

# 석유화학 플랜트의 위험성기반 진단 기술

최 송 천 · 한국가스안전공사 가스안전연구원, 책임연구원(공학박사)

\_e-mail : scchoi@kgs.or.kr

이 글에서는 최근 해외 플랜트 건설시장의 활성화와 함께 안전성과 건전성 평가기술이 크게 대두됨에 따라 정유 및 석유화학 플랜트 설비의 위험도(risk)에 근거한 진단 평가 기술에 대하여 소개하고자 한다.

**현**재 국내의 중화학 플랜트 설비는 1960년대 후반부터 양적으로 급팽창하였으나 체계적인 본질안전, 플랜트 설비의 안전성과 효율성 관리, 설비안전진단 등의 측면에서는 아직도 고유기술 개발 및 시스템 안전구축 등에서 선진국에 비하여 많은 취약점을 드러내고 있다. 국내에서 발생한 대형 사고나 국제시장에서 벌어지고 있는 치열한 기술 및 가격경쟁은 최근의 안전성 평가와 위험성기반 관리 기술과 관련된 자동화, 정보화, 센서 및 전문 프로그램 등의 성공적인 적용기술개발에 의해 국내 플랜트산업도 급격한 성장을 이룩하였다. 특히, 위험성을 기반으로 한 안전관리 및 검사·진단 기술은 경제적인 측면에서 세계적으로 널리 보급화 되고 있다.

● ●  
국내 정유(refinery) 및 석유화학(petrochemical) 회사 보유 플랜트 수는 세계 10위권 내에 있으며, 최근 플랜트의 수명 연장 및 안전성 평가에 관한 관심이 급증하고 있다.

표 1 국내 정유 및 석유화학 플랜트 현황

구분	정유	석유화학	총계
플랜트 수	63	442	505
업체 수	4	103	108

\* 비료 및 철강 플랜트는 석유화학 플랜트에 포함.

이러한 이상적인 비전에 근접하는 가장 좋은 방법이 바로 각 설비별 위험도를 순위별로 평가한 후, 이에 따른 진단 및 검사 계획을 수립하는 위험성기반 진단(RBI; Risk-Based Inspection) 기술이다. 이 기술은 미국이나 유럽에서는 가장 주목받고 있는 신기술중의 하나로서 위험설비가 산재해 있는 플랜트

내에서 언제, 어느 부위에, 무엇을, 어떻게 검사해야 이 장치들의 위험도를 최소화할 수 있는가 하는 방향을 제시하고 있다. 이는 위험성 분석(risk analysis)을 이용하여 위험도를 줄이기 위한 의사결정(decision making)이 요구되는 사안이기 때문에 이런 의미에서는 최근의 ERP(Enterprise Resource Planning) 기

술과 접목한다면 사실 RBM (Risk-Based Management) 이 보다 더 적절한 표현이라고 할 수 있다. 이제 전 세계가 지식 기반 사회로 나아감에 따라 IT를 기반으로 한 지식모드의 평가기술이 각광을 받고 있는 현실이다.

### 위험성기반 진단 기술

위험성기반 진단은 기존의 시간에 기초한 검사와는 달리 개개의 설비와 관련된 위험을 사고 확률(LOF; Likelihood Of Failure)과 피해결과(COF; Consequence Of Failure)에 의한 측정 가능한 손실비용(Risk = LOF × COF)으로 계량화하여, 잠재적으로 위험도가 높은 설비에 초점을 집중하여 검사 및 보수의 우선순위를 결정하는 기술이다. 즉, RBI 2080 rule에 의하면 전체 단위설비의 20%가 전체 위험의 80%를 차지하고 있다는 것으로, 100개의 배관이 있을 경우 약 20개 정도의 배관이 매우 위험하고 나머지는 덜 위험하다는 것이다. 따라서, 위험도가 적은 장치류들은 검사주기를 연장하여 검사경비를 줄이고, 위험도가 큰 장치류에는 더 많은 예산을 투입하여 검사주기를 줄이거나 적절한 검사 프로그램을 설계한다. 따라서 각 기기들의 파손 위험도를 체계적으로 관리하여 진단/감시 시스템의 수준을 높임으로써, 사고발생 확률을 줄여 경

