

RBI 절차의 석유화학 플랜트 적용에 관한 연구

송정수* · 심상훈* · 김지윤** · 윤기봉†

(2002년 6월 24일 접수, 2003년 1월 17일 심사완료)

A Study on Implementation of Risk Based Inspection Procedures to a Petrochemical Plant

Jung Soo Song, Sang Hoon Shim, Ji Yoon Kim and Kee Bong Yoon

Key Words : Risk(위험도), Risk Based Inspection(위험기반검사), Inventory(저장량), Petrochemical Plant(석유화학 플랜트)

Abstract

During the last ten years, the need has been increased for reducing maintenance cost for aged equipments and ensuring safety, efficiency and profitability of petrochemical and refinery plants. RBI (Risk Based Inspection) methodology is one of the most promising technologies satisfying the need in the field of integrity management. In this study, a user-friendly software, *real*RBI for RBI based on the API 581 code was developed. This software has modules for evaluating qualitative and semi-quantitative risk level, analyzing quantitative risks using the potential consequences of a failure of the pressure boundary, and assessing the likelihood of failure. A quantitative analysis was performed for 16 columns in a domestic NCC (Naphtha Cracking Center) plant whose operating time reaches about 12 years. Each column was considered as two equipment parts by dividing into top and bottom. Generic column failure frequencies were adjusted based on likelihood data. After determining release rate, release duration and release mass for each failure scenario, flammable/explosive and toxic consequences were assessed. Current risks for 32 equipment parts were evaluated and risk based prioritization were determined as a final result.

1. 서 론

RBI는 정유, 석유화학, 화력, 원자력 설비 등 광범위한 분야에서 응용되고 있다. 공정설비 분야에서는 API가 20여 개의 업체와 공동 컨소시엄을 구성하여 5년 연구과제로 정유·석유화학 설비의 위험도 평가, 진단계획 수립에 맞는 API 581 코드를 개발하여 활용하고 있다.⁽¹⁾ 또한, 최근 ASME에서도 시공 후 코드 제정 위원회(post construction code committee)를 구성하여 공정 설비뿐만 아니라 일반설비 및 발전설비 등에도 적용될 수 있는 코

드를 만드는 작업을 수행 중이다.⁽²⁾ 국내에서도 RBI 관련 연구가 중화학설비 분야를 중심으로 착수되었으며,⁽³⁻⁵⁾ 지자 등은 정유·석유화학 설비 등의 안전하고 효율적인 사용을 위해 경제적인 진단 계획을 수립하기 위한 도구로서 API 581 코드에 근거하여 RBI 소프트웨어인 *real*RBI를 개발하였다.^(6,7)

본 연구에서는 개발된 소프트웨어를 이용하여 가동시간이 약 12년에 이르는 국내 NCC (Naphtha cracking center)의 컬럼(column) 16개에 대해서 PFD (process flow diagram), P&ID (piping & instrument diagram), 공정자료 및 진단 기록을 확보하여 RBI를 수행하여 결과를 분석하였다. 각각의 컬럼을 상부(top)와 하부(bottom)로 구분하여 총 32기에 대해서 RBI 해석을 수행하였다. *real*RBI를 사용하여 적용대상 32기에 대해서 각각의 파손 시나리오에 대한 파손 빈도를 구한 후, 누출률, 누출지속

† 책임저자, 회원, 중앙대학교 기계공학부

E-mail : kbyoon@cau.ac.kr

TEL : (02)820-5328 FAX : (02)812-6474

* 회원, 중앙대학교 대학원

** 회원, 한국가스안전공사 대구경북지사

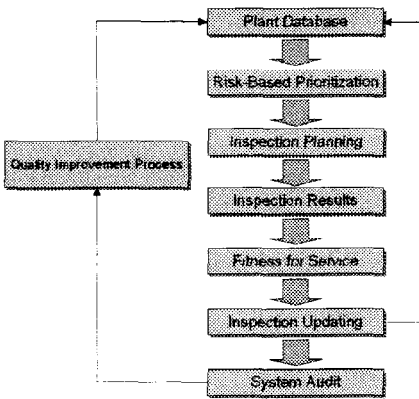


Fig. 1 RBI procedures for equipment for maintenance⁽¹⁾

시간 및 누출량을 결정하여 화재 및 폭발에 의한 피해, 독성에 의한 피해를 평가하였다. 이에 근거하여 최종 각 장치의 위험도를 산출하여 장치들의 위험도 순위를 결정하였다.⁽⁸⁾

2. RBI 해석 알고리즘 연구

2.1 RBI 절차

RBI 에서 사용하는 위험도(risk)는 식 (1)로 표현된다.

$$\text{위험도} = \text{파손빈도} \times \text{파손피해} \quad (1)$$

여기서 파손빈도(likelihood of failure)는 정성적 또는 정량적 분석에 따라 장치나 설비가 파손될 수 있는 확률이나 일년 당 파손 횟수로 정의하고, 파손피해(consequence of failure)는 한 건의 파손이 발생했을 경우 그 피해 정도를 피해면적 또는 피해 손실액으로 정의한다. 포괄적인 RBI 절차는 Fig. 1 에 보인 바와 같은 과정으로 각각 설비별로 위험등급 또는 위험도를 산정하고 이에 따라 감사의 우선 순위, 방법, 주기 및 일정계획 등을 수립하여 기술적인 근거에 의해 종합적이고 체계적인 감사를 수행하는 것이다.^(1,8)

