

## Fe<sub>3</sub>Al-4Cr 합금의 고온산화

김기영·이동복

성균관대학교 플라즈마 응용 표면기술 연구 센터

### High Temperature Oxidation of Fe<sub>3</sub>Al-4Cr Alloys

Gi-Young Kim and Dong-Bok Lee

Center for Advanced Plasma Surface Technology, Sungkyunkwan University, Suwon 440-746

(2000년 8월 2일 받음, 2000년 11월 22일 최종수정본 받음)

**초 록** Fe-28%Al(Fe<sub>3</sub>Al)과 Fe-28%Al-4%Cr(Fe<sub>3</sub>Al-4Cr) 금속간화합물을 대기중 1073, 1273, 1473K의 온도에서 최고 17일까지 장시간 산화시켰다. Fe<sub>3</sub>Al-4Cr의 산화저항은 근본적으로 Fe<sub>3</sub>Al과 거의 비슷하거나, 약간 우수하였다. Fe<sub>3</sub>Al 위에 형성된 산화물은 거의 순수한  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>로만 구성되어 있었으며, Fe<sub>3</sub>Al-4Cr 위에 형성된 산화물은 약간의 Fe와 Cr 이온이 고용된  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>로 구성되어 있었다. 외부산화막을 형성하기 위해 모재원소의 외부확산에 의해 산화물-모재 계면에는 Kirkendall 기공이 존재하였다. Fe<sub>3</sub>Al(-4Cr) 표면에 형성된 산화막은 1273K까지는 비교적 얇고 치밀하였으나, 1473K에서 산화막의 박리와 함께 상대적으로 큰 무게증가가 발생하였다.

**Abstract** Intermetallics of Fe-28%Al(Fe<sub>3</sub>Al) and Fe-28%Al-4%Cr(Fe<sub>3</sub>Al-4Cr) were oxidized at 1073, 1273 and 1473K in air for up to 17 days. The oxidation resistance of Fe<sub>3</sub>Al-4Cr was basically similar to or better than that of Fe<sub>3</sub>Al. The oxide scales formed on Fe<sub>3</sub>Al consisted essentially of pure  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, while those formed on Fe<sub>3</sub>Al-4Cr consisted of  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> having dissolved iron and chromium ions. The preferential outward diffusion of substrate elements to form the outer oxide layer led to the formation of Kirkendall voids at the oxide-matrix interface. The scales formed on Fe<sub>3</sub>Al(-4Cr) were thin and dense up to 1273K, but they spalled easily at 1473K, accompanied by more weight gains.

**Key words**: Intermetallics, Iron-aluminide, Chromium, Oxidation, Scale

### 1. 서 론

Fe<sub>3</sub>Al과 FeAl을 포함하는 Fe-aluminide계 금속간 화합물은 낮은 인성에 따른 상온에서의 열악한 취성 파괴 및 난가공성을 나타내어서 실용화에 큰 어려움을 겪고 있으나, 기존의 초합금과 비교하여 Fe와 Al을 구성요소로 하는 단순한 조성을 가지고, 장범위 규칙을 지니며, 높은 경체성, 낮은 밀도, 고용용점, 우수한 고온강도 등의 여러 장점을 지니고 있다.<sup>1)</sup> 또한, (Ti, Ni)-aluminide계 금속간 화합물과 비교하여서도 재료 자체의 상온 연성이 비교적 우수하고, 고온에서의 소성가공이 가능할 정도로 연성이 풍부하며, 다양한 합금설계와 가공 열처리에 의해 연성개선이 가능하기 때문에 장래 활용범위가 넓어지리라 기대된다.<sup>2)</sup> 실제로 미국 Oak Ridge 국립연구소는 이미 고온 강도와 연성이 우수한 Fe<sub>3</sub>Al-Cr-B-Zr계 신합금을 개발하여 실용한 바 있다. 앞으로의 과제는 상온과 고온에서의 기계적 특성 뿐만 아니라, 내산화성과 내식성이 개선되어 더욱 경량화된 합금을 개발하는 것으로서, 경량화를 위해서는 Al을 가급적 많이 함유시키는 것이 좋으나, FeAl에 가까워질수록 연성이 저하되기 때문에 이를 해결함이 중요하다. 따라서, 본 연구에서는 Fe<sub>3</sub>Al 조성영역에서는 Al이 많은 Fe-28%Al합금을 기본 조성으로 하여, 4%Cr을 첨가하여 Fe-28

%Al 합금의 산화성질에 미치는 Cr의 영향을 조사하였다.

