

## 열분석법에 의한 Mg-8.5Li-4.5Al합금의 시효거동 연구

김영우, 황영하, 박태원\*, 김도향, 홍준표

연세대학교 금속공학과

\*국방과학연구소

A Study on the Aging Behavior of a Mg-8.5Li-4.5Al alloy  
by Differential Scanning Calorimetry

Y.W. Kim, Y.H.Hwang, T.W. Park, D.H. Kim, C.P. Hong

Department of Metallurgical Eng., Yonsei University,

134 Schinchon-dong, Seodaemun-ku, Seoul, Korea, 120-749

\* Agency for Defence Development

Yuseong-Ku, P.O.Box 35-4, Taejon, Korea, 305-600

### ABSTRACT

Precipitation and strengthening mechanisms in squeeze cast Mg-8.5wt%Li-4.5wt%Al have been investigated by differential scanning calorimetry(DSC), scanning electron microscopy(SEM), in-situ and ex-situ X-ray diffraction analysis and hardness measurement. Special emphasis was placed on the investigation of the precipitation behavior by the DSC technique. Microstructural and calorimetric analysis showed that  $\theta$  and  $\delta$  precipitates in the b.c.c.  $\beta$  phase matrix, forming two exothermic peaks at the temperature ranges of 130°C~180°C and 236°C~280°C.  $\theta$  and  $\delta$  dissolve into the matrix forming an endothermic peak at the temperature range of 280°C~352°C. The as-cast microstructure consists of  $\alpha$ ,  $\beta$  and  $\delta$ . Peak strength was obtained after aging for 1 hour at 50°C. The aging time required for the peak strength decreased as the aging temperature increases. The hardness decrease during overaging was due to the coarsening of  $\theta$  precipitates. Microhardness measurement showed that variation of the hardness of  $\beta$  matrix was more pronounced than that of the  $\alpha$  phase, indicating that the  $\beta$  phase is more responsible for the strengthening of the Mg-8.5wt%Li-4.5wt%Al alloy.

### 1. 서 론

마그네슘은 금속 중에서 가장 밀도가 낮고 비강도가 높기 때문에 각종 구조물에 적용하면 많은 이점을 얻을 수 있다. 그러나 마그네슘은 조밀육방정으로 상온에서 소성가공이 어렵고<sup>1)</sup>, 강도가 비교적 약한 단점이 있다.

한편 마그네슘에 Li를 첨가하면 상온 가공성을 향상시키며 밀도를 더욱 감소시킨다. Li첨가로 조밀육방정인  $\alpha$ (Mg고용체)의 축비가 감소하여 변형이 용이하고 체심입방정인  $\beta$ (Li고용체)가 나타나  $\alpha+\beta$  2상 구조로 되어 가공성이 향상된다<sup>2)</sup>. 또한 Mg-Li 2원합금에 Al을 첨가하면  $\theta$ (MgLi<sub>2</sub>Al),  $\delta$ (AlLi) 등의 상이 생성되어 강도에 영향을 미치는 것으로 알

려져 있다<sup>3)</sup>.

Mg-Li-Al계 합금으로 LA91(Mg-9Li-1Al), LA141A(Mg-14Li-1Al) 합금 등이 개발되어 사용되고 있으며, 이들 합금 계에 대한 석출거동, 강화기구, 미세조직 등에 관한 많은 연구가 행하여져 왔다. McDonald은 Mg-14Li합금의 경우 0.2~1.0wt% Al 범위에서 Al의 양이 증가할수록 강도가 증가함을 관찰하였다<sup>4)</sup>. Kojima 등은 Li과 Al의 양적비에 따라 경화거동이 다르며, 경화는 스피노달 분해(Spinodal decomposition)에 의한 것으로 보고하였다<sup>5)</sup>. 또한 Alamo 등의 Mg-31at.%Li-1at.%Al계 합금의 석출현상에 대한 연구에서 퀴칭한 상태의  $\beta$  조직을 상온시효하면  $\beta \rightarrow \beta + \alpha + \theta$ 로, 200°C 시효에서는  $\beta \rightarrow \beta + \alpha + \theta + \delta$ 의 상 반응이 일어나며 준안정상인  $\theta$ 상의 생성으로 강화가 일어나는 것으로 보고하였다<sup>6)</sup>. McDonald 등은  $\theta$ 상의 생성으로 강화가 일어나며, 최대 경도 후에 경도가 감소하는 것은  $\theta$ 상이 분해되어  $\delta$ 상이 생성되기 때문인 것으로 보고하였다<sup>9)</sup>.

Mg-Li-Al계 합금에 관한 상 거동 및 상의 거동과 관련된 강화거동에 관해 일부 연구가 행하여져 왔지만 아직 논란의 여지가 많다. 이 합금에 관한 시효거동 및  $\theta$ 상과  $\delta$ 상 간의 상호관계, 각 상이 강화에 미치는 영향, 넓은 온도 범위에서의  $\alpha$ 상 및  $\beta$ 상의 경화거동 등에 관한 연구는 새로운 Mg-Li-Al계 합금 개발 측면에서 뿐만 아니라 학문적으로 상당히 중요한 의미를 갖는다고 할 수 있다. 넓은 온도범위에서의 석출상 거동, 석출상이  $\alpha$ 상 및  $\beta$ 의 경화에 미치는 영향,  $\theta$ 상 및  $\delta$ 상의 상호관계 등에 관한 자료는 합금설계 및 열처리조건을 설정하는 데에도 유용한 자료가 될 것으로 판단된다.

본 연구에서는 Mg-8.5wt.%Li-4.5wt.%Al합금에 대한 SHT(solution heat treatment)상태, 50°C~150°C 온도범위에서 2분~800시간 동안 시효한 상태, 50°C~350°C 온도범위에서 1시간 동안 열처리한 상태 등에 관해 열분석(DSC, differential scanning calorimetry), 경도 측정, 미세조직 관찰,

XRD(X-ray diffractometry)분석 등을 통하여 시효시간에 따른 석출상 거동, 석출상간의 상관관계 및 각 석출상이  $\alpha$ 상 및  $\beta$ 상의 경화에 미치는 영향을 조사하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1 시 료

고순도의 Mg(99.9%), Li(99.9%), Al(99.9%)을 사용하여 진공 고주파유도로에서 Mg, Al을 용해한 후 Li을 첨가하여 120 $\phi$ ×145L(mm)의 모합금을 제조하였다. 도가니는 BN코팅한 흑연도가니를 사용하였고 아르곤 분위기 중에서 용해, 주조하였다.

