

```

1      FUNCTION FR(Y)
2      FR=150.153
3      RETURN
4      END

1      SUBROUTINE RUNGE(T,DT,N,Y,DY,F,L,M,J)
2      DIMENSION DY(2),Y(2),F(14)
3      GO TO (100,110,300),L
4      100 GO TO(101,110),IG
5      101 J=1
6      L=2
7      DO 106 K=1,N
8      K1=K+3*N
9      K2=K1+N
10     K3=N+K
11     F(K1)=Y(K)
12     F(K3)=F(K1)
13     106 F(K2)=DY(K)
14     GO TO 406
15     110 DO 140 K=1,N
16     K1=K
17     K2=K+5*N
18     K3=K2+N
19     K4=K+N
20     GO TO(111,112,113,114),J
21     111 F(K1)=DY(K)*DT
22     Y(K)=F(K4)+0.5*F(K1)
23     GO TO 140
24     112 F(K2)=DY(K)*DT
25     GO TO 124
26     113 F(K3)=DY(K)*DT
27     GO TO 134
28     114 Y(K)=F(K4)+F(K1)+2.*(F(K2)+F(K3))+DY(K)*DT)/6.
29     GO TO 140
30     124 Y(K)=0.5*F(K2)
31     Y(K)=Y(K)+F(K4)
32     GO TO 140
33     134 Y(K)=F(K4)+F(K3)
34     140 CONTINUE
35     GO TO(170,180,170,180),J
36     170 T=T+0.5*DT
37     180 J=J+1
38     IF(J-4) 404,404,299
39     299 M=1
40     GO TO 406
41     300 IG=1
42     GO TO 405
43     404 IG=2
44     405 L=1
45     406 RETURN
46     END

```

異種 金屬間의 熔着磨耗에 関한 研究

李 友 桓

A STUDY ON THE DEPOSITIONAL WEAR BETWEEN DIFFERENT METALS

Woo-hwan Lee

.....〈目 次〉.....

1. 序 論
 - 1-1. 研究의 目的과 背景
 - 1-2. 研究의 概要
2. 磨耗의 理論的 考察
3. 實驗裝置 및 試料
4. 實 驗 方 法
5. 實 驗 結 果
 - 5-1. 下部試驗片을 鋼으로 한 各種金屬과의 組合에 依한 磨耗
 - 5-2. 下部試驗片을 銅으로 한 各種金屬과의 組合에 依한 磨耗
 - 5-3. 下部試驗片을 알루미늄으로 한 各種金屬과의 組合에 依한 磨耗
6. 實驗結果의 考察
7. 結 論

Abstract

The Wear becomes the most complicated cause of making various machineries short lives.

In the studies by many scholars so far, the accurate and perfect methods to eliminate it completely are not found yet owing to many affected factors.

On this view point of Depositional Wear, the wear test with seven different specimens from the part of frequent usage of which are carbon steel, nickel, copper, aluminum, zinc, lead and tin was attempted to make clear the relation between the wear of different metals and their melting point, crystal structure, sliding speed, load and lattice factors.

The results of this study are summerized as follows;

- 1) Worn amount of each metal is maximum when each metal is same quality.
- 2) The easier becomes the formation of solid solution in the course of friction proceeding, the more it results in worn amount of each metal.
- 3) The samer is each metal in crystal structure as well as lattice factor, the more it results in worn amount of each metal.

These results might be of use in designing machineries, selecting materials and operating machineries.

要 旨

磨耗는 機械部品の 壽命을 短縮하는 가장 큰 한 原因이다.

이것은 여러가지의 因子들 때문에 복잡하게 나타나므로 磨耗를 없애는 適切하고도 完全한 方法은 아직 發見되지 않고 있다.

耐磨耗材料를 잘 使用하고 改良하기 위해서는 使用되는 材料의 磨耗 機構를 알 必要가 있다.

그 中の 하나로서 溶着磨耗의 見地에서 7種類의 다른 金屬間에 대하여 그들의 溶融溫度, 結晶構造, 미끄럼速度, 荷重 및 格子常數의 사이에는 어떤 關係가 있는가를 살펴 보고 다음과 같은 事實을 實驗을 통하여 알았다.

- 1) 相互 摩擦에서 일어나는 金屬의 磨耗量은 相互金屬이 같은 金屬 일때 가장 많다.
- 2) 磨擦이 일어나는 경우 相對金屬과의 사이에 固溶體를 形成하기 쉬울수록 磨耗量이 많으며 어려울수록 磨耗量이 적다.
- 3) 다른 金屬間的 摩擦에서 생기는 磨耗量은 두 金屬이 서로 같은 結晶構造를 가지고 格子常數가 가까운 金屬일때 磨耗量이 많다.

参考文献 18 件

1. 序 論

1-1. 研究의 目的과 背景

機械 各構成部分의 磨耗은 그 機械의 壽命에 絶對的인 影響을 끼치고 있는 것으로 各接觸部分에 있어서의 變位를 이르게 構成各部의 精密度를 잃게하는 原因이 되어 왔다.

여기에 關해서는 많은 學者들의 實驗結果가 發表되고 있다. 二次大戰 以前까지 F. Robin, J. A. Brinell, Honda Kwotaro, P. A. Heller, William Hardy, Lungmuir 等々 數 많은 學者들에 依하면 材料의 磨耗量은 硬度가 큰 金屬일수록 적고, 脆性이 클수록 크고, 브린넬 硬度가 높을수록 적게 나타난다. 또 引張強度가 비슷한 것 끼리의 接觸에서 일어나는 磨耗量이 적고 그 機械的 性質의 差異가 클수록 크게 나타나는 등 一般的으로 磨耗에 對하여 가지고 있는 概念들이 實驗에 依하여 提示되었다.

그 後 二次大戰中 미국의 J. T. Burwell 의 報告¹⁾에 依하면 接觸面의 粗度如何가 그 磨耗에 미치는 영향에서 0.1μ 의 粗度和 1μ 의 粗도를 가진 接觸面에 같은 기름을 潤滑材로 使用한 結果는 全然 別個의 摩擦係數를 나타내고 있는 것이 알려졌다.

이 磨耗에 關한 研究는 1939年에서 1944年까지 Melbourn의 Australian Council for Scientific and Industrial Research의 摩擦物理部門에서 研究되어 오다가 그 後 英國의 Cambridge 大學에 옮겨져서 P. F. Bowden²⁾의 研究팀에 引繼되어 研究되고 있으며 Melbourn의 S. H. Bastow 팀과 步調를 맞추면서 研究가 進行되고 있는 現

況이다.

P. F. Bowden 과 Hughes 들은 摩擦의 機構를 研究하는 課程에서 鋼과 各種 金屬 및 合金을 摩擦시켜서 摩擦力과 接觸點의 溫度測定을 한 結果 摩擦은 接觸點이 붙었다가 미끄러졌다가 하는 不連續現象이며 分子 表面의 引力에 依한다.³⁾는 結論을 얻었으며 여기서 붙었다가 떨어졌다가 하는 限界는 그 材料의 溶融點이 가장 主要한 因子⁴⁾가 된다고 主張하였다.

本 論文은 機械의 耐性을 높이는데 必要한 要件으로서 材料를 選擇한다는 立場에서 磨耗의 本質을 규명해 보고자 몇개 材料의 物理的 性質이 磨耗에 미치는 影響을 考察하여 接觸時에 일어나는 磨耗를 減少시킬수 있는 適切한 材料의 選擇, 設計 및 管理에 도움을 주고자 한 것이다.

1-2. 研究의 概要

金屬材料의 磨耗를 일으키는 機構는 機械的 破壞, 酸化, 溶着으로 分類해서 생각되며, 磨耗狀況에 影響을 미치는 因子로서 接觸壓力, 미끄럼 速度, 磨耗粉末의 性質, 溫度의 影響, 雰囲氣의 影響, 接觸面의 狀況, 材料의 硬度, 韌性, 組織, 潤滑材, 腐蝕, 그리고 相對 材料의 性質 等等을 생각할 수 있다.

本 研究는 P. F. Bowden 및 D. Tabor 의 說에 따라 于先 第一次로 溶着磨耗의 見地에서 異種金屬間의 磨耗特性을 다루었다. 溶着磨耗의 見地에서 보면 鋼과 鋼을 서로 磨擦시킬 때의 磨耗現象은 金屬과 非金屬을 서로 磨擦시킬 때와는 달라서 磨擦面의 接觸點에 있어서 金屬이 粘着했다가 다음 瞬間에 그 粘着點이 떨어지면서 磨耗가 일어난다고 생

각되어 왔다. 지금 서로 서로 摩擦되고 있는 金屬이 粘着되고 鍛接을 일으킨다고 假定할 때, 두 金屬間에 融合이 잘 되는 金屬間일수록 磨耗量은 많다고 생각할 수 있다.

여기서 두 金屬間의 融合條件을 決定 짓는 因子로서는 두 金屬間의 原子価, 原子濃度, 電氣化學的인 因子 또는 格子常數를 들수 있으나, 이 中에서 格子常數가 重要한 影響을 미친다는 것이 W. Hume-Rothery⁵⁾에 依하여 밝혀진 바 있다. 따라서 格子常數가 비슷한 金屬間은 融合이 잘 이루어진 다.

이로 因해 磨耗量도 많아지리라 豫想된다.



2. 磨耗의 理論的 考察

P. F. Bowden 은 金屬의 接觸機構를 研究해서 人間이 만들수 있는 表面粗度에는 限度가 있고, 表面粗度は 分子의 크기에 比하면 훨씬 크고 面들이 서로 接觸할때에도 最外部側의 分子부터 接觸하게 될 것이므로 分子의 크기를 單位로 하는 限 幾何學的인 平滑面은 얻을 수 없다⁶⁾라고 報告했다.

Fig. 1 은 金属材料의 研磨面을 微視적으로 본 것이며 그 切斷面을 그림으로 表示했다.

Fig 2 는 平滑한 研磨面의 接觸狀態를 그림으로 表示하였으며 (a)는 壓力을 加하기 전 狀態로서 突起部의 最外端에서만 接觸되고 있는 것을 알 수 있으며 이 狀態에서 더욱 壓力을 加한 時가 (b)도이며 여기에서 金屬끼리의 眞實接觸이 加한 壓力에 比例해서 增大되는 狀態를 알 수 있다.

一般的으로 볼수 있는 두 物體의 巨視的接觸이 단지 겉보기의 接觸이며 이에 對하여 微視的 接觸을 眞實接觸이라 하며 table.1 에 F. P. Bowden & D. Tabor 팀의 實驗結果⁷⁾를 나타낸다.

上述한 微視的 接觸點은 眞實接觸點이라 불려지며 먼저 이와 같은 部分에서 溶着이 일어난다. 이와 같은 狀態에서 두 面의 相對運動이 일어나면 眞實接觸點 근방에서 突起部의 切斷이 일어난다.

Fig 2(c)에 表示하는 바와같이 上部物體의 突起部가 切斷되면 上部物體가 磨耗된 것이 된다.

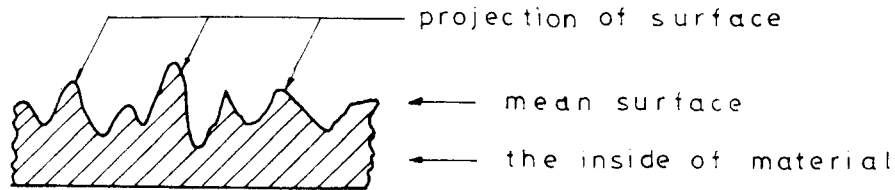


Fig 1. The unevenness of polishing metal

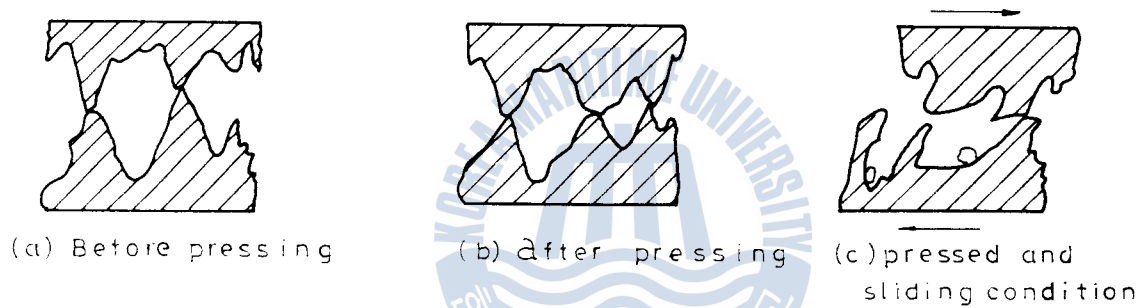


Fig 2 contact surface under no load and load

Table 1. The relation between apparent contact area and real contact area

Apparent contact area between copper plates(21cm²)

Load (Kg)	Real contact area (cm ²)	Ratio between apparent and real contact area
500	0.05	1/400
100	0.01	1/2,000
5	0.0005	1/4,000
2	0.0002	1/100,000

實際의 磨耗는 復雜하나 이와같은 模型으로서 磨耗를 考察하는 것이 可能하며 이것이 말하자면 溶着磨耗이다⁴⁾

이와같이 溶着磨耗는 眞實接觸面에서의 溶着으로 因하여, 한 材料에서 다른 材料로 金屬이 移轉함으로서 發生되는 것이며 이러한 磨耗의 防止法은 相對金屬의 溶着에 의한 結合力を 弱化시켜야 한다.

