

API-581에 의한 위험기반검사에서 독성가스의 누출사고 결과분석

이 헌 창 · 김 환 주 · 신 동 일 · † 김 태 옥

명지대학교 공과대학 화학공학과
(2004년 8월 9일 접수, 2004년 9월 22일 채택)

Consequence Analysis for Accidental Releases of Toxic Gases through Risk Based Inspection using API-581

Hern-Chang Lee · Hwan-Joo Kim · Dongil Shin and Tae-Ok Kim

Department of Chem. Eng., College of Eng., Myongji University
(Received 9 August 2004 ; Accepted 22 September 2004)

요 약

독성가스의 누출은 공정설비의 위험도에 크게 영향을 미친다. 본 연구에서는 API-581에 의한 위험기반검사에서의 매개변수의 변화에 따른 독성가스(암모니아 및 염소 가스)의 누출사고 결과를 분석하였다. 그 결과, 독성물질의 누출에 의한 사고결과, 즉 독성 피해영역은 온도가 증가할수록, 그리고 압력과 파이프 직경이 감소할수록 감소하였으며, 동일한 누출조건에서 암모니아 보다 염소가스인 경우에 큰 값을 나타내었다.

Abstract - Accidental releases of toxic gases heavily affect to the risk of process facilities. In this research, consequence analysis for accidental releases of ammonia and chlorine gases was studied using the risk based inspection, based on API-581 BRD. It was found out that consequence areas (toxic areas) decrease as temperature increases and as the pipe diameter and pressure decrease. For the same release condition, the toxic area by the release of chlorine gas was larger than that by the release of ammonia gas.

Key words : risk based inspection (RBI), consequence analysis, API-581, toxic gas, ammonia, chlorine

1. 서 론

석유화학, 정유, 가스 등 에너지 산업분야의 기술이 급속하게 발전함에 따라 각종 설비들은 복잡·다양화되고 있으며, 더욱이 생산효율을 증가시키기 위해 압력설비와 같은 고온·고압의 조건 하에서 운전되는 시설과 설비의 사용이 급증하고 있다[1]. 이와 같은 설비들은 설치 후 시간이 지남에 따라 점차 노후화 되기 때문에 보수, 대체 또는 폐기하고 있으나 경제적 또는 환경적 문제로 보수나 대체가 용이하지

않기 때문에 이로 인한 대형사고의 가능성은 매우 높아지고 있다[2].

따라서 노후화 된 장치들은 유지·보존 상태와 경제성 및 안전성에 따라 가장 효과적이고 적절한 시기에 검사하고 보수해야 할 필요성이 있으며, 이를 해결하기 위해 최근 미국석유화학협회(API)에서는 위험도에 기반하여 검사의 우선순위를 결정하고, 검사에 소요되는 자원을 관리하기 위한 방법인 위험기반검사(risk based inspection, RBI) 기법을 개발하였고 [3,4], 이를 바탕으로 다양한 RBI 프로그램이

개발·보급되어 현장에 적용하고 있다[5,6].

본 연구는 한국 실정에 적합한 새로운 위험기반검사 프로그램을 개발하기 위한 연구의 일환으로 API-581 BRD[7]에 의한 RBI에서 위험도 결정에 중요한 사고결과, 즉 사고 피해크기를 독성가스(암모니아 및 염소 가스)의 누출사고에 대해 분석하였다. 이를 위해 화학물질, 공정조건, 장치조건 등을 변화시키면서 누출속도와 독성 피해영역을 산출하고, 해석하였다.

2. 이 론

2.1. 정량적 RBI

정량적 RBI는 장치에 대한 위험도를 산출하여 검사의 우선순위를 결정하는 방법으로, 누출 시나리오(s)별 위험도(risk)는 사고발생 가능성과 사고결과 크기의 곱으로 식 (1)과 같이 나타낸다[4,7].

$$(\text{Risk})_s = (\text{LOF})_s \times (\text{COF})_s \quad (1)$$

여기서 사고발생 가능성(likelihood of failure, LOF)은 설비의 파손확율이나 파손횟수를 나타내고, 사고결과 크기(consequence of failure, COF)는 피해면적 또는 피해 손실액으로 나타낸다.

