

냉동제조 시설의 암모니아 누출사고 위험 분석

강수진 · *이익모* · 문진영 · 천영우

인하대학교 환경·안전융합전공, *인하대학교 화학과
(2016년 6월 29일 접수, 2017년 2월 9일 수정, 2017년 2월 10일 채택)

Risk Analysis of Ammonia Leak in the Refrigeration Manufacturing Facilities

Su-Jin Kang · *Ik-Mo Lee* · Jin-Young Moon · Young-Woo Chon

Dept. of Environment Technology and Safety Technology Convergence, Inha University,
Incheon 402-751, Korea

*Dept. of Chemistry, Inha University, Incheon 402-751, Korea

(Received June 29, 2016; Revised February 9, 2017; Accepted February 10, 2017)

요약

국내 냉동제조시설에서 암모니아 누출사고가 여전히 발생하고 있음을 볼 수가 있다. 암모니아는 가연성가스 및 독성가스이므로 사고 발생할 때 인체와 생태계에 큰 피해를 일으킬 수 있다. 국내 냉동제조시설의 암모니아 사고유형을 파악한 후 사고시나리오를 선정하여 피해범위를 산정하고 사고 빈도와 위험도를 분석하여 사고 피해를 최소화하는 대책 수립이 필요하다. 본 연구에서는 정량적 위험성 평가(QRA: quantitative risk assessment)의 분석 방법에 따라 암모니아 냉동시스템의 리시버 탱크에 대한 위험도를 분석하였다. 시나리오 분석 조건은 화학물질관리법에서 정하는 '사고시나리오 선정에 관한 기술지침' 및 미국 화학공정안전센터(CCPS: center for chemical process safety)의 가이드라인에 따라 정하였다. DNV사의 SAFETI 프로그램을 활용하여 시나리오에서 선정된 모든 사고 영향범위를 산정하고 빈도 분석을 통하여 리시버 탱크에 대한 위험도를 도출하였다. 빈도 값은 사건수 분석(ETA: event tree analysis) 기법과 Part count 기법을 활용하였다. 연구 결과 암모니아 냉동시스템의 개인적 위험도는 $7.71E-04/\text{yr}$ 으로 도출되었으며, 사회적 위험도 $1.17E-03/\text{yr}$ 으로 도출되었다. 도출된 위험도는 국제 화재방지협회(NFPA: national fire protection association)의 ALARP(as low as reasonably practicable) 범위를 적용하여 위험도의 적합성을 확인하였으며, 본 연구에서 제안한 위험도 산정 방법이 사고 피해 최소화 방안을 모색하는데 활용된다면 보다 좋은 결과가 도출될 것으로 판단된다.

Abstract - Recently, ammonia leak occurred frequently in the domestic refrigeration manufacturing facilities. Ammonia caused great damage to the environment and human health in the event of an accident as combustible gases and toxic gases. After considering the types of ammonia accidents of domestic refrigeration manufacturing facilities and selected accident scenarios and to analyze the risk analysis through Impact range estimates and frequency analysis and there was a need to establish measures to minimize accident damage. In this study, depending on the method of analysis quantitative risk assessment we analyzed the risk of the receiver tank of ammonia system.

Scenario analysis conditions were set according to the 'Technical guidelines for the selection of accident scenario' under the chemicals control act and 'Guidelines for chemical process quantitative risk analysis' of center for chemical process safety. The risk estimates were utilized for consequence analysis and frequency analysis by SAFETI program of DNV, event tree analysis methodology and part count methodology. The individual risk of ammonia system was derived as $7.71E-04 / \text{yr}$, social risk were derived as $1.17E-03 / \text{yr}$. The

[†]Corresponding author: imlee@inha.ac.kr

Copyright © 2017 by The Korean Institute of Gas

derived risk was confirmed to apply as low as reasonably practicable of the national fire protection association and through risk calculation, it can be used as a way to minimize accidents ammonia leakage accident damage.

Key words : refrigeration manufacturing facilities, quantitative risk analysis, ammonia, eta, frequency analysis, individual risk, societal risk, phast risk 6.7

I. 서론

현재 국내 화학산업 시설의 노후화와 화학물질 취급 및 유통량의 증가에 따라 화학사고의 발생 위험이 증대되고 있다. 화학물질에 의한 사고가 발생 시 인명과 환경에 치명적인 피해를 입을 수 있다. 또한 암모니아 취급 사업장 뿐 만 아니라 주변 지역주민들에게도 피해를 주며 사고 후 누출된 화학물질이 완전히 제거되지 않아 그 피해가 광범위하게 나타날 수 있다[1].

