

.....
 論 文

급속응고한 Al-Be합금의 미세조직 및 인장특성

이인우, 박현호, 김명호

Microstructure and Tensile Property of Rapidly Solidified Al-Be alloy

In-Woo Lee, Hyun-Ho Park and Myung-Ho Kim

Abstract

For high performance aerospace structures, the properties of highest priority are low density, high strength, and high stiffness(modulus of elasticity). Addition of beryllium decrease the density of the aluminum alloy and increase the strength and the stiffness of the alloy. However it is very difficult to produce the Al-Be alloy having useful engineering properties by conventional ingot casting, because of the extremely limited solid solubility of beryllium in aluminum. So, rapid solidification processing is necessary to obtain extended solid solubility.

In this study, rapidly solidified Al-6 at% Be alloy were prepared by twin roll melt spinning process and single roll melt spinning process. Twin roll melt spun ribbons were extruded at 450°C with reduction in area of 25 : 1 after vacuum hot pressing at 550°C and 375°C.

The microstructure of melt spun ribbon exhibited a refined cellular microstructure with dispersed Be particles. As advance velocity of liquid/solid interface increase, the morphology of Be particle vary from rod-like type to spherical type and the crystal structure of Be particle from HCP to BCC. These microstructural characteristics of rapidly solidified Al-6at.%Be alloy were described on the basis of metastable phase diagram proposed by Perepezko and Boettinger. The extruded ribbon consisted of re-crystallized grains dispersed with Be particles and exhibited improved tensile property compared with that of extruded ingot.

(Received June 2, 1995)

1. 서 론

Be은 Li과 함께 Al합금에 첨가되었을 경우 밀도 감소와 탄성계수 증가면에서 가장 효율적인 금속원소중 하나로서, 그 잠재적인 경량화 효과가 크다. 또한 약 3wt.%이상의 Li첨가는 인성과 연성에 좋지 않은 영향을 미치므로 Be이 매우 미세한 형태로 첨가된다면 더 큰 효과를 기대할 수 있다[1~3].

Fig. 1의 평형상태도에서 보듯이 상온에서는

Al에 대한 Be의 고용도가 0.03wt.% 정도로 극히 작기 때문에 conventional ingot casting에 의해 제조된 wrought Al-Be합금은 응고시 Be이 조대하고 불균일하게 편석되어 연성과 인성이 좋지 않았다. 그러나, 1025°C에서 액상 Al에 대한 Be의 solubility가 10wt.% 정도이므로, 급속응고법을 이용하면 Be을 Al고상내로 최대한 과포화 고용시킬 수 있고, 나머지 잔류하는 Be은 불연속적인 입자(dispersoid)형태로 미세하고 균일하게 재료내에 고르게 분포시킬 수 있다. 결과적으로 이러한 Be의 고용도 증가와 미세한 입자 분포로

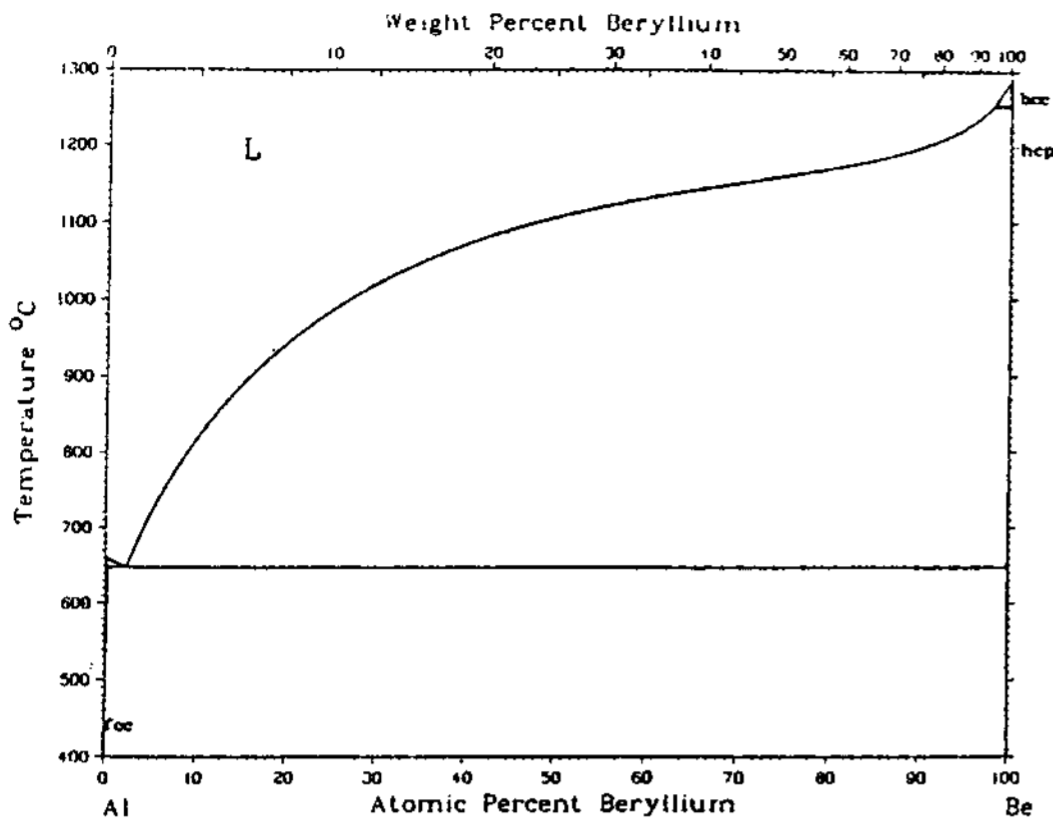


Fig. 1. Al-Be stable phase diagram[4]

인해 i) 밀도 감소, ii) 탄성계수의 증가, iii) 강도증가 등의 효과를 기대할 수 있다. 다시 말해서, 급속응고된 Al-Be합금은 α -Be dispersoids가 약간 정출한 미세조직을 가질 것으로 기대되며, 또한 α -Be은 분산강화에 의한 기계적 성질의 향상에 기여할 것으로 예상된다[1~2].

최근에 Al-Be의 급속응고에 관하여 상당한 연구가 이루어지고 있다. 먼저 Perepezko와 Boettinger[4]는 순수한 FCC Be에 대한 격자 안정도 값을 써서 측정된 상 경계를 이용하여 자유에너지 함수를 얻었고, 이를 통해 Fig. 2와 같은 Al-Be계의 준안정 2원계 상태도를 제시하였다. Fig. 2는 안정한 HCP Be과 준안정한 BCC와 FCC Be이 각각 α -Al과 평형을 이루고 있는 세가지 상태도를 함께 보여주는 것이다. 이 중 FCC Be과 α -Al의 준안정 상태도는 1100°C, 70at.%Be에서 최대의 miscibility gap를 가지는 편정계를 나타내는 것으로써, 평형상태에서 공정계로 응고되는 Al-Be합금이 급속응고시 매우 큰 과냉에 의해 응고기구가 변화될 수 있음을 보여주는 것이다. 반면, Van Aken과 Fraser[5]는 Al-Be합금의 급속응고조직을 관찰한 실험적 결과와 Perepezko와 Boettinger의 준안정상태도를 이용하여 평형상태에서는 공정반응으로 응고되는 Al-Be합금계가 급속응고시에는 큰 과냉에 의해 miscibility gap을 가지는 monotectic반응에 의해 응고될 수 있음을 보여주었다.

급속응고법에 의해 제조된 재료는 대부분 그 특성은 우수하지만, 급속응고과정 전의 ingot자

체의 macrosegregation에 의해 급속응고과정의 단계별 산물(products)이 일정한 조성을 유지하기 어렵다. 또한, 대부분 급속응고된 재료의 부피가 매우 작기 때문에 consolidation이 도입되고 있다.

본 연구에서는 melt-spinning에 의해 제조된 Al-Be합금의 미세조직에 미치는 응고속도의 영향을 파악하고 그 응고기구의 확인을 시도하였다. 또한 Al-Be합금의 기계적 특성에 미치는 급속응고의 영향을 파악하기 위해, twin roll melt spun 리본을 열간 압출한 후 인장시험 하였다.

