

# 노멀라이징 열처리한 구상흑연 주철의 마찰 · 마모특성 평가에 관한 연구

김 용 직\* · 김 윤 해\*\*

## A Study on the Evaluation of the Friction and Wear Properties for Normalized Ductile Cast Iron

Y. J. Kim\* · Y. H. Kim\*\*

### Abstract

This study is mainly concerned with the friction and wear properties for the specimens of crank shaft which are made of ductile cast iron. The friction and wear tests were carried out for the normalized ductile cast iron specimens and their properties were compared with each other at reheating temperatures(550°C, 600°C, 650°C) and in dry condition at different friction velocity(0.94 m/s, 1.88m/s, 2.83m/s) range. After austenized at 910°C, it is observed that, the higher the reheating temperature is, the hardness becomes decrease, which is supposedly attributed to the fact that the amount of pearlite, austenite matrix is reduced by reheating after normalizing, and that, as the reheating temperature goes up, the pearlite generated is less and the interval between the pearlites were widened, at last to make pearlite globular.

At the low velocity, the friction coefficient increases in the beginning and gets stabilized as the sliding distance increases. As the friction velocity grows, the friction coefficient decreases, supposedly since the abrasive wear is heavier at low velocity than at the high velocity as the friction temperature at low velocity is lower than at high velocity.

\* 한국해양대학교 재료공학과 전공

\*\* 한국해양대학교 재료공학과

## 1. 서 론

구상 흑연주철은 영국의 H. Morrgh<sup>1)</sup>가 용선(molten iron)에 세륨(cerium ; Ce)을 첨가해서 제조한 이래 미국의 A. P. Gagnebin<sup>2)</sup>이 마그네슘(magnesium ; Mg)과 그 합금을 사용해서 개발 하였으며, 다양한 열처리기법에 의해 비약적인 발전을 거듭해 왔다.

이로인해 주철이 취약하다는 종래의 통념이 점차 약해지면서 저렴한 생산비와 제조의 용이성 및 가공성으로 인해 점차 자동차, 산업기계, 공작기계, 부품소재<sup>3)</sup> 등과 같은 산업전반에 걸쳐 사용되게 되었다. 주철의 경우에는 주철중에 포함된 흑연이 건조마찰시에는 고체윤활제의 작용을 하고, 윤활마모시에는 선택적으로 마모된 흑연입자의 부위가 윤활제의 저장소 역할을 하며, 또한 마모중 형성된 마모입자나 외부로부터 도입된 입자들의 수용장소 역할을 하기 때문에 비교적 상대운동이 심한 부위에 사용되고 있으므로 마찰·마모의 특성을 충분히 파악할 필요가 있다. 마모는 상대운동을 하는 두 표면이 상호 마찰작용을 할 때 일어나는 현상이며 Holm<sup>4)</sup>, Burwell<sup>5)</sup>, Kerridge<sup>6)</sup> 등은 마모기구의 기초를 확립하였으며, 그 후 마찰·마모현상에 대해서는 사용중인 기계재료의 대기중 건조마찰에 있어서의 경도, 변형률, 전단강도 및 재결정온도 등과 같은 재료의 성질과 마찰속도 마찰면에 가하는 하중, 상대마모재의 경도, 미끄럼거리, 마찰면의 온도와 같은 다양한 인자에 관하여 연구가 진행되어져 왔다. 그러나, 각종 기계재료들의 마찰·마모특성에 대해서는 어느 정도로 규명이 되었으나 노멀라이징한 구상흑연주철의 마찰·마모특성은 거의 찾아볼 수 없다.

따라서, 본 연구에서는 구상흑연주철의 노멀라이징 온도와 재가열 온도, 표면경도, 기지조직에 따른 마찰·마모특성을 비교·고찰하고 각각의 마찰조건에서 어떤 특성변화를 나타내는가에 대해 평가하여 부품의 적정 사용회전수를 결정하여 줌으로써 부품의 설계에 명확한 자료를 제시하는 것이 본 실험의 목적이다.

## 2. 실험방법

### 2.1 시험편의 제작

마찰·마모 시험편은 공기압축기용 크랭크샤프트의 주물에서 채취하였으며 열처리 후 탈탄을 고려하여 약 2mm의 가공여유를 두고 기계가공한 뒤 열처리를 하였다. 또한, 마찰·마모시험을 위한 표면조도는 크랭크샤프트의 크랭크핀 부분 조도인  $Ra^7) = 0.5\mu m$ 와 동일하게 하기 위하여 모두 입도번호 2000번의 연마지(emery paper)로 연마한 뒤 실험을 행하였다.

