

로켓연료를 사용하는 시험설비의 위험을 줄이는 운용 방법

김상헌 · V.A.Bershadskiy · 오승협

한국항공우주연구원

Methods for Reduction of Danger in Cases of Functioning on Rocket Fuel of Test Stand

Kim, Sang Heon · V.A.Bershadskiy · Oh, Seung Hyub

Korea Aerospace Research Institute

요 약

본 논문은 발사체 추진기관의 지상 시험을 수행 하면서 쌓은 경험을 바탕으로 한 운용 방법에 대해서 서술하고 있다. 운용 방법은 발생 할 수 있는 사고를 줄이기 위한 특별한 방법 및 정책, 그리고 사고를 줄이기 위한 기술적 해결책을 포함 하고 있다. 이러한 운용 방법은 추진기관 시험 시에 발생 할 수 있는 비정상적 상황에 관한 연구를 통하여 정립 되었다. 서술한 운용방법을 통해서 발사체 추진기관의 시험운용을 개선 할 수 있으며, 안전하게 수행할 수 있다.

1. 서 론

발사체에 사용되는 연료로는 원유를 기반으로 하는 탄화수소계열의 연료와 수소 등의 청정 연료 등이 많이 사용되고 있다. 발사체에 사용하는 연료는 높은 비추력이 요구되는 고효율의 연료로서, 이러한 연료의 에너지적 잠재력은 화재-폭발 위험성으로 이어질 수 있다. 실제로 20세기에 들어 활발히 발사체 개발이 진행 되면서, 인적 물적 손실을 동반한 치명적 사고가 많이 발생 하였었다.

발사체를 개발하는 과정에서 지상시험을 통한 설계 및 제작의 검증은 매우 중요한 단계이고, 반드시 수행 하여야 하는 과정이다. 이러한 발사체 추진기관의 시험을 통한 개발 시 안전 확보의 문제는 매우 중요하다. 이 과정에서 화재-폭발의 가능성은 사용하는 연료 량에 비례하여 증가하게 되며, 화재-폭발 등의 사고가 발생하게 되면 시험대상물의 손실은 물론, 자연환경의 파괴, 국가 공공 기술 정책의 변경, 관련 기술 발전의 중단으로 이어 지기도 한다.

2. 발사체 추진기관 시험시 사고 위험을 줄이기 위한 방법

발사체 추진기관 시험 운용중 발생할 수 있는 화재나 폭발 등의 사고를 방지하기 위해

서는 아래와 같은 개념적 접근이 필요 하다.

가. 발사체 연료를 사용하는 시험설비의 운용에서 절대적으로 안전한 운용은 존재하지 않는다. 발사체 추진기관의 내구성이 비약적으로 증가 하였음에도 사고로 이어질 수 있는 비정상상황을 근본적으로 차단 할 수 없다. 발사체 분야 환경을 고려한 법규나 법령의 제정이 시급하다.

나. 발사체 추진기관 시험 운용도중 발생 할 수 있는 비정상 상황 및 사고 상황에 적절히 대처 하여야 한다. 비정상 상황은 논리적 비정상 상황과 물리적 비정상 상황으로 구분되며, 논리적 비정상 상황은 시험대상물인 추진기관의 제작단계 또는 시험 준비과정에서 중요한 기술적 요구조건을 만족시키지 않았거나, 또는 표준문서에 적합하게 이행되지 않는 것을 의미 한다. 물리적 비정상 상황은 시험 운용도중 시스템 프로세스의 중요 파라미터가 정상범위를 벗어나거나, 시험 대상물의 구조적 측정값이 허용범위를 벗어나는 것을 말한다. 사고 상황은 사전 진단 방법으로 규정하는 것으로 기밀 누설의 징조를 발견하거나, 구조적 파손 등으로 추진기관의 연료 등이 유출되는 현상을 말한다. 이러한 비정상 상황 및 사고 상황을 인지하게 되면, 확산을 막기 위하여 이를 제거 하여야 하고, 불가피할 경우 시험을 중단 하여야 한다.

