

노즐목 적용 탄소/탄소 복합재료의 열반응 특성 연구

함희철*

A Study on the Thermal Response Characteristics of Carbon/Carbon Composites for Nozzle Throat Insert

Heecheol Ham*

ABSTRACT

A thermal resistance estimation of carbon/carbon composites used as the nozzle throat insert of solid rocket motor was performed using TPEM motor. Three types of TPEM motor and two types of propellant were employed. The ablation rate is higher for the higher chamber pressure and also higher for the higher concentration of oxidizing species in combustion gas, but it is lower for the higher material density.

초 록

고체로켓 모터의 노즐목 삽입재에 적용하는 탄소/탄소 복합재료의 열반응 특성을 분석하였다. 내열 평가 시험은 3종류의 TPEM 모터를 사용하였고, 추진제는 2종류를 사용하였다. 삭마율은 연소실 압력이 상승함에 따라, 산화물분율이 증가함에 따라 증가하고, 소재 밀도가 증가함에 따라 감소한다.

Key Words: Ablation Rate(삭마율), Composites(복합재료), Graphite(흑연), Nozzle Throat(노즐목), Thermal Response(열반응), Thermal Resistance(내열), Recession(침식)

1. 서 론

고체로켓 모터의 노즐은 연소실에서 생성된 배기가스를 팽창시켜 운동에너지를 효율적으로 변환시킴으로써 비행체에 추력을 공급하는 기능을 담당한다. 비행체 추력의 약 65~75%는 노즐목까지의 아음속 영역의 가속에 의해 발생하

고, 나머지는 초음속 영역의 팽창과정에서 발생한다. 노즐설계의 목적은 제한된 외면모양, 무게 및 비용 조건하에서 비행거리 및 적재 폭발력을 최대화 할 수 있도록 배기가스의 팽창을 조정하는 것이다. 따라서 노즐은 보다 큰 체계의 한 종합적인 구성요소이며, 그 체계를 고려하지 않고는 최적화될 수 없다. 이러한 상관성 때문에 노즐설계는 공력, 열, 구조, 제작 등을 고려한 반복적인 과정을 거쳐 이루어진다. 설계된 노즐은 먼저 열적 및 구조적으로 상세해석을 통해 평가되고, 그 다음에 전체 비행체 성능에 미치

† 2005년 11월 18일 접수 ~ 2006년 3월 10일 심사완료

* 정희원, 국방과학연구소 기4-3

연락처, E-mail: godbless1001@empal.com

는 영향을 분석하게 된다. 이와 같은 이중의 반복과정은 실질적으로 최적조건이 성립될 때까지 계속된다.

공력설계에서는 요구 추력을 구현하기 위한 수렴부, 노즐목 및 발산부의 형상을 정하고, 열설계에서는 공력형상을 유지하기 위한 노즐목 삽입재, 내열재 및 단열재의 재료와 형상을 정하며, 구조설계에서는 내열부품들을 지지하고 예상하중에 견딜 수 있도록 구조물의 재료와 형상을 정한다.

일정한 연소압력을 유지하기 위해서는 일정한 노즐목 면적이 요구된다. 그러나 그레인 설계자가 노즐목 삭마를 감안하여 설계할 수 있으며, 이 경우 그레인 설계와 노즐목 설계의 반복과정이 요구된다. 노즐목 삭마는 상대적인 노즐목 변화 때문에 큰 모터 보다는 작은 모터에서 더 심각하며, 따라서 연소시간이 매우 짧은 경우를 제외하고는 작은 노즐목을 위하여 내삭마성이 보다 우수한 재료를 선택하여야 한다.

삭마에 의한 노즐목 확공을 억제시키기 위하여 노즐목 부위에 특별한 내삭마성 내열재를 사용하며, 노즐목 삽입재로서 흑연(Graphite)과 탄소/탄소 복합재료(Carbon/Carbon Composites)가 주로 적용된다.

흑연은 비교적 낮은 강도 때문에 두께를 두껍게 하거나 또는 구조적으로 잘 지지해 주어야 한다. 흑연은 취성이 큰 편이며 열응력으로 균열이 갈 때가 많이 있다. 또한 비교적 큰 열팽창계수도 설계에서 유의해야 될 점이다.

