



# 배관누출에 의한 가스 폭발사고에서 누출 시나리오 선정 및 사고결과 분석

이헌창\* · 유 준\*\* · †김태옥

명지대학교 화학공학과, \*한국안전이엔씨, \*\*한국정수공업(주)  
(2006년 12월 11일 접수, 2006년 12월 23일 채택)

## Selection of Release Scenario and Consequence Analysis for Gas Explosion by Pipe Release

Hern-Chang Lee\* · Jun Ryoo\*\* · †Tae-Ok Kim

Dept. of Chemical Engineering, Myongji University, Yongin 449-728, Korea

\*Korea Safety Engineering and Consulting

\*\*Hankook Jungsoo Industries Co., Ltd.

(Received 11 December 2006, Accepted 23 December 2006)

### 요 약

본 연구에서는 배관누출에 의한 가스 폭발사고에서 누출 시나리오 선정방법과 사고결과 분석방법을 제시하고자 하였다. 이를 위해 온도, 압력, 누출물질 등 다양한 누출조건에서 누출속도, 장치피해영역 및 상해영역을 산출하고, 비교·분석하였다. 그 결과, 산출방법에 따라 사고결과값이 다소 차이가 있었으나 파열인 경우에 최대값을 가지며, 이로부터 최악의 사고피해를 예측할 수 있었다. 그리고 누출공의 크기는 임의로 선정하기 보다는 고장률을 고려한 가중평균법으로 사고피해를 예측하는 것이 바람직하다고 판단되었다.

**Abstract** – In this study, we tried to propose a selection method of release scenarios and a method of consequence analysis at a gas explosion by pipe release. Thus, release rates, damage areas of the facilities, and fatality areas were estimated and analyzed at various release conditions(temperature, pressure, release material, etc). As a results, we could conclude that the rupture was the worst case of release scenarios, and that release rates and damage areas were better estimated by the weighted average method considering a generic failure frequency of the release hole than by an arbitrary selection of the release hole.

**Key words** : Release scenario, Consequence analysis, Gas explosion, Pipe release, API-581.

### I. 서 론

정량적 위험성 평가에 의해 사고영향을 평가하기 위해서는 무엇보다도 화학물질의 누출량을 정확하게 산출하여야 한다. 그러나 현재까지 누출 시나리오 선정에 대한 명확하고, 객관적인 기준이 없기 때문에 K-CARM 프로그램에서와 같이 누출공(release hole)의 크기를 최악의 누출 시나리오, 즉 파열로 가정하거나 또는 사용자가 임의로 결정하기 때문에 산출결과가 실제 사고결과와는 상당한 차이가 있을 수 있다. 또한 적용된 모델에 따라 사고결과 값이 다를 뿐만 아니라 피해

크기를 산출하는 이론에 대한 검증이 완벽하지 않기 때문에 피해예측 결과에 대한 신뢰성 문제로 안전대책수립에 어려움을 겪고 있다. 따라서 보다 객관적이고, 현실성 있는 누출 시나리오를 선정하고, 선정된 누출 시나리오에 의해 정확한 사고피해를 예측할 필요가 있다.

본 연구에서는 객관적이고, 현실성 있는 누출 시나리오 선정방법을 제시하고, 이를 바탕으로 배관에서 가스 폭발사고의 영향을 분석하여 현실성 있는 사고결과 분석방법을 제시하고자 하였다. 이를 위해 가연성 가스가 배관에서 다양한 누출조건(온도, 압력, 누출물질 등)으로 누출되어 폭발사고가 발생하는 경우에 일반적인 사고결과 분석(consequence analysis, CA) 방법[1], 즉 누출원모델에 의해 누출속도 또는 누출량을 산출하고,

†주저자:kimto@mju.ac.kr

TNT 당량모델에 의해 피해범위를 산출하는 방법과 미국석유협회(API)에서 제시된 위험기반검사(risk based-inspection) 절차인 API-581 절차[2]에 의한 방법을 사용하여 누출속도(또는 누출량)와 사고 피해영역을 산출하고, 비교·분석하였다.

$$Q = \sqrt{\left(\frac{2g_c Mw}{R}\right) \left(\frac{\gamma}{\gamma-1}\right) \left(\frac{T-T_s}{\left(\frac{T_s}{P_s}\right)^2 - \left(\frac{T}{P_a}\right)^2}\right)} \quad (2)$$

## II. 이론적 고찰

일반적인 사고결과 분석절차는 Fig. 1과 같이 누출유형 및 누출상태에 따라 누출속도 또는 누출량을 산출하고, 화재 및 폭발에 의한 피해범위와 독성영향을 산출한다[2].

본 연구에서는 가연성 가스가 배관에서 누출되어 증기운 폭발사고가 발생하는 경우 누출원모델로부터 순간 또는 연속 누출량을 산출하고, 증기운 폭발모델로부터 사고결과인 과압(overpressure)을 사용하여 장치피해영역과 상해영역을 산출하였다.

### 2.1. 누출원모델

배관에서 기체가 누출공을 통하여 연속으로 누출되는 경우 누출기체의 유속이 음속인 경우에는 식 (1)에 초기누출속도를 산출할 수 있다[3-5].

$$Q = AMaP_s \sqrt{\frac{\gamma g_c Mw}{RT_s}} \quad (1)$$

여기서  $Q$ 는 연속 누출량(kg/s),  $A$ 는 누출공의 단면적( $m^2$ ),  $Ma$ 는 Mach 수(-),  $\gamma$ 는 열용량비(CP/CV),  $R$ 은 기체상수(kJ/kmol·K),  $g_c$ 는 전환인자(kg·m/N·s<sup>2</sup>, -),  $Mw$ 는 분자량(-), 그리고  $P_s$ 와  $T_s$ 는 각각 공정 압력(Pa) 및 온도(K)이다.

그리고  $(P_a/P_s)$ 가  $(P/P_s)_c$ 보다 큰 경우에는 유출가스의 흐름은 아음속으로 판정하며, 식 (2)로부터 아음속 가스 누출속도를 산출한다.

