

Evaluation on Human Damage of Hydrofluoric Acid Storage Tank Spill Using a Probit Model

Chang Hyun Shin^{1,2#}, Joong Don Park¹, Soo Mi Kim¹, Gyeong Seok Seo¹, Jun Heon Yoon¹, Jai Hak Park²⁺

¹ National Institute of Chemical Safety, 90 Gajeongbuk-ro, Yuseong-gu, Daejeon, Korea

² Department of Safety Engineering, Chungbuk National University, 1 Chungdae-ro, Seowon-gu, Cheongju, Korea

Abstract

Among 382 domestic accidents for the recent four years, the leakage of storage tanks and facilities accounts for about 19.9%, which is relatively risky. A suitable dike should be installed around the tank considering the height and diameter of the tank in order to prevent chemical spills during the discharging process to outside. Considering the fundamental function of the dike, it is essential to physically block the spills and obtain smooth diffusion with the air. As the safety system is recently advanced, both detection equipment and automatic spill treatment system are used to reduce treatment time and diminish the toxic effect on the human body. This study scientifically confirms the improvements by measuring the probability of human damage using a Probit model and comparing the automatic fluid treatment system inside the dike with the current dike in the case of massive spills from a Hydrogen fluoride (55%) storage tank.

Key words: chemicals control act, hydrofluoric acid, dike, probit model

1. 서론

2015년부터 화학물질관리법이 시행되면서 화학사고 예방제도가 기존 유해화학물질관리법 제도보다 대폭 강화되었다. 대표적으로는 시설을 설치하기 전에 위험도를 평가하여 안전을 확보하는 장외영향평가, 사고 시나리오에 따른 비상조치 및 주민대피 계획 등을 수립하는 위해관리계획, 시설·설비 기준에 적합함을 확인하는 취급시설 검사 등은 사전예방제도의 핵심으로 들

수 있다(Shin, *et. al.*, 2015). 2015년 시행 원년의 계도기를 거쳐 2016년부터는 새로운 안전관리제도가 산업계에 본격 정착되어 화학사고 건수가 줄어들기 시작했다(CSC, 2017). 화학사고가 감소한 근거는 환경부 화학물질안전원이 운영하고 있는 화학안전정보공유시스템(CSC)에 구축된 화학사고 통계자료에서 확인이 가능하다(Lee, *et. al.*, 2016). CSC의 자료를 세부적으로 조사한 결과, 2013년부터 2016년까지 국내에서 총 382건의 화학사고가 발생한 것으로 나타났다. 연도별로는

The 1st author: Chang Hyun Shin, Tel. +82-42-605-7027, Fax. +82-42-605-7007, e-mail, yjoy122@korea.kr

+ Corresponding author: Jai Hak Park, Tel. +82-43-261-2460, Fax. +82-43-264-2460, e-mail, jhpark@chungbuk.ac.kr

Table 1. Statistics of chemical accidents for the recent 4 years in Korea

(unit: cases)

Year	Type	(A) Total	On-site		Off-site			
			(B) Sub total (B/A)	Human Error	Lack of facilities management	(C) Sub total (C/A %)	Human Error	Lack of facilities management
2013		86	66 (76.7 %)	35	31	20 (23.3 %)	9	11
2014		105	83 (79.0 %)	49	34	22 (21.0 %)	8	14
2015		113	92 (81.4 %)	36	56	21 (18.6 %)	14	7
2016		78	57 (73.1 %)	25	32	21 (26.9 %)	13	8
Total		382	298 (78.0 %)	145	153	84 (22.0 %)	44	40

* Source: Chemical safety clearing-house, 2017.

2013년 86건, 2014년 105건, 2015년 113건으로 점진적으로 증가하다가 2016년에는 전년 대비 약 31%가 감소한 78건이 발생하였다. 2016년의 감소 현상을 일시적인 것으로 볼 수 있지만, 화학사고 장소별·원인별 통계자료를 자세히 살펴보면 그 의미를 실감할 수 있다. <Table 1>에 연도별 화학사고 발생 건수 및 장소별 사고원인 현황을 요약해서 나타냈다. 장외에서 발생한 운송차량 사고는 감소하지 않았으나, 사업장에서 발생한 사고는 개선의 효과가 뚜렷하다. 여러 요인이 있겠지만, 강화된 안전관리 사전예방제도에 따라 산업계의 안전설비 투자, 시설 개·보수, 정기점검·검사 등 시설관리 측면의 개선효과와 안전교육 실시, 안전캠페인 전개, 작업자 의식 전환 등 운영관리 측면의 개선효과가 사고감소에 기여한 것으로 판단된다. 이는 화학물질관리법 예방제도의 주요 관리사항으로 사고감소와 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다.

