



GRA(Generic Risk Analysis) 기법을 이용한 공기분리시설에 대한 준 정량적 위험성 평가에 관한 연구

신정수 · [†]변헌수

전남대학교 공학대학 생명화학공학과

(2013년 1월 21일 접수, 2013년 2월 14일 수정, 2013년 2월 25일 채택)

A Study on Semi Quantitative Risk Analysis for Air Separation Unit using a GRA(Generic Risk Analysis) Method

Jung-Soo Shin · [†]Hun-Soo Byun

School of Biotechnology and Chemical Engineering, Chonnam National University, Yeosu, Jeonnam 550-749, S. Korea

(Received January 21, 2013; Revised February 14, 2013; Accepted February 25, 2013)

요약

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 촉매반응 등의 운전조건 하에서 시설이 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 질식재해, 고온 및 초저온으로 인한 화상 등 잠재적인 위험요소를 많이 가지고 있다.

본 연구는 신뢰성 있는 준 정량적 위험성평가 기법인 GRA(Generic Risk Analysis) 모델을 공기분리시설(ASU)에 적용하여 초기위험도(Initial Risk) 산정, 안전방벽(Safety Barriers) 적용, 잔여위험도(Residual Risk) 산정 및 중요 안전요소(EIS, Elements Important for Safety)를 도출 하였으며, 위험성 평가 결과로 도출된 중요안전요소에 대한 효과적인 안전관리 및 시행절차의 구축을 제안하였다.

Abstract - The gas production plants supply the inert gas to production plants for maintaining safe operation and also supply combustible, flammable, explosive and toxic gases as functions of basic materials needed for producing chemical goods. In addition, gas plants need to be safe and reliable operation because they are operated under high temperature, high pressure, cryogenic and catalytic reactions. As these plants have a complex process in operation, there has been a risk that major industrial accidents such as a fire, explosion and toxic gas released, also risks of asphyxiations by inert gases and burns caused by high temperature and cryogenic substances.

This study is to carry out the semi quantitative risk assesment method which is the generic risk analysis (GRA). This method is applied to air separation unit(ASU) to identify its initial risk, safety barriers, residual risk and elements important for safety(EIS). The result of this study, suggested the management tools and procedures of implementation for EIS management.

Key words : air separation, generic risk analysis, semi quantitative risk, residual risk

[†]Corresponding author:hsbyun@chonnam.ac.kr

Copyright © 2013 by The Korean Institute of Gas

I. 서 론

화학공업의 발전과 더불어 국내에서도 각종 화학 물질의 사용과 그 취급양이 증가하고 있으며 종류 또한 다양해지고 있다. 또한 부가가치가 큰 화학제품을 생산하고자 새로운 합성방법을 개발하여 생산하거나 신제품 개발을 위하여 연구하고 있는 사업장이 증가하고 있다. 그러나 이들 사업장에서 취급하고 있는 물질들은 열 안전성, 반응위험 특성이나 취급하는 공정에 대한 위험성평가 등 안전을 확보할 수 있는 여러 조치가 미흡한 상태에서 운전되고 있어, 예기치 못한 화재, 폭발 사고들이 끊임없이 발생되고 있다. 이러한 사고들은 국적과 위치, 시기에 관계없이 지속적으로 발생되고 있는 상황이다[1-2].

공기분리시설은 1902년 프랑스 및 독일에서 개발된 후, 지난 100년 동안 지속적으로 운전되고 있으며 화학 산업의 기초 원재료로 사용되고 있지만 탄화수소의 축적으로 인한 설비들의 폭발사고, 초저온으로 인한 배관 및 장치들의 파열사고 등을 포함하여 많은 인명사고 및 설비의 폭발사고가 발생하였다.

초저온 증류를 실현하기 위하여 공기의 온도를 대기온도에서 원하는 온도까지 낮추기 위하여 단열압축 및 팽창의 원리를 적용하여 압축기(Compressor) 및 팽창기(Turbine)를 이용하는 원리이다. 이 원리를 주울-톰슨 효과(Joule-Thomson Effect)라 하는데, J. P. Joule과 W. Thomson이 1854년 실험을 통하여 발견한 것이다[3]. 이 원리는 압축한 기체를 단열된 좁은 통로를 통해서 빠져나가게 하면 빠져나가기 전후 기체의 엔탈피는 같게 된다. 이론적으로는 이 과정에서 온도변화는 생기지 않지만, 실제 기체의 경우는 분자 간 상호작용이 있기 때문에 온도변화(하강)가 생긴다.

이러한 기술과 원리를 바탕으로 공기 분리시설(ASU, Air Separation Unit)은 산업계에서 널리 사용되고 있는 기초 가스를 제조하는 시설로서 초저온(-180℃ 이하) 증류(Distillation)법을 이용하여 질소, 산소 및 아르곤을 생산하는 시설이다. 이 시설은 고온, 고압, 초저온, 물리화학적 반응 등의 운전조건 하에서 운전되기 때문에 안전하고 신뢰성 있는 운영[4-6]이 반드시 필요하다. 또한 제조물질의 누출로 인한 화재, 폭발, 불활성가스로 인한 질식재해, 고온, 초저온으로 인한 화상 등 잠재적인 위험요소를 많이 가지고 있다.

