

연강의 캐비테이션 浸蝕 - 腐蝕 特性에 관한 연구(1)

- 진동 캐비테이션 침식 - 부식 손상 거동 -

林 祐 助 · 黃 在 鎬

釜山水産大學校

(1995년 8월 31일 접수)

Study on the Characteristics of Cavitation Erosion - Corrosion for Mild Steel(1)

- Damage Behaviour of Vibration Cavitation Erosion - Corrosion -

Uh - Joh Lim and Jae - Ho Hwang

*National Fisheries University of Pusan

(Received August 31, 1995)

Abstract

Cavitation erosion - corrosion implies damage to materials due to the shock pressure or shock wave that results when bubbles form and collapse at a metal surface within a liquid. If the liquid is corrosive to the material, a condition typically encountered in industry, the component materials may suffer serious damage by a combination of mechanical and electrochemical attack.

In this study, the mild steel(SS41) was tested by using the piezoelectric vibrator with 20kHz, 24 μ m to cavity generation apparatus. The damage behaviour of vibration cavitation erosion - corrosion and the environmental characteristics were investigated in various solutions which are seawater, tap water and distilled water.

The main results obtained are as follows ;

1) The cavitation erosion - corrosion damage behaviour in the seawater increases to occur at the equal degree on the middle portion and the outside portion of specimen. The distilled water specimen, on other hand, occurs beginning on the outside portion across to the middle portion of specimen.

2) The cavitation erosion - corrosion damage in the tap water of low specific resistance more increases than that in the distilled water of high specific resistance at the initial testing time and more decreases than that in it by the CaCO₃ film with testing time.

3) Cavitation erosion - corrosion damage characteristic divides into four regions ; incubation region, acceleration region, deceleration region and steady state region.

序 論

최근 공업의 발전과 더불어 기계 장치는 고속,

고출력 및 경량화의 개발 추세에 따라 유체를 사용하는 기계장치등에 유속 및 회전속도가 상승하는 경향이 나타나고 있다. 이와 같은 경향에 따라 기

계 장치의 부재에는 유체 충격과 정압의 저하에 따른 국부적 비등으로 인해 캐비테이션 침식이 발생할 수 있으며, 또 액체 중에서 기계 부재에 고주파 진동이 발생하면 그 진폭이 작아도 극심한 캐비테이션 침식을 유발할 수 있다. 이러한 진동 캐비테이션은 액체 내에서 물체가 빠른 속도로 진동할 때 진동하는 물체와 액체 사이의 경계면에 유체의 관성 때문에 간극이 생기고 여기서 정압의 저하에 따른 국부적 비등으로 인해 일어난다. 이때 발생한 기포가 다시 정압하로 이동되면서 붕괴되어 일어나는 충격력으로 인해 캐비테이션 침식이 발생해서 기계 장치의 성능 저하와 손상을 일으킨다. 특히, 부식성을 갖는 액체를 사용할 경우 금속 재료에 기계적 손상과 더불어 전기 화학적 손상을 일으켜 이들간의 상호작용에 의해서 기계 장치의 수명에 치명적인 영향을 끼친다.^{1)~4)}

캐비테이션 침식 - 부식 손상은 내연기관의 피스톤 슬랩에 의한 냉각수 축 실린더 라이너의 진동, 스피밸브의 진동, 펌프의 임펠러, 자동차의 라지에터, 각종 배관 및 선박의 프로펠러 등에서 발생하며, 사용 액체 중에 부식 인자, 고체 입자 등이 포화되는 경우, 裝置部材에 캐비테이션 침식 - 부식에 의한 손상이 더욱 심하게 일어날 수 있다.⁵⁾⁶⁾ 캐비테이션 발생으로 인한 침식 - 부식 현상은 19세기 후반에 고속 선박에서 처음 목격되었고, 이후 현재까지 각종 재료 표면의 캐비테이션 침식에 대해 다수의 연구가 행하여져 왔으나 종래의 연구들에서는 유체 역학적 현상에 대해서 주로 수행하여졌으며 증류수, 수도수 및 해수 중에서 진동 캐비테이션 침식 - 부식 손상 거동에 대한 연구보고는 거의 찾아 볼 수 없다.^{7)~10)}

따라서 본 연구는 연강의 캐비테이션 침식 - 부식 특성에 대한 연구를 하기 위하여, 진동 캐비테이션 장치를 이용해서 각종 환경 조건 하에서 연강(SS41)의 캐비테이션 침식 - 부식 실험을 실시하여 침식 - 부식 거동을 관찰 · 조사하였다. 이러한 실험 결과를 토대로 하여 각각의 부식 환경 조건의 전기 화학적 및 화학적 부식성을 분석하여 고찰하고, 캐비테이션 침식 - 부식 특성을 究明함으로써 캐비테이션 침식 - 부식 방지를 위한 기초 설계 자료 활용하는데 기여하고자 한다.

試驗片 및 實驗方法

試驗材料 및 試驗片

본 실험에 사용된 시험편의 재료는 시판의 연강인 일반 구조용 탄소강재(SS41)로 그 화학적 성분과 기계적 특성은 Table 1과 같다.

