

베어링 합금材에 대한 캐비테이션 浸蝕 舉動에 미치는 潤滑油 環境의 影響

林祐助* · 李鎮烈**

*釜山水產大學校, **韓國海洋大學校

Influence of Lubricating Oil Environments on Behavior of Cavitation Erosion for Alloy Metals of Bearing

Uh-Joh Lim* and Jin-Yeol Lee**

*National Fisheries University of Pusan

**Korea Maritime University

Abstract—Recently, due to the erosion damage that were generated increasingly at alloy metals of slide bearing by cavity of lubricating oil with tendency of high speed and high output of reciprocating engine, there is a need to study the process on the formation of cavitation erosion, and the characteristic of cavitation erosion at lubricating oil environments under various condition for marine ship. Therefore, the apparatus of cavitation erosion experiment used 20 KHz, 24 μ m piezoelectric vibrator. The main results obtained through this test method are as follows: 1. The max. erosion rate at lubricating oil environments was related to the change of space, oil film thickness, and shown to tendency of gear oil>system oil>turbine oil>mixed oil environments with different viscosity. 2. The pitted hole by cavitation erosion at high viscosity oil environments became small and deep, and in addition to, they appeared to be wide and shallow at low viscosity.

1. 序 論

液體를 취급하는 機械·裝置는 流速 및 回轉速度 등이 빠르게 되면 유체충격과 靜壓의 低下에 따른 局部的 沸騰으로 인해 캐비테이션(cavitation) 現象이 발생한다.

이러한 캐비테이션 현상에 따라 소음과 진동이 초래하고, 또한 氣泡의 崩壞에 따른 衝擊壓으로 캐비테이션-浸蝕(cavitation-erosion)이 발생하여 機械·裝置의 구성재료에 損傷이 일어남으로써 이들 機械의 效率를 저하시킴과 아울러 壽命을 短縮시킬 수 있다. 더욱이, 腐蝕性的 액체에 사용되는 機械·裝置의 금속재료에는 캐비테이션-浸蝕과 동시에 電氣化學的인 腐蝕이 일어나게 되며, 금속재료에 浸蝕-腐蝕(erosion-corrosion)이 중첩하여 발생하는 경우는 浸蝕과 腐蝕이 상호간에 加速하는 上昇效果로 인해 機械·裝置의 수명에 치명적인 영향을 미친다[1].

이와같은 캐비테이션 現象의 발생은 電氣化學的으

로 안정된 潤滑油中에서는 둔화되지만, 최근 各種 內燃機關의 출력과 회전속도가 증가되는 추세에 따라 潤滑油中에서의 캐비테이션 浸蝕損傷이 報告되고 있다[2-4]. 특히, 自動車用 內燃機關, 船舶用 디젤 機關, 發電機用 터어빈 그리고 高壓 壓縮機의 베어링 합금材 등에서 캐비테이션 浸蝕損傷이 問題가 되고 있으므로[5-7], 內燃機關用 슬라이드 베어링 합금材의 캐비테이션 浸蝕舉動에 관한 研究가 要求되고 있다.

이러한 要求에 따라 Blount과 James 등[8,9]은 베어링 합금材에서의 浸蝕損傷을 發生場所에 따라 研究한 바는 있다. 그러나 슬라이드 베어링 합금材(alloy metals of slide bearing)에서 캐비테이션 浸蝕이 發生하는 過程과 材料, 油의 特性 등의 舉動은 明確하게 밝혀져 있지 않다.

