

액체로켓엔진 시험-개선과정의 방법론

김철웅* · 베르샤드스키 비탈리 A** · 김상현*** · 오승협***

Methodical Aspects of Experimental Improvement on Working Capacity of Liquid Rocket Engine

CheulWoong Kim* · Vitaly A. Bershadskiy** · SangHeon Kim*** · SeungHyub Oh***

ABSTRACT

As a result of the study on a number of the works, published in Russia, the methodical aspects of experimental improvement on working capacity of LRE (Liquid Rocket Engine) are reviewed. In the article, on the basis of the experience of Russia and USA, the special features of experimental improvement on working capacity of LRE and the methods of its rational implementation formulated. The organizational and technical solutions of experimental improvement on working capacity of LRE for achieving the required level of the reliability and decreasing the material expenditures are presented in the article. These suggested solutions can be used for the development of LRE.

초 록

본 논문에서는 러시아에서 출간된 문헌들의 검토를 통하여 액체로켓엔진에 대한 시험-개선과정의 방법론적 측면을 고찰하였다. 그리고 러시아와 미국의 개발경험을 기초로 액체로켓엔진에 대한 시험-개선과정의 특징과 합리적인 실현방법을 명확히 하였다. 액체로켓엔진의 개발에 있어서 요구되는 수준의 신뢰도를 성취하고 물질 지출을 줄이기 위한 시험-개선과정의 행정 및 기술적인 해결법이 제시되었으며, 이와 같은 해결 방법들은 국내에서 개발되고 있는 액체로켓엔진에 적용될 수 있다.

Key Words: Liquid Rocket Engine(액체로켓엔진), Experimental Improvement of Working Capacity (시험-개선과정), Probability of No-Failure Operation(무고장 작동확률), Coefficient of Emergency Situation Detection(사고상황 포착 계수)

1. 서 론

† 2008년 6월 12일 접수 ~ 2008년 12월 9일 심사완료

* 정희원, 한국항공우주연구원 엔진팀

** 초청 러시아과학자, 한국항공우주연구원

*** 정희원, 한국항공우주연구원 추진기관체계팀
연락처, E-mail: kimcw@kari.re.kr

로켓의 추진기관은 액체로켓엔진을 중심으로 추진제 공급시스템, 제어 및 조절시스템, 측정 및 긴급진단시스템으로 이루어진 고도로 복잡한

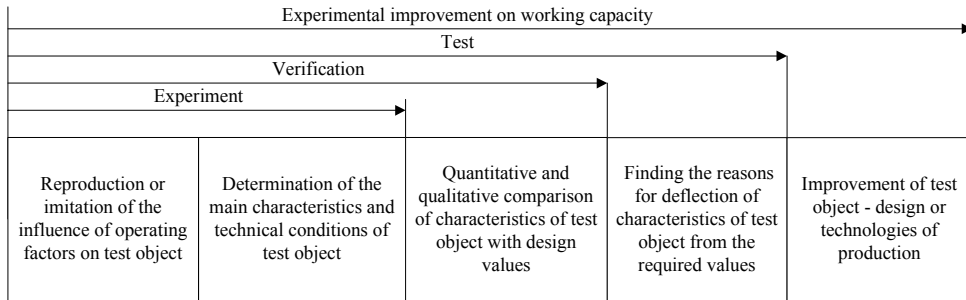


Fig. 1 General scheme of experimental improvement on working capacity of test object

기계시스템이다. 이러한 추진기관의 성공적인 개발을 위하여 최적의 시험-개선과정은 매우 중요하며, 다음과 같은 이유로 인하여 반드시 수행되어야 한다.

- 엔진의 정상상태와 천이상태에 대한 수치모델이 없거나 불충분함으로 인하여 추진기관의 개발 시에 발생하는 많은 문제들은 오직 시험적인 방법에서만 해결 할 수 있다.
- 다수의 시험결과에 의하여 축적된 경험만이 추진기관의 성능과 엔진시스템의 양적, 질적 특성이 요구조건과 일치하는지 여부에 대한 평가를 가능하게 해준다.
- 액체로켓엔진은 막대한 추력과 극도로 긴장된 상태에서 작동하는 기계장비로서, 기능상 안전성과 높은 신뢰도는 오직 시험 결과로써만 검증될 수 있다.