API-581에 의한 RBI에서 가연성 또는 독성 물질의 누출에 의한 사고결과 크기는 Fig. 1과 같이 대표유체를 결정하고, 누출 시나리오를 작성하여 누출속도를 산출한 후 누출량과 확산을 고려하여 피해범위를 산정한다. 이때, 설비 내의 검출 및 차단시스템의 완화조치에 따라 누출지속시간과 피해크기가 변화된다.

2.2. 누출유형 및 최종상태

누출유형은 3분 이내 10,000 lb_m 이상이 누출되는 경우에 순간누출로, 그리고 누출공 직경이 1/4 inch 이하인 경우에 연속누출로 가정한다. 또한 누출 후 확산경향은 운전조건과 대기조건에서 상(phase)에 따라 변화하며, 상 변화가 없으면 최종상태는 초기상태와 동일하다. 그러나 상 변화가 있는 경우에 초기-최종 상태가 기체-액체는 기상모델로, 액체-기체는 정상 끓는점이 80°F 이상인 경우에만 액상모델로 해석한다[7].

2.3. 누출공

위험기반검사에서 누출공(release hole)의 크기는 소형, 중형, 대형, 그리고 파열형으로 분

류하여 적용하며, 누출공의 크기는 사업장 내·외의 잠재적인 피해영향에 따라 선택되는데, 주로 사업장 내의 경우에는 발생 가능성이 높은 소형 및 중형의 누출공이 사용되고, 사업장 외의 경우에는 중형 및 대형의 누출공이 사용된다.

따라서 배관에서는 4가지 표준 누출공, 즉 누출공의 직경이 배관직경보다 작거나 같으면 1/4, 1, 4 inch, 그리고 파열형을 사용하며, 이때 배관에서 누출공의 발생 가능성은 Table 1과 같다.

2.4. 누출속도

위험기반검사에서 피해크기 예측은 모든 누출을 순간누출 또는 연속누출로 모델화하고, 누출속도는 물질의 물리적 특성, 초기상태 및 공정조건에 따라 다르기 때문에 물질이 설비 내에 있을 때 물질상태에 근거하여 정확한 누출속도 방정식을 선택하고, 물질이 누출됨에 따라 물질의 누출형태(음속 또는 아음속)를 선택한다.

누출공을 통한 기체의 누출형태는 음속과 아음속 형태로 나타나며, 이를 결정하기 위하여 식 (2)에 의해 산출한 설비 내의 압력이 P_{trans} 보다 클 경우에는 식 (3)의 음속기체 누출속도식을 이용하고, 압력이 P_{trans} 보다 작거나 같을 경우에는 식 (4)의 아음속 기체 누출속도식을 이용한다[8].

$$P_{trans} = P \left(\frac{k+1}{2} \right)^{\frac{k}{k-1}} \quad (2)$$

$$Q_G(\text{sonic}) = C_d A P \sqrt{\left(\frac{kM}{RT} \right) \frac{g_c}{144} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}}} \quad (3)$$

$$Q_G(\text{subsonic})$$

$$= C_d A P \sqrt{\left(\frac{M}{RT} \right) \frac{g_c}{144} \left(\frac{2k}{k-1} \right) \left(\frac{P_o}{P} \right)^{\frac{2}{k}} \left\{ 1 - \left(\frac{P_o}{P} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right\}} \quad (4)$$

여기서 Q_G 는 기체 누출속도(lb_m/s), C_d 는 누출계수(0.60-0.64), A 는 누출공의 단면적(in²), P 는 운전압력(psig), P_o 는 대기압, k 는 C_p/C_v , M 은 분자량, R 은 기체상수(ft³ · psi/mol · R), T 는 온도(R), 그리고 g_c 는 전환인자(32.174 lb_m · ft/lb_f · s²)이다.

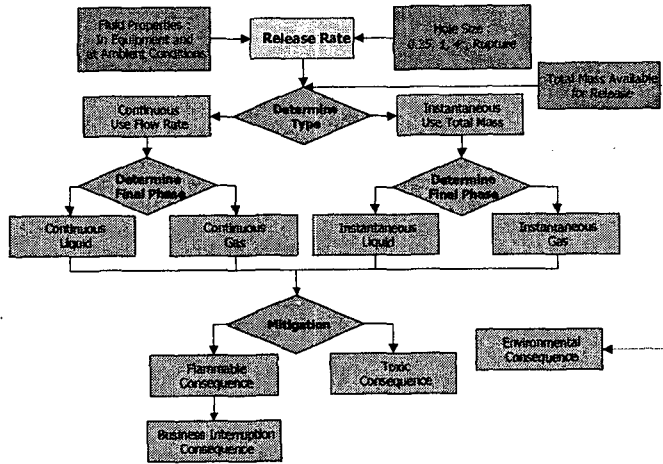


Fig. 1. Calculation procedure of consequences.

