

# 急冷凝固된 Al-Li-Ti合金의 時效析出舉動에 關한 研究

金 在 東\* · 鄭 海 用\*\*

\*東西産業(株), \*\*釜山工業大學校

(1995년 5월 1일 접수)

## A Study on the Precipitation Behaviors in Rapidly Solidified Al-Li-Ti Alloys

Jae-Dong, KIM and Hae-Yong JEONG

\*Dong Suh Industrial Co. and \*\*Pusan National University of Technology

(Received May 1, 1995)

### Abstract

As Al-Li based alloys are to find widespread use in aerospace and other structural applications in which their low-density high specific stiffness properties be exploited, their mechanical properties must adequately match those of the which they intended to replace.

In order to develop these purposes, the precipitation behaviors of the rapidly solidified Al-Li-Ti alloys aged at various temperature were investigated.

$\delta'$  phase precipitated homogeneously in the matrix during not only melt quenching but also aging at the aging temperature of 160°C and 210°C. The addition of the Ti in Al-Li alloy promoted the formation of  $\delta'$  phase.

The addition of Ti on the  $\delta'$  solvus line had a little effect over the thermodynamics  $\delta'$  solvus line. The reason for these behavior was that the  $\delta'$  phase was suppressed to precipitate as much as supercooling by melt quenching.

The discontinuous precipitation reaction occurred by the preferential growth of  $\delta'$  phase due to the migration of grain boundary provided the driving force dependent of solute concentration fluctuations.

### 緒 論

수송분야 구조물의 설계는 그 재료의 선택 기준에서 강도와 안전성 이외에 중량 경감이 중요시 되고 있다. 현재 사용되고 있는 고기능의 Al합금이나 Ti합금은 경량화가 어렵기 때문에 최근 대체재료로서 복합재료(FRM, FRP) 등의 경량재료가 개발되어 수송분야의 구조용 재료로 그 사용량이 점차

증대되고 있는 실정이다.

그러나 복합재료의 사용에는 모재와 강화재의 계면에 있어서 젖음성(wettability) 등의 불안정성 때문에 안정성에 대한 신뢰성이 결여되고 있고, 새로운 구조설비재료의 대체에 경제성이 문제시 되고 있어 역시 구조용 재료로서 신뢰성, 가격, 공급성 등의 경제적인 면에서 Al합금이 복합재료보다 우수할 뿐만 아니라 기계적, 화학적 성질 등이 한

충 향상된 새로운 기능을 갖는 합금의 개발이 예상되기 때문에 앞으로도 주요 구조재료로는 Al합금이 많이 채용될 것으로 전망할 수 있다.

이같은 새로운 합금으로 Al-Li합금이 주목되고 있는데 이것은 Al-Li합금이 저밀도이면서 강도가 7075-T6 재에 필적할 가능성이 있을 뿐 아니라 비탄성율이 높고 또한 기존 구조설비의 이용이 가능하다는 점에서 복합재료에 비해서 경제적 이득이 크기 때문이다. Li는 상온에서의 밀도가 0.53g/cm<sup>3</sup>으로 Al에 1 wt% 첨가시 약 3% 정도의 합금의 비중이 감소되기 때문에 경량화가 절실하게 요구되는 기존 구조재료에 Al-Li합금을 대체 사용하면 최대 20%까지 무게절감이 가능하여 연료비 절감이 크게 기대되고 있고, 또한 1 wt% Li 첨가에 의해서 약 6% 씩의 탄성율의 증가는 동적 구조물에 있어서 필수 불가결한 피로와 진동 등의 문제에 매우 효과적으로 대응되고 있다.

그러나 Al-Li합금은 재료적인 측면에서 인성이 낮다는 최대의 문제점이 지적되고 있다. 그 원인의 첫째는 시효시 석출하는 준안정상인 δ' 석출상의 계면에너지가 낮기 때문에 전위에 의해서 쉽게 전단될 뿐 아니라 모상과 δ' 상의 슬립(slip)면이 거의 일치하여 동일 슬립면상에 슬립이 집중된다. 이렇게 해서 planar 슬립이 증대하여 입계에서의 응력집중을 초래하고 그 결과脆性的인 파괴가 일어난다는 점이고, 둘째는 結晶粒界에 따라서 溶質原子의 濃度나 孔空의 濃도가 낮은 영역이 생기고 이로 인하여 無析出帶(precipitate free zone ;

Table.1 Chemical composition of alloys.(wt%)

specimen \ element	Li	Ti	Al
Al - Li	2.37	-	Bal
Al - Li	3.56	-	Bal
Al - Li - Ti	2.48	0.15	Bal
Al - Li - Ti	3.50	0.16	Bal

PFZ)가 형성된다. 이같은 無析出帶는 均열의 발생 원인이 되어 粒界에 따라서 粒界破壞를 일으킨다는 점이다. 그 외에도 불순물의 編析, 粒界에서의 不連續析出物의 형성 등이 Al-Ti합금의 韌性を 저하시키는 원인으로 지적되고 있다.

