

과공정 Al-15wt.%Si 압출재와 회주철의 미세조직 및 엔진 오일 환경에서의 마모 특성

강연지¹ · 김종호² · 황종일³ · 이기안[#]

Microstructure and Wear Properties in an Engine Oil Environment of Extruded Hyper-eutectic Al-15wt.%Si Alloy and Gray Cast Iron

Y. J. Kang, J. H. Kim, J. I. Hwang, K. A. Lee

(Received August 9, 2018 / Revised November 2, 2018 / Accepted November 8, 2018)

Abstract

This study investigated the microstructure and wear properties of extruded hyper-eutectic Al-Si (15wt.%) alloy in an engine oil environment. The wear mechanism of the material was also analyzed and compared to conventional gray cast iron. In microstructural observation results of Al-15wt.%Si alloy, primary Si phase (45.3 μ m) and eutectic Si phase (3.1 μ m) were found in the matrix, and the precipitations of Mg₂Si(β'), Al₂Cu(θ') and Al₆(Mn,Fe) were also detected. In the case of gray cast iron, ferrite and pearlite were observed. It was also observed that flake graphite (20-130 μ m) were randomly distributed. Wear rates were lower in the Al-Si alloy as compared to those of gray cast iron in all load conditions, confirming the outstanding wear resistance of Al-15wt.%Si alloy in engine oil environment. In the 4 kg_f condition, the wear rate of gray cast iron was 6.0 $\times 10^{-5}$ and that of Al-Si measured 0.8 $\times 10^{-5}$. The microstructures after wear of the two materials were analyzed using scanning electron microscope (SEM) and electron backscatter diffraction (EBSD). The primary Si and eutectic Si of Al-Si alloy effectively mitigated the abrasive wear, and the Al matrix effectively endured to accept a significant amount of plastic deformation caused by wear.

Key Words : Hyper-Eutectic Al-Si Alloy, Wear Resistance, Pin-On Disk Test, Engine Oil Environment, Gray Cast Iron

1. 서론

최근 환경오염, 에너지 소비 효율에 대한 관심이 증가하면서 자동차 및 항공기 등 운송수단의 경량화가 요구되고 있으며, 그에 따라 높은 경량성을 가지면서도 우수한 비강도를 갖는 Al-Si 합금의 수요가 높아지고 있다. Al-Si 합금은 경도가 높은 Si 상의 생성으로 낮은 밀도와 열팽창 계수, 우수한 내마모 특성과 내식성 및 높은 고온 강도를 나타낼 수 있다. 특히 12.6% 이상의 Si 함량을 갖는 과공정

(hyper-eutectic) Al-Si 합금의 경우 초정 Si 상이 Al 기지에 정출되도록 설계한 합금으로 매우 뛰어난 내마모 특성을 갖는다 [4]. 이에 과공정 Al-Si 합금은 자동차용 엔진 경량화 합금으로의 적용이 시도되고 있다 [1-3]. 현재 엔진 블락 및 하우징 등 일부 엔진 부품에 대해서는 경량화가 상당히 진전된 바 있으며, 연평균 약 4.6%씩 차량용 알루미늄 시장이 확대되고 있는 실정이다 [4,5]. 그러나 디젤 차량의 실린더 라이너와 같이 피스톤과의 직접적인 마찰이 지속적으로 일어나는 대부분의 엔진

1. 인하대학교 신소재공학과, 석사 과정

2. 포항산업과학연구원, 책임연구원

3. (주)LMS, 부장

Corresponding Author : Department of Materials Science & Engineering,
Inha university, 교수 E-mail: keeahn@inha.ac.kr

부품에서는 여전히 값싼 원가에 비해 마모 특성 제어가 용이한 회주철(gray cast iron)이 주로 사용되고 있다 [6,7]. 따라서 내 마모 특성을 향상시킨 과공정 Al-Si 합금의 개발이 조속히 이루어져야 할 과제이며, 차체 부피의 약 30%를 차지하는 엔진/구동 기관의 과공정 Al-Si 소재 적용이 확대됨에 따라 연료 소비량을 크게 절감할 수 있을 것으로 예상된다.

그러나 과공정 Al-Si 합금은 주조 시 고용 한계(solubility limit) 이상에서 정출된 초정 Si상이 제어되지 않고 조대한 크기로 생성될 경우 기계적 특성 및 가공성이 저하되는 문제점도 동시에 가지고 있다. 이를 해결하기 위해 주로 미세화 원소 P를 첨가하는 방법이 사용되고 있다 [8,9]. P 원소를 합금내 적절히 분산시키기 위한 방법으로 Cu-P로 합금화하여 접종하는 것이 일반적이며, 합금 조성에 따라 Fe-P 또는 Ni-P 를 기초로 한 접종도 가능하다. 상기 접종제들을 첨가하면 초정 Si 상의 핵생성 사이트 AIP를 형성시킴으로써 미세한 크기와 균일한 분포를 갖는 초정 Si 상을 얻을 수 있다 [10].

