

RDX 입도에 따른 NEPE계 추진제 특성 연구

장명욱^a · 김태규^a · 한해지^a · 윤재호^a · 손현일^{a,*}

A Study on the Property of NEPE System Propellant with Respect to the Size of RDX

Myungwook Jang^a · Taekyu Kim^a · Haeji Han^a · Jaeho Yun^a · Hyunil Son^{a,*}^aQuality Assurance Team, Hanwha Corporation Daejeon Plant, Korea^{*}Corresponding author. E-mail: victory@hanwha.com

ABSTRACT

The propellant tile and crack which account for the greatest proportion of solid rockets are profoundly affected by viscosity and mechanical properties of solid propellant. In this paper solid propellant with nitrate ester polyester(NEPE) system has been researched for the viscosity, mechanical properties and burning properties with size and mixing ratio of RDX. the viscosity of propellant was changed significantly depending on the size of RDX and mixing ratio, and mechanical properties of NEPE system propellant were also varied. Considering both lower viscosity and stable mechanical properties, the optimum size and mixing ratio of RDX can be identified as the main factors to the NEPE system propellant.

초 록

고체 추진기관의 불량 발생 요인 중 가장 큰 부분을 차지하고 있는 추진제 기공 및 크랙은 추진제의 점도와 물성이 큰 영향을 미친다. 본 연구는 혼합형 고체 추진제의 한 종류인 나이트레이트 에스터 폴리이서(Nitrate Ester Polyester; NEPE)계열의 추진제에서 주로 사용되는 RDX의 입도 및 혼합 함량에 따른 추진제 점도, 기계적 물성 및 연소특성 변화를 관찰하였다. RDX 입도와 혼합 함량에 따라 미경화 추진제의 경시적 점도가 크게 변화가 되었으며, 이에 따른 추진제 물성 또한 변화가 있었다. 추진제의 낮은 점도와 안정된 기계적 물성을 동시에 고려할 때, RDX의 입도 및 혼합 함량은 NEPE계 추진제의 주요 인자로 확인할 수 있다.

Key Words: RDX(트리메틸렌트리니트로아민), Solid Propellants(고체 추진제), Nitrate Ester Polyester System Propellant(NEPE계 추진제), viscosity(점도), Mechanical Property(기계적 물성)

Received 4 June 2017 / Revised 10 October 2017 / Accepted 15 October 2017

Copyright © The Korean Society of Propulsion Engineers

pISSN 1226-6027 / eISSN 2288-4548

[이 논문은 한국추진공학회 2017년도 춘계학술대회(2017. 5. 31-6. 2, 라마다프라자 제주호텔) 발표논문을 심사하여 수정·보완한 것임.]

1. 서 론

로켓용 고체 추진제로 사용되는 추진제로 크

계 바인더 종류에 따라 HTPB/AP(Hydroxyl Terminated Polybutadiene/Ammonium Perchlorate)계 추진제와 NEPE(Nitrate Ester Polyester)계 추진제로 구분된다. HTPB/AP계 추진제는 고체 추진기관 개발 초창기부터 현재까지 범용적으로 사용되고 있는 추진제로 산화제 역할을 하는 AP와 금속 연료로 사용되는 Al의 함량과 입도의 조절로 추진제의 특성을 다양하게 조정할 수 있다. 이에 반해 NEPE계 추진제는 HTPB/AP계 추진제의 단점을 보완하고자 개발된 추진제로 산화제로 고폭 화약류(RDX, HMX, HNIW 등)를 사용을 하며, 금속 연료를 배제하여 추진제 연소 시 발생하는 연기(Smoke)와 후연소(Afterburning) 반응으로 생성되는 플룸을 조절하여 HTPB/AP계 추진제에 비해 연기 등급을 낮출 수 있는 장점이 있다[1].

고체 추진제의 주요 특성으로는 비추력, 밀도, 연소 속도, 기계적 특성 및 제조 공정성으로 구분된다. 산화제의 함량이 정해지게 되면 산화제의 입도가 변경되도 추진제의 성능을 나타내는 비추력과 밀도는 변하지 않는다. 그러나 산화제의 입자 크기 및 비표면적에 의해 연소 속도, 기계적 특성인 인장 강도, 그리고 공정성을 나타내는 추진제의 점도는 변하게 된다[1-3].

