

석유화학공장에서 한국형 위험기반검사에 의한 화학설비의 안전성 평가

김태옥^{*} · 이헌창^{*} · 신평식^{**} · 최병남^{**} · 조지훈^{**} · 최병용^{***} · 박성후^{***} · 김형근^{***}

명지대학교 화학공학과 · ^{*}한국안전이엔씨 · ^{**}한국산업안전공단 · ^{***}대림산업(주)

(2007. 5. 9. 접수 / 2007. 11. 20. 채택)

Analysis of Safety of the Chemical Facilities by Korea Risk Based-Inspection in the Petrochemical Plant

Tae-Ok Kim^{*} · Hem-Chang Lee^{*} · Pyng-Sik Shin^{**} · Byung-Nam Choi^{**} · Ji-Hoon Jo^{**}

Byung-Young Choi^{***} · Sung-Hoo Park^{***} · Hung-Kun Kim^{***}

Department of Chemical Engineering, Myongji University

^{*}Korea Safety Engineering and Consulting

^{**}Korea Occupation Safety Healthy and Agency

^{***}Daelim Industrial Co.,Ltd.

(Received May 9, 2007 / Accepted November 20, 2007)

Abstract : As a way of improving the safety of the chemical facilities, the risk based-inspection(RBI) was executed for the facilities of the applied petrochemical plant using KS-RBI Ver. 3.0 program developed based on the API-581 based resource document(BRD). From an evaluation result of KS-RBI program, we could find the evaluation of the process safety management(PSM) for the applied plant, risk of the applied process, risk of static facilities and pipes, and the damage mechanism of the facilities. Also, we could suggest a proper inspection plan(frequency and method of inspection) using the calculated risk and the status of the facilities. Therefore, the applied plant could be achieved a reduced inspection cost by an extension of inspection frequency, improved productivity, improved reliability of the facilities, and a computerized history management.

Key Words : risk based-inspection(RBI), safety, chemical facilities, API-581, inspection frequency, PSM, damage mechanism

1. 서 론

정유 및 석유화학 산업에서는 1960년대 이후 급격한 산업의 발전과 더불어 사고발생 건수와 손실액이 점차적으로 증가되고 있다. 특히, 석유화학공장의 상대적 위험도를 비교해보면 대부분의 고위험 설비는 전체 설비 중에서 소수의 설비가 차지하고 있다. 또한 중대산업사고는 약 43%가 기계적 손상(mechanical failure)에 의한 것으로 나타나고 있으며, 기계적 손상 중 배관장치의 파손이 제일 큰 비중을 차지하고, 탱크, 반응기, 드럼 순으로 발생되었다^{1,2)}.

따라서 낡은 설비들은 유지·보존 상태와 경제성 및 안전성에 따라 가장 적절한 시기에 가장 효과적

인 방법으로 검사하고, 보수해야 될 필요성이 있다. 이를 위해 최근 미국석유협회(API)에서 개발된 위험기반검사(risk based-inspection, RBI)는 설비의 위험도에 따라 검사의 우선순위를 결정하고, 검사주기와 검사에 소요되는 자원을 관리하기 위한 검사기법이 다^{3,4)}.

본 연구에서는 API-581 절차⁵⁾에 의해 개발된 한국형 위험기반검사(KS-RBI) 프로그램을 화학설비에 적용하여 설비의 위험성을 평가하고, 이를 바탕으로 검사주기 및 검사방법을 제시하여 설비의 안전성을 향상시키는 방법을 제시하였다.

2. 한국형 위험기반검사

2.1. KS-RBI 프로그램

한국형 위험기반검사(KS-RBI Ver. 3.0) 프로그램

^{*} To whom correspondence should be addressed.
kimto@mju.ac.kr

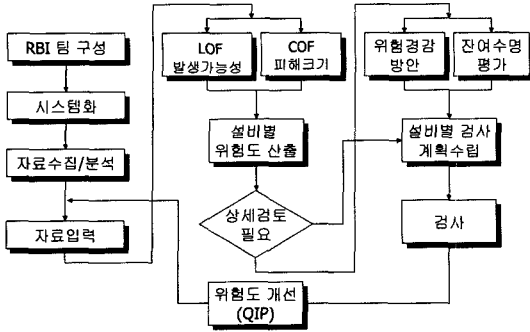


Fig. 1. Algorithm of KS-RBI program.

