

論文

항공기용 연료계통 압력조절밸브의 FMEA를 적용한 신뢰성 설계

배보영*, 이재우**, 변영환**

Reliability Design Using FMEA for Pressure Control Regulator
of Aircraft Fuel System

Boyoung Bae*, Jae-woo Lee** and Yung-Hwan Byun**

ABSTRACT

The reliability assessment is performed for Pressure Control Regulator of Aircraft Fuel System using reliability procedure which consists of the reliability analysis and the Failure Modes and Effects Analysis(FMEA). The target reliability as MTBF(Mean Time Between Failure) is set to 5000hr. During the reliability analysis process, the system is categorized by Work Breakdown Structure(WBS) up to level 3, and a reliability structure is defined by schematics of the system. Since the components and parts that have been collected through EPRD/NPRD. The predicted reliability to meet mission requirements and operating conditions is estimated as 4375.9hr. To accomplish the target reliability, the components and parts with high RPN have been identified and changed by analyzing the potential failure modes and effects. By changing the configuration design of components and parts with high-risk, the design is satisfied target reliability.

Key Words : Pressure Control Regulator(압력조절밸브), Reliability(신뢰도), WBS(Work Breakdown Structure, 작업 분류 체계), FMEA(Failure Modes and Effects Analysis, 고장형태 및 영향분석)

1. 서 론

최근 모든 산업 분야에 최첨단의 신기술이 적극 적용됨에 따라 기존의 단순한 안전 계수를 바탕으로 한 제품의 설계·생산 방법보다는 신뢰성(Reliability) 개념을 도입한 방법이 요구되어지고 있다. 특히, 신제품 또는 첨단제품을 개발할 경우 신뢰성 확보 문제는 해당 기술 분야의 선도적 역할과 제품 사용 시의 안정성 측면에서도 대단히 중요하다고 할 수 있으며, 항공기용 연료계통 압력조절밸브 독자 개발 기술 확보를 목표로 개발

하고자 하는 경우 품질 보증 및 기술 향상을 통한 국제 경쟁력 강화를 위해서 제품의 고신뢰성 달성이 절실한 실정이다[1].

여기서 신뢰성은 제품사용의 시간적 요인을 중요시하는 품질특성으로, 일정기간 동안 주어진 기능을 원활하게 수행할 수 있는 제품의 능력을 말하며, 시스템의 기능적 안정성을 나타내는 성질로서 추상적인 의미로 사용된다. 즉 높은 신뢰성을 가지고 있는 제품일수록 고장(Failure)이 잘 일어나지 않는다[2]. 따라서 본 연구에서는 목표 신뢰도를 갖는 항공기용 압력조절밸브 신뢰성설계를 위해 신뢰도를 분석하고 FMEA를 이용한 신뢰성 분석 기법을 적용하고자 한다. 즉, 신뢰성을 고려하여 목표 신뢰도의 만족여부에 따라 FMEA(Failure Modes and Effects Analysis)를 실행하여 목표 신뢰도를 만족함과 동시에 실제 신뢰성 설계 결과를 도출하고자 한다.

2008년 11월 19일 접수 ~ 2009년 1월 13일 심사완료

* 건국대학교 대학원 항공우주정보시스템 공학과

** 건국대학교 항공우주정보시스템 공학과

연락처, E-mail : jwlee@konkuk.ac.kr

서울특별시 광진구 화양동 1번지

II. 본 론

2.1 항공기용 연료계통 압력조절밸브의 개요

항공기용 연료계통 압력조절 밸브는 엔진의 여압 공기를 받아 연료탱크로 일정한 압력의 공기를 공급하는 장치로, 이와 더불어 연료탱크 내에 생성된 과압의 공기를 외부로 배출 시키고, 압력이 일정 압력 이하로 떨어진 경우에는 대기압을 흡입하여 연료탱크 내부의 압력을 일정 범위 내에서 유지시키는 기능을 한다[3].

