

고연소속도 추진제용 연소촉매 연구

황갑성, 임유진, 김창기

국방과학연구소

305-600 대전시 유성우체국 사서함35호

요 약

고연소속도 HTPB/AP 추진제를 얻기 위하여 현재 각광받고 있는 3종의 철화합물 연소촉매를 선정하여 연소속도 증진효과와 기계적 특성, 공정성 및 노화특성에 미치는 영향을 검토하였다. 사용한 철 화합물은 HTPB 프리폴리머에 silicone-ferrocene이 그래프트된 BUTACENE[®]과 결합제 역할을 하는 acylaziridinyl ferrocene(AAF), 그리고 입자크기가 30nm인 NANOCAT[®] superfine iron oxide(SFIO)이었다.

이들 철 화합물을 추진제에 적용한 결과 공정성의 경우 BUTACENE[®]은 혼합점도가 높았으나 pot life의 감소는 없었으며 AAF와 SFIO는 혼합점도는 비교적 낮은 반면 pot life가 현저히 감소하는 경향을 보였다. 추진제의 노화거동은 연소촉매를 사용하지 않았을 때보다 저하되었으나 metal deactivating 산화방지제인 PRO-TECH[®]과 함께 사용할 경우 공정성 및 노화특성 모두 바람직한 수준으로 향상되었다.

기계적 특성은 SFIO를 제외하고는 저하되었으며 BUTACENE[®]은 프리폴리머로서, AAF는 결합제로서의 기능이 다소 미흡하였다. 한편 연소촉매의 함량에 따른 촉매효과는 AAF>SFIO>BUTACENE[®] 순이었고 철 함량 측면에서는 AAF>BUTACENE[®]>SFIO 순이었다.

1. 서 론

고체 추진제의 연소특성은 AP의 함유 여부로나눌 수 있다. RDX나 HMX와 같은 nitramine계 산화제를 사용할 경우 연소속도에 대한 산화제의 입자크기 효과가 적으나 AP를 사용할 경우에는 AP의 입자크기를 조절하면 비교적 넓은 범위의 연소속도를 얻을 수 있다. 따라서 AP를 산화제로 사용하는 혼합형 고체 추진제의 연소속도는 AP의 입자크기 및 분포와 첨가된 연소촉매에 따라 달라지며 연소속도 측면에서 추진제의 종류는 표 1에 분류하였다.¹

일반적으로 중간 이상의 연소속도 추진제를 얻기 위하여는 연소촉매를 사용하여야 하고 연소촉매를 사용하면 작은 입자의 AP를 큰 입자로 대체할 수 있어 추진제 혼합 점도를 낮출 수 있으므로 공정성을 향상시키는 장점도 있다. 또한 고연소속도 추진제는 연소면적을 크게하기 위한 복잡한 추진제 그레이의 형상을 보다 더 단순화할 수 있어 추진제 그레이의 구조 안전성에도 이점을 줄 수 있다.

연소촉매로는 ferric oxide, ferric fluoride, ferric cyanide 등 철 화합물과 copper chromite 등 구리 화합물 및 chromium oxide 등 여러 종류의 전이금속의 산화물 또는 이들의 불용성 화합물들이 사용되었다. 그리고 이들의 연소속도 증가 메커니즘은 아직까지 완전히 규명되어 있지 않으나 AP와 밀접한 관계가 있는 것으로 알려져 있다.¹ HTPB/AP 추진제에는 철 화합물과 더불어 크롬 화합물이 가장

일반적인 연소촉매로서 사용되어 왔는데 특히 ferric oxide와 chromium oxide는 널리 사용되고 있으며 매우 우수한 연소특성을 보이고 있다. Copper chromite와 같은 구리 화합물은 뛰어난 연소촉매 효과에도 불구하고 HTPB 바인더의 이중결합과 반응하여 추진제 노화성능에 많은 영향을 미침으로 현재는 사용되지 않고 있다.

