

논문

유화유 환경에서 선박용 미끄럼 베어링의 캐비테이션 침식-부식거동

이진열*

The Behaviour of Cavitation Erosion-Corrosion at Emulsified Oil Environments on Marine Sliding Bearing Metals

Jin-Yeol, Lee*

<목 차>

Abstracts

- | | |
|-----------------------------------|---|
| 1. 서론 | |
| 2. 시험편 및 실험방법 | 3-3. Pb기 베어링 합금재의 유화유
환경에서의 침식 특성 |
| 2-1. 캐비테이션 발생에 대한
이론적인 배경 | 3-4. 캐비테이션 침식-부식에 미치는
유화유의 영향 |
| 2-2. 시험편 및 실험재료 | 3-5. 유화유 환경에서의 침식
-부식에 따른 부식전위와 전류밀도 |
| 2-3. 실험방법 및 실험장치 | |
| 3. 실험결과 및 고찰 | 4. 결론 |
| 3-1. 베어링 합금재의 조직분포 | ※ 참고문헌 |
| 3-2. Pb기 베어링 합금재의
유환경에서의 침식 특성 | |

Abstracts

In parallel with development of ships with higher speed and bigger size of marine engine, the cavitation erosion-corrosion damage in main bearing, piston bearing and thrust bearing recognized many shipbuilder, ship owner and marine engineer to be important problem that should be solved to improve more intensive engine performance.

Especially, this phenomenon took place strongly at lubricating oil emulsified or oxidized with water that accelerate the electrochemical corrosive action in addition to

* 한국해양대학교 해사대학 교수

cavitation erosion-corrosion in the emulsified oils, and then intend to apply widely this datum to the researcher who study the cavitation erosion-corrosion control for sliding bearing alloy metal.

1. 서론

최근 선박은 대형화, 고속화하여 국제경쟁력을 향상시키기 위하여 많은 노력을 기울이고 있는 데, 선박엔진의 장기간 운전에 대한 장애요소인 베어링의 캐비테이션 침식-부식발생에 의한 대책에 관심을 가지게 되었다. 특히 윤활유에 해수나 청수등이 침입, 누설 등에 의해 혼입·유화된 유화유에서는 유속 및 회전속도 등이 빠르게 되면 유체충격과 정압의 저하에 따른 국부적 비등으로 인해 캐비테이션 침식^{1,2)}과 더불어 부식에 의한 손상도 발생한다.

이와 같이 부식성이 강한 유화유에서 처럼 기계적인 캐비테이션 침식과 동시에 전기화학적인 부식이 일어나는 경우에는 침식과 부식이 상호간에 가속되는 상승효과로 인해 베어링의 수명에 치명적인 악영향을 미친다.³⁻⁷⁾ 특히 캐비테이션 침식손상중에서 미끄럼 베어링 합금재에서 발생한 침식손상사례를 역사적으로 관찰하여 보면, 구미(歐美)에서는 철도차량, 선박, 자동차의 각 기관에서 발생한 사례보고 등⁸⁾이 있으며, 일본(日本)에서도 1934년부터 캐비테이션 침식손상에 대한 관심이 디젤기관에서 고조되고 있다.⁹⁾ 선박엔진에서 발생하는 캐비테이션 침식손상 중에서 냉각수 계통으로는 원심펌프의 임펠러, 왕복기관의 실린더 라이너, 증기 터빈의 블레이드 및 응축기의 냉각관 등이 있고, 윤활유 계통으로는 내연기관에서의 각종 미끄럼 베어링 합금재, 왕복압축기의 베어링 합금재, 발전기의 축지지 베어링 합금재, 추력 베어링 합금재, 선미관의 스텐튜브(stern tube) 베어링 합금재 등^{10,11)}이 있다.

근래에 와서 선박엔진들의 에너지 효율의 증대 및 유지비를 절감시키기 위하여 캐비테이션 침식손상대책에 대한 관심이 요구되고 있으나^{12,13)} 캐비테이션 침식-부식작용은 유체의 기계적 작용과 부식성인 각종 환경에서 발생하고, 여러 환경인자가 복합되기 때문에 손상의 예측이나 손상속도의 추정이 곤란할 정도이고,¹⁴⁾ 베어링 합금재에서 캐비테이션에 의한 침식발생을 선박용 윤활유에서의 연구는 거의 찾아 볼 수 없는 실정이다.^{15,16)}

이러한 선박 윤활유는 전기화학적으로 안정된 비전해질이지만, 냉각수 펌프의 실(seal)누설, 냉각기의 누설 및 자켓트 냉각수(jacket cooling water) 누설에 의한 청수 또는 해수에 의한 유화작용(emulsified action)이 발생한다. 유화 윤활유에서의 캐비테이션 침식-부식작용은 베어링 합금의 탈리현상을 가속시키므로 윤활유의 유막형성 저하 및 압력변동을 유발하며, 축과 베어링사이에서 고체마찰 및 마모현상 등¹⁷⁾을 촉진시킨다.

따라서 본 연구는 유화유에서 청수 및 해수가 베어링 합금재의 캐비테이션 침식-부식에 미치는 영향을 고찰하고 그 억제에 관한 자료로 활용하고자 한다.

2. 시험편 및 실험방법

2.1 캐비테이션 발생에 대한 이론적인 배경

2.1.1 기포 형성(Bubble formation)

기포의 형성조건은 다음의 식(1)과 같이 작동 유체가 포화증기압 이하가 되면 국부적으로 진공이 형성되어 증기포가 발생한다.

$$P_V = P_{ST} - \Delta P_W \quad (1)$$

P_V : 작동유체의 포화증기압, P_{ST} : 유체의 정압, ΔP_W : 유체압력 변동

또한 미택(米澤)등¹⁸⁾의 실험에 의하면 ΔP_W 의 형성조건으로 액체 혹은 기계진동속도가 0.118 m/s 이상으로 되어야 하는 데, 본 실험장치는 이 조건에 만족하도록 설계하였다.

2.1.2 기포 발생수(혹은 캐비테이션 수, Cavitation number)

캐비테이션에 의한 기포의 발생수 K 는 Thiruvengadam과 Baker등^{19,20)}이 제안한 식(2)와 같다.

$$K = \frac{P_0 - P_V}{\rho V_0^2 / 2} \quad (2)$$

P_0, V_0 : 무한원에서 발생하는 정압과 유속, ρ, P_V : 액체의 밀도와 증기압

따라서 캐비테이션 기포수는 액체의 밀도 및 유속에 큰 영향을 받는 것으로 K 의 값은 밀도 및 속도가 같을 경우, 캐비테이션 침식손상은 정압과 증기압에 영향을 미치는 간격에 따른 기포의 충격력에 지배된다.

