

# 액체로켓엔진의 사고위험 감소방안

김철웅\* · 김승한\* · 남창호\* · 설우석\*

## Reduction of the Accident Risk of Liquid Rocket Engine

Cheul-Woong Kim\* · Seung-Han Kim\* · Chang-Ho Nam\* · Woo-Soek Seol\*

### ABSTRACT

Research of methods for preventing accidents and minimizing losses during the liquid rocket engine (LRE) test and its exploration is of current importance. In this paper the steps of progress to LRE accidents are defined, and methods for preventing LRE accidents and minimizing losses from accidents are considered. The suggested methods in this paper can be applied to LRE test and exploration for protecting engine system from emergency situation.

### 초 록

액체로켓엔진의 시험 및 운용에 있어서 사고의 예방과 피해의 축소는 중대한 과제이다. 본 논문은 엔진사고가 일어나는 과정의 각 단계를 정의하였고, 사고 예방 및 위험감소 방안을 결함제거, 비상상황이 사고로 발전하는 것을 막기 위한 사고위험요인 제거, 그리고 사고가 발생하였을 때 피해 축소 및 사고원인파악과 재발방지 부분으로 나누어 고찰하였다. 본 논문에서 제시된 방안들은 실제 엔진의 시험과 운용 시에 적용되어 사고의 위험도를 감소시키는데 이용될 수 있다.

Key Words: Liquid Rocket Engine(액체로켓엔진), Failure Protection System(사고방지시스템), Functional Diagnostics System(진단시스템), Emergency Situation (비상 상황)

### 1. 서 론

액체로켓엔진은 다수의 서브시스템과 부품들이 직렬 및 회귀(feedback)결함으로 연결된 복잡한 기계시스템으로서 큰 에너지장도의 상태에서 작동되므로 많은 형태의 사고 위험성을 가지고 있다. 뿐만 아니라 화재나 폭발 위험성이 큰

물질을 추진제로 사용하므로 사고 시 인적 피해와 물적 손실을 일으킬 수 있으며, 엔진 개발을 지연시키거나 로켓발사 프로그램의 존폐에 영향을 줄 수 있다. 따라서 엔진의 시험 및 운용 시 사고가 발생하지 않도록 하는 예방적인 조치 및 비상상황 시 위험요인 제거, 그리고 사고발생시 피해 감소방안의 연구는 매우 중요하다.

\* 한국항공우주연구원 엔진팀  
연락처, E-mail: kimcw@kari.re.kr

### 2. 액체로켓엔진의 사고

## 2.1 엔진 사고의 정의

엔진 사고는 작동엔진의 파괴에 의하여 사람의 생명과 건강에 위협을 주고 주변 시설에 피해를 가할 수 있는 위험한 사건을 말한다. 이러한 엔진 사고가 발생하는 과정이 Figure 1에 제시되어 있다.

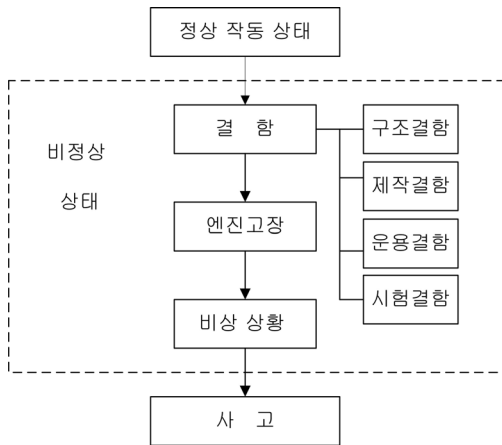


Fig. 1 Steps of Progress to a LRE accident

엔진 사고의 첫 단계는 결함(Fault)이다. 결함은 구조결함, 제작결함, 운용결함 및 시험결함으로 나뉘어진다. 구조결함은 제작·수리·운용·시험준비 및 시험수행을 기술한 설계문건 (constructional documentation)의 불완전에 의한 결함이며, 제작결함은 엔진 생산 및 수리 시설 설계문건과 기술문건의 요구조건을 이행하지 않으므로 발생하는 결함이고, 운용결함은 운용요구조건과 일치하지 않게 엔진을 운용함으로써 발생하는 결함이며, 시험결함은 설계문건에 요구된 시험의 준비 및 시험수행에 관한 조건에 부합하지 않으므로 발생하는 결함이다. 이러한 결함이 엔진의 시험 및 운영 시 엔진의 작동능력에 장애를 일으키거나 정상작동능력의 상실을 야기하는데 이를 고장(Failure)이라고 한다. 비상 상황(Emergency situation)이란 고장에 의하여 엔진이 정상작동상태로부터 천이과정을 겪거나 새로운 작동조건상태가 발생하는 사태를 말하며, 사고(Accident)의 전단계이다 [1]. 따라서 본문에서는 엔진사고의 위험감소방안을 연구하는데 있어

서 사고예방차원으로 결함제거, 비상상황이 사고로 발전하는 것을 막기 위한 사고위험요인 제거, 그리고 사고가 발생하였을 때 피해 축소 및 사고원인파악과 재발방지 부분으로 나누어 고찰하였다.

