

하이브리드 로켓 점화 장치의 신뢰도 예측

Reliability Prediction of Hybrid Rocket Ignition System

문근환^{1*}, 최주호², 김진곤²

한국항공대학교 대학원 항공우주 및 기계공학과¹,
한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부²

초 록

본 연구에서는 실제 발사를 위해 설계, 제작된 하이브리드 로켓의 구성품인 점화장치의 신뢰도 예측을 수행하였다. 신뢰도 예측 및 분석을 위해 목표 신뢰도를 할당하였으며, 고장률 Database를 이용하여 점화장치에 대한 신뢰도 예측을 수행하여 목표 신뢰도와 비교 분석을 실시하였다. 비교 분석 결과 현재 사용하고 있는 점화 장치는 요구한 목표 신뢰도를 만족하는 것을 확인할 수 있었다.

1. 서 론

하이브리드 로켓은 고체 및 액체 로켓 대비 낮은 개발 비용과 짧은 개발 기간으로 인한 경제성 및 폭발의 위험성이 낮아 안전성 측면의 장점을 가진 추진 시스템으로서, 최근 우주 발사체, 과학 로켓, 우주 여객선등의 추진 시스템으로 활용하기 위해 전 세계적으로 상용화를 위한 연구가 활발히 진행되고 있다[1].

이러한 하이브리드 로켓을 포함한 로켓 추진 시스템의 경우 시스템 자체의 복잡성과 고속/고온/고압의 극한 환경에서 운용되어 작은 결함으로 인해 시스템 전체의 손실이 발생할 수 있다.

하이브리드 로켓의 대표적 사고 사례로는 2014년 10월에 발생한 미국 Virgin Galactic사의 Spaceship Two 사고가 있다. Spaceship Two의 사고 원인은 하이브리드 로켓 엔진의 변경된 연료로 인한 엔진 폭발로 추정되기도 하였으나 미 교통 안전위원회(National Transportation Safety Board, NTSB) 조사 결과 착륙을 위한 페더링 시스템(feathering system)이 예정보다 빨리 작동되어 기체의 공력저항이 급격하게 증가하였고, 이로 인해 기체가 파손되어 추락한 것으로 결론 내려졌다[2]. 이 사고로 조종사 1명이 사망하고 1명이 중상을 입었다. 이와 같이 로켓 추진 시스템의 사고 발생 시 인명 및 경제적 손실이 발생하기 때문에 초기 설계 단계에서의 신뢰성 분

석을 포함한 설계가 반드시 필요하다.

국외에서는 1960년대부터 로켓 추진 시스템 개발 시 FMEA(Failure Mode and Effects Analysis) 및 FTA(Fault Tree Analysis)기법을 이용한 통한 정성적(qualitative) 신뢰성 분석 및 설계를 수행해 왔다[3]. 최근에는 FMEA에 정량적(quantitative) 분석 기법인 치명도 분석(Criticality Analysis, CA)을 포함한 FMECA(Failure Mode, Effects and Criticality Analysis)를 통한 로켓 추진 시스템의 신뢰성 분석에 대한 연구가 수행되었다[4].

국내에서는 항공기 및 자동차 산업 분야에서 FMEA, FTA 기법을 이용한 신뢰성 분석, 설계가 활발히 이루어지고 있으나[3], 로켓 추진 시스템에 대한 신뢰성 분석, 설계에 대한 연구는 미비한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 로켓 추진 시스템의 신뢰성 분석, 설계에 대한 기초 연구의 일환으로 본 연구진에서 기 수행한 하이브리드 로켓의 정성적 신뢰성 분석[5]을 확장하여 하이브리드 로켓의 구성품인 점화 장치에 대한 신뢰도 예측을 수행하고 목표 신뢰도와 비교/분석을 수행하였다.

2. 본 론

2.1 하이브리드 로켓 및 점화 장치

본 연구를 위한 하이브리드 로켓은 한국항공대

학교 하이브리드 및 미래추진연구실에서 2015년 시험 발사를 목적으로 설계/제작된 1단 하이브리드 로켓으로서 Fig. 1과 같다.

