

< 기술논문 >

## 한국형 위험기반검사(K-RBI) 프로그램 개발

권혁면\* · 임대식\*

(2004년 12월 20일 접수, 2005년 12월 19일 심사완료)

### Development of Program for K-RBI

Kwon Hyuckmyun and Yim Daesik

**Key Words:** Accident Prevention(사고예방), RBI(위험기반검사), K-RBI(한국형위험기반검사), Petrochemical Plant(석유화학공장)

#### Abstract

Since Risk Based Inspection(RBI) was introduced to quality the risks for jet engine and nuclear power, the technique has been expanded to the area of petrochemical plant. Recently among USA and Europe, window-based computer programme for RBI has been rapidly developed. When local companies procure such program to apply to their plants, it is difficult to build up a proper database as well as expect a good result. In this regards, K-RBI programme accustomed to Korean environments was developed. After completion of the programme in 2004, it was tested by 2 local petrochemical plants and was produced fruitful results. By using these programme, we are expecting accident prevention through risk based planning and implementing of equipment inspection, and saving dollars caused by procuring foreign expensive programme.

#### 1. 서론

위험기반 검사(Risk Based Inspection, RBI) 기법은 미국기계학회(ASME)의 비행기 제트엔진과 원자력의 위험도를 정량적으로 분석하기 위해 처음으로 시도된 이래,<sup>(1,2)</sup> 미국석유협회(American Petroleum Institute, API)를 중심으로 석유화학공업 분야로 개선하여 발전되었을 뿐만 아니라 가장 활발하게 연구되고 있다.<sup>(3-5)</sup> 또한 석유화학공업의 설비 안전도 점검에 맞는 이론개발과 윈도우 기반 컴퓨터 프로그램(Windows based computer program)을 개발·활용하고 있으며, 이 기법은 최

근 미국, 유럽 등의 선진국을 중심으로 급속히 발전하여 보급되고 있다.<sup>(6)</sup> 외국의 프로그램 개발은 Tischuk사의 T-OCA,<sup>(7)</sup> DNV사의 ORBIT,<sup>(8)</sup> TWI사의 RISKWISE, CREDO Soft사의 CREDO, APTECH Eng사의 RMDIP 등이 있다. 이와 같이 외국의 RBI 프로그램을 구입하여 사용하는 경우에는 많은 비용이 소요되고 국내 실정에 맞는 데이터베이스(DB) 구축이 어려울 뿐만 아니라 실질적인 분석효과를 기대하기가 어려운 단점이 있다. 따라서 RBI에 대한 개념적인 설명 및 일반적인 절차는 있으나 자세한 절차가 나와 있지 않은 API 581 기준을 토대로 여러 자료를 검토하여 자세한 절차를 개발하고 많은 DB를 구축하여 사용자의 편의성을 도모하고 국내 실정에 맞는 프로그램을 개발·보급함으로써 사고예방은 물론 막대한 양의 외화와 경비를 절감할 수 있을 것으

---

† 책임저자, 회원, 한국산업안전공단  
E-mail : hmkwon@kosha.net  
TEL : (032)510-0681 FAX : (032)512-8315

\* 한국산업안전공단

로 판단되어 본 연구를 수행하였다. 본 연구를 통해 설비별 위험도를 정량적으로 산출하고 위험도 순위에 따라 검사·유지보수의 우선순위를 결정하여 위험설비를 집중적으로 관리함으로써 설비의 안전성 확보와 자율안전관리를 정착시키기 위해 설비의 위험도에 근거한 검사항목, 검사방법 및 검사주기 등을 제시해 줄 수 있는 국내 실정에 맞는 위험기반검사 절차를 개발하였고, 이를 바탕으로 한국형 위험기반 검사 프로그램을 개발하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 RBI 개요

위험기반검사에서는 Fig. 1과 같이 한 개의 공장에 있는 여러 개의 공정에 대한 검사 우선순위를 결정하는 공정의 위험도계산 단계와 각 공정에 있는 개별 설비에 대한 위험도를 산출하여 설비의 검사 우선순위를 결정하는 단계로 구분되며 위험도를 토대로 검사주기, 검사방법 등을 결정하는 검사계획이 최종적으로 수립된다.

