

알루미늄-리튬합금의 조직 및 기계적성질에 미치는 Ag 첨가의 영향

신현식 · 정영훈 · 신명철 · 장현구*

한국과학기술연구원 금속연구부

*성균관대학교 재료공학과

The Effects of Ag Addition on the Structure and Mechanical Properties of Aluminium-Lithium Alloys

Hyun-Sik Shin, Young-Hoon Chung, Myung-Chul Shin and Hyun-Ku Chang*

Div. of Metals, KIST

Dept. of Materials Eng., Sung Kyun Kwan Univ.

초 록 Al-Li계합금인 2090과 CP 276합금에 Ag(0~0.16wt.%)을 첨가하여 조직 및 기계적성질에 미치는 영향을 조사하였다. Ag첨가는 결정립크기를 작게하였으며, δ' (Al₃Li)과 T₁(Al₂CuLi)석출상은 2090합금에서 미세하고 균일하게 형성되었으나 CP 276합금에서는 변화를 보이지 않았다. Ag이 0.16wt.% 함유된 2090합금의 경우 인장강도값은 약 40MPa 향상되었으며 연신율은 약간 감소하는 경향을 나타내었다. Mg이 함유된 CP 276합금에서는 미량으로 첨가된 Ag에 의한 강도 및 연신율의 변화가 나타나지 않았다. 150°C에서 시효처리하였을 경우에 합금마다 70 또는 90시간에서 최대 경도값 92H_RB를 나타내었다.

Abstract Effects of Ag addition to 2090 and CP 276 Al-Li alloy systems on the microstructure and mechanical properties have been investigated. The addition of silver up to 0.16wt.% reduced the grain size of the alloys, and was responsible for the formation of finer and more uniform δ' (Al₃Li) and T₁(Al₂CuLi) precipitates in 2090 alloys, even though no variation of precipitates was found in CP 276 alloys. The addition of 0.16wt.% Ag improved the tensile strength of 2090 alloys about 40MPa with the expense of small reduction of percent elongation. However, the small addition of Ag to CP 276 containing Mg did not show any variation of tensile strength and elongation. The aging treatment of these alloys at 150°C for 70 or 90 hours, depending on alloy systems, showed peak hardness value of about 92 H_RB.

1. 서 론

Al-Li계 합금은 비강도가 크고 탄성계수가 높아 차세대 항공기 구조용 소재로 현재 사용되고 있는 2000계열 및 7000계열합금을 대체하고자 하는 연구가 활발하게 진행되고 있다.¹⁾ 특히 비강도를 높여 보다 성능이 향상된 새로운 합금을 개발하고자 하는 연구는 가장 핵심이 되는 연구과제로 되어 있다. 최근에 개발된 대표적인 합금으로는 Martin Marietta Lab.에서 개발한 Weldalite 049합금²⁾을 들 수 있다. 이 합금은 강도가 700MPa 이상으로 높고 용접성이 우수하여 지금까지 알려진 합금중 실용화에 가장 접근한 합금으로 평가되고 있

다. 이들 합금의 주강화원인은 Cu함량이 높고 (>4 wt.%) 미량첨가원소인 Ag과 Mg이 핵생성을 조장하기 때문이며 주강화상은 δ' (Al₃Li) 보다는 T₁(Al₂CuLi)상이라고 보고되었다³⁾. 현재 진행되고 있는 Al-Li계합금의 연구에 있어서 강화석출물인 δ' , T₁ 및 S'(Al₂CuMg) 석출상등의 형성에 많은 관심이 집중되어 있으며 미량합금원소의 첨가에 의한 이들 석출상의 조절 및 열처리방법등에 대하여 연구가 진행중에 있다^{4,5)}. 특히 Al-Li계 합금에 있어서 강도향상에 따른 신율의 저하현상을 보완하기 위하여 석출상의 크기나 분포, 결정립크기의 조절 등이 많이 시도되고 있다.

본 연구에서는 지금까지 가장 널리 알려진

Al-Li계합금인 2090(Al-Li-Cu계)합금과 CP 276(Al-Li-Cu-Mg계)합금에 Ag을 미량으로 첨가하여 이들 합금원소가 결정립도, 석출상 및 인장강도에 미치는 영향을 조사하였다.

2. 실험방법

본 연구에서 Al-Li계 합금은 진공유도용해를 이용하여 Ar gas 분위기에서 용해 주조하였다. 용해주조용 시료는 고순도의 Al(99.99%)과 Li(99.9%)이 사용되었으며 Li, Mg, Ag은 순금속으로 첨가하였다. 용해시에 산화, 휘발성이 강한 Li과 Mg은 용해말기에 첨가하였다. 주조용 도가니는 1Kg용량의 고순도 흑연도가니를 사용하였으며 용해온도는 첨가되는 합금원소에 따라 750~980°C로 유지하였다. 용탕은 50mm×50mm×120mm인 각형의 주철 mold에 주조하였다. 주조후에는 billet을 길이방향으로 절단하여 주조조직의 내부결함을 조사한 후 미세편석 및 잔류응력을 제거시키기 위하여 균질처리를 수행하였다. 균질처리 전에 압연된 시료에 대한 DSC(Differential Scanning Calorimetry)시험으로 NEM(Non-equilibrium melting)발생온도를 측정하여 각 합금에 대한 균질처리조건을 조사하였다.

압연은 470°C에서 1시간 예열한 후 2mm 두께로 열간압연하였다. 압연비는 1pass당 5~10% 정도였으며 매 4회마다 10분씩 재가

열하여 3회씩 압연하였다. 제조된 합금의 용체화처리 온도는 압연재의 DSC 실험결과로부터 결정하였으며 본 실험에서는 NEM온도와 시료의 두께를 감안하여 530°C, 1.5시간을 용체화처리 조건으로 정하였다.