강화된 사고예방 규제에도 불구하고 작업자 부주의, 시설관리 미흡 등으로 인한 사고는 완전히 차단하기는 어렵다. 사고를 막기 어렵기 때문에 사고 피해를 최소화하는 조치를 강구하고 화학사고 사례를 분석하여 재발대책을 수립하는 것이 필요하다. CSC 통계시스템에 따르면 사고가 빈번하게 발생하는 장소는 저장탱크, 보관창고, 반응기 등 고압설비, 배관 등 고 위험시설이다(CSC, 2017). 특히, 저장탱크 및 보관창고는 화학물질을 대량으로 취급하기 때문에 화재·폭발이나 누출 사고가 발생하면 대형 재난사고로 확대될 가능성이 매

우 높다. 382건의 화학사고 중 총 76건(약 19.9%)이 저장·보관시설에서 누출, 화재·폭발사고가 발생한 것으로 조사되어 각별한 시설관리가 요구되고 있다. 저장탱크 주변에는 저장탱크의 유출사고를 대비해 방류벽을 설치하여 사고의 피해를 최소화하도록 2015년부터 시설기준을 강화하였다(ME, 2015). 그러나, 물리적 공간이 좁은 지역에 설치되는 경우나 2015년 이전에 설치된 기존시설이 방류벽 이격거리(1.5 m 이상)를 맞추기 위해 시설을 보수하는 것은 매우 어렵다(Shin, *et al.*, 2016). 물리적 제약을 보완하기 위해 신창현 등은 안전설비를 적용하여 저장탱크에서 유출된 물질을 신속하게 감지하여 자동처리 시스템을 이용하여 폐수처리시설로 회수 처리하는 시스템을 도입한 방류벽은 이격거리를 1.0 m까지 완화하는 것을 제안하였다(Shin, *et al.*, 2016). 이격거리가 줄어 확산면적이 감소하기 때문에 대기 확산 평가모델링 프로그램(KORA)를 이용하여 피해 영향범위가 줄어드는 효과도 확인하였다. 누출의 영향은 확산 피해 영향범위와 누출 영향 지속시간에 따른 피해 확률이 동시에 고려되는 것이 필요하나(Leem, *et al.*, 2007), 기존 연구는 피해 영향범위 비교에 초점을 맞췄다. 이에, 본 연구에서는 저장탱크로부터 누출된 물질을 신속하게 처리하는 방류벽 내 자동 회수 처리시스템을 적용한 경우 단순 체류기능을 가진 방류벽과 비교하여 Probit 모델을 이용하여 회수시간(누출 영향시간) 변화에 따른 인체 피해예측 분석을 통해 개선 시스템의 효과를 확인하였다.

II. 연구방법

1. 연구대상 물질

본 연구에 사용될 물질로 국내에서 유통되고 있는 화학물질 현황, 사고발생 현황, 독성 등을 고려하여 위험성 평가에 적합한 불산을 선정하였다. 국내 불산 유통량은 2010년에 39,172톤에서 2014년 88,366톤으로 증가하였고, 사업장의 수도 378개에서 472개로 늘어났다(NICS, 2016). 또한 지난 4년간 13건의 누출사고가 발생하여 액상 독성물질 중에서 상대적으로 많은 사고빈도를 가지고 있다. 불산(55%)은 분자량 20.01, 비중 1.9(20°C 기준), 끓는점 96°C, 녹는점 -36°C, 증기압 68 mmHg(26.7°C 기준)를 갖는다(ERG, 2014). NFPA(National Fire Protection Association) 분류코드에서 건강이 4, 화재 0, 반응 2로 분류되는 독성물질이다. 60분 노출될 경우 인체에 돌이킬 수 없거나 심각한 건강 영향을 주는 등의 독성 농도 ERPG-2(Emergency Response Planning Guideline) 기준은 20 ppm이다(ERG, 2016). 또한, ERPG-1, ERPG-3의 농도기준은 2 ppm, 50 ppm이며, 본 연구에서는 화학물질관리법의 장외영향평가에서 위험평가 및 비상대응에 활용하고 있는 ERPG-2를 적용하였다.

