

광양제철소 소둔로 가스설비에 대한 위험성 평가 및 안전성향상안 제시

†김영수·유종호*·정석열*·장의종
(주)유나이티드 퍼시픽 피엘지, *POSCO 광양제철소
(2001년 3월 8일 접수, 2001년 3월 22일 채택)

Risk Assessment and Its Application for the POSCO's Batch Annealing Furnace Gas Systems

Y. S. Kim · J. H. Yoo* · S. Y. Jeong* · E. J. Jang
United Pacific PLG, Inc., *Pohang Iron & Steel Co., Ltd.
(Received 8 March 2001 ; Accepted 22 March 2001)

요 약

광양제철소의 소둔로 설비를 대상으로 정성적 및 정량적 위험성을 평가하였다. 소둔로는 냉연 강판 제조시 품질 향상을 위한 열처리 목적으로 이용되는 제철 설비중 하나로 Coke Oven Gas(COG)가 연료로 사용되고, 수소와 질소의 혼합가스 또는 순수한 수소가 분위기 가스로 사용된다. 위험성 평가를 통하여, 소둔로의 가연성 가스 누출 시나리오와 빈도를 분석하였으며, 가연성 가스 누출 사고시 화재 또는 폭발의 피해 영향을 분석하였다. 이들 분석 결과와 함께 여러 다른 지수(Index)를 제시하여 소둔로 가스 설비의 안전성 향상 방안을 도출하였다.

Abstract - A complete spectrum of risk assessment including qualitative and quantitative approaches were performed for the POSCO's Batch Annealing Furnace (BAF) gas systems. The purpose of BAF is to enhance the quality of steel by annealing it with either hydrogen/nitrogen mixture gas or pure hydrogen gas. Number of gas leak scenarios were identified to generate frequency of their occurrences. With the hypothetical accident scenarios given, fire/explosion impact studies were performed to estimate magnitude of significant consequences. Several different indices were also presented from which practical safety improvement action items could be established.

Key words : Risk Assessment, Batch Annealing Furnace, Risk Reduction, Fire and Explosion Assessment

1. 서 론

위험성평가를 수행하는 동기에는 여러 가지가 있을 수 있다. 하지만 그 동기가 무엇이든, 궁극적으로 위험성평가를 통해서 얻고자 하는 목표는 위험성의 저감, 곧, 안전성의 향상이다. 위험성평가를 위한 접근 방법은 정성적 것과

정량적 부류로 크게 대별되고, 각 부류에는 각기 특성을 갖고 있는 여러 기법들이 있다. 따라서 우리는 기법 선정시, 그 위험성평가 특성, 설비의 특징, 안전성 향상 기대치를 동시에 고려하여 선택한다.

본 논문에서 소개하는 분석 대상인 제철소의 소둔로(Batch Annealing Furnace: BAF)는 다

양한 계기장치를 포함한 복잡한 설비로서 다단계의 운전작업이자 항상 요구되는 장치이다. 따라서 앞 절에서 설명하였듯이 정성적 위험성 평가는 물론 정량적 위험성분석이 함께 요구되는 특성을 내포하고 있는 대상이다. 정성적 평가는 위험과 운전분석(HAZOP) 기법을 적용하여 수행하였다. 또한 정성적 위험성 평가의 결과는 정량적 위험성 평가의 기초 및 입력 자료로 사용되었다. 정량적 안전성평가는 평가 방법론을 수립하고 이를 적용하여 가연성가스(H₂, COG) 누출 시나리오와 누출빈도를 분석하였으며, 가연성가스 누출 사고시 화재 또는 폭발의 피해 영향을 분석하였다. 이들 분석 결과를 바탕으로 소둔로 설비의 안전특성과 안전성 향상방안을 제시하였다.

