

발사체 고체추진제의 저장 및 시험 시 안전거리 산정에 관한 연구

신인태 · 박병문 · 변현수^{*,†}

한국항공우주연구원 나로우주센터
59571 전라남도 고흥군 봉래면 하반로 508
*전남대학교 화공생명공학과
59626 전라남도 여수시 대학로 50
(2021년 2월 5일 접수, 2021년 2월 23일 채택)

A Study on the Calculation of Minimum Safety Distance during Storage and Combustion Test of Solid Propellants for Launch Vehicles

Ahn-Tae Shin, Byung-Mun Park and Hun-Soo Byun^{*,†}

Department of NARO Space Center, Korea Aerospace Research Institute, 508 Haban-ro, Bongrae-myeon, Go-Heung, Jeonnam, 59571, Korea

*Department of Chemical and Biomolecular Engineering, Chonnam National University, 50 Daehak-ro, Yeosu, Jeonnam, 59626, Korea

(Received 5 February 2021; Accepted 23 February 2021)

요 약

한-미 미사일지침 개정으로 우주발사체에 대한 고체추진제 사용 제한이 완전히 해제 됐다. 고체추진제는 1단형 과학로켓 KSR-1과 같이 고체추진제 로켓으로 활용 가능하고, 액체연료 발사체의 추력증강 부스터로도 활용 가능하다. 고체추진제는 액체추진제에 비하여 폭발 위험성이 낮은 장점이 있지만 브라질 알칸타라 발사장 폭발사고와 같이 사고가 일어나면 대형 인명사고로 이어질 수 있다. 이와 같은 대형 인명사고를 예방하기 위해서는 고체추진제의 저장 및 시험 시 최소한의 안전거리에 대한 검토가 사업의 기획단계 부터 검토되고 반영 되어야 한다. 본 논문에서는 발사체 고체추진제를 안전하게 사용하기 위한 최소한의 안전거리를 저장시설과 시험 시로 구분하여 산정 기준 및 사례를 제시하였다.

Abstract – In accordance with the revision of the US-Korea missile guidelines, restrictions on the use of solid propellants for space launch vehicles have been completely lifted. The solid propellant can be used as a solid propellant rocket like the KSR-1 (Korea Sounding Rocket-1), and can also be used as a thrust augmentation booster for liquid fuel launch vehicles. It is known that solid propellants have a lower risk of explosion than liquid propellants, but if an accident such as an explosion at the Alcantara Launch Center in Brazil occurs, it can lead to a large-scale personal accident. In order to prevent such large-scale accidents, it is necessary to review and reflect the minimum safety distance during use, storage and combustion test of solid propellants from the planning phase of the project. In this paper, the minimum safety distance for safe use of the solid propellant is presented by dividing it into storage facilities and combustion tests.

Key words: Solid-Propellant motor, Safety distance, Consequence analysis, TNT equivalent

1. 서 론

한-미 미사일지침 개정(2020년 7월 28일)으로 우리나라의 우주발사체에 대한 고체추진제 사용 제한이 완전히 해제됐다. 고체추진제를

활용하여 우주발사체를 연구·개발 할 수 있는 길이 열렸다. 액체추진제와 고체추진제를 각각 사용할 수도 있고, 액체연료 발사체에 고체추진제 부스터를 추가하여 발사체 추력을 키울 수도 있다.

2003년 8월 22일 브라질 알칸타라 발사장에서는 최종 발사 준비과정 중에 발사패드에서 VLS-1 V03 로켓의 고체추진제 4개 중 하나가 점화되어 대형폭발이 발생한 사고가 있었다. 발사 예정일은 8월 25일로써 발사 3일전에 사고가 발생했다. 사고결과 발사대에서 기술 점검 중인 연구진 21명이 사망하였고, 발사대 주변 수목에도 화염이 옮겨 화재가 발생 하였다. 사고 원인은 정확히 밝혀진 바는

[†]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.

