

RDX를 함유한 니트로셀룰로스 조성 총포 추진제의 열적 및 강내탄도 특성

권순길^{*1)} · 황준식¹⁾ · 박민규¹⁾ · 김명섭¹⁾

¹⁾ 국방과학연구소 제4기술연구본부

Thermal and Internal Ballistic Properties of Nitrocellulose Based Gun Propellant Including RDX

Soonkil Kwon^{*1)} · Junsik Hwang¹⁾ · Minkyu Park¹⁾ · Myeongseop Kim¹⁾

¹⁾ The 4th Research and Development Institute, Agency for Defense Development, Korea

(Received 20 February 2017 / Revised 19 June 2017 / Accepted 21 July 2017)

ABSTRACT

To develop a gun propellant composition with high insensitivity and high energy, we formulated a composition by adding RDX into the nitrocellulose(NC) based propellant. The flame temperature of the RDX added NC(RAN) propellant was higher than that of neat NC propellant. The kinetic muzzle energy of RAN propellant was close to that of JA2 propellant at room temperature(21 °C). The difference of kinetic muzzle energy of RAN propellant between high and room temperature settings as well as between a low and room temperature settings were less compared to those of JA2 propellant.

Key Words : Gun Propellant(총포추진제), Propellant Composition(추진제 조성), RDX, Nitrocellulose(니트로셀룰로스)

1. 서론

추진제란 적당한 조건에서 점화되면 매우 짧은 시간에 연소하여 다량의 가스를 방출시킬 수 있는 고에너지 화학 물질을 말한다. 총, 포에서 추진제를 사용한 탄두 추진 원리는 약실에서 점화기로부터 발생한 점화제 화염이 추진제를 점화하면 추진제가 급격히 연소하여 다량의 가스를 발생하고 가스의 압력에 의

하여 탄두가 포열내에서 가속된다¹⁾. 현재 주로 사용되고 있는 총포 추진제 조성은 니트로셀룰로스를 주 성분으로 하는 단기추진제, 니트로글리세린과 같은 에너지 가소제를 니트로셀룰로스에 첨가하여 에너지를 높인 복기추진제, 복기추진제 조성에 니트로구아니딘을 첨가하여 화염온도를 낮춘 삼기 추진제이다²⁾. 복기 추진제는 단기, 삼기 추진제에 비하여 에너지가 매우 높은 고에너지 조성으로 탄자의 포구속도를 높이는 데 매우 유용하여 운동에너지탄 등에 사용되나 화제에 취약하고, 탄자 충격에 민감하게 반응함으로 용도가 제한이 있다.

^{*} Corresponding author, E-mail: ksk@add.re.kr
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

또한 복기 추진제는 시간이 경과하면 니트로글리세린과 같은 에너지 가소제가 니트로셀룰로오스에서 이동(migration)되어 추진제 표면에 석출(exudation)되는 현상이 발생하여 내탄도(internal ballistics) 특성이 바뀌는 문제점이 있었다^[3,4]. 이러한 문제점을 해결하기 위한 다양한 시도가 있었는데 가장 적절한 방법은 니트로셀룰로오스를 주성분으로 하고 에너지 가소제인 니트로글리세린 대신 고에너지를 가진 니트라민(nitramine)계 산화제를 첨가하는 조성이다. 이러한 조성은 복기추진제 수준으로 에너지는 높아질 뿐만 아니라 니트로글리세린의 석출 문제가 없으므로 시간이 경과하여도 강내탄도 특성이 변화하지 않고 일정할 것으로 예상된다^[5].

추진제의 에너지를 증가시키기 위하여 고체 결정인 RDX 함량을 증가시키면 기계적 강도를 내는 역할을 하는 니트로셀룰로스 함량이 줄어들게 된다. 추진제의 기계적 강도가 감소하면 발사시 약실내에서 추진제가 파손되어 약실내의 압력이 급격히 증가시키고 이로 인해 발사 장치가 손상된다. 따라서 RDX함량을 30 wt% 이내로 설계하여 안전에 문제가 없게 하였다.

본 연구는 니트로셀룰로스(NC, nitrocellulose)를 주성분으로 하고 고체산화제인 RDX(cyclotrimethylene trinitramine)를 첨가하여 고에너지 총포 추진제 조성을 개발하기 위하여, 니트로셀룰로스에 RDX를 12~30 wt%를 첨가한 추진제 조성에서 추진제 제조 용이성, 추진제 열적특성 및 제조된 추진제의 강내탄도 특성을 살펴보고자 하였다.

