

0.1% Sc이 첨가된 7X1X Al-합금의 압연과 T-6열처리에 따른 집합조직의 발달

제창용 · 진승준¹ · 정동석² · 임성택³ · 박노진¹

대구기능대학 재료과 · ¹금오공과대학교 신소재시스템공학부 · ²울산기능대학 재료과 · ³국방과학연구소

Texture Development of Cold Rolled and T-6 Treated 7X1X Al-alloy with 0.1% Sc

C. W. Jea, S. J. Jin¹, D. S. Chung², S. T. Lim³ and N.J. Park¹

Daegu Polytechnic College, 1495 Pyungri-dong, Seo-gu, Daegu 703-721, Korea

¹School of Advanced Materials and Systems Engineering, Kumoh National Institute of Technology, 188
Shinpyung-dong, Gumi, Gyungbuk 730-701, Korea

²ULSAN Polytechnic College, 81Dong-dong, Jung-gu, Ulsan 681-280, Korea

³Agency for Defence Development, P.O. Box 35-5, Yuseong-Gu, Daejeon 305-600, Korea

Abstract After extrusion, cold rolling and T-6 treatment, texture development of 7x1x Al-alloy with 0.1% Sc is studied. During extrusion the very strong <111>+weak <100> fiber texture is developed, which is influenced on the formation of rolling texture. The texture after 80% cold rolling can be described by strong {112}<111>(Cu)+{123}<634>(S) component in the cross section of the extruded rod, the strong -fiber+weak {110}<001>(Goss) components in the longitudinal section, and the strong {110}<112>(Bs)+weak {001}<100>(Cube) components in the transverse section. The components of rolling texture are remained after T-6 treatment, but the maximum density of ODF is higher. The calculated mean r-values and the planar anisotropy are relatively high, which are dependent on the texture. After T-6 treatment, recrystallized equiaxed grains with average grain size of 1~2 μm are obtained.

(Received February 27, 2004)

Key words: Texture, Al-alloy, Sc addition, recrystallization

1. 서 론

다결정재료들의 여러 가지 물리적, 화학적, 기계적 특성들은 집합조직(결정립의 선택적 배열상태)에 따라 변화될 수 있는데, 이러한 집합조직은 가공변형과 열처리 및 상변태와 같은 제조공정에 의하여 제어될 수 있다[1]. 다결정으로 이루어진 금속은 소성변형을 거치면서 무질서한 결정학적 방위분포를 나타내는 경우는 매우 드물고 주어진 변형조건에 의하여 안정한 방위로 회전하게 되며 다양한 이방성을 갖는 결정학적 우선방위를 나타낸다. 집합조직이 발달한 판재에서 항복응력은 판재면의 방향에 따라 변하게 되므로 딥드로잉과 같은 작업에서 불균일한 유동이 발생하는

문제가 있으며 재료 자체의 물성과 성형성에 중요한 영향을 미치는 대부분의 특성들이 집합조직과 관계되어 있기 때문에 집합조직의 형성 및 제어에 대한 연구는 필수적이다. 7000계열 합금 중 7050합금은 과괴인성과 용력부식균열특성의 양호한 조합을 이루는 항공기용 알루미늄 합금이며 이 합금에 소량의 스칸듐을 첨가하면 강도 증가와 고온균열에 대한 저항성 향상을 포함한 많은 합금들의 특성이 강화되는 것으로 알려져 있고 또한 결정립 크기를 현저하게 줄이고 재결정에 대한 저항을 개선시킬 수 있다고 보고되어 있다[2, 3]. 본 논문에서는 0.1% Sc이 첨가된 7x1x Al-합금의 가공변형과 열처리 과정에서 나타나는 집합조직의 발달을 연구하였고, 딥드로잉성에 대

한 집합조직의 영향을 고찰하였다.

