액화천연가스 연료 공급 장치에 대한 신뢰성 분석

박용태 · 이재익† · 권동현 · 이창헌
STX조선해양의장기술연구팀

RAM Study for LNG Fuel Supply System

Yongtae Park · Jaeik Lee† · Donghyun Kwon · Changheon Lee
System Engineering Research and Development Team, STX Offshore & Shipbuilding

Abstract

RAM study has been used for various range of industry such as chemical, electronics, defense industry. Recently, in the offshore & shipbuilding industry, demand of owners to analysis risk has been increased. RAM study is a quantitative pointer to risk based design and provides effective method for improvements. This article shows the result of RAM study for LNG fuel supply system. The result provides information to improve design. This study shows how result of risk assessment affects the design of LNG fuel supply system.

Keywords : Reliability, Availability, Maintainability, Monte carlo simulation, LNG fuel

1. 서 론

자국 조선소들의 해양플랜트 수주량은 몇 년 사이 크게 증가하였으며, 대형 조선사들은 수주량의 60% 이상을 해양플랜트로 목표를 두고 있는 실정이다. 또한 환경규제 강화에 따라 LNG연료추진 선박 등, LNG 공정을 포함한 신개념 선박의 개발이 요구되는 추세이며, 당사에서는 대형 컨테이너 선박에 적용 될 LNG 연료 공급 장치의 개발을 완료한 상태이다. 해양플랜트 및 LNG관련 선박들은 대부분 화공공정을 포함하고 있다. 즉, 일반적인 선박에 비해 높은 Risk를 가지며, Risk기반의 설계가 요구된다. 일찍이 화공플랜트에 대해서는 신뢰성공학을 기초로 한 Risk기반 설계가 요구되어 왔으며, 화공, 철도 및 방위산업 등을 통해서 신뢰성공학은 꾸준히 발전 및 적용되어 왔다. Risk 및 사고영향에 민감한 해양플랜트에 대해서도 설계에 신뢰성 공학을 적용해 나가는 추세이다. 이 논문은 해양플랜트 및 LNG 연료 추진 장치와 같은 화공공정에 적용할 수 있는 RAM분석이라는 신뢰성 공학의 분석기법 소개와 당사에서 개발한 대형컨테이너선의 LNG연료추진장치의 공정설계에 RAM분석을 적용한 사례에 대한 설명을 포함한다. RAM분석은 제품의 신뢰성 자료와 유지 및 보수 자료를 기초로 하여, 제품의 가용성을 미리 예측해내, Risk기반 설계 보완을 위한 정량적 자료를 제공할 수 있는 기술이다. 먼저 RAM분석 기법에 포함되는 기초적인 이론을 갖추고, 이를 설계에 적용할 수 있도록 방법을 제공하는 것이 이 글의 목적이다.

2. 관련 이론

Reliability(신뢰성)은 장비를 운용할 때에 장비가 제 역할을 얼마만큼이나 해 줄 수 있는가에 대한 통계 수치다. Failure rate, MTBF(Mean Time Between Failures), Survival Probability등과 직접적인 관련이 있으며, 기준은 장비의 신뢰성을 측정하는 방법에 따라 차이가 있다. 기준 시간에 대해 정상적으로 작동한 시간을 신뢰성으로 표현할 수 있으며, 작동한 횟수에 비해 얼마만큼 정상작동 했는가가 될 수도 있다. Reliability의 강점은 Reference가 되어있는 기존 장비들의 Reliability 통계 자료를 이용하여, 새롭게 만들게 된, 혹은 만들어진 System의 Reliability를 예측 해 낼 수 있다는 것이다. 이를 통해 신제품 개발 혹은 기존 제품 진단에 있어, 이 제품들이 그 기능을 얼마만큼 충실히 수행해 낼 수 있을지 예측할 수 있다.

