

## 탄성중합 내열재의 $\text{SiO}_2$ 와 $\text{CaC}_2\text{O}_4$ 의 충전에 의한 삭마 효과

홍 명 표

대전기계창

(1988년 11월 2일 접수)

## Ablation Effect of $\text{SiO}_2$ , $\text{CaC}_2\text{O}_4$ -Filled Elastomeric Thermal Insulator

Myung-Pyo Hong

*Daejeon Machine Depot, P. O. Box 35, Daejeon 300-600, Korea.*

(Received November 2, 1988)

요약: 5인치 소형 추진 기관인 LIEM(liner & insulator evaluation motor)의 연소 시험을 통하여 NBR(acrylonitrile-butadiene rubber) 및 HTPB(hydroxy-terminated polybutadiene)로 제조된 탄성 중합 내열재의 삭마율을 연소실압력 250psi에서 가스 속도를 0.03마하에서부터 0.15마하로 변화시키면서 측정하였다. 이때 충전제의 함량 변화 및 용융되는 silica 충전제와 분해되는 calcium oxalate 충전제가 삭마율에 미치는 영향들을 고찰하였다. 그 결과 silica 충전제를 사용하는 것이 calcium oxalate 충전제를 사용하는 것보다 우수하였으며, silica와 calcium oxalate를 혼합하여 사용하는 것이 더 효과적이었다. 본 실험 중 충전제를 혼합 사용한 NB-30-Ca30인 탄성 내열재가 250psi, 0.11마하에서 삭마율이 0.14mm/sec로 제일 우수하였다. 용융되는 silica를 사용한 경우 용융층으로 인하여 가스 속도가 0.1마하의 느린 영역에서는 삭마율이 가스 속도의 0.45승에 비례하였고, 그 이상에서는 0.9승에 비례하였다. 또한 분해되는 calcium oxalate를 사용한 경우는 가스 속도에 관계없이 모두 0.9승에 비례하므로 Bartz식에 잘 일치하였다.

**Abstract:** The measurement method of ablation rate for internal elastomeric insulators was studied by using liner and insulator evaluation motor (LIEM). The chamber pressure of LIEM was 250psi and the gas speed on the surface of insulator was 0.03-0.15Mach. The effects of fillers, content of filler, and gas speed on the surface of elastomeric insulator on the ablation rate were studied. The elastomeric insulators filled with silica have shown better performance than those filled with calcium oxalate. Furthermore, NB-30-Ca30 insulator using combined filler(calcium oxalate and silica) showed the best performance in these experiments. Ablation rate of the above insulator was found to be proportional to the 0.45th power of the Mach number in the low range of gas speed. In case of calcium oxalate, however, the ablation rate was found to be proportional to the 0.9th power of the Mach number in all gas speed.

## 서 론

추진 기관의 후미(aft-closure) 및 노즐 부위에는 연소시 2500-3500K, 500-2000psi의 고온, 고압가스가 분출되므로 막대한 열이 case벽 쪽으로 전도되어 간다. 이렇게 전도되는 열을 막을 수가 없다면 로켓의 작동이 완료되기도 전에 열에 의하여 case는 파괴될 것이다. 그러므로 열로부터 추진 기관의 case를 보호하는 내열재(insulator)를 추진 기관에 적용시켜야 한다. 이러한 역할을 하는 내열재가 우수한 성능을 발휘하려면 열전도도가 낮고, 고온에서 분해 또는 흡열 반응을 하여서 유입되는 열을 소산시켜 열전도를 방해하는 발한(transpiration cooling)의 역할도 갖추어야 하며, 고온 고속 가스에 의한 표면의 삭마율(ablation rate)도 작아야 한다.

