

API 기준에 근거한 RBI 절차 개발 및 소프트웨어의 구현 (I) 정성적 접근법

심상훈 · 송정수 · 김지윤* · 윤기봉[†]

중앙대학교 공과대학 기계공학부 · *한국가스안전공사 가스안전시험연구원
(2002. 6. 17. 접수 / 2002. 9. 9. 채택)

Development of a RBI Procedure and Implementation of a Software Based on API Code (I) - Qualitative Approach

Sang-Hoon Shim · Jung-Soo Song · Ji-Yoon Kim* · Kee-Bong Yoon[†]

Department of Mechanical Engineering, Chung-Ang University

*Institute of Gas Safety Technology, Korea Gas Safety Corporation

(Received June 17, 2002 / Accepted September 9, 2002)

Abstract : During the last ten years, effort has been made for reducing maintenance cost for aged equipments and ensuring safety, efficiency and profitability of petrochemical and refinery plants. Hence, it was required to develop advanced methods which meet this need. RBI(Risk Based Inspection) methodology is one of the most promising technology satisfying the requirements in the field of integrity management. In this study, a qualitative assessment algorithm for RBI based on the API 581 code was reconstructed for developing an RBI software. The user-friendly *real*RBI software is developed with a module for evaluating qualitative risk category using the potential consequence factor and the likelihood factor.

Key Words : RBI, risk, likelihood, consequence, damage consequence, health consequence, structural integrity, residual life, failure

1. 서 론

석유화학, 정유, 가스, 화력·원자력 설비 등 중대 산업설비는 관련기술의 발전과 더불어 설비시설이 복잡·다양화되고 있으며, 생산효율을 증가시키기 위하여 고온, 고압의 조건하에서 운전하는 반응기, 저장탱크, 압력용기, 배관 등 장치류들이 증가하고 있다. 이러한 장치류들은 설치 후 가동시간이 늘어남에 따라 점차 노후화되어 파손에 의한 대형사고의 가능성은 어느 때보다 더욱 높아지고 있다. 사고 가능성을 줄이기 위해 일부 노후설비들은 보수, 교체 및 폐기되고 있으나, 경제적·환경적 요인으로 이들의 일부는 수명연장에 의한 설비운영이 불가피

한 실정이다. 따라서 노후화된 장치류들의 유지보존 상태, 경제성 및 안전성에 따라 가장 효과적이고 적절한 시기에 검사하고 보수해야 될 필요성이 대두되면서 효율적이고 보다 선진화된 안전관리기법의 도입이 필수적이 되고 있다. 이러한 필요성에 적합한 기법이 RBI(Risk Based Inspection: 위험기반검사)이므로, 이에 대한 연구, 도입, 적용이 활발하게 이루어지고 있다¹⁾.

RBI는 정유, 석유화학, 발전 설비 등 광범위한 분야에서 응용되고 있다. 공정설비 분야에서는 API(American Petroleum Institute)가 20여 개의 업체와 공동 컨소시엄을 구성하여 5년간의 연구과제 수행 결과로 제정한 API 581 절차가 대표적이다. 이 절차는 정유·석유화학 설비의 위험도 평가, 진단계획 수립에 활용되고 있다.

본 연구에서는 API 581의 정성적 RBI 절차를 근

[†]To whom correspondence should be addressed.
kbyoon@cau.ac.kr

거로 하여 파손 빈도의 분석 및 설비 피해와 인명 피해 등의 파손피해 분석 절차를 제시하였다. 또한 제시된 각 분석 절차에 준하여 정성적 RBI 평가용 소프트웨어 모듈을 개발하였다.

2. RBI의 이론적 배경

RBI에서 사용하는 위험도(risk)는 식(1)로 정의된다.

