

7175Al 링롤단조재의 미세조직과 기계적 성질에 미치는 공정조건에 영향

이인기 · 강락경 · 이오연

전북대학교 신소재공학부, 신소재개발연구센터

Effect of Process Conditions on the Microstructure and Mechanical Properties of 7175Al Ring Roll Forgings

I. G. Lee, R. K. Kang and O. Y. Lee

School of Advanced Materials Engineering & RCAMD, Chonbuk National University, Chonju, 561-756 Korea

Abstract The aim of this study is to investigate the process conditions on the microstructural changes and mechanical properties of large 7175 aluminum ring roll forgings. The billets range from 370 mm to 720 mm in diameter were homogenized and ring roll forged after direct chill casting. The tensile properties of ring roll forged specimen manufactured with $\Phi 370$ mm billets were superior to those of $\Phi 720$ mm billets under T_6 condition. Also, these properties showed better than those of military specification under T74 treatment. The impact value of ring roll forged specimen under T_{74} treatment increased up to 20% than that of T_6 condition. The fracture toughness of ring roll forged specimen manufactured with $\Phi 370$ mm cast billet showed nearly same level of $\Phi 720$ mm billet which was processed using MF or Cog free forging followed by ring roll forging.

(Received October 24, 2003)

Key words: 7175Al alloy, Ring roll forging, Mechanical properties, Fracture toughness

1. 서 론

최근 항공기용 구조부품의 경량화에 대한 요구가 점차 증대함에 따라 비강도가 큰 7XXX계 알루미늄 합금에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[1,2]. 7175Al 합금은 7075Al 합금보다 Fe 및 Si등의 불순물 함량을 감소시키고, T_{74} 와 같은 과시효 열처리(7175- T_{74})를 함으로써 고강도를 유지하면서 SCC 저항성, 파괴인성 및 피로특성을 향상시킨 재질이다.[3-5] 그러나 7175- T_{74} 합금의 제조공정기술, 특히 건전한 빌렛트의 주조, 가공 및 열처리 기술은 일반적인 상용 제조공정과 다르고 표준화된 제조공정기술이 공개되어 있지 않아서 기계적 성질이 우수한 7175Al 합금 개발에 많은 어려움을 겪고 있다.

선진국의 경우 직경 500~800 mm 크기의 대형 빌렛트를 제조하기 위한 주조기술, 단조 및 정밀열처리 등 제조회사마다 특허나 기술적 노하우를 갖고 대형 단조품을 생산하고 있다. 특히 러시아의 VILS社, VIAM社 그리고 일본경공업, 미쓰비시 등은 대형 단조/링롤업체로서 대형 빌렛트의 주조기술 뿐만

아니라 단조관련 제조공정 기술분야까지 기술적 know how를 갖고 있는 회사로 알려져 있다. 그러나 7175Al 신합금 개발을 위한 국내의 연구실적과 제조기술 수준은 선진국에 비하여 매우 저조한 상태이며, $\Phi 370$ mm 이하의 주조빌렛트 제조기술을 확보하고 있는 실정이다.

추진복합기술 체계에서 알루미늄 단조부품은 두께 100 mm, 외경 1800 mm의 대형 제품이 요구되어 지며, 다양한 크기를 갖는 대형 빌렛트의 개발이 필수적이다. 그러나 빌렛트 크기가 증가함에 따라 주조 조직의 불균일 가능성이 증가되며, 입계에 Fe 및 Cu 등을 다량 함유한 취약한 2차상 입자의 양적 증가, cell의 조대화, 기공발생 및 응고시 내부응력 증가에 의한 균열발생 등 많은 문제점이 예측되므로 건전한 대형 주조빌렛트 제조를 위한 제조공정기술 개발이 필요하다. 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. 본 연구에서는 기계적

성질이 우수한 링롤단조품 개발을 위한 기초적 연구로서 direct chill 주조법으로 제조한 대형 7175Al 빌렛트의 제조공정에 따른 미세조직 변화를 고찰하고 링롤단조품의 기계적 성질을 평가하였다.