본 연구는 공기분리시설에 대한 사고예방을 위해 신뢰성 있는 위험성 평가방법을 사용하여 안전하고 신뢰성 있는 운전, 정비 및 유지표준 구축하는데 그 목적이 있다. 준 정량적 위험성 평가[7]는 평가방법의 복잡성 및 전문성으로 인하여 제조 설비들에 적용이 매우 어렵고 복잡한 절차 및 프로그램들이 필

요하였다. 이 연구는 기존의 정성적 평가방법[8-10] 및 정량적 평가들의 단점들을 개선하고 장점들을 조합하여 효과적인 평가방법에 대한 표준절차를 제안 및 실행하였으며 이를 통하여 공기분리 설비의 안전한 운전 및 신뢰도 유지에 반드시 필요한 중요안전요소 도출 및 이의 효율적인 관리방법을 제시하였다.

II. 위험성 평가 모델

위험성 평가의 모델은 설비의 설계, 시 운전, 운전 및 정지하는 과정에서 중대사고가 발생할 수 있는 잠재위험들을 찾아내어 사고발생 가능성과 사고결과로 나타난 사고영향의 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 준 정량적 위험성평가 기법인 GRA(Generic Risk Analysis) 모델을 이용하여 공기 분리시설에 대한 위험성을 평가하였다. 공기분리시설의 주요 위험요소는 초저온으로 인한 파이프라인 및 설비의 취약으로 인한 물리적 폭발, 탄화수소의 농축으로 인한 폭발, 과압으로 인한 설비의 물리적 폭발, 질소 및 아르곤 가스로 인한 질식재해 그리고 초저온 액체의 비산으로 인한 인명의 손상을 선정하였다. 선정된 사건 및 사고에 대해 발생확률(Frequency) 및 사고영향(Consequence)을 산정하여 이를 조합하여 위험도 구분표(Risk Matrix)에 따라 초기 위험도(Initial Risk)를 계산하였다.

초기 위험도를 낮추기 위한 위험도 경감방법을 확인, 선정 및 계산하는 순서로서, 발생확률 및 사고영향 감소를 위해 설치된 6가지 안전방벽에 대한 위험도 경감 정도를 계산하였다. 위험도 경감에 대한 계산이 완료되면 위험성평가 대상 설비에 대한 잔여위험도(Residual Risk)를 위험도 구분표에 따라 산정하였다.

다음 순서로 잔여 위험도가 수용할 수 있는 수준의 위험도인지 확인하는 단계로서, 만약 받아들일 수 없는 수준의 위험도일 때는 위험도 경감작업을 추가로 실시하여 원하는 위험도 즉, 낮은 위험도로 산정될 때 까지 반복적인 절차를 수행하였다.

잔여위험도가 원하는 수준까지 충분히 낮아졌음을 확인한 후, 초기 위험도 평가 시에 높은 수준의 위험도(즉, 44, 43, 42, 34, 33, 24)를 낮추기 위해 사용되었던

위험도 경감방법에 대해 확인하고, 위험도를 낮추기 위해 반영 하였던 중요안전요소에 대한 점검 및 유지방법을 작성한다. 공기분리시설에 대한 위험성평

가 순서도는 Fig. 1에 요약하여 나타내었다.

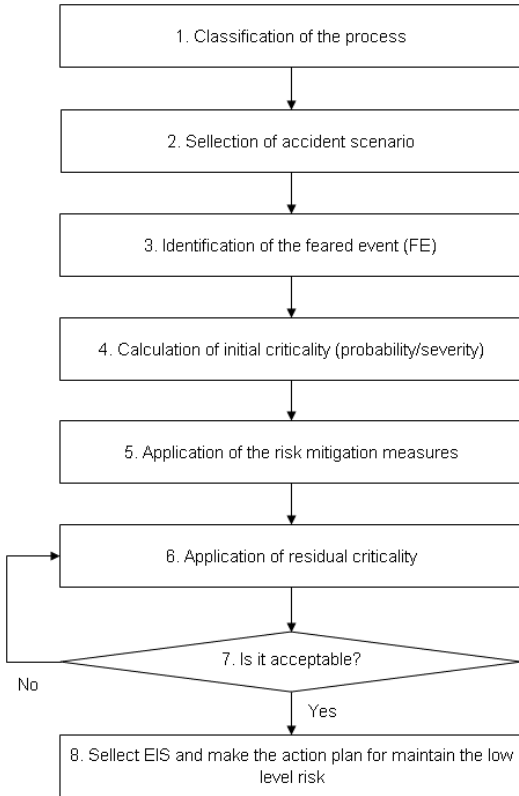


Fig. 1. Risk analysis flow chart for air separation unit (ASU).

2.1. 위험성평가 모델의 구성요소

2.1.1. 사고영향(Consequence)

사고영향은 인명의 피해정도, 환경적 피해 및 재산손실에 대하여 5단계로 구분하였으며 사고 발생에 따른 손실정도이다.

먼저 안전부분은 0단계인 인명피해 없음부터 1단계 경상, 2단계 중상, 3단계 사망자 발생 및 4단계인 다수인원의 사망사고의 5단계로 구분하였다.

환경부분은 0단계인 환경피해 없음부터 1단계 경미한 환경피해(단기간 피해 없음), 2단계 심각한 환경피해(복구 가능한 단기간 피해), 3단계 심각한 환경피해(장기간 복구가 필요), 4단계인 환경제약의 5단계로 구분되었으며, 각 단계는 사고의 여파로 인하여 환경적 피해를 복구 하는데 소요되는 시간을 기준으로 구분하였다.

재산손실 부분은 0단계인 재산손실 없음부터 1단계 경미한 재산손실(5천만 원 이하), 2단계 중요설비의 손상(5천만 원 ~ 5억 원), 3단계 심각한 재산손실(5억 원 ~ 100억 원) 4단계인 재산 또는 공장의 완전 파손의 5단계(100억 원 이상)로 구분하였고, 손실금액에 의한 분류는 각 회사의 규모 및 위험관리 정책에 따라 변경될 수 있다.

