



암모니아 입하 및 저장시설에서의 위험도 관리

정윤서 · 우인성 · †임종우

인천대학교 안전공학과

(2017년 7월 26일 접수, 2017년 10월 24일 수정, 2017년 10월 25일 채택)

Risk Management for Ammonia Unloading and Storage Tank Facility

Yun Seo Jeong · In Sung Woo · †Jong Woo Lim

Department of Safety Engineering, Incheon National University, Incheon, Korea

(Received July 26, 2017; Revised October 24, 2017; Accepted October 25, 2017)

요약

제조산업 현장에서는 수많은 유해위험물질이 사용, 처리 및 생산되고 있으며, 암모니아를 취급하는 시설에서 많은 누출, 화재 폭발사고가 보고되고 있다. 유해위험시설에서의 위험관리 및 사고예방을 위하여 공정안전관리(PSM), 가스안전관리(SMS), 장외영향평가(ORA) 제도 등 다양한 안전환경관리 프로그램이 국내 산업현장에 적용되고 있고 학계에서도 위험성평가가 관련 연구가 활발하게 진행되고 있다. 본 연구에서는 암모니아 입하 및 저장 시설을 대상으로 정량적 위험성평가가 수행되었는데 사고 시나리오에 대한 피해영향범위 산정에는 장외영향평가용 KORA 프로그램, 사고 빈도 분석에는 LOPA PFD 활용 방식을 적용하였다. 평가 결과 추정된 위험도를 완화하고 지속적인 위험을 관리하는 방안으로 누출 감지 및 비상 차단, 물 분무 및 증기 희석 설비, 방류벽 및 트렌치, 누출 비산 방호 등 공정 안전설계 하드웨어 개선부분과 위험관리기준 효과적 적용, LOPA 보완 적용, 보조 피해영향범위 산정 프로그램 활용, 위험도기반 공정안전관리제도 적용, 공정위험성 재평가 및 이행성 관리 등 프로그램 및 제도 운용 측면에서의 방안이 제시되었다.

Abstract - A lot of hazardous materials have been used for product processing and utility plant. Many accidents including toxic release, fire and explosions occur in the ammonia related facility and plant. Various safety and environment management program including PSM, SMS, ORA etc. are being implemented for risk management and accident prevention in the production industry. Also much study and research have been carried about risk assessment of accident scenario in the academic and research area. In this paper, firstly risk level was assessed by using a typically used KORA program and LOPA PFD method for the selected ammonia unloading and storage facility. And then risk reduction measures for the risk assessed facility were studied in 3 aspects and some measures were proposed. Those Risk Reduction measures are including a leak detection and emergency isolation, water spray, dilution tank, dike and trench, scattering protection in hardware improvement aspect, and a applicable risk criteria, conditional modifier for existing LOPA PFD, alternative supporting modeling program in risk estimation methodology aspect, and last RBPS(Risk Based Process Safety) program, re-doing of process hazard analysis, management system compliance audit in managerial activity aspect.

Key words : risk management, risk criteria, LOPA, KORA, ERPG-2, ammonia

†Corresponding author: worldljw@naver.com

Copyright © 2017 by The Korean Institute of Gas

I. 서론

암모니아는 산업안전보건법상 유해위험물질, 고압가스안전관리법상 가연성 가스, 독성 가스, 화학물질관리법상 사고대비물질, 유해화학물질로 규정된 법적 관리대상 물질이다. (이하 상기 물질을 유해위험물질로 통칭함) 암모니아는 냉각설비 계통에 냉매로 사용될 뿐 아니라 연소 설비의 배출가스 중 NOx 성분 제거를 위한 환원제 등 다양한 분야에서 많이 사용되고 있으나 인화성에 따른 화재 폭발의 위험과 인체 독성의 영향이 있기 때문에 취급 (이송, 입하, 출하) 및 저장에 주의하여야 한다. 제조 산업계의 이송 설비, 입출하 및 저장시설에서의 다양한 유해위험물질 누출, 화재 폭발에 대한 사고가 보고되고 있고, 2012년 구미 불산 누출사고의 여파로 국내에서 유해위험물질의 위험관리 관련한 법규가 한층 강화되었다. 국내에서 2000 ~ 2016년 발생한 주요 화학물질 관련한 사고 중 암모니아는 4 번째로 많은 비중을 차지하고 있으며, 최근 발생한 암모니아 관련 중대 사고 사례를 보면 남양주 빙과공장 폭발(2014), 광주 냉동기 폭발(2012) 등이 있고 국외의 경우도 미국 Texas 비료공장 폭발(2013), 인도 Vatva 암모니아공장 폭발(2010) 등 다수의 누출 및 화재 폭발 피해 사고가 발생하였다. [1-3]

유해위험물질을 취급하는 제조 사업장에서 사고 예방을 위한 다양한 위험관리 활동 및 프로그램이 수행되고 있는데 학계에서도 다방면의 위험관리 관련 연구가 수행되고 있고 그 중 피해영향범위 산정 및 위험도 평가 관련한 연구도 활발하게 이루어지고 있다. 기존 선행 연구자들의 연구를 살펴보면 여러 가지 사고 피해영향평가 프로그램 활용을 통한 유해위험물질 누출, 화재 폭발 피해영향 범위 산정에 집중되고 있고, [1,2,4,5] 실제 사고 시나리오에 연관된 위험도 감소를 위한 설비 개선 설계 및 위험도 결정 프로그램 적용성에 대한 연구 수행 사례는 파악되지 않았다.

