논문

A356 합금의 고주기 피로특성에 미치는 미소기공율의 영향

류석종 · 이충도 *†

쌍용자동차 재료연구팀, *인하공업전문대학 금속재료과

Effect of Microporosity on High Cycle Fatigue Property of A356 Alloy

Suk-Jong Yoo, and Choong-Do Lee*†

Material Research Team, Ssangyong Motor Co., GyeongGi-Do 459-711, Korea

*Metallurgical & Materials Engineering, Inha Technical College, Incheon 402-752, Korea

Abstract

The present study was aimed to investigate the dependence of fatigue property on microporosity variation of low-pressure die-cast (LPDC) A356 alloy. The fatigue property of A356 alloy was evaluated through high cycle fatigue test, and the microporosity-terms used were the fractographic porosity measured from SEM observation on fractured surface and the volumetric porosity obtained through the density measurement using Archimedes's principle. The number of cycles to failure of A356 alloys depends obviously upon the variation of fractographic porosity, and can describe in terms of the defect susceptibility which depends on the microporosity variation at a given value of stress amplitude. The modified Basquin's equation was suggested through the combination of microporosity variation and static maximum tensile stress to fatigue strength coefficient. Using modified Basquin's equation, it could suggest that the maximum values of fatigue strength coefficient and exponent achievable in defect-free condition of A356 alloy are 265 MPa, -0.07, respectively.

Key words : A356 alloy, Low-pressure die casting, Microporosity, Fatigue property.

(Received July 11, 2011 ; Accepted August 15, 2011)

1. 서 론

최근 더욱 더 강화되고 있는 이산화탄소 배출가스규제는 자동차 산업을 비롯하여 전 산업분야에 걸쳐 엄격하게 적용되고 있다. 이러한 이산화탄소 배출가스 감소를 통하여 지구온난화 및 환경오염 규제에 대응하기 위하여 자동차 부품의 경량화를 위한 연구가 활발히 진행되고 있다.

대표적인 자동차부품용 알루미늄 합금으로는 우수한 주조성과 비강도성이 강점인 A356 및 A380합금 등의 Al-Si계 합금으로서 다양한 상용주조공정을 통하여 주로 엔진 블록, 트랜스미션 케이스 등의 엔진부품과 알로이 휠(Alloy wheel)을 비롯한 각종 현가 및 조향 장치에 폭 넓게 사용되고 있으며, 그 사용량이 또한 꾸준히 증가하는 추세이다[1].

반면에 상용 주조공정상 불가피하게 포함되는 미량의 미소기공은 합금 제품의 연신율과 인장강도 등과 같은 기계적 특성의 현저한 저하는 물론 주조품의 품질편차를 증가시키는 원인으로 작용하여 궁극적으로는 설계 자유도를 국한시키는 인자로 작용하게 된다. 이러한 이유로 최근까지 주조품에 대한 미소기공율의 영향에 대한 꾸준한 연구가 진행되어 왔으며, 특히 파단면 관찰을 통하여 측정된 미소기공율을 이용함으로써 알루미늄합금의 기계적 특성에 미치는 미소기공율의 기여도를 보다 구체적

으로 평가할 수 있게 되었다[2-7].

그럼에도 불구하고 최근에 보고 된 미소기공율과 기계적 특성에 대한 일부 연구결과에서는 미소기공율 변화에 대한 기계적 특성의 의존도 유무에 대하여 많은 논란이 있는 것이 사실이다[8,9].

더욱이 전술한 기계적 특성에 대한 미소기공율 변화의 기여도에 대한 대부분의 연구결과는 T6 열처리를 전제로 진행된 것으로서, 잘 알려진 바와 같이 열처리형 주물합금의 강화특성은 용체화 처리 및 시효처리에 의해서 매우 다양한 특징을 보인다[10]. 이는 용탕처리를 비롯한 T6열처리 등의 후처리 공정을 통하여 알루미늄합금의 제반특성을 개선시킬 수 있음을 의미하며, 이러한 관점에서 개선의 척도 및 방향성을 판단하기 위해서는 주방상태의 미소기공율 변화에 대한 인장특성의 의존도 평가가 매우 중요하다.

