



&lt;연구논문&gt;

한국표면공학회지  
J. Kor. Inst. Surf. Eng.  
Vol. 46, No. 6, 2013.

<http://dx.doi.org/10.5695/JKISE.2013.46.6.264>

## 심리스 튜브 제조용 피어싱 플러그 공구강과 SA210C강의 고온 미끄럼 마모에 미치는 예비산화의 영향

최병영<sup>a\*</sup>, 구윤식<sup>b</sup>

<sup>a</sup>전북대학교 신소재공학부 및 신소재개발연구센터, <sup>b</sup>전북대학교 대학원 금속공학과

### Effects of Preoxidation on High Temperature Wear of Piercing Plug Tool Steel Sliding Against SA210C Steel Used for Production of Seamless Tube

Byung-Young Choi<sup>a\*</sup>, Yoon-Sik Gu<sup>b</sup>

<sup>a</sup>School of Advanced Materials Engineering and Research Institute of Advanced Materials Development, Chonbuk National University, Chonju 561-756, Korea

<sup>b</sup>Graduate School of Metallurgical Engineering, Chonbuk National University, Chonju 561-756, Korea

(Received December 9, 2013 ; revised December 25, 2013 ; accepted December 27, 2013)

#### Abstract

Effects of preoxidation on high temperature wear of piercing plug tool steel sliding against SA210C steel used for production of seamless tube have been studied using a pin-on-disc CETR tribometer, under applied normal load of 20 N at 900°C in air. It was found in the preoxidized pin specimens of piercing plug tool steel that the coefficient of friction decreased to about 0.4 at an initial stage followed by showing nearly constant value of about 0.4 during high temperature wear testing. On the other hand, it was also found in the pin specimens without preoxidation that the coefficient of friction increased and fluctuated, ranging from about 0.3 to 0.6 during the tests until the running period of about 800 sec. The compact and continuous Fe-oxide layer was formed on the contact surface of the preoxidized pin specimens after high temperature wear testing followed by penetrating along the grain boundaries of coarse ferrite in the decarburized region beneath the oxide layer due to the lower hardness of the region.

*Keywords* : Preoxidation, High temperature wear, Piercing plug tool steel, SA210C steel, Coefficient of friction, Fe-oxide layer, Seamless tube

## 1. 서 론

화력발전용 심리스 튜브(seamless tube)는 최근 만네스만 로터리 피어싱(Mannesmann rotary piercing) 공정으로 주로 제조된다. 이때 튜브의 소재인, 고온으로 가열된 빌렛을 콘 타입 롤러(corn-type roller)로 빌렛의 바깥부위를 압연하고 동시에 피어싱 플러그(piercing plug)로 축방향으로 하중을 가하여 내부를 천공시켜 심리스 튜브로 제조된다. 특히 피어싱 플러그는 고온으로 가열된 빌렛의 내부를 천공

시키는 과정이 반복되면서 고온마모가 일어나고 결과적으로 변형 및 파손되어 더 이상 사용되지 못하고 새로운 피어싱 플러그로 교체된다. 결과적으로 피어싱 플러그의 공구(tools)에 드는 비용이 증가하고 생산성도 낮아지며 심리스 튜브의 품질이 저하된다. 따라서 피어싱 플러그의 고온마모에 대한 저항성을 높이고 내열특성을 개선해야 하며 이를 위해서는 고온으로 가열된 빌렛에 반복적으로 미끄럼 접촉되어 발생하는 피어싱 플러그의 고온마모거동을 구체적으로 규명하는 것이 선결과제이다.

Yamakawa 등<sup>1)</sup>은 탄환형상의 피어싱 플러그의 앞부분(front part)의 표면에 산화막(oxide film)을 형

\*Corresponding author. E-mail : bychoi@jbnu.ac.kr

성시켜 피어싱 플러그의 수명을 개선하고자 시도하였으며 피어싱 플러그의 앞부분을 교체가능하도록 디자인하였다. 또한 Kato 등<sup>2)</sup>은 강의 미끄럼 접촉면 영역에 산화물 입자가 생성되어 지속적으로 잔류할 수 있는 정도에 따라 마모율이 증가하거나 감소한다고 보고한 바 있다. 한편 Waterhouse<sup>3)</sup>는 고온에서 매우 짧은 거리를 왕복운동하며 마찰마모를 일으키는 두 물체의 접촉면에 생성된 반질반질한 층(glaze layer)의 산화물 입자의 안정성은 주로 물체의 기판강도(substrate strength)에 따라 달라진다고 보고하고 있어 아직 피어싱 플러그 소재의 고온 마모거동을 구체적으로 밝힌 연구보고는 거의 없는 실정이다.