## 3. 엔진사고의 예방, 방지 및 사고의 피해축소

### 3.1 결함의 사전 제거

#### 3.1.1. 사고위험성 평가

엔진의 시험이나 운용에 앞서 사고 발생가능성과 사고시 잠재적인 위험을 평가하고 사고위험 감소방안을 모색한다. 또한 사고발생가능성 평가의 결과를 바탕으로 설계문건, 기술문건 (technical documentation), 운용문건(operational documentation)과 시험 프로그램에 안전한 작업 절차와 check list를 명문화한다.

#### 3.1.2 기술 문건 및 운용문건에 따른 작업 수행

작업자는 해당 작업 분야에 대한 교육을 이수한 전문가이어야 하며, 엔진의 시험 및 운용에 있어서 이미 개발된 기술문건, 운용문건, 테스트 프로그램 등을 충분히 인지한 상태에서 문건의 내용에 따라 작업을 수행해야 한다. 그리고 주요한 변동사항에 대하여는 logbook에 기록하여 다른 작업자가 인지할 수 있도록 한다.

#### 3.1.3 신뢰성 있는 엔진 제어시스템 사용

1969년 N1의 첫 비행시험에서 엔진작동제어시스템이 오류를 일으켜서 1단의 30개 주엔진 중에 정상작동 중인 2개를 정지시켰고[2], 2004년에는 Delta-IV Heavy의 발사에서 제어시스템이 공급계에 발생한 캐비테이션을 액체상이 소진된 것으로 착각하여 엔진을 정지시키는 고장을 일으켰다. 이와 같이 엔진의 제어시스템의 결함은 엔진의 기계적 고장이 없음에도 불구하고 임무수행을 불가능하게 할 수 있다. 따라서 제어-측정 시스템은 높은 신뢰도를 갖게 설계되고 제작되어야 하며, 센서 등의 오작동 유무를 판단하기 위하여 센서의 2중화나 3중화 혹은 다른 측정 파라미터들에 의한 cross check기능이 요구된다.

### 3.1.4 추진제 및 공급가스의 청정도 관리

엔진의 추진제나 공급가스(헬륨과 질소)에 들어있는 불순물(기계적 입자, 수분, 오일, 다른 가스 성분 및 산·염기)은 엔진의 작동성에 영향을 주거나 사고를 일으킬 수 있다. 이에 대한 구체적인 사례로는 1969년 N-1로켓의 2번째 비행시험 시 사고와 1982년 제니트 1단 종합연소시험 시 그리고 2007년에 발생한 제니트의 해상발사 시 사고를 들 수 있다. 이들 사고의 원인은 모두 기계적 입자로 인한 엔진의 화재와 폭발이었다. 일반적으로 액체로켓엔진에서는 기계적 입자의 크기를 20 micrometer로, 무게를 0.1 milligram/nanometer<sup>3</sup>이하로 제한되는데, 이 요구조건을 맞추기 위하여 사용 전에 공급계 배관을 퍼지하여 이물질을 제거한다.

### 3.1.5 비파괴검사를 이용한 엔진의 구조진단

비파괴 검사는 주로 부품제작, 구성단품 조립, 엔진 서브시스템과 엔진 전체를 제작 시 그리고 엔진시험과 시험 사이에 구조의 상태를 평가 할 목적으로 이용된다. 현재 비파괴검사는 재질 내 결함 및 균열을 찾거나 용접의 완성도 검사, 재질의 두께 검사 등 엔진개발과 시험에 있어서 폭넓게 이용되고 있다. 또한 TPU 축을 손으로 회전시켜서 로터가 TPU 케이스의 벽과 접촉하는지 여부를 확인하고, 비누방울이나 헬륨 leak detector를 사용하여 엔진의 기밀 검사를 수행한다.

### 3.1.6 단계적 시험 수행 및 요구신뢰도 확보

엔진시험은 단계적-수평적 원리로 수행되는데, 높은 단계의 시험은 낮은 단계의 시험이 끝나기 이전에 낮은 단계에서 이미 검증된 작동조건을 기반으로 시작되고, 시험단계가 높아질수록 시험 프로그램의 복잡도와 파라미터 결정인자(시스템의 output parameter에 영향을 주는 인자)의 수가 증가한다. 엔진시스템 시험의 시작은 엔진서브시스템들이 실추진제에서 단독시험(autonomous test)을 통하여 작동성과 신뢰성이 입증된 후에 이루어지는데 통상 서브시스템의 시험조건은 엔진시스템 시험의 조건보다 가혹하

다. 추진기관의 종합시험에 들어가기 위하여는 엔진시스템과 서브시스템의 단독시험의 결과로써 추진기관의 무고장 작동확률(Probability of No-Failure Operation)은 0.95를 넘어야 한다 [3].

