

## 위험도 평가를 통한 사고대비물질별 규정수량 고찰

안광재 · 김정욱 · 이근원\* · 정승호\*†

아주대학교 환경공학과  
16499 경기도 수원시 영통구 월드컵로 206  
\*아주대학교 환경안전공학과 교수

16499 경기도 수원시 영통구 월드컵로 206  
(2022년 6월 14일 접수, 2022년 7월 12일 수정본 접수, 2022년 7월 14일 채택)

## Consideration on the Regulated Quantity of Preparation for Accidents by Risk Assessment

Gwangjae Ahn, Jungwook Kim, Keunwon Lee\* and Seungho Jung\*†

Department of Environmental Engineering, Ajou University,  
206 World cup-ro, Yeongtong-gu, Suwon-si, Gyeonggi-do, 16499, Korea

\*Department of Environmental and Safety Engineering, Ajou University,  
206 World cup-ro, Yeongtong-gu, Suwon-si, Gyeonggi-do, 16499, Korea

(Received 14 June 2022; Received in revised from 12 July 2022; Accepted 14 July 2022)

### 요 약

화학물질관리법에서 장외영향평가서 및 위해관리계획서를 화학사고예방관리계획서로 일원화하는 제도가 시행되었다. 화학사고예방관리계획서에서 다루는 유해화학물질 중 사고대비물질은 화학사고의 발생 가능성이 높거나 화학사고가 발생한 경우에 그 피해 규모가 클 것으로 우려되는 화학물질로서 지정하고 있다. 본 연구에서는 사고대비물질별 규정수량 기준에 따른 위험도를 비교하고자 상위/하위 규정수량이 비슷한 화학물질을 특정하여 동일한 사고 시나리오를 선정하고 위험도 평가를 실시하였다. 연구대상물질은 암모니아, 염화수소, 이황화탄소, 벤젠 등 총 4종의 물질을 선정하였으며, DNV사의 정량적 위험성 평가 프로그램인 Safeti 8.0을 활용하여 위험도를 비교 분석하였다. 그 결과, 비슷한 상위/하위규정수량임에도 불구하고 상대적으로 높은 위험도를 가지고 있는 물질을 확인할 수 있었다.

**Abstract** – In the Chemicals Control Act, a system was implemented to unify off-site risk assessment and risk management plan into the prevention and management system for chemical accidents. Among the hazardous chemicals which have been covered in system, the accident preparation substances are designated as chemical substances that are likely to occur and of which damage scale are likely to be large in the event of chemical accidents. In this study, risks were compared by selecting accident preparation substances with similar regulated quantities. In addition, risk assessment studies were conducted applying the accident scenarios. Four types of materials such as ammonia, hydrogen chloride, carbon disulfide and benzene were selected for the study, and risks were finally analyzed using Safeti 8.0, a quantitative risk assessment program by DNV. As a result, some materials are identified to have high risks comparing to other substances having similar regulated quantities.

Key words: Accident preparation substances, Regulated quantity, Risk assessment, SAFETI

### 1. 서 론

국내 화학물질 사용량이 증가함에 따라 화학물질 사고 역시 빈번하게 발생하고 있는 추세이다. 2016년 기준 보고된 화학물질의 중

류만 17,000여종에 달하며 유통량 또한 5억5천만톤을 넘어서고 있다. 화학물질 사고는 2014년부터 2021년까지 적게는 58건, 많게는 114건까지 매년 꾸준히 발생하고 있다. 이는 아래 Fig. 1과 Table 1에서 확인할 수 있다[1,2].

특히 2012년 발생한 구미 불산 누출사고로 인해 대중들에게도 화학물질 사고의 심각성이 알려지게 되었다. 이에 기존 「유해화학물질관리법」을 「화학물질관리법(이하 화관법)」으로 개정하여 화학물질을 체계적으로 관리하고, 유해화학물질의 취급 기준을 강화하였다. 화관법은 화학물질로부터 국민의 건강 및 환경상의 위해를

†To whom correspondence should be addressed.