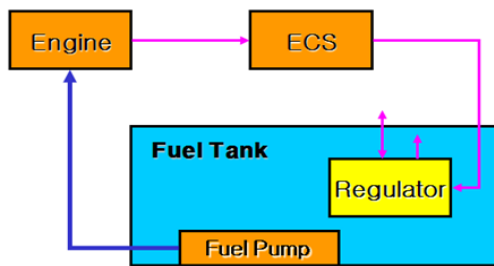


Fig 1. 연료계통 시스템 개략도

2.2 신뢰성 부품 규격서와 도구 소개

2.2.1 신뢰성 부품 규격서

신뢰성 설계에 있어 시스템 초기 설계에 필요한 개략적인 신뢰도 예측을 위해 구성품들의 실제 동작 파라미터에 대한 정확한 값을 추정하기 힘든 경우, 국제적으로 통용되는 부품의 규격을 사용한다. 본 연구에서는 미국 국방성에서 발간한 실험적인 필드 고장률 데이터로부터 이끌어낸 수학적 모델식을 설명한 핸드북인 MIL-HDBK-217FN2, RAC(Reliability Analysis Center)에서 발간한 전기/전자 부품의 고장률 데이터를 수집한 핸드북인 EPRD(Electronic Parts Reliability Data)와 비 전기/전자 부품의 고장률 데이터를 수집한 핸드북인 NPRD (Nonelectronic Parts Reliability Data)를 사용하였다[2,4].

2.2.2 신뢰성 분석 도구 소개

신뢰성 분석 도구인 Relex(Reliability Excellence)는 각 분야의 RAM(Reliability Availability Maintainability) 요구사항이 만족되는 다양한 분석, 평가 방법 및 운용 프로세스를 정의하며 RAM 분석을 통합적으로 수행할 수 있는 기능을 제공한다[5].

2.3 항공기용 압력조절밸브의 신뢰성 설계절차

2.3.1 신뢰성 설계 시 가정

구성품의 선별검사(Screening)와 배제시험에 의해 압력조절밸브는 초기 고장이 없으며, 자체 설계되어 신뢰성 운용 시험 데이터가 없기 때문에 고장률 예측에 필요한 규격인 EPRD/ NPRD의 데이터에 의해 유사 부품이 선별된다.

2.3.2 신뢰성 설계 절차

Fig. 2는 항공기용 연료계통 압력조절밸브의 신뢰성 설계 절차로 각 절차에 대한 설명은 아래와 같다[6].

항공기용 연료계통 압력조절밸브의 목표 신뢰도 설정 시 유사 항공기의 경향성을 근거로 하여, 상위 시스템에 의해 할당된 하위 시스템의 요구 조건에 따라 MTBF(Mean Time Between Failure)가 5000hr 이상으로 주어졌다. 여기서 MTBF는 제품의 수명으로 제품의 신뢰성을 판단하는 기준 중 하나로 수리 가능한 구성품에서 고장이 발생할 때까지의 평균 시간을 의미한다[4].

또한 항공기용 연료계통 압력조절밸브는 임무특성 상 MIL-HDBK-217 FN2 규격 중 Airborne, Uninhabited의 조건인 비행 중 승무원의 통제가 불가능한 위치에 탑재되는 조건으로 외부적인 압력, 온도, 충격이 심한 경우로 볼 수 있다.

항공기용 연료계통 압력조절밸브는 5가지의 서브시스템인 몸체부, 압력조절부, Positive Relief Valve부, Negative Relief Valve부, Emergency Valve부로 구성된다. Fig. 3은 항공기용 연료계통 압력조절밸브의 상위 WBS(Work Breakdown Structure)를 나타내며, Table 1은 Level 3까지 정립된 Regulator의 세부적인 WBS에 대한 목록이다.

