

7XXX계 알루미늄합금 단조재의 파괴인성 개선

송기홍, 이오연*

전주공업대학 금형설계과,

*전북대학교 신소재개발연구소

Improvement of Fracture Toughness in 7XXX Series Aluminum Alloy Forgings

K.H. Song, and O.H. Lee*

Dept of Die and Mold Design, Juonju Technical College, Chunju 567-760

*Research Institute of Advanced Materials Development, Chunbuk Nat. Univ. Chunju 560-756

ABSTRACT

The aim of this study is to investigate the effect of impurity level and fabrication processes on the strength, impact and fracture toughness of 7075, 7050 and 7175 aluminum alloy forgings. A specially processed 7175S-T74 aluminum forgings was superior to a conventionally processed 7075-T73, 7050-T74 and 7175-T74 aluminum forgings in both strength and toughness. The reduction of impurity level of iron and silicon has significantly diminished the size and volume fraction of second phase particles such as $AlCu_2Fe$ and Mg_2Si . A further reduction of the amount of second phase particles has been observed by applying a special fabrication process. This phenomena result from the application of intermediate soaking at higher temperature and more sufficient hot working temperature than that of a conventional processing.

1. 서 론

항공기의 support flame, wing spar, landing gear와 미사일부품용 알루미늄합금 구조재는 높은 비강도, 우수한 파괴인성 및 응력부식균열에 대한 저항성 등이 요구되므로 재질 요구 특성에 따라 2024-T74, 6061-T6, 7075-T73, 7049-T73, 7175-T74, 7050-T74 등의 단조재가 사용되고 있다.^{1)~3)} 7XXX계 알루미늄 소재는 약간의 강도 저하를 초래하더라도 파괴인성과 SCC에 대한 저항성을 향상시키기 위해 최대강도 수준의 시효처리(T6)보다는 과시효처리(T73 또는 T74)하여 재질의 신뢰성을 확보하는 손상허용설계(Damage Tolerance Design)개념 이상의 재질을 사용하는 추세에 있다.⁴⁾

단조용 7175Al은 불순물로 포함되어 있는 Fe와 Si의 함량을 낮춘 것을 제외하면 기존의 7075Al과 동일한 조성범위를 갖는 합금이지만, Fe와 Si의 함량을 낮춤으로써 응고시 형성되는 $AlCu_2Fe$ 와

Mg_2Si 등의 2차상 입자의 양을 감소시켜 파괴인성을 개선함과 동시에 이들 2차상 입자에 포함되는 Cu와 Mg 등의 강화상(η' 및 η)을 구성하는 원소들이 더욱 효과적으로 강화에 기여할 수 있도록 함으로써 합금의 강도수준을 7075Al보다 더 높이는 것을 목표로 하고 있다. 7175Al은 상기와 같은 순도개선 효과외에도 상용 7075Al의 제조공정 조건보다 더 높은 고온에서 열간 가공, 중간 열처리 및 용체화처리로 이루어진 특수공정을 적용하여 제조하고 있다. 이와 같이 제조된 7175Al 단조재는 7075Al 보다 높은 강도와 우수한 파괴인성을 나타내며, 규격에서 정하고 있는 SCC 저항성과 7075-T6 수준의 강도를 동시에 얻을 수 있는 것으로 알려져 있다.⁵⁾ 그러나 이 분야에 대한 국내의 연구실적과 기술수준은 크게 미흡하고, 특히 15인치 이상의 대형 빌렛트를 제조하기 위한 주조 기술, 단조, 정밀 과시효열처리(T74) 기술이 확립되어 있지 않다. 따라서 이러한 일련의 연구는 향후 항공기 및 로켓용 고강도

알루미늄 합금개발에 중요한 역할을 할 수 있을 것으로 기대된다. 본 연구는 7175-T74 단조재의 국산화 개발의 일환으로 특수공정을 적용한 7175S-T74와 일반공정을 적용한 7075-T74 및 7175-T74 단조재를 제조하고, 이들 합금의 기계적 성질을 비교 평가하기 위하여 강도, 충격인성 및 평면변형 파괴인성시험을 하였다.

