

액체로켓 시험설비에서의 위험감소 방법

이정호* · 김용욱* · 베르샤드스키** · 강선일* · 조상연* · 오승협*

A Study on the Risk Reduction Method for Liquid Rocket Test Facility

Jung-Ho Lee* · Yong-Wook Kim* · V. A. Bershadskiy**
Sun-Il Kang* · Sang-Yeon Cho* · Seung-Hyub Oh*

ABSTRACT

The method of decreasing the ecological risk for the LRE(Liquid Rocket Engine) test is developed, working on the cryogenic oxidizer and the high-boiling fuel(Kerosene). This Method is based on the study that contains a technical solution method and an accident occurrence range for decreasing of accident probability and damage. This paper contains schematic on the all risk circumstance bring to accident, block-diagram for an accident growth process in case of the propellant leakage, technical solution method and risk reduction evaluation method. It will be used to alternative method for the risk reduction of complex technical systems.

초 록

액체산소(LOx)와 케로신(Kerosene)을 연료로 사용하는 액체로켓엔진 시험설비에서 지상연소시험을 수행할 경우에 발생하는 위험도를 감소시키는 방법을 연구하였다. 본 방법은 잠재적인 사고 발생확률을 낮추고 그에 따른 발생 가능한 손실을 낮추기 위해서 사고 발생 가능한 한계선에 대한 연구와 기술적 해결방법을 바탕으로 하고 있다. 시험설비에서 사고 상황을 야기 할 수 있는 위험한 상황에 관한 개략도와 추진제 유출 사고시 발전 양상 및 발전 프로세스에 대한 도표, 기술적인 해결방법, 위험성 감소 평가 방법을 제시함으로써 기존의 확률적인 통계 값을 바탕으로 하는 것과는 또 다른 방법으로써 위험도 감소를 위한 대안으로 사용하고자 한다.

Key Words: Liquid Rocket Engine[LRE](액체로켓엔진), Risk(위험도), LOx(액체산소), Kerosene(케로신), Propellant(추진제), Safety Distance(안전거리), Leakage(누설)

1. 서론

† 2005년 5월 11일 접수 ~ 2005년 9월 12일 심사완료

* 정회원, 한국항공우주연구원 추진기관체계그룹

** 한국항공우주연구원, 한·러 해외유치과학자
연락처, E-mail: leejh28@kari.re.kr

미국과 러시아 등은 우주발사체 개발 시 단품 시험과 서브시스템 단위 시험, 엔진블록시험을

거치며 최종적으로는 비행시험을 수행한다. 그중에서도 많은 인력과 비용을 소비하는 비행시험 횟수를 줄이기 위해서 실제 비행시험과 동일한 시험결과를 얻을 수 있는 고공조건을 모사할 수 있는 시험설비 등을 폭넓게 이용하고 있다.

이러한 설비를 이용한 지상시험은 단품을 시작으로 추진제 탱크를 포함한 발사체 전체 시스템에 대해 수행하며 최종적으로 실추진제를 충전하고 시험을 수행하게 된다. 그러나 실추진제를 이용한 시험은 화재·폭발과 같은 사고로 이어지는 경우가 많이 발생하고 있다.

특히 액체로켓엔진 시험설비(이하 LRE 블록)의 경우엔 엔진개발 역사가 깊어 내구성 또한 증대되어 왔기 때문에 사고위험성은 큰 문제가 될 것이 없지만, 개발과 시험 진행과정에서 발생할 수 있는 추진제 누출이나 화재, 폭발과 같은 비정상적인 상황과 사고상황[1, 3, 5, 7, 8]을 배제할 수 없으며 사고가 발생할 경우엔 대기환경에 생태학적인 영향을 줄 수 있는 위험한 상황이 발생하기도 한다[1, 7].

일반적으로 LRE 블록에서 사고를 일으키는 주된 인자를 살펴보면 시험 중 방출 될 수 있는 열에너지와 폭발 등의 기계적 반응, 화학 반응, 전자기파 등이 있다.

