

논문

자동차휠용 A356 알루미늄 합금의 주조조직이 피로특성에 미치는 영향

송전영 · 박중철* · 안용식†

부경대학교 신소재공학부, *포항산업과학연구원 분석평가본부

Effect of Cast Microstructure on Fatigue Behaviors of A356 Aluminum Alloy for Automotive Wheel

Jeon-Young Song, Joong-Cheol Park*, and Yong-Sik Ahn†

Dept. of Materials Sci. & Eng., Pukyong National University, Busan 608-739, Korea

*Research Institute of Science & Technology, PoHang, Korea

Abstract

Recently, automotive industry is attempting to replace steels for automotive parts with light-weight alloys such as aluminum alloy, because of the growing environmental regulations governing exhaust gas and the engine effectiveness of a vehicle. The low cycle fatigue (LCF) and high cycle fatigue (HCF) properties as well as the microstructure and tensile property were investigated on the low pressure cast A356 aluminum alloy wheel, which was followed by T6 heat treatment. The cast microstructure of the alloy influenced significantly on the low cycle and high cycle fatigue behaviors. The rim part of cast aluminum alloy wheel showed higher low cycle and high cycle fatigue strength compared with the spoke part, which should be caused by higher cooling rate of rim part. The spoke part of the wheel showed coarser dendrite arm spacing (DAS) and wide eutectic zone in the microstructure, which resulted in the partial brittle fracture and lower fatigue life time.

Key words : Aluminium alloy, High cycle fatigue, Low cycle fatigue, Cast microstructure.

(Received January 12, 2010 ; Accepted January 25, 2010)

1. 서 론

최근 지구온난화의 원인으로 대두되고 있는 CO₂ 가스 배출량을 줄이려는 움직임이 대대적으로 일어나고 있으며 각종 환경규제도 엄격해 지고 있다. 자동차에서 배출되는 배기가스에 의한 환경오염 및 지구온난화 억제를 위한 각종 규제에 대응하기 위하여 자동차부품의 경량화를 위한 연구가 활발히 진행되고 있다[1]. 자동차부품용 소재로 알루미늄합금의 사용은 고장력강, 마그네슘합금, 탄소섬유강화수지 등과 함께 사용이 증가하고 있으며, 경량화의 수단으로 점차 확대되어 가고 있다. 알루미늄합금은 승용차에서 동력전달계, 서스펜션계, 샤시 등에서 폭넓게 사용되고 있으며 점차적으로 하중의 부담이 적은 부품부터 철에서 알루미늄합금으로 대체되고 있다[2]. 현재 국내에서는 자동차의 핵심부품에서부터 기본적인 부품에 이르기까지 적용 가능한 알루미늄합금에 대한 기본적인 물성이나 기초 데이터가 부족한 실정이다. 본 연구에서는 저압주조법(low pressure casting)으로 제작된 승용차용 휠 A356합금을 사용하여 미세조직 및 인장특성을 조사하였으며, 이러한 미세조직과 인장특성이 고주기 피로(High cycle fatigue, HCF) 및 저주기 피로(Low cycle fatigue, LCF)의 수명과 가지는 상관관계 등에

대해 조사하였다.

2. 실험 방법

2.1 시험소재와 기공률 측정

본 연구에서는 주조 알루미늄합금 A356으로 생산된 승용차용 휠의 rim 부와 spoke 부에서 시험편을 채취하였다. Fig. 1은 알루미늄 휠과 시험편의 채취부위를 나타내고 있다. 그림에서 ①위치가 rim 부이고 ②위치가 spoke 부이다. A356 알루미늄 휠은 저압주조 후, 535°C에서 용체화처리 및 165°C에서 인공시효를 행하는 T6 열처리가 가해졌다. 사용된 알루미늄합금 A356의 조성은 아래의 Table 1과 같다.

기공률 측정은 자체 제작한 장비를 사용하여 고주기 및 저주기 피로시험이 끝난 시편에서 그림(grip)부위만 채취해 측정하였다. 기공률 측정 전에는 시편의 표면과 채취부위에서의 불순물을 제거하기 위해 초음파 세척기에서 약 2분 동안 세척하였다.