### 2.2. 증기운 폭발모델

가연성 가스가 누출되면 점화원에 의해 증기운 폭발과 같은 사고가 발생하는데, 증기운 폭발에 의한 피해를 예측하기 위해 일반적으로 사용되는 모델인 TNT 당량모델은 상대 연소열에 근거한 TNT의 상당량을 산출하여 사고피해를 산출하는 방법으로[7], TNT 상당량,  $W(kg)$ 를 산출하는 식은 식 (3)과 같다.

$$W = \frac{\eta M H_c}{H_c_{TNT}} \quad (3)$$

여기서  $M$ 은 누출된 가연성 물질의 질량(kg),  $H_c$ 는 가연성 물질의 연소열(kJ/kg), 그리고  $\eta$ 는 폭발계수로, 석유화학물질의 경우에 약 0.01~0.2이다. 또한 TNT의 연소열,  $H_{cTNT}$ 는 4680 kJ/kg(2000 Btu/lb<sub>m</sub>)이다[8].

따라서 식 (3)에 의해 산출한 TNT 상당량을 사용하여 환산거리,  $Z(m)$ 를 산출하고, 환산거리와 TNT 상당량으로부터 관심거리,  $X$ 에서 과압(kPa)을 산출할 수 있으며[3,5], 이로부터 폭발사고에 의한 인명이나 구조물에 대한 피해영향을 추정할 수 있다.

$$X = Z \times W^{1/3} \quad (4)$$

### 2.3. 매개변수 산출

일반적인 사고결과 분석(CA)에서는 누출속도를 산출하기 위해 누출공의 크기를 다양하게 선택하고 있으나 적절한 누출공의 크기를 선정하는 것은 현실적으로 매우 어려울 뿐만 아니라 누출공의 크기에 대한 선정기준이나 방법은 현재까지 제시된 바 없다. 그러나 API-581 절차[2]에서는 미리 정의된 누출공 크기를 소형, 중형, 대형, 그리고 파열(rupture)로 분류하고, 구멍의 크기범위는 사업장 내·외의 잠재적인 피해영향에 따라 선택한다.

따라서 본 연구에서는 CA 방법과 API-581 절차에 의한 산출방법에서 누출공의 크기는 API-581 절차에서 제시된 4가지 표준 구멍크기, 즉 누출공 직경이 배관직경보다 작거나 같으면 1/4, 1, 4 in 및 파열을 사용하였다. 그리고 누출유형은 순간누출 또는 연속누출 중의 하나로 선택하였으며, 특히 3분 이내에 10,000 lb<sub>m</sub> 미만이 누출되는 경우에는 순간누출로 가정하고, 직경이 1/4 in 이하의 누출공에서 누출은 연속누출로 가정하였다[2].

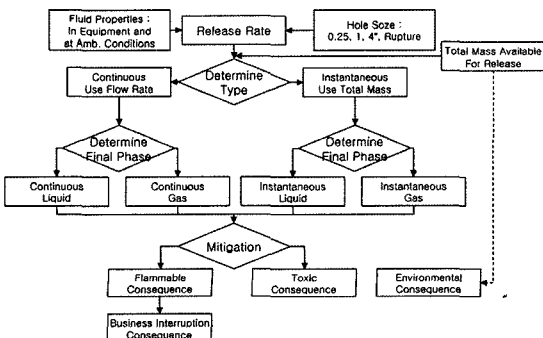


Fig. 1. Procedure for consequence analysis.

**Table 1.** Guidelines for determining the phase of a fluid.

Phase of fluid at steady-state operating conditions	Phase of fluid at steady-State ambient conditions	Determination of final phase for calculation of consequences by API-581	Final phase for consequence analysis
Gas	Gas	Model as gas	Gas
Gas	Liquid	Model as gas	Gas
Liquid	Gas	Model as gas Model as liquid (NBP <sup>a</sup> >80°F)	Two phase
Liquid	Liquid	Model as liquid	Liquid

<sup>a</sup>NBP : normal boiling point.

누출 후 유체의 확산특성은 주위의 상(phase)에 따라 크게 다르며, 운전조건에서 대기조건으로 상태가 변화할 때 상변화가 없으면 유체의 최종상태는 초기상태와 동일하다. 그러나 상변화가 있으면 피해크기를 산출하는데 필요한 물질상태의 평가가 어려워지는데, API-581 절차와 CA 방법에서 피해크기를 산출하기 위한 유체상태의 결정방법은 Table 1과 같다[2].

**2.4. 피해면적 산출**

일반적인 사고결과 분석방법에서는 누출속도와 누출(지속)시간으로부터 총 누출량(M)을 산출하고, 일정한 피해크기, 즉 과압을 갖는 환산거리로부터 누출지점에서부터 과압이 형성되는 거리를 산출하였다. 이때, 폭발계수는 1로, 그리고 피해지역은 원으로 가정하고, 피해거리(반경)로부터 피해면적을 산출하였다.

API-581 절차에 의한 피해면적 산출은 가연성 가스의 경우 누출유형과 누출 후 자연발화 가능성에 따라 Table 2를 사용하여 누출속도(연속누출의 경우) 또는 누

출량(순간누출의 경우)에 의해 장치피해영역과 상해영역의 면적을 산출하였다. 이때, 자연발화온도보다 최소 80°F 이상의 온도에서 자연발화 가능성이 있는 것으로 간주하였다[2].

따라서 산출한 장치피해영역과 상해영역으로부터 누출 시나리오별 고장률을 사용하여 식 (7)에 의해 가중평균 피해영역을 산출하였다[2].

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

**III. 결과 및 고찰**

**3.1. 누출속도**

배관직경이 1 inch이고, 유체가 C1-C2인 경우에 산출된 누출속도는 Fig. 2와 같다. 이때, 1 inch 배관의 경우 가능한 누출공 직경은 1/4 inch와 1 inch이며, Fig. 2a,b는 API-581 절차에 의해 산출된 누출속도이고, Fig. 2c,d는 CA 방법에 의해 산출된 누출속도이다. 그림에서 누출속도는 누출공 직경이 작은 경우(1/4 inch)에는 온도에 크게 영향을 받지 않으나, 누출공이 큰 경우(1 inch 직경)에는 온도 증가에 따라 감소하는 경향을 나타내었다. 그리고 누출속도는 압력이 증가함에 따라 증가하는 경향을 나타내었다. 또한 API-581 절차에 의해 산출한 누출속도가 CA 방법에서 보다 다소 크게 나타났으며, 압력이 높을수록 두 방법에서의 누출속도 차이가 감소하였다. 특히, 식 (5)에 의해 산출한 가중평균 누출속도는 누출공의 크기가 0.25 inch 직경에 가까운 쪽으로 나타났는데, 이것은 누출 시나리오에서 0.25

