

복기 추진제 로켓 모터 연소 안정제 개발

(Development of Stabilizing Agent for Double Base Propellant Rocket Motor)

손원경 · 최성한 · 이원복
(주)한화 대전공장 연구개발실

요 약 : 130mm D.B. 추진기관의 고온 시험에서 나타난 극심한 이상 연소 현상을 해결하기 위해 미세한 고체 입자들을 연소 가스에 분산시켜 불안정 연소를 억제하는 particulate damping 효과를 연구하였다. 고체 입자로서 효과적인 것으로 알려진 K_2SO_4 , ZrC, Graphite 를 CTPB, HTPB 고분자 물질에 충전시켜 epoxide, isocyanate 반응기와 가교 반응을 일으킴으로써 고무상의 탄성체 성질을 갖게하는 K_2SO_4 /CTPB, ZrC/Graphite/HTPB, ZrC/Graphite/AP/HTPB, ZrC/AP/HTPB 조성의 연소 안정제를 개발하였다. 이 연소 안정제는 외경 17mm, 길이 1000mm의 안정봉 형태로 제작하여 모터의 중심 cavity에 조립한 후 지상 연소 시험을 통하여 성능을 확인하였다. 시험 결과, 조성에 AP를 포함시켜 연소 안정제에 일정한 연소 속도를 부여하여 추진제 grain 연소 동안 고체 입자를 연소 가스에 분산되게 설계한 ZrC/Graphite/AP/HTPB, ZrC/AP/HTPB 조성의 연소 안정제가 불안정 연소 억제에 효과적인 것으로 나타났다.

1. 서 론

고체 추진기관 연소시 연소실 내부의 acoustic energy 차이의 비균형으로 인해 발생하는 연소 불안정은 압력 진동에 따라 주파수 100~1000cps의 longitudinal mode instability와 1000cps이상의 transverse mode instability로 나누어 지는데, 전자는 baffle type의 구조물을 모터 cavity 장착, 연소 진동을 감소하고 후자는 resonance rod로 불리는 기계적 형상의 구조물로 연소 불안정을 감소시키고 있다.^(1,2,3) 또한 연소 불안정을 감소시키기 위한 방법으로는 입자 억제 기능(particulate damping), 노즐 억제 기능(nozzle damping), 추진제의 조성 변화, wall damping 등이 알려져 있는데, 이러한 해결 방식은 acoustic energy의 변경이나 연소 특성을 변화시키는 것이며 어느 방식이나 연소 과정과 acoustic mode의 복합적 관계에서 그 해결의 원인을 찾고 있다.^(4,5)

130mm D.B. 추진기관은 국내에서 처음으로 복기 추진제(double base propellant)를 적용한 다연장 로켓 모터로, 복기 추진제로는 고 에너지(high energy) 추진제를 적용하였고 모터의 개략적인 구

조는 Fig. 1에 나타내었다. 고 에너지 추진제는 기존의 복기 추진제보다 비추력과 비중에서 뛰어나고 에너지를 극대화 시킨 반면, 연소 속도에서는 약 50% 빠르며 압력이 증가 할수록 연소 속도는 오히려 감소하는 등 연소 특성 분야에서 비교적 불안정한 추진제로 알려져 있다.⁽⁶⁾ 130mm D.B. 추진기관 개발 초기에 연소 불안정을 억제 하기 위해 복기 추진제 로켓 모터의 불안정 연소 억제에 사용되는 구조물로서 Fig. 2와 같은 공명 방지 배플(anti-resonance baffle) 결합체를 모터의 중심 cavity에 장착 사용하였다. 이는 불활성 성분의 기계적 구조물에 의한 억제 효과를 기대한 것인데 배플 결합체가 glass/phenolic 재질로 연소 고열에 대부분 삭마, 탄화되어 head 부위 일부만 남아있고 형체는 알아 볼 수 없을 정도로 잘려나가 있었으며, 두 차례의 고온(60℃) 시험에서 Fig. 3과 같이 주파수 300~330cps 정도의 longitudinal mode로 추정되는 연소 불안정이 발생하였다. 1 차에서는 불안정 연소가 발생하면서 연소 속도 증가와 압력 상승이 일어났으며 불안정 연소가 끝남과 동시에 연소 속도가 감소하면서 압력이 떨어졌고, 2 차에서는 불안정 연소에도 불구하고 연소 속도가 일정

