



석유화학공장에서 피해지역 및 재정적 손실에 의한 사고 피해크기 비교

김봉훈 · 이현창* · †최재욱**

부경대학교 안전공학과, *DNV Korea, **부경대학교 소방공학과
(2011년 4월 3일 접수, 2011년 12월 26일 수정, 2011년 12월 26일 채택)

Comparisons of the Consequences Based on the Damage Area and the Financial Loss in a Petrochemical Plant

Bong-Hoon Kim · Hern-Chang Lee* · †Jae-Wook Choi**

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

**Dept. of Fire Protection Engineering, Pukyong National University

(Received April 3, 2011; Revised December 26, 2011; Accepted December 26, 2011)

요 약

PSM 제도와 더불어 사고 피해크기 예측기법은 국내 석유화학공장에 많이 보급되어 활용되고 있으나, 사고로 인한 영향, 즉, 작업자, 조업중단, 유틸리티에 미치는 영향을 고려하지 않고, 비상조치계획을 수립하고 있어서 다소 현실적이지 못한 문제점이 있다. 따라서 본 연구에서는 현실적인 비상조치계획을 수립하고, 위험기반 안전관리를 수행할 수 있도록 하기 위하여 석유화학공장의 설비에서 사고로 인한 피해지역과 재정적 손실을 산출하여 사고 피해크기를 비교·분석하였다. 피해지역을 기준으로 하는 경우에는 장치손상지역, 상해지역 그리고 독성지역을 동시에 고려한 안전지역을 기준으로 피해크기 등급을 산출하여야 하고, 또한 공정의 특성 및 주변 환경을 고려하면 피해지역을 기준으로 하는 것보다 재정적 손실을 기준으로 하는 것이 현실적인 사고 피해크기 산출방법이었다.

Abstract - The consequence analysis (CA) is widely using in the petrochemical plant through adoption of the process safety management (PSM) system, but it has not practical problem that the CA was not reflected effects for employee count, business interruption loss, utility usage, and etc.. In this study, to establish the practical emergency response plan and to achieve risk based management, the consequence based on the damage area and the financial loss were estimated and compared through application on facilities in the petrochemical plant. If the damage area is used, the consequence category must be determined by safety area considering simultaneously damage area, fatality area and toxic area. Also, the consequences based on the financial loss is more practical method for the case of considering process properties and circumstances.

Key words : consequence, damage area, financial loss, risk-based inspection (RBI), API 581

1. 서 론

공정안전관리(process safety management, PSM) 제도와 더불어 화학물질을 사용하는 사업장에서는 설비의 건전성과 안전을 위하여 정량적 위험성 평가(quantitative risk assessment, QRA) 기술이 도입되어

적용되고 있다[1]. 특히, 최근 국내의 정량적 위험성 평가는 사고 피해크기 예측(consequence analysis, CA)을 통해 사업장 내 뿐만 아니라 인근 지역주민에게 까지 영향을 미칠 수 있는 결과까지 분석하여 사고로 인한 피해를 최소화할 수 있는 방안으로 활용하고 있다[2]. 또한 국내의 QRA 수준은 사고로 인하여 설비 또는 인명에게 피해를 줄 수 있는 범위를 산출하여 비상조치계획을 수립하고 있다.

†교신저자:jwchoi@pknu.ac.kr

선진국의 경우는 사고피해 영향범위, 즉 피해지역 (damage area)을 기반으로 사고로 인한 사업장의 재정적 손실(financial loss)을 평가하고, 이를 기반으로 안전관리를 수행하고 있다[3]. 특히, DNV사의 PHAST FINANCIAL과 같은 프로그램은 설비에서 고장으로 인한 사고결과를 손실비용으로 산출하여 재정적 위험도를 평가할 수 있도록 하고 있다[4]. 또한 미국석유협회(American Petroleum Institute, API)는 위험기반 검사(risk-based inspection, RBI)를 보다 효율적으로 적용하기 위하여 API RP 581을 개정(2nd ed.)[5]하여 재정적 위험에 근거한 검사주기를 선정하도록 하고 있다. 그러나 국내의 경우 재정적 위험도에 근거한 위험기반검사뿐만 아니라 재정적 피해크기에 대한 연구는 아직 초기단계이다[3,6].

