

선박 기관용 실린더 라이너의 캐비테이션 침식-부식 거동에 관한 연구

이진열* · 김수열** · 황재호***

A Study on the Cavitation Erosion-Corrosion Behaviour
for Cylinder Liner of Marine Engine

Jin-Yeol Lee* · Su-Yeol Kim** · Jae-Ho Hwang***

〈 목 차 〉

Abstract	
I. 서론	2. 부식성 환경에서의 침식-부식특성
II. 시료 및 실험 방법	3. 캐비테이션 침식-부식의 발생기구
1. 시험재료 및 실험장치	4. pH값 환경에서의 침식-부식의 상호 작용
2. 실험방법	5. 인히비터에 의한 침식-부식 억제특성
III. 실험결과 및 고찰	IV. 결론
1. 전기화학적인 영향이 없는 환경에서의 침식거동	* 참고문헌

Abstract

Due to the increased occurrence of cavitation erosion in cylinder liner wall operating in an corrosive environment, there is a need to study how to controls the erosion- corrosion on the process of cavitation damage. Cavitaion erosion implies damage to cylinder liner due to the shock pressure or shock wave that results when bubbles from and collapse at cylinder liner within a cooling water. If the cooling water is corrosive to the liner, they may suffer serious damage by a combination of mechanical and electrochemical attack.

In this study, cavitation damage was investigated by using piezoelectric vibrator with high-frequency, 20KHz and amplitude 24 μ m to cavity generation appratus. The compositions of test solutions of distilled water, sea water and pH value environments were investigated to know

* 한국해양대학교 운항시스템공학부

** 해원기계공업(주)

*** 강원도립대학 기관과

electrochemical cause in cavitation erosion damage.

We carefully observed the cavitation erosion pattern, corrosive portion in cavitation erosion-corrosion and effect of inhibitor into solutions, then suggested various control model for cavitation erosion-corrosion damage.

I. 서 론

최근의 선박 기관은 대형화, 고속화, 장기적인 FM시스템을 갖추어 세계경쟁시대에 돌입하고 있기 때문에 선박용 디젤기관의 한 구성요소인 실린더 라이너의 완벽한 기능은 기관 성능향상에 주요 영역을 점유하고 있다.¹⁻³⁾ 따라서 실린더 라이너의 손상중 상당부분을 차지하고 있는 냉각수측 캐비테이션 침식(Cavitation erosion)은 기관성능에 치명적인 영향을 미치고 있다. 따라서 이러한 캐비테이션 침식을 방지 및 억제할 수 있는 시스템을 개발함으로써 기관의 수명연장, 안전한 보수관리의 확립, 기관의 신뢰성 구축 및 경제적인 보수비 절감등 많은 잇점이 있다고 생각한다.⁴⁻⁵⁾

선박의 소형기관은 냉각수로 Cl⁻이온 환경인 해수(Sea water)를 사용하는 데 이 때의 캐비테이션 침식은 부식환경에서 발생하므로 침식과 부식이 상호 가속하는 상승효과(Synergistic effect)⁶⁾를 나타내어 캐비테이션 침식-부식은 각각의 손상을 합한 것보다 크게 증가하고 있다. 이러한 캐비테이션 침식-부식을 억제하는 대책으로는 내(耐) 캐비테이션 침식방법의 설계, 내침식성(耐浸蝕性) 재료의 선택, 음극방식법(Cathodic protection method) 및 억제제(Inhibitors) 첨가 등의 방법이 있다.⁷⁻⁸⁾

특히 대형선박기관 실린더 라이너의 캐비테이션 침식은 냉각수로 증류수(Distilled water)를 주로 이용하는 데, 이 증류수도 계속 운전하에 장기적으로 사용되므로 pH값 등 그 특성이 다소 변하여 산화되는 경향이 있다. 이러한 경우에는 캐비테이션 침식-부식이 가속되어 실린더의 수명을 단축하고, 각종 화학 첨가제가 투입된 대량의 증류수인 냉각수를 자주 교체하여야 하므로 비경제적이라 하겠다.

따라서 증류수, 해수 환경에서의 캐비테이션 침식-부식 특성을 파악하고 그 기구(機構)를 확립하고자 하며, 또한 pH 값과 Cl⁻이온을 함유한 환경은 기계적인 침식에 전기화학적 부식이 가중되므로 pH값이 다른 각 환경에 인히비터(Inhibitor)로 방지효과가 우수한 크롬산염(Chromate)을 투입하여 캐비테이션 침식거동을 연구하고자 한다.⁹⁻¹⁰⁾

이러한 침식-부식 특성과 억제방법을 개발함으로써 냉각수를 장기간 사용할 수 있고, 실린더 라이너의 수명을 연장할 수 있으므로 환경적인 측면과 경제적인 면에 크게 도움이 된다고 하겠다. 아울러 이러한 침식-부식억제방법은 대형선박기관 실린더 라이너의 캐비테이션 침식에 적용할 뿐만 아니라 윤활유 계통의 베어링, 자동차와 철도차량 등의 기관실린

나아가서는 중공업분야의 각종 원동기의 실린더 등에 적용할 수 있으므로 기계공업발전의 중추인 기관 실린더의 침식방지시스템의 개발에 기초자료로 활용하는 데 기여하고자 한다.

