

Fe-25Cr, Fe-14Al합금의 고온부식에 관한 연구

이 병 우, 김 흥 식

울산대학교 공과대학 금속공학과

A Study on High Temperature Corrosion of
Fe-25Cr and Fe-14Al Alloys

B. W. Lee and H. S. Kim

Alloys of Fe-25Cr, Fe-14Al and Fe-25Cr-6Al have been exposed isothermally to an equilibrated gas mixture of 94.9% H₂/1.1% H₂S/4% H₂O and 69.2% H₂/0.8% H₂S/30% H₂O at 1143K. Severe corrosion of Fe-25Cr alloy in both environments by the formation of non-protective Fe-rich sulfide in the outer layer of scale and Cr-rich sulfide in the inner layer of scale has been observed. Preferential sulfidation of iron and chromium of Fe-25Cr-6Al alloy in both environments enriched aluminium at the alloy/scale interface and reduced the corrosion rate of Fe-25Cr-6Al alloy compared to Fe-25Cr alloy. A complete and dense Al₂O₃ rich layer of scale is able to form on Fe-14Al alloy in both environments and protects the alloy from extensive corrosion for the 7 hours test period. However the scales showed a propensity toward a scale spallation due to thermal expansion mismatch stresses for the long hour period.

1. 서 론

고온 재료의 개발은 주로 산화성분위기에서 내식성을 갖는 합금으로서 기존의 Fe-Ni-Cr계열의 스테인레스강과 Fe-Ni-Cr-Al-X계열의 초합금 개발에 주력하였다. 현재 사용되고 있는 고온 재료는 Ni-Cr전열선이나 가스터빈 엔진의 blade와 같이 고산화/저유황분위기의 고온부식에 저항을 갈도록 설계된것으로 내식성박막은 Cr₂O₃이거나 Al₂O₃이다. Cr₂O₃는 1000°C이상에서 불안정하여 휘발에 의하여 내식 능력을 서서히 상실하는 것으로 알려져

※ “이 논문은 1989년도 문교부지원 학술진흥재단의 자유공모 과제 학술연구 조성비에 의하여 연구 되었음”

저 있고 Al₂O₃는 1000°C이상에서도 비교적 안정하여 가스터빈 재료에 주로 이용되고 있다.¹⁻⁶⁾

최근에는 산화성분위기에서 형성되는 부동태 산화물박막의 결함과 내부응력을 감소시키기위해 산화물박막과 합금의 계면에 백금을 도금하거나 Ce, Y, Hf, La, Zr, Ti, Ta 등 산소와의 반응성이 강한 합금원소나 희토류계열의 원소를 미량 첨가함으로써 고온에서 사용하는 내식합금의 사용수명을 연장시키려는 연구가 계속되고 있다.⁷⁻¹²⁾

본 연구에서는 여러문헌을 비교하고 열역학적 자료를 검토하여 고온부식분위기에서 치밀하고 이온화 경향이 적어 장시간 고온에 노출하여도 안정한 내식성 부동태박막이 형성될 수 있으리라 판단되는

합금으로서 Fe-25Cr, Fe-25Cr-6Al, Fe-14Al 합금을 선정, 고온부식 실험을 수행하여 각합금의 고온내식성을 비교 검토하였다.

2. 실험방법

2. 1 시편제작

Fe-25Cr, Fe-25Cr-6Al, Fe-14Al 합금의 시편들을 용량 50g의 진공 Arc용해로에 용해하여 응고시킨후 열간단조 또는 압연하여 열응력을 충분히 제거시키고, 시편을 10×5×1mm의 편상시편으로 절단하여 고온부식실험 및 전자현미경관찰에 사용하였고 각 시편의 화학적 성분은 Table 1과 같다.

Table. 1 Chemical composition of alloys

(Wt %)					
Alloy	Fe	Cr	Al	C	P
Fe-Cr	75.45	24.5	-	0.04	0.01
Fe-Cr-Al	69.75	24.6	5.6	0.04	0.01
Fe-Al	86.26	-	13.7	0.03	0.01

2. 2 고온부식실험 및 전자현미경관찰

각 시편들은 #320 - #1200의 연마지로써 연마하고 0.05μm 입도의 Al₂O₃ 연마제로 polishing한후 초음파세척시켜 건조하고 10⁻⁴g 정도의 신뢰도를 가진 Satorius천칭에서 무게를 칭량, 고온부식실험장치¹³⁾를 이용하여 수소가스, 수소 97.8%/황화수소 2.2% 혼합가스와 water bath를 통한 수증기를 적절하게 배합시켜 황화성, 황화성/산화성, 산화성분위기를 조절하였다. 이때의 부식실험분위기는 Table 2와 같다.

Table. 2 Initial gas composition and calculated PO₂ & PS₂ values at 1143K

Environment	H	H ₂ S	H ₂ O	PO ₂ (atm)	PS ₂ (atm)
1	94.9	1.1	4.0	3.11 × 10 ⁻²⁰	1.1 × 10 ⁻⁷
2	69.2	0.8	30.0	3.3 × 10 ⁻¹⁶	1.06 × 10 ⁻⁷
3	70.0	-	30.0	1.0 × 10 ⁻¹⁶	-

Fe-Cr계 및 Fe-Cr-Al, Fe-Al계의 1143K에서의 고온황화 및 산화에 대한 열역학적 안정도와 Table 2에 표시된 1, 2분위기를 Fig. 1, Fig. 2, Fig. 3에 나타내었다.

Fig. 1의 Fe-Cr계의 열역학적 안정도에서 1143K에서의 각분위기의 안정상은 FeCr₂O₄, Cr₂O₃, Cr이다. 마찬가지로 Fig. 2의 Fe-Cr-Al계는 FeCr₂O₄, Cr₂O₃, Al₂O₃이고, Fig. 3의 Fe-Al계는 FeAl₂O₄, Al₂O₃

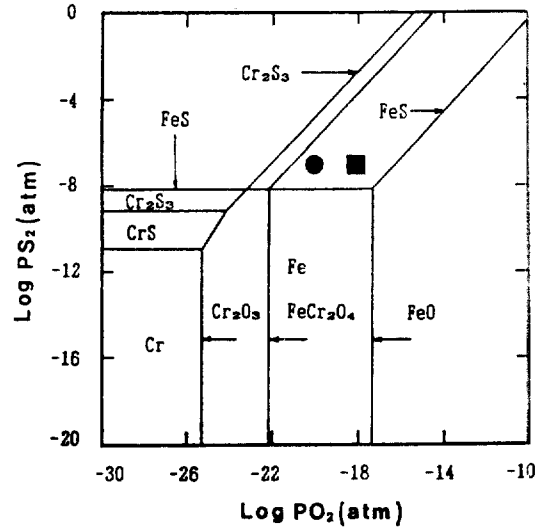


Fig. 1 Thermodynamic stability diagram for Fe-Cr system, assuming metal activities to be unity

- Sulfidation environment
- Sulfidation/Oxidation environment

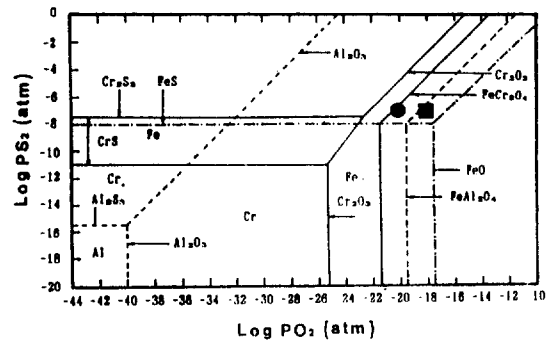


Fig. 2 Thermodynamic stability diagram for Fe-Cr-Al system, assuming metal activities to be unity at 1143K

- Sulfidation environment
- Sulfidation/Oxidation environment

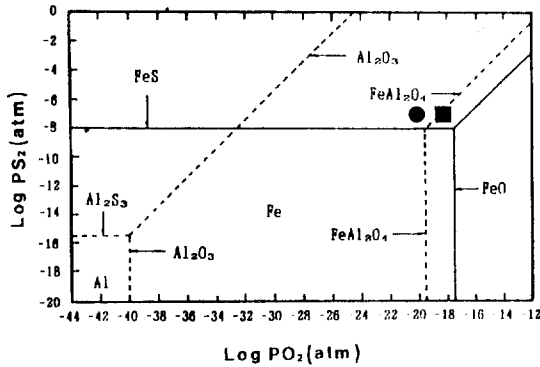


Fig. 3 Thermodynamic stability diagram for Fe-Al system, assuming metal activities to be unity

- Sulfidation environment
- Sulfidation/Oxidation environment

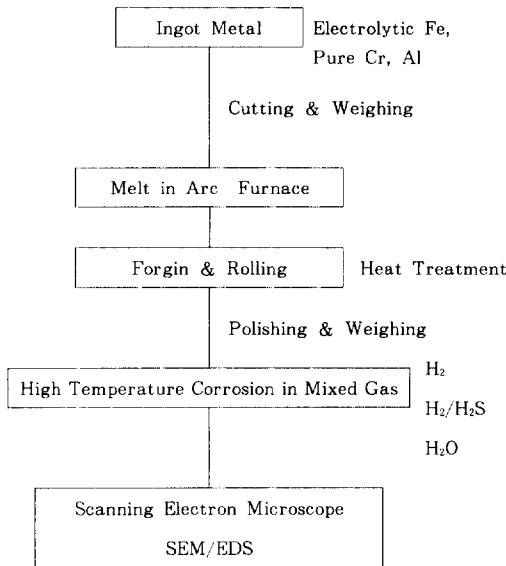


Fig. 4 Schematic diagram of experimental procedure

가 안정상이다.

부식 반응이 끝난 시편들은 데시케이터에 넣어 냉각시키고 천칭에서 무게증감을 측정 한후 부식층의 표면형상 및 성분분포특성을 확인하기 위해 주사전자현미경(JOEL, JSM 820)의 EDS분석을 이용하였다. 각 실험과정을 나타낸 계통도는 Fig. 4에 나타내었다.

3. 실험결과 및 고찰

3. 1 Fe-25Cr 합금

1143K에서의 고온부식환경에서 Fe-25Cr합금을 장시간 노출하였을때 노출시간에 따른 부식생성물로 인한 시편무게증가 경향을 Fig. 5에 나타내었다. 산화환경에서는 합금표면에 치밀한 Cr₂O₃박막의 형성으로 인해 무게증가는 반응시간이 1시간까지는 약 5mg/cm² 정도 증가하다가 장시간 노출하여도 무게증가는 일정하였다.

황화환경에서의 부식생성물로 인한 시편무게증가 경향은 황화/산화환경의 경우와 매우 유사하였다. 부식반응 초기부터 시편의 무게는 거의 직선적으로 급격히 증가하였고 반응시간 1시간이 지나면서 무게증가 곡선의 기울기는 약간 감소하였으나 반응시간이 경과함에 따라 반응 생성물의 무게가 계속증가하여 Fe-25Cr은 황화환경에서나 황화/산화환경에서 모두 고온내식성이 없음을 보여주었다.

