

內燃機關用 슬라이드 베어링材의 케비테이션 浸蝕舉動과 腐蝕影響 및 潤滑油의 舉動에 관한 研究*

李 鎭 烈 · 林 祐 助**

韓國海洋大學校, *釜山水產大學校

(1992년 5월 20일 接受)

A study on the behaviour of cavitation erosion and lubricating oils and the influence of corrosion on slide bearing metals for internal combustion engine*

Jin-Yeol LEE and Uh-Joh LIM**

Korea Maritime University

*National Fisheries University of Pusan

(Received May 20, 1992)

In this paper, the behaviour of cavitation erosion, influence of corrosion and corrosion control on slide bearing metals for internal combustion engine were investigated, and this experiment was done by the vibratory cavitation erosion tester.

The main results obtained are as follows :

1. With decreasing the space between horn and specimen, the weight loss and its rate increased step by step. But the weight loss and its rate of 0.2mm space decreased conversely more than that of 0.4mm space at early stage.
2. The weight loss and its rate with change of pH were appeared to the order of pH 2 > pH 12 > pH 7 > pH 4. And the weight loss and its rate at pH 4 decreased at best.
3. The weight loss and its rate by cavitation erosion for bearing metals were shown to the order of W. M 7 > W. M 1 > K. M 4.
4. There appeared mainly small pit hole at pH 2, and appeared the pit of netting thread type at pH 12 by the results of the damaged surfaces at pH 2 and pH 12 environments that were sensitive to cavitation erosion.
5. With increasing the viscosity of lubricating oil, the weight loss rate by cavitation erosion became dull at the space below 0.5mm.
6. The protective efficiency of cavitation erosion-corrosion is superior inhibitor of chormate(25 ppm) to cathodic protection.

* 이 논문은 1991년도 교육부지원 한국학술진흥재단의 자유공모(지방대학육성)과제 학술연구조성비에 의하여 연구되었으며, 연구지원에 감사합니다.

1. 序 論

최근 工業의 發展과 더불어 航空機, 船舶 및 自動車 等은 더욱 輕量化, 高强度化 및 高速化 되고 있으며, 이들 機械構造物 等이 사용되는 環境은 多樣化되고 苛酷化되는 趨勢에 있다. 이러한 機械 構造物 等에 케비테이션(cavitation)浸蝕에 의한 損傷이 발생함으로써, 機械의 性能에 致命的인 影響을 미친다^{1,2)}.

또한 케비테이션에 의한 浸蝕損傷은 內燃機關의 冷却水側과 메인 및 크랭크 핀 베어링, 船舶의 프러펠러, 펌프 임펠러, 船尾管軸 베어링, 공기 壓縮機의 베어링, 冷凍機의 베어링, 각종 公業용수 配管 및 원자로의 冷却配管系統 等에 많이 발생한다³⁻⁶⁾.

최근 內燃機關은 高速化 및 高出力化되므로써 機關의 各種 슬라이드 베어링에서 케비테이션浸蝕이 일어나며, 이러한 浸蝕損傷에 의해 機關의 效率이 低下하고, 壽命이 단축된다는 報告가 있다⁷⁾.

특히 船舶用 內燃機關의 潤滑油 冷却器는 海水에 의해 冷却됨으로써 海水의 侵入이 일어날 수 있다. 이러한 海水의 侵入에 의해 電氣化學的인 腐蝕이 케비테이션浸蝕을 上昇시킴으로써 內燃機關의 效率 低下 및 壽命을 더욱 短縮시킬 수 있다⁸⁾.

이와 같은 케비테이션 浸蝕-腐蝕作用에 대한 研究로는 Thiruvengadam, Haynes 및 Adler 等이 海水中에서 케비테이션 및 衝擊에 의한 浸蝕-腐蝕 研究가 있으며⁹⁻¹¹⁾, 이들은 주로 振動子(transducer)의 혼(horn)에 試驗片을 부착하여 海水霧圍氣에서 浸蝕發生 舉動을 研究하였다.

그러나 實際, 슬라이드 베어링部位에서 케비테이션에 의한 浸蝕發生은 축과 베어링사이의 潤滑油中에서 많이 發生하므로 혼과 試驗片의 對面下에서 케비테이션浸蝕舉動과 이

浸蝕을 방지하기 위한 陰極防蝕(cathodic protection) 및 腐蝕抑制劑(inhibitor) 適用下에서의 浸蝕腐蝕 抑制效果에 관한 研究가 要求되지만, 이러한 研究는 거의 찾아 볼 수 없다¹²⁾⁻¹⁵⁾.

따라서 本 研究는 超音波 振動裝置에 의해 케비테이션을 發生시켜, 振動子 혼과 試驗片과의 間隔 變化, 環境의 pH 變化 및 베어링과 潤滑油의 種類에 따라 케비테이션浸蝕-腐蝕實驗과 1% NaCl 水溶液中에서 陰極防蝕 및 腐蝕抑制劑의 適用에 의한 浸蝕-腐蝕 抑制效果에 대한 實驗을 실시하여 케비테이션浸蝕舉動 및 樣相을 觀察, 調查하였다. 이러한 實驗結果를 토대로 하여 間隔 變化, pH의 變化 및 베어링과 潤滑油의 종류에 따른 슬라이드 베어링材의 케비테이션 浸蝕-腐蝕舉動에 미치는 影響을 究明하고, 이 浸蝕-腐蝕을 방지하기 위해 陰極防蝕 및 腐蝕抑制劑에 의한 浸蝕-腐蝕 抑制效果를 考察하므로써 슬라이드 베어링材의 基礎設計 및 整備指針資料로 活用하는데 寄與하고자 하였다.

2. 試驗片 및 實驗方法

2.1 試驗片

本 實驗에 사용한 試驗片은 슬라이드 베어링 재료인 Sn基 베어링합금 1種(W.M 1), Pb基 베어링합금 7種(W.M 7) 및 Cu-Pb基 베어링합금 4種(K.M 4)으로 하였다. 이들 베어링材料의 化學的 成分및 特性은 Table 1과 같다.

이와 같은 化學的 成分및 特性을 가진 試驗材料로 부터 切取하여 製作 加工한 試驗片의 形狀은 Fig. 1에 보인다. 試驗片의 表面은 사포 1500番까지 研磨하고, 오일 랩핑(oil lapping)한 後 아세톤으로 脫脂하였다. 有效

Table 1. Chemical composition and properties of used metals

Wt(%) / metals	Sn	Pb	Cu	Sb	Ni	Density (mg/cm^3)
Sn Base(W.M 1)	90	—	4	6	—	7368
Pb Base(W.M 7)	12	73	1	14	—	9534
Cu-Pb Base(K.M 4)	0.5	25	73.5	—	1	9338

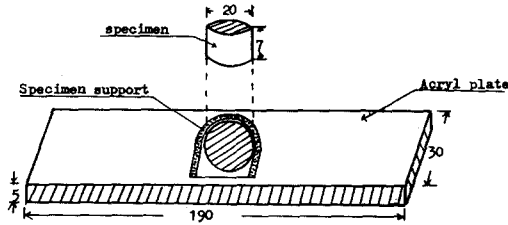


Fig. 1. Shape of specimen for cavitation erosion test(mm).