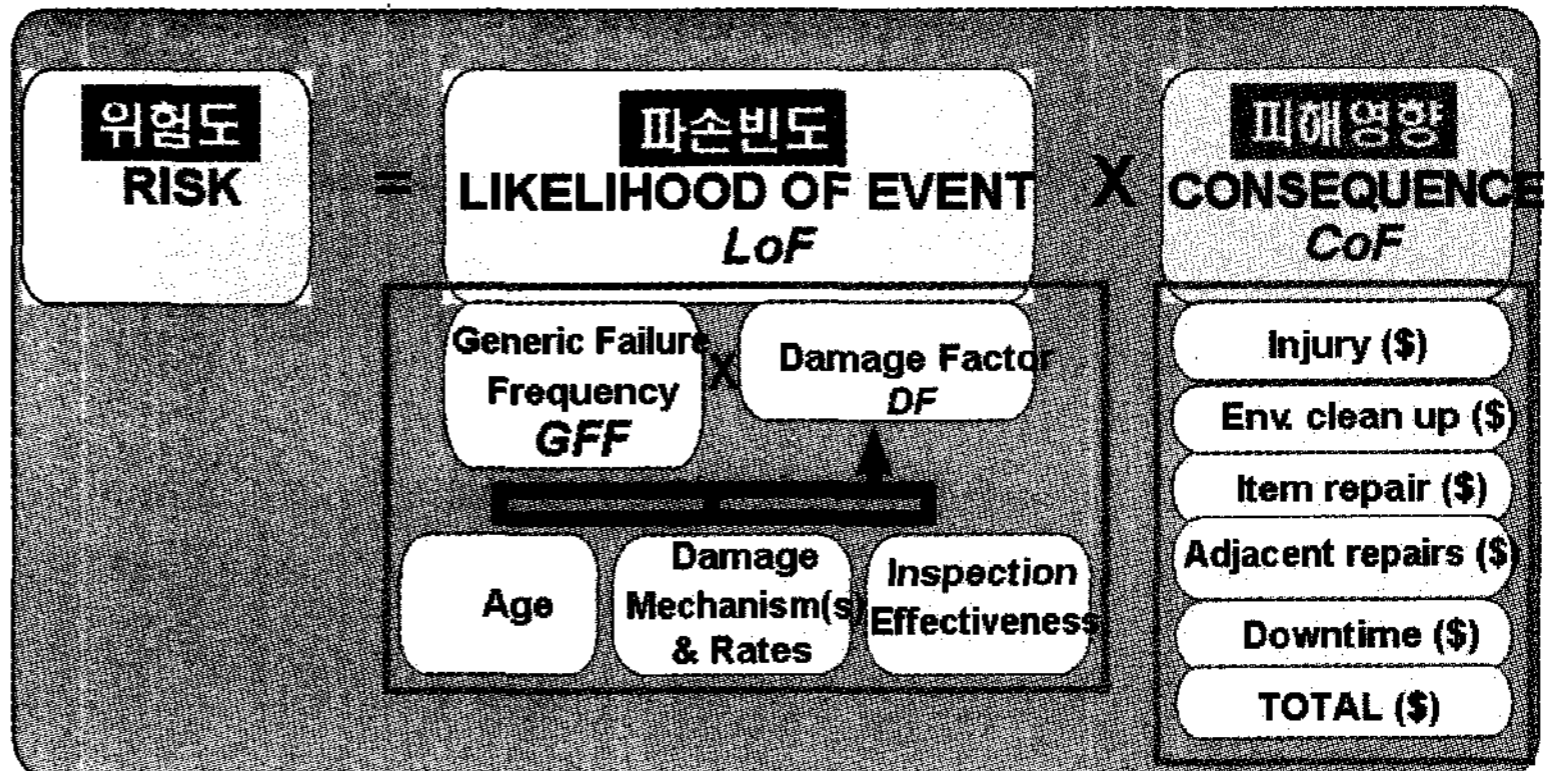


그림 1 위험도의 계량화 정의

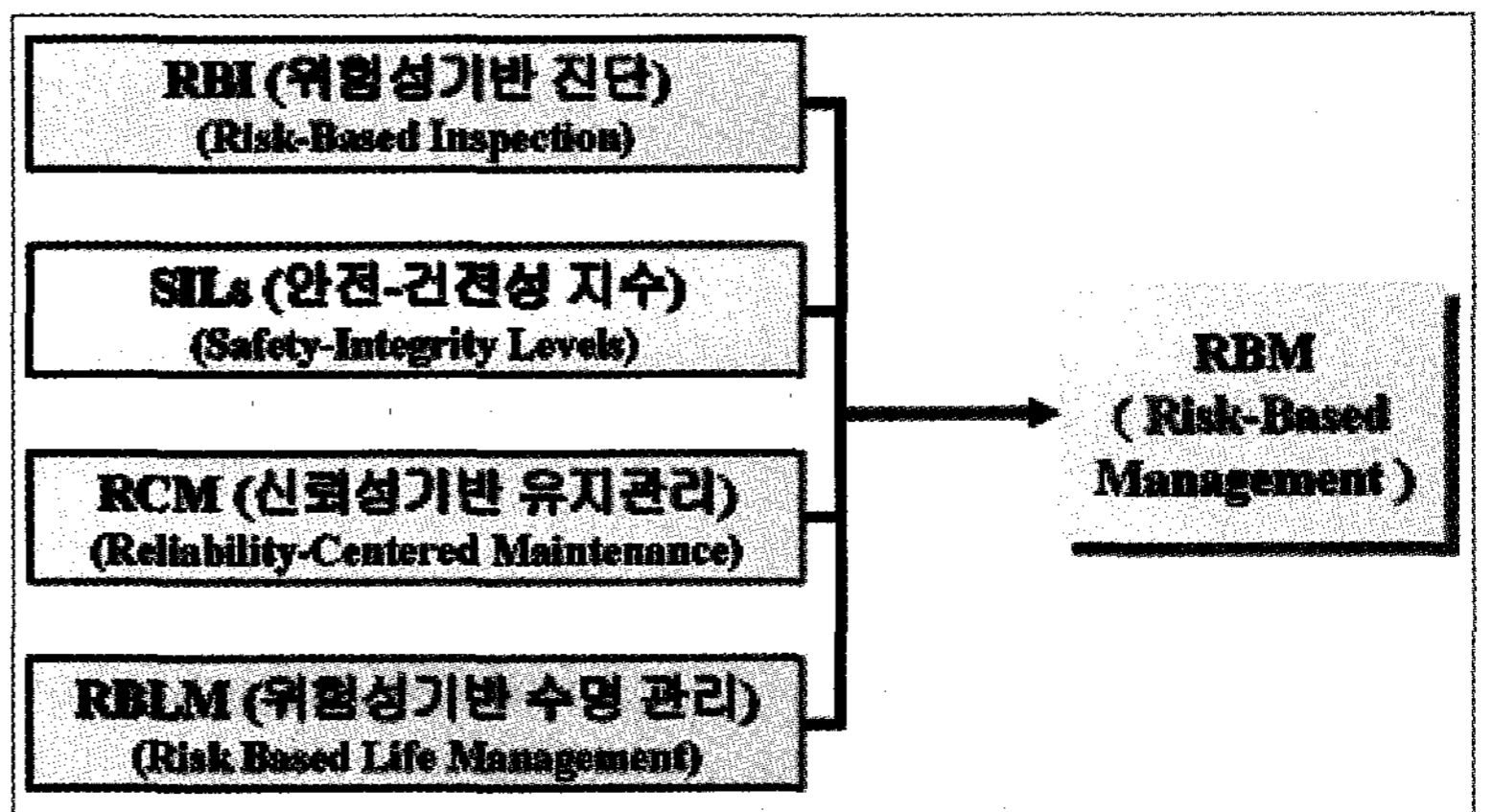


그림 2 위험도 및 안전관련 용어

비절감 및 생산성 향상의 3가지 효과를 얻을 수 있다.