이와 같이 Al-Li합금의 低韌性에 대한 원인이 많고 또한 그 支配因子에 관해서는 아직 명확하지 않은 점이 많지만 이를 해결하기 위하여 최근 활발하게 이용되고 있는 멜트 스피닝(melt spinning) 방법으로 Al-Li, Al-Li-Ti합금을 급냉응고시켰을 경우에 있어서 析出物의 特性, 析出過程 그리고 不連續析出의 형성과 성장 등에 관하여 검토하였다.

實驗方法

Li를 포함하는 Al합금의 溶解는 眞空 誘導 溶解爐(2kw, 7.7kHz)에서  $4 \times 10^{-2}$  torr 진공 후 Ar 분위기(400mmHg)에서 高純度 알루미늄이나 도가니를 사용하고 純 Al(99.99%)과 純 Li(99%)과 Al-4wt% Ti 母合金을 이용하여 溶解 製造하였다.

멜트 스피닝장치의 概略圖는 Fig. 1과 같으며, 석영관에 5~10g의 모합금을 裝入한 후 챔버내의 분위기를 진공→Ar→진공→Ar로 유지하여 熔融溫度보다 약 100℃정도 높혀 熔融시킨 후 약 2kg/cm<sup>2</sup> 압력의 Ar 가스로 1700rpm으로 회전하는 직경 300mm의 Cu-Be材 회전롤에 분사하여 리본상의 시료를 제작하였다. 얻어진 리본시료의 組成은 Table 1과 같다. 각 리본의 等時間 및 等溫 時效 열처리는 200℃ 이하에서는 ±1℃로 조절된 실리콘 오일 욕조(silicon oil bath) 중에서 교반하면서 실시하였으며, 200℃ 이상 온도의 時效處理는 ±3℃로 조절된 鹽浴(KNO<sub>3</sub>+NaNO<sub>3</sub>)에서 鹽과 Li의 반응을 방지하기 위하여 알루미늄 호일로 싸서 時效열처리를 행하였다.

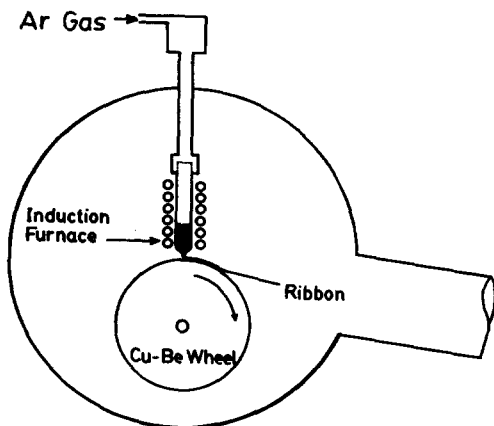


Fig. 1 Schematic diagram of single roll melt spinner.

X-선 回折試驗은 加速電壓 30kV, 10mA의 조건에서 Cu target, Ni 필터를 사용하여 하였으며 Al의 格子常數( $a_0$ ) 決定은 (220), (222), (311) 面の 回折角度로부터 Cohen법을 이용하여 구하였다. 리본의 熱的舉動은 斷熱形의 熱補償形 熱分析器 (Rigaku TAS-100)를 사용하여 측정하고, 이때 高純度의 Ar gas를 미소량(60cc/min) 흘리면서 室溫에서부터 500℃ 까지 20℃/min의 昇溫 速度로 연속 가열하면서 행하였다.

透過 電子顯微鏡의 조직 관찰은 急冷凝固된 Al-Li합금의 리본을 직경 3mm의 디스크로 제작한 후 12V의 電解 條件으로 20% HClO<sub>4</sub> : 80% CH<sub>3</sub>COOH의 電解液 또는 0.25A/m<sup>2</sup>의 電流速度와 15~20V의 電壓下에서 -40℃로 유지된 30% HNO<sub>3</sub>와 70% CH<sub>3</sub>OH의 전해액 중에서 딩플(dimple)을 형성시킨 후 최소 두께면을 찾아 200V의 加速 電壓下에서 조사하였다.

