

船舶用 Pb基 베어링 합금材의 캐비테이션 浸蝕에 대한 基礎研究 (I)

임 우 조 · 이 진 열

부산수산대학교 기계공학과, 한국해양대학교 선박운항학과

An Elementary Study on the Cavitation Erosion of Marine Pb Base Bearing Alloy Metal (I)

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

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

Recently, the cavitation erosion damage in Pb base bearing alloy metals has been an important problem, from the effective and economical operation standpoint of marine diesel engine that was able to take up the predominant position among international competition of ocean transportation by ship.

Consequently, prior to accomplishing the cavitation erosion-corrosion test under various lubricating oil condition, we adopted the distilled water and 3% NaCl solution as elementary test environments for the purpose of understanding perfectly the erosion behaviour and corrosion property of specimens by different electric conductivity.

Also, cavitation apparatus used 20 KHz piezoelectric vibrator, and test results were investigated as a method that fixed specimen in parallel to the transducer horn and varied gradually the separation distance(h) from 0.2 mm to 1.2 mm. With above test results, we observed the properties of weight loss, weight loss rate, corrosion sensitivity and maximum erosion rate under distilled water and 3 % NaCl solution with various corrosive composition.

1. 序 論

船舶이 國際競爭力 強化面에서 安全性을 확보하고, 그 技能을 충분히 발휘하도록 하기 위해서는 推進裝置인 船舶機關의 효율적인 性能向上이 절실히 요구된다.

이에 따라 機關의 高出力 增大, 補修費 節減 및 運航時間의 延長等이 필요한 데 機關의 主要 구성요소인 主: 베어링(main bearing), 크랭크 핀 베어링(crank pin bearing) 및 피스톤 핀 베

어링(piston pin bearing)재료인 Pb基 베어링 합금材(Pb base bearing alloy metal)에 대한 潤滑油에서의 캐비테이션 浸蝕損傷(cavitation erosion damage)이 큰 문제가 되고 있다.^{1~3)} 또한 浸蝕은 潤滑油가 장기간 사용됨에 따라 酸化, 炭化 및 乳化作用等에 의해 劣化됨으로써 더욱 加速되는 데, 특히 腐蝕性 潤滑油에서는 浸蝕-腐蝕作用이 서로 上昇하여 베어링에서의 潤滑機能을 저하시킴으로써 機關性能에 치명적인 惡影響을 미친다.^{4~6)}

Thiruvengadam, Haynes 및 Adler 등이 海水 環境에서 캐비테이션에 의한 浸蝕舉動 및 特性 研究로서, 振動子 혼(transducer horn)에 시험편을 부착하여 실험한 報告^{7~9})는 있다. 하지만 실제 베어링에서의 캐비테이션 浸蝕은 軸과 베어링사이의 潤滑舉動에서 발생하는 것으로 혼과 시험편을 對面하게 고정하여 潤滑油에서의 浸蝕 舉動 및 그 浸蝕에 미치는 腐蝕影響에 대한 研究는 거의 찾아 볼 수 없는 실정이다.

따라서 본 연구는 각종 潤滑油 條件下에서 침식실험을 하기 以前에, Pb基 베어링 合金材의 캐비테이션 浸蝕特性和 腐蝕感受性を 완전히 파악하기 위해서, 電氣傳導度가 완전히 다른 蒸溜水와 그 蒸溜수에 3% 食鹽을 溶解한 電解質인 水溶液을 基礎實驗環境으로 하고, 超音波 振動裝置를 이용하여 試驗片과 振動子를 對面하게 설치하여 間隔變化에 의해 浸蝕實驗을 실행하였다.

이러한 實驗結果를 토대로 各 環境에서 試驗片의 무게 減少量과 減少率을 구하고, 最高浸蝕率 및 腐蝕感受性を 구명함으로써 캐비테이션에 의한 베어링 合金材의 基礎浸蝕 研究資料로 활용하고자 한다.

2. 試驗片 및 實驗方法

2.1 試驗片 및 實驗材料

本 實驗에 사용한 試驗材料는 船用 內燃機關의 미끄럼 베어링 合金材(sliding bearing alloy metals)인 Pb基 베어링 合金材 7種(whitemetal 7, 차후 WM 7로 記載하고자 함.)으로 試驗材料의 化學的 成分 및 特性은 Table 1 과 같다.

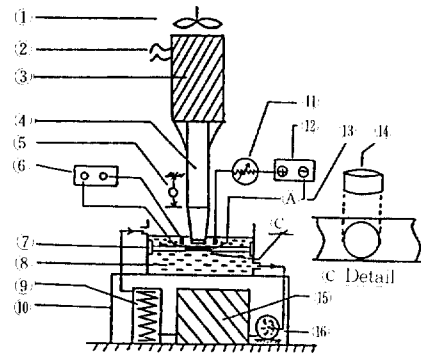
Table 1. Chemical compositions and Physical properties of sliding bearing alloy metal used as specimens of cavitation erosion test.

Metals Wt (%)	Sn	Pb	Cu	Sb	Ni	Hardness Hv	Desity mg/cm ³	Tensile strength kgf/mm ²	Impact strength kgf·m/cm ²
WM 7	12	73	1	14	—	20	9534	6.40	0.35

이와 같은 試驗材料로 부터 제작 및 가공한 試驗片(15 ϕ ×7mm)의 형상은 Fig. 1의 14와 같다. 이러한 試驗片 製作은 저속 milling의 다이아몬드 톱날로 절단하였으며, 표면은 사포 1500번까지 研磨하고 oil lapping한 후 아세톤으로 脫脂하였다. 또한 有效露出表面을 제외한 나머지 부분은 電氣化學的인 영향을 방지하기 위하여, 에폭시 樹脂(epoxy resin)로 2회 塗裝絶緣하였다. 실험용액으로는 蒸溜水(比抵抗 15×10³ Ω·cm)와 그 蒸溜수에 3% 食鹽을 혼합한 水溶液(比抵抗 30Ω·cm)으로 하였다.

