

國產 Superalloy의 高溫 酸化 學動

姜錫哲*, 田英健**, 金吉式

忠南大學校, 材料工學科

* 韓國原子力安全技術院, 安全工學部

** 韓國原子力研究所, 研究處品質管理室

Isothermal Oxidation Behaviour of Domestic Superalloys at Elevated Temperature

S. C. KANG*, Y. G. CHON**, G. M. KIM

Dept. of Materials Engineering, Chumnam National University

** Safety Engineering Div., Korea Institute of Nuclear Safety*

*** Reserch Reactor Quality Control Dept., Korea Atomic Energy Research Institute*

Abstract

The isothermal oxidation behaviour of commercial superalloys produced in Korea was investigated by using Cahn-2000 microbalance in air at 1000°C and 1100°C. The effect of alloying elements on the isothermal oxidation was studied by examination of the oxide structures, their morphologies, and EDS linescanning and mapping of cross-section of oxidized specimens. Generally, external Cr₂O₃ films were formed on all alloy surface, but were not pure. The effect on the oxidation behaviour of refractory elements such as Nb, Mo in Inconel 718 was considered to be deleterious, and the formation of internal Al oxide in Inconel 601 was beneficial.

1. 서 론

최근 국내 산업이 급격히 발전함에 따라 우주항공, 산업설비, 지상용차량 및 해상용 선박 등에 사용되는 고온재료의 수요가 급증하고 있으나, 국내에서는 초보적인 생산단계로서 Inconel, Incoloy 등의 고온용 Superalloy를 주문에 의해 소량 생산하고 있을 뿐 많은 양은 수입에 의존하고 있는 실정이다.

고온에서는 FCC와 같은 조밀격자를 가지고 비교적 높은 인장 및 파단강도, Creep과 Thermo-mechanical Fatigue를 Homologous 온도까지 유지할 수 있는 γ' , γ'' 와 같은 금속간화합물을 석출시켜서 고온에서도 우수한 기계적인 성질을 유지할 수 있도록 복잡한 화학조성으로 되어 있다.¹⁾ 첨가된

원소는 고온에서 산소와 반응성이 대단히 강하기 때문에 반응에 의한 원소의 손실로 인하여 성질의 열화가 일어난다. 그러므로 산화에 대한 저항성을 재료자체가 가지고 있거나 향상시키기 위하여 적당히 코우팅되어야 한다는 것은 잘 알려진 사실이다. 일반적으로 고온재료는 열역학적으로 안정하고, 성장속도가 느리며, 다른 원소의 확산이 어렵고, 접착력이 좋은 산화피막 (예를 들면 Al₂O₃, Cr₂O₃, SiO₂)을 표면에 형성시켜서 온도 및 반응성이 강한 분위기로부터 재료를 보호한다. 이 피막은 기지합금내에 포함하고 있는 Al이나 Cr이 표면으로 확산되어 나와서 산소와 반응하여 산화피막을 형성한다.²⁾ 그러나 이 피막은 영구적인 것이 아니라 사용중에 thermal cycling이나 성장에 의한 응력의 집중에 의해 박리가 일어나

떨어져 나가는데, 일단 떨어져 나가면 기지합금내의 보호피막을 형성하는 원소가 표면으로 확산되어 피막이 재생성되므로, 이 과정의 반복에 의해 기지합금내에 존재하던 피막을 형성하는 원소들이 소모되고, 결과적으로 고갈되어서 더 이상 보호피막을 형성할 수 없을 정도가 되면 재료의 수명은 다 하게 되는 것이다. 그러므로 될 수 있으면 장시간 보호피막을 유지시키는 것이 필요하다. 보호피막의 수명은 산화피막의 두께, 결합의 유무, 사용분위기, 합금의 화학 조성 및 사용온도 등에 의해 달라진다.³⁾ 그러므로 형성된 산화피막이 어떻게 열화되어 가는지를 규명하는 것이 고온재료의 향상된 표면안정성을 위해서 필요하다.

국내에서 생산되는 Superalloy는 제조회사의 자체 실험에 의해 화학 조성 및 기계적 성질 등의 요구 조건은 어느 정도 충족시키고 있으나, 표면의 안정성에 대한 연구 및 관심은 아주 미미한 상태이다. 본 연구에서는 생산되는 Superalloy 중 Inconel 601, Inconel 718, Incoloy 825 및 Nimonic 80A의 4종을 선택하여 산화를 촉진시키기 위하여 실제 사용 온도보다 높은 온도 즉 1000℃ 및 1100℃의 공기 중에서 항온산화 (isothermal oxidation) 실험하여 고온에서 금속기지를 보호할 수 있는 보호피막의 형성과 이들의 거동을 관찰하여 고온에서의 표면 안정성을 분석하므로써, 국산 Superalloy의 생산에 필수적인 기초자료를 제공하고자 한다.

2. 실험방법

시료는 국내 Superalloy 제조회사에서 생산되고 있는 4종류를 사용하였고, 두께 2mm, 크기 10×10mm 또는 지름 9mm 정도의 시편으로 절단하여, 시편 모두 일정한 표면상태를 유지하도록 SiC #600까지 연마한 후 정확한 시편크기를 버어니어 캘리퍼스로 측정하였고, 초음파 세척기로 표면의 이물질을 제거한후 건조시켜 화학천칭으로 시험전의 무게를 측

정했다. 시료의 화학성분은 습식으로 분석한 결과 Table 1과 같다. 또한 광학현미경으로 조직을 관찰하고, X-ray diffractometer(XRD)로 결정구조를 조사하였다.