한편 실험에 사용된 구상흑연주철 및 상대마모체인 핀의 화학적 성분은 Table.1과 같다.

Table.2에 구조된 구상흑연주철의 기계적 성질을 나타내었다.

Table.1 Chemical composition of specimen and pin

Composition (wt.%)	C	Si	Mn	P	S	Cu	Mg	Ni	Cr
Ductile cast iron	3.54	2.83	0.58	0.03	0.009	0.50	0.03	-	-
Pin(SUS420J2)	0.33	0.78	0.46	0.02	0.008	-	-	0.26	13.3

Table.2 Mechanical properties

Item	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Hardness (H <sub>RB</sub> )
Ductile cast iron	547	2.2	91

## 2.2 실험방법

### 2.2.1 열처리 방법

마모시험에 사용된 시험편은 모두 Fig.1(a)와 같은 열처리 사이클(cycle)대로 910°C에서 30분간 항온유지하여 오스테나이트(austenite)화 한 후 공냉하였다. 재가열 온도는 550°C, 600°C, 650°C로 각각 가열한 후 30분간 항온 유지한 다음 모두 공냉하였다. Fig.1(b)에 재가열 온도와 항온 유지시간을 나타낸 열처리 선도를 나타내었다.

그리고, 시험편의 재가열 온도에 따른 경도의 변화는 마찰·마모시험편에 로크웰 경도기(Rockwell hardness tester)를 사용하여 스케일 B(H<sub>RB</sub>)로 각각 10회 이상 측정하여 최소값과 최대값을 제외한 평균값을 이용하였다.

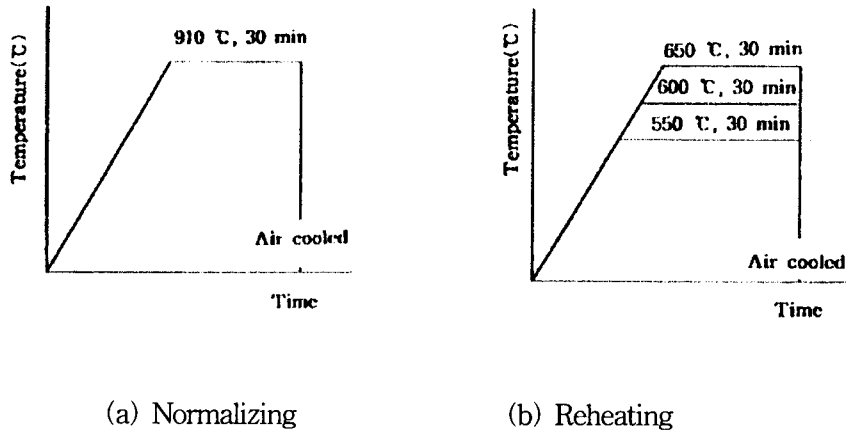


Fig.1 Heat treatment conditions of specimen

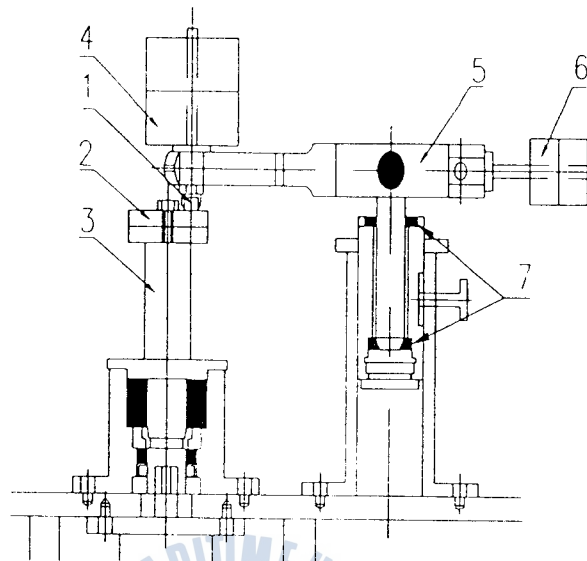
### 2.2.2 마찰·마모시험

건조 마찰·마모 시험을 위하여 사용한 시험기는 pin on disc type의 시험기이며 Fig.2에 마찰·마모시험장치의 개략도를 나타내었다.

