

論 文

乾式條件下에서 灰鑄鐵의 로링磨耗에 관한 研究

崔昌鈺\* · 金東潤\*\*

Study on the Wear Characteristics of Gray Cast Iron under Dry Rolling Condition

Chang Ock CHOI\*, Dong Yun KIM\*\*

Abstract

This study has been carried out to investigate into the difference of rolling life and rolling wear characteristics for various gray cast iron under unlubricated dry rolling condition by amsler type wear test with 9.09% sliding.

The results obtained from this study are summerized as follows:

- 1) It has been found that the amount of rolling wear id decreased when tensile strength and hardness are low, and then the rolling life up to generation of abnormal wear is conspicuously increased.
2) At the given condition the amount of rolling wear has been found to decrease as carbon equivalent of gray cast iron increases and resistance of crack propagation is an important factor on improvement of wear characteristics.
3) The amount of rolling wear is increased with increasing rolling revolution and wear of gray cast iron under dry rolling condition is characterized by three modes; initial wear, stationary wear and abnormal wear.
4) It has been found that the amount of rolling wear is increased with increasing maximum compressive stress and extremely increased when maximum compressive stress is over 59.1kg.f/mm

1. 序 論

鑄鐵은 다른 金屬材料에 비하여 우수한 耐磨耗性을 갖고 있기 때문에 耐磨耗性材料로 많이 사용되고 있으며 또한 鑄鐵은 黑鉛의 形態 및 分布狀態와 基地組織의 變化등에 의해서 여러가지 性質이 變化되는 것으로 알려져 있다.

金屬材料의 磨耗現象을 解析하는 方法은 여러가지가 있으나 이 중 磨擦에 의한 磨耗現象을 解析하는 方法으로서는 Archard의 理論<sup>3)</sup>과 N.P.Suh<sup>4)</sup>의 Delamination theory를 열거할 수 있다. Archard의 理論에 의하면 磨耗量은 作用荷重과 미끄럼거리에

비례하고 硬度에 反比例하는 것으로 보고 되어 있다. 그러나 Archard의 理論은 많은 사람들의 實驗結果에 의하여 현재는 그 타당성이 부족한 것으로 證明되었 다. Suh의 Delamination theory는 轉位の 移動에 의 하여 表面에는 낮은 轉位密度가 形成되고 hard particle에 의한 pile-up된 轉位로 void 및 crack의 形成과 傳播에 의하여 層狀의 磨耗가 일어난다고 하였다. 이들 磨耗現象에 있어서 鑄鐵의 乾式 슬라이딩 磨耗는 黑鉛의 變形이 抑制되기 때문에 磨耗特性이 대폭 개선되어지며 또한 疲勞特性이 현저히 向上되는 것으로 알려져 있다.

本 研究에서는 工業用 材料로 많이 사용되고 있는 片狀黑鉛灰鑄鐵에 對하여 反復荷重을 받는 로링磨耗인 Amsler type 磨耗試驗機에 의하여 乾式磨耗試驗

\* 東亞大學校 工科大學教授
\*\* 韓國重工業(株) (前 東亞大學校 大學院生)

을 실시하여 灰鑄鐵의 材質別에 의한 로링磨耗特性을 檢討 하였다.

2. 實驗方法

2.1 試料

本 實驗에 使用한 材料는 熔銑爐 (용량 0.5 ton/hr) 에 의하여 熔解한 용융금속을 鑄込溫度 1350℃ 에서 生型인 試驗片用鑄型에 下注法으로 鑄込하였으며, 鑄放品의 크기는 KS D 4301에 規定한 直徑 45mm, 길이 300mm인 灰鑄鐵品의 標準試驗片으로 製作 하였다.

製作한 試驗片의 化學成分은 Table 1과 같으며, Table 2는 機械的性質을 試驗한 結果로서 引張強度 및 硬度는 鑄放狀態의 材料를 KS B 0801에 規定한 規格으로 加工하여 測定하였다. 또한 試驗片의 鑄放狀態의 顯微鏡組織은 Photo 1에 나타내었다.

Table 1. Chemical composition of gray cast iron for specimens (wt%)

Comp. Specimen	C	Si	Mn	P	S	Cr	C.E
GC 15	3.30	2.66	0.65	0.057	0.026	-	4.19
GC 20	3.27	2.38	0.69	0.059	0.054	-	4.06
GC 25	3.25	1.92	0.78	0.055	0.060	-	3.89
GC 30	3.22	1.87	0.79	0.065	0.064	0.57	3.84

Table 2. Mechanical properties of gray cast iron for specimens

Specimen	Tensile strength (kg·f/mm <sup>2</sup> )	Hardness (H <sub>B</sub> )
GC 15	12.7	143
GC 20	18.8	171
GC 25	23.6	190
GC 30	27.3	219

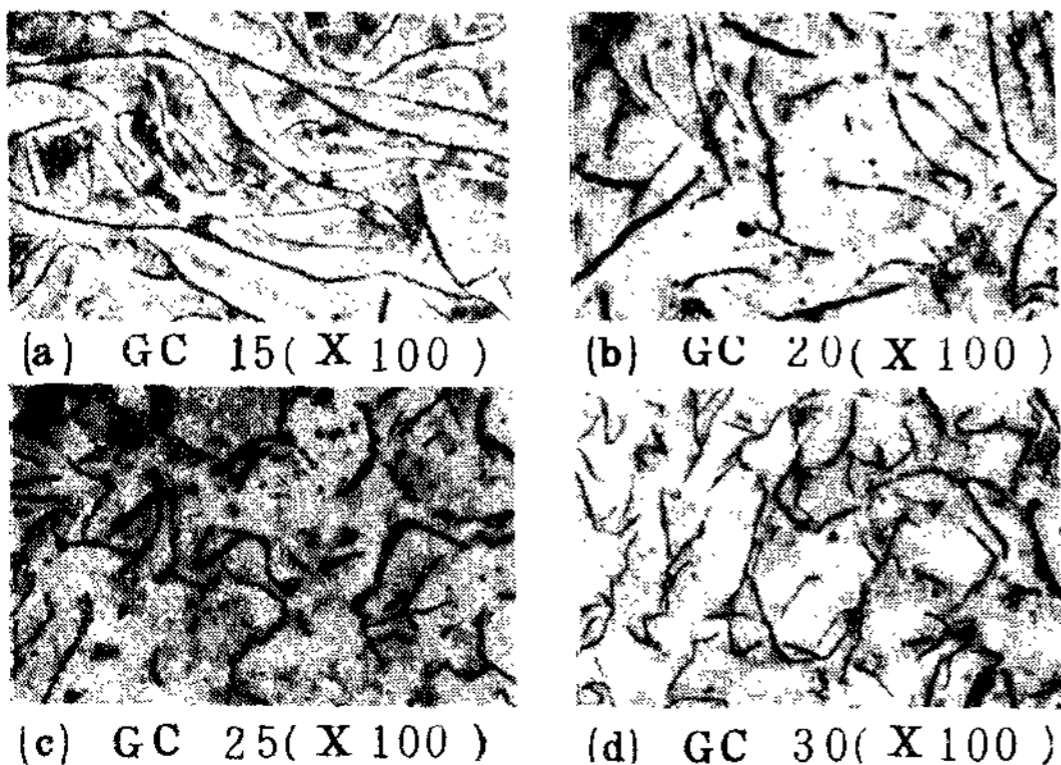


Photo.1 Microstructure of gray cast iron for specimens. (0.2% nital etched)

2.2 實驗方法

Fig 1은 本 實驗에 使用한 磨耗試驗片의 크기를 나타내며 Photo 2는 Amsler type 磨耗試驗機 (日本 Shimadzu Seisakushio 製, Model: type 2)를 表示 한다.

灰鑄鐵의 磨耗試驗片은 鑄放狀態에서 Fig.1에 表示한 尺寸로 加工 하였으며, 表面狀態는 研磨機를 使用하여 最大表面粗度 R<sub>max</sub> = 4~5μ 정도로 精密加工을 하였다.

