

Ni기 Inconel 601에 미량 Hf, Y 및 Zr 첨가에 따른 고온산화거동

李 雄 宣 · 金 吉 武
충남대학교 공과대학 재료공학과

The Effect of Hf, Y and Zr Additions on the Oxidation Behavior of Ni-based Inconel 601 at High Temperature

Woong Sun Lee, Gil Moo Kim

Department of Materials Engineering, Chungnam National University

Oxygen active elements(OAE), such as Hf, Y and Zr, have been added to high temperature alloys in order to improve oxidation resistance at elevated temperature. Inconel 601 alloys with additions of OAE (about 1 wt% Hf, 0.5 wt % Zr and 0.5 wt% Y) were subjected to isothermal oxidation tests in air at atmospheric pressure at 1000°C and 1100°C to study the oxidation behavior. Cyclic oxidation tests were also carried out at 1000°C and 1100°C to study the adherence of the oxide scale to the alloy substrate. The results of isothermal oxidation tests showed that oxidation rate of Zr added alloy was the fastest among the alloys tested and that of Hf added alloy was slower in both 1000°C and 1100°C than other alloys. It was also shown that Y did not affect the oxidation resistance in the isothermal oxidation experiment. The Inconel 601 with OAE addition improved cyclic oxidation resistance at 1100°C. Y added alloy showed better cyclic oxidation resistance than Zr and Hf added alloys. It seemed that Y improved adherence of oxide scale to the alloy substrate, and developed the Al subscale and resulted in increased lifetime of alloys.

1. 서 론

Ni-Cr 기지 초내열합금인 Inconel 601은 항공 기용으로부터 일반 산업용 발전소의 구조재에 이르기까지 고온에서 광범위하게 사용되고 있다.¹⁾ 최근에 국내 산업발전과 더불어 수요가 급증하고 있으나, 대부분 수입에 의존하고 있으며 주문에 의해 소량 생산되고 있는 실정이다. 일반적으로 고온에서 사용되는 재료는 우수한 기계적인 성질과 표면의 안정성을 동시에 요구하

고 있다.²⁾ 그러나 국내에서는 초내열합금에 대한 기계적인 성질을 향상시키기 위한 물성에 대한 연구는 활발하게 진행되고 있지만 표면의 안정성에 대한 연구는 조금씩 진행되고 있는 실정이다.³⁻⁶⁾ 더욱이 Inconel 601은 대부분 고온에서 사용되어지기 때문에 고온에서 필요한 물성을 유지하기 위해서는 여러가지의 복잡한 화학조성을 가지고 있다. 여기에 함유된 성분들은 산소와 대단히 큰 친화력을 가지고 있는데 고온에서는 산화반응이 더욱 활발하게 일어난다. 이를

방지하기 위해서는 표면에 열역학적으로 안정하고 성장속도가 느린 산화물이 형성되어서 모재를 보호해야 한다. 보통 Ni-Cr계 superalloy에서는 최대 산화저항을 갖기 위한 최소한의 Cr함량(critical minimum concentration of Cr)은 약 15-20 wt%이고, Cr함량이 적을 경우(5-7 wt% Cr)는 오히려 순수 Ni보다 더 악화되는 것으로 나타나 있다.⁷⁾ Birks 등은 20 wt% Cr 이상을 함유하는 Ni-Cr계에서는 매우 좋은 Cr₂O₃의 보호 피막이 형성되어 좋은 산화저항을 갖게 되며 이러한 현상은 NiO가 Cr₂O₃ scale내에 흡수됨으로서 향상된다고 보고하였다.⁸⁾ 보호적인 역할을 하는 Cr산화물의 선택산화를 촉진하기 위해서는 Cr의 농도, scale의 성장속도 및 합금의 상호확산계수 등이 매우 중요하다.⁹⁾ Superalloy의 사용 환경이 대부분 1000℃이상의 고온에서 작동된 뒤에 상온으로 온도가 떨어지기 때문에 thermal cycling에 의해 기지합금과 형성된 보호피막간의 열팽창계수의 차이에 의해서 계면에서 응력이 발생하게 되는 열응력(thermal stress)과 산화피막의 성장시 발생하는 성장응력(growth stress)의 집중에 의해 scale의 spallation이 일어나서 떨어져 나가는데, scale이 떨어져 나가고 재생성되는 과정의 반복에 의해 보호피막을 형성하는 원소가 고갈되어 재료자체를 못 쓰게 된다. 따라서 Ni-Cr계 합금에서 Cr의 함량은 critical minimum concentration이상 유지되어야 하며 적절한 OAE(oxygen active element)를 소량 첨가

하여 피막의 접착력을 향상시키는 것이 바람직하다.

국내에서 생산되고 있는 Inconel 601은 Table 1과 같은 화학조성을 가지고 있어 이러한 조건을 만족시키고 있으며, 고온산화에 대한 연구가 진행되어 왔는데³⁻⁶⁾ 공기중 등온산화의 경우에는 superalloy표면에 Cr산화물을 형성하였으며, Al은 Cr산화층 바로 밑에서 내부산화물로써 고리 혹은 그물 모양을 형성할 때 산화저항에 효과가 있었다.^{4,5)} 또한 cyclic산화거동시 공기중에서 Inconel 601은 1100℃의 경우에도 상당히 우수한 특성을 갖는데 이는 Cr산화층의 형성과 산화층밑에 subscale로 Al internal oxide가 고리모양으로 형성되어 산소의 유입을 차단하고, substrate로부터 cation의 확산을 차단하여 산화저항을 향상시킨것으로 나타났다.

