

## 수소 압축 개질공정의 정성적 위험성 평가

신단비<sup>1</sup> · 서두현<sup>2</sup> · 김태훈<sup>3</sup> · 이광원<sup>4</sup> · 이동민<sup>1</sup> · 김현기<sup>1</sup> · 홍성철<sup>3,†</sup>

<sup>1</sup>호서대학교 안전공학과, <sup>2</sup>PSP, <sup>3</sup>호서대학교 안전공학과, <sup>4</sup>호서대학교 안전소방학부

## Qualitative Risk Assessment of Hydrogen Compression Reforming Process

DANBEE SHIN<sup>1</sup>, DOOHYOUN SEO<sup>2</sup>, TAEHUN KIM<sup>3</sup>, KWANGWON RHIE<sup>4</sup>, DONGMIN LEE<sup>1</sup>,  
HYOUNGI KIM<sup>1</sup>, SEONGCHUL HONG<sup>3,†</sup>

<sup>1</sup>Department of Safety Engineering, Hoseo University, 20 Hoseo-ro, 79 beon-gil, Asan 31499, Korea

<sup>2</sup>PSP, Process Safety Partner, 140-9 Wolbong 4-ro, Seobuk-gu, Cheonan 31171, Korea

<sup>3</sup>Department of Safety Engineering, Hoseo University, 12 Hoseodae-gil, Dongnam-gu, Cheonan 31066, Korea

<sup>4</sup>Division of Safety and fire protection, Hoseo University, 20 Hoseo-ro, 79 beon-gil, Asan 31499, Korea

†Corresponding author :

[schong@vision.hoseo.edu](mailto:schong@vision.hoseo.edu)

Received 15 December, 2021

Revised 22 December, 2021

Accepted 28 January, 2022

**Abstract >>** In order to introduce the hydrogen economy and increase supply, research in the field of hydrogen production is being actively conducted. Among the hydrogen production methods, the method of steam reforming from natural gas and producing it currently accounts for about 50% of the global hydrogen production. In the method of steam reforming process, hydrogen can be produced by adding a reformer to an existing natural gas supply pipe. Because of these advantages, it is evaluated as a realistic production method at present in Korea, where the city gas supply chain is well established. But there is concern in that it is highly likely to be installed in downtown areas and residential spaces. In this study, the risk of the process of steam reforming to produce hydrogen was reviewed.

**Key words :** Steam reforming(수증기 개질), Hydrogen(수소), PSA(압력 변환 흡착기), HAZOP(위험과 운전분석), Compressor(압축기)

## 1. 서론

산업혁명 이후 주 에너지원으로 사용되던 화석연료는 환경오염의 문제점을 보유하고 있다. 이에 탄소 경제에서 수소 경제로 전환이 이루어지고 있다. 이러한 변화에 발맞춰 우리나라 정부는 2019년 수소 경

제 활성화 로드맵을 통해 수소 경제 도입 계획을 수립 및 발표했다.

2021년 2월 시행된 수소 경제 육성 및 수소 안전 관리에 관한 법률(약칭 수소법)은 당시 수소 연료전지 설비, 추출기, 사용시설 등에 관한 내용이 포함되지 않아 안전관리를 위한 법률로써 한계점이 존재한

다는 지적이 있었으나, 2021년 8월 수소 연료 사용 시설 및 수소 추출설비 등 KGS CODE 5종이 제정되어 사각지대를 줄였다.

수소 산업 확대를 위해 수소 공급이 중요하다. 수소 생산 방식에는 석유화학플랜트에서 발생한 부생 수소를 포집하는 방법, 천연가스 등에서 수소를 개질하는 방법, 물을 전기분해하는 수전해 방법 등이 있다. 그 중 현재 수소 개질방법은 LNG 플랜트에 설치 시 수소 대량 생산이 가능하고 현 시점 생산단가가 상대적 저렴하다는 장점이 있다. 이러한 이점으로 전 세계 수소 생산량의 약 50%를 차지하고 있다<sup>1)</sup>.

