

중국의 연구 사례를 통한 개방형 액체로켓엔진의 고장진단 동향 분석

이계림¹ · 차지형¹ · 고상호^{1,†}

¹한국항공대학교, 항공우주 및 기계공학과

A Survey on Fault Detection and Diagnosis Method for Open-Cycle Liquid Rocket Engines through China R&D Case

Kyelim Lee¹, Jihyoung Cha¹ and Sangho Ko^{1,†}

¹Department of Aerospace and Mechanical Engineering, Korea Aerospace University, Korea

Abstract

This paper examines a survey on recent research regarding health monitoring and management for liquid rocket engines (LRE). For this, we investigated precedent techniques applied to LRE development. Particularly, we focused on open-cycle LRE to apply to KSLV-II (Korea Space Launch Vehicle II). Through this study, we subdivided health monitoring algorithms and analyzed fault detection and diagnosis algorithm developed in China, since China researched open-cycle LRE that have the same cycle as KSLV-II rocket engines. We discuss significant points to be considered regarding development of the KSLV-II.

초 록

본 논문은 액체로켓엔진의 건전성 감시 및 관리기법에 대한 연구 동향을 소개한다. 이를 위하여 실제 액체로켓엔진에 연구 및 적용되었던 고장진단 알고리즘을 조사하였다. 특히 한국형발사체(Korea Space Launch Vehicle II, KSLV-II)에 적용하기 위해 한국형발사체 로켓엔진과 같은 구조인 개방형 액체로켓엔진에 적용된 알고리즘을 조사하였다. 이러한 과정을 통해 적용된 사례들의 특징을 따로 세분화하고, 한국형발사체 로켓엔진과 비슷한 중국의 개방형 액체로켓엔진들의 고장진단 기법 특징들을 분석하였다. 나아가 2019년에 발사를 목표로 하는 한국형발사체에 적용시키기 위해 고려해야 할 사항에 대하여 토론했고자 한다.

Key Words : Liquid Rocket Engine(액체로켓엔진), Open-Cycle Engine(개방형 사이클 엔진), Health Management(건전성 관리), Fault/Failure Detection(결함/고장 검출)

1. 서 론

우주발사체용 액체로켓엔진은 다수의 서브시스템과 부품들이 직렬 및 회귀결합으로 서로 커플링 된 복잡한 시스템으로 높은 에너지밀도를 가지고 극한의 상황에서 작동함으로써 높은 사고의 위험성을 가지고 있다. 특히, 화재나 폭발 위험성이 큰 물질을 추진체로

사용하기 때문에 사고 시 인적 피해·물적 손실을 일으킬 수 있으며, 사고 발생으로 엔진의 하드웨어가 크게 손상되는 경우에는 사고의 원인을 파악하는데 어려움이 있다. 따라서 엔진의 운용 시, 엔진의 작동상태를 정확히 파악하고 비상상황이 발생할 때 즉각적인 조치를 취해 사고를 최소화하는 액체로켓의 고장진단 시스템이 필수적으로 요구된다[1].

Table 1은 1980년부터 2004년까지 전 세계에서 발생한 액체로켓엔진 기반의 우주발사체 고장사례를 분석한 결과이며 전체 사고 129건에서 57% 정도인 74건이 추진시스템의 고장이 원인으로 판명되었다[2].

Table 1 Space launch vehicle subsystem failure classification by country 1980-2004 [2]

국가	추진	전자	분리	전기	구조	기타	이상	합계
미국	16	4	8	1	1	1		31
러시아	37	5	2			1	20	65
일본	9	1						10
중국	4	1			2		1	8
일본	4	1						5
인도	1	1	1	1		1		5
이스라엘	1	1						2
브라질	?							?
북한							1	1
합계	74	14	11	2	3	3	22	129
비율(%)	57.36	10.85	8.53	1.55	2.33	2.33	17.05	100

특히 우주발사체 선진국보다 일본, 브라질과 같은 신진 우주발사체 국가의 사고 고장비율은 대부분 추진 시스템으로 판단된다[2].

또한, 국내 액체로켓엔진을 개발한 경험으로는 한국 항공우주연구원에서 2002년에 개발한 추력 13톤 수준의 과학로켓 KSR-Ⅲ가 유일하며 2013년에 발사한 나로호를 제외하고는 실제 로켓운용 경험이 미미하므로 우주발사체의 신뢰성 부분을 높일 필요가 있다.

현재 국내에서 항공기, 헬리콥터와 같은 시스템을 운용하는 과정에서 고장을 예측하는 기술을 개발하고, 이를 통해 필요한 경우에만 정비하는 건전성 예측 및 관리(Prognostics and Health Management, PHM) 기술이 활발히 연구되고 있다[3]. 이러한 기법을 응용하여 2019년 발사를 목표로 하는 75톤급 개방형 액체로켓엔진의 신뢰성을 확보할 수 있을 것이라 판단된다.

