

|||||||
論 文
 |||||

주철의 마모특성에 미치는 미세조직의 영향

김석원[†] · 박진성 · 이형철 · 김기곤

Effects of the Microstructures on the Wear Characteristics of Cast irons

Sug-Won Kim[†], Jin-Sung Park, Ki-Kon Kim, Hyung-Chul Lee

Abstract

This study aims to investigate on the effects of the microstructures on the wear characteristics of the different grey cast iron(GC) and spheroidal ductile cast iron(DCI). Wear test using wear tester of pin-on-disc type was carried out under the conditions of load 47.2N, velocity 0.2m/s, distance 4000m. At the GC, Wear rates depend on graphite type and oxide layer formed at wear surface. Weak rosette graphites are easily broken and formed wear debris over 30 μm . This wear debris occurs scuffing at wear surface. As a result of surface deformation, Narrow regions of the matrix between the graphite flakes and the contact surface lead to the failure of the necks. Wear rate for the DCI depended on hardness of matrix more than size of graphite.

Keywords: Wear, GC, DCI, Graphite type, Oxide layer, Failed neck.

(Received October 8, 2004; Accepted December 15, 2004)

1. 서 론

회주철은 흑연 형상 때문에 좋은 열 전도성을 지니는 훌륭한 열적 전도체이다. 흑연립들은 연결되어있어 빠른 열손실에 대한 쉬운 경로를 제공한다. 구상흑연 주철에서 구상의 흑연 입자들은 다른 구상의 흑연립과 서로 고립되어 있어 열적 전도성에 대한 구상의 기여가 매우 작다[1]. 주철을 흑연형상으로 분류하면 편상흑연주철, CV 흑연주철, 구상흑연주철 등으로 분류되고 편상흑연의 경우는 인장강도, 경도가 각각 (10~20 kg/mm², 90~130HB)로 낮으나 연속적인 흑연상의 분포로 진동 흡수능이 탁월하여 강도를 크게 요구받지 않는 부품 및 방진재료로서 사용되고 공작기계 몸체, 자동차 부품으로서는 일정한 진동, 저하중을 받는 브레이크 패드 및 드럼, 트랜스 드럼, 휠등에 사용되고 있고[2,3], 구상흑연 주철은 Mg, Ce등을 첨가함으로써 편상의 흑연을 구상화하여 응력집중을 받는 부분을 줄임으로써 고강도(30~45 kg/mm², 130~160HB),

연신율(15%~25%), 고인성, 피로강도 및 마모특성이 우수하다. 이러한 특성으로 인하여 고온 및 고하중을 받는 자동차 부품중 엔진부위, 실린더 블록, 흡배기 다기관등에 이용되고 있는 실정이다[4]. 구상흑연 주철은 기지조직인 펄라이트와 페라이트 및 석출된 흑연입자로 구성된 조직으로 강재에 비해 경량성과 내마모성이 우수하여 사용범위가 증가하고 있는 실정이다. 구상흑연 주철의 기계적 특성에 영향을 주는 미세조직적 인자로는 구상화율, 흑연입수, 기지조직의 펄라이트/페라이트 비 및 탄화물의 존재 유무이다. 이들 중 구상화율은 구상흑연주철의 기계적 특성에 큰 영향을 주는 것으로 알려져 있다. 저하중에서 전식 마모 동안에 회주철의 훌륭한 마모 저항성은 접촉면에 산화막의 형성과 흑연립들에 의해 접촉면에 공급되기 때문이다. 회주철은 일반적으로 펄라이트 구조의 기지 구조이며 ASTM A형의 편상흑연은 아주 좋은 마모 저항성을 제공한다[5]. 따라서 본 실험에서는 시편의 두께에 따른 응고속도와 C와 Si의 변화에 따른 흑연립의 성장

전북대학교 신소재 공학부, 공학기술연구원, 공학연구원(Division of New Material Engineering, RCIT, Engineering Research Institute, Chonbuk, 561-756 Korea)

[†]E-mail : ksw@chonbuk.ac.kr

및 Cu, Mn, Cr의 펄라이트 안정화 원소 및 경화능 향상원소 첨가에 따른 흑연립과 기지 조직의 변화가 회주철 및 구상흑연 주철의 마모 특성에 어떠한 영향을 미치는지에 대해서 마모 실험을 통하여 규명하고자 한다.