Fig. 3에서 磨耗断面이 $Z=0$ 의 位置에서 움직이고, 突起全體의 數를 n , 表面의 硬度를 H 라고 본다. 單純化된 模型圖에서는 突起 한개 만이 接觸되어 있으며 n 개의 돌기가 모두 磨耗될 때의 距離는 다음과 같다.

$$[r = 0, 1, 2, 3, 4, \dots, (n-1)] h$$

磨耗荷重에 의하여 돌기의 上端은 Fig. 4에서와 같이 평편하여질 것이고 이때의 폭을 $2r$, 磨耗된 높이를 h_0 라고 하면 磨耗量은 다음과 같다.

$$\Delta V = \frac{1}{3} \pi r^2 h_0 \dots \dots \dots (1)$$

$$h_0 = r \tan \theta \text{ 이므로 이것을 식 (1)에 대입하면 } \Delta V = \frac{1}{3} \pi r^2 \tan \theta$$

單位 길이당의 磨耗量은 幅의 길이인 $2r$ 로 나누면

$$\Delta V_0 = \left(\frac{1}{3} \pi r^2 \tan \theta \right) / 2r = \frac{1}{6} \pi r^2 \tan \theta$$

따라서 n 개의 突起에 의한 磨耗量은 다음과 같다.

$$V = \sum_{r=0}^{n-1} \frac{1}{6} \pi r^2 \tan \theta = \frac{\tan \theta}{6} \sum_{r=0}^{n-1} \pi r^2$$

여기서 $\sum_{r=0}^{n-1} \pi r^2$ 은 眞實接觸面積으로서 A_r 로 表示하고 또 $A_r = W/H$ 로 表示되므로 磨耗距離 S 에 對한 磨耗量은 다음과 같이 된다.

$$V = \frac{1}{6} \frac{\tan \theta}{H} WS \dots \dots \dots (2)$$

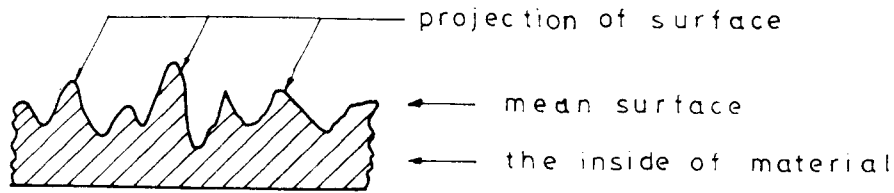


Fig 1. The unevenness of polishing metal

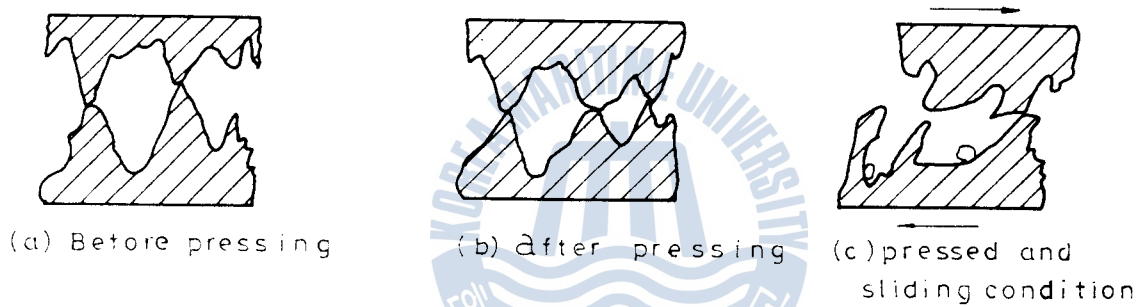


Fig 2. contact surface under no load and load

Table 1. The relation between apparent contact area and real contact area

Apparent contact area between copper plates(21cm²)

Load (Kg)	Real contact area (cm ²)	Ratio between apparent and real contact area
500	0.05	1/400
100	0.01	1/2,000
5	0.0005	1/4,000
2	0.0002	1/100,000

實際의 磨耗는 復雜하나 이와같은 模型으로서 磨耗를 考察하는 것이 可能하며 이것이 말하자면 溶着磨耗이다⁸⁾

이와같이 溶着磨耗는 眞實接觸面에서의 溶着으로 因하여, 한 材料에서 다른 材料로 金屬이 移轉함으로서 發生되는 것이며 이러한 磨耗의 防止法은 相對金屬의 溶着에 의한 結合력을 弱화시켜야 한다.

Fig. 3에서 磨耗断面이 $Z=0$ 의 位置에서 움직이고, 突起全體의 數를 n , 表面의 硬度를 H 라고 본다. 單純化된 模型圖에서는 突起 한개만이 接觸되어 있으며 n 개의 돌기가 모두 磨耗될 때의 距離는 다음과 같다.

$$[r=0, 1, 2, 3, 4, \dots, (n-1)]h$$

磨耗荷重에 의하여 돌기의 上端은 Fig. 4에서와 같이 평편하여질 것이고 이때의 폭을 $2r$, 磨耗된 높이를 h_0 라고 하면 磨耗量은 다음과 같다.

$$\Delta V = \frac{1}{3} \pi r^2 h_0 \dots \dots \dots (1)$$

$$h_0 = r \tan \theta \text{ 이므로 이것을 식 (1)에 대입하면 } \Delta V = \frac{1}{3} \pi r^3 \tan \theta$$

單位 길이당의 磨耗量은 幅의 길이인 $2r$ 로 나누면

$$\Delta V_0 = \left(\frac{1}{3} \pi r^3 \tan \theta \right) / 2r = \frac{1}{6} \pi r^2 \tan \theta$$

따라서 n 개의 突起에 의한 磨耗量은 다음과 같다.

$$V = \sum_{r=0}^{n-1} \frac{1}{6} \pi r^2 \tan \theta = \frac{\tan \theta}{6} \sum_{r=0}^{n-1} \pi r^2$$

여기서 $\sum_{r=0}^{n-1} \pi r^2$ 은 眞實接觸面積으로서 A_r 로 表示하고 또 $A_r = W/H$

로 表示되므로 磨耗距離 S 에 對한 磨耗量은 다음과 같이 된다.

$$V = \frac{1}{6} \frac{\tan \theta}{H} WS \dots \dots \dots (2)$$

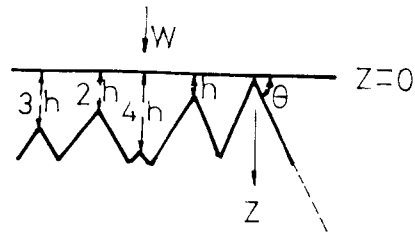


Fig3 A flat surface approaching another with conical asperites

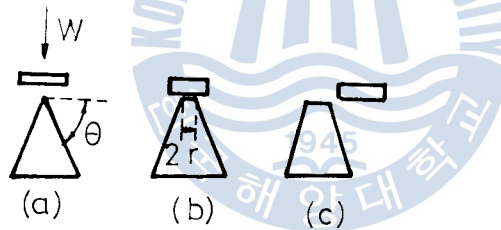


Fig 4. Schematic representation of a conical asperity being deformed and worn by a flat surface.
 (a) flat surface approaching;
 (b) deformation of the conical asperity; (c) flat surface has slid past the area of contact producing wear debris.

3. 實驗裝置 및 試料

磨耗되고 있는 面이 粘着되고 있는 狀態를 直接 測定할 수 없으므로 本 實驗에서는 乾式狀態의 磨耗試驗을 하고 磨耗量과 서로 摩擦을 한 金屬間의 結合力과의 關係를 調査했다.

磨耗試驗機는 Fig. 5와 같이 Toyo Baldwin Co., LTD의 Friction Wearing Tester Model EFM-III-E이다. 二個의 上, 下 圓筒型試片을 同時에 垂直으로 끼워서 加하는 荷重은 0.2~500 kg의 範圍까지 自由로 選定하여 미리 調停해 놓고 Strain gage를 使用한 load detector에 의거하여 荷重을 Chart에서 읽을 수 있도록 되어 있으며 미끄럼速度는 0.2~2000 mm/S까지 調整하도록 되어 있다.

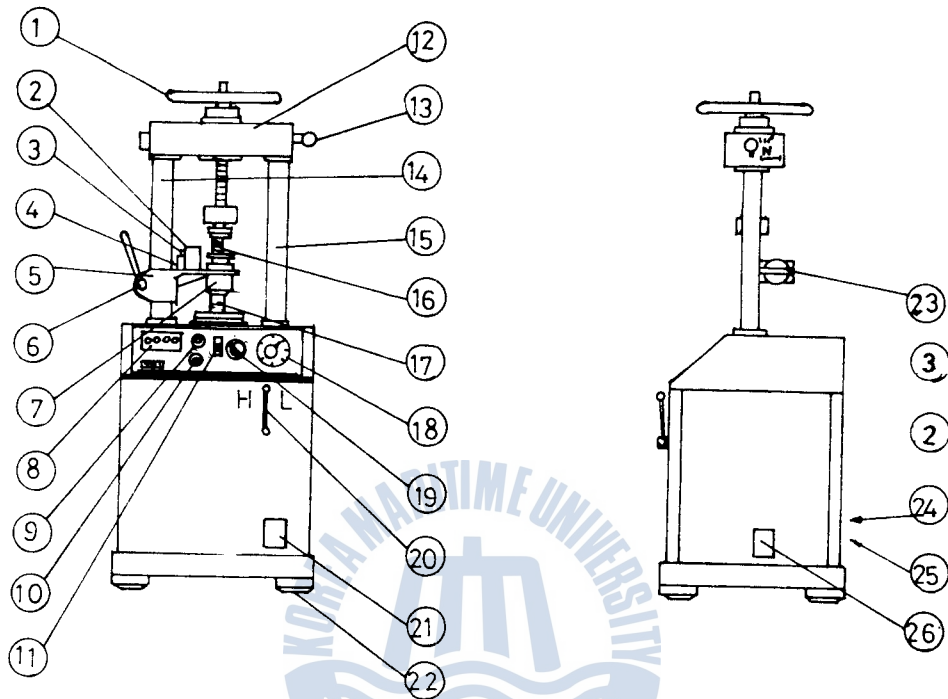
試驗片들은 炭素鋼(S45C), 니켈, 銅, 납, 錫, 그리고 알루미늄으로 하였다. 各種 試驗片들의 寸法은 Fig. 6과 같다.

各種 試驗片들의 化學成分은 Table. 2와 같다.

S45C, Ni, Cu, Al 등은 Table. 3과 같이 熱處理⁹⁾하고, Zn, Pb, Sn 등은 純度도 좋고 低融點 金屬이므로 熱處理를 하지 아니하였다.

試驗할때의 摩擦面은 砂鉄과 研磨紙 2000番을 거친 후 羅紗研磨를 해서 摩擦面의 狀態를 똑 같도록 하기 위하여 努力하였다.

實驗에 使用한 材料들의 結晶構造, 格子常數, 溶融點들을 table. 4에 나타낸다.