공정의 위험도는 사고발생 가능성, 설비손상피해, 건강피해로 구분하고, 설비손상 피해와 건강피해 중 큰 등급의 피해크기를 사고피해크기의 등급으로 결정한다. 이때, 사고발생가능성은 설비계수, 손상계수, 검사계수, 상태계수, 공정계수 그리고 설계계수에 의해 결정되며, 설비손상피해는 화학물질계수, 물질량계수, 상태계수, 발화계수, 압력계수 그리고 신뢰도계수에 의해 결정된다.

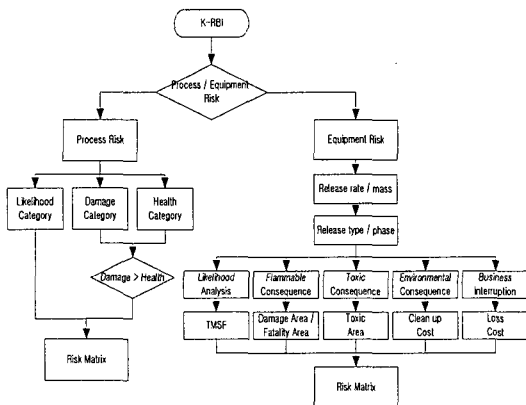


Fig. 1 Algorithm of K-RBI program

그리고 건강피해는 독성계수, 분산계수, 신뢰도계수 및 인구계수에 의해 결정된다.

이와 같이 결정된 발생가능성 등급과 피해크기 등급을 이용하여 행렬에 각각 세로와 가로에 나타내어 정성적 위험도를 결정한다. 설비별 검사의 우선순위를 결정하는 설비위험도를 산출하기 위한 누출시나리오(s)별 위험도(risk)는 사고발생가능성과 사고피해 크기의 곱으로 식 (1)과 같이 나타낸다.

$$(Risk)_s = (LOF)_s \times (COF)_s \quad (1)$$

LOF = Likelihood of Failure

COF = Consequence of Failure

여기서 s는 누출 시나리오, Risk는 누출 시나리오에 대한 위험도를 나타낸다. 이때 사고발생가능성은 각 설비의 일반 고장발생빈도와 설비변경계수 그리고 관리시스템평가계수로부터 산출된다. 설비변경계수는 각 설비의 운전 또는 조건과 관련된 기술종속계수, 보편적 종속계수, 기계적 종속계수 그리고 공정 종속계수로부터 결정되며, 각 계수들은 Fig. 2와 같이 세부 항목들로부터 결정된다.

관리시스템평가계수는 유해물질의 누출을 방지하고 공정설비의 기계적 건전성을 유지하는데 영향을 주며, 1000점(100%) 만점으로 평가하는데, 이 값을 인자로 변화하여 설비들의 상대적 위험도를 바꾸는 것이 아니라 전체 설비들의 절대적인 위험도를 높이거나 낮추는데 사용된다.

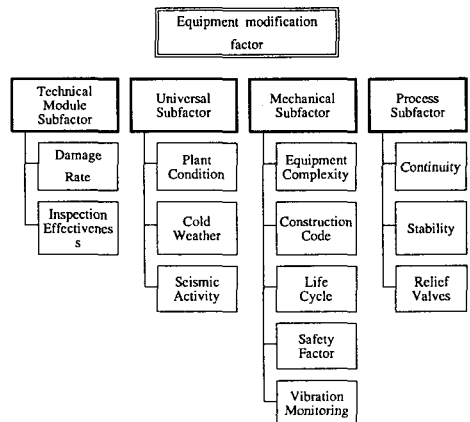


Fig. 2 Overview of equipment modification factor

사고결과 크기는 대표유체 및 유체의 특성 결정, 누출공 선택, 유체의 총 누출량 또는 누출속도 산출, 확산 및 피해크기의 결정을 위한 유형 결정, 유체의 최종상태 결정, 누출 후 반응 영향 평가 그리고 누출에 의해 잠재적으로 영향을 받는 영역으로 평가되거나 운휴 또는 환경정화로 인한 누출 피해비용으로 산출된다.