이와 같이 RBI 는 위험도를 정성적 또는 정량적으로 평가하여 전체 플랜트 위험도의 대부분을 차지하고 있는 20 % 내외의 대상 설비를 찾아내어 이에 대해 최적의 방법으로 인적, 물적 자원을 집중적으로 투입함으로써 효율적인 안전성 확보와 함께 유지관리의 경제성을 추구하는 기법이라 할 수 있다.⁽⁹⁾

2.2 API 581 에 근거한 RBI 소프트웨어 개발

본 연구팀이 개발한 *realRBI* 소프트웨어의 알고

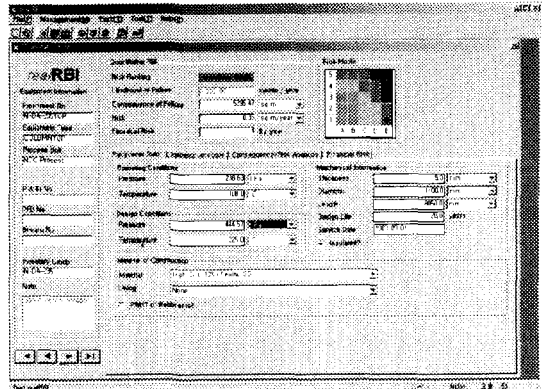


Fig. 2 Main window of developed *realRBI* software

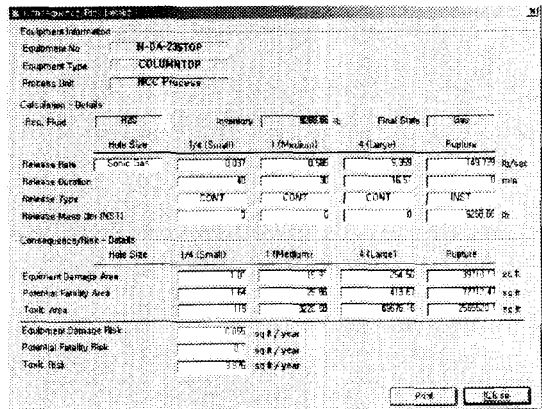


Fig. 3 Risk/consequence details for quantitative RBI

리즘은 API 581 의 부록에서 제시되고 있는 평가 순서도를 기본으로 하였고, 평가 순서도에 명확히 제시되지 않은 부분은 API 581 코드상의 본문 내용 및 참고문헌에 근거하여 작성하였다. 구성된 종합 알고리즘을 바탕으로 MS Visual C++ 6.0, MS Visual Basic 6.0 그리고 MS Access 를 사용하여 소프트웨어를 개발하였다.^(5,6)

Fig. 2 는 RBI 소프트웨어 기본 화면 구조이며 좌측에는 플랜트 데이터 관리(plant data management)를 통해 입력한 장치번호(equipment number), 장치유형(equipment type), 해당 공정(process unit) 및 인벤토리 그룹(inventory group)이 나타내어지며 기타 P&ID, PFD 및 유동 번호(stream number)도 표시되어진다. 상단에는 평가된 준정량적 위험도 등급, 파손빈도, 파손피해, 정량적 위험도 및 재정적 위험도가 나타내어진다. 그리고 시각적으로 판단하기 용이하도록 우측 상단의 위험도 행렬 상에 대상 장치의 위험도 등급 위치를 표시하였다. 또한, Fig. 2 의 중앙에 위치한 탭 컨트롤을 전환시켜 가면서 위험도 평가에 필요한 세부 데이터를 입력하도록 구성하였다. Fig. 3 은 중

Table 1 List of equipments selected for RBI analysis

Equipment	Name of equipment	Material of Construction
N-DA-101	Gasoline fractionator	Carbon Steel
N-DA-102	Pyrolysis fuel oil stripper	Carbon Steel
N-DA-103	Pyrolysis gas oil stripper	Carbon Steel
N-DA-104	Quench tower	Carbon Steel
N-DA-105	Process water stripper	Carbon Steel
N-DA-201	Gasoline stripper	Carbon Steel
N-DA-202	Condensate stripper	Carbon Steel
N-DA-203	Caustic/water wash tower	Carbon Steel
N-DA-204	Acid gas absorber	Carbon Steel
N-DA-205	Amine regenerator	Top : 300 SS-L Grade Bottom : Carbon Steel
N-DA-235	Spent caustic stripper	High Cr (13%) Ferritic SS
N-DA-401	De-ethanizer	1Cr-0.5Mo
N-DA-402	Ethylene fractionator	1Cr-0.5Mo
N-DA-404	De-propanizer	Carbon Steel
N-DA-405	De-butanizer	Carbon Steel
N-DA-406	Propylene fractionator	Carbon Steel

Table 2 Equipment data of the columns under study

Equipment	Length (top),[mm]	Length (btm),[mm]	Diameter [mm]	Thickness [mm]	Lining	Insulation
N-DA-101	28,300	4,000	6,000	16	No	Hot
N-DA-102	10,300	1,000	750	7	No	Hot
N-DA-103	11,200	1,500	1,300	6	No	Hot
N-DA-104	21,710	12,500	12,200	14	No	Hot
N-DA-105	700	400	118	7	No	Hot
N-DA-201	16,900	1,700	1,000	6	No	Hot
N-DA-202	21,400	5,000	1,100	11	No	Hot
N-DA-203	28,900	3,400	3,000	20	No	Hot
N-DA-204	26,300	1,000	2,700	18	No	Hot
N-DA-205	25,450	5,900	1,700	5	No	Hot
N-DA-235	8,050	2,700	1,400	8	No	Hot
N-DA-401	39,800	1,500	2,100	22	No	Hot
N-DA-402	76,300	1,700	3,100	27	No	Hot
N-DA-404	30,200	1,900	1,700	19	No	Hot
N-DA-405	32,800	1,500	1,700	10	No	Hot
N-DA-406	86,250	500	4,400	33	No	Hot