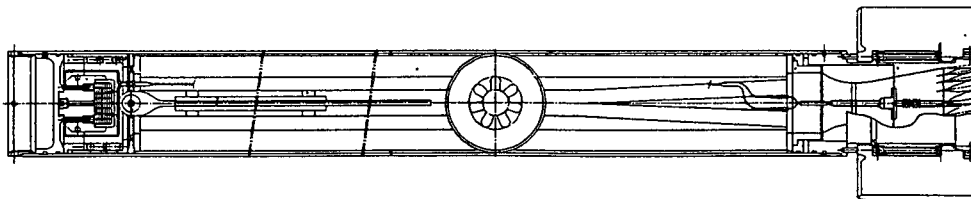


Fig. 1 130 mm D.B. 추진기관 조립도

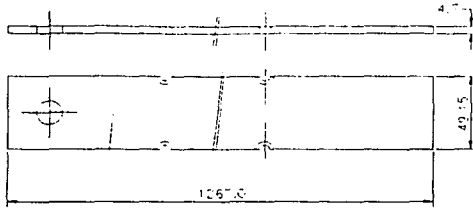
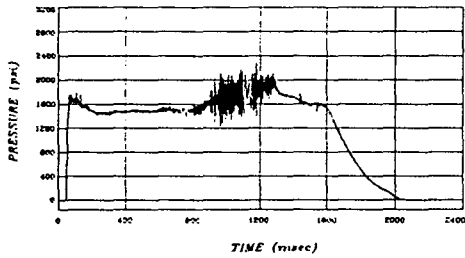
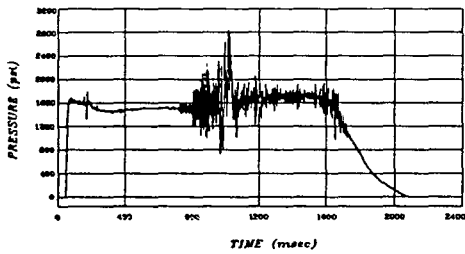


Fig. 2 공명 방지 배플 결합체



a. 1 차 지상 연소 시험 입력-시간 곡선



b. 2 차 지상 연소 시험 입력-시간 곡선

Fig. 3 이상 연소 현상

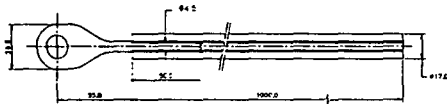


Fig. 4 안정봉

하게 나타났다. 이 후 몇 차례의 시험 결과 공명 방지 배플 결합체로는 연소 에너지가 개선된 고 에너지 추진제를 적용한 130mm D.B. 추진기관에는 연소 불안정을 해결 할 수 없다고 판단되어, 연소 불안정을 효율적으로 해결하기 위해 연소 안정제를 이용한 방법을 연구하게 되었다. 즉 비활성(inert) 형태와 활성(live) 형태의 연소 안정제를 자체적으로 조성 개발하여 Fig. 4와 같이 외경 17mm, 길이 1000mm의 안정봉 형태로 제작, 비교 시험 하여 연소 안정제에 의한 particulate damping 효과와 안정봉에 의한 기계적 구조물의 감소 효과를 고찰하였다.