2. 실험방법

용해는 (주)두레에어메탈의 8톤 반사소에서 99.9%Al 잉고트를 사용하여 7175Al 규격에 맞도록 합금성분을 첨가하여 용해한 후 반연속 주조하여 직경 15인치(372mm)의 빌렛트를 제조하였다. 또한 7175Al과 비교 평가하기 위해 Fe, Si 함량이 높은 7075Al 및 재결정 억제원소로서 Zr을 첨가한 7050Al 합금도 같은 방법으로 제조하였으며, 화학 성분은 Table 1과 같다.

Table 1. Chemical composition of 7075, 7175 and 7050Al alloys.(wt%)

Alloys	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Zr	Al
7075Al	0.015	0.35	1.59	0.005	2.70	0.19	5.70	-	bal.
7175Al	0.03	0.08	1.66	0.005	2.74	0.02	5.40	-	bal.
7050Al	0.12	0.15	2.3	0.10	2.5	0.04	6.01	0.11	bal.

이들 빌렛트는 460°C에서 30시간 균질화처리 후 직경 200mm 봉재로 압출하였다. 7075, 7050 및 7175Al 단조재는 종래의 상용공정으로 제조한 반면, 7175S는 미국 특허에 근거한 특수공정으로 제조하였다.⁶⁾ 즉, 특수공정을 적용한 7175S는 압출과 단조공정 중간에 510°C의 고온에서 6시간 고온 균질화 열처리를 추가적으로 실시하였고, 일반공정에 비해 약 30~40°C 높은 온도에서 압출, 단조 및 용체화 처리가 이루어졌다. 단조는 부품에 따라 형단조 또는 링을 단조하였다. 시효강화 열처리로서 T73과 T74는 2단 과시효처리로 1단계 시효는 107°C에서 7시간 열처리하고, 2단계 시효는 177°C에서 T73이 9시간, T74가 6시간 열처리 하였다.

기계적성질 측정은 인장, 충격, 파괴인성시험을 하였다. 인장시험은 20ton 만능시험기(Instron社)에서 ASTM E8의 subsize 규격으로 실시하였다. 충격시험은 용량 30kg·m인 계장화된 충격시험기(Yonekura MFC. Co. YC-30)를 사용하여 ASTM E23 규격에 따라 샬피충격시험을 행하였다. 평면변형 파괴인성(K_{Ic})은 LT, TL 또는 ST방향의 표준 CT(Compact Tension)시편을 제작한 후 컴퓨터 제어방식의 유압만능시험기(Instron社)를 사용하여 ASTM E-399에 주어진 규정에 따라 시험하였다. 광학현미경조직은 정연마한 후 dilute keller 시약으로 부식하여 관찰하였다. 충격시험 및 파괴인성 시험후의 파단면 관찰과 2차상입자의 분석은 SEM/EDS를 이용하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 미세조직

Fig. 1은 특수공정을 적용한 7175S-T74 그리고 일반공정을 적용한 7175-T74, 7075-T73, 7050-T74 합금 단조재의 미세조직으로서 플랜지형상으로 프레스 단조한 LT방향의 광학현미경 사진이다. 7050-T74 합금은 가공방향으로 연신된 조직이 존재하지만 대부분 5~10 μ m 크기의 미세한 등축재결정립으로 되어 있다. 그러나 7075-T73 합금은 폭 20~50 μ m, 길이 500~1000 μ m 크기를 갖는 섬유상 조직의 조대한 미세재결정 조직으로 되어 있으며, 결정립계를 따라 5~10 μ m 크기의 미세한 재결정이 생성되고 있음을 볼 수 있다. 또한 7175-T74 합금은 30~200 μ m 크기의 조대한 등축정조직과 함께 입계에 미세한 재결정립이 생성되어 있는데, 이들 조대한 재결정립은 주조시 생긴 dendrite cell에 대응된다고 생각된다. 錦木⁷⁾ 등에 의하면 dendrite cell 경계부는 그 내부에 비하여 Cr농도가 낮기 때문에 재결정이 일어나기 쉽다고 지적한 보고와 일치하며, 일반적으로 결정립계가 입내에 비하여 에너지가 높아 핵생성장으로 작용할 수 있기 때문에 입계부근에 미세한 재결정이 우선적으로 생성될 것이다.