- | | | | |
|---------------------------|-----------------------------|----------------------------|-------------------------|
| ① Thrust handle | ⑧ Peripheral speed meter | ⑮ Thrust force detector | ⑳ Antivibration stand |
| ② Friction force detector | ⑨ Starting button | ⑯ Thrust spring | ㉓ Torque arm |
| ③ Detector sliding bench | ⑩ Stop button | ⑰ Specimen | ㉔ Input power connector |
| ④ Detector fixing knob | ⑪ Speed volume | ⑱ Timer | ㉕ Instrument connector |
| ⑤ Torque arm holder | ⑫ Fixed cross head | ⑲ Timer on-off switch | ㉖ SCR controller switch |
| ⑥ Holder fixing handle | ⑬ Motor manual change lever | ⑳ Clutch change over lever | |
| ⑦ Specimen holder | ⑭ Supporting | ㉑ Power switch door | |

Fig 5. Schematic diagram of experimental apparatus

Table 2. The chemical compositions of specimens

specimens	Compositions (%)
S 4 5 C	Fe 98.577 C 0.45 Si 0.20 Mn 0.75 P 0.008 S 0.015
N i	Ni 99.99
C u	Cu 99.99
A l	Al 99.71 Si 0.095 Fe 0.19
Z n	Zn 99.98
P b	Pb 99.99 Fe 0.01
S n	Sn 99.98 Pb 0.01 Fe 0.01

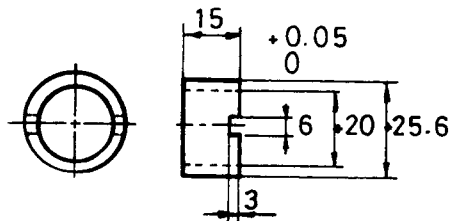


Fig 6 Specimen size

Table 3. Annealing condition for specimens

Material	Annealing temperature(°C)	Time(hr)
S 45 C	650	2
N i	430	3.5
C u	260	0.5
A l	180	1.5

Table 4. Crystal structure, lattice factor, Vicker's hardness and melting point of specimens

Specimens	Crystal structure	Lattice factor(A°)	Vicker's hardness	Melting point(C°)
S 4 5 C	B.C.C	2.8664	105	1520
N i	F.C.C	3.5238	106	1452
C u	F.C.C	3.6147	60	1083
A l	F.C.C	4.0496	20	658
Z n	H.C.P	2.6649	45	419
P b	F.C.C	4.9502	4	315
S n	B.C.C	5.8315	6	231

4. 實驗方法

固体面の 磨耗는 復雜한 過程이며 여러가지의 因子들 때문에 그 磨耗過程의 性質이 매우 달라진다.

그러므로 溶着磨耗의 見地에서 磨耗의 問題를 理論的으로 取扱할때는 大胆하게 單純化를 해서 考察함이 좋다¹⁰⁾ 라는 見解에 따라 本實驗은 異種金屬間的 磨耗量과 溶融點, 原子의 싸이즈 (size) 因子, 磨耗距離, 그리고 荷重과의 關係를 調査하기 위하여 乾式磨耗試驗을 아래와 같이 實施했다.

磨耗距離는 磨耗試驗機의 積算 回轉數를 바꾸므로서 變化시켰다.

荷重은 Fig. 5의 Thrust handle ①을 使用하여 스프링의 張力을 바꾸므로서 變化시켰다. 下部 材料는 炭素鋼 (S45C), 上部材料에 炭素鋼, nickel, 銅, 錫, 亜鉛, 납 그리고 알루미늄 試驗等으로 變化시켰다. 그리고 미끄럼速度는 263 mm/S로 荷重 2 kg인 狀態에서 3分, 5分, 10分, 15分間 磨耗시킨 다음 磨耗量을 디지털 天秤으로 測定하였다.

磨耗量의 測定은 試驗片들을 끼우기 前에 測定하고 試驗后에 磨耗粉末을 털어낸 후 다시 重量을 測定해서 그 重量의 減少에서 磨耗量을 구했다.

荷重變化에 따르는 磨耗特性을 考察하기 위하여 荷重만을 3 kg로 增加해서 磨耗量과 上述한 因子들과의 關係를 알아보기 위하여 實驗을 했다. 또한 미끄럼速度의 磨耗變化特性을 알기 위하여 미끄럼速度를 1600 mm/S, 荷重을 2 kg으로 해서 實驗을 했다. 미끄럼速度를 20 mm/S, 荷重을 3 kg로 했을때의 磨耗變化特性을 調査했다.

다음에는 같은 面心立方格子의 結晶을 갖는 銅, 알루미늄, 납에 對하

여 下部材料에 銅, 上部材料에 銅, 알루미늄, 납을 使用하여 磨耗距離變化, 荷重變化에 따른 磨耗變化特性을 實驗했다.

같은 方法으로 下部材料에 알루미늄, 上部材料에 알루미늄, 銅, 납으로 했을 때의 磨耗距離, 荷重을 變化시켜 磨耗變化特性을 알아보기 위하여 미끄럼速度를 263 mm/S , 荷重을 1 kg , 2 kg , 또 미끄럼速度를 20 mm/S , 荷重을 1 kg , 2 kg 으로 해서 實驗을 했다.

本 實驗은 異種金屬間의 熔着磨耗에서 磨耗量과 磨耗距離, 荷重, 熔融溫度, 結晶構造와의 相関關係를 定性的으로 알고져 함에 끝쳤음.



5. 實驗結果

下部 試驗片은 炭素鋼, 銅, 알미늄으로 하여 이 3種에 대하여 7種의 試驗片을 組合하여 實驗을 했다.

5-1. 下部 試驗片을 鋼으로 한 各種金屬과의 組合에 依한 磨耗

먼저 上下部 試驗片의 미끄럼速度를 263 mm/S 로 하여 여기에 Table 2의 各種金屬試驗片을 2 kg 의 荷重으로 摩擦시켜서 그때 생기는 磨耗量을 重量減에서 求했다. Fig.7은 그 結果이다.

세로軸은 回轉數를, 가로軸은 全 磨耗量을 表示한다. 下部의 圖表는 下部試驗 鋼에 나타나는 磨耗量을 各相對金屬別로 나타낸 것이고 上部 圖表는 上部 各種 試驗片의 磨耗量을 나타낸 것이다. (以下 磨耗量과 回轉數의 關係는 이러한 方法으로 나타낸다)

各種 金屬과의 摩擦에서 나타난 鋼의 磨耗量을 보면 各種金屬의 種類에 따라서 明確한 差異를 나타냈다. 下部試驗片 即 鋼의 磨耗量은 相對 接觸面이 같은 鋼일때 磨耗量이 가장 많고 다른 金屬일때가 적게 나타나며 鎳, 동, 주석, 알미늄, 납 그리고 아연의 順序로 磨耗量이 적어진다. 또 上部 試驗片의 磨耗量은 강, 鎳, 동, 주석, 아연, 납 그리고 알미늄의 順序로 적어진다.

上部 試驗片이 아연일때는 少量만 磨耗되었으나 下部의 鋼試驗片은 重量減少가 負로 나타나 아연이 溶着된 것으로 추측된다.

Sn, Pb 및 Al 즉 上部試驗片은 摩擦에 依하여 若干量 磨耗되었으나 이 때의 下部試驗片인 鋼을 上部試驗片이 鉛일 경우와 같이 溶着하지

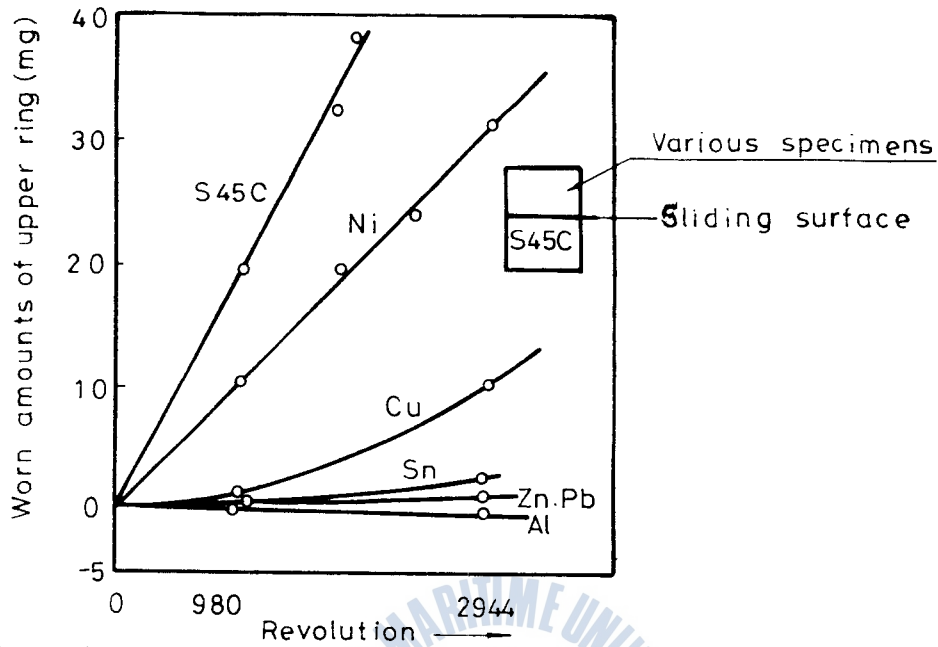


Fig 7(A) Worn amounts of various upper rings at load 2Kg with sliding speed 263mm/s

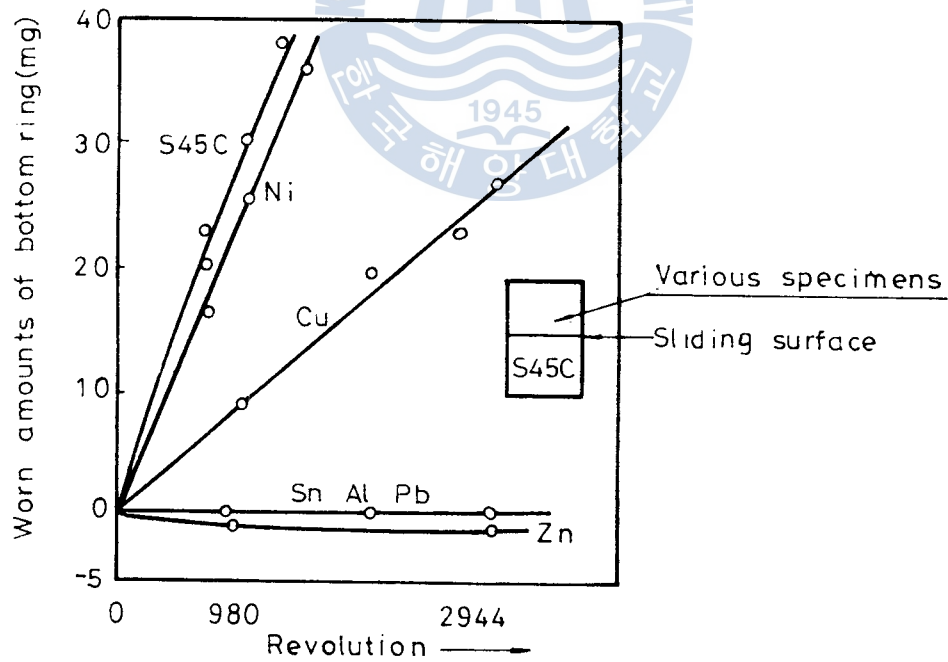


Fig 7(B) Worn amounts of bottom rings contacting with various upper rings at load 2Kg with sliding speed 263 mm/s

않고 磨耗도 하지 아니했다. 여기에서 鋼材料와 亜鉛材料가 쉽게 溶着하는 現象은 첫째로 溶融溫度에서 오는 것과 둘째로 格子構造에서 오는 것을 고려할 수 있다. 溶融溫度面에서 볼때 Zn 은 Sn , Pb 보다는 높고, Ni , Cu , Al 보다는 낮으므로 鋼과의 相關關係를 나타내는 因子로 볼수는 없다. 그러나 格子常數는 鋼의 2.8664 \AA 에 대해서 Zn 이 2.6649 \AA , Al 가 4.0496 \AA , Pb 가 4.9502 \AA 그리고 Sn 이 5.8315 \AA 이 되어 가장 近似한 값을 가진 Zn 과의 溶着現象이 수반되는 것이 아닌가 생각된다.

다음에는 같은 條件으로 荷重을 3 kg 로 增加하여 實驗을 했다. 결과는 Fig. 8 과 같이 磨耗量이 많아질 뿐이고 傾向은 荷重이 2 kg 때와 비슷하다.