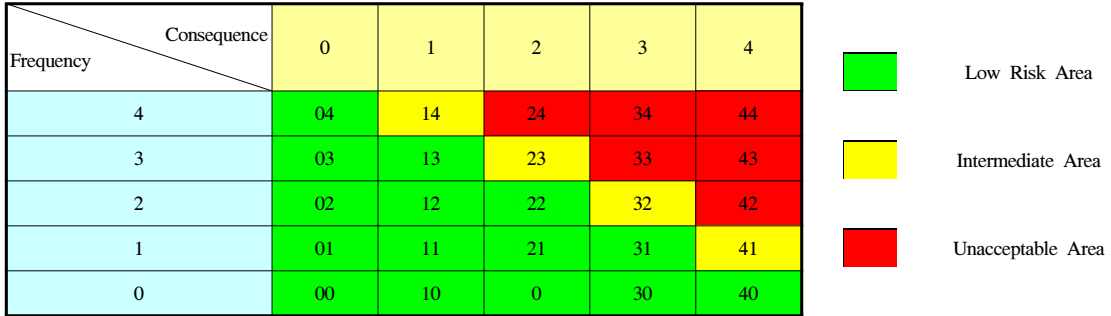
2.1.2. 발생확률(Frequency)

사고 발생확률은 0단계인 $f \leq 10^{-7}$ 부터 4단계 $f > 10^{-1}$ 까지 5단계로 구분 되고, 고장률(f)은 10^6 시간을 기준으로 하는 연속사용시간 고장률(λ)[11]로 구성되어 있으며, 고장률 데이터가 없을 경우는 해당 분야 전문가의 의견이 반드시 필요하며 자세한 분류방법은 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Definition of frequency

Frequency Level	Category Name	Frequency (per Year)	Qualitative Equivalent
0	Improbable	$f \leq 10^{-7}$	There are no known events of this kind.
1	Very Rare	$10^{-7} < f \leq 10^{-5}$	Event requiring a combination of rare events.
2	Rare	$10^{-5} < f \leq 10^{-3}$	Event has occurred once on similar equipment or facility of gas industry.
3	Possible	$10^{-3} < f \leq 10^{-1}$	Event has occurred once during the life of similar equipment or facility.
4	Frequent	$f > 10^{-1}$	Event has occurred several times during the life of similar equipment or facility.

Fig. 2. Definition of risk matrix.



2.1.3. 위험등급(Risk Matrix)

위험등급은 사고영향과 사고발생 확률의 조합으로 나타내며, 녹색지역은 사고영향이 크더라도 발생 확률이 낮은 경우, 발생확률이 높더라도 사고영향이 작은 경우, 사고영향 및 발생확률이 낮은 경우의 조합으로서 수용 가능한 위험을 나타낸다.

노란색 지역은 위험도가 낮은 상태로 가기 위하여 추가 위험성 평가가 필요하거나 위험도 경감(Mitigation) 행위가 필요함을 나타내며, 만약 위험도를 이 지역에 유지하고자 할 경우에는 이유에 대해서 기술적으로 명확한 설명을 해야 한다.

적색지역은 사고영향 및 사고 발생확률이 아주 높은 조합의 경우를 말하며 수용할 수 없는 위험이라고 말할 수 있다. 위험성평가 결과 적색지역에 해당하는 위험도로 판명될 경우에는 반드시 위험도를 줄이는 행위 및 설비를 해야 하며 위험성평가 모델에서 사용한 위험도표(Risk Matrix)는 Fig. 2로 나타내었다.

III. 공기분리시설(ASU)의 공정흐름도(PFD, Process Flow Diagram)

공기분리시설 공정은 Warm 공정과 Cold 공정으로 크게 분류하는데, 먼저 Warm 공정의 주요 생산시설은 원료인 공기를 18 bar.g의 압력으로 압축시키는 압축기(Main Air Compressor, C01), 압축된 고온의 공기를 물을 이용하여 냉각시키는 역할을 하는 냉각탑(E60) 및 열교환기(E07), 원료인 공기 중에 포함된 이산화탄소(CO₂) 및 수분(H₂O)을 제거하는 설비인 흡착탑(Adsorber, R01/R02), 18 bar.g의 공기를 6 bar.g로 팽창시켜 열원(Cold Energy)을 얻는 기능을 수행하는 터빈(Turbine, ET01/ET02)으로 구성되어 있으며, 이 공정들은 대기 중에 노출된 상태로 운전되기 때문에 Warm 공정이라 부른다.

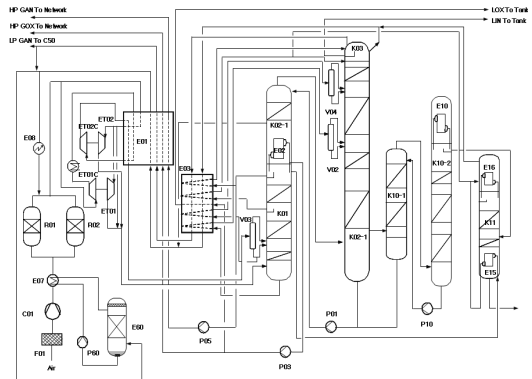


Fig. 3. Process flow diagram(PFD) for air separation unit(ASU).