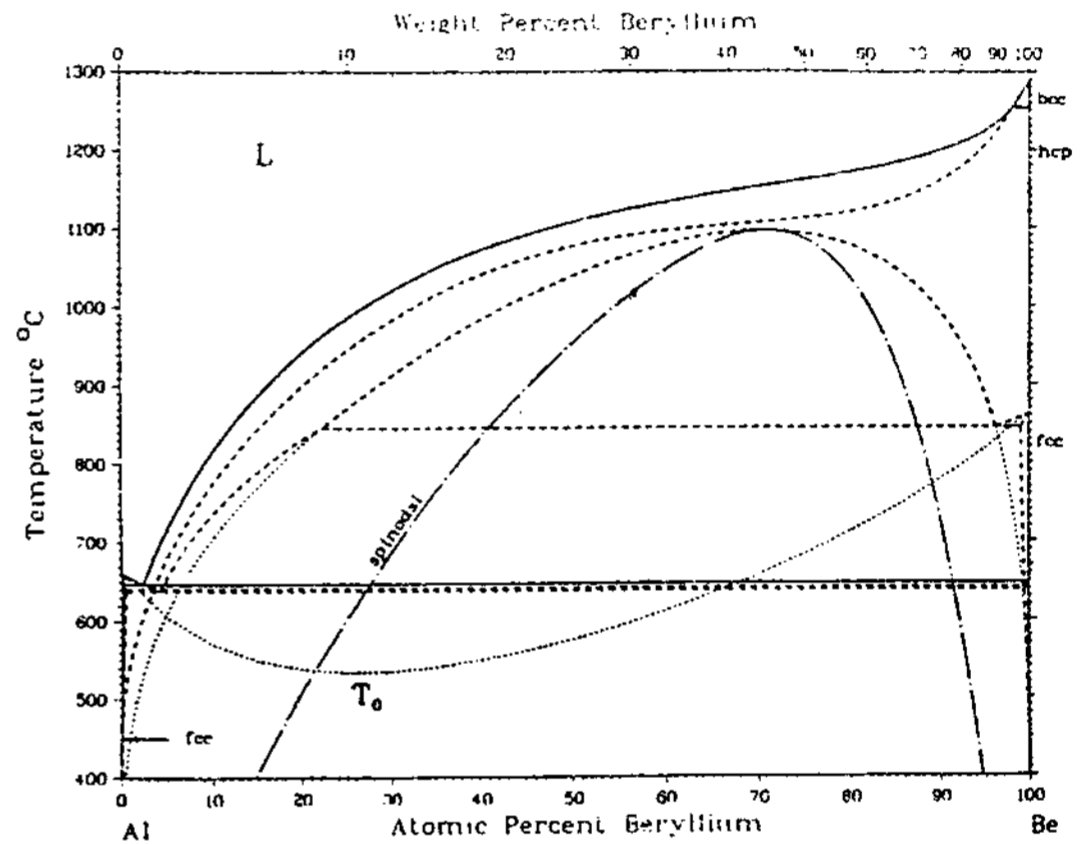


Fig. 2. Al-Be metastable phase diagram; superposition of several separate metastable diagrams involving the liquid, FCC Al, FCC Be, HCP Be, and BCC Be.[4]

2. 실험방법

Al-Be합금의 미세조직 및 응고기구에 미치는 응고속도의 영향을 파악하기 위해 Al-7.8at.% Be 합금을 chill casting과 twin roll melt-spinning공정과 single roll melt spinning공정을 이용하여 제조한 후 각각의 미세조직을 관찰하였다.

먼저 chill casting의 경우 고주파 유도 코일내의 석영관에 Al-Be합금을 장입하여 1000°C까지 가열한 후 Ar가스를 이용하여 금속판 위로 용탕이 떨어지도록 하였으며, 이 경우 미세조직은 에칭하지 않아도 광학현미경으로 관찰할 수 있었으나, 더욱 분명한 Be입자의 관찰을 위해 불산(HF)을 이용하여 선택적으로 에칭하였다.

Twin roll melt spinning공정의 경우 chill casting에서 금속판대신 회전하는 두 개의 구리 휠 사이로 대기 중에서 분사하였으며, 이 때 휠 속도는 5.4m/sec였으며, 제조된 리본은 폭 1~4cm정도, 두께 150 μ m정도였다.

마지막으로 single roll melt spinning공정은 제조되는 시편의 크기가 매우 작아 Ar가스 분위기 하에서 제조되었으며 제조조건은 다음과 같다. Chamber내의 진공도를 10⁻⁴Torr로 유지한 후 Ar가스를 주입하였으며, 5KW-400KHz의 고주파 발전장치를 이용하여 0.55mm의 분사노즐을 가진 내경 12mm의 석영관 안에서 완전히 재용융된 Al-Be합금을 1~1.2kgf/cm²의 Ar 가스압력으로 분사하였다. 이때 휠 속도는 42m/s였으며 제조된 리본은 두께 20 μ m~30 μ m, 폭 3mm정도였다. 이렇게 제조된 melt spun리본의 미세조직은 불산을 이용하여 에칭한 후 광학현미경을 이용하여 관찰하였다. 또한 더욱 자세한 미세조직관찰과 Be입자의 확인을 위해 TEM을 이용하였으며, TEM관찰을 위한 시편은 10°C에서 25% nital전해액중에서 twin-jet polisher를 이용하여 thinning[3]하였다.

다음 식과 같이 휠 속도(V)를 이용하여 Al-Be합금의 응고시 냉각속도를 다음식을 통해 계산하면[6]

$$T = 1.2 \times 10^4 K/m \times V$$

Twin roll melt spun ribbon(TR)의 경우 대략 6.5 $\times 10^4$ K/sec, single roll melt spun ribbon(SR)의 경우 대략 5.0 $\times 10^5$ K/sec의 냉각속도로 응고된 것으로 여겨진다.

Al-Be합금의 응고기구와 미세조직의 파악과 더불어 기계적 특성에 끼치는 급속응고 효과를 확인하기 위해 Al-Be합금 잉고트와 TR을 동일한 열간가공을 거치게 한 후 인장시험하였다.

열간가공은 먼저 550°C와 375°C에서 vacuum hot pressing(VHP)한 후 450°C에서 25:1로 열간 압출하여, 직경 약 11mm의 압출봉을 얻을 수 있었다. 또한 두 가지 VHP온도를 택한것은

550°C-VHP의 경우 리본간의 결합을 최대화할 수 있다고 판단되었으며, 375°C-VHP는 급속응고효과를 최대한 유지시키기 위해 가능한 한 낮은 온도를 택한 것이다. 이러한 조건은 ribbon간의 결합을 더욱 촉진시키고, 표면 산화층을 파괴하여 완전히 재분포되도록 하기 위한 것이었으며, 밀도측정과 미세조직관찰, 인장 시험결과등으로 판단할 때 건전한 압출봉을 얻었다고 판단된다. 이렇게 제조된 각각의 압출봉에서 Be입자의 크기와 분포를 확인하기 위해 수산화나트륨 용액으로 에칭한 후 광학현미경으로 관찰하였으며, 압출된 리본의 경우는 광학현미경으로 Be입자를 관찰하고, 재결정된 결정립은 TEM을 이용하여 관찰하였다.

이렇게 열간압출된 두 가지 조건의 압출봉의 인장시험은 button-head type의 봉상시편으로 시험하였다.

Table 1.의 합금조성은 최종 압출재에 대해 화학분석을 실시한 결과이며, 열간가공을 거친후의 잉고트와 리본의 Be조성차는 melt spinning공정 중 기화된 Be에 의한 것으로 여겨진다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 응고속도에 따른 미세조직의 변화

Al-Be합금의 미세조직에 미치는 응고속도의 영향을 파악하기 위해 휠 속도를 빠르게 한 single roll melt spinning공정과 휠 속도를 느리게 한 twin roll melt spinning공정, chill casting공정으로 Al-6 at.%Be합금의 제조한 후 각각의 미세조직을 관찰하였다.

