

금속선을 삽입한 고체 추진제의 연소 특성 연구

유지창*, 박영규, 김인철, 황갑성, 현형수(국방과학연구소)

요 약

HTPB/AP/Al 이 기본 조성인 ADP 302 혼합형 추진제를 대상으로 4종의 금속선(Ag, Cu, Al, Ni-Cr)을 삽입하여 금속선 직경(0.1 mm ~ 0.8 mm)별로 압력에 따른 금속선과 인접한 추진제의 연소 속도(r_w)를 측정하여 금속선 삽입 추진제의 연소 속도 증가비(r_w/r_{sb})와 압력 지수(n)의 변화를 고찰한 결과 금속선 종류에 따른 연소 속도 증가비(r_w/r_{sb})는 Ag > Cu > Al > Ni-Cr 선을 삽입한 추진제의 순으로 나타났고 금속선의 열확산 계수의 크기순과 일치하였다. Buckingham π 이론을 적용한 무차원 해석으로부터 실험식을 구하여, 이 실험식에 의해 계산된 r_w 와 실험으로부터 얻어진 r_w 를 서로 비교하여 본 결과 잘 부합됨을 알 수 있었다. 또한 금속선 수에 따른 추진제 그레이의 연소 면적을 해석적으로 계산하여, r_w/r_{sb} 가 2, 3, 4, 5 배로 증가함에 따른 시간에 따른 연소 면적 증가비의 변화를 금속선 수에 따라서 비교하여 본 결과 정상 상태에서의 그레이의 연소 면적의 증가비(A_b/A_0)는 금속선에 인접한 추진제의 연소 속도 증가비(r_w/r_{sb})와 일치했으며, 정상 상태의 연소 면적 증가비는 삽입된 금속선의 수와는 무관하며 정상 상태에 도달하는 시간에만 영향을 주는 것으로 나타났다.

1. 서론

로켓 모터의 추력 성능을 향상시키기 위해서는 로켓 모터내에 추진제의 충전물을 증대시키는 방법이 있으며, 후미 연소 그레이(end burning grain)을 사용할 경우 web 과 충전물이 매우 크다. 후미 연소 그레이는 1940년대에서 1950년대초까지 주로 이륙 보조 로켓으로 사용되었으며, 응력 완화 기법 분야의 기술 발달과 함께 1960년대부터 다시 호응을 받게 된 그레이 형상이다. 충전율이 크며 구조적 안정성이 우수한 장점이 있으나, 축방향으로 cigarette 연소를 함에 따라 추력 가스의 생성 속도가 낮은 단점이 있다. 추력 가스 생성 속도는 추진제의 연소 속도와 연소 면적에 비례한다. 따라서 추력 가스의 생성 속도를 향상시키기 위하여 추진제의 연소 속도를 증대시키거나 연소 면적을 증대시키는 방법이 있다.^(1,2)

연소 면적을 증대시키기 위해서는 star 형, wagon 형 그레이를 포함한 여러 형상의 내공형 그레이(perforated grain)을 사용하는 방법이 있으나, 후미 연소형 그레이의 장점인 높은 충전율을 유지하면서 연소 면적을 증

대시켜서 질량 연소 속도(mass burning rate)를 증대시키는 방법으로는 추진제 그레이의 축방향으로 금속선, 필라멘트, strip, rod 등의 열전도체를 추진제 내에 삽입시키는 방법이 있다.⁽³⁾

이러한 열전도체를 추진제내에 삽입시키는 연구는 1950년대 ARC(Atlantic Research Corporation)의 Rumbel에 의해 PVC/AP 계 혼합형 추진제를 대상으로 처음 시도되었으며, 그후 Kubota⁽⁴⁾, Caveny⁽⁵⁾, Gossant⁽⁶⁾, Hsing⁽⁷⁾과 King⁽⁸⁾ 등에 의해 복기(double base) 또는 혼합형(composite) 추진제를 대상으로 금속선 종류, 직경, 형태, 수 및 기하학적 배열 등에 따른 실험적, 이론적 연구가 이루어져 왔다. 이와 같은 후미 연소형 그레이에 금속선을 삽입한 그레이 형상은 현재 Red Eye 등과 같은 휴대용 지대공 유도 무기에 주로 적용되고 있다.

