

액체로켓엔진의 건전성 감시 및 관리 기법에 관한 현황 분석

차지형^a · 하철수^a · 오수현^a · 고상호^{b,*}

A Survey on Health Monitoring and Management Technology for Liquid Rocket Engines

Jiyoung Cha^a · Chulsu Ha^a · Suheon O^a · Sangho Ko^{b,*}

^aDepartment of Aerospace and Mechanical Engineering, Korea Aerospace University, Korea

^bSchool of Aerospace and Mechanical Engineering, Korea Aerospace University, Korea

*Corresponding author. E-mail: sanghoko@kau.ac.kr

ABSTRACT

This paper is about a short survey on the recent research activities regarding health monitoring and management for liquid rocket engines. For this, we investigate the precedent techniques developed in advanced space-industry countries which are USA, EU, Russia, Japan and China. Particularly, we focus on the technologies applied in China, a recently joined to the advanced space-industry countries in this field. Then we discuss some important points to be considered to apply to the development of the Korea Space Launch Vehicle KSLV-II and other related projects.

초 록

본 논문에서는 우주발사체용 액체로켓엔진의 건전성 감시 및 관리 기법에 대한 연구 동향을 소개한다. 이를 위하여 미국, 유럽, 러시아와 같은 우주선진국에서 실제 우주발사체용 액체로켓엔진에 연구 및 적용되었던 고장진단 알고리즘을 조사하였다. 특히 최근 우주선진국으로 발돋움하고 있는 중국에서 적용한 기술들을 중심으로 조사하였으며 적용된 사례들을 분석하여 특징들을 나열하였다. 이를 통하여 한국형발사체 KSLV-II 및 그 후의 한국형 달탐사선 발사체 개발사업에 적용하기 위해 고려해야 할 사항에 대하여 토의한다.

Key Words: Liquid Rocket Engine(액체로켓엔진), Health Management(건전성 관리), Fault/Failure Detection(결함/고장 검출), Damage Prognosis(손상 예지)

Received 5 June 2014 / Revised 3 November 2014 / Accepted 11 November 2014

Copyright © The Korean Society of Propulsion Engineers

pISSN 1226-6027 / eISSN 2288-4548

[이 논문은 한국추진공학회 2014년도 춘계학술대회(2014. 5. 29-30, 서울대학교) 발표논문을 심사하여 수정·보완한 것임.]

1. 서 론

우주발사체용 액체로켓엔진은 터보펌프, 주연료분사 장치, 주연소실, 분사구, 열교환기, 밸브

및 기타 배관 등과 같이 다수의 구성품들이 서로 긴밀히 결합된 복잡한 시스템으로, 높은 에너지밀도를 가지고 극한 상황에서 작동하기 때문에 사고발생 가능성이 높으며, 사고발생 시 엔진 자체뿐만이 아니라 시험설비 혹은 발사대에 큰 피해를 줄 수 있다. 더불어 사고 발생으로 엔진의 하드웨어가 크게 손상될 경우 사고의 원인 파악에도 어려움이 발생한다. 따라서 엔진의 운용 시 엔진의 작동상태를 정확히 파악하고 비상상황이 발생할 때 즉각적인 조치로 사고를 최소화하는 액체로켓시스템에 대한 고장진단 시스템이 필수적으로 요구된다.

1980년부터 2004년까지 전 세계에서 발생한 액체로켓엔진을 사용한 우주발사체의 고장사례를 분석한 결과 전체 사고 129건에서 57% 정도인 74건이 추진시스템의 고장으로 발생하였다[1]. 특히 전통적 우주발사체 선진국보다 일본, 브라질과 같은 신진 우주발사체 국가의 발사체 사고에서 추진시스템이 차지하는 고장비율이 훨씬 높다. 따라서 한국형 발사체인 KSLV-II의 2019년 발사를 앞두고 있는 현 시점에서 액체로켓의 개발 및 시험과정과 실제 비행에서의 고장원인과 위치 파악 그리고 상태를 감시하는 기술 개발이 절실히 요구된다.

이와 관련된 연구가 국외에서는 오래 전부터 다양하게 수행되었다[2]. 최근 국내에서도 자력으로 로켓을 개발하는 과정에서 액체로켓 고장진단 기술의 필요성을 경험하였고 이에 대한 이론 연구를 시도하고 있으나 국외에서 진행되는 연구에 비해 기초 이론적 연구수준으로 상대적으로 미진하다고 판단된다[2-5].