본 연구는 위험관리기준 (Risk Criteria) 적용, 위험도 산정, 개선방안 수립 및 실행에 관한 연구를 암모니아를 취급하는 설비를 대상으로 수행하였지만, 다양한 유해위험물질을 취급/저장하는 유사 시설을 보유한 제조 사업장에서 유해위험물질 관련한 사고의 위험을 최소화하는데 도움이 되는 관점에서 검토 연구를 수행하였다

II. KORA 프로그램 및 LOPA PFD 활용한 위험도 산정

2.1. 위험도 산정 대상 설비

대상 설비는 암모니아를 적재한 탱크로리가 해당 제조 사업장으로 입고되면 사업장 내 입하시설을 통해 저장 탱크로 이송 저장한 후 탈질 설비 (보일러 연소 배출 가스 중의 NOx 성분 제거, 암모니아는 NOx 물질 환원제로 사용) 로 암모니아를 공급하는 시설로서 Fig. 1. 에 공정흐름도를 보여준다.

2.2. 대상 물질 위험 특성

한국산업표준에서 암모니아는 상온에서 기체 상태로 개방된 공간에서 누출될 경우 공기보다 가벼워 빠르게 확산되기 때문에 폭발 분위기 생성을 무시하고 있다. [6] 또한 폭발 범위가 15 ~ 28% 로 폭발하한이 상당히 높아 인화 위험이 크다고 여겨지지 않았으나, 산업 현장의 실제 조건은 누출된 가스 물질이 밀폐계에 존재하거나 대기 중이지만 주변 장애물 및 대기 영향에 따라 밀폐계와 유사한 조건이 되어 폭발사고가 다수 발생되고 있다. [1]

2.3. 사고 시나리오별 위험도 산정

(1) 대상 설비 위험도 산정 조건

위험도 산정 대상 시나리오는 누출 시 피해영향 범위에 가장 큰 영향을 주게 되는 누출량과 관계되는 물질 보유량이 큰 탱크로리와 저장 탱크에서의 누출 2 개 시나리오를 선정하였다. 위험도 산정 조건은 현실적으로 발생할 가능성이 낮은 시나리오 (최악 시나리오) 가 아닌 발생 가능한 시나리오 (대안 시나리오)를 고려한 조건을 적용하였는데 기상 조건은 해당 시설지역의 1년간 평균값이다. 누출량 산정을 위한 누출공의 크기 및 누출 시간은 KOSHA Guide P-92-2012 및 API (American Petroleum Institute) 581 에서 제시하는 값을 사용하였다. [7-8]

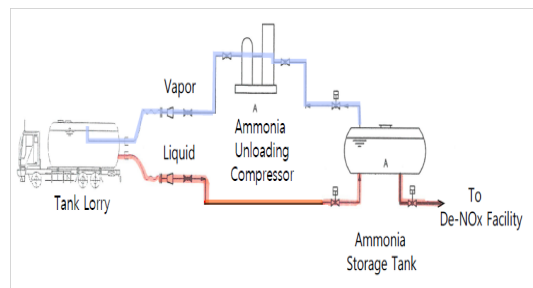


Fig. 1. Process Flow Diagram for Facility

Table 1. Operation Condition of Tank Lorry and Storage Tank

Facility	Chemical	Capacity	Operation Condition		
			Temp.	Pressure	Phase
Storage Tank	Ammonia 99.5%	93,000 kg	37 °C	1.25 Mpa	Saturated Liquid
Tank Lorry		18,000 kg	34 °C	1.25 Mpa	

Table 2. Hazard End Point Value and Atmospheric Condition

Hazard to Analyze (End Point Value)			Atmospheric Condition (1 Year Ave.)			
Toxic	Thermal Radiation	Over Pressure	Wind Velocity	Stability	Temp.	Humidity
ERPG 2	5 (kw/m2)	1 (psi)	2.7 (m/s)	D	12.8 (°C)	66 (%)

(*) ERPG : Emergency Response Planning Guideline

Table 3. Release Geometric and Geographic Condition

Scenario	Release Hole Size	Release Time	Release Height	Geo. Condition
Storage Tank Release	16 mm (20% of Connected Pipe)	20 min	0 m	City Area like
Tank Lorry Release	50 mm (100% of Connected Pipe)	30 min	0 m	City Area like

위험도 분석 대상 설비의 운전 조건은 Table 1., 위험도 산정 기준이 되는 피해영향 위험 요소의 관심 범위 (End Point) 수치 및 기상 조건은 Table 2., 누출의 기하학적, 지형적 조건은 Table 3. 에 정리하였다.

(2) 사고 시나리오에 대한 피해영향범위

각 설비 누출 시나리오별 누출 조건, 기상 조건에 따라 KORA (Korea Off-site Risk Assessment) 프로그램 (Ver. 0.9.2.38)에 의해 계산된 피해영향범위 (수평거리)는 Table 4. 와 같다.