다음으로 원료인 공기를 열 교환을 통하여 초저온(-180℃)의 액체 공기혼합물을 만드는 역할을 수행하는 열교환기(Heat Exchanger, E01/E03), 액체 공기혼합물을 산소과잉 액체 혼합물 및 액체질소를 생산하는 증류탑인 고압 증류탑(High Pressure Distillation Tower, K01), 기체질소 및 액체산소를 생산하는 저압 증류탑(Low Pressure Distillation Tower, K02/K03), 산소와 혼합되어 있는 저 순도 아르곤을 고 순도 아르곤으로 정제하는 아르곤 증류탑(Argon Distillation Tower, K10-1/K10-2) 및 기체질소, 산소를 액체질소, 액체산소로 전환시키는 액화시설(Liquefaction Unit, K11)로 구성되어 있으며 이 공정들은 초저온 상태에서 운전이 이루어지고, 단열되어 있는 장치인 폴드 박스(Cold Box) 내부에 설치되어 있어 Cold 공정이라 부른다.

위험성평가(GRA)를 실시한 공기분리시설(ASU)에 대한 요약된 시설 공정 흐름도는 Fig. 3에 나타내었다.

Table 2. Initial risk analysis results for air separation unit(ASU)

Concerned element	Plant or Equipment status	Accident										
		Dangerous Substance (1) or not (0)	Feared event	Consequences of feared event	Causes	Yes (1) / No (0)	Effect	Ci	log fi	Fi	Ri	
CONNECTION BETWEEN ROAD TANKER AND STORAGE TANK												
LIN, LAr transfer hose connected between road tanker and storage	Storage filling	LIN, LAr	0	_Hose rupture due to tow-away	_large liquid spillage _cryogenic cloud _oxygen deficient atmosphere (anoxia)	_tow-away accident by human error	1	S	3	-1.59	3	33

3.1. 위험성평가 및 수행절차

3.1.1. 초기 위험도(Initial Risk) 평가

다음의 위험도 평가는 공기분리시설의 위험성 평가 대상 총 432항목 중에 중요안전요소(EIS, Elements Important for Safety)로 선택된 위험성 평가의 일례이다. 위험성 평가 순서에 따라서 먼저 위험성평가를 대상을 선정하고 초기 위험도를 평가한다. 사고 시나리오는 초저온 액체인 질소 및 아르곤을 탱크로리에 충전하는 시설에서 트럭운전자의 실수로 인하여, 초저온 액체 충전호스가 연결된 상태에서 차량이 출발하여 다량의 초저온 액체가 비산되는 사고를 선정하여 초기위험도를 평가하였다.

초기위험도 평가에 대한 각 항목들을 다음과 같이 입력 및 계산 하였다.

- Effect 항목: 안전에 대한 내용은 "S"를, 환경은 "E"를, 재산손실은 "P"를 입력하며, 여기에서는 안전에 관련된 항목이므로 "S"를 입력하였다.
- Ci(Initial Consequence) 항목: 사고영향 구분방법에 의하여 산정되며, 여기에서는 초저온 질소액체의 누출로 인하여 작업자가 심각한 부상을 입을 가능성이 있으므로 레벨 "3"으로 선정하였다.
- log fi 항목: 초기 발생확률에 log를 취하였으며 계산된 식은 아래와 같다.

$$\log fi = \log (FILL \times SOPR) + \log (10^{-14} + I_0)$$

여기서, "FILL"의 의미는 연간 액체질소 탱크의 충전횟수가 26회 이므로 26으로 산정하였다.

"SOPR"은 작업자가 일상작업 시에 실수할 확률로서 값은 1.0×10^{-3} 이다.

$\log (10^{-14} + I_0)$ 항은 I_0 칼럼이 시나리오에 따른 사고의 발생확률과의 연관성에 대한 항목으로서, 사고와 관련이 있는 지 여부를 판단하기 위한 것으로 관련이 있으면 "1" 없으면 "0"을 입력한다.

- Fi(Initial Frequency) 항목: 발생확률의 값이 $1.0 \times 10^{-1.59}$ 이므로, Table 2에 나타난 사고 발생확률의 구분표에 의하여 레벨 "3"에 해당하는 초

기 발생확률로 계산되었다.

- Ri(Initial Risk) 항목: Fig. 2의 위험도 평가기준에 따라 "33"의 고 위험도로 평가되었으며, 발견된 위험을 감소시키기 위하여 위험도 경감이 필요한 것으로 판명되었다.

평가된 "33"의 고 위험도를 저 위험도로 감소시키기 위하여 6가지의 안전방벽들을 적용시켜 목표하는 위험도로 낮추어야 한다. 배관 및 계장도면(P&ID)에 나타나 있는 안전방벽들에 대해서 위험도 경감을 실시하였다.

위험도 평가대상, 사고 시나리오, 사고원인, 초기 사고영향, 초기 발생확률 및 초기 위험도에 대한 계산결과를 Table 2에 나타내었다.

3.1.2. 잔여 위험도 (Residual Risk) 평가

초기 위험도에 대한 사고 발생확률 및 사고영향을 낮추는 2가지 안전방벽이 있으며, 위험도를 낮추기 위해 설치된 안전방벽들의 값을 반영하여 위험도를 낮추는 평가를 실시하였다.

선정된 사고시나리오는 액체질소 및 아르곤 충전 차량이 배관이 연결된 상태에서 운전원의 실수로 차량이 출발하여 연결된 호스가 파열되고, 다량의 초저온 액체질소 및 아르곤이 누출되는 사고이다. 이를 예방하기 위하여 사고영향(Consequence)를 줄이는 방법으로서 액체질소 저장탱크의 충전배관에 긴급차단밸브(Shutoff Valve)를 설치하여 사고영향을 낮추었으며, 위험도 경감을 위한 안전방벽을 적용한 결과 잔여 위험도(Residual Risk)는 "23"으로 계산되었다.

fc (Corrective Factor) 항목에 적용된 안전방벽은 긴급차단밸브로서 PPB1 (Passive Barrier for Severity Reduction)이며, Reduction Factor는 "-1"로 계산되었다.

