



압력설비의 안전관리를 위한 위험기반검사(RBI) 기술

이헌창* · 한성환 · 조지훈** · †김태옥

명지대학교 화학공학과, *DNV 코리아, **한국산업안전보건공단
(2011년 7월 5일 접수, 2011년 8월 25일 수정, 2011년 8월 25일 채택)

Risk-Based Inspection(RBI) Technology for Safety Management of the Pressurized Facilities

Hern-Chang Lee* · Seong-Hwan Han · Ji-Hoon Cho** · †Tae-Ok Kim

Department of Chemical Engineering, Myongji University, Yongin 449-728, Korea

*Det Norske Veritas Korea

**Korea Occupation Safety Healthy and Agency

(Received July 5, 2011; Revised August 25, 2011; Accepted August 25, 2011)

요 약

위험기반검사(RBI)는 석유화학, 정유, 가스 산업 등에서 압력설비를 위험도에 따라 검사주기, 검사방법 등의 검사계획을 제시하는 검사기법으로, RBI 기술을 사용하여 위험도가 높은 설비를 집중적이고, 비용-효과적으로 유지·보수 및 관리할 수 있다. 본 논문에서는 RBI의 원리 및 수행절차, RBI에 의한 위험 및 설비 관리와 적용효과, RBI 기술현황 및 국내 적용현황을 소개하고, RBI의 발전방안을 제안하였다.

Abstract - Risk-based inspection (RBI) is a inspection technique suggesting inspection plan, such as inspection interval and inspection method, of the pressurized facilities based on its risk in the petrochemical, refinery and gas industries. Therefore, we can intensively and cost-effectively maintain, repair and manage the high-risk facilities through RBI technology. This paper reviews RBI technology, such as principle and implemental procedure of RBI, management of risks and facilities and return of investment through RBI, RBI technology at present and its application in domestic industries. In addition, some improvement directions of RBI are also proposed.

Key words : RBI (risk-based inspection), safety management, risk, API, pressurized facilities

1. 서 론

복잡한 장치와 공정으로 구성되어 있어서 장치산업으로 불리는 석유화학, 정유 및 가스 산업은 세계 각국에서 기간산업으로 자리 잡고 있다. 그러나 이러한 장치산업에서 사용되고 있는 설비들은 대부분 고온 및 고압의 가혹한 환경에서 운전되고 있을 뿐만 아니라 공정물질이 화재나 폭발의 위험성이 있기 때문에 사고가 발생하면 대규모 인명 및 재산 피해

는 물론 심각한 환경오염 등이 발생될 수 있다[1].

더욱이 생산효율을 증가시키기 위해 압력설비와 같이 고온·고압에서 운전되는 설비의 사용이 급증되고 있을 뿐만 아니라 경제적 및 환경적 요인으로 인해 이들 설비들의 보수나 대체가 용이하지 않기 때문에 사고의 위험성은 항상 잠재하고 있다[2]. 특히, 국내의 경우는 1960년대부터 1980년대에 이르기까지 많은 산업시설이 건설되었으나 이들 설비들은 점점 낡아지고 있고, 또한 운전 및 안전 기술이 많이 발전되었음에도 불구하고, 검사에 의해 사고를 예방할 수 있는 기계적 고장이 약 40% 이상을 차지하고 있다고 보고되었다[3].

†주저자:kimto@mju.ac.kr

최근 경제와 기업 환경이 급변하고 있는 상황에서 환경오염에 대한 사회적인 관심증가로 인하여 이들 장치산업은 설비의 안정성 확보와 함께 보다 효율적인 설비관리의 필요성이 대두되고 있다. 즉, 안전·환경 및 사업수행에 장애를 주는 위험요소를 검토하여 비용-효과적인 방법으로 설비를 관리할 수 있도록 할 뿐만 아니라 검사자원을 보다 효율적으로 운영하여 사고발생 가능성을 구조적으로 감소시킬 필요성이 있다.

