

# 금속선을 삽입한 고체 추진제의 연소 특성

유지창, 박영규, 김인철, 임유진  
국방과학연구소

## 요 약

HTPB/AP/Al 이 주성분인 2종의 혼합형 추진제를 대상으로 4종의 금속선(Ag, Cu, Al, Ni-Cr)을 각각 삽입하여 금속선의 직경(0.1~0.8 mm)과 연소 압력에 따른 금속선에 인접한 고체 추진제의 연소 속도 증가비( $r_w/r_{ob}$ )와 압력 지수(n)의 변화를 고찰하였다. 금속선을 추진제에 삽입함으로써 추진제의  $r_w/r_{ob}$ 는 크게 증가하였고, 1000 psia의 압력에서 최대 6.59배 증가하였다. 그러나 녹는 점이 비교적 낮은 Al선이나 Ag선은 금속선 직경이 작아짐에 따라 한계 직경에서  $r_w$ 가 급격히 감소하는 최대값이 존재하였다. 자연 발화 온도와 금속선으로 전달되는 열원인 연소 기체 불꽃 온도로 구성된 무차원군을 Buckingham pi 정리에 의해 구해진  $r_w/r_{ob}$ 에 대한 기존의 무차원 실험식에 추가로 적용하여 계산해 본 결과, 자연 발화 온도는 고려하지 않고 금속선의 녹는 점과 연소 기체의 불꽃 온도를 무시한 Hsing의 실험식에 의해 계산된 결과보다 표준 편차가 45% 이상 줄어듦을 알 수 있었다.

### 1. 서 론

고체 로켓 모터의 추력을 향상시키기 위해 추진제의 부피 충전율(volumetric loading fraction)을 증대시키는 방법이 있으며, 단면 연소형 그레인(end burning grain)의 경우 web과 부피 충전율이 매우 크다. 단면 연소형 그레인은 부피 충전율이 크고 구조적 안정성이 우수한 장점이 있으나, 길이 방향으로 cigarette형 연소를 하므로 연소 면적이 작아 연소 기체 생성 속도가 느린 단점이 있다[1]. 기체 생성 속도는 추진제의 연소 속도와 연소 면적에 비례한다. 추진제의 연소 속도를 증대시키는 방법으로는 산화제의 입자 크기나 혼합비를 조절하거나, 연소 촉매, 금속 분말 등을 추진제내에 첨가시키는 방법이 있지만, 이와 같이 추진제 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 [1,7].

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 유지

하면서 연소 면적을 증대시켜 추력 기체의 생성량을 증대시키는 가장 효율적인 방법으로는 금속선, 필라멘트, strip, rod 등의 열전도체를 단면 연소 그레인에 삽입시키는 방법이 있다[2,3,6]. 이러한 열전도체를 추진제에 삽입시키는 연구는 1950년대 Rumbel[2]에 의해 polyvinylchloride(PVC)와 ammonium perchlorate(AP)가 주성분인 혼합형 추진제를 대상으로 처음 시도되었으며, 그 후 Kubota[4], Sing[5]와 King[3] 등에 의해 복기형 추진제와 혼합형 추진제를 대상으로 금속선의 종류, 직경, 형태, 수 및 기하학적 배열 등에 따른 실험적, 이론적 연구가 이루어져 왔다.

본 연구에서는 hydroxy-terminated polybutadiene(HTPB) 바인더, 산화제인 AP와 금속 분말인 Al을 기본 조성으로 하는 혼합형 추진제인 A, B를 대상으로 직경이 0.1~0.8 mm 범위인 4종류의 금속선(Cu, Ag, Al, Ni-Cr 선)을 사용해 직경 8 mm인 스트랜드 시편내에 금속선을 단선 삽입하여 압력에 따른 금속선에 인접한 추진제의 연소 속도( $r_w$ ), 압력 지수(n) 변화를 고찰하였다. 추진제의 열역학 특성치인 연소 기체 불꽃 온도가 금속선으로의 열전달에 영향을 주며, 금속선에 인접한 추진제가 금속선에 의해 가열될 때 자연 발화 온도가 금속선에 인접

한 추진제가 분해되어 점화·연소하는데 중요한 인자로 작용할 수 있으므로, 추진제의 불꽃 온도와 자연 발화 온도를  $r_w$ 에 영향을 주는 인자로 추가로 고려하여 무차원 해석에 의한 실험식을 도출하였으며 기존의 실험식에 의한 계산 결과와 비교하였다. 이러한 방법은 추진 기관 설계에 유용하게 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

## 2. 이론적 배경

일정 온도에서 압력 변화에 따른 추진제의 연소 속도 식인 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.