본 논문에서는 LRE 블록에서 시험을 수행할 경우 발생 가능한 위험한 상황에 대한 연구결과[2, 3, 4, 6]와 일반 산업체에서 발생한 사고상황[1, 3, 5, 7, 8]을 바탕으로 액체산소와 케로신을 이용하는 LRE Block에서 발생 가능한 리스크를 줄이는 방법을 개발하고자 한다. 이를 통하여 현재 개발 중인 KSLV(Korea Space Launch Vehicle)를 위해서 이용되어질 지상연소 시험설비 구축에 적용하고 주변에 위치한 주거지역이나 산업체와의 제한거리를 규정함으로써 위험상황을 줄이고자 한다.

2. 본 론

2.1 확률적 위험 분석 방법

국내·외에서 위험도를 줄이기 위한 방법으로 확률적인 위험분석 방법이 폭넓게 발전하고 있다[2, 3, 4, 6]. 위험도를 이해하기 위해서는 발생할 수 있는 확률과 그에 따른 인적·물적 손실, 사고로 진행될 경우 발사체의 기능손실 등을 파악해야만 한다. 위험도에 대한 간단한 식은 Eq. 1과 같이 표기할 수 있다[2, 4].

$$R = B \cdot Y \quad (1)$$

R - 사고 발생 확률 (신뢰도)

B - 사고의 결과 (사고횟수)

Y - 사고 정도값 (사고로 인한 대기환경 등에 미친 손실을 금액으로 환산한 값)

이론상 잠재적인 사고발생확률 R값이 허용 가능한 사고발생확률 값 $R_{\text{permission}}$ 보다 작다면 시험은 가능하다. 그러나 LRE 블록의 경우 지상시험 횟수가 제한되어 있기 때문에 시험과정동안 발생하는 사고의 징후나 발생빈도 또한 적다. 그러므로 사고의 징후나 원인분석 결과를 기본으로 한 확률적 접근방법을 통한 계수 B와 $R_{\text{permission}}$ 의 값은 현실에선 규정할 수 없다. 또한, 비행시험 중 발생한 사고징후나 원인분석결과를 지상시험 리스크를 산정하기 위한 통계적 데이터로 사용해서도 안 된다. 그 이유는 비행시험 진행 중 사고가 발생하게 되면 추락이나 폭발 등의 연계 상황을 가져오지만, 지상에서 시험을 할 경우 이상징후가 발생되면 제어로직등 여러 가지 방법을 사용하여 시스템을 정지시킨 후 원인분석·기록을 통해서 얻은 통계 값을 데이터로 활용하기 때문에 비행시험과 지상시험에서 도출되는 데이터의 질은 확연히 다르다고 할 수 있다. 더욱이 비행시험과 달리 지상시험은 이상 징후 및 사고 발생 가능성이 보인다면 위험한 상황을 사전에 제거하여 사고자체를 예방할 수 있기 때문이다.

2.2 시험시 발생가능한 일반적인 위험

LRE 블록의 지상시험을 거치면 시험데이터

특성을 얻게 되는데 이러한 특성들은 LRE 블럭의 원만한 작동과 시험설비의 상태와도 연관이 있다. 지상시험의 경우 많은 물리적 이상 징후가 나타나며 서브파트의 고장으로 인한 정지, 시험 당시의 대기상태나 작업자의 실수, LRE 블럭의 오염, LRE 블럭 및 서브파트가 외부영향에 의해 파손되어 발생하기도 한다. 이는 잠재적인 사고 상황 및 사고를 발생시킬 수 있는 직접적인 사고원이 되기도 한다.

LRE 블럭 지상시험과 비행시험시 발생한 사고 상황이나 사고 발생후 사고조사·관련 문건 등으로 여러가지 사고 유형이 있음을 알 수 있으나, 그중에서도 가장 위험한 사고 상황은 실추진제 누출로 인한 사고이다[6].

Figure 1은 추진제 누출로 이어지는 사고원인을 분석한 분석도이다. 이는 추진제 누출이 가능한 원인을 분석할 수 있을 뿐만 아니라 일반적인 사고 원인 분석도 가능하다. Figure 1에서 나타내고 있는 사고를 유발시키는 변수들을 사전에 차단 한다면 사고확률을 줄일 수 있으며 이러한 변수들은 시험을 수행하기 전 점검사항으로도 사용이 가능하다.

