



## 산화제 과잉 연소기에 활용 가능한 금속재료의 산화 거동에 관한 연구

신동해<sup>a</sup> · 유이상<sup>a</sup> · 신민규<sup>a</sup> · 고영성<sup>a,\*</sup> · 소운석<sup>b</sup> · 한영민<sup>b</sup>

### A Study on the Oxidation Behavior of Metal Materials Applicable to Oxidizer Rich Pre-Combustor

Donghae Shin<sup>a</sup> · Isang Yu<sup>a</sup> · Minku Shin<sup>a</sup> · Youngsung Ko<sup>a,\*</sup> ·  
Younseok So<sup>b</sup> · Yeoungmin Han<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Department of Aerospace Engineering, Chungnam National University, Korea

<sup>b</sup>Engine Test and Evaluation Team, Korea Aerospace Research Institute, Korea

\*Corresponding author. E-mail: [ysko5@cnu.ac.kr](mailto:ysko5@cnu.ac.kr)

#### ABSTRACT

Metals exposed to high temperature/high pressure/oxidant excess environment of an oxygen excess pre-combustor may undergo rapid oxidation. In this study, the test facility to simulate the high temperature/high pressure/oxidant excess environment was constructed and the oxidation resistance evaluation was carried out for various metal materials. As a result, the discoloration of the metallic materials, the change in the surface roughness and the peeling of the metal surface were observed, and the weight change was also observed. The result showed that oxidation-resistant coating of a metal material of the combustor is indispensably required, and the use of XM-19, which has the highest content of Cr and Ni, is expected to provide more structural stability.

#### 초 록

산화제 과잉 예연소기는 고온/고압/산화제 과잉의 환경이며, 이러한 환경에 금속은 급격한 산화가 발생할 수 있다. 본 연구에서는 고온/고압/산화제 과잉의 환경을 모사할 수 있는 설비를 구축하고 여러 금속 재질에 대해 내산화성 평가를 진행하였다. 그 결과, 온도가 높고 압력이 높은 조건에서 금속 재질의 변색, 표면 거칠기에 변화와 금속 표면의 박리 현상이 관찰되었고 무게 변화도 확인하였다. 모든 실험 결과를 종합하였을 때 산화제 과잉 예연소기는 금속 재질에 대한 내산화 코팅이 필수적으로 요구되며, 사용 금속으로는 Cr과 Ni의 함유량이 가장 높은 XM-19를 활용하는 것이 좀 더 구조적 안정성을 확보할 수 있을 것으로 판단한다.

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

Received 15 October 2018 / Revised 11 December 2018 / Accepted 11 February 2019

Copyright © The Korean Society of Propulsion Engineers

pISSN 1226-6027 / eISSN 2288-4548

#### 1. 서 론

액체 로켓엔진은 추진제를 공급하는 방식에

따라 별도의 가압 탱크를 둔 가압식과 터빈을 활용한 터보펌프식의 두 가지 형태로 구분한다. 최근에는 터보펌프를 활용한 방식을 많이 활용하고 있다. 터보펌프의 경우 고온의 가스로 구동되는데 이 가스가 외부로 배출되는 방식을 가스 발생기 사이클 또는 open 사이클이라고 하며 연소기로 보내어 재사용하는 방식을 다단연소 사이클 또는 close 사이클이라 한다. 국내에서 개발 중인 한국형 발사체는 가스 발생기 사이클을 채택하여 활용하고 있으며, 향후 액체 로켓 엔진의 고성능화를 위해 다단연소 사이클을 채택할 것으로 예상된다.