본 연구에서는 HTPB/AP/Al 을 기본 조성으로 하는 ADP 302 추진제를 대상으로 직경이 0.1~0.8 mm 범위의 4 종류의 금속선(Cu, Ag, Al, Ni-Cr)을 사용하였다. 직경 8 mm 인 스트랜드 시편에 금속선을 1개 삽입하여 금속선에 인접한 추진제의 연소 속도(r_w), 압력 지수(n) 및 금속선이 없는 추진제에 대한 연소 속도 증가

비(r_w/r_{sb})를 고찰하였으며, 무차원 해석에 의한 경험식을 도출하여 추진 기관 설계시 적용할 수 있도록 하였다.^(2,7)

또한 정압하에서 소형 로켓 모터(SRM)의 연소 면적을 금속선 종류 및 수에 따라서 이론적으로 계산하였다. 금속선 수를 각각 1, 3, 4, 7개 사용하였을 때 정압하에서의 시간에 따른 연소 면적 증가비를 해석적으로 계산하여 금속선 수와 연소 속도 증가비에 따라 평형에 도달할 때까지의 시간을 서로 비교하여 보았다.

2. 이론적 배경

금속선이 삽입된 추진제의 연소 메카니즘은 다음과 같다. 고온의 추진제 연소 가스 불꽃으로부터 금속선으로 열이 전달되고, 이 열은 연소의 진행 방향인 추진제 그레인의 축방향으로 금속선을 따라 전달되며, 다시 금속선과 인접한 추진제로 전달된다. 이렇게 전달된 열에 의해서 금속선과 인접한 추진제의 온도가 상승하게 되며, 자연 발화 온도에 도달한 시점에서 추진제가 점화된다. 이러한 금속선 인접 추진제의 연소과정이 금속선을 따라서 진행되어 Fig. 1에서 볼 수 있는 바와 같이 원뿔 형상의 연소면 형태를 이루게 된다. 추진제 연소면과 금속선이 이루는 각을 θ 라 하면, 금속선과 인접한 추진제의 연소 속도에 대한 추진제 연소 속도의 비는 $\sin \theta$ 로 나타낼 수 있다. 이러한 원뿔 형태의 연소면의 면적은 평형을 이룰 때까지 점차적으로 증가하게 되고, 연소 면적의 증가는 모터내의 압력을 증가시키며, 증가된 압력에 따라 원뿔의 각도도 변화하게 된다.^(2,6)

일반적으로 혼합형 추진제의 연소 속도는 Vieille의 경험식에 잘 일치한다. 일정 온도에서 압력 변화에 따른 추진제의 연소 속도식인 Vieille의 경험식은 식 (1)과 같으며, 로켓 모터의 작동 압력 범위에서는 실험치와 잘 일치하는 것으로 알려져 있다.

$$r_b = aP^n \quad (1)$$

여기서 r_b 는 연소 속도, P 는 연소 압력, n 는 압력 지수이다.

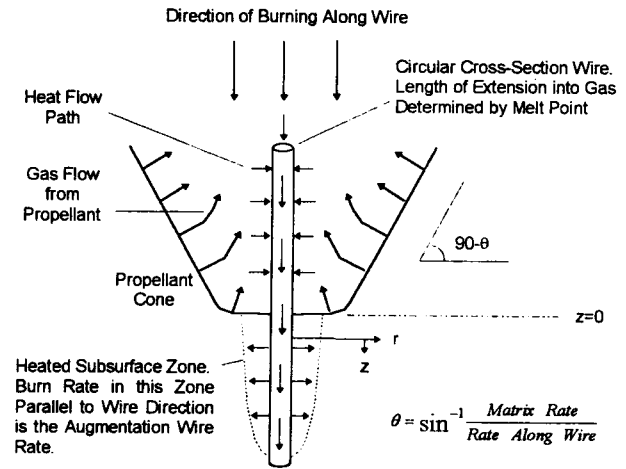


Fig. 1. Schematic of wired propellant combustion.

금속선이 삽입된 추진제 연소 속도는 금속선이 없는 경우의 추진제 본래의 연소 속도(r_{sb})와 금속선 직경(d_w), 추진제 직경(d_p), 금속선의 녹는점(T_m)과 추진제의 불꽃 온도(T_f) 및 금속선의 열확산 계수(α_w)의 함수로 알려져 있으며, 식 (2)로 표현될 수 있다. 식 (2)를 Buckingham π 이론을 적용하여 무차원 해석을 하면 금속선 삽입 추진제의 연소 속도 증가비(r_w/r_{sb})는 식 (3)과 같은 3개의 무차원군을 갖는 식으로 나타낼 수 있다.

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

$$\frac{r_w}{r_{sb}} = a \left(\frac{\alpha_w}{d_p r_{sb}} \right)^\alpha \left(\frac{d_w}{d_p} \right)^\beta \left(\frac{T_m}{T_f} \right)^\gamma \quad (3)$$

여기서 a , α , β , γ 는 상수이고 무차원 군인 $\alpha_w/d_p r_{sb}$ 는 비정상 상태 열전도에 사용되는 Fourier 수와 유사한 물리적 의미를 갖는다.

