

Technical Paper

DOI: <https://doi.org/10.6108/KSPE.2020.24.4.073>

밀폐공간에서의 추진제 정전기 민감도에 대한 연구

최지용^{a,*} · 이선재^a · 김지홍^a · 김진용^a · 박의용^a

Research of Solid Propellant Electrostatic Sensitivity in Confinement

Jiyong Choi^{a,*} · Seonjae Lee^a · Jihong Kim^a · Jinyong Kim^a · Euiyong Park^a

^aPropulsion Center, Hanwha Corporation Daejeon Plant, Korea

*Corresponding author. E-mail: jondow@hanwha.com

ABSTRACT

The main reasons that ignite the propellant in the process of producing solid rocket motor are worker mistakes, wrong working process, mechanical defects, impact, friction, electrostatic and short circuits. In the past decades, many accidents have occurred in the process of producing solid rocket motor, accidents investigation have confirmed that the sensitivity of electrostatic is very high under specific condition. In this paper, we analyzed overseas accident cases and measured the sensitivity of electrostatic in the situation of confinement and pressure load by considering the manufacturing process. As a result of the test, the sensitivity of propellant was increased in the situation of confinement and pressure load and the propellant reacted more sensitively to electrostatic in the situation of confinement than pressure load.

초 록

고체 로켓 추진기관을 생산, 취급하는 과정에서 추진제를 발화 시킬 수 있는 주요 원인은 작업자의 실수, 잘못된 작업방법, 기계적 결함, 충격, 마찰, 정전기, 누전 등이 있다. 과거 수십 년 동안 추진기관의 생산 취급과정에서 많은 사고가 발생되었으며, 사고조사 결과 특정 조건에서 정전기 민감도가 매우 높아진다는 사실이 확인되었다. 본 논문에서는 해외 사고사례를 분석하고 실제 공정을 고려한 밀폐 및 압력 하중이 가해지는 상황을 모사하여 정전기 민감도를 측정하였다. 시험결과 추진제의 밀폐 및 압력 하중 상황에서 민감도가 높아지며, 압력보다는 밀폐상황에서 추진제가 정전기에 더 민감하게 반응하는 것을 확인하였다. 본 연구를 통해 추진제 민감도 시험에 대한 시험 방식이 재설계되어야 한다고 판단되어 정전기, 압력, 마찰, 밀폐 조건을 동시에 모사할 수 있는 시험 장비 제작을 추진하게 되었다.

Key Words: Electrostatic Discharge(정전기 방전), Confinement(밀폐), Solid Propellant(고체 추진제), Hydroxyl-Terminated Polybutadiene(HTPB), Aluminum(알루미늄)

Received 6 December 2019 / Revised 18 May 2020 / Accepted 23 May 2020

Copyright © The Korean Society of Propulsion Engineers

pISSN 1226-6027 / eISSN 2288-4548

[이 논문은 한국추진공학회 2019년도 추계학술대회(2019. 11. 27-29,

해운대 그랜드호텔) 발표논문을 심사하여 수정·보완한 것임.]

1. 서 론

고체 로켓 추진기관의 생산, 취급을 위해서는 추진제의 안전성을 분석해야 한다. 일반적으로 MIL-STD-1751A를 기준으로 충격, 마찰, 정전기 민감도를 측정하여 취급절차를 마련하게 된다. 하지만 과거 수십 년 동안 로켓모터의 생산, 취급과정에서 많은 사고가 발생하였으며, 몇몇 사고들은 정전기 방전에 의한 사고로 판명 났다. 1980년대 초 프랑스 SNPE 에서는 과거 사고를 바탕으로 새로운 시험방법을 제시하였으며, 정전기에 의한 추진제 발화 원인을 분석하고 침투현상 모델<Percolation model>을 바탕으로 새로운 기준을 만들어서 추진제를 분류하였다. 정전기 침투계수를 의미하는 P는 다음과 같다.

$$P = N_c / N_i / C_b / V_b \quad (1)$$

여기서 C_b 는 바인더의 전도율, V_b 는 바인더의 단위 체적, N_c 는 전도성 입자(알루미늄)의 수, N_i 는 절연입자(AP, HMX)의 수이다. 침투계수가 $10^{10} \Omega \cdot m$ 보다 큰 조성은 민감하고, 침투계수가 $10^9 \Omega \cdot m$ 보다 작은 조성은 민감하지 않다는 기준을 제시하였다[1].