현재 우리나라에서는 공공건물 및 주거용 공간에 설치할 수소 추출기 개발이 진행되고 있다. 하지만 2019년 발생한 강릉 수소 탱크 폭발사고 등으로 인해 수소 안전성 우려의 목소리가 커져 원활한 이행을 어렵게 만들고 있다. 이는 위험성 평가를 통한 안전성 확보가 필요한 시점임을 시사한다.

이에 본 연구에서는 수소 개질공정의 위험성을 분석하기 위해 정성적 위험성 평가를 수행해 수소 개질공정의 잠재위험요소를 도출하고자 하였으며, 도출된 위험요소를 참고하여 안전성 확보방안을 제시하고자 한다.

## 2. 수소 개질공정

본 연구의 대상은 천연가스(NG)를 steam reforming하여 수소를 생산하는 방식인 수소 개질공정이다. NG에서 수소를 개질하기 위해서는 압축, 탈황공정, 개질공정, 흡착, 정제공정 등의 과정을 거쳐야 한다<sup>2)</sup>.

수소 개질공정을 설계할 때 압축기의 위치는 크게 2가지로 구분될 수 있다. 첫 번째는 현재 KGS AH171에서 규정하고 있는 NG 공급 후단부에 압축기를 설치하여 개질기 전단에서 NG를 압축하는 방법, 두 번째는 개질기와 pressure swing absorption (PSA) 사이에 압축기를 설치하여 수소를 압축하는 방법이다. 첫 번째 NG 압축의 경우 대용량 추출기에서 사용 시 유리하며, 현재 각 분야에서 안전성 검토 및 검증이 충분히 이루어졌다고 볼 수 있다. 두 번째의 방법으로

압축기를 개질기 후단에 설치함으로써, 수소를 압축의 경우 소규모 추출기에서 개질 효율 및 에너지 효율을 올릴 수 있다는 특징이 있다. 하지만 개질된 수소를 압축하는 경우 현재 안전성 검토가 충분히 이루어지지 않았으며, 실증 데이터도 부족하다. 따라서 본 연구에서는 압축기가 개질기 후단에 설치되어 수소를 압축하는 공정에 대해 잠재위험을 파악하고자 한다.

Fig. 1은 연구 대상 수소 추출공정의 PFD를 간략화한 것이다.

NG는 0.02 MPa, AMB로 공급되며, NG에 부취제로 첨가된 황 제거를 위한 탈황공정을 거친다. 황이 제거된 CH<sub>4</sub>는 DI water를 이용한 steam reforming 방식 개질기를 거쳐 수소로 개질된다.

이때 압력은 0.03 MPa, 온도는 750°C까지 상승한다. 이 시점의 물질은 수소와 수증기, CO, 소량의 유기물 등이 혼합된 혼합가스이다.

이후 열교환기, 기액 분리기 등을 차례로 거치면서 30°C까지 온도가 떨어지며 수분을 최대한으로 제거한다. 이후 압축기에 혼합가스가 공급된다. 압축기에서 혼합가스는 1 MPa까지 압축되며 온도는 40°C로 상승한다.

압축된 혼합가스는 정제기(PSA)에 원활하고 일정한 공급을 위해 탱크(TK)를 거쳐 PSA로 공급된다. 이때의 온도는 35°C, 압력은 0.7-0.9 MPa으로 압력이 승압 및 감압을 반복하며 흡착, 탈착, 재생, 균압, 가압 등의 스텝을 반복한다. 이 스텝은 PSA 내 설치되어 있는 솔레노이드 밸브(SV)의 자동 로직에 따라 작동한다. PSA에서 정제가 끝나면 99.995%의 고순

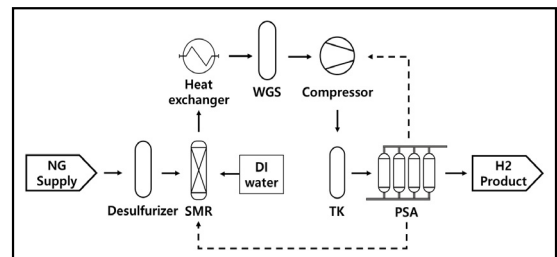


Fig. 1. PFD of hydrogen production from SMR

도 수소가 생산되며, tail gas는 개질기로 환류되어 다시 개질되거나, 대기 중으로 벤트된다.