본 논문은 액체로켓엔진의 고장진단 및 사고방지 시스템 기술개발을 위하여 국외 연구사례를 조사하였다. 우주발사체 선진국인 미국과 러시아의 고장진단 알고리즘은 예전부터 주도적으로 개발해왔지만 간략하게 결과만 소개되어 있어서 구체적인 데이터의 결과 확인이 어렵다. 이러한 이유와 함께 한국형 발사체는 현재 중국이 비슷한 모델을 이용하고 있으며 시뮬레이션 및 알고리즘이 어느 정도 논문에 공개되었기 때문에 확인하기가 쉽고, 최근 고장진단 알고리즘 연구가 활발히 이루어지고 있으므로 본 논문은 중국을 중심으로 고장진단 알고리즘을 기술하고자 한다.

본 논문의 대략적 전개는 다음과 같다. 2장에서는

개방형 액체로켓엔진 고장진단 알고리즘 필요성 및 사례 소개, 3장에서는 사례들을 분석한 특징 설명, 4장에서는 중국 액체로켓엔진 고장진단의 발전적 특징들을 설명하고 마지막으로 앞으로의 연구 방향에 대하여 기술한다.

2. 해외 고장진단 알고리즘 연구 현황

2.1 고장진단 알고리즘 연구의 필요성

액체로켓엔진의 고장(Fault)은 여러 가지 다른 형태로 발생할 수 있으며, 주요 고장은 구성품 또는 엔진의 파괴, 자동정지, 주요파라미터의 허용 한계치 초과 등이 있다. 엔진 고장은 비상상황의 발달 속도에 따라 Table 2와 같이 3개의 그룹으로 분류된다[4]. 액체로켓엔진에 고장이 발생하면 수십 분의 1초 내에 고장이 확산되므로 간단하고 빠른 시간 내에 고장을 대응할 수 있는 Red-lines 기법을 이용한 비상정지를 주로 운영하고 다양한 고장진단 알고리즘을 이용하여 고장원인 파악을 수행한다. 또한, 로켓운용 뿐만 아니라 연소 실험과 같은 지상 테스트에서도 적용하여 테스트 도중 고장이 발생하면 Red-lines 기법으로 우선 비상정지가동 후, Expert system, 신경회로망 등과 같은 고장진단 알고리즘을 통해 고장의 원인 파악을 수행한다. 이를 통해 원인 파악을 수월하게 수행할 수 있으며 엔진 시스템 보완 및 실제 로켓운용에서의 사고를 최소화할 수 있다.

해외에서는 이와 관련된 연구의 필요성을 인식하여 오래전부터 다양하게 수행되어 이미 실전에 투입하고 있으며, 시스템을 최적화 하려는 노력을 지속적으로 하고 있다.

Table 2 Certification of Failure [4]

	분류 기준 및 특징	예
1 그룹	<ul style="list-style-type: none"> 고상에 이르는 비상상황의 발전속도가 사고방지시스템의 작동속도보다 빠른 경우 액체로켓엔진 고장의 30% 차지 비상상황의 발전속도는 파이로벤트의 직통속도 보다 짧음 	니코넨의 고장
2 그룹	<ul style="list-style-type: none"> 비상상황의 발전속도 : 0.04~0.05sec 작동파라미터(압력, 온도)에 대한 정보를 이용하여 알고리즘으로 고장 최소화 할 수 있음. 이 경우 사고방지 시스템의 구조요소 작동시간은 최소화 	기체산업에 의한 산회세 펌프고장
3 그룹	<ul style="list-style-type: none"> 몇십분의 1초 이상의 사고발전속도 엔진 작동파라미터 정보는 이용하면 사고방지알고리즘으로 사고확신 방지 가능 	주진제와 가스누출

최근 국내에서도 자력으로 로켓을 개발하는 과정에서 액체로켓엔진 고장진단 기술의 필요성을 인식하여 이에 대한 이론연구를 시도하고 있다. 한국항공우주연구원은 러시아와 우크라이나 중심으로 고장진단에 대한 문헌을 조사하였으며, 최근 여러 신호처리 기법을 바탕으로 하는 액체로켓엔진의 건전성 감시 및 관리 기법에 대한 동향연구, 액체로켓엔진의 비행시험 준비와 상태진단에 대한 문헌연구 등을 수행하고 있다[4-7]. 이외에도 한국항공대에서는 개방형 액체로켓엔진의 동적 특성 해석을 위해 각 구성품을 모듈화(Modulization)하여 통합시스템을 설계하였으며[8], 우주왕복선 주엔진 시뮬레이션 모델링을 이용하여 고장진단 기법을 연구하고 있다[9, 10].

Figure 1-3은 우주왕복선 주엔진(Space Shuttle Main Engine, SSME)의 고장이 발생하였을 때의 파라미터 변화를 도식화한 것이다. 어느 한 부품에 고장이 발생하면 커플링 된 구성품에 영향을 미쳐 다양한 파라미터들에 변화가 생긴다. 이 변화는 수초에서 수백분의 1초 사이에 발생하고 개방형 액체로켓엔진에도 비슷한 전개가 진행되므로 이러한 변화를 빠르게 탐지하고 대응하는 고장진단 알고리즘이 필수적이다[9].

짧은 시간 내에 발생하는 고장을 검출하기 위하여 1990년대를 기점으로 고장진단 연구를 활발하게 진행한 나라 중심의 고장진단 알고리즘을 소개한다.