2. 실험방법

2.1. 시편제조 및 열처리

용해는 Alcoa Korea사의 8톤 반사로에서 99.9%Al 잉곳트를 사용하여 7175Al 규격에 맞도록 합금성분을 첨가하여 용해한 후 반연속 주조하여 직경 370 mm와 720 mm의 빌렛트를 제조하였다. 시편의 화학성분은 Table 1과 같다.

주조빌렛트의 균질화처리는 비평형상의 용해가 일어나지 않도록 300°C에서 3시간 유지한 후 30°C/hr 속도로 승온하여 460°C에서 16시간 가열한 다음 다시 승온하여 470°C에서 24시간 유지한 후 공냉하였다.

링롤단조품의 기계적 성질에 미치는 자유단조 공정의 영향을 조사하기 위해 $\Phi 370$ mm 주조빌렛트는 균질화처리후 링롤단조하였고, $\Phi 720$ mm 빌렛트는 $\Phi 680$ mm로 황삭가공한 다음 자유단조공정인

cogging 또는 다축단조(multi-axial forging, MF) 공정을 거쳐 링롤단조 하였다. Cogging 공정은 $\Phi 680$ mm 빌렛트를 일정시간 가열한 후 유압프레스로 $\Phi 380$ mm까지 단계적으로 단면적을 감소(진변형률: 1.16) 시켰고, MF 공정은 Fig. 1과 같은 공정을 거쳐 $\Phi 820 \times 105$ mm로 열간단조(진변형률: 4.65) 하였다.

이와같이 제조된 $\Phi 370$ mm 주조빌렛트와 자유단조소재($\Phi 720$ mm 빌렛트를 Cog 또는 MF)를 $\Phi 360 \times 1053$ mm 크기로 절단한 후 업셋팅→피어싱→링단조(ring forging)→링롤단조 공정을 거쳐 $\Phi 1185$ (외경) $\times \Phi 986$ (내경) $\times 92$ mm 크기의 링롤단조품으로 제작하였다. 제조공정을 변화시켜 제조된 링롤단조품의 열처리는 T_6 와 T_{74} 처리하였다. T_6 처리는 470°C에서 3시간 유지한 후 용체화처리한 다음 121°C에서 24시간 시효처리 하였고, T_{74} 처리는 T_6 처리후 165°C에서 20시간 시효처리 하였다.

2.2. 조직관찰 및 기계적 성질 측정

광학현미경 조직은 시편을 정면마한 후 dilute keller 시약으로 부식하여 관찰하였고, 파단면 관찰은

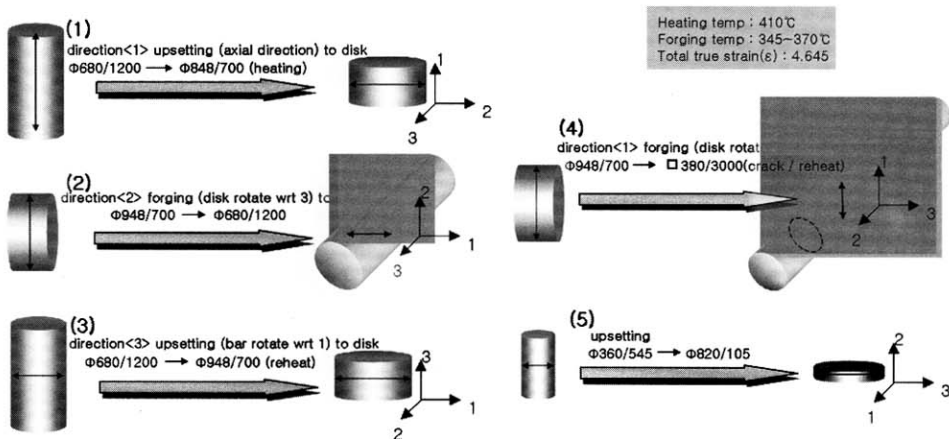


Fig. 1. Schematic drawing of billet making sequence of multi-axial forging (MF).

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

Specimens	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
$\Phi 370$ mm	0.054	0.102	1.42	0.003	2.21	0.19	5.99	0.018	bal.
$\Phi 720$ mm	0.059	0.096	1.30	0.003	2.26	0.18	5.95	0.015	bal.