2.1.3 진동수 및 진폭(Frequency and Amplitude)

캐비테이션 발생기인 초음파 진동장치에서 진동자의 진폭과 진동수는 침식 손상속도에 미치는 주요 인자로서 단위시간, 단위면적당에 방사되는 에너지(E)의 값으로 나타낸다. 따라서 손상속도(R)는 손상면적(S)에 방사되는 에너지에 비례한다고 가정하여 식(3), (4)^{21,22)}로 표현할 수 있다.

$$E = I \times S = \frac{1}{2} \pi^3 f^2 \rho c A^2 d^2 \quad (3)$$

$$R \approx f^2 A^2 d^2 \quad (4)$$

I : 침식세기, f : 진동수, ρ : 밀도, c : 음속, A : 전 진폭, d : 손상면직경

식(3), (4)에서 손상속도는 진동자의 진동수 f , 진폭 A 및 손상면의 직경 d 만 알 수 있으면 손상속도의 추정이 가능함을 알 수 있다. 이와 같이 침식속도에 미치는 인자의 특성이 복잡함으로 일정한 규정을 정하여 명시하고 있는 데, 본 실험에서의 진동수 및 진폭은 ASTM 규정(G32-85)²³⁾에서 정하고 있는 공진 주파수 20 kHz, 진폭 $24 \mu\text{m}$ 인 진동자로 캐비테이션 침식실험을 실시하였다.

2.1.4 침식손상율(Erosion Damage Rate)

재료특성에 의한 침식소공양상을 나타내는 평균깊이 손상율(MDPR, Mean Depth Penetration Rate) R_d 를 구하는 데는 다음 식(5)^{24~26)}가 적용되고 있다.

$$R_d = M/\rho \quad (5)$$

따라서, 깊이 기준의 침식속도 dR_t/dt 는 식(6)과 같다.

$$dR_d/dt = \frac{d}{dt} \left(\frac{M}{\rho} \right) = \frac{1}{\rho} \left(\frac{dM}{dt} \right) = \frac{1}{\rho} \left(\frac{d(\alpha N)}{dt} \right) = \frac{\alpha}{\rho} \left(\frac{dN}{dt} \right) \quad (6)$$

R_d : 평균깊이 손상율,

ρ : 재료밀도, M ($M = \alpha N$): 단위표면적당의 무게 감소량

α : 최대손상속도 ($(dM/dt)_{\max}$), N : 단위면적당의 충돌횟수

2.1.5 유화 윤활유의 특성

윤활유에 물(수분)이 혼입하여 유화(Emulsion)가 되면 가수분해물을 일으켜서 부식성 유기산을 생기게 하고 고무상 물질을 생성시켜 윤활유를 유화변질시키는 데 해수인 경우에는 그 현상이 더욱 심하다. 따라서 윤활유의 내압성이 변화하고, CO_2 , CO , H_2 등의 가스 도출을 억제함으로써 산화가 가속된다.

2.1.6 부식감수성(Corrosion sensitivity)

윤활유 환경에서의 무게감소량에 대한 유화유에서의 무게감소량에 따른 부식감수성(Corrosion Sensitivity, S_c)은 다음의 식(7)에 의하여 구하여 진다.

$$S_c = W_{e0} / W_{l0} \quad (7)$$

W_{e0} : 유화유 환경에서의 무게 감소량, W_{l0} : 윤활유 환경에서의 무게 감소량
(단, 윤활유는 비전해질이므로 전기화학적인 부식작용이 없는 것으로 간주한다)

2.2 시험편 및 실험재료

실험에 사용한 시험재료는 선박용 엔진의 미끄럼 베어링 합금재(Sliding Bearing Alloy Metals)인 Sn Base White Metal 1종(WM1), Pb Base White Metal 7종(WM7) 및 Cu-Pb Base Kelmet 4종(KM4)으로 시험재료의 화학적 성분 및 특성은 Table 1과 같다.

Table 1 Chemical Compositions and Properties of Sliding Bearing Alloy Metals.

W(%) Metals	Sn	Pb	Cu	Sb	Ni	경도 (Hv)	밀도 (mg/cm ³)	충격강도 (kgf/cm ²)	피로강도 (kgf/mm ²)	인장강도 (kgf/mm ²)
WM1	90	-	4	6	-	31	7368	2.50	6x10 ⁷	7.55
WM7	12	73	1	14	-	20	9534	0.35	4x10 ⁷	6.40
KM4	0.5	25	73.5	-	1	71	9338	6.30	7.6x10 ⁷	18.50

이와 같은 시험재료로 부터 제작 및 가공한 시험편은 직경이 20mm, 높이 7mm로 하였으며, 시험편 제작은 저속 밀링기(Milling machine)의 다이아몬드 톱날로 절단하였다. 표면은 사포 1500 번까지 연마하고 오일 랩핑(Oil lapping)한 후 아세톤으로 탈지하였다. 또한 유효로출표면을 제외한 나머지 부분은 전기화학적인 영향을 방지하기 위하여, 에폭시 수지(Epoxy resin)로 2회 도장·절연하였고, 또한 전위인가와 전류 및 전위측정을 위하여 0.5mm 직경의 피복전선을 시험편에 연결하였다.

또한 시료유로는 선박윤활유인 시스템 유(System Oil : SO)와 그 윤활유에 각각 1~4% 용량의 증류수(Distilled Water : DW, 비저항 15x10³Ω.cm) 및 해수(Sea Water : SW, 비저항 25Ω.cm)를 첨가·유화시킨 유화유(Emulsified Oils)로 하였다. 그들의 특성은 Table 2에 보이고 있다.

Table 2 Properties of System Oil and Emulsified Oils.

특성 종류	비중 (60/60°F)	동점도 (cSt@40°C)	중화가 (pH)	유동점 (°C)	인화점 (°C)	침전물 (V%)
시스템유탄유	0.9165	109.0	7.8	-18	260	-
3%청수유화유	0.9452	88.4	6.6	-	303	0.18
3%해수유화유	0.9541	91.3	6.3	-	310	0.232

2.3 실험방법 및 실험장치

환경 온도는 실내온도로 하고, 용액의 농도 및 전기 전도도의 변화를 방지하기 위하여 순환수펌프로 순환하고, 필터(Filter)에 의해 침전물을 제거 하였다. 또한 무게 감소량 및 감소율은 디지털 저울(Digital balance, Mettler, Swiss, MP 1400)를 사용하여 시험편을 세정하여 건조한 후에 측정하였다.

