

ME-LGI 선박엔진용 연료분사밸브 테스터 개발을 위한 시스템 엔지니어링 기반 개념 설계

노현정¹, 강관구^{1*}, 배재일²
¹한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소
²(주)유연이앤이

Conceptual Design of the Fuel Injection Valve Tester for ME-LGI Marine Engine by Using System Engineering

Hyonjeong Noh¹, Kwangu Kang^{1*}, Jaeil Bae²
¹Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering
²YOOYOUN ENE Co.,LTD

요약 최근 강화된 환경규제 및 높은 연비에 대한 요구로 인해 천연가스를 연료로 사용하는 선박이 증가하고 있다. 친환경 선박 연료로 대두되고 있는 LPG 혹은 메탄올을 사용한 선박의 요구도 증가하고 있다. 이러한 흐름의 연장선상으로 LPG 혹은 메탄올을 사용하는 ME-LGI 엔진에 대한 연구가 최근 활발히 이루어지고 있다. ME-LGI 엔진을 탑재한 선박은, 선박 항해 중 연료분사밸브의 작동 신뢰도를 지속적인 테스트를 통해 확인해야 할 필요가 있다. 따라서 연료분사밸브 테스터의 개발은 ME-LGI 엔진의 상용화를 위해 반드시 필요하다. 이에 본 연구에서는 요구조건 분석, 기능분석, 설계 합성의 순서로 진행되는 시스템 엔지니어링 프로세스를 활용하여 ME-LGI 엔진용 연료분사밸브 테스터의 개념설계를 수행하였다. 요구조건 분석 단계에서 먼저 연료분사밸브의 작동 프로세스를 분석하였고, 밀폐 오일 누유 여부 확인의 필요성을 도출하였다. 그 다음 기능분석 단계에서 연료분사밸브 테스터의 기능 및 기능의 흐름을 수준별로 정의하였다. 이후 설계 합성 단계에서 각 기능에 해당하는 장비들을 설정하였고, 이를 바탕으로 process block diagram을 도출하였다. 또한 시스템 분석 및 조정 단계의 일환으로 초기 위험도 분석을 수행하여 안전 방안을 개념설계 안에 추가하였다. 본 연구는 시스템 엔지니어링 프로세스가 개념설계에 적용되는 과정을 상세히 보여줌으로써 향후 타 시스템의 개념 설계 시 좋은 참고자료가 될 수 있을 것으로 기대된다.

Abstract As environmental regulations have been strengthened and high fuel efficiency has been in demand in recent years, the number of ships using natural gas as a fuel is increasing. The demand for ships using LPG or methanol, which are emerging as eco-friendly vessel fuels, is also increasing. In this perspective, ME-LGI engines using LPG or methanol as a fuel have attracted considerable attention. Ships equipped with an ME-LGI engine are required to check the reliability of the fuel injection valve during shipping. This means that the development of a fuel injection valve tester is essential for the commercialization of ME-LGI engine. This study conducted the conceptual design of a fuel injection valve tester for ME-LGI engines using a system engineering process in the order of requirements analysis, functional analysis, and design synthesis. In the requirement analysis stage, the operating process of fuel injection valve was analyzed, and the necessity of checking the sealing oil leakage was then derived. In the functional analysis stage, the functions and flow of them were defined at each functional level. In the design synthesis stage, the equipment for each function was set and the process block diagram based on it was derived. In addition, preliminary risk analysis was performed as a part of system analysis and control, and safety measures were added to the conceptual design. This study is expected to be a good reference material for the concept design of other systems in the future because it shows the application process of a system engineering process to the conceptual design in detail.

Keywords : Marine Engine, Fuel Injection Valve, Methanol, System Engineering, Process Block Diagram

본 논문은 선박해양플랜트연구소의 주요사업인 “해양플랜트 패키지/모듈 신뢰성 평가 핵심기술 확보 및 적용(2/3)”에 의해 수행되었습니다 (PES9300).