이와 같은 화학적 성분과 기계적 특성을 가진 시험 재료로부터 절취하여 제작 가공한 진동 캐비테이션 침식 - 부식 시험편의 형상을 Fig. 1에 나타냈다.

이 시험편의 표면은 사포 800 - 1200번까지로 연마하고, 오일 랩핑(oil lapping)한 후 아세톤으로 脫脂하였으며, 연마 및 오일랩핑 중에는 가능한 한 시험편의 표면이 경화되지 않도록 저속으로 가공하였다.

實驗裝置

본 실험의 진동 캐비테이션 침식 - 부식 실험 장치의 전체 系統圖는 Fig. 2와 같으며, 본 실험 장치(DH - 1400, 대한초음파(주))는 60Hz 220V의 전력을 받아 전자 회로의 초음파 발진기를 거쳐 정격

Table 1 Chemical compositions and mechanical properties of used material(SS41)

Chemical composition (Wt%)	C	Si	Mn	P	S
	0.12	0.29	0.59	0.01	0.01
Mechanical properties	Tensile strength (kgf/mm ²)		Yield strength (kgf/mm ²)		Elongation (%)
	42.4		25.8		32

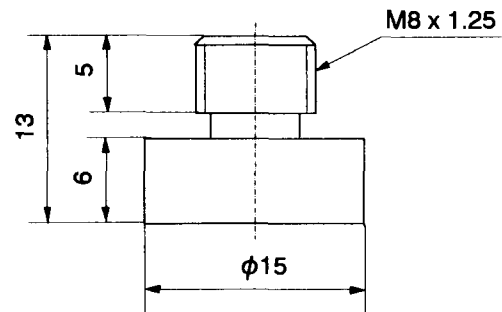


Fig. 1. Dimension of test specimen

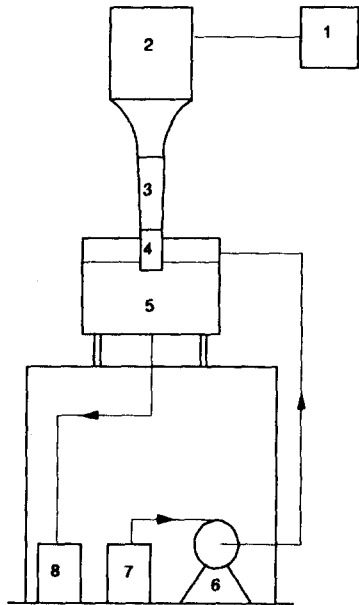


Fig. 2. Schematic diagram of cavitation erosion test apparatus

- 1. Power supply
- 2. Transducer
- 3. Horn
- 4. Specimen
- 5. Testing solution
- 6. Circulation pump
- 7. Reserver tank
- 8. Drain tank

출력을 발생시키고, 이 출력을 진동자에 공급하여 진동을 발생시키는데 이때 진동자는 초음파 발진기로부터 전기에너지를 받아 압전소자로서 기계적인 진동 에너지를 발생시키며, ASTM에 의거 공진 주파수를 20kHz로 하였고, 진폭은 정진폭 자동 제어(Constant amplitude regulation)방식을 사용해서 24 μ m로 일정히 유지하였다.

실험 장치는 제어장치, 진동자, 증폭기 혼(booster horn) 및 자동 정지 타이머 등으로 구성되어 있다. 그리고 환경조(최대 용량 950ml, 시험액량 650ml, 통 깊이 100mm)는 전기 화학적인 부식에 의한 영향을 없애기 위해 아크릴 재료를 사용하여 제작하였다.

實驗方法

환경 용액 조건은 천연 해수, 수도수 및 증류수로 하고 수온은 22 \pm 3 $^{\circ}$ C로 유지하였다. 그리고 침식-부식의 생성물에 의한 영향을 감소시키기 위

하여 10분마다 환경 용액을 교환하였다. 그리고 캐비테이션 침식-부식에 의한 무게 감소량의 측정은 시험 전에 시험편의 중량을 측정하고, 시험편을 10분간 캐비테이션 침식-부식 시험을 한 후 실험 장치의 혼(horn)에서 해체하여 아세톤으로 세척하고 건조시켜서 10분마다 중량 감량을 계측하였다.

또 시험편 표면의 캐비테이션 침식-부식 거동 관찰을 위해 시험 전에 시험편 표면 사진을 촬영하였고, 시험편을 30분간 캐비테이션 침식-부식 시험한 후 시험편을 실험 장치의 혼(horn)에서 해체하여 아세톤으로 세척한 후 건조시켜서 표면 사진을 30분마다 촬영하였다.

