

Article

하이브리드 로켓 점화 장치의 신뢰도 예측

문근환, 문희장, 최주호, 김진곤

Reliability Prediction of Hybrid Rocket Ignition System

Keun-Hwan Moon*, Hee-Jang Moon**, Joo-Ho Choi**, Jin-Kon Kim**

ABSTRACT

In this study, reliability prediction of the ignition system of hybrid rocket is performed. The FMECA is preceded to the reliability prediction. To this end, the ignition system is divided into 5 components and 19 potential failure modes. The failure cause and effects are identified and criticality analysis is carried out for each failure mode, in which the criticality number is estimated using the failure rate databases. Among the numbers, the failure modes and components with higher criticality and severity are chosen and allocated with higher weighting factor. The reliability predictions are performed using the failure rate databases, from which the current ignition system is found to satisfy the target reliability.

KeyWords : Hybrid Rocket(하이브리드 로켓), Ignition System(점화장치), FMECA
 (고장모드, 영향 및 치명도 분석), RBD(신뢰도 블록 선도)

I. 서 론

오늘날 세계적으로 사회 전 분야의 활발한 교류를 위한 항공기 운용과 인공위성의 수요의 급증으로 항공기 개발 및 인공위성 운반을 위한 로켓 추진시스템에 대한 투자와 연구 개발이 활발히 진행되고 있다.

항공기 및 로켓 추진 시스템의 경우 시스템이 매우 복잡하고, 고속/고온 및 고압의 환경에서 운용된다. 또한 시스템 구성하고 있는 부품들이 유기적 결합을 이루고 있어 하나의 부품의 결합

또는 고장이 시스템 전체의 손실로 이어 질 수 있다.

실제 1998년 스위스 항공에서 운용 중이었던 MD-11 항공기의 경우 조종실 내 전기 배선의 문제로 화재가 발생, 그 결과 비행제어가 불가능하게 되어 추락하였다. 이 사고로 승무원을 포함한 탑승객 229명이 전원 사망하고, 사고 조사비용 등을 포함하여 4년간 약 480억 원 이상의 손실액이 발생하였다. 또한 1986년 미국의 우주 왕복선 Challenger 호는 고체 로켓 부스터 접합부의 기밀을 담당하는 O-ring의 결함으로 고온의 연소 가스가 분출되어 발사 75초 만에 공중 폭발하였으며 이로 인해 승무원 7명 전원 사망, 약 4865억 원의 경제적 손실이 발생하였다.[1]

따라서 항공기 및 로켓 추진 시스템의 고장은 최종적으로 인명 및 막대한 경제적 손실을 가져올 수 있기 때문에 개발 초기 단계에서부터 신뢰성 분석 및 설계가 반드시 필요하다.

국외에서는 1950년대 초 프로펠러 추진 항공

Received : 03. Nov. 2016. Revised : 13. Dec. 2016.

Accepted : 24. Dec. 2016

* 한국항공대학교 대학원 항공우주 및 기계공학과

** 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

연락처자, E-mail : jkim@kau.ac.kr

경기도 고양시 덕양구 항공대학로 76, 기계관 423호

기가 제트 엔진 항공기로 전환되면서 전기 및 유압 장치로 구성되는 복잡한 시스템을 가진 제트기의 설계를 위해 고장 형태 및 영향 분석(Failure Mode and Effects Analysis, FMEA)을 사용한 것을 시작으로, 1960년대부터는 우주 개발 및 국방 분야에서 활용하기 위한 로켓 추진시스템에 대한 정성적(qualitative) 신뢰성 분석 및 설계를 수행해 왔다.[2]

최근에는 정성적 신뢰성 분석을 확장하여 베이즈안 추론(Bayesian Inference) 등과 같은 확률적 기법을 이용하여 고장 확률을 예측하고 신뢰도 및 위험도를 평가하는 정량적(quantitative) 분석이 수행되고 있다.[3]

국내에서도 항공기 설계 및 운항에 대한 신뢰성 및 안전성 평가에 대한 연구가 진행되었으며 한국항공우주연구원을 중심으로 우주 발사체에 대한 신뢰성 분석 기법 연구 및 한국형 우주 발사체(KSLV-II)에 대한 신뢰성 연구가 수행되고 있다.[4]

본 연구에서는 로켓 추진 시스템의 신뢰성 분석, 설계에 대한 기초 연구 및 항공기 설계와 항공운항 분야의 신뢰성, 안전성 평가의 절차 제시에 대한 기초 연구의 일환으로 본 연구진에서 기수행한 하이브리드 로켓의 설계, 연소 특성에 관한 연구[5-9] 및 정성적 신뢰성 분석[10] 결과를 바탕으로 정량적 분석을 위해 하이브리드 로켓의 구성품인 점화 장치에 대한 신뢰도 예측을 수행하고 목표 신뢰도와 비교/분석을 수행하였다.