추진제 누출의 심각한 문제는 LRE 블럭 지상시험이 수행되기 전에 발생한 징후가 향후 어떤 결과를 초래할지 알 수 없다는 점이다. 그러므로 사고징후는 LRE 블럭의 정상작동에 영향을 미치지 않게 사전진단을 통해서 해결해야만 한다. 또한 이상징후가 어떠한 양상으로 발전되어 가는지, 어떠한 형태의 사고로 발전되어 어떠한 위험성을 지니는지를 사전에 반드시 규정해야만 한다. 그러므로 Fig. 1의 사고원인 분석도를 사용하면 추진제 누출로 이어지는 사고 발생조짐을 알 수가 있다. 그러나 사고발생시 사고프로세서가 매우 빨리 진행이 되어 미처 위험성을 파악하기 이전에 사고로 이어진다면, 사전에 사고방지를 할 수 없으므로 이 방법 또한 완벽하다고 말할 수 없다. 즉 시험 중 공급계에 기밀이 유지되지 않으면 사고로 이어지고, 최악의 경우엔 추진제가 순간적으로 누출되어 연료와 산화제의 혼합물이 폭발력을 지니는 위험한 수준의

조성비를 가지기도 하고 이러한 과정으로 인해 파손과 파괴를 동반하는 사고를 일으키기도 한다.

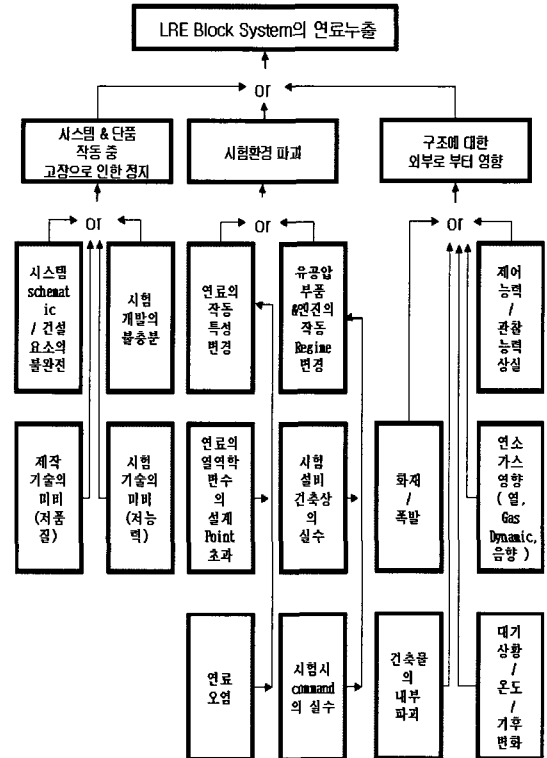


Fig. 1 Analysis on the Parameters Leading to the Propellant Leakage (Fault Tree Analysis)

LRE 블럭의 추진제 공급계에서 추진제가 누출될 경우엔 사전에 어떠한 특성을 발생하여 사전에 방지가 가능하지만 이미 어느 정도 수준까지 도달했다면 사고확산은 현재의 기술로는 제어할 수 없다. 그러므로 지상연소 시험을 할 경우 사고예방을 위해서는 LRE 블럭 내부의 특정 값들이 사고가 발생할 수 있는 한계 값에 접근하는 지를 주시하여야 한다. 한계 값을 넘어서면 순식간에 사고로 발전되어 추진제탱크가 파괴되고 추진제가 누출, 기화되어 폭발 가능한 화학당량 비를 가지게 되기 때문이다.

Figure 2는 LRE 블럭 시험시 각종원인으로 인해 추진제가 누출된 경우 사고로 이어지는 사고 발생 프로세스를 나타내었다.