II. 공정 개요

본 공정은 냉연강관을 제조하는 공정으로 열처리 목적의 소둔로 등의 설비가 있다. COG가 연료로 사용되며, 소둔로는 HN(H₂+N₂) 가스와 H₂ 가스를 분위기 가스로 사용하고 있다. 수소는 자체 공장에서 제조된 수소가 11 Kg/cm²로 수소 탱크에 저장되었다가 4 - 5 Kg/cm²로 1차 감압 된 후 소둔로 전단까지 공급된다. 수소는 다시 정압기(Regulator)에서 150 - 200mmH₂O로 2차 감압된 후 소둔로에 공급된다. 소둔로 Inner Cover 내로 공급되는 순수 수소가스는 환원성이 강하기 때문에 양질의 냉연강관을 제조하게 된다. 한편 HN 가스는 순수한 수소의 경우보다는 환원성은 떨어지나, 위험성 측면에서는 다소 유리한 측면이 있다. HN 가스내의 수소농도는 안전을 고려하여 4 - 8%로 유지하여 공급된다. 연료가스로 사용되는 COG 가스는 1200℃ 정도로 유지되어 소둔로의 Inner Cover 내부 온도를 700℃ 정도로 유지시켜 주는 역할도 한다. 수소 사용 소둔로는 소둔베이스, Inner Cover, 가열후드 및 냉각후드로 구성되어 있다. 강철 구조물로 지지되는 소둔베이스의 하부에는 기존 플랫폼 하부에 위치한 가스 공급, 배출용 배관이 설치되어 있다. 소둔베이스는 Inner Cover, 가열후드, 냉각후드를 적절히 위치시키기 위하여 두 개의 Guide Rods가 있다. 베이스와 Inner Cover사이에는 플랜지 밀봉 및 밀착기능이 있다. 순수 수소가스는 환원성이 강한 이유로 고품질, 저원가의 냉연강관 생산이 가능하다.

III. 평가 방법

소둔로 설비의 위험성 평가는 단계별로 수행되었다. 대상 설비에 대하여 먼저 정성적 위험성 평가를 수행하였으며, 다음 단계로서 정성적 위험성평가 결과를 기초자료로 활용하여 정량적 위험성 평가를 하였다. 정량적 위험성 평가는 사고 발생빈도와 사고 영향 분석으로 나누어 수행되었다.

정성적 위험성 평가 - HAZOP 분석

정성적 위험성 평가의 기본 목적은 존재 가능한 위험성(Hazard)과 운전상(Operability)의 문제 등을 도출해내는 것이다. HAZOP은 'Guide Word'와 '공정변수'를 조합하여 시스템 적으로 현장의 경험, 작업자의 지식을 통합함은 물론 중요한 안전, 작업상의 문제점을 밝히게 한다. 또한 다음 단계인 정량적 위험성평가를 위한 기초 및 입력자료를 제공한다.

정량적 위험성 평가 - 사고 발생빈도 분석

사고 발생빈도분석을 위하여 고장수목분석(Fault Tree Analysis: FTA) 기법을 이용하였다. 고장수목분석은 분석대상계통이 기능상실(이용불능: Unavailable)되는 상태를 기술하고, 계통의 운전 및 운전 주변조건을 고려해서 이용불능 상태를 발생시킬 수 있는 모든 가능한 요인을 밝혀내는 분석기법을 말한다. 여기서 고장이란 기계적고장, 인적오류(Human Error), 공통원인고장(Common Cause Failure)등 원치 않는 상태를 발생시키는 사건을 말한다.

고장수목은 기본사건(Basic Event)에서 정점사건으로 전개를 허용 또는 금지하는 게이트(Gate)로 연결되어 있다. 이 게이트는 상위 수준의 사건 발생에 필요한 사건들의 상호관계를 나타내며, 상위 사건은 이 게이트 출력력으로 나타나며, 하위사건은 이 게이트의 입력으로 들어간다. 게이트 기호에 따라 출력사건에 요구되는 입력사건의 상호 관련 형태가 표시되고, 게이트는 배관에 있는 밸브 혹은 전기회로에 있는 스위치의 기능과 유사하다. 따라서 고장수목은 분석대상 계통이 원치 않는 상태(고장수목의 정점 사건)로 변화하는 기본사건의 논리적 상호관계를 기술하게 된다.

정량적 위험성 평가 - 사고 영향 분석

본 설비에서 우려되는 사고영향은 가연성 가

스로 인한 화재 또는 폭발이다. 소둔로 설비에서 가연성 가스(H₂ 또는 COG)가 누출되는 즉시 점화가 될 경우를 가정하여 제트화재(Jet Fire)분석을 수행하였다. 또한 가스 누출이 즉시 점화로 발전되지 않고 대기중으로 확산되면서 증기운을 형성하여 가연성 농도범위에 도달하고 동시에 인화물질이 존재한다고 가정하여 증기운 폭발(VCE: Vapor Cloud Explosion)분석을 수행하였다.