위에서도 언급한 바와 같이 산화피막의 접착력을 향상시키기 위해 OAE 첨가에 대한 연구가 최근 활발한데, 이들 OAE첨가에 대한 효과는 지금까지 다음과 같이 밝혀지고 있다.^{10,11)} (1) scale과 substrate의 접착력을 향상시켜주는 oxide peg을 형성시켜준다. (2) vacancy가 scale과 metal 계면에서 응축하지 못하게 다른 응축자리를 제공한다. (3) scale의 구조를 변경시켜 plasticity를 향상시킨다. (4) scale 성장과정을 변경시킨다. 그러나 위의 설명은 각기 다른 연구자에 의해 제안되어 타당성을 설명하고 있으나 각각 다른 이유에 의하기 보다는 여러가지 종합된 이유

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

element alloy	Ni	Cr	Mo	Nb	Al	Ti	Fe	Mn	Si	C	Cu	etc	OAE
Inconel 601	61.9	22.2	<0.01	0.03	1.42	0.24	13.87	<0.01	0.28	0.03	<0.01	S<0.001	-
601+Hf	61.5	22	<0.01	<0.03	1.3	0.3	13	<0.01	0.1	0.015	<0.01	S<0.001	Hf 0.8
601+Zr	61.6	22	<0.01	<0.03	1.3	0.3	13	<0.01	0.1	0.032	<0.01	S<0.001	Zr 0.6
601+Y	61.8	22	<0.01	<0.03	1.3	0.3	13	<0.01	0.1	0.023	<0.01	S<0.001	Y 0.5

에 의해 접착력이 향상된다고 알려져 있다.¹²⁾ 이러한 OAE의 효과를 본 연구에서는 국내에서 생산되는 Inconel 601의 고온산화저동에 관한 기존 연구를 토대로 하여 OAE인 Hf, Y, Zr을 각각 1 wt%, 0.5 wt%, 0.5 wt%씩 첨가하여 모재 합금위에 산화피막의 형성과정과 OAE에 의한 접착력 향상 관계를 규명하여 고온에서 내산화성을 향상시키는데 필요한 기초자료를 제공하고자 한다.

2. 실험방법

본 실험에 사용된 Inconel 601은 국내에서 생산된 제품을 사용하였고, 여기에 OAE인 Hf를 1 wt%, Zr과 Y를 각각 0.5 wt%씩 첨가하여 진공 arc법으로 용해하여 각각의 시편을 제작하였다. 진공 arc 재용해법 (Vacuum Arc Remelting; VAR)은 불활성분위기와 용고조직을 조절할 수 있다는 장점 때문에 많은 superalloy의 재용해법으로 오래전부터 사용되고 있다.¹³⁾ 지름이 20 mm, 높이 10 mm의 크기로 주조된 버튼모양의 시편을 표면상태의 영향을 줄이기 위해 다시 low speed diamond saw로 1.5 mm, 5 mm, 7 mm의 크기를 가지는 직육면체로 만들고 600번까지의 SiC 연마지로 연마후 마이크로미터로 정확한 시편의 크기를 측정하였고, 초음파세척기로 표면의 이물질 제거한 후 건조시켜 화학천칭으로 시험전의 무게를 측정하였다. 또한 광학현미경으로 조직을 관찰하였다.

시편의 산화기구를 규명하기 위해 등온산화실험을 실시하였는데, 산소와의 반응에 의한 산화속도는 Cahn-2000 microbalance를 이용하여 측정하였다. 시험편을 항온로에 넣기전에 온도보정을 digital thermometer로 하였다. 등온산화실험분위기는 공기중에서 100시간동안 산화를 촉진시키기 위해 실제 사용온도보다 높은 1000℃와 1100℃ 두 온도구간에서 실시하였다. 수퍼얼로이가 주로 사용되는 thermal cycling 환경에서

의 변화를 알아보기 위해 cyclic 산화실험을 하였고 이를 위한 장치는 관상전기로 내부에 석영관을 삽입하고 한쪽 끝은 개방하여 공기가 통하도록 하였고, 다른쪽은 파이렉스관과 연결하여 파이렉스관 내부에 시편이 부착된 석영봉을 삽입하여 이 봉이 반응온도로 유지된 전기로내부와 상온의 외부를 왕복하게 하여 thermal cycling 실험을 하였다. 콘트롤러의 타이머로 시간을 전기로내에서 45분 다시 공기중에서 15분 유지하도록 하였다. 시편의 무게는 거의 24 cycle마다 0.1 mg의 정밀도를 가지는 화학천칭을 이용하여 측정하였다. 이들 산화된 시편들의 산화물의 종류를 알아보기 위해 XRD(X-Ray Diffractometer)를 이용하였고, 산화물의 morphology를 관찰하기 위해 SEM(Scanning Electron Microscopy)을 사용했고, 또한 산화피막과 금속기 사이의 계면관찰을 위해 SEM과 EDX(Energy Dispersive X-Ray Spectrometer)로 분석하였다.

3. 실험결과 및 고찰

Inconel 601에 OAE를 첨가하여 제작한 시편을 분석한 결과, OAE의 함량은 Inconel 601에 Hf, Zr, Y가 0.8, 0.6, 0.5 wt%으로 나타났으며 분석결과는 Table 1에 나타내었다.