Figure 1은 시험-개선과정의 일반적인 구성도로서 '시험-개선과정', '시험' 그리고 '시험대상'간의 개념상 상호관계가 제시되어 있다[1,4].

시험-개선과정은 시험대상이 운용조건에서 고장없이 안전하게 요구되는 기능을 수행 할 수 있는지를 시험을 통하여 점검하고, 제작기술이나 시험대상의 구조를 변경하여 시험대상의 성능을 향상시키는 과정이다. 여기서 운용조건은 시험대상이 수행해야 할 작동영역 및 시험대상의 기능에 영향을 주는 내·외부 인자들을 말한다.

시험은 운용조건에서 시험대상의 양적, 질적 특성을 실험적으로 측정하는 것이다. 특성의 측정은 지상 혹은 비행조건에서 내·외부 운용인자의 재현, 모델링 혹은 모사 상태 하에서 이루

어진다.

시험-개선과정 시 시험대상은 엔진시스템 전체, 엔진의 주요 서브시스템 및 단품들이 된다 [5,6].

이러한 시험-개선 과정의 수행에 있어서 아래와 같은 주요 현안 과제들이 해결되어야 한다.

- 우주개발의 막대한 물적 소비와 시간적 한계 등과 직접 연관되어 있는 시험-개선과정의 합리적 수행 문제.
- 화재 및 폭발성 추진제 혹은 독성 물질의 이용과 관련한 시험의 위험성 감소 문제.
- 시험대상의 복잡하고 빠른 동적 작동과정으로 인하여 발생하는 시험대상의 데이터 획득, 진단 및 제어에 관한 문제.

본 논문에서는 러시아에서 출간된 서적[1~15] 중 액체로켓엔진의 시험-개선과정에 관한 자료를 분석하였고, 최소의 비용으로 요구되는 기간 내에 엔진시스템을 개발하기 위한 주요 방법들을 정리하였다.

2. 엔진 시험-개선과정의 구성상 특징

액체로켓엔진의 성공적인 시험-개선과정을 위하여 단독 및 종합 시험-개선과정 단계에서 순차적인 시험의 수행과 함께 지상 및 비행시험의 합리적인 조합, 그리고 시험-개선과정의 완전성 및 유효성의 관리가 이루어져야 한다.

엔진시스템의 시험-개선 과정은 엔진서브시스템들에 대한 시험-개선과정이 완료된 후에 수행

된다. 발사체 개발에 있어서 엔진의 시험-개선과정은 보통 다음과 같은 단계들로 나뉘어진다.

- 시험 스탠드와 실험실에서 엔진서브시스템에 대한 단독 시험-개선 과정.
- 액체로켓엔진 전체의 단독 스탠드 시험-개선 과정.
- 발사체 단의 형태로 이루어지는 엔진의 종합 스탠드 시험-개선 과정.
- 발사체의 형태로 이루어지는 엔진의 종합 비행 시험-개선 과정.

단독 시험-개선 과정 시 시험의 장점은 결합의 발견이 상대적으로 수월하다는데 있다. 이것은 필요한 특성을 빠르고 정확히 측정할 수 있는 여러 능동적인 시험방법의 적용이 가능하기 때문이다. 또한 단지 몇 개의 운용 인자들의 영향만이 아니라 운용인자들의 어떤 연속성에서 혹은 조합에서의 영향도 심도있게 검사를 할 수

있다. 그리고 시험-개선과정의 낮은 단계에서 이용되는 시험 장비와 측정 기기는 보통 간단하고 저렴하다.

그러나 액체로켓엔진의 신뢰도를 보증하는데 있어서 단독 시험-개선과정만으로는 불충분하다. 왜냐하면 단독 시험-개선과정에서는 전체 엔진시스템의 상호작용을 파악할 수 없고, 엔진의 기능상 신뢰성과 안전성에 대한 평가를 할 수 없기 때문이다. 그러므로 종합 시험-개선과정이 필요하다. 그런데 종합 시험-개선과정을 필요로 하는 고도로 복잡한 시스템에서는 능동적인 시험의 수행이 어렵다. 따라서 종합 시험-개선 과정 시에는 수동적인 시험이 주가 되는데, 이때 시험 대상의 특성은 실제 운용조건에서 시험대상의 반응으로 평가된다. 이 경우, 고장이 발생할 시 원인 파악에는 큰 어려움이 따른다.