기존의 화재, 폭발, 및 독성에 의한 피해범위에 예측은 사고로 인한 영향, 즉, 작업자, 조업중단, 유틸리티와 같은 영향을 고려하지 않고, 비상조치계획을 수립하였으나, 재정적 손실에 근거한 사고 피해크기 예측은 피해범위에 근거한 사고 피해크기의 모순점들을 해결할 수 있는 장점을 가지고 있어서 현실적인 비상조치계획 수립을 할 수 있다[7].

따라서 본 연구에서는 현실적인 비상조치계획을 수립하고, 위험기반 안전관리(risk based management, RBM)를 수행할 수 있도록 하기 위하여 석유화학공장의 황회수공정에서 사고로 인한 피해지역 및 재정적 손실을 산출하여 사고 피해크기를 비교·분석하였다.

II. 이론적 배경

사고 피해크기를 산출하기 위한 절차는 Fig. 1과 같이 누출공의 크기에 따라 누출유형 및 누출상태를 고려하여 누출속도 또는 누출량을 산출한다. 이때, 인화성 물질인 경우는 장치손상지역과 상해지역을, 독성 물질인 경우 독성지역을 산출한다[5,8]. 또한 피해지역을 기준으로 설비 밀도, 인구 밀도, 그리고 일일생산량 등을 고려하여 재정적 손실비를 산출한다.

2.1. 누출원 모델

설비에서 액체가 누출공을 통하여 누출되는 경우는 식 (1)로부터 초기 누출속도를 산출할 수 있다[9].

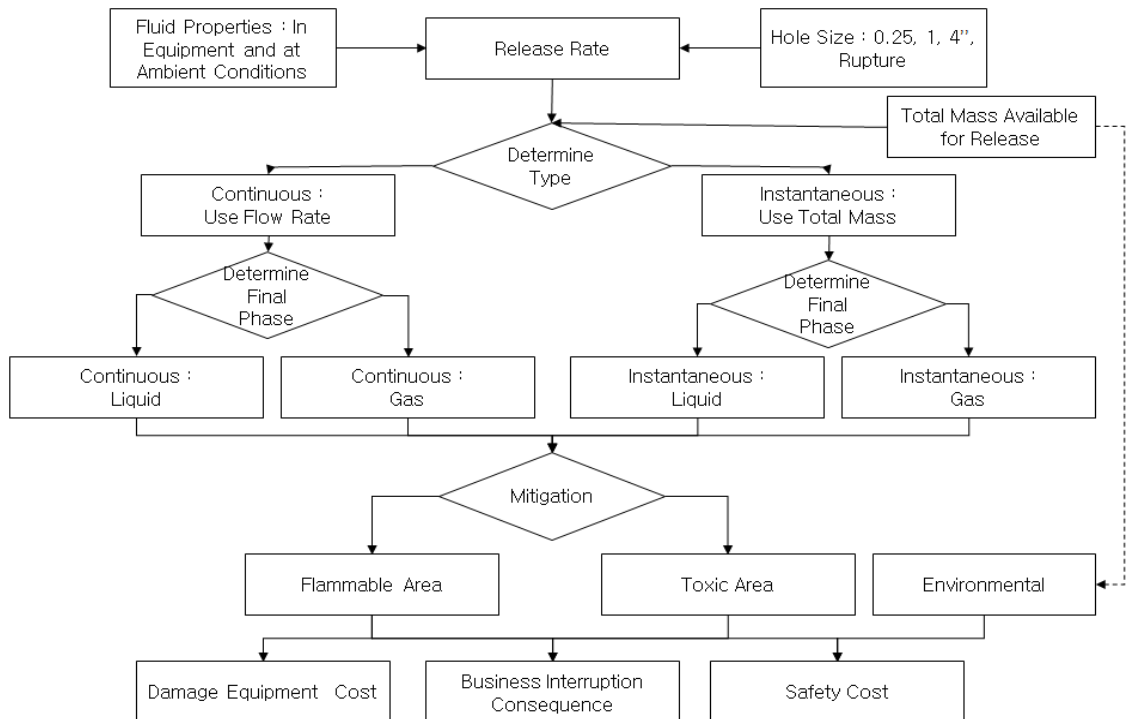


Fig. 1. Procedure for consequence analysis.