*Corresponding Author : Kwangu Kang(KRISO)

Tel: +82-55-639-2416 email: kkgkang@kriso.re.kr

Received January 17, 2018

Revised (1st March 16, 2018, 2nd April 13, 2018, 3rd April 23, 2018)

Accepted May 4, 2018

Published May 31, 2018

1. 서론

대기오염을 방지하기 위해 선박의 항해 시 대기 중으로 배출되는 질소산화물(NOx), 황산화물(SOx), 미세먼지 등 오염 물질을 줄이기 위한 노력이 전 세계적으로 이루어지고 있다. 특히 IMO에는 2020년부터 해양오염 방지협약(MARPOL 73/78)을 강제로 적용할 예정으로 이를 시행하게 되면 선박에서의 질소산화물 배출량을 2015년 14.4g/KWh에서 2016년 3.4g/KWh로 줄여야 하고, 선박 연료 내 황 함유량 기준도 2015년 3.5%에서 2020년 0.5%로 제한된다[1]. 이러한 환경 규제를 만족시키기 위해 LNG와 같이 친환경 연료를 사용하는 친환경선박이 주류로 자리잡아가고 있는 상황이다[2]. LNG 이외에도, CNG, 수소연료전지를 연료로 사용하는 다양한 친환경 선박 등이 대두되고 있다. 그 중에서 특히 LPG 또는 메탄올을 연료로 사용하는 선박이 최근 주목받고 있다. LPG와 메탄올은 LNG와 같이 친환경 연료로써, 선박 연료로 사용했을 때 벵커C유에 비교해 질소산화물, 미세먼지 배출량이 획기적으로 줄어든다. 또한 메탄올은 황을 포함하고 있지 않고, LPG는 IMO에서 제시하는 선박 연료내 황 함유량 기준을 만족한다. LNG는 끓는점이 낮아 극저온을 유지해야 하지만, LPG와 메탄올의 경우 LNG보다 상대적으로 높은 온도에서 운반이 가능하여 선박 건조 비용이 LNG 추진선의 2/3 수준으로 저렴하다. 뿐만 아니라, 유지 보수 비용도 적고 관리 기술도 단순하다는 장점을 가지고 있다.

LPG와 메탄올 등 새로운 선박 연료에 대한 관심은 해당 연료를 사용하는 추진엔진의 개발로 이어지고 있다. LNG의 경우, 과거 LNG 수송선에서 발생하는 BOG를 활용한 하이브리드 엔진의 사용에서 최근 LNG를 직접 연료로 사용하는 엔진의 비중이 점차 높아지고 있다. 대표적인 엔진은 MAN B&W사가 개발한 ME-GI 엔진으로 소량의 액체 연료유(pilot oil)를 먼저 분사하여 점화시킨 이후, NG를 고압 분사하여 엔진의 출력을 높이는 방식을 따르고 있다[3, 4]. LNG 이외의 다른 선박 연료는 각각의 연료 특성에 맞춰진 엔진 시스템을 활용해야 한다. 이에 MAN B&W사는 ME-GI 엔진 이외에도 다른 선박 연료를 활용한 이중연료엔진 등의 개발 연구도 활발히 진행하고 있다[5].

ME-LGIP와 ME-LGIM 추진엔진은 각각 LPG와 메탄올을 연료로 사용하는 엔진으로, 연료 공급 시 연료가

액상이기 때문에 ME-GI엔진에 Liquid의 L을 붙여 ME-LGI 엔진으로 통칭한다. ME-LGI 엔진을 탑재한 선박의 경우, ME-GI 엔진과 마찬가지로 선박 항해 중 연료분사밸브의 작동 신뢰도를 지속적인 테스트를 통해 확인해야 할 필요가 있다. 연료분사밸브에 누유가 발생할 경우, 엔진의 손상 혹은 화재의 위험성 등이 증가하는 등 안전에 큰 문제가 발생하기 때문이다. 즉, 연료분사밸브 테스트의 개발이 연료분사밸브의 사용을 위해 반드시 요구 된다.

ME-LGI 선박용 연료분사밸브 테스트는 기존에 없는 제품으로 신규 개발 시 여러 가지 어려움에 봉착할 수 있다. 새로운 시스템의 개발에는 시스템 엔지니어링 프로세스 방법이 매우 유용하다. 시스템 엔지니어링 프로세스는 포괄적이고 반복적이며 체계적인 문제 해결 방법으로 시스템의 목적, 필요성, 요구사항을 구체적인 생산품 내지 프로세스로 변환시키는 역할을 하게 된다[6]. 이러한 시스템 엔지니어링 프로세스는 시스템을 설계 할 때 시스템의 기능 구현에 있어 필요한 모든 구성 요소를 빠짐없이 포함시킬 수 있을 뿐만 아니라 불필요한 구성 요소가 설계에 반영되지 않도록 하는 장점이 있다[7]. 이러한 장점으로 시스템 엔지니어링 프로세스는 항공·우주, 국방, 철도, 해양플랜트 산업에서 많이 활용되고 있으나, 내부 보안 등의 이유로 인해 구체적인 적용 방법은 논문 등으로 많이 보고되지 않고 있다.