3.1 Kinetics

Fig.1은 OAE를 첨가하지 않은 Inconel 601시편과 Hf, Zr, Y를 첨가한 시편에 대해 공기중 1000℃에서 100시간 등온산화시킨 것이다. 네시편 모두 초기 10시간까지 급격한 무게증가를 보인 후에는 무게증가가 크게 일어나지 않았다. 100시간후의 무게변화를 보면, OAE를 첨가하지 않은 Inconel 601 시편은 1.08 mg/cm²의 무게증가를 보였고 Zr이 첨가된 경우에는 1.12 mg/cm², Hf이 첨가된 경우에는 0.89 mg/cm², Y이 첨가된 경우는 1.14 mg/cm²의 무게증가를 보였다. 즉, Inconel 601+Y > Inconel 601+Zr > Inconel

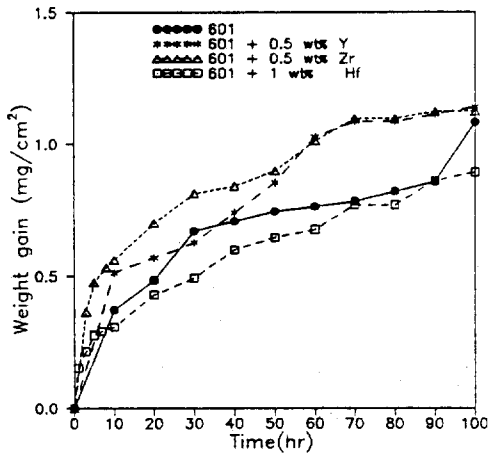


Fig. 1. Isothermal oxidation results for the Inconel 601, +Hf, +Zr, +Y tested in air at 1000°C for 100 hours

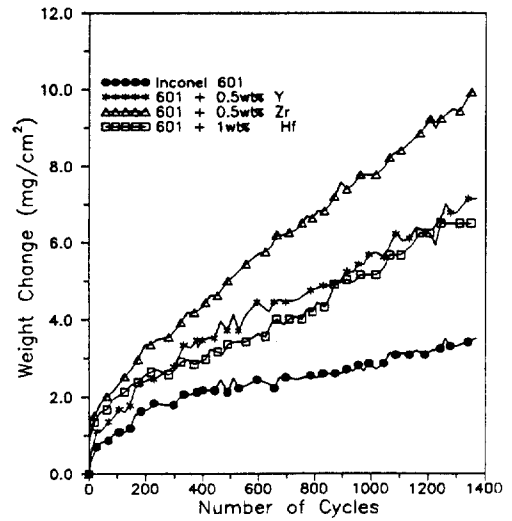


Fig. 3. Cyclic oxidation results for the Inconel 601, +Hf, +Zr, +Y tested in air at 1000°C

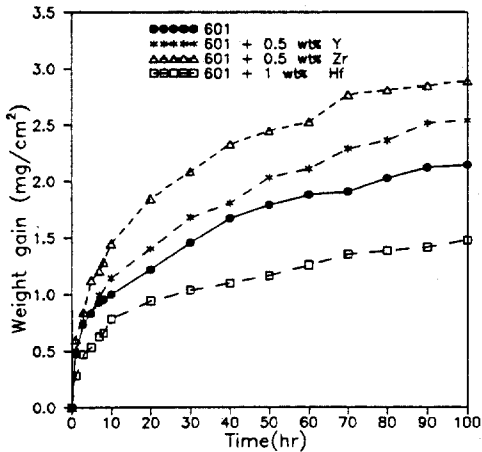


Fig. 2. Isothermal oxidation results for the Inconel 601, +Hf, +Zr, +Y tested in air at 1100°C for 100 hours

601 > Inconel 601+Hf의 순서로 무게증가가 많았다. 1100°C 에서 100시간 산화시킨 후의 무게변화를 보면, Inconel 601+Zr > Inconel 601+Y > Inconel 601 > Inconel 601+Hf의 순서로 Fig. 2에 나타나 있다. 1000°C에서는 Y를 첨가한 경우에 가장 많은 무게증가를 보였으나 1100°C에서는 Zr을 첨가한 경우에 가장 많은 무게증가가 관찰

되었다. Inconel 601은 100시간후 2.14 mg/cm²로 증가하였고, Zr이 첨가된 경우는 2.89 mg/cm², Hf이 첨가된 경우는 1.48 mg/cm², Y이 첨가된 경우는 2.54 mg/cm²의 증가를 보였다. 1000°C와 1100°C 모두 Hf이 첨가된 시편의 산화속도가 느렸다. 또한 Zr을 첨가한 경우 산화속도가 빨랐는데, 이것은 Taniguchi의 실험결과¹⁴⁾ 즉, 표면에 Al₂O₃를 형성하여 재료를 보호하는 Ni₃Al에 OAE를 첨가했을 때, Zr은 산화속도를 증가시켜 주고 Hf을 첨가했을 때는 산화속도가 감소된 것으로 나타났다는 것과 일치한다.