한편 2차상 입자의 양과 크기는 Fig. 1에서 볼 수 있듯이 4합금에서 뚜렷한 차이를 나타내었다. 즉

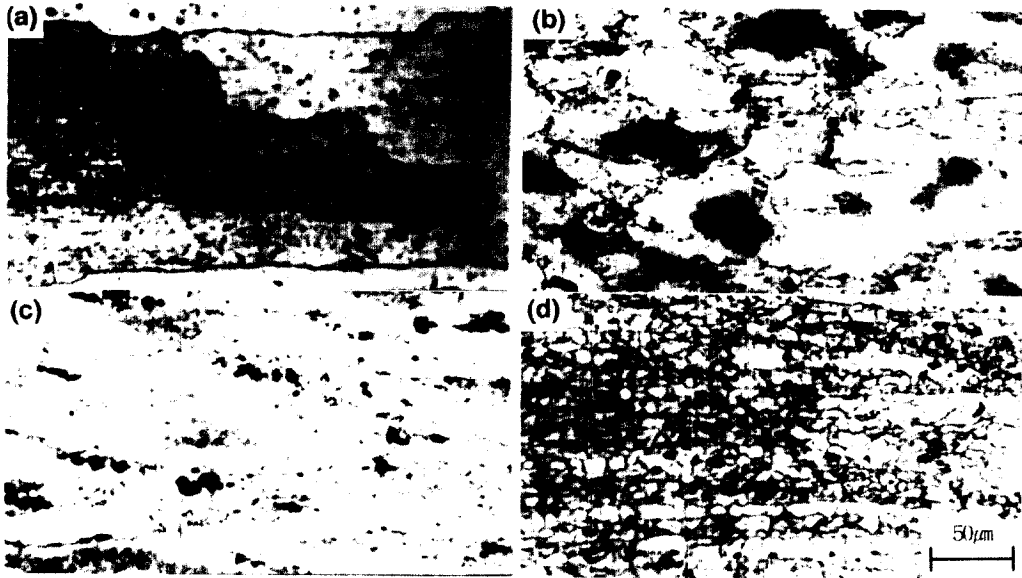


Fig. 1. Optical microstructures of LT direction in flange shaped press die foregings
(a)7175S-T74 (b)7175-T74 (c)7075-T73 (d)7050-T74

Fe+Si 함량이 많은 상용 7075-T73 단조재는 수 μm ~20 μm 크기의 조대한 2차상 입자들이 가공방향으로 연신된 결정립계를 따라 배열되어 있으며, 그 양도 상당히 많이 존재하고 있다. 그러나 Fe+Si 함량이 적은 7175S-T74와 7175-T74 단조재는 이러한 조대한 2차상 입자들의 양이 현저히 감소함과 동시에 그 크기도 수 μm 으로서 매우 작아짐을 알 수 있다. 특히 특수공정을 적용한 7175S-T74 단조재는 7175-T74 단조재에 비하여 2차상 입자의 크기와 양이 다소 감소됨을 알 수 있으며, 이러한 경향은 링롤 단조재에서도 같은 경향이 나타났다.

이와 같은 결과는 본 연구에서 적용한 특수공정에서 고온 압출 및 단조 그리고 고온에서 중간열 처리와 용체화처리를 함으로써 2차상 입자들이 미세하게 분산되며 가용성의 입자들은 일부 모상에 고용되기 때문인 것으로 판단된다. 그런데 이러한 특수공정의 적용은 가용성 입자들의 양적감소 효과 이외에도 고온에서 열처리하기 때문에 Cu 등 용질원자들의 고용량을 증가시켜 강도상승에 기여하고 석출촉진 효과도 있는 것으로 알려져 있지만 반대로 재결정이 진행되기 쉽기 때문에 정밀열처리가 요구된다.

상용 7XXX계 Al합금의 경우 불순물로 포함되어 있는 Fe와 Si 등의 원소는 응고과정중 Al 또는 Mg와 결합하여 Al₃Cu₂Fe, Al₃Fe, Mg₂Si 등의 조대한 2차상 입자들이 형성되는데, 이들 조대한 2차상 입자들은 파괴인성과 피로특성 등의 기계적 성질에 직접 관련이 될 뿐만아니라 시효 특성에도 영향을 미쳐서 합금의 강도저하를 초래할 수 있다.^{8),9)}

