Research Paper DOI: http://dx.doi.org/10.6108/KSPE.2013.17.5.018

PEBAX/AP 열가소성 고체추진제의 연소 억제 방안 연구

이형진[a,*] · 정해영[b] · 조준현[b] · 이영근[b] · 이호진[b]

Study of the Inhibition on the Combustion of PEBAX/AP Thermoplastic Propellant

Hyoungjin Lee[a,*] · Haeyoung Jung[b] · Junhyun Cho[b] · Youngguen Lee[b] · Hojin Lee[b]
[a]*PGM R&D Lab., LIG Nex1 Co., Ltd., Korea*
[b]*Research and Development Team, LIG Poongsan Protech, Korea*
[*]*Corresponding author. E-mail: hyoungjin.lee@lignex1.com*

ABSTRACT

This study suggested techniques to reduce burning rate and their effects for the AP thermoplastic composite propellant. Burning rate obtained through ground tests using a small size motor were analyzed to investigate the effects of AP particle size and LiF of 0.5~2.0% on the inhibition reaction for the PEBAX/AP thermoplastic propellant. The results showed that utilization of large size particle of AP and addition of LiF under 2.0% can reduce the burning rate sufficiently and their quantitative effects were suggested in this paper.

초 록

AP 기반의 혼합형 열가소성 고체 추진제의 연소 억제 방안과 그 효과를 제시하였다. 입자 사이즈가 다른 AP를 적용한 효과와 0.5%~2.0%의 LiF가 미치는 영향을 분석하기 위해 PEBAX/AP 열가소성 고체 추진제에 대한 지상연소 시험을 통해 연소속도 및 압력 지수를 산출한 후 비교 분석하였다. 분석 결과, 큰 AP 입자 사이즈를 적용하는 것과 2.0% 이내의 LiF 첨가는 연소속도를 감소시키는 효과를 보였으며 본 논문에서는 이에 대한 각각의 영향을 정량적으로 제시하였다.

Key Words: AP(과염소산 암모늄), Composite Thermoplastic Propellant(혼합형 열가소성 추진제), LiF(불화 리튬), Burning Rate(연소속도)

1. 서 론

과염소산 암모늄(Ammonium Perchlorate, AP)을 산화제로 사용하는 혼합형 고체 추진제는 군사용 로켓이나 유도탄에서 가장 널리 활용되고 있다[1]. 이러한 고체 추진기관의 내탄도 성능은 추진기관의 외경, 길이, 무게, 추진제 충전율 등과 같은 제약 조건을 바탕으로 추진제 그레인의

Received 11 July 2013 / Revised 17 August 2013 / Accepted 26 August 2013
Copyright ⓒ The Korean Society of Propulsion Engineers
pISSN 1226-6027 / eISSN 2288-4548 / http://journal.kspe.org

연소면적과 추진제의 연소속도에 의해 주로 결정된다[2]. 그러나 요구추력을 만족하도록 그레인을 설계하는데 있어, 연소면적만을 조절하는 것은 한계가 있으므로 추진제의 연소속도를 조절하는 것이 필요하다. 연소속도 조절은 AP 산화제의 입자 크기를 조절하는 것으로도 가능하지만 미세한 조절에는 어려움이 있다. 이에 다양한 연소 촉매제를 이용하여 연소속도를 제어하고자 하는 연구도 널리 수행되어 왔다.

연소 촉매제에 의한 연소속도 제어 연구는 연소 촉진 촉매제와 연소 억제 촉매제에 대한 것으로 구분할 수 있다. 전자의 경우, 철 또는 구리 혼합물 촉매제에 대한 것으로 HTPB/AP와 같은 열경화성 추진제에 촉매제가 미치는 효과나 반응메커니즘을 규명하고자 하는 연구가 주로 수행되었다[3-11]. 이에 반해, 연소속도 저감 촉매제에 대한 연구는 비교적 많지 않다. 연소억제 촉매제로서 옥사마이드(oxamide), 탄산칼슘, 인산칼슘, 염화암모늄, 및 황산암모늄, 염소화 탄화수소, 수산화 알루미늄, 불화 리튬, 중탄산나트륨, 탄산나트륨 등이 연소 지연 효과를 갖는 것으로 보고된 바 있으나 연소 촉진 촉매제와 같이 정량적인 연구는 거의 발표된 바 없다[12-13]. 다만, Kubota와 Hirata가 HTPB/AP 혼합형 추진제에 함유되어 있는 LiF가 연소속도 저하에 미치는 영향과 반응 메커니즘을 열분해 등 실험적 연구를 통해 보고한 바 있다[14].