II. 시료 및 실험방법

1. 시험재료 및 실험장치

실험용액으로는 증류수(S.R $15 \times 10^3 \Omega \cdot \text{cm}$, pH 6.8, 용존산소 9.2mg/l 로 전기화학적 영향이 거의 없어 순수 기계적인 침식작용의 환경으로 간주함.)와 해수(S.R $25 \Omega \cdot \text{cm}$, pH 8.2, Cl^- 이온 $18,630 \text{mg/l}$, 용존산소 8.6mg/l)로 하고, 억제제(Inhibitor)로는 크롬산염($\text{Na}_2 \cdot \text{CrO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, pH 6~7)를 사용하였다. 또한 강산성과 강알칼리 용액을 만들기 위해서 염산(HCl)과 수산화나트륨(NaOH)을 희석하여 pH값의 환경을 조정하여 실험용액으로 사용하였다.¹¹⁻¹²⁾

시험에 사용한 시험편은 선박기관의 실린더 라이너의 재료 대응으로 시판용인 탄소강재(SS41)로 직경 $\phi 15 \times$ 높이 13mm와 M8 x 1.25인 나사로 가공하였고, 시험편 표면은 사포 800~1,200번까지 연마하고 오일랩핑(Oil lapping) 한 후 아세톤으로 탈지하였으며 가능한 표면은 경화(硬化)하지 않도록 하였다. 이러한 시험편은 진동자의 혼(Horn)에 부착하여 용액에 3mm정도 침지시켜서 실험하였으며, 제작한 구조용 탄소강재의 화학적인 성분과 기계적인 특성은 Table 1과 같다.

Table 1. Chemical compositions and mechanical properties of specimen.

화학적 성분 (Wt%)	C	Si	Mn	P	S	기계적 특성	인장강도 (kgf/mm^2)	항복강도 (kgf/mm^2)	신장율 (%)
	0.12	0.29	0.59	0.01	0.01		42.4	25.8	32

압전(Piezoelectric)소자인 진동자(Transducer)는 ASTM규정¹³⁾에 의한 진동수 20KHz, 진폭 $24 \mu\text{m}$ 로 하고 증폭기 혼(Booster horn)을 진동자 끝에 부착하였다.

실험장치의 주요 구성요소는 제어장치, 진동자, 혼, 자동타이머 등이며, 환경조는 전기화학적 영향을 최소화하기 위해서 아크릴(Acryl) 재료로 제작하였다. 그리고 초음파 진동 시스템의 블록 선도(Block chart)를 Fig.1에 보이고 있다.

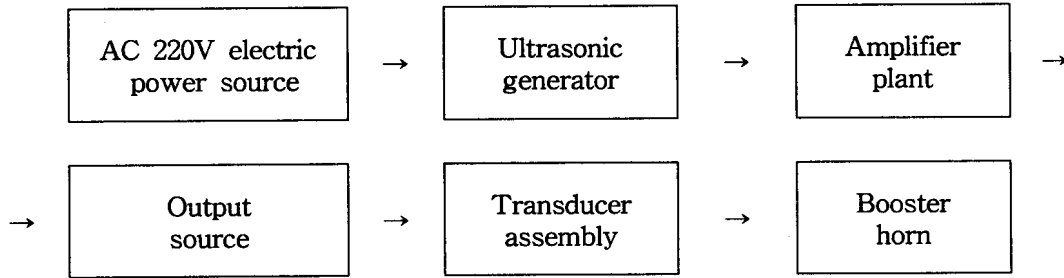


Fig.1 Block chart of Ultrasonic unit.

또 측정장치로는 전위차계(Potentiometer, mV, mA 측정용), 광학현미경, 주사전자현미경(SEM), 다이얼 게이지, 포화 카르멜 전극(SCE), 각종 테스터(Tester) 및 mg측정용 천정(Scale) 등을 사용하였다.

2. 실험방법

시험편에는 캐비테이션 발생, 기포붕괴, Ultra jet, Micro jet 등의 충격파가 동시에 작용함으로써 성장한 미소펫트에는 응력 및 산소농도차에 의해 형성된 갈바닉 전지(Galvanic cell)작용으로 양극반응(Anode reaction : $Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e$)과 음극반응(Cathode reaction : $2H^+ + 2e \rightarrow H_2$)의 전기화학적 작용도 관찰·조사하였고,¹⁴⁾ 또한 침식의 세기(Intensity, I_e)에 따른 내침식-부식성(Se)과 최고 침식율(R_{max})과의 관계 특성을 구하고, pH값에 따른 침식양상을 구명하고자 한다.¹⁵⁾

특히 침식의 세기를 정하는 시험편은 캐비테이션 기포(Cavity)가 잘 발생할 수 있도록 최적의 조건으로 정하였으며, 환경용액의 온도는 실내온도와 유사한 $25 \pm 1^\circ C$ 로 하였으며 실험시간은 자동정지 타이머에 의하여 일정한 시간(min)마다 시험편의 무게감소량(mg)을 측정하였다. 또한 실험장치의 설계, 초음파의 발생 및 실험조건 등은 다음의 식(式)들에 적합하도록 정하였고,^{16~18)} 실험에 적용한 공식들을 정리하면 다음과 같다.

