



대형 Al 7050 링 단조재의 기계적 특성에 미치는 시효처리의 영향

Effect of Aging Treatment on Mechanical Properties of Large Al 7050 Ring Forged Materials

배동수*† · 주경환* · 이진경** · 이상필** · 장창범*** · 홍성섭**** · 박태원****
 Dong-Su Bae*†, Kyung-Hwan Joo*, Jin-Kyung Lee**, Sang-Pill Lee,
 Chang-Beom Chang, Sung-Seop Hong**** and Tae-Won Park****

(Received 29 November 2017, Revision received 23 March 2018, Accepted 26 March 2018)

Abstract: After casting and solidification of large Al 7050 billets, ring forging and solution treatment were carried out and then the effect of aging on the mechanical properties at the center, middle and surface parts of the Al 7050-1, 2, 3 materials with different aging were studied. The difference in the chemical composition of the Al 7050 large ring materials according to the positions of the center, middle and surface parts was small, and the deformed microstructure was formed as the elongated grains in the circumferential direction with partially recrystallized fine grains by aging. The tensile strength, fatigue strength, and hardness of Al 7050-3 had the highest values. In the case of the plane strain fracture toughness (K_{IC}), the Al 7050-2 indicated the highest value.

Key Words : Al 7050 alloy, Large Scale Ring Forging, Aging Treatment, Mechanical Properties.

1. 서 론

항공기, 로켓 등의 구조재는 경량성, 고강도, 안전성 등의 특성을 갖는 것이 필수적이다. 경량성 및 안전성의 관점에서 고강도, 고인성 알루미늄합금이 개발되고 있으며 강도를 높이기 위해서는 경화원소인 Zn, Mg, Cu의 첨가원소의 양을 조절하고, 인성을 증가시키기 위해서는 Fe, Si 등의 불순물 원소의 양을 규제하고 있다.¹⁻⁴⁾ 알루미늄합금

중에서 Al-Zn-Mg-Cu계 합금은 가장 강도가 높은 합금이며, 보다 높은 강도와 인성을 얻기 위해 합금개발이 진행되고 있다. Al 7050합금은 Al 7075 합금을 대체하고자 Alcoa사에서 1970년대에 개발한 합금으로, Fe, Si 등의 불순물 양을 더욱 규제하여 인성을 증가시키고, Al 7050합금에서 결정립 미세화 원소로 첨가되던 Cr을 Zr으로 대체함으로써 소입감수성을 증가시켰으며 피로저항, 내응력 부식성 등의 특성을 향상시킨 합금으로 개발되었

*† 배동수(교신저자), 주경환 : 동의대학교 신소재공학과
 E-mail : dsbae@deu.ac.kr, Tel : 051-890-2288
 **이진경, 이상필 : 동의대학교 기계공학과
 *** 장창범 : 한국 알코아(주) R&D팀
 **** 홍성섭, 박태원 : 국방과학연구원 제 4 R&D연구부

*† Dong-Su Bae(corresponding author), Kyung-Hwan Joo :
 Department of Advanced Materials Engineering, Dong-Eui University.
 E-mail : dsbae@deu.ac.kr, Tel : 051-890-2288
 **Jin-Kyung Lee, Sang-Pill Lee : Department of Mechanical Engineering, Dong-Eui University.
 ***Chang-Beom Chang : R&D Team, Alcoa Korea.
 ****Sung-Seop Hong and Tae-Won Park : 4th R&D Institute, ADD

다.⁵⁻⁸⁾

국내에서는 1980년대 말부터 Al 7050합금 개발을 시도하여 고순도, 저수소함량 합금을 용해주조하기 위한 기반기술을 확보하였으나, 이는 7인치 빌렛 크기의 소형으로서 대형 부품에 적용하기 위해서는 보다 큰 직경의 빌렛이 요구되었다. Al 7000계열 합금은 다량의 합금원소를 함유하고 있기 때문에 용해 후 냉각시 고온균열과 저온균열, 수축기공과 거대편석 등이 쉽게 발생하여 대형 빌렛의 제작이 어려운데 특히, 표면과 중심부의 냉각속도의 차이에 의하여 주조 공정 중 응고균열이 쉽게 발생하는 문제점이 있다.^{3,4)}

본 연구에 사용된 대형 빌렛은 direct-chill 주조 공정으로 지름 720 mm 크기의 건전한 대형 Al 7050합금 빌렛을 몰드형상 설계, 냉각수량 조절, 응력제거처리, 균질화처리 등의 적합한 제조공정을 통하여, 국내에서 최초로 (주)알코아 코리아에서 생산된 제품이다.⁹⁾

본 연구의 목적은 대형 Al 7050빌렛을 주조 및 응고시킨 후, 링 단조와 용체화처리를 행한 다음, 시효처리를 달리하여 Al 7050합금의 중심부와 중간부 및 표면부에서의 인장강도, 경도, 평면변형 파괴인성, 피로특성 등의 기계적 특성에 미치는 시효처리의 영향을 검토하여, 대형 링 단조한 Al 7050합금의 기계적 특성에 대한 기초연구자료를 얻는 것에 두었다.