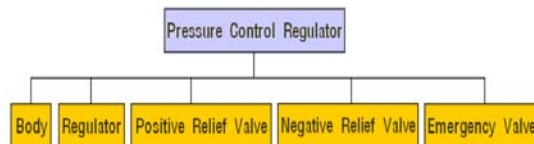


Fig 3. 항공기용 연료계통 압력조절밸브의 상위 WBS

WBS를 근거로 하여 임무 요구도를 만족하도록 각 구성품들을 기능적 관계를 고려하여 연결시킨 결과, 항공기용 연료계통 압력조절밸브는 직렬·병렬·대기 시스템이 혼합된 형태이다. 즉, Fig.

4와 같이 압력조절부가 고장 났을 경우에 Positive Relief Valve부와 Negative Relief Valve 부가 작동하므로 압력조절밸브에 대한 대기 시스템이다.

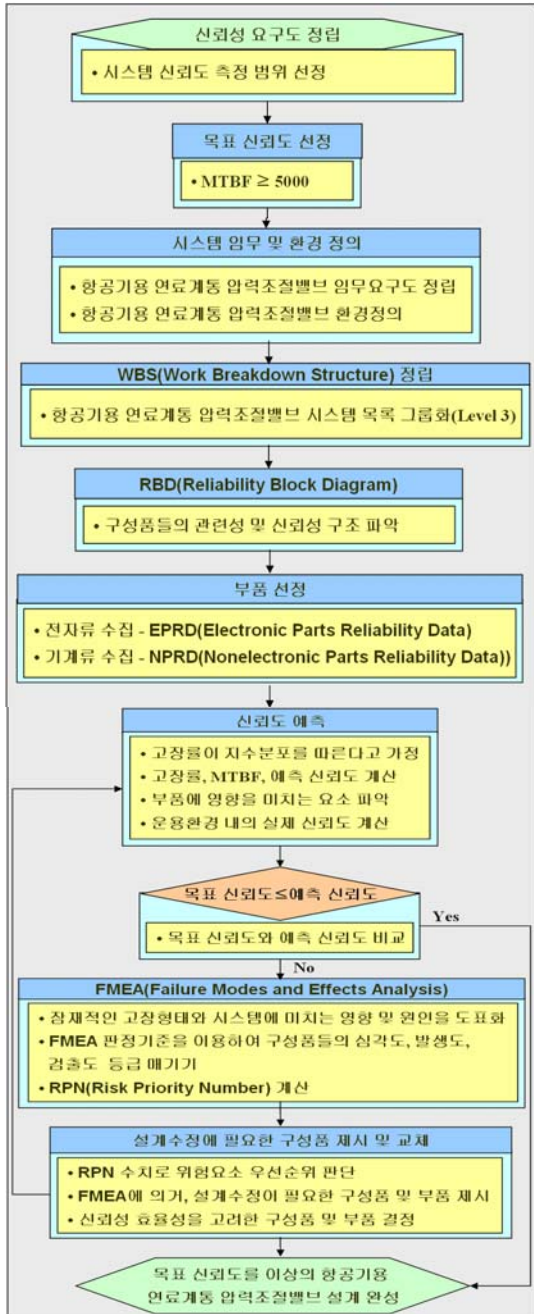


Fig 2. 항공기용 연료계통 압력조절밸브의 신뢰성 설계 절차

Table 1. 항공기용 연료계통 압력조절밸브의 WBS (WBS 1200 압력조절부)

WBS List		Title
Lv. 1		Pressure Control Regulator
Lv. 2	Lv. 3	
1200		Regulator
	1201	Bottom Body
	1202	Pressure Control Body
	1203	Spool
	1204	Supporter
	1205	Diaphragm
	1206	Sleeve
	1207	Poppet
	1208	Top Cap
	1209	Sleeve Washer
	1210	Pressure Control Spring
	1211	Top Spring
	1212	Oring-920
	1213	Oring-014
	1214	Oring-018
	1215	Oring-007
	1216	Thread Insert
	1217	Bolt
	1218	Washer
	1219	Male Connector

또한 특수한 상황에만 작용하는 Emergency Valve부는 일반적인 시스템으로 보기 어렵지만 역할의 중요도를 고려하였을 때, 압력조절부와 직렬시스템으로 볼 수 있고, 몸체부는 전체에 직렬 시스템이다.