2. 시 험

2.1 추진제 성능예측

총포 추진제 조성 설계에서 가장 중요한 요소는 추진제의 추력(impetus)과 연소가스의 화염온도이다. 추진제 추력은 단위질량당 일을 할 수 있는 능력을 의미하며 수식 (1)과 같이 추진제의 연소가스의 평균분자량에 반비례하고, 연소가스의 화염온도에 비례한다.

$$I = nRT_f = \frac{RT_f}{M_0} \quad (1)$$

여기서 n 은 1 g의 추진제가 생성하는 가스의 몰수, M_0 는 기체평균분자량(g/mol), R 은 기체상수(JK-1mol-1), T_f

는 화염온도를 나타낸다.

화염온도(T_f)는 단열조건에서 열역학적 표준상태에서 최대온도를 의미하며 수식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$T_f = \left(\frac{Q}{\sum C_v} \right) + 298 \quad (2)$$

여기서 Q 는 추진제 화학에너지(J/mol)이며 C_v 는 정적 비열을 의미한다. 화염온도는 포신 부식과 밀접한 관계가 있다. 일반적으로 화염온도가 10 % 상승하면 스틸강으로 된 포신의 부식은 2~3배 증가하는 것으로 알려져 있다. 그러나 대구경 직사탄등은 포구에너지 증대를 위하여 화염온도 3,500 K 수준의 추진제 조성을 사용하며 포신 내부에 크롬 등으로 코팅하여 추진제 화염에 의한 부식을 방지한다.

2.2 추진제 가공

본 연구에서는 평균입자 크기 4.08 μm 인 구형의 RDX를 사용하였다. 추진제를 제조하는 공정은 알코올에 담긴 니트로셀룰로스에 용매를 섞어 추진제를 가공한다. 용매의 역할은 니트로셀룰로스를 용해하고 부드럽게 하며 가공을 용이하게 하며 가공 후 용제 휘발시 니트로 셀룰로즈 조직을 치밀하게 하는 역할을 한다. Aceton, ethyl acetate, diethyl ether등과 같은 용매를 단독 혹은 혼합하여 사용할 수 있으며 무게비로 40~60 % 사용된다. 니트로셀룰로스도 질소함량 12.6 %를 단독으로 사용하든가 혹은 질소 함량 13.15 %인 니트로셀룰로스와 질소함량 11.3 %의 니트로셀룰로스를 적당량 혼합하여 질소함량 12.6 %로 맞추어도 된다. 용매를 적당량 sigma mixer에 넣고 니트로셀룰로스를 투입한다. 미리 준비한 RDX 입자를 혼합물을 넣고 함께 혼합시킨다. 용매를 증발 시켜 적당한 끈기를 가질 때 혼합을 중지하고 비닐 봉지에 넣어 추가 용매 증발을 막는다. 반죽물을 압출 금형을 장착한 금형에 넣고 RAM press를 사용하여 일정한 크기로 잘라 건조시킨다. 통산 상온에서 1일 건조 50 $^{\circ}\text{C}$ 정도에서 3일 정도 건조시킨다. 추진제 표면의 정전기를 방지하기 위해서는 흑연(graphite)을 코팅한다.

2.3 주사전자현미경(SEM)

가공된 추진제의 단면의 미세형상을 조사하기 위하여 주사전자현미경(SEM, Model : FEI Co, Quanta 650)을 사용하였다. 제조한 추진제를 액체질소에 넣어 냉

각한 후 파단하여 파단면을 고진공 조건에서 배율을 조정하며 단면 형상을 촬영하였다.

2.4 시차열분석기(DSC)

2~5 mg의 추진제 시료를 40 μ l의 알루미늄 팬에 넣어 시차열분석기(DSC, Model: Mettler DSC1)에 넣고 열분석을 수행하였다. 시료 주변 분위기는 대기(air) 분위기와 질소 분위기 2가지로 시험하였다. 대기 분위기는 시료 cell에 가스 공급을 하지 않은 상태로 유지하였으며, 질소 분위기는 시료 cell에 질소가스를 50 ml/min로 공급하였다. 가열 속도(heating rate)는 1 $^{\circ}$ C/min을 유지하였다.