잔여위험도를 줄이기 위하여 평가를 실시한 결과 사고영향는 줄였으나 발생확률은 아직 중 위험도 상태로 평가 되었다. 이와 관련된 계산결과는 Table 3

Table 3. Application of safety barriers for consequence

Type	n° EIS	Limiting the CONSEQUENCE of the feared event	Limiting the FREQUENCY of the feared event	Yes (1) / No (0)	fc (Corrective factor)	Cr	log fr	Fr	Rr
D		_rupture point (weak point) on hose to prevent damage of upstream line and shut off valve		1	-1.00	2	-1.59	3	23

Table 4. Application of safety barriers for frequency

Type	n° EIS	Limiting the CONSEQUENCE of the feared event	Limiting the FREQUENCY of the feared event	Yes (1) / No (0)	fc (Corrective factor)	Cr	log fr	Fr	Rr
D		_rupture point (weak point) on hose to prevent damage of upstream line and shut off valve		1	-1.00	2	-3.87	2	22
SPL			_anti tow-away device : detection of open rear/cabinet door / hose connections with alarm (klaxon / flashing light) (EIGA Doc 63/05 "Prevention of Tow-away accidents") Comment: This device is on the liquid trailer	1	-2.28				

에 나타내었다.

수용할 수 있는 위험도로 낮추기 위하여 사고발생 확률을 감소시키는 6종의 안전방벽 중 안전제어 장치(SPL, Safety Protection Loop)를 선택하였으며, 이 방법은 트레일러의 후면 부분에 "Anti Tow Device"를 설치하는 것이다. 이는 호스가 연결되어 있거나 뒷문이 열려 있을 경우, 차량의 출발이 불가능한 안전장치를 설치하는 것으로서 사고 발생확률을 기존 "3"에서 "2"로 낮추었으며, 위험도 평가결과 "22"의 잔여위험도로 계산되었다.

fc (Correction Factor)의 계산은 트럭에 설치된 안전설비가 {Relay + Buzzer(부저) + Flash(경광등)}으로 구성되어 있으며, 각각의 고장률을 구하는 식

은 다음과 같다.

$$fc = \log \{ (\text{Relay의 고장률} \times \text{Relay의 점검주기}) + ((\text{부저의 고장률} \times \text{연간가동시간} \times \text{점검주기}/2) + (\text{경광등의 고장률} \times \text{연간가동시간} \times \text{점검주기}/2)) + \text{작업자의 실수확률} \}$$

고장률 자료를 참고하여 의해서, 위의 식은 아래와 같이 계산되며 그 값은 $1.0 \times 10^{-2.28}$ 이고, Table 1의 사고 발생확률 구분표에 의하여 위험도 수준은 "2" 이다.

$$fc = \log \{ (1.36) \times (3, \text{1회} / 3\text{년 점검}) + ((0.04 \times 8000 \times 3/2) + (20.5 \times 8000 \times 3/2)) + (1.0 \times$$

Table 5. Results of residual risk

Type	Limiting the CONSEQUENCE of the feared event	Limiting the FREQUENCY of the feared event	Yes (1) / No (0)	fc (Corrective factor)	Cr	log fr	Fr	Rr
D	_rupture point (weak point) on hose to prevent damage of upstream line and shut off valve		1	-1.00	2	-10.47	0	20
SPL		_anti tow-away device : detection of open rear/cabinet door / hose connections with alarm	1	-2.28				
O		_anti tow-away device on the liquid trailer: flag rotated to lock the trailer	1	-2.02				
O		Non return valve (check valve) on piping avoids leakage in case of rupture of the hose	1	-2.28				
PR		_drivers training and qualification	1	-1.00				
PR		_loading procedures (it should be posted at the fix installation or in the piping cabinet of the delivery-vehicle)	1	-1.30				

$$10^{-3}) = 1.0 \times 10^{-2.28}$$

실시한 자세한 위험도 평가결과는 Table 4에 나타내었다.

운전자의 실수로 인하여 발생된 사고 발생확률 및 사고영향을 계산하여 위험도 (Risk)를 평가한 결과는 “22”로서 저 위험도(Acceptable Risk)로 판명되었지만, 위험도를 줄이면 더 안전하게 되므로 안전방벽(Safety Barrier)을 추가하였다. 추가된 안전방벽은 표준운전절차서(PR), 작업자에 대한 교육(PR) 및 기타의 안전행위(O)이며, 이들을 포함한 잔여위험도 계산결과를 Table 5에 나타내었다.

3.3. 공기분리시설에 대한 위험성 평가 결과분석

공기분리 시설에 대한 위험성평가 영역은 아래의 총 7개 부분으로 분리하여 수행 하였다.

- (1) Warm Product부분: 총 22개 사고 시나리오
- (2) Cryogenic Product부분: 총 65개 사고 시나리오
- (3) Liquefier Cycle부분: 총 50개 사고 시나리오
- (4) Specific Product부분: 총 10개 사고 시나리오
- (5) Liquid Distribution부분: 총 168개 사고 시나리오

		Consequence (사고여파)				
		0	1	2	3	4
Frequency (발생가능성)	4	0	3	8	51	44
	3	0	5	53	168	21
	2	0	0	10	58	9
	1	0	0	1	1	0
	0	0	0	0	0	0

Fig. 4. Initial risk analysis results for air separation unit(ASU).