Fig.2는 試驗片의 磨耗試驗狀態를 表示한 것으로서 下側 試驗片은 高炭素鋼 (C : 0.53, Si : 0.27, Mn : 0.69, P : 0.024, S : 0.020)를 Fig.1의 磨耗試驗片과 동일한 尺寸로 加工하여, 加工時 形成된 잔류응력을 제거하기 위하여 550℃에서 30分間 加熱後 爐冷시킨 다음, 鹽浴爐에서 820℃로 30分間 유지하여 水冷하고 160℃에서 1時間 tempering 하여 空冷시켜 硬度는 Hv 800, 表面狀態는 R<sub>max</sub> = 4~5 μ 정도로 하여 相對試驗片으로 使用하였으며 슬립율 (摺動比)은 Fig.2에 表示한 바와 같이 上下의 試驗片의 回轉數의 차이가 9.09%를 이용하였다.

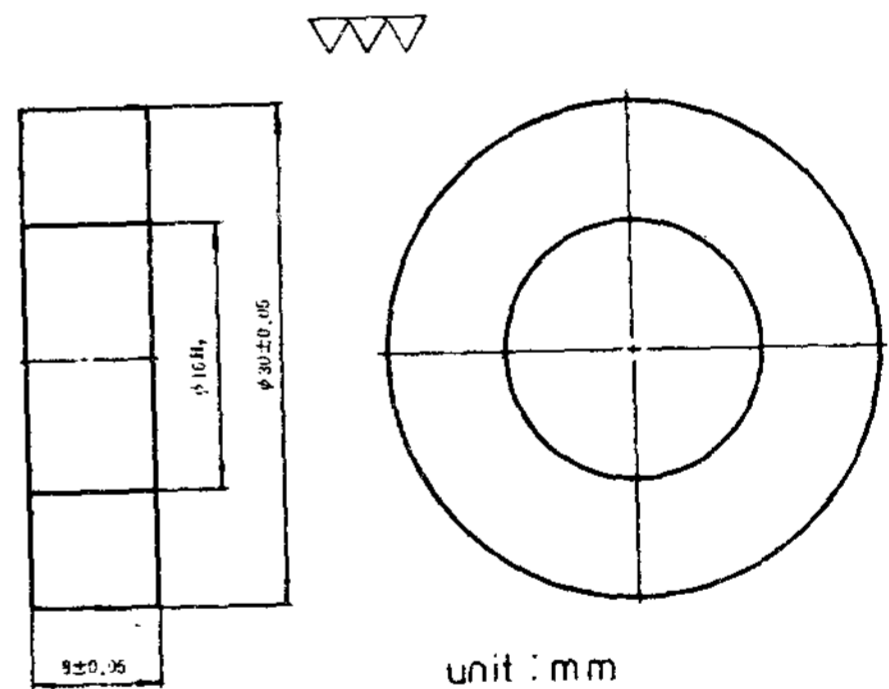


Fig.1 Specimen of Amsler type wear test

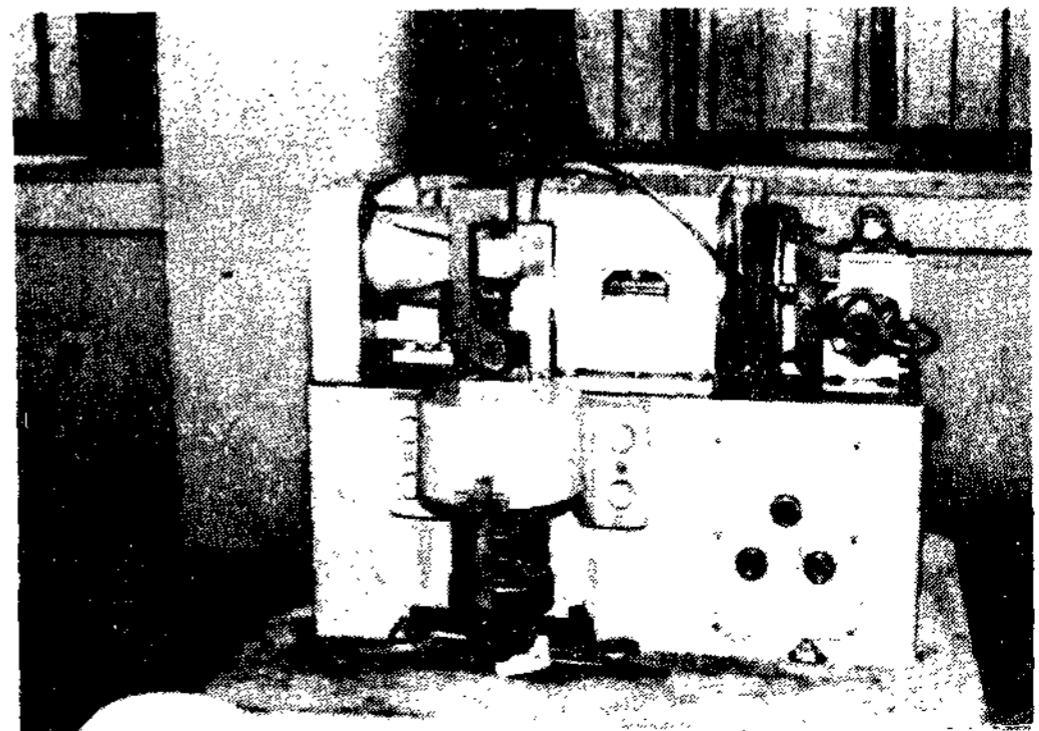


Photo.2 The Shimadzu-Nishihara metal abrasion testing machine type 2.

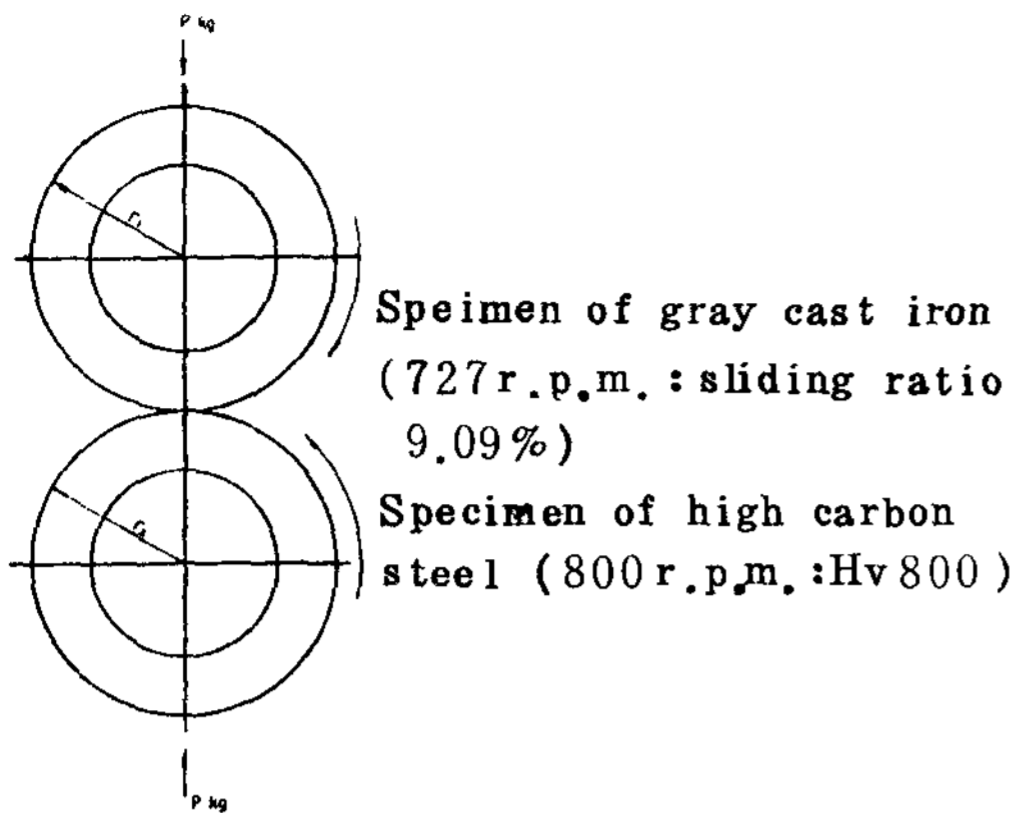


Fig. 2 Schematic representation of Amsler type wear test

壓縮荷重  $P$ 와 接觸面內의 最大壓縮應力  $\sigma_{max}$  과의 사이에는 다음과 같은 관계<sup>9)</sup>가 있다.

$$\sigma_{max} = 0.418 \sqrt{\frac{P \cdot E}{b} \left( \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right)}$$

여기서

$\sigma_{max}$  : Maximum compressive stress : kg·f/mm<sup>2</sup>

$P$  : Load : kg

$E$  : Modulus of elasticity of test specimen : 20,000 kg·f/mm<sup>2</sup>

$r_1$  : Radius of upper side test specimen : 15 mm

$r_2$  : Radius of lower side test specimen : 15 mm

$b$  : Width of test specimen : 8 mm

윗식으로부터  $\sigma_{max}$  을 산출하여 最大壓縮應力으로 表示하였다.

