

보호시스템 보증시험 적용이 장외영향평가 안전성 확보에 미치는 영향

김민수 · 김재영 · 이은별 · 윤준현 · 박재학*

환경부 화학물질안전원 사고예방심사과 · *충북대학교 안전공학과
(2017. 8. 31. 접수 / 2017. 11. 3. 수정 / 2017. 11. 16. 채택)

Effect of Proof Test of Protective System on Securing Safety of Off-site Risk Assessment

Min-Su Kim · Jae-Young Kim · Eun-Byeol Lee · Junheon Yoon · Jai Hak Park**

Division of Accident Prevention and Assessment, National Institute of Chemical Safety, Ministry of Environment

*Department of Safety Engineering, Chungbuk National University

(Received August 31, 2017 / Revised November 3, 2017 / Accepted November 16, 2017)

Abstract : The risk is expressed as consequence of damage multiplied by likelihood of failure. The installation of a protective system reduces the risk by reducing the likelihood of failure at the facility. Also, the protective system has different effects on the likelihood of failure according to the proof test cycle. However, when assessing risks in the Off-site Risk Assessment (ORA) system, the variation in risk was not reflected according to the proof test cycle of protective system. This study was conducted to examine the need for proof test and the importance of cycle setting by applying periodic proof test of the protective system to ORA. The results showed that the likelihood of failure and the risk increased with longer proof test cycle. The risk of a two-yearly proof test was eight times greater than that of a three-month cycle. From the results, the protective system needs periodic proof test. Untested protective system for a long term cannot be reliable because it is more likely to be failed state when it is called upon to operate. In order to reduce the risk to an acceptable level, it is effective to differently set the proof test cycle according to the priority. This study suggested a more systematic and accurate risk analysis standard than ORA. This standard is expected to enable an acceptable level of risk management by systematically setting the priority and proof test cycle of the protective system. 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 : risk analysis, likelihood of failure, proof test, protective system, off-site risk assessment

1. 서론

사고피해의 크기와 사고발생 가능성의 곱으로 정의 되는 위험도는 여러 가지 방법으로 분석할 수 있다. 개인 위험도는 개인이 어떤 위치에서 작업을 수행할 경우 그 상태에서 사망할 확률이며, 사회적 위험도는 임의의 수의 인명피해를 발생시킬 수 있는 누적빈도로서, 사고에 대한 빈도분석(F)과 사고피해 평가에서 계산된 사망자의 수(N)를 나타내는 F-N 곡선으로 표현된다¹⁾.

방호계층분석(LOPA, Layer of Protection Analysis)은 원하지 않는 사고의 빈도나 강도를 감소시키는 독립방호계층의 효과성을 평가하는 도구로서 사고의 빈도를

초기사고의 빈도와 독립방호계층의 작동 요구 시 고장 확률의 곱으로 나타낸다^{2,3)}. 여기서 독립방호계층(IPL, Independent Protection Layer)이란 초기사고나 다른 방호계층의 고장으로 인한 영향을 받지 않으며 사고의 전개를 방지할 수 있는 장치나 시스템을 말한다. 이러한 화학설비에 대한 위험도 분석은 근로자, 주민, 환경, 재산에 대한 잠재위험을 확인하여 사고를 예방하거나 사고피해를 최소화하기 위하여 실시한다. 또한 잠재위험을 관리하기 위한 우선순위 설정과 위험을 줄이기 위한 비용과 방법 결정 등의 안전대책을 수립하고 이행하는데 도움을 준다.

국내 안전관리 분야에서는 API-581 절차를 바탕으로

* Corresponding Author : Jai Hak Park, Tel : +82-43-261-2460, E-mail : jhpark@chungbuk.ac.kr
Department of Safety Engineering, Chungbuk National University, 1 Chungdae-ro, Seowon-gu, Cheongju Chungbuk 28644, Korea

개발된 한국형 위험기반검사 프로그램(K-RBI)이 사고 피해의 크기와 사고 발생빈도를 산출하여 위험도를 산정하고 이를 바탕으로 검사 우선순위, 검사주기, 검사방법을 결정하는데 활용하고 있다^{4,5)}. 아울러 2015년 화학물질관리법이 제정되면서 장외영향평가 제도가 시행되었는데, 이 제도는 사업장 밖의 제3자에게 인적·물적 피해를 야기하지 않도록 안전개념에 따라 시설을 설계·설치하였는지 확인하는 과정으로 유해화학물질 취급시설 설치 운영자는 화학사고가 사업장 외부에 미치는 영향을 평가하고 그 범위와 위험도를 분석한 장외영향평가서를 제출하여 심사·평가를 받는다. 또한, 장외영향평가서 심사 결과를 바탕으로 시설의 위험도 등급이 결정되며, 이 등급은 안전진단의 주기와 연동이 된다. 즉, 고 위험도 시설은 매 4년, 중 위험도 시설은 매 8년, 저 위험도 시설은 매 12년 주기로 안전진단을 실시한다⁶⁾.

