

캐비테이션에 의한 베어링材의 腐蝕·浸蝕舉動에 관한 研究〔1〕 (pH의 影響에 대하여)

林 祐 助* · 李 鎮 烈**
 釜山水産大學* · 韓國海洋大學**

A study on the behaviour of corrosion-erosion at the Bearing metals by cavitation(1) (for the influence of pH)

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

*National Fisheries University of Pusan**, *Korea Maritime University***

Recently, due to increased occurrence of cavitation-erosion at slide bearing metals with the tendency of high speed and large output at internal combustion engine, there is a need to study the role of corrosive environments on cavitation-erosion.

Therefore, This paper were investigated on the behaviour of cavitation-erosion under the change of pH environments at slide bearing metals with using piezoelectric vibratory apparatus.

The main results obtained were as follows:

1. The weight loss and its rate showed to be increased according to the order of pH 2 > pH 12 > pH 7 > pH 4 environments, and also retarded extremely at pH 4 environment
2. The resistance of material on cavitation-erosion was excellent at pH 4 environment, and also was improved considerably its resistance with increasings of the space between specimen and horn tip.
3. It was showed that the incubation periods shortened with the tendency of pH 2 > pH 12 > pH 4 > pH 7 environment, and enlarged greatly at pH 7 environment.
4. The pitted holes of damaged surface under pH 4 environment showed dense aspects by comparison with pH 7 environment.

1. 序 論

각종 機械構造物 등이 각 使用環境아래서 장시간에 걸쳐 安全性을 확보하여, 그 機能을 충분히 받

휘하도록 하기 위해서 材料에 미치는 腐蝕環境의 影響 및 損傷狀態 파악의 解明이 절실하다.

腐蝕環境中에서 이들 각종 機械構造物이 사용되어지는 경우, 機械的 影響因子에 의한 損傷보다 電

氣化學의 影響因子인 腐蝕損傷이 증첩될 때가 많다. 이러한 증첩현상에 의한 機械構造物의 損傷은 金屬材料의 캐비테이션현상이 일어남으로써 증기포(cavity)의 破壞에 의해 反復의인 충격력, 즉 疲勞에 따른 機械的 要因과 電氣化學的인 腐蝕에 의한 要因이 서로 上昇作用을 하기 때문에 機械構造物 部材의 損傷에 致命的인 影響을 미칠 수도 있다.^{1,2)}

즉 腐蝕環境中에서 機械構造物에 캐비테이션(cavitation)이 일어남으로써 腐蝕-浸蝕(corrosion-erosion)에 의한 部材의 損傷은 船舶의 프로펠러, 펌프 임펠러, 船尾管軸 베어링, 디젤 및 가솔린기관의 冷却水側과 메인 및 크랭크 핀 베어링, 공기압축기 및 냉동기의 베어링 그리고 원자로의 冷却配管系統 등에서 많이 發生한다.³⁻⁵⁾

특히, 최근 內燃機關의 高速化 및 큰 出力으로 인한 潤滑油中에서 메인 및 크랭크 핀 베어링에 캐비테이션이 發生함으로써 腐蝕-浸蝕 損傷에 의한 문제점이 보고 되고 있다.⁶⁾

따라서 本 研究에서는 內燃機關用 베어링材로 많이 이용되고 있는 슬라이더 베어링 메탈인 Sn基 white metal 1種, Pb基 white metal 7種 및 Cu-Pb基 kelmet 4種을 試驗片으로 하여, 超音波 振動裝置에 의해 캐비테이션을 發生시켜, 振動子(transducer)의 혼(horn)과 試驗片과의 間隔 變化, 腐蝕雰圍氣의 pH變化 및 試驗片의 種類 등에 따라 캐비테이션에 의한 腐蝕-浸蝕 實驗을 행하고, 이때의 腐蝕-浸蝕 舉動을 觀察·調査하였다.

이러한 實驗結果를 토대로 하여, 試驗片의 무게 減少量 및 減少率을 求하고, 最高損傷率, 特性時間 및 潛伏期間 등에 대해 考察하였으며, pH의 變化에 따른 베어링材의 腐蝕-浸蝕 舉動에 미치는 影響을 究明함으로써 內燃機關用 베어링材의 基礎設計 및 整備指針資料로 活用하는데 寄與하고자 한다.