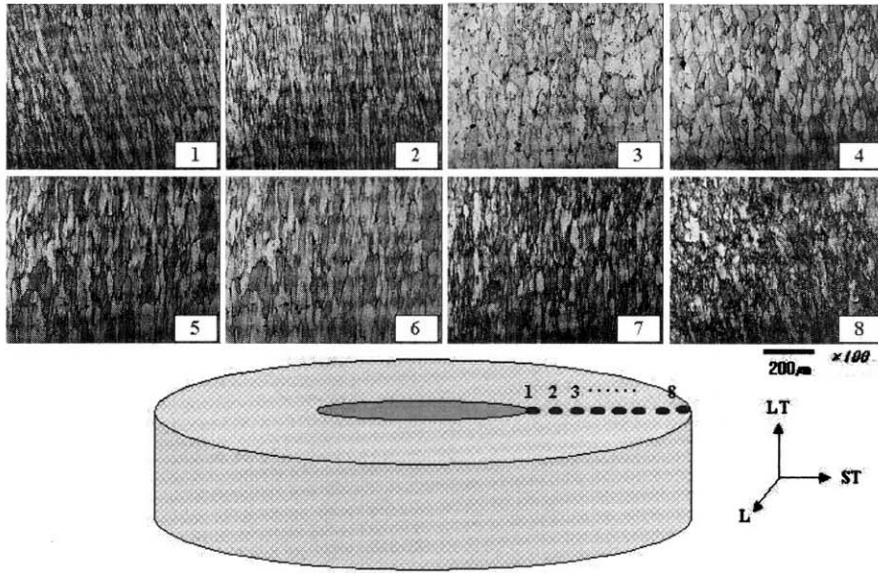


Fig. 2. Optical micrographs of ring roll forged specimen (MF).

주사전자현미경을 이용하였다. 인장시험은 시험편을 ASTM E-8 규격으로 제작한 다음 5 mm/min의 인장속도로 실시하여 항복강도, 인장강도 및 연신율을 구하였다. 충격시험은 계장화된 샤르피 충격시험기 (Tinius olsen)를 사용하여 시험편이 파괴될 때까지의 흡수 에너지를 계산하여 구하였다. 파괴인성(K_{IC})은 표준 CT시험편을 제작한 후 컴퓨터 제어방식의 유압만능시험기(Instron 8516)를 사용하여 ASTM E-399 규정에 따라 시험하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 미세조직

7175Al 합금 대형 빌렛트는 D.C. 주조법으로 제조하는데 열응력에 의한 주조균열의 발생을 억제하기 위해 비교적 낮은 속도 (13~14 mm/min)로 주조하고 있다. 그러나 응고속도가 느릴수록 cell 크기가 커지며, 최종 응고부인 cell 입체는 주강화원소(Zn, Mg, Cu)와 불순물원소(Fe, Si)가 농축되면서 비평형상의 공정화합물이나 제2상 입자를 형성하게 된다. 이러한 현상은 빌렛트의 표면부보다 중심부 쪽으로 갈수록 그리고 빌렛트 직경이 클수록 증가되는데 이들 화합물은 쉽게 고용되거나 소멸되지 않는 것으로

알려져 있다.[6,7]

Fig. 2는 다축단조공정을 거쳐 제조된 빌렛트를 사용하여 링롤단조한 시험편의 위치별 미세조직을 나타낸 것으로 링롤단조공정의 금속유동 특성상 L방향(원주방향)으로 연신된 형태의 조직을 가지고 있다. 그런데 링롤단조에서는 외경보다 맨드럴과 접촉하는 내경부위의 소성변형이 훨씬 크며 중심부쪽으로 갈수록 변형량이 감소하게 된다.[8] 조직사진에서도 이와 같

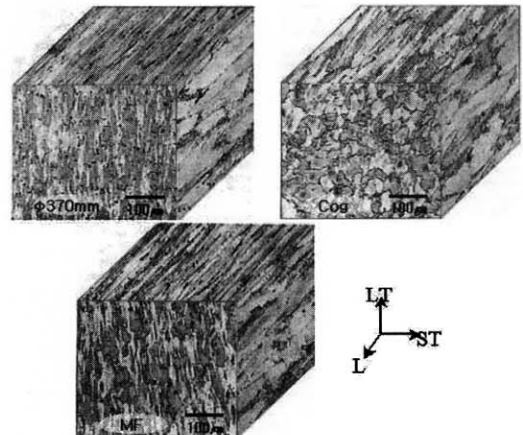


Fig. 3. Effect of manufacturing process on the microstructural changes of ring roll forged specimens.

