

〈論 文〉

## 오스텨퍼링 處理된 球狀黑鉛鑄鐵의 乾燥磨滅特性에 관한 研究

康明順\* · 全泰玉\*\* · 金亨資\*\*\* · 朴興植\*\*\*\*

(1988年 1月 22日 接受)

### A Study on the Dry Wear Characteristics of Austempered Ductile Cast Iron

Myung-Soon Kang, Tae-Ok Jun, Hyung-Ja Kim and Heung-Sik Park

**Key Words :** Wear Rate(磨滅率), Specific Wear Rate(比磨滅率), Adhesion(凝着), Mild Wear(輕磨滅), Severe Wear(重磨滅), Retained Austenite(殘留오스테나이트), Volume Fraction(體積分率)

#### Abstract

This paper is studied to know wear mechanism in variation of austempering temperature and holding time of austempered ductile cast iron against mating material SM45C hardened by heat treatment. The wear tests were carried out by rubbing the annular surface of two test pieces in dry sliding friction. The wear mechanism was investigated by scanning electron microscopy and the retained austenite volume fraction was investigated by X-ray diffractometer. The experimental results show that the wear characteristics depend largely on the oxidation of the testing materials which is influenced by the sliding velocity and distance. The retained austenite has a negative effect during frictional contact because it has increased severe wear by softened surface layer. It is shown experimentally that hard metals have lower frictional resistance and hence the resistance to adhesion is increased due to stronger interatomic linking bonds and increase in the surface energy.

#### 1. 序 論

球狀黑鉛鑄鐵은 强度와 硬度가 비교적 높고 黑鉛의 존재에 의하여 被削性, 耐磨滅性이 좋은 관계로 自動車, 産業機械 및 工作機械等の 부품과 같이 매우 광범위하게 사용되고 있으나 延性 및 靱성이 부

족하다. 이러한 機械的性質은 黑鉛의 形狀 및 基地組織에 의하여 변화된다고 알려져 있다<sup>(1)</sup>. 따라서 球狀黑鉛鑄鐵의 機械的性質을 改善하기 위하여서는 基地組織을 강화시킬 필요가 있다. 基地組織을 강화시키는 방법으로서 는 니켈, 몰리브덴 및 구리 등의 合金元素添加에 의한 방법과 熱處理에 의한 방법이 있다. 熱處理방법으로서 는 恒溫熱處理인 오스텨퍼링(austempering)이 있으며 球狀黑鉛鑄鐵의 基地組織을 베이나이트(bainite)로 하여 強靱하게 하는 방법이다<sup>(2,3)</sup>. 오스텨퍼링 처리된 球狀黑鉛鑄鐵은 鋼에 匹敵할 정도의 强度와 靱성이 얻어진다

\* 정회원, 한양대학교 공과대학 정밀기계공학과

\*\* 정회원, 동아대학교 공과대학 기계공학과

\*\*\* 정회원, 부산공업대학 기계공학과

\*\*\*\* 정회원, 한양대학교 대학원

는 사실은 잘 알려져 있지만<sup>(4)</sup>, 주철은鑄造한 그대로 사용한다고 하는 개념이 강하여 지금까지 거의 공업적으로 이용되지 않았다. 그런데 最近 美國, 핀란드 및 中國 등에서 주로 耐磨減部品으로서 自動車 後車軸의 링 기어(ring gear), 피니인기어(pinion gear)에 이르기까지 이鑄鐵이 사용되기 시작하여 그 결과 경제적으로도 鍛鋼品보다 오히려 유리하다고 보고되어<sup>(5)</sup>, 自動車工業部門에서 注目되고 있다. 그러나 그 기본적인 耐磨減特性은 아직 충분히 解明되어 있지 않은 상태이다. 따라서 本研究에서는 오스템퍼링 처리된 球狀黑鉛鑄鐵의 오스템퍼링 處理溫度와 維持時間을 변화시킨 후 大氣中の 乾燥미끄럼 摩擦實驗을 하여 耐磨減特性을 검토하는 것을 목적으로 하였다.