따라서 本 研究에서는 超音波 振動振動에 의한 各種 油中에서 Sn基 베어링 합금材 1種, Pb基 베어링 합금材 7種 및 Cu-Pb基 베어링 합금材 4種 등[10]에 대한 캐비테이션-浸蝕實驗을 실시하였다. 이 실험을

Table 1. Chemical composition and properties of alloy metals of bearing used as cavitation erosion experiment

Alloy metals of bearing (W, %)	Sn	Pb	Cu	Sb	Ni	Hardness (Hv)	Density (mg/cm ³)	Tensile Strength (kgf/cm ²)
Sn base (W.M 1)	90	—	4	6	—	31	7368	7.55
Pb base (W.M 7)	12	73	1	14	—	20	9534	6.40
Cu-Pb base (K.M 4)	0.5	25	73.5	—	1	72	9338	18.50

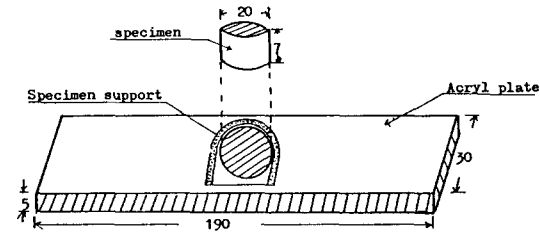


Fig. 1. Shape of specimen for cavitation erosion test (mm)

토대로 하여 油膜 두께의 變化, 油의 種類, 油의 使用時間 및 淸淨效果에 따른 浸蝕損傷學動 및 特性 등을 究明함으로써 베어링 合金材의 基礎設計資料에 寄與하고자 한다.

2. 試料 및 實驗方法

2-1. 試料材料 및 試驗片

本實驗에 사용한 試驗材料는 船舶 機關用 슬라이드 베어링 合金材인 Sn基 white metal 1種(W.M 1), Pb基 white metal 7種(W.M 7) 및 Cu-Pb基 kelmet 4種(K.M 4) 等이며, 이들 각 試驗材料의 化學的 成分 및 特性은 Table 1과 같다.

또한 Fig. 1은 低速 밀링으로 加工·製作한 시험편의 形狀을 보이고 있으며 有效露出表面(3.14 cm²)은 사포 및 oil lapping으로 精密研磨한 후 아세톤으로 脫脂하고, 나머지 部分은 電氣絶緣을 위하여 에폭시 樹脂로 2回 塗裝·絶緣하였다.

2-2. 實驗裝置

Fig. 2의 캐비테이션 發生 試驗機는 自作한 對向 二面形式의 振動加速裝置의 개략도로서 超音波 振動을 이용하고, 軸에 해당하는 振動子 혼(horn)은 共振 周波數 20 KHz, 振幅 24 μm로서 아크릴 板에 고정된 試驗片과 平行하게 間隔을 조정하여 上下로 進동하

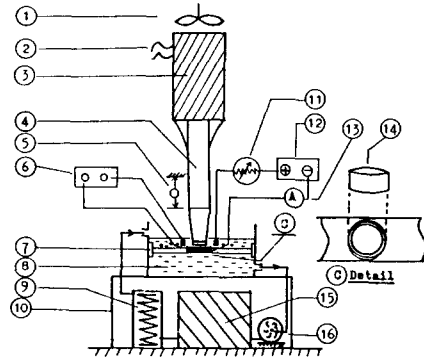


Fig. 2. Schematic diagram of cavitation erosion test apparatus

1. Cooling fan
2. Power supply
3. Transducer
4. Horn skirt
5. Dial gauge
6. Potentiometer
7. Specimen supporter
8. Soluble liquid
9. Temp. regulator
10. Stand bed
11. Rheostats
12. DC powder supply
13. Ampere meter
14. Specimen
15. Power control box
16. Circulating pump

였다.

또한 電氣化學的인 影響을 제거하기 위하여 浸蝕-腐蝕實驗 環境槽는 플라스틱으로 製作하였으며, 恆溫 裝置에 의해 약 25°C 溫度를 유지하고, 溶液의 濃度 變化를 방지하기 위하여 순환수 펌프로 每分當 2.8 리터 量을 순환시켰다.

그리고 일정한 實驗時間下에 試驗片의 무게 減少 量을 측정하기 위하여 自動停止 타이머(timer)에 의해 試驗時間을 調整하였고, 間隔測定에는 dial gage를 사용하였다.