- 리오
- (6) Gas Distribution부분: 총 38개 사고 시나리오
- (7) Utility and Common부분: 총 79개 사고 시나리오

3.3.1. 초기위험도(Initial Risk) 평가결과

7개 부분별 432개 사고 시나리오에 대한 초기위험도 평가결과는, 고 위험도군 301항목(70%), 중 위험도군 114항목(26%) 및 저 위험도군 17항목(4%)으로 평가되었으며 평가결과는 Fig. 4에 나타내었다.

3.3.1.1. 각 부분별 초기 위험도 평가결과

가) Warm Product 부분

공기분리 시설에서 원료인 공기를 압축하는 압축기, 압축과정에서 발생한 수분을 제거하는 수분배출장치, 압축하여 온도가 올라간 공기를 냉각하는 냉각탑 및 공기 중에 포함되어 있는 수분 및 이산화탄소를 제거하는 설비인 흡착설비로 구성되어 있다.

주요 위험요소는 과압으로 인한 파이프라인 및 설비의 폭발, 고온부위의 접촉에 의한 작업자의 화상사고, 설비의 부식 및 손상으로 인한 폭발 등이다.

위험요소에 대한 사고영향 대비 발생가능성의 기준에 따른 초기 위험도 평가결과, 고 위험도 군 7항목 및 중 위험도 군 15항목으로 평가 되었다. 이 부분은 대기로 노출된 상태로 운전되고 있으며, 공기분리시설의 다른 부분보다 비교적 위험도가 낮은 부분으로 평가되었다.

나) Cryogenic Product 부분

초저온 액체를 생산하는 공정으로서 여러 개의 증류탑 및 열교환기로 구성되어 있으며, 열 손실을 방지하기 위하여 보온된 철판 상자로 구성되어 있기 때문에 흔히 Cold Box 공정이라고 부른다.

주요 위험요소는 콜드박스 내부에 있는 파이프 및 플랜지에서 초저온의 누출로 인한 구조물의 붕괴, 열교환기의 폭발로 인한 구조물의 붕괴, 산소분리 및 정제 시설에서 탄화수소의 축적으로 인한 폭발 및 구조물의 붕괴, 제어 장치의 고장 또는 운전실수로 인하여 초저온 액체가 탄소강 배관에 물리적 충격을 주어 폭발이 발생하는 사고가 주요 사고 시나리오이다.

위험요소에 대한 사고영향 대비 발생가능성의 기준에 따른 초기 위험도 평가결과, 고 위험도 군 36항목, 중 위험도 군 25항목 및 저 위험도 군 4항목으로 평가 되었다.

다) Liquefier Cycle 부분

전 공정인 초저온액체 생산 공정에서 액체로 전환되지 않은 기체 질소를 액화시키는 공정으로서 기체질소 압축기, 팽창터빈 및 열 교환기들로 구성되어 있다. 주요 위험요소는 질소가스로 인한 질식사고, 과압으로 인한 장치 및 파이프라인의 폭발, 초

저온의 누출로 인한 기계설비 및 파이프라인의 폭발 등 이다.

위험요소에 대한 사고영향 대비 발생가능성의 기준에 따른 초기 위험도 평가결과, 고 위험도 군 38항목, 중 위험도 군 11항목 및 저 위험도 군 1항목으로 평가되었다.

라) Specific Product 부분

공기분리 시설에서 이 공정은 생산규모에 따라서 여러 가지 부수적인 제품이 생산되는데, 제품은 공기 중 약 0.9%를 차지하고 있는 아르곤, 흔히 희가스로 분류되는 크립톤, 제논 등의 가스를 생산하는 부분이며, 위험성 평가대상 설비는 아르곤 생산 공정만을 보유하고 있다. 주요 위험요소는 과압으로 인한 설비의 폭발로 근무자의 초저온 화상 및 설비의 손상을 일으키는 것이다. 위험요소에 대한 사고영향 대비 발생가능성의 기준에 따른 초기 위험도 평가결과, 고 위험도 군 7항목 및 중 위험도 군 3항목으로 평가되었다.

마) Liquid Distribution 부분

공기분리시설의 위험도 평가실시 결과 사고의 발생확률 및 사고영향에 따른 위험도가 높은 항목 즉 44, 43, 34의 위험도가 집중적으로 평가된 부분이다.

주요 위험요소들은 초저온 액체를 다량 저장하고 있는 저압 저장탱크들의 파손으로 인한 질식(질소, 아르곤) 및 화재/폭발(산소)사고, 초저온으로 인한 작업자의 화상사고, 고압 및 초저온 저장탱크의 폭발 사고, 초저온 배관의 폭발 사고 및 초저온 제품을 탱크로리로 이송하는 과정에서 발생하는 사고이며, 위험도가 높은 원인은 연속생산 공정이 아닌 작업자의 조치사항 들이 포함된 Manual 작업을 실시하고 있기 때문이다. 초기 위험도 평가결과, 고 위험도 군 113항목, 중 위험도 군 22항목 및 저 위험도 군 3항목으로 평가 되었다.

바) Gas Distribution 및 Utility and Common 부분
생산된 제품(산소, 질소, 아르곤)들을 고객사에 파이프라인을 통하여 공급하는 부분과 공기분리시설을 가동하기 위한 유틸리티(냉각수, 전기, 분석기, 계장용 공기, 소방시설, 제조시설 주위의 여진)에 대하여 위험도를 평가 하였다.