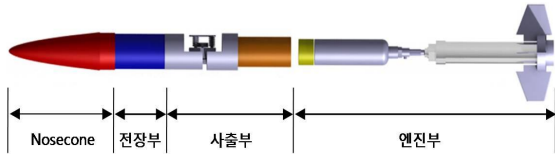


Fig. 1 Configuration of hybrid rocket

Figure 1은 하이브리드 로켓 구성을 나타낸 것으로서 추력을 발생시키기 위한 엔진 부, 로켓 회수를 위한 사출부, 비행 데이터 획득 및 미세 먼지 측정을 위한 측정 장치가 포함되어 있는 전장부로 구성되어 있다. 본 연구의 신뢰도 예측 대상인 점화장치는 엔진부에 삽입되어 초기 점화를 수행한다.

점화장치는 점화를 위한 점화 화약과 열원을 공급하기 위한 열선 및 전원공급 장치로 구성되어 있으며 Fig. 2와 같다.

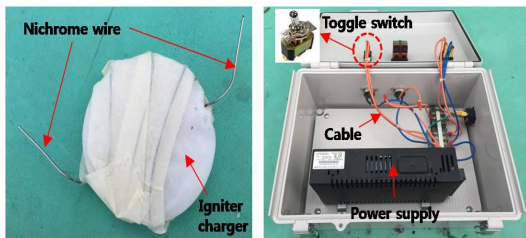


Fig. 2 Ignition system of hybrid rocket

2.2 신뢰도 예측

2.2.1 신뢰도 예측 절차

로켓 추진 시스템의 신뢰도 분석은 Fig. 3과 같은 절차로 진행된다[4].

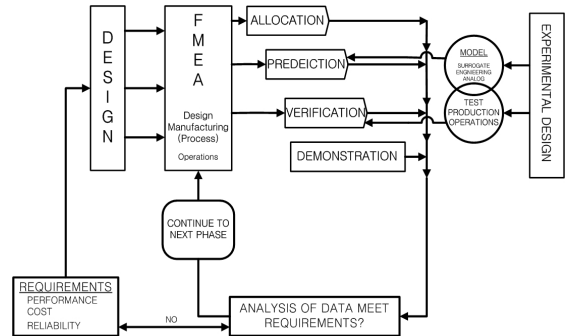


Fig. 3 Reliability analysis process

신뢰도 분석은 설계를 시작으로 FMEA 수행, 신뢰도 할당, 신뢰도 예측, 입증 및 검증을 수행하여 요구 조건을 충족하면 제조, 운용 단계의 신뢰도 분석을 수행하고 충족하지 못한 경우 재설계를 수행하여 요구조건이 충족될 때까지 반복적으로 분석을 수행한다. 본 연구에서는 입증 및 검증 수행을 위한 시험 비용 및 시험 시간을 고려하여 신뢰도 예측 후 목표 신뢰도와 비교 분석까지만 수행하도록 한다.

2.2.2 점화 장치의 FMEA

FMEA는 시스템이나 부품에서 발생할 수 있는 고장을 파악하고 고장의 발생원인 및 고장의 영향을 평가하고 이를 설계에 반영하여 신뢰성을 확보하는 대표적인 신뢰성 분석 기법이다[3].

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

본 연구에서는 시스템 분해 수준을 부품(component) 수준으로 결정하였으며 Fig. 4와 같이 점화 장치에 대한 구조도를 작성하였다.

FAILURE MODE AND EFFECTS ANALYSIS

SYSTEM	Ignition	Date	2015.05.03
SUBSYSTEM	Ignitor	SHEET	6 OF 18
Reference Drawing		COMPILED BY	
Mission		APPROVED BY	

Identification Number	Item / Functional Identification	Function	Failure modes	Failure Causes	Failure Effects			Failure Detection Method	Compensating Provisions	Severity Class	Remark or Recommended Actions
					Local Effects	Next Higher Effect	End Effects				
1-5-1-1-A	Igniter charger	연료의 점화	우발적인 점화	- 전원 공급 스위치 고장	- 우발적 점화		- 인명사고	- 점화 시험		I	-전원 공급 스위치 교체
1-5-1-1-B			점화 지연	- 점화 화약의 흡습 - 점화 화약의 부족 - 부적절한 발열선 사용 - 불충분한 전원 공급	- 점화 지연	- 연료 점화 지연	- 발사 지연	- 점화 시험		IV	- 재습 보관 - 점화 화약의 양 조절 - 발열선 교체 - 전원 공급 장치 교체
1-5-1-1-C			점화 실패	- 점화 화약의 흡습 - 점화 화약의 부족 - 발열선 단선 - 전원 공급선 단선 - 부적절한 발열선 사용 - 불충분한 전원 공급	- 점화 실패	- 연료 점화 실패	- 임무 실패	- 점화 시험		II	- 재습 보관 - 점화 화약의 양 조절 - 발열선 교체 - 전원공급선 교체 - 전원공급장치 교체

Fig. 5 FMEA sheet of Igniter charger

용하여 고장이 상위 시스템에 미치는 정도에 대한 심각도 평가를 수행하였다.