본 연구는 액체로켓의 개발 및 시험과정에 직접적으로 활용될 기반기술 개발을 목적으로 하고 있으며 이를 위해 우주선진국에서의 고장진단 알고리즘에 대한 현황을 조사하고, 앞으로 수행되어야 할 발향에 대해 토론하고자 한다.

다른 현황조사 연구에서와 같이 본 연구 목적과 관련된 기존 연구들을 모두 조사하거나 본 논문에서 언급한다는 것은 매우 어렵다. 따라서 본 조사연구에서는 고장진단 알고리즘에 초점을 맞추고 우주선진국에서 적용한 기술을 중심으로

기술하고자 한다.

본 논문의 대략적 전개는 다음과 같다. 다음 2장에서는 우주선진국에서 개발한 고장진단 알고리즘 사례에 대한 소개를 하고, 3장에서는 2장에서 소개한 사례를 분석하여 공통적인 특징을 설명하고, 4장에서는 기술의 발전적 특징을 설명하며 마지막으로 5장에서는 앞으로의 연구 방향에 대하여 기술한다.

2. 해외 고장진단 알고리즘 연구 현황

2.1 미국

미국은 우주발사체용 액체로켓엔진의 고장진단 기술을 매우 중시하여 이 분야의 연구를 지속적으로 하고 있는 나라이다. 미국은 1980년대 이전에 Atlas, Titan과 같은 대형 액체로켓엔진의 개발이 진행되면서 Red-lines 기법 등을 개발하였으며 그 이후에는 한 개의 신호만이 아닌 여러 개의 신호를 이용하여 고장을 탐지하는 기술을 개발하였다. 이 방법은 SAFD(System for Anomaly and Failure Detection)이라 불리는 기술로 24개의 엔진 변수들을 실시간 모니터링 하여 고장을 탐지하는 기술이다[6].

또한, Titan 로켓을 개발하는 과정에서 지상연소시험 등의 경험을 통해 만들어진 자료를 기반으로 고장탐지 및 진단 알고리즘을 설계하고 실제 로켓엔진에 장착된 센서에서 나오는 신호와 비교하여 처리하는 Expert System이 개발 및 적용되었다[7]. 이 방법은 IF-THEN 규칙으로 사용하여 탐지를 위한 42개의 규칙과 진단을 위한 48개의 규칙으로 구성되었다. Ali 등은 Titan 로켓에 사용된 Expert System을 개량하여 학습과 진단을 통합적으로 하는 개선된 Expert System을 제안하였다[8].

다른 방법으로도 고장탐지 및 진단을 위해 여러 알고리즘에 대해 연구를 하였으며 특히 Tulpule는 로켓엔진 시스템에서 고장이 발생되었을 경우 시스템에 부착된 센서에 미치는 영향이 각기 다르다는 것에 착안하여 각 시스템마다 적당한 알고리즘을 적용하는 방법을 제안하였다.

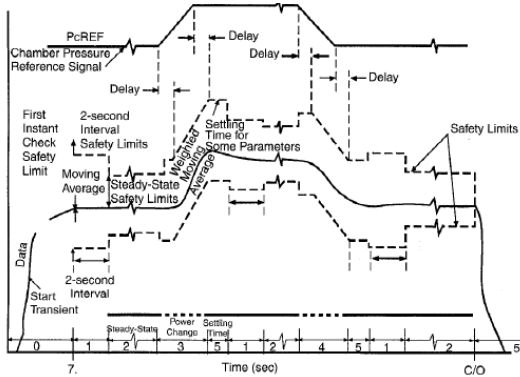


Fig. 1 Schematic of SAFD system[6].

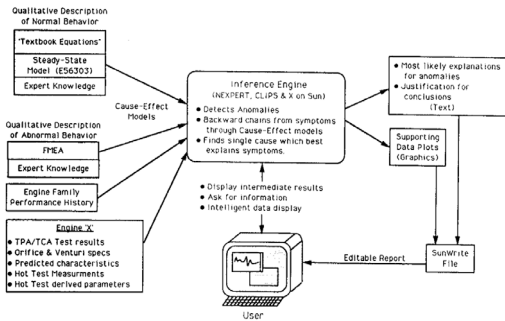


Fig. 2 The titan health assessment expert system integrates multiple sources of diagnostic information for presentation via a graphical user interface[7].

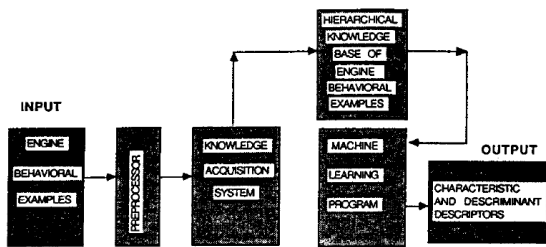


Fig. 3 Example of expert system[8].