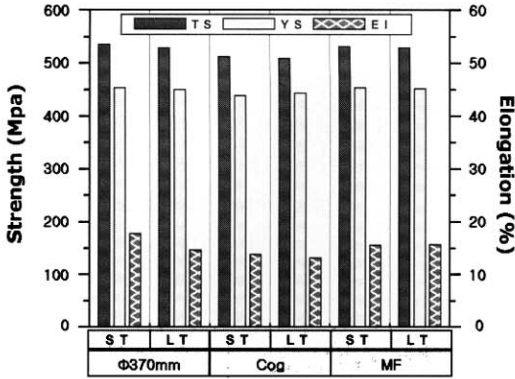


Fig. 4. Effect of manufacturing process on the tensile properties in ring roll forged specimens under T_6 condition.

은 양상의 조직변화를 관찰할 수 있는데, 내경쪽인 1, 2번 위치는 심한 변형으로 인하여 다른 부위보다 조직의 연신비(L/W)가 크지만 중심부에서 연신비는 2 정도로서 비교적 소성변형량이 작음을 알 수 있다.

Fig. 3은 자유단조공정을 달리하여 제조된 링롤단조제품의 3차원 조직사진으로서 별도의 자유단조공정을 거치지 않고 $\Phi 370$ mm 주조빌렛트를 곧바로 링롤단조한 시편이 Cog 또는 MF의 자유단조공정을 거쳐 링롤단조한 시편에 비하여 조직이 미세하였다. 자유단조공정을 거친 Cog재나 MF재를 사용한 링롤단조제품의 미세조직은 자유단조공정에서 2~3회의 가열공정을 거치는데, 각 단계별로 변형량이 충분하지 않아 결정립 성장으로 인하여 조대화된 것으로 생각된다.

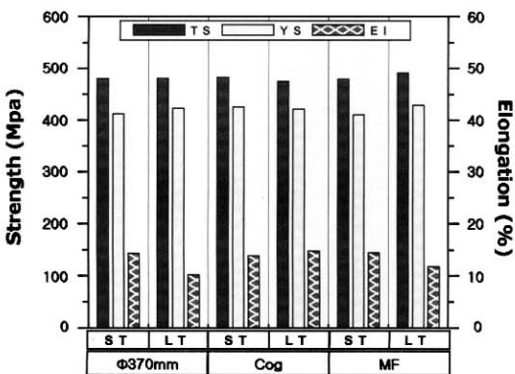


Fig. 5. Effect of manufacturing process on the tensile properties in ring roll forged specimens under T_{74} condition.

3.2. 인장성질

Fig. 4는 제조공정을 달리한 T_6 상태의 링롤단조 시편에 대한 방향별 인장시험 결과로서 ST방향인 LT 방향보다 강도 및 연신율이 약간 높은 경향을 나타내었다. 제조공정별로 보면 $\Phi 370$ mm 주조빌렛트를 직접 링롤단조한 ST방향 시편의 인장강도 및 항복강도가 각각 536MPa, 453MPa로서 다축단조공정(MF)을 거친 단조제품의 인장강도 및 항복강도와 동일한 값을 보이며, Cogging 공정을 거쳐 링롤 단조한 시편은 각각 512MPa과 440MPa로서 약간 낮은 값을 나타내었다. 연신율은 3종의 단조제품 모두 시편 채취방향에 관계없이 13% 이상의 높은 값을 보였는데, 그 중에서도 자유단조공정을 거치지 않은 $\Phi 370$ mm 주조빌렛트로 제조한 시편이 가장 우수하였다. 이러한 원인은 $\Phi 370$ mm 빌렛트가 대형빌렛트에 비하여 응고속도가 빠르게 진행되므로 cell 크기가 작고 cell 입계에 정출된 S상(Al_2CuMg)이나 기타 공정화합물의 양이 적어서 그 만큼 주강화원소에 의한 시효석출 특성이 우수하며 또한, Fig. 3에서 알 수 있듯이 결정립 미세화 효과도 인장특성을 향상시킨 요인이라고 생각된다.