연소 억제 촉매제는 촉진 촉매제와는 다르게 그 특성 상 추진제의 성능을 저하시킬 우려가 있다. 따라서 적용하는 추진제에 연소 억제 촉매제가 미치는 효과를 사전에 정확히 파악하는 것이 필수적이다. 이에 본 연구에서는 AP 기반의 혼합형 열가소성 고체 추진제의 연소 억제 방안과 그에 따라 발생하는 효과를 제시하고자 하였다. 입자 사이즈가 다른 AP를 적용하여 그 영향을 분석하고 연소 억제 촉매제로서 불화 리튬(LiF)의 첨가량이 연소 속도 및 압력 지수에 미치는 영향을 분석하고자 하였다. 시험을 위해 적용된 추진제로는 국내에서는 관련 연구가 매우 미진한 PEBAX/AP 열가소성 고체 추진제를 적용하였다. 200 μm 및 90 μm 입자 사이즈를 갖는 AP를 적용하거나, 0.5~2.5%의 LiF를 첨가하여 다양한 조성의 추진제를 제조한 후, 소형 추진기관에 적용하여 지상연소 시험을 수행하였다. 시험을 통해 시간에 따른 압력데이터를 획득하고 이로부터 연소속도 및 압력 지수를 산출하여 각각의 연소 특성을 비교 분석하였다.

2. 시험방법 및 조건

2.1 추진제 조성

본 연구에서는 기본적으로 PEBAX 바인더와 AP를 기반으로 한 열가소성 추진제를 적용하였다. 본 연구에 적용한 추진제는 크게 알루미늄 함유 유무에 따라, 알루미늄을 10% 함유하고 있는 고에너지 추진제(HE)와 알루미늄을 0.5% 함유하는 저에너지 추진제(LE)로 분류하여 각각의 추진제에 대해 연소 억제 특성을 관찰하고자 하였다. 추진제 조성은 Table 1~2와 같으며 기본적으로 PEBAX 바인더, AP 산화제, Al 금속 연료 및 LiF 연소 속도 조절용 첨가제로 구성된다.

AP와 Al은 흔히 알려진 추진제 조성물이며

Table 1. Low energetic (LE) propellant.

Component \ Type	A	B	C	D
PEBAX (%)	15	15	15	15
AP (200 μm) (%)		84.5	84	83.5
AP (90 μm) (%)	84.5			
Al (%)	0.5	0.5	0.5	0.5
LiF (%)	0	0	0.5	1

Table 2. High energetic (HE) propellant.

Component \ Type	E	F	G
PEBAX (%)	12	12	12
AP (200 μm) (%)	78	77	76
Al (%)	10	10	10
LiF (%)	0	1	2

본 논문에서는 국내에서는 다소 생소한 PEBAX와 LiF만 간단히 소개하고자 한다.

PEBAX 바인더는 폴리에테르(Polyether) 블록 아미드(Block amide)라고 불리기도 하며, 경질 폴리아미드(PA-12)와 연질 폴리테트라메틸렌옥사이드(PTMO)의 블록 공중합체로, 약 300℃의 초기 열분해 온도 특성을 갖는다. 용융온도는 139 ℃이며, 저온특성 및 탄성회복율이 뛰어나 내굴곡성 및 내피로성이 뛰어나며 다른 재료와의 혼합이 용이한 장점을 갖는다.

리튬은 타 금속에 비하여 쉽게 반응하고 열을 발산하며, 다종의 원소와 화합물을 이루는 특성을 갖는다. 이러한 리튬과 할로겐 원소인 불소(F)의 화합물이 LiF이다. 특히, 리튬은 대부분의 비금속과 화합물을 이루며 이온적이지만, 다른 알칼리 금속에 비해 공유결합성이 상당히 높다. 이러한 특징 때문에 혼합형 고체추진제에서 LiF는 연소속도 지연용 첨가제로 널리 사용되는 것으로 알려져 있다[14].

2.2 소형 지상연소 시험 모터

본 연구에서는 소형의 실린더형 그레인 및 모터를 이용한 지상연소 시험을 통해 추진제의 연소속도를 산출하였다. 연소시험을 통해 연소압력을 획득한 후, 계측된 연소압력으로부터 간단한 가정과 이론을 통해 연소속도를 산출하였다. 이를 위해 사용된 소형 모터는 Fig. 1과 같이 실린더형 연소관, 추진제 그레인, 노즐 및 점화장치로 구성된다. 연소실은 일반 steel 재질을 이용하여 내압 3,000 psi 이상에서 운용될 수 있도록 제작하였다.

