

HAZOP 기법을 이용한 이산화탄소 분리 공정 위험성 평가 및 안전도 향상 전략

유찬희 · 김지용[†]

인천대학교 에너지화학공학과
22012 인천광역시 연수구 아카데미로 119
(2018년 2월 19일 접수, 2018년 5월 4일 수정본 접수, 2018년 5월 8일 채택)

HAZOP Study for Risk Assessment and Safety Improvement Strategies of CO₂ Separation Process

Chanhee You and Jiyong Kim[†]

Department of Energy & Chemical Engineering, Incheon National University, 119 Academy-ro, Yeonsu-gu, Incheon, 22012, Korea
(Received 19 February 2018; Received in revised form 4 May 2018; accepted 8 May 2018)

요 약

화학 및 전력 산업 관련 에너지 및 환경 현안에 대응하기 위한 다양한 기술이 개발 및 실증화 단계에 있으며, 특히 아민을 이용한 이산화탄소(CO₂) 분리 공정은 CO₂ 포집 및 격리(CCS; carbon capture and sequestration) 설비의 대표적인 핵심 기술이다. 본 연구에서는 상용화 중인 아민 기반 CO₂ 분리 공정 분석 및 검토를 통하여 주요 위험 요소를 규명하고 안전성 향상을 위한 전략을 제시한다. 대상 공정에 대한 위험성 평가를 하기 위해 HAZOP 기법을 이용하였으며, 위험 등급 표(Risk matrix)를 이용하여 규명된 위험 요소들의 상대적 순위를 평가함으로써 주요 위험 요소를 완화시키거나 제거할 수 있는 설비 및 운전 상의 전략을 제시한다. 위험성 평가 결과로 운전자의 오작동, 부식에 의한 파열, 배관 및 펌프의 고장 등이 주요 위험 요소로 규명 되었고, 완화 전략으로 누출/화재/폭발에 대한 시나리오 규명, 운전자의 관리 및 교육, PSV 등 안전 밸브 설치 등 장치 변경 및 유지 보수 계획 등을 제시하였다.

Abstract – Various technologies to cope with the energy and environmental issues related to the chemical and electric power industry are in development and demonstration stage. Especially, the absorption process of carbon dioxide (CO₂) using amine solution is a key technology of the CO₂ capture and storage (CCS). In this study, we identify the major risk factors and suggest strategies for safety improvement by analyzing and assessing commercial the amine-based CO₂ separation process. HAZOP method was used to assess the risk for the process. We provide facilities and operational strategies to mitigate or eliminate major risk factors by assessing the relative ranks of identified risk factors using a risk matrix.

Key words: HAZOP, Chemical safety, Risk assessment, Amine process, CO₂ separation

1. 서 론

최근 화석 연료의 사용은 전 세계적 인구 및 소비가 급격하게 증가함에 따라 급격히 증가하고 있다[1,2]. 이러한 에너지 수요 증가는 부존 자원의 고갈, 대기 오염 및 온실 가스 배출로 인한 기후 변화 등 중요한 에너지 관련 문제를 동반한다. 현재 세계 에너지 수요의 80% 이상이 천연가스, 석유, 석탄 등 전통적인 화석 연료의 연소에 의해 충족되고[3], 이러한 에너지 자원의 최종 에너지 형태로의 전환 중에 다량의 대기 오염 물질 및 온실 가스(CO₂, CH₄, N₂O 등)의 대기로 방출로 인해 기후 변화 등 심각한 환경 문제가 발생되고 있

다[4]. 특히 이산화탄소(CO₂)는 지구 온난화 및 기후 변화에 주요한 물질 중 하나로써[5], 많은 국가들이 “탄소 포집 및 격리(carbon capture and sequestration; CCS)” 기술 개발을 통해 CO₂ 배출을 줄이기 위한 신 재료 개발 및 공정 설계 등의 연구를 활발히 수행하고 있다[6-8]. 특히, 관련 기술의 꾸준한 발전을 기반으로 Ho 등의 고 에너지 효율의 CO₂ 분리를 위한 제올라이트 기반 PSA 기술[9], Hussain Arshad 등의 배기가스 중 CO₂ 분리를 위한 다층 막 분리 공정[10], Oh 등의 최소 에너지 소비를 위한 아민 기반 CO₂ 분리 공정 설계 기술[11] 등 상용화 수준의 효율적인 CO₂ 분리 시스템 실증화를 위한 많은 연구가 수행되고 있다.

다양한 CO₂ 분리 기술 중에서 아민 기반의 CO₂ 분리 공정은 가장 널리 사용되는 성숙도가 높은 기술이다[12]. 특히 CO₂ 흡수를 위한 monoethanolamine (MEA) 수용액은 그 재생 공정 중 낮은 에너지 소요의 큰 장점으로 가장 오랫동안 잘 사용되어 온 용매이다

[†]To whom correspondence should be addressed.

E-mail: jykim77@incheon.ac.kr

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

[13]. 반면, MEA 기반 CO₂ 분리 공정은 기술적 성숙도 및 높은 가격 경쟁력으로 널리 사용되고 있으나, 위험성 평가 및 안정성 평가와 같은 안전에 관한 연구는 충분히 수행되고 있지 않다. 문헌 상에 생애주기 평가(Life cycle assessment; LCA) 등의 기법을 이용하여 MEA 기반 CO₂ 분리 공정의 누출 등 환경 영향성에 관한 연구는 시도되었고[14-16], 또 다른 연구에서는 아민 수용액에 의한 기계장치 및 설비의 부식율을 정량적으로 분석하였다[17]. 최근 Alicja Krzemień 등에 의해 아민 기반의 CO₂ 분리 공정에 대한 정성적 위험성 평가가 수행되었다[18], 하지만 상기 연구는 아민 기반의 CO₂ 분리 공정 상의 잠재 위험 요소(Hazard)를 규명한 반면 이를 완화시키거나 제거하기 위한 설비 및 운전 상의 전략 제시는 미흡하였다.

