



정량적 원인분석이 가능한 위험기반검사(KS-RBI)에 의한 화학설비의 위험도 경감방안

이헌창* · 조지훈** · 김규정** · 권혁면** · †김태옥

명지대학교 화학공학과, *한국안전이엔씨, **한국산업안전공단
(2008년 6월 11일 접수, 2008년 6월 17일 수정, 2008년 6월 17일 채택)

Reduction Method for the Risk of the Chemical Facilities by KS-RBI Program Supporting the Quantitative Cause Analysis

Hern-Chang Lee* · Ji-Hoon Jo** · Kyu-Jung Kim** · Hyuck-Myun Kwon** · †Tae-Ok Kim

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

*Korea Safety Engineering and Consulting

**Korea Occupational Safety Healthy and Agency

(Received June 11, 2008, Revised June 17, 2008, Accepted June 17, 2008)

요 약

정량적 원인분석이 가능한 위험기반검사 프로그램(KS-RBI Ver. 3.0)을 사용하여 화학설비의 위험도를 산출하고, 설비의 위험도를 경감할 수 있는 방안을 모색하였다. 그 결과, 손상메커니즘, 검사횟수 및 검사 유효성을 고려하여 사고발생 가능성(LOF)을 줄이고, 검출, 차단 및 완화 시스템의 수준을 변경하여 사고 피해 크기(COF)를 감소시킴으로써 설비의 위험도를 낮출 수 있었다. 특히, 고 위험도를 낮추기 위해서는 LOF와 COF를 동시에 낮출 수 있는 방안을 모색할 필요가 있으며, 설비의 위험도를 경감함으로써 설비의 안전성 향상으로 사고피해 감소는 물론 검사주기 연장으로 검사비용 및 인건비 절감 등을 기대할 수 있다.

Abstract – The risks of the chemical facilities were estimated by the KS-RBI(Ver. 3.0) program supporting the quantitative cause analysis, and reduction method for the risks of the facilities was investigated. As a result, we could find that the risks of the facilities decrease with reducing the likelihood of failure (LOF) affected by damage mechanism, inspection number and effectiveness of inspection, and with reducing the consequence of failure (COF) affected by the ratings of the detection, isolation, and mitigation systems. Furthermore, high risks of the facilities would be decreased by reduction of the LOF and the COF simultaneously. Accordingly, the applied plant would be able to achieve the decrease of inspection and labor costs because of the decrease of consequences and inspection intervals through the reduction of risks.

Key words : risk-based inspection (RBI), risk, chemical facilities, KS-RBI, likelihood of failure (LOF), consequence of failure (COF), damage mechanism

I. 서 론

낡은 설비들은 유지·보존 상태와 경제성 및 안전성에 따라 가장 효과적이고 적절한 시기에 검사하여 보수할 필요성이 있으며, 이를 해결하기 위해 최근 미국 석유협회(API) 등에서는 설비의 위험도(risk)에 따라 검사의 우선순위를 결정하고, 검사에 소요되는 자원을 관리하기 위한 검사방법인 위험기반검사(risk-based in-

spection, RBI)를 제시하였다[1-3].

최근 국내에서도 위험기반검사에 대한 관심이 높아지고 있을 뿐만 아니라 API-581 절차서(Based Resource Document, BRD)[4]에 의해 국내 환경에 적합한 위험기반검사 프로그램을 개발하였으나, 지금까지는 주로 검사주기 산정에만 치우치고, 설비의 위험도를 경감할 수 있는 방법은 제시를 하지 못하고 있는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 API-581 절차서에 따라 개발한 정량적 원인분석이 가능한 위험기반검사 프로그램(KS-RBI Ver. 3.0)을 사용하여 화학설비의 위험도를 산

†주저자:kimto@mju.ac.kr

정량적 원인분석이 가능한 위험기반검사(KS-RBI)에 의한 화학설비의 위험도 경감방안

출하고, 설비의 위험도를 경감할 수 있는 방안을 제시 하고자 하였다.

