병렬 시스템 적용에 따른 장외영향평가 위험도 산정 방법 개선 Improvement of Risk Analysis of Off-site Risk Assessment by Parallel System

김민수 · 이은별 · 류태권 · 김재영 · 윤준헌[†]

Min-Su Kim · Eun-Byeol Lee · Taekwon Ryu · Jae-Young Kim · Junheon Yoon[†]

환경부 화학물질안전원 사고예방심사과

Department of Accident Prevention and Assessment,

National Institute of Chemical Safety, Ministry of Environment

(Received November 22, 2017; Revised February 13, 2018; Accepted April 3, 2018)

Abstract : The risk is expressed as consequence of damage multiplied by frequency of failure in the Off-site Risk Assessment (ORA) system. The installation of a safety devices reduce the risk by reducing the frequency of failure at the facility. A typical example of various safety devices of a chemical factory is application of a parallel structure. For example, if an extra pump is ready and only one of the two pumps is operating, the system will function normally. However, when analyzing risks in the ORA system, failure rate of parallel safety devices and repair time due to the failure are not reflected. This study was conducted to present modified equation that can calculate the probability of failure and risk by reflecting the failure rate and the repair time of the parallel structure safety devices, and to compared with the risk value according to the existing risk equation. As a result, more accurate probability of failure and risk can be calculated by using the modified equation. Also, it is found that the shorter the repair time due to the failure, the lower the probability of failure and risk. Therefore, in order to reduce the risk to an acceptable level and to obtain a low level of risk rating, it is important to carry out repair according to the failure promptly when establishing maintenance plans. This study suggested a more systematic and accurate risk analysis standard than ORA in the application of parallel structure safety devices. It is also expected to contribute to securing the safety of chemical facilities and at the same time, will lead to the development of the ORA system.

Key Words : *Off-site Risk Assessment, Parallel Structure, Failure Rate, Repair Time, Risk Analysis*

요약 : 장외영향평가 위험도는 사고피해크기와 사고발생빈도의 곱으로 표현하며, 안전장치의 설치에 해당설비의 사고발생 빈도를 감소시킴으로써 위험도를 감소시킨다. 이와 같은 화학시설의 다양한 안전장치 중 대표적인 경우가 병렬구조를 적용하는 것이다. 예를 들면 여분의 펌프가 준비되어 두 개의 펌프 중 어느 한 요소만 작동하면 시스템은 정상적으로 기능을 발휘하는 경우이다. 하지만 장외영향평가에서 위험도를 분석할 때에는 병렬구조 안전장치의 고장률 및 고장에 따른 수리기간이 반영되어 있지 않다. 따라서 본 연구는 병렬구조 안전장치의 고장률과 수리기간을 반영하여 고장 확률과 위험도를 산출할 수 있는 개선된 산정식을 제시하고, 기존의 위험도 산정식에 따른 결과 값과 비교·분석하였다. 그 결과 개선된 산정식을 적용할 경우 더 정확한 고장 확률과 위험도를 산출할 수 있었다. 또한 고장에 따른 수리기간이 짧을수록 고장 확률과 위험도가 낮게 산출됨을 알 수 있었다. 따라서 허용 가능한 수준으로 위험도를 감소하고 낮은 수준의 위험도 등급을 받기 위해서는 유지·보수 계획을 수립할 때 고장에 따른 수리를 신속하게 수행하는 것이 중요함을 알 수 있었다. 결론적으로 본 연구는 병렬구조 안전장치의 적용에 있어서 장외영향평가 보다 더 체계적이고 정확한 위험도 산정의 기준을 제시하였다. 이로써 화학시설의 안전성 확보에 기여함과 동시에 장외영향평가 제도 발전의 계기가 될 것으로 예상된다.

주제어 : 장외영향평가, 병렬구조, 고장률, 수리기간, 위험도 분석

1. 서론

화학물질은 인간의 생활수준 향상과 급진적 산업발전을 위해 광범위하게 사용되지만, 시설 노후화, 부주의, 안전인식 부재 등에 따라 화학물질을 취급하는 사업장에서는 누출·유출, 화재, 폭발 등의 화학사고가 발생하여 천문학적 인·물적 피해를 야기한다. 이에 정부에서는 유해화학물질, 위험물, 고압가스 등 물질 유형별로 화학 사고를 예방하고 피해규모를 줄이기 위한 안전관리 제도를 마련하여 관리되고 있다.

