

폭발사고예방을 위한 위험물 교체작업의 안전교육 Safety Education for Workers changing Explosive Gases

임 현 교

충북대학교 공과대학 안전공학과

ABSTRACT

In spite of many accidents, accidents still occur repeatedly. The reason why we have so many accidents in industrial plants is mainly due to lack of effective safety education. Most safety education committed by safety staff is composed of general education and/or accident case studies. However, it is quite natural that the safety education should be more task-specific rather than general, if it is to be effective.

Thus for preventing gas leakage accidents during changing explosive gas cylinders, this study aimed to analyze a manual changing work in semiconductor plants, and to draw important educational points. With the help of HRA and ETA, the most important task turned out to be reconfirmation of regulator gauges.

Under the assumption of independent events, the estimated leakage probability was $2.3004E-05$, which seriously underestimated the probability, $8.1008E-05$ under the assumption of dependent events. And the most probable situation would be gas leakage from the used gas cylinder.

It was made clear that the assumption of independence could distort safety educational focus.

1. 연구목적 및 필요성

사회 곳곳에서 거듭되는 사고에도 불구하고 개선의 조짐이 잘 보이지 않는 것은 우리 국민의 안전의식이 아직도 낮기 때문이다. 하지만 안전의 선진국 국민들이 갖고 있는 높은 안전의식수준은 하루 아침에 얻어진 것이 아니라 반복되는 교육과 안전지향적인 문화의식의 소산이다.

현재 우리나라에서 시행되고 있는 안전교육은 산업재해를 예방하기 위한 것으로, 산업안전보건법에 의거 강제적으로 시행되고 있다. 그러나 교육내용이 정립되어 있지 못하고, 재해사례 소개나 표준작업 방법만을 강조하는 규범적 정신교육에 의존하고 있어 작업자의 흥미를 끌지도 못하며 교육결과나 경험을 현장에서 활용하기에도 어려움이 많다.

만약 작업 수행과정중에서 어떤 부분이 특히 과오에 취약한가를 정확히 사전에 파악할 수만 있다면, 효과적인 교육이나 관리를 통한 재해예방효과가 높아지게 될 것은 자명한 일이다 [6]. 그리고 그 요인들의 상대적 영향력이나 위중성이 정량적으로 평가되고 비교될 수만 있다면, 안전관리나 교육이 우선적으로 집중되어 재해예방 효과를 극대화할

수 있을 것이다.

본 연구는 「작업자 조작과오의 예방과 방지」에 초점을 맞추어, 반도체 공장에서의 폭발성 가스실린더를 교체하는 작업자의 작업지도 및 교육의 중점사항을 파악하여 반도체공장에서의 폭발사고예방에 기여하고자, 인간실패성분석을 통해 가스 누출의 위험성을 평가하였다.

2. 폭발성 가스의 교체작업

반도체 제조공장의 반도체 제조과정을 주요 공정별로 크게 나누면, 1) 단결정 wafer 제조 공정, 2) chip 제조공정, 3) 설계·mask 제작공정, 4) 조립·검사공정으로 나뉘어 진다.

이 중에 특히 chip 제조공정은 반도체 제조공정의 주요공정으로서 epitaxial 성장, 산화, 사진제판 (photolithography), 에칭 (etching) 및 세정, 불순물 확산, 이온 (ion) 주입, CVD (Chemical Vapor Deposition), 증착 및 spatter 등의 공정이 있다. 더우기 이 공정들은 10여 회 반복되는 것이 일반적이므로, 반도체 제조에 사용되는 반도체용 가스 및 기타 화학물질은 대부분은 이 chip 공정에서 소비된다. 가스 중에는, 종래 취급되어 온 고압가스와는 성질이 달리, 독성을 가지거나 아니면 가연성, 자연발화성 등의 성질을 가진 것도 많다.

통상 이와 같은 가스들은 봄베나 실린더의 형태로 공급되는 일이 대부분이고, 사용량이 아무리 소량이라고는 해도 사업장 규모에 따라 하루에 3~4 회 반복되는 일이 보통이다.