2. 실험방법

Al-5.09%Zn-1.83%Mg-0.32%Cu-0.25%Mn-0.1%Sc(wt.%)합금을 $\phi 150$ mm빌렛으로 제조한 후 $\phi 70$ 원형의 봉재로 78%의 단면감소율까지 압출성형을 하였다. 압출 성형된 봉재를 압출방향의 수직방향(cross section: CS)과 길이방향(longitudinal section: LS), 그리고 가로방향(transverse section: TS)으로 두께 6 mm, 폭 50 mm, 길이 100 mm의 판재로 절단하였다. 이 판재들을 완전어닐링(415°C에서 3시간 유지 후 공냉)한 후, 각 방향의 시편을 상온에서 80%까지 압연을 하였고, T-6 열처리(468°C에서 45분 동안 용체화처리 → 수냉 → 상온에서 72시간 유지 → 121°C에서 24시간 유지 → 공냉)를 수행하였다.

80% 압연과 T-6처리를 하는 과정에서 발달하는 미세조직을 TEM으로 관찰하였다. 집합조직의 발달은 Co K α X-ray를 이용하여 (111), (200), (220) 회절면에서의 극점도를 측정하여 관찰하였으며, 정량적으로 분석하기 위하여 조화함수법을 이용하여 완전한 방위분포함수(ODF, orientation distribution functions)를 해석하였다.

T-6처리 후, 각 판재의 딥드로잉(deep drawing) 능력을 판단할 수 있는 소성변형률 r-값 (r -value = ϵ 폭/ ϵ 두께), 그리고 판재의 압연방향, 45°, 90° 방향에서의 소성변형률을 이용하여 계산한 평균 소성변형률 r_m -value, 평면이방성 계수 $\Delta r = 1/2(r_{0^\circ} - 2r_{45^\circ} + r_{90^\circ})$ 를 예측하여 비교하였다. 이는 계산된 ODF와 {111}<110> slip을 이용하여 완전구속 Taylor 모델의 가정 하에 계산하였다[1].

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 1은 명시야상 TEM 이미지로서 압출방향의 길이방향 시편(LS)을 상온에서 80% 압연한 후와 T-6처리된 후의 상태를 나타내고 있다. Fig. 1(a)에서 나타나듯이 압연 후의 조직에서는 결정립 및 결정입계는 전혀 관찰할 수 없으며, 냉간가공에 의해 도입된 전위 tangle 조직만 관찰되고 있다. 이와는

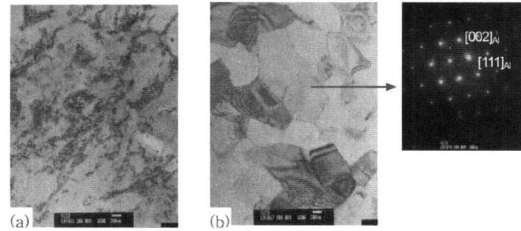


Fig. 1. TEM images and SAD pattern of (a) 80% cold rolled and (b) T-6 treated sample.

대조적으로, T-6처리된 조직은 Fig.1(b)에서와 같이 작은 결정립크기를 갖는 재결정된 조직으로 되었음을 보여주고 있다. 결정립의 크기는 평균 1~2 μm 으로 측정되었다. 이 미세한 결정립 크기는 Sc이 첨가된 Al-합금의 특징으로 미세하게 석출된 Al_3Sc 상 때문에 기인한다고 알려져 있다[3]. 또한 하나의 결정에서 회절된 제한시야 회절상(SADP: selected area diffraction pattern)은 Al의 [110] 정대축으로 파악되며, 밝은 Al의 회절점 사이에 약한 강도를 갖는 회절점이 나타나는데 이는 L1_2 규칙구조를 갖는 Al_3Sc 의 회절점으로 T-6처리 후에는 Al_3Sc 상이 석출되었음을 나타낸 것으로, 이 석출물이 Al-합금에서 더 강화된 특성에 기여하고 있다[2].

압출성형, 완전어닐링, 냉간압연과 T-6처리 후, 압출방향의 수직방향(CS)시편에서 측정된 (111) 극점도를 Fig. 2에 나타내었으며, Fig. 3에는 이를 이용하여 계산된 방위분포함수 ODF들을 보여주고 있다. 계산된 ODF 결과는 발달된 집합조직을 잘 나타내고 있는 $\phi_2=0^\circ, 45^\circ$ 와 60° 의 3개의 section에서만 나타내었다.

