

7175Al 대형 단조재의 미세조직과 파괴인성

이오연 · 장성환

전북대학교 신소재공학부, 공업기술연구소

Microstructure and Fracture Toughness of 7175Al Heavy Forgings

O. Y. Lee and S. H. Jang

Division of Advanced Materials Engineering & RIIT,
Chonbuk National University, Chonju 561-756

Abstract The 7175Al alloy is particularly interesting for its high strength and sufficient ductility, fracture toughness and corrosion resistance. Currently vigorous efforts have been made to develop large rockets usable for various purposes in the space. This has created the demand of big size of 7175Al billet which would be applied to heavy forgings. The aim of this study is to investigate the quality level of big billet and the effect of billet size on the mechanical properties of large 7175Al ring roll forgings. The billets range from 370 mm to 720 mm in diameter were homogenized and forged after direct chill casting. The size and volume fraction of second phase particles in $\Phi 720$ mm billet are larger than those of $\Phi 370$ mm billet, and its ductility is lower for the condition of homogenization and T6 treatment. The Cu-rich phases formed in interdendritic sites are considered to provide the preferential crack path during cold upsetting. The fracture toughness of ring roll forgings which are made by $\Phi 370$ mm billet is higher than those of $\Phi 720$ mm billet.

(Received January 31, 2001)

Key words: 7175Al alloy, Second phase particles, Ring roll forgings, Fracture toughness

1. 서 론

최근 항공기용 구조부품의 경량화에 대한 요구가 점차 증대함에 따라 비강도가 큰 7XXX계열의 알루미늄 합금에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.[1,2] 7175Al 합금은 7075Al합금보다 Fe 및 Si등의 불순물 함량을 감소시키고, T74와 같은 과시효 열처리(7175-T74)를 함으로써 고강도를 유지하면서 SCC저항성, 파괴인성 및 피로특성을 향상시킨 재질이다.[3] 그러나 7175-T74합금의 제조공정기술, 특히 건전한 빌렛트의 주조, 가공 및 열처리기술은 일반적인 상용 제조공정과 다르고 표준화된 제조공정기술이 공개되어 있지 않아서 기계적 성질이 우수한 7175Al 합금 개발에 많은 어려움을 겪고 있다.

현재 국내의 방위산업용 부품이나, 운송기기, 기계부품, 건축구조물 등의 경량화 추세에 따라 고강도 알루미늄 합금의 적용범위가 확대되고 있으며, 그 크기도 대형화됨에 따라 제품크기에 적합한 대형 빌렛트 및 슬라브 수요가 점차 증가하고 있다. 선진국에서는 직경 500~800 mm 크기의 대형 빌렛트를 제조하기 위한 주조기

술, 단조 및 정밀열처리 등 제조회사마다 특허나 기술적 know how를 갖고 대형 단조품을 생산하고 있다. 특히 러시아의 VILS社, VIAM社 그리고 일본경금속, 미쓰비시 등은 대형 단조/팅틀업체로서 대형빌렛의 주조 기술 뿐만아니라 단조관련 제조공정 기술분야에까지 기술적 know how를 갖고 있는 회사로 알려져 있다. 그러나 7175Al 신합금 개발을 위한 국내의 연구실적과 제조기술 수준은 선진국에 비하여 매우 저조한 상태이며, 직경 370 mm이하의 주조빌렛트 제조기술을 확보하고 있는 실정이다.

추진복합기술 체계에서 알루미늄 단조부품은 두께 100 mm, 외경 1800 mm의 대형 제품이 요구되므로 다양한 크기를 갖는 대형 빌렛트의 개발이 필수적이다. 그러나 빌렛트 크기가 증가함에 따라 주조조직의 불균일 가능성이 증가되며, 입계에 Fe, Cu등을 다량 함유한 취약한 2차상입자의 양적 증가, cell의 조대화, 기공발생 및 옹고시 내부응력 증가에 의한 균열발생등[4,5] 많은 문제점이 예측되므로 건전한 대형 주조빌렛트 제조를 위한 제조공정기술 개발이 필요하다.

또한 이러한 대형 주조빌렛트는 압출할 수 없기 때문에 단면적을 감소시키기 위해 cogging공정을 거치는데 이 단계에서 빌렛트 내부에 미세균열이 발생되고 있을 뿐 아니라 링롤단조시 심한 이방성이 나타나고 있다. 따라서 7XXX계 대형 단조품의 국산화 개발을 위해서는 건전한 빌렛트의 주조기술 뿐만 아니라 자유단조와 형단조등 관련기술 개발 및 대형 단조재에 대하여 공정별로 종합적인 품질 및 물성평가가 이루어져야 한다. 따라서 본 연구에서는 기계적 성질이 우수한 대형 단조품 개발을 위한 기초적 연구로서 direct chill 주조법으로 제조한 대형 7175Al 빌렛트의 크기에 따른 미세조직 변화를 고찰하고 링롤단조재의 파괴인성을 평가하였다.