2. 실험방법

Al 7050합금을 대형 링 단조한 소재에 대한 특성 평가를 위하여 다음과 같은 실험 방법을 행하였다. Fig. 1은 링 단조한 Al 7050합금의 소재에서 채취한 3개의 시편 중 1개 시편의 형상과 크기를 나타낸다. 이들 3개의 시편들은 모두 477°C에서 6시간 유지한 다음 수냉처리하는 용체화처리 (solution heat treatment)를 행한 후, 다음과 같이 열처리 조건을 달리한 3가지 방법(Al 7050-1, Al 7050-2, Al 7050-3로 표기)의 시효처리를 행하였다.

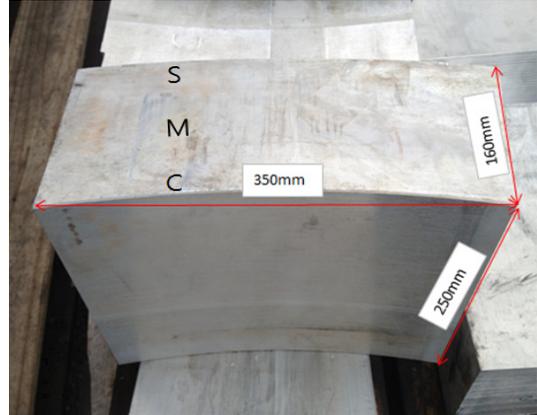


Fig. 1 Specimen size, shape and each portion of large Al 7050 ring forged alloy (surface: S, middle: M, center: C)

Al 7050-1은 T73처리(121°C×24 hr + 177°C×12 hr), Al 7050-2는 T74처리(121°C×6 hr + 177°C×12 hr), 그리고 Al 7050-3은 T826처리(140°C×6 hr + 185°C×3 hr + 120°C×12 hr)의 시효처리를 각각 행한 것을 의미한다.

대형 링 단조한 Al 7050합금의 각 부위(표면부: S, 중간부: M, 중심부: C)에서 채취한 각각의 시험편에 대하여 다음과 같은 실험을 행하였다.

먼저, ICP분석기(모델; Thermo Scientific, ICAP 6000Series)를 이용한 화학성분 분석, 금속현미경(OM)과 주사전자현미경(SEM, Quanta 200FEG) 및 에너지분산형검출기(EDS)를 이용한 미세조직의 관찰 및 화학조성 분석을 행하였다. 인장강도 특성은 ASTM G142형 인장시편(평행부 직경과 길이는 각각 6 mm와 28.6 mm)을 10 mm/min의 cross-head속도로 Instron-type의 인장시험기를 이용하여 상온에서 측정하였으며, HRB경도는 Rockwell 경도시험기를 이용하여 측정하였다.

Rotary bending-type의 피로시험기를 이용하여 상온에서의 피로시험을 행하였고, 평면변형 파괴인성, K_{Ic} 는 C-T(compact tension)시편을 이용하여 ASTM E339/E1820의 시험방법으로 Instron-type의 인장 및 압축시험기를 이용하여 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 대형 링 단조한 Al 7050합금의 화학조성

대형 링의 각 부위(표면부, 중간부, 중심부)에서 채취한 시험편의 화학성분을 ICP분석기를 이용하여 정성 및 정량분석을 하였다.

Table 1 Chemical composition analysis result of Al 7050(large ring)-1

Sample	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Zr	Ti	Ni
S	0.012	0.103	2.163	0.010	2.121	0.014	5.961	0.133	0.027	0.009
M	0.017	0.085	2.080	0.010	2.054	0.013	5.919	0.134	0.029	0.009
C	0.016	0.151	2.179	0.013	2.119	0.021	6.039	0.127	0.023	0.014

Table 2 Chemical composition analysis result of Al 7050(large ring)-2

Sample	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Zr	Ti	Ni
S2	0.014	0.103	2.068	0.011	2.031	0.017	5.688	0.135	0.030	0.009
M2	0.018	0.085	2.117	0.010	2.083	0.013	5.994	0.139	0.031	0.009
C2	0.018	0.197	2.074	0.011	2.037	0.020	5.947	0.132	0.028	0.011

Table 3 Chemical composition analysis result of Al 7050(large ring)-3

Sample	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Zr	Ti	Ni
S3	0.014	0.092	2.015	0.011	2.020	0.016	5.620	0.139	0.032	0.010
M3	0.018	0.086	2.040	0.009	2.031	0.013	5.867	0.137	0.030	0.009
C3	0.018	0.101	2.052	0.010	2.034	0.013	5.890	0.133	0.028	0.008

Table 1~3에 나타난 바와 같이, 시효처리를 달리한 Al 7050 대형 링의 각 부위별 화학성분을 분석한 결과, 대형 링의 중심부, 중간부, 표면부의 각각의 위치에 따른 화학조성에는 큰 차이가 보이지 않아, 비교적 균질한 화학조성의 분포를 보이는 것을 알 수 있었다.

