

LNG 플랜트 공정시스템의 실패율이 가용도에 미치는 영향에 관한 연구

강 경 원, 윤 명 오, 이 홍 철*, 황 인 주*[†]
서울시립대학교 재난과학과, *한국건설기술연구원 설비플랜트연구실

A Study on the Availability with Failure Rate of Process for LNG Plant

Kyung-Won Kang, Myung-O Yoon, Hong-Cheol Lee*, In-Ju Hwang*[†]

Dept. of Disaster Science, University of Seoul, Seoul 140-734, Korea

*Plant Research Div., Korea Institute of Construction Technology, Goyang 411-712, Korea

(Received October 17, 2011; revision received February 6, 2012)

ABSTRACT: The simulation investigation on the availability of LNG plant with scenario of failure events and failure rate has been carried out. This study focuses on the availability, productivity, criticality induced by failure rate of major equipment. The methodologies for simulation such as the equipment classification of LNG plant and failure type and event schematic are established. The availability and mean time to repair have second order function profile in the all cases except general equipment, but these profiles have different inclination. The production and criticality of the specified LNG plant, simulated by Monte-Carlo algorithm, is located in the range of $P = 86 \sim 92\%$ and $PL = 6 \sim 13\%$.

Key words: Risk(위험도), Availability(가용도), LNG(액화천연가스), Plant(플랜트)

기 호 설 명

A : Availability [%]
 F_s : variation of failure rate
 M : Maintainability [%]
 $MTBF$: Mean time between failures [h]
 $MTTR$: Mean time to repair [h]
 P : Production efficiency [%]
 PL : Production loss [%]
 R : Reliability [%]
 t : Repair time [h]

그 리 스 문 자

λ : Failure rate

하첨자

p : parallel
 s : series

1. 서 론

최근 에너지자원의 개발이 가속화되고 있으며, 석유계에 비하여 비교적 청정연료로 인식되고 있는 가스전 개발이 증가하고 있다.

이러한 가스플랜트는 작동 중에 누설, 점화, 부식, 침착 등 공정시스템상에서 다양한 위험요인을 보이며, 특히 유틸리티의 공급과 처리를 위한 시설의 대형화에 따라 사고나 기능 상실 등 위험도 또한 크게 증가하여 기능유지를 위한 안정성과 신뢰성 확보가 매우 중요시되고 있다.⁽¹⁾

대규모 가스플랜트 시스템의 운영에 있어서 생산성

[†] Corresponding author

Tel.: +82-31-910-0492; fax: +82-31-910-0246

E-mail address: ijhwang@kict.re.kr

이 주요한 설계 이슈로 자리하고 있으며, 이에 큰 영향을 미치는 가용도(availability)의 평가가 설계에서 차지하는 비중이 증가하고 있다.

본 논문과 관련된 주요 선행연구로는 Bosman⁽²⁾이 LNG 플랜트를 대상으로 가용도를 평가한 바가 있으며, Chang et al.⁽³⁾은 LNG 운반선을 대상으로 신뢰성을 평가한 바가 있다.

Lee and Hwang et al.^(1, 4)은 천연가스 액화계통을 대상으로 RAM(reliability, availability, maintainability) 성능해석을 위한 해석기법의 타당성과 이에 미치는 영향인자 평가에 대한 연구를 시도한 바 있다.

이러한 플랜트 공정시스템의 위험도나 가용도, 생산성 등에 관한 연구 또는 실적은 선진기업에서 노하우나 데이터베이스 형태로 보유하고 있어 범용적인 활용이 부족한 실정이다.

이에 본 논문에서는 LNG 플랜트 공정시스템의 실패율이 가용도에 미치는 영향을 분석할 수 있는 해석 모델을 정립하고, 해석기법 및 시나리오를 제시하고, 민감도 분석 및 평가를 통하여 적용성 가능성을 파악하였다.

2. 해석모델 및 방법론

2.1 해석대상

본 논문에서 해석 대상으로 하고 있는 LNG 플랜트 공정시스템은 Fig. 1에 도시되어 있으며, 주요 공정은 C3MR 액화공정을 기본으로 Table 1과 같은 세부구성요소를 갖는다.