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

여기서 파손빈도(likelihood of failure)는 공정 설비가 파손될 수 있는 가능성을 확률로 정의하고, 파손피해(consequence of failure)는 한 건의 파손이 발생했을 경우 그 피해나 손실의 정도를 피해 면적이나 피해 손실액으로 정의한다. 포괄적인 RBI 절차는 Fig. 1에 보인 바와 같은 과정으로 진행되는 데 각각 설비별로 위험등급 또는 위험도를 산정한 후에 이에 따라 검사의 우선 순위, 방법, 주기 및 일정 계획 등을 수립하여 기술적인 근거에 의해 종합적이고 체계적인 검사를 수행하게 된다. 이와 같이 RBI는 위험도를 평가하여 전체 플랜트 위험도의 대부분을 차지하고 있는 20% 내외의 구성 설비를 찾아

내어 이에 대해 최적의 방법으로 인적, 물적 자원을 집중적으로 투입함으로써 효율적으로 플랜트 전체의 안전성을 확보함과 함께 유지관리의 경제성을 추구하는 기법이라 할 수 있다²⁾.

RBI의 일반적인 추진 절차는 다음과 같다.

첫째, 사업장의 모든 공정설비를 공정단위로 구분하고 위험도가 높은 단위공정을 선정한 다음 단위 공정내의 위험기계·설비·배관 등 장치류들의 목록을 작성한다.

둘째, 장치의 재질 및 상태, 사용물질 등에 따른 손상기구(damage mechanism)와 그 손상기구에 의한 파손확률을 결정한다. 장치를 장기간 운전하게 되면 높은 온도와 압력, 함유 물질 등에 의해 장치의 재질이 열화되어 수명이 소진되어 간다. 이러한 노후 정도를 고려하여 장치별 사고 발생확률을 산정한다.

셋째, 장치 파손시 피해의 크기, 작업자의 밀집정도, 사용물질의 가연성·독성 및 누출 가능량, 운전 압력, 환경적 피해, 피해 면적 등을 고려하여 인적, 물적 피해크기 등의 사고발생의 피해 결과를 산정한다.

넷째, 위험도가 높은 장치에 대해 운전온도, 압력, 재질의 변경 등을 검토하여 위험 경감방안을 수립한다. 그리고 장치별로 위험도를 계산해 장치별 위험도에 따라 검사의 우선 순위, 개방검사 또는 외관검사, 육안검사 또는 비파괴검사(초음파 탐상, 자분 탐상, 방사선 검사 등) 등의 검사방법, 일정 등의 검사계획을 수립한다.

다섯째, 검사계획에 따라 검사 및 유지·보수를 수행한 후 이 결과를 반영시켜 위험도를 재산정하여 최종 위험도를 허용한도 내에서 유지할 수 있도록 장치를 관리한다.

플랜트의 구조 건전성(structural integrity)을 유지하기 위한 검사업무활동은 Table 1에 보인 바와 같이 변해 왔으며 사후검사, 예방검사, 예측검사, RBI 순으로 발전하여 왔다³⁾.

3. 정성적 RBI 절차 연구

정성적 RBI는 정량적 RBI의 수행에 앞서 가혹한 환경에 노출되어 상대적으로 타 설비에 비해 높은 위험을 내포하는 설비나 공정을 대략적으로 찾는 데 수행된다. 이 방법은 처음부터 모든 설비에 대해 정량적 RBI를 적용하는데에 따른 시간적·경제적 과다 손실을 막을 수 있고 우선 최소의 노력으로 대략

