

논문

구상흑연주철의 고압하 마멸특성에 미치는 합금원소의 영향 II - Si, Mo

방응호 · 강춘식 · 박재현* · 권영각*

Effects of Alloying Elements on the High Pressure Wear Characteristics of Ductile Cast Iron II - Silicon and Molybdenum

Woong-Ho Bang, Choon-Sik Kang, Jae-Hyun Park and Young-Gak Kweon

Abstract

Surface layer properties such as composition, phase, hardness, and oxide layer condition are very important if the main failure mechanism of metals is wear. Generally, stable and dense oxide layers are known to decrease the wear rate of metals by prohibition of metallic junction occurred between bare metals. Addition of Si above 4 wt% to DCI(Ductile Cast Iron) is reported to enhance the significant oxidation resistance by forming the silicon-rich surface layer which inhibits further oxidation. And addition of up to 2 wt% Mo to high Si ductile iron produces significant increases in high temperature tensile strength, creep strength, thermal fatigue resistance and oxidation resistance. High pressure wear characteristics of unalloyed DCI(Ductile cast Iron), 4.46 wt% Si ductile iron, 4.3 wt% Si-0.52 wt% Mo ductile iron were investigated through unlubricated pin-on-disc wear test. Wear test was carried out at speed of 23m/min, under pressure of 3 MPa and 3.3 MPa. Wear surfaces of each specimen were observed by SEM to determine the wear mechanism under high pressure wear condition. Addition of Si 4.46 wt% severely deteriorated wear property of ductile iron compared to unalloyed DCI. But combined addition of Si 4.3 wt% and Mo 0.52 wt% decreased the friction coefficient(μ) of ductile irons and remarkably delayed the mild-severe wear transition. (Received February 28, 2000)

1. 서론

구상흑연주철은 주조성, 기계적 특성, 경제성이 뛰어나 현재 구조용 재료로 널리 사용되고 있으며, 이러한 구상흑연주철의 실제 응용을 위한 물리적, 화학적 특성의 조절은 주로 합금원소의 첨가를 통해 이루어진다 [1,2].

Si은 구상흑연주철내 탄소원자의 흑연화를 촉진하고 조직내 페라이트상의 분율을 증가시키는 원소로 보고되고 있으며[4], Si이 4wt% 이상 첨가된 경우의 구상흑연주철은 고 Si 구상흑연주철로 정의된다. 고 Si 구상흑연주철은 주방상태 하에서도 기지조직이 완전한 페라이트화가 되고, 치밀하고 안정한 산화막을 형성하는 것으로 보고되고 있다[3,5]. 고 Si 구상흑연주철의 제조에 있어 첨가량은 재료의 인성을 고려하여 4~6wt%로 제한하는 것이 일반적이다[3]. Si이 4wt% 이상 첨

가된 고 Si 구상흑연주철은 페라이트상의 안정 온도영역이 넓어, 반복적인 열주기 환경에서도 페라이트-오스테나이트의 반복적인 상변태를 억제한다[3].

고 Si 구상흑연주철에 있어 Mo의 혼합첨가는 내산화성의 증가와 함께 고온 강도, creep 특성, 열피로 특성을 개선하는 것으로 보고되고 있으며, 이는 Mo에 의한 탄화물의 형성과 Mo에 의한 Fe 원자간의 결합력 증가에 기인한 것으로 해석되고 있다[3,5-7]. D. H. Yang 등은 Mo을 이온 주입한 순철의 마멸특성을 고찰하였으며, Mo의 첨가에 의해 철의 마찰계수가 감소하고 내마멸성이 2배 이상 증가한 것으로 보고하였다[8]. Mo 첨가에 의한 철계 재료의 마멸특성 개선은 Mo이 표면에 존재할 경우 표면 Fe 원자간의 결합력을 증가시키고 표면에너지를 감소시키기 때문으로 해석되고 있다[7]. 고 Si-Mo 구상흑연주철은 고온 내산화성, 가공성, 치수 정밀성 등을 요구하는 hot-air housing, 자동

서울대학교 재료공학부(Division of Materials Science and Engineering, Seoul National University) *포항산업과학연구원(Research Institute of Industrial Science & Engineering)

차 배기 manifold 등의 분야에 널리 사용되고 있으며, 특히 고온 산화 및 열피로에 의한 재료의 열화가 예상되는 복잡한 형상의 구조물 등으로 적용 범위가 넓어지고 있다[9].

마멸(Wear)이란 서로 접촉해 있는 두 재료의 표면이 어떤 하중 하에서 상대적인 운동을 할 때 생기는 재료의 손상으로 정의된다[10]. 마멸은 주로 재료의 표면에서 진행되므로 표면의 기계적, 화학적 특성이 재료의 마멸특성을 결정하며, 그 중 경도와 내산화성이 마멸율을 결정하는 주요 인자로 보고되고 있다[4,11,12]. 竹內榮一은 마멸 하중과 마멸 속도의 변화에 따른 구상흑연주철의 마멸율의 변화는 마멸면에 존재하는 산화막의 종류 및 안정성과 깊은 연관이 있는 것으로 보고하였다[12]. 산화막이 안정할수록 마멸율이 감소하는 것은 산화막이 마찰면에서 bare metal surface의 metallic junction을 방지하여 adhesive wear에 의한 severe wear를 방지하기 때문으로 해석되고 있다 [10,11].

본 연구에서는 고온 내산화 재료로 널리 사용되고 있는 고 Si-Mo 구상흑연주철의 고압하 마멸시험을 통해 구상흑연주철의 기계적 특성, 미세조직, 표면특성과 마멸특성의 상관관계에 관하여 고찰하고자 하였다.

2. 실험방법

2.1 시편의 제조

합금원소가 첨가되지 않은 구상흑연주철 및 고 Si 구상흑연주철, 고 Si-Mo 구상흑연주철의 제조를 위해 고주파 유도로서 장입재를 용해하였다. 모합금 및 합금재의 장입은 Sorel Metal, Ferro Silicon, 전해철, 합금원소(Mo)의 순으로 하였다[13]. 이때 Si의 과량첨가에 의한 부유흑연의 형성을 억제하기 위하여 탄소의 무게분율은 3.0~3.1wt%가 되도록 조절하였다. 흑연의 정출 및 구상화를 위해 TDCR5를 플러저 법으로 1450°C에서 용탕에 첨가하여 집종 및 구상화 처리를

동시에 행하였으며[1,2], 집종 시 첨가된 Si의 양은 일정하게 하였다. 주형은 KSD 4302 Y형 B호 셀몰드(두께 25 mm)를 사용하였으며, 용탕의 주입온도는 1450°C로 일정하게 하였다. 주물의 shake out은 용탕의 주입 후 24시간 후에 행하여 냉각속도의 차이에 의한 주물의 물성 변화를 억제하였다.