한국형 발사체는 케로신/액체산소 조합의 추진체를 사용하며 추진체 조합 특성상 연료 과잉 환경에서는 Soot가 발생하기에 다단연소 사이클의 경우 예연소기는 산화제 과잉 예연소기를 사용해야 한다. 이때 산화제 과잉 예연소기 및 예연소기 후단에 위치한 배관, 인젝터 및 기타 부품들은 고압/고온상태의 산화제 과잉 환경에 노출되는데, 이러한 고온/고압의 산화제 과잉 연소 가스는 일반 금속 재질과 접촉 시 금속 산화 또는 금속 연소가 발생할 가능성이 있게 된다[1].

이처럼 산화제 과잉 상태의 예연소기 설계에서는 금속 산화 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 내 산화에 대한 대비가 충분히 마련되어야 한다.

국외에서는 이와 같은 금속의 산화 및 연소와 관련하여 많은 연구를 수행하였다. A. Abbud - Madrid 등은 금속의 발화는 급속한 산화 반응을 통해 발생하는 것을 확인하였으며 대기압의 환경에서 여러 순수 금속에 대한 발화 온도를 확인하였다[2]. Charles E. Bates 등은 산소 농도, 유체의 다양한 압력의 조건에서 전기 가열 방식을 활용하여 금속의 발화 및 연소에 영향을 미치는 요인으로 온도, 압력과 유속 등을 확인하였으며, 이 중 온도와 압력이 주요 원인으로 확인하였다[3].

한편, 국내에서는 한국항공우주연구원의 주도

아래 차세대 액체로켓엔진 개발에 대비하여 수년 전부터 산화제 과잉 예연소기에 대한 선행적 연구를 수행하고 있으며, 산화제 과잉 상태의 축소형 예연소기를 개발하고 연소실험을 수행함으로써 기술개발 및 실험에 대한 경험을 축적하고 있다. 이와 관련하여 예연소기 연소실험 중 산화제 과잉 상태에서 금속 발화가 발생하는 사례를 관찰하게 되었으며, 현재는 해당 문제를 해결하기 위해 추가적인 연구를 수행하고 있다[1].

이에 본 연구에서는 고온/고압의 산화제 과잉 예연소기를 이용한 재질 적합성 실험을 수행하기에 앞서, 안전성 확보 차원에서 산화제 과잉 분위기를 조성하고 금속 재질의 내산화성을 평가하는 예비 실험 기법을 수립하였다.

실험을 통해 금속 재질에 대한 산화제 과잉 환경에서의 적합성을 확인하고자 한다. 이에 고온, 정체, 산화제 과잉의 환경을 모사할 수 있는 실험설비를 구축하고 선정된 금속 재질에 대한 금속 산화 및 발화에 대한 평가를 진행하였다.

## 2. 이론적 고찰과 변수 선정 및 금속 재질 선정

### 2.1 금속 산화와 연소의 원인과 과정

금속 연소의 경우 Fig. 1과 같은 과정을 통해 발생한다. 최외각에서 금속의 기화가 발생하면 금속 일부가 산소와 반응하기 시작하여 연소 반응이 발생하며 안쪽에서는 산화가 진행된다. 일반적으로 철을 포함한 금속의 경우 온도에 의해 산화가 시작되는 온도는 약 570°C 부근이다[4].

한편, 산화제 과잉 환경에서 금속 산화 및 연소가 발생하는 요인에는 유체의 온도, 압력, 유속 및 산소의 농도, 시편의 크기가 관련되어 있다. 이와 같은 요인 중에서도 산화의 주요 요인은 온도와 압력임을 참고문헌을 통하여 확인하였다[2-5].

### 2.2 실험 변수 선정

앞서, 살펴본바 산화제 과잉 환경에서의 금속 산화의 주된 원인은 유체의 압력과 온도임을 확인하여 본 연구에선 유체의 압력과 온도를 변수

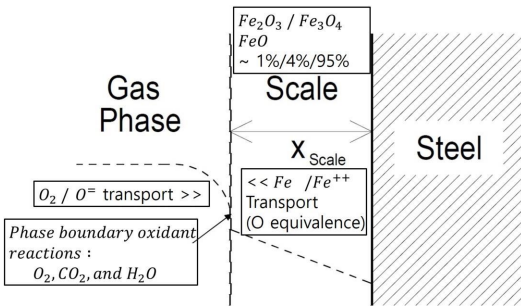


Fig. 1 The process of oxidation and combustion of stainless steel[4].

