

열분석법에 의한 Al-2.1Li-2.9Cu합금의 석출현상 (I)

— 석출순서 —

朴 太 遠

국방과학연구소

The Precipitation Phenomena of Al-2.1Li-2.9Cu alloy by
Differential Scanning Calorimetry (I)
— Precipitation sequence —

Tae-Won Park

Agency for Defense Development, P.O. Box 35, Yuseong, Taejeon 305-600

ABSTRACT

A study was conducted to examine the precipitation phenomena of Al-2.1Li-2.9Cu alloy by differential scanning calorimetry and transmission electron microscopy. DSC curves were measured over the temperature range of 25~550°C at a heating rate of 2~20°C/min.. Three heat evolution peaks and three heat absorption peaks were observed in the DSC curve for the as-quenched specimen. From DSC results and TEM analysis, it was proved that the precipitation sequence in the as-quenched specimen is supersaturated solid solution → GP zone → δ' → T₁ → T₂ and θ' was detected in the peak aged specimen at 160°C. The major phase formed at peak hardeness in the aging at 160°C was δ' phase. The activation energies for the formation of δ' and T₁ phases were 22.3kcal/mole and 24.3kcal/mole, respectively. These lower activation energies than those for diffusion of Cu and Li in Al are ascribed to the quenched-in excess vacancies.

1. 서 론

Al-Li계 합금은 기존의 알루미늄 합금계보다 현저히 낮은 밀도와 높은 탄성계수를 갖고 있다. 즉, 4wt%까지의 조성 범위에서 Li 1wt% 첨가에 따라 밀도는 3%씩 감소하고 탄성계수는 6%씩 증가한다¹⁾. 그 결과 Al-Li계 합금은 (2.8wt%Li기준) 7075Al-T651과 2024Al-T351보다 단위 무게당 탄성계수가 20% 이상 높다. 이러한 이유로 Al-Li합금 개발에 관한 많은 연구가 행하여져 용도 및 특성에 따라 많은

종의 합금이 개발되었다. 이중 하나가 고강도 합금인 7075Al을 대체하기 위해 개발된 2090Al-Li합금이다. 이 합금은 주 첨가 원소로 Cu와 Li를 함유하고 있으며, Cu/Li 비에 따라 석출 현상이 크게 변화하는데 그 비가 비교적 낮은 경우에는 δ'상(Al₃Li) 이외에 T₁상(Al₂CuLi)상이 동시에 석출되어 강화 기구가 크게 변하는 것으로 알려져 있다²⁾. 그리고 열처리 조건과 조성에 따라서는 δ'상이나 T₁상 이외에 θ'상이 동시에 석출한다. 그러나 이들 석출상보다 저온에서 나타나는 반응에 관해서는 반응의 존재조차도 명확하게

규명되지 않았을 뿐만 아니라 연구자들에 따라 많은 의견이 제안되고 있다.

Hardy³⁾ 등은 Al-Li-Cu합금계에서 발견되는 상은 $T_1(Al_2CuLi)$, $T_2(Al_6CuLi)$ 그리고 $T_B(Al_{7.5}Cu_4Li)$ 상 등이라고 하였으며, Silcock⁴⁾은 Al-Li-Cu합금을 165°C에서 시효할 때 나타나는 상은 θ'' , θ' , T_1 그리고 δ' 상이라고 하였다. 그리고 Noble²⁾ 등은 3.5%Cu-1.5%Li과 2.5%Cu-2.0%Li 합금에 존재하는 상은 T_1 , GP zone, δ' 그리고 θ' 이라고 보고하였다. 이와 같이 Al-Li-Cu합금계에 관한 많은 연구가 행하여져 왔지만 각 상의 존재 온도범위, 석출 순서 및 δ' 상 석출 이전 단계에서의 반응 생성물의 존재 등에 관해서는 아직 불명확한 점이 많다.

그리하여 본 연구에서는 Al-2.1Li-2.9Cu합금에 대해 DSC분석으로 25°C부터 550°C까지 승온가열하면서 생성되는 반응을 조사하고, 이 반응에 대응하는 석출상의 존재를 투과전자현미경으로 관찰하여 상온으로부터 550°C까지 생성되는 석출물의 존재 및 각 상이 생성되는 온도 범위와 160°C 시효시의 경화거동 및 최대 경도 때에 생성되는 석출상의 양상을 조사하였다.