그리고 불순물인 Fe함량이 Al 7050-1, 2의 중심부에서는 높은 것을 나타내고 있는데, 이는 시효처리의 영향에 기인한 것이 아니라, 대형 잉곳을 주조시 형성된 편석이 후속의 링 단조 공정 후에도 제거되지 않고 잔존함에 의한 것으로 판단된다.

3.2 대형 링 단조한 Al 7050합금의 가공조직

다음의 Fig. 2~4에 각각 시효처리한 Al 7050-1, 2 및 3합금의 대형 링의 각 부위(표면부, 중간부, 중심부)별 가공조직을 금속현미경으로 관찰한 결과를 나타내었다.

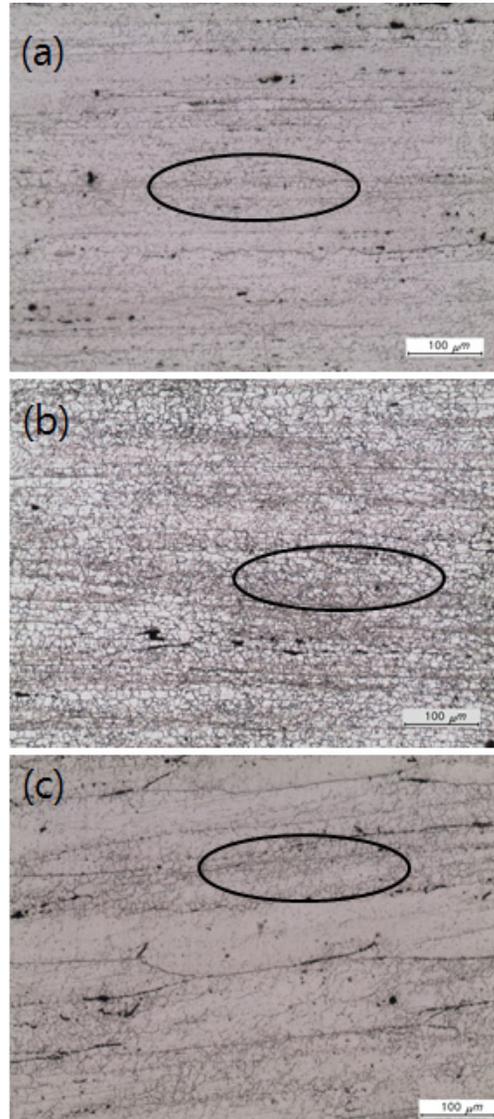


Fig. 2 Metallographic microscope images of the (a) center, (b) middle, and (c) surface portion of Al 7050-1 alloy

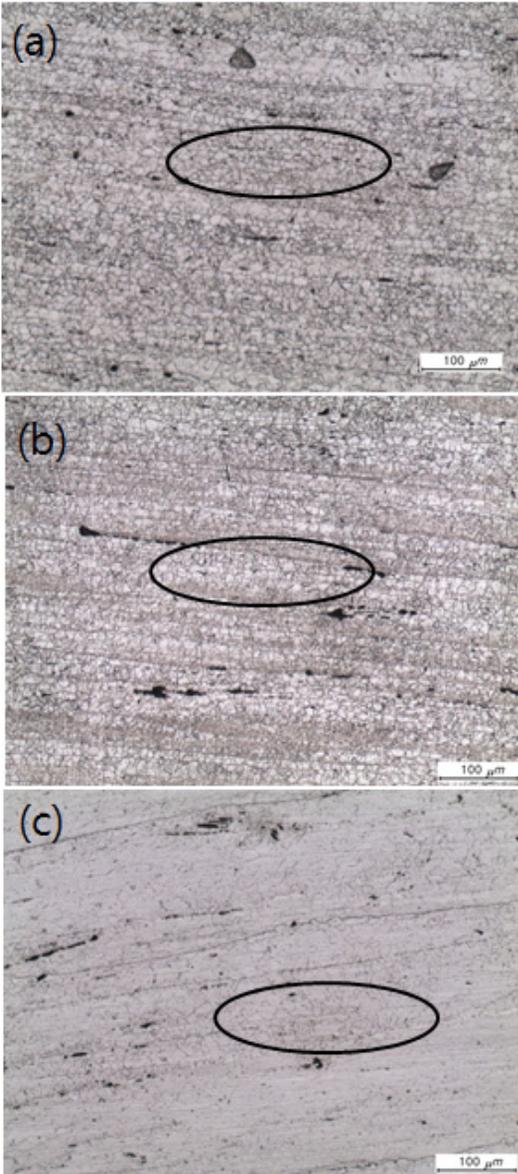


Fig. 3 Metallographic microscope images of the (a) center, (b) middle, and (c) surface portion of Al 7050-2 alloy

모든 부위에 걸쳐서, 결정립자들이 링 단조 방향의 수직방향(원주방향)으로 길게 연신되어 있으며, 중간부의 연신된 입자간격이 더 조밀하게 형성된 경향을 보인다. 이는 링 단조에 의하여, 소재에 의한 입자변형이 시작되는데, 중간부에서는 소