추진제는 원료의 혼합 공정이 완료된 후에 원하는 형상의 그레인을 가지도록 추진기관의 연소관에 주조하게 된다. 주조된 추진제는 정해진 온도에서 일정 기간 동안 경화시킴으로써 고체 추진제로 제조된다. 추진제 그레인 내부에 기공이나 균열 등과 같은 결함이 발생하면 추진기관 연소 시 연소 면적의 급격한 변화로 과다 연소가 일어나 연소관 및 노즐 파열에 의한 폭발 사고가 발생할 수 있다[2, 4].

추진제 혼화가 끝난 후 주조 공정에서 원활하게 주조되려면 추진제의 점도가 낮을수록 유리하다[5]. 여기서 추진제의 고체 원료인 산화제의 평균 입도와 혼합 비율에 따라 추진제의 점도와 유동성이 결정이 된다. NEPE계 추진제는 제조 공정이 가능하면서 최대의 비추력과 밀도가 얻어지는 경우는 고폭 화약류의 무게 함량이 약 50% 이상이 되어야 성능을 발휘할 수 있다. 따

라서 산화제의 무게 함량을 고정시키면서 공정성을 개선하는 방향으로 산화제의 평균 입도와 혼합 비율을 조절하여 점도를 최대한 낮추는 것이 유리하다.

본 연구에서는 입자 크기가 다른 2종의 RDX를 사용하여 RDX의 무게 함량을 고정하고, RDX의 입도 및 혼합 비율을 변화시키면서 NEPE계 추진제를 제조하여 이에 따른 미경화 추진제의 점도 변화를 관찰하였으며, 경화 추진제의 기계적 물성 및 연소 특성 또한 비교 분석하였다.

2. 실 험

2.1 추진제 제조

추진제 원료의 기본 구성은 고체 입자인 산화제로 RDX 2종과 AP 2종 등 총 4종을 사용하였다. 평균 입도 25~60 μm 의 RDX와 평균 입도 6.2 μm 의 RDX를 총 함량을 44.0% 내에서 투입량을 조절하고, 평균 입도 60~80 μm AP를 18.0%, 5~7 μm AP를 7.0% 총 함량 25.0%를 사용하였다.(총 산화제 함량 : 69.0%) 연소 안정제 및 연소보조제를 2.8% 적용하였다. 나머지 PEG(Polyethylene Glycol) 프리폴리머에 가소제로 DEGDN(Diethyleneglycol Dinitrate) 및 BTTN(1,2,4-Butanetriol Trinitrate), 경화제로 N-100(Polyfunctional Aliphatic Isocyanate) 및 경화 촉매류를 포함하여 총 28.2% 사용하였다. 추진제의 경화 당량비는 1.15로 제조하였으며, 경화 시 열수축을 최소화하기 위해 50 $^{\circ}\text{C}$, 10일간 경화를 진행하였다.

추진제에 사용된 큰 입자의 RDX는 레이저 입도 분석(Beckman Coulter社 LS 13 320)을 통해 측정된 평균 입도 별 4종을 적용하였다(Table 1). 작은 입자의 RDX 또한 레이저 입도 분석을 통해 평균 입도를 측정하였으며, 동일한 평균 입도(7 μm)를 사용하였다.

큰 입자의 RDX와 작은 입자의 RDX의 함량을 조절하며 시험을 진행하였으며, RDX 2종을 제외한 나머지 원료들은 동일 함량 및 동일 Spec으

로 투입하였다.

동일한 원료 투입 순서에 맞춰 추진제 혼화를 진행하였으며, 1G/L 수직형 혼화기로 1회에 3.0 kg의 추진제를 제작하였으며, 미경화 추진제 및 경화 추진제의 물성 분석을 진행하였다.

2.2 추진제 점도 및 특성 분석

추진제의 점도는 혼화 공정이 완료된 직후에 50 °C 온도에서 Brookfield 점도계로 1시간 간격으로 경시적 변화를 측정하였다. 또한 경화가 완료된 추진제는 JANNAF 시편으로 제조하여 Universal Tensile Tester로 인장시험에 의해 얻어진 신율-응력 곡선을 해석하여 인장 강도를 획득하였다. 인장 시험 조건은 50 mm/min, 20 °C에서 시험하였다. 경화된 추진제의 경도는 일반 고무 및 고체 추진제의 경도 측정에 사용되고

있는 Shore A형 경도계로 20 °C에서 측정하였다. 추진제 연소 속도는 Strand Burner를 사용하여 1,500 psia에서 측정하였다.

