

Al-Si-Mg계 주조용 알루미늄 합금의 고주기 피로 거동에 미치는 기공의 영향

이영재¹ · 강원국¹ · 어광준² · 조규상³ · 이기안[#]

Effect of Porosity on the High-Cycle Fatigue Behavior of Al-Si-Mg Casting Alloy

Lee Young Jae, Kang Won Guk, Euh Kwang Jun, Cho Kyu Sang, Lee Kee-Ahn
(Received March 3, 2009)

Abstract

The effect of porosity on the high-cycle fatigue properties of Al-Si-Mg casting aluminum alloys was investigated in this study. Microstructure examination, tensile and high-cycle fatigue test were conducted on both Al-Si-Mg casted (F) and heat-treated (T6) conditions. Porosity characteristics on the fracture surfaces of fatigue-tested samples were examined using SEM and image analysis. The microstructure observation results showed that eutectic Si particles were homogeneously dispersed in the matrix of the Al-Si-Mg casting alloys, but there were porosities formed as cast defects. The high-cycle fatigue results indicated that the fatigue strength of the 356-T6 alloy was higher than that of the 356-F alloys because of the significant reduction in volume fraction of pores by heat treatment. The SEM fractography results showed that porosity affected detrimental effect on the fatigue life: 80% of all tested samples fractured as a result of porosity which acted as the main crack initiation site. It was found that fatigue life decreased as the size of the surface pore increased. A comparison was made between surface pore and inner pore for its effect on the fatigue behavior. The results showed that the fatigue strength with the inner pores was higher than that of the surface pore.

Key Words : Al-Si-Mg Alloy, 356-F Alloy, 356-T6 Alloy, Heat Treatment, High Cycle Fatigue, Pore Size, Pore Distribution

1. 서론

최근 들어 산업 전반에 미치고 있는 부품의 소형화 및 경량화로 인하여 주철 및 철강 소재 부품을 알루미늄(Al) 및 마그네슘(Mg)으로 대체가 이루어지고 있다. 이 중에서도 알루미늄 합금은 기계적 성질, 성형성, 내구한도, 내식성, 리사이클링성 등이 우수하며 그 사용량이 증가하고 있다 [1~4]. 알루미늄 합금은 제작 비용 절감을 위하여

주로 고압 및 저압 주조 공정으로 제조하고 있으며, 제조된 주조용 알루미늄 합금은 주물 철강 소재에 비해 약 60%의 경량화가 가능하여 자동차, 항공, 선박 및 철도 차량 등을 포함한 산업 전 분야에서 사용되고 있다 [5~6].

주조용 알루미늄 합금들에서 가장 널리 사용되고 있는 합금 중 하나로 Al-Si-Mg 계 356 합금들을 수 있는데 이 합금계는 약 7%의 Si 첨가로 용탕의 유동성이 높고 주조성이 우수하며 소량(약

1. 안동대학교 신소재공학부 청정소재연구센터
2. 한국기계연구원 신금속재료연구부
3. 동양대학교 철도차량학과
교신저자: 안동대학교 신소재공학부,
E-mail: keeahn@andong.ac.kr

0.35%)의 Mg 첨가로 강도가 향상되어 기계적 성질과 절삭성이 좋다. 또한 내식성 및 용접성 등이 우수하며 열처리를 통하여 강도를 높일 수 있어 주조용 고강도 알루미늄 합금으로 잘 알려져 있다[7~8]. 주조용 알루미늄 합금의 피로 특성은 일반적으로 주조공정 상 충전 과정 중에 발생하는 기공(air porosity) 결함과 응고 과정 중 금속 고유의 응고 수축에 기인한 수축공(shrinkage cavity) 결함 등 주조 결함의 영향에 크게 의존하게 된다고 보고되고 있다[9~10]. 특히, 불가피하게 존재하는 주조 결함은 매우 낮은 함유량에서도 현저한 기계적 특성의 저하를 가져올 수 있기 때문에 이 분야에 대한 연구는 최근까지 진행되어 왔으나 [11~12] 아직까지 미흡한 실정이다. 또한 기계적 특성에 관한 기존 연구 동향을 살펴보면, 인장 특성 및 피로 수명 예측에 국한되어 있다. Al-Si계 주조용 합금의 피로 특성에 미치는 기공과 관련한 연구 결과로는 Q.G.Wang[11]과 H.R.Ammar[12]의 결과가 보고된 바 있다. Q.G.Wang[11] 등은 A356-T6의 피로 거동에 대한 기공의 면적의 중요성을 언급한바 있으며 H.R.Ammar[12] 등은 Al-Si계 합금 및 열처리재에서 표면에 위치한 기공에서 피로 균열이 생성된다고 보고한 바 있다. 그러나 아직까지 Al-Si-Mg계 주조용 합금에서 고주기 피로 특성에 미치는 표면 및 내부 균열의 영향을 체계적으로 분석한 연구는 부족한 실정이다.

