

論 文

가공열처리에 의한 고강도 Al-Cu-Li-Ag-Mg-Zr 합금의
기계적 성질 개선유정희 · 남궁일 · 이오연 · 김동건
전북대학교 공과대학 금속공학과Improvement of Mechanical Properties in Al-Cu-Li-Ag-Mg-Zr Alloys
by Thermomechanical Treatment

C.H. Yu, I. Namkung, O.Y. Lee and D.K. Kim

Department of metallurgical Engineering, Chonbuk National University

ABSTRACT

This study is aimed to investigate the effect of various thermomechanical treatments (T_6 , T_8 and ITMT) on the microstructure and mechanical properties of an Al-Cu-Li-Ag-Mg-Zr alloy (Wedalite 049) which has been known to strong natural aging response, good weldability and high strength in T_6 and T_8 temper. This experiment was performed by means of differential scanning calorimetry, tensile test, optical and transmission electron microscopy. The tensile strength in the peak aged condition shows 620, 650 MPa in T_6 and T_8 (40% cold work), respectively. Also, The tensile strength is increased with cold working in T_8 but decreased at 60% cold working. However, the tensile strength of the intermediate thermomechanical treated specimen(ITMT) is lower than that of T_6 temper about 20% but the elongation is higher than two times. It might be predicted that the ITMT is effective processing to improve the toughness of this alloy. In T_6 , T_8 and ITMT, the major strengthening phase is T_1 (Al_2CuLi) phases, and the fine T_1 phase which are homogeneously precipitated in matrix was observed much more in T_8 than T_6 and ITMT.

1. 서 론

최근 미국의 Martin Marieta 연구소에서 용접성이 우수하며 고강도를 갖는 Al-Cu-Li-Ag-Mg-Zr 합금(일명 Wedalite 049)을 개발하였다. 이 합금의 특성은 8090이나 2090계 합금에 비하여 Cu/Li의 비율을 높게 하여 T_1 석출상(Al_2CuLi)의 양을 많게 하였으며, Ag와 Mg를 동시에 첨가하여 석출물의 핵생성을 촉진시켜 T_6 나 T_8 처리 모두 높은 강도를 갖는다¹⁾. 또한 자연시효성, 응

력부식균열저항성, 용접성 및 저온성질 등이 우수하여 2-5) 7XXX 및 2XXX 계의 고강도 Al 합금을 대체할 우주 항공용 소재로서 매우 유망하지만, 이 합금 또한 Al-Li 계 합금의 공통적인 단점인 낮은 인성이 가장 큰 결점으로 지적되고 있다.

이러한 성질을 개선하기 위하여 가공열처리에 의해 주강화상인 T_1 상의 석출량을 증가시켜 planar slip을 억제하거나 합금원소 첨가 또는 결정립 미세화, PFZ 형성을 억제하는 방법이 제안되고 있다⁶⁻⁸⁾. 최근 Al-Li 계

합금의 인성을 개선하기 위한 열처리 방법으로서 최종 가공열처리(FTMT) 및 중간가공열처리(ITMT)에 관한 연구가 보고 되었다⁹⁾. 즉, FTMT는 인성과 연성을 저하시키지 않으면서 강도를 증가시키는 방법이며, ITMT는 시효전에 적당한 가공도를 부여하여 고밀도의 전위와 미세한 석출물을 균일하게 분산시키고 결정립을 미세화 함으로써 기계적 성질의 이방성, 인성 및 연성을 개선하는 방법이다. Al-Li 계 합금을 ITMT 처리하면 planar slip의 경감, PFZ 폭과 전위집적길이의 감소 및 초기 균열 생성의 원인이 되는 응력집중 현상이 감소되므로 강도-연성 조합이 현저하게 개선된다¹⁰⁾.

Wedalite 049 합금도 Al-Li 계 합금의 일종으로서 700 Mpa 정도의 초고강도를 가지고 있으므로 현재 강도보다는 연성개선에 관한 연구가 이루어져야 할 것이다. 그러나 지금까지 가공열처리에 의한 기계적 성질, 특히 연성개선에 대한 연구가 거의 발표된 바 없다. 본 연구는 Al-Cu-Li-Ag-Mg-Zr 합금에 각종 가공열처리방법(T₆, T₈, ITMT)을 적용하여 열분석, 투과전자현미경 관찰, 경도 및 인장시험 등으로 기계적 성질과 미세조직과의 상호 관계를 규명하고자 한다.