(2-5)% 첨가된 Cr은 고용강화효과 외에도 Fe<sub>3</sub>Al합금에서의 DO<sub>3</sub>-B2 천이온도를 상승시켜 운동전위의 변환이 더 높은 온도에서 이루어지게 함으로써 좋은 실온 인성을 유지시키면서 크립저항, 실온 및 고온강도를 증진시키고, Fe<sub>3</sub>Al합금에서 관찰되는 환경취화에 따른 입내파괴를 입계파괴로 유도하여 파괴저항을 증진시키는 것으로 알려져 있다.<sup>3-5)</sup> Fe-28%Al에 첨가된 (2, 6)%Cr은 실온인성을 3.7%에서 8-9% 이상으로 개선시켰으며<sup>6)</sup> 부식수용액 내에서의 저항성도 증진시켰다.<sup>7)</sup> DeVan<sup>8)</sup> 등은 1073K의 대기중 산화시 Fe-28%Al보다 Fe-28%Al-4%Cr 시편의 무게 증량이 더 컸지만, 그 값은 170시간 이후에도 최고 0.15mg/cm<sup>2</sup>일 정도로 작았으며, SEM, X-선 분석이 불가능할 정도로 표면에 생긴 산화물이 아주 얇음을 보고하였다. 대기중 1073, 1173K의 고온산화실험을 행한 Tortorelli<sup>9,10)</sup> 등은 Fe<sub>3</sub>Al내에는 Al의 양이 충분히 많기 때문에 순수한 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>보호피막이 쉽게 형성되기 때문에 (2-6)%Cr첨가는 산화성질에 큰 영향을 미치지 않음을 보고하였다. 이들에 의하면 Cr은 단지 초기 산화에 주로 영향을 미치며, Cr양이 증가할수록 산소흡수에 의해 초기 무게증량이 약간 많고 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 형성이 촉진되지만, 전체적인 무게 증량은 Fe-28%Al보다 조금 큰 정도이었다.

Table 1. Chemical compositions of the prepared alloys

Designation	Composition(wt%)	Composition(at%)
Fe-28Al	84.4Fe-15.82Al-0.001C	72.05Fe-27.9Al-0.40C
Fe-28Al-4Cr	82.1Fe-15.74Al-2.26Cr-0.001C	68.8Fe-27.3Al-3.9Cr-0.40C

고온산화 특성을 조사하고자 하는 본 연구와 기존의 연구<sup>8~10)</sup>의 차이점은 첫째, 실험온도를 1073K, 1173K에서 1073, 1273, 1473K로 올렸으며, 둘째, 실험 시간도 2배 이상 길게 하였으며, 셋째, 시편의 종류도 아크 용융 후 열간압연한 것에서 단조한 것으로 달리하였으며, 넷째, 기존의 연구에는 부족하였던 산화막 분석(SEM, EDS, XRD)을 행하였다. 현재, Fe<sub>3</sub>Al 합금은 주조법, 분말 야금법, 합금화 분말의 열간 압출법, 반응소결법, hot pressing, hot isostatic pressing(HIP) 등의 다양한 방법<sup>11)</sup>으로 제조되고 있다.

2. 실험 방법

준비된 시편에 대한 화학분석 결과를 나타낸 표 1에 명시된 두 화학조성의 Fe<sub>3</sub>Al, Fe<sub>3</sub>Al-4Cr 금속간 화합물은 99.95% 전해철과 99.9%Al을 원료로 하여 Ar 분위기하의 진공유도용해로에서 제조한 것이다. 130mm<sup>φ</sup>, 50kg으로 제조된 주괴를 1373K로 가열한 후 유압단조기를 이용하여 60mm두께로 지름방향으로 1차 단조하고, 1073-1173K로 냉각되면 다시 재가열하여 1373K에서 30mm 두께로 2차 단조하였다. 단조된 시편을 10×10×1mm<sup>3</sup> 크기로 절단하고, 표면 연마, 세척, 세정과정을 거친 후 산화시켰다.

