

〈論 文〉

오스템퍼링 한 저합금구상흑연주철의 부식마멸특성 및 그 기구에 관한 연구

박흥식* · 진동규**

(1992년 11월 28일 접수)

A Study on Corrosive Wear Characteristics and the Mechanism of Austempered Low-Alloy Ductile Iron

Heung-Sik Park and Dong-Ku Jin

Key Words : Corrosive Wear Rate(부식마멸율), Specific Corrosive Wear Rate(비부식마멸율), Critical Sliding Distance(임계미끄럼거리), Volume Fraction(체적분율)

Abstract

This study was undertaken to investigate the corrosive wear characteristics upon various transformation condition of austempered low-alloy ductile cast iron in corrosive environments against mating specimen made of the hardened SM45C. The corrosive wear test was carried out by rubbing the annular surface of two test pieces in distilled water and aqueous solution at constant sliding speed of 0.5 m/s. In severe wear region, the corrosive wear rate W_C increased hastily with NaCl concentration owing to intermetallic adhesion but W_C went down slowly in mild wear region due to lubricating effect of the corrosion product. The critical sliding distance decreased with increasing NaCl concentration due to increased generation rate of the corrosion product and the specific corrosive wear rate has maximum in 1% NaCl aqueous solution at mild wear region. With the variation of matrix, the corrosive wear resistance of the fine acicular bainite was higher than that of coarse upper bainite because of reducing the local cell reaction by carbides. A growth in volume fraction of retained austenite in matrix increased the W_C due to soften surface, but has a declining tendency of W_C in mild wear region.

1. 서 론

오스템퍼링 한 저합금구상흑연주철은 기지조직이 베이나이트와 잔류오스테나이트로 구성되어 있기 때문에 같은 화학조성을 가진 일반의 구상흑연주철에 비하여 연성과 인성의 감소없이 강도를 2배로 증가시킬 수 있다고 보고되고 있다.⁽¹⁾ 또한 이 주

철이 최근 저렴한 생산비와 제조의 용이성으로 기계부품 및 자동차후차축의 링기어, 피니언기어와 크랭크축에 이르기까지 널리 사용되어지게 됨에 따라 많은 관심을 모으고 있지만, 이의 적용에 있어서 부식환경 중 미끄럼접촉시 나타나는 부식마멸은 매우 중요한 문제로 대두되고 있다. 잘 알려진 바와 같이 부식현상은 국부전지의 구성에 의한 전기-화학적인 반응이며, 각종 부식마멸에 관한 연구로서 $Tao^{(2)}$ 는 부식마멸은 산소소비량과 관계한다고 하였고, 昭⁽³⁾는 SM45C를 상대재로 하여 연구한

*정회원, 동아대학교 기계공학과

**정회원, 동아대학교 기계공학과 대학원

결과 증류수 및 NaCl수용액 중에서 마찰계수가 변화하는 것은 부식생성물의 파괴와 회복이 계속해서 반복되기 때문이라고 하였으며, 矢作⁽⁴⁾은 SUS 316 강의 부식마멸율은 0.1% NaCl수용액 중에서 극대가 되고 하중과 부식용액의 온도상승에 따라 그 값도 증가한다고 하였다. 또한 Bachelor⁽⁵⁾는 강 및 비철금속을 사용하여 황산용액 중에서 마멸실험하여 부식현상과 연삭마멸 사이의 관계를 규명하였다. 그러나 지금까지 오스테퍼링 한 저합금 구상흑연주철에 관하여 대기중 건조 미끄럼마멸⁽⁶⁾ 및 변태조건 변화에 따른 기계적 성질과 연삭마멸^(7,8)에 대하여서는 규명되어 있지만, 실용적 견지에서 중요하다 생각되어지는 부식환경 중에서의 부식마멸특성 및 그 기구에 대한 연구는 아직 미해결 상태이며 조속히 해결되어야 할 필요성이 있다고 생각된다.

따라서 본 연구는 오스테퍼링 온도와 유지시간을 변화시켜 오스테퍼링 한 저합금구상흑연주철을 실험재로 하여 증류수 및 NaCl 수용액 중에서의 부식마멸특성 및 그 기구를 규명하여 Tribology설계에 대한 자료를 제시하는 것을 목적으로 하였다.