먼저, 응고속도가 가장 느린 chill-casting한 합금의 경우 Photo 1과 같은 응고조직을 관찰할 수 있었다. 이것은 Fig. 1의 Al-Be합금의 평형상태도에서 알 수 있듯이 과공정조성이므로 초정 Be수지상을 형성(L \rightarrow L+hcp-Be)한 후 잔류하는 액상이 공정반응(L \rightarrow α -Al+hcp-Be)을 거쳐 Photo 1과 같은 응고조직이 형성되었다고 여겨

Table. 1. Chemical composition of extruded Al-Be samples.(at.%)

	Be	Mg	Cu	Ti	Fe	Mn
Extruded Ingot	7.8	0.03	0.03	0.004	0.1	0.02
Extruded Ribbon	6.0	0.03	0.01	0.002	0.1	0.002

진다.

Chill casting에 비해 상대적으로 빠르게 응고된 두께 약 150 μ m의 Al-6.0at.%Be합금의 TR의 응고조직은 Photo 2-a와 같이 heat sink인 휠과 접한 리본 표면 부분에서 매우 미세한 결정립이 생성되어 중심부로 퍼져나간 것을 관찰할 수 있었다. 또한 리본의 중심부로 갈수록 재취(recalcescence)에 의해 계면 이동속도가 느려짐으로써 결정립이 점점 조대해지는 것을 관찰할 수 있었다.

반면, TR에 비해 빠르게 응고된 SR의 경우는 Photo 2-b와 같이 미세한 결정립만으로 이루어

진 응고조직을 관찰할 수 있었으며, 이것은 TR의 응고조직에서 휠 접한 리본 표면 부위의 응고조직과 동일한 미세조직으로 여겨진다.

Al-6.0at.%Be합금의 급속응고조직을 더욱 자세히 분석하기 위해 TEM을 이용하여 결정립과 Be입자의 분포 등을 관찰하였다. 먼저 TR의 경우 Photo 3-a과 같이 급속응고된 재료임에도 다소 조대한 결정립이 관찰되고, Photo 3-b, c와 같이 각 결정립 내에는 Be입자들이 봉상으로 결정립계와 수직한 방향으로 성장된 모습을 관찰할 수 있었다. 또한 SADP분석결과 이와 같은 봉상

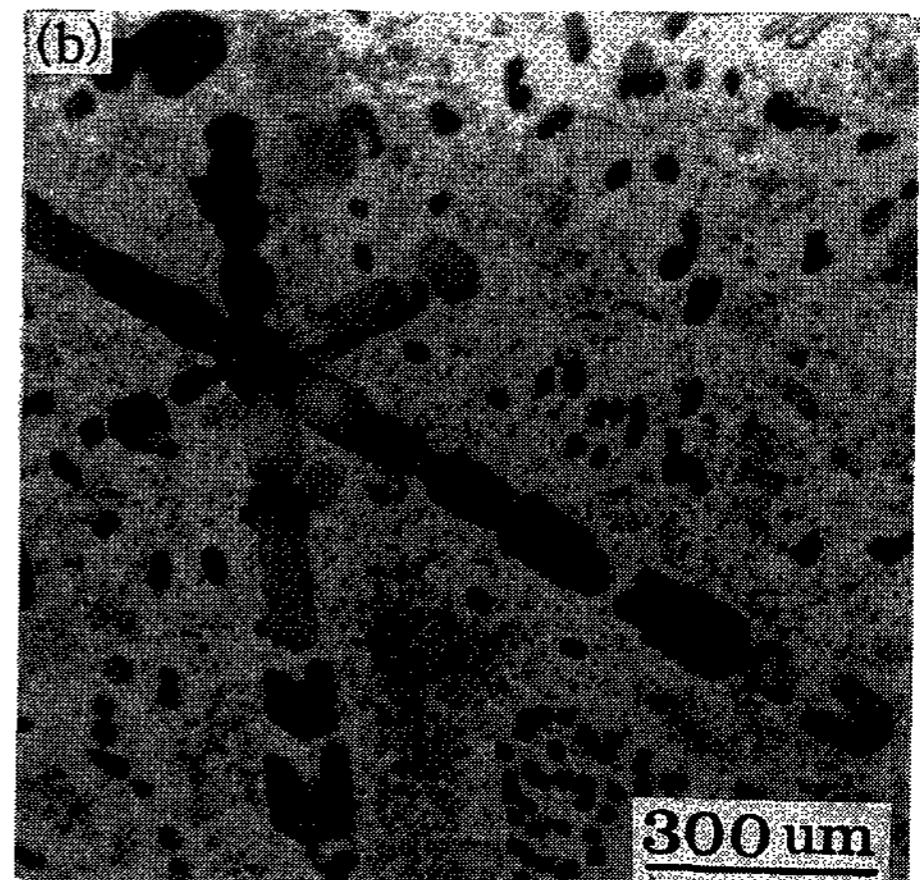
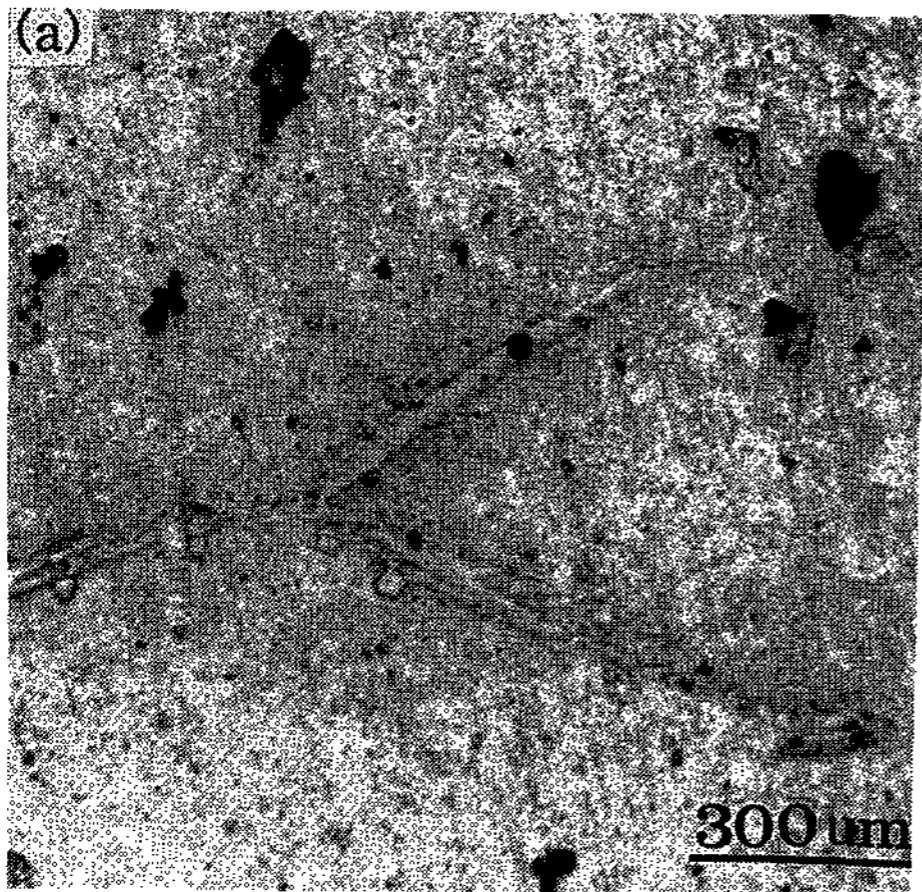


Photo 1. Optical micrographs of chill-cast Al-7.8at.%Be alloy
a) unetched, b) etched with HF.