한편 앞서 언급한 연소촉매들은 불용성이므로 비표면적의 한계로 촉매효과가 한정될 수밖에 없다. 따라서 고연소속도 추진제 제조를 위해 액상 철화합물을 고려되었으며 이것이 ferrocene 유도체들이다. Ferrocene 화합물은 1951년에 최초로 개발되어 자동차 연료의 anti-knocking제로 사용되었으며 1950년대 중반부터 혼합형 추진제에 적용되기 시작하였다. 초기에는 ferrocene의 녹는점(174°C)이 높았기 때문에 분산효과와 공정성 및 기계적 특성을 고려하여 n-butylferrocene (NBF), di-n-butyl ferrocene (d-NBF)등과 같은 액상 alkyl ferrocene 화합물이 사용되었으나 이들 화합물의 휘발성과 이동성이 문제가 되었다. 따라서 액상 alkyl ferrocene 화합물의 분자량을 크게 하여 비휘발성, 비결정성 화합물을 개발하는 방법², ferrocene의 산화반응을 억제하기 위해 여기에 불은 탄소에 α -hydrogen이 없는 화합물을 개발하는 방법² 등이 연구되었는데 대표적으로 HYCAT-6[®]와 CATOCENE[®] 등과 같은 multi-alkyl ferrocene 화합물이 많이 발표되었다.

표 1. 연소속도에 따른 추진제의 분류

Class	Burning rate, mm/s	Applied AP size	Burning Catalyst	Remarks
Ultraslow Burning	below 2.5	-	-	AP is impractical.
Slow Burning	2.5-6.4	Coarse 400 μ m	Oxamide, Dicyandiamide, Urea oxalate, Guanidine nitrate, Nitroguanidine, Melamine. etc	Suppressant
Mid Range	6.4-33	400-6 μ m	Solid	
Fast Burning	33-56	2 μ m	Solid or Liquid	
Ultrafast Burning	above 56	0.3 μ m	Liquid	Reaserch 178mm/s

그러나 이들 화합물의 경우 휘발성은 많이 감소되었지만 이동성이 역시 문제가 되었다. 따라서 휘발성과 이동성을 방지하기 위해 ferrocene을 화학결합에 의해 바인더 성분에 연결시키는 방법,²⁻⁶ AP 표면에 코팅시키는 방법^{3,7,8} 및 결합제에 ferrocene을 도입하는 방법⁹ 등이 연구되어 여러 가지 ferrocene 화합물들이 개발되었다.

그리고 앞서 언급한 고체 연소촉매의 경우도 입자크기를 감소시켜 촉매효과를 향상시키는 연구가 진행되어 suprefine iron oxide(SFIO, 3A)가 개발되어 시판되고 있다.¹⁰ SFIO는 ferrocene 화합물보다 안전성이 좋으며 가격이 상대적으로 저렴하다.

한편 철과 같은 전이금속은 연소촉매로서 작용하지만 HTPB바인더에는 pot life를 감소시키고 바인더의 산화반응을 촉진시키는 역할을 한다. HTPB는 우레탄 바인더를 형성하기 위해 isocyanate와 반응을 하는데 이 반응은 HTPB의 비극성 주쇄에 있는 allylic OH기의 높은 반응성으로 인해 촉매 없이도 빠른 반응이 진행된다.¹ 특히 Fe⁺³와 같은 용해성 양이온이 존재하면 pot life는 현저히 감소하게 된다. 또한 바인더의 산화반응은 노화에 관련되어 추진제의 수명을 감소시킴으로 연소촉매의 첨가는 전반적으로 추진제의 안정성에 나쁜 영향을 미친다.¹¹ 따라서 추진제의 공정성 또는 노화특성을 보장받기 위해서는 특별한 안정제 혹은 산화방지제를 함께 사용해야 한다.

본 논문에서는 비휘발성이고 비이동성인 ferrocene 연소촉매 중에서 HTPB 프리폴리머에 silicone-ferrocene을 그래프트시킨 SNPE의 BUTACENE[®]과, 결합제의 역할을 할 수 있는 acylaziridiny ferrocene (AAF), 그리고 입자크기가 3A인 Mach I사의 NANOCAT[®] superfine iron oxide(SFIO)를 HTPB/AP 추진제 시스템에 적용하여 공정성, 기계적 특성, 연소특성 및 노화특성을 고찰하였다.