II. 위험기반검사

2.1. 총괄 알고리즘

API-581 절차서에 따라 개발된 정량적 원인분석이 가능한 위험기반검사 프로그램(KS-RBI Ver. 3.0)은 Fig. 1과 같이 수행하고자 하는 대상공정의 검사 우선순위를 결정하는 단계와 대상공정에 대한 각 설비별 위험도를 산출하여 설비의 검사 우선순위를 결정하는 단계로 구분된다[5].

Fig. 1에서 공정 위험도는 3개의 범주, 즉 사고발생 가능성, 장치 손상피해 및 건강피해로 구분되고, 장치

손상피해와 건강피해 중 큰 등급을 사고피해 크기 등급으로 설정한다. 이와 같이 결정된 사고발생 가능성 등급과 사고피해 크기 등급을 위험도 행렬에 각각 세로와 가로에 나타내어 정성적 위험도를 결정한다.

장치별 검사의 우선순위를 결정하는 장치 위험도를 산출하기 위한 누출 시나리오(s)별 위험도(risk)는 사고 발생 가능성(likelihood of failure, LOF)과 사고피해 크기(consequence of failure, COF)의 곱으로 식 (1)과 같이 나타낸다.

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

여기서 LOF는 각 장치의 일반 고장발생 빈도와 설비 변경계수, 그리고 관리시스템평가계수로부터 산출된다. 그리고 설비변경계수는 각 장치의 운전 또는 조건과 관

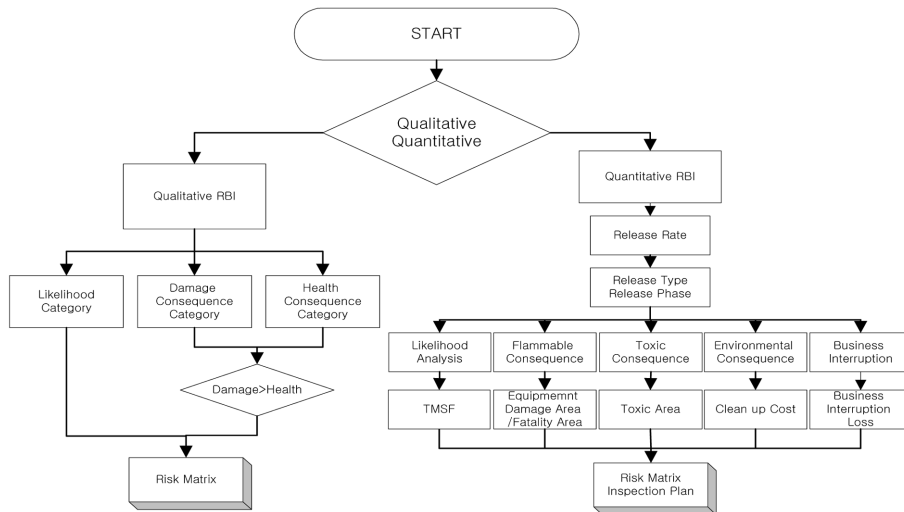


Fig. 1. Algorithm of KS-RBI Ver. 3.0 program.

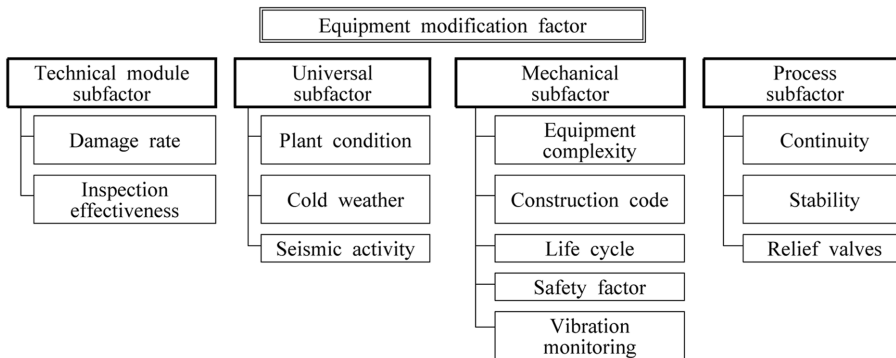


Fig. 2. Overview of equipment modification factor.

런된 기술중속계수, 보편적 중속계수, 기계적 중속계수 및 공정 중속계수로부터 결정되며, 각 계수들은 Fig. 2 와 같이 세부항목들로부터 결정된다.