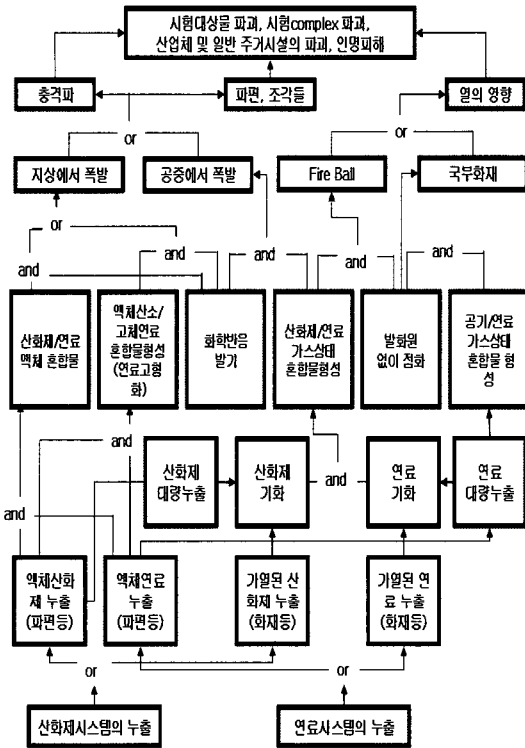


Fig. 2 Accident Propagation Process Caused by Propellant Leakage

추진제누출 사고시 발생 가능한 시나리오를 보면 대규모 설비파손, 충격파로 인한 인명손실, 폭발파편에 의한 손실, 화재·폭발시 발생하는 구모양 화재로 인한 손실을 입을 수 있다. 모든 사고는 사전에 어떠한 방법으로도 사고발생 징후를 알려주며 이상징후는 반드시 사고로 이어진다. 사고는 사고의 발생, 사고 프로세스의 발전, 사고에 따른 인근 설비 및 시설에 미치는 영향(파손), 사고정리 순으로 4단계의 사이클을 가지고 있음을 알 수 있으며, LRE 블럭의 지상시험시 시험설비와 산업/주거시설과 충분한 안전거리를 가지지 못한다면 사고여파는 인근산업/주거시설까지 확대되어 피해가 커질 것이다. 추진제는 화재 및 폭발이 일어날 수 있는 큰 잠재적인 에너지를 가지고 있고 LRE 블럭에 충전하는 순간부터 사고발생 가능성은 증가한다는 점을 명심해야만 한다.

2.3 잠재적인 사고 확률의 감소

지상시험시 잠재적인 사고확률을 줄이기 위해서는 시스템 고장으로 인한 기능손실이 생겨 안전에 영향을 주어서는 안 되며, 사고상황 발생을 예방하여야 하고, 사고가 발생할 경우 올바른 상황인식 및 해결 할 수 있는 방법을 가져야 한다.

우주산업 종사자들은 단품에서 어셈블리단위로 LRE 블럭의 기능 연동시험을 수행 하는 것을 지향한다. 러시아의 경우 구소련시절 미국과의 우주개발 경쟁으로 인해서 단품레벨에서 시스템 단위로의 시험 진행 없이 어셈블리단위를 기본으로 시험이 이루어짐으로 해서 많은 사고가 발생되었다. 그러므로 미국과 러시아의 경험을 바탕으로 볼 때 사고 방지를 위해서는 이미 검증된 단품 및 서브시스템을 이용하는 것이 타당하다고 말할 수 있으며, 이를 이용한 LRE 블럭 지상시험시 신뢰도는 0.95를 상회한다.

사고상황 발생 예방시스템은 LRE 블럭 시스템과 시험설비의 작동 내구성을 높이기 위해선 반드시 필요하며 능동적인 방법과 수동적인 방법으로 나눌 수 있다. 능동적인 방법은 자동사고방지시스템으로 연료탱크에서 연료가 누출되는 것을 방지하는 것과 같이 LRE Block에서 발생할 수 있는 사고를 근본적으로 차단하는 방법이다. 이와 달리 수동적인 방법은 정해진 방법대로 쉬운 시험에서 어려운 시험 수순으로, 또는 간단한 시험을 시작으로 위험하고 복잡한 시험으로 시험을 진행하는 것을 의미한다. 이와는 별도로 시험설비의 안전을 극대화시키기 위해서는 아래와 같이 각종 설비를 복잡하게 구성해야만 한다. 즉 유공압 설비의 경우 안전보장을 위한 퍼지라인, 각종 안전밸브, 배출포트, 샘플링포트 등을 지녀야 한다.