따라서 장치산업의 압력설비에 대해 사고를 유발할 수 있는 위험요소를 파손모드(failure mode)별로 구분하고, 설비제작에 사용된 재료, 사고발생 위치, 사고발생 인자 등의 파손메커니즘(damage mechanism)에 관련된 자료와 위험도(risk)에 따라 검사주기, 검사방법 등을 제시할 수 있는 새로운 검사기법이 위험기반검사(risk-based inspection, RBI)이다. 즉, RBI는 위험도가 높은 설비에 초점을 맞추어 유지·보수 및 관리함으로써 최소의 비용으로 설비의 안전을 확보하고, 가동률을 향상시킬 수 있는 과학적인 검사기법이다.

RBI는 미국석유협회(American Petroleum Institute, API)의 API RP 580(risk-based inspection)[4]과 API 581(risk based inspection BRD)[5]에서 권고하는 개념으로, API STD 510, 650 및 570 같은 규격을 보완하고 있으며, 또한 이들 규격들은 위험기반검사에 기초하여 검사계획(inspection plan)을 결정하도록 권장하고 있다.

본 연구에서는 RBI의 원리 및 수행절차, RBI에 의한 위험 및 설비 관리와 적용효과, RBI 기술현황 및 국내 적용현황을 알아보고, RBI의 발전방안을 제안하고자 하였다.

II. RBI에 의한 설비관리

2.1. RBI 개념

RBI는 확률론적인 방법에 기초를 두고 있다. 즉, RBI에서는 Fig. 1에서와 같이 특정시간 동안 발생하는 설비의 사고발생 확률(likelihood of failure, LOF)과 사람, 재산 및 환경에 미치는 사고피해의 정도를 정량적으로 나타내는 사고피해 크기 결과(consequence of failure, COF)의 곱(matrix)으로 나타내는 위험도에 근거하여 검사주기와 검사방법을 제시한다[6]. 이때, 위험도는 인명 손실, 설비 파손, 환경오염 등 사회적 및 경제적인 위험까지 포함한다. 그리고 LOF는 관리인자(management factor, MF)와 일반 고장률(generic failure frequency, GFF), 그리고 손상인자(damage factor, DF)에 의해 결정되고, 손상인자는 수명,

손상률, 유효검사에 의해 결정된다. 또한 COF는 장치피해 크기 또는 설비 보수비용, 상해비용, 사업중단 손실비용 등과 같이 면적 또는 비용에 의해 결정된다.

결정된 위험도를 바탕으로 검사주기를 산정하는 방식은 정적인 방법과 동적인 방법으로 구분할 수 있다. 정적인 방법은 LOF와 COF에 의하여 위험도 행렬에 설비의 위험도 등급을 결정하고, Fig. 2에서와 같이 결정된 위험도 등급에 의해 검사주기를 결정한다. 또한 동적인 방법은 시간이 지남에 따라 설비의 사고발생 가능성은 증가하기 때문에 Fig. 3에서와 같이 특정 손상인자를 초과하는 시점을 기준으로 검사주기를 결정한다.

또한 설비에 대한 유효한 검사수준은 설비에서 발생되는 손상메커니즘의 정도를 파악하고, 손상메

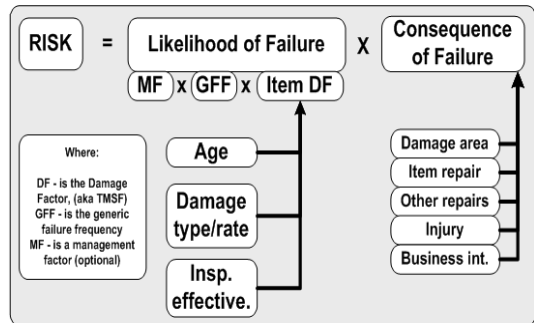


Fig. 1. Components in the calculation of the risk.

환경 설정					
설비의검사주기					
배관/고정설비(년/회)					
5	3	2	2	1	1
4	5	4	3	2	1
3	6	6	4	3	2
2	8	8	5	4	3
1	8	8	6	5	4
	A	B	C	D	E
회전장치/밸브(개월/회)					
5	3	2	2	1	1
4	5	4	3	2	1
3	6	6	4	3	2
2	8	8	5	4	3
1	8	8	6	5	4
	A	B	C	D	E

Fig. 2. Inspection interval by matrix risk category.