시뮬레이션을 가동하기 위해 필요한 것들은 각 기기들의 Reliability, 그리고 Maintainability이다. Availability는 시뮬레이션의 결과물로서 정해진 기간 동안 부품, 혹은 시스템이 얼마나 가용될 수 있는지에 대한 척도라고 할 수 있다.

총 가동 시간 중에 시스템이 멈춘 시간만큼을 뺀 나머지시간을 이용하여 구할 수 있다.

기기의 Reliability가 높을수록 그 기기는 고장날 확률이 낮다. 그렇다고 Reliability가 높은 기기가 높은 Availabilty를 가지는 것은 아니다. 기기가 고장이 났을 때 그 기기가 규정 시간 내에 수리가 완료될 확률, 바로 Maintainability를 고려해야 Availability값이 구해지기 때문이다. Reliability가 높아도 Maintainability가 불

† 교신저자 : lngcias@onestx.com, 010-2396-8191

안한 기기라면, MTTR(Mean Time to Repair)이 상대적으로 높은 값을 가지기 때문에 Availability가 떨어지게 된다.

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

$$MTBF = 1/\lambda \quad (2)$$

$$R(t) = \int_{t}^{\infty} \lambda e^{-\lambda t} dt \quad (3)$$

R(t) : t시점에서의 Reliability(exponential)

RAM 분석은 시스템의 Reliability와 Maintainability를 토대로 Availability를 계산해 내며, 주어진 운영상의 조건을 토대로 시스템의 Efficiency를 판단하는 분석법이다. 대상에 따라서는 유지보수비용과 이익간의 관계를 고려하여 생산물의 경제적 가치까지도 고려할 수 있지만, 본 연구의 대상은 Availability와 Efficiency를 최종결과로 한다.

Availability(가용성)를 설계단계에서 예측함으로써, 고장, 수리에 의해 운전 상태에 가장 큰 차질을 빚는 기기들을 파악한다. 잦은 고장이 생기는 부분에 대한 설계 보완 및 수리가 오래 걸리는 부분들에 대한 유지보수 계획 수립 등을 사전에 수행 할 수가 있다.

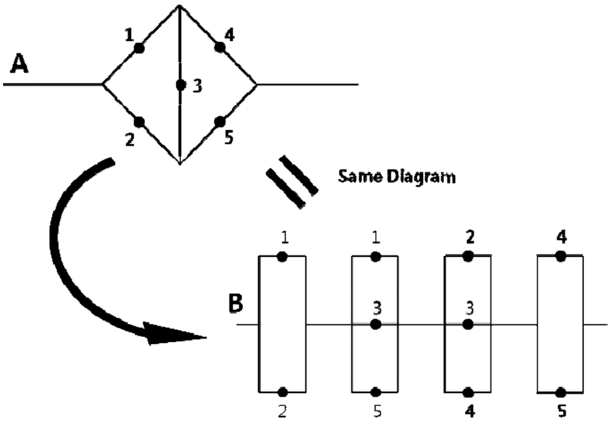

Fig. 1 Reliability Block Diagram(RBD)

RBD(Reliability Block Diagram)는 시스템의 Reliability를 계산하기 용이하게 Process Flow를 간략하게 표현한 것이다. Fig. 2의 A를 보면, A는 {1,2}, {1,3,5}, {2,3,4}, {4,5}에 해당하는 장치들이 고장 난다면 시스템이 정지하게 된다. 그래서 Reliability 관점으로 A를 본다면, B의 Reliability 관점의 Diagram을 만들 수 있다.

