

RDX 입도에 따른 다기추진제의 연소 및 강내탄도 특성

손수정^{*,1)} · 이원민¹⁾ · 이우진¹⁾ · 김대건²⁾

¹⁾ 한화에어로스페이스(주) 여수사업장 개발팀

²⁾ 국방기술진흥연구소 유도화력기술팀

Characteristic Property of Combustion and Internal Ballistics of Triple-Based Propellant according to Particle Size of RDX

Soojung Son^{*,1)} · Wonmin Lee¹⁾ · Woojin Lee¹⁾ · Daegeon Kim²⁾

¹⁾ R&D Team, Yeosu-Plant, Hanwha Aerospace, South Korea

²⁾ Guided Weapon & Firepower system Team, Korea Research Institute for Defense Technology Planning and Advancement, South Korea

(Received 4 December 2023 / Revised 16 February 2024 / Accepted 20 March 2024)

Abstract

The important factors in the design of the gun propellant are impetus, flame temperature and pressure. In this paper, we considered a nitrocellulose based propellant composition that replaced sensitive NG(Nitroglycerin) with RDX(Cyclotrimethylenetrinitramine) and DEGDN(Diethylene glycol dinitrate) which high energy and low sensitivity. Particle size and content of RDX are the two main factors that affect the burning stability of RDX-based propellants. Among them, the characteristics of the propellant according to the particle size of RDX were confirmed. The relative combustion rate(R.Q., Relative Quickness) of the propellant changed according to the RDX particle size, and internal ballistics of properties of propellant were also varied. The particle size of RDX can be confirmed as a major factor in the combustion and internal ballistics characteristics of the propellant.

Key Words : Particle Size(입도), RDX(트리메틸렌트리니트로아민), Internal Ballistics(강내탄도)

1. 서론

화포 추진제는 점화제에 의해 점화/연소되면서 발생하는 다량의 연소가스에 의하여 포신 내에서 압력이 증가하여 탄자(Projectile)에 운동에너지를 부여함으로

써, 목표하는 포구속도로 탄자를 포구 밖으로 이탈시켜 원하는 지점까지 이동시키는 역할을 한다. 이러한 화포 추진제는 조성에 따라 단기 추진제, 복기 추진제, 다기 추진제로 구분된다. 단기 추진제(Single based Propellant)는 니트로셀룰로오스(NC, Nitrocellulose)를 주요 성분으로 제조되는 추진제로, 화포 추진제 개발 초창기부터 현재까지 범용적으로 사용되고 있다. 그리고 복기 추진제(Double based Propellant)는 단기 추

* Corresponding author, E-mail: sjson0505@hanwha.com
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

진제의 짧은 사거리 및 낮은 포구 속도의 증가를 위하여 고에너지 가스제인 니트로글리세린(NG, Nitro glycerine)을 첨가하여 개발되었고, 그 후 취급의 위험성을 가진 NG의 함량을 줄이고, 고체 산화제인 니트로구아니딘(NQ, Nitroguanidine)을 첨가한 다기추진제 (Triple based Propellant)가 개발되었다^[1].