高炭素鋼을 熱處理 후 磨耗面의 表面狀態는 酸化膜으로 덮히나 그 두께는 대단히 적어 磨耗의 初期단계에서 제거되며 또한 연마에 의해서 試驗片의 폭方向에 直線狀이 表面에 나타나는 것을 피하기 위하여 本實驗에서는 熱處理한 狀態로 使用하였다. 한편 이들 酸化膜은 最大 表面粗度  $R_{max}$  에는 거의 영향이 없는 것으로 관찰되었다.

磨耗試驗에 의한 磨耗量은 試驗片의 最初의 무게와 所定의 回轉後 무게와의 차이를 自動指示 化學天秤으로 測定하였으며 灰鑄鐵은 無潤滑 조건에서 brake나 clutch 등의 素材로 널리 使用되고 있으므로 本實驗에 있어서 磨耗試驗은 거의 20℃의 溫度와 30~60%의 濕度 條件하의 大氣中에서 乾式으로 실시하였다.

磨耗試驗後의 試驗片의 pit發生과 磨耗面의 表面狀態를 Zoom stereo microscope (日本 Olympus Co.製)와 주사전자현미경 (SEM) (日本 Hitach Co.製)으로 관찰하였다.

### 3. 實驗結果 및 考察

#### 3.1 로링回轉數와 磨耗量의 關係

슬립을 9.09%의 로링 磨耗試驗에 對하여 相對試驗片의 回轉數와 灰鑄鐵의 總磨耗量과의 關係를 最大壓縮應力  $\sigma_{max} = 41.8 \text{ kg·f/mm}^2$  및  $\sigma_{max} = 54.0 \text{ kg·f/mm}^2$ 의 경우에 對해서 測定한 結果를 Fig. 3 및 Fig. 4에 表示하였다. Fig. 3에 나타낸 바와 같이 最大壓

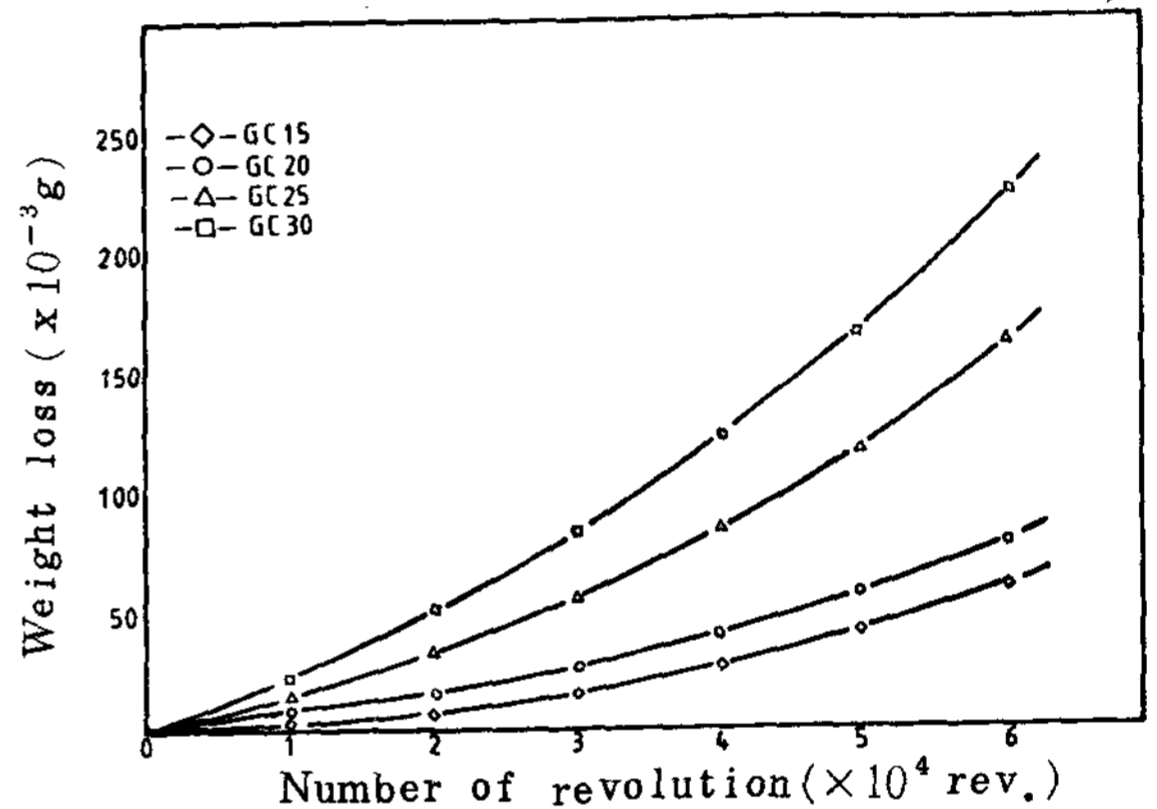


Fig. 3 Relation between weight loss and the number of revolution for various specimens of gray cast iron, maximum compressive stress 41.8 kg·f/mm<sup>2</sup> and sliding ratio 9.09%.