따라서 본 연구에서 아민 기반 CO₂ 분리 공정 전반에 관한 위험성 평가를 통하여 잠재적 위험 요소를 규명하고, 더불어 이러한 위험 요소를 완화시키거나 제거 하기 위한 장치 변경 및 유지 보수 계획 등의 능동적인 전략을 논의하고자 한다.

2. 위험성 평가

위험성 평가는 대상 공정의 유해 및 위험요인을 파악하고 해당 요인에 의한 사고 및 상해의 발생 가능성과 사고의 강도를 추정 및 결정하여 위험요인을 감소시킬 수 있는 대책을 수립하여 실행하는 일련의 과정을 말한다. 즉, 위험성 평가는 공정 내에서 사고를 예방하기 위한 첫 번째 단계이다. 즉, 대상 공정의 기술적 분석을 통하여 설비 및 운전 상의 잠재적 위험을 초래할 수 있는 모든 이탈을 체계적으로 규명하는 단계로써 안전한 사업장 구축에 가장 중요한 부분이다. 따라서 위험 평가 과정에서 대상 공정의 종류, 분석 및 평가의 수준 등을 고려하여 가장 적절한 평가 방법 선택이 정확한 위험성 평가의 시작이다. 특히 화학 공정을 대상으로 하는 위험성 평가는 주로 Preliminary Hazard Analysis (PHA), Failure Mode and Effects Analysis (FMEA), Fault Tree Analysis (FTA) 및 HAZOP 기법 등이 주로 사용되고 있다.

그 중 PHA 기법은 비교적 덜 세분화 된 분석이 필요하거나 정보에

대한 접근이 제한적일 경우 주로 사용되며, FTA는 폭발, 화재, 기타 치명적인 사건과 같은 특정 사고 분석 시에 주로 사용된다. 본 연구에서는 대상 공정이 기존의 널리 사용되고 있는 CO₂ 분리 공정이기 때문에 비교적 공정 전체의 모든 설비 및 운전 조건에서 발생 가능한 모든 위험요소와 이탈을 고려할 필요가 있으며, 많은 상용화 자료로 인하여 필요한 정보에 대한 접근도 제한적이지 않다. 따라서 본 연구에서는 모든 이탈과 조작 상의 문제를 포함하여 모든 위험 요소가 식별되고 배관 및 장치 등과 같은 시스템에 대한 기술 정보를 포괄적으로 평가 할 수 있는 HAZOP 기법을 대상 공정에 적용한다[19].

정성적 위험성 평가 기법인 HAZOP 기법은 공정에 존재하는 위험요소들뿐만 아니라 공정의 효율을 떨어뜨릴 수 있는 운전상의 문제점을 체계적으로 알아내기 위한 간단하고 구조적인 분석 방법이다. HAZOP 기법을 수행 하기 위해서 설계도면, 공정 자료 등 여러 가지 데이터를 검토하여야 한다. 구성된 팀은 모든 자료를 검토한 뒤, 공정 변수(process parameter)와 Guide words를 조합하여 발생 가능성 있는 공정 이탈(Deviation)을 찾고 난상토론(Brainstorming)을 하는 과정에서 공정의 위험요소들을 규명한다. 일반적인 HAZOP 기법을 이용한 안전성 평가는 다음과 같은 주요 절차를 따른다.

- i. 대상 공정 분석 및 도면(P&ID) 확보
- ii. 공정 변수(Parameter) 및 이탈 현상(Deviation)선정
- iii. 원인(Cause) 규명 및 결과(Consequence)예측
- iv. 사고의 강도(Severity) 및 사고의 빈도(Likelihood)평가
- v. 위험등급(Risk Rank) 결정 및 개선 및 권고사항(Recommendation)제시

3. 아민 기반 이산화탄소 분리 공정

Fig. 1에 일반적인 연소 후 MEA 기반 CO₂ 포집 공정을 나타내었다. 일반적으로 MEA는 30 wt%의 수용액 상태로 사용되며, 상업적으로 아민에 의한 열화 및 장비 부식을 방지 목적의 저해제와

