

論文

장시간 연소용 초소형 저삭마 목삽입재 선정을 위한 내열성능 평가

강윤구\*, 박종호\*\*

Thermal Performance Evaluations on High-Erosion Resistance Materials for Very Small Nozzle Throat Inserts

Yoon Goo Kang\* and Jong Ho Park\*\*

ABSTRACT

This paper describes the research on the non-eroding throat insert materials under condition of high-temperature, high-pressure, and long-burn time. C/SiC, CIT and W/Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> were chosen and tested in thermal protection evaluation motor of burning time 20 seconds. From the test results, a heat resistance of W/Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> was the most excellent among them, but was happened crack on material surface. Thermal reaction characteristics and heat resistance of these materials and feasibility of W/Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> as throat material were ascertained.

초 록

고온/고압, 장시간 연소조건에서 비삭마에 가까운 삭마 특성을 갖는 초소형 목삽입재 선정을 위한 연구를 수행하였다. 평가 소재로서 C/SiC, CIT, W/Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>를 선정하였으며, 연소시간 20초의 내열성능평가모타로 시험하였다. 시험 결과 W/Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>가 가장 우수하였으나, 균열이 발생하였다. 본 연구를 통하여 각 소재들의 열반응 특성 및 내열 성능을 이해할 수 있었으며, W/Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 적용가능성을 확인하였다.

**Key Words** : Throat Insert(목삽입재), Carbon/Silicon-Carbide(카본/실리콘카바이드), Copper Infiltrated Tungsten(구리함침텅스텐), Tungsten/Yttria(텅스텐/이트리아)

1. 서 론

고온/고압 하에서 장시간 일정 추력을 유지할 수 있는 로켓 추진기관의 노즐 목삽입재를 선정하기 위한 연구를 수행하였다.

목삽입재(throat insert)는 고온/고압에서 연소시 발생하는 연소 생성물에 의한 기계적/화학적 마모, 열충격 등의 극심한 열환경에 노출되어 있으며, 이로 인한 노즐목 삭마는 추진기관의 성능

을 좌우하는 중요한 요소가 된다. 특히 노즐목 직경이 작은 경우 상대적인 노즐목 면적 변화가 심하기 때문에 그 영향이 증대된다. 따라서 연소시간이 매우 짧은 경우를 제외하고는 목삽입재 선정 시 이러한 연소 환경을 중요하게 고려해야 하며 동시에 수급성, 경제성, 무게, 가공성 등을 고려하여 선택해야 한다[1].

일정 추력을 유지하기 위해서는 목삽입재가 비삭마(Non-Eroding)에 가까운 내열특성을 가져야 한다. 그러나 현재 목삽입재로 사용하고 있는 복합재는 이러한 요구조건을 충족시킬 수 없으며, 세라믹과 내화 금속 또한 내삭마성은 매우 우수하지만 열충격에 약하고 가공이 어려운 단점이 있다[2].

† 2009년 10월 1일접수~2009년 11월 30일 심사완료

\* 정희원, 국방과학연구소 1기술본부 6부

\*\* 정희원, 충남대학교 BK21 메카트로닉스사업단  
교신저자, E-mail : jhpark@cnu.ac.kr  
대전시 유성구 궁동 220번지

선진국에서는 1960년대에 목삽입재로 몰리브데늄(Mo), TZM, 은 함침 텅스텐(W-Ag), 구리 함침 텅스텐(Copper Infiltrated Tungsten) 등을 사용하기도 하였으나, 큰 비중으로 인한 추진시스템의 무게 증가와 설계상의 어려움 등으로 연구가 진행되지 못하였으며, 무게 측면에서 유리한 복합재 연구에 몰두해 왔다. 그러나 적용부품의 다양화와 비삭마 특성이 강조되면서 최근에는 고용점 금속(High-Melting Metals), 써밋(Cermets), 세라믹-복합재(Ceramic Matrix Composites)와 같이 각각의 장점을 상호 결합한 복합 소재에 대해 연구가 활발히 진행되고 있으며, 탄소/실리콘카바이드(Carbon /Silicon-Carbide)와 같이 밀도가 낮은 소재에 대한 연구도 함께 진행되고 있다[3~5]. 반면, 국내에서는 일부 소재를 한정적으로 사용해 왔으며, 최근에 와서 이 소재들에 대한 소소 증가로 이에 대한 연구가 서서히 진행되고 있다.