E-mail: processsafety@ajou.ac.kr

‡이 논문은 광운대학교 교재교육 교수님의 정년을 기념하여 투고되었습니다.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

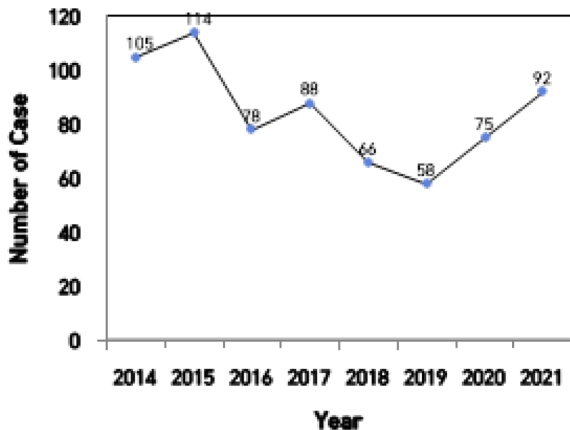


Fig. 1. Statistics of chemical accidents in 7 years.

예방하고 화학물질 사고에 신속히 대응하는 것을 목적으로 하고 있다. 화관법상 유해화학물질은 유독물질, 허가물질, 제한물질 또는 금지물질, 사고대비물질 등으로 구분되어있다.

이 중 사고대비물질은 화학사고의 발생 가능성이 높거나 화학사고가 발생한 경우에 그 피해 규모가 클 것으로 우려되는 화학물질로서 지정하고 있다[3].

또한, 화관법에서는 유해화학물질 취급시설을 설치, 운영하려는 자에게 사전에 화학사고예방관리계획서를 작성하게 하도록 하고 있다. 화학사고예방관리계획서란 기존 장외영향평가서 및 위해관리계획서의 제도 중복으로 인한 사업장의 부담을 완화하고, 유해화학물질 취급량, 취급형태에 따라 작성수준 구분 및 이행 수준을 차등화하는 제도이다.

제출대상 및 작성수준을 판단하는 수량 기준은 상위규정수량(Upper Tier, UT)과 하위규정수량(Lower Tier, LT)으로 구분되어 있다. 규정수량의 산정 기준은 사업장 단위로 각 물질별 취급시설에서 최대 채류할 수 있는 양의 합으로써 최대채류량이 상위규정수량 이상일 경우 1군 사업장, 하위규정수량 이상 상위규정수량 미만일 경우 2군 사업장, 하위규정수량 미만일 경우 면제 대상이 된다. 1군에서는 기본정보, 장외평가정보, 내·외부 비상대응계획, 지역사회 고지 등을 포함하여 제출하여야 하며 2군은 1군 제출 서류 중 외부 비상대응계획, 지역사회 고지 등은 제외된다[4].

EU의 SEVESO III Directive(이하 세베소지침)와 영국의 COMAH(Control of Major Accident Hazards, 2015)의 기준들이 화학사고 예방관리계획서 규정수량 기준의 선행연구가 되었다. 세베소지침

은 사업장의 규정량에 차이를 두어 대량 취급업체를 상위계층으로, 소량 취급업체를 하위계층으로 구분하여 관리하고 있다. 영국의 COMAH 또한 상위계층, 하위계층으로 구분하여 관리하고 있으며, 건강 위험성(H), 폭발성, 인화성, 산화성 등의 물리적 위험성(P), 환경 위험성(E), 기타(O)로 분류한 4개 물질군과 48개의 물질로 분류한 규정량 이상의 사업장에게 안전보고서를 제출하게 하도록 되어 있다[5].

화학사고예방관리계획서의 규정수량 기준은 물질의 유해성·위험성을 고려한 GHS(Globally Harmonized System of Classification and domestic Chemicals)를 기반으로 선정하고 있으며 소량기준에 한정하여 영향범위 분석 및 사고시나리오가 적용되고 있을뿐, 규정수량 기준 선정에 대해서는 사고 시나리오의 관점이 고려되지 않고 있다. 사고 시나리오란 화재, 폭발 및 유출·누출 사고로 인하여 보호대상에 영향을 줄 수 있는 모든 시나리오를 말한다. 사고대비물질은 특히 화재, 폭발 등의 화학사고가 일어날 가능성이 큰 물질이므로 규정수량을 선정함에 있어 사고시나리오의 적용은 필요하다.

본 연구에서는 사고대비물질별 규정수량 기준에 따른 위험도를 비교하고자 상위/하위 규정수량이 비슷한 암모니아, 염화수소, 이황화탄소, 벤젠 등 총 4종의 화학물질을 선정하였다. DNV사의 정량적 위험성 평가 프로그램인 Safeti 8.0을 활용하여 연구를 진행하였다. 사고대비물질들에 동일한 사고시나리오를 적용하여 위험도를 비교하고, 분석 결과를 바탕으로 사고대비 물질별 규정수량에 대해 고찰하였다.

