

고온/정체/산화제 과잉 환경에서 STS 계열의 산화 거동

신동해* · 이성민* · 이희준* · 고영성*[†] · 김선진** · 소윤석***

Oxidation Behavior of STS Series at High -Temperature/Stagnation/Oxidizer-Rich Environment

Donghae Shin* · Seongmin Lee* · Hijune Lee* · Youngsung Ko*[†] · Seonjin Kim** · Younseok So***

ABSTRACT

Metal exposed to high temperature/high pressure/oxidizer-rich environment may cause rapid oxidation(ignition and combustion). In this study, a DC power supply test system that controls the temperature of specimen by supplying power to the specimen was constructed and after simulating the high temperature/stagnation/oxidizer-rich environment, the metal oxidation and ignition of STS series metal materials were evaluated. As a result, we was confirmed that the deformation (discoloration) of the selected material, the change in the surface roughness and the peeling of the metal surface were observed, and that the weight and the specimen thickness were changed. The most oxidized specimen was STS 304 and the less oxidized specimen was XM-19.

초 록

고온/고압/산화제 과잉 환경에 노출되는 금속들은 급격한 산화(발화 및 연소)가 일어날 수 있다. 본 연구에서는 시편에 전력을 공급하여 시편 온도를 직접 제어하는 방식의 직류전원장치 시험설비를 구축하고 고온/정체/산화제 과잉 환경을 모사하여 STS 계열 금속 재질에 대한 금속 산화 및 발화에 대한 평가를 진행하였다. 그 결과, 선정된 재질의 변형(변색), 표면 거칠기에 변화와 금속 표면의 박리 현상이 관찰되었으며 무게 및 시편 두께에 변화가 있음을 확인하였다. 시편 중 가장 산화가 심한 시편은 STS 304이며 산화가 덜한 시편은 XM-19로 나타났다.

Key Words: Oxidizer-Rich(산화제 과잉), Preburner(예연소기), Oxidation(산화), STS Series Material(STS 계열 재질), Staged Combustion Cycle(다단연소 사이클)

* 충남대학교 항공우주공학과

** 충남도립대학교 소방안전관리과

*** 항공우주연구원 엔진시험평가팀

[†] 교신저자, E-mail: ysko5@cnu.ac.kr

현재 국내에서 개발 중인 한국형 발사체는 가스발생기를 활용한 open 사이클 형태의 액체 로켓 엔진이며, 가까운 미래에 한국형 발사체 액체 로켓엔진의 성능을 향상하기 위해서는 다단연소 형태의 close 사이클을 적용하는 액체 로켓 엔진의 개발이 요구된다. 현재 한국형 발사체는 케로신/액체산소 조합의 추진제를 사용하며 이에 따라 앞으로 개발이 진행될 다단연소형태의 close 사이클에서는 위와 같은 추진제 조합 특성상 산화제가 많은 상태에서 연소가 일어나는 산화제 과잉 예연소기를 사용해야 한다.

이때 산화제 과잉 예연소기 및 예연소기 후단에 위치한 배관, 인젝터 및 기타 부품들은 고압/고온상태의 산화제 과잉 환경에 노출되어 지는데, 이러한 고온/고압의 산화제 과잉 연소 가스는 일반 금속 재질과 접촉 시 금속 발화 또는 금속 연소가 발생할 가능성이 있게 된다[1]. 이처럼 산화제 과잉 상태의 예연소기 설계에서는 금속 발화 또는 금속 연소를 회피하기 위한 금속 재질의 선택 및 코팅 기술의 개발이 필수적으로 요구되며, 이를 통해 산화제 과잉 환경에 노출된 엔진 부품들과 개발 중에 사용되는 각종 센서나 보조도구들에 대한 내산화에 대한 대비가 충분히 마련되어야 한다.

한국항공우주연구원에서는 차세대 액체로켓엔진 개발을 목표로 수년전부터 산화제 과잉 예연소기에 대한 선행적 연구를 수행하고 있으며, 산화제 과잉 상태의 축소형 예연소기를 개발 연소 시험을 수행함으로써 기술개발 및 시험에 대한 경험을 축적하고 있다. 앞서 관련된 예연소기 연소시험 중 산화제 과잉 상태에서 금속발화가 발생하는 사례를 관찰하게 되었으며, 현재는 해당 문제를 해결하기 위해 추가적인 연구를 수행하고 있다[2].