$$\text{작동유체의 포화 증기압}(P_v) \geq P_{st} - \Delta P_w \quad (1)$$

P_{st} : 유체의 정압, ΔP_w : 유체압력 변동

$$\text{기포의 발생수}(K) = (P_o - P_v) / (\mu V_o^2 / 2) \quad (2)$$

V_o : 유속, μ : 밀도, P_v : 포화 증기압

$$\text{단위 면적당 방사에너지}(E) = I \times S = \frac{1}{2} \pi^3 f^2 \mu c A^2 d^2 \quad (3)$$

$$\text{손상속도}(R) \approx f^2 A^2 d^2 \quad (4)$$

S : 손상면적, I : 침식세기, f : 진동수, μ : 밀도, c : 음속,

A : 전진폭, d : 손상면 직경

$$\text{평균깊이 손상을(MDPR)} = m/\mu \quad (5)$$

m : 단위면적당의 무게 감소량, μ : 밀도

$$\text{부식전류밀도}(i) = E/(R + \rho) \quad (6)$$

E : 전위, R : 저항, ρ : 비저항

$$\text{침식강도}(I_e) = S_e \times R_{\max} \quad (7)$$

S_e : 재료의 내침식-부식성, R_{\max} : 최고 침식율

$$\text{침식억제율}(P_e, \%) = (1 - W_{\text{inh}} / W_{\text{ero}}) \times 100\% \quad (8)$$

W_{inh} : 인히비터 적용에서의 침식손상, W_{ero} : 침식손상

$$\text{침식-부식에 의한 무게 감소량}(W_t, \text{mg}) = W_e + W_c + W_s \quad (9)$$

W_e : 순수 침식에 의한 무게 감소량, W_c : 부식에 의한 무게 감소량

W_s : 상승효과에 의한 무게 감소량

따라서 위의 식들의 조건에 맞게 실험장치 및 실험방법을 선택하고, 시험편 표면에 발생한 캐비테이션 침식양상은 광학현미경과 주사전자현미경을 이용하여 관측하였다. 그리고 캐비테이션 침식-부식억제에 미치는 크롬산염 인히비터의 혼합비는 25ppm 농도로 하였다.

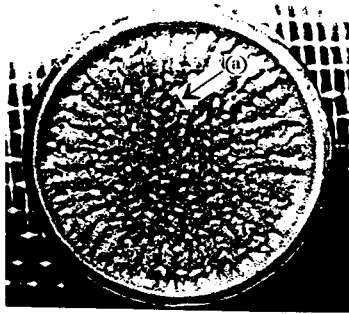
III. 실험결과 및 고찰

1. 전기화학적 영향이 없는 환경에서의 침식거동

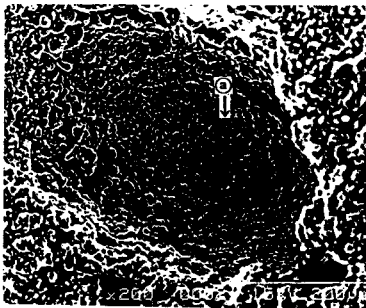
Photo.1(A)은 증류수중에서 10시간 동안 캐비테이션 침식실험을 실시한 후의 침식양상을 나타낸 것이다. 시험편 표면의 중앙부분은 둥근 핏트가 발생하는 데 외부로 갈수록 나선형의 핏트가 얇게 보이며 핏트의 표면은 날카롭다.

Photo.2(B)는 핏트의 표면을 면밀히 관찰하기 위하여 Photo.1(A)의 ㉓ 부분을 200배 주사전자현미경으로 촬영한 것으로 균열(龜裂)과 핏트(Pits)가 망사형상¹⁹⁾을 보이고 큰 핏트 내부에 미소핏트와 미소균열(Microcrack)현상을 볼 수 있다. 이러한 현상은 공동(空洞)에 의한 기포의 형성이 중앙부분에서 외부로 갈수록 적으며 핏트내에 소량의 기포가 갇혀서 서로 완충역활(Cushion action)²⁰⁾을 하기 때문이라고 생각된다.

Photo.1(C)는 Photo.1(A)의 ㉓ 부분을 5,000배 주사전자현미경으로 확대 관찰한 것으로 핏트는 덩굴(Dimple)형의 요철(凹凸)형태²¹⁾를 이루고 있다. 증류수에서의 시험편 표면의 균열과 파괴현상은 취성(脆性)과 연성파괴(延性破壞)가 동시에 작용하여 발생하는 것으로 추정된다.



(A)



(B)



(C)

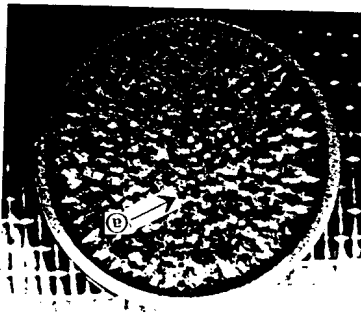
Photo.1 General pits of specimen surfaces by cavitation erosion at distilled water(DW).