## 2. 연구대상 및 방법

### 2-1. 연구대상 물질 선정

본 연구에서는 유해화학물질 중 사고대비물질로서 암모니아, 염화수소, 벤젠, 이황화탄소 등 총 4종의 액체상태로 저장된 유독물질을 선정하였다. 해당 물질의 특성은 Table 2와 같다.

해당 물질은 화관법상 사고대비물질로써 화학물질 중에서 급성독성·폭발성 등이 강하여 화학사고의 발생 가능성이 높거나, 화학사고가 발생한 경우에 그 피해 규모가 클 것으로 우려되어 화학사고 대비가 필요하다고 인정되는 물질로 지정되고 있다. 또한 해당 물질은 산업안전보건법상 관리대상 유해물질로 지정되어 있으며, 관리대상 유해물질이란 근로자에게 상당한 건강장해를 일으킬 우려가 있어 건강장해를 예방하기 위한 보건상의 조치가 필요한 물질을 말한다[6].

연구대상 물질로 선정한 4종의 유독물질은 모두 화관법상 사고

Table 1. Chemical substances statistics survey

Year	1998	2002	2006	2010	2014	2016
Reported Chemicals	8,030	9,358	14,604	15,840	16,150	16,874
Number of reporting companies	13,052	13,773	16,404	16,547	22,661	21,911
Circulating Supply(million tons)	175.4	287.4	417.9	432.5	496.9	558.6

Table 2. Physical and chemical properties of selected chemicals

Properties	UT (ton)	LT (ton)	Molecular Weight (g/mol)	Boiling Point (°C)	Melting Point (°C)	Density (kg/m <sup>3</sup> )
Hydrogen Chloride	40	5	36.46	-85.05	-114.2	1.49
Ammonia	40	2	17.03	-33.34	-77.73	0.73
Carbon Disulfide	20	2	76.14	46.3	-110.8	1.26
Benzene	20	2	78.11	80.1	5.5	876

Table 3. Facility frequency by accident scenario

Initiating Event	Frequency
Pressure vessel failure	$1 \times 10^{-6}$
Piping Rupture failure	$1 \times 10^{-5}$
Piping leak	$1 \times 10^{-3}$
Atmospheric tank failure	$1 \times 10^{-3}$
Gasket/Packing blowout	$1 \times 10^{-3}$
Turbine/diesel engine overspeed with breach	$1 \times 10^{-3}$
Safety valve open spuriously	$1 \times 10^{-2}$
Cooling water failure	$1 \times 10^{-1}$
Unloading/loading hose failure	$1 \times 10^{-2}$
Small external fire	$1 \times 10^{-2}$

대비물질로써 사고의 발생 가능성이 높고, 사고가 발생했을 시 피해 규모가 클 것으로 우려되는 물질이다. 또한 상위/하위 규정수량 기준이 비슷한 물질로써 동일한 사고시나리오를 적용하여 위험도 평가를 진행했을 시 물질들간에 상대적인 위험도 비교를 하고자 한다.

## 2-2. 사고 시나리오 선정

벤젠, 암모니아, 염화수소, 이황화탄소 등 총 4종 물질의 상위, 하위 규정수량을 저장량으로 설정하여 탱크 파열 및 배관 파열로 인한 물질의 누출 및 확산 상태를 사고 시나리오로 선정하였다. 사고 시나리오의 빈도는 ‘화학사고예방관리계획서 작성등에 관한 규정’에 따라 설정하였다.

저장 온도는 -5 °C, 10 °C, 25 °C, 40 °C 4가지 경우로 설정하였으며, 벤젠의 경우 어는점이 5.5 °C 이므로 저장온도를 10 °C, 25 °C, 40 °C 3가지 경우로 설정하였다. 공정압력은 암모니아와 염화수소는 설정 온도에 따라 기체·액체 평형을 이루는 압력, 벤젠과 이황화탄소는 상압으로 설정하였다. 사고대비물질의 특성상 다른 조건들은 최악의 시나리오 조건으로 보수적으로 선정하였다. 대기 조건은 초당 1.5 m의 풍속, 대기안정도는 “F”로 선정하였으며, 누출 시간은 저장설비에서 보유한 최대의 양이 10분 동안 모두 누출되어 화학사고를 일으키는 것으로 가정하였다. 누출속도는 각 물질의 저장량에 비례하므로 규정수량이 40 ton인 물질은 66.67 kg/s, 20ton인 물질은 33.33 kg/s, 5ton인 물질은 8.33 kg/s, 2ton인 물질은 3.33 kg/s의 누출속도를 보인다.