본 연구에서는 금형 주조로 제조된 Al-Mg-Si계 356 주조용 합금(F) 및 열처리(T6)한 합금에서 상온 고주기 피로 특성을 조사하고 피로 특성에 미치는 열처리 및 기공의 영향에 대하여 조사하고자 하였다. 또한 피로 파단면의 관찰을 통하여 피로 특성에 미치는 내부 및 표면 기공의 분리하고 상관 관계를 규명하고자 하였다.

2. 실험 방법

본 연구에서 사용된 356-F 주조용 알루미늄 합금은 14.14mm 지름의 봉상으로 금형 주조를 통하여 제조하였으며 제조된 합금의 성분은 ICP를 이용한 고체시료 무기원소 정량분석(습식분석) 방법으로 측정하여 Table 1에 나타내었다. 대기 중에서 356-F 모 합금을 용해한 후 300℃로 예열된 금형에 740℃의 용탕 주입하였으며, 주조시 탈가스와 Ar bubbling을 15분간 실시하였다. 이 시편을 T6(538℃에서 8시간 동안 용체화 처리 후 155℃에

Table 1 Chemical compositions of the 356-F casting alloy (wt.%)

Al	Si	Mg	Fe	Mn	Zn	Cu	Ti
Bal.	7.11	0.35	0.24	0.19	0.02	0.095	0.130

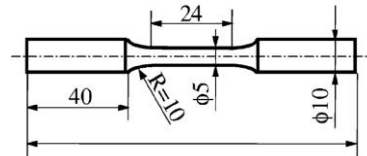


Fig. 1 Geometry and dimensions of the ASTM E466 standard specimen used for fatigue testing

서 4시간 동안 시효 처리) 열처리 하였으며 열처리 하지 않은 상태의 시편과 함께 본 연구에서는 두 가지 시편을 사용하였다. 광학현미경으로 제작된 시편의 미세 조직을 관찰 하였고 이 때 에칭액은 1mL HF + 100mL H₂O 을 사용하였으며 에칭 시간은 대략 5~10초 정도로 하였다. 미세 조직 관찰 시 영상분석을 통하여 기공도를 측정하였으며 기공도는 종류별로 각 시편당 5회 측정하여 평균값을 얻어 나타내었다. 이후 경도 측정은 마이크로 비커스 경도계를 사용하여 0.3kgf 로 10회 측정하였으며 최대값과 최소값을 제외한 후 평균값을 사용하였다. 356-F 합금과 356-T6 합금의 기본적인 기계적 특성을 비교하고 피로 시험의 사전 데이터를 얻기 위하여 상온 인장 시험을 실시하였으며 사용된 시편은 ASTM E466에 준하여 [13] Φ 5 mm 게이지 길이 24mm의 봉상 시편을 사용하였다(Fig. 1). 인장 실험은 MTS 810 기기를 사용하여 cross head speed 1 mm/min의 변형속도로 수행하였고 strain gage를 통해 연신율을 측정하였으며 인장 시험 결과를 바탕으로 하여 상기 두 소재에 대하여 고주기 피로 실험을 수행하였다. 상온 고주기 피로 실험은 Instron 8501을 사용하여, 응력비 R=0.1, Frequency 10Hz의 일정 응력 진폭 조건으로 $\sim 10^7$ 사이클에 도달하였을 때 파괴가 일어나지 않는 응력 진폭을 피로 한도로 규정하여 수행하였다. 고주기 피로 실험 후 주사전자현미경(Jeol JSM-6300)으로 피로 파단면을 관찰하였으며 피로 파괴 거동과 더불어 주조 결함으로 생성된 기공의 크기 및 형태도 함께 조사하였다. 균열생성 지점에 위치한 기공의 크기가 피로 수명에 미치는

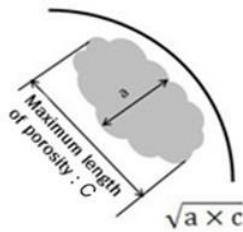


Fig. 2 Illustration of a casting defect and its dimensions as measured on the fracture surface

영향을 분석하기 위하여 기공의 크기를 측정하였는데 이 때 기공의 크기는 Fig. 2 에 나타난 바와 같이 정의하였다[12]. 즉 SEM image를 통하여 나타난 기공의 제일 긴 길이인 c 와 c 에 수직된 기공의 길이인 a 를 이용하여 면적의 제곱근을 기공의 크기로 결정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 열처리에 따른 미세 조직 및 인장 특성 변화