2. 試料 및 實驗方法

2-1 試驗材料 및 試驗片

本 實驗에 사용한 試驗材料는 內燃機關用 슬라이더 베어링 메탈인 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) 등으로 하였다.

이들 각 試驗材料의 化學的 成分 및 特性은 Table 1과 같다.

Table. 1 Chemical composition and properties of used metals

wt(%) / metals	Sn	Pb	Cu	Sb	Ni	Hardness	Density (mg/cm ³)
Sn Base (W.M1)	90	-	4	6	-	31Hv	7368
Pb Base (W.M7)	12	73	1	14	-	20Hv	9534
Cu-Pb Base(K. M4)	0.5	25	73.5	-	1	71Hv	9338

이와 같은 試驗材料로 부터 절취하여 製作한 캐비테이션 發生에 의한 腐蝕-浸蝕實驗用 試驗片의 형상은 Fig. 1에 보인다. 이 試驗片의 제작은 低速 밀링의 다이아몬드 톱날로 절단하였으며, 有效露出表面은 사포 400-1500번까지 研磨한 후 아세톤으로 脫脂하였다. 그리고 有效露出表面을 제외한 나머지 부분은 에폭시 樹脂로 2회 塗裝하여 절연하였다.

2.2 實驗裝置

本 實驗에 사용한 캐비테이션 發生裝置로서 對向

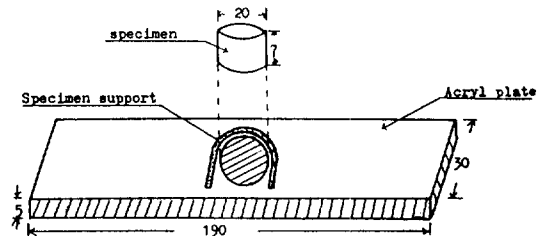
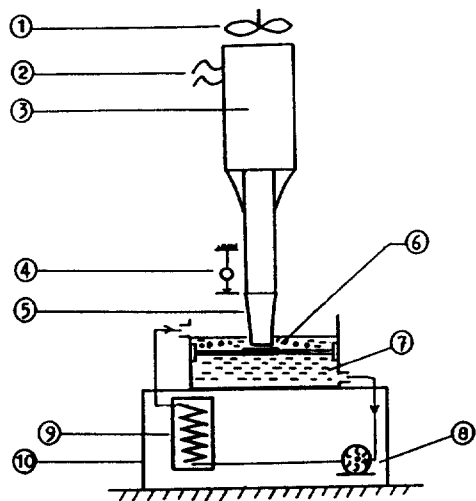


Fig. 1 Shape of specimen for cavitation erosion test(㎜).



- | | |
|-----------------|---------------------|
| 1. Cooling fan | 6. Specimen |
| 2. Power supply | 7. Environments |
| 3. Transducer | 8. Circulating pump |
| 4. Dial gauge | 9. Temp. regulator |
| 5. Horn | 10. Stand |

Fig. 2 Schematic diagram of vibratory cavitation corrosion-erosion apparatus.

二面形式의 振動加速試驗機의 全體 系統圖는 Fig. 2와 같다. Fig. 2의 캐비테이션 發生試驗機는 自作한 것으로 壓電振動子(piezoelectric vibratory)의 혼(horn)과 對向하게 試驗片을 아크릴판에 고정하고, 캐비테이션 發生에 의한 腐蝕-浸蝕試驗에서 陽極으로 한 試驗片에 垂直하게 혼을 上下로 진동시켰다. 이때 진동자의 共振周波數는 ASTM규정에 의해 20KHz로 하였고, 振幅은 24 μ m로 일정히 유지하였다.⁷⁾

이 혼의 材料는 超硬 듀랄루민으로 그 크기는 직경 15mm, 길이 150mm로 加工하였으며, 腐蝕環境槽의 腐蝕溶液에 의한 혼의 腐蝕作用을 방지하기 위하여 혼의 끝(horn tip)에 耐蝕性이 강한 18-8 스테인레스鋼의 disc(직경 15mm, 높이 8mm)을 鍍부, 고정하였다.

또한 腐蝕環境槽(190×190×200mm)는 플라스틱으로 製作하였으며, 일정한 實驗時間下에 試驗片의

무게減少量을 측정하기 위하여 自動停止 타이머에 의해 試驗時間을 조정하였다.