일반적으로 이러한 기능을 갖춘 내열재로서는 페놀, 폴리이미드 등과 같은 열경화성 수지에 유리, 규소 혹은 탄소 섬유를 함유시킨 FRP(fiber reinforced plastics)와 탄성 중합체에 무기물의 충전제를 충전한 탄성 내열재(elastomeric insulator)로 대별할 수 있다. 이중 FRP 내열재는 열차단체로서 성능이 아주 우수하나 신율이 낮아 추진 기관 작동시 압력에 의한 변위를 극복하지 못하므로 파괴가 일어날 수도 있다.<sup>1</sup> 또한 밀도가 크므로 추진제의 무게비를 증가시키는데는 바람직하지 못하다. 그러므로 밀도가 낮고, 신율이 높은 탄성 내열재를 추진 기관 내부에 적용하는 것이 바람직하다. 추진 기관의 효율을 증진시키기 위해서는 추진제의 충전율을 극대화시켜야 한다. 그렇게 하기 위해서는 inert 물질인 내열재 부피를 최소로 하여야 한다. 내열재의 부피를 최소화시키기 위해서는 위에서 언급한 조건을 만족시켜야 하는 동시에 특히 삭마율이 작은 것이 필수적이다. 추진 기관에 적용하려는 내열재에 대해서는 추진 기관의 조건 즉, 압력, 가스의 온도, 속도 등에 의한 내열재의 삭마율을 잘 알고 있어야만 내열재의 최적 두께 설계가 가능하며 추진제

충전율을 증가시킬 수 있다. 삭마율 및 내열재의 성능을 비교 고찰하는데는 oxyacetylene torch, arc image, alpha rod 시험 및 소형 추진 기관을 이용하는 연소 시험 등 여러가지 시험 방법이 소개되고 있으나,<sup>1-4</sup> 실제 조건에 가장 접근할 수 있는 방법은 소형 추진 기관에 의한 연소 시험이라 할 수 있겠다.

본 실험에서는 추진제가 연소하는 동안 추진 기관의 작동 압력이 거의 일정한 end burning 형상의 grain을 갖는 직경 5인치의 소형 추진 기관인 LIEM을 이용하여 제조된 탄성 내열재의 삭마율을 가스 속도에 따라 측정하였으며 NBR 및 HTPB 고무에 silica 및 calcium oxalate를 충전하여 이들에 대한 삭마 효과 및 함량에 따른 삭마율을 관찰하였다.

## 이 론

삭마 메카니즘 : 삭마되는 과정은 Fig. 1에서 보듯이 열이 재료로 들어오면 재료의 온도가 상승하여 500K 정도되면 휘발성 물질, H<sub>2</sub>O, CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> 등의 가스들이 빠져 나가고 마지막에는 고분자의 탄소와 탄소간의 사슬들이 끊어지게 된다. 이러한 현상이 일어나는 층을 분해층(pyrolysis zone)이라고 한다. 탄소와 탄소간의 사슬들이 끊어진 후에는 탄소들끼리 숯층(char zone)을 형성하게 된다. 이 숯층은 다공성 형태를 갖고 있으며, 열이 들어오지 못하도록 장벽 역할을 하며, 용융된 SiO<sub>2</sub>와 반응하여 흡열 반응을 일으킨다. 또한 숯층 위에는 SiO<sub>2</sub>가 용융되어 용융층(molten zone)을 형성한다. 용융된 SiO<sub>2</sub>의 액은 증발되기도 하고, 고속 가스에 씻겨 나가기도 하고, 숯층의 탄소들과 반응도 하게 된다. 위와 같은 과정을 계속하면서 재료의 무게가 감소되어 간다. 이렇게 무게가 감소되므로 들어오는 열의 양을 감소시킬 수 있다. 즉 재료의 단위 무게를 감소시키는데 필요한 열을 삭마열이라고 정의한다. 이러한 삭마열은 재료, 화학 반응의 흡

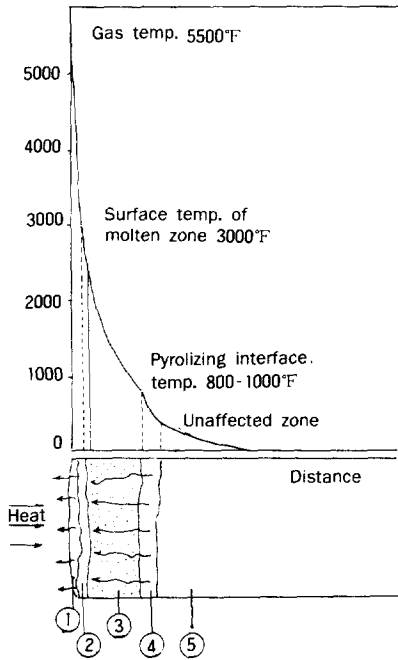


Fig. 1. Schematic presentation of an ablating insulator.  
 1. Boundary layer zone, 2. Molten zone, 3. Porous char zone, 4. Pyrolysis zone, 5. Unaffected zone.