본 연구에서는 저압주조(Low-pressure die-casting)에 의해 제작된 A356합금을 대상으로 주방상태에서의 미소기공율 변화에 따른 제반 특성평가를 진행함으로써 향후 진행될 용탕처리 및 T6열처리 등의 제조공정을 통한 개선의 척도로 삼고자 하였다. 이를 위한 연구의 일환으로 주방상태 A356합금의 미소기공율 변화에 대한 피로특성의 의존도를 평가하고 개선방향성을 모색하고자 하였다.

†E-mail : cdlee@inhac.ac.kr

Table 1. Chemical composition of A356 aluminum alloy.

Element	Si	Mg	Ti	Fe	Cu	Mn	Sr
wt%	7.18	0.35	0.14	0.02	0.14	0.01	0.02

2. 시험 방법

2.1 시험편 제작

본 연구에서 사용한 시험편은 저압주조에 의해 제작된 자동차용 알루미늄 휠(18 inch/5 spoke)의 림(Rim)에서 채취하였으며, 인장 및 피로시험편의 축 방향은 림의 원주방향에 수직인 방향으로 위치하도록 하였다. Table 1에 본 연구에서 사용한 A356 알루미늄 합금의 화학성분을 나타내었다.

2.2 미소기공율의 측정

시험편의 미소기공율은 밀도측정법과 파단면 관찰을 통한 면적분을 측정의 2가지 방법으로 구하였다. 아르키메데스 원리(Archimedes's principle)을 이용한 밀도측정법으로 시험편 전체의 밀도를 측정한 후, 이론밀도와 비교하여 미소기공율을 계산하였다. 또한 파단면 관찰을 통한 미소기공율의 측정은 피로시험편의 파단면을 주사전자현미경(Scanning electron microscope)으로 관찰하여, 전체 파단면적에 대한 미소기공의 면적분율을 측정함으로써 결정하였다.

2.3 인장시험

인장시험편은 게이지의 길이와 폭이 각각 30, 6 mm인 판상으로 제작하였다. 인장시험의 변형률 속도는 $2.78 \times 10^{-3}/\text{sec}$ 로 하였으며, 신율계(Extensometer)를 사용하여 상온에서 진행하였다.

2.4 고주기 피로시험

피로시험은 고주기 피로시험(High cycle fatigue)을 하였으며, 시험장비는 Instron 5585모델을 이용하였다. 시험조건은 평균응력은 0, 응력비($R = \sigma_{\min}/\sigma_{\max}$)는 -1의 완전역전모드(Fully reversed)로 진행하였다. 또한 하중인가 주파수는 20 Hz로 하였으며, 파단조건은 50% 이상의 하중감소를 또는 완전파단으로 하였다.

피로강도 범위는 130~180 MPa이었으며, 해당 강도수준에 대하여 5개 이상의 시험편을 시험하였다. 시험편의 표면마무리는 SiC연마지(~#2,000)를 이용하여 하중 적용축의 수직방향으로 존재하는 기계가공에 의해 형성된 노치를 제거하였다.

3. 시험 결과 및 고찰

3.1 미세조직 및 인장특성

Fig. 1은 시험편의 미세조직을 나타낸 것으로, 공정 Si입자와 초정 α -Al기지영역의 공정조직(Eutectic structure)과 초정 α -Al기지가 혼합된 전형적인 A356합금의 주조조직을 보인다.

Fig. 2는 미소기공의 형상 및 분포를 나타낸 것으로 미소기공이 초정 α -Al기지영역과 공정조직(Eutectic colony)사이 또는 공정조직 내에 분포함을 알 수 있다. 이와 같이 미소기공의 형성위치와 함께 전반적인 미소기공의 형상이 vermicular-type으로 존재함을 통하여 대부분의 미소기공은 응고과정 중의

Fig. 1. Typical microstructure of as-cast A356 alloy.

Fig. 2. Optical view of micro-pores between primary α -Al matrix and eutectic colony in as-casted A356 alloy.

Table 2. Tensile property of as-cast A356 aluminum alloy from rim of alloy wheel.