장외영향평가의 위험도는 사고영향과 사고발생빈도의 곱으로 나타내며, 사고영향의 지표로 영향범위 내 주민의 수를 적용하고, 사고발생빈도는 고장발생빈도를 적용한다¹⁾. 여기에 시설의 위험도에 따라 사고영향을 줄이거나 사고발생빈도를 줄이는 위험도 감소대책을 추가로 고려할 수 있다. 한편, 보호시스템의 설치해당설비의 사고발생 가능성을 감소시킴으로써 위험도를 감소시킨다. 또한 보호시스템은 보증시험 주기에 따라 사고발생 가능성에 미치는 영향이 다르다. 하지만 장외영향평가에서 위험도를 분석할 때에는 보호시스템의 보증시험 주기에 따른 위험도 증감이 반영되어 있지 않다.

따라서 본 연구는 장외영향평가서 작성을 위해 개발된 KORA(Korea Off-site Risk Assessment Supporting Tool) 프로그램(Ver.2.0.0)을 사용하여 사고영향과 사고 발생빈도를 산출하고 위험도를 산정하였으며, 보호시스템의 주기적 보증시험이 사고발생빈도에 미치는 영향을 장외영향평가의 위험도에 적용하였다. 이를 통하여 보호시스템의 보증시험이 위험도에 미치는 영향과 보증시험의 필요성 및 주기설정의 중요성을 검토하였다.

2. 연구방법

2.1 연구대상 물질 및 시설 선정

본 연구는 톨루엔 100% 상압 저장탱크 및 부속설비를 대상으로 하였다. 톨루엔은 주로 화학물질을 합성하는 원료로 사용되고, 용매로서도 광범위하게 사용된다. 2014년 화학물질 통계조사에 따르면 톨루엔의 유통량은 3,432 천톤, 사용량은 3,360 천톤, 제조량은

3,549 천톤이며⁷⁾, 누출로 인한 화학사고건수는 2015년에 5건, 2016년에는 5건이 보고된바있다⁸⁾.

이처럼 톨루엔은 취급량이 많고 누출사고가 빈번하게 발생되고 있는 주요 관심대상물질이다. 본 연구에서는 보편적인 톨루엔 저장시설을 모사하기 위하여 저장탱크의 용량을 대부분의 사업장이 운영하는 30 m³ 이하로 선정하였으며, 독성물질 누출로 인한 시나리오로 한정하였다.

2.2 기본평가 정보

평가대상은 탱크로리를 통하여 입고된 톨루엔 100%를 실외에 위치한 상압 저장탱크에 저장한 후 이송펌프 및 연결배관을 이용하여 제조·사용공정으로 이송

Table 1. Chemical information

Chemical	CAS No.	State	Explosion		Toxicity
			LEL	UEL	
Toluene (100%)	108-88-3	L	1.1%	7.1%	ERPG-2 (300 ppm)
Flash point	Ignition point	Boiling point	Vapor pressure		Corrosivity
6°C	480°C	111°C	21.98 mmHg (20°C)		none

Table 2. List and specification of device

Device	Chemical	State	Connection information	Pressure	
				Designed	Operating
Tank (TK-101)	Toluene (100%)	L	100A(4") STS304	FW	ATM
Temp.		Volume(m ³)		Material	Design standard
Designed	Operating	Designed	Operating		
60°C	AMB	28	25.2	STS304	KS

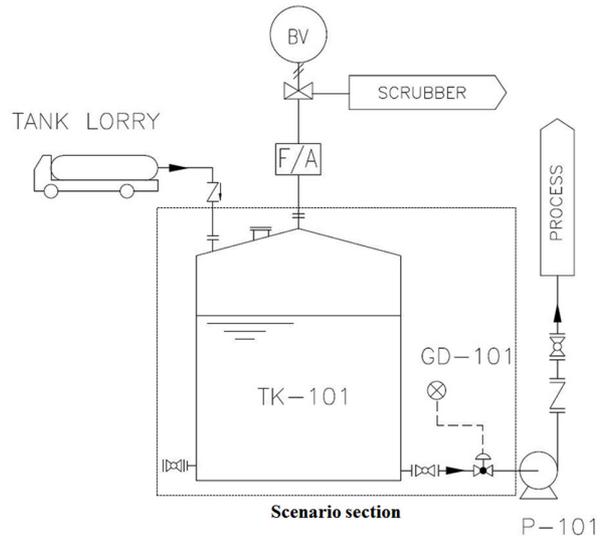


Fig. 1. P&ID and scenario section.