조직은 Keller시약으로 부식시켜 광학현미경으로 관찰하였으며 석출상은 투과전자현미경(TEM)을 사용하여 관찰하였다. TEM관찰용 시편은 열처리 후 600, 1000, 1200번 SiC 연마지를 사용하여 약 50~100μm 두께로 연마하였다. 연마 후에는 punch를 사용하여 직경 3mm의 disc를 만들었다. 제작된 disc는 jet electropolisher를 사용하여 적절한 조건에서 dimple을 형성시켰다. 이때 사용된 전해연마액은 methanol에 약 30%의 HNO₃을 혼합한 용액을 사용하였으며 액의 온도는 dry ice를 첨가하여 -30°C 이하를 유지하도록 하였다. 이와같은 과정을 통하여 만들어진 시편을 TEM에 설치하여 200Kev, 5만배의 배율에서 석출상을 관찰하였다.

경도는 Rockwell B scale로 측정하였으며 시편은 경도측정 전에 탈 Li층을 0.4mm 정도 연마하였다. 인장시험은 Instron(model 1127, load cell 10 ton, test speed 2mm/min)을 사용하여 수행하였다.

Table 1에 본 연구에서 제조한 합금의 조성을 나타내었다.

Table 1. Nominal composition of Al-Li alloys

Alloys	Nominal Composition(wt.%)					
	Li	Cu	Mg	Zr	Ag	Al
1	2.2	2.8	—	0.11	—	bal.
2	2.2	2.8	—	0.11	0.08	bal.
3	2.2	2.8	—	0.11	0.16	bal.
5	2.2	2.8	0.6	0.11	—	bal.
6	2.2	2.8	0.6	0.11	0.08	bal.
7	2.2	2.8	0.6	0.11	0.16	bal.

3. 결과 및 고찰

3.1 광학현미경 조직관찰

Fig. 1에 Ag첨가에 따른 Al-Li합금의 결정립 크기 변화를 나타내었다. Fig.1(a)와 (c)는

2090합금과 CP 276합금의 현미경조직 사진이며 Fig.1(b)와 (d)는 각각의 합금에 Ag을 0.16wt.% 첨가한 사진이다. 사진에서 나타난 바와 같이 Ag이 첨가됨으로써 양쪽 모두 결정립이 미세화되었음을 알 수 있다. 이와같이

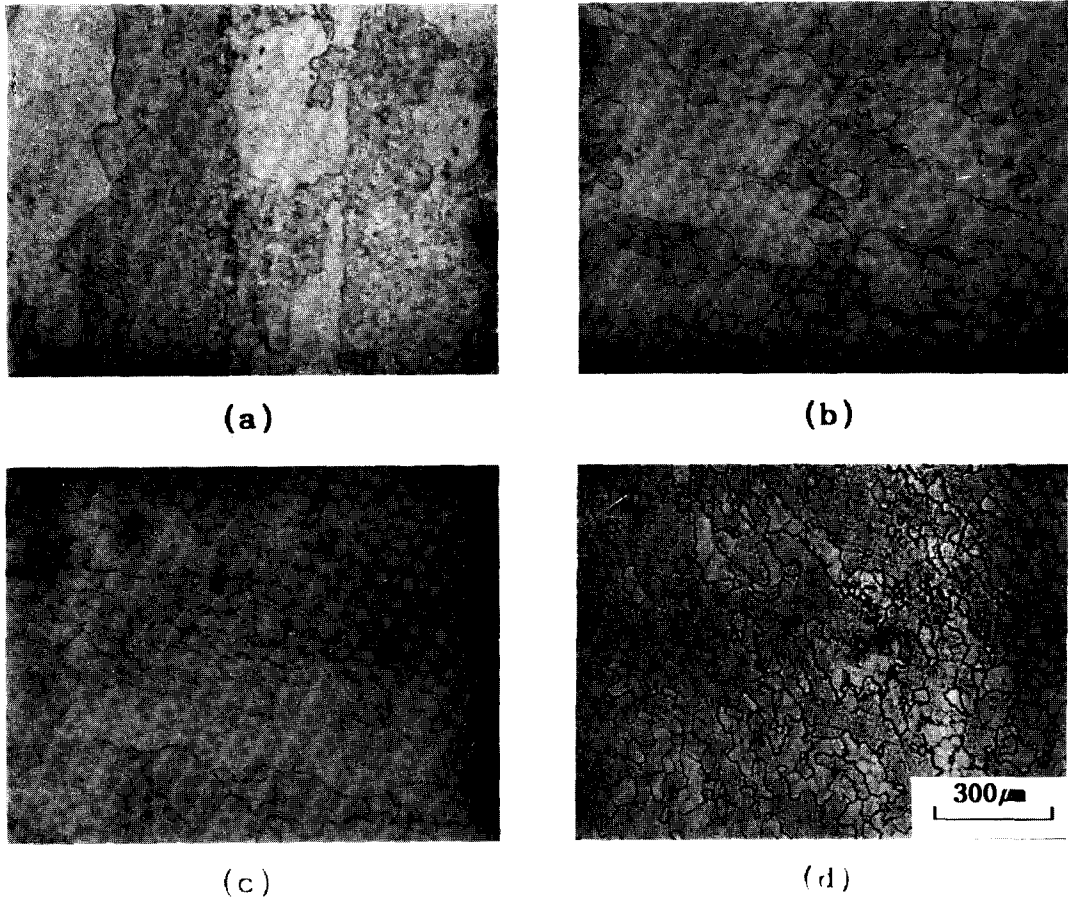


Fig. 1. Optical micrographs of 2090 and CP 276 alloys.