78%압출 성형된 봉재에서의 형성된 집합조직은 압출성형방향으로 아주 강한 <111>+약한 <100> 이중 섬유집합조직(double fiber texture)을 구성하고 있는데, 이는 매우 많은 결정립들이 압출방향과 평행한 방향으로 그 결정립의 <111>방향으로 정렬되어 있음을 뜻한다. 이 강한 섬유집합조직은 415°C에서 3시간 유지하는 완전어닐링 열처리 후에도 변화하지 않고 그대로 유지되고 있음을 Fig. 3(b)에서 볼 수 있다. 하지만 상온에서 80% 압연한 후에는 완전히 다른 집합조직으로 변화하고 있음을 Fig. 3(c)에서 볼 수 있다. 이 압연집합조직은 Cu-성분으

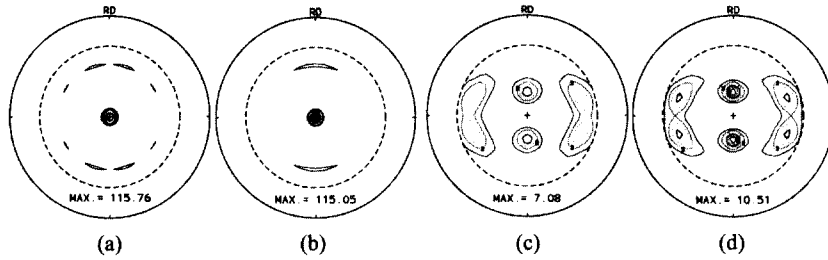


Fig. 2. (111) measured pole figures of the cross section (CS) sample after (a) 78% extrusion, (b) full annealing, (c) 80% cold rolling and (d) T-6 treatment.

로 표기되는 $\{112\}\langle 111 \rangle$ 성분($\phi_2 = 45^\circ$ 에서 보임)과 S-성분으로 표기되는 $\{123\}\langle 634 \rangle$ 성분($\phi_2 = 60^\circ$ 에서 보임)으로 구성되어 있는 집합조직으로, Cu-성분의 강도가 S-성분보다 약간 더 높은 강도를 보이고 있다. Cu-성분으로 표기되는 $\{112\}\langle 111 \rangle$ 성분은 압연면과 결정립의 $\{112\}$ 면과 평행하고, 압연 방향이 결정립의 $\langle 111 \rangle$ 방향과 평행하게 놓여 있는 결정립의 방위를 나타낸다. 즉 냉간압연을 통하여 이러한 결정립의 분률이 많아 졌음을 뜻한다. T-6처리 후에는 이러한 압연집합조직의 성분은 그대로 유지하면서 ODF의 최대강도는 전보다는 2배 이상 더 높아졌다. 이는 재결정되면서 새로운 방위를 갖는 결

정립이 생성된 것이 아니고 기존의 방위를 갖는 결정립들이 더 강하게 정렬되고 있음을 보여주고 있는 결과이다. 이는 재결정이 새로운 방위를 갖는 새로운 결정립이 생성되는 것이라 하는 기존의 재결정개념과는 다른 결과로 향후 더 많은 연구가 필요하다고 생각된다.

Fig. 4와 5는 압출방향의 길이방향(LS), 그리고 가로방향(TS)으로 절단하여 각각 80% 압연하고, T-6 열처리한 후 측정된 집합조직을 나타내었다. 압출 성형된 봉의 LS시편에서 80%압연 후 발달한 집합조직은 강한 β -fiber와 약한 $\{110\}\langle 001 \rangle$ (Goss)성분에 의해 묘사될 수 있다. Goss 성분은 $\{\phi_1, \phi_2\}$