2. 실험 방법

본 연구에서 사용한 주철은 알루미늄 도가니(5 kg)를 이용하여 고주파 유도로서 용해하였다. 시편은 선철, 고철, 가탄제(99%), Fe-Si(75%), Fe-Mn(60%)을 이용하여 C, Si, Mn, Cu, Cr의 화학 조성 목표량을 조절하였으며 목표 시편을 Table 1과 같이 제조하였다. 또한 구상흑연 주철은 레이들에서 샌드위치법으로 구상화 처리하였으며 1400°C 온도에서 사형 몰드에 주입하였으며 Fig. 1과 같이 시편의 두께 S:10 mm, M:30 mm, L:50 mm가 되도록 제조하였다. 마모 시험후 마모면은 SEM을 이용하여 관찰되었으며 경도는 HRB 스케일로 측정하였다.

마모시험은 다음과 같은 마모조건에서 (마모하중: 47.2N, 마모 거리: 4000 m, 마모 속도: 0.2 m/s) pin-on-disc 형태의 마모시험기를 이용하여 실시하였다. 상대 마모재는 HRC 19의 경도를 지니는 SKH51강을 사용하였으며, 원통의 마모 시험편은 직경 8.9 mm 높

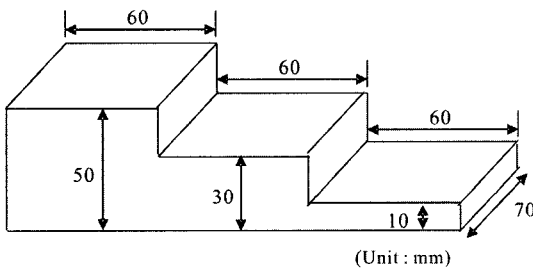


Fig. 1. The shape of the step specimens.

이 17 mm로 가공하였다. 상대 마모재와 마모시험편의 접촉면은 Ra=0.3 μm의 거칠기로 연마되고, 시험전에 아세톤으로 세척했다. 마모시험편의 무게손실은 시험 전, 후의 측정된 마모시험편의 무게에 의해 얻어지며 10⁻²g의 무게 scale이 이용된다. 마모시험을 통하여 경도 및 조직 특히 정출물의 형상과 크기가 마모량에 미치는 현상을 조사하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 미세조직

Fig. 2와 Fig. 3은 D1재(구상흑연주철)의 냉각속도 및 D1, D2, D3재의 화학적조성에 따른 미세조직의 변화를 보여준다. 냉각속도가 느린 두꺼운 부분에서 구상흑연이 주위 흑연들의 성장 및 확산에 의하여 얇은 부분에 비하여 크게 성장하는 것을 관찰할 수 있었고, Cu의 양이 0.002%일 경우 구상흑연주철의 기지가 전부 페라이트로 관찰되어 높은 연신율이 기대되었다. 그러나 Cu 함량이 증가하면서 세멘타이트 안정화 작용으로 인하여 볼스 아이형 구상흑연주철에 기지조직은 페라이트에서 펄라이트로 됨을 알 수 있었다. 볼스 아이 흑연주위에는 확산과정에서 탄소가 고갈된 페라이트가 원형으로 존재함을 알 수 있다.

Fig. 4는 화학적 조성에 의한 회주철의 미세조직 변화를 나타낸 사진이다. G1재와 G2재를 비교하였을 때 펄라이트 안정화 원소 Cu, Mn 및 경화능 향상 원소인 Cr의 첨가량이 증가함에 따라 펄라이트의 양이 증가하였고 흑연립 형태는 ASTM 규격중의 흑연립이 무질서한 방위로 균일하게 성장한 A형 흑연에서 무질서한 방위로 장미상으로 성장한 B 또는 무질서한 방위로 편상흑연이 중첩하는 C형흑연으로 바뀌었다. 또한 흑연립 주위에 탄소가 고갈된 페라이트 영역이 관찰되었다. G3재와 G4재는 C와 Si의 양의 감소에 따라

Table 1. Chemical compositions of the specimens.

