



위험기반검사 프로그램에 의한 화학설비의 정량적 위험성 평가

이헌창* · 최성규 · 조지훈** · 함병호*** · †김태옥

명지대학교 화학공학과, *한국안전이엔씨, **한국산업안전공단, ***노동부
(2007년 9월 19일 접수, 2007년 11월 16일 채택)

Quantitative Risk Assessment of the Chemical Facilities by KS-RBI Program

Hern-Chang Lee* · Sung-Kyu Choi · Ji-Hoon Jo** · Byeong-Ho Ham*** · †Tae-Ok Kim

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

*Korea Safety Engineering and Consulting Co. Ltd.

**Korea Occupation Safety Healthy and Agency

***Ministry of Labor

(Received September 19 2007, Accepted November 16 2007)

요 약

정량적 원인분석이 가능한 위험기반검사(KS-RBI) 프로그램을 사용하여 화학설비의 사고 피해범위를 산출하고, 일반적인 정량적 위험성 평가를 수행하는 프로그램인 K-CARM에서 얻은 결과와 비교하였다. 그 결과, KS-RBI 프로그램에 의해 산출한 사고피해 크기는 K-CARM의 결과와 비교적 잘 일치하여 KS-RBI 프로그램이 정량적 위험성 평가에 적극 활용할 수 있을 것으로 기대된다. 또한 사업장에서는 가중평균에 의한 사고 피해영역을 활용함으로써 현실성 있는 피해완화조치와 비상조치계획을 수립할 수 있을 것으로 생각된다.

Abstract – Damage ranges of accidents of the chemical facilities were estimated by the KS-RBI(Ver.3.0) program supporting the quantitative cause analysis, and the consequences were compared with the results of K-CARM(Ver.2.0) program which assesses the quantitative risk in an usual method. As a result, we found that the consequences of the KS-RBI program were similar to those of the K-CARM program. Therefore, the KS-RBI program could be applied to the quantitative risk assessment. In addition, it can be safely said that through applying the damage ranges of accidents by weighted average, industrial sites can come up with the effective plans of mitigation and emergency.

Key words : Quantitative risk assessment, Risk based-inspection (RBI), Safety, API-581, KS-RBI, K-CARM

I. 서 론

압력설비들은 설치 후 시간이 지남에 따라 점차 낡아지기 때문에 이를 보수하거나 대체 또는 폐기하고 있다. 그러나 경제적 요인 등으로 보수 또는 대체가 쉽지 않기 때문에 이로 인한 사고의 발생 가능성은 항상 존재하고 있다[1,2]. 따라서 낡은 설비들은 유지·보존 상태와 경제성 및 안전성에 따라 가장 효과적이고 적절한 시기에 검사하거나 보수해야 될 필요성이 있으며[3,4], 이를 해결하기 위해 최근에 도입된 방법이 위

험기반검사(risk based-inspection, RBI)[5-7]이다. 위험기반검사는 위험도에 근거하여 설비 검사를 수행할 수 있도록 검사방법, 검사시기 등을 제시하는 기법으로, 이때 위험도는 고장발생의 가능성과 사고결과의 크기 곱에 의해 결정되며, 사고결과의 크기는 API-581 절차에 따라 사용하는 유체와 공정조건에 따라 피해면적을 산출한다. 그러나 위험기반검사서 사고피해 크기는 단순히 위험도 등급을 산출하기 위한 조건으로만 사용되고 있으므로, 향후 사고 피해면적을 활용하여 비상조치계획 수립에 적극적으로 활용할 필요성이 있다[8]. 또한 위험기반검사의 절차 중의 하나인 API-581에 의한 누출 시나리오를 사용하여 현실적인 정량적 위험성

*주저자:kimto@mju.ac.kr

평가를 수행할 수 있다[9,10].