재료의 열반응 메커니즘에 대한 이해는 노즐 설계 및 해석에 있어서 매우 중요한 요소이다. 지금까지 탄소계 복합재에 대해서는 많은 연구가 수행되었지만 다른 소재들에 대해서는 연구가 미진한 상태이다. 따라서 이들을 이용한 설계 시 비삭마를 전제조건으로 용융온도를 설계 인자로 사용해 왔으며, 최근 선진국에서는 소재 개발과 함께 이에 대한 연구도 활발히 진행 되고 있다 [6,7].

본 연구에서는 자료조사를 통하여 국내에서 확보가 가능하고 요구조건을 만족할 수 있을 것으로 예상되는 3 중, 즉 탄소/실리콘-카바이드(Carbon/Silicon-Carbide, 이후 C/SiC), 구리함침 텅스텐(Copper Infiltrated Tungsten, 이후 CIT), 텅스텐/이트리아(Tungsten/Yttria, 이후 W/Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)를 선정하고, 2차에 걸쳐 성능 평가를 실시하여 적용가능성 및 열반응 특성을 확인하였다.

## II. 본 론

### 2.1 평가 소재

C/SiC는 용융온도가 3,700 K이고, 비중은 2.3 g/cc이다. 프리폼(Preform)을 고온 열처리한 후 수지함침을 하고 탄화, 고온 열처리, 1차 가공(정삭), 용융 실리콘 함침, 고온 열처리 및 화학적 기상 증착법(Chemical Vapour Deposition), 연마의 과정을 거쳐 제작된다.

프리폼 공정에 따라 적용부품이 달라지는데, 목삽입재는 스택(Stack) 혹은 니들 펀칭(Needle

Punching)으로, 출구부는 로젯(Rosette)으로, 액체 연소실은 롤링(Rolling) 혹은 필라멘트 와인딩(Filament Winding)으로 제작하여 사용하는 것이 일반적이다. 또한 추진제 연소가스의 산화물분율(Oxidential Potential)에 따라 조성비(탄소섬유/실리콘카바이드/규소/기공)를 달리 적용하는데 연소가스 중의 산화물분율이 큰 경우는 실리콘카바이드(SiC)의 함량을 크게 하여 연소가스 내의 산화물(H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub> 등)과 탄소(C)와의 반응을 적게 함으로써 삭마두께를 줄일 수 있다.

국내에서 토치 테스트(Torch Test)를 수행한 바 있으며, 그 결과 산화물분율이 낮은 곳에서 조성비를 65/20/5/10으로 하였을 때 삭마율이 0.1 mm/s이었고, 산화물분율이 높은 곳에서 조성비를 30/55/10/5로 하였을 때 120초 동안 삭마가 일어나지 않았다[8]. 또한 내열성능평가모타를 이용한 단시간 연소시험에서 ATJ 그라파이트의 삭마율의 28-35 %의 수준을 보였다[8].

이 소재는 현재 고온 로(Furnace)와 같은 산업체 현장에 적용되고 있으며, 일부 무기체계에서 적용하고 있거나 적용을 위한 연구를 진행하고 있다. 그러나 고체 로켓추진기관의 목삽입재로서 고온/고압, 장시간 연소조건에서는 적용된 사례는 보고되어 있지 않다.

CIT는 용융온도가 3,410 K이고, 비중은 18.26 g/cc이다. 순수 텅스텐(W)에 구리(Cu)를 함침하여 제작하는데, 용도에 따라 구리와 텅스텐의 함량을 조절하여 사용하기도 한다.