2.2 實驗裝置 및 實驗方法

本 實驗에 사용한 캐비테이션 發生裝置는 超音波를 응용한 振動加速試驗機로 그의 전체 系統圖는 Fig. 1과 같다.



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 power supply
13. Ampere meter 14. Specimen 15. Power control box 16. Circulating pump

Fig. 1. Schematic diagram of cavitation erosion test apparatus

Fig. 1의 캐비테이션 발생시험기는自作한 것으로 振動子 혼(直徑 15 mm, 길이 150 mm)과 對向하게 試驗片을 아크릴板에 고정하여 캐비테이션을 발생시켰고, 試驗片에 수직하게 혼을 상하로 振動하였다. 이때 振動子의 共振周波數 및 振幅은 ASTM 規程¹⁰⁾에 의해 20 kHz 및 24 μ m로 일정히 유지하였다. 또한 電氣化學的인 영향을 제거하기 위하여 環境槽은 플라스틱材로 제작하였고, 循環水 펌프도 電氣傳導度가 거의 없는 플라스틱材이다. 그리고 對面하게 設置된 試驗片과 혼사이의 間隔(h)은 feeler gauge 및 dial gauge로 측정하였고, 浸蝕에 의한 累積된 試驗片의 무게 減少量은 自動停止 timer에 의해 試驗時間을 조정하면서 測定하였다. 또한 Fig. 2는 超音波 振動 시스템의 block diagram이다.

여기서 超音波發振器는 60 Hz, 220 V 電力을 入力으로 소정의 電子回路를 통하여 20 kHz 내외의 定格出力을 발생시켜 振動子 및 여러 장치에 공급하는 역할을 담당하는 데, 超音波發振裝置에는 自動停止타이머, 제어장치(control unit), 振動子, 증폭기 혼(booster horn)등이 있다. 振動子는 發振器로 부터 소정의 입력을 받아 電氣에너지를 振動 에너지로 變換시켜서 증폭기에 전달하는 과정으로 형성되어 있다.

3. 結果 및 考察

3. 1 蒸溜水에서의 캐비테이션 浸蝕에 미치는 間隔의 영향

Fig. 3은 Pb基 베어링 合金材 7種(WM 7)에

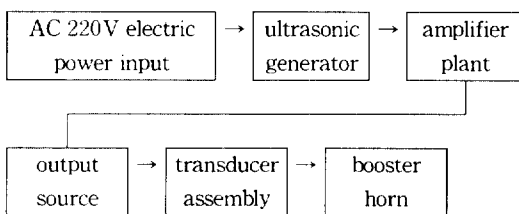


Fig. 2. Flow chart of ultrasonic unit.

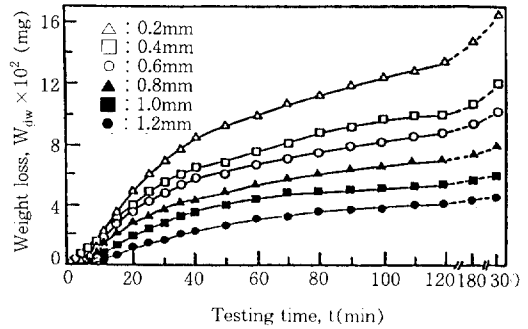


Fig. 3. Weight loss vs testing time according to separation distance in distilled water (DW) for WM 7.

대해 蒸溜水(DW, 比抵抗 $15 \times 10^3 \Omega \cdot \text{cm}$ 인 pH 7 中性溶液으로 腐蝕性이 거의 없이 機械的인 浸蝕作用만 있는 것으로 假定함.) 중에서 間隔變化에 따른 무게 減少量(Wdw)을 實驗時間(t)에 대해 측정된 결과이다.

이에 의하면 1.2 mm에서 0.2 mm로 間隔이 적어짐에 따라 무게 減少量이 차츰 增加하는 傾向을 나타내고 있으나, 實驗初期 7 분동안까지는 0.2 mm 間隔에서의 무게 減少量이 0.4 mm 間隔에서 보다 오히려 적다.

이와 같이 間隔이 적어짐에 따라 무게 減少量이 增加하는 이유는 間隔이 적어짐에 따라 振動子 혼에서 試驗片까지 도달하는 캐비테이션 氣泡數(cavitation bubbles number)가 增加하고, 氣泡 消滅時 衝擊力이 增加하여 浸蝕의 세기가 크게 되기 때문이라고 思料된다. 또한 間隔이 0.2 mm로 아주 작게 되면 0.4 mm에서 보다 實驗時間이 7 분정도까지는 오히려 무게 減少量이 적어지는 이유는 二面間에 발생한 氣泡가 分散이 어려워 일종의 緩衝作用(cushion action)¹¹⁾을 하기 때문에 衝擊力이 緩和되어 浸蝕損傷이 抑制된다고 추정된다.