### 實驗 結果 및 考察

#### 1. 急冷凝固된 리본의 相變化

Fig. 2는 各 溫度에서 1時間씩 等時間 時效處理한 합금을 X-선 回折試驗으로부터 α相의 格子常數를 측정한 결과이다. Al-Li 합금과 Al-Ti 합금에 있어서 Li의 원자반경이 1.52Å이고 Ti의 원자반경이 1.47Å으로 Al의 원자반경인 1.43Å에 비교해서 큰 값인 데도 α相의 格子常數는 固溶量에 비례해서 감소하는 결과를 나타내고 있다. 이와 같은 格子常數의 변화에 대하여 Jones<sup>1)</sup>는 面心立方體에 있어서 溶質原子가 거의 0인 固溶體를 가정하여 格子常數 변화율에 관한 식은 다음과 같이 표시된다고 하였다.

$$\phi_0 = 2\{(S_{12} - S_{11})/S_{11}\} \quad (1)$$

여기서  $\phi_0$  : 格子常數의 변화율이고,  
 $S_{11}$  : 同種原子와의 원자거리,  
 $S_{12}$  : 異種原子와의 원자거리

Al-Ti 합금에 관하여  $S_{11}=0.288$ 이고,  $S_{12}=0.271$ 이라고 할 때 (1)식으로부터 계산한 결과  $\phi_0$ 는 -0.118이나, 實測結果는 -0.24이라고 밝히고

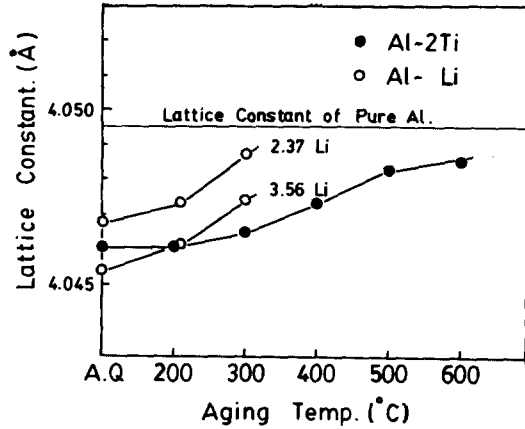


Fig. 2 The change of lattice constant due to aging temperature in Al-X(=Li, Ti) alloys.

여기에서 (-)값은 (1) 식에서의  $S_{12}$ 값이  $S_{11}$ 값보다 작은 결과로써 格子常數의 변화는 원자반경의 크기보다는 異種原子 사이의 結合力에 의해서 決定되기 때문이라고 하였다. 그림의 변화를 살펴보면 淬火상태에서 Al-3.56wt% Li 합금의 α相의 格子常數 값은 ~4.0455Å으로 純Al의 格子常數 값에 비하여 상당히 작고 時效에 의해서 210℃에서는 4.0460Å으로 210℃까지는 큰 변화는 보이고 있지 않으나 300℃에서는 ~4.0474Å으로 多少 급격하게 증가되는 경향을 나타내고 있다. 또한 Al-Ti 합금에 있어서 淬火상태에서의 α相의 格子常數 값은 ~4.046Å이고 300℃에서는 4.0465Å으로 300℃까지는 거의 변화를 보이고 있지 않으나 300℃이상에서는 급격한 증가를 보이므로 300℃부터 相變化의 시작이 일어나고 있음을 보이고 있다.

Fig. 3은 Al-2.37wt% Li-Ti合金을 멜트스피닝한 상태에서 斷熱型 走査熱量計를 이용하여 측정한 熱量-溫度 曲線을 나타낸 것으로 2원계 합금(a)와 3원계 합금(b)의 熱分析 曲線에 차이가 있음을 볼 수 있다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 2원계 합금의 as-melt spun 상태에서는 base line보다 아래에 2개의 吸熱反應과 base line보다 위에 2개의 發熱反應이 존재하고 있다. 이들 반응 영역을 각각 A,B,C,D라 하고 존재하는 온도 범위를 살펴보면 각각 146~220, 220~302, 302~352, 352~394℃이다.

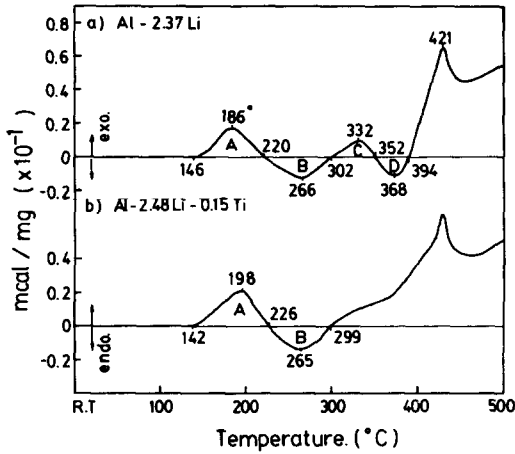


Fig. 3 H-T curves of Al-Li-Ti alloys as-melt spined.