結果 및 考察

캐비테이션 浸蝕-腐蝕의 환경 특성

Table 2는 본 실험에 사용된 각 환경 용액의 성분을 분석한 결과를 나타낸 것이다. 이들 환경 용액의 성분 분석 결과에 의하면, 연강재의 부식에 미칠 화학적 및 전기 화학적 환경 인자는 pH, 염소 이온(Cl⁻ 이온), 용존산소 그리고 비저항 값이다. pH는 증류수가 가장 낮지만 각 환경 용액의 pH가 중성이기 때문에 부식 속도에 미치는 영향은 거의 유사할 것으로 보이고, 캐비테이션 현상 하에서 산소는 부식에 영향을 미칠 것으로 생각되지만 각 환경 용액 중에서 비슷한 산소 농도를 나타내고 있다.

또 연강의 부동태 피막을 파괴하여 부식 반응을 촉진시키는 염소 이온(Cl⁻ 이온)은 천연 해수 중에서 18,630mg/l로 가장 많고 다음은 수도수 중에서

Table 2 Compositions of test solutions

Items\Solutions	Sea Water (S · W)	Distilled Water (D · W)	Tap water (T · W)
pH	8.2	6.8	7.4
Cl(mg/l)	18,630	.	22.4
CaCO ₃ (mg/l)	9.1	.	174.9
Dissolved Oxygen (mg/l)	8.6	9.2	9.2
Specific Resistance ($\Omega \cdot \text{cm}$)	25	15,000	5,000

22.4mg/l이며 증류수 중에서는 거의 존재하지 않고 있다. 그리고 식(1)에서와 같이 임의의 환경 중에서 연강의 전위 E는 일정하기 때문에 부식 전류 밀도 i는 환경 용액의 비저항 ρ(금속의 저항 R는 ρ에 비해 극히 적기 때문에 무시함)에 의해 결정된다. 즉 비저항 ρ가 낮을수록 부식은 가속된다. 이러한 비저항 ρ는 천연 해수가 25Ω·cm로 가장 낮고, 다음은 수도수이며, 증류수가 15,000Ω·cm로 가장 높다.

$$i = E / (R + \rho) \quad (1)$$

따라서 염소 이온 농도가 높고 비저항이 가장 낮은 천연 해수 중에서의 캐비테이션 손상에 있어서 부식의 영향은 크고, 염소 이온이 함유되어 있지 않고 비저항이 가장 높은 증류수 중에서의 캐비테이션 손상에 있어서 부식의 영향은 적을 것으로 생각된다.

캐비테이션 浸蝕 - 腐蝕에 의한 損傷擧動

캐비테이션 침식 - 부식에 의한 손상 거동을 고찰하기 위하여, Table 2의 각 환경 조건을 분석 및 고찰한 결과에서 부식 반응이 가장 민감 및 둔감한 환경으로 추정되는 천연 해수와 증류수 중에서의 시간 경과에 따른 캐비테이션 침식 - 부식 손상 거동을 Photo. 1 및 Photo. 2에 나타낸다.

Photo. 1은 천연 해수 중에서 캐비테이션 침식 - 부식에 의한 시험편의 손상 거동을 시간의 경과에 따라 나타낸 것이다. 천연 해수 중에서 캐비테이션 침식 - 부식에 의한 시험편의 손상 거동은 시험 시작 후 30분이 경과하면서 시험편 표면의 광택은 점차 없어지고, 150분을 경과하면서 시험편 손상면의 중앙 부위 및 테두리 부위에서 국부적으로 가시적인 손상이 일어나기 시작한다. 또 300분이 지난 후에는 손상의 정도가 확연히 나타나기 시작하며, 300분으로부터 480분까지의 침식 - 부식 손상 거동은 중앙부와 테두리 부에서 거의 비슷한 정도로 성장된다. 여기서 테두리 부의 손상은 반경 방향으로 성장되고 중앙부의 손상은 공식의 면적과 깊이가 더욱 성장하는 거동을 보이고 있다. 그리고 약 600분 후에는 손상면 전체가 거의 균일하게 극심한 캐비테이션 침식 - 부식 손상 양상을

보이고 있다.

Photo. 2는 증류수 중에서의 캐비테이션 침식 - 부식에 의한 시험편의 손상 거동을 시간의 경과에 따라 나타낸 것이다. 증류수 중에서의 캐비테이션 침식 - 부식에 의한 시험편의 손상 거동은 시험 시작 후 30분 경과시 시험편 표면에는 부분적으로 광택이 남아 있고, 150분이 경과한 경우에도 가시적인 공식은 거의 보이지 않는다. 300분이 지나면서 시험편 표면의 테두리 부가 손상되기 시작한다. 390분이 지나면 중앙부에서도 가시적인 孔蝕이 점차로 나타나고 있으며, 600분까지의 캐비테이션 침식 - 부식 손상 거동은 Photo. 1의 해수 중에서의 경우와 같이 테두리 부의 손상은 반경 방향으로 성장되고 중앙부의 손상은 공식의 면적과 깊이가 더욱 성장하는 거동을 보이고 있다.

Photo. 1 및 Photo. 2에서 캐비테이션 침식 - 부식에 의한 시험편의 손상 거동을 비교하면, Table 2에서 비저항이 높고 염소 이온이 없는 증류수 중에서의 시간 경과에 따른 손상 성장 거동은 비저항이 낮고 염소 이온이 많이 함유된 해수 중에서보다 더 지연되는 양상이다.