형성된 산화피막과 기지합금과의 열팽창계수의 차이에 의해 계면에 발생하는 열응력과 산화피막이 성장하면서 발생하는 성장응력에 의해 산화피막과 기지합금의 접착력이 영향을 받게 된다. 그러나 항온에서의 산화에 의해서는 접착력을 판단하기 곤란하여 thermal cycling조건에서의 산화실험을 실시하였다. Fig. 3은 1000°C에서 cyclic 산화실험을 한 결과이다. 약 1400 cycle 까지 실험하였으나 무게감소는 일어나지 않고 계속해서 무게 증가만 일어났을 뿐, OAE첨가에

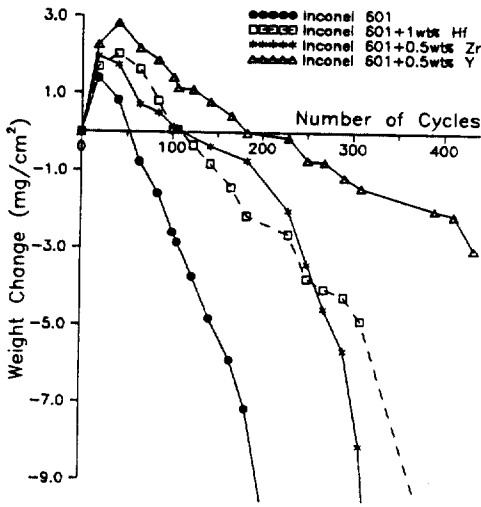


Fig. 4. Cyclic oxidation results for the Inconel 601, +Hf, +Zr, +Y tested in air at 1100 °C

따른 접착력의 변화를 검토할 수 없었다. 그래서 1100°C에서 같은 방법으로 cyclic 산화실험을 하였다. 1100°C에서의 결과는 Fig. 4와 같다. OAE를 첨가하지 않은 Inconel 601시편은 약 50 cycle에서 시편이 파괴되었고 Hf와 Zr을 첨가한 시편은 약 106 cycle에서 파괴된 반면, Y을 첨가한 시편은 183 cycle에서 파괴가 일어났다. Fig. 4에서의 결과로 보면 OAE를 첨가함으로써 모든 시편의 내산화성이 상당히 향상되었고 특히 Y은 내산화성 향상에 매우 효과적인 것으로 관찰되었다.

3.2 Metallography and Microanalysis

Fig. 5는 OAE를 첨가하지 않은 Inconel 601시편과 OAE를 첨가한 시편들을 1000°C 공기중에서 100시간동안 등온산화시킨 후의 XRD결과이다. 대체적으로 Cr₂O₃산화물이 생성되어 있으나, OAE가 첨가된 경우는 Cr_{1.3}Fe_{0.7}O₃ 스피넬 산화물이 혼재되어 나타나고 있다. 1000°C에서는 OAE를 첨가한 후에도 별다른 차이가 없었다. Fig. 6은 1000°C, 공기중에서 100시간동안 등온산화 시킨 후의 각 시편들의 SEM 단면사진이다. 그림에서 A로 표시된 산화층은 모두 Cr산화물이었다.

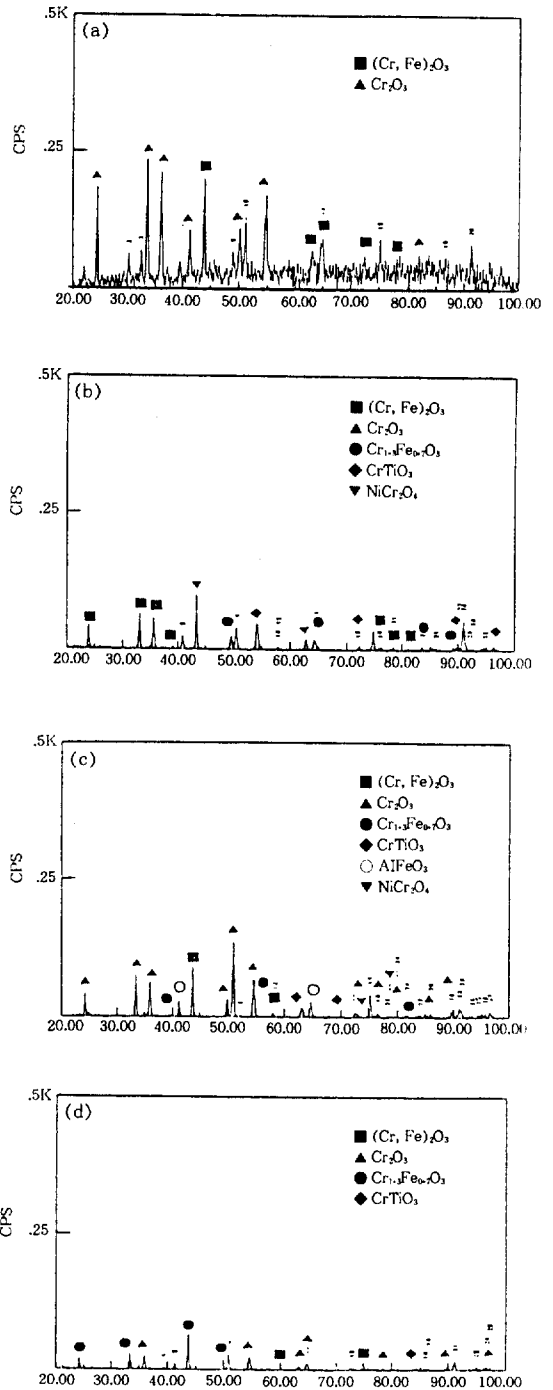


Fig. 5. XRD patterns of the oxidized surface of samples after oxidation at 1000 °C in air (a)Inconel 601 (b)601+Hf (c)601+Zr (d)601+Y