2. 실험방법

시료는 고순도의 Al(99.99%)과 Li(99.9%), Ag(99.8%), Mg(99.9%) 및 Al-40%Cu, Al-5%Zr의 모합금을 소정의 합금조성으로 배합하여 Ar 가스 분위기하의 진공고주파 유도로에서 용해하여 60 × 120 × 150 mm의 금형에 주조하였다. 주괴는 표면절삭가공 후 450°C까지 1°C/min으로 승온하여 16시간 유지하고 다시 503°C까지 1°C/min으로 승온하여 16시간 유지하는 균질화처리를 하였다. 균질화처리 후 시료의 화학조성은 Table 1과 같다.

균질화시킨 합금 시료는 25 t × 55 w × 1201 mm로 다시 절삭가공하고 각종 가공도로 냉간압연 하였을때 최종두께가 인장시편은 1 mm, 경도시편은 2 mm 가 되

Table 1. Chemical Composition of the Speciman.

Elements	Cu	Li	Ag	Mg	Zr	Fe	Si	Al
wt%	6.28	1.38	0.39	0.41	0.14	0.010	0.020	bal.

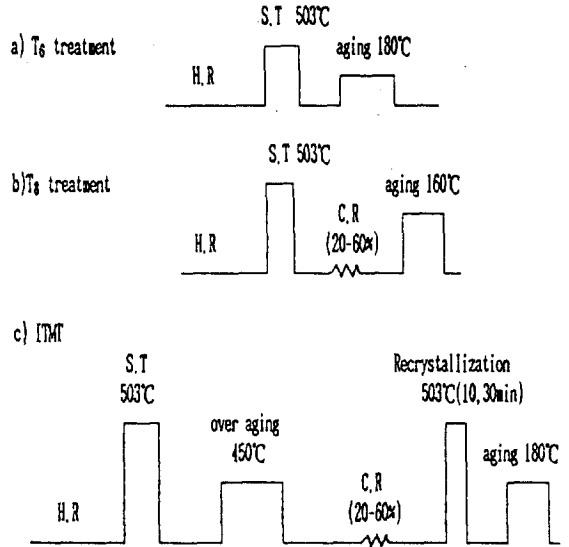


Fig.1. Schematic diagram of various thermomechanical treatments.

도록 480°C에서 열간압연하였다. 열간압연된 시료는 T8 및 중간가공열처리(ITMT)를 하기 위해 각각 20%, 40%, 60%의 냉간압연을 하였으며 Fig.1에 T₆, T₈, ITMT의 가공열처리 과정을 도식적으로 나타냈다.

각종 가공도로 냉간압연된 시료는 인장시편과 경도시편을 제작하여 503°C에서 30분 동안 유지한 후 0°C 물에 급냉하는 용체화처리를 하였으며, T₆ 및 ITMT 시편은 180°C 그리고 T₈ 시편은 160°C의 실리콘 유욕중에서 각각 인공시효 하였다. 경도값은 인공시효 후 로크웰 경도기(하중 100kg, 1/16 inch 강구)로 7회 측정하여 최소 및 최대값을 제외한 나머지 값의 평균으로 하였다. 인장시험은 용량 25 ton의 인스트롱으로 상온에서 변형속도 2.3 × 10⁻⁴/sec로 실시하였으며, 인장파면을 주사전자현미경(JEOL 200CX)으로 관찰 하였다.

각종 가공열처리 후 비열측정은 시차주사열량 분석기(Du Pont 918)에서 시료의 무게를 40-50 mg이 되도록 제작하여 승온속도 10°C/min으로 하여 상온에서 부터 400°C까지의 비열변화를 조사하였다. 광학현미경조직은 희석된 keller 시약으로 부식시켜 관찰하였으며, 투과전자현미경(Askasi 200KV)으로 석출상들의 미세조직을 관찰하였다. 투과전자현미경 시편은 25% HNO₃ + 75% CH₃COOH의 전해액을 -30°C로 유지하며 20 V, 120 mA로 전해 연마하였으며, 전해액으로 부터 Ag의 전

착을 제거하기 위해 50% HNO_3 + 50% H_2O 에 dipping 하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 비열변화

Fig.2는 T_8 및 T_8 처리를 위해 가공된 시편의 퀀칭 상태에서의 각종 가공도에 따른 비열변화를 나타낸 것으로서 두 개의 흡열반응 P, Q와 한 개의 발열반응 R이 나타났다. Peak 온도가 100°C 부근인 반응 P는 퀀칭 상태에서 존재하는 Z.P. zone 이 재고용 됨으로써 생긴