Table 1. Experimental variable.

Case	Temperature(°C)	Pressure(bar)
# 1	400	3
# 2		30
# 3	700	3
# 4		30

Table 2. Properties of Selected metal materials.

Material	melting point ( °C )	component ratio ( % )
		Cr
		Ni
S45C	1520	-
SCM 882	1427	-
STS 304	1399 ~ 1454	18 ~ 20
		8 ~ 12
STS 316L	1371 ~ 1399	16 ~ 18
		10 ~ 14
XM-19	1380 ~ 1406	20.5 ~ 23.5
		11.5 ~ 13.5

로 선정하여 실험 변수를 선정하였다. 또한, 산화제 과잉 환경을 모사하기 위해서 기화된 산소를 채워 산화제 과잉 환경(산소농도 100%)을 모사하고 일정한 공간에 압력을 형성하여 압력의 영향을 확인하였다. 압력은 저압(3 bar)의 환경과 고압(30 bar)의 환경을 선정하였고 온도의 영향

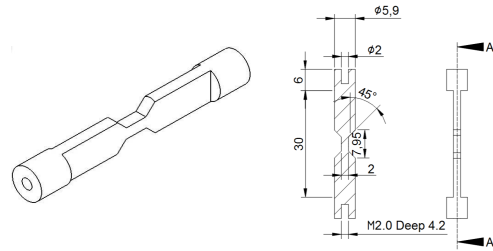


Fig. 2 Material specimen.

을 확인하기 위해서 400 °C와 700 °C를 선정하여 Table 1과 같은 4개의 Case 조건을 선정하였고 충분한 산화가 일어날 수 있도록 노출 시간은 5분으로 선정하였다.

### 2.3 시편 정보 및 형상

신동해 등과 하성업 등의 연구에서는 합금 구성비에 있어 Cr과 Ni의 함유 여부에 따른 산화 정도를 판단할 수 있음을 밝히고 있다[6,7]. 이에 로켓 연소기 제작에 많이 활용되는 금속 재질인 스테인리스 스틸 계열 STS 304와 STS 316L을 선정하였다. 또한, 산화 정도와 재질의 적합성을 비교 판단하기 위해서 상대적으로 산화가 잘될 것으로 보이는 S45C와 SCM 882를 선정하였고 상대적으로 산화에 강할 것으로 보이는 XM-19를 비교군으로 선정하였다. 각 금속 재질에 대한 물성치는 다음 Table 2와 같으며 시편의 기본적인 형태는 Fig. 2와 같이 양 끝은 원형의 실린더 형태로 금속 시편 분석(인장력 실험 등)에 있어 활용되는 기본 형상을 참고하여 시편의 형상을 선정하였다[3]. 또한, 금속 물질의 특징 중 하나인 전기적 저항을 활용하여 시편의 온도를 조절하는 만큼 저항이 크게 작용하는 위치 선정과 저항 성능을 극대화를 위해 시편 중앙을 좁게 한 노치 형태로 하였으며, 추후 분석 장비 활용에 있어 시편의 고정 등을 고려하여 일정한 두께를 가지는 평판 형으로 설계하였다. 노치 부분의 두께는 2 mm의 크기로 제작되었으며, 고정 방식은 시편 한쪽에 나사산을 내어 구리선과 결합하여 챔버에 고정이 가능하도록 하였다. 시편 사용 개수의 경우 각 실험 조건에서 동일 금속 재질 2개의 시편을 활용하여 실험을 수행하였다.