- (a) 2090 alloy (b) 2090 alloy contained 0.16 Wt.% Ag
 (c) CP 276 alloy (d) CP 276 alloy contained 0.16 Wt.% Ag

결정립이 미세화된 원인은 조직내에 고용상태로 남은 Ag이 결정립성장을 위한 원자의 확산을 방해하는 역할을 하기 때문으로 생각된다. 또한 이러한 현상은 Mg, Zr과 같은 다른 첨가원소들과 상호 작용하는 복잡한 메커니즘에 의하여 진행될 것으로 사료된다. Ag의 첨가는 Cu등과 더불어 결정립계에 미고용석출물을 형성하기 쉬우나 사진상에 보인 바와같이 그러한 현상은 나타나지 않았다. 이것은 고용한도 이내에서 소량의 Ag이 첨가되었고 균질 및 용체화처리 과정에서 완전히 기지내로 확산되어 균일하게 잘 분포되었기 때문으로 생각된다. 한편 Mg이 첨가되지 않은 2090 합금과 Mg이 첨가된 CP 276합금의 조직을 나타낸 Fig. 1(a)와 (c)를 살펴보면 CP 276합금이 더 미세한 결정립을 형성하고 있다. 또

한 Fig. 1(d)에 나타냈듯이 CP 276합금에 Ag이 첨가됨으로써 뚜렷한 결정립미세화가 되었음을 알 수 있다. 결정립 미세화효과에 대한 Mg의 역할은 아직 확실하게 규명된 바 없으나 Sc등과 같은 다른 원소와 상호작용하여 결정립 미세화효과가 있다는 것은 일부 보고된 바 있다.⁶⁾ 따라서 Fig. 1(d)의 경우에도 Ag과 Mg이 복합적으로 작용하여 결정립 미세화효과가 더욱 조장된 것으로 판단된다.

3.2 δ' , T_1 석출상 분석

2090이나 CP 276에 나타나는 경화석출물은 δ' (Al₃Li), T_1 (Al₂CuLi), θ' (Al₂Cu) 및 S' (Al₂CuMg)상 등으로 여러가지가 복합적으로 석출되어 함께 존재하고 있기 때문에 시야제한 회절법(SADP: selected area diffraction pattern)을 이용하여 석출물을 선택 관찰하였

다. 이들 경화석출물들의 격자방향과 형태는 기지조직과 일정한 방향관계를 가지고 있다. 따라서 석출상의 형태와 회절상에 나타나는 회절점으로 석출상을 구분할 때는 기지조직의 $\langle 100 \rangle$ 방향과 $\langle 112 \rangle$ 방향에서 SADP를 이용하는 것이 편리하다. $\langle 100 \rangle$ 방향의 SADP에서 관찰되는 석출물들의 형태는 δ' 석출상은 구형으로, 판상석출물인 θ' 상과 침상 또는 판상인 S' 석출상은 모두 봉상으로 관찰되며 판상인 T_1 상은 잘 관찰되지 않는다. $\langle 112 \rangle$ 방향에서의 석출상의 형태는 δ' 석출상은 구형으로 T_1 상과 S' 석출상은 일정한 각도의 서로 다른 방향으로 놓인 침상 또는 봉상으로 보인

다.

Fig. 2는 T_8 처리한 2090합금의 δ' 석출상과 SADP를 나타낸 것이다. Fig. 2의 (a), (c)는 기지방향을 $[112]$ 로 한 SADP로써 δ' 상의 초격자회절점들을 잘 나타내고 있다. Fig. 2의 (b)는 2090합금에 있어서 δ' 초격자회절을 이용하여 얻은 dark field(DF)상으로 구형의 δ' 상이 형성되고 부분적으로 조대하게 성장된 δ' 상이 존재함을 알 수 있다. Fig. 2의 (d)는 2090합금에 Ag이 0.16wt.% 함유된 합금의 δ' 상을 나타낸 DF상으로써 Ag이 첨가되지 않은 Fig. 2의 (b)보다 균일하고 미세한 δ' 석출상이 생성되었음을 보이고 있다.

