

## 수소충전시설에 대한 정량적 위험성 평가 및 모델적용에 관한 연구

신정수, 변헌수\*

전남대학교 공과대학 생명화학공학과  
(hsbyun@chonnam.ac.kr\*)

## A Study on Quantitative Risk Analysis &amp; Model Application for Hydrogen Filling Plant

Jung-soo Shin, Hun-soo Byun\*

School of Biotechnology and Chemical Engineering, Chonnam National University  
(hsbyun@chonnam.ac.kr\*)

## 서론

가스제조 시설들은 불활성 가스공급을 통하여 제조업 시설의 안전한 운영 및 유지하는 역할을 하며, 폭발성, 가연성 및 독성가스를 공급하여 화학제품 제조에 필요한 기초 원료의 공급을 담당하는 역할을 한다. 또한 가스의 제조과정에서 고온, 고압, 초저온 및 촉매 반응 등의 운전조건 하에서 제조시설이 운전되기 때문에 안전하고 신뢰성 있는 운영이 반드시 필요하다. 이러한 공장들은 공정관리가 복잡하며 제조물질의 누출로 인한 화재, 폭발 및 독성가스 누출로 인한 중대산업사고의 위험성이 있고, 불활성가스로 인한 질식 재해, 고온 및 초저온으로 인한 화상 등 잠재적인 위험요소를 많이 가지고 있다.

이러한 위험요소 및 재해를 줄이기 위해서는 단순한 안전관리에서 벗어나 생산 공정중의 잠재위험(Hazard)을 확인하여 기술적으로 평가한 후, 위험관리를 통한 손실방지 (Loss Prevention)개념이 포함된 새로운 안전관리 시스템이 절대적으로 필요한 시점에 왔다.

본 연구는 가스제조시설에 대한 명확하고 신뢰성 있는 위험성 평가방법을 통하여 이 결과를 기반으로 설비들을 안전하고 신뢰성 있는 운전, 정비 및 유지표준 구축하는데 그 목적이 있다. 설비에 대한 위험성 평가는 지난 20여 년 동안 정성적 평가 및 정량적 평가 방법 등을 통하여 실행되었으나, 평가방법의 복잡성 및 전문성으로 인하여 가스제조 설비들에 적용이 매우 어렵고 복잡한 절차 및 프로그램들이 필요하였다. 이 연구는 기존의 정성 및 정량적 평가 방법들의 단점들을 개선하고 장점들을 조합하여, 적절하고 신뢰성 있는 위험성평가 기법을 통한 위험성 평가 및 평가 결과에 대한 효과적인 실행방법에 대한 표준절차를 구축하는 것이다.

## 본론

## 1. 위험성평가모델

위험성 평가의 모델은 설비의 설계, 시 운전, 운전 및 정지하는 과정에서 중대사고가 발생할 수 있는 잠재위험들을 찾아내어 사고발생 가능성과 사고결과로 나타난 치명도의 함수로 위험성을 평가하는 체계이다. 이것은 평가대상으로 선정된 설비 또는 시스템을 묘사한 후 공정에 관한 정보를 분석하여 여러 개의 분석 단위로 분할하여 하나씩 평가를 수행한다. 설비의 재해를 예방하기 위해서는 위험성 평가가 필요하나 국내에서 개발된 위험성평가 모델이 체계화 및 평가기준이 정량화 되지 않아 위험성 평가에 어려움이 있는 실정이다.

이에 본 연구에서는 가스제조설비의 위험성 평가를 기본으로 하여 가스 제조업의 위험성 평가에 적합한 GRA(Generic Risk Analysis) 모델을 이용하여 설비들에 대한 위험성을 평가하였고, 발견된 중요안전요소(EIS, Elements Important for Safety)들 즉, 사고의 발생가능성과 사고결과로 나타난 치명도가 큰 요소(위험도가 높은 요소)들에 대한 관리방법을 Fig. 1에 제시하였다.

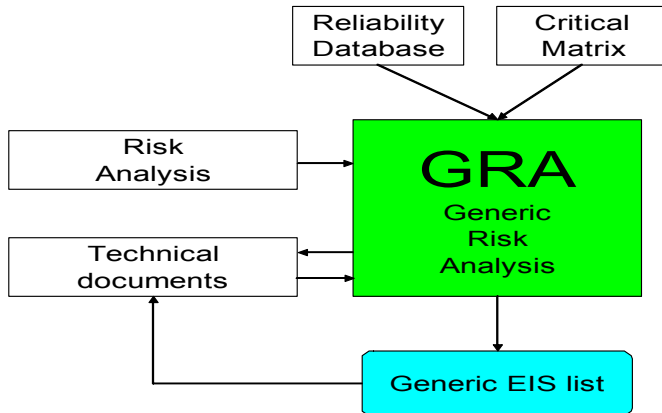


Fig. 1. The framework of the generic risk analysis(GRA) model.