2. 실험방법

2.1 실험재료

본 실험에 사용한 실험재료는 일반의 구상흑연주철 용탕에 Fe-99.9% Ni, Fe-60% Mo 및 99.9% Cu를 첨가하여 용해한 후 직경 22 mm, 길이 230 mm의 충분한 압탕이 있는 생사형에 주입한 것이며, 상대재는 SM45C를 사용하였고, 이들의 화학적 성분은 Table 1과 같다.

또한 양 시험편은 Fig. 1과 같이 가공하여 염욕

Table 1 Chemical composition of the testing materials

Materials	Composition(wt. %)								
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Mo	Ni	Mg
Ductile cast iron	3.52	2.74	0.25	0.03	0.02	0.32	0.23	1.38	0.05
SM45C	0.47	0.31	0.73	0.02	0.02	-	-	-	-

Table 2 Heat treatment and mechanical properties of test materials

Material	Heat treatment	Mechanical properties		
		Tensile strength (kgf/mm ²)	Elongation (%)	Hardness (Hv)
Austempered ductile cast iron	A 900°C × 1hr - 290°C × 1hr W.Q.	145	1.7	498
	B 900°C × 1hr - 330°C × 1hr W.Q.	124	2.7	438
	C 900°C × 1hr - 370°C × 1hr W.Q.	125	4.9	384
	D 900°C × 1hr - 410°C × 1hr W.Q.	75	2.3	325
	E 900°C × 1hr - 450°C × 1hr W.Q.	69	2.0	310
	F 900°C × 1hr - 370°C × 1hr W.Q.	51	0.3	596
	G 900°C × 1hr - 370°C × 1hr W.Q.	85	1.0	501
	H 900°C × 1hr - 370°C × 1hr W.Q.	126	5.1	402
	I 900°C × 1hr - 370°C × 1hr W.Q.	120	4.4	408
SM45C	840°C × 30min - 200°C × 30min W.Q.	105	13	496

* W.Q : Water Quenching

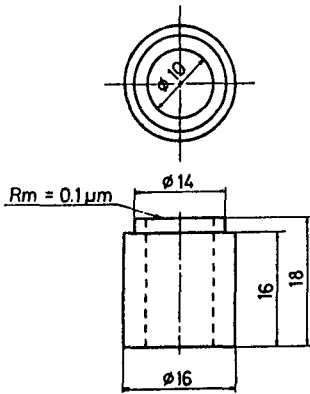


Fig. 1 Shape and dimension of wear testing specimen

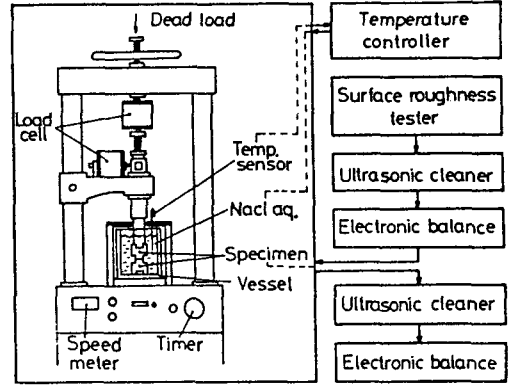


Fig. 2 Block diagram of experimental apparatus

로에서 열처리하였으며, 열처리 사이클과 열처리 후의 기계적 성질은 Table 2와 같다.

2.2 부식마멸실험

부식마멸실험을 위하여 마멸시험기를 제작하였으며 Fig. 2에는 이의 개요도 및 그 선도를 나타내었다. Fig. 1과 같이 가공한 양시험편의 마찰면조도를 $R_{max}=0.1\mu\text{m}$ 로 하여 즉시 초음파세척, 건조시킨 후 상대재인 SM45C를 하부에, 실험재를 상부에 고정하여 회전시켜 그 단면이 순수 미끄럼마찰이 되도록 하였으며, 미끄럼속도는 0.5 m/s로 일정하게 하였다. 부식용액인 증류수 및 NaCl수용액은 매회 교환하였고, NaCl수용액은 증류수에 각 중량비율로 식염을 용해한 것이며 실험중 마찰열에 의한 부식용액의 온도상승을 억제하기 위하여 강제

