Korean Chem. Eng. Res., 54(3), 360-366 (2016)
http://dx.doi.org/10.9713/kcer.2016.54.3.360
PISSN 0304-128X, EISSN 2233-9558

추진시험설비의 사고피해영향분석 및 리스크 감소방안

신안태 · 변헌수*,†

한국항공우주연구원 나로우주센터
59571 전라남도 고흥군 봉래면 하반로 508
*전남대학교 화공생명공학과
59626 전라남도 여수시 대학로 50
(2016년 1월 28일 접수, 2016년 2월 26일 수정본 접수, 2016년 3월 2일 채택)

Consequence Analysis and Risk Reduction Methods for Propulsion Test Facility

Ahn-Tae Shin and Hun-Soo Byun*,†

Department of NARO Space Center, Korea Aerospace Research Institute, 508, Haban-ro, Bongrae-myeon, Goheung, Jeonnam, 59571, Korea
**Department of Chemical and Biomolecular Engineering, Chonnam National University, 50, Daehak-ro, Yeosu, Jeonnam, 59626, Korea*
(Received 28 January 2016; Received in revised form 26 February 2016; accepted 2 March 2016)

요 약

한국형발사체 개발을 위한 추진시험설비가 구축되고 있으며, 일부 시험설비는 구축이 완료되어 추진기관시험을 실시하고 있다. 추진시험설비의 구성은 엔진 시험체 등의 시험을 실시하는 테스트 스탠드와 추진제로 사용되는 케로신(Jet A-1) 및 액체산소(LOX) 등을 저장하는 설비 등 다양한 서브시스템과 부품들이 연결되어 있다. 테스트 스탠드는 엔진개발모델이 장착되고 추진제가 혼합되어 실제 연소가 이루어지는 곳으로서 큰 에너지긴장도 상태에서 고압으로 작동되는 추진시험설비의 특성상 화재·폭발의 위험성이 존재한다. 본 논문에서는 추진시험설비의 사고피해영향분석 및 리스크 감소방안을 수립하기 위하여, 테스트 스텐드에서의 추진제 누설사고 시나리오를 가정하고, TNT당량모델 실험식을 적용하여 폭발과압에 대한 사고피해영향을 분석하였고, 추진시험설비의 안전성 확보를 위한 리스크 감소방안에 대하여 기술적, 제도적, 관리적 안전대책에 대하여 제시하였다.

Abstract – The Propulsion Test Facilities for the development of Korea Space Launch Vehicle-II are being built, some test facilities are completed and various combustion tests are running. The Propulsion Test Facilities consists test-stand, which carries out tests for engine development model, and various sub-systems and vessels containing LOX and Jet A-1 as propellant. There are always risks of fire and explosion at the test-stand since engine development model is conducted at test-stand with real combustion test with very high pressure, mixed propellant and high energy. In this paper, in order to establish the consequence analysis and risk reduction measures in the Propulsion Test Facilities, followings are considered. 1) a propellant leak accident scenario is assumed in test-stand. 2) TNT equivalent model equation based on blast wave of the explosion was used to analyze blast overpressure and impacts. Also, technical, systematic and managemental measure is described to ensure risk reduction for propulsion test facility.

Key words: Consequence analysis, Risk reduction method, TNT equivalent, Blast wave

1. 서 론

한국형발사체 개발을 위한 추진기관시험이 추진시험설비에서 한창 진행되고 있다. 추진시험설비는 한국형발사체 액체로켓엔진의 부품 및 엔진시스템의 개발을 위한 인증시험, 각 단의 연소시험을 위한 설비를 말한다. 추진시험설비의 구성은 시험대상체에 대하여 시험을 실시하는 테스트 스탠드와 추진제로 사용되는 케로신(Jet A-1) 및 액체산소(LOX)를 저장 및 공급하는 시스템, 제어계측시스템, 후류처리시스템 등 다양한 서브시스템과 부품들이 연결되어 있으며, 테스트 스탠드는 엔진개발모델이 장착되고 추진제가 혼합되어 실제 연소가 이루어지는 곳으로서 큰 에너지긴장도의 상태에서 고압으로 작동되는 추진시험설비의 특성상 화재·폭발의 위험성이 존재 한다[1]. 지난 우주개발 선진국의 액체로켓엔진 개발과정을 보면 수많은 인적·물적 손실을 동반한 치명적인 사고가 발생 하였고 화재·폭발 등의 사고가 발생하면 시험대상체 및 추진시험설비의 손실은 물론 자연환경의 파괴, 국가공공기술정책의 변경, 중단 등으로 이어지기도 하였다[2].