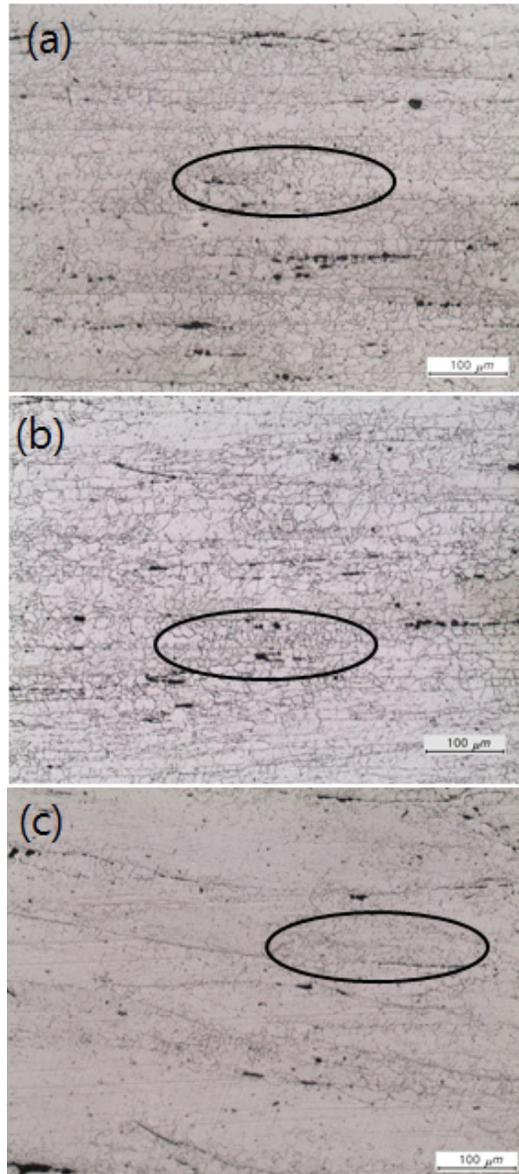


Fig. 4 Metallographic microscope images of the (a) center, (b) middle, and (c) surface portion of Al 7050-3 alloy

성변형영역이 겹치면서 입자변형량이 증가하기 때문에 판단된다. 그리고 Fig. 2-4에 타원으로 영역을 표시한 것처럼 가공으로 길게 연신된 조직 내에 시효처리에 의해 부분적으로 재결정화된 미세한 결정립자가 형성되어 있는 것을 알 수 있다.^{6,8)}

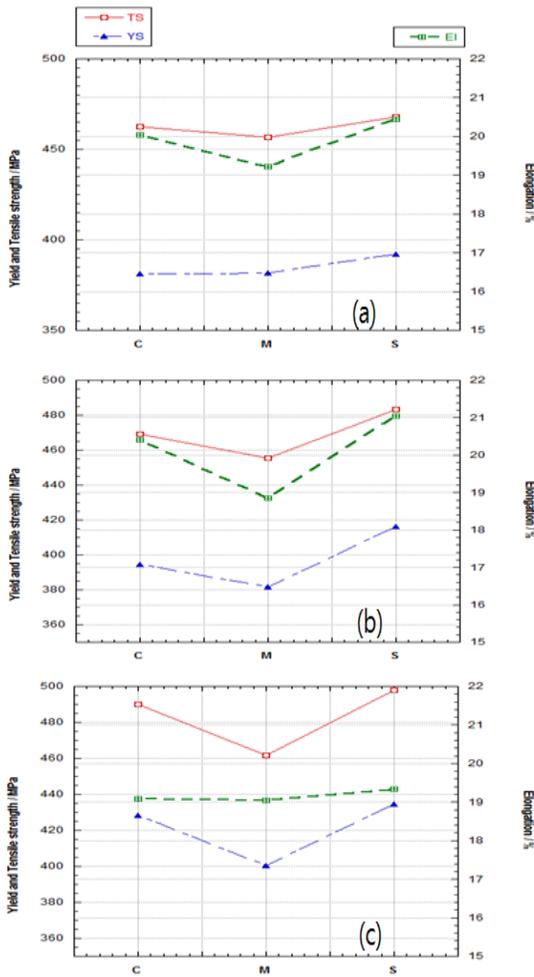


Fig. 5 Comparison of tensile strength characteristics of (a) Al 7050-1, (b) Al 7050-2, and (c) Al 7050-3 ring forged materials

3.3 대형 링 단조한 Al 7050합금의 기계적 특성

시효처리를 달리한 Al 7050의 대형 링 압연재의 각 부위(표면부, 중간부, 중심부)에서 채취한 시험편으로 상온인장시험 및 경도시험을 행하여, 시효에 따른 기계적 특성변화를 비교한 결과를 각각 Fig. 5와 6에 나타내었다.

3.3.1 인장시험

Fig. 5에서, 시효처리한 Al 7050 대형 링의 강도

및 연성특성은 시효처리 조건에 무관하게, 인장강도 223~238 MPa과 항복강도 107~124 MPa 그리고 연신율 7.1~11.3 %의 기계적 특성을 가지는 주조재⁹⁾에 비하여 크게 개선된 것을 보여준다.

