

研究論文

Friability 시험을 이용한 HTPE 및
HTPB 추진제의 충격 민감도

김창기* · 유지창* · 민병선*

Impact Sensitivity of HTPE & HTPB Propellants
using Friability Test

Changkee Kim* · Jichang Yoo* · Byoungsun Min*

ABSTRACT

Hydroxyl terminated polyether(HTPE) propellants have been developed recently as possible replacements for HTPB/AP propellants currently used in a number of tactical rocker motor. As analyzing friability of HTPE and HTPB propellants in this study, the following results could be derived. The friability of the tested propellants depended on its binder contents, mechanical property, and burning rate. It was decreased as burning rate was lowered and toughness was increased.

초 록

Hydroxyl terminated polyether(HTPE) 추진제는 전술용 모터에 현재까지도 적용되고 있는 HTPB/AP 추진제를 대체할 수 있는 추진제로서 최근에 개발되고 있다. 본 연구에서는 HTPE와 HTPB 추진제에 대한 파쇄성 시험을 수행하고 그 결과를 분석하였다. 추진제의 파쇄성은 바인더함량, 기계적 특성 및 연소속도에 의해 영향을 받았으며 연소속도가 증가할수록 기계적 인성이 낮아질수록 파쇄성은 증가하는 경향을 보였다.

Key Words: Hydroxyl Terminated Polyether(HTPE), Hydroxyl Terminated Polybutadiene(HTPB), Friability(파쇄성), Toughness(인성), Burning Rate(연소속도)

1. 서 론

탄자 충격에 의한 추진제의 반응 과정은 추진

기관에 고속의 탄자가 충돌하면 응력이 발생하고 추진기관 내부에 있는 추진제는 잘게 부서짐과 동시에 마찰이 생기며 열에너지가 발생하여 부서진 추진제의 연소가 개시된다. 추진기관 내부에서 추진제의 부서진 정도가 크면 연소면적의 증가로 내부압력이 증가될 것이며, 이와 더불어 추진제가 추진기관내에서 밀폐되어 있을 경

접수일 2010. 8. 26, 수정완료일 2010. 12. 19, 게재확정일 2010. 12. 27

* 정희원, 국방과학연구소 1기술연구본부 6부

† 교신저자, E-mail: propelkim@add.re.kr

Table 1. Characteristics of Test Propellants

No.	Rb ^a (mm/s)	Om ^b (bar)	Em ^c (%)	Propellant System
1	12.3	10.6	48	HTPE/AP
2	9.8	9.3	63	HTPE/AP/AN
3	12.1	9.0	46	HTPB/AP/AI
4	7.1	9.4	46	HTPB/AP/AI
5	13.3	18.0	20	HTPB/AP/AI
6	12.7	8.8	40	HTPB/AP
7	22.0	8.7	32	HTPB/AP
8	24.7	8.6	38	HTPB/AP
9	22.0	9.5	44	HTPB/AP

a: strand burning rate at 6.9 MPa

b: maximum tensile stress

c: strain at maximum tensile stress

우 내부압력의 상승 속도는 더욱 증가하여 결국에는 폭연에서 폭굉으로 반응이 확산되는 DDT (deflagration to detonation transition) 현상을 보이게 된다[1].

HTPE 추진제는 Hercules and Alliant Techsystems IRAD 자금으로 최초로 개발되었고 미 해군과의 계약으로 Evolved Sea Sparrow에 적용된 모터가 개발되었다. HTPE 추진제는 5인치 혹은 10인치 직경의 모터 모두 MIL-STD-2105B에서 제시하는 둔감 시험 중 급속가열, 완속가열, 탄자 및 파편 충격시험을 통과하였다고 보고되고 있다[2]. 향후 추진기관의 둔감 요구조건이 강화되면 점차 그 수요가 증가할 것으로 예상된다.

HTPB 추진제는 많은 유도무기 체계에서 채택되었고 우주발사체 분야에서도 거의 독점적 지위를 보이며 성장해 왔다. 그러나 다양한 전시상황을 겪은 선진국의 경우, 피탄 및 화재 시에 추진기관의 반응 상태를 확인해 본 결과 HTPB 추진제는 사용상의 상당한 신뢰도에도 불구하고 둔감화 측면에서 특히 완속가열 특성이 좋지 않음을 알았다[3,4].