**Table 2.** Consequence equations of continuous or instantaneous releases by API-581 BRD.

Material	Continuous release				Instantaneous release			
	Auto-ignition not likely <sup>a)</sup>		Auto-ignition likely <sup>b)</sup>		Auto-ignition not likely <sup>a)</sup>		Auto-ignition likely	
	Area of equipment damage (ft <sup>2</sup> )	Area of fatality (ft <sup>2</sup> )	Area of equipment damage (ft <sup>2</sup> )	Area of fatality (ft <sup>2</sup> )	Area of equipment damage (ft <sup>2</sup> )	Area of fatality (ft <sup>2</sup> )	Area of equipment damage (ft <sup>2</sup> )	Area of fatality (ft <sup>2</sup> )
C <sub>1</sub> -C <sub>2</sub>	A = 43x <sup>0.98</sup>	A = 110x <sup>0.96</sup>	A = 280x <sup>0.95</sup>	A = 745x <sup>0.92</sup>	A = 41x <sup>0.67</sup>	A = 79x <sup>0.67</sup>	A = 1079x <sup>0.62</sup>	A = 3100x <sup>0.63</sup>
C <sub>3</sub> -C <sub>4</sub>	A = 49x <sup>0.98</sup>	A = 125x <sup>0.96</sup>	A = 313x <sup>1.00</sup>	A = 837x <sup>0.92</sup>	A = 28x <sup>0.72</sup>	A = 57.7x <sup>0.75</sup>	A = 523x <sup>0.63</sup>	A = 1768x <sup>0.63</sup>

x = total release rate(lb<sub>m</sub>/s), A = area(ft<sup>2</sup>) or total release mass(lb<sub>m</sub>).

<sup>a</sup>)Not likely if process temperature is less than auto ignition temperature plus 80°F.

<sup>b</sup>)Must be processed at least 80°F above auto ignition temperature.

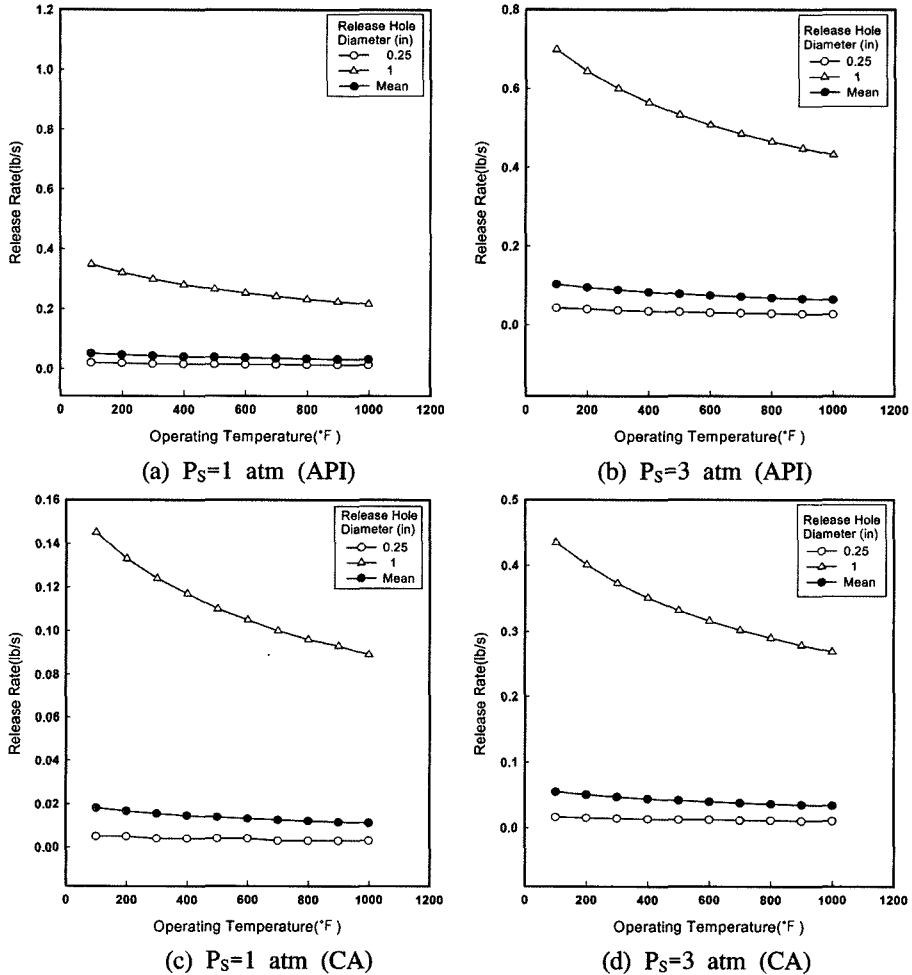


Fig. 2. Effect of the operating temperature and the release hole diameter on the release rate for 1 inch pipe and C1-C2.

inch 직경의 경우가 1 inch 직경의 경우보다 고장 발생 빈도가 높기 때문이다.

배관직경이 4 inch이고, 유체가 C1~C2인 경우의 누출속도는 Fig. 3과 같으며, 이때 4 inch 배관에서 가능한 누출공의 직경은 1/4, 1, 4 inch이다. 그림에서와 같이 누출속도는 1 inch 배관에서의 유사한 경향을 가지며, Fig. 2의 1 inch 배관에서보다 상당히 큰 값을 나타내었다. 또한 가중평균 누출속도도 1 inch 배관에서보다 다소 높은 값을 나타내었는데, 이는 1 inch 배관에서의 고장 발생빈도가 0.25 inch와 4 inch에서보다 높기 때문이다. 그리고 1기압의 낮은 압력에서 누출속도는 API-581 절차에 의한 경우가 CA 방법에서보다 큰 값을 나타내었으나, 3기압에서는 두 산출방법의 값이 거의 비슷하게 나타내었다. 이것은 CA 방법이 용기와 배관을 구분하여 누출속도를 산출하지만, API-581 절차에서는

용기와 배관을 구분하지 않고, 용기에 대한 식을 사용하기 때문으로 생각된다.

Fig. 4는 배관직경이 1 inch와 4 inch인 C3~C4 유체에 대해 산출한 누출속도를 나타낸 것으로, 순간 누출속도와 가중평균 누출속도는 Fig. 2 및 Fig. 3에서와 같이 배관직경과 운전압력이 증가할수록 증가하였다. 그리고 누출속도는 C1~C2인 경우보다 분자량의 증가로 약 2배 정도 큰 값을 나타내었다.