II. 본 론

1. 하이브리드 로켓 및 점화장치

하이브리드 로켓은 한국항공대학교 하이브리드 및 미래추진연구실에서 과학 로켓(sounding rocket) 시험 발사를 목적으로 설계/제작된 1단 하이브리드 로켓으로서 Fig. 1과 같다.

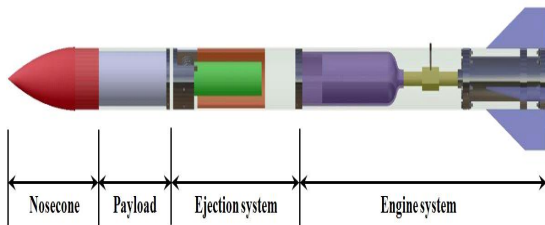


Fig. 1 Configuration of hybrid rocket

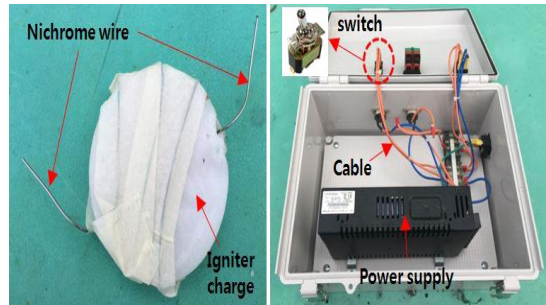


Fig. 2 Ignition system of hybrid rocket

하이브리드 로켓은 추력을 발생시키기 위한 엔진 부(engine system), 로켓 회수를 위한 사출 부(ejection system), 비행 데이터 획득을 위한 전장 부(payload)로 구성되어 있다.

본 연구의 신뢰도 예측 대상인 점화 장치는 Fig. 2와 같다. 점화 장치는 점화 화약과 열원을 공급하기 위한 열선이 결합된 점화기(Ignitor)와 열선의 가열을 위한 전원 공급 시스템으로 구성되어 있으며 점화기는 엔진 부에 삽입되어 고체 연료의 초기 점화를 수행한다.

2. 신뢰도 예측

점화 장치의 신뢰도 예측을 위해서 W. W. Wells가 제안한 로켓 추진 시스템의 신뢰성 분석 절차를 이용하였으며 분석 절차는 Fig. 3과 같다.[11]

신뢰성 분석은 시스템의 설계를 시작으로 고장모드, 영향 및 치명도 분석(Failure Mode, Effects and Criticality Analysis, FMECA)을 수행하여 시스템에서 발생 할 수 있는 고장모드를 도출하고 고장이 시스템에 미치는 영향을 평가한다.

이후 신뢰도 할당(allocation), 예측(prediction), 검증(verification), 입증(demonstration)을 수행하여, 성능, 비용, 신뢰도 등의 요구 조건을 충족하면 제조 및 운용 단계에 대한 신뢰성 분석을 수행한다. 반면 요구 조건을 충족하지 못하는 경우에는 재설계를 수행하여 요구 조건이 충족 될 때까지 반복적으로 분석을 수행한다.

본 연구에서는 입증 및 검증을 위한 시험 비용 및 시간을 고려하여 FMECA를 수행하여 점화 장치에서 발생할 수 있는 고장모드와 영향을 파악하고 목표 신뢰도 할당 및 신뢰도 예측을 수행하여 비교, 분석까지만 수행하도록 한다.

