

COG 기반 수소 정제시설의 사고 영향 분석에 관한 연구

A Study on Consequence Analysis of Coke Oven Gas-Based Hydrogen Purification Facilities

최종호*

Jong-Ho Choi*

〈Abstract〉

The technology for hydrogen production from by-product gases generated in steel mills has recently garnered significant attention, with commercialization gradually progressing. Hydrogen production based on by-product gases presents a critical technological breakthrough, enabling the reduction of carbon emissions in steel production while promoting sustainable energy generation. In this study, a consequence analysis of potential accidents was conducted by analyzing the components of a newly proposed membrane-PSA hybrid process aimed at reducing the cost of hydrogen production from the PSA-only process. The findings indicate that the extent of pipeline damage and weather conditions significantly influence the range of hydrogen leakage, the radiative heat from jet fires, and the overpressure range in vapor cloud explosions. These results provide essential foundational data for evaluating the risks associated with hydrogen leakage accidents and for establishing safety design and preventive measures.

Keywords : Coke oven Gas (COG), Hydrogen, Pressure Swing Adsorption, Membrane Separation, Consequence Analysis

* 정회원, 교신저자, 경일대학교 화학공학과, 교수
E-mail: jchoi@kiu.ac.kr

* Dept. of Chemical Engineering, Kyungil University, Professor

1. 서론

최근 지속 가능한 에너지 기술에 대한 관심이 높아짐에 따라, 수소(H₂)는 에너지 전환의 핵심 요소로 주목받고 있다. 청정 에너지원으로서 수소는 연료전지 및 화학 공정에서 필수적인 자원으로 자리매김하고 있으며, 그 중요성은 계속해서 증가하고 있다. 특히 제철소는 철강 생산 과정에서 대량의 부생수소를 생성하는 주요 산업 중 하나로, 이 부생수소는 주로 수소, 일산화탄소, 이산화탄소, 메탄 등으로 구성된 혼합가스로 구성된다. 그러나 부생수소는 다양한 불순물과 혼합된 상태로 배출되기 때문에, 이를 고순도 수소로 정제하기 위한 고도의 기술이 필요하다[1].

압력순환흡착법(Pressure Swing Adsorption, PSA)은 부생수소에서 고순도 수소를 분리하는 대표적인 기술로, 기체 혼합물 내 특정 성분을 선택적으로 흡착하고 탈착하는 원리를 이용한다. PSA 공정은 고순도 수소를 효율적으로 생산할 수 있는 반면에, 높은 초기 투자 비용과 높은 에너지 소비, 흡착제의 제한된 수명 등의 단점이 있다. 또한 복잡한 기체 조성을 갖는 낮은 유량에서는 효율성이 제한될 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 PSA 공정은 흡착제의 개선, 공정 최적화, 데이터 기반 최적화 등 다양한 방향으로 진화하고 있으며, 특히, 다단계 PSA 공정의 도입은 고순도 수소 생산의 효율성을 더욱 높이고 있다[2-4]. 뿐만 아니라, 최근에는 단독 PSA 공정의 한계를 극복하기 위해 PSA 공정 앞단에 막분리(membrane separation) 공정이 도입된 막분리-PSA 혼성(hybrid) 공정이 주목받고 있다. 막분리 공정을 거치면서 부생수소를 일차적으로 농축해 줌으로써 PSA 공정의 부담을 줄이고 에너지 소비를 절감하며, 수소 생산 효율이 향상하게 된다. 이에 따라 PSA 공정의 큰 단점 중의 하나인 수소 생산 비용을 절감할 수 있

게 된다[5-6].

본 논문에서는 제철소에서 발생하는 부생수소로부터 고순도 수소를 분리 및 정제하기 위해 새롭게 제안된 막분리-PSA 혼성 공정의 사고 영향 분석(Consequence Analysis)을 통해 설비, 배관 등의 손상, 파손, 고장 등의 시나리오를 도출하고 이를 DNV社의 PHAST 소프트웨어를 사용하여 그 위험성을 평가하였다. 위험 평가 시나리오에 의해 발생하는 수소의 누출 범위, 화재폭발에 의한 복사열의 수준별 영향 범위, 그리고 폭발의 과압 범위 등을 도출하고 주변 설비에 대한 안전성을 평가하여 설계 개선에 활용하고자 한다.

