

Ni-Fe기 Incoloy 825에 미량 Hf, Y 및 Zr 첨가에 따른 고온산화거동

李 雄 宣 · 金 吉 武

충남대학교 재료공학과

The Effects of Hf, Y and Zr Additions on the Oxidation Behavior of Ni-Fe based Incoloy 825 at High Temperature

Woong Sun Lee, Gil Moo Kim

Department of Materials Engineering, Chungnam National University

Superalloys are protected by making a protective Cr_2O_3 or Al_2O_3 layer on the surface when exposed to an aggressive environment at elevated temperature. Recently, studies on the effects of oxidation behavior by the addition of the oxygen active elements in the superalloys have been proceeded, because it improved protectiveness of oxide scales, providing good oxidation resistance to high temperature materials. In this study, the oxidation behavior and morphological features of isothermally and cyclically tested Incoloy 825 with 1wt% of Hf, 0.5wt% of Zr, and Y additions were investigated in air at 1000°C and 1100°C. The OAE added Incoloy 825 alloys showed better oxidation resistance than that without addition. Especially Y added alloy showed the best cyclic oxidation resistance among the alloys tested.

1. 서 론

수퍼알로이(Superalloy)는, VIII족 원소들을 기본으로 하여 고온에서 비교적 높은 응력과 우수한 표면안정성을 요구하는 곳에서 사용하기 위해 개발되어진 것이다. 이러한 수퍼알로이는 항공기(aircraft), 산업용 그리고 선박용 가스 터빈에 쓰인다. 또한 원자력발전소의 핵반응로, 항공기의 몸체, 우주선의 구조물, 석유화학산업의 부산물로부터의 보호 등을 위해 쓰이고 있다.¹⁾ 수퍼알로이중에서 많이 쓰이는 Ni-Fe base 인 경우, FCC matrix에 γ' , γ'' 와 같은 금속간 화합물을 석출시켜서 고온에서도 우수한 기계적인

성질을 유지한다.²⁾ 하지만 단순히 이러한 석출물이 고온에서 재료를 보호할 수는 없다. 그 이유는 고온에서는 산소 등의 가스와의 반응성이 대단히 커지기 때문이다. 그러므로, 이러한 우수한 성질들을 유지할 수 있도록 matrix 합금표면에 열역학적으로 안정하고, 성장속도가 느리며, 접착력이 좋은 Al_2O_3 , Cr_2O_3 같은 산화막을 생성시켜 matrix 합금을 보호한다.³⁾ 그러나, 이러한 보호피막은 산화피막의 성장에 따른 growth stress와 사용중의 mechanical strain에 의한 응력을 받게 된다. 또한 고온재료는 일정한 온도에서 연속적인 사용보다는 일정시간동안의 사용 후에는 사용이 중단되므로 온도변화에 따른 모

재와 산화피막간의 열팽창계수 차이에 의한 thermal stress를 발생시킨다.⁴⁾ 이러한 응력은 산화피막이 균열, matrix 합금으로부터의 산화피막의 박리 등을 일으켜 파괴가 일어나면, matrix 합금에 함유되어 있던 보호막 형성원소가 표면으로 확산되어 보호막이 재생성되어 재료를 보호한다. 이러한 현상의 반복으로 합금중 보호피막을 형성하는 원소가 고갈되어 결국 재료는 수명을 다하는 것이다. 형성된 보호피막을 장시간 유지하는 것이 바람직하므로 산화피막과 기지합금 사이의 접착력을 향상시키기 위해 oxygen active element인 Hf, Y, Zr 등을 미량 첨가하기도 한다.⁵⁾ 본 연구실에서 사용된 Ni-Fe base인 Incoloy 825의 고온산화에 대한 연구가 진행되어 왔는데,^{6,7)} Incoloy 825는 등온산화분위기에서는 표면에 Cr 산화물을 형성하여 비교적 양호한 산화특성을 나타내지만, thermal-cycling 분위기에서는 초기에는 Cr 산화층이 보호적인 역할을 하나 시간이 경과함에 따라 Cr 산화층의 파괴에 의한 Mo 및 Nb의 산화물이 형성되어 후기에는 산화저항성이 심각하게 나빠졌다. 본 연구에서 내산화성을 향상시키고자 첨가한 oxygen active element의 효과는 Cr 산화물이나 Al 산화물을 형성하는 합금에 산화피막을 형성하는 원소보다 더 산소에 대한 친화력이 큰 원소를 미량첨가하여 산화피막의 기지합금에 대한 접착력을 개선시키는 것을 말한다.⁸⁾ 등온산화시에 OAE에 의한 효과는,⁵⁾ (1) 핵생성과 Cr이나 Al의 선택산화를 촉진시키고 연속적인 보호층을 발달시킨다. (2) Cr₂O₃의 성장속도를 감소시키는 경우가 있으며 Al₂O₃의 경우 증진시키는 경우가 있다. (3) OAE는 산화물을 형성하는 원소의 확산을 억제하여 산화층의 성장과정에 영향을 준다. (4) 보호피막 성장기구의 변화로 성장이 감소한다. (5) subscale로 침투되는 peg을 형성시켜 산화층이 금속에 대해 기계적으로 고정되게 한다. 즉 계면의 부착성을 증진시킨다. (6) vacancy의 응축자리를 제공함으로써