2. 실험방법

2.1. 시편 및 열처리

용해는 (주)두레어메탈의 8톤 반사로에서 99.9%Al 잉고트를 사용하여 7175Al 규격에 맞도록 합금성분을 첨가하여 용해한 후 반연속주조하여 $\Phi 370$ mm와 $\Phi 720$ mm의 빌렛트를 제조하였다. 시편의 화학성분은 표1과 같다. 이들 빌렛트는 460°C에서 24시간 동안 균질화처리하였다. $\Phi 720$ mm 주조빌렛트는 단면적을 감소시키기 위해 420°C에서 21시간 가열한 후 유압프레스에서 $\Phi 420$ mm까지 단계적으로 cogging하였다. 링롤단조는 균질화처리된 $\Phi 370$ mm 주조빌렛트와 $\Phi 420$ mm로 cogging한 중간단조재를 일정한 길이로 절단한 후 blanking과 링단조공정을 거쳐 링롤단조하였다. 최종 링롤단조부품은 510°C에서 용체화처리한 후 T74처리 (107°C에서 7시간 시효후 177°C에서 6시간 시효처리) 하였다.

2.2. 조직 관찰

광학현미경조직은 시편을 정연마한 후 dilute keller시약으로 부식하여 관찰하였다. 파괴인성시험후 파단면 관찰과 2차상입자의 분석은 SEM/EDS를 이용하였다.

2.3. 기계적성질 측정

인장시험은 시험편을 ASTM E8 규격으로 제작한 다음 2 mm/min의 인장속도로 실시하여 항복강도, 인장강

도 및 연신율을 구하였다. 평면변형과괴인성(K_{IC})은 L, LT, ST방향의 표준 CT시편을 제작한 후 컴퓨터 제어 방식의 유압만능시험기(Instron社)를 사용하여 ASTM E-399 규정에 따라 시험하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 미세조직

7XXX계 대형 알루미늄합금 빌렛트를 direct chill주조법으로 제조할 때 빌렛트의 응고속도는 빠르기 때문에 비평형응고를 하게 되며, 이로 인하여 cell내에 핵편석 현상이 나타난다. 더욱이 가장 늦게 응고되는 cell경계는 비평형상의 저융점 공정화합물이나 제 2상입자들이 농축되며, 이러한 현상은 빌렛트 직경이 커질수록 증가되어 후속공정인 열간단조시 균열을 초래할 수 있다.[6] 대형 주조빌렛트의 균질화처리는 주조시 발생하는 열응력의 완화, 용질원자의 편석 및 저융점 화합물을 감소시켜 가공성을 향상시킬 수 있기 때문에 반드시 필요한 공정이다. 이때 가열속도는 저융점 공정화합물을 기지내에 재고용시키고 재용해를 방지하기 위하여 서서히 가열해야 한다.

Fig. 1은 주조후 빌렛트를 300°C로 예열된 균질화처

Table 1. Chemical composition of 7175Al alloy (wt. %)

Si	Fe	Cu	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
0.012	0.151	1.60	2.77	0.242	5.65	0.036	bal.

Fig. 1. Microstructure of 7175Al alloy cast billet homogenized at 460°C for 24 hrs. (a) $\Phi 370$ mm billet (b) $\Phi 720$ mm billet

리로에 장입하여 3시간 유지한 다음 서열하여 460°C에서 24시간 균질화처리한 7175Al 빌렛트의 미세조직을 나타낸 것이다. cell경계에 공정화합물이나 2차상입자가 다량 존재하였으며, $\Phi 720$ mm 빌렛트가 $\Phi 370$ mm 빌렛트에 비하여 이들 2차상입자도 크고 양도 많았다. 이러한 2차상입자의 양을 감소시키기 위해서는 낮은 조성을 갖는 모합금을 사용하고 고온주조 및 결정화속도를 증가시키는 것이 바람직한 것으로 알려져있다. 또한 $\Phi 370$ mm 빌렛트의 cell크기는 50~100 μm 정도이지만, $\Phi 720$ mm 빌렛트는 100~180 μm 으로서 $\Phi 370$ mm 빌렛트의 경우보다 평균적으로 대략 1.5~2배정도 크게 나타났다. 7XXX계 Al합금에서 2차상입자의 존재는 파괴인성과 피로특성을 저하시키는 요인으로 작용하므로 대형 단조품을 제조할 때는 압출 및 단조공정에서 깨어져 지지대에 미세하게 분산되도록 변형량을 충분히 부여해야 하며 동시에 열처리공정에서 가용성의 2차상입자들이 재고용되도록 해야한다.