표 2. 추진제 원료, 기능 및 공급처

Ingredient	Abbreviation	Function	Vendor
Hydroxy-terminated polybutadiene(R-45M)	HTPB	Prepolymer	ATOCHEM
BUTACENE [®]	BUTACENE [®]	Prepolymer & Burning Catalyst	SNPE
Isophorone diisocyanate	IPDI	Curative	Thorson Chem.
Hexamethylene diisocyanate	HDI	Curative	Mobay
Diocetyl adipate	DOA	Plasticizer	Hanyang Chem.
2,2'-Methylene bis(4-methyl-6-t-butyl phenol)	AO 2246	Antioxidant	Cyanamid
Protech [®] 3105	Protech [®]	Antioxidant	MACH I
N-(1,3-benzene dicarbonyl) methyl aziridine	HX-752	Bonding Agent	3M
Acylaziridiny ferrocene	AAF	Bonding Agent & Burning Catalyst	ADD
TEPA+Acrylonitrile+Glycol	TEPANOL (HX-878)	Bonding Agent	3M
N,N'-bis(hydroxyethyl) glycolamide	BHEGA (HX-880)	"	"
Iron oxide	Fe ₂ O ₃	Burning Catalyst	MAPICO
NANOCAT [®] superfine iron oxide	SFIO	Burning Catalyst	MACH I
Ammonium perchlorate	AP	Oxidizer	Kerr-McGee
Aluminum	Al	Metal feul	Valimet
Triphenyl bismuth	TPB	Cure Catalyst	SHARPE

2. 실험

사용된 원료는 표 2에 나타내었다. 추진제 조성은 고체 함량이 SFIO와 AAF의 경우 87% 그리고 BUTACENE[®]의 경우는 88%이다. 산화제는 평균 입경이 200 또는 6 μ m인 AP를 7대 3의 비로 사용하고 금속연료는 평균입경이 5 μ m인 Al을 AAF의 경우 2%, BUTACENE[®]과 SFIO의 경우는 18% 사용하였다. 그리고 HTPB/IPDI 또는 HDI 바인더에 일정량의 가소제, 산화방지제와 경화촉매를 투입하여 50에서 60 $^{\circ}$ C로 온도 조절되는 수직형 혼합기 (Baker Perkins vertical mixer)에서 추진제를 제조하여 진공 주조한 시편을 50 $^{\circ}$ C 오븐에서 추진제의 경도가 일정해질 때까지 경화하였다.

추진제의 pot life를 예측하기 위해 helipath stand에 Brookfield RVT viscometer를 장착하여 T-spindle을 이용하여 50 $^{\circ}$ C에서 점도를 관찰하였다. 경화후 기계적 특성은 20 $^{\circ}$ C에서 JANNAF 시편으로 INSTRON 1122 인장시험기를 사용하여 50 mm/min의 X-head speed로 시험하였고 경도는 Shore-A형 경도계로 측정하였다. 특히 AAF의 경우 결합제 효과를 관찰하기 위해 Farris Instrument사의 gas dilatometer(Farris 9486)를 이용하여 시편의 변형률에 따른 부피 팽창률과 effective strain을 측정하였다. 한편 연소촉매를 적용하였을 때 노화특성을 관찰하기 위해 알루미늄 호일로 포장한 추진제를 외기가 통하는 60 $^{\circ}$ C 오븐

에서 가속 노화하여 인장시험(20°C, TL)하였고 연소특성에 대한 연소촉매의 영향을 보기 위해 경화된 시료를 켈런형(직경 6mm, 길이 140mm)으로 만들어 질소 기체가 충전된 strand burner로 600에서 2000psia의 압력범위에서 연소시간을 측정하여 연소속도와 압력지수를 계산하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 BUTACENE®을 이용한 추진제의 특성

추진제의 바인더 중에 HTPB를 BUTACENE®으로 0%에서 100%까지 대체했을 때 미치는 추진제의 특성변화를 표 3에 나타내었고 공정성을 알아보기 위해 추진제 혼합 후 점도 변화곡선을 그림 1에 나타내었다. 프리폴리머의 25%를 BUTACENE®으로 대체했을 때 혼합점도는 크게 변하지 않았으나 함량이 증가할수록 크게 증가하였으며 기울기는 다소 둔화되었다. 이는 HTPB의 점도가 50°C에서 13 poise인데 비하여 BUTACENE®은 100 poise로 프리폴리머의 점도가 7배이상 차이가 나기 때문으로 판단된다.¹⁹