2.5 강내탄도 특성 시험

40 mm 강선포가 강내탄도 특성 시험을 위해 사용되었다. 추진제를 충전 할 수 있는 약실 부피는 440 cm^3 이었으며 탄두의 무게는 520 g이었다. 포구속도는 도플러 효과를 이용하여 속도를 측정하는 MVR(S(Muzzle Velocity radar System))를 이용하여 포구속도를 산출하였다.

3. RAN 조성 추진제 특성

3.1 성능 예측

니트로셀룰로스를 주성분으로 하고 RDX를 첨가한 추진제 조성(RAN, RDX Added NC)의 주요 성분 및 열역학 해석 code인 BLAKE code를 사용하여 계산한 열역학 특성(Impetus, 화염온도) 값을 Table 1에 보였다. 보여준 수치는 추진제 충전 밀도 0.20 g/cc일 때의 계산값이다.

총포 추진제 설계 시 우선적으로 고려할 사항은 수식 (1)의 추력을 높고 수식 (2)의 화염온도가 낮은 추진제 조성물을 개발하는 것이다.

추력 및 화염온도는 니트로셀룰로스가 주성분인 단기조성인 K679 조성이 제일 낮고, 니트로셀룰로스화 니트로글리셀린이 주성분인 JA2 조성이 제일 높다. JA2 조성은 상업화된 추진제 조성 중 추력이 가장 높은 조성이다. 니트로셀룰로스가 주성분이며 RDX를 12%, 20%, 30%를 첨가한 조성인 RAN1, RAN2, RAN3 순으로, 즉 RDX함량이 높아질수록 추력 화염온도가 높아진다. RDX가 30% 함유된 RAN3 조성은 추력은 JA2와 유사하지만 화염온도는 훨씬 낮기 때문에 포신

의 부식을 줄여 포신 수명 연장에 유리하다.

수식 (1)에서 화염온도(T_f)는 추력에 비례하고 연소 생성물의 평균분자량(M_o)과 반비례한다. JA2조성과 추력이 유사한 RAN3 조성의 화염온도가 낮은 이유는 RDX가 첨가되면 Table 1에서 보이듯이 평균 분자량이 작은 연소 생성물이 형성되기 때문이다.

Table 1. Main components and thermodynamic properties of propellants

구 분	JA2	RAN1	RAN2	RAN3	K679
주요 성분	NC, NG	RDX (12 %), NC	RDX (20 %), NC	RDX (30 %), NC	NC (97.8 %)
Impetus (J/g)	1,144	1,076	1,103	1,138	1043
화염온도 (K)	3,419	3,128	3,199	3,287	3162
기체 평균분자량 (g/mole)	24.792	24.168	24.100	24.014	25.198

3.2 물리적 특성

RDX가 첨가된 조성의 혼합물을 RAM Press를 사용하여 압출시 금형을 통과한 압출물은 표면이 매끈하게 압출되었으며, 압출물의 단면은 기포발생, 관통구멍(perforation hole) 막힘 등과 같은 압출 이상 현상이 관측되지 않았다. Fig. 1에 7공 형상으로 제조된 RAN 3 추진제의 단면과 측면을 보였다.

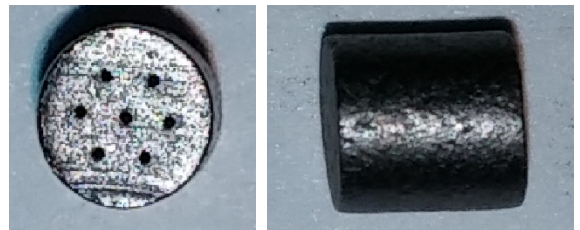


Fig. 1. Shape of an extruded RAN3 propellant grain

Fig. 2, Fig. 3, Fig. 4에 RAN1, RAN2, RAN3 조성으로 제조한 추진제의 파단면을 SEM(Scanning Electric Microscopy)으로 촬영한 모습이다. RDX입자는 니트로셀룰로스 모체(matrix)에 잘 분산되어 있다.