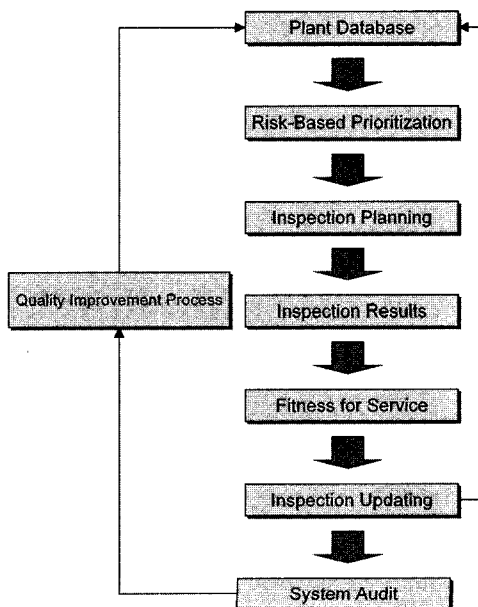


Fig. 1. Overall RBI procedures

Table 1. Changes in inspection activities for the last two decades³⁾

단계	시기	구분	내용
1	1980년 이전	사후검사	- 위험기계 및 설비들의 기능이 저하되거나 고장난 후에 검사 실시 - 사고발생가능성이 높음 - 검사결과기록의 단순성
2	1980~1990년	예방검사	- 위험기계 및 설비 등이 고장나기 이전에 주기적으로 적절한 검사 실시 - 검사능력의 한계 - 설비관리비용의 과다 - 전산자료 관리체계 필요성
3	1991~1997년	예측검사	- 위험기계 및 설비 등의 상태를 관찰·진단하여 고장을 예측하여 고장이 일어나기 전에 검사 실시 - 설계, 운전자료 분석과 입체적 관리 강화 - 검사 및 관리비용이 매우 높음 - 검사표준작성
4	1997년 이후	RBI	- 전체설비에 대한 피해발생가능성과 피해크기에 의한 위험도 등급을 기반으로 검사주기·방법·항목·일정 등의 종합계획을 수립하여 검사 실시 - 장치신뢰도 극대화 - 설비관리비용의 효율적 사용

적인 위험도 등급을 결정할 수 있어 차후 상세한 정량적 RBI적용 대상 설비를 가려내는 목적으로 작업을 수행하는 데 사용된다.

정성적 RBI는 다음과 같은 3종류의 단계적 범위를 대상으로 수행할 수 있다.

- 한개의 공정 유니트; 전체공정을 대상으로 하는 것이며 보통 150개 이상의 기기를 포함한다.
- 공정 유니트 내에서 주요 기능별로 분류된 섹션; 보통 20 ~ 150개의 기기를 포함한다.
- 각 시스템; 정성적 평가의 최소단위로서 보통 5~20개의 기기로 구성된다.

3.1. 파손빈도 분석

정성적 RBI의 파손빈도 인자(likelihood factor)는 대형 누출 가능성에 영향을 미치는 인자들을 각각 점수로 평가하여 합산함으로써 결정한다. 파손빈도 인자를 구성하는 6개의 인자들은 다음과 같다.

- 장치의 수 (Equipment factor)
- 손상기구 (Damage factor)
- 진단/검사의 효율성 (Inspection factor)
- 플랜트 관리/유지의 적절성 (Condition factor)
- 공정의 특성 (Process factor)
- 설계 기준 (Mechanical Design factor)

Equipment factor(EF)는 파손될 잠재성을 가지고 있는 공정 내 장치의 수를 반영하는 인자이며 장치

개수에 따라 0~15점으로 평가된다. Damage factor (DF)는 공정에서 온면부식, 피로균열, 저온노출, 고온열화 등의 발생하고 있거나 발생할 수 있는 손상 기구들을 고려하여 인자의 크기를 0~20점 사이에서 결정한다. Inspection factor(IF)는 공정에서 발생하거나 발생할 수 있는 손상기구를 평가하기 위해 수행한 진단/검사의 효율성을 반영하는 인자이다. IF는 음의 값을 가지며, 최소값은 -15점이다. Condition factor(CCF)는 플랜트 관리/유지하고 있는 방법이 적절한가를 평가하여 CCF값을 0~15점으로 산정한다. Process factor(PF)는 물질 누출을 유도할 수 있는 비정상적인 작동과 특이 상황의 잠재성이 있는 지를 체크하여 반영하기 위한 것이며 PF는 0~15점으로 계산된다. Mechanical design factor(MDF)는 운전되고 있는 공정이 현재 표준으로 설계되었는지 등의 설계 안전성과 관련된 인자이다. MDF는 0~15점의 값을 가진다.

위에 설명한 6개의 인자를 평가한 후 이들을 합산하여 최종 파손빈도 인자를 계산한다. 그리고, Table 2를 이용하여 파손빈도 범주(likelihood category)를 1단계에서 5단계까지 분류하여 해당 범주를 결정한다.

3.2. 파손피해 분석

정성적 RBI에서 파손피해는 정유와 석유화학 설비에 발생할 수 있는 두 분야의 피해로 구분하여 평가한다. 첫째는 화재 및 폭발에 의한 설비피해(damage consequence)이고, 둘째는 독성에 의한 인명피해(health consequence)이다. 파손피해는 설비피해와 인명피해를 각각 고려함으로써 얻어진다. 이 두 분야의 파손피해를 산정하여 둘 중 높은 값이 전체 위험도를 나타내는데 사용된다. 공정중의 비가연성 물질의 경우에는 설비피해는 고려할 필요가 없으며 독성 물질이 없는 경우에는 인명 피해를 고려하지 않는다.

