

금속선을 삽입한 니트라민계 추진제의 연소특성

유지창*

Burning Characteristics of Nitramine Propellant Embedded with Metal Wires

Yoo, Ji chang*

Abstract

Burning rate of the matrix propellant(r_{sb}) and burning rate along the metal wire(r_w) were measured and analyzed for the HTPB/AP/Al propellant embedded with Ag wire($\Phi 0.15\text{mm}$) according to weight % of RDX(0~20%). Variation of burning rate increment ratio(r_w/r_{sb}) and pressure exponent(n) was studied for the nitramine propellant having 10% RDX embedded with three kinds of metal(Ag, Cu, and Ni-Cr) of which diameter range is between 0.1~0.6mm. Maximum burning rate increment ratio of the nitramine propellant embedded with Ag wire($\Phi 0.1\text{mm}$) was 5.94 at 20 °C, 1000 psia, 16.4% faster than that of HTPB/AP propellant, it is because that autoignition temperature of the nitramine propellant was higher than that of HTPB/AP propellant

Standard deviation of absolute $(r_{wc}-r_{we})/r_{we}$ calculated by using new empiracal equation composed of four dimensionless groups, is 6.11% less than that calculated by using original empirical equation composed of three dimensionless group. The new empiracal equation is derived from Buckingham pi theorem using the parameters such as thermal diffusivity, melting temperature, wire diameter, propellant sample diameter, frame temperature, autoignition temperature and matrix burning rate which influence on r_w .

초 록

본 연구에서는 RDX가 함유된 HTPB/AP/Al 추진제내에 Ag선을 단선 삽입하여 RDX 함량(0~20%)에 따른 추진제 연소속도와 Ag선 0.15mm를 삽입하였을 때 금속선과 인접한 추진제의 연소속도(r_w)의 변화를 살펴보고, RDX 10%가 함유된 추진제를 대상으로 금속선 3종(Ag, Cu, Ni-Cr선)을 직경(0.1~0.6mm)별로 r_w/r_{sb} 와 압력지수(n)의 변화를 고찰하였다. 금속선을 삽입한 RDX를 함유한 니트라민계 추진제의 경우 직경이 0.1 mm인 Ag선을 삽입하였을 때 연소속도 증가비가 압력 1000psia에서 5.94배로 RDX를 함유하지 않은 HTPB/AP추진제의 경우에 비해 약 16.4% 크게 나타났으며, 그 이유는 니트라민계 추진제의 자연발화온도가 상대적으로 낮기 때문으로 판단된다. 또한 금속선의 물리적 성질인 열확산 계수, 녹는점, 직경, 추진제의 열역학 특성치인 연소기체 불꽃온도, 추진제의 자연발화온도와 연소속도가 r_w 에 영향을 주는 인자로 고려하여 무차원해석에 의한 실험식을 도출한 결과 $(r_{wc}-r_{we})/r_{we}$ 절대값의 표준편차는 6.11%로 기존의 3개의 무차원군을 사용한 경우의 표준편차보다 17.5% 작아짐을 알 수 있었다.

* 국방과학연구소(Agency for Defence Development)

1. 서 론

추진제의 연소 속도를 증대시키는 방법으로는 산화제의 입자 크기나 혼합비를 조절하거나, 연소 촉매, 금속 연료 등을 추진제내에 첨가시키는 방법이 있지만, 이와 같이 로켓추진제 조성을 변화시켜서 연소 속도를 빠르게 하는 방법에는 여러 면에서 한계가 있으므로 일정한 연소 속도에서 추력 기체의 생성량을 증대시키기 위해서는 연소 면적을 크게 하는 방법이 요구된다^{1),6)}.

그레인의 연소 면적을 증대시키기 위해서는 여러 형상의 내면 연소형 그레인(perforated grain)을 사용하는 방법이 있으나, 부피 충전율이 작은 단점이 있다. 따라서 단면 연소형 그레인의 장점인 높은 부피 충전율을 유지하면서 연소 면적을 증대시켜 추력 기체의 생성량을 증대시키는 가장 효율적인 방법으로는 금속선, 필라멘트, strip, rod 등의 열전도체를 단면 연소 그레인에 삽입시키는 방법이 있다¹¹⁾. 이러한 열전도체를 추진제에 삽입시키는 연구는 1950년대 Rumbel¹¹⁾에 의해 polyvinylchloride (PVC)와 ammonium perchlorate(AP)가 주성분인 혼합형 추진제를 대상으로 처음 시도되었으며, 그 후 Kubota¹²⁾, Caveny¹⁴⁾, Gossant¹³⁾, Hsing¹⁵⁾과 King¹⁶⁾ 등에 의해 복기형추진제와 혼합형추진제를 대상으로 금속선의 종류, 직경, 형태, 수 및 기하학적 배열 등에 따른 실험적, 이론적 연구가 이루어져 왔다.

