

논문

급속응고한 Ti-48Al-xCr 금속간화합물의 미세조직에 관한 연구

정태호 · 황정현 · 남태운

A Study on the Microstructures of Rapidly Solidified Ti-48Al-xCr Intermetallic Compounds

Tae-Ho Jeong, Jung-Hyun Hwang and Tae-Woon Nam

Abstract

The effects of rapid solidification and Cr addition to the microstructure variations of the rapid solidified Ti-48Al-xCr(X = 2, 4, 6) alloys have been investigated using X-ray diffractometry, optical microscopy, scanning electron microscopy and transmission electron microscopy. The segregated coarse gamma phase was eliminated and the microstructure was refined by rapid solidification of the cooling rate of 10^4-10^6 °C/sec. The lattice parameters and tetragonality of gamma phase decrease with the increase Cr content and by the rapid solidification. Non-equilibrium phase alpha remains at room temperature condition, which would be resulted from the restriction of phase transformation alpha to alpha_2 + gamma. (Received October 14, 1999)

1. 서론

급속간 화합물은 고온강도가 우수하고 온도상승에 따른 높은 탄성률 유지능력과 확산에 대한 높은 활성화 에너지를 가지며 저온에서의 낮은 연성과 파괴인성을 나타내는 등의 특성을 지니고 있으며 2종이상의 금속 원소가 정수비로 결합하고 상온에서 long range order 구조를 이루고있는 합금으로 규정할 수 있다. 급속간 화합물은 현재 고온용 구조재료 및 내열 부품재료로 사용되고 있는 불규칙 배열된 합금계와 비교했을 때 고온에서의 강도유지능력과 크립 저항능력 및 산화저항능력이 우수하다. 이러한 특성으로 인하여 최근 규칙배열된 급속간 화합물에 대한 연구와 논의가 활발하게 진행되고 있다.[1-4] 이러한 급속간 화합물들중 TiAl계 급속간 화합물은 Fig. 1의 TiAl계 합금의 상태도에 나타낸 것과 같이 Al의 조성에 따라 TiAl, Ti3Al, Ti2Al로 구분할 수 있다. 이들 중에서 gamma TiAl(L10, tP4)계 급속간 화합물은 Table 1에 나타낸 것과 같이 현재 항공우주분야 및 기타 내열부품재료로 널리 사용되고 있는 Ni기 초합금 및 상용 Ti합금과 비교했을 때 대등한 고온물성을 가지고 있으면서 이들

합금보다 비중이 낮아 경량화가 가능한 대체재료로서 주목받고 있다[2]. TiAl 급속간 화합물이 지니고 있는 우수한 고온강도는 근본적으로 Ti원자와 Al원자간의 강한 공유결합에 의한 것이고 특히 gamma-TiAl은 결정구조 자체가 fct로 변형에 강하게 저항하고 변형에 필요한 slip계가 제한되어 있을 뿐만 아니라 전위의 이동에 필요한 활성화에너지가 높기 때문에 상온에서뿐만 아니라 고온에서도 강도 및 탄성유지능력이 우수하다. 그러나 이러한 고유특성으로 인하여 상온에서 낮은 연성과 인성을 나타내게 되며 이로 인해 우수한 고온 물성에

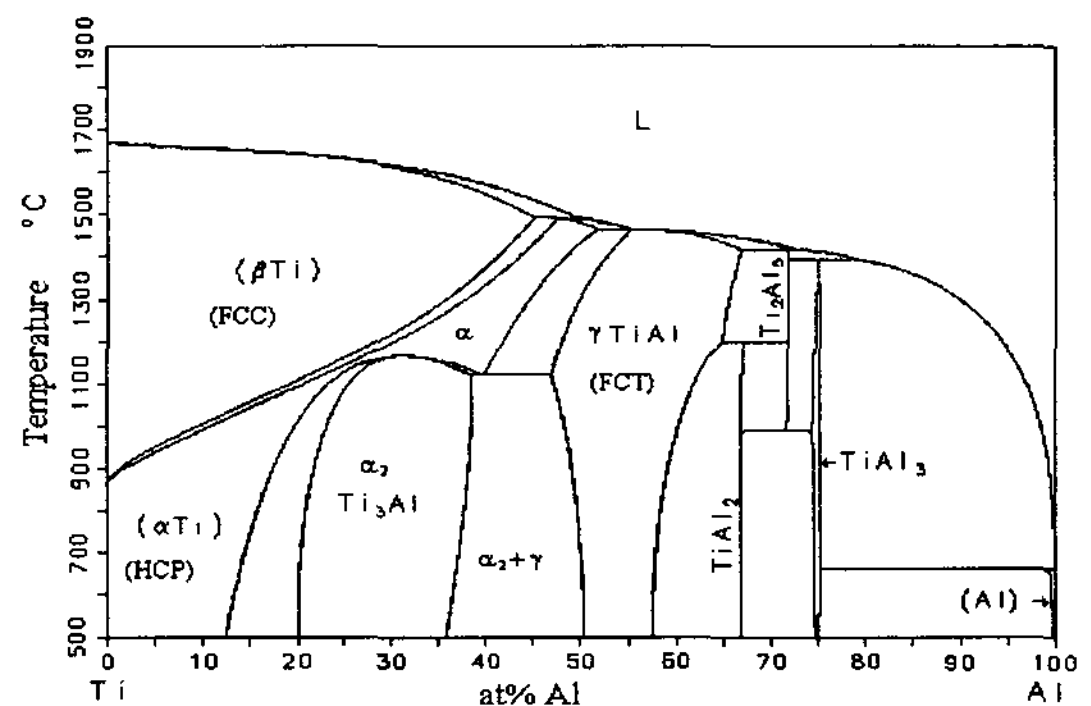


Fig. 1. Ti-Al equilibrium phase diagram.

Table 1. Properties of TiAl intermetallic compounds and superalloy

Property	Ti ₃ Al(α_2) alloys	TiAl(γ) alloys	Superalloys
Density(g/cm ³)	4.1 ~ 4.7	3.8 ~ 4.0	8.3
Young's modulud (GPa)	120 ~ 145	160 ~ 175	206
Ductility(%)	2 ~ 5	1 ~ 3	3 ~ 5
Yield strength (MPa)	700 ~ 990	400 ~ 650	1100
Thermal conductivity (W/mK)	7	22	11
Phase stability limit (°C)	1180	1440	1450
Creep limit(°C)	750	900	1090
Oxidation limit(°C)	650	900	1090

도 불구하고 상용화가 어려운 것으로 인식되고 있다.

최근 TiAl계 금속간 화합물의 취약한 상온인성 및 연성을 개선하여 상용화하기 위한 연구가 집중적으로 진행되고 있으며 이들 연구는 주로 제3원소 첨가 혹은 열처리를 통한 미세조직 제어에 중점을 두고 있으며 이를 통해 주조재의 상온 물성 향상을 도모하고 있다 [5-7]. 그러나 TiAl합금의 평형 상태도에서 알 수 있듯이 이들의 미세조직은 Al의 조성변화에 따라 매우 복잡한 응고경로를 거쳐 다양한 상을 형성하고 특히 비평형응고를 수반하는 일반 주조재는 Al의 조성변화, 응고속도의 변화 등에 더욱 민감하게 영향을 받아 보다 복잡한 응고경로를 거치기 때문에 미세조직의 해석에 많은 어려움이 따르고 있다. 또한 일반 주조재의 경우 조직내에 거대한 γ 상이 입계에 편석되고 좁은 응고범위로 인하여 불균일한 조성을 초래하여 기계적 성질을 해하는 등의 문제점을 나타내고 있다.

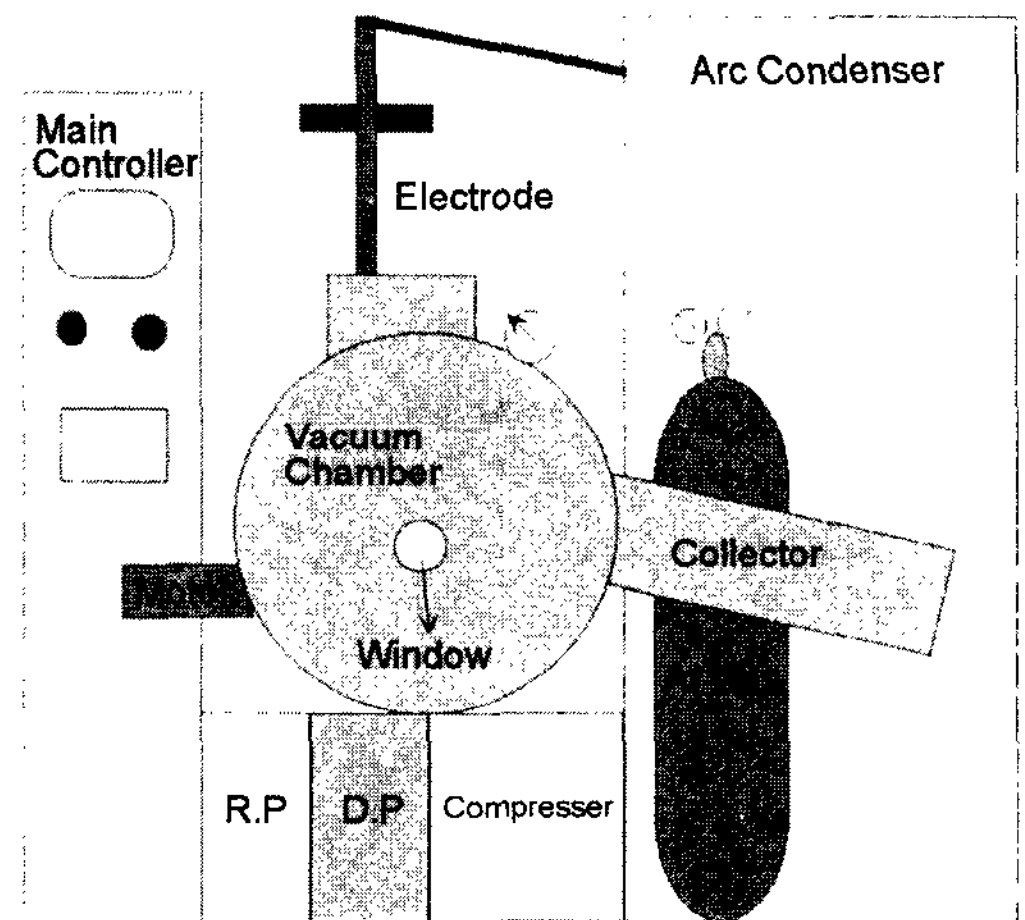
한편, 급속응고법은 잘 알려진 바와 같이 일반 주조법으로는 얻기 어려운 냉각속도를 재료에 부여함으로써 화학적으로 균일하고, 미세한 조직을 획득할 수 있으며 빠른 냉각속도를 통해 비평형응고에 의한 준안정상을 얻을 수 있다[8]. 이러한 급속응고법을 TiAl 금속간 화합물제조에 도입함으로써 통상적인 금속간 화합물제조공정에서 나타나는 제반 문제 해결이 가능하고 미세한 조직 및 균일한 화학조성을 갖는 γ -TiAl 금속간 화합물을 제조함으로써 이로 인한 연성 향상을 기대할 수 있다.