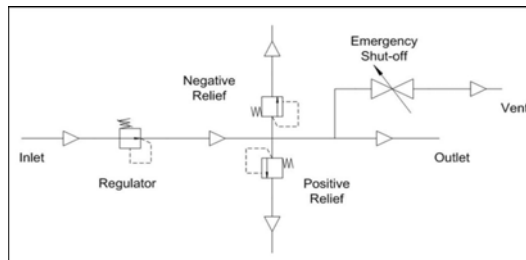


Fig 4. 항공기용 연료계통 압력조절밸브의 시스템 기능도

2.4 신뢰도 예측

신뢰도 예측을 위해 EPDRD/NPRD 규격서를 이용하여 구성품들의 관련성 및 기능성을 만족하는 부품들을 선정하였다. Fig. 5는 서브 시스템에 선정된 구성품의 번호, Category, Subcategory, 개수, 예측된 고장률을 나타낸다.

Name	Part Number	Category	Subcategory	Quan...	Failure Rate
Main Body	NPRD-1072	Body	Valve (Summary)	1	0.016000
Positive Bracket	NPRD-1179	Bracket	Body, Assembly	1	0.032000
Negative Bracket	NPRD-1179	Bracket	Body, Assembly	1	0.032000
Regulator Bracket	NPRD-1179	Bracket	Body, Assembly	1	0.032000

(a) 몸체부

Name	Part Number	Category	Subcategory	Quan...	Failure Rate
Bottom Body	NPRD-1072	Body	Valve (Summary)	1	0.016000
Pressure Control Body	NPRD-1072	Body	Valve (Summary)	1	0.016000
Spool	NPRD-13041	Valve	Spool	1	6.900000
Supporter	NPRD-10449	Support	Air, Compressor	1	0.032000
Diaphragm	NPRD-4074	Diaphragm	Valve	1	0.256300
Sleeve	NPRD-10036	Sleeve	(Summary)	1	0.696900
Poppet	NPRD-12951	Valve	Poppet	1	0.016000
Top Cap	NPRD-1738	Cap	Pneumatic Valve	1	13.969800
Sleeve Washer	NPRD-13084	Washer	(Summary)	1	0.065900
Pressure Control Spring	NPRD-10312	Spring	Helical, Compression	1	1.429700
Top Spring	NPRD-10312	Spring	Helical, Compression	1	1.429700
Oring-920	NPRD-9745	Seal	O-Ring	1	0.554400
Oring-014	NPRD-9745	Seal	O-Ring	1	0.554400
Oring-018	NPRD-9745	Seal	O-Ring	1	0.554400
Oring-007	NPRD-9745	Seal	O-Ring	1	0.554400
Thread Insert	NPRD-6661	Insert	Screw Threaded	4	0.256400
Bolt	NPRD-1117	Bolt	(Summary)	4	1.786000
Washer	NPRD-13084	Washer	(Summary)	4	0.263600
Male connector	NPRD-5065	Fitting	(Summary)	2	0.446000

(b) 압력조절부

Name	Part Number	Category	Subcategory	Quan...	Failure Rate
Positive Relief Cap	NPRD-1738	Cap	Pneumatic Valve	1	13.969800
Positive Relief Actuator	NPRD-307	Actuator	Mechanical (Summary)	1	21.514100
Positive Relief Spring	NPRD-10318	Spring	Helical, Compression	1	0.471800
Oring-015	NPRD-9745	Seal	O-Ring	1	0.554400
Oring-024	NPRD-9745	Seal	O-Ring	1	0.554400
Thread Insert	NPRD-6661	Insert	Screw Threaded	4	0.256400
Bolt	NPRD-1117	Bolt	(Summary)	4	1.786000
Washer	NPRD-13084	Washer	(Summary)	4	0.263600
Male connector	NPRD-5065	Fitting	(Summary)	1	0.223000