국내 안전관리 제도는 2012년 9월 발생한 구미 불화수소 누출사고를 시점으로 변화되었는데, 사고 이전에는 산업안

전보건법에 따라 화학사고로부터 사업장 부지 내 시설과 근로자 보호를 위한 공정안전보고서 작성·제출, 고압가스 안전관리법에 따라 고압가스 시설에 대한 안전성평가를 실시하여 종합적 안전관리를 확보하는 안전성향상계획서 작성·제출 등의 제도가 실시되고 있다. 하지만, 이들 제도는 유해화학물질 사고로 인한 사업장 외부의 환경 피해와 지역주민의 피해를 최소화하는 제도적 장치가 마련되어있지 않았다. 이에 환경부는 기존 유해화학물질관리법을 화학물질관리법으로 전면 개정하면서, 장외영향평가서 및 위해관리계획서 작성·제출, 취급시설 설치·관리기준 준수, 개인보호구 착용 등 훨씬 강화된 화학사고 예방·대응·수습과 사업장 내·외부의 안전관리를 위한 제도적 장치를 마

[†] Corresponding author E-mail: soiljh@korea.kr Tel: 042-605-7040 Fax: 042-605-7065

련하게 되었다.¹⁾

특히, 장외영향평가 제도는 사업장 밖의 주민, 근로자 및 환경에 주는 피해를 최소화할 수 있도록 안전 개념에 따라 시설을 설계·설치하였는지 심사·평가하는 일련의 과정이다. 이에 따라 유해화학물질 취급시설 설치·운영자는 화학사고로부터 사업장 외부에 미치는 영향을 평가하고 그 피해범위와 위험도를 분석한 장외영향평가서를 제출하여야 한다. 장외영향평가 결과가 적합한 경우 판정되는 위험도 등급은 취급시설의 안전진단 주기와 연동된다. 즉, 고위험도 시설은 매 4년, 중위험도 시설은 매 8년, 저위험도 시설은 매 12년 주기로 안전진단을 실시한다.¹⁾ 따라서 유해화학물질 취급시설 설치·운영자는 허용 가능한 수준으로 위험도를 감소시키거나, 위험도 등급을 낮추기 위한 대책을 강구하는 측면이 중요한 부분으로 요구된다. 장외영향평가의 위험도는 사고피해크기와 사고발생빈도의 곱으로 정의하고 있는데, 사고피해크기를 줄이거나 사고발생빈도를 줄이는 방법으로 위험도를 감소시킬 수 있다.

안전장치는 해당설비가 정상적인 작동에 실패하는 경우에 작동하여 사고발생을 예방하기 위한 시스템이다. 따라서 장외영향평가에서는 위험도 감소의 한 가지 방법으로 안전장치를 설치하여 사고발생빈도를 감소시키는 것을 인정하고 있다. 여기서 설비를 병렬구조로 설치하는 방법은 화학시설의 안전장치 중 대표적으로 적용되는 사례이다. 예를 들면 여분의 펌프가 추가로 준비되어 두 개의 펌프 중 어느 한 요소만 작동하면 시스템은 정상적으로 기능을 발휘하는 경우이다. 하지만 장외영향평가 위험도 산정 시 병렬구조 안전장치의 고장률 및 고장에 따른 수리기간은 반영되어 있지 않아, 보다 정확한 위험도 산정을 위한 개선 방법이 필요하다.

따라서 본 연구는 장외영향평가 측면에서 병렬 시스템 적용에 따른 개선된 위험도 산정식을 제시하고, 기존의 장외영향평가 위험도 산정 방법에 따른 결과 값과 비교·분석하였다. 이를 통하여 장외영향평가 제도에서 법적 의무사항인 위험도 등급을 더 정확하게 결정할 수 있는 방법을 마련하고, 사업장의 체계적인 위험도 관리와 안전성 확보에 활용할 수 있는 근거를 제시하고자 하였다.

2. 연구방법

2.1. 연구대상 선정

이 연구에서는 풀화재(Pool fire)와 독성물질 누출에 해당하는 시나리오를 평가하기 위하여 국내 유통량이 많고 사고가 빈번하게 발생되는 물질인 톨루엔 및 암모니아를 선정하였다. 톨루엔은 사업장에서 주로 화학물질을 합성하는 주원료로 사용되며, 용매로서도 광범위하게 사용되고 있는 유해화학물질로서 환경부에서 보고된 2014년 화학물질 통계조사에 따르면 국내 유통량은 3,432 천톤에 이른다.²⁾ 또한, 높은 인화성을 나타내어 화재, 폭발 등의 화학사고가 빈번하

게 발생하는 물질로서, 최근 화학물질안전원에 신고된 화학사고 건수는 2015년에 5건, 2016년에는 5건으로 보고된 바 있다.³⁾ 암모니아는 비료, 냉매, 의약품, 폭약, 합성 섬유, 염료, 금속표면 처리 등의 다양한 용도로 사용되는 유해화학물질로서 2014년 화학물질 통계조사⁶⁾에 따르면 국내 유통량은 1,128 천톤으로 보고된 바 있으며,²⁾ 높은 독성을 나타내는 사고다발물질로서, 최근 화학물질안전원에 신고된 화학사고 건수는 2015년에 7건, 2016년에는 9건으로 보고된 바 있다.³⁾ 이에 본 연구에서 대상물질로 선정한 톨루엔은 인화성을 나타내므로 풀화재로 인한 시나리오로 선정하였고, 암모니아는 독성물질 누출 시나리오로 선정하였다.