이에 본 연구에서는 ME-LGI 엔진용 연료분사밸브 테스트를 개발하기 위해 시스템 엔지니어링 프로세스를 활용하여 ME-LGI 엔진용 연료분사밸브 테스트의 개념 설계를 수행하였다. 이를 위하여 우선 연료분사밸브의 작동 프로세스를 분석하여 밀폐 오일 누유 여부 확인을 테스트의 목적으로 선정하였다. 이후 연료분사밸브 테스트의 기능분석, 설계 합성 과정을 거쳐 최종적으로 Process block diagram을 도출하였다.

2. 시스템 엔지니어링 프로세스

시스템 엔지니어링은 복잡하거나 과거에 존재하지 않았던 새로운 시스템의 설계 시 유용한 대표적인 방법이다.

시스템 엔지니어링을 가장 체계적으로 발전시킨 미국의 Department of Defense에서 제시한 시스템 엔지니어링

어링 프로세스는 Fig. 1과 같고, 시스템 엔지니어링의 가장 기본적인 프로세스 개념으로 쓰이고 있다[6]. 시스템 엔지니어링 프로세스는 Fig. 1에서 표현된 바와 같이 요구조건 분석(requirement analysis), 기능분석(functional analysis), 설계 합성(design synthesis)으로 이루어진다. 그리고 이러한 일련의 단계의 균형을 맞추기 위해 시스템 분석 및 조정(system analysis and control)이 수행된다.

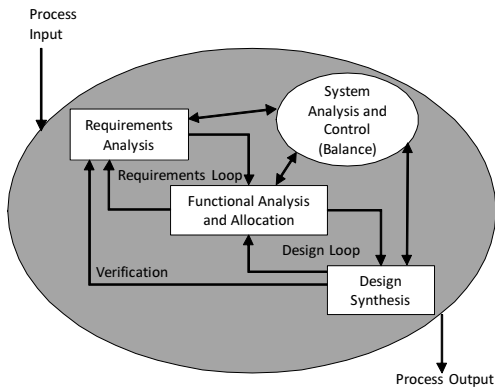


Fig. 1. System engineering process[6]

시스템 엔지니어링 프로세스의 첫 단계인 요구조건 분석 단계에서는 시스템에 요구되는 목표를 명확히 도출하고, 이를 요구조건으로 선정한다. 시스템의 목표와 요구조건을 파악한 이후, 요구조건을 만족시킬 수 있는 기능들을 파악하는 기능분석을 수행한다. 기능분석은 시스템이 수행해야 하는 기본 기능을 정의하고, 이 기본 기능을 수행하는 구성요소를 구체화하는 단계이다. 기능분석을 수행할 수 있는 방법은 여러 가지가 있으나 본 연구에서는 FFBD(functional flow block diagram) 방법을 사용하여 기능분석을 수행하였다. FFBD는 시스템이 수행해야 하는 기능의 흐름 순서를 수준별로 보여준다(Fig. 2). 기능은 필요한 경우 직렬 또는 병렬의 순차로 이루어지게 되며, 각각의 기능은 다시 하부 기능으로 발전하여 전개할 수 있다. 보통 FFBD는 각 기능의 순서를 보여줄 뿐, 소요되는 시간 또는 기능간의 시간의 흐름을 보여주지는 않는다[8].