모합금 표면의 산화층을 제거한 후 대기 고주파용 해로에서 아르곤가스를 흘리면서 용해하여  $\phi$ 50×145L(mm)의 금형에 주입한 후 100MPa로 가압하여 시료를 제조하였다.

제조된 시편의 합금조성은 Table. 1과 같다.

Table 1. Chemical composition of Mg-Li-Al alloy used. (wt.%)

Elements	Li	Al	Mg
Composition	8.24	4.44	Bal.

### 2.2 열처리

400°C에서 1시간 동안 아르곤 분위기 중에서 용체화처리한 후 얼음물에 퀴칭하였다. 퀴칭한 시편을 절단하여 50°C, 75°C, 100°C, 150°C에서 2분~800시간 동안 시효 및 50°C~350°C 범위에서 1시간 동안 열처리한 후 열분석(DSC, differential scanning calorimetry) 및 경도측정을 행하였다.

### 2.3 열분석

열처리에 따라 생성되는 석출물의 거동을 조사하기 위한 열분석은 듀폰사 제품 모델 2100의 시차주사열량계를 사용하였다. 시편은 지름 5mm, 두께 1mm 정도의 디스크로 가공하였다. 측정시 아르곤가스의 유

속은 100ml/min으로 30~400°C 범위에서 10°C/min의 승온속도로 가열하였다. 열분석곡선의 baseline은 10°C/min으로 400°C까지 측정한 후 400°C에서 0.5°C/min으로 상온까지 냉각한 시편을 다시 10°C/min으로 400°C까지 측정한 곡선으로 결정하였다.

## 2.4 경도측정

시효한 시편을 조연마한 다음 MgO분말로 세연마하여 경도를 측정하였다. 측정 장치는 Wilson사 제품 model Mo-2043의 미소 비커스 경도계를 사용하여 하중 200kg, 부하 시간 15초로 12회 측정한 후 최대, 최소값은 버리고 10회의 평균치를 경도 값으로 선정하였다.  $\alpha$ 상 및  $\beta$ 상에 대해 경도측정은 나이탈로 부식한 후 Future Tech.사 제품 model FM-7의 미소 비커스 경도계를 사용하여 하중 10g, 부하 시간 10초로 측정하였다.

## 2.5 X선 회절 분석

용체화처리한 시편에 대해 석출상의 존재 및 생성, 분해 거동 등을 관찰하기 위해 X선 회절 분석을 행하였다. JDX-8030을 이용하여 Cu-K $\alpha$ 선으로 입사하였으며, 회절각( $2\theta$ )범위는 20~70°, 주사속도는 0.02°/step로 0.5초간 행하였다. 용체화처리한 시편은 상온에서 측정하였으나 열분석곡선에서 나타나는 피크에 대응하는 상의 존재를 규명하기 위한 회절분석은 열 분석 측정시와 같은 조건인 10°C/min.으로 가열하여 피크가 나타나는 온도인 150°C, 280°C와 용체화처리온도인 400°C에서 측정하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 시효상태의 열분석곡선

Fig. 1은 400°C에서 1시간 동안 용체화처리한 후 열분석한 결과이다. 130~180°C 범위에서 피크온도가 153°C인 발열과 236~280°C 범위에서 피크온도가 262°C인 2개의 발열반응이 관찰된다. 김 등<sup>6)</sup>은

이전의 연구 결과에서 130~180°C 범위의 피크는  $\theta$ 상의 생성에 의한 것이며, 236~280°C 범위의 피크는  $\delta$ 상의 생성에 의한 것임을 상세히 언급한 바 있다<sup>6)</sup>.

400°C에서 1시간 동안 용체화처리한 후 50°C, 75°C, 100°C 및 150°C에서 2분~800시간 동안 시효한 시편에 대해 열분석 결과를 Fig. 2, Fig. 3, Fig. 4 및 Fig. 5에 나타내었다. 50°C시효(Fig. 2)에서는  $\theta$ 상의 생성이 서서히 일어나 시간의 경과에 따른  $\theta$ 상의 생성에 의한 발열이 서서히 작아져, 200시간에서 아주 작아졌으며 800시간에서는 관찰되지 않고  $\delta$ 상의 생성에 의한 발열만이 관찰된다. 75°C시효(Fig. 3)에서는 16시간의 시효로  $\theta$ 상의 생성에 의한 발열이 나타나지 않고,  $\delta$ 상의 생성에 의한 발열은 200시간까지 전혀 영향을 받지 않는다. 100°C시효(Fig. 4)에서는 2시간의 시효로  $\theta$ 상의 생성에 의한 발열이 사라지고  $\delta$ 상의 생성에 의한 발열도 약간 작아지는 경향을 나타낸다. 150°C시효(Fig. 5)에서는 2분 동안 시효하였을 경우에만  $\theta$ 상의 생성에 의한 발열이 관찰되고 이후에는  $\delta$ 상의 생성에 의한 발열만이 관찰되며, 50시간 이후에는  $\delta$ 상의 생성에 의한 발열도 관찰되지 않고 고온의 흡열이 저온으로 이동하는 양상을 보이고 있다.

Fig. 6 및 Fig. 7은 각각  $\theta$ 상과  $\delta$ 상의 생성에 의한 열량의 변화를 열분석 피크의 면적에서 구하여 시효시간에 대해 나타낸 것이다.  $\theta$ 상의 경우(Fig. 6) 50°C 시효에서는 50시간, 75°C 시효에서는 4시간,

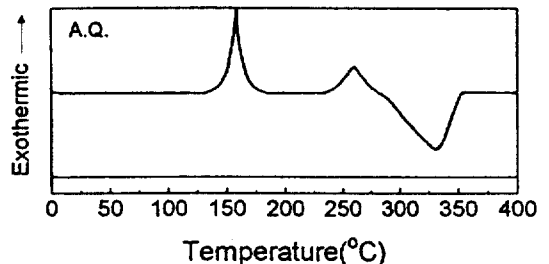


Fig. 1 DSC curve of a Mg-8.5Li-4.5Al alloy quenched after solution treated for 1hour at 400°C (heating rate : 10°C/min.).