후미 연소 그레인에서 금속선에 인접한 추진제의 연소 속도 증가에 의하여 형성된 원뿔 모양의 연소면

이 형성된다. 그레인의 연소에 따른 면적의 변화는 편의상 다음의 5 단계로 나누어 고려할 수 있다.

첫째, 점화가 이루어진 직후부터 각각의 금속선 주위에 형성된 원뿔 형상의 경계가 접하는 단계 (단계 I).

둘째, 각각의 금속선 주위의 원뿔 형상의 경계가 접하기 시작한 이후로부터 연소면이 완전히 증가하여 일정하게 유지되기 시작하기까지의 단계 (단계 II).

셋째, 연소면이 완전히 증가하여 일정하게 유지되는 정상 상태 (단계 III).

넷째, 정상상태를 지나 원뿔의 형태가 사라지기 시작할 단계로부터 각 금속선 주위의 사라지는 원뿔의 경계가 접하는 단계 (단계 IV).

다섯째, 단계 IV 이후로부터 그레인이 완전히 연소되기까지의 단계 (단계 V).

이러한 5 단계의 연소 면적의 변화를 Fig. 2에 나타내었다.

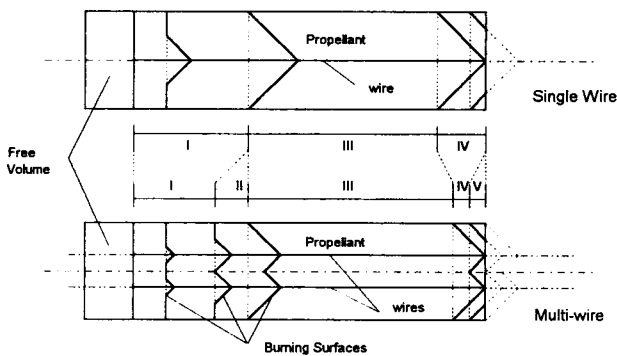


Fig. 2. Several Steps of Burning Surface Regression for Wire Embedded Solid Propellant Grain.

단계 I의 연소 면적은 원뿔 부위가 차지하는 면적 (S_c)와 금속선과 수직인 후미 연소 면적(S_s)으로 형성되며, 단계 II에 이 있어서의 원뿔 형상 이외의 연소 면적의 계산은 약간 복잡하며, 몇 가지 기하학적인 기법이 요구된다⁶⁾. 일단 금속선 주위에 원뿔 형태의 연소면이 완전히 형성되는 단계 III에서는 면적이 일정하게 유지되는 정상 상태가 된다.이 때, 그레인의 전체

연소 면적은 식 (4)와 같이 그레인의 단면적과 금속선과 인접한 추진제의 연소 속도 증가비의 곱이 된다.

$$A_b = A_0 \frac{1}{\sin(\theta)} = A_0 \frac{r_w}{r_{sb}} \quad (4)$$

여기서 A_b 는 금속선을 삽입한 추진제의 연소중의 연소 면적, A_0 는 초기 연소 면적을 나타낸다. 단계 IV, V의 연소 면적은 정상 상태의 연소 면적에서 단계 I의 S_c 에 해당되는 면적을 제외한 것이다.⁶⁾

Fig. 3는 금속선이 7개 삽입된 추진제 그레인의 정상상태에서의 연소면을 나타낸 것으로써 I-DEAS에 의해 연소 표면적을 계산한 결과 계산치와 일치함을 알 수 있었다.

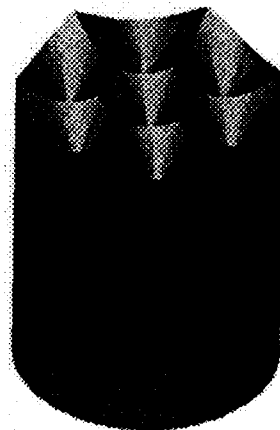


Fig. 3. Burning Surface Structure of 7-Wire Embedded End Burning Grain.

3. 실험 장치 및 방법

금속선에 인접한 추진제의 연소 속도를 측정하기 위해 추진제 시편내에 금속선을 삽입하였다. 추진제는 ADP 302 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 inhibitor로 에폭시(Epon 815)와 경화제(Genamid)의 비율 1:1로 혼합한 후, 단열성을 높이기 위해 첨가제로 aerosil200을 inhibitor 1 cc 당 0.05 g 비율로 혼합하여 추진제 표면에 2회 코팅한다.

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.

