

연강의 캐비테이션 침식 - 부식 특성에 관한 연구(3)

-진동 캐비테이션 손상 억제 거동-

황 재 호 · 임 우 조 · 정 기 철*

부경대학교, 동명전문대*

(1997년 6월 21일 접수)

Study on the Characteristics of Cavitation Erosion - Corrosion for Mild Steel(3)

-Behaviour of Erosion - Corrosion Damage Suppression
under Vibratory Cavitation-

Jae - Ho Hwang, Uh - Joh Lim and Ki - Cheol Jeong*

Pukyong National University, *Dongmyung Junior College

(Received June 21, 1997)

Abstract

The component materials threatened by cavitation include ship propellers as well as turbine runners, pump impellers, pipe lines and radiators. Today it is known that cavitation damage takes place on many other components including on the cooling water side of the cylinder liners of diesel engines. 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.

To suppress cavitation erosion as well as cavitation erosion - corrosion to hydraulic equipment, innovations such as the improvement in the geometric design of the equipment or the selection of suitably resistant construction materials are necessary.

In this study, we investigated that the cavitation erosion - corrosion damage under vibratory cavitation can be reduced by adding of side flow velocity to the cavitation bubble group in order to eliminate bubbles formed in sea water environment.

1. 서 론

기계 장치가 고속화, 고출력화 됨에 따라 유체를 사용하는 장치 부재에서의 유속 및 회전속도는 상승하는 등, 환경은 가혹화되는 경향을 나타내고 있다. 특히, 액체 중의 기계부재에서 고주파 진동이 발생하면 그 진폭이 작아도 극심한 캐비테이션 침식을 유발하며, 더욱이 부식성

의 액체인 경우에는 심한 캐비테이션 침식 - 부식 손상을 일으켜 기계장치의 수명에 치명적인 영향을 미친다. 이러한 캐비테이션 침식 - 부식 손상을 억제하는 대표적인 방지법으로는 인히비터(inhibitor)의 사용에 의한 억제, 음극 방식(cathode protection)법 그리고 설계 개선에 의한 방법 등이 있다. 따라서 어떤 경우에 어떤 방지법을 선택할 것인가 하는 것은 보수비의 최

소화, 장치의 수명 연장, 안전성의 제고, 더 나아가서는 제조 원가를 내릴려는데 목적이 있으므로 최적 경제효용 입장에서 결정하지 않으면 안되는 문제이다.^{1)~3)}

진동 캐비테이션 침식-부식 손상은 전기화학적 부식 인자 보다는 기계적 침식 인자가 더 지배적인 캐비테이션 침식 지배형 손상이 발생한다⁴⁾. 이러한 손상을 억제하기 위하여 캐비테이션 손상 방지법 중에서 설계 개선 방법을 선택, 기계 부재의 진동 방향에 측면 유속을 가하므로서 진동 캐비테이션 침식-부식 손상을 억제하는 방법을 착안하였다.

본 연구에서는 천연해수 환경하에서 진동 캐비테이션 발생장치의 진동 방향의 측면에 유속을 가하여, 측면 유속에 따른 소성변형 거동 및 초기의 침식 양상, 잠복기의 거동 및 파면 특성 등을 규명 고찰함으로써 캐비테이션 침식-부식 손상 억제를 위한 한가지 방법으로 확립하고자 하였다.

2. 시험편 및 실험방법

2-1 시험재료 및 시험편

본 실험에 사용된 시험편 재료는 연강인 일반 구조용탄소강재(SS41)로 화학적 성분과 기계적 특성 그리고 시험편의 형상은 전보(前報)와 같다.⁴⁾

2-2 실험장치

본 실험에 사용된 진동 캐비테이션 침식-부식 실험장치는 전보(前報)에서 보고한 것과 같이 ASTM에 의거 공진 주파수를 20kHz로 하였고, 진폭은 정진폭 자동제어(constant amplitude regulation)방식을 사용해서 24 μm 로 일정히 유지하였다.⁵⁾ Fig.1은 캐비테이션 손상을 억제하기 위하여 진동 캐비테이션 발생 부분에 대해 측면 유속을 가하는 개략도를 나타낸 것이다. 여기에 사용된 유속은 $V=0\%$, $V=0.5\%$, $V=1\%$, $V=1.5\%$ 그리고 $V=2.0\%$ 이며, 유속은 유량계를 이용하여 측정하였다.