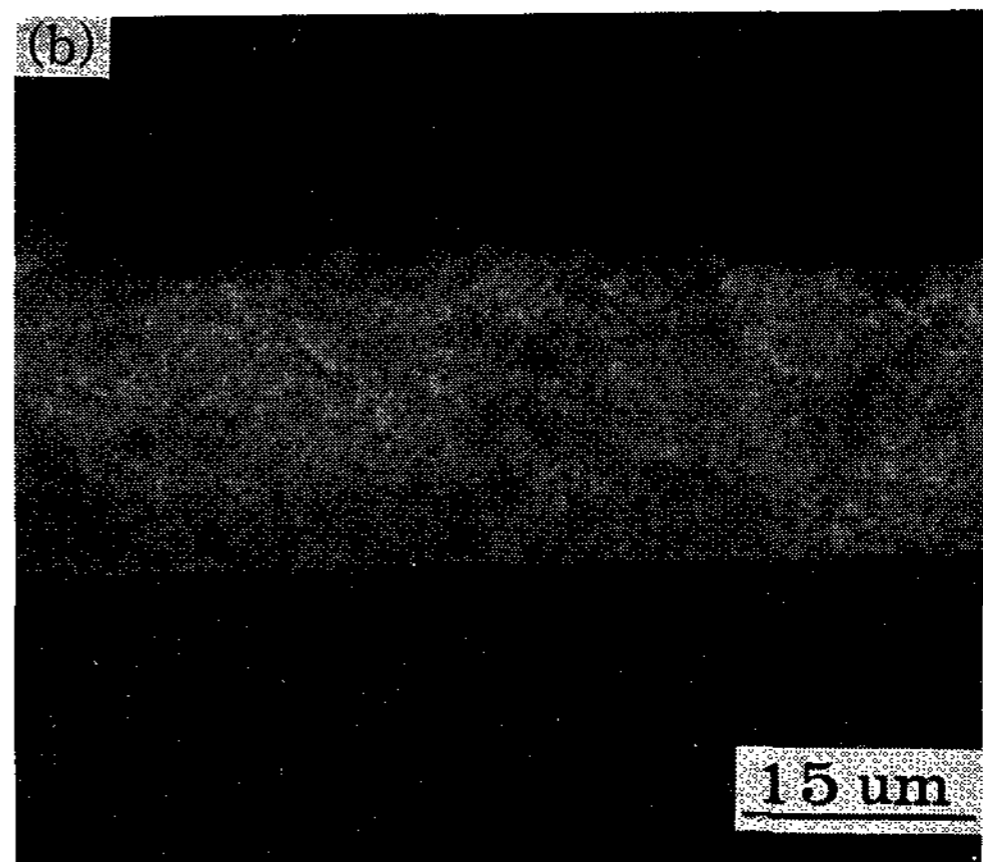
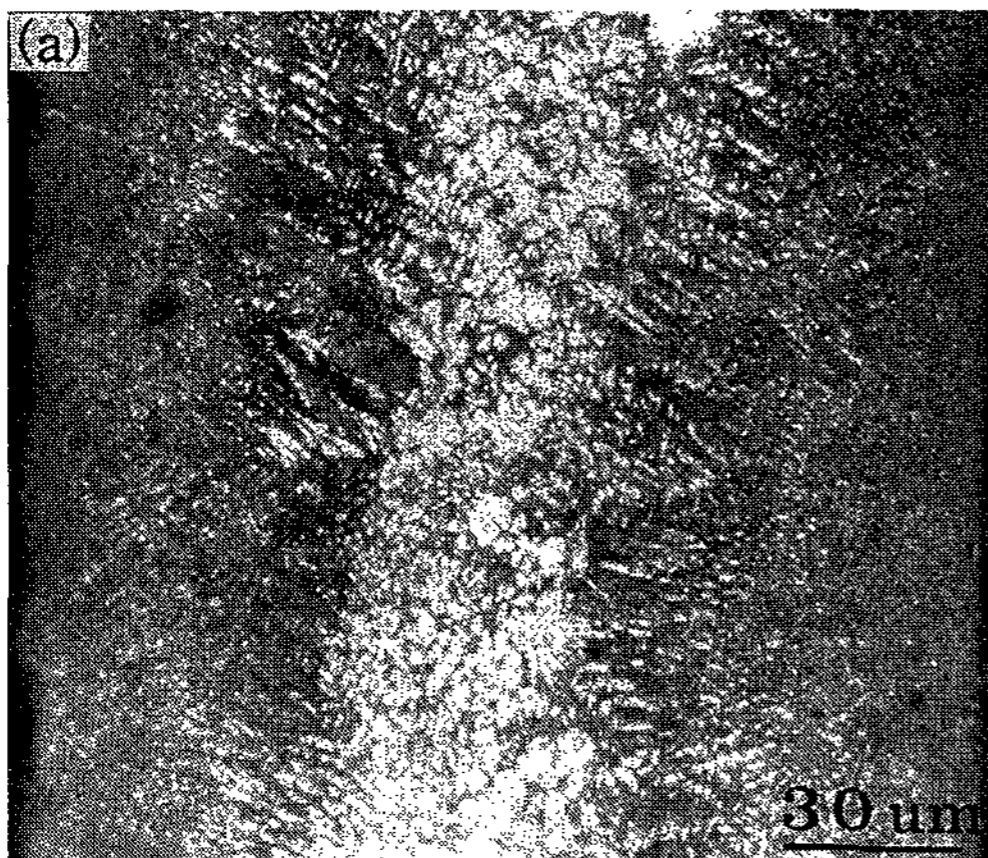


Photo 2. Optical micrographs of melt spun Al-6at.%Be ribbons(longitudinal section)
a) twin-roll melt spun ribbon,
b) single-roll melt spun ribbon.

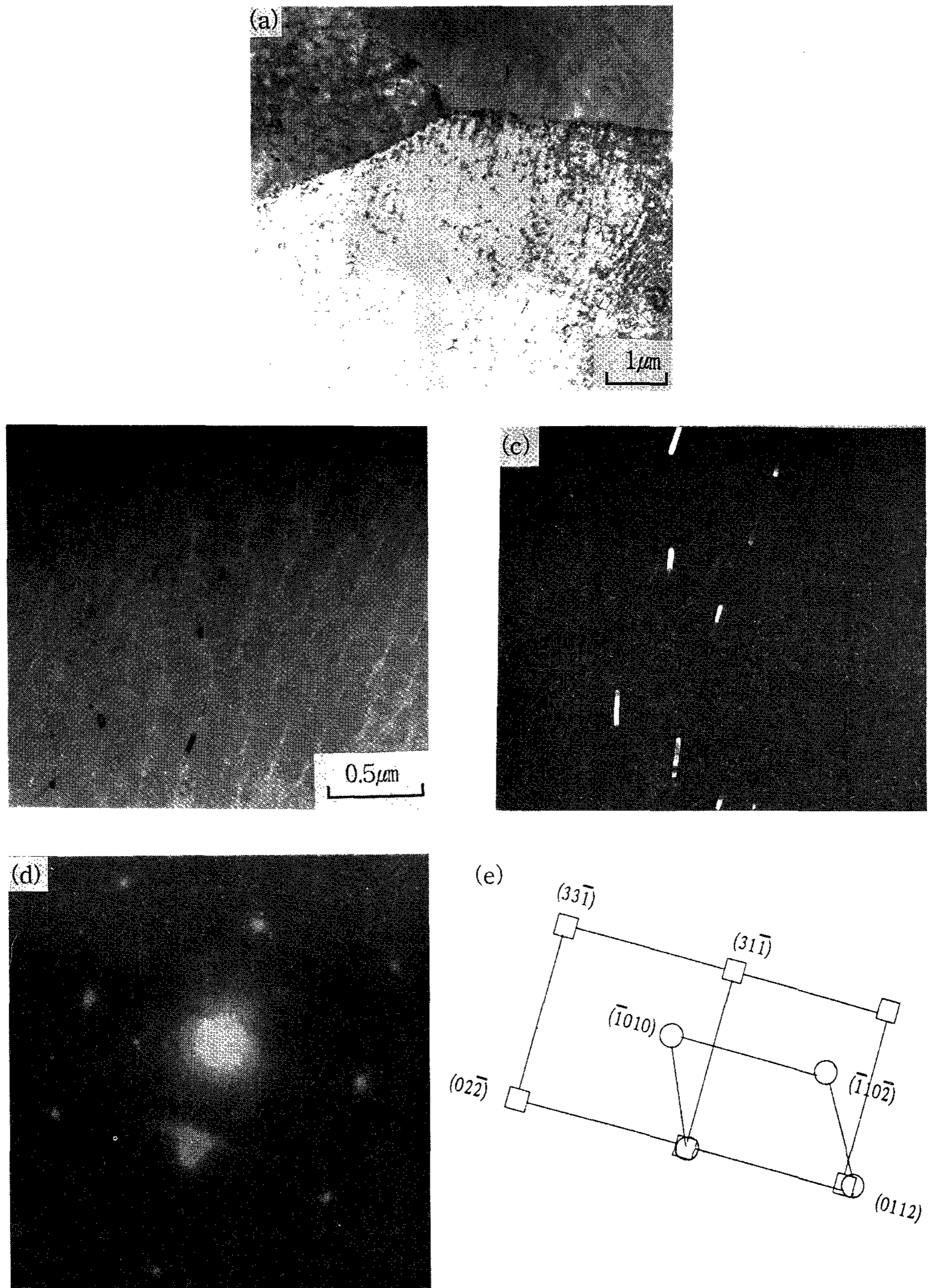


Photo 3. Transmission electron micrographs of twin roll melt spun Al-6.0at.%Be alloy.