은 API-581 절차를 바탕으로 개발된 종합알고리즘⁶⁾으로부터 NACE⁷⁾ 부식물 DB, ASME B31.3⁸⁾ 재질 DB 등이 구축되어 있으며, 재질은 KS, JIS, DIN 등과 호환된다.

Fig. 1은 KS-RBI Ver. 3.0 프로그램의 수행절차로, 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 피해크기 예측을 통해 설비별 위험도를 산출한 후 이를 반영하여 검사계획과 위험경감방안을 수립하도록 하고 있다⁹⁾.

이와 같은 알고리즘을 바탕으로 개발한 KS-RBI Ver. 3.0 프로그램의 수행절차는 Fig. 2와 같다.

Table 1은 KS-RBI Ver. 3.0 프로그램의 메뉴로, 사용자들이 쉽게 결과를 확인할 수 있도록 구성되었다.

22. 데이터 입력

화학설비에 대해 RBI를 수행하기 위하여 유체와

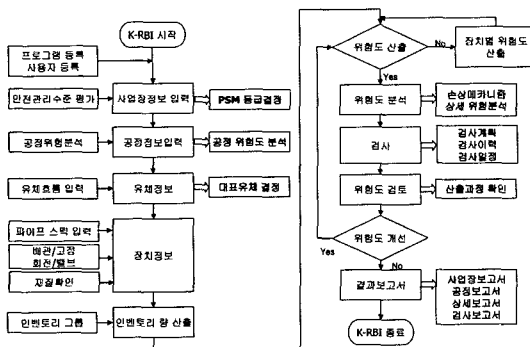


Fig. 2. Procedure of KS-RBI program Ver. 3.0.

Table 1. Menu of KS-RBI program Ver 3,0

파일	새로운 DB/DB 열기/DB Export/프린터 설정/화면인쇄/종료
공정 위험도	사업장 정보: 사업장 기본정보/안전관리수준(세부)/안전관리수준(종합) 공정 위험도 분석: 공정정보/공정 위험도 분석/공정 위험도 비교
설비 정보	유체정보: 유체흐름/대표유체 결정 장치정보: 배관재질 사양/장치관리/재질결정/파이프 스펙 수정 인벤토리
위험도 분석	위험도 산출 위험도 분석: 손상메카니즘/상세 위험 분석
검사	검사계획/검사이력/검사일정
위험도 검토	산출과정 확인
	잔여수명 확인
	위험도 개선
	설비 찾기: 잔여수명 평가/고위험도 설비
보고서	검사주기 확인
	인벤토리별 위험
	위험도 행렬
	공장보고서: 안전관리수준평가/공정별 수행설비목록/공정 위험도 비교
	공정보고서: 공정 위험도 분석/공정설비 위험도 분포/위험도 분석
환경 설정	상세보고서: 유체정보/설비정보/배관스펙 사양/설비 위험도/설비 상세위험도
	검사보고서: 검사보고서/검사일정/검사이력/검사주기별 현황
원도우	단위/설비의 검사주기/일반DB/위험도 등급/비밀번호 변경/사용자 관리/국가별 재질입력/화학물질 입력
도움말	

설비에 대한 정보를 시스템화를 통해 취득하였으며, 이때 입력된 대상설비는 Table 2와 같이 고정설비 11기와 배관 23기이었다. 또한 시스템화를 통해 입력된 유체정보는 유체명을 포함한 22개 항목, 고정설비는 설비명 및 설비형태 등을 포함한 44개 항목, 배관은 설비명 및 배관사양 등을 포함한 49개 항목이었다.

