

〈 논문 〉

개선된 RBI 기법을 이용한 석유화학설비의 위험도평가

이상민*, 송기훈*, 장윤석*, 최재봉*, 김영진†, 한상인**, 최송천**

(2005년 6월 3일 접수, 2005년 9월 10일 심사완료)

Risk Assessment of Petrochemical Equipments Using Enhanced RBI Technique

Sang-Min Lee, Ki-Hun Song, Yoon-Suk Chang, Jae-Boong Choi, Young-Jin Kim,
Sang-In Han and Song-Chun Choi

Key Words : Mole Fraction (몰분률), Petrochemical Equipment (석유화학설비), Qualitative Approach (정성적접근법), Quantitative Approach (정량적접근법), Risk-based Inspection (위험도기반검사)

Abstract

API 581 guideline provides a methodology for calculating the risks of equipments in refinery or petrochemical plant. However, especially in part of the consequence of failure, there is a major limitation of its application to the petrochemical plant directly since only a representative material is considered in calculating the risk while the equipment is composed of numerous materials. The objectives of this paper are to propose an enhanced risk-based inspection (RBI) technique to resolve shortcomings inclusive of the above issue and to assess the risks of typical petrochemical equipments. In this respect, a program incorporating material database was developed to fully incorporate the characteristics of different materials. The proposed RBI program consists of qualitative, semi-quantitative and quantitative risk evaluation modules in which toxic materials as well as representative materials were selected automatically for comparison to those in the current guideline. It has been applied to assess the risks of equipments in ethylene facilities of petrochemical plants. Thereby, more realistic evaluation results were obtained and applicability of the proposed RBI program was proven.

1. 서 론

석유화학설비(petrochemical equipment)는 산업특성상 일정기간 동안 중단 없이 운전되어야 한다. 원유정제 및 화학제품 생산에 필요한 처리기술의 발전으로 인하여 관련 설비들은 보다 복잡하고 다양화되었을 뿐만 아니라 생산효율을 제고하기 위하여 고온, 고압의 가혹한 운전상태에서 가동 중이다. 따라서 가동연수 증가로 인하여 설비파손의 가능성은 증가하고 있으며, 건전성확보는 필수적이다. 석유화학사고는 인명 및 설비손상, 환경오염,

생산중단 등으로 인하여 사회적, 경제적으로 많은 손실을 야기할 수 있다. 이러한 사고가능성을 줄이기 위해 일부 노후설비들이 보수, 교체, 폐기되고 있으나 다수의 불확실성과 판단기준의 모호함으로 인하여 용이하지 않은 실정이다. 따라서 설비가동에 따른 경제성 및 안전성을 판단하고 개별적 설비 위험도(risk)에 따라 적절한 검사와 보수를 시행하는 위험도기반검사(Risk-Based Inspection: RBI) 기법이 적절한 방법론으로 대두되고 있다.⁽¹⁻⁷⁾

현재 RBI 기법은 전세계적으로 활발하게 연구와 보급이 이루어지고 있다. 대표적인 예로 미국 석유협회(American Petroleum Institute: API)의 API 580/581 코드가 널리 사용되고 있으며,^(8,9) 특히 API 581에 제시된 RBI 평가절차는 정유(oil refinery) 및 가스 플랜트 등에 적용되고 있다. 또한 미국기계학회(American Society of Mechanical Engineers: ASME)에서는 원자력발전소 설비를 중심으로 RBI에 대한 연구를 진행해 왔으며, 위험도

† 책임저자, 회원, 성균관대학교 기계공학부

E-mail : yjkim50@skku.edu

TEL : (031) 290-5274 FAX : (031) 290-5276

* 회원, 성균관대학교 기계공학부

** 회원, 한국가스안전공사 시설연구실

정보 가동중검사(Risk-Informed In-Service Inspection: RI-ISI)를 시범적용 중에 있다.⁽¹⁰⁾ 유럽(Europe)에서도 발전소 설비의 검사와 유지보수를 위하여 RIMAP(Risk-Based Inspection and Maintenance Procedure for European Industry) 프로젝트를 수행 중에 있다.⁽¹¹⁾