간 계산과정에서 생성되는 주요 값인 누출률, 누출지속시간, 누출유형, 누출량 및 각 파손 시나리오에 따른 화재 및 폭발에 의한 피해와 독성에 의한 피해 등을 나타내는 세부 창으로써 사용자가 위험도 계산과정을 이해하는데 도움이 되도록 구현되었다.⁽¹⁰⁾

대표물질 선정에 있어서는 비등온도, 몰무게 (molecular weight) 및 밀도를 가지고 식 (2)를 이용하여 혼합물질에 가장 유사한 대표물질을 선정하였다.

$$(property)_{mix} = \sum x_i \times (property)_i \quad (2)$$

3. 적용 대상 NCC 플랜트

개발된 *realRBI*를 이용하여 국내 산업설비 중에서 한 NCC 플랜트를 대상으로 선정하여 *RBI*를 적용하였다. 선정된 플랜트의 주요 공정, 주요 설비 내역 및 *RBI*를 적용하기 위해 선정된 대상 요소 등에 대해 본 절에서 설명하였다.

여기에서 x_i 는 혼합물질의 몰분율(mole fraction)이고, $(property)_i$ 는 비등온도, 몰무게, 밀도 등이 다.⁽¹¹⁾

3.1 *realRBI* 소프트웨어 적용설비

RBI 적용대상 NCC 플랜트는 약 12년 동안 가동된 설비로 설비의 주요 재질은 탄소강이 대부분이나 저온 운전을 하는 정제 공정부의 경우 오스테나이트계 스테인리스강이 사용된다. 대상 설비는 Table 1 과 같이 분해로 및 급냉공정의 컬럼 5 개, 차지 가스(charge gas) 압축공정의 컬럼 6 개 및 C_2/C_3 정제공정의 컬럼 5개로 총 16개의 컬럼이다. 컬럼은 상부와 하부의 유체, 유체의 초기 상태, 독성 물질과 그 함유량 등이 상이하다. 따라서 컬럼의 수준계(level indicator)를 기준으로 상부와 하부로 분리하여 총 32 기의 대상에 대해서 정량적 *RBI*를 수행하였다.⁽⁸⁾

컬럼에서 누출이 발생된다면 연동계(interlock system)에 의해 공급 유체가 차단되고, 하류(down-stream)측에서 순차적으로 MOV(motor operated valves)의 개폐가 이루어지기 때문에 누출 가능량을 결정하려면 최소한 인접 배관 및 장치를 일부 포함시켜 인벤토리 그룹을 구성하여야 하지만, 이에 대한 상세 정보가 없어도 해석을 수행할 수 있도록 우선 본 연구에서는 컬럼의 상부와 하부만을 인벤토리 그룹으로 구성하였다.^(1,12,13)

3.2 *RBI* 수행용 입력 데이터

적용 대상 컬럼의 상부와 하부 총 32 기에서 내부 물질이 순수물질인 장치는 총 20 기이고 혼합물질인 경우는 12기이다. 혼합물질인 12기의 경우

realRBI 소프트웨어 구동에 필요한 설비 데이터는 Table 2 에 보인 바와 같다. 또한 설계조건 및 운전조건은 Table 3 에 요약하였다. 파손피해 산출에 필요한 데이터로서 대표물질과 초기상태는 Table 4 에 정리하였고, 누출 가능량 계산에 필요한 장치의 액체 비율(liquid percent)과 기체 밀도는 Table 5 에 보인 바와 같다. 독성 물질, 독성 물질 비율 그리고 감시·차단·피해 감소 시스템(detection·isolation·mitigation system)에 대한 정보가 필요하여 사용된 데이터를 Table 6 에 보였다. 파손 빈도 산출에 필요한 데이터로서 노출 수, 설계 수명, 계획적인 가동정지 및 비계획적인 가동정지는 Table 7 에 정리 하였으며, 공정의 건전성(stability ranking), 안전밸브 보수 수의 수준(relief valve

Table 3 Design/operating conditions of the columns

Equipment	Design Pressure [kg/cm ² G]	Design Temp [°C]	Oper. Pressure [kg/cm ² G]	Oper. Temp. [°C]
N-DA-101	3.50	340	1.39	105
N-DA-102	3.50	340	0.44	185
N-DA-103	3.50	340	0.43	135
N-DA-104	3.50	340	0.33	41
N-DA-105	3.50	147	0.77	118
N-DA-201	3.50	150	0.50	48
N-DA-202	11.00	92	8.65	27
N-DA-203	11.00	120	8.53	43
N-DA-204	11.00	120	8.47	43
N-DA-205	3.50	130	0.70	113
N-DA-235	3.50	225	1.40	108
N-DA-401	25.20	-40	21.00	-22
N-DA-402	19.40	-45	17.40	-35
N-DA-404	19.10	105	16.70	43
N-DA-405	7.00	150	4.45	48
N-DA-406	20.70	75	18.66	45