3. 실험 장치 구성 및 분석 방안

3.1 실험 장치 구성

본 연구에는 산소의 농도 100%인 고온/고압의 산화제 과잉 환경을 모사하기 위해서 Fig. 3의 개략도와 같은 실험 설비를 구축하였다. 본 실험 장치에서는 시편의 가열은 전기를 활용하는 만큼 직류전원장치(DC Power)를 활용하였고 시험 리그(Test Rig)에 정정한 압력 구현을 위해서 레귤레이터를 활용하였다. 또한, 시편의 상태 변화를 실시간으로 확인하기 위한 CCD 카메라와 시편의 온도를 측정하기 위해 열화상 카메라(Thermal Imaging Camera)를 설치하였고 시편의 온도와 압력 데이터를 저장하기 위한 계측기(DAQ)를 설치하였다. 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, 가변저항에 의해 전력을 제어하는 방식을 채택하였고 과전류가 발생하여 온도가 비정상적으로 상승하거나 장비에 이상이 발행하였을 경우 자동으로 전원공급이 차단되도록 설계되었다. 시험 리그의 경우 Fig. 3에 나타난 바와 같이 시험 리그 가운데 시편이 위치하게 되며, 위 아래로 구리 전도체를 두어 시편에 전류를 공급하게 된다. 또한, 전기를 활용하는 만큼 실험 중 안정성을 위해서 시험 리그에 전류가 흐르지 않도록 테프론 소재의 절연 장치를 Fig. 3과 같이 구성하여 활용하였다.

3.2 시편 온도 측정 및 검증

본 연구에서는 시편 온도의 제어의 경우 직류전원장치를 활용하기 때문에 시편 온도에 대한 정확한 계측이 필요하다. 이에 시편 온도를 실시간으로 계측하기 위하여 열화상 카메라를 활용하였다. 열화상 카메라의 경우 세팅 값에 따라 온도 편차가 존재하기에 접촉식 온도 센서와 비교 실험을 통해 열화상 카메라의 온도 측정에 대해 비교를 하였고 시편의 재질별 특성에 맞는 방사율(emissivity) 값을 찾아 활용하였다. 본 연구에 활용된 열화상 카메라는 NEC 사의

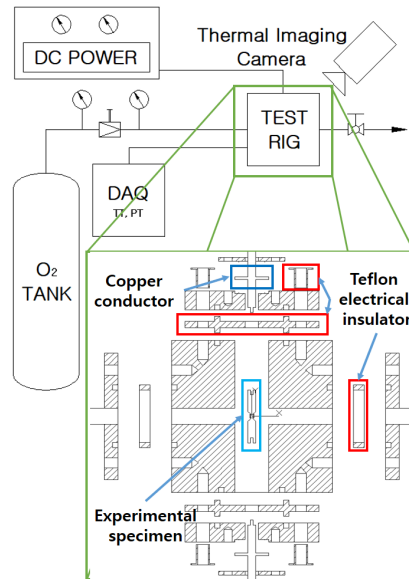


Fig. 3 Schematic of Test Facility.

Table 3. Thermo Tracer TH9100 Series.

Measuring range	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

Thermo Tracer TH9100 Series이며 자세한 사양은 Table 3과 같다.

그리고 시험 리그의 경우 일정한 압력을 유지하기 위해서 밀폐된 구조여야 하며 열화상 카메라를 통해 시편의 온도 계측을 위해서 별도의 가시화 창을 설치하였다. 가시화 창 선정에서는 열화상 카메라가 측정하는 특정 파장 대역을 충분히 통과시킬 수 있는 특수 재질의 가시화 창을 선택하였고 가시화 창 재질은 KBr(Potassium Bromide)로 Fig. 4와 같이 열화상 카메라의 측정 적외선 파장 8 ~ 14 μm에서의 투과율이 약 91%로 일정하게 투과됨으로 시편의 온도를 측정하는 데 문제가 없음을 확인하였다.