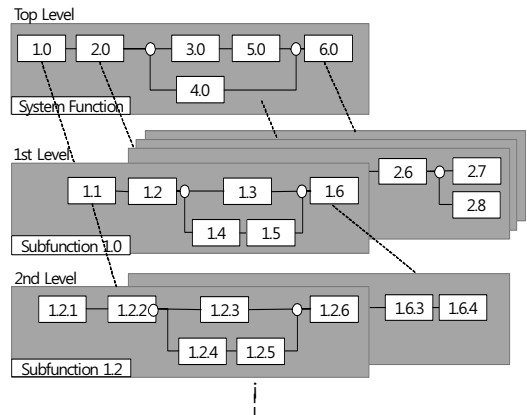


Fig. 2. Example of a functional flow block diagram

FFBD는 시스템이 ‘무엇을’ 수행해야 하는지 기능을 보여주는 것이지 기능을 ‘어떻게’ 수행하는지 보여주지 않는다. 따라서 시스템의 기능을 수행하기 위한 물리적 장비의 도출은 마지막 단계인 설계 합성 단계에서 진행된다. 본 연구에서는 설계 합성을 위해 RAS (requirement allocation sheet)를 사용하였다. RAS는 도출된 기능들을 수행할 구성/장비/물품 등이 무엇인지 도출하기 위해 방법론으로, 표에서 기능을 좌측 열에 기술하고, 각 기능들이 고려해야 하는 요구사항 또는 조건을 그 다음 열에 기술하고, 각 조건을 수행할 수 있는 구성/장비/물품 등이 무엇이 있는지 오른쪽 열에 각각 기술하는 방법이다[9]. 이러한 과정을 통하게 되면 최종 생산품의 주요 장비 및 장비간 상호 관계를 명확히 파악할 수 있다. 또한 주요 설계 변수를 누락시킬 위험을 최소화 할 수 있다.

본 연구에서는 연료분사밸브 테스트의 개념설계를 위해 요구조건 분석을 수행하여 테스트의 기능 목표를 우선적으로 명확히 하였다. 이를 위해 연료분사밸브의 작동프로세스를 분석하였다. 그 뒤, 기능분석 수행을 통해 테스트의 기본 기능을 정의하고, 하위 수준에 따른 주요 기능을 FFBD를 통해 도출하였다. 그 다음 도출된 기능들의 수행에 필요한 장비를 RAS를 통해 식별하였다. 본 연구는 이러한 프로세스를 통해 ME-LGI 용 연료분사밸브 테스트가 임무를 수행할 Process block diagram을 도출하였다.

그리고 도출된 Process block diagram에 안전 개념을 보완하기 위해 Fig. 1의 시스템 분석 및 조정의 단계의 일환으로 초기 위험도 분석을 수행하였다. 초기 위험도

분석에서는 테스트의 위험요소를 구분하고, 위험요소로 인한 사고 결과 및 위험을 낮추는 방안을 제시한다. 이렇게 도출된 방안을 도출된 Process block diagram에 보완하면, 테스트의 안전성을 크게 향상시킬 수 있다.

3. 결과 및 고찰

3.1 연료분사밸브 작동프로세스 요구조건 분석

요구조건을 도출하기 위해 본 연구는 ME-LGI 연료분사밸브의 작동프로세스를 분석하였다. LPG 또는 메탄올을 선박 연료로 사용하는 ME-LGI엔진은 연료의 공급시 연료의 상이 ME-GI엔진과 다르다. ME-GI는 엔진실린더의 압축행정에서 NG를 직접 분사시키는 방식이기 때문에 고압(300 bar)의 조건을 만들어 줘야 한다. 이를 위해 액체 상태에서 고압 생성 후 기화하여 엔진에 가스를 공급하는 형태를 띄게 된다[3]. 반면 ME-LGI 엔진은 액체상태의 연료를 주입한다. 메탄올은 10 bar, LPG는 50 bar의 압력으로 시스템에 공급되나, 그 이후 500-600 bar의 고압 액체 상태로 실린더에 주입된다[5].

메탄올을 연료로 사용하는 ME-LGI 연료분사밸브의 작동프로세스를 살펴보면 유압유(hydraulic oil)가 외부 작동 밸브(external control valve)에 의해 가압되면 플런저가 내려오면서 부스터챔버 내 연료의 압력이 증가한다. 압력이 점점 증가함에 따라 컷오프 압력에 도달하게 되면 스펀들이 열리면서 연료가 550 bar의 고압으로 엔진에 주입되게 된다 (Fig. 3). 고압으로 주입된 연료는 미립화되어 분사됨으로써 최적의 연소상태를 유지할 수 있고 이를 통해 엔진 효율을 높일 수 있다. 이후 연료가 연료분사밸브로 다시 들어가면서 연료는 부스터 챔버 (booster chamber)에 채워지게 된다.

이러한 일련의 연료분사과정에서 연료분사밸브의 온도는 60°C 이하로 유지되어야 한다. ME-LGI 엔진에 사용되는 연료는 점도가 낮아 이를 위해서 윤활, 밀폐와 냉각을 동시에 담당하는 밀폐 오일(sealing oil)이 밸브에 주입된다. 또한, 밀폐 오일은 연료가 시스템의 다른 부분으로 침투되는 것을 방지하는 역할을 한다. ME-LGI 엔진 연료분사밸브의 밀폐 오일 압력은 유압유의 작동과는 무관하게 생성되기 때문에 유압유의 오염을 방지할 수 있다는 장점이 있다[10].