본 연구에서는 둔감 HTPE 고체 추진제 조성

개발 중에 획득한 둔감 시험자료중 추진제의 종류에 따른 파쇄성 시험결과로부터 추진제의 기본 특성과 상관관계를 고찰하여 충격에 둔감한 추진제 조성 개발 방향을 살펴보고자 한다.

2. 시 험

시험에 사용한 추진제의 연소속도는 7.1~ 24.7 mm/s 까지 다양하게 선택 하였다. 파쇄성에 영향을 미칠 것으로 예상되는 추진제의 연소속도와 인장특성 값들을 Table 1에 나타내었다. 시료번호 1, 2번은 HTPE 추진제이고 나머지는 HTPB 추진제이다.

Table 2에 나타나 있는 바와 같이 추진제에 대한 friability 시험은 UN Test Series 7의 “7(c)(ii)”와 “7(d)(ii)”로 규정되어 있다[5]. 같은 항목인 Susan 시험과 EIDS bullet impact 시험은 야외 시험이고 군용장비가 지원되어야 하는데 비

Table 2. Substance Test Items of UN test series 7[5]

Test No	Test Name	Country	Failure Criteria	Remark
7(a)	EIDS CAP	Germany /US	Detonation of any Sample	Shock
7(b)	EIDS GAP	US	Detonation at Gap of 70 mm	Shock (Confinement)
7(c)(i)	Susan	US	P > 27 kPa @ v = 333 m/s	High Velocity Impact
7(c)(ii)	Friability	France	dP/dt > 15 MPa/ms for v = 150m/s	
7(d)(i)	EIDS Bullet Impact	US	Explosion /Detonation	Impact & Penetration
7(d)(ii)	Friability	France	dP/dt > 15 MPa/ms for v = 150 m/s	
7(e)	EIDS External Fire	UN	Detonation, Fragment Throw > 15 m	External Fire
7(f)	EDIS Slow Cook-off	US	Detonation, ≥ 3 Fragment	Thermal Environment

해 파쇄성 시험은 실내에서 실시할 수 있는 장점이 있는 방법이다. 이 시험의 목적은 EIDS 후보가 충돌상태에서 변형 특성 및 변형 후의 민감도를 평가하는 시험이다. 추진기관이 보관·수송 중 또는 운용 중에 고속의 파편, 탄자 충격을 받는 경우 추진기관 내에 충전된 추진제 역시 변형률로 변형되고 이로 인하여 기계적 변형이 발생한 추진제는 변형·파괴된 후 수반되는 열, shock 등의 충격에 의해 반응성이 커져 폭발(explosion) 또는 폭발(detonation)으로 이어지게 된다[5]. 파쇄성 시험은 이러한 동적 기계적 충격에 대하여 화약 및 추진제의 반응 정도를 알아보기 위한 시험이며, 충격을 받아 기계적 변형이 생긴 추진제(또는 화약)를 연소 시험한 결과로부터 얻은 시간당 압력 변화율 (dP/dt)을 통하여 그 추진제의 반응형태가 외부의 동적 충격에 대하여 폭굉으로 전이될지 혹은 폭연(deflagration)이나 연소(burning)로 반응할지 여부를 평가한다[5].

본 시험은 직경이 18 mm, 무게 9 g 인 원통형 시편을 두께 20 mm의 강철판에 탄속 140, 150, 160 m/s에서 각 3회 충돌시킨 후 변형된 추진제를 포집하고, 이를 평균직경이 0.75 mm인 흑색화약 0.5 g과 hot wire(M 100)로 구성된 점화 백을 사용하여 체적이 108 cc이고 시간당 압력변화를 측정할 수 있는 closed bomb에서 연소시킨다. 이때 측정된 압력변화 결과로부터 dP/dt를 계산하고 최대값을 구한다[6]. UN Test Series 7에서 파쇄성 시험의 통과기준(Pass/Fail criteria)은 충돌속도 150 m/s에서 연소시험 결과인 dP/dt의 최대값의 평균값이 15 MPa/ms 이하이면 시험물질은 EIDS에 통과한 물질로 규정하고 있다(Table 2).

