

## 금속선을 삽입한 N-5복기 추진제의 연소 특성

유지창\* · 박영규\* · 김인철\*

### A Study on the Burning Characteristics of N-5 Propellant Embedded with Metal Wires

J. C. Yoo\* · Y. K. Park\* · I. C. Kim\*

#### ABSTRACT

Burning characteristics of solid propellants embedded with four kinds of metal wires(Ag, Cu, Al, Ni-Cr wire) were studied with varying wire diameters(0.108 mm) for N-5 propellant. It was found that the order of the burning rate increment ratio( $r_w/r_{sb}$ ) was Ag wire > Cu wire > Al wire > Ni-Cr wire which was the same as the order of the magnitude of thermal diffusivity. The burning rate increment ratio( $r_w/r_{sb}$ ) of N-5 propellant was less than that of composite Propellant because of the difference of adiabatic flame temperature and flame structure. When Ag, Cu and Al wire having high thermal diffusivity were embedded in N-5 propellant, the plateau and mesa characteristics of the double base propellant were disappeared, but not disappeared in the case of propellant embedded with Ni-Cr wire due to its poor thermal conductivity.

#### 초 록

복기 추진제인 N-5 추진제에 4종의 금속선(Ag, Cu, Al, Ni-Cr선)을 삽입하여 연소 특성을 고찰하여 보았다. 금속선이 삽입된 복기 추진제의 연소속도 증가비( $r_w/r_{sb}$ )는 Ag선 > Cu선 > Al선 > Ni-Cr선의 순으로서 금속선의 열확산 계수의 크기 순과 일치하였다. 금속선을 삽입한 N-5추진제의  $r_w/r_{sb}$ 는 단열 불꽃 온도와 구조의 차이에 의하여 혼합형 추진제보다 작게 나타났다. 복기 추진제에 열확산 계수가 비교적 큰 Ag, Cu, Al선을 삽입한 경우, 금속선이 삽입되지 않은 추진제에서 나타난 plateau와 mesa 연소 특성이 사라진 반면 열확산 계수가 작은 Ni-Cr선을 삽입한 경우에는 plateau와 mesa 연소 특성이 그대로 존재했다.

\*국방과학연구소(Agency for Defense Development)

## 1. 서 론

추진제의 연소 속도를 증대시키는 방법으로는 산화제의 입자 크기나 혼합비를 조절하거나, 연소 촉매, 금속 연료 등을 추진제내에 첨가시키는 방법이 있지만 이러한 추진제 조성을 변화시키면서 연소 속도를 향상시키는 방법에는 한계가 있다. 따라서 일정한 연소 속도에서 추력 가스의 생성량을 증대시키기 위해서는 연소 면적을 크게 하는 방법이 요구된다<sup>[1,4,12]</sup>.

추진제 그레인의 연소 면적을 증대시키기 위해서는 여러 형상의 내면 연소형 그레인(perforated grain)을 사용하는 방법이 있으나 부피 충전률이 작은 단점이 있다. 따라서 단면 연소형 그레인의 장점인 높은 부피 충전률을 유지하면서 연소 면적을 증대시켜서 추력 가스의 생성량을 증대시키는 가장 효율적인 방법으로는 금속선, 필라멘트, strip, rod 등의 열전도체를 단면 연소 그레인내에 삽입시키는 방법이 있다<sup>[7,8]</sup>.

이러한 열전도체를 추진제내에 삽입시키는 연구는 1950년대 Rumbel에 의해 PVC(poly-vinyl chloride)와 AP(ammonium perchlorate)가 주성분인 혼합형 추진제를 대상으로 처음 시도되었으며, 그 후 Kubota, Caveny, Gossant, Sing과 King 등에 의해 복기 추진제와 혼합형 추진제를 대상으로 금속선 종류, 직경, 형태, 수 및 기하학적 배열 등에 따른 실험적, 이론적 연구가 이루어져 왔다<sup>[2,3,6,7,9,13,14]</sup>.