2.2. 풀화재 시나리오 분석(톨루엔)

해당 공정은 원료인 톨루엔 및 기타 화학물질을 반응기에서 반응시켜 제품을 제조한 후 반응기 하단의 배출밸브를 통하여 화학제품을 회수하는 공정이며, 공정배관계장도(Piping and Instrument Diagram, P&ID) 및 시나리오 구간은 Fig. 1과 같다. 시나리오 구간은 장외영향평가의 위험도 분석을 위한 구간으로 해당 고정장치인 반응기를 중심으로 인입측 플랜지부터 토출측 펌프까지로 설정하였다. 이는 고정장치를 기준으로 사고발생 시 차단될 수 있는 구간을 기준으로 설정한 것이다. 안전장치는 반응기의 jacket에 냉각수를 계속 공급하기 위한 병렬구조의 펌프(P-101A/B)가 설치되어 있으며, 이 외에 가스검지기와 소화설비가 설치되어 있다. 본 시나리오는 냉각수 공급펌프가 고장으로 인하여 냉각수공급이 실패하여 폭발반응이 발생할 수 있는 상황을 대비하여 예비로 준비된 펌프가 작동하는 경우이다.

Scenario section

Fig. 1. P&ID and scenario section for toluene scenario.

Fig. 2. P&ID and scenario section for ammonia scenario.

2.3. 독성물질 누출 시나리오(암모니아)

해당 공정은 탱크로리를 통해 입고된 암모니아를 실내에 위치한 고압용기에 저장한 후 제조·사용 시설로 이송하는 공정이며, 공정배관계장도 및 시나리오 구간은 Fig. 2와 같다. 안전장치는 병렬구조의 안전밸브(PSV-102A/B)가 설치되어 있으며, 이 외에 가스검지기와 소화설비가 설치되어 있다. 본 시나리오는 고압용기에서 과압이 발생되어 안전밸브가 열려야 하는 상황에서 고장으로 열리지 않는 상황을 대비하여 예비로 준비된 안전밸브가 열리는 경우이다.

2.4. 장외영향평가 위험도 분석

장외영향평가의 위험도는 사고피해크기와 사고발생빈도의 곱으로 정의된다. 사고피해크기의 지표로 영향범위 내 주민 수를 적용하며, 사고발생빈도는 고장발생빈도를 적용한다.⁴⁾

$$\text{위험도} = \text{영향범위 내 주민 수} \times \text{사고발생빈도} \quad (1)$$

영향범위는 KORA (Korea Off-site Risk Assessment Supporting Tool) 프로그램을 사용하여 산출되었다. 영향범위

를 산출하기 위한 피해 기준은 독성농도, 복사열, 폭발 과압으로 구분되며, 영향범위가 산출되면, 영향범위 내 주민의 수를 적용하여 대안의 사고시나리오에 대하여 위험도를 분석하였다. 여기서 영향범위 내 주민 수는 해당 사업장내 근로자 수를 제외한 주민 수이므로 인근 사업장 근로자도 포함되었다.

2.4.1. 기본평가 정보

기본 평가정보는 장외 평가정보에서 위험도를 산정하기 위해 사전에 반드시 필요한 기초정보로 구성되며, 취급물질 정보는 Table 1, 취급시설 목록 및 명세는 Table 2와 같다.⁴⁾

2.4.2. 사고시나리오 및 영향범위

장외영향평가에서 사고시나리오는 최악의 사고시나리오와 대안의 사고시나리오로 구분된다. 최악의 사고시나리오는 저장용기 또는 배관 등에서 최대량이 화재·폭발이나 유출·누출되어 사람 및 환경에 미치는 영향 범위가 최대인 경우를 말하며, 대안의 사고시나리오는 현실적으로 발생 가능성이 높고 사람이나 환경에 미치는 영향이 사업장 밖까

Table 3. Evaluation condition of scenario

		Scenario	
		Worst	Alternative
Endpoint	Toxic concentration	ERPG-2	
	Thermal radiation	5 kW/m ² (40 s)	
	Explosive overpressure	1 psi	
Weather conditions	Wind speed	1.5 m/s	1 year average
	Temperate	25 °C	1 year average
	Humidity	50%	1 year average
	stability	F	D
Surface curvature		Urban or country	
Leak temp.		Operation temperate	
Leak point		Surface leak	Leak height
Leakage		Maximum	Realistic leakage
Leak duration		10 min	Realistic duration