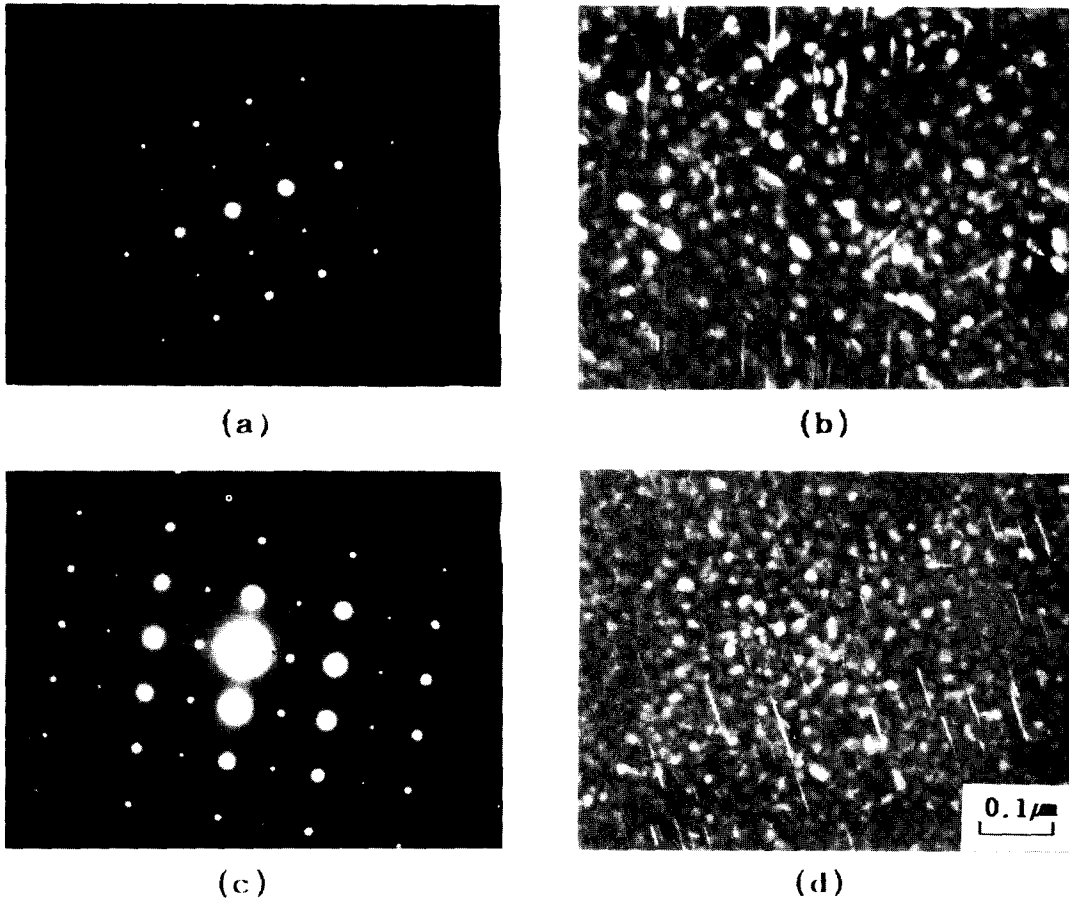


Fig. 2. TEM micrographs of 2090 alloys.

- (a) SADP of $B \cong [112]$ in 2090 alloy
- (b) δ' DF image in 2090 alloy
- (c) SADP of $B \cong [112]$ DF image in 2090 alloy contained 0.16 Wt.% Ag
- (d) δ' DF image in 2090 alloy contained 0.16 Wt.% Ag.

Fig. 3은 CP 276합금의 δ' 석출상과 SADP를 나타낸 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 Ag를 첨가하지 않은 Fig. 3(b)의 δ' 석출상과 Ag를 0.16wt.% 첨가한 Fig. 3(d)의 δ' 석출상이 거의 비슷한 형태로 형성되었음을 알 수 있다. 이상의 결과를 고찰하여 보면 2090합금에 소량의 Ag이 첨가됨으로써 δ' 석출상이 미세화 되었으며 균일한 분포를 하고 있음을 알 수 있다. 이것은 Ag이 석출상생성에

있어서 핵생성 seed로 작용하여 많은 핵생성 site를 제공하였기 때문으로 생각된다. 일부의 보고에 의하면 Ag과 Mg이 동시에 Al-Li합금에 첨가되었을 경우에 냉간가공 없이도 핵생성에 유효한 역할을 하며 자연시효상태에서 전위밀도가 비교적 낮은 상태에서 핵생성효과가 큰 것으로 보고된 바 있다⁷⁾. 본 실험결과에서는 Ag만 첨가하였을 경우에도 δ' 및 T_1 석출상의 미세화가 일어남을 확인하였다.

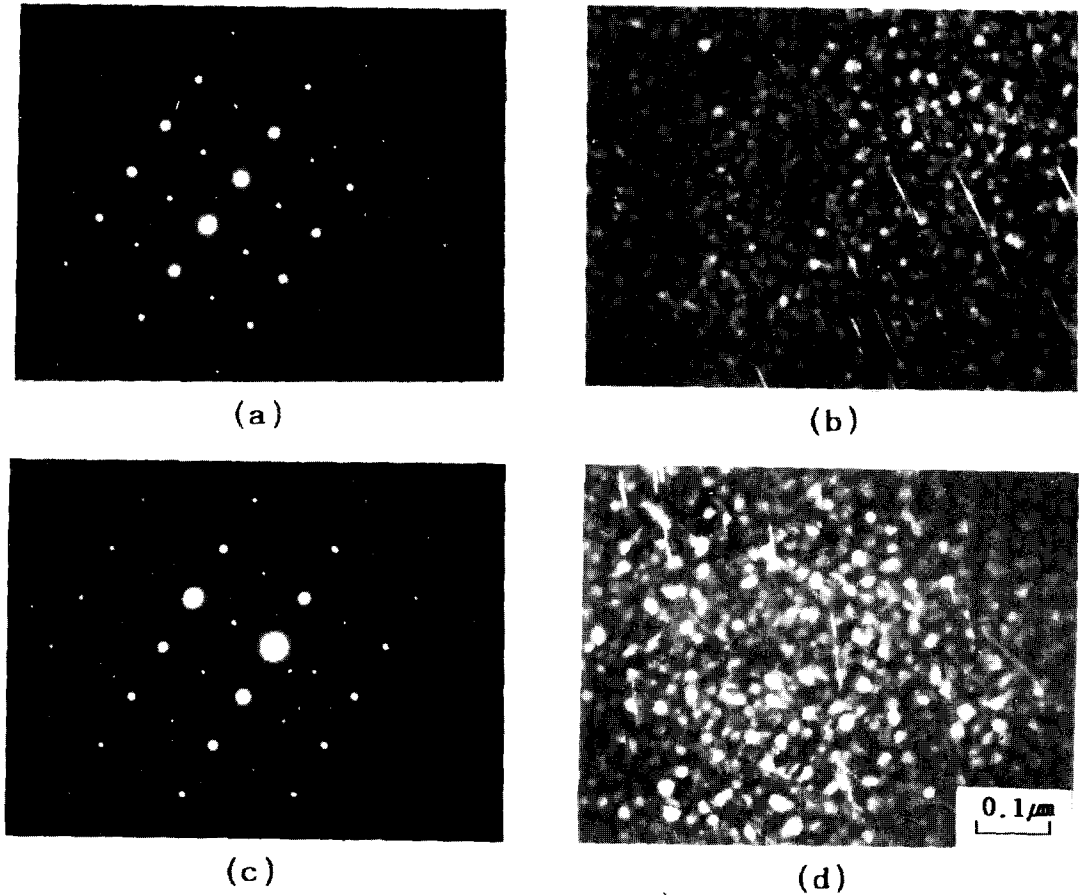


Fig. 3. TEM micrographs of CP 276 alloys.