3. 결과 및 고찰

추진제의 비추력 측면에서 비교해 보면 최대 이론 비추력을 보이는 산화제 함량은 HTPE의 경우 80%, HTPB는 89% 이다. 대부분의 추력 발생용 추진제조성은 이론 비추력이 최대인 영역

근방에서 최적 조성을 개발하기 때문에 HTPE 추진제와 HTPB 추진제는 근본적으로 충격에 둔감한 바인더의 함량 차이가 발생하고 이로 인해 적어도 파쇄성 측정시험 시 연소속도가 같을 경우 HTPE 추진제가 HTPB 추진제 보다 태생적으로 우수할 것으로 판단된다(Fig. 1).

Figure 2는 충돌 속도에 따라 추진제가 손상을 입은 전형적인 추진제 형상이다. 2번 추진제는 HTPE/AP/AN 추진제로서 고체 함량이 81%, 4번 추진제는 HTPB/AP/Al 추진제이고 고체 함량이 88% 이다. 2번 추진제는 HTPE 추진제 중에서 가장 낮은 파쇄성 값을, 4번 추진제는 HTPB 추진제 중에서 가장 낮은 파쇄성을 가진다. 충돌 속도가 증가할수록 추진제의 부서짐 정도는 증가함을 육안으로도 관찰이 가능하였다.

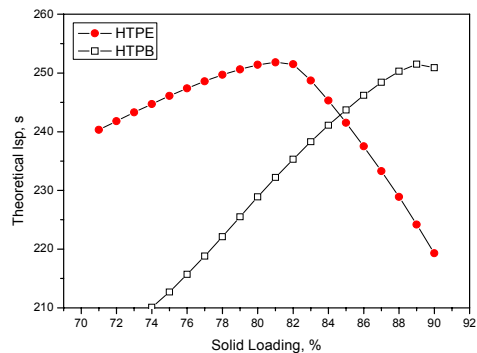


Fig. 1 Theoretical specific impulse of HTPE and HTPB solid propellants

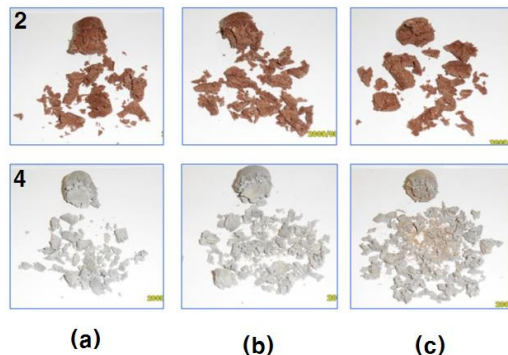


Fig. 2 Broken shape of 2 & 4 propellant according to impact velocities (upper: No.2, lower: No.4): (a)140, (b)150, (c)160 m/s

Figure 3은 충돌속도에 따라 시험한 추진제를 CBT 시험한 결과인 $(dP/dt)_{max}$ 를 나타낸 그림이다. 충돌속도가 증가함에 따라 추진제가 많이 부서짐으로 연소표면적이 증가하여 $(dP/dt)_{max}$ 는 증가함을 알 수 있다. 4번 추진제의 경우 2번 추진제에 비해 연소속도가 낮음에도 불구하고 $(dP/dt)_{max}$ 가 크고 시험 편차가 컸다. 이 원인은 바인더의 함량이 적어 추진제의 성질이 2번에 비해 취성(brittle)이 더 증가하였기 때문에 부서질 때 추진제 파편이 좀 더 불규칙했기 때문인 것으로 판단된다. 결론적으로 추진제 2가 4보다 파쇄성이 낮았는데 이는 바인더의 함량이 높고 기계적 특성이 우수하기 때문으로 판단된다.

고체 추진제의 인장 및 연소 특성은 추진제의 조성에 따라 매우 상이한 값을 가질 수 있다. 폴리우레탄 바인더를 이용하는 고체 추진제는 가소제의 함량, 바인더의 가교 밀도에 의해 인장 특성을 조절 가능하며 가소제가 적을수록 가교 밀도가 높을수록 인장 강도가 증가하고 가교 밀도가 낮을수록 인장 변형율이 증가한다[7,8]. 고체입자의 함량 및 분포도 중요한 변수 인데 통상 고체 함량이 증가하면 인장 강도가 증가하는 경향을 보이지만 변형율은 감소한다[9]. 또한 압모늄 퍼크로레이트(AP)를 사용한 경우 AP의 입자 크기가 작아질수록 연소속도는 증가한다[10].