이에 본 연구에서는 고온/고압의 실제 산화제 과잉 예연소기를 이용한 재질 적합성 시험을 하기에 앞서, 안전성 확보 차원에서 산화제 과잉 분위기를 조성하여 금속재질의 내산화성을 평가하는 예비 시험 기법을 수립하고 금속 재질에 대한 산화제 과잉 환경에서의 적합성을 확인 및 산화제 과잉 연소기 설계에 적용하고자 한다. 이

를 위해 시편에 전류를 흘려보내어 시편 온도를 직접 조절하는 방식의 직류전원장치를 활용한 시험설비를 구축하고 고온, 정체, 산화제 과잉의 환경을 모사하여 선정된 STS 계열(STS 304, STS 316L, XM-19) 금속 재질에 대한 금속 산화 및 발화에 대한 평가를 진행하였다.

2. 실험 방법 및 분석 기법

2.1 금속 발화 및 연소 발생 요인

산화제 과잉 환경에서 금속 발화 및 연소가 발생하는 요인에는 유체의 온도, 압력, 유속 및 산소의 농도, 시편의 크기가 관련되어 있다. 이와 같은 요인들 중에서도 금속 발화 및 연소가 발생하는 주요 요인은 온도와 압력임을 참고문헌을 통하여 확인하였다[1,3-4]. 이에 고온, 고압, 산화제 과잉 환경을 모사할 수 있는 시편 온도를 직접 조절하는 방식의 직류전원장치를 활용한 시험설비를 구축하였다.

2.2 Test Rig 및 직류전원장치

본 연구에는 산소의 농도가 100%인 정체/산화제 과잉 환경을 모사하고 직류전원장치를 활용하여 시편의 온도를 고온상태로 가열하여 시편의 변화를 관찰하였다. 시험 설비의 구성에 대한 개략도는 Fig. 1과 같으며 Fig. 2와 같이 기밀관, 테프로 씌, 시편 고정부 등으로 구성되어진 Test Rig를 구성하였다.

또한 본 연구에서 활용된 직류전원장치는 3상 440 V, 60 Hz로 공급되는 1차 교류전압을 DC 0~50 V, 0~800 A로 변화하여 최대 40 kW의 전력을 공급할 수 있으며, 가변 저항에 의해 전력을 제어하는 방식이다. 또한, power supplier의 내부나 공급전력에 과전류가 발생하여 온도가 비정상적으로 상승하거나 장비에 이상이 발행하였을 경우 자동적으로 전원공급이 차단되도록 되어 있다. 본 설비는 3상 380 V 전원만 들어오는 시험 여건상 별도의 변압기(transformer)를 사용하여 1차 교류전압을 3상 440 V로 공급할 수 있도록 하였다. 직류전원장치는 Fig. 3과 같다[5].