Fig. 3 은 금형 주조된 356-F와 356-T6 합금의 광학 미세 조직 관찰 결과로 전형적인 Al-Si계 주조용 합금의 미세 조직을 보여주고 있다. Fig. 3 (a) 와 (c)에서 보이는 바와 같이 356-F 합금의 경우 Al-Si 수지상(dendrite)과 함께 결정립계를 따라 형성된 공정 Si 입자들이 침상으로 미세하고 균일하게 존재하며 수지상의 형태는 불규칙적으로 관찰되었다. Fig. 3 (b)와 (d)에서 보이는 바와 같이 356-T6 합금의 조직은 356-F 합금의 조직보다 공정 Si 입자의 크기는 증가하였으나 형상은 다소 구형으로 나타났다. 356-F 합금과 356-T6 합금의 전체적인 수지상의 크기는 $50\sim 500\mu\text{m}^2$ 정도로 나타났다. 한편 Fig. 3 에서 주조 결함인 기공은 주로 공정 Si 입자 부근에서 발견되는 것에 주목할 만하다. 기공도 측정 결과 356-F 합금의 경우 평균 0.36%, 356-T6의 경우에는 0.35%로 거의 유사한 수준의 기공률을 보였다. 그러나 기공의 크기는 356-F 합금보다 356-T6 합금이 작게 나타났으며 356-F 합금에서는 $100\mu\text{m}^2$ 이상의 매우 조대한 기공들이 존재하였으나 356-T6 합금에서는 전체적으로 작은 기공이 산재하여 분포하는 경향을 보였다. 이를 통하여 열처리의 영향으로 공정 Si 입자는 작아지고, 기공의 크기를 감소시키는 것으로 생각된다.

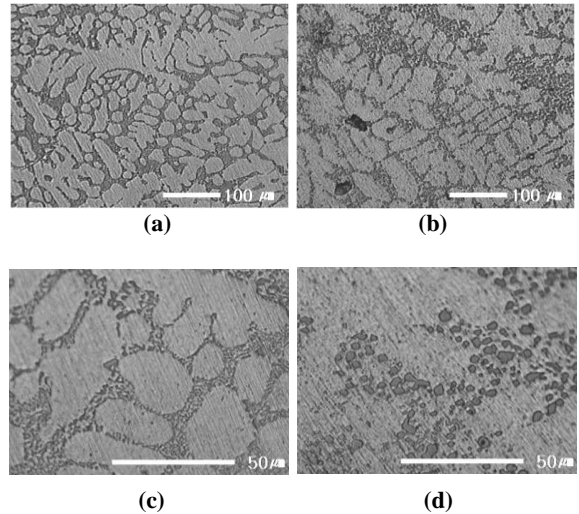


Fig. 3 Optical micrographs showing 356-F alloy ((a), (c)) and 356-T6 alloy ((b), (d))

Al-Si-Mg계 주조용 알루미늄 합금의 경도 및 인장 시험 결과를 정리하여 Table 2에 나타내었다. 356-F 합금과 356-T6 합금 모두 균일한 경도 값을 나타내었으며 356-F 합금은 66.64 Hv 값을 보이는데 비하여 356-T6 합금은 101.55 Hv 정도로 나타나 356-F 합금보다 356-T6 합금의 평균 경도 측정값이 상대적으로 높게 나타났다. 356-F와 356-T6 합금들의 상온 인장 시험 결과, 인장 강도 및 항복 강도 모두 356-T6 합금이 356-F 합금보다 높은 것으로 나타났으며, 연신율 또한 9.1% 로서 높게 나타났다. 앞서 언급한 바와 같이 일반적으로 356-F 합금에 T6 열처리를 실시하면 용체화 처리에 의하여 공정 Si 입자가 구상화되어 응력 집중의 효과를 감소시키고 공정 Si입자의 미세화로 인하여 연성이 높은 기지 조직으로 변화되기 때문에 연신율이 증가하는 것으로 생각된다. 한편 Kashyap 등은 356 합금의 열처리 시 미세한 Mg_2Si 의 석출에 의해서 경도 및 강도가 상승될 수 있다고 보고된 바 있으며[7~8] 이는 본 연구에서와 같이 기공을 포함한 주조재의 경우 그 효과가 크게 나타나는 것으로 사료된다. 반면 Goulart 등은 인장 강도의 경우 DAS (dendrite arm spacing)가 감소함에 따라 특성이 향상되는 것으로 보고한 바 있는데 [15~16] 본 연구의 열처리 후 미세조직 관찰 결과에서는 DAS의 변화가 크게 나타나지 않았다. 따라서 주조용 356-F 합금에 비해 상대적으로 우수하게 나타난 356-T6 합금의 기계적 특성은 열처리

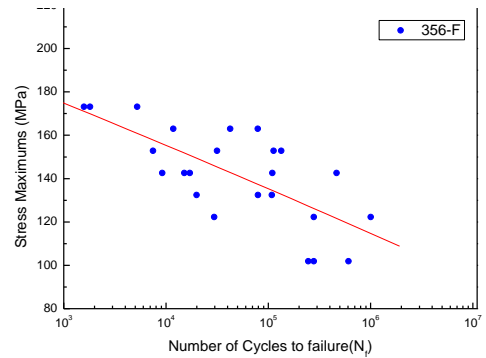
Table 2 Vickers hardness and room-temperature tensile test results of the 356-F and 356-T6 alloys