이에 본 연구에서는 피어싱 플러그 소재와 심리스 튜브용 빌렛 소재를 사용하여 각각 핀(pin)과 디스크(disc) 시편을 제작한 다음, pin-on-disc형 고온 마모시험기에서 고온 미끄럼 접촉 마모 시험을 실시하면서 실시간으로 마찰계수를 측정하고 핀 시편과 디스크 시편의 미끄럼 접촉면에 형성된 마모 부스러기(wear debris)와 마모면 및 그 직하의 단면을 관찰한 결과를 분석 및 고찰하여 고온마모거동을 밝히려고 한다. 특히 피어싱 플러그 소재인 핀 시편을 미끄럼 접촉 고온마모 시험 중에 하중을 가하기 전, 가열된 디스크 시편에 접촉시켜 예비산화시킬때 나타나는 고온마모거동과 예비산화하지 않고 접촉시킨 후 즉시 하중을 가해 시험한 경우, 나타나는 거동을 비교하였다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 시편 제작

피어싱 플러그 소재를 정밀절단한 후 직경 6 mm, 높이 9 mm의 원주형의 한쪽 끝부분이 20 mm의 곡률반경의 돔 형상의 핀 시편으로 가공하였다. 디스크 시편은 원주형 심리스 튜브용 빌렛 소재(ASME SA210C)를 정밀절단한 다음 직경 50 mm, 두께 6 mm의 디스크형으로 가공하여 제작하였고 이때 한쪽면을 연마하여 경면가공하였다.

### 2.2 고온마모시험

그림 1에 도식적으로 나타난 pin-on-disc형 고온 마모시험기(CETR tribometer)에서 핀 시편을 상부 홀더에 장착하고 디스크 시편을 하부 홀더에 각각 장착한 다음 마모시험기에 부착된 컴퓨터에 표 1과 같은 고온마모 시험조건을 입력하고 시험기를 작동하였다. 먼저 디스크 시편을 900°C까지 가열한 다음 10분동안 유지하고 핀 시편을 가열된 디스크 시

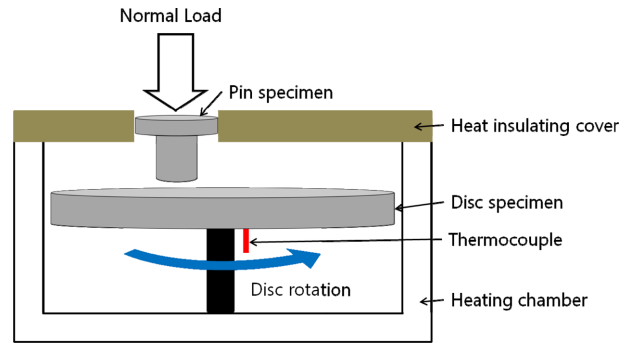


Fig. 1. Schematic diagram showing the CETR pin-on-disc tribometer.

Table 1. High temperature wear test conditions

Heating temperature and soaking time for disc	900°C, 600 sec
Contacting time between pin and disc heated at 900°C before applying load to preoxidize pin	900 sec
Normal load	20 N
Sliding speed	0.05 m/s
Sliding radius	10 mm
Testing duration	1200 sec

편에 접촉시킨 다음 15분동안 유지하여 예비산화시킨 후 20 N의 수직하중을 가하면서 디스크 시편을 회전시켜 미끄럼 접촉 고온마모 시험을 900°C에서 20분동안 표 1과 같은 조건으로 실시하였다. 위의 예비산화시킨 경우와 비교하기 위하여 핀 시편을 가열된 디스크 시편에 접촉시킨 후 즉시 20 N의 하중을 가하면서 동일한 방법으로 미끄럼 접촉 고온마모 시험을 또한 실시하였다. 이때 실시간으로 마찰계수를 측정하여 마모시험기에 부착된 컴퓨터에 저장하고 그 값을 그래프로 나타내었다.

### 2.3 화학성분 분석

피어싱 플러그 소재와 심리스 튜브용 빌렛 소재를 선반에서 드릴링하여 생긴 칩을 채취하여 초음파 세척한 후 습식분석으로 핀 시편과 디스크 시편의 화학성분을 조사한 결과 표 2와 같이 나타났다.