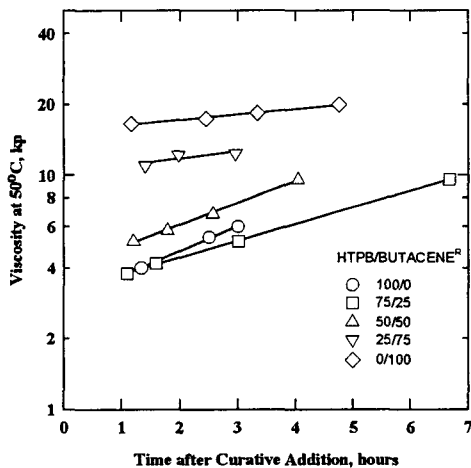


Fig. 1. Effect of BUTACENE® on viscosity build-up for aluminized propellants.

기계적 특성은 BUTACENE®이 많아질수록 HTPB만을 사용한 추진제에 비하여 최대응력(σ_m)과 초기 탄성률(E_o)이 감소하는 반면 최대응력에서의 신율(ϵ_m)은 거의 일정하였다(표 3). 이와 같은 기계적 성질의 저하는 BUTACENE®의 고분자 측쇄에 부피가 큰 ferrocene기가 달려 있는 것과 무관치 않으며 프리폴리머의 말단에 존재하는 OH기가 개질 반응 과정에서 일부 소실되어 관능기가 2이하인 프리폴리머가 형성되었을 가능성이 있고 이로 인해 경화 반응에 의해 형성된 고분자 망상구조에 dangling chain이 있을 가능성이 있다.

표 3. BUTACENE® 적용 추진제의 특성

HTPB/ Butacene®	η , kp	Rb (n)	Mech. Properties					Eq. Ratio
			σ_m	ϵ_m	ϵ_b	E_o	Hs	
100/0	5.0	11.23 (0.5583)	-	-	-	-	-	0.96
75/25	4.5	16.84 (0.2553)	5.0	39	45	19	40	0.96
50/50	6.2	23.02 (0.3110)	11.0	29	30	58	62	1.05
25/75	10.5	29.31 (0.3182)	7.8	29	33	40	53	1.05
0/100	17.0	36.02 (0.3279)	7.5	23	37	48	55	1.05

3.2 SFIO를 이용한 추진제의 특성

SFIO는 서론에서 언급한 바와 같이 비표면적이 현저히 증가된 Fe_2O_3 이기 때문에 추진제 적용시 특별한 주의가 필요하다. 즉 bulk density가 작고 자기 무게의 15%까지 수분을 흡수할 수 있기 때문에 SFIO의 보관 상태에 따라 추진제의 특성이 달라질 수 있다. 따라서 수분에 의한 영향을 줄이기 위해 가스제나 HTPB와 함께 혼합하여 공급되기도 한다. 그리고 SFIO에서 생성되는 양이온은 우레탄 반응의 경화촉매 작용과 동시에 노화에 나쁜 영향을 미치기 때문에 이런 현상을 해결하기 위한 첨가제로 metal deactivating antioxidant인 PRO-TECH® 3105가 시판되고 있다.

그림 2에는 SFIO가 추진제 점도에 미치는 영향을 도시하였다. 경화제로 HDI를 사용한 추진제에서 SFIO를 적용하지 않았을 경우와 0.3%적용한 경우를 비교하면 SFIO를 사용하면 점도상승이 빨라 공정이 불가능하였다. 이는 앞서 논의한 바와 같이 SFIO의 경화 촉매효과 때문이며 경화제의 반응성이 HDI에 비해 다소 느린 IPDI로 대체하였을 경우 점도상승은 속도는 완화되었고 PROTECH®을 같이 적용하였을 경우는 점도상승으로 인한 SFIO의 문제점은 해결되었다.

기계적 특성은 경화제로 HDI를 사용하였을 경우 SFIO 0.3% 첨가시 당량비를 0.02 낮추었는데도 불구하고 E_o 및 σ_m 이 증가하였고 이로 인해 ϵ_m 이 약간 감소함으로 기존 염료용 iron oxide와 비슷한 영향을 줄일 수 있다.^{12,13} 한편 IPDI를 사용한 추진제의 경우 SFIO 함량이 0.3%에서 1.0%로 증가되었을 경우 기계적 성질이 모두 감소하고 있는데 이는 SFIO에 흡착된 수분의 영향으로 판단된다.