Specimens	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mg	CE
G1	3.351	2.142	0.198	0.022	0.009	0.006	0.022	0.012	-	4.065
G2	3.335	2.143	0.471	0.037	0.070	0.083	0.033	0.053	-	4.049
G3	3.060	1.849	0.668	0.039	0.065	0.125	0.037	0.097	-	3.679
G4	2.912	1.686	0.767	0.041	0.073	0.146	0.039	0.109	-	3.474
D1	3.582	2.534	0.196	0.025	0.009	0.002	0.015	0.009	0.053	4.427
D2	3.483	2.564	0.208	0.026	0.007	0.028	0.018	0.019	0.047	4.337
D3	3.352	2.562	0.200	0.026	0.008	0.556	0.016	0.010	0.049	4.206

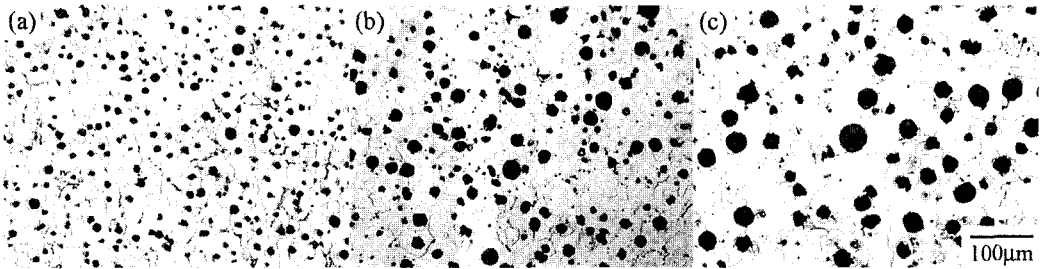


Fig. 2. Optical micrographs of D1 with various cooling rates. (a) D1(10 mm) (b) D1(30 mm) (c) D1(50 mm)



Fig. 3. Optical micrographs of DCI with different chemical compositions. (a) D1M (b) D2M (c) D3M

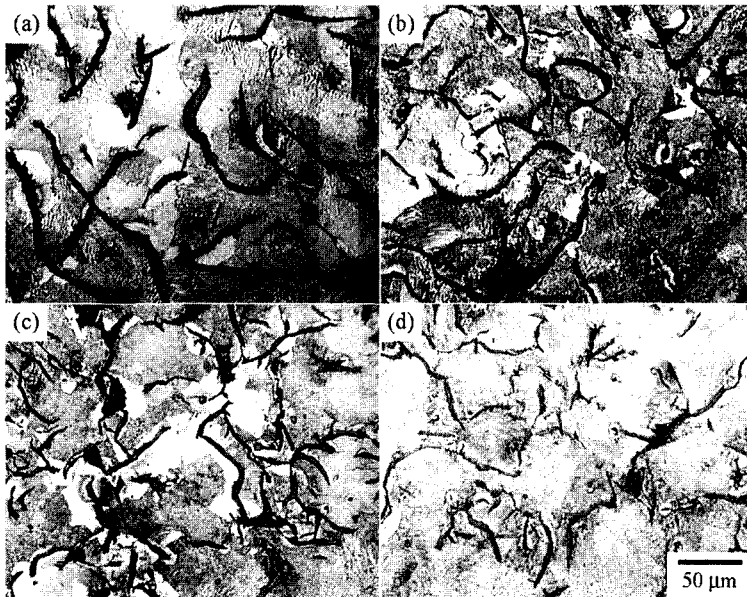


Fig. 4. Optical micrographs of GC(M) with different chemical compositions. (a) G1M (b) G2M (c) G3M (d) G4M

G1재와 G2재에 비하여 흑연립의 형태는 흑연립의 성장이 제대로 이루어지지 않은 A 또는 B형 흑연으로 바뀌었고 Cu, Mn, Ni, Cr 등의 펄라이트 안정화 및 경화능 향상 원소의 첨가량이 증가됨에 따라 펄라이트

가 미세화되고 안정화 되었다.