없지만 가스누설 감지기 고장으로 발사대 주변에 인화성 가스가 축적됨을 인지하지 못한 상태에서 전자기 간섭으로 고체추진제가 점화되어 폭발사고가 발생 한 것으로 추정되고 있다[1]. 고체추진제는 폭발 위험성이 낮은 장점이 있다고 알려져 있지만 화약류로써 이와 같이 대형 사고로 이어질 수 있는 상황을 고려하여야 한다. 발사체 고체추진제로 사용되는 화약류의 안전한 사용을 위해서는 사용되는 물질의 종류 및 최대사용량 확인이 필요하다. 그에 따라 저장 및 시험 시 안전대책은 사업 기획단계 부터 반영되어야 한다. 최근 발사체 연소시험관련 사고피해영향분석[2], 고체추진제의 연소속도[3], 가스폭발위험범위 예측모델[4] 등에 대해서도 연구 된 바 있다.

2. 이론적 배경

2-1. 고체추진제 원리

추진제는 발사체를 원하는 지점까지 이동시키는데 필요한 추력을 발생시키는 에너지원을 말한다. 발사체 엔진은 추진력을 얻기 위하여 액체추진제, 고체추진제, 하이브리드추진제를 사용한다. 액체추진제는 엔진시스템이 복잡하고 취급에 위험성이 있지만 연소시간이 길고 연소제어가 가능하다는 장점이 있다. 고체추진제는 점화가 시작되면 추진제가 모두 없어질 때까지 멈추지 않고 연소한다는 단점이 있지만 액체추진제에 비하여 구조가 간단하고 추력이 좋으며 제작비가 저렴하다. 또한, 추진제가 충전된 상태에서 장기간 보관이 가능하기 때문에 저장하기 쉽고 임의의 시각에 즉시 사용 가능하는 장점이 있다.

고체추진제 모터는 Fig. 1과 같이 케이싱과 그레인, 점화기, 노즐로 구성되어 있다[5]. 케이싱은 그레인이라고 불리는 연료와 산화제 혼합물 고체추진제를 감싸고 있고, 연소 시 발생하는 압력을 충분히 견디도록 설계된다. 점화기는 연소가 시작되도록 점화원 역할을 하고, 점화가 시작되면 고체추진제 중심부에서 케이싱 바깥쪽을 향하여 연소가 진행되며 고온 배기가스를 만들어 낸다. 고체추진제 가운데 통로의 형상은 연소 패턴과 연소율을 결정하고 추력을 제어하는 역할을 하며, 노즐을 통하여 고온 배기가스가 배출되어 추력을 얻는다.

고체추진제 모터는 용도가 다양하다. 소형 고체추진제 모터는 발사체 상단에 사용되거나 위성을 실은 탑재체를 원하는 궤도에 진입시키는데 사용된다. 나로호 발사체가 해당된다. 나로호는 2단형 발사체로써 고체추진제를 사용하여 나로과학위성을 정해진 궤도에 진

입시켰다. 또한, 고체추진제는 발사체의 추력을 증가시키기 위하여 부스터로도 사용된다. 델타(Delta), 타이탄(Titan) 발사체의 추력증강 부스터(Thrust Augmentation Solids)가 이에 해당된다. 델타 발사체의 고체부스터 형상은 Fig. 2와 같다[6].

액체추진제 시스템에서도 일부의 화약류가 사용된다. 터보펌프 터빈을 구동하기 위한 파이로 시동기, 가스발생기 점화용으로 사용되는 착화기 및 엔진 점화용으로 사용되는 점화기가 해당 된다.