이의 자세한 內容을 Fig. 4에 實驗時間 20 분까지의 무게 減少量 樣相으로 나타내고 있다. 이에 의하면 實驗시간이 7 분정도 경과하여 시험편 周邊部로의 기포분산에 의한 전달작용이

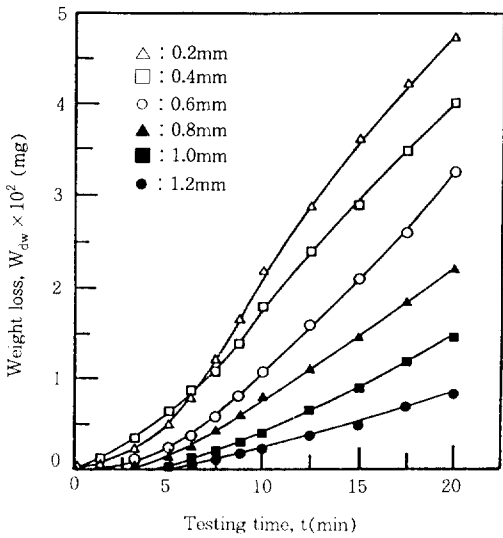


Fig. 4. Weight loss at initial stage of cavitation erosion test in distilled water (DW) for WM 7.

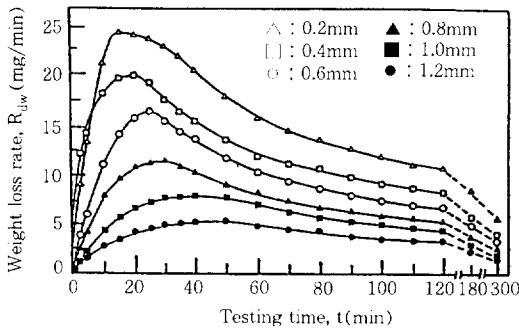


Fig. 5. Weight loss rate vs testing time according to separation distance in distilled water (DW) for WM 7.

용이하게 발생함으로써 浸蝕의 세기에 따른 試驗片에 浸蝕損傷이 커져서 間隔이 증가한다. 따라서 間隔이 증가됨에 따라 氣泡分散이 용이함으로써 침식 세기에 비례하여 무게 減少量이 재차 增加하는 것으로 추정된다.

Fig. 5는 Pb基 베어링 合金材 7種(WM 7)에 대해 蒸溜水(DW) 중에서 間隔變化(h)에 의한 무게 減少率(R_{dew})을 實驗時間(t)에 대해 측정

한 것이다. 여기서 무게 減少率은 實驗時間(t)에 대하여 累積된 무게 減少量(W_{dew})의 増分量($\Delta W_{dew}/\Delta t$)을 나타내어 보인 것이다.

이에 의하면 最高 浸蝕率(R_{max}, 試驗片의 무게 減少率이 가장 크게 나타나는 값을 稱함.)은 1.2 mm에서 0.2 mm로 間隔이 적게 됨에 따라 크게 나타나고, 特性時間(最高 浸蝕率에 이르는 浸蝕實驗時間을 稱함.)도 間隔이 적으면 짧아진다. 또한 實驗時間이 경과함에 따라 간격이 적을 수록 무게 減少率은 감소하고 있다.

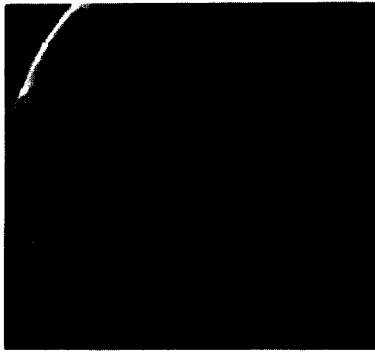
이와 같이 1.2 mm에서 0.2 mm로 間隔이 적어짐에 따라 最高 浸蝕率이 증가하는 이유는 間隔이 적으면 氣泡의 崩壞時 衝擊力이 강하고, 氣泡數에 의한 浸蝕小孔이 증가하기 때문이라고 思料된다.

또한 間隔이 적으면 特性時間이 짧아지고 무게 減少率이 급속히 減少하는 것은 間隔이 적을 수록 浸蝕小孔이 크고 깊게 됨으로써 캐비테이션에 의한 무게 減少率이 급속히 증가하고, 이러한 浸蝕小孔에 氣泡가 흡착하여 緩衝作用을 함으로써 衝擊力이 완화되기 때문이라고 생각된다.

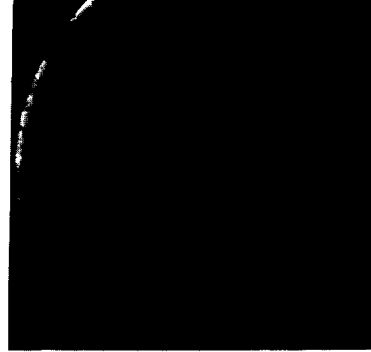
Photo. 1은 Pb基 베어링 合金材 7種(WM 7)에 대해 0.2, 0.6, 1.0 및 1.2 mm인 間隔變化에 따른 蒸溜水(DW)에서의 浸蝕損傷面을 나타낸 寫眞으로 實驗時間은 120 분동안이다.

이에 의하면 0.2 mm 間隔인 Photo. 1(a)의 浸蝕損傷은 불균일한 微小 凹凸形態을 하고 있으며, 浸蝕小孔은 부분적인 金屬粉의 脫離作用으로 損傷面이 넓고 깊다. 이와 같은 현상은 間隔이 적어서 액체의 流出入에 의한 剪斷應力에 따른 損傷面과 강한 氣泡의 衝擊力에 의한 材料粒子의 剝離作用이 重疊되기¹²⁾ 때문이라고 생각된다.