인구밀도는 2021년 1분기 전국산업단지 현황 통계를 참고하여, 전체 고용 인구수(2,257,626 명)를 전체 면적(677,713,000 m<sup>2</sup>)으로 나눈 값인 3,334 명/km<sup>2</sup>으로 균일하게 산정하였다.

## 2-3. 연구 분석 방법

본 연구는 DNV사의 Safeti 프로그램을 사용하여 연구대상 물질로 선정된 총 4종의 사고대비물질의 위험도를 정량적으로 비교하여 규정수량을 고찰하고자 하였다.

위험도(Risk)란 사고가 발생할 빈도와, 사고로 인해 발생하는 피해영향의 결합으로 정의할 수 있다. 즉 이번 연구에서는 위험도(Risk)를 특정 사고가 발생할 확률(frequency)과 사고로 인해 발생하는 피해영향(consequence)의 곱의 총합으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{Risk}(\text{Avg Year}) = \sum_{i=1}^n (f_i \times N_i)$$

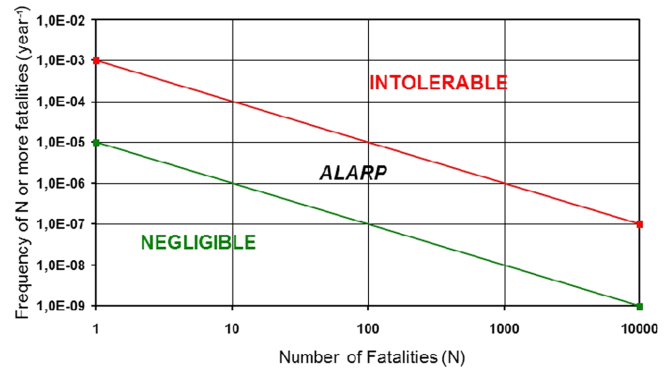


Fig. 2. The F-N curve.

여기서, Risk는 1/AvgYear의 단위를 가지며 물질별 상대적인 위험도를 비교하기 위한 정량적인 수치로,  $f_i$ 는 사고가 발생할 확률(frequency),  $N_i$ 는 사고로 인해 발생하는 피해 영향(consequence)으로 정의하였다.

이에 따라 연구대상 물질로 선정된 4종의 사고대비물질의 공정 온도별 상대적 위험도를 비교하고, 상위/하위 규정수량에 따른 상대적 위험도를 정량적으로 비교하였다. 이는 Safeti 프로그램 내에서 물질별로 독성, 화재, 폭발 등의 위험요소들을 공정조건에 따라 수치적으로 해석해주어 정량적인 수치로 나타낼 수 있다.

위험도는 F-N curve를 통해서도 확인할 수 있다. F-N curve에서 Y축에 나타내는 F(Frequency of N Fatalities [1/AvgYear])는 사고가 발생할 빈도를 1/AvgYear로 나타낸 값이고, X축에 나타내는 N(Number of fatalities)은 사고로 인해 발생하는 사망 또는 부상자의 수를 나타낸 값이다. F-N curve를 통해 사고가 발생할 확률과 사고로 인해 예상되는 피해의 정도를 인구밀도 등을 포함하여 정량적으로 평가하게 된다.

또한 이러한 수치들이 허용 가능한 범위의 위험도인지 일반적으로 허용불가영역(Intolerable), 조건부허용영역(ALARP : As Low As Reasonably Practicable), 허용영역(Negligible) 세 영역으로 나누어 구분한다. 일반적으로 ALARP 영역을 정량적 위험성평가 기준으로 많이 활용하고 있다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3-1. 상위/하위 규정수량 위험도 비교

연구대상 물질로 선정된 총 4종의 사고대비물질의 상위, 하위 규정수량을 저장량으로 하여 각 물질별 위험도를 공정온도 -5 °C, 1 °C, 25 °C, 40 °C 4가지 경우로 설정하여 비교하였으며 정량적 위험성 분석 프로그램인 Safeti 8.0 프로그램을 이용하여 위험도를 평가·분석하였다.

상위 규정수량을 저장량(20 ton/d ~ 40 ton/d)으로 했을 때가 하위 규정수량을 저장량(2 ton/d ~ 5 ton/d)으로 했을 때 보다 위험도가 높게 나타났으며, 그 중에서도 염화수소의 위험도가 전체적으로 가장 높게 나타났다. 또한, 상온·상압에서 성상이 기체인 염화수소와 암모니아의 위험도가 벤젠·이황화탄소보다 상대적으로 높게 나타났다.