2. 시료 및 실험 방법

2.1 시료

본 실험에서 사용한 시료의 화학 조성은 Table 1과 같다. 시료는 진공유도용해로(vacuum induction melting furnace)에서 105L×60W×40T(mm) 크기의 잉고트를 제작한 후 주괴 내의 미세편석과 응고시의 잔류응력을 제거하기 위해 530°C에서 24시간 동안 균질화처리하였다. 그 후 표면을 3mm 정도 면삭하여 500°C에서 2시간 동안 가열하여 열간 및 냉간압

연을 행하여 경도 측정용 시편과 DSC분석용 시편을 각각 두께 13mm와 1.3mm로 제작하였다.

2.2 실험방법

경도 측정용 시편은 10L×10W×13T(mm)로 절단하였고, DSC분석용 시편은 5.5mm ϕ 의 디스크 형태로 펀칭하여 열처리하였다. 용체화처리는 HNO₃, NaNO₃, KNO₃가 혼합된 염욕로를 사용하였고, 온도를 균일하게 하기 위해 교반하였으며 540°C에서 30분 동안 유지한 후 수냉하였다. 수냉 후의 시효처리는 $\pm 1^\circ\text{C}$ 로 조절된 실리콘욕 중에서 교반하면서 실시하였다.

시효한 시편에 대해 경도측정을 행하였으며 시편을 조연마한 다음 Mgo분말로 세연마하여 실시하였다. 측정 장치는 Wilson사 제품 model Mo-2043의 미소 비커스 경도계를 사용하여 하중 100g, 부하 시간 15초로 12회 측정한 후 최대, 최소값은 버리고 10회의 평균치를 경도값으로 선정하였다.

각 석출상의 열적 거동을 조사하기 위한 DSC분석은 듀폰사 제품 model 2100을 사용하여 행하였다. 측정시 아르곤 가스의 유속은 60ml/min, 승온 속도는 5°C/min.으로 하여 25°C~550°C 온도범위에서 행하였으며, 활성화에너지를 구하기 위해 승온 속도를 2, 5, 7.5, 10, 15, 20°C/min으로 변화시켰다. 용체화처리 상태의 시편은 상온시효를 방지하기 위해 용체화처리후 즉시 DSC분석을 행하였으며 시효한 시편은 냉장고에 보관한 후 분석하였다.

DSC분석 중에 일어나는 발열 및 흡열의 양은 다음과 같이 결정하였다. 먼저 DSC곡선과 baseline의 차이를 온도의 함수로 취하여 D(T)로 나타내면, 비열 변화 ΔC_p 는 다음과 같이 나타내어진다.

$$\Delta C_p(\text{J/mol}\cdot\text{K}) = -\frac{K \cdot M \cdot D(t)}{W \cdot \phi_i}$$

여기서 K는 장치정수(cell constant), M은 시료의 분자량(g/mol), W는 시료의 중량(mg), ϕ_i 는 승온속도(=dT/dt(K/S))이다. 장치정수 및 온도의 교정은 고순도의 In, Sn, Pb 등의 용해열 및 용점을 측정하

Table 1. Chemical composition of alloy used. (wt%)

Cu	Li	Zr	Mg	Fe	Si	Al
2.9	2.1	0.12	0.15	0.02	0.03	Bal.

여 결정하였다. 위의 식에 의해 구한 ΔC_p 를 이용하여 ΔC_p -T 곡선을 구하고 이것을 수치적분함으로써 발열 및 흡열의 양을 구할 수 있다.

미세조직 관찰은 Jeol 200CX 투과전자현미경을 이용하여 DSC장치에서 승온가열중 생성되는 각 피크(peak) 온도에서 급랭한 시편과 160℃에서 최고경도까지 시효한 시편에 대하여 행하였다. 시편은 연마지에서 약 100 μ m 두께까지 연마한 후 지름 3mm로 편칭하여 double jet polishing장치를 이용하여 30% HNO₃+70% CH₃COOH 용액에서 -40℃, 12~20V 전압으로 박판을 제작하였으며, 160kV의 가속전압에서 관찰하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 용체화처리 상태의 석출현상

3.1.1 DSC곡선

Fig. 1은 Al-2.1Li-2.9Cu합금을 540℃에서 30분간 용체화처리하여 급랭한 시편에 대해 5℃/min으로 25~550℃온도범위에서 DSC분석한 곡선이다. 63℃, 155℃ 그리고 288℃ 부근에서 피크를 나타내는 발열반응이 나타나고, 115℃, 240℃ 및 460℃에서 피크를 가지는 흡열반응이 나타남을 알 수 있다. 즉 용체화처리 상태에서 고용된 용질원자가 수냉으로 상온에서 과포화상태로 되며, 이 시편을 DSC장치에서 열을 가하면 용질원자의 석출이 일어나며 이 석출은 열분석 곡선에서 발열로 나타난다.