본 연구에서는, 과거에 반도체 공장에서 발생하였던 재해사태들을 수집하여 반도체 공장 재해사고의 유형을 파악하고, 인적과오의 원인 및 유형에 대하여 분석하였다. 분석에 이용된 반도체 공장의 사고 및 앓차사고는 일본에서 보고된 사고 291 건과 직접 국내의 생산현장에서 입수된 182 건의 총 473 건이었는데, 자료들은 공정별로 분류되어 각 공정에서의 재해사고특성이 파악, 비교되었다. 이 중 인적요인에 의해 과오 가능성이 높은 가스 교체작업을 연구대상으로 삼았고, 특히 작업대상의 범위도 실란 (SiH_4) 이나 포스핀 (PH_3) 같은 폭발성 가스의 실린더를 교체하는 경우로 좁혔다.

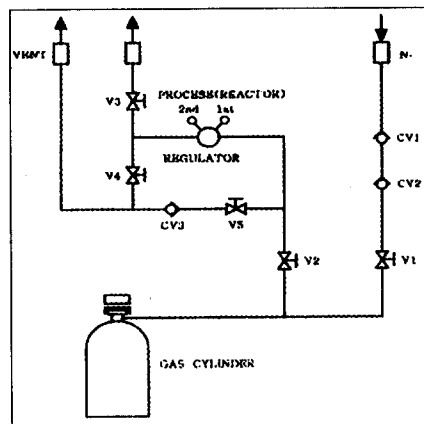


그림 1 가스 교체장치의 구조

전형적인 가스 실린더 교체작업은 상당히 위험한 작업이라고 인식되고 있어 작업현장 곳곳에 위험표지와 주의표지, 그리고 경고표지가 다량 부착되어 있다. 기기장치의 상당

부에는 계기 패널이 붙어 있으며, 실제작업은 이 계기패널의 스위치를 on/off 시키는 수작업과 가스 실린더의 취급으로 이루어진다.

가스 실린더의 교체작업은 한 두 단계로 끝나는 것이 아니라 여러 단계의 직무들로 구성되기 때문에 그다지 단순하지 않았는데, 작업자의 직무분석 (Task Analysis) 을 통해 교체작업은 24 단계의 직무들로 정리되었다.

3. 가스 교체작업의 인간신뢰성분석

가스 실린더 교체작업에 대한 인간신뢰성 분석방법은 De_BDA (Detailed Block Diagram Analysis) 를 이용하였다. 이것은 行待茂生이 THERP 기법에 묘사적 기호를 추가하여 직무의 성격을 쉽게 파악할 수 있도록 한 것으로 [7], 화학 플랜트의 밸브교체작업의 신뢰성 평가에 응용되기도 하였으며 [5], 산업용 로봇의 교시작업의 안전성평가에도 이용되기도 하였었다 [1].

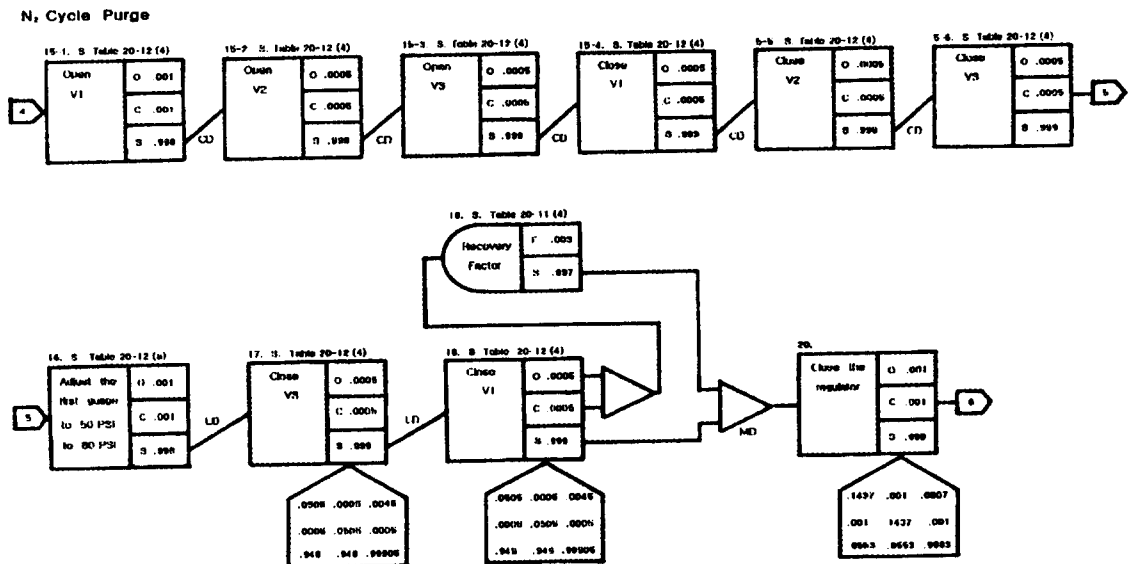


그림 2 가스교체작업의 DeBDA (일부)