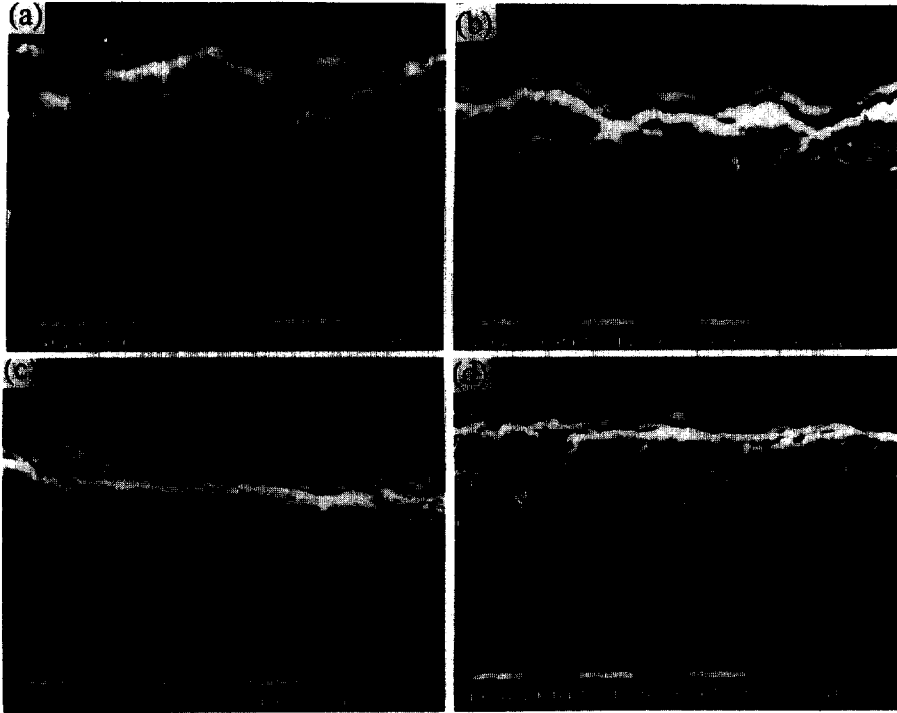


Fig. 6. Transverse sections of samples tested in air at 1000°C for 100 hours (a)Inconel 601 (b)601+Hf (c) 601+Zr (d)601+Y

(a)는 OAE를 첨가하지 않은 시편으로 산화층은 주로 Cr_2O_3 이며 산화층이 고르게 발달되어 있지를 못하고 내부산화가 심하게 일어났으며 산화피막과 모재의 접착력이 떨어지는 것으로 나타났다. (b)는 Hf이 첨가된 경우로 (a)보다 산화층이 조밀하고 기지합금과 양호한 접착력을 유지하였다. 산화층 바로 밑 B 부분과 검게 보이는 C 부분이 다량의 Al을 포함하는 산화물이었으며 Al의 함량은 내부의 C 부분이 더 많이 관찰되었다. 이러한 Al_2O_3 subscale이 존재하여 산소의 내부유입과 모재원소의 외부화산을 느리게 하여 산화반응을 감소시키는 역할을 해주는 것으로 생각된다. (c)는 Zr을 첨가한 경우로써, 산화층과 모재의 접착력이 양호하게 나타났다. 산화층의 두께는 $8\ \mu\text{m}$ 정도로 나타났다. (d)는 Y가 첨가된 시편의 morphology이며, B 부분과 같이

산화층 밑에 Al_2O_3 subscale이 형성되어 있다. (d)에서 보면 C 부분층의 고리모양을 한 Al_2O_3 산화물이 Zr과 Hf를 첨가했을 때와는 달리 깊이는 깊지 않지만 비교적 조밀하게 분포되어 있는데, 이 층이 substrate와 산화층간의 결합력을 높여 주어 산소의 inward diffusion과 cation의 outward diffusion을 억제하여¹⁵⁾ 접착력을 향상시키는 것으로 생각된다. OAE를 첨가한 경우 산화층의 접착성이 향상되었다.

1000°C에서 등온산화시킨 결과 산화속도의 차이가 거의 없어 1100°C에서 다시 100시간 산화시킨후의 XRD 결과가 Fig. 7이다. 1000°C와 달리 OAE를 첨가하지 않은 경우에 Cr과 Fe의 spinel 산화물이 주로 나타나고 있는데, OAE를 첨가한 경우 모두 안정적인 Cr_2O_3 산화물이 발달하여 있음을 알수 있다. OAE가 Cr의 선택산화를