이들 반응 영역은 基地에 析出物의 形成과 再固溶에 관련된 반응으로 A는 母相과 整合인  $L1_2$  급 구조의  $\delta'$ 相 形成에 기인된 발열반응으로 A반응 이전에는 아무런 반응이 나타나지 않고 있다.

析出硬化型 Al-Li 2元系 합금에서는  $\delta'$ 相은 쉘 층 도중에도 形成되기 때문에  $\delta'$ 相의 析出 以前 단계에 있어서의 析出 生成물의 존재 유무를 조사하기란 극히 곤란하지만 Norzato<sup>2)</sup>, Ceresara 등<sup>3)</sup>은 전기전항 측정을 통하여, Takahashi<sup>4)</sup>, Nozato<sup>5)</sup>, Jo<sup>6)</sup> 등은 열 분석을 이용하여, Shehegoleva<sup>7)</sup>는 투과 전자현미경 관찰에 의해서  $\delta'$ 相 생성 이전의 前驅階段의 生成물이 形成되고 있다고 하고 있으나 급냉 응고된 경우에 있어서 A 반응 이전에 아무런 반응 영역이 나타나지 않는 것으로 보아서  $\delta'$ 相의 形成 이전에는 析出物의 生成은 없는 것으로 판단된다. 흡열반응 B의 peak 온도는 266°C로서, Nozato와 Nakai에 따르면  $\delta'$ 相에 관련된 이들 두 A, B반응 현상의 peak 온도는 Li량에 의존하고, 존재하는 온도는 2.37wt% Li일 경우 160°C와 255°C라고 하고 있으나 본 실험 결과에 있어서  $\delta'$ 相의 形成과 再固溶에 관련된 peak 온도는 186°C와 266°C로서 Nozato와 Nakai의 결과보다 고온측으로 이동하고 있음을 알 수 있다. 이와 같이 넓은 온도 범위에 걸쳐서 고온 측에서 반응이 일어나고 있는 까닭은 주로 급냉 응고에 의해서 초기의  $\delta'$ 相 形成이 억제되는 까닭으로 여겨지나, 另外的인 조건

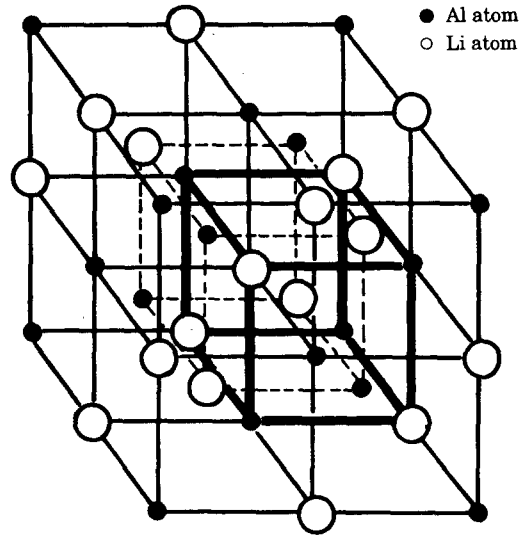


Fig. 4 Unit cell of  $\delta$  phase (NaTi type).

으로 昇溫速度가 20°C/min 로서 너무 크기 때문에 확산이 완전하게 이뤄지지 않은 점도 있고 또한 리본시편의 두께 방향에 있어서의 자유표면층의 偏析이 존재하기 때문이라고 해석된다.

한편 발열반응 C의 peak 온도인 332°C에서 쉘 층하여 X-선 회절 시험을 행하여 본 결과 Fig. 4와 같은 결정구조를 같은  $\delta$ 相의 존재를 Fig. 5와 같이 나타내므로서 이 영역은  $\delta$ 相의 形成에 기인하는 것이라 판단된다.