2.1 점화 장치의 FMEA

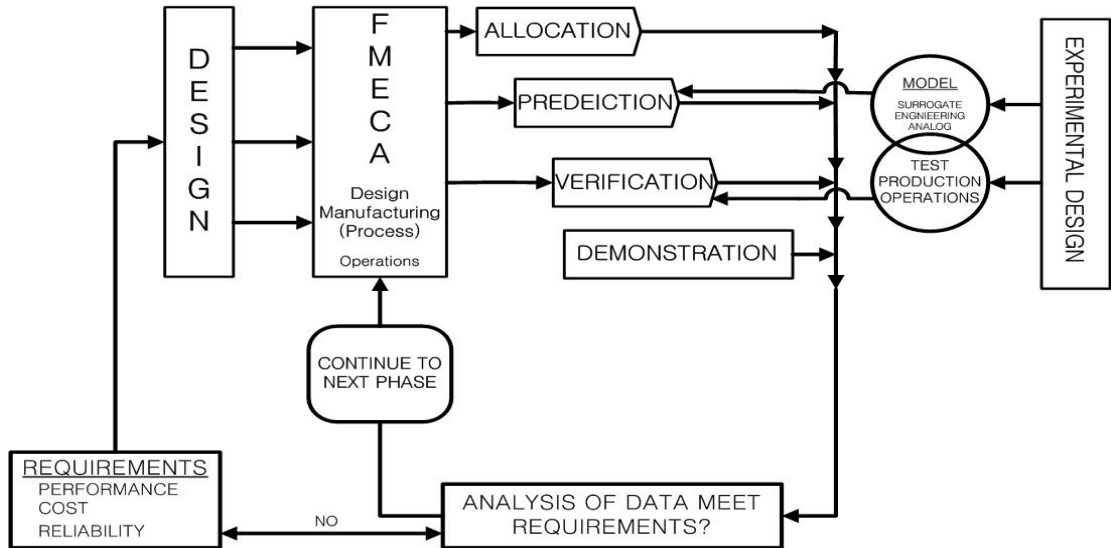


Fig. 3 Reliability analysis process of rocket propulsion system[11]

FMECA는 정성적 신뢰성 분석 기법인 고장형태 및 영향 분석(FMEA)과 준-정량적 분석 기법인 치명도 분석(Criticality Analysis, CA)이 결합된 것으로서 우선적으로 개선 조치가 필요한 부품 또는 고장모드를 도출하고 개선 조치를 수행하는 대표적 신뢰성 분석 기법이다.[12]

FMECA 수행을 위해서는 우선적으로 FMEA가 수행되어야 한다. FMEA는 시스템이나 부품에서 발생할 수 있는 고장을 파악하고 고장의 발생원인 및 고장의 영향을 평가하고 이를 설계에 반영하여 신뢰성을 확보하는 분석 기법이다.[2]

FMEA 수행은 우선적으로 시스템의 분해 수준을 결정하여 구조도를 작성하고, 고장모드와 원인 파악 및 영향 분석 순으로 진행된다.

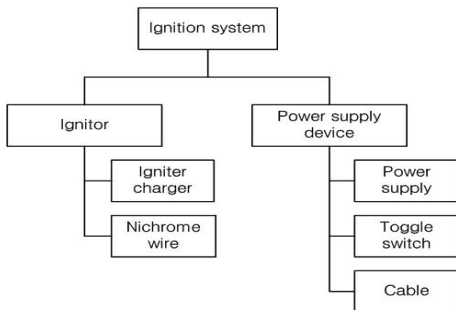


Fig. 4 Structure deployment of Ignition system

본 연구에서는 시스템 분해 수준을 부품(component) 수준으로 결정하여 Fig. 4와 같이 점화 장치에 대한 구조도를 작성하였다. 점화 장치는 총 2개의 서브시스템으로 구성되어 있으며 하위 5개의 부품으로 구성되어 있다.

구조도 작성 후 점화 장치의 5개의 부품에서 발생할 수 있을 것으로 판단되는 총 19개의 고장모드를 정의하였으며, 고장의 발생원인 및 영향을 분석하였다. 분석 결과는 MIL-STD-1629A[13]의 양식을 이용하여 Fig. 5와 같이 FMEA sheet를 작성하였다.

FMEA sheet에는 고장 모드와 원인, 영향의 분석 결과가 기재되며 추가적으로 고장 검출 방법, 심각도, 개선 조치 사항이 기재된다. 특히 고장의 영향은 'Local effects', 'Next higher level', 'End effects'로 나누어 고장 발생이 부품 자체에 미치는 영향뿐만 아니라 상위 시스템에 미치는 영향까지 분석하였다. 또한 MIL-STD-1629A에 제시되어 있는 심각도(severity) 분류 기준과 FMEA 수행을 통해 도출된 'End effects'를 이용하여 심각도 평가를 수행하였다.

Figure 5는 점화 장치 부품 중 점화 화약에 대한 FMEA sheet를 작성한 것으로서 점화 화약의 경우 연료의 초기 점화를 위한 부품으로서 점화 화약의 결함은 우발적 점화로 인한 인명사고 및 점화 실패로 인한 임무 실패가 발생할 수 있음을 확인 할 수 있다.