그러나 기존의 정유플랜트 및 원자력발전소 관련 설비에 대한 RBI 연구결과를 직접적으로 석유화학설비에 적용하기 위해서는 여러가지 어려움이 존재한다. 주요한 이유는 위험도를 평가하기 위하여 고려해야 하는 설비내 포함 물질수(number of materials)이다. 기존의 API 581 코드에서는 파손피해(Consequence Of Failure: COF) 평가시 설비당 하나의 대표물질(representative material)을 선정하여 계산한다. 그러나 석유화학설비에는 특성이 상이한 다수의 물질들이 각각의 몰분률(mole fraction)에 따라 혼합물의 형태로 존재하므로, 설비위험도 평가시 하나의 대표물질을 선정하기 보다는 모든 물질의 특성을 반영하는 것이 바람직하다. 본 논문에서는 석유화학설비에 적용 가능한 개선된 RBI 기법을 제안하고자 하며, 이를 대표적인 석유화학플랜트인 에틸렌공장(ethylene facilities)의 주요기기를 대상으로 시범 적용하고자 한다. 또한 정성적(qualitative), 준정량적(semi-quantitative), 정량적 접근법(quantitative approach)을 용이하게 수행할 수 있도록 개선된 RBI 평가 프로그램을 개발하고자 한다.

2. 기존 RBI 기법의 분석

2.1 API 581 코드

RBI 기법은 파손빈도(Likelihood Of Failure: LOF)와 파손피해를 종합적으로 고려하여 설비 위험도를 평가하고, 이에 근거한 검사대상 및 우선순위 결정을 통하여 설비관리를 위한 검사계획을 수립하는 것을 의미한다.

$$\text{Risk} = \text{LOF} \times \text{COF} \tag{1}$$

여기서, 파손빈도(LOF)는 일반적으로 장치나 설비의 파손가능성이나 일년당 파손횟수로 정의하며, 파손피해(COF)는 한 건의 파손이 발생했을 때 피해 또는 손실의 정도를 피해면적 또는 손실액으로 정의한다. RBI 기법은 평가목적과 보유정보 수준에 따라 정성적, 준정량적, 정량적 RBI로 구분할 수 있으며, Figs. 1과 2에 각각의 위험도 평가 절차 및 결과를 제시하였다.

2.2 정유 및 석유화학 플랜트 비교

정유플랜트는 원유(crude oil)를 비등점(Normal Boiling Point: NBP)의 차이에 따라 액화석유가스(Liquefied Petroleum Gas: LPG), 나프타(naphtha), 휘