열 혹은 발열, 반응 조건 즉, 온도, 압력, 농도에 따라 다르므로 결정하기 힘들다. 이러한 삭마열을 결정하려면 다음과 같은 사항들을 고려하여야 한다.<sup>25</sup> 복사열, 대류열로 들어오는 열의 양, 다공성인 숏층을 통과하여 경계층으로 나오는 가스들이 연소되어 발열 반응으로 생긴 열이 유입 되는 양, 대기 온도에 있는 재료가 추진제 연소 표면 온도로 상승하는데 소모되는 열의 양, 바인더 및 충전제들을 분해시키는데 필요한 열, 분해된 가스가 숏층을 나오면서 들어오는 열을 냉각시키는 발한(transpiration cooling) 양, 표면에서의 재복사열, 용융된 SiO<sub>2</sub>와 숏층에서 탄소와의 흡열 반응열, 가스 성분 중 고온의 수증기와 숏층의 탄소와의 흡열 반응열(이때 반응열들은 탄소와 용융된 SiO<sub>2</sub>의 농도, 압력, 온도에 관계된다), 용융된 SiO<sub>2</sub>가 액체로 되고 액체에서 일부는 증발되므로 상변화에 의한 잠열의 양 등이다.

위와 같은 사항들을 고찰하여 볼 때 이상적인 내열재<sup>1</sup>라고 하는 것은 분해시 저분자량의 가스가 최대 발생되어야 하며, 숏층이 견고하여야 하며, 흡열 반응이 최대로 되어야 하며, 표면은 점성이 큰 용융 상태로 존재하여야 한다.

열속과 삭마율과의 관계 : 열에 의하여 재료의 단위 무게를 감소시키는데 필요한 열량 Q\*를 삭마열이라고 하면, 정의에 의하여 아래 식과 같아진다.

$$Q^* = \frac{q_{in} A_o t}{\Delta W} \quad (1)$$

여기서 q<sub>in</sub>은 시편으로 들어오는 열속, A<sub>o</sub>는 시편의 면적, t는 열에 의한 노출시간, ΔW는 감량을 의미한다. 위의 식을 변형하면, 삭마율 E<sub>r</sub>는 식(2)과 같다.

$$E_r = \frac{q_{in}}{\rho Q^*} \quad (2)$$

여기서 ρ는 시편의 밀도이며, 삭마율은 열속에 직접 비례함을 알 수 있다. 내열재를 통하여 전도되는 열속은 복사열과 대류열의 합으로 표시되며, 로켓의 후미나 노즐 부위에서는 대류열에 비하여 복사열은 아주 적으므로 무시할 수 있다. 그러나 알루미늄 가루가 다량 함유된 추진제에서는 복사열이 크므로 복사열도 감안하여 주어야 한다. 복사열이 적다고 하고 대류열만 고려한다면 대류열 q<sub>in</sub>을 구하는 식은 아래와 같다.<sup>6,7</sup>

$$q_{in} = h(T_{aw} - T_w) \quad (3)$$

여기서 h는 대류 열전달 계수, T<sub>aw</sub>는 단열 벽면 온도, T<sub>w</sub>는 벽면 온도를 의미한다. 잘 발달된 파이프 내에서 유체가 난류로 흐르는 경우 열전달 계수를 구하는 식은 아래와 같다.<sup>6,7</sup>

$$N_{Nu} = \frac{h D}{K} = 0.023 N_{Re}^{0.8} N_{Pr}^{0.4} \quad (4)$$

여기서  $N_{Nu}$ ,  $N_{Pr}$ ,  $N_{Re}$ 는 각각 Nusselt, Prandtl, Reynolds 번호이며,  $D$ 는 유체가 흐르는 관의 직경,  $K$ 는 유체의 열전도도,  $C_p$ 는 유체의 정압 비열,  $G$ 는 질량유속을 의미한다. 식(4)를 기본으로 해서 로켓의 노즐 부위의 열전달 식은 Bartz<sup>8</sup>에 의하여 발표되었으며, 결과 식은 식(5)과 같다.

$$h = \frac{0.026}{D_t^{0.2}} \left( \frac{\mu^{0.2} C_p}{N_{Pr}^{0.6}} \right) \left( \frac{g P_c}{C^*} \right)^{0.5} \left( \frac{A_t}{A} \right)^{0.9} \left( \frac{D_t}{R_c} \right)^{0.1} \sigma \quad (5)$$