露出表面을 제외한 나머지 部分은 에폭시 樹脂로 2回 塗裝絶緣하였고, 陰極防蝕을 실시 하기 위하여 0.5mm 直徑의 被覆電線을 試驗片에 連結하고, 陰極防蝕中 外部電源法에서 不溶性陽極으로는 白金電極(99.9%) 그리고 犧牲陽極防蝕으로는 Al-合金犧牲陽極을 使用 하였으며, Table 2는 Al-合金犧牲陽極의 化學的 成分을 보이고, 이 Al-合金양극의 開路 電位는 $-1050mV/SCE$ 이었다.

2.2 實驗裝置

本 實驗에 使用한 캐비테이션 發生裝置로서 對向二面形式의 振動加速試驗機의 全體系統圖는 Fig.2와 같으며, Fig.2의 캐비테이션 發生試驗機는 自作한 것으로 振動子(transducer)의 흔(15D×150Lmm)과 對向하게 試驗片을 아크릴板에 固定하고 캐비테이션을 發生시켰으며, 試驗片에 垂直으로 흔이 上下로 振動하도록 하였다. 그리고 흔의 끝

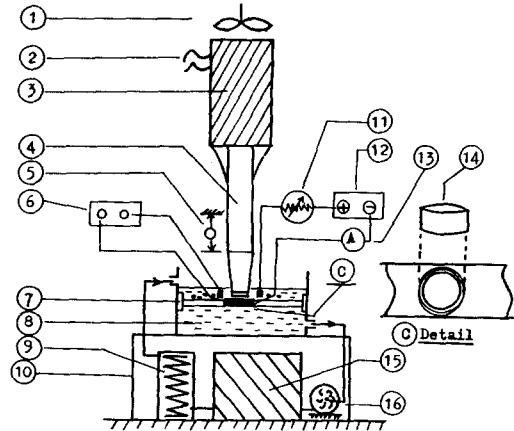


Fig. 2. Schematic diagram of cavitation erosion test apparatus.

에는 耐蝕性이 강한 STS304 스테인레스鋼의 디스크 (직경 15mm, 높이 8mm)을 取付. 固定하였다. 이때 振動子의 共振周波數는 ASTM規程¹⁶⁾에 따라 20KHz로 하였고, 振幅은 $24\mu m$ 로 일정히 維持하였다.

또한 環境槽는 플라스틱으로 製作하였으며, 自動停止 timer에 의해 試驗時間을 調整하도록 하였다.

Table 2. Chemical composition of Al-alloy sacrificial anode (wt%)

composition weight(%)	Zn	In	Fe	Si	Ca	Al
	4.2	0.027	0.053	0.072	0.005	balance

2.3 實驗方法

캐비테이션浸蝕-腐蝕 實驗은 pH를 變化시킨 環境과 船舶用 潤滑油中에서도 실시하였으며, 浸蝕-腐蝕 抑制實驗의 環境으로는 浸蝕抑制效果를 알기 위한 實驗은 腐蝕성이 강한 1% NaCl 水溶液中에서 陰極防蝕法 및 腐蝕抑制劑 적용하에서 실시하였다. 各 使用 環境의 溫度는 恒溫裝置에 의해 約 25°C로 유지하고, 溶液의 濃度 및 傳導度의 變化를 防止하기 위하여 플라스틱材인 循環水펌프로 2.8liter/min量을 循環하였다.

또, 試驗片과 흔과의 間隔은 다이얼 게이지로 測定하였으며, 무게減少量은 試驗片을 아세톤으로 洗淨, 乾燥한 後 測定하였다. 그리고 陽極인 各 試驗片과 對極인 스테인레스 鋼 디스크와의 電氣化學的인 影響은 캐비테이션 發生에 의한 腐蝕-浸蝕에 比하여 微小함으로 無視하였다¹⁷⁾.

各 實驗條件에 따른 상세한 實驗方法을 要約하면 다음과 같다.

1) pH의 變化에 따른 캐비테이션 浸蝕實驗

腐蝕環境은 pH 7인 蒸溜水에 HCl과 NaOH溶液을 소량씩 混合하여 pH 2, pH 4, 및 pH 12로 각각 고정하였다.

2) 間隔變化에 따른 캐비테이션 浸蝕實驗
pH 7에서 試驗片과 진동자 흔의 間隔을 0,

2, 0.4, 0.7 및 1.0mm로 각각 고정하였다.

3) 윤활油중에서 캐비테이션浸蝕舉動

船舶用 各種 潤滑油中에서 캐비테이션 浸蝕舉動을 糾明하기 위하여 船舶用 潤滑油인 시스템油(system oil), 터어빈油(turbine oil), 기어油(gear oil) 및 混合油(mixed oil, M. O)로 하였으며, 混合油는 시스템油(70% Wt)에 디젤油(30% Wt)을 混合, 使用하였다. Table 3은 各種 潤滑油의 特性을 나타내 보이고 있다.

4) 陰極防蝕 및 腐蝕抑制劑에 의한 캐비테이션浸蝕-腐蝕 抑制實驗

캐비테이션浸蝕-腐蝕 抑制實驗은 防蝕效果를 明確하게 하기 위하여 1% NaCl 溶液中에서 실시하였으며, 防蝕電位는 飽和카로멜 電極(SCE)을 基準電極으로 사용하여 Fig. 2에 보인 防蝕回路中の 電位差計에 의해 防蝕電位를 측정하였다. 그리고 各 腐蝕抑制劑의 特性은 Table 4에 나타내고 있다.