2.3 實驗方法

腐蝕環境은 蒸溜水에 HCl과 NaOH溶液을 혼합하면서, pH를 pH 2, pH 4, pH 7 및 pH 12의 溶液으로 각각 고정하고, 腐蝕溶液의 溫度는 恒溫裝置에 의해 約 25C로 유지하면서, 캐비테이션 發生에 의한 腐蝕-浸蝕實驗을 행하였다.

溶液의 濃度 및 傳導度의 變化를 방지하기 위하여 플라스틱材인 循環水펌프로 매분당 2.8리터의 量으로 循環하고, 무게減少는 미-리 그림까지 측정할 수 있는 digital저울(Mettler, swiss, MP 140))을 사용하여, 試驗片을 蒸溜水로 洗淨하여 乾燥한後 무게減少量을 測定하였다.

또한 試驗片과 디스크와의 間隔 h는 0.2, 0.4, 0.7, 1.0, 1.4 및 1.8mm로 變化시켰으며, 이 때 間隔은 다이알 게이지로 측정하였다. 디스크의 끝부분은 腐蝕溶液에 約 3mm정도 浸漬하였고, 캐비테이션 發生에 의한 腐蝕-浸蝕이 혼에 미치는 腐蝕은 거의 관찰되지 않았지만 부착된 18-8 스테인레스鋼의 디스크(disc)은 1회의 實驗이 끝난後 새로운 디스크로 교환하여 實驗하였다.

그리고 陽極인 각 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과 浸蝕에 비해 微小함으로 무시하였다.⁸⁾

3. 實驗結果 및 考察

3.1 pH의 變化가 캐비테이션에 의한 腐蝕-浸蝕學動에 미치는 影響

Fig. 3은 pH를 變化시킨 腐蝕環境中에서 혼과 試驗片과의 間隔(h)을 0.7mm로 일정히 한後 Sn基 white metal 1種의 무게減少量 Wt 및 무게減少率 R를

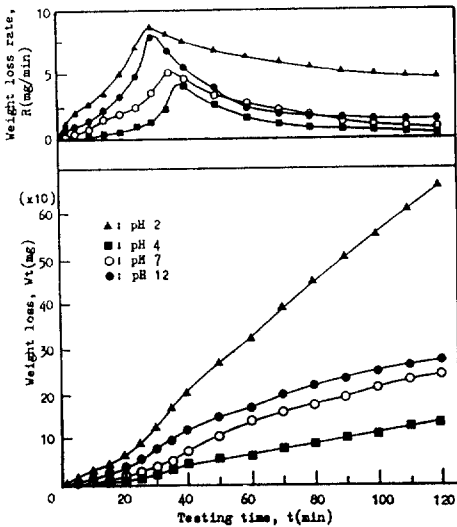


Fig. 3 Cavitation corrosion-erosion processes in various environmental liquids at the space of 0.7mm for W.M 1

실험시간 t에 따라 계산에 의해 정리하여 나타낸 것이다. 여기서 무게減少率 R는 單位時間(min)에 대하여 무게減少量(mg)의 増分量($\Delta W/\Delta t$)을 나타낸 것이다.

이에 의하면 pH 2 > pH 12 > pH 7 > pH 4의 順으로 무게減少量, 무게減少率 및 最高 浸蝕率(무게減少率이 가장 높게 나타날 때를 最高 浸蝕率로 假定하고, 이하 最高 浸蝕率이라 稱함)이 나타나고, pH 4에서 가장 鈍感하였다. 또한 特性時間(最高 무게減少率까지의 實驗時間을 特性時間이라 가정하고, 以下 特性時間이라 稱함)도 다소 짧게 나타나는 樣相을 보이고 있다.