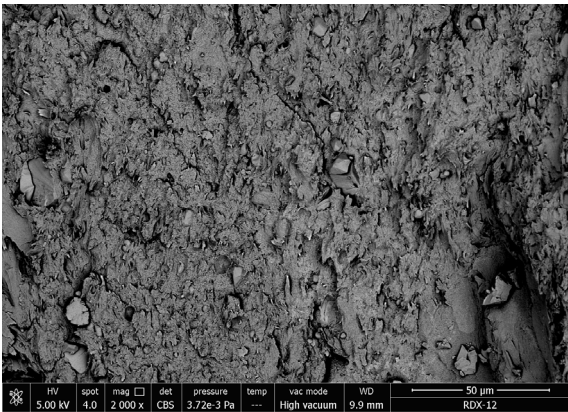


Fig. 2. SEM image of the cut surface of RAN1 propellant(RDX 12 %)

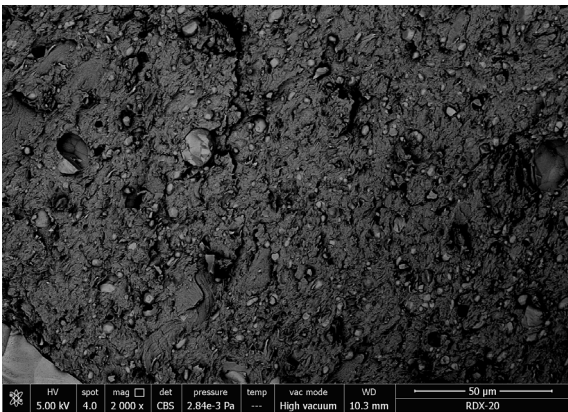


Fig. 3. SEM image of the cut surface of RAN2 propellant(RDX 20 %)

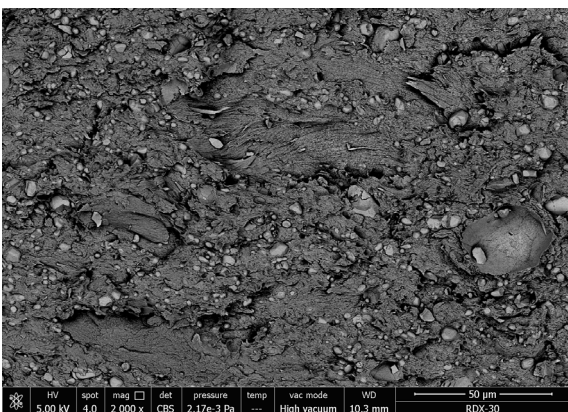


Fig. 4. SEM image of the cut surface of RAN3 propellant(RDX 30 %)

3.3 열적 특성

시료의 열분석은 추진제 시료를 넣은 DSC cell 내부 분위기를 대기(air) 분위기와 질소 분위기 2가지로 유지하며 시험하였다. 대기 분위기는 시료 cell에 가스 공급을 하지 않은 상태로 유지 하였으며, 질소 분위기는 시료 cell에 질소가스를 50 ml/min로 공급하였다.

Fig. 5는 DCS로 분석한 단기 조성인 K679 추진제의 열 특성 곡선이다. 발열 peak는 onset 온도,(외삽 분해 개시온도), slope 온도, peak 온도를 얻을 수 있다. 본 분석에서는 onset 온도만 사용하였고, 반응속도가 최고인 온도(slope 온도)에 도달하기 위한 개시온도의 의미가 있다. 실제로 분해 개시온도는 onset 온도 보다 약 20 °C 낮은 지점이다.

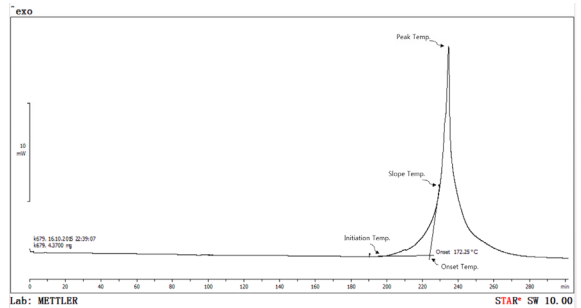


Fig. 5. DSC thermal analysis curve for K679 propellant

Fig. 6에 질소 분위기에서 측정된 추진제의 열 특성 곡선과 Fig. 7에 대기 분위기에서 측정된 열 특성 곡선을 보였다. Table 2에 질소 분위기와 대기 분위기에서 측정된 발열 peak의 onset 온도를 종합하였다.