2. 막분리-PSA 혼성 수소 정제시설 구성

본 연구에서 다루는 공정은 제철소에서 발생하는 COG(Coke Oven Gas)를 정제하여 고순도의 수소를 제조하는 것을 목적으로 한다. COG는 수소, 일산화탄소, 이산화탄소, 질소, 메탄 등의 주요 성분과 황화수소, 암모니아, 시안화수소 등 다양한 불순물이 포함된 복합 가스이다. 이러한 주요 성분과 불순물들은 수소의 순도를 높이기 위해 정제 및 분리 공정에서 제거되어야 한다. 본 연구에서는 Fig. 1에 나타낸 막분리-PSA 혼성 공정의 수소 정제시설에 대한 사고 영향 분석을 수행하였다[7].

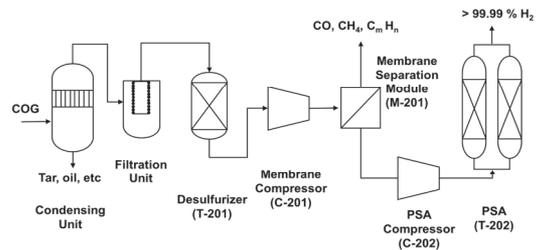


Fig. 1 A hybrid hydrogen purification process with a membrane separation and a PSA process

전체 공정은 크게 전처리 공정과 분리 공정으로 나눌 수 있다. 우선 전처리 공정은 COG의 주요 불순물인 타르, 유분, 황화수소, 암모니아 등을 제거하기 위해 집진, 탈타르, 탈황 등의 단계를 거치게 된다. 이 단계에서 COG는 약 0.5~4 barG의 압력 상태에서 처리되며, 이러한 압력 조건은 공정의 효율성을 극대화하는 데 중요하다. 2차 공정한 막분리 공정과 PSA 혼성 공정은 전처리가 완료된 부생가스들이 분리막 모듈과 압축기로 이루어진 막분리 공정에서 부생가스 내의 수소를 순도 80% 이상으로 농축시킨 후, 최종적으로 PSA 공정을 거치며 고순도의 수소를 생산하게 된다.

3. 위험 분석 및 시나리오 도출

3.1. 공정의 설비 및 배관 분석

설계된 공정은 앞서 설명한 것과 같이 전처리, 막분리-PSA 혼성 공정으로 크게 구분할 수 있다. 전처리 공정은 불순물 제거가 목적이므로 화재, 폭발의 원인이 되는 가연성 가스인 수소, 일산화탄소, 메탄 등의 농도는 크게 증가하지 않는다. 다만 전처리 공정의 인입 가스는 불순물로 황화수소, 시안화수소 일산화탄소 등의 독성 가스를 포함하고 있으므로 누출 시 주변에 허용 농도 이상이 되는지 판단할 필요가 있다.

막분리-PSA 공정을 모두 거치게 되면 최종적으로 99.995% 이상의 순도를 가지는 수소가 9 barG 압력으로 시간당 300 Nm³ 생산된다. 이 공정 중 PSA 순환을 위한 가압용 압축기에서 압력이 약 10 barG로 상승하게 되며, 이때 배관의 크랙이나 손상으로 인한 누출이 발생하게 되면 피해 영향 범위가 가장 클 것으로 예측된다.

일반적으로 배관 등에서 가연성 가스가 누출될 경우, 즉시 점화, 지연 점화, 또는 점화 실패 등으로 인해 화재나 폭발이 발생할 수 있다. 즉시 착화가 이루어지면 분출 화재(Jet Fire)가 발생할 수 있으며, 누출된 가스가 착화되지 않고 체류한 상태에서 지연 점화가 이루어질 경우 증기운 폭발(Vapor Cloud Explosion, VCE)이 발생할 수 있다. 가연성 독성 가스는 상기 과정과 유사한 영향을 미칠 수 있으며, 점화원이 없거나 착화되지 않는 불연성 독성 가스의 확산에 따른 중독 사고를 유발할 수 있으므로 이에 대한 대비가 필요하다.

