

API RP 581 Code를 기반으로한 LNG 플랜트의 Risk-Based Inspection(RBI) 기술 개발

최 송 천[†] · 최 재 봉¹ · 황 인 주²

한국가스안전공사 가스안전연구원, ¹성균관대학교 기계공학부, ²한국건설기술연구원
(2012년 4월 26일 접수, 2012년 10월 16일 수정, 2012년 10월 16일 채택)

Development of Risk-Based Inspection(RBI) Technology for LNG Plant Based on API RP581 Code

Song-Chun Choi[†], Jae-Boong Choi¹, and In-Ju Hawang²

Korea Gas Safety Corporation, Institute of Gas Safety R&D, Siheung 429-712, Korea

¹School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 440-746, Korea

²Korea Institute of Construction Technology, Ilsan 411-712, Korea

(Received April 26, 2012; Revised October 16, 2012; Accepted October 16, 2012)

As one of promising solutions to overcome high oil price and energy crisis, the construction market of high value-added LNG plants is spotlighted world widely. The purpose of this study is to introduce LNG-RBI system to develop risk assessment technology with RAM(Reliability, Availability, Maintainability) modules against overseas monopolization. After analyzing relevant specific features and their technical levels, risk assessment program, non-destructive reliability evaluation strategy and safety criteria unification class are derived as core technologies. These IT-based convergence technologies can be used for enhancement of LNG plant efficiency, in which the modular parts are related to a system with artificial optimized algorithms as well as diverse databases of facility inspection and diagnosis fields.

Keywords : information technology, LNG plant, reliability, risk based inspection, risk assessment

1. 서 론

세계적인 에너지 위기 및 고유가를 극복하기 위해 고 부가가치의 LNG 플랜트 건설시장이 최근 해외 건설시장에서 각광을 받고 있다. LNG 플랜트의 경우 다른 중요 기간산업 설비와 마찬가지로 설계시부터 안전성이 확보되어야 하므로, 해외 선진기업은 안전성 평가 전문기업으로부터 고액의 컨설팅을 받아 시공, 관리, 운영 등을 수행하고 있다.¹⁾ 본 연구의 목적은 LNG 플랜트의 위험도기반 진단기술(Risk Based Inspection: RBI) 평가 기술에 대한 현재까지의 개발 현황을 소개하기 위한 것으로써, LNG 플랜트 설비 및 배관 계통도에 대하여 API RP 581 Code를 기반으로 인공지능을 내재한 웹기반의 최적화 위험도평가 모듈을 개발하여 RAM(Reliability, Availability, Maintainability) 기반의 LNG 플랜트 모듈화 기술에 접목시키고자 한다. 이를 위해 엔지니어링 효율성 개선기술과 연계하여 운전 전후 및 유지관리를 위한 검사·진단 분야에서도 활용할 수 있도록 시스템

를 구축하기 위한 LNG-RBI 시스템의 소프트웨어에 대한 기본 설계 내용을 소개하고자 한다.

2. Risk 개념 정의 및 적용 분야

위험요소(hazard)는 사람, 재산 또는 환경에 피해를 미칠 수 있는 잠재성을 가진 고유한 물리적, 화학적 특성을 말한다. 위험도(risk)는 어떠한 기회에 의해서 사람 또는 설비에 손상을 입히는 데 원인이 되는 잠재적인 위험성 또는 유해성이 사고로 이어질 수 있는 빈도(frequency)와 사고결과(consequence)의 곱으로 이루어지는 시나리오 시스템으로 정의된다.²⁾ 또한 신뢰성(reliability)은 주어진 시간 내에 파손이 발생하지 않을 확률을 의미하며, 유지관리성(maintainability)은 주어진 시간 내에 보수·수리를 수행할 확률을 의미한다고 할 수 있다.

위험도 기반의 진단 및 관리(Risk-Based Inspection & Management: RBIM) 기술은 기존의 시간에 기초한 검사와는 달리 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 개개의 설비와 관련된 위험도를 파손확률(likelihood of failure: LOF)과 피해결

[†] Corresponding author: scchoi@kgs.or.kr

과(consequence of failure: COF)에 의해 측정 가능한 손실비용(Risk=LOF×COF)으로 계량화함으로써, 잠재적으로 위험도가 높은 설비에 초점을 집중하여 검사 및 보수 우선순위를 결정하는 기술이다. 특히, RBI 기술은 압력용기를 포함하여 pump seal 부분의 파손까지도 포함하고 있다.³⁾ 또한 검사의 우선순위를 결정함으로써 산업현장에서 고 위험군에 속하는 장치에 대하여 집중적인 검사기법을 제공함은 물론 손상에 따른 메카니즘을 제공하여 효율적인 검사와 함께 검사비용의 절감을 꾀할 수 있다.⁴⁾