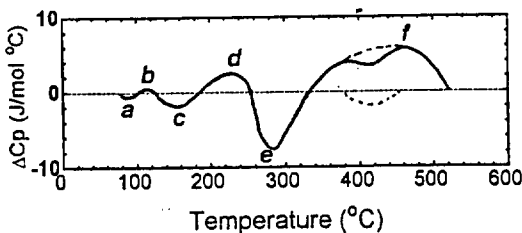


Fig. 1 DSC curve of Al-2.1Li-2.9Cu alloy quenched from 540℃. Heating rate : 5℃/min.

Al-Li-Cu합금계에서는 δ' , θ' 그리고 T₁ 상 등이 생성되는 것으로 알려져 있지만 이들 석출상보다 저온에서 나타나는 반응에 관해서는 반응의 존재조차도 명확하게 규명되지 않았을 뿐만 아니라 연구자들에 따라 많은 의견이 제안되고 있다. Ceresara 등⁵⁾, 野里 등⁶⁾, Nozato 등⁷⁾, 高橋 등⁸⁾ 및 Papazion 등⁹⁾은 열분석법에 의해 Al-Li 2원합금에 전구 생성물이 존재함을 보고하였고, 曹 등¹⁰⁾, Shchegoleva 등¹¹⁾은 Al-Li-Mg 3원계 합금의 시효거동을 조사함으로써 δ' 상의 석출 전에 어떤 생성물이 존재함을 추정하였다. Noble 등²⁾은 Al-Li-Cu합금의 Cu/Li비에 따른 석출상의 거동을 다음과 같이 제안하였다.

- Cu/Li > 4 : $\alpha \rightarrow$ G.P. zone $\rightarrow\delta''\rightarrow\theta'\rightarrow\theta$
- Cu/Li=2.5~4 : $\alpha \rightarrow$ G.P. zone \rightarrow (G.P. zone+ δ')
 $\rightarrow(\theta''+\delta'')\rightarrow(\theta'+\delta')\rightarrow\delta'+T_1\rightarrow T_1$
- Cu/Li=1~2.5 : $\alpha \rightarrow$ (G.P. zone+ δ') $\rightarrow(\theta'+\delta')$
 $\rightarrow(\delta'+T_1)\rightarrow T_1$
- Cu/Li < 1 : $\alpha \rightarrow(\delta'+T_1)\rightarrow T_1$

이와 같이 Al-Li 합금에 있어서 초기 단계에 일어나는 반응에 대해서는 많은 이견이 있지만, 본 실험에서 행한 Al-2.1Li-2.9Cu합금은 Cu/Li의 비가 약 1.4로서 $\alpha \rightarrow$ (G.P. zone+ δ') $\rightarrow(\theta'+\delta')\rightarrow(\delta'+T_1)\rightarrow T_1$ 의 석출과정과 유사할 것으로 판단된다. 본 실험의 DSC곡선에서 나타난 3개의 발열반응과 3개의 흡열반응을 Noble 등이 제안한 석출순서와 비교해 보면 63℃에서 피크를 나타내는 발열반응(피크 "a")은 G.P. zone의 생성에 의한 것으로 판단된다. 이 피크는 36℃~78℃ 범위에서 존재하며 반응열량이 약 1.0J/g로 나타났다. 흡열 "b"는 이 GP zone이 재고용하기 때문에 나타난 것으로 판단된다.

166℃에서 피크를 나타내며 140℃~190℃ 범위에서 3.7J/g의 반응열량을 나타내는 발열반응(피크 "c")이 관찰되었으며, 고온에서의 흡열반응 "d"는 피크 "c"의 발열반응으로 생성된 석출상이 재고용하기 때문에 나타난 것으로 판단된다.

피크 "e"는 254℃~332℃ 범위에서 반응열량은

16.3J/g이고 최대 피크온도는 274℃로 나타났다. 460℃에서 피크를 가지는 흡열반응 "f"는 피크 "e"의 발열반응으로 생성된 상이 고온에서 재고용하기 때문에 나타난 것으로 판단된다. 그리고 이 고온의 흡열반응 "f"는 2개의 봉우리를 나타내는데 이것은 Fig.의 점선에서 나타낸 바와 같이 큰 흡열 중에 작은 발열이 존재하기 때문에 나타나는 것으로 생각되며, 고온상의 석출에 의한 것으로 판단된다. 즉 Fig.에서 점선으로 나타낸 발열반응과 큰 흡열반응이 겹쳐짐으로써 외관상 실선으로 된 하나의 흡열로 보이며 2개의 봉우리를 나타낸 것으로 판단된다.