(c) Positive Relief Valve부

Name	Part Number	Category	Subcategory	Quan...	Failure Rate
Plug & Pin	NPRD-8166	Plug	(Summary)	1	10.466500
Connector	NPRD-2853	Connector	Electrical	1	0.422300
Electric Connector	NPRD-2865	Connector	Electrical	1	37.486700
Solenoid Valve	NPRD-12693	Valve	Hydraulic, Solenoid (...)	1	71.307900
Bolt	NPRD-1117	Bolt	(Summary)	4	1.786000
Washer	NPRD-13084	Washer	(Summary)	4	0.263600

(d) Negative Relief Valve부

Name	Part Number	Category	Subcategory	Quan...	Failure Rate
Negative Relief Cap	NPRD-1738	Cap	Pneumatic Valve	1	13.969800
Negative Relief Actuator	NPRD-307	Actuator	Mechanical (Summary)	1	21.514100
Negative Relief Spring	NPRD-10318	Spring	Helical, Compression	1	0.471800
Oring-022	NPRD-9745	Seal	O-Ring	1	0.554400
Oring-132	NPRD-9745	Seal	O-Ring	1	0.554400
Male connector	NPRD-5065	Fitting	(Summary)	1	0.223000

(e) Emergency Valve부

Fig 5. 항공기용 연료계통 압력조절밸브의 부품선정

각각의 서브 시스템에 대한 신뢰도를 계산하고, 기능적 관계에 맞게 신뢰도를 산출한 결과, MTBF는 4375.9hr로 결과값이 도출되었다. 이 때, EPRD/NPRD 규격서에 제시된 동일한 임무환경의 압력조절밸브의 MTBF와 비교 하였을 때 도출된 결과값이 20.78% 작다.

2.5 고장형태 및 영향분석(FMEA)

2.5.1 FMEA 정의 및 목적

보통 FMEA(Failure Modes and Effects Analysis)라고 불리는 고장형태 및 영향분석은 부품이 고장날 수 있는 방식을 열거하고 각 고장형태가 체계 전체에 미치는 특성과 결과를 추적하는데 가장 널리 쓰이는 기법 중의 하나이다. 이 기법은 주로 정성적인 성격을 갖지만, 흔히 약간의 고장 확률 추정치도 포함된다.

일반적으로 FMEA는 제품의 개발 및 설계단계에서 적용되며, 일회적으로 실시되는 것이 아니라 지속적으로 upgrade 및 follow-up하고, 이러한 활동들은 이력관리가 되도록 한다[1].

2.5.2 FMEA 결과

Table 2는 항공기용 연료계통 압력조절밸브에 대하여 MIL-STD-1629A[7]의 기준을 근거로 산출된 심각도(Severity, S), 발생도(Occurrence, O), 검출도(Detectability, D)에 따라 RPN(Risk Priority Number)이 높은 설계수정의 대상이 되는 구성품들만을 나타내며, FMEA의 결과로써 재설계의 근거가 된다. RPN은 심각도, 발생도, 검출도의 평가점을 각각 곱하여 산출되며 식 (1)과 같이 표현된다.

$$RPN = S \times O \times D \quad (1)$$

식 (1)으로부터 산출된 위험 우선순위는 설계 개선의 우선순위를 결정하며, RPN과 관계없이 심각도가 높은 경우 특별한 주의가 필요하다[8]. 따라서 FMEA의 결과를 통하여 신뢰도 향상을 목적으로 하는 재설계를 위한 구성품을 선정할 수 있었으며, Table 2는 전체 구성품 중에서 RPN 수치가 높은 구성품만을 나타낸다.