최근 과공정 Al-Si 합금의 미세조직 및 마모 특성을 제어하고 엔진 대체 소재로서 적용하기 위한 연구들이 지속적으로 발표되고 있다. F. Wang 등은 Si 원소의 함량이 증가할수록 합금의 내마모 특성이 향상된다고 보고하였다 [12]. 또한 과공정 Al-Si 합금에 열간 압출 공정을 시행하면 공정 Si상 및 초정 Si 상의 형상을 제어하고 결정립을 미세화시킬 수 있다고 제시되고 있다 [13-14]. J. W. Yeh 등은 압출 횟수에 따라 초정 Si상이 제어되고 기계적 특성 또한 향상된다고 밝힌 바 있다 [14]. 또한 본 연구진은 T6 열처리를 통해 Al-Si 합금의 물성을 크게 개선할 수 있음을 제시한 바 있다 [15]. Al-Si 계 합금은 시효 경화형 합금이 아님에도 T6 열처리 과정에서 강화상인 Al_2Cu 상의 미세화 등의 효과로 경도 및 인장, 피로 특성이 향상되는 효과가 있다.

마찰-마모-윤활 특성은 그 메커니즘이 다양하고 복잡한 만큼 실제 사용 환경과 유사한 조건에서 수행되어야 할 필요성이 있다. 그러나 현재까지 과공정 Al-Si 합금을 마모 용 경량 소재로 적용하기 위하여 다양한 연구들이 수행되었음에도 불구하고 실제 사용 환경인 엔진 오일 환경에서의 마모 특성은 아직까지 보고된 바 없다.

본 연구에서는 과공정 Al-15wt.%Si 합금의 미세조직 및 엔진 오일 윤활 조건에서의 마모 특성을 조사하였다. 합금 내 초정 Si 상 제어와 내마모 특성 향상을 위해 Cu-P 를 첨가 후 압출 공정을 수행하였다. 또한 현재 자동차 엔진 부품으로 주로 사용되고 있는 회주철의 마모 특성도 함께 평가하여 비교하였다. 이와 함께 각 소재들에서의 미세 마모 기구를 미세조직과 연계하여 규명하고자 하였다.

2. 실험방법

본 연구에 사용된 과공정 Al-15wt.%Si 합금은 DC 주조(direct chilled casting) 공정을 통해 빌렛으로 제조되고 이 후 균질화 처리, 열간 압출을 수행한 소재이다. 주조 과정에서 초정 Si 상의 미세화를 위해 Cu-P 미세화제를 첨가하였으며, 압출 후 T6 열처리(515°C/90min. + 175°C/600min.)를 수행하였다. 또한 비교재로 쓰인 회주철(gray cast iron)의 경우 자동차의 엔진 실린더 부품에서 직접 소재를 채취하고 시편으로 가공하여 사용하였다.

조성 분석을 위하여 X-ray fluorescence (XRF) 분석을 수행하였으며, 그 결과를 표 1에 나타내었다. X-ray diffraction (XRD)을 이용하여 소재의 상분석을 수행하였다. 두 소재의 미세조직 관찰을 위해서 silicon carbide 연마지(#400~#4000) 및 1 μm alumina slurry로 폴리싱(polishing)을 수행한 후 에칭하였다. 본 연구에서 에칭 용액으로 과공정 Al-Si 합금의 경우는 modified Keller's 용액(2ml HF, 3ml HCl, 20ml HNO₃,

Table 1 Chemical compositions of hyper-eutectic Al-Si alloy and gray cast iron used in this study

(a) Elements	Mg	Si	Fe	Ni	Cu	Mn	Sr	Zn	Al
Hyper-eutectic Al-Si	0.801	15.04	0.117	0.04	0.445	0.153	0.003	0.902	Bal.
(b) Elements	Fe	C	Si	Mn	P	Cr	S	Cu	
Cast iron	Bal.	3.25-3.5	1.57	0.78	0.23	0.22	0.15	0.11	

증류수 175ml)을, 회주철의 경우는 Nital(5ml HNO₃, 95ml ethanol) 용액을 사용하였다. 초기 시편의 미세조직 관찰을 위하여 광학 현미경 (optical microscope, BX53M) 및 field emission scanning electron microscope (FE-SEM, TESCAN, CZ/MIRA I LMA) 분석을 수행하였다.

기계적 특성 평가를 위해 경도 및 마모 시험을 수행하였다. 경도 특성은 비커스 경도 측정 장치 (Vicker's hardness tester, HM-124)를 사용하여 조사하였으며, 0.5Hv 하중으로 10초간 압입하였다. 경도값은 각 시편당 12번씩(과공정 Al-Si 합금 내 초정 Si상의 경우 20회 측정) 시험 후 최대, 최소값을 제외한 평균값으로 산정하였다. 마모 실험은 pin-on disk 시험 장비(RB 102-PD)를 사용하였으며, STD11 steel을 pin 소재로 이용하였다. 마모 시험은 각 합금에 대해 2kg_f, 3kg_f, 4kg_f 하중에서 0.5m/s 속도로 1 시간 동안 윤활제 환경의 wet 조건으로 수행하였다.