제어시스템의 경우에는 사고 상황에 대비하여 회로구성이 3중 채널로 설계된 비상정지 로직과 내구성이 검증된 기타 서브파트를 가지고 있어야 하며, 전기설비에서는 점화원 발생을 사전에 차단하는 방폭구조를 이용해야 하며, 사고상황 식별과 제거는 사고를 예방하는 방향으로 진행 시켜야한다.

이는 다음과 같은 변수들을 사전에 규정 또는 분석해야 한다. LRE 블럭에 대한 구성·기능적 분석, 발생 가능한 이상징후 및 사고 상황에 대한 규정, 사고나 이상징후를 식별 할 수 있는 파라미터 한계에 대한 규정, 제어 가능한 파라미터 범위의 규정, 안전규정의 정립, 진단 알고리즘 정립, 사고상황 발생시 사고상황 제거 알고리즘 정립이 이에 해당한다. 또 앞서 말한 것과는 별도로 LRE 블럭에서 사고발생시 시험을 자동·수동으로 중단시킬 수 있는 시스템이 필요하다. 위에 열거한 내용은 미국의 "스페이스 셔틀", 러시아의 "부란"을 통해서 검증이 된 방법들이다.

24 잠재적인 사고 발생시 손실의 감소

사고 발생시 인근 주거 지역과 산업체등의 건물파손 정도를 평가하기 위해서는 사고 진원지로부터 주변설비 및 건축물까지의 안전거리를 계산하는 방법을 사용해야 한다. 사고 발생시 입을 수 있는 손실 규모나 범위를 알아보기 위해서는 Eq. 2를 사용한다. 실제로 2차 세계대전 당시 각기 다른 규모의 폭발물이 폭발 할 때의 특성을 기반으로 작성되어진 것으로 미국, 영국, 러시아 등에서 사용되고 있다[5].

$$H = \frac{K \cdot W_{TNT}^{1/3}}{\left(1 + \left(\frac{3180}{W_{TNT}}\right)^2\right)^{1/6}} \quad (2)$$

H : 폭발 진원지로부터의 거리

K : 파괴(파손) 계수

$$W_{TNT} = \frac{0.4 \cdot q_{nf} \cdot Z \cdot M}{0.9 \cdot q_{TNT}} \quad (3)$$

q_{TNT} : TNT 1 kg의 연소열량

q_{nf} : 폭발하여 발생하는 연소열량

Z : 누출계수 (0.03, 0.1, 0.3, 0.5)

M : 누출량

0.4 : 가스성분의 40 % 영향

0.9 : TNT 90 %가 충격파로 발생

을 알아야 하지만 현재까지는 모든 폭발상황에 적용하고 폭발성질을 규정할 수 있는 보편적인 방법은 없다. 그러나 M값은 한계상황의 거리 혹은 발생 가능한 시나리오를 기반으로 그 값을 정의 할 수 있으며, Z값은 사고 유형에 따라 달리 표현되지만 관련문헌[8]에 따르면 0.03 ~ 0.5 정도임을 알 수 있다.

로켓시험을 위한 설비의 경우 Z값은 완전개방형은 0.03 ~ 0.1, 부분 개방형은 0.1 ~ 0.3, 밀폐형은 0.3 ~ 0.5의 계수 값을 사용한다[8].

Table 1은 K 또는 P (kpa)값의 변화에 따른 산업체나 주거공간에 영향을 미치는 위험반경을 나타낸다. 만약, 설비 폭발시 주거공간에 미치는 파괴정도를 유리창 50 %정도 파손되는 것을 기준으로 결정된다면 K=56으로 해야 한다.