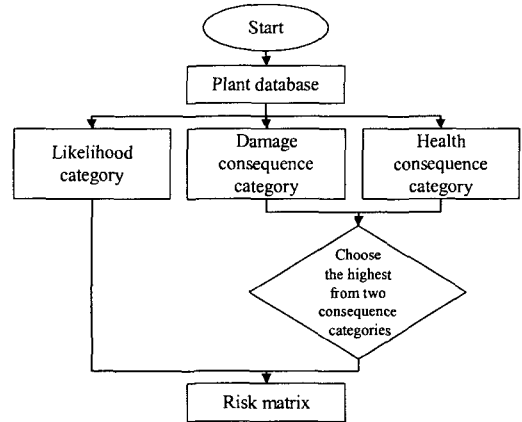


Fig. 1 Risk evaluation process of qualitative RBI

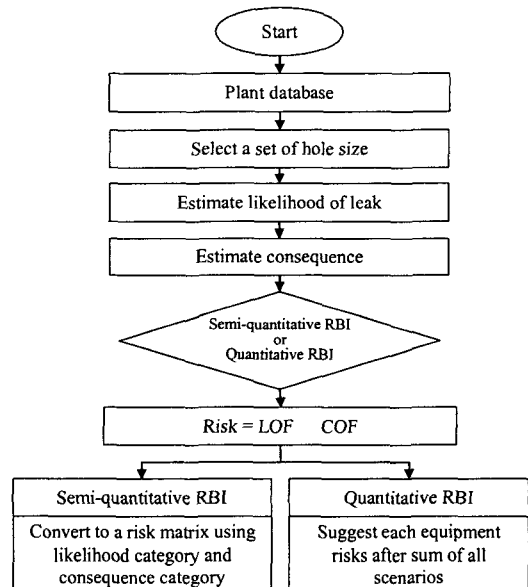


Fig. 2 Risk evaluation process of semi-quantitative and quantitative RBI

발유, 등유, 경유 등으로 분리하는 시설이다. 이에 반해 석유화학플랜트는 나프타를 분해(cracking)하여 에틸렌(ethylene), 프로필렌(propylene), 부타디엔(butadiene), 벤젠(benzene), 톨루엔(toluene), 자일렌(xylene) 등의 기초원료를 만들고, 이로부터 최종적으로 폴리에틸렌(poly-ethylene), 폴리프로필렌(poly-propylene), 폴리스티렌(poly-styrene), 고순도 테레프탈산(Purified Terephthalic Acid: PTA) 등의 합성수지, 합성원료, 합성고무를 생산하는 시설을 의미한다.

정유와 석유화학 플랜트의 가열공정은 공통적으로 있으나, 석유화학플랜트의 경우 다양한 화학반응공정이 추가로 존재한다. 또한 설비 측면에서 정유플랜트는 열교환기(heat exchanger), 가열로(heater), 상압증류탑(Crude Distillation Unit: CDU) 등

의 비교적 단순한 공정을 포함하는 설비들로 구성되어 있으나, 석유화학플랜트는 수침설비(hydro treater), 개질설비(reformer), 분리탑(fractionator column), 추출탑(extractor column), 용기(vessel) 등의 복잡한 공정을 취급하는 설비들로 구성되어 있다.⁽¹²⁾ 그러나 정유와 석유화학 플랜트를 구성하는 핵심 기기의 형상, 재료특성, 손상기구 등은 유사하여, 동일한 일반파손빈도(generic failure frequency) 값을 바탕으로 각각 장치보정인자(equipment modification factor) 및 관리시스템평가인자(management system evaluation factor)를 고려하여 최종적인 파손빈도를 결정한다. 따라서 본 논문에서는 유사한 기능을 수행하는 정유 및 석유화학 플랜트의 주요 설비에 대하여 파손빈도 계산시 API 581 코드에 제시된 절차를 동일하게 적용하였다.

각 공정별 사용물질을 살펴보면, 정유플랜트에서는 비등점의 차이에 따라 물질이 분류되기 때문에 하나의 설비에 존재하는 물질이 제한적이다. 그러나 석유화학플랜트는 열 및 화학 반응을 통하여 원료와 제품을 생산하기 때문에 하나의 설비에 다양한 물질이 존재한다. 따라서 정유설비는 기존의 API 581 코드에 따라 하나의 대표물질만을 고려하여 파손피해를 계산하는 것이 가능하며, Fig. 3

에 준정량적평가시 파손피해를 계산하는 절차를 나타내었다. 석유화학플랜트의 경우 각각의 설비에 다수의 화학물질이 존재하므로 개별 물질의 모든 특성을 반영할 수 있는 파손피해 평가법이 요구된다. Table 1은 실제 에틸렌공장의 설비에 존재하는 화학물질의 목록을 나타낸 것으로써, 그 수는 25개 이상이다.

3. 개선된 RBI 프로그램 개발

3.1 파손피해 평가절차

본 논문에서는 석유화학설비의 정확한 파손피해 평가를 위하여 모든 물질의 특성을 반영할 수 있도록 개선된 파손피해 계산절차를 제안하였다. 개선된 RBI 방법은 기존의 API 581 코드에 제시된 바와 같이 크게 정성적, 준정량적, 정량적 평가모듈로 구성되며, 특히 준정량적 및 정량적 평가부분은 본 논문을 통하여 개선된 파손피해 평가절차를 적용하였다.