G.P. zone의 생성에 대해서는 G.P. zone 생성이 저온으로부터 가장 먼저 일어나기 때문에 Noble이 제안한 상 석출순서에 따라 피크 "a"가 G.P. zone의 생성에 기인한 것으로 규정하였지만, G.P. zone 이후의 상 석출순서는 복잡하기 때문에 발열반응 "c", "e" 및 점선의 피크에 대응하는 상 석출에 대해서도 Noble이 제안한 석출순서에 따르는 것은 큰 오류를 범하기 쉽다. 그리하여 각 피크에 대응하는 상의 존재를 확인하기 위해 각 피크까지 5℃/min.으로 가열하여 3분 동안 유지한 후 급랭한 시편에 대하여 투과전자현미경 관찰을 행하였다.

3.1.2 미세조직

DSC곡선에서 나타나는 각 피크에 대응하는 상의 존재를 확인하기 위해서 투과전자현미경 조직을 관찰한 결과를 Photo. 1, Photo. 2 및 Photo. 3에 나타내었다. G.P zone은 일반 전자현미경으로 관찰이 어렵기 때문에 피크온도 166℃와 288℃ 그리고 피이크 "f"의 큰 흡열 중에 존재하는 것으로 추정되는 420℃ 부근의 발열반응에 대해 관찰하였다.

Photo. 1은 용체화처리한 Al-2.1Li-2.9Cu합금을 DSC 장치에서 5℃/min의 승온속도로 가열하여 피크인 166℃에서 3분간 유지한 후 급랭하였을 때의 TEM조직으로서 (a) 및 (b)는 각각 [100] zone axis에서의 δ'상의 암시야상(dark field image) 및 전자선회절패턴(selected area diffraction pattern)

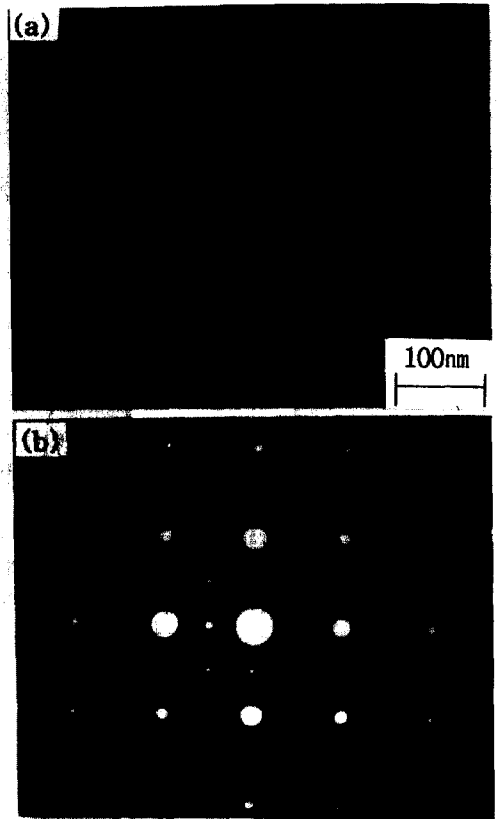


Photo. 1 TEM micrographs showing δ' phase in Al-2.1Li-2.9Cu alloy quenched from 166℃ at DSC instrument. (a) dark field image (b) SADP from [100] zone axis

이다. 이로 보아 166℃에서 피크를 나타내는 반응은 δ'상의 생성에 의한 것임을 알 수 있다. 이 시편에서 θ'상은 관찰되지 않았다.

곡선 "e"에 대해서는 생성온도범위가 넓기 때문에 두 종류의 석출상이 같은 곡선내에 존재할 가능성을 고려하여, 피크 온도 288℃를 기준으로 하여 274℃, 288℃ 및 308℃의 세 온도에 대하여 생성된 석출상을 조사한 결과를 Photo. 2에 나타내었다. Photo. 2의 (a), (b), (c), (d) 및 (e)는 각각 용체화처리한 후 274℃, 288℃, 308℃로 가열하여 3분간 유지한 다음 급랭한 시편의 암시야상, 308℃ 조직의 명시야상