마찰·마모시험중에 디스크 핀(disc pin)에 가하는 인가하중은 선박용 공기압축기의 압축압력인  $68.6\text{Mpa}(7\text{kg/cm}^2)$ 을 적용해 주기 위하여 13.55 N으로 일정하게 유지하게 하였다. 구상흑연 주철 표면의 마찰력 및 마찰계수를 측정하는 원리는 구상흑연주철 디스크 시험편과 핀의 마찰에 의해 발생된 미끄럼 마찰력이 밸런스바를 통해 로드셀(load cell)에 전달된 뒤 증폭기(amplifier)를 통해 증폭이 되고 이 힘이 펜레코더(pen recorder)에 기록됨으로써 측정이 된다. 마찰력이 측정되는 개략도를 Fig.3에 나타내었다.

### 2.2.3 마찰·마모 시험편의 마모량 측정

마찰·마모 시험편의 마모량은 측정도 0.1 mg의 정밀천칭(Sartorius社製 YDK01)을 이용하여 마모시험전의 중량과 마모시험후의 시험편 중량을 각각 초음파 세척기로 세척한후 측정하였으며 본시험에서는 최대값과 최소값을 제외한 평균값을 마모량으로 이용하였다.



- |                     |                   |
|---------------------|-------------------|
| 1. Pin              | 5. Balance bar    |
| 2. Disc specimen    | 6. Balance weight |
| 3. Axis of rotation | 7. Ball bearing   |
| 4. Applied weight   |                   |

Fig.2 Schematic illustration of friction and wear test apparatus

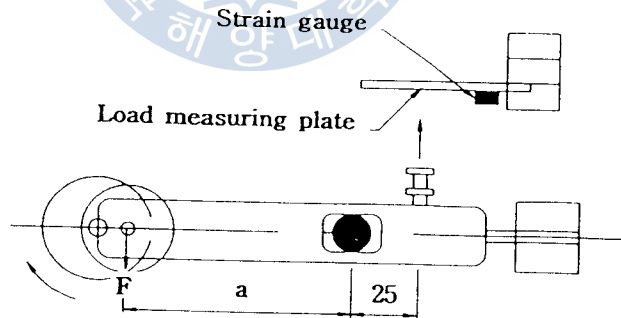


Fig.3 Schematic illustration of friction force

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 열처리에 따른 경도와 기조직의 변화

Fig.4에는 재가열한 시험편의 면적분율을 나타내었다. 퍼얼라이트의 면적분율은 금속현미경에 디지털카메라(digital camera)를 장착하여 촬영한 이미지화일(image file)을 이용하여 동일면적에 대하여 면적분율을 측정하였으며 재가열 온도가 높아짐에 따라 퍼얼라이트의 면적이 감소하는 것을 알 수 있었다. Fig.5에 시험에 사용된 구상흑연주철의 재가열 온도에 따른 경도의 변화와 상대마모재의 경도를 나타내었다.

910℃에서 노멀라이징 한 후 재가열 온도에 따른 경도는 재가열 온도가 높을수록 저하하는 것을 알 수 있는 데, 이는 노멀라이징 후의 기지조직에서 재가열 온도가 높을수록 생성되는 퍼얼라이트의 양이 감소하기 때문이라고 생각된다. 또한, 퍼얼라이트의 층간격 또한 재가열 온도가 증가할수록 넓어지면서 그 형상이 구상 퍼얼라이트(globular pearlite)로 되기 때문이라고 생각된다.