하는 공정이다. 취급물질 정보는 Table 1과 같으며, 취급시설 목록 및 명세는 Table 2와 같다. 공정배관계장도 및 시나리오 구간은 Fig. 1과 같다. 시나리오 구간은 장외영향평가의 위험도 분석을 위한 구간으로 해당 고정 장치인 저장탱크를 중심으로 인입측 플랜지부터 토출측 긴급차단시스템까지로 설정하였다. 이는 고정 장치를 기준으로 사고발생 시 차단될 수 있는 구간을 기준으로 설정한 것이다.

2.3 사고영향

장외영향평가의 사고시나리오는 최악의 사고시나리오와 대안의 사고시나리오로 구분한다. 최악의 사고시나리오는 저장용기 또는 배관 등에서 최대량이 화재·폭발이나 유출·누출되어 사람 및 환경에 미치는 영향 범위가 최대인 경우를 말하고, 대안의 사고시나리오는 최악의 사고시나리오보다 현실적으로 발생 가능성이 높고 사람이나 환경에 미치는 영향이 사업장 밖까지 미치는 사고시나리오 중에서 영향 범위가 최대인 사고시나리오를 말한다^{9,10}. 본 연구의 각 사고시나리오의 평가조건은 Table 3과 같다.

지표면 굴곡도는 시골지형의 경우, 평탄한 지형 상태, 도시지형은 건물과 나무 등이 많은 지형 상태를 의미한다. 또한, 대안의 사고시나리오에서 누출량 산정을 위한 누출공 크기는 가장 큰 연결 배관직경(100A)의 20%인 20A로 산정하였고¹⁰, 누출시간은 미국 석유화학협회의 위험기반검사 기준(API 581)에 따른 산출방법에 따라 검출시스템과 차단시스템을 고려하여 30분으로 산정하였다¹¹. 위험요인은 톨루엔 저장탱크 연결 배관에서 독성물질이 누출되어 확산되는 경우로서 끝

점 기준을 ERPG-2 값인 300 ppm으로 적용하였다. 이것은 거의 모든 사람들이 비가역적이거나 심각한 건강영향 또는 방어 행동을 취할 능력의 상실 없이 1시간까지 최대 300 ppm에 노출될 수 있는 것을 고려한 것이다¹².

KORA 프로그램을 활용하여 영향범위를 산정 시 미국 EPA RMP guidance에 따른 수식을 적용하였다^{10,13,14}. 즉, 대기온도에서 액체인 톨루엔이 누출되어 액체 층을 형성하고, 대기 중으로 확산되는 속도가 액체 층의 표면에서 증발되는 속도로 가정하였으며, 이때의 증발 속도는 다음과 같은 수식으로 표현된다.

$$Q = \frac{1.4 \times U^{0.78} \times M^{2/3} \times A \times P}{82.05 \times T} \quad (1)$$

여기서 Q는 증발속도(kg/min), U는 풍속(m/s), M은 분자량, A는 액체층의 표면적(m²), P는 증기압(mmHg), T는 온도(K)이다. 해당 시설의 방류벽 용량은 저장탱크 용량의 110% 이상으로 설치되었으므로 액체층의 표면적은 방류벽 면적에서 저장탱크의 단면적을 제외한 값인 50 m²을 적용하였다.

액체층의 표면에서 증발된 톨루엔 증기는 가우시안 플룸 모델을 사용하여 영향범위를 산정하였다^{15,16,17}. 가우시안 플룸 모델의 특정 위치에서의 농도는 다음과 같은 수식으로 표현된다.

$$C(x, y, z; H_E) = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_x u} \exp\left[-0.5\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] \left\{ \exp\left[-0.5\left(\frac{H_E - z}{\sigma_x}\right)^2\right] + \exp\left[-0.5\left(\frac{H_E + z}{\sigma_x}\right)^2\right] \right\} \quad (2)$$

여기서 C는 (x,y,z)에서 누출물질의 농도(kg/m³), H_E는 유효높이(m), Q는 누출속도(kg/s), σ_y는 바람 단면방향의 확산계수(m), σ_x는 바람 수직방향의 확산계수(m), u는 실제 누출높이(H_s)에서의 풍속(m/s)이다.

2.4 사고발생빈도

장외영향평가에서 사고 발생빈도는 아래 식과 같이 주요기기의 고장빈도와 보호시스템에 의한 안전성 향상도의 곱으로 산출된다¹.

$$\text{사고발생빈도} = \sum[(\text{주요기기의 고장빈도} \times \text{안전성 향상도})] \quad (3)$$

주요기기의 고장빈도는 초기사고의 빈도(FIE, Frequency of Initiating Event)값을 적용하였고, 안전성 향상도는 Table 4 및 5에 정리한 수동적 및 능동적 독립방호계층의

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 4. 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 5. 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

결함 발생확률(PFD, Probability of failure on Demand)을 적용하였다¹⁸⁾.