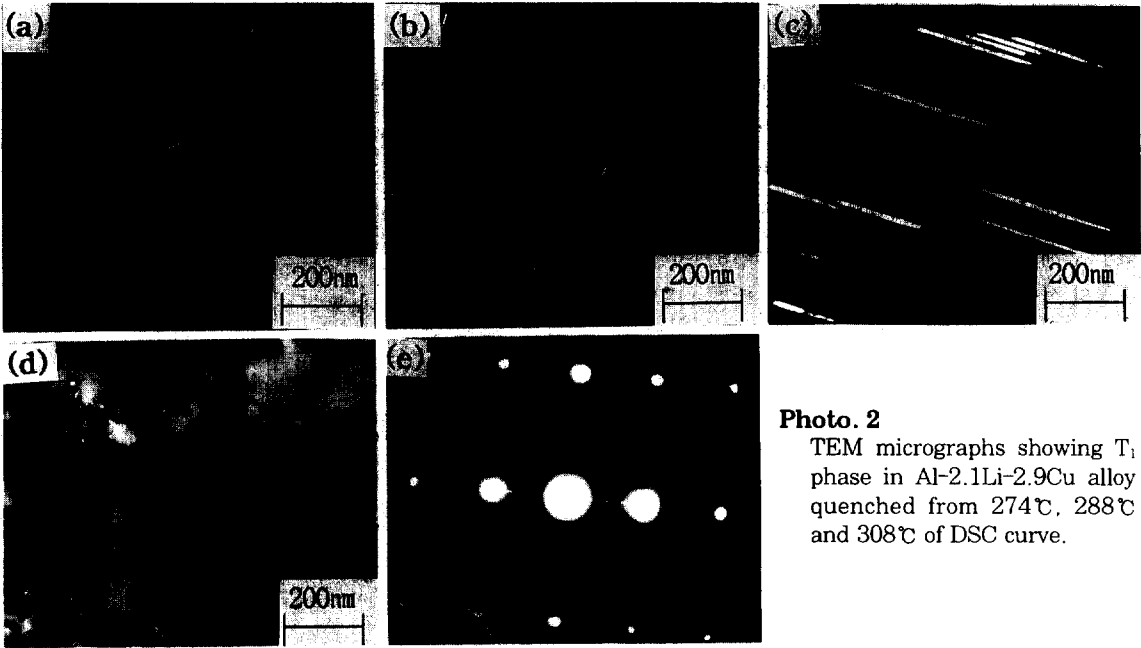
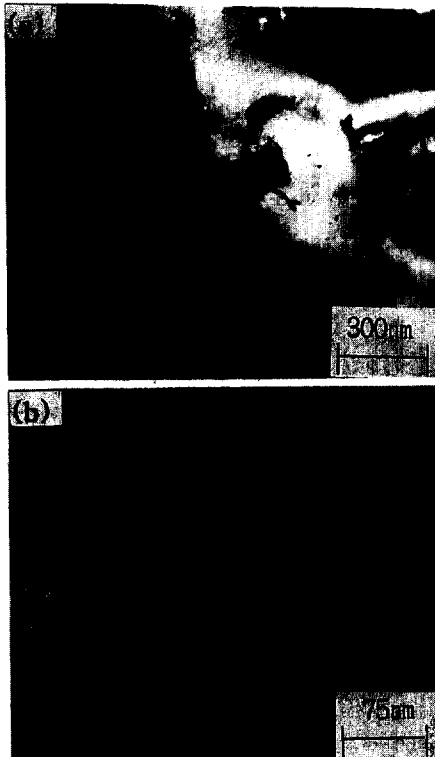


Photo. 2

TEM micrographs showing T_1 phase in Al-2.1Li-2.9Cu alloy quenched from 274°C, 288°C and 308°C of DSC curve.



(bright field image) 및 전자선회절패턴을 나타낸 것이다. 이들은 Zone axis가 $[112]$ 방향에서의 조직 및 전자선회절패턴으로서 모두 T_1 상만이 관찰되었다. 이로부터 288°C에서 피크를 가지는 발열반응은 T_1 상의 생성에 의한 발열이며 온도가 높아질수록 T_1 상이 성장하였음을 알 수 있다. 이들 시편에서도 역시 θ' 상은 관찰되지 않았다.

Photo. 3의 (a), (b)는 용체화처리 후 피이크 "r"의 큰 흡열 중에 존재하는 것으로 추정되는 420°C부근의 발열반응을 조사하기 위해 420°C까지 가열하여 3분간 유지한 후 급랭한 시편을 투과전자현미경으로 관찰한 조직이다. (a)는 $[110]$ zone axis에서의 명시야상으로 T_1 상임을 알 수 있고, T_1 상 외에 미세한 상이 관찰되는데 (b)는 이 미세한 상을 고배율로 관찰한 조직이다. Photo.에 나타난 바와 같이 다각형(육각형)의 석출상으로 나타났는데 이 상은 Al-Li-

Photo. 3

TEM micrographs showing T_1 and T_2 phase in Al-2.1Li-2.9Cu alloy quenched from 420°C at DSC instrument. (a)low magnification (b)high magnification

Cu합금계에서 고온상으로 알려진 T₂상으로 사료된다. 이로서 큰 흡열 피크 "f" 중에 나타나는 작은 발열 반응은 T₂상의 생성에 의한 발열반응인 것으로 생각된다.