Fig. 5는 T_{74} 처리한 링롤단조 시편의 인장시험 결과로서 T_6 상태보다 항복강도는 5~9%, 인장강도는

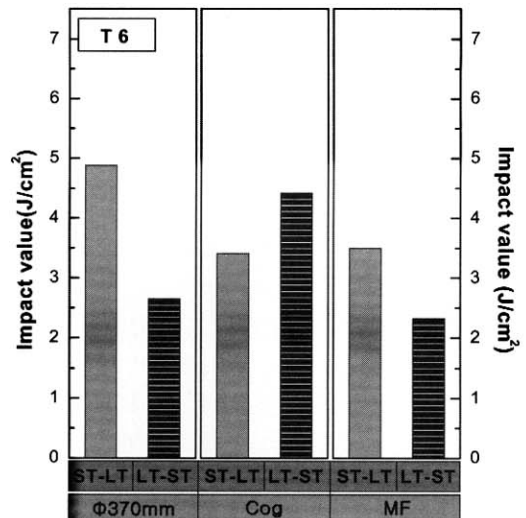


Fig. 6. Effect of manufacturing process on the impact values in ring roll forged specimens under T_6 condition.

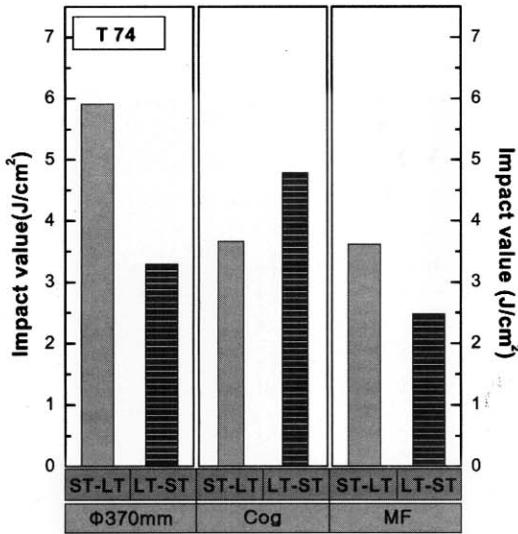


Fig. 7. Effect of manufacturing process on the impact values in ring roll forged specimens under T₇₄ condition.

7~10% 감소하였다. 과시효가 진행됨에 따라 강도가 저하하는 이유는 과시효에 의해 기지와 부정합을 이루는 평형석출물이 점차 조대화되며 그 간격이 넓어져 석출강화 효과가 감소되기 때문이다. 그러나 이 과정에서 응력부식균열(SCC) 저항성이 향상되므로 [9,10] 고강도 Al합금에서는 대부분 T₇₄처리와 같은 과시효처리를 실시하여 사용한다.

T₇₄ 시효처리한 링롤단조품의 항복강도와 인장강도는 제조공정에 관계없이 각각 412~429MPa, 480~491MPa로서 거의 비슷한 값을 나타내었으며, 연신율은 10.2~14.9%로서 T₆처리제보다 낮았다. 본 연구에서 제조된 링롤단조품의 인장 및 항복강도는 military spec.(MIL-A-227710 A7075-T₇₃, Hand Forging)보다 14%정도 높고, 연신율은 5배 이상으로서 인장특성이 매우 우수하였다.

3.3. 충격인성 및 평면변형 파괴인성

Fig. 6은 T₆처리한 링롤단조 시편의 방향별 충격치를 나타낸 것이다. ST-LT방향에서는 Φ370 mm 주조빌렛트를 사용한 링롤단조 시편의 충격치가 4.88J/cm²로서 가장 크고, Φ720 mm 빌렛트를 Cogging 또는 MF 공정을 거쳐 링롤단조한 시편은 각각 3.41J/cm²과 3.50J/cm²로서 비슷한 값을 나타내었다. 그러나 LT-ST방향에서는 Cog재가 가장 우수하였고,

그 다음이 Φ370 mm 주조빌렛트, MF재 순으로 나타났다.