2.5 위험도 분석

장외영향평가에서 위험도는 대안의 사고시나리오에 대하여 분석하며 아래 식과 같이 산정한다¹⁾. 이 연구에서 영향범위 내 주민 수는 해당 사업장내 근로자 수를 제외한 주민 수이다.

$$\text{위험도} = \text{영향범위 내 주민 수} \times \text{사고발생빈도} \quad (4)$$

2.6 보호시스템과 주기적 보증시험

보호시스템은 설비가 정상적인 작동에 실패하는 경우에 필요한 시스템이다. 예를 들어 압력용기에 과압이 걸리는 경우 압력제어 시스템이 작동되어 보호시스템의 작동은 필요하지 않다. 그러나 압력제어시스템이 중단되어 설비의 압력이 허용초과수준으로 상승하기 시작하면 보호시스템인 압력방출 밸브가 작동되어 과압을 방출함으로써 설비의 폭발을 예방한다.

시스템 또는 구성요소의 가장 전형적인 고장률(Failure

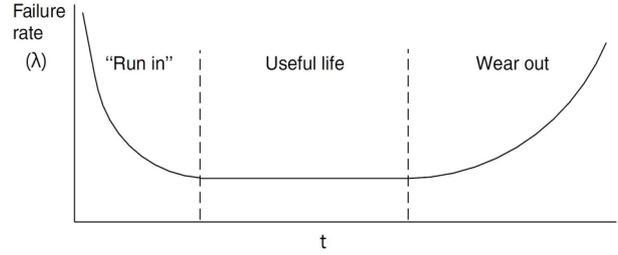


Fig. 2. The bathtub curve^{19,20)}.

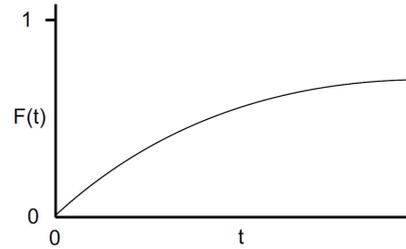


Fig. 3. Probability of failure by time²¹⁾.

rate) 패턴은 욱조곡선을 따르며(Fig. 2)^{19,20)}, 여기서 고장률은 단위 시간 내에 고장을 일으키는 비율이다. 욱조곡선은 3가지 단계로 구분되는데, 정상상태(Useful life) 기간의 고장률은 시간 t에 따라 거의 일정하다고 가정하므로 고장률이 λ(failures per year)인 보호시스템의 시간 t에서 결함 발생확률(F(t), Probability of failure)은 아래 식과 같으며 Fig. 3과 같이 표시된다²¹⁾.

$$\begin{aligned} F(t) &= 1 - (e^{-\lambda t}) \\ &= 1 - [1 - \lambda t + \frac{(\lambda t)^2}{2!} - \frac{(\lambda t)^3}{3!} + \dots] \quad (5) \\ &\approx \lambda t \end{aligned}$$

보호시스템은 보증시험을 시행할 때 작동이 가능한 상태에 있거나, 또는 수리되어 작동이 가능한 상태로 복구되기 때문에 Fig. 4와 같이 결함 발생확률은 0으로 초기화가 된다. 따라서 보호시스템은 특정 기간(T_p)마다 한 번씩 보증시험을 시행하는 경우 T_p에서 결함 발생확률(PFD_{avg})은 다음과 같다^{19,21)}.

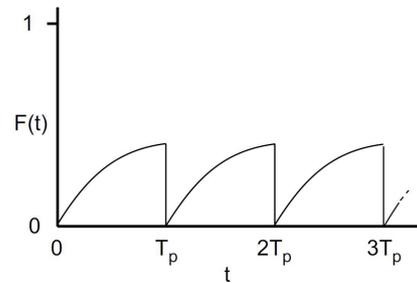


Fig. 4. Probability of failure by periodic test²¹⁾.

$$\begin{aligned}
 PFD_{avg} &= \frac{1}{T_p} \int_0^{T_v} F(t) dt & (6) \\
 &= \frac{1}{T_p} \int_0^{T_v} (1 - e^{-\lambda t}) dt \\
 &= 1 + \frac{1}{\lambda T_p} (e^{-\lambda T_v} - 1) \\
 &= \frac{\lambda T_p}{2!} - \frac{(\lambda T_p)^2}{3!} + \frac{(\lambda T_p)^3}{4!} \\
 &\approx \frac{\lambda T_p}{2}
 \end{aligned}$$

실제로 보증시험을 시행하는데 소요되는 기간(T_i), 보호시스템을 수리하는데 소요되는 기간(T_r), 보증시험 장치가 보호시스템을 복구하지 못할 가능성(R)을 고려하면 PFD_{avg} 는 다음과 같다¹⁹⁾.