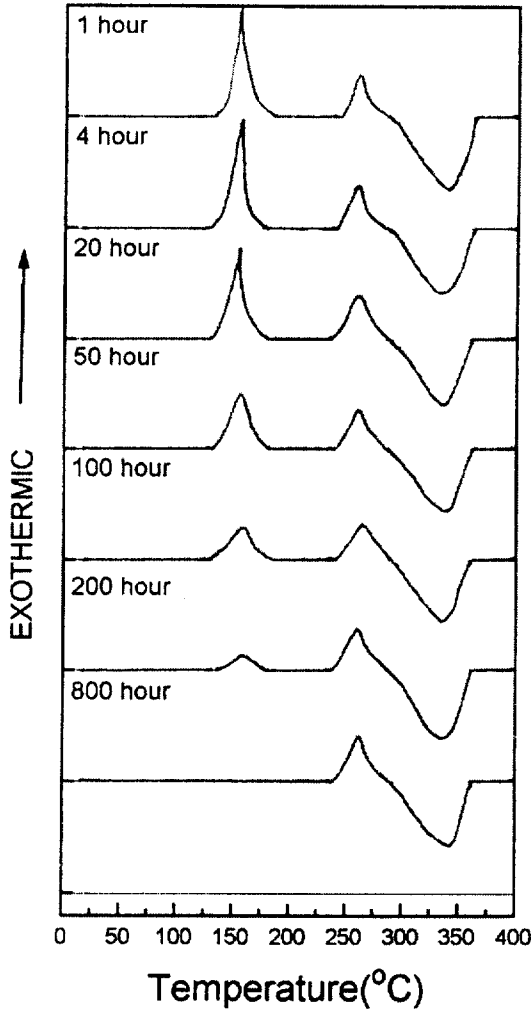


Fig. 2 DSC curve of the Mg-8.5Li-4.5Al alloy quenched and aged for various times at 50 °C (heating rate : 10°C/min.).

100°C 시효에서는 10분, 150°C 시효에서는 시효 즉시 열량이 급격히 감소하는 것으로 보아 이 시간의 시효 이후에는  $\theta$  상의 생성이 급격히 일어나 열분석 측정 중에 생성되는  $\theta$  상의 양은 감소하는 것으로 판단된다.  $\delta$  상의 생성에 의한 열량(Fig. 7)은 50°C, 75°C 시효에서는 거의 영향을 받지 않고 100°C 시효에서는 완만히 감소하며, 150°C에서는 8시간의 시효 이후에 급격히 감소하여 16시간의 시효에서는

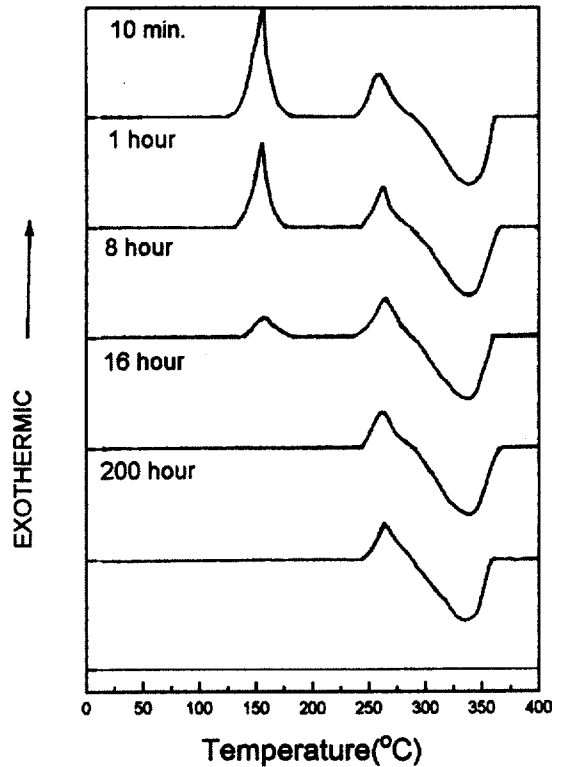


Fig. 3 DSC curve of the Mg-8.5Li-4.5Al alloy quenched and aged for various times at 75 °C (heating rate : 10°C/min.).

피크가 관찰되지 않는다.

Fig. 8은 400°C에서 1시간 동안 용체화처리한 후 여러 온도에서 1시간 동안 열처리한 시편에 대한 열분석 결과이다. 50°C, 1시간의 시효에서는 용체화처리 상태의 곡선과 비슷하며 외관상의 변화는 관찰되지 않는다. 100°C, 1시간의 시효로  $\theta$  상이 상당량 생성되어 피크가 작아졌고, 150°C, 1시간의 시효로  $\theta$  상의 생성에 의한 발열이 없어졌다. 100°C, 1시간의 시효로는  $\delta$  상의 생성에 영향을 미치지 못하지만, 150°C에서는 시효로  $\delta$  상이 일부 생성됨으로써  $\delta$  상의 생성에 의한 발열피크의 크기가 작아졌다. 200°C에서는 시효로  $\delta$  상의 생성이 더욱 진행되어, 발열의 크기가 작아졌으며 생성된 양이 150°C보다 많다.

250°C 및 300°C에서  $\theta$  상의 생성에 의한 발열이

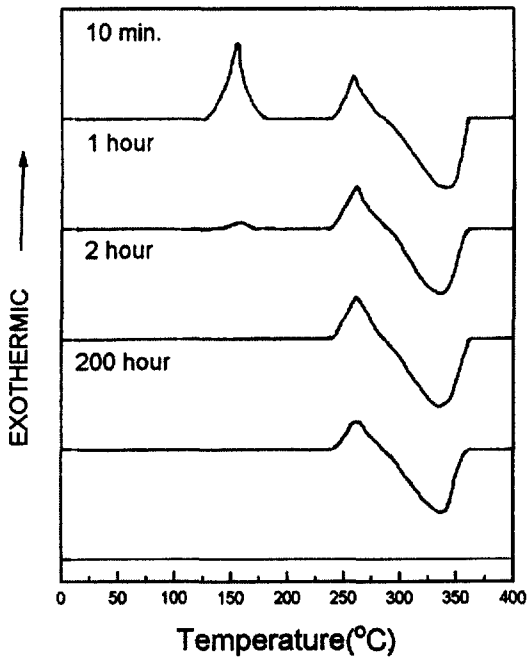


Fig. 4 DSC curve of the Mg-85Li-4.5Al alloy quenched and aged for various times at 100 °C (heating rate : 10°C/min.).