질소분위기에서 측정된 onset 온도는 복기조성인 JA2 조성이 167.5 °C로 가장 낮았으며, 단기조성인 K679 조성이 172.2 °C이었으며, RDX 12 % 일 때(RAN1) onset 온도가 172.8 °C, RDX 20 %(RAN2) 일 때 172.6 °C, RDX 30 %(RAN3) 일 때 172.3 °C로 K679 조성과 유사하였다. 그러나 RDX가 첨가된 조성은 JA2 조성 보다 onset 온도가 높았다.

공기 분위기속에서 측정된 onset 온도는 질소 분위기에서 측정된 onset 온도보다 낮았다. 이는 추진제 조성이 산소부족 물질이기 때문에 시료 주변의 공기 속의 산소가 추진제 발화를 용이하게 하기 때문으로 생각된다. 공기 분위기속에서도 질소 분위기와 마찬가지로 RDX가 첨가된 조성은 단기조성인 K679 조성과

onset 온도가 큰 차이가 없었고 JA2 조성보다는 onset 온도가 높았다.

추진제 분해온도를 높이면 화재 발생시 추진제가 발화하는데 걸리는 시간이 길어져 인명 대피, 탄약 이동 등에 유리하게 된다.

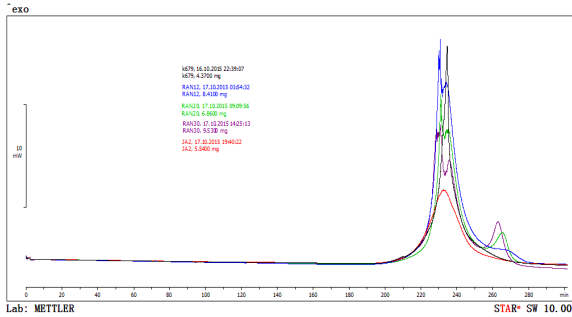


Fig. 6. DSC thermal analysis curves for different propellants in the nitrogen condition

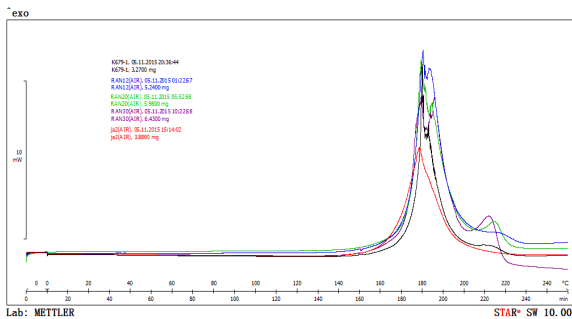


Fig. 7. DSC thermal analysis curves for different propellants in the ambient condition

Table 2. Onset temperatures of propellants in different gas conditions

구 분	JA2	RAN1	RAN2	RAN3	K679
Onset Temp. (N2 분위기)	167.5	172.8	172.6	172.3	172.2
Onset Temp. (Air분위기)	163.2	170.3	171.5	169.6	168.2

RDX는 고체 결정으로 녹는점(melting point)이 220 °C이며 녹는점에서 흡열 peak를 보이다가 온도가 조금 더 올라가면 RDX가 분해하며 발열 peak를 보이는

물질이다. 니트로셀룰로스에 RDX를 첨가한 RAN1,2,3 조성의 onset 온도가 니트로셀룰로스를 주성분으로 하는 단기조성인 K679 조성과 onset 온도가 유사한 것은 RDX의 녹는점이 니트로셀룰로스의 분해온도인 140 °C 보다 매우 높기 때문에 니트로셀룰로스의 열적 특성에 거의 영향을 미치지 않았기 때문으로 생각 된다.

3.4 강내탄도 특성

포구 운동에너지를 수식 (3)처럼 정의할 수 있다.

$$E = \frac{1}{2}mv^2 \tag{3}$$

여기서 m은 탄두 무게, v는 포구속도이다.