또한 관리시스템평가계수는 유해물질의 누출을 방지 하고, 공정설비의 기계적 건전성을 유지하는데 영향을 주며, 1000점(100%) 만점으로 평가하는데, 이 값을 인자로 변환하여 전체 장치들의 절대적인 위험도를 높이거나 낮추는데 사용된다.

사고피해 크기는 대표유체 및 유체의 특성 결정, 누출공 선택, 유체의 총 누출량 또는 누출속도 산출, 확산 및 피해크기 결정을 위한 누출유형 결정, 유체의 최종상태 결정, 누출 후 반응영향 평가, 그리고 누출에 의해 잠재적으로 영향을 받는 영역으로 평가되거나 운휴 또는 환경정화로 인한 누출 피해비용으로 산출된다.

이와 같이 산출된 각 장치에서 최종 위험도는 장치의 모든 누출 시나리오에 대한 합으로, 식 (2)와 같이 표현된다.

$$(Risk)_{Equipment} = \sum_s (Risk)_s \quad (2)$$

2.2. KS-RBI 프로그램

API-581 절차를 바탕으로 작성한 종합알고리즘[5] 으로부터 개발된 KS-RBI Ver. 3.0 프로그램은 NACE [6] 부식률 DB, ASME B31.3[7] 재질 DB 등이 구축되어 있으며, 재질은 KS, JIS, DIN 등과 호환된다.

Fig. 3은 KS-RBI Ver. 3.0 프로그램의 수행절차를 나

타낸 것으로, RBI 팀에 의해 P&ID와 PFD를 이용하여 시스템화(유체흐름, 장치 상세구분, 인벤토리 영역 등의 설정)를 수행하고, 설비에 대한 자료를 수집하여 프로그램에 입력한다. 그리고 프로그램을 통해 설비의 위험을 규명하고, 위험으로부터 사고발생 가능성 평가와 사고피해 크기 예측을 통해 설비별 위험도를 산출한 후 이를 반영하여 검사계획과 위험도 감감방안을 수립하도록 하고 있다[8].

2.3. 데이터 입력

D 화학공장의 H 공정에 대해 KS-RBI Ver. 3.0 프로그램을 이용하여 위험기반검사를 수행하기 위해 유체와 설비에 대한 정보를 시스템화[8]를 통해 취득하였으며, 이때 입력된 대상설비는 Table 1과 같이 고정설비 11기와 배관 23기이었다. 또한 시스템화를 통해 입력된 유체정보는 유체명을 포함한 22개 항목, 고정설비의 경

Table 1. Equipment numbers of the applied plant.

Facilities	Equipments	Number	Division no.
Static facilities	Drum	1	11
	Heat exchanger	3(7)	
	Tank	2	
	Filter	1	
Pipes	Pipe	23	23
Total		30	34

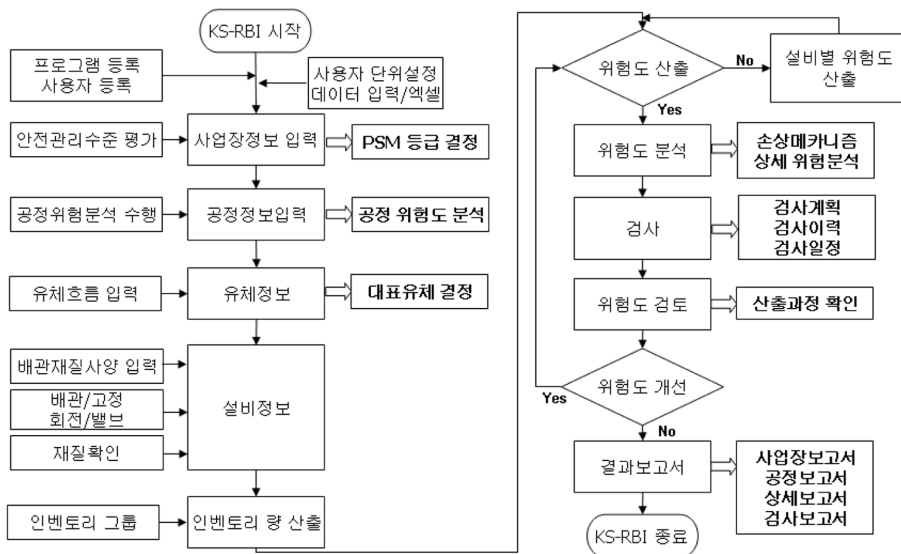


Fig. 3. Procedure of KS-RBI Ver. 3.0 program.