본 연구에서는 용탕추출(melt-extraction)을 이용한 급속응고법을 통해 얻어진 리본형태의 급속응고된 TiAl

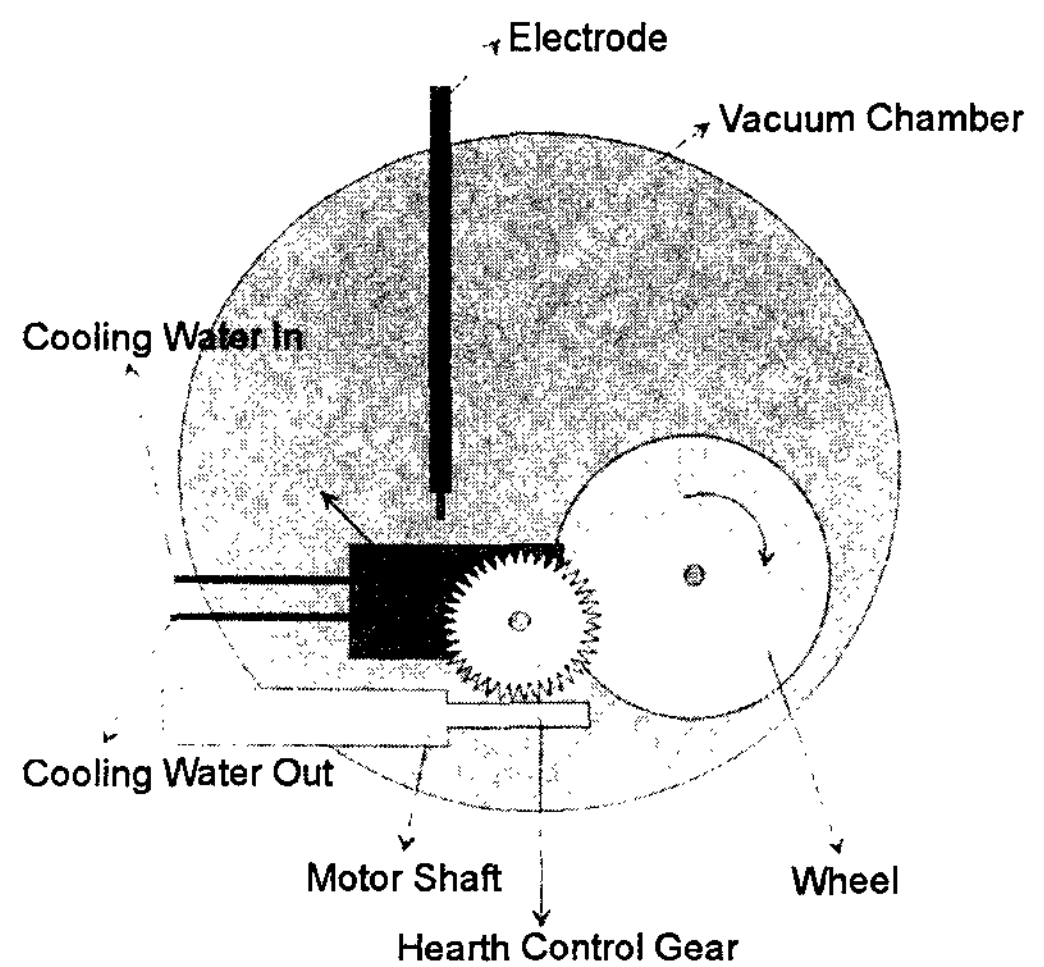
금속간 화합물의 미세조직을 연구하여 급속응고에 따른 미세조직의 변화와 함께 첨가원소인 Cr이 미세조직에 미치는 영향을 조사하였다.

2. 실험방법

모합금 및 리본제조에 이용한 vacuum plasma arc furnace와 melt extraction 장치의 개략도를 Fig. 2에 나타내었다. 모합금 및 급속 응고리본은 수냉 Cu 도가니를 사용하여 용해하였고 전극봉은 W를 사용하였다. 용해 및 리본 제조시 합금의 1회 장입량은 200 g으로 하였다. 리본 제조시 냉각속도를 결정하는 wheel은



(a)



(b)

Fig. 2. Schematic diagram of (a) vacuum plasma arc furnace and (b) melt extraction equipment.

고융점 금속인 Mo를 사용하였으며 회전속도는 1500 rpm으로 하였다. 용해 및 리본제조는 산화를 방지하고 저융점금속의 증발을 최소화하기 위해 진공챔버의 진공도를 10^{-6} torr로 유지한 후 Ar가스를 주입하여 0.5 atm의 Ar분위기 하에서 수행하였다.

급속응고된 리본을 제조하기 위한 모합금은 순도 99%의 Ti, Al, Cr을 사용하여 진공플라즈마 아크용해로(Vacuum Plasma Arc Furnace)에서 용해하였으며 합금 조성은 Al 조성을 48at%로 고정하고 Cr의 조성을 0, 2, 4, 6 at%로 변화시켜 제조하였으며 균일한 조성의 모합금 제조를 위해 5회 반복 용해하였으며 제조된 모합금을 용해하여 vacuum plasma arc furnace chamber내부에 장착된 melt extraction 장치를 이용하여 급속응고된 리본을 제조하였다.

제조된 모합금 및 급속응고 리본의 화학성분은 ICP 분석기를 이용하여 조사하였고 각 시편의 잔류가스농도를 N/O 분석기를 이용하여 조사하였다.

제조된 모합금 및 급속응고리본의 단면 미세조직과 표면의 응고형상을 주사전자현미경과 편광렌즈 및 위상차렌즈가 장착된 광학현미경을 이용하여 관찰하였고 부식액은 질산 5 ml, 불산 3 ml, 물 100 ml의 혼합용액을 사용하였다. Cu target이 장착된 X 선 회절기를 사용하여 일반 주조된 모합금과 급속 응고된 시편의 조성변화에 따른 회절패턴을 조사 분석하여 구성상의 변화를 비교관찰 하였고 Cohen법을 사용하여 γ 상의 격자상수 a와 c 및 축비 c/a를 산출하였다.

투과전자현미경(JEOL-2010, 200kV)을 이용하여 급속응고된 리본의 미세조직 및 결정구조를 관찰하였으며 시편은 $80\ \mu\text{m} \sim 100\ \mu\text{m}$ 두께의 급속응고된 리본을 $40\ \mu\text{m}$ 까지 기계연마 후 전해액(methanol 90 vol%, perchloric acid 10 vol%)에서 -30°C , 100 mA의 조건으로 전해 연마하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 조성분석결과

제조된 각 시편에 대한 조성분석결과를 Table 2에 나타내었다. 각 시편 모두 합금설계 조성에 근접한 조성으로 제조되었다. 모합금 용해 및 리본 제조 중 유입가능성이 있는 산소의 잔류농도는 측정결과 Table 2에 나타낸 것과 같이 미량인 것으로 조사되었다. 산소의 잔류농도는 TiAl 금속간 화합물계에서 침입형으로

Table 2. The results of chemical composition analysis

	Ti-48Al (A0)	Ti-48Al-2Cr (A2)	Ti-48Al-4Cr (A4)	Ti-48Al-6Cr (A6)
Ti(at%)	51.42	49.83	47.04	45.21
Al(at%)	48.48	48.06	48.73	48.98
Cr(at%)	0	1.98	4.13	5.74
O ₂ (wt%)	0.023	0.040	0.048	0.038

격자구조에 존재하여 인성 및 연성에 다소 영향을 주는 것으로 보고되고 있으나[9] 본 연구에서 제조된 시편에서의 산소잔류농도는 이러한 영향을 고려할 만한 수준은 아닌 것으로 추측된다.

3.2 단면조직관찰

Photo 1에 Cr조성 변화에 따른 모합금의 미세 조직

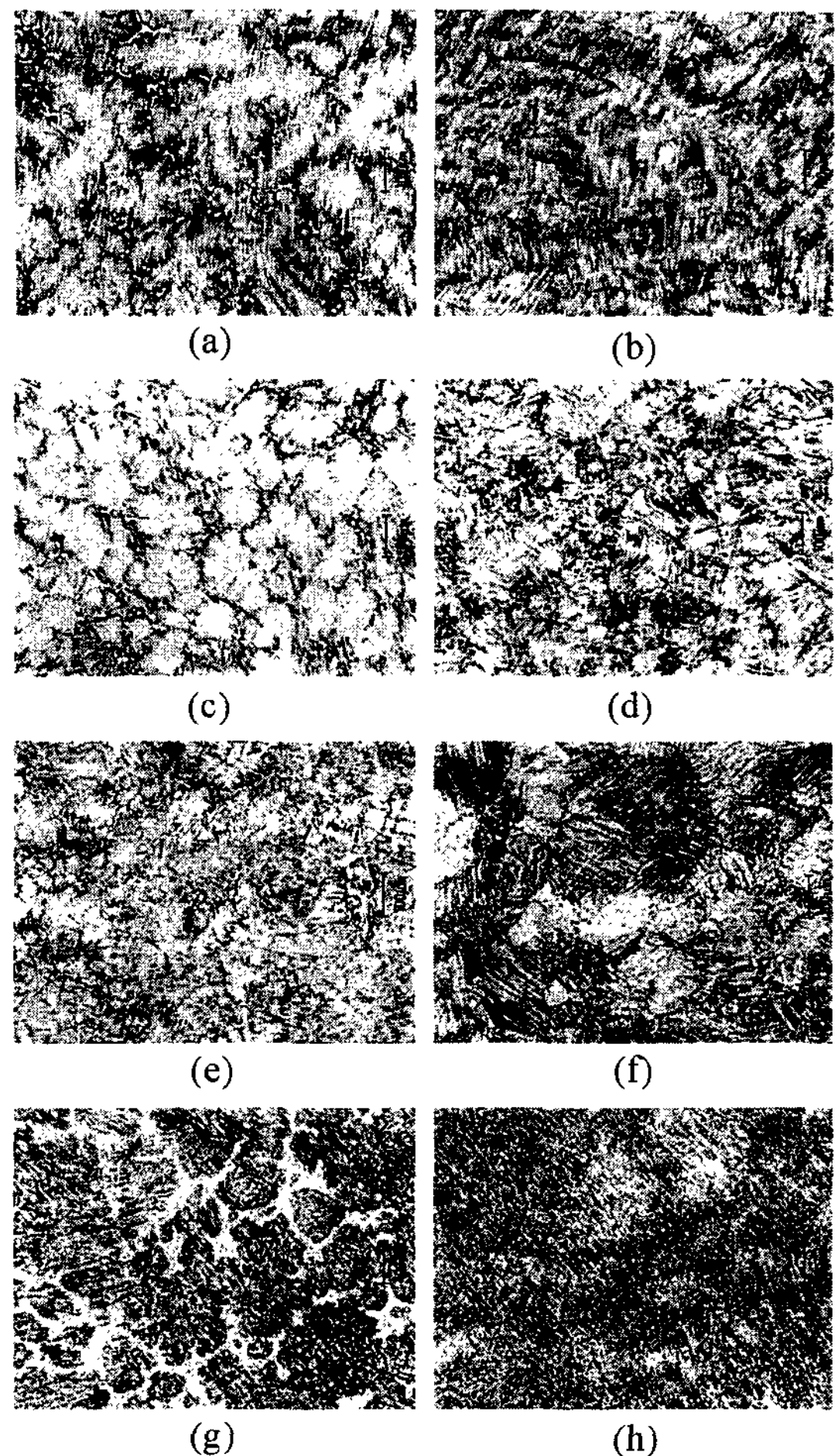


Photo 1. Optical micrographs of Ti-48Al-xCr as cast specimen. (A0 : (a)(b), A2 : (c)(d), A4 : (e)(f), A6 : (g)(h), left : center, right : chill side)