Specimen	Vickers Hardness (Hv)	Yield Strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Elongation (%)
356-F	66.64	174.60	237.48	2.88
356-T6	101.55	403.72	9.1	

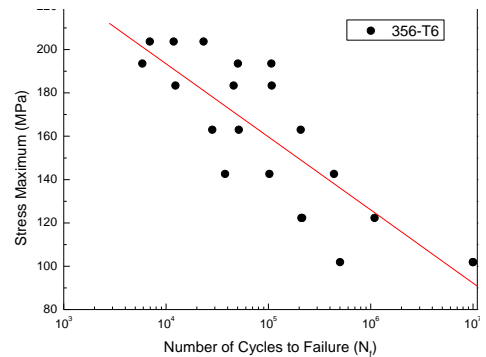
로 인하여 석출된 Mg_2Si 와 공정 Si 입자의 미세화 및 기공의 미세화가 주된 요인으로 해석될 수 있다.

3.2 고주기 피로 거동에 미치는 열처리 영향

Fig. 4 는 356-F와 356-T6 합금의 고주기 피로 특성 결과로서 356-T6 합금이 356-F 합금에 비하여 우수한 피로 특성을 가지는 것으로 나타났다. 일반적으로 탄성영역에서의 응력이 반복적으로 가해지는 고주기 피로의 경우 인장 강도가 높을수록 피로 균열 생성에 대한 저항력이 증가하여 우수한 피로 수명을 보이는 것으로 알려져 있으며[17~18], 이는 본 연구 결과에서도 동일하게 나타났다. 또한 Al-Si-Mg 주조용 합금의 합금원소 중 Si은 용탕의 유동성을 좋게 하고 공정 Si 입자를 형성시켜 주조성과 강도를 향상시키지만, 이 공정 Si 입자들은 취약하여 깨지기 쉽고 주조 공정 중 응고셀 경계를 따라 길게 형성되어 피로 균열전파의 저항성을 크게 낮추는 것으로 보고되고 있다[19~22]. 또한 조대한 침상의 공정 Si 입자를 갖는 합금은 구상의 Si 입자를 갖는 합금과 비교할 경우 균열 성장 속도는 응력변화에 따라 민감하게 반응하며, 이는 침상의 Si 입자가 높은 가공경화를 유발하고 응력변화가 증가할수록 균열이나 파괴 등으로 불안정한 균열성장이 발생한다고 보고된 바 있다[23]. 이상의 연구 결과들과 관련하여 본 연구에서 상대적으로 높은 인장 강도 및 공정 Si 입자의 크기가 작고 구상 공정 Si 입자를 갖는 356-T6 합금이 356-F 합금보다 고주기 피로 특성이 우수한 결과들이 잘 이해될 수 있다. 한편 동일한 응력 진폭을 가했을 때 피로 수명의 분포를 살펴보면, 상대적으로 356-T6 합금이 더 넓은 피로 수명 분포를 나타내는 것으로 나타났다. 이와 같이 높은 피로 한도를 나타내는 356-T6



(a)



(b)

Fig. 4 Fatigue S-N curves of (a) 356-F alloy and (b) 356-T6 alloy

합금의 넓은 피로 수명 변동 기공의 분포에 기인하는 것으로 판단되며 기공의 영향에 대해서는 3.3 절에서 보다 자세히 다루었다.

일반적으로 고주기 피로 수명은 피로 균열의 시작과 전파에 의해서 결정되는데 재료 내부에 결함이 많지 않은 경우에는 균열 시작이 전체 피로 수명의 많은 부분을 차지하므로 균열 생성 지점을 찾고 그 기구를 이해할 필요가 있다. 이를 위해 Fig. 5에 고주기 피로 시험 후 356-F와 356-T6 합금의 파단면을 주사전자현미경을 이용하여 관찰한 결과를 나타내었다. Fig. 5 (a)와 (b)는 전체적인 파단면을 나타낸 것이고, Fig. 5 (c)와 (d)는 균열 생성 부분을 관찰한 결과를 나타낸 것이다. 356-F와 356-T6 합금의 파단면은 표면에서 균열이 생성되어 전파되는 전형적인 피로 파단면의 형상으로 균열 생성 지점과 균열 전파 지점 그리고 급속한 파괴 지점이 뚜렷이 구분되는 유사한 경향을 나타내었다. 대부분 기공으로부터 균열이 생