$$W = C_d A \sqrt{2g_c \rho_l \Delta P} \quad (1)$$

여기서 W 는 누출속도(kg/s), C_d 는 누출계수(-), ρ_l 는 액체 밀도(kg/m³), A 는 누출공의 단면적(m²), g_c 는 환산인자(kg · m/N · s²), 그리고 P 는 압력(Pa)이다.

또한 기체가 설비의 누출공에서 누출될 경우 식 (2)와 같이 저장압력과 P_{trans} 를 비교하여 음속인 경우에는 식 (3)을, 아음속인 경우에는 식 (4)로부터 누출속도를 산출할 수 있다[5,8].

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

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

$$W = C_d A P_s \sqrt{\left(\frac{M_w g_c}{R T_s} \right) \left(\frac{2k}{k-1} \right) \left(\frac{P_{atm}}{P_s} \right)^{\frac{2}{k}} \left(1 - \left(\frac{P_{atm}}{P_s} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right)} \quad (4)$$

여기서 P_{atm} 은 대기압력(Pa), P_s 는 저장압력(Pa), k 는 열용량비(-), M_w 는 분자량(kg/kmol), R 은 기체 상수(8314 J/kmol K), 그리고 T_s 는 저장온도(K)이다.

2.2. 피해면적 산출

일반적인 사고결과 분석방법에서는 연속누출인 경우에는 누출속도를, 순간누출인 경우에는 누출속도와 누출(지속)시간으로부터 누출량을 산출하여 각 누출공의 크기별로 피해지역을 산출한다. 이때, 누출공별 산출된 피해면적을 사용하여 식 (5)에서와 같이 설비의 고장률을 이용하여 가중평균에 의한 방법으로 가중평균면적을 산출한다[5,8].

$$\text{Weighted average area} = \frac{\sum_{n=1}^{n=4} ((Area)_n \times (Frequency)_n)}{\sum_{n=1}^{n=4} (Frequency)_n} \quad (5)$$

2.3. 재정적 손실 산출

산출된 피해면적을 바탕으로 재정적 손실비를 산출할 수 있다[5,8]. 이때, 설비손상비는 장치손상지역과 단위면적당 장치비(equipment cost, USD/m²)를 곱하여 산출하고, 조업중단손실비(business interruption cost)는 조업중단일수(outage day)와 일당 조업중단비(outage cost, USD/day)로부터 산출한다. 또한 안전비(safety cost)는 상해지역 및 독성지역을 이용하여 인구밀도(population density, 1인/m²)와 상해비(injury cost, USD/1인)를 곱하여 산출한다. 그리고 총비용(total cost)은 조업중단비와 안전비를 더하여 산출한다.

III. 대상공정 선택

3.1. 공정 개요

정유 및 석유화학공정에서는 황과 아민을 포함하고 있으며, 이들은 증류공정에서 오프가스(off-gas)의 형태로 제거된다. 그러나 오프가스가 대기 중에 배출될 경우에는 심각한 환경문제를 발생시킬 수 있기 때문에 이를 회수하여 처리하는 과정을 거치게 된다. 즉, 공정에서 생성된 산성가스(acid gases)는 황 성분을 황산으로 전환하기 위하여 황회수공정으로 보내고, 황회수공정에서 생성된 잔여가스(tail gas)는 소각로(incinerator)를 거쳐 대기로 방출될 수 있는 양을 최소화하기 위해 잔여가스처리공정으로 이송된다.

3.2. 초기 가정

대상공정에서 재정적 손실을 예측하기 위하여 실제 조건을 참조하여 초기 가정을 설정하였다. 이때, 가정된 항목은 설비손상비, 인구밀도, 상해비, 최악의 설비손상비와 최악의 잠재 상해자수로, 각각 222.72 USD/m², 0.0005345 1인/m², 1,000,000 USD/1인, 2,500,000 USD, 6인이었다.