$$PFD_{avg} = \frac{\lambda T_p}{2} + \frac{T_t}{T_p} + \lambda T_r + P \quad (7)$$

하지만 식(7)은 보호시스템의 결함 발생확률이 매우 낮은 경우에만 적용된다. 따라서 보호시스템의 PFD_{avg} 와 해당 설비의 사고 발생빈도는 다음과 같다.

$$PFD_{avg} = \frac{\lambda T_p}{2} \quad (8)$$

$$\text{사고발생빈도} = \sum[\text{초기사고의 빈도} \times PFD_{avg}] \quad (9)$$

3. 연구결과

3.1 장외영향평가 제도의 위험도 분석

KORA 프로그램을 활용하여 저장탱크 연결배관에서 독성물질인 톨루엔 누출로 인한 영향 거리를 산정한 결과는 Table 6과 같다. 여기서 장외 거리는 해당 사업장의 부지경계로부터 외부에 미치는 거리이다. 대안의 사고시나리오에 대하여 식(3)을 적용하여 산출한 사고 발생빈도 결과는 Table 7과 같다. 식(4)에 따른 위험도 산정을 위해 영향범위 내 주민 수는 5명으로 가정하였다. 보호시스템에 의한 안전성 향상도를 고려한 사고 발생빈도는 Table 7에서 구한 9.11E-03을 사용하였다. 따라서 장외영향평가에서 위험도를 분석한 결과는 다음과 같다.

$$\text{위험도} = 5 \text{명} \times 9.11\text{E-}03 = 4.56\text{E-}02$$

Table 6. Results of consequence distance

	Scenario	
	Worst	Alternative
Temperature	AMB	AMB
Pressure	ATM	ATM
Volume (kg)	22,595	22,595
Chemical	Toluene	Toluene
State	L	L
Leak hole (mm)	-	20
Leak rate (kg/s)	37.66	1.46
Distance (m)	Consequence	13.4
	Off-site	7.0
		2.6

Table 7. Results of frequency for alternative scenario

Division	Frequency of initiating event (FIE) (yr^{-1})	Quantity	PFD of passive	PFD of active	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]
I-3	Piping leak/100 m	1.00E-03	1	-	1.00E-01 [A-1]
I-4	Atmosphere tank failure	1.00E-03	1	1.00E-02 [P-3]	-
I-5	Gasket/Packing blowout	1.00E-02	8	1.00E-01 [A-1]	-
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 open(failure)	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-02 [P-7]	-
I-16	Large external fire	1.00E-02	0	-	-
Frequency = $\sum[(\text{Frequency of initiating event} \times \text{quantity}) \times (\text{passive PFD}) \times (\text{active PFD})]$					9.11E-03

3.2 주기적 보증시험에 따른 위험도 분석

보호시스템은 사고발생빈도를 감소시킴으로써 해당 설비의 위험도를 감소시킬 수 있다. 이러한 보호시스템의 결함 발생확률과 해당설비의 사고발생빈도를 산출하기 위한 고장률 데이터는 Table 8과 같이 조사되었다^{20,22)}. 장외영향평가에서 분석한 위험도를 식(8)과 식(9)에 따른 보호시스템의 주기적 보증시험을 반영하여 위험도를 비교한 결과는 Table 9 및 Fig. 5와 같다.

Table 9 및 Fig. 5에서 보는 바와 같이 기존 장외영향평가의 위험도는 4.56E-02로 일정하게 산정되었다. 이는 기존 장외영향평가의 위험도 분석은 보호시스템의 주기적 보증이 반영되어 있지 않기 때문이다. 반면에 식(8)과 식(9)에 따른 보호시스템의 보증시험을 반영한 위험도는 주기에 따라 변하는 것을 알 수 있었는데, 주기가 길어질수록 위험도는 증가하였다. 즉, 보증시험을 0.25년(3개월) 주기로 시행할 때의 위험도는 1.59E-02,

Table 8. Failure rate resulted from different sources^{20,22)}

Division	Protection system	Failure rate (λ)		Source	Comment
A-1	Detector	31.51E-06/h	2.76E-01/yr	OREDA ²⁰⁾	Fire & Gas detectors, Hydrocarbon gas
P-3	Open vent (no valve)	7.88E-06/h	6.90E-02/yr		
P-7	Flame arrestor	3.40E-06/h	2.98E-02/yr	TSTA ²²⁾	Flame arrestor