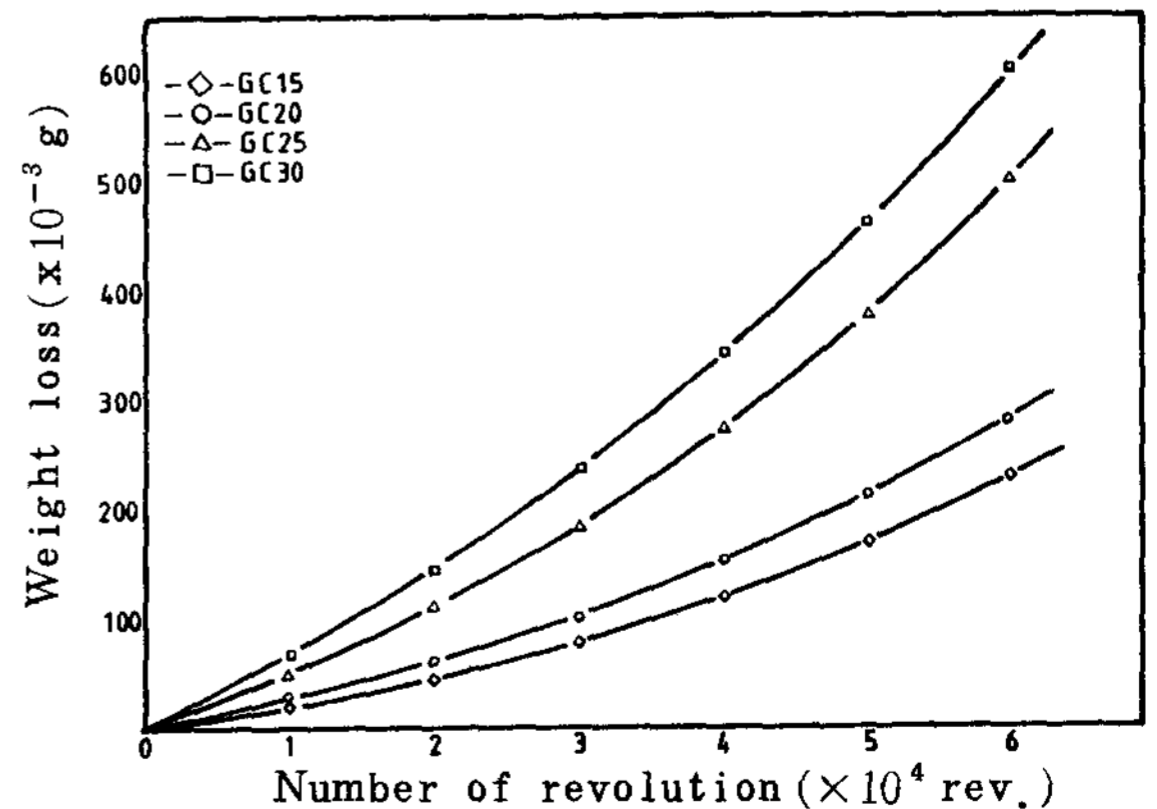


Fig. 4 Relation between weight loss and the number of revolution for various specimens of gray cast iron, maximum compressive stress 54.0 kg·f/mm<sup>2</sup> and sliding ratio 9.09%.

縮應力  $\sigma_{max} = 41.8 \text{ kg}\cdot\text{f}/\text{mm}^2$ 인 경우 灰鑄鐵의 引張強度가 증가 할 수록 磨耗量이 증가하여 GC 30이 GC 15보다 많은 磨耗를 나타내었다. 또한 回轉數가 증가함에 따라 磨耗量이 증가하는 경향을 나타내었다. 한편 Fig.4에 보인 最大壓縮應力  $\sigma_{max} = 54.0 \text{ kg}\cdot\text{f}/\text{mm}^2$ 의 경우,  $\sigma_{max} = 41.8 \text{ kg}\cdot\text{f}/\text{mm}^2$ 와 동일한 경향을 나타내며 最大壓縮應力 증가는 灰鑄鐵의 材質에 의한 磨耗量의 차이가 현저함을 알 수 있었다. 따라서 引張強度가 증가하면 磨耗量이 증가하는 現象을 나타내었다.

一般的으로 材料의 硬度가 높으면 耐磨耗性이 우수하다는 것은 周知의 사실이나 本 實驗에서 相對試驗片을 高炭素鋼으로 한 灰鑄鐵의 경우 引張強度 및 硬度가 높은 GC 30이 GC 15보다 磨耗量이 많은 이유는 灰鑄鐵의 乾式로링 磨擦에서 組織中の 黑鉛이 固體 潤滑劑로서 作用하기 때문에 Photo.1에서 보인 바와 같이 黑鉛의 形態가 크며 黑鉛量이 많은 引張強度 및 硬度가 낮은 GC 15가 오히려 GC 30보다 더 좋은 耐磨耗性을 갖게 되며 또한 基地의 소성유동에 따른 黑鉛粒의 박리가 억제되는 효과도 있기 때문이라 思料된다.

슬립을 9.09%의 로링磨耗에 있어서 로링回轉數와 磨耗率과의 關係를 最大壓縮應力  $\sigma_{max} = 41.8 \text{ kg}\cdot\text{f}/\text{mm}^2$  및  $\sigma_{max} = 54.0 \text{ kg}\cdot\text{f}/\text{mm}^2$ 에 對하여 Fig.5 및 Fig.6에 表示하였다.

磨耗率은 1,000回轉當의 磨耗量으로 表示 하였다. Fig.5 및 Fig.6에서 보인 바와 같이 磨耗率의 變化는 回轉數 증가에 따라서 初期磨耗가 存在하며 다음은

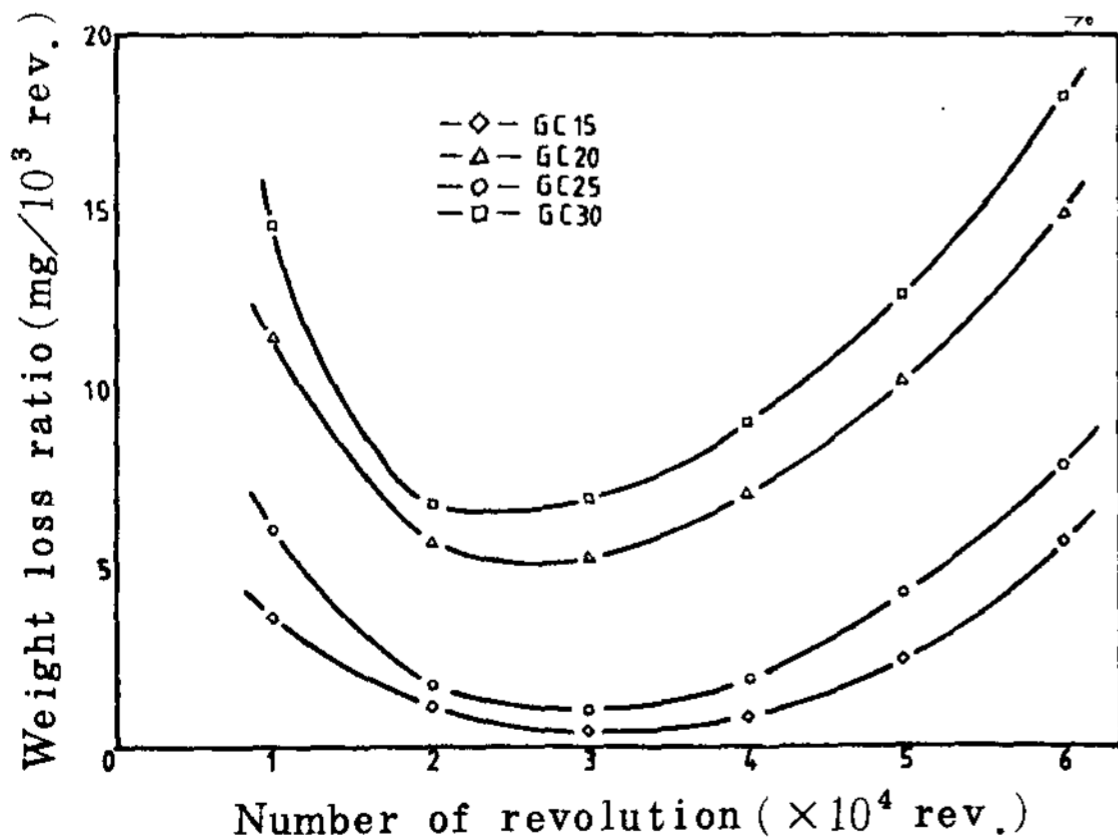


Fig.5 Relation between weight loss ratio and the number of revolution for various specimens of gray cast iron, maximum compressive stress  $41.8 \text{ kg}\cdot\text{f}/\text{mm}^2$  and sliding ratio 9.09%.