2-2. 고체추진제 물질 정보

2-2-1. 고체추진제 물성 정보

고체추진제는 더블베이스형 추진제(Double base rocket propellants), 복합형 추진제(Composite Rocket Propellants), 복합더블베이스형 추진제(Composite/Double base rocket propellants)로 분류된다. 더블베이스형 추진제는 폭발성이 강한 니트로글리세린과 니트로셀룰로오스가 주성분인 추진제다. 이러한 특성으로 인하여 추진제의 제작과 사용에 있어 위험성이 크다. 복합형 추진제는 여러 가지 물질을 혼합하여 만든 추진제다. 복합형 추진제의 성분은 탈수산화부타디엔(HTPB, Hydroxy terminated polybutadiene)을 많이 사용한다. 연료는 분말형태의 금속 알루미늄과 마그네슘이 사용되고, 산화제는 과염소산암모늄(Ammonium perchlorate, 질산암모늄(Ammonium nitrate))이 사용된다. 이들은 보통 폭약에 사용되는 산화제인 질산칼륨(Potassium nitrate)보다 산소가 더 많이 포함되어 있다. 최근 발사체개발 선진국에서는 대기오염을 줄이기 위하여 무공해 고체 추진제를 개발하고 있다. 발사체용 추진 모터로는 안정성이 우수한 물질을 사용하는 복합형 고체추진제를 가장 보편적으로 사용한다.

고체추진제는 화약류에 속하며 화약류는 폭발물 중에서 폭발 성질을 공업적으로 이용할 가치가 있는 고체, 액체 혼합물이다. 가벼운 타격, 마찰이나 열에 의하여 짧은 시간에 화학변화를 일으켜 급격히 많은 열과 가스를 발생하여 순간적으로 큰 힘을 발생시키는 물질이다. 화약류의 특징은 결합이 불안정한 상태로 평형을 유지하고 있기 때문에 외부로부터 작은 충격이 가해지면 분해되고, 반응열이 발생하여 아직 분해되지 않은 쪽으로 전파되어 급격한 반응을 일으킨다. 이에 따라 높은 온도의 열과 다량의 가스가 발생하여 원래의 용적보다 더 큰 팽창이 이루어지고, 파괴력을 일으킨다. 화약은 자체 내에 산화제를 함유하고 있기 때문에 산소가 없는 곳에서도 반응이 가능하다.

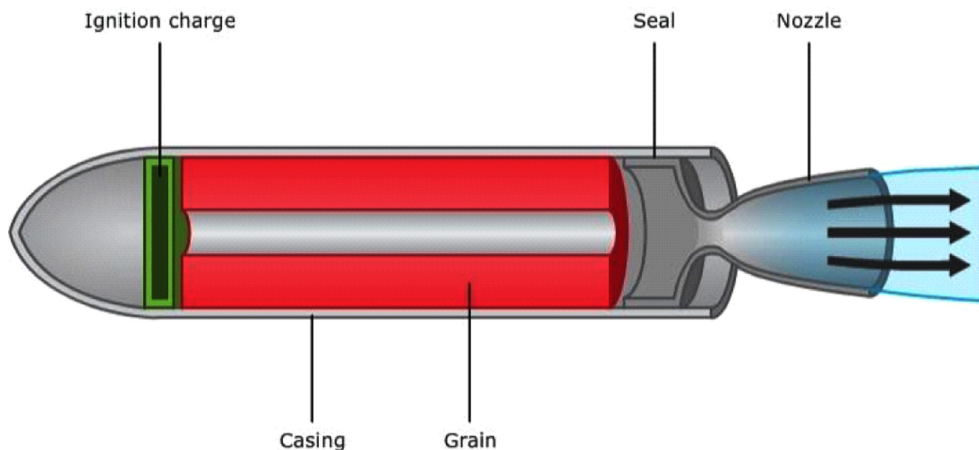


Fig. 1. Solid-Propellant Motor.