탄소/탄소 복합재료는 매우 각광을 받는 신소재이다. 탄소/탄소 복합재료는 흑연에 버금가는 내삭마성을 가지면서도 강도가 더 크고 열적, 기계적 충격에 더 잘 견디는 성질을 가진다. 노즐재료로 탄소/탄소 복합재료를 사용함으로써 무게를 줄일 수 있고 노즐효율도 개선시킬 수 있다. 이것은 탄소/탄소 복합재료가 훌륭한 내열재이면서 동시에 훌륭한 구조재이기 때문에 가능하다.

노즐 표면은 고온의 연소생성물에 의해 기계적 침식(mechanical erosion), 화학적 침식

(chemical erosion), 증발(evaporation), 용융(melting), 숯화(charring) 등 여러 가지 거동으로 반응하게 되며, 보통 이것을 통칭하여 삭마(ablation)라 부른다. 삭마는 그 현상의 복잡성에도 불구하고 다음과 같이 단순하게 표시될 수 있다.

처녀층 → 숯층 + 분해가스

연소생성물과 내열재료의 성분 및 분해가스 사이의 삭마에 의한 표면후퇴는 순전히 화학적인 현상으로 가정한다. 입자침식에 의한 기계적 침식, 국부적 쪼개짐(spalling), 그리고 표면마찰에 의한 용융층의 제거 등은 해석적으로 고려하기 어렵고, 이와 같은 영향을 무시할 수 없을 정도가 되면 경험식을 개발하여 적용하는 것이 일반적인 방법이다[1].

1.1 기존의 열반응 특성 연구

고체로켓 모터 작동조건에 따른 노즐 내열재의 삭마율은 성능설계에 있어서 가장 중요한 기초 자료가 되며, 이를 위해 실제 삭마두께를 예측하기 위한 시험 방법 및 수치해석 방법들이 연구되어 왔다.

McDonald & Hedman[2]은 흑연 삭마의 주요 원인은 표면 화학반응이며, 알루미늄 함량이 증가함에 따라 감소하고, H_2 는 삭마에 큰 영향을 미치지 않는다고 서술하였다. Lewis etc.[3]은 다양한 흑연 및 탄소/탄소 복합재료의 탄소와 연소가스 내의 CO_2 , H_2O , O_2 와의 상호작용을 연구하였으며, $H_2O \gg CO_2 \gg O_2$ 의 순서로 흑연 삭마율에 영향을 미치는 것을 보였다. Klager[4]는 흑연 침식(recession)의 주원인을 H_2O CO_2 가스들의 화학작용(chemical attack)임을 연소실험을 통하여 규명하였다. 또한 연소압력은 삭마율에 지대한 영향을 주는 반면, 연소가스 온도는 삭마율에 직접적인 영향이 없었다. Keswani etc.[5]은 BATES와 MERM 두 종류의 모터를 사용하여 여러 가지의 추진제 조성 및 모터 작동조건 하에서 노즐 열반응 거동을 연구하였다. 삭마율은 주로 노즐 표면으로의 주요 산화물(H_2O 및 CO_2)의 확산에 의존하고, 모터 및 노

즐 내부 형상과 주요 산화물의 농도, 연소실 압력에 영향을 받는다. Kuo & Keswani[6]는 이론적 모델을 사용하여 탄소/탄소 복합재료의 열반응 과정을 분석하였다. 노즐표면의 온도가 급격히 상승하는 시기인 연소 초기, 즉 비교적 낮은 표면 온도구간에서는 화학반응(chemical kinetics)이, 그 이후 온도가 높은 구간에서는 노즐표면으로의 산화성분들의 확산이 삭마과정에 지대한 영향을 준다. 또한 삭마율은 추진제의 알루미늄 함량의 감소에 따라, 그리고 압력, 표면조도의 증가와 더불어 상승하는 결과를 도출하였다. Borie etc.[7]는 고체 로켓 모터에서 탄소/탄소 복합재료에 영향을 미치는 요인에 대한 열화학분석을 수행하였으며, H_2O 에 의한 탄소 화학작용이 노즐 삭마에 영향을 미침을 확인하였다.