metal/scale계면에서 void의 형성을 감소시킴으로써 부착성을 향상시킨다. (7) OAE는 metal/scale계면에 걸쳐 화학결합을 증진시켜 부착성을 증진시킨다. (8) 황(sulfur)같은 불순물이 있을 경우 OAE는 이들과 강력히 결합하여 metal/scale계면에 void형성을 억제시킨다. (9) OAE의 첨가는 scale의 plasticity를 증진시켜 scale의 growth stress를 감소시킨다. 그러나 자기 다른 연구자에 의해 제안되어 어느경우에도 명확하게 적용되는지 여부가 밝혀지지 않아 이에 대한 연구가 필요하다. 이러한 OAE의 효과를 본 연구에서는 국내에서 생산되는 Incoloy 825의 고온산화거동에 관한 기존 연구를 토대로 oxygen active element인 Hf, Y, Zr 등을 첨가하여 기지합금위에 산화피막의 형성과정과 oxygen active element에 의해 모재와 산화피막 접착력이 어떻게 변하는지를 규명하여 국내에서 생산되는 superalloy인 Incoloy 825의 고온에서의 내산화성을 향상시키는데 필요한 자료를 제공하고자 한다.

2. 실험방법

본 연구에 사용된 시편은 국내에서 생산되는 Incoloy 825에 희토류금속인 hafnium, zirconium, yttrium을 제 3원소로 각각 1 wt%, 0.5 wt%, 0.5 wt%를 첨가하여 진공 arc로에서 채용해하였다. 시편의 균일한 합금성분구조를 위해 5회이상 채용해를 실시하였다. ingot는 지름 20mm, 높이 10mm의 버튼모양으로 주조되었으며, 이를 다시 1.5mm×5mm×7mm 형태의 시편으로 가공하였다. 또한 표면을 SiC 연마지로 #600까지 연마한 후 acetone 용액에 넣어 초음파 세척기로 세척하여 건조시킨후 반응전의 시편의 크기 측정으로 표면적을 계산하였다. 시편의 무게는 0.1 mg까지의 정밀도를 갖는 미국 Fisher사의 화학천칭을 이용하여 측정후 실험하였다. 시편의 산화현상 및 반응속도를 관찰하기

위하여 등온산화실험을 하였다. 일정온도에서 산화시의 중량변화를 관찰하기 위하여 CAHN 2000 microbalance 를 사용하였다. 실험분위기는 공기중에서 1000℃, 1100℃ 로 각각 100 시간동안 산화실험하였다. 형성된 산화피막은 피막의 성장에 의한 growth stress 와 온도의 변화에 의한 thermal stress에 의해 응력을 받게 되는데, 고온에서 사용되는 superalloy 는 온도의 변화에 따른 thermal stress 에 의해 피막에 응력집중에 의한 파괴가 일어나서 내산화성을 크게 떨어뜨리므로 이 영향을 검토하기 위해 cyclic 실험을 하였다. cyclic oxidation 을 위한 장치로는 관상로에 일정온도를 유지한후 노내에서 45 분, 상온(25℃)의 공기중에서 15 분 유지할 수 있도록 장치를 만들어 실험하였다. 주조된 미세조직을 알아보기 위해서 에칭후, 광학현미경을 이용하여 관찰하였으며, 형성된 산화물의 종류를 알기 위해 XRD(X-Ray Diffractometer)를 이용하였다. 또한 산화물의 형태를 관찰하기 위해서 주사전자현미경(Scanning Electron Microscopy; SEM)을 이용하였다. 또한 산화물과 금속간의 계면관찰을 위해 시편을 Mounting한 후 0.05 μm 의 알루미늄나 파우더까지 연마하여 세척후 SEM 으로 관찰하고 EDX(Energy Dispersive X-ray Spectrometer)를 이용하여 분석하였다.

3. 실험결과 및 고찰

본 연구에 사용된 시편의 화학성분은 주조한 시편을 습식분석하였으며 그 결과는 Table 1 과

같다. Incoloy 825 시편은, 기지성분인 Fe 의 함량이 많고, 상대적으로 Ni 의 함량은 적음을 알 수 있다. OAE 의 함량은 Incoloy 825 에 Hf, Zr, Y 을 첨가한 경우, 0.52, 0.6 그리고 0.7wt% 씩 첨가된 것으로 나타났다.