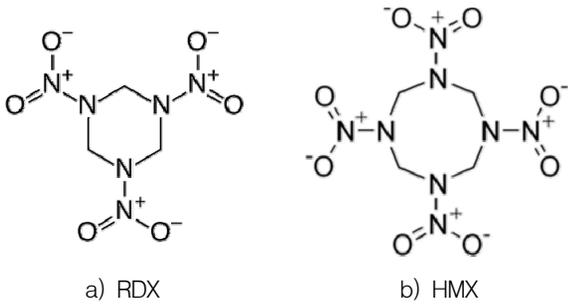


Fig. 1. RDX and HMX chemical structure

또한 근래에는 화포용 추진제에 고에너지물질인 RDX(Cyclotrimethylenetrinitramine,) 및 HMX(Cyclotetramethylene-tetranitramine)와 같은 니트라민(Nitramine)계 원료(Fig. 1)를 첨가하는 조성의 추진제가 지속적으로 검토가 진행중이다. 이는 단기/복기/다기 추진제 전 영역에서 개발이 진행되고 있는 것으로 알려져 있다^[2-5]. 화포용 추진제 분야에서 RDX의 사용은 추진제가 탄약의 성능에 영향을 미치는 요소인 추진제의 추력 (Impetus) 및 연소속도(Burning Rate), 그리고 연소가스의 양 등에 차이를 발생시킨다. RDX가 적용된 추진제는 적절한 화염온도를 유지하면서 분자량이 작은 가스를 대량 방출하여 추력이 높아지게 된다^[6]. 그리고 취급의 위험성 및 석출(Migration)로 인한 보관상의 문제를 가진 원료인 NG를 적용한 추진제와 비교를 하였을 때, RDX를 적용한 추진제는 화염온도가 상대적으로 낮고, 가스 발생량을 증가시킬 수 있는 장점을 갖고 있다^[7]. 추가적으로 NG는 Nitrate ester계 물질로 장기 보관 중 발생하는 산이나 수분 등에 의해 분해가 발생하고 이러한 반응은 자촉매 반응으로 발전하여 추진제 안정성에 문제가 되기도 한다^[8]. 이러한 문제를 지닌 NG를 배제하기 위하여 DEGDN(디에틸렌 글리콜 디니트레이트, Diethylene glycol dinitrate)와 TEGDN(트리에틸렌 글리콜 디니트레이트, Triethylene glycol dinitrate) 등의 에너지성 가스체가 대체물질로 고려되고 있고, 추력 등을 보상하기 위해 RDX 등의 니트라

민계 원료를 적용하였다. 아래 Table 1에 니트라민계 원료와 NG의 특성을 비교하였다.

Table 1. Properties of Nitramines and NG

구 분	NG	RDX	HMX
Molecular Weight	227.1	222.1	296.2
Oxygen Balance (%)	+3.5	-21.6	-21.6
Flame Temperature (K)	4,157	4,119	4107
Pressure (MPa)	471.52	597.52	595.59
Gas Production (cc/g)	0.860	0.988	0.902
Impact Sensitivity (J)	0.2	7.5	7.4

본 연구에서는 NC를 기반으로 한 추진제 조성에 고에너지 고체 산화제인 RDX와 저온 안전성이 우수한 에너지 가스제인 DEGDN을 첨가한 다기 추진제 조성을 기반으로 하였다. 동일한 추진제 조성에 입도가 다른 RDX 2종을 적용하여 추진제를 제조하고, 본 추진제의 연소특성 및 강내탄도 특성을 고찰하고자 하였다.

2. RDX가 첨가된 추진제 제조 및 분석

2.1 RDX 제조

RDX는 MIL규격에 의해 입도 조건이 규정되어있다. 국내에서는 RDX CL-1, CL-3, CL-5는 재결정화에 의해 제조하고 있고, 이보다 입도가 작은 RDX는 분쇄 (Grinding) 공정을 적용하여 제조된다. 국내에서 제조되고 있는 RDX의 입도별 크기를 아래 Table 2에 나타내었다.

Table 2. Average particle size of RDX grade

구 분	평균 입도
RDX CL-1	100 ~ 250 μm
RDX CL-3	250 ~ 500 μm
RDX CL-5	10 ~ 50 μm
RDX CL-G	3 ~ 8 μm
RDX CL-N	0.5 ~ 3 μm

본 연구에서는 RDX CL-5와 RDX CL-G를 추진제에 적용하여 성능을 비교하였다. 여기서 2종의 입도를 선정한 이유는 32 μm 이상 입도의 RDX를 적용한 추진제의 압력지수는 화포 추진제에 허용되는 범위를 초과하는 것으로 확인되었기 때문이다⁹⁾. 2종의 RDX는 Table 2에 나타난 입도 규격에 맞는 것을 적용하였고, 평균 입도는 아래 Table 3에 나타내었다. 본 입도 분석에 적용한 기기는 레이저 회절을 이용한 입도를 측정하는 기기인 FIRTSCH社의 Particle sizer 중 ANALYSETTE22 모델을 이용하여 분석하였다.

Table 3. Average particle size of applied RDX

구 분	평균 입도
RDX CL-5	38.5 μm
RDX CL-G	6.3 μm

또한 RDX의 형상은 AIS社의 SEM(주사전자현미경) 중 AIS 2300C 모델을 적용하여 분석을 진행하였다. SEM 분석은 금으로 코팅한 시료의 표면을 진공상태에서 전자를 이용하여 표면 상태를 확인하는 분석 방법으로, 입자의 형상은 Fig. 2에 나타내었다.