참고로 표에 나타난 결과는 사용한 프로그램의 한계로 주변의 지형적인 장애물이 고려되지 않고 수평적인 확산 피해영향범위만을 제시하고 있으며 해당 관련 사항은 다음 4.3 항 현행 프로그램 적용성

Table 4. Calculated Horizontal Distance of Impact (Unit : m)

Scenario		Hazard				
		Toxic	VCE	BLE-VE	Pool Fire	Zet Fire
Storage Tank Release, Fire & Explosion	Gross Distance to End Point	253	313	542	14	32
	Distance Beyond Fence	0	0	132	0	0
Tank Lorry Toxic Release	Gross Distance to End Point	969	181	296	42	92
	Distance Beyond Fence	552	0	0	0	0

(*) Vertical Disperse Profile can not be calculated by KORA

(위험도 저감) 분석 검토 사항에서 보다 상세하게 기술하였다.

(3) 사고 시나리오에 대한 위험도 산정

KORA 프로그램에 의해 계산된 피해영향범위 결과 (Table 4. 참조) 에서 사업장 외부로 피해 영향이 미치는 저장 탱크 누출 시나리오의 BLEVE (Boiling Liquid Evaporating Vapor Explosion) 복사열 피해와 탱크로리 누출 시나리오의 Toxic 확산 가스 중독 피해 경우를 선정하여, LOPA (Layer of Protection Analysis) 고장율 Data (PFD : Probability of Failure On Demand) 를 활용한 계산법으로 위험도를 사고 발생빈도를 계산하였으며, 계산 과정 및 결과를 Table 5. 와 Table 6. 에 나타내었다.

최종적으로 피해영향범위 내에 활동 또는 상주하는 인력의 수를 파악 (프로그램에서 제공하는 해당지역 인구 밀도에 근거한 주민수와 직접 문의를 통해 파악한 주변 지역 사업장 종업원수 및 대형 주요 건물 거주자수를 포함) 하여 전 단계에서 계산한 사고 발생빈도와 파악된 피해영향 인원수를 곱함으로써 해당 설비의 사고 시나리오에 대한 위험도를 계산하였다. 그 결과는 Table 7. 에 나타내었다.

(4) 위험도 허용기준 적용

2 개 시나리오에 대해 산정한 위험도가 10^{-1} , 10^{-2} 수준이므로 장외영향평가 결과 위험도 개선 조치 기준 (국내 장외영향평가 심사 기관 운영 기준) 에 따라 위험도를 추가로 $10^{-1} \sim 10^{-2}$ 정도 낮추는 방안이 검토되었다. 다음 III항에서는 위험도를 산정한 대상 공정의 위험도 감소를 위한 설비 개선

Table 5. Frequency Calculated from PFD of Initiating Event and IPL for Storage Tank BLEVE Scenario

	Initiating Event	Frequency	No.	Risk Reduction		Total PFD
				PFD of IPL	Description	
1	Pressure Vessel Failure	1.E-06	2	1.E-02	Relief Valve	2.00E-08
2	Piping Rupture/100m	1.E-05	1	1.E-03	Detector/ Isolation, Relief Valve	1.00E-08
3	Piping leak/100m	1.E-03	1	1.E-02	Relief Valve	1.00E-05
4	Atmosphere Tank Failure	1.E-03	0			
5	Gasket/Packing Blowout	1.E-02	20	1.E-01	Detector/ Isolation	2.00E-02
6	Turbine/Diesel Engine overspeed with casing breach	1.E-04	0			
7	Third-party intervention (external impact by Back-hoe, etc)	1.E-02	0			
8	Lightning strike	1.E-03	0			
9	Safety valve open(Failure)	1.E-02	5	1.E-02	Relief Valve	5.00E-04
10	Cooling Water failure	1.E-01	0			
11	Pump Seal Failure	1.E-01	0			
12	Unloading/ Loading Hose Failure	1.E-01	0			
13	BPCS Instrument Loop Failure	1.E-01	0			
14	Regulator ㉔ Failure	1.E-01	0			
15	Small External Fire	1.E-01	0			
16	Large External Fire	1.E-02	1			1.00E-02
Frequency considering Risk Reduction						3.05E-02

(*) PFD : Probability of Failure on Demand, IPL : Independent Protection Layer.

Table 6. Frequency Calculated from PFD of Initiating Event and IPL for Tank Lorry Toxic Release Scenario

	Initiating Event	Frequency	No.	Risk Reduction		Total PFD
				PFD of IPL	Description	
1	Pressure Vessel Failure	1.E-06	1			1.00E-06
2	Piping Rupture/100m	1.E-05	1	1.E-03	Detector/ Isolation, Relief Valve	1.00E-08
3	Piping leak/100m	1.E-03	1	1.E-02	Relief Valve	1.00E-05
4	Atmosphere Tank Failure	1.E-03	0			
5	Gasket/Packing Blowout	1.E-02	14	1.E-01	Detector/ Isolation	1.40E-02
6	Turbine/Diesel Engine overspeed with casing breach	1.E-04	0			
7	Third-party intervention (external impact by Back-hoe, etc)	1.E-02	0			
8	Lightning strike	1.E-03	0			
9	Safety valve open(Failure)	1.E-02	0			
10	Cooling Water failure	1.E-01	0			
11	Pump Seal Failure	1.E-01	0			
12	Unloading/ Loading Hose Failure	1.E-01	1	1.E-02	Trench	1.00E-03
13	BPCS Instrument Loop Failure	1.E-01	0			
14	Regulator ㉔ Failure	1.E-01	0			
15	Small External Fire	1.E-01	1	1.E-02	Fire Fighting Equipment (Two Types)	1.00E-03
16	Large External Fire	1.E-02	1			1.00E-02
Frequency considering Risk Reduction						2.60E-02

설계 사항, IV항에서는 현 국내 피해영향범위 산정 프로그램 및 위험도 산정 방법에 대한 보완 적용을 통한 위험도 저감 방안, V항에서는 위험도 개선 관련 회사 내 조직 및 인력에 대한 관리적 개선 방안에 대해 검토한 사항을 기술하였다.