Fig. 2는 Fig. 1(a), (b)의 조직을 상분석기로 분석한 것으로서 2차상입자의 양과 크기 및 면적분율을 나타낸

것이다. $\Phi 720$ mm와 $\Phi 370$ mm 빌렛트의 2차상입자의 양은 각각 1.43%, 0.52%로서 대형 빌렛트가 약 3배 정도 많았고, 그 크기도 훨씬 크게 나타났다. 이것은 빌렛트의 직경이 클수록 재료 내외부의 응고속도의 차이가 심하고 냉각속도가 느리기 때문에 cell크기가 조대화되며 특히 늦게 응고되는 cell입제에는 Fe, Cu등의 편석이 증가되는데 기인한다고 생각된다.

Fig. 3과 Table 2는 균질화처리한 $\Phi 720$ mm 빌렛트

Fig. 3. SEM micrographs of 2nd phase particles in $\Phi 720$ mm cast billet.

Table 2. SEM/EDS analysis of 2nd phase particles in $\Phi 720$ mm billet

Fig. 2. The area fraction of second phase particles in 7175 Al cast billet. (a) $\Phi 370$ mm cast billet (b) $\Phi 720$ mm cast billet

의 cell경계에 존재하는 2차상입자를 SEM/EDS로 정량 분석한 결과를 보여주고 있다. 분석결과 상용7XXX계 Al합금에서 주로 불순물로 포함되어 있는 Fe, Si등의 원소와 강화원소인 Cu, Mg등이 용고과정중 Al과 결합하여 형성되는 Al_7Cu_2Fe , $(Fe,Cu)Al_6$, Mg_2Si 등이 다량 검출되고 있음을 알 수 있다. Fig. 3(a)에서 point 3으로 표시된 부분은 길이 10 μm , 폭 3 μm 크기의 2차상입자로서 주로 Cu, Mg, Cr등이 다량 검출되고 있다. 또한 Fig. 3(c)의 point 4는 Cu-rich 상으로서 cell경계에 타원형 형태로 다량 정출되어 있으며, point 5의 검출 나타난 부분은 musy zone에서 생성되는 Mg_2Si 라고 생각된다. 그리고 point 6은 30~40 μm 크기의 공정화합물로서 $(Fe, Cu)Al_6$ 라고 판단된다.[7] 이와같이 불균일하게 분포하고 있는 조대한 2차상입자들은 취약하기 때문에

cogging 공정에서 응력집중부로 작용하여 균열발생의 원인이 될 수 있을 뿐아니라 시효특성에도 영향을 미쳐서 합금의 강도저하를 초래할 수 있다[8].

Fig. 4와 Table 3은 균질화처리 상태의 대형 빌렛트에서 $\Phi 40 \times 80$ mm로 가공한 시편을 $\epsilon=0.8$ 까지 냉간 업셋팅한 시편에 나타난 균열발생 장소와 균열경로에 대한 SEM/EDS분석을 행한 것이다. Fig. 4에서 화살표로 표시한 균열은 취약한 2차상입자들 주변에서 발생하며 cell경계를 따라 진전되고 있음을 알 수 있다. 그런데 대부분의 균열발생장소는 $FeAl_3$, $(Fe, Cu)Al_6$, Cr_2Al_7 , $(Mg, Cu)Zn_2$ 등 2차상입자들이 존재하는 부분에서 발생하고 있고 이들 2차상입자를 따라 균열이 진전되고 있는 것이 확인되었다. 특히 균열진전경로의 주변에는 SEM/EDS분석 결과 Cu-rich 상이 다량 검출되고 있는데, 응고시 이러한 Cu-rich 상의 생성거동에 대해서는 향후 연구가 진행되어야 할 것이다.

한편 이들 업셋팅시편을 육안적으로 관찰하여 보면 $\epsilon=0.6$ 까지는 외관상의 균열이 발견되지 않았으나 $\epsilon=0.8$ 에서는 최대전단응력방향으로 전단균열이 다수 발견되었다.