따라서 반응 D는  $\delta$ 相의 재고용에 의한 흡열 반응이라고 추정된다. Fig. 3(b)는 Ti을 첨가한 경우에 있어서의  $\delta'$ 相 形成에 기인하는 peak A가 거의 변화가 없는 것으로 보아 Ti이 Al-Li 합금에 있어서  $\delta'$ 相의 形成에 크게 기여하지 못하는 것으로 여겨지며, 또한  $\delta$ 相의 形成 peak도 McAlister의 非平衡狀態圖<sup>8)</sup>上에서 나타나는  $\delta$ 相의 生成 온도인 약 276°C 보다 훨씬 고온인 299°C에 존재하는 것으로 보아 Ti을 첨가한 경우  $\delta$ 相의 形成을 억제한다고 생각된다. 한편 복합 析出相에 기인하는 반응은 열분석법에 의해서 조사할 수 없었다. Fig. 6은 Al-2.37wt% Li 합금의 210°C의 時效處理 온도에서 時效處理 시간의 변화에 따른 H-T 곡선으로 그림에서 알 수 있는 바와 같이 4시간 時效處理한 경우를 보면 as-melt spun 상태에 비하여 발열반응 A, 즉  $\delta'$ 의 形成에 기인하는 발열반응 면적

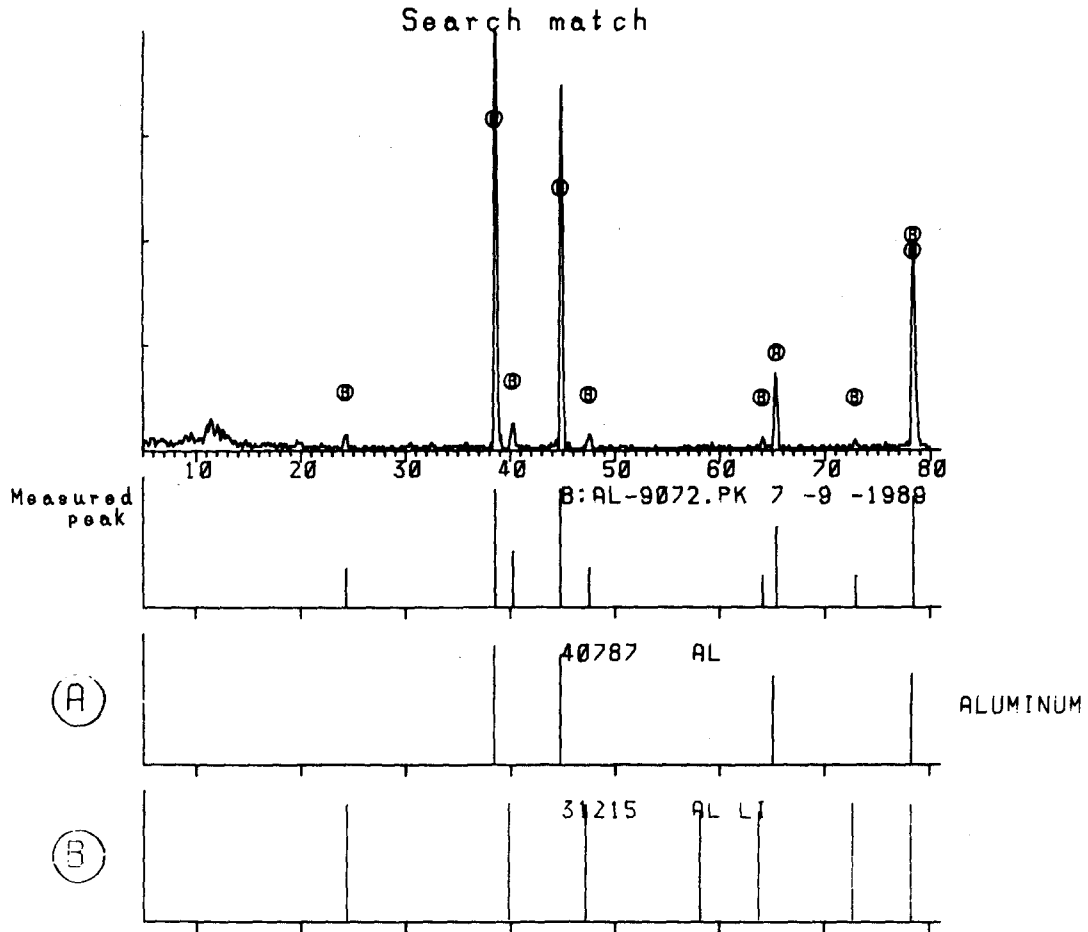


Fig. 5 Identification of  $\delta$  phase by x-ray diffraction after quenched from 332°C of C peak in Fig. 3(a).