이 알고리즘은 통합 고장진단(Integrated Diagnostic System, IDS)이라 불리며 이를 위해 세 가지 알고리즘[Pattern Recognition(PR), model-based Fault Detection and Isolation(FDI), Artificial Intelligence(AI)]을 사용하며 Table 1과 같이 구분하였다[9].

Table 1. Role of diagnostic algorithms in IDS[9].

Level	Task	Algorithm Type
Engine	Mission Evaluation	AI
	System Identification	AI/FDI
	Component Identification	AI
	Failure Identification	FDI
Component	State Estimation	FDI/PR
	Parameter Identification	FDI
	Trend Analysis	PR
	Failure Detection	FDI/PR
Sensor	Noise Reduction	PR
	Thresholding	PR
	Signal Conditioning	PR
Ground	Database Management	AI
	Maintenance	AI

NASA 또한 주요 실현 기술 중 하나로 통합 건전성 관리 시스템(Integrated Vehicle Health Monitoring System, IVHM)을 선정하였으며 Sanders는 재사용 우주발사체의 시스템 건전성 관리(System Health Monitoring, SHM)의 기본 요구사항을 제안하였다.

2.2 러시아

러시아는 고장진단 기술방면에서 선진적 기술과 풍부한 실전경험을 획득하고 있다. Katargin 등은 고성능 액체로켓엔진(RD-170)을 연구하여 건전성 관측과 잔여수명 평가 및 예측 시스템을 개발하였다[10]. Goncharov 등은 액체로켓엔진(RD-0120)의 잔여수명 및 건전성 관측에 대하여 연구하였다[11]. 건전성 관측을 위해서 지상시험 및 비행시험에서 얻은 데이터를 이용하였으며 각종 시험에서 얻은 데이터를 분석하여 한계치를 설정, 일종의 Red-lines 기법을 응용한 방법을 이용하였다. Vasilchenko 등은 Buran 우주비행체의 궤도를 실시간 자동관측 및 예측시스템을 개발하여 우주비행사에게 시각화 정보를 제공함으로써 관측과 비행체의 운항 상황제어를 용이하게 하였다. Dmitry 등은 우주발사체의 구조적 건전성 관리(Structural Health Monitoring, SHM) 기법을 개발하기 위하여 유한요소법을 이용한 시뮬레이션과 Fig. 4와 같은 지상실험을 통

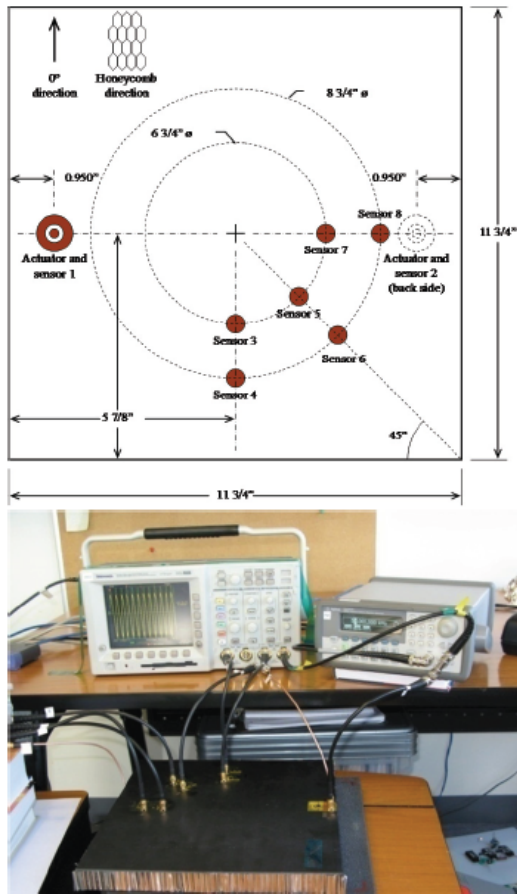


Fig. 4 (top) The schematic of experimental setup (bottom) Photograph of the experimental setup [12].

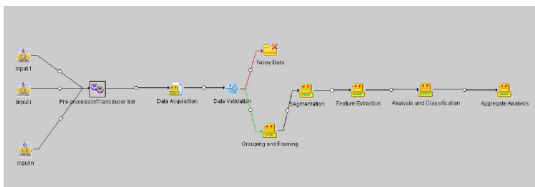


Fig. 5 Real-time monitoring standard architecture[13].