각 부위별 인장강도의 변화는 Fig. 5(a)~(c)에 나타난 바와 같이, 시효처리 조건과 무관하게 모두 중간부(M)에서 낮은 값을 가졌다. 그리고, 항복강도는 Fig. 5(a)에서 보듯이 중심부에서 표면부 측으로 약간 증가하는 것을 제외하고는, Fig. 5(b)와 (c)에 보인 바와 같이 중간부에서 가장 낮은 값을 나타내었다.

이는 Fig. 2~4에 나타난 OM사진을 보면, 링 단조에 의하여, 소재의 중간부에서 소성변형영역이 겹치면서 입자내부에 축적되는 변형에너지도 증가하게 된다. 따라서, 시효처리에 의해서 중간부의 재결정화가 소재의 표면부와 중심부에 비하여 상대적으로 빠른 속도로 진행되므로, 입자의 성장이 약간 발생하였기 때문에 중간부에서의 항복 및 인장강도 특성이 낮은 것으로 판단된다.

연성은 Fig. 5(a)와 (b)에 나타난 바와 같이, 중심부(M)에서 낮은 값을 가지나, Fig. 5(c)의 경우는 중심부와 표면부가 큰 변화가 없는 것을 알 수 있는데, 이는 그림(c)의 중간부에서의 인장 및 항복강도의 감소폭이 Fig. 5(a)와 (b)에 비하여 크므로, 연신율은 상대적으로 증가하는 것에 기인한다고 판단된다.

즉, Al 7050-3 대형 링의 단조 및 시효처리에 의해, 중간부에서의 연성은 중심부와 표면부에 비하여 큰 차이가 없으나, 항복 및 인장강도가 많이 감소한 것을 알 수 있다. 그리고 Al 7050-1, 2, 3의 시효처리 방법을 달리한 재료 중에서, Al 7050-3의 대형 링의 항복과 인장강도 및 연성특성이 가장 우수한 것을 알 수 있었다.

3.3.2 경도시험

Fig. 6에 시효처리를 달리한 대형 링의 반지름 방향으로의 경도를 중심부에서 표면부에 걸쳐서 상온에서 측정된 결과를 나타내었다.

Fig. 6 (a), (b) 및 (c)에 나타난 바와 같이, 각각 Al 7050-1, 2 및 3재의 중심부에서 표면부에 이르는 단면에 걸친 경도분포를 측정된 결과, 전 단면

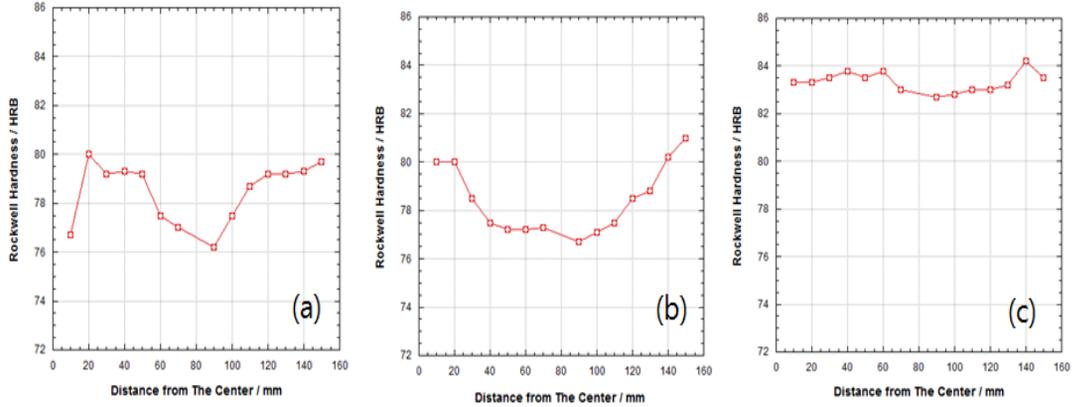


Fig. 6 Sectional hardness distribution curves for each part of (a) Al 7050-1, (b) Al 7050-2, and (c) Al 7050-3 ring forged materials

에 걸쳐서 Al 7050-1재는 HRB 76~80, Al 7050-2재는 HRB 77~81의 경도범위 내에 분포하고 있는 것을 알 수 있으며, 중심부와 표면부에 비하여 중간부의 경도값이 낮은 분포를 보였는데, 이는 Fig. 5의 인장시험결과와 유사한 경향을 나타내고 있어, 시효처리에 의해 중간부의 재결정화된 입자의 크기가 중심부와 표면부에 비하여 약간 더 조대한 것에 의한 것으로 판단된다. 그러나 Al 7050-3재는 HRB 82~84의 경도범위 내에서 고른 경도분포하고 있는 것을 알 수 있다.

따라서 링 단조재의 경도는 전보⁹⁾에서 발표한 주조재의 경도 HRF 69~74(HRB 19~29에 해당)에 비하여 크게 상승하였으며, Al 7050-3재의 경도는 Al 7050-1, 2재에 비하여 높은 경도값과 균일한 경도분포를 가진다. 이는 Fig. 5의 인장시험결과에서 Al 7050-3재의 인장강도값이 Al 7050-1, 2재에 비하여 높은 것과 일치하는 것을 알 수 있다.