†To whom correspondence should be addressed.
E-mail: hsbyun@jnu.ac.kr
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

추진시험설비에서의 화재·폭발 및 안전사고를 예방하기 위하여 체계적인 안전관리시스템인 공정안전관리제도(Process Safety Management, PSM)를 도입하고, 관계법령에 따라 고압가스제조시설 및 특정소방대상물에 대한 사용승인 인허가를 해당 지자체로부터 받고, 비상상황 발생시 밸브 등을 초기화 시키는 비상정지시스템을 도입하는 등 추진시험설비 안전성 확보를 위하여 만전을 기하여야 한다. 하지만 개발품의 특성상 시험대상체 또는 추진시험설비의 제작결함, 시험운용도중 정상범위를 벗어나거나 구조적 측정값이 허용범위를 벗어나 비상상황으로 이어지는 상황은 언제든지 발생가능하다. 이에 대한 대비로서 추진시험설비의 위험성 분석 및 취급되는 물질의 유해·위험성 검토가 선행으로 이루어져야 하며, 추진기관시험 중 발생 가능한 사고시나리오를 가정하고 사고피해영향분석을 실시하고 이에 대한 리스크 감소방안이 수립되어야 한다. 최근에 화학공장에서의 사고대응 가이드라인[3]과 운송수단에 대한 위해성 평가[4] 및 공정상의 도출되는 사고시나리오[5] 등에 대해서도 연구된바 있다.

본 논문에서는 추진기관시험 중 테스트 스탠드에서 발생 가능한 사고시나리오를 가정하고 폭발에 따른 과압이 미치는 피해영향을 TNT 당량모델 실험식을 적용하여 분석하였고, 이에 대한 대책으로서 추진기관시험의 안전성을 확보하기 위한 리스크 감소방안에 대하여 기술적, 제도적, 관리적으로 구분하여 제시하였다.

2. 추진시험설비 사용물질 및 공정

2-1. 추진시험설비 사용물질

추진시험설비는 공정의 특성상 사용물질에 대하여 고압을 가하고 극저온 환경에서 다루기 때문에 수격작용 등으로 인한 배관 및 밸브 등에 피로도를 주어 물질의 누설 등이 발생할 수 있다. 추진시험설비에서 사용되는 위험물질은 추진연료로 쓰이는 케로신(Jet A-1) 및 산화제로 쓰이는 액체산소(LOX)가 있다. 이들 물질의 위험성은 사용량에 비례하여 증가하게 되며 물리·화학적 특성은 Table 1와 같다[6-8].

추진시험설비에서 사용되는 추진연료는 발사체나 항공기에서 많이 사용되는 케로신 계열의 항공유인 Jet A-1을 사용한다. 케로신(Jet A-1)은 인화점이 41.5 ºC인 인화성 액체로서 폭발 상·하한(Lower Flammable Limit, LFL·Upper Flammable Limit, UFL)이 0.6~3.7 (vol.%)이고, 증기상 물질이 되면 공기와 혼합되고 폭발혼합물이 되어 인화성이 매우 강해지며 전기적 스파크, 정전기 등 여러가지 점화원에 의하여 쉽게 발화된다. 발화되는 정도는 연료의 종류 및 주변온도에 따라 달라지지만 대체로 연료가 기화되기 쉬울수록 주변의 온도가 높을수록 발화환경이 높아지므로 취급에 주의를 요한다. 산화제로 쓰이는 액체산소(LOX)는 조연성 물질로서 다른 물질의 연소를 증대시키며 유지류와 접촉되면 급격한 연소반응을 일으키고, −183 ºC의 극저온 액체로서 피부에 직접 접촉시 동상 및 피부내부의 조직까지 동결 시킬 수 있다. 또한, 개인보호구를 착용하지 않은 신체의 일부가 단열처리 되지 않은 극저온 용기나 배관 등에 닿은 경우 극저온 설비에 피부가 달라붙고 떼려고 하면 피부가 찢어질 수도 있다. 이와 같은 위험물질의 유해·위험성은 물질안전보건자료(Material Safety Data Sheet, MSDS)에 기술되어 있지만, MSDS 주요 내용은 위험물질의 인체영향 및 환경영향 등 보건분야에 치우쳐진 경향이 있다[9].

Table 1. Physical&Chemical Properties of Kerosene (Jet A-1) and LOX

Item	Jet A-1	LOX
Physical State	Liquid	Liquid
Boiling Point	149~300 °C	−183 °C
Flash Point	41.5 °C	-
LFL, UFL	0.6~3.7%	-
Vapor Pressure	0.013 kPa at 20 °C	101.325 kPa at −183 °C
Specific Gravity	0.77~0.84	1.1407
Auto Ignition	230.2 °C	-
LD 50	2,835 mg/kg	-

Table 2. Process Condition of A Propulsion Test Facility

Item	Jet A-1	LOX
Type of Run Tank	Cylindrical	Cylindrical
Volume of Run Tank	15.6 m^3	30 m^3
Flow rate	88.5 liter/s	157.14 liter/s
Operating Pressure	25 MPa	20 MPa
Operating Temperature	−10~30 °C	−183 °C
Specific Gravity	0.77~0.84	1.1407

2-2. 추진시험설비 공정

한국형발사체의 추력을 담당하는 액체로켓엔진 연소기의 성능평가를 목적으로 구축된 A추진시험설비는 가압식 설비로서 고압질소가스를 이용하여 추진제를 가압하고, 가압된 추진제를 시험대상체에 공급하여 연소시험을 실시하는 설비로서 공정조건은 Table 2와 같다.