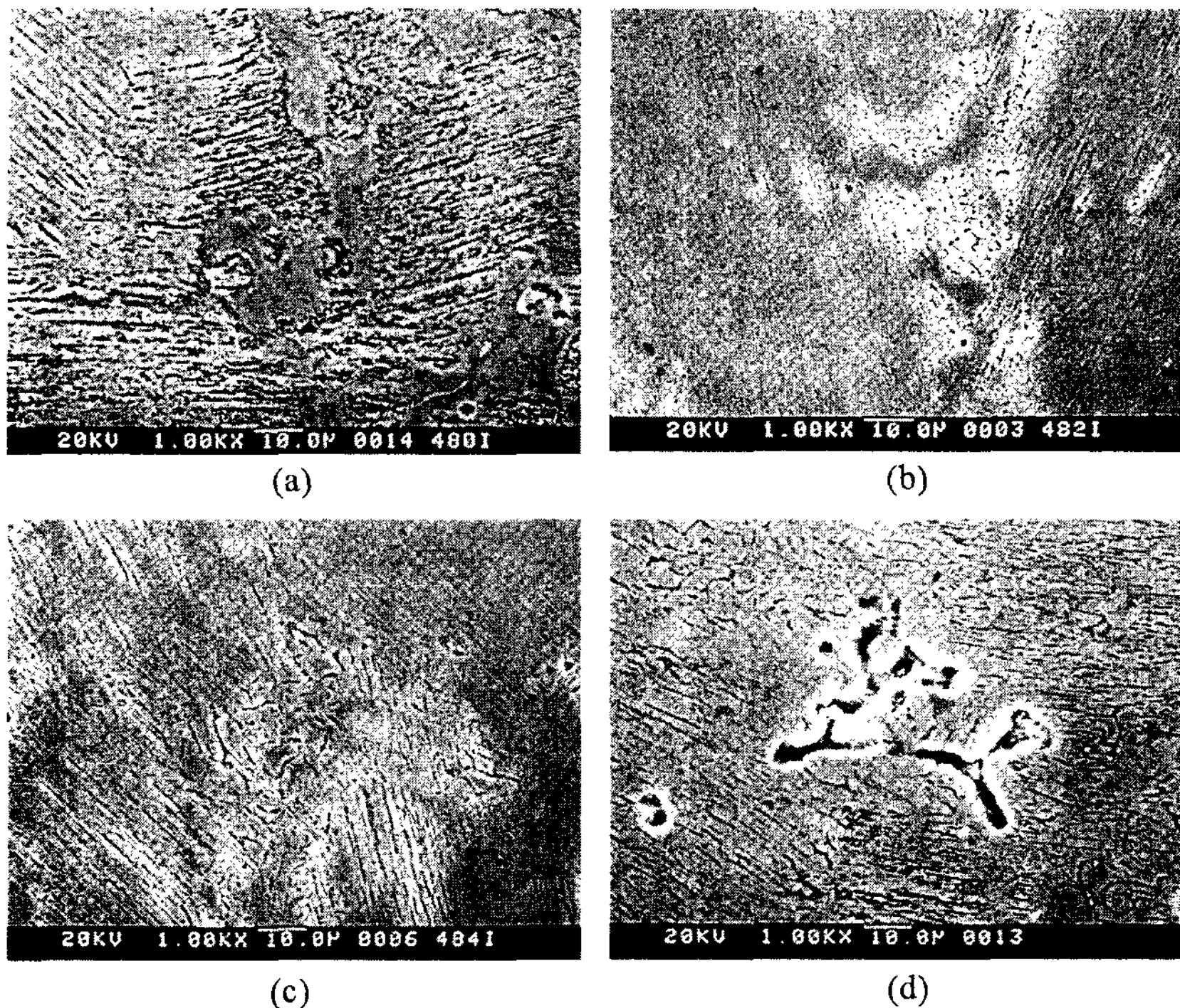


Photo 2. Secondary electron images of microstructure variation of Ti-48Al-XCr as cast specimen. as a function of Cr content. (a) A0 (b) A2 (c) A4 (d) A6

변화와 냉각속도가 상대적으로 빠른 주형과의 접촉부 ((d), (f))와 이 보다 중심부에 가까운((b), (f)), 그리고 냉각속도가 상대적으로 느린 주형중심부((a), (c), (e), (g))에서의 미세조직을 각각 나타내었다. 모합금의 미세 조직은 photo. 1의(d), (f)에서 볼 수 있듯이 전반적으로 냉각속도가 다소 빠른 주형 벽과의 접촉부에는 내부조직이 $\alpha_2+\gamma$ 의 층상조직으로 이루어진 조대한 셀 형태가 관찰되고 이보다 냉각속도가 느린 보다 중심부에 가까운 부분에서는 photo. 1의 (b), (h)에서와 같이 내부조직이 층상조직으로 이루어진 주상형태를 나타내고 있다. 그리고 냉각속도가 가장 느린 모합금의 중심부 조직에서는 photo 1의 (a), (c), (e), (g)에서 볼 수 있듯이 내부조직이 층상조직으로 구성된 수지상 형태와 수지상 사이에 다소 조대한 편석 γ 상이 관찰된다.

이러한 결과는 냉각속도가 느려짐에 따라 응고형태가 셀 형태에서 주상형태로 그리고 수지상 형태로 변화하는 것을 나타내는 것이고 중심부에서 관찰되는 조대한 γ 상은 응고과정 중 초기응고후의 잉여 용질이 응집되어 응고최종단계에서 수지상 사이에 형성된 것임을 나타내는 것이다. 한편 Cr이 첨가되면서 수지상

의 크기가 다소 감소하고 있으며 Cr량 변화에 따른 편석 γ 상의 크기, ($\alpha_2+\gamma$)와 γ 상의 구성상분율, 층상조직에서의 층간격 등과 같은 미세 조직상의 차이는 크게 나타나지 않는다. Photo 2는 모합금의 중심부에서 관찰되는 편석 γ 상을 주사전자 현미경으로 관찰한 것이다. 수지상 사이에 편석 되어 있는 γ 상은 Photo 2의 (a)에서와 같이 수지상 경계와 뚜렷이 구분이 되지 않지만 (b), (c), (d)로 Cr조성이 증가하면서 수지상 경계와의 구분이 희미해지고 그 분율도 서서히 증가하는 것을 관찰할 수 있다. 이는 Cr조성이 증가하면서 상대적으로 시편의 Al량이 증가되어 γ 상의 분율이 증가되었기 때문인 것으로 생각된다. Photo 3은 Cr조성 변화에 따른 모합금에서의 층상조직을 주사전자 현미경으로 확대 관찰한 것이다. Cr이 첨가되지 않은 (a)의 경우 층간격은 약 $1\mu\text{m}$ 정도이나 Cr이 첨가된 (b), (c), (d)의 경우 층간격은 약 $0.5\mu\text{m}$ 정도로 감소하였으며 Cr조성 변화에 따른 층간격의 변화는 뚜렷하게 나타나지 않았다. 또한 층간격은 동일조성의 시편에서도 냉각속도가 느린 중심부와 냉각속도가 빠른 주형벽과의 접촉부인 외부에서의 간격이 약 $0.5\mu\text{m}$ 정도의 차이를 보이고 있

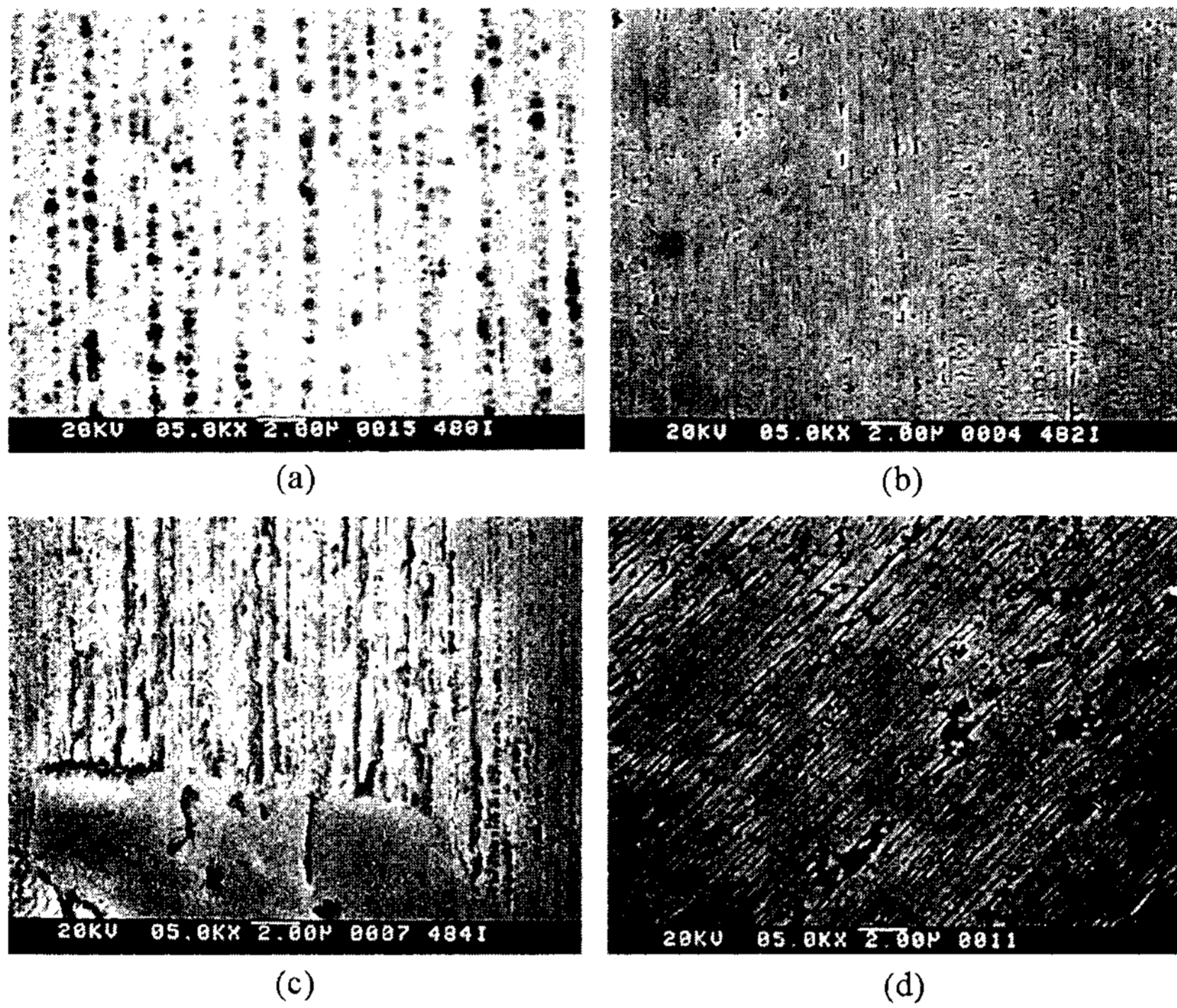


Photo 3. Secondary electron images of lamellar structure of Ti-48Al-XCr as cast specimen. (a) A0 (b) A2 (c) A4 (d) A6