온도에 따른 위험도는 염화수소와 암모니아가 -5 °C에서 가장 높게 나타났으며, 저장 온도가 증가함에 따라 위험도는 감소하였다.

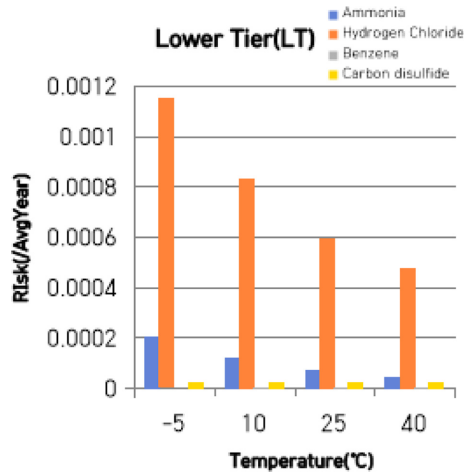


Fig. 3. Risk comparison chart of lower tier regulated quantity.

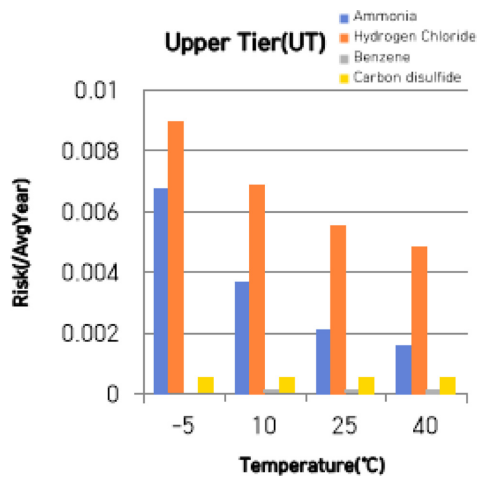


Fig. 4. Risk comparison chart of upper tier regulated quantity.

벤젠과 이황화탄소는 저장 온도 40 °C에서 위험도가 가장 높게 나타났으며, 저장 온도가 증가함에 따라 위험도가 증가하였다.

상위/하위 규정수량을 저장량으로 한 저장 온도별 위험도 비교는 아래 Fig. 3, 4와 같다.

물질마다 저장 온도에 따른 위험도가 다르므로 물질별 가장 높은 위험도(고위험도)를 통한 비교를 진행하였다. 이를 상위/하위 규정수량으로 나누어 비교한 데이터는 아래 Table 4와 같다.

고위험도 또한 상위 규정수량을 저장량으로 했을 때가 하위 규정수량을 저장량으로 했을 때 보다 높게 나타났다. 상위 규정수량, 하위 규정수량 모두에서 염화수소가 가장 높은 위험도를 보였으며,

Table 4. Comparison of high risk by material

	Material	High Risk (/AvgYear)
Lower Tier	Ammonia	$2.04 \times 10^{-4}$
	Hydrogen Chloride	$1.15 \times 10^{-3}$
	Benzene	$3.06 \times 10^{-6}$
	Carbon Disulfide	$2.49 \times 10^{-5}$
Upper Tier	Ammonia	$6.78 \times 10^{-3}$
	Hydrogen Chloride	$8.94 \times 10^{-3}$
	Benzene	$1.24 \times 10^{-4}$
	Carbon Disulfide	$5.38 \times 10^{-4}$

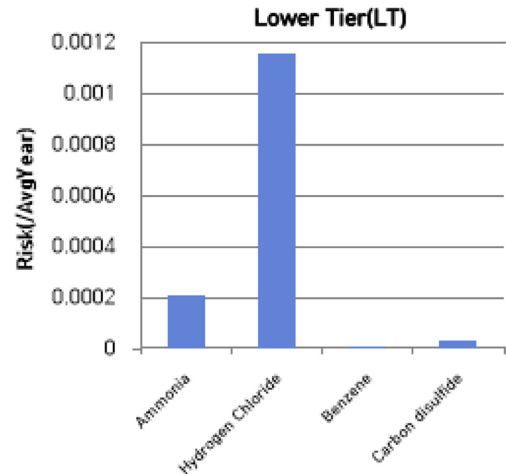


Fig. 5. High Risk comparison chart of Lower Tier regulated quantity.