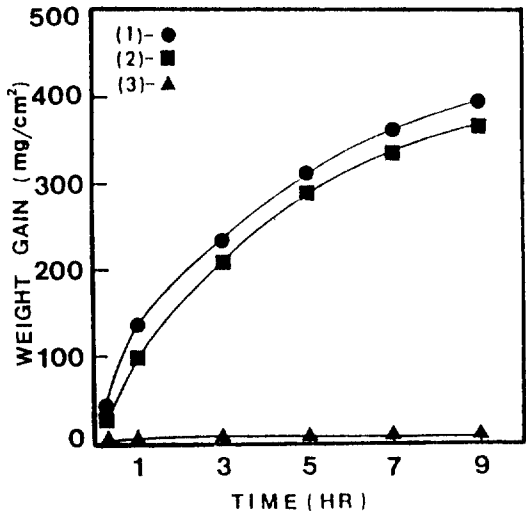


Fig. 5 Weight gain of Fe-25Cr alloy exposed to hot corrosion environment at 1143K ;

- (1) Sulfidation environment
- (2) Sulfidation/oxidation environment
- (3) Oxidation environment

3. 1. 1 Fe-25Cr합금의 고온황화부식

Fig. 6은 Fe-25Cr합금을 고온(1143K)황화부식 환경에 노출하여 얻은 부식생성물의 표면 조직을 전자현미경으로 관찰한 결과이다. 부식환경에 15분간 노출하였을때 부식생성물이 상당량 형성되고 결정화하여 미세한 결정이 시편표면을 모두 피복하였으

며 결정경계에는 미세한균열이 존재하였다. 부식환경에 1시간 이상 노출하였을때의 결정입자는 성장하여 조대하게 되었고 결정경계사이의 균열 역시 대단히 크게 성장하였으며 부식생성물의 성분은 SEM/EDS분석에 의하여 철황화물 결정이었음이 확인되었다.

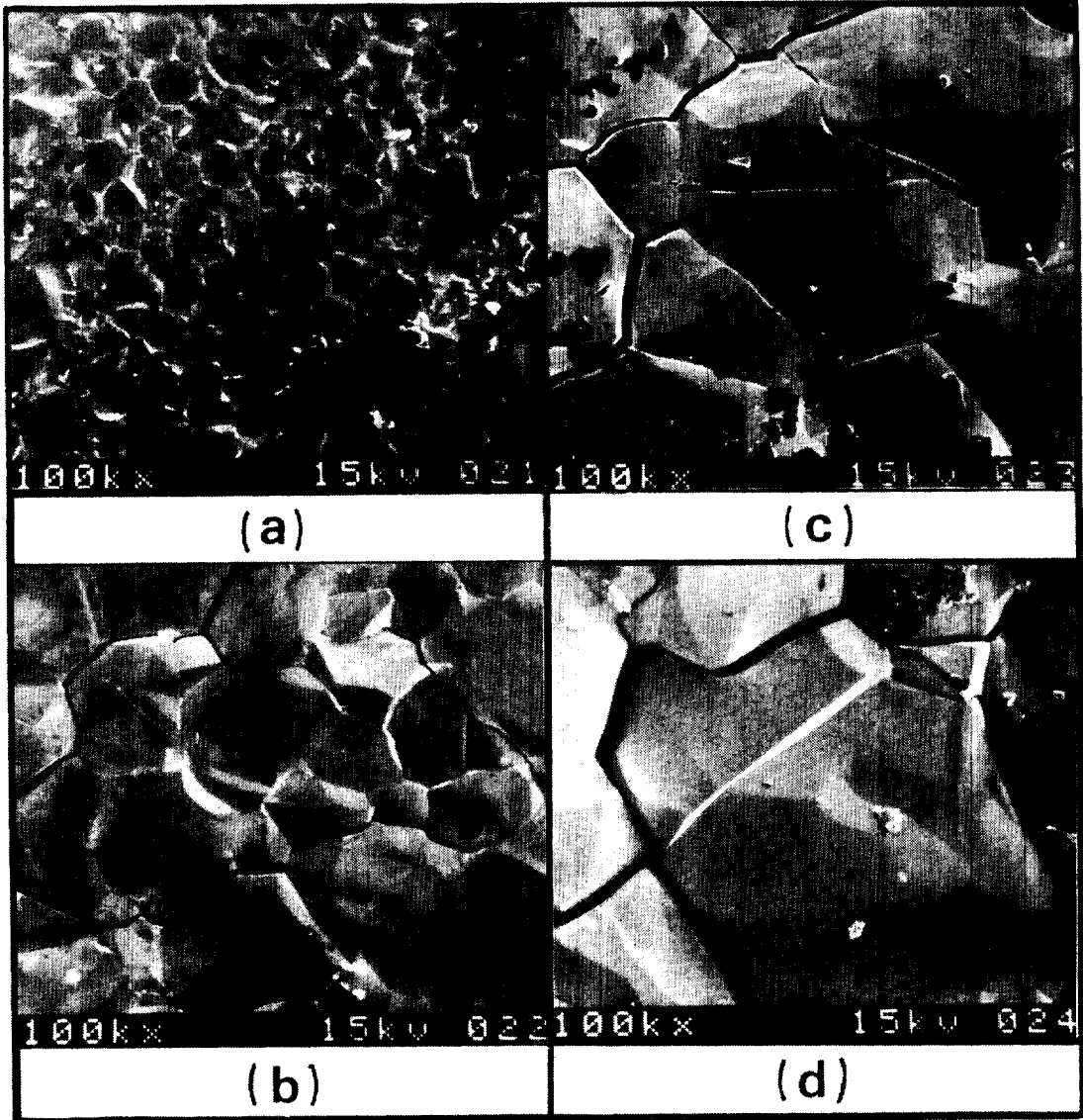


Fig. 6 Surface morphology of scale formed on Fe-25Cr alloy exposed to sulfidation environment for (a) 15 minutes (b) 1 hour (c) 3 hours (d) 5 hours respectively

Fe-25Cr합금의 합금원소가 부식거동에 미치는 영향을 알아보기 위해 부식환경에 15분간 노출한 시편의 단면조직에 대하여 SEM/EDS분석을 수행하

였다. (Fig. 7)

단면조직은 합금소지(A)와 내부부식층(B), 외부부식층(C)으로 구분되는데, 합금과 부식층경계에

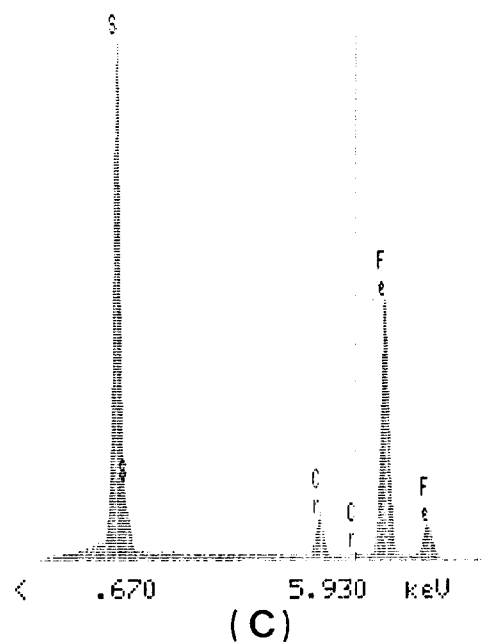
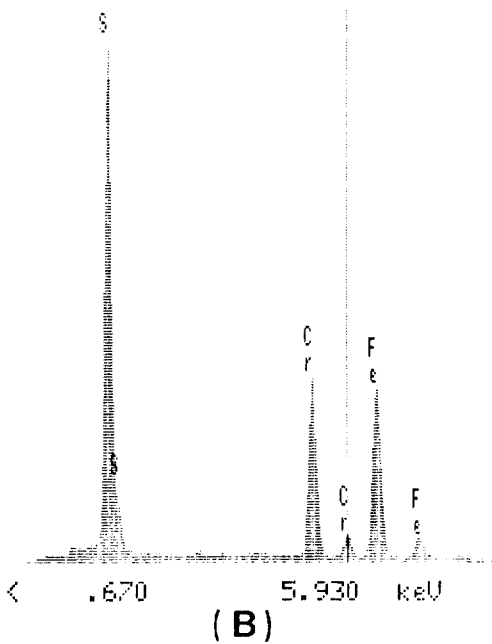
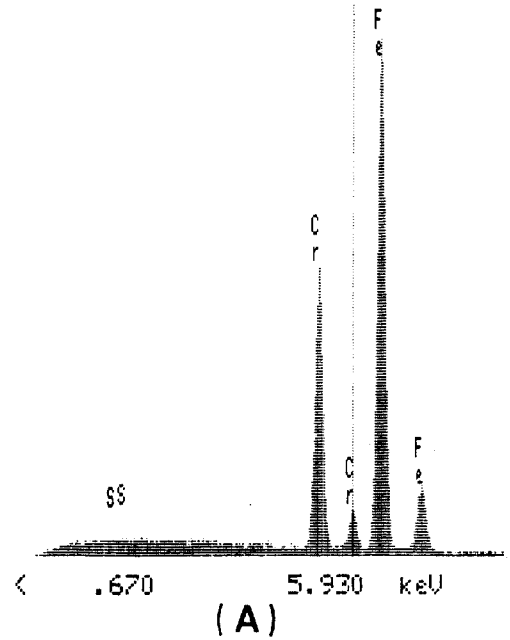
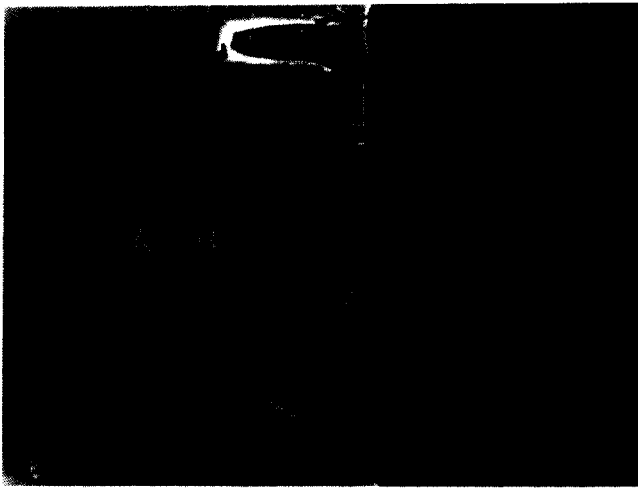


Fig. 7 SEM/EDS spectra from the cross section of Fe-25Cr alloy exposed to sulfidation environment at 1143K for 15 minutes : (A) alloy substrate (B) inner region of scale (C) outer region of scale

가까운 내부부식층은 크롬 함유량이 높은 황화물이 고 부식환경에 접하고 있는 외부부식층은 철 함유량이 높은 황화물이다.

