



## 압력용기에서 가스 누출사고에 의한 피해지역 및 재정적 손실의 매개변수 분석

김봉훈 · 이현창\* · †최재욱

부경대학교 안전공학과, \*DNV Korea

(2011년 4월 3일 접수, 2011년 10월 28일 수정, 2011년 10월 28일 채택)

## Parameter Analysis of the Damage Area and the Financial Loss by the Gas Release Accident at Pressure Vessels

Bong-Hoon Kim · Hem-Chang Lee\* · †Jae-Uk Choi

Dept. of Safety Engineering, University of Bukyung, \*Det Norske Veritas Korea

(Received April 3, 2011; Revised October 28, 2011; Accepted October 28, 2011)

### 요 약

현실적인 사고 피해크기 예측에 의해 사업장의 안전경영을 달성할 수 있도록 하기 위하여 인화성 가스를 사용하는 압력용기에서 가스 누출사고에 의한 피해지역과 재정적 손실에 영향을 주는 매개변수를 분석하였다. 그 결과, 재정적 손실은 조업중단 비용이 가장 크게 영향을 미쳤으며, 설비의 종류와 재질, 공정 특성 및 주변 환경을 잘 고려하는 것으로 나타났다. 또한 사업장에는 피해지역 보다 재정적 손실로 사고 피해크기를 산출하는 것이 보다 현실성이 있었다.

**Abstract** - To achieve the safety management of an industry by using practical consequence analysis, parameters affecting damage area and financial loss by gas release accident were analyzed at pressure vessels containing flammable gas. As a result, the total financial loss cost was largely effected by the business interruption cost, and it was considered for equipment type and materials, process properties, and circumstances. Also, the consequences of the financial loss must be practically used more than the consequences of the damage area in industry.

**Key words** : consequences, damage area, financial loss, API 581, safety management

### I. 서 론

위험기반검사(risk-based inspection, RBI) 기법은 2000년대에 와서 API를 중심으로, 설비의 최적의 검사방법을 제공하기 위하여 API Publ. 581[1]이 개발된 이후 2008년에 API RP 581[2]가 개발되었다. API RP 581 2판에서 가장 핵심적인 부분은 재정적 손실의 고려이다. 즉, 초판에서는 사고 피해크기를 산출할 경우 피해지역을 중심으로 평가하도록 하였으나, 2판에서는 설비손상비용(equipment damage cost), 조업

중단비용(business interruption cost), 안전비(safety cost) 등을 고려한 총 손실비용(total cost)에 근거하여 피해크기를 산출하도록 하고 있다.

외국에서는 RBI에 의한 정밀진단을 수행할 경우 대부분이 정량적 평가방법인 재정적 손실에 근거하여 설비의 위험도(risk)를 산출하고 있으나, 국내의 경우는 사고와 관련된 자료 부족 등의 이유로, 재정적 손실에 근거한 평가 보다는 피해지역을 중심으로 위험도를 산출하고 있는 실정이다.

피해지역을 중심으로 사고 피해크기를 산출할 경우 피해범위는 작으나 재정적으로 크게 영향을 줄 수 있는 설비에는 부적합한 모순을 가지고 있다. 이러한

†교신저자:jwchoi@pknu.ac.kr

이유로 API에서는 재정적 손실을 기반으로 하는 사고 피해크기를 사용하도록 권장하고 있다[2].

뿐만 아니라 정량적 위험성 평가(quantitative risk assessment, QRA)[3]에서는 위험거리 산출을 기준으로 하고 있으나, 최근 DNV사의 PHAST FINANCIAL 과 같은 프로그램은 설비에서 고장으로 인한 결과를 손실비용으로 산출하여 재정적 위험성을 평가할 수 있도록 하고 있다[4].

사업장에서는 안전관리를 하기 위해 설비에 대한 위험도 등급을 부여한 후 등급에 따라 차등하여 적용하고 있는 추세이다[5,6]. 이때, 피해지역에 근거한 위험도 등급은 공정의 특성 및 환경은 고려하지 않고, 고온·고압의 대규모 설비는 위험도 등급을 높게 책정하고 있다. 그러나 실제 사업장의 관점에서는 피해지역도 중요하지만 사업 중단과 같은 손실이 안전경영에 있어서 보다 큰 영향을 주게 된다.