Table 9. Comparison according to test of protection system

Division	FIE	Quantity	Protection system		ORA										
			Division	PFD	Subtotal										
I-2	1.00E-05	1	[A-1]	1.00E-01	1.00E-06										
I-3	1.00E-03	1	[A-1]	1.00E-01	1.00E-04										
I-4	1.00E-03	1	[P-3]	1.00E-02	1.00E-05										
I-5	1.00E-02	8	[A-1]	1.00E-01	8.00E-03										
I-15	1.00E-01	1	[P-7]	1.00E-02	1.00E-03										
Frequency						9.11E-03									
Risk						4.56E-02									
Considering Test of protection system															
Division	Failure rate (λ , yr ⁻¹)	Cycle (T_p , yr)													
		0.25		0.5		0.75		1		2		3		4	
		PFDavg	Subtotal	PFDavg	Subtotal	PFDavg	Subtotal	PFDavg	Subtotal	PFDavg	Subtotal	PFDavg	Subtotal	PFDavg	Subtotal
I-2	2.76E-01	3.45E-02	3.45E-07	6.90E-02	6.90E-07	1.04E-01	1.04E-06	1.38E-01	1.38E-06	2.76E-01	2.76E-06	4.14E-01	4.14E-06	5.52E-01	5.52E-06
I-3	2.76E-01	3.45E-02	3.45E-05	6.90E-02	6.90E-05	1.04E-01	1.04E-04	1.38E-01	1.38E-04	2.76E-01	2.76E-04	4.14E-01	4.14E-04	5.52E-01	5.52E-04
I-4	6.90E-02	8.63E-03	8.63E-06	1.73E-02	1.73E-05	2.59E-02	2.59E-05	3.45E-02	3.45E-05	6.90E-02	6.90E-05	1.04E-01	1.04E-04	1.38E-01	1.38E-04
I-5	2.76E-01	3.45E-02	2.76E-03	6.90E-02	5.52E-03	1.04E-01	8.28E-03	1.38E-01	1.10E-02	2.76E-01	2.21E-02	4.14E-01	3.31E-02	5.52E-01	4.42E-02
I-15	2.98E-02	3.72E-03	3.72E-04	7.45E-03	7.45E-04	1.12E-02	1.12E-03	1.49E-02	1.49E-03	2.98E-02	2.98E-03	4.47E-02	4.47E-03	5.96E-02	5.96E-03
Frequency	-	-	3.18E-03	-	6.35E-03	-	9.53E-03	-	1.27E-02	-	2.54E-02	-	3.81E-02	-	5.08E-02
Risk	-	-	1.59E-02	-	3.18E-02	-	4.76E-02	-	6.35E-02	-	1.27E-01	-	1.91E-01	-	2.54E-01

Table 10. Comparison according to differential test cycle

Division	FIE	Quantity	Case1		Case2		Case3		Case4		Case5	
			Cycle	Subtotal								
I-2	1.00E-05	1		6.90E-07		1.04E-06		1.38E-06		2.76E-06		4.14E-06
I-3	1.00E-03	1	0.5	6.90E-05	0.75	1.04E-04	1	1.38E-04	2	2.76E-04	3	4.14E-04
I-4	1.00E-03	1		1.73E-05		2.59E-05		3.45E-05		6.90E-05		1.04E-04
I-5	1.00E-02	8		2.76E-03								
I-15	1.00E-01	1	0.25	3.72E-04								
Frequency			-	3.22E-03	-	3.26E-03	-	3.31E-03	-	3.48E-03	-	3.65E-03
Risk			-	1.61E-02	-	1.63E-02	-	1.65E-02	-	1.74E-02	-	1.83E-02

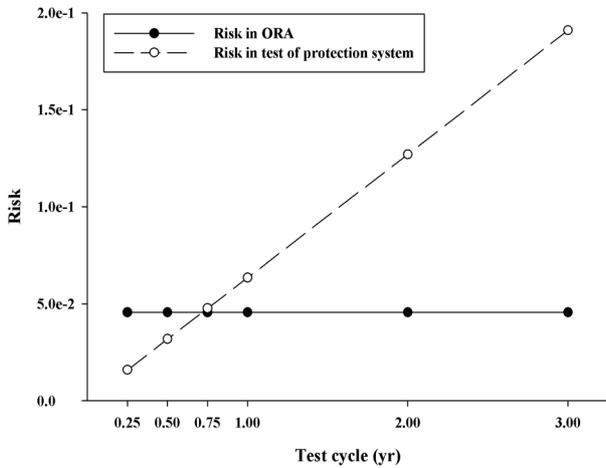


Fig. 5. Risk according to test of protection system for toluene tank scenario.