시험-개선과정의 각 단계에서 주요한 시험의

Table 1. Problems in the step of autonomous experimental improvement on working capacity of engine subsystems

1. 작동매질과 운용부하의 모델링 하에 수력 및 기계적 특징 확인	2. 실제 작동매질에서 신뢰있는 기능 확인을 위한 시험-개선과정	3. 엔진의 구성으로서 운용가능성 평가를 위한 검증시험
1.1 수력저항, 강도 및 기밀 확인 1.2 에너지 특성과 동적 특성의 확인 1.3 진동 및 load factor가 작동능력에 끼치는 영향 평가	2.1 상태파라미터와 작동조건에 요구되는 변화영역에서 수행 2.2 정해진 작동수명동안 요구되는 작동 조건 영역에서 수행 2.3 내부요인과 외부 실제환경조건에 변화를 모사한 상태에서 수행	3.1 제작 및 수리 이후에 작동능력 확인 3.2 구조검사를 통한 결합 존재여부 확인

Table 2. Problems in the step of autonomous and complex experimental improvement on working capacity of engine

1. 단독 시험개선과정에서 스탠드 시험	2. 단독 및 복합 시험개선과정에서 인증 시험 (Qualification Test)	3. 복합 시험개선과정에서 비행 인가시험 (Certification Test)
1.1 실험엔진의 시험결과를 이용하여 최상의 엔진 scheme과 구성의 선택 1.2 실험엔진의 특성과 강도의 마진 확인 1.3 고장과 위험요소를 없게 하기 위하여 실험엔진의 구조를 개선	2.1 내,외부 인자를 모사한 상태에서 엔진의 특성과 신뢰도, 안전성을 요구되는 수준까지 높이기 2.2 로켓의 단(stage)형태로 복합 시험개선 과정을 하기 위한 준비단계로서 엔진의 양적, 질적 특성을 검사 2.3 로켓의 단형태로 구성되어 운용 시에 엔진이 요구조건과 일치함을 예비적으로 확인	3.1 실제 운용조건에서 엔진이 요구조건과 일치함을 확인 3.2 대량 생산 시 엔진이 요구조건과 일치함을 확인

형태와 해결해야 될 과제가 Table 1과 Table 2에 제시되었다. Table 1은 액체로켓엔진 요소들의 단독 시험-개선과정에 관한 것이고, Table 2는 액체로켓엔진 전체의 단독 및 종합 시험-개선 과정에 관한 것이다. 단독 시험-개선과정을 거쳐야 하는 액체로켓엔진의 요소들은 터보펌프, 가스발생기, 연소기 및 제어 장치, 추진제 공급 및 유량 조절 장치 등이다. 미국과 러시아의 우주발사체기술의 초기발전단계에서 시험-개선과정의 주요 부분은 비행시험으로 수행되었다. 이것은 오직 실제 작동 조건에서만 다방면에서 엔진의 품질을 검사할 수 있기 때문이다. 그러나 이러한 접근방법의 주요 단점은 고비용의 비행시험을 여러 번 수행해야 한다는 점이다. 예를 들면, 발사체 'Titan'(미국)과 'Vostok'(러시아)의 개발 프로그램에서 비행시험은 각각 30회 이상이 요구되었다. 많은 수의 사고, 비행시험의 적은 정보 생산수준, 발사체 제작 및 비행시험 준비와 수행에 있어서의 고비용은 시험-개선과정의 주요 부분을 비행시험에서 지상시험을 기반으로 수행하게 만들었다.

지상시험의 증가는 1960년대와 1970년대에 미국과 러시아에서 달 탐험 프로젝트를 수행하는 시기에 이루어졌는데 이는 비행사고 시 인적 손실과 함께 물적 피해가 5억 달러에 이를 수 있었기 때문이다.

시험-개선과정의 주요부분이 지상시험으로 이전될 때 많은 수의 시험설비가 구축되었고, 비행 운용조건을 모사하는 시험 장치의 제작과 시험 수행 방법들이 개발되었다. 예를 들면 발사체 'Saturn-Apollo'(미국)의 프로그램 수행에 지출된 전체 비용 240억 달러(당시 비용) 중 지상 시험-개선과정에 160억 달러가 소모되었다. 우주왕복선 'Energia-Buran'(러시아)의 시험-개선과정에는 300개가 넘는 특수한 시험설비가 만들어졌고 그곳에서 7천회가 넘는 시험이 수행되었다. 지상시험의 증대로 인하여 비행 시 발사체의 신뢰도가 증가하였고, 비행시험의 횟수가 감소하였으며, 비행시험의 실패로 인한 물적 손실이 크게 줄어들었다.