FAILURE MODE AND EFFECTS ANALYSIS

SYSTEM	Ignition				Date	2015.05.03
SUBSYSTEM	Igniter				SHEET	6 OF 18
Reference Drawing					COMPLIED BY	윤근환
Mission					APPROVED BY	김진곤

Identification Number	Item / Functional Identification	Function	Failure modes	Failure causes	Mission phase / Operational mode	Failure Effects			Failure detection method	Compensating provisions	Severity class	Remark or Recommended actions
						Local effects	Next higher level	End effects				
1-5-1-1-A	Igniter charger	연료의 점화	우발적인 점화	- 전원 공급 스위치 고장	발사 초기	- 우발적 점화		- 인명사고	- 점화 시험		I	- 전원 공급 스위치 교체
1-5-1-1-B			점화 지연	- 점화 와약의 흡습 - 점화 와약의 부족 - 부적절한 발원선 사용 - 불충분한 전원 공급		- 점화 지연	- 연료 점화 지연	- 발사 지연	- 점화 시험		IV	- 재습 보관 - 점화 와약의 양 조절 - 발원선 교체 - 전원 공급 장치 교체
1-5-1-1-C			점화 실패	- 점화 와약의 흡습 - 점화 와약의 부족 - 발원선 단선 - 전원 공급선 단선 - 부적절한 발원선 사용 - 불충분한 전원 공급		- 점화 실패	- 연료 점화 실패	- 발사 실패	- 점화 시험		II	- 재습 보관 - 점화 와약의 양 조절 - 발원선 교체 - 전원공급선 교체 - 전원공급장치 교체

Fig. 5 FMEA sheet of Igniter charge

Table 1은 심각도 분류 기준과 점화 장치에서 발생할 수 있는 고장모드들 중 각 기준에 해당하는 고장모드의 개수를 나타낸 것이다.

Table 1. Classification of severity and number of failure modes in ignition system

Classification	Severity	Number of failure modes
I (Catastrophic)	추진기관 파손 및 인명 손실	3
II (Critical)	임무 실패	11
III (Marginal)	임무 지연 및 수행능력 저하	5
IV (Minor)	수리 요망	-

점화 장치에서 고려된 총 19개의 고장모드 중 14개의 고장모드가 추진기관 파손 및 인명 손실, 임무 실패에 해당하는 고장모드들로 이러한 고장모드들은 다른 고장모드에 비해 우선적인 개선 조치 및 중점적인 관리가 필요한 고장모드들이다.

2.2 치명도 분석

치명도 분석은 고장의 발생이 부품 및 전체

시스템에 미치는 영향을 정량적으로 분석하는 것으로서 치명도로 표현된다.

치명도 분석은 부품 또는 고장모드 중에서 치명도가 높은 부품을 찾아내는 것으로서, 치명도 행렬을 작성하여 심각도가 높고 치명도가 높은 부품 또는 고장모드는 우선적으로 개선 및 지속적 관리가 필요하다.

각 부품에 대한 치명도는 식 (1)과 같이 부품에서 발생할 수 있는 고장모드들의 치명도 합으로 계산 된다.[12]

$$C_r = \sum_{n=1}^j (\beta \alpha \lambda_c t)_n = \sum_{n=1}^j (C_m)_n, n = 1, 2, \dots, j \quad (1)$$

식 (1)에서 β 는 어떤 고장모드가 발생했을 때, 임무 수행에 치명적 결과가 생길 가능성을 의미하며 Table 2와 같은 기준을 사용하여 결정한다.[13]

Table 2. Typical failure effect probabilities

Failure effect	β value
Actual loss	1.00
Probable loss	$0.10 < \beta < 1.00$
Possible loss	$0 < \beta < 0.10$
No effect	0

또한 α 는 해당 부품의 고장률(λ_c) 중에 각각의 고장모드들이 해당하는 비율을 나타내는 것이다. 일반적으로 α 는 가용한 데이터베이스(database)를 [14] 이용하여 고장모드의 비율을 결정하지만, 사용할 수 있는 데이터베이스가 없는 경우 치명도 분석을 수행하는 사람의 결정으로 할당하여 사용할 수 있다.

λ_c 는 각 부품의 고장률(failure rate)을 나타내는 것으로서 실제 데이터를 사용하거나 가용한 데이터베이스를 이용한다. 본 연구에서는 점화 장치에 대한 실제 데이터가 없으므로 데이터베이스를 [15,16] 이용하여 도출하였으며 Table 3과 같다.