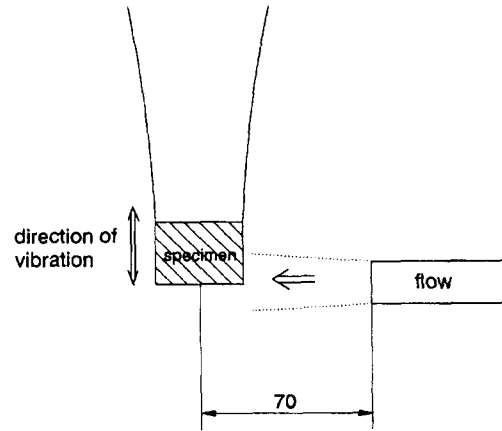


Fig. 1 Schematic diagram of vibratory cavitation erosion-corrosion test with flow(unit : mm)

2-3 실험방법

환경 용액은 천연해수이며 수온은 $22 \pm 3^\circ\text{C}$ 로 유지하였다. 그리고 캐비테이션 침식-부식 손상에 의한 무게 감소량은 시험 전에 시험편의 중량을 측정하고, 시험편을 5분간 캐비테이션 침식-부식 시험을 한 후 실험장치의 혼(horn)에서 해체하여 아세톤으로 세척하고 건조시켜서 5분마다 중량 감량을 계측하였다.

캐비테이션 침식-부식 손상에 의한 시험편 표면의 소성변형 파문의 폭은 이미지 프로세서(Image Pro II DT-2853, Vtec)를 이용하여 측정하였고, 시험편 표면의 손상 부위에 있는 피트(pit)의 최대 깊이는 금속광학현미경으로서 표면의 손상이 일어나지 않은 부분을 기준으로 해서 손상이 발생한 부분과의 초점차를 이용하여 측정하였다.

또 시험편 표면의 캐비테이션 손상 거동 관찰을 위해 시험 전에 시험편 표면 사진을 촬영하였고, 시험편을 5분마다 캐비테이션 침식 시험한 후 시험편을 실험장치의 혼(horn)에서 해체하여 아세톤으로 세척한 후 건조시켜서 표면 사진을 촬영하였다.