따라서 특정 검사활동의 수행에 대한 가치를 설명하는 수단(tool)과 검사계획 수립을 위한 의사결정 경영수단(decision making management tool)으로서의 역할을 수행한다.(그림 1~3)

### RBI 기술의 개발배경 및 기존 검사 코드와의 연관성

RBI의 시작은 수년 전 미국기계학회(ASME)에서 비행기의 제

트 엔진과 원자력의 안전도를 정량적으로 분석하기 위해 처음으로 시도한 것이다. 이러한 개념을 미국석유협회(API; American Petroleum Institute)를 중심으로 1993년부터 정유·석유화학 산업에 도입하여 개선 발전시킨 것이다. API를 중심으로 21개의 대형 관련 업체들이 각 5만 달러씩 투자하여 총 10억여 원의 연구비를 들여 5년 과제로 개발을 진행하여 1999년도에 Phase 3(정량적 평가)이 완료됨으로써 API 581(2000년 5월 초판 인

운전 중인 기기에 대한 RBI 프로그램의 전반적인 프로세스는 전체 시스템에 대한 주기적인 시스템 감사와도 연계하여 품질개선공정(QIP)에 맞추어 지게 되며 지속적인 개선도 가능하며, 향후에는 회전기기를 포함한 안전성 및 위험성과 관련한 종합적 관리 시스템 구축이 요구되고 있다.