Table 2. System rating of inventory group.

No.	Inventory group	Detection system	Isolation system	Mitigation system
1	INV-11	A	B	B
2	INV-12	A	C	B
3	INV-13	A	B	B
4	INV-14	A	B	B
5	INV-15	A	B	B

우 설비명 및 설비형태 등을 포함한 44개 항목, 배관의 경우 설비명 및 배관사양 등을 포함한 49개 항목이었다.

또한 시스템화에 의해 나누어진 구역, 즉 인벤토리 그룹은 Table 2와 같이 검출(detection), 차단(isolation) 및 완화(mitigation) 시스템에 대하여 등급을 부여하였다. 이때, 누출이 발생할 경우 이를 검출하는 검출시스

템은 완전자동(A), 반자동(B) 및 육안(C)로 구분하였고, 누출로 인해 사고발생시 이를 차단하기 위한 차단시스템은 완전자동(A), 반자동(B) 및 수동(C)로 구분하였다. 그리고 완화시스템은 자동 또는 반자동차단시스템(A), 살수시스템과 방수총(B), 방수총(C) 및 소화거품 분사 시스템(D)로 구분하였다.

III. 결과 및 고찰

KS-RBI Ver. 3.0 프로그램을 사용하여 D 석유화학공장의 H plant에 대해 위험기반검사를 수행하고, 설비의 위험도와 손상메커니즘을 분석하였다. 그리고 설비의 위험도 경감방안을 제시하기 위하여 사고발생 가능성에 영향을 미치는 손상메커니즘, 검사횟수 및 검사 유효성과 사고피해 크기에 영향을 미치는 검출, 차단 및 완화 시스템의 수준에 대하여 해석하였다.

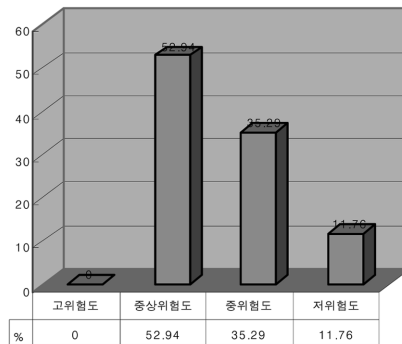
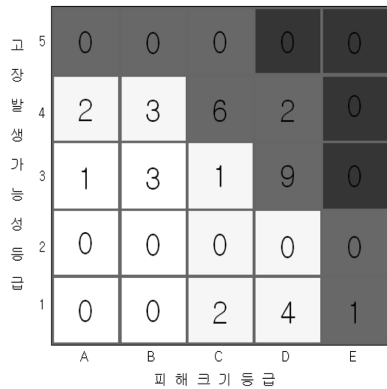


Fig. 4. Risk distributions of equipments in the H plant.

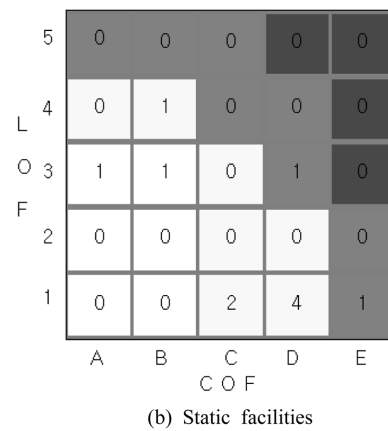
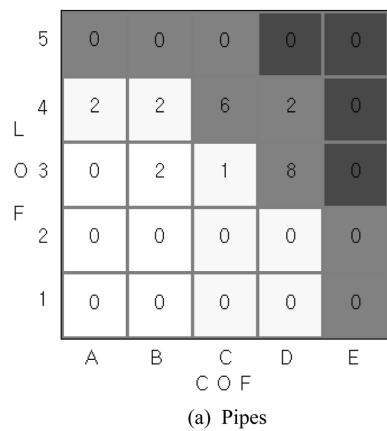


Fig. 5. Risk distributions of pipes and static facilities.