적용된 추진제 그레인 형상은 Fig. 2와 같으며, 추진제 외부에 연소억제제(inhibitor)를 부착하여 연소가 추진제 내부에서만 진행되도록 하였다. d_o, d_e, L은 각각 추진제 내경, 외경, 길이를 나타낸다. Table 3에 추진제 형상에 대한 기본 정보를 제시하였다. 길이 108 mm, 외경 58 mm, 내경 25 mm로 제작된 추진제는 설계 치수에 대해 1% 이내의 오차를 갖는다. 관찰하고자 하는 연소 압력 영역에 따라 7~10 mm 직경의 노즐목을 적용하였다. 마지막으로 점화 과정은 내경 10 mm 정도의 다수의 홀을 갖는 금속 바스켓에 흑색화약과 추진제 chip을 소량 충전한 후, 바스켓을 전방덮개에 체결탭을 이용하여 고정하고 범용 연소형 스퀴브를 이용하여 추진제가 점화되도록 하였다. 본 연구에서는 예비시험을 통해 추진제가 손상되지 않는 범위에서 점화성능이 발생될 수 있도록 적절한 화약량을 선정하였으며, 흑색화약 0.5 g, 추진제 chip 1.5 g이 적용되었다. 연소실에서 생성되는 압력은 연소실 전방덮개에 홀을 내고 센서를 연결하여 획득하였다.

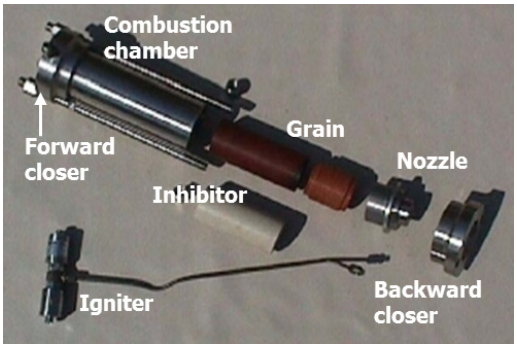


Fig. 1 Small-size motor for ground test.

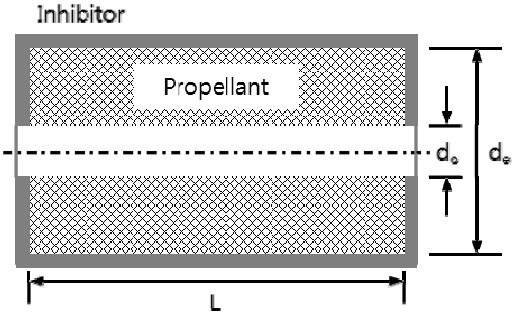


Fig. 2 Shape of propellant grain.

Table 3. Specifications of propellant grain.

	LE Propellant	HE Propellant
Density	1.71 g/cm^3	1.813 g/cm^3
Length (L)	108 mm	108 mm
E.D (de)	58 mm	58 mm
I.D (do)	25 mm	25 mm
Weight	397 g	421 g

2.3 연소속도 산출

고체추진제의 연소속도 측정은 스트랜드버너법, closed bomb법, 초음파법, x-ray법, plasma capacitance gauge(PCG)법 및 acoustic emission법 등 다양한 방법으로 가능하다[15]. 각각의 기법이 계측상의 장단점을 가지고 있지만, 스트랜드버너법이 일반적인 압력 범위에서는 가장 널리 사용된다. 그러나 스트랜드버너법은 가압설비 등 부가적인 장비나 설비가 필요하다. 본 연구에서는 이러한 부가 설비 없이 소형 모터를 이용한 지상 연소시험을 통해 획득한 시간 대 압력 데이터로부터 연소속도를 직접 계산하는 기법을 적용하였다. 이 기법은 비교적 간단하면서 일회의 시험을 통해 넓은 압력 범위에 대한 연소속도를 산출하는 것이 가능하며 혼합형 추진제 뿐 아니라 복기 추진제에도 적용이 가능한 것으로 알려져 있으며, 비교적 정확한 연소속도를 손쉽게 산출할 수 있는 장점이 있다.

실린더형 그레인은 연소가 이루어지면 점차 연소면적이 증가되므로 연소실 내부 압력 역시 Fig. 3과 같이 점진적으로 증가한다. 이러한 압력 데이터로부터 연소속도를 산출하는데 적용된 가정과 방법은 다음과 같다.

1. 연소 진행 동안 노즐목 크기는 일정하다.
2. 연소는 추진제 내부로부터 연소 표면에 수직으로, 그리고 길이방향으로는 동시에 발생한다.
3. 초기 점화 또는 침식 연소 영향은 무시한다.
4. 연소 시간 동안 특성 속도는 일정하다.