K값의 결정은 국내여건 상 안전거리를 최대로 확보 할 수 없으므로 사고시에 시험설비나 주변 시설의 파손을 얼마만큼 감수를 하느냐에 달려 있다. 이러한 결정은 책임을 질 수 있는 최고 결정권자나 결정을 할 수 있는 위원회에서 결정을 내리는 것이다. 예를 들면 시험설비가 폭발을 하게 되더라도 최소한 통제실은 안전을 확보해야만 한다면 피해가 적은 K=56을 적용하는 것이다. 그러나 시험설비 주변의 자재저장소라 예를 들면 건물붕괴가 없으면 된다고 최고결정권자가

Table 1. Risk Range Affecting on the Residential Area According to the Change of K or P Value by Explosion[5]

| K | P (kpa) | 산업체/ 주거공간의 파괴정도 | 위험 반경 |
|-----|---------|-----------------------|-------|
| 3.8 | 70 | 전파 | R1 |
| 5.6 | 33 | 파손정도 심각 (50%정도) | R2 |
| 9.6 | 25 | 중간정도의 파손 (건물의 붕괴는 없음) | R3 |
| 28 | 4 | 소규모파괴 (내부벽 파괴) | R4 |
| 56 | 2 | 피해적음 (유리창파손 50%이하) | R5 |

Equation 2와 3을 이용하기 위해선 M과 Z값

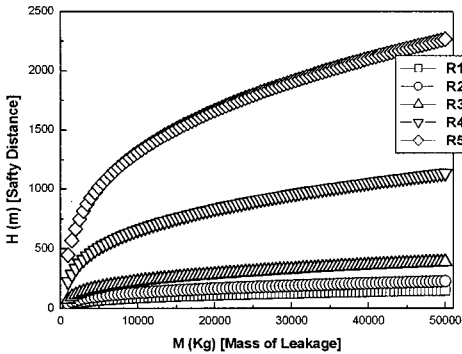


Fig. 3 Safety Distance in case of Explosion of LOx / Kerosene Mixture (Z=0.3)

결정을 내리게 되면 K=9.6을 적용하는 것이다.

위의 방법을 근거로 부분개방형 설비를 기준 (Z=0.3)으로 Table 1에 나타난 K값의 변화에 따라서 사고시 입을 수 있는 손실정도를 나타낸 특성 그래프는 Fig. 3과 같다.

부분개방형(Z=0.3)에 K=28(내부벽의 소규모 파괴)이고 추진제 누출이 50 ton이라고 가정하면, 최소한 주거공간과 시험설비의 거리가 1 Km이 내에 있는 건물은 내부벽이 파괴되는 정도의 손실을 입을 수 있다는 것을 알 수가 있다.

Figure 4는 피해가 적은 K=56을 기준으로 추진제 누출로 인한 사고시 시험설비형태 즉 Z값 변화에 따른 안전거리를 보여 주고 있다.

시험설비가 완전개방형이고 추진제 누출이 50 ton, 유리창 정도의 파손이라면 주거공간과 시험설비와의 거리를 1 Km이상을 유지해야만 한다.

사고시 누출된 연료의 양이 50 ton이라고 가정을 한다면, 안전보장을 위한 시험설비에서 주변설비와 가옥, 건축물까지 거리는 시험설비 형태에 따라 다르다. 결과를 살펴보면 완전개방형 시험설비는 1,500 m, 부분 개방형 시험설비는 2,200 m, 밀폐형 시험설비는 2,700 m의 안전거리를 두어야만 한다.

잠재적인 손실에 대한 해석결과를 통해 다음과 같은 기술적·구조적 해결책을 얻을 수 있으며, 결과적으로 리스크를 감소시킬 수 있다.

i) 시험설비를 설계할 경우 안전보장을 위해서

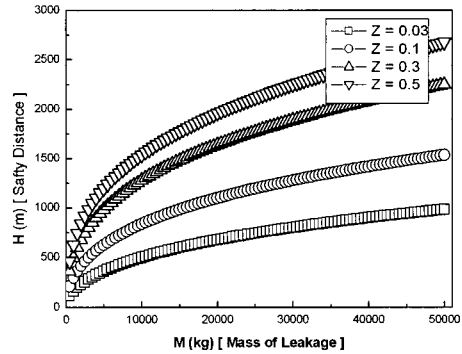


Fig 4. Safety Distance According to Test Facility Type in case of Explosion of LOx / Kerosene Mixture Caused by Propellant Leakage (K=56)

산업체·주거지역과 충분한 안전거리를 두고, 경제적·지질학적 여건을 고려한 설계를 한다.