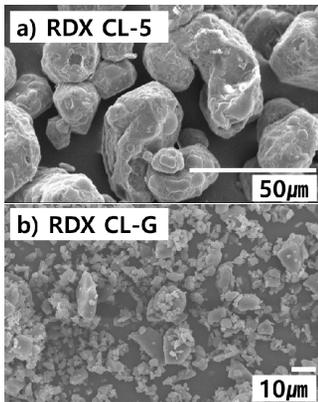


Fig. 2. RDX image

2.2 추진제 제조

본 연구에서 사용되는 추진제 원료의 주요 구성은 NC, DEGDN, NQ, RDX이고, 첨가제로 안정제 및 화염 감소제 등이 적용되었다.

추진제는 Fig. 3과 같은 일련의 공정을 통해 제조하였다. 시그마 믹서(Sigma mixer)에 원료들을 투입하는

데, 이때 용매를 투입하여 NC를 팽윤상태로 만들어서 고상의 원료들의 포집을 위한 가교역할을 하게 되고 이는 용매가 건조됨에 따라서 추진제를 치밀하게 만들게 된다. 시그마 믹서에서 균일하게 될 때까지 혼화를 하고 그 후 압출하기에 알맞은 상태가 될 때까지 용매를 휘발시킨다. 적절한 형상으로 추진제를 만들기 위하여 램 프레스(RAM Press, Fig. 4)를 사용한다. 원하는 형상의 금형을 프레스에 장착하고, 혼화약을 프레스에 투입한다. 그 후, 적당한 압력으로 압출한 코드를 절단기를 사용하여 일정한 크기로 자른 후, 건조공정을 거치게 된다. 건조가 완료된 후 추진제의 정전기 발생 및 흡습 방지를 위하여 흑연(Graphite)으로 외부를 코팅하는 작업을 진행한다. 본 제조 방법은 용제를 사용하는 추진제 제조방법으로 다양한 추진제 제조에 적용된다.

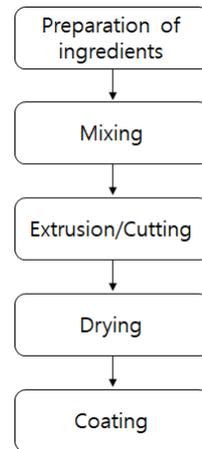


Fig. 3. Manufacturing process of propellant



Fig. 4. Hydraulic press

2.3 연소 특성 시험

본 연구에서 제조된 추진제의 실제 연소특성을 확인하기 위하여 밀폐용기시험(CBT, Closed Bomb Test)을 진행하였다. 이때 사용한 설비의 내적은 700 cc이고, 추진제의 점화를 위하여 소량의 점화제를 사용하였다. 아래 Fig. 5와 같이 정적으로 유지되고 있는 밀폐용기 내부에 추진제를 점화시켜 발생되는 압력을 시간에 따라 측정하게 된다. 여기서 시간에 따른 압력의 변화율을 구할 수 있고, 또한 추진제의 상대적인 연소속도(R.Q., Relative Quickness) 및 연소 패턴 등을 확인할 수 있다.

밀폐용기시험 시, 충전 밀도를 0.3 g/cc로 맞추어 210 g의 추진제를 사용하였다. 이때 사용한 추진제는 아래 Fig. 6에 나타난 형태를 적용하여 시험을 진행하였고, 점화제는 CBI(무연점화제, Clean Burning Ignitor) 5 g을 적용하였고, 시험은 아래 그림과 같이 진행하였다. 본 시험은 포발사시험에서 생성되는 압력과 유사한 압력이 발생하는 충전밀도를 선정하여 진행하였고, 동일한 시험을 3회 진행하였다.

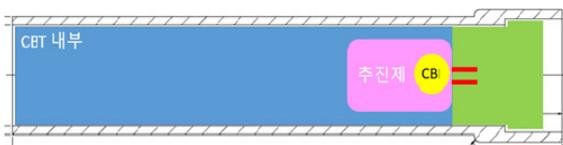


Fig. 5. CBT bomb and schematic of CBT test

2.4 강내탄도 특성 시험

강내탄도 특성 시험은 155 mm K9 포신(CN98)을 사용하여 포발사시험을 통하여 결과를 도출하게 된다. 이때, 포구속도는 도플러 효과를 이용하여 속도를 측정하는 MVR(S(Muzzle Velocity Radar System)을 적용하여 포구속도를 확인하였다. 강내압력은 동구센서

(Copper Crusher Gage)를 사용하여 측정하였고, 본 시험에서 적용한 탄두의 무게는 46 kg이다.