국내 사고현황(03~14년)에 관한 화학물질안전원의 공식자료[2]에 따르면 다양한 화학사고의 형태 중 화학물질 유출 및 누출로 인한 사고가 가장 빈번한 것으로 조사되었다. 물질별 유출 및 누출 사고를 살펴보면 산류, 인화성 액체, 독성가스 및 염기류 등의 순으로 사고가 빈번하게 발생하였으며, 사고의 발생 건수는 매년 증가하는 추세로 나타났다. 최근 2년간 유출 및 누출 사고의 원인물질 중 암모니아가 대표적이며, 독성 가스의 유출 및 누출 사고에서도 암모니아가 약 63%를 차지할 정도로 그 사고가 빈번하게 발생하였다. 시설별로는 암모니아 냉동제조시설에서의 사고가 가장 많았다. 냉동제조시설 중 약 64%에 해당하는 시설이 15년 이상 경과된 노후 시설이었으며 그로 인한 암모니아 유출 및 누출 등의 사고도 증가하는 추세를 보였다[3].

암모니아는 「화학물질관리법」과 「화학물질의 등록 및 평가에 관한 법률」에 유독물질 및 사고대비물질로 「산업안전보건법」에 노출, 작업 및 관리물질로 「고압가스안전관리법」에 독성 및 가연성물질로 선정하여 규제를 하고 있다. 암모니아는 다양한 용도로 사용하는데 그 중에서도 냉매로서의 우수한 성능을 지니고 있다. 그러나 폭발성의 위험과 인체 독성의 영향이 있기 때문에 저장과 취급 시 주의하여야 한다[4].

따라서 암모니아 누출로 인한 사고 발생 시 피해영향 범위를 예측하고 개인적 위험도와 사회적 위험도를 분석하여 암모니아 취급사업장에서 사고 피해 최소화와 사고예방을 위한 체계적인 안전관리 방안을 마련할 필요가 있다.

따라서 본 연구는 SAFETI 프로그램을 이용하여 국내 암모니아 냉동제조시설의 사고유형을 파악한 후 사고 시나리오를 선정하여 피해범위 예측하고 사고빈

도를 분석하여 위험도 산정방법을 제시함으로써 향후 암모니아 누출사고 발생 시 사고피해의 범위나 규모를 최소화하는데 그 목적을 두고 있다.

II. 연구방법

위험성 평가 방법에는 정성적 위험성 평가와 정량적 위험성 평가가 있다. 본 연구에서는 정량적 위험성 평가기법을 활용하여 사고 상황을 설정하고, 원인결과분석(CCA)기법을 활용하여 사고영향을 파악하였고, 사건수분석(ETA)를 활용하여 빈도를 알아내어 위험도를 도출하였다.

2.1. 암모니아 냉동 시스템

무수 암모니아는 미국표준협회(american national standards institute)의 기준인 ANSI/ASHRAE-15의 그룹 2의 냉매로서 분류된다. 이 코드는 장치의 위치, 냉매의 허용 수량 및 다양한 냉동 시스템의 보호 및 설치의 규칙에 관한 요구 사항을 포함한다. 냉각을 위한 전형적인 암모니아 시스템을 Fig. 1에 나타내었으며 약 10 bar의 압력으로 증발기에서 낮은 압력으로 암모니아 가스를 압축할 수 있는 압축기로 구성된다.

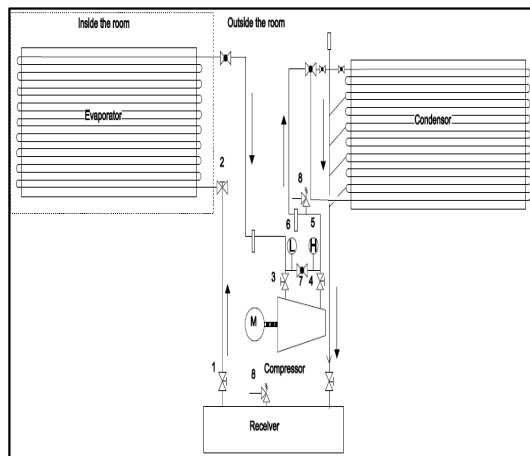


Fig. 1. Ammonia refrigeration system.

가스는 응축기로부터 토출된다. 암모니아 가스가 10 bar 압력 하에 있는 경우 25°C에서 액화된다. 따라서 물이 21°C 또는 그 이하의 온도에서 응축기 배관을 통해 순환하는 경우 다음 가스는 액화 및 물 잠열을 방출하게 된다. 응축기 내 액체 암모니아는 용기 또는 저장 탱크에 저장되고 파이프를 통해 흐르게 된다. 이 파이프에 위치한 밸브는 시스템을 통해 지나가는 액체의 양을 제어한다. 이 밸브를 통해 액체가 흐르는 즉시 압력이 감소하고 다시 기체 상태로 변화함에 따라 주변의 열을 흡수하여 내부가 차가워진다. 만일 코일에 물탱크가 배치된 경우 물은 냉각된다. 암모니아는 저압가스 및 액체로 변화되기 위해서는 충분한 열을 흡수해야 하고, 그때 압축기로 다시 유입되고 그 동작이 반복된다[5].