(a) SADP of $B \approx [112]$ in CP 276 alloy

(b) δ' DF image in CP 276 alloy

(c) SADP of $B \approx [112]$ in CP 276 alloy contained 0.16Wt.% Ag

(d) δ' DF image in CP 276 alloy contained 0.16 Wt.% Ag

Fig. 4는 2090합금과 CP 276합금의 T_1 석출상과 SADP를 나타낸 그림이다. Fig. 4(a)는 CP 276합금에서 기지방향이 $[112]$ 에 해당하는 SADP로써 T_1 상에 기인된 초격자 회절점들이 뚜렷하게 잘 나타나고 있다. Fig. 4(b)는

2090합금의 T_1 석출상으로써 비교적 크게 성장한 모습을 보이고 있으며 Fig. 4(c)는 2090합금에 0.16wt.%의 Ag이 첨가된 경우로써 T_1 석출상이 미세하고 작게 형성되었음을 알 수 있다. 이것은 앞서 언급한 δ' 석출상의 경우와

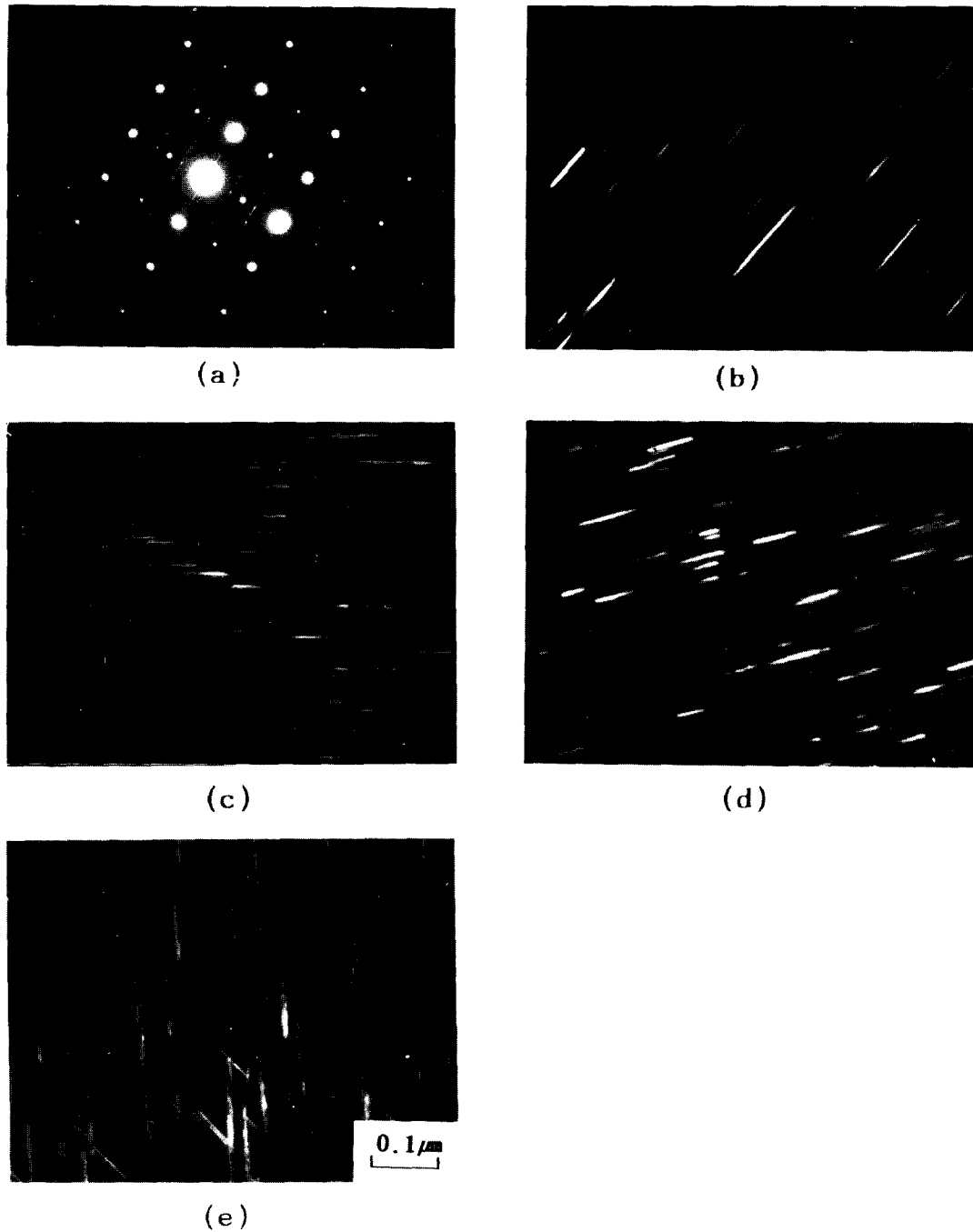
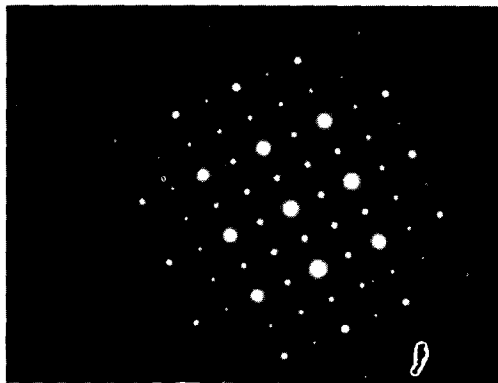


Fig. 4. TEM micrographs of 2090 and CP 276 alloys.