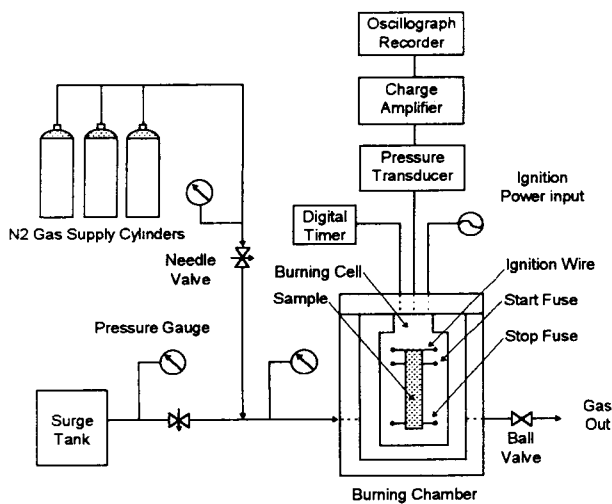


Fig. 4. Schematic Diagram of Strand Burner System.

4. 결과 및 고찰

본시험에서는 직경 8 mm 시편의 중심부에 단선의 금속선을 삽입하여 스트랜드 버너(ARC, 735)를 사용하여 금속선 종류(Ag, Cu, Al, Ni-Cr) 및 직경(0.1 ~ 0.8 mm)에 따라 200 ~1500 psia의 압력에서 연소 속도를 측정

하였다. 시험에 사용된 금속선들의 열전도도, 밀도, 열용량, 열확산 계수 및 녹는점 등의 물리적 특성을 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Physical Properties of Wire Materials

Metal	Thermal Wire Conductivity (cal/cm s K)	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
Al	0.65	2.70	0.216	1.11	933
Ni-Cr	0.032	8.40	0.107	0.036	1673

Ag, Cu, Al 선은 열확산 계수가 1.1 cm²/s 이상으로 상당히 큰 값을 나타내고, 현재 금속선 삽입 추진제에 주로 적용되고 있는 금속선 들이다. Ni-Cr 선은 Ni 80 %, Cr 20 %인 합금으로 고온 산화에 견디고 고온 강도도 높으므로 고온용 발열체로 널리 쓰이는 금속선으로 열확산 계수는 상대적으로 낮은 반면 높은 녹는점을 갖는다.

금속선과 인접한 추진제의 연소 속도는 금속선의 열확산 계수에 1차적으로 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 열확산 계수가 큰 열전도체에 의해 높은 온도를 갖는 불꽃 지역의 추진제 연소 가스로부터 금속선으로 열이 전달되고, 금속선으로부터 다시 미연소 추진제로의 열전달이 진행됨으로써 금속선과 인접한 추진제의 온도가 상승하여 일정 발화 온도에 도달하게 되면 추진제가 점화되며, 따라서 금속선과 인접한 추진제의 연소가 열전도체를 따라 빠르게 진행하게 된다. Table 1로부터 시험에 사용된 금속선의 열확산 계수의 크기는 Ag 선 > Cu 선 > Al 선 > Ni-Cr 선순으로 나타났고, 금속선의 녹는점은 Ni-Cr 선 > Cu 선 > Ag 선 > Al 선의 순으로 나타났다.

Fig. 5, 6, 7, 8은 ADP 302 추진제에 Ag, Cu, Al, Ni-Cr 선을 직경별로 압력 변화에 따라 실험한 결과를 나타낸 것이다. 직경이 0.1, 0.25, 0.5 mm 인 Ag 선을 삽입한 경우 r_w/r_{sb} 는 압력 1,000 psia에서 각각 4.87, 3.94, 3.10

이였으며, 압력 지수는 각각 0.56, 0.33, 0.19 로써 직경이 작을수록 연소 속도와 압력 지수가 증가하였다. 직경이 0.1, 0.3, 0.6 mm 인 Cu 선을 삽입한 경우 r_w/r_{sb} 는 압력 1,000 psia 에서 각각 4.40, 3.41, 2.66 이였고 압력 지수는 각각 0.32, 0.29, 0.24 로써, Ag 선과 마찬가지로 직경이 작을수록 연소 속도와 압력 지수가 증가하였으며 증가비는 상대적으로 낮았다. 또한 직경이 0.13, 0.25, 0.58, 0.8 mm 인 Al 선을 삽입한 경우 r_w/r_{sb} 는 압력 1,000 psia 에서 각각 2.38, 2.53, 1.88, 1.79 였고, 압력 지수는 각각 0.47, 0.28, 0.28, 0.35 로 나타났는데 금속선 직경이 0.25 mm 부근에서 r_w/r_{sb} 가 가장 크게 나타났다. 직경이 0.1, 0.2, 0.4 mm 인 Ni-Cr 선을 삽입한 경우, r_w/r_{sb} 는 압력 1,000 psia 에서 각각 1.54, 1.26, 1.07 이였고, 압력 지수는 각각 0.34, 0.35, 0.37 로 금속선 직경이 작아질수록 r_w/r_{sb} 는 다소 증가한 반면 압력 지수의 변화는 거의 없었다.