이 때 윤활제는 자동차 엔진 가동 환경과 유사한 조건을 부여하기 위하여 엔진 오일(Kixx D1 RV)을 선택, 사용하였다. 마모 질량 측정을 위해 판독률 (readability) : 0.0001g의 정밀 계량기(PAG214C)를 사용하여 시험 전·후 무게를 각 5 회 측정하였다. 마모 시험 후 마모 표면 및 단면 변형 조직의 관찰을 위해 FE-SEM 및 electron backscatter diffraction (EBSD) 분석을 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 과공정 Al-15wt.%Si 압출재 및 회주철의 미세조직 및 경도 특성

두 소재의 미세조직 및 구성 상들의 형상, 분포를 알아보기 위해 수행한 광학(OM) 관찰의 결과를 그림 1에 도시하였다. 일반적으로 Cu-P 미세화제를 첨가하면 용융 액상 내 P 원소가 AIP의 형태로 변화되어 불균일 핵생성 사이트를 제공하고 이에 응고 중 가장 먼저 생성되는 초정 Si 상을 분산시킨다고 알려져 있다 [10]. 즉 응고 시 초정 Si 상이 핵생성 사이트(AIP)에서 먼저 정출되고 이후 공정 온도 (eutectic temperature) 이하에서부터 추가로 공정 Si 상이 생성된다 [16]. Al-Si 과공정 압출 소재의 경우 그림 1(a)에서 볼 수 있듯이 약 45.3 μm 크기의 비

교적 조대한 초정 Si 상(dashed line)들과 약 3.1 μm 크기의 공정 Si 상(arrows)들이 알루미늄 기지 내 각각 1.7% 및 3.3% 분율로 분포하는 것으로 나타났다.

그림 1(b)의 비교재 회주철의 미세조직 관찰 결과, 편상의 흑연들이 다양한 크기 (20 μm~130 μm)로 분포하고 있었다. 회주철은 편상 흑연의 분포를 기준으로 ASTM A 247 분류에 따라 구분될 수 있다. 그림 1(b)와 같이 편상 흑연이 방향성 없이 무작위하게 분포하여 있는 경우 type A 회주철로 분류된다. Type A 회주철의 경우 탄소 함량이 증가할수록 편상 흑연의 크기가 감소하여 기계적 특성의 향상될 수 있지만, 만약 편상 흑연이 일부 영역에 집중된 형태 (분류 type B에 해당)로 배열될 경우 물성의 저하가 나타난다. 편상 흑연이 균질하게 분포된 본 type A 회주철의 경우 마모 환경에서 흑연의 작용으로 합금 표면에 적절하게 윤활막이 형성되어 내마모 특성이 우수하다고 보고되고 있다 [17]. 한편 그림 1(b)에서 회주철의 경우 편상 흑연의 평균 분율이 6.7%로 측정되었다.

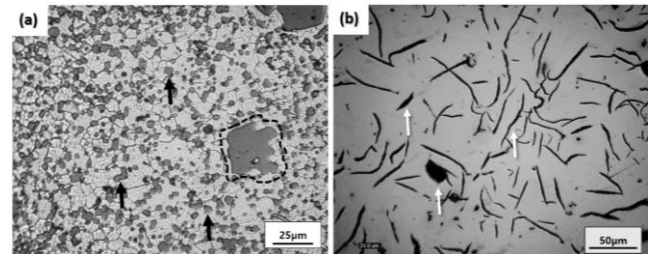


Fig. 1 Microstructures of (a) hyper-eutectic Al-15wt.%Si alloy and (b) gray cast iron

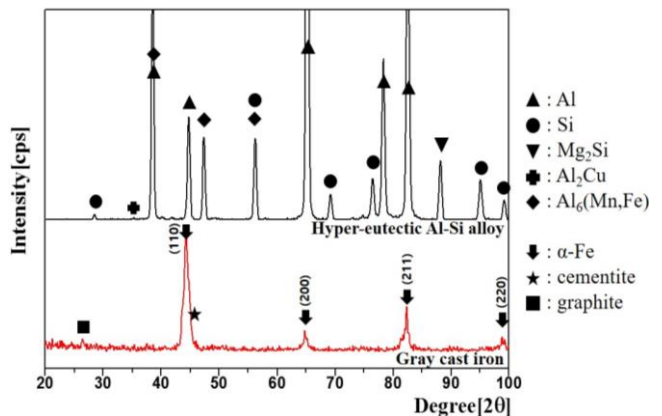


Fig. 2 XRD phase analysis results of Al-15wt.%Si alloy and gray cast iron

그림 2의 XRD 상분석 결과 과공정 Al-Si 합금에서는 알루미늄 기지와 Si 상(초정 및 공정 Si) 외에 Al-Si 계 합금의 대표적인 강화상으로 알려져 있는 Al₂Cu 상 및 다양한 2차상들이 나타났다. Al₂Cu 상의 경우 미세화제인 Cu-P의 첨가로 Cu 원소가 유입되었기 때문에 사료된다. 또한 Mg₂Si, Al₆(Mn,Fe) 석출상들도 부가적인 강화 효과를 나타내는 것으로 알려져 있다. 회주철에서는 페라이트(ferrite) 상, 흑연(graphite) 그리고 시멘타이트(cementite) 상들이 확인되었다.