3.2. 위험성 평가 시나리오 구성

위험성 평가 시나리오는 공정전문가 회의를 통해 설정되었는데, 본 공정의 경우 고압으로 저장되는 압력 용기가 없어 처리 설비를 통해 발생하는 고압 배관 부위를 취약부로 판단하고 위험성 평가를 진행하였다. 선정된 위험성 평가 시나리오는 Fig. 1에 나타난 막분리-PSA 공정에서 9 barG

Table 1. Accident Scenario

Components	Inventory			Piping (inch)	Gas Components	Scenario	Leak Size (mm)	Leak Time (min)
	Pressure (barG)	Temp. (°C)	Flow Rate (Nm ³ /hr)					
Compressor Outlet (C-202)	9.0	40	473	2	H ₂ : 79.29 % CO ₂ : 6.49 % CO : 10.79 %	Small Leak	10.16	10
					N ₂ : 3.21 % CH ₄ : 0.22 %	Large Leak	25.40	10

압축된 가스가 운반되는 압축기(C-202)-PSA 배관의 파손에 따른 가연성 가스, 즉 수소의 누출 상황으로 설정하였다. 즉, 배관의 파손이 가연성 가스의 누출 가능성을 초래할 수 있음을 분석하였다. 이를 위해 배관의 손상은 소규모(small leak)와 대규모(large leak) 두 가지 시나리오로 나누어 분석하였으며, 이로 인해 발생할 수 있는 사고의 독성과 가연성에 대한 영향을 자세히 검토하였다. 또한 사고 시나리오의 영향을 최소화하기 위해 적절한 대응 방안을 마련하고자 하였다.

본 연구에서는 가스 배관의 파손 크기를 직경의 20%와 50%로 설정하여 분석을 진행하였으며, 이는 다양한 누출 상황을 평가하기 위한 기준이 되었다. 각 경우에 따른 피해 범위와 영향을 분석하였는데, 누출 시간은 한국산업안전보건공단(KOSHA)의 가이드를 참조하여 10분으로 설정하였으며, 이는 초기 대응 및 사고 차단을 위한 표준 시간으로 적용되었다. 추후 차단 안전장치의 작동 시간이 설정될 경우, 이 기준 시간에 따라 조정될 예정이며, 이를 반영하여 누출 상황에 대한 보다 정확한 분석이 이루어질 것이다. 뿐만 아니라 해당 공정의 적용될 지역의 기후조건을 조사하여 풍향 및 기온에 따른 영향 인자도 고려하였다.

4. 위험성 평가 결과 및 해석

본 연구에서는 제철소 부생수소로부터 고순도 수소를 분리해 내기 위한 막분리-PSA 혼성 공정 중 압축기-PSA 배관의 20% 및 50% 파손 시 수소 누출에 따른 위험성을 평가하였으며, 그 결과는 수소의 누출 범위, 제트 화재의 복사열 범위, 및 증기운 폭발의 과압 범위 등으로 구분하여 분석하였다.

Table 2는 배관의 파손 크기와 날씨 조건에 따른 수소의 누출 범위를 나타낸다. 압축기-PSA 배

관이 20% 손상될 경우, 우선 가스가 공기 중에서 폭발하거나 불이 붙을 수 있는 최고의 농도를 나타내는 UFL(upper flammable limit)까지의 거리는 약 0.41 m로 기상 변화와 관계없이 일정하게 나타났으나, 가스가 공기 중에서 폭발하거나 불이 붙을 수 있는 최저 농도를 나타내는 LFL(lower flammable limit)까지의 거리는 기상 조건에 따라 7.44 m에서 12.46 m까지 크게 변동하는 것으로 나타났다. 이에 반해 압축기-PSA 배관이 50% 손상될 경우, UFL과 LFL까지의 거리가 각각 약 0.7

Table 2. Distance to lower and upper flammability limit. (Case 1, 2, 3 : wind speed 1.4, 5.3, 10.5 m/s)

Case	Weather	Distance to UFL [m]	Distance to LFL [m]
20%	Case 1	0.41	12.46
	Case 2	0.41	9.49
	Case 3	0.41	7.44
50%	Case 1	0.72	32.25
	Case 2	0.72	33.11
	Case 3	0.71	32.38

Table 3. Distance downwind to various intensity level. (Level 1, 2, 3 = 4.0 12.5, 37.5 kW/m²)

Case	Weather	Flame length [m]	Distance downwind [m]		
			Level 1	Level 2	Level 3
20%	Case 1	6.38	7.61	6.96	6.52
	Case 2	6.32	7.31	6.78	6.41
	Case 3	6.32	7.11	6.67	6.32
50%	Case 1	14.28	20.43	17.45	15.64
	Case 2	14.15	19.62	16.96	15.35
	Case 3	14.14	18.57	16.38	15.05

m와 32 m로, 기상 조건에 따라 거의 유사한 것으로 나타났다.