2.2. 사고 시나리오 선정

2.2.1. 사고 상황 설정

위험성 평가를 수행하기 위해서는 일반적인 암모니아 냉동 시스템의 공정흐름도, 공정배관계장도 및 기술 문서 등을 바탕으로 사고시나리오의 설정이 필요하다.

암모니아 냉동시스템은 리시버 탱크, 증발기, 응축기 및 압축기 등으로 구성되며 리시버 탱크를 기준으로 독성 및 가연성의 잠재적 영향이 나타나게 되는데, 그 영향은 대해 Table 1과 같이 정리하였다. 암모니아는 가연성 및 독성 가사이므로 Jet fire, Pool fire, Flash fire, UVCE(Unconfined vapor cloud explosion) 및 중독 등으로 인한 사고가 발생할 수 있다. UVCE로 인하여 폭발할 경우 Fireball이 발생할 수 있는데 Fireball의 경우는 본 연구에서 제시한 가정조건과 다르므로 제외하였다.

Table 1. Summary of MAEs in the ammonia refrigeration system by QRA modeling

MAE No.	Stream No.	Description of location	Hazardous event	Potential consequence	Release material modeling
1	1	Flow to receiver	Release from pipeline	Toxic, flammable	Ammonia, anhydrous
2	2	Flow to evaporator	Release from pipeline	Toxic, flammable	Ammonia, anhydrous
3	3	Storage receiver	Release from receiver	Toxic, flammable	Ammonia, anhydrous

2.2.2. 누출시나리오

(1) 끝점

끝점은 유해화학물질의 물리·화학적 특성에 따른 화재·폭발 및 유출·누출의 위험에 따라 결정된다. 끝점은 “사고시나리오 선정에 관한 기술지침[6]”에 따라 독성은 농도가 ERPG-2에 도달하는 지점, 폭발은 1 psi의 과압이 걸리는 지점, 화재는 40초 동안 5 kw/m²의 복사열이 노출되는 지점, 유출 및 누출은 유출 및 누출물질의 인화한계에 이르는 지점으로 설정하였다.

(2) 기상조건

가. 국내 냉동제조시설의 경우 경기도 지역에 많이 분포하였기 때문에 본 연구의 기상조건으로 국내 D지역의 기상 조건을 활용하였으며 기온은 12.4°C, 습도는 62%를 사용하였고 풍속 및 대기안정도는 사고시나리오 선정에 관한 기술지침[6]을 활용하여 최악의 사고시나리오는 풍속 1.5 m/s, 대기안정도 F등급을 사용하였고, 대안의 사고시나리오는 풍속 3 m/s, 대기안정도는 D등급을 사용하였다.

(3) 누출공의 크기

누출량 계산을 위해서는 누출공의 크기 자료가 필요하다. 누출공의 크기는 미국 화공안전센터(CCPS: center for chemical process safety)의 “화학 공정의 정량적 위험 분석 가이드라인(guidelines for chemical process quantitative risk analysis)”[7]에 따라 선정하였으며 Table 2에 나타내었다.

(4) 인구

사고의 위험도를 분석하기 위해서는 대상 공정에서 근무하는 인원과 주변지역 주민의 위치가 중요하다. 위험도 산정을 위한 인구수를 Table 3에 나타내었

Table 2. Hole Size

Release Scenario	Hole Size	Comment
Small	5 mm	Representative of a generic small leak from vessel/pipework
Medium	25 mm	Representative of a generic medium leak from vessel/pipework
Large	100 mm	Representative of a generic large leak from vessel/pipework
Rupture	Full Bore	Representative of a generic catastrophic leak from vessel/pipework Actual line diameter is considered as leak size

Table 3. Population distribution and occupancy rate

Individuals	Number	Occupancy rate
Factory	40	0.9
Admin building	20	0.9
Education center	40	1
Commercial	30	1
Residential	500	1
Industrial	30	1

다. 본 연구에서는 암모니아 냉동제조시설을 가상으로 선정하였기 때문에 위험도를 산정하기 위한 인구수 또한 명확하지 않았다. 따라서 인구수의 산정은 공장 및 관리 건물의 경우 일반적으로 중소기업에 근무하는 인원의 평균치를 사용하였고 교육센터는 하루에 교육받는 평균인원, 상업 및 공업단지의 인구는 소기업에서 근무하는 평균인원, 거주 지역은 아파트 단지의 평균인원으로 설정하였다. 공장 및 관리 건물의 점유부하율은 0.9로 설정하였고 그 외 지역은 항상 사람이 있는 것으로 설정하였으며 점유부하율은 1로 설정하였다.