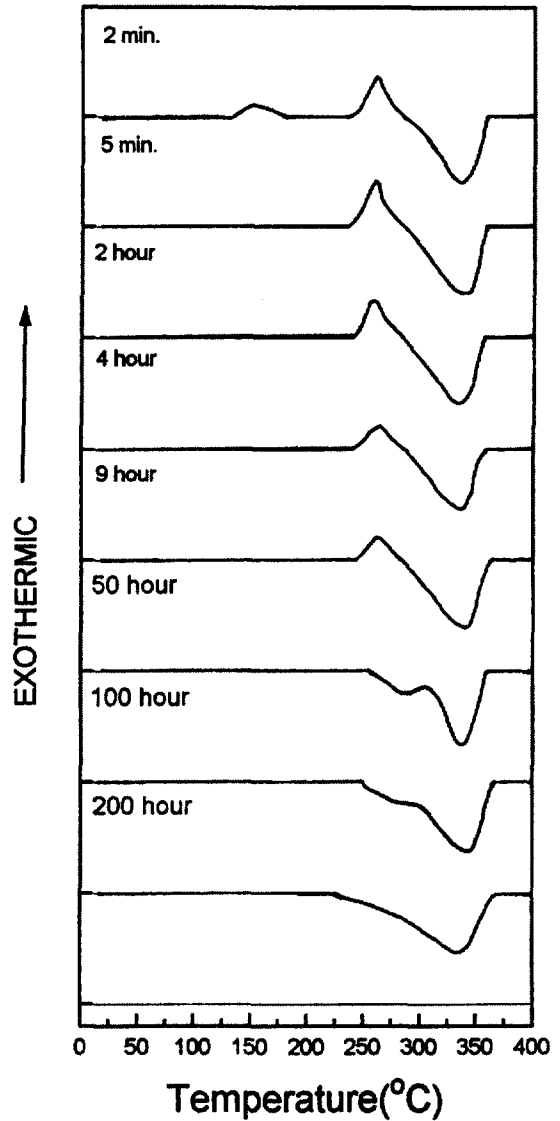


Fig. 5 DSC curve of the Mg-85Li-4.5Al alloy quenched and aged for various times at 150 °C (heating rate : 10°C/min.).

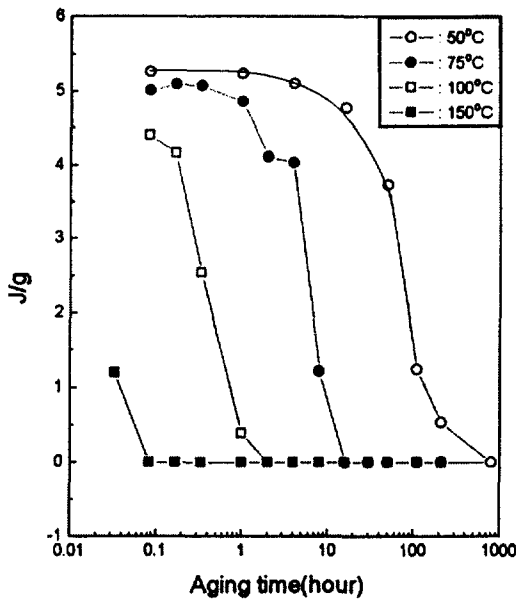


Fig. 6 Variation of the reaction energy of  $\theta$  phase according to the aging time in the Mg-85Li-4.5Al alloy quenched and aged at 50°C, 75°C, 100°C, and 150°C (heating rate : 10°C/min.).

다시 나타나는 것은 이 온도에서 고용되었던 용질원자가 상온에서 과포화상태로 되어 열분석 승온 중에 재석출하여 발열을 나타내기 때문으로 판단된다. 이것은  $\delta$ 상의 생성이 활발하게 일어나는 200°C, 250°C, 300°C 시효의 경우 생성상의 용해에 의해 나타나는 흡열반응의 시작 온도가 각각 273°C, 238°C,

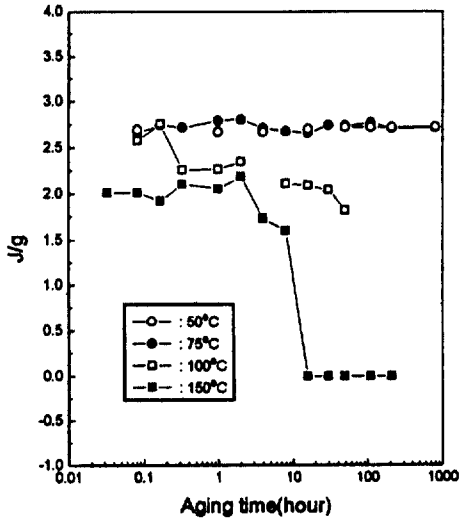


Fig. 7 Variation of the reaction energy of  $\delta$  phase according to the aging time in the Mg-8.5Li-4.5Al alloy quenched and aged at 50°C, 75°C, 100°C, and 150°C (heating rate: 10°C/min.).

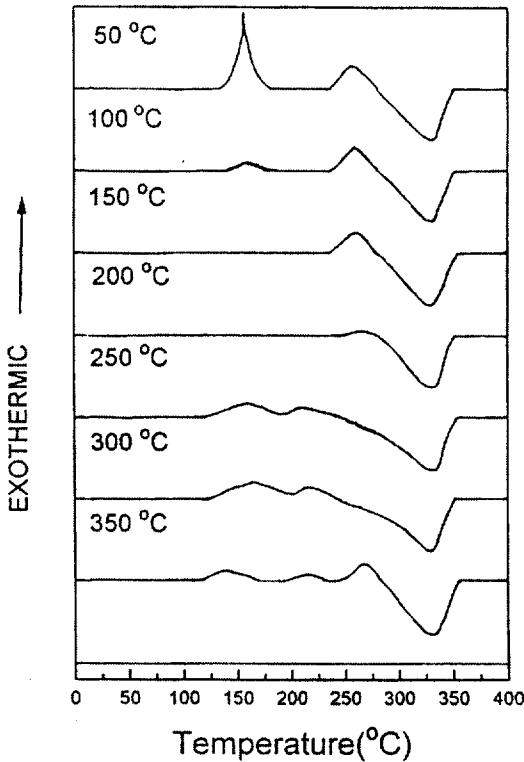


Fig. 8 DSC curve of the Mg-8.5Li-4.5Al alloy quenched and aged for 1 hour at various temperatures (heating rate: 10°C/min.).