3. 연구 결과 고찰

3.1 미경화 추진제 점도 특성

추진제의 점도는 고체 입자인 산화제의 입자별 혼합 함량과 밀접한 관계가 있다. 동일한 산화제 함량을 적용한 추진제에서 점도는 고체 입자의 비표면적과 비례하는 것을 확인할 수 있으며, 전체 비표면적이 낮을수록 점도가 낮아진다. 혼화 공정이 완료된 추진제는 원하는 형태로 주조 공정에 의해 연소관에 충전이 된다. 이때 충전은 진공상태에서 추진제를 주입시키며, 추진제의 점도가 낮을수록 진공 충전 시 추진제 내부의 기공을 파열시키는데 유리하여 추진제 그레이인 내부에 기공이나 균열과 같은 결함을 최대한 줄이기 위해 낮은 점도가 선호된다[6].

본 연구에서는 Table 2에 나타난 조성으로 추진제를 혼화하여 큰 입자와 작은 입자의 RDX 2종의 혼합 비율에 따라 나타나는 점도의 변화를 Fig. 1, 2에 도시하였다. 큰 입자의 RDX의 함량이 증가할수록, RDX의 평균 입도가 커질수록 점

Table 1. Particle sizes of RDX.

Test Sample	Average Size(μm)	Surface Area(cm^2/g)
1	27.2	6,021
2	35.1	3,575
3	45.3	1,707
4	60.2	962

* Small size RDX : 6.2 μm , 18,400 cm^2/g

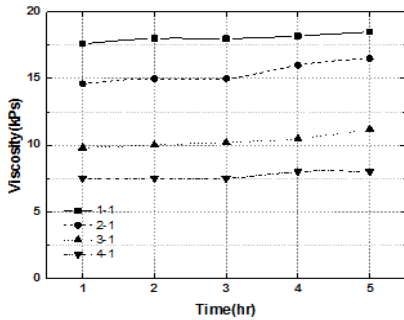
Table 2. Design of propellants with mixing contents of RDX.

Test Sample	1			2			3			4		
	1-1	1-2	1-3	2-1	2-2	2-3	3-1	3-2	3-3	4-1	4-2	4-3
RDX ¹	24.0	30.0	35.0	24.0	30.0	35.0	24.0	30.0	35.0	24.0	30.0	35.0
RDX ²	20.0	14.0	9.0	20.0	14.0	9.0	20.0	14.0	9.0	20.0	14.0	9.0
AP ¹	18.0											
AP ²	7.0											
BS*	1.3											
BA**	1.5											
Binder***	28.2											

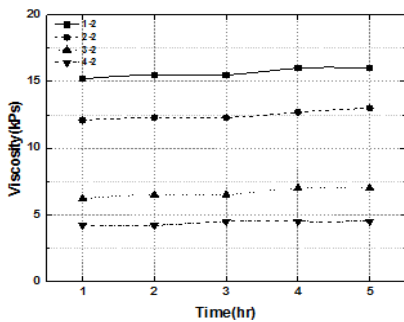
RDX¹ : Large size RDX, RDX² : Small size RDX, AP¹ : Average size 70 μm , AP² : Average size 6 μm

BS* : Burning Stabilizer, Zirconium Carbide(ZrC), BA** : Burning Adjuvant, Carbon Black

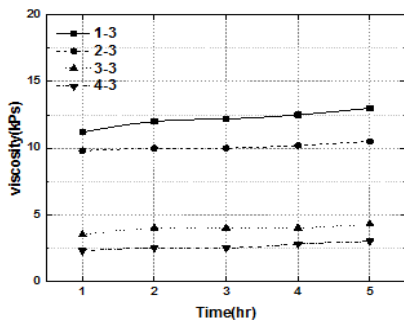
Binder*** : Prepolymer + Curative Agent + Plasticizer + Catalyst, etc.