3.2 충격인성

Fig. 2는 프레스 단조재인 각종 알루미늄 합금의 충격에너지를 나타낸 것으로서 모든 경우에 E₁가 E_p보다 현저하게 크며, ST방향보다 L방향의 충격 흡수 에너지가 높게 나타났다. 이러한 현상은 2차상 입자의 양과 크기가 현저히 적은 7175-T74와 7175S-T74 단조재에서 뚜렷하게 나타났다. 충격흡수 에너지는 7075-T73, 7175-T74, 7175S-T74 순서로 증가하였으며, 인장시험 결과 강도-연성 조합이 가장 우수했던 7050-T74는 7075-T73과 같은 수준의 낮은 충격에너지 값을 보였다. 이러한 결과는 두 합금 모두 충격인성에 나쁜 영향을 주는 2차상 입자의 양이 많고, 특히 7050-T74 합금은 상당한 재결정이 진행되어 입계파괴 양상을 나타

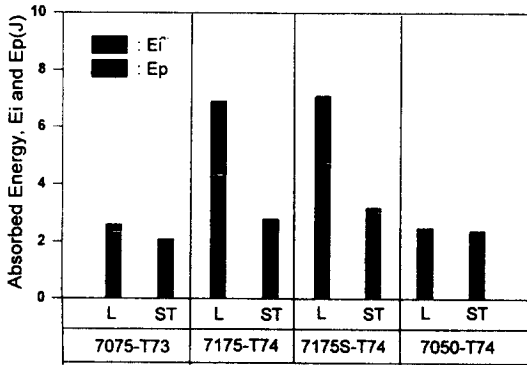


Fig. 2. Impact absorbed energy of L and ST direction in 7XXX Al press die forgings.

내기 때문이라고 생각된다.

Fig. 3은 7075-T73 단조재의 충격파면 사진과 2차 상입자들을 SEM/EDS로 정성분석한 결과를 보여주고 있다. Fig. 3(a)의 화살표로 표시한 2차 상 입자르 분석한 결과 Al, Mg, Si, Cu, Fe 그리고 저용점 원소인 Na 등의 피크가 나타났다. 종래의 연구자들의 정량분석결과에 의하면 7XXX계 합금에서 나타나는 2차상 입자들은 대부분 Al₂Cu₂Fe, Al₂CuMg 그리고 Mg₂Si 등의 조성을 갖는 것으로 밝혀져 있다. 충격인성은 2차상 입자나 dispersoid의 양 및 분포상태와 밀접한 관련이 있는 것으로 알려져 있는데¹⁰⁾, 특히 입계에 존재하는 조대한 2차상 입자는 가공방향으로 연신된 입계를 따라 분포하게 되며, 이들 입자들은 응력을 받으면 쉽게 파괴되어 균열의 우선 경로로 작용하기 때문에 충격인성을 현저하게 저하시킨다.

Fig. 4는 햄머 단조재에 대한 L방향의 충격시험 결과로서 2차상 입자의 양이 상당히 적은 7175-T74가 7075-T74보다 충격흡수 에너지가 크고, 특수공정을 적용한 7175S-T74는 7175-T74보다 더욱 증가하였다. 특히 7175S-T7454는 7175S-T74보다 충격흡수 에너지가 38% 증가한 9.5J을 나타내었는데, 이것은 잔류응력제거를 위한 소성변형이 과시효를 촉진하였기 때문인 것으로 판단된다. Fig. 5는 Fig. 4에 나타난 시편의 충격파단면 사진으로서 3합금 모두 깊은 dimple을 갖는 연성파괴 형태

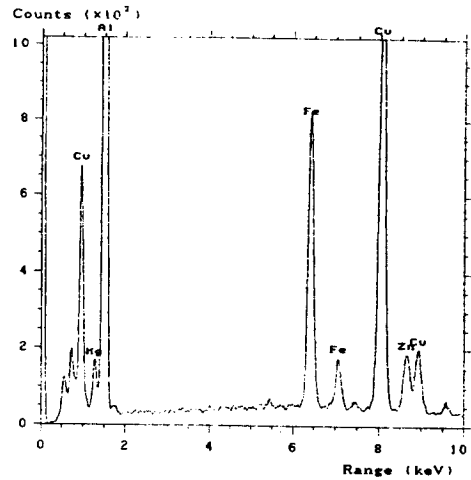


Fig. 3. Fracture surface and SEM/EDS analysis of 7075-T73 alloy.