3.4 대형 링 단조한 Al 7050합금의 피로특성

대형 링의 각 부위(표면부, 중간부, 중심부)에서 채취한 시험편의 피로시험을 상온에서 rotary-bending type의 피로시험기를 이용하여 측정된 결과를 Fig. 7에 응력진폭(S)-사이클 수(N)의 피로곡선으로 나타내었다.

Fig. 7에서 Al 7050-1, 2, 3재 모두 내구환을 나타내지 않으므로, 비철재료가 가지는 전형적인 피로곡선을 나타내고 있으며, Al 7050 대형 링의 피

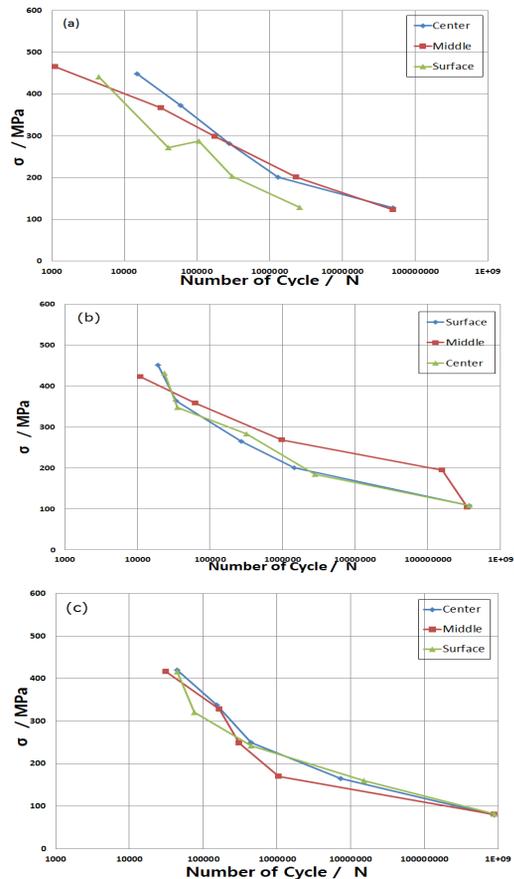


Fig. 7 Fatigue curves for each part of (a) Al 7050-1, (b) Al 7050-2, and (c) Al 7050-3 ring forged materials

로곡선들은 시효처리에 의한 차이가 크게 나타나지 않았다.

그러나 동일한 응력진폭에 대한 피로파괴까지의 사이클 수를 비교해 보면, 피로강도 특성은 AI 7050-3재가 가장 크며, AI 7050-2재 그리고 AI 7050-1재의 순으로 그 특성이 약간씩 작아지는 것을 알 수 있다.

3.5 대형 링 단조한 AI 7050합금의 평면변형 파괴인성, K_{1C}

대형 링의 각 부위(표면, 중간, 중심부)에서 채취한 시험편의 평면변형 파괴인성, K_{1C} 를 실온에서 측정된 결과를 정리, 분석하였다.

J저항곡선 (J-R curve)은 균열성장량(Da)에 대하여 J값의 증가량을 나타낸 것으로 이는 균열전파에 대한 시험편의 저항성 크기를 나타낸다. ASTM E1820에 따르면 J_Q 값은 균열이 0.2 mm성장할 때의 J값으로 정의되며, 이는 J-R 곡선이 0.2 mm offset blunting line과 교차하는 점의 J값으로 결정한다. 이때 J-R곡선은 다음과 같이 멱함수로 fitting한다.

$$J = C \cdot (\Delta a)^m$$

이렇게 얻어진 J_c 혹은 J_Q 값은 다음의 이론식을 이용하여 다시 K_{1C} (K_{Jc} 로 표기) 값으로 환산되었다.

$$K_{Jc} = \sqrt{\frac{E}{1-\nu^2}} J_c, \text{ 혹은 } K_{Jc} = \sqrt{\frac{E}{1-\nu^2}} J_Q$$

아래에 나타난 Fig. 8~10의 그래프들은 시효처리를 달리한 AI 7050-1, 2, 3재의 각 부위에서 채취한 시험편들 중, 중간부에서 채취한 시험편들에 대해 K_{1C} 실험한 결과의 그래프와 여기서 J_Q 값을 구하는 그래프를 한 예로 들어 나타내었다.

Fig. 8~10의 각각의 하중-변위곡선은 모두 최대 하중값을 보인 후 감소하고 있는 “pop in”현상을 보이고 있는데, 이는 불안정한 균열이 빠른 속도로 전파한 후 다시 찢어지며(tearing) 전파하기 때문이다.