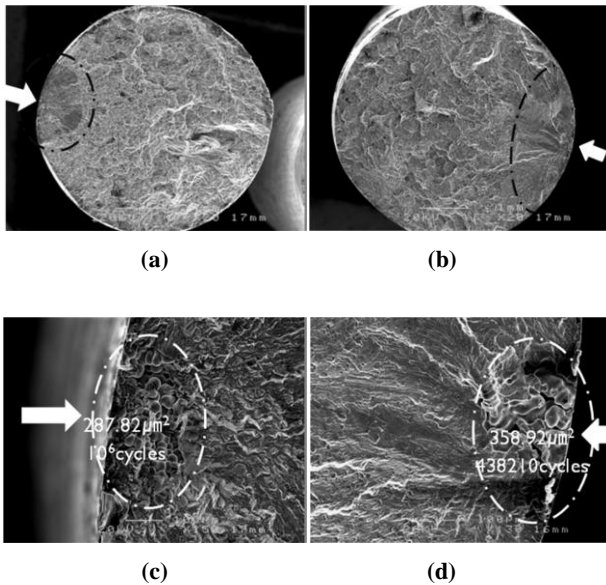


Fig. 5 SEM images of the fatigue fracture surfaces of 356-F alloy and 356-T6 alloy specimens taken at : low magnification ((a) and (b)) showing the bright area and the crack initiation site and high magnification ((c) and (d)) showing the surface pore associated with the crack initiation site

성된 것으로 관찰되었고, 그 형태를 자세히 조사한 결과 주조 공정에서 발생하는 수지상 주위의 기공이 주요 원인인 것으로 나타났다. 또한 부분적으로는 피로 파단면의 전형적인 striation이 관찰되었다.

Table 3에 356-F 합금과 356-T6 합금의 균열이 생성된 지점과 기공의 평균적 크기의 분석 결과를 나타내었다. 실험한 시편의 80 % 이상이 기공으로부터 균열이 생성되어 전파된 것으로 관찰되었으며 평균적인 기공의 크기는 356-F 합금이 상대적으로 크게 존재 하였다. 한편 기공이 존재하지 않은 시편은 기공이 존재하는 시편보다 비교적 높은 피로 수명을 나타내었다. 이는 기공에서 피로 균열이 시작되면 임계 균열의 크기를 이루기 위한 균열 시작에 걸리는 피로수명이 단축되어 피로 강도가 저하되는 것으로 사료된다. 즉, 356-T6 합금이 356-F 합금보다 상대적으로 기공의 크기가 작기 때문에 피로 균열 생성을 억제시키며 공정 Si입자의 구상화 효과로 인하여 우수한 피로 특성을 나타내는 것으로 생각된다.

Table 3 Number of samples which fractured under the effect of porosity in the alloys examined for the present study

Alloy	Number of samples tested	Fatigue fractures caused by porosity	Other than porosity	Average of Pore Size (μm^2)
356-F	22	20	2	1010.17
356-T6	18	13	5	972.80
Total	40	33	7	1032.65
Percentage (%)	100	82.5	17.5	

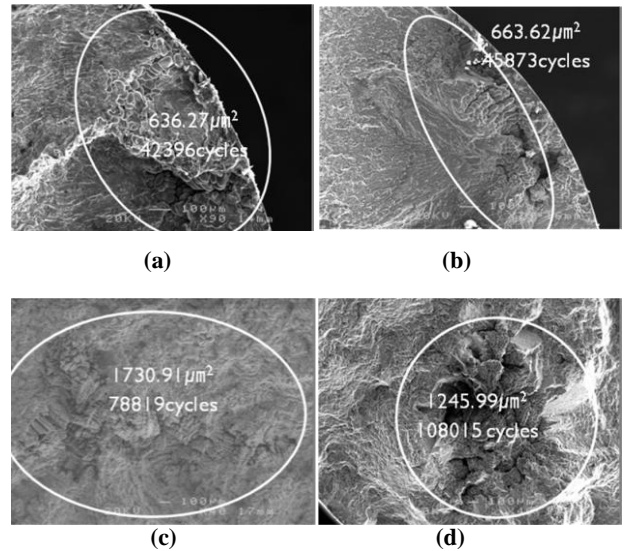


Fig. 6 SEM images of the fatigue fracture of 356-F alloy and 356-T6 alloy specimens, taken at surface pores ((a) and (b)) and inner pores ((c) and (d))

3.3 고주기 피로 거동에 미치는 기공의 영향

Fig. 6 은 기공으로부터 균열이 생성된 지점을 관찰한 것으로, (a)와 (b)는 표면에 위치한 기공을 나타낸 것이고, (c)와 (d)는 내부에 위치한 기공을 나타낸 것이다. 두 합금 모두 표면의 기공에서 균열이 시작된 경우 전형적인 피로 파단면을 보인 반면, 내부 기공에서 균열이 시작된 경우에는 부분적인 피로 파단면이 나타났지만 연성의 파괴 파단면의 경향을 더 크게 나타내었다. 또한 그림에서 볼 수 있듯이 파단면에서 나타난 기공의 크기는 상대적으로 표면 기공보다 내부 기공에서 더 크게 나타났다.