2. 實驗方法

2.1 實驗材料

本 實驗에 사용된 材料는 一般球狀黑鉛鑄鐵溶湯에 Fe-99%Ni, Fe-60%Mo 및 99.9%Cu를 첨가하

Table 1 Chemical composition of the testing materials

| Material          | Composition(wt %) |      |      |      |      |      |      |      |      |
|-------------------|-------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|                   | C                 | Si   | Mn   | P    | S    | Cu   | Mo   | Ni   | Mg   |
| Ductile cast iron | 3.50              | 2.75 | 0.23 | 0.03 | 0.02 | 0.34 | 0.23 | 1.37 | 0.05 |
| SM45C             | 0.47              | 0.31 | 0.73 | 0.02 | 0.02 | -    | -    | -    | -    |

Table 2 Heat treatment and mechanical properties of the testing materials

| Material                      | Heat treatment                | Mechanical properties                  |                |               |
|-------------------------------|-------------------------------|--|----------------|---------------|
|                               |                               | Tensile strength (kg/mm <sup>2</sup> ) | 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            | 311           |
| SM45C                         | 840°×0.5hr.→W.Q.              | —                                      | —              | 658           |
|                               | 840°×0.5hr.→200°C×0.5hr.W.Q.  | 105                                    | 13             | 496           |
|                               | 840°C×0.5hr.→300°C×0.5hr.W.Q. | 99                                     | 15             | 406           |

※W.Q: Water Quenching

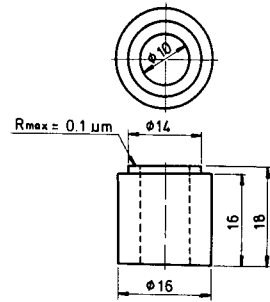


Fig. 1 Shape and dimension of specimen

여 溶解한 후 直徑 22mm, 길이 230mm의 충분한 押湯이 있는 生砂型에 鑄入된 것이며, 相對材料는 市販의 SM45C의 煖봉을 사용하였다. 이들의 化學成分은 Table 1과 같다.

그리고 兩材料는 Fig. 1과 같이 실린더型으로 切削加工하여 熱處理하였으며 熱處理사이클(cycle)과 機械의性質은 Table 2와 같다. 熱處理에 사용한 鹽은 오스테나이트처리를 위하여 55%NaCl-45%KCl의 中性鹽을, 低溫區間에서는 55.2%KNO<sub>3</sub>-44.8%NaNO<sub>2</sub>의 低融點鹽을 사용하였다. 精確한 溫度를 측정하기 위하여 디지털溫度計를 사용하여 실험온도의 精確도를 ±2°C의 범위내로 유지시키면서 행하였다.

Fig. 2는 球狀黑鉛鑄鐵의 熱處理前狀態에서의 顯微鏡組織을, Fig. 3은 各 오스템퍼링 溫度에서의 顯微鏡組織을 나타낸 것이다. 이는 試驗片을 熱間마운팅하여 研磨한 후 에틸알콜에 全容量中 4% 피크린酸과 1%窒酸을 混合하여 腐食液으로 사용하였다.

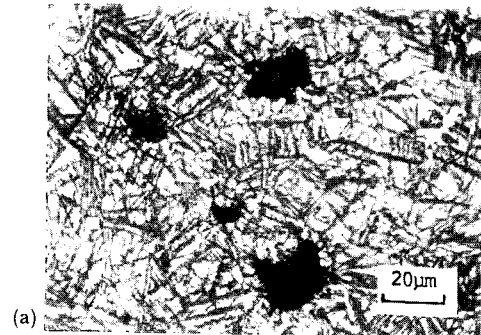


Fig. 2 Optical micrographs of as-cast ductile cast iron( $\times 600$ )