Fig. 2 Series of equipment

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

직렬 연결된 장비의 Reliability 계산

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

병렬 연결된 장비의 Reliability 계산

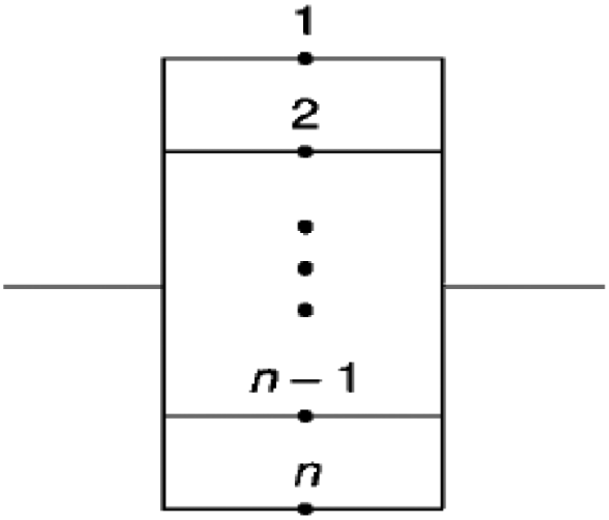

Fig. 3 Parallel connection of equipment

직렬과 병렬로 연결된 기기들의 총 Reliability를 계산하는 방법이다. Reliability가 Probability Density Function이기 때문에 RBD의 Reliability계산은 확률계산과 동일하다.

Reliability가 확률 함수의 형태기 때문에 직렬로 연결된 기기들의 Reliability 합은 개개의 Reliability보다 작으며, 병렬로 연결된 기기들의 Reliability의 합은 개개의 Reiliability보다 큰 것은 명백하다. Redundancy의 유무가 전체 Reliability를 증가시킨다는 점은 그런 이유에서이다.

본 연구대상인 초대형 컨테이너선의 LNG연료공급 시스템의 RAM 평가 지수는 아래 항목들과 같다.

- Reliability
- Availability
- Critical Failure
- Construction Cost

3. 연료 공급 장치 신뢰성 분석 결과

본 연구는 당사에서 개발한 초대형 LNG연료 추진 컨테이너선 내부에서 LNG 연료를 공급하는 장비들에 대한 RAM 분석을 통하여 사전설계에서 고려해야 할 사항들을 확인하기 위해 수행한 것

이다. 본 연구의 RAM분석에는 노르웨이 선급인 DNV사가 제공하는 MAROS라는 RAM 분석 프로그램을 활용하였다. LNG를 연료 조건에 맞게 기화하여 엔진까지 보내 주는데 적용되는 공정과정에 대해 RAM분석을 수행하였으며, 공정상의 RAM 분석 적용범위는 다음과 같다.

- 연료공급 공정의 주요 프로세스
- 장치류(Pumps, Heat Exchangers, etc..)
- 배관 및 밸브 제외
- 센서 제외

그 외 조건은 다음과 같다.

- Failure Data, Repair Data는 OREDA2009참고
-연료공급에 영향을 미치는 기기의 Critical Failure 만을 적용
- Utility System(Electric Power, Hydraulic..)은 100% 가용
- 수리 후 기기 성능 저하 없음
- 수리 인원 및 Spare부품의 가용성은 충분하다고 가정

시스템의 RAM 개선을 위해서는 크게 여러 가지 방법이 있다. 몇 가지 예를 들자면, Critical Failure를 개선하는 방법은 설계에 적용되는 장치 및 기기류를 개선하는 것이고, Reliability를 개선하는 방법에는 공정의 구성을 Reliability를 개선하는 방향으로 수정하는 것 등이 있다. 예컨데 Redundancy를 병렬로 연결하여 Reliability를 개선할 수 있고, 병렬 공정으로 변경 가능한 직렬 공정을 수정하는 것도 하나의 방법일 것이다. 또한 Efficiency를 개