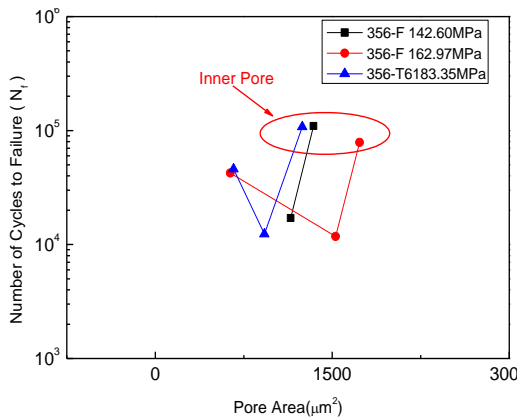


Fig. 7 Effect of pore size on the fatigue life of 356-F alloy and 356-T6 alloy at different crack initiation site

Fig. 7 은 피로 파단면을 관찰한 결과를 바탕으로 균열이 시작된 기공 위치가 피로 수명에 미치는 영향을 분석한 결과의 예를 보여주는 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 열처리 유무에 관계없이 두 조건 모두에서 표면 기공으로부터 균열이 생성되어 균열이 전파된 시편의 피로 수명이 내부에 위치한 기공에서 균열이 생성된 경우의 피로 수명보다 낮게 나타났다. 한편 내부에 기공이 존재하는 시편의 피로 수명보다 표면에 기공이 존재하는 시편의 피로 수명은 356-F 합금에 비해 356-T6 합금이 더 큰 피로 수명 감소율(더 큰 기울기의 감소)을 보였다. 이러한 결과를 바탕으로 기공의 크기가 커질수록 내부의 기공에 비해 표면의 기공이 피로 수명에 더 크게 악영향을 미치는 것을 알 수 있다. 또한 피로 파단면 및 기공의 영향을 관찰한 결과 356-T6 합금이 356-F 합금보다 균열이 생성된 기공의 위치에 따라 더 민감한 거동을 보이는 것으로 나타났다.

표면 기공에서 피로 균열이 시작되면 임계 균열의 크기를 이루기 위한 균열 시작에 걸리는 피로 수명이 단축되어 피로 강도가 저하된다. 이로 인해 기공의 크기가 피로 거동에 미치는 영향을 분석하기 위하여, Fig. 5 에서 나타난 표면 기공의 크기를 측정하였고 그 결과로 356-F 합금은 300~2500 μm², 356-T6 합금은 350~1600 μm²의 분포를 나타냈다. 이러한 결과들을 바탕으로 Fig. 8 에 356-F 합금과 356-T6 합금의 피로 거동에 미치는 기공 크기의 영향(기공 크기에 따른 피로 수명 분포)을 나타내었다. 그림에서 표면 기공의 크기가

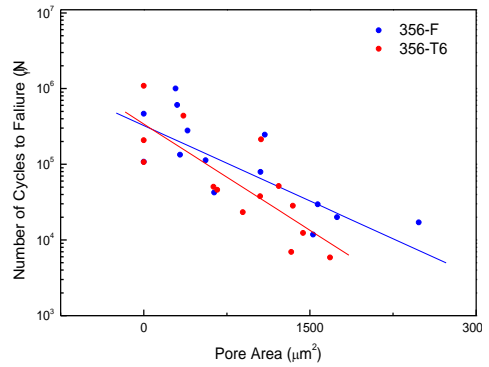


Fig. 8 Effect of surface pore size in the fatigue life of 356-F and 356-T6 alloys

커질수록 피로 거동이 저하되는 것을 명확히 알 수 있다. 이런 현상은 앞서서도 언급한 바와 같이 기공의 크기가 커질수록 임계 균열 크기를 이루기 위한 균열 생성에 걸리는 피로 수명이 기공의 크기가 작을 때 보다 감소되어 피로 수명이 저하되는 것으로 해석될 수 있다.

Fig. 8의 결과에서 기공의 크기와 피로 수명의 상관 관계는 아래와 같은 식으로 표현될 수 있었다.

$$\log y = -\left(\frac{\log y_1 - \log y_2}{\Delta x} \times x\right) + \log y' \quad (1)$$

여기에서 log y는 피로 수명(fatigue life) 이며, x는 기공의 크기(pore size)를 나타낸다. 식 (1)을 이용하여 356 합금의 경우에는 아래 식을 얻을 수 있으며,

$$FatigueLif = [(66.43 \times 10^{-5}) \times PoreSize] + 5.63 \quad (2)$$

356-T6 합금의 경우에는 아래 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$FatigueLif = [(93.57 \times 10^{-5}) \times PoreSize] + 5.5 \quad (3)$$

식 (2)와 (3)의 기울기를 통하여 나타나는 바와 같이 356-F 합금에 비하여 356-T6 합금이 기공의 크기에 따라 피로 수명에 더 큰 민감도를 보이는 것을 알 수 있다. 이상의 결과에서 작은 크기의 기공을 가지고 있는 356-T6 합금의 경우 356-F 합금에 비하여 우수한 피로 수명을 나타내지만 기공의 위치 및 기공 크기 변화가 피로 수명에 미치는 영향은 356-F 합금보다 더 큰 것으로 판단된다.