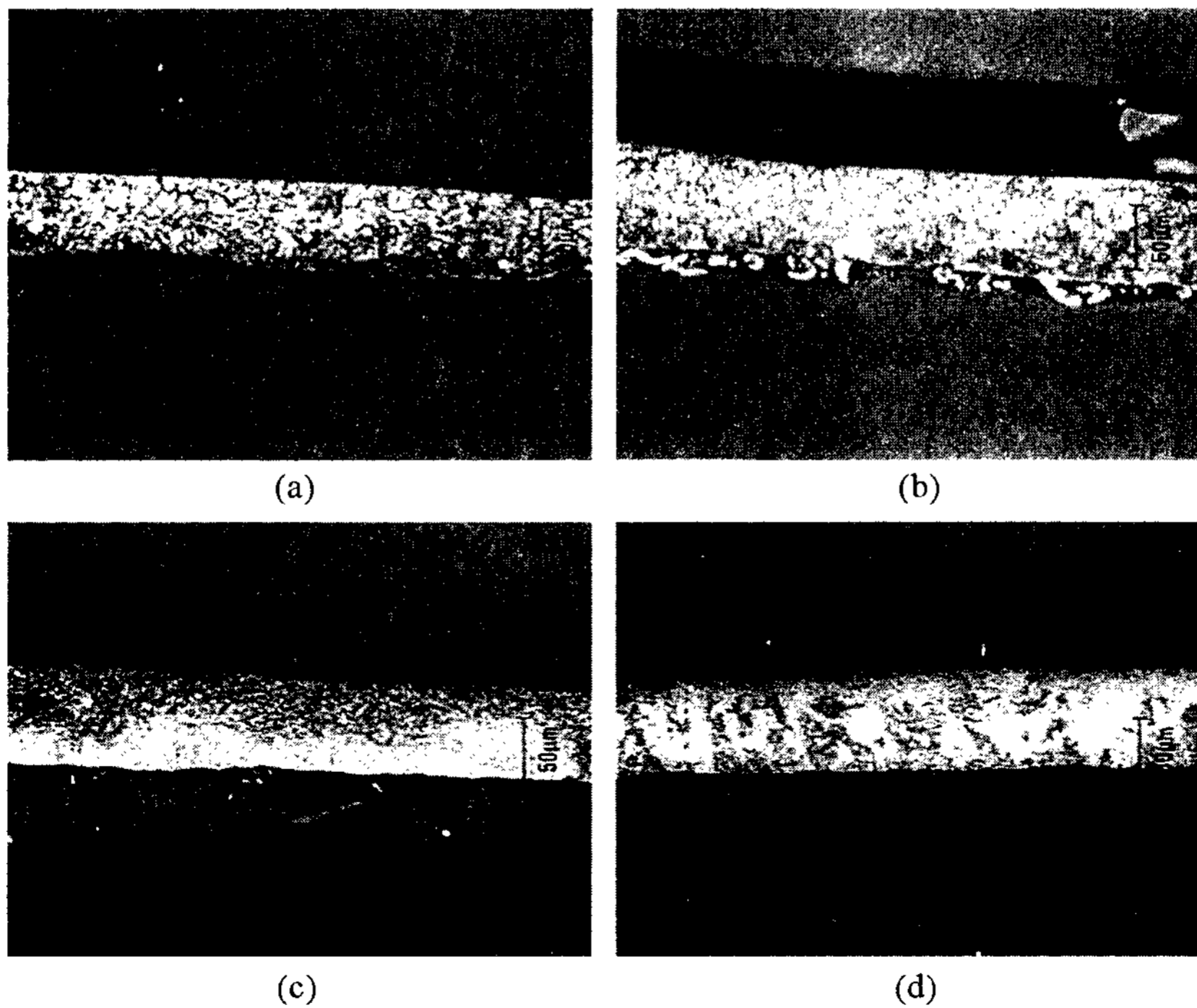


Photo 4. Optical microstructure of cross-sectioned Ti-48Al-XCr melt spun ribbon. (a)A0 (b)A2 (c)A4 (d)A6

으며 이는 as-cast된 상태에서는 Cr첨가의 영향보다는 냉각속도가 층간격에 미치는 영향이 보다 크다는 것을 나타내는 것이라 생각된다.

급속응고된 리본의 냉각속도는 시료의 용점이 높고 플라즈마 용해로의 특성상 정확한 직접 측정은 어렵고 제조된 리본의 두께와 냉각 wheel의 열전달 관계를 이용하여 Fourier heat flow equation[10]으로 이론적인 냉각속도를 산출한 결과 제조된 리본의 두께에 따라 차이가 있지만 대략 $10^4 \sim 10^6$ °C/sec 정도인 것으로 추측된다. 제조된 리본은 wheel의 접촉면과 동일한 3 mm 폭이고 길이는 용탕의 유입량에 따라 1 mm ~ 300 mm 였으며 두께는 평균 80 μ m였다. Photo 4는 급속응고된 리본의 측단면조직을 광학현미경으로 관찰한 것이다. 급속응고된 리본의 조직은 동일한 조성에서도 리본의 두께, 즉 냉각속도에 따라 부분적으로 차이가 나지만 대부분 응고시 생성된 초기 정출상의 형태인 미세한 셀 혹은 주상형태 및 수지상의 백색부분과 이들 정출상 사이의 흑색부분으로 구성되어 있으며 동일한 리본에서도 냉각속도가 빠른 wheel과의 접촉부와 그 반대측의 조직이 차이를 나타낸다. (c)의 리본 하단부와 같이 냉각속도가 빠른 wheel과의 접촉부위에서 셀

의 집합체인 백색부분이 관찰되고 다소냉각이 느린 리본의 상단부에서는 미세한 수지상과 수지상간 영역이 관찰된다. 한편 모합금 조직에서 관찰되는 조대한 편석 γ 상은 관찰되지 않으며 셀 혹은 수지상내부에서 관찰되는 층상조직 또한 광학현미경상에서는 관찰되지 않는다. Photo 5는 리본의 횡단면 조직을 주사전자현미경으로 관찰한 것이다. 관찰된 시편은 wheel과의 반대면으로부터 대략 20 μ m 하단부의 미세조직으로 Cr 조성변화에 관계없이 리본의 내부에 회색으로 나타나는 초정으로 정출한 수지상의 형태가 관찰되고 수지상 사이에 심하게 부식된 백색의 불규칙한 경계부가 관찰된다. 이러한 경계부에는 미세한 γ 상이 존재할 가능성이 있으나 부식에 의해 수지상 끝 부분이 침식되면서 함께 침식되어 관찰이 되지 않는 것으로 생각된다. 한편 모합금조직에서 나타나는 수지상 혹은 셀의 내부에서 관찰되는 층상조직은 뚜렷하게 관찰되지 않았으며 이는 빠른 응고속도로 인해 층상조직으로의 변태가 억제되어 나타난 결과로 추측할 수도 있으나 투과전자현미경관찰 결과 일부 미세한 층상조직이 관찰되기 때문에 보다 더 세밀한 규명작업이 필요한 것으로 생각된다.

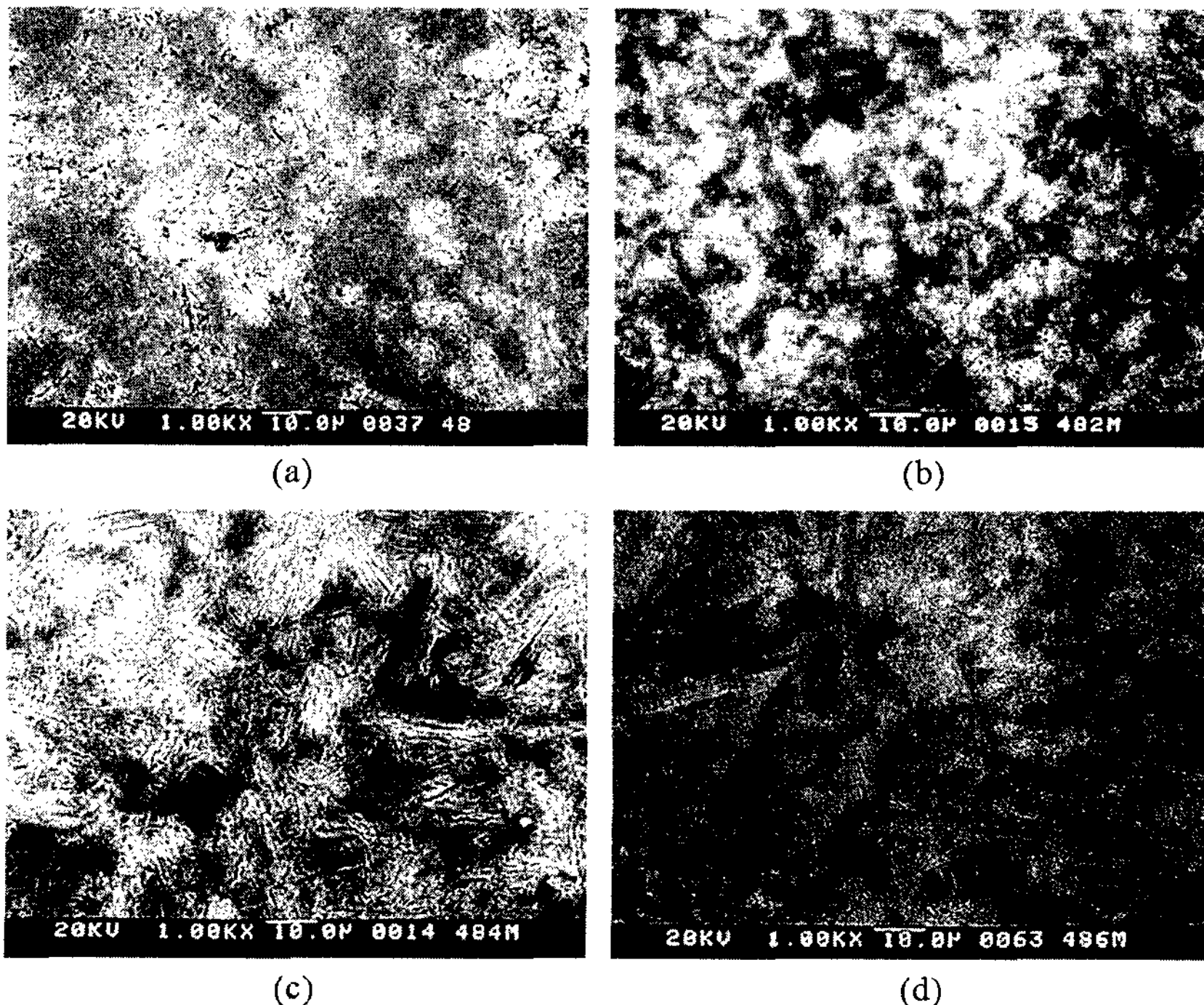


Photo 5. Secondary electron images of cross-sectioned Ti-48Al-XCr melt spun ribbon. (a)A0 (b)A2 (c)A4 (d)A6