또 해수 중에서 캐비테이션 침식 - 부식 손상 거동은 중앙부와 테두리 부에서 거의 비슷한 정도로 발생하여 성장되지만, 증류수 중에서의 캐비테이션 침식 - 부식 손상 거동은 테두리 부에서 중앙부 쪽으로 손상되기 시작한다. 그리고 해수 중에서는 중앙부와 테두리 부에서 거의 비슷한 정도로 침식 - 부식 손상이 일어나서 성장되지만 증류수 중에서는 테두리 부에서 손상이 먼저 일어난 다음 중앙부에 손상이 일어나는 이유는 캐비테이션 발생 시에 시험편의 주위에서 기포가 붕괴되기 때문에 증류수 중에서는 손상이 기계적인 침식에 지배됨으로써 테두리 부에서 손상이 먼저 일어난 다음 중앙부에 손상이 일어나지만, 해수 중에서는 부식성이 강한 전해질이므로 유속이 느린 중앙부가 양극으로 작용함으로써 전기 화학적 부식과 기계적인 침식의 상승 작용에 의해 중앙부와 테두리 부에서 거의 비슷한 정도로 침식 - 부식 손상이 발생·성장되는 것으로 思料된다.

따라서 본 연구에서의 연강의 캐비테이션 침식 - 부식 손상 거동은 이온농도차에 의한 전지 작

연강의 캐비테이션 浸蝕-腐蝕 特性에 관한 연구(1)

