing errors)로 분류하고, 작업요소간 과오의 종속성을 5단계로 구분하여, 인간이 수행하는 작업요소간의 종속성을 근거로 작업수행의 성공확률과 실패확률을 수학적으로 추정하는 기법을 창안하였다.

이후 行待茂生등은 묘사적인 기호를 첨가하여 직무의 성격을 쉽게 파악할 수 있도록 하였는데, 이 기법은 화학 플랜트의 벨브교체작업의 신뢰성 평가에 응용되기도 하였으며<sup>7,8)</sup>, 또 Nagamachi<sup>10)</sup>에 의해 산업용 로봇의 교시작업의 안전성평가에도 이용되었다.

본 연구의 대상인 실린더 교체작업은 다음 절에서 설명하는 바와 같이 복잡하고 다단계로 구성되어 있으므로, 직무의 성격을 용이하게 이해하고 분석의 효율성을 높이고자 이 기법들을

응용하였다.

#### 4. 연구범위

##### 4.1. 반도체 제조공정과 위험가스

반도체 제조과정은 크게 1) 단결정 wafer 제조 공정, 2) chip 제조공정, 3) 설계·mask 제작공정, 4) 조립·검사공정으로 나뉘어진다.

이 공정에는 다양한 종류의 가스가 사용되고 있는데, 이 가스들 중에는, 종래 취급되어 온 고압가스와는 성질이 달라, 독성을 가지거나 아니면 가연성, 자연발화성 등의 성질을 가진 것도 많다. 이와 같은 다양한 가스를 그 위험성과 특성에 따라 분류하면 Table 1과 같다.

Table 1 Classification of hazardous gas

질식성	Ar, N <sub>2</sub> , He, CG <sub>2</sub>
자연성 (支然性)	O <sub>2</sub> , Air, NO, N <sub>2</sub> O, NF <sub>3</sub> , F <sub>2</sub> , Cl <sub>2</sub>
가연성, 폭발성	H <sub>2</sub> , SiH <sub>4</sub> , PH <sub>3</sub> , B <sub>2</sub> H <sub>6</sub> , SiHCl <sub>3</sub> , AsH <sub>3</sub> , H <sub>2</sub> Se, CH <sub>4</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> , C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> , GaH <sub>3</sub> , Si <sub>2</sub> H <sub>6</sub>
유독성	AsH <sub>3</sub> , PH <sub>3</sub> , B <sub>2</sub> H <sub>6</sub> , SiH <sub>4</sub> , SiF <sub>4</sub> , AsCl <sub>3</sub> , PF <sub>3</sub> , PF <sub>5</sub> , PCl <sub>3</sub> , POCl <sub>3</sub> , BF <sub>3</sub> , H <sub>2</sub> Se, GeH <sub>4</sub> , NH <sub>3</sub> , H <sub>2</sub> S
부식성	HCl, Cl <sub>2</sub> , NH <sub>3</sub> , H <sub>2</sub> S, BF <sub>3</sub> , BCl <sub>3</sub> , SiCl <sub>4</sub> , SiH <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub> , SiHCl <sub>3</sub> , PH <sub>3</sub> , PF <sub>3</sub> , PF <sub>5</sub> , PCl <sub>3</sub> , POCl <sub>3</sub>

통상 이와 같은 가스들은 봄베나 실린더의 형태로 공급되는 일이 대부분이고, 사용량이 아무리 소량이라고는 해도 사업장 규모에 따라 하루에 3~4회 반복되는 일이 보통이므로, 가스의 특성에 비추어 본다면 교체작업의 위험성이 과소평가되고 있다고 할 수 있다.

##### 4.2 분석자료

가스의 누출사고는 교체작업에서의 실패가 아니면, 생산라인에서의 부식에 기인한다고 판단되었으므로, 본 연구에서는 인적요인의 작용에 의해 과오 가능성이 높은 교체작업, 특히 실란(SiH<sub>4</sub>)이나 포스핀(PH<sub>3</sub>) 같은 폭발성 가스의 실린더를 교체하는 경우로 연구대상의 폭을 좁혔다.