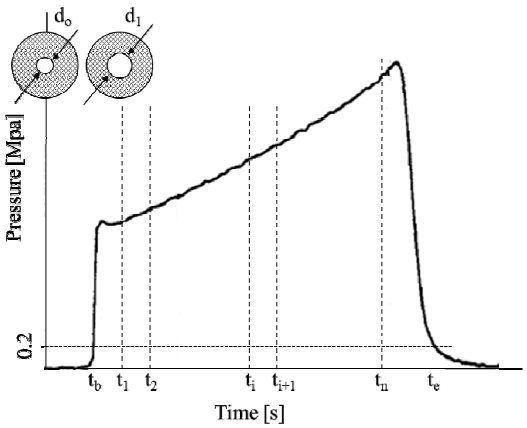


Fig. 3 Typical pressure trace of cylindrical propellant.

위의 가정으로부터 연소 시작 및 종말 등 전체 연소 시간영역의 압력 적분은 Eq. 1과 같다.

$$I_{P_m} = \int_{t_b}^{t_e} P_c dt \tag{1}$$

여기에서 계산에 적용되는 시간영역은 노즐이 초킹될 것으로 예상되는 연소실 압력이 0.2 MPa 이상이 되는 지점을 선정하였다. 이러면 실제 연소반응 시간은 Eq. 2와 같다.

$$t_a = t_e - t_b \tag{2}$$

이로부터 특성 속도, C^*를 계산하면 Eq. 3과 같으며, $\dot{m}$은 질량유량, M은 추진제 총 질량, A_t는 노즐목 면적을 의미한다.

$$C^* = \frac{P_c A_t}{\dot{m}} = \frac{\int_{t_b}^{t_e}(P_c A_t)dt}{\int_{t_b}^{t_e}(\dot{m})dt} = \frac{I_{P_m} A_t}{M} \tag{3}$$

$$A_t = \frac{d_t^2 \pi}{4}$$

이후, 데이터 산출을 위한 시작 및 종료 시점을 유동의 천이영역을 제외한 임의의 지점 t_1과 t_n으로 선정하면 시간 간격은 Eq. 4와 같다.

$$\Delta t = \frac{t_n - t_1}{n} \tag{4}$$

가정에 의해 점화기의 의한 영향을 무시하면 천이영역에서의 압력 적분 I_{P_b}은 Eq. 5와 같으며, 천이단계 t_1 시간까지 연소된 추진제 질량은 Eq. 6으로부터 계산된다.

$$I_{P_b} = \int_0^{t_1} P_c dt \tag{5}$$

$$m_{P_o} = \frac{A_t I_{P_o}}{C_m^*} \tag{6}$$

한편, Eq. 6으로부터 t_1 시간까지 연소된 추진제 질량은 추진제 물성 및 기본 형상 크기로부터 Eq. 7과 같으며, 최종적으로 Eq. 8과 같이 t_1시간에 해당하는 연소면 직경 d_1을 계산할 수 있다.

$$m_{p_o} = \frac{\pi}{4}\left(d_1^2 - d_o^2\right) L \rho \tag{7}$$

$$d_1 = \sqrt{\frac{4m_{p_o}}{\pi \rho L} + d_o^2} \tag{8}$$

시간 t_i와 t_{i+1}에서 동일한 방법을 적용하면 $i+1$에서의 연소면 직경 d_{i+1}은 Eq. 9와 같이 구하고, 연소속도는 Eq. 10과 같다.

$$d_{i+1} = \sqrt{\frac{4m_{p_i}}{\pi \rho L} + d_i^2} \tag{9}$$

$$\dot{r_b} = \frac{d_{i+1} - d_i}{2\triangle t} \tag{10}$$

최종적으로, 혼합형 고체 추진제의 경우 일반적인 압력 범위에서의 연소속도는 Vieille's Law에 의해 Eq. 11과 같이 정의될 수 있으며 Eq. 11로부터 a및 n을 계산할 수 있다.

$$\dot{r_b} = a P^n \tag{11}$$

여기서, $\dot{r_b}$는 연소속도, a는 추진제 온도에 따른 상수, P는 압력, n은 압력지수이다.