Figure 5는 점화장치의 점화 화약에 대한 FMEA를 수행한 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 확인할 수 있다.

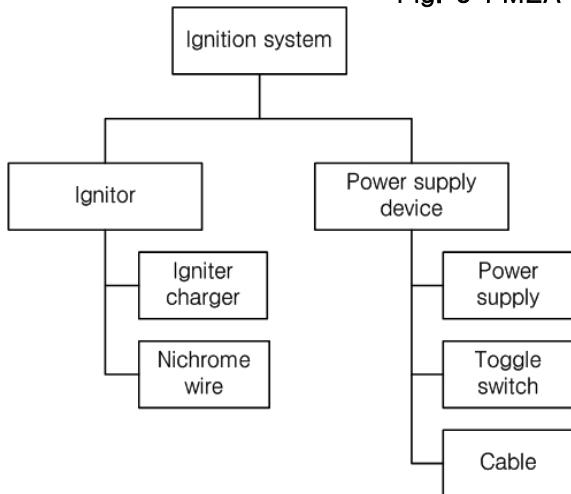


Fig. 4 Structure deployment of Ignition system

위와 같이 구성된 부품에 대해 참고문헌 [4,6]을 바탕으로 각 부품에서 발생할 수 있는 고장모드와 원인 및 영향을 분석하여 Fig. 5와 같이 FMEA sheet를 작성하였다.

FMEA sheet에는 고장모드와 발생원인, 시스템에 미치는 영향이 수록되어 있으며, 특히 영향에 대해서는 ‘Local - effects’, ‘Next higher level’, ‘End - effects’로 세분화하여 부품 자체에 대한 영향뿐만 아니라 상위 시스템에 미치는 영향까지 분석을 수행하였다. 또한 MIL-STD-1629A [7]에 제시되어 있는 정성적 심각도(severity) 기준을 이

Table 1. Classification of Severity and Failure Mode No. of Ignition system

Classification	Severity	Failure Mode No.
I (Catastrophic)	추진기관 파손 및 인명 손실	3
II (Critical)	임무실패	11
III (Marginal)	임무지연 및 수행능력 저하	5
IV (Minor)	수리 요망	-

Table 1은 MIL-STD-1629A의 정성적 심각도 분류 기준과 수행한 점화 장치 FMEA에서의 ‘End-effects’를 이용하여 심각도 평가를 수행하고 각각의 기준에 해당되는 고장모드의 개수를 나타낸 것이다. 고려된 총 19개의 고장모드 중 14개의 고장모드가 심각도 I, II에 해당하는 고장모드들로 이러한 고장모드들은 다른 고장모드에

비해 우선적인 개선조치가 필요한 고장모드이다.

2.2.3 목표 신뢰도 할당

목표 신뢰도를 할당에는 기존에 성공적으로 운용되었던 기존 시스템의 신뢰도 이력을 활용하거나 가용한 신뢰도 이력이 없는 경우 직접 신뢰도를 할당하는 방법이 사용되고 있다[4].

직접 신뢰도를 할당하는 경우 각 부품 또는 고장모드에 대해 동일한 신뢰도를 할당하는 동일 신뢰도 기반과 부품의 중요도를 고려해 가중치를 부여하는 가중 계수 기반이 있다. 동일 신뢰도 기반의 경우 쉽고 빠르게 신뢰도를 할당할 수 있다. 그러나 중요하지 않은 부품에 대해 불필요하게 높은 신뢰도가 할당되어 신뢰도 입증, 검증에 과도한 실험 비용이 요구되는 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. 이 방법의 경우 중요도가 높은 부품에 지나치게 낮은 신뢰도가 할당되는 단점이 있으나, 중요 부품 및 고장모드들에 대한 관리가 용이하고 시험 비용의 측면에서 동일 신뢰도 기반에 비해 유리하다[4].