본 연구에서는 사업장에서 위험기반검사 방법에 의한 정량적인 위험성 평가를 실시하고, 그 결과를 비상조치계획 수립에 적극 활용할 수 있도록 하고자 하였다. 이를 위해 정량적 위험성 평가 등의 원인분석이 가능하도록 API-581 절차에 따라 개발된 위험기반검사(KS-RBI Ver.3.0) 프로그램을 사용하여 산출한 사고피해 크기와 일반적인 사고결과 분석방법에 의해 산출된 사고피해 크기를 비교·해석하였다.

II. 이 론

위험기반검사에서 누출 시나리오(s)별 위험도(risk)는 사고발생 가능성과 사고피해 크기의 곱으로 식 (1)과 같이 나타낸다[7].

$$(\text{Risk})_s = (\text{Likelihood of Failure})_s \times (\text{Consequence of Failure})_s \quad (1)$$

여기서 사고발생 가능성은 설비의 파손확률이나 파손횟수를 나타내고, 사고결과 크기는 피해면적 또는 피해손실액으로 나타낸다.

사고피해 크기를 분석하는 일반적인 절차는 Fig. 1과 같이 누출유형 및 누출상태에 따라 누출속도 또는 누출량을 산출하고, 화재 및 폭발에 의한 피해범위와 독성영향을 산출한다[7].

2.1. 누출원모델

배관에서 기체가 누출공(release hole)을 통하여 연속으로 누출되는 경우 누출기체의 유속이 음속인 경우에는 식 (2)에 초기누출속도를 산출할 수 있다[7,11].

$$Q = A M a P_s \sqrt{\frac{\gamma g_c M w}{R T_s}} \quad (2)$$

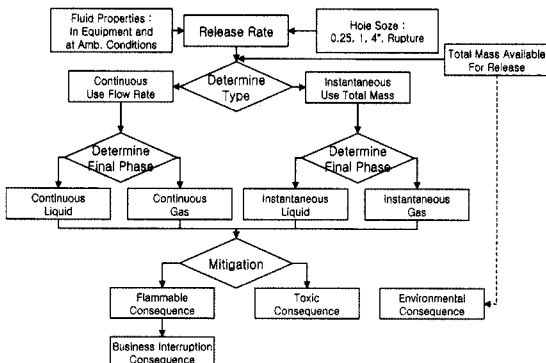


Fig. 1. Procedure for consequence analysis.

여기서 Q 는 연속 누출량(kg/s), A 는 누출공의 단면적(m^2), Ma 는 Mach 수(-), γ 는 열용량비(C_p/C_v), R 은 기체상수($kJ/kmol \cdot K$), g_c 는 전환인자($kg \cdot m/N \cdot s^2$), Mw 는 분자량(-), 그리고 P_s 와 T_s 는 각각 공정 압력(Pa)과 온도(K)이다.

그리고 (P_a/P_s) 가 $(P/P_s)_c$ 보다 큰 경우에는 유출가스의 흐름은 아음속으로 판정하며, 식 (3)로부터 아음속 가스의 누출속도를 산출한다[11].

$$Q = \sqrt{\left(\frac{2g_c M w}{R}\right) \left(\frac{\gamma}{\gamma-1}\right) \left(\frac{T-T_s}{\left(\frac{T_s}{P_s}\right)^2 - \left(\frac{T}{P_a}\right)^2}\right)} \quad (3)$$

또한 용기누출에서 초기누출속도는 음속누출인 경우에는 식 (4)를, 그리고 아음속누출인 경우에는 식 (5)를 사용한다[12].

$$Q = C_D A P_s \sqrt{\frac{\gamma g_c M w}{R T_s} \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}} \quad (4)$$

$$Q = C_D A P_s \sqrt{\frac{2g_c M w}{R T_s} \frac{\gamma}{\gamma-1} \left(\left(\frac{P_a}{P_s}\right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left(\frac{P_a}{P_s}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}}\right)} \quad (5)$$

여기서 C_D 는 누출계수(-)로, 난류흐름의 C_D 값은 Green과 Perry[13]에 의해 제시되었다.