해 얻은 데이터를 비교하였으며 실제 우주비행체에 탑재하기 위해 연구가 더 진행되고 있는 중이다[12].

또한, Alexandre는 우주발사체뿐만 아니라 우주발사체에 탑승하고 있는 승무원의 건강관리를 위해서도 연구하였다[13]. 승무원의 건강은 탑승

하고 있는 우주발사체의 환경의 영향을 많이 받는다. Alexandre는 이를 착안하여 우주발사체 고장진단 기법에서 Data-Driven Approach와 Model-Driven Approach 그리고 이 두 기법을 복합적으로 사용하는 Hybrid Approach를 이용하여 국제우주정거장에 적용할 수 있는 우주의학(Space Medicine)에 대해서 연구하고 있으며 이를 실시간으로 사용할 수 있도록 연구하고 있다.

2.3 유럽

유럽 우주발사체 고장진단 기술 측면에서도 많은 연구가 있었으며 실용적 고장진단 시스템이 몇 가지 개발되었다. 탑재 로켓에 있어서는 독일의 Matijevic이 1990년대 초에 이미 패턴인식을 이용한 Expert system 방법을 개발하였는데, 이 방법은 액체로켓엔진에 대해 고장진단하는 방식으로 시뮬레이션 시스템의 한 방식이다. 프랑스의 Delange 등도 역시 Ariane-5 로켓엔진에 사용하는 고장진단 기술에 대해 연구하였다. Delange 등이 연구한 기술은 고장진단 속도가 빠르고, 정확도가 높으며 엔진에서 발생하는 중대한 고장에 앞서 엔진을 정지시키는 특징이 있다. 현재 유럽우주국은 이미 미래의 탑재로켓 기술방안(Future Launchers Technologies Program, FLTP)과 미래의 탑재로켓 준비방안(Future Launcher Preparatory Program, FLPP)을 제안해 놓은 상태로 이 가운데 중요한 테마는 건전성 진단 시스템이며 Ariane-5 다음 세대의 발사체에 적용할 계획으로 2000년대 초에 개발을 시작하였다[14]. 이 밖에 독일에서는 D2 우주 실험실에서 임무 수행하는 가운데, Hottop 등이 원격제어장치 설비인 건전성 감시 및 고장관리 시스템에 대하여 연구를 진행하였다[15]. 이 기술들은 대부분 Expert system이다. 또한 Kiler는 유럽 재활용형 플랫폼-유레카(EURECA) 플랫폼 콜드 폐쇄 시스템에 근거하여 다중 값 논리(Multi-valued Logic) 기술을 채택함으로써 지식 건전성 관리 및 고장진단 시스템을 개발하였다.

2.4 일본

일본도 우주발사체의 고장진단기술 연구를 매

우 중시하였고, H-2 로켓 발사가 연속적으로 실패함에 따라 투자에 더욱 박차를 가하게 되었으며, Sakamoto 등이 이 분야에 연구를 수행하여 H-2 탑재 운항 로켓엔진의 실시간 관측기술에 대해 분석하였다. Itawa 등은 Expert system과 멀티센서 기술로 위성시스템에 대한 고장진단과 건전성관측을 진행하였으며, 국제우주정거장(International Space Station, ISS)의 구성부품 중 하나인 일본의 실험동(Japanese Experimental Module, JEM) 개발측면에서는 1980년대 말의 Shiraki부터 Yoshikawa 등에 이르기까지 실험동의 환경과 생명유지시스템(ECLSS)의 진단기술에 관한 연구에서 크게 진전을 보여 최근에는 Kibo라 불리는 실험동이 개발되어 국제우주정거장의 한 기관을 구성하고 있다[16,17].