성분분석은 Y 블록의 유효 부분을 채취하여 시편 당 5회씩 EPMA(WDS)로 기지조직의 성분을 분석한 후 2회씩 C/S분석(0.3-0.4g)을 하여 전체 성분을 산출하였다. 시편의 성분분석 결과를 Table 1에 나타내었다. 제조된 구상흑연주철 시편의 흑연 분포 및 기지조직의 양상을 정량적으로 관찰하기 위해 Image Analyzer (BMI-Plus)로 미세조직의 분석을 하였다. 각 시편의 미세조직 관찰결과를 Table. 2에 나타내었다.

2.2 기계적 특성의 고찰

Si과 Mo에 의한 기계적 특성의 변화가 구상흑연주철의 고압하 마멸특성에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 경도 및 충격특성을 관찰하였다. 경도 측정은 ASTM E 10의 규격에 따른 Brinell hardness 측정법 중 3000 Kg 하중, 10mm indenter diameter, 30 sec load time(3000/10/30)의 방식으로 행하였다. 시편의 두께는 규격에 따라 8mm로 가공하였으며, 각 시편 당 4회씩 경도값을 측정하였다. 샤피 충격시험은 ASTM E23-66에서 규정한 V형의 노치를 가진 10×10×55(mm)로 가공하여 각 시편 당 4회씩 충격값을 측정하였다.

Table 1. Chemical Composition of DCI specimens. (wt%)

specimen status	Elements				
	C	Si	Mn	Mo	Mg
unalloyed	3.59	2.62	0.01	-	0.03
Si 4.46wt%	3.05	4.46	0.002	-	0.03
Si 4.30wt% Mo 0.52wt%	3.13	4.30	0.01	0.52	0.03

Table 2. Effect of alloying elements on the microstructure of DCI.

specimen status	area fraction of Graphite (%)	nodule Count of Graphite (#/mm ²)	mean diameter of Graphite (μm)	area fraction of pearlite (%)
unalloyed	9.1	277	20.4	41.4
Si 4.46wt%	11.8	402	19.4	-
Si 4.30wt% Mo 0.52wt%	12.5	412	19.7	15.5

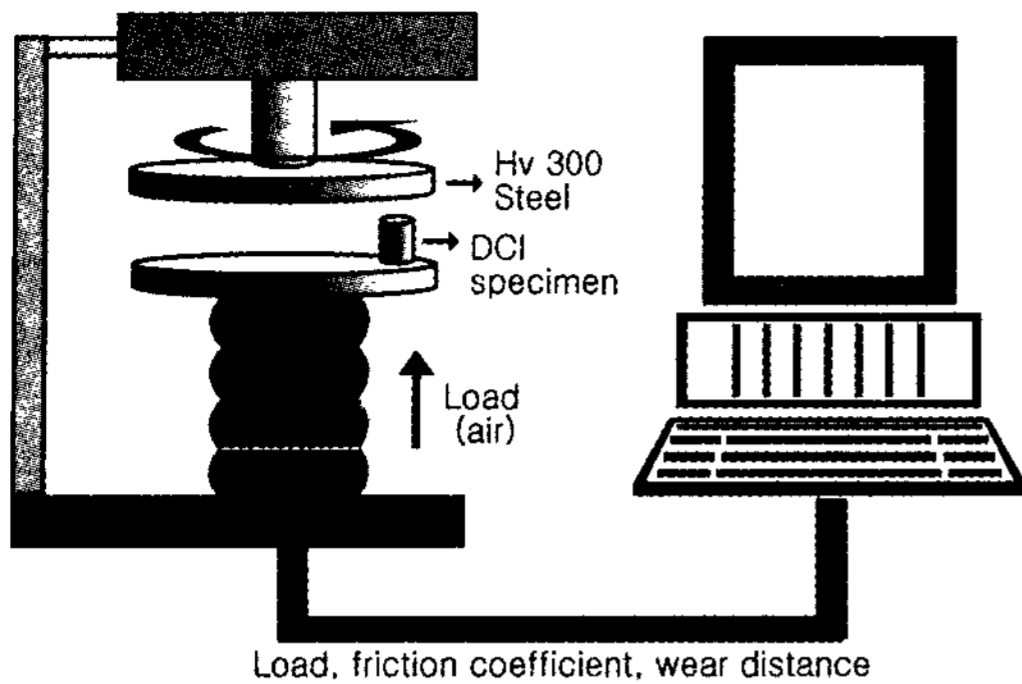


Fig. 1. Schematic diagram of wear test machine.

2.3 마멸시험

구상흑연주철의 고압하 마멸특성에 미치는 Si과 Mo의 영향을 고찰하기 위해 압하 3 MPa, 3.3 MPa과 마멸속도 23 m/min의 마멸조건 하에서 Pin-on-Disc 건식 마멸시험을 행하였다. 마멸재는 구상흑연주철을 직경 8 mm의 핀으로 가공한 후 표면을 깨끗이 연마하여 고정자로 하였고, 비커스 경도 300(HB 285)의 열처리강을 디스크로 가공한 후 표면을 깨끗이 연마하여 회전자 상대 마멸재로 사용하였다. 마멸특성중 주요 data인 토크, 마찰계수 등은 data acquisition system으로 10 초당 하나씩 저장하였다. 마멸시험 후 마멸량은 1mg까지 측정이 가능한 저울을 사용하여 측정하였다. 압하 3 MPa 조건하에서는 마찰계수가 0.2이하인 영역까지 마멸시험을 한 후 SEM으로 마멸면을 관찰하여 mild wear 영역의 마멸기구를 고찰하였으며, 3.3 MPa의 조건하에서는 mild-severe wear transition 후까지 마멸시험을 행한 후 마멸면을 SEM으로 관찰하여 severe wear 마멸기구를 고찰하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 합금원소에 따른 미세조직의 변화