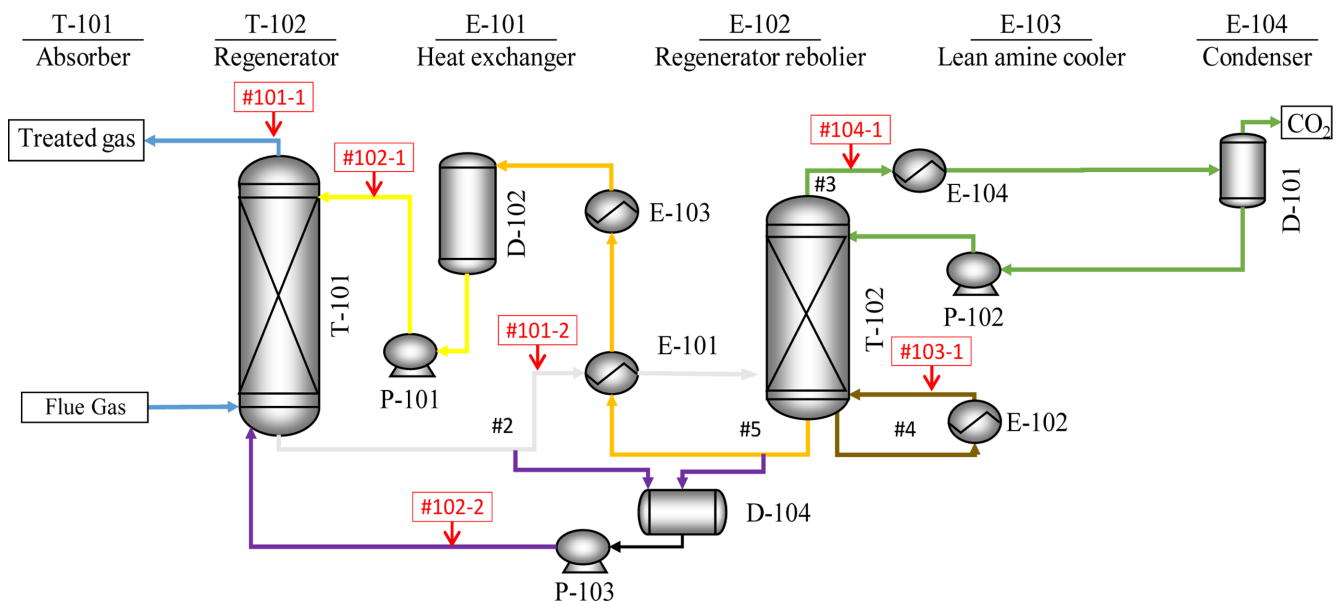


Fig. 1. Process flow diagram of the MEA-based CO₂ separation process.

함께 사용된다[18]. MEA 기반 CO₂ 분리 공정은 전형적으로 두 개의 탑의 조작으로 수행된다. 첫 번째 탑(T-101)은 흡수제로 사용되는 아민 수용액에 CO₂를 흡수하는데 사용된다. 따라서 이 흡수탑을 일반적으로 흡수기(Absorber)라고 부르며, 주입되는 원료 가스는 실질적으로 CO₂와 H₂S를 제거 할 수 있는 이 흡수기에서 처음으로 아민 용액과 접촉을 한다. 화학적 흡수에 의해 CO₂가 풍부한 아민 수용액(Rich amine solution)은 열 교환기(E-101)를 지나 아민 수용액의 재사용을 위해 흡수된 CO₂를 분리하기 위한 탈거기(regenerator; T-102)에 유입된다. 두 번째 탑인 regenerator에서는 CO₂가 흡수된 아민 수용액을 재생한다. 재생된 아민 수용액(Lean amine solution)은 열 교환기(E-101)를 걸쳐 absorber로 다시 유입된다. 분리된 CO₂는 두 번째 탑의 상부에서 배출한다.

본 연구에서는 MEA 기반 CO₂ 분리 공정을 상용 모사기를 이용하여 모사하였으며, 공정 모사에 사용된 가정 및 설계 조건(Design specification)은 아래와 같다.

- 주입 가스의 CO₂ 유량은 199.5 kg/hr이며, 이 중 90% 이상의

CO₂가 제거된다.

- 본 대상 공정은 파일럿 공정으로써 주입된 배기 가스는 41.21 kmol/h이며 조성은(CO₂ 11%, N₂ 76% H₂O 6% O₂ 6%)이다
- 열 교환기 및 콘덴서의 온도 차이(LMTD)는 10 °C이며, 압력 강하는 무시된다.
- 흡수탑에서의 압력 강하는 5 kPa이고 탈거탑에서의 압력 강하는 10 kPa이다.
- 공급되는 다른 화합물들의 영향은 무시된다.
- 흡수탑의 단수는 6단, 탈거탑의 단수는 11단이며 탈거탑의 환류 비는 1.97이다.
- Kettle 유형의 리 보일러를 사용하였고, partial-vapor 유형의 콘덴서를 사용한다.

공정 모사 결과 장치의 주요 설계 인자와 공정 상의 흐름 정보를 분석하였다. 특히 대상 공정에 대한 전체적인 위험성평가는 많은 노력과 시간이 소요되므로, 예비 분석을 통하여 주요한 위해 및 위험 요소를 선별하고, 그 결과 심각한 위험요소가 예상되는 부문에

Table 1. Main equipment, operation and normal operating conditions of the selected nodes

| Node | Section | Main equipment | Operation | P [MPa] | T [°C] | m (kg/h) |
|--------|---------------|--|--|---------|--------|----------|
| #101-1 | Feed ~ T-101 | Absorber, flue gas and treated gas lines | Removal of acid gas components | 3.5 | 25.0 | 1,200 |
| #101-2 | T-101 ~ E-101 | Absorber bottom, rich amine line | Transport of rich amine to regenerator | 3.1 | 36.0 | 44,238 |
| #102-1 | T-102 ~ E-104 | Buffer drum, lean amine line | Supply of lean amine to absorber | 0.1 | 120.0 | 3,038 |
| #102-2 | T-102 ~ E-102 | Blow down drum, pump | Gas storage and transport | 0.09 | 50.0 | 2,869 |
| #103-1 | T-102 ~ E-101 | Regenerator, lean amine line | Regeneration and transport of amine solution | 0.12 | 125.5 | 44,051 |
| #104-1 | P-101 ~ T-101 | Regenerator overhead system | Transport of removed acid gas out | 3.46 | 35.0 | 44,058 |