2.5 중국

중국의 우주발사체 고장진단 기술연구에서는 시작은 다소 늦었으나 최근 점진적으로 이 분야의 중요성과 긴박성을 인식하게 됨으로써 우주 선진국의 관련기술을 추적하는 연구가 진행 중에 있다. 특히 이론의 측면에서는 어느 정도의 연구진전이 있었다[18]. 베이징 제어공학연구소는 위성제어시스템의 실시간 고장진단 전문가 시스템 원형(SCRDES)을 개발하였다. 이 SCRDES는 위성의 지상관측, 그리고 위성운항 상태를 지상과 온라인으로 실시간 진단하는 목적으로 사용된다. 하얼빈 공업대학은 중국우주기술연구원 등 기관과 별도 협력하여 유인우주선과 우주정거장의 전원 시스템, 추진 시스템 그리고 인공위성의 고장진단에 대해 심도 있는 연구를 시행함으로써 어느 정도 경험을 획득하였을 뿐 아니라 각기 고장진단 원형 시스템을 개발하였다[19]. 중국에서의 고장진단 기술연구에 있어서는 액체로켓엔진의 구성품 중 터보펌프의 고장진단을 위주로 진행하였다. 국방과학기술대학의 XIE Guang-jun 등은 터보펌프의 고장진단을 위하여 진동데이터를 이용하였으며 IACTA(the Improved Adaptive Correlation Thresholds Alg-orithm)을 이용하여 특정 액체로켓엔진의 시험데이터와 196차례에 걸친 로터의 충돌, 마모 데이터로 고

장검출의 타당성을 시험하여 약 96.0%의 확률로 고장을 검출하는 것을 확인하였다[20]. 베이징 항공우주 추진기관의 DOU Wei 등 또한 터보펌프의 진동데이터를 이용하여 고장진단을 하였다. DOU Wei 등은 온라인으로 고장진단하기 위하여 improved negative selection alg-orithm이라는 생물학적 면역 메커니즘을 이용하였다[21].

또한, 국방과학기술대학의 Liu Honggang 등이 액체로켓엔진의 실제 데이터를 이용하여 고장진단 프로그램을 개발하였는데 실시간 결함을 검출해내기 위하여 EA(Envelope Algorithm), BP(Back Propagation) 등 여러 알고리즘을 이용하여 고장진단을 하였으며 높은 신뢰성을 갖는 결과를 얻었다[22]. 이 밖에도 Yulin Zhang 등은 중국의 액체로켓엔진 중 하나인 YF-20B의 고장진단을 위해 Fuzzy Hypersphere Neural Network 알고리즘을 이용하여 실시간으로 고장진단이 가능토록 하였다[23]. 이들은 무작위로 부품을 선정하여 고장이 발생하였을 때의 신호를 보내 고장진단을 검토하였으며 이를 더 개선하여 화성 탐사 로켓에 이용할 예정이다. 이처럼 중국에서는 다양한 알고리즘을 이용하여 액체로켓엔진의 고장진단을 위한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 그러나 중국에서 개발하였다는 대부분의 고장진단 시스템은 기본적으로 실험단계에 머물고

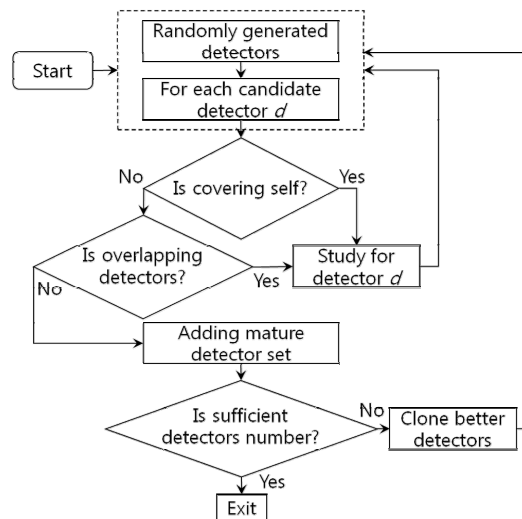


Fig. 6 Detector generation algorithm of v-detectors[21].

있으며 실용단계까지에는 아직 거리가 멀고 해결하여야 할 과제가 많다. 현재는 주로 지상시험 진단 수준에 있다[24].

3. 해외 사례의 공통적인 특징

해외 고장진단의 사례조사를 통해 우주발사체 고장진단 알고리즘에서 다음과 같은 공통적인 특징이 있다[24].

3.1 신호처리를 이용한 방법

이 방법은 진단영역의 응용에 있어서 비교적 초기에 시행된 방법 중 하나이며 주로 임계값 모델을 사용한다. 신호분석은 비교적 다량 획득할 수 있는 시간영역, 주파수영역, 진폭, 시간-주파수 영역 등으로 행한다. 신호처리 방법에는 주로 피크, RMS, 파고율, 파계수, 왜도지수 등에 의한 매개(parameter)분석 등이 있다. 이 신호분석 방법은 다른 진단방법의 기초가 된다.