2.2 가용도 해석기법

플랜트의 가용도는 Fig. 2에 도시한 바와 같이 이상적으로 잠재적 운전이 가능한 시간과 주어진 환

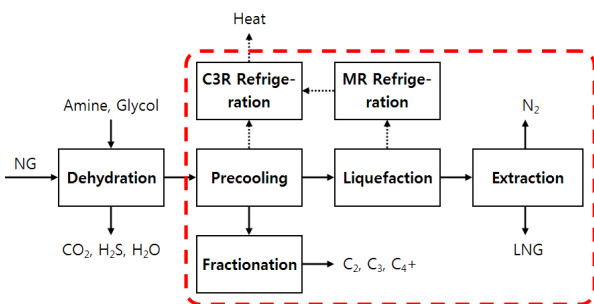


Fig. 1 Schematic diagram of typical process of LNG plant.

Table 1 Equipment classification of LNG plant

Reciprocating compressor
◦ N2 compressor
Centrifugal compressor
◦ C3/MR compressor
Flash drum
◦ Mixing drum
◦ Scrub column reflux drum
◦ De-ethanizer/De-propanizer reflux drum
◦ LPG separator
◦ MR compressor 1st/2nd/3rd suction drum
◦ C3 LLP/LP/MP/HP compressor suction drum
◦ LPG/HP MR separator
◦ C3 accumulator
◦ N2 stripper column
Vessel/Column
◦ Scrub column
◦ De-ethanizer/De-propanizer
Separator
◦ C2/C3 refrigerant tank
Cryogenic HX
◦ Main cryogenic heat exchanger
Evaporator/Condenser
◦ Feed gas MP/LP evaporator
◦ Scrub column OVHD condenser
◦ De-ethanizer/De-propanizer OVHD condenser
◦ Re-injection/LLP C3 evaporator
◦ HP MR-HP/MP/LP/LLP
◦ C3 condenser/C3 sub-cooler
◦ Flash gas exchanger
◦ C3 vaporizer
Fan-fin cooler
◦ MR compressor 1st/2nd/3rd after cooler
◦ C3 compressor de-superheater
◦ C2 vaporizer
Electric reboiler/heater
◦ Defrost heater
◦ Scrub column re-boiler
◦ De-ethanizer/De-propanizer reboiler
Electric pump
◦ Scrub column reflux pump
◦ De-ethanizer/De-propanizer reflux pump
◦ Butane/LPG recycle pump/LNG export pump
◦ C3 refrigerant pump
Power generation
◦ Gas turbine power generator
◦ Diesel engine power generator
Miscellaneous equipments
◦ Flow/Level/Temp./Press. indicator
◦ Control V/V, Anti surge V/V

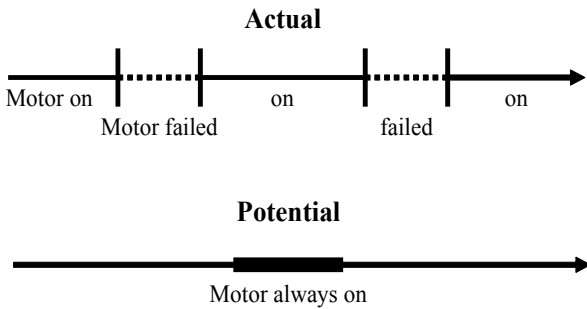


Fig. 2 The concept of availability.

경과 운전조건 하에서 확률적인 신뢰성 및 보전성을 고려하여 실제 운전되는 시간과의 비로 정의된다.

이러한 개념을 이용하면 잠재적인 운전시간은 평균고장간격 MTBF(mean time between failures)와 평균 수리시간 MTTR(mean time to repair)의 합으로 계산될 수 있으며, 가용도는 식(1)과 같이 상관관계를 나타낼 수 있다.

신뢰성은 확률적인 개념으로 식(2)와 같이 시간당 고장건수인 실패율(λ)의 함수로 정의할 수 있으며, 고장이 일어나는 평균적인 시간간격은 식(3)과 같이 실패율의 역수로 계산된다.

$$Availability = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (1)$$

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (2)$$

$$MTBF = \frac{1}{\lambda} \quad (3)$$

플랜트 시스템은 기자재나 단위공정 등이 복잡하게 구성되며, 이러한 시스템 구성은 기능과 용량, 성능 등을 고려하여 직렬(series)형과 병렬(parallel)형, 이들의 조합(combination)형을 구현하기도 한다.