3. RDX가 첨가된 추진제 특성

3.1 추진제 조성에 따른 열역학적 특성

열역학 해석 코드인 BLAKE code를 사용하여 RDX를 포함한 추진제의 열역학 특성을 Table 4에 나타내었다. 이때 추진제의 충전 밀도는 0.3 g/cc를 기준으로 하였다.

비교 조성으로 선정한 KM30A1 조성은 NC, NG, NQ를 기반으로 한다. 이 조성은 155MM용 추진장약으로 현재 일반적으로 사용되는 K676/K677 장약에 적용 중인 조성으로, 추력은 1,067 J/g, 화염온도는 3,021 K이다. KM30A1 조성에서 취급상 위험성을 가진 NG를 배제하고, 추력은 유사하나 화염온도를 낮춰 포신의 마모를 감소시킬 수 있는 조성을 개발하였다. 개발된 조성은 RDX와 DEGDN을 적용한 조성으로, KM30A1 조성과 비교하였을 때, 추력은 약 7 J/g, 화염온도는 약 130 K가 낮은 것을 확인하였다. 본 열역학 해석 코드는 조성 및 충전 밀도에 대한 열역학 데이터를 획득할 수 있으나, 원료의 입도 및 형상 등에 따른 열역학 데이터는 확인할 수 없었으나, 조성이 동일하면 열역학 데이터가 변하지 않을 것으로 판단된다.

Table 4. Thermodynamic properties of propellants

구 분	KM30A1	R-type
조성	NC, NG, NQ	NC, DEGDN, RDX, NQ
추력 (J/g)	1,067	1,060
화염온도 (K)	3,021	2,886

3.2 추진제의 형상

R-type 조성을 적용하여 제조한 추진제의 형상은 Fig. 6에서 보듯이 19-hole의 Hexagonal형으로 관통구멍(Perforation hole)의 직경은 약 0.6 mm로 제조하였다. 제조된 추진제의 외형을 확인해본 결과, 표면 및 절단면에 기포 또는 흠집 등의 이상은 확인되지 않았고 19개의 관통구멍의 막힘 또한 관측되지 않았다.



Fig. 6. Shape of propellant

3.3 추진제 연소특성

아래 Table 5에는 상온(21 °C)에서 CBT로 측정된 추진제 조성의 연소특성을 나타내었다. 최대압력에 도달하는 시간은 RDX CL-5를 적용한 추진제인 R-type(5) 대비 RDX CL-G를 적용한 추진제인 R-type(G)가 약 3 msec 빨랐으나, 최대압력은 유사한 것을 확인하였다. 이 때, 2종의 추진제를 압출할 때 동일한 금형을 적용하여 작업을 진행하였기 때문에 치수(Dimension)는 거의 유사하다고 볼 수 있으므로, RDX 입도에 따라 연소속도가 다르다는 것을 확인하였다.

Table 5. CBT results of propellant

구 분	KM30A1	R-type(G)	R-type(5)
Closed bomb Volume (cc)	700	700	700
Loading density (g/cc)	0.3	0.3	0.3
Pmax. (psi) ¹⁾	59,973	59,607	59,782
Pmax-t (msec) ²⁾	44.80	34.75	37.40
Rise Time (msec) ³⁾	4.15	5.05	4.08

- 1) Pmax : 밀폐용기시험에서 최고압력을 나타냄
- 2) Pmax-t : 밀폐용기시험에서 최고압력일 때의 시간을 나타냄
- 3) Rise time : 최대압력의 25 %에서 75 %까지 상승하는데 걸리는 시간

밀폐용기시험 분석 및 추진제의 치수 분석 결과를 기초로 하여 연소속도에 대한 지수를 구할 수 있다. 일반적으로 추진제의 압력에 대한 연소속도식인 Saint-Robert and Vieille에 의해 아래 식 (1)와 같은 간단한 지수식이 제시되었다.

$$r = aP^n \tag{1}$$

여기서 r은 연소속도(Burning rate), a는 상수, n은 압력지수(Burning rate pressure exponent)이고, 상수a는 상온에서 추진제 온도(Ambient grain temperature)에 의해 변화한다. 압력지수 n은 원칙적으로 초기 입자 온도에 영향을 받지 않지만, 용기 압력(Chamber pressure)의 영향을 받게 되고, 압력지수와 연소속도는 비례관계로 압력지수 값이 높으면 연소속도 변화 또한 빠르게 상승한다^[10].