금속선을 삽입한 복기 추진제에 대한 실험적 연구는 특히 중국과 일본을 중심으로 70년대 말부터 90년대 초까지 주로 진행되어 왔다. Kubota는 열전대를 사용하여 연소면의 온도 분포를 측정함으로써 fizz 영역과 dark 영역의 불꽃 온도와 연소속도와의 상관관계에 대하여 규명하였으며<sup>[14]</sup>, Machida는 Ag 선을 사용하여 복기 추진제의 plateau와 mesa 특성의 변화에 대한 실험을 하였으나, 이러한 원인에 대한 규명이나 더 이상의 자세한 내용에 대해서는 연구를 수행하지 않았다<sup>[11]</sup>.

본 연구에서는 NC와 NG가 주성분으로 구성된 복기 추진제인 N-5 추진제를 대상으로 직경이 0.108 mm 범위의 4종류의 금속선(Cu, Ag, Al,

Ni-Cr 선)을 사용하여, 직경 6 mm인 스트랜드 시편내에 금속선을 단선 삽입하여 압력에 따른 연소 속도( $r_w$ ), 압력 지수( $n$ )와 금속선에 인접한 추진제의 연소 속도 증가비( $r_w/r_{sb}$ )의 변화와 금속선 종류에 따른 N-5 추진제의 plateau와 mesa 특성의 변화를 고찰하였다.

## 2. 이론적 배경

복기 추진제의 연소는 추진제 표면에서의 고상 반응과 표면에서 떨어진 기상 반응으로 분류할 수 있으며 기상 반응은 3영역으로 분류된다<sup>[12]</sup>. 첫번째 영역은 연소 표면에서 발생한 연소 가스가 발열 반응을 하는 얇은 층으로 fizz 층이라 하며 약간의 온도 상승을 나타내는 영역이다. 두번째 영역은 거의 온도 상승이 없는 영역으로 암층(dark zone)이라 하며, 세번째 영역은 불꽃층(flame zone)으로 최종적인 기상 반응에 의해 연소 가스 온도가 불꽃 온도까지 상승한다.

단면 연소 그레인을 사용할 경우 추진제의 성분을 변화시키지 않고 연소 가스의 생성량을 증가시키는 방법으로 추진제내에 축방향으로 기공을 만들어 주는 방법, 튜브를 삽입시키는 방법, 광섬유를 삽입시키는 방법과 열전도체를 삽입시키는 방법이 있다<sup>[4,8,10,13]</sup>. 이중 열전도체인 금속선을 추진제 그레인과 길이 방향으로 배열시키는 방법이 가장 효율적인 것으로 알려져 있으며 금속선과 인접한 추진제의 연소 속도와 압력지수는 금속선의 종류 및 직경의 함수로 알려져 있다<sup>[3,9]</sup>.

금속선을 삽입한 추진제의 연소 속도에 관한 이론적 연구는 1960년대 말 Caveny가 처음 연소 모델을 제안한 이후로 지금까지 이에 관한 연구가 King 등에 의해 일부 이루어 졌으나, 아직 만족할 수준의 연구는 이루어지지 않은 실정이다<sup>[2,4,6,9]</sup>.

금속선을 삽입한 고체 추진제의 연소 형태는 Fig. 1과 같으며 추진제가 연소하면서 생성된 고온의 연소 가스로부터 금속선으로 전달된 열이 축방향으로 추진제내에 삽입되어 있는 금속선으로 전달되고, 가열된 금속선의 열이 금속선과 인접한 추진제로 전달되면서 인접한 추진제의 온도를 상승시킨다. 금속선

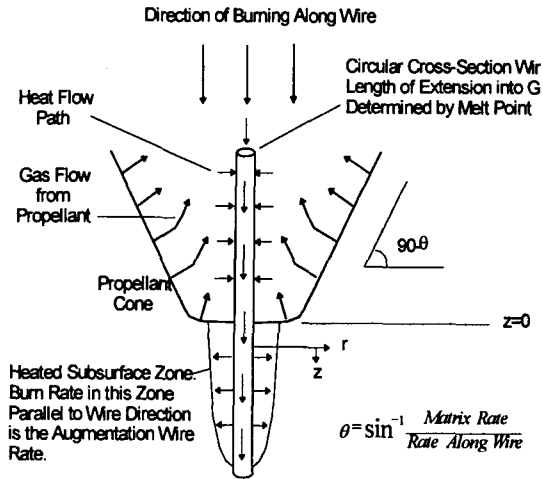


Fig. 1. Schematic diagram of solid propellant combustion embedded with metal wire.