식(4)는 직렬로 연결되는 단위기기나 공정의 신뢰성을 연결되는 기자재에 대응되는 해당 신뢰도를 곱하여 산출하는 방식이며, 식(5)는 병렬로 연결된 시스템의 신뢰도를 산출하는 식이다.

$$R_S = \prod_{i=1}^n R_i \quad (4)$$

$$R_P = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i) \quad (5)$$

상기와 같은 기초 방정식을 이용하여 복잡한 시스템의 가용도를 연속적으로 모사하기 위해서는 영향인자인 실패율, 고장간격, 보수시간 등 경계조건

을 정의를 하여야 하며 본 논문에서는 Fig. 3과 같이 도식화하여 활용하였다.

플랜트는 수많은 장치류, 단위공정, 기자재 등으로 구성되므로 다양한 형태의 실패현상과 수리기간 등을 가지므로 근본적으로 불확실성(uncertainty)을 내포하고 있다.

이러한 불확실성을 반영하기 위해서는 시스템에서 일어날 수 있는 다양한 조합을 가정하여야 하며, 본 논문에서는 Fig. 4에 도시한 바와 같이 무작위적인 이벤트, 작위적인 이벤트, 조합형 등 세 가지 유형의 이벤트 스케줄을 가정하였다.

대규모 플랜트의 속성상 수많은 이벤트와 스케줄이 가정될 수 있으며, 이를 효과적으로 모사하고 해를 구하기 위해서는 해석적인 방법보다는 컴퓨터를 이용한 반복적인 연산기법의 적용이 효과적이다.

이에 본 논문에서는 상기 수식과 이벤트 스케줄을 토대로 계산된 결과가 정해진 확률분포의 범위로 수렴할 때까지 반복적인 연산을 수행하는 Monte-Carlo simulation을 적용하였다.

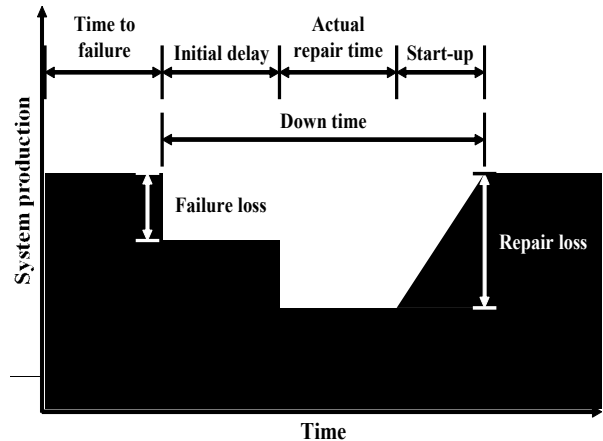


Fig. 3 Event schematic for simulation.

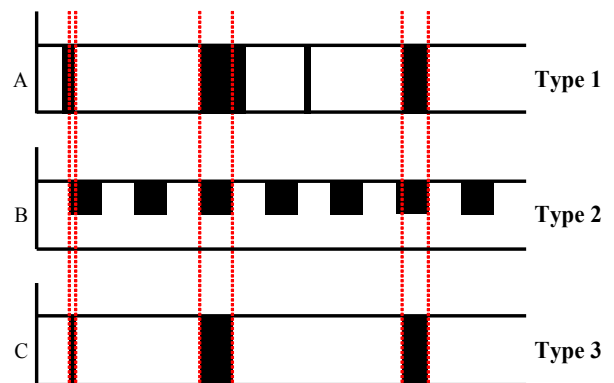


Fig. 4 Basic types of failure event.

2.3 해석방법 및 조건

Monte-Carlo 시뮬레이션 기법을 이용한 가용도 평가 및 개선에 관한 로직을 Fig. 5와 같이 정형화 하였으며, 세부적인 알고리즘을 이용하여 상용프로그램 (Microsoft Excel) 상에서 연산과정을 구현하였다.

본 논문에서 구현한 방법론은 Lee and Hwang⁽⁴⁾이 선행연구를 통하여 신뢰성을 평가한 바 있으며, 시스템의 용량, 기자재의 실패율 데이터, 위험률 합수 등에 대하여 해석결과를 상용도구와 비교하여 최대 3.51%의 범위에서 안정적으로 사용할 수 있음을 확인한 바 있다.

이러한 방법을 본 연구에도 적용하였으며, 발생 가능한 모든 상황을 검토하기 위하여 각각의 경우에 250회 반복 수행을 통하여 일정한 확률분포의 범위로 수렴하도록 하였다. 정규확률분포로 도시된 가용도 해석결과는 95% 신뢰수준에서 ±0.3% 오차범위를 보였다.