Fig. 9, 10, 11, 12 에 Ag, Cu, Al, Ni-Cr 선을 삽입한 경우에 r_w 의 연소 속도의 직경에 따른 압력별 변화를 나타내었으며, Ag, Cu, Al 선을 사용하였을 경우 직경이 감소할수록 r_w 는 증가하였으며 직경이 0.1 mm 이하의 영역에서 r_w 의 극대점이 형성될 것으로 보이며, Al 선을 사용하였을 경우에는 금속선 직경이 0.25 mm 부근에서 극대점이 형성되었다.

Fig. 13 은 ADP 302 추진제의 경우에 있어서, 압력 1,000 psia 에서 금속선 종류별로 직경에 따른 r_w 를 나타낸 것으로써, r_w 의 크기는 Ag 선 > Cu 선 > Al 선 > Ni-Cr 선의 순으로 금속선의 열확산 계수의 순서와 일치하는 것으로 나타났으며, Ag, Cu, Ni-Cr 선을 사용하였을 경우에는 직경이 감소할수록 r_w 가 점차적으로 증가함을 나타냈고 Al 선을 사용하였을 경우에는 직경이 0.25 mm 로 감소할 때까지는 r_w 가 증가하다가 그보다 작은 경우에는 r_w 가 감소함을 보였다.

압력에 따른 금속선 종류별, 직경별 r_w 값과, α_w , T_m 등 금속선의 물리적 성질과 추진제 연소 가스의 열역학적 성질로부터 Buckingham π 을 적용한 실험식을 구하여 실험치와 비교하여 보았다. Hsing⁽⁹⁾ 은 Ag 선과 Cu 선을 사용하여 소형로켓 모터의 지상 연소 시험 데이터를 사용하여 무차원 실험식을 구하였으나 본 연구에서는 추진제 종류별로 금속선 삽입 추진제의 스트랜드 시험 데이터를 사용하여 같은 이론을 적용하여 계산해 보았다.

다음 식 (5) 는 무차원 해석에 의한 3 개의 무차원군으로 형성된 실험식을 나타낸 것이다.

$$\frac{r_w}{r_{sb}} = 0.6612 \left(\frac{\alpha_w}{d_p r_{sb}} \right)^{0.5057} \left(\frac{d_w}{d_p} \right)^{-0.2251} \left(\frac{T_m}{T_f} \right)^{0.9365} \quad (5)$$

Fig. 14 는 실험식으로부터 계산된 r_w 를 실험치와 비교한 것으로써, 대체적으로 실험치와 잘 부합됨을 알 수 있었다. 그러나 금속선 직경이 0.1 mm 인 r_w 실험치는 다른 실험값보다 실험식에서 벗어나는 경향을 보였는데, 이는 직경이 0.1 mm 이하의 금속선을 삽입한 추진제의 시편 제조시 생기는 error 가 연소 속도 신뢰도를 떨어뜨리는 것으로 판단된다. 실험치를 기준으로 하여 실험식으로부터 계산된 r_w 와 실험치인 r_{sb} 의 오차 ($|r_w - r_{sb}|$) 의 표준 편차 (σ) 는 13.58% 였다.

Fig. 15 는 금속선이 7 개 삽입된 그레인에 금속선 주위의 연소속도 증가비가 각각 2, 3, 4, 5 배 일때의 시간에 따른 연소 면적의 증가비를 식 (4) 에 근거하여 해석적으로 계산한 값을 나타낸 것으로써, 정상 상태에서의 그레인의 연소 면적의 증가비는 금속선 주위의 연소속도 증가비와 같음을 알 수 있었다. 즉, r_w/r_{sb} 가 각각 2, 3, 4, 5 배일 때의 연소 면적은 금속선을 삽입하지 않은 추진제 그레인의 연소 면의 2, 3, 4, 5 배 였다. Fig. 16 은 r_w/r_{sb} 가 4 에서 금속선 수를 1, 3, 4, 7 개를 삽입했을 때 시간에 따른 연소 면적 증가비를 해석적으로 계산한 값

을 나타낸 것으로써 연소 면적 증가비는 금속선의 수와 무관하게 정상 상태에서 일정하며 금속선의 수가 증가할수록 추진제 그레인의 연소 면적이 정상 상태에 빨리 도달함을 알 수 있었다.