다음에는 下部試驗片을 鋼으로 上部試驗片을 S45C , Ni , Cu , Al , Zn 그리고 Sn 로 하고 미끄럼速度를 1600 mm/S 로 增加시키고 荷重을 2 kg 으로 해서 實驗을 했다.

結果는 Fig. 9 와 같고 下部試驗片 鋼의 磨耗量의 大小는 S45C , Ni , Cu , Al , Zn , 그리고 Sn 의 順序이고, Pb 는 回轉數가 올라감에 따라 發熱때문에 測定이 困難하였다.

上部試驗片인 各種金屬의 磨耗量을 보면 回轉數가 約 12000 回轉 以內에서는 磨耗量의 大小 順序가 S45C , Ni , Al , Zn , Cu , 그리고 Sn 이며 回轉數가 約 12000 回轉을 超過時에는 Al , Ni 의 順序가 뒤 바뀌고 있는데 速度가 빠를수록 摩擦熱이 蓄積되어 溫度가 上昇하므로 Ni 의 溶融點이 $1452 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 이고 Al 의 溶融點이 $658 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 이기 때문에 鍛接된다가 떨어져 나갈때의 抗力의 差異때문이 아닌가 推測됨.

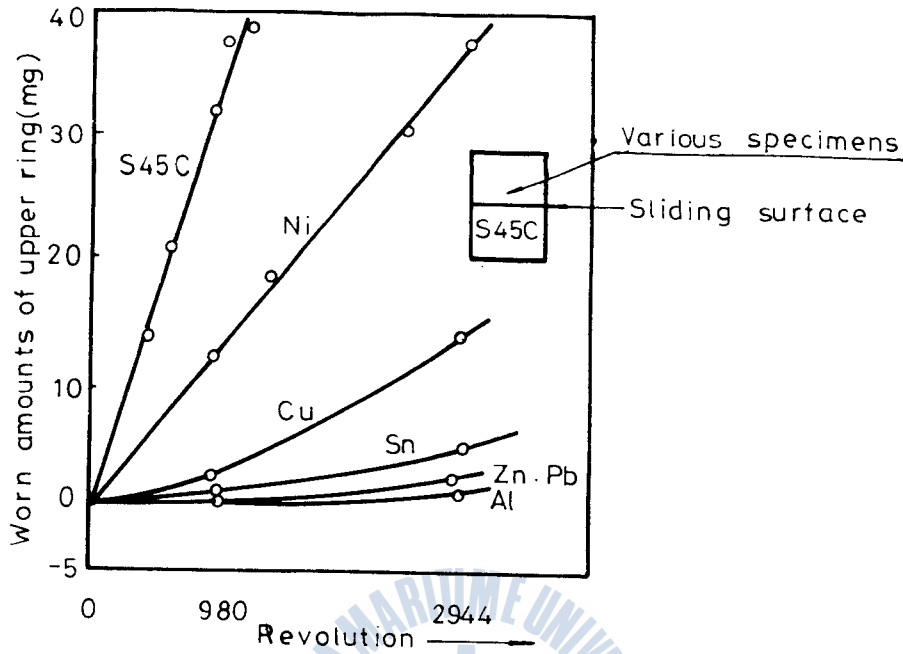


Fig 8(A) Worn amounts of various upper rings at load 3Kg with sliding speed 263mm/s

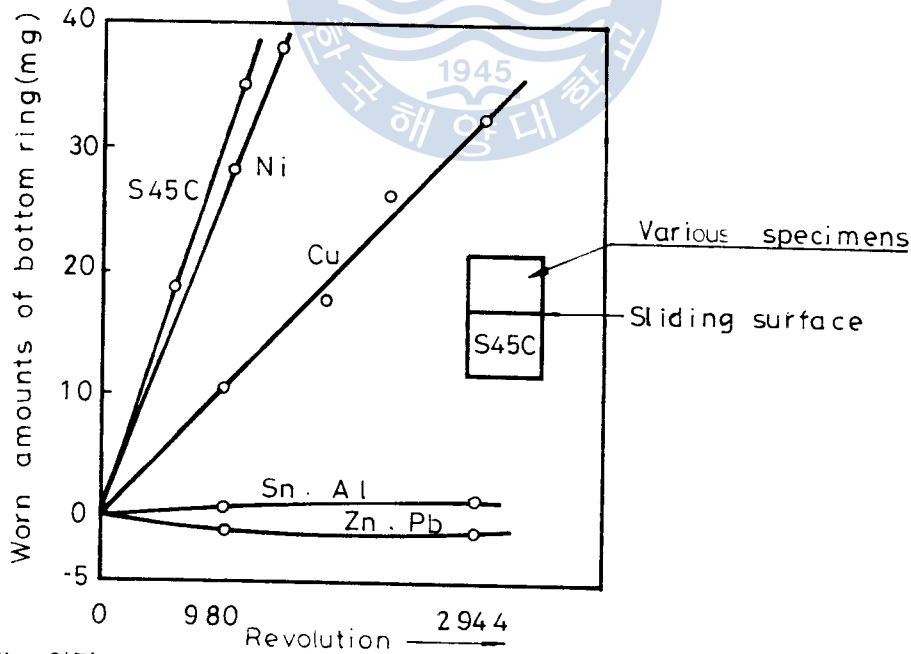


Fig 8(B) Worn amounts of bottom rings contacting with various upper rings at load 3Kg with sliding speed 263mm/s

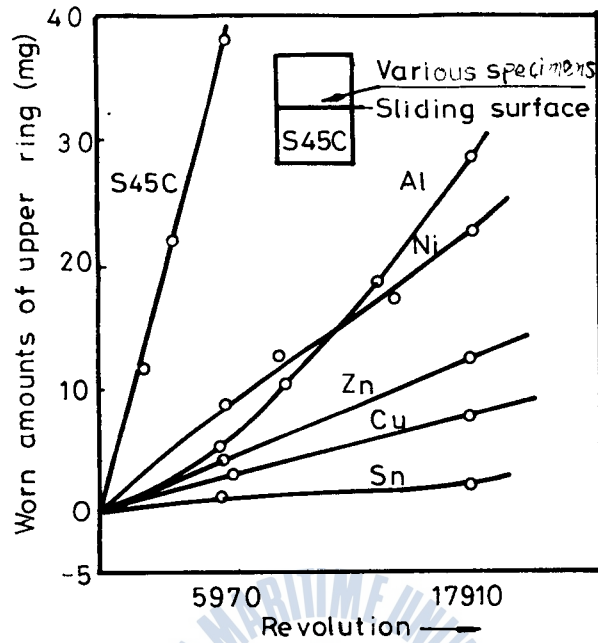


Fig9(A) Worn amounts of various upper rings at load 2Kg with sliding speed 1600 mm/s

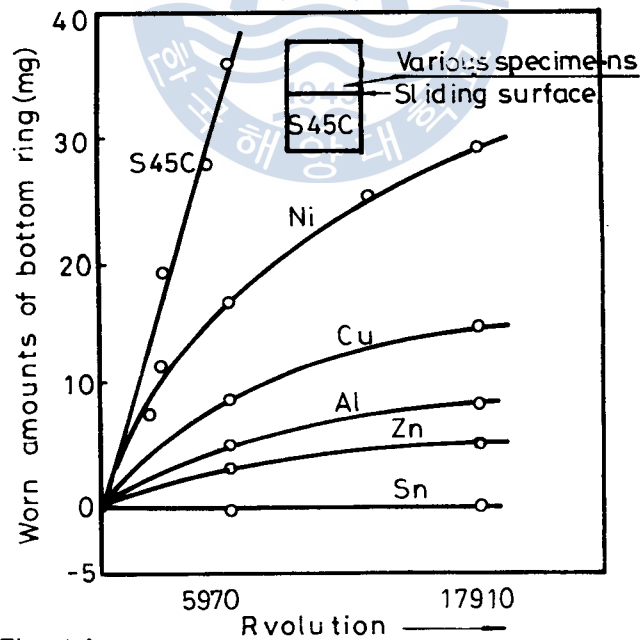


Fig 9(B) Worn amounts of bottom rings contacting with various upper rings at load 2Kg with sliding speed 1600 mm/s

그러므로 앞서 한 두 實驗과 비슷한 傾向을 나타내고 있다고 생각할 수 있다.

다음에는 摩擦速度가 낮은 20 mm/S 로 實驗을 했다.

實驗結果는 Fig.10과 같다. 上部 試驗片들의 磨耗量의 大小 順序는 S45C, Ni, Zn, Cu, Al, Pb 그리고 Sn의 順序이고 下部 試驗片 鋼의 磨耗順序는 S45C, Ni, Cu, Sn, 이고 Al, Pb, Zn의 重量減少는 負로 나타났다.

以上の 結果를 보면 摩擦速度, 荷重에 關係없이 恒常 上部 試驗片이 鋼이고 下部 試驗片이 鋼일때의 磨耗量이 다른 어떤 組合때의 磨耗量보다도 가장 많고 다음이 上部 試驗片이 니켈 일때의 下部 鋼試驗片의 磨耗量이고, 그다음이 上部 試驗片이 銅일때의 下部 試驗片 鋼의 磨耗量이다.

Fig. 7, 8, 9 그리고 10을 通하여 S45C, Ni, Cu들의 磨耗 傾向은 確實한데 Al, Zn, Pb 그리고 Sn의 磨耗量의 微量의 差異는 荷重이나 回轉數가 바뀌므로서 溶融點과 化學的인 性質에 關係가 있는 것을 나타내고 있다. S45C와 이들 金屬과의 固溶體形成의 難易性에 對하여 考察해 보면 S45C와 S45C는 같은 金屬이기 때문에 어떤 比率로도 融合하며 S45C와 Ni에 對하여 Fig.11과 같이 되고 어떠한 比率로도 融合해서 固溶體를 만든다.

S45C와 Cu은 Fig.12에 나타난 바와 같이 固溶體가 되는 範圍는 化合物도 만들지 않고 Ni에 比해서 固溶하기가 어렵다.

이러한 見地에서 考察해 보면 下部 試驗片 S45C의 磨耗量은 相對가 되는 金屬과의 固溶體를 만들기 쉬운 順序로 되어 있음을 알 수 있다.

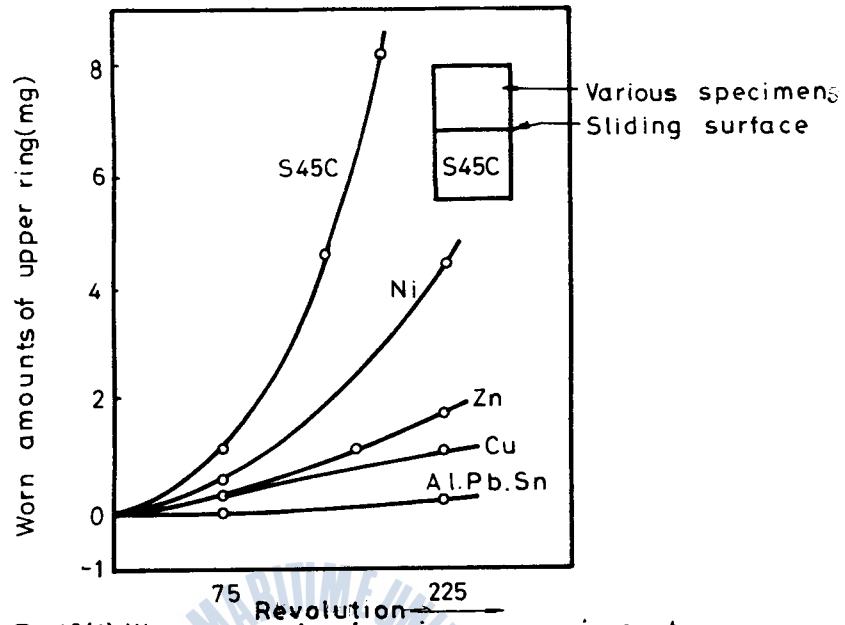


Fig 10(A) Worn amounts of various upper rings at load 3Kg with sliding speed 20mm/s.