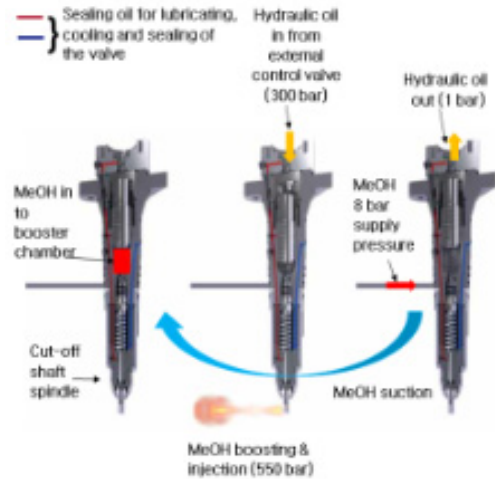


Fig. 3. Working principle in the Booster Fuel Injector Valve (BFIV) for methanol[5]

이러한 밀폐 오일에 누유가 생기게 되면 결과적으로 연료의 누유를 야기할 수 있고, 이 경우 엔진의 손상 혹은 화재의 위험성 등이 증가하게 된다. 따라서 ME-LGI 엔진을 탑재한 선박의 항해 중 연료분사밸브의 밀폐 오일 누유 여부를 지속적으로 확인해야할 필요가 있다.

이런 점을 고려해볼 때 연료분사밸브 테스트의 기본 요구조건으로 연료분사밸브 밀폐 오일 누유 여부를 체크하는 것으로 설정하였다. 이러한 기능을 수행하는 테스트의 개발은 ME-LGI 엔진의 상용화에 필수적이다. 이러한 기본 요구조건을 만족시키기 위하여 테스트의 기능 분석, 설계 합성을 순차적으로 수행하였고, 다음 섹션에서 각각 상세히 설명된다.

3.2 연료분사밸브 테스트의 기능분석

요구조건 분석 이후에는 ME-LGI 엔진의 연료분사밸브의 밀폐 오일 누유 여부 테스트를 위한 기능분석을 수행하였다. 기능분석을 위해 FFBD 방법을 사용하여 테스트의 기능을 수준별로 분리하고 각 수준 별 기능 흐름을 정의하였다.

연료분사밸브 테스트의 FFBD의 결과는 Fig. 4와 같다. 연료분사밸브 테스트의 목적인 밸브의 밀폐 오일 누유를 확인하기 위해서는 우선 테스트와 밸브를 연결하고 밀폐 오일을 주입해야 한다. 그 후 밀폐 오일의 압력을 상승시켜 오일 누유 여부를 확인한다. 누유 여부를 확인한 뒤 밀폐 오일을 제거하고 테스트와 밸브를 분리시키

는 일련의 작업이 필요하다. 이러한 각각의 기능을 순서대로 표현하면 Fig. 4a에 해당하는 FFBD가 도출된다. 이를 다시 세분화하여 기능 1.0과 2.0과 4.0을 하위수준(lower level)으로 전개하면 Fig. 4b에 해당하는 FFBD를 도출할 수 있다. 기능 1.0은 테스터와 밸브의 연결을 위해 밸브를 마운트(mount)에 고정시키고(1.1) 밀폐 오일의 공급호스를 연결한 뒤(1.2), 누유확인 호스와 밸브를 연결하는(1.3) 순서로 이루어진다. 밀폐 오일의 압력을 상승하는 작업의 수행을 의미하는 기능 2.0을 만족시키기 위해 본 연구는 압축공기(compressed air)를 사용하여 가압한다고 정의하였다. 기능 2.0은 압축공기의 진입(2.1), 압축공기의 압력 상승(2.2), 이를 통한 밀폐 오일의 목표압력으로 상승(2.3) 순서로 이루어진다. 기능 3.0의 누유 여부 확인은 육안으로 점검한다고 가정하여 별도의 세부 기능전개가 이루어지지 않았다. 기능 4.0은 압축공기의 공급 중단(4.1), 밀폐 오일 압력 제거(4.2)의 순서로 이루어진다. 모든 테스트가 끝나면 밸브는 테스터와 분리(5.0)된다. 이렇게 기능 1.0부터 5.0까지 일련의 기능을 수행하면 연료분사밸브 테스터의 임무는 완료된다.