의 크기가 상당히 작아지고 있다. 이것은 時效에 의한  $\delta'$ 相의 형성은 아직 계속 이어지고 있으나 이미  $\delta'$ 相의析出이 상당히 진행되어진 것에 기인한 것이라고 생각된다.  $\delta$ 相의 형성에 의한 발열 반응 C는 時效處理 시간의 경과에도 불구하고 반응시작 온도는 일정하나 반응종료 온도가 저온측으로 이동되고 있고  $\delta$ 相의 재고용에 의한 흡열 반응이라고 판단되는 반응 D 역시 그 면적이 감소되고 있는 것으로 보아 화학적 자유에너지를 구동력으로 하는  $\delta'$ 相의 형성 속도가 감소되어 Fig.6(b,c)의 48시간 이후에서는  $\delta'$ 相의 형성반응은 완료되어 반응 peak가 나타나고 있지 않다.

Fig. 7은 Al-3.56Li 합금을 210°C에서 48시간

의 동일한 시간으로 時效處理한 경우에 있어서의 Ti 첨가 효과를 고려한 열분석 곡선이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 (a)와 (b)의 경우 모두 이미  $\delta'$ 相의 형성은 완료된 상태로 이 단계에서는  $\delta'$ 相의體積分率이 일정한 가운데 입자의 성장만이 계속 이어진다고 판단된다.

## 2. 不連續析出의 형성과 성장

Fig. 8은 Al-Li-Ti 합금을 160°C에서 時效處理하였을 때 粒界에서의 不連續析出 양상을 투과전자현미경의  $\delta'$ 의 회절 반점으로부터 얻은 暗視野像으로 하얗게 보이는 노들(nodule) 형태의 不連續析出物은  $\delta'$ 相으로 판단된다. 不連續析出은

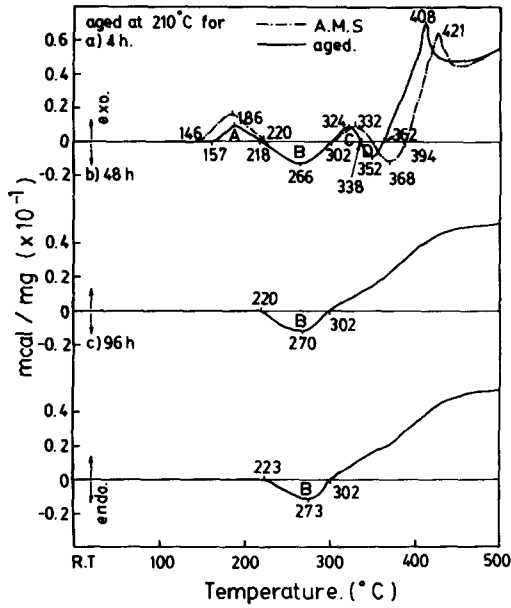


Fig. 6 The effect of aging time at 210°C in Al - 2.37wt% Li.

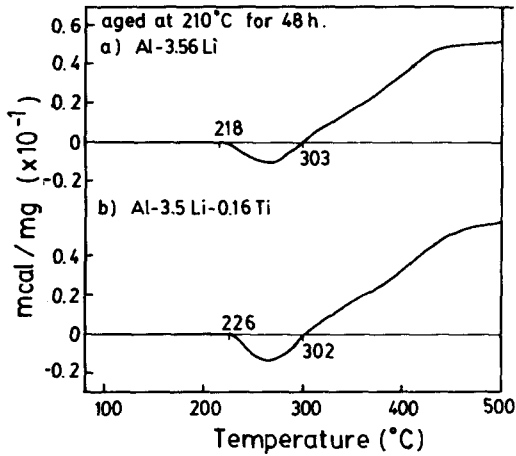


Fig. 7 The effect of additives(Ti) under the condition aged at 210°C for 48h.

Fig.8(a)의 화살표에서와 같이 粒界 부근의  $\delta'$ 相의 크기가 비교적 큰 것에서 우선적으로 성장이 일어나고 또한 Fig.8(b)의 화살표에서와 같이 粒界 전체에 걸쳐서 일정하게 일어나는 것이 아니라 돌출한 부분에서 우선적으로 성장하고 있는 것을 볼 수 있다.