Table 7. Risk after Reflecting No. of Effected Persons

Scenario	Frequency	No. of Effected Persons	Risk
Storage Tank BLEVE	3.05×10^{-2}	-	3.05×10^{-2}
Tank Lorry Toxic Release	2.60×10^{-2}	20	5.20×10^{-1}

(*) Small No. of Effected Persons was due to Most Non-Occupied Mountain Area Beyond Facility and Exclusion of Facility Internal Persons.

III. 공정 안전 설계 보완 측면 위험도 개선 방안

3.1. 누출 조기 감지 및 긴급 차단 설비

누출 가능성이 있는 탱크로리 입하배관 연결 지점, 저장 탱크 상부 배관 연결 지점 및 하부 배관 연결 지점에 가스 감지기를 설치하고, 탱크로리 입하배관, 저장탱크 저장 입하배관, 공정 이송 배관 상에 감지기와 연동 작동이 되는 긴급차단 장치(밸브)를 설치한다. 암모니아 증기의 누출 시 가스 감지기에 설정된 값(TWA 25ppm)에 경보가 작동(20초 이내)하게 되며, 경보와 동시에 탱크로리 입하배관, 저장탱크 저장 입하배관, 공정 이송 배관 상에 설치된 긴급차단 장치(밸브)가 폐쇄됨으로써 추가적인 누출을 차단한다. 탱크로리 자체에 누출 지속 방지를 위한 과류 방지 긴급차단 설비를 설치할 수도 있으나 모든 이송 차량에 일괄적으로 적용하는 데에는 어려움이 예상된다. API-581에 누출 감지 설비와 긴급 차단 설비의 기능에 따른 누출 시간(누출원 크기별 5분 ~ 1시간)을 제시하고 있으므로 [8] 누출량 감소에 따른 위험도 경감 효과를 설명하는 기술적 근거로 활용할 수 있다. 본 가스 누출 감지 및 긴급 차단 안전 설비는 공정 설계에 반영하여 II항에서의 위험도 산정 시 이미 고려되었다. (타 유사 공정 및 시설에도 적용될 수 있도록 검토 내용을 포함하였다)

3.2. 확산 방지 및 희석 설비

(1) 물분무 설비

물분무 설비를 탱크로리 및 저장탱크의 상부에 설치하여 암모니아 누출 및 주변 화재 발생 시 탱크로리와 저장 탱크 외벽에 분사함으로써 누출 확산은 물론 열 차단 및 냉각 효과를 기대할 수 있고

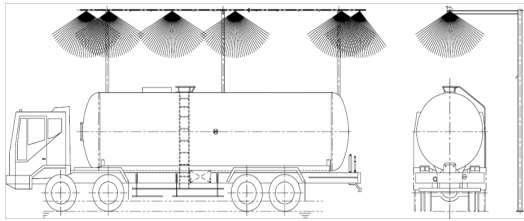


Fig. 3. Water Spray Diagram for Tank Lorry

Table 8. Water Spray Design Data

Location	Storage Tank	Tank Lorry
Capacity (l/m ² ·min)	5	5
Spray Area (m ²)	204.7	79.6
Required Spray Water Volume	1,126	398
On/Off Signal	NH ₃ Detector	NH ₃ Detector
No. of Nozzle	56	14
Flow Capacity of Each Nozzle	23.7	32

또한 암모니아가 물에 잘 흡수 용해되는 특성을 활용한 누출 암모니아의 농도 희석 효과도 가져올 수 있다. 본 연구에서 검토 적용한 탱크로리 상부 물분무 시설 설치 방식을 Fig. 3. 에 나타내었으며 저장 탱크 상부에도 유사한 방식으로 물분무 시설을 설치 한다. 해당 물분무 설비에 대한 설계 Data 는 Table 8. 과 같다.

탱크로리에서의 암모니아 누출 시 물분무 설비의 암모니아 농도 희석효과는 암모니아의 물에 대한 용해도 (54 g/100mℓ @ 20 ℃, 안전보건공단 MSDS) 를 참조하여 주변 환경의 용해 장애 요소를 고려하지 않고 단순히 이론 수치적으로만 계산해 본 결과 용해 희석에 따른 누출 암모니아 감소 효과는 54 g/100mℓ (용해도) x 4,209 ℓ (살수량) = 2,270 kg 로 누출 가능량 (탱크로리 전체 용량 18,000 kg) 의 13 % 정도였다. 결론 적으로 누출량 제거 감소효과에 따른 피해영향범위 감소 효과는 5% 정도 가져 오는 것으로 계산되었다. 본 물분무 설비는 공정 설계에 기 반영하여 II항에서의 위험도 산정 시 이미 고려되었다. (타 유사 공정 및 시설에도 적용될 수 있도록 검토 내용을 포함하였다)