Table 4 Representative fluid and initial state in the columns

Equipment	Fluid (top)	Fluid (btm)	Initial state (top)	Initial state (btm)
N-DA-101	C ₁ - C ₂	C ₉ - C ₁₂	Gas	Liquid
N-DA-102	H ₂	C ₉ - C ₁₂	Gas	Liquid
N-DA-103	Steam	C ₉ - C ₁₂	Gas	Liquid
N-DA-104	C ₁ - C ₂	C ₉ - C ₁₂	Gas	Liquid
N-DA-105	Water	Water	Liquid	Liquid
N-DA-201	C ₃ - C ₄	C ₉ - C ₈	Gas	Liquid
N-DA-202	C ₃ - C ₄	C ₅	Gas	Liquid
N-DA-203	C ₁ - C ₂	C ₃ - C ₄	Gas	Gas
N-DA-204	C ₁ - C ₂	Water	Gas	Liquid
N-DA-205	Steam	Water	Gas	Liquid
N-DA-235	H ₂ S	Water	Gas	Liquid
N-DA-401	C ₁ - C ₂	C ₃ - C ₄	Gas	Liquid
N-DA-402	C ₁ - C ₂	C ₁ - C ₂	Gas	Liquid
N-DA-404	C ₃ - C ₄	C ₃ - C ₄	Gas	Liquid
N-DA-405	C ₃ - C ₄	C ₅	Gas	Liquid
N-DA-406	C ₁ - C ₂	C ₃ - C ₄	Gas	Liquid

Table 5 Liquid percent and gas density required for determining group inventory

Equipment	Liquid % (top)	Liquid % (btm)	Gas density (top), [kg/m ³]	Gas density (btm), [kg/m ³]
N-DA-101	0	100	2.46	-
N-DA-102	0	100	0.78	-
N-DA-103	0	100	1.04	-
N-DA-104	0	100	1.46	-
N-DA-105	100	100	-	-
N-DA-201	0	100	2.83	-
N-DA-202	0	100	14.19	-
N-DA-203	0	0	9.91	10.03
N-DA-204	0	100	10.03	-
N-DA-205	0	100	0.94	-
N-DA-235	0	100	4.81	-
N-DA-401	0	100	39.05	-
N-DA-402	0	100	31.48	-
N-DA-404	0	100	36.75	-
N-DA-405	0	100	12.64	-
N-DA-406	0	100	38.89	-

Table 6 Toxic material/percent & detection/isolation/mitigation rating of the columns

Equipment	Toxic (top), [%]	Toxic (btm), [%]	Detection rating	Isolation rating	Mitigation rating
N-DA-101	H ₂ S/0.02	-	B	A	C
N-DA-102	-	-	B	A	C
N-DA-103	-	-	B	A	C
N-DA-104	H ₂ S/0.04	-	B	A	C
N-DA-105	-	-	B	A	C
N-DA-201	H ₂ S/0.09	-	B	A	C
N-DA-202	-	-	B	A	C
N-DA-203	-	-	B	A	C
N-DA-204	-	H ₂ S/0.15	B	A	C
N-DA-205	H ₂ S/1.06	H ₂ S/0.06	B	A	C
N-DA-235	H ₂ S/37.50	-	B	A	C
N-DA-401	-	-	B	A	C
N-DA-402	-	-	B	A	C
N-DA-404	-	-	B	A	C
N-DA-405	-	-	B	A	C
N-DA-406	-	-	B	A	C

Table 7 Number of nozzles, design life and number of shutdowns for the columns

Equipment	No. of nozzles(top)	No. of nozzles(btm)	Design life (years)	No. of planned shutdown	No. of unplanned shutdown
N-DA-101	39	8	20	5	3
N-DA-102	11	6	20	5	3
N-DA-103	10	6	20	5	3
N-DA-104	23	14	20	5	3
N-DA-105	12	9	20	5	3
N-DA-201	11	13	20	5	3
N-DA-202	18	12	20	5	3
N-DA-203	39	13	20	5	3
N-DA-204	29	4	20	5	3
N-DA-205	26	14	20	5	3
N-DA-235	11	8	20	5	3
N-DA-401	27	7	20	5	3
N-DA-402	47	7	20	5	3
N-DA-404	27	7	20	5	3
N-DA-405	24	5	20	5	3
N-DA-406	35	8	20	5	3

Table 8 Supplementary data for likelihood analysis of the columns

Equipment	Stability ranking	RV maint.	Fouling service	Corrosive service	Very clean service
N-DA-101	B	A	A	No	Yes
N-DA-102	B	A	A	No	Yes
N-DA-103	B	A	A	No	Yes
N-DA-104	B	A	A	No	Yes
N-DA-105	B	A	A	No	Yes
N-DA-201	B	A	A	No	Yes
N-DA-202	B	A	A	No	Yes
N-DA-203	B	A	B	Yes	Yes
N-DA-204	B	A	B	Yes	Yes
N-DA-205	B	A	B	Yes	Yes
N-DA-235	B	A	B	Yes	Yes
N-DA-401	B	A	A	No	Yes
N-DA-402	B	A	A	No	Yes
N-DA-404	B	A	A	No	Yes
N-DA-405	B	A	A	No	Yes
N-DA-406	B	A	A	No	Yes

maintenance), 공정의 청결성 및 부식성(fouling·corrosive·very clean service 등)은 Table 8에 나타나 있다.⁽⁸⁾

4. RBI 해석에 의한 위험도 평가 및 고찰

선정된 NCC 플랜트내의 컬럼 16 개의 상부와 하부 32 기에 대해 정량적 RBI 해석을 수행하여 위험도를 분석을 실시한 결과는 아래와 같다.

4.1 파손빈도 평가결과

RBI 에서는 API 581 코드에서 제시한 기본 파손 빈도에 개별 장치의 손상기구 등을 반영/보정하여 최종 파손빈도를 산출하게 된다. 장치유형이 컬럼인 장치의 기본 파손빈도는 파손 시나리오 별로 (파손기구와 무관하게 4 가지 홀 크기로 정의함) 소형 홀(small, 1/4 in)인 경우 8.00E-05, 중형(medium, 1 in)인 경우 2.00E-04, 대형(large, 4 in)이 2.00E-05, 파단(rupture)이 6.00E-06 이고 모두 합한 파손빈도는 3.06E-04 이다.⁽¹⁾ 정량적 RBI 를 수행한 결과 얻은 각 파손 시나리오에 따른 파손빈도와 총 파손빈도 결과는 Table 9에 보인 바와 같다. 대상으로 선정한 NCC 플랜트는 가혹한 환경에서 가동되지 않기 때문에 특별히 파손빈도를 증가시키는 손상기구는 존재하지 않는다. 따라서 대상 장치의 파손빈도가 기본 파손빈도보다 낮게 나올 것을 예측할 수 있으며 Table 9의 평가 결과도 전반적으로 기본 파손빈도보다 낮음을 보여주고 있다.