과 인접한 추진제의 온도가 상승하여 자연 발화 온도에 도달하게 되면 추진제는 발화, 연소하게 된다. 자연발화 온도는 공기 중에 놓여 있는 물질이 상온에서 저절로 발열하여 그 열의 축적에 의해 발화점에 이르러 발화, 연소하는 현상을 말하며 그때의 최저 온도를 자연 발화 온도라 한다. 이와 같이 금속선에 인접한 추진제는 빠른 속도로 연소가 진행되고 금속선과 인접하지 않은 추진제는 연소면과 수직인 방향으로 본래의 연소 속도로 연소가 진행됨에 따라 Fig. 1에서 볼 수 있듯이 원뿔 형상의 연소면을 이루게 된다. 이러한 원뿔의 형성은 연소 면적을 증대시켜서 추진제 연소 가스의 질량 유속을 증대시키는 역할을 한다

### 3. 실험 장치 및 방법

추진제의 연소 속도는 MIL-STD-286B-T803.1 방법[25]에 따라 측정하였다. 금속선에 인접한 N-5 추진제의 연소 속도를 측정하기 위해 추진제 시편에 금속선을 삽입하였다. 복기 추진제는 제조 공정 중에 금속선을 삽입하기가 어려우므로 압연 과정을 거친 판상 추진제를 두께 6 mm, 길이 150 mm 정도로 절단하고 시편의 절반을 절개하여 시편의 중심부에 금속선을 길이 방향으로 고정시킨 후, 복기 추진제

가 아세톤에 잘 녹는 성질을 이용하여 소량의 아세톤으로 절개된 부위를 접착 시켜 시편을 제작하였다. 소량 사용된 아세톤을 휘발 시키기 위해 40℃ 항온기에서 72시간 동안 건조 시켰다. inhibitor로 에폭시 수지(Shell Chemical Co., Epon 815)와 경화제(EVRA Inc., Genamid 2000)의 비를 1:1로 혼합한 후, 단열성을 높이기 위해 첨가제로 Aerosil 200(Degussa Inc.)을 inhibitor 1 cc당 0.05 g 비율로 혼합하여 로켓 추진제 표면에 2회 코팅하였다.

정압 조건에서 추진제의 연소 속도를 측정하는 장비인 스트랜드 버너(Atlantic Research Corp., 735)를 사용하여 금속선을 삽입한 추진제의 연소 속도를 측정하였으며, Fig. 2에 스트랜드 버너의 장치도를 나타내었다. 스트랜드 버너는 연소실과 surge tank, 압력 공급 장치, 온도 조절 장치 및 로켓 추진제 시편의 연소 시간과 압력을 측정하는 장치인 디지털 타이머와 오실로그래프 기록계로 구성되어 있다. Surge tank는 추진제 시편의 연소 시 연소실 내부의 압력 상승을 줄이는 역할을 하며, 연소실 압력은 질소 기체에 의해 조절 되었다.

밀도 측정 시편은 경화된 추진제 시료로부터 한 변이 약 20 mm인 정육면체로 잘라서 제작하였다. 추진제의 밀도는 화학 천칭(Mettler, AK-160)을 이용하여 20C에서 부력에 의한 방법으로 측정하였고, 부력에 이용한 액체는 실리콘 오일(Dow Corning Co., Fluid 200, 10 cs)을 사용하였다.

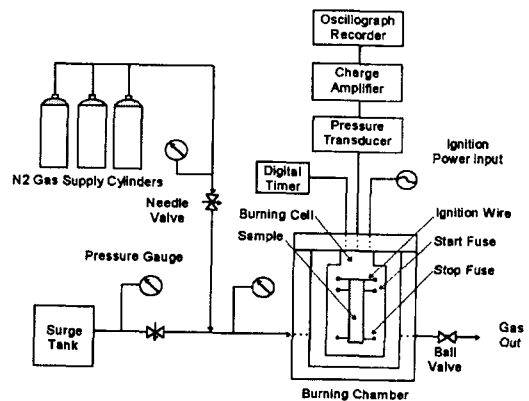


Fig. 2. Schematic diagram of strand burner system.

