

# 광양제철소 산소공장 위험특성 도출 및 중요도에 근거한 향상 안 제시

최종승, \*김영수, \*김연중, 박진섭  
J. S. Choi, \*Y. S. Kim, \*Y. J. Kim, J. S. Park

포스코 광양제철소  
\* 유나이티드 퍼시픽 피엘지

## ABSTRACT

The air separation plants in the POSCO's Gwangyang Steel Works require high standard on quality as well as reliability as they have to continuously supply such essential utility gases as oxygen, nitrogen and argon. And the plants are in the category of high pressure gas systems by the regulatory guidelines, which signifies that they have to maintain utmost level of safety. As an effort to systematically understand and calculate the risk potentials in the air separation plants, risk assessments have been performed on a phased approach; qualitative and followed by quantitative. POSCO has chosen to use hazard and operability study and fault tree analysis to satisfy the requirements. As a result, the risk assessment team has identified number of safety and operability related findings. With importance of each and every findings calculated, a priority list for what/when to do for them could have been presented on a balanced fashion.

## 1. 서 론

산소공장은 제철소 공정에서 필요로 하는 다양한 유틸리티 가스인 산소, 질소, 알곤 을 생산공장(제강, 고로, 냉연공장 등)에 압송하여 주고 또한 비상용으로 탱크에 저장하여 두었다가 사용하는 중요한 설비이다. 고압의 설비이고 또한 높은 공급신뢰도가 요구되는 이유 때문에 가능한 모든 노력을 포함한 수준 높은 안전관리 프로그램이 요구된다. 안전관리 프로그램의 중요한 요소이고 또한 체계적인 관리의 출발점이 되기도 하는 '위험성분석'을 최근에 산소공장 3개 플랜트에 (#1,2,3) 대해서 수행하였다. 본 논문에서는 대상설비에 대하여 수행한 Hazard and Operability, Fault Tree Analysis 분석 절차 및 결과의 의미를 소개한다. 또한 위험성 측면에서 중요도(Importance)에 따라 개선권고사항이 시행될 경우 안전도가 얼마나 향상될 수 있는지를 계량화하여 제시한다.

## 2. 본 론

### 2. 1. 위험성(Risk)에 관련된 개념

#### 2. 1. 1. 위험성과 불확실성 (Uncertainty)

'위험'이라는 용어에 대하여 사전은 ' 좋지 않은 일이 생길 우려가 있어서 위태롭고 험악함'이라고 설명하고 있다. 즉, '생길 우려'라는 불확실성과 ' 좋지 않은'이라는 손실(Loss, Damage)을 갖고 있다. 이를 수식으로 표현하면 아래와 같다.

위험성 = (불확실성, 손실)

이는 불확실성, 손실이라는 두 가지 요소 중 하나만 해결되어도 우리는 위험성이라고 부르지 않는다. 어느 부

실한 건물이 붕괴되는 시점을 확실히 알고 있다면 그 사건이 위험성 있다고는 말하지 않는다. 물론 붕괴로 인한 손실은 존재하지만 불확실성이 해결되었기 때문이다. 주식을 전혀 보유하지 않은 사람에게서는 주식가격이 오동치는 것이 전혀 위험으로 받아 들여 지지 않는다. 비록 불확실한 사건일지라도 그 사람에게 손실을 주는 것이 아니기 때문이다. 앞으로 소개될 위험성분석은 불확실성과 손실을 질적, 양적으로 알아보려고 하는 노력이다.

#### 2. 1. 2. 위험성과 위험의 원천

혼용되어 사용되기에 더욱 혼동되기 쉬운 두 개념이 위험성(Risk)과 위험의 원천(Risk Source = Hazard)이다. 이를 구태여 수식으로 표현하자면 다음과 같다.