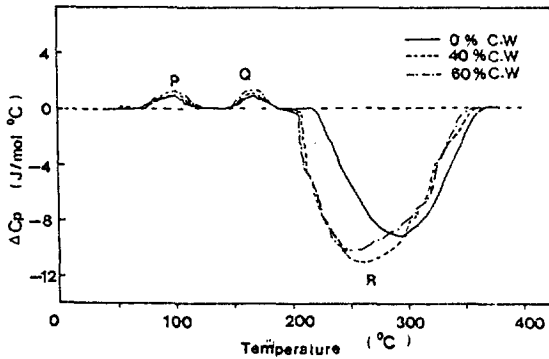


Fig.2. The effect of cold working on the enthalpy change in T_8 and T_8 tempers at quenched condition.

흡열반응으로 peak 온도는 가공도가 증가함에 따라 약간 고온쪽으로 이동하고 있지만 엔탈피는 거의 일정함을 알 수 있다. 또한 약 170°C 부근에서 나타난 반응 Q는 퀀칭상태에서 미세하게 존재하는 δ' 의 재고용에 의해 생긴 흡열반응이며, 가공도가 증가함에 따라 엔탈피가 커짐을 알 수 있다. 반응 Q는 시료를 540°C에서 0°C 물에 급냉시킨 용체화처리 상태에서도 미세한 δ' 이 존재하고, 이것이 170°C 부근에서 재용해되기 때문에 생긴 것이며, 반응 P는 용체화 처리후 시효처리하거나 냉간 가공하는 사이에 자연시효되어 Z.P. zone 이 생성되고¹¹⁾ 이것이 100°C 부근에서 재용해되기 때문에 생긴 것이다.

반응 R은 이 합금의 주강화상인 T_1 상과 약간의 θ' , S'상의 핵생성에 의한 발열반응이다. 가공도가 증가함에 따라 peak 온도가 저온쪽으로 이동하며 엔탈피도 커지는 것을 알 수 있다. 이것은 가공도가 증가함에 따라 전위밀도가 증가함으로써 T_1 상의 핵생성이 촉진되어 석출량이 많아지기 때문이다. 그러나 60%의 가공도에서는 오히려 40%에 비해 엔탈피가 약간 작는데, 이것은 60% 가공의 경우 오히려 시료내에 많은 전위의 도입으로 인하여 공공농도가 급격히 감소함으로써 원자확산이 저하되어 석출량이 적어진 것으로 사료된다¹²⁾. 주강화상인 T_1 상의 핵생성에 기인된 반응 R의 시효시간과 가공도에 따른 엔탈피는 Table 2와 같다.

Fig.3은 중간가공열처리를 위해 가공된 시편의 퀀칭

Table 2. The Variation of R Reactions with Cold Working and Aging Condition in T_8 Temper.

Cold working	Reaction	AQ	UA	PA	OA
0%	Temp. range(°C)	219-365	197-370	242-369	253-372
	Peak temp. (°C)	296	299	296	297
	Enthalpy(J/g)	27.16	26.38	17.56	12.09
20%	Temp. range(°C)	215-335	191-337	225-333	228-330
	Peak temp. (°C)	250	249	248	248
	Enthalpy(J/g)	28.95	24.21	13.15	10.74
40%	Temp. range(°C)	210-319	185-317	219-315	223-320
	Peak temp. (°C)	241	240	242	241
	Enthalpy(J/g)	31.12	22.49	18.72	5.21
60%	Temp. range(°C)	206-318	193-341	230-337	231-338
	Peak temp. (°C)	242	248	248	247
	Enthalpy(J/g)	29.21	21.97	12.01	6.24

Table 3. The Variation of R Reactions with Cold Working and Aging Condition in ITMT.