A추진시험설비의 주요 구성품으로는 추진제를 다루는 유공압 설비와 시험장 운용 및 상태 점검을 위한 제어계측 설비 그리고 소음저감 및 시험장 안전을 다루는 부대설비가 있다[10]. 유공압 설비는 케로신(Jet A-1) 설비, 액체산소(LOX) 설비, 고압가스 설비, 점화제 설비, 그리고 연소시험이 진행되는 테스트 스탠드가 있으며 개략적으로 도식화하면 Fig. 1과 같다. 각 공정에 대하여 간략히 설명하면 케로신 설비는 추진연료의 저장, 공급 및 배출하는 설비로서 탱크로리를 이용하여 저장탱크에 추진연료를 저장하고 추진기관시험시 시험에 사용되는 추진연료를 펌프를 이용하여 런탱크에 충전 및 고압질소를 이용하여 연료를 가압하고 시험 대상체에 공급한다. 액체산소 설비는 케로신 설비와 동일한 방법으로 극저온 펌프를 이용하여 런탱크에 충전 및 고압질소를 이용하여 산화제를 가압하고 시험 대상체에 공급한다. 고압가스 설비는 질소, 헬륨, 공기의 저장, 공급 및 배출을 다루며 설비의 대부분은 액체질소 설비로 구성되어 있다. 질소는 액체상태로 저장탱크에 저장하고 압축기로 액체질소를 압축하고 기화기로 질소가스를 제조하여 질소공급설비(Nitrogen Delivery Rack, NDR)을 통하여 각종 탱크, 배관 및 시험체에서 요구하는 압력에 따라 질소가스를 퍼지, 배관 구동용으로 공급한다. 점화제 설비는 연소의 초기점화에 사용되며 혼합물질(Triethyl aluminum 15% + Triethyl borane 85%)을 사용한다[10]. 또한, 테스트 스탠드에는 75톤급 고추력 스탠드와 7톤급 저추력 스탠드로 구성되며, 고추력 스탠드에서는 75톤급 연소기의 연소시험을 수행하고, 저추력 스탠드에서는 7톤급 연소기의 연소시험 및 가스발생기의 연소시험을 수행한다.

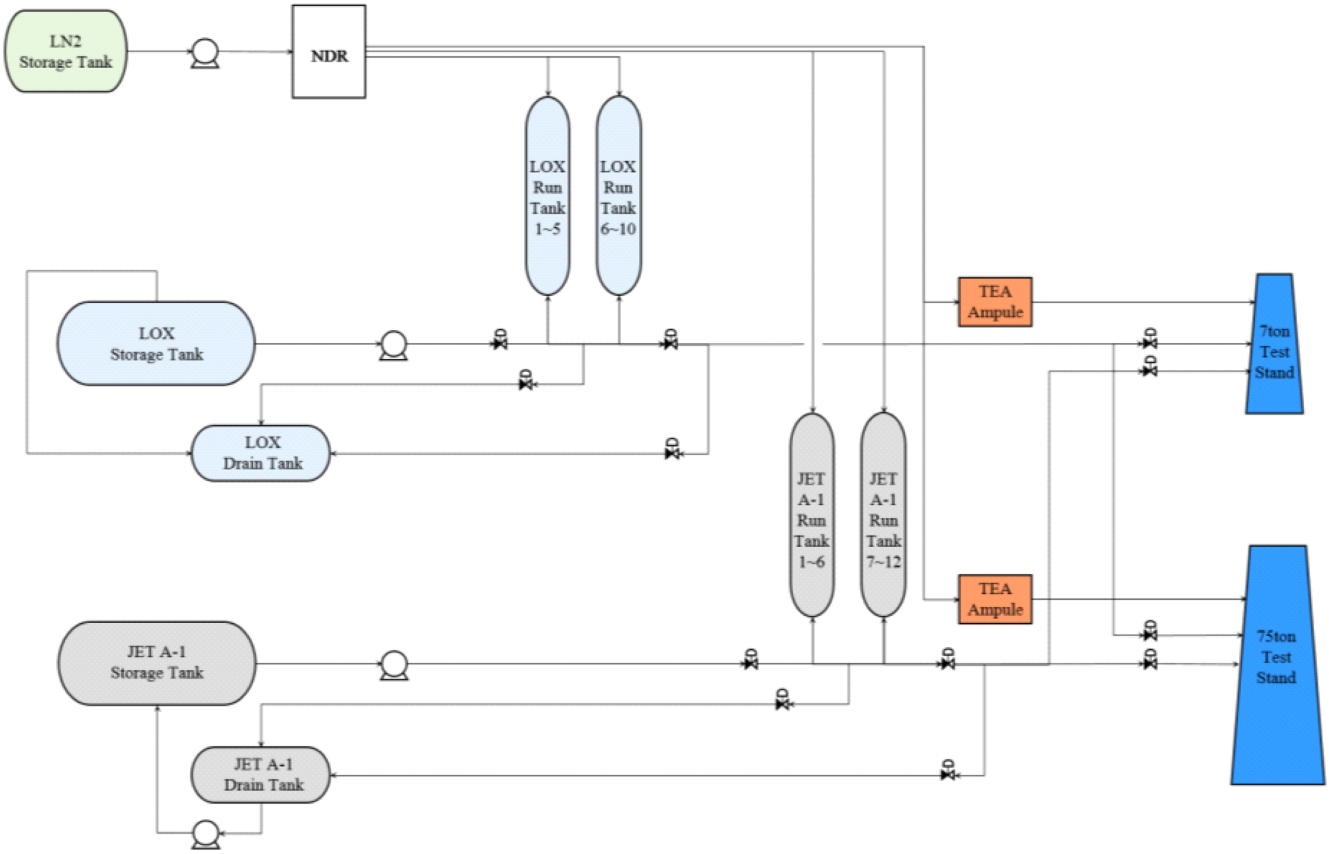

Fig. 1. The Basic Schematic of A Propulsion Test Facility.