2. 부식성 환경에서의 침식-부식특성

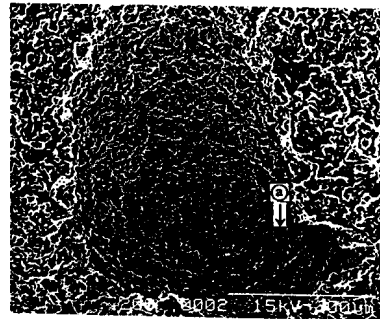
Photo.2(A)는 부식성이 강한 해수(海水)중에서의 캐비테이션 침식-부식실험을 실시한 것으로 기계적인 침식에 부식이 상호 가속된 상태의 손상이라고 하겠다. 여기서도 실험시간은 10시간으로 Photo.1과 비교·검토하는 자료로 활용하고자 한다. 이에 의하면 침식의 핏트는 시험편 전면에 거의 같은 크기로 균등하게 분포되어 있으며 핏트의 깊이가 크게 보인다.

Photo.2(B)는 사진(2-A)의 ① 부분을 200배율로 확대하여 보인 것으로 핏트의 내부는 플레이크(Flake)형²²⁾으로 추정되며 핏트내부 전체가 촘촘한 망사형을 이루고 있다. 이와 같은 현상은 Cl⁻이온에 의한 침식-부식의 상승작용 때문이라고 생각된다.

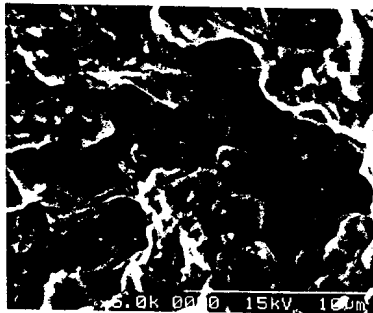
Photo.2(C)는 5,000배율로 Photo.2(A)의 ① 부분을 확대·촬영한 것이다. 핏트내의 균열면이 날카롭고 깊은 벽개파면을 보이고 있다. 이러한 현상은 기계적인 침식작용에 전기화학적인 부식작용에 의해 손상부의 경계가 날카로운 형상을 띠면서 탈리(脫離)가 발생하여 균열의 폭이 큰 것으로 사료된다. 특히 해수중에서의 시험편 표면의 파괴는 취성파괴가 많이 작용한 것으로 사료된다.



(A)



(B)



(C)

Fig.2는 10시간 실험후의 순수 기계적인 캐비테이션 침식에 의한 무게 감소량(We), 순수 부식에 의한 무게감소량(Wc), 침식-부식의 상승효과²³⁾에 의한 무게 감소량(Ws)과의 관계를 나타낸 것이다. 이에 의하면 We(약 239mg), Wc(약 2mg), Ws(약 52mg), Wt(약 393mg)이고, 100분율로 표시한 Fig.3에 의하면 We(약 74%), Wc(약 1%), Ws(약 25%)을 나타내고 있다.

Photo.2 General pits of specimen surfaces by cavitation erosion at sea water(SW).

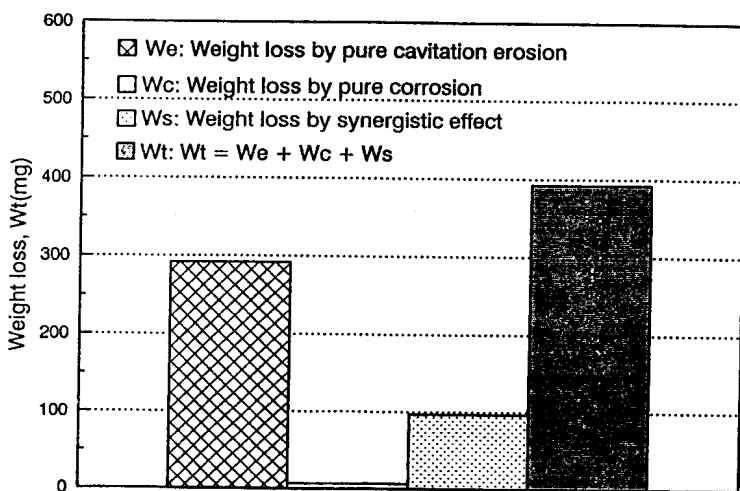


Fig.2 Relationship of We, Wc, Ws and Wt

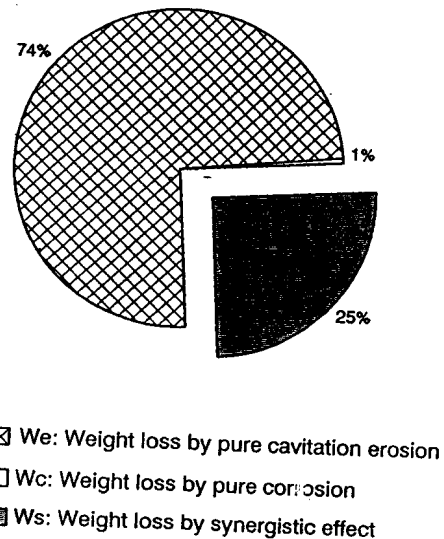
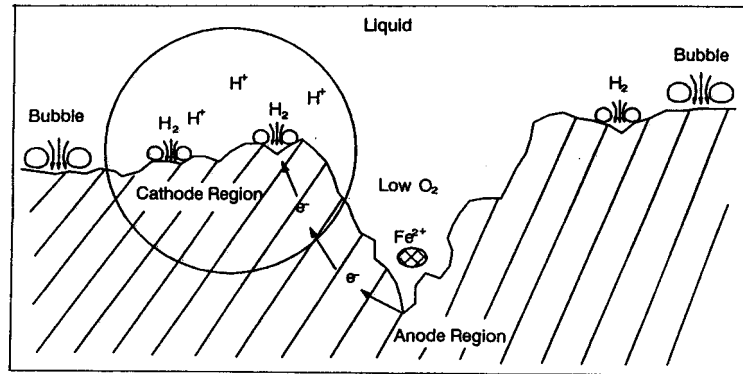