정량적 위험성 평가-사고 발생빈도 분석
정성적 분석 단계에서 도출된 사고추이를 기본으로 하여 소둔로 설비에서 H₂ 및 COG 가스의 누출 발생빈도를 구하기 위해 고장수목 분석을 수행하였다 (그림 1 참조). 고장수목 분석은 한국원자력연구원이 개발한 도구인 KAERI Integrated Reliability Analysis Code Package(KIRAP)를 사용하여 수행하였다.

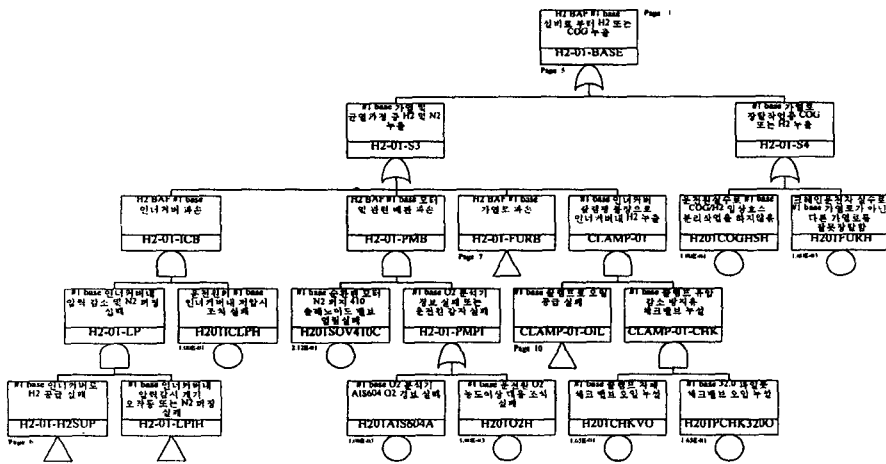


Fig. 1. Fault Tree for the BAF (Portion)

IV. 평가 결과

정성적 위험성 평가

HAZOP을 16개의 노드로 구분, 분석하여 총 190건의 사고 시나리오를 발견하였다. 이 중 시급한 조치가 필요할 정도인 위험등급 1인 시나리오는 발견되지 않았으며, 우려할 정도의 위험도로 단기간 내에 시정될 필요가 있는 위험등급 2에 해당하는 시나리오는 1건이 발견되었다. 일반적으로 통용되는 기준에 따르면, 위험등급 1과 2에 대한 시정조치는 선택사항이 아니라 '필수'인 것으로 인식된다. 나머지 사고 시나리오는 3, 4 또는 5의 위험등급에 해당되었다. 3등급 이하의 경우, 도출된 사고 시나리오에 대해 경제성 및 타당성을 검토하여 개선 및 권고사항을 선택적으로 도입할 수 있다. 정성적 위험성 평가의 결과 총 42건의 개선권고사항이 제시되었는데, 추가로 분류하면 설비 자동화 9건, 감지설비 강화 14건, 점검강화 8건 및 기타 설비개선 사항이 11건이다.

KIRAP은 사건수목 구성, 고장수목 구성, 최소 단절군(MSC : Minimal Cut Set) 생성 및 정량화, 중요도 계산, 불확실성분석 등을 수행하는 전산코드이다.

고장수목 분석 후 각 사고유형별로 발생빈도를 계산하였으며 본 분석 단계에서 도출된 사고시나리오를 바탕으로 가연성가스 누출 빈도를 분석한 결과, 소둔로 설비에서의 누출빈도는 $3.926 \times 10^{-1}/\text{yr}$ 으로 계산되었다. 그리고 메인 버너 착화전 운전원의 파일럿 버너 착화확인 불량, 각 베이스별 폐가스 댐퍼 잘못 닫힘, 각 베이스별 폐가스 모터구동밸브 잘못 닫힘, 크레인 운전자의 실수로 다른 가열로를 잘못 장탈함 등이 주요 가스 누출 사고를 발생시키는 요인으로 발견되었다.