(2) 희석 설비

저장 탱크 및 관련 부속 설비에 연결된 대기 비상

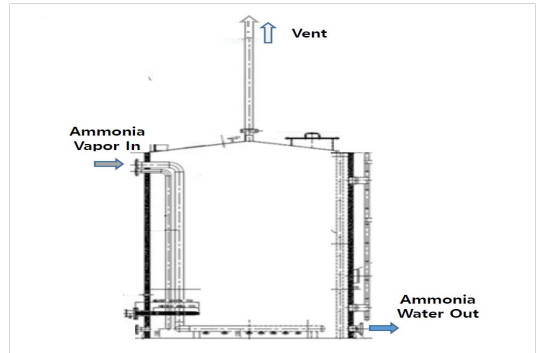


Fig. 4. Ammonia Dilution Tank.

방출 설비인 Vent 배관 및 안전밸브로 부터 방출되는 암모니아 증기를 희석 처리하기 위하여 내부에 물이 채워진 암모니아 희석 탱크 (습식 Scrubber 기능) 를 설치한다. 저장 탱크 계에서 배출되는 암모니아 증기는 희석 탱크의 물속으로 유입되어 물에 용해 희석되어 탱크 하부 배관으로 배출되는데, 저장 탱크계의 이상 발생 (안전밸브 방출 작동 등) 에 따른 암모니아 증기의 희석 탱크로의 동시 다량 유입으로 처리되지 않은 증기 일부가 희석 탱크 상부 배출 배관을 통하여 대기로 방출될 수 있는 경우 (가장 큰 유입원인 안전밸브 방출)를 고려하여 다음과 같이 설계한다. 희석 탱크 상부 Vent 배관 끝단의 높이는 Vent 배관의 끝단에서 배출되는 증기가 지상 사람 키 높이 (1.5 m) 에 도달하게 되는 농도가 ERPG-2 값 (150 ppm) 이하가 되는 높이로 한다. 본 연구에서 검토한 Vent 배관 개방구 끝 지점은 지상 5.35 m 이상이면 되며 Fig. 4. 에 암모니아 증기 희석 탱크에 대한 개략도를 나타내었다.

(3) 저장탱크 방유제 및 탱크로리 Trench

저장 탱크 방유제 (Dike) 는 탱크 저장량 전량이 누출되는 경우를 고려하여 저장량 100% 를 수용할 수 있는 크기로 방유제를 설치하고, 방류제를 설치할 수 없는 탱크로리 입하 작업시 정차지역 주변에는 Trench를 설치하여 탱크로리 누출 시 누출 액체가 바로 Trench 를 통하여 사고 지점으로부터 다른 저장조 (폐수처리장 포함) 로 배출되도록 하여 누출에 따른 추가적인 2차 사고 확대 발생을 방지한다. 본 방유제 및 Trench 안전 설비는 공정 설계에 기 반영하여 II항에서의 위험도 산정 시 이미 고려되었다. (타 유사 공정 및 시설에도 적용될 수 있도록 검토 내용을 포함하였다)

3.3. 배관 접속부 (Flange) 비산방지 시설

배관 및 설비 연결 접속부에는 누출된 암모니아 가 주변 설비 및 작업자에게로 비산되지 않도록 비산방지 시설을 설치한다. 배관 및 배관 연결부가 보온재로 보호가 되어 있다면 별도의 추가적인 비산방지 시설은 필요 없는 것으로 통상 인정되고 있다.

IV. 위험도 산정 방법론 측면 위험도 개선 방안

4.1. 위험관리기준 적용 연구 제안

해외 안전관리 선진국에서는 공장 부지를 검토하는 단계부터 공장 운영기간 동안 법으로 규정된 위험관리기준을 의무적으로 준수하도록 하고 있다. Table 9. 에 주요 국가별 위험관리기준을 나타내었다. [9]

그러나 우리 국내에서는 이러한 위험관리기준이 법제화 되어 있지 않고, 그나마 화학물질관리법에 따른 장외영향평가 시 관계 기관 (화학물질안전원) 심사 기준으로 운영되고 있다. 위험관리기준 운영 내용을 살펴보면 해외 위험관리기준은 사람이 연간 치명상을 입을 수 있는 확률 (Fatality/Yr) 로 규정되고 있으나, 국내에서는 독성 누출의 경우 ERPG-2 값, 화재의 경우 복사열 5 kw/m^2 , 폭발의 경우 과압 1 psi 의 치명상보다는 낮은 수준의 기준에 근거하여 해당 영향 범위 내 사람의 수를 피해 대상으로 위험도를 산정하고 있다. 본 연구에서 수행된 피해영향범위 산정에 있어서 독성 누출 시나리오에 대해 개략적으로 ERPG-2 값 (150 ppm) 기준 범위와 IDLH 값 (300 ppm) 기준 범위를 비교해 본 결과 IDLH 값 적용 시 영향 범위는 ERPG-2 값 적용 시 영향 범위의 60% 정도였다. 여기서 IDLH 값을 적용해 본 이유는 사람에게 치명상을 줄 수 있는 농도가 명확하게 규정되어 있지 않고 IDLH 값이 일반적으로 산업계에서 노출 한계 최고 농도로 관리되고 있어서이다.