CIT는 열적으로 안정하며, 제작이 용이하고 가공이 쉬울 뿐만 아니라 수급이 용이하고 저가이다. 또한 강도가 높고 열충격에 강하며 내삭마성이 좋아 낮은 삭마율을 요구하는 곳에 널리 사용된다. 연소 중에 함침된 구리가 기화하면서 증발냉각효과(Transpirational Cooling Effect)를 발생시켜 노즐목을 열적으로 보호하는 내열특성을 갖고 있다.

J. L. Quilici 등은 저비용, 경량화 고정노즐 개발을 목적으로 평균압력 2,300 psia, 연소시간 62초, 노즐목 직경 11.84 mm의 조건에서 시험을 수행하였으며, 삭마율이 0.02 mm/sec이었으나, 비축대칭 삭마 및 River Valley Pattern의 삭마가 발생하였다고 보고하였다[9].

W/Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>는 용융온도가 3,410 K이고 비중이 19.30 g/cc이다. 순수 텅스텐(W) 99%에 이트리아(Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 1% 분말을 혼합, 성형, 소결, 압축/풀림의 제조공정을 거쳐 제작된다.

일반적으로 순수 텅스텐의 경우 1,273 K이상에서는 기계적 물성이 상온에 비해 50 %이상 급

격히 저하되며, 연성-취성 전이온도가 높기 때문에 냉간가공이 어려운 단점이 있다. 이러한 단점을 극복하기 위하여 텅스텐에 상온 연성이 우수한 레늄(Re)을 합금화하거나 고온 안정 산화물인 란탈리아(La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), 토리아(ThO<sub>2</sub>), 이트리아(Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)등을 분산시켜 소성 가공성 및 고온 강도를 향상시키는 연구가 진행되고 있다. 이 중 란탈리아는 상온에서의 흡습성으로 인해 취급 및 제조 공정이 복잡한 단점이 있으며, 토리아는 구성 원소인 토륨(Th)이 방사성 원소이기 때문에 인체에 유해한 것으로 알려져 있다. 이에 반해 이트리아는 인체에 무해하고 취급이 간편할 뿐만 아니라 구입이 용이하기 때문에 현재 텅스텐의 고온 특성 및 소성 가공성 향상을 위해 활발히 연구가 진행되고 있다.

현재까지 목삽입재로 적용된 바가 보고되어 있지 않지만 추진기관의 다른 부품에 적용되어 좋은 결과를 얻은 바 있다[10].

**2.2 시험장치 및 방법**

소재 성능 평가를 위한 모터의 형상은 Fig. 1과 같으며, 연소시간은 약 20 초이다. CIT 및 W/Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 목삽입제 평가를 위한 시험에서는 열충격을 최소화하기 위하여 그림의 상단 형상과 같이 노즐목 부위에만 두께를 얇게 하여 배치하였으며, C/SiC 목삽입제 평가시험에서는 그림의 하단 형상과 같이 배치하였다.

1차 시험은 알루미늄 2 % 추진제에 노즐목 직경 10.8 mm로 하여 C/SiC 및 CIT, W/Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>를 시험하였으며, 2차 시험은 알루미늄 0 % 추진제에 노즐목 직경 7.5 mm로 CIT와 W/Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>를 시험하였다. 연소 시 화염에 노출되는 축소부와 확대부의 내열부품은 1차 시험에서 C/SiC를 사용하였으나, 노즐 출구로 입자 분출이 심하여 2차 시험에서는 ATJ 그라파이트를 사용하였으며, W/Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>는 1차 시험에서 발생한 균열을 차단할 목적으로 수소(H<sub>2</sub>) 열처리하였다.