자연 발화 온도는 Du Pont 910 DSC를 이용하여 시료는 약 2mg 취하고, 승온 속도는 각각 1, 2, 5, 10C/min., 온도는 상온에서부터 400C까지 변화시키면서 측정하였다. DSC thermogram의 기준선의 접선과 발열 곡선의 접선과의 교점인 열분해 개시 온도를 각 가열 속도에 따라 구한 후, Kissinger 식에 의하여 계산하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 추진제의 물리적/열적 성질 및 연소 기체의 열역학 특성

시험에 사용된 N-5 복기 추진제의 조성과 물리적 특성 및 연소기체의 열역학 특성을 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Formulation and Physical and Thermo-dynamic Properties of N-5 and AA-2 Propellant

Propellant		N-5
Composition (Wt %)	NC	50.0
	NG	34.9
	DEP	10.5
	Triacetin	-
	DPA	-
	2NDPA	2.0
	Lead Salicylate	1.2
	Lead 2-ethylhexoate	1.2
	Lead -resorcylate	-
	Copper Salicylate	-
	Wax	0.2
Flame Temperature @ 1000psia (K)		2,298
Density (g/cm <sup>3</sup> )		1.55
Autoignition Temperature (K)		431
rsb @ 1000psia (mm/s)		10.99

복기 추진제인 N-5는 NC와 NG가 주성분으로 구성되어 있고, 연소 촉매로 납화합물인 lead salicylate, lead 2-ethylhexoate와 Monobasic copper salicylate가 함유되어 있다. 소량의 납화합물을 복기 추진제에 첨가함으로써 로켓 모터 작동 압력 범위에서 plateau 영역과 mesa 영역을 갖는 연소 특성을 얻을 수 있는데, plateau 영역에서의 압력 지수는 0.2 범위이며, mesa 영역에서의 압력 지수는 음수로 나타난다.

N-5 추진제의 연소속도는 압력 1000 psia에서 10.99 mm였고 압력 범위 6001500 psia범위에서 plateau와 mesa영역을 나타냈다. 추진제의 자연 발화 온도는 431K로 이는 일반적인 혼합형 추진제와 비교하여 볼 때 100K 이상 작은 값이다.

4.2 금속선의 물리적 성질

시험에 사용된 금속선들의 열전도도, 밀도, 열용량, 열확산 계수 및 녹는 점 등의 물리적 특성을 Table 2에 나타내었다. Ag, Cu, Al선은 열확산 계수가 1.110-4 m<sup>2</sup>/s이상으로 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<sup>[7,8]</sup>.

금속선과 인접한 추진제의 연소 속도는 금속선의 열확산 계수에 1차적으로 영향을 받는 것으로 알려져 있다<sup>[7]</sup>.

열확산 계수가 큰 열전도체에 의해 높은 온도를 갖는 추진제의 연소 불꽃으로부터 금속선으로 열이

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	4,226	10,5103	234	1.7210-4	1,235
Cu	3,905	8,92103	385	1.1610-4	1,356
Al	2,720	2,70103	904	1.1110-4	933
Ni-Cr	134	8,40103	448	3.610-6	1,673

전달되고, 금속선으로부터 다시 미연소된 추진제로 열전달이 진행됨으로써 금속선과 인접한 로켓 연료의 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 Ag선 > Cu선 > Al선 > Ni-Cr선 순으로 나타났고, 금속선의 녹는 점의 크기는 Ni-Cr선 > Cu선 > Al선 > Ag선의 순으로 나타났다.