국내에서 독성 시나리오에 대해 치명상 대신 ERPG-2 값을 적용함에 따라 계산되는 위험도 수치가 증가되는 효과가 있으나 국내 위험도 심사 충족기준이 해외 기준보다 낮은 수준이므로 위험도 관리 전체적인 측면에서 국내와 해외가 큰 차이가 없다고 할 수도 있다. 그렇더라도 여러 물질의 경우 물질 별로 고유 특성의 확산 거동을 가지고 있고 누출 조건이 다르므로 영향 범위 감소 효과는 달라질 수 있으므로 모든 유해위험물질에 공통 적용될 수 있는 위험관리기준을 어떻게 적용할 것인지에 대해서는 향후 추가적인 심층 연구 검토가 필요하겠다.

Table 9. Individual Risk Criteria in Other Country (Fatality/Yr)

Criteria	UK HSE	Netherlands (N)/ Australia (A)	USA EPA
Maximum Tolerable Risk to Worker	10^{-3}	$10^{-3} \sim 10^{-4}$ (A)	-
Maximum Tolerable Risk to the Public	10^{-4}	10^{-6} (N, A)	$10^{-7} \sim 10^{-8}$
Broadly Acceptable Risk to Worker & Public	10^{-6}	10^{-7} (A)	-

(*) 'Guidelines for Developing Quantitative Safety Risk Criteria' Published by CCPS.

4.2. 위험도 산정 시 LOPA 의 효율적 적용

현 LOPA 위험도 산정 방법에서는 검토 대상으로 선택한 사고 시나리오에 대해 LOPA 방식에서 제시한 16개 개시 사건 (Initiating Event) 중 시나리오에 적합한 개시 사건을 선택하여 제시된 고장발생 확률 값 (PFD, Probability of Failure on Demand) 을 조정 없이 그대로 적용한다.

그런데 실제 공정 현장에서 개시 사건이 피해 없이 종료되거나 혹은 종료되지 않고 2차 중대 사고로 진행되는 데에는 여러 가지 조건과 요소들이 서로 연관되어 작용할 수 있다. 이들 요소에는 사건 발생 확률은 아니지만 사건이 피해 결과로 진행되도록 기여하는 요소인 '사고 전개 조건 (Enabling Condition)' 으로 해당 지역의 계절적 요인 (동절기, 하절기), 공정 운전주기 요인 (Batch, 비연속) 등이 있고, 초기 개시 사건 발생 이후 사고를 진전시키는 확률에 기여하는 요소인 '조건 확률 변수 (Conditional Modifier)' 로 누출 물질의 위험 분위기 조성 확률, 점화 확률, 사고 현장에 사람 존재 확률, 사고 영향에 따른 인체 상해 확률, 설비 손상 확률 등이 있다. [10-11] 위험도 산정에 영향을 줄 수 있는 이들 요소는 통상적으로 공정에 다양하게 존재하므로 위험도 산정 시 공정 특성 및 환경 조건을 잘 이해하여 해당 요소를 고려한다면 위험도를 상당히 낮출 수 있다.

본 연구에서 탱크로리 누출 시나리오의 경우 최종 위험도가 5.20×10^{-1} (Table 7. 참조) 이지만 상기 조건 확률변수 (Conditional Modifier)를 적용할 경우 위험도가 감소하는 효과를 다음과 같이 확인해 볼 수 있다. 탱크로리 누출 시나리오는 탱크로리 입하 작업이 진행 중일 때만 발생할 수 있다고 예상되므로 $(52 \text{회 입하작업/년}) \times (2 \text{시간/입하작업}) / (8760 \text{시간/년}) = 1.19 \times 10^{-2}$ 만큼 위험도 감소 효

과가 있을 수 있고 최종 위험도는 $(5.20 \times 10^{-1}) \times (1.19 \times 10^{-2}) = 6.19 \times 10^{-3}$ 로 상당히 감소하게 된다.

4.3. KORA 범용 프로그램 보조 자료 활용

현 KORA 프로그램은 누출에 대한 피해 영향 범위 산정 시 2차원 수평면적인 확산 거리는 보여주지만 수직 확산 거리에 대한 프로파일 (Profile) 은 보여주지 못하고 있다. 어떤 공장 (본 연구 대상 시설도 해당) 의 경우 공장 건설 시 공정 위험 특성을 고려하여 주변 지형학적인 구조를 활용한 부지 조건 (일반 지역 사회와의 사이에 산악 지형 등 고지대 위치) 을 채택하였는데, 사고 시나리오에 대한 피해영향범위 산정 시 현 범용 KORA 프로그램에 의해서는 지형적인 장애효과가 반영되지 못하고 있다. 그러므로 유해위험화학물질을 취급하는 공장 시설의 위험도가 과도하게 높은 경우(수평 확산거리 증대) 공장 부지의 지형적인 확산 장애 정도(효과)를 위험도 감소 방안으로 활용할 수 있고, 그 근거로 누출 물질의 수직 확산 정도를 계산한 자료 (PHAST 등 상용프로그램 활용한 결과 등) 를 준비할 필요가 있다.