여기서  $D_t$ 는 노즐목의 직경,  $\mu$ 는 연소실 내의 유체의 점도,  $g$ 는 중력 가속도,  $P_c$ 는 연소실 내의 압력,  $A_t$ 는 노즐 목의 단면적,  $C^*$ 는 특성 속도,  $A$ 는 시편의 단면적,  $R_c$ 는 노즐 외측의 곡선 반경을 의미하며, 또한  $\sigma$ 는 유체의 온도와 벽면의 온도차에서 오는 보정 계수이다. 식(5)로부터 열전달 계수를 구할 수 있다. 즉 삭마율은 열속에 비례하고, 또한 열속은 열전달 계수  $h$ 에 비례하므로 삭마율은 열전달 계수에 비례함을 알 수 있다. 식(5)에서 연소실 압력에 따라 가스의 열적 성질이 크게 변하지 않는다면 열전달 계수와 삭마율은 연소실 압력의 0.8승, 시편과 노즐과의 면적비(마하수)의 0.9승에 비례하게 된다.

### 실험 방법

**추진 기관(LIEM)의 현상 :** 탄성 내열재의 삭마율을 측정하기 위하여 사용된 추진 기관의 형상은 Fig. 2와 같다.

**시편의 준비 :** NBR 탄성 내열재의 시편은 Table 1의 조성 과 같이 하여 혼합 밀로 혼합하였으며 급형에 사출한 후  $150\text{Kg}/\text{cm}^2$ ,  $150^\circ\text{C}$ 에서 30분 동안 경화시켜 제조하였다. Table 1의 조성은 고정시키고 Table 2와 같이 충전제의 종류와 충전제의 함량을 변화시켰다. 충전제로는 Degussa 제 품인 Aerosil-200( $\text{SiO}_2$ )과 calcium oxalate를 사용하였다. 이들 시편 번호는 충전제 함량에 따라

명명하였으며, Table 2와 같다. 또한 HTPB와 같은 액체 프리폴리머를 기본으로 한 탄성 내열재는 cowles dissolver를 이용하여 Table 3과 같은 조성으로 혼합하였으며, 혼합 액을 주조하여  $60^\circ\text{C}$ 에서 15시간 경화시켜 시편을 제조하였다.

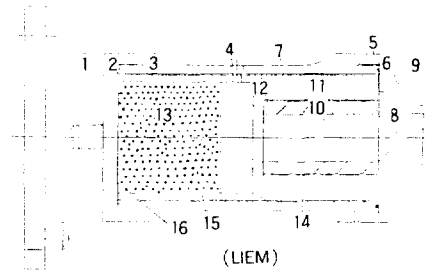


Fig. 2. Liner & Insulator Evaluation Motor.

1. Stand, 2. Head Closure, 3. Steel Case(ID=124, L=254mm), 4. Pressure Pick up Hole, 5. O-Ring, 6. Rear Closure, 7. FRP Cartridge for propellant, 8. Graphite Nozzle, 9. Rubber Plate, 10. Sample (ID=variable OD=72 L=108), 11. Sample Holder, 12. FRP Disk, 13. Propellant, 14. FRP Cartridge for Sample, 15. Inert Rubber, 16. Rubber Plate.

Table 1. Weight Ratio for NBR Insulator without Filler

	Raw Material	Amount
Rubber	NBR(DN-206)	100
Additives	Anti-F	2
	Anti-D	1.5
	Sulfur	1.5
	Coumarone Indene Resin	5
	DOP	7.5
	Stearic Acid	1.5
	ZnO	5
	DM	1.5
	TT	0.5
ACC-D	0.3	

- Anti-F : N, N-di-β-naphthyl P-phenylenediamine  
 Anti-D : Phenyl-β-naphthylamine  
 DOP : Dioctyl phthalate  
 DM : Dibenzothiazyl disulfide  
 TT : Tetramethylthuyram disulfide  
 ACC-D : Diphenyl guanidine

**Table 2.** Sample by Filler Content

Sample Number	Elastomer	SiO <sub>2</sub> Amount (phr)	CaC <sub>2</sub> O <sub>4</sub> Amount (phr)
NB-0	NBR Based with	0	
NB-10	Table 1	10	
NB-20		20	
NB-30		30	
NB-40		40	
NB-50		50	
HT-0	HTPB Basedwith		0
HT-10	Table 3		10
HT-20			20
HT-30			30
HT-40			40
HT-50			50
HT-60			60
NB-30-Ca10	NBR Based with	30	10
NB-30-Ca20	Table 1	30	20
NB-30-Ca30		30	30
NB-30-Ca40		40	40