위에서 산출된 각 설비에서 최종 위험도는 설비의 모든 누출시나리오에 대한 합으로써 식 (2)와 같이 표현된다.

$$(Risk)_{Equipment} = \sum_{i=1}^s (Risk)_i \quad (2)$$

이와 같이 RBI는 위험도를 정성적(Qualitative) 또는 정량적(Quantitative)으로 평가하여 전체 설비 위험도의 대부분을 차지하고 있는 20% 내외의 대상설비를 찾아내어 이에 대해 최적의 방법으로 인적·물적 자원을 투입함으로써 효율적인 안전성 확보와 함께 유지관리의 경제성을 추구하는 기법이라 할 수 있다.

2.2 절차 개발

RBI는 수행하고자 하는 대상공정의 검사 우선순위를 결정하는 정성적 RBI와 대상 공정에 대한 각 설비별 위험도를 산출하여 설비의 검사 우선순위를 결정하는 정량적 RBI로 구분된다. 정성적 RBI는 정량적 RBI의 수행에 앞서 가혹한 환경에서 노출되어 상대적으로 타 설비에 비해 높은 위험을 갖는 설비나 공정을 대략적으로 찾는 데 사용하는 방법으로 사업장의 안전관리수준평가를 산업안전보건법에 의해 시행중인 공정안전관리제도(Process Safety Management, PSM)에서의 안전관리 이행수준평가 방법으로 대체하여 설비의 사고발생확률에 적용하고, 공정위험도분석을 이용하여 RBI 수행공정을 선택하여 설비별 위험도 분석에 적용한다.

정량적 RBI는 공정별 DB에 포함된 공정 데이터와 설비 데이터를 가지고 접근한다. 어떠한 누출이 발생하고, 그 누출이 어떠한 상황으로 진전되는지를 결정하기 위해 여러 가지 지정된 누출시나리오를 고려하고, 각각의 시나리오에 대해 위험도를 결정하고 결정된 위험도의 합이 그 설비의 최종 위험도가 된다.

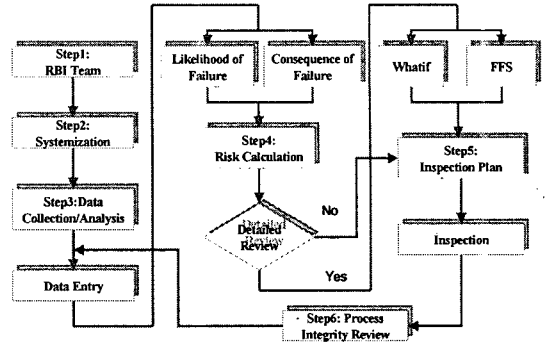


Fig. 3 Procedure of RBI

상세한 RBI 절차는 Fig. 3에서와 같이 Step1 - Step6의 순으로 진행되며, 공정 및 설비에 대한 위험도를 산출하기 위해 전문가들로 구성된 RBI 수행팀을 구성하고, 이 팀은 데이터 취득을 위한 시스템화를 통해서 구간을 정의하고, 시스템화로부터 설정된 설비의 데이터를 취득하게 된다. 이때, K-RBI 프로그램의 적용이 가능한 설비는 배관, 고정설비, 회전설비 및 밸브이며, 얻어진 데이터를 K-RBI 프로그램에 입력함으로써 설비의 위험도를 산출하고, 검사 우선순위, 검사주기, 검사방법 등을 결정할 수 있다.