V. 관리적 측면 위험도 개선 방안

5.1. 위험도에 근거한 공정안전관리

미국 PSM 제도를 모태로 한 국내 PSM/SMS (공정안전관리, 가스안전관리) 제도는 20여년의 적용 과정에서 국내 안전관리 수준을 상당히 향상 시킨 것으로 산업 현장에서 인식되어왔으나 최근 수년 전 국적으로 일련의 중대 사고의 지속 발생의 경향을 볼 때 PSM 제도 및 다른 안전환경 관련 제도의 일부 보완 내지는 강화가 필요한 시점인 듯하다. 2013년 사업장 위험성평가 확대 시행 이후, 2014년 PSM 적용대상 물질 항목수의 확대, 2015년 사업장 장외 영향평가 및 위해관리계획서 제도 시행 등 국내 안전환경관리 법적 의무 프로그램 및 제도 운영에 있어서 사업장 위험성평가 및 화학물질 누출사고에 대비한 비상 대응 준비 태세의 강화 추세가 보여진다. PSM 제도의 원조인 미국의 안전관리 동향을 보면 산업계에 대한 다양한 안전관리 프로그램이 시도되고 있지만 특히 '위험도기반 공정안전관리 (Risk-Based Process Safety, RBPS)' 제도가 2000년대 중반부터 강조되고 있다. PSM 이 12개 요소인 반면 RBPS 제도는 4개의 주요소 (Accident Prevention Pillars - Commit to Process Safety, Understand Hazards and Risk, Manage Risk, Learn from Experience) 와 20개 부요소 (Elements - Process Safety Culture,

Process Safety Competency, Workforce Involvement, Stakeholder Outreach, Hazard Identification and Risk Analysis, Management Review and Continuous Improvement 등) 로 구성되어 있다. [12] RBPS 의 개념은 회사의 한정된 자원 (인력, 예산 등) 을 회사에서 정한 기준보다 높은 위험도의 분야나 항목에 집중하고, 낮은 수준의 위험도 항목은 해당 위험의 존재는 인식하되 후순위로 관리하는 것이다. 즉 위험도 관리에 있어서 선택과 집중의 개념을 적용하는 것이다. 국내에서도 현시점에 추가로 새로운 의무적(법적) 제도 (RBPS, 위험도 기반 공정안전관리)를 도입 적용하기에는 산업계 전반에 예기치 않은 어려움이 있을 수 있으므로 자발적 수행이 가능한 사업장 중심으로 시범 운영을 실시한 후 확대 적용하는 방식을 활용할 수도 있겠다.

5.2. 공정 위험성 재평가 효과적 수행

위험성평가 관련한 사항은 국내 PSM 제도에서도 하나의 관리 요소로 강조되고 있고, 5.1 항의 위험도기반 공정안전관리 제도에서도 중요한 요소로 되어 있다. 산업 현장에서 최근 사고를 경험하지 않았더라도 앞으로도 사고가 발생하지 않는 것을 보장하는 것이 아니다. 즉 시간이 경과함에 따라 다음과 같은 사유로 공정의 위험도가 변함 없이 일관되게 유지될 수는 없다고 본다. 공정에서 설비나 절차의 변경이 이루어졌거나, 중대 사고는 없었더라도 피해 결과가 작아 사소하다고 간주되는 사고가 발생하고 있거나, 설비의 검사 결과 향후 문제가 될 수 있는 사항이 발견되거나, 회사 조직의 변화, 법규 기준의 변경 등 지난 위험도에 영향을 주는 많은 요소가 공정을 운영하는 과정에서 지속적으로 발생하고 있다. 이러한 위험 요소를 주기적으로 검토하여 사전에 대책을 세우도록 하는 것이 위험성 재평가이다. 위험성 재평가는 국내 법적 요건으로도 규정되어 있으며, 대상이 되는 사업장이 공정 위험성 재평가를 관례적인 형식적 수행을 배제하고 주기적으로 제대로만 수행한다면 상당히 많은 위험도 증가 위험요소를 제거할 수 있다.

5.3. 공정안전관리 이행성 상시 점검

아무리 좋은 제도도 그것을 운용하는 주체는 사람이다. 내용적으로 훌륭한 제도보다는 모든 조직과 구성원이 제도 상의 절차를 철저히 준수하려는 의식이 사업장 전반에 배어 있어야 한다. 특히 제도 운영 과정 (Plan-Do-Check-Action) 에서의 이행성 점검/문제점 개선 업무 활동이 중요하며, 그래서 PSM 제도는 물론 모든 안전관리 프로그램에는 반

드시 이행성 및 성과를 측정하는 업무 요소가 포함되어 있다. 그런데 이런 업무가 흔히 잘못된 점을 들추어 내서 책임 추궁내지는 실적 평가로 연계되는 경우가 있다보니 점검 대상 조직도 만족하고 점검하는 조직도 만족하는 선에서 형식적으로 수행되는 경향이 있다. 한 사고 사례를 예로 들면 한 공장에서 중대 사고가 발생하였는데 사고 조사결과 그 공장은 사고 6개월 전에 내부 자체 감사(점검) 가 있었는데 결론은 '본 공장은 PSM 제도가 전반적으로 양호하게 이행되고 있다' 였다. 그러나 사고 조사결과에서는 상당히 많은 PSM 업무 수행 부적합 사항이 발견되었던 것이었다. 형식적인 감사와 점검은 문제점 개선의 기회를 상실하는 것이다. 그 결과는 시기 상의 문제일 뿐 반드시 값비싼 대가를 치르게 된다. 이러한 유용한 이행성 점검/감사 제도가 제대로 정착되기 위해서는 회사 내에서도 삼자 (Staff, 안전환경조직) 에 의존하기 보다는 현장 조직 스스로 자발적으로 수행하고 개선하려는 안전 문화 의식이 전제되어야 한다.