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 발화·연소하게 된다.

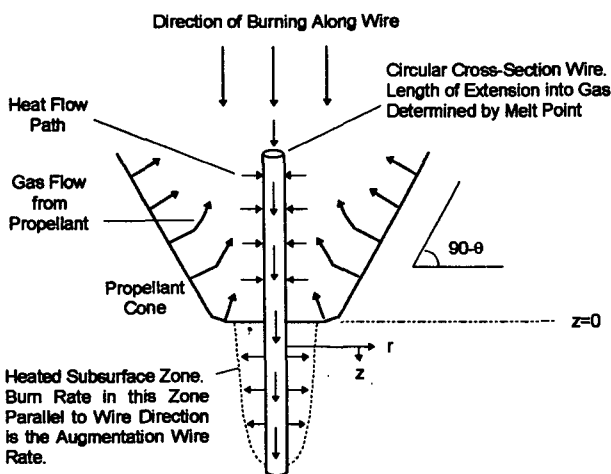


Fig. 1. Schematic Diagram of Solid Propellant Combustion Embedded with Metal Wire.

금속선이 삽입된 추진제의 연소 속도( $r_w$ )는 금속선이 삽입되지 않은 본래 추진제의 연소 속도, 연소 기체 불꽃 온도, 금속선의 열확산 계수, 금속선의 녹는 점, 금속선의 직경과 그레인 직경의 함수이며 이 중 금속선의 열확산 계수에 가장 영향을 받는 것으로 알려져 있다[2].

따라서  $r_w$ 는 식 (2)와 같은 함수로 표현될 수 있다. 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 상승할 때 추진제가 쉽게 분해되므로  $r_w$ 는 증가할 수 있다. 식 (2)를 Buckingham pi 정리[7]를 적용하여 무차원 해석을 하면  $r_w/r_{sb}$ 는 식 (3)과 같은 3개의 무차원군을 갖는 식으로 나타내어 진다.

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

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

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  $\alpha_w/d_p r_{sb}$ 는 비정상 상태 열전도에 사용되는 Fourier 수와 유사한 물리적 의미를 갖는다.

Hsing은 식 (3)의 무차원군 중 우변의 3번째 온도 항의 영향을 무시하고 우변의 첫 번째와 두 번째 항만을 고려하여  $r_w$ 를 계산하였다. 식 (3)는 자연 발화 온도를 고려하지 않았으므로, 자연 발화 온도와 연소 기체 불꽃 온도로 구성된 무차원군을 추가하면  $r_w/r_{sb}$ 는 식 (4)와 같이 4개의 무차원군을 갖는 식으로 나타낼 수 있다.

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

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

## 3. 실험장치 및 방법

Cellulose acetate butyrate(CAB)로 제작된 직경 8 mm 인 스트로우(straw)를 이용해서 미경화 추진제에 금속선을 길이 방향으로 단선 삽입하여 시편을 만든 후 60°C 항온기에 5일간 경화시킨다. 경화된 추진제 시편의 스트로우를 벗겨 낸 후, inhibitor로 에폭시 수지(Shell Chemical Co., Epon 815)와 경화제(EVRA Inc., Genamid 2000)의 비율 1:1로 혼합한 후, 단열성을 높이기 위해 첨가제로 Aerosil 200(Degussa Inc.)을 inhibitor 1 cc 당 0.05 g 비율로 혼합하여 추진제 표면에 2회 코팅한다.

정압 조건에서 추진제의 연소 속도를 측정하는 장비인 스트랜드 버너(Atlantic Research Corp., 735)를 사용하여 금속선을 삽입한 추진제의 연소 속도를 측정하였으며, Fig. 2 에 스트랜드 버너의 장치도를 나타내었다.

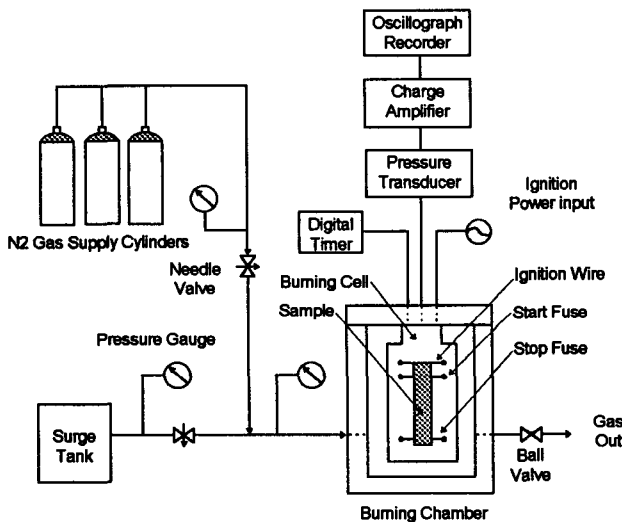


Fig. 2. Schematic Diagram of Strand Burner System.