이와 같이 pH 2 > pH 12 > pH 7 > pH 4의 順으로 무게減少量, 무게減少率 및 最高 浸蝕率 나타나고, 特性時間도 다소 짧게 되는 이유는 Sn基 white metal 1種이 酸性과 高 알카리에서 腐蝕성이 敏感한 兩性 合金金屬으로 因해 pH 2 > pH 12에서 캐비테이션에 의한 腐蝕-浸蝕이 敏感한 것으로 생각된다.¹¹⁾ 여기서 pH 2의 腐蝕溶液에서 腐蝕-浸蝕이 가장 敏感한 것은 強酸性인 pH 2에서 Cl⁻이 增

가함에 따라 試驗片의 陽極活性化로 因해 腐蝕이 촉진되기 때문이고, pH 12의 腐蝕溶液에서 pH 2 다음으로 腐蝕-浸蝕이 敏感한 것은 OH⁻의 化學反應으로 因한 高 알카리腐蝕과 NaOH가 高濃縮할 때 水素가 試驗片의 損傷部에 침투함으로써 苛性脆 弱化에 의한 것으로 思料된다. 특히 弱酸性인 pH 4의 腐蝕溶液에서 무게減少量이 pH 7의 腐蝕溶液에서 보다 적은 이유는 pH₇보다 pH₄에서 Cl(OH⁻)의 皮膜이 試驗片에 더 많이 吸着함으로써 不動態에 의한 腐蝕-浸蝕이 抑制하기 때문이라 생각된다.^{10,11)}

3. 2 캐비테이션에 의한 腐蝕-浸蝕損傷의 特性

Fig. 4는 腐蝕環境의 pH를 變化시킴에 따른 베어링材인 Sn基, Pb基 및 Cu-Pb基의 最高浸蝕率을 間隔에 대해 整理하여 나타낸 것이다.

이에 의하면 베어링材의 最高浸蝕率은 pH 2 > pH 12 > pH 7 > pH 4의 順으로 最高浸蝕率 나타나고, pH 4에서의 最高浸蝕率이 가장 낮게 나타났다. 그리고 間隔이 증가함에 따라 最高浸蝕率은 점차

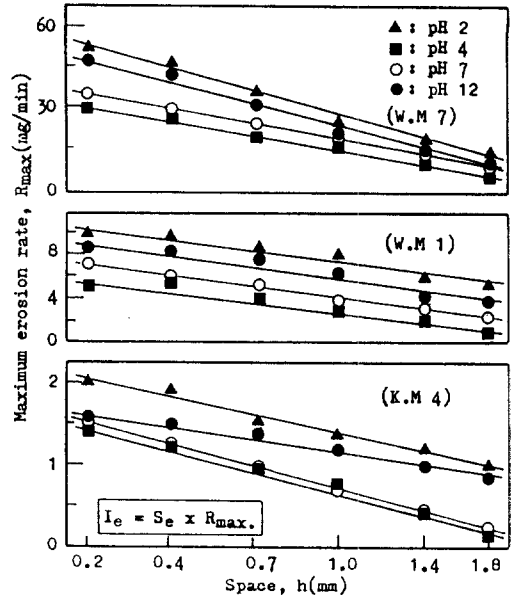


Fig. 4 Maximum erosion rate versus space for various test liquids and materials.

낮게 나타나는 傾向은 각각의 베어링材에서 거의 유사하게 나타내고 있다.

또한 本 試驗機의 캐비테이션 發生에 의한 腐蝕-浸蝕의 intensity I_e 를 환경의 변화에도 불구하고 간격이 같으면 일정한 것으로 가정했을 때 I_e 는 다음 식으로 나타냈다.¹²⁾

$$I_e = S_e \times R_{max} \dots\dots\dots (1)$$

따라서 캐비테이션의 충격력에 대한 시험편의 耐 강도(strength) 즉, 材料의 耐 腐蝕-浸蝕性 S_e 는 다음 식에 의해 評價될 수 있다.

$$S_e = I_e / R_{max} \dots\dots\dots (2)$$

여기서, S_e : 材料의 耐 腐蝕-浸蝕性

R_{max} : 最高 浸蝕率

Fig. 4와 式 (2)에 의하면 R_{max} 는 부식성이 강한 환경일수록 증가한 반면, S_e 는 재료의 劣化때문에 감소한다. 따라서 pH 2 > pH 12 > pH 7 > pH 4의 順으로 材料의 耐 腐蝕-浸蝕性이 減少하고, pH 4에서 材料의 耐 腐蝕-浸蝕性이 우수하게 나타나며, 間隔이 크게됨에 따라 材料의 耐 腐蝕-浸蝕性이 향상됨을 알 수 있다.

Fig. 5는 腐蝕環境의 pH의 變化에 따른 Sn基 white metal 1種의 特性時間을 間隔에 대해 정리하여 보인 것이다.