2-3. 實驗方法

環境 溶液으로는 船舶用 潤滑油인 기어 油(gear oil, G.O), 시스템 油(system oil, S.O), 터어빈(turbine oil, T.O) 및 시스템 油(system oil) 70%(Wt)에 디이젤

Table 2. The properties of oil environments used as cavitation erosion experiment for alloy metals of bearing

Name of oil used	Specific Gravity (15/4°C)	Viscosity (cSt, 40°C)	Pour Point (°C)	Flash Point (°C)
System oil (S.O)	0.916	109.0	-18	260
Turbine oil (T.O)	0.876	65.5	-15	234
Gear oil (G.O)	0.878	144.1	-29	222
Mixed oil (M.O)	0.858	32.4	-12	150

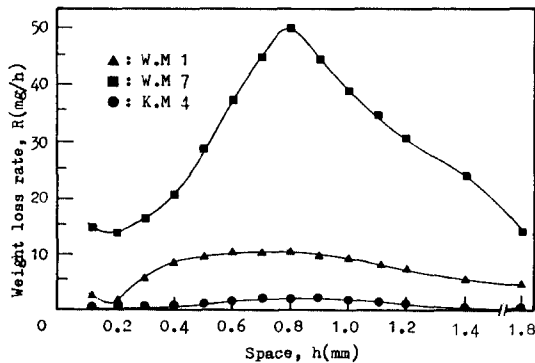


Fig. 3. Weight loss rate versus space under system oil environments for various materials

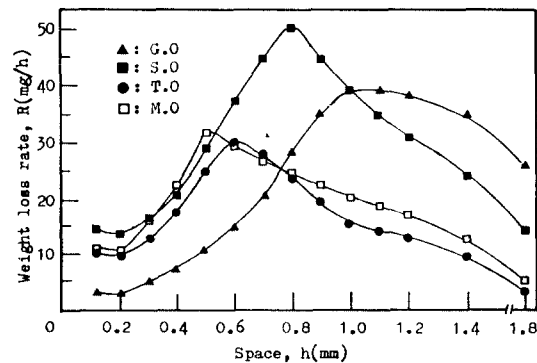


Fig. 4. Weight loss rate versus space under various oil environments for W.M 7

(dieseli oil) 30%(Wt)을 섞은 混合油(mixed oil, M.O) 등으로 하였으며, 캐비테이션 浸蝕實驗에 사용된 環境의 特性은 Table 2와 같다.

이때 浸蝕의 세기는 油膜 두께인 間隔 變化(0.1 mm~1.8 mm)로 조정하였으며, 試驗片의 무게 減少量(mg)을 測定하기 위하여 시험편의 유분은 綿으로 除去하고 아세톤으로 脫脂한 후 증류수에 洗滌·乾燥하였다. 또한 시스템 油을 基本 油 環境으로 사용하고, 油 環境의 종류 및 油의 使用時間에 따른 각종 油 環境中에서 浸蝕實驗을 수행하였다.

3. 結果 및 考察

3-1. 油膜두께인 間隔變化에 의한 캐비테이션-浸蝕損傷의 樣相

Fig. 3은 各種 베어링 合金材에 대한 시스템 油(system oil) 環境中에서 油膜두께인 間隔(h)의 變化에 따른 캐비테이션 침식손상에 의한 무게 減少率(R)를 정리하여 나타낸 것으로 實驗時間은 9時間이다.

이에 의하면 油膜의 두께인 間隔이 증가함에 따라 캐비테이션 浸蝕에 의한 무게 減少率은 증가하다가 약 0.7~0.8 mm에서부터 다시 감소하는 傾向을 나타

내고 있으나, 本 實驗中 間隔이 가장 적은 0.1 mm에서는 0.2 mm에서 보다 무게 減少率이 증가하는 양상이다. 그리고 Pb基 베어링 合金材 7種(W.M 7)의 무게 減少率이 전반적으로 크게 나타난다.