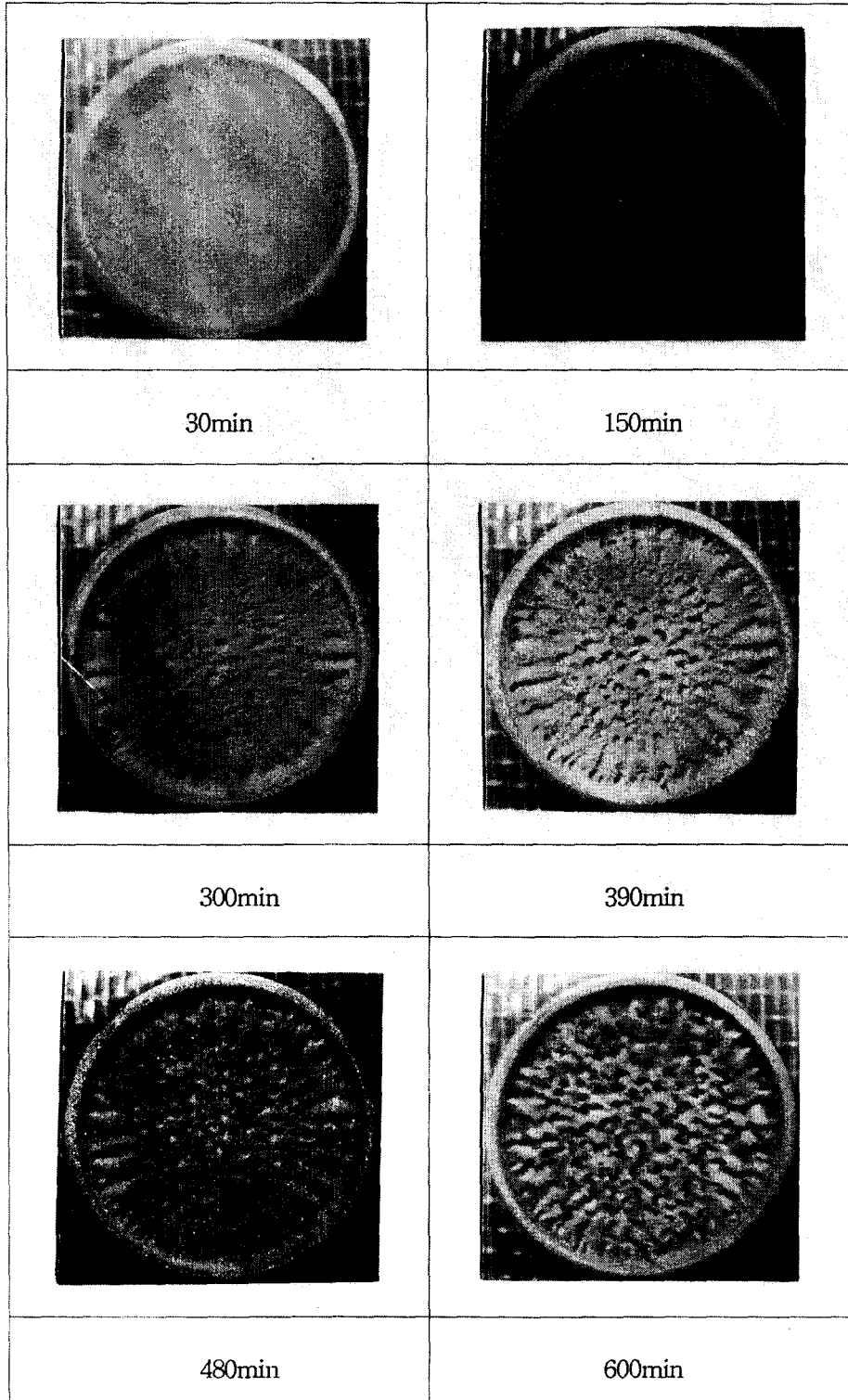


Photo. 1. Appearance of damaged surface of specimen in sea water

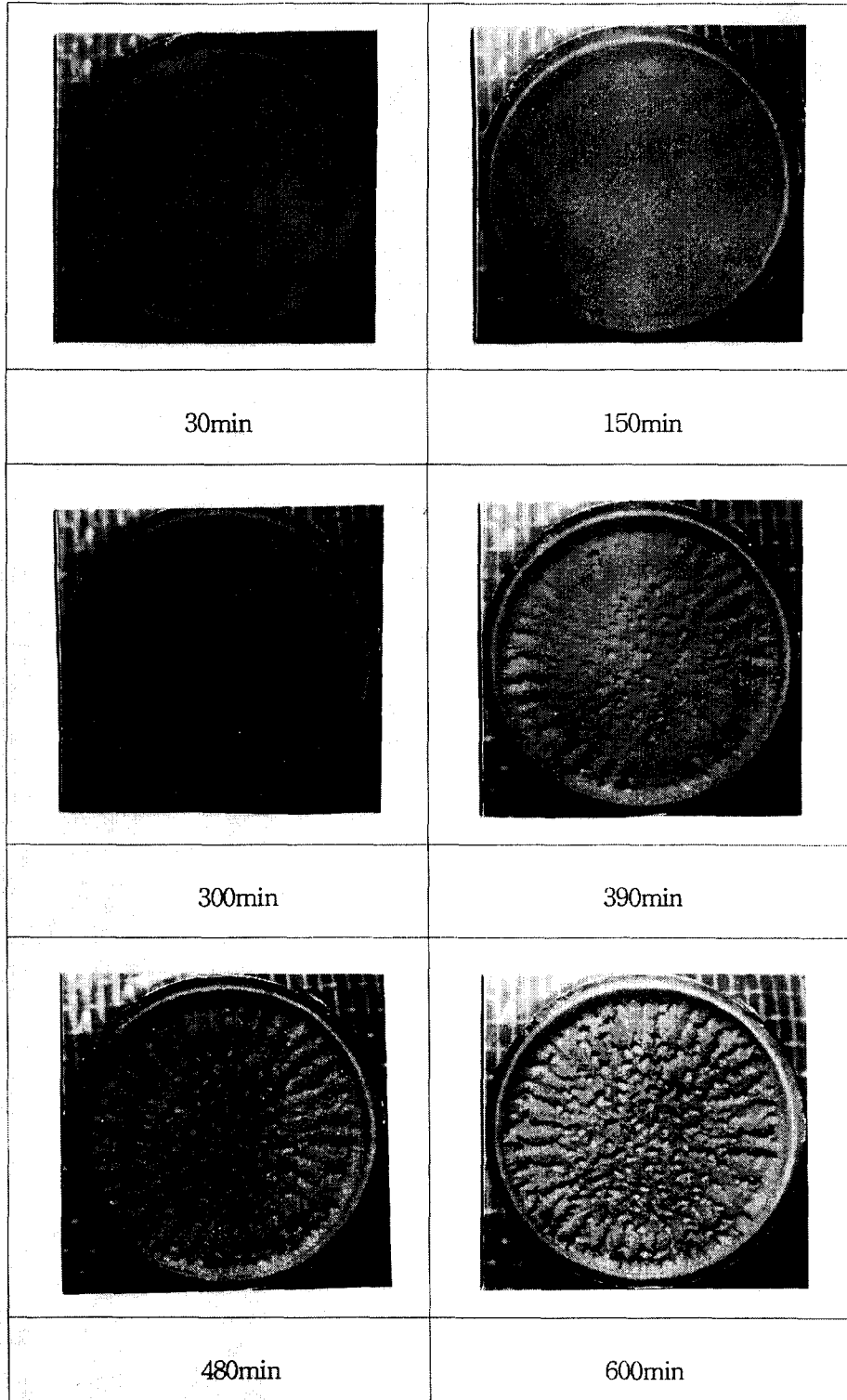


Photo. 2. Appearance of damaged surface of specimen in distilled water

용 부식이 일어나는 것이 아니고 통기차에 의한 전지 작용 부식인 것으로 추정된다¹⁾.

腐蝕環境이 캐비테이션 浸蝕-腐蝕 損傷에 미치는 影響

Fig. 3은 각종 부식 환경 중에서 캐비테이션 침식-부식 손상에 의한 무게 감소량을 시험 시간의 경과에 따라 나타낸 것이다. Table 2에 보인 바와 같이 비저항값이 가장 낮고 염소 이온이 가장 많이 함유된 천연 해수 중에서 시간의 경과에 따른 캐비테이션 침식-부식 손상에 의한 무게 감소량이 가장 많이 증가되는 양상이다. 또 비저항이 5,000 Ω·cm인 수도수 중에서도 비저항이 15,000Ω·cm인 증류수 중에서의 캐비테이션 침식-부식 손상에 의한 무게 감소량은 약 120분까지는 비저항이 낮은 수도수 중에서의 무게 감소량이 비저항이 높은 증류수 중에서보다 더 증가하지만 약 120분 이후부터는 비저항이 더 높은 증류수 중에서보다 비저항이 낮은 수도수 중에서 무게 감소량이 더 지연되는 추세를 나타내고 있다.