파손빈도를 평가한 결과 장치번호가 N-DA-203 TOP 인 코스틱/물 세척 타워(caustic/water wash tower)의 상부와 N-DA-204TOP 인 산성 가스 흡수기(acid gas absorber)의 상부는 기본 파손빈도와 같게 평가되었고, 나머지 30 기는 기본 파손빈도보다 낮게 평가되었다. 특히 장치번호가 N-DA-101BTM 인 가솔린 분류기(gasoline fractionator)의 하부, N-DA-102BTM 인 열분해 연료 오일 스트리퍼(pyrolysis fuel oil stripper)의 하부, N-DA-103BTM 인 열분해 가스 오일 스트리퍼(pyrolysis gas oil stripper)의 하부 및 N-DA-105BTM 인 공정수 스트리퍼(process water stripper)의 하부 등은 총 파손빈도가 2.91E-05 로 평가되어 기본 파손빈도보다 약 1/10 정도로 작게 나왔으므로 파손 위험은 적은 것을 알 수 있다. 파손빈도에 영향을 주는 인자들 중에는 설비의 복잡성을 반영하는 노즐 수와 운전상태를 반영하는 설계 압력 대 운전 압력의 비가 있다. 위 네 컬럼의 하부의 경우 노즐 수가 상대적으로 적으므로 파손빈도가 작아지고, 또 운전 압력이

Table 9 Likelihood results for 32 column parts of this study

No	Equipment No.	Adjusted column failure frequencies (events/year)				Total
		small	medium	large	rupture	
1	N-DA-101TOP	1.07E-05	2.67E-05	2.67E-06	8.00E-07	4.08E-05
2	N-DA-101BTM	7.62E-06	1.90E-05	1.90E-06	5.71E-07	2.91E-05
3	N-DA-102TOP	8.42E-06	2.11E-05	2.11E-06	6.32E-07	3.22E-05
4	N-DA-102BTM	7.62E-06	1.90E-05	1.90E-06	5.71E-07	2.91E-05
5	N-DA-103TOP	8.42E-06	2.11E-05	2.11E-06	6.32E-07	3.22E-05
6	N-DA-103BTM	7.62E-06	1.90E-05	1.90E-06	5.71E-07	2.91E-05
7	N-DA-104TOP	9.41E-06	2.35E-05	2.35E-06	7.06E-07	3.60E-05
8	N-DA-104BTM	8.42E-06	2.11E-05	2.11E-06	6.32E-07	3.22E-05
9	N-DA-105TOP	8.42E-06	2.11E-05	2.11E-06	6.32E-07	3.22E-05
10	N-DA-105BTM	7.62E-06	1.90E-05	1.90E-06	5.71E-07	2.91E-05
11	N-DA-201TOP	8.42E-06	2.11E-05	2.11E-06	6.32E-07	3.22E-05
12	N-DA-201BTM	8.42E-06	2.11E-05	2.11E-06	6.32E-07	3.22E-05
13	N-DA-202TOP	1.23E-05	3.08E-05	3.08E-06	9.23E-07	4.71E-05
14	N-DA-202BTM	1.07E-05	2.67E-05	2.67E-06	8.00E-07	4.08E-05
15	N-DA-203TOP	8.00E-05	2.00E-04	2.00E-05	6.00E-06	3.06E-04
16	N-DA-203BTM	3.20E-05	8.00E-05	8.00E-06	2.40E-06	1.22E-04
17	N-DA-204TOP	8.00E-05	2.00E-04	2.00E-05	6.00E-06	3.06E-04
18	N-DA-204BTM	2.29E-05	5.71E-05	5.71E-06	1.71E-06	8.74E-05
19	N-DA-205TOP	2.29E-05	5.71E-05	5.71E-06	1.71E-06	8.74E-05
20	N-DA-205BTM	1.78E-05	4.44E-05	4.44E-06	1.33E-06	6.80E-05
21	N-DA-235TOP	1.78E-05	4.44E-05	4.44E-06	1.33E-06	6.80E-05
22	N-DA-235BTM	1.45E-05	3.64E-05	3.64E-06	1.09E-06	5.56E-05
23	N-DA-401TOP	1.45E-05	3.64E-05	3.64E-06	1.09E-06	5.56E-05
24	N-DA-401BTM	9.41E-06	2.35E-05	2.35E-06	7.06E-07	3.60E-05
25	N-DA-402TOP	1.78E-05	4.44E-05	4.44E-06	1.33E-06	6.80E-05
26	N-DA-402BTM	1.07E-05	2.67E-05	2.67E-06	8.00E-07	4.08E-05
27	N-DA-404TOP	1.45E-05	3.64E-05	3.64E-06	1.09E-06	5.56E-05
28	N-DA-404BTM	9.41E-06	2.35E-05	2.35E-06	7.06E-07	3.60E-05
29	N-DA-405TOP	1.23E-05	3.08E-05	3.08E-06	9.23E-07	4.71E-05
30	N-DA-405BTM	8.42E-06	2.11E-05	2.11E-06	6.32E-07	3.22E-05
31	N-DA-406TOP	1.78E-05	4.44E-05	4.44E-06	1.33E-06	6.80E-05
32	N-DA-406BTM	1.07E-05	2.67E-05	2.67E-06	8.00E-07	4.08E-05

설계 압력에 비해 극히 낮으면 안전성이 확보되므로 파손빈도가 더욱 작아진다. 따라서 이 네 장치의 노즐 수가 타 장치들에 비해 상대적으로 적은 각각 8 개, 6 개, 6 개 그리고 9 개이고 설계 압력 3.5 kg/cm² G 에 비해 운전 압력이 아주 낮은 각각 1.39 kg/cm² G, 0.44 kg/cm² G, 0.43 kg/cm² G 그리고 0.77 kg/cm² G 이었으므로 파손빈도가 낮게 평가된다.