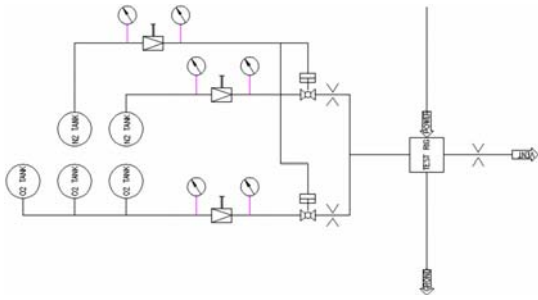


Fig. 1 Test facility schematic

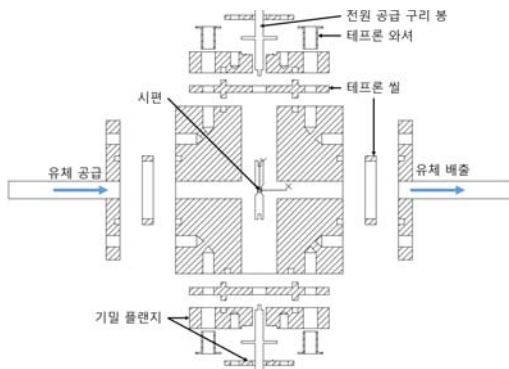


Fig. 2 Test Rig Schematic



Fig. 3 DC power source

는 STS 계열의 STS 304, STS 316L, XM-19을 선정하였으며 각 금속 재질에 대한 물성치는 다음 Table1과 같다. 또한, 사전 조사 결과 내부식 능력은 XM-19, STS 316L, STS 304 순으로 확인이 되었다. 시편의 기본적인 형태는 Fig. 4와 같이 양끝은 원형의 실린더 형태이며 노치가 위치하는 부분은 일정 두께를 가지는 평판형이다. 노치 부분의 두께는 2 mm의 크기로 제작되었으며, 고정 방식은 시편 한쪽에 M2 나사산을 내어 구리선과 결합하여 챔버에 고정이 가능하도록 하였다.

Table 1 Properties of Selected metal materials

재질	STS 304	STS 316L	XM-19
밀도 (g/cm^3)	8.03	7.99	7.88
용융점(°C)	1399 ~ 1454	1371 ~ 1399	1380 ~ 1406
구성비 (%)	Cr (18 ~ 20) Ni (8 ~ 12)	Cr (16 ~ 18) Ni (10 ~ 14)	Cr (20.5 ~ 23.5) Ni (11.5 ~ 13.5)

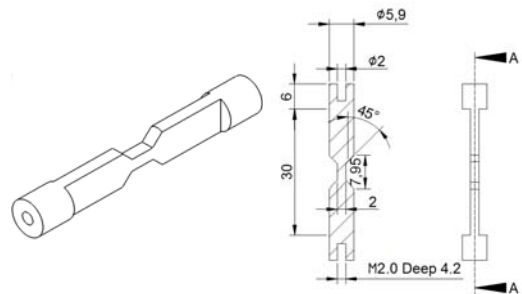


Fig. 4 Material specimen

2.3 시편 정보 및 형상

본 연구에서는 산화제 과잉 예연소기 설계 및 제작에 앞서 산화제 과잉 환경에 적합한 금속 재질 선정을 위해 수행되는 예비시험이다. 이에 본 연구에서는 로켓 연소기 제작에 많이 활용되

2.4 시편 온도 측정 방안

본 연구에서는 시편 온도를 직류전원장치를 활용하여 조절하게 된다. 이에 시편 온도를 실시간으로 계측하기 위하여 열화상카메라를 활용하였다. 본 연구에 활용된 열화상 카메라는 NEC

사의 Thermo Tracer TH9100 Series이며 Fig. 5와 같으며, 자세한 사양은 Table 2와 같다.



Fig. 5 Thermo Tracer TH9100 Series

Table 2 NEC 사의 Thermo Tracer TH9100 Series

Measuring range	-20 to 100 °C 0 to 250 °C 100 to 800 °C 200 to 2000 °C
Resolution	0.06 °C(at 30 °C 60 Hz)
Accuracy	± 2 °C
Spectral range	8 to 14 μm
Emissivity correction	0.1 to 1

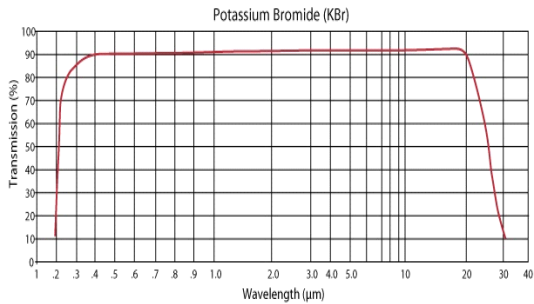


Fig. 6 Visualization window transmission about KBr

또한, 열화상 카메라의 경우 적외선 영역의 특정 파장대역을 계측하기 때문에 Test Rig의 가시화 창은 특수 재질의 가시화 창이 필요하다. 따라서 KBr(Potassium Bromide) 소재로 제작된 특수 가시화창을 설치하였다. 본 가시화 창은 Fig. 6과 같이 파장 250 nm ~ 26 μm에서의 투과율이 약 90% 이상이기 때문에 Table 2에 나온 열화상

카메라 측정 적외선 파장에 대해 측정 문제가 없다.