위험성 = 위험의 원천/ 안전보완장치

위의 수식은 비록 위험의 원천이 동일할지라도 안전보완장치(Safeguard)의 크기에 따라 위험의 정도가 달라짐을 의미한다. 예를 들면, 단독으로 소형 보트를 타고 부산을 출발하여 동해를 가로질러 금강산으로 간다고 하면, 모두가 상당히 위험한 계획이라고 할 것이다. 파도, 폭풍 등 여러 Risk Source에 대하여 변변한 안전장치 없이 긴 시간 동안 노출되기 때문이다. 하지만 같은 목적에 대형 유람선을 이용한다면 그 것이 위험하다고 의견을 내는 사람은 없을 것이다. 차이는 안전보완장치의 크기 때문이다. 본 수식은 또한 위험의 원천이 존재하는 한 안전보완장치를 많이 키운다 하더라도 위험성을 '0'으로 만들 수는 없다고 예시한다. 보완장치는 곧 안전을 위한 투자의 규모와 밀접한 상관관계가 있다. 따라서 위험성평가는 허용 가능한 위험도 (Acceptable Risk = Safety Target)와 투자의 규모를 동시에 고려할 수 있는 도구이기도 하다.

2. 1. 3. 인식의 상대성

많은 경우 절대(Absolute) 위험성과 인식된(Perceived) 위험성은 일치하지 않는다. 어느 대상이든 절대 위험성은 정하여져 있으나, 그 대상에 대해서 관찰하는 사람이 갖고 있는 지식과 경험에 따라 인식된 위험성은 매우 틀릴 수 있다. 각 사람이 갖고 있는 배경에 근거하여 절대 위험성 보다 큰 위험으로 받아들이기도 하고, 반대로 작은 위험으로 받아들일 수 있다. 위험성평가는 또한 되도록 객관적이고 통합된 지식, 증거를 이용하여 절대 위험도에 근접시켜서 인식하려는 노력이다.

2. 1. 4. 빈도와 손실의 크기

위험은 빈도(Likelihood) 와 손실의 규모(Damage Level)로 표현된다.

위험성 = (사고의 빈도, 사고의 크기)

다른 문헌에서는 (사고의 빈도 × 사고의 크기) 와 같이 산술적으로 곱한 값으로 표현하기도 한다. 하지만 산술적인 값이 곧 위험성과 동등하다고 말하기 어려운 경우도 많기에 두 요소의 함수로 보는 것이 더 적절할 수 있다.

2. 2. 위험성분석 및 기법

앞에서 소개된 위험성의 속성을 이해하고 규명하는 노력은 곧 다음 3개의 질문에 대한 대답이라고 할 수 있다.

- 무엇이 잘못 될 수 있나? (What can go wrong?)
- 잘못될 사건의 발생 가능성은? (How likely is it?)
- 결과로 인한 손실 규모는? (What is the consequence?)

2. 2. 1. 정성적 위험성분석

위험성을 정성적으로 분석하기 위한 기법으로 Hazard and Operability (HAZOP)을 선택하였다. HAZOP은 국내의 고압가스안전관리법에서 추천하고 있을 뿐 아니라, 구조적 형태를 갖고 있으며 다양한 전문가들의 지식과 경험을 수렴하기에 용이한 기법이다.

HAZOP이 갖고 있는 특징 중에 하나는 Guide Word를 사용하는 것이다. Guide Word와 공정변수를 조합시켜서 본래 설계/운전 개념으로 어떠한 이탈(Deviation)이 가능한지를 살펴본다. 이탈의 원인, 그를 위한 안전장치, 이탈의 결과 등을 논리적으로 도출하는 기법으로 더욱 상세한 설명은 본문에서는 피하지만, HAZOP 진행의 절차는 그림 1과 같이 요약된다.

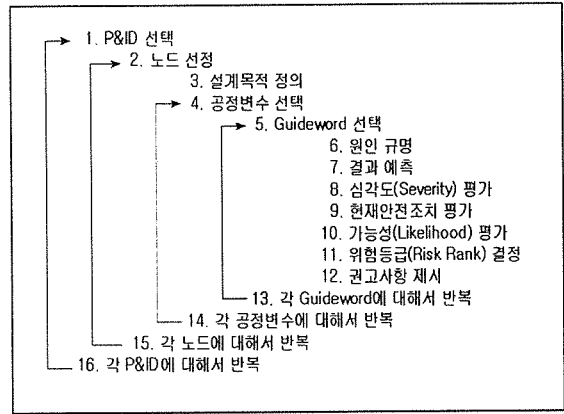


그림 1 HAZOP 분석절차

2. 2. 2. 산소공장이 내포한 위험성

산소공장은 대기 중의 공기를 정제하여 알곤, 산소, 질소 등을 생산하는 설비로 공정 중 알곤의 정제를 위하여 반응기에서 가연성 물질인 수소를 사용한다. 본 공정의 원료물질인 공기 자체는 위험성이 없으나 산소공장의 잠재 위험성은 생산가스 또는 반응용 수소, 그리고 정류탑 내에 공기 정제 과정 중에 불순물로 제거되는 미량의 탄화수소 계통의 가스들이다.