5. 결 론

HTPB/AP/Al 을 기본 조성으로하는 ADP 302 혼합형 추진제를 대상으로하여 4종의 금속선(Ag, Cu, Al, Nichrome)을 삽입하여 금속선 직경(0.1 mm ~ 0.8 mm)별로 압력에 따른 금속선과 인접한 추진제의 연소 속도(r_w)를 측정하여 금속선 삽입 추진제의 연소 속도 증가비(r_w/r_{sb})와 압력 지수(n)의 변화를 고찰하였고 추진제별로 금속선 직경에 따라서 압력별로 r_w 가 극대점을 갖는 영역을 살펴보았으며, Buckingham π 이론을 적용한 무차원 해석으로부터 실험식을 구하여, 이 실험식에 의해 계산된 r_w 와 실험으로부터 얻어진 r_w 를 서로 비교하여 보았다. 또한 금속선 수에 따른 추진제 그레인의 연소 면적을 해석적으로 계산하여, r_w/r_{sb} 가 2, 3, 4, 5 배로 증가함에 따른 시간에 따른 연소 면적 증가비의 변화를 금속선 수에 따라서 비교하여 보았다.

이상의 실험 및 계산 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

1). 금속선 종류에 따른 연소 속도 증가비(r_w/r_{sb})는 Ag > Cu > Al > Ni-Cr 선을 삽입한 추진제의 순으로 나타났고 금속선의 열확산 계수의 크기순과 일치하였다. Ag, Cu, Ni-Cr 선을 사용한 경우 시험한 금속선 직경 범위(ϕ 0.1~0.6 mm)내에서 r_w 는 직경이 감소할수록 증가하였으며, Al 선을 사용한 경우 r_w 는 금속선 직경이 감소함에 따라 0.25 mm 부근의 한계 직경 이하에서는 오히려 급격히 감소하는 영역이 있었다. 이는 금속선 직경이 가늘어질수록 r_w 는 금속선의 녹는점에 더 의존하는 것으로 판단된다.

2). Buckingham π 이론을 적용한 무차원 해석에 의해 ADP 302 추진제의 r_w/r_{sb} 를 계산할 수 있는 r_w/r_{sb} 의 실험식을 각각 구하였으며 다음식과 같았다.

$$\frac{r_w}{r_{sb}} = 0.6612 \left(\frac{\alpha_w}{d_p r_{sb}} \right)^{0.5057} \left(\frac{d_w}{d_p} \right)^{-0.2251} \left(\frac{T_m}{T_f} \right)^{0.9365}$$

3). 정상 상태에서의 그레인의 연소 면적의 증가비는 금속선에 인접한 추진제의 연소 속도 증가비(r_w/r_{sb})와 일치했으며, 정상 상태의 연소 면적 증가비(A_b/A_o)는 삽입된 금속선의 수와는 무관하며 정상 상태에 도달하는 시간에만 영향을 주는 것으로 나타났다.

참고문헌

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", vol. 20, AIAA J., 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 Composite Propellant Granis 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, 김인철, 김종욱, "금속선을 삽입한 추진제 연소특성 연구", 항공우주학회 추계학술대회 논문집, 1993.
8. 유지창, 박영규, 정정용, 김인철, "금속선 삽입 추진제의 연소 특성", MSDC-421-940575, 국방과학연구소, 1994.

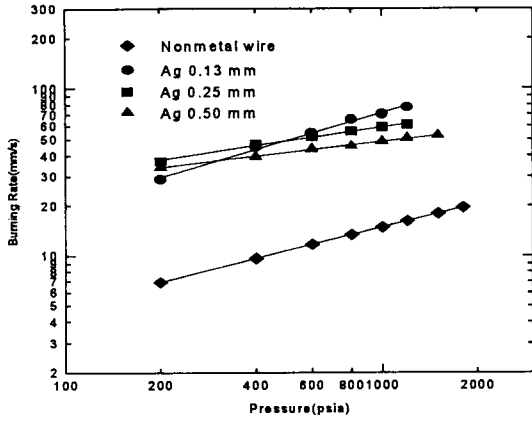


Fig. 5. Plot of r_w vs. P of Propellant Embedded with Ag Wire.