231°C로서 저온으로 이동하는 것으로부터 250°C 및 300°C에서는 용질원자가 고용됨이 증명된다. 350°C도 흡열반응이 종료하는 온도와 비슷하지만 400°C보다  $\theta$ 상 및  $\delta$ 상의 생성에 의한 피크의 크기가 작은 것은 400°C보다 과포화도가 적고 시효 후에 공랭하였기 때문으로 판단된다.

### 3.2 시효경화곡선

Fig. 9는 400°C에서 1시간 동안 용체화처리한 후 50°C, 75°C, 100°C 및 150°C에서 여러시간 동안 시효한 시편에 대해 경도측정한 결과이다.

50°C 시효에서는 1시간, 75°C 시효에서는 10분, 100°C 시효에서도 10분의 시효로 최대경도값을 나타내었다가 감소한다. 150°C 시효에서는 초기부터 경도가 급격히 감소한다. 시효온도가 낮을수록 최대 경도를 나타내는 시간은 길고, 최대 경도값이 낮게 나타나는 결과는 시효석출경화 합금에서 나타나는 일반적인 현상과 비슷한 경향을 보여준다.

Frost 등<sup>7)</sup>은 Mg-Li합금에 Al양을 0.5~10% 범위에서 변화시키면서 93°C에서 시효한 경화곡선을

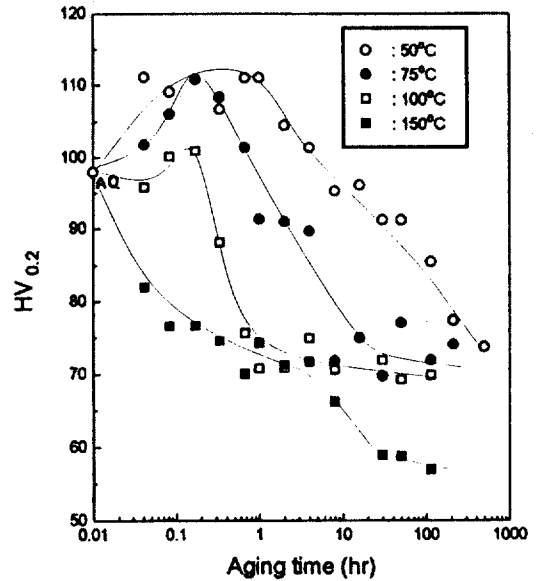


Fig. 9 Variation of hardness according to the aging time in the Mg-8.5Li-4.5Al alloy quenched and aged at 50°C, 75°C, 100°C, and 150°C.

조사하였는데, 0.5% Al일 경우에는 단지 고용에 의한 강화로 Mg-Li 2원 합금보다 경도가 약 2배정도 상승함을 보였고, 1% Al일 경우에는 초기부터 경도가 완만히 상승하다가 약 100시간의 시효로 최대 경도를 나타낸 후 감소하고, 2% Al일 경우에는 약 1시간에 못미쳐 최대 경도를 나타내며 경도 상승은 1% Al에 비해 훨씬 크게 나타났다. 4% Al일 경우에는 2% Al보다 최대 경도값은 높고 최대 경도에 도달하는 시간이 단축되었고, Al양이 6% 이상일 경우에는 퀴칭한 상태에서 경도가 가장 높고 시효시간이 진행할수록 감소하는 경향을 보여주었다. 6% Al의 퀴칭한 상태에서의 경도값은 Mg-Li 2원 합금의 약 5.5배 이상이었다. 0.5~10% Al 범위에서 Al양이 증가할수록 퀴칭한 상태에서 경도와 피크경도가 증가한다. 또 그들의 결과에서 1000시간의 시효가 완전 과시효된 상태라고 가정한다면 1000시간의 시효에서는 석출물은 강화에 기여하지 못하고 단지 고용된 Al에 의해 강화가 되는 것으로 가정할 수 있다. 1000시간 시효 상태에서는 6% Al까지는 Al양이 증가할수록 경도가 증가하나 이 이상일 경우에는 비슷한 경도값을 보여주었는데 이것은 Al이 고용되지 못하고 Al 단독으로 존재하기 때문에 더 이상의 강화에 기여하지 못하는 것으로 판단된다. 피크 경도와 1000시간 시효시의 경도 차이는 석출물의 생성에 의한 영향으로 고려할 수 있으며, 경도 차이는 Al양이 증가할수록 크다. 그리고 Al양이 증가할수록 최대 경도를 나타내는 시간이 단축되며 6% Al의 경우 퀴칭한 상태에서 경도값이 가장 큰 것은 급랭시 강화에 기여한 상이 이미 생성된 것으로 판단된다.

본 실험에서 Al양이 4.44%이기 때문에 상의 생성은 상당히 빠를 것으로 예상되며 실제 퀴칭한 시편에 대한 회절 분석 결과에서  $\theta$  상의 존재에 의한 아주 작지만 피크가 관찰되었다<sup>6)</sup>. 퀴칭한 상태와 피크 시효한 상태(50°C, 1시간)를 열분석한 곡선에서는  $\theta$  상의 생성에 의한 피크 변화를 관찰할 수가 없었다. 본 합금의 경우는 얼음물에 냉각시 미세하고 균일하게 생성되었던  $\theta$  상이 시효로 성장하면서 최대 경도

를 나타낸 후 더욱 성장하면서 경도가 감소되며, 시효 시간이 경과할수록 과포화 상태로 존재하던 용질 원자가 석출되면서 새로운  $\theta$  상이 생성되는 것으로 보이며 이것은 150°C 부근에서 나타난 열분석 피크가 없어지면서  $\theta$  상의 양이 증가하는 것으로부터 추정 가능하다.