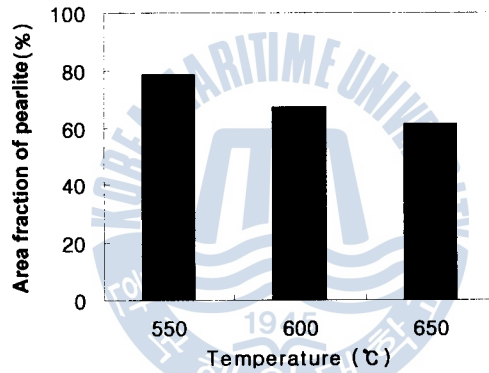


Fig.4 Effect of tempering temperature on the fraction of pearlite area

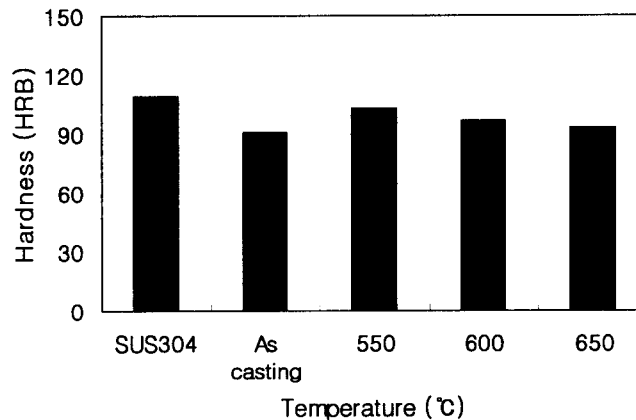


Fig.5 Effect of heat treatment condition on hardness

### 3.2 마찰속도에 따른 마찰계수의 변화

본 실험에서는 재가열 온도를 다르게 한 각각의 마찰·마모 시험편에 인가하중 13.55N을 주고 마찰속도를 0.94m/s, 1.88m/s, 2.83m/s로 변화시켰을 때 마찰계수의 변화를 Fig.6 ~ Fig.8에 나타내었다. Fig.5에 저속인 0.94m/s 일 때 재가열 온도에 따른 마찰계수의 변화를 나타내었다. 저속인 경우 초기 마찰계수가 증가하다가 마찰 거리가 증가함에 따라 마찰계수가 안정화되는 경향을 보이고 있으며, 550°C에서 재가열한 경우 초기 마찰계수 값은 가장 큰 값을 나타내고 있으나 마찰거리와는 별다른 영향이 없이 거의 안정화된 경향을 보이고 있다. 중속과 고속의 경우에도 마찰계수 값들은 재가열 온도와는 별다른 상관없이 안정화되어 가고 있음을 알 수 있으나 마찰 속도가 증가할수록 마찰계수 값은 점차 감소하는 특징이 있다. 이는 저속인 경우에는 마찰온도가 고속인 경우보다 상대적으로 낮아 기계적인 마모가 많이 일어나기 때문으로 생각된다.

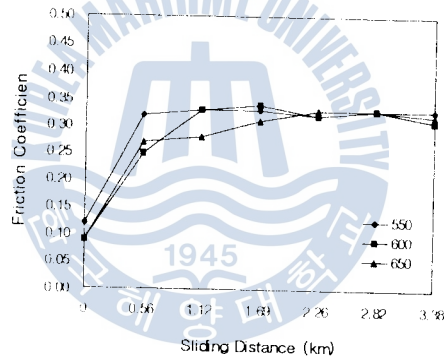


Fig.6 Effect of friction velocity on friction coefficient at 0.94 m/s along with sliding distance

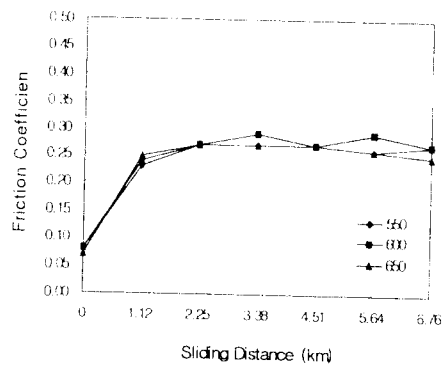


Fig.7 Effect of friction velocity on friction coefficient at 1.88 m/s along with sliding distance

### 3.3 마찰시간에 따른 마찰계수의 변화

Fig.9 ~ Fig.11은 건조 마찰 조건하에서 동일한 인가하중 13.55N으로 마찰속도를 변화시켰을 때 재가열 온도에 따른 마찰계수의 변화를 나타낸 결과이다. 이 결과에 의하면 각각의 재가열 온도에서 마찰속도에 따라 마찰계수의 값은 저속, 중속, 고속의 순서로 낮은 경향을 보이고 있으며, 마찰시간이 증가함에 따라 마찰계수가 점차 안정화 되는 경향을 보이고 있음을 알 수 있다.