Table 1. Chemical information

Chemical	CAS No.	State	Explosion		Toxicity	Flash point	Ignition point	Boiling point	Vapor pressure	Corrosivity
			LEL	UEL						
Toluene	108-88-3	Liquid	1.1%	7.1%	ERPG-2 (300 ppm)	6 °C	480 °C	111 °C	22 mmHg (20 °C)	none
Ammonia	7664-41-7	Liquid	15%	25%	ERPG-2 (150 ppm)	-	651 °C	-33 °C	7,510 mmHg (25 °C)	none

Table 2. List and specification of device

Device		Chemical	State	Connection information	Pressure		Temp.		Volume (m ³)		Material	Design standard
					Designed	Operating	Designed	Operating	Designed	Operating		
Reactor (R-101)	Shell	Toluene	Liquid	4"	0.35	ATM	90 °C	40 °C	35	28	A516-70	ASTM
	Jacket	Cooling Water	Liquid	2"	0.55	0.35	90 °C	32 °C	2.7	2.7	A516-70	ASTM
Tank (TK-102)		Ammonia	Liquid	0.25"	1.5	1.0	60 °C	AMB	35	28	A516-70	ASTM

Table 4. Consequence result table

Scenario	Temperature (°C)	Pressure (MPa)	Volume (kg)	Chemical	State	Leak hole (mm)	Leak rate (kg/s)	Distance (m)	
								Consequence	Off-site
R-101 (Pool fire)	40.0	0.0	24400	Toluene	Liquid	20.00	1.52	17	11
TK-102 (Toxic)	25.0	1.0	17020	Ammonia	Liquid	6.35	0.26	58	45

지 미치는 사고시나리오 중에서 영향범위가 최대인 사고시나리오를 말한다.⁴⁻⁷⁾ 각 사고시나리오의 평가조건은 Table 3과 같다.

KORA 프로그램을 이용하여 대안의 시나리오에 대하여 영향범위를 산정한 결과는 Table 4와 같다. 플화재 시나리오의 경우 피해반경은 해당 취급시설을 중심으로 한 영향범위로서 17 m로 산출되었으며, 장외거리는 해당 사업장 부지를 제외한 영향범위로서 11 m로 산출되었고, 영향범위 내 주민 수는 해당 사업장내 근로자 수를 제외한 주민 수로서 2명이 산출되었다. 독성물질 누출 시나리오의 경우 피해반경은 58 m로 산출되었으며, 장외거리는 45 m로 산출되었고, 영향범위 내 주민 수는 28명이 산출되었다.

2.4.3. 사고발생빈도 및 위험도 분석

장외영향평가의 사고발생빈도는 아래 식과 같이 주요기기의 고장빈도와 안전장치에 의한 안전성 향상도의 곱으로 산출된다.⁴⁾

$$\text{사고발생빈도} = \Sigma[\text{주요기기의 고장빈도} \times \text{안전성 향상도}] \quad (2)$$

여기서 주요기기의 고장빈도는 초기사고의 빈도(Frequency of initiating event, FIE) 값이 적용되고, 안전성 향상도는 Table 5 및 6에 정리한 수동적 및 능동적 독립방호계층(Independent protection layer, IPL)의 고장 확률(Probability of failure on demand, PFD)이 적용된다.⁸⁾ 따라서 장외영향평가에서 해당 설비의 사고발생빈도와 위험도는 다음과 같이 산정되었다.

$$\text{사고발생빈도} = \Sigma[\text{초기사고의 빈도} \times \text{PFD}] \quad (3)$$

$$\text{위험도} = \text{영향범위 내 주민 수} \times \Sigma[\text{초기사고의 빈도} \times \text{PFD}] \quad (4)$$

Table 5. PFD of active IPL

Division	IPL	contents	PFD
Active IPL	A-1	Detector and shut-off valve	Immediate detection and action at leak 1,00E-01
	A-2	Relief valve/ Rupture disc	Prevent from exceeding specified overpressure 1,00E-02
	A-3	Basic process control system	Basic process control system 1,00E-01
	A-4	Other active protection	Other active protection 1,00E-01

Table 6. PFD of passive IPL

Division	IPL	Contents	PFD
Passive IPL	P-1	Dike	Reduces the frequency of large consequences of a tank overflow 1,00E-02
	P-2	Underground drainage system	Reduces the frequency of large consequences of a tank overflow 1,00E-02
	P-3	Open vent (no valve)	Prevents overpressure 1,00E-02
	P-4	Fire proofing	Reduces rate of heat input 1,00E-02
	P-5	Blast wall/Bunker	Reduces the frequency of large consequence of an explosion 1,00E-03
	P-6	Inherently safety design	Reduce the consequences associated with a scenario 1,00E-02
	P-7	Flame arrestor	Eliminate the potential for flashback 1,00E-02
	P-8	Other passive protection	Other passive protection 1,00E-01

2.5. 병렬구조 안전장치에 따른 위험도 산정

장외영향평가에서 위험도를 분석할 때 병렬구조로 안전장치가 설치된 경우 고장률과 고장에 따른 수리기간이 반영되어 있지 않다. 따라서 이를 반영한 개선된 위험도 산정식을 제시하고, 기존의 장외영향평가 위험도 산정식에 따른 결과 값과 비교·분석하였다.