Tensile property	YS (MPa)	UTS (MPa)	Elongation (%)
Ave. value	98.8	188.9	9.6
(Max. value)	(+8.1)	(+8.3)	(+4.1)
(Min. value)	(-8.8)	(-30.1)	(-4.9)

수소고용도 변화에 의한 가스방출보다는 고/액 변태에 수반되는 부피변화에 의해 형성된 수축공(Shrinkage hole)의 형상을 가지고 있는 것으로 판단된다.

Table 2는 인장시험 결과를 나타낸 것으로 항복강도 및 인장강도는 평균 98.8, 288.9 MPa이었으며, 평균 연신율은 9.6%이었다. 이와 같이 각 인장특성 값에 상당한 편차가 존재하는데, 기존의 연구결과에 의하면 이러한 실험값의 편차가 발생하는 주된 원인으로 미소기공의 존재를 들 수 있다[3-7].

3.2 미소기공율 변화에 대한 파단주기의 의존성

Fig. 3은 본 연구에서 진행한 피로시험 결과를 S-N곡선의 형태로 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 동일한 피로강도에 대해서 각 시험편 간의 파단주기는 상당히 넓은 편차를 가지며 분포함을 알 수 있다. Fig. 3의 S-N곡선은 각 시험편의 미소

Fig. 3. S-N curve of as-cast A356 alloy.

Table 3. Strength parameters in Basquin's equation.

Fatigue strength coefficient(σ_f')	Fatigue strength exponent(b)
213.3	-0.043

기공율을 고려하지 않은 것으로 Basquin관계식[12]을 이용하여 각 피로강도에서의 평균 파단주기에 대하여 피로강도계수와 지수를 구하면 Table 3에 나타난 바와 같이 각각 213.4 MPa와 -0.043임을 알 수 있다.

Fig. 4는 각각의 응력진폭에 대한 파단주기 변화를 밀도측정법에 의한 미소기공율과 파단면 관찰을 통한 미소기공율의 변화에 대하여 나타낸 것이다. Fig. 4(a)에서 보듯이 밀도측정법에 의한 미소기공율과 파단주기 간의 관계는 각 응력진폭에 대하여 일정한 경향을 보이지 않는다.

잘 알려진 바와 같이 미소기공과 같은 재료 내의 하중전달의 불연속 영역이 존재하는 경우, 수직응력 적용에 따른 국부응력 집중을 통하여 균열전파경로를 최소 하중전달능력의 단면적을 따라서 진행하기 때문에 미소기공을 증가에 따른 파단주기는 명백히 감소하게 됨에도 불구하고, 일부 응력진폭에 대해서는 미소기공율이 증가함에 따라 파단주기가 증가하는 경향을 보이기도 하였다.

Fig. 5. Morphology of micro-pores and traces of fatigue propagation in α -matrix region neighbor to micro-pores on fractured specimen.

반면에 Fig. 4(b)의 파단면 관찰을 통하여 측정한 미소기공율의 경우에는 파단주기가 미소기공율의 변화에 대하여 일정한 의존도를 가지고 있음을 확인할 수 있다. 특히 동일한 응력진폭에서 미소기공율이 증가됨에 따라 파단주기가 감소함을 알 수 있으며, 이것으로 시험편의 파단주기에 미치는 인자로서 미소기공율의 영향이 명확히 존재함을 알 수 있다.

3.3. 파단면 관찰 결과

Fig. 5는 피로 파단면을 주사전자현미경으로 관찰한 결과이다. 그림에서 보듯이 파단면 내부에 수직상정의 형상을 포함하는 미소기공이 존재함을 알 수 있다. 또한 미소기공 주위(그림 내의 원)에 존재하는 초정 영역에 형성된 피로균열의 전파 흔적(Fatigue striation)을 나타낸 것이다. 시험편의 표면에 근접하여

Fig. 4. Dependence of cycles to failure on porosity variation for each level of stress amplitude: (a) volumetric porosity, (b) fractographic porosity.

Fig. 6. Cross-sectional view on fractured specimen.

Fig. 7. Cross-sectional view for crack propagation by penetration to α -Al matrix region.

존재하는 미소기공으로부터 피로균열 전파가 진행되었음을 알 수 있다.