### 3.2. 장치피해영역

배관누출로 인한 가스 폭발사고의 영향을 평가하기 위하여 Fig. 5와 같이 API-581 절차에 의한 방법과 CA에 의한 방법을 1 inch 배관과 C1~C2 유체인 경우에 대하여 장치피해크기를 비교하였다. 3.1절의 결과와 같이 온도의 감소, 누출공 직경의 증가, 그리고 운전압력

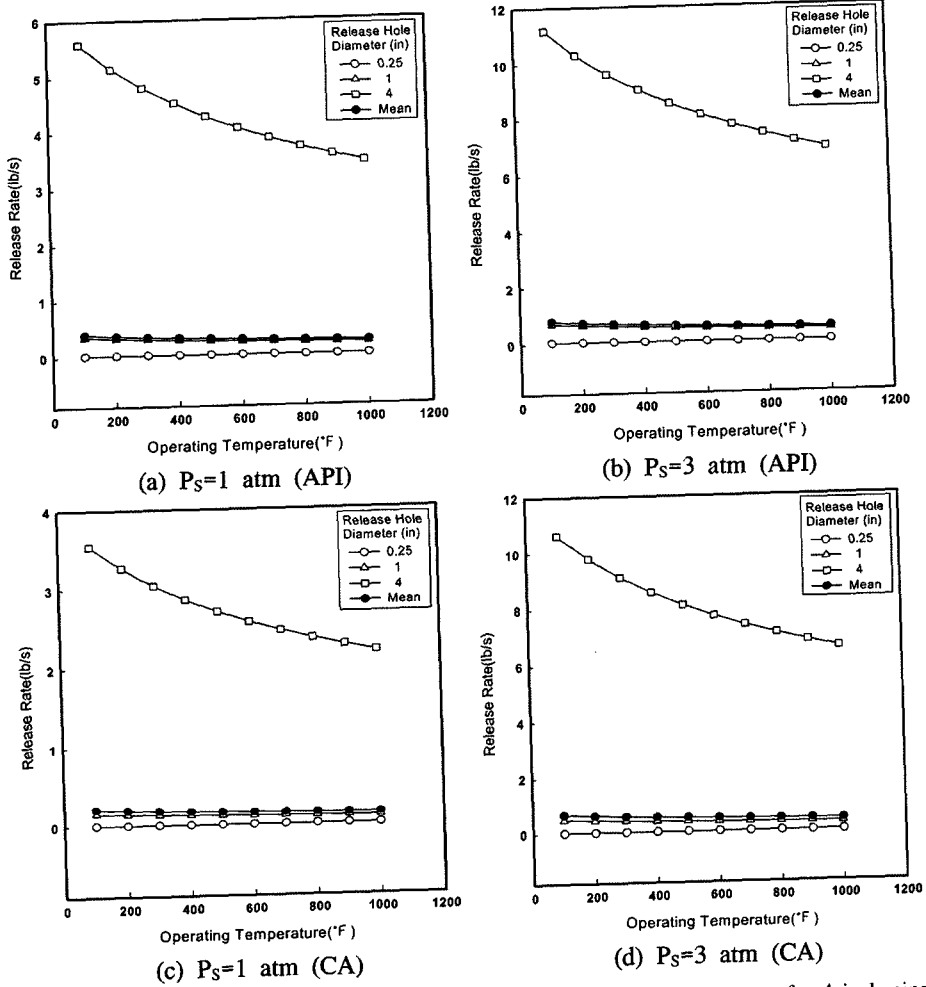


Fig. 3. Effect of the operating temperature and the release hole diameter on the release rate for 4 inch pipe and C1-C2.

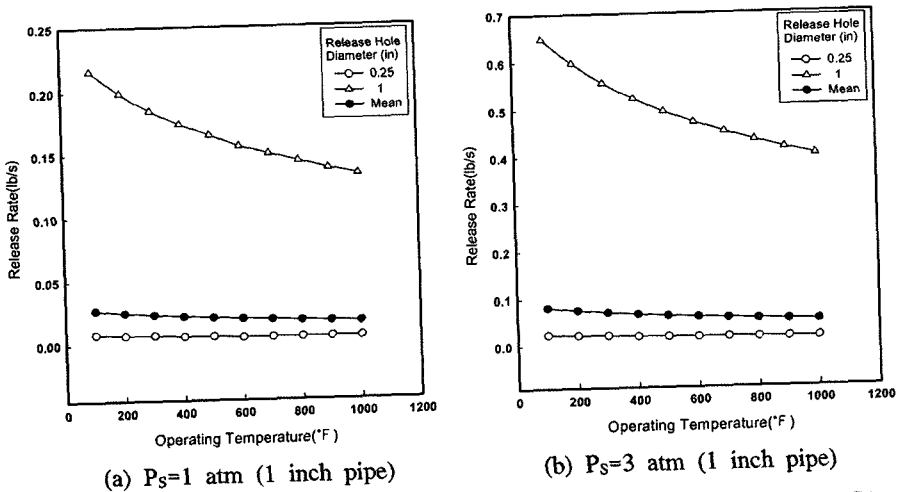


Fig. 4. Effect of the operating temperature and the release hole diameter on the release rate for C3-C4.

배관누출에 의한 가스 폭발사고에서 누출 시나리오 선정 및 사고결과 분석

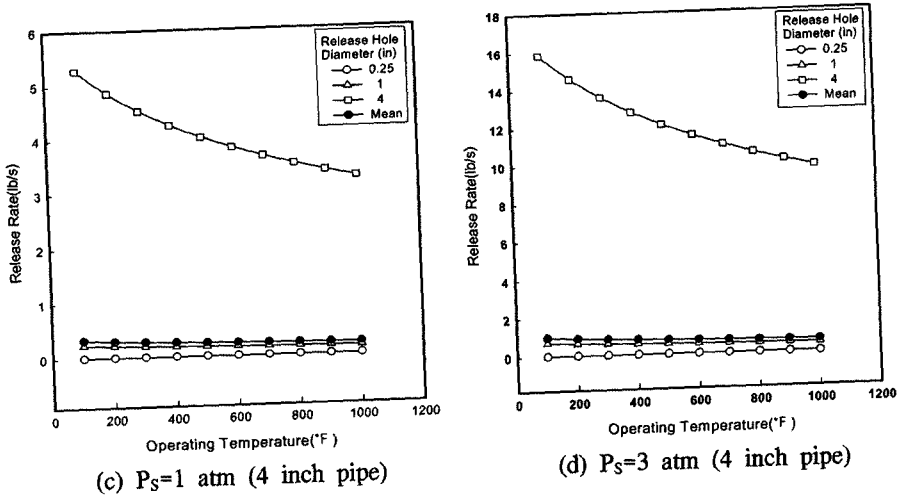


Fig. 4. Continued.