Si 4.46 wt% 첨가에 의한 기지조직의 변화를 Fig. 2b에 나타내었다. Si 4.46 wt%의 첨가로 구상흑연주철의 기지조직은 주방상태에서도 완전히 페라이트화가 되며, 흑연상의 면분율이 증가하고 단위 면적당 흑연입수가 증가하는 것으로 관찰되었다. 이는 용탕내 Si의 함유량이 증가함에 따라 용탕에 고용된 탄소의 chemical potential이 증가하여[1,4], 집중량을 일정하게 행하여도 흑연의 정출 구동력이 커져 용탕의 냉각 중

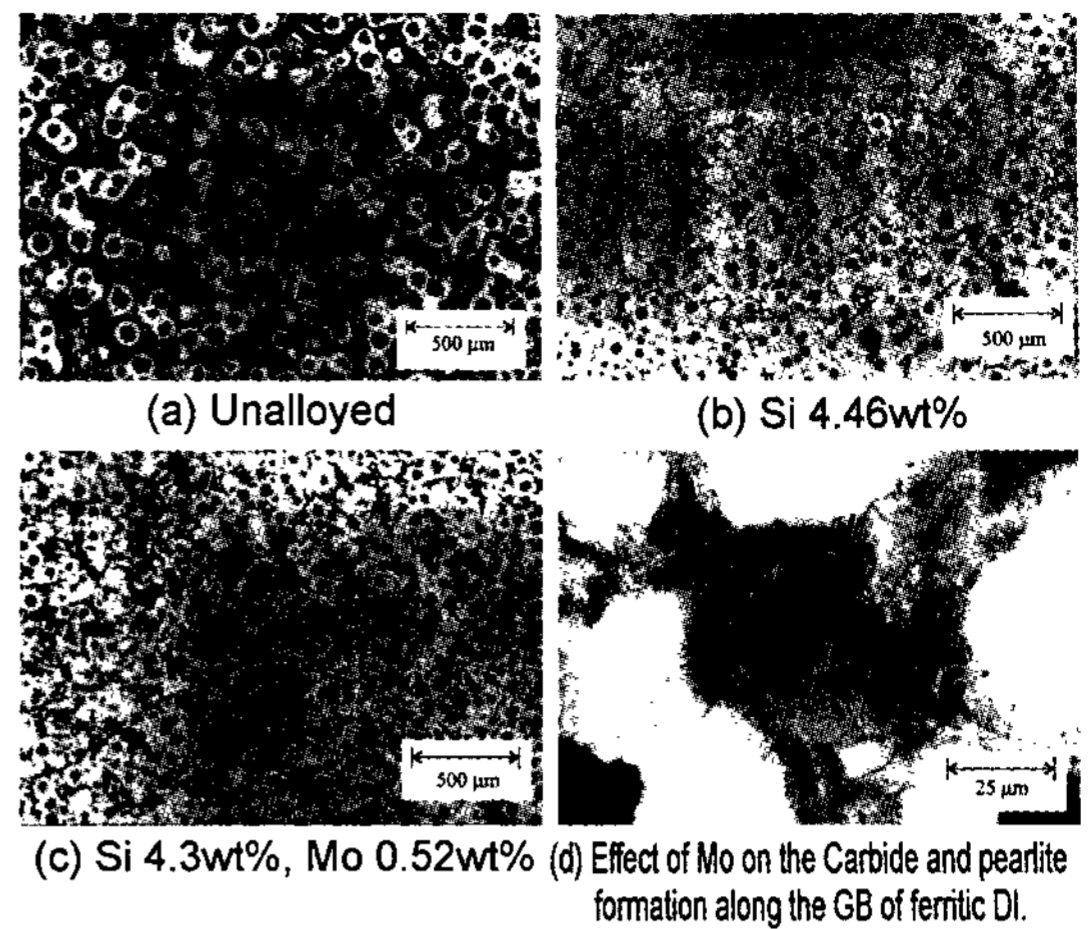


Fig. 2. Microstructure of unalloyed DCI and high Si-Mo ductile iron.

흑연의 핵생성이 많아졌기 때문으로 판단되었다.

고 Si 구상흑연주철내 Mo 0.52 wt%의 첨가는 기지조직내 페라이트의 입계를 따라 조대한 탄화물의 형성을 유도하였으며[5], 탄화물의 주변을 따라 펄라이트가 형성되는 것이 관찰되었다. Fig. 2c에 Mo이 첨가된 고 Si-Mo 구상흑연주철의 미세조직을 나타내었고, Fig. 2d에 입계를 따른 탄화물 및 주변 펄라이트의 미세조직을 나타내었다. 기지조직과 탄화물을 따른 Mo의 상대적 분포를 SEM line scanning 성분분석 방법으로 행하였으며, 그 결과를 Fig. 3에 나타내었다. SEM line scanning 분석 결과 Mo이 펄라이트에 국부 편석한 것을 관찰할 수가 있었다. 이러한 결과를 통해 Mo은 페라이트의 입계를 따라 편석하여 탄화물 및 펄라이트의 석출을 유도하는 것으로 판단되었다.

3.2 합금원소에 따른 일반적 기계적 특성의 변화

금속의 경도, 인성 등은 마멸율을 결정하는 중요한 요소이다[15,16]. 합금원소 및 기지조직의 종류에 따른 브리넬 경도와 충격치의 변화를 Table 3에 나타내었다. Si이 과량 첨가된 경우 기지조직이 페라이트화 되어도 경도치는 증가하는 경향을 보였으며, 이는 Si에 의한 페라이트 기지조직의 고용경화에 기인한 것으로 보고되고 있다[14]. Mo이 혼합 첨가된 경우에는 Si이 단독으로 다량 첨가된 경우보다 경도가 증가하였으며, 이는 Mo 탄화물과 펄라이트의 형성에 기인한 것으로 판단되었다. 충격치는 Si과 Mo의 첨가에 의해 감소하는 것으로 관찰되었다.