3. 사고피해영향분석

3-1. 이론적 고찰

폭발사고의 피해영향을 평가할 때 고려하여야 할 사항으로는 폭발에서 동반되는 파편(Fragment) 및 폭발과압(Blast wave)에 의한 직접피해, 복사열(Fire ball), 화학제가 있다. 이들 중 폭발과압은 그 피해범위가 가장 넓은 폭발효과로서 본 논문에서는 파편, 복사열 및 화학제의 피해는 제외하고 폭발과압을 기준으로 사고피해영향을 분석하였다[11]. 폭발과압의 크기는 실험식으로 잘 알려진 C. N. Kingery & B. F. Pannill식을 적용하였으며, 이 식은 다수의 TNT폭발실험결과를 토대로 스케일화 거리에 따른 폭발과압 곡선을 도출한 것으로서, 케로신 및 액체산소의 양을 TNT등가량으로 환산하여 식 (1)에 대입하고 Table 3의 폭발과압에 대한 스케일화 거리를 적용하면 폭발중심으로부터의 피해영향거리를 구할 수 있다[12].

Table 3. Peak Overpressure vs Scaled Distance

λ (m/kg$^{1/3}$)	Overpressure (kPa)	λ (m/kg$^{1/3}$)	Overpressure (kPa)
0.112	21717.93	17.920	3.24
0.224	7910.63	22.400	2.41
1.120	288.48	24.640	2.07
2.240	66.26	33.600	1.31
3.360	32.13	39.200	1.10
4.480	20.54	44.800	0.89
6.720	11.72	56.000	0.62
10.080	6.96	61.600	0.55
11.200	6.07	67.200	0.48

$$R = \lambda \times W^{1/3} \quad (1)$$

여기서, R(m)은 폭발중심으로부터 피해영향거리이고, λ(m/kg$^{1/3}$)은 스케일화된 거리, W(kg)는 케로신 및 액체산소를 TNT등가량으로 환산한 값이다.

TNT 등가량 환산방법은 해외 발사장에서 비행시험 및 추진기관 시험시 사고피해영향 분석에 폭넓게 사용되고 있는 해석방법이다. 이 방법은 방호물, 지형 및 기상상태 등 다른 외부요인은 고려하지 않고, 폭발중심으로부터의 폭발과압이 미치는 범위를 판단하는 것으로서 폭발중심에서는 과압이 과다 예측되고 멀리 떨어진 위치에서는 과압이 과소 예측되는 단점이 있으므로 실제 안전율 적용에 있어서 보다 보수적인 접근이 필요하다. 추진시험설비에서 화재·폭발이 발생한 경우 그 위험성을 판단하기 위해서는 케로신 및 액체산소 혼합에 따른 위험성 분석이 필요하다. Table 4와 같이 美 DoD 군사기준에서는 케로신 및 액체산소 혼합에 따른 위험성에 대하여 TNT 등가량 환산기준을 제시하고 있다. 여기서, Static Test Stands는 추진연료의 지상 저장 또는 지상 연소시험의 경우에 적용하고, Range Launch Pads는 발사체의 비행시험에 적용 한다[13].

폭발과압이 인명 및 구조물에 미치는 영향 판단기준은 G.F.

Table 4. Energetic Liquid Explosive Equivalents

Energetic Liquids	TNT equivalent	
	Static Test Stands	Range Launch Pads
LO_2/RP-1	10% of W. Where W is the weight of LO_2/RP-1	20% of W up to 500,000 lbs + 10% of W over 500,000 lbs Where W is the weight of LO_2/RP-1

Table 5. Blast Damage Side on Overpressure Correlation

kPa	Effect of Damage
0.069~0.276	-Minimum damage to glass panels.
0.689	-Breakage of small windows under strain.
1.034~1.517	-Typical window glass breakage
1.517~2.482	-Overpressure at limit for debris and missile damage. -"Safe distance" (probability 0.95 of no serious damage below this value) Projectile limit and some damage to house ceilings 10% window glass broken.
3.516~7.515	-Windows shattered, minor damage to some buildings. -Partial demolition of houses, made uninhabitable.
7.515~12.479	-Personnel knocked down. -Panels of sheet metal buckled.
12.479~19.995	-Failure of walls constructed of concrete blocks.
19.995~29.992	-Oil storage tanks ruptured. -Steel frame building distorted and pulled away from foundations.
29.992~49.987	-Utility poles broken off. -Serious damage to buildings with structural steel framework. -Nearly complete destruction of houses.
39.990~59.984	-Reinforced concrete structures severely damaged.
69.982~79.979	-Probable total destruction of most buildings.