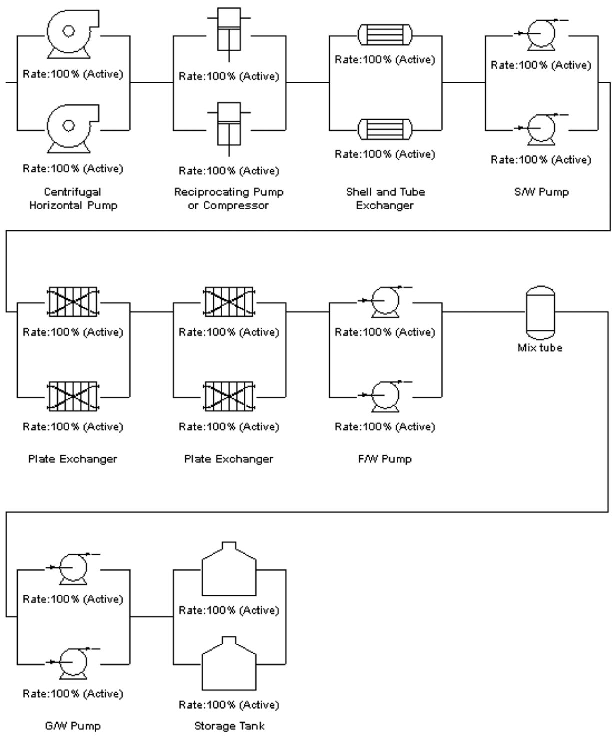

Fig. 4 RBD

선해주기 위한 공정개선의 방법도 생각할 수가 있다. 위의 조건과 Block Diagram을 토대로 RBD(Reliability Block Diagram)을 나타낸 것이 Fig. 4이다.

Table1은 각 장비들의 고장발생회수 통계를 기초로 작성한 MTTF와 수리시간에 대한 자료이다. RBD에 포함되는 장비들에 대하여, OREDA2009에서 선정한 자료들이다. OREDA2009의 고장발생확률은 지수확률분포를 따른다.

Table 1 Failure table of equipment

Item	# of Failure (10^6 hours)	MTTF (h)	Repair time
Centrifugal Pump	184.08	5432.42	27
Reciprocating Pump	84.98	11767.47	26
Pump	86.51	11559.35	36
Vaporizer	13.7	72992.70	1.5
Motor	30.33	32970.65	27
Motor(non-gas)	15.7	63694.26	29
Heat exchanger	59.09	16923.33	5.3

대상이 되는 초대형 LNG연료 추진 컨테이너선의 경우 평균적으로 약 30일을 운항 한다고 설정하였다. 30일이 지난 시점까지 시스템이 정상 작동을 할 확률, 즉 30일 시점에서의 Reliability를 구하였다. 아래의 표는 각 장치들의 Reliability와 각 Group(장치들이 포함된 각 부분; RBD의 각 병렬구조)의 Reliability, 전체 시스템의 Reliability등에 대한 계산 결과 값들이다.

Table 2 Reliability table of equipment

Node	Reliability (Item)	Reliability (Node)
Centrifugal Pumps	0.85695	0.97953
Reciprocating Pumps	0.92033	0.99336
Pumps (S/W, G/W, F/W)	0.929051	0.99496
Vaporizers	0.990184	0..99904
Heat exchanger	0.989985	0.99826
System	0.956844	0.9556844

Table 3 Availability

Availability (%)	Average Outage (hr)
99.353%	9.586

시스템은 99.353%의 가용도를 가진다. Down Rates는 전체 운영시간에 시스템을 정지시킬 고장의 발생률이다. Outage는 고장이 생겼을 시 시스템이 운용되지 않는 시간이며, 시스템이 정상상태로 돌아오기 까지 걸리는 시간이다.

이 대상의 경우 Reliability가 Availability보다 낮다, 이 경우는

잦은 고장이 발생하는 시스템 이지만 유지 보수 시간 및 비용이 적게 소모됨을 알 수 있다. 실제로 시뮬레이션 결과의 Average outage time을 보면 약 9시간으로 한번 시스템이 심각한 고장으로 정지하더라도, 9시간 내에 정상상태로 돌아가게 된다는 것이다.