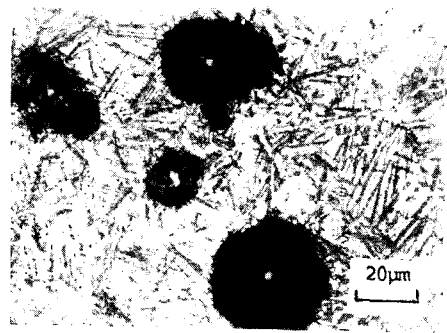
球狀黑鉛鑄鐵은 多量의 炭素를 함유하고 있어 그 炭素가 大部分 球狀黑鉛의 형태로 존재하고 있으며 이것이 오스테나이트화 가열중에 炭素의 저장소로 하여 基地組織에 炭素를 擴散시킨다. 따라서 오스템퍼링한 球狀黑鉛鑄鐵의 基地組織은 針狀 또는 板狀의 베이나이트와 오스테나이트(austenite)와의 微細한 混合組織으로 되어 페라이트(ferrite)相의 형태와 오스테나이트相과 페라이트相의 量의 비율이 오스템퍼링溫度와 時間에 따라서 機械的性質이 變化한다<sup>(6)</sup>. 恒溫變態중에 針狀 페라이트가 오스테나이트에서 성장하고 동시에 炭素는 페라이트에서 周邊의 오스테나이트 內로 들어간다 따라서 變態가 진행됨에 의해 오스테나이트는 多量의 炭素를 함유하게 되며 球狀黑鉛鑄鐵은 硅素(Si)를 많이 함유하여 炭化物의 形成을 억제하므로 炭素量이 높은 오스테나이트가 殘留하게 된다<sup>(2~6)</sup>. 그러므로 Fig. 3에서 A의 基地組織은 微細한 針狀의 下部 베이나이트(lower bainite)를 가지고 있으며 약간의 殘留 오스테나이트가 보이고 있음을 알 수 있으며, B,C는 微細한 針狀의 下部베이나이트와 粗大한 針狀의 베이나이트로 구성되어 있으며 殘留오스테나이트의 量이 增加하는 것을 볼 수 있다. D에서는 板狀의 上部 베이나이트(upper bainite)의 형태를 가지고 있음을 알 수 있다.

## 2.2 摩擦實驗

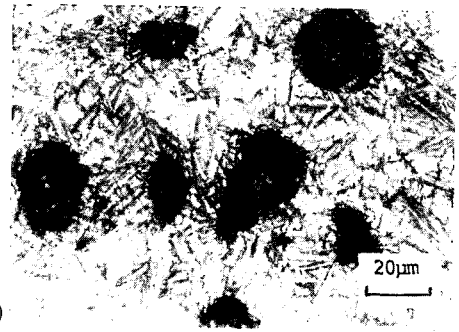
摩擦實驗은 Fig. 4와 같이 摩擦試驗機를 제작하여 사용하였다. Fig. 1과 같은 兩試驗片을 에머리 페이퍼(emery paper) 1200番으로 研磨한 후 摩擦面粗度を  $R_{max}=0.1\mu m$ 로 하고 즉시 超音波洗淨을 하여 乾燥시켜 相對材인 SM45C를 下部에 고정하고 實驗材料를 上部에 附着하여 實驗條件에 따라서



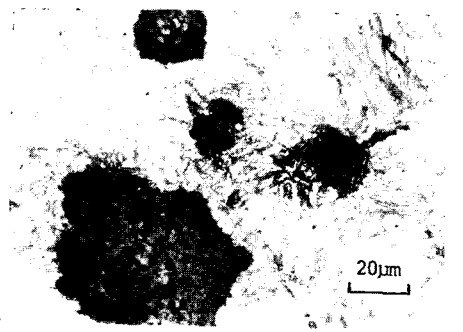
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 3 Optical micrographs of austempered ductile cast iron( $\times 600$ )

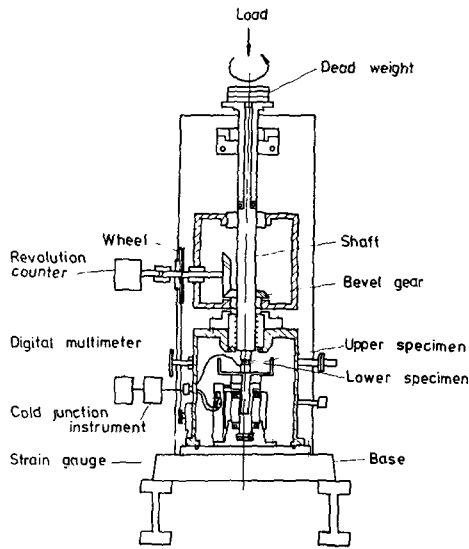


Fig. 4 Schematic diagram of experimental apparatus

廻轉시켜 그 端面이 순수미끄럼 摩擦이 되도록 하였다. 實驗後에는 摩擦面에 附着된 磨滅粉除去를 위하여 다시 超音波洗淨後 乾燥시켜 感度 0.1mg의 디지털天秤으로 그 重量減少量을 측정하였다. 摩擦面平均溫度는 相對材인 SM45C의 摩擦面에서 下方 2mm에 지름 1mm의 구멍을 뚫어 지름 0.3mm의 C.A(Chromel-Alumel)熱電對의 양끝을 點溶接하여 Fig. 4에서와 같이 冷接點시켜 디지털溫度計로 측정하였다. 各 實驗에서 平均미끄럼거리는 300m로 일정하게 하였고, SM45C는 200°C에서 템퍼링 (tempering)한 것을 사용하였다. 그리고 磨滅機構를 조사하기 위하여 摩擦面觀察은 走査電子顯微鏡 (S.E.M)을, 殘留오스테나이트體積分率의 측정에는 X線廻折試驗機 (X-ray diffractometer)를 이용하였으며 베이나이트의 體積分率의 측정은 포인트카운팅 (point counting)法<sup>(7,8)</sup>으로 행하였다.