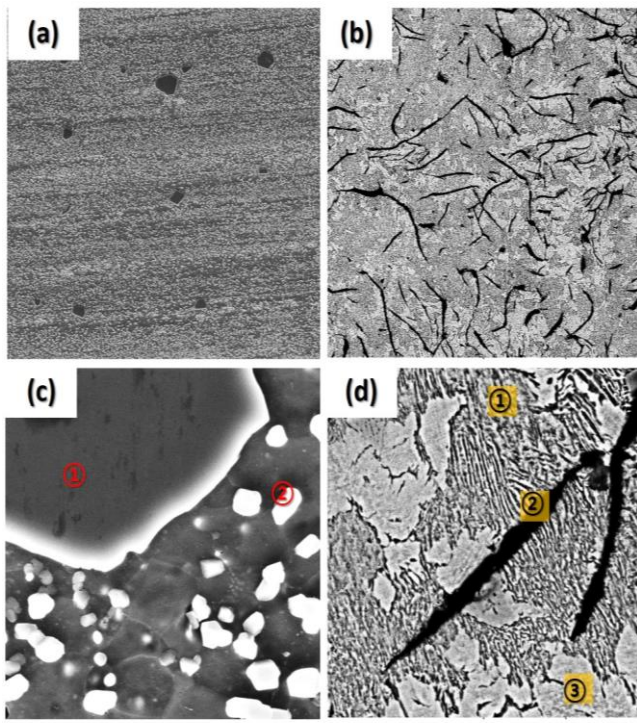


Fig. 3 Low magnification SEM images of (a) Al-15wt.%Si alloy, (b) gray cast iron and high magnification SEM-EDS results of (c) Al-15wt.%Si, and (d) gray cast iron

Al-Si alloy	Conc.		Gray cast iron	Conc.			Unit.
	1	2		1	2	3	
Al	1.002	41.773	Fe	90.957	31.416	0.064	Wt.%
Si	98.216	59.227	C	6.49	66.824	0.047	
Fe	0.266	-	Si	1.591	0.694	6.917	
Ni	0.179	-	P	0.402	0.764	-	
Cu	0.178	-	Cr	0.227	0.082	-	
Mg	0.159	-	Mn	0.333	0.221	-	
total	100	100	100	100	100	100	

상기 XRD 결과에서 검출된 다양한 상들의 형상, 크기, 분포를 알아보기 위해 SEM-EDS 관찰 결과(저배율 및 고배율)들을 그림 3에 나타내었다. 과공정 Al-Si 합금의 경우 그림 3(a)에서와 같이 공정 Si 상이 압출 방향으로 배열되어 있었으며, 결합은 나타나지 않았다. 회주철의 경우 층상 구조의 펄라이트(pearlite)가 높은 분율을 차지하고 있었으며, 검정색의 편상 흑연과 이웃한 밝은 회색의 페라이트가 함께 관찰되었다(그림 3(b), (d)). 페라이트 상은 주로 편상 흑연 상계면과 이웃하여 생성되어 있었다. 또한 고배율 SEM 관찰 결과(그림 3(d)), 펄라이트의 층간 거리는 평균 0.38 μm로 측정되었다.

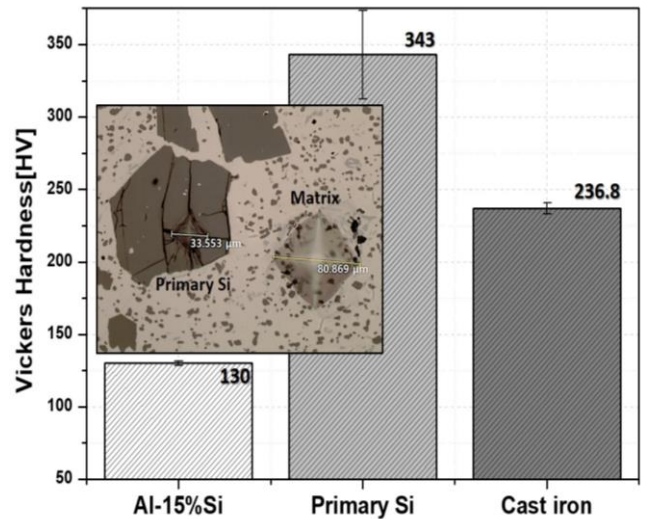


Fig. 4 Vickers hardness results for Al-15wt.%Si alloy, primary Si and gray cast iron

두 소재, 과공정 Al-Si 합금과 회주철의 비커스(Vickers) 경도 측정 결과를 그림 4에 도시하였다. 여기에서 과공정 Al-Si 합금의 경우 경도가 큰 초정 Si 상들의 존재로 인해 경도의 편차가 크게 측정되었으며, 이에 초정 Si 상과 Al 기지+공정 Si 상 두 영역을 구분하여 측정하였다. 그 결과 Al 기지+공정 Si 상 영역은 130Hv, 초정 Si 상은 343Hv로 얻어졌으며 회주철의 경우는 236.8Hv로 나타났다. 즉 과공정 Al-Si 합금의 기지는 회주철의 경도보다 낮았으나 초정 Si 상의 경우 회주철 보다 더 높은 것을 확인할 수 있었다.