3.3 AAF를 이용한 추진제 특성

결합제 HX-752의 유사체로서 HX-752의 중심체인 benzene을 ferrocene으로 치환하여 합성한

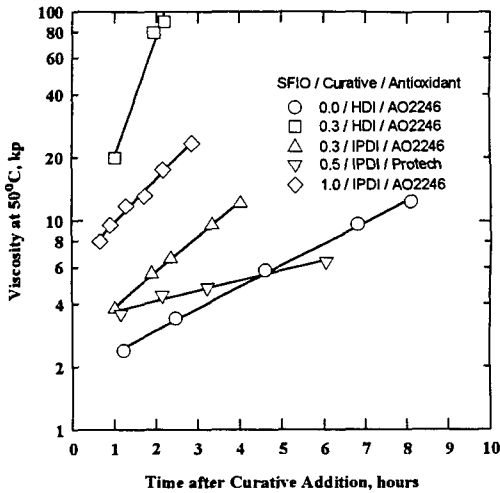


Fig. 2. Effect of additive on viscosity build-up of SFIO propellants.

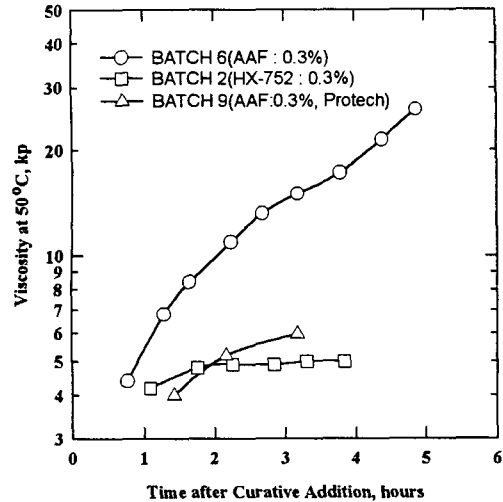


Fig. 3. Effect of additive on viscosity build-up for AAF propellants.

표 4. SFIO 적용 추진제의 특성

SFIO, %	Eq. Ratio	Rb (n)	Mech. Properties					Remark
			σ_m	ϵ_m	ϵ_b	Eo	Hs	
0.0	0.98	9.73 (0.5582)	10.2	40	43	46	57	HDI AO2246
0.3	0.96	13.38 (0.4044)	11.4	36	37	49	59	HDI AO2246
0.3	0.90	13.38 (0.3949)	7.5	48	53	27	47	IPDI AO2246
0.5	0.94	14.49 (0.3739)	6.5	44	52	24	44	IPDI Protech
1.0	0.90	14.99 (0.3836)	6.2	39	44	24	45	IPDI AO2246

acylaziridiny ferrocene(AAF)는 AP 주위에 고분자 막을 형성하는 결합제와 연소촉매의 역할을 동시에 제공할 수 있다.⁹

그림 3에 의하면 AAF를 첨가하였을 때 점도 상승속도가 크게 나타남으로 인해 pot life는 현저히 감소함을 알 수 있고 PRO-TECH[®]을 첨가하면 SFIO에서와 마찬가지로 pot life는 현저히 증가되었다.

AAF의 함량과 당량비를 변화시키며 시편을 제조하여 추진제의 기계적 특성에 미치는 영향을 관찰하였으며 이 결과를 표 6에 나타내었다. 같은 당량비로 제조된 추진제에서 결합제를 사용하지 않았을 경우보다 HX-752 0.3%를 결합제로 사용할 경우에 기계적 성질 면에서 Eo, σ_m 및 ϵ_m 이 더 커졌다. 이는 HX-752가 AP 표면에서 수소결합하여 개환 중합에 의해 강인한 고분자 막을 형성함으로써 AP와 바인더와의 결합력을 크게 증진시킨 결과로 생각된다.¹⁴ 그리고 AAF 0.3%를 함유한 추진제는 결합제

가 없는 추진제에 비하여 σ_m 은 증가하였으나 HX-752에 비해 ϵ_m 은 작았다.