(a) RDX¹ & RDX² mixing ratio = 24.0 : 20.0



(b) RDX¹ & RDX² mixing ratio = 30.0 : 14.0



(c) RDX¹ & RDX² mixing ratio = 35.0 : 9.0

Fig. 1 Viscosity of propellants with different mixing ratio of RDX.

도가 낮아지는 것을 확인할 수 있었다.

이러한 현상을 바탕으로 추진제 충전 공정 중 발생하는 기공 발생을 줄일 수 있으며, 이에 따른 추진기관 불량률을 감소시킬 것으로 기대할 수 있다.

3.2 경화 추진제의 기계적 물성

각 조건 별 혼화된 추진제를 경화한 후 추진

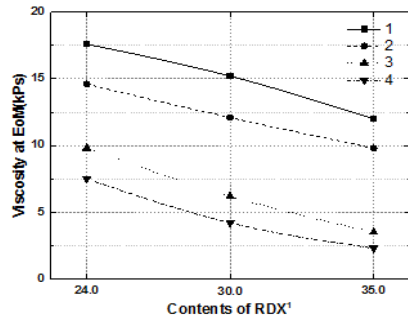


Fig. 2 Viscosity of propellants with different particle size of RDX.

Table 3. Mechanical properties of propellants.

Test Sample	Stress (bar)	Strain (%)	Density (g/cm ³)	Hardness
1-1	8.7	32.2	1.695	57
1-2	8.0	33.7	1.695	55
1-3	7.7	34.2	1.695	54
2-1	8.1	34.3	1.696	56
2-2	7.6	35.4	1.696	55
2-3	7.4	36.3	1.695	53
3-1	7.5	36.1	1.695	54
3-2	7.1	36.7	1.695	53
3-3	6.7	37.5	1.696	52
4-1	6.7	38.2	1.695	52
4-2	6.2	39.3	1.696	51
4-3	5.9	40.3	1.695	50

제의 기계적 물성을 측정하였으며, 결과는 Table 3. 및 Fig. 3, 4에 명기하였다.

RDX의 혼합 비율 및 입자 크기에 따라 경화 추진제의 기계적 물성이 차이나는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 현상은 RDX 입도 별 혼합 비율의 차이에 따른 충전율의 변화로 유추할 수 있다. 충전율이 높은 추진제는 인장강도가 증가하는 반면, 연신율은 저하되는데 입도의 크기에

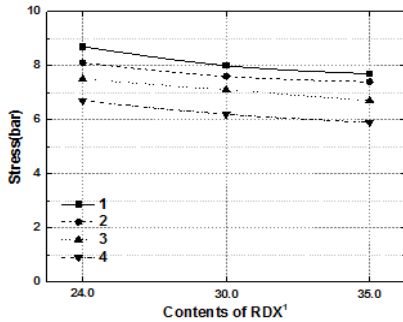


Fig. 3 Stress of propellants with different particle size of RDX.

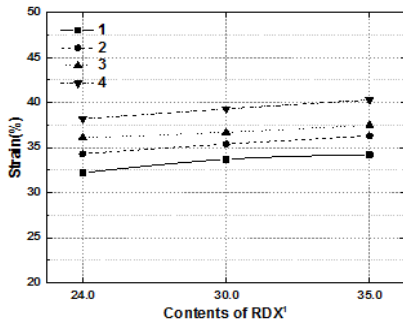


Fig. 4 Strain of propellants with different particle size of RDX.

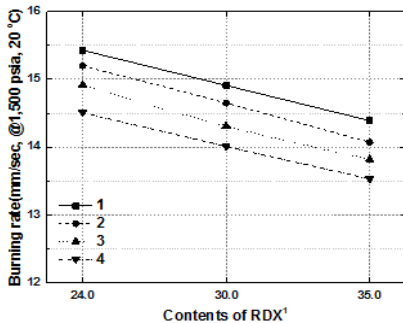


Fig. 5 Burning rate of propellants with different particle size of RDX. (@1,500 psia, 20 °C).

따른 증진율의 변화가 나타나는 것을 확인할 수 있다.

3.3 경화 추진제의 연소속도

각 조건 별 추진제의 연소 속도는 1,500 psia,

20 °C 조건에서 연소 속도를 측정하였으며, 결과는 Fig. 5에 명기하였다.