#### 4.3 금속선을 삽입한 복기 추진제의 연소 특성

Fig. 3~6은 Ag, Cu, Al, Ni-Cr선의 직경별로 금속선이 삽입된 N-5 추진제의 압력 변화에 따른 연소 속도 결과를 나타낸 것으로서 Ag, Cu, Al선을 삽입하였을 때 복기 추진제의 plateau와 mesa 연소 특성이 사라졌다. 직경이 0.1, 0.25, 0.5 mm인 Ag선을 삽입한 경우 압력 1000 psia에서의  $r_w/r_{sb}$ 는 각각 2.38, 2.94, 2.68이었으며, 압력 지수는 각각 0.98, 0.71, 0.52였다. 압력 1000 psia까지는 직경이 클수록  $r_w$ 가 큰 값을 나타냈으며, 압력 지수도 작게 나타났다. 금속선을 삽입하지 않은 추진제의 연소속도가 압력 1000psia에서 8mm/s인 Kuboda의 시험 결과와 비교하여 보면, Ag 선 0.6mm를 삽입한 경우 본 논문의  $r_w/r_{sb}$ 는 2.45배로 추정되고

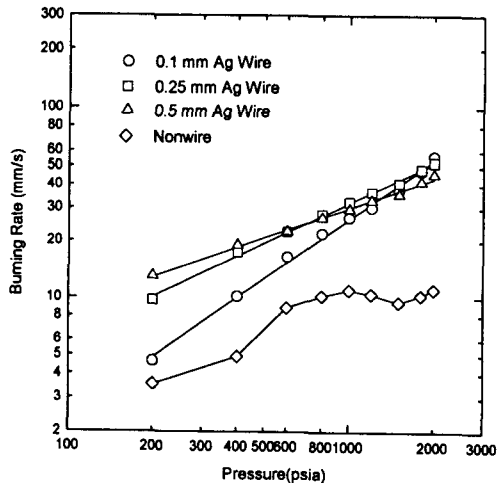


Fig. 3. Plot of burning rate vs. pressure of N-5 propellant embedded with Ag wires of 0.1, 0.25, 0.5 mm.

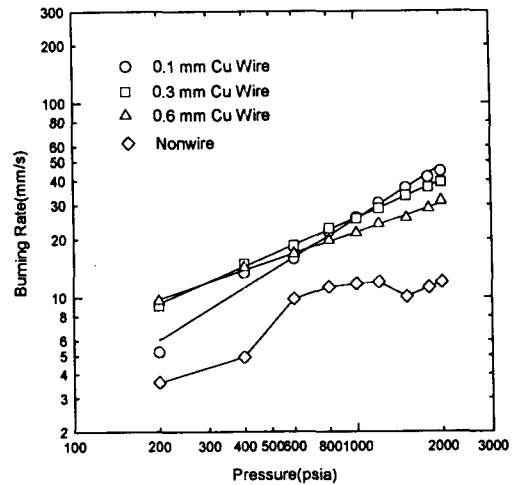


Fig. 4. Plot of burning rate vs. pressure of N-5 propellant embedded with Cu wires of 0.1, 0.3, 0.6 mm.

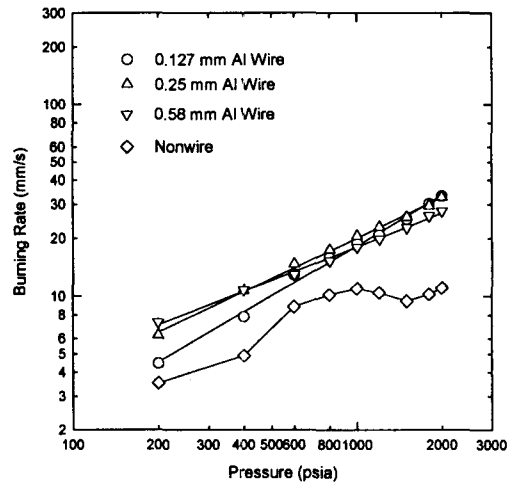


Fig. 5. Plot of burning rate vs. pressure of N-5 propellant embedded with Al wires of 0.127, 0.25, 0.58 mm.