Table 2. Conversion of likelihood factor into likelihood category²⁾

Likelihood Factor	Likelihood Category
0 - 15	1
16 - 25	2
26 - 35	3
36 - 50	4
51 - 75	5

3.2.1. 설비피해 분석

설비피해 인자(damage consequence factor)는 화재 또는 폭발에 의한 피해를 결정하는 다음의 7개의 인자들을 평가한 결과의 합에 의해 결정된다.

- 고유의 점화도 세기 (Chemical factor)
- 누출 가능한 유체의 양 (Quantity factor)
- 기체로 변하는 가능성의 정도 (State Factor)
- 자동점화 가능성 (Auto-ignition factor)
- 고압운전에 의한 피해 가능성 (Pressure factor)
- 안전장치 유무 (Credit factor)
- 손상을 입을 가능성 (Damage potential factor)

Chemical factor(CF)는 화학물질의 점화되는 고유의 성질을 나타내고, 물질의 플래시(flash) 인자와 반응성(reactivity) 인자를 모두 고려하여 결정된다. 플래시 인자는 물질의 NFPA 클래스 등급에 따라 결정될 수 있으며, 반응성 인자는 물질이 점화원에 노출되었을 때 얼마나 빨리 폭발할 수 있는가에 따라 정해진다. CF는 0 ~ 25점의 점수로 평가되어진다. Quantity factor(QF)는 공정에서 한번의 사고 발생 시 예상되는 가연성 물질의 최대 누출량을 나타낸다. QF의 최대값은 50점이다. State factor(SF)는 유체가 대기로 누출되었을 때 기화와 발산되는 유체의 경향을 반영하는 인자로 자연 비등온도에 의해 결정된다. SF는 최대 8점, 최소 -3점으로 평가된다. Auto-ignition factor(AF)는 유체가 누출될 때 유체의 점화 가능성을 나타내는 인자로서 13점에서 -10점까지 분류된다. Pressure factor(PRF)는 사고 발생시 유체가 얼마나 빨리 누출이 되는가를 나타내기 위한 인자이다. 따라서 이는 운전압력에 따라 변하며 PRF 값을 0에서 -15점까지 갖도록 평가한다. Credit factor (CRF)는 해당 공정의 안전 시스템을 고려하여 결정된다. 안전장치가 있는 경우 음의 값을 가지며 최소 -10점을 갖는다.

3.2.2. 인명피해 분석

인명피해 인자(health consequence factor)는 잠재적 독성에 의한 피해의 정도를 결정하는 다음 4개의 인자들을 평가하여 산정한 점수의 합에 의해 결정된다.

- 독성가스 누출량과 독성의 정도 (Toxic quantity factor)
- 일반적인 공정조건에서의 확산정도 (Dispersibility factor)
- 누출탐지 및 방지 시스템 유무 (Credit factor)

- 누출 부근의 인구밀도 (Population factor)

Toxic quantity factor(TQF)는 독성물질의 양과 독성의 정도를 나타내기 위한 인자이다. TQF는 0 ~ 55점을 부여한다. Dispersibility factor(DIF)는 물질의 발산하는 정도를 반영하는 값이다. 이 값은 물질의 자연 비등온도로부터 직접적으로 결정될 수 있는데 비등온도가 높을수록 물질의 발산 가능성이 낮아진다. DIF는 0.03에서 1 사이의 값을 부여한다. Credit factor(CRF)는 해당 공정의 감시, 차단 및 피해 감소 시스템 등, 파손 피해를 경감시키는 안전 시스템의 유무를 고려하여 결정한다. 따라서 CRF는 음의 값을 가지며 최소 -31점까지 부여된다. Population factor(PPF)는 독성 물질의 누출에 의해 잠재적으로 영향을 받을 수 있는 사람 수에 의해 결정된다. PPF는 최대 20점을 가진다.