Table 1에 수소 추출의 주요 공정인 탈황(de-sulfurizer), 개질(steam methane reformer, SMR), CO 전환 반응(water-gas shift, WGS), PSA에 대해 나타내었다.

탈황기는 상온에서 황을 흡착하여 탈황시키며 부가적으로 EM, Thiophene을 제거한다. 개질기는 버너 일체형으로 도시가스에 수증기를 750°C에서 반응시켜 3H<sub>2</sub>와 CO로 개질한다. WGS에서는 200-250°C에서 CO를 H<sub>2</sub>O와 반응시켜 H<sub>2</sub>와 CO<sub>2</sub>로 변환시킨다. PSA에서는 1MPa 미만의 압력으로 CO<sub>2</sub> 외 불순물을 흡착 및 탈착 등의 과정을 통해 제거하여 고순도의 수소를 만든다.

### 3. 위험성 평가

본 연구는 위험성 평가를 수행하기 위해 정성적 위험성 평가 방법인 hazard and operability study (HAZOP)를 사용했다. 위험요인(hazard)은 직,간접적으로 인적, 물적, 환경적 피해의 원인이 될 수 있는 실제 또는 잠재된 요인이고, 운전성(operability)은 공정이 의도대로 안전하게 운전되는 정도이다.

즉, 이 기법은 공정에 존재하는 위험요인과, 공정의 효율을 떨어뜨릴 수 있는 운전상의 문제점을 찾아내 그 원인을 제거하고자 하는 방법이다.

이탈상태란 공정의 설계의도에서 벗어난 상태를

Table 1. Table of SMR process feature

| Process       | Feature                                                                                   |
|---------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| De-sulfurizer | - Adsorption for removing sulfur at AMB<br>- Removal of EM, Thiophene, etc.               |
| SMR           | - CH <sub>4</sub> +H <sub>2</sub> O=3H <sub>2</sub> +CO<br>- 750 , Burner integrated type |
| WGS           | - CO+H <sub>2</sub> O=H <sub>2</sub> +CO <sub>2</sub><br>- 200-250                        |
| PSA           | - Absorption and removal process of impurities and CO <sub>2</sub><br>- 1MPa              |

말하며, 가이드 워드(guide word)와 변수(parameter)를 조합하여 도출한다. 이 과정을 통해 공정을 체계적으로 확인할 수 있다.

가이드 워드는 변수의 질, 양 등을 표현하는 것이고, 변수는 유량, 온도, 압력 등 공정의 조건을 나타내는 것이다. Fig. 2에 이탈 상태표를 나타내었다.

이탈 상태표를 사용하여 공정의 위험요소를 도출하면 원인의 발생 빈도와 결과의 강도에 따른 위험 등급을 산정한다.

Table 2는 빈도 등급의 기준, Table 3은 강도 등급의 기준을 나타낸 것이다. 연구에서는 빈도와 강도를

| PARAMETER   | GUIDE WORD |            |              |           |                      |                            |                            |
|-------------|------------|------------|--------------|-----------|----------------------|----------------------------|----------------------------|
|             | MORE       | LESS       | NONE         | REVERSE   | PART OF WRONG AMOUNT | AS WELL AS ADDED COMPONENT | OTHER THAN WRONG COMPONENT |
| FLOW        | HIGH FLOW  | LOW FLOW   | NO FLOW      | BACK FLOW |                      |                            |                            |
| PRESSURE    | HIGH PRESS | LOW PRESS  | VACUUM       |           |                      |                            |                            |
| TEMP        | HIGH TEMP  | LOW TEMP   |              |           |                      |                            |                            |
| LEVEL       | HIGH LEVEL | LOW LEVEL  | NO LEVEL     |           |                      |                            |                            |
| AGITATION   | TOO MUCH   | TOO LITTLE |              |           |                      |                            |                            |
| REACTION    | HIGH LATE  | LOW LATE   | NO REACTION  | DECOMPOSE | INCOMPLETE           | SIDE REACTION              | WRONG REACTION             |
| MIXING      | TOO MUCH   | TOO LITTLE | NONE         |           |                      |                            |                            |
| ADDITION    | TOO MUCH   | TOO LITTLE |              |           |                      |                            |                            |
| COMPOSITION | HIGH CONC  | LOW CONC   | NONE         |           |                      | EXTRA COMPONENT            | WRONG COMPONENT            |
| PHASE       | TOO MANY   | TOO FEW    | SINGLE       | INVERSION | EMULSION             |                            |                            |
| TIME        | TOO MUCH   | TOO LITTLE |              |           |                      |                            |                            |
| STEP        | STEP LATE  | STEP EARLY | MISSSED STEP | BACK STEP | PARTIAL STEP         | EXTRA ACTION               | WRONG ACTION               |