Kinney (1985) 및 Clancey (1972) 등이 여러 문건에서 다루고 있다. 각 문건에서 제시하고 있는 피해영향 판단기준은 큰 차이가 없으며 이를 종합하면 Table 5와 같다. 이에 따르면 2.068 kPa이하의 수치에서 95%이상이 안전하다는 Safe Distance이며, 6.895 kPa에서는 구조물의 일부 파괴, 20.684 kPa에서는 철 구조물이 건물에서 일부 떨어져 나갈 수 있다고 제시하고 있다[14,15].

해외 발사장에서 적용되고 있는 폭발과압기준을 살펴보면 인체의 손상가능성이 시작되고, 저장탱크 등의 파손 가능성이 나타나는 폭발과압은 24.133 kPa로 한다[16]. 美 DoD 군사기준에서는 폭발에 의한 주거시설거리(Inhabited Building Distance, IBD)를 폭발과압 8.274~6.205 kPa로 정의하고 있으며, 이 수준의 과압은 건물 내부의 사람은 사망 및 심한 부상으로부터 상당한 수준의 보호를 받게 되는 것으로 보고 있다[13]. CFR 417 기준에서는 예상인명피해(Expected casualty, EC) 최소화 거리 및 파편에 의한 피해영향 계산시 폭발과압을 6.895 kPa로 하고 있다[17]. 발사장 허가를 위한 법률 CFR 420에서는 발사장 주변의 소개영역 계산시 폭발과압 3.447 kPa를 기준으로 하고 있다[18,19]. 나로우주센터 추진기관시험시 인원소개를 위한 폭발과압 기준값은 해외 발사장 사례 등을 검토한 결과값을 토대로 예상인명피해 최소화 거리기준인 6.895 kPa를 적용한다[16].

3-2. 가상사고 시나리오

추진시험설비 사고피해영향분석을 위하여, A 추진시험설비를 대상으로 선정한 가상사고 시나리오는 75 톤급 추진기관시험 중 런탱크에 충전된 케로신 및 액체산소가 동시에 테스트 스텐드 시험대상체 연결배관으로 유입 후 원인 미상의 점화원에 의한 화재·폭발을 일으킨 상황으로서, 누설량 및 누출속도는 Table 1에 제시된 공정조건을 반영하고 케로신 및 액체산소 런탱크 저장량은 탱크용량의 90%를 적용하고, 누출속도는 제시된 유량을 적용한다.

3-3. 사고피해영향분석

A 추진시험설비 케로신 및 액체산소 런탱크 저장량 10%를 TNT

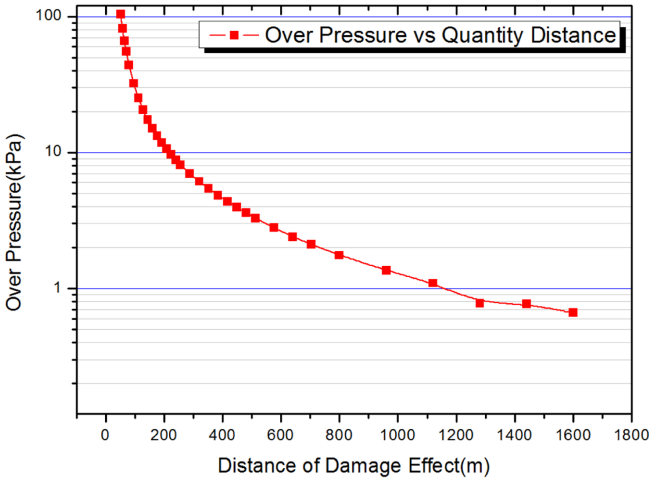

Fig. 2. Distance of Damage Effect by Full Release.

등가량으로 하여 식 (1)에 대입하면 아래의 Fig. 2와 같이 런탱크 저장량 기준 폭발과압에 따른 피해영향거리가 그래프로 나타내어진다. 계산결과에 따르면 3.447 kPa가 미치는 거리는 480 m, 6.895 kPa가 미치는 거리는 288 m, 24.133 kPa가 미치는 거리는 110 m로서 추진기관시험시 인원소개를 위한 폭발과압 기준값 6.895 kPa를 기준으로 한 A 추진시험설비 시험시 인원소개가 필요한 거리는 288 m이다.

A 추진시험설비에는 비정상 상황이 감지되면 추진시험설비를 보호하기 위하여 설정값에 따라 수초이내에 비상차단밸브가 작동되고 공급라인이 정지되도록 하는 비상정지시스템이 반영되어 있다. 이와 관련 비상정지시스템이 가동되기 전까지의 일정한 유량값을 기준으로 누적된 누설량을 기준으로 한 주요 폭발과압 기준값에 대한 피해영향거리를 계산하면 아래의 Fig. 3과 같이 그래프로 나타내어진다.

계산결과에 따르면 비상정지시스템이 비상상황을 감지하여 2 초 이내에 자동으로 밸브를 잠그고 설비를 초기화 한 경우 3.447 kPa가 미치는 거리는 109 m, 6.895 kPa가 미치는 거리는 66 m, 24.133 kPa가 미치는 거리는 26 m임을 알 수 있다. 여기서 누설시간에 따른 피해영향거리는 폭발과압 값이 클수록 변동 폭이 작고, 폭발과압 값이 작을수록 변동 폭이 큰 것을 알 수 있다.