세부적인 수행절차는 Fig. 5에 도시하였으며, 운전 초기에는 정상상태(100%)로 가정되고 발생한 난수가 해당 장치 및 조건별 발생하는 운전오류에 대한 확률에 부합되는 경우 Fig. 3과 같이 초기조치시간, 수리시간, 시운전시간 등 다운타임(downtime) 기간 동안의 운전을 감소량이 정상상태에 반영된다.

장치별, 운전 오류 형태별 운전율은 생애주기 동안 검토되며, 절차에 따라 장치별 정기적 유지보수계획에 의한 다운타임이 추가로 DB에 임시 저장된다.

이상과 같은 대상, 해석모델 및 기법을 이용하여

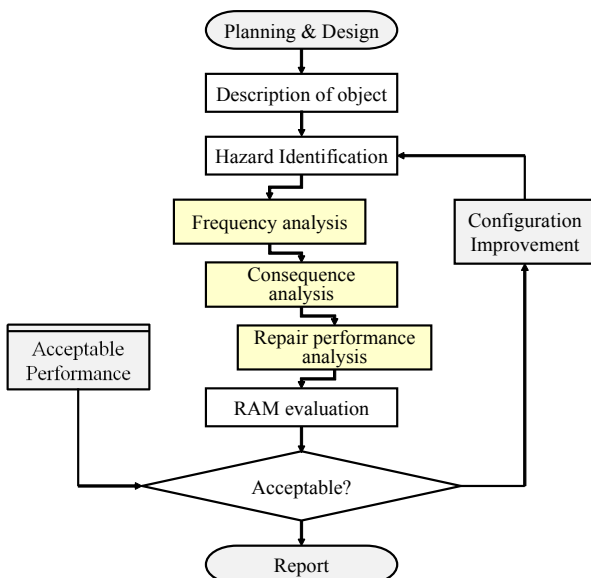


Fig. 5 The procedure of RAM evaluation.

연산과정을 구현하였으며, 이에 입력되는 초기값은 Table 2에 나타내었다.

Table 2 The equipment data of LNG process

Equipment	Failure rate (#/10 ⁶ h)	MTTR (h)	Remarks
Compressor	1038.22	6.00	Reciprocating
Compressor	479.86	23.00	Centrifugal
Gas turbine	966.87	28.00	
Turbine generator	75.26	24.00	
Diesel engine generator	24.13	43.00	
Flash drum	195.43	4.90	
Vessel	151.67	9.70	
Column	151.67	9.70	
Separator	250.41	2.40	
Refrigerant tank	250.41	2.40	
Cryogenic HX	10.15	336.00	
Fan-fin cooler	98.21	4.00	
Compressor	1038.22	6.00	Reciprocating
Compressor	479.86	23.00	Centrifugal
Gas turbine	966.87	28.00	
Turbine generator	75.26	24.00	
Diesel engine generator	24.13	43.00	
Flash drum	195.43	4.90	
Vessel	151.67	9.70	
Column	151.67	9.70	
Separator	250.41	2.40	
Refrigerant tank	250.41	2.40	
Cryogenic HX	10.15	336.00	
Fan-fin cooler	98.21	4.00	
Evaporator	10.15	1.50	
Condenser	10.15	1.50	
Re-boiler, Heater	74.21	2.50	Electric
Pump	356.16	18.00	Electric
Flow indicator	10.15	2.00	
Level indicator	7.61	2.30	
Temp. indicator	9.37	9.70	
Press indicator	0.00	0.00	
Control V/V	16.80	4.6	
Anti surge V/V	8.46	3.40	
Anti surge V/V	8.46	3.40	

초기 입력값은 현장에서 검증을 통하여 확보된 실패율, 수리소요시간 등이며, 본 논문에서는 OREDA 데이터와 신규 제품인 경우에 해석적 데이터를 산출하고 타당성을 검증하여 입력하는 방식을 채택하였다.

3. 해석결과 및 고찰

상기와 같은 대상, 적용기법, 경계조건을 이용하여 다음과 같은 결과 및 고찰을 수행하였다.