2. 조성 개발

2.1 조성 개발

particulate damping은 미세 입자들을 연소 가스에 분산시켜 가스의 유동을 감소시키는 방식으로 이 입자들은 가스 밀도보다 500~5000 배의 보다 큰 밀도를 가지므로 진동속에서 연소 가스의 운동에 쉽게 따르지 않는다. 즉 가스 진동의 파장이 입자를 스쳐 지나 갈 때 진동을 감소 시키는데 감소 효과는 진동수와 이에 따른 입자 크기 분포에 따라서 다르게 나타나며 일반적으로 2~20 μ m 크기의 입자들이 사용된다. 이러한 particulate damping에 효과적인 입자로는 Al, ZrC, Al₂O₃, SiO₂, K₂SO₄, Graphite 등이 알려져 있는데, 이 성분들은 실제 composite 추진제에서는 추진제의 한성분을 구성하고 있으며, 본 실험에서는 K₂SO₄, Graphite, ZrC 등을 선정하여 조성을 개발하였다. 이 입자들은 CTPB, HTPB 고분자 물질에 충전되어 CTPB의 -COOH기가 epoxide와 가교 반응하여 hydroxy ester 결합을 하고, HTPB의 -OH기가 isocyanate와 가교 반응하여 urethane 결합을 하여 고무상의 탄성체로서의 기능을 갖게되는데, 실험에 적용한 자세한 조성은 Table. 1과 같다.

Table. 1 연소 안정제 조성

조성 1	조성 2	조성 3	조성 4
epoxide/-COOH 1.00	-NCO/-OH 1.05	-NCO/-OH 1.05	-NCO/-OH 1.05
Binder 20%	Binder 30%	Binder 30%	Binder 30%
CTPB	HTPB	HTPB	HTPB
Epoxide	IPDI	IPDI	IPDI
DBPC	DOA	DOA	DOA
DOZ	HX-752	HX-752	HX-752
Silane	A.W	A.W	A.W
NPB	TPB	TPB	TPB
DABCO			
Solid	Solid	Solid	Solid
K ₂ SO ₄ 80%	Graphite 35%	Graphite 20%	ZrC 40%
	ZrC 35%	ZrC 20%	AP F 30%
		AP F 30%	

CTPB : Carboxyl terminated polybutadiene

DBPC : 2-6-Di-t-butyl-p-cresol

Epoxide: Glycidyl ester of glycerol, EPON-812

DOZ : Di(2-ethylhexyl) azelate

Silane : γ -Aminopropyl-triethoxy silane

NPB : Lead octoate

DABCO : 1,4-Diazabicyclo(2,2,2)octane

AP F : Ammonium perchlorate, 6 μ m

HTPB : Hydroxyl terminated polybutadiene

IPDI : Isophorone diisocyanate

DOA : Dioctyl adipate

HX-752 : 1,1'-(1,3-Phenylene dicarbonyl) bis-methyl

-aziridine

A.W : Dinaphthylphenylene diamine

TPB : Triphenylbismuth

조성 1과 2로 제작한 연소 안정제는 비활성 조성으로 추진제가 연소되면 고온의 연소 가스에 의해 삭막되어 연소 가스에 혼합, 분산되고 가스 밀도보다 훨씬 큰 K_2SO_4 , Graphite, ZrC 고체 입자들이 가스 유동을 억제하여 연소 진동을 감소하게 된다.

조성 3과 4는 산화 장진제 AP를 첨가한 활성 조성으로 연소 안정제에 일정한 연소 속도를 부여하여 추진제 grain 연소 동안에 맞추어 고체 입자를 분산하도록 조성 개발된 것으로 AP의 조성은 연소 안정제 연소 속도를 고려하여 30%로 정하였다. 또한 조성 3에서는 Graphite를 20% 포함하고 조성 4에서는 제외시켜 선정된 고체 입자들의 효과를 비교하였다.

2.2 안정봉 제작

연소 안정제의 조성 개발 및 혼화 공정에는 1G/L mixer를 사용하였으며, 혼화가 끝난 연소 안정제는 진공 상태에서 알루미늄 호일을 씌운 종이 상자에 담아 60°C oven에서 7일 동안 경화시킨 물성 및 연소 특성 시험을 위한 시료로 사용하였다.