2. 사고사례

과거 정전기에 의한 사고사례를 살펴보면 언제나 HTPB 바인더에 알루미늄 분말을 포함한 복합형 추진제에서 발생했다[1-3]. 아래에는 대표적인 사례 세 가지를 요약하였다.

SNPE에서의 사고(1976~1978)[1]

1976년 말에서 1978년 3월까지 SNPE의 복합형 추진제 그레인을 생산 및 취급하는 생메다르 공장에서 6건의 사고가 발생했으며, 르보켓 연구 센터에서 4건의 사고가 발생하였다. 모두 품질 시험을 통과한 알루미늄 분말이 포함된 추진제에서 발생했다. 어떤 사고는 추진제가 연소하지 않았으며, 정전기가 발생한 것만 확인하였다. 작

업자는 추진제가 들어있는 폴리에틸렌 봉지를 열고, PVC로 인히비팅(Inhibiting)된 추진제 그레인을 잡으려고 했다. 작업자의 손가락이 추진제 그레인에 가까워졌을 때, 균열이 생기는 것 같은 큰 소음이 발생했고 '폭발'이 발생하고 인히비터(Inhibitor)가 깨져버렸다. 인히비터(Inhibitor)가 떨어져 나간 위치에 추진제 그레인의 균열이 발생된 것을 확인하였다. 모든 추진제 조성의 바인

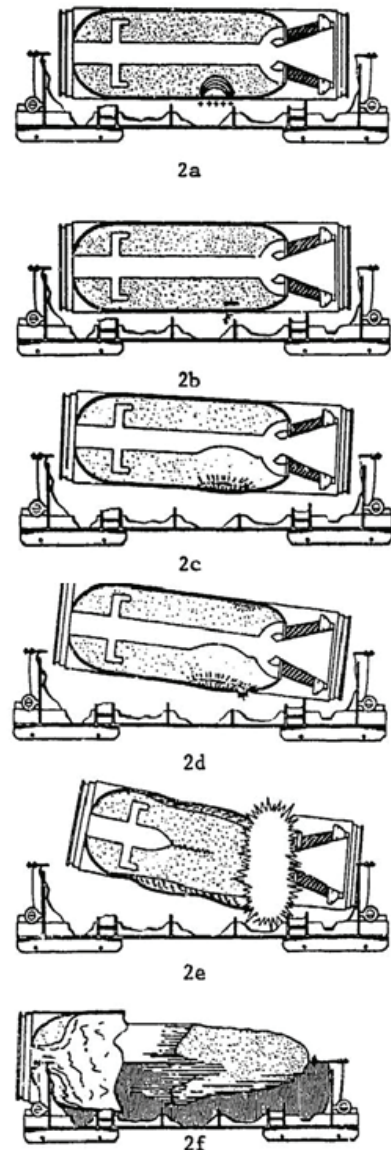


Fig. 1 Sequence of events as perishing II.

더는 HTPB를 사용하였다.

퍼싱 2(Pershing II) 추진기관 사고(1985)[3]

추진기관은 1984년 여름에 HERCULES, INC Magna, UT에서 제작되었다. 1984년 12월 독일로 이송되었다가 외부 보관창고에서 1985년 1월까지 보관하였다. 그 기간 동안 심한 한파와 기록적인 오도 하강이 있었다고 보고되었다. 추진기관은 케블라 섬유 소재의 연소관을 사용하였고 보관상자는 금속으로 제작되었다. 추진기관 인양 중에 추진기관이 금속 받침대에 부딪히며 추진제 내부에서 정전기 방출이 일어났다. 그 결과 비정상적인 연소가 발생하였고 연소관이 1초도 안되어 폭발하였다. 사고 이후 점화장치는 작동되지 않은 채 발견되었다. Fig. 1은 추진기관 발화 이벤트 순서를 나타낸다. 퍼싱 2 추진기관은 HTPB-AP 추진제를 사용하였고 다른 추진제에 대비해 외부자극에 둔감한 특성을 가지고 있다고 판명되었다. 모사 시험 및 사고조사 결과 아래와 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 연소관 외면에서 마찰 대전이 발생하면, 추진기관에 전하량 재분배가 일어난다.
- (2) 연소관의 정전기 방전이 아주 높은 전기장을 발생시켜 추진제에 영향을 준다.
- (3) 충분히 낮은 온도 환경이 연소관의 전하량 생성을 증폭시키고, 추진제를 점화시키는 문턱전압(Threshold Voltage)을 낮춘다.