Fig. 5는 냉각속도에 의한 미세조직의 변화를 나타낸 사진이다. 냉각속도가 비교적 빠른 얇은부분(a)에서는 초정 오스테나이트가 수지상 모양으로 성장하고 오스



Fig. 5. Optical micrographs of G2(CE:4.049) with various cooling rates. (a) G2S (b) G2M (c) G2L

테나이트 내부에 Fe_3C 가 존재하는 레테브라이트 수지상이 형성되었고 또한 수지상 사이에 미세하게 흑연립이 무질서한 방위로 편석한(ASM D형 흑연)의 흑연 형태를 지닌다. 그렇지만 냉각속도가 감소함에 따라 수지상정은 사라지고 불안정상인 Fe_3C 가 안정상인 $3Fe+C$ 로 바뀌면서 기지는 페라이트, 펄라이트 기지에 흑연이 성장한(ASM A형 흑연) 양상을 볼 수 있다. 이러한 A형의 흑연형상은 우수한 내마모성을 지닌다. (C)는 가장 두꺼운 부분에서 조직사진으로 흑연이 성장하여 흑연립의 길이가 더욱 성장하는 것을 볼 수 있다.

3.2 경도

Fig. 6은 본 실험에서 사용된 시편의 합금조성 및 냉각속도에 따른 경도분포를 보여준다. 회주철 및 구상흑연주철에서 전반적으로 얇은 부분, 즉 냉각속도가 가장 빠른 부분에서 가장 높은 경도값을 나타내었는데, 이는 미세한 공정흑연상(D형)이 기지 전반에 분포하며 경도값이 높은 레테브라이트 상이 형성되었기 때문이다. 두께가 증가할수록 연성의 편상 흑연이 성장하면서 미세하게 경도가 줄어드는 현상을 보이고 있다. 또한 기지조직이 동일할 때 회주철이 구상흑연 주철에 비하여 낮은 경도값을 나타내는데 이는 연성의 흑연이 기지 전체에 걸쳐 연속적으로 분포하기 때문에 경도값이 낮게 측정되었다. 그러나 이러한 연속적인 흑연립의 분포가 마모실험시 마모면과 상대마모재의 표면에 윤�활작용을 하여 회주철이 구상흑연 주철에 비하여 더욱더 좋은 내마모성을 나타내리라 사료된다.

3.2 마모실험

3.2.1 회주철

Fig. 7은 다양한 형상의 편상흑연을 가진 회주철의 마모실험 결과이다. 위의 실험에 적용된 하중과 마모

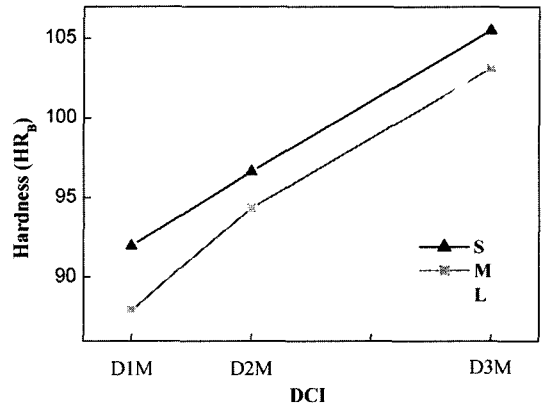
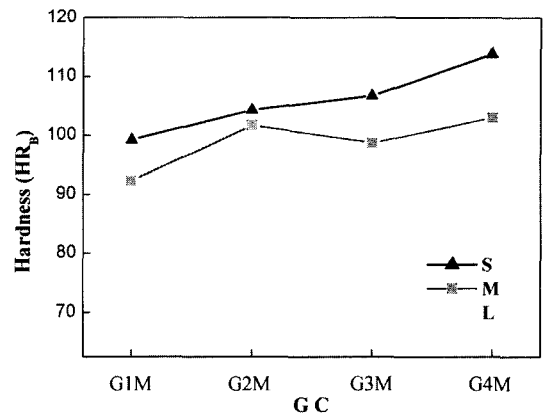


Fig. 6. Hardness variation of cast iron and ductile cast iron with various thickness.