2.2 인장시험

인장시험은 MTS810 (Max load: 10kN)으로 수행하였으며 시험편은 Fig. 2와 같이 게이지 길이는 15 mm, 게이지부 지

†E-mail : ysahn@pknu.ac.kr

Table 1. Nominal chemical composition (wt%) of used A356 aluminum alloy.

composition	Mg	Si	Ti	Fe	Cu	Sr	Al
wt. %	0.26	6.21	0.11	0.25	0.001	0.0052	Bal.



Fig. 1. Photograph of a vehicle wheel indicates specimen sections for tensile and fatigue test.

름 5 mm 인 봉재형태로 제작하였다. 인장시험은 ASTM E8 규정에 의해 50 mm/min 의 일정변형속도로 시험하였으며, 동일조건에서 2회씩 측정하여 평균값을 취하였다.

2.3 고주기피로(HCF)시험

Stress-life (S-N Curve) 피로 특성을 알아보기 위해 고주기 피로시험(High Cycle Fatigue, HCF)을 수행하였다. 인장시험과 동일한 MTS 810 시험기에서 평균응력 “0”, 응력비(R) “-1”의 완전역전피로시험(Fully reversed)으로 수행하였다. HCF 시험용 시편은 Fig. 3과 같이 시험 시 시험편의 R부분에서의 파괴를 방지하기 위해 continuous radius 형상으로 가공하였으며 시험방법은 ASTM E466에서 정해진 규정에 의거하여 진행하였다[3].

2.4 저주기피로(LCF)시험

Strain-life(ϵ -N Curve) 피로특성을 알아보기 위하여 저주기피로시험(Low cycle fatigue, LCF)을 수행하였다. 시험에 사용된 장비는 인장시험 및 HCF시험과 동일한 MTS 810 이었고, 시험방법은 ASTM E606[4]의 규격에 따라 수행하였다. 시험편은 Fig. 2의 인장시험편과 동일한 것을 사용하였다. LCF시험은 HCF와 달리 일정변형률제어시험(Strain controlled test)으로 시험 조건은 정현파(sine waveform), 응력비(R)는 “-1”, 주기는 0.1Hz로 고정하였다. 총변형률($\Delta\epsilon$)은 0.3, 0.4, 0.5 및 0.6%로 총 4단계를 사용하였으며, 변형률 제어를 위해 게이지길이 8 mm, 용량 6%인 상온 신장계(extensometer)를 사용하여 시험하였다. 또한 저주기피로시험에서 peak stress 값이 15% 이하를 지점을 파괴로 정의하였다.

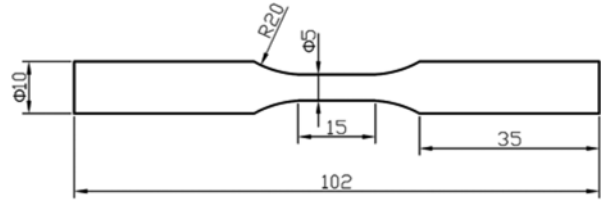


Fig. 2. Specimen geometry used for tensile test.

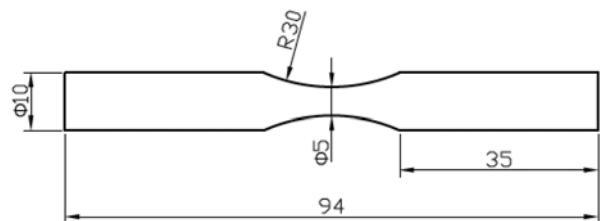


Fig. 3. Specimen geometry used for high cycle fatigue test.

3. 결과 및 고찰

3.1 미세조직관찰

Fig. 4는 rim 부와 spoke 부의 미세조직을 광학현미경으로 관찰한 것이다.

rim부(a)와 spoke부(b) 조직에서 수지상간격(Dendrite Arm Spacing, DAS)을 비교하면 뚜렷하지는 않지만 rim부가 조금 작은 것을 관찰할 수 있다. 특히 spoke부에는 rim부에서는 전혀 관찰되지 않는 비정상적으로 폭이 넓은 공정조직(Fig. 4(c))이 많이 관찰되었다. 이는 저압주조 시 금형에서의 냉각속도의 차이로 인한 결과로 생각된다. 즉 상대적으로 spoke부에 비해 냉각속도가 빠른 rim부는 모든 조직이 고른 미세한 수지상정 조직을 나타내나, 냉각속도가 느리고 냉각속도가 불규칙한 spoke부에서는 수지상정 조직(70%)과 공정조직(30%)이 골고루 분포하는 양상을 나타낸다. 응고속도가 빠르면 DAS 및 결정립 조직이 미세해지며 용질원자의 고용률이 확대되고 편석이 감소할 뿐만 아니라 제2상입자의 정출량이 감소하고 크기도 작아지며, 수축공 및 기공이 감소하고 미세하게 분산된다[5].