3.2. 인장성질

Table 4와 Table 5는 각각 7175Al 합금 대형빌렛트를 균질화처리 및 T6처리한 시편의 인장시험 결과를 나타낸 것이다. 균질화처리한 상태에서 인장강도와 항복강도는 $\Phi 720$ mm 빌렛트가 $\Phi 370$ mm 빌렛트보다 약간 증가하는 경향을 보이지만 연신율은 16.7%에서 10.6%로 현저히 감소하였다. 대형빌렛트에서 이러한 연신율의 감소 현상은 2차상입자의 양적증가와 밀접한 관련이 있을 것으로 생각된다.

또한 대형 주조빌렛트를 단조비 3.2이상으로 cogging한 후 T6처리한 상태의 인장강도는 570.7 Mpa로서 규격치보다 높은 값을 보였다. 한편 $\Phi 720$ mm 빌렛트에서 단조비(S)가 1.47에서 3.38로 증가함에따라 연신율이 3.4%에서 9.8%로 현저하게 향상되었다. 그리고 Φ

Fig. 4. SEM/EDS analysis of 2nd phase particles in crack site of cold upset specimen.

Table 3. SEM/EDS analysis of 2nd phase particles in cold upset specimen

Table 4. Result of tensile test after homogenization treatment

Billet size	$\Phi 370$ mm billet	$\Phi 550$ mm billet	$\Phi 720$ mm billet
TS(Mpa)	224.6	241.2	239.3
YS(Mpa)	92.2	110.8	110.8
EL.(%)	16.7	13.9	10.6

Table 5. Result of tensile test after T6 treatment

Billet size	spec.	Φ370 mm billet → Φ200 mm cogging	Φ370 mm billet → Φ200 mm extrusion	Φ720 mm billet → Φ560 mm cogging	Φ720 mm billet → Φ460 mm cogging	Φ720 mm billet → Φ360 mm cogging
TS(Mpa)	530.5 ↑	570.7	593.3	543.3	535.4	584.4
YS(Mpa)	455.0 ↑	505.0	527.6	495.2	473.6	514.8
EL.(%)	8.0 ↑	10.3	14.4	3.4	5.7	9.8
S(단조비)	-	3.24	3.24	1.47	2.19	3.38

370 mm 빌렛를 Φ200 mm로 압출한 경우가 cogging 한 경우에 비하여 강도 및 연신율이 매우 우수하였다. 따라서 같은 양의 소성변형을 받았다고 해도 가공방법에 따라 재료의 기계적 성질이 상당히 달라짐을 알 수 있다.

3.3. 평면변형파괴인성

7XXX계 Al합금의 파괴인성은 불순물 및 합금의 미세 구조에 큰 영향을 받는다[9]. 불순물원소인 Fe 및 Si 등은 주조 및 용고과정에서 Al 및 다른 합금원소들과 결합하여 Al₇Cu₂Fe, Mg₂Si, (Mg, Cu)Zn₂ 등의 조대한 2차상입자를 형성하게 되는데 주조상태에서는 대부분 cell경계에 존재한다. 이들 입자들은 균질화처리와 가공 과정에서 일부 고용되기도 하지만 가공방향으로 변형되어 방향성을 갖게 되며 이에 수직인 방향의 응력을 받을 때 인성저하의 요인으로 작용한다. 또한 2차상입자는 상당히 취약하여 비교적 낮은 응력을 받아도 쉽게 파단되는 등 균열발생장소가 되는 불른이고 균열전파의 경로로 작용한다. 따라서 이들 2차상입자의 존재는 Al 합금 단조재의 파괴인성을 저하시키는 원인이 된다[10].

링형상의 단조품은 주조빌렛를 일정한 길이로 절단한 다음 blanking과 링단조 공정을 거쳐 2~3회의 링롤단조하여 제조한다. Fig. 5는 링롤 단조품의 평면변형 파괴인성을 나타낸 것으로서 L방향이 가장 높고 ST, LT 방향 순서로 낮게 나타났다. Φ720 mm 빌렛를 사용하여 제조한 단조품은 Φ370 mm 빌렛로 제조한 것보다 단조비 3.4정도의 추가 cogging공정을 도입하여 제조하였음에도 불구하고 파괴인성값은 모든 방향에서 낮은 값을 보였다. 즉 L방향의 파괴인성값은 35.3Mpa·m^{1/2}로서 Φ370 mm 빌렛로 제조한 것보다 16.8% 감소하였고 LT 및 ST방향에서는 각각 5%, 2.8%로 저하되었다. 이와 같이 Φ720 mm 빌렛의 파괴인성이 낮은 이유는 다음과 같이 생각할 수 있다. 첫째, Fig. 2에서 볼 수 있듯이 고강도 7175Al합금의 파괴인성에

Fig. 5. Diagram showing the fracture toughness of ring roll forgings.