3.1 Kinetics

Fig. 1 은 산화속도와 반응메카니즘을 살펴보기 위해 CAHN2000 microbalance 를 이용하여 1000℃ 공기중에서 100 시간 등온산화시킨 결과이다. 일단 일정온도로 가열된 노에 CAHN2000 microbalance 와 연결된 시편을 넣어 연속적인 무게의 변화를 보았다. Fig. 1 은 Incoloy 825,

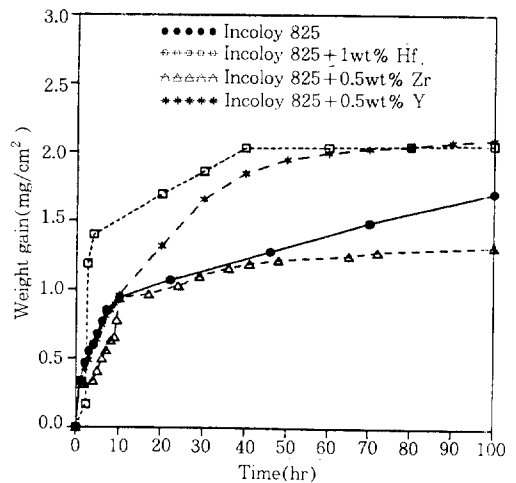


Fig. 1. Isothermal oxidation results for the Incoloy 825, +Hf, +Zr, +Y tested in air at 1000℃ for 100 hours.

Table 1. Chemical compositions of the superalloys used.(wt%)

Element Alloy	Ni	Cr	Mo	Nb	Al	Ti	Fe	Mn	Si	C	Cu	etc	OAE
Incoloy 825	43.8	22.6	2.0	0.03	0.05	0.80	28.3	0.12	0.17	0.01	2.17	s<0.007	-
825+Hf	43.3	22.3	1.73	0.01	0.12	0.92	28.7	0.13	0.15	0.002	2.11	s<0.006	Hf 0.52
825+Zr	43.7	21.5	2.5	<0.1	0.1	0.9	28	0.1	0.3	-	2.0	s<0.007	Zr 0.6
825+Y	43.5	21	2.5	<0.1	0.1	1.0	28	0.1	0.2	-	2.0	s<0.007	Y 0.7

Incoloy 825+1wt% Hf, Incoloy 825+0.5wt% Zr, Incoloy 825+0.5wt% Y 시편의 시간에 따른 중량변화를 연속적으로 측정하여 단위면적당 중량변화(mg/cm^2)를 시간의 함수로 나타낸 것이다. Incoloy 825 시편의 경우, 초기 10 시간까지 무게가 급격하게 증가한 후 100 시간까지 서서히 무게가 증가하였다. Hf이 첨가된 경우에는 초기 약 4 시간까지 무게가 급격히 직선적으로 증가하였으며, 40 시간까지 서서히 증가한 후 100 시간까지는 약간의 무게증가만 있었다. Zr이 첨가된 경우에는 약 40 시간까지는 Incoloy 825 시편과 산화거동이 비슷하였으나 40 시간 이후의 무게변화는 더욱 적었다. Incoloy 825+Y 시편은 100 시간 산화후 $2.1\text{mg}/\text{cm}^2$ 으로써 무게증가가 가장 많았고, Incoloy 825+Hf 시편은 100 시간 경과후 $2.06\text{mg}/\text{cm}^2$ 로 무게가 증가하였고, Incoloy 825 시편은 100 시간 경과후 $1.71\text{mg}/\text{cm}^2$ 로 무게가 증가하였으며, Incoloy 825+Zr 시편은 100 시간 경과후 $1.32\text{mg}/\text{cm}^2$ 로 무게증가가 네개의 시편중 가장 적었다. 1000°C 에서의 산화실험결과 산화속도차이가 있지만, 뚜렷한 차이를 보이지 않아서 1100°C 에서 다시 산화속도를 측정하였다. 1000°C 에서와 마찬가지로 공기중에서 산화시간에 따른 무게변화는 Fig. 2 와 같다. 1000°C 와는 달리 중량변화는 $\text{Incoloy 825+Zr} > \text{Incoloy 825+Y} > \text{Incoloy 825} > \text{Incoloy 825+Hf}$ 의 순서로 나타났다. Incoloy 825의 경우 100 시간후 $2.61\text{mg}/\text{cm}^2$ 로 무게가 증가하였다. Zr이 첨가된 경우는 $3.85\text{mg}/\text{cm}^2$ 로 무게가 증가하여 1000°C 에 비하여 $2.53\text{mg}/\text{cm}^2$ 이나 증가하였다. Zr을 첨가함으로써 1100°C 에서 내부산화 촉진시킨 것으로 보이며 Smialek 등의 결과와 일치한다.⁹⁾ Hf이 첨가된 경우는 100시간이 경과한 후에 $2.17\text{mg}/\text{cm}^2$ 로 증가하여 1000°C 때와 비교하여 약 $0.55\text{mg}/\text{cm}^2$ 정도의 무게증가밖에 일어나지 않았다. 또한 1000°C 에서 가장 많은 무게증가를 보였던 Y를 첨가한 시편은 $2.78\text{mg}/\text{cm}^2$ 의 무게증가를 보였다. 하지