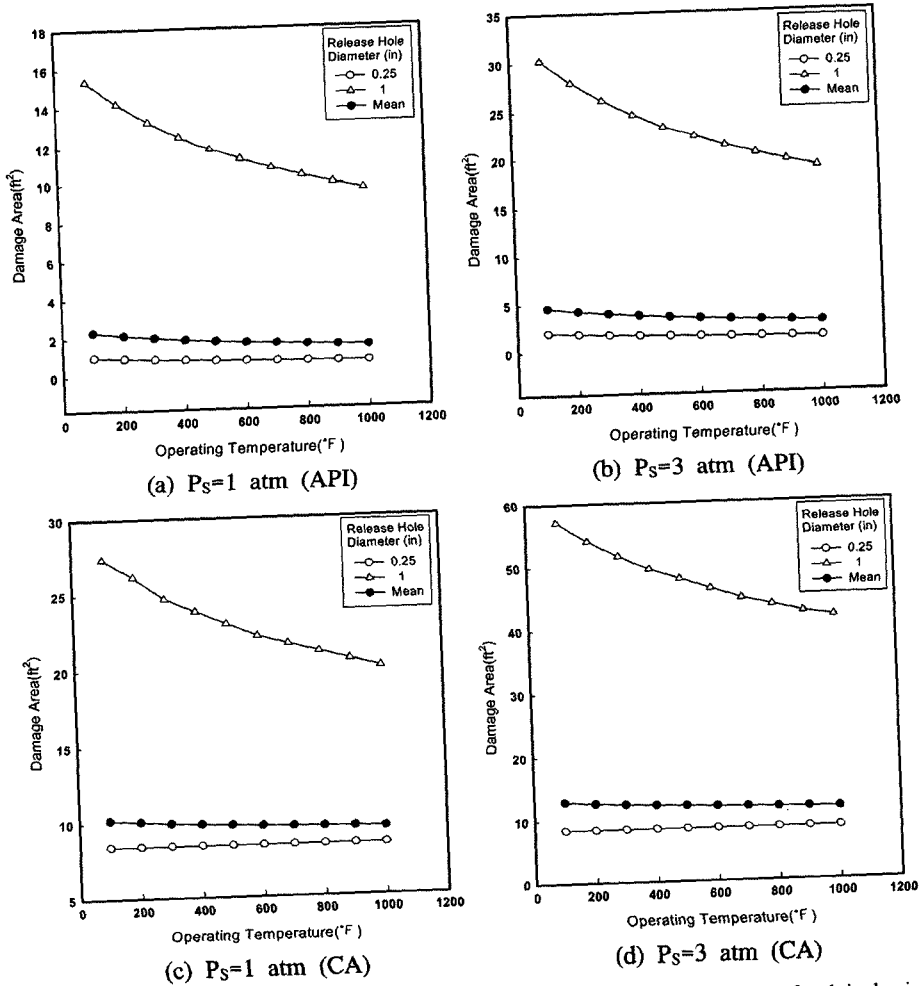
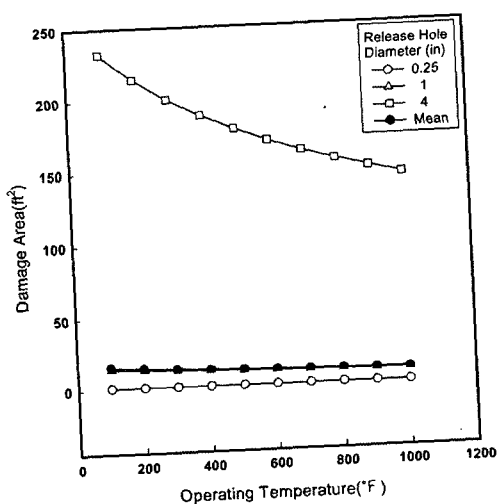


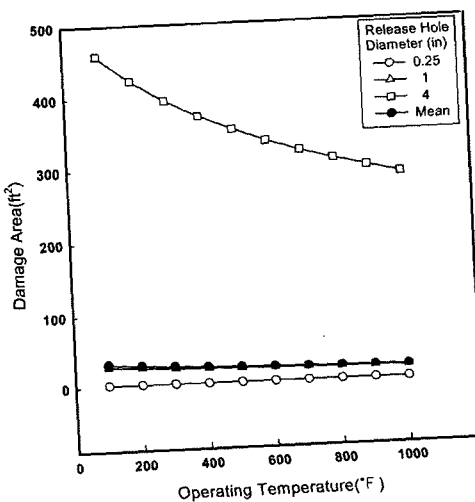
Fig. 5. Effect of the operating temperature and the release hole diameter on the damage area for 1 inch pipe and C1-C2.

의 증가에 따라 누출속도가 증가되었기 때문에 장치피해영역은 증가되었다. 그러나 누출속도는 API-581 절차에 의해 산출한 경우가 CA 방법에서보다 크게 나타났으나, 장치피해영역은 CA에 의한 방법이 크게 나타났다. 또한 가중평균에 의한 장치피해영역도 CA에 의한 방법에서 다소 크게 나타났는데, 이것은 API-581 절차에 의해 피해영역을 산출하는 방법은 경험적으로 얻어진 식,  $Y = aX^b$ 을 사용하여 피해영역, Y를 산출하지만, CA 방법은 폭발사고에 대해 TNT 당량모델을 적용하여 과압에 따른 환산거리에 의해 실제 장치피해가 일어나는 거리를 산출하고, 이를 원으로 가정하여 면적을 산출하기 때문으로 보인다.