(5) 독성 프로빗

프로빗은 시간의 함수로서 사망 가능성의 척도이다. SAFETI(Phast Risk V6.7)에서 다음의 식(1)을 이용하여 계산할 수 있다.

$$Pr = A + B \ln(C^N \times t) \quad (1)$$

A, B 및 N은 프로빗 방정식의 상수이며 C는 ppm 단위의 농도이며 t는 분당 노출 기간을 나타낸다. 암모니아 프로빗 상수 A, B 및 N 값은 Louvar, J.F. and Louvar, B.D[8]의 자료를 활용하였으며 A는 -16.14, B는 1이며 N은 2의 값을 사용하였다.

2.2.3. 공정조건

실제 유량을 측정하기 위해 대표적인 공정 조건을 정의하였다. 정의된 공정 조건과 누출공의 크기에 따라 누출량과 누출률이 계산된다. Table 4에 본 연구의 대상 공정 조건을 물질의 유량, 상태, 온도, 압력, 배관 사이즈 및 용량 등을 상세히 나타내었다.

2.2.4. 누출률

누출률은 공정 조건 및 누출공의 크기에 따라 사고

Table 4. Summary of stream data for MAEs in the ammonia refrigeration system

MAE No.	Description of location	Flow rate (kg/s)	Phase	T (°C)	P (bar)	Line size (")	Line length (m)
1	Flow to receiver	0.5	V	29	10	3	30
2	Flow to evaporator	0.5	L	24	10	2	8
3	Storage receiver	N/A	L	115	17	N/A	N/A

Table 5. Release rates in the ammonia refrigeration system

MAE No.	Flow rate (kg/s)	Pipe diameter (")	Phase	Release rate (kg/s)			
				5 mm	25 mm	100 mm	Full Bore
1	0.5	3	V	0.32	3.53	3.53	3.53
2	0.5	2	L	0.01	0.31	5.79	20.31
3	N/A	N/A	L	0.78	10.07	10.07	10.07

시나리오 별로 SAFETI에 포함된 가스 및 액체의 누출률 모델을 사용하여 계산하였으며 그 결과를 Table 5에 나타내었다.

III. 사고영향범위 결과

사고 시나리오범위 예측은 정량적 소프트웨어인 DNV사의 SAFETI을 사용하였다. 미국 화학공정안전센터(CCPS: center for chemical process safety)[9]의 guideline에 따라 사고영향범위의 분석 절차를 수행하였다.

3.1. 독성에 의한 피해영향범위 모델링 결과

암모니아 누출로 인한 독성에 대한 모델의 결과를 Fig. 2와 Fig. 3과 같이 나타내었다. ERPG-2에 도달하는 지점을 그래프로 도식하였으며 최악의 시나리오의 경우 최대 약 144.3 m, 대안의 시나리오의 최대 약 195.9 m까지 영향을 미치는 것으로 나타났다.

3.2. 화재에 의한 피해영향범위 모델링 결과

암모니아 누출로 인한 Jet fire 모델링 결과를 Fig. 4와 같이 나타내었다. 5 kw/m²의 복사열이 노출되는 지

냉동제조 시설의 암모니아 누출사고 위험 분석

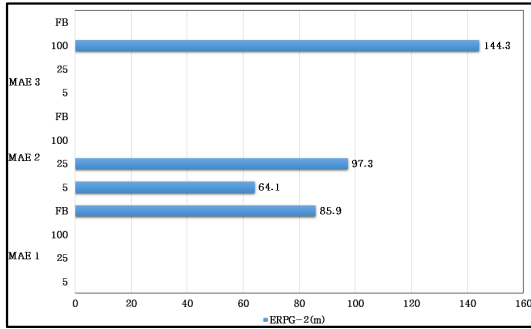


Fig. 2. Results of worst scenario on toxic.