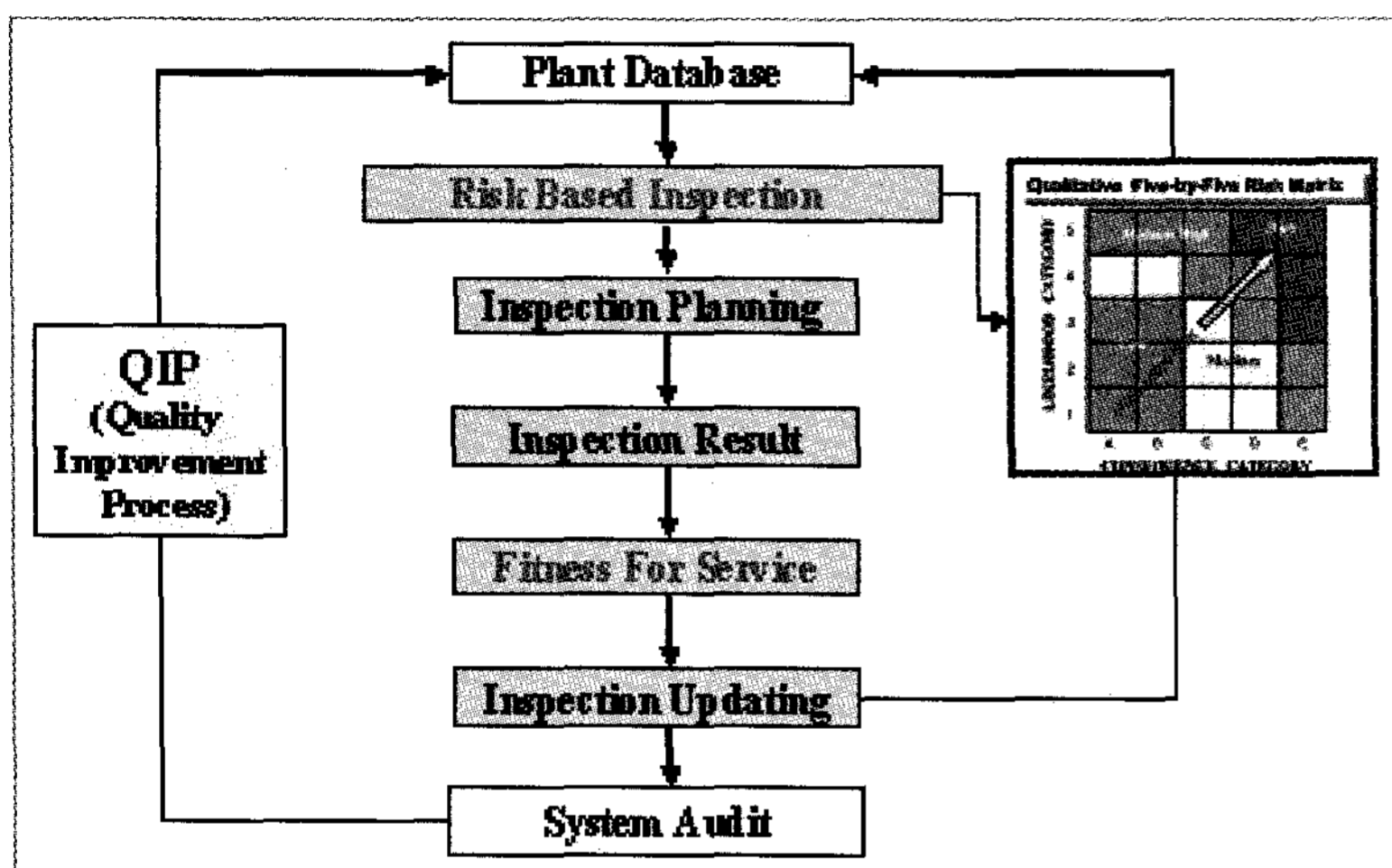


그림 3 운전 중인 기기에 대한 RBI 프로그램

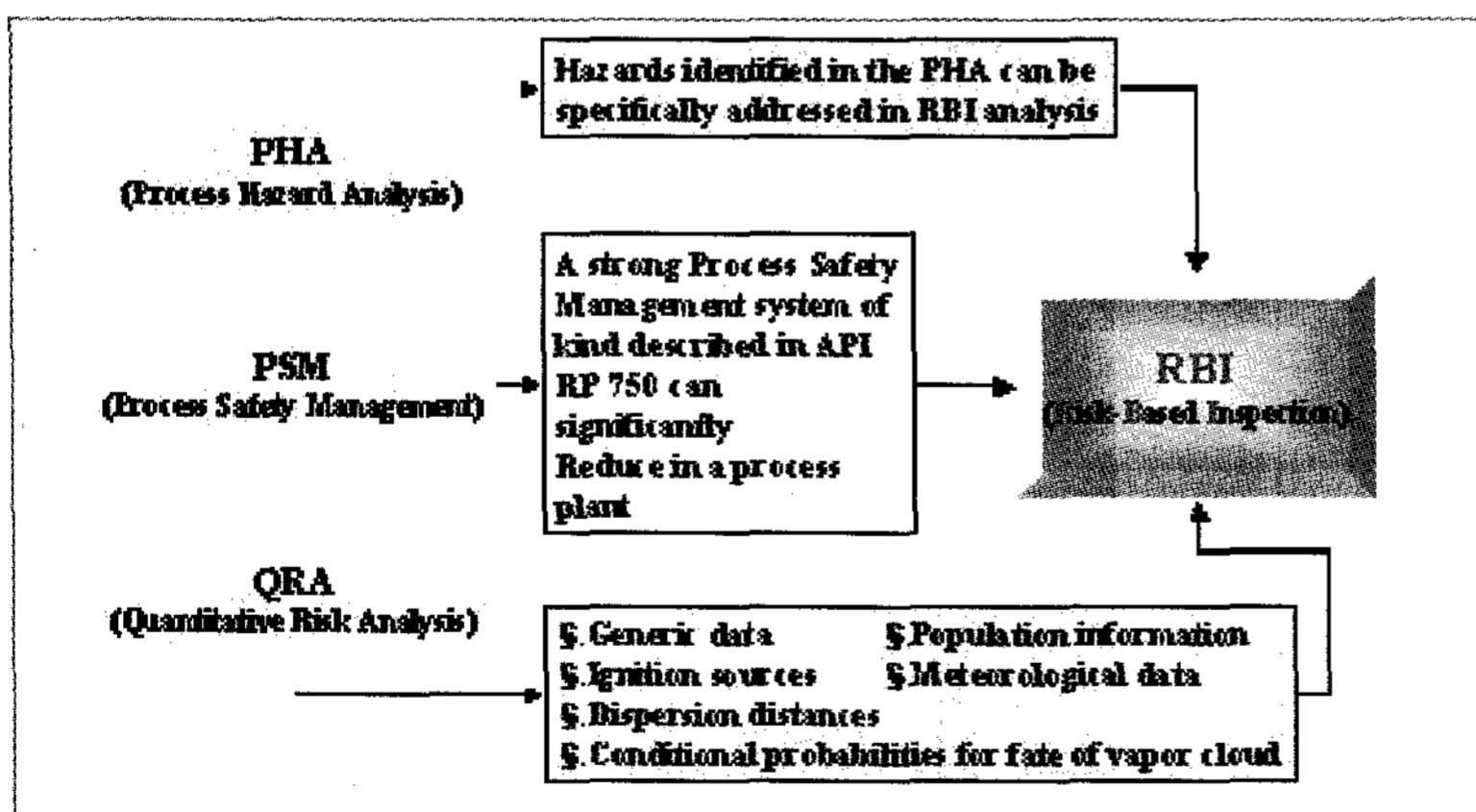


그림 4 기존의 안전관련 평가기법과 RBI와의 관계

쇄)과 API 580(2002년 5월 초 판 인쇄)의 규정집을 발간하게 되었다. 이러한 code를 바탕으로 개발한 API-RBI 프로그램을 이

용하여 각 업체내의 플랜트 평가를 수행한 결과, 안전성과 신뢰성에 극적인 향상을 보였으며 대부분의 기업에서는 매년 수백 억

원의 경비절감과 함께 생산성 향상 효과를 보이고 있다.

미국에서의 API-RBI는 1993년을 시작으로 1995년에는 Phase 1인 정성적인 평가절차가 완성되었으며, 1997년에는 Phase 2인 준정량적 평가방법이 개발되었다. 마지막 해인 1999년에 비로소 Phase 3인 정량적인 평가절차가 모두 완성되어 2000년 5월에 API 581(Risk-Based Inspection Base Resource Document)이 초판 인쇄 발간되었다.

미국의 API-RBI는 크게 다음과 같은 3단계로 구분하여 연구가 진행되었다.