따라서 본 연구에서는 인화성 가스를 사용하는 압력용기에서 누출이 발생하는 경우를 대상으로 하여 화학공정의 과학적인 안전관리를 위하여 피해지역과 재정적 손실에 영향을 줄 수 있는 매개변수의 영향에 대하여 분석하였다.

## II. 이론적 배경

압력용기에서 인화성 가스의 누출에 의한 사고 피해크기의 산출절차는 누출원모델, 누출형태, 사고 피해크기 산출 및 재정적 손실평가의 순서로 이루어진다.

### 2.1. 누출원모델

압력용기에서 인화성 가스가 누출공으로부터 누출될 경우 식 (1)을 이용하여 저장압력이  $P_{trans}$  보다 클 경우에는 음속 누출원모델인 식 (2)를 적용하고, 저장압력이 작은 경우에는 아음속 누출원모델인 식 (3)을 이용하여 누출속도를 산출할 수 있다[1,2,7].

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

$$W = C_d A P_s \sqrt{\left( \frac{k M_w g_c}{R T_s} \right) \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}}} \quad (2)$$

$$W = C_d A P_s \sqrt{\left( \frac{M_w g_c}{R T_s} \right) \left( \frac{2k}{k-1} \right) \left( \frac{P_{atm}}{P_s} \right)^{\frac{2}{k}} \left( 1 - \left( \frac{P_{atm}}{P_s} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right)} \quad (3)$$

여기서  $P_{trans}$ ,  $P_{atm}$ ,  $P_s$ 는 각각 전이압력[kPa], 대기

압[kPa], 저장압력(kPa)이고, k는 이상기체 비열비[-], W는 이론 누출속도[kg/s],  $C_d$ 는 누출계수[-], A는 누출공 단면적[mm<sup>2</sup>],  $M_w$ 는 분자량[kg/kg-mol],  $g_c$ 는 중력상수[kg·m/N·S<sup>2</sup>], R은 이상기체상수[8,314 J/kg-mol·K], 그리고 T는 저장온도[K]를 나타낸다.

### 2.2. 누출형태

산출된 사고 피해크기는 선택된 누출형태에 따라 큰 차이가 있다. 따라서 API에서는 누출의 유형을 Fig. 1과 같이 정의하고 있다. 즉, 누출공이 작은 1/4

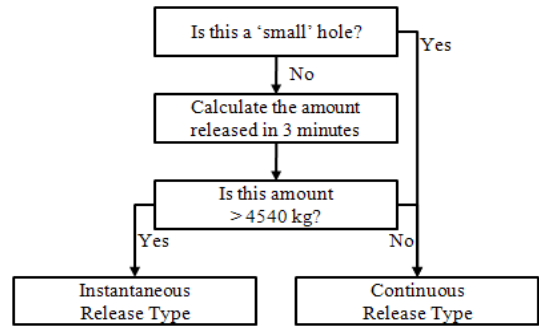


Fig. 1. Determination of release type.

Table 1. Consequence equation constants

Fluid	Type	Continuous releases constants			
		Auto-ignition not likely		Auto-ignition likely	
		a	b	a	b
H <sub>2</sub>	Damage	13.13	0.992	86.02	1.00
	Injury	32.05	0.933	228.8	1.00
NG	Damage	8.669	0.98	55.13	0.95
	Injury	21.83	0.96	143.2	0.92
LPG	Damage	10.13	1.00	64.23	1.00
	Injury	25.64	1.00	171.4	1.00
Fluid	Type	Instantaneous releases constants			
		Auto-ignition not likely		Auto-ignition likely	
		a	b	a	b
H <sub>2</sub>	Damage	9.605	0.657	216.5	0.618
	Injury	18.43	0.652	636.5	0.621
NG	Damage	6.469	0.67	163.7	0.62
	Injury	12.46	0.67	473.9	0.63
LPG	Damage	4.590	0.72	79.94	0.63
	Injury	9.702	0.75	270.4	0.63

inch에서는 연속누출로 가정하고, 이외의 누출공에서는 3분간 누출량이 4,540 kg을 초과하는 경우에 순간누출로 사고 피해크기를 산출한다[1,2].

2.3. 누출지속시간

API에서는 검출시스템과 차단시스템의 등급에 따라 누출공의 크기별 지속시간을 제시하고 있으며, 검출 및 차단시스템이 자동인 경우 작은 누출공에서는 20분, 중간(1 inch) 누출공에서는 10분, 큰 누출공(4 inch)에서는 5분을 제시하고 있다. 또한 재고량과 누출속도로부터 실제 가능한 누출지속시간을 산출한 후 API[1,2]에서 제시된 시간을 비교하여 더 작은 누출시간을 최종 누출시간으로 결정한다.