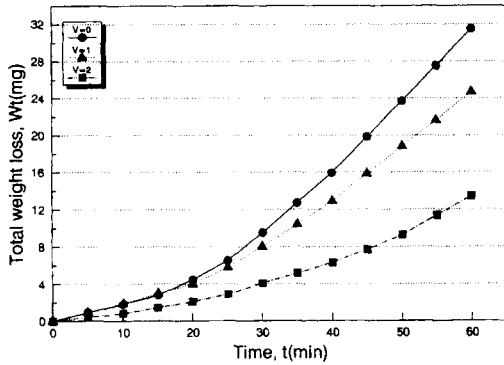


Fig. 2 Total weight loss of specimen with flow velocity(m/s) in sea water

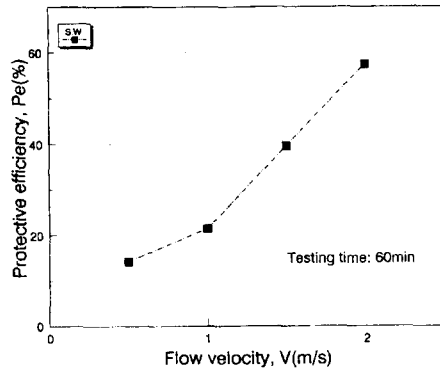


Fig. 3 Protective efficiency vs. flow velocity in sea water

3. 결과 및 고찰

3-1 천연해수 중에서의 측면 유속에 의한 캐비테이션 손상 억제 거동

Fig. 2는 천연해수 중에서 진동 캐비테이션 침식-부식 손상 억제를 위하여 진동 캐비테이션 발생부에 측면 유속을 가하여 유속에 따른 침식-부식에 의한 무게감소량을 나타낸 것이다. 측면 유속이 빠를수록 무게감소량이 적어지는 양상을 보이며 시험시간 경과에 따른 무게감소량의 증가폭은 측면 유속이 빠를수록 크게 둔화되고 있음을 보이고 있다. 특히, 측면 유속 V=2.0 %에서 시간의 경과에 따른 무게감소량이 가장 적게 나타나고 있다.

Fig. 3은 시험시간 60분 동안에 진동 캐비테이션 발생부에 가한 측면 유속이 진동 캐비테이션 침식-부식 손상을 억제하는 효과를 좀 더 정량적으로 검토하기 위하여 측면 유속에 따른 손상억제효율을 나타낸 것이다. 측면 유속을 가하지 않았을 때의 무게감소량을 기준으로 해서 각 측면 유속에서의 무게감소량을 나눈 값으로 손상억제효율을 나타냈으며, 손상억제효율(Pe)은 다음 식(1)과 같다.

$$Pe(\%) = (1 - Wt_v / Wt_{(v=0)}) \times 100 \quad (1)$$

Wt_v : 각 측면 유속에서의 무게 감소량(mg)

$Wt_{(v=0)}$: 측면 유속 V=0 % 일 때의 무게 감소량(mg)

측면 유속이 V=1.0 %에서의 손상억제효율은 약 22%이고, 측면 유속이 V=2.0 %에서의 손상억제효율은 약 58%를 나타내고 있다. 유속이 빨라질수록 손상억제효율이 좋아지는 것은 진동 캐비테이션 발생부에 측면 유속을 가해 기포를 제거시킴으로써 침식에 의한 손상과 침식과 부식의 상호작용이 감소되기 때문으로 생각된다. 그리고 측면 유속이 V=2.0 % 인 경우가 V=1.0 % 일 때 보다 더 큰 손상억제효율을 나타내는 것은 측면 유속이 더 빨라짐으로써 진동 캐비테이션에 의해 발생한 기포가 더 많이 제거되어 침식에 의한 손상과 침식과 부식의 상호작용이 더욱 감소되기 때문으로 것으로 사료된다.

3-2 측면 유속에 따른 캐비테이션 발생부의 잠복기 지연 특성

Photo.1은 천연해수 중에서 진동 캐비테이션 발생부의 측면 유속을 V=0 %, V=2.0 %로 가했을 때에 침식-부식 손상이 발생한 시험편 표면 중의 한 부분을 지정하여, 시험시간 5분 마다 400배율의 광학현미경으로 촬영해서 연강의 내 침식성의 기준으로 볼 수 있는 잠복기를 관찰한 것이다.

진동 캐비테이션 발생부의 측면 유속이 V=0 % 인 경우 시험시간 5분이 지나면서 ㉓와 ㉔ 부분의 피트(pit)에서 국부 부식 현상이 나타나고 연마 흔적이 남아 있으나 소성변형 파문