2.2. 사고 영향모델

가연성 가스가 누출되는 경우에는 점화원에 의해 증기운 폭발과 같은 사고가 발생하는데, 증기운 폭발에 의한 사고피해를 예측하기 위해 일반적으로 사용되는 모델인 TNT 당량모델은 상대 연소열에 근거한 TNT의 상당량을 산출하여 사고피해를 산출하는 방법으로[11], TNT 상당량, W (kg)을 산출하는 식은 식 (6)과 같다.

$$W = \frac{\eta M H c}{H c_{TNT}} \quad (6)$$

여기서 M 은 누출된 가연성 물질의 질량(kg), Hc 는 가연성 물질의 연소열(kJ/kg)이고, η 는 폭발계수(-)로, 석유화학물질의 경우 약 0.01~0.2이다. 그리고 TNT의 연소열, Hc_{TNT} 는 4680 kJ/kg (2000 Btu/lb_m)이다[14].

따라서 식 (6)에 의해 산출한 TNT 상당량을 사용하여 환산거리, Z (m)을 산출하고, 환산거리와 TNT 상당량으로부터 관심거리, X 에서 과압(kPa)을 산출할 수 있으며[1,12], 이로부터 인명이나 구조물에 대한 사고피해 영향을 추정할 수 있다.

$$X = Z \times W^{1/3} \quad (7)$$

또한 가연성 압축 또는 액화된 가스가 저장탱크나 배관에서 누출되는 경우에는 방출된 물질이 주위의 공기와 혼합되어 점화원과 만나면 상당한 길이의 제트화재(jet fire)가 발생된다. 제트화재의 경우 API RP-521에서 수직적인 방향의 제트화재에 의한 복사열은 Brzustowski와 Sommers[1]에 의해 제시된 식 (8)에 의해 산출할 수 있다.

$$I_{th} = \frac{\tau \beta Q_{th}}{4\pi D^2} \quad (8)$$

여기서 I_{th} 는 복사열[kW/m²], τ 는 투과율[-], Q_{th} 는 전체 방출열[kW], β 는 복사된 열의 비율[-], 그리고 D 는 화염중심에서부터 대상물까지의 거리[m]이다.

III. 결과 및 고찰

정량적 원인분석이 가능하도록 API-581 절차에 따라 개발한 Fig. 2와 같은 위험기반검사 프로그램(KS-RBI Ver.3.0)을 사용하여 D 사의 H plant에 대해 위험기반검사를 수행하고, 대상설비의 정량적 위험성 평가를 실시하였다. 그리고 그 결과를 비교·분석하기 위하여 한국산업안전공단(KOSHA)에서 개발한 K-CARM Ver.2.0 프로그램을 사용하여 수행하였다. 이때, 누출공 크기, 누출시간 등과 같은 누출 시나리오는 KS-RBI에서 사용된 방법인 API-581 절차를 사용하였다. 즉, 누출공은 1/4, 1, 4, 16 inch 직경을 사용하였고, 누출시간은 검출시스템과 차단시스템에 의해 산출된 누출 지속시간과 저장량을 누출속도로 나눈 시간을 비교하여 적은 시간으로 하였다.

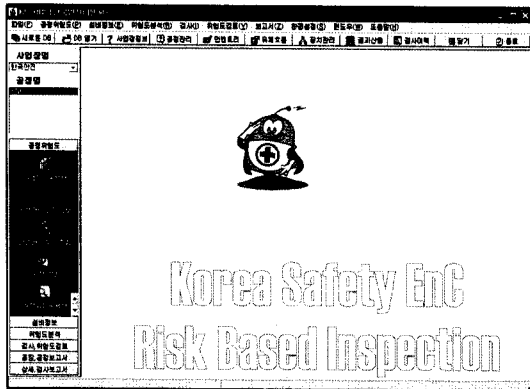


Fig. 2. KS-RBI Ver.3.0 program developed by Korea Safety Enc.

Table 1. Conditions of process and release for quantitative risk assessment.