3. 實驗結果 및 考察

3.1 베어링의 캐비테이션 浸蝕-腐蝕特性

3.1.1 캐비테이션浸蝕에 미치는 間隔변화의 影響

Fig. 3은 pH 7인 環境中에서 흔과 試驗片

Table 3. The properties of oils used as cavitation erosion tests for slide bearing metals

Name of oil used	S.G(15°C Kg/l)	RW.#1(15°C)	P.P(°C)	F.P(°C)
System oil(S.O)	0.916	109	-18	260
Turbine oil(T.O)	0.876	65.5	-15	234
Gear oil(G.O)	0.878	144.1	-29	222
Diesel oil(D.O)	0.837	35.4	-10	52

Table 4. The properties of inhibitors used at erosion protection

Chromate Na ₂ CrO ₄ ·4H ₂ O pH 6-7	Nitrite NaNO ₂ pH 7	Phosphate NaH ₂ PO ₄ ·2H ₂ O pH 6	Ethylene Glycol HOCH ₂ CH ₂ O ₂ pH 7
---	--------------------------------------	--	---

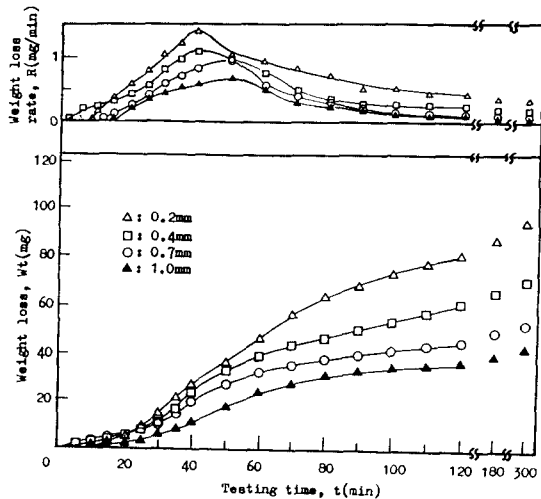


Fig. 3. Cavitation erosion processes in various space and at PH 7 environmental liquid for K.M 4.

과의 間隔(h)變化에 의한 Cu-Pb基 베어링합금 4種(K, M 4)의 무게減少量(Wt) 및 무게減少率(R)을 實驗時間(t)에 따라 整理하여 나타낸 것이다. 여기서 무게減少率 R은 單位時間 t에 대하여 무게減少量(mg)의 增分量($\Delta Wt/\Delta t$)을 나타낸 것이다.

間隔 h가 작아짐에 따라 무게減少량과 무게減少率은 더 커지는 경향이며, 最高浸蝕率(무게減少率이 가장 크게 나타날 때를 最高浸蝕率로 가정하고, 이하 最高浸蝕率이라 칭함)도 작은 間隔에서 더 크게 나타나고, 0.2 mm의 間隔에서 最高浸蝕率이가 가장 민감하게 나타났다. 이러한 경향의 원인은 間隔이 작을수록 衝擊壓을 발생하는 케비테이션氣泡가 試驗片까지 도달하는 數가 많아짐과 동시에 그 壓力이 크기 때문에 무게減少量, 무게減少率 및 最高浸蝕率이 커지게 된 것으로 생각된다. 그러나 초기단계에 $h=0.2mm$ 에서의 무게減少량과 무게減少率이 0.4mm의 것보다 작아지다가 약 20분을 경과하면서 무게減少량과 무게減少率이 더 크게 됨을 알 수 있다. 이와 같이 초기단계에 $h=0.2mm$ 의

무게減少량과 무게減少率이 0.4mm에서 보다 작은 이유는 二面間에 발생한 케비테이션氣泡의 分散이 어려워, 갇힌 氣泡가 일종의 緩衝作用을 하기 때문이며, 또 케비테이션浸蝕이 계속되면 浸蝕損傷에 의하여 처음 間隔보다 더 크지므로써 氣泡의 分散이 확산되어 다시 $h=0.2mm$ 일 때의 무게減少량과 무게減少率은 $h=0.4mm$ 의 그것보다 增加하는 것으로 思料된다¹⁸⁾.

3.1.2 시간의 經過에 따른 케비테이션浸蝕舉動

Fig. 4는 蒸溜水인 pH 7의 環境과 間隔 $h = 0.2mm$ 로 일정한 조건하에서 케비테이션浸蝕에 의한 베어링합금 4種(K, M 4)의 무게減少量(Wt), 무게減少率(R) 및 浸蝕損傷表面積(a)을 實驗時間(t)에 따라 모델링(modeling)한 것이다. 즉 Wt-t 및 R-t曲線의 상관관계를 考察하기 위하여 點線으로 表示한 a-t線圖에서 直線區域에 따라 分類하면, Wt-t線圖에서 ①, ②, ③, ④의 特性區域 그리고 R-t曲線의 ①, ②, ③, ④의 特性區域으로 區分하여 나타낼 수 있다. 여기서 浸蝕

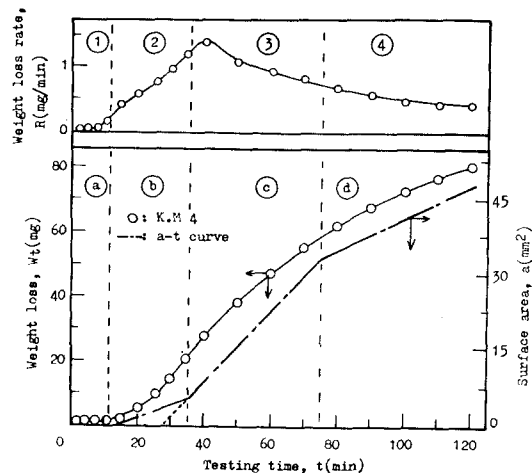


Fig. 4. Typical process of cavitation erosion at pH 7 environmental liquid for K.M 4. (space: 0.2mm).

表面積 a 는 다음의 식(1)을 利用하여 求하였다¹⁹⁾.

$$a = W / \rho d \dots\dots\dots (1)$$

여기서,

a : 浸蝕表面積 (mm^2)

W : 浸蝕에 의한 무게減少量 (mg)

ρ : 試驗材料의 密度 (mg/m^3)

d : 浸蝕 小孔의 平均 깊이 (mm)

Wt-t 및 R-t曲線에 의하면 ㉑ 및 ①期間에서는 무게減少量 및 무게減少率이 극히 적고, 시간에 따라 거의 일정하게 나타나는 경향이며, 이러한 경향의 원인은 케비테이션氣泡에 의해 試驗片表面에 塑性變形이 생기면서 酸化皮膜이 서서히 脫離하여 케비테이션氣泡로 인한 핵이 形成되지만 小孔은 발생하지 아니한 潛伏期(incubation region)로 사료된다. 또한 ㉒ 및 ②期間은 시간이 경과함에 따라 무게減少량과 무게減少率이 점차 커지고 있으며, 이와 같은 양상은 케비테이션氣泡로 형성된 핵으로부터 數個의 小孔이 생성되면서 損傷이 增大하는 케비테이션損傷의 增加期(acceleration region)로²⁰⁾ 보이고, 또 ㉓ 및 ③기간은 시간이 경과함에 따라 무게減少량이 커진후 다시 둔화되는 경향을 나타낸다. 그 이유는 小孔이 많이 생김과 동시에 그 面積이 增大하여 損傷速度가 最大가 되나, 점차 케비테이션浸蝕에 의해 間隔이 크게 되어 케비테이션氣泡 崩壞壓이 서서히 떨어져짐으로써 損傷量이 減少하기 때문인 것으로 생각된다. 그리고 이 기간은 무게減少率이 최대가 되었다가 점차 감소되는 減少期(deceleration region)로 보인다. 그리고 ㉔ 및 ④기간은 시간의 경과에 따라 무게減少량이 크게 되지만 ㉓ 및 ③기간에 비해 기울기가 완만해지고, 시간의 경과에 따라 무게減少率이 상당히 鈍化됨으로써 安定期(steady state region)로 보인다. 이와 같은 安定期는 케비테이션氣泡가 試驗片 表面의 小孔에 吸

着과 間隔이 크게 됨으로써 케비테이션에 의한 氣泡崩壞가 緩衝作用 및 衝擊壓이 완화하여 小孔의 數가 적게 성장되기 때문이며, 이러한 기간은 材料 및 腐蝕環境特性보다는 力學的인 影響이 더 크게 지배되는 것으로 생각된다^{21,22)}.