순환펌프로 용액을 순환시켜 그 때의 분위기를 온도를 $25\pm 1^\circ\text{C}$ 로 유지하였다. 또한 실험후에는 감도 0.1 mg의 디지털천칭으로 그 중량감소량 측정하였으며, 마찰면관찰은 주사전자현미경을 사용하였다. 그리고 기지조직내 베이나이트의 체적분율은 포인트카운팅법으로 하였으며, 잔류오스테나이트의 체적분율을 구하기 위해서는 X선회절 시험기를 사용하였고, 마르텐사이트의 체적분율은 전체적분율에서 베이나이트와 잔류 오스테나이트의 체적분율의 차로써 구하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 현미경조직변화

구상흑연주철의 오스템퍼링 처리에 있어서는 오

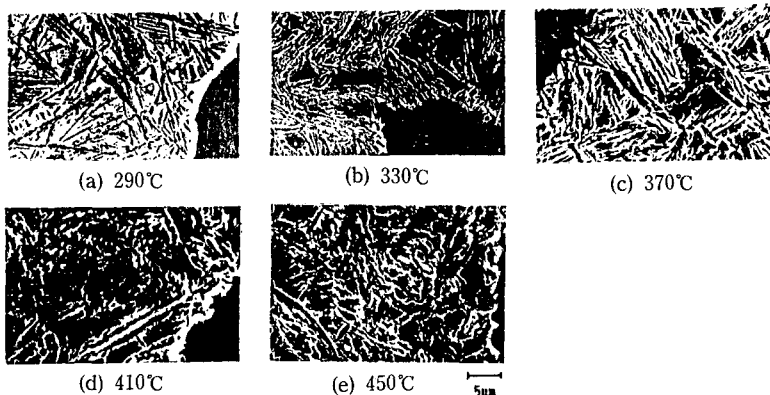


Fig. 3 Scanning electron micrographs of specimens which austempered at different temperature for 1 hr

스테나이트화하기 위한 가열이 필요하며 이 온도의 범위는 일반적으로 850~950°C가 적당하다^(9,10)고 알려져있다. 따라서 본 연구에서는 오스테나이트중의 탄소량이 균일하게 될 때까지 장시간을 요하는 낮은 오스테나이트화 온도와 오스테나이트 결정립이 조대화하게 되어 기계적 성질을 저하시키는 높은 오스테나이트화 온도를 피하여 900°C에서 행하였으며, 기지조직내의 탄소량이 평형에 도달할 수 있게 하기 위하여 1시간 동안 유지하였다.

Fig. 3은 오스템퍼링 온도를 290°C, 330°C, 370°C, 410°C 및 450°C로 변화시켜 각각 1시간 동안 유지하였을 때의 현미경조직 사진을 나타낸 것이다. (a) 290°C와 (b) 330°C의 경우 기지조직은 전부분에 걸쳐 미세한 침상의 하부베이나이트가 형성되어 있고 소량의 잔류오스테나이트가 존재하며, 오스템퍼링 온도가 370°C인 (c)의 경우에는 미세한 침상의 하부베이나이트와 조대한 침상 및 판상의 상부베이나이트가 형성되어 있으며 기지조직내 잔류오스테나이트양이 증가한 것을 볼 수 있다. 그리고 (d) 410°C와 (e) 450°C의 경우에는 오스템퍼링 온도의 상승에 따라 조대한 판상의 상부베이나이트로 성장한 것을 볼 수 있다. 따라서 오스템퍼링 온도의 변화에 따라 현미경조직은 미세한 침상의 하부베이나이트가 조대한 침상 및 판상의 상부베이나이트로 성장한다는 것을 알 수 있으며, 본 연구에서는 오스템퍼링 온도가 370°C 부근이 하부베이나이트에서 상부베이나이트로 성장하는 천이온도라고 생각된다.