일반적으로 금형에서의 냉각 시 핵생성은 주벽에서 최초로 발생하며 주벽에서 멀어질수록 냉각속도는 느려진다. 저압주조 시 금형 내에서 부위별 냉각속도는 미세조직의 형성을 좌우하고 이것이 소재의 기계적인 성질에 직접적인 영향을 미치는 것으로 생각된다.

3.2 인장시험

알루미늄 주조합금에서 기계적 성질에 영향을 미치는 금속학적 조직인자로는 DAS, 결정립 크기, 제2상입자의 크기 및 분포 등이 있다. 인장특성을 조사한 결과 Table 2에서 나타내는 바와 같이 rim부는 spoke부에 비해 최대인장강도(Ultimate Tensile Strength, UTS), 연신율(Elongation, El)이 약간 높았으며, 항

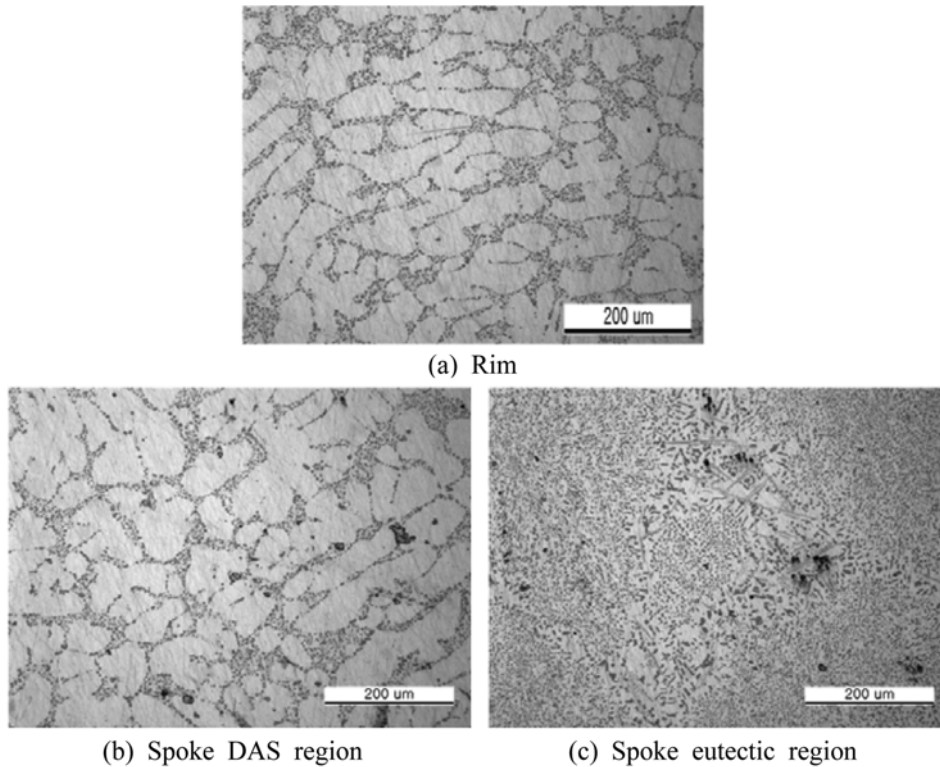


Fig. 4. Photographs of Microstructure at the Rim region (a) and Spoke region (b), (c) of Al-alloy wheel.

Table 2. Results of tensile test.

	Rim	Spoke
YS [MPa]	168	170
UTS [MPa]	271	243
EI [%]	5	4

Table 3. Values of parameters in Basquin's equation.