## 2. 위험성평가 실시절차

### 1) 초기위험도 (Initial Criticality) 평가

(1) 초기 치명도(Initial Severity),  $S_i$  : 먼저 각각의 발생사고 (FE, Feared Event)에 대하여 위험도를 평가하며, 평가표기는 사람에 대해 영향이 있으면 "S"이고, 환경오염은 "E"이고, 생산설비 및 재산손실에 대해서는 "P"로 표기한다.

(2) 초기 사건 발생확률(Initial Probability),  $F_i$  : 발생된 사건 시나리오의 결과로서 신뢰도 데이터베이스(Reliability Database) 및 위험성 평가자의 의견을 반영하여 계산 및 결정한다.

(3) 초기 위험도(Initial Criticality),  $C_i$  : 위에서 계산한 초기 치명도 및 발생확률의 조합으로 산정되며 위험도의 높고 낮음을 GRA 프로그램을 통하여 자동으로 저 위험도(Low Risk), 중 위험도(Intermediate Risk) 및 고 위험도(Unacceptable Risk)로 산정된다.

초기위험도 평가는 현재 공정 및 장치에 반영되어 있는 안전방벽(Safety Barrier)들에 대한 위험도를 반영하지 않고 평가를 실시한다.

### 2) 안전방벽(Safety Barrier) 산정

안전방벽은 발생사건에 대하여 치명도 (Severity) 및 발생확률(Probability)의 위험수준을 낮추는 기능을 수행한다. 안전방벽은 항상 작동이 가능한 것(Passive: Always Available) 것과 항상 작동하지 않는 (Active: Could be Unavailable) 것으로 구분할 수 있다.

### 3) 잔여위험도(Residual Criticality) 산정

잔여위험도는 초기의 사고 발생확률 및 치명도를 감소를 위하여 사용된 안전방벽 (Safety Barrier)의 연속사용 고장률( $\lambda$ ) 및 요구고장률(PFD, Probability of Failure on Demand)의 합을 통하여 계산된다.

### 4) 중요안전요소(EIS, Elements Important for Safety)의 도출

위험성 평가결과 위험도가 높게 평가된 고 위험도를 중요안전요소라 하며, 이러한 초기 위험도는 위험도 경감을 통하여 수용 가능한 위험도로 낮추어야 한다. 또한 위험성 평가결과 위험도가 낮은 것으로 계산된 위험도(Low Level Risk)들도 가능하다면 더 낮출 수 있도록 하여야 한다.

## 3. 수소충전시설에 대한 위험성평가 결과

위험도 평가결과 녹색 부위로 표시되는 저 위험도 군(Low Level Risk Area), 노란색 부위로 표시되는 중 위험도 군(Intermediate Area) 및 적색으로 표시되고 위험도가 높은 고 위험도 군(Unacceptable Risk Area)으로 평가 하며, 특히 고 위험도 군으로 평가된 24, 34, 44, 33, 43 및 42를 저 위험도로 낮추기 위해 사용되었던 6종의 안전방벽들을

중요 안전요소(EIS, Elements Important for Safety)라 한다. 이는 수소 충전시설의 운전 및 안전 유지를 위하여 가장 중요한 사항이라 할 수 있으며, 위험도에 따른 자세한 평가기준은 Fig. 2에 나타내었다.

		Severity (치명도)				
		0	1	2	3	4
Probability (발생가능성)	4	04	14	24	34	44
	3	03	13	23	33	43
	2	02	12	22	32	42
	1	01	11	21	31	41
	0	00	10	20	30	40

Fig. 2. Guideline for risk level.

1) 초기위험도 평가결과

초기위험도 평가 실시결과 수소 가스의 누출로 인한 화재, 폭발 사고시나리오 총 23개의 사고시나리오 중, 고 위험도 군(Unacceptable Area) 8개 항목, 중 위험도 군(Intermediate Area) 14개 항목 및 저 위험도 군(Low Level Risk Area) 1항목으로 평가 되었으며, 이와 관련된 초기위험성 평가결과는 Fig. 3에 나타내었다.

		Severity (치명도)				
		0	1	2	3	4
Probability (발생가능성)	4		4			
	3		1	4	11	
	2				3	
	1					
	0					

Fig. 3. Initial risk analysis results for hydrogen filling center.