이상의 결과로부터 G.P. zone, δ' 및 T₁ 상의 존재 온도범위, 피크온도 및 반응열량을 요약하면 Table 2 와 같다.

Table 2 Existence temperature range and reaction heat of each phase.

GP zone	T _s (°C)	36
	T _p (°C)	63
	T _F (°C)	78
	ΔH (J/g)	1.0
δ'	T _s (°C)	140
	T _p (°C)	166
	T _F (°C)	190
	ΔH (J/g)	3.7
T ₁	T _s (°C)	254
	T _p (°C)	288
	T _F (°C)	332
	ΔH (J/g)	16.3

T_s : Starting Temperature
 T_p : Peak Temperature
 T_F : Finishing Temperature

3.2 160°C에서의 석출현상

3.2.1 시효경화곡선

Fig. 2는 540°C에서 30분 동안 용체화처리하여 급랭한 후 160°C에서 여러 시간 시효한 경우의 시효경화곡선을 나타낸 것이다. 초기부터 경도가 상승하여 72시간의 시효로 최대경도를 나타내고 그 이후는 급격히 감소한다. 피크경도를 나타낸 72시간 때의 석출상의 거동을 조사하기 위해 DSC분석을 행하였다.

3.2.2 DSC곡선

Fig. 3은 540°C에서 30분 동안 용체화처리하여 급랭한 후 160°C에서 72시간 시효한 시편을 DSC분석

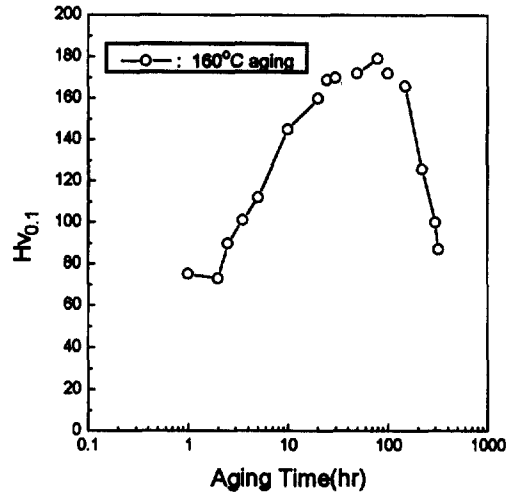


Fig. 2 Age hardening curve of Al-2.1Li-2.9Cu alloy quenched from 540°C and aged at 160°C.

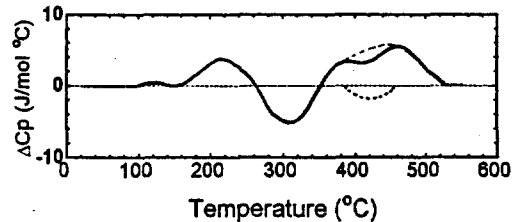


Fig. 3 DSC curve of Al-2.1Li-2.9Cu alloy quenched from 540°C and aged for 72hour at 160°C. Heating rate : 5°C/min.

한 결과이다. Fig. 1의 곡선에서 관찰되었던 피크 "a" 및 피크 "c"는 나타나지 않고 피크 "e"는 그 크기가 작아진 것을 알 수 있다. 이것은 160°C 시효로 피크 "a" 및 피크 "c"에 대응하는 G.P. zone 및 δ'상이 이미 생성되었으며, 피크 "e"에 대응하는 T₁상도 약간 생성됨으로써 그 크기가 작아진 것으로 판단된다. 이 곡선에서는 160°C시효로 생성된 G.P. zone과 δ'상이 DSC분석 중에 재고용됨으로써 흡열반응을 나타내어 각각 105°C와 215°C 부근에서 흡열피크를 나타낸다. 160°C 시효로 석출된 δ'상의 재고용으로 생성된 흡열량은 15.5J/g으로서 용체화처리 상태의 시편을 가열할 경우에 생성되는 발열량 3.7J/g보다는

그 양이 상당히 증가하였다. 반면에 T_1 상의 생성에 의한 발열량은 14.8J/g으로서 용체화처리 상태의 16.3J/g과 비교하여 차이가 나지 않는다. 시효 후의 δ' 상의 생성으로 나타난 총 열량보다 증가한 것은 Fig. 1에서 관찰한 바와 같이 160℃는 δ' 상의 생성이 가장 활발하게 일어나는 온도(피크온도 : 166℃) 부근이기 때문에 시효 중에 과포화된 기지에서 계속 용질원자가 공급되지만, 승온가열 중에는 δ' 상의 고상선 이하에서는 용질원자가 공급되지만 고상선 이상으로 가열되면 δ' 상이 생성되지 않기 때문에 δ' 상의 생성에 의한 발열량이 적은 것으로 판단된다.