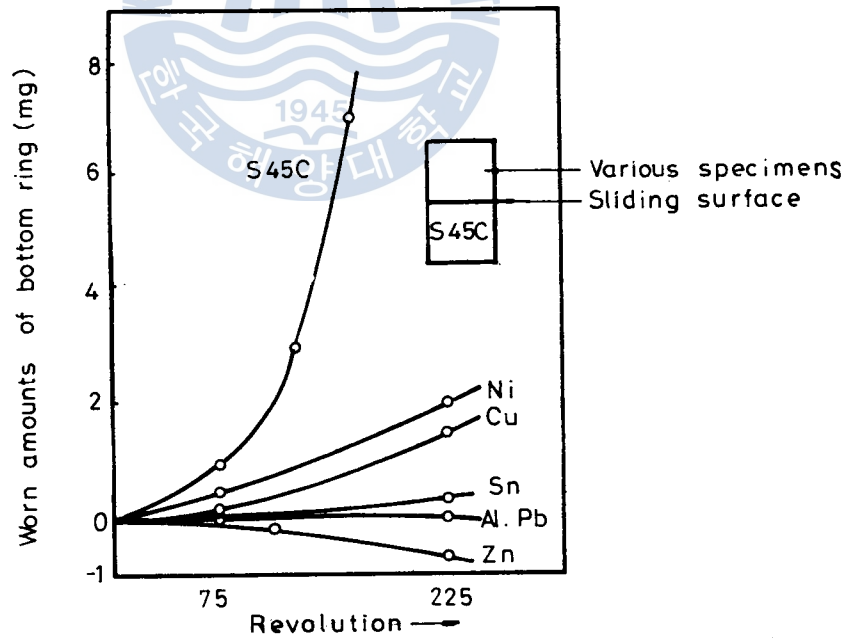


Fig 10(B) Worn amounts of bottom rings contacting with various upper rings at load 3Kg with sliding speed 20mm/s.

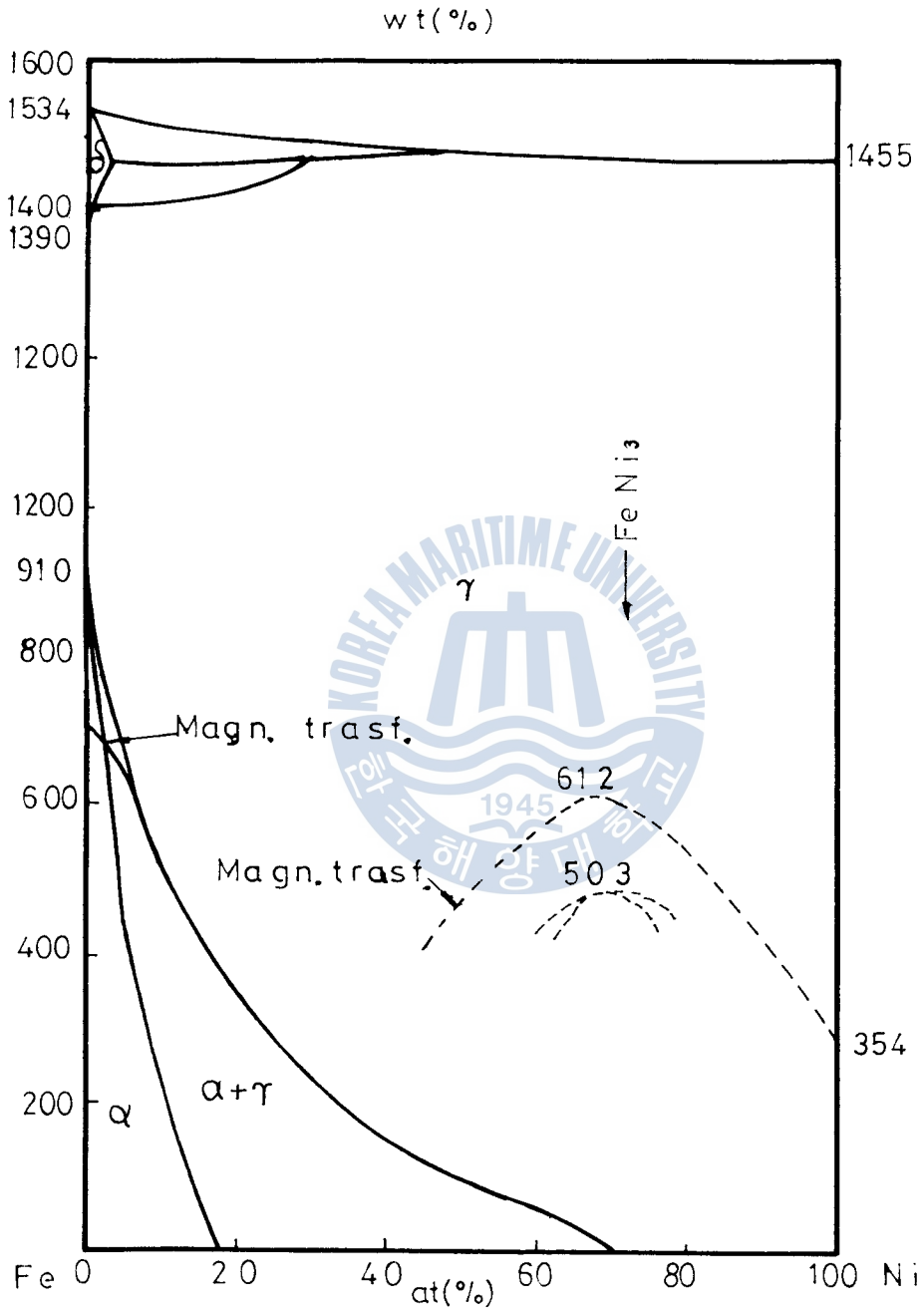


Fig 11. Ni-Fe Equilibrium Diagram

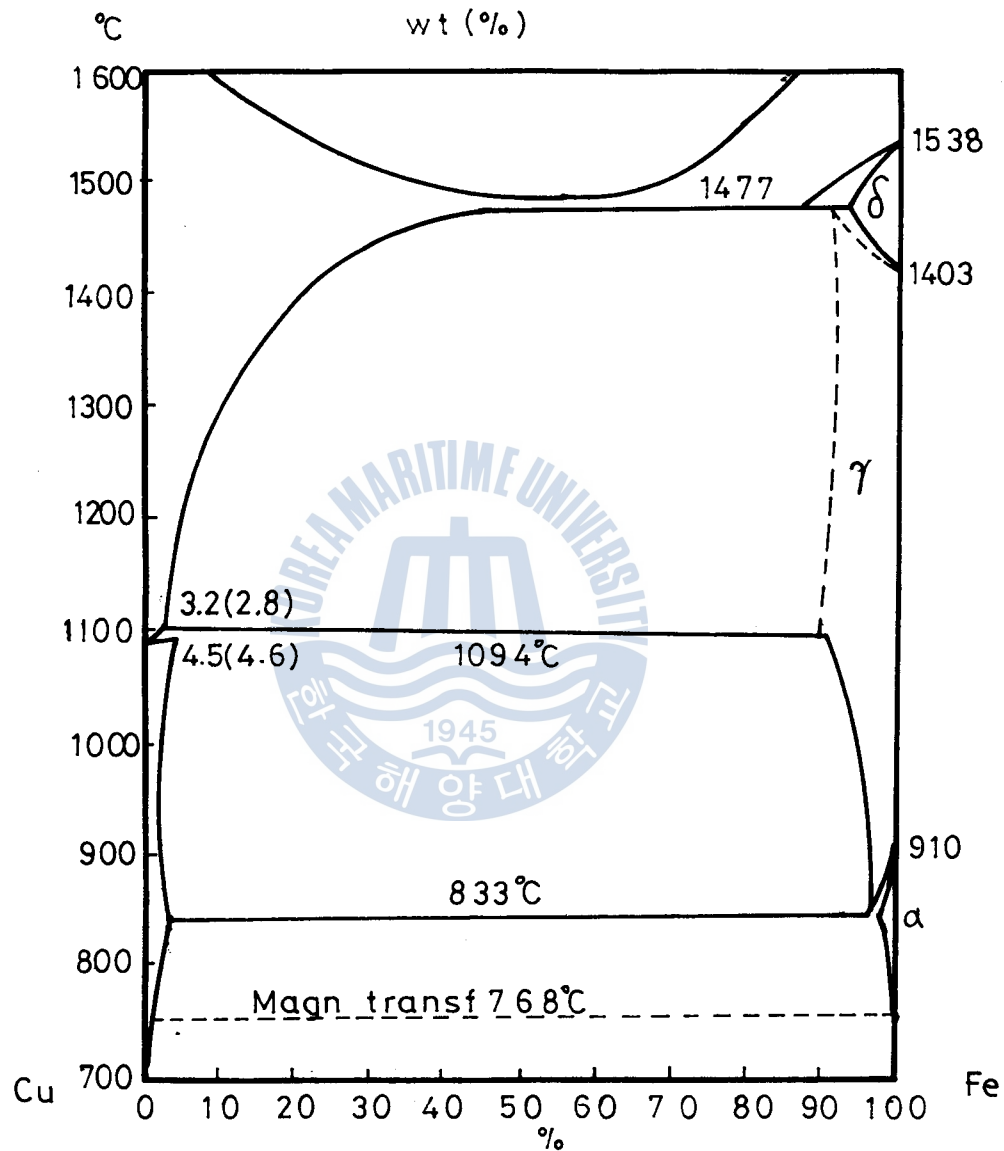


Fig 12. Cu-Fe Equilibrium Diagram

5-2. 下部試驗片을 銅으로 한 各種金屬과의 組合에 依한 磨耗

下部에 銅 試驗片을 끼우고 上部에 各種金屬을 摩擦시켜 實驗한 結果는 다음과 같다.

銅은 面心立方結晶을 가지는 金屬이며 Al, Pb, 등도 또한 面心立方結晶을 갖는 金屬이므로 서로 固溶되기 쉬운 것은 格子常數가 가까운 數值일수록 더 좋을 것으로 생각하여 이들 面心立方格子를 갖는 金屬의 磨耗試驗을 하고 格子常數와의 關係를 調査했다.

格子常數는 Cu가 3.6147\AA , Al이 4.0496\AA , Pb가 4.9502\AA 이므로 銅에 대하여 固溶하기 쉬운 順序는 Cu, Al, Pb의 順이다. 따라서 磨耗도 이 順序와 一定한 關係가 있을 것이다. 熔融點은 銅이 1083°C 알루미늄이 658°C , 납이 315°C 이다.

Fig. 13 및 14는 미끄럼속도가 263mm. S 때의 下部에 銅 試驗片을 끼우고 上部에 Cu, Al, Pb 試驗片을 끼었을 때의 磨耗試驗 結果이며 回転數와 磨耗量과의 關係를 나타냈다. Fig. 13은 荷重이 1kg 때이며 下部試驗片 銅에 대해서 보면 相對가 되는 金屬에 따라서 磨耗量이 틀리며 銅과 銅의 組合일 때가 가장 磨耗量이 많으며 Al과 짝 지을 때가 훨씬 적고, Pb와 짝이 될 때가 거의 磨耗하지 않고 있음을 알 수 있다. 上部試驗片의 磨耗量을 보면 Cu, Al, Pb의 順으로 적어지고 있다. 이와같은 結果가 되는 것은 破壞에 대한 抗力의 差異도 포함되어 있으리라 생각된다.

Fig. 14는 荷重이 2kg 일 때이다. 下部 試驗片 即 銅의 磨耗量을 보면 上部試驗片이 銅일 때의 磨耗量이 가장 많고 다음이 Al과의 組合일 때 그 다음이 Pb와의 組合일 때이며 Pb와의 組合일 때 下部 銅 試驗

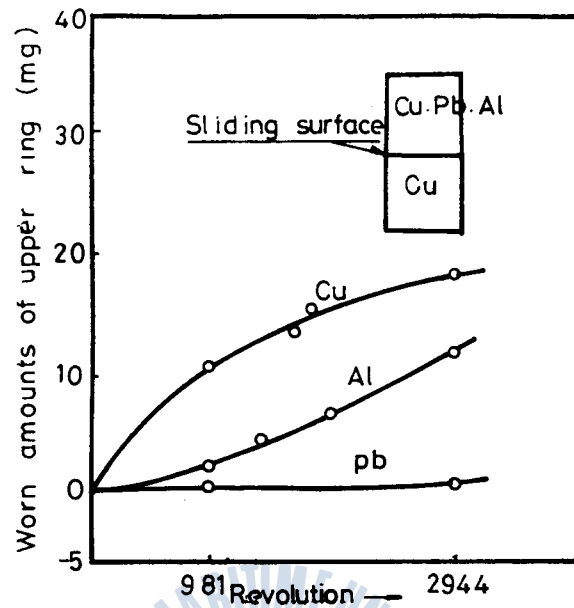


Fig13(A) Worn amounts of various upper rings at load 2Kg with sliding speed 263 mm/s.