Figure 2는 미국과 러시아에서 액체로켓엔진이 장착된 발사체의 첫 비행실패가 일어나기 전까지 성공적인 발사 횟수의 변천과정을 보여준다[7].

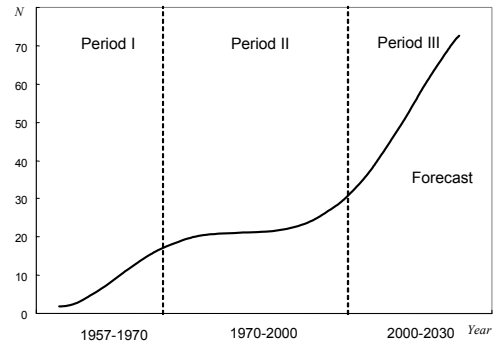


Fig. 2 Average number of successful rocket launch before first flight failure in Russia and USA

시험-개선과정의 완전성과 유효성은 합리적인 시험-개선과정의 계획과 시험의 수행 그리고 시험-개선과정의 적절한 관리를 수행함으로써 얻어질 수 있다.

시험-개선과정의 계획은 프로그램과 작업의 주요 단계별 수행 일정의 형태로 작성된다. 이들은 시험-개선과정의 주요개념을 규정하고, Fig. 3에 제시된 모델과 같이 제작되는 엔진시스템의 품질 향상을 가능하게 해준다.

프로그램은 시험대상의 명칭과 특이점, 시험의 목적과 과제, 시험수행의 형태와 장소 및 기간, 시험수행의 조건과 영역, 시험결과에의 평가방법 및 제시형식, 시험수행을 위한 편성 및 안전에 대한 책임 등을 기술한 문서이다.

일정은 시험-개선과정의 수행에 있어서 이용 가능한 재정 한도 내에서 시간을 최적화한 작업 공정이다.

시험의 수행은 엔진의 작동 및 정보의 획득과 관련된 작업들의 총체이다. 모든 시험의 수행 목적은 시험대상의 기능 및 특성의 확인, 시험대상의 설계와 제작 및 운용과정 중 적용된 결정의 합리성을 판단하는데 필요한 정보를 얻는데 있다.

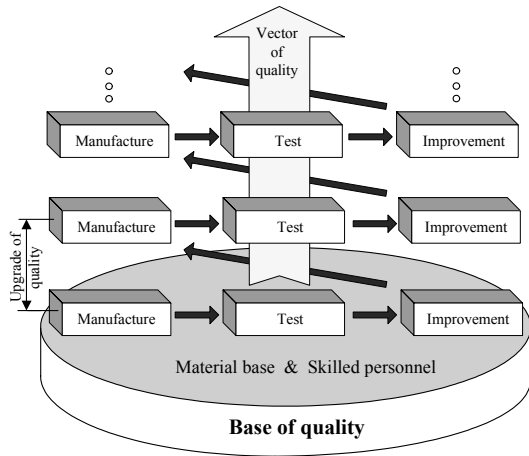


Fig. 3 Quality improvement model of a developing engine
 material base - manufacturing facilities, test facilities and financial possibilities, skilled personnel - qualified expert manpower for corresponding work

시험의 내용과 구체적인 목적에 상관없이 시험의 생산물은 정보이므로, 시험의 준비와 수행은 액체로켓엔진에 대하여 요구되는 정보를 얻기 위한 과정으로 간주되어야만 한다. Fig. 4에서 시험 수행의 일반적인 기능 모델이 구성도의 형태로 제시되었다.