공기 중에는 메탄 20 ppm, 아세틸렌 1 ppm 등이 아주 미량 포함되고 아세틸렌 가스는 매우 불안정한 탄소와 수소의 화합물이므로, 열을 가하거나 압축할 경우에는 폭발의 가능성이 있다. 따라서 정류탑에서는 아세틸렌 축적을 방지하기 위하여 액산 펌프를 이용하여 액산을 순환시키고, 흡착기에서 아세틸렌을 흡착하여 제거하고 있다.

알곤의 정제공정에 사용되는 수소 (연소 범위 4 - 75%)는 공기보다 가벼워 누출되어도 쉽게 날라 간다. 하지만 점화 원인이 존재하면 폭발의 가능성이 있으며 공정 중에 불순물로 제거되는 아세틸렌 (연소범위 2.5 - 81%)은 가스 상태에서 폭발의 위험이 있다. 산소공장에서 취급되는 가스의 성질은 표 1과 같다.

표 1. 산소공장 취급 가스의 성질

물질	수소	아세틸렌	질소	산소
분자량	2	26	28	32
증기압	760mmHg (@-253℃)	760mmHg (@-84℃)	760mmHg (@-196℃)	760mmHg (@-183℃)
자연발화온도	500℃	305℃	해당없음	해당없음
연소 한도 (Vol %)	하한(LFL)	4.0 (4.0)	2.5 (2.5)	해당없음
	상한(UFL)	75.0 (94)	81 (93)	해당없음
기체비중(공기-1.0)	0.07	0.90	0.97	1.1

\*()안은 산소중의 폭발한계

2. 2. 3. HAZOP 분석 및 결과

HAZOP 미팅에는 각 분야 전문가가 9명이 참석하여 약 6주간 진행되었다. 본 HAZOP을 분석하면서 두었던 주요 관점은 다음과 같이 정리된다.

- 위험성 및 조업성에 문제를 일으킬 수 있는 요소의 발견
- 안전성 및 조업성 향상을 위한 개선사항의 수립
- 공장의 설계원리와 운전관련 교육프로그램 개선
- 운전지침 및 절차상의 개선
- 비상대응조치계획에 반영

- 압축기류의 손상
- Revex, 열 교환기, 기화기의 손상
- 펌프터빈의 손상
- 정류탑 손상
- 수소 반응기 손상
- 펌프류 손상
- 저장탱크 손상
- 공급망 순도 불량

분석된 시나리오의 중요도 및 시급성을 표시하기 위하여 위험등급을 5등급으로 나누었다. 이는 국내외 안전 관련 규제기관은 물론 여러 선진기업에서 제시하는 방법이다. 위험등급 1, 2에 대해서는 시정조치가 '선택'이 아니라 '필수'라고 받아들여진다. 광양제철소 산소공장에 대한 HAZOP에서는 위험등급 1과 2는 발견되지 않았다. 3개 산소공장에 대한 HAZOP 동안 270개에 가까운 시나리오가 토의되었고, 안전성, 조업성 상의 개선을 위한 제안이 47건이 도출되었다. 이를 정리하면 표 2와 같다.

고장수목분석을 수립하기 위해서 산소 1,2공장의 단순계통도가 작성되었고 이는 그림 2와 같다. 단순계통도를 작성하는 목적은 대상 산소공장의 배관 및 계기장치도를 단순화하여 고장수목에서 고려되는 설비의 대부분을 나타내서 설계에 대한 이해를 돕는데 있다.