속도는 47.2N과 0.2 m/s로 일반적인 회주철의 미소 마멸범위에 속한다. 미소 마멸 기구안에 회주철의 마모율은 주로 표면산화와 흑연의 형상에 의해 주로 조절이 되는데 마모율이 작은 G1재와 G2재는 A형 형태의 조대한 편상흑연을 가지며 장미상흑연(B형) 및 작은 편상흑연을 가지는 G3와 G4재에 비하여 더욱 작은 마

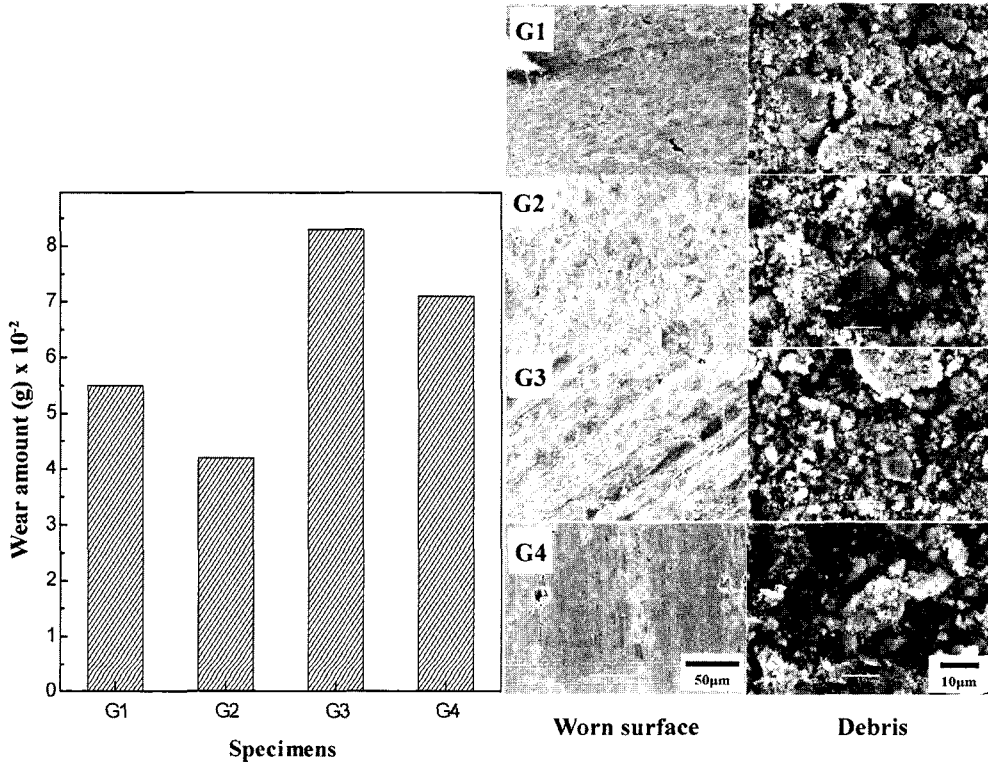


Fig. 7. Wearing amount and SEM micrographs of worn surfaces and debris with various flake types.

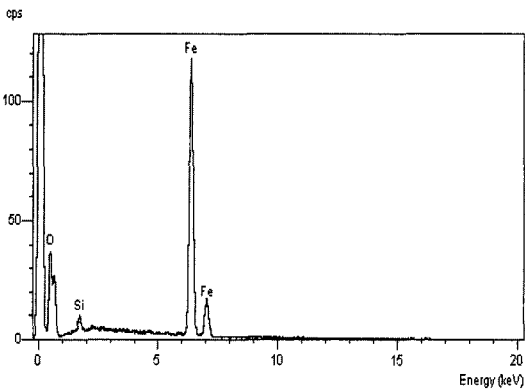


Fig. 8. EDX results of worn surface of G2.

모양을 나타낸 것을 볼 수 있다. 이는 조대한 A형의 편상흑연이 마모 동안에 윤회작용을 하여 마모량이 감소하였다. 또한 G2 시편의 마모분을 XRD로 측정된 결과 10µm 이하의 마모분이 산화철 분말을 형성하는 것을 볼 수 있었다(Fig. 8). 또한 마모동안 작용하는 하중에 의하여 접촉계면 과 계면 아래 바로 존재하는

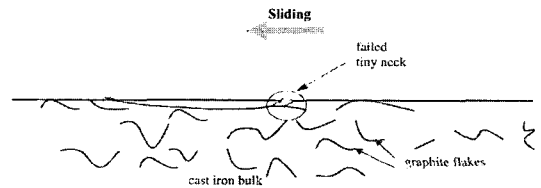


Fig. 9. Schematic illustration of the sequence of events leading to the failure of the necks.