본 연구에서는 RDX가 함유된 HTPB/AP/Al 추진제내에 Ag선을 단선 삽입하여 RDX 함량(0~20%)에 따른 금속선과 인접한 추진제의 연소속도 증가비(r_w/r_{sb})의 변화를 살펴보고, RDX 10%가 함유된 추진제를 대상으로 금속선 3종(Ag, Cu, Ni-Cr선)을 직경(0.15~0.6mm)별로 r_w/r_{sb} 와 압력지수(n)의 변화를 고찰하였다. 또한 금속선의 물리적 성질인 열화산 계수, 녹는점, 직경, 추진제의 열역학 특성치인 연소기체 불꽃 온도, 추진제의 자연발화온도와 연소속도가 r_w 에 영향을 주는 인자로 고려하여 무차원해석에 의

한 실험식을 도출하였다^{15,7)}.

2. 이론적 배경

일정 온도에서 압력 변화에 따른 추진제의 연소 속도식인 Viellie의 경험식은 식 (1)과 같으며, 로켓 모터의 작동 압력 범위에서는 실험치와 잘 일치하는 것으로 알려져 있다.

$$r_{sb} = aP^n \quad (1)$$

여기서 r_{sb} 는 연소 속도, a 는 상수, P 는 연소 압력, n 은 압력 지수이다.

추진제의 성분을 변화시키지 않고 연소 기체의 생성량을 증가시키는 방법으로는 추진제내에 길이 방향으로 연소공간을 만들어 주는 방법, 튜브를 삽입시키는 방법, 광섬유를 삽입시키는 방법과 열전도체를 삽입시키는 방법 등이 있다. 이 중 열전도체로 금속선을 추진제 그레인과 길이 방향으로 배열시키는 방법이 가장 효율적이며, 금속선과 인접한 추진제의 연소 속도와 압력 지수는 금속선의 종류 및 직경의 함수로 알려져 있다¹¹⁾.

금속선을 삽입한 고체 추진제의 연소 형태는 Fig. 1과 같으며, 추진제가 연소하면서 생성된 고온의 연소 기체로부터 금속선으로 전달된 열은 다시 추진제에 삽입되어 있는 금속선의 길이 방향으로 전달되고, 최종적으로 미연소 로켓 연소에 삽입되어 있는 금속선의 열은 금속선과 인접한 추진제로 전달되면서 추진제의 온도를 상승시킨다. 금속선에 인접된 추진제의 온도가 상승하여 자연 발화 온도에 도달하게 되면 추진제는 발화연소하게 된다^{6,7)}. 이와 같이 금속선에 인접한 추진제는 금속선으로부터의 열전달에 의해 빠른 속도로 연소가 진행되고 금속선과 인접해 있지 않은 추진제는 연소면과 수직인 방향으로 본래의 연소 속도로 연소가 진행됨에 따라 Fig. 1에서 볼 수 있듯이 원뿔 형상의 연소면을 이루게 된다. 이와 같이 연소 면적이 원뿔 모양으로 증가하고, 연소 기체의 질량 유속을 증대

시키는 역할을 한다.

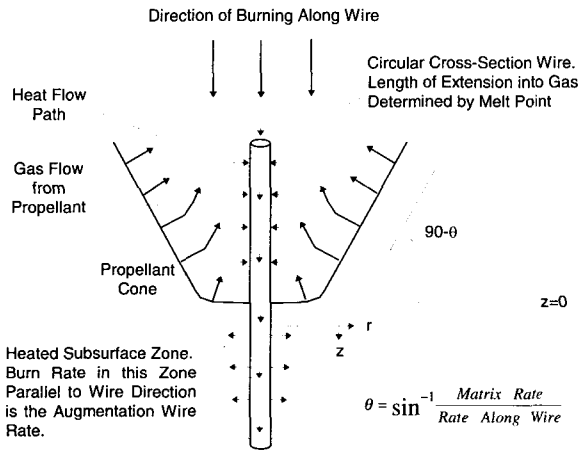


Fig. 1 Schematic Diagram of Solid Rocket Fuel Combustion Embedded with Metal Wire.