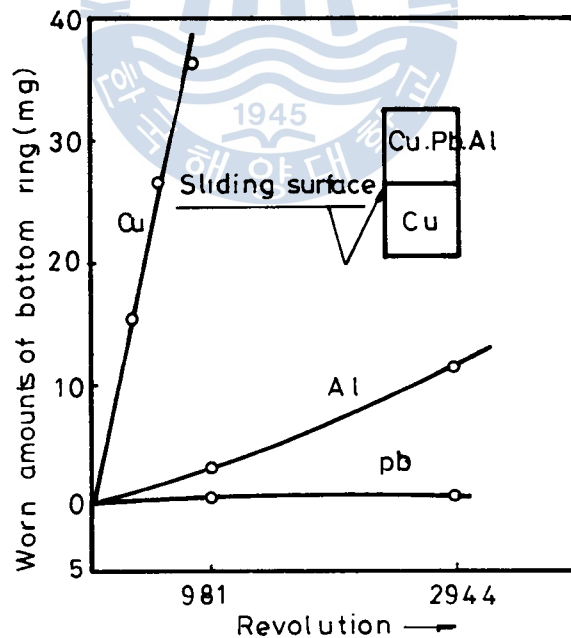


Fig13(B) Worn amounts of bottom rings contacting various upper rings at load 1Kg with sliding speed 263 mm/s

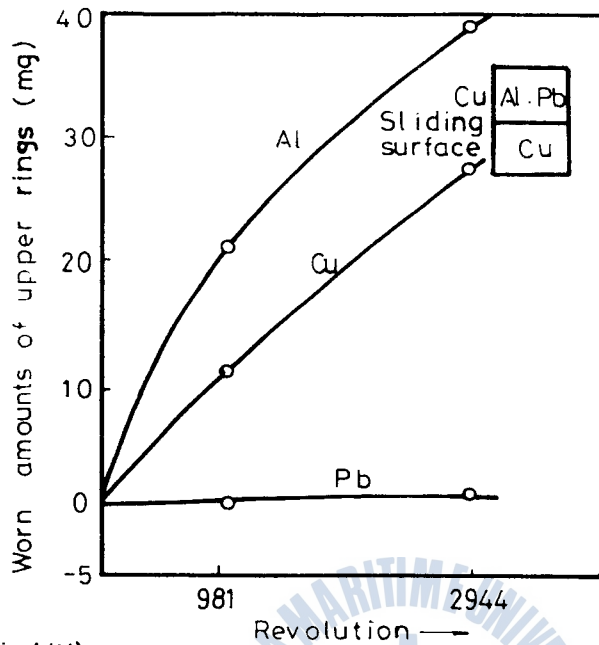


Fig 14(A) Worn amounts of various upper rings at load 2Kg with sliding speed 263 mm/s.

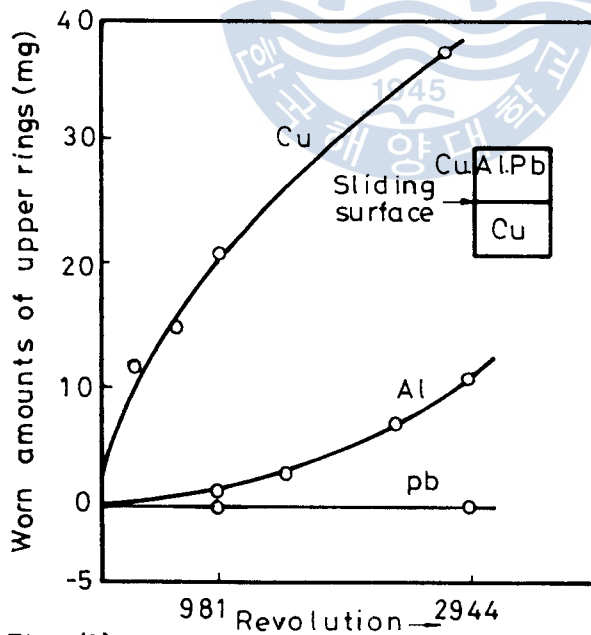


Fig 14(B) Worn amounts of bottom rings contacting with various upper rings at load 2Kg with sliding speed 263 mm/s.

片을 거의 磨耗되지 않고 있다. 上部 試驗片의 磨耗量은 Al, Cu, Pb의 順으로 나타났는데 荷重이 1 kg 때와는 Al, Cu의 順序가 바뀐 것 外는 비슷한 傾向이다. 上部試驗片의 磨耗順序가 Al와 Cu가 荷重이 增加함에 따라서 바뀐 것은 Cu의 熔融點이 1083℃이고 Al의 熔融點이 658℃이므로 摩擦時에 鍛接되었던 것이 미끄럼으로 떨어져 나갈 때의 抗力의 差 때문이 아닌가 推測된다.

回轉速度가 낮은 25 mm/S 때에 대해서 實施한 實驗結果는 Fig. 15 및 16에 나타나 있다.

Fig. 15은 荷重이 1 kg 때이며 下部試驗片 Cu의 磨耗量을 보면 上部가 銅 即 같은 銅끼리의 組合일 때가 磨耗量이 가장 많으며 그 다음이 Pb이고 上部試驗片이 Al일 때는 Al가 下部 銅 試驗片에 붙어 重量이 增加된다. 이 結果는 摩擦에 依하여 金屬은 粘着하는 것을 나타낸다. 같은 條件으로 Pb 上部 試驗片이 작이 될 때는 下部 銅 試驗片은 重量變化가 없이 磨耗하지 않았다.

Fig. 16은 荷重이 2 kg 일 때이다. 荷重이 1 kg일 때와 비슷한 傾向이고 下部 銅 試驗片의 磨耗를 보니 같은 銅일 때가 磨耗가 가장 많고 Al와 작일 때 荷重이 1 kg일 때와 같이 銅 試驗片의 重量이 增加했다. Pb와 작일 때도 磨耗가 거의 비슷한 傾向이고 磨耗되지 않고 있다.

以上の 實驗結果에서 Cu에 Cu, Al, Pb를 摩擦시켰을 때 같은 Cu를 서로 摩擦시켰을 때가 가장 磨耗가 크고 다음이 Al, Pb와 摩擦시켰을 때는 Cu는 거의 磨耗되지 않고 있다는 것이 밝혀졌다.

이 結果를 結晶格子常數와 熔融點의 關係로 考察하면 Cu, 3.6147Å, Al 4.0496 Å, Pb 4.9502 Å 이기 때문에 같은 結晶構造이면 格子常數가 가

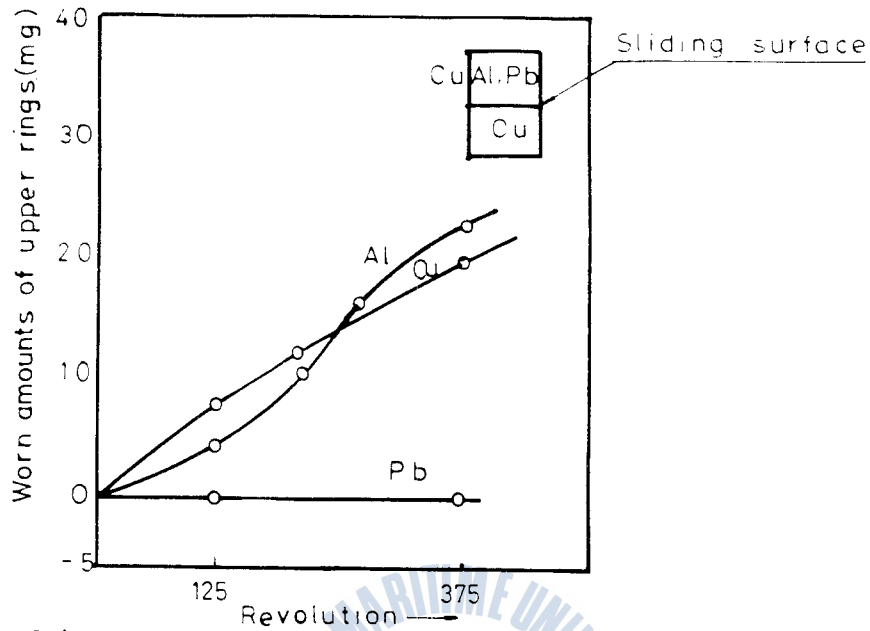


Fig 15(A) Worn amounts of various upper rings at load 1Kg with sliding speed 25mm/s.

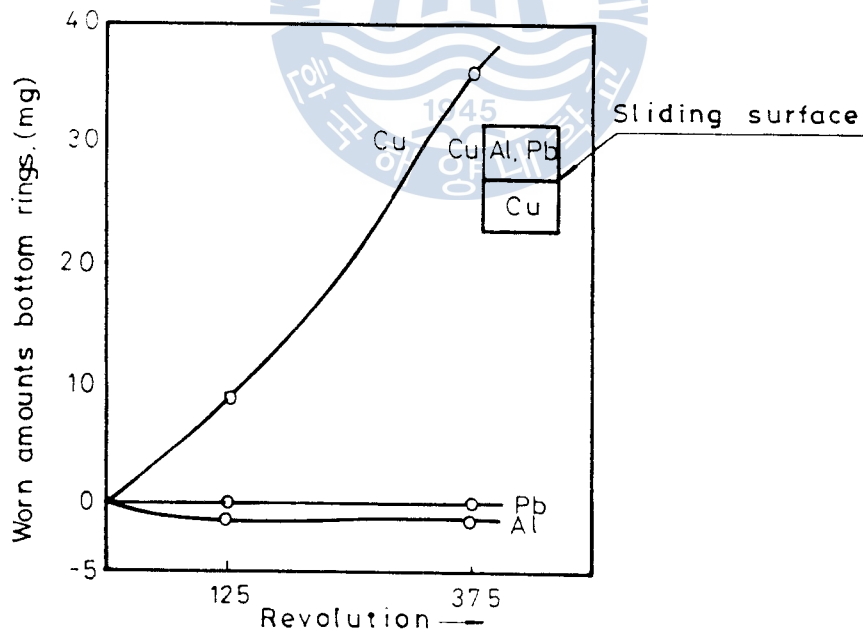


Fig 15(B) Worn amounts of bottom rings contacting with various upper rings at load 1Kg with sliding speed 25 mm/s.

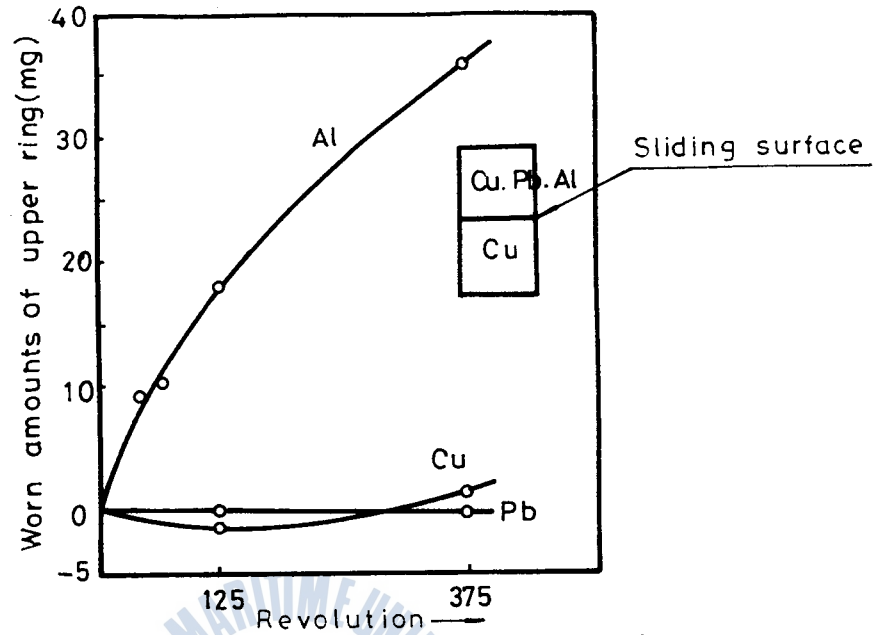


Fig 16(A) Worn amounts of various upper rings at load 2Kg with sliding speed 25 mm/s.