3. 1. 3 베어링재료에 따른 케비테이션浸蝕舉動

Fig.5는 pH 7의 環境中과 間隔 $h = 0.4$ mm下에서 120분 동안 케비테이션浸蝕에 의한 Sn基 베어링합금 1種(W.M 1), Pb基 베어링합금 7種(W.M 7) 및 Cu-Pb基 kelmet 4種(K.M 4) 試驗片의 무게減少량을 나타낸 것이다.

이들 베어링材들의 케비테이션浸蝕에 의한 무게減少량은 W.M 7 > W.M 1 > K.M 4의 순으로 크게 나타나고, W.M 7의 베어링재가

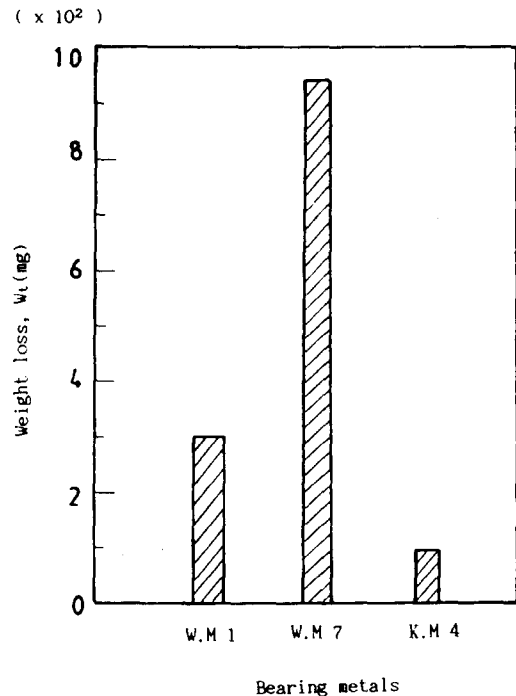


Fig. 5. Weight loss of bearing metals after cavitation test for 120 min., $h=0.4mm$ and pH 7.

케비테이션浸蝕에 가장 敏感하고, 케비테이션에 의한 耐浸蝕성에 K, M 4의 베어링材가 우수함을 알 수 있다. W, M 7의 베어링材가 케비테이션浸蝕에 가장 敏感한 원인은 W, M 7의 化學的成分이 주로 延性的 材料인 Pb基 때문인 것으로 생각된다.

3. 1. 4 케비테이션浸蝕—腐蝕에 미치는 pH변화의 影響

Fig. 6은 Fig. 5에서 케비테이션浸蝕에 가장 敏感한 Pb基 베어링합금 7種(W, M 7)의 무게減少량을 腐蝕環境中の pH 변화에 대해 整理하여 나타 낸 것이며, $h=0.4mm$ 의 間隔으로 120분간 實驗을 실시한 것이다.

腐蝕環境의 pH 를 변화시킴에 따른 케비테이션浸蝕—腐蝕에 의한 무게減少량은 pH $2 > pH 12 > pH 7 > pH 4$ 의 순으로 크게 나타나는 경향이며, 산성인 pH 2 및 고알카리인 pH 12에서의 케비테이션浸蝕—腐蝕에 의한 무게減少량은 약산성인 pH 4 및 중성이며 증류수인 pH 7에서의 케비테이션浸蝕—腐蝕에 의한 무게減少량보다 더 크게 나타나고,

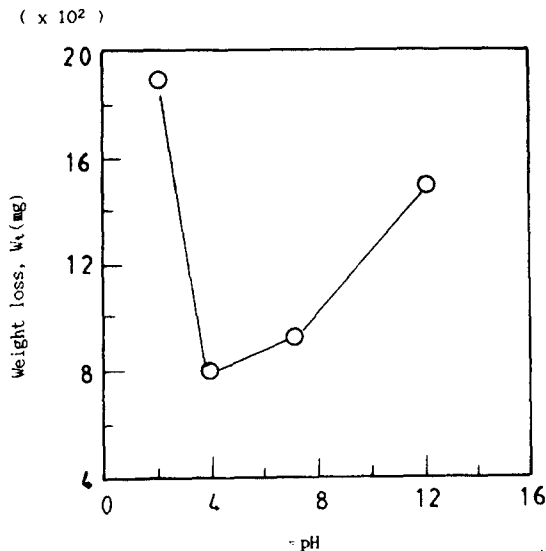


Fig. 6. Weight loss of W.M 7 in various pH after cavitation test for 120 min. and $h=0.4mm$.

약산성인 pH 4에서 케비테이션浸蝕—腐蝕에 의한 무게減少량이 가장 작게 나타났다.

Fig. 7은 Fig. 6의 pH의 변화에 따른 케비테이션浸蝕—腐蝕의 경향에서 케비테이션기포에 의한 機械的인 損傷외에 순수한 腐蝕의 影響을 좀더 定量的으로 검토하기 위하여, HCl과 NaOH溶液을 혼합하여 고정된 pH 2, pH 4 및 pH 12의 무게減少량에 대한 증류수인 pH 7의 무게減少량의 比를 계산하여 비교함으로써 腐蝕環境의 pH값이 변화함에 따른 腐蝕感受性を 평가하여 보인 것이다. (단, 증류수인 pH 7에서는 HCl과 NaOH溶液이 혼합되어 있지 않는 증류수이므로 腐蝕의 影響은 무시함.)