#### 4. 결과 및 고찰

시험에 사용된 2종의 혼합형 추진제의 조성 및 물리적 특성 및 연소 기체의 열역학 특성은 Table 1에 나타내었다. 혼합형 추진제 2종은 바인더로 HTPB를 사용하였고, 산화제로는 AP 입자를 사용하였으며, 금속 추진제로는 Al 입자를 사용하였다. 하이드록시(-OH)계 폴리머인 HTPB 바인더는 점도가 낮아 고체 충전율이 높고 기계적 특성과 노화 특성이 우수한 것으로 평가되어 1980년대 이후로 대부분의 혼합형 추진제에 사용되고 있다.

Table 1. Formulations and Physical and Thermodynamic Properties of 2 Composite Propellants

| Propellant Name                    |                                | A                    | B                    |
|------------------------------------|--------------------------------|----------------------|----------------------|
| Composition<br>n<br>(Wt %)         | Binder(HTPB)                   | 12.7                 | 12.0                 |
|                                    | AP                             | 85.0                 | 70.0                 |
|                                    | Al                             | 2.0                  | 17.5                 |
|                                    | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.3                  | 0.5                  |
| Flame Temperature at 1000 psia (K) |                                | 3,031                | 3,564                |
| Density (kg/m <sup>3</sup> )       |                                | 1.72×10 <sup>3</sup> | 1.80×10 <sup>3</sup> |
| Autoignition Temperature(K)        |                                | 544                  | 542                  |
| r <sub>sb</sub> at 1000 psia(mm/s) |                                | 15.07                | 15.16                |
| n                                  |                                | 0.47                 | 0.45                 |

A 추진제는 Al 입자가 2% 함유된 추진제로 압력 1000 psia에서 연소 기체의 불꽃 온도는 각각 3031K로 나타났으며, B 추진제는 17.5%의 상당히 많은 Al 입자가 함유된 추진제로서 연소 기체 불꽃 온도가 3564K로 A 추진제에 비해 530K 이상 높은 값을 나타냈다[9]. 추진제 연소 기체의 불꽃 온도는 추진제의 성능 예측 프로그램인 chemical equilibrium calculation (CEC) code[9]로 계산하였다. 밀도는 B 추진제가 A 추진제에 비해 다소 큰 값을 나타내었는데, 이는 Al의 밀도가 추진제에 비해 1.6 배 정도 크기 때문이다. 압력 1000 psia에서 A 추진제와 B 추진제의 연소 속도는 각각 15.07, 15.16 mm/s였고, 압력 지수는 각각 0.47, 0.45로 서로 비슷한 값을 나타냈다. 추진제의 자연 발화 온도는 A, B가 각각 544, 542K로 비슷한 값을 나타냈다.

시험에 사용된 금속선들의 열전도도, 밀도, 열용량, 열확산 계수 및 녹는 점 등의 물리적 특성을 Table 2에 나타내었다. Ag, Cu, Al선은 열확산 계수가  $1.1 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$  이상으로 상당히 큰 값을 나타내었고, 현재 금속선이 삽입된 로켓 모터에 주로 적용되고 있는 금속선들이다. Ni-Cr선은 Ni 80%, Cr 20% 인 합금으로 고온에서 산화에 잘 견디고, 또한 고온에서의 강도가 높아서 고온용 발열체로 널리 쓰이는 금속선이며, 열확산 계수는 상대적으로 낮은 반면, 녹는 점이 높다[9]. 사용된 금속선의 직경은 0.1~0.8 mm 범위를 선정하였다. 0.1 mm 이하의 직경은 공정성의 문제로 실제 로켓 모터에 적용하기 어렵고,

시험 데이터의 신뢰도 또한 상대적으로 떨어지리라 판단된다.

금속선과 인접한 추진제의 연소 속도는 금속선의 열확산 계수에 1차적으로 영향을 받는 것으로 알려져 있다[2,3]. 열확산 계수가 큰 열전도체에 의해 높은 온도를 갖는 추진제의 연소 불꽃으로부터 금속선으로 열이 전달되고, 금속선으로부터 다시 미연소된 추진제로 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 2로부터 시험에 사용된 금속선의 열확산 계수의 크기는 Ag 선 > Cu 선 > Al 선 > Ni-Cr 선 순으로 나타났고, 금속선의 녹는 점의 크기는 Ni-Cr 선 > Cu 선 > Al 선 > Ag 선의 순으로 나타났다.