2.5 분석 기법

앞서 설명한 시험 장치에서 산소 농도 100%/고온/정체의 산화제 과잉 시편시험을 마친 후 재질의 내산화성에 대한 분석을 수행하고자 한다. 먼저, 시험 진행 후 바로 산화의 정도를 용이하게 파악하기 위하여 시편의 무게 변화와 두께의 변화를 측정하였다. 본 연구에 활용된 정밀 저울은 METTER TOLEDO 사의 ME403이며 광학현미경은 HaaN사의 HI-Scope HS-300U이다. 이들의 자세한 스펙은 Table 3, Table 4와 같으며 장비의 모습은 Fig. 7, Fig. 8과 같다.

Table 3 HaaN's HI-Scope HS-300U Specification

Image sensor	2.0 Mega 1/3.2"
Magnification	x 100(40 ~ 130배)
	x 200(70 ~ 200배)
	x 400(21 ~ 420배)
	x 1000(600 ~ 1200배)
초점 조절 방식	미동 및 조동

Table 4 METTLER TOLEDO's ME403 Specifications

Maximum Capacity	420.0 g
Readability	1.0 mg
Repeatability	0.7 mg
Linearity	1.0 mg
Resolution	1.0 mg
Readability (Certified)	1.0 mg



Fig. 7 HS-300U



Fig. 8 ME403

3. 실험 장치 검증 및 시편 시험 결과

3.1 실험 장치 검증

본격적인 시험에 앞서 직류전원장치 설비 및 시편의 온도 정보를 확인하기 위한 예비시험을 수행하였다. 시편의 정확한 온도를 측정하기 위하여 앞서 설명한 열화상카메라를 활용하여 공급전력량에 따른 시편의 온도를 확인하였으며, 선정된 특수 가시화 창을 통해 측정하고자하는 적외선 파장이 잘 투과되는지를 확인하였다. 그 결과 Fig. 9와 같이 시편의 온도가 측정되었으며 특수 재질의 가시화창 유무에 따라 측정되는 시편의 온도에는 변화가 거의 없음을 확인하였다. 이에 위와 같은 시험 설비 검증을 통하여 다음 Table 5와 같이 시험 조건을 선정하였다.

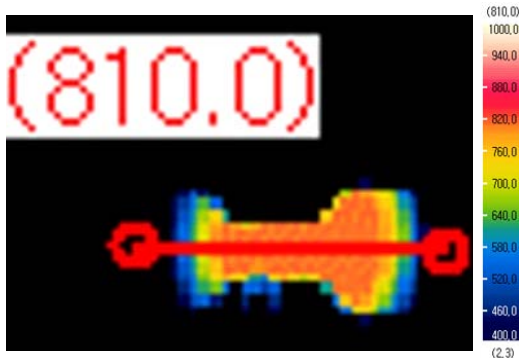


Fig. 9 Specimen temperature using infrared camera

Table 5 Test target conditions

산소농도 (%)	100
온도 (°C)	> 700
노출 시간 (s)	> 300

3.2 실험 결과

본 실험을 수행한 결과 Fig. 10과 같이 각 시편 시험 후 시편 표면에 변화(변색)과 표면이 거칠어지고 일부 시편의 표면에서 금속이 박리되

는 것을 육안으로 확인하였다. 이에 시편의 산화 정도를 파악하기 위하여 시편의 무게 및 두께를 측정하여 시험 전 후를 비교하였으며 Table 6과 같이 정리하였다.