### 2.4 마모 분석

미끄럼 접촉 고온마모 시험 중에 시편의 미끄럼 접촉면에 형성된 마모면과 그 직하 단면을 2% Nital 용액에 에칭한 후 그 미세조직을 각각 주사 전자현미경과 광학 현미경으로 관찰하고 마모 부스러기는 EDS로 성분분석하여 그 결과를 실시간 측정된 마찰계수의 변화와 관련지어 고찰하였다. 특히 피어싱 플러그 소재인 핀 시편의 미끄럼 접촉 고온마모

Table 2. Chemical compositions of high temperature wear test specimens (wt.%)

Element Specimen	C	Si	Mn	Cr	P	S	Ni	Mo	W	V	Fe
pin	0.19	0.71	0.44	1.47	0.023	0.012	2.93	0.25	0.14	0.01	bal.
disc (ASME SA210C)	0.19	0.22	0.96	0.075	0.009	0.0041	0.063	0.012	-	-	bal.

시험조건별로 마이크로 비커스 경도계로 마모면 직하 단면의 경도값의 변화를 300 g의 하중을 가하면서 측정하고 그 결과를 위의 미세조직과 함께 분석하여 미끄럼 접촉 고온마모거동을 고찰하였다.

의 마모면 직하 단면의 미세조직을 광학 현미경으로 관찰한 결과이다. 그림 3(a)는 미끄럼 접촉 고온마모 시험을 실시하기 전 상태의 핀 시편의 단면을 관찰한 미세조직이며 베이나이트 조직이 형성되어 페라이트에 베이나이트 탄화물(bainitic carbides)이

### 3. 실험 결과

#### 3.1 마찰계수

그림 2는 미끄럼 접촉 고온마모 시험 중에 실시간 측정된 마찰계수값을 컴퓨터 프로그램을 사용하여 그래프로 작성한 결과이며 핀 시편을 900°C로 가열된 디스크 시편에 접촉시킨 다음 15분동안 유지하여 예비산화시킨 후 20 N의 하중을 가하면서 900°C에서 20분동안 시험 중에 나타난 마찰계수값은 초기에 감소한 다음 약 0.4로 거의 일정한 값을 보여준다. 반면에 핀 시편을 900°C로 가열된 디스크 시편에 접촉시킨 후 예비산화시키지 않고 즉시 20 N의 하중을 가하면서 900°C에서 20분동안 시험 중에 나타난 마찰계수값은 약 0.3~0.6의 범위에서 초기에 증가한 다음, 800초 이후에 감소하여 약 0.4에 수렴하여 거의 일정한 값을 보인 비교적 심한 변화(relatively larger fluctuations)를 나타낸다.

#### 3.2 마모면 직하 단면의 미세조직과 경도변화

그림 3은 미끄럼 접촉 고온마모 시험 후 핀 시편

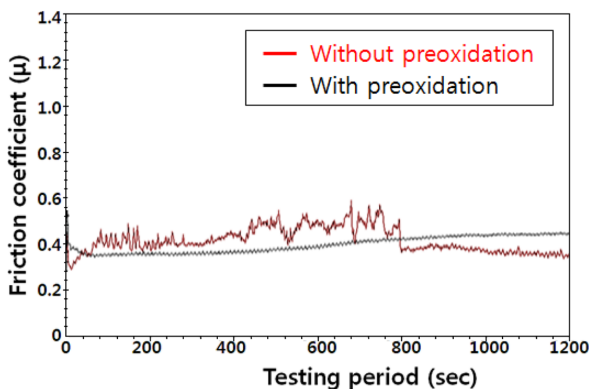


Fig. 2. Friction coefficients as a function of time for pin specimen without and with preoxidation sliding against disc specimen.