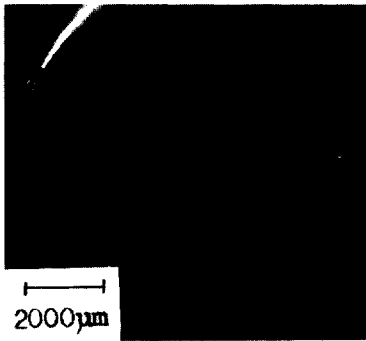
Photo. 1(b)의 경우에는 캐비테이션 浸蝕에 의한 浸蝕小孔이 微小 窪靨(dimple)모양이고, 小孔壁에는 덩어리의 金屬 粒子의 脫離現象도 거의 없으며 침식면적이 露出面積에 걸쳐 분



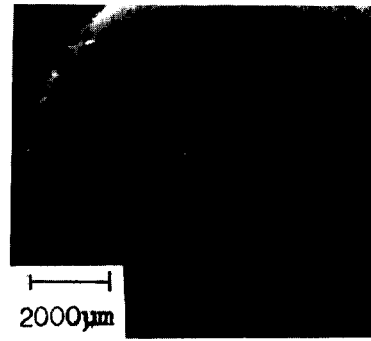
(a) 0.2 mm, 120 min



(b) 0.6 mm, 120 min



(c) 1.0 mm, 120 min



(d) 1.2 mm, 120 min

Photo. 1. Progressive change of the damaged surfaces according to 0.2, 0.6, 1.0 and 1.2mm in distilled water(DW) for WM 7.

산되어 있다. 이러한 현상은 間隔의 크기가 氣泡形成 및 分散 舉動에 적합하므로 氣泡數가 많고 침식의 세기가 다소 일정하기 때문이라고 사료된다.

Photo. 1(c)의 浸蝕損傷面에는 미소한 浸蝕小孔은 試驗片에 많이 발생하고 있으나, 浸蝕面積이 적으며 中央部에 金屬脫離 現象이 약간 있다. 이와 같은 원인은 Photo. 1(b)에 比하여 間隔이 증가함으로써 露出面積과 氣泡數가 적고, 衝擊力은 周邊部에 比하여 中央部가 강하기 때문이라고 추정된다.

Photo. 1(d)의 浸蝕損傷 樣相은 氣泡의 衝擊力이 약하고, 露出面積이 적기 때문에 浸蝕小孔이 적고, 凹凸모양의 얇고 작은 小孔이 형성

되어 있다. 이러한 浸蝕損傷은 間隔이 증가해서 침식세기가 약하고 氣泡數가 적기 때문으로 사료된다.

Photo. 2는 Pb基 베어링 合金材 7種(WM 7)에 대해 蒸溜水(DW) 중에서 캐비테이션 浸蝕損傷의 進展狀態를 5, 15, 60 및 120 min 實驗時間의 경과에 따라 나타낸 사진으로 간격은 0.4 mm이다. 이에 의하면 Photo. 2(a)에서는 材料表面에 발생한 氣泡가 崩壞함에 따라 材料表面에 衝擊力이 작용함으로써 酸化皮膜 등이 破壞되면서 浸蝕 小孔核이 성장하는 段階로 보인다.

Photo. 2(b)에서는 浸蝕小孔이 周邊部에서 中央部로 확대되며, 損傷速度가 增加하는 단계로서 小孔核이 成長하여 浸蝕損傷이 進行하는 과

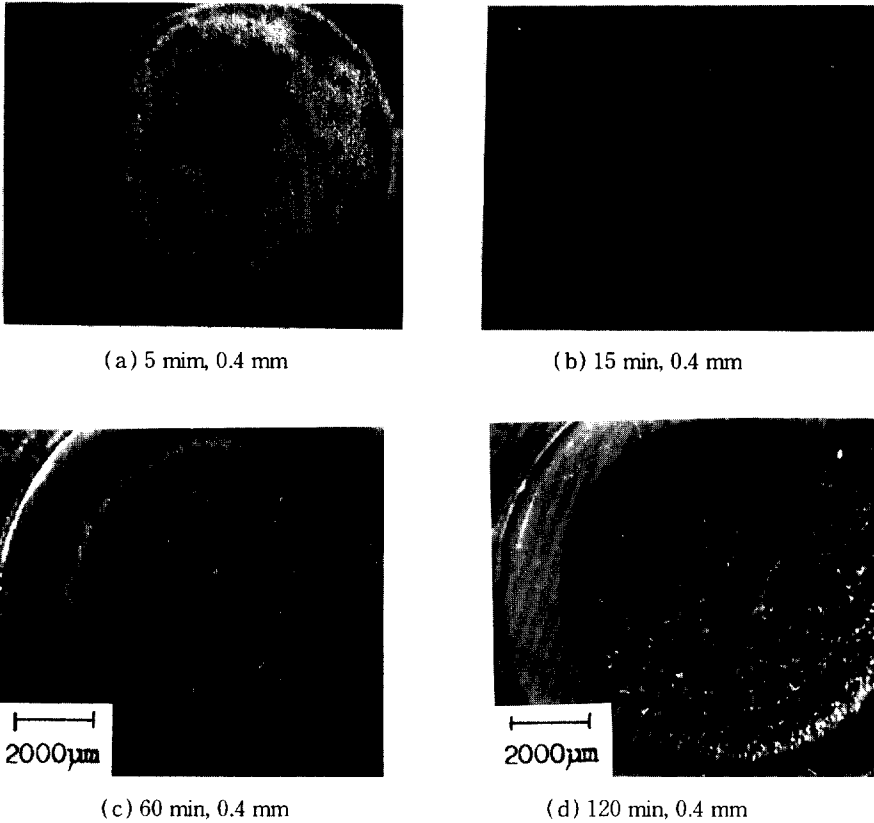


Photo. 2. Progressive change of the damaged surfaces according to 5, 15, 60 and 120min testing time in distilled water(DW) for WM 7.