오스템퍼링 온도를 370°C로 일정하게 하고 유지시간을 단계적으로 변화시켰을 때의 베이나이트 변태과정을 Fig. 4에 나타내었으며, 이 때의 각 상의 체적분율을 Table 3에 나타내었다. Fig. 4의 (a)는 유지시간이 2분인 경우로서 침상페라이트가 오스테나이트의 결정입계에서 성장한 것을 볼 수 있으며 미변태된 대부분의 오스테나이트는 점차적으로 탄소량이 증가하여 냉각후의 기지조직은 소량의 미세한 침상베이나이트와 급냉에 의한 다량의 마르텐사이트로 형성된다. 유지시간이 10분인 (b)는 유지시간의 증가에 따라 베이나이트가 성장을 계속하며 탄소를 다량 함유한 오스테나이트가 마르텐사이트로 변태하여, 최종조직에서 마르텐사이트양은 감소하며 잔류오스테나이트는 점차로 증가하게된다. 유지시간이 40분인 (c)는 미세한 침상베이나이트가 조대한 침상베이나이트로 성장하고, Table 3과 같

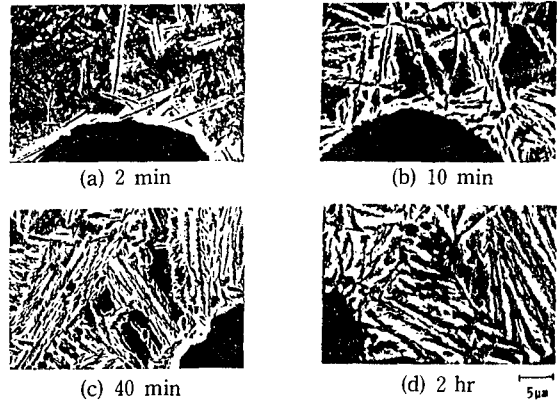


Fig. 4 Scanning electron micrographs of austempered specimens maintained at 370°C for different holding time

Table 3 Volume fraction of matrix for specimen C(%)

Structure	Holding time (min)				
	2	10	40	60	120
Martensite	96.8	32.1	6.0	2.4	-
Bainite	2.1	52.4	70.0	80.1	84.8
Retained austenite	1.1	15.5	24.0	17.5	15.2

이 탄소가 풍부하고 안정된 잔류오스테나이트양이 최대가 된다. 또한 유지시간이 2시간인 (d)의 경우에는 변태가 계속 진행됨에 따라 조대한 침상베이나이트가 판상의 베이나이트로 성장하며, 잔류오스테나이트의 감소는 탄화물의 석출에 의하여 조대한 침상베이나이트에서 판상베이나이트로의 성장에 기인하기 때문이라고 생각된다.

3.2 부식마멸

(1) 마멸에 미치는 NaCl농도특성

Fig. 5는 기계적 성질이 우수한 오스템퍼링 온도 370°C에서 1시간 동안 유지한 C재의 경우 하중 P를 39.2N으로 일정하게 하고 미끄럼거리 L을 단계적으로 변화시켰을 때의 각 부식용액에 대한 부식마멸을 Wc를 나타낸 것이며, Wc는 다음식으로 구하였다.