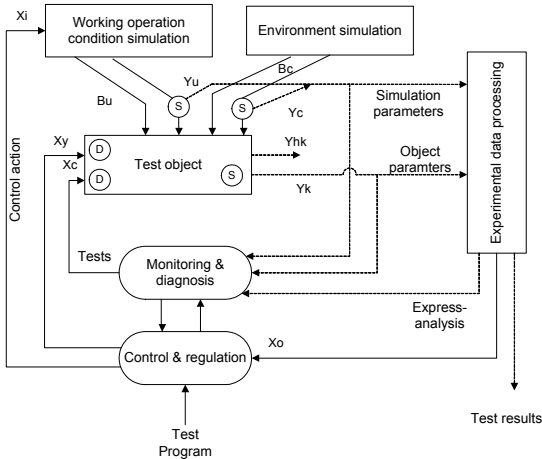


Fig. 4 General functional model of test.

X_y , X_o , X_c , X_i - controlling, stimulating and imitating influences. Y_k , Y_{hk} , Y_u , Y_c - information on controlled reactions of test object and imitator of engine system. B_u , B_c - influence of operating conditions. D - executive components, S - sensors

시험 프로그램 수행으로 시험대상에 대한 필요한 정보를 획득함으로써 수행된 시험-개선과정의 완전성을 확인할 수 있다. 시험-개선과정이 완료 시 엔진의 특성, 신뢰도, 가공성, 안전성, 운반성, 경제성, 심미성, 인간공학적임, 규격화 및 통일성, 특허권리 보호 등의 주요 품질 지표들이 요구수준에 해당할 때 시험-개선과정은 유효한 것으로 간주된다.

열거된 지표들 각각의 수준은 품질에 관한 다른 지표들로 결정된다. 일례로 신뢰도를 결정하는 지표들은 엔진의 안정성, 무고장성(no-failure operation), 내구성, 보수편의성 및 엔진성능의 보존성 등이다.

시험-개선과정이 적절했는지는 보통 엔진 시스템의 주요 특성(추력, 비추력, 지속시간과 작동 사이클로그래 등)들이 요구치와 일치하는지 여부와 엔진시스템의 신뢰도로 평가한다. 이때 신뢰도의 주된 양적인 판단기준으로는 무고장성이다. 무고장은 시험대상이 사이클로그래의 규정된 시간에서 작동가능상태를 유지하는 것을 의미하며, 고장은 시험대상의 작동가능상태가 왜해되는 사태를 말한다.

시험을 수행함으로써 엔진의 고장 원인을 찾고 제거할 수 있으므로 시험횟수의 증가는 엔진의 무고장 작동 확률(Probability of no-failure operation, PNFO)을 증가시킨다. 무고장 작동 확률 $PNFO = 1 - e^{-aN}$ 이며, 여기서 N 은 시험횟수, a 는 신뢰도 증가 경험지수이다. 무고장 작동 확률로 엔진의 첫 고장 이전까지 작동시간과 엔진수명을 비교할 수 있다.

Figure 5에 시험-개선 과정의 진행순서가 제시되어 있다.

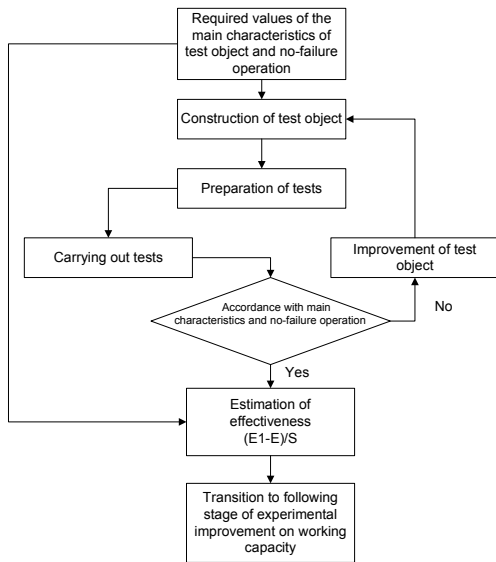


Fig. 5 Management scheme of process for experimental improvement on working capacity

E1 and E - required(given) PNFO and obtained(actual) PNFO respectively, S - time consumption and cost for preparation and tests performance

3 시험-개선과정의 합리적인 수행 방법

로켓의 엔진시스템을 개발하는 동안 엔진의 시험-개선과정은 가장 작업량이 많고 고비용이 소모되는 과정인데, 보통 5~10년의 장기간이 필요하고 엔진 개발에 드는 전체 비용의 약 60%가 요구된다. 따라서 비용을 줄이기 위한 여러 행정 및 기술적 해결방법들이 이용되고 있는데, 주로 엔진의 제작 개수와 시험횟수의 감소에 방향이 맞추어져 있다[6,8,14].