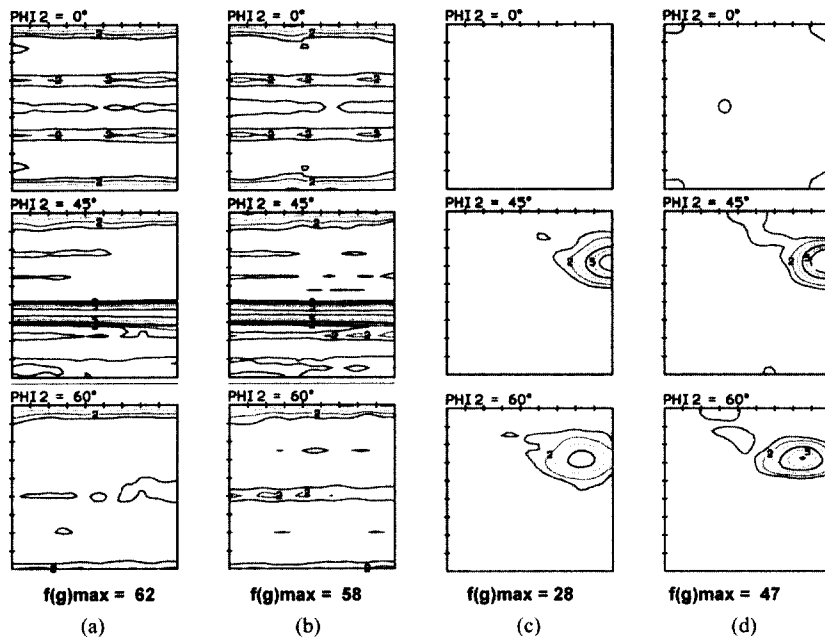


Fig. 3. Evolution of textures during the processes in cross section (CS) sample after (a) 78% extrusion, (b) full annealing, (c) 80% cold rolling and (d) T-6 treatment.

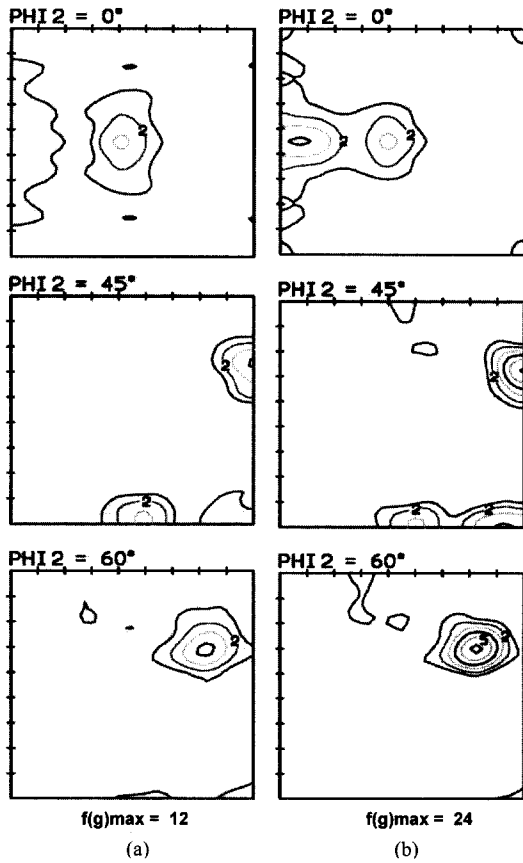


Fig. 4. ODF of the longitudinal section (LS) sample after (a) 80% cold rolling and (b) T-6 treatment.

ϕ_2) = {0, 45, 0°} 또는 {90, 90, 45°}에 나타나는 성분이며, β -fiber는 FCC 결정구조를 갖는 금속재료의 냉간압연시 대표적으로 나타나는 집합조직으로 Bs-성분으로 표기되는 {110}<112> 성분과 {112}<111>(Cu) 그리고 {123}<634>(S) 성분으로 구성되어 있다. Bs-성분은 $\{\phi_1, \Phi, \phi_2\} = \{35, 45, 0^\circ\}$ 혹은 $\{55, 90, 45^\circ\}$ 에 나타나고 있다. Fig. 4(b)에 나타낸 T-6처리 후의 집합조직은 압연집합조직의 성분들이 그대로 남아있지만 ODF의 강도는 더 증가했음을 보여주고 있다. 특히 Goss성분의 강도의 증가는 다른 성분보다 우세하게 나타나고 있다. Fig. 5(a)에서 보여주는 압출 성형된 봉의 TS시편에서 80%압연 후 집합조직은 매우 강한 {110}<112> Bs-성분과 약한 {100}<001> Cube-성분으로 나타낼 수 있다. 이는 전자의 두 집합조직과는 또 다른