1. Pilot Study : RBI 기술이 현장에 적용 가능한지를 판정하기 위해 1994년부터 계속해서 10개 이상의 공장에서 수십 개의 공정 분야별로 RBI를 시도한 결과와 경험을 축적하는 과정(OREDA; Off-shore Reliability Database)
2. RBI 프로그램 및 Damage 모듈 개발 : 현장 검사요원들도 적절하게 사용할 수 있는 손쉬운 소프트웨어를 개발함에 있어서, damage 모듈은 부식 모듈과 각 부식 형태에 따른 위험성 정도, 부식균열 모듈과 이에 따른 적절한 대응방안의 활용으로 위험도를 줄이는 옵션 개발과정
3. 위험성 분석, 재정적 위험성

모델 및 적정 검사계획의 향상  
RBI 기술은 기존의 PHA(공정 위험성 분석), PSM(공정안전관리) 및 QRA(정량적 위험성평가)를 바탕으로 하여 도출되었으며, 쉽게 설명하자면 QRA기법이 피해범위의 평가에 중점을 두는 반면 RBI는 파손확률에 보다 많은 비중을 두고 평가한다고 할 수 있다. 따라서 각 설비에 대한 QRA가 준비되어 있다면 RBI 프로그램은 이로부터 많은 부분을 이용할 수 있다. QRA와 RBI 평가에 공통으로 적용되는 정보는 ① 일반적인 데이터, ② 인구밀도, ③ 발화원, ④ 기상정보, ⑤ 확산거리, ⑥ 증기운의 상태적인 확률이다.

RBI와 기존의 검사 코드와의 관계는 API 510(압력용기 검사), API 653(저장탱크 검사) 및 API 570(배관 검사) 등의 코드 외에도 ASME의 각종 검사 절차들이 참고되었다. 또한 최근 API 581의 제정으로 이와 관련된 기존의 ASME 및 API 코드에도 위험성 평가의 내용이 개정 반영되었다. API RP750(공정 위험관리)에서는 효과적인 공정안전관리 시스템의 포괄적인 정의를 설명하고 있다. 여기엔 공정위험분석, 기계/운전 기록 및 절차의 수집, 효과적인 기기 검사 프로그램의 수행 등이 필요하다. RBI를 수행하기 위해서는 필수적으로 FFS(Fitness-for-Service, 사용적정성 평가)기법이 연계된다. FFS 절차에서는 열화속도가 보수적으로

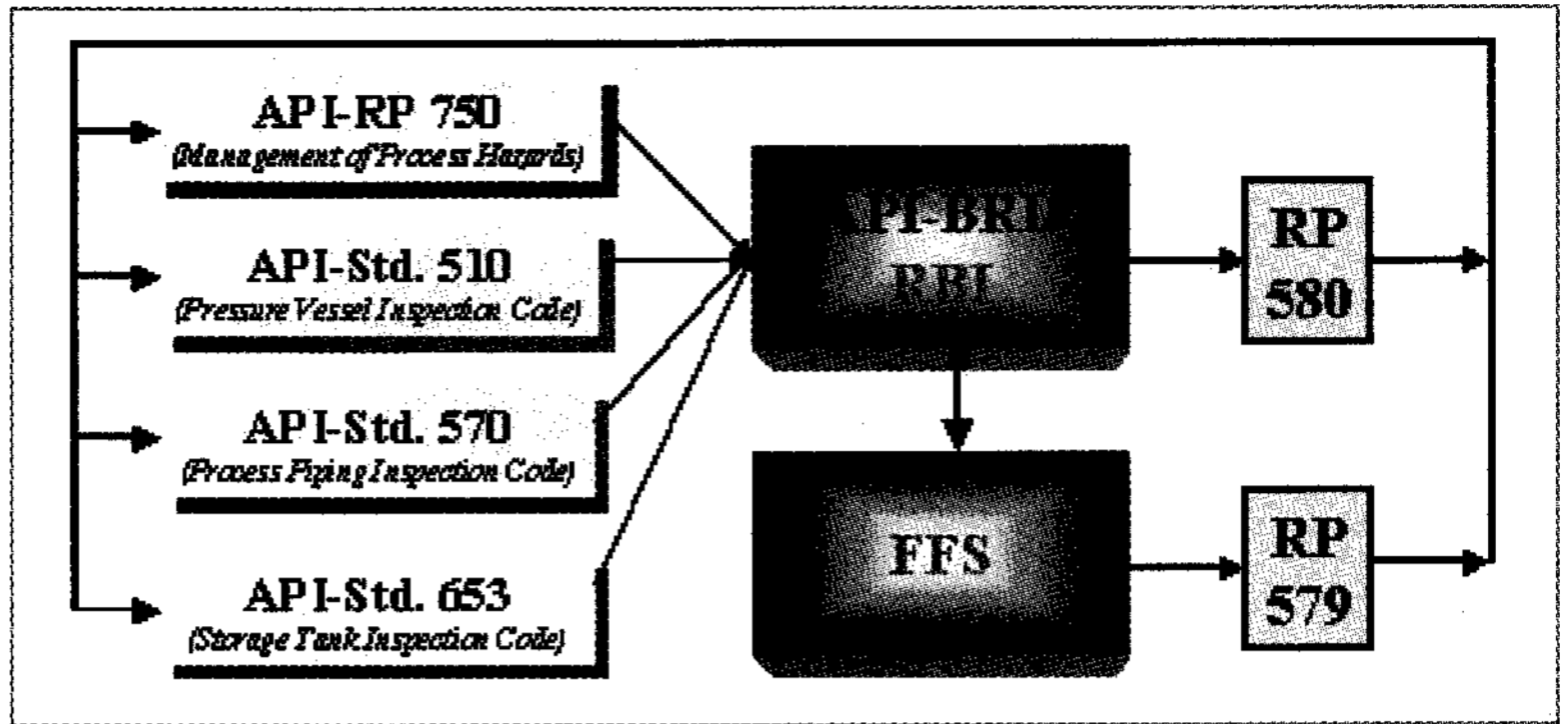


그림 5 기존의 API 검사 코드들과의 관계

계산된다. 그리고 기기가 견딜 수 있는 손상의 정도가 계산되며 예상되는 파손이 발생하기 전에 차기 검사일을 계획하게 된다. 차기 검사 시마다 실제 열화속도를 좀 더 명확하게 정의하고 열화속도에 맞추어 검사주기를 조정할 수 있다. 즉, RBI 평가는 기계적 파손과 관련된 비파괴 전공자, 재료(부식)공학 전공자 및 플랜트 공정 전반에 대한 오랜 경험과 해박한 지식을 소유한 전공자가 하나의 그룹으로 이루어진 첨단진단·평가 기술이다.