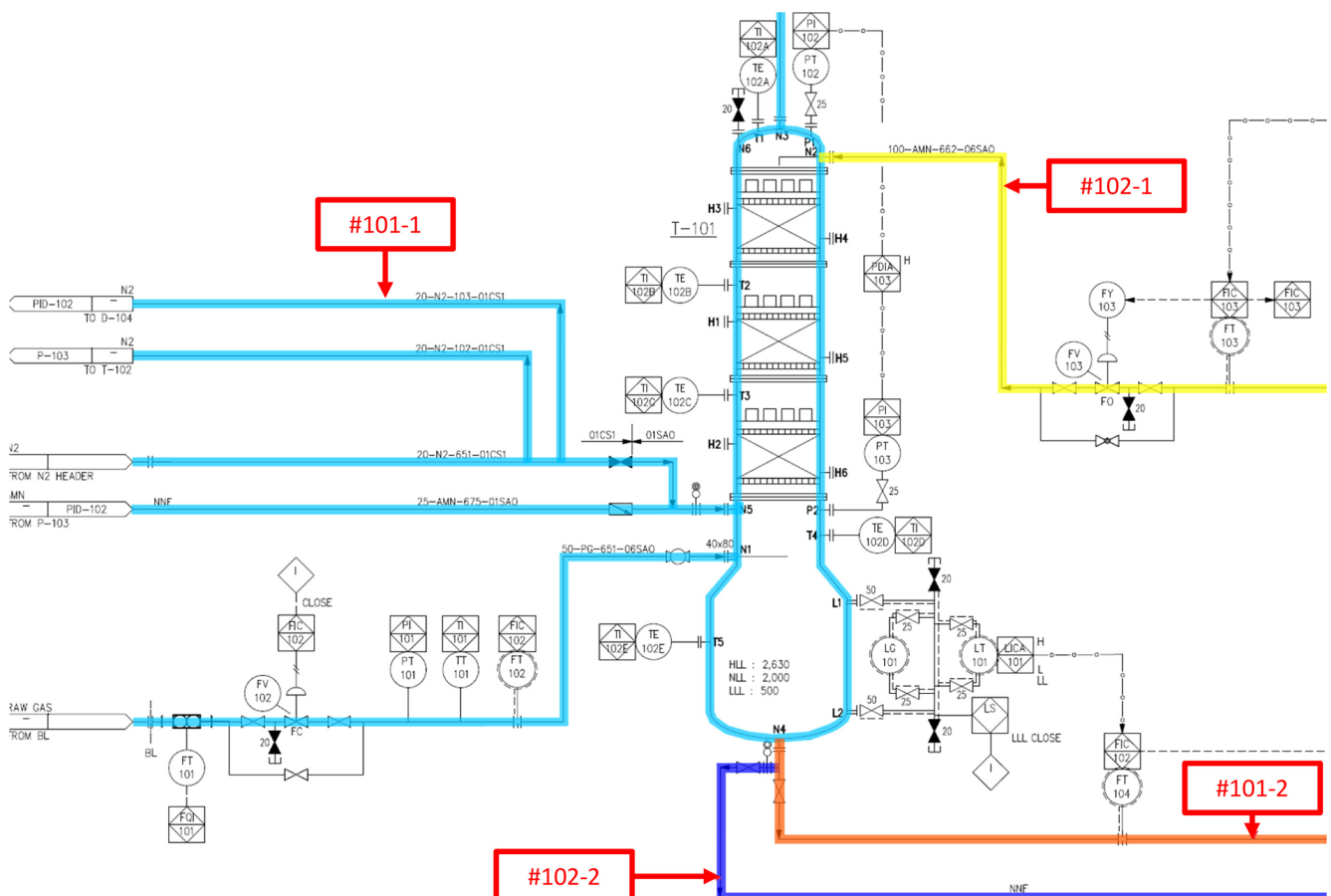


Fig. 2. P&ID of absorber (T-101) in the MEA-based CO₂ separation process.

대해 실시하는 것이 일반적인 연구 방법이다 [20]. 따라서 본 연구에서도 정성적인 위험성 평가인 HAZOP을 수행하기 앞서 공정 모사 결과를 기반으로 한 예비 분석을 통하여 위험성 평가를 위한 주요 장치 및 흐름을 선별하였고, 이 결과 5 가지의 주요 검토 구간(Node)을 Fig. 1과 Table 1에 나타내었다.

4. 위험성 평가

4.1. 공정 예비 분석

HAZOP 기법을 사용하기 위해서는 공정 모사를 통해 도출한 PFD 수준의 정보(장치 및 설비의 크기, 체원, 운전 조건, 흐름 정보 등)은 물론 공정의 운전 및 설계, 제작 등과 관련된 사양의 자세한 정보가 포함된 정보 분석이 매우 중요하다. 따라서 본 연구에서는 P&ID를 이용하여 대상 공정의 각 장치에 대한 충분한 정보(piping, instrument, control scheme 등)를 검토하였으며, 대상 공정의 대표적인 장치인 absorber (T-101) 및 regenerator (T-102)에 대한 P&ID와 관련된 주요 검토 구간(#101-1, #101-2, #102-1, #102-2, #103-1

#104-1)을 Figs. 2-3에 표현하였다. 또한 상기 예비 분석된 5가지 검토 구간을 중심으로 유량 변화(Flow deviation), 온도 변화(Temperature deviation), 온도 변화(Pressure deviation), 반응 이상(Reaction deviation), 점도 변화(Viscosity deviation) 등 10 여개의 진단 항목(Guide words)을 적용하여 가능한 원인 및 결과를 검토하였다[21](Table 2 참조).