실험에 사용한 캐비테이션 발생장치는 초음파를 응용한 진동가속시험기로 진동자(Transducer)의 혼(Horn, 직경 15mm, 길이 150mm)로 시험편과 대향하게 일정한 간격을 두었으며, 양극인 시험편에 수직하게 혼을 상하로 진동하였다. 이때 진동자의 공진주파수는 ASTM규정에 의해 20kHz로 하였고, 진폭은 24 μ m로 일정히 유지하였다. 또한 전기화학적인 영향을 제거하기 위하여 환경조는 플라스틱(Plastic)재로 제작하였고, 순환수 펌프도 전기전도도가 거의 없는 플라스틱재이다. 그리고 대면하게 설치된 시험편과 혼의 간격(h)은 틈새 게이지(Feeler gauge) 및 다이얼 게이지(Dial gauge)로 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 베어링 합금재의 조직분포

Photo.1은 캐비테이션 침식실험에 사용된 Sn기 베어링 합금재 1종(WM1), Pb기 베어링 합금재 7종(WM7) 및 Cu-Pb기 베어링 합금재 4종(KM 4)등의 모재(Base Metal : BM)조직을 200배 SEM 사진으로 나타낸 것이다.

이에 의하면 Photo.1(a)는 WM1의 조직으로 Sn에 Sb와 Cu를 첨가한 것으로 상온에서 나타나는 조직상은 Sn에 소량의 Sb가 고용된 δ 고용체, 화합물 CuSn 및 CuSb의 3상으로 구성되어 있고, Sn은 수지상인 α 상이고, Cu는 구상으로 첨재되어 있으므로 모재의 조직에서 날카로운 결정은 단일 수지상 CuSn이고, 바닥의 조직은 공정이다. Photo.1(b)는 WM7 조직으로 사각의 백색은 β 이고, 바닥은 Pb와 β 의 공정이다. Photo.1(c)는 KM4의 조직인데 백색은 Pb-Cu의 공정이고, 흑색은 Pb의 수지상으로 구성되어 있다.

위의 조직으로 볼 때 조직 특성상 WM1이 WM7에 비하여 연성은 떨어지나, 경도가 크고 내-마모성이며 충격력에 대한 저항이 크다. 또한 KM4는 다른 베어링 합금재에 비하여 열전도도가 높고 압축강도가 크다.²⁷⁾

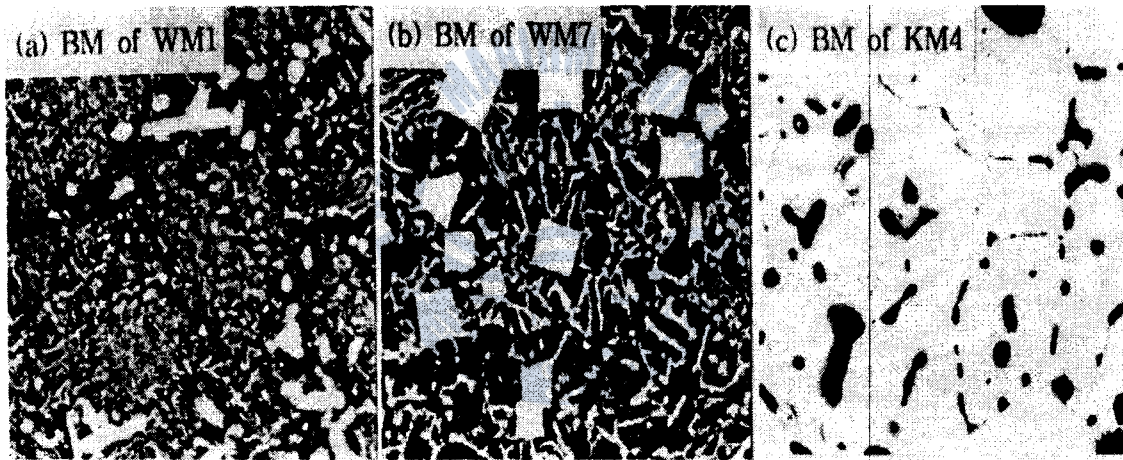


Photo.1 Appearance on Base Metal Structure of Baring Alloy Metals.

3.2 Pb기 베어링 합금재의 유환경에서의 침식특성

Photo.2는 Pb기 베어링 합금재 7종(WM7)에 대해 시스템유(S.O)에서의 캐비테이션 침식 손상과정을 시간 경과에 따라 정리한 사진이다.

이와 같이 캐비테이션 침식손상면은 초기 실험시간이 3~120 분까지 경과함에 따라 주변부에서 중앙부로 침식손상이 변천하는 경향을 보인다. 이러한 현상은 주변부에서는 기포의 유출입이 용이하여 완충작용이 적고, 시간경과에 따라 침식소공이 발생하면 소공에 기포흡착에 의한 충격력의 완화²⁸⁾로 중앙부로 침식손상이 진전되는 것으로 사료된다. 또한 실험초기 3분에서는 침식손상의 핵인 미소한 소공과 균열이 발생하는 단계이고, 10분에서는 소공 핵이 촉진되어 침식손상이 증가한다.

또한 20~40분으로 실험시간이 경과함에 따라 소공의 크기는 차츰 증가하고, 소공벽에서는 입자의 탈리현상이 일어난다. 또한 70~120분에서는 딥플형인 손상소공에 기포의 완충작용으로 인하여 침식손상진전이 둔화되면서 소공이 수지상으로 미소한 형태을 나타낸다.

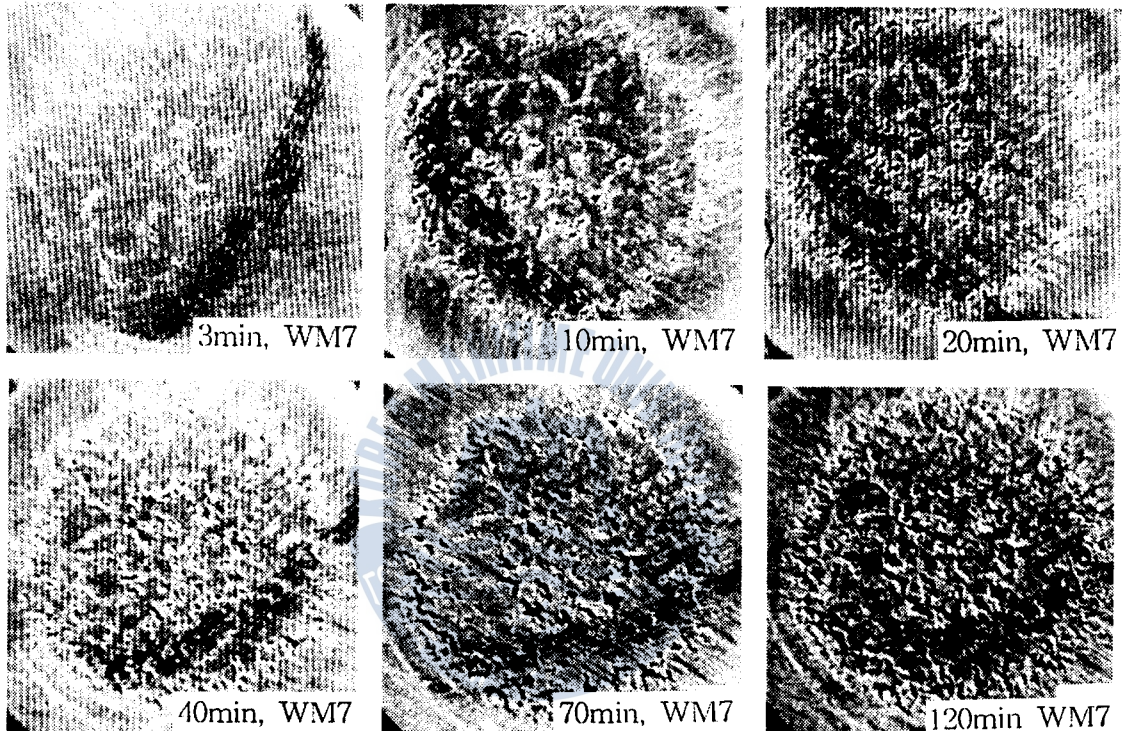


Photo.2 Progressive Cavitation Damaged Surfaces vs Testing time in System Oil(SO) for WM7.