4.2 파손피해 평가결과

32 기 장치의 파손피해 데이터와 인벤토리 그룹 모듈을 통해서 계산된 누출 가능량 값을 사용해 평가한 화재 및 폭발에 의한 장치 피해면적, 인명 피해면적, 독성에 의한 독성 피해면적 등의 파손 피해 평가결과는 Table 10에 정리하였다.

Table 10의 파손피해를 분석한 결과 장치번호 N-DA-105TOP/BTM 의 공정수 스트리퍼와 장치번호 N-DA-235BTM 의 사용후 코스틱 스트리퍼(spent caustic stripper)는 파손이 발생하더라도 장치 파손 외에는 아무런 피해를 보이지 않았다. 하지만 장치번호 N-DA-235TOP 인 사용후 코스틱 스트리퍼의 상부는 독성에 의한 피해면적이 5,295.47 m²로 가장 크게 평가되었다. 이유는 사용후 코스틱 스트리퍼가 길이 10,750 mm, 직경 1,400 mm로서 타 장치에 비해 크기도 작고, 따라서 누출 가능량

Table 10 Consequence results of 32 column parts of this study

No	Equipment No.	Calculated consequence (m ³)		
		Equipment damage area	Potential fatality area	Toxic area
1	N-DA-101TOP	52.37	104.74	6.83
2	N-DA-101BTM	146.64	596.13	0.00
3	N-DA-102TOP	66.34	118.25	0.00
4	N-DA-102BTM	28.84	127.51	0.00
5	N-DA-103TOP	0.00	17.31	0.00
6	N-DA-103BTM	41.44	137.08	0.00
7	N-DA-104TOP	33.55	67.10	5.16
8	N-DA-104BTM	109.60	470.02	0.00
9	N-DA-105TOP	0.00	0.00	0.00
10	N-DA-105BTM	0.00	0.00	0.00
11	N-DA-201TOP	14.42	34.61	2.88
12	N-DA-201BTM	57.69	161.62	0.00
13	N-DA-202TOP	41.44	106.57	0.00
14	N-DA-202BTM	86.53	188.99	0.00
15	N-DA-203TOP	28.54	59.81	0.00
16	N-DA-203BTM	92.60	102.92	0.00
17	N-DA-204TOP	50.70	252.75	0.00
18	N-DA-204BTM	0.00	0.00	161.52
19	N-DA-205TOP	0.00	43.26	211.01
20	N-DA-205BTM	0.00	0.00	92.90
21	N-DA-235TOP	75.14	136.62	5295.47
22	N-DA-235BTM	0.00	0.00	0.00
23	N-DA-401TOP	65.12	133.59	0.00
24	N-DA-401BTM	301.93	805.16	0.00
25	N-DA-402TOP	102.47	204.93	0.00
26	N-DA-402BTM	414.42	819.73	0.00
27	N-DA-404TOP	163.64	442.50	0.00
28	N-DA-404BTM	224.52	588.39	0.00
29	N-DA-405TOP	33.55	88.80	0.00
30	N-DA-405BTM	74.99	164.40	0.00
31	N-DA-406TOP	178.97	353.85	0.00
32	N-DA-406BTM	810.62	2315.74	0.00

도 비교적 작지만 누출 시의 대표물질이 독성인 황화수소 (H₂S)가 약 37.5 %를 차지하기 때문이다. 또한 장치번호 N-DA-406BTM 인 프로필렌 분류기(propylene fractionator)의 상부가 장치 피해면적과 인명 피해면적이 각각 810.62 m²와 2,315.74 m²로 가장 큰 화재 및 폭발에 의한 피해면적을 보였다. 그 이유는 이 프로필렌 분류기가 길이 86,750 mm, 직경 4,400 mm로써 장치 중에 가장 크고 같은 인벤토리 그룹인 N-DA-406TOP 부의 기체 밀도도 38.89 kg/m³이어서 누출 가능량이 55,356 kg으로 가장 크기 때문이다.

4.3 위험도 평가 결과

컬럼 16 개의 상부와 하부 32 거의 기본 파손빈도를 근거로 분석된 파손빈도와 대표물질, 독성물질, 누출 가능량 등 파손피해 결정에 필요한 데이터 입력을 통해 얻은 파손피해를 통해서 4 개의 파손 시나리오에 대해 위험도 분석을 실시하고 4 개의 파손 시나리오의 위험도 값을 합산함으로써 총 대상 장치의 위험도를 결정하였다. 분석된 각 장치별 화재 및 폭발에 의한 위험도, 독성 위험도 및 위험도 순위(risk ranking) 평가결과는 Table 11 및 Fig. 3 에 보인 바와 같다.