이는 RAM기반의 LNG 플랜트 모듈화를 위한 핵심사항의 하나이며, 전체 설비계통에 대한 정성적·정량적 위험도 지수를 평가하고 각 설비에 대한 안전지수를 산정하여 저비용 고효율의 안전관리 시스템을 구축하는 진단 및 관리 기술로 정의할 수 있다. 즉, LNG 플랜트에서 존재하는 상시 위험성에 대한 정량적인 시스템 위험도 평가 및 비파괴평가 시스템을 구축한 후 인공지능 미들웨어를 탑재하고 Enterprise resource planning(ERP) 시스템과 연동이 가능하도록 엔지니어링 요소기술 및 핵심인자를 제공함으로써, 대형사고 예방 및 에너지 자원의 안정적 공급을 도모할 수 있는 필수적 기술이라 할 수 있다.

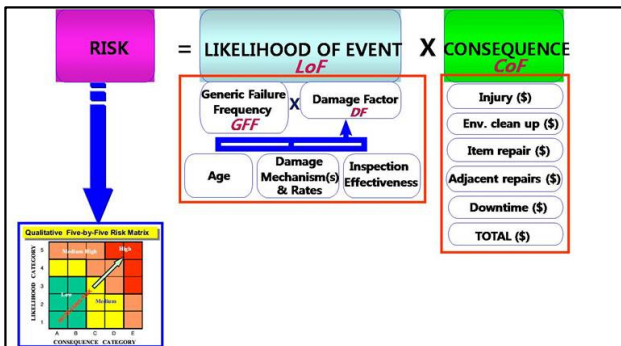


Fig. 1. Definition of risk.

3. LNG 플랜트의 파손확률 및 피해영향 평가 모델

LNG플랜트에 대한 고정장치(압력용기, 배관, 드럼, 열교환기, 타워 등)에 대한 위험성 평가를 위해서는 우선 장치의 파손확률($P_f(t)$)을 계산하여야 한다. 이 경우 API Code에서 제시하고 있는 일반파손빈도(gff)와 손상인자($D_f(t)$) 및 경영평가인자(F_{MS})를 곱하여 파손확률을 계산할 수 있다. 일반파손빈도는 전 세계 석유화학 업계에서 축적된 데이터를 근거로 하여 American Petroleum Institute(API)에서 수집한 자료를 바탕으로 Code에 반영하였으며, 손상인자는 아래의 Table 1과 같이 총 21개로 구성되어 있다.

Fig. 1에서 제시된 바와같이 API 581 RP Code에서 기술하는 위험도 평가를 위한 플랜트내의 파손확률은 아래의 식(1)로 표현된다.⁵⁾

$$P_f(t) = gff \cdot D_f(t) \cdot F_{MS} \quad (1)$$

$P_f(t)$: Probability of failure

gff : Generic failure frequency

$D_f(t)$: Damage factor

F_{MS} : management system factor

위험성 기반 진단 기술에서 파손확률을 평가할 경우 개정된 API RP 581 Code에서는 기존의 API BRD 581 Code에서 제시된 Technical Module Subfactor의 Furnace Tube 항목이 삭제되어 있다.

특히 두께감육의 경우에는 국부부식과 전면부식으로 구분할 수가 있으며, 손상기구별 부식의 전체값은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

◆ Damage Factor Combination for Multiple Damage Mechanism

- Local Thinning : $D_{f-total} = \max \{ D_{f-gov}^{thin}, D_{f-gov}^{entail} \} + D_{f-gov}^{inc} + D_f^{alka} + D_f^{brit} + D_f^{fat}$
- General Thinning : $D_{f-total} = D_{f-gov}^{thin} + D_{f-gov}^{entail} + D_{f-gov}^{inc} + D_f^{alka} + D_{f-gov}^{brit} + D_f^{fat}$

특히, LNG 플랜트의 경우에는 저온 운전조건으로 단열재

Table 1. Damage Factor for Evaluation of Probability of Failure

Damage Factor		
Thinning	SCC-PTA Cracking	External CUI CLSCC -Austenitic Component
Component Lining	SCC-CLSCC	HTHA(High Temp. Hydrogen Attack)
SCC-Caustic Cracking	SCC-HSC-HF	Brittle Fracture
SCC-Amine Cracking	SCC-HIC/SOHIC-HF	Temper Embrittlement
SCC-Sulfide Stress Cracking	External Corrosion-Ferritic Component	885 Embrittlement
SCC-HIC/SOHIC-H ₂ S	CUI-Ferritic Component	Sigma Phase Embrittlement
SCC-Carbonate Cracking	External CLSCC-Austenitic Component	Piping Mechanical Fatigue