Fig. 2. Table of deviation

Table 2. Table of Frequency

| No. | Frequency                                      |
|-----|------------------------------------------------|
| 5   | More than one occur on operating time          |
| 4   | Not more than one occur on operating time      |
| 3   | Sometime can occur on operating time           |
| 2   | Probability of hazard exists on operating time |
| 1   | Very rarely occur on operating time            |

Table 3. Table of criticality

| No. | Criticality                         |
|-----|-------------------------------------|
| 5   | Fatality, more than two men injured |
| 4   | More than one man injured           |
| 3   | More than two men hurt              |
| 2   | Not more than one man hurt          |
| 1   | Safely designed process             |

모두 5등급으로 나누었으며, 그에 따른 위험등급 또한 5등급으로 나누어 산정하였다.

본 연구에서 수행한 위험등급 기준을 다음 Table 4에

Table 4. Risk matrix

| Frequency | Criticality |   |   |   |   |
|-----------|-------------|---|---|---|---|
|           | 5           | 4 | 3 | 2 | 1 |
| 5         | 5           | 5 | 4 | 3 | 3 |
| 4         | 5           | 4 | 3 | 3 | 2 |
| 3         | 4           | 3 | 3 | 2 | 2 |
| 2         | 3           | 3 | 2 | 2 | 1 |
| 1         | 3           | 2 | 2 | 1 | 1 |

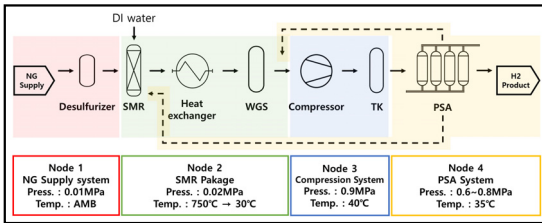


Fig. 3. Figure of HAZOP Node

Table 5. Sample of HAZOP sheet

| No. | Deviation   | Cause                                         | Consequence                                                 | Safety/management                                | Risk level |             |       | Action/recommendation                                  |
|-----|-------------|-----------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|------------|-------------|-------|--------------------------------------------------------|
|     |             |                                               |                                                             |                                                  | Frequency  | Criticality | Level |                                                        |
| 1   | No/low flow | - Overflow in separator                       | - Inflow of moisture at rear end                            | - Level gauge                                    | 3          | 1           | 2     | - Drain regularly                                      |
|     |             |                                               |                                                             | - Auto drain when high alarm                     |            |             |       |                                                        |
|     |             | - SV fail to open                             |                                                             |                                                  | 2          | 1           | 1     |                                                        |
|     |             | - Front and rear Vents of TK are open         | - Hydrogen and CO <sub>2</sub> released into the atmosphere |                                                  | 1          | 1           | 1     | - KGS AH171 : released into the atmosphere is illegal. |
|     |             | - Leak of joint and fitting of valve and pipe | - Released into the atmosphere                              | - Hydrogen detector and Emergency shutdown logic | 2          | 1           | 1     | - Individual hydrogen detector installation            |
| 2   | Back flow   | - Back flow from PSA vent line                | - High pressure at front end                                | - Recycling to burner (20% combustion)           | 2          | 1           | 1     | - Consider check valve installation of vent lines      |
|     |             |                                               |                                                             | - Individual vent lines                          |            |             |       |                                                        |

나타냈다. 위험등급 1, 2등급은 현 상태를 유지 가능한 상태이고, 3, 4등급은 위험을 감소할 수 있는 대책을 실시한 경우 작업이 가능하며, 위험등급 5등급은 즉시 작업을 중지하고 공정을 개선해야하는 등급이다.