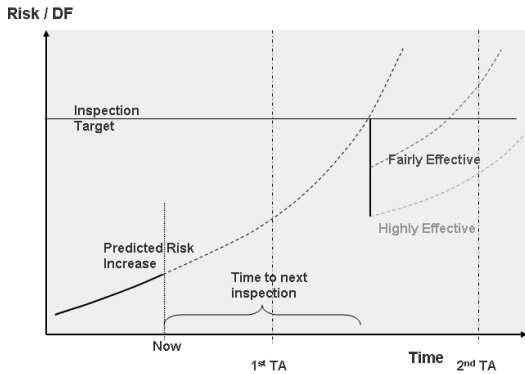


Fig. 3. Inspection interval by damage factor.

커니즘별로 매우 효과적(highly), 대체로 효과적(usually), 효과적(fairly) 및 약간 효과적(poorly)인 검사 유효성 등급 중 가장 적합한 수준을 결정하여 적용하게 된다.

2.2. RBI 수행절차

위험기반검사의 수행절차는 Fig. 4에서와 같이 진단 대상설비의 정의, 정성적 및 정량적인 위험도 평가, 사용적합성 평가, 잔여수명 평가, 그리고 검사계획 수립의 4단계로 구분할 수 있다.

첫 번째 단계는 검사대상이 되는 설비 및 설비의 구성장치들을 정의하는 단계로, 위험도 평가에 필요한 자료를 수집하여야 한다. 특히, 파손모드나 설비의 신뢰성에 영향을 미칠 수 있는 요소 등에 대한 자료수집이 요구된다.

두 번째 단계는 각 장치의 위험도 등급을 정하여 분류함으로써 정성적인 방법 또는 정량적인 방법으로 위험도를 평가하는 단계이다. 일반사항(설계, 시공 및 사용 이력 등), 안전과 관련된 사항(유지보수 이력, 사고 발생 이력 등) 및 진단과 관련된 사항(과거 진단시기, 적용된 검사기법 등) 등이 검토되어야 한다. 이 밖에도 설비의 사용 중 상태(압력, 온도 등)를 검토할 수 있으면 잠재위험을 쉽게 예측할 수 있다.

세 번째 단계는 위험기반검사에 필요한 자료들을 효과적으로 통합하여 위험을 정량적으로 평가하고, 설비의 사용적합성(fitness for service, FFS) 평가 및 잔여수명(remaining useful life, RUL)을 평가하는 단계이다.

마지막 단계에서는 검사주기, 검사절차 및 검사방법 등을 정의하여 표준검사계획을 수립(specific equipment inspection plan, SEIP)하여 검사를 수행하고, 검사 후 설비의 상태에 따라 보수나 교체와 같은 적절한 조치를 취하게 된다.

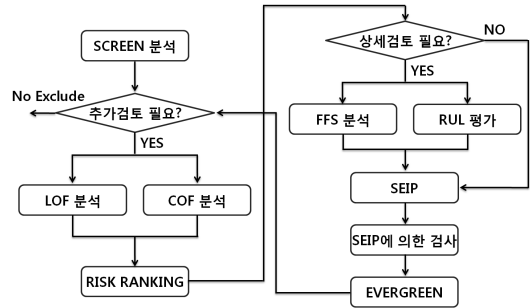


Fig. 4. Implemental procedure of RBI.

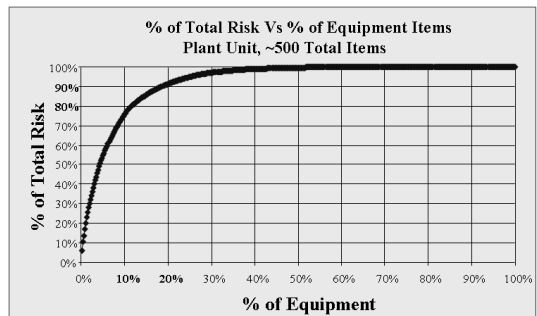


Fig. 5. % of total risk vs. % of equipment item.