Fig.3 Percentage of We, Wc and Ws

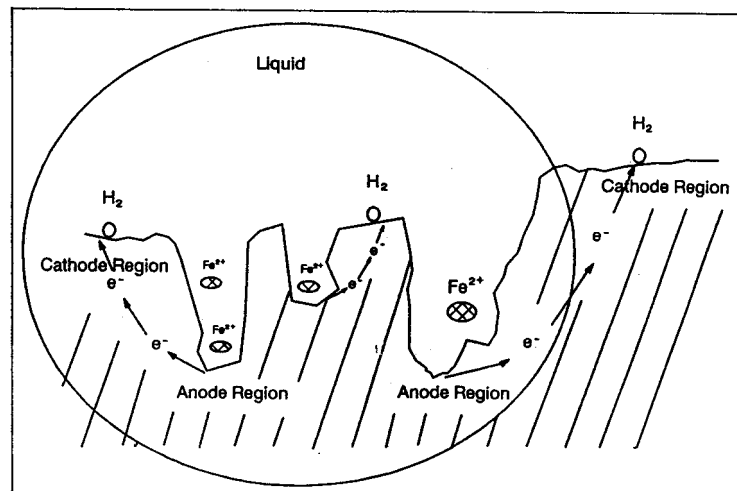
3. 캐비테이션 침식-부식의 발생기구

Fig.4(A)은 캐비테이션 침식-부식손상에 있어서 침식과 부식작용의 상호 가속하는 상승 효과의 기계적인 원인을 추정하여 도시(圖示)한 것이다. 펌트내부의 양극반응(Anode reaction)에서 철(Fe)이 이온화(Fe^{2+})되어 금속의 용출이 촉진된다. 그리고 펌트 주위의 음극반응(Cathode reaction)에서 수소가스(H_2)가 발생할 것으로 추정된다.

음극에서 발생한 H_2 가 붕괴되어 마이크로 제트 및 울트라 제트가 발생함²⁴⁾으로써 기계적인 손상이 가중되는 것으로 생각된다. 만약 부식환경 중에서는 캐비테이션에 의한 기포의 붕괴에 따른 손상과 H_2 의 붕괴에 따른 손상이 동시에 발생함으로써 더욱 극심한 캐비테이션 침식손상이 발생하는 것으로 생각되며 이러한 상승효과는 기계적 원인이라고 사료된다.



(A)



(B)

Fig.4 Modeling of mechanical(A) and electrochemical(B) cause of synergistic effect.

Fig.4(B)는 침식-부식에 있어서 상승효과의 전기화학적 원인을 나타낸 것이다. 이에 의하면 기포의 충격압 및 전지작용으로 형성된 H₂의 붕괴압에 의해 발생한 시험편 표면의 미세 핏트들에서 응력 및 산소농도차에 의해 갈바닉 전지(Galvanic cell)가 형성되어, 이의 양극(Anode)에서 철의 이온화 현상으로 Fe²⁺의 용출이 발생하여 부식이 더욱 가속되는 것으로 사료된다.

또한 Fig.4(A), Fig.4(B)에 의한 결과에서 캐비테이션 침식-부식에 의한 무게 감소량(Wt) 중에서 상승효과에 의한 무게감소량(Ws)를 재정리(再整理)하면 다음과 같다.

$$W_s = \Delta W_e + \Delta W_c \quad (10)$$

ΔW_e : 상승효과중의 기계적인 원인에 의한 무게감소량

ΔW_c : 상승효과중의 전기화학적인 원인에 의한 무게감소량

따라서 앞에서 나타내었던 캐비테이션 침식-부식에 의한 무게감소량(Wt)는 다음식으로 재정리할 수 있다.

$$W_t = W_e + W_c + (\Delta W_e + \Delta W_c) \quad (11)$$

또한 무게감소량(Weight loss, wt)와 무게감소율(Weight loss rate, R)을 실험시간(t)에 따라 곡선으로 도시(圖示)함으로써 캐비테이션 침식-부식에 의한 시험편의 최고 침식율(Max. erosion rate), 잠복기(Incubation period) 등의 특성²⁵⁾도 알 수 있다.

Fig.5는 실험시간(t)의 경과에 따른 무게감소율(R)의 특성을 나타낸 곡선(R-t)으로 ㉠, ㉡, ㉢ 및 ㉣의 4단계 영역으로 구분할 수 있다.