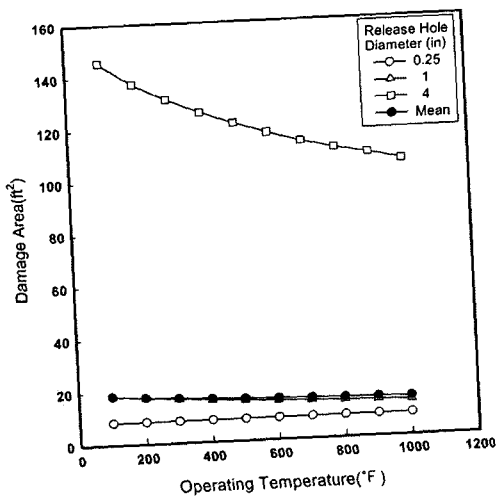
Fig. 6은 4 inch 배관에서 C1~C2 유체의 장치피해영역의 경향은 1 inch 파이프에서와 같은 유사한 경향을 나타내었으나 Fig. 5에서와 같이 산출방법에 따라 결과값은 다소 차이가 있다. 즉, 2 inch 직경의 누출공에서는 CA에 의한 산출값이 API-581 절차에 의한 값보다 다소 큰 값을 나타내었으나 4 inch 직경의 누출공에서는 API-581 절차에 의해 산출한 값이 CA에 의한 산출값보다 약 1.6배 정도 크게 나타났다. 또한 가중평균에 의한 장치피해영역은 API-581 절차에 의한 방법이 CA 방법에서보다 다소 크지만 비슷하게 나타났는데, 이것은 1 inch 누출공에서 고장발생빈도가 지배적이었기 때문에 피해크기가 적어



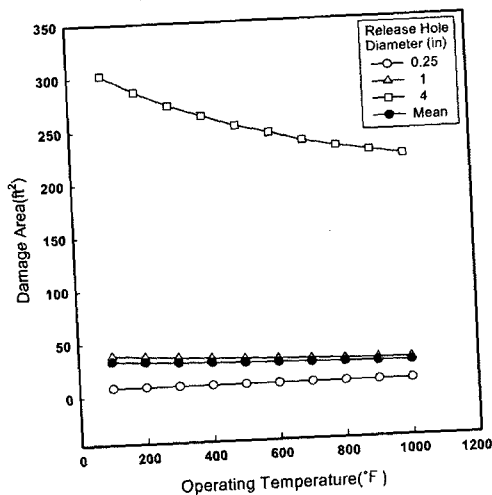
(a)  $P_s=1$  atm (API)



(b)  $P_s=3$  atm (API)



(c)  $P_s=1$  atm (CA)



(d)  $P_s=3$  atm (CA)

Fig. 6. Effect of the operating temperature and the release hole diameter on the damage area for 4 inch pipe and C1-C2.

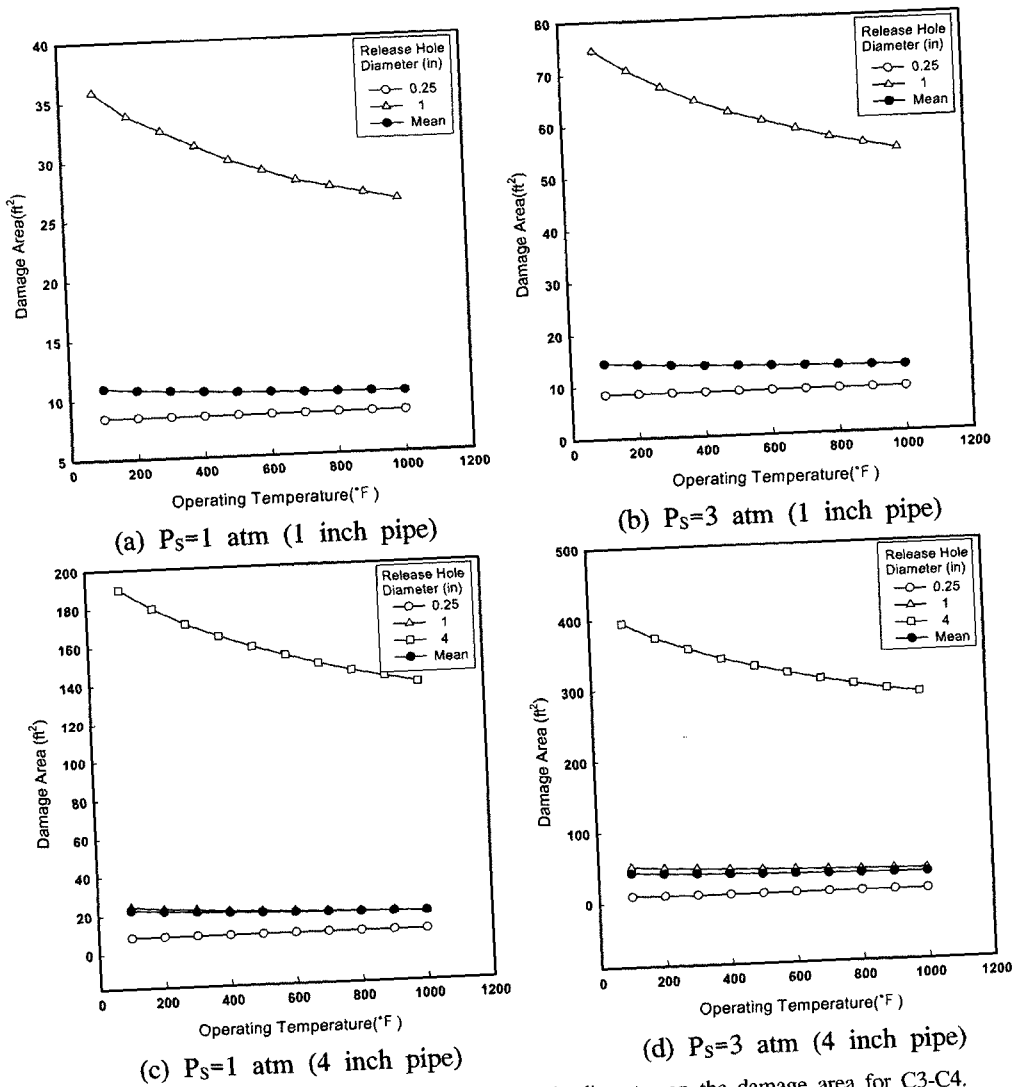


Fig. 7. Effect of the operating temperature and the release hole diameter on the damage area for C3-C4.

서 차이가 많이 나지 않지만, 배관직경이 증가할수록 차이가 다소 증가하였다.

Fig. 7은 대표유체가 C3~C4인 경우 배관직경이 1, 4 inch이고, 압력이 1, 3 atm일 때 산출한 장치피해영역을 나타낸 대표적인 그림으로, 유체가 C1~C2인 경우와 유사한 경향을 나타내고 있다.

### 3.3. 상해영역

인적피해(사망)가 발생할 수 있는 영역, 즉 상해영역은 폭발과압이 1 psig인 경우를 기준으로 산출하고, 이를 비교·분석하였다.