또한 gas dilatometer를 이용하여 신율에 따른 부피 팽창변화를 관찰하였다. Nonreinforcing 고체 충전제가 많이 함유된 탄성체에 응력을 가해 변형이 생기면 충전입자 주위에 응력 집중에 의한 고체 충전제와 바인더간에 dewetting(혹은 debonding) 또는 바인더에 vacuole이 생기면서 전체적인 부피가 증가하고 크기는 충전제의 입자크기와 함량, 충전제와 바인더 결합력 그리고 바인더의 인열저항(tear resistance)에 의존한다. 이때 결합제를 첨가하여 바인더와 충전제간의 결합력을 증가시키면 dewetting 현상은 작아질 수 있으나 결합제의 영향에 의해 바인더 구조를 변화시켜 인열저항에 영향을 미치게 된다.^{15,16} 따라서 결합제 사용시 effective strain (ϵ_{eff}) 값은 결합제 효능의 지표가 될 수 있을 것이다.

HX-752 0.3%를 함유한 추진제와 비교하기 위해 AAF를 같은 함량인 0.3%와 비슷한 imine 당량을 가질 수 있도록 0.4%를 첨가한 추진제 그리고 과량의 AAF를 첨가한 추진제의 dilatation 특성을 표 6에 비교하였다. AAF의 함량이 증가할수록 Eo와 σ_m 감소하고 ϵ_m 은 약간 증가하였으나 ϵ_{eff} 는 16% 정도로 차이가 나지 않았으며 HX-752의 19%보다는 작았고 부피 팽창 기울기는 유사하였다. 그러나 비슷한 탄성률을 가지는 추진제에서 결합제의 성능을 비교하기 위하여 NCO/OH 당량비를 0.84~0.90까지 변화시키며 여러 가지 Eo를 가지는 추진제를 제조하였을 때 AAF 결합제를 사용한 추진제의 σ_m 과 ϵ_m 이 HX-752의 경우보다 모두 작았다. 이와 같은 결합제로서 성능 차이는 근본적으로

표. 6. AAF 함유 추진제의 특성

Additive wt%	Rb (n)	Eq. Ratio	Mech. Properties				Dilatation		Anti-oxidant
			σ_m	ϵ_m	ϵ_b	Eo	ϵ_{eff} %	Slope	
HX-752 0.0	-	0.90	4.4	31	25	51	-	-	AO2246
HX-752 0.3	-	0.84	7.5	63	26	52	-	-	"
HX-752 0.3	9.65 (0.4483)	0.87	8.1	55	31	55	19	0.0053	"
HX-752 0.3	-	0.90	11.2	41	54	67	-	-	"
AAF 0.1	11.98 (0.3630)	0.90	7.7	33	53	53	-	-	"
AAF 0.3	14.22 (0.3630)	0.90	8.0	29	50	59	-	-	"
AAF 0.3	-	0.92	8.1	27	58	58	16	0.0049	"
AAF 0.4	14.68 (0.3522)	0.92	8.3	30	52	61	16	0.0052	"
AAF 0.5	14.94 (0.3448)	0.90	-	-	-	-	-	-	"
AAF 1.0	17.65 (0.3247)	0.92	5.4	29	31	45	16	0.0036	"
AAF 0.3	-	0.94	10.1	21	118	73	-	-	Protech

AAF와 HX-752의 물리적 성질 차이라고 판단된다. 즉 AAF의 녹는점(약 80°C)이 추진제 제조공정 온도(60°C)보다 높기 때문이며 poly(AAF)의 기계적 성질이 poly(HX-752)보다 다소 brittle 하기 때문이라고 생각된다.⁹

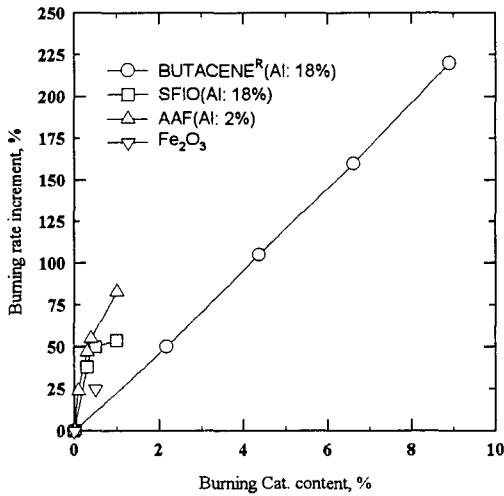


Fig. 4. Efficiency as a function of burning catalyst content.