정이라 하겠으며, 이 때에는 小孔周邊이나 小孔들 사이에 塑性變形에 의한 균열도 발생하고 있다.

Photo. 2(c)에서는 Photo. 2(b)에서 보다 더 進展된 損傷樣相으로써 小孔數와 크기가 증가하였다. 특히 이 과정에서는 露出面積周邊部가 심하게 脫離되고, 小孔은 다소 불규칙하게 성장하고 있다. 이 단계는 小孔이 주변에서 중앙으로 이동하면서 증가하고, 주변에서는 小孔에 吸着한 氣泡 緩衝作用으로 浸蝕損傷이 둔화되면서 安定期로 들어가는 遷移段階(transition stage)라고 생각된다.

Photo. 2(d)의 경우는 全 材料表面에 浸蝕損傷이 발생한 양상으로 損傷面의 小孔에 吸着된

氣泡의 緩衝作用으로 浸蝕損傷狀態가 거의 一層적으로 安定된 상태이며, 損傷面의 모양은 海綿狀으로서 벌집(honeycomb)形態¹³⁾를 이루고 있다.

Fig. 6은 Fig. 3, Fig. 5 및 Photo. 2에 의한 무게 減少量과 무게 減少率 양상을 좀더 미시적으로 考察하기 위하여, Pb基 베어링 合金材 7種(WM 7)에 대해 蒸溜水(DW) 중에서의 캐비테이션 浸蝕에 의한 무게 減少量(W) 및 무게 減少率(R)을 實驗時間(t)에 대해 모델링(modeling)한 것이다. 여기서 W-t 및 R-t 曲線特性에 따라 4 區域¹⁴⁾으로 분류하면, ㉠, ㉡, ㉢, ㉣ 및 ①, ②, ③, ④로 나타낼 수 있다.

이에 의하면 ㉠ 期間에서는 캐비테이션 氣泡

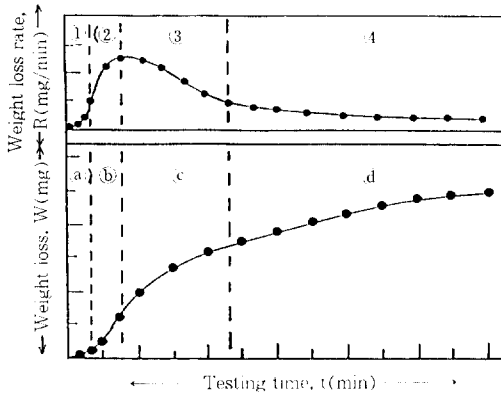


Fig. 6. Typical cavitation erosion process vs testing time in distilled water(DW) for WM 7.

의 충격력에 의해 材料表面에 塑性變形이 생기고 酸化皮膜과 二重層이 서서히 脫離하여 浸蝕小孔의 핵이 형성되는 과정으로 浸蝕小孔은 크지 않는 단계이고, ㉑ 期間은 數個의 浸蝕小孔이 발생하여 損傷速度가 증대하는 기간으로, ㉒에서 ㉓로의 遷移期間이라 할 수 있다. 또한 ㉓ 期間은 小孔이 많이 발생함과 동시에, 材料의 露出面積이 증대하여 損傷速度가 촉진되었으나, 實驗時間의 경과에 따른 浸蝕損傷에 의해 증대한 小孔内部에 氣泡가 충전하여 緩衝作用때문에 차츰 衝擊力이 완화되면서 損傷量이 감소하는 단계이다. 또 ㉔ 期間에는 캐비테이션 氣泡가 材料의 浸蝕小孔面에 크게 흡착하여 氣泡崩壞가 잘 일어나지 않는 단계로서 무게 減少率도 최대로 억제되는 단계이다. 그리고 위의 ㉑, ㉒, ㉓, ㉔의 4 구역을 實驗時間에 따른 무게 減少率 곡선에서도 4 가지 구역으로 구분할 수 있다. 즉, ㉑ 潛伏期(incubation region), ㉒ 增加期(acceleration region), ㉓ 減少期(deceleration region) 및 ㉔ 安定期(steady state region)의 4 단계로 구분이 된다.

3.2 3% 食鹽 水溶液에서의 浸蝕-腐蝕에 미치는 間隔의 영향

Fig. 7은 Pb基 베어링 合金材 7種(WM 7)에

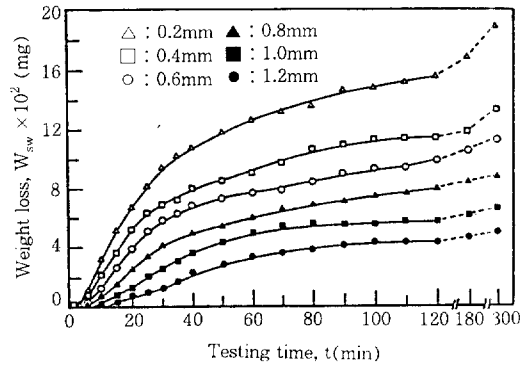


Fig. 7. Weight loss vs testing time according to separation distance in 3% NaCl solution(SW) for WM 7.