Fig. 6은 피로시험 후 파단된 시험편의 횡단면을 관찰한 결과로서 그림의 화살표는 미소기공의 위치를 나타낸다. 이러한 미소기공의 존재는 재료 내 하중전달능력의 변화와 함께 미소기공 주변의 응력분포 변화를 통하여 응력집중을 발생하게 되므로 피로균열의 성장에 상당한 영향을 미치게 된다.

또한 미소기공으로부터 발생한 피로균열은 주로 공정 Si영역을 따라서 성장하지만, Fig. 7에 나타난 바와 같이 하중작용방향에 초정 α -Al기지영역의 장축(Long-axis)이 위치한 경우에는 주위의 공정 Si영역을 따라서 우회하지 않고 해당 초정 α -Al기지영역을 관통하여 피로균열이 성장하는 것을 관찰할 수 있다.

4. 고 찰

4.1 미소기공율을 고려한 Basquin관계식

잘 알려진 바와 같이 재료의 피로수명(N_f)과 응력진폭(σ_a)의 관계는 식 (1)의 Basquin관계식을 이용하여 표현할 수 있다[11].

$$\sigma_a = \sigma_f' \cdot [2N_f]^b \quad (1)$$

σ_a : 응력진폭(Stress amplitude)

σ_f' : 피로강도계수(Fatigue strength coefficient)

$2N_f$: 파단주기(Number of cycles to failure)

b : 피로강도지수(Fatigue strength exponent)

여기서 피로강도계수 σ_f' 는 $2N = 1$ 에 해당하는 정적 인장강도(monotonic true stress)와 동일한 개념이며, 주어진 응력진폭에 대해서 파단주기는 정적 인장강도와 피로강도계수 및 강

도지수로 표현된다.

다른 한편으로 A356합금의 인장강도에 대한 미소기공율의 기여도에 대한 Surappa와 Cáceres 등의 연구결과에 의하면 인장강도 및 연신율은 미소기공율 변화에 역비례 포물선 관계로 묘사할 수 있음이 보고된 바 있다[3-5]. 또한 Gokhale 등은 미소기공율의 변화에 대한 연신율의 의존도를 결함민감도(Defect susceptibility)항으로 표현함으로써 그 의존도를 보다 명확하게 묘사할 수 있었다[6]. 이와 유사하게 미소기공율 변화에 대한 인장강도의 의존도 또한 결함민감도 항으로써 묘사할 수 있으며, 인장강도에 대한 미소기공율의 기여도를 식(2)와 같이 나타낼 수 있다[6,7,12].

$$\sigma_f' = \sigma_i = \sigma_o \cdot [1 - f]^m \quad (2)$$

σ_i : 미소기공율, f 를 가지는 재료의 인장강도

σ_o : 결함이 없는 조건(Defect-free condition, $f=0$)에서 도달할 수 있는 최대 인장강도

m : 정적 인장강도의 미소기공율 변화에 대한 결함민감도

식(1)의 Basquin관계식의 피로강도계수 항에 식(2)의 미소기공율 항을 반영하면 식(3)을 얻을 수 있다.

$$\sigma_a = \sigma_f' \cdot [2N_f]^b = \sigma_o \cdot [1 - f]^m \cdot [2N_f]^b \quad (3)$$

즉, Fig. 4의 실험결과에서도 나타난 바와 같이 미소기공율 변화에 대한 파단주기의 의존도는 Basquin관계식을 통한 수학적 표현에서도 파단주기가 미소기공율의 함수로서 표현될 수 있음을 나타낸다.

식(3)의 양변에 로그함수를 적용하면, 식(4)와 같이 미소기공율 변화에 대한 파단주기의 의존도를 결함민감도(m/b)의 항으로 표현할 수 있다.

$$\ln[2N_f] = (1/b)\ln(\sigma_a/\sigma_o) - (m/b)\ln[1 - f] \quad (4)$$

4.2 미소기공율 변화에 대한 파단주기의 의존도

각각의 적용하중에서의 파단주기(N_f)를 식(4)과 같이 미소기

Fig. 8. Defect susceptibility of number of cycles to failure to microporosity variation.

Table 4. Variation of defect susceptibility (D.S.) on stress amplitude.