Photo. 1, Photo. 2 및 Fig. 3에 있어서 비저항이 낮은 해수 중에서의 캐비테이션 침식-부식 손상

에 의한 무게 감소량이 비저항이 더 높은 수도수 및 증류수 중에서보다 무게 감소량이 더 증가하는 이유는 Table 2의 시험 용액 조성에서 보인 바와 같이 해수 중의 적은 양의 CaCO₃는 부동태 피막을 형성할 것으로 추정되지만 천연 해수 중의 많은 양의 Cl⁻ 이온에 의해 이러한 부동태 피막이 쉽게 파괴되고, 또 천연 해수는 비저항이 낮은 강전해질 이므로 캐비테이션 기포의 충격에 의해 발생한 공식에서 Peterson의 갈바닉 전지가 형성되어 부식이 활성화됨으로써 공식 주위의 음극에서는 수소가스가 발생하고 양극인 공식으로부터 철의 이온화(Fe²⁺)현상으로 금속의 용출이 촉진되기 때문에 해수 중에서 가장 심하게 캐비테이션 침식-부식 손상이 일어나는 것으로 思料된다.⁶⁾

그리고 시험 시작 후 약 120분까지는 수도수에서의 무게 감소량이 증류수에서보다 더 증가하지만, 약 120분 이후부터는 증류수 중에서보다 수도수에서 무게 감소량이 더 지연된다. 이것은 시험 시작 120분까지는 염소 이온을 함유하고 비저항이 낮은 수도수에서 전기 화학적인 침식-부식의 중첩 효과에 의한 당연한 결과라 할 수 있고, 시험 시간 약 120분 이후에 있어서 무게 감소량은