로켓 모터 설계에 있어서 추진제 그레인의 기체 발생 속도를 아는 것이 가장 중요한 인자이다. 일반적으로 혼합형 연료의 연소 속도는 Viellie의 경험식에 잘 일치한다. 금속선이 삽입된 추진제의 연소 속도(r_w)는 금속선이 삽입되지 않은 본래 추진제의 연소 속도, 금속선의 열확산 계수, 금속선의 녹는 점, 연소 기체 불꽃 온도, 금속선의 직경과 그레인 직경의 함수이며 이 중 금속선의 열확산 계수에 가장 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 따라서 r_w 는 식 (2)와 같은 함수로 표현될 수 있다. 그러나 식 (2)에 나타난 인자들 외에 금속선의 용해열과 추진제의 자연 발화 온도 등이 r_w 에 영향을 줄 수 있는 인자로 작용할 수 있다. 금속선이 추진제 연소 기체의 불꽃에 의해 녹을 때 금속선의 용해열에 의해 금속선의 열이 일부 손실될 수가 있다. 또한 자연 발화 온도는 추진제의 온도가 상승함에 따라 추진제의 성분이 분해되면서 점화 연소되기 시작하는 최저 온도를 의미하며, 자연 발화 온도가 낮으면 금속선으로부터 전달된 열에 의해 금속선에 인접한 추진제의 온도가 상승

할 때 추진제가 쉽게 분해되므로 r_w 는 증가할 수 있다. 식 (2)을 Buckingham pi 정리를 적용하여 무차원 해석을 하면 r_w/r_{sb} 는 식 (3)과 같은 3개의 무차원군을 갖는 식으로 나타내어진다.

$$r_w = F(r_{sb}, r_w, T_m, T_f, d_w, d_p) \quad (2)$$

$$\frac{r_w}{r_{sb}} = a \left(\frac{\alpha_w}{d_p r_{sb}} \right)^b \left(\frac{d_w}{d_p} \right)^c \left(\frac{T_m}{T_f} \right)^d \quad (3)$$

여기서 a, b, c, d 는 실험 상수이다. r_{sb} 는 금속선이 삽입되지 않은 본래 추진제의 연소 속도, T_m 은 금속선의 녹는 점, T_f 는 추진제 연소 기체의 불꽃 온도이고 d_p 는 추진제 시편 직경이다. 첫 번째 무차원군인 $r_w/d_p r_{sb}$ 는 비정상 상태 열전도에 사용되는 Fourier 수와 유사한 물리적 의미를 갖는다.

Hsing^[5]은 식 (3)의 무차원군 중 우변의 3번째 온도항의 영향을 무시하고 우변의 첫 번째와 두 번째 항만을 고려하여 r_w 를 계산하였다. 식 (3)은 자연 발화 온도를 고려하지 않았으므로, 자연 발화 온도와 연소 기체 불꽃 온도로 구성된 무차원군을 식 (3)에 추가하면 r_w/r_{sb} 는 식 (4)와 같이 4개의 무차원군을 갖는 식으로 나타낼 수 있다^[7].

$$\frac{r_w}{r_{sb}} = a \left(\frac{\alpha_w}{d_p r_{sb}} \right)^b \left(\frac{d_w}{d_p} \right)^c \left(\frac{T_m}{T_f} \right)^d \left(\frac{T_{ig}}{T_f} \right)^e \quad (4)$$

여기서 a, b, c, d, e 는 상수이고 T_{ig} 는 추진제의 자연 발화 온도이다.

3. 실험 장치 및 방법

금속선에 인접한 추진제의 연소 속도를 측정하기 위해 추진제 시편내에 금속선을 삽입하였다. 추진제는 RDX가 함유된 혼합형 추진제를 사용하였으며, 금속선을 삽입하기 위하여 미경화된 추진제를 사용하였다. 미경화 추진제내에

금속선을 길이 방향으로 시편 중심부에 일정하게 삽입하기 위하여 재질이 cellulose acetate butyrate(CAB)로 제작된 직경 8 mm, 길이가 21.6 mm 스트로우(straw)를 사용하였다. 이렇게 만들어진 시편은 fluoroscope를 사용하여 기포와 이물질이 있는지 확인한 후 60°C 오븐에 5일간 경화시킨다. 경화된 추진제 시편의 스트로우를 벗겨낸 후 측면연소억제제(Lucite)를 도포하였다^[7]. 정압 조건에서 추진제의 연소 속도를 측정하는 장비인 스트랜드 버너(Atlantic Research Co., 735)를 사용하여 금속선 삽입 추진제의 연소 속도를 측정하였다. Fig. 3에 스트랜드 버너의 장치도를 나타내었다. 추진제의 연소 속도는 MIL-STD-286B-T803.1 방법에 따라 측정하였다.

산 계수 및 녹는점 등의 물리적 특성을 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Physical Properties of Wire Materials

Metal Wire	Thermal Conductivity (cal/cmsK)	Density (g/cm ³)	Specific Heat (cal/g K)	Thermal Diffusivity (cm ² /s)	Melting Temp. (K)
Ag	1.01	10.5	0.056	1.72	1235
Cu	0.95	8.92	0.092	1.16	1356
Ni-Cr	0.032	8.40	0.107	0.036	1673

Ag, Cu선은 열확산 계수가 1.1 cm²/s이상으로 상당히 큰 값을 나타내고, 현재 금속선 삽입 추진제에 주로 적용되고 있는 금속선들이다.