1.2 연구배경 및 목적

추진제가 연소하면서 발생하는 고온, 고압의 가스는 노즐을 통과하면서 팽창, 가속된다. 이때 열에너지는 운동에너지로 바뀌고 로켓의 추력이 발생된다. 노즐을 통하여 흐르는 고온가스의 유동은 침식성이 강하여 특수 내열재료를 사용해야 한다. 이런 특수 내열재료는 내삭마성, 치수안정성, 열충격저항, 열응력, 고압 및 재현성이 우수한 저밀도의 가벼운 물질이어야 한다. 이런 재료는 침식성이 강한 기체 분위기에서 수초에서부터 수분까지도 견디는 성질을 가져야 한다.

탄소/탄소 복합재료는 열안정성, 높은 열전도도와 낮은 열팽창 계동 등으로 인하여 열충격에 대한 저항성이 매우 우수하여 노즐재료로서 요구되는 특성에 가장 근접된 재료이다[8].

또한, 탄소/탄소 복합재료는 페놀재료의 열분해(pyrolysis)시 야기되는 가스 발생을 피할 수 있고, 열팽창계수가 매우 적어 열팽창에 의한 내부 열응력을 줄일 수 있어 설계 단순화를 가져올 수 있으며, 또한 무게를 줄일 수 있어 노즐 효율을 증대시킬 수 있다. 아울러 탄소/탄소 복합재료는 훌륭한 내열재이면서 동시에 훌륭한

구조재 역할을 담당한다. 탄소/탄소 복합재료는 밀도가 클수록 내삭마성 및 강도 등의 성질이 우수하므로 밀도를 증대시키는 것이 큰 과제이다.

따라서 최적의 열반응 특성을 갖는 탄소/탄소 복합재료의 개발과 열반응 특성 규명에 대한 필요성이 대두되어 본 연구를 수행하게 되었으며, 탄소/탄소 복합재료와 ATJ 흑연의 열반응 특성을 상호 비교함으로써 국산재료 및 기술의 발전 가능성을 확인하고자 하였다.

2. 탄소/탄소 복합재료의 열반응 특성

복합재료의 내열(thermal resistance) 및 삭마(ablation) 특성은 우주항공 기술분야에서 매우 중요한 재료의 성질이다.

노즐목 부분은 가스의 압력이 높고, 가스의 속도는 음속(Mach 수 1.0)이 되는 곳이다. 열충격과 침식을 많이 받을 뿐만 아니라 노즐벽으로 전달되는 열량이 가장 큰 곳이다. 노즐의 내부벽은 연소 생성물에 의해서 산화되고, 산화되어 약해진 부분이 고속의 연소가스에 의해서 깎여 나가는 삭마현상을 겪게 된다. 탄소/탄소 복합재료의 삭마율은 연소실 압력 및 추진제의 종류, 복합재료의 밀도에 따라 변화한다.

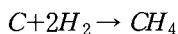
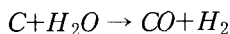
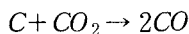
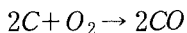
2.1 기계적 삭마

고체 로켓 모터 추진제 내의 알루미늄 입자의 비율은 높은 경우 약 20% 정도 차지한다. 추진제 연소 시 발생하는 산화알루미늄 입자는 높은 열과 큰 운동량을 가지고 로켓 노즐 내부를 유동하게 되며, 고온, 고속의 유체 내부에서 유동하는 입자는 일반적으로 액체 상태로 존재하게 된다. 이러한 액적은 표면장력과 유동, 그리고 액적 간의 속도차이에 의한 항력에 의해서 상대적으로 큰 액적에서 작은 액적으로 분리되므로 액적의 유동 궤적이 상당히 변화하게 되며, 열적 삭마나 기계적 마모에 의한 노즐 표면의 파손을 가져온다.

알루미늄 입자가 노즐 삭마에 미치는 영향은 다음과 같이 해석할 수 있다. 연소생성물에 함유된 알루미늄 입자는 일반적으로 기체인 연소생성물보다 무겁기 때문에 연소생성물보다 큰 관성력을 가지고 이동하게 된다. 알루미늄 입자는 연소실을 지나 노즐의 수축부를 지나면서 충돌각도와 노즐목 근처에서의 유동 급가속에 의한 운동량 변화가 발생하게 되고, 노즐벽과 충돌하게 됨으로 수축부의 삭마두께가 급속히 증가한다. 이런 알루미늄 입자에 의한 삭마두께는 액적이 클수록 증가하는 것으로 알려져 있다.