이상의 인자들을 평가하여 합산함으로써 설비피해 인자와 인명피해 인자를 평가하여 두 값 중에서 큰 값을 파손피해 인자로 결정한다. 파손피해 인자 값으로부터 Table 3을 이용하여 파손피해 범주(consequence category)를 5단계로 나누어 결정한다.

3.3. 정성적 위험도 평가

이상에서 설명한 파손빈도 분석 및 파손피해 분석 절차를 요약하여 도식적으로 표시하면 Fig. 2에 나타낸 바와 같다. 이와 같이 결정된 파손빈도 범주, 파손피해 범주는 Fig. 3에 보인 5×5 위험도 행렬의

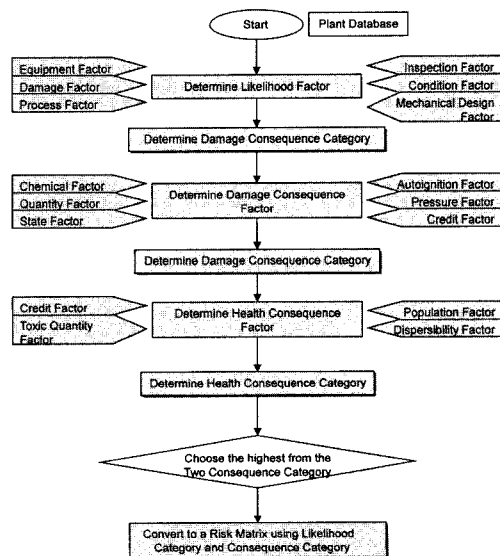


Fig. 2. Flowchart for qualitative RBI procedure

Table 3. Conversion of consequence factor into consequence category²⁾

Damage Consequence Factor	Health Consequence Factor	Consequence Category
0 - 19	< 10	A
20 - 34	10 - 19	B
35 - 49	20 - 29	C
50 - 79	30 - 39	D
> 80	> 40	E

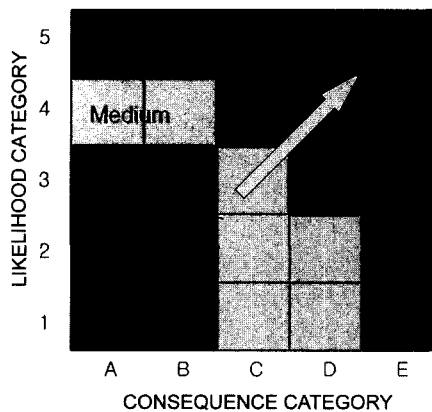


Fig. 3. Qualitative risk-based ranking matrix

각각 y축과 x축으로 나타내게 된다. Fig. 3에 보인바와 같이 API 581 규정에서는 파손빈도보다 파손피해에 더 큰 비중을 두고 있다. Fig. 3에 회색의 명암으로 표시한 분류에서 low에서 high로 갈수록 해석 대상설비의 위험에 더 크게 노출되어 있다는 것을 의미한다.

4. 정성적 RBI 소프트웨어의 개발

본 연구에서 개발한^{4,9)} *realRBI*(risk evaluation and assessment of life software for RBI) 소프트웨어는 API 581의 부록에 제시되고 있는 평가 순서도를 기본으로 알고리즘을 개발하였고, 평가 순서도에 명확히 제시되지 않은 부분은 API 581 코드상의 본문 내용 및 참고문헌에 근거하여 알고리즘을 개발하였다. 구성된 알고리즘을 바탕으로 MS Visual C++ 6.0 과 MS Visual Basic 6.0 언어를 사용하고 MS Access 를 DB로 사용하여 소프트웨어를 구현하였다. 주요 구성화면은 다음과 같다.

4.1. 평가 모듈

파손빈도 평가 모듈, 설비피해 평가 모듈, 인명피

해 평가 모듈의 구성을 Fig. 4, Fig. 5 및 Fig. 6에 각각 나타내었다. 각 Fig에서 알 수 있듯이 각각 화면의 좌측에 위치한 컨트롤 박스를 클릭한 후에 우측