산화실험을 위해, 준비된 2종류의 시편을 알루미늄 도가니에 각각 넣어 머플로내에 장입한 후, 1기압의 대기중에서 1073, 1273 및 1473K에서의 세 실험온도에서 일정시간 동안 등온산화(isothermal oxidation)시킨 후, 산화에 따른 시편의 무게증량을 10<sup>-6</sup>g의 정밀도를 가진 미세저울을 이용하여 측정하였다. 이때, 자연 박리된 산화물의 무게는 제외하였다. 산화실험후 생성된 표면산화물의 미세조직과 성분은 SEM/EDS를 이용하여 분석하였으며, 산화물의 종류는 X선 분석기를 이용하여 조사하였다.

3. 결과 및 고찰

유도 용해 후 2회 단조된 Fe<sub>3</sub>Al과 Fe<sub>3</sub>Al-4Cr 시편의 광학현미경 조직사진인 그림 1에서 시편의 모재는 모두 0.5mm 이상의 조대한 결정립으로 이루어져 있음을 알 수 있다. 그림 2는 공기중 1073-1473K의 온도에서 일정시간동안 시편을 등온산화시켰을 때의 시편 표면적당 무게증가량, ΔW/A, 대 시간, t의 관계를 나타낸 것이다. Fe<sub>3</sub>Al과 Fe<sub>3</sub>Al-4Cr 시편은 장시간 산화에도 불구하고 모든 온도에서 전반적으로 작은 무게 증가량을 나타내고 있으며, 1073, 1273K에서는 Fe<sub>3</sub>Al합금이, 1473K에서는 Fe<sub>3</sub>Al-4Cr합금이 약간 더 좋은 내산화성을 나타내고 있다. 산화시 1273K까지는 육안으로 박리가 거의 관찰되지 않았으며, 산화곡선도 포물선적 모양을 가져 산화반응은 확산에 의해 지배됨을 알 수 있었다. 1473K에서는 산화시 시편 표면 산화물이 국부적으로 박리되고 생성됨이 관찰되어 무게 증가

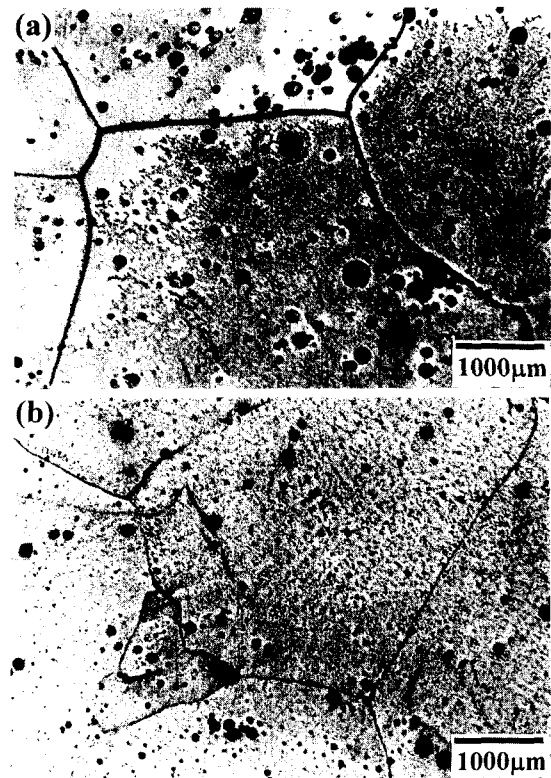


Fig. 1. Optical microstructure of the prepared alloys. (a) Fe<sub>3</sub>Al, (b) Fe<sub>3</sub>Al-4Cr. Etched with (5ml HF + 15ml HNO<sub>3</sub> + 80ml distilled water). Dark spots are etch pits.