Fig. 7은 T₇₄처리한 링롤단조 시편의 충격치를 나타낸 것으로 Φ370 mm 주조빌렛트를 사용하여 제조한 단조품은 T₆상태보다 약 18% 증가하였으나, Cog 또는 MF 공정을 거쳐 링롤단조한 시편은 3~7% 정도의 상승을 보였다. T₆처리 상태의 충격치와 마찬가지로 Φ370 mm 주조빌렛트와 MF재는 ST-LT방향이 LT-ST방향보다 높은 값을 보였다. 그러나 Cogging 공정을 거쳐 제조된 링롤단조품의 경우 T₆상태나 T₇₄상태 모두 LT-ST방향의 충격인성이 높은 것은 Cog 특유의 일방향 단조에서 나타나는 섬유조직의 형성에 의한 영향이라고 생각된다.

7XXX계 Al합금의 입계에 생성된 S상(Al-Cu-Mg계), T상(Al-Cu-Mg-Zn계), 및 Fe, Cr, Ti등이 포함된 입계석출물 그리고 입내의 시효석출물의 크기나 분포상태는 이 합금의 기계적 성질 특히 파괴인성에 큰 영향을 미친다.[11] cell입계에 존재하는 조대한 2차 상입자들은 균질화 처리와 가공공정에서 일부 고용되기도 하지만 가공방향으로 변형되어 방향성을 띄게 되며, 이에 수직인 방향의 응력을 받을 때 인성저하의 요인으로 작용한다. 또한 2차상입자들은 상당히 취약하여 비교적 낮은 응력을 받아도 쉽게 파단되는 등 균열발생장소가 됨은 물론이고 균열전파의 경로로도 작용한다. 따라서 이들 취약한 2차상입자의 존재는 Al합금 단조재의 파괴인성을 저하시키는 주요원인이 된다[12,13].

Fig. 8은 시편채취방향에 따른 제조공정별 평면변형 파괴인성값으로서 29.5~34.1Mpa · m^{1/2}범위였다.

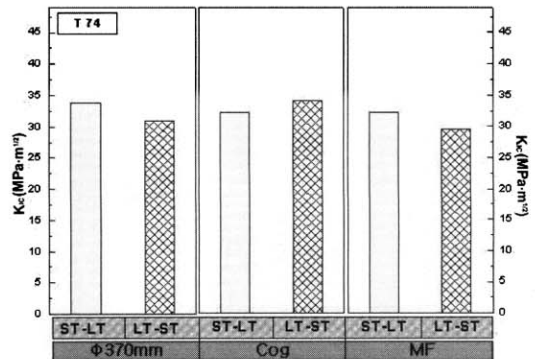


Fig. 8. Effect of manufacturing process on the KIC values in ring roll forged specimens under T₇₄ condition.

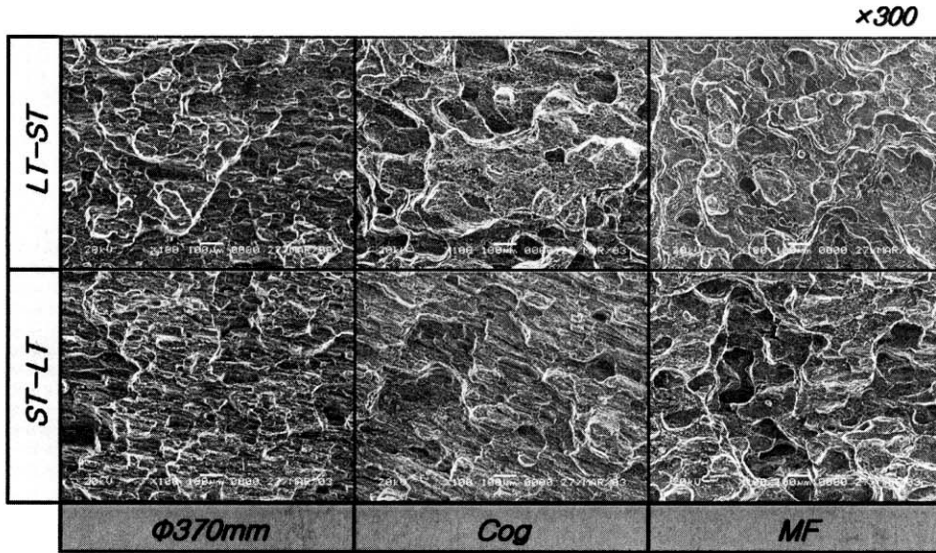


Fig. 9. SEM fractographs of KIC specimens in ring roll forged specimens under T_{74} condition.