3.3 Pb기 베어링 합금재의 유화유 환경에서의 침식특성

Photo.3은 Pb기 베어링 합금재 7종(WM 7)에 대해 증류수(D.W, 비저항 $15 \times 10^3 \Omega \cdot \text{cm}$)를 1.0, 2.0, 3.0 및 4.0% 비율로 혼입한 유화 시스템유에서의 캐비테이션 침식-부식에 의한 손상면의 양상을 나타낸 것이며, 실험시간은 30분동안이다.

이에 의하면 증류수 혼입이 1%인 유화유 중의 손상면에는 전 시험편의 유효노출표면에 미소소공이 조밀하게 존재하지만 소공은 적고 얇다. 한편 증류수 혼입비가 증가한 유화유 중일수록 침식-부식에 의한 소공은 점차 더 크게 되고, 이와 같은 소공주변부에 금속립자의 탈락현상이 강한 것으로 추정되는 수지상의 소공이 서로 혼합된 양상이다. 이러한 양상은 유화된 윤활유 중에서 캐비테이션 기포의 붕괴시 윤활유보다 비중이 더 큰 수분의

확산에 의해 침식의 세기가 크게 되는 동시에 윤활유보다 전기화학적으로 불안정한 유화유 중에서 부식활성화를 촉진시킴으로써 금속의 표면층이 쉽게 탈리되기 때문이라고 생각된다.

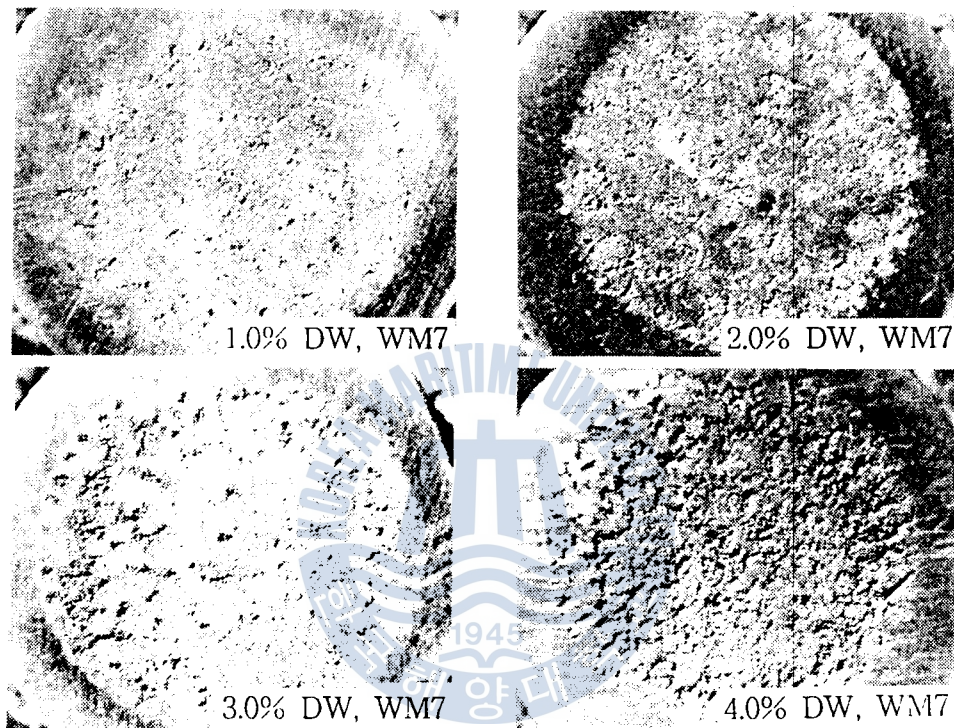


Photo.3 Appearance of Cavitation Damaged Surfaces vs Emulsified Oils with 1.0, 2.0, 3.0 and 4.0% Distilled Water(DW) for WM7.

Photo.4는 Pb기 베어링 합금재 7종(WM7)에 대해 천연해수(비저항 $25\Omega\cdot\text{cm}$)를 1.0, 2.0, 3.0 및 4.0 % 비율로 혼입한 유화 시스템유에서 캐비테이션 침식-부식에 의한 손상면 양상을 나타낸 것이며, 실험시간은 30 분동안이다.

이에 의하면 해수혼입이 가장 적은 1.0% 유화유 중에서 캐비테이션 침식-부식손상면에는 전 유효노출표면에 미소소공이 조밀하게 존재하지만 해수혼입비가 증가한 유화유중일수록 침식소공은 더 크게 되고, 전 표면에 흩어져 있다. 또한 소공에는 금속분의 탈리현상도 촉진되고, 소공벽이 뾰족하게 되는 양상을 나타내는 경향이 크다. 이러한 소공양상은 해수혼입에 의해 유화된 윤활유 중에서의 캐비테이션 기포붕괴시 수분의 확산에 의한 침식의 세기가 크게 되고, 강전해질인 Cl^- 이온이 침입하여 부식활성화를 촉진하여 금속립자가 쉽게 탈리되기 때문이라고 생각된다.