대표적인 개선사항은 Fig. 4에 제시한 바와 같이 모든 물질의 몰분률과 그에 따른 파손피해를 곱하여 종합적인 파손피해를 계산할 수 있는 부분이다. 이 때 사용되는 물질은 공정흐름도(Process Flow Diagram: PFD)의 물질조성표(Material Balance Table: MBT)에서 확인할 수 있다. 한편 API 581 코드에서는 파손피해 계산시 필요한 정압비열(C_p) 식을 온도(T)의 3차방정식 형태로 제시하고 있으나, 대표물질만을 고려하기 때문에 석유화학 플랜트에서 취급하는 모든 물질에 대한 정보를 수록하고 있지 않다. 따라서 본 논문에서는 새로운 화학물질의 파손피해 평가에 필요한 정압비열 값을 얻기 위하여 화학물질 핸드북에 제시되어 있는 다음의 4차 방정식을 사용하였다.⁽¹³⁾

Table 1 Example of material list in ethylene facilities

| Material | Name | Material | Name |
|--------------------------------|------------------|----------------------------------|-------------------------|
| H ₂ | Hydrogen | C ₅ H ₆ | 1-Pentene-3-yne |
| CO | Carbon monoxide | C ₅ H ₈ | 1-Pentyne |
| CO ₂ | Carbon dioxide | C ₅ H ₁₀ | 1-Pentene |
| H ₂ S | hydrogen sulfide | C ₅ H ₁₂ | n-Pentane |
| CH ₄ | Methane | C ₆ H ₆ | Benzene |
| C ₂ H ₂ | Acetylene | C ₆ H ₁₂ | Cyclohexane |
| C ₂ H ₄ | Ethylene | C ₇ H ₈ | Toluene |
| C ₂ H ₆ | Ethane | C ₇ H ₁₄ | 1-Heptene |
| C ₃ H ₄ | Propadiene | C ₈ H ₈ | Styrene |
| C ₃ H ₆ | Propylene | C ₈ H ₁₀ | Ethylbenzene / O-Xylene |
| C ₃ H ₈ | Propane | C ₈ H ₁₆ | 1-Octane |
| C ₄ H ₆ | 1,3-Butadiene | C _n H _{2n+2} | n-Paraffin |
| C ₄ H ₈ | 1-Butene | H ₂ O | Water |
| C ₄ H ₁₀ | n-Butane | | |

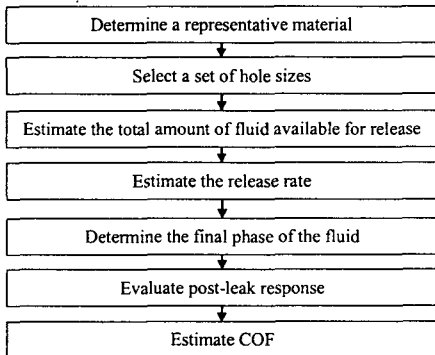


Fig. 3 COF estimation process of API 581 semi-quantitative method

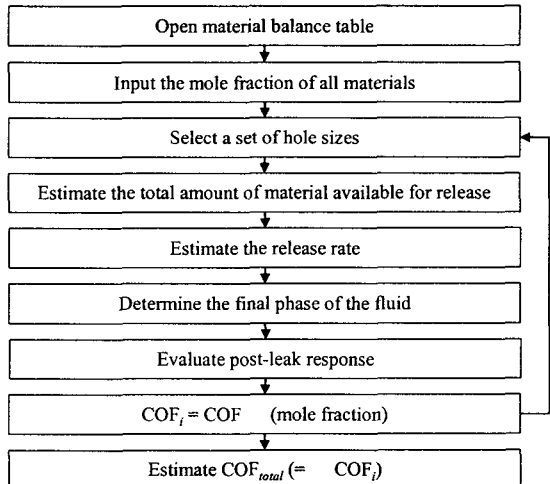


Fig. 4 COF estimation process of proposed semi-quantitative method

$$C_p = A + BT + CT^2 + DT^3 + ET^4 \quad (2)$$

여기서 A, B, C, D, E는 기체상수이다.

3.2 RBI 프로그램

본 RBI 프로그램은 API 581 코드를 기반으로 하되 개선된 파손피해 평가절차를 포함하고 있다. 개발된 프로그램은 크게 석유화학물질을 관리하는 부분과 개선된 절차에 따라 위험도를 평가하는 부분으로 이루어져 있다. Fig. 5는 제안된 RBI 프로그램의 전체구조를 나타낸 것으로서, Microsoft Visual C++ 6.0, Microsoft Visual Basic 6.0 그리고 Microsoft Access 2000을 이용하여 사용자 인터페이스(user interface), 평가프로그램, 데이터베이스 등의 3계층 구조로 개발하였다. 또한 MBT 입력기능을 추가하여 해당설비에 포함된 모든 물질의 물분류를 입력할 수 있고, API 581 평가기준과 결과를 비교하기 위하여 대표물질 및 독성물질 자동선정 알고리즘을 탑재하였다. 따라서 개선된 RBI 프로그램은 기존의 정유설비 뿐만 아니라 석유화학설비의 모든 물질특성을 반영하여 위험도평가를 수행하는 것이 가능하다.