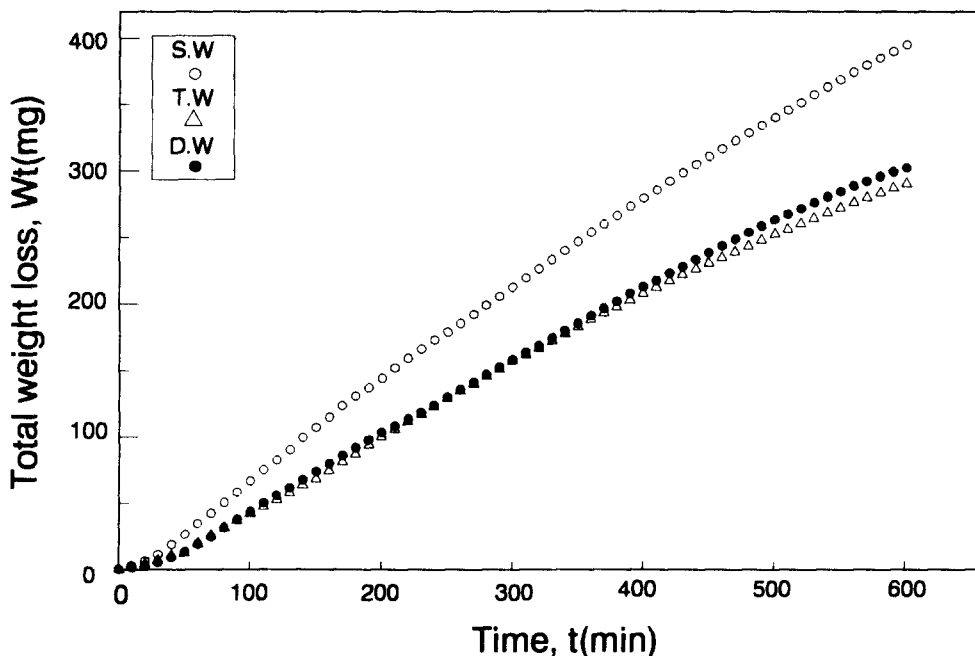


Fig. 3. Total weight loss of specimen in various test solutions

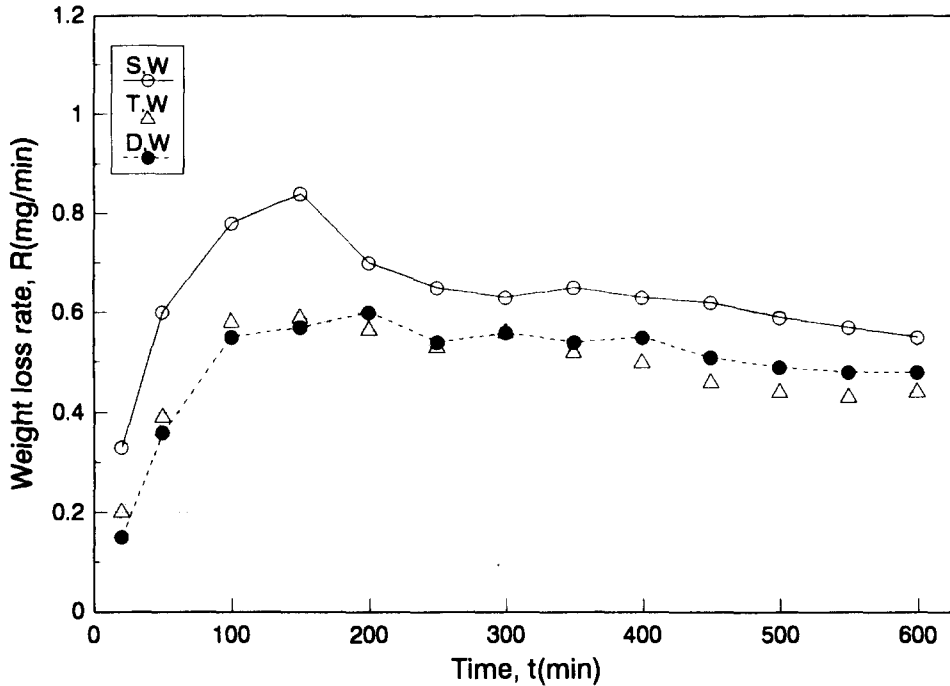


Fig. 4. Relationship between the weight loss rate and testing time in various test solutions

Table 2의 시험 용액 조성에서 보인 바와 같이 증류수 중에서는 CaCO_3 가 함유되어 있지 않지만 수도수 중에는 CaCO_3 가 함유되어 있어 이 CaCO_3 가 시험 시간이 경과함에 따라 시험편 표면에 화학적인 부동태 피막을 형성하여 캐비테이션 침식-부식 손상을 억제하는 것으로 생각된다. 즉 CaCO_3 의 부식 억제제(inhibitor) 역할로 인한 시험편 표면의 부동태 피막 형성 때문에 약 120분 이후부터 수도수에서의 무게 감소량이 증류수중에서보다 점차 더 둔화되는 것으로 생각된다.

Fig. 4는 Fig. 3의 각종 환경 중에서 캐비테이션 침식-부식 손상에 의한 무게 감소량의 실험 값에 대해 시간에 따른 비를 계산하여, 무게 감소율 R를 실험 시간 t에 따라 정리한 것이다. 해수 중에서의 무게 감소율은 증류수나 수도수 중에서도보다 더 크게 나타나는 경향이고, 이러한 경향은 캐비테이션 침식-부식 시험 약 30분 이후부터 약 200분까지의 영역에서 가장 민감하게 나타나고 있다.

그리고 각 환경 조건에 있어서 초기에는 무게 감소율이 증가하다가 시간이 경과되면서 점점 감소하다가 거의 안정 상태로 되는 과정을 보이고 있다.

캐비테이션 浸蝕 - 腐蝕 損傷 特性

각종 부식 환경 중에서 캐비테이션 침식-부식 손상 거동을 좀 더 구체적으로 고찰하고자 Fig. 4의 각 환경 조건에 따른 캐비테이션 침식-부식 손상에 의한 무게 감소율의 거동과 Photo.1 및 Photo.2의 손상 양상을 비교·고찰하여 무게 감소율(R)과 실험 시간(t)에 대한 특성을 Fig. 5에 나타낸 것이다. 여기서 R-t 곡선의 특성에 따라 4구역으로 분류하면, ㉠, ㉡, ㉢ 및 ㉣로 나타낼 수 있다.

㉠에서는 캐비테이션 기포의 충격력에 의해 재료 표면에 소성변형이 생기고 산화 피막과 이중층이 서서히 脫離하여 침식-부식에 의한 小孔의 핵이 형성되는 과정으로 小孔은 거의 나타나지 않는 단계로서 잠복기(incubation region)로 추정된다. 또 ㉡는 수개의 캐비테이션 침식-부식에 의한 小孔이 발생하여 손상 속도가 증대하는 증가기(acceleration region)로, ㉠로부터 ㉢로 遷移되는 遷移기간이라고도 할 수 있다. 또한 ㉢는 캐비테이션 침식-부식에 의한 小孔이 많이 발생함과 동시에, 재료의 노출 면적이 증대하여 손상 속도가 촉진되지만, 재료의 노출 면적이 증대한 小孔 내부에