Table 3에 탄두무게 520 g의 탄약에 추진제 380 g을 충전하고 발사 시험하여 얻은 포구속도를 운동에너지로 환산한 값이다. RDX를 첨가한 조성은 RDX함량을 12 %, 20 %, 30로 증가 시키면 상온(21 °C), 고온(52 °C), 저온(-40 °C)에서 포구속도는 RDX 함량이 높은 조성에서 포구에너지는 증가하였다. RAN3 조성은 상온에서 포구에너지는 514 kJ, 고온에서 529 kJ, 저온에서 486 kJ로 고온과 상온의 포구에너지 차이는 15 kJ, 상온과 저온의 차이는 28 kJ이었다. JA2의 경우에는 상온에서 포구에너지는 523 kJ, 고온에서 553 kJ, 저온에서 481 kJ로 고온과 상온의 포구에너지 차이는 30 kJ, 상온과 저온의 차이는 41 kJ이었다. RAN3 조성의 경우에는 상온에서 운동에너지는 JA2 조성의 98 % 수준으로 유사하며, JA2 조성 추진제에 비하여 상온, 고온, 저온에서 포구 운동에너지 차이가 적어 넓은 온도 범위에서 균일한 성능을 발휘 할 수 있는 장점을 보였다.

Table 3. Muzzle kinetic energy of propellants in different temperatures

구 분	상온(21 °C)	고온(52 °C)	저온(-40 °C)
JA2	523 kJ	553 kJ	481 kJ
RAN1	422 kJ	453 kJ	386 kJ
RAN2	481 kJ	498 kJ	425 kJ
RAN3	514 kJ	529 kJ	486 kJ

Fig. 8에 RAN 3 조성의 상, 고, 저온에서 강내압력을 보였다. 강내압력은 저온, 상온, 고온 순으로 추진제 환경처리 온도가 증가할수록 높아지며, 추진제 충전 약량이 증가 할수록 높아지는 정상적인 강내탄도 특성을 보였다.

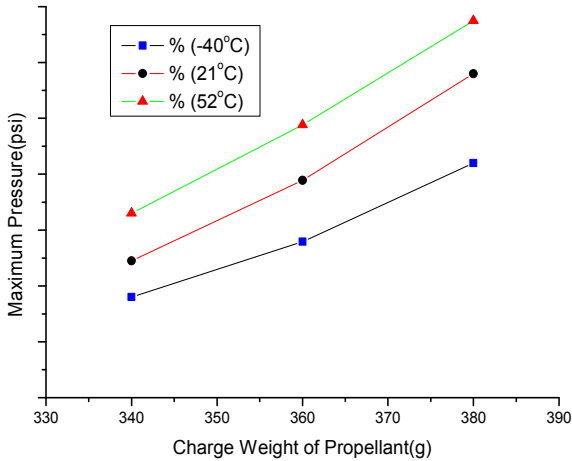


Fig. 8. Chamber pressure in different temperatures in terms of loading weight of RAN3 propellant

4. 결론

니트로셀룰로스를 주성분으로 하고 RDX 함량을 12 %, 20 %, 30 % 첨가한 조성의 총포 추진제의 열적 안정성은 단기조성(K679)과 유사하지만 복기 조성(JA2)

에 비해서는 뛰어났다. 상온, 고온, 저온에서 이상 연소 현상을 일으키지 않았고 RDX 첨가량을 증가 시킬수록 포구에너지는 증가하였다. 니트로셀룰로스 주성분에 RDX를 30 % 첨가한 조성은 복기조성인 JA2 조성에 비해 상온에서 포구에너지는 유사하나 상, 고, 저온에서 포구에너지 차이가 적은 장점을 보였다.

References

- [1] V. Yang, T. B. Brill, and W. Z. Ren, "Solid Propellant Chemistry, Combustion, and Motor Interior Ballistics," the American Institute of Aeronautics and Astronautics, pp. 267-285, 2000.
- [2] L. Stiefel, "Gun Propulsion Technology," the American Institute of Aeronautics and Astronautics, pp. 103-132, 1988.
- [3] J. P. Agrawal, H. Singh, Qualitative Assessment of Nitroglycerin Migration from Double-base and Composite Modified Double-base Rocket Propellant : Concepts and Methods of Prevention, Propellants Explos. Pyrotech, 18, 106-110, 1993.
- [4] A. Provas, Energetic Plasticizer Migration Studies, Energetic Materials, 21, 237-245, 2003.
- [5] S. K. Kwon, J. S. Hwang, J. S. Kim, M. K. Park, and B. S. Hong, "Internal Ballistics of Nitrocellulose Based RDX Propellant at 40 mm CTA Ammunition," Proceedings of the Korea Institute of Military Science and Technology Conference, 2016.