VI. 결 론

본 연구에서 암모니아 입하 및 저장시설에 대하여 국내에서 통상적으로 사용되는 LOPA Data 적용 기법 (피해 영향범위 계산에 KORA 범용 프로그램 활용)을 활용하여 가상 사고 (탱크로리 및 저장 탱크 누출) 시나리오에 대한 위험도를 산정해본 결과 위험도를 저감하기 위한 방안이 수행되어야 하는 수준 (국내 위험도 평가결과 심사 기관의 내부 평가 운영기준 근거) 이었고 다음과 같이 위험도 저감 방안이 검토되었다.

검토 대상 시설에 대한 하드웨어 보안을 통한 위험도 경감 방안에 대해, 누출 조기 감지 및 긴급 차단설비 설치, 누출물에 대한 확산 방지 및 회석 설비 설치, 각 설비 연결 부위에 대한 비산방지 설비 설치 방안을 제시하였다. 3 건의 방안 중 2 개 항목은 이미 위험도 산정 전에 설계에 반영하여 위험도 산정에 고려되어서 1건 만 위험도 감소 위한 추가 개선 사항으로 수행되었다.

다음 위험도 산정 방법론 적용 측면에서의 위험도 감소 방안으로써 피해영향범위 계산과 위험도 산정 방법에 대해 검토한 결과, 현재 국내에서 피해영향범위 계산 시 적용되는 비상대응 농도 값 (ERPG-2) 적용 기준을 치명도 (Fatality) 에 근접하는 대체 농도 값 적용 기준 (외국은 치명도 기준 적용 (국내 공론화 필요), 위험도 산정 위한 LOPA PFD 적용 시 단일 PFD 일방적인 적용 보다는 다양한 사고

전개 조건 (Enabling Condition) 과 조건 확률 변수 (Conditional Modifier) 의 부수적 적용, 현 피해영향범위 계산 프로그램의 2차원적 피해 영향범위 산정의 한계를 보완하는 3차원적 (수직 확산 프로파일 포함) 검토 수행을 제안하였다.

마지막으로 관리적 측면에서의 위험도 경감 방안으로 위험도 기반 공정안전관리(RBPS) 추진, 공정 위험성 재평가 강화, 관리 시스템 이행성 상시 점검 추진을 제안하였다.

상기 위험관리 방안 들을 제대로만 적용하고 준수한다면 본 연구 대상 암모니아 시설은 물론 다른 일반 제조 사업장에서의 위험도 개선에 대해 기대한 수준 이상의 성과를 거둘 수 있을 것으로 생각된다. 사고는 사람 들이 잊어 버릴만하면 다시 발생하는 반복적 특성이 있다고 한다. 사고 발생에 설비적인 요소도 있지만 인적 요소가 그만큼 비중을 차지하는데 기인한 것으로 보여진다. 그러므로 상기 위험관리 방안 외에 당연히 해당 설비를 운용하는 회사의 경영층 및 일반 구성원들의 위험관리를 위한 의지와 노력이 보다 중요하다고 할 수 있다.

REFERENCES

- [1] Park S W, Jung S H, "Recommended Evacuation Distance for Offsite Risk Assessment of Ammonia Release Scenarios", *Journal of the Korean Society of Safety*, 31(3), 156-161, (2016)
- [2] Pae M S, "Consequence Analysis and Safety Measures on Ammonia Release from Tank Container", *Chungbuk National University Master Degree Thesis*. 5-6, (2016)
- [3] NCIS CSC System 'Accident Information' (2017) (<http://csc.me.go.kr>)
- [4] Kim J H, Jung S H, "Off-site Consequence Modeling for Evacuation Distances against Accidental Hydrogen Fluoride(HF) Release Scenarios", *Korean Chemical Engineering Research*, 54(4), 582-585, (2016)
- [5] Lee D H, Park K S, Kim T O, Shin D M, Shin S Y, 'Offsite Risk Assessment on Flammable Hazard Site', *Korean Journal of Hazardous Materials*, 3(1), 52-58, (2015)
- [6] KS C IEC 60079-10-1 : Explosive atmospheres - Part 10-1 Classification of areas - Explosive gas atmospheres. (2012)
- [7] KOSHA Guide P-92-2012, Technical Guidelines for Release Source Modeling. (2012)

- [8] API RP 581 : Risk Based Inspection Base Resource Document. (2000)
- [9] CCPS of AIChE, "*Guidelines for Developing Quantitative Safety Risk Criteria*", Wiley, (2009)
- [10] CCPS of AIChE, "*Layer of Protection Analysis - Simplified Process Risk Assessment*", (2001)
- [11] CCPS of AIChE, "*Guidelines for Enabling Conditions and Conditional Modifier in LOPA*" , Wiley, (2014)
- [12] CCPS of AIChE, "*Guidelines for Risk Based Process Safety*", Wiley, (2007)