Table 2. Physical Properties of Wire Materials

| Metal Wire | Thermal conductivity (J/m s K) | Density (kg/m <sup>3</sup> ) | Specific Heat (J/kg K) | Thermal Diffusivity (m <sup>2</sup> /s) | Melting Point (K) |
|------------|--------------------------------|------------------------------|------------------------|-----------------------------------------|-------------------|
| Ag         | 4226                           | 10.5×10 <sup>3</sup>         | 234                    | 1.72×10 <sup>-4</sup>                   | 1235              |
| Cu         | 3905                           | 8.92×10 <sup>3</sup>         | 385                    | 1.16×10 <sup>-4</sup>                   | 1356              |
| Al         | 2720                           | 2.70×10 <sup>3</sup>         | 904                    | 1.11×10 <sup>-4</sup>                   | 933               |
| Ni-Cr      | 134                            | 8.40×10 <sup>3</sup>         | 448                    | 3.6×10 <sup>-6</sup>                    | 1673              |

Fig. 3은 A 추진제의 경우에 있어서 압력 1000 psia에서 금속선 종류별로 직경에 따른  $r_w$ 를 나타낸 것으로서  $r_w$ 의 크기는 Ag 선 > Cu 선 > Al 선 > Ni-Cr 선의 순으로 금속선의 열확산 계수의 크기 순과 일치하였다. Ag 선, Cu 선, Ni-Cr 선의 경우는 직경이 작아질수록 연소 속도가 증가하였고, 녹는 점이 가장 낮은 Al 선의 경우에는 직경이 0.25 mm에서  $r_w$ 의 최대점이 형성되었으며 그 이하의 직경에서는  $r_w$ 가 급격히 감소하였다. 직경이 각각 0.1, 0.25, 0.5 mm인 Ag 선을 삽입한 경우,  $r_w/r_{sb}$ 는 압력 1000 psia에서 각각 4.87, 3.94, 3.10 이었고, 압력 지수는 각각 0.56, 0.33, 0.19로서 직경이 작아질수록 연소 속도와 압력 지수는 크게 증가하였다. 직경이 각각 0.1, 0.25, 0.3, 0.6 mm인 Cu 선을 삽입한 경우, Ag 선과 마찬가지로

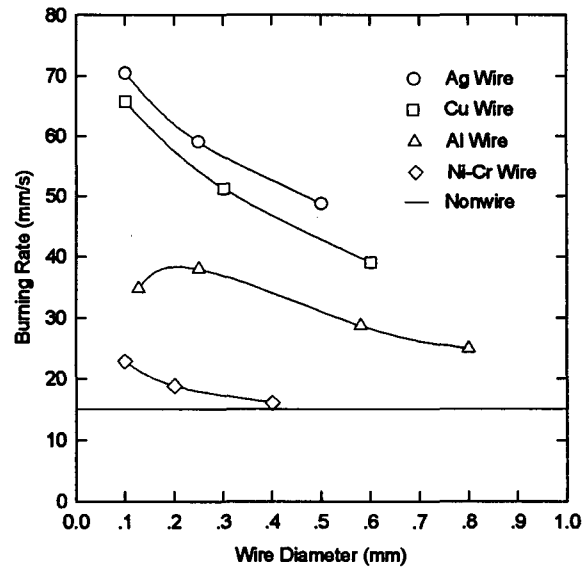


Fig. 3. Effect of Diameters of Ag, Cu, Al and Ni-Cr Wires on the Burning Rate of A Propellant at 1000 psia.

직경이 작아질수록 연소 속도와 압력 지수는 증가하였으며  $r_w/r_{sb}$ 는 압력 1000 psia에서 각각 4.40, 3.45, 3.41, 2.66 이었고, 압력 지수는 각각 0.32, 0.27, 0.29, 0.24 였다. 각 직경별  $r_w/r_{sb}$ 와 압력 지수는 Ag 선의 경우에 비해 상대적으로 작게 나타났다. 또한 직경이 각각 0.127, 0.25, 0.58, 0.8 mm인 Al 선을 삽입한 경우,  $r_w/r_{sb}$ 는 압력 1000 psia에서 각각 2.38, 2.54, 1.88, 1.79 였고, 압력 지수는 각각 0.47, 0.28, 0.28, 0.35로 나타났는데, 금속선 직경이 0.25 mm에서  $r_w/r_{sb}$ 가 가장 크게 나타났다. 0.1 mm에서 직경이 각각 0.1, 0.2, 0.4 mm인 Ni-Cr 선을 삽입한 경우,  $r_w/r_{sb}$ 는 압력 1000 psia에서 각각 1.54, 1.26, 1.07 이었고, 압력 지수는 각각 0.34, 0.35, 0.37로 금속선 직경이 작아질수록  $r_w/r_{sb}$ 는 다소 증가한 반면, 압력 지수의 변화는 거의 없었다.