먼저, 과거에 화학공장에서 발생하였던 재해 사례들을 수집하여 화학공장 재해사고의 유형을

파악하고, 인적과오의 원인 및 유형에 대하여 분석하였는데, 분석에 이용된 반도체 공장의 사고 및 앓차사고는 일본에서 보고된 사고 291건과 직접 국내의 생산현장에서 입수된 182건의 총 473건이었다.

자료들은 공정별로 분류되어 각 공정에서의 재해사고특성을 파악, 비교하였는데, 유감스럽게도 재해사례의 기록이 충분히 상세하지 못하여 가스 실린더 교체작업의 작업수준을 참조하였다.

##### 4.3 가스 실린더 교체작업

가스 실린더를 교체하는 작업은 기기패널의 스위치를 on/off시키는 수작업과 가스 실린더의 취급으로 이루어진다.

물론 제조회사와 반도체 생산공장에 따라 다를 수 있겠으나, 현실적으로 이런 기기를 생산·공급하는 업체가 국내에 3개 회사밖에 없다고 알려져 있으므로 작업의 표준화에는 기기판의 모양이 크게 영향을 주지 않는다고 할 수 있다.

Table 2는 가스 실린더 교체작업의 직무분석을 통해 24단계로 간략화하여 정리한 것이다. 직무 5와 직무 23은 모두 질소(N<sub>2</sub>) purge 작업인데, 작업의 수행이 모두 차례대로 해당 밸브들을 열거나 다시 닫는 작업요소들로 구성되어 있어, 이 표에는 간략히 표기하였으나, 실제 분석에서는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 각각의 개별적인 작업요소로 나누어 분석하였다.

Table 2 Major sequence of shifting gas cylinders (part)

<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Close the Main Valve.</li> <li>2. Turn on the Gas Supplier on the CRT.</li> <li>3. Check the Gauges of Regulator &amp; CRT Display.</li> <li>4. Open V1.</li> <li>5. Commit N<sub>2</sub> Cycle Purge more than 20 times.</li> </ol> <p style="text-align: center;">... (omitted) ...</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>23. Purge the Gas for about 10 mins.</li> <li>24. Turn off the Gas Supplier on the CRT.</li> </ol>
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

그렇지만 각 작업요소들의 형태가 매우 유사하여 종속성(dependence)도 극히 높으므로 완전

종속(complete dependence)이라고 가정하는 경우 최초의 직무만이 분석에 반영되고 이후의 나머지 직무들은 종속성에 따른 조건부 확률이 모두 1이 되므로 결과적으로 하나의 직무라고 간주해도 차이는 없다.

### 5. 인간신뢰성 분석

세분화된 직무들을 대상으로 Swain과 Guttman<sup>3)</sup>의 종속성 모형(Dependence Model)에 입각하여 현장 근로자들과의 직접면담을 통하여 각 작업요소들간의 상호 연관관계를 파악하였다. 면접에 참여했던 현장 근로자들은 최소 5년 이상의 경험을 가진 숙련자로서 국내 우수 반도체 생산업체의 근로자들이었다.

Housing 기호안의 수치는 이들의 판단에 따라 결정된 종속도를 근거로, Swain과 Guttman의 제안식에 따라 계산되었다. 예를 들어 Low Dependence인 Task 4, Open V1의 경우에는 A.D. Swain<sup>3)</sup>의 Table 20-12(4)로부터 BHEP=.0005, EF(Error Factor)는 10이므로

$$\Pr(O | O) = \frac{1 + 19 \times .0005}{20} = .0505$$

$$\Pr(C | C) = \frac{1 + 19 \times .0005}{20} = .0505$$

$$\Pr(S | S) = \frac{1 + 19 \times .999}{20} = .9991$$

이고, 따라서 이 직무를 1회 수행한 결과 O, C, S의 상태로 남을 확률은 다음과 같다.

$$\Pr(|) \cdot \begin{bmatrix} BHEP_o \\ BHEP_c \\ BHSP \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} .0505 & .0005 & .0004 \\ .0005 & .0505 & .0005 \\ .9490 & .9490 & .9991 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} .0005 \\ .0005 \\ .9990 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} .0004 \\ .0005 \\ .9991 \end{bmatrix}$$

종속성에 따른 조건부확률의 추정은 Table 3과 같이 THERP의 이론식을 이용하였다.