Table 3. Failure rate of ignition system component

Component	Failure rate (/10 ⁶ hour)
Igniter charger	42.4264
Nichrome wire	0.25581
Power supply	39.00
Switch	24.152
Cable	1.791

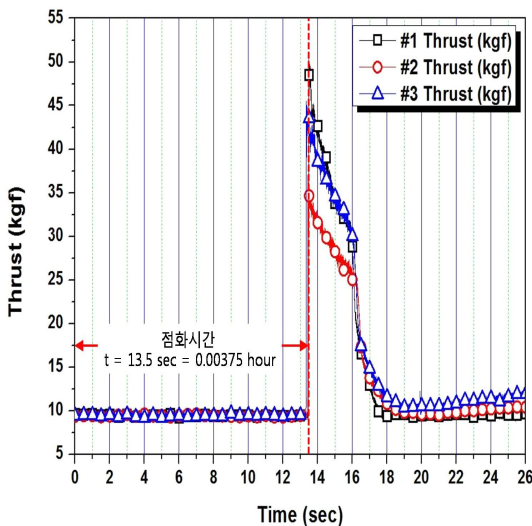


Fig. 6 Estimation of ignition time

마지막으로 t 는 부품의 운용 시간(operation time)을 나타내는 것으로서 실제 운용되는 시간을 사용한다. Fig. 6은 3회의 연소 실험에서의 추력선도를 나타낸 것으로서 점화 시간은 약 13.5 sec인 것을 확인할 수 있다. 이에 본 연구에서의 점화 장치의 운용시간은 $t = 13.5 \text{ sec} = 0.00375 \text{ hour}$ 로 설정하였다.

Table 4는 앞서 설정된 변수들의 값을 식 (1)에 대입하여 각 부품의 치명도를 계산한 결과이다. 또한 치명도 계산 결과와 FMEA에서 수행된 심각도 분석 결과를 이용하여 Fig. 7과 같은 치명도 행렬을 작성하여 각 부품의 치명도를 분석하였다.

Table 4. Component criticality of ignition system

Component	Criticality ($C_m \times 10^{-8}$)
Igniter charger	12.8
Nichrome wire	0.03
Power supply	7.3
Switch	4.9
Cable	0.27

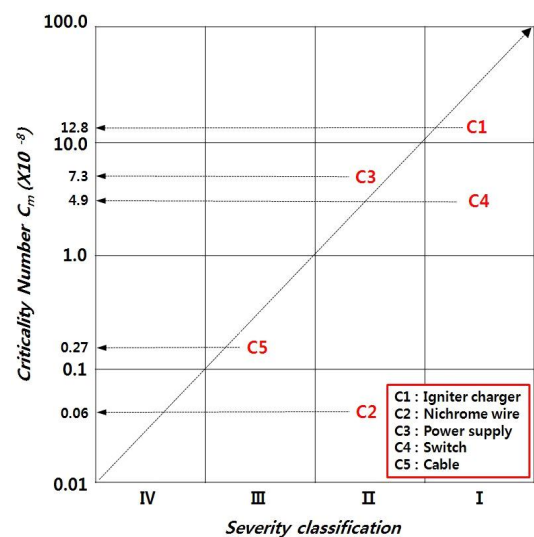


Fig. 7 Criticality matrix of ignition system component

치명도 행렬에서는 원점으로부터 대각선 방향으로 멀어질수록 고장이 발생할 경우 시스템에 치명적인 영향을 주는 것으로서 여기에 해당하는 부품들은 우선적 개선조치 및 지속적인 관리가 요구된다.

점화 장치에 대한 치명도 분석 결과 점화 화약과 토클 스위치가 심각도가 높고 치명도가 높은 중요 부품인 것을 확인할 수 있으며, 이러한 부품들은 우선적인 개선 조치와 중점적 관리가 요구되는 부품들이다.

2.3 목표 신뢰도 할당

점화 장치의 신뢰도 예측 결과의 비교 분석을 위해서는 목표 신뢰도 설정이 필요하다. 목표 신뢰도의 설정은 기존에 성공적으로 운용되었던 동일한 시스템의 신뢰도 이력을 사용하거나 가용한 신뢰도 이력이 없는 경우 직접 신뢰도를 할당하는 방법이 사용된다.[11] 본 연구의 신뢰도 예측 대상인 점화 장치의 경우 가용한 신뢰도 이력이 없으므로 직접 신뢰도를 할당하였다.

직접 신뢰도를 할당하는 경우 각 부품 또는 고장모드에 대해 동일한 신뢰도를 부여하는 동일 신뢰도 기반과 부품의 중요도를 고려하여 가중치를 부여하는 가중 계수(weight factor) 기반 신뢰도 할당 방법이 있다.

동일 신뢰도 기반 신뢰도 할당은 쉽고 빠르게 신뢰도를 할당할 수 있는 장점이 있으나 중요하지 않은 부품에 대해 불필요하게 높은 신뢰도가 할당되어 신뢰도 입증, 검증에 과도한 실험 비용이 요구될 수 있다는 단점을 가지고 있다.