3.3 물질관리 프로그램

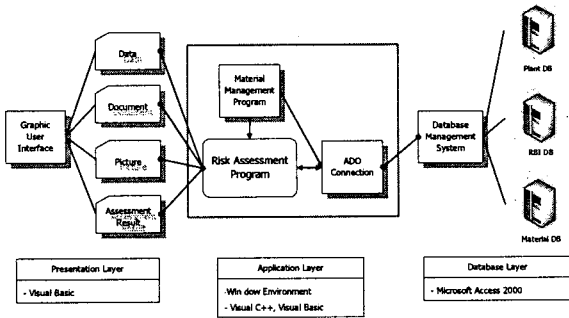


Fig. 5 3-tier structure of proposed RBI program

Fig. 6 Initial screen of material management program

석유화학설비에 존재하는 다수의 물질에 관한 정보를 효과적으로 관리하기 위하여, 설비의 MBT에 기재된 정보를 분석한 후 물질관리 프로그램을 개발하였다. Fig. 6은 개발된 프로그램의 초기화면을 나타낸 것으로서, 파손피해 계산시 반드시 필요한 물질명, 몰중량(molecular weight), 밀도(density), 비등점 등의 정보를 추가, 수정, 삭제할 수 있도록 구성되어 있다.

4. 개선된 RBI 기법의 적용

4.1 컬럼(column)에 대한 RBI 평가

개선된 RBI 기법의 적용성 검토를 위하여 에틸렌공장 설비 중 다양한 공정에 존재하는 컬럼을 대상으로 정성적, 준정량적, 정량적 위험도평가를 수행하였다. 위험도평가에 필요한 주요 데이터는 국내 석유화학설비 운영회사의 엔지니어 및 규제기관 전문가의 도움을 얻어 획득하였다. 이를 바

Table 2 Column list considered in the present work

| Equipment | Description | Construction Material |
|-----------|-----------------------------|--|
| 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 | 300 SS-L grade (TOP) Carbon steel (BTM) |
| 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 |

Fig. 7 Result screen of qualitative RBI module

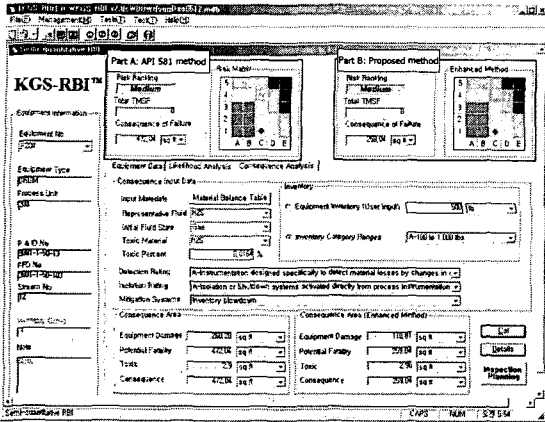


Fig. 8 Result screen of semi-quantitative RBI module

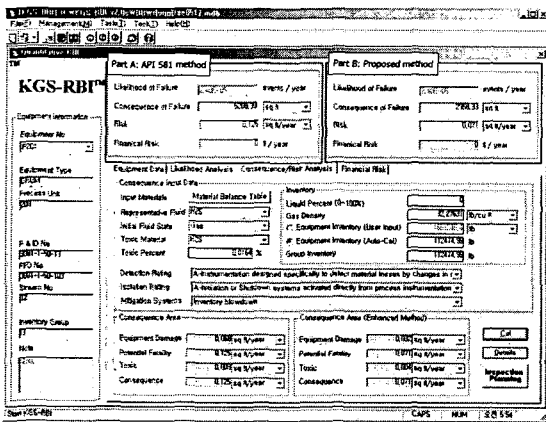
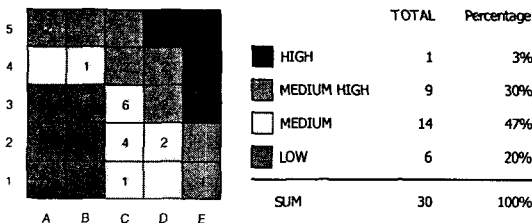
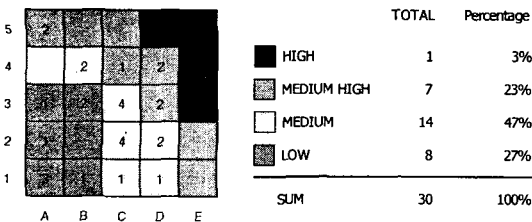