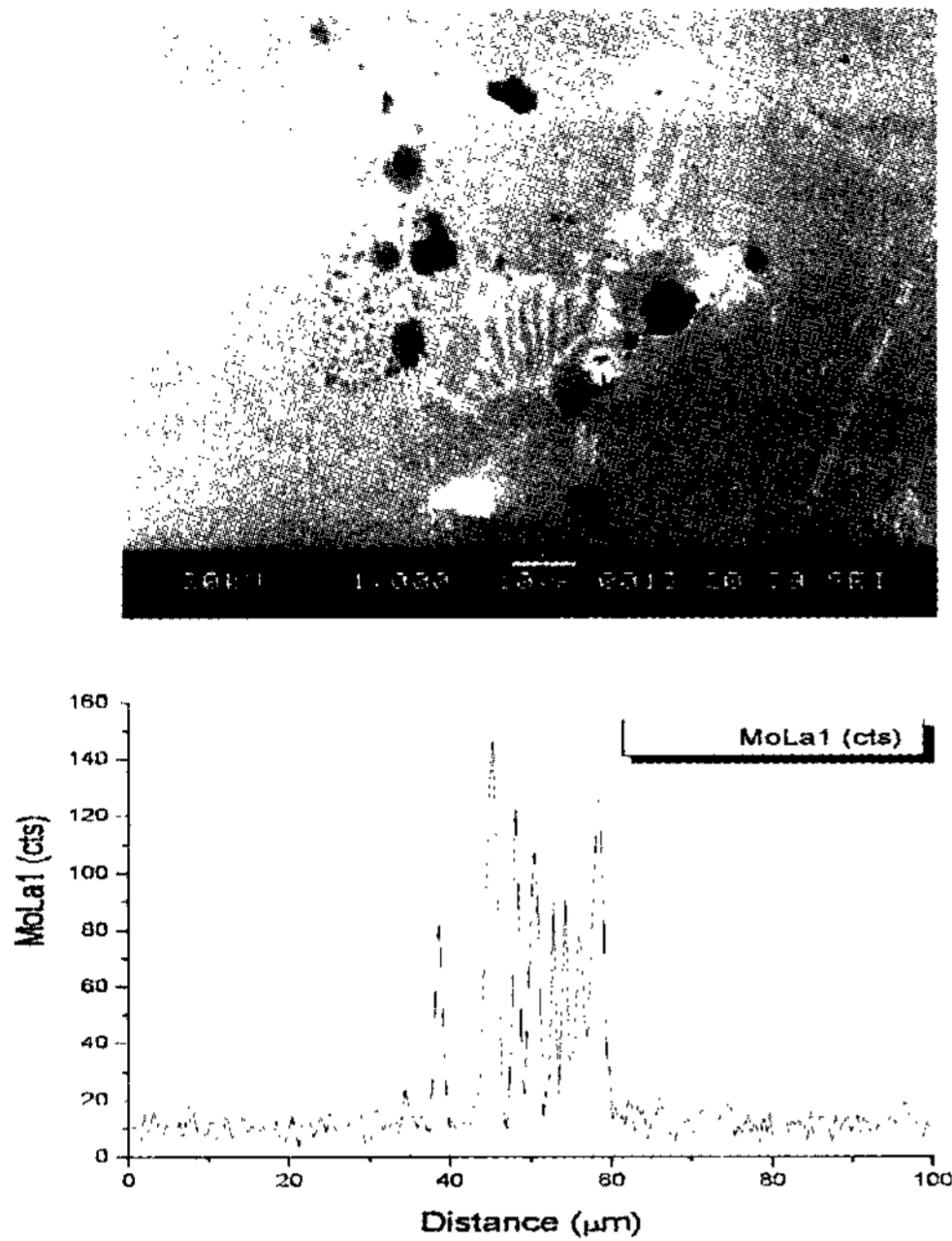


Fig. 3. Segregation of Mo in the carbide and pearlite of high Si-Mo ductile iron. of Mo in the carbide and pearlite of high Si-Mo ductile iron.

3.3 합금원소에 따른 마멸특성의 변화

mild wear 영역에서의 마멸량은 각 시편에 대하여 마찰계수가 0.2이하인 영역에서 일정마멸거리까지 마멸 시험을 행한 후 시편의 무게차를 측정하여 구하였다. severe wear 영역에서의 마멸량은 마찰계수 및 마멸율이 급격히 증가하는 severe wear 영역까지 마멸시험을

행한 후 시편의 무게차를 측정하여 산출하였다. 일반적으로 금속재료의 마멸율과 마찰계수는 비례하는 경향을 보이므로[10], 본 실험에서는 시간에 따른 마멸율의 변화를 마찰계수의 변화로 보정하여 산출하였다. 각 조건에 따른 마멸 data를 Table 4 및 Table 5에 나타냈다. 또한 각 조건에서 마멸의 진행에 따른 마찰계수와 마멸율의 변화를 Fig. 4~Fig. 7에 나타냈다.

3.3.1 unalloyed 구상흑연주철

Fig. 4~Fig. 7로부터 합금원소가 첨가되지 않은 구상흑연주철의 고압하 마멸의 진행은 마찰계수와 마멸율이 작은 mild wear 영역으로부터 마찰계수와 마멸율이 매우 높은 severe wear의 영역으로 천이하는 것을 관찰할 수가 있었다. mild wear 영역 및 severe wear 영역에서의 마멸기구를 고찰하기 위해 마찰계수의 천이 전과 천이 후의 마멸면을 SEM으로 관찰하였으며, 이를 Fig. 8a, 8b에 나타내었다. 마멸면의 SEM 관찰로부터 구상흑연주철의 고압하 마멸에 있어 mild wear의 진행은 흑연상의 탈락에 의한 것으로 판단되었다. 그러나 임계 마멸거리에서의 mild-severe wear의 천이

Table 4. Effect of alloying elements on the mild wear characteristics of DCI. (3 MPa)

specimen status	mean friction coefficient(μ)	mean wear rate (mg/Km)
unalloyed	0.128	6.24
Si 4.46wt%	0.134	59.29
Si 4.30wt%	0.133	7.65
Mo 0.52wt%		

Table 3. Effect of alloying elements on the microstructure and mechanical property of DCI.

specimen status	area fraction of pearlite (%)	BrinellHardness (3000/10/30)	V-notched charpy impact energy (joule)
unalloyed	41.4	180	2.99
Si 4.46wt%	-	199	1.42
Si 4.30wt%	15.5	214	1.35
Mo 0.52wt%			