Ni-Cr선은 Ni 80%, Cr 20%인 합금으로 고온 산화에 견디고 고온 강도도 높으므로 고온용 발열체로 널리 쓰이는 금속선으로 열확산계수는 상대적으로 낮은 반면 높은 녹는점을 갖는다.

금속선과 인접한 추진제의 연소 속도는 금속선의 열확산 계수에 1차적으로 영향을 받고 녹는점에 2차적인 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 금속선에 인접한 추진제의 연소과정을 간략히 설명하면 다음과 같다. 높은 온도를 갖는 불꽃 지역의 추진제 연소 가스로부터 금속선으로 열이 전달되고 추진제내에 삽입된 금속선을 따라 열전달이 일어난다. 추진제내에 삽입된 금속선으로부터 다시 미연소 추진제로의 열전달이 진행됨으로써 금속선과 인접한 추진제의 온도가 점차적으로 상승하여 일정 발화 온도에 도달하게 되면 추진제가 점화되어 금속선과 인접한 추진제의 연소가 열전도체를 따라 빠르게 진행하게 된다. Table 1로부터 시험에 사용된 금속선의 열확산 계수의 크기는 Ag선 > Cu선 > Ni-Cr선 순으로 나타났고, 금속선의 녹는점은 Ni-Cr선 > Cu선 > Ag선의 순으로 나타났다.

실험에 사용된 추진제는 Al이 10%, RDX가 0~20% 사용된 니트라민계 추진제를 사용하였으며 Al이 각각 2%, 17.5% 사용된 혼합형 추진제 2종과 상대적으로 비교 분석하였다. RDX를

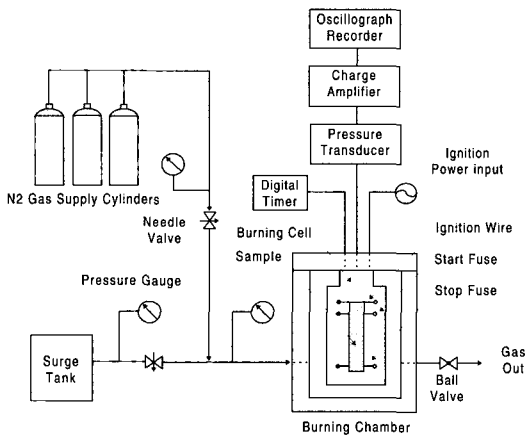


Fig. 2 Schematic Diagram of Strand Burner System.

4. 결과 및 고찰

본 시험에서는 직경 8 mm 시편의 중심부에 단선의 금속선을 삽입하여 스트랜드 버너(ARC, 735)를 사용하여 금속선 종류(Ag, Cu, Ni-Cr) 및 직경(0.1~0.6 mm)에 따라 200~1500 psia의 압력범위에서 연소 속도를 측정하였다. 시험에 사용된 금속선들의 열전도도, 밀도, 열용량, 열확

8% 사용한 니트라민계 추진제의 연소속도는 압력 1000 psia 기준에서 혼합형 추진제 A, B 추진제의 연소속도(r_{sb})와 유사한 값을 나타내었다. 실험에 사용된 추진제의 조성구분과 열역학, 물리적 특성치 및 연소특성치를 Table 2에 나타내었다.

Table 2. Formulations and Properties of Solid Propellants

Propellant		A	B	Nitramine Propellant
Com-position (Wt. %)	Binder (HTPB)	12.7	12.0	7.5
	AP	85.0	70.0	72.0
	RDX	-	-	10.0
	Al	2.0	17.5	8.0
	Fe ₂ O ₃	0.3	0.5	-
	Butacene	-	-	2.5
T _f @1000psia(K)		3,031	3,564	3,409
ρ (g/cc)		1.72	1.80	1.74
T _{ig} (K)		544	542	463
r_{sb} @1000psia		15.07	15.16	14.59
n		0.47	0.45	0.28

Fig. 3, 4는 AP대신에 RDX함량을 각각 0, 20% 대치하였을 때, 압력별 r_{sb} 와 r_w 의 변화를 나타낸 것이다. Fig. 3에서 알 수 있듯이 압력 1000psia 이하에서는 RDX 함량이 늘어날수록 r_{sb} 가 커지며, 압력지수는 작아짐을 알 수 있다. 반면에 Ag선 0.15mm를 삽입한 경우의 압력지수는 RDX 함량과 무관하게 0.48~0.55 범위로 유사한 값을 나타내었고 r_w 는 RDX 함량에 비례하여 증가함을 알 수 있었다. 실험결과에서 알 수 있듯이 RDX를 AP에 일부 대치하였을 때, r_w 를 증가시킬 수 있는 인자인 추진제 불꽃온도와 추진제 본래의 연소속도의 변화없이도 r_w 를 현저히 증가시켰는데, 이러한 이유는 Table 2에서 볼 수 있듯이 RDX를 함유한 추진제의 자연발화온도가 RDX를 함유하지 않은 HTPB/AP 추진제보다 상대적으로 작은 이유 때문으로 사료된다.