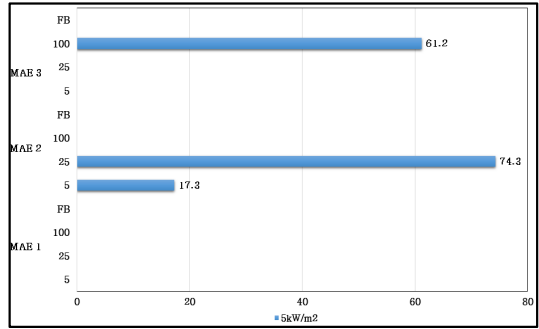


Fig. 5. Results of alternative scenario on jet fire

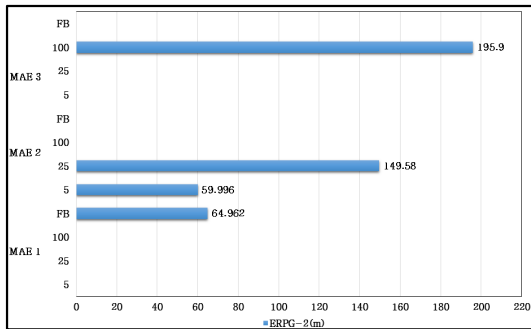


Fig. 3. Results of alternative scenario on toxic

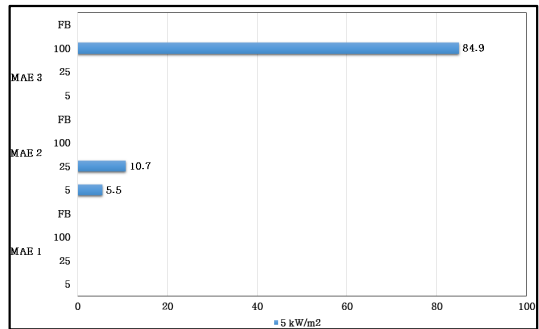


Fig. 6. Results of worst scenario on pool fire

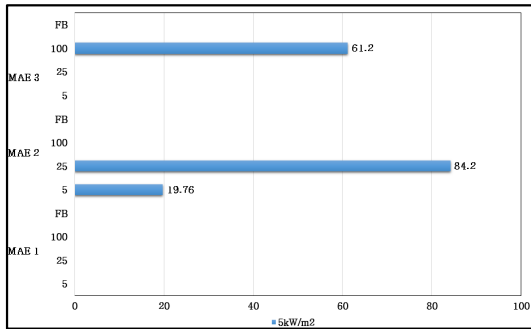


Fig. 4. Results of worst scenario on jet fire.

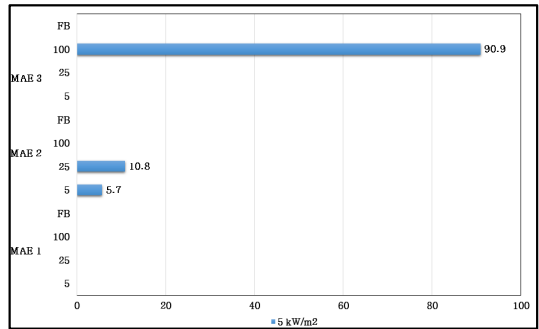


Fig. 7. Results of alternative scenario on pool fire

점을 그래프로 도식하였으며 최악의 시나리오의 경우 최대 약 84.2 m까지 영향을 미치는 것으로 나타났다.

Jet fire 의 대안의 시나리오 결과를 Fig. 5에서 나타내었으며 최대 약 74.2 m까지 영향을 미치는 것으로 나타났다. Pool fire 모델링 결과를 Fig. 6과 Fig. 7에서 나타내었으며 최악의 시나리오의 경우 최대 약 84.9 m, 대안의 시나리오는 최대 약 90.9 m까지 영향을 미치는

것으로 나타났다.

IV. 빈도분석

빈도 분석은 기본적으로 결함수 분석(FTA) 등을 활용하여 각 시나리오별 발생 가능성에 대한 분석을 실시하여야 한다. 그러나 시나리오별 빈도분석을 하는

Table 6. Ignition probability

Leak size	Ignition probability	
	Gas	Liquid
Minor (< 1 kg/s)	0.01	0.01
Major (1 ~ 50 kg/s)	0.07	0.03
Massive (> 50 kg/s)	0.3	0.08

것은 많은 시간과 비용이 소요된다[10]. 본 연구에서는 사고빈도를 계산하기 위해 part counts 기법과 사건수 분석(ETA: event tree analysis) 기법을 활용하였으며 각 장치별 고유의 고장 빈도값은 석유 및 가스 생산 국제 협회(IOGP: international association of oil & gas producer)[11] 데이터 및 정량적 위험성 평가 가이드라인의 purple book[12]의 데이터를 활용하였다.

4.1. 누출발생빈도

초기 빈도를 결정하기 위한 일반적인 고장률 데이터는 다양한 hole size에 대한 part counts에 사용되며 각 장치에 대한 고장 빈도는 OGP(Oil & Gas Producers) 데이터[11]를 활용하였다.

4.2. Part counts

Part count는 대상공정의 장치에서 잠재적인 누출로 인해 발생할 수 있는 부분을 카운트하였다. Part count는 P&ID 및 배치도를 활용하여 작성하였으며 용기, 밸브, 펌프, 핀 팬 열 교환기, 압축기 등으로부터 장치들을 카운트하였다. 밸브의 개수가 가장 많았고 계기류, 플랜지 순으로 나타났다.