본 시험에 사용한 추진제는 이런 조성 변수를 고려한 추진제는 아니나 시험 추진제의 기본 특성과 파쇄성의 상관관계를 살펴봄으로서 개략적인 상관관계를 파악할 수 있었다. Fig. 4, 5는 시

험한 추진제의 변형을 및 인장강도와 파쇄성의 관계이다. 그림 내의 번호는 Table 1의 추진제 번호와 동일하다. 5번 추진제를 제외하면 추진제의 인장 변형을 및 강도와 파쇄성은 반비례관계

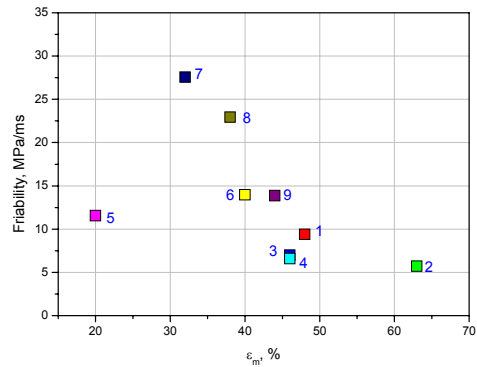


Fig. 4 Friability as a function of strain at maximum stress

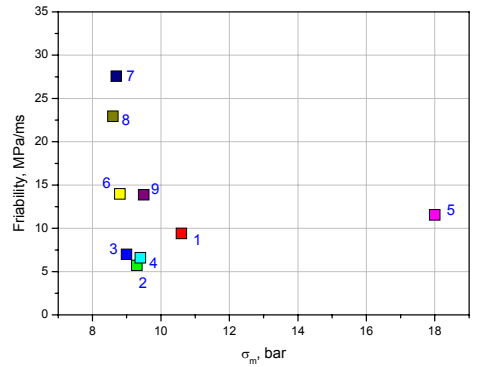


Fig. 5 Friability as a function of maximum stress

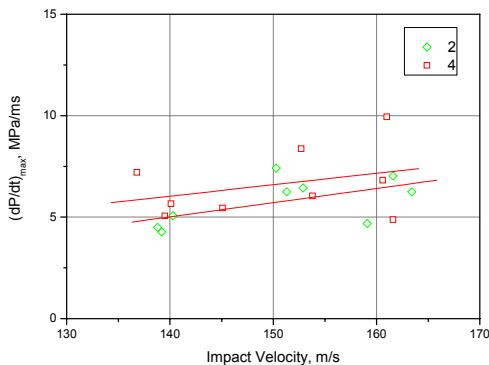


Fig. 3 $(dP/dt)_{max}$ vs. impact velocity

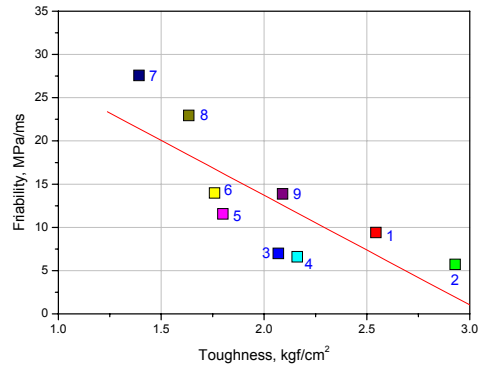


Fig. 6 Friability as a function of mechanical toughness

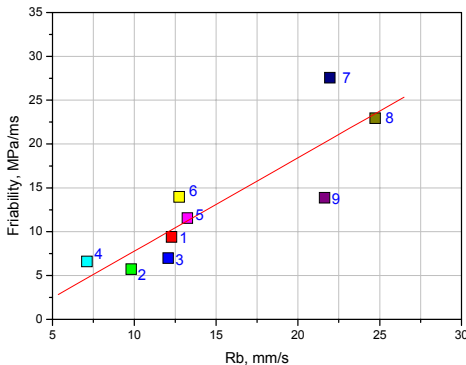


Fig. 7 Friability as a function of burning rate

를 잘 보여 주고 있다. 추진제의 인장특성이 충격 변형시 중요한 고려대상임을 알 수 있다. 5번 추진제 경우 약간의 예외적인 특성을 보여주는 데 이는 추진제에 응력이 인가되지 않는 추진기관용으로 제작된 추진제이기 때문에 인장강도는 보통의 연소관에 접촉되어 있는 추진제보다 훨씬 크나 변형율은 상대적으로 무척 낮기 때문이다. 그러나 추진제의 인장 응력-변형 곡선으로부터 추진제가 인장 변형할 때 흡수한 에너지인 인성을 계산하여 이 값과 파쇄성의 상관관계를 표시한 Fig. 6을 보면 추진제의 종류와 상관없이 인성이 증가할수록 파쇄성은 감소함을 알 수 있고 비교대상 추진제의 기계적 인성이 같을 경우 (추진제 4, 9) 연소속도가 낮을수록 파쇄성은 낮아지는 경향을 보인다.

Figure 7은 추진제 연소속도 함수로 파쇄성을 표시하였다. 이 경우는 추진제의 연소속도가 증가할수록 파쇄성은 증가하였고 같은 연소속도를 가지는 추진제일 경우(예, 추진제 7, 9)는 기계적 특성이 좋을수록 낮은 파쇄성을 나타내었다.

이상의 시험 결과로부터 고체 추진제의 파쇄성은 추진제의 연소속도에 비례하고 기계적 인성 반비례함을 알 수 있었고 같은 연소속도의 추진제는 기계적 인성이 클수록 파쇄성은 낮았다.

4. 결 론

HTPE 및 HTPB 추진제 9종에 대하여 파쇄성 시험을 실시하였다. 고체 추진제의 기본 특성인 기계적 성질과 연소속도와의 상관관계를 고찰하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