McDonald 등은  $\theta$  상의 생성으로 강화가 일어나며, 최대 경도 후에 경도가 감소하는 것은  $\theta$  상이 분해되어  $\delta$  상이 생성되기 때문인 것으로 보고하였으나<sup>8)</sup>, Fig. 2~Fig. 7에서 살펴본 바와 같이 50°C, 75°C 및 100°C에서는 장시간 시효하여도  $\delta$  상은 거의 생성되지 않기 때문에 경도 감소는  $\delta$  상이 생성되기 때문이 아니고  $\theta$  상이 조대화하기 때문인 것으로 판단된다.

50°C 시효시 경도 상승에 따른  $\alpha$  상 및  $\beta$  상 각각의 경화 거동을 조사하기 위하여  $\alpha$  상 및  $\beta$  상 각각에 대해 경도를 측정된 결과를 Fig. 10에 나타내었다.  $\alpha$  상의 경도값은 최대 경도를 나타낸 1시간 시효에서 약간 높지만 시효시간에 따라 거의 변화가 없었고,  $\beta$  상은 최고 경도시 가장 높은 값을 나타내었다가 과시효한 200시간 시효에서는 감소하였다. 이것으로

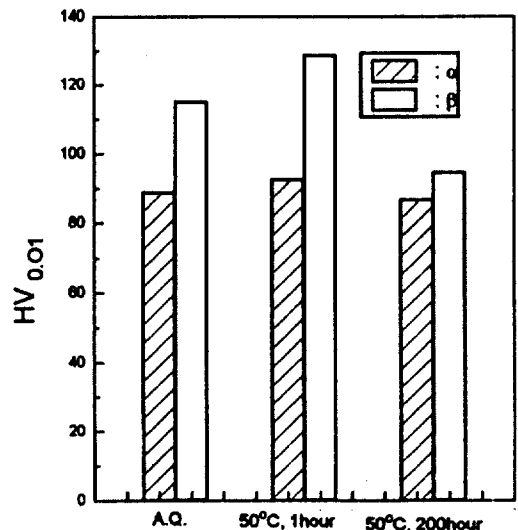


Fig. 10 Variation of the hardness of  $\alpha$  and  $\beta$  phases according to the aging time in the Mg-85Li-4.5Al alloy quenched and aged 50°C.

보아 시효에 의한 석출 강화는  $\alpha$ 상 보다는  $\beta$ 상 내에서 일어남을 알 수 있다.

Fig. 11은 400°C에서 1시간 동안 용체화처리한 후 여러 온도에서 1시간 동안 열처리한 시편에 대해 경도 측정된 결과이다. 퀴칭한 시편의 경우 50°C에서 증가한 후 감소하여 100~200°C 범위에서는 최저값을 나타낸 후 250°C부터 증가하여 300°C 이상에서는 퀴칭한 상태와 비슷한 값을 나타낸다. 50°C와 75°C에서의 증가는 앞에서 언급한 바와 같이  $\theta$ 상의 생성에 의한 것으로 판단된다. Fig. 8의 열분석 곡선에서 살펴본 바와 같이 100°C 및 150°C에서 1시간의 시효로는  $\delta$ 상의 생성에 거의 영향을 미치지 못하기 때문에 경도감소는 단지  $\theta'$ 상의 조대화에 기인된 것으로 판단된다. 200°C에서는  $\delta$ 상이 생성되어 있으나 경도에는 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다. 같은 열처리한 경우에 대해  $\alpha$ 상과  $\beta$ 상 각각에 대해 경도 측정된 결과를 Fig. 12에 나타내었다.

전체적인 경도 변화는 Fig. 10과 비슷한 경향을 보여준다.  $\alpha$ 상,  $\beta$ 상 각각의 경도값은 Fig. 10에 나타

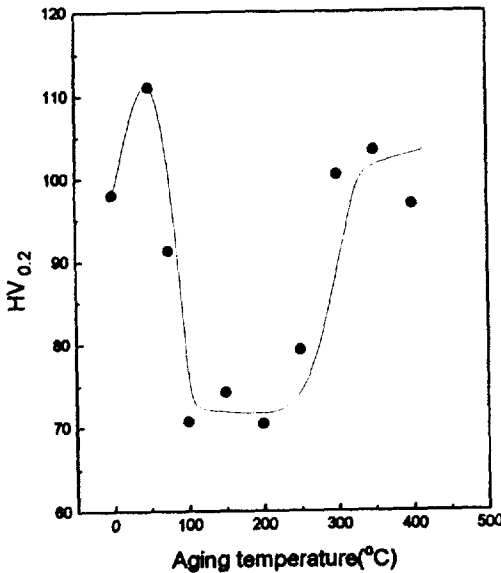


Fig. 11 Variation of hardness according to the aging temperature in the Mg-8.5Li-4.5Al alloy quenched and aged for 1 hour at 50°C, 100°C, 150°C, 200°C, 250°C, 300°C, 350°C, and 400°C.

낸 바와 같이  $\beta$ 상의 경도값이 더 높다. 그러나 Fig. 10과는 달리 시효온도를 달리할 경우에는  $\alpha$ 상의 경도값도 변화한다. 저온에서 시효할 경우에는  $\alpha$ 상 및  $\beta$ 상 공히 경도값이 높고, 과시효상태인 100~200°C 범위에서는 경도값이 감소하며, 250°C 이상이 되면 석출상이 용해되면서 재고용된 원자가 냉각 중에 석출상을 생성시킴으로서 다시 경도가 증가하는 것으로 판단된다. 이것도 역시 Fig. 8에서 나타낸 250°C 이상의 온도에서는 상의 생성에 의한 발열이 열분석 곡선에서 나타나는 경향과 잘 일치함을 알 수 있다. 그리고 100~200°C 범위에서 시효한 시편이 완전히 과시효된 상태이며 순수한 고용강화만이 강화에 기여한다면,  $\alpha$ 상의 경우 퀴칭한 상태와는 HV10 미만, 최대 경도값과는 약 HV25 정도 차이가 있지만  $\beta$ 의 경우는 퀴칭한 상태와는 약 HV35 정도, 최대 경도값과는 약 HV55 정도의 차이가 있음을 알 수 있다. 즉 본 실험에서 행한 합금의 경우  $\alpha$ 상 보다는  $\beta$ 상 내에서의 강화가 전체 경도에 큰 영향을 미침을 알 수 있다.