부식환경에 3시간 노출시킨 합금과 부식 생성물의 단면조직은 SEM/EDS spectrum(Fig. 8)에 의하면 내부부식층(A)은 크롬이 상당량 함유된 황화물

이지만 외부부식층(B)은 크롬이 전혀 없는 철황화물이다. 열역학적 안정도(Fig. 1)에 의하면 고온황화 분위기에서 안정한 부식생성물은 FeS, $FeCr_2O_4$ 및 Cr_2O_3 이지만 본 실험결과는 철황화물과 크롬화물이었다. 그 이유는 부식초기에 철이 선택 황화하여 박막이 시편표면을 피복하므로서 합금과 부식

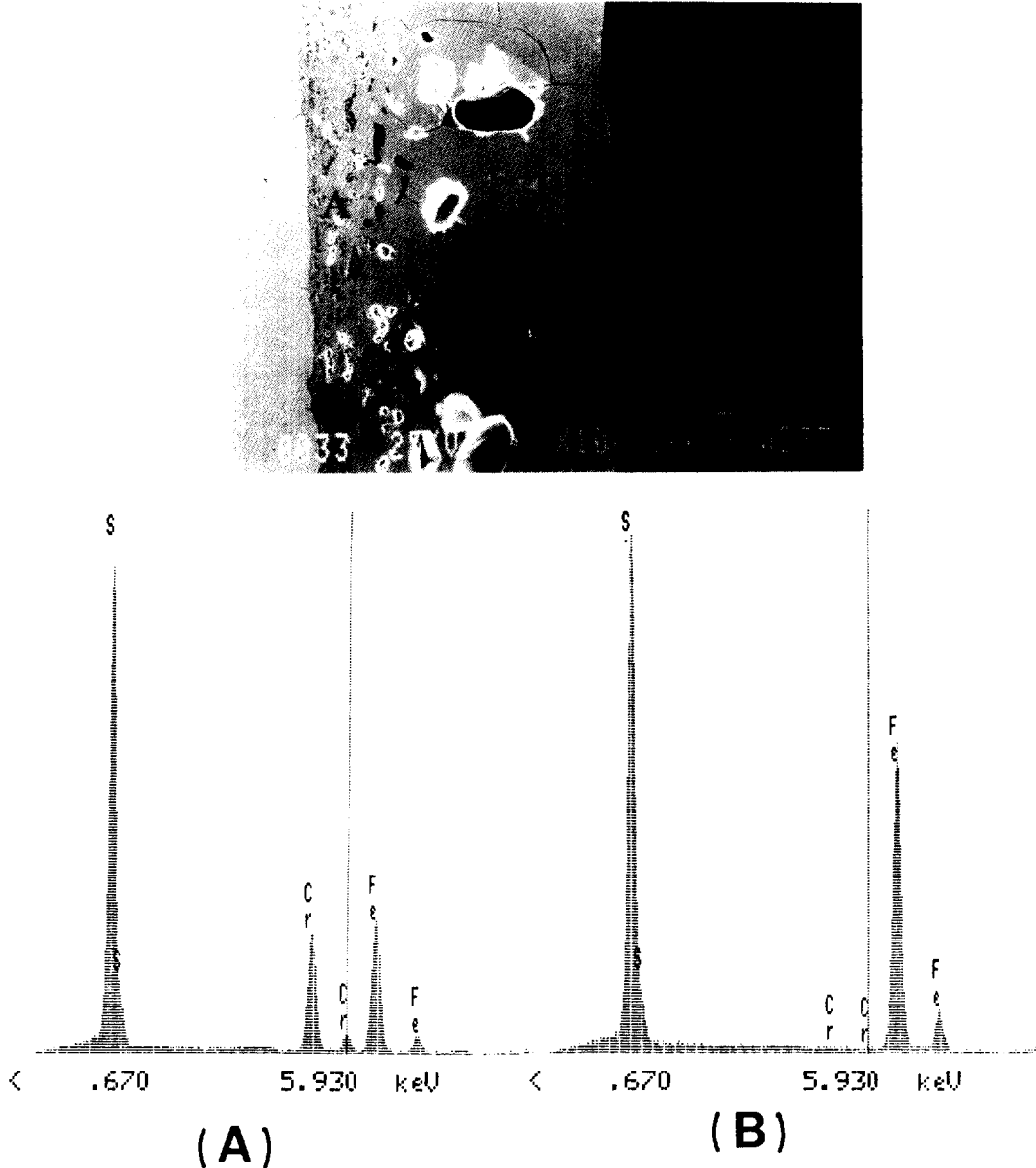


Fig. 8 SEM/EDS spectra from the cross section of scale formed on Fe-25Cr alloy exposed to sulfidation environment at 1143K for 3 hours ; (A) inner scale (B) outer scale

생성물 계면에 산소분압을 낮추어 계면에 농축된 크롬을 황화시켰기 때문인것과 Fe가 Cr보다 빠른 속도로 외부로 확산해 나간것으로 간주된다.

3. 1. 2 Fe-25Cr합금의 고온황화/산화 부식

Fe-25Cr합금을 고온 황화/산화 부식환경에 노출하였을때 부식생성물의 표면 조직(Fig. 9)은 고온

황화부식환경에 노출한 경우(Fig. 6)와 유사하였다. 15분간 노출하였을 경우 부식생성물의 결정경계가 명확치는 않으나 1시간 노출한 경우에는 부식생성물의 결정화가 명백히 보였고 결정경계에는 균열이 뚜렷이 나타났다. 또한 노출시간이 경과함에 따라 결정입자가 성장하였고 결정경계의 균열 역시 더욱 크게 성장하였다.

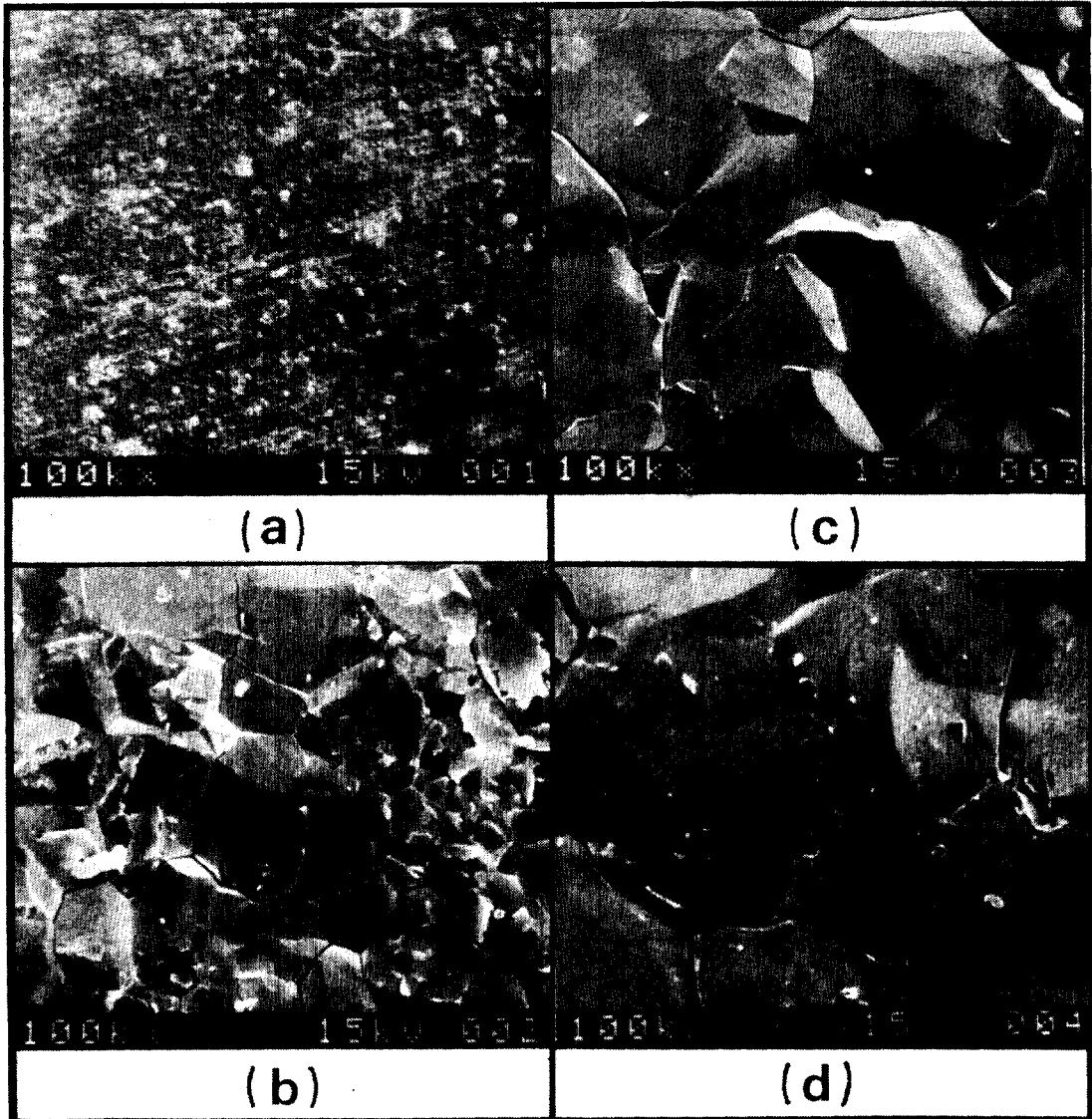


Fig. 9 Surface morphology of scale formed on Fe-25Cr alloy exposed to sulfidation/oxidation environment for (a) 15 minutes (b) 1 hour (c) 3 hours (d) 5 hours respectively

부식환경에 15분간 노출한 시편의 단면조직은 Fig. 10과 같이 내부부식층(B)와 외부부식층(C)의 구분이 뚜렷하였다. SEM/EDS 분석에 의하면 내부부식