주요 위험요소들은 산소압축기의 폭발로 인한 사고, 유틸리티의 공급중단으로 인한 설비의 고장으로 발생된 폭발사고, 소방시설의 미 작동으로 인한 화재 및 제조시설 주위로부터 영향을 받아 일어난 사고 등이다.

초기 위험도 평가결과 Gas distribution 부분은 고 위험도 군 30항목 및 중 위험도 군 8항목으로 평가 되었고, Utility and Common 부분은 고 위험도 군 40항목, 중 위험도 군 30항목 및 저 위험도 군 9항목으로 평가 되었다.

3.3.2. 안전방벽을 반영한 잔여 위험도

초기위험도 평가결과를 바탕으로 위험도 평가대상 설비인 공기분리시설에 대해 고위험도 군으로 평가된 301항목과 중 위험도 군으로 평가된 114항목에 대하여 위험도 경감을 실시하였으며, 저 위험도 군 17개 항목에 대해서도 잔여 위험도를 가능한 더 낮추는 위험도 평가를 실시하였다. 안전방벽을 반영한 후의 잔여 위험도 평가결과, 중 위험도 군 5항목이 도출되었으며 위험도 평가결과를 Fig. 5에 보였다.

잔여위험도 평가결과에 따르면 공기분리 시설에 대한 총 432 사고시나리오 중 위험도 경감을 실시하였더라도, 중 위험도 5개 항목에 대해서는 원하는 저 위험도로 낮춰지지 않았음을 볼 수 있다.

첫 번째 사고 시나리오는 100m³ 이상의 초저온 액체 아르곤 저장탱크의 폭발로 인하여 탱크 내부의 초저온 액체가 외부로 누출되고 저온화상 사고, 파이프라인 및 설비들의 손상 그리고 산소결핍으로 인한 인명재해가 발생하는 경우이다. 초기 위험도 평가결과 "44"로 사고발생확률 및 사고영향이 가장 높은 수준으로 평가되었는바, 4가지의 위험도 경감 방법을 적용 하였다. 먼저 경감방법은 사고의 사고영향을 낮추는 방법으로서 설계에 반영한 사항으로서, 초저온 액체의 누출에 대비하여 예비 저장조 또는 위험구역을 설정하여 위험도를 산정한 결과 "32"의 중 위험도로 평가되었다. 이 위험도를 더 낮추기 위

하여 초 저온액체가 대량으로 누출될 경우 이를 자동으로 감지하여 공급밸브를 차단하는 안전 제어장치와 저장탱크에 비상정지 버튼을 설치하는 두 가지 안전제어장치를 추가하고, 비상조치계획 절차서를 추가하여 위험도 경감을 실시한 결과, 최종 위험도 평가는 "32"로 산정되었으며 공기분리시설의 운영시에 집중적으로 관리해야 할 사항이다.

두 번째 사고시나리오는 초저온 아르곤 파이프의 파손으로 인하여 초 저온화상으로 인한 인명손상, 설비의 파손, 산소결핍으로 인한 인명손상의 사고로서 초기위험도 평가결과 "24"의 위험도로 평가되었다. 이 의미는 사고영향은 낮으나 사고발생 확률이 아주 높은 경우로서 대상설비에 대해 사고영향을 낮추는 위험도 경감을 위에서 설명한 방법과 동일하게 실시 하였으나 평가결과 "14"의 중 위험도로 평가되었다.

세 번째, 네 번째, 다섯 번째 사고시나리오는 초저온액체 펌프를 이용하여 액체아르곤, 액체질소, 액체산소 탱크에 충전할 때, 탱크의 압력이 디자인 압력보다 높아졌으나, 탱크에 설치된 압력완화 장치가 작동하지 않아 저장 탱크가 폭발하였으며, 이로 인하여 초저온 액체가 다량누출, 초저온 화상사고, 설비의 파손, 산소결핍으로 인한 인명손상사고가 발생한 시나리오이다. 초기 위험도 평가결과 "33"의 위험도로 평가되었고 사고발생 확률을 줄이는 위험도 경감을 실시하였다. 위험도 경감방법은 안전제어 장치를 설치하는 것으로서 초저온 저장탱크를 보호하기 위하여 과압이 발생할 경우, 이의 신호를 받아서 액체 충전펌프의 자동정지 및 탱크 밸브를 자동으로 차단하는 방법이다. 평가결과 "32"의 위험도로 평가되었으며, 위험도를 더 낮추기 위해서는 안전제어장치를 1 out of 1(1 oo 1)에서 2 out of 3(2 oo 3)로 변경하면 사고 발생확률을 더 낮출 수 있다.

		Consequence (사고영향)				
		0	1	2	3	4
Frequency (발생가능성)	4	1	1	0	0	0
	3	3	8	0	0	0
	2	1	19	64	4	0
	1	0	2	52	127	0
	0	0	2	30	111	7

Fig. 5. Residual risks for air separation unit(ASU).

3.3.3. 중요안전요소의 도출결과 및 안전방벽

위험도 평가결과 공기분리 시설의 안전하고 신뢰성 있는 운전 및 사고예방을 위하여 반드시 유지 및 관리해야 할 중요안전요소를(24, 34, 44, 33, 42 및 42 영역의 초기 위험도) 도출하였으며, 기준에 따른 평가결과 총 153개의 중요안전요소가 도출되었다.