σ_a	130	140	150	160	170	180
D.S.	35.9	43.9	46.6	34.1	42.6	54.6

Fig. 9. Comparison of S-N Curves between maximum value of defect-free condition and average value with no consideration of microporosity.

공율에 대한 로그함수로 표현하면 Fig. 8과 같이 나타낼 수 있다. 이 때 각 직선의 기울기는 미소기공을 변화에 대한 파단주기의 의존도인 결함민감도를 의미하며, 각 피로강도에 대한 결함민감도를 Table 4에 나타내었다.

피로강도가 증가함에 따라 각 응력진폭에서의 결함민감도는 증가하는 양상을 보이며, 파단주기는 응력진폭이 증가함에 따라 미소기공율의 작은 변화에 매우 민감하게 의존함을 알 수 있다.

Fig. 9과 Table 5에는 결함이 없는 조건에서 도달할 수 있는 최대 파단주기를 Fig. 3의 미소기공율의 변화를 고려하지 않은 평균값과 비교하여 S-N곡선으로 나타내었다. 피로강도계수 및 강도지수는 각각 265.6MPa, -0.071로서 미소기공을 변화를 고려하지 않은 S-N곡선의 평균값에 비하여 현저한 차이를 가지는 것으로 나타났다.

한편 하중전달능력 변화에 대한 인장특성의 의존도는 파단면 상에 관찰된 최대 미소기공의 크기로서 묘사할 수 있음이 보고된 바 있다[13]. 본 연구에서는 피로특성에 대해서도 파단면 상의 최대 미소기공의 크기에 대하여 파단주기의 의존성을 평가하였으며, 이를 Fig. 10에 나타내었다.

그림에서 보는 바와 같이 각각의 응력진폭에 대한 파단주기는 파단면 전체의 미소기공을 변화와 마찬가지로 최대 미소기공

Table 5. Values of strength parameter in S-N curve for defect-free condition($f=0$) and without consideration of microporosity variation.

	Fatigue strength coefficient(σ_f')	Fatigue strength exponent(b)
$f=0$	265.6	-0.071
Ave. value*	213.3	-0.043

*Average value means fatigue strength coefficient and exponent which do not take account of microporosity variation as shown in Fig. 3.

Fig. 10. Dependence of cycles to failure on variation of maximum pore area.

의 면적변화에 대하여 직선관계로 묘사할 수 있다. 이것으로 보아 파단면 상에 존재하는 최대 크기의 미소기공이 합금의 기계적 특성에 상당한 영향을 미침을 알 수 있다[13]. 또한 이러한 직선관계는 시험편의 미소기공율과 최대 미소기공의 면적 사이에 비례관계가 있음을 의미한다.

Fig. 11에 파단면 전체의 미소기공율과 최대 미소기공 간의 관계를 나타내었다. 그림에서 보듯이 파단면 전체의 미소기공율에 대하여 최대 미소기공의 면적이 직선적으로 비례함을 알 수 있다.

반면에 하중전달능력의 척도로서 파단면 상의 최대 미소기공 크기를 선택함에 있어서 시험편의 조건이나 미소기공의 분포를 고려해야 할 것으로 판단된다. Fig. 12는 응력진폭이 170 MPa인 피로파단 시험편을 대상으로 미소기공율과 최대 미소기공 면적 간의 관계를 나타낸 것이다.

그림의 하단 우측에 위치한 시험편은 하단 좌측에 있는 시험편에 비하여 전체 미소기공율이 높음에도 불구하고, 최대 미소기공의 크기는 작으며, 상대적으로 여러 개의 작은 미소기공이 파단면에 존재함을 의미한다. 물론 이러한 경우에도 최대 미소기공의 면적변화에 대한 피로파단주기의 의존도를 직선적으로 묘사할 수는 있지만, 정확한 의존도 파악은 어렵다. 그러므로 파단면 상에 관찰된 최대 미소기공의 크기를 하중전달능력의

Fig. 11. Linearity between maximum pore area and fractographic porosity measured at fractured surface.

Fig. 12. Deviation from linear relationship between maximum pore area and fractographic porosity.

척도로서 선택하기 위해서는 미소기공의 크기 분포가 존재해야 하며, 궁극적으로는 시험편의 크기 또한 고려되어야 할 것으로 판단된다.