Cold working	Reaction	AQ	UA	PA	OA
0%	Temp. range (°C)	219-385	217-387	248-391	259-393
	Peak temp. (°C)	295	296	298	302
	Enthalpy (J/g)	21.02	19.15	11.10	10.22
20%	Temp. range (°C)	211-381	226-381	235-390	247-395
	Peak temp. (°C)	293	287	288	289
	Enthalpy (J/g)	23.15	18.46	8.18	5.76
40%	Temp. range (°C)	210-380	226-369	230-385	238-390
	Peak temp. (°C)	272	272	271	270
	Enthalpy (J/g)	24.63	16.94	6.17	4.34
60%	Temp. range (°C)	208-373	225-361	229-380	230-390
	Peak temp. (°C)	272	271	272	271
	Enthalpy (J/g)	25.47	15.02	5.79	3.41

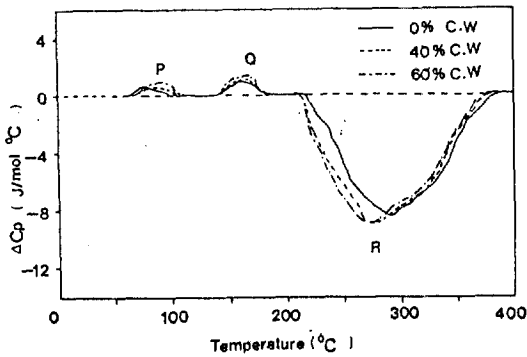


Fig. 3. The effect of cold working on the enthalpy change in ITMT at quenched condition.

상태에서의 각종 가공도에 따른 비열변화를 나타낸 것이다. T_6 나 T_8 처리와 마찬가지로 두 개의 흡열반응 P, Q와 한 개의 발열반응 R이 존재한다. 흡열반응 P는 퀴칭상태에서 존재하는 Z.P. zone의 재고용에 의해 생긴 것이며, 가공도가 증가함에 따라 peak 온도가 고온 쪽으로 약간 이동하며 엔탈피의 변화가 없었다. 한편 반응 Q는 퀴칭상태에서 존재하는 δ' 이 기지에 재용해되기 때문에 생긴 것이며, 엔탈피 및 peak 온도는 앞에서 설명한 T_6 나 T_8 의 경우와 유사하다. 반응 R은 주강화상인 T_1 상 및 S' , θ' 상의 핵생성에 기인된 것으로서 T_6 나 T_8 처리에 비해 엔탈피는 약간 작으며, 가공도가 증가함에 따라 석출량이 많아지며 석출이 시작되는 온도와

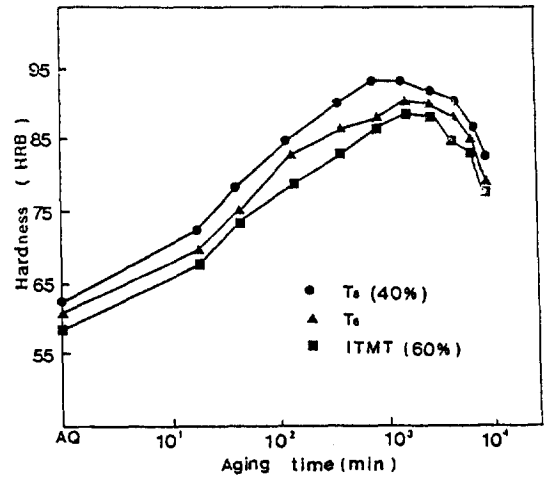


Fig. 4. Hardness change with aging time in various thermomechanical treatments.

peak 온도가 저온쪽으로 이동하는 것을 알 수 있다. 이것은 가공도가 증가함에 따라 결정립이 미세화되고 결정입계가 T_1 상의 불균일 핵생성 장소로 작용하여 핵생성을 촉진하기 때문이다¹³⁾. ITMT 처리시 주강화상인 T_1 상의 핵생성에 의한 반응 R의 가공도 및 시효시간에 따른 엔탈피 값을 Table 3에 나타냈다.

3.2. 가공열처리에 의한 기계적 성질의 변화

Fig. 4는 T_6 , T_8 (40% 냉간가공), ITMT(60% 냉간가

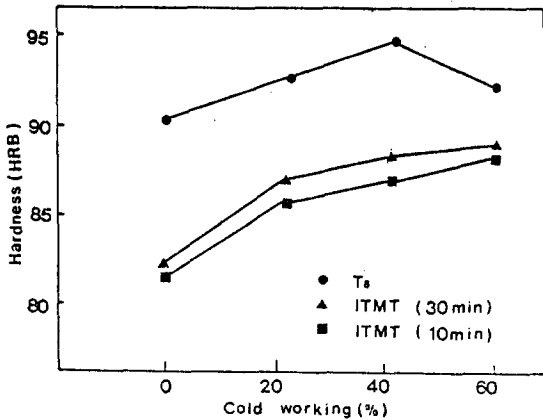


Fig. 5. Hardness change with cold working in various thermomechanical treatments at peak aged condition.