HAZOP 방법론은 주로 정성적인 위험성 평가를 위해 사용되는 반면, 각 비정상 상태의 상대적 우선순위를 결정 하기 위한 빈도(Likelihood) 및 강도(Severe) 등 비정상 상태의 위험등급 설정을 통하여 정량적 비교 평가도 수행할 수 있다[22]. 즉, 사고의 빈도는 위험요소로 도출된 사항이 얼마나 자주 발생하는가를 평가하는 기준으로써, 사고의 강도는 사고 결과에 의한 인적, 물적, 환경적 손실의 기준을 정하는 용도로 사용된다. 일반적으로 위험등급을 결정짓는 사고의 빈도와 강도의 구분 기준은 기업의 매출이나 자산 규모, 설비 운영 형태에 따라 달라질 수 있으므로 사업장의 규모에 따라 별도로 구분하는 것이 합리적이다. 본 연구의 대상 공정인 MEA 기반 CO₂ 분리 공정은 산업적으로 널리 활용되는 매우 성숙한 공정으로써,

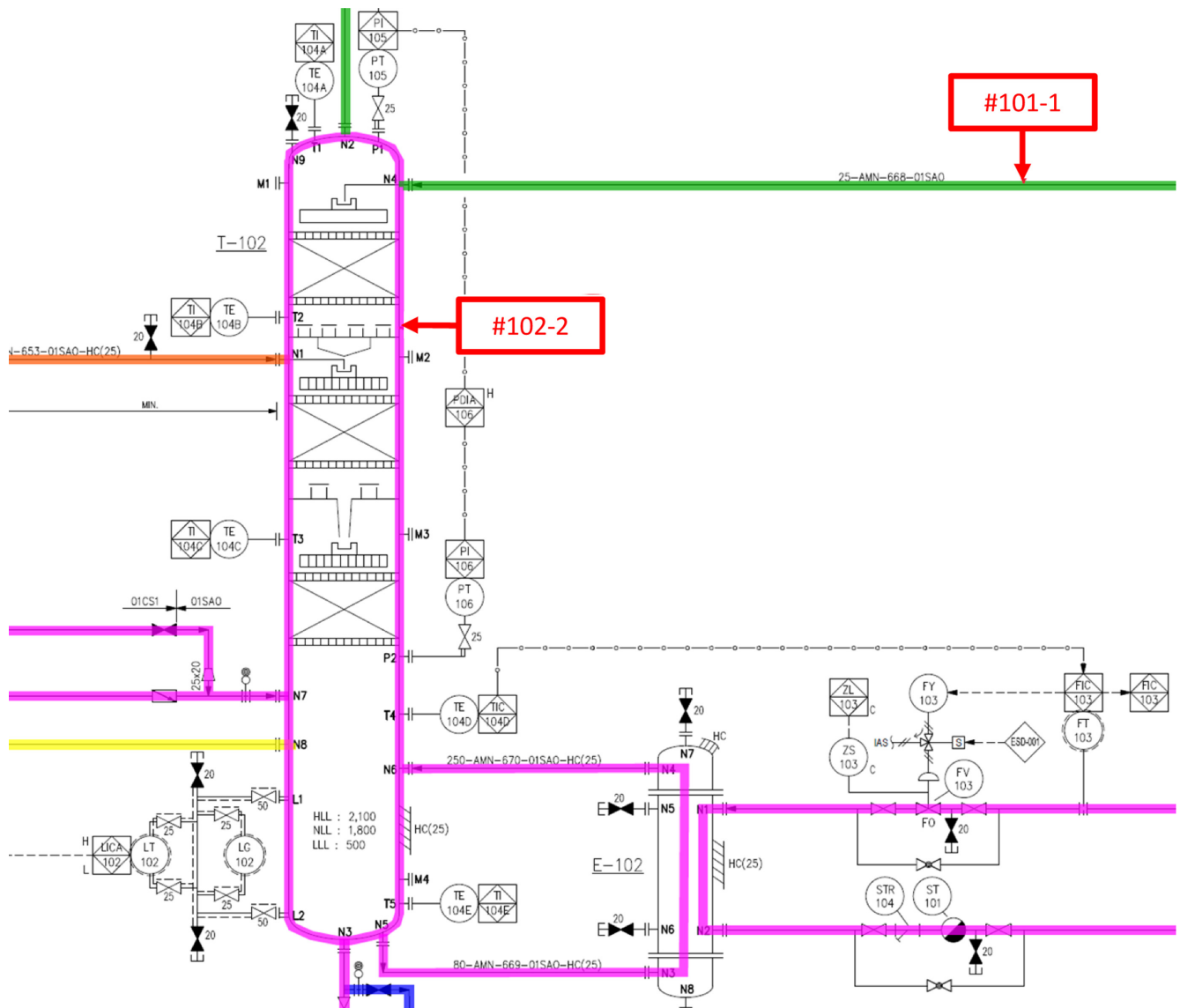


Fig. 3. P&ID of regenerator (T-102) in the MEA-based CO₂ separation process.

Table 2. Guide words with relevant deviations for HAZOP study of the MEA-based CO₂ separation process

| Parameter | Deviation | 101-1 | 101-2 | 102-1 | 102-2 | 103-1 | 104-1 |
|-------------|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Flow | More flow | O | O | O | O | O | O |
| | Less flow | O | O | O | O | O | O |
| | No flow | O | O | O | O | O | O |
| | Reverse(back) flow | Δ | Δ | O | Δ | Δ | O |
| Pressure | High pressure | O | O | O | O | O | O |
| | Low pressure | O | Δ | O | Δ | Δ | O |
| | No pressure(vacuum) | X | X | X | X | X | X |
| Temperature | Higher temperature | O | O | Δ | Δ | O | O |
| | Lower temperature | O | O | Δ | O | O | Δ |
| Level | High level | O | Δ | O | O | O | O |
| | Low level | O | Δ | O | O | O | O |
| | No level | X | X | X | X | X | X |
| Reaction | More reaction | X | X | X | X | X | X |
| | Less reaction | X | X | X | X | X | X |
| | No reaction | X | X | X | X | X | X |
| | Side reaction | X | X | X | X | X | X |
| | Reverse reaction | X | X | X | X | X | X |
| Viscosity | More viscosity | X | X | X | X | X | X |
| | Less viscosity | X | X | X | X | X | X |
| Others | Abnormal operation | X | X | X | X | X | X |
| | Mechanical failure | O | O | O | X | O | O |
| | Process maintenance | X | X | X | X | X | X |
| | Leak | O | X | X | X | O | X |
| | Safety | X | X | O | X | X | X |
| | Other | X | O | X | Δ | X | X |