2.4. 피해면적

각 누출공별 피해면적은 연속누출인 경우 식 (4), 순간누출인 경우 식 (5)를 이용하여 산출할 수 있다. 이때, 누출속도는 2.1절에서 산출된 누출속도를 사용하며, 상수 a, b는 Table 1의 값을 이용한다.

$$Area_{cont} = a(rate_n)^b \tag{4}$$

$$Area_{inst} = a(mass_n)^b \tag{5}$$

누출공별 산출된 피해면적은 식 (6)에서와 같이 적용된 설비의 고장률을 이용하여 가중평균에 의한 방법으로 가중평균면적을 산출하게 된다[1,2].

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

2.5. 재정적 손실 산출

산출된 피해면적을 바탕으로 재정적 손실비용을 산출할 수 있다[1,2]. 이때, 설비손상 비용은 장치손상지역과 단위면적당 설비비용(equipment cost, USD/m<sup>2</sup>)을 곱하여 산출할 수 있으며, 조업중단비용(business interruption cost)은 조업중단일수(outage day)와 조업중단비용(outage cost, USD/day)으로부터 산출된다. 또한 안전비용(safety cost)은 상해지역을 이용하여 인구밀도(population density, 1인/m<sup>2</sup>)와 상해비용(injury cost, USD/1인)을 곱하여 산출할 수 있다. 또한 총비용(total cost)은 조업중단비용과 안전비용을 더하여 산출한다.

III. 매개변수

3.1. 영향인자

인화성 가스의 누출에 의한 화재 및 폭발의 피해 영향을 분석하기 위하여 사고 시나리오의 변수 변화 범위를 Table 2와 같이 설정하여 피해지역 및 재정적 손실에 대한 영향분석을 수행하였다. 이때, 적용된

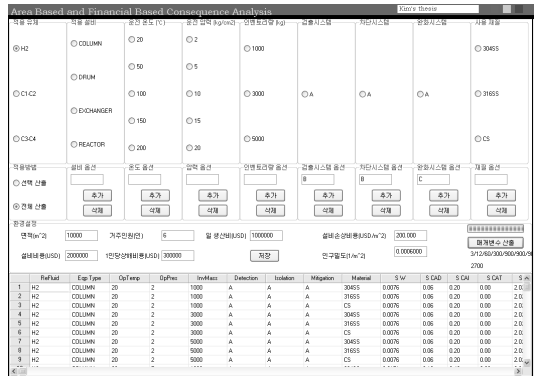


Fig. 2. Parameters analysis program.

Table 2. Parameters ranges

Fluid	Equip.	Operating temp. [°C]	Operating press. [kgf/cm <sup>2</sup> ]	Inventory amount [kg]	Material	Population [Person]	Injury cost [USD/person]	Production [USD/day]
H <sub>2</sub>	Column	20	2	5,000	CS	6	500,000	1,000,000
NG	Drum	50	5	10,000	304SS	10	1,000,000	2,000,000
LPG	Exchanger	100	10		316SS			
	Reactor	150	15					
		200	20					

Note) Shared areas are standard condition.

검출, 차단 및 완화시스템은 완전히 자동화된 공정이라고 가정하였고, 공장의 부지는 10,000 m<sup>2</sup>, 설비 비용은 100,000,000 USD으로 가정하였다.

### 3.2. 분석 프로그램

설정된 매개변수를 기준으로 Fig. 2와 같이 비주얼 프로그램인 DELPHI Ver.7.0을 사용하여 매개변수 분석 프로그램을 작성하였다. 작성된 프로그램을 이용하여 모든 결과는 엑셀파일로 출력하여 데이터를 분석하였다.

### 3.3. 등급 설정

피해지역과 재정적 손실의 등급 비교를 위하여 API RP 581의 권장사항에 따라 Table 3과 같이 등급 기준을 설정하였다[2].