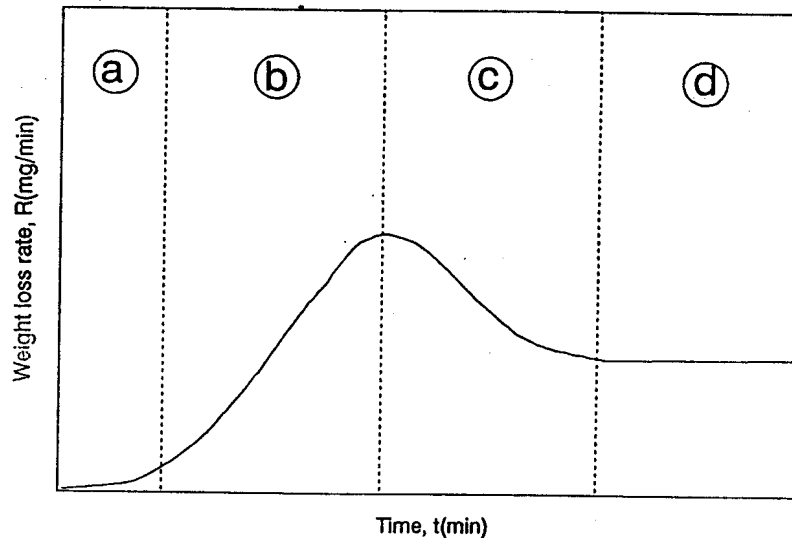


Fig.5 Modeling of R-t curve by cavitation erosion-corrosion.

이 내용에 의하면 영역 ㉑에서는 캐비테이션 기포 붕괴의 충격력에 의해 재료표면에 소성변형이 생기고 재료의 표면 거칠기가 증가하지만 핏트의 발생 및 무게 감소량은 일정한 잠복기간을 거쳐 발생하는 초기 저항기간이라고 할 수 있다. 영역 ㉒의 단계에서는 핏트의 수가 증가하고, 핏트의 깊이와 면적이 증가하는 과정으로 침식 속도가 증가하는 증가기로 ㉑로 부터 ㉓로 천이되는 기간이라고 할 수 있다. 영역 ㉓의 단계가 되면 핏트수는 증가하지 않고 약간의 깊이와 면적이 증가할 뿐 진행속도는 급속히 약해지는 데, 이러한 현상은 핏트의 내부에 기포가 충만하여 완충작용(Cushion action)이 일어나기 때문이다. 충격력은 완화되면서 캐비테이션 침식손상이 감소하는 기간이다. 또한 영역 ㉔는 캐비테이션 기포가 핏트내에 많이 흡착되어 기포 붕괴가 잘 일어나지 않는 단계로서 무게 감소율이 억제되는 안정기이다.

이와 같이 실험시간(t)에 따른 무게감소율(R) 곡선에서 영역 ㉑는 잠복기(Incubation region), 영역 ㉒는 증가기(Acceleration region), 영역 ㉓는 감소기(Deceleration region) 및 영역 ㉔는 안정기(Steady state region)의 4단계²⁶⁾로 구분할 수 있다.

4. pH값 환경에서의 침식-부식의 상호작용

중류수에 염산용액(HCl)과 수산화나트륨(NaOH)를 첨가하여 pH값을 2, 4, 7, 12값이 되는 4가지 실험용액에서 캐비테이션 침식-부식손상시험을 행하였다. 이러한 용액에서의 일정한 실험시간후의 무게감소량은 pH 2 > pH 12 > pH 7 > pH 4의 순으로 무게감소량이 나타나는 데 pH 2인 강산성(強酸性)과 pH 12인 강알칼리 용액에서 캐비테이션 침식-부식작용에 민감한 것으로 생각된다.

여기서 pH 2의 부식용액에서 침식-부식이 가장 민감한 것은 Cl⁻이온이 증가함에 따라 손상부에 양극활성화(陽極活性化)로 인해 부식이 촉진되기 때문이고, pH 12용액이 pH 2 다음으로 침식-부식작용이 강한 것은 OH⁻의 화학반응으로 인한 고알칼리 부식과 NaOH가 고농축할 때 수소가스가 손상부에 침투함으로써 가성취약화(苛性脆弱化)²⁷⁾에 의한 것으로 사료된다. 특히 pH 4용액에서 무게감소량이 pH 7용액에서 보다 적은 것은 Cl(OH⁻)피막흡착으로 인한 부동피막에 의해 것으로 생각된다. 이러한 상황을 고려하여 볼 때 pH값 환경에서의 캐비테이션 침식-부식 거동을 시험편 표면의 손상양상에 따라 모델링하는 것이 가능하며 손상면의 상태 파악이 쉬울 것이다.

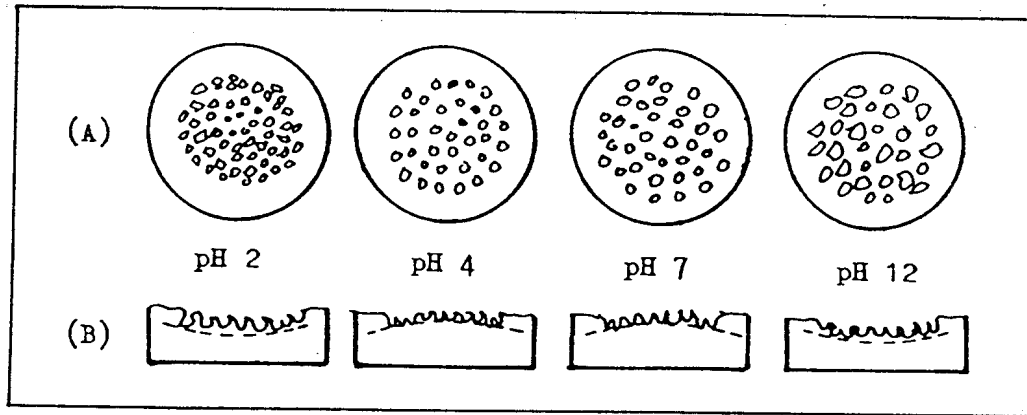


Fig.6 Modeling of cavitation erosion process vs pH value.