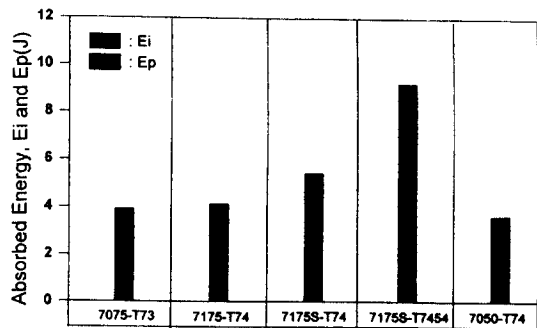


Fig. 4. Impact absorbed energy of L direction in 7XXX Al hammer forgings.

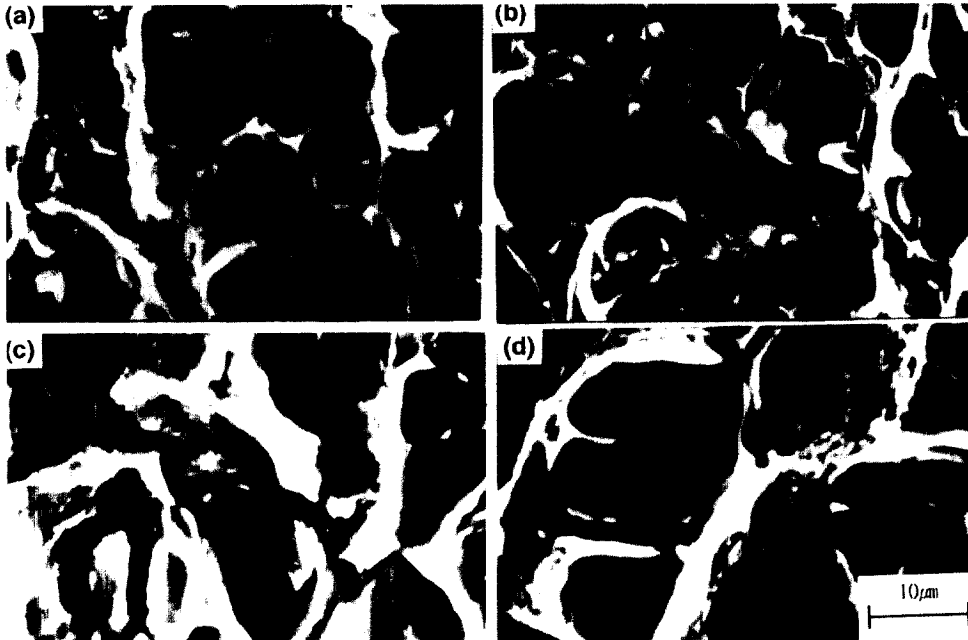


Fig. 5. SEM fractographs of impact specimen at L direction in 7XXX Al hammer forgings. (a)7075-T73 (b)7175-T74 (c)7175S-T74 (d)7175S-T7454

를 나타내고 있다. 파단형상은 L방향으로 배열된 연신된 결정립의 수직 단면내에 다수의 아결정립이 존재하는 형상을 보여주며, 파괴시 대경각입계 및 아경계를 통하여 파단되었다. 3종류의 합금중에서 충격인성이 가장 우수했던 7175S-T7454의 파면이 가장 크고 깊은 dimple을 나타내고 있어 충격에너지가 높았던 사실을 뒷받침해주고 있다.

전체적으로 볼 때, 합금의 순도, 제조공정에 따라 충격흡수 에너지가 큰 차이를 나타내지만, 동적충격인성은 특수공정을 적용한 7175S-T74가 일반공정을 적용한 7075-T73, 7050-T74 및 7175-T74보다 우수하였는데, 이것은 조대한 2차상 입자들이 특수공정에 의하여 상대적으로 감소되었기 때문이라고 생각된다. 충격인성은 특히 다른 기계적 성질과 달리 2차상 입자의 양, 크기 및 분포상태에 크게 영향을 받기 때문에 그 특성을 개선하기 위해서는 Fe, Si 등의 불순물 함량을 감소시키고, 특수공정을 적용하는 것이 매우 효과적인 방법이라고 판단된다.

3.3 강도 및 파괴인성

7XXX계 Al합금의 파괴인성은 불순물 및 합금의 미세구조에 큰 영향을 받는다. 불순물 원소인 Fe 및 Si 등은 응고과정에서 Al 및 다른 합금원소들과 결합하여 조대한 2차상 입자를 형성하게 되는데, 이들 입자들은 상당히 취약하여 비교적 낮은 응력을 받아도 쉽게 파단되는 등 균열 발생 장소가 되는 물론이고, 균열 전파의 경로로 작용한다.^{11,12)} 따라서 이들 2차상 입자의 존재는 Al합금의 파괴인성을 현저하게 저하시키는 원인이 된다.