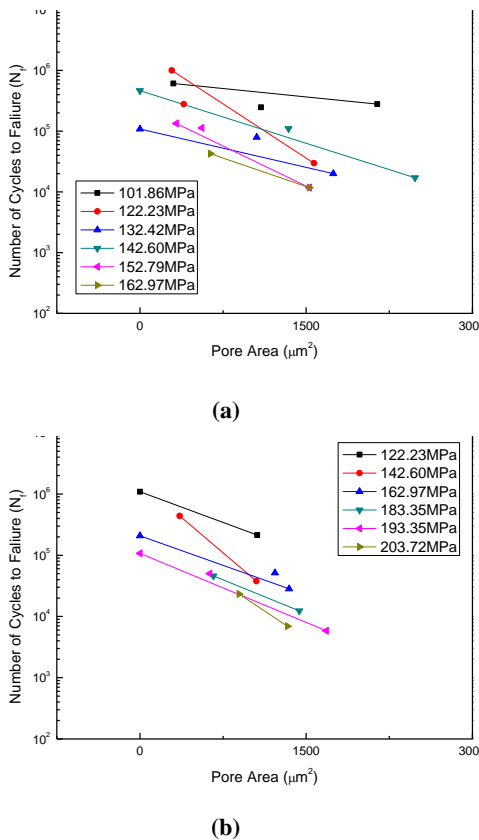


Fig. 9 Effect of surface pore size in the fatigue life of (a) 356-F alloy and (b) 356-T6 alloy at different stress levels

Fig. 9는 Fig. 8의 결과와 관련하여 두 합금의 응력 진폭 조건에 따라 기공이 피로 수명에 미치는 영향을 나타낸 것으로, 356-F 합금의 경우 120~200MPa의 응력 진폭 범위와 356-T6 합금은 100~160MPa의 응력 진폭 조건에서 표면 기공 크기에 따른 피로 수명을 나타낸 것이다. 그림에 알 수 있듯이 비슷한 크기의 기공이라 하더라도 전체적으로 응력 진폭이 커짐에 따라서 피로 수명이 현저하게 저하되는 것을 확인할 수 있다. 이것은 낮은 응력 진폭보다 높은 응력 진폭에서 균열의 생성이 보다 용이하여 비록 비슷한 크기의 기공이라고 하더라도 응력 진폭에 따라 피로 수명에 다르게 영향을 미치는 것으로 생각된다.

4. 결론

본 연구에서는 Al-Si-Mg계 주조용 합금(356-F,

356-T6)의 고주기 피로 특성에 미치는 기공의 영향을 조사하였고 그 결과로 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) Al-Si-Mg계 주조용 합금의 고주기 피로 특성 결과 356-T6 합금이 356-F 합금 보다 모든 응력 범위에서 우수한 피로 수명을 가지는 것으로 나타났다. 두 합금 모두에서 동일 응력 진폭 조건이라 하더라도 피로 수명 분포가 넓게 나타났으나 상대적으로 356-F 합금의 피로 수명 분포가 더 큰 것을 알 수 있었다.

(2) 피로 시편 파단면의 80% 이상이 초기 균열 생성 부분에서 기공이 존재하였다. 이 중 80% 정도가 표면에 기공이 존재하였고, 20%는 시편 내부에서 관찰되었다.

(3) Al-Si-Mg 계 주조용 합금은 기공의 크기가 증가 할수록 피로 수명이 감소하였으며 기공이 피로 수명에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 또한 표면에 위치한 기공이 상대적으로 큰 크기의 내부에 위치한 기공보다 피로 수명에 더 큰 영향을 미치는 것으로 밝혀졌으며 동일 크기의 기공에서도 응력 진폭 조건에 따라 피로 수명의 차이가 나타났다.

(4) 표면 기공과 피로 특성의 상관 관계 분석 결과 356-T6 합금이 356-F 합금보다 표면 기공 크기에 따라 피로 수명에 더 큰 민감도를 나타냈으며 표면 기공의 크기와 피로수명과의 상관관계에 대해 다음과 같은 식으로 표현할 수 있었다.