가중 계수 기반 신뢰도 할당은 부품들의 시험 비용 등의 중요도에 따른 가중치를 부여하는 방법으로서 고가의 부품 및 성능을 결정짓는 중요 부품의 경우에 시험 비용이 높기 때문에 신뢰도 수준을 낮게 하여 시험을 적게 유도하는 방법이다. 가중 계수 기반 신뢰도 할당은 중요도가 높은 부품에 지나치게 낮은 신뢰도가 할당되는 단점이 있으나, 중요 부품 및 고장모드들에 대한 관리가 용이하고 시험 비용의 측면에서 동일 신뢰도 기반에 비해 유리하다.[11]

본 연구에서는 앞서 수행한 치명도 분석의 치명도 행렬 작성 결과를 바탕으로 하여 심각도 및 치명도가 높은 점화 화약과 스위치, 전원 공급 장치를 중요 부품으로 결정하여 가중 계수 기반 신뢰도 할당 방법을 이용하여 목표 신뢰도를 할당하였다.

가중 계수 기반 신뢰도 할당은 다음 식 (2)와 식 (3)을 통해 목표 신뢰도를 부여하게 된다.

$$R_{critical} = (R_{higher\ level})^{\frac{1}{n+1}} \quad (2)$$

$$R_{non-critical} = \left[(R_{higher\ level})^{\frac{1}{n+1}} \right]^{\frac{1}{y}} \quad (3)$$

식 (2)와 식 (3)에서의 R 은 신뢰도, n 은 중요 부품의 개수, y 는 중요도가 낮은 부품의 개수를 나타내는 것이다. 또한 $R_{higher\ level}$ 은 점화 장치 전체의 신뢰도를 의미하는 것으로서 본 연구진의 경험적 판단으로 $R_{higher\ level} = 0.999$ 로 가정하였다.

Table 5는 식 (2)과 식 (3)을 이용하여 하이브리드 로켓 점화 장치를 구성하고 있는 부품에 대해 신뢰도를 할당한 결과를 나타낸 것으로서 중요도가 높은 부품인 점화 화약, 토클 스위치에 다른 부품에 비해 상대적으로 낮은 신뢰도가 할당되는 것을 확인할 수 있다.

Table 5. Reliability allocation of ignition system and components

System and component	Allocation reliability	Critical
Ignition system	0.999	-
Igniter charger	0.9997499	critical
Nichrome wire	0.9998749	non-critical
Power supply	0.9997499	critical
Switch	0.9997499	critical
Cable	0.9998749	non-critical

2.4 신뢰도 예측 및 결과 비교 분석

본 연구에서 각 부품의 신뢰도 예측은 부품들의 고장률(failure rate)과 식 (4)를 이용하여 예측을 수행하였다.[17]

$$R(t) = e^{-\lambda_c t} \quad (4)$$

각 부품의 신뢰도를 예측 후 점화 장치 전체 시스템에 대한 신뢰도를 예측하기 위해서 신뢰도

블록 선도(Reliability Block Diagram, RBD)를 이용하여 신뢰도 예측을 수행한다. 신뢰도 블록 선도는 신뢰도와 관련하여 서브 시스템 또는 부품들의 관계를 도식적으로 표현하며 각 부품들의 신뢰도를 이용하여 전체 시스템의 신뢰도를 예측할 수 있다.[17] 본 연구에서는 Fig. 4의 점화 장치 구조도와 각 부품들의 기능을 고려하여 Fig. 8과 같은 점화 장치의 신뢰도 블록 선도를 작성하였다.

Figure 8은 점화 장치에 대한 신뢰도 블록 선도를 나타낸 것으로서 각 부품들은 직렬 구조로 연결되어 있음을 확인할 수 있다. 이것은 현재 사용하고 있는 점화 장치는 부품의 고장에 대비한 예비 시스템(redundancy system)이 없어 하나의 부품의 고장은 점화 장치의 전체의 고장으로 이어지는 것을 의미한다.