3.2 Al-15wt.%Si 및 회주철의 엔진 오일 환경하에서의 마모 특성

그림 5에 오일 환경 하에서의 pin-on disk 마모 시험 결과를 소재 및 하중별로 나타내었다. 마모 질량 감소(wear loss) 결과에서는 두 소재 모두 하중이 증가함에 따라 마모량이 증가하는 일반적인 경향을 나타내었다. 경 마모(mild wear) 조건인 2kg_f 하중에서는 두 소재 모두 마모가 거의 발생하지 않았다. 그러나 3kg_f 와 4kg_f 하중 조건들에서는 회주철의 마모량이 급격히 증가하였으며, 4kg_f 하중에서 질량 감소량(1 시간 마모 시험 후)은 회주철의 경우 0.029 (±7.2×10⁻⁴) g, 과공정 Al-Si 합금의 경우 0.002 (±5.8×10⁻⁵) g 으로 측정되었다. 합리적인 마모량 비교를 위해서는 과공정 Al-Si 합금이 밀도가 매우 낮은 경량 합금임을 고려해야 하며, 이에 과공정 Al-Si 합금과 회주철의 밀도를 아르키메데스법을 통해 측정(표 2)하고 그 결과를 바탕으로 마모 부피(그림 5(b)) 및 마모율(그림 5(c))를 계산하였다. 얻어진 마모량으로부터 마모 부피와 마모율 값을 환산하기 위해 사용한 식을 아래 식 1에 그리고 측정된 아르키메데스 밀도 값을 표 2에 나타내었다.

$$K_i = \frac{V_i}{F \times S} \quad (1)$$

여기서 K_i는 마찰일 당 마모된 부피인 마모율(wear rate)이며, V_i는 마모 부피(wear volume), 분모는 마찰력 F와 마찰 거리 S의 곱인 마찰일이다. 마모율 결과 또한 마모 질량 결과와 동일한 경향을 보였다. 가장 큰 격차를 보인 4kg_f 하중에서의 마모율은 회주철의 경우 6.0×10⁻⁵, 과공정 Al-Si 합금의 경우 0.8×10⁻⁵으로 얻어졌다. 즉 밀도 차를 고려하였음에도 회주철에 비해 과공정 Al-Si 합금의 내마모 특성이 현저히 우수함을 확인할 수 있었다.

Table 2 Archimedes density measurement results of Al-15wt.%Si alloy and gray cast iron

	Gray cast iron	Hyper-eutectic Al-Si alloy
Density[g/cm ³]	7.01	2.634

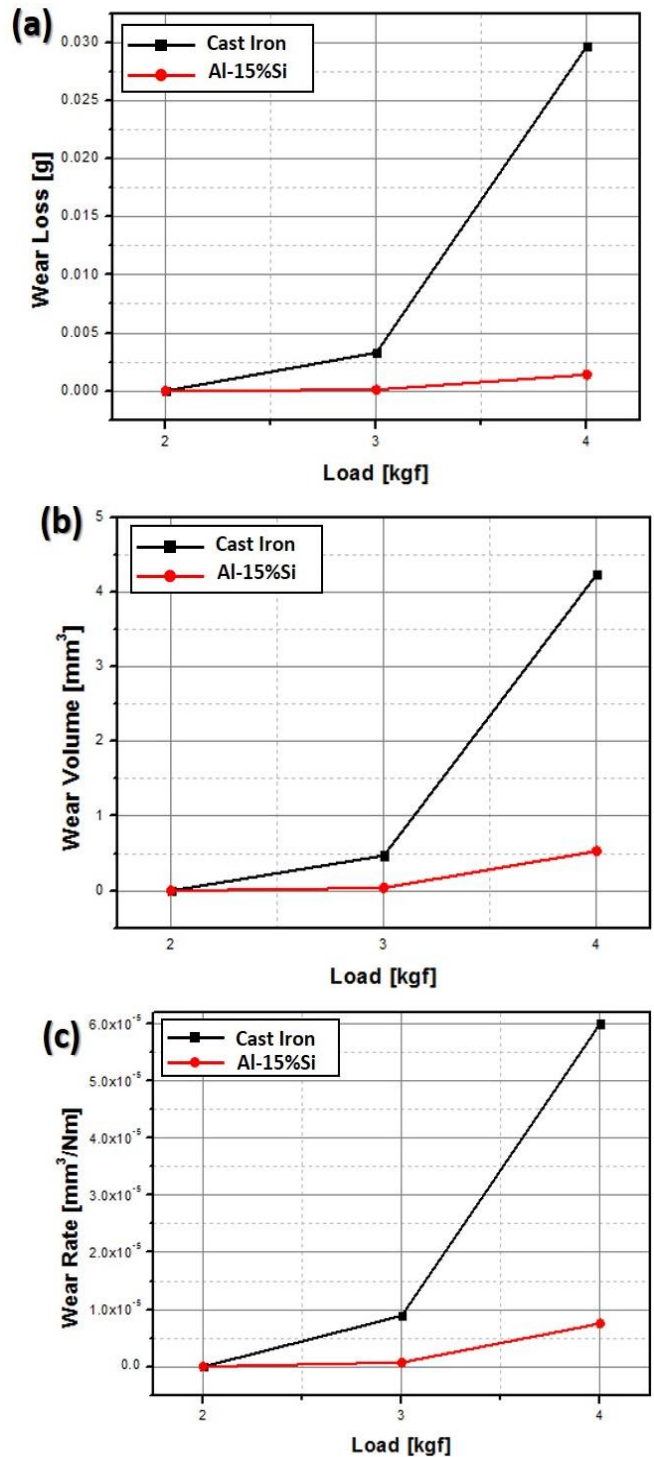


Fig. 5 Wear properties of Al-15wt.%Si and grey cast iron in engine oil environment with (a) wear loss, (b) wear volume and (c) wear rate