$$W_c = W_i / L \tag{1}$$

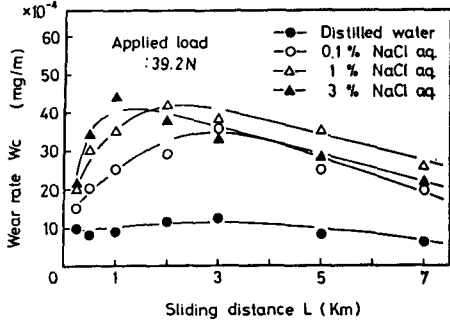


Fig. 5 Wear curves in corrosive wear loss with sliding distance for specimen C

여기서 W_c 는 부식마멸량을 나타낸다. Fig. 5와 같이 W_c 는 0.1% NaCl 수용액 중에서는 3km, 1% NaCl 수용액 중에서는 2 km, 그리고 3% NaCl 수용액 중에는 1 km까지 거의 직선적으로 상승하지만 그 이상의 L 에서는 완만하게 감소하고 있으며 증류수 중에서의 W_c 는 거의 변화가 없다는 것을 볼 수 있다. 각 부식용액에서 W_c 가 거의 직선적으로 상승하는 임계미끄럼거리 L_{cr} 까지의 마찰면은 양 금속간 미소돌기부의 연속적인 전단에 의한 금속응착으로 마멸율이 증가하는 severe wear가 되기 때문이며, L_{cr} 이상의 L 에서는 흑연과 기지조직 사이의 국부전지작용으로 부식반응이 활성화되어 마찰면에 생성된 황색, 적색 및 흑색의 부식생성물이 계면에서 윤활작용을 하여 마멸율이 감소하는 mild wear가 되기 때문이라고 생각된다. 그러나 증류수 중에서는 부식생성물이 거의 존재하지 않고 금속응착마멸만이 지배적으로 작용하므로 W_c 는 거의 변화가 없는 것으로 생각된다.

Fig. 6에는 1% NaCl 수용액 중에서의 마찰면을 나타낸 것이다. severe wear 영역인 (a) $L=500$ m에서는 미끄럼방향으로 심한 금속응착마멸의 양상을 나타내고 있지만, (b) $L=3$ km인 mild wear 영역에서는 흑연과 기지조직사이에서 흑연이 음극, 기지조직이 양극의 역할을 하는 국부전지 작용으로 흑연주위에서 부식이 진행되어 부식생성물이 생성된 것을 볼 수 있다. 한편 Fig. 7에는 3% NaCl 수용액 중에서의 마찰면과 종단면의 Stereo사진을 나타내었다. severe wear 영역인 (a) $L=500$ m의 마찰면에서는 국부적으로 부식의 진행과 더불어 금속응착이 일어나 분화구 형상을 한 골의 부분을 볼 수 있고 종단면에서는 크랙이 생성, 진전되고 있는

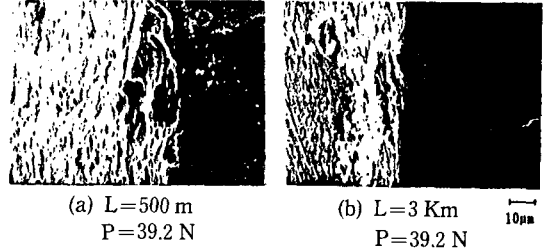


Fig. 6 Photographs of rubbed surface for specimen C in 1% NaCl aqueous solution

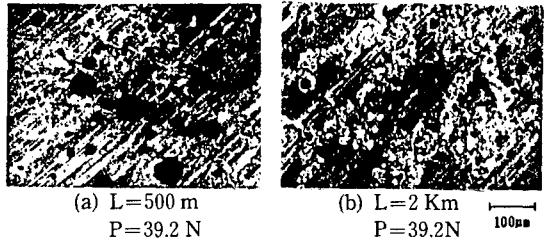


Fig. 7 Stereo photographs of rubbed surface and cross section for specimen C in 3% NaCl aqueous solution

것을 볼 수 있지만, mild wear 영역인 (b) $L=2$ km의 마찰면에서는 부식반응이 활성화되어 생성된 부식생성물이 존재하는 것을 볼 수 있다. 따라서 부식마멸율 W_c 는 증류수 중보다 NaCl 수용액 중이 훨씬 크며, 부식에 의한 표면형상의 변화가 기계적 파괴작용인 마멸과의 상호작용에 의하여 부식마멸이 진행된다는 것을 알 수 있다.

Fig. 8은 각 부식용액에 있어서 하중 P 에 따른 임계미끄럼거리 L_{cr} 의 변화를 나타낸 것이며 각 농도곡선에서 하부는 severe wear 영역을, 상부는 mild wear 영역을 나타낸다. 각 부식용액에서 P 가 증가함에 따라 L_{cr} 은 거의 직선적으로 상승하고 고농도가 될수록 곡선은 우하로 이동하며, 동일 하중에서도 L_{cr} 은 농도가 증가할수록 짧아진다는 것을 알 수 있다. 그러므로 각 부식용액 중에서의 L_{cr} 은 고농도 일수록 생성물의 생성속도가 증가하므로 severe wear 영역이 짧아지며, 또한 P 가 상승함에 따라 실제접촉면적이 증가하여 접촉계면의 연속적인 소성변형으로 인한 금속응착 및 기계적 마멸이 지배적으로 작용하고 마찰에 의하여 부식생성물이 용액중으로 신속히 분산되어지기 때문이라고 생각된다.