시험편을 항온로에 삽입하기 이전에 온도를 교정하기 위해 거의 같은 조건에서, 즉석영관(quartz tube)내에 시편의 위치에서의 온도를 digital thermometer(Omega)로 측정하여 항온로의 온도 조절기를 보정하였으며, 장시간 온도의 변화를 측정 한 결과 5℃범위 이내였다. 시편의 산화처리 이전의 무게를 화학천칭으로 0.1mg까지 측정하였고, 산소와 반응에 의한 중량변화는 Photo 1과 같이 Cahn-2000 microbalance을 사용하여 연속적으로 strip chart recorder에 기록되게 하고, 반응이 끝난 시편은 다시 화학천칭으로 무게를 측정하여 무게 변화가 일치하는가를 확인하였다. 특히 Cahn-2000 microbalance 실험 장치로 산화과정의 무게 측정시 건물 또는 주변 기기에서 오는 진동을 최소화하기 위해 지지대 밑에 고무판과 15cm정도의 모래를 깔았고, 지지대를 최대한 무겁게 하였다. 무게 변화를 정밀히 측정하고자 recorder range를 10mg으로 하여 0.1mg까지 측정 할 수 있게 했다. 공기중 산화 처리는 먼저 900℃에서 시도했으나 무게변화가 적어 1000℃ 및 1100℃의 항온에서 실험을 수행하였다.

1000℃ 및 1100℃의 항온에서 장시간(약 90-160시간) 산화처리를 행한 후 미세조직을 관찰하였으며, 또한 중간과정의 조직을 관찰하기 위해 같은 조건에서 24시간, 48시간 및 72시간동안 산화처리하여 조직을 관찰하였다. 산화된 시편은 먼저 XRD를 이용하여 형성된 산화물의 구조를 관찰한후 SEM(Jeol JSM-T300, 30KV)으로 산화물의 형상을 관찰하였고, SEM기기에 부착된 EDS(Link System)로 산화물을 분석하였다. 표면의 산화물을 관찰한 후 가능한 한 표면의 산화물이 떨어지지 않게 하여 호마이크로 molding하였고, cross-section을 관찰하기 위

Table. 1. Chemical compositions of the superalloys.

	Ni	Cr	Mo	Nb	Al	Ti	Fe	Mn	Si	C	Cu	Other
Nimonic 80A	76.5	18.7			1.1	1.6	1.7		0.4			S<0.001
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
Inconel 718	53.9	17.8	2.1	5.15	0.61	0.80	19.3	0.05	0.15	0.04	0.07	S<0.001
ncoloy 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

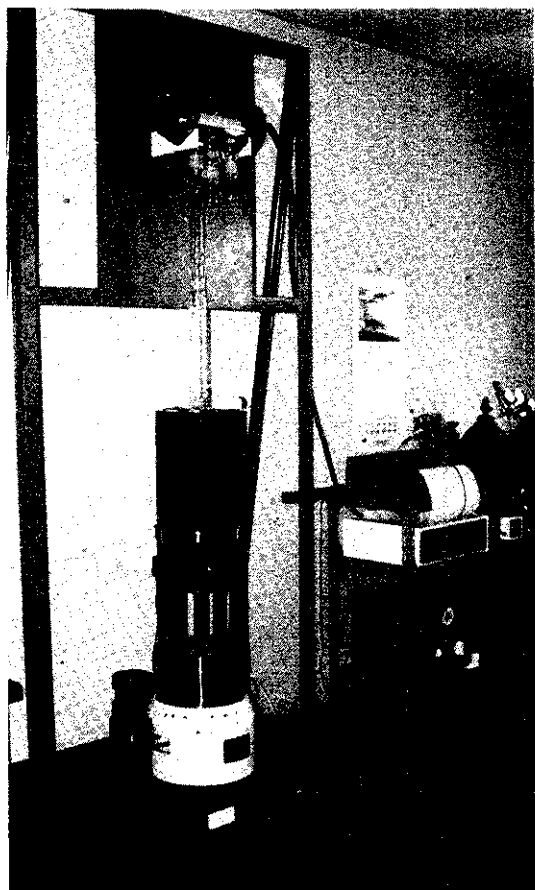


Photo. 1. The experimental apparatus for the isothermal oxidation

해 시편의 중앙부까지 연삭하고 0.05 μ m의 alumina로 연마한 후 초음파세척기로 세척후 SEM으로 cross-section을 관찰하였으며, SEM에 부착되어 있는 EDS로 cross-section의 line scanning 및 mapping을 하여 주요원소의 분포상태를 조사하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 산화물의 구조

100 $^{\circ}$ C에서 24시간동안 산화된 시편의 표면을 XRD로 분석한 결과 Fig.1에서와 같이 표면에 생성된 대부분의 산화물은 Cr₂O₃이며, TiO₂, spinel (NiCr₂O₄)등 여러 복합적인 산화물이 나타났고, 각 alloy 별 형성된 산화물은 Table.2와 같다.

Table.2. Compositional structures of the oxides.

Inconel 601	Inconel 718	Nimonic 80A	Incoloy 825
Cr ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃
NiCr ₂ O ₄	Cr _{1.3} Fe _{0.7} O ₃	NiCr ₂ O ₄	(CrFe) ₂ O ₃
Cr _{1.3} Fe _{0.7} O ₃	NiCr ₂ O ₄	Cr _{1.3} Fe _{1.7} O ₃	TiO ₂
CrTiO ₃	TiO ₂	AlFeO ₃	NB ₂ O ₅
AlFeO ₃	Cr ₂ MoO ₆	Cr ₂ MoO ₄	
	Cr ₂ NbO ₄		