3.3 Al-15wt.%Si 합금 및 회주철의 마모 기구

3kg_f, 4kg_f 하중에서 시험된 두 소재 마찰 시편들의 마모흔 표면 관찰 결과를 그림 6에 나타내었다. 그림 6(a,b)에 나타난 과공정 Al-Si 합금의 두 하중 조건에서의 주요 마모 기구는 연삭 마모로 관찰되었다. 또한 미세 마모 트랙 (arrows)들이 공통적으로 관찰되었는데, 이러한 마모 트랙들은 수직 하중이 증가함에 따라 더 선명하게 나타났다. 이는 마모 과정에서 깨지거나 기지로부터 떨어져 나온 경한 강화상들이 추가적인 마모를 일으켜(three body effect) 발생하는 것으로 판단된다. 회주철의 마모흔 표면 관찰 결과(그림 6(c),(d)) 하중의 증가에 따라 4kg_f 에서 연삭 마모가 더욱 심화됨을 확인할 수 있으며, 추가적으로 회주철 4kg_f 마모 하중의 경우에 부분적으로 일부 기지가 떨어져 나간 흔적(dashed line)이 관찰되었다. 이러한 국부적 기지의 박리는 조대한 마모 입자의 생성으로 three body 효과를 더 가중시키는 것으로 보여진다.

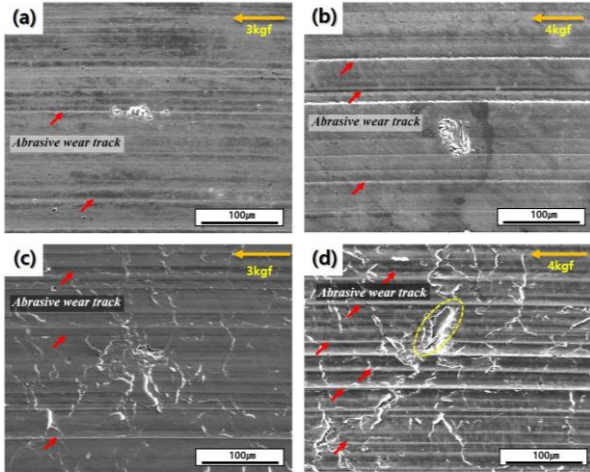


Fig. 6 SEM images showing worn out surface of (a) Al-15wt.%Si alloy (c) grey cast iron tested at 3kg_f wear load, (b) Al-15wt.%Si alloy, (d) gray cast iron tested at 4kg_f wear load

마모 변형 조직 관찰을 위해 각 합금의 4kg_f 시험된 마모흔 단면을 분석하였다(그림 7). 마모흔 직하에서 관찰되는 초정 Si 상은 그림 7(a)와 같이 파단된 형태로 나타났다. 앞서 설명한 그림 6의 마모흔 표면 관찰 결과에서도 마찬가지로 초정 Si 상이 파

단된 형태로 나타났지만 기지와 분리나 탈락되는 형태는 나타나지 않았다. 상기 마모흔 표면 및 단면 관찰 결과로 종합하여 볼 때 초정 Si 상은 마모 환경에서 소재에 부여되는 응력의 일부를 수용함으로써 소재 전체의 마모 저항성을 향상시키는 것으로 판단된다. 회주철의 경우에도 소성변형 영역에서 펄라이트상의 휘어짐(그림 7(b), arrows)이 관찰되었는데, 이 때 소성변형 영역은 과공정 Al-Si 합금보다 작은 약 3.5 µm 깊이로 측정되었다. 회주철의 높은 마모율에 비해 소성변형 영역이 작게 나타난 것은 경한 Fe 기지가 변형을 수용하기 보다 주로 표면에서의 연삭 작용에 의해 마모된 것임을 유추할 수 있다. 또한 앞서 마모흔 표면 관찰 결과에서 박리된 Fe 기지가 연삭 마모를 심화시킴을 알 수 있었는데, 그림 7(c)로부터 편상 흑연이 집중된 일부 영역에서 Fe 기지가 덩어리 채로 파단되어 마모 입자(debris)로 떨어져 나오는 것이 관찰되었다.

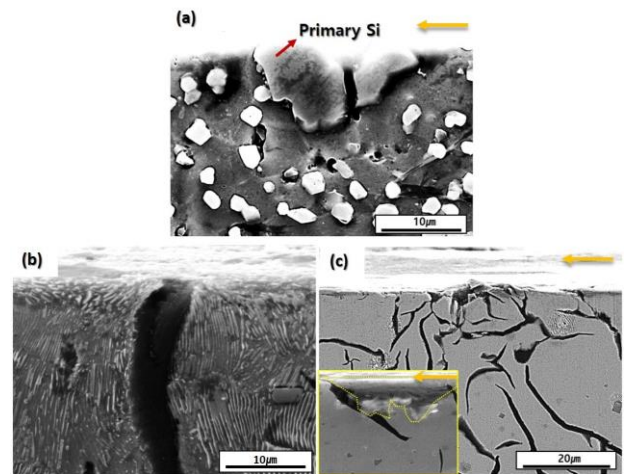


Fig. 7 SEM images showing etched worn out cross-sectional areas of Al-15wt.%Si alloy ((a), (b)), and grey cast iron ((c), (d)) tested at 4kg_f wear load