2.2 화학적 삭마

Kuo와 Keswani[6]의 논문을 참조하면 추진제 내의 알루미늄 함량이 증가함에 따라 연소온도는 상승하지만 H_2O CO_2 의 물분율과 노즐목에서의 삭마율은 감소하는 것을 알 수 있다. 즉, 알루미늄 함량의 증가에 따른 삭마율의 감소는 H_2O CO_2 의 물분율 감소가 직접적인 원인이라 할 수 있다. 이것은 탄소/탄소 복합재료 노즐목에서의 삭마과정은 알루미늄 입자에 의한 기계적 삭마에 의한 영향보다는 연소생성물에 함유된 H_2O CO_2 와 같은 산화성 가스에 의한 화학적 침식이 중요한 원인이라는 것을 확인할 수 있다. 즉, 탄소구조물에 대한 열반응 메커니즘은 H_2O CO_2 등의 산화성 가스가 탄소구조물의 탄소와 결합하여 CO , H_2 로 되는 과정을 거치게 된다. 탄소계 내열재의 표면층에 존재하는 탄소는 고체 로켓모터의 연소생성물과 화학반응을 하게 되며 대표적인 반응은 다음과 같다.



고체 로켓모터의 경우 연소생성물내의 O_2 농도는 무시될 정도로 적고, 또한 C 와 H_2 의 반응은 매우 높은 온도에서만 일어나므로 연소생성물 내에 존재하는 CO_2 또는 H_2O 와 노즐벽면의 C 간의 화학반응이 지배적인 역할을 한다.

이러한 반응성분들은 연소 중 노즐 표면 위에 형성된 난류 경계층을 통과, 확산되고 탄소와 반응하여 노즐 삭마를 일으킨다. 따라서 탄소의 삭마율은 화학반응과 확산에 의해 영향을 받는다고 할 수 있다.

노즐 삭마에 영향을 미치는 또 다른 중요한 변수는 연소압력이다. 노즐 표면에 형성된 경계층을 따라 노즐표면으로의 산화성분의 질량 전달율은 가스상 밀도, 즉 압력에 비례한다. 압력의 감소는 가스상 밀도의 감소 원인이 된다. 난류 경계층으로의 질량 전달율은 밀도에 직접적으로 비례하므로 압력의 감소는 노즐 표면으로의 산화성분들의 공급 감소를 초래한다.

3. 시 험

3.1 시험재료

본 연구에 사용된 탄소/탄소 복합재료 제작에 사용된 매트릭스는 열분해 탄소(pyrolytic carbon)와 콜타르 핏치(coal-tar pitch)이다. 탄화공정은 프로판 가스를 사용하여 기상침침법(CVI)으로 탄소를 1차 함침, 탄화시킨 후 2차로 핏치를 함침, 가압탄화(HIP) 한다. 보강섬유로 사용한 탄소섬유는 PAN계 고강도 섬유로 태광산업(주)에서 제조한 TZ-307 3K 또는 12K, 그리고 일본 Toray에서 제조한 T-700S이다. 핏치는 정우석탄화학(주)의 석탄계 핏치를 사용하였다 [8].

3.2 시험방법 및 모터 형상

이상연소시험은 TPEM(Thermal Protector Evaluation Motor) 모터를 사용하여 수행하였으며, 2종류의 추진제를 사용하여 시험하였다 (Table 1 참조). 노즐목 위치에 탄소/탄소 복합재료 및 ATJ 흑연을 적용하여 연소시험을 수행하였다.

TPEM 모터의 경우 연소시험 후 분석 자료의 신뢰성 및 재현성을 향상시키기 위하여 조립된 모터를 20°C의 항온실에서 20시간 이상 보관 후

연소시험을 수행하였다. 연소시험 시 추진제 연소시간, 압력, 추력을 측정하였으며, 연소시험 후 단위 시간당 제거된 재료의 두께를 나타내는 삭마율을 구하였다.