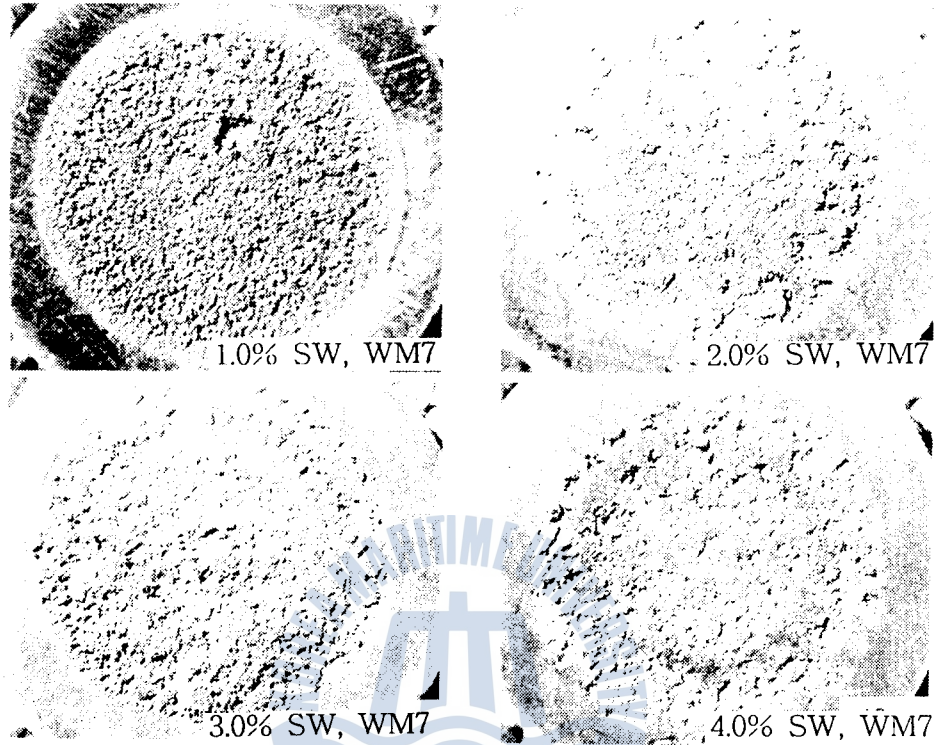


Photo.4 Appearance of Cavitation Damaged Surfaces vs Emulsified Oils with 1.0, 2.0, 3.0 and 4.0% Sea Water(SW) for WM7.

3.4 캐비테이션 침식-부식에 미치는 유화유의 영향

Fig.1과 Fig.2는 Photo.3, 4의 유화된 윤활유중에서 캐비테이션 침식-부식손상을 베어링 합금재의 종류, 유화유의 종류 및 유화정도에 따라 좀더 구체적으로 고찰하기 위하여, Sn기 베어링 합금재 1종(WM1), Pb기 베어링 합금재 7종(WM7), Cu-Pb기 베어링 합금재 4종(KM4)에 대한 시스템유, 그리고 윤활유에 증류수와 해수를 0.5, 1.0, 2.0, 3.0 및 4.0%의 비율로 혼입한 유화유 중에서 캐비테이션 침식-부식에 의한 무게 감소량을 측정하는 것이며 실험시간은 300분동안이다.

이에 의하면 윤활유 중에 증류수 및 해수혼입 비율이 높아질 수록 캐비테이션 침식-부식에 의한 각 베어링 합금재의 무게 감소량은 증류수 및 해수가 전혀 혼합되지 아니한 윤활유 중에서 캐비테이션 침식에 의한 베어링 합금재의 무게 감소량보다 점차 더 증가하는 양상을 나타내고 있으며, 특히 윤활유에 증류수 및 해수혼입 비율이 높아질 수록 증류수가 혼입된 유화유 중에서의 무게 감소량보다 해수가 혼입된 유화유중에서의 무게 감소량이

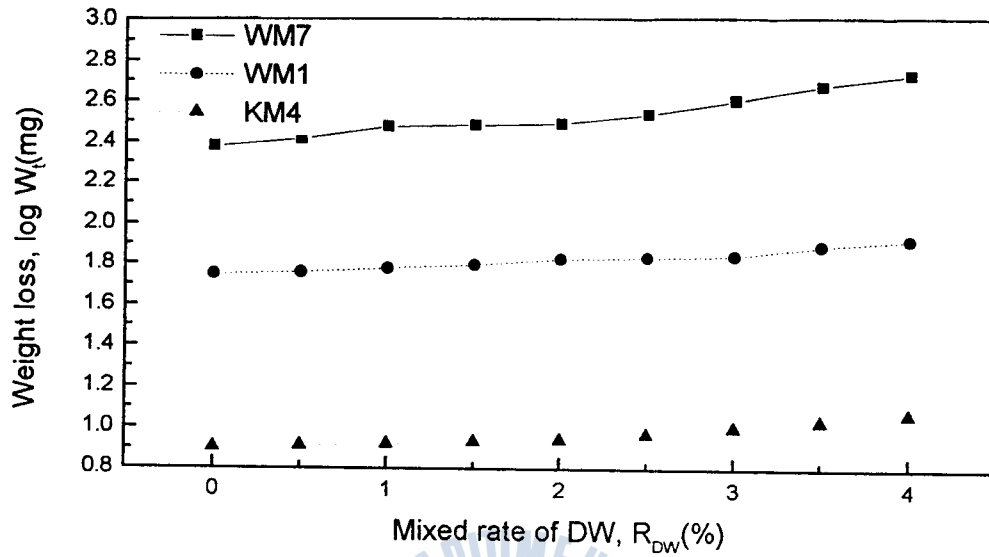


Fig.1 Weight loss vs emulsified oils with mixture of distilled water(DW) in system oil for materials.

더욱 크게 증가하고 있다. 그리고 각 환경조건에 있어서 WM7의 베어링 합금재가 캐비테이션 침식-부식에 의한 무게 감소량이 가장 크게 되고, KM4의 베어링 합금재가 가장 낮게 되고 있음을 알 수 있다.

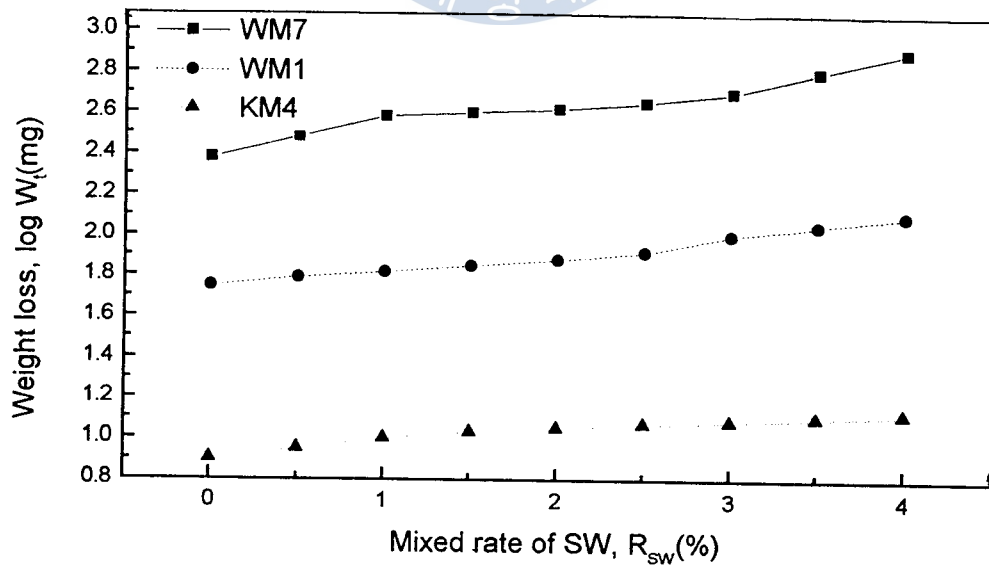


Fig.2 Weight loss vs emulsified oils with mixture of sea water(SW) in system oil for materials.