3.3. 데이터 취득

대상공정으로부터 설비의 자료를 취득하기 위하여 공정흐름도(process flow diagram, PFD)에 부식회로(corrosion circuit) 및 인벤토리그룹(inventory group)을 구분하고, 개별설비에 대한 데이터를 취득하였다. 이때, 취득한 설비는 Table 1과 같이 총 467개이었다.

Table 1. Selected equipments count for applied process

Equipment	Pipe	Vessel							Rotating	Total
		Column	Exchanger	Heater	Drum	Filter	Reactor	Tank		
Count	294	12	69	5	16	25	8	1	37	467

Table 2. Consequence category

Category	Damage area [m ²]	Financial loss [USD]
A	0 ~ 9.29	0 ~ 10 ⁵
B	9.29 ~ 92.90	10 ⁵ ~ 10 ⁶
C	92.90 ~ 929.03	10 ⁶ ~ 10 ⁷
D	929.03 ~ 9290.30	10 ⁷ ~ 10 ⁸
E	9290.30 ~ ∞	10 ⁸ ~ ∞

3.4. 피해크기 등급 설정

개별설비의 피해크기 등급을 산출하기 위하여 API RP 581의 권장사항에 따라 Table 2와 같이 등급기준을 설정하였다[8].

IV. 결과 및 고찰

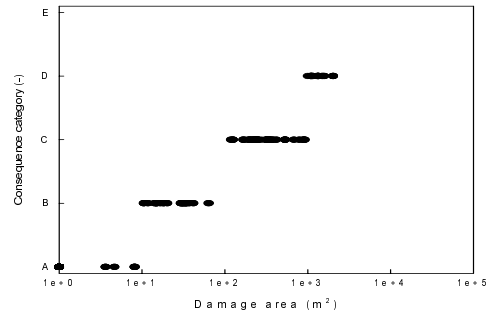
4.1. 피해지역

설비로부터 피해지역을 산출하기 위하여 인화성 물질 및 독성물질을 개별설비별로 입력하였다. 입력된 화학물질로부터 인화성 물질인 경우에는 장치손상지역과 상해지역을, 그리고 독성물질인 경우에는 독성지역을 산출하였으며, 인화성과 독성을 고려하여 안전지역을 산출하였다.

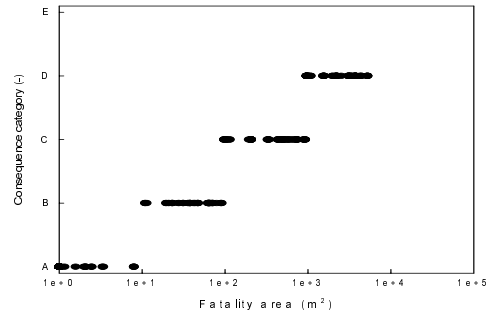
대상공정 설비의 피해지역을 산출한 후 3.4절의 등급 설정기준에 따라 분류된 등급별 설비의 수는 Table 3과 같다. 사용된 물질이 전반적으로 황과 아민을 포함하고 있고, 일부가 인화성 물질을 포함하고 있어서 장치손상지역과 상해지역은 낮은 등급이 많았으나, 독성지역은 전체등급에서 다양하게 나타났다. 특히, 장치손상지역, 상해지역 및 독성지역을 종합적으로 고려한 안전지역에 대한 등급은 전체적으로 다양한 등급분포를 나타내었다.

Table 3. Equipment count for various consequence categories based on damage area

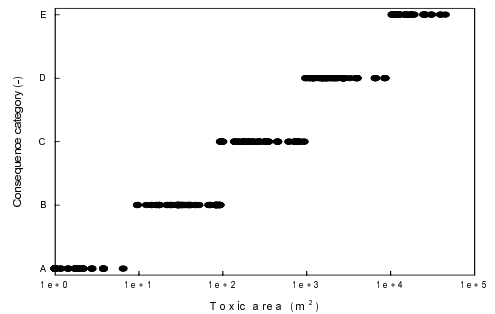
Category	Damage area	Fatality area	Toxic area	Safety area
A	319	288	183	135
B	43	51	77	108
C	76	64	83	95
D	29	64	73	78
E	-	-	51	51