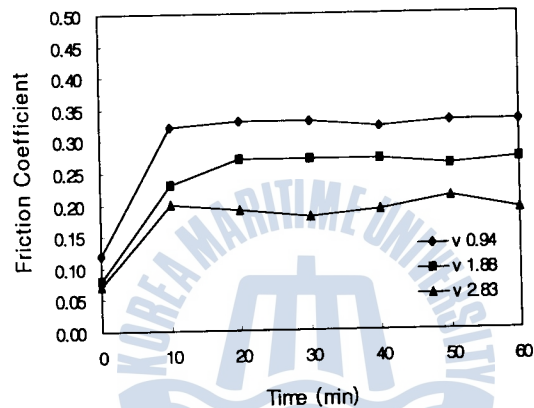


Fig.8 Effect of friction velocity on friction coefficient at 2.83 m/s along with sliding distance

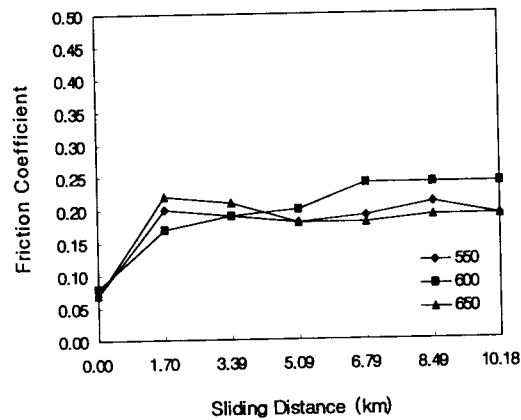


Fig.9 Effect of tempering temperature on friction coefficient at 550°C along with friction time



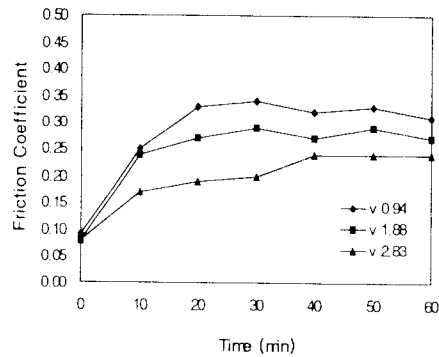


Fig.10 Effect of tempering temperature on friction coefficient at 600°C along with friction time

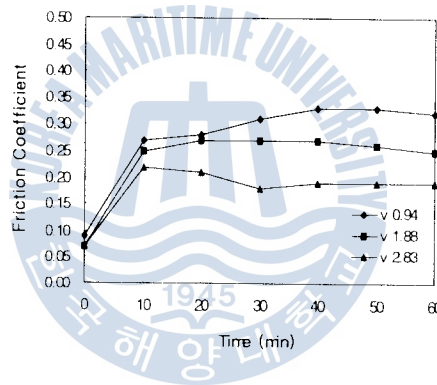


Fig.11 Effect of tempering temperature on friction coefficient at 605°C along with friction time

### 3.4 마찰속도와 재가열 온도에 따른 마모량의 변화

Fig.12에는 재가열 온도와 마찰속도에 따른 마모량의 변화를 나타내었다. 그림에서 마찰속도가 빠를수록 마모량이 감소하는 것을 알 수 있는데 이는 저속의 경우 마찰면에 적갈색의 산화물이 생성되고, 고속에서는 흑색의 산화물이 덮여있는 것과 관계가 있는 것으로 생각된다. 고속에서 마모량이 감소되는 것은 마찰이 진행되면서 중속과 저속에서 보다 마찰온도가 상대적으로 높아지게 됨에 따라 마모분의 산화가 급격히 진행하고 이것이 적갈색에서 흑색의 산화물로 되어 마찰면에서 피막을 형성하며, 소성 유동을 도와주게 되어 양호한 윤활제의 역할을 한다고 보고하고 있다.<sup>8)</sup>

Fig.13에 배율 500배로 촬영한 유색의 산화물과 구상흑연의 마모분을 나타내었다.

즉, 마찰속도가 저속에서 고속으로 높아지면 마찰면의 온도가 상승하게 되고 이에 따

라 마찰면의 마모형태는 응착마모에서 용융마모로 이행되는 것으로 생각할 수 있다. 마찰속도의 변화에 따라 마찰면에 생기는 유색의 산화물에 대하여 Quinn<sup>9)</sup>은 철강재료의 마찰중에 생성되는 적갈색의 산화물은 금속성 입자에서 생겨 그것이  $Fe_2O_3$ 로 구성되어 있으며, 고속, 고하중에서 생성되는 흑색의 산화물은  $Fe_3O_4$ 가 주성분이라고 보고하고 있다. 그리고 재가열 온도가 높아짐에 따라 경도가 감소하기 때문에 응착저항이 감소하여 마모량이 증가하는 것으로 생각된다.