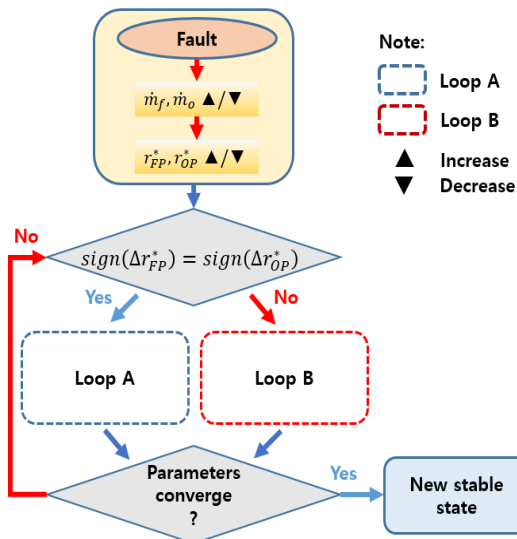


Fig. 1 Fault propagation flow chart of to a 20% less-opened main fuel valve fault [9]

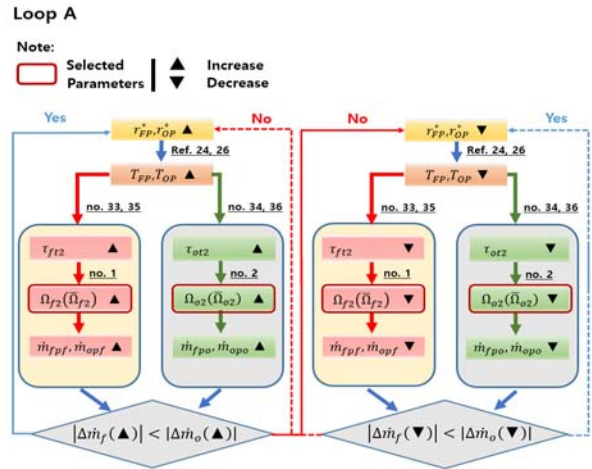


Fig. 2 Loop A flow Chart of repeatedly occurring parameter changes due to faults [9]

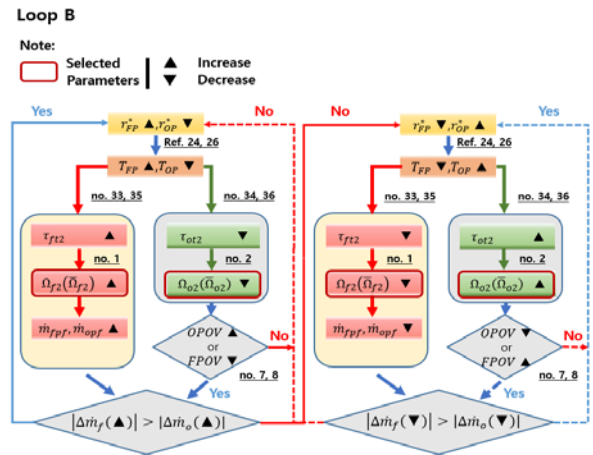


Fig. 3 Loop B flow chart of repeatedly occurring parameter changes due to faults [9]

2.2 1990년 이전 알고리즘

1990년 이전의 액체로켓엔진의 고장진단 기술은 미국과 러시아가 주도적으로 개발하였으며 현재에도 지속적으로 연구를 진행하고 있다[1]. 미국은 1980년 이전에 이미 Atlas, Titan과 같은 대형 액체로켓엔진 개발을 진행하면서 임계값을 이용하여 고장여부를 판단하는 Red-lines 기법 등을 이용하였으며, 그 이후에 통계적 기법을 활용하여 24개의 엔진 변수들을 실시간 감시하여 고장을 탐지하는 기술인 SAFD(System for Anomaly and Failure Detection)을 개발하였다[11]. 또한, Titan을 개발하는 과정에서 지상연소 시험 등의 경험을 통해 얻은 데이터를 기반으로 고장탐지 및 진

단 알고리즘을 설계하고 실제 로켓엔진에 장착된 센서 신호와 비교하여 처리하는 Expert system이 개발되었다[12]. 이후 미국이 재사용 가능한 로켓엔진인 우주 왕복선 주엔진(SSME)을 개발하면서 고장진단 알고리즘 개발에 초점을 맞춰 연구를 수행하였으며, 엔진의 추력 등 성능을 제어하는 제어기와 시스템 진단을 동시에 수행할 수 있는 로켓엔진 통합제어시스템(Intelligent Control System, ICS)을 개발하였다[13].

러시아도 미국처럼 고장진단 알고리즘 기술방면에서 선진적 기술과 풍부한 실전경험을 획득하고 있는 나라로 RD-170, RD-0120 등의 엔진을 개발하면서 고장진단 알고리즘 및 잔여수명 관측에 대하여 연구를 진행하였다[14, 15]. 엔진을 개발하는 과정에서 건전성 관측을 위해 지상시험 및 비행시험에서 얻은 데이터를 이용하였으며, 각종 시험에서 얻은 데이터를 분석하여 Red-lines 기법을 응용한 방법을 이용하였다.

2.3 1990년 이후 알고리즘

1990년 이후에는 중국이 우주발사체용 로켓 개발을 시작하면서 점차 건전성 감시 및 관리기법의 중요성 및 필요성을 인식하게 되면서, 우주 선진국의 관련기술을 추적하는 연구가 진행 중에 있다[1, 16].