356-F 합금의 경우,

$$FatigueLife = [(66.43 \times 10^{-5}) \times PoreSize] + 5.63$$

356-T6 합금의 경우,

$$FatigueLife = [(93.57 \times 10^{-5}) \times PoreSize] + 5.5$$

후 기

본 연구는 지식경제부 금속소재정보은행 구축 사업의 지원으로 수행되었으며 이에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

[1] W. S. Miller, L. Zhuang, J. Bottema, A. J. Wittebrood, P. De Smet, A. Hazler, A. Viererger, 2000, Recent development in aluminium alloys for

- the automotive industry, *Mater. Sci. Res. Eng.*, Vol. 280, No. 1, pp. 37~49.
- [2] Aluminum: The Corrosion Resistant Automotive Material, The Aluminum Association, Inc., 2001, p. 6.
- [3] Hayashi H, Nakagawa T, 1994, Recent trends in sheet metals and their formability in manufacturing automotive panels, *J. Mater. Proc. Tech.*, Vol. 46, pp. 455~487.
- [4] Ashley. S, 1997, Steel cars face a weighty decision, *Mech. Eng.*, Vol. 119, pp. 56~61.
- [5] H. W. antes, H. Markus, 1970, *Mat. Sci. Quart.*, Vol. 10, p. 9.
- [6] S. U. ihara, 1991, *Pros. Of Int. Conf. in recent Advances in Science and Engineering of Light Matal*s, Tokyo, p. 1163.
- [7] T. Kashyap, S. Murali, K. S. Raman, K. S. S. Murthy, 1993, Casting and heat treatment variable of Al-7Si-Mg alloy, *Mater. Sci. Technol.*, Vol. 9, No. 3, pp. 189~203.
- [8] J. H. Kim, Evgenij Barsoukov, C. O. Yoon, Housll Lee, 1998, 7Li NMR Study of Li Intercalated Carbons Prepared by Electrochemical Method, *J. Kor. Foundrymen's Soc.*, Vol. 18, pp. 297~302.
- [9] C. H. Cáceres, 1995, On the effect of macroporosity on the tensile properties of the Al-7%Si-0.4%Mg casting alloy, *Scripta Metall.*, Vol. 32, No. 11, pp. 1851~1856.
- [10] C. H. Cáceres, B. I. Selling, 1996, Casting defedcts and the tensile properties of an Al-Si-Mg ally, *Mater. Sci. Res. Eng.*, Vol. 22, No. 1-2, pp. 109~ 116.
- [11] Q. G. Wang, D. Apelian, D. A. Lados, 2001, Fatigue behavior of 356-T6 aluminum cast alloys. Part I. Effect of casting defects, *J. Light. Met.*, 1, pp. 73~84.
- [12] H. R. Ammar, A. M. Samuel, F. H. Samuel, 2008, Effect of casting imperfections on the fatigue life of 319-F and 356-T6 Al-Si casting alloys, *Mater. Sci. Res. Eng.*, Vol. 473, No.1-2, pp. 65~75.
- [13] ASTM E466, Annual Book of ASTM Standards, 1996, Section 3, Vol. 3, p. 465.
- [14] G. Gustafesson, T. Thorvaldesson, G. L. Dumlo, 1986, The influence of Fe and Cr on the microstructure of cast Al-Si-Mg alloys, *Metall trans.*, Vol. 17, pp. 45~52.
- [15] P. R. Goulart, J. E. Spinelli, W. R. Osorio, A. Garcai, 2006, Mechanical properties as a function of microstructure and solidification thermal variables of Al-Si castings, *Mater. Sci. Eng. Vol. 421*, No.1-2, pp. 245~253.
- [16] C. H. Cáceres, C. J. Davidson, J. R. Griffiths, 1995, The deformation and fracture behaviour of an Al-Si-Mg casting alloy, *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 197, No. 2, pp. 171~179.
- [17] James A. Wasynczuk, W. Dave Hanna, Franklin D. Ross, Thomas A. Freitag, 1994, High-cycle fatigue of Kovar, *Fatigue of Electronic Materials.*, pp. 110~122.
- [18] M. Deters and J.C. Williams, 1984, *Metall. Trans. A*, Vol. 15A, p. 1588.
- [19] K. Gall, N. Yang, M. Horstemeyer, D. L. Mcdowell, J. Fan, 1999, *Metal. Mater. Trans.*, Vol. 30A, No.12, p. 3079.
- [20] M. J. Couper, A. E. Neeson, J. R. Griffith, 1990, Casting Defects and the Fatigue Behavior of an Aluminium Casting Alloy, *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.*, Vol. 13, pp. 213~227.
- [21] Y. H. Kim, S. Lee, N. J. Kim, D. Y. Lee, 1991, *J. Kor. Inst. Met. & Mater.*, Vol. 29, p. 112.
- [22] B. Zhang, D. R. Poirer, W. Chen, 1999, Microstructural effects on high-cycle fatigue-crack initiation in 356.2 casting alloy, *Metal. Mater. Trans. Vol. 30*, No. 10, pp. 2659~2666.
- [23] Sang-Won Han, Sug-Won Kim, 2002, Fatigue Behaviors in Aluminum Cast Alloys, *J. Kor. Foundrymen's Soc* 22, Vol. 2, pp. 61~68.