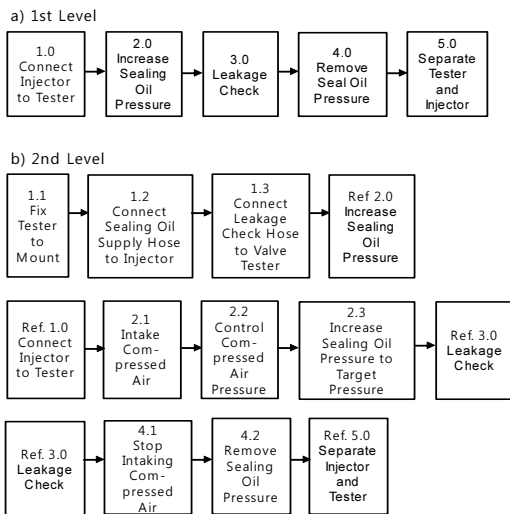


Fig. 4. FFBD (Functional Flow Block Diagram) of a fuel injection valve tester (a) 1st level and (b) 2nd level

3.3 연료분사밸브 테스터의 설계 합성

위에서 언급한 기능분석 결과를 바탕으로 연료분사밸브 테스터의 개념설계를 위해, 실제 기능을 수행하는 장

비를 구성하는 설계 합성 단계가 필요하다.

이를 위해 본 연구에서는 RAS 분석을 진행하였다. FFBD를 통해 도출된 기능들을 대상으로 RAS 분석을 하면 Table 1이 도출된다. 각각의 세부기능에 따른 조건을 기술하고 그에 따른 장비를 정리하였다.

Table 1. Requirement allocation sheet of a fuel injection valve tester

Function no. and Name	Functional Performance and Design Requirements	Nomenclature
1.1 Fix Tester to Mount	Withstand the weight of the Injector	Mount
1.2 Connect sealing oil supply hose to Injector	Withstand sealing oil pressure over 600 bar	High pressure hose
1.3 Connect leakage check hose to valve tester	Connect well with water bucket to check leaked gas	Hose
2.1 Intake compressed air	Supply more than 10 bar of air from outside	Compressed air connection
2.2 Control compressed air pressure	Control the pressure of compressed air	Gauge and valve for compressed air pressure
2.3 Increase sealing oil pressure to target pressure	Increase the pressure of sealing oil over 600 bar	Pump Gauge and valve for sealing oil pressure Oil tank
3.0 Leakage check	Visually check whether the oil is leaking through the creation of a bubble	Test bucket
4.1 Stop intaking compressed air	Control flow rate of compressed air	Gauge and valve for compressed air pressure
4.2 Remove sealing oil pressure	Sealing oil can be returned to the oil tanker by installing a valve to remove high pressure seal oil pressure	Pressure relief valve Oil tank
5.0 Separate injector and tester	Separate tester and injector safely	Mount

기능 1.0의 경우, 세 가지 하부 기능을 수반하고 있으며, 각 기능에 필요한 장비로 mount, flexible hose, hose를 도출하였다. 기능 2.0은 압축공기를 밀폐 오일의 목표압력까지 높이기 위한 기능으로 세 가지 하부 기능이 있으며, 이 기능을 수행하기 위해 compressed air connection, pump, gauge, oil tank 등의 장비를 도출하였다. 이때 압력을 연료 분사 압력인 600 bar 까지 상승시킬 수 있어야 한다. 기능 3.0은 누출이 있을 경우 버블 생성을 확인하기 위한 test bucket이 필요하다. 기능 4.0은 밀폐 오일의 압력을 낮추는 기능으로 compressed air

pressure control valve, 압축공기의 압력을 확인할 수 있는 gauge, 밀폐 오일의 압력을 낮추기 위한 pressure relief valve와 oil tank가 필요하다. 기능 5.0의 테스트의 분리는 mount 장치가 다시 필요하게 된다.

RAS 분석 결과에 따라 도출된 장비를 바탕으로, FFBD에 따라 해당 기능에 대응하는 장비를 연결하여 Fig. 5과 같은 Process block diagram을 도출하였다.

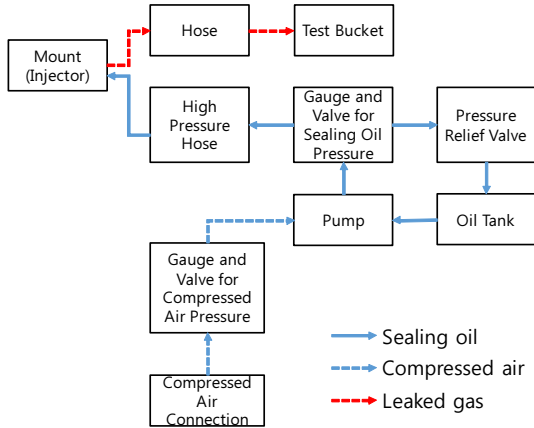


Fig. 5. Process block diagram of a fuel injection valve tester

Fig. 5에서 나타났듯이 연료분사밸브 테스트는 압축 공기를 조절하여 펌프를 통해 밀폐 오일의 주입, 압력 상승, 배출 기능을 수행하게 된다. 마운트된 밸브에 오일 누유가 있을 경우 테스트 버킷(test bucket)에 버블이 생성되어 누유 여부를 확인할 수 있다.