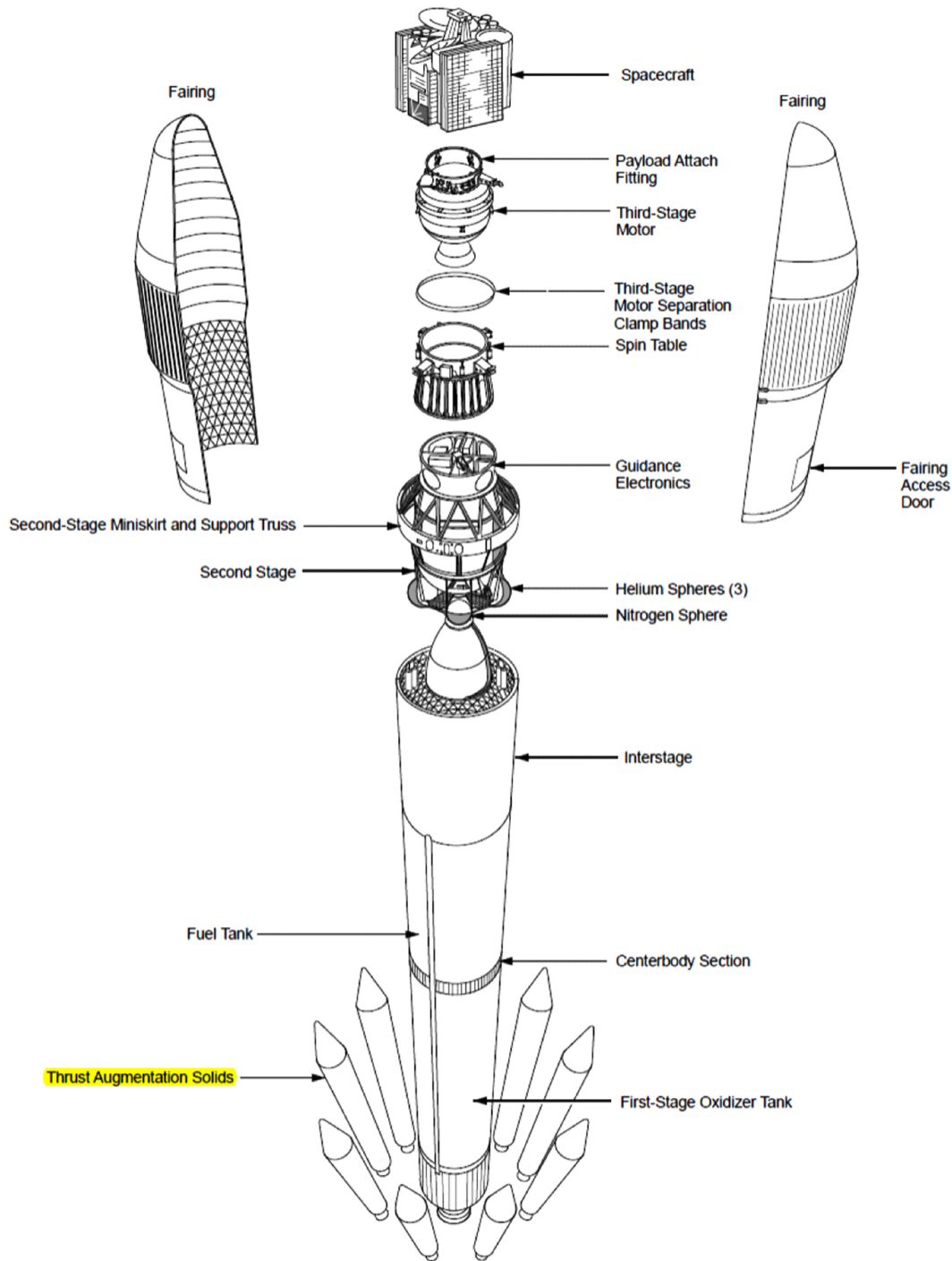


Fig. 2. Thrust Augmentation Solid of Delta Launch Vehicle.

Table 1. Blast Overpressure at Solid Propellants

IMD	ILD	PTRD	IBD
55.2 kPa	24.1 kPa	15.9~11.7 kPa	8.3~6.2 kPa

2-2-2. 고체추진제 위험등급 분류

폭발물은 열역학적으로 불안정한 평형상태의 화합물 또는 아주 작은 자극에서도 물리·화학적 반응을 일으켜 주변에 급격한 충격파를 일으키는 물질이다.

폭발물은 혼합저장 그룹, 잠재적 폭발력 위험등급에 따라 위험등급을 분류한다. 국제연합기구에서는 고체추진제를 Class1 폭발물로

구분한다. Class1 폭발물의 위험등급은 다음과 같이 6개 분야로 구분하고 각각에 대한 안전거리 기준을 다르게 적용하고 있다.