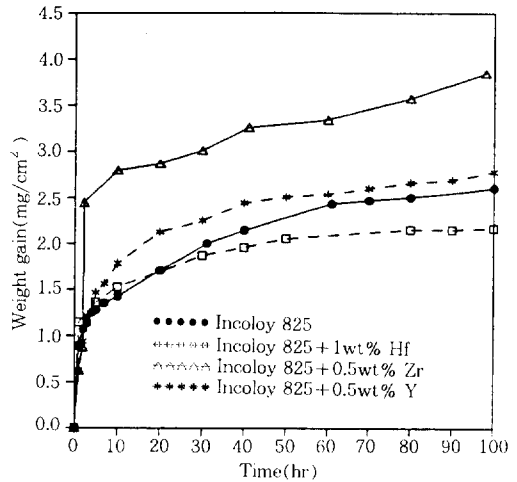


Fig. 2. Isothermal oxidation results for the Incoloy 825, +Hf, +Zr, +Y tested in air at 1100°C for 100 hours.

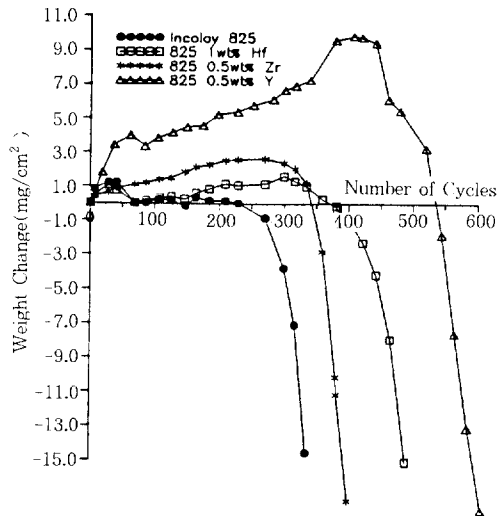


Fig. 3. Cyclic oxidation results for the Incoloy 825, +Hf, +Zr, +Y tested in air at 1000°C .

만 산화기구를 규명하기 위한 등온산화실험으로는 내산화성향상에 대한 뚜렷한 증거를 얻을 수 없어서 cyclic 산화실험을 하였다. 1000°C 에서 Incoloy 825와 OAE를 첨가하여 cyclic 산화실험한 결과는 Fig. 3과 같다. OAE를 첨가하지 않은 시편은 229 cycle까지 lifetime이 지속되었

다. Zr을 첨가한 경우에는 340 cycle에서 시편이 파괴되었으며, Hf을 첨가한 경우에는 359 cycle에서 시편이 파괴되었고 Y을 첨가한 경우가 535 cycle로 가장 오랜 lifetime을 가지는 것으로 나타났다. 특히 Y을 첨가한 경우에는 약 450 cycle까지 무게감소 없이 다른 원소를 첨가한 것과는 달리 더욱 무게증가가 많았다. Y을 첨가한 시편 > Hf을 첨가한 시편 > Zr을 첨가한 시편 > Incoloy 825 시편의 순으로 lifetime이 길게 나타나 OAE를 첨가함으로써 내산화성의 뚜렷한 향상을 가져옴을 알 수 있고 더우기 Y이 Hf나 Zr에 비해 내산화성을 더욱 향상시키는 것으로 생각된다.

3.2 Metallography and Microanalysis

Fig. 4은 Incoloy 825와 OAE를 첨가한 시편에 대해 1000℃, 공기중에서 100시간동안 등온산화시킨 후의 표면 XRD 결과이다. OAE를 첨가하지 않은 시편의 경우에 있어서는 주로 Fe₃O₄와 (Cr, Fe)₂O₃ 산화물이 주를 이루는 것으로 나타났다. 그러나 OAE를 첨가한 경우에는 이와 다른 양상을 보임을 알 수 있다. Hf을 첨가한 경우에는 첨가하지 않은 시편에 비해서 Cr₂O₃ 산화물이 비교적 강하게 나타나고 있으며, 상대적으로 Fe₃O₄ 산화물은 적었다. Zr을 첨가한 경우에는 Hf을 첨가한 경우보다 더 Cr₂O₃ 산화물이 많이 나타나고 있다. Y을 첨가한 경우에는 Hf, Zr을 첨가한 두 경우보다 더 Cr₂O₃ 산화물이 많이 발달함을 볼 수 있다. 즉 OAE를 첨가함으로써 Cr의 선택산화를 촉진시켰다고 생각된다. 이들 1000℃ 공기중에서 100시간 동안 산화시킨 시편들의 계면관찰을 위해 단면을 SEM과 EDX로 관찰 분석하였다.