3. 연구결과

3.1. 개선된 위험도 산정식

화학시설의 위험도 분석에서 병렬구조로 설치된 안전장치는 매우 중요하고 특별한 경우이다. 예를 들면 여분의 펌프를 한 개 더 준비하여 두 개의 펌프 중 어느 한 요소만 작동하면 시스템이 기능을 발휘할 수 있도록 결합하는 경우이다. 하지만 장외영향평가에서 위험도를 분석할 때 병렬구조로 안전장치가 설치된 경우, 이에 대한 고장률과 고장에 따른 수리기간이 반영되어 있지 않다. 따라서 이를 반영하여 개선된 고장 확률과 위험도 산정식을 제시하고자 한다.

고장률이 λ 인 구성요소의 시간 t 에서 고장 확률($F(t)$, Probability of failure)과 신뢰도($R(t)$)는 식 (5) 및 (6)과 같다.^{9,10)}

$$F(t) = 1 - \exp(-\lambda t) \quad (5)$$

$$R(t) = 1 - F(t) = \exp(-\lambda t) \quad (6)$$

고장률이 동일한 두 요소 A, B가 병렬구조를 이룰 때의 신뢰도는 시스템 요구에 따라 달라진다. 만약 두 요소 A, B가 모두 작동되어야 하는 AND 논리 연결 구조로 이루어진 경우라면 신뢰도는 식 (7)과 같다.¹¹⁾

$$R_s = R_a \times R_b \\ = \exp(-2\lambda t) \quad (7)$$

만약 두 요소 A, B 중 하나의 요소만 작동이 되어도 충분한 OR 논리 연결 구조로 이루어진 경우라면 신뢰도는 식 (8)과 같으며, 고장 확률(PFDs)은 식 (9)와 같다.¹¹⁾

$$R_s = R_a + R_b - (R_a \times R_b) \\ = 2\exp(-\lambda t) - \exp(-2\lambda t) \quad (8)$$

$$PFD_s = 1 - R_s \\ = 1 - [2\exp(-\lambda t) - \exp(-2\lambda t)] \quad (9)$$

여분의 부품이 병렬구조로 설치된 경우의 고장 확률은 식 (9)가 적용되므로, 병렬구조 안전장치의 고장률을 반영한 개선된 위험도 산정식은 식 (9)를 식 (4)에 대입하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\text{위험도} = \text{영향범위 내 주민 수} \times \sum[\text{초기사고의 빈도} \times PFD_s] \\ = \text{영향범위 내 주민 수} \times \sum[\text{초기사고의 빈도} \times \{1 - (2\exp(-\lambda t) - \exp(-2\lambda t))\}] \quad (10)$$

식 (10)을 다시 살펴보면, 시스템에 고장이 발생할 수 있는 경우는 하나의 부품에 고장이 발생하여 수리중일 때 다른 부품에 고장이 발생하는 경우뿐이다.

따라서 고장에 따른 수리기간(t_r)의 신뢰도(R_{sr})는 식 (11)과 같다.¹¹⁾

$$R_{sr} = \exp(-\lambda t_r) \quad (11)$$

따라서 기존의 장외영향평가 위험도 분석에서 고려되고 있지 않은 병렬구조 안전장치의 고장률 및 고장에 따른 수리기간을 반영한 실제의 고장 확률(PFDsr)과 위험도는 식 (12) 및 식 (13)과 같다.¹¹⁾

$$PFD_{sr} = 1 - R_{sr} \\ = 1 - \exp(-\lambda t_r) \quad (12)$$

$$\text{위험도} = \text{영향범위 내 주민 수} \times \sum[\text{초기사고의 빈도} \times PFD_{sr}] \\ = \text{영향범위 내 주민 수} \times \sum[\text{초기사고의 빈도} \times \{1 - \exp(-\lambda t_r)\}] \quad (13)$$

3.2. 위험도 분석결과

3.2.1. 폴화재 시나리오 분석(톨루엔)

장외영향평가의 기존 위험도 산정 방법에서 여분의 펌프 고장 확률(PFD)은 Table 5의 [A-4]값인 1.00E-01을 적용한다. 하지만 개선된 고장 확률 산정식 (12)에 따라 여분의 펌프 고장 확률(PFDsr)은 다음과 같이 계산된다. 여기서 여분의 펌프 고장 확률을 산출하기 위한 고장률 Data와 평균 수리기간은 Table 7과 같이 조사되었다.¹²⁾

$$PFD_{sr} = 1 - \exp(-\lambda t_r) \\ = 1 - \exp(-9.87E-01 \times 8.36E-02) = 7.91E-02$$