3. 실험 결과 및 논의

3.1 AP-LiF의 반응 효과 고찰

LiF가 미치는 영향을 이해하기 위해 먼저 AP 추진제의 분해 및 반응 메커니즘을 간략히 소개하고자 한다. DTA(differential thermal analysis) 및 TG(thermogravimetry)를 통해 수행된 기존의 연구 결과[14], 순수 AP입자는 가열과정 중 약 243 ℃에서 흡열반응에 의해 사정정계 입자가 6면체로 변화된 후 402 ℃에서 Eq. 12와 같이 기체상태의 암모늄과 과염소산이 형성되는 발열 분해반응이 발생하는 것으로 알려져 있다.

$$NH_4ClO_4 \rightarrow NH_3 + HClO_4 \tag{12}$$

이에 반해, LiF가 첨가된 AP는 총 3단계에 걸쳐 분해반응이 발생하는데, 먼저 1차적으로 약 243 ℃에서 350 ℃의 넓은 온도영역에 걸쳐 흡열반응에 의해 고체상태의 AP는 액체상태의 AP와 과염소산 리튬(Lithium perchlorate, LP)으로 분해된다. 이후, Eq. 12와 같이 기체상태의 가스로 분해되는 2차 발열 분해반응이 LiF가 첨가되지 않은 경우와 비교하여 낮은 온도에서 발생한다. 온도가 더욱 가열되면 약 500 ℃에서 3차 분해반응을 통해 액화 상태로 남아있던 LP가 분해되며 Eq. 13과 같이 고체상태의 LiCl이 발생한다.

$$LiClO_4 \rightarrow 2O_2 + LiCl \tag{13}$$

AP가 첨가된 혼합형 추진제의 가스 상태 반응율은 LiF에 의해서 감소되는데, 이는 궁극적으로 반응물이 기체상태가 아닌 액체상태이기 때문에 열전달량이 감소하는데서 발생하는 것으로 보여진다. 이런 현상은 순수 AP의 반응 메커니즘과 다르게, 연소 표면에서 액체 상태 반응물이 존재하는 변형된 분해 반응 때문인 것으로 판단한다. 결국 LiF가 첨가되는 경우는, 더 낮은 온도의 가스상태 반응물이 생성되며 이 때문에 반응율 또한 감소하게 된다. 즉, 가스 상태 반응물로부터 연소 표면으로의 열전달이 더 작아짐을 의미하며 이런 반복적인 현상이 최종적으로 연소속도를 감소시키는 것으로 알려져 있다[14].

3.2 연소 속도 측정 및 영향 분석

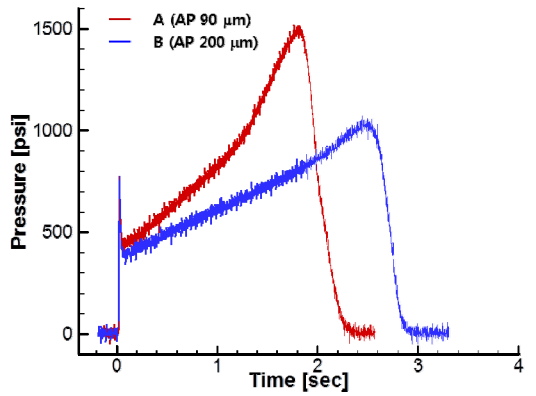
3.2.1 AP 입자 사이즈 영향

연소속도를 감소시키기 위한 간단한 방안이 AP 입자 사이즈의 조절이다. AP 입자 사이즈가 추진제 연소속도에 미치는 영향을 분석하기 위해 저에너지 추진제에 90 μm 와 200 μm AP를 적용하여 연소 특성을 분석하였다.

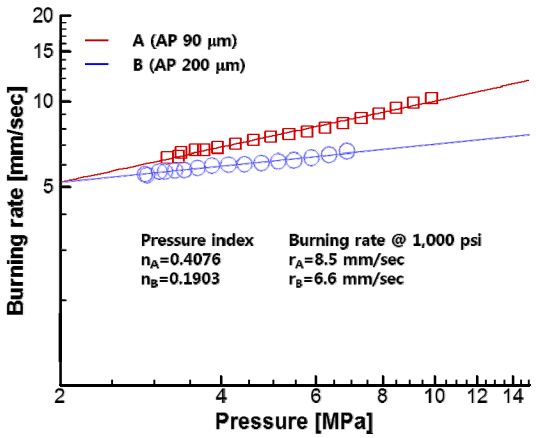
Fig. 4에 두 추진제에 대한 연소시험 결과로 시간에 따른 연소실 내부 압력과 2.3에서 제시한 기법을 이용하여 산출한 연소속도를 제시하였다. 시험 조건으로 소형 모터에 사용된 노즐 목 직경은 8 mm이다. 시간에 따른 연소실 압력 선도는 초기 점화기에 의한 영향으로 매우 짧은 시간 큰 점프가 발생한 후, 일반적인 실린더형 추진제가 연소할 때의 점진적 형상을 따른다. 추진제 A의 경우가 보다 큰 최대 압력을 발생시키며 그 결과 총 연소 지속시간이 0.8초 정도 짧았다. Fig. 4(b)에 두 추진제의 압력에 따른 연소속도를 제시하였다. 기호마크는 압력 데이터로부터 산출한 연소속도로 비교하기 적절한 시간 간격으로 표시하였고, 실선은 연소속도 데이터를 Power fitting하여 나타낸 결과이다. 전반적으로 유사한 압력범위에서 AP 사이즈가 작을수록 연소속도가 크게 발생하였다. 분석결과, 추진제 A의 경우 압력지수 n은 0.4076, B의 경우는 0.1903로, 200 mm 사이즈를 갖는 AP의 적용은 90 mm에 비해 3~10 MPa의 압력범위에서 약 53% 압력지수 강하 영향을 보였다. 1,000 psi (약 6.9 MPa) 압력조건에 해당하는 두 추진제의 연소속도는 각각 8.5, 6.6 mm/sec로 A 추진제 대비 B의 경우 약 22%의 연소속도 감소 효과를 가져왔다.