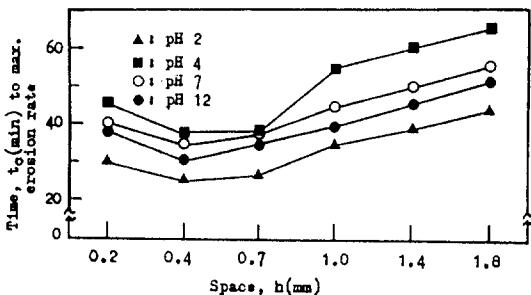


Fig. 5 Comparison of time (characteristic time) to max. erosion rate by the spaces for W. M 1

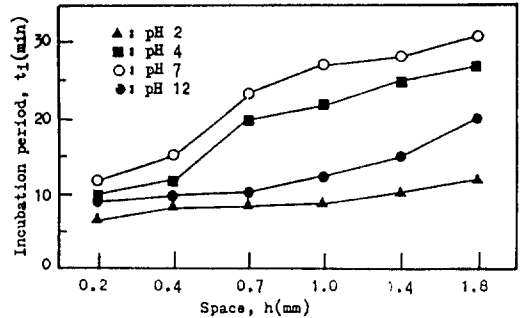


Fig. 6 Relationship between incubation periods and the space for W. M 1 ($t_c = 10mg$)

이에 의하면 特性時間은 pH 2 > pH 12 > pH 7 > pH 4의 順으로 나타나고, pH 4에서의 特性時間이 가장 지연되었다. 그리고 이 特性時間은 間隔이 증가함에 따라 약간 빨라지다가 間隔이 約 0.7mm에서부터 점차 遲延되는 傾向을 나타내고 있다.

Fig. 6은 腐蝕環境의 pH의 變化에 따른 Sn基 white metal 1種의 潛伏期間(무게減少량이 10mg以下일때)을 間隔에 대해 정리하여 보인 것이다.

이에 의하면 潛伏期間은 pH 2 > pH 12 > pH 4 > pH 7의 順으로 짧아지는 樣相을 나타내고, Fig. 4에 의하면 最高浸蝕率は pH 4에서 가장 낮게 나타났으나 潛伏期間은 pH 7에서 가장 遲延되었다. 특히 pH 7에서 潛伏期間이 pH4에서 보다 遲延되는 이유는 潛伏期間동안에는 弱酸性인 pH 4의 腐蝕溶液中에서 $Cl(OH)^-$ 의 皮膜生成이 弱하기 때문에 中性인 pH 7의 腐蝕溶液中에서 潛伏期間이 더 遲延되는 것으로 思料된다.

그리고 間隔이 클수록 潛伏期間은 遲延되고, pH 2 및 pH 12에서 보다 pH 4 및 pH 7에서의 潛伏期間은 間隔이 크게될 수록 더 큰 差로 됨을 알 수 있다.

3. 3 캐비테이션에 의한 腐蝕-浸蝕舉動的 樣相

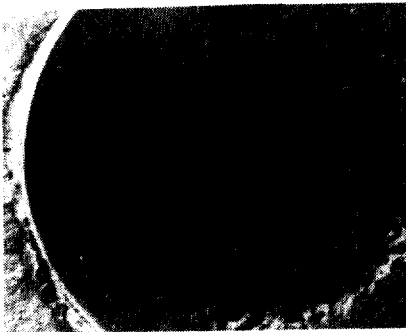
Photo. 1은 Sn基 white metal 1種, Photo. 2는 Pb基 white metal 7種의 試驗片을 腐蝕용액의 pH를

2, 4, 7 및 12로 變化시킴에 따른 浸蝕損傷狀態를 나타낸 것으로, 間隔은 모두 0.4mm로 일정하게 하고, 實驗期間은 一律적으로 180分으로 하였다.