Fig. 4는 B 추진제의 경우에 있어서, 압력 1000 psia에서 금속선 종류별로 직경에 따른  $r_w$ 를 나타낸 것으로서 직경 0.1 mm인 Cu 선의 경우를 제외하고는  $r_w$ 의 크기는 Ag 선 > Cu 선 > Al 선 > Ni-Cr 선의 순으로 나타났다. Ag 선을 삽입한 경우에는 직경에 따른  $r_w$ 의 변화가 거의 없었다. Cu 선을 삽입한 경우에는 금속선 직경이 감소할수록  $r_w$ 가 급격히 증가하였으며, 금속선 직경이 약 0.25 mm 이하의 영역에서는 오히려 Ag 선을 삽입했을 때보

다  $r_w$ 가 더 커졌다. 또한 Al 선을 삽입한 경우  $r_w$ 는 B 추진제와 마찬가지로 직경이 0.25 mm에서 최대점을 보이다가 직경이 0.25 mm보다 더 작아질수록  $r_w$ 는 감소하였다. 직경 0.1 mm인 Cu 선을 삽입한 경우의 B 추진제의  $r_w$ 가 Ag 선 0.1 mm를 삽입한 경우보다 더 커진 이유는 녹는 점이 낮은 금속선은 금속선 직경이 지나치게 작은 경우에 B 추진제의 높은 불꽃 온도에 의해 쉽게 녹기 때문에 효과적으로 추진제의 온도 상승에 기여하지 못하고, 녹는 점이 높은 금속선은 직경이 작은 경우에도 쉽게 녹지 않고 열전달 매체로 작용하기 때문에 사료된다. Cu 선은 Ag 선보다 열확산 계수는 약 9% 정도 작으나 녹는 점은 오히려 9% 정도 크므로 금속선 직경이 0.1 mm로 작은 경우에는 오히려 Cu 선을 삽입했을 때가 Ag 선을 삽입했을 때보다  $r_w$ 가 더 증가한 것으로 보인다. 따라서 금속선 직경이 0.1 mm 이하로 작아질수록 금속선에 인접한 추진제의 연소 속도 증가비는 금속선의 열확산 계수보다 녹는 점에 더 의존하는 것으로 생각된다. 직경이 0.1, 0.25, 0.5 mm인 Ag 선을 삽입한 경우,  $r_w/r_{sb}$ 는 압력 1000 psia에서 각각 4.98, 4.98, 4.89였고, 압력 지수는 각각 0.39, 0.31, 0.32로서 직경별 연소 속도와 압력 지수 변화는 크게 나타나지 않았다. 직경이 각

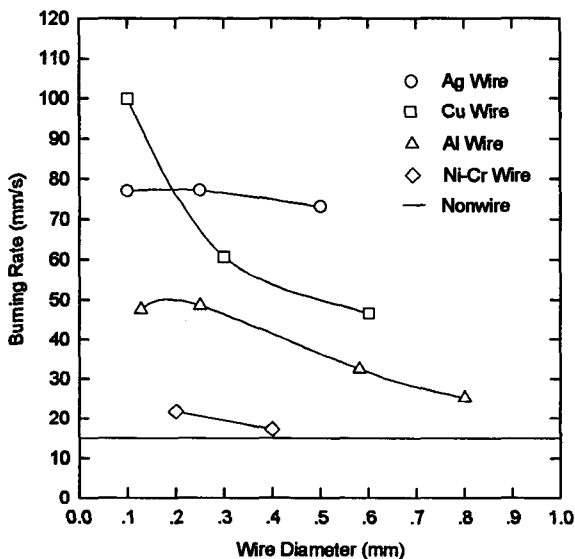


Fig. 4. Effect of Diameters of Ag, Cu, Al and Ni-Cr Wires on the Burning Rate of B Propellant at 1000 psia.