피스키퍼(Peacekeeper) 추진기관 사고(1987)[1]

추진기관의 이형공정에서 코어에서 발생하는 마찰이나 정전기 방전과 같은 자극은 추진제를 연소하는데 필요한 자극수준보다 훨씬 작다. 그러나 피스키퍼 추진기관 이형공정에서 또다시 HTPB 추진제를 사용한 추진기관이 점화되는 사고가 발생하자 추진제의 민감도를 높이는 인자에 대한 연구가 진행되었다. 미국의 로켓 생산 업체인 티오클(Thiokol)이 수행한 분석은 압력이나 밀폐(Confinement)가 추진제의 민감도에 영향이 매우 큰 것으로 나타났다. Table 1에서는 HTPB-AI (AP 68%, AI 20%)기반 추진제에 대한 온도와 압력에 의한 정전기 민감도이다. 온도가

낮고 추진제에 가해지는 압력이 높을수록 정전기에 대한 민감도가 높아지는 것을 확인 할 수 있다.

사고사례를 살펴보면 다음과 같은 결과를 도출 할 수 있다.

- (1) HTPB 바인더와 알루미늄 분말을 사용하는 복합형 추진제에서 정전기 방전에 의한 연소가 발생한다.
- (2) 추진제 온도와 습도가 낮을 경우 정전기에 의한 추진제 민감도가 증가한다.
- (3) 밀폐 및 압력 상황에서 정전기에 의한 민감도가 증가한다.

프랑스와 미국에서는 사고경험을 바탕으로 추진제 민감도에 대한 측정 방식을 생산 공정 및 취급상황을 반영한 시험방안으로 수립하였으며, 지속적인 연구를 통해 다른 유형의 민감도를 분석하고 있다. 본 연구에서는 해외사고사례 분석 결과를 반영하여 국내에서 사용되는 HTPB-AI 기반 추진제에 대한 밀폐 및 압력상황에서의 정전기 민감도를 측정하고 분석하였다.

Table 1. Electrostatic sensitivity by pressure and temperature.

Type	Pressure(MPa)			
	0.1	1	5	10
+20℃	5 J	760 mJ	-	340 mJ
-20℃	460 mJ	460 mJ	230 mJ	80 mJ



Fig. 2 Equipment of electrostatic sensitivity.

3. 시험개요

본 시험 이전에 Fig. 2와 같은 표준시험 장비(ESD 2008A/OZM)를 이용하여 본시험과 동일한 추진제 민감도를 검증하였다. 시편의 두께는 본 시험과 동일하게 0.3~0.5 mm로 제작하여 시험을 수행하였다. 시편에 전달되는 에너지는 낮은 에너지부터 발화유무에 따라 증가시키면서 시험을 진행하였다. 시험결과 시험장비가 낼 수 있는 최대에너지인 25 J에서도 정전기로 인한 추진제 발화는 발생하지 않았다. 초고속카메라 촬영을 통해 방출 상태를 관찰하였으나 발화로 판단할 수 있는 불꽃, 냄새, 연소반응은 관찰되지 않았다. 표준시험 장비는 추진제 시편이 밀폐되어 있지 않고 하중역시 가해지지 않는 상태이다. 즉, 표준시험 장비 기준으로는 시험에 사용된 추진제는 정전기에 대한 민감도가 매우 둔감한 것으로 나타난다. 그러나 앞서 살펴봤듯이 추진제의 정전기에 대한 민감도는 우리가 알고 있던 것보다 특정상황에서 민감하다는 것을 알 수 있다. 추진기관의 제조 및 취급공정상황을 반영한 민감도 시험이 필요하며, 시험결과를 반영한 안전대책 및 취급 규정의 마련이 필요하다.