Equipment	V-156 Tank			
Storage material	Iso-butane			
Storage temperature (°C)	46			
Storage pressure (kg/cm ²)	5.4			
Tank diameter (cm)	340			
Tank height (cm)	1360			
System	Detection	Isolation	Mitigation	
	Automatic	Manual	Fire water/Foam spray	
Release diameter (inch)	1/4	1	4	16
Release time (sec)	3,600	2,400	180	180
Storage quantity (kg)	about 100			
Wind velocity (m/s)	5			
Atmospheric stability	Class D			

대상설비는 석유화학공장의 H 공정에서 피해범위가 큰 설비 중의 하나인 'V-156' tank를 선택하였으며, 누출 시나리오 및 공정조건에 대한 정보는 Table 1과 같다. 이때, 이소부탄(iso-butane)은 기-액상태(액상 30%)로 저장되어 있으며, 누출 후에는 기상으로 변하고, 누출과정에서 점화가 발생하면 제트화재와 같은 사고가 발생한다. 또한 대기 중에서 공기보다 무겁기 때문에 누출이 발생되면 분산되어 지면에 체류할 가능성이 높으며, 체류한 가스는 점화원에 의해 증기운 폭발(vapor cloud explosion, VCE)이 발생할 수 있다. 따라서 이와 같은 두 가지의 사고유형에 대해 KS-RBI 프로그램과 K-CARM 프로그램을 이용하여 사고결과

장비명	설비번호	설비종류	소재	용량	상태
E-136	Jube	Exchang			
E-137	channel	Exchang			
E-137	shell	Exchang			
E-137	Jube	Exchang			
E-138	channel	Exchang			
E-138	shell	Exchang			
E-138	Jube	Exchang			
E-138	shell	Exchang			
E-138	Jube	Exchang			
E-138	shell	Exchang			
E-141	shell	Exchang			
E-141	Jube	Exchang			
F-022A	B/C	Drum			
F-107A/B		Filter			
V-017		Tank			
V-051A/B/C		Drum			
V-062A/B/C		Drum			
V-081		Drum			
V-116A/B		Drum			
V-153		Column			
V-154		Column			
V-157		Drum			

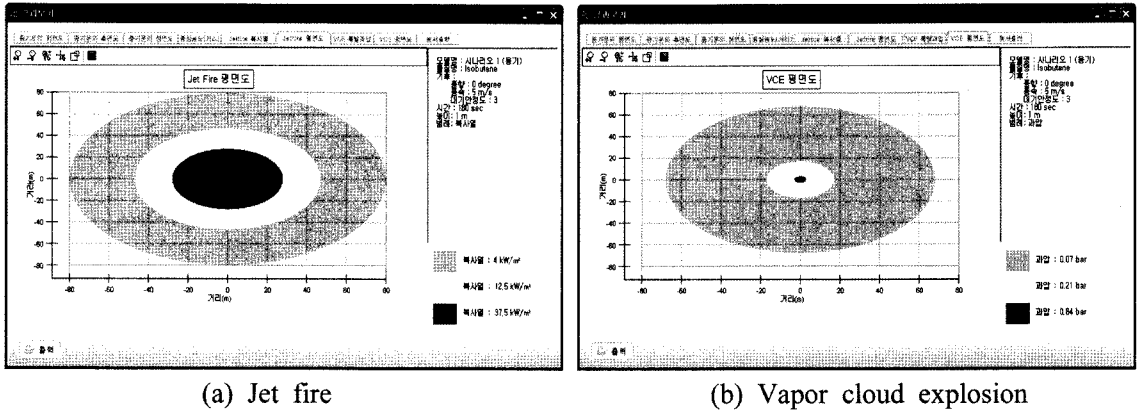
설비번호	설비종류	소재	용량	상태
Tank	HOPE plant	Carbon Steel(AS)		

출발점	출발점	출발점	출발점
46	5	RECYCLE ISO-BU	

누출시나리오	소	용	타	상태
누출속도		5.332	85.315	1,365.043
누출시간	3,600	2,400	180	180
누출압력	Cont	Cont	Inst	Inst
누출량	1,200	12,797	15,357	245,708

누출시나리오	소	용	타	상태
설비손상지역	44	623	79,536	636,761

Fig. 3. Simulation results for release scenario of V-156 tank estimated by KS-RBI.