3.2 Expert system 방법

규칙의 방법 또는 생산형 방법을 일컫는 이 초기 고장진단 Expert system은 모두 규칙을 근거로 하고 있다. 이 규칙들은 전문가의 경험 가운데서 종합/정리된 결과이며 고장과 상관 징후를 분류 기술하는데 이용된다. 이 방법의 이점은 지식표시가 간단하고, 직관적이며 생동적이고 편리하다. 또한, 속도가 빠르고 요구되는 데이터의 저장공간이 상대적으로 작으며 프로그램을 짜기 쉽고 원형 시스템을 신속히 개발할 수 있다는 점이다. 결점은 고장모델이 지식 베이스에 한계가 있고, 아직 발생하지 않았거나 경험 부족으로 잘못 처리된 고장진단에 대해서는 무능력하다는 것과 지식 베이스 가운데 상응하는 모델이 있거나 징조가 규칙에 맞지 않을 때 오진하거나 진단실패를 가져오기 쉽다는 점들이다.

3.3 신경회로망을 이용한 방법

인공신경회로망의 장점은 비선형시스템과 결합 허용성(fault tolerance)과 연상기억 등이 가능

하다는 점이다. 또한 연상기억장치, 자기학습, 자기조직화 등의 장점을 가지고 있으므로 복잡한 시스템의 고장진단 알고리즘으로 사용하기 좋다. 하지만 고장진단에서의 인공신경회로망의 응용에는 아직 부족함이 많다. 즉 진단방법이 “블랙박스” 방법에 속하고 있어, 시스템 내부에 잠재하고 있는 일부 관련 사안을 밝히지 못하며, 진단과정에 대해 명확한 해석을 하지 못한다. 신경회로망 훈련시간은 비교적 길며, 아직 훈련 중에 있지 않은 견본 중에 나타난 고장은 진단능력이 없어서 잘못된 진단의 결론을 얻게 되는 경우도 있으며 이 모두 훈련시간을 길게 하는 요인이 된다.

3.4 모델을 이용한 방법

로켓엔진 시스템의 수학적 모델을 이용하여 엔진에 부착된 센서에서의 출력값과 모델의 출력값의 차이를 통계학적 또는 논리적인 처리과정을 이용하여 고장탐지 및 진단을 하는 방법으로 진단의 정확성을 향상시킨다. 따라서 이 방법은 로켓엔진 시스템의 정확한 모델링이 관건이며 현재 심도있게 연구가 진행되고 있다. 이 방법의 이점은 아직 예견되지 못하는 고장을 진단할 수 있고, 과거의 경험 지식은 필요로 하지 않는다는 점이다. 결점은 시스템의 시뮬레이션 모델을 사용하므로 모델이 비교적 복잡하고 방대하며, 진단 속도가 느리고 모델 정밀도에 의존성이 강하다는 것이다. 또한, 실제 시스템과 만들어진 수학적 모델이 어떤 점에서 동일하지 않고, 어떤 모델의 불확실한 요소나 착오 신호를 보낼지 모른다는 점을 고려해야 한다.

3.5 Petri 망을 이용한 방법

Petri 망은 시스템 구조와 동태의 진행 중요정보를 표시하며 시스템 모델을 그래픽으로 나타낸다. Petri 망 고장진단 방법의 이점은 고장현상의 발생과 전파과정을 동태적으로 그려내며, 시스템 동작의 변화를 통해 고장진단을 진행하는 과정이 편리하다. 결점은 고장진단이 완전히 Petri 망의 모델형성에 의존하며 서로 다른 특징의 고장이 발생하게 될 때 고장의 원인을 추적

하기 어렵고, 문제 해결 과정 중 고장충돌 현상이 쉽게 일어날 수 있다는 점이다.

3.6 멀티센서 정보융합을 이용한 방법

고장진단의 본질은 진단대상 시스템의 운항 중 여러 상황의 정보와 이미 알고 있는 지식 진행 정보의 종합처리를 이용하는 것이므로, 최종적으로는 시스템의 운항과 고장상황의 종합평가에 관해서 결과가 나와야 되며, 이 점에서 정보의 융합기술은 서로 같은 목적과 요구를 가진다. 이 방법은 일정 정도에서 정확한 상태예측을 능히 획득할 수 있어야 하며, 진단의 신뢰도를 증진시키고, 모니터링의 성능을 개선하며, 감응신호장치의 자원을 충분히 이용해야 한다.

3.7 패턴인식을 이용한 방법

패턴인식 기법은 데이터에 따라 처리를 하는 방법으로 넓은 규모의 테스트가 수행되어졌으며 정상상태의 데이터와 비교를 통해 결함상태를 검출한다. 패턴인식은 신호처리를 포함하며 특징을 검출해내고 분류할 수 있다. 이 기법은 모의 실험 데이터에 의하여 정상상태와 비정상상태의 시스템 작동에 대하여 학습을 하여 정상상태와 고장상태의 분류를 위한 자료로 이용된다.