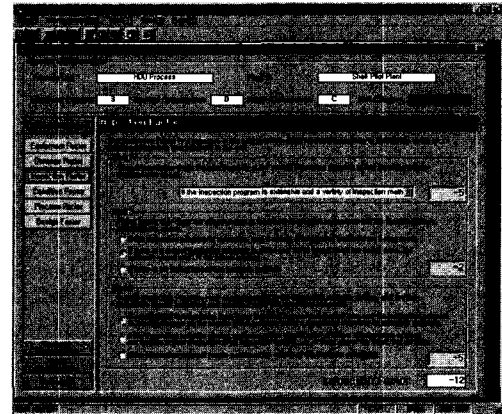


Fig. 4. Module for likelihood analysis

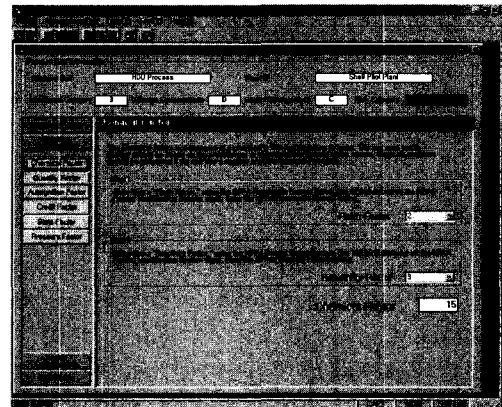


Fig. 5. Module for damage consequence analysis

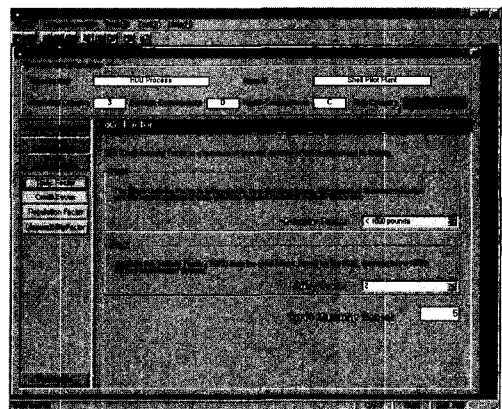


Fig. 6. Module for health consequence analysis

에서 설비에 해당하는 내용을 선택하면 파손빈도 평가모듈에서는 equipment factor, damage factor, inspection factor, condition factor, process factor 및 mechanical design factor의 값이 결정된다.

또한 Fig. 5의 설비피해 평가 모듈에서도 좌측 컨트롤 박스 중 원하는 인자(factor)를 선택하고 우측에 설비의 해당 정보를 입력하면 chemical factor, quantity factor, auto-ignition factor, credit factor, state factor 및 pressure factor의 값이 결정된다. 파손빈도 평가 모듈에서도 같은 방식으로 Fig. 6에서 toxic factor, credit factor, population factor 및 dispersibility factor의 값을 결정한다.

개발된 소프트웨어에서는 각 인자 값의 결정 기준을 API 581에 따랐으나, RBI 해석 대상설비의 사고 이력 또는 특성을 고려하여 각 인자 값의 결정기준을 수정할 수 있다¹⁰⁾. 또는 3.1절과 3.2절에 설명한 인자의 종류를 삭제 또는 추가하여 정성적 RBI 평가를 수행 할 수 있다. 이에 대해 최근 ASME (American Society of Mechanical Engineers)에서 연구 중이다¹¹⁾.

4.2. 위험도 행렬 (Risk Matrix)

Fig. 7은 해석 결과를 나타내는 화면으로써 좌측 하단의 Risk Matrix 컨트롤을 클릭하면 해석 대상 공정 또는 시스템의 현재 위험도 등급이 화면 가운데의 matrix에 표시된다.

본 연구로 개발된 정성적 RBI 소프트웨어에서 파손빈도와 파손피해 값을 결정하는 각 인자 값의 선택은 해석자의 판단이나 주관에 따라 입력 값이 차

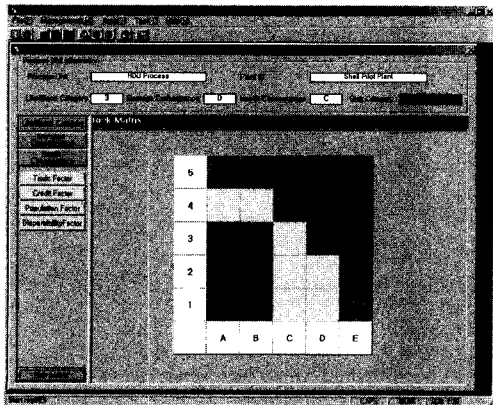


Fig. 7. Risk matrix window of realRBI

이가 날 수 있으므로 RBI 내용을 숙지하고 해석을 수행해야 한다. 따라서 이러한 개인차를 없애기 위해 준정량적 또는 정량적 RBI 소프트웨어의 개발이 필요하다¹²⁾. 이에 대해서는 별도의 논문에서 기술할 예정이다.