중요안전요소(EIS)들은 안전제어장치(Safety Protection Loop, SPL), 절차서(Procedure, PR), 압력완화장치(Pressure Relief Device, PRD), 알람(Alarm, A), 설계반영사항(Design, D) 및 기타 안전장치(Other Safety Features, O)의 여섯 가지로 분류할 수 있다. 초기 설계단계에서 위험도가 높은 위험요소들을 위의 여섯 가지 EIS를 통하여 위험도를 수용할 수 있는 위험도로 감소시키고, 이를 통하여 공장 및 설비의

Table 6. Frequency data for test periods

RECURRENT Frequency data - Initiating events frequency		
Name	Value	Comments
Periodicity of Analyzers calibration	12.00	_Calibration frequency for Analysers _Example : TEST = 1 corresponds to 1 calibration of analysers every year
Periodicity of PSV test	1	_Test frequency for PSV _Example : TESTPSV = 5 corresponds to 1 calibration of PSV every 5 years
Periodicity of check valve test	3	_Test frequency for check valve _Example : TESTCHECK = 5 corresponds to 1 calibration of check valve every 5 years
Periodicity of safety loop or safety alarm (Ambiance Analyser, Fire Alarm, Emergency Stop Button) test	1	_Test frequency for safety protection loop or safety alarm _Example : TESTSPL = 3 corresponds to 1 test of safety loop or safety alarm every 3 years
Periodicity of final element (of safety loop) test	1	_Test frequency of shutdown or trip that could be considered as a test frequency of the final element _Typical final elements = control valves, shutoff valves, electrical motor switch _Example : TESTV = 0.5 corresponds to a shutdown or trip frequency every 6 months

Table 7. List of elements important for safety(EIS) for air separation unit(ASU)

EIS 종류	EIS 수
SPL(Safety Protection Loop)	37
PR (Procedure)	23
PRD(Pressure Relief Device)	42
A(Alarm)	4
D(Design)	37
O(Other Safety Features)	10
Total	153

안전성과 신뢰도를 확보하고 있다.

설비의 운전과 관련된 EIS들(SPL, PRD, A)의 정상적인 작동은 설비의 안전성에 크게 영향을 미치므로 이에 대한 효과적인 정비(Maintenance)계획이 필요하며, 위험성 평가 초기단계에서 설정한 정비주기를 반드시 따라야 한다. 153개 주요안전요소에 대해 위험도 경감 방법에 따라 분류하면 약 76% 정도가 안전제어장치, 압력완화장치 및 알람으로 평가되었으며 각 EIS의 정비주기에 대한 자세한 내용은 아래 Table 6에 나타내었다.

위험도 평가결과 공기분리공장에 대한 주요안전

요소는 총 153개이며 각 종류별 EIS에 대해서는 아래 Table 7에 자세히 나타내었다.

IV. 결 론

공기분리 시설에 대해 총 7개 부분 432개 사고시나리오에 대한 준 정량적 위험성평가를 통한 초기위험도 평가결과는 고 위험도 군 301항목, 중 위험도 군 114항목 및 저 위험도 군 17항목으로 평가되었다. 초기위험도 평가결과 공기분리 시설에서는 Liquid Distribution부분의 위험도가 가장 높은 것으로 판명 되었으며, 위험도가 높은 원인은 자동운전 설비 또는 장치가 아닌 작업자가 수동으로 운전 및 조작하는 작업특성 상의 문제로 판명되었다.

초기위험도 평가결과에 따라 수용할 수 없는 위험도 인, 고 위험도 군 및 중 위험도 군에 대하여 위험도 경감방법인 안전방벽을 반영한 후 잔여위험도를 계산하였다. 잔여위험도 평가결과는 중 위험도 군 5항목 및 저 위험도 427항목으로 평가되었다. 위험도를 줄이기 위한 안전방벽을 설치하였으나, 평가결과 중 위험도 군으로 판명된 5항목에 대한 안전한 운전 및 사고 예방을 위한 관리방법을 제시하였다.

공기분리 시설의 안전한 운전 및 운영을 위하여 반드시 관리해야 할 주요안전요소(EIS)를 153개 및 6가지로 구분 도출하였으며, 공장 및 설비의 안전한 운전과 유지를 위하여 주기적인 점검과 정비(Main-

tenance)가 필요한 EIS에 대해 설비의 고장률 및 신뢰도를 고려하여 적절한 정비주기를 제안하였다.

참고문헌

- [1] CCPS, "Guidelines for Process Safety Documentation", AIChE, New York, (1995). International Labor Organization, "Prevention of Major Industrial Accidents", ILO, Geneva, (1993).
- [2] Council of the European Communities, "Council Directive on the Major Accident Hazards of Certain Industrial Activities", Official Journal of the European Communities, (1982).
- [3] Smith J. M., Van Ness H. C. and Abbott M. M., "Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics", 6th Ed., McGraw-Hill, Boston, (2001).
- [4] CCPS, "Plant Guideline for Technical Management of Chemical Process Safety", AIChE, New York, (1992).
- [5] CCPS, "Guidelines for Auditing Process Safety Management Systems", AIChE, New York, (1995).
- [6] Crowl D. A. and Louver J. F., "Chemical Process Safety : Fundamental with Application", 3rd Ed., Prentice Hall, New Jersey, (2009).
- [7] Korea Gas Safety Corporation, "Qualitative Risk Assessment", Korea Association of Professional Safety Engineers, Seoul, (1999).
- [8] CCPS, "Guidelines for Chemical Process Qualitative Risk Analysis", AIChE, New York, (1989).
- [9] CCPS, "Guideline for Hazard Evaluation Procedures CCPS", AIChE, New York, (1992).
- [10] Dow Chemical Co., "Dow's Fire & Explosion Index Hazard Classification Guide", 7th Ed., AIChE, Pittsburgh, (1994)
- [11] CCPS, "Guideline for Process Equipment Reliability Data with Data Tables", AIChE, New York, (1989).