분석된 위험도에서 장치번호가 N-DA-406BTM

인 프로필렌 분류기의 하부가 화재 및 폭발에 의한 장치피해 위험도와 인명피해 위험도에서 가장 크게 평가되었고, 평가된 장치피해 위험도는 0.033 m³/year 이고 인명피해 위험도는 0.094 m³/year 이었다. 이와 같은 결과는 평가대상 장치의 경우에는 파손빈도보다는 화재 및 폭발에 의한 파손피해가 타 장치에 비해 아주 크기 때문에 나타난다. 8 개의 장치에서는 장치손상 위험도가 없는 것으로 분석되었고 5 개의 장치에서는 인명피해 위험도가 없는 것으로 평가되었다.

장치번호가 N-DA-235TOP 인 사용후 코스타 스트리퍼의 상부가 가장 큰 독성 위험도를 보였고, 평가된 독성 위험도는 0.36 m³/year 이었다. 이 위험도는 이 장치가 황화수소를 다량으로 포함하고 있어 독성에 의한 피해에서 가장 큰 피해면적으로 보였기 때문이다. N-DA-204BTM, N-DA-205TOP/BTM 및 N-DA-235TOP 을 제외한 독성물질을 소량 포함하는 장치인 N-DA-101TOP, N-DA-104TOP 및 N-DA-201TOP 는 독성 위험도가 0 으로 평가되었다.

N-DA-105TOP/BTM 과 N-DA-235BTM 은 대표물질이 물이고 독성 물질을 포함하고 있지 않아 파손사고 발생 시 피해면적이 없으므로 위험도는 0 으로 분석되었다.

화재 및 폭발에 의한 장치피해 위험도 및 인명피해 위험도 그리고 독성 위험도를 종합하여 최고 위험도(maximum risk)를 기준으로 위험도 순위를 정하였다. 종합 위험도 순위에서 첫 번째는 독성 위험도에서 가장 높은 위험도를 나타낸 장치번호 N-DA-235TOP 인 사용후 코스타 스트리퍼의 상부이고 두 번째는 화재 및 폭발에 의한 장치피해 위험도와 인명피해 위험도에서 가장 높은 값을 갖는 장치번호 N-DA-406BTM 인 프로필렌 분류기였다. 이상의 해석 결과를 사용하여 정기 진단 시 위험도 순위를 검사의 우선 순위로 하여 진단을 수행할 수 있으며, 검사의 내용은 위의 결과에 의해 결정될 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 정유-석유화학 설비에서 경제성 및 효율성을 고려하여 설비의 진단 전략 및 진단의 우선 순위를 결정할 수 있는 RBI 소프트웨어의 적용 연구를 수행하였으며 연구 결과는 다음과 같다.

(1) API 581 코드에 근거하여 MS Visual C++, MS Visual Basic, MS Access 를 사용하여 RBI 소프트웨어를 개발하였으며, GUI 환경을 구현하여 소프트웨어

Table 11 Risk results of 32 column parts of this study

No	Equipment No.	Risk data (m ³ /year)				Risk ranking
		Equipment damage	Potential fatality	Toxic risk	Maximum risk	
1	N-DA-101TOP	0.002	0.004	0.000	0.004	22/32
2	N-DA-101BTM	0.004	0.017	0.000	0.017	12/32
3	N-DA-102TOP	0.002	0.004	0.000	0.004	22/32
4	N-DA-102BTM	0.001	0.004	0.000	0.004	22/32
5	N-DA-103TOP	0.000	0.001	0.000	0.001	28/32
6	N-DA-103BTM	0.001	0.004	0.000	0.004	22/32
7	N-DA-104TOP	0.001	0.002	0.000	0.002	27/32
8	N-DA-104BTM	0.004	0.015	0.000	0.015	13/32
9	N-DA-105TOP	0.000	0.000	0.000	0.000	30/32
10	N-DA-105BTM	0.000	0.000	0.000	0.000	30/32
11	N-DA-201TOP	0.000	0.001	0.000	0.001	28/32
12	N-DA-201BTM	0.002	0.005	0.000	0.005	19/32
13	N-DA-202TOP	0.002	0.005	0.000	0.005	19/32
14	N-DA-202BTM	0.004	0.008	0.000	0.008	16/32
15	N-DA-203TOP	0.009	0.018	0.000	0.018	11/32
16	N-DA-203BTM	0.011	0.030	0.000	0.030	5/32
17	N-DA-204TOP	0.016	0.031	0.000	0.031	4/32
18	N-DA-204BTM	0.000	0.000	0.014	0.014	14/32
19	N-DA-205TOP	0.000	0.005	0.026	0.026	7/32
20	N-DA-205BTM	0.000	0.000	0.006	0.006	18/32
21	N-DA-235TOP	0.005	0.009	0.360	0.360	1/32
22	N-DA-235BTM	0.000	0.000	0.000	0.000	30/32
23	N-DA-401TOP	0.004	0.007	0.000	0.007	17/32
24	N-DA-401BTM	0.011	0.029	0.000	0.029	6/32
25	N-DA-402TOP	0.007	0.014	0.000	0.014	14/32
26	N-DA-402BTM	0.017	0.033	0.000	0.033	3/32
27	N-DA-404TOP	0.009	0.025	0.000	0.025	8/32
28	N-DA-404BTM	0.008	0.021	0.000	0.021	10/32
29	N-DA-405TOP	0.002	0.004	0.000	0.004	22/32
30	N-DA-405BTM	0.002	0.005	0.000	0.005	19/32
31	N-DA-406TOP	0.012	0.024	0.000	0.024	9/32
32	N-DA-406BTM	0.033	0.094	0.000	0.094	2/32