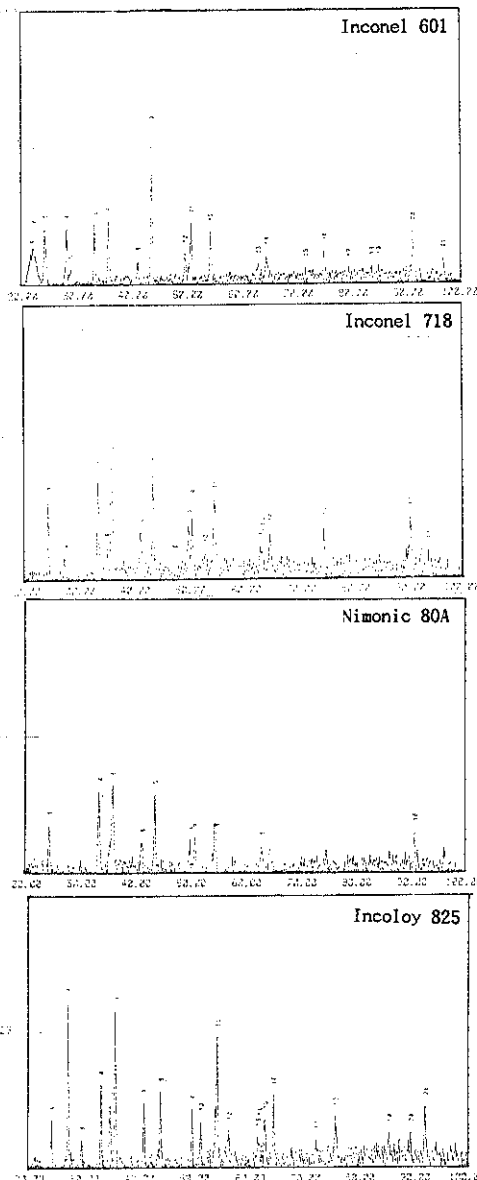


Fig. 1. XRD patterns of the oxidized surfaces of the superalloys

3.2. 1000℃에서의 Kinetics 및 morphology

Chan-2000 microbalance을 이용하여 1000℃ 공기중에서 4종류의 superalloy에 대한 무게변화를 측정 한 결과는 Fig.2와 같다. 24시간 이내의 산화 초기에는 Incoloy 825<Inconel 601< Nimonic 804 < Inconel 718 순으로 무게증가가 많았으며, 24시간에서 72시간까지는 시간이 경과함에 따라 Inconel 601 < Inconel 825 < Nimonic 80A < Inconel 718순으로 변하고, 그 이후에는 Inconel 601 < Inconel 825 < Inconel 718 < Nimonic 80A 순으로 변하는 것으로 나타났다.

시편 4종류의 parabolic rate constant(Kp) 는 Table 3과 같이 시간이 경과함에 따라 변하게 되는

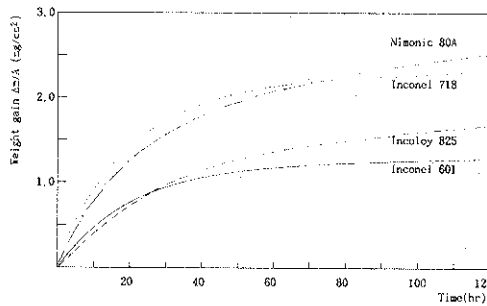


Fig. 2. Weight gain/time curves for isothermal oxidation of the commercial superalloys in air at 1000℃

데, Inconel 718은 약 60시간, Inconel 601과 Incoloy 825는 약 72시간, Nimonic 80A는 약 96 시간을 전후하여 Kp값이 변하는 것으로 나타났다.

24시간 산화후 시편표면의 morphology 및 EDS 분석결과는 Fig.3과 같이 4종류의 superalloy 모두 Cr 및 Ti산화물이 관찰되었으며, 이는 확산속도가 빠른 Ti가 외부로 확산되어 나온 것으로 cross-section관찰시 확인되었다. 산화초기(24시간 까지)에는 Inconel 601 및 Incoloy 825와 같이 Cr함량이 많은 alloy가 무게증가가 적음을 알 수 있는데, 이는 Fig.4에서와 같이 Cr산화층이 빨리 형성되어 internal oxide가 거의 형성되지 않았기 때문이다. 산화시간의 경과에 따라 Inconel 601은 Fig.5에서 처럼 Cr산화층이 견제하고, 내부에 Al산화물이 고리형태로 형성되어 내부에 성장속도가 빠른 다른 산화물의 생성을저지함으로서 산화저항이 다른 합금보다 양호함을 관찰할 수 있었으며, Incoloy 825가 Inconel 601보다 무게증가가 많은 것은 Fig.6에서 보는 바와 같이 성장 속도가 빠른 Ti산화물이 Cr산화층 내·외부에 형성되었기 때문인 것으로 추정된다. Cr함량이 비교적 적은 Inconel 718 은 산화초기에 Fig.7에서 나타난 바와 같이 Nb 및 Mo산화물이 형성되어 무게증가가 다른 alloy보다 많은 것으로 판단된다. Cr함량이 Inconel 718과 비슷한 Nimonic 80A는 Fig.8에서와 같이 산화초기에 빠르게 형성된 Ti산화층이 Cr산화층과 함께 보

Table. 3. Parabolic rate constant of the superalloys

Alloy	1000℃	1100℃
	Kp(g ² /cm ⁴ sec), (Log Kp)	Kp(g ² /cm ⁴ sec), (Log Kp)
INCONEL 601	Upto 72hr 7.45×10 ⁻¹² , (-11.13)	Upto 36hr 3.00×10 ⁻¹¹ , (-10.52)
	After 72hr 4.48×10 ⁻¹² , (-11.35)	After 362hr 1.80×10 ⁻¹¹ , (-10.74)
INCONEL 718	Upto 60hr 1.32×10 ⁻¹¹ , (-10.88)	Upto 48hr 3.89×10 ⁻¹¹ , (-10.41)
	After 60hr 6.81×10 ⁻¹² , (-11.17)	After 48hr 3.71×10 ⁻¹¹ , (-10.43)
INCONIC 80A	Upto 96hr 1.63×10 ⁻¹¹ , (-10.79)	Upto 60hr 5.93×10 ⁻¹¹ , (-10.23)
	After 96hr 5.23×10 ⁻¹² , (-11.28)	After 60hr 4.274×10 ⁻¹¹ , (-10.37)
INCOLOY 825	Upto 72hr 1.73×10 ⁻¹¹ , (-10.89)	Upto 60hr 2.62×10 ⁻¹¹ , (-10.58)
	After 72hr 5.99×10 ⁻¹² , (-11.22)	After 60hr 2.38×10 ⁻¹¹ , (-10.62)