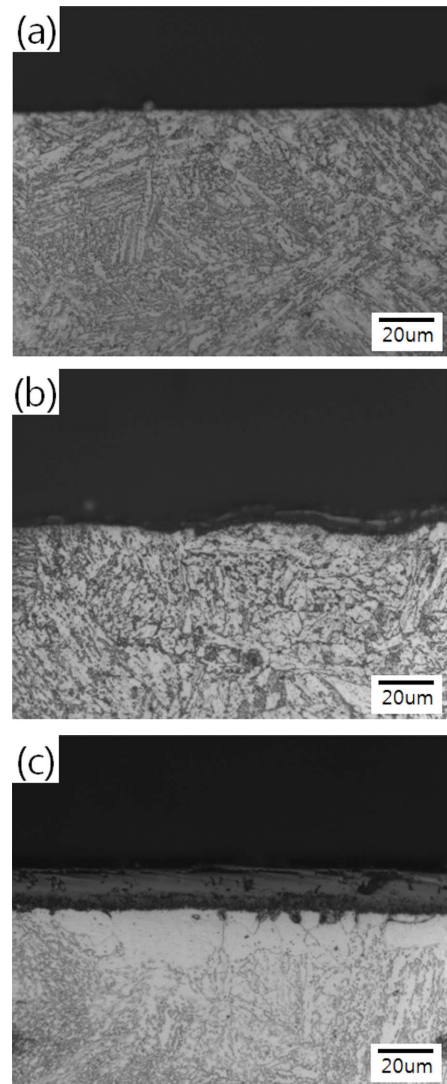


Fig. 3. Optical micrographs showing microstructure of cross-section of pin specimens (a) before wear test (b) without preoxidation sliding against disc specimen for 1200 s (c) with preoxidation sliding against disc specimen for 1200 s during wear test.

Table 3. Microhardness measured below the surface of pin specimens for high temperature wear test (Hv)

	20 um from surface	100 um from surface
Before wear test	337.5	346
Without preoxidation	271.2	323.8
With preoxidation	229.4	289.3

일정한 방향으로 분포하여 나타남을 알 수 있다. 그림 3(b)는 핀 시편을 900°C로 가열된 디스크 시편에 접촉시킨 후 예비산화시키지 않고 즉시 20 N의 하중을 가하면서 900°C에서 20분동안 미끄럼 접촉 고온마모 시험 후 마모면 직하 단면의 미세조직이며 마모면 표면에 불연속적으로 산화층이 생성되었고 소성변형되어 표면산화층과 표면에 드러난 금속기지(substrate)가 굴곡면을 나타내고 있다. 한편 핀 시편을 예비산화시킨 후 20 N의 하중을 가하면서 900°C에서 20분동안 미끄럼 접촉 고온마모 시험 후에는 그림 3(c)와 같이 마모면 표면에 치밀하고 연속적인 산화층이 비교적 평평한 면을 나타내며 형성되었고 탈탄이 일어나<sup>4)</sup> 흰색을 나타내는 표면직하 금속기지의 결정입계로 표면에 형성된 산화층이 침투되어 나타났다.

위의 미끄럼 접촉 고온마모 시험을 실시하기 전 상태의 핀 시편과 시험 후 핀 시편의 마모면 직하 단면을 마이크로 비커스 경도계로 측정된 결과, 표 3에 나타난 바와 같이 미끄럼 접촉 고온마모 시험 후 핀 시편의 마모면 직하 단면의 경도값이 마모시험 전에 비해 감소하였다. 특히 핀 시편을 900°C로 가열된 디스크 시편에 접촉시킨 다음 15분동안 유지하여 예비산화시킨 후 20 N의 하중을 가하면서 900°C에서 20분동안 미끄럼 접촉 고온마모 시험 후, 핀 시편의 마모면 직하 영역의 경도값이 가장 낮게 나타났다.

3.3 마모면 표면의 미세조직과 마모 부스러기의 분포 및 성분분석

미끄럼 접촉 고온마모 시험 후 핀 시편과 디스크 시편의 마모면 표면을 주사 전자현미경으로 관찰하고 그 표면 위에 형성된 마모 부스러기의 분포와 성분을 분석한 결과, 그림 4~7과 같이 나타났다. 그림 4는 핀 시편을 900°C로 가열된 디스크 시편에 접촉시킨 후 예비산화하지 않고 즉시 20 N의 하중을 가하면서 900°C에서 20분동안 미끄럼 접촉 고온마모 시험 후 마모면 표면의 미세조직과 마모면 위에 형성된 마모 부스러기의 성분을 분석한 결과