3.2.2 LiF 첨가에 따른 영향

Fig. 5에 저에너지 추진제(LE 추진제)에 대한 LiF의 첨가가 연소속도에 미치는 영향을 Fig. 4에

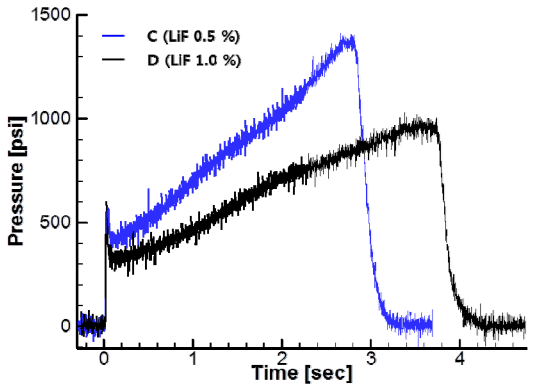


(a) Chamber pressure trace

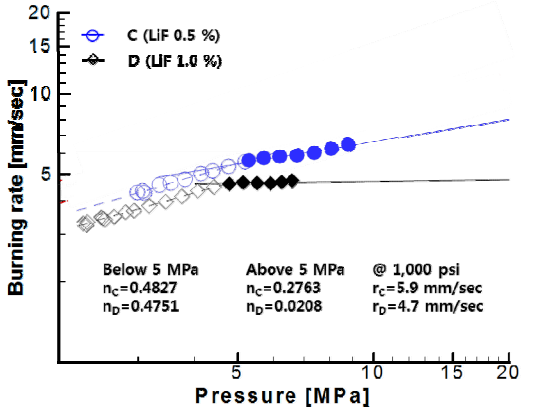


(b) Burning rate with chamber pressure

Fig. 4 Burning characteristics with AP size.



(a) Chamber pressure trace



(b) Burning rate with chamber pressure

Fig. 5 Burning characteristics with LiF percentage for low energetic (LE) propellant.

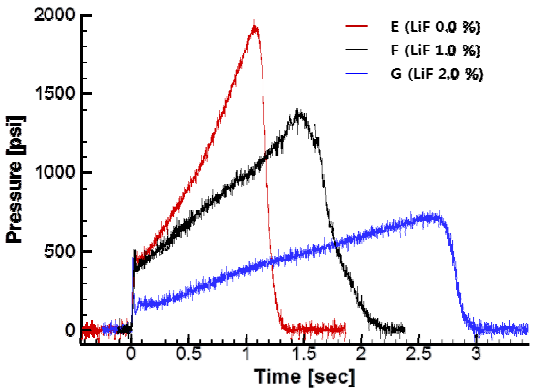
제시한 것과 동일한 방법으로 제시하였다. 추진제 조성은 Table 1의 B를 기준으로 LiF 함량을 0.5%씩 증가시킨 반면, 200 mm AP의 함량은 0.5%씩 감소시켜 그 영향을 관찰하였다. 사용된 시험 모터의 노즐목 직경은 7 mm이다.

Fig. 5(a)는 LiF 함량에 따른 압력 변화의 경향성을 보여준다. LiF의 기본 특성으로부터 예측할 수 있는 것과 같이, LiF의 함량이 증가할수록 연소실 압력이 감소함을 보여준다. Fig. 5(b)는 LiF 함량에 따른 추진제의 연소속도 특성을 나타낸다. C와 D 추진제 모두 연소실 내부 압력, 약 5 MPa을 기준으로 압력 지수가 변경되는 경향성을 보였으며, 이는 닫힌 기호와 열린 기호로 구분하여 표현하였다. 연소속도 역시 압력 경향성과 마찬가지로 LiF의 증가에 따라 감소되는 특징을 보였다. 특히, 연소지수의 경우 내부 압력이 5 MPa 이하인 경우는 큰 변화가 없는 반면, 5 MPa 이상인 경우에는 압력 지수가 90% 이상 감소하는 특성을 보였다. 즉, LiF를 1.0% 첨가한 경우, 5 MPa 이상의 압력 범위에서는 내부 압력이 증가하더라도 연소속도가 거의 일정한 경향성을 나타냈다. 추진제 B, C, D에 대한 1,000 psi 기준 연소속도는 각각 6.6, 5.9, 4.7 mm/sec로 감소되었으며, LiF가 0.5~1.0% 증가함에 따라 10.6%, 28.8%의 감소 효과가 나타났다.