Table 3. Setting of consequence category

Cat.	Damage area[m <sup>2</sup> ]		Financial loss[USD]	
	From	To(incl.)	From	To(incl.)
A	0	9.29	0	10 <sup>5</sup>
B	9.29	92.90	10 <sup>5</sup>	10 <sup>6</sup>
C	92.90	929.03	10 <sup>6</sup>	10 <sup>7</sup>
D	929.03	9290.30	10 <sup>7</sup>	10 <sup>8</sup>
E	9290.30	∞	10 <sup>8</sup>	∞

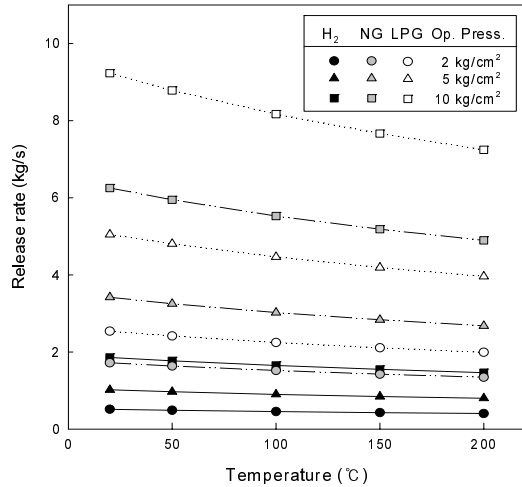


Fig. 3. Release rate for various chemicals at standard conditions.

## IV. 결과 및 고찰

### 4.1. 피해지역

설정된 매개변수로부터 작성된 프로그램을 이용하여 누출속도를 산출하고, 이를 이용하여 장치손상 지역과 상해지역의 피해범위를 예측하였다. 이때, 누출속도, 장치손상지역 및 상해지역은 소, 중, 대, 파열의 4가지 시나리오에 대하여 산출하고, 가중평균면적을 산출하였다.

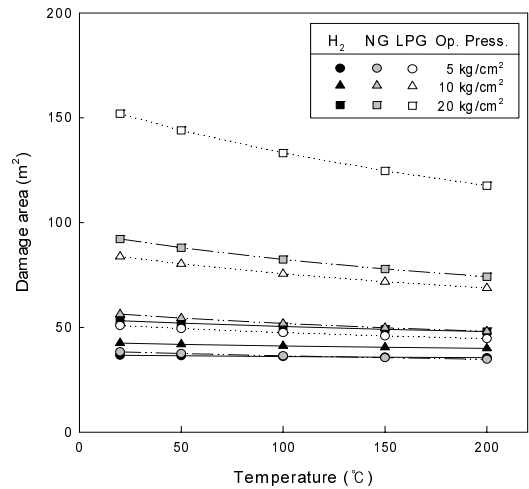


Fig. 4. Damage area for various chemicals at standard conditions.

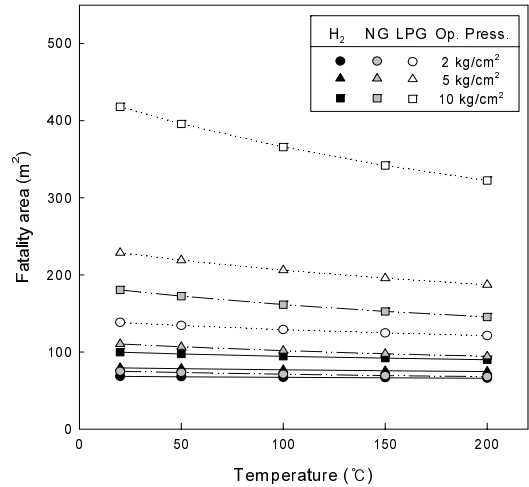


Fig. 5. Fatality area for various chemicals at standard conditions.

작성된 프로그램의 결과로부터 산출된 누출속도는 Fig. 3과 같으며, 이때 재고량은 5,000 kg을 기준으로 산출하였다. 그림에서 누출속도는 온도가 증가할수록 감소하고, 압력이 증가할수록 증가하는 경향을 나타내었다. 또한 누출속도는 LPG, NG, H<sub>2</sub>의 순으로 나타났는데, 이것은 누출물질의 분자량이 LPG가 가장 크고, H<sub>2</sub>가 가장 작기 때문이다. 또한 누출속도는 재고량, 설비형태 및 재료의 함수가 아니기 때문에 영향을 받지 않는 것으로 나타났다.