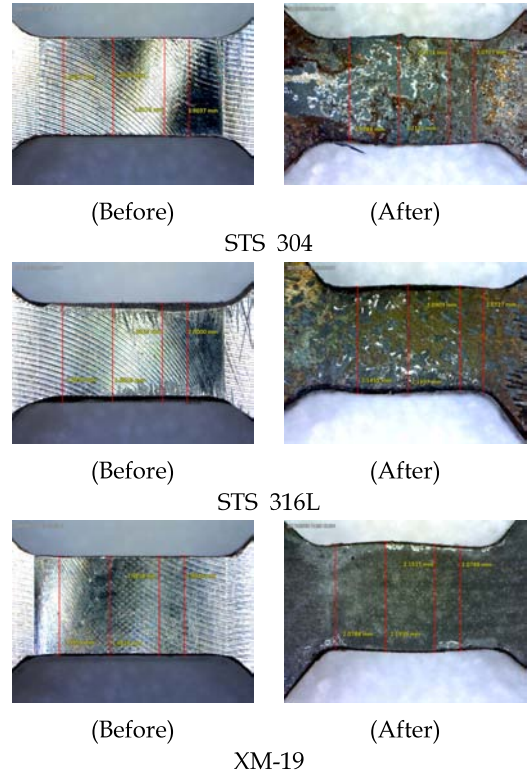


Fig. 10 Comparison of test specimens

Table 6 Test Results

		STS 304	STS 316L	XM-19
무게 (g)	시험 전	4.751	4.824	4.621
	시험 후	4.747	4.821	4.620
	감소율(%)	0.842	0.518	0.235
두께 (mm)	시험 전 (평균)	1.965	1.982	1.982
	시험 후 (평균)	2.124	2.120	2.126

시편의 무게 및 두께를 측정된 결과 무게 및 두께에는 변화가 나타난 것을 확인할 수 있었다. 선정된 재질 중 가장 두께 및 무게 변화가 심한 재질은 STS 304로 무게가 다른 시편에 비해서 시험 전후 가장 심하게 변화가 나타남을 확인하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 산화제 과잉 예연소기, 부품 및 배관 등에 제작 적합한 금속 재질 선정을 위하여 시편에 전류를 흘려보내어 시편의 온도를 직접 조절하는 방식의 직류전원장치를 활용한 시험설비를 구축하고 고온, 정체, 산화제 과잉의 환경을 모사하여 선정된 STS 계열 금속 재질에 대한 금속 산화 및 발화에 대한 평가를 진행하였다.

선정된 재질(XM-19, STS 316L, STS 304)을 산소 농도 100 %, 온도 약 700 ~ 800 °C의 산화제 과잉 환경에서 시험 결과 금속 표면의 변형(변색), 거칠기에 변화 및 금속 표면 박리 현상이 나타남을 육안으로 확인하였다. 이에 무게 및 두께의 변화를 측정해 본 결과 시험 전 후 변화가 나타남을 확인하였으며 선정된 재질 중 STS 304가 가장 많이 산화된 것으로 확인되었다. 또한, 사전 조사에서 선정된 금속 재질의 상대적 내산화성은 XM-19, STS 316L, STS 304 순으로 시험 결과와 비교해보면 내산화의 상대적 경향성이 일치함을 확인할 수 있었다.

따라서 본 연구의 결과로 미루어 볼 때 시험이 수행된 고온/정체/산화제 과잉환경에서는 시험이 진행된 STS 계열 중 상대적으로 내 부식성이 강한 XM-19 재질을 선정하여 예연소기 및 기타 부품을 제작하는데 활용하는 것이 좋을 것으로 사료된다. 하지만 본 시험에 있어서는 약 3 ~ 4 barg의 환경에서 시험이 수행되었기 때문에 추후 시험 설비를 보강하여 고압의 환경에서 어

떠한 변화가 있는지 확인할 것이다.

후 기

본 연구는 항공우주연구원의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Charles E. Bates, James E. Wren, Raymond monroe, and C. D. Pears, "Ignition and combustion of Perrous Metals in High Pressure, High Velocity, Gaseous Oxygen," J. Materials for energy systems, Volume. 1, pp.61-76, June 1979.
2. Moon Insang, Moon Ilyoon, Ha, Seun-Up, "Research on Metal Burning on Preburner Development," KSPE Spring Conference, 2015, pp.50-55
3. A. Abbud-Madrid, G. J. Fiechtner, M. C. Branch, and J. W. Daily, "Ignition and Combustion Characteristics of Pure Bulk Metals," 32nd Aerospace Sciences Meeting & Exhibit, Reno, N.W., USA, AIAA 94-0574, Jan 1994.
4. E. L. White and J. J. Ward, "Ignition of Metals in Oxygen," Office of the director of deffense research and engineering, DMIC report 224, Feb 1966.
5. Donghae Shin, Isang Yu, Wanchan Kim, Youngsung Ko, Yeongmin Han, "Evaluation of Material in an Excess Oxygen Atmosphere," KSPE Fall Conference, 2016, pp.391-394