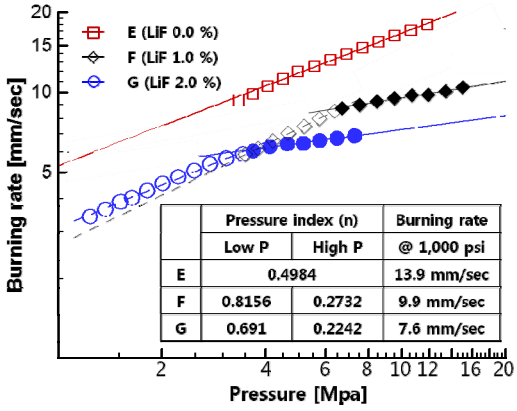
Fig. 6은 알루미늄이 10% 함유된 고에너지(HE) 추진제에 대해 LiF의 첨가에 의한 영향을 나타내는 것으로, 적용된 시험모터 노즐목 크기는 E와 G는 10 mm, F는 9 mm이다. LiF가 첨가되지 않은 HE 추진제, E는 1,000 psi 기준 연소속도가 LE 추진제, B의 연소속도 6.6 mm/sec에 비해 13.9 mm/sec로 약 2배에 가까이 증가하는 것으로 보인다.

HE 추진제에 대한 LiF의 영향 역시 LiF의 함유량이 증가할수록 연소 현상이 억제되는 것으로 나타났다. 특히, LiF가 1.0% 첨가된 추진제 F의 경우는 노즐목 면적이 9 mm로 E에 비해 1 mm가 작음에도 불구하고 연소실 내 생성되는 연소압력이 더 낮았다. Fig. 6(b)는 동일한 방법으로 산출한 연소실 압력에 대한 연소속도 분포이다. LiF가 첨가됨에 따라 연소속도에 미치는 영향은 LE 추진에의 경우와 매우 유사하지만, 그 경향성이 보다 분명하게 나타난다. LiF가 첨가됨에 따라 압력지수가 변화되는 변곡점이 발생되며 LiF의 첨가량이 많을수록 낮은 압력에서 압력지수가 변동하기 시작하였다.

따라서, 압력이 낮을수록 연소속도가 급격하게 감소하며, 변곡점 압력 이후에서는 연소실의 압력이 증가해도 연소속도는 크게 증가하지 않는 특성을 보였다. 변곡점 압력 지점 이상에서 압력지수는 LiF가 1~2% 증가됨에 따라 45~55%가 감소하였다. 마찬가지로 1,000 psi 기준 연소속도는 LiF의 함유량에 따라 7.6~13.9 mm/sec로 나타났으며, LiF를 1~2% 증가시킴에 따른 연소속도 감소 효과는 28.8~45.3%로 나타났다. 이러한 수치



(a) Chamber pressure trace



	Pressure index (n)		Burning rate
	Low P	High P	@ 1,000 psi
E	0.4984		13.9 mm/sec
F	0.8156	0.2732	9.9 mm/sec
G	0.691	0.2242	7.6 mm/sec

(b) Burning rate with chamber pressure

Fig. 6 Burning characteristics with LiF percentage for high energetic (HE) propellant.

는 LE 추진제에 대한 LiF의 첨가에 따른 영향과 상당히 유사하다. 특히 LiF 1%의 첨가에 따른 연소속도 감소 효과는 추진제의 알루미늄 함유와 무관하게, 즉 저에너지/고에너지 두 추진제 모두에게 동일한 특성을 보였다.