(a) Jet fire

(b) Vapor cloud explosion

Fig. 4. Consequences for 16 inch release hole diameter estimated by K-CARM.

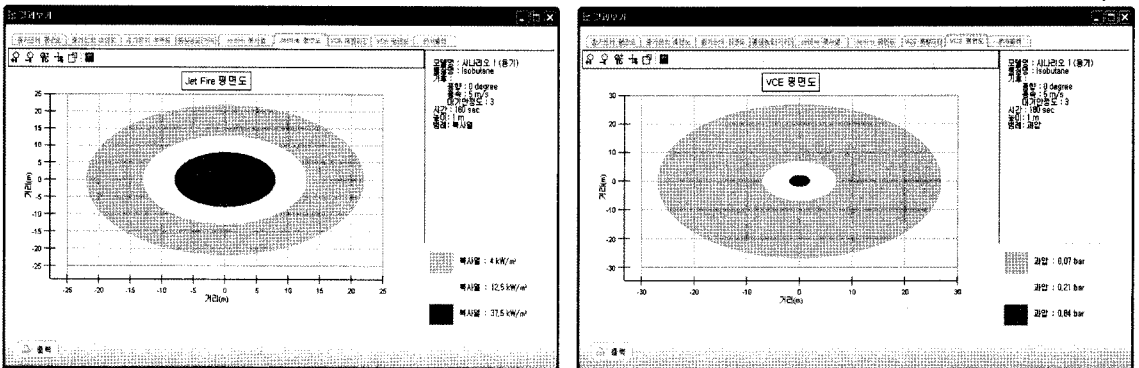
를 분석하였다.

Fig. 3은 KS-RBI 프로그램을 사용하여 얻은 결과를 나타낸 것으로, 장치손상지역은 소(1/4 inch), 중(1 inch), 대(4 inch), 과열(16 inch)에 대해 각각 17, 253, 28926, 212941 ft^2 이었다. 즉, 피해반경이 약 1, 3, 30, 80 m이었다. 이때, 1/4 inch 누출의 경우는 누출된 량이 적어서 피해범위가 크지 않았으나, 누출공의 크기가 클수록 누출량이 많아져서 제트화재와 증기운 폭발로 인한 피해범위가 급격히 증가하였다.

Fig. 4는 16 inch 직경의 누출공에서 누출이 발생할 경우 K-CARM에 의해 산출한 제트화재에 의한 복사열과 VCE에 의한 과압의 영향을 나타낸 것이다. 제트화재의 경우는 약 80 m(반경) 이내에서 복사열의 영향을 받는 것으로 나타났으며, VCE의 경우는 68 m(반경) 범위 내에서 과압의 영향을 받는 것으로 나타났다. 이 결과를 KS-RBI 프로그램의 결과와 비교하면 16 inch 누출공에서 제트화재에 의한 영향의 결과는 잘 일치하는 것으로 나타났다.

Fig. 5는 4 inch 직경의 누출공에서 누출이 발생할 경우 K-CARM에 의해 산출한 제트화재에 의한 복사열과 VCE에 의한 과압의 영향을 나타낸 것이다. 제트화재의 경우는 약 22 m(반경) 이내에서 복사열의 영향을 받는 것으로 나타났으며, VCE의 경우는 27 m(반경)이내에서 과압의 영향을 받는 것으로 나타났다. 이 결과는 VCE의 경우 KS-RBI 프로그램의 결과인 약 40 m(반경)과 잘 일치함을 알 수 있다.