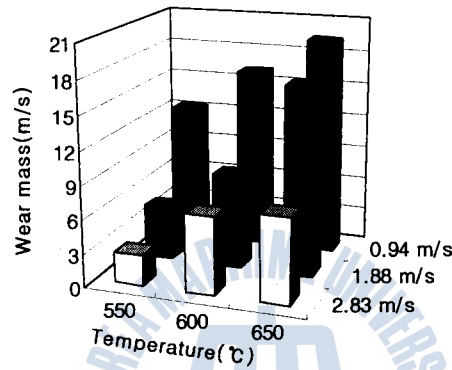


Fig.12 A relationship between wear mass at friction velocity and reheating temperature

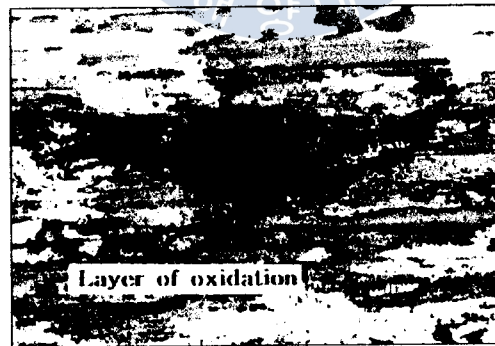


Fig.13 The layer of oxidation and nodular graphite

#### 4. 결론

노멀라이징 열처리한 구상흑연주철의 마찰거리와 시간에 따른 마찰계수의 변화와 마모량의 변화에 대한 실험 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 구상흑연주철을 910°C에서 노멀라이징 한 뒤 재가열온도를 높여줄수록 경도는 점차 감소하였으며 이는 기지조직에서 재가열 온도가 높을수록 생성되는 퍼얼라이트의 양이 감소하기 때문이라고 생각되며, 아울러 퍼얼라이트의 층간격 또한 재가열 온도가 증가할수록 넓어지면서 그 형상이 구상 퍼얼라이트(globular pearlite)로 되기 때문이라고 생각된다.
2. 마찰속도가 저속인 경우, 초기 마찰계수가 증가하다가 마찰 거리가 증가함에 따라 마찰계수가 안정화되는 경향을 보이고 있으며, 마찰속도가 증가할수록 마찰계수 값은 점차 감소하는 특징이 있다. 이는 저속인 경우 마찰온도가 고속인 경우보다 상대적으로 낮아 기계적인 마모가 많이 일어나기 때문으로 사료된다.
3. 각각의 Tempering 온도에서 마찰속도에 따라 마찰계수의 값은 저속, 중속, 고속의 순서로 낮은 경향을 보이고 있으며, 마찰시간이 증가함에 따라 마찰계수가 점차 안정화되는 경향을 보이고 있다.
4. 마찰속도가 빠를수록 마모량이 감소하는 것을 알수 있는데, 고속에서 마모량이 감소되는 것은 마찰이 진행되면서 중속과 저속에서 보다 마찰온도가 상대적으로 높아지게 됨에 따라 마모분의 산화가 급격히 진행하고 이것이 적갈색에서 흑색의 산화물로 되어 마찰면에서 보호피막을 형성하며, 소성유동을 도와주게 되어 양호한 윤활제의 역할을 하기 때문인것으로 생각된다.

### 참고 문헌

- 1) H. Morrogh and W. J. Williams, Iron and steel Inst, 155, pp.321, 1947.
- 2) A. P. Gagnebin, K. D. Millis and N. B. Pilling, Iron Age, 163, pp.76, 1947.
- 3) Allen G. Gray, Metal Progress, 10, pp.83, 1971.
- 4) R. Holm, "Electric Contacts", Hugo, Gerbers Ferlag, pp.214, 1946.
- 5) J. T. Burwell Jr., and C. D. Strang, "On the Empirical Law of Adhesive Wear", J. App. Phys., 23-1, pp.18~25, 1952.
- 6) M. Kerridge and J. K. Lancaster, "The Stages in a Process of Service Metallic Wear", Proc. Roy Soc., A-236, pp.250~255, 1956.
- 7) 박홍식, 오스탬퍼링한 저합금구상흑연주철의 기계적 성질 및 마멸특성에 관한 연구, 한양대학교, 1989.
- 8) 日本工業規格, 表面粗さ-定義及び表示, JIS B 0601, 1994.
- 9) J. F. J. Quinn, The Effect of Hotspot Temperatures on the Unlubricated Wear of Steel, ASLE Trans., 10, pp.158~168, 1967.