3.4 연소촉매 효과

일반적으로 연소촉매 효과는 AP의 입자크기와 알루미늄 함량에 밀접한 관계가 있는데 경험적으로 AP의 입자크기가 작을수록, 알루미늄 함량이 적을수록 효과는 좋아진다. 따라서 동일한 AP 혼합비(200/6 μ m=7/3)를 같은 추진제에서 다른 연소촉매를 첨가하였을 때 이들의 촉매효과를 비교하였다. 그림 4의 첨가한 촉매함량에 따라 비교하면 AAF > SFIO > BUTACENE 순으로 BUTACENE가 가

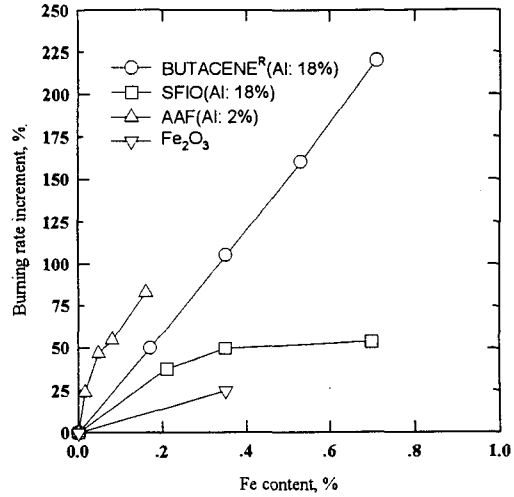


Fig. 5. Efficiency as a function of iron content.

장 낮은 이유는 철함량이 다른 화합물보다 적기 때문으로 생각된다. 그러나 그림 5의 철함량에 따라 비교하면 연소속도 증가율은 AAF > BUTACENE > SFIO 순이었다. AAF가 BUTACENE보다 좋은 이유는 바인더로서 작용하는 BUTACENE보다 결합제로서 사용된 AAF의 ferrocene기가 AP에 더 가까이 존재함으로써 연소촉매 효과가 더 증가된 것으로 생각된다.

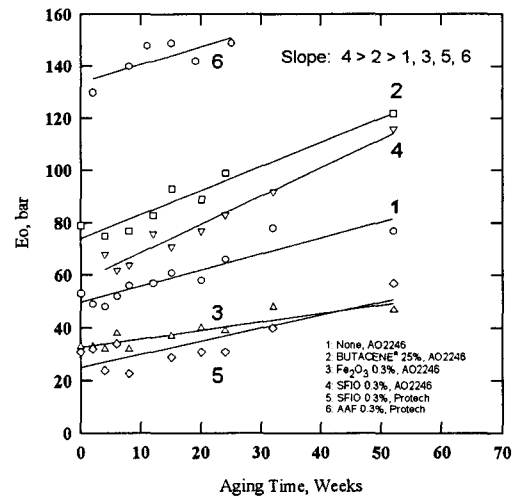


Fig. 6. Accelerated aging behavior of HTPB/AP propellant system.

3.5 가속 노화 특성

그림 6에 연소촉매로 사용된 BUTACENE, SFIO, AAF, 그리고 염료용 Fe₂O₃을 적용한 추진제의 가속노화 특성을 비교하였다. 먼저 염료용 Fe₂O₃

을 적용한 추진제와 적용하지 않은 추진제와 비교해 볼 때 기울기의 변화가 거의 없는 것으로 미루어 Fe₂O₃는 노화에 영향을 거의 미치지 않음을 알 수 있다. 그러나 BUTACENE[®]을 사용한 추진제와 SFIO를 사용한 추진제는 많이 기울기가 증가하였는데 특히 SFIO 추진제는 약 2배 가량 증가하였다. 이는 고연소속도용 연소촉매의 경우 표면이 활성화 되어 있기 때문에 연소촉매 효과가 있는 철이 HTPB 바인더의 산화반응을 촉진시키기 때문이며 앞서 논의한 바와 같이 공정성과도 관계가 있다. 한편 이런 문제점을 해결하기 위해 PRO-TECH[®]을 사용하였을 경우 연소촉매를 사용하지 않은 추진제 수준으로 감소하였다.