[Step1] RBI 팀 구성 과정이다. RBI 팀은 RBI 평가 경험자 또는 교육을 받은 전문가가 참여하고 해당 공정 운전경험자, 검사·정비 경험자 등이 참여하여 조직화된 팀을 구성하여야 한다. 팀 책임자는 위험설비의 운전 또는 검사에 충분한 경험과 지식을 가져야 하며, RBI 추진 업무에 대한 총괄책임을 담당한다. 설비·설계 검사자는 설비의 상태 및 운전조건에 대한 자료를 확보하고, 재료·부식 전문가는 손상 또는 파손 메커니즘(Damage Mechanism)의 형태와 적용방법에 대하여 평가하는 임무를 담당한다. 공정기술자는 위험설비의 운전조건, 유체의 조성, 독성 및 인화성 등의 공정 기술정보를 제공하여야 하며, 운전·정비 전문가는 운전변수들의 규정된 운전범위 내에서 운전되고 있는지에 대한 확인을 하여야 한다. 또한 위험성 평가 전문가는 RBI 분석에 필요한 자료를 이용하여 위험성을 분석·평가하게 된다.

[Step2] 시스템화(Systemization) 과정이다. 시스템화는 K-RBI 프로그램을 이용하여 효율적으로 RBI를 수행할 수 있도록 하기 위해 인벤토리 그

롭과 유체흐름에 대한 구분방법과 적용에 대해 규정한다. 이때, K-RBI의 데이터베이스는 설비번호, 유체번호 및 인벤토리 그룹에 의해 구분되며, 데이터를 입력하기 위한 시스템화를 수행한다.

인벤토리 그룹은 누출될 수 있는 유체량의 상한선을 정의하기 위한 것으로 배관 및 계장도(P&ID) 상의 모터구동밸브(Motor-Operated Valve, MOV) 구간을 찾아 정의하거나, 없을 경우 제어밸브(Control Valve)에 의해 구간을 정의한다. 또한 인벤토리 그룹은 동일한 유체의 흐름에 대해 적용함을 원칙으로 한다. 또한 유체흐름은 동일 함유 물질, 동일 운전/온도/압력, 동일 유체상태에 대해 결정하며, 한 개 이상의 시스템이 연결된 경우에 대해서는 부분별로 구분하여야 한다. 설비에 대한 정보는 설비구분기호, 유체흐름 명, 설비번호 등을 이용하여 구분하고, 또한 반응기 칼럼, 열교환기 등의 설비에서 동일 설비 내에서 운전조건 또는 공정 유체 특성의 변화가 있을 경우 접미사로 TOP, MID, BTM, Shell, Tube 등과 같이 구분 기호를 사용하여 상세히 구분하여야 한다.

[Step3] Data 수집/분석/입력 과정이다. 설비의 위험도를 산출하기 위하여 P&ID 상에서 시스템화를 수행한 후 적용대상 설비를 선정하게 되며, 필요한 데이터는 P&ID, 공정흐름도(Process Flow Diagram, PFD), 장치설계도(Equipment Drawing) 등으로부터 얻을 수 있다. 이때, 데이터 입력방법은 공정유체의 경우 유체번호, 유체명 등의 항목, 배관의 경우 배관번호, 배관규격, 측정두께, 운전온도, 운전압력, 유속 등의 항목, 고정설비의 경우 설비번호, 설비형태, 재질, 동체두께, 운전압력 등의 항목, 회전설비의 경우 설비번호, 설비형태, 운전압력, 재질 등의 항목, 밸브의 경우 설비번호, 설비형태, 압력 등의 항목이 필요하다. 또한 RBI의 효과적인 결과를 얻기 위해서는 Data의 신뢰성이 필수적이므로 양질의 Data 수집이 제일 중요하다.

[Step4] 위험도계산 과정이다. 설비를 장기간 운전하게 되면 높은 온도와 압력, 함유 물질 등에 의해 설비의 재질이 열화 되어 수명이 소진되므로 설비의 재질 및 상태, 사용물질 등에 따른 파손기구와 그 파손기구에 의한 사고발생확률을 구한다. 설비 고장시 피해크기, 근로자의 접근정도, 사용유체의 유해성 및 재고량, 사용압력, 환

경적 피해, 피해범위 등을 고려하여 인적, 물적 피해크기 등의 사고피해크기를 계산한다. 사고피해의 크기 및 사고발생 확률을 계산한 후 위험도를 계산한다.