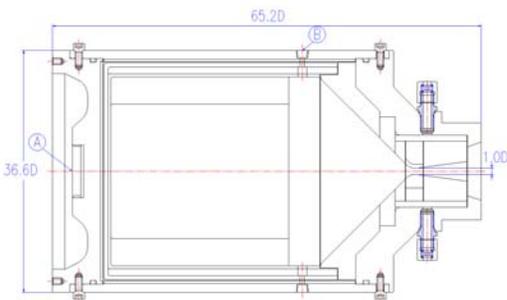


Fig. 1. Cross Section of Test Motors

**Table 1. Density and Composition of Test Materials**

소재	밀도(g/cc)	조성
C/SiC	2.1	C : SiC : Si : Pore = 30 : 60 : 5 : 5
CIT	17.03	W : Cu = 90 : 10
W/Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18.76	W : Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> = 99 : 1

1차 시험에서는 목삽입제 배면의 온도를 측정하고자 목단열재 배면에 센서 통로를 만들었으나 W/Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 연소 시험 중 화염이 이곳으로 누출되어 2차 시험에서는 통로를 모두 차단하였다.

압력은 Fig. 1의 B에서 측정하였으며, 압력센서는 DYNISCO사(미국)의 G831-101-1.5M을 사용하였고, 추력은 그림 1의 A에서 측정하였으며, BLH(미국)사의 U3G2 로드셀을 사용하였다.

노즐목 삭마율은 다음의 식으로 산출하였다.

$$\text{삭마율}(\epsilon) = \frac{(D_{t_{\text{min}}} - D_{t_{\text{ini}}})/2}{\tau}$$

여기서  $D_{t_{\text{min}}}$ ,  $D_{t_{\text{ini}}}$ 는 각각 시험 전후의 노즐목 최소 직경이며, 3차원 측정기를 사용하여 측정하였고,  $\tau$ 는 연소 초기 100 psi까지 올라간 시간에서부터 연소말기 30 psi까지 떨어지는데 까지 걸리는 시간이다.

평가 소재의 밀도 및 조성을 Table 1에 정리하였다.

**2.3 시험결과 및 고찰**

1) 내열 성능

1차 시험에서 C/SiC 및 CIT, W/Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 삭마율은 각각 0.0627 mm/s 및 0.0437 mm/s, 0.0128 mm/s이었으며, 2차 시험에서 CIT 삭마율은 1차 시험보다 증가한 0.0539 mm/s이었고, W/Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>는 0.0123 mm/s로 유사하였다.

Fig. 2는 1차 및 2차 시험 후의 목삽입제 상태를 보여주고 있다. C/SiC의 내면 상태는 양호하지만 노즐목 단면이 사각형에 가까운 형상이다. CIT는 1차 시험에서 노즐목 입구부가 회백색으로 변색되어 있고, 비축대칭 삭마 및 River Valley Pattern의 삭마 형태가 보이며, 2차 시험에서는 삭마 형상이 비슷하지만 변색된 부위는 발견되지 않는다. W/Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>는 1차 시험에서 축방향으로 2 군데 균열과 River Valley Pattern의 삭마 형태가 보이고, 노즐목 입구부에 이슬방울처럼 입자가 맺혀 있는 모습이며, 2차 시험에서 다

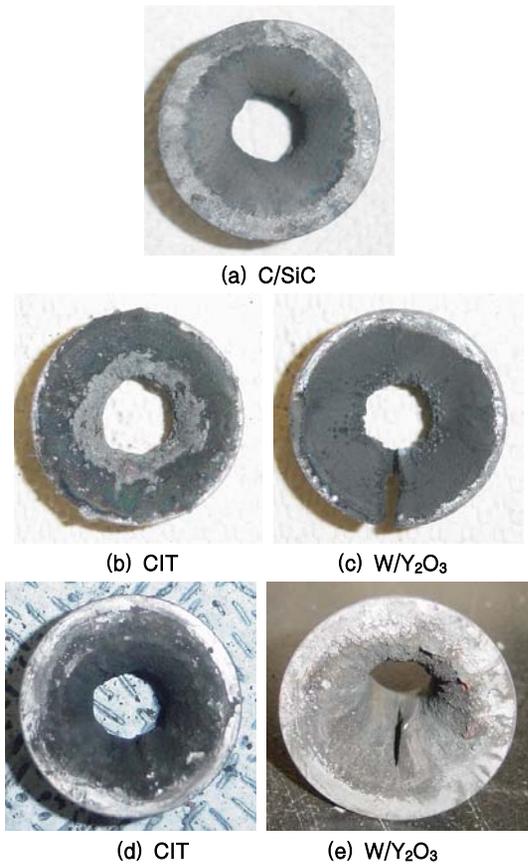


Fig. 2. Throat Inserts after Firing 1st Test : (a),(b),(c) 2nd Test : (d),(e)