이 결과에 의하면 산성인 pH 2에서의 腐蝕感受性は 약 2.2로 가장 민감하고, 다음으로 고알카리인 pH 12에서의 腐蝕感受性は 약 1.5로 나타났으나 약산성인 pH 4에서의 腐蝕感受性は 약 0.8로 오히려 증류수인 pH 7에서 보다 더 鈍化되는 경향을 나타내고 있다. 이러한 경향으로 나타나는 이유는 산성

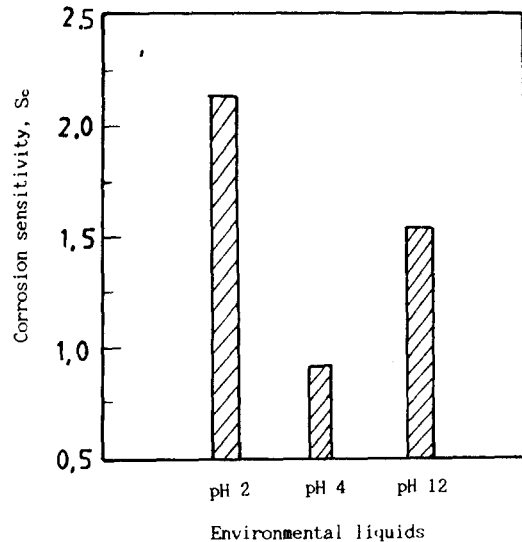


Fig. 7. Corrosion sensitivity of W.M 7 in various pH after cavitation test for 120 min., $h=0.4mm$.

인 pH 2에서는 Cl⁻이온이 많으므로 케비테이션 충격壓에 의하여 不動態 皮膜이 破壞되면 Cl⁻이온에 의해 試驗片의 表面部가 陽極活性化 腐蝕이 촉진되어 腐蝕感受性은 민감하고, 高알카리인 pH 12 環境에서는 OH⁻와의 化學反應으로 인한 陰極腐蝕과 NaOH의 高濃縮으로 발생한 水素가 試驗片의 表面部 및 小孔內部에 浸透하여 苛性脆弱化에 의해 腐蝕感受性이 높게 나타나지만 산성에서의 腐蝕보다는 鈍感한 것으로 생각된다. 특히 약산성인 pH 4 에서 무게減少率이 pH 7 에서 보다 더 적은 것은 케비테이션에 의한 베어링材의 腐蝕-浸蝕樣相이 酸素消費의 腐蝕이 지배적으로 再不動態化的 皮膜때문에 溶存酸素量이 부족하여 酸化抑制와 水和作用에 따른 Cl(OH⁻)가 試驗片 損傷部에 吸着되는 두가지 원인에 의해 pH 2에서의 浸蝕-腐蝕이 pH 7에서 보다 抑制되기 때문이라 思料된다²³⁻²⁵).

3.1.5 케비테이션浸蝕 損傷部の 機械的, 組織的 特性

Fig. 8은 間隔 0.4 mm로 일정히 하고, pH 7에서 Sn基 베어링합금 1種(W.M 1), Pb基 베어링합금 7種(W.M 7) 및 Cu-Pb基 베어링합금 4種(K.M 4)의 베어링材料에 대해 30

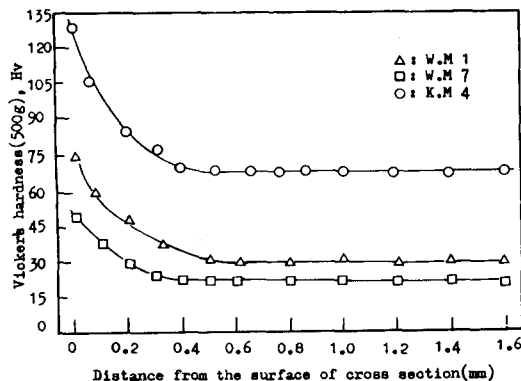


Fig. 8. Change in hardness of specimen after cavitation test fo 30 min. and pH 7 environmental liquid (space=0.4mm).

분동안 케비테이션 浸蝕實驗後, 浸蝕에 의해 損傷된 各 試驗片의 斷面部 表面으로 부터 깊이 方向의 거리에 따른 硬度값을 나타낸 것이다.

이들 베어링材料의 硬度값은 K.M 4 > W.M 1 > W.M 7의 順으로 높게 나타나고, 表面 損傷部의 硬度가 가장 높게 나타나며 浸蝕 斷面部 表面으로 부터 깊이 方向으로 깊어짐에 따라 硬度가 점차 낮아지다가 케비테이션에 의한 影響을 받지 않은 母材의 硬度값과 같게 된다. 이들 베어링材料의 硬度값이 K.M 4 > W.M 1 > W.M 7의 順으로 높게 나타남과 Fig. 5에서 케비테이션浸蝕에 의한 무게減少量이 W.M 7 > W.M 1 > K.M 4의 順으로 크게 나타나는 것을 比較, 考察하면 정도가 높게 될수록 케비테이션에 의한 耐浸蝕性이 우수한 것으로 보인다. 그리고 表面 損傷部의 硬度가 가장 높게 나타나는 이유는 케비테이션氣泡의 衝擊壓에 의해 생기는 소성변형에 의한 變形硬化(strain hardening) 때문이라 생각된다.

Photo. 1은 pH 變化에 따른 베어링합금 7種(W.M 7)의 試驗片을 間隔 0.4mm로 일정히 하여 120分 케비테이션浸蝕-腐蝕實驗을 실시한 後, 走査電子顯微鏡에 의해 表面 損傷部의 組織을 보인 것이다.

pH 2의 組織에 의하면 粒內 및 粒界腐蝕이 共存하며, 粒界에 따라 많은 數의 미소한 浸蝕 小孔과 썩기형의 小孔이 나타나고, 浸蝕의 핵이 되는 微小龜裂과 微小龜裂이 脫離되어 형성된 것으로 생각되는 보다 더 큰 孔도 보인다²⁶).

pH 4의 組織에서는 약간의 小孔과 tongue의 모양이 보이며, 미세한 龜裂現狀이 粒界에 따라 成長하기도 하고 脫離되어 형성된 것으로 생각되는 보다 더 큰 孔도 일부 나타나고 있다²⁷).