Fig. 8은 1 inch 배관에서 C1~C2 유체에 대하여 누

출에 따른 상해영역을 나타낸 것으로, 장치피해영역의 변화경향과 매우 유사하게 나타났으며, 과압기준이 5 psig에서 1 psig로 낮아졌기 때문에 장치피해영역 보다 약 2배 이상 증가하였다. 또한 CA 방법으로 산출한 상해영역은 API-581 절차에 의한 방법보다 약 7배 이상 크게 나타났으며, 이와 같은 경향은 가중평균에 의한 상해영역에서도 거의 동일하였다.

Fig. 9는 4 inch 배관에서 C1~C2 유체의 누출로 인한 상해영역을 나타낸 것으로, 상해영역의 변화 경향은 1 inch 배관에서의와 유사하였다. 특히, 배관직경이 4배로 증가할 때 상해영역은 API-581 절차에 의한 경우 약 15배, CA 방법에 의한 경우 약 5배 이상 증가하였고,



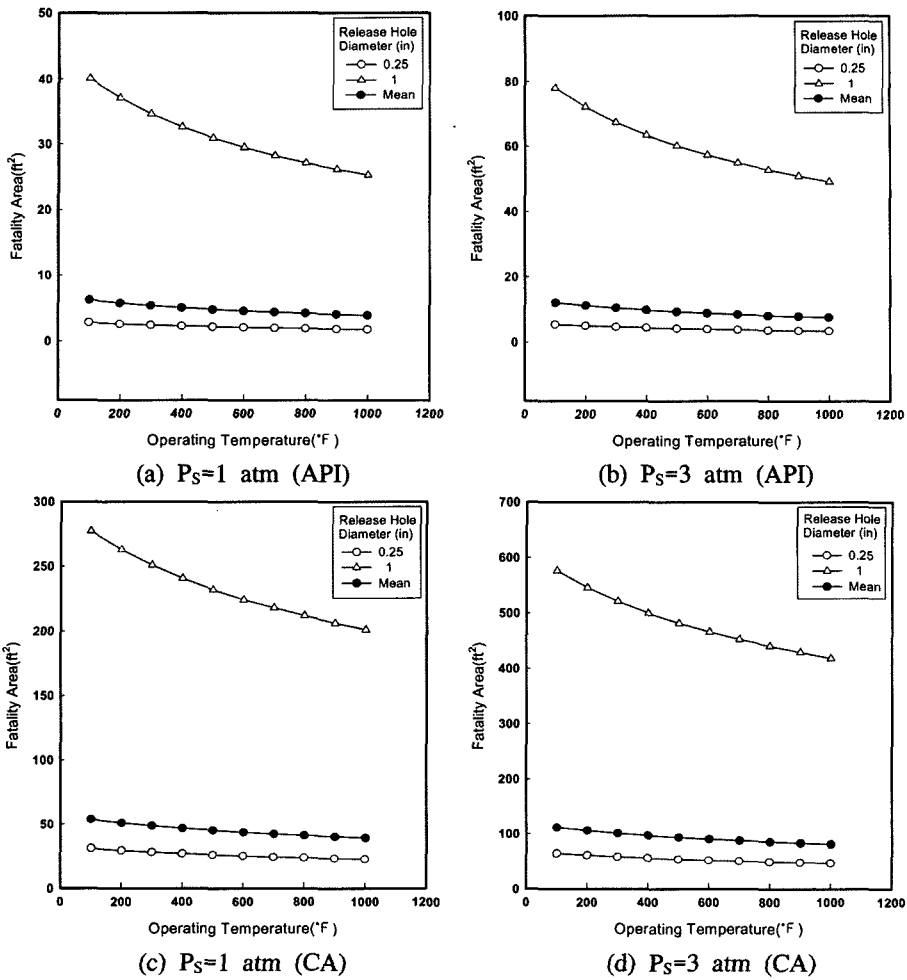


Fig. 8. Effect of the operating temperature and the release hole diameter on the fatality area for 1 inch pipe and C1-C2.

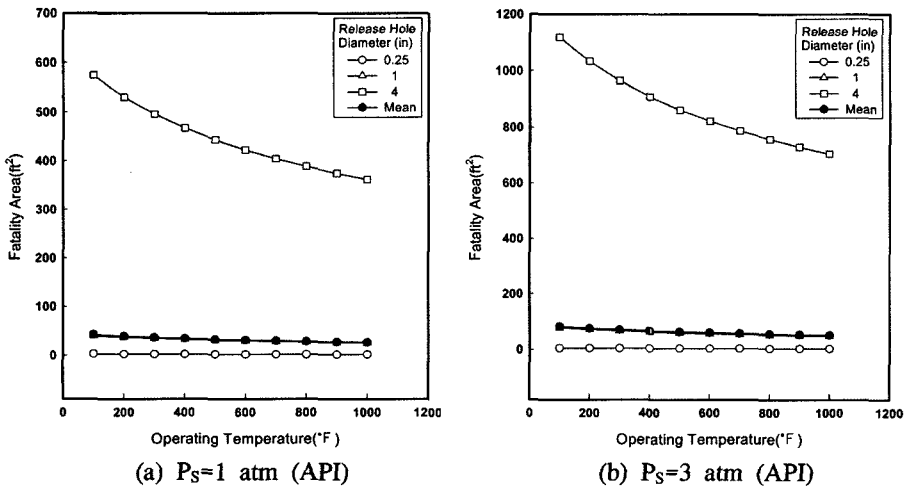


Fig. 9. Effect of the operating temperature and the release hole diameter on the fatality area for 4 inch pipe and C1-C2.

배관누출에 의한 가스 폭발사고에서 누출 시나리오 선정 및 사고결과 분석

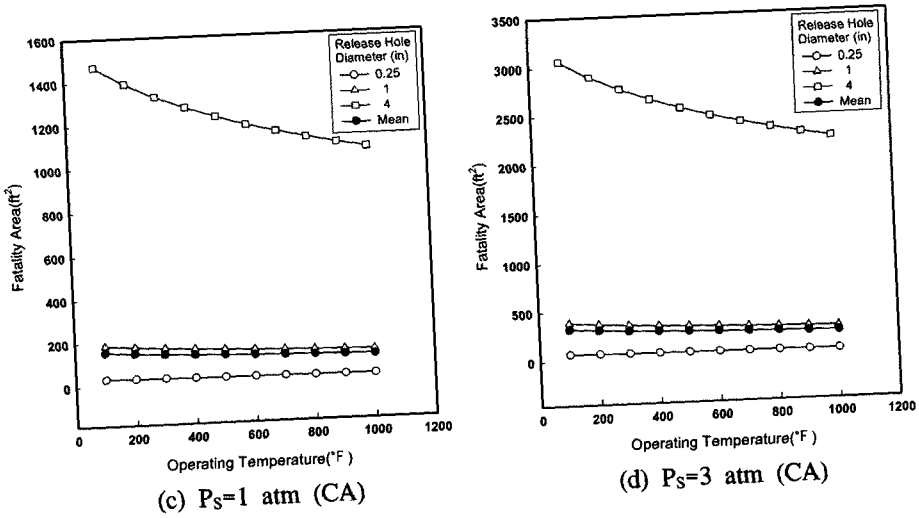


Fig. 9. Continued.