수행되어지는 시험의 횟수는 요구되는 신뢰도와 무고장 작동확률을 평가 할 때 사용하는 방법에 의해 달라진다. 엔진 신뢰도에 대한 표준적인 요구값은 무고장 작동확률(PNFO) $\geq 0,985 \sim 0,995$ 에 해당한다. 이와 같은 값일 때 예상되는 성공적인 비행시험 횟수는 60~200회에 있다[7].

'블랙박스'모델의 입-출력함수의 변화만을 고

려하는 복잡한 기계시스템의 신뢰도 이론에서는 제시된 무고장 작동확률의 값을 얻기 위하여 $N \geq 300$ 의 고장이 없는 시험이 요구된다. 이 경우 로켓의 각 단계 서로 다른 용도의 엔진들을 갖는 발사체를 개발한다는 것은 재정규모와 소요기간을 고려할 때 국내에서는 실현 가능성이 적다.

액체로켓엔진의 작동에 대한 해석방법과 시험-개선과정 결과의 처리 시 수학적 통계 방법들을 적용할 경우 요구되는 시험량은 현저히 줄어든다[2,3,4]. 이 방법들은 출력함수에 대한 양적 정보를 우연한 과정에 의한 것처럼 이용하는데, 이것은 신속 시험(accelerated test)모델의 적용을 기반으로 무고장 작동확률을 평가할 수 있게 해준다. 신속 시험은 일부 엔진들에서 고장이 일어나기 직전까지의 무고장 작동 시간(no-failure operation time)에 대한 정보와 나머지 엔진들의 고장없는 시험을 통하여 제한된 엔진시스템의 신뢰도 정보를 얻게 해준다.

1990년까지 비행시험 시작 이전에 엔진시스템의 무고장 작동확률이 0,97~0,985를 넘지 않았고 이것이 발사 성공률을 현저히 낮추었으며, 요구되는 엔진의 신뢰도는 실제 운용 기간에서야 도달할 수 있었다. 따라서 시험-개선과정의 방법들의 개선이 당면과제로 대두되기 시작하였다.

액체로켓엔진이 시험-개선과정 중 요구되는 수준의 신뢰도에 도달하는데 필요한 물질적 소비를 정의하는 주요값으로 보통 시험엔진의 총 개수, 시험과정 중 엔진의 무고장 작동 총 시간, 개별 엔진의 시험과정에서 비행시간 사이클의 평균 개수를 사용한다. Table 3에는 미국과 러시아에서 비행시험 전까지 액체로켓엔진에 대한 시험-개선과정의 수행결과가 제시되었다. Table 3의 자료를 분석하면 시험-개선과정 수행 시 미국이 러시아보다 더 적은 수의 엔진을 사용했고, 평균 무고장 작동시간과 하나의 엔진을 이용한 반복시험 횟수가 많다는 것을 알 수 있다. 이로써 시험-개선과정의 수행에서 소모되는 엔진 개수는 각 엔진의 평균 작동지속시간 및 시동횟수가 증가할수록 감소함을 알 수 있다.

Table 3. Results of experimental improvement on working capacity of LRE

엔진명, 국가	추력 (지상/진공) kN, 연소압 MPa	추진제성 분	사용된 엔진수	연소시험 회수	총 무고장작동 시간, sec	한 엔진의 무고장작동시간 의 평균 사이클 수	단 이름, 엔진 수
J - 2, USA	1023 / - ; 5.38	LOx, hydrogen	43	1645	127962	6.2	2nd stage «Saturn 5», 5
F - 1, USA	7776 / 6770; 7.78	Oxygen, kerosene	57	1638	122100	12.6	1st stage «Saturn 5», 5
SSME, USA	2130 / 1668; 20.7	Oxygen, hydrogen	19	700	128700	13	SSME, 3
NK - 33, Russia	1638 / 1510 14.8	Oxygen, kerosene	76	221	44393	4.2	1st stage «N1-L3», 30
RD - 0120, Russia	1900 / 1475; 22.0	Oxygen, hydrogen	83	689	133900	3.2	2nd stage «Energia», 4
RD - 170, Russia	8060 / 7400; 24.5	Oxygen, kerosene	59	804	93300	10.5	1st stage «Zenit SL», 1
RD - 180, Russia	4152 / 3828; 26.0	Oxygen, kerosene	19	134	26800	5.9	1st stage «Atlas 5», 1

액체로켓엔진의 시험-개선과정에서 얻어진 경험을 바탕으로 물적 소모를 줄이면서 엔진에 요구되는 신뢰도에 도달하기 위한 주요 방법들을 정리하면 다음과 같다[4,6,8,9,10,11,14,15].