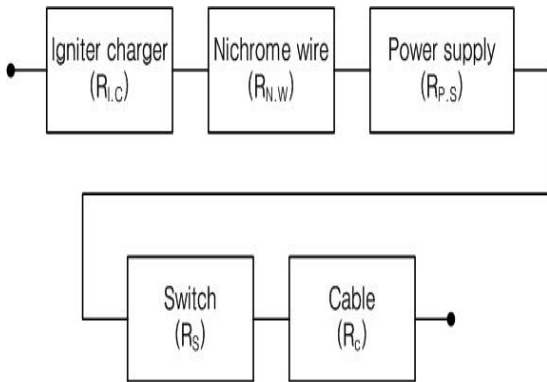


Fig. 8 Reliability block diagram of ignition system

신뢰성 블록 선도에서 직렬 구조인 경우 시스템의 신뢰도 계산은 각 부품의 신뢰도 값의 곱으로 계산할 수 있으며[17] 점화 장치의 전체 신뢰도 R_{LS} 는 식 (5)와 같이 표현된다.

$$R_{LS} = R_{IC} \times R_{N.W} \times R_{P.S} \times R_S \times R_C \quad (5)$$

식 (4)와 식(5)에 의해 예측된 점화 장치의 부품 및 점화 장치 전체의 신뢰도와 할당된 신뢰도의 비교 결과는 Table 6과 같다.

Table 6은 목표 신뢰도와 신뢰도 예측 결과를 비교한 것으로서 점화장치를 구성하고 있는 부품들과 점화 장치 전체의 신뢰도가 목표 신뢰도 보다 높아 요구된 신뢰도 조건을 만족하는 것을 확인할 수 있다.

Table 6. Allocation reliability vs Prediction reliability of Ignition system

System and component	Allocation reliability	Prediction reliability
Ignition system (R_{LS})	0.999	0.999999596
Igniter charger (R_{IC})	0.9997499	0.999999841
Nichrome wire ($R_{N.W}$)	0.9998749	0.999999999
Power supply ($R_{P.S}$)	0.9997499	0.999999854
Switch (R_S)	0.9997499	0.999999909
Cable (R_C)	0.9998749	0.999999993

그러나 본 연구의 신뢰도 예측에 사용된 고장률은 모두 해외의 문헌을 통해 정의된 것으로서 본 연구에서 사용되고 있는 점화 장치 부품의 고장률과는 상이할 수 있다. 예를 들어 본 연구진이 사용하고 있는 점화 화약의 경우 직접 제조하여 사용하고 있기 때문에 해외 문헌에서 제공하는 점화 화약과는 종류, 조성비, 질량 등이 다를 수 있어 현재 사용되는 점화 화약의 고장률로 사용하는 것에 한계가 존재한다. 따라서 보다 객관적인 신뢰도 예측을 위해서는 점화 화약과 같이 제조하여 사용하는 부품의 경우 적합한 고장률 데이터 확보를 위한 실험 계획 수립 및 실험을 수행하여야 한다. 또한 전원 공급 장치 및 스위치 등과 같이 구매하여 사용하는 부품에 대해서는 제조사의 가용한 고장률 데이터를 확보하여 신뢰도 예측을 수행하여야 할 것이다.

III. 결 론

본 연구는 로켓 추진 시스템의 신뢰성 분석, 설계에 대한 기초 연구로서 하이브리드 로켓의 구성품인 점화 장치에 대한 신뢰도 예측을 수행하였다.

신뢰도 예측에 앞서 점화장치에 대한 FMEA 수행을 통해 점화 장치를 구성하고 있는 부품들에서 발생할 수 있는 고장모드와 발생원인, 고장의 영향을 분석하였으며 정성적 심각도 분석을

통해 중요 고장모드를 파악할 수 있었다. 신뢰도 예측을 위해 부품의 중요도가 고려된 가중 계수 기반 신뢰도 할당을 수행하였으며, 문헌에 제시된 고장률을 이용하여 신뢰도 예측을 수행하였다. 신뢰도 예측 결과와 목표 신뢰도를 비교 분석한 결과 점화 장치를 구성하고 있는 부품과 점화 장치 전체에 대한 예측 신뢰도가 목표 신뢰도가 높은 것을 확인할 수 있었다. 이를 통해 현재 사용하고 있는 점화 장치는 요구된 신뢰도 조건을 만족하며 점화 장치 고장으로 인한 임무 실패 확률이 낮은 것을 확인할 수 있었다.

향후 실험 또는 부품에 대한 실제 고장률을 확보하여 보다 현실적인 신뢰도 예측을 수행할 것이며 하이브리드 로켓 전체에 대한 신뢰도 예측을 수행할 예정이며, 추가 연구를 통해 도출된 연구 결과는 향후 하이브리드 로켓 설계/제작에 반영되어 신뢰성 확보를 위한 기초 자료로 활용될 것이다.