이와 같이 間隔의 變化에 의해 무게 減少率이 증가하다가 감소하는 이유는 試驗片의 損傷에 미치는 기포의 崩壞時 衝擊壓과 캐비테이션 氣泡의 數에 따라 무게 減少率에 미치는 영향이 가장 큰 원인으로 생각된다. 즉 h가 增加하면 氣泡의 分散은 용이하지만 기포의 衝擊壓이 약하고, 損傷面에 미치는 기포의 數가 적기 때문에 무게 減少率이 낮아진다고 생각된다. 또한 h가 적어지면 二面間에 발생한 氣泡가 分散되기 어렵게 됨으로써 氣泡가 일종의 緩衝作用을 하기 때문에 오히려 무게 減少率이 적어지고, h가 대단히 적은 0.1 mm로 되면 油의 流出入에 의한 剪斷에 의해 상당히 큰 應力이 試驗片 表面部에 作用하기 때문에 再次 무게 減少率이 약간 增加하는 것으로 추정된다[11, 12]. 그리고 W.M 7 試驗片의 무게 減少率이 크게 나타나는 이유는 Table 1에 의하면 W.M 7의 材料가 다른 베어링 合金材에서 보다 延性이므로 캐비테이션에 의한 금속표면의 損傷量이 증가하기 때문이라 생각된다.

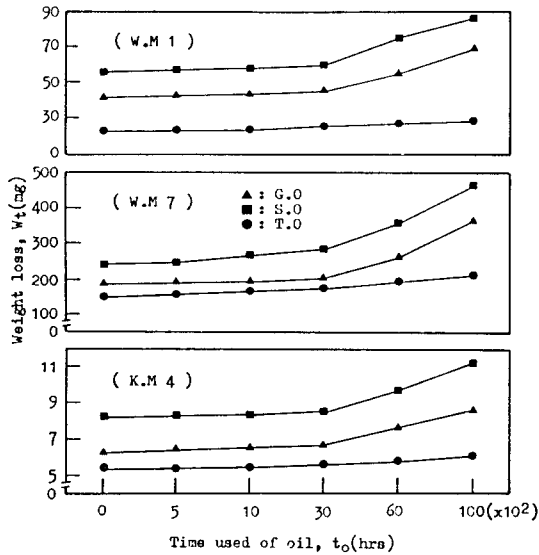


Fig. 5. Weight loss versus the time & kind of used oils for various materials after 5 hrs test duration

3-2. 潤滑油의 환경에 따른 油膜두께가 캐비테이션-浸蝕損傷에 미치는 영향

Fig. 4는 Pb基 베어링 합금材 7種에 대해 여러 潤滑油 環境中에서 間隔(h)의 變化에 따른 캐비테이션 침식손상에 의한 무게 減少率을 정리한 것으로 실험 시간은 9時間이다.

이에 의하면 最高 浸蝕率(實驗時間에 따른 무게 減少率)이 最高 증가한 때를 稱함)은 S.O>G.O>M.O >T.O의 油 環境 順으로 나타나고, 最高 浸蝕率)이 나타나는 油膜의 두께인 間隔은 G.O>S.O>T.O>M.O의 環境 順이다.

이와 같이 最高 浸蝕率)이 S.O>G.O>M.O>T.O 油 環境으로 나타나는 이유는 Table 2에 의하면 粘度가 높게 됨에 따라 氣泡의 崩壞時 衝擊壓이 강하기 때문에 最高 浸蝕率)이 크게 되지만, 粘度가 높은 G.O에서 보다 S.O에서 最高 浸蝕率)이 증가하는 것은 G.O에서 衝擊壓도 크지만 氣泡의 崩壞時 氣泡의 數가 적기 때문이라고 思料된다.

또한 油의 粘度가 낮은 M.O와 T.O에서는 氣泡의 形成·分散이 容易하지만 氣泡의 崩壞·消滅의 衝擊力이 약하여 最高 浸蝕率)이 낮지만, M.O에서 보다 粘度가 높은 T.O에서가 最高 浸蝕率)이 증가한 것은 燃料 油에 의한 腐蝕作用 때문이라 생각된다.