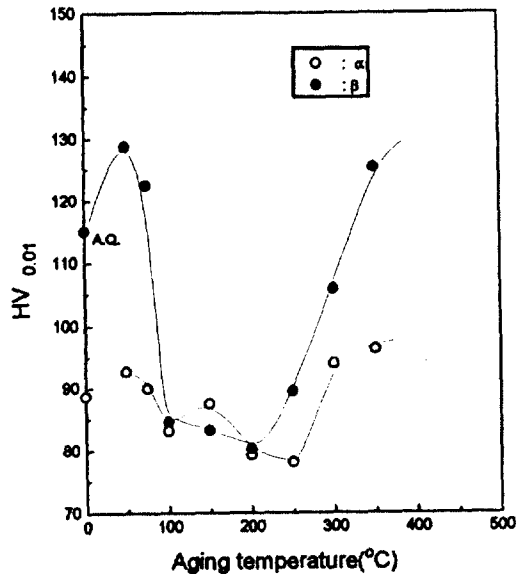


Fig. 12 Variation of hardness of  $\alpha$  and  $\beta$  phases according to the aging temperature in Mg-8.5Li-4.5Al alloy quenched and aged for 1 hour at 50°C, 100°C, 150°C, 200°C, 250°C, 300°C, 350°C, and 400°C.



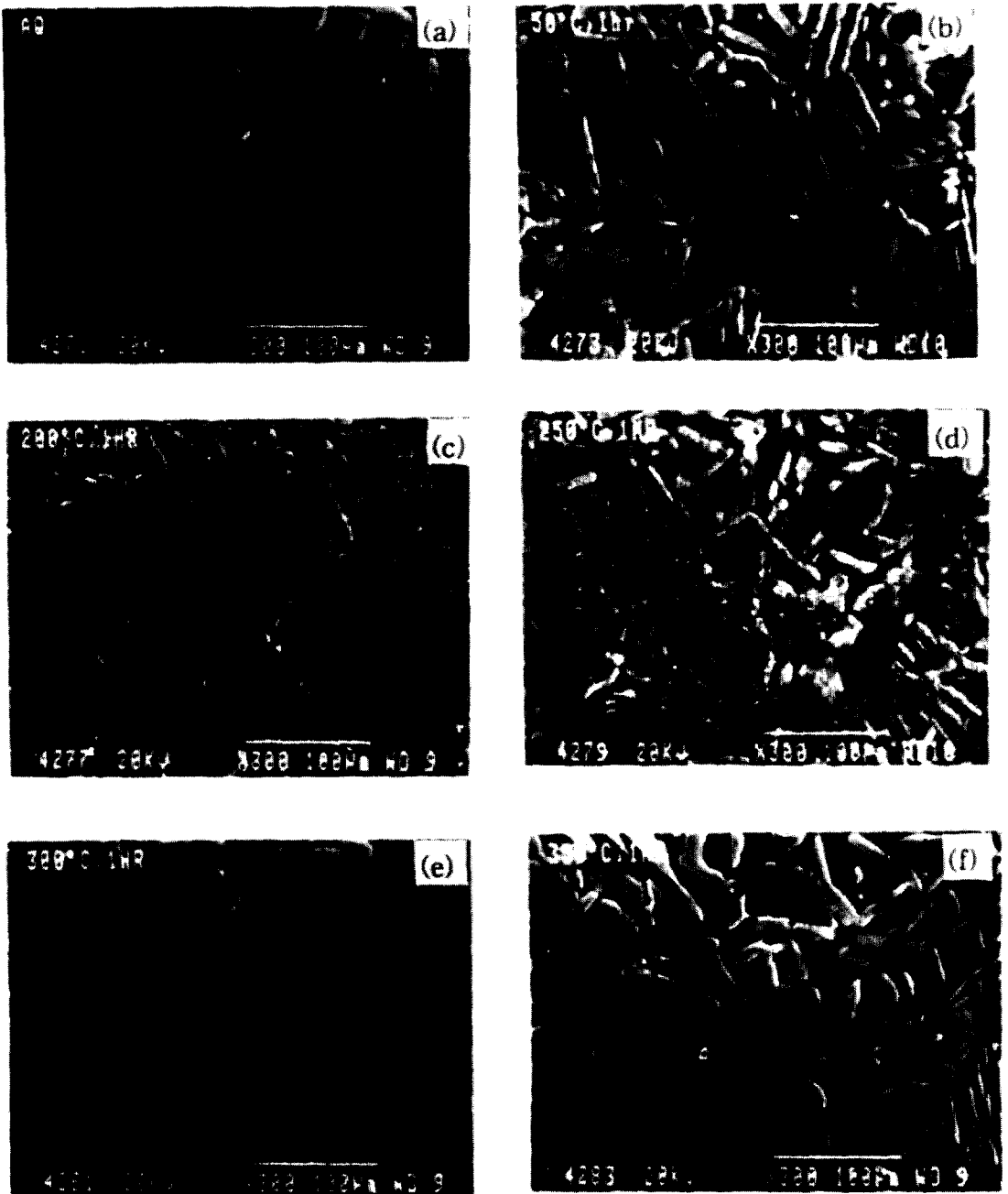


Fig. 13 Microstructures of a Mg-8.5Li-4.5Al alloy heat treated for 1hour at (a) A.Q., (b) 50°C, (c) 200°C, (d) 250°C, (e) 300°C, and (f) 350°C.

Fig. 13은 400℃에서 1시간 동안 용체화처리한 후 여러 온도에서 1시간 동안 열처리한 시편의 조직이다. 퀘칭한 상태와 50℃에서는 석출상이 거의 관찰되지 않고, 200℃에서는 석출상이 많이 관찰된다. 250℃에서도 역시 석출상이 관찰되나 200℃의 경우보다는 크기가 작아진 것을 알 수 있다. 300℃에서는 석출상의 크기가 작아졌으며 350℃에서는 석출상이 거의 관찰되지 않는다.