일반적으로 금속선을 삽입하였을 경우 r_w/r_{sb} 는 추진제 본래의 연소속도가 느릴수록 크고 추진제의 불꽃온도에 비례하는 것으로 알려져 있다.

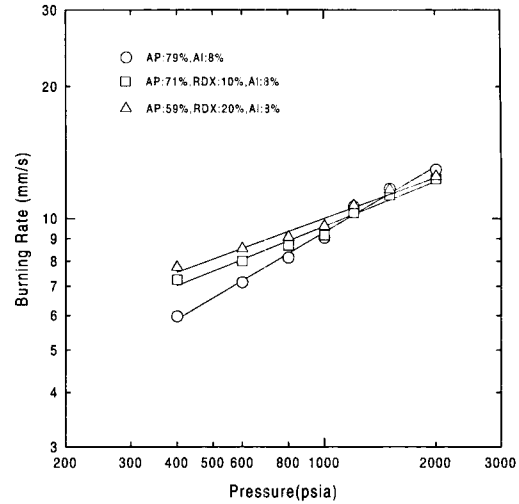


Fig. 3 Plot of Burning Rate vs. Pressure for Nitramine Propellant Embedded with Nonwire.

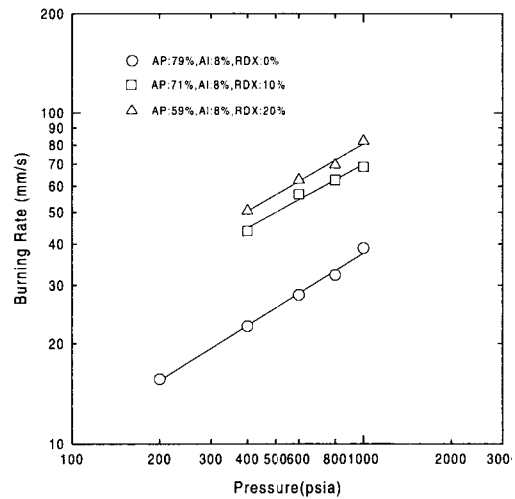


Fig. 4 Plot of Burning Rate vs. Pressure for Nitramine Propellant Embedded with Ag Wire(Φ 0.15mm).

니트라민계 추진제는 B 추진제에 비해 추진제 불꽃온도도 150 K정도 낮고, 압력 1000psia 기준에서의 연소속도는 A, B 추진제와 유사하며 압력지수는 약 40%정도 낮은 수준이다. Fig. 5에 Ag선 4종을 삽입하였을 때의 압력별 r_w 를 나

타내었다. 압력 1000 psia 기준에서 Ag선의 직경이 0.1, 0.15, 0.25, 0.5 mm의 금속선을 삽입하였을 때, 금속선이 없는 추진제의 연소속도에 대한 금속선에 인접한 추진제의 연소속도 증가비(r_w/r_{sb})는 Fig. 5로부터 각각 5.94, 5.77, 5.59, 4.76으로 계산되었고 압력지수는 0.52, 0.30, 0.29, 0.22로 금속선 직경이 증가할수록 현격히 작아지는 경향을 보였다. Ag선의 직경이 0.1, 0.25mm의 경우에는 추진제 불꽃온도가 더 높은 B추진제의 경우보다도 니트라민계 추진제의 r_w/r_{sb} 가 각각 16%, 10%정도 더 크게 나타났으며 직경이 0.5 mm의 경우에는 유사한 값을 나타내었다.

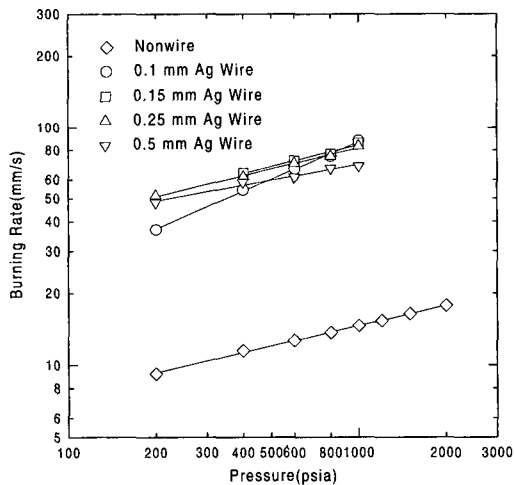


Fig. 5 Plot of Burning Rate vs. Pressure for Nitramine Propellant Embedded with Ag Wires.