4.3. 사건수 분석

ETA는 주요 사고지점에서 누출공의 크기에 따라 누출이 발생할 경우, 즉 각각의 초기 사건에 접화 확률을 바탕으로 작성하였다. 사건수 작성 시 접화 확률은 Lee's model[13]을 활용하였으며 Lee's model에 의한 접화 확률을 Table 6에서 나타내었다. Lee's model은 누출공의 크기에 따라 가스 상태는 0.1, 0.07 및 0.3의 확률이며 액화 상태는 0.01, 0.03 및 0.08의 확률로 나타내었다.

주요 사고지점에서의 누출 사건에 대한 사건수를 작성하여 Fig. 8에서 나타내었으며 누출공 5 mm 사이즈의 누출빈도는 1.95E-04, jet fire와 pool fire의 합한 빈도는 3.69E-06, 독성빈도 값은 1.93E-04로 나타났다.

도출된 시나리오 별 빈도를 Table 7에 나타내었다. 리시버의 누출빈도가 가장 크게 나왔으며 5 mm의 누

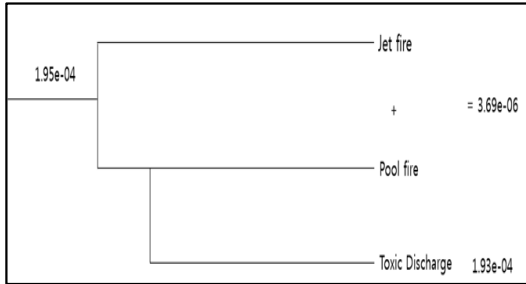


Fig. 8. Leak frequency of 5 mm size

Table 7. Summary of release and event frequencies in ammonia refrigeration system

MAE No.	Hole size (mm)	Release frequency, p.a.	Toxic event frequency, p.a.	Fire hazard event frequency, p.a.
1	5	1.95E-04	1.93E-04	3.69E-06
	25	2.40E-05	2.33E-05	1.31E-06
	100	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
	Rupture	2.40E-05	2.33E-05	1.31E-06
2	5	1.95E-04	1.93E-04	3.69E-06
	25	2.40E-05	2.33E-05	4.54E-07
	100	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
	Rupture	2.40E-05	2.33E-05	1.31E-06
3	5	3.94E-03	3.90E-03	7.46E-05
	25	6.83E-04	6.63E-04	3.72E-05
	100	1.10E-04	1.07E-04	6.00E-06
	Rupture	3.08E-04	2.99E-04	1.68E-05

출빈도는 3.94E-03이며 jet fire와 pool fire의 합한 빈도는 7.46E-05이며 독성빈도 값은 3.90E-03로 나타났다.

V. 위험도

산업시설에서 위험도를 수치화하는 방법은 크게 위험성 지수(risk index), 개인적 위험도(individual risk) 및 사회적 위험도(societal risk) 형태로 구분할 수 있다[10]. 위험성 지수는 단순한 표시를 산출하는 하나의 숫자 또는 도표이며 개인적 위험도는 사고의 영향권 내에 있는 개인의 위험성을 고려하고 사회적 위험

도는 사고의 영향권 내에 있는 인구에 미치는 위험성을 고려한다.

5.1. 개인적 위험도

개인적 위험도는 위험시설의 인근에 있는 개인에게 미칠 수 있는 위험성으로 정의하며, individual risk contour는 개인적 위험성의 지리적 분포를 표시하는 방법이다[14].

국제 화재방지협회(NFPA: national fire protection association)[15]의 위험도 기준을 활용하여 개인적인 위험도의 허용 여부를 판단할 수 있는 위험도를 Table

Table 8. Criteria for tolerability of individual risk (IR)

Classification	Individual risk	Remarks
Zone 1	$IR \leq 1.0E-05/year$	Not permitted: Residential, office, and retail Permitted: Occasionally occupied developments(e.g., pump houses, transformer stations)
Zone 2	$1.0E-06/year \leq IR \leq 1.0E-05/year$	Not permitted: Shopping centers, large-scale retail outlets, etc Permitted: Work places, retail and ancillary services, residences in areas of 28 to 90 persons/hectare density
Zone 3	$3.0E-07/year \leq IR \leq 1.0E-06/year$	Not permitted: Churches, school, hospitals, major public assembly area, and other sensitive establishment Permitted: All other structures and activities

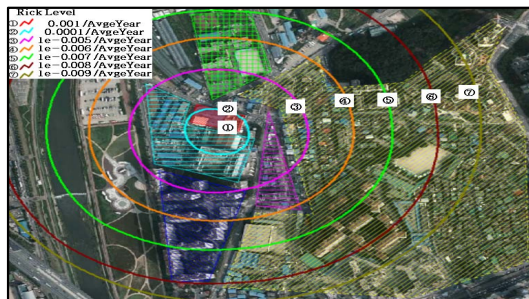


Fig. 9. Individual risk contour for ammonia refrigeration system

8에 타내었다. Zone 1은 $IR \leq 1.0E-05/year$ 이 기준이며 Zone 2는 $1.0E-06/year \leq IR \leq 1.0E-05/year$ 이고 Zone 3은 $3.0E-07/year \leq IR \leq 1.0E-06/year$ 로 나타났다.