공, 30분 재결정)시편의 시효시간에 따른 경도 변화를 나타낸 것으로서 T₈ 처리가 전반적으로 가장 큰 경도값을 나타내며 ITMT의 경우가 가장 낮은 값을 보이고 있다. 이와 같이 인공시효전에 냉간가공을 한 T₈ 처리가 T₈나 ITMT의 경우보다 경도가 높은 것은 냉간가공으로 도입된 전위가 T₁상의 불균일 핵생성 장소가 되어 T₁상의 핵생성을 증가시키기 때문이다. 또한 T₈ 처리는 다른 열처리에 비해 비교적 빨리 최대경도에 이르는 것으로 보아 시효가 촉진됨을 알 수 있다. 최대경도값은 주강화상인 T₁상의 양에 거의 좌우되며 T₈의 경우 95이고 T₈ 처리시는 90으로서 2090이나 8090합금에 비해 매우 높은 값이다. 이와 같이 Weldalite 049 합금은 T₈ 상태에서 높은 경도를 나타내기 때문에 냉간 가공이 어려운 제품에 적합한 재료임을 알 수 있다.

Fig. 5는 T₈ 및 ITMT 경우의 각종 가공도에 따른 최적 시효상태에서의 경도변화를 나타낸 것이다. 먼저 ITMT 처리시 10분 재결정 한 것은 30분 재결정시킨 경우에 비해 약간 낮은 경도값을 나타내고 있는데, 이것은 10분의 재결정 처리로서는 재결정이 충분히 이루어지지 않았기 때문이다. ITMT 처리한 경우는 재결정 시간에 관계없이 가공도가 60%까지 증가함에 따라 경도는 점차 증가하고 있다. 그러나 T₈ 처리한 경우는 40% 가공도 까지는 경도가 증가하나 60% 가공도에서는 오히려 감소하고 있다. 이와 같은 현상은 전위가 가공의 sink로 작용하며 재료내에 과도한 전위가 도입되

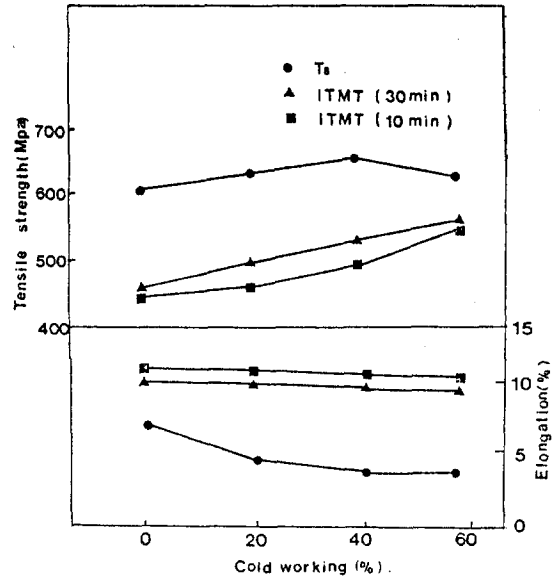


Fig. 6. Tensile strength and elongation change with cold working in various thermomechanical treatments at peak aged condition.

면 가공에 의한 석출촉진 효과가 작아지므로 석출량이 줄어들기 때문이다¹⁴⁾. 따라서 T₈ 처리의 경우 60% 이상의 냉간가공을 하는 것은 바람직하지 못하다고 사료된다.

Fig. 6은 T₈ 및 ITMT(10분, 30분 재결정)처리한 경우의 각종 가공도에 따른 인장성질의 변화를 나타낸 것이다. 경도 변화와 유사하게 ITMT의 경우는 가공도가 증가함에 따라 인장강도가 증가하나, T₈의 경우는 40% 냉간가공시 650 Mpa 정도의 가장 큰 강도를 나타내며, 60%의 가공에서는 오히려 저하하였다. 한편 연신율은 ITMT 처리시 가공도의 증가에 따라 거의 변화가 없으며 약 10% 정도로 높은 연신율을 나타내고 있는 반면, T₈ 처리는 가공도가 증가함에 따라 감소하며 3~5% 정도의 낮은 값을 나타낸다. 따라서 본 합금에서 ITMT 처리는 T₈나 T₈ 처리에 비해 인장강도가 약 20% 정도 낮아진 반면, 연신율은 2배 이상 좋아짐으로서 ITMT가 인성개선에 효과적임을 알 수 있다. 이와 같이 ITMT 처리시 인성이 개선되는 이유는 광학현미경조직에서도 볼 수 있듯이 가공도가 증가함에 따라 결정립이 미세화 됨으로서 경도나 강도는 증가하는 반면에 연신율은 거의 일정하여 인성이 개선된다고 사료된다.