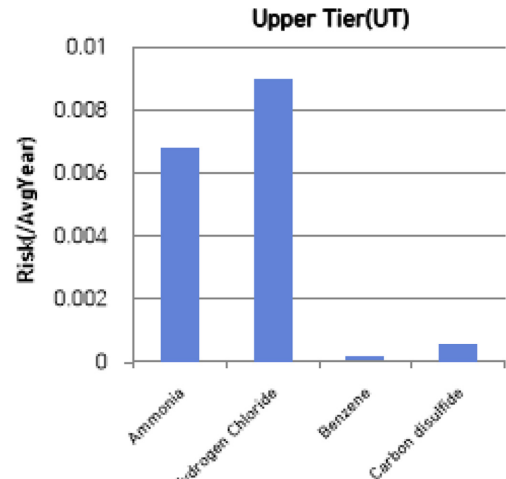


Fig. 6. High Risk comparison chart of Upper Tier regulated quantity.

벤젠이 위험도가 가장 낮게 나타났다. 고위험도 비교를 위한 정량적인 그래프는 아래 Fig. 5, 6과 같다. 가장 높은 위험도를 보인 염화수소의 정량적 수치는  $1.15 \times 10^{-3}/\text{AvgYear}$ 으로 다른 물질들과 비교했을 때 적게는 4배에서 많게는 300배 이상의 위험도 차이를 보였다.

### 3-2. F-N Curve 결과

F-N curve를 활용하여 각 물질별 위험도가 일반적으로 정량적 위험성 평가의 기준으로 삼는 ALARP 영역에 들어오는지 확인해 보고자 하였다. 이전과 동일하게 상위, 하위 규정수량을 저장량으로 하였고 저장온도 조건 중 가장 위험도가 높은 조건을 기준으로 하여 보수적인 F-N curve를 그려보았다.

하위 규정수량을 기준으로 한 F-N curve에서는 가장 높은 위험도를 보였던 염화수소와 상대적으로 위험도가 다소 높게 나타났던 암모니아가 ALARP 영역을 벗어났다. 그 중에서도 염화수소가 ALARP 영역을 보다 더 크게 벗어났다.

상위 규정수량을 기준으로 한 F-N curve에서는 하위 규정수량을 기준으로 한 F-N curve와 동일하게 염화수소가 ALARP 영역을 가장 크게 벗어났으며, 염화수소와 암모니아는 물론이고 추가적으로 이황화탄소까지 ALARP 영역을 벗어났다.



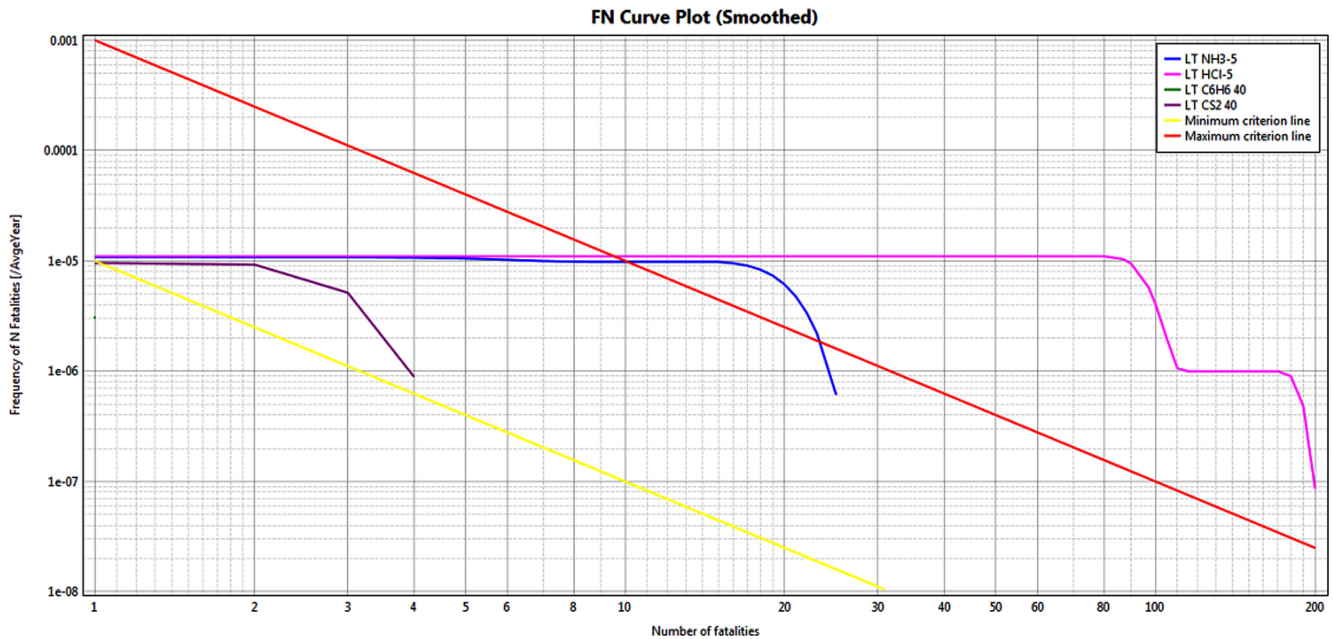


Fig. 7. The F-N curve of Lower Tier regulated quantity.