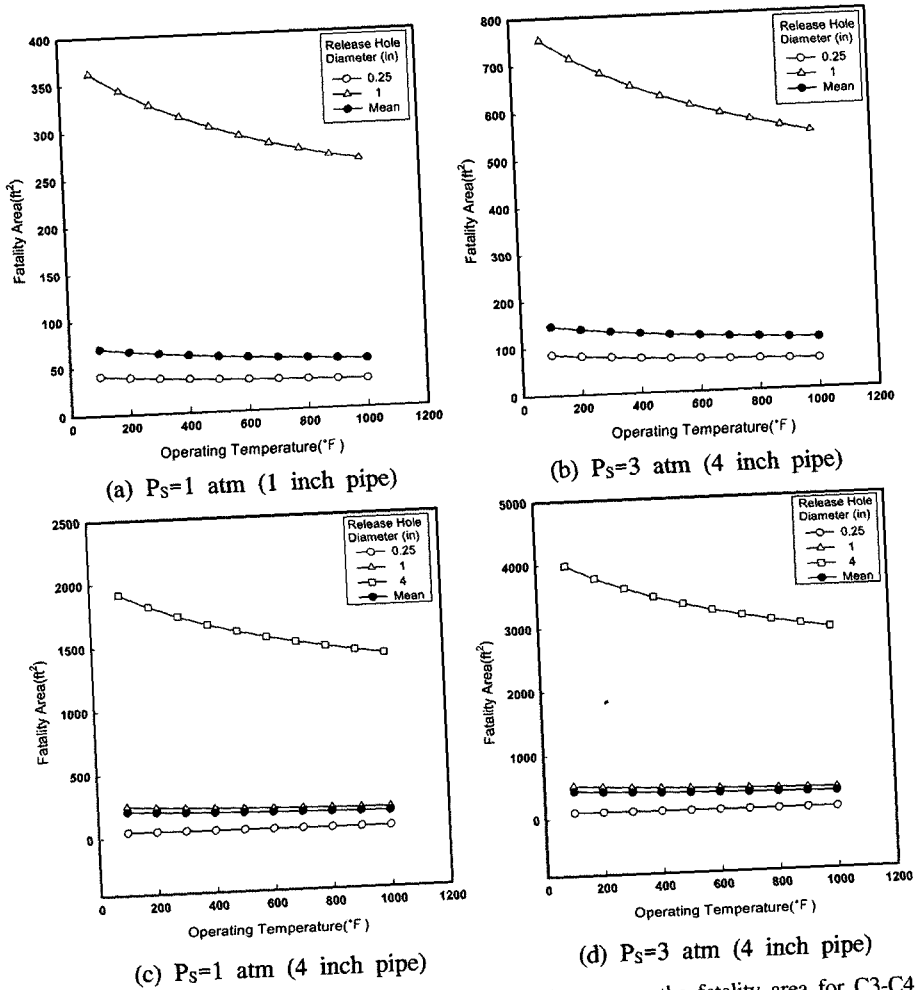


Fig. 10. Effect of the operating temperature and the release hole diameter on the fatality area for C3-C4.

가중평균에 의한 상해영역은 CA 방법에서 약 4배 정도 큰 값을 나타내었다.

Fig. 10은 대표유체가 C3~C4에서 배관직경이 1, 4 inch이고, 압력이 1, 3 atm일 때 산출한 상해영역을 나타낸 대표적인 그림으로, 상해영역은 Fig. 7의 장치피해영역에서와 비슷한 경향을 나타내었으며, 장치피해영역에 비해 약 10배 정도 증가하였다.

이상의 결과와 같이 사고결과, 즉 누출속도, 장치피해영역 및 상해영역은 최악의 누출시나리오, 즉 파열인 경우에 최대값을 가지며, 최악의 누출 시나리오를 제외한 경우에는 사고발생 가능성을 고려한 가중평균법으로 사고피해를 예측하는 것이 현실적으로 가장 바람직한 방법으로 볼 수 있다.

#### IV. 결 론

본 연구에서는 가연성 가스의 배관누출에 의한 폭발 사고에서 API-581 절차와 일반적인 사고결과 분석방법을 사용하여 누출속도, 장치피해영역, 및 상해영역을 산출하였다. 그 결과, 누출속도, 장치피해영역 및 상해영역은 온도에 크게 민감하지 않으나, 압력이 증가할수록, 그리고 배관직경이 증가할수록 증가하였다. 또한 산출방법에 따라 사고결과값이 다소 차이가 있었으나 파열인 경우에 최대값을 가지며, 이로부터 최악의 사고피해를 예측할 수 있었다. 그리고 사고결과 분석에서 사용하는 누출공 크기는 임의로 선정하기 보다는 API-581 절차에 의한 방법, 즉 고장률을 고려한 가중평균법

으로 사고피해를 예측하는 것이 바람직하다고 판단되었다.

#### 참고문헌

- [1] Korea Occupational Safety and Health Agency (KOSHA), Consequence Analysis(CA), Industrial Safety Training Institute of KOSHA, ISTI-2001-29-86, (2001)
- [2] API, RBI Basic Resource Document : API-581, American Petroleum Institute, (2000)
- [3] Lees, F.P., Loss Prevention in the Process Industries, Butter-worths Ltd., Vol. 2, London, (1991)
- [4] CCPS, Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis, Center for Chemical Process Safety of AIChE, New York, (1989)
- [5] Crowl, D.A. and J.F. Louvar, Chemical Process Safety Fundamentals with Applications, Prentice Hall, New York, (1990)
- [6] Perry, R.H. and Green, D., Perry's Chemical Engineering Handbook, 7th ed., McGraw-Hill, New York, (1997)
- [7] Crowley, W.K., Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions, Technical Manual TM 5-1300, U.S. Army, Navy, and Air Force, U. S. Government Printing Office, Washington, D.C., (1969)
- [8] Industrial Risk Insurances(IRI), Oil and Chemical Properties Loss Potential Estimation Guide, IRInformation, IM 8011, (1992)