Table 1. Composition of Propellant and Concentrations of Oxidizing Species at Nozzle Throat

추진제종류	연소가스			추진제 알루미늄 (wt.%)
	산화물분율		온도, K	
	CO ₂	H ₂ O		
ADP-302	0.10	0.39	2761	2.0
ADP-304	0.01	0.15	3245	17.5

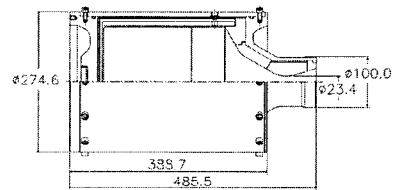
3.21 TPEM 모터

내열재의 내열성 및 단열성을 평가하고, 내열재의 표면 및 내부 열반응 모델링의 적합성을 평가하며, 나아가서 이러한 평가 자료들을 표준화하기 위하여서는 내열평가 시험모터의 운용은 필수적이다. 내열평가 시험모터는 추진제를 선택적으로 충전할 수 있고, 연소실 압력의 설계가 자유로우며, 취급이 용이하여 시험하는데 부담이 없고, 모터 케이스의 재사용이 가능하여 경제적이란 좋은 것이다. 따라서 이러한 사항들을 충족시킬 수 있는 모터를 개발하였으며 이를 TPEM(Thermal Protector Evaluation Motor)이라 명명하였다. TPEM 모터는 연소관 직경 10 inch 급과 16 inch 급의 두 종류로 개발되었으며, TPEM-10은 가용 압력이 200~600 psia, 연소시간이 15~25초 정도의 후미연소(End Burning) 그레이의 소형 시험모터이다. TPEM-10m은 연소관 및 앞마개는 기존 사용 중인 TPEM-10을 그대로 사용하고 노즐만 교체하여 시험한다. 가용압력은 최대 1200 psia, 연소시간은 최대 30초, 노즐목 직경은 10.0~18.5 mm이다. 노즐목은 7 mm tubular 형상이다. TPEM-16은 가용 압력이 700~1300 psia, 연소시간이 9~20초 정도의 반경방향 연소(Radial Buring) 그레이의 중형 시험 모터이다. Table 2는 TPEM 모터의 표준 제원 및 성능이며, Fig.

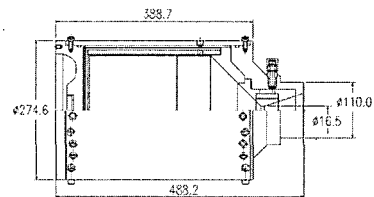
1은 TPEM 모터의 형상도이다.

Table 2. Standard Dimension and Performance about Three Types of TPEM Motor

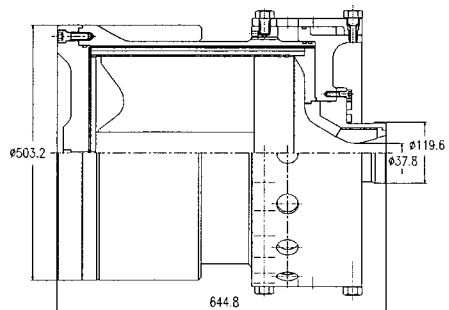
모터 종류	TPEM-10	TPEM-10m	TPEM-16	
제원	노즐목직경 (mm)	Ø23.4	Ø16.5	Ø37.8
	출구내경 (mm)	Ø79.0	Ø66.2	Ø69.0
	외경×길이 (mm)	Ø274.6×485.5	Ø274.6×488.2	Ø503.2×644.8
성능	평균압력 (psia)	300	1000	1000
	평균추력 (lbf)	300	500	3000
	연소시간 (sec)	20	10	10



(a) TPEM-10



(b) TPEM-10m



(c) TPEM-16

Fig. 1 Schematic of Three Types of TPEM Motor

3.3 삭마두께 측정

탄소/탄소 복합재료 및 ATJ 흑연의 지상연소 시험 후 측정 결과를 Table 3~4에 나타내었다.