2.6 신뢰성 설계 결과

신뢰도 예측 결과, 목표 신뢰도 값인 5000보다 작은 값을 얻었으므로 MIL-STD-1629A[5]의 기준을 근거로 하여 FMEA를 수행하고 RPN 수치가 높은 구성품들은 EPRD/NPRD 규격서를 이용하여 새로운 구성품으로 설계가 변경되어야 한다. 즉, Spool, Diaphragm, Pressure Control Spring, Positive Relief Actuator, Electric Connector, Solenoid valve를 신뢰성 효율이 좋은 구성품으로 변경하였으며, 그 결과 목표 신뢰도 이상의 값인 6600.5hr를 얻을 수 있었다.

Table 2. 항공기용 연료계통 압력조절밸브의 FMEA 결과

번호	품명	고장형태	고장원인	고장영향	검출방법	심각도	발생도	검출도	RPN
1203	Spool	균열, 파손	진동, 충격, 노화	압력조절기능 감소	육안	5	9	2	90
1205	Diaphragm	찢어짐, 늘어남, 파손	이물질, 노화	압력조절기능 감소	육안	5	9	2	90
1210	Pressure Control Spring	파손	진동, 충격	압력조절기능 감소	육안	5	9	2	90
1302	Positive Relief Actuator	균열, 파손	진동, 충격, 노화	Positive Relief 기능 감소	육안	5	9	2	90
1501	Electric Connector	파손	진동, 충격, 노화	Emergency shut-off기능 감소	육안	6	9	2	108
1505	Solenoid valve	미작동	솔레노이드 결선 불량, Electric Connector 파손, 솔레노이드 밸브 내부 이물질로 막힘	Emergency shut-off기능 감소	BIT	6	9	4	216

III. 결 론

본 연구에서는 항공기용 연료계통 압력조절밸브의 임무조건에 따른 신뢰도를 분석하고, FMEA를 이용하여 목표 신뢰도를 만족할 수 있도록 신뢰성 설계를 수행하였다. 시스템은 초기 고장이 없는 것으로 가정하였고 MIL-HDBK-217 FN2 계산 방법으로 수행하였다. 목표 신뢰도를 MTBF가 5000hr 이상이도록 선정하였고, 구성품의 WBS를 Level 3까지 정립하였다. 임무 요구도에 따라 직렬·병렬·대기 시스템이 혼합된 형태임을 파악하였으며, 관련성 및 기능성을 만족하는 구성품들은 EPRD/NPRD 규격서를 이용하여 선정되었다.

또한 FMEA 결과에 의하여 구성품의 기능성 및 관련성에 만족하도록 해당 구성품과 같은 범주 내에서 설계를 변경해야 할 구성품들이 선정되었다. 그리하여 목표 신뢰도를 만족하도록 구성품들을 최종적으로 선택하여 예측 신뢰도 계산을 수행하였다. 그 결과 목표 신뢰도를 만족시키는 항공기용 연료계통 압력조절밸브의 설계를 수행하였다.

후 기

본 연구는 (주)한화(과제번호 2007-A011-0085)와 BK21의 지원으로 수행되었으며 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] 한국기계연구원, “기계류부품 신뢰성 평가 통합기술 개발”, 특정연구개발사업/원자력연구개발사업 학술기사, 2001, pp.1, 17.
- [2] 김태원, 박창준, “전자부품 품질 및 신뢰성”, 전자공학회지, 제18권, 제2호, 1991년 2월, pp. 45~54.
- [3] Multiphysics FSI를 적용한 Regulator 성능해석, (주)한화
- [4] 김만수, 김원경, 송준엽, 신주환, 장수주, 최충현, 시스템 신뢰도예측 가이드, 교우사, 2004.
- [5] (주)모아소프트 신뢰성기술연구소, *Relax Reliability Studio 2007 Reference Manual*, 2007.
- [6] 김진호, 배보영, 이재우, 변영환, 김경미, “FMEA를 통한 공중발사 로켓, 미리내II의 신뢰성 설계”, 한국항공우주학회지, 36권, 12호, 2008년 12월, pp. 1190~1200.
- [7] Department of defense, MIL-STD-1629A.
- [8] 한국표준협회컨설팅(Korean Standards Association Consulting), FMEA 기초이론 및 적용.