해외사고사례를 기반으로 다음 값이 증가하면 추진제의 발화가 가능할 것이라고 추정하였다.

- (1) 추진제 시편에 가해지는 하중
- (2) 추진제 시편의 밀폐 유무
- (3) 시편에 전달된 에너지

이 변수를 고려하여 Fig. 3과 같은 시험 장비를 구성하였다. 상부에는 제작 공정 시 추진제에 가해지는 하중을 모사할 수 있도록 무게 추를 장착하였고, 하단부에는 추진제와 치구의 접합면을 모사하여 에너지가 인가 될 수 있도록 구성하였다. Fig. 4는 정전기 방전 시험의 개략도이다. 추진제 시편은 두 개의 전극 사이에 위치한다. 추진제에 압력을 가하기 위해 상부에 위치한 전극에 무게 추를 올릴 수 있도록 구성하였다. 추진제 시편을 케이스를 이용하여 밀폐 상황을 모사하였다. 추진제가 발화되는 시점부터 각 조건에서 40~50회 정도 반복적으로 수행하여 발화 시 인가에너지를 측정하였다.

4. 시험결과

시험 조건은 추진기관 제작 공정을 고려하여 아래와 같이 선정하였다.

- (1) 시편 두께: 0.3~0.4 mm
- (2) 하중 조건: 33 kg, 103 kg
- (3) 밀폐 조건: 우레탄 폼 케이스 유무

시편에 전달되는 에너지는 캐패시터와 전압을 조절하여 추진제의 발화여부에 따라 증가 및 감소를 하였다. 추진제 반응은 발화 또는 균열의 두 가지 형태로 나타났다. 초고속 카메라로 찍은 동영상을 관찰하면 발화의 경우 발화하면서 추진제 균열이 발생하고 연소가 확산되었다. 다른 경우는 발화가 일어나지 않지만 시편에 미세한 균열이 관찰되었다. 균열이 발생한 경우는 미발화로 판단하여 분석을 진행하였다.

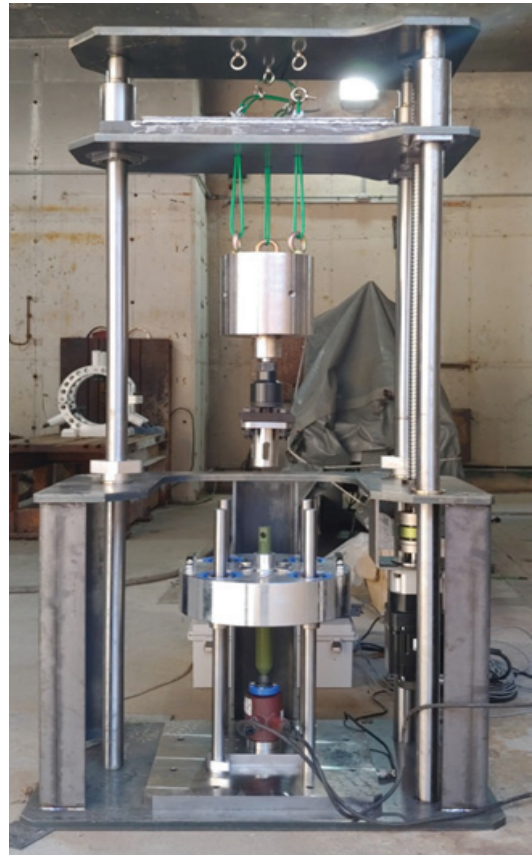


Fig. 3 Equipment by electrostatic spark.