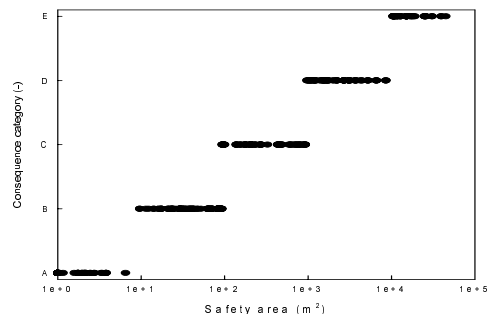
(a) Damage area



(b) Fatality area



(c) Toxic area



(d) Safety area

Fig. 2. Consequence category distributions for various damage area.

등급 분류를 위해 산출된 면적을 기준으로 면적과 등급과의 관계는 Fig. 2에 나타내었다. 장치손상지역의 A등급은 Table 3에서 319개의 설비를 나타내었으나 대부분이 1이하의 값을 나타내어 Fig. 2(a)에서 Category 축 위에 분포하였다. 이것은 적용된 공정의 사용물질이 황과 아민이 대부분이었고, 인화성을 나타내는 경우는 B 등급 이상으로 분포되었기 때문이다. 또한 상해지역을 나타내는 Fig. 2(b)는 장치손상지역과 유사한 경향을 나타내었으나 일부 설비는 등급이 증가되었다. 특히, 독성지역을 나타내는 Fig. 2(c)는 황과 아민의 독성 영향으로 인하여 등급이 A에서 E까지 다양하게 나타났다. 또한 일부 설비에서는 독성물질이 소량으로 포함되어 있어서 A 등급에서 Category 축 위 또는 가깝게 분포를 나타내었다. 따라서 피해지역을 고려한 안전지역은 Fig. 2(d)와 같이 전반적으로 독성지역의 경향을 따르는 것으로 나타났다. 이것은 대부분의 설비가 황과 아민을 포함하고 있기 때문이다.

4.2. 재정적 손실

설비의 피해지역, 인구밀도, 설비손상비, 설비운휴일을 기준으로 재정적 손실을 평가하였으며, 산출된 조업중단비와 총손실비는 Table 4와 같다. 재정적 손실비의 경우는 피해지역의 등급분포와 달리 조업중단 손실비는 B등급까지, 총손실비는 C등급까지 나타내었다. 이와 같은 결과는 재정적 손실에 의한 평가가 공정의 특성을 잘 반영하였으며, 또한 피해지역이 상대적으로 과대평가되었다고 판단할 수 있다.

설비손실비에 대한 등급분포는 Fig. 3과 같이 나타났으며, 사업중단 손실비와 총손실비는 A 등급의 범위 보다 10배 낮은 10,000[USD] 이하를 나타내는 설비가 많이 존재하였으며, 이들 설비는 Category 축 위에 분포하는 것으로 나타내었다. 이것은 유틸리티를 사용하는 일부 설비들이 존재하고, 고장으로 인한 손실일수가 짧아서 상대적으로 손실비가 낮게 평가된 것으로 사료된다.

4.3. 사고 피해크기 비교

Fig. 4는 피해지역과 총손실비를 비교하여 나타낸 것이다. Fig. 4(a)의 경우 개별설비에서 총손실비보다 장치손상지역의 피해크기가 다소 크게 나타났으며, 인화성 물질을 사용하지 않거나 소량인 경우에는 사고 피해크기는 총손실비의 축 위에 나타나는 설비가 많았다. 이것은 장치손상지역은 없거나 낮더라도 재정적 손실을 초래할 수 있음을 의미한다.