3.3 리본의 표면형태 관찰

주사전자 현미경을 이용하여 관찰한 급속응고된 ribbon의 표면형태를 Photo 6~Photo 9에 나타내었다. ribbon의 표면은 wheel과의 접촉면과 반대면이 냉각속도의 차이에 의해 상이한 형태를 이루고 있음을 알 수 있다. Photo 6은 wheel과의 접촉 반대 면에서 ribbon 표면에 형성된 응고 형태를 관찰한 것으로 리본 전체에 걸쳐 10~20 μm 정도의 미세한 수지상과 2~3 μm의 미세한 셀 형태의 응고조직이 형성되어 있었다. 한편 Cr조성이 증가함에 따라 수지상 및 셀의 크기가 다소 증가되고 있는 것을 관찰할 수 있었다. 따라서 단면 조직에서 관찰되는 미세조직은 수지상 혹은 셀의 외곽부분이 상간경계구역의 부식과 함께 상당량 침식되어 있는것임을 알 수 있다. 또한 Cr량이 증가함에 따라 수지상의 2차수지상의 형성 분율이 증가되고 있는 것을 알 수 있다. Photo 7은 wheel과의 접촉면에 형성된 응고형태를 전체적으로 관찰한 것으로 리본 제조시 용탕과 냉각 Wheel과의 불규칙한 접촉으로 형성된 불규칙한 응고 형태가 관찰되며 냉각wheel과 접촉되어 응고가 진행된 부분에서는 Photo 8에 나타낸 것과 같이 미세한 셀과 다소 조대한 셀 형태가 관찰되며

반대면(free side)에서 관찰되는 photo 6에서와 같은 뚜렷한 수지상 형태의 조직은, ribbon제조 시 일반적으로 나타나는 냉각wheel과의 접촉없이 응고되어 상대적으로 냉각속도가 느린, air porket영역에서만 부분적으로 관찰된다. 한편 Cr조성변화에 따른 응고형태의 변화를 관찰한 결과 응고형태에 미치는 Cr의 영향은 거의 없는 것으로 생각된다. 이러한 응고형태는 동일한 리본에서도 응고가 진행되면서 발생하는 미세한 냉각속도의 차이가 존재함으로써 발생하는 결과로 Photo 9에 나타낸 것과 같이 응고가 진행되면서 Cr의 조성과는 무관하게 냉각속도의 차이에 따라 응고형태가 photo 9의 (a)에서와 같이 wheel과의 접촉면에서 관찰되는 미세한 셀조직에서 (b)의 조대한 셀로 변화하며 냉각속도가 더욱 느려지면서 (c)에서와 같이 air porket에서 관찰되는 primary 수지상 혹은 주상형으로 변화하고 응고속도가 더욱 느려지면 (d)에서와 같이 냉각 wheel과의 접촉이 없는 free side 혹은 air porket에서 관찰되는 secondary 수지상형태로 변화되는 것을 알 수 있다. 또한 wheel과의 접촉면에 생성된 air porket에서 부분적으로 관찰되는 수지상 혹은 셀 형태의 응고조직은 wheel 반대면에서 관찰되는 것과 동일한 형

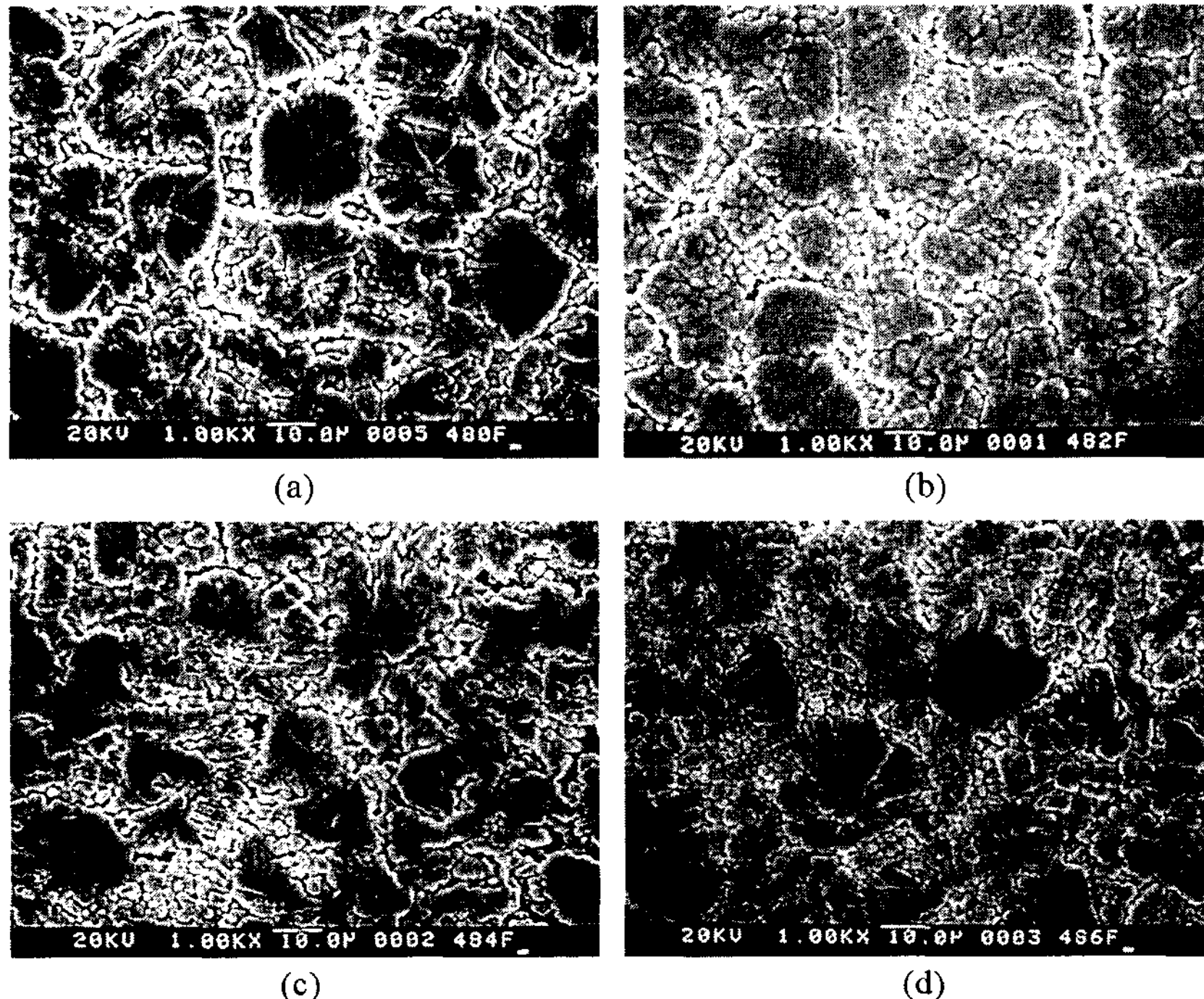


Photo 6. Secondary electron images of Ti-48Al-XCr ribbon surface morphology. (free side) (a) A0 (b) A2 (c) A4 (d) A6

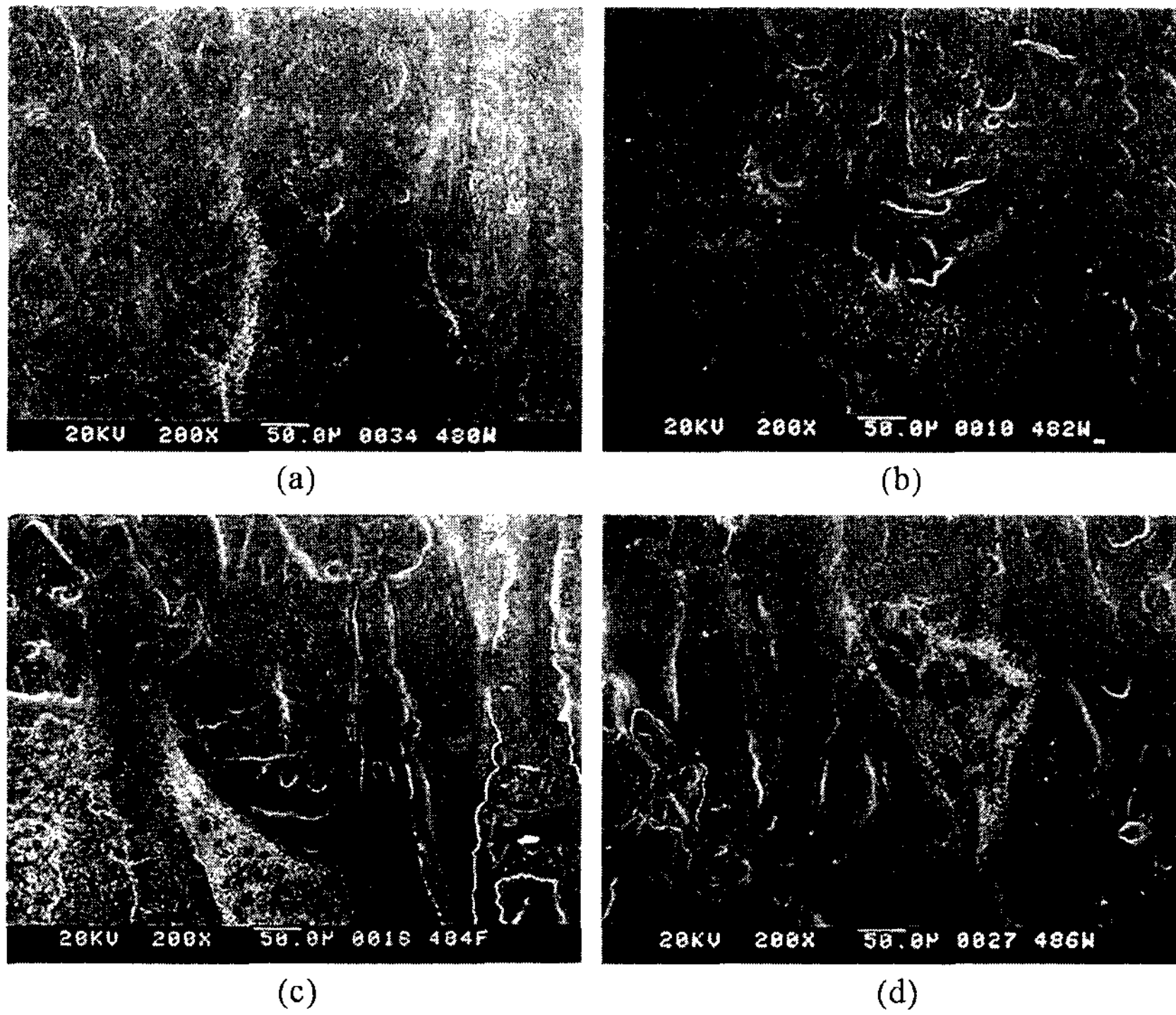


Photo 7. Secondary electron images of Ti-48Al-XCr ribbon surface morphology. (chill side) (a) A0 (b) A2 (c) A4 (d) A6