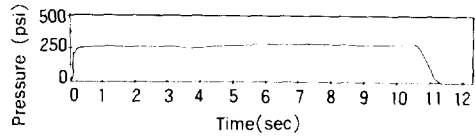
**Table 3.** Weight Ratio for HTPB Insulator without Filler

Raw Material	Amount
HTPB (Arco, R-45M)	90
TMHD	10
TDI	10.4

TMHD : Trimethyl hexanediol  
TDI : Toluene diisocyanate

Table 3의 조성에서 HTPB, TMHD, TDI의 무게의 합을 100으로 하고서 충전제 calcium oxalate의 함량을 Table 2와 같이 변화시켜 제조하였으며, 이들의 시편 번호는 Table 2에 나타나 있다. 시편 위를 통과하는 분출 가스의 속도를 변화시키기 위해서 시편의 내경을 변화할 수 있도록 직경이 다른 여러가지 core를 사용하였으며, 시험 후 삭마율을 측정하기 위하여 가스가 통과하는 경 측, 시편의 내경을 telescope gage 및 calipers를 이용하여 시편의 끝으로부터 2cm 내부인 위치에서 120도 간격으로 세 곳을 측정하였다.

연소 시험시 사용된 추진제(CTPB-102)는 carboxy- terminated polybutadiene (CTPB) 프리



**Fig. 3.** Typical pressure VS time Curve for CTPB-102 propellant.

폴리머에 과산화암모늄이 84%로 고충진된 것이며, 경화제로는 에폭시를 사용하였고 60℃에서 7일간 경화시켜 제조하였다. 이때 추진제를 점화시키기 위하여 BKNO<sub>3</sub> 가루 3g을 칭량한 후 작은 비닐 주머니에 넣고 도화선을 이용하여 점화시켰다. 이때 압력 측정용 pressure cell은 500psi 짜리를 이용하였고, chart speed는 1 inch / 0.1sec로 하였다. 또한 이 실험에 CTPB-102 추진제를 사용하여 얻은 전형적인 압력-시간 곡선은 Fig. 3과 같다.

### 결과 및 고찰

Table 1의 NBR 조성을 이용 silica의 함량을 0phr에서부터 50phr까지 변화시켜 시편을 제조하였으며, CTPB 추진제의 연소 시험을 통하여 시편의 삭마율을 측정하였다. 그 결과는 Fig. 4에 나타나 있으며, 시험 후 동일한 조건에서 시편의 삭마율을 비교하기 위해서 시편을 지나는 가스 속도 및 연소실 압력은 각각 0.077마하 및 250psi의 조건으로 Bartz식을 이용하여 환산하였다.

Fig. 4에서 보듯이 SiO<sub>2</sub>의 함량을 증가시킬수록 삭마율은 감소하였고 30phr부터는 변화가 별로 없었다. 그 이유는 추진제가 연소되어 분출되는 고온가스에 의하여 SiO<sub>2</sub>가 용융되어 생긴 점성이 큰 액체가 재료의 표면을 덮어 보호하여 주기 때문이라고 생각된다. 또한 탄성 내열재는 silica 및 glass phenolic 내열재와는 달리 숯층이 견고하지 못하므로 SiO<sub>2</sub>와 같은 용융층이 없다면 고속 가스의 흐름에 의하여 숯층마저도 떨어져 나가 표면을 보호할 수도 없을 뿐 아니라 숯층의 탄소

와 SiO<sub>2</sub>의 용융액과의 흡열 반응도 기대 될수 없기 때문으로 생각된다. 이러한 점에서, 내열재에 사용되는 충전제는 용융되어 접도가 높은 것이 바람직하다. 그러므로 glass보다는 silica가 silica보다는 quartz 쪽이 우수하다 하겠다. 또한 입자의 크기가 작을수록 용융 속도가 빠르므로 입자의 크기는 작은 것이 유리하다고 할 수 있다.