이밖에도 상대적으로 적은 관심이긴 하지만 Fuzzy logic과 Approximate reasoning이 액체로켓엔진의 건전성 모니터링을 위해 적용되고 있다.

4. 고장진단 기술의 발전적 특징

미국, 러시아, 유럽, 일본, 중국 등 수십년간의 우주발사체 고장진단 기술에 대해 상세분석을 통하여 우주발사체의 고장진단 기술은 발전하는 방향성에 대해 다음과 같은 특징이 있다[24].

- 1) 고장진단 시스템이 본래 하나의 개별 서버 시스템의 고장진단 시스템에서부터 시스템 상태 모니터링, 고장진단 및 고장복구가 하나의 우주발사체 통합 건전성 관리(IVHM) 시스템으로 발전하였다.

- 2) 전자기술의 발전에 따라 저장할 수 있는 실험 데이터의 양이 많아지고 수학적 모델의 용량이 커지는 등 다양한 데이터의 저장이용이해져 보다 많은 변수를 고려하는 고장진단이 가능하게 되었다.

- 3) 전산기술이 발전함에 따라 네트워크화 기술, 컴포넌트화 기술, 우수한 사용자 인터페이스(User Interface) 기술 등 고장진단 시스템에도 역시 많은 신기술을 사용하게 되었다.

5. 결 론

본 논문에서는 우주선진국에서의 액체로켓엔진의 고장진단 알고리즘 개발현황에 대하여 사례조사를 하였으며 특징분석을 하였다.

현재 국외 여러 학교와 연구소를 중심으로 액체로켓엔진 고장진단 알고리즘에 대한 연구가 진행되고 있다. 추후 동 분야에 대한 발전 방향성으로는 실시간으로 액체로켓엔진의 고장진단하고 고장이 발생한 부품을 식별하며 능동적으로 대처 및 잔여수명 예측하는 등의 단독 개념이 아닌 통합적인 건전성관리 기법이 요구되리라 판단된다. 이를 위해서는 다음과 같은 사항이 고려되어야 한다.

- 1) 모델링 기술에 대한 연구
 - 2) 모델과 고장진단방법을 결합하는 기술에 대한 연구
 - 3) 고장진단의 컴포넌트화 기술에 대한 연구
 - 4) 고장진단의 네트워크화 기술에 대한 연구
- 액체로켓엔진 고장진단 알고리즘은 연소공학, 열/유체공학, 동역학 그리고 제어공학이 융합된 분야로서 국외에서는 우주개발과 함께 활발하게 진행되고 있으며 특히, 최근에 우주선진국으로 발돋움하고 있는 중국에서 특히 연구되고 있는 분야이다. 현재 국내에서도 연구가 진행되고 있으나 아직 시작하는 단계로 상대적으로 미흡하다고 판단된다.

본 현황조사 및 특징 분석을 통하여 국내에서도 동 분야와 관련된 여러 세부 분야의 전문가

들이 협력하여 활발한 연구가 이루어지는 기회가 되길 바란다.

후 기

이 논문은 2013년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2013M1A3A3A02042434).