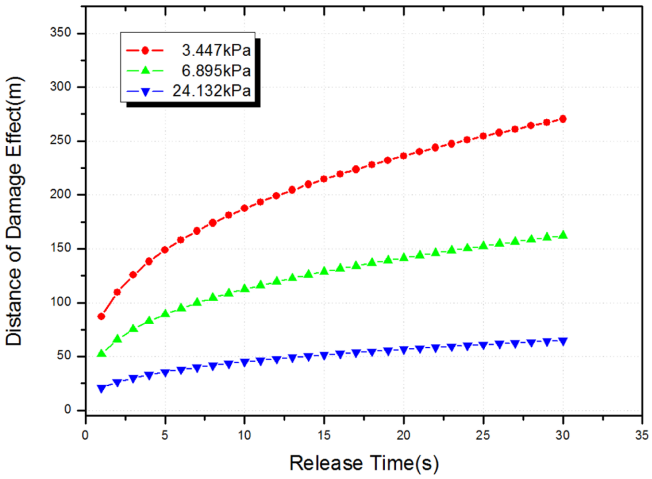

Fig. 3. Distance of Damage Effect by Release Time.

4. 리스크 감소방안

도출된 사고피해영향분석결과는 추진시험설비에 반영된 방호벽, 방호지형, 안전설비, 소방설비 등을 고려하지 않는 개방된 공간에서의 폭발에 대한 사고피해영향결과로서 실제 피해영향은 보다 적을 것으로 판단된다. 하지만, 추진시험설비에 대한 안전대책은 보다 보수적인 관점에서 수립되어야하기 때문에 위 도출된 사고피해영향분석결과를 근거로 안전반경을 적용하고, 추진기관시험 안전통제계획에 따라 추진시험설비 주변의 안전통제 및 비상상황에 대비한 자체소방대를 배치하고 추진기관시험이 진행되어야 한다. Fig. 4는 추진기관시험의 안전성을 확보하기 위한 리스크 감소방안에 대하여 기술적, 제도적, 관리적 안전대책으로 분류하여 제시한 도식이며 구체적인 내용은 다음과 같다.

4-1. 기술적 안전대책

추진시험설비는 설계단계에서 기술적 안전대책이 반영될 수 있도록 검토 및 반영이 필요하다. 최우선 조건으로서 추진시험설비에서 화재·폭발이 발생하여도 인근의 설비에 영향을 미치지 않도록 안전반경을 고려하여 설비배치가 필요하며, 테스트 스탠드에서 화재·폭발이 발생하여도 구조적으로 케로신 및 액체산소 저장탱크에 직접적인 영향을 미치지 않도록 방호벽 등을 설치하여 구조물의 강도를 확보하여야 한다. 설비적인 측면에서는 설계조건에 적합한 펌프, 배관 및 개스킷 등이 사용되어야 하며, 안전밸브 및 파열판의 설정압력은 사용 환경과 적합하게 설정되어야 하고, 실내에 케로신 및 액체산소를 저장·취급하는 설비가 구축된 경우 각각 가연성가스측정기, 산소농도측정기를 설치하고 허용 농도 값을 벗어난 경우 신호

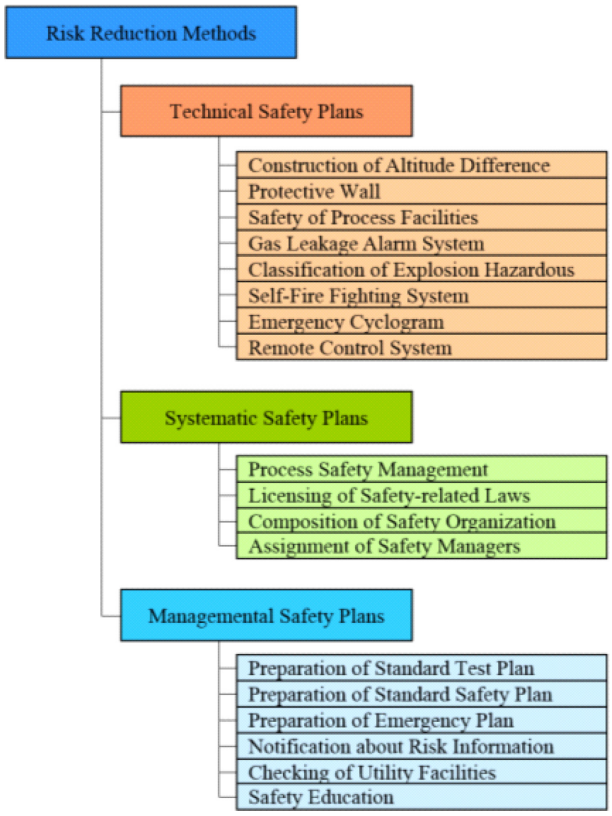

Fig. 4. Risk Reduction Methods of Propulsion Test Facilities.