또한 이론적인 해석 및 예측을 위하여 전술한 수정된 Basquin관계식을 이용하여 피로특성을 평가할 경우에는 정확한 하중전달능력의 평가가 요구되며, 이 경우 미소기공의 최대 크기보다는 하중적용면적에 대한 미소기공율로 표현하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

4.3 피로균열의 전파과정

Al-Si합금의 파괴과정은 균열의 발생, 성장, 합체의 3단계로 구성되며, 각 단계는 미소기공과 같은 주조결함 이외에 공정 Si 입자의 크기 및 분포, 그리고 초정 α -Al기지영역 간의 간격 등의 미세조직 인자의 영향을 고려할 수 있다[14,15]. 특히 균열의 발생은 미소기공 주변에서의 응력집중 이외에도 공정 Si 입자에서의 균열발생(debonding/cracking)을 통하여 이루어지며, 성장 및 합체과정에서는 수지상 간격으로 묘사되는 초정 α -Al

Fig. 13. Cross-sectional view of crack propagation along eutectic Si-particles and colonies observed in tensile fractured specimen.

기지영역의 소성변형이 주된 영향을 미치게 된다[15].

한편 Fig. 3과 Table 3에 나타난 바와 같이 미소기공율의 변화를 포함하는 합금의 피로강도계수는 213 MPa로서 이는 Table 2에 나타난 정적 인장강도의 평균값인 189 MPa에 비하여 약 25 MPa의 차이를 가진다. 더욱이 본 연구에서 측정된 최대 인장강도에 비하여 약 15 MPa의 차이를 보이는데, 알루미늄합금의 피로강도계수는 정적 인장강도와 거의 유사한 수준을 가진다고 기존에 알려진 바[16]와는 다른 결과를 나타낸다. 이러한 차이를 발생하는 원인으로서는 피로하중과 인장하중 하에서의 균열 전파특성의 차이를 들 수 있다. Fig. 13는 인장파단과정에서 형성된 균열의 횡단면을 관찰한 결과로써, Fig. 7에 나타난 피로 파단 과정에서의 균열성장경로와 다른 점을 관찰할 수 있다.

Fig. 7에 보인 피로균열의 성장과정에서는 주로 초정 α -Al기 지영역을 우회하여 공정 Si입자 및 colony영역을 따라서 전파되지만, 일부 축하중 방향으로 초정 α -Al기지영역의 장축이 존재하는 경우에는 이를 관통하는 균열성장형태를 가진다. 반면에 낮은 변형을 속도가 적용되는 인장하중 하의 균열성장은 공정 Si입자 및 colony영역을 따라서 연속적으로 전파하게 된다. 이와 같은 파단양상의 차이는 근본적으로 하중적용 속도의 차이에 따른 국부적인 소성변형과 이에 따른 균열의 우선발생에 의한 것으로 판단된다.

5. 결 론

1) 고주기 피로특성을 표현하는 기존의 Basquin 관계식의 구성인자 중 피로강도계수(σ_f')에 미소기공율(f)과 결함민감도(m)항을 고려함으로써 정적 인장강도(σ_o)와 미소기공율 변화에 대한 파단주기(N_f)의 의존도를 표현하는 수정된 관계식을 제안하였다.

$$\sigma_a = \sigma_f' \cdot [2N_f]^b = \sigma_o \cdot [1 - f]^m \cdot [2N_f]^b$$

2) A356합금의 피로파단주기는 파단면 관찰을 통하여 측정된 미소기공율의 변화에 대하여 명확한 의존도를 가지며, 이러한 의존도는 수정된 Basquin관계식에 포함된 결함민감도로써 묘사할 수 있다. 미소기공율 변화에 대한 파단주기의 결함민감

도는 응력진폭이 증가함에 따라 증가하는 양상을 가진다.

3) 수정된 Basquin관계식의 피로강도계수 항에 포함되는 최대 인장강도와 정적 인장시험에서의 최대 인장강도 간의 차이가 존재하는데, 이는 피로시험과 인장시험에서의 균열성장 경로의 차이에 의해 발생한다.