또한, 3등급 이상은 조건부 허용이 가능 구간이므로 개선 권고사항을 필히 작성하도록 하였으며, 빈도와 강도, 위험등급표는 평가 인원들이 조정할 수 있다.

HAZOP 수행을 위해 연구의 대상이 되는 수소 추출 공정을 다음 Fig. 3과 같은 검토구간으로 나누었다.

노드 1은 NG를 공급받아 탈황기를 통해 황 제거 후 개질기에 공급하는 구간이다. 노드 2는 개질기부터 순서대로 열교환기, 기액 분리기, 압축기 전단까지의 구간이다. 노드 3은 압축기부터 TK까지의 구간이다. 노드4는 TK후단부터 PSA를 통해 최종 수소가 생산되는 구간으로, PSA에서 각 압축기와 개질기로 수소를 리사이클링 하는 구간도 포함한다. 노드 5는 DI water를 개질기에 공급하는 라인이다.

다음 Table 5는 수행한 HAZOP 시트의 일부이다.

### 4. 위험성 평가 결과

HAZOP 수행 결과 5개의 검토구간에서 총 130개의 시나리오가 도출되었다. Fig. 4에 위험등급 분포를 나타내었다.

위험등급 1등급의 시나리오는 총 122개, 위험등급 2등급은 8개로 도출되었으며, 위험등급 3등급, 4등급 및 5등급은 도출되지 않았다.

도출된 개선 권고사항에 따른 조치계획은 노드 1은 10개, 노드 2는 15개, 노드 3은 17개, 노드 4는 14개, 노드 5는 4개로 총 60개이다.

도출된 주요 개선권고 사항 및 조치계획을 Table 6에 정리하였다.

첫 번째로는 TK 전후단 벤트 열림의 사항이다. 이 경우 수소 또는 CO<sub>2</sub>가 대기로 방출된다. 하지만, 현재 KGS AH171 상에서 대기방출을 금지하고 있기 때문에, 버너로 우회하여 연소 후 배출할 수 있도록 하는 방안을 제시하였다.

두 번째로는 PSA에서 개질기로 가는 환류라인에 관한 사항이다. 이 환류라인에서 역류 발생 시 개질기 전단부 고압형성이 가능하다. 체크밸브 설치를 검토하도록 하였다

세 번째로는 기액 분리기에서의 수분넘침 사항이다. 기액분리기의 수분이 후단부로 유입되는 경우 압축기 파손, 수소가스 순도 저하, PSA 수명 단축 등이 우려된다. 따라서 기액 분리기에 수분 high 알람을

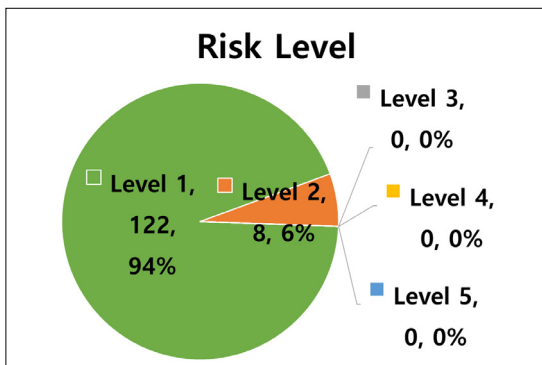


Fig. 4. Risk level distribution

설치하고, 정기적 드레인을 실시하도록 하였다.

네 번째로는 공정 설계 검토에 관한 사항이다. 현재 연구의 대상이 되는 공정은 개질기, 압축기, PSA 순으로 구성된 상압 가동형 공정이다. 하지만 KGS AH171에 따르면 가압, 개질기, PSA 순으로 구성하는 가압 가동형을 기준으로 하고 있다. 따라서 추후 설계를 검토하도록 하였다.