	Fatigue strength coefficient (σ'_f)	Fatigue strength component (b)
Rim	585	-0.10595
Spoke	969	-0.17228

복강도(Yield strength, YS)는 뚜렷한 차이를 나타내지 않았다. 일반적인 금속재료는 결정립 크기가 작아질수록 강도가 증가하는 Hall-Petch 관계식이 성립한다. 본 연구에서는 rim부가 spoke부보다 DAS가 약간 작은 것으로 나타났으나 이러한 결과가 강도에 미치는 영향은 아주 미약하였다. A356합금의 경우 수지상정 조직에서 DAS가 증가할수록 강도가 높아지는 결과도 보고되었다[6]. 그러나 이와 같이 Hall-Petch 관계에 반대되어 나타나는 현상은 DAS의 크기차이가 강도에 미치는 영향 이외에도 내부에서 발생하는 공정조직의 함량 및 2차상 등의 영향이 복합적으로 고려되어야 할 것으로 생각된다. 본 연구에서 spoke 부위에서는 상대적으로 느린 냉각속도에 의해 취약한 공정(eutectic) 조직이 광범위하게 발생하였으며 이것이 rim부에 비해 인장강도를 감소시킨 원인이라고 생각되며 이것은 피로강

도에도 직접적인 영향을 미치게 된다.

3.3 고주기피로(HCF)시험

일반적으로 알루미늄합금과 같은 비철금속은 응력의 감소와 함께 계속적으로 피로수명이 증가하는 곡선의 형태를 보이며 피로한도(Fatigue limit)도 뚜렷하게 나타나지 않는 것으로 알려져 있다[7]. 본 피로시험에서는 한 응력조건 당 3~6 개씩 실험하여 prediction band를 도출하였고 여기에 Basquin 식을 적용하였다. 일반적으로 금속에 대한 피로수명(Number of cycle to failure, N_f)과 True stress amplitude(σ_a)의 관계는 식 1의 Basquin's equation을 따르며[8], Table 3은 HCF시험의 결과를 Basquin 식에 적용한 것이다.

$$\sigma_a = \frac{\Delta\sigma}{2} = \frac{\Delta\epsilon_e \cdot E}{2} = \sigma'_f (2N_f)^b \quad (1)$$

위식에서 강도계수(σ'_f)와 강도 지수(b)는 실험적인 상수이다. Fig. 6의 S-N 선도 경사부(Open symbol)에서 확인할 수 있듯이 spoke부에서는 rim부에 비하여 피로수명에서 상대적으로 심한 편차를 관찰할 수 있다. 이는 spoke부에서 발생한 공정 조직에 의한 것으로 생각된다. 피로한도는 S-N 선도 수평부(Close symbol)에서의 피로시험응력의 평균값으로 정의하였다. 피로한도를 구하는 수평부는 소정의 제한반복수($N_f = 10^7$)동안에 파괴되었을 때 일정간격 응력 아래에서 시험, 소정의 제한 반복수에서 파괴되지 않았을 경우 일정간격응력 위에서 시험하는 staircase법으로 수행하였다[9]. 본 연구에서 staircase법으로 구한 rim부와 spoke부의 피로한도는 각각 95MPa, 75.4MPa로