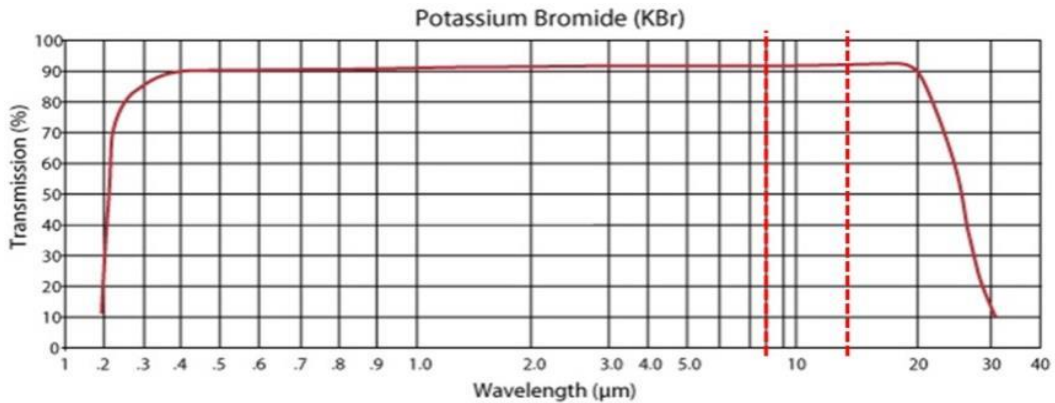


Fig. 4 Visible window transmittance.

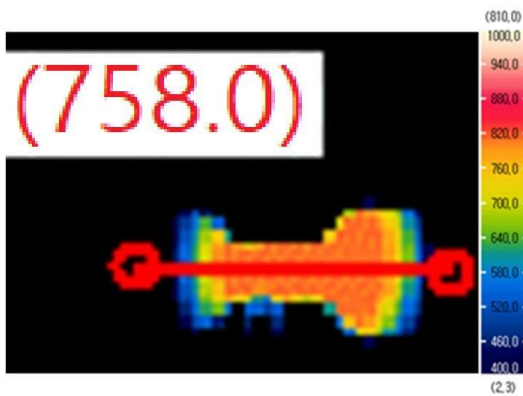


Fig. 5 Thermal camera specimen temperature.

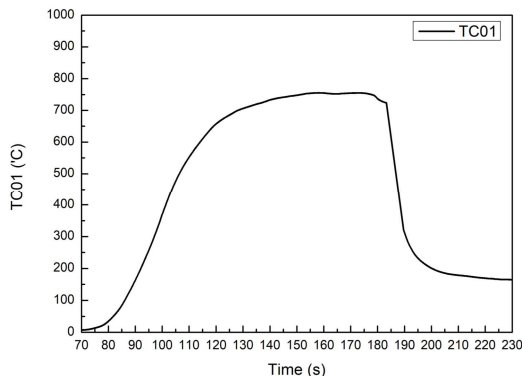


Fig. 6 Thermocouple Specimen Temperature.

이에 선정된 가시화 창을 통한 열화상 카메라의 온도 측정이 가능한지 여부와 열전대를 통한 온도 계측 가능 여부를 확인하는 검증 시험을

수행하였다. 그 결과, Fig. 5 ~ 6과 같이 가시화 창을 통해서 열화상 카메라로 온도 측정 및 열전대를 통한 온도 측정 결과이다. 두 개의 온도 측정 장비를 비교하면 약 3°C 정도의 차이를 보이며 이에 열화상 카메라를 활용하여 시편의 온도를 측정하는 것이 적합함을 확인하였다.