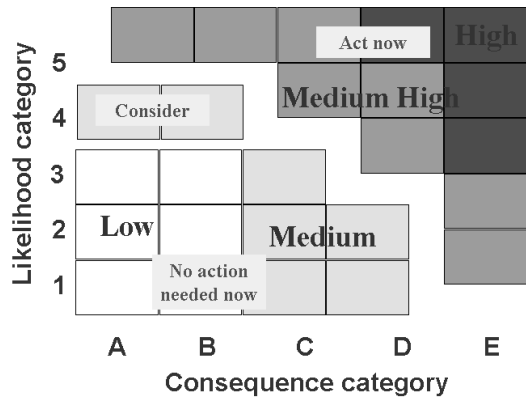


Fig. 6. Risk management of facilities.

2.3. 위험관리

위험수준(risk level)을 체계적으로 감소시키기 위해서는 Fig. 5에서와 같이 사고발생 빈도가 높고, 피해정도가 적은 위험설비보다 발생빈도는 낮지만 피해정도가 심각한 위험설비에 중점을 두어 소수의 고위험 설비(전체 설비의 10~20%)를 집중적으로 관리함으로써 가능하다. 즉, Fig. 6에서와 같이 고위험

설비에 대하여는 즉각적인 검사를 수행하여 설비에 대한 신뢰도를 확보할 수 있어야 하며, 이외의 설비에 대해서는 향후 설비의 사용조건 및 상태에 따라 적절한 검사주기를 연장하고, 지속적인 모니터링을 통해 설비의 상태를 최적의 조건으로 관리해 주어야 한다.

2.4. 설비관리

(1) 과학적 근거에 의한 체계적인 검사

검사의 목적은 계획된 주기적 검사를 통해 비상, 조업중지, 누출 또는 고장 등을 방지하여 인체 및 설비의 안전 확보를 통한 재산상의 손실을 최소화 하는 것이다. 또한 잘 계획된 체계에 따라 검사를 수행하고, 결과 데이터를 분석하여 설비의 부식율과 잔여수명을 예측함으로써 경제적이고 안전한 설비의 교체시점을 선정하며, 운전기간을 최대화 할 수 있는 안정성을 확보하는 것이다. 이때, 손실을 최소화 하고, 안전성을 확보하기 위한 검사의 주요소는 what, why, when, where, how라고 할 수 있다. 즉, 검사를 요구하는 설비는 어떤 설비이고, 왜 검사를 해야 하며, 그리고 언제 검사가 필요한지, 그리고 설비에서 어떠한 위치에서 검사를 해야 하고, 얼마나 자주 검사를 해야 할지이다.

따라서 검사를 수행하여야 할 설비가 선정되면 설비에서 취약부위를 분석하여 육안검사 및 비파괴 검사방법을 선정하게 된다. 또한 취약 부위에 대해 손상메커니즘의 형태 및 영향인자를 파악하여 예방 및 완화 방법을 강구하여야 할 뿐만 아니라 향후 검사방법과 모니터링 방법을 결정하여 체계적으로 관리하여야 한다.

(2) RBI 프로그램을 통한 관리시스템 구축

검사가 완료되면 각종 검사결과에 대해 이력을 관리해야 한다. 검사이력은 기록표로써 수기의 형태로 보존할 수도 있으나 설비수가 많을 경우는 전산 시스템을 구축하여 관리하기도 한다. 특히, 배관의 경우는 관리대상이 방대하므로, 이력의 전산화가 효율적이다. 검사이력은 설비관리에 있어서 중요한 자료가 되므로, 반드시 작성, 유지 및 보존해야 한다. 해당설비가 폐기된 이후에도 이력은 상당기간 보존되어야 하는데, 그 이유는 유사한 설비를 신설 또는 증설하는 경우에 초기 관리등급 및 중점 검사부위의 선정에 중요한 참조자료가 되기 때문이다.