3. 實驗結果 및 考察

3.1 磨滅의 速度特性

Fig. 5는 C材의 경우 荷重  $P$ 를 一定하게 하고 미끄럼速度  $V$ 를 변화시켰을 때의 磨滅率  $W$ 를, Fig. 6은 比磨滅率  $W_s$ 를 나타내며, Fig. 7에는 摩擦面平均溫度  $T_m$ 을 표시하였다. Fig. 6에서 미끄럼速度  $V$ 가 0.2m/sec 附近의 低速에서, 1.2m/sec 以上の 高速에서  $W$ 는 적고, 그 中間速度인 0.7

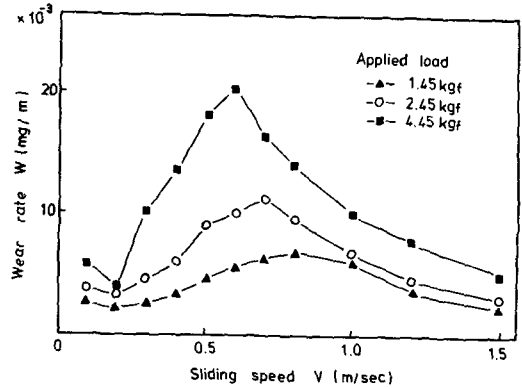


Fig. 5 Variation of wear rate and sliding speed for specimen C

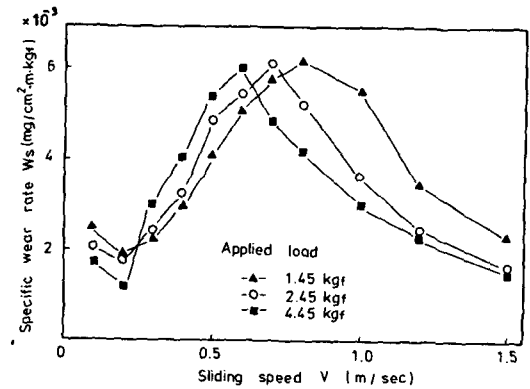


Fig. 6 Variation of specific wear rate and sliding speed for specimen C

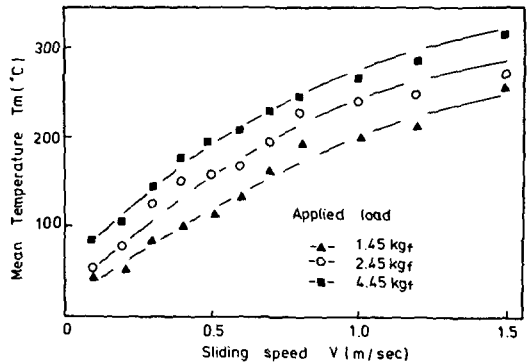


Fig. 7 Variation of mean temperature and sliding speed for specimen C

m/sec附近에서 極大値를 나타내고 있다. 그리고 荷重  $P$ 가 상승함에 따라서  $W$ 는 증가함과 더불어  $W$ 의 極大値를 표시하는  $V$ 가 低速側으로 移行하는 것을 알 수 있다. 0.2m/sec 附近的 低速域에서는 미세한 磨滅粉이 즉시 酸化하여 赤褐色의 酸化鐵微粉이 되어 摩擦面의 凹凸에 덮혀 金屬凝着을 방지하여 輕磨滅이 되므로  $W$ 는 적고, 中間速度인 0.7m/sec 附近에서는 酸化反應速度가 磨滅速度를 따라가지 못하므로 酸化鐵의 生成은 극히 적어 兩金屬間의 微少돌기부의 연속적인 凝着으로 이들의 剪斷에 의하여 摩擦面은 金屬光澤을 나타내며 重磨滅이 되어  $W$ 는 極大가 되며, 1.2m/sec 以上인 高速域에서는 미끄름速度의 증가에 따라 摩擦熱이 증대하여 酸化反應速度가 磨滅速度보다 빠르게 되어 다시 磨滅粉의 酸化가 進行되어 黑色의 酸化鐵微分으로 輕磨滅이 되어  $W$ 는 低減된다고 생각된다. 그리고 Quinn<sup>(9)</sup>은 鐵鋼材料가 摩擦中 低速, 低荷重에서의 磨滅粉은 金屬性粒子에서 생겨 그것이  $Fe_2O_3$ 가 되며, 高速, 高荷重에서는  $Fe_3O_4$ 가 된다 하였고 Holm<sup>(10)</sup>은 凝着磨滅에 대하여 摩擦하는 兩金屬이 荷重  $P$ 를 받아 接觸하고 있을 때 表面의 微小突起의 先端에서 金屬凝着이 생기지만 實接觸面積  $A$ 는 材料의 硬度를  $H$ 라 하면