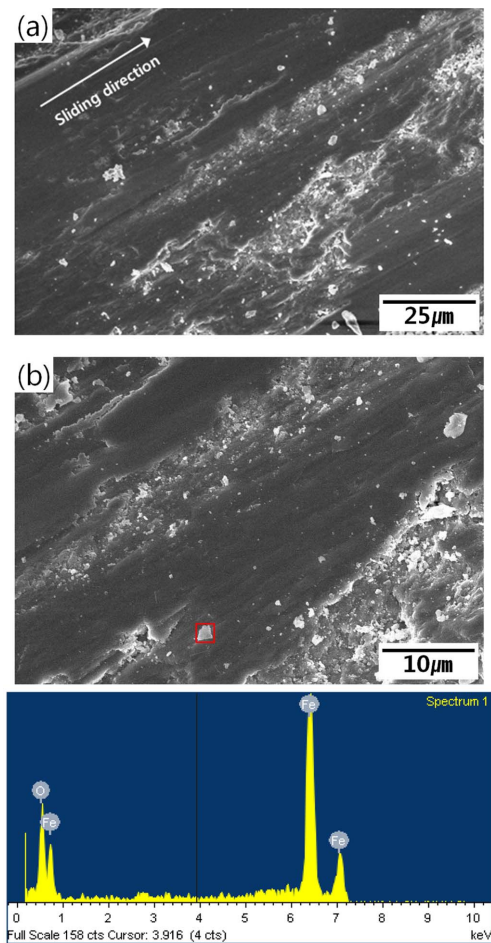


Fig. 4. SEM images and chemical analysis of wear debris (formed in Fig. 4b) on the worn surface of pin specimen without preoxidation sliding against disc specimen for 1200 s.

이다. 먼저 미세조직을 보면 미끄럼 접촉방향에 따라 검은 색으로 나타난 반질반질한 층과 흰 색을 띠는, 내부가 드러난 부분 및 마모 부스러기들이 형성되어 있고 그 성분을 분석한 결과 Fe 산화물임을 확인하였다. 그 마모 부스러기들은 반질반질한 층과 내부가 드러난 부분에 걸쳐 분포하여 나타났다. 미끄럼 접촉 고온마모 시험시 상대재로 사용된 디스크 시편의 마모면 표면을 관찰한 결과, 그림 5에 나타난 바와 같이 미끄럼 접촉방향에 따라 검은 색의 움푹 파인 영역(groove)과 압착되어 변형된 영역, 다공성(porous)의 비교적 촘촘한 산화층 및 마모 부스러기들이 형성되었다. 그 마모 부스러기들은 핀 시편에 비해 적은 수의 입자들이 주로 움푹 파인 영역과 압착되어 변형된 영역 주위에 분포하고 있고 성분을 분석한 결과, Fe 산화물임을 확인하였다.

그림 6은 핀 시편을 900°C로 가열된 디스크 시편에 접촉시킨 후 15분동안 유지하여 예비산화시킨



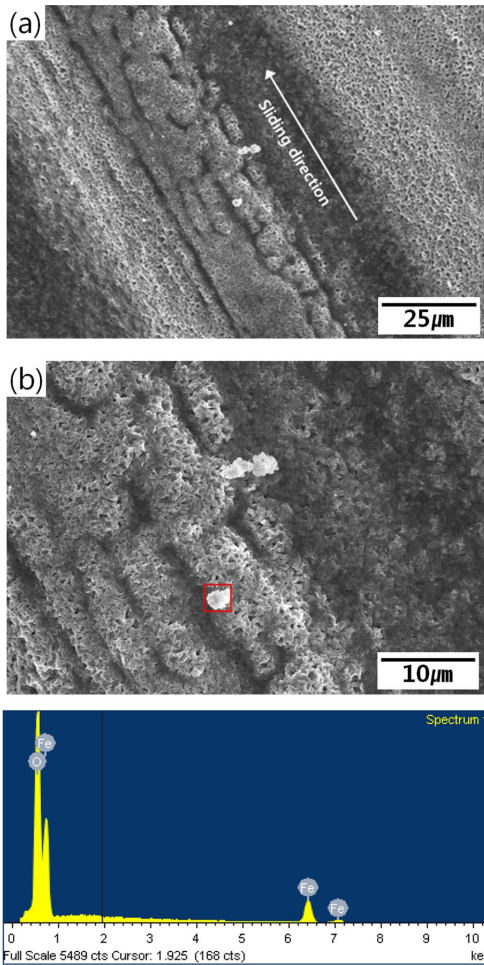


Fig. 5. SEM images and chemical analysis of wear debris (formed in Fig. 5b) on the worn surface of disc specimen sliding against pin specimen without preoxidation for 1200 s.