표 2. 개선권고사항 요약

구 분	산소 1,2공장	산소 3공장
설비자체를 개선	28	7
설비점검 및 관리 강화	9	1
기타	2	0

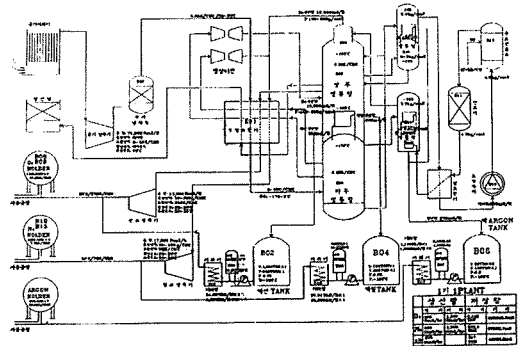


그림 2 POSCO 광양제철소 산소공장 1, 2 플랜트 단순계통도

2. 2. 4. 사고빈도분석

정성적인 접근 방식인 HAZOP을 통해서 일단 걸러진 주요 사고시나리오를 계량화를 위해서 상세히 분석된다. 본 분석을 위해서 고장수목분석(Fault Tree Analysis)이 도입되었다. 여기서 주요사고라 함은 HAZOP분석 결과 심각도가 상대적으로 높은 사고로서 중요 기기 또는 압력용기의 파손, 그리고 가스순도를 저하시키는 사고를 포함한다. 본 분석에서 상용된 방법론은 미국화공학회에서 제시하는 'Guidelines for Engineering Process Quantitative Risk Assessment' 또는 한국산업안전공단의 'P-04-1999 결함수 분석기법' 등에서 제시하고 있다.

고장수목분석을 위하여 또한 선행되던 좋은 것이 Layer of Protection Analysis (LOPA)이다. LOPA는 현재 대상설비가 어떤 종류의 독립적인 안전보완책을 얼마나 보유하고 있는지를 보여준다. 일반적으로 고장수목분석 이전에 LOPA를 수행하여 두면 사고의 진행과정을 이해하는데 도움이 많이 된다. 이러한 절차를 통해서 주요 사고 시나리오를 논리적으로 보여주는 고장수목이 작성된다. 고장수목의 일부를 그림 3에서 보여준다.

분석에 사용된 전산코드는 한국원자력연구소에서 개발한 KAERI Integrated Reliability Analysis Code Package (KIRAP)를 사용하였다. KIRAP은 정량적 안전성평가에 필요한 고장수목 구성, 최소단절집합(Minimal Cut Set) 생성 및 정량화, 중요도 계산, 불확실성 분석 등을 수행할 수 있는 전산코드이다.

고장수목을 정량화하기 위해서는 각 기본사건에 데이터를 입력하여야 한다. 대상 산소공장에 대한 고장 및 각종 사건 데이터가 현재에는 확립되어 있지 않다. 따라서 타 산업계 또는 업계가 정립한 데이터를 일반데이터로 사용하였다. 이 같은 일반데이터에서도 구할 수 없는 경우에는 운전 원의 판단, 전문가의 공학적 판단을 입력하였다. 분석에 고려된 데이터는 크게 3개 분야로 구별된다.

HAZOP 분석 결과 심각도가 상대적으로 높은, 즉, 심각도 C급 이상의 시나리오들을 고장수목분석에 포함하고 있다. 심각도 C급 이상의 사고는 1명 이상의 중상자 또는 5,000만원 이상의 재산상 손실을 의미하며, 산소 1, 2공장에서는 다음의 설비가 주로 고려되었다.

- 기기 고장 데이터
- 공통원인고장 데이터
- 정비, 시험에 의한 이용 불능도

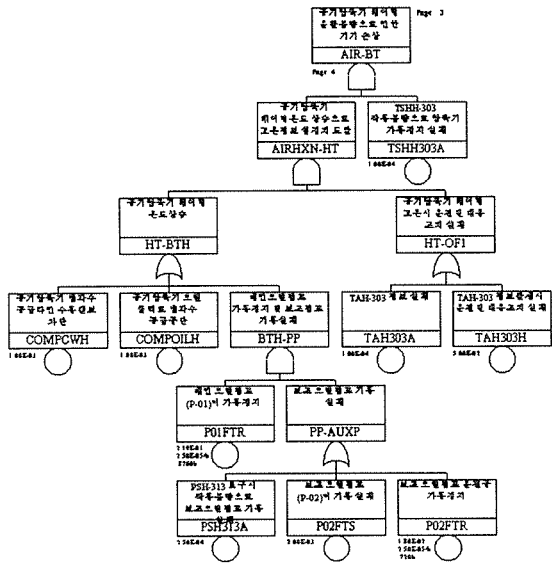


그림 3 산소공장 주요사고 발생 고장수목(일부)

### 2. 2. 5. 분석의 결과 및 활용

산소 1,2 공장에서 우려할만한 사고 또는 고장의 빈도는 2.7E-01/yr 로 계산되었다. 이 같은 사고, 고장의 주요 원인을 나열하면 다음과 같다.