## 3.2 엔진 비상상황 발생시 위험요인 제거

### 3.2.1 추진제 누설 탐지 및 배출

엔진 및 공급계에서 누설로 인하여 가스가 허용한도 이상의 농도가 되었을 때 누설경보와 함께 비활성기체에 의한 퍼지 및 누설가스의 배출이 이루어져야 한다. 이러한 안전시스템은 엔진의 화재나 폭발사고 뿐만이 아니라 작업인원의 질식사고를 방지하기 위하여도 갖추어져야한다.

### 3.2.2 안전장비의 이중화를 통한 사고 방지

추진제 누출에 의한 사고는 가장 빈번하면서도 사고의 피해는 막대할 수 있다. 따라서 시험스탠드의 추진제 탱크의 과급, 드레인 및 배출시스템의 이중화와 추진제 및 가스저장탱크의 자동압력유지장치의 중복설치를 통하여 이들 시스템의 예기치 못한 고장 시 여분의 장비를 이용하여 사고로의 진전을 방지한다.

### 3.2.3 엔진 작동 파라미터를 이용한 엔진상태진단

엔진의 hot test시에 주요 기능 파라미터들(압력, 유량, 회전수, 온도, 각, 이동 등 저속변화파라미터)과 진동-음향 파라미터(구조요소의 진동, 유동로에서 가스와 액체의 압력펄스, 액체추진제의 유량펄스 등 고속변화파라미터)를 이용하여 엔진의 상태를 점검한다. 시험 중 진단시스템으로부터 받은 정보를 바탕으로 위험의 초기조건에서 엔진을 더 안전한 작동조건으로 전이시킬 수 있다[4]. 단 고속변화파라미터의 급진적인 변화는 이러한 안전조치 수행에 제한을 준다.

### 3.2.4 비상정지시스템의 활용

비상정지시스템은 능동형 사고방지시스템에 속한다. Figure 2에는 진단시스템과 연계되어 있는 비상정지시스템의 구조를 보여준다[5]. 비상정지시스템은 엔진이 작동할 때 제어되는 파라미터들(보통 가스발생기 온도, TPU의 회전수 및

연소압 등)을 연속적으로 측정하고 이들을 허용 한계값과 비교하며 한계값을 초과할 경우 제어 시스템에 엔진을 정지시키는 명령을 내린다. 비상정지시스템의 효율성은 엔진의 비상상태 포착 계수와 비상정지시스템의 신뢰성에 의존한다. 포착계수의 증가는 제어되는 파라미터 수의 증가를 의미하며, 이는 시스템을 복잡하게 만들어서 신뢰성을 떨어뜨리며, 이로써 엔진이 거짓 정보에 의하여 정지될 가능성이 증가된다. 따라서 비상정지시스템의 설계 시 최대로 신뢰할 수 있게 하는 최적의 파라미터가 선택되어야 한다.

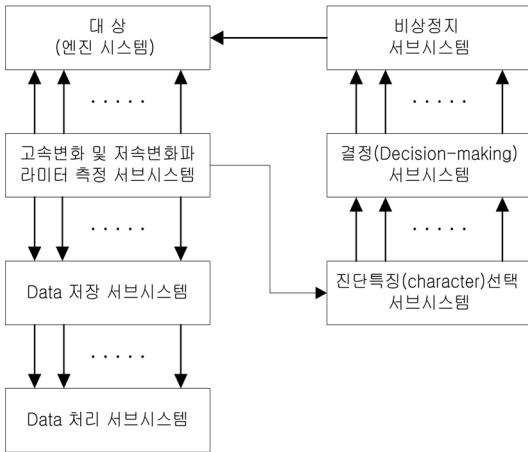


Fig. 2 Systems for control, diagnosis and failure protection of LRE

### 3.2.5 시험운영자의 판단에 의한 사고위험 방지

자동비상정지시스템 이외에 공급계시스템의 압력, 구조요소의 진동부하, 추진제 누설 및 엔진과 스탠드의 화재에 대하여는 시험운영자의 결정에 의하여 엔진을 보다 안전한 작동조건으로 이전시키거나 사고방지시스템을 작동시킬 수 있다 (Figure 3). 이를 위하여 엔진 및 시험설비의 주요부에 대하여 모니터를 통한 관찰이 가능해야 하며, 누설 경보 및 진동 측정 결과가 모니터링 될 수 있어야 한다. 시험운영자는 비상시 운영 메뉴얼을 숙지하고, 판단 및 명령하는 운영자와 실제 콘솔을 조작하는 운영요원을 구분하여 비상상태에 인적실수를 방지한다.