신뢰성 분석의 입력 자료는 원칙적으로 세분된 직무(task)와 가장 유사한 직무의 값을 인용하였으나, NUREG/CR-1278이 원래 원자력발전

소의 운용자들을 대상으로 하는 것이어서 본 연구의 의도와 차이가 있으므로, Irwin et al(1964)과 Williams(1989)의 자료도 부분적으로 차용하였다.

Table 3 Conditional probability of dependence model

Pr(success   success)	dependence	Pr(failure   failure)
<i>BHSP</i>	<i>LD</i>	<i>BHFP</i>
$(1 + 19 \times BHSP)/20$	<i>MD</i>	$(1 + 19 \times BHFP)/20$
$(1 + 6 \times BHSP)/7$	<i>HD</i>	$(1 + 6 \times BHFP)/7$
$(1 + BHSP)/20$	<i>CD</i>	$(1 + BHFP)/20$
1		1

그러므로 작업을 성공적으로 수행할 확률은 Table 3의 식을 이용하여 다음 식과 같이 표현될 수 있다. 즉, i번째 직무에서의 생략과오와 수행과오를 각각  $F_{i,o}$  와  $F_{i,c}$ ,  $i=1,2,\dots,24$  라고 한다면

$$R_{0-1}(t) = [1 - (F_{1,o} + F_{1,c})] \left[ \frac{1 + 19(1 - (F_{2,o} + F_{2,c}))}{20} + \frac{19(F_{2,o} + F_{2,c})}{20} (1 - F_3) \right] \left[ \frac{1 + 19(1 - (F_{4,o} + F_{4,c}))}{20} \right]$$

$$R_{1-2}(t) = 1 - (F_{5,o} + F_{5,c})^{20}$$

등으로 표시되며, 작업전체의 성공확률 즉 교체 작업의 인간신뢰성은 이러한 함수들의 곱으로써 얻을 수 있다.

그러나 이와 같은 방법은 단 한 차례의 과오도 없는 작업의 완벽한 성공확률을 지향하는 것이고, 본 연구의 목적은 폭발성 가스의 누출에 연구초점을 맞추고 있으므로, 보편적인 작업수행상의 인간신뢰도를 평가하기보다는 반도체 공장의 안전사고에 더 밀접한 관계를 갖고 있다고 판단되는 가스누출사고의 가능성을 중심으로 사상수목분석(Event Tree Analysis; ETA)을 수행하였다.

먼저 가스누출은 이제까지 사용하던 구실린더로부터 발생하던가, 아니면 새 실린더로부터 발생하는 것이므로 상황을 두 가지로 구분하여



분석하였는데, Fig. 2는 구실린더로부터의 가스 누출을 분석한 그림이다.

예를 들어 그림의 사상수목(event tree)에서 부분적 가스 누출의 첫 번째 사상의 경우는 1) 직무 3 regulator gauge를 확인하지 않고, 2) 직무 1 main valve를 성공적으로 잠그고, 3) 직무 2 gas supplier를 성공적으로 켜고, 4) 직무 4 valve V1을 닫은 상태로 방치하는 일련의 작업으로 구성된다.

따라서 이 일련의 사상들이 연속적으로 일어날 확률은  $Pr\{case\ 1\} = R_1(t) = S_1S_2F_3F_4$ 가 된다.

여기에는 THERP의 기본 이론에 따라 각각의 직무에 실패할 확률(불신뢰도, unreliability)이 대수 정규분포를 따른다고 가정하여 이들의 관계식으로부터 가스누출의 확률을 계산하였다.

즉, 일반적으로 Swain과 Guttman의 THERP 보고서에 인용된 인간실패성 자료표는 중앙값(median)과 Error Factor(EF)로 표현되어 있는데, 이 경우에 중앙값은 50백분위수(50 percentile)  $X_{50}$ 에 해당하므로, 해당 직무의 실패확률이  $F \sim \Lambda(\mu, \sigma)$ 를 따르는 경우

$$X_{50} = e^{\mu}$$

$$EF = \sqrt{\frac{X_{95}}{X_{05}}} = \sqrt{\frac{e^{\mu+1.645\sigma}}{e^{\mu-1.645\sigma}}} = e^{1.645\sigma}$$

라는 관계식이 성립한다.