0.5년(6개월) 주기일 때는 $3.18E-02$, 0.75년(9개월) 주기일 때는 $4.76E-02$, 1년 주기일 때에는 $6.35E-02$, 2년 주기일 때는 $1.27E-01$ 로 산정되어, 2년 주기로 시행한 위험도는 3개월 주기로 시행한 위험도보다 8배 증가하는 것으로 나타났다. 또한, 보증시험을 9개월 주기로 시행할 때의 위험도가 $4.76E-02$ 로 산정되어 장외영향평가의 위험도와 비슷한 경향이였다. 따라서 9개월 주기를 기점으로 보증시험을 9개월 미만으로 시행할 때의 위험도는 장외영향평가의 위험도보다 낮았고, 9개월 이상 시행할 때의 위험도는 장외영향평가의 위험도보다 높게 산정되었다. 이러한 결과는 보호시스템을 설치한 이후 시간이 경과할수록 보호시스템의 작동이 필요할 때 결함 발생확률이 증가하기 때문이며, 짧은 주기로 자주 보증시험을 시행할수록 보호시스템의 결함 발생 확률(PFDavg)이 초기화된 이후 낮게 산정되어 해당 설비의 사고발생빈도와 위험도가 감소하기 때문이다.

보증시험은 해당 설비에 설치된 모든 보호시스템을 일률적인 주기로 시행할 수도 있지만 보호시스템별로 차등적으로 시행하는 것이 가능하다. Table 9와 같이 개시사건의 빈도 또는 보호시스템의 결함률이 높은 구성요소에서 해당설비의 사고발생빈도와 위험도가 높게 산정됨을 알 수 있었다. 즉, 개시사건이 I-5 및 I-15에 해당하는 보호시스템 [A-1] 및 [P-7]에서 사고발생 빈도가 높게 산출되어 해당 설비의 위험도가 높게 산정되었다. 따라서 위험도가 높게 산정될 수 있는 구성요소인 개시사건 I-5 및 I-15에 해당하는 보호시스템 [A-1] 및 [P-7]은 3개월의 짧은 주기로 보증시험을 시행하고, 나머지 구성요소는 Table 9와 같이 0.5년(6개월)~3년의 주기로 시행한 위험도 산정 결과는 Table 10과 같다. Case 1의 경우 I-2, I-3 및 I-4에 해당하는 보호

시스템은 6개월의 주기를 I-5 및 I-15에 해당하는 보호시스템은 3개월의 주기를 적용한 경우이다. 이러한 보호시스템별 차등적인 주기로 보증시험을 시행한 Case 1~5의 위험도는 $1.61E-02$ ~ $1.83E-02$ 로 산정되어, Table 9에서 모든 보호시스템의 보증시험을 3개월의 일률적인 주기로 시행한 위험도인 $1.59E-02$ 와 비교했을 때, 101~115% 수준으로 큰 차이가 없었다. 한편, Case 1~5의 위험도는 9개월의 일률적인 주기로 시행한 위험도인 $4.76E-02$ 와 비교했을 때, 34~38% 수준으로 대폭 감소하는 경향이였다. 따라서 모든 보호시스템에 대하여 보증시험을 일률적인 주기로 시행하는 것보다 해당설비의 위험도에 지배적인 영향을 미치는 구성요소에 우선순위를 부여하는 방법으로 차등적인 주기를 설정하는 것이 효율적으로 나타났다.

4. 결론 및 고찰

장외영향평가의 위험도는 보호시스템을 설치하여 사고발생빈도를 감소시킴으로써 해당 설비의 위험도 감소를 인정하고 있다. 하지만, 보호시스템의 주기적 보증시험에 따른 위험도 증감이 반영되어 있지 않다. 본 연구에서는 보호시스템의 주기적 보증시험에 따른 위험도 증감을 장외영향평가의 위험도 분석에 적용하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 사고 발생빈도와 위험도는 보호시스템의 보증시험 주기가 짧을수록 감소하고 보증시험 주기가 길수록 증가함을 알 수 있다. 2년 주기로 보증시험이 시행된 위험도는 3개월 주기로 시행된 위험도보다 8배 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 결과로 볼 때 보호시스템은 설치된 후 작동이 가능한 상태인지 확인하기 위해 반드시 보증시험을 시행해야 함을 알 수 있었다. 장기간 보증시험을 하지 않은 보호시스템은 작동이 필요한 때 이미 작동 불능상태에 있을 확률이 높아지기 때문에 신뢰할 수 없다고 판단된다.

2. Table 10의 차등적인 주기로 보증시험을 시행한 Case 1~5의 위험도는 Table 9에서 3개월의 일률적인 주기로 보증시험을 시행한 위험도와 비교했을 때, 101~115% 수준으로 큰 차이가 없었다. 이러한 결과는 사업장에서 허용 가능한 수준으로 위험도를 감소하기 위해서는 보호시스템의 보증시험 주기를 우선순위에 따라 차등적으로 결정하는 것이 효율적임을 알 수 있었다.