첫째, HTPE 및 HTPB 추진제의 파쇄성 값을 비교해 볼 때 HTPE 추진제가 충격 민감도가 낮았으며 그 원인은 연소속도효과를 배제할 경우 상대적으로 많은 바인더 함량에 있다고 판단된다.

둘째, 연소속도가 증가할수록 파쇄성은 증가하였으나 같은 연소속도라 할지라도 기계적 특성이 우수하면 충격 민감도는 감소하였다.

셋째, HTPB 추진제의 경우 비록 바인더 함량이 낮아 HTPE 추진제에 비해 다소 brittle 할 것으로 예상되지만 기계적 특성이 우수하고 낮은 연소속도를 가지는 추진제의 경우는 상대적으로 충격 민감도가 낮았다.

참 고 문 헌

1. Andrew C. Victor, "Insensitive munitions technology for tactical rocket motors, Tactical Missile Propulsion, AIAA, 1996
2. 1st Quarter 2003 NIMIC Newsletter
3. Herman H. Weyland and Marvin L. Jones, "Propellant development for insensitive munitions: IM testing," IMAD program, Contract # N68936-98-C-0189, NAWCWD, China Lake
4. Ingvar Wallace and Duane Blue, "Insensitive munitions aluminized propellant for tactical boosters, IMAD program, Contract # N60530-91-C-0254, NAWCWD, China Lake
5. Michael M. Swisdak, Jr. "Hazard class/division 1.6: articles containing extremely insensitive detonating substances (EIDS)," 1989, NAVAL SURFACE CENTER
6. 유지창, 김창기, 이경주 "Shot gun & RQ bomb 에 의한 추진제 폭연 특성," 제6권, 제

- 3호, 추진공학회지, 2002
7. Alain Davinas Ed, "Solid rocket propulsion technology," Pergamon Press, 1993
8. A.E. Oberth, Rubber Chem. and Technol., Vol 44, 1971, pp.152
9. A.E Oberth and R.S Bruenner, Trans. Soc. Rheol. vol 9, no 2, 1965, pp.165
10. "Fundamentals of Solid propellant combustion," K. K.Kuo and M. Summerfield Ed., vol 90 of "progress in Astronautics and Aeronautics." Published by AIAA, New York, 1984