Table 2의 HTPB를 기본으로 하는 조성을 이용하여 calcium oxalate의 함량을 0에서부터 60phr

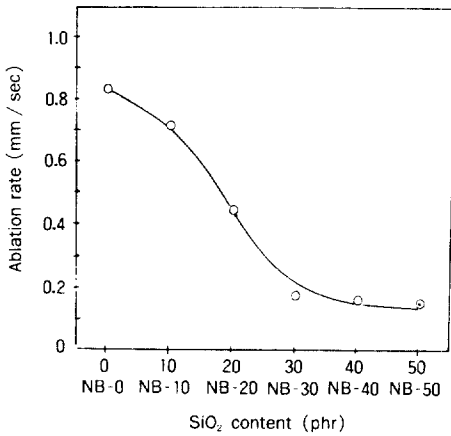


Fig. 4. Effect of SiO<sub>2</sub> content on ablation rate of NBR; condition gas velocity : 0.07 Mach, Chamber Pressure : 250psi, Propellant : CTPB-102.

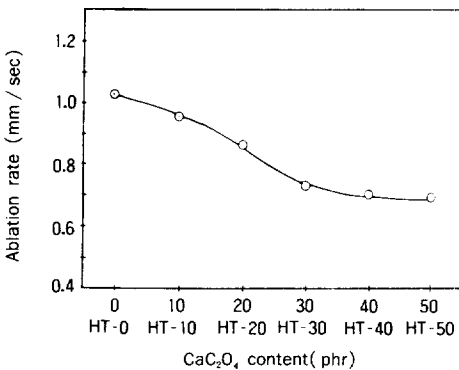


Fig. 5. Effect of calcium oxalate content on ablation rate of HTPB; condition : gas velocity : 0.077Mach, chamber pressure : 250psi, propellant : CTPB-102.

까지 변화시켜 시편을 제조하였으며, CTPB추진제로 연소시험을 하여 삭마율을 측정하였다. 동일 조건에서 비교하기 위하여 앞에서와 같이 0.077마하와 250psi 조건으로 환산하였으며, 그 결과는 Fig. 5에 나타나 있다. calcium oxalate의 함량이 증가할수록 삭마율은 감소하였으며, 앞의 결과와 같이 30phr이상에서는 별 영향이 없었다. calcium oxalate는 TGA 분석 결과 Fig. 6과 같으며, 512°C에서 CaC<sub>2</sub>O<sub>4</sub>는 CaCO<sub>3</sub>와 CO로 1차 분해되어 CO가스가 발생되고, 784°C에서 CaCO<sub>3</sub>는 CaO와 CO<sub>2</sub>로 2차 분해되어 CO<sub>2</sub>가스가 발생된다. 이 발생되어 나오는 CO, CO<sub>2</sub> 가스가 유입되는 열을 냉각시켜 주기 때문이다. 앞의 결과와 마찬가지로, 30phr 이상에서 큰 변화가 없는 것은 충전제가 다량 함유되어 가스의 발생량은 커 냉각의 효과는 우수하나 바인더 함량이 적으므로 삭마율이 반대로 증가하기 때문이다. Fig. 4,5에서 NB-O와 HT-O 즉, 충전제가 포함되어 있지 않은 순수 바인더만의 삭마율을 비교할 때, 각각 0.83mm/sec, 1.02mm/sec로 NBR 쪽이 삭마율이 낮아 우수하다는 것을 알 수 있다. 용융되는 silica와 분해되는 calcium oxalate에 따른 삭마율을 비교하여 볼 때 silica를 첨가하지 않은 NB-O의 삭마율 0.83mm/sec에서 silica를 40, 50phr 첨가한 NB-40, 50의 삭마율 0.15mm/sec까지 약 30% 정도 삭마율을 감소시킬 수 있다. 비록 바인더의 종류는 다르지만 감소된 양을 비교할 때 삭마율을 감소시키기 위해서는 분해되는

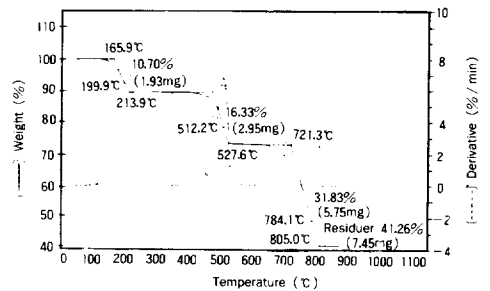


Fig. 6. TGA result of calcium oxalate.