이와 같이 윤활유에 증류수 및 해수의 혼입비율이 높아질 수록 캐비테이션 침식-부식에 의한 각 베어링 합금재의 무게 감소량이 증가하는 양상을 좀더 정량적으로 구명하기 위하여, Fig.3과 Fig.4에 Sn기 베어링 합금재 1종(WM1), Pb기 베어링 합금재 7종(WM7) 및

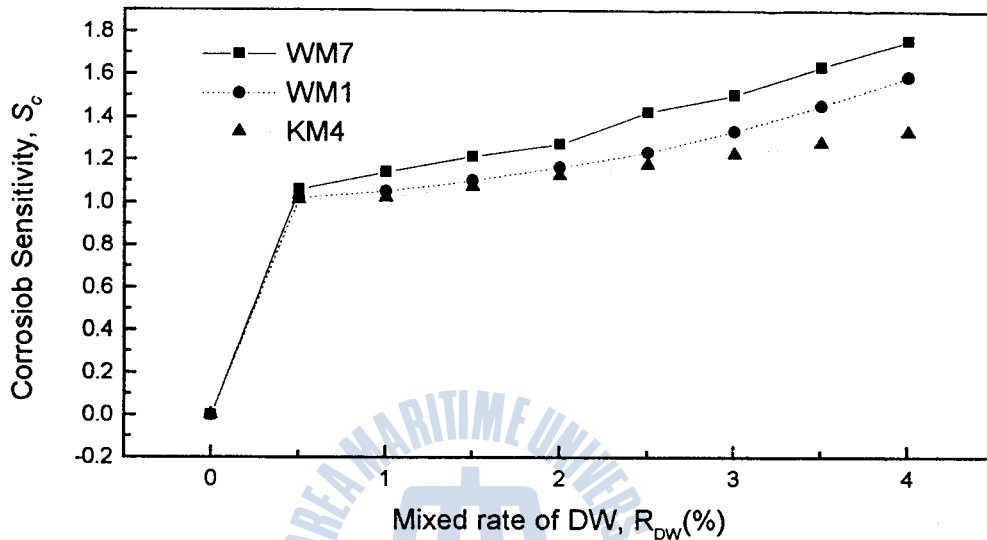


Fig.3 Corrosion sensitivity vs emulsified oils with mixture of distilled water (DW) in system oil for materials.

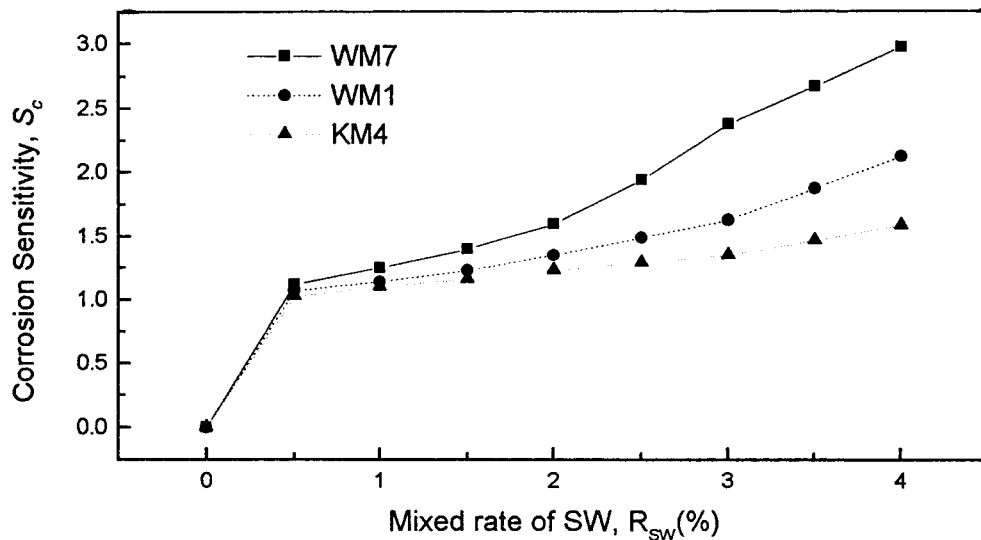


Fig.4 Corrosion sensitivity vs emulsified oils with mixture of sea water (SW) in system oil for materials.

Cu-Pb기 베어링 합금재 4종(KM4)에 대해 캐비테이션 침식-부식이 무게 감소량에 미치는 해수 및 증류수의 혼입비율에 따른 부식감수성 (S_c)을 Fig.3과 Fig.4의 각 실험치를 적용하여 계산에 의해 정리한 것이다.

이들의 결과에 의하면 윤활유 중에 증류수 및 해수의 혼입비율이 높아지는 유화유일수록 캐비테이션 발생에 의한 침식-부식에 미치는 부식감수성은 급격히 증가하는 양상, 즉 부식에 민감함을 알 수 있으며, 특히 해수의 혼입비율이 높아짐에 따른 부식감수성은 증류수에 비교하여 더욱 민감하게 나타나고 있다. 그리고 WM7의 부식감수성은 다른 베어링 합금재에 비해서 윤활유 중에 증류수 및 해수의 혼입비율이 높아질 수록 가장 민감한 양상을 나타내고, 유화유 중에서 KM4의 부식감수성이 가장 둔감하였다.

이와같이 윤활유 중에 증류수 및 해수의 혼입비율이 증가할 수록 캐비테이션 침식-부식에 의한 베어링 합금재의 무게 감소량이 크게 되고 부식감수성에 민감한 것은 증류수 및 해수혼입 비율이 높게 될수록 유화된 윤활유 중에서 캐비테이션 기포 붕괴시 윤활유보다 물의 비중이 크므로 수분 확산이 윤활유의 확산속도보다 더 빠르게 되어 침식의 세기가 크게 됨과 동시에 전기화학적 금속면의 부식활성화 작용이 가속되기 때문이라고 생각된다. 또한 증류수 및 해수의 혼입비율이 증가할수록 해수에 의한 유화유 중에서 부식감수성이 증류수에 의한 유화유에서 보다 더 증가하는 것은 비저항이 $15 \times 10^3 \Omega \cdot \text{cm}$ 인 증류수 중에서 보다 강전해질의 Cl 이온 함유량이 증가되어 비저항이 작은 $25 \Omega \cdot \text{cm}$ 인 해수 중에서 부식전류밀도가 더 크게 배류되어 부식활성화됨으로써 기계적 침식에 더하여 전기화학적 부식의 상승효과²⁹⁾에 의해 침식-부식이 일어나기 때문이라고 추정된다. 그리고 증류수 및 해수가 혼입되어 유화된 윤활유 중에서 KM4의 부식감수성이 WM1 및 WM7 보다 둔감한 것은 해수중에서 각 금속의 부식전위열에 의하면 KM4 베어링 합금재의 주성분인 Cu가 다른 베어링 합금재의 주성분인 Pb 및 Sn 보다 더 귀전위열(Cathode 측)에 있으므로 부식에 둔감한 내식성재료³⁰⁾이기 때문인 것으로 사료된다.