Fig. 5는 이들의 단면사진이다. (a)는 Incoloy 825 (b)는 Hf을 첨가한 시편 (c)와 (d)는 각각 Zr과 Y을 첨가한 시편이다. EDX 결과 네시편 모두 A로 표시된 산화층은 대부분 Cr 산화물이었다. 그러나 표면의 XRD 결과에 나타난 Fe 산

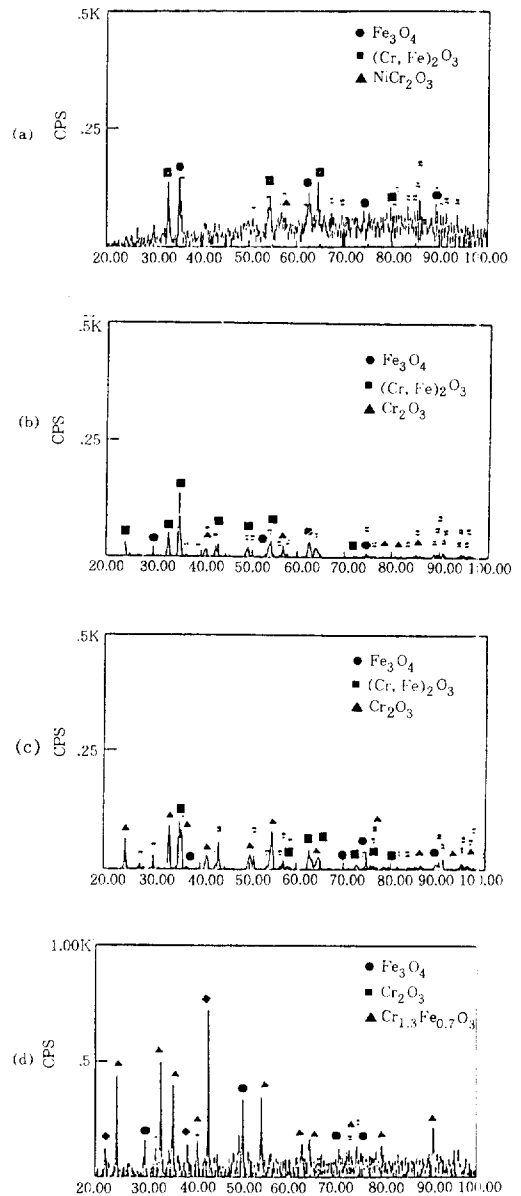


Fig. 4. XRD patterns of the oxidized surface of samples after oxidation at 1000℃ in air (a) Incoloy 825 (b) 825+Hf (c) 825+Zr (d) 825+Y.

화물은 산화반응초기에 형성되었던 산화물이 표면에 남아 있는 것으로 생각되며 단면에 나타난 산화물층은 대부분 Cr 산화물이었다. (a)의 B

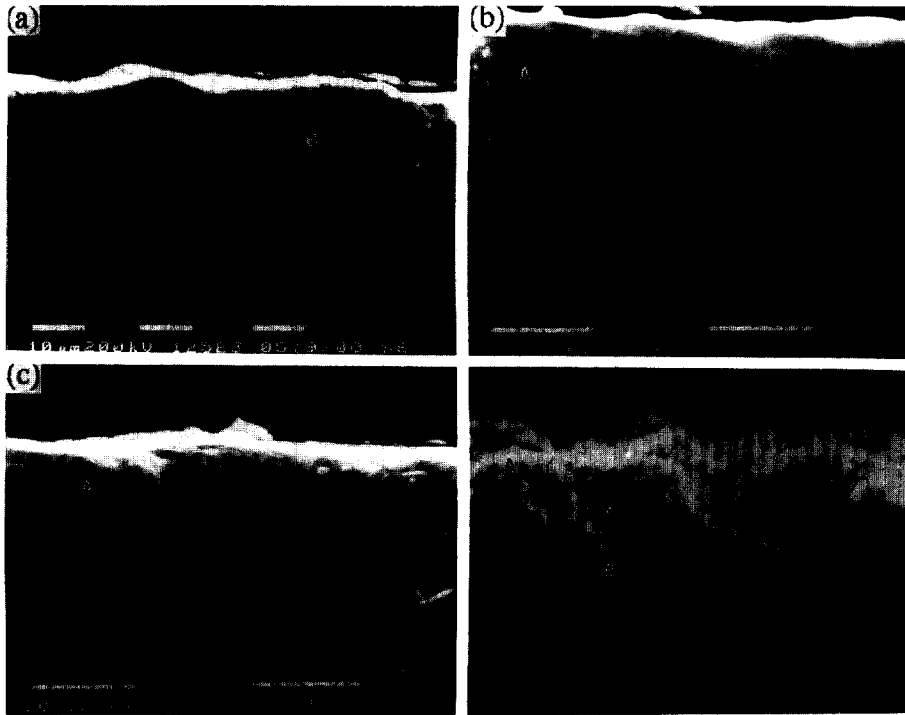


Fig. 5. Transverse section of samples tested in air at 1000°C for 100 hours (a) Incoloy 825 (b) 825+Hf (c) 825+Zr (d) 825+Y.