3.1. 공정설비의 위험도 분포 및 손상메커니즘 분석

H 공정에서 공정설비의 위험도 분포는 Fig. 4에서와 같이 고 위험도 설비는 없었으며, 중상 위험도 설비는 18개로 약 52.94%, 중 위험도 설비는 12개로 약 35.29%, 그리고 저 위험도 설비는 4개로 약 11.76%를 차지하였다. 이때, 배관과 고정설비에서 위험도 분포는 Fig. 5에서와 같이 배관의 위험도 분포는 중상 위험도 16개(69.57%), 중 위험도 5개(21.74%), 그리고 저 위험도 2개(8.70%)이었고, 고정설비의 위험도 분포는 중상 위험도 2개(18.18%), 중 위험도 7개(63.64%), 그리고 저 위험도 2개(18.18%)이었다[9].

배관과 고정설비에서 활성중인 손상메커니즘은 Fig. 6에서와 같이 유체흐름에 의한 두께감소와 외부부식이 예측되었으며, 외부부식의 경우는 보온 밀 부식(corrosion under insulation, CUI)이 예측되어 향후 검사 시 보온재를 제거하고, 외부검사를 수행할 필요가 있는 것으로 나타났다. 또한 내부부식의 경우는 부식률이 2 mpy 이하로 나타났으며, 전면부식의 형태로 발생하는 것으로 예측되었다. 이때, 손상메커니즘이 예측되는 설비는 배관이 67.65%, 열교환기 20.59%, 반응기 8.82%, 그리고 여과기 2.94%를 차지하였다.

특히, Fig. 5에서 배관과 고정설비의 LOF 등급을 비교하면 전반적으로 배관에서 사고발생 가능성이 높게 나타나고 있다. 이것은 Fig. 6에서와 같이 배관은 보온재로 보온되어 있어 보온 밀 부식이 예측되기 때문으로 생각된다.

3.2. LOF에 의한 위험 경감방안

D 사업장의 경우 설치 후 현재까지 배관에 대하여

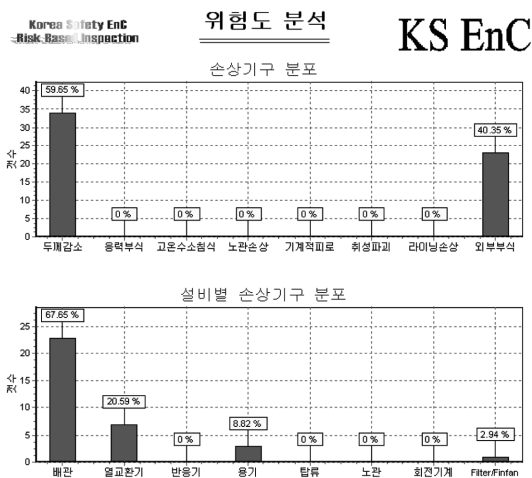


Fig. 6. Analysis of damage mechanism.

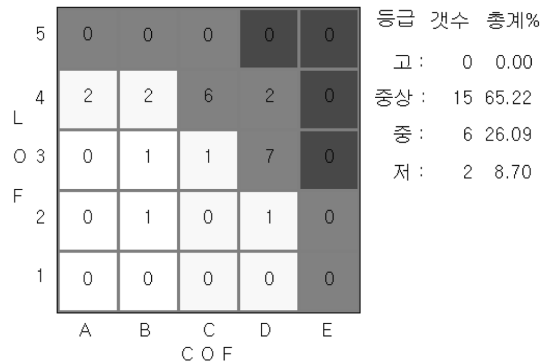


Fig. 7. Risk distributions of pipes in case of no external corrosion.

검사를 수행하지 않았기 때문에 실제 외부부식이 발생되는지를 확인할 필요성이 있는 것으로 평가되었다. 따라서 Fig. 7은 외부부식이 발생되지 않는다는 가정 하에 배관에서의 위험도 행렬을 나타낸 것이다. 그 결과, 대상 배관에서 보온이 된 설비는 3개로, Fig. 5(a)의 위험도 행렬에서 COF/LOF 등급이 B/3 등급인 1개 배관이 Fig. 7의 B/2 등급으로, 그리고 D/3 등급인 1개 배관이 D/2 등급으로 각각 LOF 등급이 낮아짐을 알 수 있었다. 따라서 검사를 수행함으로써 설비의 신뢰성을 높이고, 사고발생 가능성 등급을 낮출 수 있을 것으로 판단되었다.