Kuboda의 결과는 2.25배로 연소속도가 3mm/s가 더 빠른 본 논문의 경우가 더 크게 나타났다[14]. 이러한 경과는 연소속도가 느린 경우의  $r_w/r_{sb}$ 가 더 크게 나타나는 일반적인 경향과는 부합하지 않으나, 이 경우에는 추진제 자체의 물리화학적 특성이 차이가 나기 때문으로 판단된다. 직경이 0.1, 0.25, 0.6 mm인 Cu선을 삽입한 경우는 압력 1000 psia에서의  $r_w/r_{sb}$ 는 각각 2.34, 2.32, 1.97이었고, 압력 지

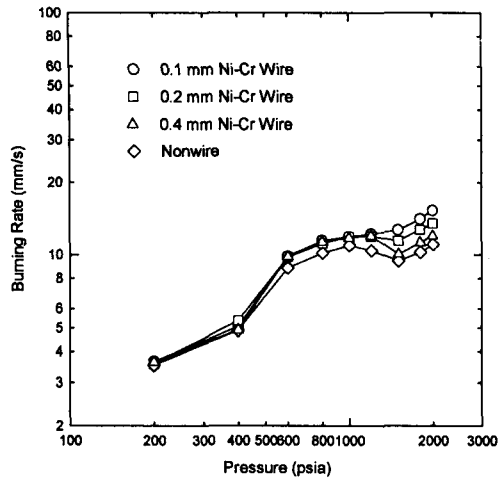


Fig. 6. Plot of burning rate vs. pressure of N-5 propellant embedded with Ni-Cr wires of 0.1, 0.2, 0.4 mm.

수는 각각 0.78, 0.60, 0.49였다. Ag선과 마찬가지로 금속선 직경이 클수록 압력 지수는 감소하였으며, 800 psia까지는 직경이 클수록  $r_w$ 가 큰 값을 나타냈고, 그 이상의 압력에서는 직경이 작아질수록  $r_w$ 가 급격히 커짐을 알 수 있었다.  $r_w/r_{sb}$ 와 압력 지수값은 Ag선의 경우보다 상대적으로 낮았다.

또한 직경이 0.127, 0.25, 0.58 mm의 Al선을 삽입한 경우,  $r_w/r_{sb}$ 는 압력 1000 psia에서 각각 1.72, 1.87, 1.64였고, 압력 지수는 각각 0.86, 0.69, 0.57이었다. Ag, Cu선과 마찬가지로 직경이 클수록 압력 지수는 감소하였고, 800 psia까지는 0.1 mm 직경의 금속선을 사용한 추진제의  $r_w/r_{sb}$ 가 가장 작게 나타났으며, 0.25 mm 직경의 금속선을 사용한 추진제의  $r_w/r_{sb}$ 가 400 psia 이상의 압력에서 가장 크게 나타났다. 0.1, 0.2, 0.4 mm인 직경의 Ni-Cr선을 삽입한 경우,  $r_w/r_{sb}$ 는 압력 1000 psia에서 각각 1.08, 1.08, 1.07이었고, 금속선을 삽입하지 않은 본래 추진제의 plateau와 mesa 연소 특성이 사라지지 않고 그대로 나타났으며, 압력이 높은 영역에서는 직경이 작을수록  $r_w/r_{sb}$ 는 약간씩 증가하는 것으로 나타났다.

이상의 결과로부터 4종류의 금속선을 삽입한 N-5 추진제의  $r_w/r_{sb}$ 를 비교 고찰해 본 결과, Ag선을 삽입한 추진제의  $r_w/r_{sb}$ 가 가장 컸고 다음으로 Cu선,

Al선, Ni-Cr선을 삽입한 추진제의 순으로 나타났다.

혼합형 추진제와 비교해 볼 때 4종의 금속선을 삽입한 N-5 추진제의  $r_w/r_{sb}$ 의 크기는 상대적으로 작은 값을 나타냈고, Ag선과 Cu선을 삽입한 추진제의  $r_w/r_{sb}$ 는 혼합형 추진제의 경우보다 절반으로 줄어들었다. 이러한 이유는 첫째로 복기 추진제의 단일 불꽃 온도가 혼합형 추진제에 비해 400700K 이상 낮은 값을 나타내어 연소 기체로부터 금속선으로 전달되는 열속이 작게 되고, 둘째로 복기 추진제는 연소시 불꽃 영역이 혼합형 추진제보다 연소 표면에서 더 멀리 떨어져 있고, 그 사이에 온도 변화가 없는 암층이 존재하여 금속선으로부터 미연소 추진제로의 열전달 효과를 경감시킨다.