4. 결 론

본 논문에서는 AP 기반의 혼합형 열가소성 고체 추진제의 연소 억제 방안과 그에 따라 발생하는 효과를 연소속도의 변화량을 기준으로 정량적으로 제시하였다. AP 입자 사이즈 효과와 LiF의 첨가가 연소특성에 미치는 영향을 분석하기 위해 PEBAX/AP 열가소성 고체 추진제에 대한 지상연소 시험을 수행하고, 이를 통해 연소속도 및 압력 지수를 산출한 후 비교 분석하였다. 분석 결과, 큰 AP 입자 사이즈를 적용하는 것과 2.0% 이내의 LiF를 첨가하는 것은 연소를 억제하는 데 있어 상당한 효과를 주는 것으로 나타났다. 200 μm 입자 AP의 적용은 90 μm 입자 사용에 비해 22%의 연소속도 억제 효과를 보였다. 열가소성 추진제에 대한 LiF의 사용은 전반적으로 연소속도를 크게 감소시키는 것으로 보인다. 특히, 낮은 내부 압력 조건에서는 압력지수가 상당히 크면서 작은 압력 변화에도 연소속도가 크게 감소하고, 높은 압력 조건에서는 압력지수가 매우 작아 내부 압력이 증가해도 연소속도의 변화량이 크지 않는 특성을 보였다. 또한 LiF 1.0%의 함량은 추진제의 조성에 알루미늄의 함유와 무관하게, 28.8%의 동일한 연소속도 감소 효과를 가져왔다. 이러한 정량적 결과는 향후 열가소성 추진제 및 AP를 적용한 혼합형 고체추진제의 연소속도를 조절하는데 있어 유용할 것으로 판단된다.

References

1. Yim Y., "The Tendency in Solid Propellant Technolgoy for Missiles," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 9, No. 1, pp. 112-120, 2005.
2. Davenas, A., *Solid Rocket Propulsion Technolgy*, Pergamon Press, 1993.
3. Bakhman, N.N., Nikiforov, V.S., Avdyunin, V.I., Fogelzan, A.E., Kichin, Y.S., "Catalytic Effect of Ferrous Oxide on Burning Rate of Condensed Mixtures," *Combustion and Flame*, Vol. 22, No. 77, pp. 77-87, 1974.
4. Korobeinichev, O.P., Anisiforov, G.I., Tereschenko, A.G., "High Temperature Decomposition of Ammonium Perchlorate -Polystyrene - Catalyst Mixtures," *AIAA Journal*, Vol. 13, No. 5, pp. 628-633, 1975.
5. Krishnan, S., Jeenut, R., "Combustion Characteristics of AP/HTPB Propellants with Burning Rate Modifiers," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 8, No. 4, pp. 748-755, 1992.
6. Charavarthy, S.R., Price, E.W., Sigman, R.K., "Mechanism of Burning Rate Enhancement of Composite Solid Propellants by Ferric Oxide," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 13, No. 4, pp. 471-480, 1997.
7. Ma, Z., Li, F., Bai, H., "Effect of Fe_2O_3 in Fe_2O_3/AP Composite Particles on Thermal Decomposition of AP and on Burning Rate of the Composite Propellant," *Propellant, Explosive, Pyrotechnics*, Vol. 31, No. 6, pp. 447-451, 2006.
8. Hwang, K., Yim, Y., Kim, C., "The Effect of Fe Compounds for Burning Catalyst on HTPB/AP Propellant," *Journal of The Korean Society for Aeronautical & Space Sciences,* Vol. 25, No. 4, pp. 39-48, 1997.
9. Kim C., Yoo J., Hwang, K., Yim Y., "Properties of HTPB/AP/Butacene Propellants," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers,* Vol. 9, No. 2, 2005.
10. Kim, J., Yim, Y., Kim, I., Park, Y., Seo, T., Jung, J., Yoo, J., "Increasing the burning

rate of solid propellants," *2009 KSPE Spring Conference*, pp. 169-172, 2009.

11. Yim, Y., Kim, J., Yoo, J., "Effect of FeOOH on Burn Rate for AP Propellant," *2010 KSPE Spring Conference*, pp. 390-393, 2010.
12. Poulter, L.W., Nelson, R.W., Smalley Jr., R.B., Hawkins, M.C., "Robust Propellant Liner and Interfacial Propellant Burn Rate Control," US Patent 5767221, Thiokol Corporation, Ogden, UT, USA., 1998.
13. Chai, Y., Tao, Z., Jiang, Y., "Study on the Catalytic Thermal Decomposition of Sodium Azide and its Correlation with the Burning Rates of Nitrogen Generating Propellants," *Journal of Propulsion Technology*, Vol. 16, No. 52, 1995.
14. Kubota, N., Hirata, N., "Inhibition reaction of LiF on the Combustion of Ammonium Percholorate Propellants." *Twentieth Symposium International Symposium on Combustion*, The Combustion Institute, pp. 2051-2056, 1984.
15. Yoo, J., Jung, J., Y., Yim, Y., Ko, S., "The Measurement Technique of Burning Rate in Solid Proplellant at High Pressure," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 12, No. 4, pp. 1-6, 2008.