누출속도로부터 식 (5)에 의해 산출한 장치손상지역은 Fig. 4와 같이 누출속도의 변화경향과 유사하였다. 특히, 압력이 낮은 경우인 5 kg/cm<sup>2</sup>에서는 H<sub>2</sub>와 NG의 장치손상지역이 비슷하고, LPG가 다소 크게 나타났는데, 이것은 H<sub>2</sub>가 누출속도는 작으나 연소열이 크기 때문에 피해범위가 비슷하지만, 압력이 증

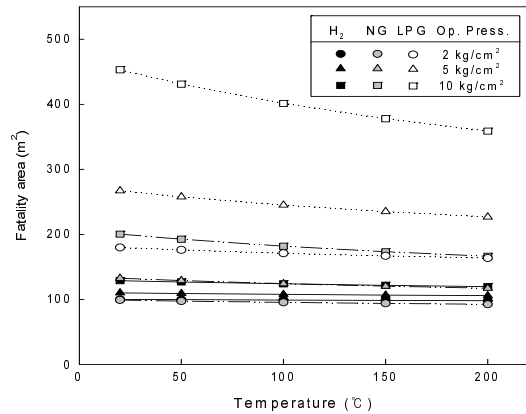
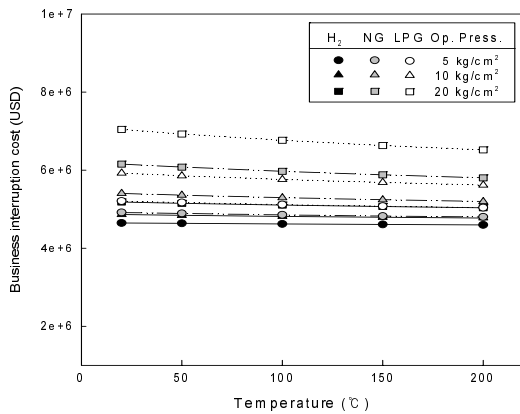
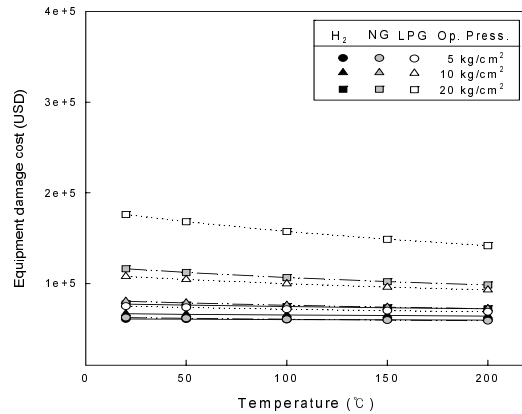


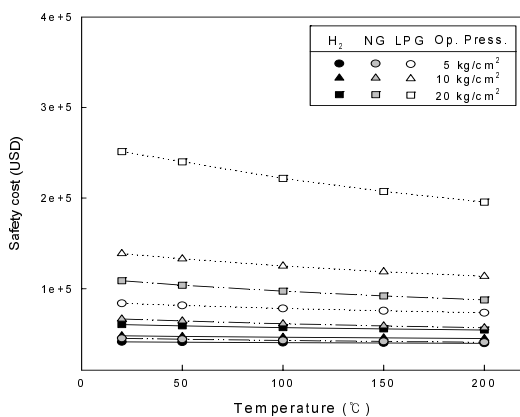
Fig. 6. Fatality area for various chemicals at 10,000 kg inventory amount.



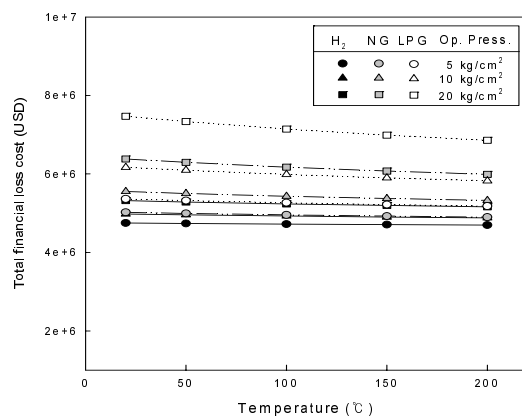
(a) Business interruption cost



(b) Equipment damage cost



(c) Safety cost



(d) Total financial loss cost

Fig. 7. Financial loss for each chemicals at standard conditions.

가할수록 분자량이 큰 NG 및 LPG의 누출량의 증가로 인하여 피해범위가 크게 나타났다. 따라서 피해범위는 누출속도가 작은 경우에는 연소열의 영향을 크게 받으며, 누출속도가 큰 경우 연소열보다 누출속도(량)에 크게 의존하는 것으로 나타났다.