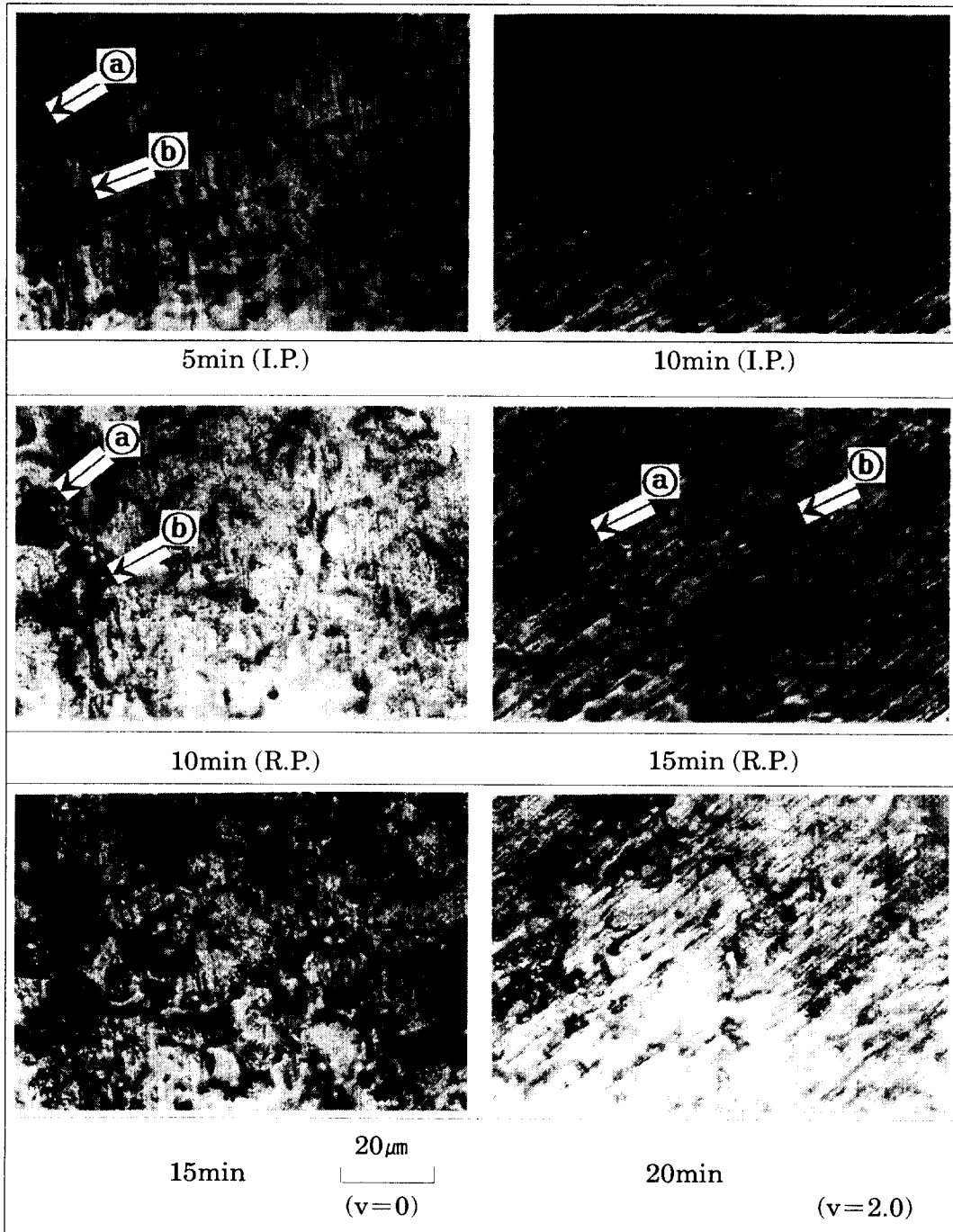


Photo. 1 Optical micrographs showing incubation period in sea water
(I.P. : Incubation Period, R.P. : Removal Period)

(plastic deformation ripple)은 형성되지 않은 잠복기 단계로 추정된다.

시험시간 10분이 지나면서 소성변형 파문(plastic deformation ripple)이 나타나기 시작하나 뚜렷한 소성변형 파문은 형성되지 않고 있으며 국부 부식이 발생하는 ㉠와 ㉡와 같은 취약부에서 탈리가 발생하기 시작하여 탈리기로 들어가는 것으로 생각된다.

진동 캐비테이션부의 측면 유속이 $V=2.0$ %인 경우 시험시간 10분이 지나면서 미세한 피트에서 국부 부식 현상이 약간 나타나며, 연마 흔적은 $V=0$ %의 5분에 비해 많이 남아 있어 잠복기 단계인 것으로 추정된다. 15분이 지나면서 $V=0$ %에서와 같이 뚜렷한 소성변형 파문(plastic deformation ripple)이 나타나기 전에 국부 부식이 발생하는 ㉠와 ㉡ 같은 취약부에서 탈리가 발생하여 탈리기로 들어가는 것으로 생각된다.