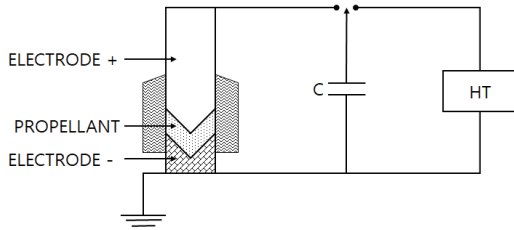


Fig. 4 Schematic arrangement of a test by electrostatic spark.

Table 2. Electrostatic energy with opening.

Pressure load condition	Applied energy	
	33 kg	min. E:
avg. E:		11.96 J
103 kg	min. E:	4.61 J
	avg. E:	5.86 J

Table 3. Electrostatic energy with confinement.

Pressure load condition	Applied energy	
	33 kg	min. E:
avg. E:		103.8 mJ
103 kg	min. E:	7.0 mJ
	avg. E:	9.2 mJ

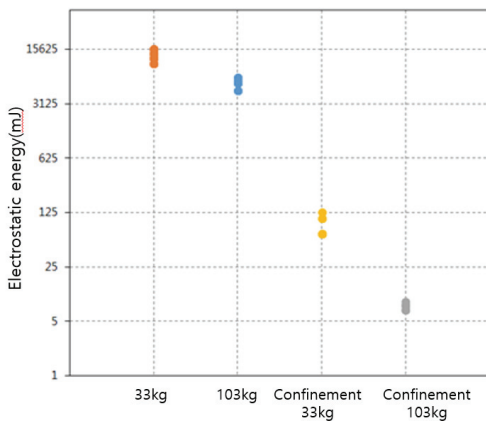


Fig 5 Comparison of Electrostatic Energy with Pressure and Confinement.

Table 2와 3은 밀폐조건 적용 유무와 하중 조건에 따른 정전기에 의한 발화 에너지 분석 결과이다. 발화 시 시편에 전달된 에너지의 최소값과 산술 평균값을 나타내었다. 시험 결과 밀폐조건일 경우 더 낮은 에너지에서 추진제가 발화되는 것을 확인하였다. 추진제가 외부와 밀폐가 되면 인가된 에너지의 손실이 적어 낮은 에너지에서 발화되는 것으로 판단된다. 하중 조건에 따른 결과를 살펴보면 하중이 증가할수록 낮은 에너지에서 발화 되는 것을 확인하였다. 하중이 증가할수록 전극 간에 거리가 줄어들어 낮은 에너지에서 발화 되는 것으로 판단된다. 시험 조건별 발화 에너지의 분포를 나타내고 있는 Fig. 5를 살펴보면 추진제의 밀폐조건이 하중조건의 변화보다 정전기에 의한 발화 영향성이 더 민감한 것으로 확인되었다.

일반적으로 인체에서 발생 할 수 있는 정전기는 상대습도가 10~20%로 매우 낮을 경우 최대 35kV 까지 발생하며, 작업자의 경우는 최대 6kV 까지 발생 할 수 있다고 알려져 있다. 추진제에 인가되는 에너지는 추진기관의 정전용량에 따라 달라지기 때문에 추진기관의 크기와 형상 및 취급 상황에 따라 달라질 수밖에 없다. 그러나 연소관에 추진제 충전 후 이형 전까지 추진제는 밀폐 및 압력하중이 가해지는 상황에 놓여있다. Table 3에 나타난 결과처럼 밀폐 및 하중 조건에서는 낮은 에너지인 7.0 mJ에서도 발화가 일어날 수 있기 때문에 추진기관의 취급이전에 정전기가 발생되지 않도록 접지 및 온습도 관리 등의 안전조치가 수행되어야 한다.

본 연구에서 수행되어진 시험은 특정 추진기관을 대상으로 시험 장비를 구성하였으며 시험 조건을 해당 추진기관을 기준으로 설정하였다. 항온항습 조건하에서 시험을 수행을 하였으나, 장비의 한계로 온습도 조건의 변화에 따른 정전기 민감도의 측정을 수행하지 못하였다. 또한 마찰과정에서 발생할 수 있는 정전기 역시 고려하지 못하였다. 상기의 문제점을 해결하기 위해 다양한 추진기관과 추진제에 대한 민감도를 분석하고 정전기, 압력, 마찰, 밀폐 조건을 동시에 모사한 시험 장비를 설계하고 제작을 진행 중이다.