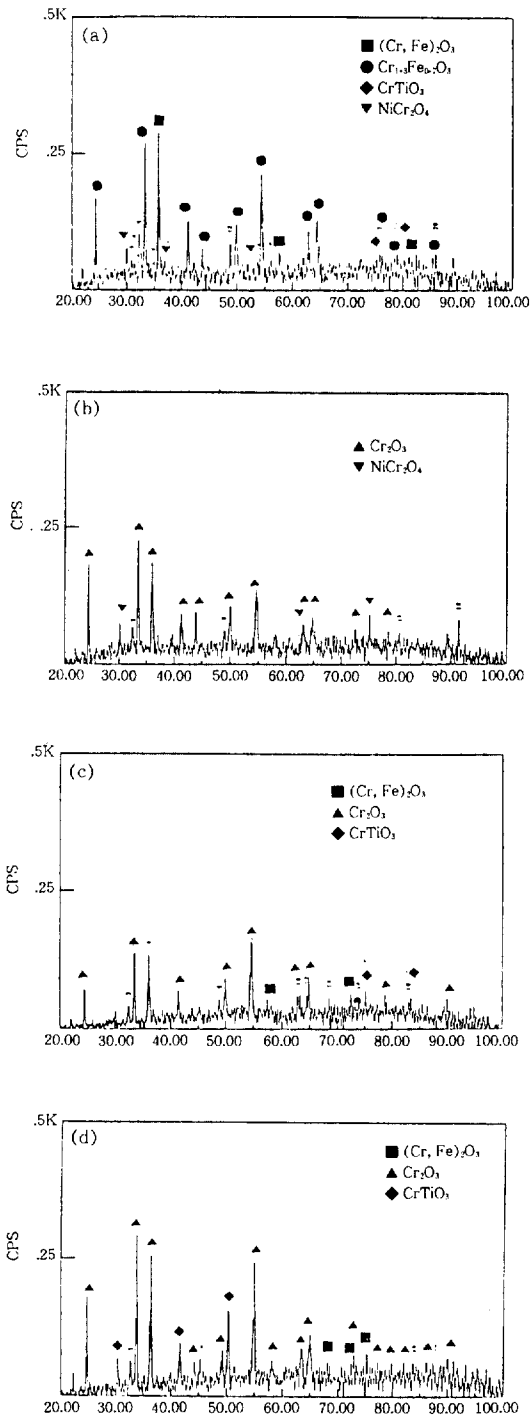


Fig. 7. XRD patterns of the oxidized surface of samples after oxidation at 1100°C in air (a) Inconel 601 (b) 601+Hf (c) 601+Zr (d) 601+Y

촉진 시켰다고 생각한다. Fig.8은 1100°C에서 100시간동안 등온산화시킨 시편들의 단면사진이다. 산화층 A는 모두 EDX결과 Cr산화층으로 나타났다. (a)는 OAE를 첨가하지 않은 시편으로서 Cr_2O_3 층이 형성되어 있으나, B, C 부분처럼 Ni, Fe, Cr을 함유하는 Al의 산화물이 형성되어 있었다. Hf을 첨가한 경우에는 Al subscale이 좀더 고리모양으로 (b)의 B 부분처럼 Ni, Fe, Cr을 함유하는 산화물로서 비교적 균일하고 미세하게 분포되어 있었다. (c)처럼 Zr을 함유하는 경우에는 상당히 많은 양의 내부산화가 일어났는데 주로 Ni, Fe를 함유하는 산화물로서 가장 큰 무게증가를 나타내는 원인으로 보인다. 특히 Y을 첨가한 경우 (d)에 있어서는 B, C 부분과 같이 고리모양의 Al subscale이 분포되어 있었다.

특히 Y의 경우에는 Jedinski¹⁶⁾가 보고한 바에 의하면, Al산화물을 형성시킬 때 Y의 효과는 다음과 같다. 첫째로, Al산화물 형성을 가속화하는 경우에는 Y가 heterogeneous nucleation site를 제공하기 때문에 입자의 성장을 방해하여 미세한 Al산화물을 형성한다. Al산화물 형성을 지연시키는 경우에 Y는 불안정한 Al산화물의 chemical doping을 유발하고 intrinsic oxygen vacancy를 소모시킨다. (d)에서 보면 C 부분에서 Y산화물이 나타났다. 특히 C 부분은 Al산화물 subscale층인 점을 유의할 필요가 있다. 위에서 살펴본 바와 같이 Hf이나 Zr의 경우와 달리 Al subscale층이 뚜렷이 발달한 이유는 Y이 Al subscale의 생성을 촉진시켰기 때문이라 생각된다.

앞의 kinetics에서도 본바와 같이 1000°C와 1100°C 모두 Hf이 첨가된 시편의 산화속도가 느렸다. 또한 Zr을 첨가한 경우 산화속도가 빨랐는데, 앞서서도 언급하였지만 Taniguchi¹⁴⁾에 의하면 Ni_3Al 에 OAE를 첨가했을 때, Zr은 산화속도를 증가시켜주고 이때 Al_2O_3 의 기지금속예의 침입현상이 뚜렷이 나타났고 Hf을 첨가했을 때는 산화속도가 감소되고 산화층의 접합성이 높아졌는데, 여기서 Hf의 산화물은 발견할 수 없었지만