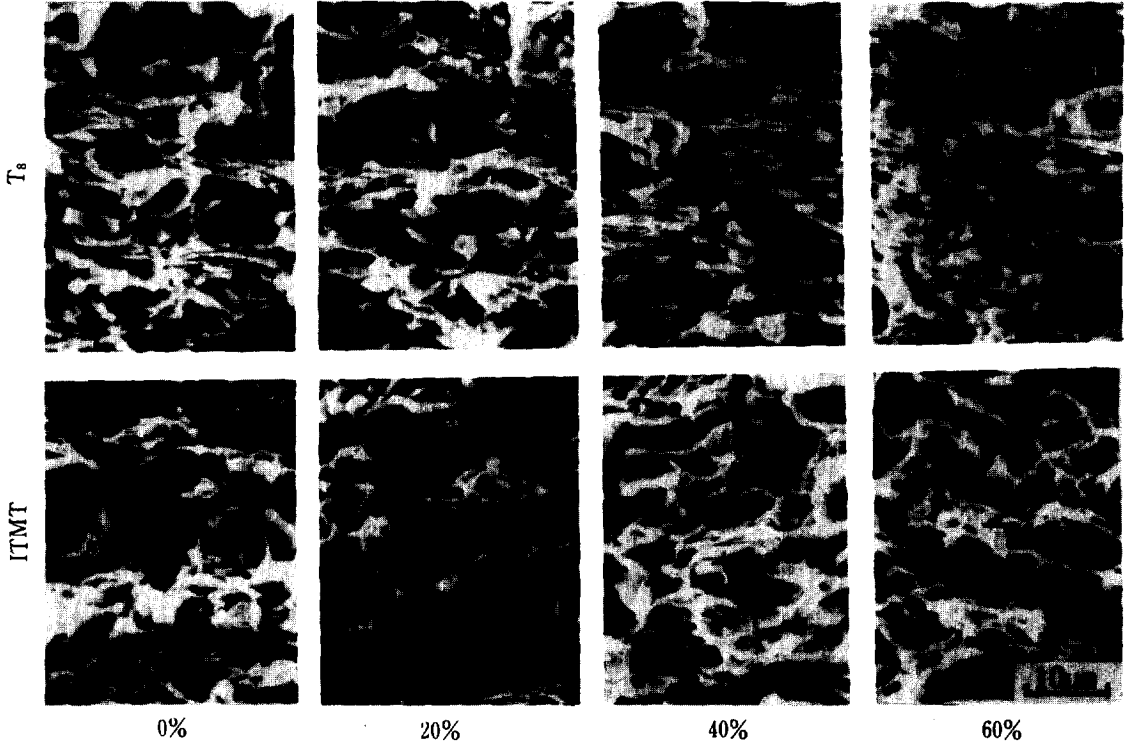


Photo 1. Optical microstructure in Intermediate Thermomechanical Treatment 30 min recrystallization.

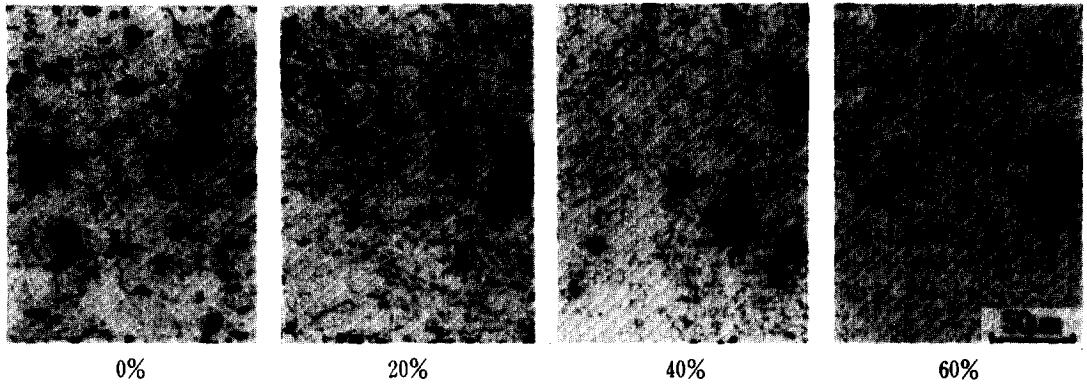


Photo 2. Scanning electron micrographs of fracture surface in various thermomechanical treatments at peak aged condition.