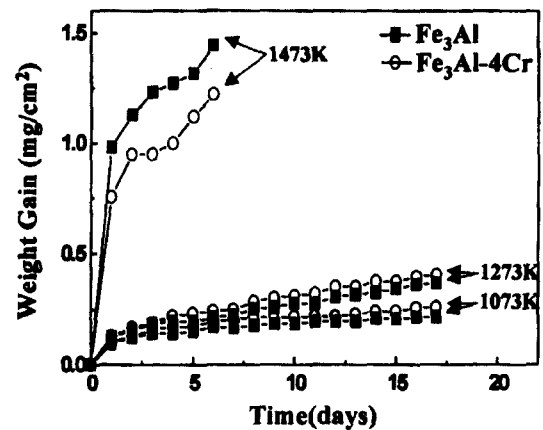


Fig. 2. Weight gain vs. oxidation time curves of Fe<sub>3</sub>Al and Fe<sub>3</sub>Al-4Cr during oxidation between 1073 and 1473K in air.

곡선에 약간의 동요가 보인다. 따라서, 1273K까지는 작은 산화무게증량을 고려할 때, Fe<sub>3</sub>Al 합금과 Fe<sub>3</sub>Al-4Cr 합금은 실험오차 범위내에 드는 비슷한 내산화성을 나타내었고, 1473K에서는 Fe<sub>3</sub>Al-4Cr합금이 약간 더 좋은 내산화성을 나타낸다고 사료된다. 한편, Tortorelli<sup>9,10)</sup> 등은 1173K의 산화시 Fe-28Al(-Cr) 시편 표면에서 심각한 박리가 일어

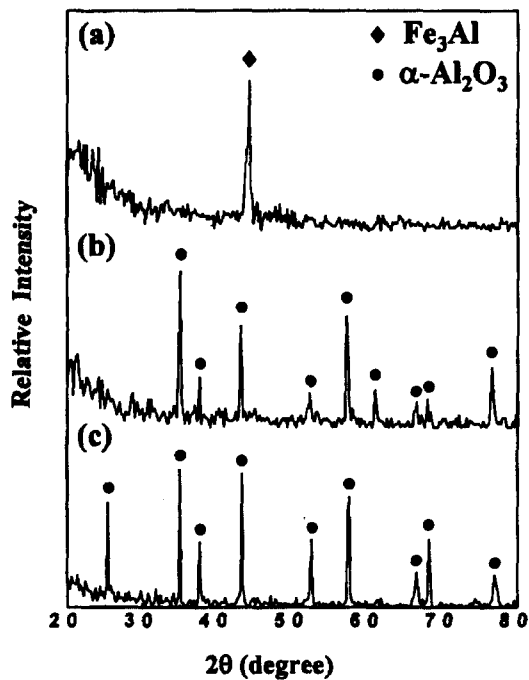


Fig. 3. X-ray diffraction patterns of the scales formed after oxidation. (a) Fe<sub>3</sub>Al-4Cr, 1073K for 6 days, (b) Fe<sub>3</sub>Al-4Cr, 1273K for 6 days, (c) Fe<sub>3</sub>Al, 1473K for 6 days.

나 소량의 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>로 추정되는 산화막만 모재 표면에 붙어 있었음을 보고하였다. 이와 달리 본 실험에서 산화막의 육안 관찰로부터 검증된 1273K까지의 우수한 산화물 접착성은 상이한 시편의 제조과정 때문으로 사료된다. 또한, 이들은 1073K의 대기중 산화시, Cr은 Fe<sub>3</sub>Al합금에서 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 생성을 촉진시켜 초기 산화속도와 전체 산화속도를 약간 증가시켰지만, 온도가 1173K로 증가됨에 따라 Cr효과는 미약해짐을 보고하였다. 유사하게, 1073K 이상에서 실험한 본 연구에서도 Cr이 Fe<sub>3</sub>Al합금의 산화에 미치는 영향은 뚜렷이 나타나지 않았다.