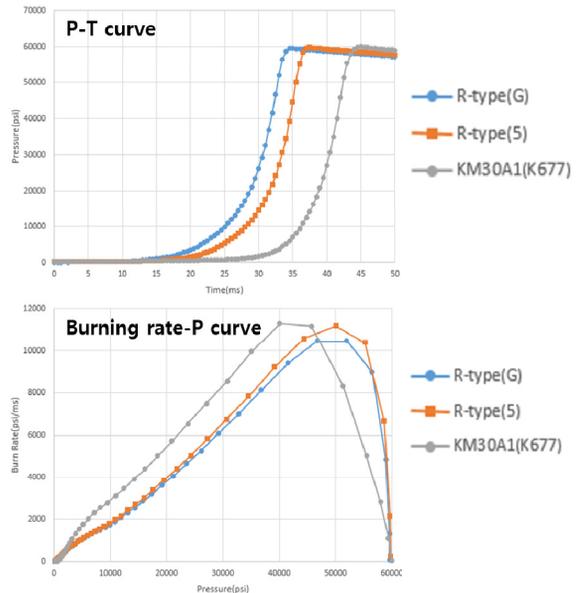


Fig. 7. P-T curve and burning rate curve of R-type (G/5) propellant

위 Fig. 7에 나타난 위쪽 그래프는 시간-압력 그래프고, 아래쪽 그래프는 압력에 대한 연소속도 그래프이다. 그래프는 3회 시험 결과 그래프의 형태가 유사하여 대표성을 갖는 1회의 시험 데이터만 나타내었다. 주황색(사각형)과 파란색(원형) 그래프는 R-type 조성 추진제의 RDX 입도에 따른 결과 그래프이고, 회색(원형) 그래프는 기준추진제로 사용한 KM30A1 조성 K677 추진제이다. K677 추진제는 조성과 형상이 모두 다르기 때문에 압력에 대한 연소속도 그래프에서 차이가 발생하였다. R-type 추진제의 시간에 따른 압력 그래프를 보면 R-type(G)가 R-type(5) 대비 압력 상승 시작이 빠르므로 이를 통하여 연소가 더 빨리 시작됨을 확인하였고, 최대압력에 도달하는 시간도 Table 5에 나타난 결과와 동일하게 그래프에서 확인할 수

있었다. 여기서 R-type(G)가 연소 시작 시간이 빨라 연소속도가 더 빠른 것으로 생각할 수 있으나, 최대압력의 25 %에서 75 %까지 압력이 상승하는 시간(Rise time)이 R-type(5)가 더 짧으므로, R-type(5)가 연소속도가 더 빠르다고 판단할 수 있다. 압력에 대한 연소속도 그래프를 보면 R-type(5)가 R-type(G) 대비 동일 압력에서 연소속도가 빠른 것을 확인할 수 있었다.

밀폐용기시험 결과 및 열역학 특성을 분석하여 추진체의 연소속도(Burnig Rate)를 계산할 수 있는 소프트웨어인 BRLCB 프로그램을 사용하여 각 조성의 a값과 n값을 확인하였고, 결과는 아래 Table 6에 나타내었다. RDX 입도에 대한 a와 n값은 a값은 입도가 커질수록 작아지고, n값은 이와 반대로 입도가 커질수록 커지는 비례관계를 확인하였으나, KM30A1 조성의 a와 n값과 비교하면, R-type 2종과는 상당한 차이가 나는 것을 확인하였다.