Fig. 4(b)에서 상해지역은 장치손상지역의 피해크

Table 4. Equipment count for various consequence categories based on financial loss

Category	Business interruption cost	Total cost
A	420	271
B	47	95
C	-	101
D	-	-
E	-	-

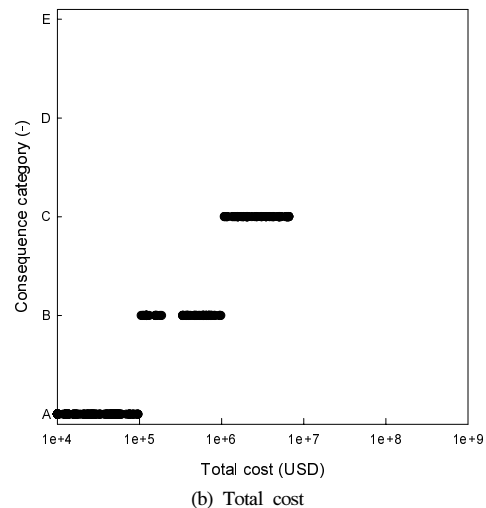
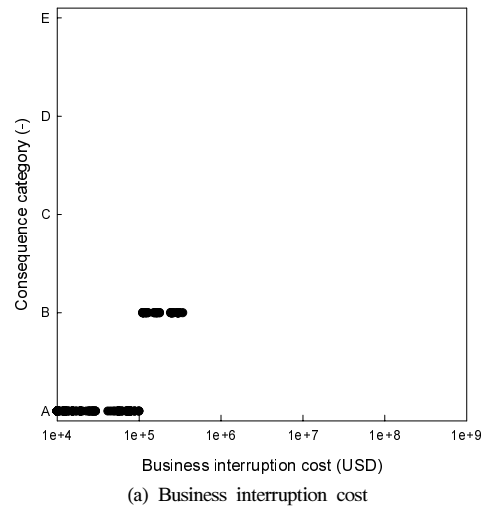


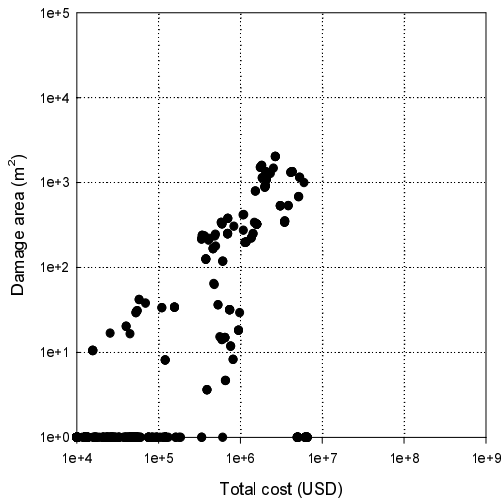
Fig. 3. Consequence category distributions for various financial loss.

석유화학공장에서 피해지역 및 재정적 손실에 의한 사고 피해크기 비교

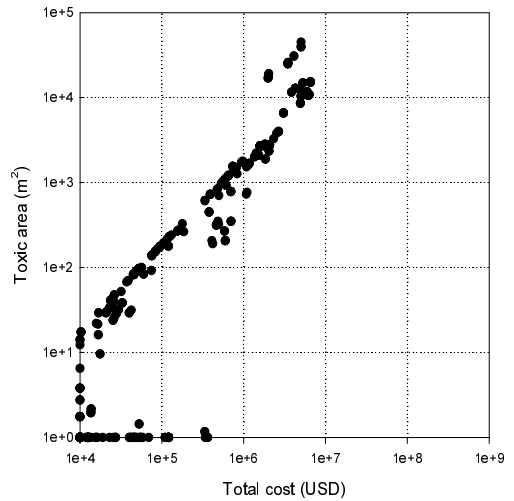
기보다 다소 높게 나타났는데, 이것은 폭발의 경우 동일한 과압(overpressure)이 형성되더라도 설비보다 인적 상해를 입을 수 있는 범위가 크기 때문이다. 장치손상지역의 결과에서와 동일하게 일부 설비는 상해지역이 존재하지 않거나 낮더라도 재정적 손실을 크게 초래하는 것으로 나타났다. 특히, 장치손상지역에서와 달리 상해지역의 축 위에 피해크기를 나타낸 설비들이 있었는데, 이는 스팀(steam)과 같은 유틸리티를 사용할 경우 장치손상지역은 0을 나타

내고, 상해지역은 낮은 값을 나타내기 때문이다. 이러한 경우 상해지역은 낮은 등급범위에서 나타나고, 재정적 손실의 크기는 최소값을 가질 수 있다.