과공정 Al-Si 합금과 회주철의 마모흔 표면 및 단면 관찰 결과로부터 두 합금 간 마모에 의한 소성 변형 영역에 차이가 있음을 확인하였다. 소성 변형 영역에서 나타나는 각 합금 내 미세조직적 차이를 분석하기 위해 EBSD 분석을 수행하였으며, 그림 8에 그 결과를 나타내었다. 그림 8(a), (c)의 inverse pole figure 결과에서 마모면 아래의 변형된 영역을 관찰하기 위해 low angle boundary (white line) 분포를

나타내었다. 그 결과 Al-15wt.%Al 합금 마모 시편에서 회주철의 마모 시편보다 low angle boundary의 분율이 높으며 그 분포도 잘 분산되어 있음을 알 수 있었다. 한편 Image quality map 결과(그림 8(b), (d))로도 각 소재의 마모 시편에서 기지의 변형 정도를 예측할 수 있었다 [18]. 파란색은 intensity가 낮은 영역으로 소성 변형이 발생한 것으로 간주할 수 있다. 그림 8(b)의 과공정 Al-Si 합금의 경우 평균 12.6 μm 깊이까지 소성 변형이 나타났는데, 그림 7에서 관찰된 소성 변형 영역과 부합하는 결과를 확인할 수 있었다. 초정 Si 상 직하에서도 기지의 변형이 관찰되었다. 이는 초정 Si 상 직하의 이웃한 기지에 응력을 분산시켜 합금의 마모를 억제시키는 데 기인하는 것으로 사료된다. 일반적으로 복합재료의 경우 마찰 환경에서 강화상에 의해 응력이 분산되는 하중 지지 효과[19,20]가 발생하는데, 과공정 Al-Si 합금의 경우, 경도가 높게 나타났던 초정 Si 상이 Al 기지 내 높은 분율로 존재하면서 복합 재료와 유사한 효과를 얻을 수 있는 것으로 이해될 수 있다. 반면 그림 8(c), (d)와 같이 회주철에서는 마모흔 직하의 기지에서만 변형의 수용이 확인되었다.

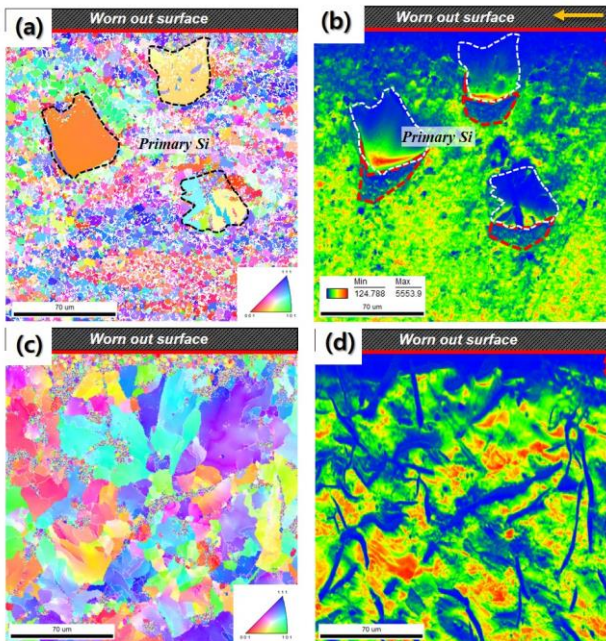


Fig. 8 EBSD analysis results of Al-15wt.%Si alloy ((a), (b)) and cast iron using ((c), (d)) tested at 4kg_r wear load; (a),(c) inverse pole figures and (b),(d) image quality maps

이상에서 회주철의 경우 표면의 연삭 마모와 일부 영역에 집중된 편상 흑연들 사이에서 발생하는 기지의 탈락이 주된 마모 기구로 작용하고, 과공정 Al-Si 합금의 경우 초정 Si상이 표면에서의 연삭 마모 저항성을 향상시킬 뿐만 아니라 연한 Al 기지에 고루 분포함으로써 하중을 분산시키는 역할을 하여 엔진 오일 환경에서 우수한 내마모 특성을 나타내는 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 과공정 Al-Si 합금과 상용 회주철의 미세조직 관찰 및 마모 특성을 조사하였다. 두 합금의 마모 거동을 분석함으로써 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 과공정 Al-Si 합금의 경우 공정 Si 상 및 초정 Si 상이 정출되어 있었으며, 특히 초정 Si 상은 Al 기지 + 공정 Si 상 분포 영역보다 우수한 경도 특성을 나타내었다. 상용 실린더 라이너에서 채취한 회주철 소재의 경우 다양한 크기의 편상 흑연들이 무작위적인 분포를 갖는 type A 회주철로 나타났다.

(2) 엔진 오일 윤활 조건에서의 pin-on disk 시험 결과, 마모 질량이 과공정 Al-Si 합금에서 현저히 작게 나타났으며, 마모율(wear rate)의 경우도 회주철에 비해 과공정 Al-Si 합금이 약 87% 더 작게 나타났다. 즉 과공정 Al-Si 합금이 낮은 밀도에도 불구하고 엔진 오일 분위기 하에서 현저히 우수한 내 마모 특성을 나타냈다.