층은 크롬함유량이 대단히 높은 황화물로서 균열이 적고 비교적 치밀한 조직이었고 외부 부식층은 미세한 균열이 다수 존재하는 철황화물이었다. 부식

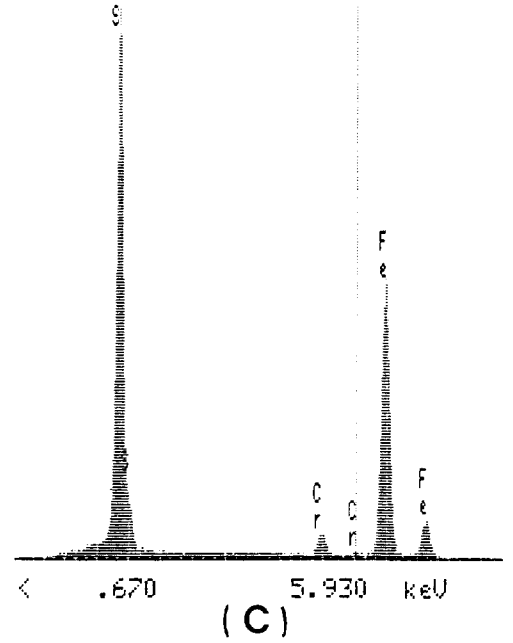
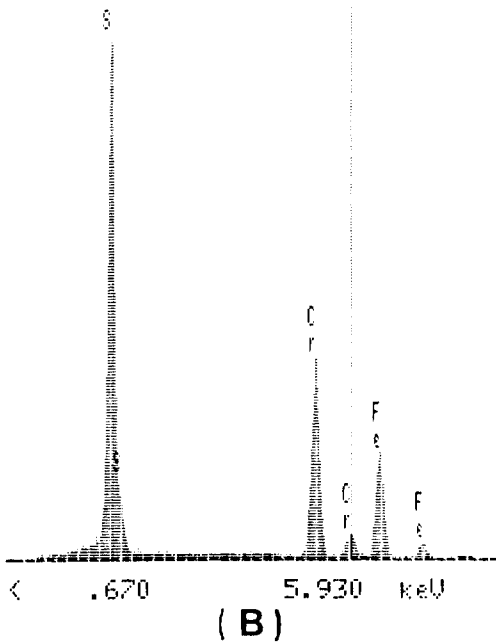
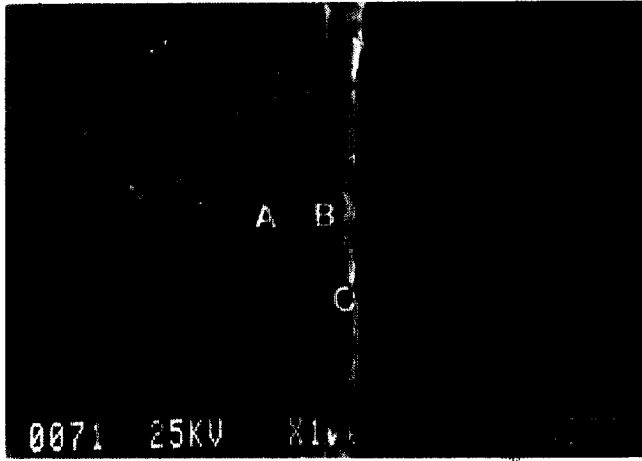


Fig. 10 SEM/EDS spectra from the cross section of Fe-25Cr alloy exposed to sulfidation/oxidation environment at 1143K for 15 minutes ;

(A) alloy substrate (B) inner region of scale (C) outer region of scale

환경에 1시간 노출시키 시편의 단면조직 역시 내부 부식층은 크롬함유량이 높은 Fe-Cr-sulfide이었고 외부부식층은 크롬을 소량 함유한 철황화물로 확인되었다.

이상과 같이 Fe-25Cr합금을 황화/산화 부식환경에 노출하였을때 형성된 부식생성물은 황화환경에 노출한 경우와 매우 유사하였고 Fe-25Cr-6Ti 및 Fe-25Cr-6Zr합금이 황화/산화환경에서 내식성 Cr_2O_3 박막을 형성하는것¹³⁾과는 매우 대조적이었다.

Cr_2S_3 와 같은 황화물이 Cr_2O_3 와 같은 산화물 보다 성장속도가 빨라 내식성이 불량한 이유는 Cr_2O_3 는 화학양론적으로 결함이 없어 치밀한 조직을 이루지만 황화물은 $Cr_2S_{3.1X}$ 로서 음이온 또는 양이온

결함을 형성하여 고온에서 확산속도가 빠르기 때문인 것으로 간주되나 이를 뒷바침할 연구의 수행이 필요하다.

3. 2 Fe-14Al 합금

Fe-14Al합금은 철에 14wt%의 알루미늄을 첨가한 합금으로서 원자비율로 Fe_3Al 의 금속간화합물이며 고온 부식환경에 특출한 내식성을 보인다고 알려져 있다.¹⁴⁾

본 연구에서도 1143K의 고온부식 환경에 노출하였을때 Fig. 11과 같이 각 환경에 따라 초기 1시간 이내까지는 $1-4mg/cm^2$ 으로 증가한후 장시간 노출하여도 무게의 증가가 없이 일정하였다.

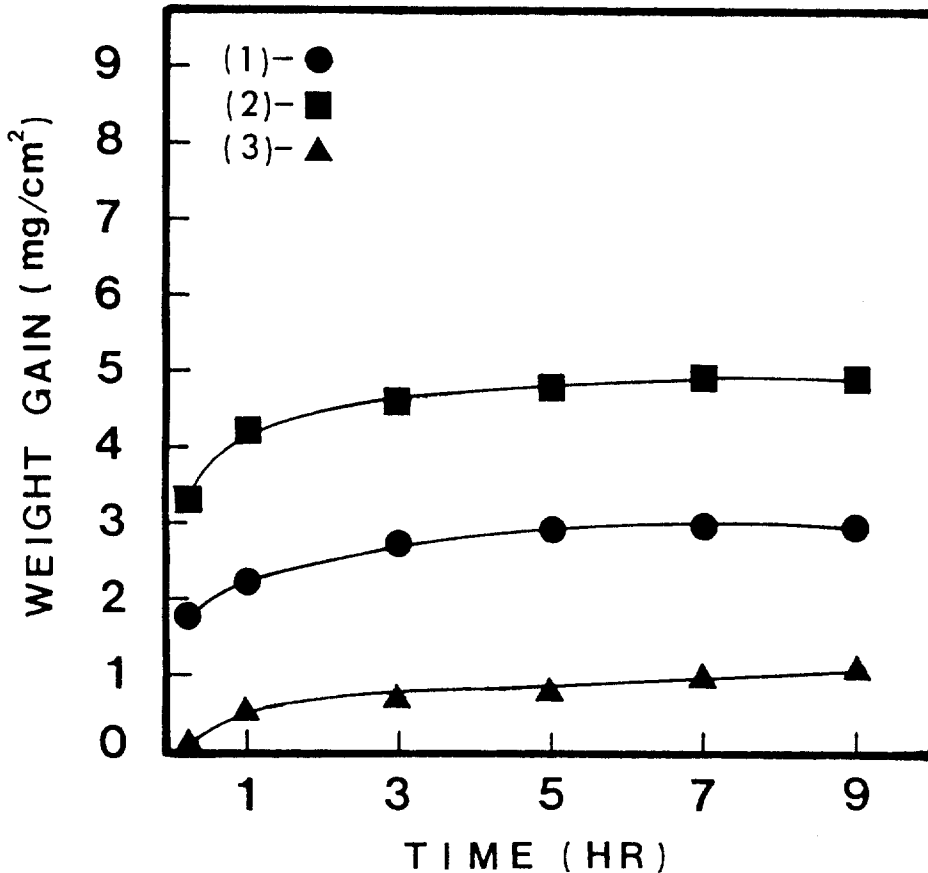


Fig. 11 Weight gain of Fe-14Al alloy exposed to hot corrosion environment at 1143K ;
 (1) Sulfidation environment (2) Sulfidation/oxidation environment (3) Oxidation environment

3. 2. 1 Fe-14Al 합금의 고온황화부식

고온 황화환경에 Fe-14Al 합금을 노출시킨 결과 형성된 부식 생성물의 표면 조직은 Fig. 12에 보인 바와 같이 표피가 국부적으로 손상되고 불균일한

모습을 보이고 있다. 부식환경에 장시간 노출시킨 고온 합금시편은 상온에 방치하였을때 Fig. 12의 (C)와 같이 부식층이 열수축으로 인하여 박리되고 합금표면에는 부식 생성물 조각의 흔적만 남아 있

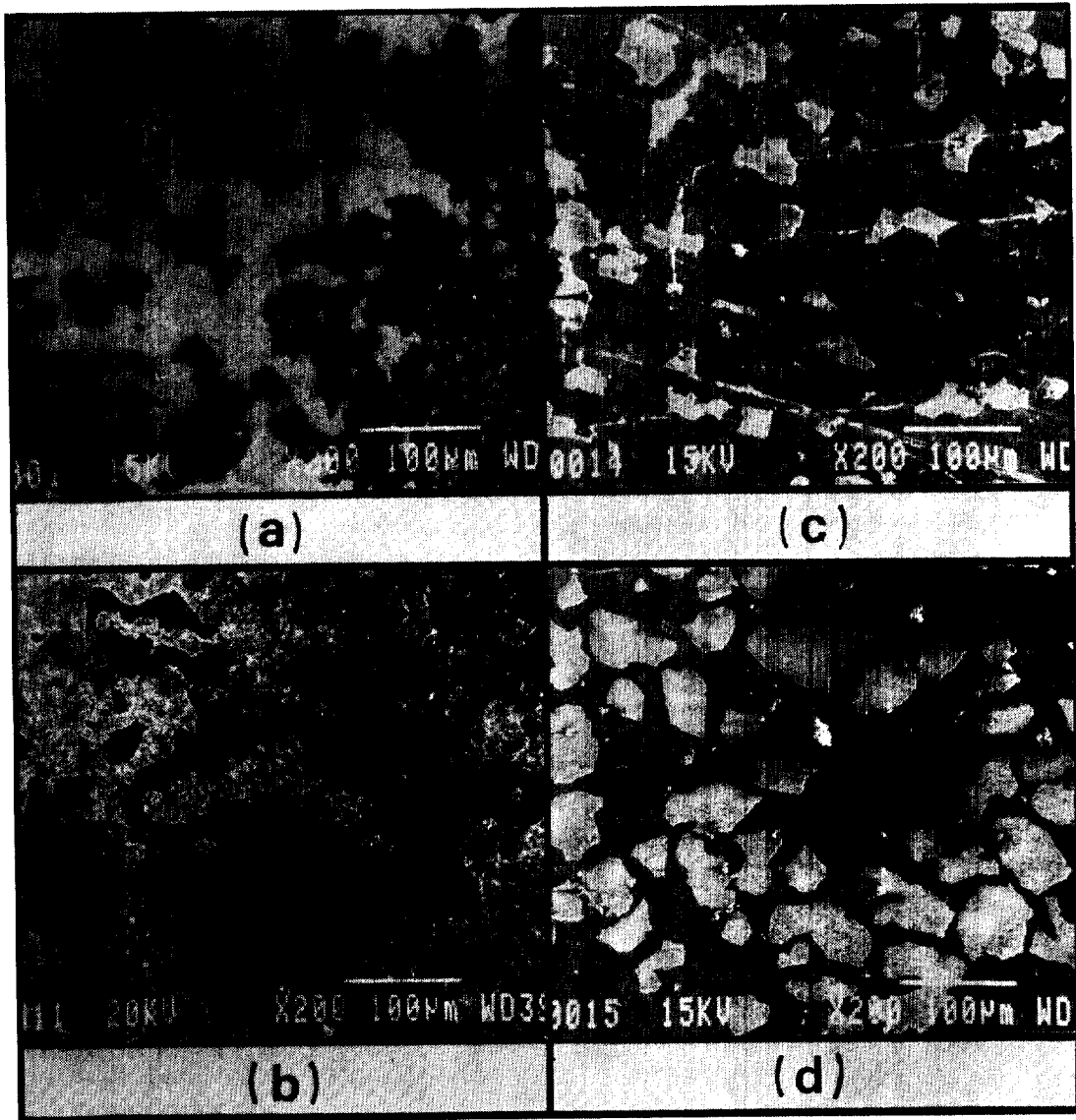
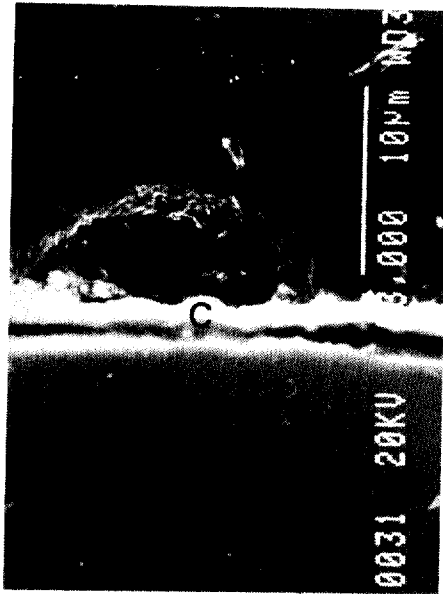
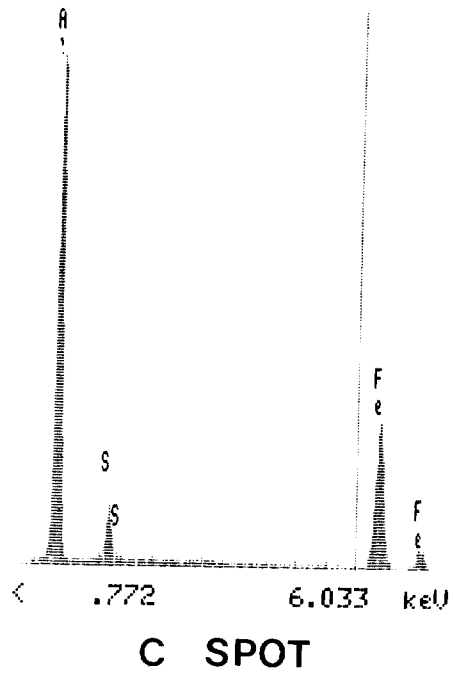