pH 7 環境에서의 組織은 많은 수의 ripple

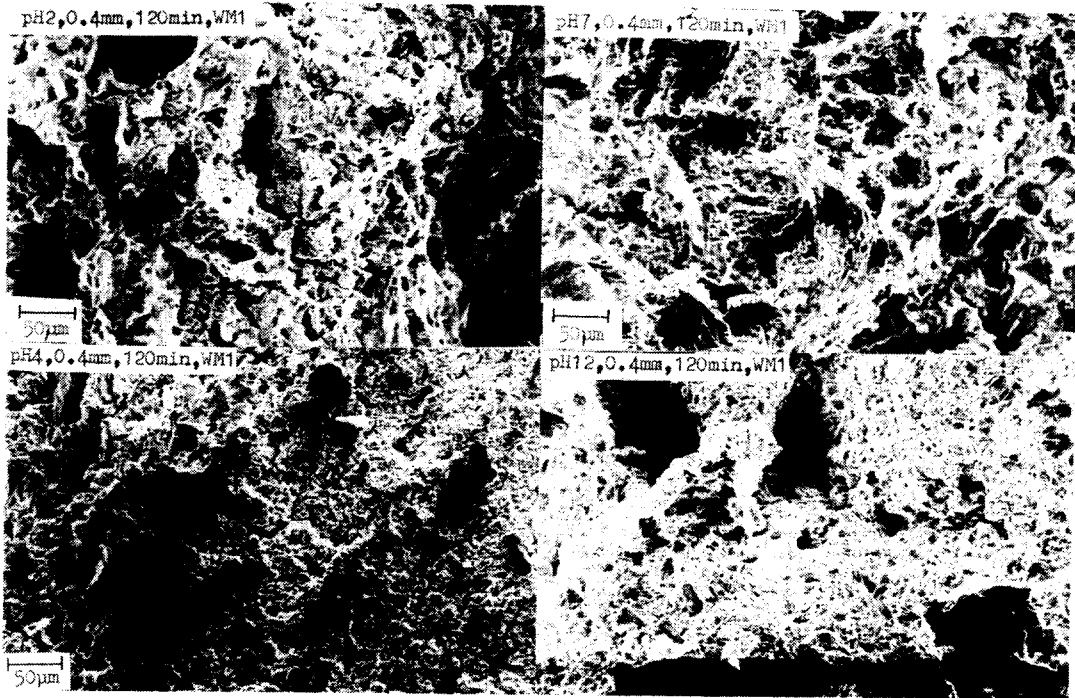


Photo.1. Damaged surfaces under various corrosive liquids for W.M 7.

現象인 striation, 小孔 및 疲勞에 의한 微小龜裂 그리고 脫離現象에 의한 큰 孔이 있음을 알 수 있다.

pH 12의 浸蝕面은 纖維狀破面(fibrous fracture)과 유사한 미소한 網絲形의 小孔을 이루고 있으며, 큰 孔의 脫離面을 보이고 있다²⁸⁾.

특히 Fig. 6에서 케비테이션浸蝕-腐蝕이 가장 심한 pH 2와 pH 12 環境中에서는 孔의 分布形態가 honeycomb striation 形狀을 이루고 있으며, 이러한 形狀은 Cl^- 과 OH^- 이온에 의한 電氣化學的인 腐蝕의 影響때문이라 思料된다²⁹⁾.

3.2 潤滑油中에서 케비테이션浸蝕舉動

Fig. 9는 Table 3의 선박용 潤滑유인 시스템油, 터빈油, 기어油 및 混合油中에서의 베어링합금 7種(W.M 7)의 무게減少率을 間隔(h)의 크기에 대해 정리하여 보인 것이다.

케비테이션浸蝕에 의한 무게減少率은 混合

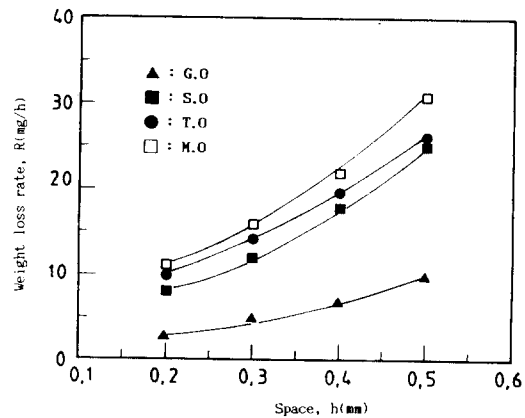


Fig. 9. Weight loss rate versus space under various lubrication oil environments for W.M 7.

油 > 터빈油 > 시스템油 > 기어油의 順으로 크게 나타나는 現象이며 이러한 現象은 Table 3에서 潤滑유의 점도가 작을 수록 케비테이션浸蝕에 의한 무게減少率은 크게 됨과 일치하고, 기어油가 케비테이션浸蝕損傷抑制油로 가장 우수하며, 특히 混合油(시스

탐유 : 70% Wt에 디젤유 : 30% Wt을 혼합)에서는 케비테이션浸蝕에 의한 무게減少率이 가장 크게 되며, 베어링과 축의 間隔이 증가하면 케비테이션浸蝕損傷이 커짐을 알 수 있다. 윤활유의 점도가 작을 수록 케비테이션浸蝕에 의한 무게減少率이 混合油 > 터어빈油 > 시스템油 > 기어油의 順으로 크게 나타나는 이유는 Fig. 9와 Table 3을 비교하면 潤滑油의 점도가 낮을수록 케비테이션 기포에 의해 試驗片表面部の 유막과손이 쉽기 때문이라 생각된다^{30,31}).

3.3 케비테이션浸蝕-腐蝕의 抑制特性

3.3.1 陰極防蝕에 의한 케비테이션浸蝕-腐蝕 抑制特性.

Fig. 10은 陰極防蝕에 의한 케비테이션浸蝕-腐蝕 抑制特性을 考察하기 위해, 베어링합금 7種 試驗片(W.M 7)을 1% NaCl水溶液中에서 陰極防蝕中 外部電源法을 適用한 경우로서, 防蝕電位の 변화에 따른 무게減少量을 時間에 대해 整理한 結果로서 間隔은 0.4 mm로 하였다.

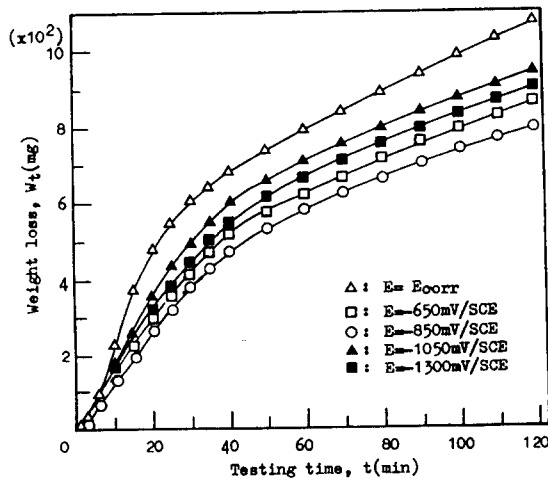


Fig. 10. Weight loss with testion time under various protective potential at 1% NaCl soluble water for W.M 7. (space : 0.4mm, E_{corr} : $-490mV/SCE$).

陰極防蝕電位 $-650 \sim -1300mV/SCE$ 下에서의 무게減少量은 無防蝕(腐蝕電位 = $-490mV/SCE$)下에서 보다 더 작게 나타나고, 防蝕電位 $-650mV/SCE$ 보다 더 卑電位化시킨 防蝕電位 $-850mV/SCE$ 에서의 무게減少量이 더 적으며, $-850mV/SCE$ 보다 더 卑電位化시킨 -1050 , $-1300mV/SCE$ 下에서는 陰極防蝕效果가 $-850mV/SCE$ 보다 오히려 더 낮아지는 傾向이다. 腐蝕電位보다 약 $-360mV/SCE$ 로 더 卑電位化시킨 $-850mV/SCE$ 에서 防蝕效果가 좋은 이유는 이 防蝕電位下에서 케비테이션浸蝕中 電氣化學的인 不動態皮膜을 형성하여 腐蝕電流를 抑制하기 때문이고, $-1050mV/SCE$ 하에서는 陰極防蝕效果가 $-850mV/SCE$ 보다 더 낮아지는 原因은 過防蝕으로 貫通電位에 의해 不動態皮膜이 일부 破壞되기 때문이라 思料된다³²).