Fig. 9 Result screen of quantitative RBI module



(a) API 581 method



(b) Proposed RBI method

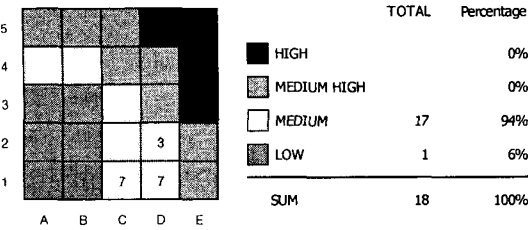
Fig. 10 Result of risk matrix for columns by semi-quantitative RBI

Table 3 Vessel list considered in the present work

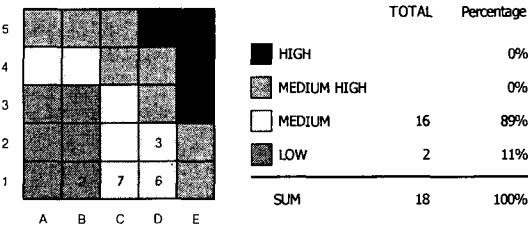
| Equipment | Description | Construction Material |
|-----------|--|-----------------------|
| 121-F | Quench water separator | Carbon steel |
| 123-F | Decoking drum | Carbon steel |
| 201-F | PGC 1 st stage suction drum | Carbon steel |
| 202-A-F | PGC 2 nd stage suction drum | Carbon steel |
| 203-F | PGC 3 rd stage suction drum | Carbon steel |
| 204-F | PGC 4 th stage suction drum | Carbon steel |
| 205-F | PGC 4 th stage discharge drum | Carbon steel |
| 206-F | PGC 5 th stage suction drum | Carbon steel |
| 210-F | Dryer feed knockout drum | Carbon steel |
| 217-F | Dea Stripper reflux drum | Carbon steel |
| 301-F | Demethanizer feed 1 st flash drum | Carbon steel |
| 302-F | Demethanizer feed 2 nd flash drum | Carbon steel |
| 303-F | Demethanizer feed 3 rd flash drum | Carbon steel |
| 304-F | Demethanizer feed 4 th flash drum | Carbon steel |
| 306-F | Demethanizer overhead reflux drum | Carbon steel |
| 307-F | Expander separator drum | Carbon steel |
| 313-F | C3 recycle drum | Carbon steel |
| 314-F | C3 splitter reflux drum | Carbon steel |

탕으로 Table 2에 제시한 바와 같이 컬럼들을 상부 구조(TOP)와 하부구조(BTM)로 나누어 총 30부분에 대하여 RBI 프로그램을 적용하였다. 컬럼의 공정배관계장도(Piping and Instrumentation Diagram: P&ID)에 제시된 정보를 바탕으로 위험도평가를 수행한 후, 개선된 RBI 기법을 이용한 평가결과와 기존 API 581 코드에 준한 평가결과를 비교하였다. 특정 컬럼에 대하여 RBI 평가를 수행하는 과정과 이에 대한 결과를 Figs. 7~9에 제시하였다. 앞서 기술한 바와 같이 정성적 평가모듈을 이용한 계산결과는 기존의 API 581 코드와 동일하며, Fig. 7은 파손피해(가로축)와 파손빈도(세로축)로 이루어지는 위험도행렬(risk matrix)의 형태로 평가결과를 나타낸 것이다. 특히 위험도행렬은 상(high), 중상(medium high), 중(medium), 하(low)의 영역으로 구성된 위험도순위(risk ranking)에 대한 정보를 제공하여 전체적인 공정 또는 설비 위험도를 쉽게 파악하는 것이 가능하다. 또한 Fig. 8에 제시한 바와 같이 준정량적 평가모듈에서는 평가대상의 기본적 재질, 설계/운전 데이터, TMSF(Technical Module Subfactor), 물질, 인벤토리(inventory), 관리시스템 정보 등을 바탕으로 위험도행렬의 형태로 제공되는 평가결과에 대하여 기존의 API 581 방법(Part A)과 개선된 RBI 기법(Part B)의 차이를 비교할 수 있도록 하였다. 정량적 평가모듈에서는 Fig. 9에 나타낸 바와 같이 준정량적 평가시 필요한 정보 이외에 기계적보조인자(mechanical subfactor), 공정보조인자(process subfactor), 비용정보(financial information) 등이 추가로 요구되며, 2가지 평가법에 따른 파손빈도, 파손피해, 위험도 등의 구체적 계산결과를 제시한다.