그리고 最高 浸蝕率)이 나타나는 間隔)이 G.O>S.O >T.O>M.O 油 環境 順인 것은 粘度가 높을수록 氣

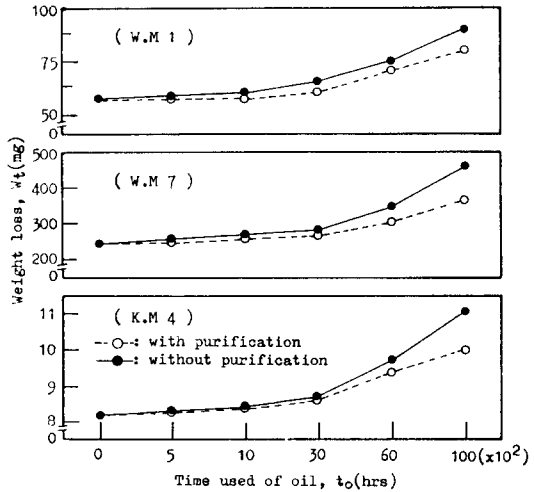


Fig. 6. Weight loss after 5 hrs cavitation erosion test at system oil used for various specimens

泡의 形成·消滅에 요하는 油膜 두께가 크고, 氣泡의 崩壞時에 油 擴散에는 큰 間隔)이 필요하기 때문이라고 思料된다[13].

3-3. 베어링 合金材에 대한 油의 使用時間에 따른 浸蝕損傷의 特性

Fig. 5는 各種 베어링 合金材에 대해 여러 潤滑油 環境에서 油의 使用時間에 따른 試驗片의 무게 減少量을 整理한 것으로 實驗時間은 300分이고, 間隔은 0.7 mm로 하였다.

이에 의하면 使用時間이 증가한 油 環境일수록 무게 減少量은 증가하나, 약 3000時間 使用 後부터 급격히 증가한다. 또한 K.M 4 試驗片에서의 무게 減少量의 增加幅)이 가장 鈍하다.

이와 같이 長時間 사용한 油 環境일수록 무게 減少量)이 증가하는 이유는 약 3000時間 使用 油는 潤滑油 檢査에 의하면 pH값이 4.0 以下인 弱 酸性으로 變化함으로써 固形物)이 증가하여 粘度가 上昇하기 때문이라 생각된다. 그리고 K.M 4 試驗片에서 무게 減少量)의 增加幅)이 적은 이유는 K.M 4 試驗片은 Table 1에서 Cu 및 Ni이 함유하고 있으므로 腐蝕性인 酸化作用에 鈍感)하여 皮膜의 形成)이 강하고 硬度가 높은 耐 浸蝕-腐蝕性인 材料)이기 때문이다[14].

3-4. 무게 減少量)에 미치는 淸淨油와 非 淸淨油의 特性

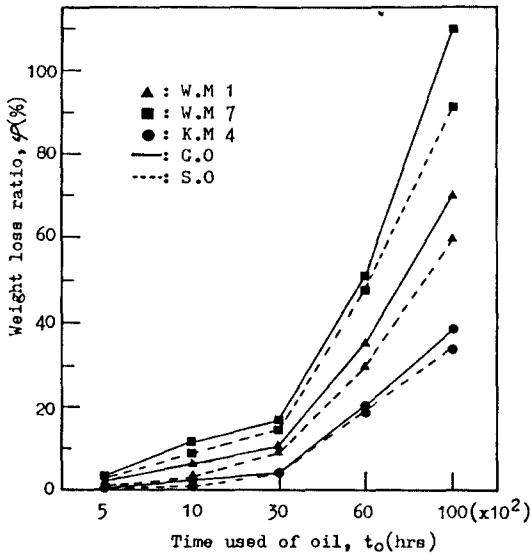


Fig. 7. Weight loss ratio between used oils and new oils after 5 hrs test duration for various materials

Fig. 6은 使用中 連續的으로 遠心分離器에 의해 淸淨한 S.O油와 淸淨하지 않은 S.O油 環境에서 各種 베어링 合金材에 대한 무게 減少量을 정리한 것으로 浸蝕 實驗時間은 300分이고, 間隔은 0.7 mm로 하였다.