(3) 마모 변형 조직 관찰결과, 회주철의 경우 소성 변형 영역이 매우 좁은 범위로 나타났으며, 표면에서의 연삭 작용과 기지의 탈락에 의해 마모가 발생함을 알 수 있었다. 또한 엔진 오일 환경에서 흑연 윤활막 생성되지 않고, 일부 영역에 집중적으로 분포된 흑연들에 의한 기지의 박리가 주요 마모 기구로 판단된다. 반면, 과공정 Al-Si 합금은 경도가 높은 초정 Si 상이 표면의 연삭 마모를 완화시켰으며, 동시에 기지 내부에서는 Si상의 하중지지 효과로 마모가 억제되는 것을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 민군기술협력사업의 지원으로 수행되

었으며 이에 감사드립니다.

REFERENCES

- [1] H. Ye, J., 2003, An overview of the development of Al-Si Alloy based material for engine applications, *Mater. Eng. Perform.* Vol. 12, No. 3, pp. 288~297
- [2] H.R. Ammar, A. M. Samuel, F. H. Samuel, Effect of casting imperfections on the fatigue life of 319-F and A356-T6 Al-Si casting alloys, *Mat. Sci. Eng. A* Vol. 473, No. 1~2, pp. 65~75
- [3] Q. Li, T. Xia, Y. Lan, W. Zhao, L. Fan and P. Li, 2013, Effect of rare earth cerium addition on the microstructure and tensile properties of hypereutectic Al-20%Si alloy, *J. Alloy. Compd.* Vol. 562, pp. 25~32
- [4] J. Hirsch, 2014, Recent development in aluminium for automotive applications, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China* Vol. 24, pp. 1995~2002
- [5] O Faruk, J Tjong and M Sain, 2017, *Lightweight and Sustainable Materials for Automotive Applications.*, CRC Press
- [6] N. Tiruvenkadam, P.R. Thyla, M. Senthilkumar, M.Bharathiraja, A. Murugesan, 2015, Synthesis of new aluminum nano hybrid composite liner for energy saving in diesel engines Vol. 98, pp. 440~448
- [7] P. J. Ward, H. V. Atkinson, P. R. G. Anderson, L. G. Elias, B. Garcia, L. Kahlen and J. Ibabe, 1996, Semi-solid processing of novel MMCs based on hypereutectic aluminium-silicon alloys, *Acta Metall.* Vol. 44, No. 5, pp. 1717~1727
- [8] Z. Henghua, D. Haili, S. Guangjie and X. Luoping, 2008, Microstructure and mechanical properties of hypereutectic Al-Si alloy modified with Cu-P, *Rare metals* Vol. 27, No. 1, pp. 59~63
- [9] Y. Wu, S. Wang, H. Li and X. Liu, 2009, A new technique to modify hypereutectic Al-24%Si alloys by a Si-P master alloy, *J. Alloy. Compd.* Vol. 477, No. 1~2, pp. 139~144
- [10] H. Yi, D. Zhang, T. Sakata and H. Mori, 2003, *J. Alloy. Compd.* Vol. 354, No.1~2, pp. 159~164
- [11] A. R. Riahi and A. T. Alpas, 2003, Wear map for grey cast iron, *Wear* Vol. 255, No. 1~6, pp. 401~409
- [12] F. Wang, H. Liu, Y. Ma and Y. Jin, 2004, Effect of Si content on the dry sliding wear properties of spray-deposited Al-Si alloy, *Mater. Design* Vol. 25, No. 2, pp. 163~166
- [13] X. Baiqing, Z. Yongan, W. Qiang, S. Likai, X. Changan, S. Chengjia and H. Xinlai, 2003, The study of primary Si phase in spray forming hypereutectic Al-Si alloy, *J. Mater. Process. Tech.* Vol. 137, No. 1~3, pp. 183~186
- [14] J. W. Yeh, S. Y. Yuan and C. H. Peng, 1998, A reciprocating extrusion process for producing hypereutectic Al-20wt.% Si wrought alloys, *Mat. Sci. Eng. A* Vol. 252, No. 2, pp. 212~221
- [15] G. S. Ham, M. S. Baek, J. H. Kim, S. W. Lee and K. A. Lee, 2017, Effect of heat treatment on tensile and fatigue deformation behavior of extruded Al-12 wt%Si alloy, *Met. Mater. Int.* Vol. 23, No. 1, pp. 35~42
- [16] H. G. Jeong, D. J. Yoon, E. Z. Kim, H. J. Park and K. H. Na, 2002, The influence by hydrostatic extrusion on the microstructure and extrudability of the IM processed hypereutectic Al-Si-X alloys, *J. Mater. Process. Technol.* Vol. 130~131, pp. 438~443
- [17] J. Sugishita and S. Fujiyoshi, 1981, The effect of cast iron graphites on friction and wear performance I: Graphite film formation on grey cast iron surfaces, *Wear* Vol. 66, No. 2, pp. 209~221
- [18] S. I. Wright and M. M. Nowell, 2006, EBSD Image Quality Mapping, *Microsc. Microanal.* Vol. 12, No. 1, pp. 72~84
- [19] R. Ipek, 2005, Adhesive wear behaviour of B4C and SiC reinforced 4147 Al matrix composites (Al/B4C-Al/SiC), *J. Mater. Process. Tech.* Vol. 162~163, pp. 71~75
- [20] H. C. Park, S. C. Kang, H. Kwon, and Y. S. Kim, 2002, Effect of counterpart materials on dry sliding wear characteristics of carbide-particle-reinforced 6061 Al alloy matrix composites fabricated by a pressureless infiltration technique, *J. Kor. Inst. Met. & Mater.* Vol. 40, No. 11, pp. 1127~1134