- Class1 Division1(1.1) : mass explosion
- Class1 Division2(1.2) : moderate explosion
- Class1 Division3(1.3) : mass fire
- Class1 Division4(1.4) : moderate fire
- Class1 Division5(1.5) : mass detonation hazard
- Class1 Division6(1.6) : detonation hazard

고체추진제는 1.3등급에 해당된다. 1.3등급에 해당하는 품목은 고체추진제 모터, 단기추진제(98% 미만의 니트로셀룰로오스 함유), 복기추진제(20% 미만의 니트로셀룰로오스 함유), 다기추진제, 주조형 추진제, 추진장약, 과염소산암모늄, 화학탄 등이 있다. 1.3등급에 속하는 고체추진제는 점화 후 급격히 연소를 일으키기 때문에 한번 불이 붙으면 소화가 매우 어렵다. 화재 위험은 연소되는 추진제, 점화원, 비산물질 및 충격이 원인이며 안전거리를 확보하면 유독성 물질의 영향은 없다.

2-3. 폭발물 안전거리 분류

美, DoD 6055.9-STD에서는 폭발물의 폭발에 의한 안전거리를 주거시설거리(Inhabited Building Distance, IBD), 지상탄약고간거리(Intermagazine Distance, IMD), 내부격리거리(Intraline Distance, ILD), 공로거리(Public Traffic Route Distance, PTRD)로 나누어 적용하고 있다. 폭발물 저장 및 사용 시 관련 된 대상 시설별로 필요한 안전거리를 폭발과압으로 Table 1과 같이 정리하고 있다[7].

폭발물 안전거리별 피해 및 손상 범위는 다음과 같다. 주거시설거리(IBD)는 비강화 건물은 복구 대체비용의 약 5%까지 손상을 입는 정도이고, 인원은 유리나 건물 파편에 의한 부상으로부터 보호를 받을 수 있는 수준이다. 지상탄약고간거리(IMD)는 비강화 건물은 완전히 파괴될 수 있을 정도로 손상을 입는 정도이고, 인원은 폭발과압에 의하여 고막파열(20%)이나 폐에 심각한 손상을 입고 건물의 잔해나 파편에 의하여 부상으로 본다. 내부격리거리(ILD)는 비강화 건물은 복구 대체비용의 약 50% 정도의 손상을 입는 정도이고, 인원은 1% 정도가 고막이 상할 위험도다. 공로거리(PTRD)는 비강화 건물은 복구 대체비용의 약 10~20%의 손상을 입는 정도이고, 노출된 구조에 있는 인원은 파편 및 폭발과압에 의하여 일시적인 청각장애나 부상이 일어난다[7].

3. 고체추진제 안전거리 분석

3-1. 고체추진제 저장시설의 안전거리

3-1-1. 저장시설 안전거리 기준

고체추진제 저장시설 안전거리는 고체추진제 양에 따라 식 (1)을 적용하여 구할 수 있다. 고체추진제의 양 450 kg 이하에 대해서는 450 kg에 해당되는 안전거리를 그대로 적용한다[7].

$$\ln D = 1.4715 + 0.2429 \times (\ln(W)) + 0.00384 \times (\ln(W))^2 \quad (1)$$

여기서, $D(m)$ 는 안전거리이고, $W(kg)$ 는 고체추진제의 총량이다.

Table 2. Minimum Safety Distance of Solid Propellant Storage Facility

W(kg)	D(m)	W(kg)	D(m)
≤ 450	23	25,000	78
500	24	40,000	89
1,000	27	60,000	99
1,500	30	80,000	109
2,000	34	100,000	119
3,000	39	130,000	134
5,000	46	180,000	159
7,000	53	260,000	193
10,000	60	350,000	219
15,000	63	500,000	251