Fig. 10은 대표적인 석유화학설비인 컬럼에 대하여 위험도행렬의 형태로 준정량적 평가결과를 나



(a) API 581 method



(b) Proposed RBI method

Fig. 11 Result of risk matrix for vessels by semi-quantitative RBI

타낸 것이다. Figs. 10(a)와 (b)에서 보는 바와 같이 기존의 API 581 방법 적용시 중상위 이상의 위험도순위는 33%를 차지하는 것으로 평가되었으며, 개선된 RBI 기법을 적용하여 계산한 중상위 이상의 위험도순위는 26%로 기존 결과에 비하여 7% 낮아졌다. 또한 정량적 위험도평가를 수행한 결과, 전체적으로 개선된 RBI 기법을 이용한 평가가 기존의 API 581 코드를 적용한 경우보다 낮은 위험도를 도출하는 것으로 계산되었다.

4.2 용기(vessel)에 대한 RBI 평가

석유화학설비 중에서 가압된 화학물질을 다루는 드럼(drum), 축압기(accumulator), 반응기(reactor) 등의 용기는 에틸렌공장의 다양한 공정에 사용되고 있으며, 화학물질 저장 및 역류방지 등의 중요한 역할을 원활하게 수행하기 위해서 기기건전성 확보가 필수적이다. 본 논문에서는 Table 3에 제시한 용기에 대하여 기존의 API 581 코드에 준한 방법과 개선된 RBI 기법을 이용하여 총 18개의 용기에 대하여 준정량적 및 정량적 위험도평가를 수행하였다.

Fig. 11은 용기에 대하여 2가지 평가법에 따른 준정량적 평가결과를 위험도행렬로 나타낸 것이다. Figs. 11(a)와 (b)에 제시한 바와 같이 기존의 API 코드에 따른 평가결과, 중 및 저 위험도순위는 각각 94%와 6%로 계산되었으나, 개선된 RBI 기법에 의한 결과는 각각 89%와 11%의 위험도순위를 갖는 것으로 평가되었다.

4.3 토의

석유화학설비 중에서 대표적인 컬럼과 용기에 대하여 준정량적, 정량적 위험도평가를 수행한 결

과, 기존의 API 581 코드에 준한 방법보다는 개선된 RBI 기법을 이용한 평가가 대체적으로 보수성이 낮은 파손피해 평가결과를 제시하였다. 이는 개선된 위험도평가기 석유화학 플랜트의 특성을 보다 구체적으로 반영하였기 때문인 것으로 판단되며, 충분한 개수의 설비를 대상으로 위험도평가를 수행하면 중상위 이상과 미만의 위험도순위 비율이 2:8 정도가 된다는 현장경험 및 전문가 의견과도 일치한다(14,15). 본 논문에서 제안한 RBI 기법에 따라 컬럼에 대하여 위험도순위를 계산한 결과, 현장경험치와 유사한 2.6:7.4로 평가되었다. 그러나 용기에 대한 평가시 충분한 설비개수를 고려하지 못하여 중 및 하의 위험도순위만을 갖는 것으로 평가되었다. 또한 일부 컬럼과 용기의 경우, 개선된 RBI 기법을 적용한 평가가 기존의 API 581 코드를 이용한 경우보다 높은 위험도를 갖는 것으로 계산되었다. 개선된 RBI 평가법을 좀 더 다양한 석유화학 설비에 적용한다면 더욱 정확한 평가 결과를 획득 가능하다.