1990년대 초기에는 고장진단 알고리즘 개발에 앞서서 국방과학기술대학의 Wu Jianjun 등은 시뮬레이션을 이용하여 고장이 발생한 부품에 따라 고장의 특징들을 분석하였다[17, 18]. 고장이 발생하였을 경우, 미분방정식을 이용한 동적특성 분석과 대수방정식으로부터 정상상태의 변화를 분석하였으며 5개의 매개변수(정상엔진의 산화제-연료 유동량, 정상 산화제 분출 전 압력, 정상 연료 LED 튜브, 터빈 회전속도)을 이용하여 고장 특성을 분석하였다[17, 18]. 그 이후에 시동과정 고장진단 알고리즘 개발을 위해 Full-order 동적 비선형 모델을 사용하여 17개의 비선형 미분 방정식 및 대수 방정식을 혼합하였으며[19], 참고문헌[20, 21]에서는 정확하고 실시간이 가능한 해석 모델이 어려운 시동과정의 비선형 특성을 준정적 과정(Quasi steady state)으로 가정했다. 그리고 검출계산법이 유용한지 알기 위해 Red-lines 기법을 이용하였으며, 시동과정 고장진단을 신경회로망에 적용하여 온라인 고장진단 알고리즘을 구성하였다. Fig. 4은 비선형 모델에 적용된 실시간 온라인

고장진단 알고리즘으로 실제 출력 값과 온라인으로 추정되는 값의 오차 값을 이용하여 고장 유무를 판별할 수 있다[20].

이 밖에도 Yulin Zhang 등은 중국의 액체로켓엔진인 YF-20B의 고장진단을 위해 Fig. 5에 나와 있는 Fuzzy Hypersphere Neural Network 알고리즘을 이용하여 실시간 고장진단이 가능하도록 하였다. 이 알고리즘은 n개의 입력 노드(Input node, a_n)와 m개의 초구 노드(Hypersphere node, b_m)를 통해 고장여부를 판단할 수 있으며 c_p 는 p번째 고장 계열 노드(Fault class node)이다. 이들은 무작위로 부품을 선정하여 고장이 발생하였을 때, 신호처리를 통해 고장진단 하였으며 알고리즘을 개선하여 화성탐사 로켓에 이용할 예정이다[22].

2000년대 들어서는 신경회로망 이외에도 Support Vector Machines(SVM) 등 기계학습법을 이용하여 액체로켓엔진 시스템을 구성하는 부품의 고장 특성을 분석하였다. 특히 고장이 많이 발생하는 터보펌프를 고장원인에 따라 분석하였으며 생물학적 면역시스템을 이용한 인공적 면역 알고리즘(Artificial Immunisation Algorithm, AIA)을 SVM에 적용 및 최적화된 알고리즘을 설계하였다[23].

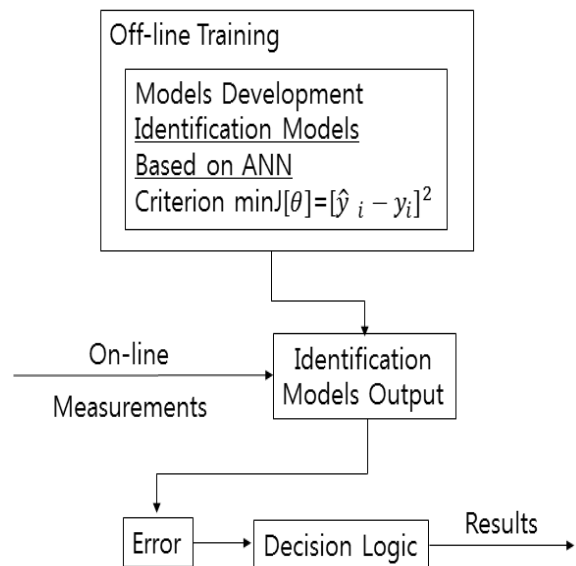


Fig. 4 The scheme of the real-time on-line fault detection for Liquid Propellant rocket engine [20]

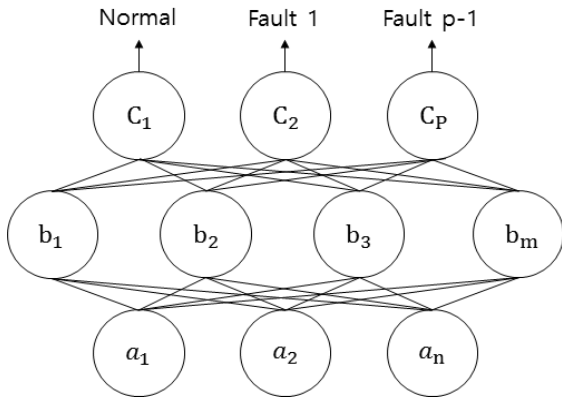


Fig. 5 Structure of fuzzy hypersphere neural network [22]

또한 DOU Wei 등은 온라인 고장진단을 위하여 생물학적 면역 메커니즘(Improved Negative Selection Algorithm)을 응용하여 고장진단 기법에 응용하였으며 그에 대한 알고리즘은 Fig. 6와 같다[24].