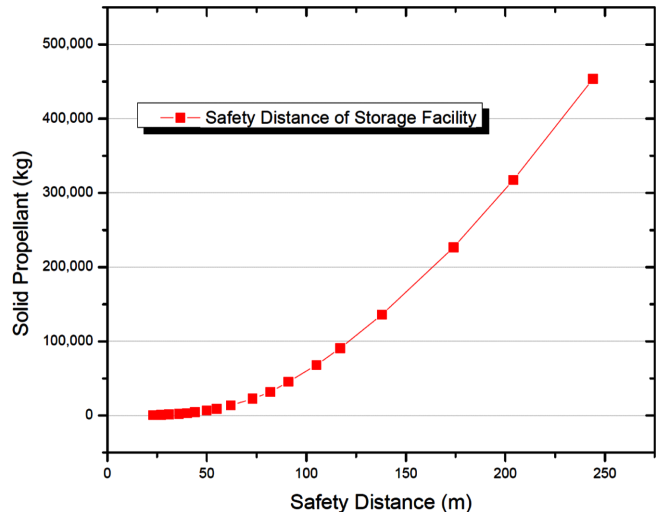


Fig. 3. Increase rate of Minimum Safety Distance of Solid Propellant Storage Facility.

453,590 kg을 초과하는 고체추진제의 경우 아래 식 (2)을 적용하여 안전거리를 구한다[7].

$$D = 3.17 W^{1/3} \quad (2)$$

3-1-2. 저장시설 안전거리 산정 사례

고체추진제 저장시설 안전거리 기준 식 (1), (2)를 적용하여 고체추진제 450 kg ~ 500,000 kg에 대하여 저장시설의 안전거리를 구하면 Table 2와 같고, 증가율은 Fig. 3과 같다. 계산결과에 따르면 고체추진제 10,000 kg을 저장하고자 하는 경우 인원이 상주하는 건물과 최소 60 m 안전거리 확보가 필요하다. 고체추진제가 다수일 경우에는 모두 합산하여 총량을 기준으로 안전거리를 정한다.

산출된 거리는 고체추진제가 폭발 시 유리나 파편에 의한 부상으로 부터 인체를 보호 받을 수 있는 수준으로써 인원이 상주할 수 있는 건물과의 최소 안전거리 기준으로 활용 가능하다.

3-2. 고체추진제 시험 시 안전거리

3-2-1. 시험 시 안전거리 기준

액체추진제 폭발사고의 피해영향을 평가할 때 고려하여야 할 사항으로는 폭발에서 동반되는 파편(Fragment) 및 폭발과압(Blast wave), 복사열(Fire ball), 화학제가 있다. 이들 중 폭발과압은 그 피해범위가 가장 넓은 폭발효과로서 사고피해영향 분석에 사용된다[8]. 고체추진제도 동일하게 그 피해범위가 가장 넓은 폭발과압을 기준으로 안전거리 산정이 가능하다. 폭발과압은 실험식으로 잘 알려진 C. N. Kingery & B. F. Pannill식을 적용한다. 이 식은 추진제의 양을 TNT등가량으로 환산하여 식 (3)에 대입하고 폭발과압에 대한 스케일화 거리를 적용하여 폭발중심으로부터 피해영향 거리를 구한다[9,10].

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

여기서, $D(m)$ 는 폭발중심으로부터 피해영향 안전거리고, $\lambda(m/kg^{1/3})$ 은 스케일화 된 거리, $W(kg)$ 는 고체추진제를 TNT등가량으로 환산한 값이다.

TNT 등가량은 총 추진제량에 대한 비율로 산정한다. 액체추진제

Table 3. TNT equivalent of Solid Propellants

Type/Material	TNT Equivalence
Composite Rocket Propellants	50%
Double Base Rocket Propellants	100%
Composite/Double Base Rocket Propellants	100%

의 TNT등가량은 美, CFR 및 DoD 문서에 사용 연료별로 자세히 정리되어 있다. 고체추진제 TNT등가량은 공개된 자료가 많지 않다. 몇 가지 해외 사례를 보면 일본 H-II 3호기 발사 안전거리 산정 시 고체추진제 TNT등가량은 50%로 환산하고 있다[11]. 美, 해군 기술 기준의 고체추진제의 TNT등가량 환산 기준은 Table 3과 같다[12].