또한 Ag, Cu, Al선과 같이 열확산 계수가 큰 금속선을 사용할 경우 금속선을 삽입한 추진제의 연소 속도는 추진제 본래의 조성보다는 금속선에 의한 열전달에 더 영향을 받는 것으로 사료된다. 복기 추진제는 소량의 납화합물을 사용함으로써 광화학 반응의 촉진으로 인하여 불꽃으로부터 연소 표면으로의 복사 에너지를 증가시키고, 납화합물이 연소중에 탄소 촉매를 형성하여 불꽃으로부터 연소면으로의 열전달 차단효과를 가져옴으로 인해 일정 압력 범위에서 연소속도 변화가 없는 plateau 영역과 연소속도가 줄어드는 mesa 영역이 나타나고, 이 탄소 촉매가 연소 기체 성분 중 NO를 분해시키면서 나타나는 발열반응으로 추진제의 연소를 촉진시킴에 따라 super rate 효과를 얻을 수가 있는 것으로 알려져 있다<sup>[15]</sup>. 따라서 납화합물을 첨가함으로써 일정 압력 범위에서 plateau와 mesa 영역이 나타나게 되는데, 열확산 계수가 큰 금속선을 삽입한 경우에는 금속선과 추진제간의 열전달로 인해 금속선에 인접한 추진제 연소 표면에서의 탄소 촉매 생성을 억제 하므로써 본래 추진제의 연소 특성인 plateau와 mesa 연소 특성이 사라진 것으로 판단된다.

Fig. 7은 압력 1000 psia에서 금속선 종류별로 직경에 따른 N-5 추진제의  $r_w/r_{sb}$ 를 나타낸 것으로서,  $r_w/r_{sb}$ 의 크기는 Ag선 > Cu선 > Al선 > Ni-Cr선의 순으로 금속선의 열확산 계수값의 크기 순서와 일치하는 것으로 나타났다. Fig. 8은 직경 0.25mm의 Cu선과 Ag선이 1개 삽입된 N-5 추진제의 경우, 스트랜드 시편 직경이 각각 3, 6, 12mm

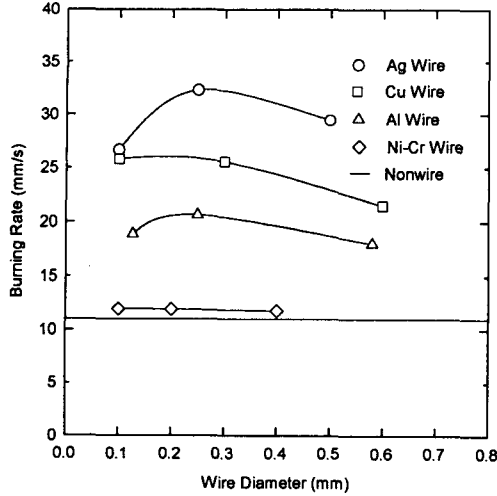


Fig. 7. Effect of diameters of Ag, Cu, Al and Ni-Cr Wires on the burning rate of N-5 propellant at 1000 psia.

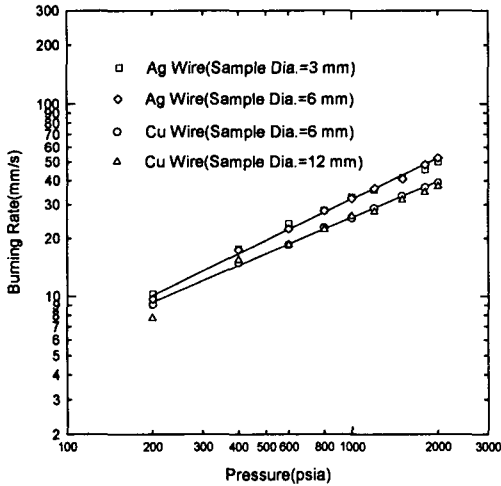


Fig. 8. Effect of strand sample size on  $r_w$  of N-5 propellant embedded with Ag, Cu wire of 0.25 mm.