Fig. 6은 실패율의 증가시 회전기계, 탱크, 열교환기 등에 대하여 repair time 변화를 도시한 결과로서 기타 기자재는 비교적 안정적인 운전조건에서 영향이 미미하나 열교환기는 2차 함수의 경향으로 증가하는 결과를 보였다.

Fig. 7은 Fig. 6과 같이 실패율이 증가할 때 가용도의 변화로서 회전기계류, 열교환기, 탱크 등 비

교적 운전조건에 가혹한 경우에 실패율에 따른 수리시간 등의 증가로 인하여 가용도가 2차 함수의 형태로 감소하는 경향을 보였다.

Fig. 8~Fig. 10은 기자재별 실패율이 0.9~1.1(그림 내에서 상부에서 하부로 증가하는 순서로 표시)의 범위로 변할 때 이들 기자재가 연간 생산성에 미치는 영향을 월별로 나타낸 결과이다.

Fig. 8은 회전기계류에 대하여 연간 생산성을 월별로 도시한 결과로서 87.5~91.5%의 범위에서 생산성이 변화됨을 보여주고 있다. Fig. 9는 압력탱크류에 의한 연간 생산성이 88.9~91% 범주에서, Fig. 10은 열교환기에 의하여 연간 생산성이 86~92%의 범위에서 변화됨을 알 수 있다.

Fig. 11은 주요 기자재에 의한 가용도, 생산성에 미치는 영향의 중요도(criticality)를 3차원 차트로 나타낸 결과이다.

Fig. 11에서 실패율이 높은 경우에 주요 기자재

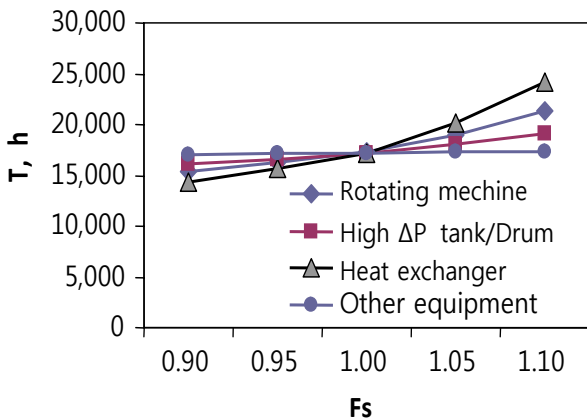


Fig. 6 Repair time variation with failure rate.

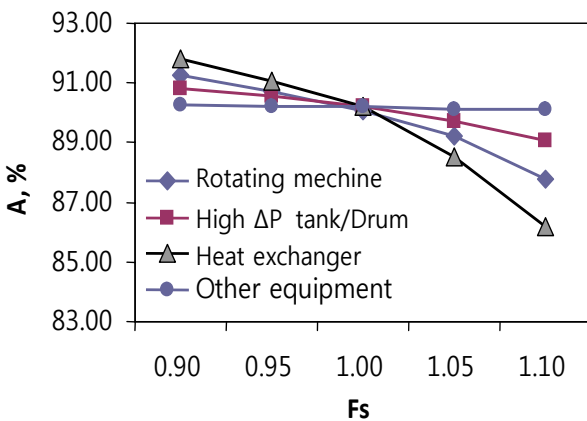


Fig. 7 Availability variation with failure rate.

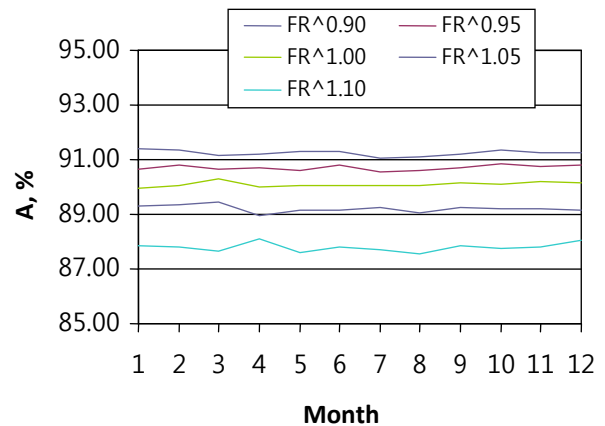


Fig. 8 Annual productivity variation by rotating machines.