기존 장외영향평가의 산정식 (4)에 따라 산출한 위험도와 여분의 펌프 고장 확률(PFDsr)을 반영하여 개선된 산정식 (13)에 따라 산출된 위험도를 비교한 결과는 Table 8과 같다. 냉각수 공급실패로 인한 초기사고의 빈도가 1.00E-01인 경우 기존 방법에 따르면 여분의 펌프 고장 확률로 1.00E-01을 적용하여 사고발생빈도는 1.00E-02으로 산정되지만, 개선된 방법에 따르면 여분의 펌프 고장 확률은 7.91E-02을 적용하여 사고발생빈도는 7.91E-03으로 산정된다. 따라서 여분의 펌프가 준비된 경우 개선된 산정식에 따른 고장 확률은 고장률과 수리기간이 반영되며, 수리기간에 따라 고장 확률이 달라질 수 있으므로 보다 더 정확한 고장 확률과 사고발생빈도를 산정할 수 있다.

3.2.2. 독성물질 누출 시나리오(암모니아)

장외영향평가의 기존 위험도 산정 방법에서 여분의 안전밸브 고장 확률(PFD)은 Table 5의 [A-2]값인 1.00E-02을 적용한다. 하지만 개선된 고장 확률 산정식 (12)에 따라 여분의 안전밸브 고장 확률(PFDsr)은 다음과 같이 계산된다. 여기서 여분의 안전밸브 고장 확률을 산출하기 위한 고장률 Data와 평균 수리기간은 Table 7과 같이 조사되었다.¹²⁾

$$PFD_{sr} = 1 - \exp(-\lambda t_r) \\ = 1 - \exp(-2.10E-01 \times 1.78E-02) \\ = 3.74E-03$$

기존 장외영향평가의 산정식 (4)에 따라 산출한 위험도와 여분의 안전밸브 고장 확률(PFDsr)을 반영하여 개선된 산

Table 7. Failure rate and repair time for toluene and ammonia scenario

Scenario	Protection system	Failure rate		Repair time		Source	Comment
		Per hours	Per year	Manhours	Year		
Toluene	Pump	112,64E-06	9,87E-01	30,5	8,36E-02	OREDA	Pumps, Centrifugal
Ammonia	Relief valve	23,99E-06	2,10E-01	6,5	1,78E-02		Valves, PSV-Conventional

Table 8. Comparison for toluene scenario

Div.	Frequency of Initiating event (FIE, yr ⁻¹)	Q'ty	ORA			Considering the modified equation	
			PFD of Passive	PFD of Active	Subtotal	PFDsr	Subtotal
I-1	Pressure vessel failure	1.00E-06	0	-	-	-	-
I-2	Piping rupture/100 m	1.00E-05	1	-	1.00E-01 [A-1]	1.00E-06	1.00E-06
I-3	Piping leak/100 m	1.00E-03	1	-	1.00E-01 [A-1]	1.00E-04	1.00E-04
I-4	Atmosphere tank failure	1.00E-03	1	-	-	1.00E-03	1.00E-03
I-5	Gasket/Packing blowout	1.00E-02	9	-	1.00E-01 [A-1]	9.00E-03	9.00E-03
I-6	Turbine/Diesel engine overspeed with casing breach	1.00E-04	0	-	-	-	-
I-7	Third-party intervention	1.00E-02	0	-	-	-	-
I-8	Lightning strike	1.00E-03	0	-	-	-	-
I-9	Safety valve opens spuriously	1.00E-02	0	-	-	-	-
I-10	Cooling water failure	1.00E-01	1	-	1.00E-01 [A-4]	1.00E-02	7.91E-02
I-11	Pump seal failure	1.00E-01	0	-	-	-	-
I-12	Unloading/Loading hose failure	1.00E-01	0	-	-	-	-
I-13	BPCS Instrument loop failure	1.00E-01	0	-	-	-	-
I-14	Regulator failure	1.00E-01	0	-	-	-	-
I-15	Small external fire	1.00E-01	1	-	1.00E-01 [A-4]	1.00E-02	1.00E-02
I-16	Large external fire	1.00E-02	0	-	-	-	-
Frequency = $\sum[(FIE \times Q'ty) \times PFD] =$					3.01E-02		2.80E-02
Risk = 2 people $\times$ Frequency =					6.02E-02		5.60E-02

정식 (13)에 따라 산출된 위험도를 비교한 결과는 Table 9와 같다. 고압용기 파열로 인한 초기사고의 빈도가 1.00E-06인 경우 기존 방법에 따르면 여분의 안전밸브 고장 확률은 1.00E-02을 적용하여 사고발생빈도는 1.00E-08으로 산정되지만, 개선된 방법에 따르면 여분의 안전밸브 고장 확률은

3.74E-03을 적용하여 사고발생빈도는 3.74E-09으로 산정된다. 따라서 여분의 안전밸브가 준비된 경우 개선된 산정식에 따른 고장 확률은 고장률과 수리기간이 반영되며, 수리기간에 따라 고장 확률이 달라질 수 있으므로 보다 더 정확한 고장 확률과 사고발생빈도를 산정할 수 있다.