Fig. 11은 1% NaCl 水溶液中에서 陰極防蝕中 防蝕電位가 $-1050mV/SCE$ 로 동일한 外部電源法과 Al合金犧牲陽極法에 의한 케비테이션浸蝕 抑制特性을 比較하기 위하여, 이

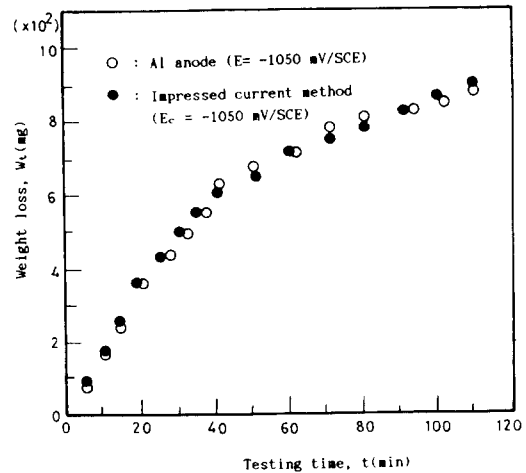


Fig. 11. Weight loss of W.M.7 with testion time under Al-alloy anode and impressed current method. (space : 0.4mm, 1% NaCl).

들 陰極防蝕을 실시한 베어링합금 7種(W. M. 7)의 무게減少량을 시간에 대해 정리하여 보인 것이다.

케비테이션浸蝕-腐蝕抑制를 위한 陰極防蝕電位가 같은 外部電源法과 Al合金犧牲陽極法에 있어서 무게減少량은 시간에 따라 큰 차이없이 교차됨으로 防蝕電位가 같을 경우 防蝕效果가 거의 유사하게 나타남을 알 수 있다.

3.3.2 케비테이션浸蝕-腐蝕 抑制에 미치는 腐蝕抑制劑의 效果

Fig. 12는 腐蝕抑制劑에 의한 케비테이션浸蝕-腐蝕 抑制特性을 考察하기 위해, 1% NaCl 水溶液에 Table 4의 腐蝕抑制劑들을 投入한 溶液中에서 케비테이션浸蝕에 의한 베어링합금 7種(W. M. 7)의 무게減少率을 實驗時間에 대해 整理하여 나타낸 것으로 間隔은 0.4mm로 하였다.

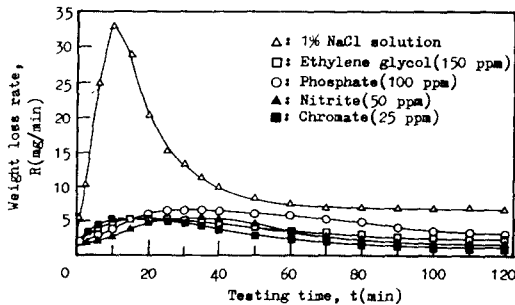


Fig. 12. Weight loss rate versus testion time under 1% NaCl solution and various inhivitive solutions for W.M 7. (space: 0.4mm).

각 腐蝕抑制劑를 첨가한 무게減少率은 腐蝕抑制劑를 첨가한 하지 않은 무게減少率보다 현저히 저하하였고, 각 腐蝕抑制劑를 첨가한 무게減少率은 最高浸蝕率이 나타나지 않고 있음을 알 수 있으며, 腐蝕抑制劑에 의한 케비테이션浸蝕-腐蝕 抑制效果는 chromate (25ppm) > nitrite (50ppm) > phosphate (100ppm) > ethylene glycol (150

ppm)의 順으로 크게 나타나는 경향을 보이고 있다. 이러한 경향의 이유는 化學的 不動態皮膜 形成劑이면서 anode分極을 증가시키는 chromate가 케비테이션浸蝕-腐蝕 抑制效果가 가장 우수하고, nitrite의 腐蝕抑制劑가 化成膜形成劑인 phosphate보다 防蝕의 效果가 더 있으며, 中和로서 抑制하는 ethylene glycol 에서의 케비테이션浸蝕-腐蝕 抑制效果로는 큰 有用性이 없는 것으로 思料된다³³⁾.

3.3.3 防蝕에 의한 케비테이션浸蝕-腐蝕의 抑制效率

Fig. 13은 陰極防蝕과 腐蝕抑制劑에 의한 케비테이션浸蝕-腐蝕에 대한 抑制效果를 定量的으로 評價하기 위하여, Fig. 10, 12에서 무게減少량이 가장 낮은 陰極防蝕電位 -850 mV/SCE 및 腐蝕抑制劑인 chromate (25 ppm) 適用下의 케비테이션浸蝕-腐蝕의 抑制效率(Protective efficiency)을 나타낸 것이다. 여기서 케비테이션浸蝕-腐蝕의 抑制效率, Pe는 安定期까지의 무게減少량을 基準으로 하였으며 다음과 같은 式(2)³⁴⁾에 의해 계산하였다.

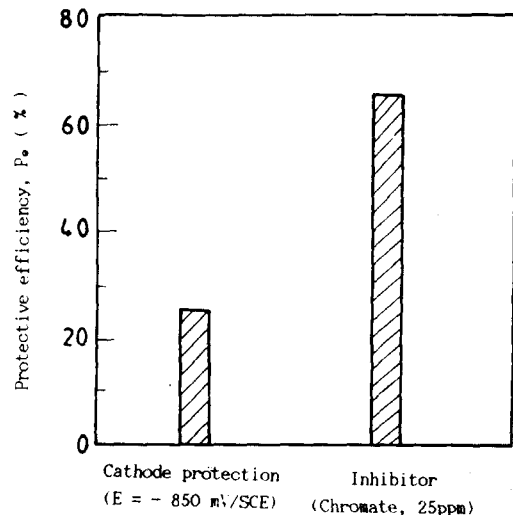


Fig. 13. Protective efficiency of W.M 7 for 120 min. testing duration by cathode protection and inhibitor. (h=0.4mm).

$$Pe(\%) = (1 - W_2 / W_1) \times 100\% \dots\dots\dots (2)$$

여기서

W_1 : 1% NaCl 水溶液에서의 무게 減少量

W_2 : 防蝕適用下의 試驗片의 무게 減少量

이 결과에 의하면 케비테이션浸蝕-腐蝕의 抑制效率은 腐蝕抑制劑인 chromate(25ppm)가 陰極防蝕에서 보다 더 우수함을 알 수 있으며, 케비테이션浸蝕-腐蝕을 抑制하기 위해서는 化學的 不動態皮膜 形成劑이면서 anode 分極을 증가시키는 chromate가 電氣化學的인 不動態皮膜을 형성하여 腐蝕電流를 抑制하는 陰極防蝕보다 防蝕效果가 더 우수한 것으로 생각된다.