유럽에서의 RBI와 유사한 절차서 개발에 관한 진행도를 나타내고 있다. 일명 RIMAP(Risk Based Inspection and Maintenance Procedures for European Industry) Project(GROWTH Project GRD1-2000-25852 RIMAP)는 2001년 3월에 시작되어 2005년 9월에 완료된 총 54개월에 걸쳐 이루어지는 유럽연합 공동연구 과제로서 '위험성 기반의 의사결정

기술개발을 위해 유럽공동체 및 다른 국가들의 현장 작업개선을 위한 요구조건을 수용하여 보다 진일보된 진단 및 유지관리 절차서와 Program 개발'에 그 목적을 두고 있다.(그림 4, 5)

## 국내 RBI 기술개발 현황

한국가스안전공사에서는 2001년 1월부터 2002년 12월까지 2년 계획으로 '중대 산업설비의 위험등급에 따른 진단평가 기술(RBI) 개발' 선행 연구과제를 수행하여 API 581을 기반으로 한 정유플랜트용 RBI S/W를 국내 최초로 중앙대학교 윤기봉 교수팀과 공동개발에 성공하였다. API 581 Code는 정유 플랜트를 전용으로 개발한 절차서로서 초기 개발품을 현장에 1차 적용 테스트를 실시하고자 현재의 GS-Caltex 정유(주)의 CDU 플랜트에 본 프로그램을 적용하게 되었다. 그 결과, 해외의 DNV 사로부터 RBI를 적용한 결과 값과 유