Table 2. Equipment numbers of the applied plant

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

3. 결과 및 고찰

한국형 위험기반검사 프로그램(KS-RBI Ver. 3.0)을 사용하여 D 석유화학회사의 H plant에 대해 위험기반검사를 수행하고, 설비의 안전성을 평가하였다.

3.1. PSM 이행수준 및 공정 위험성 평가

노동부와 한국산업안전공단에서 수행중인 안전관리 이행수준평가¹⁰⁾를 자체적으로 평가하여 적용한 결과는 Fig. 3과 같으며, 안전관리 수준은 86.6점으로 PSM 등급 중 S등급에 해당하여 안전관리수준이 대체로 잘 이행되고 있는 것으로 평가되었다.

또한 H 공정의 위험도를 분석한 결과는 Fig. 4와 같이 고장발생 가능성은 3등급, 가연성 물질에 의한 피해는 B등급이었으며, 이로부터 결정된 공정의 위험성 등급은 저 위험도에 해당하였다. 그러나 독성 물질은 사용하고 있지 않아서 평가하지 않았다.

Korea Safety Risk Inspection		안전관리 수준평가(종합) KS EnC			
번호	내용	최고점백분	최고완성점수	평가점백분	완성점수
1	안전경영과 근로자 참여	500	240	418	200
2	공정안전자료	40	50	34	42
3	공정위험성평가	60	55	38	34
4	안전문헌지침과 절차	80	40	60	23
5	설비의 점검/정비/유지관리 지침	110	55	62	41
6	안전직업자가 될 절차	190	65	170	58
7	형식안전 관리	110	40	102	57
8	공정안전에 대한 교육/훈련	50	50	40	40
9	가용한 점검지침	30	30	30	23
10	변경요소관리	80	70	76	65
11	지배 검사	70	90	70	50
12	공정사고조사	70	30	56	24
13	비상조치계획	60	35	56	32
14	현장확인	170	150	162	142
총합		1620	1000	1394	658

Fig. 3. Evaluation of process safety management.

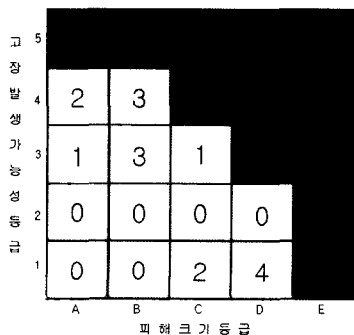
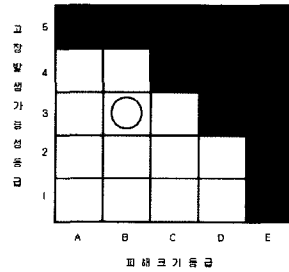


Fig. 5. Risk distributions of equipments in the H plant.

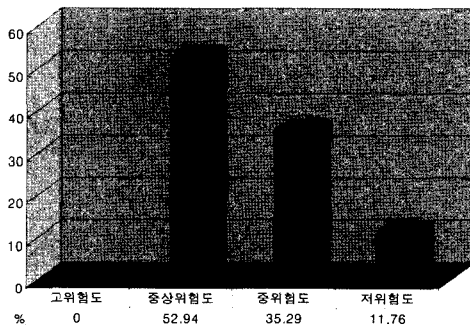


고장 발생 가능성: 3등급	피해크기: B등급	건강피해: A등급
설비계수: 15	화학물질계수: 13	독성물질계수: 0
손상계수: 16	물질발생계수: 31	확산계수: 0
검사계수: -7	상태계수: 6	신뢰계수: 0
상태계수: 2	지연발생계수: -10	인구계수: 0
공정계수: 1	안전계수: -10	
기계적 설계계수: 2	신뢰계수: -7	
위험도등급: 저		

Fig. 4. Analysis of process risk.