고정설비는 법에 의해 재검사를 수행하도록 되어 있으므로, 사업장은 현재 주기적인 검사를 실시하고 있다. 따라서 본 연구에서는 검사횟수에 의한 위험도 경감방안을 제시하기 위하여 고정설비는 검사를 하지 않은 것으로 가정하고, 고정설비의 위험도 행렬을 산출하였으며, 그 결과를 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 5(b) 행렬에서

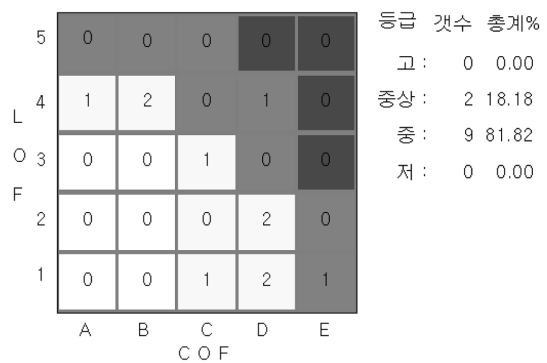


Fig. 8. Risk distributions of static facilities in case of no inspection.

정량적 원인분석이 가능한 위험기반검사(KS-RBI)에 의한 화학설비의 위험도 경감방안

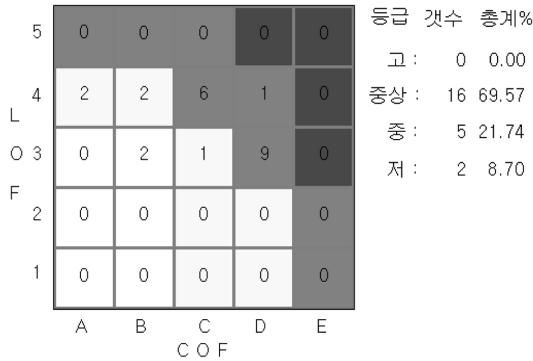


Fig. 9. Risk distributions of pipes at corrosion rate = 1 mpy.

COF/LOF 등급이 A/3 등급인 1개 설비가 A/4 등급으로 이동하였고, B/3 등급인 1개 설비가 B/4로, C/1 등급인 1개 설비가 C/3으로, 그리고 D/1 등급인 2개 설비가 D/2로 각각 이동됨을 알 수 있다. 즉, 고정설비에서 검사를 수행하지 않은 것으로 가정하였을 경우에는 설비의 신뢰도가 감소하여 사고발생 가능성 등급이 높아짐을 알 수 있다. 이와 같이 배관에서도 검사를 수행할 경우에는 고장발생 가능성 등급이 전체적으로 낮아짐을 알 수 있었다.

LOF에 크게 영향을 미치는 인자는 부식률로, 부식이 심각하게 발생할 경우에는 LOF 값이 증가하게 된다. KS-RBI Ver. 3.0 프로그램은 NACE의 부식률을 DB화 하였으며, NACE 부식률은 보수적인 방법으로 공정조건에서 최대값을 사용하고 있다. 따라서 검사를 통해 측정 부식률을 얻은 다음 이를 반영한다면 LOF 값은 보다 낮아 질 수 있다.

H 공정에서 부식률은 전반적으로 2 mpy 이하로 예측되었으며, Fig. 5(a)의 행렬에서 COF/LOF 등급이 D/4인 1개 배관에 대해 부식률을 1 mpy로 가정하고, 위험도를 산출한 결과는 Fig. 9와 같다. 그 결과, Fig. 9에서 COF/LOF 등급이 D/3 등급으로 변화하여 LOF 등

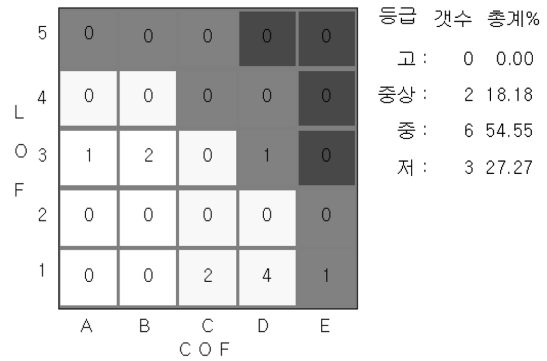


Fig. 10. Risk distributions of static facilities at inspection effectiveness = highly.