부분은 Ti 산화물이었고, 이는 산소가 내부로 확산하여 산화층 밑부분에서 Cr_2O_3 보다 열역학적으로 안정한 TiO_2 의 내부산화물(internal oxide)을 형성한 것으로 생각된다. 산화층의 두께는 약 $10\ \mu\text{m}$ 정도이다. 산화물의 형상은 고르고 보호적인 역할을 할 수 있는 것처럼 보이지만 상당히 굴곡이 있으며, 내부산화가 일어난 것을 알 수 있다. (b)는 Hf를 첨가한 경우로 산화층의 두께는 약 $14\ \mu\text{m}$ 이다. 산화층은 OAE를 첨가하지 않은 경우에 비해 상당히 두껍게 형성됨을 알 수 있고 이는 Fig. 3에서 보았듯이 Hf를 첨가한 경우 OAE를 첨가하지 않은 경우보다 100 시간 후의 산화속도가 빨랐음과 일치하는 것이다. 또한 Hf를 첨가한 경우에는 산화층이 고르게 형성되었고, 굴곡이 없이 잘 접착되어 있음을 알 수 있다. 내부산화물은 거의 보이지 않았다. (c)는 Zr를 첨가한 경우이

며 1000°C에서 Hf를 첨가한 경우나 첨가하지 않은 경우에 비해 Zr를 첨가한 경우는 단면사진에서 보듯이 약 $8\ \mu\text{m}$ 정도의 산화층 두께를 보여 다른 시편에 비하면 산화가 적게 일어났다. Hf를 첨가한 경우와 마찬가지로 역시 산화물층이 고르게 잘 접착되어 있음을 볼 수 있고 내부산화는 거의 볼 수 없었다. (d)는 Y를 첨가한 경우의 단면 morphology이다. 산화층이 다른 세 경우와 비교해서 가장 불안정하였다. 표면에 산화층이 고르게 분포하는 것이 아니고, 내부산화가 많았으며 특히 B 부분에서는 Y 산화물이 상당량 Ti 산화물과 같이 혼재되어 있었는데, Y와 Ti의 복합산화물의 형성에 의해서 내부산화를 촉진시킨 것으로 보인다.

Fig. 6은 1100°C에서 100 시간 등온산화시킨 후의 표면 XRD 결과이다. 무게증가가 제일 많은 Zr를 첨가한 시편의 경우에 있어서 1000°C

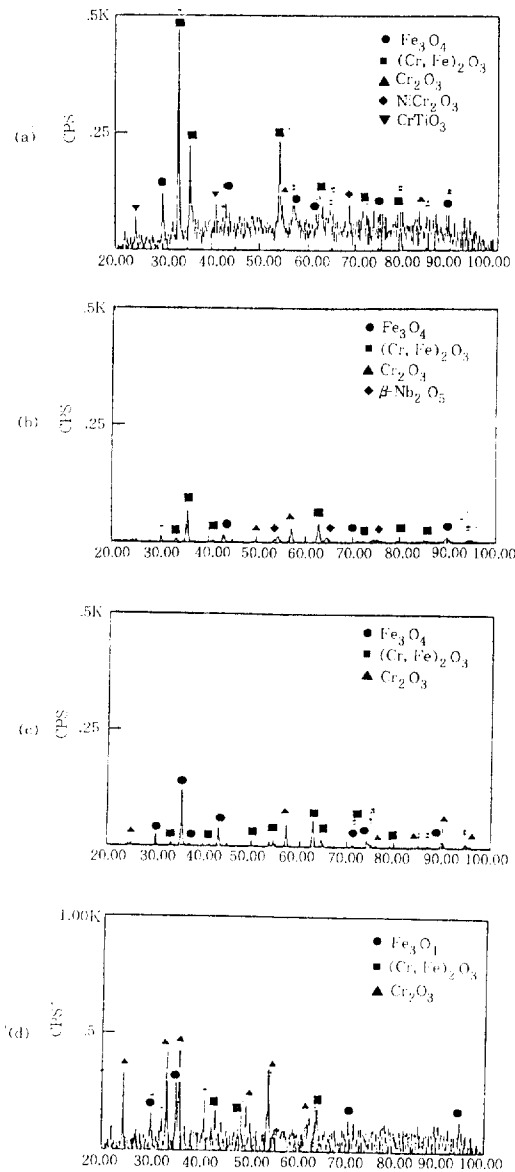


Fig. 6. XRD patterns of the oxidized surface of samples after oxidation at 1100°C in air (a) Incoloy 825 (b) 825+Hf (c) 825+Zr (d) 825+Y.

때와는 달리 Fe_3O_4 산화물이 늘어난 것을 볼 수 있다. OAE를 첨가하지 않은 경우에는 주로 Fe 산화물이 주종을 이루고 있다. 특히 Y를 첨가한 경우에는 1000°C 때와 마찬가지로 산화물

이 주로 Cr 산화물임을 알 수 있는데, 다른 OAE들보다 특히 Y이 더욱 Cr의 선택산화를 촉진시킨 것으로 보인다.