이같은 不連續析出의 형성기구에 대하여 Fournelle

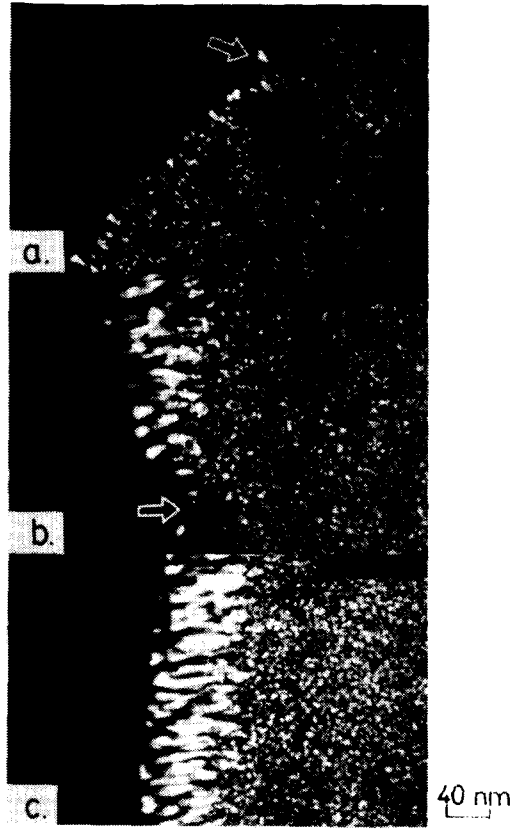


Fig. 8 Dark field images of the growth of the discontinuous precipitates in Al - 3.5Li - 0.15Ti alloy aged at 160°C for 0.5h, 1h and 24h.

등<sup>9)</sup>과 Williams 등<sup>10)</sup>은 粒界面적의 감소, 즉 계면 에너지의 감소에 의한다고 하였으며, Tu 등<sup>11)</sup>은 Fig. 9(a)의 (1)과 같이 판상의 粒界析出物은 그 한면이  $a_1$ 結晶粒의 정벽면에 있고 다른 한면은  $a_2$ 結晶粒의 정벽면에 있지 않은 상태에서 析出하여 그때의 계면에너지 차이가 구동력으로 되어  $a_2$ 결정립과 析出物과의 계면의 면적을 가능한 한 감소시키도록 粒界를 Fig.9(a)의 (2)와 같이 이동시키고 판상 析出物은  $a_1$ 결정립 속으로 밀려 들어간다. 이같은 粒界이동이 반복이 되어 (a)의 (3) 과 같이 不連續 析出이 일어난다고 하였으나  $\delta'$ 相은 球狀으로 균일하게 析出되며 격자불일치 (lattice misfit)가 매우 작고 또한 모상과의 계면 에너지가 매우 작으며 그리고 돌출부에서 粒界 면적을 증가시키는 방향으로 不連續 析出物이 성장하므로 위와 같은 형성기구조 해석이 불가능하다.

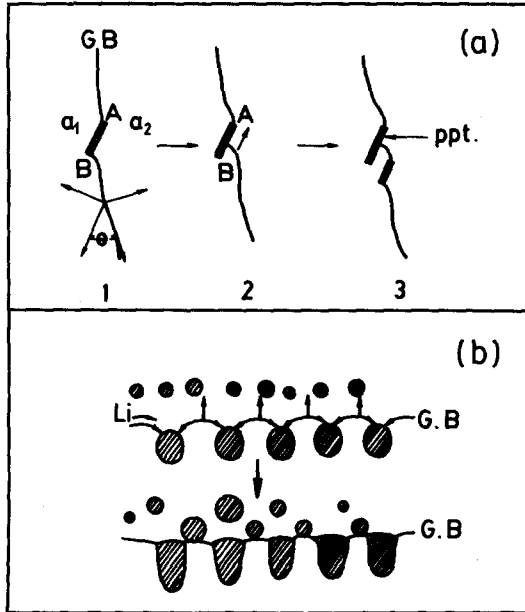


Fig. 9 Schematic mechanism for initiation of the discontinuous reactions at the grain boundary.

따라서 粒界 근방의 비교적 粗大한  $\delta'$ 析出物에서 우선적으로 不連續析出이 일어나는 것은  $\delta'$ 析出物 전면에 孔空의 흐름이 존재하고 또한 어떤 한 계치 이상의 공공 밀도가 이뤄지므로 결정립계 위치의 요동이 증가하여 결정립계의 이동도 크게 되고 또한 용질원자의 확산이 촉진되어 증가된 격자 확산 및 粒界확산에 의하여 노들 계면의 전면에 용질원자가 작은 영역을 형성할 때 격자정수의 변화에 의한 격자 변형에너지가 粒界 이동의 구동력으로 주어져서 不連續析出이 일어나고 이때 과포화도 이외에 노들 전면의 매우 미세한  $\delta'$ 析出物의 재고용에 의하여 방출되는 에너지에 의하여  $\delta'$ 노들의 성장이 진행되어서 不連續析出이 일어나는 것이라고 생각된다. Fig. 8(c)와 같이  $\delta'$ 노들의 핵생성부보다 성장부의 폭이 커지고 있는 것으로 보아 不連續析出物은 용질원자의 확산에 의하여 성장되고 있음을 알 수 있으며 또  $\delta'$ 노들의 성장 전면에 개재물과 같은 용질원자의 고갈영역이 존재하여  $\delta'$ 노들의 성장 방향이 바뀌고 있는 것을 볼 때 不連續析出物인  $\delta'$ 노들의 성장에는 용질원자의 유무에 따라 변한다는 것을 추정할 수 있다. 따라

서 Fig. 9(b)의 模式圖에서 粒界상에 존재하는 작은析出物은 粒界 확산을 통한 용질원자의 공급을 통하여 성장하거나 또는 粒界이동에 의하여 보다 작은析出物을 포획하여 더욱 크게 성장할 것이다.