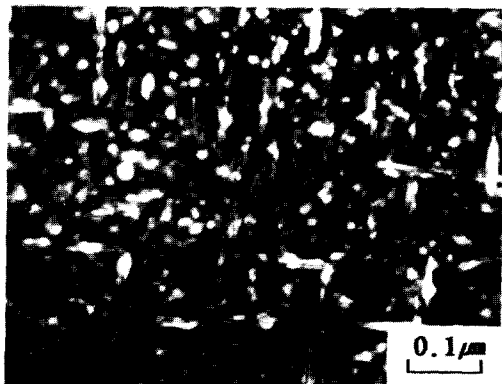
- (a) SADP of $B \cong [112]$ in CP 276 alloy
- (b) T_1 DF image in 2090 alloy
- (c) T_1 DF image in 2090 alloy contained 0.16Wt.% Ag
- (d) T_1 DF image in CP 276 alloy
- (e) T_1 DF image in CP 276 alloy contained 0.16Wt.% Ag

마찬가지의 경향을 보이고 있다. Fig. 4(d)는 CP 276합금의 T_1 석출상을 나타낸 것으로서 2090합금보다는 작은 T_1 석출상이 형성되었음을 알 수 있다. Fig. 4(e)는 CP 276에 Ag이 0.16wt.% 함유된 합금의 T_1 석출상을 나타낸 것으로 약간 조대하게 형성되었으며 S'석출상도 일부 존재하고 있음을 알 수 있다. CP 276에 Ag이 미량(0.16wt.%)으로 함유되었을 경우에 T_1 석출상의 형성에 관하여는 Mg과의 복합적인 관계가 있기 때문에 추후 구체적인 연구가 필요하다.

Fig. 5는 2090합금에 Ag이 0.16wt.% 함유된 합금의 SADP와 δ' 및 θ' (Al_2Cu) 석출상을 나타낸 그림이다. 기지의 방향이 $[100]$ 에 해당하는 SADP에서는 δ' 과 θ' 을 나타내는 초격자 회절점들이 잘 나타나 있으며 DF상에서는



(a)



(b)

Fig. 5. TEM micrographs of 2090 alloy.
(a) SADP of $B \approx [100]$ in 2090 alloy
(b) δ' and θ' DF image in 2090 alloy contained 0.16Wt.% Ag

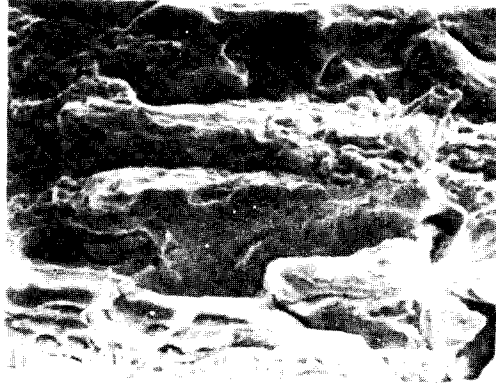
다량으로 분포하는 구형의 δ' 상 사이에 θ' 상이 길게 형성된 모습을 보이고 있다. 한편 Al-Li계합금의 시효처리시에 석출상을 균일하게 많이 분포시키기 위하여 시효처리 전에 stretching처리를 하게 되는데 이때 δ' 석출상의 조대화 속도는 stretching을 할 경우에 더 커지게 되며 이것은 stretched합금에서 Li의 확산을 위한 활성화에너지의 감소에 기인된다고 보고된 바 있다. 아울러서 stretching처리는 T_1 석출상의 핵생성속도를 크게 증가시키고 또한 T_1 석출상의 성장속도는 전위를 따라 이동하는 Cu의 확산속도에 의하여 조절되는 것으로 알려지고 있다.⁸⁾ 또한 stretching처리는 S'과 T_1 석출상의 핵생성 site를 증가시킴으로써 강화효과에 기여할 수 있으며 강화에 크게 기여하는 T_1 석출상은 보통 전위상에서 핵생성되나 입계에서도 일부 불균일하게 석출되기도 한다. 인공시효처리한 조건에서 T_1 석출상은 다른 석출상에 비하여 우선적으로 강화효과가 있는 석출물이며 그 외에 소량으로 석출된 θ' 석출상과 S'석출상이 강화에 기여한다. 또한 미량으로 첨가되는 Ag과 Mg이 T_1 석출상을 생성시키는 데 효과적으로 작용한다는 보고도 있다⁹⁾. 경도에 미치는 S'석출상 연구에서 GPB(Guiner-Preston boundary) zones은 시효경화에 대한 큰 효과는 없으며 GPB→S'로의 상변태가 항복강도의 증가와 크게 연관된 것으로 보고 되고 있다¹⁰⁾. T_1 석출상과 S' (Al_2CuMg)석출상이 강도에 크게 기여하는 이유는 planar slip이 쉽게 일어나는 δ' 석출상과는 달리 전위가 이들 석출상을 쉽게 penetration할 수 없기 때문이다. 이들 두 상은 불균질 핵생성을 하며 matrix안에서 많은 량이 균일하게 분포할 수 있다. 따라서 stretching처리를 함으로써 이와같은 효과를 얻을 수 있기 때문에 본 연구에서도 약 7%의 stretching처리를 하였다.