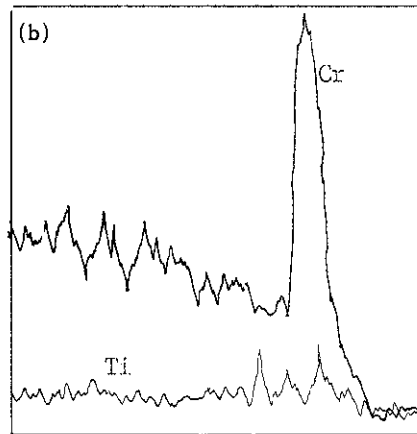
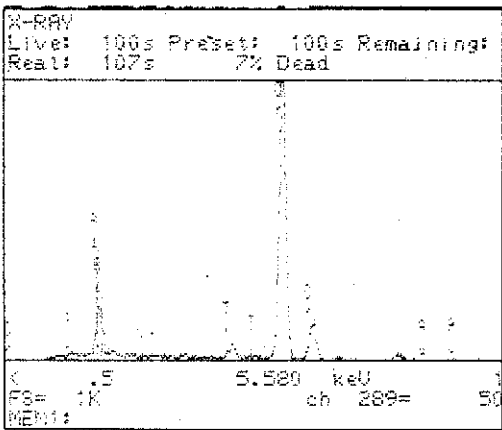
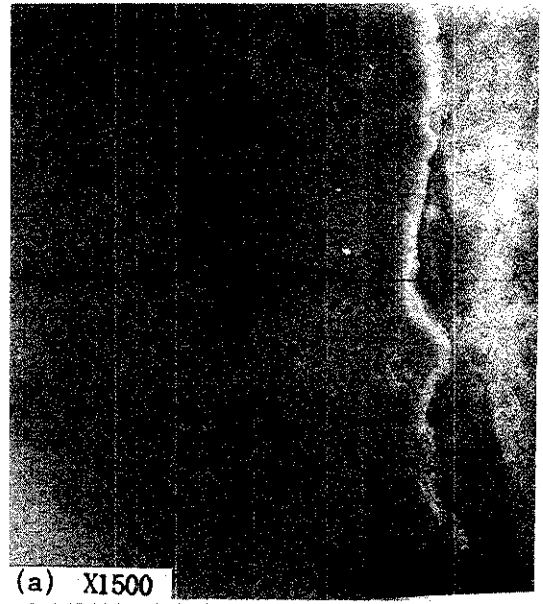
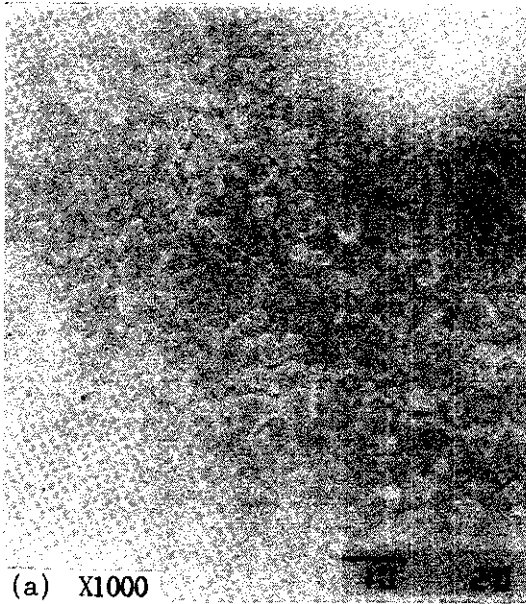


Fig. 3. Surface morphology of Inconel 606 exposed to air for 24 hrs, (a)SEM micrograph of the surface (b)EDX of overall surface.

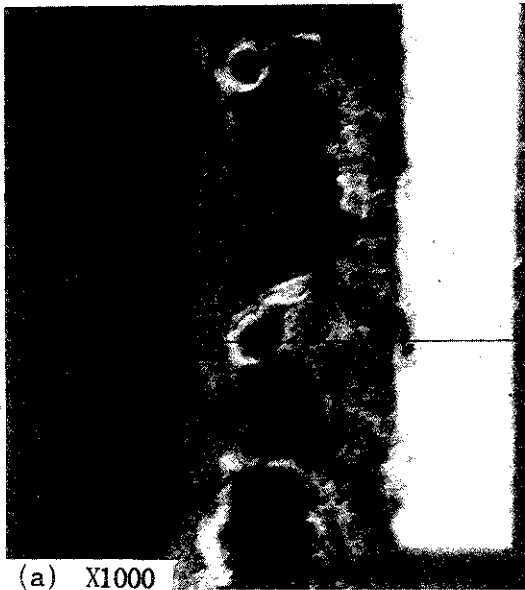
Fig. 4. (a) The transverse section and (b)EDS line profiles of Incoloy 825 after 24 hr oxidation in air 1000℃

호피막으로서의 역할을 하여 Inconel 718보다 초기의 무게증가는 적으나, 시간이 경과함에 따라 Ti산화층이 계속 성장하여 무게증가를 유발하고 조밀한 보호피막을 형성하지 못하므로 다른 합금보다 산화물 성장속도가 빠르며, parabolic rate constant의 변환시점이 Table 3에서 보듯이 합금보다 늦게 나타남을 알 수 있다.

3. 3. 1100℃에서의 kinetics 및 morphology

1000℃에서와 동일한 방법으로 1100℃ 공기중에서 각 합금의 산화시간에 따른 무게변화를 나타내면 Fig.9와 같다. 산화후 약 60시간까지는 Incoloy 825 < Inconel 601 < Inconel 718 < Nimonic 80A 순으로 무게증가가 많았고, 그 이후에는 Inconel 601 < Incoloy 825 < Inconel 718 < Nimonic 80A 순으로 변하는 것으로 나타났다.