Fig. 6은 플랜지현상으로 프레스 단조한 7075-T73, 7175/7175S-T74 및 7050-T74 합금의 평면변형 파괴인성(K_{IC})을 나타낸 것이다. 파괴인성값은 23.5~38.5 MPa \sqrt{m} 범위의 값을 가지며, 합금의 종류 및 제조공정에 따라서 상당한 차이를 보였다. 파괴인성값은 LT 및 TL 방향 모두 7075-T73, 7175-T74, 7175S-T74 순서로 증가하였으며, 7050-T74 합금은 7175-T74와 동등한 수준을 나타내었다. 합금에 따라 다소 차이는 있지만 LT 방향보다 TL방향의 파괴인성값이 약 18% 증가되었다.

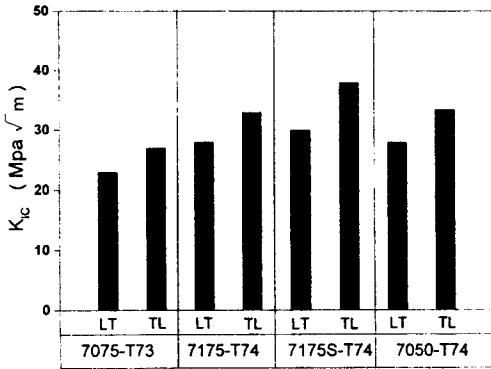


Fig. 6. Fracture toughness of LT and TL direction in 7XXX Al press die forgings.

LT방향의 파괴인성값을 보면 7075Al 합금은 T73 처리에 의해 그다지 개선되지 않았는데, 이것은 인성값은 27.3 MPa√m으로서 7075-T73에 비하여 20% 증가하였으며, 7175S-T74는 이보다 높은 28%의 증가를 나타냈다. 이것은 순도개선과 특수공정의 적용이 파괴인성 개선에 효과적인 방법이 파괴인성이 2차상 입자와 밀접한 관련이 있음을 간접적으로 시사해 준다. 그러나 7175-T74의 파괴라는 것을 알 수 있다. 한편 TL 방향의 파괴인성은 LT 방향보다 그 개선 효과가 더욱 현저하였다. 즉 7175-T74는 7075S-T73에 비하여 23% 높게 나타났으며, 7175S-T74의 파괴인성값은 38.1 MPa√m로서 7075-T73에 비하여 40% 향상되었다.

Fig. 7은 링롤 단조재의 인장성질을 나타낸 것으로서 L방향의 강도가 ST방향보다 약 4kg/mm² 높으며 연신율도 우수하였다. 각 방향별 인장강도는 7075-T73, 7175-T74, 7175S-T74 순서로 증가하였다. 즉 7175-T74의 강도는 7075-T73보다 약 2.3kg/mm² 증가하였고, 7175S-T74의 강도는 7075-T73보다 약 4kg/mm² 정도 향상되었다. 이와 같은 강도 및 연신율의 증가는 합금의 순도개선 뿐만아니라 특수공정의 적용 효과라고 생각된다.

Fig. 8은 링롤 단조재인 7075-T73, 7175-T74 및 7175S-T74 합금의 ST방향에서의 파괴인성을 상호비교하기 위하여 항복강도와 함께 나타냈 것이다. 항복강도와 파괴인성값 모두 7075-T73, 7175-T74 7175S-T74순서로 증가하였으며, 이러한 결과

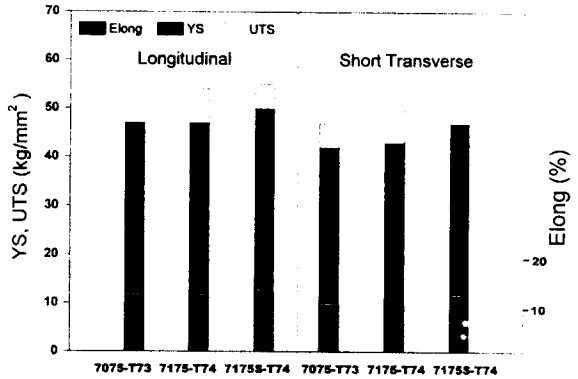


Fig. 7. Tensile properties of L and ST direction in 7XXX Al ring roll forgings.