가 배관이나 기계장치에 적용되어 지며, cyclic operation 및 idle상태에서도 단열재에 의한 하부부식(Corrosion under insulation, CUI)이 발생한다. 따라서 파손확률 평가에서도 손상인자에 Table 1에서와 같이 외부손상 인자 중에서 탄소강 계통과 같은 ferritic component와 Austenite stainless의 CUI에 의한 염소응력부식균열(CLSCC)이 나타난다. 이러한 Damage Factor를 근거하여 LNG 플랜트의 각 핵심장치별 손상기구를 VR시스템과 연동하여 Fig. 2에 각 손상기구에 대한 평가 결과를 나타낼 수 있도록 손상기구별 coloring을 도입하여 3차원 플랜트 설계도면에 따른 Damage Factor Module을 설계하였다. 따라서, 이러한 장치의 손상정보를 바탕으로 향후 검사계획 및 검사 모니터링 시스템과도 연동하여 안전관리를 수행할 수 있을 것이다. 또한, 피해 영향 평가 모듈은 아래의 식 (2)로 표현된다. 이 경우 대표 운전물질은 API Code에서 대표값으로 선택할 수 있으며, 누출속도는 압력과 함께 누출 hole size(1/4", 1", 4", rupture)에 관계한다.

$$CA = a \cdot X^b \quad (2)$$

CA : Consequence area

a, b : reference fluid based on API RP 581 Part 3, Table 5.8-5.9

X : Release rate

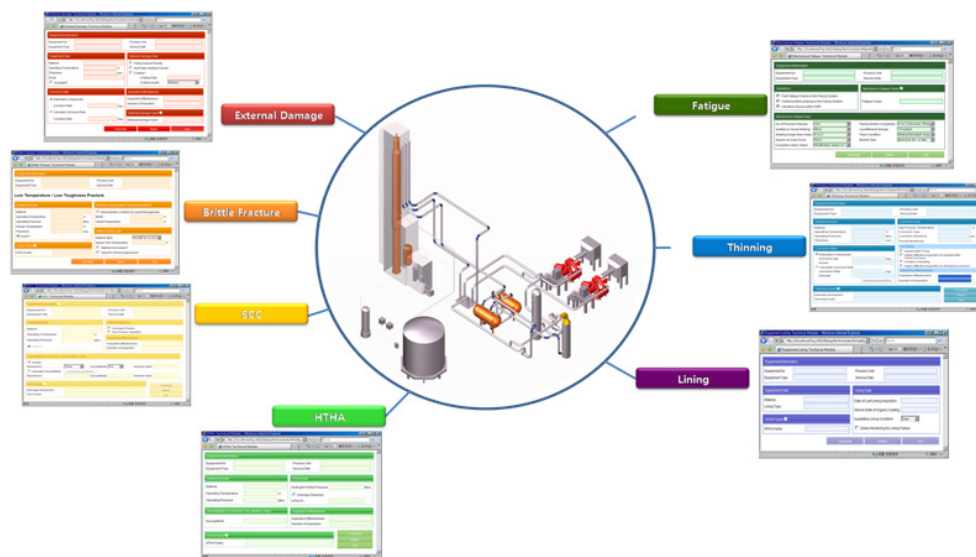


Fig. 2. Design of Damage Factor Modules.

4. LNG 플랜트 운전 및 관리시스템을 탑재한 LNG-RBI 구조

Fig. 3은 LNG 플랜트 시스템의 위험도평가 소프트웨어를 위한 기본 개념설계를 통한 계층구조를 나타낸 것이다. User interface layer (UIL)는 Virtual Reality (VR)와 연계한 Graphic User Interface(GUI)를 제공하고 있으며, Application layer는 Business logic로 처리하고 Data-base layer는 data의 저장 및 '가져오기' 구조로 이루어져 있다.

Fig. 4에는 LNG-RBI 소프트웨어의 메인화면과 내부 평가 모듈을 나타내고 있으며, 정성적 및 정량적 평가로 구성되어 그 결과값에 근거하여 검사계획을 수립할 수 있도록 하였다.