및 경고음을 주도록 시스템 구축이 필요하다. 또한, 화재·폭발 우려가 있는 가스폭발 위험장소에는 폭발위험장소 구분도 및 방폭기기 선정기준에 따라 적합한 방폭설비 구축이 필요하다. 또한, 소방관계법에서 제시하고 있는 최소한의 소방설비 외에 추진시험설비의 특성에 적합한 자체소방설비를 추가로 구축하여 비상상황 발생시 초기진압이 가능하도록 설비구축이 필요하다. 비정상상황 발생시에는 모든 공급밸브를 자동으로 잠그고 초기화시키는 비상정지시스템 반영되어야 하며, 이와 같은 모든 설비의 제어 및 감시는 이중화된 통신방식으로 안전거리가 확보된 장소에서 원격으로 제어되어야 한다.

4-2. 제도적 안전대책

추진시험설비를 구축하고 운영하기 위해서는 관련법령에 따라 각종 인허가, 신고 및 승인이 선행되어야 한다. 대표적으로 추진시험설비 설계단계부터 공정안전자료를 검토하여 위험성을 평가하여 추진기관시험이 안전하게 실시될 수 있도록 하는 공정안전관리제도(Process Safety Management, PSM)에 따라 공정안전보고서를 작성하여 고용노동부로부터 사용승인을 득하여야 한다. 공정안전관리제도는 美 NASA 기술기준 및 존슨우주센터 등에서도 발사장 안전관리를 위한 제도적 안전대책으로 활용되고 있다[20,21]. 또한, 고압가스안전관리법 및 소방시설설치유지 및 안전관리에관한법률 등에 의한 고압가스시설 및 소방시설에 대한 사용시설 인허가를 받아야 하고, 고압가스 및 위험물 안전관리법령에 따라 안전관리조직체계를 수립하고 안전관리자를 선임하는 등의 행정적인 조치가 필요하다.

4-3. 관리적 안전대책

추진기관시험을 하고자 할 경우에는 사전 시험계획서 수립 및 시험참여자 교육이 필요하다. 시험계획서에는 각 진행단계에 따른 절차서 뿐만 아니라 시험의 위험성, 안전규칙, 사전점검결과, 시험참여인원 조직 및 임무가 명확히 명시되어야 한다. 또한, 공공안전 확보를 위하여 사고피해영향분석 결과에 따라 추진시험설비 주변의 안전반경을 설정하고 추진기관시험 진행단계에 따라 안전통제가 필요하다. Table 6은 추진기관시험 진행단계에 따라 조치되어야 하는 안전통제절차를 요약 정리한 것이다.

안전통제절차에 대하여 간략히 소개하면 케로신 및 액체산소가 런탱크에 충전되면 안전통제요원을 현장에 배치시키고 시험장 주변 인원소개를 실시한다. 인원소개가 완료된 후에는 안전통제요원도 안전구역으로 대피하고 시험장 주변 안전상태가 보증되면, 케로신 및 액체산소에 대하여 설정된 목표압력까지 가압을 실시하고 연소시험을 진행한다. 시험종료 후에는 케로신 및 액체산소가 해압이 완료될 때까지 안전통제 유지한다. 추진기관시험시에는 비상상황이 발생하여 자체소방설비로 1차 진압이 불가한 경우 화학소방차로 편성된 자체소방대가 투입되어 2차 진압이 가능하도록 자체소방대 배치가 필요하며 화학소방차는 유류화재에 적응 가능한 소화 약제를 사용하여야 한다. 또한, 시험 중에는 일부 화염이 외부로 노출되고 소음, 진동, 연기 등이 발생되므로 인근 주민들이 놀라지 않도록 사전 시험계획에 대한 공지가 필요하다. 또한, 시험 전 비상설비, 통신, 공조, 전력, 기상상황에 대하여 점검하여 특이사항 유무를 확인하고, 시험 전 미팅을 통한 금일 시험의 위험성 및 안전대책에 대한 안전교육이 필요하다.

Table 6. Procedure of Safety Control in Propulsion Test

Step	Test Operation Part	Safety Control Part
1	- Fill up the storage tank (Kerosene and LOX) - Check the valve and sensor - Install ignitions ampule (TEA+TEAL) and Check the sealing - Check the control system and electric equipment - Check the fire fighting, communication, broadcast and safety system	- Organizing a list of safety control officer and fireman - Check of the fire truck and multi disaster truck - Check of the emergency equipments (air respirator, oxy-life, AED) - Check of the security system (CCTV, Cardkey, VCS) - Check and removal of the risk factors on test facility around - Check of the operation facilities, weather conditions
2	- Hold a test meeting (Have a safety training to officers)	
3	- Normal/ Emergency/ Blocking cyclogram dry-run	- Inform safety control plan to employees - Notify a related public organizations of risk informations - Distribute the safety control plan to the safety control officer
4	- Cold flow test and fill up the cooling water	
5	- Set up the pressure of gas-generator and combustion chamber	
6	- Fill up the run tank (Kerosene and LOX)	
7	- Pre-pressurization	- Place the safety control officers - Confirm the personnel in test facility around and control vehicles - Place the fireman and fire truck - Test mode conversion of the security system
8	- Check the sealing of ignitions ampule (TEA+TEAL)	
9	- Manual mode conversion of the fire fighting system	
10	- Evacuate the test operate officers	- Completion of evacuating personnel - Safety control officers evacuate to safety area
11	- Enter the test mode	
12	- Pressurize to the setting pressure	- Fireman ready to move
13	- Count down and Cyclogram operation - Startup/Shutdown	
14	- Par off Test facilities	
15	- Drain of the propellent and ignitions	
16	- Finish test	- Removal of the control situation and withdrawal of a fireman - Normal mode conversion of security system