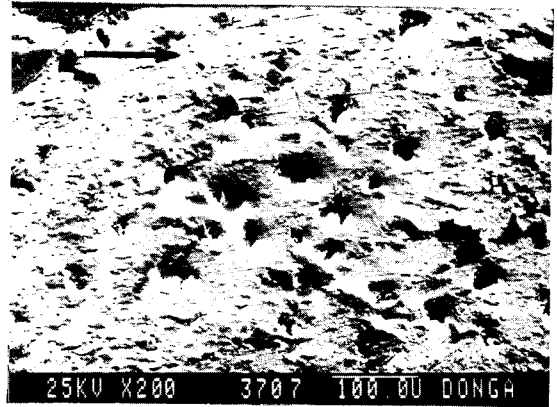
$$A = P/H^{(10)} \quad (1)$$

의 관계가 성립하고 磨滅量  $W$ 는 다음式으로 表示된다.

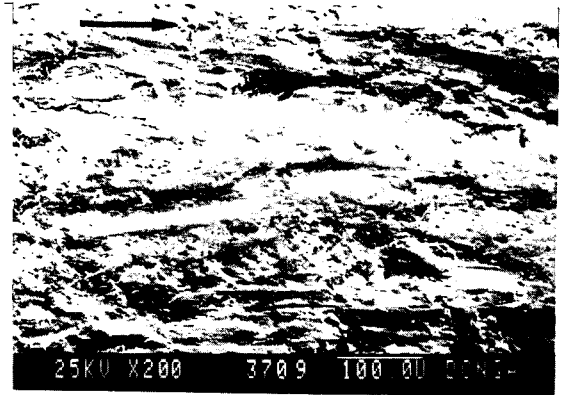
$$W = \alpha \cdot P \cdot L/H^{(10)} \quad (2)$$

여기서  $\alpha$ 는 材料常數이며  $L$ 은 미끄름 거리이다.  $W$ 는  $H$ 가 일정하면  $P$ 에 比例하는 것을 알 수 있다. Fig. 8은  $V$ 를 변화시켰을 때의 摩擦面을 나타낸 것으로서 (a)와 (c)에서 赤褐色酸化物과 黑色의 酸化物이 摩擦面全領域에 분포되어 있고 黑鉛이 流出된 흔적과 굵직한자국을 볼 수 있지만, (b)에서는 摩擦面に 격렬한 凹凸面과 깊은 홈이 미끄름方向(→표)으로 나타나 있는 重磨滅狀態인 것을 알 수 있다. 그리고  $P$ 가 증가하면 式(2)에 의하여  $W$ 는 커지고,  $W$ 가 極大가 되는  $V$ 는  $P$ 에 따라 변화하지만 Fig. 6에서와 같이  $W_s$ 의 極大値는 거의 一定値로 된 것은  $W$ 가 荷重에 비례한다는 것을 알 수 있다. 또한  $V$ 가 0.8m/sec 以上에서  $W_s$ 가  $W$ 와는 반대로 감소하고 있는 것은 兩金屬의 摩擦面實接觸部溫度(閃光溫度)가 높기 때문이라고 생각된다.