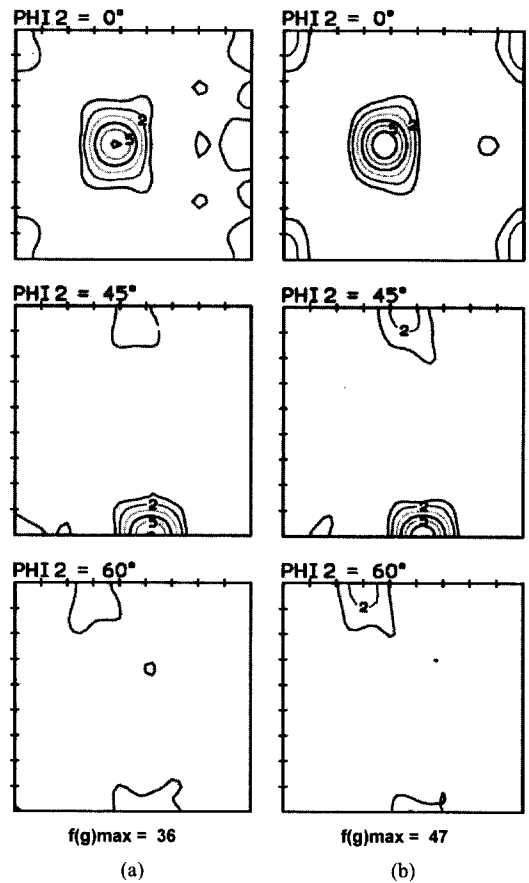


Fig. 5. ODF of the transverse section (TS) sample after (a) 80% cold rolling and (b) T-6 treatment.

형태의 집합조직이다. 이 집합조직도 T-6처리 후에는 강도가 강해지며 성분은 그대로 유지하고 있음을 보여주고 있다.

Fig. 3, 4, 5에서 보여주는 결과는, 같은 재료에서도 시편의 가공방향에 따라 매우 상이한 집합조직이 발달하고 있음을 보여주는 결과로 이를 이용하면 재료의 특성을 극대화시킬 수 있는 방안을 도출할 수 있으리라 생각된다. 이의 확인을 위하여 측정된 집합조직과 완전구속 Taylor 모델의 가정 하에 계산된 소성변형률 r-값들을 Fig. 6에 나타내었다. 그림의 X-축은 판재의 압연방향으로부터의 회전각이다.

Fig.3과 같은 집합조직을 나타내는 압출방향의 수직방향(CS)시편의 경우, 압연방향에서의 소성변형률 r-값은 약 0.7의 값을 나타내고 있으며 압연방향에서 45° 회전된 방향에서 약 2.5 그리고 횡방향(압연방향

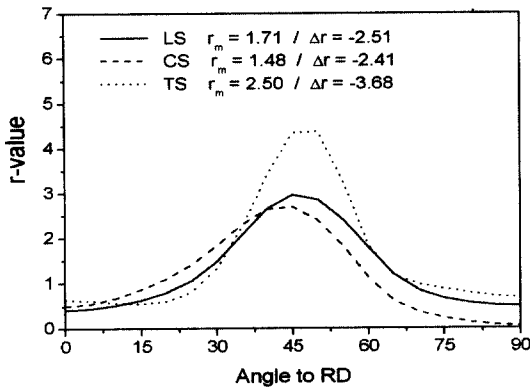


Fig. 6. Calculated r-values (the plastic strain ratio, $r\text{-value} = \epsilon_{width} / \epsilon_{thickness}$) with measured textures as a function of angle to the rolling direction, r_m : mean value (the normal anisotropy), Δr : the planar anisotropy $\Delta r = 1/2(r_{0^\circ} - 2r_{45^\circ} + r_{90^\circ})$.