5. 결 론

본 논문에서는 A추진시험설비에서의 추진제 누설사고 시나리오를 가정하고 폭발에 따른 사고피해영향거리 및 비상정지시스템이 가동되기 전까지의 누적된 누설량을 기준으로 폭발과압에 대한 누출시간별 피해영향거리를 계산하였다. 결과 값은 정량적 사고피해영향결과로서 추진기관시험시 안전반경 산정기준 및 비상상황 발생시 현장의 폭발과압에 의한 피해규모를 예측하는데 활용이 가능하다. 또한, 제시된 리스크 감소방안은 추진기관시험의 안전성을 확보하기 위한 기본 준수사항으로 활용이 가능하다.

감 사

본 논문은 우주센터 2단계사업의 일환으로 수행되었습니다(신안태).

References

1. Cho, N. K., Yu, B. I., Kim, J. H., Han, Y. M. and Jun, S. B., "Infrastructure of Propulsion System Test Complex for KSLV-II," Proceedings of the Korean Society of Propulsion Engineers Conference, **40**, 179-182(2013).
2. Kim, S. H., Bershadskiy, V. A. and Oh, S. H., "Methods for Reduction of Danger in Cases of Functioning on Rocket Fuel of Test Stand," *Proceedings of the Korea Institute of Fire Science and Engineering Conference*, **33**, 405-408(2011).
3. Lee, I. J. and Kim, R. H., "Safety Enhancement of LPG Terminal by LOPA & SIF Method," *Korean Chem. Eng. Res.*, **53**(4), 431-439(2015).
4. Kim, I. H., Dan, S., Cho, S., Lee, G. and Yoon, E. S., "Optimization of Single-stage Mixed Refrigerant LNG Process Considering Inherent Explosion Risks," *Korean Chem. Eng. Res*., **52**(4), 467-474(2014).
5. Yang, J. M., Seol, J. W., Yong, J. W., Ko, S. W., Park, C. Yoo, B. and Ko, J. W., "A Method to Develop for Emergency Guidelines using Business Continuity Plan in Chemical Plant," *Korean Chem. Eng. Res*., **52**(6), 743-749(2014).
6. Korea Aerospace Research Institute, "Jet A-1 Material Safety Data Sheet," MSDS-1027, Korea(2014).
7. Korea Aerospace Research Institute, "Liquid Oxygen Material Safety Data Sheet," MSDS-1073, Korea(2014).
8. Shin, B. W. and Shin, M. H., "Combustion Characteristics of the Liquid Fuel for KSLV-II," *Korea Aerospace Research Institute*, Korea(2014).
9. Occupational Safety & Health Research Institute, "A Study on the Research in Risk Assessment Methods," Korea(2013).
10. Lee, K. J., Lim, B. J., Seo, S. Y., Han, Y. M. and Choi, H. S., "Sub-System Requirements of a Pressure-fed Hot-firing Test Facility for the Performance Assessment of a LRE Thrust Chamber," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, **15**(4), 94-102(2011).
11. Baker, W. E., "Explosions in Air," University of Texas Press, Austin (1973).

12. Kingery, C. N. and Pannil, B. F., "Peak Overpressure vs Scaled Distance for TNT Surface Bursts," BRL, Memorandum Report No. 1518(1964).
13. U.S. Department of Defense, "DoD Ammunition and Explosives Safety Standards," DoD 6055.9-STD, Washington, D.C(2004).
14. Kinney, G. F. and Graham, K. J., "Explosive Shocks in Air," Springer-Verlag New York Inc, New York(1985).
15. Clancey, V. J., "Diagnostic Features of Explosion Damage," 6th International Meeting on Forensic Sciences, Edinburgh, Scotland(1972).
16. Kim, S. H. and Han, Y. M., "A Case Study of the Allocation of the Propulsion Test Facilities Abroad in Consideration for Explosion Blast Overpressure," 2011 Fall Conference of The Korean Society For Aeronautical and Space Sciences, **11**, 438-442(2011).
17. U.S. Federal Aviation Administration, "Flight Safety Analysis Methodologies and Products for a Launch Vehicle Flown with a Flight Safety System," 14 CFR Parts 417, Appendix a to Part 417, Washington, D.C(2016).
18. Sim, H. S., Choi, K. S., Ko, J. W. and Roh, W. R., Analysis on the Hazardous Radius for Blast Overpressure and Fireball from Launch Vehicle Explosion at Launch Pad," 2012 Spring Conference of The Korean Society of Aeronautics and Space Sciences, 274-279(2012).
19. U.S. Federal Aviation Administration, "14 CFR Parts 401, 417 and 420 Licensing and Safety Requirements for Operation of a Launch Site; Rul," Part II Department of Transportation, Washington, D.C(2000).
20. National Aeronautics and Space Administration, "Safety Standard for Explosive, Propellants, and Pyrotechnics," NASA-STD-8719.12, Washington, D.C(2011).
21. Lyndon, B., Johnson Space Center, "JSC Safety and Health Handbook," JPG 1700.1, Houston(2002).