Fig. 3의 열량 변화로부터 시효로 생성된 δ' 상의 양은 많고 상대적으로 T_1 상의 양은 적은 것으로 판단된다. 이 δ' 상은 Li_2 규칙구조를 갖고, 구형의 형태이며, 기지와 정합을 이루고 큐브-큐브 방향관계를 갖는다. 또 δ' 상의 조성은 Al_3Li 로서 Li함량이 적으므로 비교적 작은 과포화 상태에서도 많은 체적분율의 석출이 가능하다. 이상으로부터 Fig. 2의 시효경화곡선에서 시효 초기에 경도가 급격히 증가하는 것은 δ' 상의 생성에 의한 것으로 추측할 수 있으며 160℃ 시효시의 강화는 주로 δ' 상의 생성에 영향을 받는 것으로 판단된다.

3.2.3 미세조직

Photo. 4는 540℃에서 30분 동안 용체화처리하여 급랭한 후 160℃에서 72시간 동안 시효한 시편의 투과전자현미경 조직을 나타낸 것이다. (a), (b)는 각각 [100] zone axis와 [110] zone axis에서 관찰한 상을 나타낸 것이다. (a)에는 전체적으로는 구형의 δ' 상이 관찰되며, δ' 상과 wetting되어 있는 판상의 θ' 상이 관찰된다. 즉, δ' 상은 θ' 상에 wetting이 매우 잘 되기 때문에 일부 δ' 상이 θ' 상과 기지의 계면에 석출하여 나타난 형태이다. 전체적으로 δ' 상은 기지 내에 아주 미세하고 균일하게 분포되어 있으며 DSC곡선에서 관찰한 바와 같이 160℃시효에서의 강화의 대부분은 이 δ' 상의 기여에 의한 것으로 판단된다. (b)는 T_1 상을 나타낸 조직이다. Photo. 4로부터 160℃ 시효시

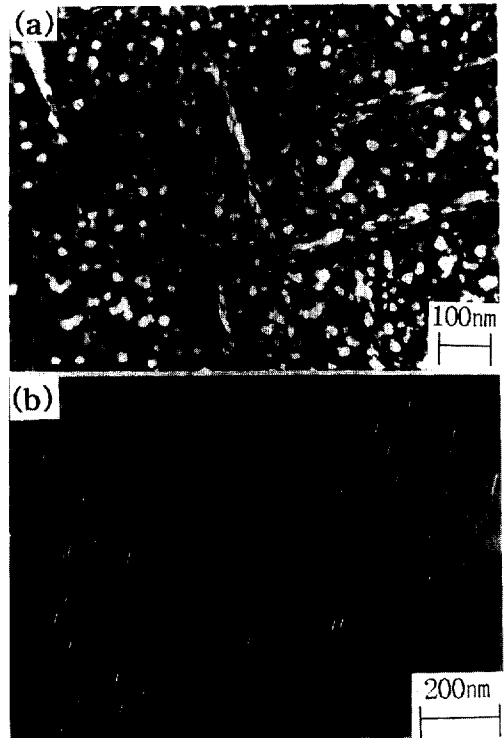


Photo. 4 TEM micrographs showing (a) δ' (and θ') and (b) T_1 phases in Al-2.1Li-2.9Cu alloy quenched from 540℃ and aged for 72 hour at 160℃.

관찰되는 상은 δ' , θ' 및 T_1 상임을 알 수 있다. 즉, 용체화처리 상태에서 승온가열 중에는 관찰되지 않은 θ' 상이 160℃ 시효시에는 생성되었음을 알 수 있다.

3.3 δ' , T_1 상의 속도론적 해석

DSC곡선에서 석출물의 생성에 의해서는 발열, 재고용에 의해서는 흡열이 나타난다. 반응이 단일과정으로 일어난다면 승온속도 $\dot{\phi}_i (=d\phi/dt)$ 의 DSC측정 중에 나타나는 반응의 피크온도 T 와 반응의 활성화에너지 E_a 간에는 다음의 관계가 있음을 Ozawa¹¹⁾는 제시하였다.

$$\log \dot{\phi}_i = 0.4567(-E_a/RT) + C$$

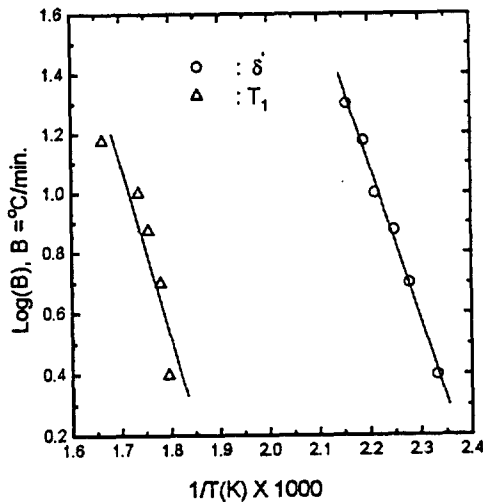


Fig. 4 log φ vs 1/T plot for the formation peaks of δ' and T₁ in Al-2.1Li-2.9Cu alloy quenched from 540°C.