a) general microstructure, b) bright field image, c) dark field image, d) SADP, e) solution of (d)

Be입자의 결정구조가 HCP임을 확인할 수 있었다.

반면, SR의 경우는 thinning하는 동안 많은 양의 Be입자들이 빠져 나가 Be입자의 분포가 명확히 관찰되지는 않았지만 Photo 4-a와 같이 Be입자가 결정립전체에 걸쳐 균일하게 분포하며, TR에서 관찰되는 봉상 Be입자가 구상에 가까운 형태로 변화하였으며 결정립과 Be입자의 크기도 TR에서 관찰되는 봉상 Be입자가 구상에 가까운 형태로 변화하였으며 결정립과 Be입자의 크기도 TR에 비해 훨씬 미세한 것으로 관찰되었다. 또한 SADP분석결과 구상의 Be입자는 Van Aken과 Fraser[7]의 연구에서도 관찰되는 것과 같이 격자상수 2.46 Å의 BCC결정구조를 보였다.

이와같은 TR과 SR의 응고조직 차이는 이미 광학현미경 조직상에서 관찰되는 결정립의 크기

에서도 예상할 수 있는 것이었다. 즉, Photo 2에서 SR의 응고조직은 TR의 리본 표면부의 응고가 시작되는 영역과 유사한 형태로 여겨지며, 휠 속도와 Photo 3과 4의 결정립크기 등으로 볼 때 TR에 비해 SR이 상대적으로 큰 과냉 하에서 응고가 진행된 미세조직으로 판단할 수 있다. 즉, TR에 비해 SR이 더 빠른 계면 이동속도로 응고가 진행된 것으로 판단할 수 있다.

고액계면의 전진속도는 Al-Pb합금에 대한 연구[8]와 동일하게 다음과 같이 근사적으로 유추할 수 있다. 즉, melt spinner의 substrate인 휠의 선속도를 v , 시편의 두께를 d , 응고가 진행중인 리본의 길이를 X 라 하면, 고액계면의 이동속도 R 은 다음과 같이 표시될 수 있을 것이다.

$$R = \frac{d \cdot v}{X}$$

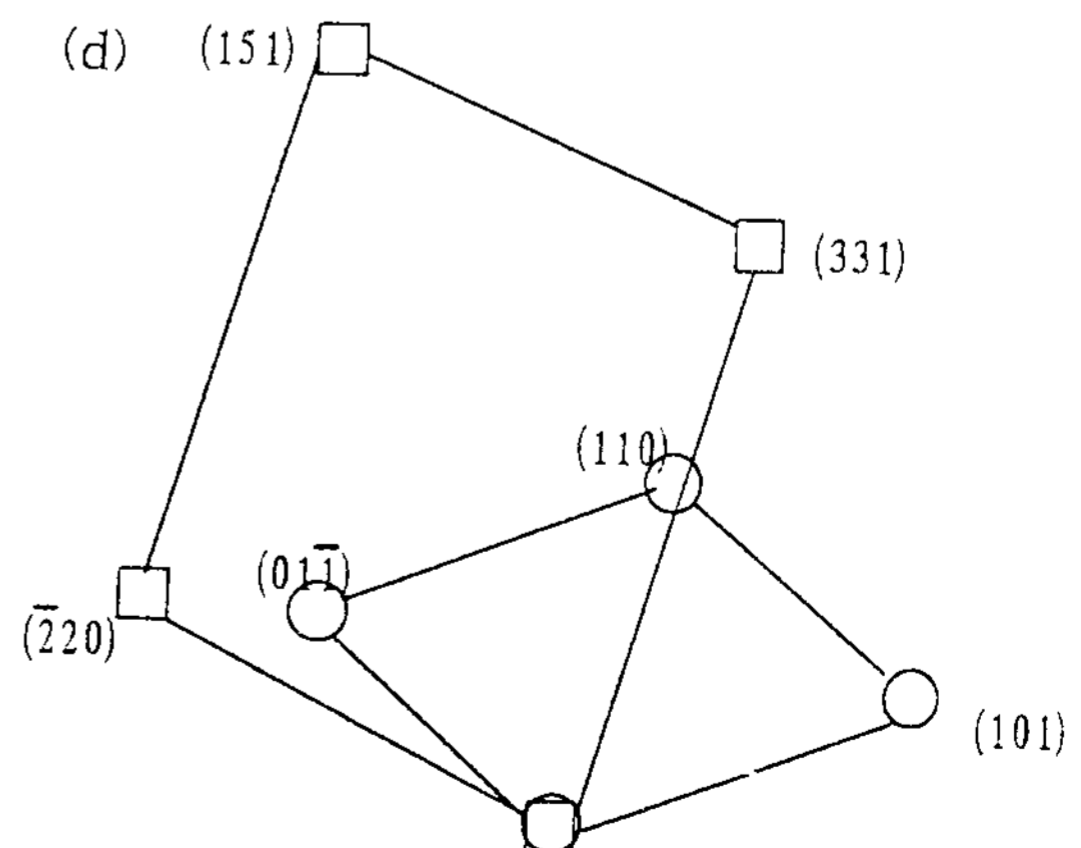
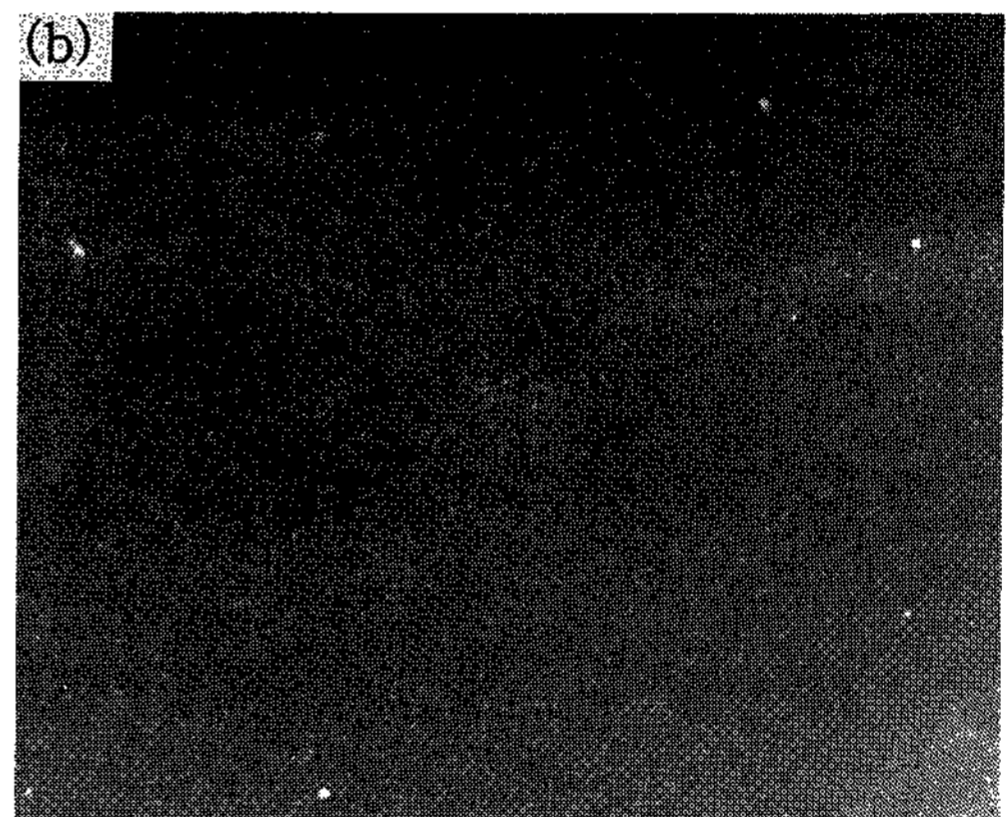
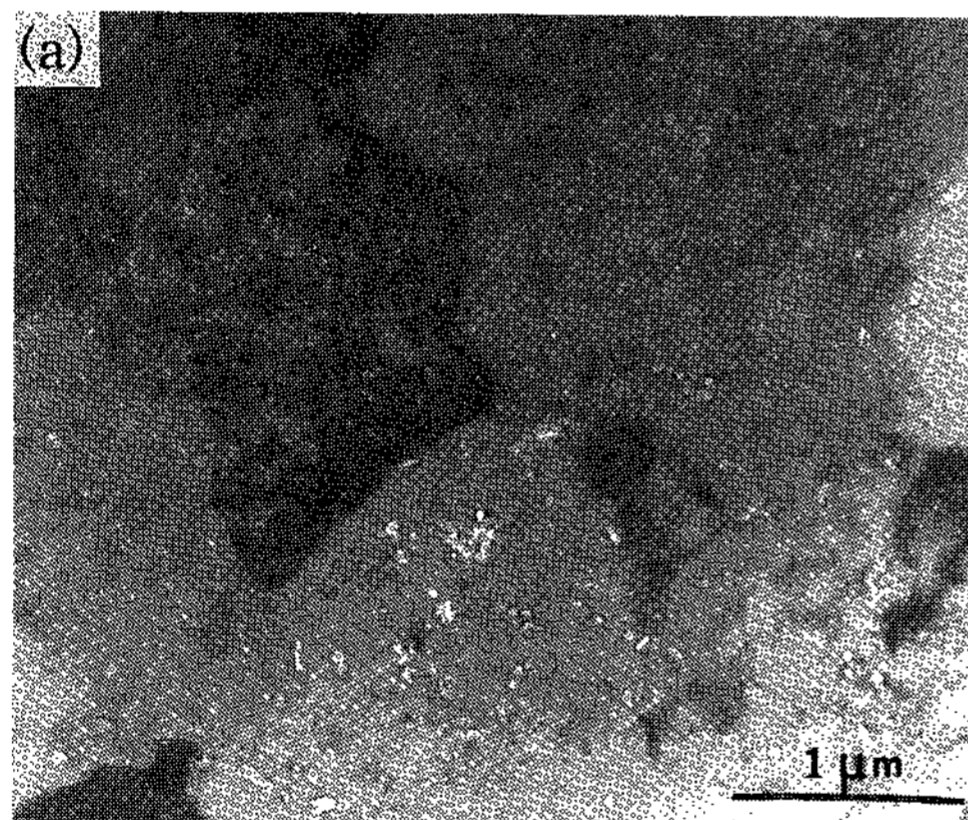