또한 직무 1, 2, 3에 모두 실패하는 경우의 종합적인 작업의 실패확률  $F_T$ 은  $F_T = F_1 \cdot F_2 \cdot F_3$ 이고, 직무 1에 실패하거나 2에 실패하거나, 혹은 직무 3에 실패하는 경우에는  $F_T = F_1 + F_2 + F_3$ 로 표시되며 각각의 분산은  $Var_T = \sigma^2_{F_1} + \sigma^2_{F_2} + \sigma^2_{F_3}$ 인 관계를 가지며 대수정규분포  $F_T \sim \Lambda(\mu_T, \sigma_T)$ 를 따른다는 성질을 이용하였다.

그러므로 만약 위 직무들의 수행 혹은 과오가 독립적이라면, 기초적 과오확률(Basic Human Error Probability, BHEP)로부터 마찬가지로 방법에 의해

$$Pr\{case\ 1\} = .998 \times .998 \times .001 \times .001 = 9.97E-07$$

$$Pr\{case\ 2\} = .998 \times .998 \times .001 = 9.96E-04$$

$$Pr\{case\ 3\} = .002 \times .0019 \times .001 = 3.0E-09$$

를 얻을 수 있고, 총확률은 9.97E-04가 된다.

그러나 각 직무들이 독립이 아닌 경우에는 Table 3의 방법에 의해 종속성을 반영하여 다음과 같이 구하였다. 즉,

$$Pr\{case\ 1\} = .998 \times .9981 \times .001 \times .0009 = 8.96E-07$$

$$Pr\{case\ 2\} = .998 \times .0019 \times .001 = 9.96E-04$$

$$Pr\{case\ 3\} = .002 \times .0019 \times .001 = 3.0E-09$$

이 되고, 이 경우 실패확률의 총합은  $Pr\{\text{부분적 gas 누출}\} = 9.9690E-04$ 를 얻게 된다.

이와 같은 방법에 의해 구하면 부분적 gas 누출의 발생확률은 연쇄사상의 발생이 독립일 경우 각각 9.9600E-07, 1.996E-06, 4.0E-09이므로 총합은 2.996E-06이고, 의존성 모형을 가정하는 경우에는 각 사상연쇄의 발생확률은 각각 5.8801E-05, 1.8962E-06, 1.039E-07이고 확률총합은 6.0801E-05가 된다. 마찬가지로 각각의 상황에 대해 발생확률을 계산하여 나타낸 것이 Fig. 3이다.

이 분석 결과에 따르면, 사상연쇄의 발생이 독립적인 경우 신 실린더로부터 직접 고압가스가 누출될 확률은 78.27%로서, 이미 사용하고 있던 실린더에 비해 신규 가스실린더로부터의 누출 위험성이 압도적이라는 것을 알 수 있다.

그러나 의존성 모형을 가정하는 경우에는 이미 사용하고 있던 가스 파이프라인에서 잔류가스가 누출될 확률은 75.06%로서, 신규 가스실린더보다는 이미 사용하고 있던 실린더로부터의 누출 위험성이 압도적이라는 것을 알 수 있다.

따라서 사상연쇄의 발생이 각각 독립적이라고 가정하는 지나치게 단순화된 작업분석은 현실적인 문제점과는 동떨어진 엉뚱한 결론을 내리기 쉽다는 점에 주의해야 한다.

한편 반도체 공장에서 취급되는 폭발성 가스 실린더의 교체작업은 작업자 1인에 의한 단독작업이기 때문에 작업감독자에 의한 확인작업이 없으므로, 단독작업을 수행하는 경우 확인작업을 간과할 가능성이 매우 높아 해당작업이 인

간과오에 대하여 상당히 취약하다고 판단되었다.