Table 3. Thermal Response Characteristics of ATJ, CC1 at Nozzle Throat in TPEM-10 and TPEM-10m Motor

모터종류/재료 (추진제종류) 열반응 특성	TPEM-10			TPEM-10m		
	ATJ (ADP-304)	CC1 (ADP-304)		ATJ (ADP-304)	ATJ (ADP-302)	CC1 (ADP-304)
연소실 평균압력 (psia)	350 340 335	330 360 340 355 347 346	329 340 340 330 325 335	974 972 994 1002 1067	1123 1071	983
삭마율 (mm/sec)	0.005 0.006 0.004	0.006 - 0.004	0.007 0.006 0.003 0.007 0.005 0.005	0.070 0.075 0.034 0.038 0.047	0.078 0.084	0.054

Table 4. Thermal Response Characteristics of ATJ, CC1, CC2, CC3 at Nozzle Throat in TPEM-16 Motor

재료 (추진제종류) 열반응 특성	ATJ (ADP-304)	ATJ (ADP-302)	CC1 (ADP-304)	CC2 (ADP-304)	CC3 (ADP-304)
연소실 평균압력 (psia)	1270 1000	1017	990 1020 1008 1049 1015	996 1079 1033 964 985	982
삭마율 (mm/sec)	0.159 0.112	0.176	0.118 0.112 0.127 0.110 0.112	0.190 0.168 0.191 0.128 0.119	0.198
무차원 밀도	0.870 0.870	0.870	0.910 0.910 0.935 0.945 0.945	0.850 0.855 0.850 0.885 0.885	0.825

Table 3은 TPEM-10과 TPEM-10m 모터를 사용하여 지상연소시험을 수행한 후 측정 결과를 정리한 것이며, ATJ 흑연의 시험 결과도 비교 정리하였다. 추진제는 ADP-304를 기본으로 사용하였으며, 산화물분율이 ADP-304 추진제보다 높은 ADP-302 추진제를 사용한 ATJ 흑연의 시험 결과도 비교하였다(Table 1 참조). Table 4는

TPEM-16 모터를 사용하여 지상연소시험을 수행한 후 측정 결과를 정리한 것이며, ATJ 흑연의 시험 결과도 비교 정리하였다. 추진제는 ADP-304를 기본으로 사용하였으며, ADP-302 추진제를 사용한 ATJ 흑연의 시험 결과도 비교 하였다. 평가 소재는 모두 탄소/탄소 복합재료이며, 프리폼 구조는 동일하고 밀도차이에 따라 3종류(CC1, CC2, CC3)를 시험하였다. 무차원 밀도는 소재 밀도를 2.0 g/cm³로 나눈 값이다.

삭마두께는 노즐목(throat) 위치에서 측정된 연소시험 전후 내경의 차이로 계산되며, 3차원 측정 장비를 사용하여 측정하였다. 노즐목 삽입재의 열반응 특성은 단위 시간 당 삭마두께, 즉 삭마율을 사용하여 분석하였다.

4. 시험결과 분석

4.1 연소실 압력에 따른 변화

Figure 2는 TPEM-10과 TPEM-10m 모터의 연소실 압력 변화에 따른 탄소/탄소 복합재료(CC1)와 ATJ 흑연의 삭마율을 나타낸 것이다.

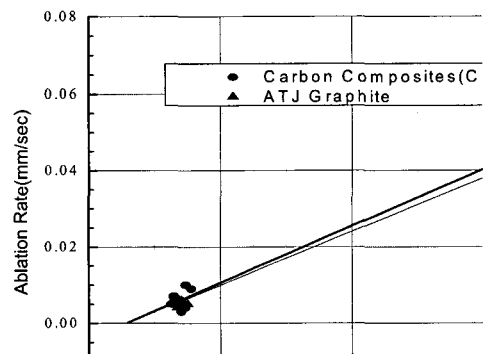


Fig. 2 Effect of Chamber Pressure on Ablation Rate

TPEM-10의 연소실 설계 평균압력은 300 psia 이고, TPEM-10m의 연소실 설계 평균압력은 1000 psia이다. 두 모터 모두 동일한 ADP-304 추진제(산화물분율 0.16)를 사용하였으며, 연소 형태도 후미연소로 동일하다. 앞의 Fig. 1에서 알 수 있듯이 연소실 구조물도 TPEM-10에서