또한 본 연구에서 제시한 신뢰성 분석 절차 및 기법들은 로켓 추진 시스템뿐만 아니라 항공기 설계 및 항공운항 분야의 신뢰성, 안전성 평가를 위한 절차 제시 및 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다. (계약번호 UD140024GD)

이 논문은 2016년도 정부(미래창조과학부) 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임. (NRF-2013M1A3A3A02042277)

Reference

- 1) Song, Ji-Ho and Park, Jun-Hyub (2007), An Introduction to Reliability Engineering in Mechanical design, Intervision, Seoul.
- 2) Korea Agency for Technology and Standards (2007), Reliability Terms Handbook, Korea Agency for Technology and Standards, Korea, pp. 182~185.
- 3) Stamatelatos, M. Dezfuli, H. (2011), Probabilistic Risk Assessment Procedures Guide for NASA Managers and Practitioners, National Aeronautics and Space Administrations, Washington D. C., pp.1~15.
- 4) Shin, Myoung-Ho, Cho, Sang-Yeon and Kim, Hyun-Woo (2016), Structural-Functional and Failure Modes Analysis and Reliability Modeling on KSLV-II 75-ton Engine System, 2016 KSPE Spring conference, Korea, pp. 102~116.
- 5) Moon, Hee-Jang, Yoon, Chang-Jin, Song, Na-Young, Yoo, Woo-Jun, Kim, Jin-Kon and Sung, Hong-Gye (2006), Study of the Preliminary Design and Performance Prediction for the Hybrid Propulsion System, Journal of the Korean Society for Aeronautical Science and Flight Operation, Vol. 14, No. 4, pp. 17~23.
- 6) Do, Gyu-Sung, Yoon, Chang-Jin, Moon, Hee-Jang and Kim, Jin-Kon (2007), A Study on Structural Safety of the Solid Fuel Grain by Hot Flow inside a Hybrid Rocket Combustor, Journal of the Korean Society for Aeronautical Science and Flight Operation, Vol. 15, No. 4, pp. 38~44.
- 7) Kim, Soo-Jong, Moon, Hee-Jang and Kim, Jin-Kon (2010), Combustion Experiment Measurement Uncertainty for Hybrid Rocket Motor, Journal of the Korean Society for Aeronautical Science and Flight Operation, Vol. 19, No. 1, pp. 7~14.
- 8) Kim, Kye-Hwan, Moon, Keun-Hwan, Kim, Jin-Kon and Moon, Hee-Jang (2014), Oxidizer Flow Rate Throttling for Thrust Control of Hybrid Rocket, Journal of the Korean Society for Aeronautical Science and Flight Operation, Vol. 22, No. 4, pp. 93~98.
- 9) Ryu, Sung-Hoon, Oh, Ji-Sung, Moon, Keun-Hwan, Kim, Hak-Chul, Moon, Hee-Jang and Kim, Jin-Kon (2015), Effect of Diaphragm Thickness on Regression Rate Improvement in Hybrid Rocket Motor, Journal of the Korean Society for Aeronautical Science and Flight Operation, Vol. 23, No. 4, pp. 1~5.
- 10) Moon, Keun-Hwan, Kim, Dong-Sung, Choi,

- Joo-Ho and Kim, Jin-Kon (2013), FMEA and FTA for Reliability Analysis of Hybrid Rocket Motor, Journal of the Korean Society for Aeronautical Science and Flight Operation, Vol. 21, No. 4, pp. 27~33.
- 11) Wells, W. W. (1996), Solid Rocket Booster Reliability Guidebook-Volume II, Society of Automotive Engineers, Inc, Warrendale, pp. 26~49, 119~179.
 - 12) Borgovini, R., Pemberton, S. and Rossi, M. (1993), Failure Mode, Effects and Criticality Analysis (FMECA), Reliability Analysis Center GRIFFISS AFB, NewYork, pp. 1~34.
 - 13) Standard, M. (1980), Procedures for Performing a Failure Mode, Effects and Criticality Analysis, MIL-STD-1629, AMSC Number N3074, Washington D. C., pp. 7~38.
 - 14) Crowell, W., Denson, W., Jaworski, P. and Mahar, D. (1997), Failure Mode / Mechanism Distribution 1997, Reliability Information Analysis center, Rome, pp. 13~370.
 - 15) Dennis, F. M. and Joe C. M. (1978), Missile Materiel Reliability Prediction Handbook Parts Count Prediction, U.S. Army Missile Research and Development Command, Alabama, pp.. 3~175.
 - 16) David, M., William, F., John R., Peter, Z. and Scott. M. (2011) Nonelectronic Parts Reliability Data 2011-Volume 1 and 2, Reliability Analysis Center, NewYork, pp. 126, 448, 474, 669.
 - 17) Federal Aviation Administration (2005), Guide to Reusable Launch and Reentry Vehicle Reliability Analysis , FAA, Washington D. C., pp. 25~31