시 균열이 보이지만 1차 시험보다 상태가 양호하고, 입자 땀힘 현상은 발견되지 않는다.

1차 및 2차 시험을 통하여 W/Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>는 내삭마성이 우수하게 나타났지만, C/SiC와 CIT는 [8] 및 [9]의 결과에 비해 삭마율이 크게 나타났다.

C/SiC의 노즐목 삭마가 심한 원인을 분석하기 위해 Fig. 3에 기존 시험결과와 압력-시간 곡선을 비교하였다. 기존 시험은 노즐목 직경 16.5 mm, 알루미늄 2%인 추진제를 사용한 것이며, 연소실 평균압력 및 웹 연소시간이 각각 1,320 psia 및 7.6초이었으며, 삭마율은 약 0.03 mm/s이었다. 그림에서 연소 초기의 곡선 형태가 서로 다른 것은 모타 특성에 의한 것이다. 동일한 시간대에서부터 변곡이 발생하여 압력 감소율이 27 psia/sec 및 24 psia/sec로 유사한 경향을 보이고 있는데, 이것은 두 모타의 노즐목 면적변화율이 유사하기 때문이다. 그러나 시간이 경과하면서 1차 시험의 압력 감소율이 50 psia/sec로 급격히 증가하고 있는데, 그 원인은 이 시간대의 노즐목

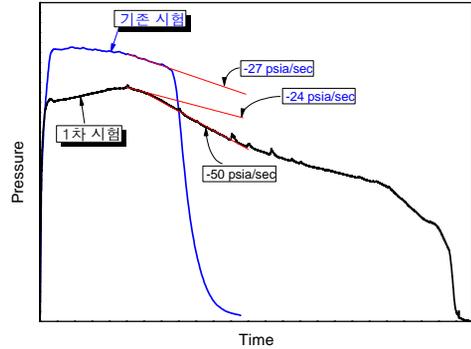


Fig. 3. Pressure-Time Curves for C/SiC

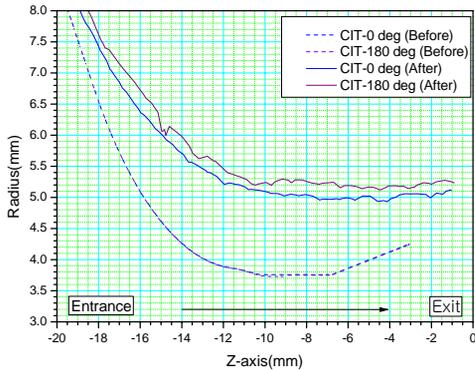
면적이 급격히 증가 때문이다. 결국 연소가 진행되면서 목삽입재의 내부온도가 증가하고 표면 용융층의 두께가 증가함으로 인해 삭마가 심해진 것으로 보인다. 한편, 노즐목 단면 형상이 사각형인 것은 노즐목이 삭마될 때 프리폼(Preform) 직물구조를 유지하기 때문이다. 이것은 노즐목 직경이 큰 경우에는 영향이 크지 않을 수 있지만, 노즐목 직경이 작은 경우에는 영향이 크게 나타날 수 있다. 결국 장시간 연소시 나타나는 삭마율 증가와 삭마 형태는 C/SiC가 갖고 있는 특성으로 보이며, 비삭마 목삽입재로 부적합하다.