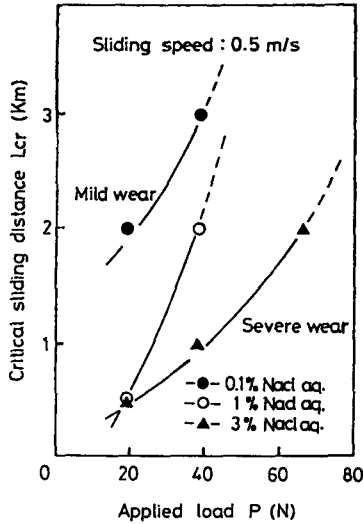


Fig. 8 Variation in critical sliding distance with applied load for specimen C

그리고 mild wear 영역인 $L=5$ km, P 를 39.2N 으로 하고 NaCl농도를 단계적으로 변화시켰을 때의 비부식마멸율 W_s 를 Fig. 9에 나타내었으며, W_s 는 다음 식으로 구하였다.

$$W_s = W_c / (P \cdot L) \quad (2)$$

W_s 는 증류수 중에서 최소치를, NaCl농도가 1%에서 최대치를 나타내며 3% 이상의 농도에서는 거의 변화가 없다는 것을 알 수 있다. 이것은 생성물의 생성속도는 NaCl수용액의 농도가 증가할수록 빨라지며 정상적인 mild wear가 되지만, 이 상태가 된 후에는 생성물의 수용액 중으로의 분산이 더 큰 영향을 주기 때문이라고 생각되며 여기에는 미끄럼속도, 유체의 점도, 마찰력 및 하중 등이 관련된다고 생각된다. 그러나 본 연구에서는 미끄럼 속도와 하중을 일정하게 하였으므로 실제로 영향을 주는 인자는 부식생성물이 마찰면에 흡착되는 흡착력으로 생각되며, 이것은 전기적 현상인 부식전위 및 부식전류를 측정하면⁽¹¹⁾ 더욱 명확하게 될 가능성도 있지만, 본 연구에서는 행하지 않았다.

(2) 마멸에 미치는 기지조직특성

오스테퍼링 한 저합금 구상흑연주철의 기지조직은 다상혼합조직이며, 기지조직내 각 상의 체적분율에 따른 W_c 를 알기 위하여 오스테퍼링 온도와 유지시간을 변화시켰으며 Fig. 10에는 3% NaCl수용액 중에서 오스테퍼링 온도변화에 따른 W_c 를, Fig.

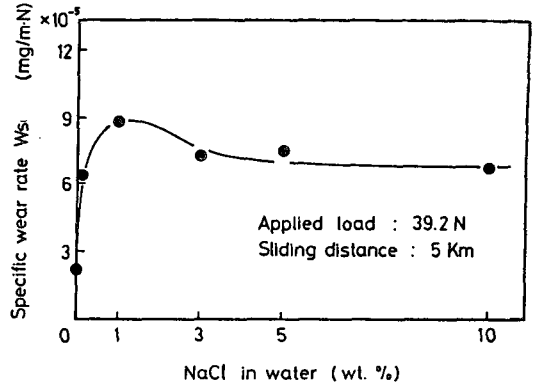


Fig. 9 Effect of wt. percent of NaCl in water on the specific corrosive wear rate for specimen C

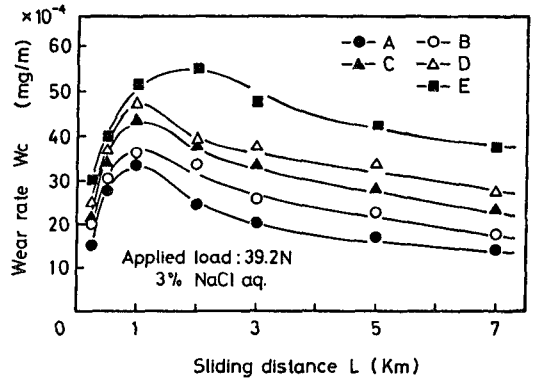


Fig. 10 Wear curves in corrosive wear rate with sliding distance for specimen A, B, C, D and E