1100℃에서도 1000℃에서와 같이 시간이 경과하면 parabolic constant가 변하는데 Table 3 에서와



(a) X1000

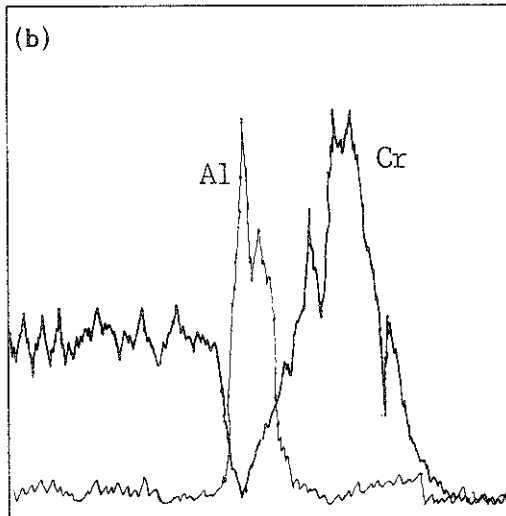
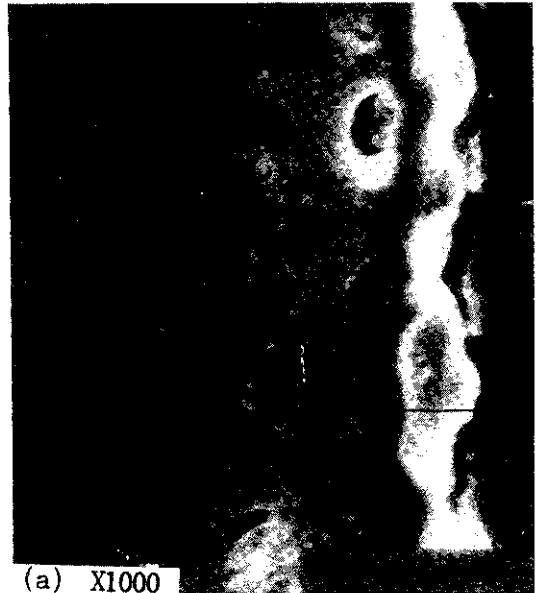


Fig. 5. (a)The transverse section and (b)EDS line profiles of Inconel 601 after 144 hr oxidation in air at 1000°C



(a) X1000

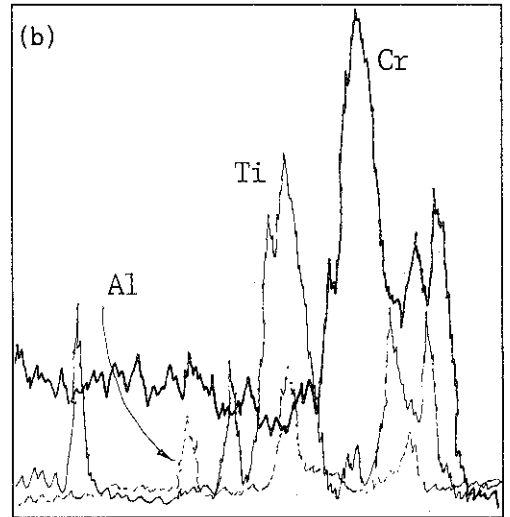
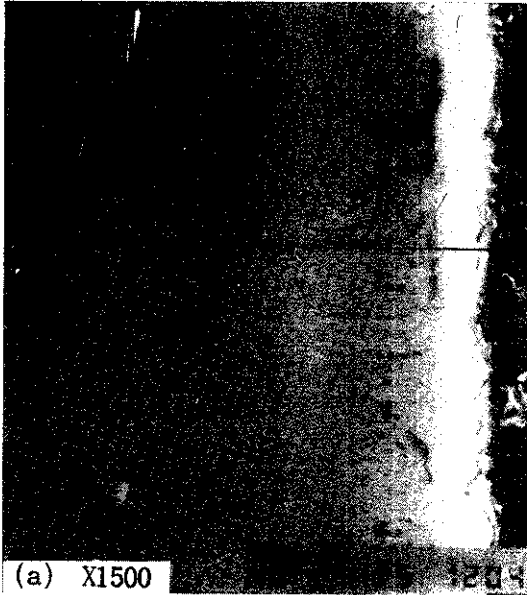


Fig. 6. (a)The transverse section and (b)EDS line profiles of Incoloy 825 after 159 hr oxidation in air at 1000°C

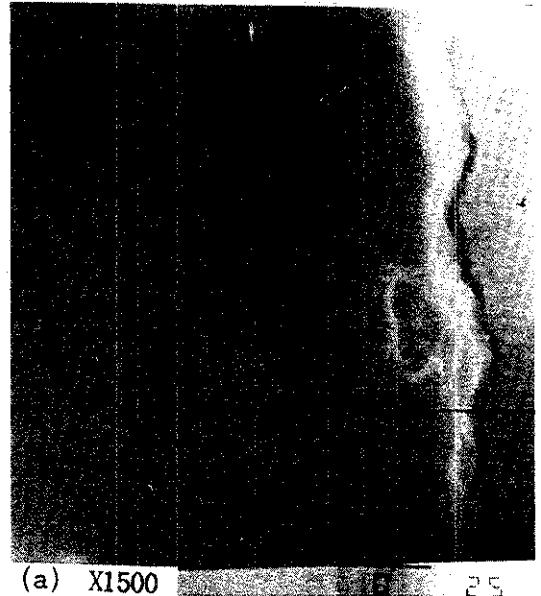
같이 온도가 높으면 그 변하는 시점이 빨라짐을 알 수 있다. 24시간 산화후 시편표면의 EDS분석 결과는 Inconel 601은 Cr 및 Ti산화물이 관찰되었으며, Inconel 718, Incoloy 825 및 Nimonic 80A는 Cr, Ti 및 Fe 산화물이 관찰되었다.

합금의 무게증가량은 Cr함량에 따라 구분될 수 있는데, Cr함량이 많은 Inconel 601 및 Incoloy 825

와 Cr함량이 대체로 적고, Nb, Mo 및 Al, Ti 가 각각 포함된 Inconel 718 과 Nimonic 80A로 분류 할 수 있다. 초기에 산화속도가 가장 느린 Incoloy 825는 Fig. 10에서 보듯이 조밀한 Cr산화층이 짧은 시간에 형성되어 다른원소의 산화를 저지함을 관찰할 수 있었으며, Inconel 601의 경우 산화초기에 Incoloy 825보다 무게 증가가 많은 것은



(a) X1500



(a) X1500

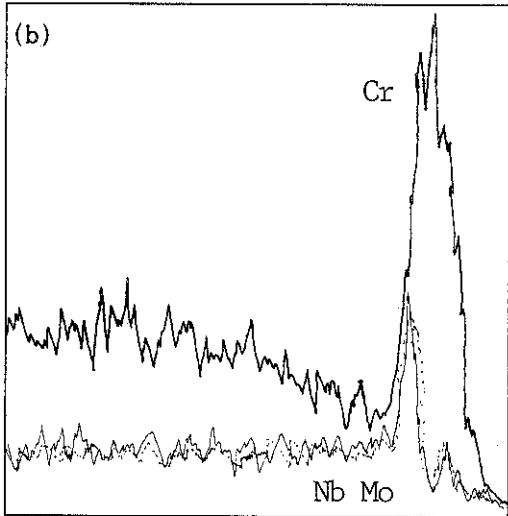


Fig. 7. (a)The transverse section and (b)EDS line profiles of Inconel 718 after 24 hr oxidation in air at 1000°C