Fig. 6에 Cu선 3종을 각각 삽입하였을 때의 압력별 r_w 를 나타내었다. Cu선을 삽입한 경우 니트라민계 추진제의 r_w 가 불꽃온도가 상대적으로 낮은 A 추진제 보다는 r_w/r_{sb} 가 15~30% 정도 크게 나타난 반면, 불꽃온도가 상대적으로 높은 B 추진제 보다는 0~27% 정도 낮게 나타났다^[7]. 이러한 이유는 Cu선을 삽입한 경우에는 Cu선의 녹는점이 Ag선보다 높아서 r_w 는 추진제 자연 발화온도보다 추진제 불꽃온도에 더 크게 의존하기 때문인 것으로 판단된다. Cu선의 녹는점이

높으면 추진제 표면에 노출된 금속선의 길이가 길게 되며, 추진제의 불꽃온도가 높을수록 금속선을 통해 미연소추진제로 전달되는 열속이 증대하게 된다.

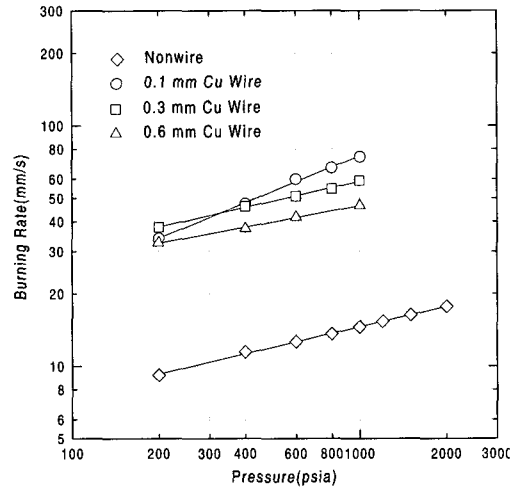


Fig. 6 Plot of Burning Rate vs. Pressure for Nitramine Propellant Embedded with Cu Wires.

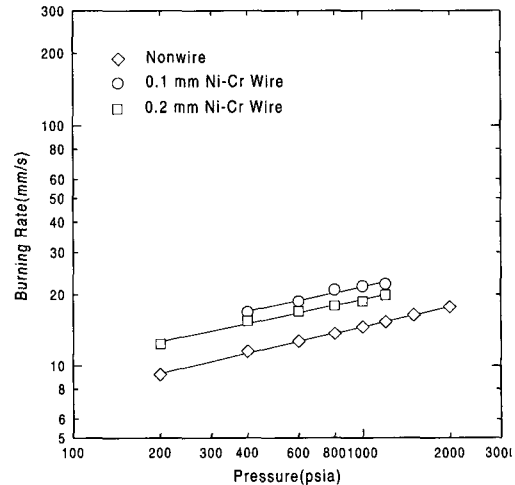


Fig. 7 Plot of Burning Rate vs. Pressure for Nitramine Propellant Embedded with Ni-Cr Wires.

Fig. 7에 Ni-Cr선 2종을 삽입하였을 때 압력별 r_w 를 나타내었다. 이 경우 니트라민계 추진제의 r_w 는 A, B 추진제의 경우와 거의 차이가 나지 않았다. Ni-Cr선의 경우는 녹는점은 높으나 열

확산계수가 낮아서 r_w 는 직경이 0.1mm에서도 1.5배를 넘지 못하며 추진체의 불꽃온도에도 크게 의존하지 않음을 알 수 있었다.

이상의 결과로 볼 때 3종의 금속선을 삽입하였을 때의 r_w/r_{sb} 는 은선을 삽입하였을 때가 가장 크게 나타났으며 그 다음이 Cu선, Ni-Cr선의 순으로 나타났다. 이는 금속선의 열확산 계수의 크기순과 일치하며 r_w/r_{sb} 는 금속선의 열확산 계수에 일차적으로 의존함을 확인할 수 있었다.