O: Applicable; Δ: Not applicable after review; X: Not applicable

Table 3. Risk matrix for HAZOP study of the MEA-based CO₂ separation process

| Likelihood | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|-------------|-------------------------|---------------|------------------|------------------|-----------------|----------------|
| | | Hardly occurs | Once in 50 years | Once in 20 years | Once in 5 years | Once in a year |
| Severe | 1 No loss | I | I | II | II | III |
| | 2 Slight injury | I | II | II | III | IV |
| | 3 Severe injury | II | II | III | IV | IV |
| | 4 Several severe injury | II | III | IV | IV | V |
| | 5 Fatality | III | IV | IV | V | V |
| Risk level: | | Very low | Low | Modest | High | Very high |

대기업 규모의 사업장에서 주로 사용되기 때문에 대기업 규모의 공장에 대한 지표를 가정하였다. 사고 이력을 기초로 하여 인적 손실 피해 정도를 파악하여 Table 3에 보인 바와 같이 각 5단계의 세부 항목을 갖는 위험성 평가 기준을 구성하였다[23].

Table 3에서와 같이, 위험 등급은 사고의 강도와 사고의 빈도의 곱을 하여 I~V 등급 등 총 5 구간으로 설정하였다. 위험 등급 I 및 II는 허용 가능한 위험등급으로써 특별한 완화 및 제거 조치가 필요 없음으로 가정한다. 위험 등급 III은 *As Low As Reasonably Practicable* (ALARP) 원칙에 따라 운전 및 관리 측면에서의 위험 요소를 완화하거나 제거하기 위한 권고사항이 필요한 등급이라 설정하였다. 더 위험한 상위 등급(위험등급 IV 및 V) 역시 허용 불가한 위험등급으로써 본 등급으로 평가된 위험 요소는 위험등급 III 이하로 낮출 수 있는 구체적 전략을 제시한다.

4-2. 위험성 평가 결과

HAZOP 기법을 사용하여 대상 공정을 분석한 결과 총 6개의 node에서 102개의 비정상 상태를 고려하였고 이들에 대한 발생 원인과 결과 그리고 보완 사항 등을 분석하였다. 특히, HAZOP 결과를 통해 도출한 위험성이 높은 검토 구간(Node)인 흡수기 (T-101)의 주요 구간 #101-1, 탈거기(T-102)의 주요 구간 #103-1에 관하여 각 22개의 비정상 상태를 분석하였으며, 이 중 주요 위험 요소를 Table 4 및 5에 요약하여 나타내었다.

검토 구간 node #101-1의 경우, 유량(Flow)의 변화(Deviations of more, less and no)가 주요한 위험 요소로 분석되었다. 특히 송수 신기 고장, 운전자의 실수, 제어 밸브 고장 등의 원인으로 유입되는 원료 가스의 양을 조절하는 유량 밸브(FV-102)의 고장이 발생될 때, 상대적으로 높은 등급의 위험성이 잠재함을 규명하였다. 반면 검토 구간 node #103-1의 경우, 온도(Temperature)의 변화(Deviations of

high, low)가 주요한 위험 요소로 분석되었다. 특히 송수신기 및 제어 밸브 고장, 운전자의 실수, 냉각기(E-103)의 과 냉각 등의 원인으로 탈거기(T-102) 내의 온도를 조절하는 온도 지시 및 조작기(TIC-104)의 고장이 발생할 때, 높은 등급의 위험성이 잠재함을 규명하였다.

아민 기반 CO₂ 분리 공정에 대하여 위험성 평가한 결과, 이 대상 공정에서 발생 가능한 중대 사고는 원료 가스(Raw gas), 처리 가스(Treated gas) 및 산 가스(Sour gas)의 누출에 의한, 폭발, 화재가 가장 많은 시나리오로 규명되었다. 또한 이러한 중대 사고는 아민 기반 CO₂ 분리 공정의 주요한 두 탑, 흡수기(T-101) 및 탈거기(T-102)와 관련된 위험 요소가 가장 큰 관련이 있으며, 고장, 오작동 등 주요한 원인은 다음과 같다.

- 운전자 실수, 송신기 및 제어 밸브 고장에 의한 수동 밸브의 오 조작
- 운전자 실수, 송신기 및 제어 밸브 고장에 의한 레벨 송신기의 오 조작

- 질소 (N₂) 공급 배관 밸브의 고장
- P-101의 고장
- 주기적인 점검 실패
- 부식에 의한 배관 및 장치 손상

4-3. 위험 완화 및 제거 전략

아민 기반 CO₂ 분리 공정에 관하여 102개에 달하는 광범위한 위험 요소에 관한 정성적 평가를 수행하여 각 항목에 관한 원인, 결과 및 상대적 등급 등을 분석하였다. 더불어 본 연구에서는 규명된 위험 요소에 관하여 완화하거나 제거할 수 있는 조치 및 전략(Recommendation)을 도출하였다. 특히 즉각적인 운전 및 관리에서의 완화 및 제거 조치가 필요한 위험 등급 III 이상 위험 요소에 관한 항목을 Table 6에 요약하여 나타내었다. 보완 사항이 가장 많은 구간인 #101-1 node는 흡수기(Absorber; T-101)를 중심으로 구성된 검토 구간(Node)이다. 즉, HAZOP 기법을 통해 분석한 결과,