Photo 4. Transmission electron micrographs of single roll melt spun Al-6.0at.%Be alloy.
a) bright field image, b) dark field image, c) SADP, d) solution of(c)

본 실험에 대해 적용하면 melt spinning시 응고가 진행중인 리본의 길이는 1~5mm로 가정하였고[8], 휠의 선속도는 TR이 약 5.4m/s, SR이 약 42m/s, 리본의 두께는 TR이 150 μ m, SR이 25 μ m정도였으므로, Al상의 성장시 고액계면의 전진속도(R)는 TR이 80~400mm/s, SR이 210~1050mm/s정도로 계산된다.

Van Aken과 Fraser[7]는 Al-1.5at.%Be 합금의 안정한 평면계면 성장을 위한 임계속도를 18m/s로 계산하였는데, 합금조성 등의 차이는 있지만 본 실험의 고액계면 전진속도가 이 값에 비해 훨씬 작으므로, 불안정 계면으로 응고가 진행될 것으로 여겨진다. 이렇게 고액계면이 굴곡되면 오목한 영역에 용질원자가 모이게 되고, 그 부분은 고상과 농도차이가 크기 때문에 고상의 지속적인 성장이 어려우며, 따라서 그 부분에 용질원자의 미소편석이 일어나게 될 것이다. 이렇게 되면 바로 셀조직이나 수지상조직으로 천이하게 되어[9] 셀경계나 수지상가지 사이에서 편정계와 유사한 반응 즉 고농도 액상 \rightarrow Be고상+저농도 액상의 반응으로 응고하여 셀경계나 수지상 경계에 Be입자를 남겨 놓고 Al고용체는 성장하는 것으로 여겨진다.

TR과 SR의 Be형상 차이는 고액계면의 이동속도와 Be의 확산 등에 원인이 있는 것으로 여겨진다. 즉, TR의 경우 Be고상이 정출하게 되면 일부분은 전진하는 셀이나 수지상에 의해 둘러싸이고 Be고상의 첨단부는 밀려나는 Be-enriched 확산경계층으로부터 계속 Be성분이 공급되므로 결과적으로 응고계면에 수직한 방향으로 늘어선 봉상 Be입자를 보이게 되는 것으로 여겨진다. 그러나, SR의 경우에는 TR에 비해 고액계면 이동속도가 빠르므로 Be봉상이 "pinch-off"되어 비슷한 직경의 입자로 형성된 것으로 볼 수 있다. Schfer, Johnston 및 Parr등[10]은 Al-Bi-Fe 과편정합금의 일방향응고에 대한 연구에서 G/R(G: 온도구배, R: 성장속도)가 크면 봉상, G/R가 작으면 구상의 형태를 보이는 것으로 분석하여 본 실험과 동일한 결과를 얻었다. TR의 봉상Be과 SR의 구상 Be의 결정구조차이는 다음과 같은 원인에 의한 것으로 설명할 수 있다. 즉, SR의 열방출속도가 TR에 비해 상대적으로 빨라서 고상Be으로부터 Al의 확산이 어렵기 때문에,

SR의 구상Be이 TR의 봉상Be에 비해 더 많은 양의 Al을 함유하게 될 것이다. 이렇게 잔류하는 Al은 BCC-Be을 안정화시킨다고 알려져 있다[7]. 따라서 급속응고시 Al-Be합금이 Fig. 2와 같은 준안정상태도대로 불용성공극을 가지는 편정계로 응고가 진행된다는 사실을 이러한 Be형상과 결정구조로부터 확인할 수 있다.

3.2 인장특성에 미치는 급속응고의 영향

Al-Be합금의 인장특성에 미치는 급속응고의 영향을 파악하기 위해 잉고트와 twin roll melt spinning공정에 의해 급속응고시킨 리본을 동일한 열간가공을 거치게 한후 인장시험하였다. 또한 급속응고의 효과에 대한 열간가공 온도의 영향을 최소화할 수 있는 조건을 찾기 위해 vacuum hot pressing(VHP)온도를 고온(550 $^{\circ}$ C)과 저온(375 $^{\circ}$ C)으로 나누어 실험하였다. 열간가공을 거친 후의 모든 Al-Be합금 압출재의 밀도는 거의 이론밀도에 가깝게 측정되어 일단 열간가공 공정은 적당하였다고 판단되며, 각각의 압출재를 인장시험한 결과는 Fig. 3과 같다.