Fig. 12 Surface morphology of scale formed on Fe-14Al alloy exposed to sulfidation environment for (a) 15 minutes (b) 1 hour (c) 3 hours (d) 5 hours respectively



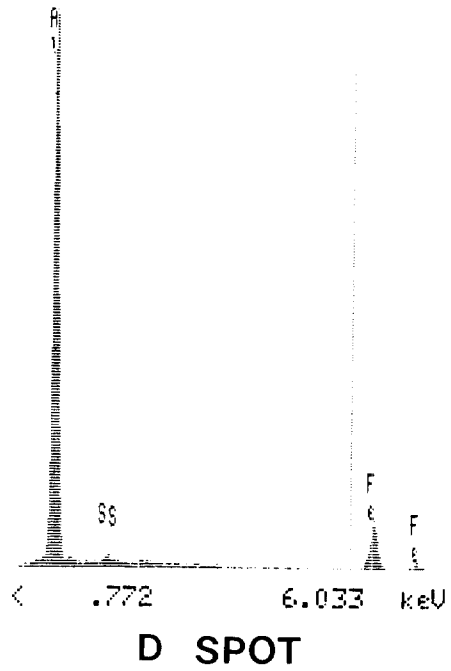
(A)



C SPOT



(B)



D SPOT

Fig. 13 SEM/EDS spectra from the cross section of scale formed on Fe-14Al alloy exposed to sulfidation environment at 1143K ; (A) 15 minutes (B) 3 hours respectively

었다. 부식층의 두께는 Fig. 13에 보인바와 같이 노출시간이 15분이 경과한후에는 크게 증가하지 않았으나 노출시간이 길 경우에는 Fig. 13의 (B)와 같이 부식층의 두께는 증가하였으나 열수축으로 인하

여 박리되어지는 과정으로 보였다. 부식층의 성분은 철이 소량 함유된 알루미늄산화물이었다. 이 환경에서의 열역학적평형에 의하면 알루미늄의 산화능력이 철의 황화능력보다 크다. 따라서 철 황화물

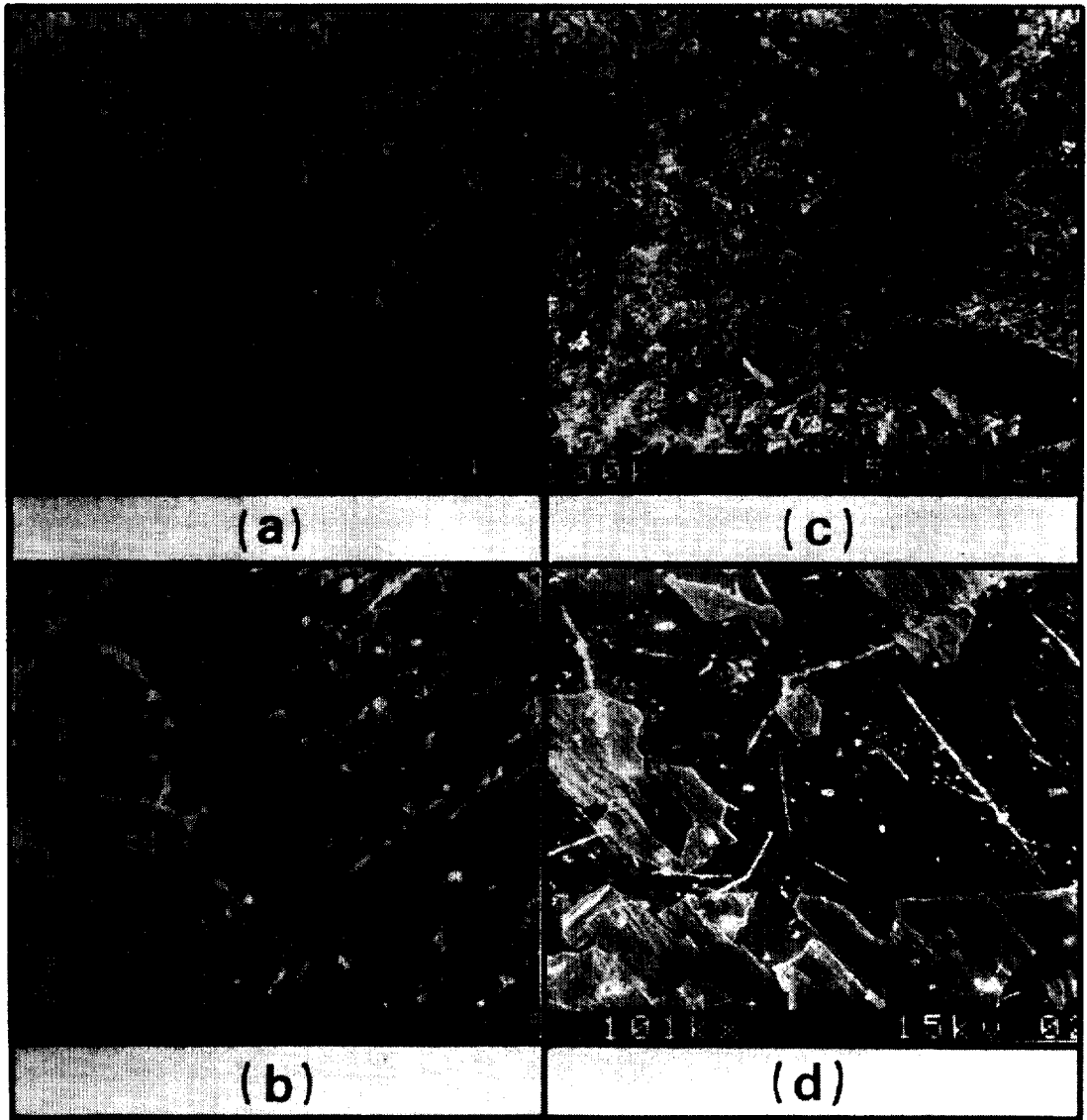


Fig. 14 Surface morphology of scale formed on Fe-14Al alloy exposed to sulfidation/oxidation environment for (a) 15 minutes (b) 1 hour (c) 3 hours (d) 5 hours respectively

이 형성되기전에 알루미늄의 산화막막이 형성되어 합금의 황화부식을 방지한 것이다.

3. 2. 2 Fe-14Al 합금의 고온 황화/산화부식 황화환경의 부식에서의 유사하게 고온 황화/산화

환경의 부식 생성물의 표면조직도 Fig. 14에 보인바와 같이 표피가 국부적으로 손상되고 불균질한 모습들을 보이고 있다. 부식환경에 장시간 노출하여 생성된 부식층은 상온에 방치하였을때 열수축으로 인

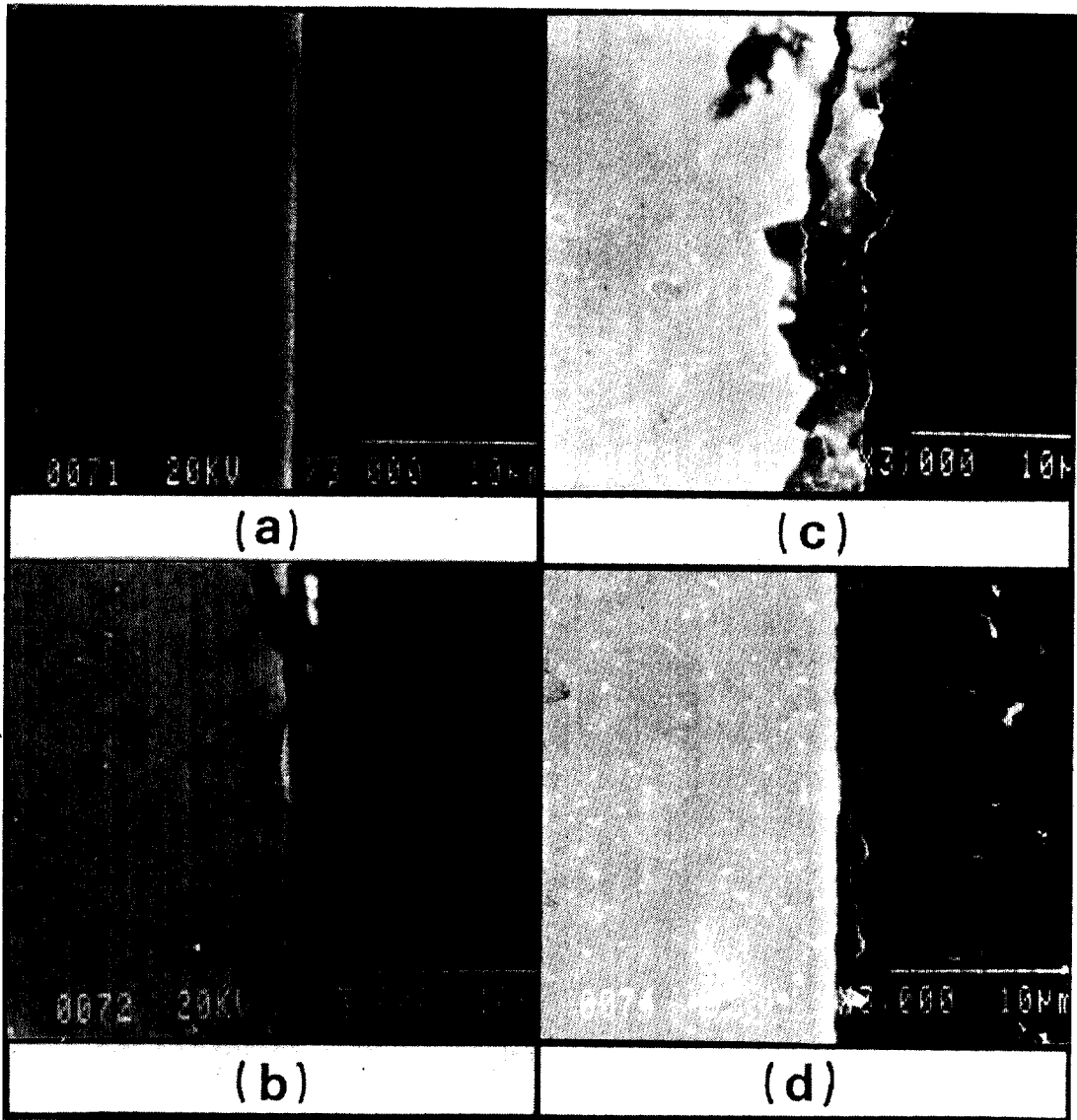


Fig. 15 Cross section of scale formed on Fe-14Al alloy exposed to sulfidation/oxidation environment for (a) 15 minutes (b) 1 hour (c) 3 hours and (d) 5 hours respectively

한 압축응력때문에 박리되어진 것으로 보인다.