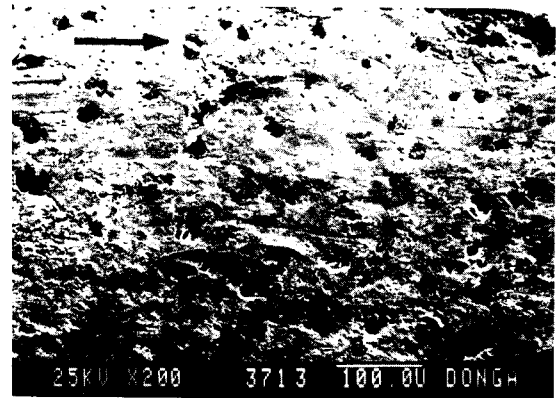
摩擦面平均溫度  $T_m$ 은 Fig. 7에서와 같이  $P$ 와  $V$ 가 증가 할 수록  $T_m$ 은 점차적으로 상승하고 있



(a)  $P=2.45kgf, V=0.2m/sec$



(b)  $P=2.45kgf, V=0.7m/sec$



(c)  $P=2.45kgf, V=1.5m/sec$

Fig. 8 Photographs of the rubbed surfaces for specimen C

다.  $W$ 의 極大値를 나타내는  $T_m$ 은  $P$ 에 따라 다르나 대체로 200°C 정도 일 때 인것을 알 수 있다. 그러나  $T_m$ 은 摩擦面下方 2mm에서 측정한 온도이지만 閃光溫度(flash temperature)는 이보다

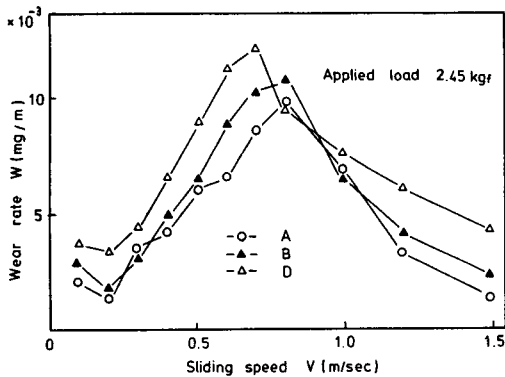


Fig. 9 Variation of wear rate and sliding speed for specimen A,B,D

더 높은 온도가 될 것이라 생각되며, 岡林<sup>(11)</sup>은 이 온도는 300~400°C가 된다 하였다.

Fig. 9는 A,B 및 D材의 경우 上述한 바와 같은 實驗條件에서의 W를 표시한 것이다. 各試材의 W는 Fig. 5에서의 C材와 유사한 경향을 나타내고 있으나 D材가 대체로 크고 A材가 적다는 것을 알 수 있다. 基地組織이 D材는 板狀의 上部베이나이트이고 A材는 미세한 針狀의 强度和 硬度가 높은 下部베이나이트이므로 式(2)에서와 같이 H가 증가하면 W는 반대로 감소 한다는 것을 알 수 있다.

3.2 磨滅의 相對材硬度特性

Fig. 10은 相對材硬度 Hv를 변화시켰을 때의 W를 나타낸 것이다. 相對材硬度的 영향은 V에 따라 크게 다르지만 W는 Hv가 클수록 감소하고 있고, 특히 W가 極大가 되는 V에서 현저하다는 것을 알 수 있다. W를 지배하는 材質的因子는 硬度

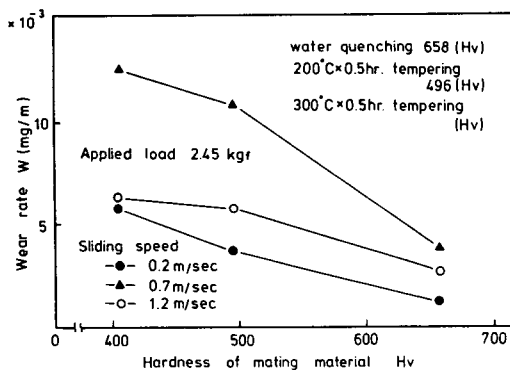


Fig. 10 Variation of wear rate and hardness of mating material for specimen C

뿐 만은 아니지만 대체로 磨擦하는 兩材料를 경하게 할 수록 W는 적어지고 兩材料를 경하게 할 수 없는 경우에는 한쪽만을 경하게 함으로써 W는 상당히 감소시킬 수 있다는 것을 알 수 있다. 그러나 式(2)에서는 實驗材의 硬度만을 논하고 相對材硬도에 의하여 W가 변하는 本實驗에는 적용 할 수 없다고 생각된다. 金屬은 硬度가 증가할 수록 原子間結合이 강하고 表面에너지가 증가하므로 金屬間의 凝着抵抗이 커져<sup>(12)</sup> 低磨擦이 되며, 磨擦하는 相對材의 硬度가 증가하면 輕磨滅領域이 넓어지고 重磨滅領域은 좁아진다<sup>(13)</sup>는 것처럼 相對材硬度的 영향은 W를 변화시키는 因子의 역할을 한다는 것을 알 수 있다.