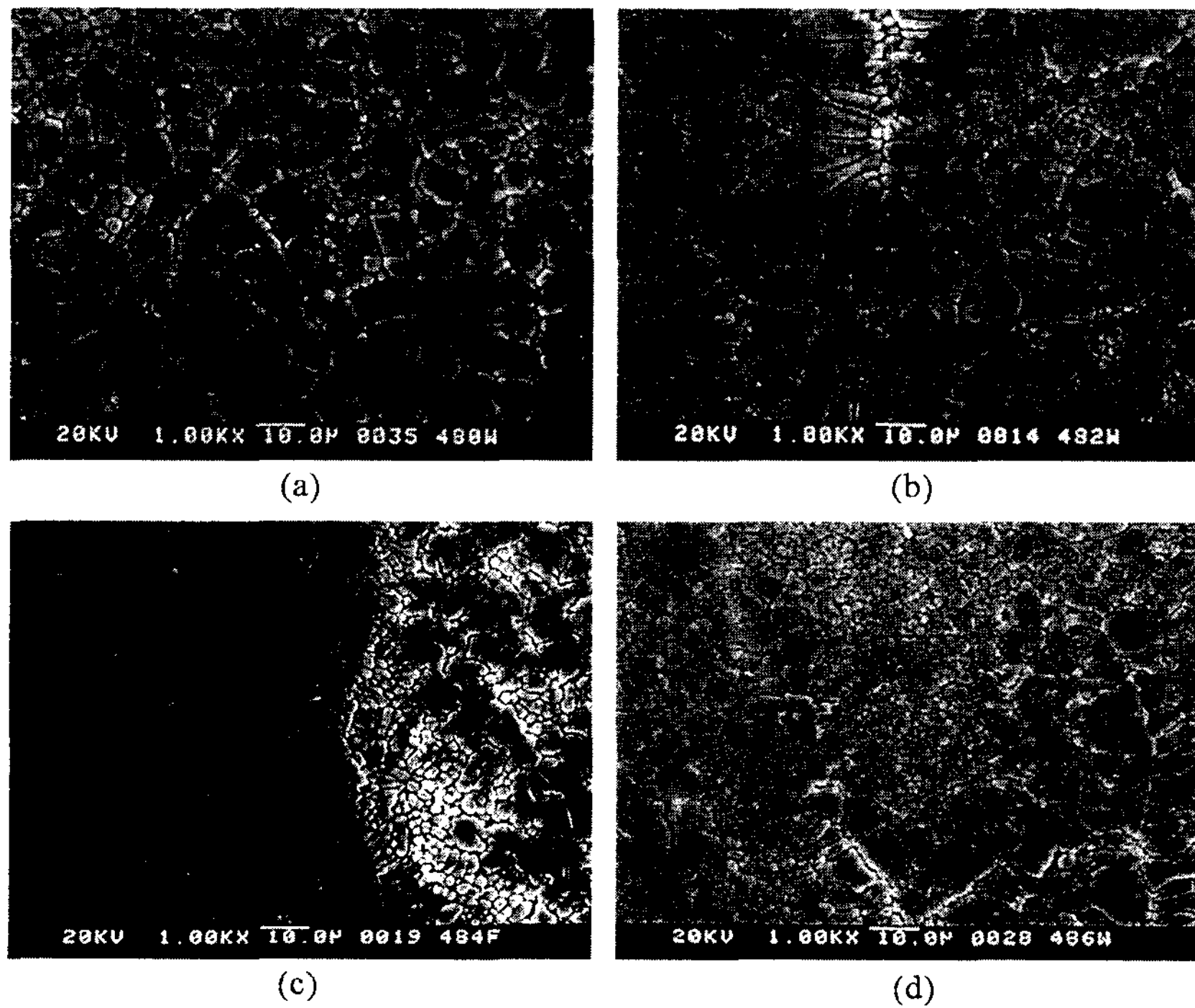


Photo 8. Secondary electron images of Ti-48Al-XCr ribbon surface morphology. (chill side) (a) A0 (b) A2 (c) A4 (d) A6

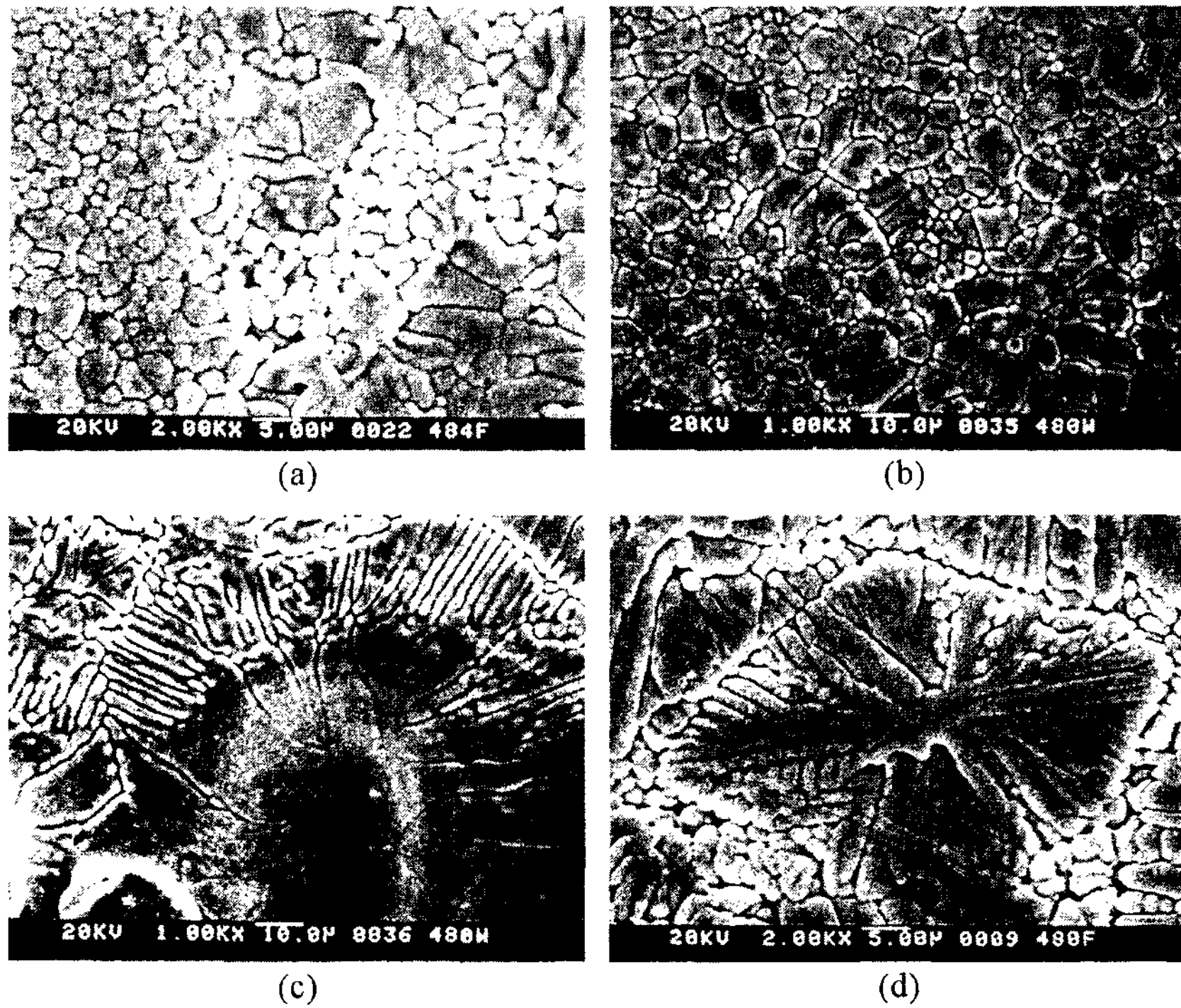


Photo 9. Secondary electron images of surface morphology variations of Ti-48Al-xCr ribbon, as a function of cooling rate. (a) A4 (b) A0 (c) A0 (d) A0

태로 이들 air pocket 영역에서의 냉각속도가 부분적으로 낮은 것을 나타내는 것이다.

3.4 XRD분석

급속 응고된 ribbon에 대한 x선 회절pattern과 피크에 상응하는 상의 면지수를 Fig. 3에 나타내었다. 분석결과에서 알 수 있듯이 각 시편 모두 fct구조의 γ 상과 hcp구조의 α 혹은 α_2 상으로 구성되어있는 것을 알 수 있으며 이는 시편의 조직관찰결과와 일치하는 것을 보여준다. 회절패턴에서 나타나는 39° 부근의 회절강도가 가장 강한 피크는 $\gamma(111)$ 의 주피크와 hcp(002)상의 회절각이 중첩되어 나타나는 것으로 바로 인접한 40° 부근의 hcp(201)의 회절강도가 증가하면 상대적으로 감소하는 경향을 나타내고 있다. 따라서 본 연구에서는 $\gamma(111)$ 과 hcp(201)피크의 상대적 회절강도의 변화를 관찰하였다. 모합금과 리본의 경우 모두 Cr이 첨가되지 않은 A0시편에서는 이들 강도가 비슷한 것이 관찰되고 Cr첨가에 따라 hcp의 강도가 γ 의 강도보다 상대적으로 감소되다가 Cr첨가량이 증가하면서 다소 증가하는 경향을 나타낸다. 그리고 모합금 및 리본의 회절도

에서 다소 회절강도가 강하게 나타나는 $\gamma(202)$ 피크는 분석결과 $\gamma(220)$ 과 중첩되어 피크의 폭이 넓고 강하게 나타나며 모합금의 경우 변화의 폭이 리본의 경우보다 상대적으로 커보이나 이것은 상분율의 변화에 상응한 다기 보다는 특정방향의 방향성이 강조된 것으로 생각되며 이는 분석시료형태가 리본의 분말상과 모합금의괴상의 차이에서 기인하는 것으로 생각된다. 한편 Cr첨가로 인한 편석물이나 제 3의 화합물상은 관찰할 수 없었다. Fig. 4는 XRD 분석결과로부터 구한 γ 상의 격자상수 a와 c를 나타낸 것이다. Cr조성증가에 따라 리본의 격자상수 a와 c가 감소 하는 것을 알 수 있다. 이에 비해 모합금의 경우 Cr조성의 변화에도 격자상수 a 및 c의 변화는 거의 없으며 A2시편에서는 모합금과 리본의 격자상수가 거의 비슷한 것을 나타낸다. 이러한 결과는 γ 단상구역의 일반구조조직에서 Cr첨가시 격자상수가 직선적으로 감소한다는 보고[11]와는 다른 결과로 열처리하지 않은 본 연구의 조성을 갖는 as-cast 상태의 조직에서는 Cr첨가에 따른 격자상수의 큰 변화는 관찰 할 수 없었다. 한편 급속응고된 리본에서는 Cr첨가에 따라 격자상수가 직선적으로 감소하는 경향