본 연구에서는 앞서 수행한 FMEA에서의 심각도 분석 결과를 바탕으로 심각도가 높은 고장모드를 포함하고 있는 점화 화약과 토글 스위치를 중요 부품으로 결정하고 가중 계수 기반 신뢰도 할당 방법을 이용하여 신뢰도를 할당 하였다.

가중 계수 기반 신뢰도 할당은 다음과 같은 식 (1), (2)를 통해 목표 신뢰도를 부여하게 된다[4].

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

$$R_{non-critical} = \left[(R_{higher\ level})^{\frac{1}{n+1}} \right]^{\frac{1}{y}} \quad (2)$$

식(1)과 식(2)에서의 R 은 신뢰도, n 은 중요 부품의 개수, y 는 중요도가 낮은 부품의 개수를 나타내는 것이다. 본 연구에서 $R_{higher\ level}$ 은 점화 장치 전체 신뢰도로서 본 연구진의 경험적 판단

으로 0.999로 가정하였다.

Table 2는 식(1)과 식(2)를 이용하여 하이브리드 로켓 점화 시스템을 구성하고 있는 부품에 대해 신뢰도를 할당한 결과로서 중요도가 높은 부품인 점화 화약, 토글 스위치에 상대적으로 낮은 신뢰도가 할당되는 것을 확인할 수 있다.

Table 2 Reliability allocation of Ignition system and components

System and Component	Target reliability	Critical
Ignition system	0.999	-
Igniter charger	0.99966655	critical
Nichrome wire	0.99988883	non-critical
Power supply	0.99988883	non-critical
Toggle switch	0.99966655	critical
Cable	0.99988883	non-critical

2.2.4 신뢰도 예측

본 연구에서 각 부품의 신뢰도 예측은 부품들의 고장률(failure rate)과 식(3)을 이용하여 예측을 수행하였다[8].

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

식(3)에서의 R 은 신뢰도, λ 는 고장률, t 는 부품의 운용시간을 나타낸 것이다. 각 부품의 고장률은 참고문헌[9,10]을 이용하여 Table 3과 같이 정의하였으며 운용시간은 실제 연소 실험에서 점화 장치의 운용시간을 사용하였다.

Table 3 Failure rate of Ignition system components

Component	Failure rate (/10 ⁶ hour)
Igniter charger	42.4264
Nichrome wire	0.25581
Power supply	39.00
Toggle switch	12.5053
Cable	1.791

Figure 6은 3회의 연소 실험에서의 추력 선도를 나타낸 것으로서 점화 시간은 약 13.5 sec인 것을 확인 할 수 있다. 이에 본 연구에서의 점화 장치의 운용시간은 $t = 13.5 \text{ sec} = 0.00375 \text{ hour}$ 로 설정하였다.

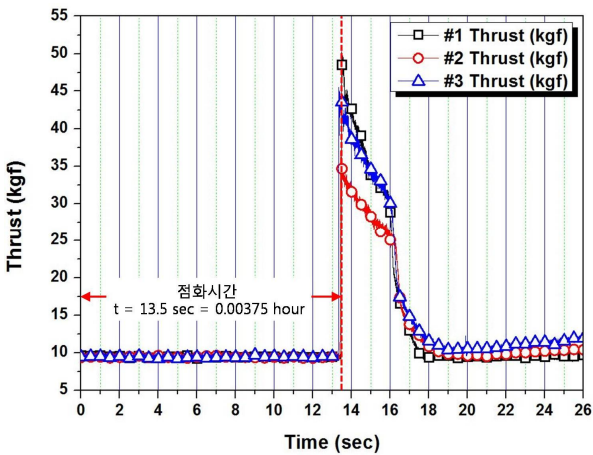


Fig. 6 Estimation of Ignition time

또한 각 부품의 신뢰도를 예측 후 점화 장치에 전체에 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[8]. 본 연구에서는 Fig. 4의 점화 장치 구조도와 각 부품들의 기능을 고려하여 Fig. 7과 같은 점화 장치의 신뢰도 블록 선도를 작성하였다.

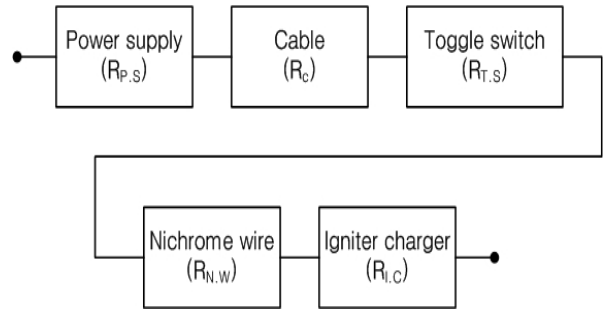


Fig. 7 Reliability Block Diagram of Ignition system

Figure 7은 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 시스템 전체의 고장으로 이어지는 것을 의미한다.