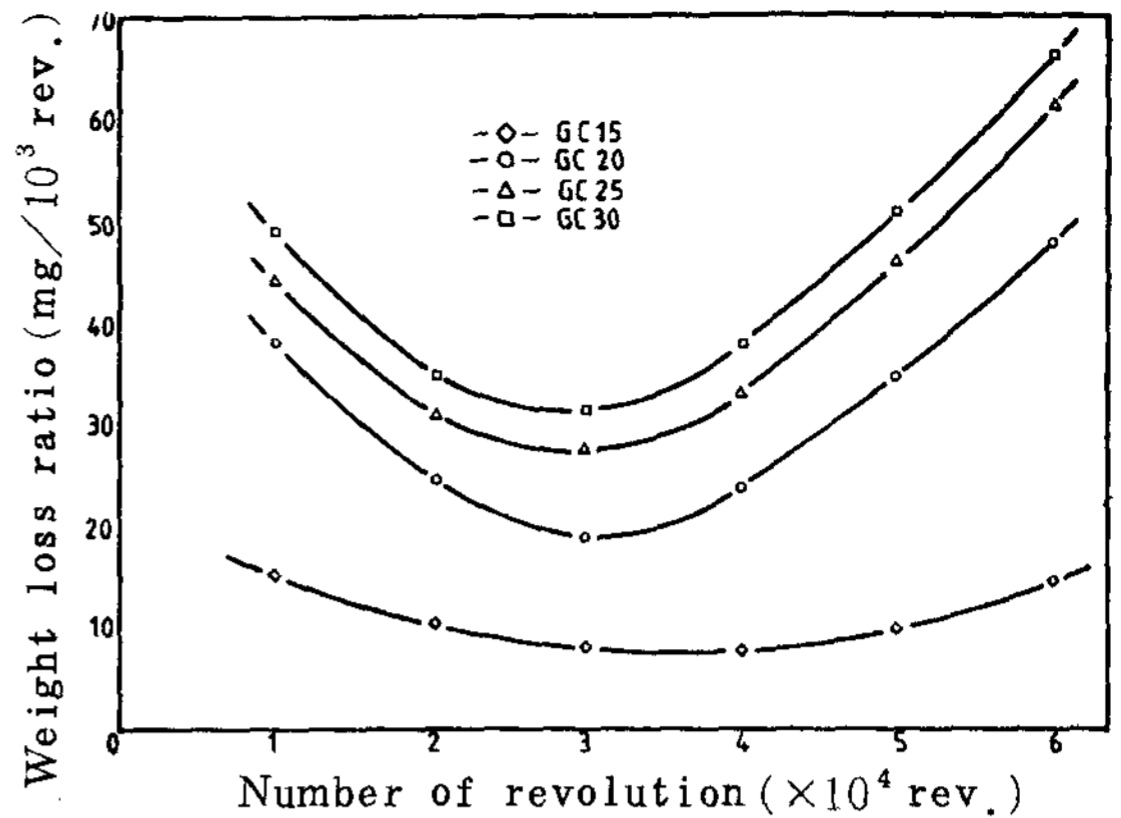


Fig.6 Relation between weight loss ratio and the number of revolution for various specimens of gray cast iron, maximum compressive stress  $54.0 \text{ kg}\cdot\text{f}/\text{mm}^2$  and sliding ratio 9.09%.

磨耗量이 낮은 一定한 定常磨耗가 있는 中間段階가 있으며 그후 異常磨耗를 表示하는 급격한 磨耗率의 증가를 나타내었다. 즉 이는 磨耗의 初期段階에 있어서는 磨耗面은 다갈색의 酸化鐵  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  및  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 로 뒤덮혀 이것이 磨耗面의 剝離를 防止하여 金屬凝着을 防止하기 때문에 磨耗는 적지만 中間段階에서는 酸化物的의 生成이 認定되지 않고 凝着部의 機械的 破壞가 일어나는 보다 激烈한 磨耗로써 磨擦面은 金屬光澤이 있는 形態를 나타내는 것으로 사료된다.

最大壓縮應力  $\sigma_{max} = 41.8 \text{ kg}\cdot\text{f}/\text{mm}^2$ 인 경우 GC 15, GC 20, GC 25, GC 30의 순으로 定常磨耗에서 磨耗率이 현저히 낮으며 또한 異常磨耗가 發生하는 로링回轉數의 경우는 GC 30보다 GC 15가 더 낮은 磨耗率을 보이고 있었다.

最大壓縮應力을  $\sigma_{max} = 54.0 \text{ kg}\cdot\text{f}/\text{mm}^2$ 로 증가 시키면 GC 30의 경우 定常磨耗率이 증가 하며 異常磨耗 發生까지의 回轉數는 급격히 감소하였다. 또한 GC20의 경우 異常磨耗 發生까지의 로링回轉數가 현저히 低下하고 있음을 알 수 있었다.

接觸壓力이 크게 되면 磨擦面의 溫度가 上昇하고 接觸面의 熔着性이 증가해서 磨耗는 증가하지만 보다 이상의 溫度가 되면 接觸面은 이미 熔融狀態에 달해서 磨耗는 감소하였다. 따라서 溫度에 의한 磨耗量에는 極大值가 存在하는 경우가 있으며 黑鉛形態가 작은 것은 壓力의 영향에도 敏感하게 反應을 보이는 것 같았다.

급격한 磨耗를 表示한 異常磨耗는 實際로는 試驗片 表面의 剝離에 따른 pit發生에 의한 것도 있었다.

pit發生은 그 部品의 運轉을 決定的으로 不可能하게 하기 때문에 pit發生까지의 로링回轉數가 그 試驗條件에서 壽命을 表示하게 되었다. 즉, pit發生까지의 壽命은 로링磨耗에 對한 耐磨耗性을 表示하는 重要한 特性이 된다.

3.2 로링回轉數와 壽命과의 關係

Fig.7은 슬립을 9.09%의 로링試驗에 對한 pit發生 까지의 壽命과의 關係이다. 특히 GC 15에 있어서는 pit發生 까지의 壽命은 最大壓縮應力( $\sigma_{max}$ )에 거의 영향을 받지 않는 結果를 나타내었다.

GC 15가 GC 30보다 높은 荷重에서 壽命이 긴 것이 明確하여 灰鑄鐵의 相對試驗片을 高炭素鋼으로 使用하였을 경우 黑鉛의 形態가 큰 것이 로링 磨耗에 큰 效果를 미치는 것으로 나타나고, 로링壽命에도 좋은 效果가 있는 것을 알 수 있었다.

Pit發生 樣相을 알기 위해 接觸面을 Zoom Stereo Microscope로 관찰했으며, 각 材質의 磨擦面의 狀態를 調查하기 위해서 주사전자현미경으로 觀察하여 각각 Photo.3, Photo.4 및 Photo.5에 나타내었다.

Photo.3은 슬립을 9.09%의 로링磨耗에 있어서 GC 15의 磨擦面의 양상을 나타낸 것으로 明確한 흠집이 存在하고 있으며 이러한 흠집은 壓縮에 의해서 생긴 剪斷力과 슬립율에 따라 생긴 剪斷力의 反復으로 成長하여 이것에 따라 pit가 發生되는 것으로 생각되며 로링에 의해서 表面에 생긴 微小한 흠집이 슬립에 의해서 表面層과 함께 剝어졌다.