2.5. 투자 대비 이득

RBI를 구축하면 높은 위험도를 갖는 설비는 높은 수준의 검사 및 유지관리 비용을 배정하고, 낮은 위

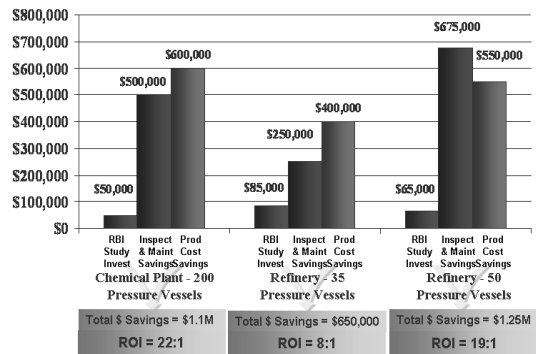


Fig. 7. Typical return of investment by RBI[7].

험도를 갖는 설비는 그에 합당한 비용을 배정할 수 있다. 즉, 효율적인 설비유지비용 및 자원관리의 최적화가 가능하게 되며, 투자 대비 이득(return of investment, ROI)의 증가로 이어지게 된다. 더불어 설비의 효과적인 위험관리가 이루어지므로, 재보험 비용을 절감할 수 있다.

Fig. 7은 ROI에 대한 대표적인 예를 나타낸 것으로 [7], 화학플랜트의 경우는 RBI 구축비용(\$50,000)을 투자하면, 검사유지비용의 절감(\$500,000)과 연속운전으로 인한 제품생산비용(\$600,000)의 이득이 발생하여 이를 ROI로 나타내면, $ROI = (\$500,000 + \$600,000) : (\$50,000) = 22 : 1$ 이 된다. 즉, RBI를 도입하면 약 22배의 경제적 효과가 발생하게 된다. 또한 정유공장의 경우는 약 8-19배의 RBI 적용효과가 있을 수 있다.

III. RBI 기술 및 적용 현황

3.1. RBI 기술현황

RBI 기법은 수년전 미국기계학회(American Society Mechanical Engineers, ASME)에서 비행기의 제트엔진과 원자력의 위험도를 정량적으로 분석하기 위해 처음으로 시도되었으며[8], 이 개념을 석유화학공업 분야로 개선하여 발전시켰을 뿐만 아니라 가장 활발하게 연구하고 있는 곳이 미국석유협회(API)이다. API는 21개의 업체와 공동으로 컨소시엄을 구성하여 5년 과제로 많은 연구비를 들여 석유화학공업의 설비 안전도 점검에 맞는 이론개발과 원도우 기반의 컴퓨터 프로그램을 개발·활용하고 있으며, 이 기법은 최근 미국, 유럽 등의 선진국을 중심으로 급속히 발전하여 보급되고 있다[9].

최근 미국기계학회에서는 다시 ASME-Post Construction Committee를 설립하여 석유화학공업뿐만 아

나라 일반 설비 및 원자력 산업 등에도 적용될 수 있도록 기준(Code)을 만드는 작업을 시작하였다[8,10]. 이밖에도 미국에서는 DNV, APTEch, Capstone사 등을 중심으로 활발한 RBI 컨설팅 업무가 이루어지고 있으며, 네덜란드에서는 Shell Global Solutions사가, 그리고 영국에서는 AEA, Tischuk, TWI사 등이 가장 활발한 활동을 보이고 있다.

현재 외국에서 개발되어 보급되고 있는 RBI 프로그램은 Tischuk사의 T-OCA, DNV사의 ORBIT On-shore, TWI사의 RISKWISE, CREDO Soft사의 CREDO, APTEch Eng사의 RMDIP 등이 있다[11].