본 연구에서는 암모니아 냉동시스템에 인구분포를 적용하여 개인적 위험도를 계산하였다. Fig. 9에 개인적 위험도를 ①에서 ⑦의 위험수준을 등고선으로 나타내었다. 개인적 위험도는 $7.71E-04/yr$ 로 계산되었으며 NFPA의 허용 가능한 범위를 초과하는 것으로 나타났다.

5.2. 사회적 위험도

유해화학물질을 다량으로 생산, 취급하는 시설은 사고발생 시 많은 사람들에게 피해를 줄 수 있다. 이와 같이 대규모 인구 집단이 피해를 입을 수 있는 위험성을 나타내는 것이 사회적 위험도이다. 사회적 위험도를 표현하기 위해서는 피해예측결과 및 사고발생 빈도 자료와 주변의 인구분포 및 낮과 밤에 따른 인구의 이동형태와 같은 사회적 데이터가 필요하다. 사회적

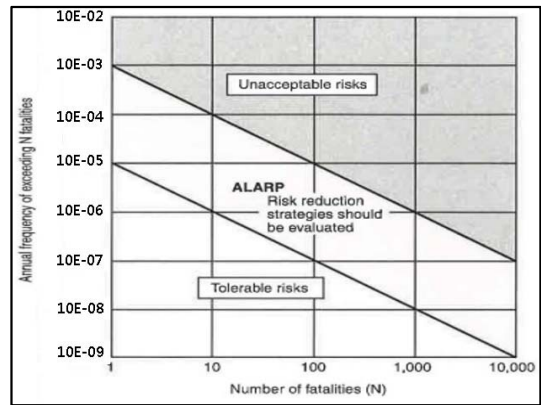


Fig. 10. Acceptability regions for societal (injury) risk

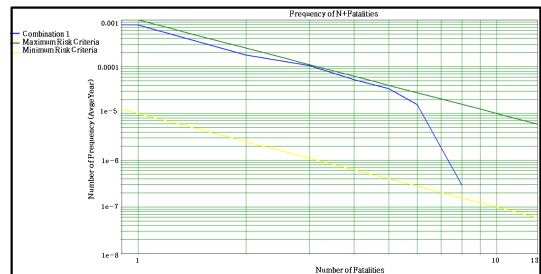


Fig. 11. FN curve for ammonia refrigeration system.

위험도 산정을 위해 앞의 Table 2에서 가정한 인구수를 이용하였다.

또한 사회적 위험도의 허용 여부를 판단하기 위한 기준을 정하기 위해 Fig. 10에 나타낸 미국 전국방화협회(NFPA)[15]의 위험도 기준을 활용하였다.

NFPA에서는 다음과 같은 기준을 제시하고 있다.

- (1) Unacceptable : $1 \times 10^{-03}/\text{year}$ 및 $1 \times 10^{-07}/\text{year}$
- (2) Acceptable : $1 \times 10^{-05}/\text{year}$ 및 $1 \times 10^{-09}/\text{year}$
- (3) ALARP region은 unacceptable 및 acceptable region의 중간 영역

위의 위험도 기준을 사용하여 SAFETI를 통해 사회적 위험도를 도출하였고 그 결과를 Fig. 11에 나타내었다. 암모니아 시스템 내 리시버의 사회적 위험도는



Fig. 12. Individual risk contour for ammonia refrigeration system.

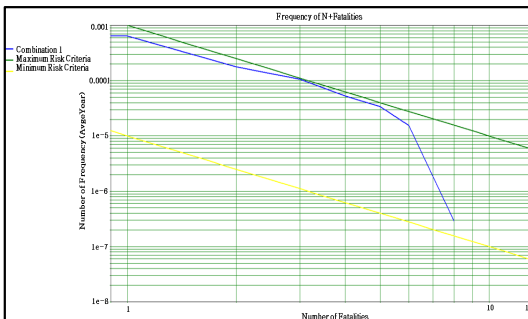


Fig. 13. FN curve for ammonia refrigeration system.

$1.17\text{E-}03/\text{yr}$ 로 계산되었으며 결과 값은 낮과 밤의 위험도 값을 종합한 결과이며, 사회적 위험도는 NFPA의 허용 가능한 범위에 포함되는 것으로 나타났다.