Fig. 8, 9는 각각 압력별로 Ag선과 Cu선의 직경에 따른 연소속도 변화를 보여준다. Ag선의 경우 직경 0.15mm에서 최대값을 나타내었고, 압력이 증가할수록 그러한 경향이 점차 사라짐을 알 수 있었다. 녹는점이 낮은 Ag선의 경우 한계 직경이하에서는 쉽게 녹아 없어져서 추진체 표면위에 노출된 금속선의 길이가 짧아져서 열전달 효과를 떨어뜨리기 때문이며 이러한 현상은 상대적으로 r_w 가 작은 낮은 압력에서 현저하게 나타나는 것으로 판단된다. 반면에 녹는점이 Ag선보다 높은 Cu선의 경우 전압력 구간에서 직경이 작을수록 r_w 가 크게 나타났으며, 압력이 낮아질수록 r_w 가 최대값을 나타내는 최적직경이 0.3mm에서 점차적으로 나타남을 알 수 있었다.

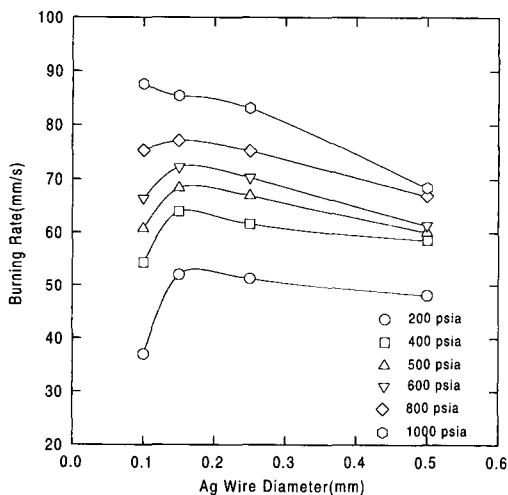


Fig. 8 Effect of Ag Wire Diameter on the Burning Rate for Nitramine Propellant according to Pressure.

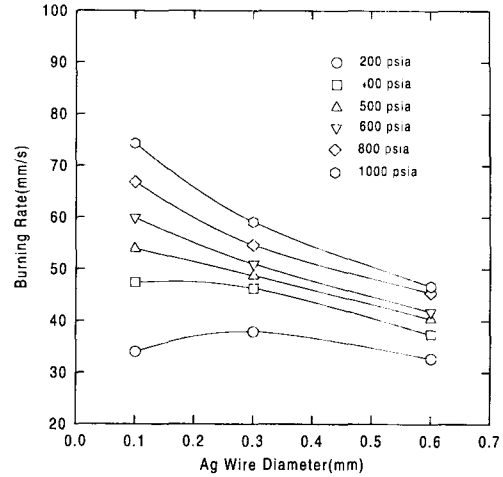


Fig. 9 Effect of Cu Wire Diameter on the Burning Rate for Nitramine Propellant according to Pressure.

이상의 결과로 볼 때 일반적으로 금속선의 직경이 작아짐에 따라 r_w 는 증가하는 경향을 보이거나 일부 금속선의 경우 직경이 작아짐에 따라 오히려 r_w 가 감소하는 한계 직경이 나타남을 알 수 있고, 금속선의 녹는점이 낮은 금속선의 경우가 이러한 경향이 잘 나타남을 알 수 있었다.

1990년 Chung-Shan IST의 Hsing은 무차원 해석에 의해 금속선이 삽입된 고체 추진체의 연소속도 증가비를 일반적인 실험식으로 표현하려고 시도하였다. Hsing은 r_w 를 r_{sb} , α_w , d_w 의 함수로 가정하고, 이 중 r_{sb} 와 d_p 를 반복 매개변수로 선택하여 Buckingham pi정리를 적용하여 (5)식 우변의 3개의 무차원군으로 구성된 실험식을 구하였다. 추진체의 자연발화온도는 고려하지 않았다.

본 연구에서는 추진체의 자연발화온도가 r_w 에 중요한 인자로 작용할 수 있다고 판단하여 자연발화온도와 금속선으로 전달되는 열원인 연소기체의 불꽃온도로 구성된 무차원 온도항을 식(5)에 추가한 새로운 실험식 식(6)을 구하였다.

$$\frac{r_w}{r_{sb}} = 0.882 \left(\frac{\alpha_w}{d_p r_{sb}} \right)^{0.1127} \left(\frac{d_p}{d_w} \right)^{0.1175} \left(\frac{T_f}{T_m} \right)^{1.259} \quad (5)$$

$$\frac{r_w}{r_{sb}} = 6.699 \times 10^{-7} \left(\frac{\alpha_w}{d_p r_{sb}} \right)^{0.708} \left(\frac{d_p}{d_w} \right)^{0.101} \left(\frac{T_f}{T_m} \right)^{-0.0512} \left(\frac{T_f}{T_{ig}} \right)^{7.672} \quad (6)$$

Fig.10, 11은 식(5), (6)을 각각 적용하여 계산된 r_w 를 실험값과 비교한 것이다. 두식 모두 대체적으로 실험값을 잘 표현하는 것으로 나타났으나 식(6)에 의해 계산된 $(r_{wc}-r_{we})/r_{we}$ 절대값의 표준편차가 식(5)에 의해 계산된 표준편차보다 17.5% 작은 6.11%로 나타났다.