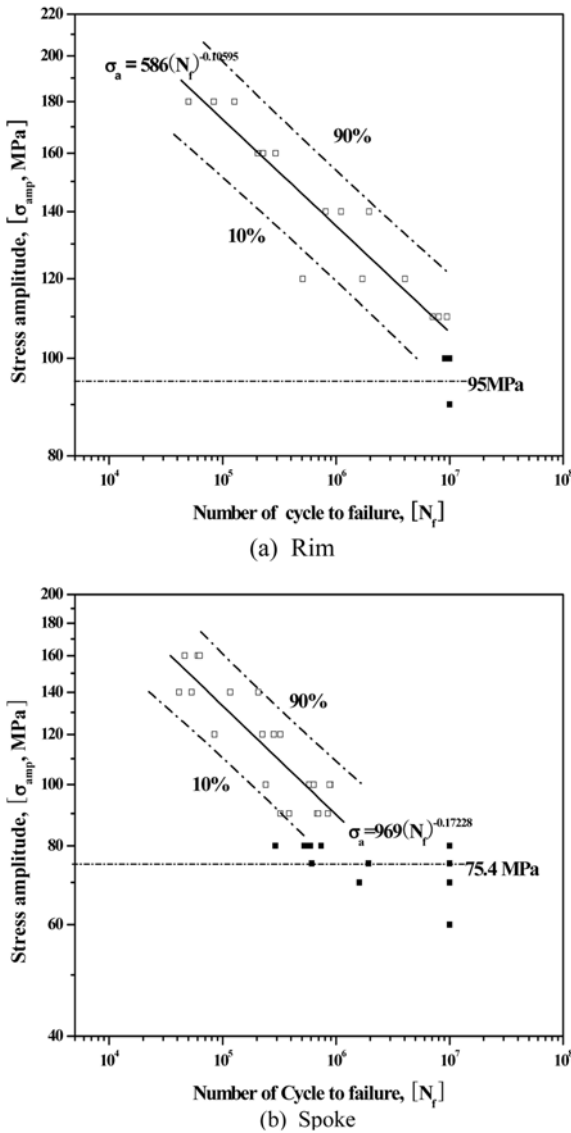


Fig. 6. Plots of maximum shear stress amplitude vs. number of cycles to failure for A356 aluminum alloy subjected to high cycle fatigue test.

rim부가 spoke부에 비해 약 20MPa 높게 나타났다.

주조 시 생성되는 기공이 고주기피로시험결과에 미치는 영향을 조사하기 위하여 rim부와 spoke부의 기공률(porosity)을 측정하였다. 주조결합 중 공공은 연신율과 파괴인성의 평균값을 크게 감소시킬 뿐만 아니라 조제품질의 편차를 증가시키고, 주조 시 생성된 공공에서 피로균열이 시작되기 때문에 피로수명을 감소시킨다고 알려져 있다[10,11].

Fig. 7은 기공률과 수명의 관계를 나타낸 것이다. 본 연구에서의 기공률 측정결과 rim부와 spoke부 모두 기공률은 3% 이내였으며 서로 뚜렷한 차이를 보이지 않았고, 기공률분포와 피로수명의 관계에서도 큰 관련성을 발견하지는 못했다. 따라서 본 연구범위에서 spoke 및 rim부의 기공도의 차이가 인장특성 및 피로특성에 미치는 영향은 극히 미약하다고 판단된다.

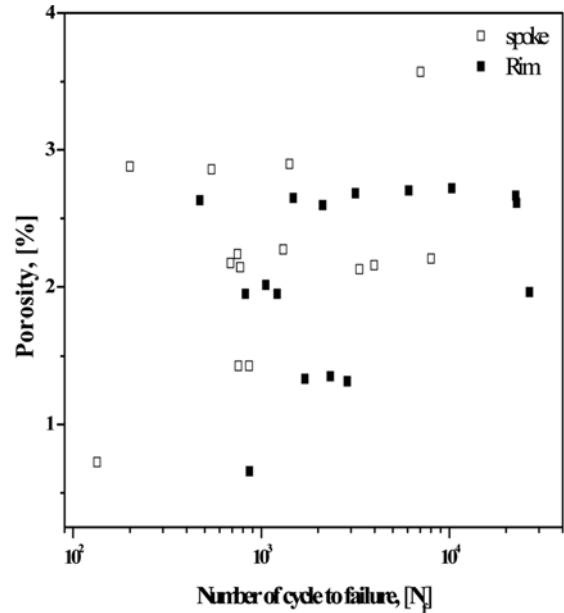


Fig. 7. Plots of porosity vs. number of cycles to failure.

3.4 저주기피로(LCF)시험

Fig. 8은 rim부와 spoke부의 LCF시험 결과를 나타내고 있다. LCF시험의 결과 역시 HCF결과에서 예상한 바와 같이 rim부의 피로수명이 spoke부에 비해 높게 나타났다. 탄성거동의 직선적인 부분은 고주기피로시험과 마찬가지로 Basquin이 제안한 식으로 표현할 수 있으며 피로수명과 소성 변형률과의 관계는 Coffin과 Manson[12]이 제안한 식으로 표현된다. 즉 어떤 피로수명(N_f)에서의 변형률 진폭(Total strain amplitude)은 정상상태에서의 히스테리시스 루프로부터 탄성 변형률과 소성 변형률의 합으로서 표시할 수 있다. 큰 변형률 혹은 짧은 피로수명을 가질 때에는 소성변형률 향이 우세하고, 작은 변형률 혹은 긴 피로수명을 가질 때에는 탄성변형률 향이 우세하다. 이러한 저주기피로시험의 관계는 식 2로 표현된다[12].