또한, CIT의 노즐목 삭마율이 [9]와 큰 차이를 보이는데 시험조건 등이 상세하게 언급되어 있지 않아 정확한 원인을 알 수는 없지만, 소재의 조성 및 제작 방법, 추진제 조성의 차이 때문인 것으로 추정된다.

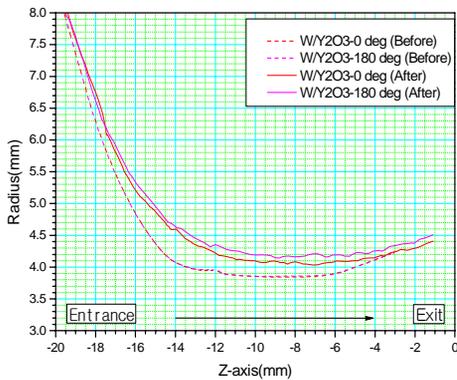
W/Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 균열은 열충격에 의한 것으로 보이며, 1차 시험에서 균열 폭이 커진 것은 연소가스가 균열 면을 통과하여 온도 측정을 위해 확보한 통로로 빠져나가면서 균열면이 삭마되었기 때문이다. 2차 시험에서 균열 방지를 위해 수소(H<sub>2</sub>) 열처리를 하였지만 균열을 막지는 못하였다.

CIT 및 W/Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 목삽입재의 1차 시험에서 발생한 노즐목 입구부의 변색 및 입자 땀힘 현상은 유동면적이 급격히 감소하면서 연소가스 중의 액상의 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>가 유동을 따라 빠져나가지 못하고 벽면에 침적되어 나타난 현상으로 보인다.

Fig. 4는 2차 시험 전후의 CIT 및 W/Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 노즐목 형상을 도식한 것으로써, 시험 전 형상에서 플랫(Flat)한 부분이 노즐목이다. 3차원 측정기를 사용하여 원주방향으로 0° 및 180°에서 측방향을 따라가며 측정하였으며, 점선 및 실선은 각각



(a) CIT



(b) W/Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

Fig. 4. Inner Contours of Throat Inserts before/after Firing

Table 2. Summary of Test Results

	목 직경(mm)		삭마율 (mm/s)	진원도
	전	후		
C/SiC	10.72	13.74	0.0627	1.4437
CIT (1차/2차)	10.79	12.88	0.0437	1.2731
	7.55	9.84	0.0539	1.0575
W/Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (1차/2차)	10.88	11.47	0.0128	0.8163
	7.73	8.23	0.0123	0.4699

시험 전후의 형상이고, 유동은 그림의 좌측에서 우측으로 진행한다. 노즐목에 가까워질수록 삭마 두께가 점점 증가하는 모습을 보이고 있으며, 삭마로 인해 최소 직경이 출구 쪽으로 이동하였음을 확인할 수 있다.

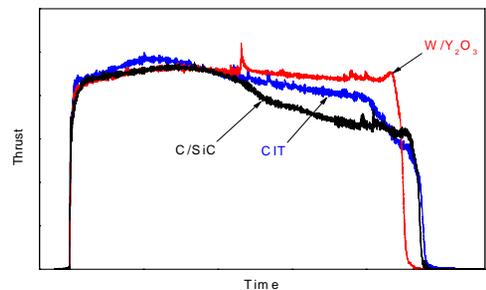
각 소재의 시험 전후 노즐목 직경 및 삭마율, 진원도를 Table 2에 정리하였다.