2) 잔여위험도 평가결과

초기 위험도 평가결과를 바탕으로 수소 충전시설에 대해 고 위험도 군 11항목, 중 위험도 군 11항목 및 저 위험도 군 1항목에 대해 위험도 경감을 실시하였으며, 위험도 경감을 위하여 반영한 안전방벽(Safety Barrier)들은 안전제어장치, 압력완화장치, 절차서 및 안전조치 행위이다. 총 21항목의 사고 시나리오에 대해 안전방벽들을 적용시킨 후, 계산된 위험도 평가결과는 모두 저 위험도 군으로 평가 되었으며, 수소 충전시설에 대한 자세한 잔여위험도 평가 결과는 Fig. 4에 나타내었다.

		Severity (치명도)				
		0	1	2	3	4
Probability (발생가능성)	4					
	3					
	2	1		1		
	1		4		3	
	0		2	2	10	

Fig. 4. Residual risks for hydrogen filling center.

3) 중요안전요소 도출과 안전방벽

위험성 평가결과 수소 충전시설의 안전한 운전 및 사고예방을 위해서 반드시 유지 및

관리해야 할 중요안전요소는 24, 34, 44, 33, 43 및 42의 고 위험도 군으로 평가된 위험도를 줄이기 위하여 반영 되었던 안전방벽을 말하며, 평가결과 총 11개의 중요안전요소가 도출되었다. 11개의 중요안전요소들에 대한 안전방벽들(Safety Barriers)은 안전제어장치(SPL) 6, 압력완화장치(PRD) 4, 절차서(PR) 1 및 기타 안전행위(O, Other Safety Features) 1 항목으로 도출 되었다.

위험성평가를 실시한 수소 충전시설의 안전방벽에 대한 점검주기는 사용설비의 치명도 및 발생확률을 낮추기 위하여 설정된 정기 점검주기이며, 공장 또는 설비들에 대한 정기보수(Turnaround)의 기준으로 설정할 수 있는 장점이 있다. 수소 충전시설의 경우에는 1년에 1회 반드시 점검을 실시해야 하는 항목들이 PSV(Pressure Safety Valve) 및 과열판(Rupture Disk)이므로 이를 이중으로 설치하면, 낮은 위험도에서도 2배의 정기보수기간을 늘릴 수 있는 장점이 있으나 이는 관련설비에 대한 투자비용과 운전이익(Operating Profit)을 비교하여 결정해야 하는 사항이다.

## 결론

수소 충전시설에 대하여 3개 부분 총 23개의 사고시나리오에 대하여 정량적 위험성평가 모델인 GRA를 수행하였으며, 초기위험도 평가결과 고 위험도 군 8항목, 중 위험도 군 14항목 및 저 위험도 군 1항목으로 평가되었다. 초기위험도 평가결과를 바탕으로 고 위험도 군 및 중 위험도 군에 대해 위험도를 낮추기 위한 안전방벽을 적용하여 잔여 위험도를 평가 하였으며, 23개 사고시나리오 모두 저 위험도로 평가되었다.

수소 충전시설의 안전한 운전 및 사고예방을 위해 반드시 관리해야 할 중요안전요소 11항목을 도출하였으며, 중요안전요소의 구성은 안전제어장치 6, 압력완화장치 4, 절차서 반영 1 및 기타 안전행위 1항목으로 평가되었다. 11항목의 중요안전요소를 중요도 관점에서 분석하면 압력완화장치가 가장 중요하며, 다음으로 수소 압축기 전단 배관에 설치된 산소검지기 및 이의 경보 발생 시 압축설비를 자동으로 정지시키는 안전제어장치이다.

## 참고문헌

1. International labor organization, "Prevention of major industrial accident", ILO, Geneva, 1993.
2. Crowel D. A. and Louver J. F., "Chemical process safety : Fundamental with application", Prentice hall, 1990.
3. 한국리스크관리학회 학술세미나, "E-HAZOP 개발에 관한 연구", 1997.
4. 한국가스안전공사 한국안전전문기관협의회, "정성적 위험성 평가", 1999.
5. Environmental protection agency, "RMP offsite consequence analysis guideline", EPA, 1996.
6. American petroleum institute, "Guide for pressure - Relieving and depressuring system : Recommended practice 521", 3<sup>rd</sup> Edition, API, Washington D. C., 1990.
7. Council of the european communities, "Council directive on the major accident hazards of industrial activities", Official J. of the european communities, 1982.
8. CCPS, "Plant guideline for technical management of chemical process safety", AIChE, New York, 1992.
9. 한국산업안전공단, "공정안전보고서 이행평가기법 개발", 2002.
10. CCPS, "Guidelines for auditing process safety management systems", AIChE, New York, 1995.
11. CCPS, "Guidelines for process safety documentation", AIChE, New York, 1995.
12. 백종배, "화학공정에서의 정량적 위험성 평가를 위한 기반구조 구축에 관한 연구", 광운대학교 박사학위논문, 1995.