4. 結 論

超音波 振動加速에 의한 케비테이션浸蝕 試驗機를 사용하여 각종 腐蝕環境條件下에서 內燃機關用 슬라이드 베어링材의 케비테이션 浸蝕-腐蝕舉動과 그 抑制效果에 관한 研究結果 다음과 같은 結論을 얻었다.

1. 間隔이 작아짐에 따라 무게減少량과 減少率은 점차 增加하지만 초기단계에서는 0.2 mm 間隔의 무게減少량과 減少率은 0.4mm 間隔에서 보다 오히려 더 작아졌다.
2. 環境의 pH를 變化시킴에 따른 무게減少량과 減少率은 pH 2 > pH 12 > pH 7 > pH 4의 順으로 나타나고, 弱酸性인 pH 4에서의 무게減少량 및 減少率이 가장 작아졌다.
3. 베어링 材料에 따른 무게減少率은 W, M 7 > W, M 1 > K, M 4의 순이었다.
4. 케비테이션浸蝕-腐蝕에 민감한 pH 2 와 pH 12에서 浸蝕損傷面은 pH 2에서는 小孔이 주로 많이 나타나는 반면 pH 12에서는 미세한 망사형이었다.
5. 케비테이션浸蝕에 의한 무게減少率은

混合油 > 터어빈油 > 시스템油 > 기어油의 順으로 크게 되었다.

6. 케비테이션浸蝕-腐蝕의 抑制效率은 腐蝕抑制劑인 chromate(25ppm)가 陰極防蝕 보다 더 우수하였다.

參 考 文 獻

- 1) Kenneth R. Tretheway and John Chamberlain(1988): Corrosion (for students of science and engineering). Longman Scientific & Technical, 153-156.
- 2) 松村倉信,岡 良則(1982): 腐蝕 及 影響. 防蝕技術 31, 國際文獻印刷社, 67.
- 3) M.G Talks and G. Moreton (1981-6): Proc. ASME Symp. Cavitation erosion Fluid System, 139.
- 4) W. H. Ailor (1980): Engine Coolants Testing. State of the Art, ASTM, STP 705, 81-101.
- 5) 日本材料學會(1988): 材料強度學. 進行印刷出版, 173-175.
- 6) 日本潤滑學會(1985): 潤滑故障例 對策. 養賢堂, 16.
- 7) 鄭善模(1988): 潤滑工學. 東明社, 360-367.
- 8) 日本協會(1984): 現場 潤滑技術. 壯光舍印刷, 33-37.
- 9) A. Thiruvengadam (1982): Erosion, Wear, and Interfacs with Corrosion. ASTM, STP 567, 220-221.
- 10) G. S Haynes and Robert Baboian (1985): Laboratory Corrosion Tests and Standards. ASTM, STP 866, 552-557.
- 11) W. F Adler (1979): Erosion: Prevention and useful Applications. ASTM STP 664, 418-431, 439-443.
- 12) 岩井善良,岡田庸敬(1988): すべり 軸受の キャビ-ツヨソ・ェロー-ツヨソ. 潤滑, 養賢

- 堂, 33(1), 3.
- 13) 日本機械學會(1986): 腐食 破壊., 日本工業出版社, 67-73.
 - 14) 大能秀明(1987): 埋設建物配管 腐食對策 現狀, 日本防食技術, 6(7), 468-469.
 - 15) C. C. Nathan(1981): Corrosion Inhibitors. National Association of Corrosion Engineers, Houston Texas, 25-45.
 - 16) Annual Book of ASTM Standard(1989): 03.02 Wear and Erosion; Metal erosion, G32-85, ASTM, 115.
 - 17) 山本洋一(1984): さびを 防ぐ 事典. 産業調査會, 74-79.
 - 18) 伊藤伍良(1982): 機械工學全書 第6卷(腐蝕防蝕). コロナ社, 232-235.
 - 19) Masanobu Matsumura and Yoshinori Oka (1982): Influence of Erosion on Corrosion. Boshoku Gijutsu, Vol. 31, 67-69.
 - 20) M. G. Fontana(1988): Corrosion Engineering. McGraw-Hill, 104-105.
 - 21) L. L. Shreir (1979): Corrosion, Butterworth Inc. Vol. 2 (20): 76-20: 78.
 - 22) 林祐助, 李鎮烈(1991): 케비테이션에 의한 베어링材의 腐蝕. 浸蝕舉動에 관한 研究(1), 韓國腐蝕學會誌, 20(4), 285-289.
 - 23) 梅村文夫・松創伸二・川本輝明(1989): 炭素鋼とステソレス鋼のエロージョン・コロジョネンに關する 電氣化學的 考察, 防食技術, 36(10), 628-634.
 - 24) 前掲書(17), 94.
 - 25) 遠藤吉良, 駒井謙治良(1982): 金屬の腐蝕疲勞と強度設計. 養賢堂, 5.
 - 26) 高 原寬(1985): 金屬破斷面寫真集. テクノアイ出版部, 22-23.
 - 27) 黒木岡同良, 大林官次良(1981): 金屬の強度と 破壊. 東京林北出版, 37-45, 102-110.
 - 28) Yoneo Kikuta(1984): Metallographic Atlas, Japan welding Society, 73-74, 356-357.
 - 29) H. O. Fuchs and R. I. Stephens (1980): Metal fatigue in Engineering, John Wiley & Sons Inc., 31-33.
 - 30) 岡田庸敬, 岩井善良(1988): 高含水 作動液中における キャビテ-ツォン・エロ-ジォン. 潤滑, 33(12), 907-914.
 - 31) 掘切川一男, 菊地金他(1990): 振動 キャビテ-ション壞食の潜伏期後期の SEM 觀測と微小租の影響. 日本機械學會 論文集(B篇), 56(527), 12-18.
 - 32) 伊藤伍郎(1982): 機械工學全書 6. 日本コロナ社, 139-142.
 - 33) R. N Parkins, Ya. M. Kolotyarkin (1983): Corrosion Fatigue. USSR-UK Seminar in Loov., USSR 19-22 May 1980, The Metal Society London.
 - 34) 露木昭治, 江成孝文, 佐木孝彦(1985): 不凍性水溶液の キャビテ-ツォン 損傷抑制能の 評價. 防蝕技術 34, 國際文獻印刷社, 509-510.