사용한 연소실 구조물을 TPEM-10m에 그대로 사용하였으며, 노즐목 내경을 23.4 mm에서 16.5 mm로 축소함으로써 압력을 상승시켰다. 노즐목 내면 형상은 일반적인 De-Laval 노즐 형태이며, TPEM-10m의 경우 7 mm의 tubular를 두었다. 그림에서 알 수 있듯이 탄소/탄소 복합재료(CCI)의 와 ATJ 흑연 모두 압력이 상승함에 따라 유사한 기울기로 삭마율이 증가함을 알 수 있다. 탄소/탄소 복합재료(CCI)의 경우 100 psia 당 0.008 mm/sec로 삭마율이 증가한다. 그러나 평균압력이 1000 psia인 경우 탄소/탄소 복합재료(CCI)의 삭마율 측정치가 1위치뿐이고, ATJ 흑연의 삭마율 측정치도 서로 큰 차이를 보이고 있어 이에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

노즐 표면에 형성된 경계층을 따라 노즐표면으로의 산화성분의 질량 전달율은 가스상 밀도, 즉 압력에 비례한다. 압력의 증가는 가스상 밀도의 증가 원인이 된다. 난류 경계층으로의 질량 전달율은 밀도에 직접적으로 비례하므로 압력의 증가는 노즐 표면으로의 산화성분들의 공급 증가를 야기하므로 압력이 상승함에 따라 삭마율도 증가함을 알 수 있다.

4.2 산화물분율에 따른 변화

Figure 3은 TPEM-10m과 TPEM-16 모터 각각의 경우 산화물분율 변화에 따른 ATJ 흑연의 삭마율을 나타낸 것이다.

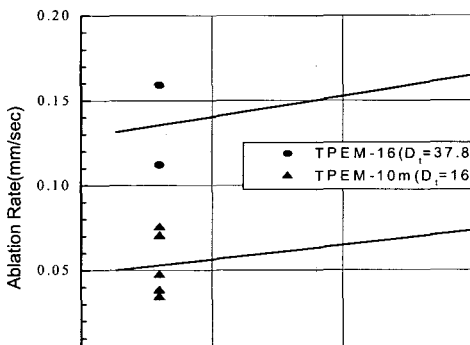


Fig. 3 Effect of Oxidation Mole Fraction on Ablation Rate of ATJ Graphite

앞의 Table 1로부터 알 수 있듯이 ADP-304 추진제의 경우 산화물분율은 0.16이고, ADP-302 추진제의 산화물분율은 0.49이다. 앞에서도 언급하였듯이 TPEM-10m과 TPEM-16의 연소실 설계 평균압력은 1000 psia로 동일하다. 그림에서 알 수 있듯이 산화물분율이 증가함에 따라 두 모터 모두 삭마율이 유사한 기울기로 증가하였으며, 모터의 형상과 노즐목 내경 차이에 의해 기울기가 크게 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 노즐목 내경이 37.8 mm인 TPEM-16은 0.1 산화물분율 당 0.123 mm/sec로, 16.5 mm인 TPEM-10m은 0.085 mm/sec로 삭마율이 증가한다. 그러나 TPEM-16, 산화물분율 0.49인 경우 삭마율 측정치가 1위치뿐이고, 산화물분율이 0.16인 경우 측정치도 서로 차이를 보이고 있어 이에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

노즐목에서의 삭마과정은 연소생성물에 함유된 H_2O CO_2 와 같은 산화성 가스에 의한 화학적 침식이 중요한 원인이라는 것을 확인할 수 있다. 즉, 탄소구조물에 대한 열반응 메커니즘은 H_2O CO_2 등의 산화성 가스가 탄소구조물의 탄소와 결합하여 CO 로 되는 과정을 거치게 된다. 이러한 반응성분들은 연소 중 노즐 표면 위에 형성된 난류 경계층을 통과, 확산되고 탄소와 반응하여 노즐 삭마를 일으킨다. 따라서 탄소의 삭마율은 반응성분들의 화학반응과 확산에 의해 영향을 받는다.

4.3 소재 밀도에 따른 변화

Figure 4는 TPEM-16 모터의 경우 탄소/탄소 복합재료의 밀도변화에 따른 삭마율을 나타낸 것이며, ADP-304 추진제(산화물분율 0.16)를 사용하였다. 밀도차이에 따라 3종류 소재의 시험 결과를 분석하였다.