Fig. 5의 (a)는 정성적 위험도평가 모듈과 함께 VR 플랜

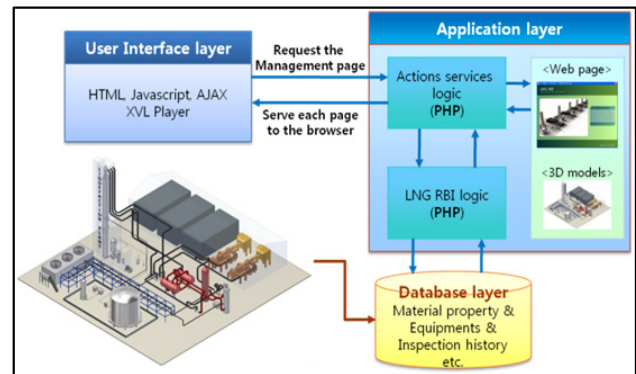


Fig. 3. The three-tier architecture of LNG-RBI S/W.

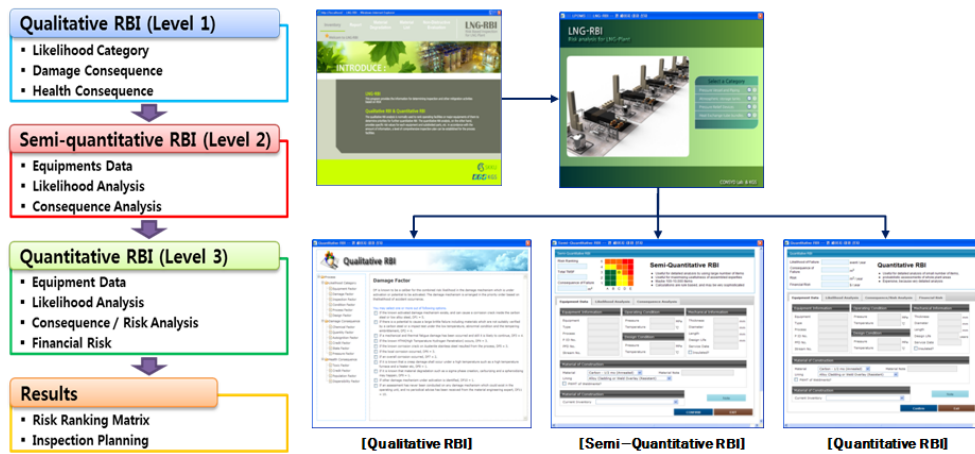


Fig. 4. Development of algorithm for LNG-RBI S/W.

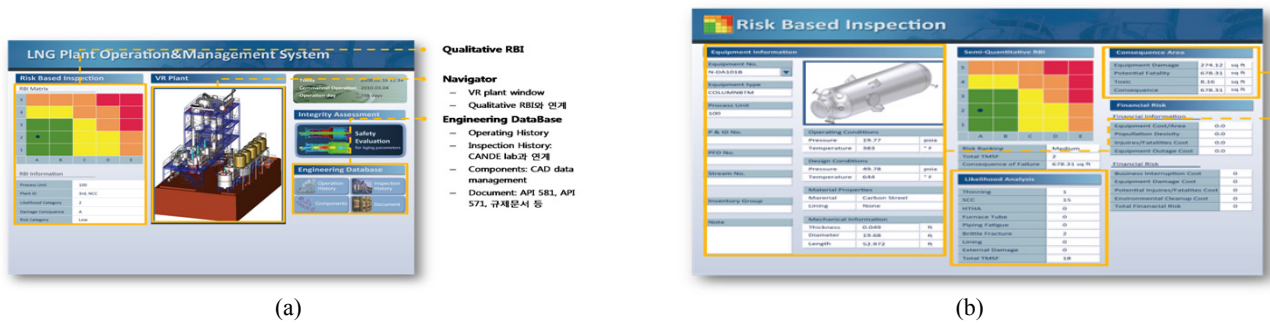


Fig. 5. Development of Operation & Management system LNG- RBI.