또한 상해지역은 Fig. 5와 같이 장치손상지역과 동일한 경향을 나타내었으며, 피해범위의 크기는 약 2.5배 정도가 크게 나타났다. 이것은 동일한 압력에서도 설비의 손상보다 인적인 손상을 더 크게 영향을 미치기 때문이다.

표준조건에서 재고량을 10,000 kg인 경우의 상해지역은 Fig. 6과 같이 표준조건인 Fig. 5의 경우보다 약 1.1배 증가하였다. 이것은 재고량은 누출속도에는 영향을 미치지 않으나 누출될 수 있는 시간이 길어져 장치손상지역 및 상해지역이 다소 증가한 것으로 사료된다.

#### 4.2. 재정적 손실

4.1절의 결과로부터 탄소강 재질(carbon steel)의 칼럼(column)에서 Table 2의 표준조건을 적용하여 재정적 손실을 산출하였다. 이때, 총 재정적 손실비용은 사업중단 손실비용, 설비손상비용, 안전비용을 더하여 산출하였다.

표준조건에서 재정적 손실은 Fig. 7과 같이 나타났으며, 사업중단 손실비용, 안전비용, 설비손상비용의 순서로 나타났으며, 총 재정적 손실비용은 사업중단 손실비용에 크게 영향을 받았다. 특히, 압력이 낮은 경우인 5 kg/cm<sup>2</sup>에서는 인화성 가스의 종류

에 관계없이 손실비용이 비슷하게 나타났는데, 이것은 장치손상지역의 결과에서와 같이 누출속도가 작은 경우 연소열이 크게 영향을 미쳤기 때문이다.

또한 표준조건에서 공정내의 인원과 일생산비를 변화시키면서 총 재정적 손실비용을 산출한 결과는 Fig. 8과 같다. 공정내 인원이 6명이고, 일생산비가 0.5×10<sup>6</sup> USD인 경우 H<sub>2</sub>, NG 및 LPG의 총 손실비용은 크게 차이가 없었으나, 공정내 인원이 10명이고, 일생산비가 1×10<sup>6</sup> USD인 경우는 총 손실비용이

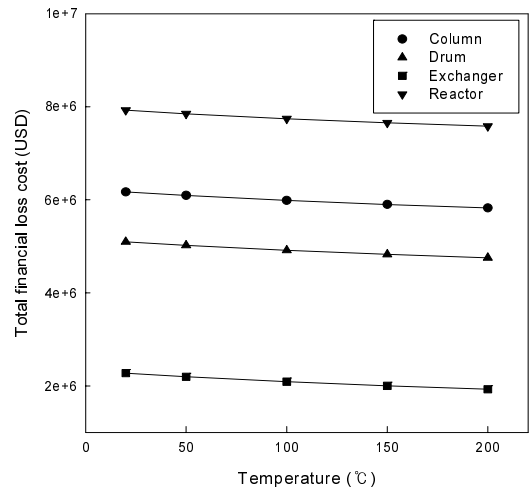


Fig. 9. Comparison of financial loss at various persons and production cost.

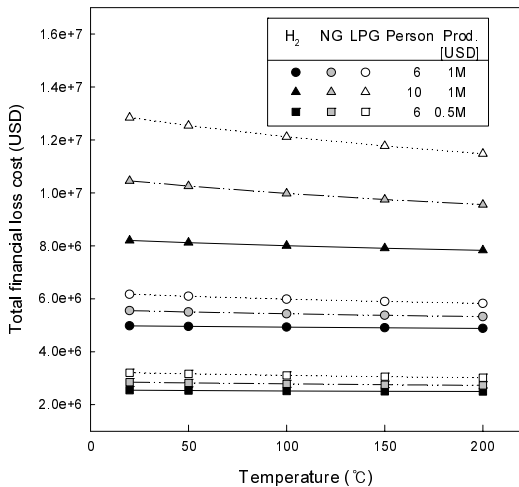


Fig. 8. Comparison of financial loss at various persons and production cost.