지대한 영향을 미치는 조대한 2차상입자의 양이 많고 둘째, 단조비(S=3.4)는 2차상입자가 깨어져 입내에 미세하게 분산되기에는 불충분한 가공량이며 셋째, 결정립은 가공방향으로 길게 연신된 미세결정 조직을 유지하고 있지만 Φ370 mm 빌렛의 조직에 비하여 재결정 진행정도가 심한것도 하나의 요인이 될 것이다. 따라서 cogging재에 대해서는 cogging 공정조건과 열처리온도를 재검토할 필요가 있다. 상기 3가지 인자중 파괴인성 저하의 결정적인 요인은 앞에서 지적한 바와 같이 2차상입자가 많기 때문이라고 생각된다.

Fig. 6은 Φ370 mm 빌렛과 Φ720 mm 빌렛로 제조한 링롤단조품의 미세조직으로서 가공방향으로 길게 연신된 미세결정 조직을 보여주고 있다. 그런데 Φ720 mm 빌렛로 제조한 링롤단조 시편은 Φ370 mm 빌렛보다 조대한 2차상입자들의 면적분율이 훨씬 많고, 연신된 결정입계 및 입내에도 상당한 재결정이 진행되고 있음을 알 수 있다. Staley[11]에 의하면 7XXX계 Al 합금에서 완전한 재결정이 이루어지면 전위가 소멸되므로 소성변형시 조대한 슬립밴드를 형성하여 입계파괴를

조장하기 때문에 파괴인성을 저하시킨다고 보고하였다. 7XXX계 고강도 알루미늄합금의 파괴인성은 합금조성, 미세조직, 입계 및 입내의 석출상태에 크게 의존하는데 재결정조직보다 미세결정의 연신된 조직이 우수하며, 조대한 등축정보다는 미세한 결정립을 가질 때 높은 파괴인성을 나타낸다.

Fig. 7은 $\Phi 370$ mm와 $\Phi 720$ mm 빌렛으로 제조한 링롤단조품을 각 방향별로 파괴인성시험한 후 파단면을 주사전자현미경으로 관찰한 것이다. $\Phi 370$ mm 빌렛으로 제조한 링롤단조시편은 $\Phi 720$ mm 빌렛으로 제조한 시

편보다 미세한 2차상입자와 관련된 크고 깊은 덩플이 파괴과정을 지배하는 연성파괴 거동을 보이지만, $\Phi 720$ mm 빌렛으로 제조된 링단조품은 L방향을 제외하고 대부분 입계파괴 양상이 관찰되고 있어 $\Phi 370$ mm의 링단조품보다 파괴인성이 낮았던 것과 부합되고 있다.

4. 결 론

본 연구는 대형 7175Al 빌렛의 크기에 따른 미세조직 변화를 고찰하고 링롤단조재의 파괴인성 실험을

통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) $\Phi 720$ mm 빌렛트는 $\Phi 370$ mm 빌렛트에 비하여 제 2상입자의 크기와 부피분율이 크고 균질화처리 및 T6상태의 연성도 낮았다.

2) 냉간업세팅시 균열발생은 cell경계에 존재하는 Cu-rich 상에서 시작되어 cell경계를 따라 균열이 진전하였다.

3) 링를 단조품의 파괴인성은 $\Phi 720$ mm 빌렛트로 제조된 링단조품이 $\Phi 370$ mm 빌렛트로 제조된 링단조품보다 낮게 나타났다.

참고문헌

1. Sung Gyu Pyo, Jae Jeong Kim and Nack J. Kim: J. Kor.

Inst. Met. & Mater. 37 (1999) 904.

2. E. W. Lee, T. R. Mcnelley and A. F. Stengel: Metall. Trans., 17A (1986) 1043.

3. M. V. Hyatt: Metal Progress, 9 (1977) 56.

4. K. Higashi, Y. Hirai and T. Ohnishi: Light Metals, 35 (1985) 520.

5. J. T. Staley: American Society for Testing and Materials (1976), p. 71~103.

6. E. Kato, Y. Ueda and T. Kobayashi: Light Metals, 35 (1985) 689.

7. J. T. Staley: Met. Eng. Quar, 16 (1976) 137.

8. Hisashi Suzuki and Hiroshi Saitoh: Light Metals, 36 (1986) 4.

9. J. T. Staley: "Evaluation the New Aluminum Aerospace Forging Alloys", (1974).

10. Yoshio. BABA: Light Metals, 39 (1989) 384.

11. J. T. Staley: ASTM STP 605 (1976) 671.