에서 90° 회전된 방향)에서 거의 0의 값을 보여주고 있다. 이에 따라 평균 r-값 r_m 은 1.48이며, 평면이방성 계수 Δr 은 -2.15이다. 이는, 이 시편은 비교적 좋은 딥드로잉성을 가지며 원통형으로 드로잉시 압연 방향의 45°, 135°, 225°, 315°에서 이어링의 발생이 예상되는 결과이다. 또한 압출방향의 길이방향(LS)시편의 경우(Fig. 4의 집합조직), 평균 r-값 r_m 은 1.71이고 평면이방성 계수 Δr 은 -2.51을 나타내고 있는데, CS시편에서의 값들보다 높음을 보여주고 있다. 이는 집합조직의 Goss와 Bs-성분의 높은 강도에 기인한 것으로, 특히 Goss성분은 압연방향의 90°(횡방향)에서의 높은 r-값을 갖게 하는 성분이다. 압출방향의 가로방향(TS)시편에서는 계산된 평균 r-값 r_m 은 2.5이고, 평면 이방성 계수 Δr 은 -3.68인데 그것은 CS와 LS시편들에서의 값보다 높은 값으로, 가장 좋은 딥드로잉성을 나타낼 것으로 판단된다. 이는 집합조직의 강한 Bs-성분은 압연방향에서 45~50°에서의 r-값을, Cube-성분은 압연방향과 횡방향에서의 r-값을 증가시켜 나타난 결과이다.

본 연구를 통하여 압연된 집합조직은 시편의 방향에 따라 즉, 초기집합조직에 따라 다르게 발달되었음을 확인하였다. 그리고 형성된 집합조직은 aK드로잉성에 중요하게 작용했음을 r-값의 계산을 통해 확인하였다. 평균 r-값들은 1.7과 2.5사이인데 그것은 Al-합금으로써는 매우 높은 값들이며, 이러한 집합조

직을 갖는 판재를 딥드로잉하면 압연방향의 45°, 135°, 225°와 315°에서 이어링의 발생이 예상된다. 압연 후 T-6처리는 미세조직을 아주 작은 결정립 크기로 재결정되게 하였으나, 집합조직의 변화에는 큰 영향을 주지 않았다. 이는 일반적인 Al-합금의 재결정현상과는 다른 결과로서, 향후 더 많은 연구가 이 현상의 설명을 위해 필요하다고 생각된다.

4. 결 론

0.1% Sc이 첨가된 7x1x Al-합금의 가공과 열처리에 따른 집합조직 발달에 대한 연구를 통하여 얻어진 결과는 다음과 같다.

1. T-6처리 후에 1~2 μm 크기의 결정립 크기를 갖는 미세조직이 얻어졌다.
2. 78%압출성형 봉재에서의 집합조직은 아주 강한 $\langle 111 \rangle$ + 약한 $\langle 100 \rangle$ 이중 섬유집합조직이 형성되었으며, 완전어닐링 후에도 변형섬유집합조직의 변화는 없었다.
3. 상온에서 80%압연 후 형성된 집합조직은 압출 방향의 수직방향(CS)에서는 강한 $\{112\} \langle 111 \rangle$ (Cu-성분) + $\{123\} \langle 634 \rangle$ (S-성분)으로, 길이방향(LS)에서는 강한 β -fiber + 약한 $\{110\} \langle 001 \rangle$ (Goss-성분)으로, 가로방향(TS)시편에서는 강한 $\{110\} \langle 112 \rangle$ (Bs-성분) + 약한 $\{100\} \langle 001 \rangle$ (cube-성분)으로 설명될 수 있다.
4. T-6처리 후의 집합조직은 압연집합조직의 성분을 그대로 유지하였으며 최대강도는 T-6처리 전보다 2배 이상 높아졌다.
5. 계산된 평균 r-값 r_m 과 평면이방성 계수 Δr 은 비교적 높음을 보여주고 있으며, 그 값은 집합조직에 따라 다르게 나타남을 확인하였다.

참고문헌

1. H. J. Bunge : *Texture Analysis in Materials Science*, Butterworths Pub., London (1982) p.42-118.
2. E. A. Marquis and D. N. Seidman : *Acta mater.*, **49** (2001) p.1909-1919.
3. L. S. Toporova, D. G. Eskin, M.L. Kharakterova and T. B. Dobatkina : *Advanced Aluminum Alloys Containing Scandium*, Gordon (1998) p.237-315.