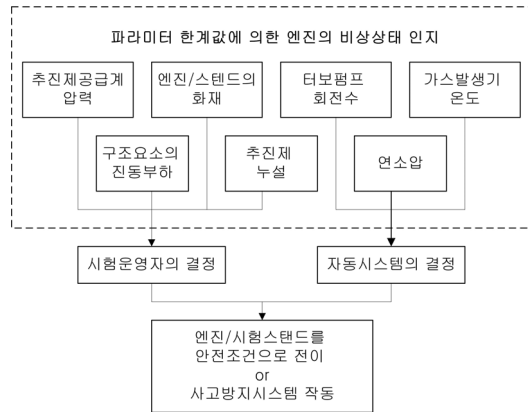


Fig. 3 Plan of emergency protection system [3]

## 3.3. 엔진 사고 발생시 피해 감소 및 원인 분석

### 3.3.1 엔진 시험시 적정 추진제 용량 사용

러시아 Niichimmash사에서 엔진시험 중 터보펌프가 폭발하였고 파편이 추진제공급 탱크와 충돌하여 큰 화재가 발생한 사례가 있다. 따라서 엔진시험 시 시험스탠드의 추진제 탱크에는 시험에 필요한 적정 추진제 용량만을 저장하여 화재 시 피해를 최소화한다. 또한 시험설비에 있는 추진제 탱크의 강도는 사고를 대비하여 충분히 견고해야 한다.

### 3.3.2 화재 차단 및 소화/방재시설

사고가 발생시 피해의 확산을 막기 위하여 엔진과 추진제 탱크사이에 방화 및 방폭벽을 설치하여 화재를 국지화시키고, 화재위험 부분에는 소화시설을 설치한다. 러시아의 경우 로켓에 소화시스템을 설치한 사례가 있는데 1969년 N-1 로켓의 발사시 일어난 엔진화재로 인하여 이후에 제작된 N-1로켓의 엔진부에는 프레온 소화시스템이 설치되었다.

### 3.3.3 사고발생의 원인 분석 및 재발방지

발생한 사고가 진압되면 사고발생의 원인을 파악하고 재발방지에 노력해야한다. 그러나 엔진의 시험 및 운용에서 일어나는 사고는 많은 경우 엔진의 구조를 완전히 파괴하므로 사고발생 원인을 찾는 데 어려움이 있다. 따라서 실제 사고 상황 시 기록된 파라미터 데이터를 비상상태 특

성해석 프로그램에서 재현하는 과정을 통하여 사고발생의 원인과 사고발생위치를 찾아낼 수 있다. 비상상태 분석 프로그램에는 정상상태로 작동하는 엔진에서 산화제라인의 누설, 연료라인의 누설, 산화제라인의 막힘 현상, 연료라인의 막힘 현상, 터빈노즐·엔진노즐 및 배기노즐의 파손, 가스관의 누설, 가스발생기내 체(grid)구조물의 막힘, 배기부의 막힘, 터빈·연료 및 산화제 펌프의 효율 변화, 연료 및 산화제 펌프의 양정 변화 등의 사고상황이 모델링 되어 있다.

#### 4. 결 론

액체로켓엔진은 고도로 복잡한 기계시스템으로 높은 에너지긴장상태와 열악한 환경에서 작동되므로 많은 형태의 잠재적인 사고요인이 내포되어 있으며 사고를 미연에 100% 방지하는 것은 사실상 불가능하다. 따라서 사고의 예방과 더불어 엔진의 고장이 사고로 진전되는 것을 막고, 사고발생시 피해를 축소시키는 것도 매우 중요하다.

본문에 제시된 결함 제거, 비상상황에서 사고를 방지하여 주는 위험요인 제거 그리고 엔진사고 발생 시 피해감소와 원인분석 방안들은 액체

로켓엔진의 시험 및 운용 시 사고위험을 감소시키기 위하여 사용될 수 있다.

#### 참 고 문 헌

1. 소비에트연방 국가표준 "액체로켓엔진의 신뢰도, 검사 및 시험. 용어와 정의" GOST 22763-77, SSSR 국가표준위원회, 1982.
2. Chertok B.E., "Rocket and persons" RTSoft, 2007.
3. Bershadskiy V.A., Galeev A.G., "Strategy of Risk Reduction at Stand Test for Rocket Propulsion Units", Aerospace technology, No. 2. 2004.
4. Belyaev E.N., Chvanov V.K., Chervakov V.V., "Mathematical Modeling of Working Processes in Liquid Rocket Engine", MAI, 1999.
5. Dmitryev E.A., "Systems for Control, Diagnosis and Failure Protection of the Liquid Propellant Rocket Engine with Slow- and Fast Changing Parameters", Odessa State Polytechnic Univ. 1998.