Table 5. Effect of alloying elements on the severe wear characteristics of DCI. (3.3 MPa)

specimen status	mean frictioncoefficient (μ)	μ transition distance (meter)	mean wear rate (mg/Km)
unalloyed	0.20	620	128
Si 4.46wt%	0.32	no transition	1639
Si 4.30wt%	0.17(distance: 620m)	1,180	229(distance: 620m)
Mo 0.52wt%	0.21(distance: 1,180m)		291(distance: 1,180m)

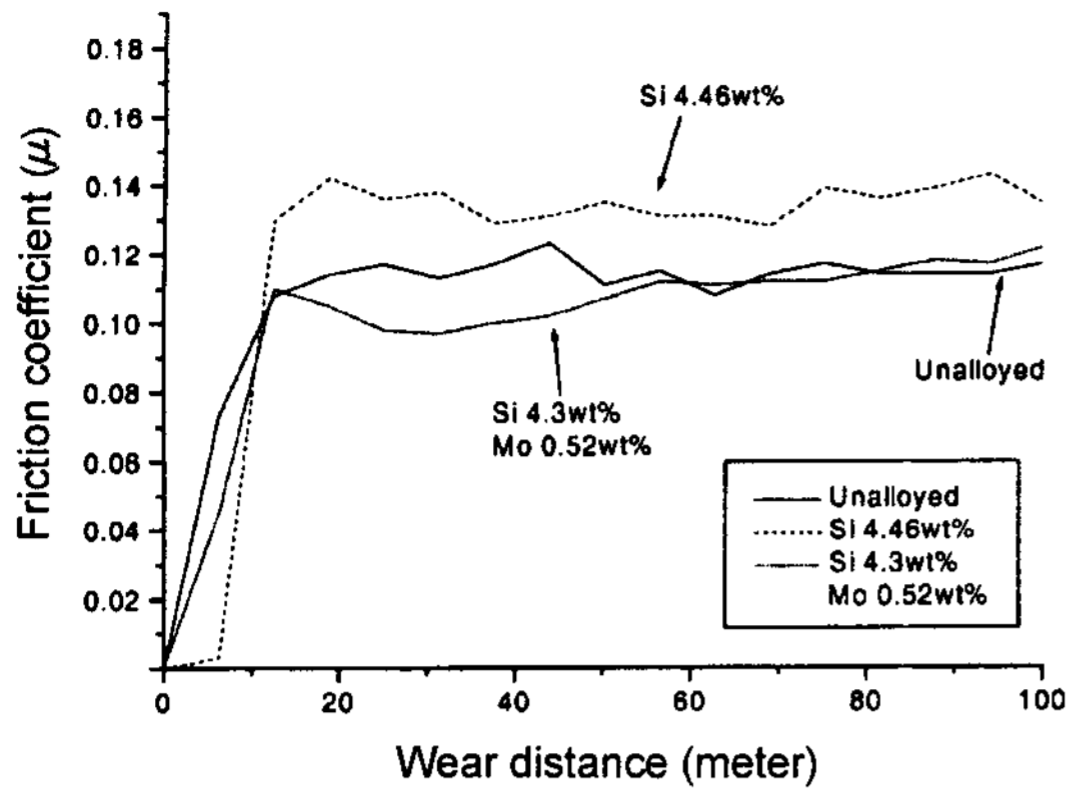


Fig. 4. Relationship between wear distance and friction coefficient(μ) in the condition of mild wear. (3MPa).

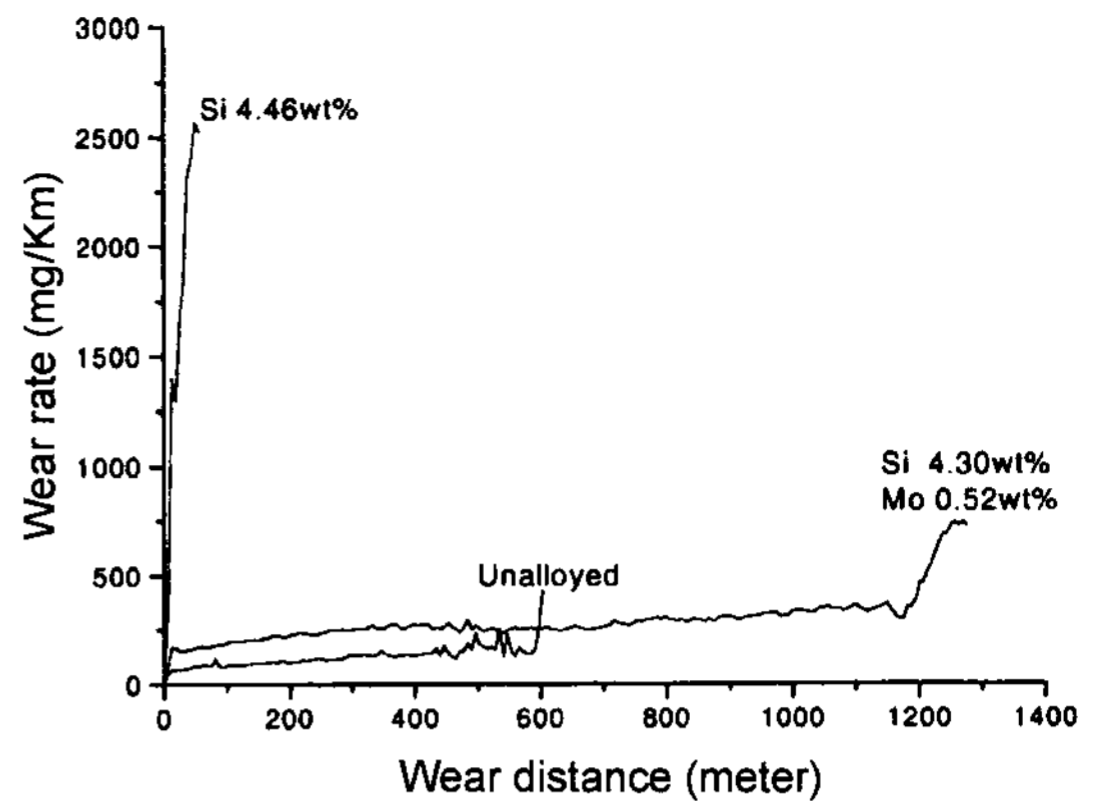


Fig. 7. Relationship between wear distance and wear rate (mg/Km) of in the condition of severe wear. (3.3 MPa)