황화환경과 마찬가지로 부식층의 두께(Fig. 15)는 노출시간이 1시간 경과후에는 증가하지 않았고 노출시간이 길어지면 부식층의 박리가 일어났다. 부

식층의 성분은 SEM/EDS분석(Fig. 16)에 의하면 황화 환경과 유사하게 알루미늄이 주성분인 산화물이었다.

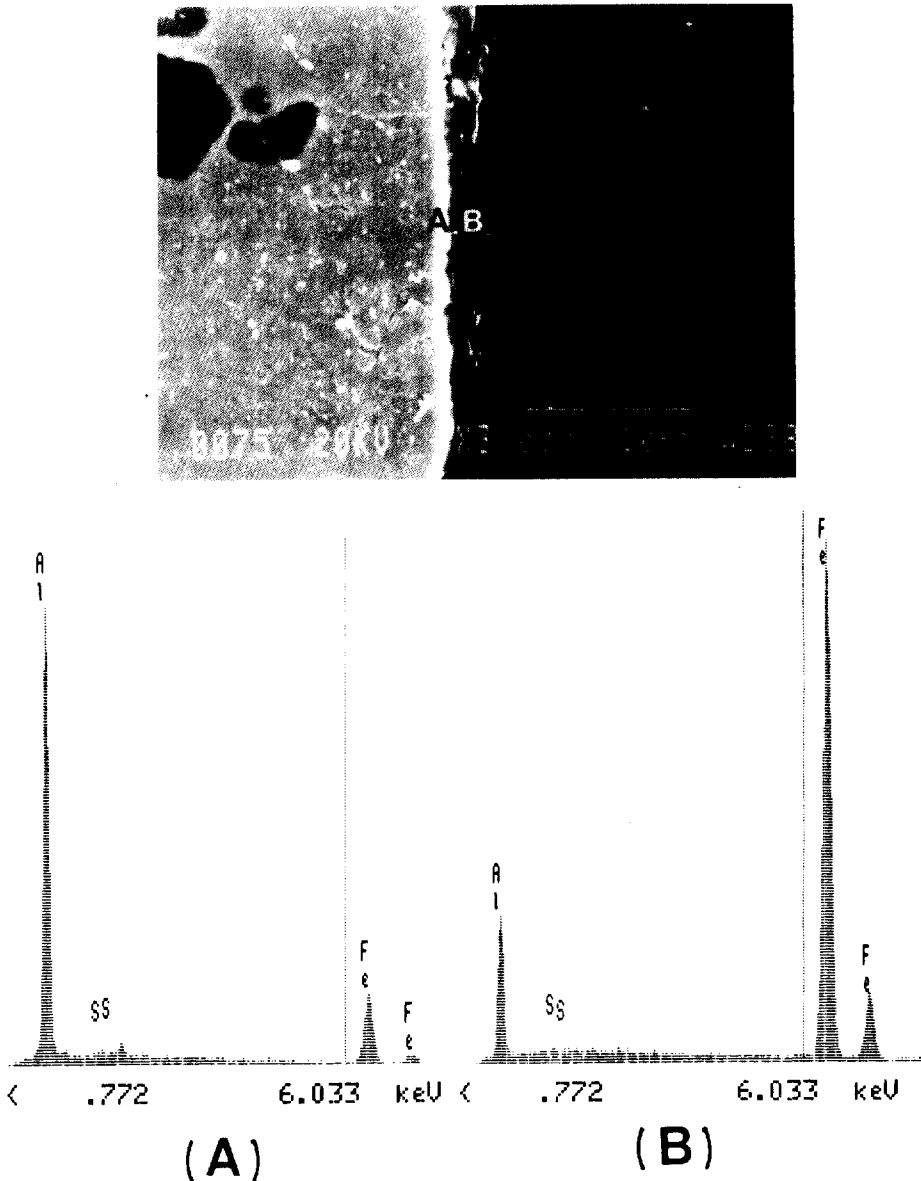


Fig. 16 SEM/EDS spectra from the cross section of scale formed on Fe-14Al alloy exposed to sulfidation/oxidation environment at 1143K for 7 hours ; (A) inner scale (B) outer scale

3. 3 Fe-25Cr-6Al 합금

Fe-25Cr-6Al합금을 고온(1143K) 부식환경에 노출하였을때 부식층 형성에 따른 무게증가 곡선을 Fig. 17에 보였다. 고온 황화부식 환경에서는 부식 초기 3시간 이내에서는 부식 생성물의 무게가 직선적으로 급격히 증가하였고 그 이후에는 완만하게 증가하여 9시간후 무게증가가 100mg/cm^2 이하로서 Fe-25Cr 합금의 무게 증가 400mg/cm^2 보다는 양호한 내식성을 보였으나 전반적으로 우수한 내식성을 갖지

못하였다. 고온 황화/산화 환경에서 부식초기 3시간 이내에 부식층의 무게가 매우 완만하게 증가하여 우수한 내식성을 보였으나 그 이후에는 부식층의 무게가 급격히 증가하므로써 황화환경에서의 내식성과 별차이가 없었다. 산화환경에서는 Al_2O_3 및 Cr_2O_3 의 내식성박막으로 인해 Fe-25Cr과 동일한 무게증가 곡선을 이루었다.

3. 3. 1 Fe-25Cr-6Al 합금의 고온 황화부식

Fe-25Cr-6Al합금을 고온 황화부식 환경에 노

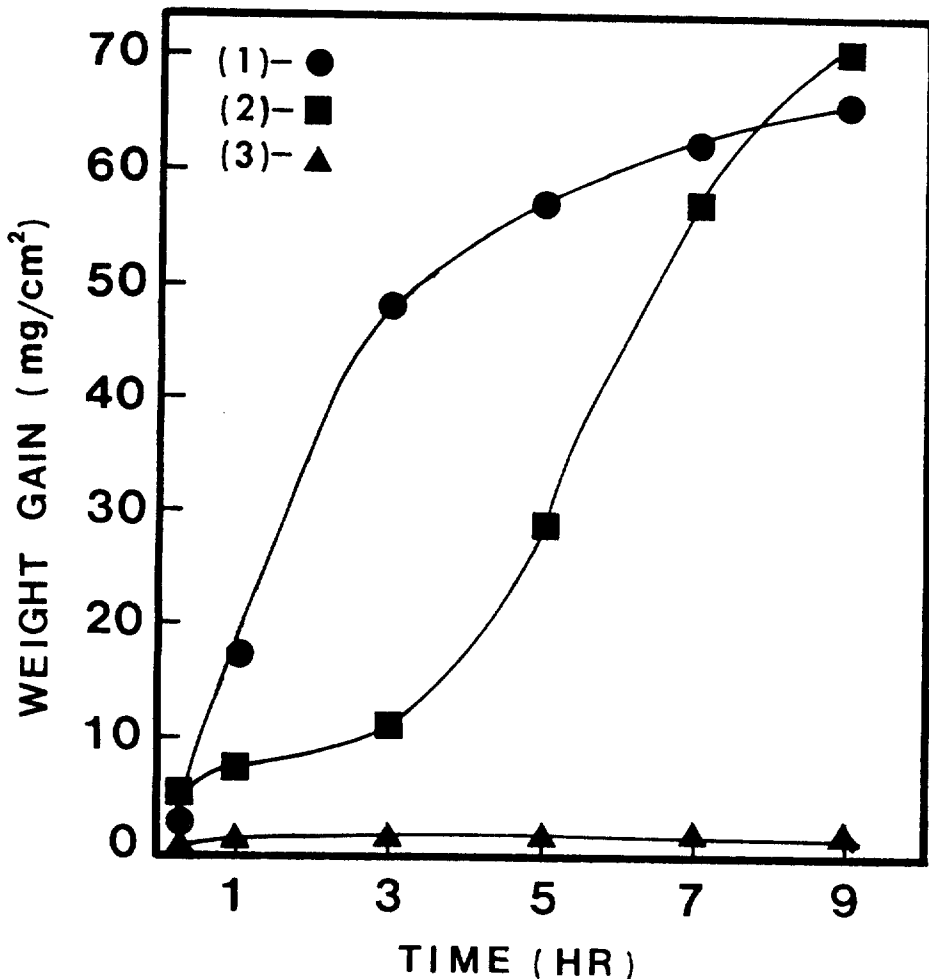


Fig. 17 Weight gain of Fe-25Cr-6Al alloy exposed to hot corrosion environment at 1143K ; (1)Sulfidation environment (2) Sulfidation/oxidation environment (3) Oxidation environment

출하였을때 형성되는 부식층의 표면형상을 Fig. 18에 보였다. 이 환경에 15분간 노출하였을때 부식층의 핵생성과 성장이 상당량 진행되었고 1시간 노출한 시편의 경우에는 부식층이 시편 표면을 완전히 피복하였으며 부식층 표면에는 침상결정이 다수 핵생성하였다. 3시간 노출하였을때는 침상결정들이

더 크게 성장하여 무질서한 망상을 이루었다. 15분간 노출하여 얻은 핵생성 부식층의 성분을 SEM/EDS로 분석한 결과를 Fig. 19에 나타내 보였다. 피막이 형성된 spot(A)는 철과 크롬을 다량 함유한 알루미늄 산화물이었고, 산화물층 위에 형성한 작은 결정상인 spot(B)는 철과 크롬의 황화물이었으며, spot