편상 흑연의 상호작용에 의하여 기지가 파괴된 부분 (Fig. 7에 화살표로 표시된 부분)이 존재하며 이러한 파괴 기구를 간단히 Fig. 9에 설명하였다. 이것은 마모 표면에 인접하는 조대한 편상흑연을 가지는 시편을 마모실험 할 때 마모시편과 상대 마모재에 걸리는 소성에 의해서 마모표면에 뜯김 현상이 발생하여 나타난다. 또한 흑연의 형상이 장미상의 형상(B형)을 가지는 G3재의 경우 마모 실험 동안에 이런 장미상들이 미세 조직 안에 취약하게 연결되어 있어 쉽게 부서진다. 그 결과 30µm 이상의 금속 마모분이 형성되어 접촉면 안에 갇혀지고 접촉 표면들 사이에 갇혀진 큰 크기의 미립자들

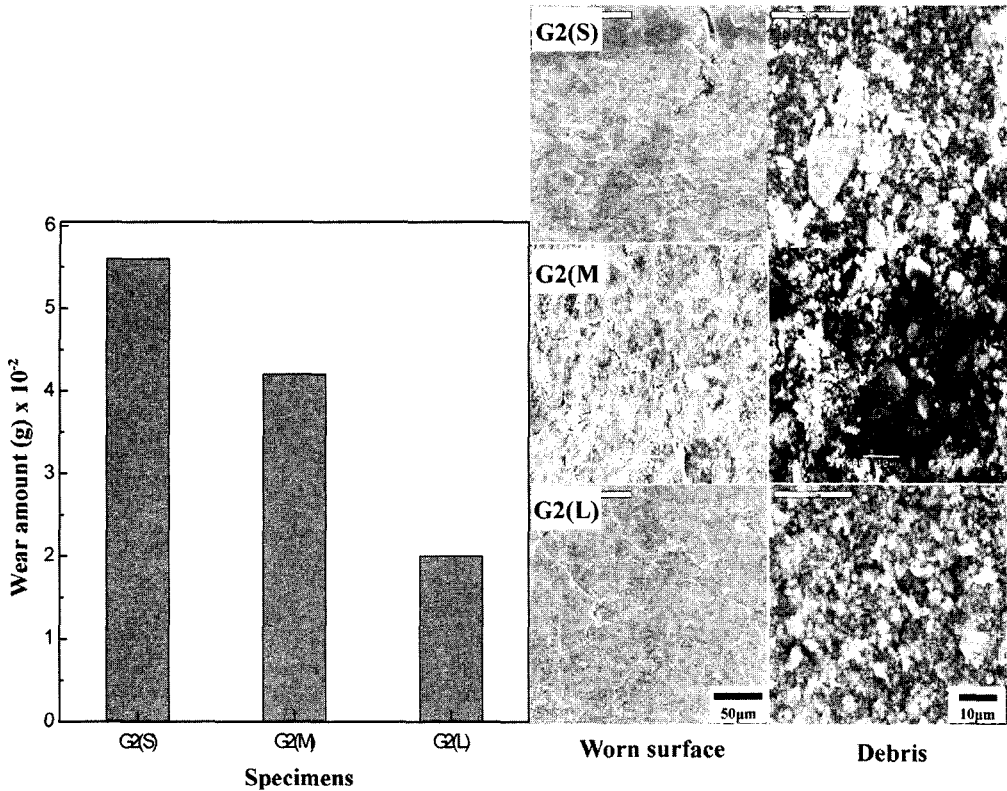


Fig. 10. Wearing amount and SEM micrographs of worn surfaces and debris of G2 with various cooling rates.

은 종종 접촉면들을 상하게 하여 마모량이 증가된다. 이것이 G3재의 마모량이 크게 증가되는 원인이 된다. 또한 C와 Si 량의 부족으로 인하여 흑연의 정출량이 G1 및 G2재에 비하여 적어 마모할 때 윤활작용이 적게 발생하여 마모량이 G1 및 G2재에 비하여 증가된다.

Fig. 10은 마모량이 가장 적은 G2재의 냉각속도에 따른 마모량의 차이를 보여준 사진이다. G2재의 냉각속도에 따른 마모량의 경향은 앞의 경향과 마찬가지로 조대한 A형의 편상 흑연을 지니는 G2(L)재가 낮은 마모량을 보이고 있으며 이러한 마멸기구는 앞에서 Fig. 9에서 설명한 마멸기구와 동일하다. 또한 Fig. 7과 Fig. 10의 마모면을 SEM을 통하여 관찰한 결과 모두 마멸 마모 표면을 나타내었다.