3.2. 공정설비의 위험도 분포

H 공정에서 공정설비의 위험도 분포는 Fig. 5에서와 같이 고위험도 설비는 없었으며, 중상위험도 설비는 18개로 약 52.94%, 중위험도 설비는 12개로 약 35.29%, 그리고 저위험도 설비는 4개로 약 11.76%를 차지하였다. 이때, 고정설비 및 배관의 위험도 분포는 Fig. 6과 같이 고정설비는 중상위험도 2개(18.18%), 중위험도 7개(63.64%), 그리고 저위험도 2개(18.18%)이었고, 또한 배관은 중상위험도 16개(69.57%), 중위험도 5개(21.74%), 그리고 저위험도 2개(8.70%)이었다. 특히, 배관은 보온된 상태에서 운전되고 있어서 외부부식에 의한 손상메커니즘이 존재하기 때문에 고장발생 가능성이 높게 나타났으며, 고정설비에서는 저장용량이 많아서 사고발생 시 누출속도 또는 누출량이 크기 때문에 사고 피해



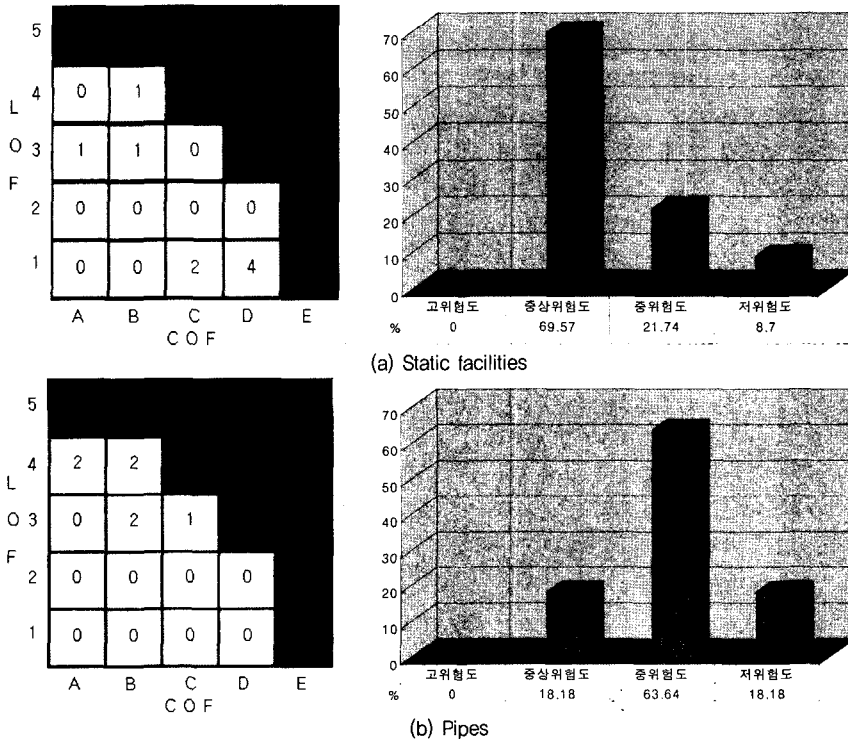


Fig. 6. Risk distributions of static facilities and pipes.

크기가 커서 화재 또는 폭발에 의한 피해범위가 클 것으로 예측되었다.

3.3. 공정설비의 손상메카니즘 분석

고정설비 및 배관에서 손상의 메카니즘은 Fig. 7에서와 같이 활성중심 손상메카니즘은 유체흐름에 의한 두께감소와 외부부식이 예측되었으며, 외부부식의 경우는 보온 밀 부식이 예측되어 향후 검사 시

보온재를 제거하고, 외부검사를 수행할 필요가 있는 것으로 나타났다. 또한 내부부식의 경우 부식률은 2mpy 이하이고, 전면부식의 형태로 발생하는 것으로 예측되었다. 또한 손상메카니즘이 예측되는 설비는 배관이 67.65%, 열교환기 20.59%, 반응기 8.82%, 필터 2.94%를 차지하였다.