우선 응고속도의 면에서는 급속응고된 리본을 압출한 시편이 잉고트를 압출한 시편에 비해 강도는 향상되었으며, 연신율은 감소하였다. 이러한 경향을 보이는 원인을 파악하기 위해 Photo. 5와 같이 각각의 압출재내의 Be입자의 크기와 분포등을 광학현미경을 이용하여 관찰하였다. Photo 5-a, b와 같이 압출한 잉고트의 경우 횡단면에서는 VHP온도에 따라 각각 최대 20 μ m와

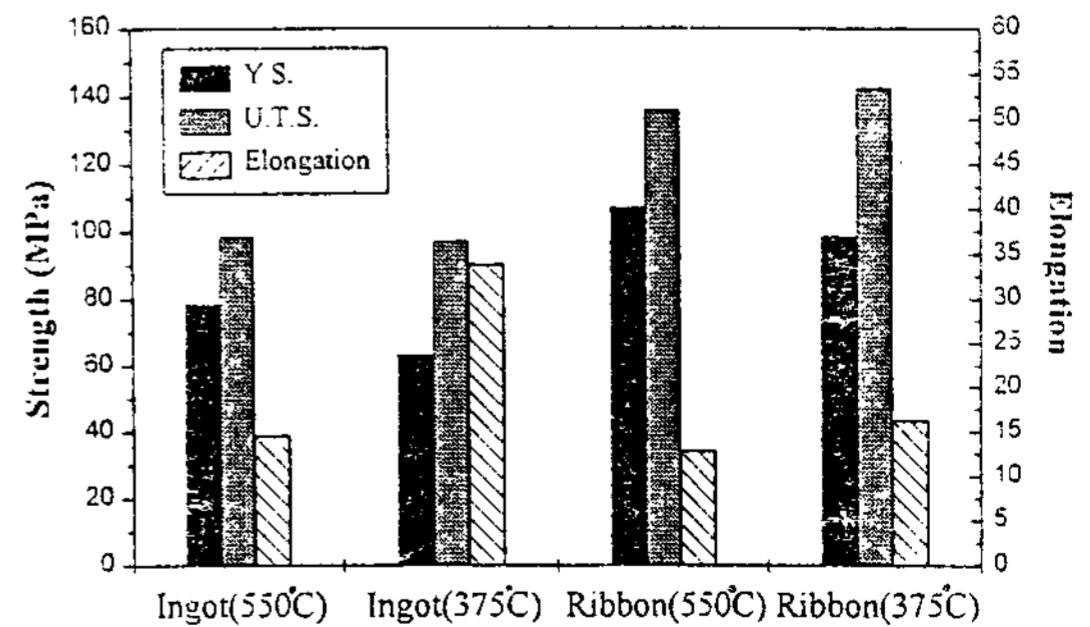


Fig. 3. Tensile property of Al-6.0at.%Be alloys extruded at 450 $^{\circ}$ C with reduction in area of 25 : 1 after vacuum hot pressing at 550 $^{\circ}$ C and 375 $^{\circ}$ C.

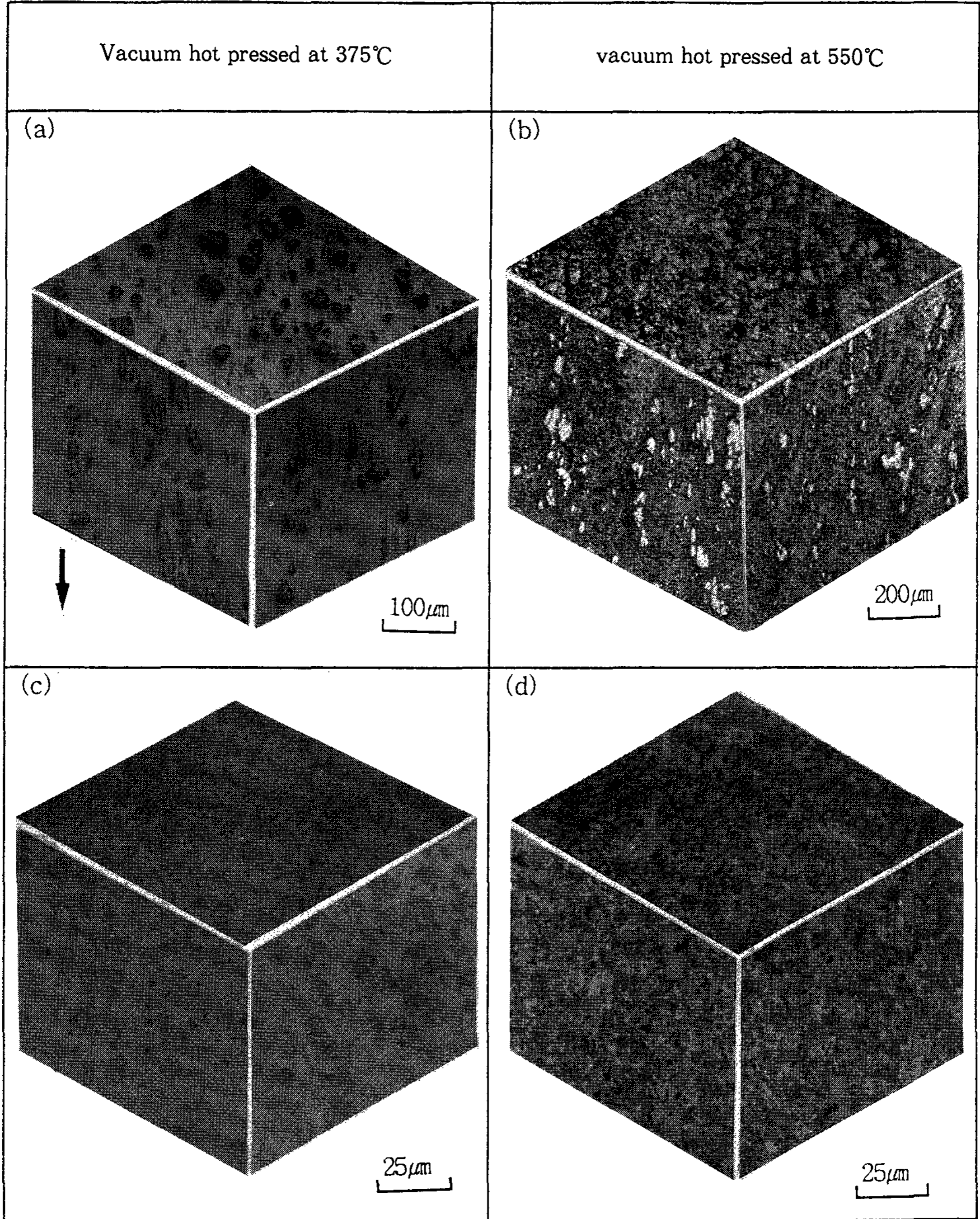


Photo 5. Optical micrographs of Al-6.0at.%Be alloys extruded at 450°C with reduction in area of 25 : 1 after vacuum hot pressing at a) 550°C and b) 375°C

40 μ m 정도의 Be입자가 분포하고 있는 것으로 관찰되었다. 즉, VHP 온도가 375 $^{\circ}$ C에서 550 $^{\circ}$ C로 변함에 따라 Be입자의 크기가 거의 2배 정도로 조대화되었다.

Photo 5-c,d와 같이 압출한 리본의 경우에는 압출한 잉고트에 비해 미세한 5 μ m 이하의 Be입자가 균일하게 분산되어 있었으며, 낮은 온도에서 VHP한 후 압출한 리본에서 Be입자가 더 미세하였다.