- 초기운전 시 산소, 알콘, 질소의 급격한 기화로 인한 기화기 후단 배관 파손
- 산소, 질소 열 교환기 튜브 누설 후 재가동시 운전원의 감지 실패로 열 교환기 손상 및 Revex 경로 막힘
- 산소, 질소 압축기 열 교환기 누설 후 압축기 재가동시 누설 냉각수 유입으로 파손
- 수소저장탱크 주변 외부화재 발생시 1냉연공장에서 오는 수소라인 공급 차단 실패

앞에서 언급된 요인이 사고, 고장의 전체 발생빈도의 95% 이상을 차지하고 있다. 따라서 이 시나리오에 대한 보완 및 관리를 집중적으로 시행한다면 산소공장의 안전도를 향상시키는데 큰 도움이 된다. 예를 들어, 앞에서 언급한 주요 사고, 고장 원인을 제거하기 위하여 산소, 알콘, 질소의 기화기 후단에 압력방출밸브를 설치하면 상당한 안전개선효과가 있다. 즉, 위험감소율 = (현재의 공급중단 빈도 - 개선 후 공급중단 빈도) / 현재의 공급중단 빈도 × 100(%) 라는 Index를 이용할 경우, 3개소에 압력방출밸브를 설치하는 것으로 약 55%의 감소 효과가 있다.

### 3. 결 론

정성적, 정량적 위험성분석을 HAZOP과 고장수목분석을 통하여 수행하였다. 광양제철소 산소공장에 대한 고유데이터가 현재에는 분석용으로 정리되어 존재하지 않기에, 비록 일반데이터를 이용하여 사고, 고장의 빈도를 계량화 하였지만 시나리오를 중요도에 따라 서열화 할 수 있었다. 전체 사고, 고장 시나리오 중 약 8개에 대해서 적절한 조치를 취한다고 하면 안전성을 탁월하게 증대시킬 수 있다. 그 이유는 상위 8개 요인이 전체 고장, 사고율의 95% 이상을 차지하기 때문이다.

본 분석은 광양제철소의 산소공장에 대해서 처음 수행된 것으로 위험성분석 모델을 제시하였으며, 향후 설비의 개선 및 변경과 함께 개정(Update)될 수도 있다. 대상 공장을 가장 잘 이해하고 있는 전문가들의 지식을 통합하는 위험성평가라는 접근방식을 통하여 내재한 위험성을 정확하고 객관적인 관점으로 계산할 수 있다. 또한 가장 현실적인 개선권고사항을 도출하게 한다.

위험성분석의 결과 및 보고서는 최근 지식을 보관하고 타인에게 전달하는 도구로도 사용된다. 운전 경험이 농축되어 문서화되고 주기적으로 개정된다면 안전 및 생산성 향상에 기여하는 지식근간(Knowledge Base)이 될 수 있다.

### 참고문헌

- (1) 'Hazard Evaluation - Quantitative Methods,' American Institute of Chemical Engineers, 1993
- (2) Crowl, D. A. 'Chemical process Safety: Fundamentals with Applications,' Prentice Hall, 1990
- (3) Fthenakis, V. M., 'Prevention of Control of Accidental Release of Hazardous Gases,' Van Nostrand Reinhold, 1993
- (4) Offshore Reliability Data, 3rd Edition, OREDA-97, SINTEF Industrial Management, Norway, 1997
- (5) 국내화학공장 설비 및 기기 신뢰도 데이터베이스 구축(II), 한국산업안전공단, 2000
- (6) 유나이티드 퍼시픽 피엘지, POSCO 광양제철소 산소공장 1,2,3 플랜트 안전성향상 계획 보고서, 2003