2) 추력 성능

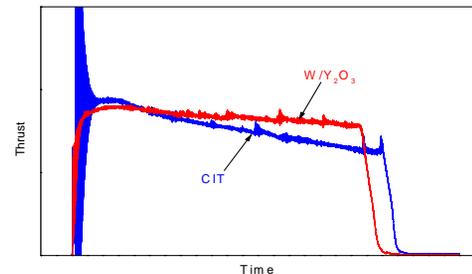
Fig. 5의 (a),(b)는 1차 및 2차 시험의 각 소재에 대한 추력-시간 선도를 도식한 것이다. 1차 시험의 초기 추력 상승은 모터 특성이지만 CIT의 상승이 두드러진 것은 소재의 열팽창으로 인한 노즐목 수축 때문이며, 이러한 현상은 2차 시험에서도 나타나고 있다. C/SiC의 연소 중 추력 감소는 앞에서 언급한 바와 같이 용융층 두께 증가로 인한 급격한 삭마율 증가 때문이다. CIT와 W/Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 추력은 연소시간 동안 대체적으로 일정하지만, W/Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 추력이 더 일정하게 나타나고 있다. 또한 2차 시험에서도 추진제 조성 및 노즐 형상의 변경으로 초기 추력 상승이 나타나지 않은 것과 CIT의 연소 초기 진동에 의한 추력 떨림 현상을 제외하고는 1차와 동일한 경향을 보이고 있다. 결국 3 가지 소재 중 W/Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 추력 형태가 요구조건에 가장 적합한 것을 확인할 수 있다.

3) 침적물 분석

소재 상태 및 열반응 특성을 확인하기 위해 1차 시험 후 SEM(Scanning Electron Microscope) 분석을 하였다. Fig. 6(a)는 CIT 노즐목 표면을,

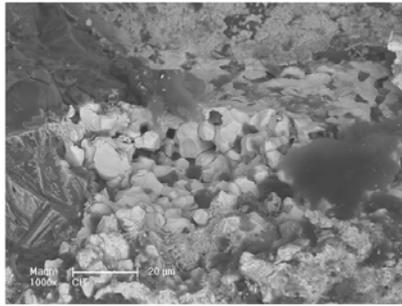


(a) 1st Test



(b) 2nd Test

Fig. 5. Thrust-Time Curves



(a) CIT

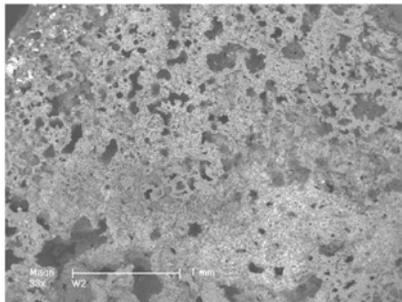
(b) W/Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

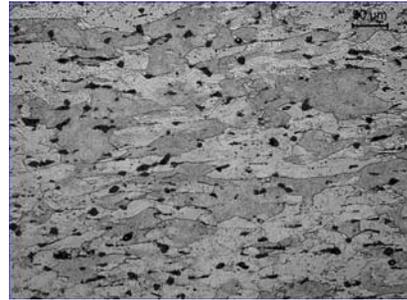
Fig. 6. Inner Surfaces after 1st Test

Fig. 6(b)는 W/Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 목삽입재 표면의 침적물을 촬영한 것이다. CIT의 경우 텅스텐 사이에 함침되어 있던 구리가 용출되어 기공이 형성되어 있으며, 이 기공은 노즐 외면에서도 관찰된다. 또한, 표면에 점착된 성분을 분석한 결과 O, Cu, Al, W, Si이었으며, 이 성분들은 다음의 과정으로 생성된 성분이 점착된 것으로 보인다.

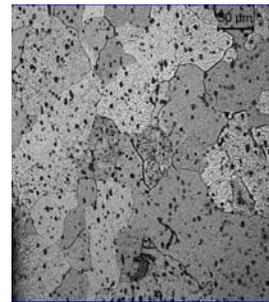
- 추진제가 연소하면서 생성된 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>
- 목삽입재가 연소가스의 산화 성분과 반응하여 생성된 WO<sub>3</sub>
- 내열부품인 실리카/페놀의 용융에 의해 생성된 SiO<sub>2</sub>
- 목삽입재 내의 구리(Cu)가 용출될 때 표면 용융층에 점착된 Cu

한편, W/Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 침적물에서는 O, Al, W 성분이 확인되었으며, 이 성분들은 CIT와 동일한 과정으로 생성된 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 및 WO<sub>3</sub>인 것으로 판단된다.