Table 3은 압축기-PSA 배관이 파손될 경우 수소 제트 화재 복사열의 도달 거리를 나타내는데, 여기에 사용된 Level 1(4 kW/m²)은 사람이 화상을 입을 수 있는 수준을, Level 2(12.5 kW/m²)는 나뭇조각이 발화하거나 플라스틱 튜브가 녹는 수준을, Level 3(37.5 kW/m²)은 공정 기계의 손상을 일으키는 강도의 복사열로 구분된다. 우선 화염의 길이는 배관의 파손 정도나 기상 조건과 관계없이 큰 차이를 보이지 않았다. 하지만, 배관의 20% 파손 시 제트 화재 복사열의 도달 거리는 Level 1의 경우 기상 조건에 따라 7.61 m에서 7.11 m 정도이지만, 50% 파손 시에는 14.28 m에서 14.14 m 정도로, 20% 파손에 비해 크게 증

가했다. Level 2와 Level 3에서도 유사한 경향이 발견되는데, 이는 제트 화재 복사열 도달 거리가 기상 조건보다는 배관의 파손 정도에 더 큰 영향을 받게 됨을 확인할 수 있었다. 두 결과를 종합해 보면, 배관의 파손 크기가 제트 화재의 복사열 도달 거리와 화염 길이에 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있었다.

Table 4는 배관 정도 따른 증기운 폭발의 과압 범위를 나타낸다. 여기에 사용된 가연성 가스 폭발의 과압 0.07 bar는 주택의 복구가 불가능한 일부 파손이나 고막 파열이 일어나는 수준이며, 과압 0.21 bar는 건축물의 철구조물이 손상되어 기초에서 이탈하거나 신체 부상이 가능한 수준이며, 과압 0.70 bar는 건축물 대부분이 전파되는 수준을 나타낸다. 그리고 수소 누출 시 지연 점화에 의한 증기운 폭발은 과압이 닿는 최대 직경을 위험 범위로 나타낸다.

우선, 압축기-PSA 배관이 20% 파손되었을 때, 0.07 bar 과압의 도달 거리는 15.7~27.6 m, 0.21 bar 과압의 도달 거리는 12.5~23.3 m, 0.70 bar 과압의 도달 거리는 11.2~21.6 m로 나타났다. 이에 반해 배관이 50% 손상되었을 때, 0.07 bar, 0.21 bar, 0.70 bar 과압의 도달 거리는 각각 72.0~78.6 m, 59.5~68.0 m, 54.7 ~64.0 m로 나타났다. 증기운 폭발의 과압 범위 역시 배관의 파손 정도가 증가함에 따라 폭발의 과압 범위가 크게 증가함을 확인할 수 있었다.

결론적으로, 배관의 파손 정도와 기상 조건의 변화는 수소의 누출 범위, 제트 화재의 복사열 범위, 및 증기운 폭발의 과압 범위에 큰 영향을 미침을 확인하였다. 이 결과는 수소 누출 사고의 위험을 평가하고, 안전 설계 및 예방 조치를 수립하는데 중요한 기초 자료를 제공하며, 향후 추가적인 연구와 분석을 통해 더 정밀한 안전 대책이 필요함을 시사한다.

Table 4. Overpressure range of vapor cloud explosion. (Case 1, 2, 3 : wind speed 1.4, 5.3, 10.5 m/s)

Case	Weather	Overpressure level [bar]	Maximum distance [m]
20%	Case 1	0.07	27.64
		0.21	23.28
		0.70	21.64
	Case 2	0.07	26.51
		0.21	22.80
		0.70	21.40
	Case 3	0.07	15.72
		0.21	12.46
		0.70	11.23
50%	Case 1	0.07	72.04
		0.21	59.48
		0.70	54.74
	Case 2	0.07	70.17
		0.21	58.67
		0.70	54.34
	Case 3	0.07	78.60
		0.21	67.99
		0.70	64.00