Table 1. Suggested generic equipment failure frequencies[7].

Equipment type	Leak frequency(per year for 4 hole sizes)			
	1/4 in	1 in	4 in	Rupture
Piping, 0.75 in diameter, per ft	1×10^{-5}			3×10^{-1}
Piping, 1 in diameter, per ft	5×10^{-6}			5×10^{-1}
Piping, 2 in diameter, per ft	3×10^{-6}			6×10^{-1}
Piping, 4 in diameter, per ft	9×10^{-7}	6×10^{-1}		7×10^{-6}
Piping, 6 in diameter, per ft	4×10^{-7}	4×10^{-1}		8×10^{-6}
Piping, 8 in diameter, per ft	3×10^{-7}	3×10^{-1}	8×10^{-6}	2×10^{-6}
Piping, 10 in diameter, per ft	2×10^{-7}	3×10^{-1}	8×10^{-6}	2×10^{-6}
Piping, 12 in diameter, per ft	1×10^{-7}	3×10^{-1}	3×10^{-6}	2×10^{-6}
Piping, 16 in diameter, per ft	1×10^{-7}	2×10^{-1}	2×10^{-6}	2×10^{-6}
Piping, >16 in diameter, per ft	6×10^{-8}	2×10^{-1}	2×10^{-6}	1×10^{-6}

2.6. 피해영역

위험기반검사에서서는 일반적으로 정제설비에서 독성위험을 유발하는 원인이 되는 암모니아(NH₃), 염소(Cl₂) 등과 관련이 있는 위험을 평가한다. 일반적으로 설비 내에 있는 물질의 농도가 IDLH (immediately dangerous to life or health), 즉 생명이나 건강에 즉각적으로 위험한 수치 이하의 값이면, 독성 누출물질을 평가할 필요는 없으며, 암모니아는 300 ppm, 그리고 염소는 30 ppm이 이에 해당된다.

API-581[7]에서는 연속누출 또는 순간누출에서 누출속도 또는 누출량에 대한 피해영역(ft²)을 확산된 구름형태로부터 산출하여 식 (5)의 관계를 제시하였으며, 상수 c와 b의 값은 Table 2와 같다.

$$A = cx^b \tag{5}$$

여기서 x는 누출속도(lb_m/s) 또는 총 누출량((lb_m)이다.

따라서 4가지 누출공(0.25, 1, 4 inch, 파열)에서 산출한 피해면적(Area)을 사용하여 식 (6)에 의해 가중평균 피해영역을 산출한다.

Weighted average area =

$$\sum_{n=1}^{n=4} (Area)_n \times \frac{(Frequency)_n}{\sum_{n=1}^{n=4} (Frequency)_n} \tag{6}$$

여기서 Frequency는 Table 1의 고장 발생율이다.

Table 2. Constants in Eq. (5)

Gas	Instantaneous release		Continuous release		
	c	b	Release time(min)	c	b
Ammonia	14.17	0.9011	10	3374	1.2032
			30	8673	1.1872
			60	14835	1.1836
Chlorine	14.97	1.177	10	16317	1.0784
			30	23381	1.1355
			60	46166	1.0868

3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 API-581 절차에 따라 독성물 질인 암모니아와 염소 가스의 누출에 의한 사고피해 크기를 독성 피해영역에 대해 산출하고, 매개변수의 영향을 해석하였으며, 이때 매개변수의 변화범위는 Table 3과 같다.

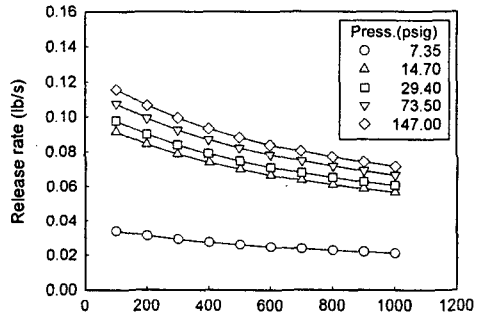
Table 3. Parameter ranges for calculation of consequence area.