그림 3은 생성된 산화물에 대한 대표적인 X-선 시험결과를 나타낸 것이다. 모재 구성원소인 철-, 크롬-산화물은 어떤 경우에도 존재하지 않았으며, 특히 1073K에서는 생성되는 산화물층이 얇아 모재인 Fe<sub>3</sub>Al의 회절패턴만 보인다. 합금내의 Al의 양은 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 피막을 형성하는데 필요한 15%<sup>12)</sup>보다 훨씬 크기 때문에 X선 실험결과 항상 α-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>만 관찰되었으며, Fe<sub>3</sub>Al-4Cr의 경우 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>도 생길 수 있지만 모든 조성범위에 걸쳐 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>는 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>에 완전히 고용되기 때문에<sup>13)</sup> 관찰되지 않았다. 기본적으로, 그림 2에 나타난 Fe<sub>3</sub>Al, Fe<sub>3</sub>Al-4Cr 합금의 우수한 내산화성은 산화시 얇은 α-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 보호피막이 생성되기 때문이며, α-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>는 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>보다 성장속도가 느리고 휘발성도 없지만, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 산화막과 모재간의 나쁜 접착력과 균열 발생은 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 산화막의 큰 단점으로 알려져 있다.<sup>14)</sup>

그림 4는 Fe<sub>3</sub>Al(-4Cr) 합금 표면 위에 생성된 α-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 산화막의 외표면을 관찰한 것으로서, Fe<sub>3</sub>Al과 Fe<sub>3</sub>Al-4Cr 합금에서 생성되는 산화막의 형상은 동일 산화조건에서는

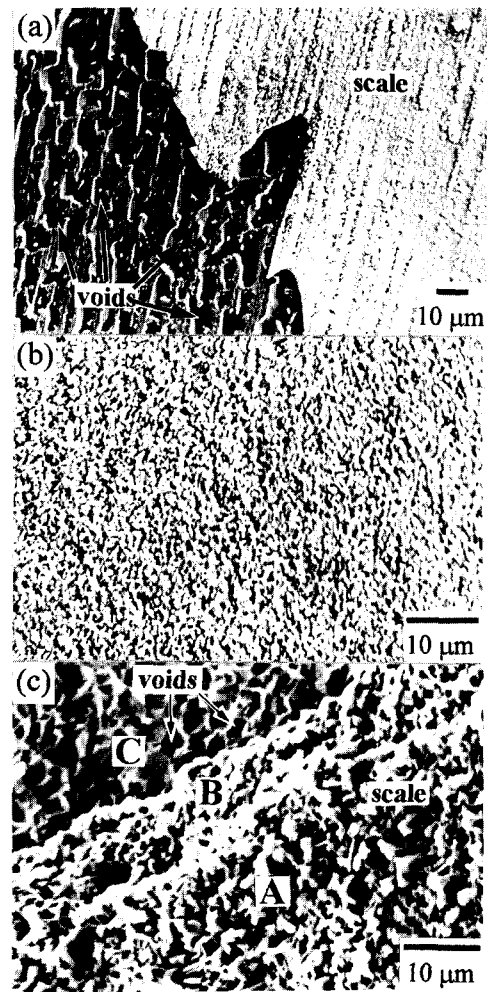


Fig. 4. SEM images of top view of the scales formed after oxidation. (a) Fe<sub>3</sub>Al-4Cr, 1073K for 10 days, (b) Fe<sub>3</sub>Al, 1273K for 16 days, (c) Fe<sub>3</sub>Al, 1473K for 6 days. In (c), A is the outermost oxide surface, B is the fracture surface of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> oxides formed, and C is the oxide-matrix interface.

근본적으로 동일하였으며, 전반적으로 산화온도와 시간이 증가할수록 등근 산화물 결정립은 점차 조대해 지고, 산화물의 박리도 빈번해졌다. 산화물이 박리된 지역(그림 4(a), (c))에서는 외부 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 피막형성을 위해 산화막-모재 계면에서 Al의 외부화산에 의해 생성된<sup>15)</sup> 수 많은 미세한 기공이 관찰되었다. 또한, 그림 4(c)의 산화물의 표면(A 지역), 산화물 파단면(B 지역) 관찰에서 α-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 산화물은 미세한 등근 입자들로 구성되어 있음을 알 수 있다.

산화물에 대한 횡단면 관찰에서 모든 시편에서 1273K까지는 일부 산화막의 박리는 관찰되었지만, 산화막은 모재와 전반적으로 잘 접착되어 있으며, 균일한 두께의 얇고 치밀한 조직을 갖고 있음을 알 수 있었다(그림 5(a), (b)). 이들 산화막에 대한 EDS 스펙트럼 분석에서, Fe<sub>3</sub>Al-4Cr 모재위에 형성된 α-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 산화막은 어느 정도량의 Fe와 미량의 Cr을 함유하고 있으며(그림 5(c)), Fe<sub>3</sub>Al 모재 위에 형성된 산화막은 거의 순수한 α-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>로서만 구성되어 있음을 알 수 있다(그림 5(d)).