동일한 조건에서 열간 가공한 Al-Be 합금에서

Be입자의 크기와 분포가 차이를 보이는 원인은 열간가공전의 잉고트와 리본에서의 Be입자의 크기와 분포 차이가 열간가공후에도 유지되고 있음을 의미한다. 따라서 압출한 리본이 압출한 잉고트에 비해 강도가 향상된 것은 Be입자의 미세화에 원인을 둘 수 있다. 또한 연신을 감소에 대한 원인은 광학현미경사진에서는 찾을 수 없었으나, 열간가공전 리본 표면의 산화층이 고르게 분포하지 못하고 균집화되어 리본을 압출한 압출봉의 캔재료와 Al-Be 합금간의 일부계면에서 관찰된

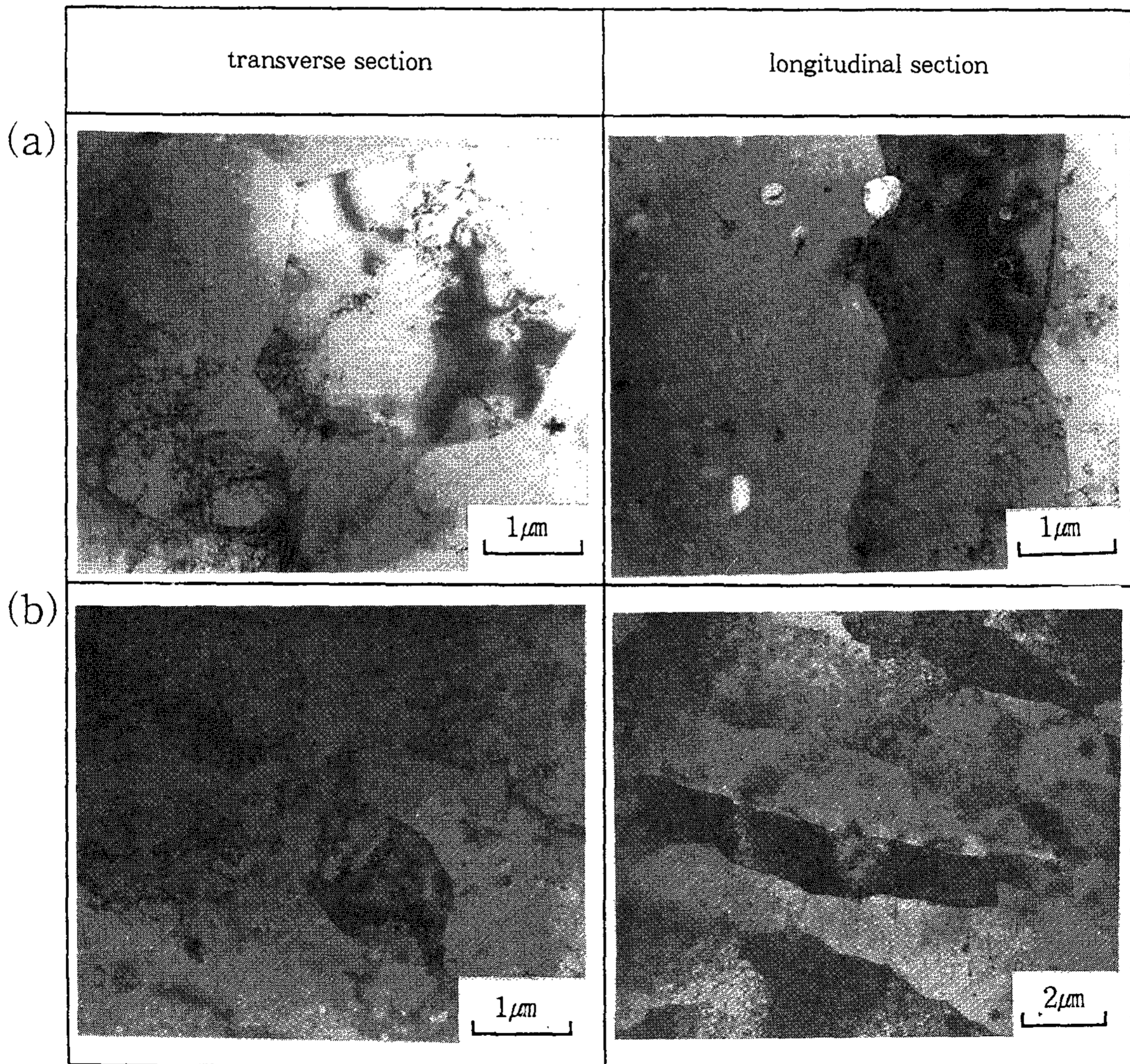


Photo 6. Transmission electron micrographs of Al-6.0at.%Be alloys extruded at 450 $^{\circ}$ C with reduction in area of 25 : 1 after vacuum hot pressing at a) 550 $^{\circ}$ C and b) 375 $^{\circ}$ C

것으로 보아 산화개재물의 영향인 것으로 여겨진다.

열간 가공에 의한 급속응고 효과 감소를 최소화하기 위해 375°C에서 VHP한 결과 압출한 리본의 인장특성이 전체적으로 향상됨을 알 수 있었다. 이러한 경향을 보이는 원인은 Photo 5-c,d 와 같이 VHP온도를 낮춤으로써 횡단면에서의 Be입자가 최대 6μm정도의 크기에서 2μm정도의 크기로 미세화되었으며, Photo 6과 같이 TEM으로 재결정된 결정립을 관찰한 결과 횡단면기준으로 550°C에서 VHP한 경우 직경 3μm정도에서 375°C에서 VHP한 경우 직경 1.5μm정도로 미세해졌다. 따라서, 375°C에서 VHP한 후 압출한 리본이 강도와 연신을 모두 향상된 것은 Be입자와 결정립의 미세화에 원인이 있음을 알 수 있다.

이러한 결과로부터 Al-Be합금의 잉고트보다는 급속응고된 재료가 열간가공시 온도등의 인자에 의해 더 크게 영향받는 것을 알 수 있고, 열간가공조건의 변화보다는 응고속도의 변화에 의해 인장특성이 더 크게 영향받는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

Al-Be합금의 미세조직과 인장특성에 미치는 급속응고의 영향을 파악하기 위한 실험에서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) Melt spinning에 의해 급속응고된 Al-6at.%Be합금은 Al기지내에 Be입자가 미세하게 분산된 응고조직을 보였으며, 고상 Be이 G/R가 크면 HCP-봉상Be으로 형성되며, G/R가 작으면 BCC-구상Be으로 형성되는 것으로 여겨진다. 이러한 형상변화는 편정계의 합금에서 주로 관찰되는 것이며, 응고과정의 유추에서도 평형상태에서 공정계인 Al-Be합금이 급속응고시 큰 과냉에 의해 편정계로 변화했음을 알 수 있었다.

2) Al-6at.%Be합금의 melt spun 리본 압출재와 잉고트 압출재의 인장시험결과 리본 압출재가 급속응고효과에 의해 향상된 인장특성을 보였으며, 이것은 잉고트 압출재에 비해 상대적으로 미세한 재결정립과 Be입자의 미세함파 균일한 분포에 의한 것으로 여겨진다. 또한 열간가공은

도의 변화보다는 응고속도의 변화가 인장특성에 더 큰 영향을 끼치는 것으로 여겨진다.

5. 참고문헌

- [1] J. WADSWORTH, A. R. PELTON, D. D. CROOKS, R. E. LEWIS and A. E. VIDOZ : Journal of Materials Science 21, (1986), pp. 3850-3858.
- [2] J. WADSWORTH, A. JOSHI, D. D. CROOKS and A. E. VIDOZ : Journal of Materials Science 21, (1986), pp.3843-3849.
- [3] RICHARD E. LEWIS DONALD D. CROOKS and GILBERT J. LONDON : "Feasibility of Rapid Solidification Processing of Aluminum-Lithium-Beryllium Alloys" Proc. Symp. on Enhanced Properties in Structural Metals via Rapid Solidification, Florida October 6~10 1986, ASM, edited by F. H. Froes and S. J. Savage.
- [4] W. J. BOETTINGER and J. H. PEREPEZKO : "Rapidly Solidified Alloys" edited by Howard H. Liebermann, Marcel Dekker Inc, (1993), pp.17-78.
- [5] DAVID C. VAN AKEN and HAMISH L. FRASER : Acta Metall. 33, (1985), pp. 963-974.
- [6] Materials Science and Technology vol. 15 "Processing of Metals and Alloys" edited by R. W. Cahn, published by VCH Inc., p. 98.
- [7] DAVID C. VAN AKEN : Ph.D. thesis, Univ. of Illinois at Urbana-Champaign, 1986.
- [8] 김원태, 김동훈 : 대한금속학회지, Vol. 23, No. 4, (1985), p. 437.
- [9] W. KURZ and D. J. FISCHER : Fundamentals of Solidification, Trans. Tech. Pubs, 1984, pp.68-72.
- [10] SCHAFFER et al. : Acta Metall., Vol. 31, No.8, 1983, p.1221.