대해 3% 食鹽을 혼합한 水溶液(SW, 腐蝕性이 강하여 浸蝕-腐蝕作用이 上昇하는 환경으로 가정하고, 이하 水溶液이라 칭함.)에서 間隔變化에 따른 무게 減少量(W_{sw})을 實驗時間(t)에 대해 측정된 결과로서, Fig. 3에 比較하여 1.2mm에서 0.2mm로 間隔이 적어짐에 따라 무게 減少량의 증가는 더욱 커지고, 實驗初期에서 0.2mm에서의 무게 減少량이 0.4mm 間隔에서 보다 적은 경우 實驗時間은 3분 정도로 짧다.

이와 같은 현상은 기계적인 浸蝕作用만 있는 蒸溜水에 比하여 電氣化學的으로 불안정한 수용액에서 強電解質인 Cl^- 이온이 침입하여 腐蝕活性化를 촉진시킴으로써 금속의 表面層이 쉽게 脫離되기 때문이라고 생각된다. 또한 實驗初期에 0.2mm 間격에서의 무게 減少량이 0.4mm에서 比하여 크게 나타나는 實驗時間이 증류수에 比하여 3% 食鹽을 혼합한 水溶液에서가 짧은 현상은 浸蝕-腐蝕活性化인 水溶液에서는 초기의 캐비테이션 氣泡의 衝擊力에 의해 不動態皮膜이 쉽게 破壞되어 金屬表面에 腐蝕作用이 증가하여 浸蝕面積이 커짐으로써 間隔增加에 의한 氣泡分散이 급속히 촉진되기 때문으로 사료된다. 그리고 이와 같이 蒸溜水에 比하여 3% 食鹽 水溶液에서의 무게 減少량에 따라 浸蝕에 미치는 腐蝕作用의 영향을 평가하기 위하여,

Fig. 3 및 Fig. 7의 結果로 腐蝕感受性(S_c)을 Fig. 8에 정리하였는데, 腐蝕感受性(S_c)은 다음 식(1)과 같이 계산하였다.

$$S_c = W_{sw} / W_{dw} \quad \dots\dots\dots (1)$$

여기서, W_{dw} : 間隔變化에 따른 蒸溜水에서의 무게 減少量이고,

W_{sw} : 3% 食鹽 水溶液에서의 무게 減少量이다.

(또한, 蒸溜水에서의 무게 減少量은 非電解質의 環境이므로 腐蝕이 없는 機械的인 浸蝕作用만 있는 것으로 간주함.)

Fig. 8의 結果에 의하면, 蒸溜水에서의 무게 減少量에 比하여 水溶液에서의 浸蝕-腐蝕作用에 의한 무게 減少量에 미치는 腐蝕感受性은 급격히 증가하는 樣相, 즉 腐蝕에 민감함을 알 수 있으며, 특히 間隔이 적어짐에 따른 腐蝕感受性은 더욱더 敏感하게 나타나고 있다.

이와같이 蒸溜水에 比하여 水溶液에서의 腐蝕感受性이 민감한 것은 強電解質인 Cl^- 이온에 의한 電氣化學的인 腐蝕活性化 作用이 金屬表面, 小孔 및 龜裂部에 촉진되어 浸蝕-腐蝕作用이 上昇하기 때문이라고 생각된다. 또한 간격이 감소할 수록 腐蝕感受性이 증가하는 현상은 比抵抗이 $15 \times 10^3 \Omega \cdot cm$ 인 蒸溜水에서 보다 強電解質

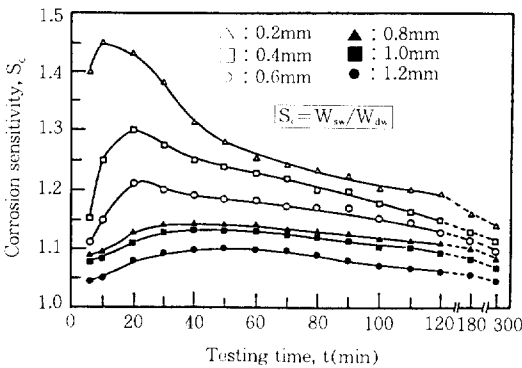


Fig. 8. Corrosion sensitivity vs testing time according to separation distance in W_{dw} and W_{sw} for WM 7.

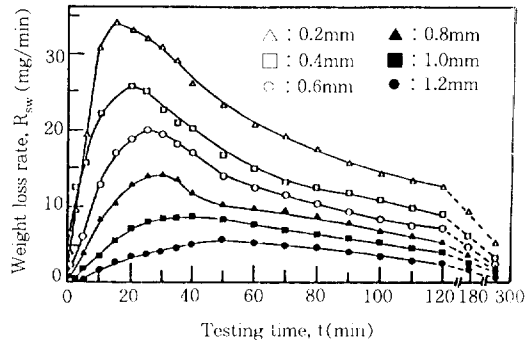


Fig. 9. Weight loss rate vs testing time according to separation distance in 3% NaCl Solution (SW) for WM 7.

의 Cl^- 이온 함유량이 증가되어 比抵抗이 작은 $30.2 \cdot cm$ 인 水溶液에서 腐蝕電流密度가 더 크게 配流되어 腐蝕活性化가 촉진됨으로써 機械的인 浸蝕에 더하여 電氣化學的인 腐蝕의 上昇效果¹⁵⁾에 의해 浸蝕-腐蝕이 가속되기 때문이라고 추정된다.