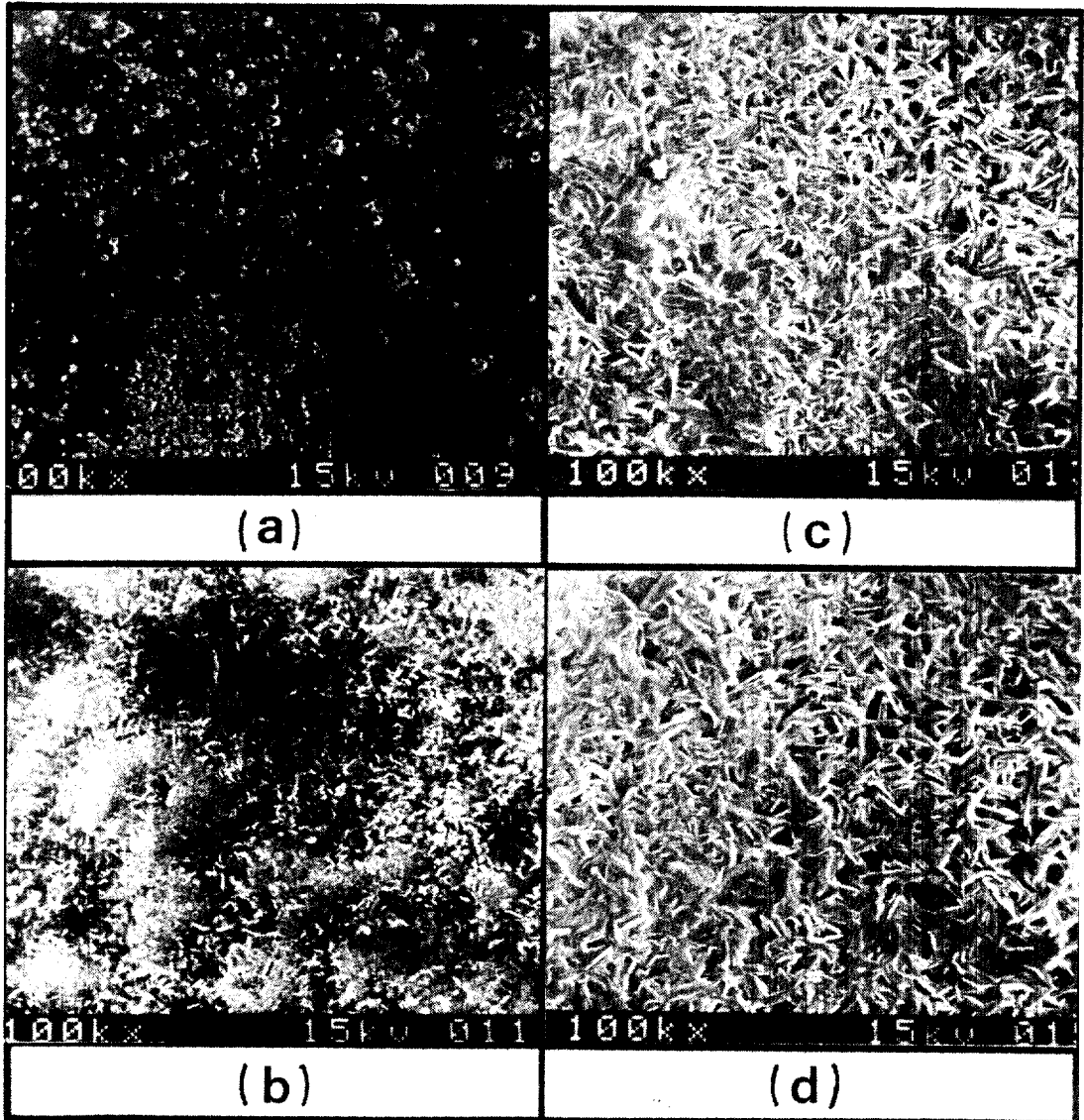


Fig. 18 Surface morphology of scale formed on Fe-25Cr-6Al alloy exposed to surfidation environment for (a) 15 minutes (b) 1 hour (c) 3 hours (d) 5 hours respectively

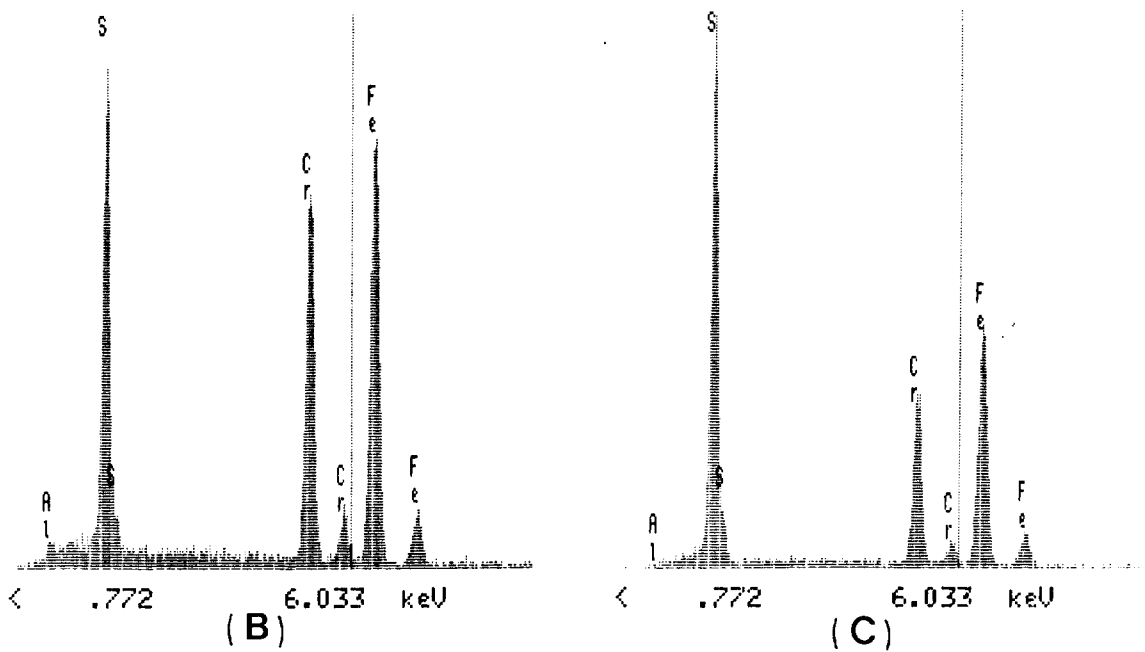
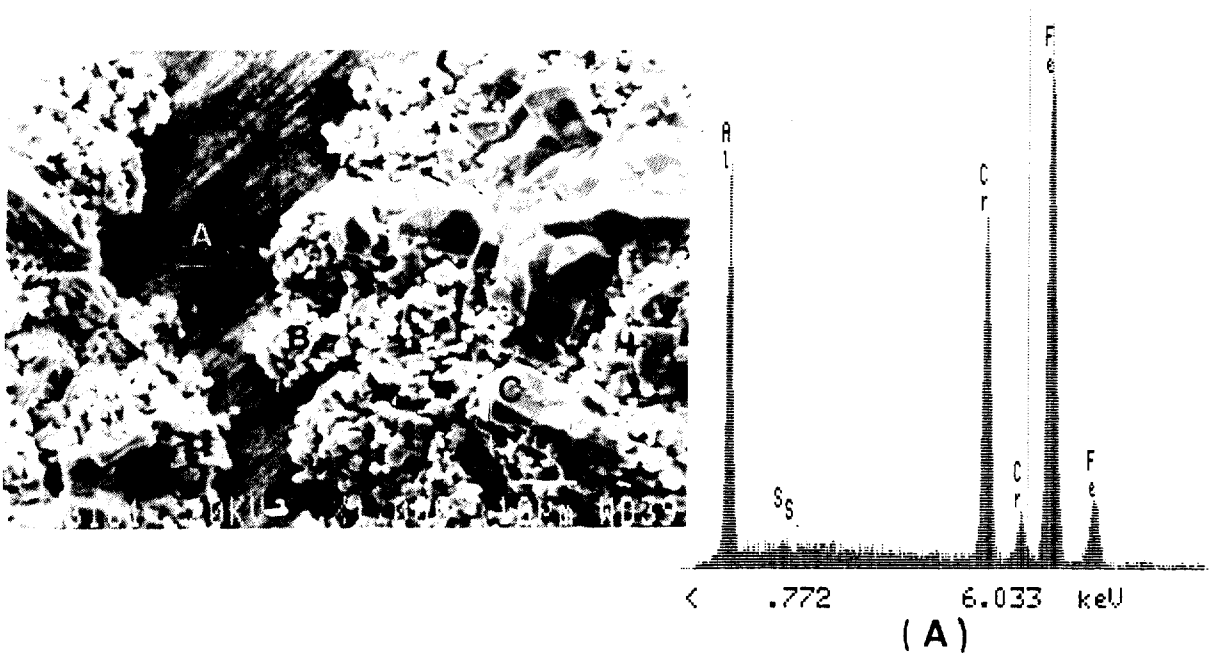


Fig. 19 SEM/EDS spectra from the surface of scale formed on Fe-25Cr-6Al alloy exposed to sulfidation environment for 15 minutes ; (A) spot A (B) spot B (C) spot C