복합형 추진제(Composite Rocket Propellants)의 TNT등가량 비율 50%는 국내의 총포화약법에서 규정하고 있는 화약류의 환산기준과도 일치한다. 총포도검화약류 등의 안전관리에 관한 법률에서는 폭약 1톤으로 환산하는 수량을 화약 2톤으로 하고 있다[13,14].

해외 발사장에서 적용되고 있는 폭발과압 기준을 살펴보면 인체의 손상 가능성이 시작되고, 저장탱크 등의 파손 가능성이 나타나는 폭발과압은 2.4 kPa로 한다[15]. CFR 417 기준에서는 예상인명피해(Expected casualty, EC) 최소화 거리 및 파편에 의한 피해영향 계산 시 폭발과압을 6.9 kPa로 하고 있다[16]. 발사장 허가를 위한 법률 CFR 420에서는 발사장 주변의 소개영역 계산시 폭발과압 3.4 kPa를 기준으로 하고 있다[17,18]. 나로우주센터 고체추진제 시험시 인원 소개를 위한 폭발과압 기준을 제시하면 Table 4와 같다.

건물내부를 포함한 외부 전체 인원을 소개하는 범위(OB)는 해외 발사장 사례 등을 검토하여 2.4 kPa를 적용한다. 건물외부 인원만 소개하는 범위(IB)는 주거시설거리(IBD)를 적용하여 6.2 kPa를 기준으로 한다. 건물 내·외부 전체 인원 소개를 위한 폭발과압 기준은 액체추진제 추진기관시험 시 폭발과압 기준과 동일하게 적용한 것이다.

3-2-2. 시험 시 안전거리 산정 사례

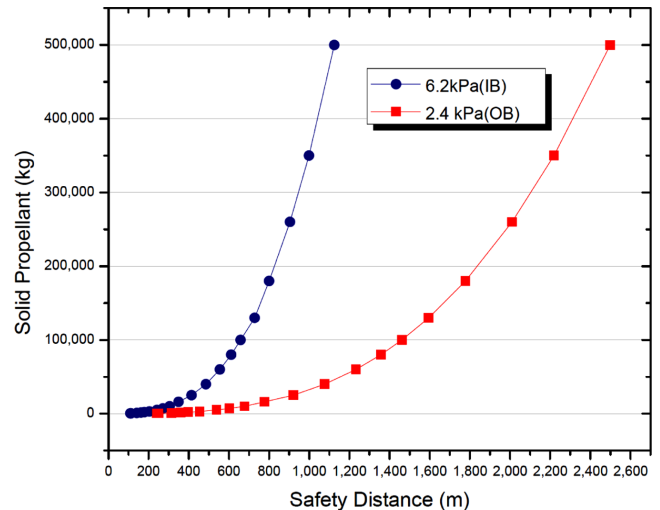
고체추진제 시험 시 확보되어야 하는 안전거리는 식 (3)을 적용하여 고체추진제 450 kg ~ 500,000 kg에 TNT등가량 50%로 환산하여 안전거리를 구하면 Table 5와 같고, 증가율은 Fig. 4와 같다. 계산결

Table 4. Overpressure Reference Value for Calculating Safety Distance

Evacuate only personnel inside the building (IB)	Evacuate all personnel inside and outside the building (OB)
6.2 kPa	2.4 kPa

Table 5. Minimum Safety Distance required during Combustion Test according to the Amount of Solid Propellants

W(kg)	D(m)		W(kg)	D(m)	
	IB	OB		IB	OB
450	109	241	25,000	414	921
500	112	250	40,000	485	1,077
1,000	141	314	60,000	555	1,233
1,500	162	360	80,000	611	1,357
2,000	179	397	100,000	658	1,461
3,000	204	454	130,000	728	1,595
5,000	242	538	180,000	800	1,778
7,000	271	602	260,000	904	2,010
10,000	305	678	350,000	999	2,219
15,000	349	777	500,000	1,125	2,499

**Fig. 4. Increase rate of Minimum Safety Distance Required during Combustion Test according to the Amount of Solid Propellants.**

과에 따르면 고체추진제 10,000 kg을 연소시험 하는 경우 건물내부 인원소개 거리는 305 m, 건물 내·외부 인원소개 거리는 678 m 안전거리 확보가 필요하다.