3.2.2 구상흑연주철

Fig. 11은 DCI재에서 인장강도에 따른 마모량의 차이를 나타낸 사진이다. 페라이트로 구성된 D1재가 퍼얼라이트로 구성된 D3재보다 많은 마모량을 나타내고

있으며 이에 비례하여 산화철 분말 또한 조대해졌으며 미소 마멸 기구 안에서 모든 시편의 마모면은 마멸 마모 표면을 보이고 있다.

또한 흑연립의 수와 크기에 따른 마모량의 차이를 살펴보았을 때(Fig. 12) 전체적으로 흑연립의 크기에 따라 마모량의 차이는 미미하나 미세한 구상의 흑연립을 가지는 D1S재가 약간 작은 마모량을 보이고 있으며 앞의 회주철과 마찬가지로 하중에 의한 흑연과의 상호작용에 의해 뜯김 현상이 관찰되고 흑연립의 크기가 커질수록 fail neck의 크기가 커지고 마모분 또한 조대해 짐을 볼 수 있어 마모량이 증가된다고 사료된다.

Fig. 11과 Fig. 12의 결과로 마모량의 차는 흑연립보다도 기지조직의 차이가 날 때 더욱더 많은 차이가 나며 이로 미루어 흑연립의 크기와 수가 구상흑연 주철의 마모에 약간의 영향을 미치나 마모율에 영향을 미치는 주요 인자는 회주철과 다르게 기지의 경도에 의해 좌우된다고 볼 수 있다.

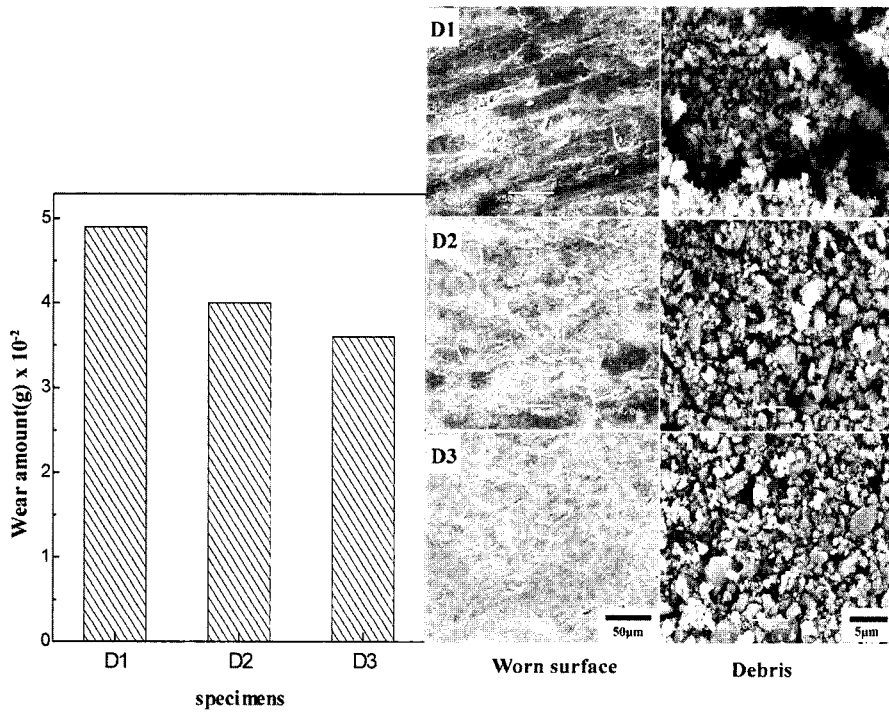


Fig. 11. Wearing amount and SEM micrographs of worn surface and debris of DCI specimen with various tensile strengths.