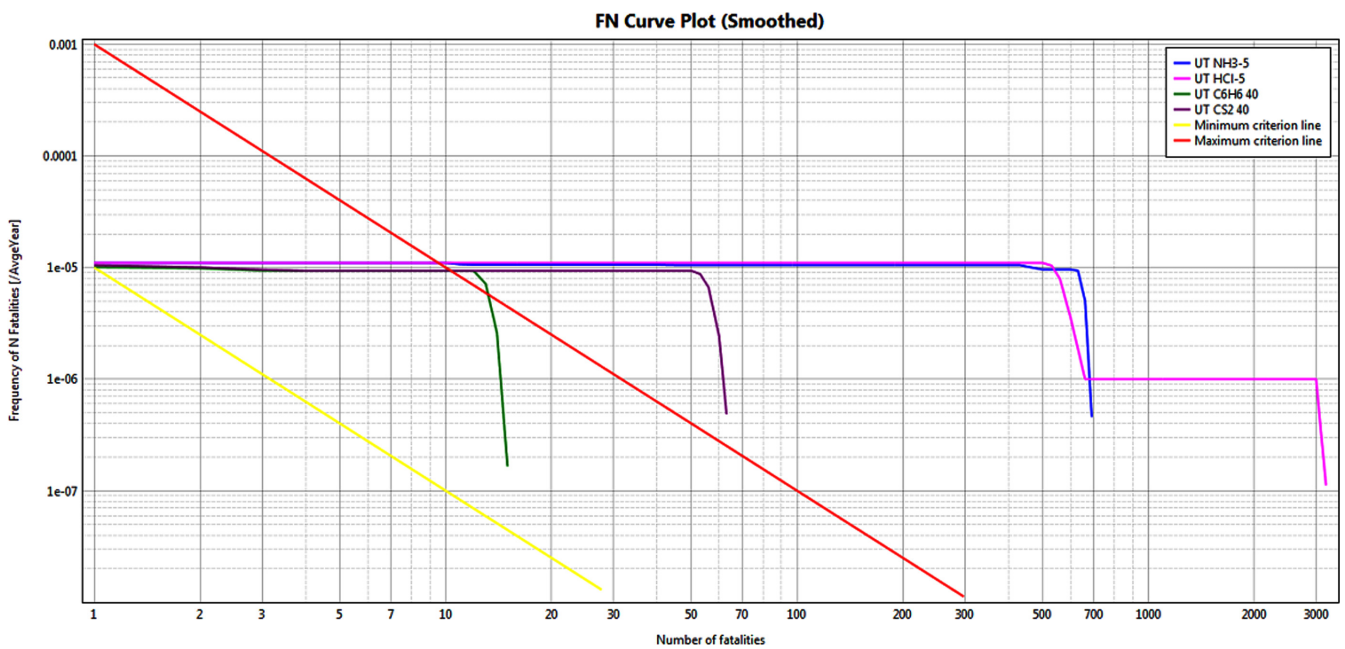


Fig. 8. The F-N curve of Upper Tier regulated quantity.

#### 4. 결 론

사고대비물질은 화학물질 중에서 급성독성·폭발성 등이 강하여 화학사고의 발생 가능성이 높거나, 화학사고가 발생한 경우에 그 피해 규모가 클 것으로 우려되어 화학사고 대비가 필요하다고 인정되는 물질로서 지정하고 있는데, 사고대비물질별 규정수량은 사고 시나리오를 적용하지 못하고 있는 실정이다. 그래서 본 연구에서는 동일한 사고시나리오를 선정하여 규정수량이 비슷한 사고대비물질들의 상대적 위험도를 비교하여 규정수량을 고찰하고자 하였다. 위험도 평가를 위해 정량적 위험성 전문 프로그램인 Safeti를 활용하였다.

상위규정수량을 저장량으로 설정하였을 때가 하위규정수량을 저장량으로 하였을 때 보다 비교적 위험도가 높게 나타났다. 물질별로는 염화수소가 가장 위험도가 높게 나타났으며, 암모니아, 이황화탄소, 벤젠 순이다. 규정수량이 비슷한 물질들을 선정하였음에도 물질별 위험도의 차이가 크게 나타났다.