Photo 1은 T₈ 처리 및 ITMT 처리한 경우의 최적시 효조건에서 인장시험 후 파단면의 주사전자현미경 사진이다. T₈ 및 T₈ 처리(20%)한 경우는 약간의 dimple이 존재하는 연성 파면을 나타내고 있지만 가공도가 40%, 60%로 증가됨에 따라 균열이 입계를 따라 전파되는 입

계취성 파괴를 나타내고 있다. 그러나 ITMT 처리한 경우는 가공도가 증가함에 따라 dimple이 많아지고 그 크기는 작아지는 경향을 보이며, T₈ 처리에 비하여 전반적으로 dimple이 많은 연성파면을 나타내고 있어 인성이 향상됨을 예측할 수 있다.

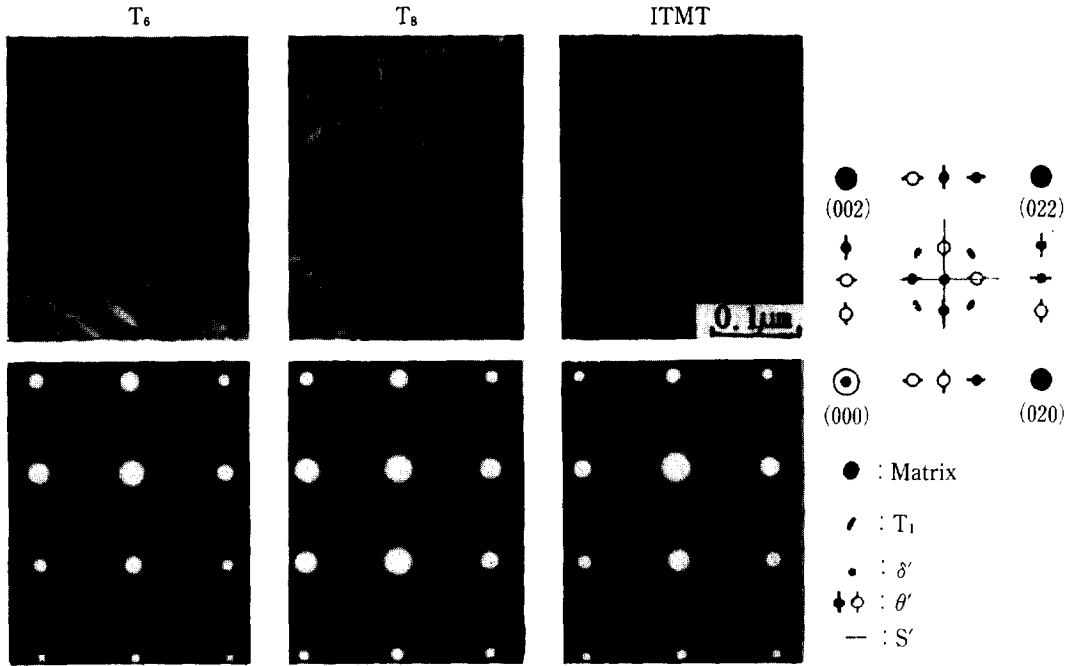


Photo 3. Transmission electron micrographs of various thermomechanical treatments at peak aged condition.

3.3. 미세조직 변화

Photo 2는 ITMT 처리한(30분 재결정) 경우의 광학 현미경조직 사진으로서 0%에서는 조대한 결정립들이 존재하며, 20% 냉간가공한 경우는 재결정이 일부 진행되고 있는 것을 볼 수 있고, 40% 가공도에서는 재결정이 많이 일어나 전반적으로 조직이 미세하지만 아직 재결정 되지 않은 큰 결정립도 존재한다. 그러나 60% 냉간가공한 경우는 완전히 재결정이 진행되어 전체적으로 미세한 결정립이 균일하게 분포되어 있어 경도나 강도가 높게 나타나며 연성이 우수한 것으로 사료된다. 이와 같이 가공도가 증가함에 따라 결정립이 미세화되는 것은 냉간가공으로 많은 전위가 도입됨으로서 재결정이 촉진되기 때문이다.