RDX의 입도가 커질수록 연소 속도가 늦어지는 경향을 나타내었고, RDX의 혼합 비율에 따라 연소속도가 변하는 경향을 나타내었다. 이는 RDX의 비표면적의 차이에 따라 발생하는 현상으로 고체 산화제의 RDX의 비표면적에 추진제 연소 속도는 비례하는 경향을 나타낸다. 하지만 고체 산화제의 함량이 동일한 비율로 투입이 되었기 때문에 추진제의 성능을 나타내는 비추력과 밀도는 변하지 않아 성능상의 변화는 없을 것으로 판단이 된다.

적용 결과 RDX 입도에 따라 추진제의 연소 속도는 평균 입도가 약 10.0 μm 가 작아질수록 약 0.3 mm/sec가 빨라지는 것으로 확인할 수 있으며, 동일 입도에서 RDX 함량이 약 5.0 wt%가 변화할수록 0.5 mm/sec가 변화하는 것을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

고체 추진기관의 불량 발생 요인 중 가장 큰 부분을 차지하고 있는 추진제 기공 및 크랙은 추진제의 점도와 물성이 큰 영향을 미친다. 고체 추진제의 점도가 낮을수록 추진기관 내부에 발생하는 기공을 저감시킬 수 있으며, 추진기관 불량률 개선에 큰 인자가 된다.

본 연구에서는 NEPE계 고체 추진제에서 4종의 큰 입자의 RDX와 평균 입도 6.2 μm 의 작은 입자의 RDX를 사용하여 큰 입자의 RDX의 입도를 변화 및 RDX의 혼합 비율을 달리하여 추진제의 점도, 기계적 물성 및 연소 특성을 확인하였다.

(1) 추진제의 점도는 RDX의 평균 입도가 클수록, 큰 입자의 RDX 비율이 커질수록 점도는 개선되는 것을 확인할 수 있었다. 이는 고체 산화제인 RDX의 비표면적에 비례하는 것을 확인할 수 있었으며, 이에 따른 추진제의 점도 조절 인자로 크게 작용하는 것으로 확인

할 수 있었다.

- (2) 추진제의 기계적 물성은 RDX의 평균 입도와 큰 입자의 RDX 비율에 따라 변화하는 것을 확인하였다. 이는 고체 추진제의 충진율이 기계적 물성 조절 인자로 크게 작용하는 것으로 확인할 수 있었다.
- (3) 추진제의 연소 속도는 RDX 입도, 혼합 비율에 따라 규칙적으로 변화하는 것을 확인하였으며, 이러한 결과는 추진제 점도의 변화와 마찬가지로 고체 산화제인 RDX의 비표면적이 연소 속도 조절 인자로 확인할 수 있다.

본 연구에서 수행된 결과를 바탕으로 NEPE계 추진제를 적용한 추진기관 제작 시 불량률 개선에 적용할 수 있으며, 추후 추진제 조성 설계 시 반영할 예정이다.

References

1. Obeth, A.E., *Principles of Solid Propellant Development*, 1st ed. CPIA Publication, Baltimore, MD, USA, Ch 5, 1987.
2. Sutton, G.P. and Biblarz, O., *Rocket Propulsion Elements*, 8th ed., John Wiley & Sons Inc., New York, N.Y., U.S.A., Ch 13, 2010.
3. Yim, Y.J., "A Study on the Burning Rate of Composite Solid Propellant," Ph. D. Thesis, Chemical Engineering, Yonsei University, Seoul, Korea, 1983.
4. Jain, et al., "Influence of Ammonium Perchlorate on Properties of Composite Propellant," *Defence Science Journal*, Vol. 59, No. 3, pp. 294-299, 2009.
5. Dörr, A., Sadiki, A. and Mehdizadeh, A., "A Discrete Model for the Apparent Viscosity of Polydisperse Suspensions Including Maximum Packing Fraction," *Journal of Rheology*, Vol. 57, No. 3, pp. 1-14, 2013.
6. Horine, C.L. and Madison, E.W., "Solid Propellant Processing Factors in Rocket Motor Design," NASA, Washington, D.C., U.S.A., SP-8057, 1971.