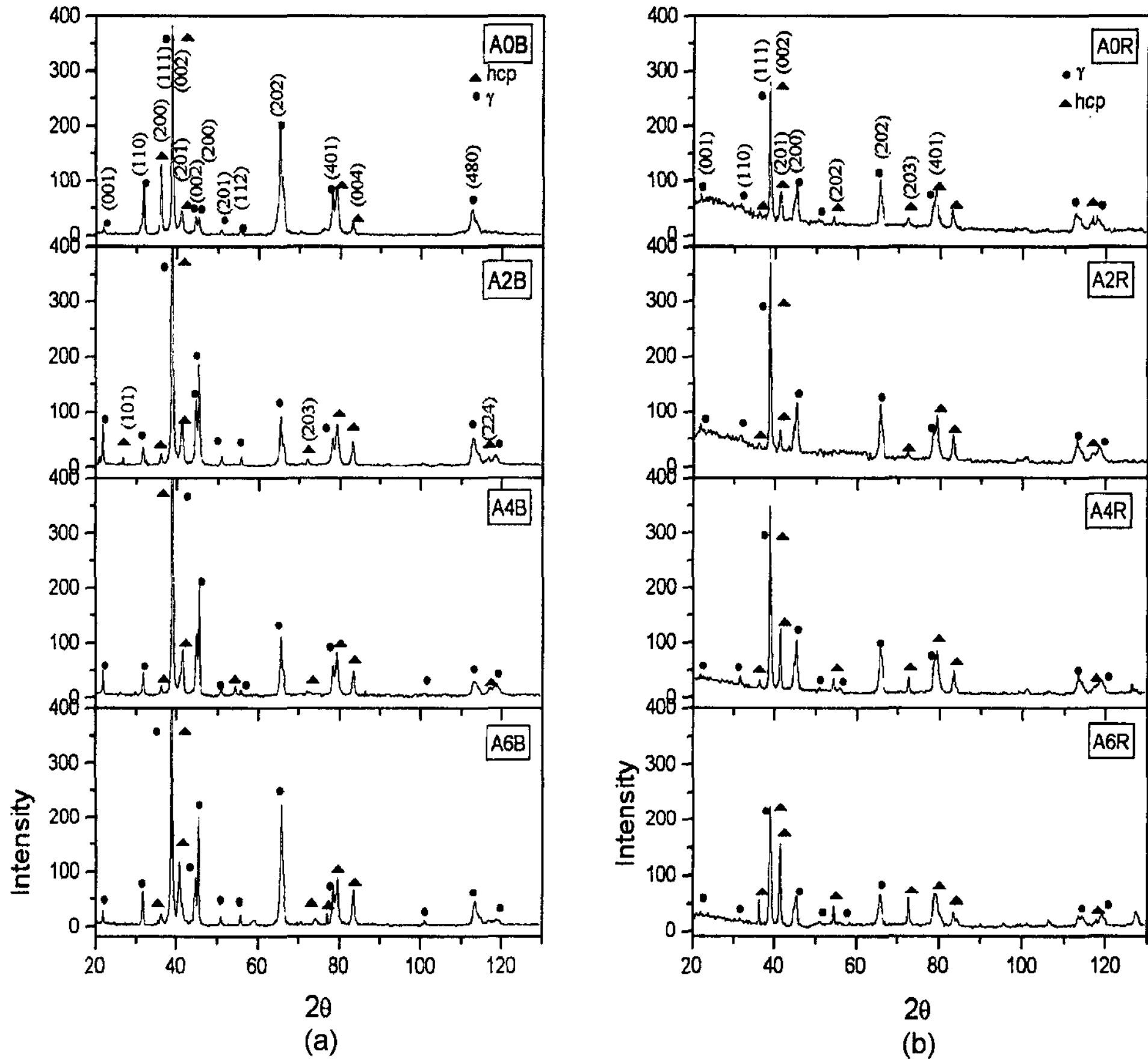


Fig. 3. XRD pattern of (a) as-cast specimens (b) melt spun ribbons.

을 나타낸다. 또한 Cr이 첨가되지 않은 A0시편에서는 모합금의 격자상수값이 리본의 경우보다 작은 것으로 나타나고 있으며 Cr이 첨가된 A2시편부터 감소되는 경향을 나타내고 있다. 사용한 시편은 Cr첨가량이 증가하면 상대적으로 Al조성이 증가하고 있으며 선행 보

고된 결과에[12-13], 의하면 Al함량이 증가함에 따라 c는 증가하고 a는 감소하는 경향을 보이거나 본 연구결과에서는 이러한 경향은 나타나지 않고 c와 a가 비슷한 기울기로 감소하고 있으며 Cr조성이 증가함에 따라 모합금과 비교하여 감소폭이 증가하고 있다. 따라서 Cr이 첨가된 급속응고된 리본에서 격자상수의 변화는 급속응고에 따른 Cr용질의 거동변화에 의한 것이라고 생각된다.

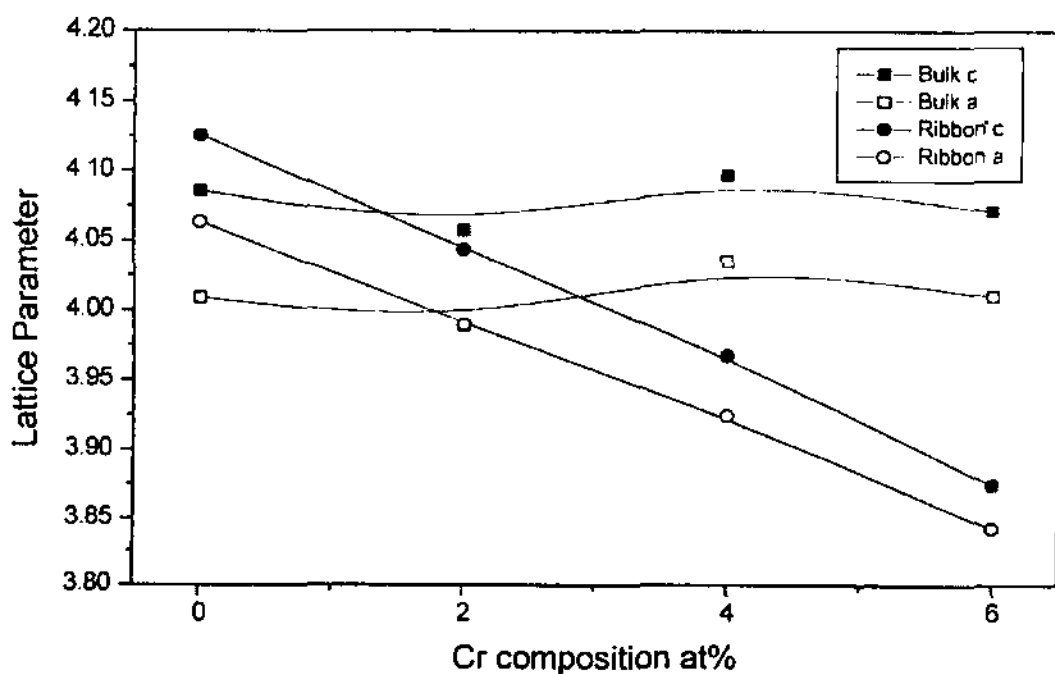


Fig. 4. Variation of lattice parameter a and c of γ phase.

Fig. 5는 γ상의 축비 c/a를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 Cr조성변화에 따라 모합금과 리본 모두 감소하는 경향을 나타낸다. 또한 모합금과 리본 모두 기준축비인 1.02보다 감소되어 있으며 급속응고된 시편의 경우 보다 크게 감소되어 있다. 축비 c/a의 감소는 γ상의 변형기구에 상당한 작용을 하는 주요인자로 인식되고 있으며 축비의 감소는 결정구조의 이방성의 감소를 의미한다. Cr첨가로 인해 모합금과 리본의

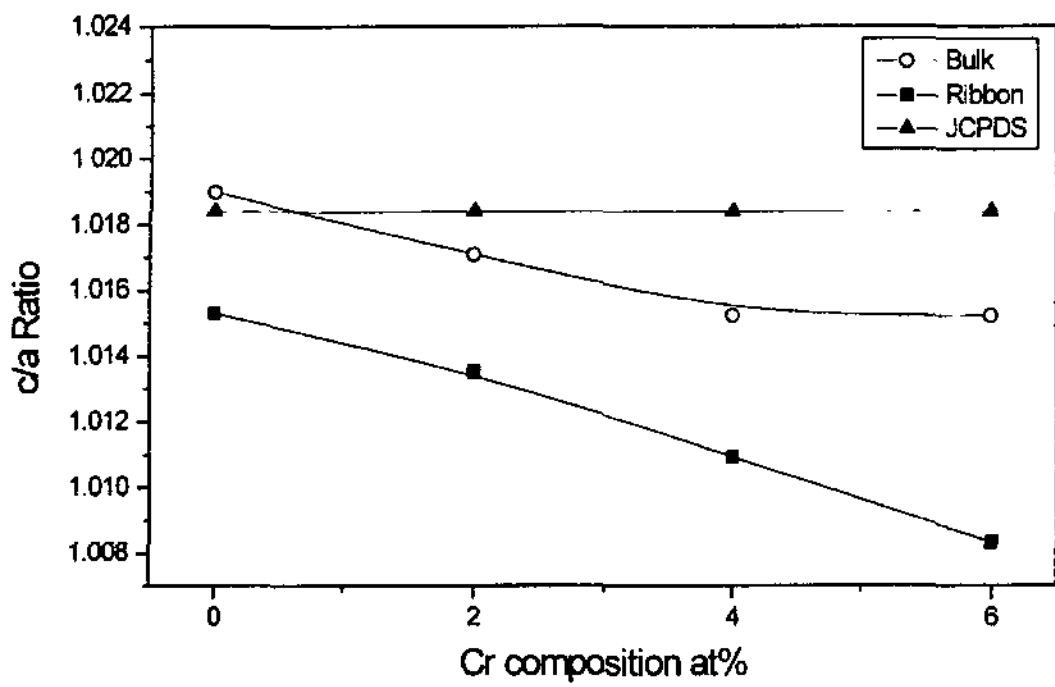


Fig. 5. Variation of axial ratio c/a of γ phase.

경우 모두 축비가 감소경향이 나타나고 특히 급속응고된 리본의 경우 보다 현저하게 감소됨을 알 수 있다. 따라서 Cr첨가와 급속응고의 영향이 복합적으로 작용하여 축비의 감소를 가져온 것으로 생각된다.

3.5 투과전자현미경 관찰

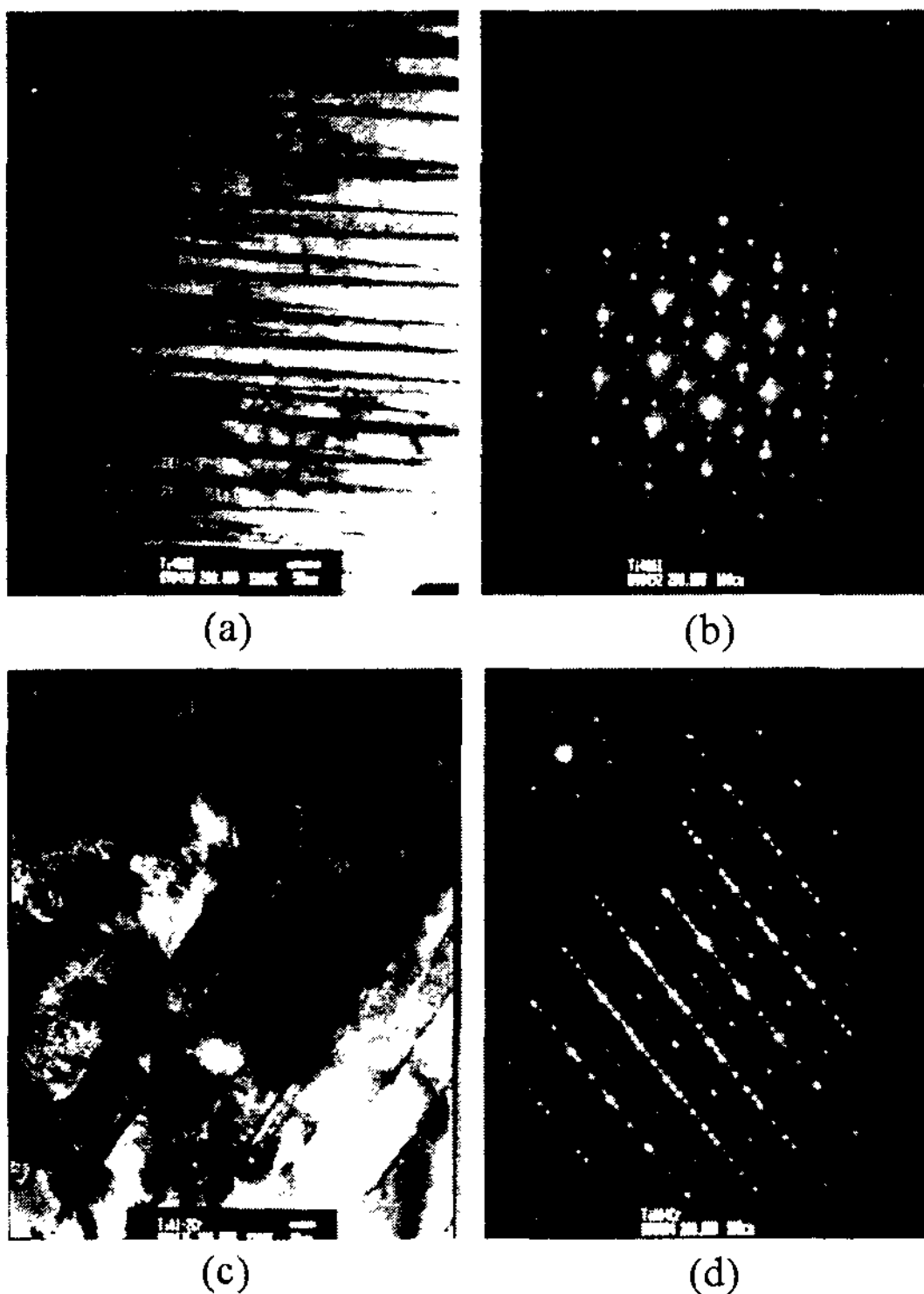


Photo 10. TEM images of Ti-48Al-XCr ribbon and selected area diffraction patterns. (a) lamellar structure of A0 ribbon (b) selected area diffraction patterns of A0 ribbon (c) lamellar structure of A2 ribbon (d) selected area diffraction patterns of A2 ribbon