5. 결론

본 논문에서는 API 581 코드에 제시된 파손피해 평가절차를 개선하여 석유화학설비에 적용할 수 있는 개선된 RBI 기법을 제시하였으며, 다음과 같은 주요 결과를 얻었다.

- (1) 물질조성표에 제시된 물분률과 정압비열식을 고려하여 파손피해를 계산할 수 있도록 준정량적 및 정량적 평가절차를 제안하였으며, 이를 반영하여 RBI 프로그램을 개발하였다.
- (2) 대표적인 석유화학설비에 대하여 개발된 RBI 프로그램을 적용하여 준정량적 위험도평가를 수행하였다. 그 결과 현장경험치와 유사한 위험도순위 분포를 갖는 것으로 계산되어 제안된 평가절차는 타당한 것으로 판단된다.

(3) 컬럼과 용기에 대하여 제안된 정량적 평가절차에 따라 위험도를 계산한 결과, 기존의 API 581 코드를 적용한 경우에 비하여 각각 83% 및 50% 낮은 결과값을 갖는 것으로 평가되었다.

향후, 배관(pipe), 필터(filter), 냉각기(cooler), 열교환기 등에 대하여 개발된 RBI 프로그램을 적용함으로써 광범위하게 제안된 RBI 평가절차의 적용성을 확인할 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 논문은 한국과학재단 산하 성균관대학교 산업설비 안전성평가 연구센터와 한국가스안전공사의 연구비 지원으로 이루어진 것으로서, 이에 관계자 여러분들께 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) Shim, S.H., Song, J.S., Kim, J.Y. and Yoon, K.B., 2003, "A Study on the Application of RBI Procedure for Petrochemical Plant," *Transaction of KSME (A)*, Vol. 27, No. 3, pp. 416~423.
- (2) Horikawa, H., Yoshikawa, M. and Takasu, N., 2004, "Structural Integrity Assessment for Various Failure Modes Using a Risk-Based Maintenance Method," *ASME PVP*, Vol. 490, pp. 261~270.
- (3) Bareib, J., Buck, P., Matschecko, B., Jovanovic, A., Balos, D. and Perunicic, M., 2004, "RIMAP Demonstration Project. Risk-Based Life Management of Piping System in Power Plant Heilbronn," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 81, pp. 807~813.
- (4) Fujiyama, K., Nagai, S., Akikuni, Y., Fujiwara, T., Furuya, K., Matsumoto, S., Takagi, K. and Kawabata, T., 2004, "Risk-Based Inspection and Maintenance Systems for Steam Turbines," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 81, pp. 825~835.
- (5) Jovanovic, A., 2003, "Risk-Based Inspection and Maintenance in Power and Process Plants in Europe," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 226, pp. 165~182.
- (6) Nilsson, F., 2003, "Risk-Based Approach to Plant Life Management," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 221, pp. 293~300.
- (7) Schroder, H.C. and Kauer, R., 2004, "Regulatory Requirements Related to Risk-Based Inspection and Maintenance," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 81, pp. 847~854.
- (8) American Petroleum Institute, 2000, "Risk-Based Inspection," API Recommended Practice 580.
- (9) American Petroleum Institute, 2000, "Risk Based Inspection - Base Resource Document," API 581.
- (10) American Society of Mechanical Engineers, 1998, "Boiler and Pressure Vessel Code," Section VIII & XI.
- (11) Kauer, R. and Jovanovic, A., 2004, "Plant Asset Management RIMAP, the European approach," *ASME PVP*, Vol. 488, pp. 183~192.
- (12) Cho, S.K., 2000, "Petrochemical Plant Process," Intervention.
- (13) Yaws, C.L., 1999, "Chemical Properties Handbook," McGraw-Hill.
- (14) JGC Corporation, "Failure Modes in Chemical Facilities," Private Communication.
- (15) YEOCHUN NCC, "Inspection Activity of Major Equipments in Petrochemical Plant," Private Communication.