Fig. 6은 인장시험 후 관찰한 Al-Li계 합금의 표면조직을 나타낸 것으로서 2090합금인 Fig. 6(a)는 커다란 결정립이 벽개파괴를 일으킨 모양을 하고 있다. 또한 여기에 Ag이 첨가된 Fig. 6(b)는 작게 형성된 결정립들이 균일하게 입계를 따라 파괴된 경향을 보이고 있다. CP 276합금인 Fig. 6의 (c), (d)를 비교하여 보면 Ag이 첨가된 Fig. 6(d)가 비교적

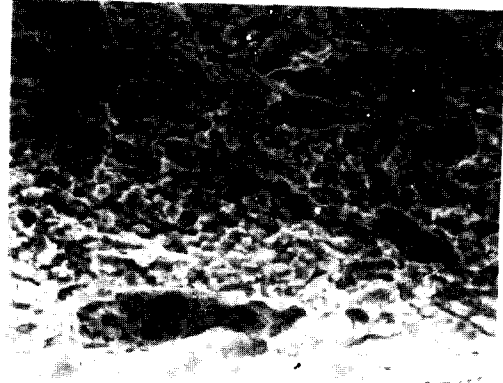
연성파괴의 경향을 보이고 있다.

이와같은 파면조직의 형태를 Table 2에 나타난 강도값과 비교하여 보면 가장 낮은 인장강도(519 MPa)를 나타낸 2090합금의 경우

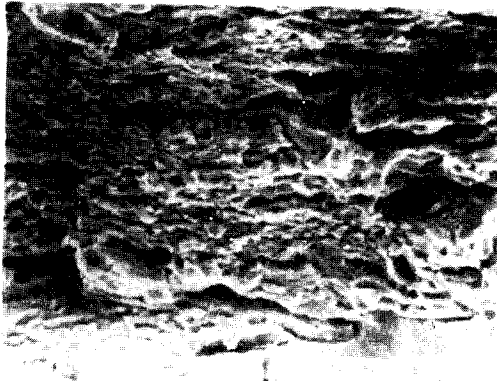
파면의 형태가 커다란 결정립의 입계를 따라 취약하게 파괴를 일으킨 모습을 나타내고 있다. 반면에 570MPa정도의 인장강도값을 나타낸 CP 276 합금은 대단히 미세한 파면조직의



(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 6. Scanning electron micrographs of fracture surfaces in 2090 and CP 276 alloys.

- (a) 2090 alloy (b) 2090 alloy contained 0.16Wt.% Ag
 (c) CP 276 alloy (d) CP 276 alloy contained 0.16Wt.% Ag

형태를 나타내고 있으며 Ag이 0.16wt.% 첨가된 Fig. 6(d)에서 그 경향이 뚜렷함을 알 수 있다.

3.3 경도 및 인장시험

Fig. 7과 8은 2090합금과 CP 276합금의 Ag함량에 따른 시효처리시 경도변화를 나타낸 것이다. 2090합금에서는 Ag이 0.16wt.% 첨가된 합금의 경우에 경도값이 향상되었음을 알 수 있으나 CP 276합금에서는 Ag의 첨가에 의한 경도변화가 뚜렷하게 나타나지 않고 있다. 대체적으로 70시간과 90시간에서 가장 높은 경도값을 나타내었으며 시료에 따라 어

느 정도의 차이는 있으나 89~92 H_RB의 높은 경도값을 나타내었다. Fig. 7에서는 Ag이 0.16wt.% 함유된 합금이 가장 높은 경도분포를 보이고 있으며 2090합금과 Ag이 0.08wt.% 첨가된 2090합금은 거의 비슷한 경향을 나타내고 있다. CP 276합금에 Ag이 첨가된 합금(Fig.8)에서는 거의 비슷한 경도분포를 나타내고 있다. 이와같은 경도값의 변화양상은 앞 절에서 언급한 결정립 미세화 경향과 석출상의 크기 및 분포 등에 기인된 것으로 사료된다.