3.5 유화유 환경에서의 침식-부식에 따른 부식전위와 전류밀도

Fig.5은 Sn기 베어링 합금재 1종(WM1), Pb기 베어링 합금재 7종(WM7) 및 Cu-Pb기 베어링 합금재 4종(KM4)에 대해 3% 해수혼입에 의한 유화유 중에서 캐비테이션 침식실험시간에 따른 부식전위(혹은 자연전위) 변화과정을 측정된 것이다. 단 10시간 분극후의 자연전위는 WM1이 -150mV/SCE 이고, WM7가 -160mV/SCE 이며 KM4가 -78mV/SCE 이다.

이에 의하면 캐비테이션 침식시작과 동시에 귀방향으로 전위가 5~8 mV/SCE정도 증가하나, 그 후 재차 비방향으로 이동하여 자연전위보다 상당히 비전위화하는 데, 실험시간이 경과함에 따라 일정한 전위치를 유지하는 경향을 보인다. 그리고 WM7에서가 실험시간 경과에 따라 다른 베어링 합금재에 비하여 가장 급속히 비전위화하는 추세이다.

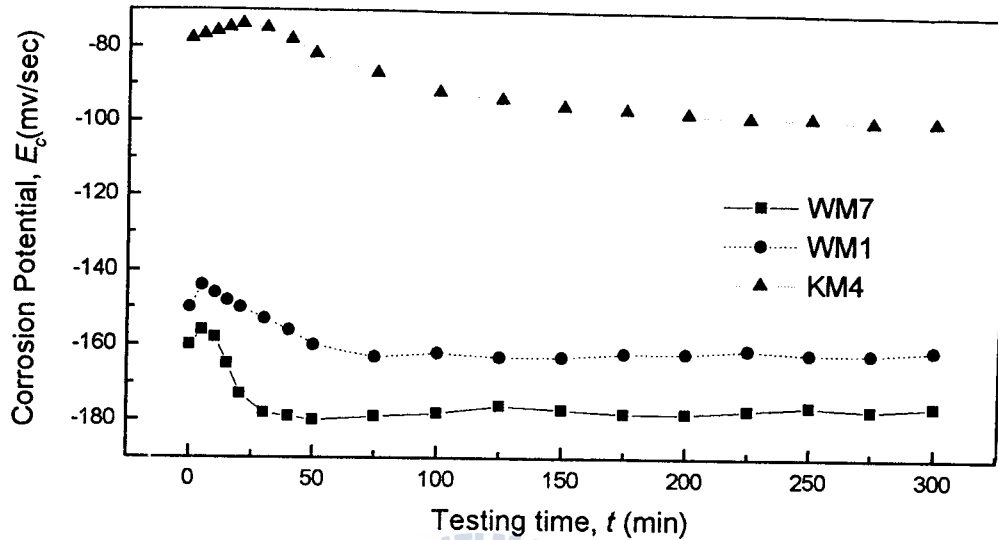


Fig.5 Corrosion potential vs testing time in emulsified oil mixed with 3% sea water(SW) for materials.

이와 같이 실험시작과 동시에 순간적으로 5~8 mV/SCE로 귀전위화한 후, 다시 비전위화하는 것은 캐비테이션 침식시험 시작과 동시에 주위에서 공기가 휘말려 들어가 용존산소인 산화제가 금속표면에 급속히 공급되기 때문에 일시적으로 귀방향으로 증가하며, 그 후 침식실험 경과와 더불어 기포의 충격력에 따라 시험편의 부동태피막 손상에 의해 금속표면이 활성화하기 때문이라고 사료된다.

또한 실험시간이 경과함에 따라 일정한 전위치가 지속되는 것은 금속표면이 캐비테이션 침식-부식작용에 의해 일정한 속도로 침식손상이 계속되어 보호피막 형성이 어렵기 때문이라 추정된다. 그리고 WM7에서 실험시간 경과에 따라 급속히 비전위화하는 것은 Table 1에서와 같이 다른 베어링 합금재에 비교하여 경도가 낮으므로써 캐비테이션 기포의 충격력에 의해 쉽게 금속립자가 탈리되어 활성화하기 때문으로 생각된다.

Fig.6는 3% 해수혼입인 유화유 중에서 Sn기 베어링 합금재 1종(WM1), Pb기 베어링 합금재 7종(WM7) 및 Cu-Pb기 베어링 합금재 4종(KM4)에 대해 캐비테이션 침식-부식에 의한 부식전류밀도를 실험시간에 따라 측정된 것이다. 또한 10시간 분극후 WM1, WM7 및 KM4 시험편의 부식전류밀도는 각각 0.4, 0.6 및 0.3 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 이다.

이에 의하면 WM1 및 WM7 에서는 캐비테이션 침식실험시작과 동시에 부식전류밀도가 약간 증가하여 최대치를 나타낸 후 일정한 값을 유지하는 경향이고, KM4에서는 실험시작과 동시에 부식전류밀도가 최대치를 나타낸 후 실험시간경과에 따라 계속하여 비전위화하는 추세이다. 이와 같이 베어링 합금재에서 실험초기에 부식전류밀도가 높게 나타나는 경향은 캐비테이션 기포의 충격력에 의해 보호피막의 탈락현상으로 금속표면이 활성화하기

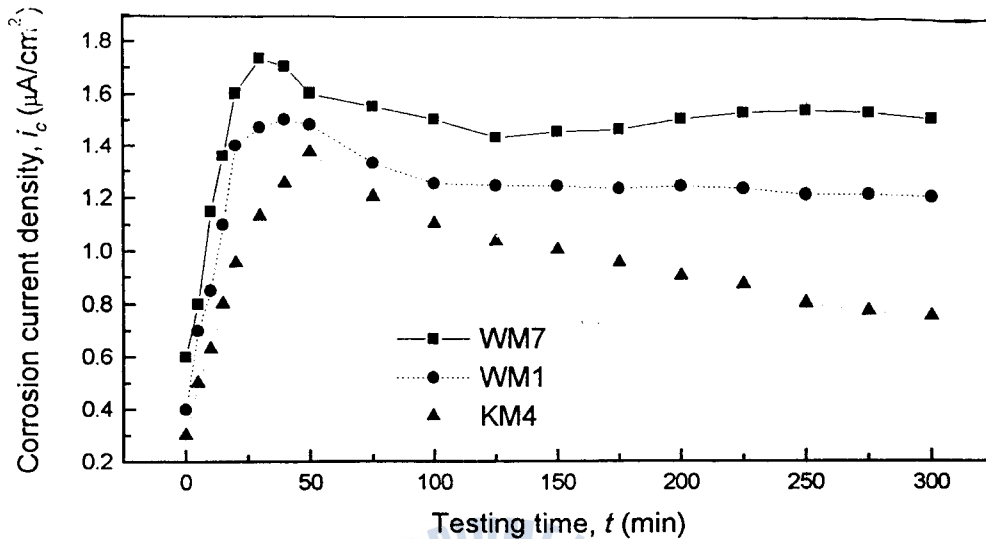


Fig.6 Corrosion current density vs testing time in emulsified oil mixed with 3% sea water(SW) for materials