Gas	Pipe dia.(in)	Temp.(°F)	Pressure(psig)
Ammonia	1	100	7.35
Chlorine	2	200	14.70
	4	300	29.40
	8	400	73.50
	16	500	147.00
		600	
		700	
	800		
	900		
	1,000		

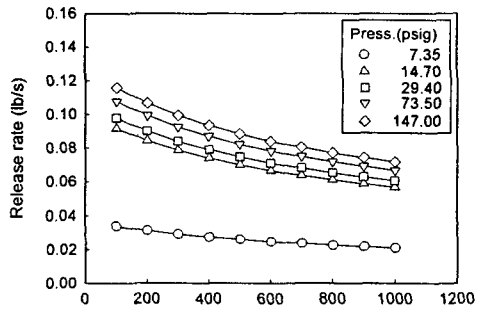
* Shaded areas represent standard conditions.

Fig. 2는 암모니아와 염소 가스의 연속누출에서 누출속도에 미치는 온도와 압력의 영향을 나타낸 것으로, 누출속도는 가스 종류에 거의 무관하게 온도증가에 따라 서서히 감소하고, 압력증가에 따라 낮은 압력범위에서는 큰 폭으로 증가하였으나, 그 이후에서는 거의 비례적으로 증가하였다. 이와 같은 결과는 API-581 절차에 의해 산출한 가연성 물질의 누출사고 피해결과[9]와 일치한다.

따라서 Fig. 3에서와 같이 누출속도로부터 산출된 독성 피해영역은 누출속도에서와 비슷한 경향을 나타내었을 뿐만 아니라 독성이 큰 염소가스가 암모니아 보다 상당히 큰 값을 나타내었다.



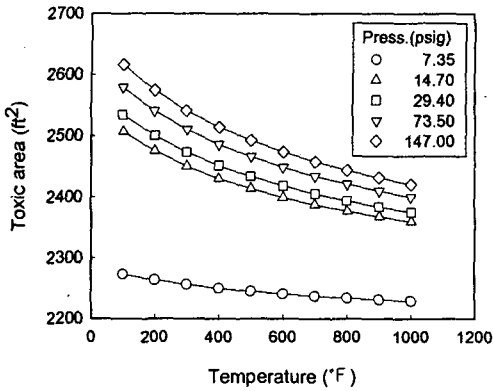
(a) Ammonia



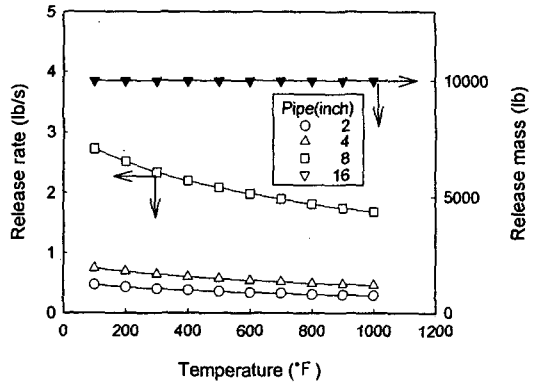
(b) Chlorine

Fig. 2. Effect of temperature and pressure on release rate at 1 inch pipe.

Fig. 4와 Fig. 5는 2기압에서 암모니아와 염소가스의 누출속도 및 독성 피해크기에 미치는 온도와 파이프 직경의 영향을 나타낸 것으로, 이때 본 연구에서는 누출유형의 판단기준인 10,000 lb_m를 순간 누출량으로 기준하고, 누출시간을 산출하여 판단한 결과, 파이프 직경이 8 inch 이하에서는 연속누출을, 그리고 16 inch에서는 순간누출을 각각 나타내었다.