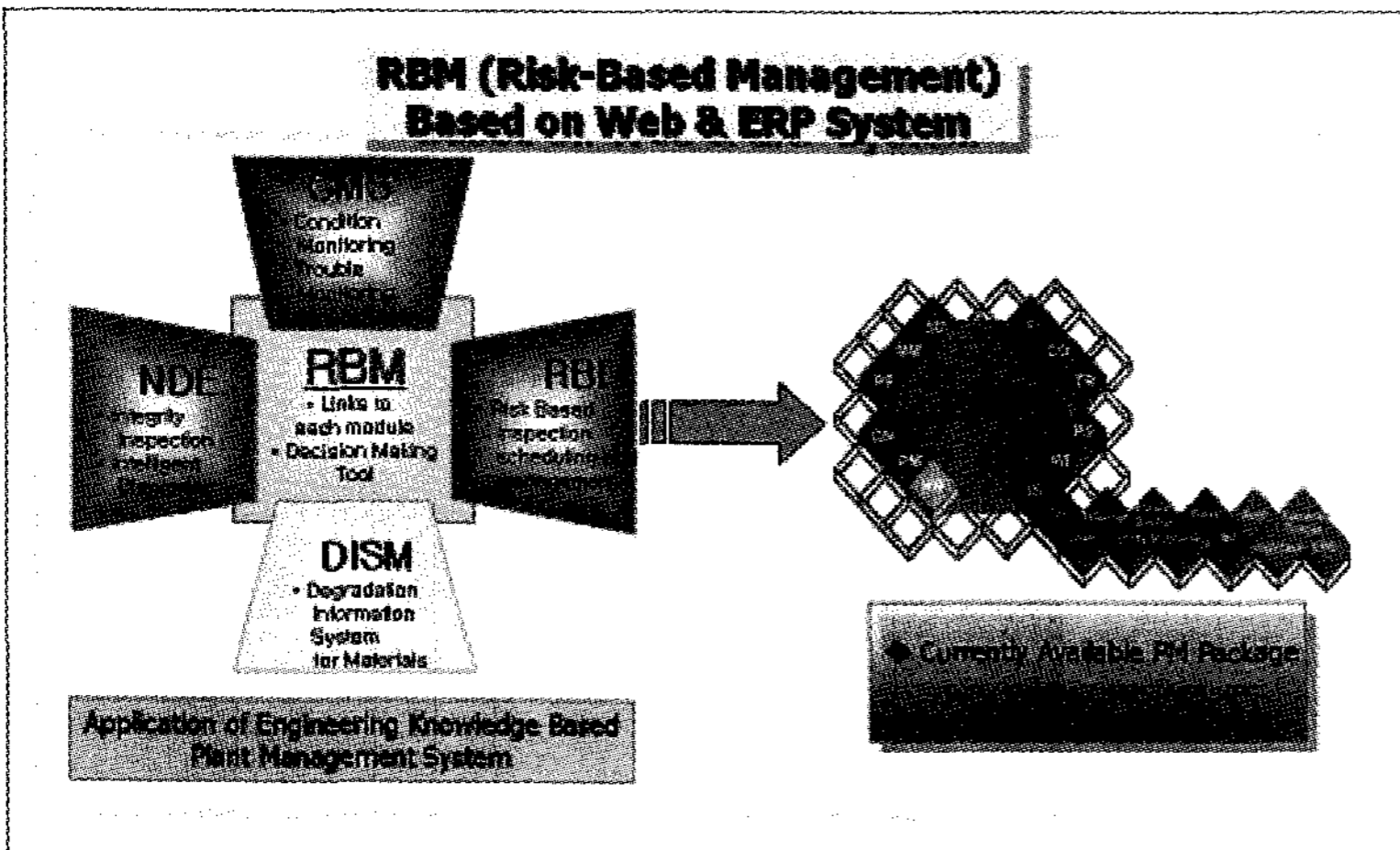


그림 6 전사적 자원관리 시스템과의 연동 구조

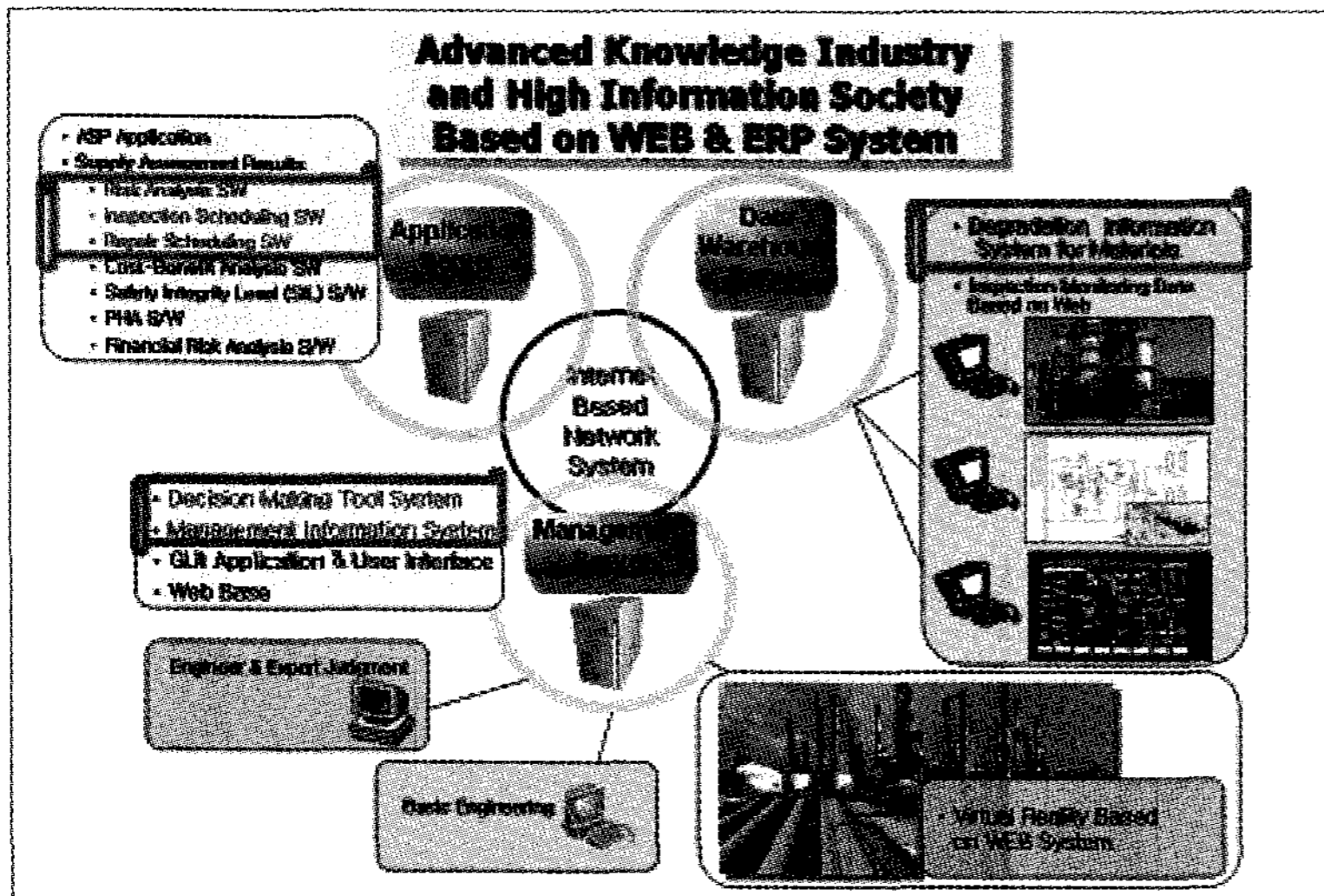


그림 7 웹 기반의 종합적 유지관리 기술

사한 위험성 평가 결과를 나타내었으나, 손상기구(damage mechanism)에서는 보다 탁월한 입·출력 기능 및 상세정보를 보다 많이 확보하고 있는 것으로 나타났으며 RBI를 수행하는 현장 종사자들로부터도 크게 호평을 받았다. 그 후 현장 적용 테스트 기간 중에 발생한 S/W의 오차를 1년간 수정·보완하였다. RBI 기

술개발은 현장의 Needs를 반영하고 학계 및 연구소의 검증을 획득하여 모두가 공감하는 현장에 필요한 기술개발의 필요성이 대두되게 되었다. 개발 중 API 581 code에 근거한 프로그램은 정유플랜트 전용으로 플랜트 내 사용되는 유체의 종류가 17가지로 한정되어 피해범위 평가에는 오차를 발생하게 된 것을 발견하

게 되었다. 따라서 2004년 1월부터 2004년 12월까지 1년간에 걸쳐 성균관대학교 기계공학부 최재봉 교수 팀과 공동으로 석유화학 플랜트에서 사용하는 유체의 종류에 따른 특성별 DB를 구축하여 KGS-RBI 프로그램과 연동하게 함으로써 피해범위(consequence) 평가에 반영이 되도록 석유화학전용 KGS-RBI 프로그램 개발에 착수하여 완료하게 되었다. 그 후 현재까지 약 10여 개의 플랜트에 RBI 시스템을 구축하였으며, 현재 업계의 지속적인 관심 속에 진행 중이다.