### 3.3 산화에 대한 분석

시편에 대한 실험을 마친 후 재질의 산화 정도를 파악하기 위해서 분석 장비들을 활용하여 금속의 산화 정도를 분석 수행하였다. 먼저, 실험 진행 후 금속 표면의 산화의 정도를 용이하게 파악하기 위하여 시편의 무게 변화를 측정하고 시편 표면의 변화를 관측하였다. 본 연구에는 무게 변화는 METTER TOLEDO 사의 ME403 정밀 저울을 활용하였으며 시편 표면 변화는 HaaN사의 HI-Scope HS-300U의 광학 정밀 현미경을 활용하였다. 자세한 스펙은 Table 4, Table 5와 같다.

또한, 시편의 실험 전후 시편 표면의 산화 정도를 정확히 파악하기 위해서 장방출 주사 전자현미경을 활용하여 시편의 실험 전 후 산소 함유량 변화를 관측을 위해 EDS (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy) 분석을 수행하였다. EDS는 고 에너지의 전자빔을 활용하여 시편의 구조 및 화학 조성 정보를 확인 할 수 있는 기법 중에 하나이다. 본 연구에 활용된 장방출 주사 전자 현미경은 ZEISS 사의 MERLIN Series를 활용하였다.

Table 4. METTLER TOLEDO's ME403 Specifications.

Maximum Capacity	220.0 g
Readability	0.1 mg
Repeatability	0.1 mg
Linearity	± 0.2 mg
Resolution	0.1 mg

Table 5. HaaN's HI-Scope HS-300U Specification.

Image sensor	2.0 Mega 1/3.2"
Magnification	x 100(40 ~ 130 times) x 200(70 ~ 200 times) x 400(21 ~ 420 times) x 1000(600 ~ 1200 times)
Focus adjustment method	Fine and coarse

#### 4. 실험 결과

##### 4.1 실험 결과

###### 4.1.1 무게 변화

실험을 수행한 결과, Table 6의 결과는 시편의 2개 평균값을 기록한 것으로 일부 시편에서 무게가 변화된 것을 확인할 수 있다. 이와 같은 무게 변화는 산소 분자와 금속 분자가 결합하는 산화가 진행되어 나타난 결과이며 일부 시편에서의 무게 감소는 Fig. 7의 STS 304의 예시와 같이 생성된 산화층이 시험 도중 박리가 되면서 떨어져 나간 것으로 판단한다.

또한, S45C와 SCM 882는 시험조건 # 3번에서 다른 시편들에 비해 가장 많은 무게 변화와 표면 산화가 된 것이 관측되어, 해당 시편의 경우 산화제 과잉 예연소기 제작에 활용이 불가하다고 판단하여 시험조건 # 4를 수행하지 않았다. 또한, STS 304, STS 316L, XM-19에서도 앞선 시편과 같이 시험조건 # 3에서 무게 증가 및 표면 산화가 다른 시험 조건들보다 가장 두드러지는 것을 확인 할 수 있다. 무게 변화로 보았을 때는 Cr과 Ni이 함유된 STS 계열이 내산화 성이 상대적으로 우수하다고 할 수 있다.

Table 6. Weight change before and after test.

S45C		Before	After	Change
Weight ( g )	# 1	4.7412	4.7437	0.0025
	# 2	4.7349	4.7354	0.0005
	# 3	4.7313	4.7475	0.0162
SCM 882		Before	After	Change
Weight ( g )	# 1	4.7693	4.7699	0.0006
	# 2	4.7473	4.7476	0.0003
	# 3	4.7517	4.7620	0.0103
STS 304		Before	After	Change
Weight ( g )	# 1	4.8147	4.8149	0.0002
	# 2	4.7874	4.7874	0
	# 3	4.7460	4.7481	0.0021
	# 4	4.8011	4.8011	0
STS 316L		Before	After	Change
Weight ( g )	# 1	4.8555	4.8543	-0.0012
	# 2	4.8490	4.8490	0
	# 3	4.8260	4.8270	0.001
	# 4	4.8456	4.8455	0
XM - 19		Before	After	Change
Weight ( g )	# 1	4.7918	4.7913	-0.0005
	# 2	4.8016	4.8011	-0.0005
	# 3	4.6210	4.6360	0.0015
	# 4	4.8011	4.8006	-0.0005