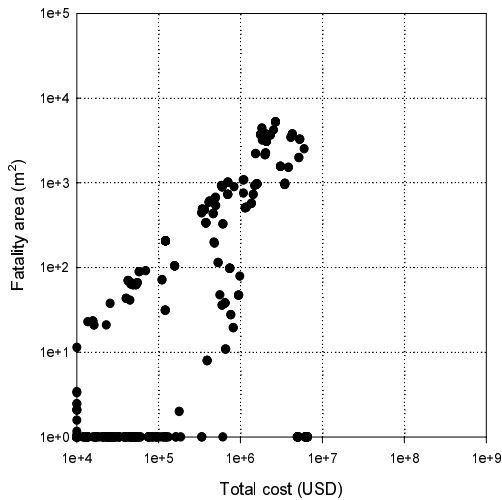
Fig. 4(c)는 독성지역과 총손실비를 나타낸 것으로, 장치손상지역 및 상해지역의 경우 보다 독성지역의 피해크기가 상당히 크게 나타났다. 그리고 독성지역은 D 및 E 등급까지 나타내는 반면, 총손실비는 C 등급까지 나타났다. 즉, 재정적 손실보다는 독성지역의 범위가 상대적으로 과대평가된 것으로 나타났다.



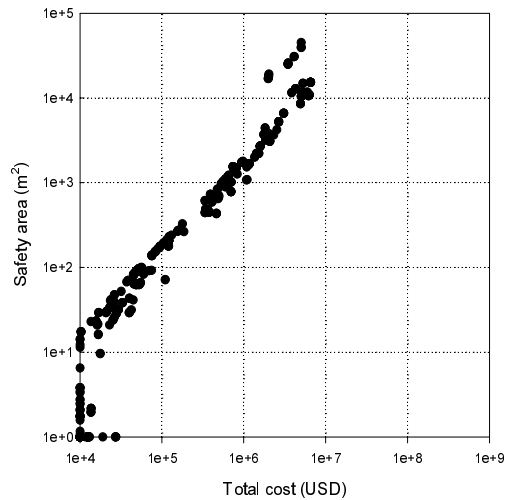
(a) Damage area



(c) Toxic area



(b) Fatality area



(d) Safety area

Fig. 4. Comparisons of consequences based on the damage area and the financial loss.

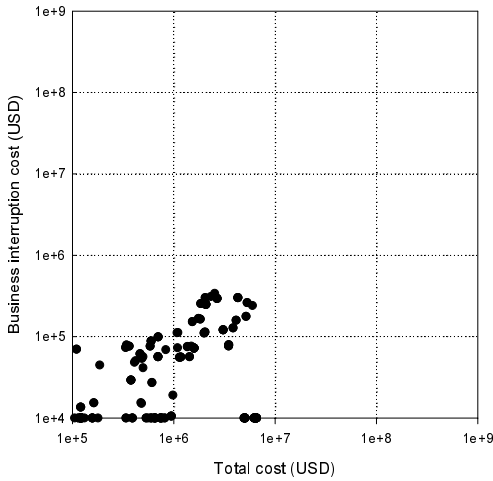


Fig. 5. Comparisons of business interruption cost and total cost.

안전지역과 총손실비의 피해크기는 Fig. 4(d)와 같이 독성지역의 결과와 유사한 경향을 나타내었다. 즉, 적용된 대상공정이 황화 아민을 주로 포함하고 있어서 안전지역은 독성지역의 영향을 받은 결과이다. 특히, 인화성 물질과 독성물질이 아닌 경우 피해지역은 가장 낮은 값을 나타내어 총손실비의 축 위에 나타났다. 또한 독성이 작거나 유틸리티를 사용하는 경우 재정적 손실은 가장 낮은 값을 나타내어 안전지역의 축 위에 나타났다.