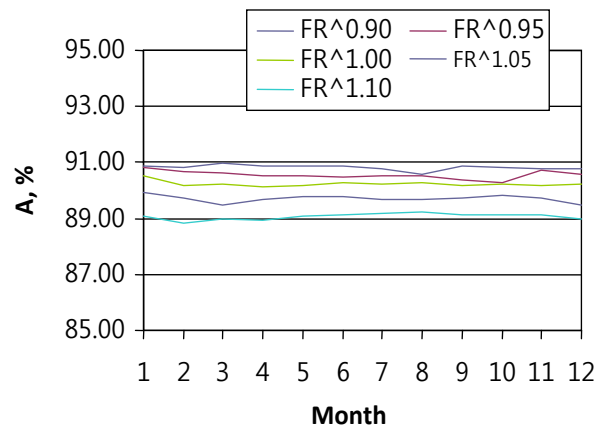


Fig. 9 Annual productivity variation by pressure tanks.

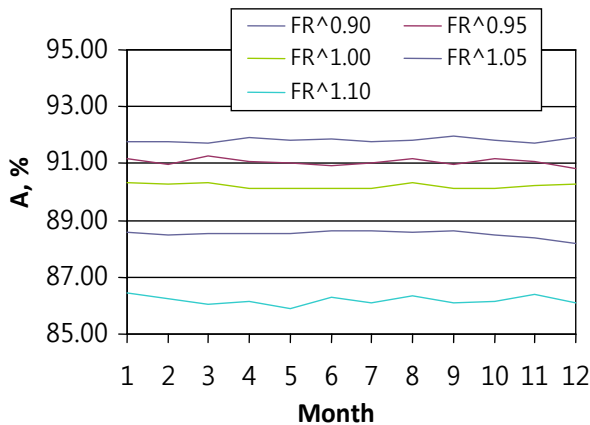


Fig. 10 Annual productivity variation by HX.

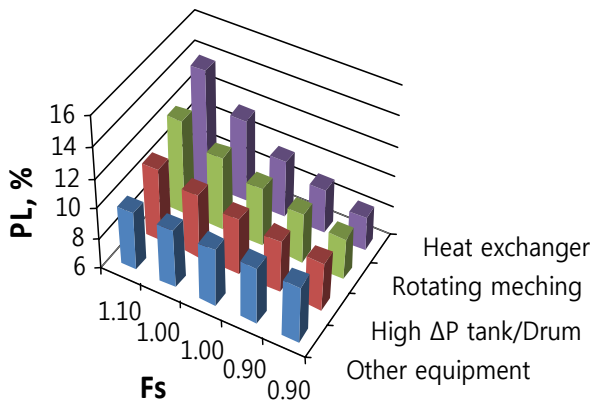


Fig. 11 Criticality(productivity loss) with failure and equipment.

가 손실에 미치는 영향이 크고, 특히 열교환기나 회전기계의 경우에는 수명이나 운전조건에 대한 설계 검증이 중요한 것으로 파악되었다.

4. 결 론

이상과 같이 LNG 플랜트 주요 기자재에 의한 실패율이 가용도에 미치는 영향을 평가하여 다음과 같

은 결론을 도출하였다.

도입한 실패유형 시나리오, Monte-Carlo 기법의 적용성을 확인하였으며, 실패율이 2차 함수의 형태로 가용도를 변화시킴을 알 수 있었다. 또한 기자재별, 운전조건별 실패율에 따른 기자재의 중요도(criticality)를 판단하였으며 설계에 반영할 수 있음을 확인하였다.

향후 주요 기자재의 실패율과 실패율에 영향을 미치는 위험도 등을 고려하는 연구를 통하여 시뮬레이션의 신뢰도를 높이고자 한다.

후 기

본 연구는 국토해양부 LNG 플랜트사업단의 연구비지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. Lee, H. C. and Hwang, I. J., 2011, A study on the evaluation of RAM performance for test-bed of LNG plant, Proceeding of SAREK 2011 Summer Conference, pp. 281-284.
2. Bosman, M., 1985, Availability analysis of a natural gas compressor plant, Reliability Engineering, Vol. 11, pp. 13-26.
3. Chang, K. P., Rausand, M., and Vatn, J., 2008, Reliability assessment of liquefaction systems on LNG carriers, Reliability Engineering and System Safety, Vol. 93, pp. 1345-1353.
4. Lee, H. C. and Hwang, I. J., 2011, A study on the applicability of RAM evaluation based on reliability theory for LNG plant test-bed, Proceeding of SAREK 2011 Summer Conference, pp. 277-280.