일 때의 압력에 따른  $r_w/r_{sb}$ 를 나타낸 것으로서 시편 직경에 따른  $r_w/r_{sb}$ 의 변화는 없는 것으로 나타났다.

### 5. 결 론

복기 추진제인 N-5 추진제를 대상으로 4종의 금

속선(Ag, Cu, Al, Ni-Cr)을 삽입하여 금속선 직경 (0.1058 mm)별로 압력에 따른 금속선과 인접한 추진제의 연소 속도( $r_w$ ), 연소 속도 증가비( $r_w/r_{sb}$ )와 압력 지수( $n$ )의 변화를 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 금속선이 삽입된 복기 추진제의  $r_w/r_{sb}$ 는 Ag선 > Cu선 > Al선 > Ni-Cr선의 순으로 금속선의 열확산 계수의 크기 순과 일치하였다.
2. 복기 추진제는 혼합형 추진제와 비교해 볼 때,  $r_w/r_{sb}$ 의 크기는 상대적으로 작은 값을 나타냈고, 특히 Ag선과 Cu선을 삽입한 복기 추진제의  $r_w/r_{sb}$ 는 혼합형 추진제의 절반 수준으로 작게 나타났다. 이러한 이유는 단일 불꽃 온도 차이로 인한 열속 저하와 불꽃 구조 특성의 차이 때문으로 사료된다.
3. 복기 추진제에 열확산 계수가 비교적 큰 Ag, Cu, Al선을 삽입한 경우, 금속선이 삽입되지 않은 추진제에서 나타난 plateau와 mesa 연소 특성이 사라졌으며, 그 이유로는 금속선에 인접한 추진제는 금속선으로부터 추진제로 전달되는 열에 의해 연소 표면에서 연소 촉매로 작용하는 탄소의 생성이 억제되었기 때문으로 판단된다. 반면 열확산 계수가 작은 Ni-Cr선을 삽입한 경우에는 plateau와 mesa 연소 특성이 그대로 존재했다.

### 참 고 문 헌

1. Linder, V.: "Explosives-Propellants Theory and Practice", US Army Research & Development Command, 6, (1968).
2. King, M.K.: *J. Propulsion*, 7(3), 312(1988).
3. Shuling, C. and Fehgsleng, L.: *Combustion and Flame*, 45, 231 (1982).
4. Wirch, P.C. and Irvine, R.D.: "Forced Cone Burning for Active Control of Solid Propellant Burning Rate" AIAA Paper No. 86-1710, Defence Science and Technology Organization, Salisbury, South Australia, (1986).

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. King, M.K.: "Analytical Modeling of Effects of Wires on Solid Motor Ballistics", AIAA Paper No. 89-2784, Atlantic Research Corp. Gainesville, VA, (1989).
7. Rumbel, K.E. and Caren, M.: British Patent No. 994184, (1965).
8. Golub, G. : *J. Spacecraft*, 2(4), 593 (1965).
9. Carveny, L.H and Glick, R.L.: *J Spacecraft and Rocket*, 4(1), 79(1967).
10. Tanaka, M. and Morisaki, K.: *Kogyo Kayaku*, 50(5), 436(1989).
11. Marchida, H., Araki, I. and Fukuda, T.: *Kogyo Kayaku*, 42(6), 378(1981).
12. Oberth, A.E.: "Principles of Solid Propellant Development", Chap. 9, CPIA Pub. No. 469, (1987).
13. 유지창, 박영규, 김인철 : *항공우주학회지*, 제26권, 2호, 133(1998).
14. Kubota, N. and Ichida, M.: "Combustion Processes of Propellants with Embedded Metal Wires", AIAA J.20(1), 116(1982).
15. Kuo, K.K. and Summerfield, M.: *Fundamentals of Solid Propellant Combustion*, Chap., 1, Progress in Astronautics and Aeronautics U.S.A., 90, (1984)