국방과학기술대학의 Liu Hoggang 등은 액체로켓엔진의 실제 데이터를 이용하여 고장진단 프로그램을 개발하였다. 실시간 결함을 검출하기 위하여 EA (Envelope Algorithm), BP(Back Propagation) 등 여러 알고리즘을 이용하여 고장진단을 하였으며 높은 신뢰성을 갖는 결과를 얻었다[25].

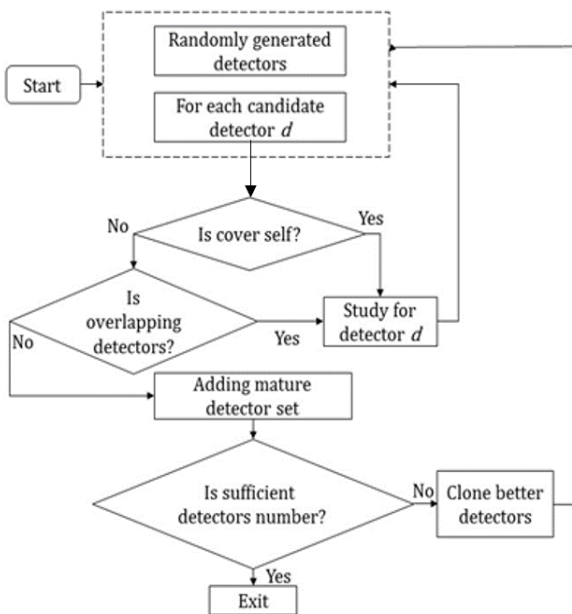


Fig. 6 Detector generation algorithm v-detectors [24]

제 2포병공대의 Zhang Yuxiang 등은 액체미사일 동력 시스템의 정상상태 데이터를 이용하여 시스템 식별(System Identification)을 하였으며 확장된 Kalman 필터를 이용하여 고장진단 알고리즘을 구성하였다 [26]. 시스템 데이터로 엔진의 산화제·연료 유량, 터보펌프의 회전속도, 연소실 압력을 이용하여 모델링을 하였으며 자기회귀(Auto Regressive, AR) 모델과 자기회귀이동평균(Auto Regressive Moving Average, ARMA) 모델을 이용하여 시스템 식별을 통해 모델링을 하였다[26].

이처럼 중국에서는 다양한 알고리즘을 이용하여 액체로켓엔진의 고장진단을 위한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 그러나 중국에서 개발 및 응용된 대부분의 고장진단 시스템은 기본적으로 실험단계이며 현재까지는 주로 지상시험 진단 수준에 머물고 있다[27].

3. 액체로켓엔진 고장진단 알고리즘

액체로켓엔진 고장진단 알고리즘을 사례조사 한 결과, 초기에는 미국과 러시아와 같이 우주선진국에서 연구를 주로 수행하였으며 최근에는 중국에서 많은 연구가 수행되고 있음을 파악하였다. 또한, 미국과 러시아에서는 다단연소 사이클 로켓엔진의 고장진단 알고리즘을 수행하는 반면에 중국은 현재 사용 중인 개방형 사이클 엔진 적용을 위한 연구를 수행하고 있어서 국내의 75톤급 개방형 액체로켓엔진에 적용하는데 도움이 될 것이라고 판단된다.

중국에서 수행된 고장진단 알고리즘 연구에서 다음과 같은 알고리즘 이용하여 연구를 진행한 사례들을 분석하였다.

3.1 신호처리를 이용한 방법

이 방법은 측정신호와 엔진구조 및 운용경험을 이용하여 시스템의 상태를 판정하는 방법으로 임계값, 진동 등을 이용한 방법들이 포함된다. 임계값을 이용하여 고장 여부를 판단하는 Red-lines 기법이 있다. 액체로켓엔진 상태 표시에 중요한 매개변수인 진동 및 유체 압력 신호를 이용하여 고장진단을 할 수 있는데 이는 시간영역, 주파수영역, 진폭, 시간-주파수영역에서 분석이 가능하다. 신호처리 방법으로 피크, RMS,

파괴율, 파괴수, 왜도지수 등에 의한 매개변수(parameter)분석, 상관 분석법, 봉투 분석법, 최대 엔트로피 스펙트럼(Entropy Spectral)법 등이 있으며 다른 진단방법의 기초가 되고 현재에는 여러 방법들을 결합하여 사용된다[1].

3.2 Expert system 방법

Expert system 방법은 정확한 엔진 수학적모델과 시험데이터가 부족한 상황에서 인공지능원리를 이용하고, 전문가는 추진시스템의 전문지식과 운용경험을 일정한 규칙에 따라 데이터를 추출하여 고장 여부를 알 수 있는 방법이다. 시스템에 이상신호가 나타났을 때 검출 결과에 근거하여 고장 부분을 유추하고 진단결과를 얻는다. 이 방법은 속도가 빠르고 요구되는 데이터의 저장 공간이 상대적으로 작으며 프로그램을 짜기 쉽고 원형 프로그램을 신속히 개발할 수 있는 장점이 있다[1]. 하지만 진단을 위해 자체학습이 필요하여 준비시간이 오래 걸리며, 고장모델이 지식 베이스에 한계가 존재하고, 아직 발생하지 않은 고장들은 전문가들의 경험 부족으로 잘못 처리된 고장진단이 발생할 수 있다는 점이다[28].