급이 낮아짐을 알 수 있었다.

또한 LOF 등급에 의해 위험도를 경감하기 위한 방안에는 검사 유효성 등급이 있다. 즉, 검사 수행에서 검사수준에 따른 검사의 신뢰도는 LOF 등급에 영향을 주게 된다. 고정설비의 경우 Fig. 5(b)의 행렬에서 COF/LOF 등급이 B/4 등급인 설비는 이전 검사에서 효과적(fairly)인 수준으로 검사를 수행하였으나, 매우 효과적(highly)로 검사를 수행하였다고 가정할 경우에는 Fig. 10의 행렬에서 COF/LOF 등급이 B/3 등급으로 낮아짐을 알 수 있다.

3.3. COF에 의한 위험 경감방안

사고피해 크기는 누출속도와 누출량, 그리고 누출 지속시간에 의해 결정된다. 이때, 누출속도와 누출량은 공정조건과 누출 시나리오에 영향을 받으며, 운전에 의해 변경이 어려운 변수이다. 그러나 누출 지속시간은 검출, 차단 및 완화 시스템에 의해 영향을 받으므로, 이들 시스템의 수준을 상승시켜 누출시간을 단축할 수 있다.

Table 2의 인벤토리 그룹에서 INV-11~INV-15의 검출

Table 3. Consequence areas for change of isolation system rating.

Item no.	Equipment type	COF	Risk category	Isolation system rating(C)		Isolation system rating(A)	
				Damage area (ft ²)	Fatality area (ft ²)	Damage area (ft ²)	Fatality area (ft ²)
400-1-P-4256-F1	Pipe-1	B	low	63	157	47	119
400-2-P-4274-F1	Pipe-2	C	medium	358	857	270	650
400-3-P-4252-F1	Pipe-4	D	medium-high	2373	6523	1909	5217
400-4-P-4250-A1	Pipe-4	D	"	1305	3556	1055	2854
V-156	Tank	E	"	37241	110908	30265	89367

Table 4. Consequence areas for various release scenarios.

Item no.	Consequence area(ft ²)	Isolation system rating(C)				Isolation system rating(A)			
		Small	Medium	Large	Rupture	Small	Medium	Large	Rupture
400-1-P-4256-F1	Damage	28			417	21			314
	Fatality	71			1,018	54			772
400-2-P-4274-F1	Damage	32	480		1,867	24	362		1,409
	Fatality	82	1,169		4,422	62	887		3,355
400-3-P-4252-F1	Damage	54	822		45,484	41	620		36,974
	Fatality	138	1,980		127,541	105	1,502		102,789
400-4-P-4250-A1	Damage	15	231		27,089	12	174		22,021
	Fatality	40	571		74,337	30	433		59,910
V-156	Damage	17	253	28,926	212,941	13	191	23,515	173,103
	Fatality	44	623	79,598	636,781	33	473	64,150	513,199

시스템은 모두 A등급이고, 차단시스템은 INV-12가 C 등급이고, 나머지는 모두 B등급이었다. 따라서 INV-12의 차단시스템을 완전자동(시스템 상에서 차단)으로 제어할 수 있는 밸브를 설치하였다고 가정하고, 위험도를 산출·분석하였다.

Table 3은 차단시스템의 수준을 변경하기 전후 설비의 위험도 변화를 나타낸 것으로, COF 등급과 위험도 등급은 변화가 없으나, 가중평균에 의한 장치피해와 상해영역은 차단시스템 수준이 높을수록 감소함을 알 수 있다. 즉, 가중피해범위가 변경되면 COF 등급도 변경이 가능하며, 이에 따라 위험도 등급도 변경될 수 있음을 의미한다.