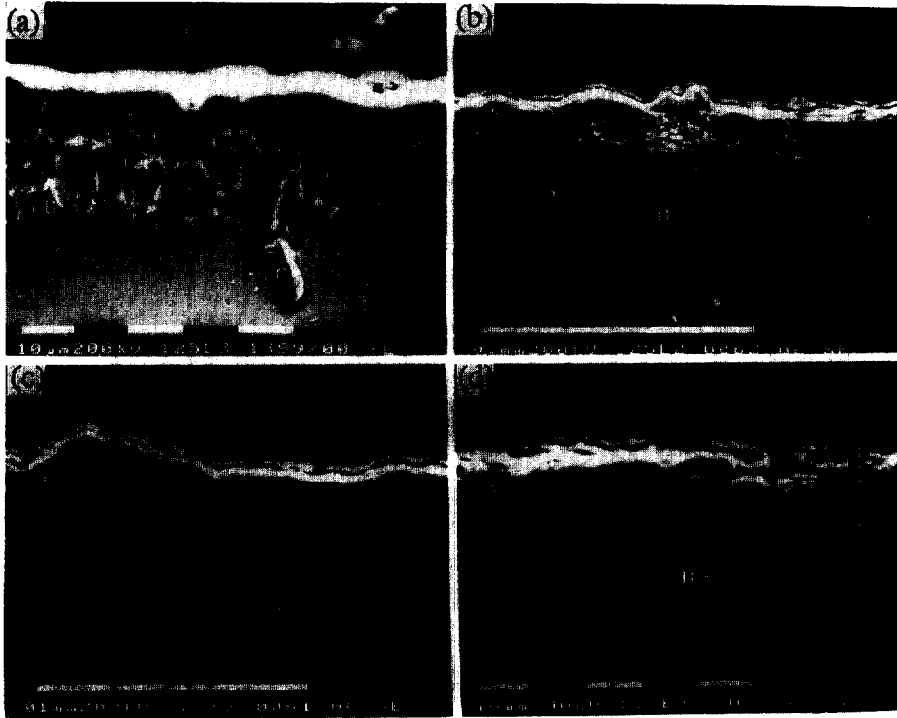


Fig. 8. Transverse sections of samples tested in air at 1100°C for 100 hours (a)Inconel 601 (b)601+Hf (c) 601+Zr (d)601+Y

HfO₂가 많은 영향을 미친 것으로 보인다. Taniguchi의 결과가 보여준 것과 같이 Zr은 내부산화물 촉진시켰으며, Hf는 산화속도를 현저히 감소시킨 결과는 일치하였다. 등온산화조건에서 Y과 Zr을 첨가함으로써 내부산화물 촉진되어 산화속도가 증가된 반면 Hf 첨가는 Zr이나 Y에 비해서 내부산화물 감소시켜주기 때문에 산화속도를 감소시킨 것으로 보인다.

Thermal cycling조건에서의 산화피막의 접착력을 검토한 1100°C에서의 cyclic 산화실험 결과는 Fig. 9과 같다. Fig. 9에서 보면 A로 표시된 산화층들이 thermal cycling에 의해 박리가 일어나서 매우 불균일함을 볼 수 있는데, EDX결과 이 산화층들의 주성분은 Cr산화물이었다. Fig. 9의 (a)는 OAE를 첨가하지 않는 Inconel 601 시편을

250 cycle 동안 1100°C에서 산화시킨 후의 단면 morphology이다. 산화층 밑에서 C 부분처럼 발달한 Al subscale을 볼 수 있고 또한 내부에도 B 부분과 같이 Cr산화물이 분포되어 있었다. 여기에 OAE를 첨가한 경우를 보면, Hf를 첨가한 경우는 (b)와 같은데 433 cycle이 경과한 후에도 산화피막과 기지합금이 상당히 잘 접착되어 있는 Cr산화물층인 A 부분과 C 부분처럼 Al subscale이 발달되어 있었고 특히 B 부분에서는 Hf이 Al subscale에서 발견되었다. 이것은 Hf이 선택산화와 접착력을 향상시켜주었음을 나타내고 있다. Zr을 첨가한 경우에도 외부산화물은 주로 Cr산화물이었고 내부에 B로 표시된 부분들처럼 Al 산화물이 발달해 있었다. Y을 첨가한 경우도 (d)에서 내부에 B로 표시된 Al산화물들

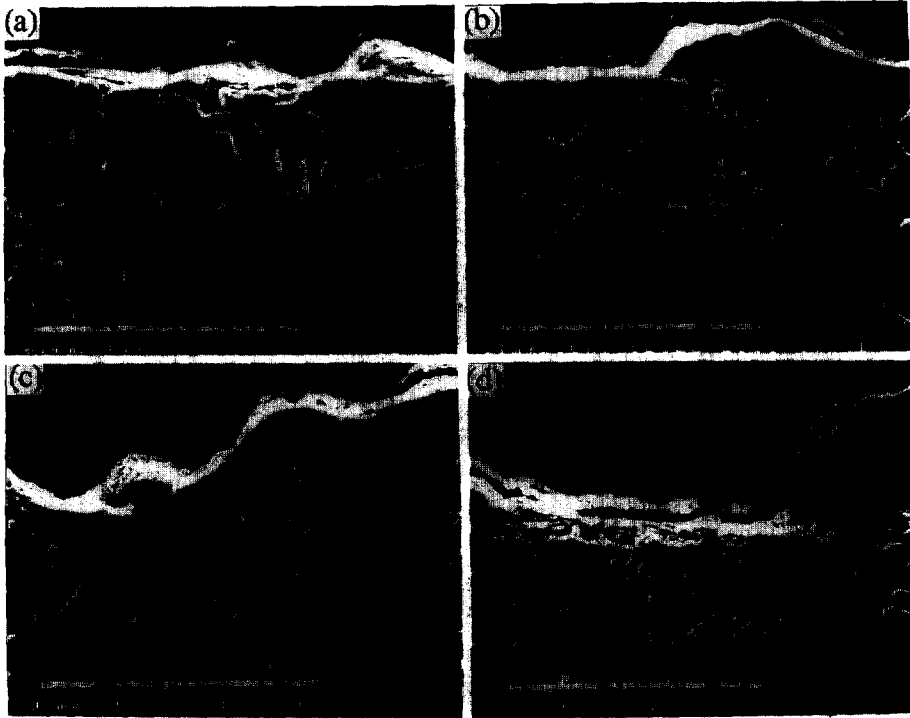


Fig. 9. Transverse sections of samples cyclically tested in air at 1100°C (a)Inconel 601 (for 250 cycles) (b) 601+Hf (for 433 cycles) (c)601+Zr (for 390 cycles) (d)601+Y (for 433 cycles)