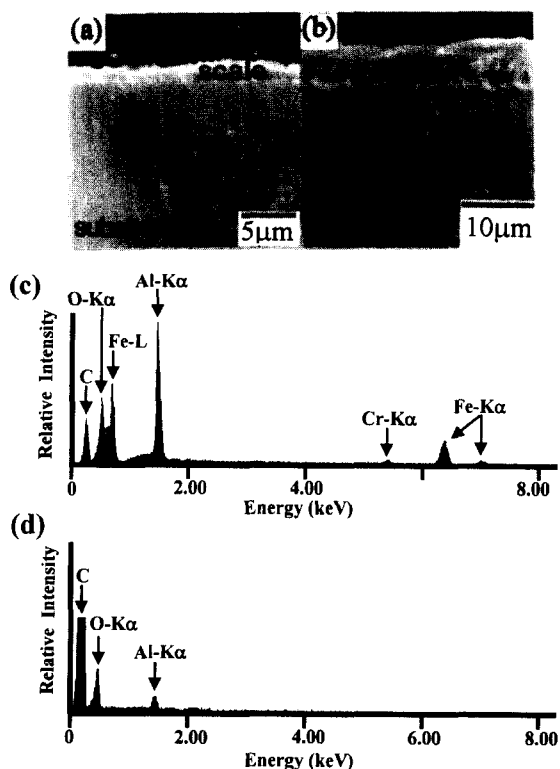


Fig. 5. Cross-sectional scales formed after oxidation. (a) SEM image of Fe<sub>3</sub>Al-4Cr, 1073K for 10 days, (b) SEM image of Fe<sub>3</sub>Al, 1273K for 16 days, (c) EDS spectrum of the oxide scale shown in (a), (d) EDS spectrum of the oxide scale shown in (b).

그림 6은 Fe<sub>3</sub>Al(-4Cr) 합금을 1473K에서 6일간 산화시켰을 때 형성되는 산화막의 형상과 EDS 분석결과를 나타낸 것이다. 온도증가에 따른 내산화성의 저하에 의해 Fe<sub>3</sub>Al시편에서 생성된 두꺼운 산화막은 2층으로 파단되어 있다(그림 6(a)). 이는 산화막이 임계 두께에 도달하면 잔류응력의 이완을 위해 모재로부터 박리되고<sup>16)</sup> 기존의 산화막-모재 계면은 박리된 산화막을 통과한 산소에 노출되어 새롭게 산화되지만, 모재에는 충분한 양의 Al이 존재하여<sup>9,10,12)</sup> 산화막이 박리 분리되더라도 모재 표면에는 쉽게 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>가 생성될 수 있기 때문에 2층 산화물이 형성된 것으로 사료된다. 산소는 모재와 수직인 방향으로 침입해 들어오기 때문에 모재 표면과 수직인 방향으로 성장하는 산화막 아래에는 모재와 수직인 방향으로 라멜라 형태로 생성되는 내부 산화물들이 보인다. Fe<sub>3</sub>Al 모재위에 생성된 산화막은 그림 5(b), (d)에서와 같이 거의 순수한 α-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>로서만 구성되어 있다(그림 6(b)). 1473K에서 Fe<sub>3</sub>Al과 비교하여 상대적으로 무게증량이 적었던 Fe<sub>3</sub>Al-4Cr 모재 위에 형성된 산화막은 아직까지 두 층으로는 분리되지는 않았고, 산화막 아래의 모재에는 내부산화물도 보이지 않는다(그림 6(c)). 또한, 그림 5(a), (c)에서와 같이 Fe와 Cr이 일부 고용되어 있는 α-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>로 구성되어 있다(그림 6(d)). 순수한 Fe<sub>3</sub>Al합금에서는 Al의 외부확산이 지배적으로 발생하였지만<sup>17)</sup>, Fe<sub>3</sub>Al-4Cr 합금에서는 Al이온 뿐만 아니라 Fe와Cr이온도 산화물내로 외부확산함이 본 실험에서 밝혀졌으며, 산화막내에 고용된 Fe와 Cr이온은 α-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 산화막의 접착력을