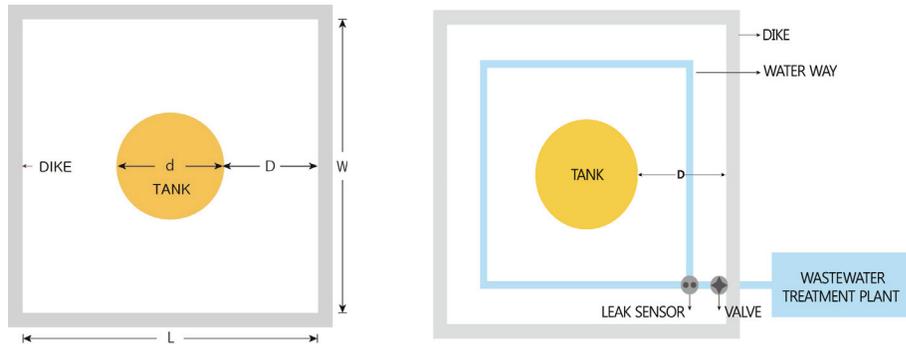
2. 연구대상 시설

본 연구에서는 식각, 세척 등으로 반도체·전기전자 산업에서 널리 사용되는 55% 불산을 25,000 L 용량을 취급하는 저장탱크를 선정하였다. 불산을 수용액으로 취급하기 때문에 저장탱크에서 전량으로 유출되는 최악의 사고를 대비하기 위해 화학물질관리법의 시설기준에 따라 저장탱크 주변에 방류벽(Dike)이 설치되어야 한다. 일반적으로 방류벽 내에 설치된 저장탱크의 최대용량의 110% 이상으로 안전한 이격거리(1.5 m 이상)를 확보하도록 법에서 요구하고 있다(ME, 2015). 방류벽은 저장탱크의 유출사고를 대비해 외부 확산을 막기 위해 저장탱크 주변에 설치되는 방호시설로 분류되며(Shin, 2016), 설계 시 안전하게 수용하는 것과 유

출된 물질로 인한 증발물질이 원활하게 대기로 확산되도록 주의해야 한다(HSE, 2015). 이러한 관점에서 저장탱크로부터 충분한 이격거리 확보와 방류벽의 높이는 중요한 설계변수이다(Shin, *et. al.*, 2016). 화학물질관리법에서는 1.5 m 이상 이격하여 저장탱크에서 유출된 물질이 외부로 흐르지 않도록 저장탱크의 높이와 지름을 고려하여 충분한 방류벽 높이를 공학적으로 선정하도록 요구하고 있다. 물리적 공간이 충분한 신규 사업장은 가능하지만, 공간이 협소한 곳에 설치된 기존 사업장이나 중소기업장은 사정이 달라 법적 기준을 준수하기가 곤란하다.

신창현 등은 1.5 m 이상 준수하기 어려운 사업장의 경우 유출 감지설비를 설치하여 신속하게 유출물질을 폐수처리장으로 유입시키는 자동화 처리 개선 방류벽 시스템을 적용하여 1.0 m로 유예시키는 연구를 수행하였다(Shin, *et. al.*, 2016). 방류벽 이격거리를 줄이는 경우 유출물질의 표면적을 줄여 대기로 증발되는 증발률과 증발량이 감소하여 대기로 확산되는 피해 영향범위가 감소된다(Shin, *et. al.*, 2016). 다만, 방류벽과 저장탱크 간 이격거리가 감소하여 작업공간이 충분하지 않기 때문에 점검활동에 주의를 기울이고, 감지센서와 밸브 장치를 주기적으로 관리하여 유출사고에 대비해야 한다. 신창현 등의 연구는 유출 표면적과 피해 영향범위와의 상관관계를 규명하는 연구 측면에서는 의의가 있지만, 유출 영향 지속성 측면은 고려하지 않은 한계가 있다.