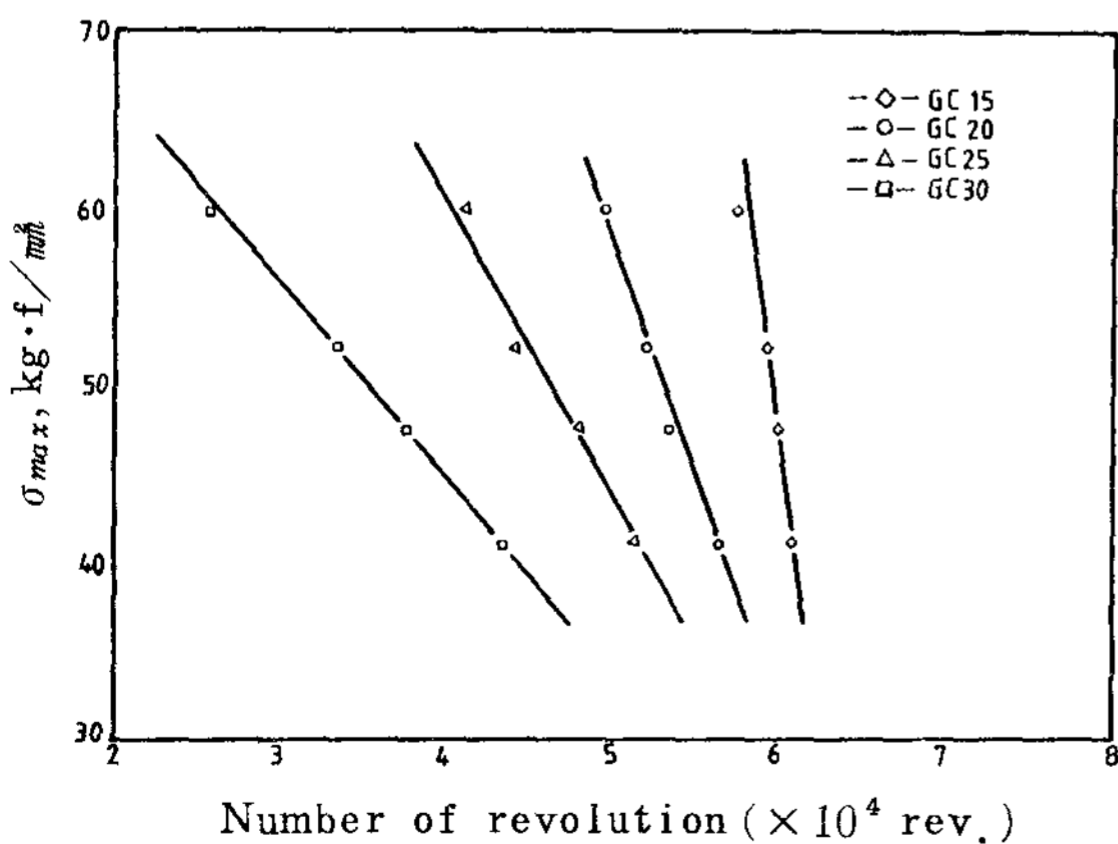
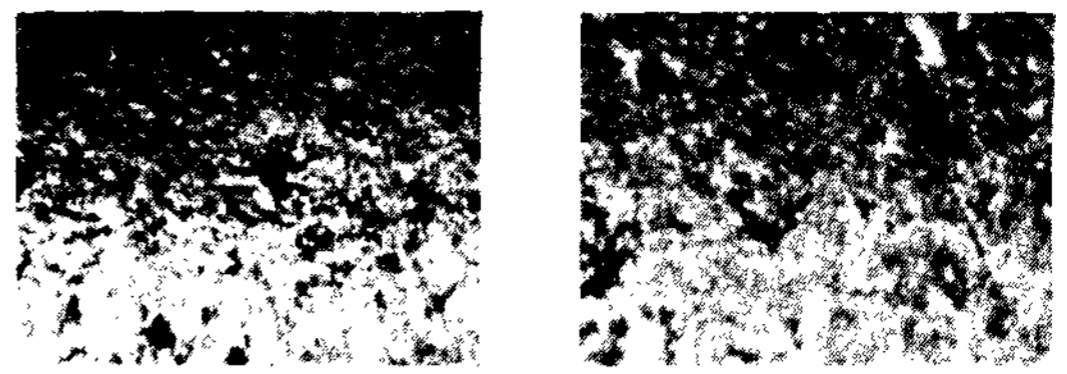
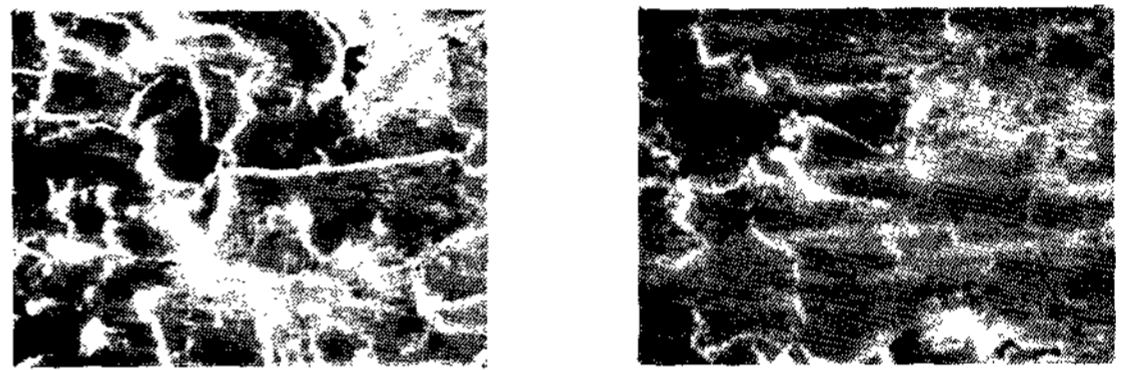


Fig.7 Relation between rolling life and maximum compressive stress up to pit generation for various specimens of gray cast iron in rolling wear test of sliding ratio 9.09%.

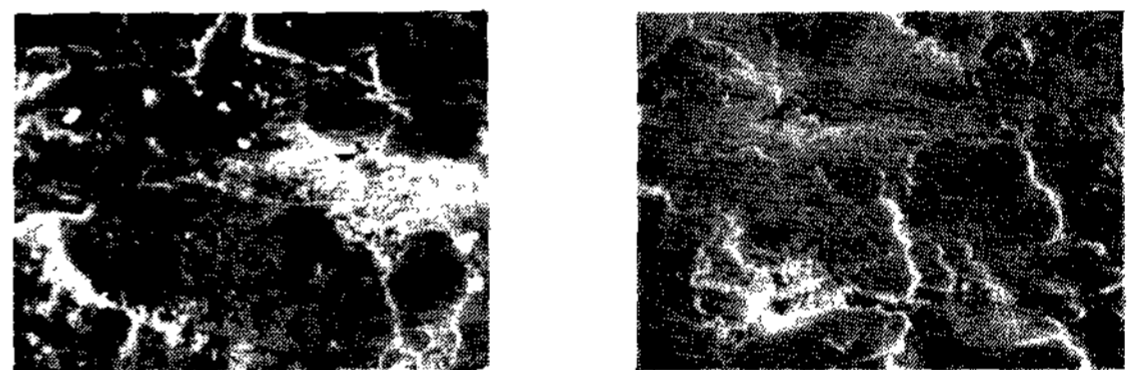


(a) The initial state of pit generation. (X 20)  
(b) The final state of pit generation. (X 20)

Photo.3 Wear surfaces of GC 15 for gray cast iron up to pit generation for rolling wear test as viewed in the zoom stereo microscope, maximum compressive stress 41.8 kg·f/mm<sup>2</sup> and sliding ratio 9.09%.

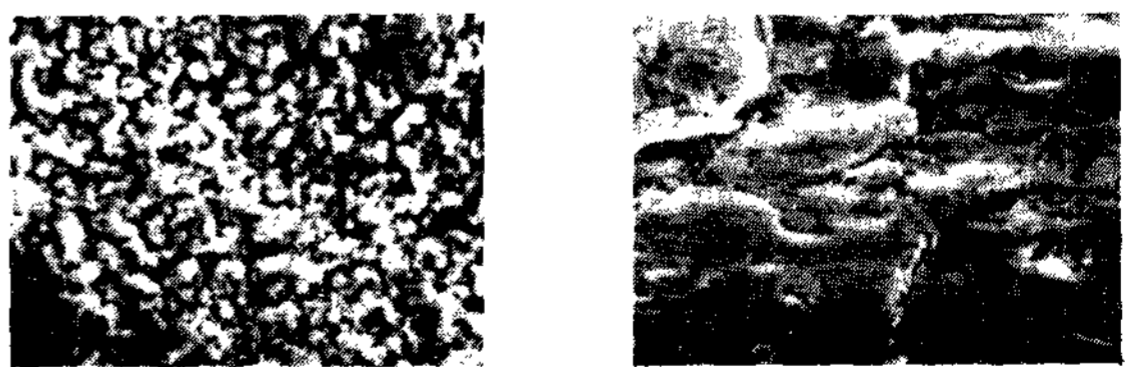


(a) GC 15 (X 200) (b) GC 20 (X 200)



(c) GC 25 (X 200) (d) GC 30 (X 200)

Photo.4 Wear surfaces of various specimens for gray cast iron at identical condition as viewed in the scanning electron microscope.



(a) Oxidized wear debris (X 1000) (b) Elongated crack (X 1000)

Photo.5 Wear surfaces of GC 15 for gray cast iron as viewed in the scanning electron microscope.

Photo.4의 주사전자현미경 사진은 同一條件下에서 磨耗面의 表面狀態를 나타낸 것이며 (a), (b), (c) 및 (d) 순으로 表面이 거칠어 지는 樣相을 보이며 黑鉛粒으로 생각되는 흠집이 차츰 커지는 現象을 나타내어

이는 GC 15 가 GC 30 보다 磨耗特性이 우수한 것으로 추정된다.