그러나 외국의 상용 프로그램을 구입하여 사용하는 경우에는 국내 실정에 맞는 데이터베이스(DB) 구축이 어려울 뿐만 아니라 실질적인 분석효과를 기대하기 어렵기 때문에 국내 실정에 맞는 RBI 프로그램을 개발·보급하여 설비에 대한 검사계획을 수립·시행함으로써 사고예방은 물론 막대한 양의 외화와 경비를 절감하고 있다. 즉, 한국가스안전공사(KGS)와 한국산업안전보건공단(KOSHA)은 2002년부터 API 581을 근거로 국내 실정에 적합한 위험기반검사 프로그램을인 KGS-RBI와 KOSHA-RBI를 각각 개발하여 현재 사업장에 보급 및 컨설팅을 수행하고 있다. 또한 에너지관리공단에서도 보일러 및 압력용기에 대한 위험기반검사를 수행할 수 있는 프로그램을 자체적으로 개발하고 있으며, SK는 APTEch 엔지니어링의 프로그램에 표준검사계획 기능을 추가하여 개발하여 사용하고 있다.

3.2. RBI 기술의 국내 적용현황

한국산업안전보건공단은 2001년부터 Tischuk 사의 T-OCA 프로그램을 이용하여 K석유화학, K아연(주), S석유화학 등의 일부 화학공정에 적용하였으며, 2003년부터는 자체 개발한 KOSHA-RBI 프로그램을 사용하여 N화학, D산업, L석유회사, D유화, S중앙연구소 등의 일부 공정에 대하여 적용하였다[12]. 또한 한국가스안전공사는 KGS-RBI 프로그램을 이용하여 H석유화학, S정유회사 등의 일부 공정에 대하여 적용하였다. 그러나 적용 사업장은 초기 개발 프로그램의 문제점 및 오류 등으로 어려움을 많이 겪었음에도 불구하고, RBI 적용 후 설비에 대한 신뢰도는 상당한 수준으로 향상되었다.

또한 L화학과 G석유회사 등은 DNV의 ORBIT 프로그램을 사용하여 일부 공정을 제외한 전 공정에 대하여 RBI를 수행하였으며, 배관의 검사와 더불어 사용중 검사를 실시하여 RBI를 체계적으로 구축하였다.

이밖에도 석유화학공장을 중심으로 많은 기업들이 국내·외 RBI 프로그램을 사용하여 컨설팅을 받

거나 RBI 적용을 고려하고 있으며, 해외 석유화학플랜트 건설에서는 설계 시 RBI 적용을 의무화 하고 있기 때문에 RBI 기술의 도입·적용은 더욱 활발해질 전망이다.

3.3. RBI 기술의 적용효과

RBI 적용을 통한 비용효과를 분석한 국내의 경우에는 A사에서 CLX 공장의 FCC 공정에 대해 RBI를 수행하여 연간 8억 5천만원의 비용절감효과를 얻을 수 있었다. 이때, 개방 및 청소비용에서 연간 6억원, 검사비용에서 1억 5천, 검사준비비용에서 1억원의 비용절감이 이루어 졌으며, 비용절감의 요인으로는 정기보수 주기 연장, 개방항목 감소, 검사시간 단축 등이었다[12].

또한 국외의 경우는 DOW Chemical이 연간 1억 달러의 비용절감 효과를 얻었으며, 위험기반검사를 통해 설비의 신뢰도 향상, 비생산적 작업의 제거와 40%의 검사비용 절감을 달성하였다.

이와 같이 RBI를 수행 후 직접적인 효과로는 비생산적인 검사활동 제거 및 인건비 절감, 저 위험도 설비의 검사항목 조정 및 주기연장, 설비별 파손기구 규명 및 과학적인 검사방법 적용 등에 의한 정비비 절감, 공정의 안정 및 정비기간 단축으로 인한 생산량 증대에 의한 생산성 향상, 비생산성 에너지 절감, 원부 재료손실 감소, 폐기물 발생량 감소 등에 의한 원가 절감, 위험도 높은 소수의 설비를 집중적으로 관리함으로써 위험도가 낮은 설비의 검사주기 연장 등에 의한 대정비주기 변경 등이 있다.