본 연구에서는 유출 영향 지속시간에 따른 피해 영향정도를 분석하기 위해 화학물질관리법에 따른 방류벽 설치조건과 유출물질 자동 처리시스템을 적용한 개선 방류벽 설치조건을 비교 평가하였다(Shin, *et. al.*, 2016). <Figure 1>에 요약해서 나타낸 바와 같이, 왼쪽은 현재 화학물질관리법에 따른 방류벽으로 유출물질을 안전하게 수용하는 역할을 고려하고 있다. 반면에 오른쪽의 개선 시스템은 자동 처리시스템으로 유출물질을 누출 감지설비가 신속하게 감지하여 밸브를 회전시켜 유출물질을 폐수처리장으로 유출물질을 신속하게 유입시키는 방식을



※ Source: Improvement on the Risk of Spill from a Storage Tank of Nitric Acid(Shin & Park, 2016).
 Figure 1. Installation diagram of storage tank and dike (Left : current system, Right : advanced system)

적용하고 있다. 개선 시스템은 안전설비를 이용하여 유출 물질이 신속하게 회수 처리되기 때문에 사고대응요원이 방제를 위해 사고 시 반드시 방류벽 내부로 진입하는 작업이 개선되어 방류벽 이격거리가 일부 완화될 수 있다.

3. 유출 시나리오 및 유출 영향 지속시간 비교

화학물질관리법에 따른 방류벽을 Case A, 자동화 처리설비를 적용한 위험성 개선 방류벽을 Case B로 분류하였다. 25,000 L 불산 수용액 저장탱크에서 전량이 유출되는 최악의 사고 시나리오를 가정하였다(NICS, 2016). 유출물질이 전부 방류벽 내부에 체류하게 되는데 저장탱크에서 유출된 물질이 외부로 확산되지 않기 위한 고유의 기능은 동일하다. Case A는 외부로 안전하게 회수처리까지 보유하고 있으나, Case B는 유출물질을 펌프를 이용하여 폐수처리장으로 신속하게 처리하는 추가적인 기능을 가지고 있다(Shin, et. al., 2016). 자동 유체처리 시스템을 제외한 기상조건 등은 동일한 것으로 가정하였다. Case A의 경우 감지거나 작업자의 순찰을 통해 유출 사실을 발견하여 사고대응기관(소방 등)에 신고 후 자체적으로 초기대응을 한다. 소방은 10분 내외로 현장에 도착하여 초동대응을 실시하고, 환경부와 지자체가 사고 수습을 거쳐 유출물질을 폐기물 처

량을 이용하여 외부로 이송한다. 사고의 규모와 유형에 따라 다르지만, CSC 통계상 일반적인 사고대응 시간은 사고신고 접수 후 3시간 내외로 운반차량이 도착하여 유출물질 전량을 차량에 이송하는데 4시간 10분(250분)이 소요된다. 화학물질관리법의 운반차량 시설 기준에 따르면 운반차량의 토출 펌프 용량은 분당 200 L 이하로 규정하고 있으나, 비용·운영 측면을 고려하여 산업계에서 일반적으로 사용하고 있는 100 L/min를 적용하였다. 이를 종합해보면, Case A의 유출물질 회수처리의 총 소요시간은 7시간 10분(430분)이 된다.

Case B는 누출 감지기가 유출을 진단하면 자동밸브를 전환하여 펌프를 작동시켜 유출물질을 폐수처리장으로 이송한다. 사업장에서 불산을 이송하기 위해 사용되는 이송펌프의 용량을 Case A의 운반차량 펌프 용량과 동일하게 100 L/min로 가정할 경우, 25,000 L를 이송하는데 250분(4시간 10분)이 소요된다. <Table 2>에 Case A와 Case B의 기본조건을 요약해서 나타내었다.

III. 연구결과 및 고찰

1. 방류벽 설치조건에 따른 인체의 피해영향 비교
 Case A에서 유출물질이 외부로 회수 처리되는 시간

Table 2. Comparison of the specification for the two cases

Case \ Type	Tank volume (L)	Type of spill treatment	Pump capacity (L/min)	Spill duration affected (min)
Case A	25,000	Pump from outside transport vehicle	100	430
Case B	25,000	Pump equipped in a dike	100	250

Table 3. Each constant of Probit equations for HF

Substance	U.S. Coast Guard (1980)			World Bank (1988)		
	A _t (ppm)	B _t (ppm)	n	A _t (ppm)	B _t (ppm)	n
Hydrogen Fluoride	-25.87	3.354	1.00	-26.3	3.35	1.0

* Source: Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis, 2000.