때문이고, 또한 실험시간 경과에 따라 일정한 전류밀도값을 유지하는 것은 침식소공의 증가로 인하여 해면상의 소공에 기포가 흡착하므로 충격력이 완충되어 기계적인 침식과 전기화학적 부식의 상승작용이 억제되기 때문이라고 사료된다. 그리고 KM4에서 실험시간 경과에 따라 부식전류밀도가 계속 감소하는 것은 KM4가 보다 내침식-부식성이므로 기포의 완충작용이 적어 충격력에 의한 부식성의 활성화가 억제되기 때문이라고 생각된다.

4. 결 론

각종 베어링 합금재에 대한 증류 및 청수를 혼합·유화시킨 유화유에서 캐비테이션 침식실험을 한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 캐비테이션 침식소공은 증류수에 의한 유화유보다 해수에 의한 유화유 환경에서 작고 조밀하며 전 영역에 분포되어 있으며 침식손상도 크다는 것을 알 수 있다.
- 2) 유화유에서 증류수 및 해수의 혼합비가 높아지는 유화유일수록 캐비테이션에 의한 부식감성은 민감하며, 증류수에 비하여 해수혼입시가 더욱 민감하다. Pb기 베어링 합금재 7종이 가장 민감하고 Cu-Pb기 베어링 합금재 4종이 상대적으로 둔감하다.
- 3) 부식전위는 Pb기 베어링 합금재 7종이 가장 적으며 전류밀도는 가장 크다. 실험시간이 경과함에 따라 부식전위와 밀도는 안정되게 일정하다.

참고문헌

- [1] 西本榮司(1982),“油壓系の潤滑問題,機械の研究”,34卷,1號,pp 207~209.
- [2] Manabumi Masuko and Kazumi Okada(1991),“Tribology of O/W Emulsion”, Journal of Japanese Society of Tribologists, Vol.36, No.5, pp 369~374.
- [3] 向井喜彦.村田雅人(1979),“ステンレス鋼の應力腐蝕龜れに對する破壊力學について”,日本銲接學會,48卷,11號,pp 5.
- [4] Masanobu Matsumura and Yoshinori Oka(1982), “Influence of Erosion on Corrosion”, Corrosion Engineering, Vol.31, No.2, pp 67~68.
- [5] 腐食防食協會(1985),エロジョン.コロジョン入門講習會テキスト(1985年 11月).
- [6] Yoshinori Oka, Hiroyuki Kouzai and Masanobu Matsumura(1986), “Mechanism of the Mutual Action between Erosion and Corrosion”, Boshoku Gijutsu, Vol.35, No.6, pp 320~321.
- [7] 腐食防食協會(1982), 第4回 腐食防食シンポジウム資料「エロジョン・コロジョンの實際と試験法」
- [8] M.G Talks and G.Moreton(1981-6), Proc. ASME Symp. “Cavitation erosion Fluid System” , pp 139.
- [9] W.H.Ailor(1980),“Engine Coolants Testing:State of the Art”, ASTM, STP 705, pp 81~101.
- [10] F.L.La Que(1983),Marine Corrosion”,Wiley-Interscience Publication, pp11~12.
- [11] S.H Frederick and H.Capper(1981), Materials for Marine Machinery, Marine Media Management Ltd, pp 211~212.
- [12] D.K.Shetty and G.Wright(1982), The International Forum, NACE, paper No.155(1982 March), Houston Texas.
- [13] J.Grabiner(1984), Chemical Processing(1984 Nov.), Vol.47, No.12, pp 118.
- [14] 吉野達治(1987), エロジョン.コロジョン(流體による 材料の浸蝕), 裳華房, pp 110~112.
- [15] 小若正倫(1983), “金屬の腐食損傷と防食技術”, 新日本印刷(株), pp 10~11.
- [16] 林 祐助.李 鎮烈 外2名(1992),“陰極防蝕에 의한 船舶用 5086 알루미늄 合金의 腐蝕疲勞龜裂 進展抑制에 관한 研究”, 韓國船用機關學會誌, pp 111.
- [17] C.C.Nathan(1981), “Corrosion Inhibitors” , National Association of Corrosion Engineers, Houston Texas, pp 25~45.
- [18] R.T.Knapp, J.W.Daily and F.G.Hammitt(1970), “Cavitation” , McGraw-Hill, NY.
- [19] M.S. Plesset and R.B.Chanpman(1971), “J.Fluid Mech.” ,Vol.47, part 2,pp 283.
- [20] 佐藤政治(1979), “自動車技術會 學術講演會前刷集” , 792 號, pp 373.

- [21] 米澤 徹.千田二郎.大久保 捻.藤本 元.三本英雄(1985), 日本船用機關學會誌, 20卷, pp 361.
- [22] R.T.Knapp(1955), “Trans. ASME” , Vol.77, pp 1045.
- [23] A.Thiruvengadam, S.L.Rudy and J.G.Gunasekaram(1970), ASTM, STP 474, pp249.
- [24] D.W.C.Baker, K.H.Jolliffe and D.Pearson(1966), Phil. Trans. Roy. Soc.,Vol. A260, pp 193.
- [25] W.C.Leith(1965), Proc. ASTM, Vol.65, pp 789.
- [26] 實吉純一.菊池喜充.能本工彦(1960), “超音波技術便覽”, 日刊工業新聞, pp 9~10.
- [27] 高 原寬(1985), “金屬破斷面寫真集”, テクノアイ出版部, pp 8~16.
- [28] 溶接學會溶接冶金研究委員會(1984), “溶接部組織寫真集”, 黒木出版社, pp73~74, 356~357.
- [29] V.Ashworth(1988), “Corrosion” , Pergamon press., pp 412~422.
- [30] 岩井善郎.大村純一 外 2 名(1992),“固體粒子が混入した水中でのキャビテーション・エロージョン”, 日本機械學會論文集(A編), 58卷, 551號, pp.1240~1242.