Photo 10의 (a), (c)와 Photo 11의 (a), (b)는 급속응고된 리본에 존재하는 층상조직을 관찰한 것이다. 이들 층상조직은 모든 시편에서 부분적으로 관찰되었다. 밝은 층으로 나타나는 γ 상의 층상 두께는 약 50 nm 정도이며, 어두운 층으로 나타나는 α_2 층의 두께는 약 10 nm 이하로 일반 주조조직의 층상 두께와 비교하여 급속응고에 의한 조직미세화가 매우 큼을 알 수 있다.

Cr첨가의 영향은 일반 주조 조직에서 α 상 영역의 감소로 인하여 lamellar α_2 의 평형부피분율의 감소를 가져오며, γ 상의 층간 간격을 감소시키는 것으로 알려져 있다. 또한 수지상의 크기를 감소시킬 뿐만 아니라 등축상으로 변화시키며 γ 상의 결정립을 보다 미세화시키는 것으로 알려져 있다. 그러나 급속응고한 리본의 Cr 변화에 따른 lamellar 두께의 변화는 층상구조가 너무 미세하고 국부적으로 층상두께가 모두 다르게 관찰되므로 직접적인 비교에 의한 변화를 관찰하기는 어렵다.

Photo 10의 (b)와 (d)는 (a)와 (c) 층상조직에 대한

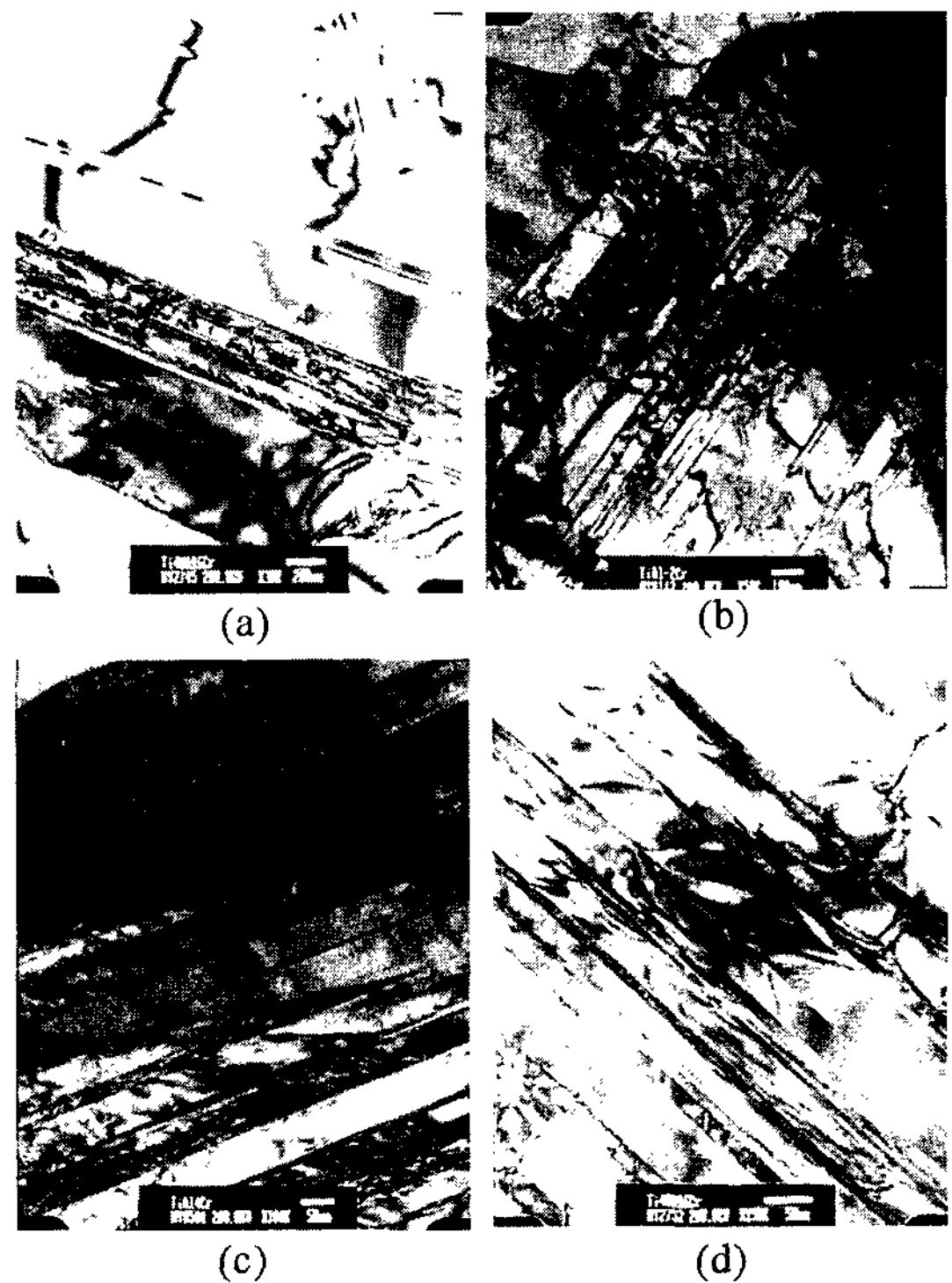


Photo 11. TEM images of Ti-48Al-xCr ribbon. (a) lamellar morphology of A0 ribbon (b) lamellar morphology of A2 ribbon (c) lamellar morphology of A4 ribbon (d) lamellar morphology of A6 ribbon

SAD 패턴으로 γ 상의 최조밀면인 (111)면과 α_2 상의 최조밀면인 (0001)면과 일치하며, 두면을 공통으로 α_2 상과 γ 상이 층상구조를 이룸을 알 수 있다. 또한 (d)의 패턴의 경우 층상 γ 내에 twin이 많이 존재함을 보여준다. 여기서 입사된 빔의 방향은 γ 상에 대하여 $\langle 110 \rangle$ 이며, α_2 상에 대하여 $\langle 1120 \rangle$ 이다. 이는 급속응고한 리본의 경우도 일반주조 조직과 같은 Blackburn의 방위관계와 일치하게 층상구조가 생성되었음을 알 수 있다.

Blackburn 방위관계: $\{111\} \gamma // \{0001\} \alpha_2$
 $\langle 110 \rangle \gamma // \langle 1120 \rangle \alpha_2$

또한 Photo 10의 (b)와 (d)는 α_2 상의 경우 규칙(order)격자 패턴을 보여주고 있으며, (d)의 작은 회절 패턴의 경우와 같이 불규칙(disorder) α 상의 격자 패턴이 관찰된다. 이는 급속응고에 효과에 의하여 α_2 및 γ 상으로의 변태가 억제되어 고온안정상인 불규칙(disorder) γ 상이 상온에서 존재함을 나타내는 것이다. Photo 11의 (c)와 (d)는 급속응고리본의 전체 형상에 대한 명시야 상으로 일반 주조조직에서 보여지는 조직과 마찬가지로 ($\alpha_2 + \gamma$)층상조직과 γ 단상영역의 duplex 구조를 나타내고 있다. 또한 γ 단상 내부의 경우 twin과 dislocation이 존재하고 있다.

4. 결 론

용탕추출법으로 급속응고 시킨 Ti-48Al-xCr(x = 2, 4, 6)합금의 미세조직에 대하여 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 용탕추출법에 의해 제조된 리본의 냉각속도는 104 ~ 106°C/sec로 추정되고 일반주조제보다 조직이 미세화 되었으며 조대한 편석 γ 상이 제거되었으며 미세한 수지상과 셀로 구성되어있다.

2. 급속응고에 의해 비평형조직인 고온 α 상이 상온

에서도 존재하였다.

3. Cr조성의 변화가 급속응고리본의 미세조직의 변화에 미치는 영향은 뚜렷하게 관찰되지 않았다.

4. Cr첨가 및 급속응고의 영향으로 γ 상의 축비 c/a와 격자상수 c, a가 감소하였다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 특정연구과제(96-0300-11-01-3)의 연구비 지원으로 수행된 연구이다.

참 고 문 헌

- [1] D. M. Dimiduk, D. B. Miracle : High Temperature Ordered Intermetallic Alloys III, C. T. Liu et. al(Eds.), MRS, Pittsburgh, Pennsylvania (1989) 349
- [2] S. C. Huang, J. C. Chesnutt : Intermetallic Compounds vol.2, (1994), 73
- [3] J. D. Destefani : Ade. Mat. and Proc., 2(1989) 37
- [4] I. Baker and P. R. Monroe : J. Met., Feb(1989) 28
- [5] Y. W. Kim : J. Metals, 41 (1989) 24
- [6] Y. W. Kim and D. M. Dimiduk : J. Metals, 43(8)(1991), 40
- [7] T. Kawabata, T. Tamura and O. Izumi : High Temperature Ordered Intermetallic Alloys III, C. T. Liu et. al(Eds.), MRS, Pittsburgh, Pennsylvania (1989) 329
- [8] T. S. Srivatsan and T. S. Sudarshan : Rapid Solidification Technology, Technomic Publication Ltd., (1990)
- [9] A. N. Parataix, A. Huguet and A. Menand : Gamma Titanuim Aluminides, Y. W. Kim, R. Wagner and M. Yamaguchi(EDs.), TMS, Warrendale PA(1995)197
- [10] Otooni, Monde A : Elements of Rapid Solidification Fundamentals and Appliction, Springer series in Materials Science vol. 29 (1998) 1
- [11] D. Vujic, Z. Li and S. H. Whang : Metall. Trans. A, 19(1988) 2445
- [12] P. Duwez and J. L. Taylor : Trans. Metall. Soc AIME, 196(1952)
- [13] Th. Pfullmann and P. A. Beaven : Scripta Metall. Mater., 28(1993) 275