이 발달해 있음을 볼 수 있다. OAE를 첨가함으로써 Cr과 Al의 선택산화물을 촉진하고 접착력을 향상시켰으며, 특히 Y을 첨가한 경우에는 등온산화실험시에 관찰되었던 Al subscale이 고리모양으로 발달하고 특히 subscale내에 Y이 존재하여 Al 산화물이 발달할 수 있는 자리제공을 해 줌으로써 더욱 보호적인 역할을 해주었던 것으로 나타났는데 이러한 이유에서 Y을 첨가한 경우가 lifetime이 다른 OAE를 첨가한 시편에 비해 80 cycle 이상 향상되었던 것으로 생각한다.

등온산화실험과 cyclic 산화실험 결과에서 나타난 것처럼 등온산화실험에서는 OAE를 첨가함으로써 산화를 촉진시켜서 산화속도를 증가시켰으나 thermal cycling조건에서는 산화피막의 파괴가 일어나면 OAE에 산화피막이 신속하게 재생성되어 내산화성이 뚜렷이 개선되었고, 이것

은 OAE가 Cr과 Al의 선택산화물을 촉진하고 이들의 접합력을 향상시켰기 때문으로 생각된다.

4. 결 론

국내에서 생산된 superalloy인 Inconel 601 시편에 대해 내산화성 향상을 위하여 Hf, Zr, Y을 1 wt%, 0.5 wt%, 0.5 wt% 씩 첨가하여 채용해 시킨 후 공기중 1000°C, 1100°C에서 등온산화실험과 cyclic산화실험 결과에 의해 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 공기중 1000°C, 1100°C에서 등온산화실험 결과, 모두 Zr과 Y을 첨가한 경우가 산화속도가 빠르고 Hf을 첨가한 경우가 산화속도가 느리게 나타났다. 이는 Zr과 Y을 첨가함으로써 외부 산화피막의 형성뿐만 아니라 산소의 내부로의 확산

산에 의한 내부산화를 촉진시켜 산화속도가 빠른 것으로 나타났다.

(2) OAE를 Inconel 601에 첨가함으로써 Cr의 선택산화를 촉진시켜서 평활한 산화피막과 기지합금의 계면을 유지하면서 접착력을 향상시켰다.

(3) Thermal cyclic 산화실험결과 Hf, Y, Zr 등의 OAE를 첨가한 경우에 접착력이 현저히 개선되었으며, 특히 Y를 첨가한 경우, Cr_2O_3 산화피막과 기지합금의 접착력을 향상시키고 내부 Al 산화물이 고리모양으로 형성되어 원소의 확산을 차단하여 Hf이나 Zr을 첨가한 시편보다 더욱 lifetime을 향상시켰다.

후 기

본 연구는 1994년도 문교부지원 학술진흥재단 신소재분야 연구지원에 의해 수행된 것으로 이에 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. C. T. Sims, N. S. Stoloff and W. C. Hagel, *Superalloys II*, John Wiley, New York, 1987
2. G. H. Meier and N. Birks, *Introduction to High Temperature Oxidation of Metals*, Edward Arnold, London, 1983
3. G. M. Kim, J. Kor. Inst. Met. Mater., 29-12 (1991) 1246
4. S. C. Kang, Y. G. Chon and G. M. Kim, J. Kor. Inst. Surf. Eng., 24-3 (1991) 151
5. S. C. Kang, Y. G. Chon and G. M. Kim, J. Corr. Sci. of Kor., 20-4 (1991) 291
6. W. S. Lee and G. M. Kim, J. Corr. Sci. of Kor., 23-3 (1994) 170
7. E. A. Gulbransen and W. S. Wysong, TAIME, 175 (1948) 628.
8. N. Birks and H. Rickert, J. Inst. Met., 91 (1962) 308
9. C. Wagner, Z. Phys. Chem, 21 (1933) 25
10. A. W. Funkenbusch, J. G. Smeggil, and N. S. Bornstein, Metall. Trans., 16A (1985) 1164
11. J. G. Smeggil, Metall. Trans., 17A (1986) 923
12. A. Rahmel and M. Schutz, Oxid. Met., 38 (1992) 255
13. N. K. Park and J. C. Cho, J. Kor. Inst. Met. Mater., 31-1 (1993) 22
14. S. Taniguchi, *Oxidation of High Temperature Intermetallics*, The Minerals, Metals & Materials Society, 1989
15. F. S. Pettit, C. S. Giggins, J. A. Goebel and E. J. Felter, *Alloy and Microstructural Design*, Academic Press, 1976
16. N. S. Stoloff, *Alloying*, ASM International, Metals Park, 1988