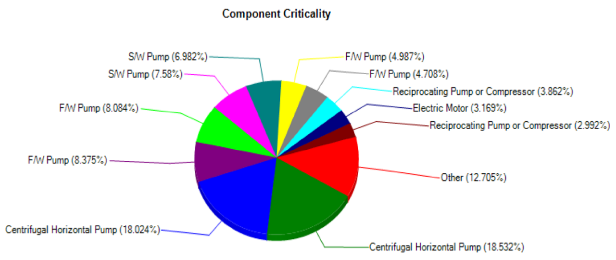

Fig. 5 Criticality

Criticality는 연료공급 지연에 가장 치명적인 영향을 미치는 장비 혹은 Subsystem을 판단하는 것이다. 위 통계자료에 의하면 Vaporizer와 열 교환을 하는 Heating cycle의 기여도가 50% 이상으로 가장 높게 나타난다. 이는 Vaporizer를 통과하는 LNG가 연료조건에 맞지 않는 온도로 기화 되어 나오게 되며 이 때문에 발생하는 연료공급지연 현상이 가장 큰 문제가 될 수 있다는 점을 명시한다.

5. 결 론

Vaporizer와 Vaporizer에 연결된 LNG heating cycle의 설계 수정이 연료공급 효율성에 얼마만큼의 영향을 미칠지 수정후 적용해 보았다.

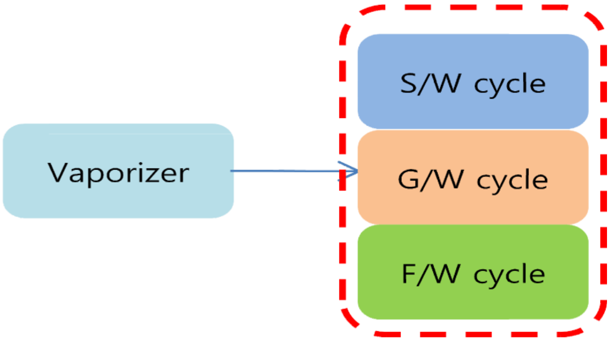

Fig. 6 Vaporizer & heating cycle

- Heating Cycle의 설계 조정
- Vaporizing system의 공정과정 변경

두 가지 수정 대안에 대한 비용 및 효율성 향상은 다음 그림과 같다.

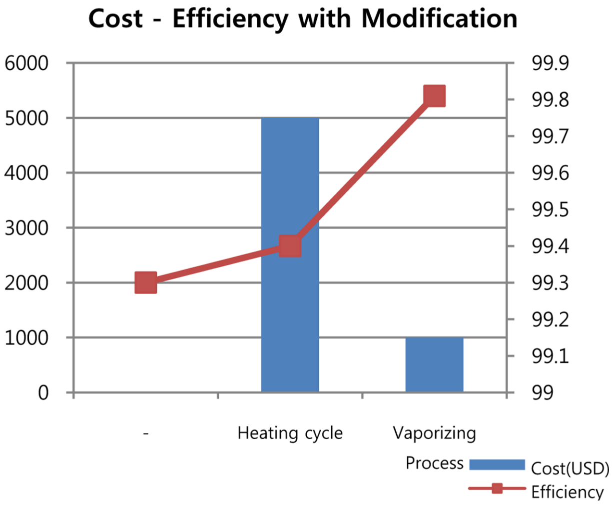

Fig. 7 Optimizing Efficiency

Heating Cycle의 설계는 기기의 Reliability를 향상 시키는 방법이며 비교적 많은 비용이 소요된다. 반면에 공정과정의 수정은 비용이 적게 들면서 Heating Cycle의 고장으로 인한 열 교환율 감소를 극복하여 효율성을 효과적으로 향상시켜 주게 된다.

참 고 문 헌

Marvin Rausand, Arnljot Hoyland, 2004. *System Reliability Theory*: Models, Statistical Methods, and Applications, Wiley Interscience

Sheldon M. Ross, 2007. *Introduction to Probability Models*, Elsevier Inc.

SINTEF, DNV, 2009, *Offshore Reliability Data Handbook*, PREDA Participants

박 용 태 | 이 재 익 | 이 창 헌 | 권 동 현