4) 미소기공율의 기여도를 포함하는 수정된 Basquin관계식을 이용함으로써 미소기공을 포함하지 않는 건전한 주방상태에서의 S-N곡선을 제안하였다. 미소기공을 차이를 고려하지 않은 A356 합금의 고주기 피로특성에서 피로강도계수와 강도지수는 각각 213.3MPa, -0.043이지만, 결함이 없는 건전한 조건에서의 피로 강도계수 및 강도지수는 최대 265MPa, -0.07까지 도달할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 2010년도 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행되었음(과제번호 : 2010-0022284).

참고문헌

- [1] Y. N. Kwon, S. S. Kim, Y. S. Lee, J. H. Lee : J. Kor. Inst. Met. & Mater., "Deformation Behavior with the Variation of Microstructure of A356 Alloy", 43 (2000) 834-840
- [2] Q. G. Wang, D. Apelian, D. A. Lados : SCI. Met., "Fatigue Behavior of A356-T6 Aluminum Cast Alloy. Part 1. Effect of Casting Defects", (2001) 73-84
- [3] M. K. Surappa, E. Blank, J. C. Jaquet : Scripta Metall. et Mater., "Effect of Macro-porosity on the Strength and Ductility of Cast Al-7Si-0.3Mg alloy", 20 (1986) 1281-1286
- [4] C. H. Cáceres : Scripta Metall. et Mater., "On the Effect of Macroporosity on the Tensile Properties of the Al-7%Si-0.4%Mg Casting Alloy", 32 (1995) 1851-1855
- [5] C. H. Cáceres, B. I. Selling : Mater. Sci. Eng.(A), "Casting Defects and Tensile Properties of an Al-Si-Mg Alloy", 220 (1996) 109-116
- [6] A. M. Gokhale, G. R. Patel : Scripta Metall. et Mater., "Origins of Variability in the Fracture-related Mechanical Properties of a Tilt-pour-permanent-mold cast Al Alloy", 52 (2005) 237-241
- [7] C. D. Lee : Mater. Sci. Eng.(A), "Effects of Microporosity on Tensile Properties of A356 Aluminum Alloy", 464 (2007) 249-254
- [8] J. S. Park, S. Y. Sung, B. S. Han, C. Y. Jung, K. A. Lee : J. Kor. Inst. Met. & Mater., "High Temperature Fatigue Deformation Behavior of Automotive Heat Resistant Aluminum Alloys", 48 (2010) 28-38
- [9] J. Y. Song, J. C. Park, Y. S. Ahn : J. Kor. Foundrymen's Soc., "Effect of Cast Microstructure on Fatigue Behaviors of A356 Aluminum Alloy for Automotive Wheel", 20 (2010) 46-51
- [10] J. E. Hatch, "Aluminum-Properties and Physical Metallurgy", ASM, 1984, p.193
- [11] O. H. Basquin : American Society for Testing and Materials, "The Exponential Law of Endurance Tests", Vol. 10
- [12] C. D. Lee : Mater. Sci. Eng.(A), "Effect of Damage Evolution of Si-particles on the Variability in the Tensile Ductility of Squeeze-cast Al-10%Si-2%Cu-0.4%Mg Alloy", 527 (2010) 3144-3150
- [13] Z. Ma, A. M. Samuel, F. H. Samuel, H. W. Doty, S. Valtierra : Mater. Sci. Eng.(A), "A Study of Tensile Properties in Al-Si-Cu and Al-Si-Mg alloys : Effect of β -iron Intermetallics and Porosity", 490 (2008) 36-51
- [14] C. Park, S. S. Kim, Y. N. Kwon, Y. S. Lee, J. H. Lee : J. Kor. Inst. Met. & Mater., "Mechanical and Corrosion Behaviors of Rheocast and Low-pressure cast A356-T6 Alloy", 41 (2003) 750-756
- [15] M. D. Dighe, A. M. Gokhale, M. F. Horstemeyer : Metall. and Mater. Trans. A, "Effect of Loading Condition and Stress State on Damage Evolution of Silicon Particles in an Al-Si-Mg-Base Cast Alloy" 33 (2002) 555-565
- [16] D. N. Lee, "Mechanical metallurgy" (1987) 302