不連續析出이 일어나고 있는 한계 온도에 관해서 Bohm은 각조성에 대한 固溶限 온도( $T_L$ )에 대하여  $0.8 \sim 0.9 T_L$ 를 한계온도로 하고 Tu 등은 時效 온도가  $0.5 T_L$ 이하인 경우, Fig. 9(a)와 같은 S 형태의 不連續析出이 형성되며, Fournelle<sup>9</sup>, Williams<sup>10</sup> 등은 時效온도가  $0.5 T_L$ 이상일 경우에는 한쪽 방향으로만 不連續析出이 진행된다고 하고 있으나 그 이하일 경우에 대한 결과 보고는 없다. 본 연구에 있어서 Li의 조성이 3.56wt% 일때  $\delta'$  solvus 온도가  $340^\circ\text{C}$ 이고 時效온도가  $160^\circ\text{C}$ 이므로  $0.5 T_L$ 이하에서 편측과 양측에서 不連續析出이 형성되고 있는 결과를 볼 때 고용한 온도( $T_L$ )로 不連續析出의 형성을 根據하기에는 再論의 여지가 있다고 본다.

## 結 論

최근 수송분야의 구조용 재료로 주목받고 있는 Al-Li계 합금을 단 로울(single-roll) 멜트 스피닝 법에 의하여 약  $5 \times 10^4$  °C/s의 냉각속도로 급냉용고시켜서 제조한 리본을 각 온도에서 時效 열처리함에 따라 일어나는析出樣相을 파악하기 위하여 열분석과 X선 회절 그리고 투과 전자현미경에 의한 조직 관찰을 행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 급냉용고된 Al-Li-Ti 3원계 합금의 時效時  $\delta'$ 相 생성 이전의 전구 단계로서의析出 생성물의 형성은 일어나지 않았으며, Ti의 첨가로  $\delta'$ 相 및  $\delta$ 相의 형성과 제거가 나타났다.

2. Al-Li 2원계 합금의  $\delta'$  solvus 온도는 급냉용고에 의해서 보다 높아졌고, Li의 조성량이 작을수록 그 경향은 더욱 컸다. 또한 Ti의 첨가에 의한  $\delta'$  solvus 온도의 증가가 나타났으나 Al-Li 2원계 합금에 비하여 현저하지는 않았다.

3. 不連續析出 반응은 계면에 존재하는  $\delta'$ 相이 孔空濃度 영향에 의한 화학적 자유에너지 변화가 계면 이동의 구동력이 되고, 이에 의존하여 우선

형성되며, 이때 粒界의 편측 또는 양측에서 형성되는 것은 粒界의 方位와 결정 구조의 영향에 기인한 것이라고 여겨진다. 또한 불연속 析出 반응은 Ti의 첨가에 의하여 억제되지 않았다.

### 參考文獻

- 1) Jones, H.(1983) : Scr. Met. 17, p.97.
- 2) Nozato, R. and G. Nakai (1977) : Trans. Japan Inst. Met. 18, p.679.
- 3) Ceresara, S., A. Giarada and A. Sanchez (1977) : Phil. Mag. 35, p.97.
- 4) 高橋恒夫, 里達雄(1986) : 輕金屬, p.207.
- 5) 野里僚一, 井澤秀雄, 椿野晴潔 (1980) : 日本金屬學會 44, p.1203.
- 6) Jo, H.H. (1987) : ph.D Thesis. Univ. of Tohoku, Japan.
- 7) Shchegoleva, T.V. and O.F. Rybalko (1981) : Phys. Met. Metall. 52, p.120.
- 8) McAlister, A.J.(1982) : Bull. of Alloy Phase Diagrams 3, p.178.
- 9) Fournelle, R.A. and J.B. Clark(1972) : Met. Trans. 3, p.2757.
- 10) Williams, D.B. and P. Butler (1981) : International Materials Review 3, p.153.
- 11) Tu, K.N. and D.B. Williams(1967) : ACTA Met. 15, p.369.