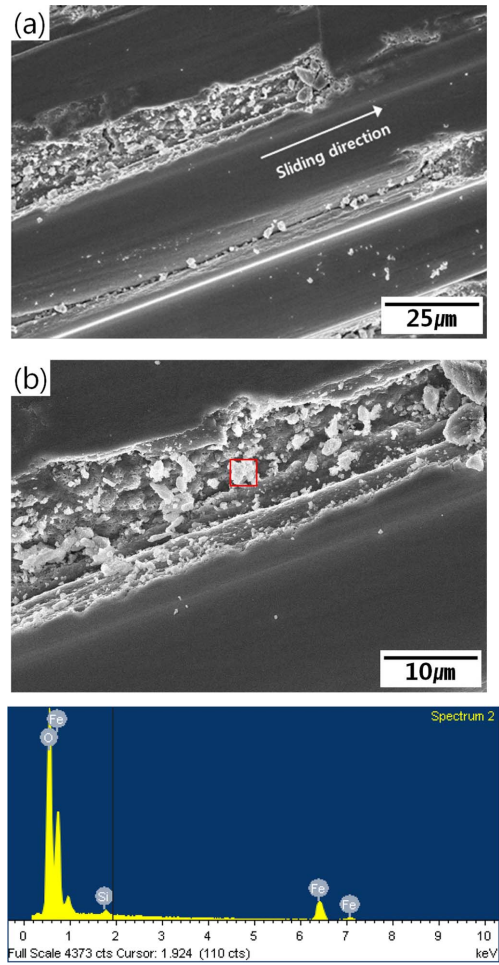


Fig. 6. SEM images and chemical analysis of wear debris (formed in Fig. 6b) on the worn surface of pin specimen with preoxidation sliding against disc specimen for 1200 s.

후 20 N의 하중을 가하면서 디스크 시편을 회전시켜 미끄럼 접촉 고온마모 시험을 900°C에서 20분 동안 실시한 다음, 핀 시편의 마모면 표면의 미세 조직과 마모면 위에 형성된 마모 부스러기의 성분을 분석한 결과이다. 우선 미세조직을 보면 미끄럼 접촉방향에 따라 검은 색으로 나타난 반질반질한 층과 흰 색의 내부가 드러난 부분 및 마모 부스러기들이 형성되었고 그 성분을 분석한 결과 Si를 함유한 Fe 산화물임을 확인하였다. 그림 4의 예비산화하지 않은 경우에 비해 마모 부스러기들이 그림 6(a)에 나타난 바와 같이 주로 흰 색의 내부가 드러난 부분에 집중적으로 분포하여 마모 부스러기들이 서로 인접하여 있으며 우측 상단부에 검은 색의 반질반질한 층으로 흰 색의 내부가 드러난 부분의 일부가 덮여져 나타나는 것을 알 수 있다. 그림 7은 미끄럼 접촉 고온마모 시험시 상대재로 쓰인 디스크 시편의 마모면 표면을 관찰하고 성분을 분석

한 결과이며, 그림 5의 예비산화하지 않은 경우에 나타난 움푹 파인 영역이 나타나지 않고 미끄럼 방향을 따라 압착되어 변형된 영역이 주위에 비해 어두운 색을 띠며 형성되었으며 마모 부스러기가 거의 없는 표면에 다공성의 비교적 촘촘한 Fe 산화물층이 형성되었음을 분석을 통해 확인하였다.

#### 4. 고 찰

피어싱 플러그 소재인 핀 시편을 900°C에서 10분 동안 가열된 디스크 시편에 접촉시켜 15분동안 유지하여 예비산화시킨 경우, 20N의 하중을 가하면서 900°C에서 20분동안 미끄럼 접촉 고온마모 시험을 실시하기 전에 핀 시편의 표면에 산화층(oxide layer)이 생성된 반면에, 핀 시편을 디스크 시편에 접촉시킨 후 즉시 20 N의 하중을 가하면서 동일한 방법으로 미끄럼 접촉 고온마모 시험한 경우에는