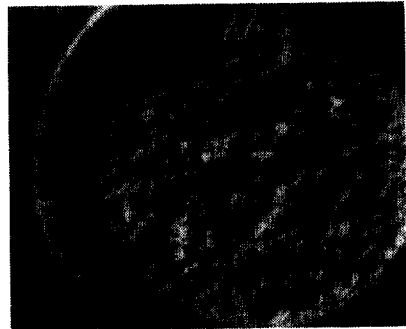
Photo. 1과 Photo. 2에 의하면 試驗片 損傷部의 사진들은 損傷率이 安定期(시험편 小孔의 기포완충 작용으로 침식의 손상이 약한 단계를 칭함)에 접어들어 거의 浸蝕이 없는 상태의 모습으로, 각 腐蝕溶液中에서 Sn基와 Pb基의 損傷面은 유사한 樣相을 나타내고 있다. 이 損傷面은 캐비테이션 충격압에 의하여 過荷重을 받아 塑性變形이 동반된 脆性破壞로서 약간의 壁開破壞와 dimple형태인 腐蝕피트의 小孔을 보이고 있다.¹³⁾

이와 같은 損傷面을 좀더 具體적으로 考察하면, pH 4의 腐蝕溶液中에서 보다 pH 2의 腐蝕溶液中에서 Sn基와 Pb基의 小孔數가 더 많고, 조밀하며 損傷面이 더 깊게 나타나고 있는 현상이다. 이 현상은 pH 2의 腐蝕溶液中에서 Cl⁻에 의한 腐蝕의 影響으로 더 쉽게 粒子가 脫離하기 때문이라고 여겨진다.

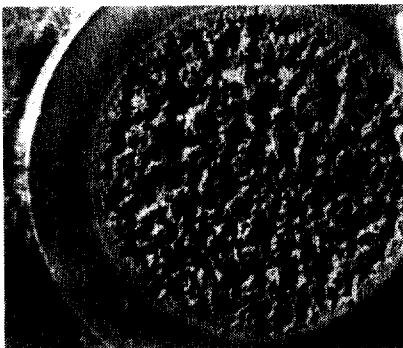
그리고 pH 12의 腐蝕溶液中에서의와 pH 7의 腐蝕溶液中에 있어서 Sn基와 Pb基의 損傷面은 상당히 유사한 모양을 보이고 있으나, pH 12에서 脫離된 小孔이 pH 7의 霧圍氣에서 보다 더 크고, 小孔의 面積은 더 넓으며, 더 깊게 나타나는 傾向을 보이고 있다. 이러한 傾向은 pH 12에서 水素가스에 의해 생



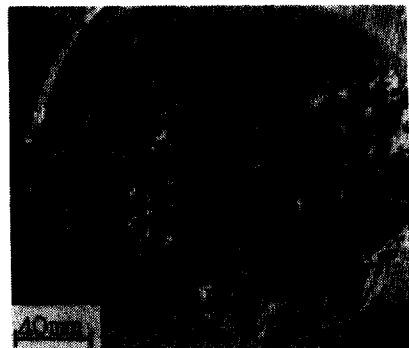
pH 2, W.M 1



pH 7, W.M 1

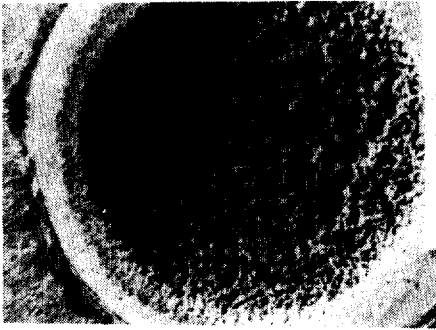


pH 4, W.M 1

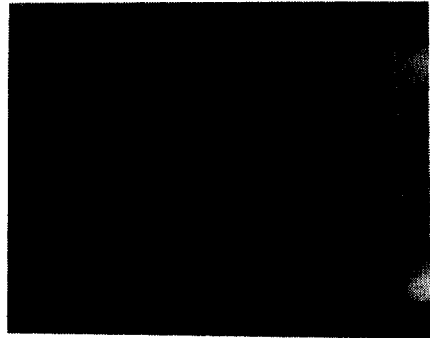


pH 12, W.M 1

Photo. 1 Appearance of the damaged surfaces after test duration of 180min in various environments at 0.4mm space for W.M 1.



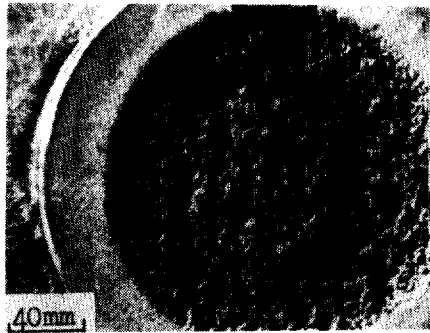
pH 2, W.M 7



pH 7, W.M 7



pH 4, W.M 7



pH 12, W.M 7

Photo. 2 Appearance of the damaged surfaces after test duration of 180min in various environments at 0.4mm space for W.M 7.