Table 6. BRLCB results of propellant

구 분		KM30A1	R-type(G)	R-type(5)
상온 (21 °C)	a	0.259	0.125	0.117
	n	0.747	0.866	0.886

3.4 강내탄도 특성

강내탄도 특성을 확인하기 위하여, 2종의 추진체를 소진탄피에 각각 충전하여 추진장약을 제조하였다. 이때, RDX를 제외한 모든 원료는 동일한 것을 사용하여 원료에 대한 차이를 배제하였다. 2종의 입도를 적용한 각 추진체의 밀도는 유사하여 원료인 RDX의 입도에 따른 추진체의 밀도 차이는 없으므로, 추진체의 밀도에 따른 연소특성은 차이가 없을 것으로 판단되었다.

탄자가 포구를 이탈하는 시점의 운동에너지는 운동 에너지를 구하는 간단한 수식인 수식 (2)와 같이 정의된다. 여기에서 m은 탄두의 무게로 단위는 kg이고, v는 포구속도로 단위는 km/sec, 포구 에너지 E는 MJ이다.

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

발사 시험에 앞서 위험성을 검토하고 성능을 예측하기 위하여 강내탄도 예측 프로그램인 FNGUN을 이용하여 포구에너지와 평균압력을 예측하였다. 이 프로그램을 구동하기 위해선 조성에 대한 열역학 특성 데

이터 및 BRLCB의 결과인 상수 a와 압력 지수 n값이 요구된다. 추진체 및 소진탄피 등의 조성 및 형상에 대한 값을 입력하고, 탄두 및 포신에 대한 정보 또한 필요한 정보로 입력을 해야한다. 그 후, 상온(21 °C)에서 포구 에너지 20 MJ을 가지는 약량 및 그 때 강내 압력 등을 확인하였고, 그 결과를 아래 Table 7에 나타내었다.

Table 7. Simulation results of muzzle energy and pressure

구 분	R-type(G)	R-type(5)
포구에너지 (MJ)	20.00	20.00
약량 (kg)	13.9	13.6
평균압력 (psi)	52,440	55,207

위 표에 M&S 결과를 보면, 동일한 포구에너지를 가질 때의 약량 및 평균압력을 확인하였다. R-type(G) 추진체는 20 MJ의 포구에너지를 갖기 위해 필요한 추진체 양은 13.9 kg으로 13.6 kg이 필요한 R-type(5) 대비 약 300 g이 더 필요한 것을 확인하였다. 그에 반해 평균압력은 R-type(G)는 52,440 psi로 R-type(5) 대비 약 3,000 psi가 낮은 것이라는 결과를 확인하였다. 약량과 평균 압력의 차이가 발생하는 이유는 RDX의 입도 차이로, 이는 RDX 입자 크기가 증가함에 따라 이론적으로 표면적은 감소하였지만, RDX 입자 크기가 NC 함유 직경보다 크기 때문에 추진체 내부에서 RDX 입자에 대한 접촉력은 감소하고 이로 인하여 계면의 간격이 증가하여 제조된 추진체의 구조 치밀도가 감소하게 된다. 그리고 연소율은 RDX 입자 크기가 증가함에 따라 증가하였다. 이것은 RDX의 입자 크기가 커지면서 연소 표면의 RDX 비표면적이 감소하여 고상에서 액상/기상으로 되는 과정의 열흡수율이 감소하기 때문이다^[11].

M&S 결과를 바탕으로 성능 확인을 위한 발사 시험을 진행하였고, 결과는 아래 표에 나타내었다. 본 발사 시험에 적용한 추진장약의 구성품 중 추진체는 위에서 M&S한 것으로 RDX의 입도만 다른 동일 조성 2종이고, 나머지 추진장약의 구성품은 동일한 것을 사용하여 제작하였다. 추진체는 M&S에서 검토한 상온에서 포구 에너지가 20 MJ의 값을 가지는 추진체 양을 적용하여 온도에 따른 발사 시험을 진행하였다. 이