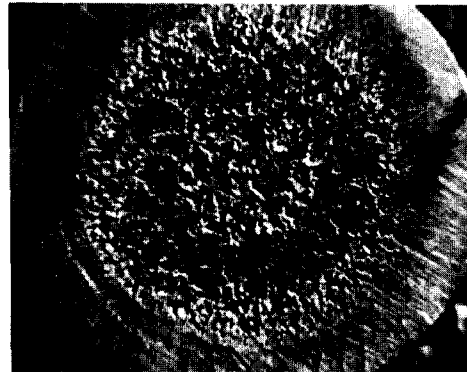
이에 의하면 油의 使用時間이 길어짐에 따라 非淸淨油의 무게 減少量이 淸淨油에서의 무게 減少量보다 크게 증가하고 있으며, 淸淨油에서 보다 非淸淨油에서 무게 減少量의 증가폭은 W.M 7>W.M 1>K.M 4의 試驗片 順으로 나타내고 있다.

이와 같이 淸淨油와 非淸淨油 사이에 油의 使用時間이 길어짐에 따라 무게 減少量의 차이가 큰 이유는 連續的으로 淸淨을 하게 되면 酸化와 乳化作用에 影響을 미치는 酸化觸媒作用의 因子인 殘留炭素粉, 灰分, 不溶解粉 및 水分 등이 감소함으로써 油의 特性 變質이 鈍化되기 때문이라고 생각된다.

또한 油의 使用時間이 증가할수록 淸淨油와 非淸淨油에서 무게 減少量의 增加幅이 W.M 7>W.M. 1 >K.M 4 試驗片 順으로 나타나는 이유는 W.M 7



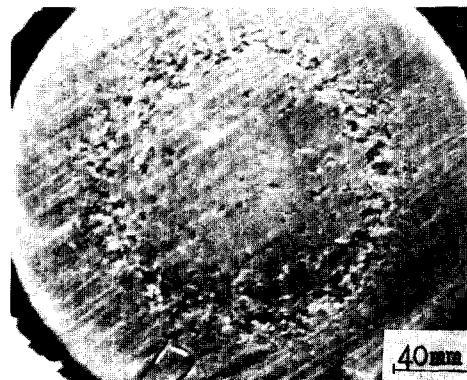
W.M 7, G.O



W.M 7, S.O



W.M 7, T.O



W.M 7, M.O

Photo 1. 1 Damaged surfaces by cavitation processes under various oil environments for W.M 7 (space: 0.7 mm, test duration: 120 min.)