Fig. 7의 (a),(b)는 시험 전후 목삽입재 표면의 미세조직 변화를 보여주고 있다. 열에 노출된 후 텅스텐 결정립이 조대화되는 현상이 관찰되며, 이러한 현상은 연소가스에 직접 노출된 모든 부위에서 관찰된다. 또한 CIT의 Cu는 모두 용출된 반면, W/Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>는 미세한 입자로 텅스텐사이에서 잔류하고 있는 것으로 보아 연소시간 동안 바인더로서의 역할을 하고 있었음을 유추할 수 있다.



(a) Before Test



(b) After Test

Fig. 7. Microstructures of W/Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

### III. 결 론

고온/고압, 장시간 연소조건에서 비삭마에 가까운 삭마 특성을 갖는 초소형 목삽입재 선정을 위한 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 내삭마율은 W/Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CIT, C/SiC 순으로 우수하다.
- 2) C/SiC는 연소시간이 증가하면 목삽입재 내부의 온도 상승으로 인해 표면 용융층이 두꺼워져 삭마가 심해지며, 노즐목은 프리폼(Preform)의 직물구조 형상으로 남는다.
- 3) CIT는 비대칭 및 river valley pattern의 삭마 현상을 보이며, 문헌에 보고된 삭마율과는 큰 차이를 보인다.
- 4) W/Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>는 요구조건을 만족하는 우수한 내삭마 특성을 보이지만 균열이 발생한다.
- 5) CIT는 구리(Cu)의 용출과 극심한 산화 반응에 의해 구조적으로 취약해지는 반면, W/Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>는 이트리아(Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)가 잔류하여 텅스텐의 결합력을 유지한다.

### 참고문헌

- 1) Steiner Haugen, "Non-Eroding Nozzle Throat Material for Rocket Motors with

AP-Based Propellant", AIAA-98-3972, Jul., 1998.

2) NASA, "Solid Rocket Motor Nozzles", NASA-SP-8115, 1975.

3) R. Brogan, "Corrosion of Rocket Nozzle Metallic Throats in Oxidizing Propellant Environments, CPIA, JANNAF Propulsion Meeting, 1981, pp. 339~352.

4) G. E. Hilmas, W. G. Fahrenholtz, and S. E. Landwehr, "Advanced Tactical and Boost Nozzle Materials", AIAA-2005-4497, Jul. 2005.

5) G. M. Song, Y. J. Wang, and Y. Zhou, "Evaluated Temperature Ablation Resistance and Thermophysical Properties of Tungsten Matrix Composites Reinforced with ZrC Particles", Journal of Materials Science, Vol. 36, 2001, pp. 4625~4631.

6) Piyush Thakre, and Vigor Yang, "Chemical erosion of Refractory-Metal nozzle Inserts in Solid-Propellant Rocket Motors",

Journal of Propulsion and Power, Vol. 25, No. 1, Jan.-Feb., 2009, pp. 40~50.

7) Justin L. Sobourin, and Richard A. Yetter, High-Temperature Heterogeneous Reaction

Kinetics of Tungsten Oxidation by CO<sub>2</sub>, CO and O<sub>2</sub>", Journal of Propulsion and Power, Vol. 25, No. 2, Mar.-Apr., 2009, pp. 490~498.

8) Y. C. Kim, "Design, Manufacturing and Performance Evaluation of Carbon Fiber Reinforced Silicon Carbide(C/SiC) Composites for Rocket Propulsion Systems", Masters of Degree, Jun., 2006.

9) J. L. Quilici, "Nozzle Development for the Proposed AGM-130 , Rocket Motor", AIAA-84-1415, Jun., 1984.

10) Y. Kim, M. H. Hong, S. H. Lee, E. P. Kim, S. Lee and J. W. Noh, "The Effect of Yttrium of Yttrium Oxide on the Sintering Behavior and Hardness of Tungsten", Met. Mat. Int., Vol. 12, No. 3, 2006. pp. 245~248.