때, 동일한 시료를 제작하여 3회이상 발사시험을 진행하였고, 탄속의 편차는 약 3 m/s 이내였다. 발사 시험 결과는 Table 8에 추진제에 적용한 RDX의 입도에 따른 포구에너지 및 평균압력을 나타내었다. 포발사 시험의 결과 예측한 결과보다 상온에서 포구에너지가 약 0.1 MJ 차이로 거의 유사하였으나, 평균압력은 M&S 결과 대비 2종의 추진제 모두 낮게 예측이 되었는데, R-type(G)는 약 1,000 psi, R-type(5)는 약 2,000 psi가 낮게 예측되었다. 발사시험 결과를 보면 온도가 증가할수록 포구에너지도 증가하는 경향을 확인할 수 있었다. 그리고 RDX의 입도 차이에 의해 고온보다는 저온에서 성능차이가 더 크게 나타났다. R-type(G)와 R-type(5)의 포구에너지가 상온과 고온에서는 거의 유사한 수준이었으나, 저온에서는 R-type(5)가 약 1 MJ 이 높은 것을 확인하였다. R-type(5)의 경우 온도에 따른 포구에너지의 차이가 작아 넓은 온도에서 균일성능을 구현할 수 있으리라 판단된다. 그리고 상온에서 포구에너지는 19.9 MJ로 2종의 추진제가 유사하나, RDX의 입도가 증가할수록 평균압력이 증가하는 경향을 보였다. 모든 온도조건에서 R-type(5)가 R-type(G) 대비 압력이 높으나, 온도가 낮아질수록 평균압력의 차이가 크게 발생하는 것을 확인하였다. 이는 고온에서 연소속도가 증가하여 입도차이에 의한 차이가 상쇄된 것으로 보인다. 저온-고온에서 압력의 차이 또한 R-type(G)가 약 2,000 psi가 더 크게 나타나므로 입도가 커질수록 온도가 증가함에 따라 압력의 상승 폭이 줄어드는 것을 확인하였다. 또한 강내압력은 온도가 증가할수록 높아지지만, 포발사 시험 시 포신의 허용압력 수치까지 상승하지 않았고, 정상적인 강내탄도 특성을 보여, 2종의 RDX 입도를 적용한 추진제의 연소 안정성을 확인하였다.

Table 8. Muzzle energy and pressure of propellant

구 분		R-type(G)	R-type(5)
포구 에너지	저온(-46 °C)	17.5 MJ	18.6 MJ
	상온(21 °C)	19.9 MJ	19.9 MJ
	고온(63 °C)	21.1 MJ	21.2 MJ
평균 압력 (psi)	저온(-46 °C)	47,461	50,485
	상온(21 °C)	51,267	53,667
	고온(63 °C)	59,581	60,585

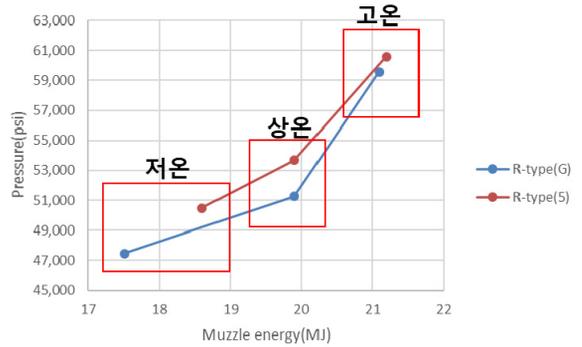


Fig. 8. P vs muzzle energy curve

발사시험 결과를 바탕으로 각 추진제의 온도에 대한 압력과 포구에너지의 그래프를 Fig. 8에 나타내었다. 그래프에서 나타났듯이 RDX 입도에 따른 그래프의 기울기가 유사한 것을 확인할 수 있었다. 이는 동일한 조성을 적용하여 그래프의 형상이 유사하므로 연소패턴이 유사한 것을 확인하였고, 그래프의 기울기 등이 다르므로 RDX 입도에 따른 차이도 확인하였다. 상온을 기준으로 고온으로 갈수록 입도가 작은 RDX를 적용한 추진제인 R-type(G)의 포구속도에 대한 압력변화가 더 크고, 온도가 낮아질수록 R-type(5)의 압력변화가 더 큰 것을 확인하였다. 그래프 기울기가 가파른 것은 추진제의 연소가 빠르게 일어나 가스 발생량이 많아지고 이로 인하여 압력이 상승한 결과라고 판단된다.

4. 결론

화포에 적용되는 다기추진제 조성에 입도가 다른 2종의 RDX를 적용하여 추진제를 제작하였다. 취급의 위험이 있는 NG를 대신하여 DEGDN을 추진제에 적용하고, RDX를 추진제 조성에 포함시키면 연소 특성을 변화시킬 수 있다. 그리고 기존에 사용되고 있는 KM30A1 조성 대비 추력은 유사하나, 화염온도가 약 130 K가 낮은 조성을 기준으로 하여 추진제를 제작하였다. 이 때 입도가 6.3 μm인 RDX CL-G와 38.5 μm인 RDX CL-5를 적용하여 추진제를 제작하였고, 제작 공정상에서는 큰 차이점 없이 유사한 수준에서 작업이 가능하였다.