사고발생에 기여하는 원인별로 중요도분석 및 민감도분석을 수행하였다. 중요도 분석에는 향후 안전성 향상 계획에 유용한 정보를 제공하는 Fussell-Vesley (F-V)중요도, 위험도 달성가치(Risk Achievement Worth: RAW), 위

해도 감소가치(Risk Reduction Worth: RRW) 등의 지수(Index)가 제시되었다. RRW(혹은 F-V중요도)가 큰 부분에 대하여 우선적으로 설계 개선을 하는 것이 효과적이다. RAW가 큰 부분에 대하여는 절차서 개선, 정기검사, 보수, 및 운전원훈련 등을 강화하여야 한다. RRW(Fussell-Vesely 중요도)와 RAW 모두 낮은 부분에 대하여는 별도의 특별한 조치가 필요 없고 현재의 설계상태를 유지한다. 분석 결과 작업자의 실수로 크레인으로부터 코일이 낙반되는 사건과 전원 공급불량이 우선적으로 설계개선이 필요한 부분으로 선정되었다. 주요 설비 및 작업자 오류에 대한 개선효과를 계산하기 위해 민감도분석을 수행한 결과, 폐가스 탬퍼 및 모터구동벨브에 대한 설비 개선이 시행되거나 또는 코일 적입 과정 중 작업자의 실수를 감소시킬 수 있다면, 전체 가스 누출빈도를 각각 35%와 23% 정도 경감할 수 있는 것으로 나타났다.

사고영향 분석

소둔로 설비에서 가연성 가스(H₂ 또는 COG)가 누출되는 경우 누출 즉시 점화가 될 가능성이 있고 이때 제트화재(Jet Fire)가 발생하게 된다. 누출이 차단되어 소량의 가연성 가스가 방출되면 단기간의 제트화재로 종료되나 누출이 차단되지 않으면 장기간의 제트화재가 된다. 가연성 가스가 누출되더라도 즉시 점화되지 않으면 누출된 기체가 대기중으로 확산되면서 증기운을 형성하게 된다. 확산되던 증기운이 가연성 농도범위에 도달하게 되면 인근의 점화원에 의해 폭발되는 증기운 폭발(VCE: Vapor Cloud Explosion) 또는 플래쉬화재(Flash Fire)가 발생한다.

HAZOP 및 빈도분석 결과를 근거로 소둔로 설비에서 가능한 가연성 가스 누출 사건을 다음과 같이 정리된다.

- 사건 1. 코일 낙반사고 시 지하에 위치한 H₂ 및 COG 배관망 파손
- 사건 2. H₂ 소둔로의 Inner Cover 씬(Seal), 클램핑 불량으로 H₂ 누출
- 사건 3. 가열로 장탈, 가열로 내 폭발로 H₂ 및 COG연결호스 파손

1. 폭발사고 사건 분석 결과

소둔로 설비로부터의 가연성가스 누출에 따른

가장 최악의 시나리오는 코일낙반으로 인한 수소 및 COG 배관망 파손에 따른 폭발로 인한 피해이다. 분석결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 1psig (6,895Pa)의 과압이 부과되는 거리는 폭발지점으로부터 약 80m로 나타났다. 1 psig의 압력은 사람이나 구조물에는 영향이 거의 없으나 유리창이 파손되고 가옥이 부분적으로 파손되는 정도로서, BAF설비보호를 위한 과압기준으로 적용되므로 설비의 배치시 고려하여야 한다.
- 2) 폭발지점으로부터 10m 내에 존재하는 사람은 고막파열이상의 부상 및 사망할 가능성이 90 %이상이며, 구조물 및 유리창의 파손가능성도 거의 100%에 달한다.
- 3) 각 피해 종류별 손상확률이 50%가 되는 거리는 다음과 같다.

피해 종류	손상확률 50% 인 과압	해 당 거 리
폐출혈로 인한 사망	145,000 Pa (21psig)	12 m
고막 파열	44,000 Pa (6.4psig)	22 m
구조물 파손	19,000 Pa (2.8psig)	36 m
유리창 파손	4,000 Pa (0.6psig)	120 m

4) 이상의 4가지 피해종류 즉, 폐출혈로 인한 사망, 고막파열, 구조물파손 및 유리창 파손 등에 대해서 모두 안전한 거리는 약 280m이다.