Table 4. Conversion from probit to percentages

Percentage (%)	Probits (n applications below)									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	-	2.67	2.95	3.12	3.25	3.36	3.45	3.52	3.59	3.66
10	3.72	3.77	3.82	3.87	3.92	3.96	4.01	4.05	4.08	4.12
20	4.16	4.19	4.23	4.26	4.29	4.33	4.36	4.39	4.42	4.45
30	4.48	4.50	4.53	4.56	4.59	4.61	4.64	4.67	4.69	4.72
40	4.75	4.77	4.80	4.82	4.85	4.87	4.90	4.92	4.95	4.97
50	5.00	5.03	5.05	5.08	5.10	5.13	5.15	5.18	5.20	5.23
60	5.25	5.28	5.31	5.33	5.36	5.39	5.41	5.44	5.47	5.50
70	5.52	5.55	5.58	5.61	5.64	5.67	5.71	5.74	5.77	5.81
80	5.84	5.88	5.92	5.95	5.99	6.04	6.08	6.13	6.18	6.23
90	6.28	6.34	6.41	6.48	6.55	6.64	6.75	6.88	7.05	7.33
%	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
99	7.33	7.37	7.41	7.46	7.51	7.58	7.65	7.65	7.88	8.09

* Source: Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis, 2000.

은 7시간 10분(430분)이고, Case B에서 유출물질이 폐수처리장으로 처리되는 시간은 4시간 10분(250분)이다. Case에 따라 유출 지속시간이 달라 인체 피해영향은 변하는 것이 예상된다. 독성물질 누출로 인한 인체 피해영향을 예측하기 위해 다음과 같이 프로비트 분석을 수행하였다(CCPS, 2000). C(농도) 값은 ERPG-2 값인 20 ppm을 적용하였다.

$$Pr = A_t + B_t \ln T_L \tag{1}$$

$$T_L = C^n t_e \tag{2}$$

여기서, A_t, B_t는 특정 독성물질의 상수(ppm)이다 (<Table 3>).

식 (1)과 식 (2)에서 <Table 3>을 적용(CCPS, 2000)하여 Case A의 Probit을 계산할 결과는 미국 해안경비

대의 계산식은 4.52, 세계은행의 계산식은 4.05 값으로 산출되었다. 이를 <Table 4>를 이용(CCPS, 2000)하여 사망 확률로 환산한 결과 미국 해안경비대의 계산식은 30.6%P, 세계은행의 계산식은 16.7%P로 나왔다. Case B의 Probit은 미국 해안경비대의 계산식은 2.70, 세계은행의 계산식은 2.23 값으로 계산되었다. 이를 사망 확률로 환산한 결과 미국 해안경비대의 계산식은 1%P, 세계은행의 계산식은 1%P로 나왔다. <Table 5>에 Case A와 Case B의 인체의 피해영향 비교를 요약해서 나타내었다. Case B가 Case A의 경우보다 Probit 계산식에 의한 사망 확률이 15.7에서 29.6%P까지 감소한 것으로 확인되었다. 이는 신속한 누출감지 및 자동처리 시스템을 적용한 Case B의 누출지속시간이 Case A 보다 180분 감소하여 노출시간이 줄어들게 되고, 이에 따른 사망에 이르는 가능성이 더 감소한 것으로 나타났다.

Table 5. Conversion from probit to percentages

Type	t _e (min)	C (ppm)	T _L (ppm · min)	Probits (Pr)		Death Percentage (%)	
				U.S. Coast Guard	World Bank	U.S. Coast Guard	World Bank
Case A	430	20	8,600	4.52	4.05	30.6	16.7
Case B	250	20	5,000	2.70	2.23	> 1	> 1

Table 6 Conversion from probit to percentages

Type	Pump Capacity (L/min)	T _e (min)	C (ppm)	T _L (ppm · min)	Probits (Pr)		Death Percentage (%)	
					U.S. Coast Guard	World Bank	U.S. Coast Guard	World Bank
Case B-1	70	357	20	7,143	3.89	3.43	12.9	6.9
Case B-2	80	250	20	6,260	3.45	2.98	6.0	2.8
Case B-3	90	200	20	5,566	3.05	2.59	1.2	> 1
Case B	100	250	20	5,000	2.70	2.23	> 1	> 1

본 연구에서 제안한 시스템이 누출 물질 체류 기능만을 수행하는 기존 방류벽보다 사망 확률이 개선되어 현장에 적용될 수 있는 논리적 근거가 마련되었다.