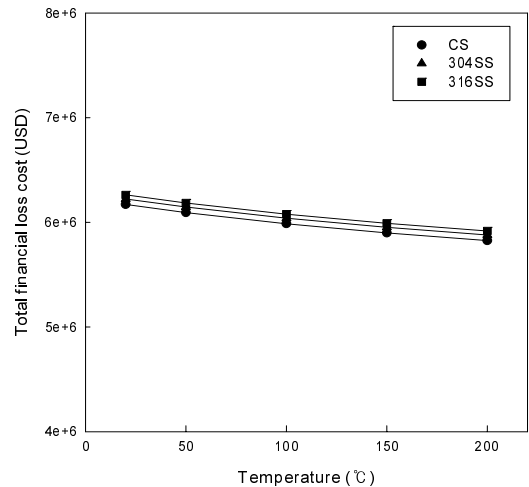
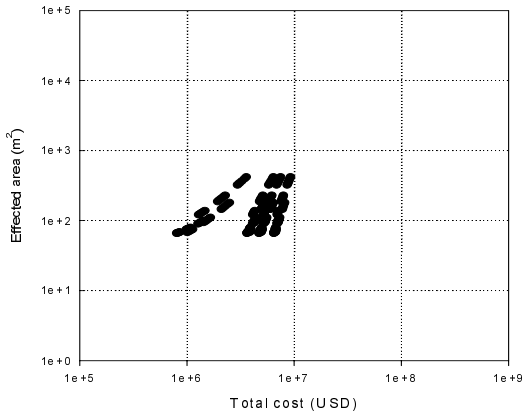
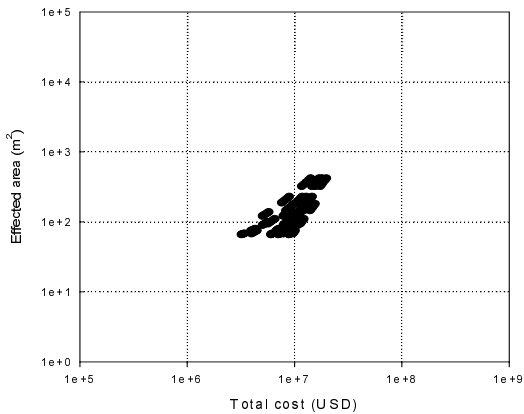


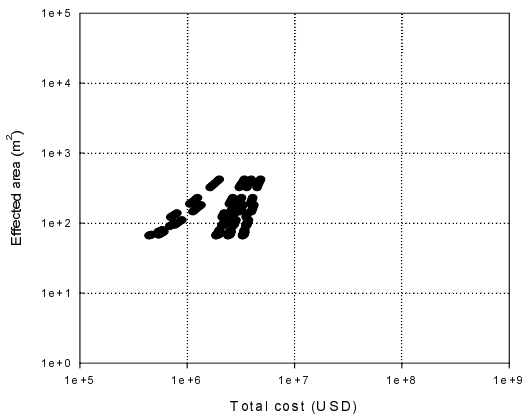
Fig. 10. Comparison of financial loss at various materials.



(a) Standard condition



(b) 10 persons



(c) 0.5M USD product cost

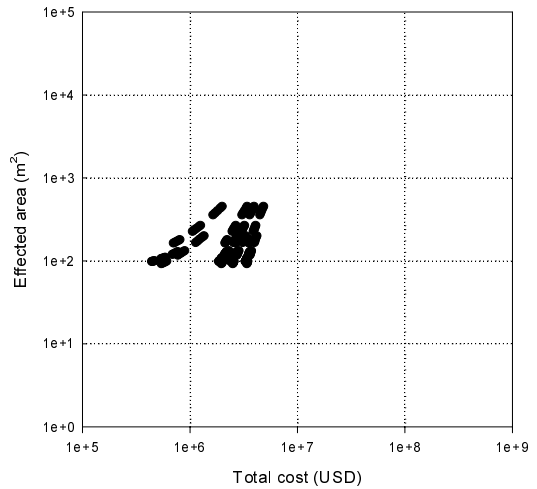
크게 차이를 나타내었다. 이것은 공정내 인원의 증가에 따른 안전비용이 증가하고, 또한 일생산비가 증가함에 따라 조업중단 손실이 증가하여 두 가지의 복합적인 요인에 의해 상대적으로 더 증가한 것으로 생각된다.