여기에서 R은 기체상수, T는 절대온도, C는 정수이다. 이 식을 도출할 때 근사식을 사용하였기 때문에 $20 \leq Ea/RT \leq 50$ 으로 제한된다.

Fig. 4는 용체화처리후 급랭한 시편에 대해서 여러 가지 승온속도로 DSC측정하여 δ'상 생성에 의한 발열 피크온도 T의 역수에 대하여 log φ를 플롯트한 것이다. 직선의 기울기로부터 구한 δ'상과 T₁상의 생성을 위한 활성화에너지는 각각 22.33kcal/mol과 24.1kcal/mol로 나타났다. 이들 값은 曹 등¹⁰⁾이 Al-Li-Mg 3원계 합금을 유냉후 상온시효하였을 경우에 Ozawa방법으로 계산한 δ'상의 생성을 위한 활성화에너지, 22.6kcal/mol.과 거의 유사한 값을 나타낸다. 그러나 이들 δ'상과 T₁상의 생성을 위한 활성화에너지는 Al중의 Cu와 Li의 확산을 위한 활성화에너지인 33.1kcal/mol.,과 33.25kcal/mol.와 비교할 때 적은 값을 나타내었다. 이것은 급랭으로 과포화된 Li원자가 동결됨과 동시에 용체화처리 온도에서의 평형농도의 공공이 상온까지 유지되어 과잉 동결공공이 생성되어 Cu와 Li원자의 확산을 촉진시키기 때문에 δ'상과 T₁상의 생성을 위한 활성화에너지가 실제 Al내에

서 Cu와 Li의 확산을 위한 활성화에너지보다 작아지는 것으로 판단된다.

4. 결 론

DSC분석을 통하여 Al-2.1Li-2.9Cu합금의 석출현상을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) Al-2.1Li-2.9Cu합금을 용체화처리한 상태에서 DSC분석할 경우 저온으로부터 GP zone → δ' → T₁상의 순으로 석출되며 고온의 흡열 중에 나타나는 발열은 T₂상의 생성에 의한 것으로 판단된다. 160°C에서 시효할 경우에는 이들 상 외에도 θ'상이 관찰되었다.
- 2) 160°C 시효시 초기의 경도상승은 δ'상의 생성에 의한 것이며, 최대 경도를 나타내는 72시간 시효시의 조직에는 δ', θ' 및 T₁상이 존재하였으며 δ'상의 양이 T₁상의 양보다 많은 것으로 나타나 160°C시효시 주 강화상은 δ'상인 것으로 판단된다.
- 3) δ'상 및 T₁상의 생성을 위한 활성화에너지는 각각 22.3kcal/mol. 및 24.3kcal/mol.로 나타났으며 이 값은 Al중의 Cu와 Li의 확산을 위한 활성화에너지인 33.1kcal/mol.,과 33.25kcal/mol.보다 작은 것으로 보아 공공이 δ'상 및 T₁상의 생성을 위한 확산에 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다.

참고문헌

1. B. Noble, S.J. Harris and K. Dinsdahl: J. Mat. Sci., 1982, vol.17, p.461.
2. B. Noble, and G.E. Thompson: Met. Sci. J., 1972, vol.6, pp.167~174.
3. H.K. Hardy and J.M. Silcock: J. Inst. Met., 1955~1956, vol.84, p.423.
4. J.M. Silcock: J. Inst. Met., 1959~1960, vol.88, p.357.
5. S. Ceresara, A. Giardada and A. Sanchez:

- Phil. mag., 1977, vol.35, p.97.
6. 野里燈一, 井根辰秀雄: 日本金屬學會誌, 1980, vol.44, p.1203.
 7. R. Nozato and G. Naka: Trans Jim, 1977, vol.18, p.680.
 8. 高稿恒夫, 里遠雄: 輕金屬, 1986, vol.36, p.207.
 9. J.M. Papazian, C. Sigli and J.M. Sanchez: Script Metall., 1986, vol.20, p.210.
 10. 曹亨鎬, 大島民夫, 平野賢一: 輕金屬, 1986, vol.36, p.759.
 11. T. Ozawa: Bull. Chem. Japan, 1965, vol.38, p.1881.