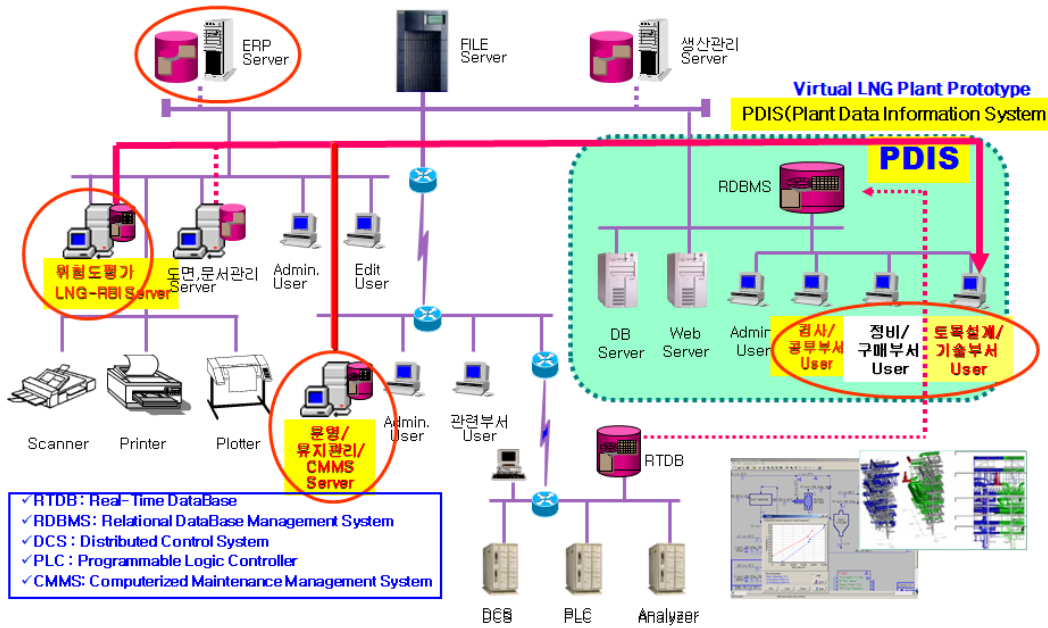


Fig. 6. System Configuration of Risk-Based Management for LNG Plant.

트의 Navigator 기능을 탑재한 평가 모듈을 보여주며, (b)에는 정량적 평가모듈내 핵심설비의 설계도면을 통한 파손 확률/피해범위 및 운전과 장치정보를 전체화면에 보여주고 있다. 정량적 위험성 평가 기법은 장치정보, 검사기록 및 유지관리정보 뿐만 아니라 플랜트 공정의 기계적 건전성과 안전 전반에 다양한 공정안전 관리에 영향을 미친다.⁶⁾

Fig. 6에는 본 연구에서 개발된 LNG-RBI 시스템을 플랜트의 메인 서버와 연결하여 ERP 시스템에 적용이 가능하도록 Module을 설계하였다. 즉, 통합정보관리 시스템에 LNG-RBI Module을 탑재함에 따라 각 장치별 위험요소와 함께 핵심장치의 부식 및 손상원인을 평가하고 그에 따른 피해 확산범위를 추정하여 정량적인 위험성 평가를 통한 대형 사고예방 및 안전관리를 수행할 예정이다.

5. 결 론

API 581 RP code에 기반하여 LNG 플랜트의 위험성 평가를 위한 정성적/정량적 평가 모듈을 개발하고 그에 따른 진단·검사를 위한 정량적인 지수 및 관리 방안을 제시하여, IT 기술 접목에 따른 저비용 고효율의 안전관리 시스템인 LNG-RBI를 구축하기 위한 소프트웨어 기본설계를 완성하였다.

특히, 위험도평가 모듈과 함께 VR플랜트의 Navigator 기능을 탑재한 손상기구별 평가 모듈을 설계하였으며, 정량적

평가모듈내 핵심설비의 설계도면을 통한 파손확률/피해범위 및 운전과 장치정보를 제공하고자 하였다. 특히, 현재 건설 중에 있는 LNG 플랜트 테스트베드에 본 연구결과물을 적용하여 신뢰성을 확보하고 이를 통하여 LNG 플랜트 건설, 증설 및 유지관리를 위한 첨단 안전시스템을 구축함으로써 IT기반의 위험성 평가기술의 해외 수출에 기여하고자 한다.

후 기

본 연구는 국토해양부 LNG플랜트사업단의 연구지원비에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. Ministry of Knowledge Economy, Road Map of Technology for Plant Engineering (2005).
2. API, *API BRD 581*, American Petroleum Institute, Washington, D. C. (2000).
3. J. T. Reynolds, *ASME PVP*, **336**, 125 (1996).
4. G. Alvarado, L. Kaley, and R. R. Valbuena, *CORROSION 99, NACE International*, No. 388 (1999).
5. API, *API RP 581*, American Petroleum Institute, Washington, D. C. (2008).
6. J. T. Reynolds, *CORROSION 2000, NACE International*, No. **00690** (2000).