1 inch 직경의 누출공에서 누출이 발생할 경우 K-CARM에 의해 산출한 제트화재에 의한 복사열과 VCE에 의한 과압의 영향은 Fig. 6과 같다. 제트화재의 경우는 약 6 m(반경) 이내에서 복사열의 영향을 받는 것으로 나타났으며, VCE의 경우는 26 m(반경)이내에서 과압의 영향을 받는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 KS-RBI 프로그램에 의해 산출한 제트화재의 피해범위(반경)인 약 3 m와 매우 비슷하였으나, VCE의 피해범위와는 상당한 차이가 있다. 이것은 K-CARM의 경우 2400초 동안 누출된 이소부탄이 희석되지 않고,



(a) Jet fire

(b) Vapor cloud explosion

Fig. 5. Consequences for 4 inch release hole diameter estimated by K-CARM.

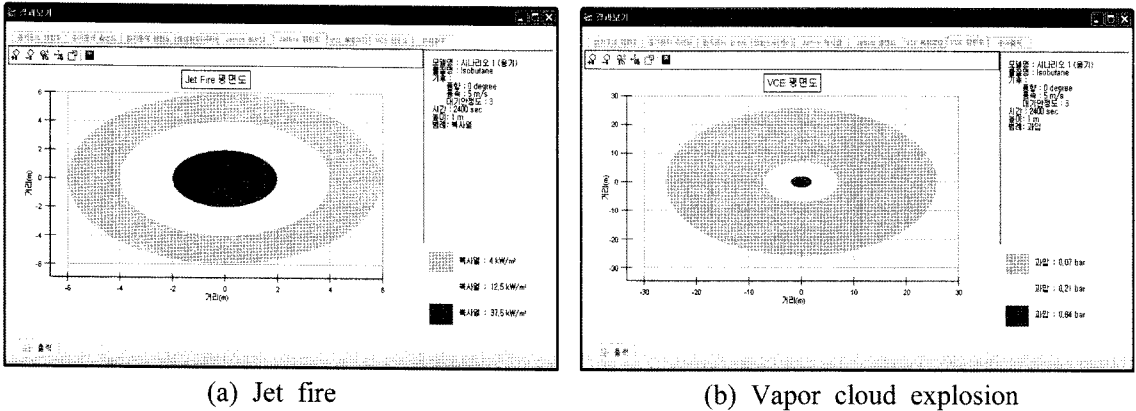


Fig. 6. Consequences for 1 inch release hole diameter estimated by K-CARM.

모두 폭발한 것으로 가정하였기 때문에 피해범위가 큰 것으로 판단된다.

또한 1/4 inch 직경의 누출공에 대한 모사결과는 1 inch 직경의 결과와 매우 비슷한 경향을 나타내었으며, 누출공의 크기가 작은 경우는 연속누출이 이루어져서 제트화재는 다소 피해범위가 크게 나타날 수 있으나, VCE의 경우는 누출속도가 작고, 공기 중에서 희석되기 때문에 피해범위는 상당히 줄어들 것으로 판단된다.

이상의 결과로부터 가중피해영역을 산출하였다. 즉, API-581 절차[7]에서는 식 (9)와 같이 피해범위를 가중 피해영역 즉, 4가지의 누출 시나리오에 대한 고장률과 피해범위를 사용하여 가중평균(weighted average)한 피해영역으로 나타낸다. 이때, 피해범위를 원으로 가정하고, 각 누출 시나리오에 대한 고장률(회/년)(7.4×10^{-6} , 1.9×10^{-5} , 1.9×10^{-6} , 3.7×10^{-6})과 피해범위(반경)(1, 3, 30, 80 m)를 사용하여 식 (9)에 의해 산출한 가중피해영역은 28.3 m(반경)이었다.