11에서 오스테퍼링온도 370°C의 경우 유지시간의 변화에 따른 W_c 를 각각 나타내었다. Fig. 10에서 처럼 오스테퍼링 온도를 변화시켰을 때에는 저온의 변태온도에서 처리한 Table 2의 A재가 부식마멸저항이 가장 강하며, 고온의 변태온도에서 처리한 E재가 부식마멸저항이 가장 약하다는 것을 알 수 있으며, Fig. 11에서는 유지시간이 가장 짧은 F재의 W_c 는 적고, 2시간인 I재의 W_c 는 대체로 크며 미끄럼거리 L 이 2 km 이상인 mild wear 영역에서는 잔류오스테나이트량이 최대(24%)로 되는 H재가 부식마멸저항이 크다는 것을 알 수 있다. 주철의 부식현상에 대하여 원전⁽¹²⁾은 주철중의 조직성분과 전위와의 관계에서 조직적으로 복잡한 퍼얼라이트가 존재하면 흑연과 기지조직뿐만 아니고 페라이트와 퍼얼라이트의 사이에서 국부전지가 구성된다고

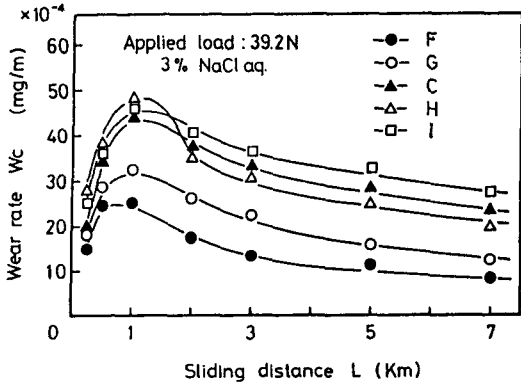


Fig. 11 Wear curves in corrosive wear rate with sliding distance for specimen F, G, C, H and I

하였으며, 더욱이 퍼얼라이트에 있어서도 구성요소인 세멘타이트와 페라이트의 사이에서 국부전지가 발생하여 양극용해가 일어나 부식반응이 활성화 된다고 하였다. Fig. 10에서 저온처리한 A재는 강도와 경도가 큰 미세한 침상베이나이트로 구성된 하부베이나이트로서 침상페라이트와 잔류오스테나이트의 결정입계에서 형성되는 탄화물이 미세하여 기지조직 사이의 국부전지 작용이 적기 때문에 부식마멸저항이 강하다고 생각된다. 그리고 Fig. 11에서 유지시간이 2분인 F재의 기지조직은 대부분 급냉에 의한 단상의 고용체인 마르텐사이트로서 이상의 작용을 하는 탄화물이 거의 존재하지 않기 때문에 이로 인하여 기지조직 사이의 국부전지 작용이 어려워 부식은 대체로 흑연과 기지조직사이의 경계면에서만 진행되어 부식마멸저항이 크므로 W_c 는 적다고 생각된다. 또한 기지조직이 조대한 판상의 상부베이나이트인 E재는 고온에서 처리하였으므로 판상페라이트의 결정입계에서 이상인 탄화물이 증가하여 기지조직내의 페라이트가 양극, 탄화물이 음극으로 작용하여 페라이트가 용해되어 부식량이 증가하므로 부식마멸이 촉진된다고 생각된다. 오스템퍼링 변태과정에서 유지시간이 증가하여 1시간 이상이 되면 탄소가 풍부한 오스테나이트 및 베이나이트 입계에서 탄화물이 석출되며 이로 인하여 Table 3과 같이 잔류오스테나이트의 감소로 탄화물이 증가하게 되고, Fig. 11의 유지시간이 2시간인 I재는 전술한 바와 같이 부식속도가 증가하기 때문에 W_c 는 크게 되며, 잔류오스테나이트양이 최대인 H재는 잔류오스테나이트가 마찰면 표층을 연화시키므로⁽¹³⁾ severe wear 영역에서는 마멸을

촉진시키는 경향이 있지만, L 이 2 km 이상인 mild wear 영역에서는 L 의 증가와 더불어 계면의 온도상승으로 인하여 잔류오스테나이트가 마르텐사이트로 변태하기 때문에 부식마멸율은 감소한다고 생각된다.