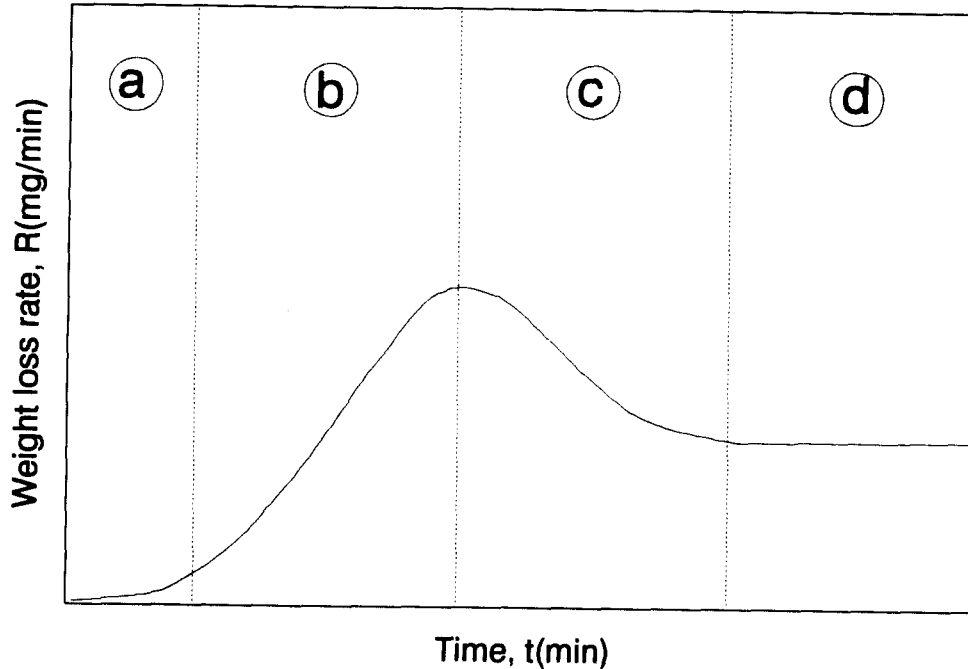


Fig. 5. Modeling of R - t curve by cavitation erosion - corrosion

기포가 충전하여 완충 작용에 의해 차츰 충격력이 완화되면서 손상량이 감소하는 감소기(deceleration region)이다. 또한 ㉔는 캐비테이션 기포가 재료의 침식 - 부식에 의한 小孔 면에 많이 흡착하여 기포 붕괴가 잘 일어나지 않는 단계로서 무게 감소율도 최대로 억제되는 단계로 무게 감소율이 거의 일정하게 되는 안정기(steady state region)이다. 이상과 같은 실험 시간에 따른 무게 감소율 곡선에서 ㉑ 잠복기(incubation region), ㉒ 증가기(acceleration region), ㉓ 감소기(deceleration region) 및 ㉔ 안정기(steady state region)의 4단계로 구분할 수 있다.

結 論

각종 환경 조건에서 진동 캐비테이션 침식 - 부식 시험 장치에 의해 연강(SS41)의 캐비테이션 침식 - 부식 손상 거동에 관한 연구를 한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 해수 중에서의 캐비테이션 침식 - 부식 손상 거동은 중앙부와 테두리 부에서 거의 비슷한 정도

로 발생하여 성장되지만, 증류수 중에서는 테두리 부에서 손상이 먼저 발생한 다음 중앙부에도 손상이 점차 일어난다.

2) 비저항이 낮은 수도수 중의 캐비테이션 침식 - 부식 손상은 초기에는 비저항이 높은 증류수 중에서의 것보다 증가하지만 시간이 경과하면서 CaCO₃의 피막 형성에 의해 둔화된다.

3) 캐비테이션 침식 - 부식 손상 특성은 잠복기, 증가기, 감소기 및 안정기의 4단계로 구분된다.

參考文獻

- 1) Tretheway, K. R. and Chamberlain, J.(1988) ; Corrosion(for students of science and engineering), Longman Scientific & Technical, 153 - 156.
- 2) Talks, M. G. and Moreton, G.(1981) : Proc. ASME Symp. Cavitation Erosion Fluid System, 139.
- 3) 松村倉信,岡 良則(1982) ; 腐蝕に及ぼすエロージョンの影響, 防蝕技術 31, 國際文獻印刷社, 67 - 72.
- 4) 千葉 近(1990) : 超音波 噴霧, 山海堂.
- 5) Ailor, W. H.(1980) ; Engine Coolants Testing, State of the Art, ASTM STP 705, 81 - 101.

- 6) 日本材料學會(1988) : 材料強度學, 進行印刷出版, 173 - 175.
- 7) Gould G. C. (1970) ; Some Observations on Erosion by Cavitation and Impingement, ASTM, 182 - 211.
- 8) Young, S. G. and Johnston, J. R.(1970) : Effect of Temperature and Pressure on Cavitation Damage in Sodium, ASTM, 67 - 108.
- 9) 加藤洋治(1979) : キャビテーション, 日本振書店, 1.
- 10) 渡邊 豊, 高橋秀明(1988) : 炭素鋼の氣液2相流中エロージョン・コロージョンにおける電氣化學的作用, 日本防食技術 37(2), 69 - 74.
- 11) 임우조, 양학기, 인현만, 이진열(1994) : 부식과 방식, 원창출판사, 108 - 109.
- 12) 이진열, 임우조(1992) : 내연기관용 슬라이드 베어링재의 캐비테이션 침식 거동과 부식 영향 및 윤활유의 거동에 관한 연구, 한국어업기술학회지, 28(2), 171 - 183.