2. 유출 영향 지속시간에 따른 인체의 피해영향 비교
 누출물질 자동화 처리 시스템이 적용된 방류벽 개선 사양 Case B에 대해 폐수처리장으로 유입하는 펌프 용량의 변화에 따른 사망 확률을 비교 평가하였다. 펌프의 용량은 시설비용과 직접적인 관계가 있으며, 중소영세사업장은 비용을 절감하기 위한 측면에서 적은 용량의 펌프를 설치하는 편이다. 이를 고려하여 100 L/min를 적용한 Case B의 펌프 용량보다 적은 용량을 선정하였다. 펌프의 용량이 줄어들면 단위 시간당 처리량이 감소하기 때문에 노출시간이 늘어난다. 펌프의 처리 용량을 70, 80, 90, 100 L/min로 세분화할 경우 25,000 L 누출물질 용량을 수거하는데 소요시간은 각각 357분, 250분, 200분, 250분이 된다. 이를 식 (1), 식 (2), <Table 3>을 이용하여 Probit를 각각 구하면 <Table 6>과 같다.

미국 해안경비대의 계산식은 Case B-1이 3.89, Case B-2가 3.45, Case B-3이 3.05로 계산되었고, 세계은행의 계산식은 Case B-1이 3.43, Case B-2가 2.98, Case B-3이 2.59로 산출되었다. 이를 <Table 4>를 이용하여 사망 확률로 환산한 결과 미국 해안경비대의 계산식은 Case B-1이 12.9%P, Case B-2가 6.0%P, Case B-3이 1.2%P로 계산되었고, 세계은행의 계산식은 Case B-1이 6.9%P, Case B-2가 2.8%P, Case B-3이 1%P로 산출되었다. <Table 5>에 각 Case 별로 인체의 피해영향 비교를 요약해서 나타내었다. 펌프 용량이 감소하면 유출물질이 회수 처리되는데 시간

이 늘어나 노출 영향시간이 증가하여 사망 확률이 높아지게 되고, 펌프 용량이 증가하면 그 반대가 된다. 이 때문에 사업장은 비용측면에서 적은 용량을 선정하기 보다는 저장탱크에서 누출되는 사고로부터 독성 노출에 따른 사망 확률을 감소시키기 위해서는 용량이 큰 펌프를 선정해야 한다. 한편, 100 L/min을 적용한 Case B에서 사망 확률이 최소값이 1%P를 갖기 때문에 사망 확률 측면만 고려했을 경우 이보다 큰 용량을 선정하는 것은 개선의 효과가 미비한 것으로 나타났다.

IV. 결론

본 연구는 독성이 강한 불산 수용액(55%)을 취급하는 25,000 L 저장탱크에서 최악의 사고 시나리오를 가정하여 전량이 누출된 경우를 가정하였다. 유출사고로 인한 인체의 피해영향을 비교 평가하기 위해 유출물질의 피해 확산을 막고 회수 처리하기까지 체류시키는 기존의 방류벽(Case A)과 유출물질을 신속하게 감지하여 폐수처리장으로 유입시켜 노출시간을 줄인 유체 자동화 처리 시스템의 방류벽(Case B)으로 구분하여 회수 처리시간(노출시간)의 변화를 조사하였다. 아울러, 자동 유체처리 시스템(Case B)에서 유출물질의 회수 시간에 영향을 주는 펌프 용량의 변화에 따른 인체의 피해영향도 함께 분석하였다. 사망 확률은 미국 해안경비대의 계산식과 세계은행의 계산식을 적용하였다.

1. Case A의 Probit은 미국 해안경비대의 계산식은 4.52, 세계은행의 계산식은 4.05 값으로 산출되었다. 이를 사망 확률로 적용한 결과 미국 해안경비대의 계산식은 30.6%P, 세계은행의 계산식은 16.7%P로 산출되었다.