Table 9. Comparison for ammonia scenario

Div.	Frequency of Initiating event (FIE, yr ⁻¹)	Q'ty	ORA			Considering the modified equation	
			PFD of Passive	PFD of Active	Subtotal	PFDsr	Subtotal
I-1	Pressure vessel failure	1.00E-06	1	-	1.00E-02 [A-2]	1.00E-08	3.74E-09
I-2	Piping rupture/100 m	1.00E-05	1	-	1.00E-01 [A-1]	1.00E-06	1.00E-06
I-3	Piping leak/100 m	1.00E-03	1	-	1.00E-01 [A-1]	1.00E-04	1.00E-04
I-4	Atmosphere Tank Failure	1.00E-03	0	-	-	-	-
I-5	Gasket/Packing blowout	1.00E-02	10	-	1.00E-01 [A-1]	1.00E-02	1.00E-02
I-6	Turbine/Diesel engine overspeed with casing breach	1.00E-04	0	-	-	-	-
I-7	Third-party intervention	1.00E-02	0	-	-	-	-
I-8	Lightning strike	1.00E-03	0	-	-	-	-
I-9	Safety valve opens spuriously	1.00E-02	0	-	-	-	-
I-10	Cooling water failure	1.00E-01	0	-	-	-	-
I-11	Pump seal failure	1.00E-01	0	-	-	-	-
I-12	Unloading/Loading hose failure	1.00E-01	0	-	-	-	-
I-13	BPCS Instrument loop failure	1.00E-01	0	-	-	-	-
I-14	Regulator failure	1.00E-01	0	-	-	-	-
I-15	Small external fire	1.00E-01	1	-	1.00E-01 [A-4]	1.00E-02	1.00E-02
I-16	Large external fire	1.00E-02	0	-	-	-	-
Frequency = $\sum[(FIE \times Q'ty) \times PFD] =$					2.01E-02		2.01E-02
Risk = 28 people $\times$ Frequency =					5.63E-01		5.63E-01

Table 10. Comparison according repair time for toluene scenario

Repair time (t, manhours)	PFDsr of pump	Risk of scenario
10	2.67E-02	4.55E-02
20	5.26E-02	5.07E-02
30	7.79E-02	5.58E-02
40	1.02E-01	6.07E-02
50	1.26E-01	6.55E-02

Table 11. Comparison according repair time for ammonia scenario

Repair time (t, manhours)	PFDsr of relief valve	Risk of scenario
2	1.15E-03	5.63E-01
4	2.30E-03	5.63E-01
6	3.45E-03	5.63E-01
8	4.60E-03	5.63E-01
10	5.74E-03	5.63E-01

3.2.3. 수리기간

개선된 산정식에 따라 결함 확률과 위험도를 산정할 때 고장률 Data book의 평균 수리기간이 아닌 해당 사업장의 유지·보수 계획에 따른 실제 수리기간을 적용할 수 있다. 따라서 톨루엔과 시나리오에 대하여 수리기간의 변화에 따라 개선된 산정식에 따른 고장 확률과 위험도 산정 결과를 Table 10에 나타내었다. 톨루엔 시나리오의 경우 고장에 따른 수리기간이 길수록 고장 확률은 높게 산출되며, 또한 위험도가 증가됨을 알 수 있었다. 이는 하나의 부품에 고장이 발생한 경우 수리 없이 방치한 상태에서 다른 부품으로 운전하는 시간이 경과할수록 고장 확률과 위험도가 증가됨을 의미한다.

암모니아 시나리오에 대하여 수리기간의 변화에 따라 개선된 산정식에 따른 고장 확률과 위험도 산정 결과를 Table 11에 나타내었다. 암모니아 시나리오의 경우 고장에 따른 수리기간이 길수록 고장 확률은 높게 산출되나, 위험도의 변화에는 큰 차이가 없음을 알 수 있었다. 이는 여분의 안전밸브 고장 확률은 암모니아 시나리오의 위험도에 미치는 영향이 적기 때문이다.

4. 결론

본 연구는 기존의 장외영향평가 위험도 분석에서 고려되지 않은 병렬구조 안전장치의 고장률과 고장에 따른 수리기간이 반영된 개선된 고장 확률과 위험도 산정식을 제시하였다. 또한 사례연구를 통하여 기존 장외영향평가에 따른 위험도 값과 개선된 위험도 산정식에 따른 값을 비교·분석한 결과 다음과 같은 결론이 도출되었다.