3.3 磨滅의 基地組織特性

오스텨퍼링 처리한 球狀黑鉛鑄鐵의 基地組織은 多相混合組織이지만 基地組織의 體積分率의 변화에 따른 W를 알기 위하여 오스텨퍼링維持時間을 변화시켰다. Table 3에는 C材의 各相의 體積分率을 표시하였고 이때의 W는 Fig. 11에 나타내었다. 各 V에서 마르텐사이트의 體積分率이 감소할수록, 베이나이트와 殘留오스테나이트의 體積分率이 증가할 수록 W는 증가하지만 오스텨퍼링 維持時間이 40分일 때, 즉 殘留오스테나이트량이 最大(24%)가 될 때 極大值를 나타내며, 베이나이트體積分率이 80%以上이 되면 거의 변화가 없다는 것을 알 수 있다. 鐵鋼材料의 담금질(quenching)시에 나타나는 殘留오스테나이트가 磨滅에 미치는 영향에 대해서는 殘留오스테나이트량이 40%일 때 臨界應力以上에서는 疲勞크랙의 核生成과 傳播를 방해하므로 正의 效果가 있다<sup>(14)</sup>고 하였지만, 本實驗에서는 그와같은 현상은 찾을 수 없었고 오스텨퍼링 처리된 球狀黑鉛鑄鐵의 安定한 殘留오스테나이트는 軟質組織으로서 磨擦中 表面層을 軟化시키므

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

| Structure (%)      | Holding time(min) |      |      |      |      |      |      |
|--------------------|-------------------|------|------|------|------|------|------|
|                    | 2                 | 10   | 20   | 40   | 60   | 120  | 240  |
| Martensite         | 96.8              | 32.1 | 18.7 | 6.0  | 2.4  | —    | —    |
| Bainite            | 2.1               | 52.4 | 60.3 | 70.0 | 80.1 | 84.8 | 98.5 |
| Retained austenite | 1.1               | 15.5 | 21.0 | 24.0 | 17.5 | 15.2 | 1.5  |

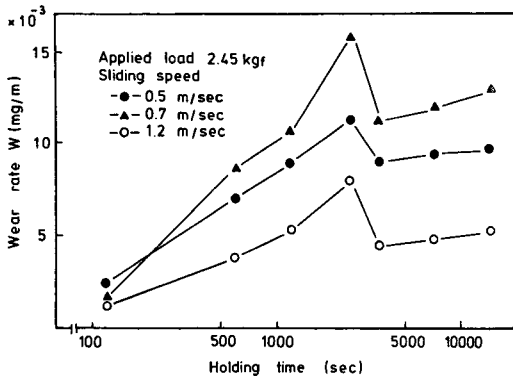


Fig. 11 Variation of wear rate and austempering holding time for specimen C

로  $W$ 에 미치는 영향은 크다고 생각된다. 그리고 베이나이트는 強度和 靱성이 뛰어난 組織이므로 80%以上이 되면 磨滅에 큰 영향이 없다고 생각된다.

3.4 磨滅의 미끄름 距離特性

Fig. 12는 미끄름距離  $L$ 을 변화시켰을 때 各試材 A, B, C 및 D材의  $W$ 를 나타낸 것이다. 各試材는 대체로  $L$ 이 300m까지는  $W$ 가  $L$ 에 比例하며 急激히 증가하지만 그 以上の 거리에서는 서서히 증가하고 있다.  $L$ 이 300m까지는 金屬間凝着에 의하여 塑性變形이 進진되어 摩擦面에는 酸化物的 生成이 극히 적은 重磨滅이 되며, 그 以上에서는  $L$ 의 증가와 더불어 閃光溫度의 상승으로 인하여 磨滅粉이 酸化물이 되어 이것이 摩擦面에 덮혀 凝着을 방지하여 輕磨滅이 되기 때문이라 생각된다. 重磨滅에서 輕磨滅로 轉移하는 臨界미끄름距離  $L_c$ 는 대체로 300m정도인 것을 알 수 있으며  $L_c$ 는 摩擦條件과 相對材硬度에 따라 다르지만 같은 摩擦條件