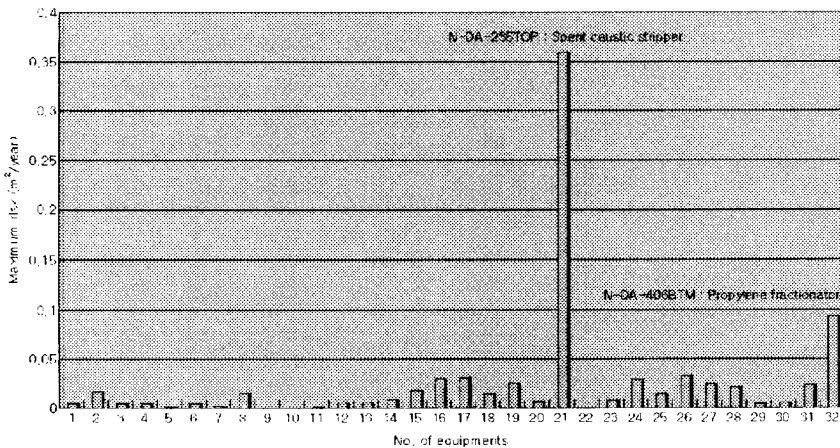


Fig. 3 Risk results of 32 column parts

어 사용자의 사용상 편의를 도모하였다. 이 소프트웨어는 정성적 RBI, 준정량적 RBI, 정량적 RBI 해석 모듈이 포함되고 위험도 계산수행을 지원하고 계산 결과를 적용하기 위한 보조 모듈이 포함되어 있다.

(2) 가동시간이 약 12 년에 이르는 국내 NCC 플랜트 컬럼 16 기를 대상으로 상부와 하부를 분리하여 32 기의 장치에 대해서 정량적 RBI를 수행하였다. 32 기의 총괄 위험도 순위에서 첫 번째는 독성 위험도에서 가장 높은 위험도를 나타낸 장치

번호 N-DA-235TOP 인 사용후 코스틱 스트리퍼의 상부이고 두 번째는 화재 및 폭발에 의한 장치피해 위험도와 인명피해 위험도에서 가장 높은 값을 갖는 장치번호 N-DA-406BTM 인 프로필렌 분류기였다. 이상의 해석 결과를 사용하여 정기 진단 시 위험도 순위를 검사의 우선 순위로 하여 진단을 수행할 수 있으며, 검사의 내용은 위의 결과에 의해 결정될 수 있다.

후 기

본 연구는 한국가스안전공사의 위탁과제인 “중대산업설비의 위험등급에 따른 진단평가 기술 개발” 과제 및 한국과학재단 산하 산업설비 안전성평가 연구센터(SAFE)의 연구비 지원으로 수행한 연구 결과입니다. 연구비 지원에 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) API, 2000, “Risk-Based Inspection Base Resource Document,” *API Publication 581*, 1st edition.
- (2) Le May, 2000, “ASME Post Construction Standards : Current Status and Planning,” *Proceedings of Invited Seminar and PCS Conference*.
- (3) Song, J. S., Shim, S. H., Noh, W. H., Park, J. H., Choi, S. C., Kwon, J. R., Kim, J. Y., Yoon, K. B., 2001, “A Study of Surveying on RBI Software Functions,” *Proceedings of '01 KIGAS Autumn Conference*, pp. 161~166.
- (4) Song, J. S., Shim, S. H., Noh, W. H., Choi, S. C., Yoon, K. B., 2001, “A Group Sponsored Study of Surveying on RBI Software Functions,” *Proceedings of '01 KIIS/KSOEH Joint Conference*, pp. 337~342.
- (5) Song, J. S., Shim, S. H., Noh, W. H., Park, J. H., Choi, S. C., Kwon, J. R., Kim, J. Y., Yoon, K. B., 2001, “A Study of Surveying on RBI Software Functions,” *Journal of KIGAS*, Vol. 5, No. 4, pp. 56~61.
- (6) Song, J. S., Shim, S. H., Choi, S. C., Kwon, J. R., Kim, J. Y., Yoon, K. B., 2001, “Development of the RBI Software algorithm based on API 581,” *Proceedings of '01 KIGAS Autumn Conference*, pp. 167~172.
- (7) Song, J. S., Kim, J. H., Lee, S. J., Choi, S. C., Kim, J. Y., Yoon, K. B., 2001, “Development of the RBI Software based on API-RBI BRD,” *Proceedings of '01 KIIS/KSOEH Joint Conference*, pp. 381~386.
- (8) Song, J. S., 2001, “A Study on Development and Implementation of Risk Based Inspection Procedures for a Petrochemical Plant,” M. S. Thesis, Chung Ang University, Seoul.
- (9) Shim, S. H., Song, J. S., Kim, J. Y., Yoon, K. B., 2002, 9., “Development of a RBI Procedure and Implementation of a Software Based on API Code (I) – Qualitative Approach,” *Journal of KIIS*.
- (10) Yoon, K. B., Song, J. S., Shim, S. H., 2001, “Development of Inspection Planning and Diagnosis Technology for Major Industrial Plants Considering Potential Risk Involved,” *KGS 2001-100*.
- (11) Robert C. Reid, John M. Prausnitz, Tomas K. Sherwood, 1987, *The properties of gases and liquids*, 4th edition, McGraw-Hill Book Company.
- (12) Song, J. S., Shim, S. H., Choi, S. C., Yoon, K. B., 2003, “Development of a RBI Procedure and Implementation of a Software Based on API Code (III) – Quantitative Approach,” *Journal of KIIS*, In Press.
- (13) Shim, S. H., Song, J. S., Yoon, K. B., Choi, S. C., Kim, J. Y., 2002, “Development of the RBI Software for the Process Plant,” *Proceedings of '02 1st KSME Materials and Fracture Conference*, pp. 248 ~ 255.