Weighted average area=

$$\frac{\sum_{n=1}^{n=4} (Area)_n \times (Frequency)_n}{\sum_{n=1}^{n=4} (Frequency)_n} \quad (9)$$

따라서 이와 같이 가중피해범위를 산출하여 방호벽 설치와 같은 피해 완화조치를 통한 피해범위 최소화 방안과 비상조치계획의 수립 등에 반영할 수 있다. 즉, 사업장에서는 가중피해범위와 최악의 누출 시나리오(파열인 경우)를 동시에 고려할 필요가 있으나, 최악의 누출 시나리오를 중심으로 사고를 예방할 경우에는 사업

장에서 막대한 비용을 들여야 하기 때문에 다소 비현실적일 수 있다.

이상의 결과와 같이 위험기반검사 프로그램에 의해 산출된 피해범위는 일반적인 정량적 위험성 평가방법에 의해 산출한 피해범위와 비슷하게 나타났다. 따라서 사업장에서는 검사방법을 제시하기 위해 개발된 RBI 기법을 사용하여 정량적 위험성 평가에 적극 활용할 수 있을 뿐만 아니라 가중피해영역에 의해 최적의 비용으로 비상조치계획을 수립할 수 있을 것으로 생각된다.

IV. 결 론

정량적 원인분석이 가능하도록 API-581 절차에 따라 개발한 위험기반검사 프로그램(KS-RBI Ver.3.0)을 이용하여 화학설비의 사고 피해범위를 산출하고, 일반적인 정량적 위험성 평가 프로그램인 K-CARM에서 얻은 결과와 비교하였다. 그 결과, KS-RBI 프로그램에 의해 산출한 사고피해 크기는 K-CARM의 결과와 비교적 잘 일치하여 사업장에서는 검사방법을 제시하기 위해 개발된 위험기반검사 프로그램인 KS-RBI 프로그램을 정량적 위험성 평가에 적극 활용할 수 있을 것으로 기대된다. 또한 각 누출 시나리오에 대한 고장률과 사고 피해범위를 사용하여 산출한 가중피해영역에 의해 효과적으로 피해완화조치와 비상조치계획을 수립할 수 있을 것으로 생각된다.

참고문헌

- [1] Lees, F. P., Loss Prevention in the Process Industries, Butterworths, London, (1980)
- [2] Kletz, T. A., What Went Wrong?, Gulf Publishing Co.,

- Houston, TX, (1986)
- [3] API, Fitness for Service : API-579, American Petroleum Institute, New York, (1999)
- [4] KAERI, "The 7th Korea-Japan PSA Workshop", Korea Atomic Energy Research Institute, May, (2002)
- [5] API, Based Resource Document of Risk Based Inspection : API-580, American Petroleum Institute, New York, (2001)
- [6] CRTD/ASME, Risk-Based Inspection - Development of Guidelines, American Society of Mechanical Engineers, CRTD-20-1, New York, (1991)
- [7] API, Risk-Based Inspection - Basic Resource Document : API-581, American Petroleum Institute, New York, (2000)
- [8] KOSHA, Development of K-RBI Program II, Korea Occupational Safety & Health Agency, Technical Manual, (2005)
- [9] 이현창, 유준, 김태욱, "배관누출에 의한 가스 폭발사고에서 누출 시나리오 선정 및 사고결과 분석", *한국가스학회지*, **10**(4), 52-62, (2006)
- [10] 이현창, 조지훈, 김태욱, "용기누출로 인한 가스 폭발 사고에서 API-581 절차의 누출 시나리오에 의한 사고결과 분석", *한국가스학회지*, **11**(2), 15-24, (2007)
- [11] KOSHA, Consequence Analysis(CA), Korea Occupational Safety & Health Agency, ISTI-2001-29-861, (2001)
- [12] Crowl, D.A. and J.F. Louvar, Chemical Process Safety Fundamentals with Applications, Prentice Hall, New York, (1990)
- [13] Perry, R.H. and D. Green, Perry's Chemical Engineering Handbook, 7th ed., McGraw-Hill, New York, (1997)
- [14] Industrial Risk Insurance(IRI), Oil and Chemical Properties Loss Potential Estimation Guide, IR Information, IM 8011, (1992)