Photo. 5 의 (a) 는 初期磨耗狀態의 酸化磨耗粉 (oxidized wear debris) 을 나타낸 것이다. 한편 基地와 黑鉛과의 境界에서는 黑鉛에 따라 균열(crack) 이 發生하며 그것에 따라 基地가 破壞 脫락하는 樣相이 인정된다. (b) 는 균열 (crack) 發生을 나타낸 것이며 最大返復應力이 높을 수록 균열은 黑鉛粒을 選擇해서 傳播되는 것으로 생각되며 이것은 Suh<sup>4)</sup>의 Delamination theory 로 설명되어 친다. 또한 이는 Hirth<sup>16)</sup>, Mugharhi<sup>17)</sup> 및 Fourie<sup>18)</sup> 와 이외에 많은 사람들<sup>19~21)</sup> 에 의해 증명 되었다.

磨耗率은 Delamination theory 에 의한 磨耗과정 이 예상되는 것으로 軟한 表面에 대한 硬한 表面이 sliding 할 때의 total wear 는 다음과 같이 表示 된다.

$$W = N_1 (S/S_{o1}) A_1 h_1 + N_2 (S/S_{o2}) A_2 h_2$$

- 여기서 A : delamination sheet 의 평균면적
- h : 이탈판의 두께
- S : 미끄럼거리
- N : 각층의 磨耗板의 총수
- So : 임계미끄럼거리
- subscript 1 과 2 : 軟한 材料 및 硬한 材料

(S/So) 는 除去되는 層의 수와 같다.

Hirth 와 Lothe<sup>22)</sup> 에 의해 제안된 表面에 平행한 전위에 作用하는 image shear stress 의 대략의 값은 다음과 같다.

$$\sigma_i = Gb/4\pi(1-V)h$$

- 여기서  $\sigma_i$  : image shear stress
- G : shear modulus
- b : burgers vector
- V : poisson's ratio

이 값은 friction stress 에 방향은 반대이고 表面으로부터 轉位가 소멸될 때의 表面 energy 의 變化이다.<sup>23)</sup> 그러므로  $\sigma_i$  대신 friction stress  $\sigma_f$  를 도입하면 다음과 같이 변환된다.

$$h = Gb/4\pi(1-V)\sigma_f$$

각 이탈판 平均表面積은 단위 asperities 의 實接觸面積과 비례한다고 가정하므로

- 여기서 A : 이탈판의 평균 表面積
- Ar : asperity 의 實接觸面積
- C : 비례상수

Gupta 와 Cook<sup>24)</sup> 는 asperities 의 實接觸面積과 asperities 의 수는 作用荷重에 비례한다고 증명 하였다.

$$Ar \propto P_n^{0.91}$$

$$n \propto P_n^{0.09}$$

- 여기서  $P_n$  : 作用荷重
- n : 接觸時의 asperities 의 數

이는  $n \propto N$  이므로

$$W = b/4\pi [K_1 G_1 / \sigma_{f1} S_{o1} (1-V_1) + K_2 G_2 / \sigma_{f2} \cdot S_{o2} (1-V_2)] L \cdot S$$

$K_1, K_2$  : 表面상수

여기에서 磨耗가 적으려면 剪應力 (shear modulus) 을 friction stress 로 나눈 값이 적어야 되고 臨界 미끄럼 거리는 커야 한다. 대부분의 金屬에서는 磨擦應力은 shear modulus 에 비례한다고 Cottrell<sup>23)</sup> 은 증명 하였다. 이를 간단히 表示하면

$$W = K \cdot L \cdot S$$

이 理論에 의하면 實驗적으로 磨擦係數의 決定없이 磨耗率을 量的으로 예측할 수 있다.

### 3.3 로링磨耗에 미치는 炭素當量과 硬度的 영향

灰鑄鐵의 炭素當量은 機械的 性質에 영향을 미치므로 各 材質別 炭素當量에 의한 磨耗現象을 檢討하였다.

最大壓縮應力에 의한 炭素當量과 磨耗量과의 關係를 Fig. 8 에 表示하였다.

Fig. 8 에 表示한 바와 같이 炭素當量의 증가에 따라 磨耗量은 감소 하였다. 또한 同一한 炭素當量에 있어서 最大壓縮應力이 높으면 磨耗量은 증가하며 또한 炭素當量이 증가하면 最大壓縮應力에 의한 磨耗폭은 감소하는 경향을 나타내었다.

磨耗面은 상당히 얇은 變質層으로 덮여있으므로 磨擦面의 溫度에 있어서 그 變質層의 硬도를 생각하면 磨耗와 硬度사이에는 關聯性이 있을 것으로 생각된다. 各 材料의 硬度變化에 따른 pit 發生까지의 壽命에 對한 영향을 Fig. 9 에 表示한다. Fig. 9 에 나타낸 바

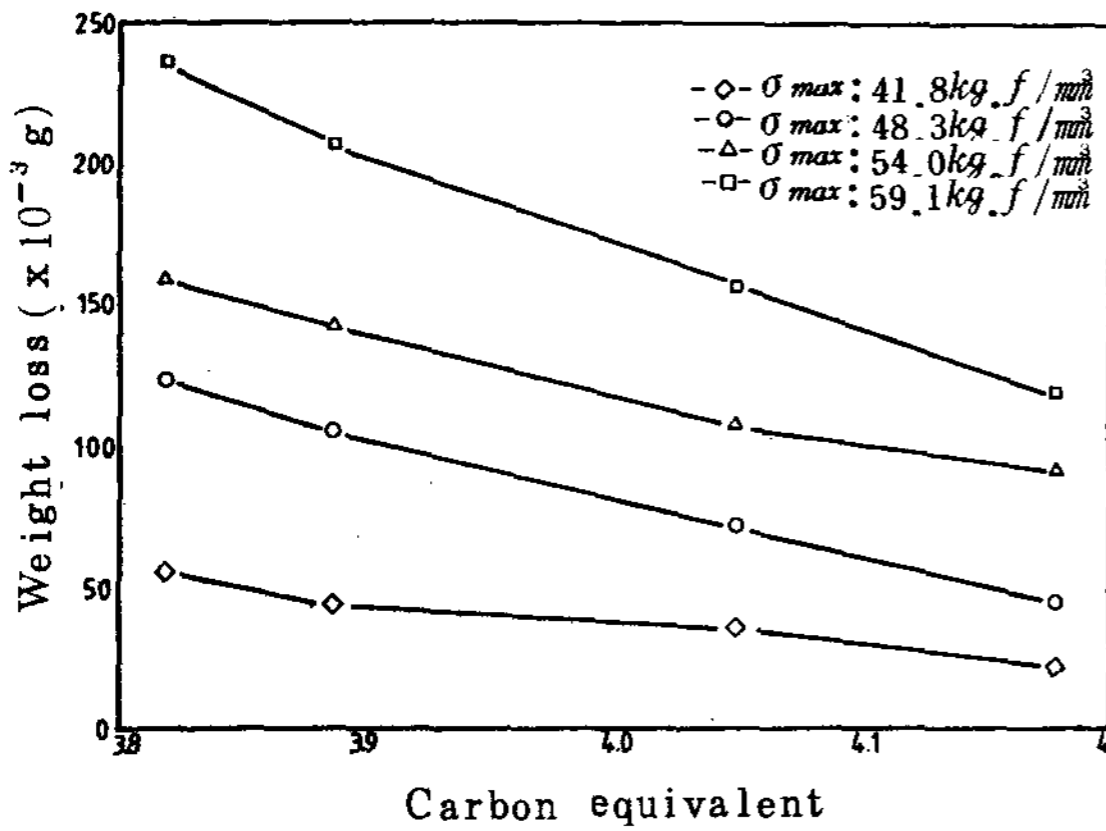


Fig. 8 Relation between weight loss and carbon equivalent for various specimens of gray cast iron,  $3 \times 10^4$  revolution and sliding ratio 9.09%.