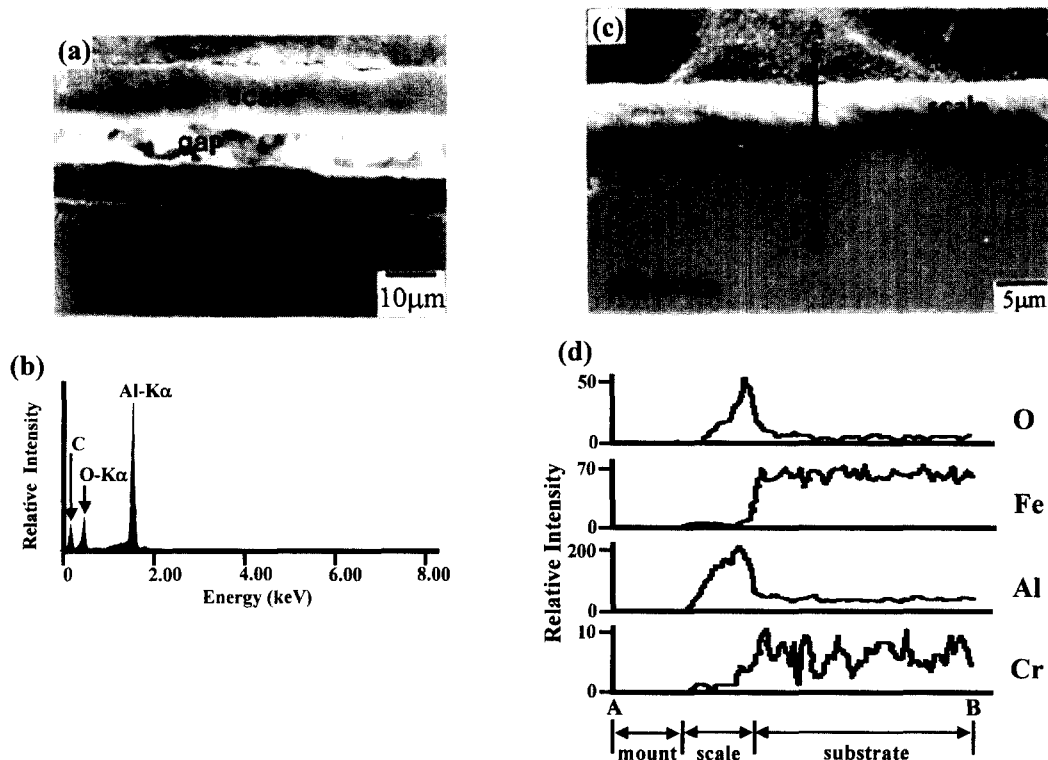


Fig. 6. Cross-sectional scales formed after oxidation at 1473K for 6 days. (a) SEM image of Fe<sub>3</sub>Al, (b) EDS spectrum of the oxide scale shown in (a), (c) SEM image of Fe<sub>3</sub>Al-4Cr, (d) EDS line profile of the oxide scale shown in (c).

산화막의 양론적 (stoichiometry) 의 차이, 산화막 결정구조 차이 또는 결정립 크기 차이 등의 효과<sup>16)</sup>에 의해 어느 정도 증진시키는 것으로 사료된다.