$$\frac{\Delta \epsilon_t}{2} = \epsilon_a = \frac{\Delta \epsilon_e}{2} + \frac{\Delta \epsilon_p}{2} = \frac{\sigma'_f}{E}(2N_f)^b + \epsilon'_f(2N_f)^c \quad (2)$$

여기서 $\Delta \epsilon_t/2$ 는 총변형률 진폭(Total strain amplitude), $\Delta \epsilon_e/2$ 는 탄성변형률 진폭(Elastic strain amplitude), $\Delta \epsilon_p/2$ 는 소성 변형률 진폭(plastic strain amplitude), σ'_f 는 피로강도계수, b 는 피로강도지수이며, ϵ'_f 는 피로연성계수, c 는 피로연성지수이다.

탄성 및 소성 변형률의 향이 같아지는 피로수명을 천이수명(transition fatigue life : $(2N_t)_i$)라 하며, 이 천이수명은 탄성 및 소성 변형률과 피로수명이 교차하는 수명이다. 천이수명은 식2에서부터 식 3과 같이 표현할 수 있으며, 본 저주기피로시험에서의 rim부와 spoke부의 천이수명은 각각 420cycle, 141cycle이다.

$$(2N_t)_i = \left(\frac{\epsilon'_f \cdot E}{\sigma'_f} \right)^{\frac{1}{b-c}} \quad (3)$$

천이수명 이하의 큰 변형률 혹은 단 수명(short fatigue life)

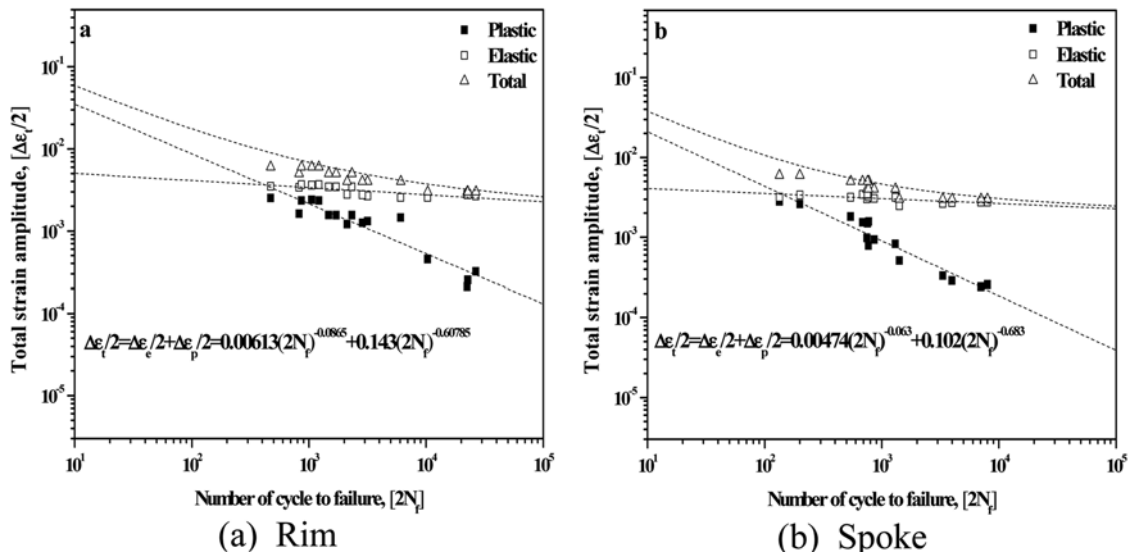


Fig. 8. Plots of total strain amplitude vs. number of cycles to failure for A356 aluminum alloy subjected to low cycle fatigue test.