3.4. 설비의 위험도

고정설비 및 배관에 대한 사고 피해크기(consequence of failure, COF) 등급, 사고발생 가능성(likelihood of failure, LOF) 등급, 위험도, 고장률 등의 결과는 Table 3과 같다. 설비들은 프로판(propane), 이소부탄(iso-butane), 에틸렌(ethylene) 등의 화학물질을 사용하고 있었으며, 이들 유체는 대기 중에 누출될 경우 증기운 폭발(vapor cloud explosion, VCE)을 일으킬 수 있는 가연성 물질로, 전반적으로 피해범위는 D 등급을 나타내는 경우가 많았다. 특히, V-156 탱크의 경우 저장량이 많아서 사고발생시 피해범위가 클 것으로 예측되지만, 사고방지를 위해 검출시스템과 차단시스템 등이 모두 자동으로 연동되어 있었다.

그리고 설비에 대한 잔여수명은 손실여유분을 부

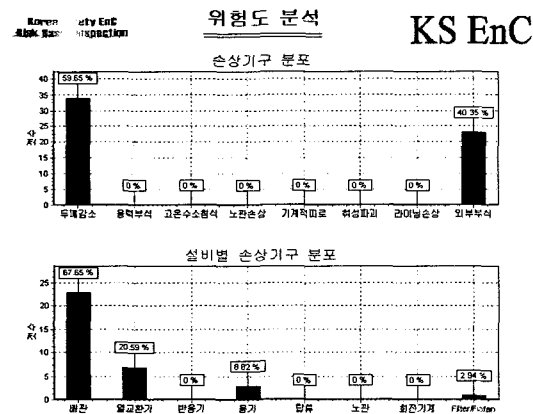


Fig. 7. Analysis of damage mechanism.