5. 결론

RDX가 함유된 니트라민계 추진제내에 금속선 3종(Ag, Cu, Ni-Cr선)을 직경(0.1~0.6mm)별로 삽입하여 r_w/r_{sb} 와 압력지수(n)의 변화를 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 니트라민계 추진제에 3종(Ag, Cu, Ni-Cr선)의 금속선을 직경별(0.1~0.6mm)로 삽입하여 측정된 r_w 크기순은 Ag > Cu > Ni-Cr선으로 금속선의 열화산계수의 크기순과 일치하였으며 금속선의 직경이 작을수록 크게 나타났다.
2. RDX를 AP에 일부 대치함에 따라 r_w 가 현저히 증가하였고, RDX를 10%함유한 니트라민계 추진제의 r_w 는 기존 HTPB/AP계 추진제에 비해 20℃, 1000psia기준에서 최고 5.94배로 30%까지 크게 났으며 이는 니트라민계 추진제의 자연발화온도가 상대적으로 낮기 때문으로 판단된다.
3. Hsing에 의해 주장된 기존의 실험식에 자연발화온도와 추진제 불꽃온도로 구성된 무차원군을 추가한 새로운 실험식을 사용하여 계산된 $(r_{wc}-r_{we})/r_{we}$ 절대값의 표준편차가 기존의 실험식에 의해 계산된 표준편차보다 17.5% 작은 6.11%로 나타났다.

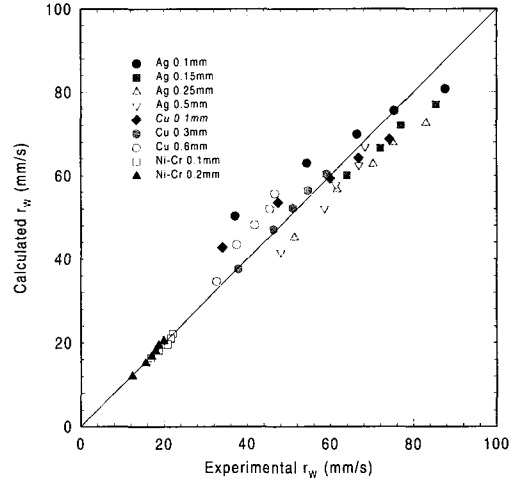


Fig. 10 Comparison between Calculated and Experimental Burning Rate for Nitramine Propellant Embedded with Metal Wires.

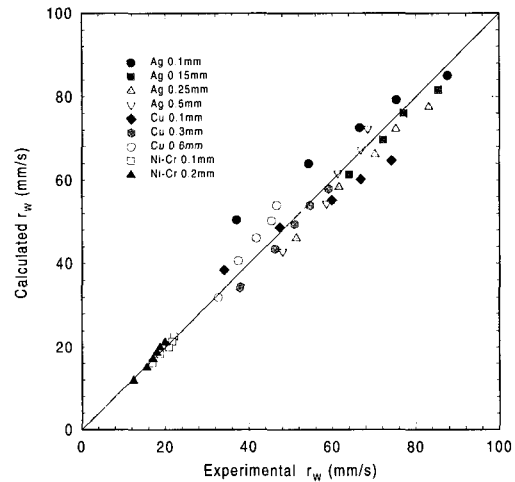


Fig. 11 Comparison between Calculated and Experimental Burning Rate for Nitramine Propellant Embedded with Metal Wires.

참고 문헌

1. K. E. Rumbel, M. Caren, et al., Patent Specification 994, 184, 1965.

2. N. Kubota, M. Ichita, " Combustion Process of Propellants with Embedded Metal Wires", AIAA J. vol. 20, 1981.
3. B. Gossant, F. Godfroy, and P. H. Robert, "Theoretical Calculus of Burning Rate Ratio in grains with Imbedded Metal Wires", AIAA 88-3255, 1988.
4. L. H. Caveny, T. T. Sawyer, " Solid Propellant Burning along a Tube Heated by Combustion Gas Influx", vol.5, AIAA J., 1967.
5. Y. Hsing, S. Wu and J. Kuo, "Burning Rate of HTPB Compsite Propellant Grains with Embedded Metal Wires", AIAA-90-2201, 1990.
6. M. K. King, "Analytical Modeling of Effects of Wires on Solid Motor Ballistics", AIAA 89-2784, 1989
7. 유지창, 박영규, 김인철, "금속선을 삽입한 혼합형 추진제의 연소특성", 제26권, 제2호, 항공우주학회지, 1998.