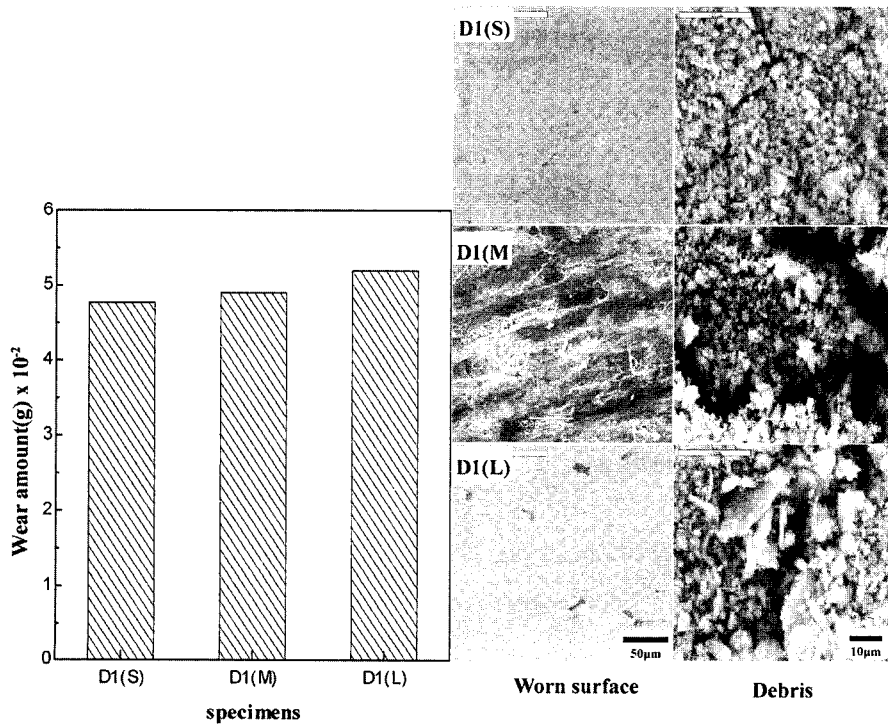


Fig. 12. Wearing amount and SEM micrographs of worn surface and debris of D1 specimen with different cooling rates.

4. 결 론

서로 다른 C와 Si 및 Mn, Cu, Cr의 화학적 조성 에 의해 제조된 회주철과 구상흑연주철의 마모실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 냉각 속도가 느릴수록 회주철의 흑연은 성장하여 A형을 나타내며 마모율은 A형의 흑연을 가질 때 윤활 작용에 의하여 마모율은 감소하며 그때의 마모면과 마 모분은 마멸 마모기구와 산화철 분말 형태를 가졌다.
2. C와 Si의 첨가량을 증가하였을 때 흑연은 A 타 입의 흑연으로 성장하였고 Cu, Mn, Cr의 각각의 원소 첨가량이 증가된 시편의 기지는 펄라이트로 나타나며 흑연의 성장은 억제되어 마모시험시 마모율이 증가하 였다.
3. 마모 동안에 취약하게 결합되어 있는 장미상 흑연 (B형)은 쉽게 부서져 30 μm 이상의 금속 마모분을 형 성하고 마모면을 손상시켜 마모량을 증가시킨다.
4. 마모동안에 작용하는 하중에 의하여 발생하는 소 성에 의하여 접촉 계면과 계면 아래 바로 존재하는 편 상흑연의 상호 작용에 의해서 흠이 발생한다.
5. 구상흑연주철의 마모율은 구상흑연 형태보다도 기

지 조직에 의해 크게 영향을 받았다.

감사의 글

본 논문은 2003년도 (재) 산학협동 재단의 산학협동 연구비 지원에 의하여 수행되었으며 이에 감사를 드립니다. 또한 전북대학교 공학기술연구소센터에도 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] G. Cueva and A. Sinatora : Wear, " Wear resistance of cast irons used in brake disc rotors", 255 (2003) 1256-1260.
- [2] C. V. White, friction, Lubrication and Wear Technology, ASTM Handbook, 18, 10th ed., ASTM International, Metals Park, OH, 1992, 553-562.
- [3] P. W. Leech and D.W. Borland : The unlubricated wear of flake graphite cast iron, Wear, 85 (1983) 257.
- [4] S. W. Kim : The Journal of the Korean Foundrymen's Society, 10, "Manufacturing of Ferrite Type DCI in the As-Cast State", (1990) 215-218.
- [5] A. R. Riahi and A. T. Alpas : Wear, " Wear map for grey cast iron ", 255 (2003) 401-409.