### RBI 기술개발 및 적용에 따른 효과

위에서 살펴본 바와 같이 RBI 기술은 현재 전 세계적으로 플랜트 산업에서의 안전과 경제적 효율성을 동시에 만족시키고자 하는 필연의 첨단 진단 평가 기술임에는 분명하다. 따라서 현재 국내 기간산업의 경우 적극적인 RBI 프로그램의 적용이 기대되어지는 것이 당연하다. 특히 해마다 계속되는 고유가 시대로 접어들면서 유지관리비와 생산비용의 절대적인 절감을 꾀함은 물론 안전에 대한 투자비 역시 간과할 수 없는 현실이기 때문이다.

RBI 구축에 따른 공장에서의 실질적인 효과를 보면 ① 고위험 장치의 집중적인 관리가 용이, ② 누출사고의 감소, ③ PM/PdM의

기본 자료로 활용, ④ 운전시간의 증가, ⑤ 검사비용의 최적화, ⑥ S/D에 따른 업무량 및 비용 절감, ⑦ Data 및 도면의 up-data, ⑧ 기존의 시간의존 검사에서 탈피한 조건 및 위험성에 근거한 검사로의 변환을 들 수 있다.

그러나 RBI 수행 시 간과해서는 안 될 점이 몇 가지 있다. 즉, 검사 노력만으로 위험도가 zero(0)가 될 수 없는 경우가 있다. ① 인적오류, ② 자연재해, ③ 외적요소(충돌이나 추락사고 등), ④ 인접한 unit에 의한 2차적인 사고, ⑤ 고의적인 행동(파업 등), ⑥ 검사방법의 근본적인 제한, ⑦ 설계오류 및 알려지지 않은 손상 기구로서 이들 중 다수는 기존의 안전성향상 계획서(SMS)에 의해 크게 영향을 받는다.

그러나 세계 4위의 석유 소비국인 우리나라의 경우, 각 플랜트에 동일한 방식으로 무분별하게 적용될 수는 없는 처지이다. 한국 실정에 적합한 데이터베이스와 사용이력에 부합함은 물론 현장 종사자들에게 가깝게 접근할 수 있는 한글화로 이루어진 평가방법도 필요하기 때문이다. 또한 해외 RBI S/W의 무분별한 도입은 지속적인 업그레이드(up-grade)에 따른 기술료 지급 문제와 그에 따른 기술종속은 회피할 수 없는 현실이다. RBI 기술은 앞에서 밝힌 바와 같이 최첨단의 지식기반 기술 사업이기 때문에 결코 단순한 S/W의 운영에 그치는

문제가 결코 아니다. 오랜 경험 및 관련 학문에 대한 깊이 있는 전문가의 평가 결과가 반영되게 되므로 해외 컨설팅 전문업체에서는 지속적인 up-grade와 관련한 유지관리 계약을 체결하여 현장의 애로사항을 해결하는 첨병의 역할을 수행하고 있다.

최근에는 LNG, Offshore 플랜트 및 지하매설 가스배관에 대하여 RBI 평가를 많이 수행하고 있다. 또한 기업 내 전사적 자원 관리(ERP; Enterprise Resource Planing)시스템과 연계하여 설비관리 시스템[EAM(Enterprise Asset Management), CMMS(Computerized Maintenance Management System)] 등을 확대 적용하여 플랜트 자산의 비용-편익분석에 따른 안전 투자가치의 효용성을 증대시키는 RBM 기술로 전환하고 있는 실정이다. 결국 플랜트 분야의 비파괴 진단기술과의 접목과 ERP를 바탕으로 한 Web 기반의 설비 열화정보 시스템을 연계한 통합형 안전진단 솔루션을 제공할 수 있는 최첨단의 진단평가 프로그램을 개발하려는 계획으로 추진하고 있으며, 초기의 시스템 구축뿐만 아니라 운전 및 유지관리(O&M; Operating and Maintenance)기술을 더욱 개발하여 일체형 종합관리 시스템이 필요하다. 현재까지는 정유 및 석유화학 플랜트 설비에서 발생할 수 있는 설비별 열화기구에

대하여 API 571(고정설비 열화기구) code 및 ASME PCS를 바탕으로 2005년 1월부터 2006년 12월까지 중앙대학교 윤기봉 교수팀과 함께 2년간 '위험설비 재열화 진단 정보 프로그램'을 개발하였다. 이러한 탁월한 진단 정보 프로그램과 현재의 KGS-RBI 프로그램 및 비파괴 검사기술을 접목한 Web 기반의 자산 건전성/진단평가 및 유지관리 프로그램인 RBM 기술을 2007년부터 2009년까지 3개년 계획으로 개발하고 있다. 특히 국내의 플랜트산업뿐만 아니라 해외 플랜트기술 수출과 동반하여 해외 선진국과 비교하여 어깨를 겨룰 수 있는 설비 및 자산관리 기술 개발에 그 목적을 두고 있다. 석유화학 산업 등 중화학 공업은 중국 및 인도 등과 같은 거대 공룡국가들의 추격을 피할 수 없는 현실에서 앞날의 기술 로드맵을 구성해 볼 때 과연 어떤 기술력으로 경쟁과 생존에서 우위를 차지할 수 있을 것인가를 분명히 짚고 넘어가야 할 기로에 서 있다고 할 수 있다. 그렇다면 우리의 강점인 IT 기술을 기반으로 플랜트 분야의 운영관리 기술 분야에 박차를 가할 때 국제 경쟁력은 물론 국내 설비의 투자 효율성도 극대화시킬 수 있으리라 생각한다.(그림 6, 7)