구체적인 분석내용으로는, 세분화된 직무들을 대상으로 Swain 과 Guttman [3] 의 종속성 모형 (Dependence Model) 에 입각하여 현장 근로자들과의 직접면담을 통하여 각 작업요소들간의 상호 연관관계를 파악하였다. 면담에 참여했던 현장 근로자들은 최소 5년 이상의 경험을 가진 숙련자로서 국내 우수 반도체 생산업체의 근로자들이었다. Housing 기호안의 수치는 이들의 판단에 따라 결정된 종속성을 근거로, Swain 과 Guttman 의 제안식에 따라 계산되었다.

입력 자료는 원칙적으로 세분된 직무 (task) 와 가장 유사한 직무의 값을 원용하였으나, NUREG/CR-1278 이 원래 원자력발전소의 운용자들을 대상으로 하는 것이어서 본 연구의 의도와 차이가 있으므로, Irwin et al (1964) 과 Williams (1989) 의 자료도 부분적으로 차용하였다 [2, 3, 4].

전체 작업을 과오없이 완벽하게 수행할 확률은 각 직무의 개별적 성공확률을 축차적

으로 곱하여 얻을 수 있다. 따라서

$$R(t) = \prod_{i=0}^7 R_{i-i+1}(t)$$

로써 얻을 수 있다.

그러나 이와 같은 방법은 단 한 차례의 과오도 없는 작업의 완벽한 성공확률을 지향하는 반면, 폭발성 가스의 누출이라는 사고를 분석하는 데에는 충분하지 않다고 판단하여 사상수목분석 (Event Tree Analysis ; ETA) 을 수행하였는데, 상식적으로 가스누출은 이제까지 사용하던 구실린더로부터 발생하던가, 아니면 새 실린더로부터 발생하는 것이므로 상황을 두 가지로 구분하여 분석하였다. 그림 3 은 새 실린더로부터 가스가 누출되는 상황에 대하여 분석한 것이다.