3.3 신경회로망을 이용한 방법

인공신경회로망은 인간의 신경시스템 구조 원리에 근거하여 발전된 방법이다. 연상기억, 자체학습, 자체조직화, 병렬처리 등의 특징을 이용하여 엔진의 고장을 진단할 수 있다[28]. 하지만 진단방법이 “블랙박스” 방법으로 시스템 내부에 잠재하고 있는 일부 관련 사안을 밝히지 못하며, 진단과정에 대해 명확한 해석을 하지 못한다[28]. 특히 중국에서는 Red-lines 기법과 결합된 형태로 많이 사용되었다[21]. 고장진단에서의 인공신경회로망의 응용에는 아직 실험실 연구 단계에 있는 상태로 계속 연구를 진행하고 있으며, 다른 방법보다 고장진단 알고리즘 연구의 최우선으로 하여 연구를 진행하고 있다.

3.4 상태예측을 이용한 방법

이 방법은 일종의 시스템 수학적모델을 기반으로 한 고장진단 방법이다. 상태관측기 또는 Kalman 필터로 예측한 출력값과 함께 측정신호의 오차를 이용하여 고

장진단을 진행한다. 이 방법의 기본 절차를 다음과 같다.

- (1) 수학적모델과 상태관측기를 이용해 시스템의 상태에 대한 예측을 진행한다. 주로 사용되는 상태예측방법에는 Markov 연쇄법 등이 있다.
- (2) 예측한 출력값과 측정값 사이의 오차를 이용한다.
- (3) 오차 데이터들의 분석을 위해 통계량을 만들고 이에 대한 가설검증을 진행한다.

이 방법을 통하여 고장진단 이론적 연구에 많은 진전이 있었지만 실제 적용하기에는 엔진 시스템의 잠재적인 고장의 종류가 많고, 수학적모델의 차원이 높으며, 비선형이라는 점에서 계산하는데 어려움이 있다. 따라서 다양한 가설을 통해 수많은 Kalman 필터의 설계가 필요하지만 모델링의 정확도가 요구될수록 계산량의 증가로 인해 실시간 고장진단을 판단하기 어렵다는 결론이 있다.

3.5 시계열을 이용한 방법

시계열을 이용한 방법은 정상상태 조건에서 적용되는 방법으로 이전 값을 사용하여 현재 신호 값을 결정하는 자기회귀이동평균(ARMA)모델을 이용하여 고장진단을 수행하는 방법이다. 실시간이 가능하고 계산속도가 빠르다는 장점이 있지만, 시스템이 정상상태와 같이 시불변시스템 조건에서만 적용된다는 단점이 있다.

3.6 기계학습법을 이용한 방법

고장에 따른 양상을 분석하여 원인을 파악하는 방법으로 주로 패턴인식(Pattern Recognition, PR) 방법을 사용한다. 각 고장의 원인에 따라 고장 부분이 다르므로 이를 구분하는 방법이 필요하며, 고장에 따른 각 패턴을 이용하여 고장의 발생위치와 원인을 찾는데 사용된다. 최근 패턴인식을 하는 방법에는 Support Vector Machine(SVM)을 많이 이용하며 각 고장 원인을 잘 파악할 수 있다. 하지만, SVM 방법은 계산시간이 많이 걸리며 높은 신뢰성을 위해 많은 실험의 데이터 확보가 필요하고, 밀접하게 커플링 된 부품들의 고장원인을 파악하는데 오차가 존재할 가능성이 있다.

이와 같은 다양한 방법 중 실제 로켓운용 시, 고장 발생상황에서 빠르게 구현하여 비상정지를 할 수 있는 신호처리 방법의 하나인 Red-lines 기법은 액체로켓엔진 고장진단 알고리즘에서 필수적으로 요구되지만 충분한 시험을 통해서 얻어진 데이터베이스가 있어야지만 가능하다. 또한, 고장원인 분석보다는 고장에 의한 결과에 치중한 방법이기 때문에 빠른 시간 내에 고장을 대응하기 위해서는 효율적이지만 고장원인을 파악하는데 한계가 있다. 따라서, 비상정지를 통해 피해의 최소화만이 아니라 고장원인을 빠르고 구체적으로 파악하기 위해서는 Red-lines 기법과 함께 다른 여러 기법들(Expert system, 신경회로망, 기계학습법 등)이 결합된 고장진단 알고리즘이 요구된다. 향후, 계산능력이 향상될 경우 Expert system, 신경회로망, 기계학습법 등의 방법들을 직접적으로 이용하여 빠른 시간 내에 액체로켓엔진 고장 검출 및 원인분석에 효과적으로 사용될 것이라고 기대할 수 있다.

4. 중국 액체로켓엔진 고장진단 발전적 특징

최근 중국에서 초점을 두고 연구를 하는 개방형 액체로켓엔진의 건전성 관리 및 고장진단 알고리즘의 연구 사례조사를 통해 중국에서 수행된 연구 진행순서를 다음과 같이 정리하였다.

4.1 해외 사례분석 및 정적 고장 모델링

중국에서는 초기에 고장진단 알고리즘 연구를 수행하기 전에 해외사례 분석을 통해 고장진단 알고리즘을 조사하였으며, 액체로켓엔진 시뮬레이션 모델링을 수행하였다. 모델링을 위하여 동적상태를 기반으로 한 미분방정식과 정상상태를 기반으로 한 대수방정식을 이용하여 모델링을 하여 각 부품 고장에 따른 고장 모델링을 적용시켜 주요 파라미터의 영향을 분석하였다 [17, 18].