이러한 찢어지며 전파하는 양상은 AI 7050-1, 2,

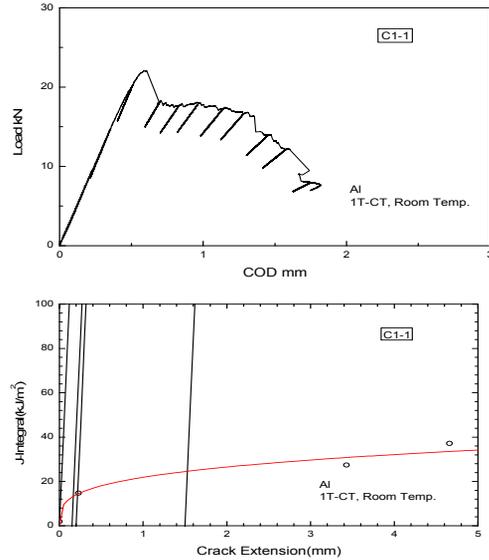


Fig. 8 K_{1C} experiment graph(above) and calculation graph of J_Q value of the center part in AI 7050-1(C1-1) specimen

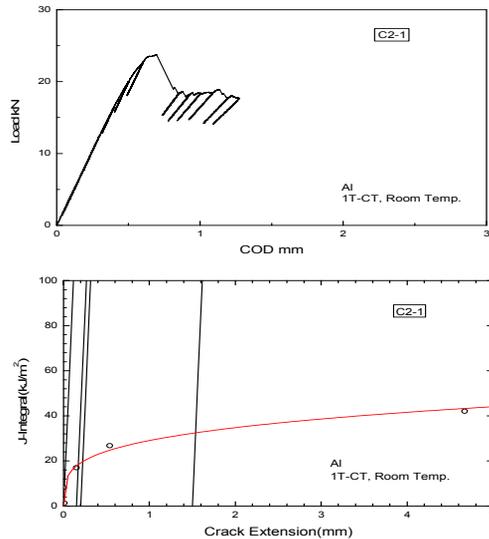


Fig. 9 K_{1C} experiment graph(above) and calculation graph of J_Q value of the center part in AI 7050-2(C2-1) specimen

3재질별로 조금 상이한데, Fig. 8은 하중이 급감 후 서서히 계속 감소하고 있으며, Fig. 9는 하중이 급감 후 일정한 값을 그리고, Fig 10은 하중이 급

감 후 약간 상승하다가 감소하고 있다.

그러므로 본 소재에 대한 평면변형 파괴인성 특성은 시효처리 조건에 따라서 균열전과 후 다시 찢어지며 전파하는 양상이 변하는 것을 알 수 있다.

Table 4는 Al 7050-1, 2, 3재의 각 부위에서 채취한 시편들에서 구한 JQ값 및 K_{IC}값을 모두 나타낸 것이다. 여기서, C1, M1, S1은 각각 Al 7050-1재의 중심부, 중간부, 표면부에서 채취한 시편을 의미하며, C2, M2, S2는 Al 7050-2재의 경우를, C3, M3, S3은 Al 7050-3재의 경우를 각각 의미한다.

Table 5는 Table 4에 나타낸 K_{IC}값을 평균하여 정리한 것으로 Al 7050-1, 2, 3 중에서는 Al 7050-2재가 가장 큰 K_{IC}값을 가지는 것을 알 수 있었다. K_{IC}는 균열과 같은 결함이 존재하는 재료의 파괴에 대한 고유의 저항성을 나타낼 수 있는 재료의 특성값으로 온도와 변형속도의 함수이며, 일반적으로 온도가 감소하고 변형속도가 증가할수록 그 값은 감소한다.

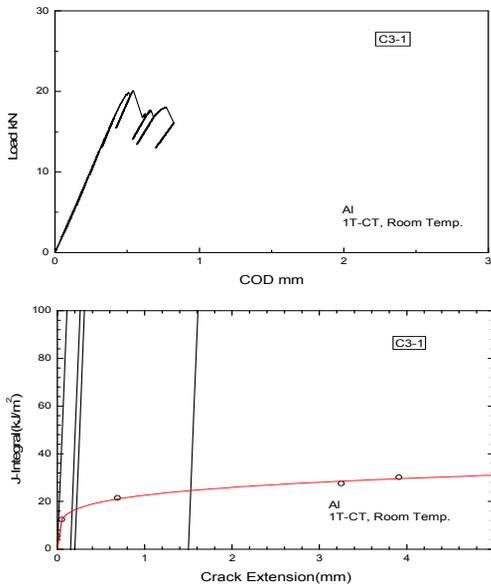


Fig. 10 K_{IC} experiment graph(above) and calculation graph of JQ value of the center part in Al 7050-3(C3-1) specimen