5. 결론

본 연구는 제철소 부생수소에서 고순도 수소를 생산하는 막분리-PSA 혼성 공정에 대한 사고 영향 분석을 실시한 결과인데, 압축기-PSA 배관의 파손으로 인한 수소의 누출 시나리오에 대한 피해 영향을 분석하였다. 우선, 압축기-PSA 배관의 손상(20%, 50%)에 대해 수소의 누출 범위를 계산하였다. 수소는 4~75 %의 폭발 한계를 갖고 있으며, 폭발 하한의 50%인 20,000 ppm을 기준으로 한 누출 범위는 가혹 조건에서 20% 손상 시 최대 약 22미터, 50% 손상 시 최대 약 55미터까지 확장되었다. 가연성 가스 검지기의 검지 농도는 LEL 25%로 설정되어 있으며, 이는 계산된 누출 범위보다 넓은 것으로 예상된다. 다만 LEL 25%와 50% 농도는 폭발이나 화재 발생 전 단계의 농도이므로, 작업자가 이를 인지할 수 있도록 검지기를 설치하고 적절한 조치를 취해야 한다. 또한, 누출 범위를 줄이기 위해 경보와 차단이 가능한 인터록(inter lock) 시스템의 설치가 필요하다. 작업 공간이 누출 범위에 포함될 경우, 해당 지역 및 주변을 방폭 구역으로 지정하고, 방폭 전기기기 인증을 받은 제품을 설치하여 체류 가스가 점화되는 것을 예방해야 한다.

제트 화재의 경우, 배관 파손의 크기와 압력에 따라 영향을 받으며, 배관 20% 손상 시에는 최저 기준인 4 kW/m^2 (화상 발생) 범위에 사무동이 포함되지 않았다. 그러나 배관 50% 손상 시에는 사무동이 해당 범위에 포함되므로, 작업자의 안전을 위해 방호벽과 망입 유리 등을 설치하는 것이 필요함을 확인하였다. 증기운 폭발의 경우, 폭발 압력이 사업장 외부까지 넓게 미치며, 이는 누출 시간과 지연 점화에 따른 현상이므로 누출 검지 및 차단 시스템을 적용하여 누출 시간을 단축하고, 방폭 구역을 지정하여 점화원을 제거해야 함을 확인하였다.

본 연구는 제철소 부생수소로부터 고순도 수소를 분리 및 생산하기 위해 제안된 막분리-PSA 혼성 공정의 가연성 가스 누출에 대한 전반적인 피해 영향을 분석하고, 적절한 예방 및 대응 방안을 제시함으로써, 안전한 작업 환경을 유지하는 데 기여할 것으로 기대된다.

사 사

이 논문은 2024년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구입니다(No. 20213030040170).

참고문헌

- [1] W. Liu, H Zuo, J. Wang, Q Xue, B. Ren, and F Yang, "The production and application of hydrogen in steel industry", *Int. J Hydrogen Energy*, 46, 10548-10569 (2021).
- [2] M. Luberti, H. Ahn, "Review of Polybed pressure swing adsorption for hydrogen purification", *Int. J Hydrogen Energy*, 47, 10911-10933 (2022).
- [3] P. Cavaliere, "Hydrogen Separation and Purification. In: Water Electrolysis for Hydrogen Production" Springer (2023).
- [4] V. Kalman, J. Voigt, C. Jordan, and M. Harasek, "Hydrogen Purification by Pressure Swing Adsorption: High-Pressure PSA Performance in Recovery from Seasonal Storage", *Sustainability*, 14(21), 14037 (2022).
- [5] T. Kim, Y. Song, J. Kang, S. K. Kim, and S. Kim, "A review of recent advances in hydrogen purification for selective removal of oxygen: Deoxo catalysts and reactor systems", *Int. J Hydrogen Energy*, 47, 24817-24834 (2022).

- [6] S. Singla, N. P. Shetti, S. Basu, K. Mondla, and T. M. Aminabhavi, "Hydrogen production technologies - Membrane based separation, storage and challenges", *J. Environ. Manag.*, 302, 113963 (2022).
- [7] J. -H. Kim, J. -Y. J eon, B . -R. Park, and H. -C, Kang, "Method and system for separation and recovery of hydrogen from coke oven gas in the steel industry", Korea Patent, 10-2329389, (2021).

(접수: 2024.08.21 수정: 2024.08.23. 게재확정: 2024.08.28.)