4. 결론

HTPB/AP계 고연소속도 추진제 개발을 위해 최근에 연소촉매로 개발된 비휘발성이고 비이동성인 BUTACENE[®] 프리폴리머와 결합제인 AAF 그리고 기존의 iron oxide보다 입자크기가 현저히 감소한 NANOCAT[®] Superfine iron oxide(SFIO)를 사용하여 추진제의 공정성, 가속노화, 기계적 성질 및 연소 특성에 미치는 영향을 연구하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

1. 추진제 제조 공정성은 BUTACENE[®]은 자체 점도가 높아 작은 입자의 산화제를 많이 사용할 경우 추진제의 혼합시간이 증가하고 혼합점도가 큰 단점이 있으나 점도 상승률이 작아 pot life에 영향이 없었으며, SFIO와 AAF의 경우 혼합점도는 낮으나 pot life가 현저히 감소하였다.
2. 연소촉매를 적용한 추진제의 노화 특성은 연소촉매를 사용하지 않은 추진제보다 노화가 빨리 진행되었다.
3. 추진제의 기계적 성질은 SFIO를 제외하고 연소촉매 투입시 모두 저하되었으며 BUTACENE[®]은 바인더로서 충분한 망상구조 형성에 주의를 기울여야 하고 AAF의 경우는 결합제로서 역할이 다소 미흡하였다.
4. 철함량에 따른 연소촉매 효과는 AAF가 가장 우수하였고 다음이 BUTACENE[®]이었다. SFIO는 기존 염료용 Fe₂O₃ 보다는 효과가 증가하였지만 ferrocene 화합물보다는 낮았다. 그러나 촉매함량의 측면에서는 철함량이 작은 BUTACENE[®]이 가장 낮았다. 또한 압력지수는 연소촉매 투입시 모두 감소하였다.
5. 철을 함유하는 연소촉매 적용시 공정성과 노화특성의 저하는 metal deactivating antioxidant의 적용으로 해결되었다.

참고 문헌

1. A. E. Oberth, "Principles of Solid Propellant Development," CPIA Publication, 469, 1987.
2. J. Bohnlein-Maus, M. Bohn, K.P.Brehler, K. Menke, K. Gottlieb, H. Jungbluth, G. Lohmann and W. Thunker, "Structural Influences of Ferrocenes on Burn Rate Modification of Composite Rocket Propellants," 23th International Annual Conference of ICT, 1993.
3. C. Gotzme, N. Johnson and M. Graff, "Non-migrating Ferrocene Modifiers for Composite Propellants," CPIA Publication 300, Vol. II, 475-483, 1979, JANNAF Propulsion Meeting, 1979.
4. Braun et.al. U.S. Patent 3,932,240, 1976.
5. K. Kishore and P. Raialingam, *J.Polym.Sci., Part C: Polym. Lett.* 24, 471-476, 1986.
6. K. Kishore and P. Raialingam, *J. Appl. Polym. Sci.*, 37, 2845-2853, 1989.
7. H. M. Ficher, "Multipurpose Additives for Composite Propellant," Report No. RK-TR-69-6, U.S. Army Missile Command, 1969.
8. O. E. Ayers and C. W. Huskins, "Multipurpose Additives for Composite Propellants Part II," Report No. RK-TR-70-8, U.S.Army Missile Command, 1969.
9. 이범재, 황갑성, 김창기, 박영철, 서승근, 서태석, "Ferrocene 화합물이 함유된 고연소속도 HTPB/AP 추진제의 연구," MSDC-411-950019, 1995.
10. T. Rudy, "Butacene Critique," MACH I Technical report(1992).
11. P. R. Paolino, "Antioxidants," Chap. 1 in "Thermoplastic Polymer Additives," ed. by J. T. Lutz, Marcel Dekker, New York, 1989.
12. 김창기, 황갑성, "ADP-315 추진제 조성 개발," MSDC-421-950071, 1995.
13. 김창기, 황갑성, "ADP-315 추진제 조성 개발 (II)," MSDC-421-96419C, 1996.
14. K. Hori, A. Iwama and T. Fukuda, *Propellants, Explosives and Pyrotechnics*, 15, 99-102, 1990.
15. F. N. Kelly, "Propellants Manufacture, Hazards, and Testing," ed. by C. Boyars and K. Klager, American Chemical Society, Washinton DC, 1969.
16. K. Klager and J. M. Wrightson, "Mechanics and Chemistry of Solid Propellants," ed. by A. C. Eringen, H. Liebowitz, S. L. Koh, and J. M. Crowley, Pergamon Press, 1967.