Fig. 9은 Pb基 베어링 合金材 7種(WM 7)에 대해 3% 食鹽을 혼합한 水溶液(SW)에서 間隔變化(h)에 의한 무게 減少率(R_{sw})을 實驗時間(t)에 대해 측정된 것이다.

이에 의하면 最高 浸蝕率은 Fig. 5에 比較하여 1.2 mm에서 0.2 mm로 間隔이 적게 됨에 보다 더욱더 크게 증가하는 傾向이다. 이와 같은 현상을 定量的으로 評價하기 위하여, Fig. 5의 蒸溜水에서의 무게 減少率(R_{dw})과 Fig. 9의 3% 食鹽 水溶液에서의 무게 減少率(R_{sw})을 比較, 整理하여 각각의 最高 浸蝕率(R_{max})을 間隔變化(h)에 따라 Fig. 10에 나타내고 있다.

이와 같이 最高 浸蝕率은 間隔이 증가함에 따라 점차 감소하는 傾向을 보이고, 最高 浸蝕率의 차이는 적어진다. 이러한 현상은 캐비테이션 浸蝕-腐蝕作用에 의해 最高 浸蝕率이 腐蝕性 環境에 민감하고, 間隔變化, 즉 침식의 세기에 큰 영향을 받기 때문이라고 생각된다.

따라서 最高 浸蝕率을 침식의 세기와 결부하여 材料特性을 파악하고자 다음과 같은 關係로

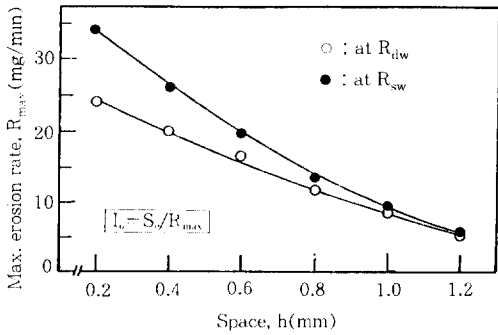


Fig. 10. Max. erosion rate vs separation distance in distilled water (DW) and 3% NaCl solution (SW) for WM 7.

정리하여 보았다. 즉, 본 시험기에서 캐비테이션 발생에 의한 침식-부식 실험시의 intensity I_e를 환경 변화에도 불구하고 간격이 같으면 일정한 것으로 가정했을 때 I_e는 다음 관계식(2)¹⁶⁾으로 나타냈다.

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

따라서 캐비테이션의 충격력에 대한 시험片的 耐强度(strength), 즉 材料的 耐 浸蝕-腐蝕性 Se는 다음 식(3)에 의해 評價될 수 있다.

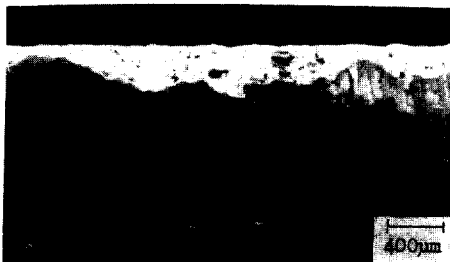
$$Se = I_e / R_{max} \dots\dots\dots (3)$$

여기서, Se : 材料的 耐 浸蝕-腐蝕性, R_{max} : 最高 浸蝕率이다.

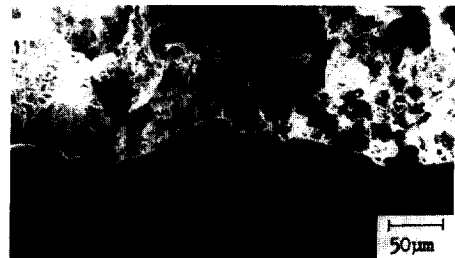
Fig. 10 과 식(3)에 의하면 R_{max}는 腐蝕性이 강한 환경일수록 증가한 반면, Se는 침식의 세기인 충격력에 의한 材料劣化때문에 감소한다. 따라서 침식세기인 間隔變化에 대해서도 재료의 耐浸蝕性에 미치는 腐蝕影響을 규명할 수도 있다. 즉, 間隔이 클수록 材料的 耐浸蝕-腐蝕性이 나타나며, 또한 間隔이 증가하여 침식의 세기가 약하면 浸蝕小孔 및 露出面積의 減少에 따라 腐蝕性에 의한 浸蝕-腐蝕作用의 上昇效果가 鈍感되는 것으로 사료된다.

3.3 캐비테이션에 의한 浸蝕斷面의 樣相

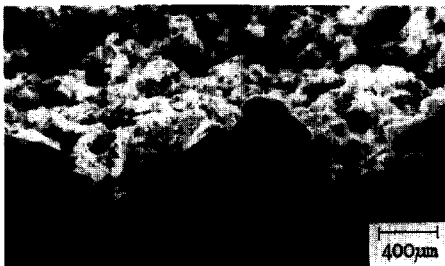
Photo. 3은 蒸溜水 및 3% 食鹽 水溶液에서



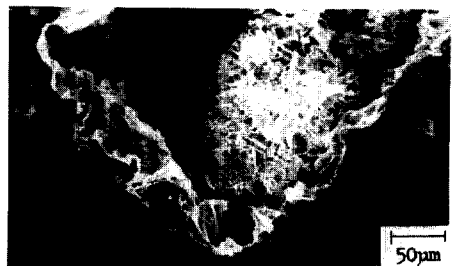
(a) DW, 0.4mm, 120min



(b) DW, 0.4mm, 120min



(c) SW, 0.4mm, 120min



(d) SW, 0.4mm, 120min

Photo. 3. Damaged cross section in distilled water (DW) and 3% NaCl solution (SW) for WM 7.