References

1. Chang, I.S., "Space Launch Vehicle Reliability," World Wide Web location <http://aerospace.wpengine.netdna-cdn.com/wp-content/uploads/crosslink/V6N2.pdf/>. Crosslink, Spring, pp. 23-32, 2005.
2. Kim, C.W., Park, S.Y. and Cho, W.K., "Methodology of Liquid Rocket Engine Diagnosis," *Aerospace Engineering and Technology*, Vol. 11, No. 2, pp. 182-194, 2012.
3. Kim, C.W., Kim, S.H., Nam, C.H. and Seol, W.S., "Reduction of the Accident Risk of Liquid Rocket Engine," *2008 KSPE Fall Conference*, Daejeon, Korea, pp. 388-392, Nov. 2008.
4. Kim, I.S. and Lee, E.S., "Recent Trends in Liquid Rocket Engine Health Monitoring/Management Methods," *2012 KSPE Fall Conference*, Yeosu, Korea, pp. 824-832, Nov. 2012.
5. Kim, C.W., Park, S.Y. and Cho, W.K., "Flight Test Preparation for Liquid Rocket Engine and Its Diagnosis," *2013 KSPE Fall Conference*, Gyeongju, Korea, pp. 34-39, Dec. 2013.
6. Panossin, H.V. and Ewing, W.D., "Real-time Failure Detection Algorithm for the Space Shuttle Main Engine," *IEEE Control System*, Vol. 17, No. 4, pp. 16-23, 1997.
7. Bickmore, T.W. and Bickford, R.L., "Aerojet's Titan Health Assessment Expert System," *28th AIAA/SAE/ASME/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*, Nashville, TN, U.S.A., AIAA-1992-3330, Jul. 1992.
8. Ali, M. and Gupta, U., "An Expert System for Fault Diagnosis in a Space Shuttle Main Engine," *26th AIAA/SAE/ASME/ASEE Joint Propulsion Conference*, Orlando, FL, U.S.A., AIAA-1990-1890, Jul. 1990.
9. Tulpule, S., "Pattern Classification Approach to Rocket Engine Diagnostics," *25th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference*, Monterey, CA, U.S.A., AIAA-1989-2850, Jul. 1989.
10. Katorgin, B.I., Chelkis, F.J. and Limerick, C.D., "The RD-170, a Different Approach to Launch Vehicle Propulsion," *29th AIAA/SAE/ASME/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*, Monterey, CA, U.S.A., AIAA-1993-2415, Jun. 1993.
11. Orlov, V., Rachuk, V., Shostak, A. and Starke, R., "Reusable Launch Vehicle Propulsion Based on the RD-0120 Engine," *31st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*, San Diego, CA, U.S.A., AIAA-1995-3003, Jul. 1995.
12. Luchinsky, D.G., Hafiychuk, V., Smelyanskiy, V., Tyson, R.W., Walker, J.L. and Miller, J.L., "High-fidelity Modeling for Health Monitoring in Honeycomb Sandwich Structures," *IEEE Aerospace Conference*, Big Sky, MT, U.S.A., pp. 1-7, 2011.
13. Popv, A., "System Health Management and Space Medicine Predictive Diagnostics. Common Concepts and Approaches," *IEEE Aerospace Conference*, Big Sky, MT, U.S.A., pp. 1-7, 2012.

14. Bonnal, C. and Caporicci, M., "Future Reusable Launch Vehicles in Europe: the FLTP(Future Launchers Technologies Programme)," *Acta Astronautica*, Vol. 47, No. 2, pp. 113-118, 2000.
15. Hotop H.J., "Knowledge-based Fault Detection and Analysis for Robots: First Results for the ROTEX Robots." *Transl. into ENGLISH of Wissensbasierte Fehlererkennung und-diagnose fuer Roboter-Erste Ergebnisse fuer den ROTEX-Roboter (Brunswick, Fed. Republic of Germany, DFVLR)*, pp. 1-47, 1989.
16. Yoshikawa, J., Imagawa, K., Kubo, K., Matsuo, Y., Nemoto, M. and Horiuchi, M., "Research and Development of the Off Gas Monitoring Device," *Proceedings of the 22nd International Symposium on Space Technology and Science*, Morioka, Iwate Prefecture, Japan, Vol. 22, May. 2000.
17. Obara, T., Matsumoto, H. and Koga, K., "Space Environment Measurements by JAXA Satellites and ISS/JEM," *Acta Astronautica*, Vol. 71, pp. 1-10, 2012.
18. Zichu, Y., "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.
19. Xianfeng, F. and Xingwei, J., "Model-based Temperature Forecasting and Fault Diagnosis on the Heat Control System of Satellite," *High Technology Letters of China*, No. 4, 2002.
20. Xie G.J., Hu N.Q. and Hu, L., "Improved Adaptive Correlation Thresholds Algorithm for Turbopump Real-time Fault Detection," *Journal of Propulsion Technology of China*, Vol. 27, No. 1, pp. 5-8, 2006.
21. Dou, W. and Liu, Z.S., "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.
22. Honggang, L., Tingfeng, X., Qiang, H. and Jianjun, W., "Real-time Fault Detection and Alarm System for Ground Test of Liquid Propellant Rocket Engines," *Missile and Space Vehicles of China*, No. 1, pp. 49-52, 2008.
23. Zhang, Y., Wu, J., Huang, M., Zhu, H. and Chen, Q., "Liquid-propellant Rocket Engine Health-Monitoring Techniques," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 14, No. 5, pp. 657-663, 1998.
24. Wuxing, L.B.S.L.J., Xingwei, J. and Zhi, L., "A Review and Propect of Fault Diagnosis Technique of Spacecrafts," *Missile and Space Vehicles of China*, No. 3, pp. 32-37, 2003.