다. 추진기관 시험 안전 확보를 위하여 해당분야 전문가 및 추진기관 시험의 운영-기술 책임자가 포함된 전문가 집단을 바탕으로 한 조직을 갖춘다. 발생할 수 있는 사고로 인한 설비의 파손, 인명손실 등에 관한 리스크를 사전 평가하고, 사고 발생 확률을 산정 하여야 한다.

2.1 발사체 추진기관 시험의 사고 위험을 줄이기 위한 접근 방법

발사체 추진기관 시험의 사고 위험을 줄이기 위한 첫 단계는 발생 할 수 있는 위험의 기술적 특성을 파악하여 적합한 대응 방법을 마련하는 것이고, 또 이러한 대응 방법들이 얼마나 효과적인지 평가 하는 것이다. 발사체 추진기관 시험 시에 발생할 수 있는 사고를 감소 시키기 위해서는 시험대상물인 추진기관 및 시험설비의 내구성을 높이는 방법과 현대의 진단기술을 이용하여 사고를 일으키는 인자들을 사전에 찾아 제거 하는 방법, 그리고 사고 발생 시 그 확산 프로세서를 제어하는 수동적 방법을 사용 한다. 앞서 언급한 추진기관 시험 시 사고를 줄이기 위한 방법에 대한 평가는 아래와 같이 백터량을 활용한 수식으로 표현 할 수 있다.

$$\sum K_i a_i \rightarrow K_{effic.} ,$$

$K_{effic.}$ -조치(방법)의 효율, K_i -각각의 조치(처방) 방법에 따른 효율 지수, a_i -질량계수, 전문가들이 산정한 값.

2.2 발사체 추진기관 시험의 사고 위험을 줄이기 위한 방법 제안

발사체 추진기관의 안전한 시험을 위해서 추진기관에 요구되는 내구성은, 추진기관을 구성하는 단품들에 대한 시험을 어떻게 수행 했는지, 그리고 추진기관을 이루고 있는 기

타 파트들에 대한 단품시험 결과와 많은 연관관계가 있다. 시험을 통해 추진기관을 개발하는 방법에 대한 효율은 아래와 같이 표현 한다.

$$K_{A1} = \prod_1^n B_i ,$$

$B_i = 1 - m_i/N_i$ - 구조 파트, 시스템, 설 비등이 고장 없이 작동 할 수 있는 확률, 예측 수명을 넘어 최초 고장 발생까지의 작동시간 N_i -시험회수, m_i -시험시 발생한 문제 회수

현대의 발사체에 적용하는 추진기관들은 최소한 0.985~0.995 정도의 신뢰도를 확보 하여야 하며, 일반적인 추진기관의 지상 복합 시험의 목표 신뢰도는 0.95 이상이다.($K_{A1}>0.95$) 발사체 전문가들의 평가에 의하면, 신뢰도 값이 0.95 이상이면 추진기관의 지상 복합 시험시 발생할 수 있는 잠재적 사고 가능성은 10^{-4} ~ 10^{-5} 정도이다.

연료의 성분 및 청정도 관리. 발사체 추진기관에 사용하는 연료의 발사 혹은 점화를 준비하는 기술적 단계에서 가압용 비응축성 가스등이 극저온 연료내에 용해 되거나 또는 연료내에 고형의 이물질로 존재 하는 것을 의미한다. 발사체 추진기관에 사용되는 연료의 품질은 아래와 같은 관계식으로 평가 할 수 있다.

$$K_{A2} = [1 - \Sigma P_i/P_{lim}] ,$$

P_{lim} - 연료의 허용 오염 한계 P_i -실질적인 연료의 오염 정도

연료 누설시 시험설비 및 추진기관의 보호. 화재-폭발 가능성이 많은 연료의 누출을 막기 위해서는 능동적 또는 수동적 방법을 적용 할 수 있다. 능동적 방법은 추진기관의 엔진으로 연료를 공급하는 공급계 시스템을 이용하는 방법이고, 수동적 방법은 추진기관이나 시험설비의 설계시 사고 상황을 고려한 마진설계를 의미한다. 이러한 보호시스템의 잠재적 효율은 아래 식으로 정의 할 수 있으며, 현재의 기술력으로 얻을 수 있는 사고 예방 계수는 대략 0.4~0.85 정도 이다.

$$K_{A3} = P_{ds}/P ,$$

P_{ds} -설비 사고(정지) 회수의 관련 계수, P-능동적 그리고 수동적 방어 방법에 의한 사고 예방한 결과.