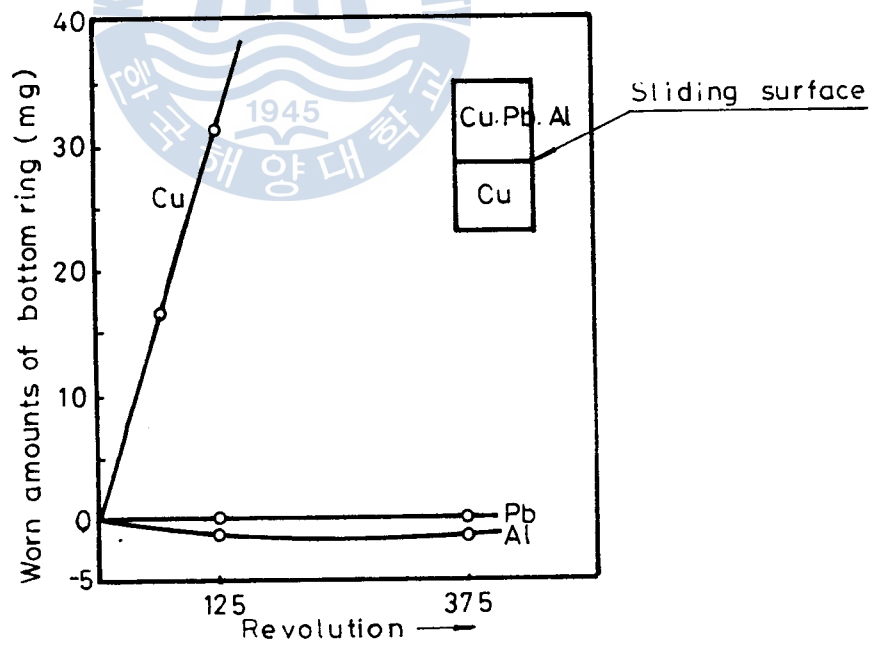


Fig 16(B) Worn amounts of bottom rings contacting with various upper rings at load at same. above.

까운 것 일수록 摩擦時에 磨耗되기 쉽다라는 結論을 얻을 수 있다.

5-3. 下部試驗片을 Al로 했을 때의 各種金屬과의 組合에 依한 磨耗

下部 試驗片을 Cu로 하여 各種金屬에 對하여 實驗한 것과 같은 생각으로 Al 試驗片을 만들어서 面心立方結晶을 갖는 金屬과의 磨耗試驗을 했다.

Al은 面心立方格子를 가지며 그 格子常數는 Cu보다 크고 Pb보다는 작다. 그러므로 格子常數가 가까울수록 磨耗量이 많다고 하면 磨耗量은 Al, Cu, Pb의 順으로 豫想이 된다.

Fig. 17 및 Fig. 18은 미끄럼속도를 263 mm/S 로 荷重이 1 kg , 2 kg 때의 結果이다. Fig. 17의 下部 Al 試驗片의 磨耗를 보면 相對가 Al일때가 磨耗量이 가장 많은 것은 S45C, Cu일 때와 같고, Cu 試驗片이 그 다음이고 Pb 試驗片일때는 Pb가 Al에 붙어서 下部 Al 試驗片의 重量을 增加시킨다. 荷重이 2 kg 인 때의 Fig. 18을 보면 下部試驗片의 磨耗가 相對인 試驗片이 Al, Cu, Pb의 順으로 下部試驗片이 磨耗되고 있다. 上部試驗片의 磨耗를 보면 磨耗의 大小의 順이 Pb, Al, Cu이다. 이것은 摩擦速度, 熔融點, 化學的인 性質 其他의 充分히 說明할 수 없는 因子가 있는 것으로 思慮되며 더 많은 研究가 必要한 것으로 생각된다.

다음에는 摩擦速度가 20 mm/S 로서 같은 實驗을 했다.

Fig. 19는 荷重이 1 kg 의 結果이며 Fig. 20은 荷重이 2 kg 때의 結果이다. 摩擦速度가 263 mm/S 때와 같이 下部 Al 試驗片의 磨耗는 上部試驗片이 Al 때가 磨耗量이 最大이고 Cu, Pb의 順으로 적어지고 있다. 上部試驗片의 磨耗는 Al, Pb, Cu의 順이다.

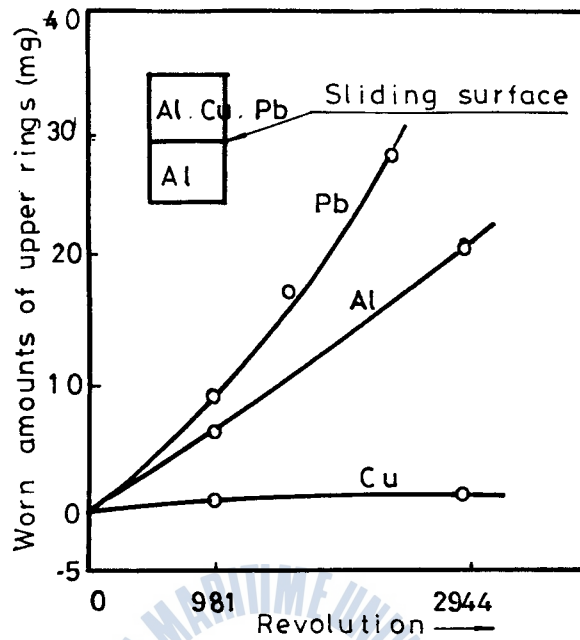


Fig 17(A) Worn amounts of various upper rings at load 1Kg with sliding speed 263 m m/s.

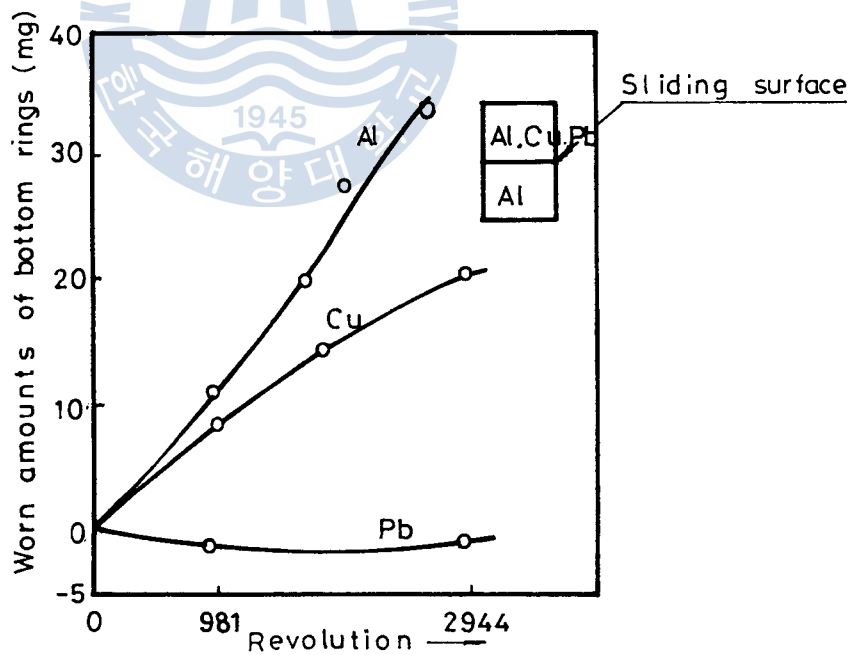


Fig 17(B) Worn amounts of bottom rings contacting with various upper rings at same above.

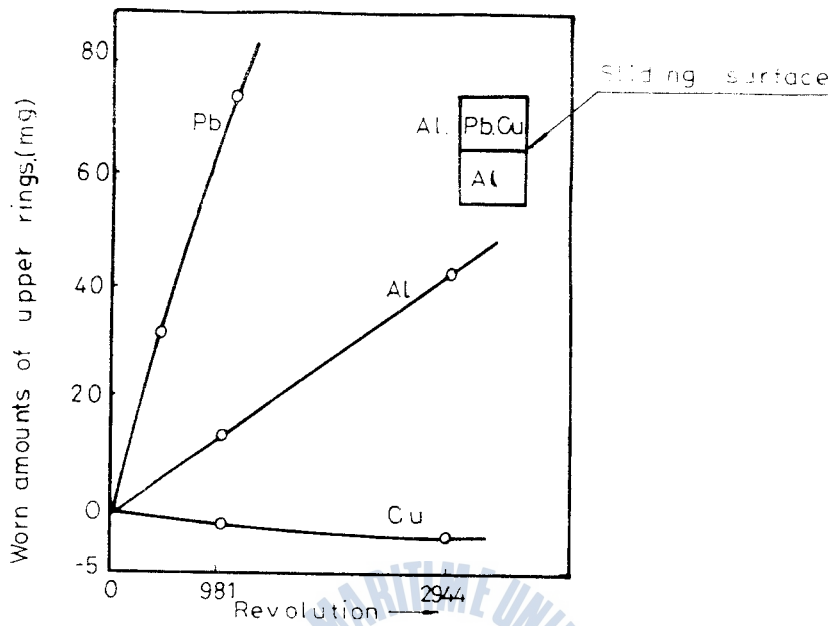


Fig 18(A) Worn amounts of various upper rings at load 2kg with sliding speed 263mm/s

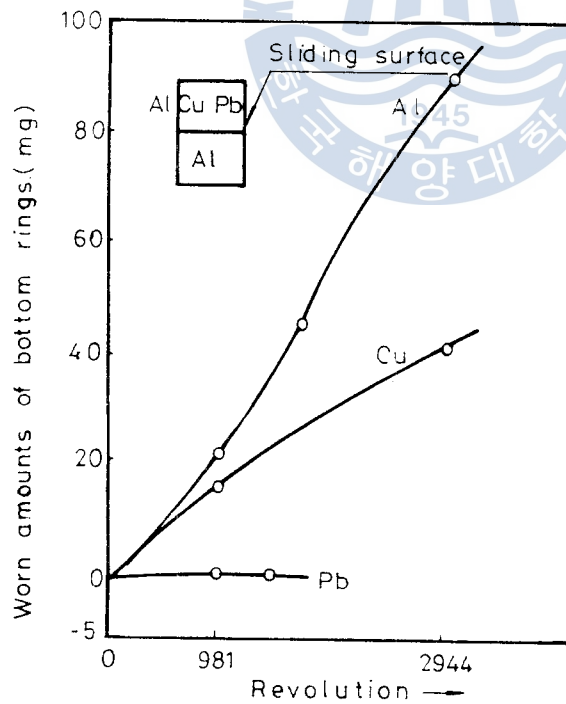


Fig 18(B) Worn amounts of bottom rings contacting with various upper rings at same above.

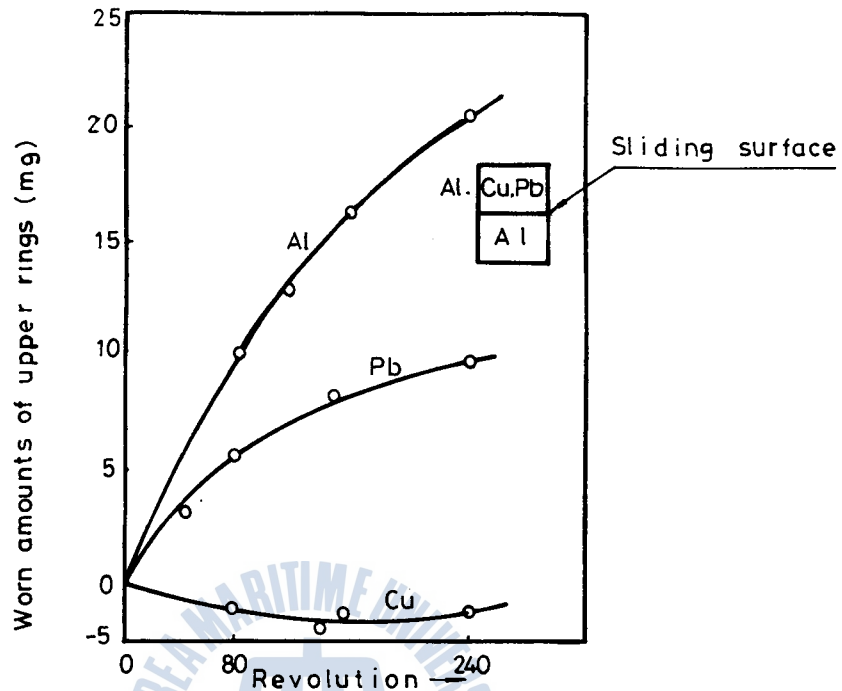


Fig19(A) Worn amounts of various upper rings at load 1Kg with sliding speed 20 m/m/s.