1. 대형 엔진을 이용하여 발사체 단 구성을 최적화한다. 예를 들면 발사체 'Zenit SL'와 'Atlas-5'의 제 1단 블록의 추진기관에는 각각 한 개의 대추력 엔진 RD-170과 RD-180을 이용하였다.
2. 시험-개선과정을 통과했거나 기존 엔진에서 이미 사용되었던 구성품 및 단품을 이용하여 엔진의 초기 신뢰도와 구조적 완결성을 높인다. 예를 들면 엔진 RD-180의 제작 시 구성품의 75%는 이미 운용 중이던 RD-170과 동일한 것들이었으며, 이로써 발사체 'Atlas-3'을 위한 RD-180의 시험-개선과정은 단지 10개의 엔진과 90회의 hot fire test만으로 가능하였다.
3. 액체로켓엔진의 시험-개선과정으로 얻은 시험 데이터를 분석하여 엔진의 작동마진 평가방법과 작동과정의 수학적 모델링 기법을 향상시키고, 이를 이용하여 계산되는 주요 엔진 파라미터값들의 신뢰도를 높일 수 있다.

4. 시험엔진의 개수, 무고장 작동 총 시간과 한 개 엔진의 평균 무고장 작동시간은 기존의 엔진개발경험을 근거하여 정해져야만 한다. 최근의 엔진개발 경험을 볼 때, 액체로켓엔진 60기를 이용하여 엔진의 단독시험의 수행하고자 한다면 각 엔진의 평균 무고장 작동시간으로 5회의 비행운용 사이클이 필요하고, 3회 사이클 이하의 무고장 작동시간 시 요구되는 엔진수는 150기까지 증가하게 된다.
5. 엔진을 재시동이 가능하게 만들고, 적은 긴장도와 위험성으로부터 높은 긴장도와 위험성으로 단계적인 시험을 수행하며, 시험-개선과정의 프로그램을 최적화한다. 예를 들면 시험수행 시 개별 운용인자들을 적용하지 않고 운용인자들은 종합화한 최적 모사는 Table 3에 제시된 엔진들의 시험-개선과정 수행 시 물적 소비를 18%가량 감소시켰다.
6. 엔진의 보수용의성과 작동능력 마진의 관리를 통하여 연속된 시험에서 고장난 엔진의 구성요소들의 교환을 수월하게 한다.
7. 개선된 진단 시스템을 이용하여 엔진 주요부의 작동능력을 검사하고 고장 가능성을 파악하여 위험이 있을 시에 엔진을 보다 안전한

작동조건으로 낮춘다. 예로서 SSME의 시험에서는 진단시스템을 적용하여 엔진의 작동능력에 영향을 주는 주요파라미터들의 증가 속도를 평가하였다. 이로써 엔진의 각 구성품들의 작동한계 내에서 엔진 파라미터들에 대한 적절한 제어를 할 수 있었다.

8. 능동적인 사고방지수단의 적용으로 고가의 엔진과 스탠드 시스템의 파괴를 막는다. 사고방지수단의 중요한 특성 중 하나는 사고상황 포착계수이며, 이 계수는 엔진 구성품의 파괴시작시점 이전에 엔진의 작동정지 능력을 보여준다. 사고상황 포착계수는 엔진 구성품이 요구되는 고속동작으로 작동될 때 0.8보다 커야 한다.
9. 엔진의 지상 혹은 비행시험 시 무고장 작동확률이 0.95~0.98보다 클 때 발사체 단시험이 시작되어야 한다. 무고장 작동확률이 낮을 경우 엔진의 선행 비행시험은 이미 사용 중이거나 값싼 로켓에 장착하여 수행하는 것이 타당하다. 예로서 J-2 엔진의 첫 비행시험은 'Saturn 1'에서 수행되었고 RD-170의 시험은 'Zenit'에서 실시되었다.
10. 국제 협력으로 엔진 개발을 할 수 있다. 'Energomash'(러시아)와 'Pratt & Whitney'(미국), 'Lockheed Martin'(미국)사와의 RD-180엔진 제작에 관한 협력이 한 예가 될 수 있다. 발사체 'Atlas-5'를 위한 RD-180의 개발 경험을 바탕으로 KSLV-1을 위한 RD-151의 시험-개선 과정이 10기의 엔진과 100회의 시험으로 계획되었다.