소둔로 설비로부터의 가연성가스 누출 사고 중 빈번히 일어날 수 있는 사건은 H₂ 소둔로 설비의 인너커버 씬(Seal) 또는 클램핑 불량으로 인한 H₂ 누출에 따른 폭발로 인한 피해이다. 분석결과 수소 0.5Kg 누출 시 각 피해 종류별 손상확률이 50%가 되는 거리는 폐출혈로 인한 사망이 5m, 고막파열이 9m, 구조물 파손이 14m, 그리고 유리창 파손이 48m로 나타났다. 따라서 수소는 미량이 누출되더라도 일단 폭발이 발생하면 그 피해범위가 넓으므로 누출 방지 및 검지에 각별한 주의를 기울여야 한다.

2. 화재사고 사건 분석 결과

소둔로 설비로부터 가연성가스가 누출되어 화재를 일으키는 사건은 가열로 장탈 실수 또는 가열로 내 폭발로 인한 H₂ 및 COG연결호스 파손이다. H₂ 연결호스 또는 COG 연결호스에서 누출된 H₂ 또는 COG는 주변 점화원(예,

버너불꽃)에 의해 제트화재(Jet Fire)를 일으킬 수 있다. 분석결과는 다음과 같다.

1) 제트화재의 화염길이는 수소누출시 6m, COG 누출 시 8m로 계산되었다.

2) 베이스 지역에 있는 작업자의 50%가 사망 피해 가능 거리를 계산한 결과 수소누출의 경우 수소버너 연결호스에서 1분간 누출되었을 경우는 0m, 그리고 5분간 누출되었을 경우는 약 2m로 계산되었다. COG 누출의 경우는 1분간 누출되었을 경우는 약 4m, 그리고 5분간 누출되었을 경우 약 8m로 계산되었다. 지면에 있는 작업자의 50%가 사망 피해 가능 거리를 계산한 결과 수소누출의 경우 수소버너 연결호스에서 1분간 누출되었을 경우는 1m, 그리고 5분간 누출되었을 경우는 약 2m로 계산되었다. COG 누출의 경우는 1분간 누출되었을 경우는 약 5m, 그리고 5분간 누출되었을 경우 약 9m로 계산되었다. 따라서 수소누출시 보다는 COG누출 시 피해가 더 크며, 지면에 있는 작업자도 베이스에 있는 작업자만큼 위험하다.

V. 결 론

제철소의 소둔로 설비를 대상으로 가연성 가스의 누출 가능성을 정성적, 정량적 위험성 평가 기법으로 수행하였으며, 가연성 가스 누출 사고시 화재 또는 폭발의 피해 영향을 분석하였다. HAZOP 분석 및 사고 빈도분석 결과를 바탕으로 관리개선 사항과 설비개선 사항으로 수행 결과를 정리하였다. 이 결과는 소둔로 설비의 안전특성 및 안전성 향상방안으로 도출되어 중요도 순서에 따라 제시되었다.

본 분석의 에서 제시된 3종류의 지수, F-V중요도, RAW, RRW는 위험도 감소 측면에서 도입이 필요한 항목의 우선 순위는 물론 조치의 종류(Category)에 대한 공학적 근거를 제시한다. 위험성평가의 궁극적 목표인 '안전성향상' 방안을 이러한 지수들은 구체적으로 제안한다. 이 중 관리개선 사항으로는 도면 및 운전 절차서의 개정, 설비의 변경 부분 재검토, 그리고 기기 이력관리의 효율화 등이 중요 사항이었다. 설비개선사항으로는 설비 자동화 및 감지설비 강화, 점검 및 보수작업 강화, 그리고 기타 설비 강화 등의 소둔로 설비 운영의 모든 분야를 포함하고 있다.

위험성 평가에서 제시된 사항들은 사안별로 중장기적 대책 등을 수립하여 검토할 필요가 있다. 관리 또는 설비 개선이 이루어진 후에는 본 평가 방법을 적용하여 위험성 평가를 수행하는 것이 바람직하다. 또한 수립된 위험성 평가 모델을 지속적으로 활용하여 안전성 향상을 점검하는 것이 요구된다.

VI. 참고자료

- [1] (주)유나이티드퍼시픽피엘지, "포항종합제철(주) 광양제철소 제1냉연공장 Batch Annealing Furnace (BAF) 가스설비 위험성평가 및 방폭안전진단 보고서", (2000).
- [2] 김연중, 안상현, 조현춘: 화학공업과 기술, "가스시설의 위험성평가 기법 및 적절한 기법의 선택을 위한 고려 사항", 14(4), 351 (1996).