###### 4.1.2 금속 표면의 변화

Fig. 7은 실험 Case 3의 실험 전후 시편의 대표적인 모습으로 시편 표면에서 열손상(변색)이 나타났고 표면 거칠기에 변화가 발생하는 것을 확인하였다. 또한, S45C, SCM 882와 같이 산화층이 두껍게 형성된 경우 균열이 진행된 것을 확인하였고 STS 304, STS 316L와 같이 시편의 표면에서 금속이 산화되어 박리되는 현상을 확인하였다.

###### 4.1.3 금속 산화 정도의 변화

장방출 주사 전자 현미경을 활용하여 산소의 함유량에 대해서 분석한 결과, 모든 시험 조건에서 금속 표면의 산화가 진행된 것을 확인할 수

Table 7. Change of oxygen content of test specimen before and after test.

			Before	After	Change
S45C	Oxygen (wt%)	# 1	4.11	24.11	20
		# 2		25.66	21.55
		# 3		26.35	22.24
SCM 882	Oxygen (wt%)	# 1	1.83	25.28	23.45
		# 2		26.75	24.92
		# 3		27.89	26.06
STS 304	Oxygen (wt%)	# 1	1.55	22.07	20.52
		# 2		22.75	21.2
		# 3		24.52	22.97
		# 4		24.91	23.36
STS 316L	Oxygen (wt%)	# 1	2.12	22.12	20
		# 2		22.87	20.75
		# 3		23.83	21.71
		# 4		25.56	23.44
XM-19	Oxygen (wt%)	# 1	2.04	19.68	17.64
		# 2		20.14	18.1
		# 3		21.76	19.72
		# 4		22.17	20.13

있었으며 그 결과는 Table 7과 같다. 특히 가장 많은 산소 함유량을 함유한 재질은 SCM 882이며 가장 적은 산소 함유량을 함유한 재질은 XM-19로 확인하였다. 또한, 산화가 일어나는 요인 중 압력의 변화에 따른 산화보다 온도 변화에 따른 산화가 더 많이 일어난 것을 확인할 수 있었다