또한 안정봉 제작에는 Fig. 5와 같은 제작 설비를 이용하였다. 외경 7mm, 내경 5mm tube 형태로 된 carbon/phenolic 재질의 안정봉 심을 lower mold의 중심 위치에 고정시킨 후 upper mold를 체결하면 mold 결합체가 된다. molding stand에 고정시킨 mold 에서 연결된 tube를 연소 안정제가 들어 있는 mixer bowl에 집어 넣어 진공을 이용, 연소 안정제를 몰드에 흡입시켜 채운다.

이 연소 안정제는 60°C oven에서 7일 동안 경화시키고 몰드의 상·하판을 분리하여 Fig. 4와 같은 안정봉 결합체를 제작하였다.

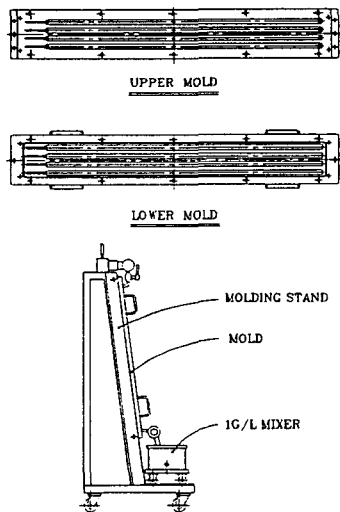
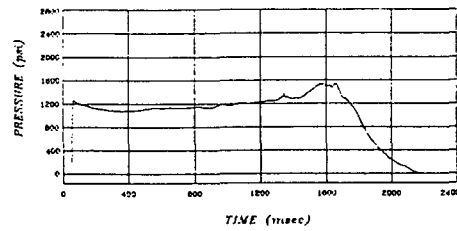


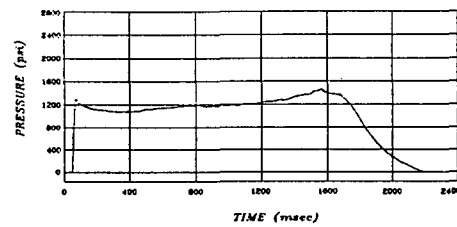
Fig. 5 안정봉 제작 설비

3. 결과 및 고찰

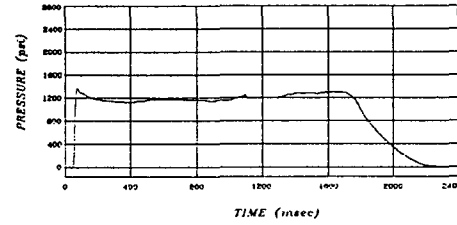
조성 개발한 네 종류의 연소 안정제는 안정봉 형태로 제작하여 모터의 중심 cavity에 조립 한 후 지상 연소 시험을 통하여 성능을 확인하였다. 시험 전 모터는 60°C 환경 chamber에서 20 시간 이상 보관 하였고 (주)한화 여수공장 지상 연소 시험장에서 시험하여 Fig. 6과 같은 결과를 얻었다. 조성 1과 2는 연소 시간 1200 msec까지는 비교적 안정된 연소를 보이다가 web 연소 완료 근처에서 연소 진동을 나타내어 연소 속도 증가와 압력 상승이 발생하였다.



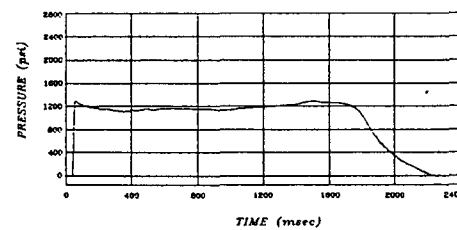
a. 조성 1 연소 안정제 (K_2SO_4 /CTPB)



b. 조성 2 연소 안정제 (ZrC/Graphite/HTPB)



c. 조성 3 연소 안정제 (ZrC/Graphite/AP/HTPB)



d. 조성 4 연소 안정제 (ZrC/AP/HTPB)