이와 같이 피해크기 등급을 결정할 때 안전지역과 총손실비를 사용할 경우에는 안전지역의 피해크기가 총손실비의 피해크기보다 다소 높게 나타나는 것으로 평가되었다. 그러나 이와 같은 결과는 적용공정에 대한 결과이므로, 반드시 이러한 결과를 나타내는 것은 아니다. 그리고 피해지역과 총손실비를 동시에 고려할 경우에는 피해지역에 의한 피해크기 등급은 다소 높게 나타나는 것으로 사료된다. 뿐만 아니라 총손실비를 적용할 경우에는 공정의 특성 및 현실성을 반영하였기 때문에 사업장에서는 보다 적합하게 적용할 수 있을 것으로 사료된다.

Fig. 5는 사업중단 손실비와 총손실비를 비교한 것으로서, 사업중단 손실비와 총손실비는 전반적으로 비례하는 것으로 나타났다. 그러나 일부 설비에서 사업중단 손실비가 최소값을 나타내었으나 총손실비는 최소값이 아닌 경우가 있었다. 즉, 사업중단 손실비가 최소값을 나타내는 경우에도 안전비와 설비손상비가 상대적으로 높은 경우가 있었다. 따라서 재정적 손실에 의한 시고피해를 평가하는 경우는

사업중단 손실비, 안전비 및 설비손상비 등을 동시에 고려하여야 한다.

V. 결론

본 연구에서는 현실적인 비상조치계획을 수립하고, 위험기반 안전관리를 수행할 수 있도록 하기 위하여 석유화학공장의 황화수공정에서 사고로 인한 피해지역과 재정적 손실을 산출하여 비교·분석하였다. 그 결과, 상해지역은 장치손상지역보다 피해범위가 다소 크게 나타났으며, 피해지역을 기준으로 피해크기 등급을 산출할 경우에는 장치손상지역, 상해지역, 그리고 독성지역을 동시에 고려한 안전지역을 기준으로 하는 것이 현실적이었다. 그리고 안전지역과 총손실비는 최소값을 나타내는 경우를 제외하고, 비례하는 관계를 가지나 안전지역을 고려한 경우가 다소 과대평가되는 것으로 나타났다. 또한 피해지역을 기준으로 한 경우는 피해크기가 최소값 또는 0을 나타내는 설비가 많았으나, 재정적 손실을 고려할 경우는 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났다.

따라서 피해지역을 기준으로 안전관리를 할 경우에는 안전지역을 기준으로 하는 것이 바람직하지만, 공정의 특성 및 주변 환경을 고려하면 재정적 손실을 기준으로 하는 것이 보다 현실적이었다.

감사의 글

이 논문은 2010학년도 부경대학교의 지원을 받아 수행된 연구임 (PS-2010-028)

참고문헌

- [1] KOSHA, *Consequence Analysis*, Korean Occupational Safety and Health Agency, Incheon, (2010)
- [2] KOSHA, *종합위험관리체계(IRMS) 활용예시집*, Korean Occupational Safety and Health Agency, Incheon, (2006)
- [3] 이중희, 최성규, 이현창, 조지훈, 김태욱, “석유화학공정에서 재정적 위험도에 의한 위험기반 검사의 적용”, *KIGAS*, **13**(4), 53-60, (2009)
- [4] DNV, *PHSAT FINANCIAL*, Technical Manual, Det Norsk Veritas, (2010).
- [5] API, *API RP 581 - Risk-Based Inspection Technology*, American Petroleum Institute, 2nd ed., September, (2008).
- [6] KOSHA, *Update of KOSHA-RBI Program*, Korean Occupational Safety and Health Agency, Incheon,

- (2007)
- [7] 김봉훈, 이현창, 최재욱, “압력용기에서 가스 누출사고에 의한 피해지역 및 재정적 손실의 메개변수 분석”, *KIGAS*, **15**(5), 42-49, (2011)
- [8] API, *API Publication 581 - Risk-Based Inspection Base Resource Document*, American Petroleum Institute, 1st ed., May, (2000).
- [9] Perry, R. H. and Green, D., *Perry's Chemical Engineering Handbook*, McGraw-Hill, 6th ed., New York, (1984).