석유화학공장에서 한국형 위험기반검사에 의한 화학설비의 안전성 평가

Table 3. Risk analysis for static facilities and pipes

(a) Static facilities													
No	장치번호	장치형태	인벤토리	유체번호	COF 등급	LOF 등급	위험도 등급	내부 부식률	잔여 수명	검사 주기	검사요구 수준	위험도	고장율
1	E-040A/B/C_shell	Exchanger	INV-13	901	C	1	중	2	84	6	P	0.0130	1.8E-05
2	E-040A/B/C_tube	Exchanger	INV-13	406	B	4	중	2	7	4	U	0.1096	1.2E-03
3	E-055_channel	Exchanger	INV-15	901	C	1	중	2	141	6	P	0.0105	1.4E-05
4	E-055_shell	Exchanger	INV-15	407	D	1	중	2	88	6	P	0.1266	4.1E-05
5	E-055_tube	Exchanger	INV-15	901	A	3	저	2	19	6	F	0.0004	6.2E-04
6	E-141_shell	Exchanger	INV-11	901	D	3	중상	2	68	4	F	0.3942	3.5E-04
7	E-141_tube	Exchanger	INV-11	405	B	3	저	2	33	6	F	0.0189	5.7E-04
8	F-107A/B	Filter	INV-14	406	D	1	중	2	67	6	P	0.5137	2.0E-04
9	V-017	Tank	INV-15	407	D	1	중	2	16	6	P	0.1338	3.2E-05
10	V-116A/B	Drum	INV-14	406	D	1	중	2	52	6	P	0.2135	2.9E-05
11	V-156	Tank	INV-12	406	E	1	중상	2	32	5	P	1.1735	3.2E-05
(b) Pipes													
No	장치번호	장치형태	인벤토리	유체번호	COF 등급	LOF 등급	위험도 등급	내부 부식률	잔여 수명	검사 주기	검사요구 수준	위험도	고장율
1	200-3-P-2627-F1	Pipe-4	INV-13	406	D	3	중상	2	17	4	F	0.0127	8.2E-06
2	200-3-P-2629-F1	Pipe-4	INV-14	406	D	3	중상	2	17	4	F	0.0171	8.2E-06
3	200-3-P-2632-F1	Pipe-4	INV-14	406	D	3	중상	2	17	4	F	0.0170	8.1E-06
4	200-6-P-2628-F1-Ih	Pipe-6	INV-14	406	D	3	중상	2	32	5	P	0.0096	1.2E-06
5	400-1 1/2-P-4114-C1-Ih	Pipe-2	INV-11	405	C	4	중상	2	22	3	U	0.0740	4.1E-04
6	400-1 1/2-P-4120-C1	Pipe-2	INV-11	405	C	4	중상	2	27	3	U	0.0408	2.8E-04
7	400-1-CWR-4170-L1	Pipe-1	INV-11	901	A	4	중	2	41	5	U	0.0003	4.2E-04
8	400-1-CWS-4168-L1	Pipe-1	INV-11	901	A	4	중	2	41	5	U	0.0006	6.5E-04
9	400-1-P-4256-F1	Pipe-1	INV-12	406	B	3	저	2	46	6	F	0.0039	6.2E-05
10	400-2-P-4115-A1	Pipe-2	INV-11	405	C	4	중상	2	13	3	U	0.1196	5.5E-04
11	400-2-P-4255-F1	Pipe-2	INV-13	406	D	4	중상	2	11	3	U	0.5034	1.5E-04
12	400-2-P-4274-F1	Pipe-2	INV-12	406	C	3	중	2	11	5	F	0.0200	5.6E-05
13	400-3-P-4118-C1-2	Pipe-4	INV-11	404	D	4	중상	2	38	3	U	0.0688	5.5E-05
14	400-3-P-4252-1-F1	Pipe-4	INV-13	406	D	3	중상	2	17	4	F	0.0187	1.2E-05
15	400-3-P-4252-F1	Pipe-4	INV-12	406	D	3	중상	2	17	4	F	0.0300	1.3E-05
16	400-3-P-4253-F1	Pipe-4	INV-13	406	D	3	중상	2	17	4	F	0.0110	7.1E-06
17	400-3-PR-4142-C1-Io	Pipe-4	INV-15	407	C	4	중상	2	49	3	U	0.0360	3.8E-05
18	400-3-PR-4313-C1	Pipe-4	INV-15	407	B	4	중	2	24	4	U	0.0043	4.6E-05
19	400-3-PR-4314-C1	Pipe-4	INV-15	407	C	4	중상	2	38	3	U	0.0386	4.1E-05
20	400-4-CWR-4316-L1	Pipe-4	INV-15	901	B	3	저	2	56	6	F	0.0014	2.7E-05
21	400-4-CWS-4315-L1	Pipe-4	INV-15	901	B	4	중	2	56	5	U	0.0025	4.3E-05
22	400-4-P-4250-A1	Pipe-4	INV-12	406	D	3	중상	2	39	4	F	0.0248	1.9E-05
23	400-4-PR-4312-C1	Pipe-4	INV-15	407	C	4	중상	2	25	3	U	0.0058	4.6E-05

식물로 나누고, 사용년수를 제외하여 산출하였다. 이때, 고정설비의 경우는 최소두께와 사용두께를 알기 쉬우나, 배관의 경우는 최소두께 값을 모르는 경우가 많으므로, KS-RBI 프로그램에서는 배관스펙에

의해 최소두께를 결정하였다. 즉, ASME B31.3에 의해 설계온도와 설계두께에 의해 해당재질의 최소두께를 산출하였다. 그리고 위험도는 설비의 고장발생 가능성과 사고 피해크기를 곱하여 산출하였다.