누출공의 크기가 소(1/4 inch), 중(1 inch), 대(4 inch) 및 파열(직경 또는 16 inch)인 경우의 4가지 누출 시나리오에 대한 피해범위는 Table 4와 같이 누출공이 작은 경우에는 피해범위가 크게 차이가 나지 않으나, 파열인 경우에는 상당히 감소됨을 알 수 있다. 따라서 시스템 조건을 변경시킴으로써 피해범위를 감소시켜 설비의 위험도 등급을 경감할 수 있을 것으로 판단된다.

이상의 결과로부터 고 위험도 설비의 위험도를 낮추기 위해서는 사고발생 가능성과 사고피해 크기를 동시에 낮출 수 있는 방안이 모색되어야 할 것으로 판단된다. 즉, 검사가 수행되지 않은 설비에 대해서는 검사를 수행하여 설비의 신뢰도를 높임과 동시에 검사수준을 엄격(매우 효과적)하게 수행하여야 할 것이다. 또한 검사수행에 있어서는 예측된 손상메커니즘에 대한 확인과 정확한 두께 측정이 병행되어야 하며, 시스템에 대한 위험도를 고려하여 검출, 차단 및 완화 시스템의 수준을 결정해야 할 것이다.

IV. 결 론

API-581 절차에 따라 개발한 정량적 원인분석이 가능한 위험기반검사 프로그램(KS-RBI Ver. 3.0)을 사용하여 석유화학공장의 화학설비에 대해 위험도를 산출하고, 위험도 분포와 손상메커니즘 분석한 후 설비의 위험도를 경감할 수 있는 방안을 모색하였다. 그 결과, 손상메커니즘, 검사횟수 및 검사 유효성을 고려하여 사고발생 가능성(LOF)을 줄이고, 검출, 차단 및 완화 시스템의 수준을 최상의 조건으로 하여 사고 피해크기(COF)를 감소시킴으로써 설비의 위험도를 낮출 수 있었다. 특히, 고 위험도를 낮추기 위해서는 적절한 검사 시기와 엄격한 검사수준으로 설비의 신뢰도를 높이고, 적절한 수준의 검출, 차단 및 완화 시스템을 설치하여 사고피해를 최소화 하여 LOF와 COF를 동시에 낮출 수 있는 방안을 모색할 필요가 있다.

따라서 설비의 위험도를 경감함으로써 설비의 안전성 향상으로 사고피해 감소는 물론 검사주기 연장으로 검사비용 및 인건비 절감 등을 기대할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 2007년 제15차 산학연컨소시엄센터의 지원으로 이루어 졌으며, 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

[1] API, Based Resource Document of Risk Based Inspection: API-580, American Petroleum Institute,

정량적 원인분석이 가능한 위험기반검사(KS-RBI)에 의한 화학설비의 위험도 경감방안

- New York, (2001)
- [2] CRTD/ASME, Risk-Based Inspection - Development of Guidelines, American Society of Mechanical Engineers, CRTD-20-1, New York, (1991)
- [3] Petroleum Publishing Co., "Refinery Embraces Risk-Based Inspection Plan", *Oil & Gas Journal*, **97**(21), 58-61, (1999)
- [4] API, Risk-Based Inspection - Basic Resource Document: API-581, American Petroleum Institute, New York, (2000)
- [5] KOSHA, Development of K-RBI Program II, Korea Occupational Safety & Health Agency, Technical Manual, (2005)
- [6] NACE, Corrosion Data Survey - Metals Section, National Association of Corrosion Engineers International, 6th Ed., Houston, Texas, (1985)
- [7] ASME, Process Piping: ASME Code for Pressure Piping, B31.3, American Society of Mechanical Engineers, New York, (1999)
- [8] 이현창, 신평식, 임대식, 김태옥, "한국형 위험기반검사(K-RBI)의 절차 개발", *한국안전학회지*, **21**(3), 31-37, (2006)
- [9] 김태옥, 이현창, 신평식, 최병남, 조지훈, 최병용, 박성후, 김형근, 김태옥, "석유화학공장에서 한국형 위험기반검사에 의한 화학설비의 안전성 평가", *한국안전학회지*, **22**(6), 35-40, (2007)