5.3. 위험도 활용방안

암모니아 냉동시스템의 위험도 분석결과를 바탕으로 위험도를 낮추기 위한 방안을 모색하였다. 그 방안으로 사고영향범위를 감소시키거나 사고가 발생하는 빈도를 감소시키는 방법 등이 있다. 본 연구에서는 위험도 감소시키기 위한 방법으로 누출 포인트 감소방안을 제시하였으며 다음과 같은 결과를 도출하였다. 개인적 위험도 산정결과를 등고선을 이용하여 Fig. 12에 나타내었다. 위험도 감소방안 전·후의 개인적 위험도는 각각 $7.71\text{E-}04/\text{yr}$ 및 $7.06\text{E-}04/\text{yr}$ 로 산정되었으며 NFPA의 허용 가능한 범위를 초과하는 것으로 나타났다.

사회적 위험도 산정 결과를 Fig. 13에 나타내었다. 위험도 감소방안 전·후의 사회적 위험도는 낮과 밤의 위험도를 종합한 결과이며 각각 $1.17\text{E-}03/\text{yr}$ 및 $1.03\text{E-}03/\text{yr}$ 로 산정되었으며 NFPA의 허용 가능한 범위에 포함하는 것으로 나타났다.

VI. 결론

냉동제조시설에서 암모니아 냉동시스템에 대한 위험도 분석을 실시하고 그에 따른 활용방안을 제시하고자 본 연구를 수행하고 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

(1) 암모니아 냉동시스템 내 리시버의 누출 포인트 감소 전·후의 각각 개인적 위험도는 $7.71\text{E-}04/\text{yr}$ 및 $7.06\text{E-}04/\text{yr}$ 로 도출되었으며, NFPA의 위험도 기준 범위를 초과하였다.

(2) 암모니아 냉동시스템 내 리시버의 누출 포인트 감소 전·후의 각각 사회적 위험도는 $1.17\text{E-}03/\text{yr}$ 및 $1.03\text{E-}03/\text{yr}$ 로 도출되었으며, NFPA의 ALARP 영역 내에 포함되었다.

(3) 또한 위험도 감소시키는 방안으로 누출 포인트 감소방안 외에도 수동적 완화장치 및 능동적 완화장치를 제안함으로써 사고 발생 빈도 및 위험도를 낮추는데 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구에서는 암모니아 냉동제조시설에서 사고가 발생할 경우 개인적 위험도와 사회적 위험도를 산정하는 방법을 제시하였으며, 이와 유사한 사고 발생할 경우 사고의 범위와 피해 규모를 최소화하는 방안이 활용된다면 사고예방에 도움이 될 것이라고 판단된다.

REFERENCES

- [1] Ju, H. S., Lee, Y. S., Im, O. J., and Yu, J. M., "Through a risk assessment of chemicals spills industrial complex environmental impact assessment studies Improvement", Korea Environment Institute, (2013)
- [2] National Institute Chemical Safety, "Chemical Safety and Hazard status", (2014)
- [3] Ministry of Trade, Industry and Energy, "Gas Safety Management" , (2014)
- [4] Park, S. W., and Jeong, S. H., "Damage and evacuation distance range Prediction of Ammonia leak in the refrigeration system", Theory and Application of Chemical Engineering, Vol 21, No. 1, (2015)
- [5] GAPS Guidelines, "AMMONIA HAZARDS", A Publication of Global Asset Protection Services LLC,(2015)
- [6] National Institute Chemical Safety, "Technical guidelines for selecting accident scenarios", <http://nics.me.go.kr/>, (2014)
- [7] Centre for Chemical Process Safety (CCPS), "Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis", American Institute of Chemical Engineers, New York, 2nd Edition, (2000)
- [8] Louvar, J.F., and Louvar, B.D., "Health and Environmental Risk Analysis: Fundamentals with Applications", (1998)
- [9] CCPS, "Guidelines for Consequence Analysis of Chemical Releases", WILEY, (1999)
- [10] Seong, D. H., "A Study on the way of creating hazard Risk Contour facilities", Hoseo University, (2012)
- [11] International Association of Oil & Gas Producers, "Process release frequencies, Report No. 434-1, Risk Assessment Data Directory of Oil & Gas Producers", OGP, (2010)
- [12] Committee for the Prevention of Disaster, "Guidelines for Quantitative Risk Assessment, 'Purple book', CPR 18E" CPR, (2005)
- [13] Lees, F.P., "Loss Prevention in the Process Industries", 2nd Edition, Butterworths-Heinemann, (1996)
- [14] Gwon, H. M., Seong, D. H., Kim, J. H., Im, D. S., Kim, K. Y., Pyeon, M. W., Moon, I., Go, J. U., Lee, Y. S., and Yoon, I. S., "A great comprehensive risk management system for industrial accidents Study on Construction (IRMS)", Journal of the KIIS, Vol. 18, No. 3, (2003)
- [15] NFPA 59A, "Standard for the Production, Storage, and Handling of Liquefied Natural Gas (LNG)," National Fire Protection Association, (2013)