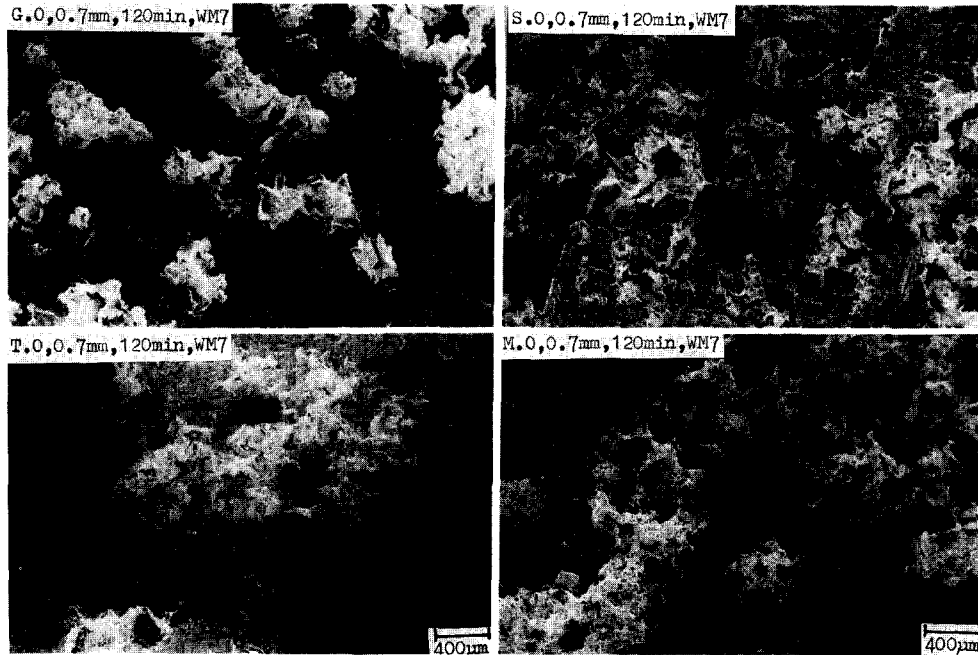


Photo 2. Damaged surfaces under various oil environments by cavitation erosion for W.M 7

시험片 材料가 延性的이기 때문에 캐비테이션 衝擊壓에 약하고, 腐蝕性인 酸化와 乳化作用에 敏感하여 浸蝕-腐蝕의 上昇作用을 가속하기 때문이다.

Fig. 7은 各種 베어링 合金材인 시험片에 대해 使用時間에 의한 油 環境(淸淨과 非淸淨인 G.O와 S.O의 油 環境 等)에서의 무게 減少量의 比率[(非淸淨油에서의 무게 減少量-淸淨油에서의 무게 減少量/非淸淨油에서의 무게 減少量)×100%]를 整理한 것이다[15]. 이때의 實驗時間은 300分이고, 間隔은 0.7 mm로 하였다.

이에 의하면 시험片的 종류에 큰 관계없이 油의 使用時間이 약 3000時間에서부터 급격히 增加하는 추세이다. 또한 G.O의 油 環境에서의 比率이 S.O의 油 環境에 比하여 크며, 材料面에서 보면 W.M 7>W.M 1>K.M 4의 試驗片 順으로 나타난다.

이와 같이 淸淨油에 대한 比淸淨油에서의 무게 減少量 比率이 약 3000時間 使用 後부터 크게 增加하는 이유는 比淸淨油 環境에서 酸化促進 및 固形物質의 生成 等이 급격히 增加하여 酸化에 의한 腐蝕作用이 가속되고 油 粘性이 增加하기 때문이고, G.O에서의 比率이 S.O에 比하여 높은 것은 油의 使用環境과 運轉條件이 가혹하기 때문이라 생각된다. 그리고 W.M 7과 같이 延성이 풍부한 材料일수록 浸蝕-腐蝕의 上

昇效果에 따른 金屬粒子의 脫離現像이 촉진됨으로써 脆性이 강한 K.M 4 試驗片에 比하여 무게 減少量의 比率이 증가한다고 思料된다.

3-5. 各種 潤滑油 環境中에서의 캐비테이션-浸蝕 損傷面 寫眞

Photo 1은 Pb基 베어링 合金材 7種 試驗片에 대해 潤滑油의 種類에 따른 浸蝕損傷面을 나타난 寫眞으로 120分 浸蝕實驗 後의 損傷面이고, 間隔은 0.7 mm로 하였다.

이에 의하면 粘度가 높은 油인 G.O 中에서의 浸蝕小孔形態는 小孔이 적고, 깊으며 날카롭다. 반면, S.O 中에서의 浸蝕小孔을 보면 中央部의 小孔은 크게 脫落되어 dimple 形態를 이루고 周邊部의 小孔은 樹脂狀으로 小孔形態는 다소 不規則하다.

또한 T.O 中에서의 소공모양은 小孔壁의 脫離現像으로 小孔 크기가 넓고 얇으며, 小孔壁이 多少 날카로운 形態이다. 그리고, M.O의 境遇는 浸蝕小孔의 數가 적으며 소공모양은 뾰족뾰족하고 날카로운 樹脂狀을 이루고 있다.

Photo 2는 Photo 1에서의 浸蝕損傷面을 좀더 구체적으로 考察하기 위하여 Pb基 베어링 合金材 7種 試驗片에 대해 各種 潤滑油 環境에 따른 浸蝕損傷面을

SEM 寫眞으로 나타낸 것이다.