액체+고체추진제 발사체인 경우에는 각 단의 연료량을 TNT등가량으로 환산 후 총 합산하여 산정한다. 항공유/액체산소를 연료로 하는 액체추진제량이 500,000 kg이고 고체추진제(복합추진제)가 100,000 kg인 경우 TNT등가량은 각각 20%, 50%로 환산되고, 식 (3)에 대입하면 2.4 kPa 건물 내·외부 인원소개 거리(OB)는 2,108 m가 된다.

4. 결 론

본 논문에서는 발사체 고체추진제의 저장 및 시험 시 안전거리 산정 방법론에 대하여 기술하였다. 고체추진제 총량에 따라 저장시설 및 시험시 안전거리 산정 기준을 제시하였고, 고체추진제 450 kg~500,000 kg에 대하여 안전거리 산정 사례를 정리하였다. 고체추진제 사용 시 제시된 안전거리를 준수하여 만일의 비정상상황 발생 시 그 피해를 최소화 할 필요가 있다.

감 사

본 논문은 우주센터 2단계사업의 지원을 받아 수행되었습니다.

References

- Johnson, C. W. and Almeida, I. M., "An Investigation into the Loss of the Brazilian Space Programme's Launch Vehicle VLS-1 V03," *Safety Science.*, **46**, 38-53(2008).
- Shin, A. T. and Byun, H. S., "Consequence Analysis and Risk Reduction Methods for Propulsion Test Facility," *Korean Chem. Eng. Res.*, **54**(3), 360-366(2016).
- Yim, Y. J., Rho, M. K. and Lee, S. M., "A Study on the Burning Rate of Composite Solid Propellant," *Journal of the Korean Institute of Chemical Engineers.*, **22**(2), 83-90(1983).

4. Jung, Y. J. and Lee, C. J., "A Study on Predictive Models Based on the Machine Learning for Evaluating the Extent of Hazardous Zone of Explosive Gases," *Korean Chem. Eng. Res.*, **58**(2), 248-256(2020).
5. <https://www.sciencelearn.org.nz/resources/393-types-of-chemical-rocket-engines>, University of Waikato(2011).
6. The Boeing Company Space and Communications Group., "Delta II Payload Planners Guide," MDC H3224D(1996).
7. U.S. Department of Defense, "DoD Ammunition and Explosives Safety Standards," DoD 6055.9-STD, Washington, D.C(2004).
8. Baker, W. E., "Explosions in Air," University of Texas Press, Austin(1973).
9. Kinney, G. F. and Graham, K. J., "Explosive Shocks in Air," Springer-Verlag New York Inc, New York(1985).
10. Clancey, V. J., "Diagnostic Features of Explosion Damage," 6th International Meeting on Forensic Sciences, Edinburgh, Scotland (1972).
11. NASDA, "H-II 3 Ground Safety Plan," Safety 3-6-1(1994).
12. Naval Surface Weapons Center, "Maximum TNT Equivalence of Naval Propellants," ADP004886, Maryland(1984).
13. Sim, H. S., Choi, K. S., Shin, A. T. and Ko, J. H., "Criteria for Calculating the Explosion Risk of Space Launch Vehicles," KARI (2008).
14. KNPA, "Enforcement Decree of the Control of Firearms, Swords, Explosives, etc. act," Presidential Decree No. 31380(2021).
15. 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).
16. 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).
17. Sim, H. S., Choi, K. S., Ko, J. H. 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, **12**, 274-279(2012).
18. U.S. Federal Aviation Administration, "14 CFR Parts 401, 417 and 420 Licensing and Safety Requirements for Operation of a Launch Site; Rule," Part II Department of Transportation, Washington, D.C(2000).