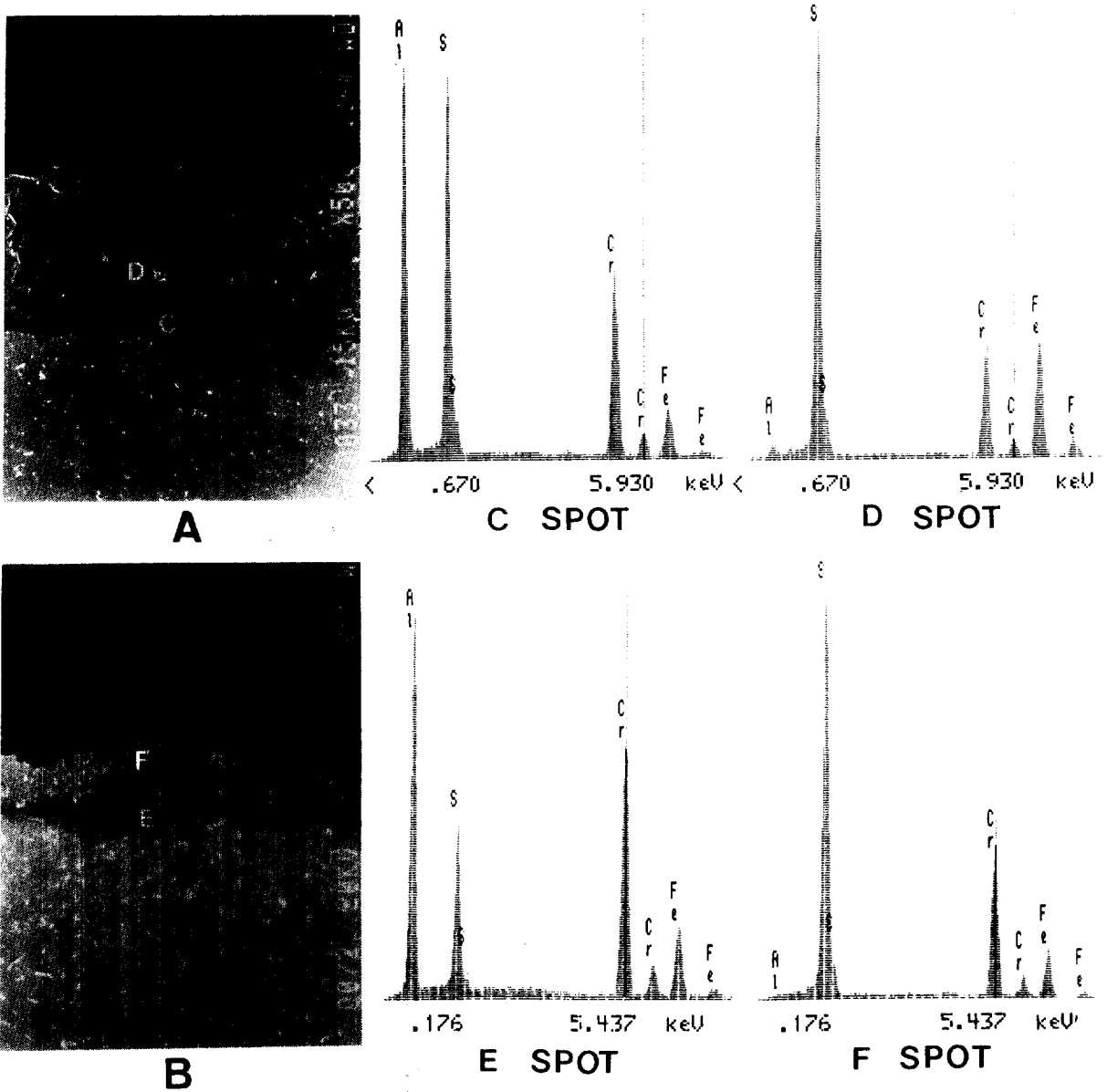


Fig. 20 SEM/EDS spectra from the cross section of scale formed on Fe-25Cr-6Al alloy exposed to hot corrosion environment at 1143K ;

(A) sulfidation environment, 3 hours (B) sulfidation/oxidation environment, 3 hours

(C)는 Fe-Cr sulfide의 결정이었음이 확인되었다. 또한 침상결정이 철과 크롬의 황화물이라는 것도 SEM/EDS로 확인할 수 있었다. 부식층의 단면조직을 Fig. 20에 보였다. 다공질이며 결함밀도가 높은 외부 부식층(D)과 합금과 부식층 계면에 좀 더 겹쳐 보이는 내부 부식층(C)으로 구분되며 부식층의 두께는 부식시간의 증가에 비례하여 증가하였다. SEM/EDS

분석에 의하면 외부 부식층은 철과 크롬의 황화물이고 내부 부식층은 크롬황화물을 함유한 알루미늄산화물로 Fig. 19의 spot분석과도 거의 일치하는 결과로 확인될 수 있다.

3. 3. 2 Fe-25Cr-6Al 합금의 고온 황화/산화 부식 부식층의 표면형상을 Fig. 21에 나타내 보였다. 15분간 부식시켰을때 부식의 핵생성과 성장이 상당히

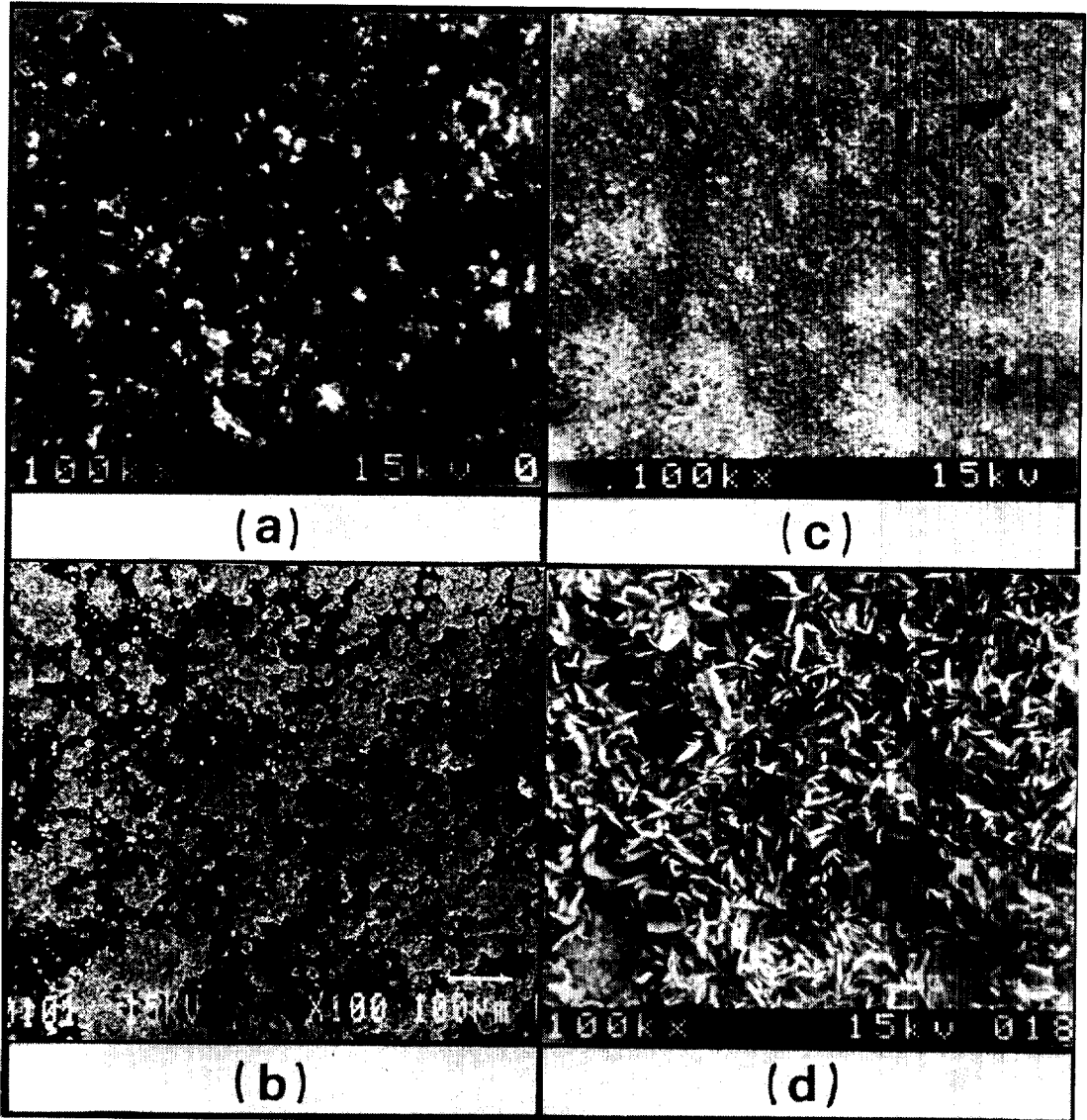


Fig. 21 Surface morphology of scale formed on Fe-25Cr-6Al alloy exposed to surfidation/oxidation environment for (a) 15 minutes (b) 1 hour (c) 3 hours (d) 5 hours respectively

진행되었고 1시간 후에는 시편 표면을 부식층이 완전히 피복하였다. 노출시간이 3시간이 지나도록 침상 황화물 결정은 생성되지 않았으나 노출시간이 5시간부터는 침상 황화물결정이 부식층 표면을 완전히 피복하였다. 침상황화물 결정의 성장은 부식이 촉진되는 신호로 간주된다. Fig. 17에 보인 무게증가 곡선에서 노출시간 3시간까지는 부식 생성물에 의한 무게증가가 대단히 완만하다는 사실과 부식층 표면에 침상결정이 핵성생하지 않는 사실은 서로 상관관계가 있음이 명백하다. Fig. 20에 보인 부식층 단면조직에서 3시간 까지는 부식층 두께가 거의 일정하였고, 외부 부식층에는 균열등의 결함이 대단히 높아졌고 5시간 이후 부터는 부식층의 두께가 급격히 증가 하였다. 3시간 노출시킨 시편의 부식층의 성분을 SEM/EDS로 분석한 결과 (Fig. 20) 외부 부식층(F)은 철과 크롬의 황화물이었고 합금과 외부 부식층 경계에 있는 검고 얇은 내부 부식층(E)은 황 함유량이 낮은 철과 크롬황화물과 알루미늄 산화물이었다. 침상 황화물 결정형성이 고온부식을 촉진하는 원인에 대하여 연구가 계속 진행되어야 할 것으로 생각된다.

결 론

Fe-25Cr, Fe-25Cr-6Al 및 Fe-14Al 합금을 1143K에서의 고온부식환경, 즉 황화(94.9% H₂/1.1% H₂S/4% H₂O)환경과 황화 산화(69.2% H₂/0.8% H₂S/30% H₂O) 환경에서 15min-9hr 노출시켜 얻은 부식층 무게증가곡선 경향과 SEM/EDS분석에 의한 실험결과를 요약하면 다음과 같다.

1. Fe-25Cr 합금의 부식층의 노출시간에 따른 무게증가곡선의 결과와 SEM/EDS분석의 결과에 의하면 철의 선택황화에 이어 Cr이 황화되므로서 황화, 황화/산화환경 모두 내식성은 거의 없었다.
2. Fe-25Cr-6Al 합금은 합금과 부식 생성물계면에 알루미늄이 농축되어 Fe-25Cr 합금 보다는 내식

성이 비교적 양호하지만 우수한 내식성이 보이지 않았다.

3. Fe-14Al 합금은 무게증가가 1~5mg/cm²으로서 환경에서 장시간 노출하여도 일정하였다. SEM/EDS 분석에 의하면 부식층은 Fe가 소량 함유된 알루미늄산화물로서 알루미늄산화막의 형성이 황화부식을 방지시켜 우수한 내식성을 보였으나 그 산화물막은 내부응력으로 인해 쉽게 붕괴되는 취약함을 보였다.

참 고 문 헌

1. G. C. Wood et al ; Roy. Soc. A356, 177(1977)
2. F. H. Stott et al ; Corr. Science. 19, 869(1979)
3. B. A. Gordon et al ; Oxid. Met. 13(2), 12(1979)
4. B. A. Gordon et al ; Oxid. Met. 13(2), 197 (1979)
5. K. Natesan ; Corrosion(NACE), 41(11), 646 (1985)
6. M. Schutze ; Mater. Sci. Technol. 4(5), 407 (1988)
7. T. T. Huang et al ; Met. trans. 16(A), 2051 (1985)
8. P. C. Patnaik and W. W. Smeltzer ; J. Electrochem. Soc. 132(5), 1226(1985)
9. T. N. Rhys-Jones et al ; Mater. Sci. Technol. 4(5), 446(1988)
10. J. L. Pandey et al ; Key. Eng. Mater. 20-28 (4), 3507(1988)
11. S. Mrowec et al ; Met. A. 35-2177(1988)
12. B. A. Ghazi ; Met. A. 35-2764, 35-2766(1988)
13. B. W. Lee and H. S. Kim ; J. Corr. Sci. Soc. of Korea. 19(2), 75(1990)
14. J. H. Devan ; "Oxidation of High Temperature Intermetallics" Edited by T. Grobstein and J. Doychak, P107(1988), published by TMS