또한 간접적인 효과로는 설비 사고 및 고장건수 감소로 설비 신뢰도 향상, 회사의 인지도 제고 및 이로 인한 보험료 등의 경비절감 가능성, 기계적 안정성 유지로 설비 및 장치의 전반적인 위험 감소, 검사시스템의 개선 및 검사방법 선정, 설비의 안전과 신뢰가 확보될 수 있도록 검사주기 선정, 위험 완화를 위한 검사기술의 효과 정량화, 설비의 유지, 보수, 이력관리의 전산화 실현, 실질적인 공정관리의 정량화 실현 등을 들 수 있다.

IV. 결론 및 제언

위험기반검사(RBI)는 석유화학, 정유, 가스 산업 등에서 압력설비를 위험도에 따라 검사주기, 검사방법 등의 검사계획을 제시하는 검사기법으로, RBI 기술을 사용하여 위험도가 높은 설비를 집중적이고, 비용-효과적으로 유지·보수 및 관리할 수 있다. 따라서 현재 일부 기업에서는 RBI 적용 시 초기에 RBI 프로그램 구입과 컨설팅 비용이 들지만 검사비용 및

인건비 절감과 생산성 증대와 같은 효과를 기대하고 있기 때문에 국내·외 RBI 프로그램을 이용하여 위험기반검사를 실시하고 있거나, 적용을 고려하고 있다. 그러나 현재 RBI 도입·적용을 적극적으로 뒷받침해줄 수 있는 법 제도가 완벽하게 마련되어 있지 않은 상태이다. 즉, 고압가스안전관리법에서는 검사주기를 최장 10년으로 할 수 있도록 법이 개정되었으나, 산업안전보건법은 아직까지 개정되지 않은 실정이다. 특히, 사업장에서는 고압가스안전관리법, 산업안전보건법 및 에너지이용합리화법을 동시에 적용받고 있어서 공인된 RBI 프로그램을 이용한 경우에는 관련기관에서 이를 상호 인증해주는 법적인 보완장치가 필요하다. 또한 사업장에서는 RBI를 수행한 후 설비에 대한 검사표준 및 부식지도를 작성하고, 사용 중 검사를 병행하여 설비의 상태를 최적조건으로 유지하여야 한다. 그리고 관계기관은 사업장 스스로가 자체적으로 RBI를 수행할 수 있도록 권장하여 향후 자체적으로 수행한 공정에 대해서는 공인된 기관으로부터 심사(audit)를 수행한 후 검사주기 연장에 대한 승인을 해주는 것이 바람직하다.

참고문헌

- [1] Lees, F. P., *Loss Prevention in the Process Industries*, Butterworths, London, (1980)
- [2] Kletz, T. A., *What Went Wrong?*, Gulf Publishing Co., Houston, TX, (1986)
- [3] Marsh-McClelln Laboratory, <http://www.mmc.com/knowledgecenter/index.php>, (2006)
- [4] API, *Based Resource Document of Risk Based Inspection* : API-580, American Petroleum Institute (API), New York, (2001)
- [5] API, *Risk Based Inspection Base Resource Document* : API-581, American Petroleum Institute(API), 1st ed., New York, (2000)
- [6] API, *Risk-Based Inspection Technology* : API RP 581, American Petroleum Institute(API), 2nd ed., New York, (2008)
- [7] DNV Korea, *Risk Based Inspection - What is RBI?*, Det Norske Veritas(DNV) Korea, Training Material (Rev.01), p.5, (2008)
- [8] ASME, *Risk-Based Inspection - Development of Guidelines*, Center for Research & Technology Development(CRTD), American Society of Mechanical Engineers(ASME), CRTD-20-1, New York, (1994)
- [9] KAERI, *The 7th Korea-Japan PSA Workshop*, Korea Atomic Energy Research Institute, May, Daejeon, (2002)
- [10] ASME, *Risk-Based Testing : Development of Guidelines*, Center for Research & Technology Development(CRTD), American Society of Mechanical Engineers(ASME), CRTD-40-1, New York, (2000)
- [11] 한국산업안전보건공단, *현장적용을 통한 사용자 중심의 위험기반검사 발전방안 수립, 최종보고서*, (2008)
- [12] KOSHA, *Development of K-RBI Program(Ver.2.0)*, Korea Occupational Safety & Health Agency (KOSHA), Incheon, (2004)