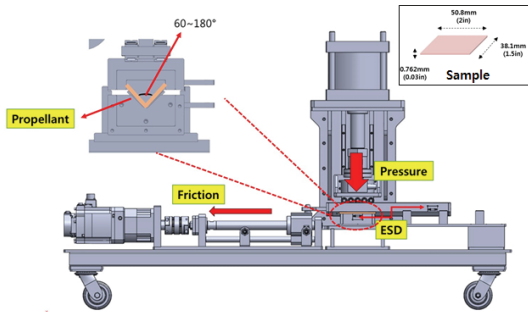


Fig. 6 Equipment of ESD/Pressure/Friction/Confinement.

Fig. 6은 사고조사 사례를 참고하여 설계된 시험 장비이다[2,4,5]. 시험 장비는 추진제 시편 홀더와 치구 무게에 의해 발생하는 압력을 모사할 수 있는 압력실린더, 이형속도에 의한 영향을 확인할 수 있는 마찰 실린더로 구성되어 있다. 위의 장비들을 통해 추진제 시편에 특정 상황을 부여하고 정전기를 인가하였을 때 추진제가 발화하는지 확인할 수 있는 시험 장비이다.

5. 결 론

고체 로켓 추진기관을 생산, 취급하는 과정에서 추진제를 발화 시킬 수 있는 주요 원인은 작업자의 실수, 잘못된 작업방법, 기계적 결함, 충격, 마찰, 정전기, 누전 등이 있다. 본 논문에서는 정전기에 의한 발화 영향성을 파악하기 위해 해외사고사례를 분석하고 표준시험방식이 아닌 실제 공정을 고려한 밀폐 및 압력 하중이 가해지는 상황을 모사하여 정전기 민감도를 측정하였다. 해외사고사례 조사 결과 HTPB-AI 기반의 추진제는 우리가 알고 있던 것 보다 온습도가 낮고 밀폐 및 압력 상황에서 정전기 민감도가 높아진다는 것을 알게 되었다.

실제 사용되고 있는 추진제의 정전기 민감도를 분석하기 위해 표준시험 장비와 생산 및 취급공정을 고려한 시험 장비를 사용하여 정전기

민감도를 측정하였다. 시험 결과 표준시험 장비로 측정된 정전기 민감도보다 생산, 취급 공정을 고려한 상황에서 정전기 민감도가 더 높다는 것을 확인할 수 있었다. 본 연구를 통해 추진제의 정전기 민감도는 재평가가 이루어져야 한다고 생각한다.

안전을 위해 금속연료를 사용하지 않는 다거나 민감하지 않은 추진제만 사용한다는 생각은 비현실적이다. 또한 정전기, 압력, 마찰, 밀폐 조건을 동시에 모사한 시험을 수행하고 그 결과를 바탕으로 안전 절차를 수립한다고 해도 모든 상황을 고려할 수는 없다. 추진제의 민감도는 많은 요인의 함수일 것이다. 하지만 추진제 및 로켓 추진기관을 생산, 취급하는 과정에서 기본적으로 항온항습을 유지하고 철저한 접지 및 작업자의 관리가 이루어진다면 정전기에 의한 사고는 최소한으로 예방할 수 있을 것이다.

References

1. Alain, D. and Roger, R., "Sensitivity of Solid Rocket Motors to Electrostatic Discharge: History and Future," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 18, No. 4, 2002.
2. Campbell, L.A., "SRM Propellant, Friction /ESD Testing," MORTON THIOKOL. INC., ECS-SS-3509, 1989.
3. James, A.K., "Technical Investigation of 11 January 1985 PERSHING II Motor Fire," US Army, 1986.
4. Eric, C., "Ignition Sensitivity of Composite Energetic Materials to Electrostatic Discharge," Texas Tech University, 2013.
5. Raun, R.L., "Modeling of ESD-Induced Confined Ignition of Solid Rocket Propellants," *Combustion and Flame*, Vol. 120, pp. 107-124, 2000.