- ii) 추진제탱크 내로 충전하는 추진제의 최대량은 설비의 구조적 여건과 지질학적 여건을 고려하여 신중하게 결정한다.
- iii) 사고방지를 위해서 시험설비 인근에 저장하는 화재·폭발 가능성 물질에 대한 관련 규정(법규)을 정한다.
- iv) 시험요원에 대한 행동규정 및 사고 발생시 예상되는 파손·파괴정도를 예측하여 사고시 상세 인명구조규정을 정한다.
- v) 상기와 같은 내용을 고려한 사고시 발생하는 손실 및 피해에 대한 보상규정을 정한다.

2.5 시험에 따른 리스크 감소의 평가

잠재적인 사고 발생 확률과 사고시 예상되는 손실에 대한 정도는 Eq. 4를 통해서 알 수 있다 [8].

$$Z = \sum_{i=1}^n a_i \cdot B_i \tag{4}$$

a_i = 가중치

B_i = 사고발생 가능한 경우의 수의 합

지상연소 시험시 리스크를 감소시키는 작업에는 관련된 전문가집단에게 사용하는 방법에 대

해서 검증을 받아 적용을 해야만 한다. 즉 LRE 블럭에서 발생가능한 각각의 요소들에 대해서 전문가집단에 소속된 개개인이 가중치를 산정하고, 그 결과에 대한 통계 값을 바탕으로 시험설비의 잠재적인 사고 확률과 그로 인한 발생 가능한 손실을 줄이기 위한 기술적인 해결 방법을 적용하고 위험도를 평가·규정한 뒤에 이러한 방법이 적용되기 전후를 비교하여 시험 진행 여부를 결정한다.

3. 결론

액체산소와 케로신을 사용하는 액체로켓엔진 지상연소시험 설비에서 리스크를 감소시키는 방법에 대해 연구를 진행 하였다. 본 방법은 잠재적인 사고 발생확률을 낮추고 그에 따른 발생 가능한 손실을 낮추기 위한 시험시의 사고 발생 가능한 한계선에 대한 연구와 기술적 해결방법을 바탕으로 하고 있다. 본 방법은 아래와 같은 내용을 포함하고 있다.

- i) 지상연소 시험시 사고상황을 야기 할 수 있는 위험한 상황에 대한 원인·연관관계가 있는 개략도 (추진제 누출을 야기하는 변수)
- ii) LRE 블럭에서 추진제 누출 사고 발생 후 사고로 이어지는 사고의 발전 양상 및 발전 프로세스에 대한 도표
- iii) 잠재적인 사고 발생 확률과 사고로 인한 손실을 줄이기 위한 기술적인 해결방법(Safety Distance)
- iv) 지상연소 시험시 시험 진행여부를 판단하기 위한 전문가집단의 위험성감소 평가 방법

본 연구결과는 KSLV개발을 위한 추진기관 중

합 시험설비나 LRE 블럭에서 지상연소 시험시 발생될 수 있는 위험한 상황과 사고를 사전에 예방하기 위한 방안으로 이용될 수 있을 것이다.

참고 문헌

1. V. V. Adushkina, C. I. Kazlova, "Ecological problems and Risk of Rocket-space technology on the natural environment", Ankil, Moscow, 2000
2. E. D. Henli, X. Kumamoto, "Reliability of technical systems and evaluation of risk". Mashinostroenie, Moscow, 1984
3. V. Marshal, "General Risks of chemical production", Mir, Moscow, 1989
4. V. P. Busigin, O. G. Batyuhob, P. V. Zaharova, "Indices and criterion of the ecological safety for productions", ecological systems and instruments, Moscow, No. 8, 2004
5. V. A. Beschatnov, "Industrial explosions, Evaluation and warning", Chemistry, Moscow, 1991
6. RD 03-418-01, "instructions for risk analysis method of dangerous production facility", Russian Federal Mining and Industrial Oversight, 2001
7. A. I. Kiselev, A. A. Medbedev, V.A. Menishikob, "Cosmonautics of millenium", Mashinostroenie, 2002
8. V. A. Bershadskiy, A. G. Galeev, "Strategy of hazard reduction at stand test for rocket propulsion units", Journal(aerospace technology), Moscow, No. 2, 2004