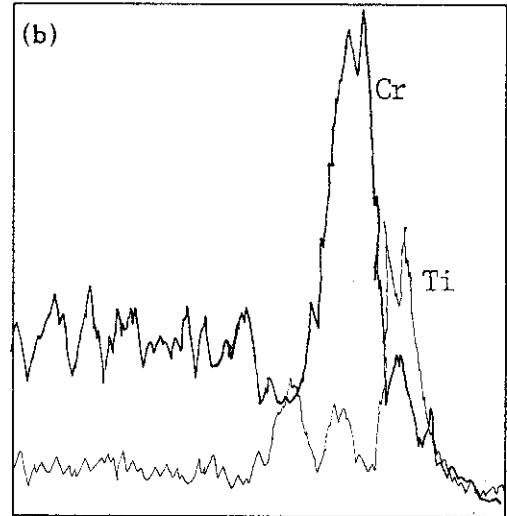


Fig. 8. (a)The transverse section and (b)EDS line profiles of Nimonic 80A after 24 hr oxidation in air at 1000°C

Fig. 11에서 보듯이 Cr산화층 밑에 Al의 내부산화물이 형성되기 때문인 것으로 판단된다. 산화시간이 경과(36시간 이후)함에 따라 Inconel 601이 Incoloy 825보다 parabolic rate constant가 낮아지게 되는데, 그 이유는 Inconel 602의 경우는 초기에 형성된 Al의 내부산화물이 다른 원소의 산화를 저지시키고, Inconel 825에서는 성장속도가

빠른 다량의 내부 Ti산화물이 형성되기 때문인 것으로 추정된다. 산화속도가 가장 빠른 Nimonic 80A는 Al 및 Ti를 많이 함유하고 있으나, Fig. 12에서 보듯이 1100°C에서는 산화초기에 다량의 Ti산화층의 급속히 형성되므로 Cr산화층과 더불어 무게증가를 가속시키고 또한 이들 산화층으로 인해 내부에 Al화물의 형성이 지연되어 상당한 시간 경과후에도 4합금

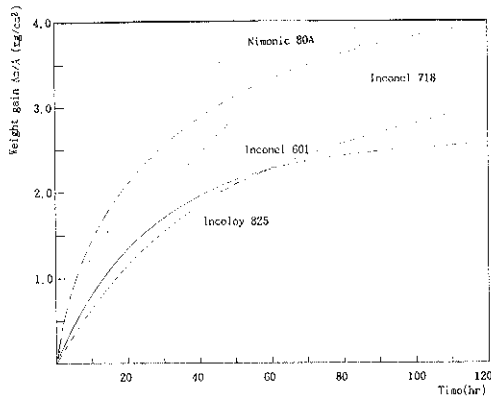
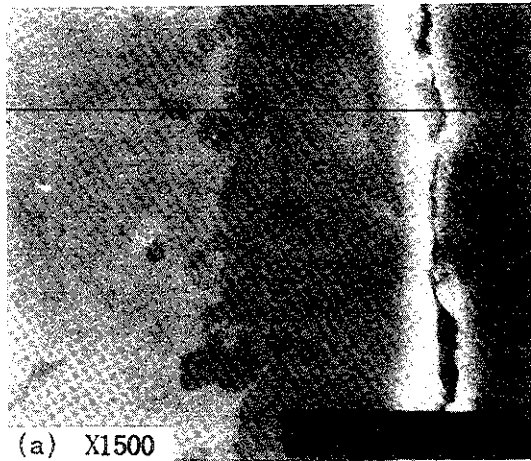


Fig. 9. Weight gain/time curves for isothermal oxidation of the superalloys in air at 1100°C



(a) X1500

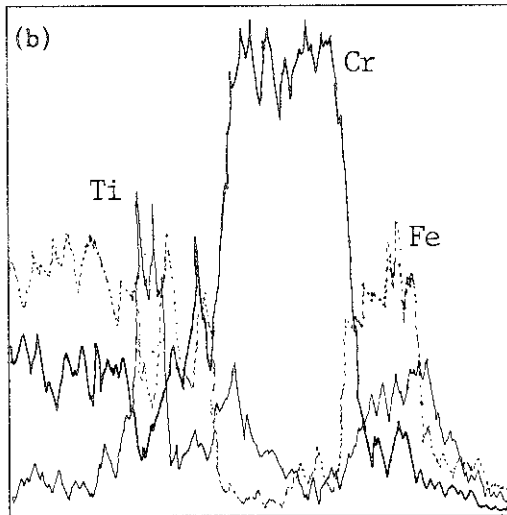


Fig. 10. (a) The transverse section and (b) EDS line profiles of Incoloy 825 after 144 hr oxidation in air at 1100°C



(a) X1000

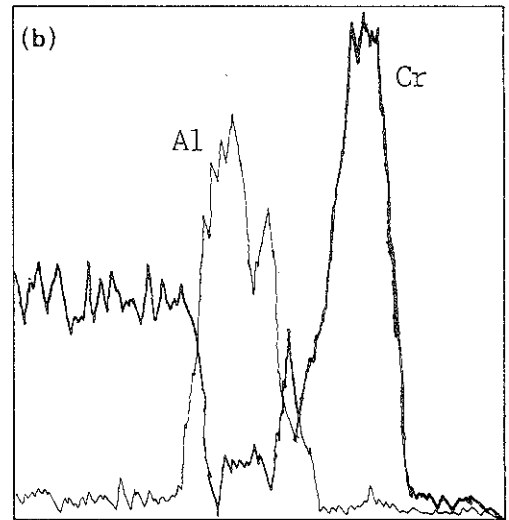
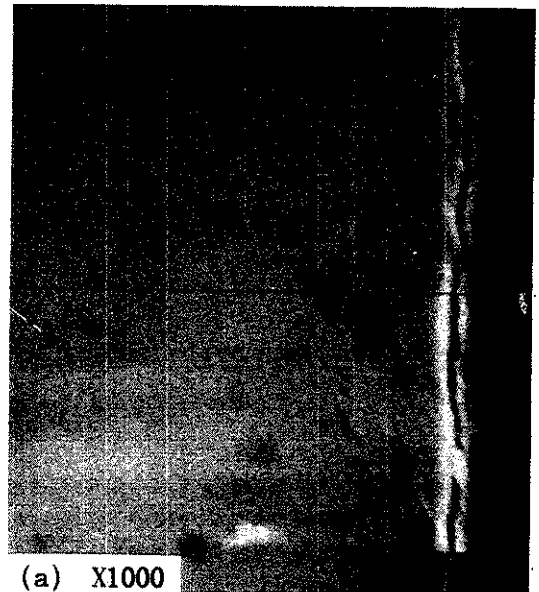