2. Case B의 Probit은 미국 해안경비대의 계산식은 2.70, 세계은행의 계산식은 2.23 값으로 계산되었다. 이를 사망 확률로 적용한 결과 미국 해안경비대의 계산식은 1%P, 세계은행의 계산식은 1%P로 나왔다.
3. Case B가 Case A의 경우보다 Probit 계산식에 의한 사망 확률이 15.7%P에서 29.6%P까지 감소한 것으로 확인되었다. 이는 신속한 누출 감지 및 자동처리 시스템을 적용한 Case B의 누출 지속시간이 Case A 보다 180분 감소되어 유출물질의 회수 처리시간(노출시간)이 줄어들어 사망 확률이 감소한 것으로 나타났다.
4. Case B에서 펌프의 처리 용량을 70(Case B-1), 80(Case B-2), 90(Case B-3), 100(Case B) L/min로 변경할 경우 Probit을 구하면 Case B-1이 3.80, Case B-2가 3.45, Case B-3이 3.05로 계산되었고, 세계은행의 계산식은 Case B-1이 3.43, Case B-2가 2.98, Case B-3이 2.59로 산출되었다. 이를 <Table 7>과 <Table 8>을 이용하여 사망 확률로 환산한 결과 미국 해안경비대의 계산식은 Case B-1이 12.9%P, Case B-2가 6.0%P, Case B-3이 1.2%P로 계산되었다. 세계은행의 계산식은 Case B-1이 6.9%P, Case B-2가 2.8%P, Case B-3이 1%P로 산출되었다.
5. 펌프 용량은 설치비용과 직접적인 관계가 있으며, 노출시간 증가하여 사망 확률이 높아지게 된다. 다만, Case B의 경우 사망 확률이 최소값이 1%P를 갖기 때문에 사망 확률 측면만 고려했을 경우 이보다 큰 용량을 선정하는 것은 개선의 효과가 미비한 것으로 나타나 100 L/min을 초과한 경우 비용을 증가시키는 요인이 될 것으로 판단된다.

References

Lee, Tae Hyeong, Sang Jae Lee, and Chang Hyun Shin. 2016. Statistical Analysis of Chemical Substance Transporting Accidents. *Korean Institute of Fire Science & Engineering*.

30(6): 23-80.

Leem, Sah Wan, Yong Jeong Huh, and Jong Rark Lee. 2007. A Study on Estimation of Human Damage for Shock Wave by Vapor Cloud Explosion using Probit Model. *The Korean Society of Mechanical Engineers*. 31(11): 936-914.

Ministry of Environment. 2015. The Chemicals Control Act. Ministry of Environment.

National Institute of Chemical Safety(NICS). 2014. Emergency Response Guideline(ERG). NICS.

National Institute of Chemical Safety(NICS). 2016. Emergency Response Guideline(ERG). NICS.

National Institute of Chemical Safety(NICS). 2016. Guidelines for selecting Scenario of Chemical Accidents. NICS.

National Institute of Chemical Safety(NICS). 2016. Pollutant Release and Transfer Register. NICS.

National Institute of Chemical Safety(NICS). 2017. Chemical Safety Clearing-house. NICS.

Shin, Chang Hyun and Jai Hak Park. 2016. Improvement in the Risk Reduction of Dikes of Storage Tanks Handling Hazardous Chemicals. *Crisisonomy*. 12(1): 83-93.

Shin, Chang Hyun and Jai Hak Park. 2016. Improvement on the Risk of Spill from a Storage Tank of Nitric Acid. *Crisisonomy*. 12(5): 119-132.

Shin, Chang Hyun, Chung Soo Lee, Jae Eun Kang, Beyong Chol Ma, Yi Yoon, Jun Hyeon Yoon, and Jai Hak Park. 2015. Review on the Safety Management System of Facilities Handling Hazardous Chemicals under the Chemicals Control Act. *Crisisonomy*. 11(6): 245-262.

U.S.A Center for Chemical Process Safety(CCPS). 2000. Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis(2nd. edition). CCPS.

UK HSE. 2015. Storage of flammable liquids in tanks, Health and Safety Executive. HSE.

Korean References Translated from the English

신창현, 박재학. 2016. 유해화학물질 저장탱크 방류벽의 위험성 저감 방안. *Crisisonomy*. 12(1): 83-93.