4. 결 론

오스템퍼링 한 저합금구상흑연주철의 변태조건변화에 따른 부식마멸특성 및 그 기구를 알기 위하여 열처리하여 경화시킨 SM45C를 상대재로 하여 증류수 및 NaCl수용액 중에서 부식마멸실험한 결과는 다음과 같다.

(1) NaCl 농도변화에 따라서 중마멸상태가 되는 임계미끄러거리 L_{cr} 까지는 금속용착이 지배적으로 작용하여 부식마멸을 W_c 는 거의 직선적으로 상승하지만, 그 이상이 되면 경마멸상태가 되어 부식생성물의 윤활작용으로 W_c 도 감소한다.

(2) NaCl농도가 증가할수록 부식생성물의 생성속도가 증가하여 L_{cr} 는 짧아지며 경마멸영역에서 비부식마멸을 W_s 는 NaCl농도 1%에서 최대가 된다.

(3) 기지조직의 변화에 따라 미세한 침상베이나이트 조직이 조대한 침상 및 판상의 베이나이트 조직보다 이상인 탄화물에 의한 국부전지 작용의 감소로 부식마멸저항이 크다.

(4) 기지조직내 잔류오스테나이트 체적분율의 증가는 L_{cr} 까지는 마찰면 표층을 연화시켜 W_c 를 증가시키지만, 그 이상에서는 W_c 를 감소시키려는 경향이 있다.

후 기

이 논문은 1991년도 교육부 학술연구조성비의 지원으로 이루어진 것으로 이에 관계자께 감사를 드립니다

참고문헌

- (1) John Dodd, 1978, "High Strength High Ductility Ductile Irons," Modern Casting 68, No. 5, pp. 60~66.
- (2) Tao, 1968, "The Role of Diffusion in Corrosive Wear," ASLE, Trans, 11, p. 121.

- (3) 肥田 昭, 1968, "腐食摩耗について," 潤滑, 第30卷, 第7號, pp. 467~471.
- (4) 矢作嘉章, 1989, "NaCl水溶液における S45Cおよび SUS316鋼の腐食摩耗について," 潤滑學會九州大會講演 稿集, pp. 53~59.
- (5) Bachelor, 1988, "Predicting Synergism between Corrosion and Abrasive Wear," *Wear*, 123, pp. 281~291.
- (6) 姜明順, 全泰玉, 金亨資, 朴興植, 1988, "오스템퍼링 處理된 球狀黑鉛鑄鐵의 乾燥摩滅特性에 관한 研究," 大韓機械學會 論文集, 第12卷, 第3號, pp. 489~496, 1988.
- (7) Shepperson, S. and Allen, C. 1988, "The Abrasive Wear Behaviour of Austempered Spheroidal Cast Iron," *Wear*, pp. 271~287.
- (8) Shaah, S.M. and Bahadur, S. 1986, "Erosion Behavior of High Silicon Bainitic Structures," *Wear*, 113, pp. 279~290.
- (9) Voigt, R.C. and Loper, R. JR., 1984, "Austempered Ductile Iron-Process control and Quality Assurance," *J.Heat Treating*, Vol. 3, No. 4, pp. 291~309.
- (10) Blackmore, P.A. and Harding, R.A. 1984, "The Effects of Metallurgical Process Variables on the Properties of Austempered Ductile Iron," *J. heat Treating*, Vol. 3, No. 4, pp. 301~325.
- (11) 矢作嘉章, 水 嘉之, 1986, "鑄鐵の腐食摩耗 (1)," 潤滑, 第31卷, 第12號, pp. 883~888.
- (12) 原田昭治, 矢野 滿, 遠藤達雄, 川口 昇, 1988, "球狀黑鉛鑄鐵の強度評價に關する 基礎的研究," 日本機械學會論文集(A偏), 第54卷, 第501號, pp. 934~94.
- (13) 小川喜代一, 1981, "金屬の潤滑摩耗とその對策," 養賢堂, pp. 176~171.