화재-폭발을 일으키는 혼합물 생성 및 그의 폭발 예방. 발사체 추진기관 및 시험설비에서 연료누설을 막는 방법과 연료 누설 시에 점화/발화가 발생 하지 않는 안전한 소재를 사용하는 방법을 적용 할 수 있다. 위 두 가지 방법에 대한 효율성은 아래와 같은 방법으로 평가 한다.

$$K_{A4-1} = 1 - \Sigma C_i/C_{lim-i} ,$$

$$K_{A4-2} = S_{safe}/S ,$$

C_{lim-i}, c_i -사용하는 방법들의 화재폭발 가능성이 있는 혼합물의 허용 가능한 최대 누설량 및 실제 누설량 측정값. S_{safe} -가연성의 혼합물이 발생하여 저장되지 않도록 사전에 고려한 국부적 공간의 개수, S -화재-폭발 가능성이 있는 혼합물이 조성될 수 있는 공간의 총 개수.

사고 발생 시에 동반되는 잠재적 손실 평가. 발사체 추진기관 시험 시에 발생하는 사고에 의한 설비나 인근 지역의 손실 정도는 아래 두 가지 정보를 파악함으로써 예측 가능하다. 첫 번째는 누설되는 연료의 양에 따라 위험지역을 산정하는 것이고, 두 번째는 시험 시 추진기관 탱크 내에 충전하는 연료의 양을 근거로 하여 위험지역을 산정하는 것이다. 자세히 말하면 추진기관 연료 탱크내 연료가 전량 누설 되었다고 가정하고, 전량이 폭발 반응을 일으켰을 때 인근의 주거 및 산업지역에서 감지되는 충격파가 어느 정도 형성되는 지를 파악하여 산정하는 것이다. 누설된 연료의 폭발력을 TNT의 폭발력으로 환산하여, 발생하는 충격파의 정도를 파악하는 방법으로 산정한다. 현대의 발사체 추진기관의 시험 운용 시 사고가 발생하면, 그 확산 프로세스의 제어는 어렵다. 따라서 추진기관의 시험 운용 시 안전에 관한 충분한 마진을 가지고, 사전에 사고를 예측하여 예방 시험을 수행 하여야 한다. 아울러 추진기관 시험 운용 시 사고를 미연에 방지하기 위하여 연료 탱크 내에 충전하는 연료의 양은, 추진기관을 시험하는 시험설비의 형태와도 밀접한 연관이 있으며, 완전개방형 시험설비의 경우 가장 많은 연료를 충전할 수 있다.

3. 결 론

본 논문은 고열량의 발사체 연료를 사용하는 추진기관의 지상 시험 시, 위험성을 줄이는 일반적인 방법에 대해서 경험을 바탕으로 작성 하였다. 아울러, 발생 할 수 있는 사고의 개념적 규정을 포함하고 있으며, 시험 운용 시 사고 발생 확률을 낮추기 위한 방법도 포함하고 있다.

또 논문에서 제안한 여러 가지 방안 중 눈여겨 볼 것은 시험대상물이나 시험 설비 등의 기계 구조적 상태의 분석 결과 및 작동시간, 그리고 상태, 발생 가능한 잠재적 비정상상황 및 사고 상황을 염두 하여 선택 적용 하라는 것이다. 주관적인 논리를 배제하기 위해서는 제시한 방법으로 충분한 기술운영을 통하여 평가와 효율성을 따져야 한다.

참고문헌

1. Martial. V. "The main risk of chemical plants." Mir. 1989
2. Bershadskiy.V.A.,Galeeb A.G "로켓추진기관의 지상시험시 위험을 감소 시키기 위한 전략" Aerospace engineering and technology. 2004. No.2. p.38-45
3. B.B.Adushkina, S.I.Kozloba, A.B.Petroba, "Ecological problems and risk of rocket-space technology on the natural environment", Ankil, Moscow, 2000