Pb基 베어링 합금材 7種(WM 7)에 대한 浸蝕 損傷의 斷面을 각각 25 및 200 배 SEM寫眞으로 나타낸 것으로 間隔은 0.4 mm 이고, 實驗時間은 120 分동안이다. 이에 의하면 水溶液에서와 같이 電氣化學的인 腐蝕環境에서의 浸蝕斷面에는 小孔壁에 심한 金屬 脫離作用이 있고, 腐蝕성이 거의 없는 蒸溜水에서의 斷面은 완만한 曲線을 形成하며 小孔壁(walls)의 金屬脫離現象은 아주 微弱하다.

이와 같이 水溶液에서는 Cl⁻이온의 小孔吸着에 의한 腐蝕活性化가 촉진됨으로써 孔蝕電流密度의 配流에 의한 陰陽極部가 形成¹⁷⁾된다. 이로 인하여 小孔壁이 허물어지고 龜裂이 가속되어 날카로운 톱니형의 핏트(pits)가 발생하는 것으로 추정된다. 그리고 蒸溜水에서의 浸蝕小孔 壁은 反復的인 氣泡의 衝擊力에 의한 기계적인 浸蝕作用으로 小孔壁이 均일하게 浸蝕되어, 流線形의 완만한 曲率를 형성하고 있는 것으로 생각된다.

4. 結 論

腐蝕성이 거의 없는 蒸溜水와 強電解質인 3% 食鹽 水溶液에서의 캐비테이션 浸蝕舉動 및 特性을 연구한 結果, 다음과 같은 結論을 얻었다.

1. 最高 浸蝕率은 間隔이 증가됨에 따라 작게 나타나고, 間隔變化에 의한 最高 浸蝕率의 차이는 實驗時間이 경과함에 따라서 차츰 減少하는 경향을 보인다. 그러나 特性時間은 間隔이 증가하면 길어진다.
2. 캐비테이션에 의한 浸蝕實驗過程에서 무게 減少率에 따라 潛伏期, 增加期, 減少期 및 安定期의 4 단계로 구분된다.
3. 蒸溜水에 比하여 水溶液에서 캐비테이션에 의한 浸蝕-腐蝕에 미치는 腐蝕感受性は 급격히 증가하고, 특히 間隔이 적어짐에 따라 腐蝕感受性は 더욱더 敏感하게 나타나고 있다.
4. 水溶液에서와 같이 強電解質인 環境에서의

浸蝕斷面에는 小孔壁에 심한 金屬 脫離作用이 있고, 腐蝕성이 거의 없는 蒸溜水에서의 斷面은 완만한 曲線을 形成하고 小孔壁의 金屬脫離現象은 미약하다.

參 考 文 獻

1. Francis. L. LaQue, Marine Corrosion, Wiley-Interscience Publication, pp. 11-12 (1983).
2. S. H. Frederick and H. Capper, Materials for Marine Machinery, Marine Media Management Ltd, pp. 211-212 (1981).
3. Yoshiro Iwai and Tsunerori Okada, Cavitation erosion in sliding bearing, Journal of Japan Society of Lubrication Engineers, Vol. 33, No. 1, pp. 2-3 (1988).
4. Toshinori Oka, Hiroyuki Kouzai, and Masanobu Matsumura, Mechanism of the Metal Action between Erosion and Corrosion, Boshoku Gijutsu, Vol. 35, No. 6, pp. 320-321 (1986).
5. 松村倉信, 岡 良則, 腐蝕に及ぼすエロジョンの影響, 防蝕技術, 31卷, 2卷, 國際文獻印刷社, pp. 67-68 (1982).
6. W. H. Ailor, Engine Coolants Testing : State of the Art, ASTM, STP 705, pp. 81-101 (1980).
7. A. Thiruvengadam, Erosion, Wear, and Interfacs with Corrosion, ASTM, STP 567, pp. 200-218 (1982).
8. G. S. Haynes and Robert Baboian, Laboratory Corrosion Tests and Standards, ASTM, STP 866, pp. 552-557 (1985).
9. W. F. Adler, Erosion : Prevention and useful Applications, ASTM, STP 664, pp. 418-431 (1979).
10. Annual Book of ASTM Standard, 03.02 Wear and Erosion: Metal erosion, G32-85,

- ASTM, pp. 115 (1989).
11. 林祐助, 李鎮烈, 베어링 合金材의 浸蝕-腐蝕 舉動에 미치는 乳化 潤滑油의 影響, 韓國船舶 機關學會誌, 17卷, 3號, pp. 44-49 (1993).
 12. 本本日出夫, 關口恭裕, キャピテーション衝擊 壓力に關する研究, 日本機械學會論文集(B 編), 55卷, 518號, pp. 1617 (1989).
 13. L. L. Shreir, Corrosion Vol. 1, Butter-worth Inc., pp. 8:126-8:132 (1979).
 14. L.L. Shreir, Corrosion Vol. 2, Butter-worth Inc., pp. 20:76-20:78 (1979).
 15. Yoshiro Iwai, Tsunenori Okada, Takashi Nishimoto, and Tadashi Morishita, Cavitation erosion in high water base fluids 2nd report), tribologists, Vol. 35, No. 10, pp. 727-731 (1990).
 16. 前掲書(8), pp. 30-49.
 17. 伊藤伍郎, 機械工學全書 6(腐食と防食). コロナ社, pp. 162-171 (1982).