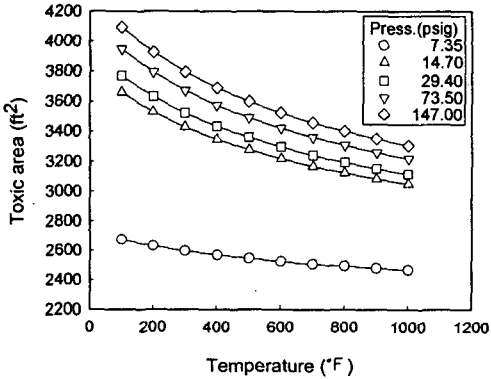


(a) Ammonia



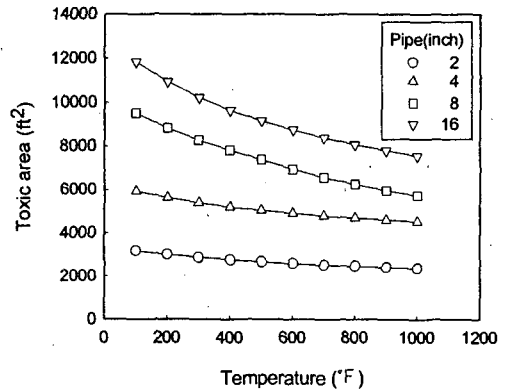
(b) Chlorine

Fig. 4. (continued).

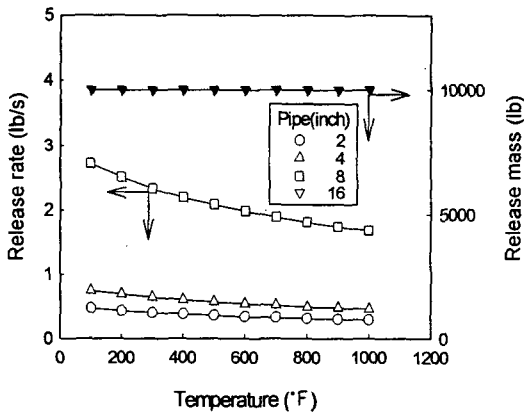


(b) Chlorine

Fig. 3. Effect of temperature and pressure on toxic area at 1 inch pipe.

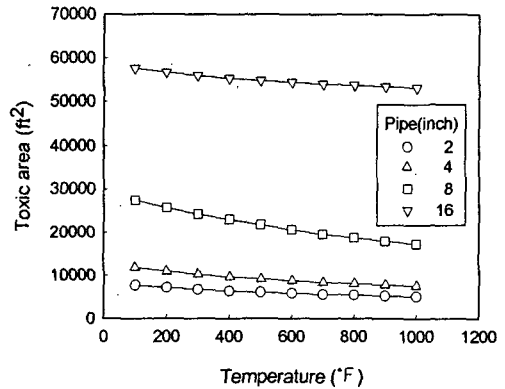


(a) Ammonia



(a) Ammonia

Fig. 4. Effect of temperature and pipe diameter on release rate at 29.4 psig

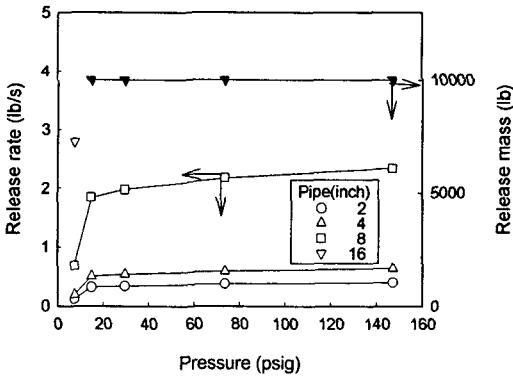


(b) Chlorine

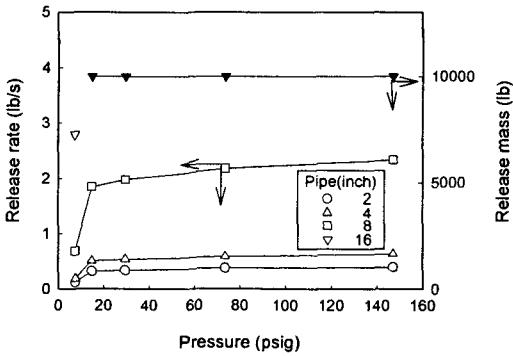
Fig. 5. Effect of temperature and pipe diameter on toxic area at 29.4 psig.

Fig. 4에서 연속누출의 경우에는 파이프 직경의 증가에 따라 누출속도는 급격히 증가하고, 온도의 영향은 다소 증가하였으나 순간누출에서는 누출량이 상당히 크고, 온도에 무관하였다. 또한 Fig. 5에서와 같이 독성 피해영역은 누출유형에 무관하게 파이프 직경이 증가할수록 증가하였다.