한편, Fe-Al 합금의 고온 산화시 생성되는  $Al_2O_3$  산화물의 종류는 치밀하고, 느린 성장속도를 가진 안정한  $\alpha-Al_2O_3$  뿐만 아니라 낮은 산화온도 (1073-1273K)와 짧은 산화시간 (0-20시간)에서는 둥근 입자로 구성되어 있는 준안정한  $\gamma-Al_2O_3$  및 whisker 또는 blade 모양의 독특한 형태를 갖는 준안정한  $\theta-Al_2O_3$  상도 존재하여 합금의 산화속도에 영향을 미치게 된다.<sup>18)</sup> 그런데, 본 실험에서 이들 준안정한 ( $\theta$ -,  $\gamma$ -)  $Al_2O_3$  상이 관찰되지 않은 이유는 본 실험의 경우 1073K 이상에서 1일 이상 산화시킨 시편에 대해 조사하였기 때문이다. (Fe, Ni)-Al계 금속간 화합물의 고온산화시 초기에는 준안정  $Al_2O_3$ 가 존재하고, 산화시간과 온도가 증가할수록  $\alpha-Al_2O_3$ 로 변태하는 것에 대해서는 기존에 많은 연구<sup>17,18)</sup>가 수행되었기 때문에 본 연구에서는 생략하였다.

#### 4. 결 론

유도용해 후 단조가공된  $Fe_3Al$ 과  $Fe_3Al-4Cr$  합금의 고온 장시간 산화에서 1073와 1273K에서는  $Fe_3Al$  합금이 실험오차범위 내에서 약간 우수하였으며, 1473K에서는  $Fe_3Al-4Cr$  합금의 내산화성이 약간 우수하였다. 1273K까지는 생성된 산화막은 비교적 얇고 치밀하였으나, 1473K에서 산화막이 두꺼울 때는 박리도 용이해지고, 산화막은 두 층으로 분리되었다. 이때, 산화막 직하의 모재에는 기공과 내부산화물들이 보였다. 순수한  $\alpha-Al_2O_3$  산화막이 형성되는  $Fe_3Al$ 합금과는 달리,  $Fe_3Al-4Cr$  합금에서는 Fe와 Cr이 고용된  $\alpha-Al_2O_3$  산화막이 형성되었다.

#### 감사의 글

본 연구는 한국과학재단 산하 성균관대학교 플라즈마 응용 표면기술 연구센터의 연구비 지원으로 이루어졌습니다.

#### 참 고 문 헌

1. C.T. Liu and K.S. Kumar, JOM, **45**(5), 38 (1993).
2. 박종우, 대한금속학회 회보, **5**, 35 (1992).
3. C.G. McKamey, J.H. DeVan, P.I. Tortorelli and V. K. Sikka, J. Mater. Res., **6**, 1779 (1991).
4. V.K. Sikka, Processing, Properties and Application of Iron Aluminides, eds. J.H. Schneibel and M.A. Crimp, TMS, Warrendale, PA, p. 3 (1994).
5. J.R. Knibole and R.N. Wright, Mater. Sci. Eng., **A153**, 382 (1992).
6. C.G. McKamey, J.A. Horton and C.T. Liu, Scrip. Metall., **22**, 1679 (1988).
7. 최한철, 최담천, 김관휴, 대한금속학회지, **33**, 1677 (1995).
8. J.H. DeVan, Oxidation of High-Temperature Intermetallics, eds. T. Grobstein and J. Doychak, TMS, Warrendale, PA, p. 107 (1989).
9. P.F. Tortorelli and J.H. DeVan, Mat. Sci. and Eng., **A153**, 573 (1992).
10. P.F. Tortorelli and J.H. DeVan, Processing, Properties and Application of Iron Aluminides, eds. J.H. Schneibel and M.A. Crimp, TMS, Warrendale, PA, p. 257 (1994).
11. B.H. Rabin, R.N. Wright J.R. Knibloe, R.V. Raman and S.V. Rale, Mat. Sci. and Eng., **A153**, 706 (1992).
12. W.C. Hagel, Corros., **21**, 316 (1965).
13. E.N. Bunting, Bur. Standards J. Research, **6**, 948 (1931).
14. R. Prescott and M.J. Graham, Oxid. Met., **38**, 233 (1992).
15. J.D. Kuenzly and D.L. Douglass, Oxid. Met., **8**, 139 (1974).
16. F.H. Stott, Mater. Sci. Tech., **4**, 431 (1988).
17. G.H. Meier, Oxidation of Intermetallics, eds. H.J. Grabke and M. Schütze, Wiley-VCH, New York, p. 15 (1997).
18. I. Rommerskirchen, B. Eltester and H.J. Grabke, Oxidation of Intermetallics, eds. H.J. Grabke and M. Schütze, Wiley-VCH, New York, p. 175 (1997).