Fig.6은 증류수에 염산용액(HCl)과 수산화나트륨(NaOH)를 첨가하여 pH값을 2, 4, 7, 12 값이 되는 4가지 실험용액에서의 시험편 표면(A) 및 단면의 침식손상면(B)을 안정기에서 모델링한 것이다.

이에 의하면 부식성이 거의 없는 증류수(pH 7용액) 혹은 부식성이 미약한 pH 4환경에서의 침식 표면과 단면을 관찰하여 보면, pH 4는 pH 7에서 보다는 침식핏트가 작지만 핏트 형태는 덩풀상이고, 핏트벽이 완만한 곡선을 형성하고 있다. 또한 단면에서의 핏트모양은 시험편의 주변 부분이 깊은 골(Trough)을 형성한 반면, 중앙부(中央部)는 주변부(周邊部)에 비하여 침식이 약하며, 약간 블록한 모양을 하고 있다. 그러나 침식-부식성이 강한 pH 2와 pH 12환경에서의 침식양상을 비교하여 보면, pH 2에서의 침식핏트는 적으면서 깊은 반면 pH 12에서의 핏트는 크고 다소 넓은 모습이다. 하지만 단면에서의 침식손상면은 주변부에서 안쪽까지 평평하거나 약간 중앙부분이 깊은 접시모양의 침식손상면을 보이고, 핏트벽은 뽀족한 톱니형으로 탈리(脫離)되어 있다.

5. 인히비터에 의한 침식-부식 억제특성

인히비터는 양극(陽極)을 제어하는 양극반응 인히비터(Anodic inhibitor), 음극(陰極)을 제어하는 음극반응 인히비터(Cathodic inhibitor), 부동태피막을 형성해서 양극과 음극반응을 동시에 억제하는 흡착성 인히비터등이 있다. 또한 D.M. Brasher와 A.D. Mercer²⁸⁾는 부식성 환경에 인히비터를 투입함으로써 음이온(Anion)농도를 변화하여 침식-부식을 억제한다고 보고하였다. 여기에서는 부동태피막(Passive state film) 형성인 흡착성 인히비터인 크롬산염($\text{Na}_2 \cdot \text{CrO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$)²⁹⁾를 환경제어용으로 사용하였다. 또 인히비터의 투입농도에 대한 기초실험으로 희석량(稀釋量)을 5~100ppm까지 단계적으로 침식-부식억제실험에

사용한 결과, 25ppm에서 가장 효과가 있었다.

Table 2는 침식-부식작용이 가장 심한 증가기에서 인히비터인 크롬산염을 25ppm농도로 투입하여 실험한 결과의 침식-부식억제율(Pe %)을 나타내고 있다.

Table 2 Protective efficiency of cavitation erosion at acceleration period

Solutions	pH 2	pH 4	pH 7	pH 12
Pe(%)	65~80	55~62	60~75	40~52

이에 의하면 pH 12 < pH 4 < pH 7 < pH 2의 순으로 침식손상이 억제되고 있다. 특히 강산성 용액인 pH 2에서가 강알카리인 pH 12에서 보다 침식손상이 크게 억제되는 것은 용액과의 화학반으로 $Cr_2O_3 \cdot MCrO_4 \cdot Cr_2O_2M_2O_3$ (단, M은 시험편인 금속을 뜻함.) 등의 스케일 층(Scale layer)이 Cl^- 이온과 반응하여 금속표면에 피막을 형성함으로써 음극환원작용(陰極還元作用)을 가속시켜 침식-부식이 억제된다고 생각된다.

약산성인 pH 4에서 침식억제가 미약한 것은 Cl^- 이온과의 부동태피막형성이 부족하여 국부부식(localized corrosion)을 초래하기 때문이라고 사료된다. 그리고 pH 12와 같은 강알카리 수용액에서 침식억제효과가 다소 적은 것은 pH 2에서의 흡착성 크롬산염 인히비터를 I라 하고, 금속을 M이라 하면 $(M \cdot I)_{abs}$ 형태로 피막이 형성되는 데, pH 12에서는 $(M \cdot OH \cdot I)$ 형태³⁰⁾로 결합하므로 OH^- 이온에 의한 음극부식이 부분적으로 발생하기 때문이라고 하겠다.

V. 결 론

초음파 진동자에 의하여 증류수, 해수 및 pH값 환경에서 캐비테이션 침식-부식거동 및 억제 특성을 실험한 결과 다음과 같은 결론들을 얻었다.