표준조건에서 설비의 종류에 따른 총 재정적 손실비용은 Fig. 9와 같이 반응기, 칼럼, 드럼, 열교환기의 순서를 나타내었다. 설비의 운휴일은 칼럼 > 반응기 > 드럼 > 열교환기의 순서로 산출되었으나 반응기의 고장률이 칼럼보다 상대적으로 크기 때문에 가중평균으로 산출할 경우 Fig. 9와 같이 반응기가 칼럼보다 총 재정적 손실비용이 크게 나타나게 되었다. 또한 열교환기의 경우 병렬로 운전되는 경우가 많아서 운휴시간이 짧게 나타났다.

설비재질의 영향을 평가하기 위하여 표준조건 하에 칼럼에서 재질을 변경하며 총 손실비용을 산출하였다. 일반적으로 탄소강이 사용되지만 영향을 고려하기 위하여 스테인리스강을 고려하였다. 그 결과, Fig. 10과 같이 비슷하게 나타났는데, 이것은 재질의 단가 비용이 316SS > 304SS > CS(carbon steel)이기 때문이다.

#### 4.3. 사고 피해크기 비교

사고 피해크기 등급은 피해지역을 기준으로 할 경우에는 일반적으로 장치손상지역, 상해지역, 독성지역을 고려하여 최종 피해지역을 피해크기 등급으로 사용하며, 재정적 손실을 기준으로 할 경우에는 조업중단비용, 설비손상비용 및 안전비용을 고려한



(d) 10,000 kg inventory amount

Fig. 11. Distribution classified by each category for various scenarios.

Fig. 11. (Continued).

총비용을 피해크기 등급으로 사용한다. 따라서 매개변수를 모두 산출하여 피해지역과 총비용을 비교하여 Fig. 11에 나타내었다. 이때, 그래프의 보조선은 Table 3에 의해 설정된 등급의 기준을 나타낸다.

Fig. 11(a)의 표준조건에서는 피해지역이 총 손실비보다 크게 나타났으며, Fig. 10(b)의 공정내 인원이 10명이 존재할 경우에는 전반적으로 비슷하게 나타났다. 또한 Fig. 11(c)의 일생산비가  $0.5 \times 10^6$  USD인 경우에는 표준조건인 Fig. 11(a)와 비교할 때 총 손실비용이 보다 낮게 나타났다. 그리고 Fig. 11(d)는 인벤토리량을 10,000 kg으로 고려한 경우로 표준조건에서보다 총 손실비용이 더 낮게 나타났다.

## V. 결론

본 연구에서는 화학공정의 과학적인 안전관리를 위하여 인화성 가스를 사용하는 압력용기에서 누출이 발생할 경우에 피해지역과 재정적 손실에 영향을 주는 매개변수의 영향에 대하여 분석하였다.

그 결과, 피해지역은 누출물질, 온도 및 압력 등과 같은 공정조건에 크게 의존하며, 설비 종류와 재질, 생산성 등을 고려할 필요가 있는 것으로 나타났다. 총 재정적 손실은 조업중단 비용, 안전비용, 장치손상비용의 순으로 영향을 미치며, 반응기 > 칼럼 > 드럼 > 열교환기의 순으로 나타났다. 또한 공정내의 인원, 일생산비 등도 재정적 손실을 평가함에 있어서 중요한 인자로 작용하였다.

따라서 공정의 특성 및 주변 환경을 고려하면 피

해지역을 고려한 피해크기 보다 재정적 손실을 고려한 사고 피해크기가 보다 현실적이라고 사료된다.

## 참고문헌

- [1] API, *API Publication 581 - Risk-Based Inspection Base Resource Document*, American Petroleum Institute(API), 1st ed., May, (2000).
- [2] API, *API RP 581 - Risk-Based Inspection Technology*, American Petroleum Institute(API), 2nd ed., September, (2008).
- [3] KOSHA, *Consequence Analysis*, Korean Occupational Safety and Health Agency(KOSHA), Incheon, (2010).
- [4] DNV, *PHSAT FINANCIAL*, Technical Manual, DNV, (2010).
- [5] KOSHA, *Update of KOSHA-RBI Program*, Korean Occupational Safety and Health Agency(KOSHA), Incheon, (2007).
- [6] Lee, J. H., Choi, S. K., Lee, H. C., Cho, J. H., and Kim, T. O., "Application of Risk-Based Inspection with Financial Risk for a Petrochemical Process", *Journal of the Korean Institute of Gas*, **13**(4), 53-60, (2009).
- [7] Perry, R. H. and Green, D., *Perry's Chemical Engineering Handbook*, McGraw-Hill, 6th ed., New York, (1984).