Fig. 7은 이들의 단면 SEM 사진이다. A로 표시된 산화층은 1000°C 때와 마찬가지로 Cr 산화물이었다. (a)의 경우 산화층 두께는 약 $2(\mu\text{m})$ 정도이다. B 부분은 산소가 내부로 확산해서 이룬 Ti의 내부산화물이다. 산화층이 1000°C에 비해 상당히 두꺼워졌으나, 1000°C 보다는 상당히 안정된 고른 산화층을 보여주고 있다. (b)에서 Hf을 첨가한 경우, 산화층이 고르지 못하고 접착력이 우수하지 못함을 확인할 수 있다. 산화층 두께도 상당히 얇게 생성되었다. (c)는 Zr을 첨가한 경우인데, 내부산화가 많이 일어났으며 산화층 A와 B 부분등에서 Zr의 산화물이 형성되어 있었다. B 부분에서 희게 보이는 부분이 Zr 산화물이고 검게 보이는 곳은 Cr 산화물이다. 즉, Cr 산화물내에 Zr 산화물이 형성되어 있는 것이다. 이러한 것으로 보아 1100°C에서는 Zr을 첨가한 경우 내부산화를 촉진하는 것으로 나타났다. Fig. 2의 결과에서 보듯이 무게증가가 가장 많이 나타난 것과 Fig. 7의 (c)에서 보듯이 외부산화뿐만 아니라 내부에도 산화가 일어나 산화속도가 증가한 것으로 보인다. Smialek 등이 보고한 바에 의하면⁹⁾ 표면에 Al_2O_3 를 형성하는 NiCrAl 합금에 Zr을 첨가한 경우에 있어서 1100°C에서 산화시켰을 때, 내부의 void 쪽으로 산화물이 발달하고 내부산화가 촉진되어진 것으로 알려졌는데, 그의 결과와 일치하는 것으로 보인다. (d)는 Y를 첨가한 경우이다. 산화속도가 Zr 보다는 느리게 나타났지만 내부산화가 많이 일어났고, B부분과 같은 내부 Cr산화물에서 Y산화물이 나타났다. 이것으로 보아 Fig. 6에서 보았듯이 Y이 Cr의 선택산화를 촉진시킨 것으로 생각된다. 1000°C와 1100°C의 경우를 종합해 볼때, 1000°C에서는 Zr을 첨가한 경우 산화속도가 느린 것은 1100°C에 비해서 내부산화가 적게 일어난 것으로 생각되며, 동온산화 실

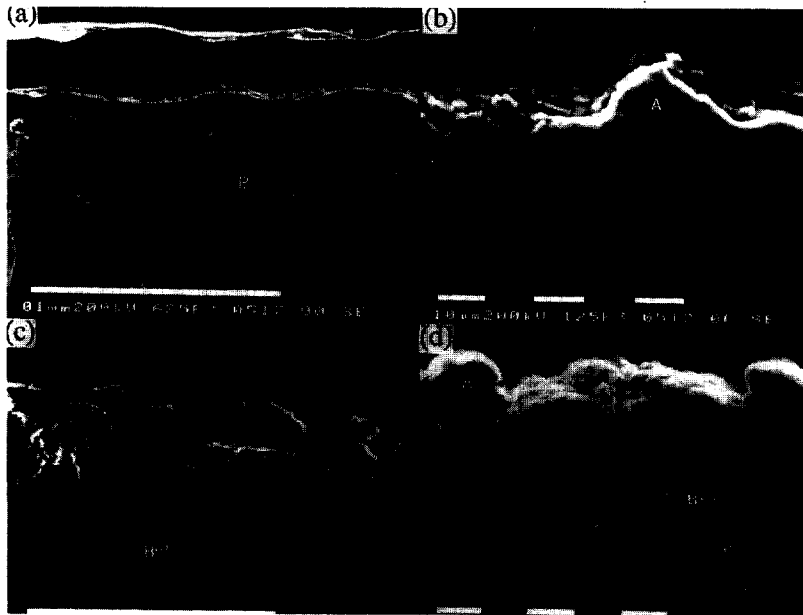


Fig. 7. Transverse section of samples tested in air at 1100°C for 100 hours (a) Incoloy 825 (b) 825+Hf (c) 825+Zr (d) 825+Y.

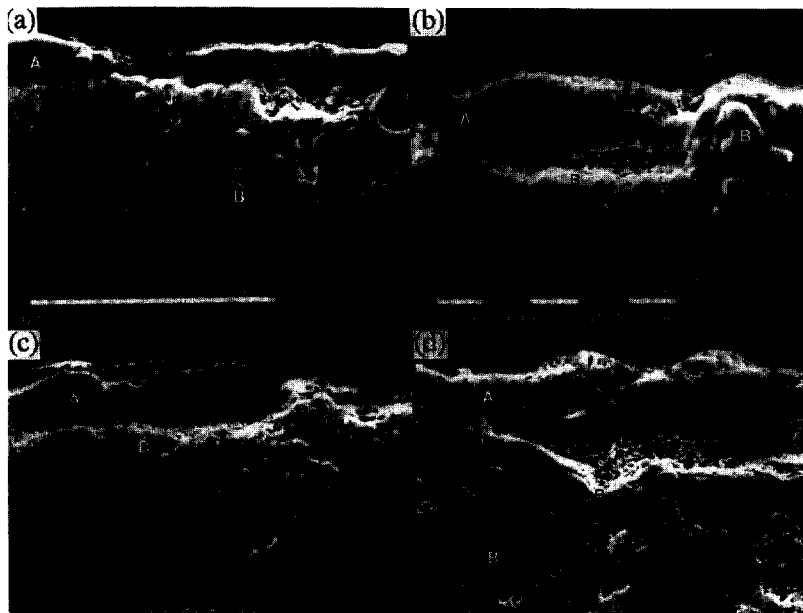


Fig. 8. Transverse section of samples cyclically tested in air at 1000°C (a) Incoloy 825 (for 359 cycles) (b) 825+Hf (for 552 cycles) (c) 825+Zr (for 552 cycles) (d) 825+Y (for 825 cycles).