[Step5] 설비별 검사계획수립 과정이다. 산출된 위험도를 바탕으로 검사의 우선순위 및 설비의 검사유효성 등급을 결정하고, 위험도와 검사유효성 등급으로부터 검사주기를 결정한 후 검사유효성 등급으로부터 검사방법 및 검사기법을 결정하는 등 검사계획을 수립한다.

[Step6] 검사결과 피드백(Feed Back) 과정이다. 검사계획에 따라 검사 및 유지·보수한 후 결과를 피드백 시켜 위험도를 재설정하며 위험도를 허용한도 내에서 유지할 수 있도록 설비를 관리한다.

이와 같이 위험기반검사는 구성 요소별로 위험도를 정량적으로 평가한 후 위험도가 높은 부품이나 설비에 우선순위를 두어 검사업무를 추진함으로써 위험도가 높은 소수의 설비에 대해 최적의 방법으로 인적, 물적 자원의 집중적인 투입이 가능하게 하는 과학적인 기법이라 할 수 있다.

### 2.3 K-RBI 프로그램

한국형 위험기반 검사 프로그램(K-RBI)은 API-581의 절차를 바탕으로 국내 실정에 맞는 종합알고리즘을 작성하고, Fig. 4와 같이 관리모듈(Management Module), 입력/수정모듈(Input / Edit Module), 엔지니어링모듈(Engineering Module), D/B모듈(Database Module), 위험도산출모듈(Risk Calculation Module), 유지보수이력모듈(Maintenance Module), 검사계획모듈(Inspection Module), 출력모듈(Output Module) 등 8개 모듈로 구성하여 실행되도록 하였다.

K-RBI 프로그램의 실행 절차는 Fig. 5와 같이 공정에 대한 정보를 입력 후 인벤토리 그룹(Inventory Group)을 정의하고, 유체 및 설비의 정보를 Excel 프로그램에 입력하여 인벤토리 량을 계산하여 설비의 위험도를 분석한다.

이와 같은 절차에 따라 K-RBI를 수행하는 메인화면은 Fig. 6과 같이 주메뉴, 단축아이콘, 패널, 아웃룩메뉴 그리고 실행창으로 구성하였다. 설비에 대한 위험도 분석은 Fig. 7과 같이 입력된 데이터에 대해 계산을 수행한다. Fig. 8은 각 공정에 대한 상세한 위험도를 나타내며, Fig. 9는 공정에 대한 위험도 분포를 나타내고 있다.



**Table 1** Results of risk analysis at K-RBI Ver. 2.0 program

Equipment \ Risk	A Company					B Company				
	H	M	H	M	L	H	M	H	M	L
Piping	57	32	13	2	10	31	8	2	10	11
Static	33			27	6	28		1	26	1
Rotating	3		3			3				3

도록 다음과 같은 특징을 가지고 있다.

첫째, 미국부식협회(NACE)의 부식율 자료를 DB화 하였다.

277종 이상의 화학물질 및 미국재료시험협회(ASTM) 재질에 대한 DB를 구축함으로써 부식율 산출 및 잔여수명을 산출할 수 있는 기능을 구축 하였다.

둘째, 재료규격을 DB화 하였다.

ASTM, KS, JIS, DIN의 재질을 DB화함으로써 상호 호환이 가능하도록 하였다.

셋째, 자료입력을 간편하게 하였다.

Excel 프로그램을 이용한 데이터 일괄 입력기능, 정확한 데이터를 입력할 수 있게 하기위한 입력 항목의 도움말 기능, 위험도 산출 오류를 예방하기위한 입력 데이터의 필터링 기능 및 화학물질, 재질, 인벤토리 등을 간편하게 선택할 수 있는 찾기 기능 등을 구축 하였다.

넷째, 상세한 위험도 분석이 가능하게 하였다.