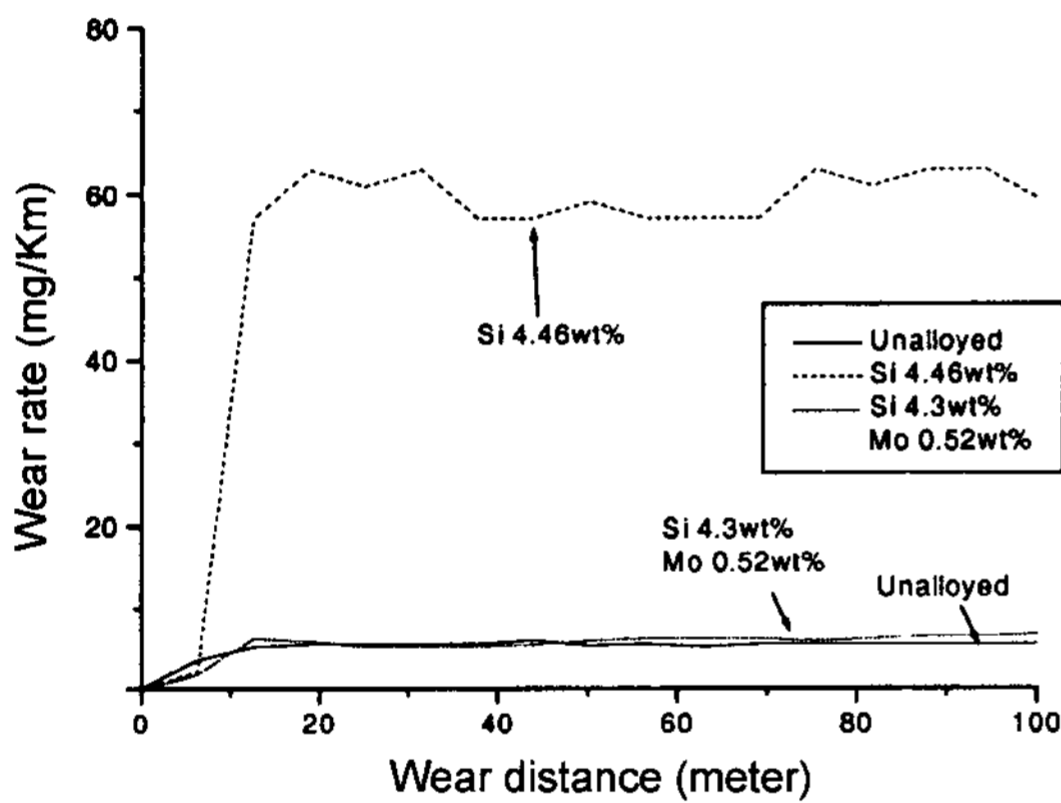


Fig. 5. Relationship between wear distance and wear rate (mg/Km) in the condition of mild wear. (3MPa)

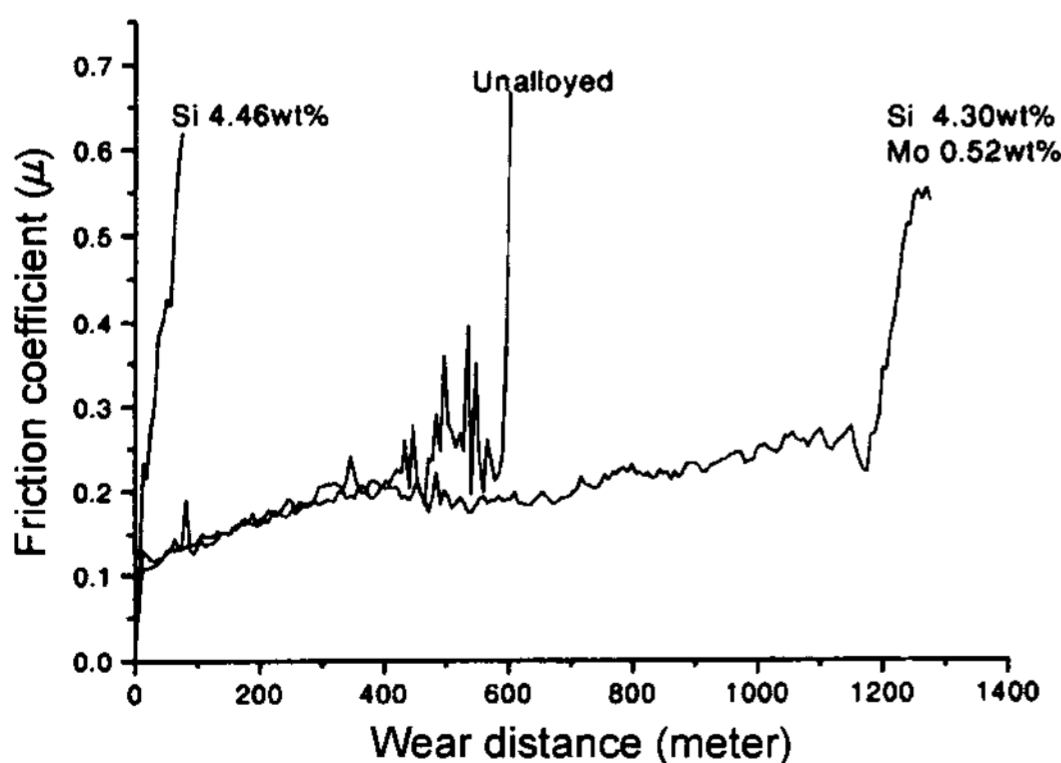


Fig. 6. Relationship between wear distance and friction coefficient(μ) of in the condition of severe wear. (3.3MPa)

후, 마멸의 진행은 흑연의 윤활 효과가 사라지며 기지조직의 심한 손상을 동반한 adhesive wear 및 표면과

피 기구인 것으로 판단되었으며, 이러한 마멸기구는 흑연상의 윤활 효과를 줄이며 마찰계수 및 마멸율을 급격히 증가시키는 것으로 판단되었다.