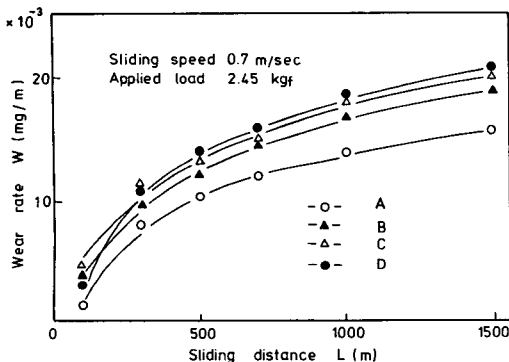


Fig. 12 Variation of wear rate and sliding distance

이라면 相對材硬度증가에 따라 짧아진다<sup>(13)</sup>. 그리고 A材의  $W$ 가 적은 것은 前述한 바와 같이 基地組織과 殘留오스테나이트의 體積分率(7.2%)이 적기 때문이라 생각된다.

4. 結 論

오스템퍼링 처리한 球狀黑鉛鑄鐵의 오스템퍼링溫度와 維持時間에 따른 磨滅特性을 알기 위하여 相對材인 熱處理된 SM45C를 사용하여 各實驗條件을 변화시키면서 乾燥미끄름實驗을 한 結果는 다음과 같다.

- (1) 미끄름速度를 變化시켰을 때 低速과 高速에서는 酸化鐵에 의하여 輕磨滅이 되며, 中間速度附近에서는 金屬間凝着에 의하여 重磨滅이 된다. 그리고 A材가 基地組織이 미세하므로 磨滅率이 적다.
- (2) 相對材硬度가 경할 수록 金屬間凝着抵抗의 증대로 磨滅率은 감소한다.
- (3) 基地組織內的 殘留오스테나이트의 體積分率의 增加는 摩擦面表層을 軟化시킴으로써 磨滅率은 증가한다.
- (4) 臨界미끄름距離까지는 凝着에 의한 塑性變形으로 重磨滅이 되며 그 以上에서는 酸化물에 의하여 輕磨滅이 된다.

參 考 文 獻

- (1) Sidney H. Avner, 1974, "Introduction to Physical Metallurgy." McGraw-Hill, 2th ed., pp. 423~460.
- (2) J.F. Janowak, and P.A. Morton, 1984, "A Guide to Mechanical Properties Possible by Austempering 1.5% Ni-0.3% Mo Ductile Iron." AFS Trans. 120, pp. 489~498.
- (3) T.N. Rouns, and K.B. Rundman, 1984, "On the Structure and Properties of Austempered Ductile Cast Iron," AFS Trans. 121, pp. 815~827.
- (4) J. Dodd, 1978, "High Strength-High Ductility Ductile Irons." Modern Casting. M-344, pp. 1~8.
- (5) 和出昇, 上田倣完, 1984, "球狀黑鉛鑄鐵의 強じん化のためのオーステンパー處理條件", 鑄鐵의 磨耗と材料特性, 鑄物第24委員會鑄物分科會, pp. 192~193.
- (6) 塩川忠, 1980, "鑄鐵造と熱處理", 綜合鑄物センタ, pp. 29~30.
- (7) Yoshiyuki Tomita and Kunio Okabayashi, 1983, "Met Trans.," A Vol., 14A, p. 485.
- (8) Yoshiyuki Tomita and Kunio Okabayashi, 1985,

"Met Trans.," A Vol., 16A, p. 73.

(9) T.F.J.Quinn, 1985, "鋼の摩耗における表面酸化の影響", 潤滑, 第30巻, 第5號, pp. 312~316.

(10) R. Holm, 1958, "Electric Congres Handbook", 3rd ed., springer Berlin, pp. 377~378.

(11) 岡林邦夫, 川本信, 1981, "摩擦面温度と摩耗", 潤滑, 第26巻, 第6巻, pp. 377~378.

(12) M.O.A.Mokhtar, 1982, "The Effect of Hardness

on the Frictional Behavior of Metals", Wear, 78, pp. 297~304.

(13) 江川清美, 1981, "軟鋼の摩耗特性", 潤滑, 第26巻, 第6號, pp. 426~428.

(14) J. Siepak, 1982, "The Influence of Contact Stress on the Wear of a Carburized Steel Case with a High Content of Retained Austenite", Wear. 80, pp. 301~305.