Table 4. An example of the HAZOP sheet for node #101-1

| Parameter | Deviation | Cause | Consequence | Safeguard | S | L | Rank | No. |
|-----------|--------------|--|---|-------------------------------------|---|---|------|---------|
| Flow | More flow | FV-102 Complete opening (due to transmitter malfunction, controller failure) | Treated gas poor specifications. | - FQI-101 - PDIA-103 | 2 | 2 | II | 101-1-1 |
| | | | Operational problems caused by pressure drop in upstream | - FQI-101 - PDIA-103 - PI-101 | 2 | 2 | II | 101-1-2 |
| | | | Operational problems caused by pressure increase in downstream | -FQI-101 -PI-102 -PDIA-103 | 2 | 2 | II | 101-1-3 |
| | No/Less flow | FV-102 shut down (due to transmitter malfunction, controller failure) | Fire/explosion by flue gas leak | -FQI-101 -PI-101 -PI-102 | 3 | 3 | II | 101-1-4 |
| | | | Treated Gas stopped production | -FQI-101 -PI-101 -PI-102 | 2 | 3 | II | 101-1-5 |

Table 5. An example of the HAZOP sheet for node #103-1

| Parameter | Deviation | Cause | Consequence | Safeguard | S | L | Rank | No. |
|-------------|------------------|---|--|-------------------------------------|---|---|------|----------|
| Temperature | High temperature | TIC-104D malfunction (due to Transmitter malfunction, controller failure) | Fire by T-102 pressure increase, Amine/sour gas leakage | -TI-104A/B/C -PI-105 -PSV-103 | 3 | 1 | II | 103-1-9 |
| | | | Treated gas poor specifications. | -TI-102A/B/C/D/E -PDIA-103 | 2 | 2 | II | 103-1-10 |
| | | E-103 super cooling | T-101 liquid carry over | -TI-102A/B/C/D/E -PDIA-103 | 2 | 2 | II | 103-1-11 |
| | Low temperature | TIC-104D malfunction (due to transmitter malfunction, controller failure) | Treated gas poor specifications | -TI-104A/B/C -PI-105 | 2 | 2 | II | 103-1-12 |

Table 6. Recommendations for the mitigation and elimination of the selected high-ranked hazards

| Node | Number | Recommendations | S | L | Rank | Action order |
|--------|----------|---|---|---|------|--------------|
| #101-1 | 101-1-4 | Review of low alarm installation on FQI-101 of Flue gas inlet line | 3 | 3 | III | 1 |
| | | Requiring of Setting up Leak/fire/explosion scenarios and management/training | 3 | 3 | III | 1 |
| | 101-1-18 | Review the need to install check valve on flue gas line | 3 | 3 | III | 1 |
| | 101-1-19 | Require Including gas-blow by case through FV-104 failure on PSV-103 casualty | 4 | 2 | III | 1 |
| | 101-1-21 | Review application of double block valve on N2 line | 3 | 3 | III | 1 |
| #102-1 | 102-1-8 | Spectacle blind on N2 line changed to normally close | 3 | 3 | III | 1 |
| | 102-1-8 | Review necessity to install check valve on line(100-AMN-662-06SAO) at the end of FV-103 | 3 | 3 | III | 1 |
| #102-2 | 102-2-1 | Review necessity to install check valve on line(20-N2-653-01CS1) | 3 | 3 | III | 1 |
| | 102-2-10 | Check if D-104 vent is safe location | 3 | 3 | III | 1 |

#101-1 node에서 absorber는 누출/화재/폭발의 사고를 초래하는 비정상 상태가 많기 때문에 권고사항으로 누출/화재/폭발 시나리오 설정 및 관리/교육 훈련을 요구하였다. 또한 흡수기(Absorber; T-101)가 부착된 주요 부가 설비 및 기기(FQI-101, FV-104, N₂ line 등)의 장치 재검토 및 재정비 등이 주요한 완화 조치로 도출되었다. 반면, #103-1 node 등 Table 5에 기술된 검토 구간은 #101-1와 동일한 수의 비정상 상태를 보인 반면 별도의 완화 및 제거 조치에 관한 권고 사항은 제시되지 않았다. 그 이유는 대부분의 위험 등급이 II 이하인 항목으로써, 운전 및 관리 관점에서 측면에서 검토해 보았을 때, 대부분의 비정상 상태가 운전자의 실수 및 주기적인 점검의 소홀에서 비롯되기 때문이다.

4. 결 론

본 연구에서는 LNG산업, CO₂ 포집 및 격리 기술(CCS) 등에서 널리 상용 중인 아민 기반 CO₂ 분리 공정에 대하여 공정 모사를 진행한 후, HAZOP기법을 이용한 정성적 위험성 평가를 실시하였다. 즉, MEA를 이용한 CO₂ 분리 공정의 PFD 및 P&ID의 공정도 분석을 통하여 주요 사고 시나리오를 도출하였으며, 도출된 시나리오들의 원인과 결과를 HAZOP 기법을 통하여 규명하였다. 또한, Risk matrix 작성을 통하여 규명된 사고 시나리오에 대해 각각 다른 등급의 사고의 빈도(Likelihood; L) 및 사고의 강도(Severe; S) 분석함으로써 대상 공정의 위험 완화 및 제거 전략에 관하여 분석하였다. 결과적으로 주요한 위험 요소들은 주로 아민 기반 CO₂ 분리 공정의 주요 장치인 2개의 탑, 흡수기(absorber; T-101) 및 탈거기(Regenerator; T-102)의 장치 및 운전과 관련되어 있으며, 특히 두 탑의 누출/폭발/화재 등의 사고 시나리오 위험이 상당한 것으로 분석되었다.