프로그램상의 계산과정을 확인할 수 있는 감사(Audit) 기능 및 분석된 결과값을 기능별로 나타내어 초보자도 쉽게 이해할 수 있도록 하였으며 GUI를 이용하여 결과를 빨리 이해할 수 있도록 시각화 하였다.

다섯째, 다양한 보고서 기능이 가능하게 하였다. 공장보고서(안전관리수준/RBI수행/공정위험도 비교), 공정보고서(공정위험도행렬/설비위험도분포/위험도분석), 상세보고서(유체정보/설비정보/설비위험도/설비상세위험도), 검사보고서(검사보고서/검사일정/검사이력) 등 다양한 보고서를 출력할 수 있도록 하였다.

2.4 적용 사례 분석

개발된 K-RBI Ver. 2.0 프로그램을 이용하여 2개의 석유화학 공장에 대하여 적용하였으며 영국 TISCHUK사의 T-OCA 상용프로그램과 비교 분석하였다. 두 개의 공정사업장에 대한 위험도 분포

는 Table 1과 같이 나타났으며, 상용 프로그램의 결과값과 비교하였을 때 대부분의 설비에서 유사한 위험도를 얻을 수 있었다.

3. 결 론

본 연구를 통하여 데이터 수집 규칙 등이 포함된 RBI 수행을 위한 절차를 개발하였으며, 이를 토대로 개발된 한국형 RBI 프로그램은 공정위험도 분석시 국내 산업안전보건법에 의한 공정안전보고서제도(PSM)의 이행수준평가지 사용하는 안전관리수준평가 내용을 반영도록 함으로써 사용자의 중복 작업을 피하였고 공정 및 설비에 대한 부식율 자료가 거의 없는 국내실정에서 미국부식협회(NACE)의 부식율 자료를 DB화함으로써 잔여수명을 산출할 수 있도록 하였고, KS 및 JIS 규격을 많이 사용하는 상황에서 KS와 JIS뿐만 아니라 ASTM, DIN으로 상호 호환되도록 하였고, 메뉴 및 입력내용을 가능한 국문으로 하여 사용자의 편의성을 도모하도록 하였으며, 개발된 K-RBI 프로그램을 국내 사업장에 보급하여 적용함으로써 막대한 양의 외화와 경비를 절감하는 등 다음과 같은 효과를 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

- (1) 개발된 프로그램을 국내 사업장에 보급하여 비생산적인 검사활동제거 및 저 위험도 설비의 검사주기 연장에 의한 정비비용 절감
- (2) 공정의 안정 및 정비기간 단축으로 인한 생산성 향상, 원가절감
- (3) 위험도가 높은 소수의 설비를 집중 관리함으로써 위험도가 낮은 설비의 검사주기 연장에 의한 정비주기 변경 등의 직접효과
- (4) 설비의 신뢰도 향상, 검사 시스템의 개선, 회사의 인지도 제고 및 보험료 인하 등의 간접효과

참고문헌

- (1) Center for Research and Technology Development, American Society of Mechanical Engineers, 2000, "Risk-Based Testing : Development of Guidelines," ASME, Vol. 40, No. 1.
- (2) Center for Research and Technology Development

- American Society of Mechanical Engineers, 1994, "Risk-Based Inspection, Development of Guidelines," *ASME*, Vol. 20, No.1.
- (3) American Petroleum Institute, 2001 "Risk-Based Inspection," API 580.
- (4) American Petroleum Institute, 2000, "Risk-Based Inspection Basic Resource Document," API 581.
- (5) Korea Society of Mechanical Engineers, KSME, 2003, "A Study on Implementation of Risk Based Inspection Procedures to a Petrochemical Plant," *Trans. of the KSME A*, Vol 27, No. 3.
- (6) Korea Atomic Energy Research Institute, May, 2002, "The 7th Korea-Japan PSA Workshop."
- (7) TISCHUK, 2003, "User Manual T-OCA V.2 & WhatIf Ver. 2.0," T-OCA V.2 User Manual
- (8) DNV, 1993, "User Manual for Process Hazard Analysis Software Tools(PHA-ST)," DNV Technical Manual Ver 4.1.