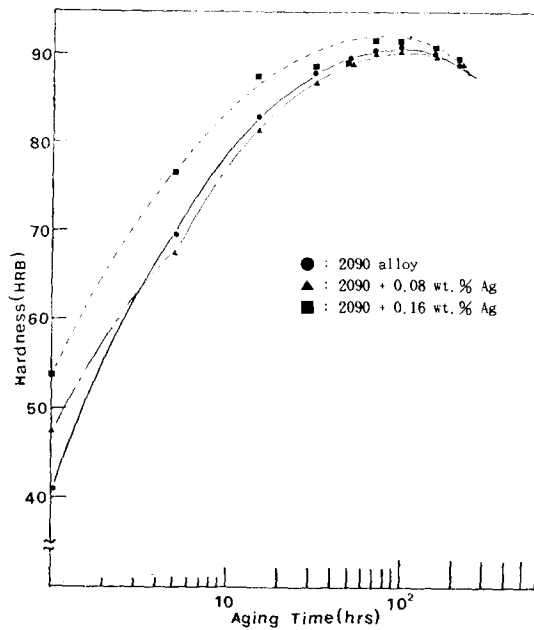


Fig. 7. Variations of hardness with aging time in 2090 alloys aged at 150°C

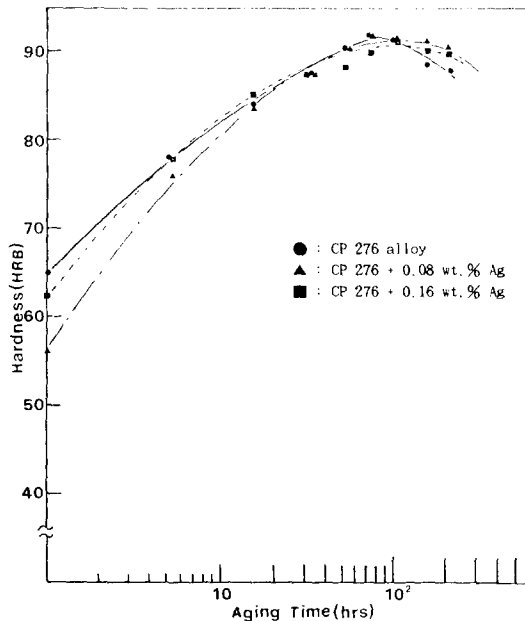


Fig. 8. Variations of hardness with aging time in CP 276 alloys aged at 150°C

Table 2에 Al-Li합금의 인장시험결과를 나타내었다. 2090합금에 Ag이 첨가된 합금의 경우 Ag이 0.16wt.% 함유된 3번합금에서

559MPa의 가장 높은 인장강도 값을 나타내었으며 연신율은 반대로 점차 감소하여 4.8%를 나타내었다. 또한 CP 276합금에 Ag이 소량 첨가된 합금의 경우는 인장강도값이 570MPa이상의 높은 값을 나타내었으며 인장강도에 미치는 Ag첨가의 영향은 뚜렷하게 나타나지 않았다. 이 경우 Ag첨가의 영향이 두드러지게 나타나지 못한 원인은 CP 276합금에 Mg이 0.6wt.% 함유되어 인장강도에 Ag보다는 Mg이 크게 작용하였기 때문으로 사료된다. 또한 연신율은 Ag이 가장 많이 첨가된 7번시료에서 가장 낮은 값을 나타내었다.

Table 2. Tensile properties of Al-Li alloys

Alloys	Y.S(MPa)	U.T.S(MPa)	Elongation(%)
1(2090)	474	519	6.0
2(2090+0.08Ag)	474	520	5.7
3(2090+0.16Ag)	509	559	4.8
5(CP 276)	536	574	6.8
6(CP 276+0.08 Ag)	524	568	6.7
7(CP 276+0.16 Ag)	534	573	5.6

4. 결 론

Al-Li계 합금에 Ag을 첨가하여 조직검사와 재질특성을 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 2090합금에 소량(약0.18%)의 Ag을 첨가하여 결정립미세화 효과가 있었으며 균일하고 미세한 δ' 및 T_1 석출상의 생성을 도모할 수 있었다. 그러나 CP 276합금에서는 결정립미세화 효과는 있었으나 δ' 석출상은 큰 변화가 없었으며 T_1 석출상은 약간 조대한 모습을 나타내었다.

2) 2090합금에 Ag이 첨가됨으로써 인장강도값 및 경도값이 향상되었으며 연신율은 약간 감소하는 경향을 나타내었다. 또한 CP 276합금에 Ag을 첨가하였을 경우에 인장강도, 연신율 및 경도값에 변화가 없었다.

3) 2090합금에 비하여 CP 276합금의 강도값이 크게 향상된 이유는 T_1 석출상과 Mg첨가에 의하여 생성된 S' 석출상이 함께 강도향상에 기여하였기 때문으로 판단된다.

4) Ag이 첨가된 2090합금과 CP 276합금의 경도분포는 88~92 HRB의 높은 값을 나타내

있으며 150°C에서 시효처리하였을 경우 70 또는 90시간의 영역에서 최대경도값을 나타내었다.

후 기

본 연구는 과학기술처의 지원으로 수행된 G7과제중 “저비중 고강도 알루미늄-리튬합금 개발”에 관한 연구의 일부임을 밝히며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. T.H. Sanders, Jr., The 1st International Aluminium-Lithium Conference Proceedings, (ed) T.H. Sanders, Jr. and E.A. Starke, Jr., Atlanta, Georgia, May, 63 (1980)
2. J.R. Pickens, F.H. Heuban and T.S. Langan, Proc. Airframe Material Symposium, National Research Council of Canada July, 3(1991)
3. J.D. Huang and A.J. Ardell, Acta Met. Vol. 36, 2995(1988)
4. W.T. Tack, F.H. Heubaum and J.R. Pickens, Scripta Metallurgica et Materialia, Vol. 24, 1685(1990)
5. D. Buttinelli, F. Felli, C. Lupi and F. Marani, The 6th International Aluminium-Lithium Conference Proceedings, (ed) M. Peters and P.J. Winkler, Garmisch-Partenkirchen(FRG), 433(1991)
6. L.I. Kaygorodova, Proc. the 6th International Aluminium-Lithium alloy Conf. Garmisch-Partenkirchen(FRG), (ed) M. Peters and P.J. Winkler 363(1991)
7. W.T. Tack, F.H. Heubaum and J.R. Pickens, Scripta METALLURGICA and MATERIALIA, Vol. 24, 1685(1990)
8. W.S. Jung and J.K. Park, Proc. the 6th International Aluminium-Lithium alloy Conf. Garmisch-Partenkirchen(FRG), (ed) M. Peters and P.J. Winkler 88(1991)
9. Frank W. Gayle, Proc. the 6th International Aluminium-Lithium alloy Conf. Garmisch-Partenkirchen(FRG), (ed) M. Peters and P.J. Winkler 206(1991)
10. P. Sainfort and B. Dubost, Proc. the 4th International Aluminium-Lithium alloy Conf. Paris(France), (ed) G. Champier, B. Dubost, D. Miannay and L. Sabetay, 410 (1987)