4.2 동적 고장 모델링 및 알고리즘 연구

정상상태 시뮬레이션 모델링을 고장진단 알고리즘에 적용하였으며 고장요소(Fault factor)를 이용하여 만족할 만한 성능을 얻었다[22]. 또한, 동적 고장 모델의

시뮬레이션을 이용하여 각 펌프의 효율이 손실되었다고 가정하였을 때, 가스발생기 성분비가 시간에 따라 상승하였으며 유동량 및 압력에 대한 파라미터가 감소하는 것을 알 수 있다. 또한, 캐비테이션(cavitation), 메인 밸브 개도 변화 등 임의의 고장을 모델링하여 각 매개변수의 변화를 도식화하였다[17].

정상상태에서의 고장진단 알고리즘 연구와 동적 고장 모델링을 진행하면서 시동과정에 적용할 만한 고장진단 알고리즘 연구도 같이 수행하였다. 주로 Red-lines 기법을 이용하여 고장 여부를 판별하고 신경회로망을 이용한 한계치 선정 및 고장이 발생한 부품을 탐지하는데 사용하였다[19-21].

4.3 특정 부품 고장 특성 연구

시동과정 및 정상상태에서 시스템의 고장이 발생하면 부품을 탐지하는 고장진단 연구를 수행하였다. 시스템의 고장이 발견되면 그 부품을 탐지하는 연구를 수행한 후 고장 원인 및 정도를 파악하는 연구가 진행되고 있다. 참고문헌[23, 24]과 같이 터보펌프와 같은 특정 부품 안에서 발생할 수 있는 여러 고장 원인을 다양한 기계학습법을 이용하여 파악하였으며 이외에 다른 주요 부품에도 적용하여 특정 부품에서의 더 구체적인 고장원인을 파악하였다.

5. 결 론

본 논문에서는 우주선진국에서 개발된 고장진단 알고리즘 소개 및 한국형발사체에 사용될 75톤급 액체로켓엔진과 유사한 중국의 개방형 액체로켓엔진의 고장진단 알고리즘 개발현황에 대하여 사례조사를 하였으며 특징을 분석하였다.

해외의 여러 학교와 연구소를 중심으로 액체로켓엔진 고장진단 알고리즘에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있으며, 특히 중국은 개방형 액체로켓엔진 건전성 관리기술에 대해 광범위한 연구가 진행되고 있다. 이 기술은 사람들의 관심을 받고 있어 이미 액체로켓엔진 기술 중 하나의 새로운 발전 영역이 되었다.

액체로켓엔진 건전성 관리기술은 컴퓨터 공학, 제어 공학, 계측공학과 엔진기술을 서로 결합된 분야이며, 해외에서는 로켓엔진 뿐 만아니라 많은 기계시스템과

전자시스템에 고장검출 및 진단의 이론과 실험을 적용하여 많은 발전을 이루었다. 현재 국내에서도 연구가 진행되고 있으나, 아직 시작하는 단계로 상대적으로 미흡하다고 판단된다. 이 기술의 연구를 진행하는 것은 국내에서 개발하는 액체로켓엔진의 신뢰성을 제고하고 개발 비용을 절감, 달 탐사선 등을 포함한 로켓의 안정성을 확보하는데 중대한 의의를 갖는다. 따라서 본 현황조사 및 특징 분석을 통해 국내에서도 동 분야와 관련된 여러 세부 분야의 전문가들의 관심을 끌어내고 서로 협력하여 활발한 연구가 이루어지는 기회가 되길 바란다.

후 기

이 논문은 2013년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원 및 2016년도 한국형발사체 개발사업의 “개방형 액체로켓엔진 고장진단 기법 연구”과제로 한국항공우주연구원의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2013M1A3A3A02042434) 와 (No.2016M1A3A1A02021180).