탄성중합 내열재의 SiO<sub>2</sub>와 CaC<sub>2</sub>C<sub>4</sub>의 충전에 의한 삭마 효과

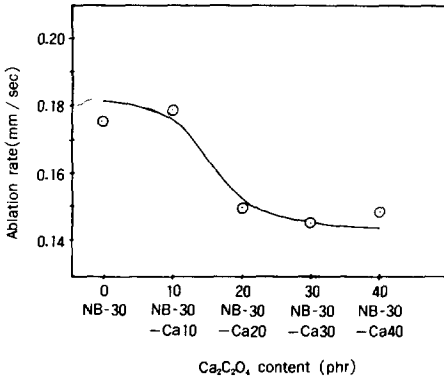


Fig. 7. Effect of calcium oxalate content on ablation rate of NB-30.

calcium oxalate 충전제보다는 용융되는 silica 충전제가 더 효과적임을 알 수 있다. Fig. 4에서 삭마율이 낮은 NB-30을 기본으로 하여 calcium oxalate 함량을 0phr에서부터 40phr로 변화시켜 시편을 제조, 연소 시험을 수행하였다. 압력은 250psi로 가스의 속도는 0.11마하로 전환하였다. 그 결과는 Fig. 7과 같다. 충전제로 silica만 이용한 NB-30의 경우보다도 calcium oxalate와 혼합 사용한 경우 NB-30-Ca30, 40, 50의 삭마율이 낮았다. 삭마율이 낮은 이유는 용융된 silica의 용융층이 내면을 보호하여 줄 뿐 아니라 분해된 가스가 내열재 내부로 들어오는 열을 냉각시켜 주는 이중의 효과 때문이다. 또한 NB-30-Ca30을 HT-60, NB-40 등과 비교하기 위해서 시편을 일정한 압력 250psi에서 시편 위를 지나는 가스의 속도를 변화시켜 가면서 삭마율을 측정하였다. 그 결과는 Fig. 8에 나타나 있으며, NB-30-Ca30의 삭마율은 HT-60, NB-40 보다도 낮은 삭마율을 지니고 있다. silica가 함유된 NBR계에서는 0.07-0.1마하에서 꺾이는 점이 존재하는 반면, HT-60의 경우는 직선인 결과를 볼 수 있다. 용융되는 silica 충전제를 이용한 NB-40, NB-30-Ca30의 경우 분출되는 가스의 속도가 0.07마하 이상에서는 앞의 이론에서 기술한 Bartz식에 잘 적용되어 At/A 즉, 마하수의 0.9승에 잘 비례함을 볼 수 있고,

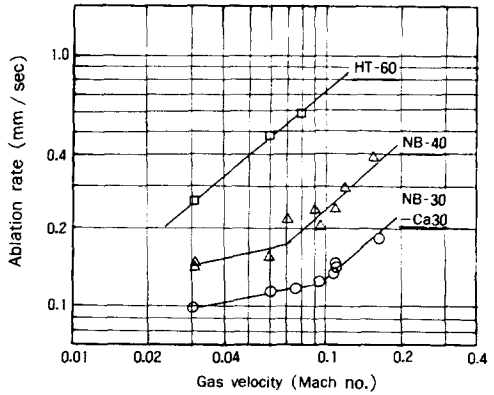


Fig. 8. Effect of gas velocity on ablation rate of HT-60, NB-40, NB-30-Ca30. condition : chamber pressure : 250psi, propellant: CTPB-102.

0.7-0.1마하 미만에서는 삭마율이 0.9승에 비례하지 않고 지수가 훨씬 작음을 볼 수 있다. 이러한 현상은 다음과 같이 설명되어질 수 있다. Bartz의 식은 대류 열전달에서 열전달 계수 h를 구하는 식으로서 이것과 삭마율과 관계되었기 때문에 재료 자체의 성질이 고려되어 있지 않았다. 가스의 분출 속도가 느린 영역에서는 silica의 용융층이 잘 형성되어 질 수 있으나 가스의 분출 속도가 증가하므로 용융층이 안정화되지 않고 가스의 전단력으로 씻겨 나갈 수 있다. 즉, 시편위를 지나는 가스의 분출이 고속과 저속일 경우 표면의 상태가 다르다. 그러므로 저속으로 지나가는 경우는 0.9승에 비례하지 않고, 더 낮은 지수 0.45승으로 비례하게 되어 전이점이 존재한다. 그러나 HT-60은 바인더, 충전제 모두 분해되는 경우이므로 분출되는 가스가 고속이건 저속이건 재료의 표면 상태가 동일하므로 전구간 모두 Bartz식에 잘 일치한다. 연소 시험 후 시편의 표면을 관찰하여 보면 HT-60의 경우는 분출 속도가 고속이었을 때와 저속이었을 때 모두 용융층, 슛층을 볼 수 없었으며 표면의 상태가 동일하였다. 그러나 NBR에 silica를 함유한 경우는 용융층과 슛층이 존재하고 있고, 표면이 울퉁불퉁하여 측정이 곤란하였으나 그 두께는 1-2mm 정도 이었다.