3.3.2 고 Si 구상흑연주철 (Si 4.46 wt%)

Table 4, Table 5 및 Fig. 4~Fig. 7로부터 Si 4.46 wt% 첨가에 의해 마찰계수 및 마멸율이 매우 높아지는 것을 관찰할 수가 있으며, 마멸은 mild-severe wear의 천이 없이 마멸의 진행에 따라 마찰계수 및 마멸율이 계속 증가하는 것으로 관찰되었다.

Si이 단독으로 다량 첨가된 경우의 마멸기구를 고찰하기 위해 마찰계수가 0.2 이하인 영역과 마찰계수가 매우 높아지는 영역에서의 마멸면을 SEM으로 관찰하였다. 각 경우에 대한 SEM 관찰결과를 Fig. 8c와 8d에 나타냈다. SEM 관찰로부터 Si 4.46 wt%가 첨가된 경우 마찰계수가 작은 영역과(μ : 0.2 이하) 마찰계수가 높아지는 영역에서의 마멸면은 모두 거친 adhesive wear의 형상을 갖는 것으로 관찰되었다. 이는 Si의 다량첨가에 의한 기지조직의 페라이트화가 페라이트상인 상대 마멸재 steel과의 압접에 대한 구동력을 크게 하여 압접을 및 압접강도의 증가를 유발하였기 때문으로 판단되었다. 이로부터 Si 4.46 wt% 첨가에 의한 마찰계수 및 마멸율의 증가는 Si에 의한 adhesive wear의 활성화로 해석되었다.

S. C. Lim 등은 산화막이 안정한 경우 마찰운동 하에서 bare metal surface의 형성을 감소시켜 metallic junction에 의한 adhesive wear를 감소시키는 것으로 보고하였으나[11], 본 연구에서는 Si에 다량첨가에 의한 산화막의 안정성이 adhesive wear의 방지에 큰 영

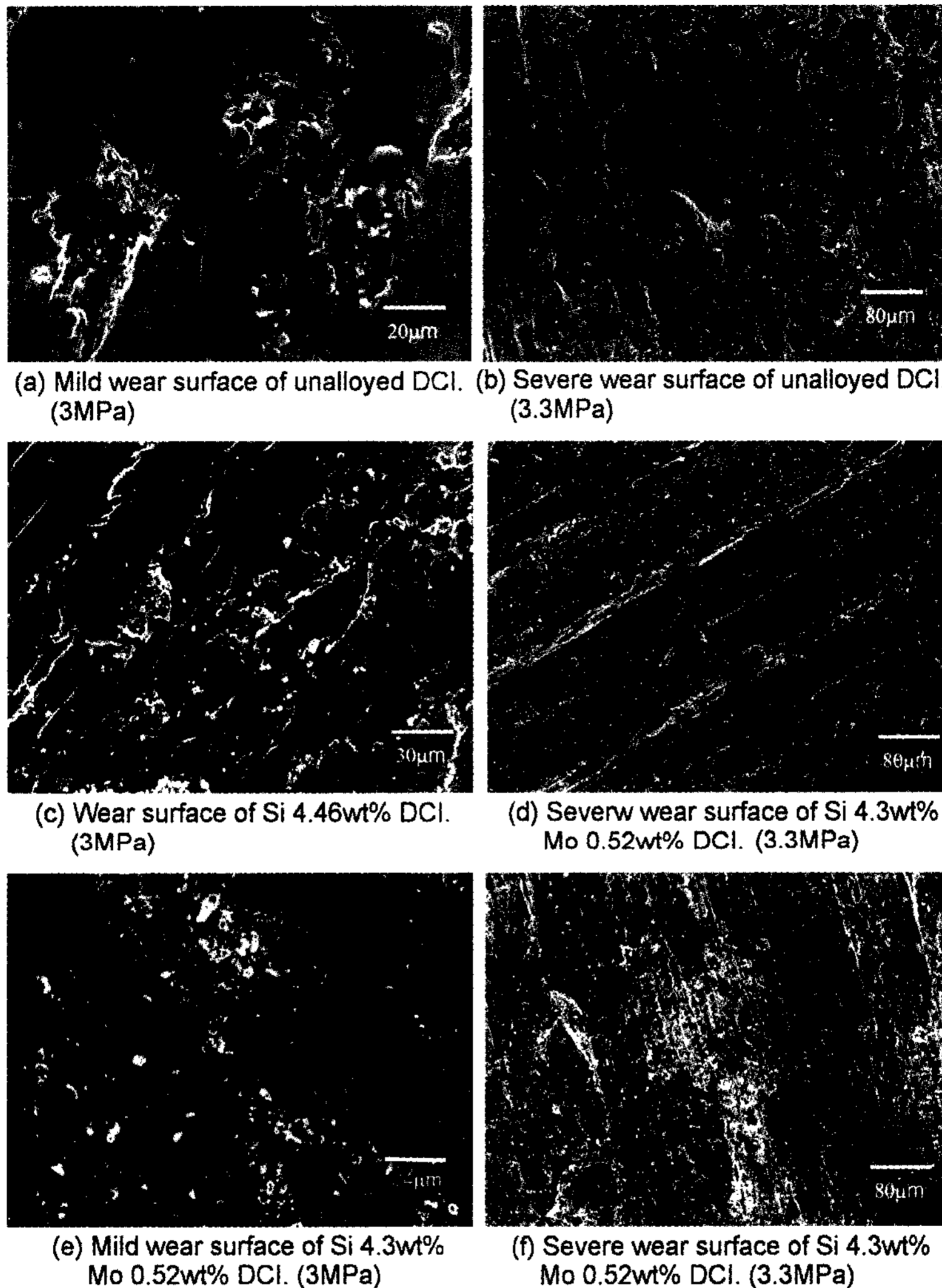


Fig. 8. SEM observation of wear surface of unalloyed and high Si-Mo ductile iron.

향을 주지 않은 것으로 관찰되었다. 이는 본 실험에서의 마멸 압하가 금속과 산화막의 cohesion force 이상으로 되어, 산화막의 탈락이 Si이 다량 첨가된 경우에도 매우 용이하였기 때문으로 판단되었다.