3.4 연료분사밸브 테스트의 시스템 분석 및 조정

연료분사밸브 테스트는 Table 1과 같이 600 bar에 해당하는 고압을 다루게 되므로 상용화를 위해서는 안전의 담보가 필수적으로 요구된다. 이에 본 연구에서는 Fig. 1의 시스템 분석 및 조정에 해당하는 초기 위험도 분석을 수행하였다.

Table 2는 초기 위험도 분석 결과 중, 위험도가 높은 결과들을 보여준다. 첫 번째 위험요소는 고압 호스의 파열이다. 고압 호스가 파열되면 600 bar에 해당하는 밀폐 오일이 누출되고 이는 주변 작업자의 큰 부상을 야기하고, 작업장을 오염시킬 수 있다. 따라서 고압 호스 누출시, 테스트의 전체 시스템을 차단할 수 있는 응급 차단 밸브

(Emergency Shutdown Valve)를 설치해야 한다. 두 번째 위험요소는 펌프 이후 배관에서 밀폐 오일의 누출이다. 이 배관이 파열되면 고압의 밀폐 오일로 인해 테스트에 큰 손상이 발생할 수 있고, 또한 작업장에 오염이 발생한다. 따라서 비정상적인 압력 상승을 방지할 수 있는 압력 안전 밸브(Pressure Safety Valve)를 설치해야 한다.

Table 2. Results of preliminary hazard analysis of a fuel injection valve tester

No	Item	Hazard/ Cause	Potential Consequences	Risk Reducing Measure
1	High pressure Hose	Rupture of high pressure hose	Serous injury of worker by high pressure (~600 bar) of leaked sealing oil workshop contamination by leaked sealing oil	Install Emergency Shutdown Valve
2	Pump and connected pipes	Rupture of piping by high pressure induced by faulted gauge	Damage of valve Workshop contamination by leaked sealing oil	Install Pressure Safety Valve
3	Oil tank	Leakage of oil tank	Not working of tester Workshop contamination by leaked sealing oil	Install Level Transmitter in the oil tank

세 번째 위험요소는 오일 탱크에서 오일의 누출이다. 오일 탱크에서 누출이 발생되면 테스트가 작동을 못하게 되고 작업장을 오염시키게 된다. 따라서 오일 탱크에서의 누출을 확인할 수 있는 레벨 송신기(Level Transmitter)를 장착해야 한다. 이러한 안전장치들이 장착된 Process block diagram을 Fig. 6에 나타내었다.

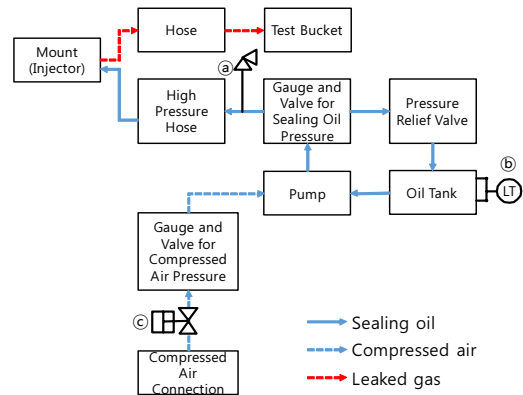


Fig. 6. Updated process block diagram of a fuel injection valve tester, (a) pressure safety valve, (b) level transmitter, and (c) emergency shutdown valve.

이렇게 도출된 Fig. 6는 연료분사밸브 테스트의 상세 설계 등에 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 또한 본 식련의 위험도 분석과정은 시스템 분석 및 조정과정이 설계 합성과정에서 도출된 결과를 어떻게 보완하는지 명백히 보여준다.