3. 이로써 보호시스템의 보증시험 주기에 따른 위험도 증감을 장외영향평가의 간이 위험도 분석에 반영하여 보다 더 정확한 위험도 분석의 기준을 제시하였다. 이러한 기준이 인정받기 위해서 사업장의 유지보수 계

획에 보호시스템의 보증시험 주기를 포함하고 철저한 관리를 해야 할 것으로 예상된다. 원하는 보호시스템의 고장률 자료를 문헌에서 얻을 수 없는 경우에는 사업장의 고장 자료를 정립하여 작성한 신뢰도 자료 또는 제조사가 제공하는 자료를 이용하거나 고장률 예측 모델에 의한 방법으로 계산해야 하며, 장외영향평가의 간이 위험도 분석보다 더 정확한 위험도 분석의 어려움을 해소할 수도 있다. 또한 낮은 수준의 위험도를 판정받기 위해 설정한 짧은 보증시험 주기가 사업장의 경제적 부담이 될 수 있다. 하지만 장외영향평가의 위험도 등급이 낮을수록 화학물질관리법의 후속조치로서 안전진단의 주기가 길어지는 이득이 있다.

따라서 본 연구에서 도출한 보호시스템의 보증시험 우선순위와 주기의 결정은 위험도를 체계적으로 관리할 수 있어 사업장의 안전성 확보 기여와 동시에 장외영향평가 제도 발전의 계기가 될 것으로 예상된다.

References

- 1) NICS, "Preparation Guide of Off-site Risk Assessment", National Institute of Chemical Safety, Daejeon, 2014.
- 2) CCPS, "Guidelines for Initiating Events and Independent Protection Layers in Layer of Protection Analysis", WILEY, Agawam, 2014.
- 3) KOSHA, "Technical Guideline on Layer of Protection Analysis (LOPA), Notification KOSHA Guide P-113-2012", Korea Occupational Safety and Health Agency, Incheon, 2012.
- 4) H. J. Kim, H. C. Lee, S. I. Jang, P. S. Shin, D. S. Lim and T. O. Kim, "Development of Procedure and Application of K-RBI", Theories and Applications of Chem. Eng., Vol. 10, No. 2, pp. 2383-2386, 2004.
- 5) H. C. Lee, P. S. Shin, D. S. Lim and T. O. Kim, "Development of Implemental Procedure for K-Risk Based Inspection", Journal of the Korean Society of Safety, Vol. 21, No. 3, pp. 31-37, 2006.
- 6) ME, "Chemical Control Act", Ministry of Environment, Sejong, 2017.
- 7) ME, "Report of Chemicals Statistical Surveys", Ministry of Environment, Sejong, 2014.
- 8) NICS, "Chemistry Safety Clearing-house", National Institute of Chemical Safety, Daejeon, 2017.
- 9) ME, "Regulation on Preparation of Off-site Risk Assessment, Notification 2017-104", Ministry of Environment, Sejong, 2017.
- 10) NICS, "Technical Guideline on Selection of Accident Scenario, Notification 2016-4", National Institute of Chemical Safety, Daejeon, 2016.
- 11) API, "Risk-Based Inspection Technology : API Recommended Practice 581, 2nd edition", American Petroleum Institute, Washington, 2008.
- 12) AIHA, "ERPG(Emergency Response Planning Guidelines)", American Industrial Hygiene Association, Falls Church, 2016.
- 13) U. S. EPA, "Risk Management Program Guidance for Offsite Consequence Analysis", United States Environmental Protection Agency, Washington, 2009.
- 14) Y. Jung, B. Kim, H. Heo, B. Yoo, C. Sin, Y. Yoon, J. Yoon and B. Ma, "A Study on the Simplified Estimating Method of Off-site Consequence Analysis by Concentration of Hydrochloric Acid", Journal of the Korean Society of Safety, Vol. 32, No. 2, pp. 52-58, 2017.
- 15) NICS, "Technical Guideline on Calculation of Damage Consequence of Chemical Accident, Notification 2015-1", National Institute of Chemical Safety, Daejeon, 2015.
- 16) D. B. Turner, "Workbook of Atmospheric Dispersion Estimates", United States Environmental Protection Agency, Washington, 1970.
- 17) CCPS, "Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis, Second Edition", American Institute of Chemical Engineers, New York, pp. 119-140, 2000.
- 18) CCPS, "Simplified Process Risk Assessment: Layer of Protection Analysis", American Institute of Chemical Engineers, New York, 2001.
- 19) Mark Tweeddale, "Managing Risk and Reliability of Process Plants", Gulf Professional Publishing, Burlington, 2003.
- 20) OREDA, "Offshore Reliability Data Handbook 4th Edition", Det Norske Veritas, Høvik, pp. 511-803, 2002.
- 21) MTL Instruments, "An introduction to Functional Safety and IEC 61508, AN9025-3", MTL Instruments, Perth, 2002.
- 22) L. C. Cadwallader and R. S. Willms, "TSTA Piping and Flame Arrestor Operating Experience Data", Fusion Engineering and Design, Vol. 98-99, pp. 2112-2115, 2014.