험에서는 크게 차이를 볼 수 없으나 OAE를 첨가함으로써 집착력을 향상시키고 Cr의 선택산

화를 촉진하여 내산화성을 향상시킨 것으로 생각된다. 특히 Zr의 경우에는 1000°C보다는

1100°C에서 더욱 내부산화를 촉진시키는 역할을 하는 것으로 나타났고, Y은 두 온도구역 모두에서 산화를 촉진시키는 것으로 나타났다.

등온산화실험만으로는 내산화성의 향상여부를 알 수 없어 cyclic 산화실험을 하였는데, Fig. 3에서 본것과 같이 OAE를 첨가함으로써 lifetime을 향상시킬 수 있었다. Fig. 8은 1000°C에서 cyclic 실험을 한후의 단면 SEM 사진이다. 시편들은 모두 30mg/cm² 이상 무게 감소가 일어나 시편이 완전히 파괴된 후에 단면을 분석하였다. 네 시편 모두 A로 표시된 외부산화층은 보호적인 역할을 하던 Cr 산화물이 파괴되어 확산되어 나온 Fe, Ni 산화물 등이 형성되어 있었다. 각 사진의 B 부분이 보호적인 역할을 하던 Cr 산화물이다. OAE를 첨가한 경우에 시편이 파괴되었음에도 불구하고 Cr 산화물층이 고르게 잘 접착되어 남아 있었다. 특히 lifetime이 다른 OAE보다도 100 cycle 이상 길었던 Y첨가한 시편의 경우 Fig. 8의 (d)에서 보듯이 내부에 B 부분들과 같이 Cr 산화물이 더욱 많이 나타났다. 이는 Y이 Cr의 선택산화를 촉진시키고 이들 Cr 산화물의 접착성을 더욱 향상시켜 내산화성을 향상시키는 것으로 생각된다.

4. 결 론

국내에서 생산된 superalloy인 Incoloy 825 시편에 대해 내산화성 향상을 위하여 Hf, Zr, Y을 1 wt %, 0.5wt%, 0.5 wt% 씩 첨가하여 채용해시킨 후 공기중 1000°C, 1100°C에서 등온산화실험과 cyclic 산화실험결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 등온산화실험결과, 산화속도는 1000°C에서는 Incoloy 825+Y>825+Hf>825>825+Zr 순으로 빨랐으며 1100°C에서는 825+Zr>825+Y>825>825+Hf 순이었다. 이는 OAE를 첨가함으로써 Cr의 선택산화를 촉진시키고 산화피막의 접합성을 개선시켰으며, 1100°C에서는 Zr이 내부산화를 촉진시킨 것으로 사료된다.

2. 1000°C와 1100°C 공기중에서 100 시간동안 등온산화시킨결과, OAE를 첨가함으로써 Cr의 선택산화를 촉진시켰고, 더우기 Y은 Cr의 선택산화를 Hf이나 Zr보다 더욱 촉진시켰다.

3. 1000°C cyclic 실험결과 OAE를 첨가한 경우 Cr 산화물의 접착성을 향상시켜 lifetime이 100 cycle 이상 향상되었다. 특히 Y은 Cr의 선택산화를 더욱 촉진시키고 접합성을 향상시켜 Hf이나 Zr을 첨가한 경우보다 100 cycle 정도 더 lifetime이 향상되었다.

(후 기)

본 연구는 1993년도 문교부지원 학술진흥재단 신소재분야 연구지원에 의해 수행된 것으로 이에 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. Matthew J. Donachie Jr., *Superalloys Sourcebook*, ASM. (1984) 3.
2. Chester T. Sims, Norman S. Stoloff, William C. Hagel, *Superalloys II.*, John Wiley & Sons, (1987)
3. G. H. Meier and N. Birks, *Introduction to High Temperature Oxidation of Metals*, Edward Arnold. (1983) 54.
4. Chang-Oh Moon, Soon-Bok Lee, *Oxidation of Metals*, 39 (1993) 1.
5. A. Rahmel and M. Schutz, *Oxidation of Metals*, 38 (1992) 255.
6. 강석철, 전영건, 김길무, 한국표면공학회지, 24 (1991) 151.
7. 강석철, 전영건, 김길무, 한국부식학회지, 20 (1991) 291.
8. G. H. Meier, *Materials Science and Engineering*, A120 (1989) 1.
9. James L. Smialek et al, *Metal. Tran.*, 14A. Oct. (1983).