는 비록 단조공정이 다르기 때문에 정량적으로 비교하기 곤란하지만 플랜지형상의 프레스 단조재에서 3종류의 합금에 대한 LT 방향의 파괴인성값과 거의 동등한 수준이었다. ST 방향에서 7175S-T74의 파괴인성값은 29.7 MPa√m로서 매우 우수하며, 7075-T73에 비하여 37.5%의 증가를 보였다. 이상의 실험결과로부터 7175/7175S-T74 및 7050-T74의 파괴인성값은 7075-T73에 비하여 모든 방향에서 현저하게 증가하였다. 특히 7175S-T74(TL 방향)의 파괴인성값은 38.1MPa√m로서 가장 우수하였는데, 이것은 합금의 순도 개선과 특수공정의 적용이 파괴인성을 크게 향상시킨 것으로 판단된다.

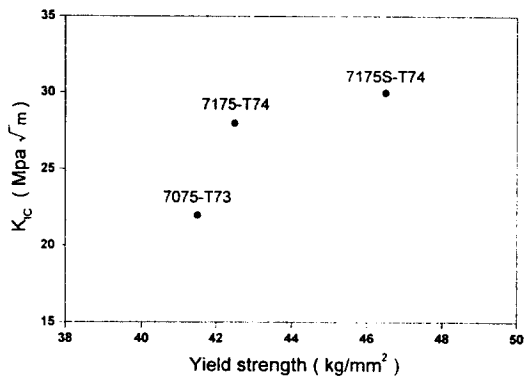


Fig. 8. Fracture toughness and yield strength of ST direction in 7XXX Al ring roll forgings.

4. 결 론

특수공정을 적용한 7175S-T74와 일반공정을 적용한 7075-T73, 7050-T74 및 7175-T74 합금의 기계적 성질을 비교할 목적으로 충격시험, 인장시험, 파괴인성(K_{Ic}) 시험을 실시하여 합금의 순도와 제조공정 인자가 7XXX계 알루미늄 합금의 재질 특성에 미치는 영향을 평가한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 7075-T73, 7050-T74 단조재는 수 μm ~수십 μm 크기의 조대한 2차상 입자들이 주로 입계 또는 interdendritic site에 존재하며 그 양도 상당히 많지만, 7175S-T74 단조재는 합금의 순도 개선과 특수공정의 적용효과에 의하여 2차상 입자의 양과 크기가 상당히 감소하였다.
- 2) 충격인성은 특수공정을 적용한 7175S-T74가 일반공정의 7075-T73, 7050-T74 및 7175-T74보다 우수하였는데, 이것은 2차상 입자의 감소효과에 기인한다.
- 3) 7175S-T74 단조재의 파괴인성 값은 7075-T73, 7050-T74 및 7175-T74에 비하여 모든 방향에서 현저히 증가하였는데, 이것은 합금의 순도 개선과 아울러 특수공정의 적용이 파괴인성을 크게 향상시킨 것으로 판단된다.
- 4) 7175S-T74 단조재는 7075-T73, 7175-T74에 비하여 우수한 강도-충격인성-파괴인성 조합을 나타냈다.

참고문헌

1. A. R. Canfield and E. E. Anderson : "Space shuttle Nozzle Development" AIAA-78-951
2. A.J. Bryant : J. Inst. Metal, vol. 94(1966), pp.94
3. 馬場義雄 : 輕金屬, vol. 39 (1989), pp. 378
4. T. Ohnishi : Japan. Inst. of Light Metals, (1983), pp.69
5. M. V. Hyatt : Metal progress, vol.9 (1977), No. 3, pp.56
6. P. W. Kroger : U.S. Patent 3, 791, 876
7. 錦木壽, 菅野幹光, 濟藤洋 : 輕金屬, vol. 36(1986), pp.22
8. J. T. Staley : Metal. Eng. Quar., vol. 16 (1976), pp.137
9. 서인석, 박중근, 임성택, 은일상 : 대한금속학회지, 33권 3호 (1995), pp. 390
10. E. Kato, Y. Ueda and T. Kobayashi : Light metals, vol. 35 (1985), pp.689
11. K. Higashi, Y. Hirai and T. Ohnishi : Light metals, vol.35 (1985), pp.353
12. J. S. Santner : Metall. Trans., vol.9 (1978), pp.769