삭마율은 질량의 함수이므로 밀도가 상승함에 따라 삭마율이 감소함을 알 수 있다. ATJ 흑연의 경우 동일한 밀도의 탄소/탄소 복합재료 보다는 낮은 삭마율을 나타내고 있다. 소재 밀도가 증가함에 따라 0.1 g/cm^3 당 0.076 mm/sec로 삭마율이 감소한다. 그러나 ATJ 흑연의 삭마

을 측정치가 2위치뿐이고, 그 차이도 크게 나타나고 있어 이에 대한 추가적인 시험이 요구된다.

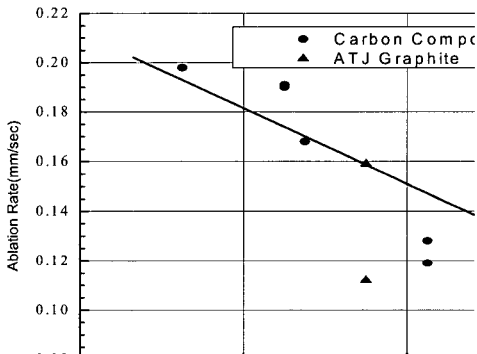


Fig. 4 Effect of Material Density on Ablation Rate

5. 결 론

고체로켓 모터의 노즐목 삽입재에 적용하는 탄소/탄소 복합재료의 열반응 특성을 분석하였다. 내열평가 시험은 3종류의 TPEM 모터를 사용하였고, 추진제는 2종류를 사용하였으며, 연구 결과에 대한 결론은 다음과 같다.

1. 산화물분율이 0.16일 때 연소실 압력이 상승함에 따라 탄소/탄소 복합재료(CC1)의 경우 100 psia 당 0.008 mm/sec로 삭마율이 증가하였다.
2. 산화물분율이 증가함에 따라 ATJ 흑연의 경우 삭마율 기울기가 모터의 형상과 노즐목 내경 차이에 의해 크게 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 노즐목 내경이 37.8 mm인 TPEM-16은 산화물분율 0.1 당 0.123 mm/sec로, 16.5 mm인 TPEM-10은 0.085 mm/sec로 삭마율이 증가하였다.
3. 산화물분율이 0.16일 때 소재 밀도가 증가함에 따라 탄소/탄소 복합재료의 경우 0.1 g/cm³ 당 0.076 mm/sec로 삭마율이 감소하였다.
4. 따라서 국산 탄소/탄소 복합재료와 ATJ 흑연의 열반응 특성을 상호 비교한 결과 국산

재료의 개발 가능성을 확인하였다.

참 고 문 헌

1. "Solid Rocket Motor Nozzles Space Vehicle Design Criteria(Chemical Propulsion)," NASA-SP-8115, June 1975
2. McDonald A. J. and Hedman P. O., "Erosion of Graphite in Solid-Propellant Combustion Gases and Effects on Heat Transfer," AIAA Journal, Vol. 3, July 1965, pp.1250-1257
3. Lewis J. C., Floyd L. J. and Cowlard F. C., "A Laboratory Investigation of Carbon-Gas Reactions of Relevance to Rocket Nozzle Erosion," AGARD Conference Proceedings No. 52, Feb. 1970
4. Klager K., "The interaction of the efflux of solid propellants with nozzle materials," Propellants and Explosives Vol. 2, 1977, pp.55-63
5. Keswani S. T., Andiroglu E., Campbell J. D. and Kuo K. K., "Recession Behavior of Graphite Nozzles in Simulated Rocket Motors," Journal of Spacecraft, Vol. 22, No. 4, 1985, pp.396-397
6. Kuo K. K. and Keswani S. T., "A Comprehensive Theoretical model for Carbon-Carbon Composite Nozzle Recession," Combust. Sci. and Tech., Vol. 42, 1985, pp.145-164
7. Borie V., Bruland J. and Lengelle G., "An Aerothermochemical Analysis of Carbon-Carbon Nozzle Recession in Solid-Propellant Rocket Motors," AIAA-88-3346, July 11~13, 1988
8. 박인서, "n-D 탄소/탄소 복합재료의 삭마특성에 관한 연구," 1994