Fig. 13의 (a), (b)에는 육안으로 관찰되지 않지만 X-선 회절분석 결과<sup>9)</sup>로 보아  $\theta$ 상이 생성되었을 것으로 추측된다. 200℃에서는 이상이 조대화된 것으로 보이며, Fig. 9의 열분석곡선에서 조사한 바와 같이 이 온도에서는  $\delta$ 상도 생성되지만 조직상에서  $\theta$ 상과  $\delta$ 상을 구분하는 것은 불가능하다. 250℃에서 석출상의 크기가 200℃의 경우보다 작아진 것은 생성된 석출상이 250℃에서 열처리시 일부가 용해되어 재고용되었기 때문으로 판단된다. 이것도 역시 Fig. 9의 열분석곡선에서 200℃에서는 나타나지 않던 발열이 250℃에서 다시 나타난 것과 Fig. 12에서 재고용된 용질원자가 냉각시 다시 석출하여 강화를 일으킴으로서 경도가 증가하기 시작하는 결과와 잘 일치한다. 300℃와 350℃에서는 재고용되는 양이 많아져 열분석시 생성되는 발열의 크기가 커진 것을 알 수 있다.

Fig. 14의 (a), (b) 및 (c)는 50℃에서 각각 1시간, 200시간 및 800시간 시효한 시편의 석출상을 나타낸 주사전자현미경 조직이다. 열분석과 회절분석 결과에서 50℃에서 시효할 경우에는  $\theta$ 상만이 존재하기 때문에 이 석출상은  $\theta$ 상으로 추정된다. 1시간의 시효에서는 아주 미세한 상이 관찰되고, 50시간, 800시간으로 시효시간이 경과할수록 석출상이 조대한 경향을 나타낸다.

#### 4. 결 론

Mg-8.5wt.%Li-4.5wt.%Al 합금에 대해 A.Q. (as-quenched) 상태, 50℃ ~ 150℃ 온도범위에서

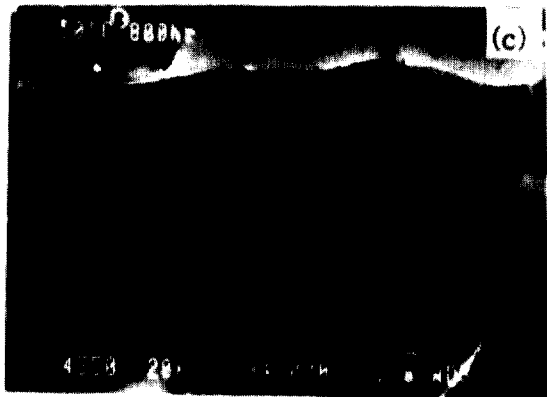
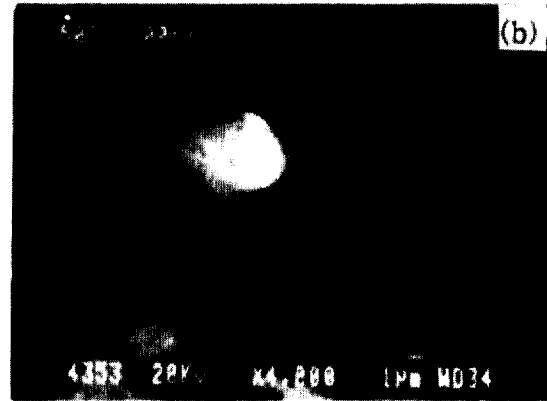


Fig. 14 SEM Micrographs showing  $\theta$  phase in Mg-8.5Li-4.5Al alloy aged at 50℃ for (a) 1, (b) 200, and (c) 800 hours.

여러시간 동안 시효한 상태, 50℃~350℃ 온도범위에서 1시간 동안 열처리한 상태 등에 관해 석출상 거동, 석출상간의 상관관계 및 각 석출상이  $\alpha$ 상 및  $\beta$ 상의 경화에 미치는 영향을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 50℃ 시효에서는 1시간, 75℃ 시효에서는 10분, 100℃ 시효에서도 10분의 시효로 최대 경도를 나타낸 후 감소하며, 150℃ 시효에서는 초기부터 경도가 급격히 감소한다. 시효온도가 낮을수록 최대 경도를 나타내는 시간은 길고 최대 정도값은 작은 결과를 보였다.
2. 시효온도에 따른 정도변화 곡선에서 50℃에서 최대 경도를 나타내며, 75℃에서 감소하였다가 100℃, 150℃, 200℃에서는 최저 정도를 나타내었다가 250℃ 이상에서 다시 증가한다. 이것은 생성되었던 석출물이 고온으로 올라가면 재고용되었다가 냉각중 재석출하기 때문인 것으로 판단된다.
3. 50℃ 시효시, 시간에 따른  $\alpha$ 상의 정도는 변화폭이 작지만,  $\beta$ 상의 정도는 시효시간에 따라 변화폭이 크다. 이것은  $\alpha$ 상보다는  $\beta$ 상 내에서의 경화가 기지의 정도 변화에 큰 영향을 미침을 나타낸다.
4. 50℃, 75℃, 100℃ 및 150℃ 시효시 최대 정도를 나타낸 후 정도값의 감소는  $\theta$ 상의 조대화에 의한 것으로 판단되며,  $\delta$ 상의 생성은 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.

## 후 기

본 연구는 1996년도 국방과학연구소의 연구비(계약번호 : UD960018AD)의 지원에 의하여 수행된 연구결과의 일부로 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. S. HORI, W. FUGITANI : 輕金屬, vol.40, no. 4 (1992), pp.285~289.
2. F. H. Harbstein, B. L. Averbach : Acta Met., 4, (1956), p.414.
3. A. Alamo, A.D. Banchik : J. Mat. Sci., vol. 15, (1980), pp. 222~229.
4. J.C. McDonald : J. Inst. Met., vol. 99, (1971), pp. 24~25.
5. H. Hatta, R. Chandran, S. Kamado, Y. Kojima : 輕金屬, vol. 47, no. 4 (1997), pp. 202~207.
6. 김영우, 황영하, 박태원, 김도향, 홍준표 : 대한금속학회지 vol. 35 12 (1997), 게재 예정
7. P.D. Frost, J.G. Kura and L.W. Eastwood : Transactions of AIME, vol. 188, Oct., (1950), pp. 1277~1282.
8. J.C. McDnald : Transactions of ASM, vol. 61, (1968), pp. 505~518.