이와 같이 S.O의 油 環境에서 浸蝕小孔形態는 斑 狀 樹 脂 狀으로 形 成 되 어 있 으 며 큰 小 孔 周 邊 에 는 微 小 龜 裂이 존재하고 있다. 또한 G.O의 油 環 境 中 에 서 微 小 小 孔의 數는 S.O의 油 環 境 中 에 서 보 다 多 少 적 지 만, 깊고 큰 甍 兒 的 脫 離 에 의 한 큰 小 孔이 불규칙하게 발생되어 있다. 그리고 低 粘 度인 T.O와 M.O 油 環 境 中 에 서의 침식모양은 金屬皮膜의 脫 離 作 用이 試 驗 片 전 표 면에 發 生 하 면 서 微 小 小 孔이 存 在 하고 있다.

4. 結 論

超音波 振動裝置에 의한 各種 潤滑油 環境中에서 內燃機關用 베어링 合 金 材의 캐비테이션-浸蝕學動을 연구한 結果 다음과 같은 結論을 얻었다.

1. 潤滑油 環境中에서 캐비테이션 浸蝕에 의한 最高 浸蝕率은 粘 度가 높을수록 油膜이 두꺼운 間隔에서 나타난다.

2. 使用時間이 증가한 油 環境일수록 무게 減少量은 증가하나, 약 30000時間 使用 後부터 급격히 증가하는 추세로서 K.M 4 試驗片에서의 무게 減少量의 增加 幅이 가장 鈍하다.

3. 캐비테이션에 의한 浸蝕小孔의 형태는 實驗時間과 油 環境의 종류에 따라 상이하고, 高 粘 度인 油 環境에서의 浸蝕小孔은 깊고 날카로운 반면, 低 粘 度에서는 小孔이 넓고 얇다.

참 고 문 헌

1. 日本機械學會, 腐食と破壊, 日本工業出版社, pp. 67-

- 73, 1986.
2. 西本榮司, 機械の研究, 第34卷, 第1號, pp. 207-209, 1982.
 3. W. Kleinbreuer, Fluidtechnischen Kolloquium, Marz, pp. 24-25, 1986.
 4. 山口惇, 潤滑, 日本潤滑學會, 第27卷, 第9號, pp. 635-637, 1982.
 5. 吉野達治, エロ-ジョン・コロ-ジョン(流體による材料の侵食), 裳華房, pp. 109-120, 1987.
 6. 日本潤滑學會, 潤滑故障例とその對策, 養賢堂, pp. 16, 1985.
 7. S.H. Frederick and H. Capper, Materials for Marine Machinery, Marine Media Management, Ltd., pp. 211-212, 1981.
 8. G.N. Blount and R.D. James, Proc 9th Leeds-Lyon Symp. on Tribology, 1982, IME, pp. 297, 1983.
 9. R.D. James and G.N. Blount, 2nd Int. Conf. on Cavitation, IME Paper C-216, pp. 229, 1983.
 10. 大同メタル工業(株), すべり軸受の 選び方と取扱い, pp. 3-4, 1987.
 11. 岩井善良, 岡田庸敬, すべり軸受の キャビテ-ション・エロ-ジョン, 潤滑, 第33卷, 第1號, 日本潤滑學會, pp. 4-5, 1998.
 12. 伊藤博信, 山本隆司, 濕式クラッチ用 フェ-シソグ材の摩擦特性に及ぼす潤滑油 粘 度 の 影 響, トライボロ-スト, 第34卷, 第9號, 日本潤滑學會, pp. 664-668, 1989.
 13. 岡田庸敬, 栗津 熏, 岩井善朗, 日本機械學會 論文集(A編), 51卷, 471號, pp. 2656, 1985.
 14. 岡田庸敬, 機械の研究, 41卷, 1號, pp. 15, 1989.
 15. Shoji Tsuyuki, Takafumi Enari and Takahiko Sasaki, Evaluating the Cavitation Damage Inhibition of Aqueous Antifreeze Solution, Boshoku Gijutsu, 34, pp. 513-515, 1985.