마지막으로 추후 연구가 필요한 부분이다. 연구대상 수소 추출기의 압축 대상은 수소, CO, H<sub>2</sub>O, 소량의 유기물로 이루어져 있으며 이는 현재 위험성 검증 경험이 없다. 앞서 언급한 바와 같이 소형 추출기에서 개질 수소를 압축하는 방식이 개질 효율이 좋다고는 하나, 수증기의 경우 압축 시 액화되어 위험성이 커질 우려가 있고, CO는 치명적인 위험성은 갖지 않을 것으로 예상되나 소량의 유기물의 경우 압축되면 점성을 가질 우려가 있다. 따라서 압축 공정 전 기액 분리를 필수로 설치하여 위험성이 큰 수증기의 위험성을 제외하도록 하였으며, 추후 개질 수소 압축에 따른 위험성을 검토하여야 한다.

Table 6. Major Improvement recommendations

| No. | Risk                                                                                                                                                                                                                                                                                   | Action                                                                  |
|-----|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| 1   | Hydrogen and CO <sub>2</sub> released into the atmosphere by opening the front and rear Vents of Tank. KGS AH171 : released into the atmosphere is illegal                                                                                                                             | Bypass to burner for combustion released                                |
| 2   | Back flow from PSA vent line side creates high pressure at front end                                                                                                                                                                                                                   | Consider check valve installation of vent lines                         |
| 3   | Inflow of moisture into the rear end due to overflow in separator                                                                                                                                                                                                                      | Drain regularly                                                         |
| 4   | Process design different from KGS AH171                                                                                                                                                                                                                                                | Review the process                                                      |
| 5   | Compression targets are hydrogen, CO, H <sub>2</sub> O, and a small amount of organic matter without risk verification experience<br>- Water vapor : Liquefaction potential upon compression<br>- CO : Low risk concern<br>- Small amounts of organic matter : viscosity, needs review | Separator installation.<br>Risk review of reformed hydrogen compression |

## 5. 결론

본 연구에서는 부생수소의 한정된 생산량을 보완할 수 있는 수소 생산 방식인 수소 개질방식에 대한 위험성 평가를 진행하였다.

수소 개질 방식은 현재 전 세계 수소 생산량의 50%를 차지할 뿐만 아니라 도시가스 보급망 구축이 잘 되어있는 우리나라의 환경에도 적합하다.

하지만 현재 수소 생산 방식에 대한 연구는 부족한 실정이며, 특히 수소 개질 방식의 경우 거주지 및 도심지에 설치될 가능성이 있다는 점에서 소형 수소 추출기를 연구 대상으로 선정하였다. 소형 수소 추출기의 경우 현재 KGS AH171에서 제시한 공정 설계 순서와 상이한 부분이 있어 공정별 영향을 파악할 수 있는 HAZOP 기법을 사용해 평가를 진행했다.

HAZOP 수행 결과 총 시나리오는 130개가 나왔으며, 조치 계획은 60개기 도출되었다.

주요 조치사항으로는 수소 또는 CO<sub>2</sub> 버너로 우회하여 연소 후 배출, PSA 환류라인에 체크밸브 설치 검토, 기액 분리기의 high 알람 설치 및 정기적 드레인 실시, 위험성 검증 경험이 부족한 KGS AH171과 상이하게 설계된 공정 순서, 압축 대상의 위험성 추가연구 필요 등이 있다.

## 후 기

연구의 대상은 위험성 검증 경험이 없고, 현재 법적 기준 요건과 상이한 공정 순서를 가진 소형 수소 추출기이다. 하지만 추후 수소 추출기의 개발이 계속될 경우 다양한 공정의 수소 추출기에 대해 위험성 검토가 필요하다. 따라서 본 논문의 의의는 다양한 수소추출기 공정의 위험성 검토에 있다.

## 감사의 글

본 연구는 에너지기술평가원 에너지기술개발사업(20203040030110)에 의하여 연구되었음에 감사드립니다.

## References

1. Y. H. Lee, "Analysis of the characteristics of reformer for the application of hydrogen fuel cell systems to LNG fueled ships", Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety, Vol. 27, No. 1, 2021, pp. 135-144, doi: <https://doi.org/10.7837/kosomes.2021.27.1.135>.
2. K. W. Rhie, T. H. Kim, J. K. Kim, and S. Y. Han, "Safety assessment for hydrogen gas production facilities (steam reforming)", Journal of the Korean Institute of Gas, Vol. 9, No. 4, 2005, pp. 44-49, Retrieved from <https://www.koreascience.or.kr/article/JAKO200509408728618.pdf>.