Fig. 11. (a) The transverse section and (b) EDS line profiles of Inconel 601 after 48 hr oxidation in air at 1100°C

중 계속적으로 무게가 가장 많이 증가되는 것으로 판단되며, morphology에서도 관찰할 수 있듯이 scale/metal 계면에 void가 많이 형성되고 산화층이 조밀하지 않기 때문에 산화속도가 비교적 높은 것으로 판단된다. 반면 Cr함량이 Nimonic 80A와 비슷하고, matrix에서 γ 의 형성에 필요한 Nb Mo를 가장 많이 함유한 Inconel 718은 산화초기에



(a) X1000

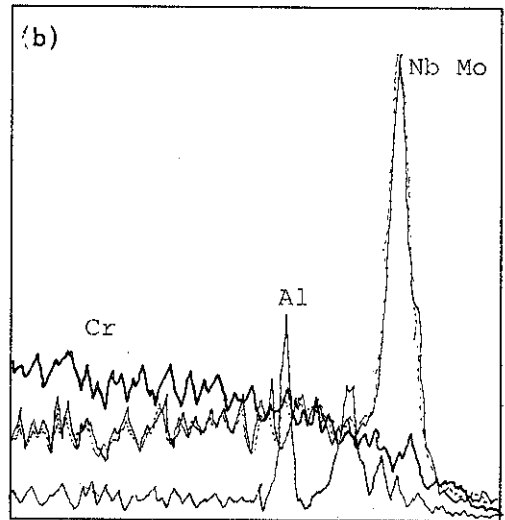
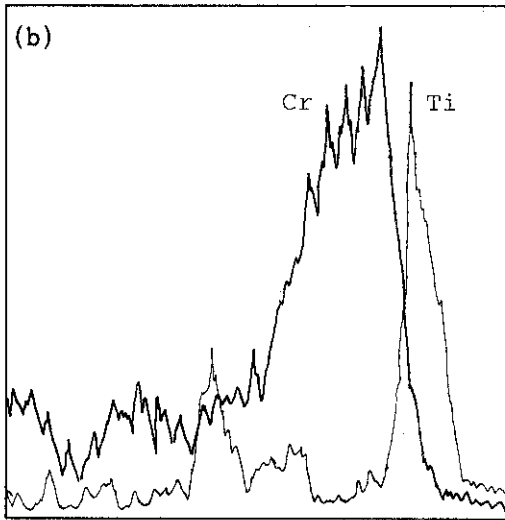


Fig. 12. (a)The transverse section and (b)EDS line profiles of Nimonic 80A after 24 hr oxidation in air at 1100°C

Fig. 13. (a)The transverse section and (b)EDS line profiles of Inconel 718 after 48 hr oxidation in air at 1100°C

Cr산화물과 Nb, Mo 산화물이 형성되어 무게증가가 심하고, 시간이 경과함에 따라 무게증가가 완만한 것은 산화피막이 Nimonic 80A에서 보다는 조밀하기 때문인 것으로 생각된다. 그러나 Inconel 718은 Fig.9 에서와 같이 38시간 부근에서 급격하게 무게가 증가하는 현상을 나타내었는데, 이와 같은 현상은 산화피막의 균열 때문⁴⁾인 것으로 알려져 있고, 이와 같은 균열은 scale/alloy계면에 Mo산화물(MoO₂,

MoO₃)과 PBR⁵⁾ (oxide-metal volume ratio)이 2.68로 대단히 높은 Nb₂O₅⁶⁾ 등의 산화물이 성장하여 응력이 집중되어 발생하는 것으로 추정되며, 1100°C의 경우 중간단계의 morphology 및 EDS분석 결과 어떤부위에서는 Cr산화층 밑에 Nb 및 Mo산화물이 관찰되었고, Fig.13에서와 같이 많은 부위에서는 Cr산화층이 없고 Nb 및 Mo산화층만 남아 있었는데 이것은 냉각과정에 압축응력을 받아 Cr산

화층이 떨어졌거나 취급과정에 손실된 것으로 추정되므로 Inconel 718의 산화피막은 substrate와의 접착력이 아주 약한 것으로 판단된다.

3.4. 1000℃와 1100℃에서의 비교고찰

1000℃ 및 1100℃에서 Kp값을 이용하여 산화초기의 (log Kp) vs (1/T × 10³)의 관계를 나타낸 것이 Fig. 14이다.

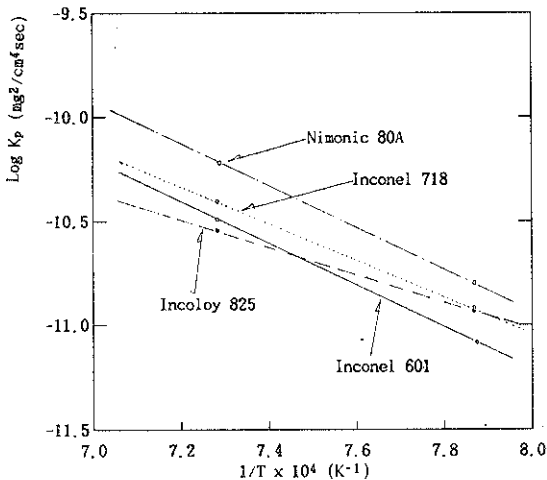


Fig. 14. Parabolic rate constants for the domestic superalloys.