References

- [1] J. H. Cha, C. S. Ha, S. H. O and S. H. Ko, "A Survey on Health Monitoring and Management Technology for Liquid Rocket Engines," *Journal of The Korean Society of Propulsion Engineers*, vol. 18, no. 6, pp. 50-58, 2014.
- [2] I. S. Chang, "Space Launch Vehicle Reliability," World Wide Web location <http://aerospace.wpengine.netdna-cdn.com/wp-content/uploads/crosslink/V6N2.pdf>, pp. 22-32, 2005.
- [3] J. H. Choi, "A review on prognostics and health management and its applications," *Journal of The Society for Aerospace System Engineering*, vol. 8, no. 4, pp. 7-17, 2014.
- [4] C. W. Kim, S. Y. Park and W. K. Cho, "Methodology of Liquid Rocket Engine Diagnosis," *Korea Aerospace Technology*, vol. 11, no. 2, pp. 182-194, 2012.
- [5] C. W. Kim, S. H. Kim, C. H. Nam and W. S. Seol, "Reduction of the Accident Risk of Liquid Rocket Engine," *Proc. of 31st KSPE Fall Conference*, pp. 388-392, 2008.
- [6] I. S. Kim and E. S. Lee, "Recent Trends in Liquid Rocket Engine Health Monitoring/Management Methods," *Proc. of 32nd KSPE Fall Conference*, pp. 824-832, 2012.
- [7] C. W. Kim, S. Y. Park and W. K. Cho, "Flight Test Preparation for Liquid Rocket Engine and Its Diagnosis," *Proc. of 31st KSPE Fall Conference*, pp. 34-39, 2013.
- [8] M. Son and J. Y. Koo, "One Dimensional Analysis for Dynamic Characteristics of Turbopump-fed Liquid Rocket Engine," *Journal of The Society for Aerospace System Engineering*, vol. 4, no. 1, pp. 1-9, 2010.
- [9] J. H. Cha, C. S. Ha, J. Y. Koo and S. H. Ko, "Dynamic Simulation and Analysis of the Space Shuttle Main Engine with Artificially Injected Faults," *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*, vol. 17, no. 4, pp. 535-550, 2016.
- [10] J. H. Cha, C. S. Ha, S. H. Ko and J. Y. Koo, "Application of fault factor method to detection and diagnosis for space shuttle main engine," *Acta Astronautica*, vol.126, pp. 517-527, 2016.
- [11] H. V. Panossian and W. D. Ewing, "Real-time failure detection algorithm for the space shuttle main engine," *IEEE Control System*, vol. 17, no. 4, pp. 16-23, 1997.
- [12] T. W. Bickmore and R. L. Bickford, "Aerojet's Titan health assessment expert system," *Proc. of the 28th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, Nashville, TN*, AIAA-92-3330, Jul. 1992.
- [13] C. F. Lorenzo and J. L. Musgrave, "Overview of rocket engine control," NASA, TM-105318, Jan. 1992.
- [14] B. Katorgin, F. Chelkis and C. Limerick, "The RD-170, a different approach to launch vehicle propulsion," *Proc. of the 29th AIAA/ASME/SAE/ASEE*

- Joint Propulsion Conference, Monterey, CA, AIAA-93-2415, Jun. 1993.*
- [15] N. Goncharov, V. Orlov, A. Shostak and R. Starke, "Reusable launch vehicle propulsion based on the RD-0120 Engine," *Proc. of the 31st AIAA/ASME /SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, San Diego, CA, AIAA-95-3003, Jul. 1995.*
- [16] Y. Zichu, "The development of condition monitoring and failure diagnostic technique for liquid propellant rocket engines," *Missiles and Space Vehicles of China*, no. 2, pp. 8-17, 1994.
- [17] J. Wu, Y. Zhang and Q. Chen, "Transient performance simulation of a large liquid rocket engine under fault condition," *Journal of Aerospace Power of China*, vol. 9, no. 4, pp. 361-365, 1994.
- [18] J. Wu, Y. Zhang and Q. Chen, "Steady fault simulation and analysis of liquid rocket engine," *Journal of Propulsion Technology of China*, vol. 15, no. 3, pp. 6-13, 1994.
- [19] J. Wu, Y. Zhang and Q. Chen, "A real-time verification system on fault diagnosis methods for liquid propellant rocket engine," *Proc. of the 32nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, Lake Buena Vista, FL, AIAA-96-2831, Jul. 1996.*
- [20] J. Wu, Y. Zhang and Q. Chen, "Real-time fault detection algorithm based on neural networks for liquid propellant rocket engine," *Proc. of the 32nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, Lake Buena Vista, FL, AIAA-96-2591, Jul. 1996.*
- [21] J. Wu, Y. Zhang and Q. Chen, "Real-time on-line fault detection algorithm for starting process of liquid propellant rocket engines," *Journal of Propulsion Technology of China*, vol. 17, no. 6, pp.24-57, 1996.
- [22] Y. Zhang, J. Wu, M. Huang, H. Zhu and Q. CHen, "Liquid-propellant rocket engine health-monitoring techniques," *Journal of Propulsion and power*, vol. 14, no. 5, pp. 657-663, 1998.
- [23] S. Yuan and F. Chu, "Fault diagnosis based on support vector machines with parameter optimisation by artificial immunisation algorithm," *Mechanical System and Signal Processing*, vol. 21, no. 3, pp. 1318-1330, 2007.
- [24] W. Dou and Z. S. Liu, "A new fault diagnosis method for turbopump of liquid rocket engine," *Journal of Propulsion Technology of China*, vol. 32, no. 2, pp.266-270, 2011.
- [25] H. Liu, T. Xie, Q. Huang and J. Wu, "Real-time fault detection and alarm system for ground test of liquid propellant rocket engines," *Missiles and Space Vehicles of China*, no. 1, pp.49-52, 2008.
- [26] Y. Zhang, D. Wang and H. Sha, "Application of kalman filter adaptive algorithm to the fault detection of a liquid missile power system," *Mechanical Science and Technology of China*, vol. 25, no. 7, pp.789-792, 2006.
- [27] B. Long, L. Song, W. Jing, Z. Jiang and Z. Li, "A review and propect of fault diagnosis technique of spacecrafts," *Missiles and Space Vehicles of China*, no. 3, pp.32-37, 2003.
- [28] J. Wu, Y. Zhang and Q. Chen, "Health monitoring techniques for liquid rocket engine - a survey," *Journal of Astronautics of China*, vol. 16, no. 2, pp. 93-99, 1995.