각 0.1, 0.3, 0.6 mm인 Cu 선을 삽입한 경우,  $r_w/r_{sb}$ 는 압력 1000 psia에서 각각 6.59, 4.01, 3.28 이었고, 압력 지수는 각각 0.39, 0.31, 0.29로서 직경이 0.1 mm일 때의  $r_w/r_{sb}$ 가 모든 금속선 직경 중에서 가장 큰 값을 나타냈으며, 압력 지수는 Ag 선을 삽입한 경우와 비슷하였다. 또한 직경이 각각 0.127, 0.25, 0.58, 0.8 mm인 Al 선을 삽입한 경우,  $r_w/r_{sb}$ 는 압력 1000 psia에서 각각 3.11, 3.57, 2.16, 1.72였고, 압력 지수는 각각 0.39, 0.31, 0.27, 0.24로서 직경이 0.25 mm까지는 직경이 감소할수록 연소 속도와 압력 지수는 서서히 증가하다가 직경이 0.1 mm일 때 연소 속도는 낮아지고 압력 지수는 급격히 증가하였다. 직경이 0.2, 0.4 mm인 Ni-Cr 선을 삽입한 경우,  $r_w/r_{sb}$ 는 압력 1000 psia에서 각각 1.52, 1.18 이었고, 압력 지수는 각각 0.31, 0.32로서 연소 속도는 크게 증가하지 않았으며 압력 지수의 변화는 없었다.

이상의 시험 결과로부터 추진제의 연소 속도가 비슷한 A와 B 추진제를 비교하여 보면, 압력 지수는 크게 차이가 없었으나  $r_w/r_{sb}$ 는 B 추진제가 A 추진제보다 모든 금속선 종류와 직경에서 크게 나타났다. 이러한 이유로서는 첫째로 금속 입자 함유량이 많을수록 추진제 연소 기체의 불꽃 온도가 상승되어 불꽃으로부터 금속선으로의 전달되는 열속이 증대되며, 둘째로는 추진제 자체의 열확산 계수가 증대되어 금속선으로부터 금속선과 인접한 추진제로의 열전달이 촉진되기 때문으로 사료된다. 따라서 Al 입자를 많이 함유하고 있는 B 추진제의  $r_w/r_{sb}$ 가 더 크게 나타난 것으로 생각된다.

4 종류의 금속선 중 전체적으로 Ag 선을 삽입한 추진제의  $r_w/r_{sb}$ 가 가장 크게 나타났으며, 그 다음이 Cu 선, Al 선, Ni-Cr 선을 삽입한 추진제의  $r_w/r_{sb}$  순으로 나타났다. 이는 금속선의 열확산 계수의 크기 순과 일치하였다. 또한 금속선 직경이 감소함에 따라 압력 지수는 증가함을 알 수 있었고, 직경이 0.25 mm 보다 작을 경우에 압력 지수는 급격히 증가하였다. 0.1 mm 직경의 Ag 선을 A 추진제에 삽입한 경우의 외에는 금속선을 삽입한 추진제의 압력 지수가 금속선이 삽입되지 않은 추진제의 압력 지수보다 작은 값을 나타냄을 알 수 있었다. 압력 1000

psia에서 0.1 mm 직경의 Cu 선을 삽입한 B 추진제의  $r_w/r_{ab}$ 가 6.59로 모든 금속선 종류와 직경 중에서 가장 크게 나타났으며, 같은 직경의 금속선을 사용한 A 추진제의 경우보다도 1.5 배나 크게 나타났다. 같은 열전도도를 갖는 금속선의 경우, 녹는 점이 더 클수록 열전달 효과가 더 크게 나타나며, 금속선의 직경이 작아질수록 이러한 경향은 더 크게 나타날 수 있다. B 추진제의 불꽃 온도는 A 추진제의 불꽃 온도보다 500K 이상 높기 때문에 A 추진제의 경우보다 금속선으로의 열전달 효과가 더 크게 나타나고 금속선의 직경이 작은 경우에는 삽입된 금속선의 녹는 점이 클수록 고온의 불꽃 온도에 쉽게 녹지 않고 열전달 매체로 작용할 수 있다. 따라서 금속선 직경이 0.1 mm로 작은 Cu 선을 B 추진제에 삽입하였을 때의  $r_w/r_{ab}$ 가 같은 직경의 Ag 선을 삽입하였을 때의  $r_w/r_{ab}$ 보다 30%이상 크게 나타났고 같은 직경의 Cu 선을 삽입한 A 추진제의  $r_w/r_{ab}$ 보다도 50%나 더 크게 나타났다.