5. 결론

본 연구에서는 석유화학, 정유 플랜트에서 경제성 및 효율성을 고려하여 설비의 진단 전략 및 진단의 우선 순위를 결정하는 RBI 절차의 국내 개발을 위해 정성적 RBI 절차에 대해 연구하였으며, RBI 소프트웨어인 realRBI를 개발하였다. 연구 결과는 다음과 같다.

1) API 581의 RBI-base resource document에 포함된 RBI 평가절차에 따라 기본 알고리즘을 결정하였으며, API 581에 명확히 제시되지 않은 부분은 코드의 본문 내용 및 참고문헌에 근거하여 최종 알고리즘을 구성하였다. 따라서 본 연구결과에서 개발된 realRBI 소프트웨어를 사용하면 API 581 절차에 충실한 평가결과를 얻을 수 있다

2) 구성된 RBI 종합 알고리즘을 바탕으로 MS Visual C++ 6.0, MS Visual Basic 6.0 언어 및 MS Access를 사용하여 RBI 소프트웨어 realRBI를 개발하였으며, GUI 환경을 구현하여 소프트웨어 사용자의 사용상 편의를 도모하였다.

감사의 글 : 본 연구는 한국과학재단 산하 산업설비 안전성평가 연구센터(SAFE)의 연구비 지원 및 한국가스안전공사의 연구비 지원으로 수행한 연구 결과입니다. 연구비 지원에 감사 드립니다.

참고문헌

- 1) 이일재, "장치 산업에서의 설비 위험도 평가 (RBI)," 가스안전, 한국가스안전공사, 5/6월호, pp. 7-12, 2001. 6.
- 2) API 581, Risk Based Inspection Methodology, 1st edition, 2000. 2.
- 3) 한국산업안전공단, "위험기반검사(RBI) 기술에 대한 국제 동향 및 기술개발 적용방안," 안전분야 기술자료, 안전 2001-18-235, 2001. 7.
- 4) 송정수, 심상훈, 윤기봉 외, "다자간 공동연구를 통한 RBI 소프트웨어 기능에 관한 조사," 2001

- 한국산업안전·위생학회 공동 학술대회 논문집 pp. 337-342, 2001. 11.
- 5) 송정수, 윤기봉 외, "API-RBI BRD에 따른 RBI 소프트웨어의 개발," 2001 한국산업안전·위생학회 공동 학술대회 논문집, pp. 381-386, 2001. 11.
 - 6) 송정수, 심상훈, 윤기봉 외, "RBI 소프트웨어의 기능에 관한 조사 연구," '01 한국가스학회 추계 학술발표회 논문집, pp. 161-166, 2001. 10.
 - 7) 송정수, 심상훈, 윤기봉 외, "API 581에 근거한 RBI 소프트웨어의 알고리즘 개발," '01 한국가스학회 추계학술발표회 논문집, pp. 167-172, 2001. 10.
 - 8) 윤기봉, 심상훈, 송정수, "상용 RBI software 기능의 비교평가," GSP 최종보고서, 산업설비 안전성평가 연구센터(SAFE), 2001. 5.
 - 9) 윤기봉, 송정수, 심상훈, "중대산업설비의 위험 등급에 따른 진단평가 기술 개발 I," 과제 최종보고서, 한국가스안전공사, 2001. 11.
 - 10) 윤기봉, "위험도에 근거한 검사," 위험관리, 삼성화재, 2000년 겨울호, pp. 19-21, 2000. 12.
 - 11) Le May, "ASME Post Construction Standards : Current Status and Planning," Invited Seminar 및 PCS 연구회(가칭) 발기대회 자료집, 2000. 6.
 - 12) T. Reynolds, "Risk-Based Inspection - Where are we today?," NACE International, CORROSION 2000 Paper No. 00690.