신뢰성 블록 선도에서 직렬 구조인 경우 시스템의 신뢰도 계산은 식(4)와 같이 각 부품의 신뢰도 값의 곱으로 계산할 수 있으며[8] 점화 장치의 전체 신뢰도 $R_{I.S}$ 는 식(5)와 같이 표현된다.

$$R_{total} = R_A \times R_B \times R_C \times \dots \quad (4)$$

$$R_{I.S} = R_{P.S} \times R_C \times R_{T.S} \times R_{N.W} \times R_{I.C} \quad (5)$$

따라서 식(3)과 식(5)에 의해 예측된 점화장치의 부품 및 점화 장치 전체의 신뢰도는 Table 4와 같다.

Table 4 Reliability prediction of Ignition system and components

System and Component	Reliability (Prediction)
Power supply (R_{PS})	0.99999985
Cable (R_C)	0.99999999
Toggle switch (R_{TS})	0.99999995
Nichrome wire (R_{NW})	0.99999999
Igniter charger (R_{IC})	0.99999984
Ignition system (R_{IS})	0.99999964

2.3 신뢰도 예측 결과 비교 분석

Table 5는 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 5 Allocation reliability vs Prediction reliability

System and Component	Allocation	Prediction
Power supply (R_{PS})	0.99988883	0.99999985
Cable (R_C)	0.99988883	0.99999999
Toggle switch (R_{TS})	0.99966655	0.99999995
Nichrome wire (R_{NW})	0.99988883	0.99999999
Igniter charger (R_{IC})	0.99966655	0.99999984
Ignition system (R_{IS})	0.999	0.99999964

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 현실적인 신뢰도 예측을 위해서는 점화 화약과 같이 제조하여 사용하는 부품의 경우 적합한 데이터 획득을 위한 실험 계획 수립 및 실험을 수행하여 고장률을 도출해야 한다. 또한 전원 공급 장치 및 스위치 등과 같이 구매하여 사용하는 부품에 대해서는 제조업체에서의 가용한 고장률 데이터를 확보하여 신뢰도 예측을 수행하여야 할 것이다.

3. 결론

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 예정이다. 또한 본 연구 및 추가 연구를 통해 도출된 연구 결과는 향후 하이브리드 로

켓 설계/제작에 반영되어 신뢰성 확보를 위한 기초 자료로 활용될 것이다.

후 기

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

참고문헌

- [1] Martin, F., Chapelle, A., Orlandi, O., Yvart, P., 2010, Hybrid Propulsion Systems for Future Space Applications, 46th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibits, Nashville, TN.
- [2] National Transportation Safety Board, 2015 <http://www.nts.gov/news/press-releases/Pages/PR20150728.aspx>, Washington, D.C.
- [3] Korea Agency for Technology and Standards, 2007, Reliability Terms Handbook, KATS, Korea, pp. 182~186.
- [4] Wells, W. W., 1996, Solid Rocket Booster Reliability Guidebook—Volume II, Society of Automotive Engineers, Inc., Warrendale, pp. 26~49, 119~179.
- [5] K.H. Moon, J.H. Choi, J.K. Kim, 2014, FMECA for Reliability Analysis of Hybrid Rocket, 2014 KASS Fall Conference, Korea, pp. 22~27.
- [6] Reliability Information Analysis Center, 1997, Failure Mode / Mechanism Distribution 1997, A DoD Information Analysis Center, New York, pp. 13~370.
- [7] Department of Defence, 1980, Procedures for performing a Failure Mode, Effects and Criticality Analysis, DoD, Washington, D.C., pp. 7~38.
- [8] Federal Aviation Administration, 2005, Guide to Reusable Launch and Reentry Vehicle Reliability Analysis, FAA, Washington, D.C., pp. 25~31.
- [9] 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.

[10] David, M., William, F., John, R., Peter, Z. and Scott, M., 2011, Nonelectronic Parts Reliability Data 2011—Volume 1 and 2, Reliability Information Analysis Center, New York, pp. 126, 448, 474, 669.