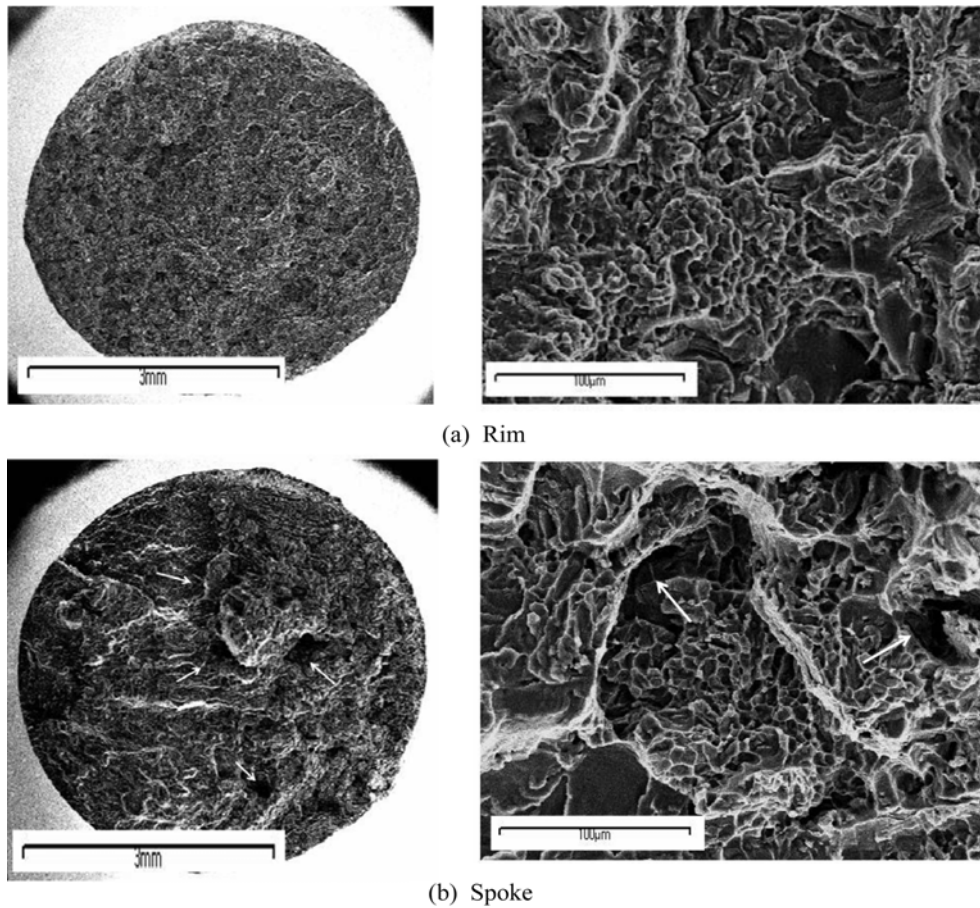


Fig. 9. Scanning electron fractographs of broken LCF test specimens of (a) rim, (b) spoke part of Al-alloy wheel.

의 경우 소성 변형률 향이 우세하며, 이때 재료의 피로수명은 ductility에 의해 지배되는 반면 천이수명 이상의 작은 변형률 혹은 장 수명(long fatigue life)경우 소성 변형률보다 탄성 변형률 향이 우세하며, 파괴강도에 의해 결정된다[7,13].

본 연구에서의 rim부와 spoke부의 저주기 피로시험은 파단

피로 수명이 천이 피로 수명보다 더 장 수명 데이터로서 plastic strain amplitude 보다 elastic strain amplitude 가 더 지배적인 것을 알 수가 있다. 전체적인 피로 특성을 가장 효과적으로 다루기 위해서는 plastic strain amplitude 과 elastic strain amplitude의 균형이 중요하다.

3.5 파단면 분석

Fig. 9는 저주기피로시험 후 rim부와 spoke부의 SEM 파단면을 나타낸 것이다. A356합금의 주 강화기구는 T6 열처리를 통해 형성된 Mg₂Si 석출이나 초정상의 크기와 공정상의 분포가 소재의 강도에 직접적으로 영향을 미친다[10]. Rim부와 spoke부 모두 파면에는 dimple파괴양상이 주도하는 연성파괴가 주된 파괴기구인 것으로 생각된다. 또한 rim부의 파단면은 spoke부에 비해 상대적으로 요철이 심하지 않고 수직상정 부분을 관통하는 shearing에 의한 전단파괴가 일부 관찰되지만 전체에서 차지하는 비율은 낮으며 고른 파단면을 관찰할 수 있다. Spoke부는 rim부에 비해 상대적으로 요철이 심한 것을 관찰할 수 있다. 이는 수직상정 조직 외에도 넓게 분포되어 있는 공정조직(Fig. 4(c))의 파단에 의한 것으로 생각된다. 즉 수직상정조직에서는 소성변형을 수반하는 연성파괴(dimple)를 보이거나 공정조직은 소성변형을 거의 일으키지 않는 취성파괴로 진행되었던 것으로 판단된다. 이와 같이 공정조직이 많이 관찰되었던 spoke부에서는 상대적으로 취성파괴가 많이 발생하였고 따라서 피로강도가 낮았다고 생각된다.