신창현, 박재학. 2016. 질산 저장탱크 유출사고의 위험도 개선. *Crisisonomy*. 12(5): 119-132.

- 신창현, 이청수, 강재은, 마병철, 윤이, 윤준현, 박재학. 2015. 화학물질관리법의 유해화학물질 취급시설 안전관리 체계 고찰. *Crisisonomy*. 11(7): 19-33.
- 이태형, 이상재, 신창현. 2016. 화학물질 운송 화학사고 특성 분석에 관한 연구. *한국화재소방학회*. 30(6): 23-80.
- 임시환, 허용정, 이종락. 2007. Probit 모델에 의한 증기운 폭발 충격파의 인체피해예측. *대한기계학회*. 31(11): 936-941.
- 화학물질안전원. 2014. 비상대응핸드북(ERG). 화학물질안전원
- 화학물질안전원. 2016. 화학물질 배출·이동량(PRTR) 정보시스템. 화학물질안전원.
- 화학물질안전원. 2016. 화학사고 시나리오 선정에 관한 기술지침. 화학물질안전원.
- 화학물질안전원. 2017. 화학안전정보 공유시스템(www.csc.me.go.kr). 화학물질안전원.
- 화학물질안전원. 2016. 비상대응핸드북. 화학물질안전원.
- 환경부. 2015. 화학물질관리법. 환경부.

Received: Apr. 27, 2018 / Revised: May 10, 2018 / Accepted: May 18, 2018

Probit 모델을 이용한 불산 저장탱크 누출의 인체피해 예측

국문초록 최근 4년간 국내에서 발생한 저장·보관시설의 유출사건은 전체 382건 중 약 19.9%로 사고 위험이 비교적 높다. 저장탱크 주변에는 유출의 확산을 막기 위해 저장탱크의 높이와 지름을 고려하여 방류벽이 설치된다. 방류벽의 단순 기능만 고려하면 물리적인 차단과 증발물질의 원활한 대기 확산이 필수적이다. 최근 안전시스템의 개발로 방류벽 내 누출감지 설비와 자동 유체처리 시스템을 적용하면 회수시간이 줄어들어 인체에 미치는 독성 피해영향이 개선되는 효과를 얻을 수 있다. 본 연구는 불산(55%) 저장탱크에서 대량 유출시 자동 유체처리 방류벽과 기존 방류벽을 Probit 모델을 이용한 인체 피해 확률을 비교하여 개선 효과를 확인하였다.

주제어 : 화학물질관리법, 불산, 방류벽, 프로빗 모델

Profiles **Chang Hyun Shin** : He is a first author. He has been studying safety engineering in Chungbuk National University and working at the National Institute of Chemical Safety. The major paper are “Design of the safety standard at hydrofluoric acid handling facilities for risk reduction(2018)” and so on. The interested areas are safety engineering, handling facility standards, machine safety(yjoy122@korea.kr).

Joong Don Park : He is a second author, working at the National Institute of Chemical Safety. The major task is chemical accident prevention. The interested areas are RMP(Risk Management Prevention), training, root cause analysis of accidents and so on(donnydonny@korea.kr).

Soo Mi Kim : She is a third author, working at the National Institute of Chemical Safety. The major task is chemical accident preparedness planning. The interested areas are accident response, RMP(Risk Management Plan), chemical prevention and so on(ksm3604@korea.kr).

Gyeong Seok Seo : He is a fourth author, working at the National Institute of Chemical Safety. The interested areas are handling facility standards, risk assessment, terrorism and so on(skkm03@korea.kr).

Jun Heon Yoon : He is a fifth author. After a doctor's degree in Korea University, he is working at the National Institute of Chemical Safety. The major paper are “Analysis on the Risk of the Impermeable Concrete Bottom of Dikes for Nitric Acid Storage Tanks (2016)” and so on. The interested areas are risk assessment, CCPS and so on(soiljh@korea.kr).

Jai Hak Park : He is a corresponding author. After a bachelor's degree in Seoul National University and a master's and doctor's degree in KAIST, majored in mechanical engineering, he is professor of safety engineering in Chungbuk National University. The major paper are “Estimation of Leak Rate through Circumferential Cracks in Pipes in Nuclear Power Plants(2015)” and so on. The interested areas are mechanical safety, fracture mechanics, structural safety and so on(jhpark@chungbuk.ac.kr).