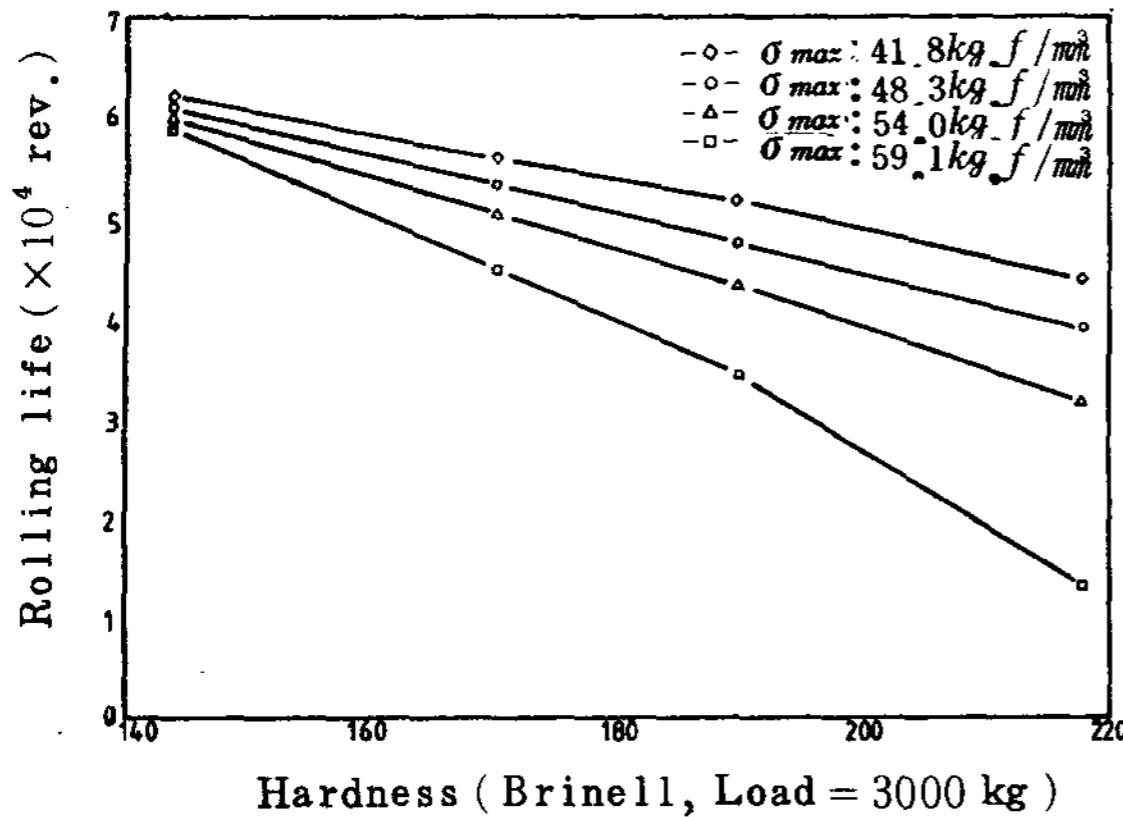


Fig. 9 Relation between rolling life and brinell hardness for various specimens of gray cast iron in sliding ratio 9.09%.

와 같이 硬度 증가와 함께 로링壽命은 현저하게 감소함을 알 수 있다. 最大壓縮應力  $\sigma_{max} = 59.1 \text{ kg} \cdot \text{f} / \text{mm}^2$ 으로 되면 로링壽命이 현저히 감소하였다. 이는 로링磨耗에 있어서 灰鑄鐵의 遷移壓縮應力을 나타내었다.

로링磨耗는 疲勞磨耗라고 稱하는 바와 같이 材料의 疲勞特性에 크게 영향을 미친다. 따라서 로링磨耗에서는 균열傳播抑制가 耐磨耗性 향상의 큰 要因中의 하나이다.

#### 4. 結 論

灰鑄鐵의 로링磨耗特性에 對하여 相對試驗片으로 高炭素鋼을 利用한 경우 9.09%의 슬립으로 無潤滑 乾式 Amsler type에 의한 磨耗試驗 結果 다음과 같

은 結論을 얻었다.

① 灰鑄鐵의 引張強度 및 硬度가 낮으면 磨耗量은 감소하며 異常磨耗에서 pit發生까지 로링壽命은 현저히 증가하였다.

② 로링回轉數가 증가 할 수록 磨耗量은 증가하며 磨耗現象은 回轉數에 따라 初期磨耗, 定常磨耗 및 異常磨耗로 구분되었다.

③ 最大壓縮應力이 증가함에 따라 磨耗量은 증가하고, 最大壓縮應力  $\sigma_{max} = 59.1 \text{ kg} \cdot \text{f} / \text{mm}^2$  이상이면 급격하게 증가하였다.

④ 灰鑄鐵의 炭素當量이 증가하고, 黑鉛이 粗大할 수록 磨耗量은 감소하는 경향을 나타내며 龜裂傳播抑制가 耐磨耗性 향상의 要因이 되었다.

#### 參 考 文 獻

- 1) H. Fredriksson et al : B.F.S.62,54,(1971)
- 2) H.T.Augus : "Cast iron." Butter Worths Co.172(1976)
- 3) J.F.Archard : Journal of applied physics. 981(1953)
- 4) N.P.Suh : Wear 25, 111.(1973)
- 5) M.M.Kruschov and M.A.Babihlen : Metallov, 18(1960)
- 6) G.L.Sheldon : Journal of engineering material and technology : 133, April (1977)
- 7) R.C.Richardson : National Institute of Agriculture Engineering Wrest Park, 18, Dec.(1966)
- 8) 岡林, 辻川, 面田, 池永 : 鑄物 53,494.(1981)
- 9) Instruction manual on use of the shima-dzu-nishihara metal abrasion testing machine type 2.5, Jul.(1968)
- 10) T.S.Eyre and F.Wilson : Journal of the A.S.L.E Vol.29, 65, Feb.(1972)
- 11) T.S.Eyre and P.Williams : Wear 24,337 (1973)
- 12) S.Jahanmir, N.P.Suh and E.P.Abrahamson II : Wear 32, 33 (1975)
- 13) T.Hisakado : Wear 4, 41 (1976)
- 14) N.Bay and J.Wanheim : Wear 38,201 (1976)
- 15) T.Hisakado : Wear 37, 41 (1976)
- 16) J.P.Hirth and D.A.Rigney : Wear 39,

- 13 (1976)
- 17) H.Mughrabi : Physics status of solids, 44 (1977)
- 18) J.J.Fourie : Philosophy magazine 17, 735 (1968)
- 19) D.R.Wheeler and D.H.Buckley :Wear 33, 65 (1975)
- 20) V.C.Scott and H.Willman : Process of Royal Society A 353, (1958)
- 21) S.Jahamir and N.P.Suh : Wear 40,18 (1976)
- 22) J.P.Hirth and J.Lothe : Theory of dislocation, McGraw- Hill, Hew York (1968)
- 23) A.H.Cottrell : Dislocation and plastic flow in crystals, clarendon press, Oxford (1953)
- 24) P.K.Gupta and N.H.Cook : Wear 20,73 (1972)
- 25) S.Jahamir and N.P.Suh : Wear 44, 87 (1977)
- 26) M.Boas and A.Rosen : Wear 44,212(1977)
- 27) S.Jahunmir and N.P.Suh : Wear 44, 17 (1977)
- 28) 山田俊宏, 佐々敏美, 奥本武臣 : 鑄物 47,163 (1975)
- 29) 岡林邦夫, 川本信 : 鑄物 48,520(1976)
- 30) 川本信, 足立雅彦, 安藤繁, 岡林邦夫 : 鑄物 50, 32 (1978)
- 31) 江川濟美 : 潤滑 26, 426 (1981)
- 32) 川本信, 木村數男, 岡林邦夫 : 鑄物 53, 431 (1981)
- 33) 岡林邦夫, 辻川正人, 西田明 : 鑄物 53, 494 (1981)
- 34) 辻川正人, 池永明, 岡林邦夫 : 鑄物 53, 604 (1981)