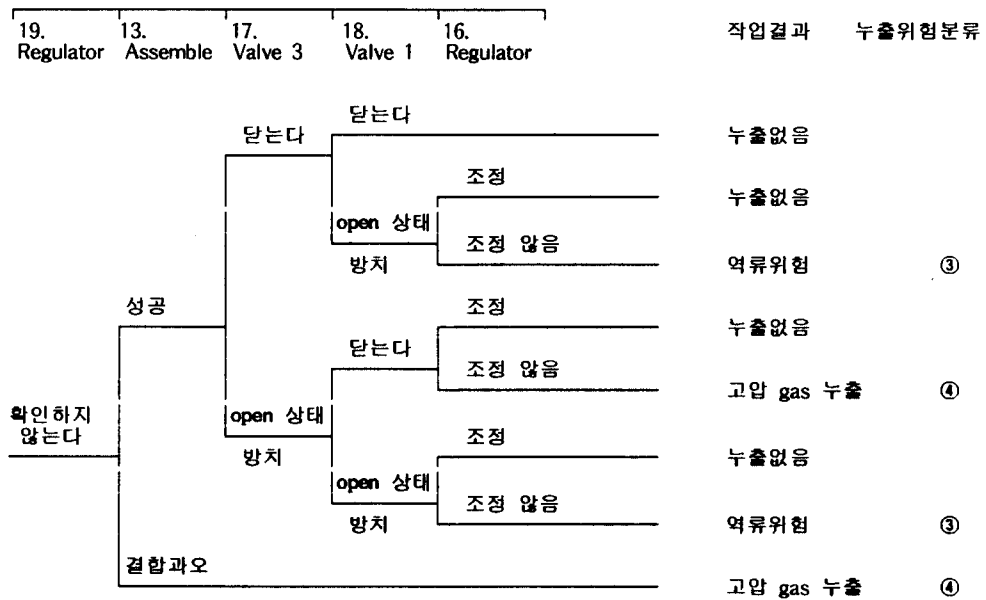


그림 3 새 실린더로부터의 누출사고

분석결과에 따르면, 이미 사용하고 있던 가스 파이프라인에서 잔류가스가 누출될 확률은 75.06 %, 구 실린더로부터 대기중에 가스가 누출될 확률은 2.34 %, 신 실린더로부터 파이프 라인을 타고 폭발성 가스가 역류될 위험확률은 0.026 % 로 무시할 정도이며, 그리고 신 실린더로부터 직접 고압가스가 누출될 확률은 22.58 % 로서, 신규 가스실린더보다는 이미 사용하고 있던 실린더로부터의 누출 위험성이 압도적이었다.

또한, 작업이 다단계로 구성되어 있어 직무의 연속적 수행에 따른 EF (error factor) 의 값이 상당히 증가하기 때문에, 작업자의 숙련정도에 따라 작업수행의 성공여부가 크게 좌우된다는 것을 고려한다면, 작업의 위험성에 비추어 작업자의 교육 및 훈련의 중요성을 새삼 인식할 수 있었다.

한편 직무 2 의 1 회실행에 실패할 확률은 2E-03 내외이지만, 직무 3 의 확인만 제대로 수행된다면 직무 2 의 실패를 회복할 수 있기 때문에, 실제로 직무 2 에 실패할 확률은 1000 분의 1 인 2E-06 로 감소한다. 또한 직무 18 의 경우에도 1 회 실행시의 실

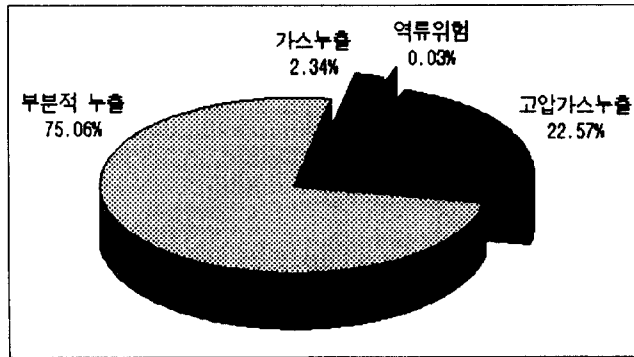


그림 4 가스누출형태의 분포

패 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 중요성이 DeBDA를 통해서 명백히 입증되고, 그 대상기기는 모두 regulator였으므로 직무교육시 regulator 확인작업이 집중강조사항이 되어야 한다는 것을 알 수 있었다.

더욱이 사상발생들이 독립적이라고 가정할 경우 새 실린더로부터의 고압누출이 78.27%로 대부분을 차지하는 것으로 예상되었으나, 종속성이 반영되는 경우에는 기기 및 pipe 내에 남아있던 가스가 누출되는 경우가 75.06%로 전혀 다른 양상을 띄게 된다는 것을 알 수 있었고, 이같은 변화를 가져오는 직무는 직무 17과 직무 18의 valve를 닫는 직무들이라는 것을 확인하였다.

4. 결론

본 연구는 반도체 공장에서 많이 사용하고 있는 포스핀 (PH_3)이나 실란 (SiH_4)과 같이, 가연성이나 폭발성을 지니고 있어 만약 누출되는 경우 사업장 전체의 존폐위기까지도 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 판단되었다.

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 해야 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 직무실패확률에 비해 적게는 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.

5. 참고문헌

- [1] Nagamachi,M., Human Factors of Industrial Robots and Robot Safety Management in Japan, *Applied Ergonomics*, Vol.17, No.1, 1986, pp.9-18.
- [2] Rasmussen,J., "A Taxonomy for Describing Human Malfunction in Industrial Installations," *J. of Occupational Accidents*, Vol.4, 1982, pp.311-333.
- [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] 塩見弘, 人間信頼性工学入門, 日科技連, 1996.
- [5] 林喜男, 人間信頼性工学, 海文堂, 1984.
- [6] 青木通佳, "化学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)", *安全工学*, Vol.21, No.2, 1982, pp.92-100.
- [7] 行待武生, 飛岡利明, "人間-機械系の定量的信頼性解析のための一技法 — Detailed Block Diagram Analysisの事例研究", *人間工学*, Vol.19, No.4, 1983, pp.197-204.