본 연구를 통하여 아민 기반 CO₂ 분리 공정에 포함된 대부분 장치 및 설비, 운전 등에 관하여 광범위한 HAZOP 기반의 정성적 위험성 평가를 수행함으로써, 대상 공정의 안전 적인 운영에 기초 분석 자료를 제공하였다. 반면, 본 연구의 결과를 기반으로 Fault tree analysis (FTA), Event tree analysis (ETA) 등의 정량적 위험성 평가(Quantitative Risk Analysis; QRA) 및 PHAST 등을 이용한 장 내외 평가 등 향후 연구 수행을 통하여 안전한 아민 기반 CO₂ 분리 공정의 산업적 활용 확대에 기여할 필요가 있다.

Acknowledgments

This work was supported by the Technology Innovation Program (10067793, Engineering Education System of Integrated Design by Case Based Plant Process and Safety) funded by the Ministry of Trade, Industry & Energy (MOTIE, Korea) and Korea Evaluation Institute of Industrial Technology (KEIT, Korea).

Reference

1. Velmurugan, V. and Srithar, K., "Performance Analysis of Solar Stills Based on Various Factors Affecting the Productivity—a Review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **15**(2), 1294-1304(2011).
2. Jin, H., Gao, L., Han, W. and Hong, H., "Prospect Options of CO₂ Capture Technology Suitable for China," *Energy*, **35**(11), 4499-4506(2010).
3. Wu, Z., Zhu, Y., Huang, W., Zhang, C., Li, T., Zhang, Y. and Li, A., "Evaluation of Flocculation Induced by pH Increase for Harvesting Microalgae and Reuse of Flocculated Medium," *Biore-sour. Technol.*, **110**, 496-502(2012).
4. Wang, L., Liu, Z., Li, P., Yu, J. and Rodrigues, A. E., "Experimental and Modeling Investigation on Post-combustion Carbon Dioxide Capture Using Zeolite 13X-APG by Hybrid VTSA Process," *Chem. Eng. J.*, **197**, 151-161(2012).
5. Mulgundmath V., Tezel F., Saatcioglu T. and Golden T., "Adsorption and Separation of CO₂/N₂ and CO₂/CH₄ by 13X Zeolite," *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, **90**(3), 730-738(2012).
6. He, B., Song, Q., Yao, Q., Meng, Z. and Chen, C., "Influences of A-or B-site Substitution on the Activity of LaMnO₃ Perovskite-type Catalyst in Oxidation of Diesel Particle," *Korean Journal of Chemical Engineering*, **24**(3), 503-507(2007).
7. Raynal, L., Bouillon, P., Gomez, A. and Broutin, P., "From MEA to Demixing Solvents and Future Steps, a Roadmap for Lowering the Cost of Post-combustion Carbon Capture," *Chem. Eng. J.*, **171**(3), 742-752(2011).
8. Hongjun, Y., Shuanshi, F., Xuemei, L., Yanhong, W. and Jiang-hua, N., "Economic Comparison of Three Gas Separation Technologies for CO₂ Capture from Power Plant Flue Gas," *Chin. J. Chem. Eng.*, **19**(4), 615-620(2011).
9. Ho, M. T., Allinson, G. W. and Wiley, D. E., "Reducing the Cost of CO₂ Capture from Flue Gases Using Pressure Swing Adsorption," *Ind. Eng. Chem. Res.*, **47**(14), 4883-4890(2008).
10. Hussain, A. and Hägg, M., "A Feasibility Study of CO₂ Capture from Flue Gas by a Facilitated Transport Membrane," *J. Membr. Sci.*, **359**(1), 140-148(2010).
11. Oh, S., Binns, M., Cho, H. and Kim, J., "Energy Minimization of MEA-based CO₂ Capture Process," *Appl. Energy*, **169**, 353-362(2016).
12. IEA, C., "Capture and Storage-A Key Carbon Abatement Option," *International Energy Agency, OECD, Paris*, (2008).
13. Rochelle, G. T., "Amine Scrubbing for CO₂ Capture," *Science*, **325**(5948), 1652-1654(2009).
14. Badr, S., Frutiger, J., Hungerbuehler, K. and Papadokonstantakis, S., "A Framework for the Environmental, Health and Safety Hazard Assessment for Amine-based Post Combustion CO₂ Capture," *International Journal of Greenhouse Gas Control*, **56**, 202-220(2017).
15. Karl, M., Wright, R. F., Berglen, T. F. and Denby, B., "Worst Case Scenario Study to Assess the Environmental Impact of Amine Emissions from a CO₂ Capture Plant," *International Journal of Greenhouse Gas Control*, **5**(3), 439-447(2011).
16. Koornneef, J., Ramírez, A., Turkenburg, W. and Faaij, A., "The Environmental Impact and Risk Assessment of CO₂ Capture, Transport and Storage—an Evaluation of the Knowledge Base," *Progress in Energy and Combustion Science*, **38**(1), 62-86(2012).
17. Krzemiński, A., Więckol-Ryk, A., Smoliński, A., Koteras, A. and Więclaw-Solny, L., "Assessing the Risk of Corrosion in Amine-based CO₂ Capture Process," *J. Loss. Prev. Process Ind.*, **43**, 189-197(2016).

18. Krzemień, A., Więckol-Ryk, A., Duda, A. and Koteras, A., "Risk Assessment of a Post-combustion and Amine-based CO₂ Capture Ready Process," *Journal of Sustainable Mining*, **12**(4), 18-23(2013).
19. AIChE Guidelines for Hazard Evaluation Procedures: Center for Chemical Process Safety, American Institute of Chemical Engineers, New York, 1985.
20. Korea Gas Safety Corporation, "Qualitative Risk Assessment," Korea Association of Professional Safety Engineers, Seoul, 1999.
21. Freeman, R. A., "Documentation of Hazard and Operability Studies," *Process Saf. Prog.*, **10**(3), 155-158(1991).
22. CCPS, "Guideline for Process Equipment Reliability Data with Data Tables," AIChE, New York (1989).
23. Guide, K., "Risk and HAZOP," (2006).