이 실험에서 구해진 superalloy 4종류의 log Kp 값은 -10.8~-11.4, 1100℃에서 -10.2~-10.8로 거의 비슷한 값을 갖는데, Gigg인과 Pettit 발표한 결과와 비교해 보면 4 alloy 모두 Cr₂O₃층을 형성하는 Ni-30Cr⁷⁾ 보다는 낮고, Al₂O₃층을 형성하는 Ni-14Cr-12Al⁸⁾ 보다는 높은 값을 나타내었다. 4 종류의 합금 모두 Cr산화층이 1000℃에서 보다 1100℃에서 빠르게 형성되지만, Fig. 12에서 보듯이 1100℃의 경우 Cr산화층이 조밀하지 못하며 작은 void가 형성되어 있다. Inconel 718은 Nb, Mo산화층이, Nimonic 80A는 Ti산화층이 1100℃에서 빠르게 성장함을 관찰할 수 있었으며, 이로 인해 1000℃의 경우 보다 1100℃의 경우 금속기지(matrix)로의 내부산화 깊이가 깊어지고 내부산화물의 형상이 커지는 것을 확인할 수 있었다. 1100℃에서의 무게증가는 1000℃에서 보다 1.5-3배 정도 높고 Parabolic rate constant 가 변하는 시점은 1100℃의 경우 1000℃에서 보다 약 12-36시간 앞

당겨지는 것으로 나타났다.

1000℃ 및 1100℃에서의 산화거동을 종합적으로 비교 검토해 보면, superalloy 4종류에 대한 초기과정의 고온산화저항은 합금원소로 첨가된 Cr함량이 많을 경우 대체로 양호하며 시간이 경과함에 따라 Cr산화층의 완전성 및 Cr산화층 내·외부에 생성되는 다른 산화물에 의해 산화속도가 달라지는 것으로 판단된다. 특히 산화초기에 무게증가가 가장 많은 Inconel 718은 Cr함량이 적고, refractory element인 Nb, Mo가 다른 alloy에 비해 많이 함유되어 있기 때문인 것으로 판단된다. 이러한 refractory element 들은 oxygen getter의 역할을 하여 Al₂O₃ 및 Cr₂O₃의 형성을 촉진시키기도 하지만 Al, Cr등의 확산을 저지시키는 기능도 하며, 이들의 oxid는 일반적으로 저용점, 높은 증기압, 높은 확산속도 등으로 인하여 보호층으로서의 기능이 약한 것으로 알려져있다.⁹⁾ Inconel 601의 경우는 다른 합금에 비해 산화속도가 느린것으로 나타나는데, 이는 시간의 경과에 따라 Cr산화층이 다른 합금의 Cr산화층보다 조밀하여 anion의 확산, 즉 산소의 침투를 막아 주고, 고리모양의 internal Al oxide가 형성되어 산소의 유입을 차단할 뿐만 아니라 substrate로 부터 cation의 확산도 차단하여 산화저항을 향상시켜 주는 것으로 판단된다. Nimonic 80A의 경우에는 합금내에 비교적 많은 양의 Ti를 함유하기 때문에 Cr산화층 외부로 Ti가 확산되어 형성함으로써 산화속도가 커진 것으로 판단된다.

4. 결 론

국내에서 생산된 superalloy인 Inconel 601, 718 및 Incoloy 825와 Nimonic 80A를 1000℃ 및 1100℃ 공기중에서 산화시켜 reaction kinetics와 합금의 표면에 형성된 산화막의 특성 및 이들의 산화저항성에 대하여 연구한 결과 아래와 같은 결론을 얻었다.

1. Superalloy 표면에 모두 Cr산화층을 형성하지만, 완전히 조밀한 산화층은 형성하지 못했고, 초기의 산화저항은 Cr함량이 많은 alloy가 양호함을 나타냈다.
2. Inconel 601 및 Inconel 825는 산화저항이 양호한 것을 알 수 있었으며, 특히 Inconel 601의 경우 비교적 완전한 Cr산화층외에도 초기부터 내부에 소량의 Al산화물이 생성되어 다른 산화물의 형성을 저지하기 때문에 시간이 경과함에 따라

Incoloy 825보다 향상된 산화저항을 나타냈다.

3. Nimonic 80A는 비교적 Ti를 많이 함유하고 있기 때문에 Ti가 Cr산화층 외부로 확산 되어 산화물을 형성하므로 산화속도가 커지고, scale/substrate 계면에 void가 많이 생성되어 산화저항이 나빠짐을 알 수 있었다.
4. Inconel 718 는 1000℃보다 1100℃에서 Nb 및 Mo산화물이 더 빠르게 성장하여 Cr산화층을 균열을 유발하고 이로 인해 무게 증가가 많아짐을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 1992년도 문교부지원 학술진흥재단 신소재분야 연구지원에 의해 수행된 것으로 이에 감사를 드립니다. 또한 본 실험이 가능하도록 협조하여 주신 삼미특수강(주)에 심심한 사의를 표합니다.

참고문헌

1. C. T. Sims, N. S. Stoloff and W. C. Hagel, Superalloys II, John Wiley & Son, (1986)
2. C. Wagner, Z. Elektrochem., 63(1959) 772.
3. F. H. Stott and M. F. Chong, in Corrosion Resistant Material for Coal Conversion Systems, D. B. Meadowcroft and M. I. Manning, ed., Applied Science Publisher, London and New York, (1983) 491.
4. N. Birks and G. H. Meier, Introduction to High Temperature Oxidation of metals, Edward Arnold, London, (1983) 6.
5. N. B. Pilling and R. E. Bedworth, J. of Inst. of Met., 29 (1923) 529.
6. C. S. Giggins and F. S. Pettit, Trans. TMS-AIME, 245 (1969) 2495.
7. C. S. Giggins and F. S. Pettit, J. Electrochem. Soc., 118(1971) 1782.
8. P. Hancock and R. C. Hurst, in Advances in Corrosion Science and Technology, R. W. Steahle and M. G. Fontana, Plenum Press, New York, (1974).
9. F. S. Pettit and G. H. Meier, Refractory Alloying Elements in Superalloy, J. K. Tien and S. Reichman(eds), ASM, Metals Park, OH, (1984) 165.