3.3.3 고 Si-Mo 구상흑연주철 (Si 4.3 wt%, Mo 0.52 wt%)

Table 5 및 Fig. 4, Fig. 6으로부터 Mo의 첨가에 의해 일정 마멸거리에서의 마찰계수가 가장 낮아지는 것을 알 수가 있으며, mild-severe wear의 천이가 지연되는 것을 관찰할 수가 있다. 이는 Mo 첨가에 의한 표면에너지의 감소로[8] 상대 마멸재와의 adhesion energy를 감소시켜 마찰시 adhesion 영역이 다시 분리

되는 전단강도가 낮아져 마찰계수가 감소되기 때문으로 해석되었다. 또한 Mo 첨가에 의한 mild-severe wear transition의 지연 역시 표면에너지의 감소가 상대 마멸재와의 압접을 유도하는 ‘표면에너지 최소화’의 구동력을 줄임으로써 severe wear의 주요 마멸기구인 adhesive wear를 지연하였기 때문으로 해석되었다. Table 4, Table 5 및 Fig. 5, Fig. 7로부터 Si 4.3 wt% Mo 0.52 wt%의 혼합첨가는 Si이 단독으로 다량 첨가된 경우에 비하여 마멸율을 감소시키나 합금원소가 첨가되지 않은 경우보다 mild wear 영역에서의 마멸율을 약간 증가시키는 것을 관찰할 수가 있다. 이는 기지조직의 페라이트화에 따른 흑연상의 분율 증가로 인해

mild wear 영역에서의 마멸기구인 흑연상의 탈락량이 많아졌기 때문으로 판단되었다.

Si 4.3 wt%, Mo 0.52 wt%가 혼합 첨가된 경우 마찰계수의 천이 전과 천이 후의 마멸면의 SEM 관찰결과를 Fig. 8에 나타내었다. Si 4.46 wt%가 단독으로 첨가된 경우 마찰계수가 작은 영역에서도 마멸면은 adhesive wear의 거친 형상을 갖는 것으로 관찰되었으나, Mo이 혼합 첨가된 경우 mild wear 영역에서의 마멸면은 마멸의 진행이 흑연상의 탈락이 주된 기구로 작용하는 abrasive wear의 형상을 갖는 것으로 관찰되었다. 그러나 마찰계수의 천이 후 마멸면은 마멸의 진행이 기지조직의 심한 손상을 동반하는 adhesive wear의 형상을 갖는 것으로 관찰되었다.

4. 결 론

고 Si-Mo 구상흑연주철의 기계적 특성 관찰 및 고압하 마멸시험을 행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. Si 4.46 wt%의 첨가로 구상흑연주철의 기지조직은 주방상태에서도 페라이트화가 되었으나 Si에 의한 고용경화로 경도가 증가하고 충격치가 감소하였다.
2. Si 4.3 wt%, Mo 0.52 wt%의 혼합첨가는 페라이트의 입계를 따라 조대한 탄화물 및 펄라이트의 형성을 유도하였으며, 경도가 증가하고 충격치가 감소하였다.
3. 마멸하중이 높은 마멸면에서의 산화막의 안정성은 마멸의 감소에 크게 영향을 주지 않는 것으로 판단되었다. 이는 마멸하중이 높아지는 경우 산화막의 기계적인 파손이 많아지기 때문으로 판단되었다.
4. Si 4.46 wt%가 단독으로 첨가된 경우 mild wear의 영역이 없이 마멸율이 매우 높아지는 것을 관찰할 수가 있었다. 이는 기지조직의 페라이트화가 상대 마멸재인 steel과의 압접에 대한 구동력을 크게 하고 압접강도를 증가시켜 adhesive wear가 활성화 되었기 때문으로 판단되었다.
5. 고 Si 구상흑연주철에 있어 Mo의 혼합첨가는 마찰계수를 감소시키며 mild-severe wear의 천이를 유도하는 것으로 판단되었다. 이는 Mo에 의한 표면에너지

의 감소가 압접면의 분리강도를 감소시킴으로써 마찰면의 adhesive wear를 어렵게 하였기 때문으로 판단되었다.

6. Table 3~Table 5로부터 Si의 다량 첨가 및 Mo의 첨가에 의한 경도와 충격치의 변화는 구상흑연주철의 마멸율과 마찰계수의 변화에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 고찰되었다. 이는 고 Si-Mo의 고압하 마멸에 있어 마멸율은 기계적 특성에 의해 결정되지 않고 마멸면의 상분포, 표면의 화학적 특성 등에 의해 결정되기 때문으로 해석되었다.

후 기

본 연구는 1999년도 포항산업과학연구원의 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다. 또 본 연구의 수행에 많은 도움을 주신 생산기술연구원의 주조공정개발팀에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

- [1] A. F. Spengler : The Ductile Iron Process, Miller and company (1982), 1-30 299-314
- [2] C. S. Kang : Foundry Engineering, Gaemoonsa, Seoul (1985) 353
- [3] Keith D. Millis : Ductile Iron Data for Design Engineers, QIT-Fer et Titane Inc (1990), III
- [4] Charls F. Walton : Iron Castings Handbook, Iron Castings Society, Inc. (1981) 141, 325, 491-528
- [5] S. W. Kim : Journal of the KFS, 18 (1998) 167
- [6] M. G. Fontana : Corrosion Engineering, McGraw-hill, 1986, pp73
- [7] C. D. Warren : Wear, 134 (1989) 149
- [8] D. H. Yang : Wear, 173 (1994) 129
- [9] W. Fairhurst : Foundry Trade J., 29 (1979) 659
- [10] A. D. Sarka : Friction and Wear, Academic Press (1980), 5-28, 33-61, 64-92
- [11] S. C. Lim : Acta metall, 35 (1987) 1343
- [12] GedaGuchi : Iron making and Steel making, 6 (1974) 1396
- [13] J. N. Lee : Foundry Engineering, Bosung Inc, Seoul (1980) 293-297, 382-329
- [14] Erich Nechtelberger : Gußeisenwerkstoff, Fachverlag Schiele & schün GmbH (1977) 29-32
- [15] C. A. Queener : Wear, 8 (1965) 391
- [16] J. F. Archard : J. Appl. Phys. 24 (1953) 981