#### 4. 결 론

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

선정된 재질을 산소 농도 100%, 온도 약 400/

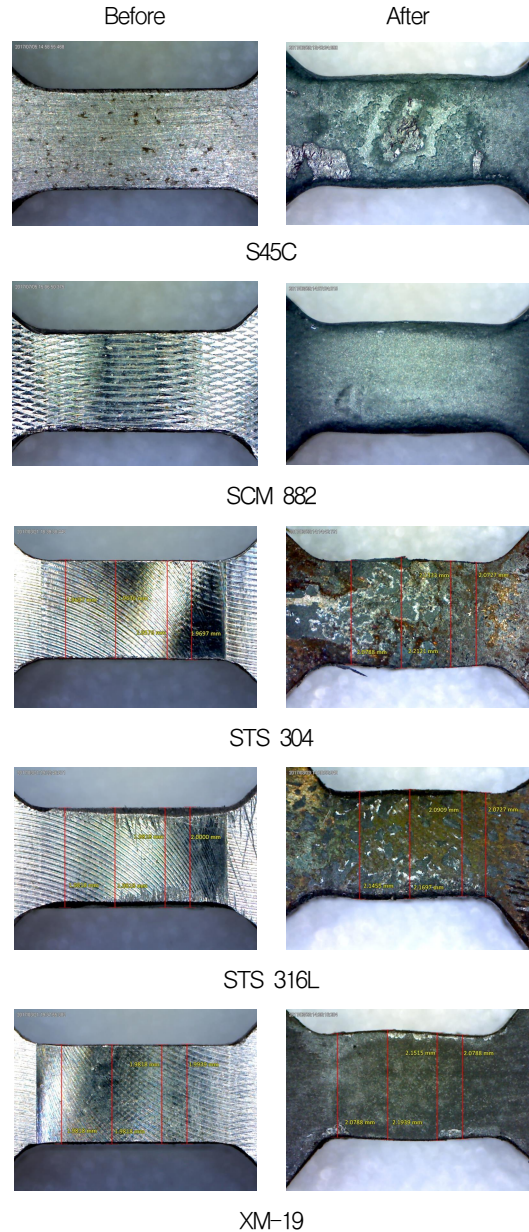


Fig. 7 Change of specimen surface before and after experiment in case 3.

700 °C, 압력은 저압(3 bar)과 고압(30 bar)에서 산화제 과잉 환경에서 실험 결과 금속 표면의 변색, 거칠기에 변화 및 금속 표면 박리 현상이 나타남을 육안으로 확인하였다. 그 중 시험 조건 Case 3에서 가장 많은 변화를 보였다.

이에 무게의 변화를 측정해 본 결과, 실험 전/후 변화가 나타남을 확인하였으며 선정된 재질 중 Cr과 Ni 함유량이 없는 S45C와 SCM 882가 가장 많이 산화된 것으로 확인되었다. 이는 참고 문헌에서 Cr과 Ni의 함유량이 있는 금속 재질이 내산화성이 우수하다는 결과와도 일치함을 확인하였다. EDS 분석 결과를 보면 XM-19가 다른 금속들에 비해서 최대 약 22%보다 적은 산소 함유량을 함유하고 있어, 선정된 금속 재질 중 내산화성이 가장 우수하다고 판단한다. 그러나 금속 표면 광도 및 거칠기 변화 정도 그리고 EDS 분석 결과로 미루어 볼 때 XM-19도 금속 표면에서 산화가 이루어졌음을 확인하였다.

위 결과들을 종합해 보면 산화제 과잉 환경에서 금속 산화에 있어 압력보다 온도의 영향이 더 큼을 확인할 수 있었다. 따라서 본 연구의 결과로 미루어 볼 때, 산화제 과잉 환경에서 운용되는 산화제 과잉 예연소기는 온도에 제한을 두어야 하며 활용되는 금속 재질은 내 산화 코팅이 요구된다. 또한, 코팅 모재로는 Cr과 Ni의 함유량이 가장 높은 XM-19를 활용하는 것이 좀 더 구조적 안정성을 확보할 수 있을 것으로 판단한다.

## 후 기

본 연구는 한국항공우주연구원의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

## References

1. Moon, I.S., Moon, I.Y., and Ha, S.U., "Research on Metal Burning on Preburner Development," 2015 KSPE Spring Conference, Republic of Korea, pp. 50-55, May. 2015.
2. A. Abbud-Madrid and 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, pp. 94-0574, Jan. 1994.
3. Charles E. Bates and James E. Wren, Raymond Monroe, C. D. Pears, "Ignition and Combustion of Ferrous Metals in High Pressure, High Velocity, Gaseous Oxygen", USA, American Society for Metals, Vol.1 , pp. 61-76, JUNE 1979.
4. D. Poirier, Grandmaison, M.D. Matovic, K.R. Barnes and B.D. Nelson, "High Temperature Oxidation of Steel in an Oxygen-enriched Low NOX Furnace Environment," USA, IFRF Combustion Journal, 2006.
5. 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.
6. Donghae Shin, Isang Yu, Wanchan Kim, Youngsung Ko and Yeongmin Han, "Evaluation of Material in an Excess Oxygen Atmosphere," 2016 KSPE Fall Conference, Republic of Korea, pp. 391-394, Dec. 2016.
7. Ha, S.U., Yoo, J.H., Moon, I.Y., and Moon, I.S., "Development History and Modern Trends of Oxidizer-Rich Preburner", 2012 KSPE Fall Conference, Republic of Korea, pp. 461-464, Nov. 2012.