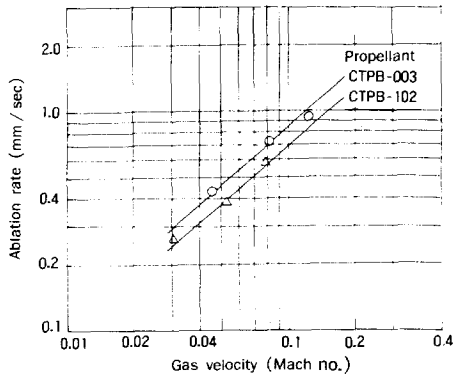


Fig. 9. Effect of propellants on ablation rate of HT-60 under 250 psi.

다음으로 추진제 종류에 따라서 삭마율이 얼마나 영향을 받는지 관찰하기 위하여 HT-60의 시편으로, 추진제로서는 알루미늄 가루가 16%로 다량 함유된 CTPB-003과 2% 함유된 CTPB-102를 택하여 실험하였다. 결과는 Fig. 9에 나타나 있으며 CTPB-003 추진제를 사용한 경우가 CTPB-102를 사용한 경우보다도 삭마율이 약 20%정도 증가되었다. 그 이유는 추진제의 성분 중 알루미늄 가루의 의한 것인 바, 알루미늄 가루가 함유되어 있는 경우 연소시 대류열 외에 막대한 복사열이 추가되며, 연소 가스중 뜨거운  $Al_2O_3$ 의 고체 입자에 의한 기계적 침식 현상 때문이다.

### 결 론

이상과 같은 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 용융되는 silica 충전제를 사용한 경우가 분해되는 calcium oxalate 충전제를 사용한 경우보다도 삭마율이 낮았다.
2. 용융되는 silica 충전제 혹은 분해되는 calcium oxalate 충전제를 단독으로 사용한 경우보다는

혼합 사용한 경우가 삭마율이 더 낮았다.

3. Silica를 사용한 NB-40, NB-30-Ca30의 경우에는 분출되는 가스의 속도가 0.1마하 미만의 느린 영역에서는 삭마율이 가스 속도의 0.45승으로 비례하여 Bartz식에 일치하지 않았으며, 0.1마하 이상에서는 삭마율이 가스 속도의 0.9승에 비례하여 Bartz식에 잘 일치하였다.

4. Calcium oxalate를 사용한 HT-60의 경우 삭마율은 가스 속도의 모든 영역에서 0.9승에 비례하여 Bartz식에 잘 일치함을 보였다.

5. LIEM의 소형 추진 기관을 이용하므로써 내열재의 삭마율을 보다 간편하게 측정할 수 있었으며, 내열재 조성 연구중 내열재의 screening test에 많은 도움이 되리라 생각된다.

### 참 고 문 헌

1. R. W. Jones and S. B. Eglin, "Solid Rocket Liner and Insulation Materials", ARS Space Flight Report to the Nation / N. Y. coliseum, October 9-15 (1961).
2. G. F. D'alelio and J. A. Parker, "Ablative Plastics", Marcel Dekker, Inc., N. Y. (1971).
3. Rosato, and Schwartz, "Environmental Effects on Polymeric Materials", Vol. 1 Interscience Pub., New York (1968).
4. "Oxyacetylene Ablation Testing of Thermal Insulation Materials", ASTM, E-285-70.
5. R. S. Fairall, et al., *Chemical Engineering Progress Symposium Series*, 63, 44(1965).
6. William H. McAdams, "Heat Transmission", 3rd. ed., McGraw-Hill Inc., New York(1954).
7. J. P. Holman, "Heat Transfer", 5th. ed., McGraw-Hill, Inc., New York (1981).
8. D. R. Bartz, *Jet Propulsion*, 27, 49(1957).