강내탄도 예측 프로그램 및 발사시험 결과, 상온에서 동일한 포구에너지를 가지는 약량에서 압력이

R-type(5)가 R-type(G) 대비 높은 압력대를 갖는 것을 확인하였다. 이는 저온이나 고온에서도 동일한 경향을 나타내었고, 상온에서 동일 성능을 가질 때, R-type(5)가 저온 및 고온에서 탄속 및 압력이 더 높은 결과를 확인하였다. 동일 조성에서 적용한 RDX의 입도가 커질수록 포구에너지 및 평균압력이 증가하는 경향을 보였다. 이는 RDX의 입도가 커짐에 따라 비표면적 즉 연소 면적은 줄어들었으나, RDX의 연소 단계에 관련있는 용융과 증발 과정의 열흡수율이 감소하기 때문에 연소율이 증가하게 되므로 이러한 결과가 발생하게 된 것이라고 판단된다.

주어진 공간에 추진제가 적용되어야 하므로 추진제의 약량이 적을수록 유리하고, 동일한 포구에너지를 가지는 경우에는 압력이 작을수록 장약의 제작 및 운용적 측면에서 유리하다. 이에 따라 R-type(5)가 약량에서는 약 300 g 정도 유리하나, 상온 및 고온 압력에서 약 1,000~2,000 psi가 높아 신규 추진제의 설계 시 본 연구의 결과를 토대로 RDX 선정을 검토할 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구에서 2종의 다른 입도의 RDX를 적용한 NC 기반의 다기 추진제 조성에 대하여 강내탄도 프로그램 및 포발사 시험 결과 이상연소 반응 등의 문제는 나타나지 않아, 강내탄도 특성의 안정성을 확인하였다. 본 결과를 통하여 RDX 입도에 대한 추진제 적용 가능성 및 성능에 대한 예측하기 위한 데이터로 적용이 가능할 것으로 사료된다.

후 기

이 논문은 2023년도 정부(방위사업청)의 재원으로 국방기술진흥연구소의 지원을 받아 수행된 연구임(No. KRIT-CT-22-003, 둔감화 단위장약 기술)

This work was supported by Korea Research Institute for defense Technology planning and advancement(KRIT) grant funded by Korea government(DAPA(Defense Acquisition Program Administration))(No. KRIT-CT-22-003, Insensitive Ammunition)

References

- [1] L. Stiefel, "Gun Propulsion Technology," the American Institute of Aeronautics and Astronautics, pp. 103-132, 1988.
- [2] R. Damse, "Nitramine-based high energy propellant compositions for tank guns," Defence Sci. J., pp. 75-81, 2000.
- [3] R. R. Sanghavi, "HMX based enhanced energy LOVA gun propellant," J. Hazard mater, pp. 532-534, 2007.
- [4] Soonkil. Kwon, "Processibility and Physical Properties of RDX Based Gun Propellant," KIMST Annual Conference Proceedings, pp. 691-694, 2003.
- [5] D. Devynck, "The Effect of Nature and Amount of the Plasticizer on the Burn Rate of Nitramin Propellants," 32nd JANNAF Combustion Meeting, CPIA, 1995.
- [6] H. Krier, "Interior Ballistics of Guns," AIAA, p. 312, 1979.
- [7] "Gun Propellants," Cranfield University, 1996.
- [8] R. Meyer, "Explosives," 6th ed., Wiley-VCH & Co., 2007.
- [9] A. G. S. Pillai, "Studies on RDX Particle Size in LOVA Gun Propellant Formulations," Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 26, pp. 226-228, 2001.
- [10] Soonkil Kwon, "Thermal and Internal Ballistic Properties of Nitrocellulose Based Gun Propellant Including RDX," Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology, Vol. 20, No. 4, pp. 514-519, 2017.
- [11] Bin-bin Wang, "Effects of particle size and content of RDX on burning stability of RDX based propellants," Defence Technology, 18, pp. 1247-1256, 2022.