Fig. 6은 600°F에서 누출속도에 미치는 파이프 직경의 영향을 나타낸 것으로, 이때 직경이 8 inch 이하의 파이프에서는 연속누출을, 그리고 16 inch 직경의 파이프에서는 순간누출을 각각 나타내었다. 그림에서 연속누출속도는 압력증가에 따라 낮은 압력범위에서는 급격히 증가하고, 그 이후에서는 서서히 증가하는 경향을 나타내었다. 또한 누출속도로부터 산출한 독성 피해영역은 Fig. 7에서와 같이 누출유형에 무관하게 압력증가에 따라 약 20 psig이하의 낮은 압력에서는 급격히 증가하고, 그 이후에서는 서서히 증가하였다.

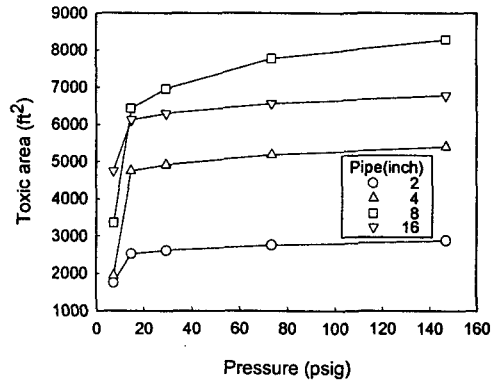


(a) Ammonia

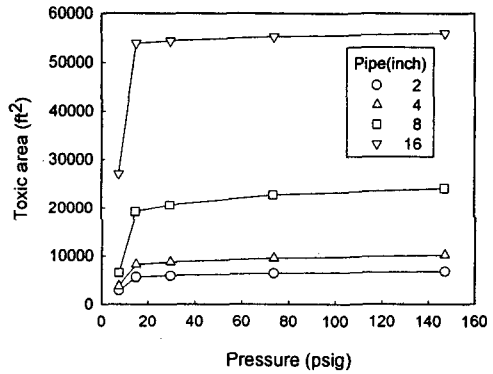


(b) Chlorine

Fig. 6. Effect of pressure and pipe diameter on release rate at 600 °F.



(a) Ammonia



(b) Chlorine

Fig. 7. Effect of pressure and pipe diameter on toxic area at 600 °F.

이상의 결과, 즉 위험기반검사에서 위험도 결정에 중요한 사고 결과분석은 위험경감 방안 제시에 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

4. 결론

API-581에 의한 위험기반검사에서 매개변수 변화에 따른 독성가스(암모니아 및 염소 가스)의 누출사고 결과를 분석하였다. 그 결과, 사고 결과의 크기, 즉 독성 피해영역은 온도가 증가할수록, 그리고 압력과 파이프 직경이 감소할수록 감소하였으며, 동일한 누출조건에서 암모니아 보다 염소가스인 경우에 큰 값을 나타내었다. 따라서 이 결과를 바탕으로 설비의 위험경감 방안을 제시할 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] F. P. Lees, *Loss Prevention in the Process Industries*, Butter-worths, London (1980).
- [2] T. A. Kletz, *What Went Wrong?*, Gulf Publishing Co., Houston, TX (1986).
- [3] API, *Based Resource Document of Risk Based Inspection : API 580*, American Petroleum Institute, New York (2001).
- [4] CRTD/ASME, *Risk-Based Inspection : Development of Guidelines*, American Society of Mechanical Engineers, CRTD-20-1, New York (1991).
- [5] DNV, *Risk Based Inspection : Inspection Optimization*, <http://www.dnvprocess.com/process/Main-Insp/RBI.htm>, Des Norske Veritas(DNV) Technical Manual (2001).
- [6] KUMHO, *BD Plant Risk-Based Inspection Case Study*, KUMHO Co. Ltd. (2001).
- [7] API, *Risk-Based Inspection - Basic Resource Document : API 581*, American Petroleum Institute, New York (2000).
- [8] CCPS/AIChE, *Consequence Analysis of Chemical Release*, American Institute of Chemical Engineers, New York (1999).
- [9] H. C. Lee, *Improved Risk-Based Inspection Supporting the Quantitative Cause Analysis*, Ph.D. Thesis, Myongji University (2004).