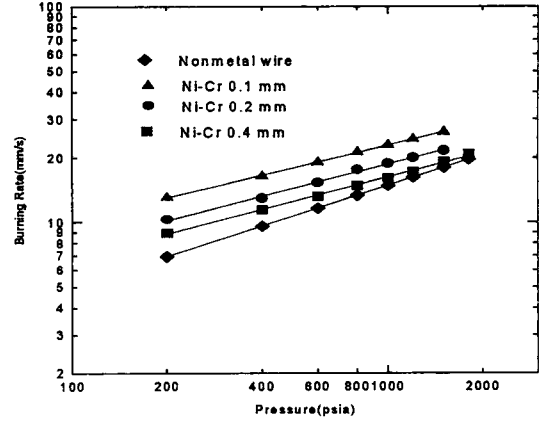


Fig. 8. Plot of r_w vs. P of Propellant Embedded with Ni-Cr Wire.

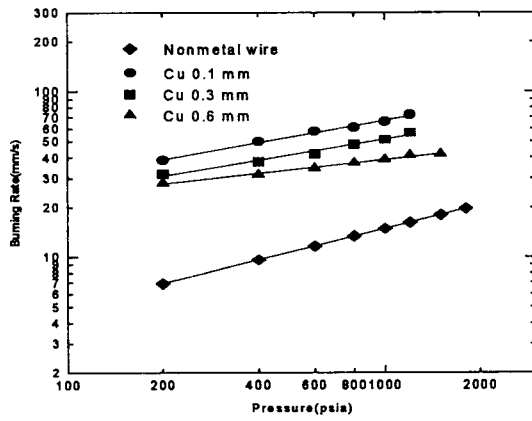


Fig. 6. Plot of r_w vs. P of Propellant Embedded with Cu Wire.

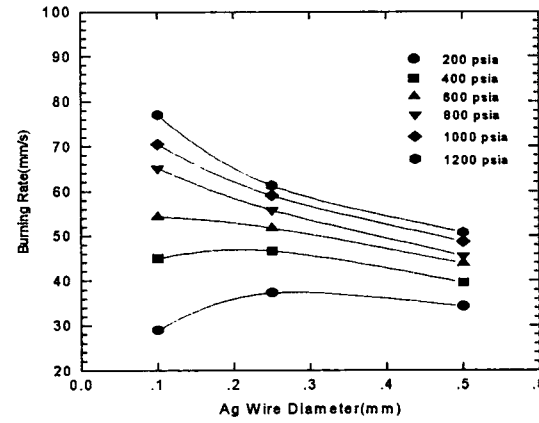


Fig. 9. Effect of Diameters of Ag Wires on r_w .

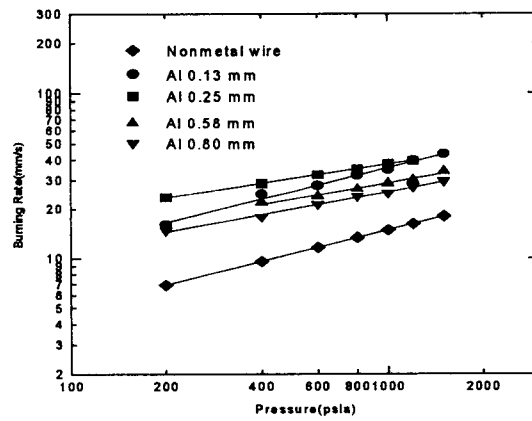


Fig. 7. Plot of r_w vs. P of Propellant Embedded with Al Wire.

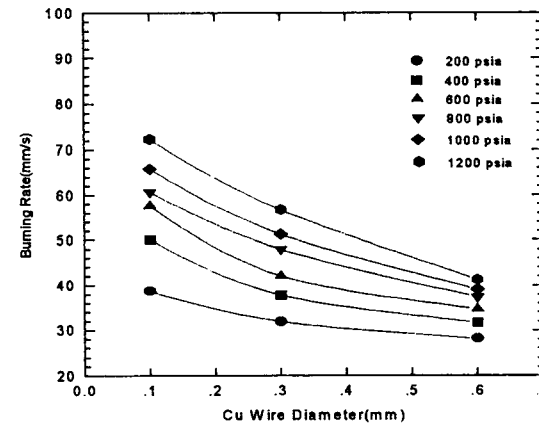


Fig. 10. Effect of Diameters of Cu Wires on r_w .

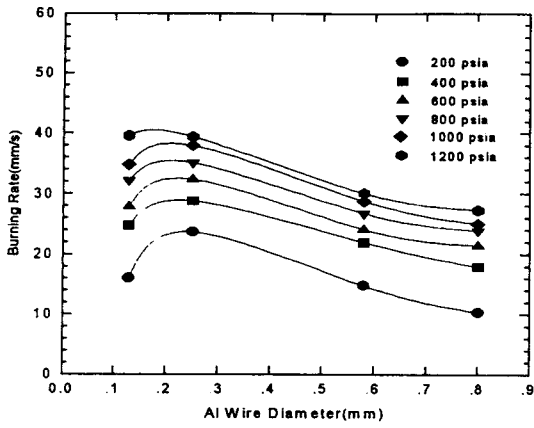


Fig. 11. Effect of Diameters of Al Wire on r_w .