4. 결 론

저압주조법으로 제조한 A356 알루미늄합금 휠의 rim부와 spoke부에서 채취한 시편을 가지고 인장시험, 고주기 및 저주기 피로시험을 수행하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) 조직관찰 결과 알루미늄 휠의 A356합금의 조직은 시편의 채취부위인 rim부, spoke부에 따라 서로 상이한 조직을 보였다. 비교적 냉각속도가 빠른 rim부에서는 주조조직의 특징을 보여주는 수직상정 조직이 고르게 관찰되었으나 spoke부에서는 느린 냉각속도로 인해 수직상정으로 성장하지 못한 공정조직(eutectic)이 넓게 분포되어 있는 것이 관찰되었다.

2) 알루미늄합금 휠의 rim부는 spoke부에 비해 보다 높은 인장강도특성을 보이며, 고주기와 저주기 피로시험에서 우수한 피로 특성을 보인다. Rim부가 spoke부에 비해 높은 인장강도, 피로강도특성을 보이는 이유는, rim부의 경우 주조 시 빠른 냉각속도에 의해 고른 수직상정조직으로만 이루어져 있는 반면 spoke부는 상대적으로 느린 냉각속도 하에서 수직상정 조직 외에 넓게 분포되어 있는 공정조직이 발생하였기 때문이라고 판단된다.

3) A356 알루미늄 합금휠의 spoke부에서 발생한 취약한 공정조직 때문에, spoke부는 rim부에 비하여 고주기피로수명에서 상대적으로 심한 편차가 나타났으며, 또한 저주기피로수명 및 전이수명을 감소시키는 결과를 가져왔다

4) Spoke부와 rim부의 SEM 피로파면 관찰한 결과 rim부에서는 소성변형이 파괴의 주원인으로 판단되며, spoke부는 소성변형과 취성균열의 복합적인 메커니즘에 의해 파괴에 이른 것으로 판단된다. 이것은 주조 시 발생한 공정조직이 취성파괴를 야기하였기 때문이라고 판단된다.

참고문헌

- [1] Korea Institute of Science and Technology Information, "Aluminum alloy", 2007
- [2] Korea Machine Tool Manufactures' Association, "The new materials seeking for light-weight and high strength", vol.7, 2002
- [3] ASTM, "Conducting constant amplitude axial fatigue tests of metallic materials", ASTM E466-07, 1995
- [4] ASTM, "Strain controlled fatigue testing", ASTM E606-04, 2005
- [5] J. K. Lee, C. S. Park and M. H. Kim, "Effects of the mold temperatures on the microstructure and mechanical properties of low pressure die cast product", J. Kor. Foundry's Soc., vol.18, No.3, pp.254-261, 1998
- [6] A. A. Benzerga, et al., "Smaller is softer: An inverse size effect in a cast aluminum alloy", Acta mater, 49, pp.3071-3084, 2001
- [7] S. Suresh, "Fatigue of materials", Cambridge Univ., pp.128, 1991
- [8] Basquin. O. H., "The Exponential Law of Endurance Tests," American Society for Testing and Materials Proceedings, Vol. 10.
- [9] "Metallic materials fatigue testing-Statistical planning and analysis of data", KS B ISO 12107, 2004
- [10] Y. N. Kwon, S. S. Kim, Y. S. Lee and J. H. Lee, "Deformation behavior with the variation of microstructure of A356 alloy", J. Kor. Inst. Met. & Mater., vol.43, No.12, pp.834-840, 2005
- [11] Q. G. Wang, D. Apelian, D. A. Lados, "Fatigue behavior of A356-T6 aluminum cast alloys. Part 1. Effect of casting defects", SCI. Met, pp.73-84, 2001
- [12] L. F. Coffin, Failure in Mechanics and Structures - Power Generation, "Failure and Microstructures", pp.1-27, American Society for Metals, Metals Park, Ohio, 1979
- [13] R. I. Stephene, A. Fatemi, R. R. Stephene, "Metal fatigue in engineering", pp.108, 1980