Figure 2에서는 한번의 발사 사고에 대하여 2010 ~ 2030년도에 예상되는 성공적인 로켓 발사횟수의 증가를 보여주는데[7], 이러한 예상수치는 항목 1부터 10에 걸쳐 제시된 시험-개선과정의 주요방법들을 적용함으로써 실현될 수 있다.

러시아와 미국의 경험을 바탕으로 가용한 물적 수단과 요구되는 기간 내에 신뢰성있는 액체로켓엔진을 개발하기 위한 시험-개선 과정의 방법들을 고찰하였다. 그리고 시험-개선과정의 주요 개념들, 계획의 특성, 단독 및 종합 시험-개선과정의 단계적 실현의 필요성, 적용되는 시험-개선과정의 완전성과 유효성의 평가 방법을 정리하였다.

엔진이 고장없이 기능을 수행하고 양적, 질적 특성이 요구되는 수준과 일치한다는 것을 확인하기 위한 충분한 정보의 획득은 고비용과 장시간이 소요되며 비행 운용조건외의 모사 수준과도 관련되어 있다. 현재 시험-개선과정에서 물적 지출과 시간의 소비를 줄이기 위한 주요한 경향은 신속 시험, 각 엔진의 작동시간 증가, 엔진의 작동조건 및 시동횟수 조절, 시험횟수 및 시험엔진개수의 감소 등을 기반으로 한 엔진의 신뢰도를 평가하는 통계적방법의 사용에 있다.

본 논문에서는 러시아와 미국엔진들의 시험-개선과정 경험을 토대로 물적 지출을 줄이며 요구되는 엔진의 신뢰도 수준에 도달하는 것을 가능하게 하는 행정 및 기술적인 해결방법을 제시하였다.

참고 문헌

1. Zhukovskiy A.E., Kondrusev V.S., Okorochkov V.V. 액체로켓엔진시험. Mashinostroenie, 1992
2. Milenko. N. P., Serduk A.V. 액체로켓엔진 시험의 모델링, Mashinostroenie, 1975
3. Luarsabov K.A., Pron' L.V., Serduk A.V. 액체로켓엔진의 비행시험, Mashinostroenie, 1977
4. Aleksandrovskaya L.N., Kruglov V.I., Kusnetsov A.G. and others. 복잡 기술시스템의 시험-개선과정 및 시험 이론, Logos, 2003

5. Kholodkov N.V. 편집. 우주비행체의 시험-개선과정. MAI, 1994
6. Gribanov V.F. 편집. 과학 및 국영 로켓-우주 콤플렉스의 시험-개선 방법, Mashinostroenie, 1995
7. Kiselev A.I., Medvedev A.A., Menshikov V.A. 밀레니엄 말기에서의 우주비행공학, Mashinostroenie, 2002
8. Gubanov B.I. '에네르기아의 업적과 비극, IER, 1999
9. Katargin B.I. 대추력 액체로켓엔진 제작의 전망. Journal '러시아 과학아카데미회보', 2004, No. 3, 74권
10. Pirogov N.A., Rahmanin V.F., Chvanov V.K. 국제공동 협력에서의 우주기술 발전 전망. Journal 'Engine', 2007. No. 6
11. Zhezherya A.P. 에너지 긴장상태의 액체로켓엔진의 진단 및 사고방지 기술의 발전 전망. Journal 'Energetika', 2003. No. 3
12. Bershadskiy V.A. 품질 검사와 관리. 교재, MGAPI, 2003
13. Afanas'ev I. '에네르고마쉬'가 엔진 RD-180을 미국에 보냄. Journal '우주비행공학 소식', 2001. No. 1
14. Samarin G. 러시아와 미국의 액체로켓엔진의 시험-개선 방법의 비교분석, Journal 'Engine', 2001, No. 5
15. Gahun G.G. 액체로켓엔진의 구조와 설계, Mashinostroenie, 1989