F-N curve를 통해서도 위험도 평가를 실시하였다. 상위규정수량을 저장량으로 하였을 때는 염화수소, 암모니아, 이황화탄소 물질이 ALARP 영역을 벗어났고, 하위규정수량을 저장량으로 하였을 때는 염화수소, 암모니아 두가지 물질이 ALARP 영역을 벗어났다.

이번 연구를 통해 화학사고예방관리계획서의 규정수량 보완 및 검토에 대한 기초 연구자료로 활용할 수 있을 것이다. 또한, 더 많

은 사고대비물질의 위험도를 평가하여 상대적 위험도가 높은 물질, 즉 해당 연구에서 규정수량 기준이 비슷한 유독물질을 특정하였음에도 염화수소처럼 상대적 위험도가 높게 나타나는 물질들에 대한 규정수량 강화 및 보완에 대한 지속적인 연구가 필요하다.

## 감 사

이 논문은 2022년도 산업통상자원부의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(P0012787, 산업혁신인재성장지원사업).

## References

1. Ministry of Environment, "Chemical Substances Statistics Survey," *Press Release*, **1**, (2018).
2. National Institute of Chemical Safety, "Chemical Accident Case," (2021).
3. Park, J. K., Seo, Y. W. and Gan, S. Y., "Improvement of Chemical Accident Prevention System under the Chemical Substances Control Act," *Korea Environment Institute*. (2019).
4. National Institute of Chemical Safety, "An Introduction of Risk Management Plan System," (2021).
5. Lee, S. J., "A Study on the Advancement of Safety Management for Preventing Chemical Accidents," *Ph.D. Thesis*, Myongji University, Republic of Korea, 39-42(2020).
6. Park, E. W. et al., "A Study on the Establishment of the Criteria for Selection of Hazardous Substances Requiring Management in Occupational Safety and Health Act," *Journal of Korean Society of Occupational and Environmental Hygiene*, **24**, (2014).
7. Lee, D. J., Lyu, S. and Song, C. G., "Improvement Strategy for Management of Accident Preparedness Substances Causing Chemical Accidents," *Journal of the Korean Society of Safety*, **32**, 47-52(2017).
8. EU Seveso Directive III, 2012/18/EU, 2012.
9. Jo, G., Lee, I., Hwang, Y. and Moon, J., "A Study on the Simulation of Damage Distance for Toxic Substances Leakage," *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, **18**(4), 599-607(2017).
10. Lee, D. Y., "A Study on the Improvement of Risk Selection by Analyzing the Cases of Off-site Consequence Analysis," *Master Thesis*, University of Incheon, Republic of Korea(2019).
11. Cho, G. S., Lim, J. T., Han, J. W., Baek, E. S., Yu, W. J. and Park, K. S., "A Study on the Reasonable Estimation of Consequence of Chemical Release," *Journal of the Korean Institute of Gas* **24**(5), 20-28(2020).
12. Kim, H. D., Kim, H. L., Seo, C. M., Jun, J. W. and Park, K. S., "Evaluation of Adequacy of Upper and Lower Tier Qualifying Quantities for the Substance Requiring Preparation for Accidents," *Journal of the Korean Society of Safety*, **2**, 1017(2022).
13. Jae, S. K., "Study on the Consequence Effect Analysis & Process Hazard Review at Gas Release from Hydrogen Fluoride Storage Tank," *Society of Disaster Information*, **9**(4), 449-461(2013).
14. Woo, J. W., "Off-site Consequence Analysis for Hydrogen Fluoride Release from a Tank Container," *Korea Institute of Plant Engineering&Construction*, **14**(1), 81-85(2014).
15. Seo, M. S., "A Study on the Risk Criteria for Korea and Assessment Method of Societal Risk Using KORA," *Journal of Hazardous Materials*, **7**(1), 79-89(2019).

## Authors

**Gwangjae Ahn:** Master's course, Department of Environmental Engineering, Ajou University, Suwon 16499, Korea; agj0716@ajou.ac.kr

**Jungwook Kim:** Master's course, Department of Environmental Engineering, Ajou University, Suwon 16499, Korea; yhoo0412@ajou.ac.kr

**Keunwon Lee:** Professor, Department of Environmental and Safety Engineering, Ajou University, Suwon 16499, Korea; leekw0@ajou.ac.kr

**Seungho Jung:** Professor, Department of Environmental and Safety Engineering, Ajou University, Suwon 16499, Korea; processsafety@ajou.ac.kr