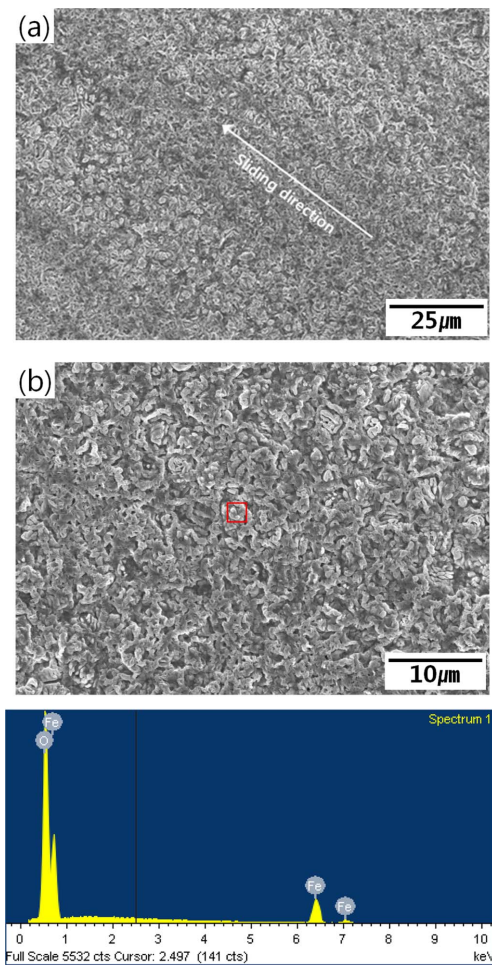


Fig. 7. SEM images and chemical analysis of wear debris (formed in Fig. 7b) on the worn surface of disc specimen sliding against pin specimen with preoxidation for 1200 s.

하중을 가하기 전에 핀 시편의 표면이 금속기이다. 이때 디스크 시편의 표면에는 핀 시편과 접촉하기 전에 900°C에서 10분동안 가열 중에 이미 산화층이 형성되므로 미끄럼 접촉 고온마모 시험시 하중을 가하기 시작할 때, 핀 시편과 디스크 시편의 접촉면 표면이 핀 시편을 예비산화시킨 경우에는 산화물-산화물(oxide-oxide)이며 예비산화시키지 않은 경우에는 금속-산화물(metal-oxide)이 된다.

그림 2에 나타난 예비산화시키지 않은 경우 마찰계수값이 초기에 증가하는 주 원인은 핀 시편의 금속기지와 디스크 시편의 산화물의 접촉표면의 울퉁불퉁한 면(asperity)이 변형되고 울퉁불퉁한 면이 서로 접하는 영역(asperity junction)에 작용하는 분자의 응착에 의해 마찰력이 작용하는데 기인한다고 생각된다<sup>5)</sup>. 그 다음에 마찰계수값이 약 0.3~0.6의 범위에서 비교적 심한 변화(relatively larger fluctuations)를 보이는 것은 그림 3(b)와 그림 4에 나타난 바와

같이 미끄럼 접촉 고온마모 시험이 진행됨에 따라 Fe 산화물인 마모 부스러기가 한군데로 모여져 뭉쳐지지 못하고 흩어져 불연속적인 산화층과 금속기지의 굴곡면이 핀 시편의 마모면 표면에 생성되고 일부 접촉 표면에 드러난 금속기지와 디스크 시편의 다공성의 산화층으로 인해 디스크 시편이 연삭(abrasion)되어 움푹 파인 영역(groove)이 그림 5에 나타난 바와 같이 생성되는데 주 원인이 있다고 생각된다. 또한 마찰계수값이 800초 이후에 감소하여 약 0.4에 수렴하여 거의 일정한 값을 보이는 것은 디스크 시편의 압착되어 변형된 산화층 영역과 핀 시편의 반질반질한 산화층이 주된 접촉표면, 즉, 트리보쌍(tribopair)이 되어 접촉영역에서 분자의 응착에 의한 마찰력의 증가요인이 현저히 낮아지는데 주 원인이 있다고 생각된다.