Table 4. Estimated Inspection frequency of static facilities and pipes

Inspection frequency(yr)	1	2	3	4	5	6	8	Total
Static facilities	0	0	0	2	1	8	0	11
Pipes	0	0	8	11	2	2	0	23

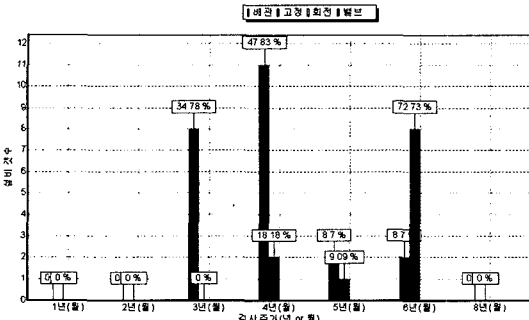


Fig. 8. Distributions of inspection frequency for equipments.

3.5. 공정설비의 검사주기 변화

검사주기는 설비의 위험도 등급과 상태를 반영하여 결정하였으며, Table 4 및 Fig. 8은 KS-RBI 프로그램을 통해 얻어진 설비의 검사주기 현황이다. 배관의 경우는 설치 후 검사를 수행하지 않았기 때문에 Fig. 6에서 LOF 등급이 높게 나타난 것으로 판단된다. 따라서 배관은 향후 검사를 수행(4년 주기 11개, 5년 주기 2개, 6년 주기 2개)하고, 설비에 대한 신뢰도를 확보한 후 검사주기를 재선정하는 것이 바람직한 것으로 판단된다. 또한 고정설비는 현재 3년(7개) 또는 4년(4개) 주기로 검사를 수행하고 있으나 RBI를 수행한 결과, 설비의 검사주기가 4~6년으로 연장할 필요가 있는 것으로 나타났다.

이와 같이 검사주기의 연장으로 검사비용을 절감할 수 있고, 설비의 검사이력을 데이터화함으로써 업무효율을 증대시킬 수 있을 것으로 예측된다.

4. 결론

API-581 절차에 따라 개발한 한국형 위험기반검사 프로그램(KS-RBI Ver. 3.0)을 석유화학공장에 적용하여 화학설비의 안전성을 평가하였다. 그 결과, 적용 사업장의 자체 안전관리는 대체로 잘되고 있

었으며, 공정의 위험도는 저위험도이었다. 또한 개별설비의 위험도를 얻을 수 있었으며, 위험도가 높은 설비는 별도로 관리함으로써 사고예방에 도움이 될 것으로 예측되었다. 그리고 설비의 손상메커니즘을 예측하고, 잔여수명을 평가하여 검사주기를 산출하였다.

따라서 RBI 수행을 통해 검사주기 연장 등으로 정비비용의 절감, 생산성 향상과 더불어 설비 신뢰도 향상, 설비의 유지·보수 및 이력관리의 전산화 등을 실현할 수 있었다.

참고문헌

- 1) F. P. Lees, "Loss Prevention in the Process Industries", Butterworths, London, 1980.
- 2) T. A. Kletz, "What Went Wrong?", Gulf Publishing Co., Houston, TX, 1986.
- 3) API, "Based Resource Document of Risk Based Inspection : API-580", American Petroleum Institute, New York, 2001.
- 4) CRTD/ASME, "Risk-Based Inspection - Development of Guidelines", American Society of Mechanical Engineers, CRTD-20-1, New York, 1991.
- 5) API, "Risk-Based Inspection - Basic Resource Document : API-581", American Petroleum Institute, New York, 2000.
- 6) KOSHA, "Development of K-RBI Program(II)", Korea Occupational Safety & Health Agency, Technical Manual, 2005.
- 7) NACE, "Corrosion Data Survey - Metals Section", National Association of Corrosion Engineers International, 6th Ed., Houston, Texas, 1985.
- 8) ASME, "Process Piping : ASME Code for Pressure Piping, B31.3", American Society of Mechanical Engineers, New York, 1999.
- 9) 이헌창, 신평식, 임대식, 김태욱, "한국형 위험기반검사(K-RBI)의 절차 개발", 한국안전학회지, 제21권, 제2호, pp. 31~37, 2006.
- 10) 노동부, "공정안전관리 이행수준의 평가", 산업안전보건법 시행규칙 제73조 제3의 3항, 2004.