본 연구의 대상작업의 경우 직무 2의 1회실

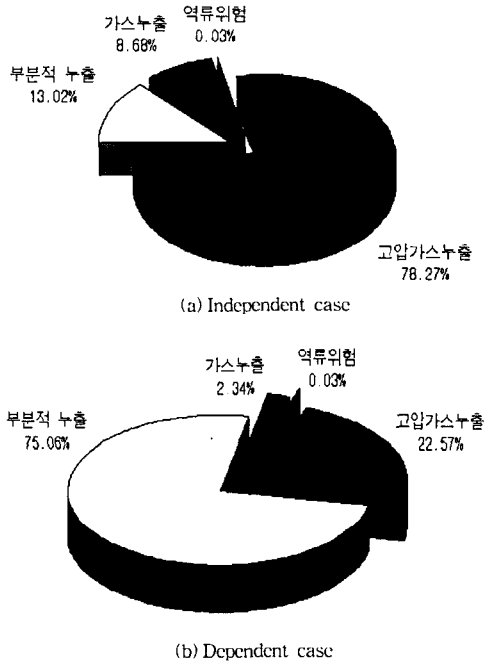


Fig. 3 Distribution of accident causes

행에 실패할 확률은  $2E-03$  내외이지만, 직무 3의 확인만 제대로 수행된다면 직무 2의 실패를 회복할 수 있기 때문에, 실제로 직무 2에 실패할 확률은 1000분의 1인  $2E-06$ 로 감소한다. 또한 직무 18의 경우에도 1회 실행시의 실패 확률은  $1E-03$  내외이지만, 직무 19의 확인만 제대로 수행된다면 직무 18의 실패를 회복할 수 있기 때문에, 실제로 직무 18에 실패할 확률은 약 300분의 1인  $2.85E-06$ 정도로 감소한다. 이와 같이 확인작업의 중요성은 DeBDA를 통해서 명백히 입증되므로, 직무교육시 집중교육대상이 되어야 함은 물론이다.

그러므로 예를 들어  $N_2$  cycle purge와 같이 '20회 이상, 혹은 10분 이상 반복적으로 수행한다'고 규정되어 있는 작업지시에 비추어 볼 때, 단독작업이라는 상황에서 이러한 반복적 직무수행이 과연 실효성이 있으며, 또 제대로 실행되

고 있는가 의문을 갖지 않을 수 없다.

더욱이 실제로는 위의 사상수목분석 결과에서도 볼 수 있듯이, 작업의 성패에 크게 영향을 끼치는 직무는  $N_2$  cycle purge가 아니라 구 실린더에 대한 조치 중 직무 1 'main valve'를 잠근다'와 직무 3 'regulator의 gauge를 확인한다'이거나, 새 실린더에 대한 조치 중 직무 13 '새 실린더를 결합한다'와 직무 19의 'regulator 2차 gauge의 값을 확인한다'는 직무들이라는 것을 확인할 수 있어, 작업수행 중 regulator 확인직무가 얼마나 중요한가를 실감할 수 있다. 따라서 작업자의 작업훈련은 이들 직무를 중심으로 이루어져야 함은 말할 나위도 없다.

## 6. 결론

인간실패성 연구가 당면하고 있는 가장 큰 문제의 하나는 현실적인 자료은행(data bank)의 부족이다. 본 연구의 경우에도 예외가 아니어서, 유사한 직무의 자료를 찾는 데 많은 시간을 허비하지 않을 수 없었고, 부득이 여러 자료를 부분적으로 차용하여 추정에 이용하였다.

물론 이러한 방법에는 많은 문제점이 있을 수 있으나, 수행도형성요인(Performance Shaping Factors)들의 영향을 고려하는 경우 작업자의 과오율이 크게는 20여 배까지 증가하기도 한다는 점을 고려한다면, 본 연구와 같은 시도만으로도 해당작업의 위험성을 정량적으로 부각시키기에 충분하다고 판단된다.

본 연구는 이러한 시도의 하나로서 반도체 공장에서 많이 사용하고 있는 포스핀( $PH_3$ )이나 실란( $SiH_4$ )과 같이, 가연성이나 폭발성을 지니고 있어 만약 누출되는 경우 사업장 전체의 존재위기까지도 초래할 수 있는 위험 gas 실린더를 교체하는 경우의 누출사고에 초점을 맞추어 수행되었다.