LT-ST방향에서는 Cog재가 $34.1\text{Mpa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 로서 가장 크고, $\Phi 370\text{ mm}$ 주조빌렛트와 MF 공정을 거쳐 제조한 링롤단조 시편은 각각 $30.9\text{Mpa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 와 $29.5\text{Mpa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 로서 비교적 낮은 값을 보였다. 이와 같은 파괴인성값은 종래에 제작된 링롤단조 시편에서 나타난 파괴인성값인 $29.6\sim 34.2\text{Mpa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 과 동등한 수준이었다. Fig. 9는 파괴인성시험후 시편의 파단면을 관찰한 사진으로서 모든 시편은 입내에서 연성파괴양상을 보이며, 파괴인성값이 낮았던 LT-ST방향의 MF 재와 $\Phi 370\text{ mm}$ 주조빌렛트를 직접 링롤단조한 시편은 비교적 얇은 덩굴을 갖는 파괴양상을 나타내었다.

4. 결 론

본 연구에서는 $\Phi 370\text{ mm}$ 와 $\Phi 720\text{ mm}$ 대형 7175Al합금 빌렛트를 사용하여 제조한 링롤단조품의 미세조직, 인장성질, 충격인성 및 파괴인성 등의 기계적 성질에 미치는 제조공정인자의 영향을 조사하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 링롤단조 시편의 미세조직은 원주방향으로 연신된 조직 형태를 보이며 가장 심한 변형영역은 맨드럴에 가까운 부분이었다.
2. T_6 상태에서 강도와 연신율은 $\Phi 370\text{ mm}$ 빌렛트

소재를 사용하여 제조한 링롤단조 시편이 가장 우수하였으며, T_{74} 처리하면 강도는 5~10% 감소하고 연신율도 약간 저하되는 경향을 나타냈다. 그러나 T_{74} 상태에서 링롤단조품의 강도는 미국방성 규격보다 14% 높았으며 연신율도 매우 우수하였다.

3. T_6 상태에서 ST-LT방향의 충격치는 자유단조공정을 거치지 않은 $\Phi 370\text{ mm}$ 빌렛트를 사용하여 제조한 시편이 가장 우수하였으며, T_{74} 처리에 의해 20%정도 증가되었다.

4. $\Phi 370\text{ mm}$ 빌렛트로 제조한 링롤단조 시편의 파괴인성은 자유단조공정을 거치지 않고 링롤단조 하였음에도 불구하고 $\Phi 720\text{ mm}$ 빌렛트를 MF 또는 Cog 등의 자유단조공정을 거쳐 제조한 링롤단조 시편의 파괴인성과 동등한 수준을 나타냈다.

참고문헌

1. S. G. Pyo, J. J. Kim and N. J. Kim : J. Kor. Met & Mater. 37 (1999) 904.
2. E. W. Lee, T. R. Mcnelley and A. F. Stengel : Metall Trans., 17 (1986) 1043.
3. U. S. Patent 3198676 (1965)
4. M. V. Hyatt : Metal Progress, 9 (1977) 56.
5. D. Godard, P. Archambault, E. Alby-Gautier and G. Lapasset : Acta Meter., 50 (2002) 2319.

6. K. Higashi, Y. Hirai and T. Ohnishi : *Light Metals*, 35 (1985) 520.
7. Y. Baba : *Light Metals*, 39 (1989) 378.
8. S. L. Semiatin : *Metals Handbook* (9th ed.) 14 (1988) 112.
9. K. G. Keni : *J. Inst. Metals*, 97 (1969) 127.
10. A. J. Sedriks, J. A. S. Green and D. L. Novak : *Metall. Trans.*, 3 (1973) 1992.
11. J. T. Staley : *Met. Eng. Quar.*, 16 (1976) 137.
12. G. T. Hahn and A. R. Rosenfield : *Metall. Trans.*, 6 (1975) 653.
13. J. S. Santner : *Metall. Trans.*, 9 (1978) 769.