앞에서 고찰한 2종의 혼합형 추진제의 압력에 따른 금속선의 종류별, 직경별,  $r_{ab}$ ,  $r_w$  값과  $\alpha_w$ ,  $T_m$  등 금속선의 물리적 성질, 그리고 추진제의 연소 특성인 자연 발화 온도와 연소 기체의 불꽃 온도를 Buckingham pi 정리를 적용하여 무차원 해석을 하여 4개의 무차원군으로 형성되는 실험식을 얻었으며, 이 식으로부터 계산된  $r_w$  값과 2종의 혼합형 추진제의  $r_w$  실험치를 비교하여 보았다. 1990년 Chung-Shan IST의 Hsing은 이러한 무차원 해석에 의해 금속선을 삽입한 추진제의 연소 속도를 계산하는 연구를 처음으로 시도하였다. 그러나 Hsing은 추진제의 연소 특성인 자연 발화 온도는 전혀 고려하지 않았으며, 연소 기체의 불꽃 온도는 무시하였다. 추진제의 온도가 상승함에 따라 추진제의 성분이 분해되면서 점화-연소되는 온도인 자연 발화 온도와 금속선으로 전달되는 열원인 연소 기체의 불꽃 온도는  $r_w$ 에 중요한 인자로 작용할 수 있으므로 이러한 두 인자를 매개 변수로 추가하여 무차원 해석을 수행하였다. Hsing은 식 (4)의 우변의 첫 번째와 두 번째 항만을 고려하여  $r_w$ 를 계산하였으며, 본 연구에서는 세 번째와 네 번째 항의 온

도 항을 추가하여 계산하였다. 식 (5), (6)은 무차원 해석에 의한 4개의 무차원군으로 형성된 A와 B 추진제에 대한  $r_w/r_{ab}$ 의 실험식을 나타낸 것이다.

$$\frac{r_{w,A}}{r_{ab,A}} = 3323 \times 10^{-9} \left( \frac{d_w}{d_{p,ab,A}} \right)^{0.7539} \left( \frac{d_w}{d_p} \right)^{-0.1938} \left( \frac{T_m}{T_{f,A}} \right)^{1.041} \left( \frac{T_{ig,A}}{T_{f,A}} \right)^{-12.28} \quad (5)$$

$$\frac{r_{w,B}}{r_{ab,B}} = 9528 \times 10^{-6} \left( \frac{d_w}{d_{p,ab,B}} \right)^{0.7702} \left( \frac{d_w}{d_p} \right)^{-0.2384} \left( \frac{T_m}{T_{f,B}} \right)^{0.8969} \left( \frac{T_{ig,B}}{T_{f,B}} \right)^{-7.687} \quad (6)$$

Fig. 5, 6은 A와 B 추진제의 실험식으로부터 계산된  $r_w$ 를 실험값과 비교한 것으로서 대체적으로 실험값과 잘 부합됨을 알 수 있었고, A 추진제의  $r_w$  실험값( $r_{w,e}$ )에 대한 실험식으로부터 계산된  $r_w$  계산값( $r_{w,c}$ )의 오차비  $[(r_{w,c}-r_{w,e})/r_{w,e}]$ 의 편차( $\sigma$ )는 10.38%였고, B 추진제의  $(r_{w,c}-r_{w,e})/r_{w,e}$ 의 표준 편차는 13.26%였다. 이러한 값들은 온도 항인 식 (6)의 우변의 3, 4 번째항을 고려하지 않은 Hsing의 계산 결과와 비교하여 보면, 표준 편차가 50% 정도 줄어들음을 알 수 있었다. 특히 자연 발화 온도와 연소 기체의 불꽃 온도로 구성된 네 번째 무차원군이 표준 편차를 줄이는 데 큰 역할을 한 것으로 나타났다. 또한 금속선 직경이 0.1 mm 이하의  $r_w$  데이터는 상대적으로

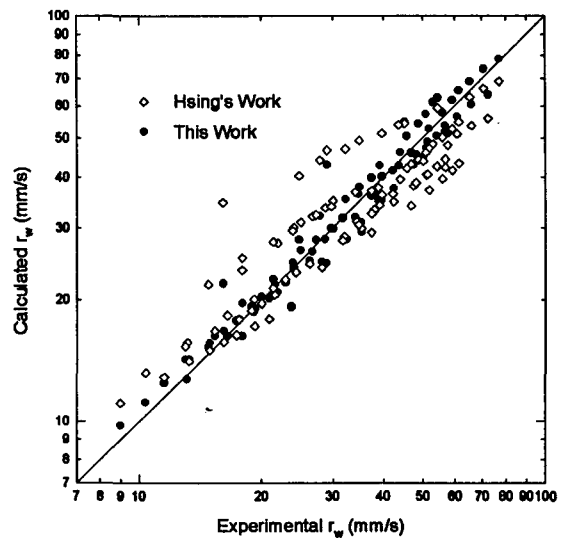


Fig. 5. Comparison between Calculated and Experimental Burning Rates of A Propellant Embedded with Metal Wires.