4. 결론

본 연구에서는 ME-LGI 엔진용 연료분사밸브 테스트의 개념설계를 시스템 엔지니어링 프로세스를 통해 진행하였고, 아래와 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 친환경 선박 연료로 주목받고 있는 LPG와 메탄올을 사용하는 연료분사밸브의 작동 프로세스 분석을 수행하였고, 이를 통해 연료분사밸브의 밀폐 요일 누유 여부를 확인할 수 있는 밸브 테스트의 필요성을 도출하였다.
- (2) 본 연구에서는 요구조건 분석, 기능분석, 설계 합성으로 진행되는 일련의 시스템 엔지니어링 프로세스를 통해 밸브 테스트의 주요 장비 및 장비 간 상호 관계를 정의하였고, 이를 바탕으로 Process block diagram을 도출하였다.
- (3) 도출된 Process block diagram의 안전을 담보하기 위해서는 시스템 분석 및 조정하는 단계에 해당하는 위험도 분석과 같은 방법의 활용은 필수적이다.
- (4) 본 연구에서 보여주고 있는 설계 절차는 시스템 엔지니어 프로세스 방법론이 개념설계에 어떻게 적용하는지를 상세히 보여주고 있어, 시스템 엔지니어링 프로세스 적용의 유용한 사례로 활용될 수 있다. 특히 과거에 존재하지 않는 새로운 개념의 시스템을 개발할 때 유용한 예제로 활용될 것이라 사료된다.

References

- [1] H. E. Lindstad, C. F. Rehn, G. S. Eskeland, "Sulphur abatement globally in maritime shipping", *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 57, pp. 303-313, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.09.028>
- [2] H. E. Lindstad, G. S. Eskeland, "Environmental regulations in shipping: Policies leaning towards

globalization of scrubbers deserve scrutiny", *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 47, pp. 67-76, 2016.

- [3] MAN Diesel & Turbo, ME-GI Dual Fuel MAN B&W Engines: A Technical, Operational and Cost-effective Solution for Ships Fuelled by Gas, p. 1-32, MAN, 2014.
- [4] S. K. Kim, "[Special Issues : Diesel Engine for LNG Carrier] The Introduction of MAN B&W M/E and ME - GI Engine for LNG Carrier", *J. Korean Soc. of Marine Engineering*, vol. 29, no. 6, pp. 603-611, 2005.
- [5] N.B.Clusen, ME-GI, LGI and FGSS Update, p. 1-47, MAN, 2014.
- [6] Defense Acquisition University, Systems Engineering Fundamentals : January 2001, Supplementary text, Fort Belvoir, p. 1-215, Virginia, 2001.
- [7] N. Viola, S. C., Marco Fioriti, F. Stesina, Functional Analysis in Systems Engineering: Methodology and Applications, Systems Engineering - Practice and Theory, Prof. Boris Cogan (Ed.), ISBN: 978-953-51-0322-6, p. 1-28, InTech, 2012, Available from: <http://www.intechopen.com/books/systemsengineering-practice-and-theory/functional-analysis-in-systems-engineering-methodology-and-applications>. (accessed Mar., 8, 2018)
- [8] NASA, NASA Systems Engineering Handbook: NASA/SP-2007-6105 Rev1. p. 1-340 12th Media Services, 2007.
- [9] J. O. Grady, System Requirements Analysis. p. 1-801 Elsevier Academic Press, 2006.
- [10] L. Juliussen, ME-GI and ME-LGI Gas Technologies - Development Status and Tests, p. 6-7, Dieselfacts, 2016.

노 현 정(Hyonjeong Noh)

[정회원]



- 2005년 2월 : 서울대학교 지구시스템과학과 (지구시스템학사)
- 2007년 2월 : 서울대학교 지구시스템과학과 (지구시스템석사)
- 2007년 4월 ~ 현재 : 선박해양플랜트연구소 연구원

<관심분야>

위험성 평가, 신뢰성 평가

강 관 구(Kwangu Kang)

[정회원]



- 1996년 2월 : 중앙대학교 기계공학과 학사
- 2005년 8월 : 중앙대학교 기계공학과 (공학박사)
- 2006년 11월 ~ 2009년 5월 : U. of Illinois at Urbana-Champaign, Post Doc.
- 2011년 4월 ~ 현재 : 선박해양플랜트연구소 선임기술원

<관심분야>

위험성 평가, 신뢰성 평가

배 재 일(Jaeil Bae)

[정회원]



- 2001년 2월 : 동아대학교 기계공학과 (기계공학사)
- 2005년 2월 : 부산대학교 조선해양공학과 (조선해양공학석사)
- 2007년 4월 ~ 2011년 1월 : 한국조선해양기자재연구원 선임연구원
- 2011년 2월 ~ 2016년 7월 : 이케이중공업 기술연구소 이사

- 2016년 1월 ~ 현재 : ㈜유연이앤이 대표이사

<관심분야>

위험도 및 신뢰성 기반 설계, KOLAS