Table 4 The J_Q and K_{IC} values of each part in Al 7050-1, 2, 3 materials

Spec. No.	Y.S.	T.S.	Test Temp.	Const. C	Const. m	J _Q	K _{IC}
	MPa	MPa	°C			KJ/m ²	MPa·m ^{0.5}
c1-1	381.40	462.60	22	21.86	0.278	14.18	33.02
c1-2	381.40	462.60	22	36.09	0.240	25.38	44.18
c2-1	394.80	469.20	22	29.05	0.259	19.64	38.87
c2-2	394.80	469.20	22	33.93	0.258	22.94	42.01
c3-1	428.50	490.10	22	22.63	0.291	16.66	35.80
c3-2	428.50	490.10	22	29.13	0.195	21.69	40.85
m1-1	381.50	456.70	22	29.36	0.229	20.75	39.95
m1-2	381.50	456.70	22	29.88	0.240	20.77	39.98
m2-1	381.50	455.50	22	39.28	0.205	29.07	47.29
m2-2	381.50	455.50	22	34.02	0.206	25.14	43.98
m3-1	400.50	461.50	22	30.26	0.273	20.00	39.23
m3-2	400.50	461.50	22	27.36	0.319	16.63	35.77
s1-1	391.90	468.00	22	33.10	0.358	19.25	38.48
s1-2	391.90	468.00	22	32.57	0.159	25.60	44.37
s2-1	416.10	483.50	22	33.64	0.226	23.90	42.88
s2-2	416.10	483.50	22	35.81	0.358	20.83	40.03
s3-1	434.40	498.10	22	17.47	0.363	9.92	27.62
s3-2	434.40	498.10	22	27.65	0.164	21.55	40.72

- C(center)1, M(middle)1, S(surface)1; Al 7050(large ring)-1.
- C2, M2, S2; Al 7050(large ring)-2.
- C3, M3, S3; Al7050(large ring)-3.

Table 5 The K_{IC} values of each part in Al 7050-1, 2, 3 materials

	K _{IC}		
	C	M	S
Al 7050-1	38.60	39.96	41.43
Al 7050-2	40.44	45.64	41.46
Al 7050-3	38.33	37.5	40.72

링 단조재의 각 부위별 K_{IC}값을 보면, 표면부에서는 Al 7050-1, 2, 3재 모두 큰 차이가 없으나 Al 7050-2재가 가장 큰 값을 가지며, 특히 중간부에서 그 차이가 가장 크게 나타났다.

이는 3.2절에서 서술한 바와 같이, 중간부에서

는 소성변형영역이 겹치면서 입자변형량이 증가하므로 상대적으로 균열발생원이 감소하기 때문으로 판단된다.

4. 결 론

1) Al 7050 대형 링의 중심부, 중간부, 표면부의 각각의 위치에 따른 화학성분의 차이는 적었으며, 그 가공조작은 원주방향으로 길게 연신된 입자 내에 시효에 의해 부분 재결정된 미세립자가 형성되어 있었다.

2) Al 7050-1, 2, 3의 열처리 방법을 달리한 재료 중에서, Al 7050-3재의 대형 링의 항복과 인장강도 및 연성 등의 인장강도 특성이 가장 우수하였다.

3) Al 7050-3재의 대형 링의 피로강도가 Al 7050-1, 2재의 경우보다 높았다.

4) Al 7050-3재의 전 단면에 걸쳐서 HRB 82.5~84.0의 경도범위 내에 고른 경도분포를 나타내어, Al 7050-1, 2재에 비하여 높은 경도값을 가졌다.

5) Al 7050-1, 2, 3중에서는 Al 7050-2재의 K_{IC} 값이 가장 큰 K_{IC} 값을 가졌다.

후 기

본 논문은 동의대학교 전자세라믹스센터(RIC) 장비를 사용하였습니다.

References

1. J. H. Kim et al., 2012, "The Influence of Alloy Composition on the Hot Tear Susceptibility of the Al-Zn-Mg-Cu Alloy System", Korean Journal

Met. Mater. Vol. 50, No. 9, pp. 669-675.
 2. S. W. Kim, and C. H. Lee, 1998, "A Study on the Electron Beam Weldability of A5083, A6061, A7075 AL Alloys for the Transportation Applications", Korean Journal Met. Mater. Vol. 36, No. 7, pp. 1169-1175.
 3. M. Koç, J. Culp and T. Altan, 2006, "Prediction of residual stresses in quenched aluminum blocks and their reduction through cold working processes", Journal of Materials Process Technology, Vol. 174, No. 1-3, pp. 342-354.
 4. R. Nadella et al., 2008, "Macrosegregation in direct-chill casting of aluminum alloys", Progress in Materials Science, Vol. 53, No. 3, pp. 421-480.
 5. L. Hua, L. Pan and J. Lan, 2009, "Researches on the ring stiffness condition in radial-axial ring rolling", Journal of Materials Process Technology, Vol. 209, No. 5, pp. 2570-2575.
 6. J. Chen et al., 2015, "Microstructure evolution of 7050 Al alloy during age-forming", Materials Characterization, Vol. 102, pp. 114-121.
 7. A. Brotzu et al., 2017, "Study of defect formation in Al 7050 alloys", Procedia Structural Integrity, Vol. 3, pp. 246-252.
 8. Y. L. Deng et al., 2010, "Evolution of microstructures and textures of 7050 Al alloy hot-rolled plate during staged solution heat-treatments", Journal of Alloys and Compounds, Vol. 498, pp. 88-94.
 9. D. S. Bae et al., 2016, "Microstructures and Mechanical Properties of Extruded Al 7050 Billet and Ring Forged One with Large Scale", Journal of The Korean Society for Power System Engineering, Vol. 20, No. 6, pp. 40-45.