한편 예비산화시킨 경우에는 그림 2에 나타난 바와 같이 마찰계수값이 초기에 감소하여 약 0.4에 수렴하여 거의 일정한 값을 보인다. 이는 미끄럼 접촉 고온마모 시험이 진행됨에 따라 생성된 Si를 함유한 Fe 산화물인 마모 부스러기가 그림 6과 그림 7에 나타난 바와 같이 서로 인접하여 뭉쳐지고 다져져서(agglomeration and compaction) 그림 3(c)와 같이 핀 시편의 마모면 표면에 치밀하고 연속적인 산화층이 형성되어 상대재인 디스크 시편과 접촉영역에서 작용하는 분자의 응착에 의한 마찰력의 증가요인이 현저히 낮아지는데 주로 기인한다고 생각된다<sup>5)</sup>. 이때 디스크 시편의 접촉면 표면은 미끄럼 방향을 따라 Fe 산화물이 압착되어 변형된 영역이 주위에 비해 어두운 색을 띠며 형성되는 것을 그림 7에서 볼 수 있으며, 그림 3(c)의 핀 시편의 마모면 표면에서 치밀하고 연속적인 산화층의 형성과정은 그림 6에 미끄럼 방향을 따라 검은 색으로 나타난 반질반질한 층이 덮여지면서 겹겹이 쌓여 소결(sintering)되면서 진행된다고 판단된다<sup>6)</sup>. 이와 같이 형성된 디스크 시편의 접촉면 표면의 압착변형된 산화층 영역과 핀 시편의 표면의 치밀하고 연속적인 산화층의 트리보쌍(tribopair)이 미끄럼 접촉 고온마모 시험이 진행됨에 따라 유지되어 그림 2와 같이 예비산화시킨 경우 마찰계수값이 약 0.4에 수렴하여 거의 일정한 값을 나타낸다고 생각된다.

피어싱 플러그 소재인 핀 시편을 미끄럼 접촉 고온마모 시험 중에 하중을 가하기 전, 900°C로 가열된 디스크 시편에 접촉시켜 예비산화시킬 때 화학적 산화(chemical oxidation)와 탈탄(decarburization) 반응이 일어나 핀 시편의 표면에 산화물이 형성되고 그 산화층 직하에는 그림 3(c)에 나타난 바와 같이 탈탄층의 조대한 페라이트 조직이 형성되었다고

판단된다. 표 3에 핀 시편의 마모면 직하 단면의 경도를 측정된 결과에서 예비산화시킨 경우 경도가 가장 낮게 나타나는 것은 위의 사실을 입증해주고 있다. 결과적으로 미끄럼 접촉 고온마모 시험 중에 하중을 가함에 따라 형성되는 핀 시편의 치밀하고 연속적인 산화층이 표면직하의 탈탄층의 조대한 페라이트의 결정입계를 따라 침투되어 산화층을 지지하고 있는 금속기지의 입계파손이 예측된다. 이와 함께 거의 일정한 값의 비교적 낮은 마찰계수를 보이며 마모 보호층(wear-protective layers)의 역할을 하는 핀 시편의 치밀하고 연속적인 산화층도 결국 파손될 것이다.

## 5. 결 론

피어싱 플러그 소재인 0.2C-2.9Ni-1.5Cr-0.25Mo-0.14W강과 심리스 튜브용 빌렛 소재인 0.2C강(ASME SA210C)를 사용하여 각각 핀과 디스크 시편을 제작한 다음, pin-on-disc형 고온마모시험기에 실험한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 피어싱 플러그 소재인 핀 시편을 900°C에서 10분동안 가열된 디스크 시편에 접촉시켜 15분동안 유지하여 예비산화시킨 경우, 20 N의 하중을 가하면서 900°C에서 20분동안 미끄럼 접촉 마모시험 중에 마찰계수값이 초기에 감소하여 비교적 낮은 값인 약 0.4에 수렴하여 거의 일정한 값을 보인 반면, 예비산화시키지 않은 경우에는 초기에 증가하

여 약 0.3~0.6 범위에서 비교적 심한 변화를 나타냈다.

2. 핀 시편을 예비산화시킨 경우 미끄럼 접촉 고온마모 시험 후 핀 시편의 마모면 표면에 형성된 치밀하고 연속적인 Fe 산화층이 표면직하의 탈탄층의 조대한 페라이트의 결정입계를 따라 침투되어 나타났으며, 그 원인은 Fe 산화층을 지지하는 금속기지의 낮은 강도에 주로 기인한 것으로 생각된다.

## 후 기

본 연구는 “고효율 발전 보일러(USC)용 ferrite계 Seamless Tube 소재 및 제조기술개발”(과제번호: SUBJID\_000000014361)에 관한 에너지기술개발사업의 일환으로 수행된 결과의 일부입니다.

## References

1. T. Yamakawa, K. Shimoda, US Patent No. US 7,383,710 B2 (2008).
2. H. Kato, K. Komaim Wear, 262 (2007) 36.
3. R. B. Waterhouse, Tribology International, 14 (1981) 203.
4. M. Hajduga, J. Kucera, Oxidation of Metals, 29 (1988) 419.
5. B.-Y. Choi, H.-K. Kim, J. Kor. Inst. Met. Mater., 47 (2009) 667.
6. F. H. Stott, Tribology International 35 (2002) 489.