1) 기존 장외영향평가에 따른 예비 펌프와 예비 안전밸브의 고장 확률은 일률적인 값인 1.00E-01과 1.00E-02이 적용된다. 하지만 개선된 산정식에 따른 고장 확률은 7.91E-02

와 3.74E-03으로 산출되어, 기존 산정식에 따른 값과 차이가 발생하였다. 이는 개선된 산정식이 고장률과 수리기간이 반영되어, 수리기간에 따라 고장 확률이 달라지기 때문이다. 따라서 개선된 산정식을 적용할 경우 기존 장외영향평가 보다 더 정확한 고장 확률과 위험도를 산출할 수 있을 것으로 판단된다.

2) 개선된 산정식에 따라 고장 확률과 위험도를 산출할 때 고장률 Data book의 평균 수리기간을 적용하는 것 보다는 해당 사업장의 실제 수리기간을 적용하는 것이 더 정확한 위험도를 분석하는 데 도움이 된다. 또한, 하나의 부품에 고장이 발생하여 수리가 필요할 때 수리기간이 짧을수록 고장 확률이 낮게 산출되며, 수리기간이 길수록 고장 확률은 높게 산출됨을 알 수 있었다. 이는 하나의 부품에 고장이 발생한 경우 수리 없이 방치한 상태에서 다른 부품으로 운전하는 시간이 경과할수록 고장 확률과 위험도가 증가됨을 의미한다. 따라서 해당 사업장의 유지·보수 계획을 수립할 때 고장에 따른 수리를 신속하게 수행하는 것이 위험도를 저감하는데 도움이 된다.

3) 톨루엔 시나리오의 경우 기존 산정식에 따른 위험도는 6.02E-02로 산출되어, 개선된 산정식에 따른 값인 5.60E-02와 차이가 있었다. 하지만 암모니아 시나리오의 경우 기존 산정식에 따른 위험도는 5.63E-01로 산출되어, 개선된 산정식에 따른 값인 5.63E-01와 큰 차이가 없었다. 또한, 고장에 따른 수리기간의 변화에 따라 개선된 산정식에 따른 위험도 역시 톨루엔 시나리오의 경우 차이가 있었지만, 암모니아 시나리오의 경우 큰 차이가 없었다. 이는 여분의 펌프 고장 확률은 톨루엔 시나리오의 위험도에 지배적인 영향을 미치는 구성요소이나, 여분의 안전밸브 고장 확률은 암모니아 시나리오의 위험도에 미치는 영향이 적기 때문이다. 따라서 병렬구조의 안전장치가 해당 시나리오의 위험도에 지배적인 영향을 미치는 구성요소일수록 개선된 산정식의 중요성은 커진다고 할 수 있다.

결론적으로 본 연구는 유해화학물질 취급시설 설치·운영자의 법적 의무사항인 장외영향평가에서 위험도 등급을 더 정확하게 결정할 수 있는 기준을 제시하였고, 사업장의 체계적인 위험도 관리와 안전성 확보에 도움이 될 것으로 판단된다.

KSEE

References

1. ME, Chemical Control Act, Ministry of Environment, Sejong (2017).
2. ME, Report of Chemicals Statistical Surveys, Ministry of Environment, Sejong(2014).
3. NICS, Chemistry Safety Clearing-house, <http://csc.me.go.kr>, December(2016).
4. NICS, Preparation Guide of Off-site Risk Assessment, Na-

- tional Institute of Chemical Safety, Daejeon, pp. 17~84(2014).
5. ME, Regulation on Preparation of Off-site Risk Assessment : Notification 2017-104, Ministry of Environment, Sejong (2017).
 6. NICS, Technical Guideline on Selection of Accident Scenario : Notification 2016-4, National Institute of Chemical Safety, Daejeon(2016).
 7. AIHA, ERPG (Emergency Response Planning Guidelines), American Industrial Hygiene Association, Falls Church(2016).
 8. CCPS, Simplified Process Risk Assessment: Layer of Protection Analysis, American Institute of Chemical Engineers, New York(2001).
 9. Tweeddale, M., "Chapter 6 : Assessing the Frequency or Likelihood of Potential Hazardous Incidents or Losses," Managing Risk and Reliability of Process Plants, Gulf Professional Publishing, Burlington, pp. 153~187(2003).
 10. MTL Instruments, An introduction to Functional Safety and IEC 61508, AN9025-3, MTL Instruments, Perth(2002).
 11. Lee, S. Y., Reliability engineering : 3rd ed., Hyungseul publishing, Paju, pp. 153~170(2005).
 12. OREDA, Offshore Reliability Data Handbook 4th Edition, Det Norske Veritas, Høvik, pp. 511-803(2002).