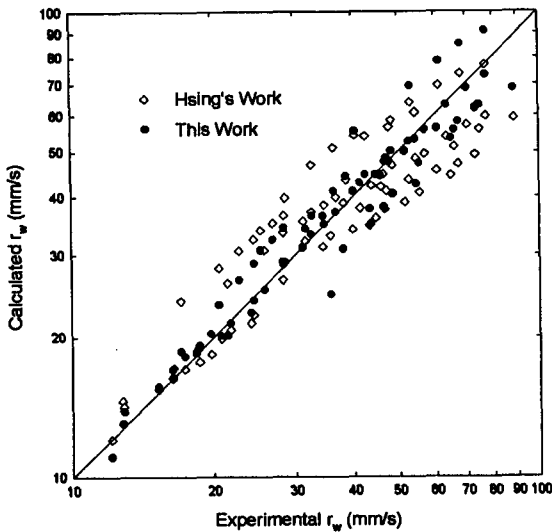


Fig. 6. Comparison between Calculated and Experimental Burning Rates of B Propellant Embedded with Metal Wires.

로 높은 연소 속도값을 나타내어 다른 직경의  $r_w$  데이터와 비교하여 볼 때 상대적으로 신뢰도가 떨어졌다. 0.1 mm 직경의  $r_w$  데이터를 제외한 경우에  $(r_{w,c} - r_{w,e})/r_{w,e}$ 의 표준 편차는 각각 6.13, 8.87%로 0.1 mm 직경의 데이터를 고려하였을 때보다 30~40% 정도 표준 편차가 작아짐을 알 수 있었다.

### 5. 결론

2종의 혼합형 연료를 대상으로 4종의 금속선(Ag, Cu, Al, Ni-Cr)을 삽입하여 금속선 직경(0.1~0.8 mm)별로 압력에 따른 금속선과 인접한 추진제의 연소 속도( $r_w$ ), 연소 속도 증가비( $r_w/r_{sb}$ )와 압력 지수(n)의 변화를 고찰하였으며, Buckingham pi 정리를 적용한 무차원 해석으로부터 실험식을 구하여 계산된  $r_w$ 와 실험으로부터 얻어진  $r_w$ 를 서로 비교·고찰하였다.

1. 금속선을 추진제에 삽입함으로써  $r_w/r_{sb}$ 는 크게 증가하였고, 1000 psia의 압력에서 최대 6.59 배였다.  $r_w/r_{sb}$ 의 크기 순은 삽입된 금속선의 열확산 계수의 크기 순과 일치하였고, 금속선의 직경이 작을수록, 연소 기체 불꽃 온도가 높을수록  $r_w/r_{sb}$ 는 증가하였다.
2. 녹는 점이 비교적 낮은 Al선이나 Ag선은 한계 직경

에서  $r_w$ 가 급격히 감소하는 최대값이 존재하였으며, 이러한 최대값이 생기는 이유는 연소 기체 불꽃으로부터 전달된 열에 의해 금속선이 빠르게 녹아 없어져서 연소 표면 위로 노출된 금속선의 길이가 짧아지게 되어 미연소 추진제로 열을 전달하는 매체로서의 기능이 급격히 떨어졌기 때문으로 사료된다.

3. 자연 발화 온도와 연소 기체의 불꽃 온도를 Buckingham pi 정리를 적용한 무차원 해석에 추가로 적용하여 계산해 본 결과, 자연 발화 온도와 연소 기체의 불꽃 온도를 무시한 Hsing의 방법보다 50% 정도 표준 편차가 작아짐을 알 수 있었다.

### 참고문헌

1. Sutton, G.G. and Ross, D.M.: "Rocket Propulsion Element", Chap. 10, John Wiley & Sons, (1976).
2. Rumbel, K.E. and Caren, M.: British Patent No. 994184, (1965).
3. King, M.K.: "Analytical Modeling of Effects of Wires on Solid Motor Ballistics", AIAA Paper No. 89-2784, Atlantic Research Corp. Gainesville, VA, (1989).
4. Kubota, N. and Ichita, M.: *ALAA J.*, 20(1), 116(1982).
5. Hsing, Y., Wu, S. and Kuo, J.: "Burning Rate of HTPB Composite Propellant Grains with Embedded Metal Wires", AIAA Paper No. 90-2201, Chung-Shan Institute of Science and Technology Taiwan, R.O.C, (1990).
6. Golub, G.: *J. Spacecraft*, 2(4), 593 (1965).
7. Buckingham, E.: *Physical Review*, 2, 345(1914).
8. 木村逸郎: *Rocket 工學*, 養賢堂, (1993).
9. Yoo, J. C., et al.: "Combustion Characteristics of Wire Embedded Propellant", MSDC-421-940575, Agency for Defense Development, (1994).