연구 결과, 가스누출사고의 예상평균확률은 각 사상발생들의 독립성을 가정할 경우 약  $2.3004E-05$  정도이지만, 종속성이 반영되는 현실을 감안한다면 약  $8.1008E-05$ 이나 되어, 독립성이라는 가정 여부가 gas 누출이라는 재해발생 위험성을 과소평가하고 있는 것으로 판단되었

다.

또한 최고의 누출위험빈도는 사상발생들이 독립적이라고 가정할 경우 새 실린더로부터의 고압누출이 78.27%로 대부분을 차지하는 것으로 예상되었으나, 종속성이 반영되는 경우에는 기기 및 pipe내에 남아있던 가스가 누출되는 경우가 75.06%로 전혀 다른 양상을 띄게 된다는 것을 알 수 있었고, 이같은 변화를 가져오는 직무는 직무 17과 직무 18의 valve들을 닫는 직무들이라는 것을 확인하였다. 본 연구에서는 이 직무들에 대해 낮은 종속도(Low Dependence)를 가정하였으나 만약 종속성이 더욱 높아진다면 이 변화는 더욱 심해질 것으로 판단된다.

그러므로 1인 작업에 대해 '20회 이상 purge 한다' 혹은 '10분 이상 purge 한다'등의 비현실적인 작업요령을 지시하고 이를 준수하도록 할 것이 아니라, 좀 더 현실적이고 효과적으로 작업을 수행하도록 하고 동시에 가스 누출의 가능성을 배제하기 위해서는 Regulator의 gauge 확인작업이 교육훈련의 중점사항이 되어야 함을 알 수 있었다. 또한 이렇게 확인작업만 원활히 수행된다면 확인작업이 없는 1회 시행시의 직무 실패확률에 비해 300분의 1 내지 1000분의 1로 감소한다고 판단되었다.

이 이외에 가스누출에 크게 영향을 주는 사상에는 직무 13 '새 실린더의 결합'과 직무 1의 'main valve를 닫는' 직무에 실패하는 것을 들 수 있었다.

본 연구에서는 THERP의 방식에 따라 결정론적(deterministic)인 입장에서 확률값을 계속하였으나, 수행도형성요인(PSF)들에 따라 얼마든지 가변적일 수 있다는 점을 인식하여, 앞으로는 확률분포에 근거한 분석 뿐만 아니라 Fuzzy 이론과 같은 새로운 방향에서의 시도를 계속할 계획이다.

본 연구는 충북대학교 국책 자유공모과제(과제번호: 96F-5)의 지원으로 수행된 것으로, 이에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- 1) 青木通佳, "化學プラントにおける人的要因事故の分析手順の試案と安全対策 (1)", 安全工學, Vol. 21, No. 2, pp. 92~100, 1982.
- 2) 青木通佳, "化學プラントにおける人的要因事故の分析手順の試案と安全対策 (2)", 安全工學, Vol. 21, No. 3, pp. 164~171, 1982.
- 3) Swain, A.D., and Guttman, H.E., Handbook of Human Reliability Analysis with Emphasis on Nuclear Power Plant Applications, NUREG/CR-1278, US. Nuclear Regulatory Commission, 1983.
- 4) Gelder, K.V., "Human Error with a Blending-Process Simulator," IEEE Trans. on Reliability, Vol. R-29, No. 3, 1980.
- 5) Rasmussen, J., "A Taxonomy for Describing Human Malfunction in Industrial Installations," J. of Occupational Accidents, Vol. 4, pp. 311~333, 1982.
- 6) 林喜男, 人間信賴性工學, 海文堂, 1984.
- 7) 行待武生, 飛岡利明, "人間-機械系の定量的信賴性解析のための一技法-Detailed Block Diagram Analysisの事例研究", 人間工學, Vol. 19, No. 4, pp. 197~204, 1983.
- 8) 塩見弘, 人間信賴性工學入門, 日科技連, 1996.
- 9) 行待武生, 飛岡利明, "人間-機械系の定量的信賴性解析の一技法", 人間工學, Vol. 18, No. 2, pp. 83~95, 1982.
- 10) Nagamachi, M., Human Factors of Industrial Robots and Robot Safety Management in Japan, Applied Ergonomics, Vol. 17, No. 1, pp. 9~18, 1986.