- 1) 부식성이 없는 증류수 중에서의 캐비테이션 침식은 시험편에 취성파괴와 연성파괴가 동시에 발생한 양상이지만, 전기화학적인 영향이 큰 해수중에서의 손상은 주로 취성 파괴가 많이 작용하고 있다.
- 2) 캐비테이션 침식-부식의 상승효과는 약 25%이며 상승효과의 기계적인 원인은 펄트의 음극부에서 발생하는 H_2 에 의한 것으로 판단한다.
- 3) 실험시간의 경과에 따른 무게감소율의 양상은 잠복기, 증가기, 감속기, 안정기 등의 4 단계로 구분할 수 있다.
- 4) 캐비테이션에 의한 시험편 침식표면양상은 약산성인 pH 4 와 pH 7에서는 시험편 주변부에 침식이 많이 발생하는 데 비하여 강산성인 pH 2 와 강알카리인 pH 12에서는 중앙부에 침식손상이 심하게 발생한다. 또한 인히비터에 의한 캐비테이션 침식억제율은 강산성인 pH 2에서가 pH 12인 강알카리 용액에서보다 크게 증가하고 있다.

참 고 문 헌

1. F.L.La Que(1983), "Marine Corrosion", Wiley-Interscience Publication, pp 11-12.
2. 廣安博之(1991), "內燃機關", コロナ社, pp 2~5.
3. T. Yonezawa and H.Kanda(1984), "Study of Cavitation Erosion on Cylinder Liner and Cylinder Block", Journal of the JSME, Vol.19, No.5, pp 384-390.
4. Denny A.Jones(1992), "Principles and Prevention of corrosion", Macmillan Publishing Company, pp 342~348.
5. Y.K. Zhou, J.G. He and F.G. Hammit(1982), "Cavitation Erosion of Diesel Engine Wet Cylinder Liners", Wear, Vol.76, pp 321-328.
6. R.J.K. Wood and S.A. Fry(1989), "The Synergistic Effect or Cavitation Erosion and Corrosion for Copper and Cupro-Nickel in Sea water", Transaction of the ASME, Vol. 111, pp 271-277.
7. Y. Iwai, Q.G. Yuan, J. Ohamura and T. Okada(1992) : Cavitation Erosion in Water Containing Solid Particles, JSME(B), Vol. 58(551), pp 1239-1244.
8. Y. Oka and I.M. Hutchings(1990), "Dependence of Material Hardness on Erosion by Solid Particle Impact", Boshoku Gijutsu, Vol.39, pp 610-615.

9. M. Matsumura, A. Yabuki and S. Sanui(1991), "Effects of Inhibitor in Cavitation Erosion of Commercially Pure iron", *Zairyo-to-Kankyo*, Vol.40, pp 814-820.
10. Ernest W. Flick(1993), "Corrosion Inhibitors", Noyes Publications, U.S.A, pp 5-8.
11. 産業科學技術研究所(1990), "金屬의 腐蝕 및 防蝕", pp 49-55.
12. 田大熙(1990), "實用防蝕工學", 太和出版社, pp 75-80.
13. Annual Book of ASTM Standards(1986), "03.02 Wear and Erosion ; Metal Corrosion", G32-85, pp 188-195.
14. Peterson, F.B(1971), "Relationship Between Corrosion and Cavitation Phenomena", MFPG Technical Report No.8, April.
15. A.Thiruvengadam(1982),"Erosion, Wear, and Interfaces with Corrosion", ASTM STP 567, pp 220-221.
16. Masanobu Matsumura and Yoshiniri Oka(1982), "Influence of Erosion on Corrosion", *Boshoku Gijytsu*, Vol.31, pp 67-69.
17. Annual Book of ASTM Standards(1986), "03.02 Wear and Erosion ; Metal Corrosion", G32-85, pp 115-119.
18. A.Thiruvengadam, S.L.Rudy and J.G.Gunasekaram(1970), "STP 474", ASTM, pp 249.
19. Yoneo Kikuta(1984), "Metallographic Atlas", Japan Welding Society, pp 73-74.
20. 林祐助, 李鎮烈(1993),"베어링 合金材의 캐비테이션 腐蝕-浸蝕舉動에 미치는 乳化潤滑油의 影響", 韓國船用機關學會誌, 17卷,3號, pp 44-49.
21. L.L.Shreir(1979),"Corrosion Vol. 1", Butterworth Inc., pp 8:126-8:132.
22. 吉田亨(1991), "金屬破斷面 解析マニュアル", 新技術開發センター, pp 57-69.
23. Kenneth R. Trethewny and John Chamberlain(1988), "Corrosion(for students of science and engineering)", Longman Scientific & Technical, pp 153-156.
24. Terence McGuinness and A.Thiruvengadam(1974), "Cavitation Erosion-Corrosion Modeling", ASTM STP 567, pp 30-35.
25. M. Abdulsalam and J.T. Stanley(1992)," Steady-State Model for Erosion-Corrosion of Feedwater Piping", *Corrosion*, Vol.48, No.7, pp 587-593.
26. ASTM Special Technical Publication 567(1982), "Erosion, wear, And Interfaces with Corrosion", ASTM, pp 30-37.
27. 溶接學會溶接冶金委員會(1984), "溶接部組織寫真集", 黒木出版社, pp 73-74, 356-357.
28. D.M.Bracer and A.D.Mercer(1968),"Br. Corrosion J.", Vol.3, No.3, pp 120-129.
29. C.C. Nathan(1981),"Corrosion Inhibitors", National Association of Corrosion Engineers, Houston Texas, pp 25-45.
30. L.L.Shreir(1979), "Corrosion Vol.2", Butterworth Inc, pp 18:34-18:53.