Photo 3은 T₆, T₈(40% 냉간가공), ITMT(60% 냉간가공후 30분 재결정) 처리한 경우의 투과전자현미경 사진으로서 T₆, T₈, ITMT 처리 모두 주강화상은 T₁상이며 다른 Al-Li계 합금에 비해 T₁상이 많다. T₈의 경우는 T₆에 비해 T₁상이 미세하고 균일하며 그 양도 많고 SADP에서 알 수 있듯이 θ'과 δ'도 존재한다. 이와 같이 T₈ 처리시 다량의 T₁상이 존재하는 것은 가공에 의해 도입된 전위가 T₁상의 불균일 핵생성 장소로 작용하

여 핵생성이 많이 일어났기 때문인 것으로 사료된다. 한편 ITMT 처리한 경우에는 T₆나 T₈ 처리에 비해 T₁상이 조대하고 그 양도 작았으며 전술한 비열변화, 경도 및 인장실험 결과와 잘 일치한다.

4. 결 론

고강도 Al-Cu-Li-Ag-Mg-Zr 합금의 각종 가공열처리(T₆, T₈, ITMT)에 의한 기계적 성질의 변화 및 미세조직 관찰 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 최적 시효상태에서 T₆ 및 T₈ 처리(40% 냉간가공)시 최대 인장강도는 각각 620 Mpa, 650 Mpa 이었다.
- 2) T₈ 처리시 가공도가 증가함에 따라 경도와 인장강도는 증가하나 60%의 가공도에서는 오히려 감소하였다.
- 3) 중간가공열처리시 가공도가 증가함에 따라 경도와 강도는 증가하며 연신율은 10% 정도로서 거의 일정하였다. 그리고 T₆ 처리에 비하여 강도는 약 20% 감소하지만 연신율은 약 2배 증가됨으로서 인성 향상에 효과적인 열처리 방법이다.
- 4) 최적 시효상태에서 T₆, T₈ 및 중간가공열처리시

주강화상은 T₁상이며, T₈ 처리의 경우가 T₆나 중간가공 열처리에 비하여 미세하고 균일한 T₁상이 다량 존재하였다.

「후 기」

본 연구는 1991년도 교육부 학술 연구 조성비의 지원에 의하여 수행된 것으로서 이에 깊이 감사 드리며, 아울러 시료용해에 도움을 주신 삼선공업(주) 김 울태 사장님께도 감사 드립니다.

5. 참 고 문 헌

1. W.T. Tack, F.H. Heubaum, and J.R. Pickens : *Scripta Metallurgica* 24(1990) pp.1685.
2. L.S. Kramer, F.H. Heubaum, and J.R. Pickens, in Proceedings of the Fifth International Al-Li Conference. T.H. Sanders and E.A. Starke, eds., MCE Publications Ltd., Birmingham U.K., 1989, pp.1415.
3. F.W. Gayle, F.H. Heubaum, and J.R. Pickens : *ibid* 2, pp.701.
4. A. Cho, R.F. Ashton, G.W. Steels, J.L. Kirby : *ibid* 2, pp.1377.
5. W.T. Tack and L.W. Loechel : *ibid* 2, pp.1457.
6. W.S. Miller, A.J. Cornish, A.P. Titcher and D. A. Benenett : Al-Li Alloys II, *TMS-AIME* (1984) pp.17.
7. E.A. Starke, Jr. and F.S. Lim ; *Metal Trans.* 13A, (1982) pp.2259.
8. T.H. Sanders, Jr. and E.A. Starke, Jr. : *Acta Metall.* 30(1982) pp.927.
9. F.S. Lim : *Scripta Metall.* 16(1982) pp.1295.
10. R.F. Ashton, D.S. Thompson, E.A. Starke, Jr and F.S. Lin : Al-Li Alloys II, *TME-AIME* (1984) pp. 66.
11. J.M. Papazian, C. Sigli and J.M. Sanchez : *Scripta Metallurgica* Vol.20 (1986) pp.201.
12. J.M. Papazian, G.G. Bott and P. Shaw : Al-Li Alloys IV Journal of Physique, Paris, (1987), pp. 231.
13. K.S. Kumar, S.A. Brown, and J.R. Pickens : *ibid* 2, pp.1245.
14. W.A. Cassada, G.J. Shiflet and E.A. Starke, Jr. : Al-Li Alloys IV(1987) pp.397.