成된 苛性脆化의 影響 때문인 것으로 思料된다.¹⁴⁾

또한 Cl^- 의 影響을 많이 받은 pH 2와 pH 4의 腐蝕溶液에서 Sn基와 Pb基의 損傷部 형태는 pH 7과 pH 12에서의 損傷部の 형태에 比하여 보다 小孔들이 조밀하고, 더 깊다. 이는 Cl^- 과의 電氣化學的인 作用에 의해 腐蝕이 加速되기 때문이라 생각된다.

특히 本 研究에서 캐비테이션 發生에 의한 베어링 材料의 耐 腐蝕-浸蝕이 우수한 環境인 pH 4와 pH 7을 比較·考察하면, pH 4의 境遇는 pH 7에 比하여 Cl^- 에 의한 腐蝕의 影響으로 損傷部の 小孔이 치밀하고 깊으나 小孔의 脫離現狀은 오히려 鈍하게 나타나는 경향을 보이고 있다. 이와 같은 경향은 pH 4에서 시간이 경과함에 따라 $Cl(OH^-)$ 의 皮

膜이 試驗片에 吸着함으로써 캐비테이션 충격력에 의한 小孔의 脫離現狀을 억제하기 때문에 脫離現狀이 鈍하게 나타나는 것으로 思料된다.

4. 結 論

pH를 變化시킨 腐蝕溶液中에서 캐비테이션 發生에 의한 內燃機關用 슬라이더 베어링材의 腐蝕·浸蝕舉動에 관한 研究를 한 結果 다음과 같은 結論을 얻었다.

1. 베어링材의 무게減少量 및 무게減少率은 $pH 2 > pH 12 > pH 7 > pH 4$ 의 順으로 나타나고, pH 4에서 가장 鈍感하였다.

2. pH 4에서 베어링 材料의 耐 腐蝕-浸蝕性이 가장 優秀하고, 間隔이 증가함에 따라 材料의 耐 腐蝕-浸蝕性이 향상되었다.
3. 潛伏期間은 pH 2 > pH 12 > pH 4 > pH 7의 順으로 나타나고, pH 7에서 潛伏期間이 가장 遲延되었다.
4. pH 4 腐蝕溶液中에서 損傷部의 小孔은 pH 7에 比하여 치밀하고 깊게 나타났으나, 小孔의 脫離 現狀은 오히려 鈍하게 나타났다.

參 考 文 獻

1. 向井喜彦, 村田雅人, 스텐레스鋼의 應力腐蝕龜裂에 對する破壞力學について, 日本鎔接學會, 48, No. 11(1979) 5.
松村倉信, 岡 良則, 腐蝕に 及ぼす エロシヨンの 影響, 防蝕技術 31卷, 國際文獻印刷社(1982) 67.
F. L. La Que, Marine Corrosion, Wiley-Interscience Publication(1983) 11-12.
S. H Frederick and H. Capper, Materials for Marine Machinery, Marine Media Management Ltd(1981) 211-212.
5. W. H. Ailor, Engine Coolants Testing: State of the Art, ASTM, STP 705(1980) 81-101
6. 日本潤滑學會, 潤滑故障例と その對策, 養賢堂(1985) 16
7. Annual Book of ASTM Standard, 03.02 Wear and Erosion; Metal Erosion, G32-85, ASTM(1989) 115-119.
8. 山本洋一, さびを防ぐ 事典, 産業調査會(1984) 74-79.
9. 伊藤伍郎, 機械工學全書 第6卷(腐蝕と 防蝕), コロナ社(1982) 94-96.
10. M. G. Fontana, Corrosion Engineering, McGraw-Hill(1988) 94-96.
11. 遠藤吉郎, 駒井謙治郎, 金屬の 腐蝕疲勞と 強度設計, 養賢堂(1982) 5-7
12. A. Thiruvengadam, Erosion, Wear, and Interfaces with Corrosion, ASTM, STP 567(1982) 220-221.
13. 高原寬, 金屬破斷面寫眞集, テクノイ 出版部(1985) 8-16.
14. 溶接學會溶接冶金研究委員會, 溶接部組織寫眞集, 黒木出版社(1984) 73-74, 356-357.