Fig. 6 연소 안정제 종류별 지상 연소 시험 압력-시간 곡선

Table. 2 연소 안정제 특성

참고문헌

구 분	조성 3	조성 4
Mechanical properties at 20°C		
Maximum stress, bar	13.6	8.59
Elongation at peak, %	39	180
Elongation at break, %	40	210
Modulus, bar	78	32
Hardness	56	35
Density at 20°C, g/cc	1.676	1.675
Burning rate at 1500psi, mm/sec	2.31	2.23
Viscosity at end of mix, Kp	4.0	3.2
Tg point, °C	-73.21	-75.86

- 1) Culick, F.E.C., 1970, "Stability of Longitudinal Oscillations with Pressure Velocity Coupling in a Solid Propellant Rocket", Combustion Science and Technology, Vol.2, pp.119
- 2) E. W. Price, 1965, "Experimental Solid Rocket Combustion Instability", 10th Symposium (International) on Combustion, pp.1067~1082.
- 3) Vigor Yang and Culick, F.E.C., "On the Existence and Stability of Limit Cycles for Transverse Acoustic Oscillation in a Cylindrical Combustion Chamber", Combustion Science and Technology, Vol.72, pp.37~65.
- 4) M.D. Horton and M.R. McGie, June 1963, "Particulate Damping of Oscillatory Combustion", AIAA Journal, Vol.1, No.6.
- 5) Povinelli, L.A., "Particulate Damping in a Solid Propellant Combustion Instability", AIAA Journal, Vol.5, No.10.
- 6) 1994, "130mm D.B. 추진기관 탐색 개발 연구 보고서", (주) 한화, pp 9~12.

또한 조성 1과 2는 산화 장진제 AP를 포함하지 않은 비활성 연소 안정제로 연소 시험이 끝난 모타를 점검 해보면, 삭마되지 않은 연소 안정제가 상당량 존재하여 효율적인 연소 안정이 이루어지지 않았음을 알 수 있었다. 반면에 산화 장진제 AP를 포함한 활성 연소 안정제인 조성 3과 4에서는 전 연소 구간에 걸쳐 대단히 안정된 연소를 보여 연소 불안정 억제에 효과적이었음을 알 수 있었다.

추진제 grain 연소 동안 연소 안정제가 고체 입자를 분산시킬 이론상의 연소 안정제 연소 속도는

$$\frac{(\text{안정분 직경} - \text{안정분 심 직경})}{(\text{추진제 grain 연소 시간} \times 2)} = \frac{(17-7)}{(2 \times 2)}$$

위와 같이 계산하여 2.50mm/sec가 된다. 연소실 설계 압력 1500psi에서 strand burner로 측정된 조성 3, 4의 연소 안정제 연소 속도는 2.31mm/sec와 2.23mm/sec로 이론상의 연소 안정제 연소 속도와 거의 유사하여 효과적으로 고체 입자를 분산시켰음을 알 수 있다.

또한 조성 3과 4의 압력-시간 곡선은 거의 유사하여 Graphite에 의한 효과는 없는 것으로 판단되고 ZrC가 가장 효과적인 것으로 나타나 130mm D.B. 추진기관에는 ZrC/AP/HTPB 조성의 연소 안정제를 적용하였다. 조성 3과 4의 각종 특성은 Table. 2에 실었다.

4. 결 론

K₂SO₄/CTPB, ZrC/Graphite/HTPB 조성의 비활성 연소 안정제는 효율적인 연소 안정이 이루어지지 않았으나, 조성에 AP를 포함한 ZrC/Graphite/AP/HTPB, ZrC/AP/HTPB 조성의 활성(live) 연소 안정제는 모타 연소 전 구간에 걸쳐 안정된 연소를 보여 불안정 연소 억제에 효과가 있었다. 또한 활성 연소 안정제 시험 결과를 비교하여 보면, Graphite에 의한 효과는 없는 것으로 보여지고 ZrC가 가장 효과적으로 나타나 130mm D.B. 추진기관에는 ZrC/AP/HTPB 조성의 연소 안정제를 적용하였으며, 이러한 활성 연소 안정제는 타 복기 추진제 로켓 모타에도 응용 가능하리라 판단된다.