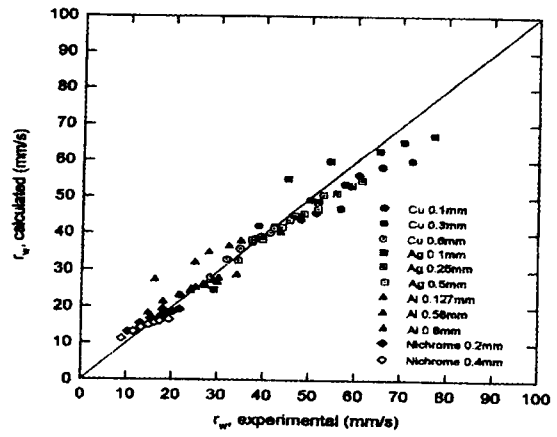


Fig. 14. Comparison of Calculated and Experimental r_w .

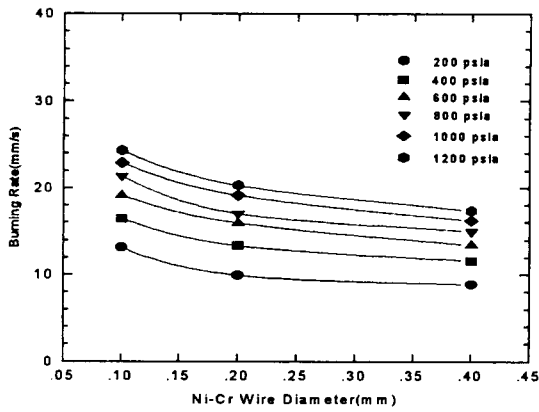


Fig. 12. Effect of Diameters of Ni-Cr Wire on r_w .

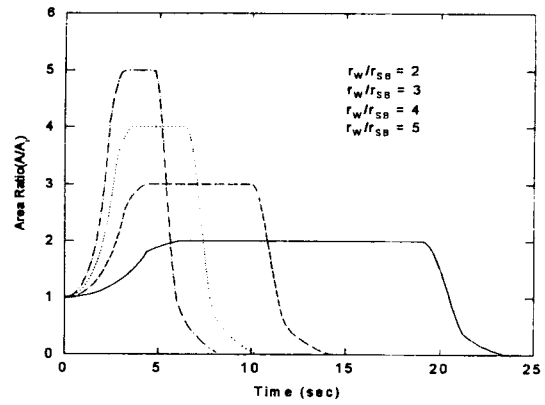


Fig. 15. Burning Surfaces Area Ratio of 7-Wire Embedded Grain.

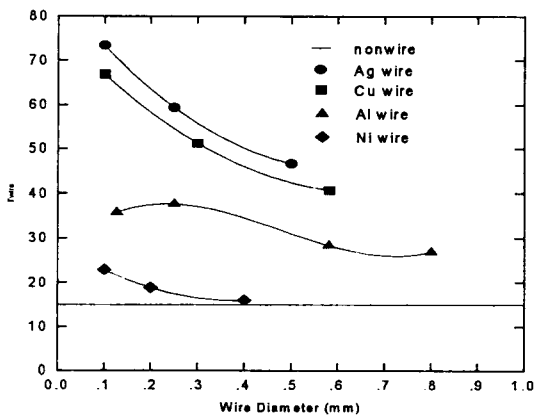


Fig. 13. Effect of Diameters of Wire on r_w .

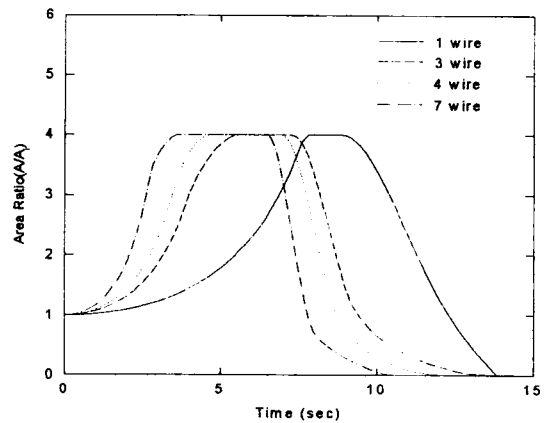


Fig. 16. Wire Number Dependency of Burning Surface Area at $r_w/r_{sb} = 4$.