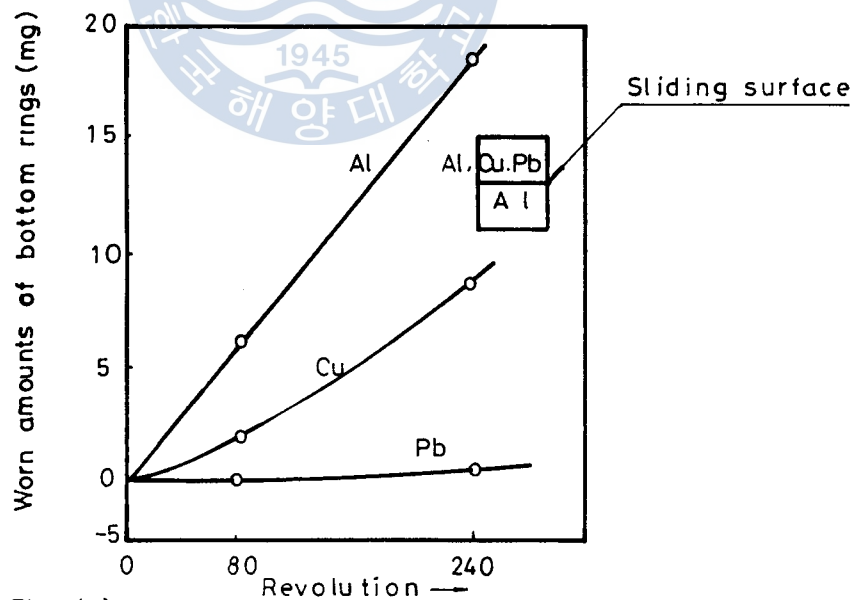


Fig19(B) Worn amounts of bottom rings contacting with various upper rings at same above.

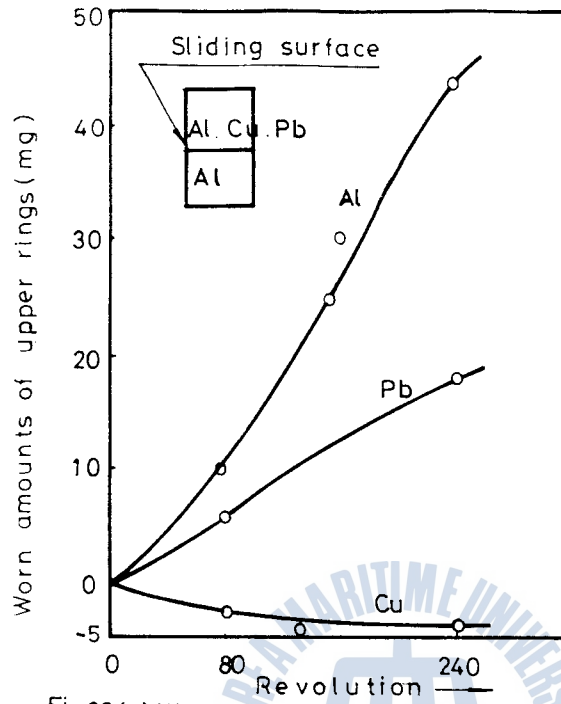


Fig 20(A) Worn amounts of various upper rings at load 2Kg with sliding speed 20 mm/s.

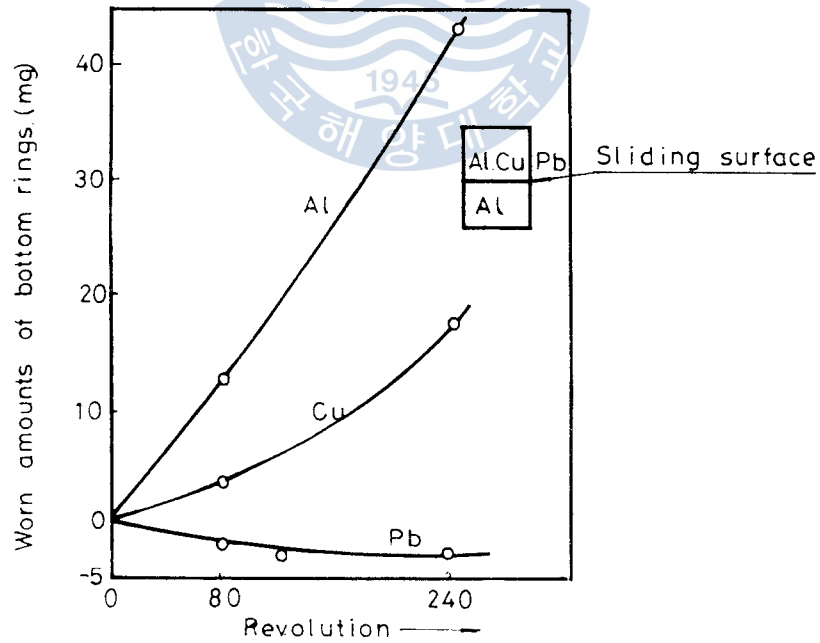


Fig 20(B) Worn amounts of bottom rings contacting with various upper rings at same above.

S45C, 혹은 Cu 下部試驗片일때는 Pb는 거의 磨耗하지 아니 했는데 Al 下部試驗片과의 組合일 때 磨耗하는 것은 格子常數의 差가 적게 되는 性質이 S45C, Cu보다 가깝기 때문일 것이다.

以上の 實驗에서 알루미늄에 대해서도 溶融點만으로는 充分히 說明이 안되고 格子常數가 가까운 것 일수록 磨耗를 많이 한다고 說明할 수가 있다.

6. 實驗結果의 考察

以上の 實驗을 綜合하여 보면 磨耗는 接觸되는 金屬에 따라서 많이 다르며 磨擦面의 突起部의 機械的 破壞에 依하여 일어나는 機構만으로는 說明이 不充分하다.

硬度가 큰 것은 磨耗가 적다.¹¹⁾ 脆性이 큰 것은 磨耗量이 크다.¹²⁾ 또 가스浸硫室化處理하면 耐磨耗性이 크다¹³⁾ 등의 性質도 耐磨耗性을 決定하는 重要한 因子이나 이것만으로서는 完全치는 못한 것 같다.

P. F. Bowden이 主張했듯이 溶融點에 대해서는 特히 注意해야 할 點이며 相對金屬의 種類에 關係없이 溶融溫度가 磨耗의 性質을 決定짓는 因子¹⁴⁾ 다 라고 한 說도 完全한 說明은 못되는 것 같다.

어떤 두 金屬이 接合함에는 相互金屬이 반듯이 溶融될 必要는 없는 것이며 溶融點의 1/3程度에서도 金屬表面의 原子擴散이 일어나게 되며¹⁵⁾ 磨擦熱이 發生하면서 接觸金屬은 熔着이 되는 것이다.

固溶될 수 있는 金屬의 接觸일지라도 磨耗는 熔着을 해서 다음 瞬間에

벌어져 나가면서 비로서 磨耗가 始作된다.

本 實驗은 荷重이 增加하면 磨耗量이 增加하고 摩擦距離가 크면 磨耗量이 크다는 J. T. Burwell과 C. D. Strang 의 實驗結果¹⁶⁾와 一致되고 있는 것을 보여준다.

P. F. Bowden 및 T. P. Hughes 는 研磨의 研究에서 研磨粉의 熔融溫度는 研磨되는 物體의 熔融溫度보다 높아야 한다¹⁷⁾고 報告하고 있다.

研磨도 磨耗의 一種이고, 研磨粉은 非金屬物質이 使用되는 것이 普通이므로 研磨되는 物質과 들어 붙지 않으므로 熔着磨耗가 아닌 것이다.

故로 熔融溫度는 熔着磨耗가 아닌 磨耗에서는 重要한 因子가 될 수 있어도 熔融溫度로서는 說明이 充分히 안되는 磨耗現象은 金屬과 金屬의 接觸에 依한 熔着現象에서 많이 볼 수 있다.

實際問題로서 배어링이 타는 경우에는 固溶體形成에 關係가 깊을 것으로 생각된다. 배어링에는 鋼軸에 對하여 鑄鐵의 배어링을 많이 使用하고 있으나 鋼의 배어링을 使用하지 않고 있다. 鑄鐵은 黑煙組織이 있으므로 普通의 金屬과는 달라서 鋼에 對해서 鋼보다 粘着하기가 어렵다. 이것이 鋼軸의 배어링으로 鑄鐵을 使用하고 있는 理由의 하나가 된다. 또 最近에 磨耗防止를 위하여 그 한 方法으로 酸化皮膜¹⁸⁾을 만드는 것이 있는데 이 事實이 磨耗라고 하는 것은 들어 붙기 때문에 일어난다는 것을 立証하고 있다. 卽 酸化皮膜이 摩擦面에 密着되어 있으면 相對金屬에 直接 接觸할 수가 없고 다시 말하면 固溶體形成을 못하기 때문이 아닐까 생각되며 따라서 磨耗가 되지 않는 것이라고 說明할 수가 있다.

磨耗가 摩擦面의 突起部가 서로 맞물려 溶着하지 않고 機械的으로만 破壞가 일어나는 것이라면 酸化皮膜은 磨耗防止의 效果가 없을 것이다.

7. 結 論

炭素鋼, 니켈, 銅, 알루미늄, 亜鉛, 납 그리고 朱錫 等の 異種金屬을 組合하여 各々の 磨耗特性을 調査한 結果 다음과 같은 結論을 얻었다.

- 1) 相互摩擦에서 일어나는 金屬의 磨耗量은 接觸金屬이 같은 金屬일 때 가장 많다.
- 2) 摩擦이 일어나는 경우 接觸金屬과의 사이에 固溶체가 形成되기 쉬울수록 磨耗量이 많으며 어려울수록 磨耗量이 적다.
- 3) 다른 金屬間의 摩擦에서 생기는 磨耗量은 두 金屬이 서로 같은 結晶構造를 가지고 格子常数가 가까운 金屬일 때 磨耗量이 많다.



参 考 文 献

1. J.T. Burwell: Report of S.A.E., New York, P.7 (1942)
2. P.F. Bowden and A.C. Moore, Trans. Faraday Soc. 47, 900 (1951)
P.F. Bowden and Blackwood, Proc. Roy. Soc. A213, 285 (1952)
3. P.F. Bowden and D. Tabor: The friction and lubrication of Solids, Oxford (1954) 曾田訳 丸善(株)東京 p. 58~60 (1982)
4. 前掲書(3) p. 54
5. W. Hume-Rothery: Electrons, Atoms, Metals, and Alloys, New York, P. 315 (1971)
6. 住本誠治: 船発会報 住本研究所 第162号 別冊 p. 5 東京(1962)
7. 前掲書(3) p. 27
8. 田中良平: 極限に挑む 金属材料, 工業調査局, 東京, p. 147~148(1979)
9. A.S.M: Heat Treating, Cleaning, and Finishing, Ohio, P271-292, (1964)
10. 前掲書(3) p. 271
11. W. Einlender: Archiv. f.d. E.H.W., P.61 (1935)
12. H. Meyer: Archiv. f.d. E.H.W., 501, P.9-10 (1937)
13. Osamu Momose and Sosuke Uchida: Wear of Gas Nitrosulfurized Alloy, J. Japan Inst. Metal, Vol.45 No.7, P718-722.(1981)
14. P.F. Bowden & T.P.Hughes: idid, A172, 280 P. 55 (1939)
15. 磯谷彰男, 中島耕一: 金属 vol, 43 No7 July p. 40 (1979)
16. J.T. Burwell & C.D. Strang: Proc. Roy. Soc. A212 470

P.282 (1952)

17. P.F. Bowden & T.P. Hughes: Nature, 139, 152 P.64 (1937)
18. A.J. Moore & D. Tabor: C.S.I.R. Tribophysics Division,
Report A.46 P.273 (1942)