뚜렷한 소성변형 파문(plastic deformation ripple)이 나타나기 전에 탈리가 일어나는 것은 천연해수 중의 Cl^- 이온에 의해 침식과 함께 부식이 심하게 일어나기 때문으로 사료된다. 그리고 측면 유속을 가함으로써 시험편 표면에 발생한 캐비테이션 기포군이 제거되어 기포의 붕괴에 따른 충격압이 줄어들고 이로 인해 침식 손상과 동시에 침식과 부식의 상호 작용이 줄어들어 잠복기가 길어지는 것으로 추정된다. 이러한 결과들을 정리하면 천연해수에서의 캐비테이션 손상은 일반적인 캐비테이션 손상에서 나타나는 소성변형기(plastic deformation period), 가공경화기(work hardening period), 탈리기(removal period)의 세 과정에서 가공경화기(work hardening period)의 과정이 분명하지 않음을 알 수 있다.^{6),7)}

Fig. 4는 천연해수 중에서 진동 캐비테이션 발생부에 측면 유속을 가해 진동 캐비테이션 손상에 있어서 연강의 내 침식성의 기준으로 볼 수 있는 잠복기(incubation period)를 침식 깊이와 비교해서 나타낸 것으로 피트의 깊이는 광학현미경의 초점차를 이용해서 측정했다. 각 측면 유속에서의 잠복기 내의 피트 깊이는 약

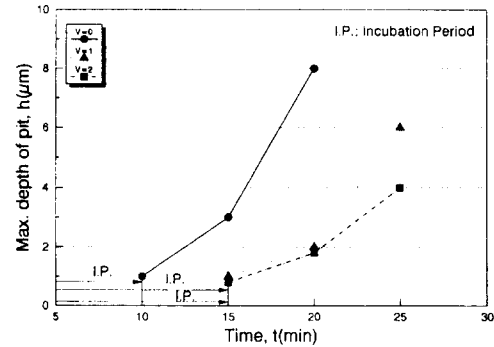


Fig.4 Relationship between max. depth of the pit and testing time in sea water

1 μ m이하이며, 잠복기는 측면 유속 $V=0$ %에서는 약 10분, 측면 유속 $V=1.0$ %과 $V=2.0$ %에서 약 15분으로 측면 유속이 빨라지면서 잠복기가 지연되는 양상을 보이고 있다. 그리고 시험시간의 경과에 따른 피트 깊이가 증가는 측면 유속이 빠를수록 완만하게 증가하는 양상을 보이고 있다. 피트의 깊이가 약 1 μ m이하의 얇은 깊이에서 시험편 표면의 탈리가 일어나는 것은 캐비테이션 침식과 부식의 상호 가속하는 상승 작용 때문으로 생각된다.

3-3 진동 캐비테이션 손상부의 유속에 따른 표면 파면 양상

Photo. 2는 천연해수 중에서 진동 캐비테이션 발생부의 측면 유속에 따른 캐비테이션 침식-부식 손상 시험을 한 시험편 표면의 파면 양상을 나타낸 것이다. 여기서 Photo. 2의 (a)는 $V=0$ %, (b)는 $V=1.0$ % 그리고 (c)는 $V=2.0$ %이다. 측면 유속이 빨라질수록 시험편 표면은 탈리가 발생하지 않은 평활한 상태를 나타내며 연마 가공 부분이 조금 남아 있다. 그리고 측면 유속이 감소할수록 미탈리부가 줄어들고 탈락 입자의 크기가 커지고 많아져서 표면의 요철이 심하게 발생하고 있다. 측면 유속이 증가할수록 시험편 표면에 미탈리부가 많이 생기는 이유는 진동 캐비테이션에 의해 발생된 기포가 많이 제거됨으로써 시험편 표면에 미치는 기포 붕괴압이 감소하여 표면 탈리가 적어지기

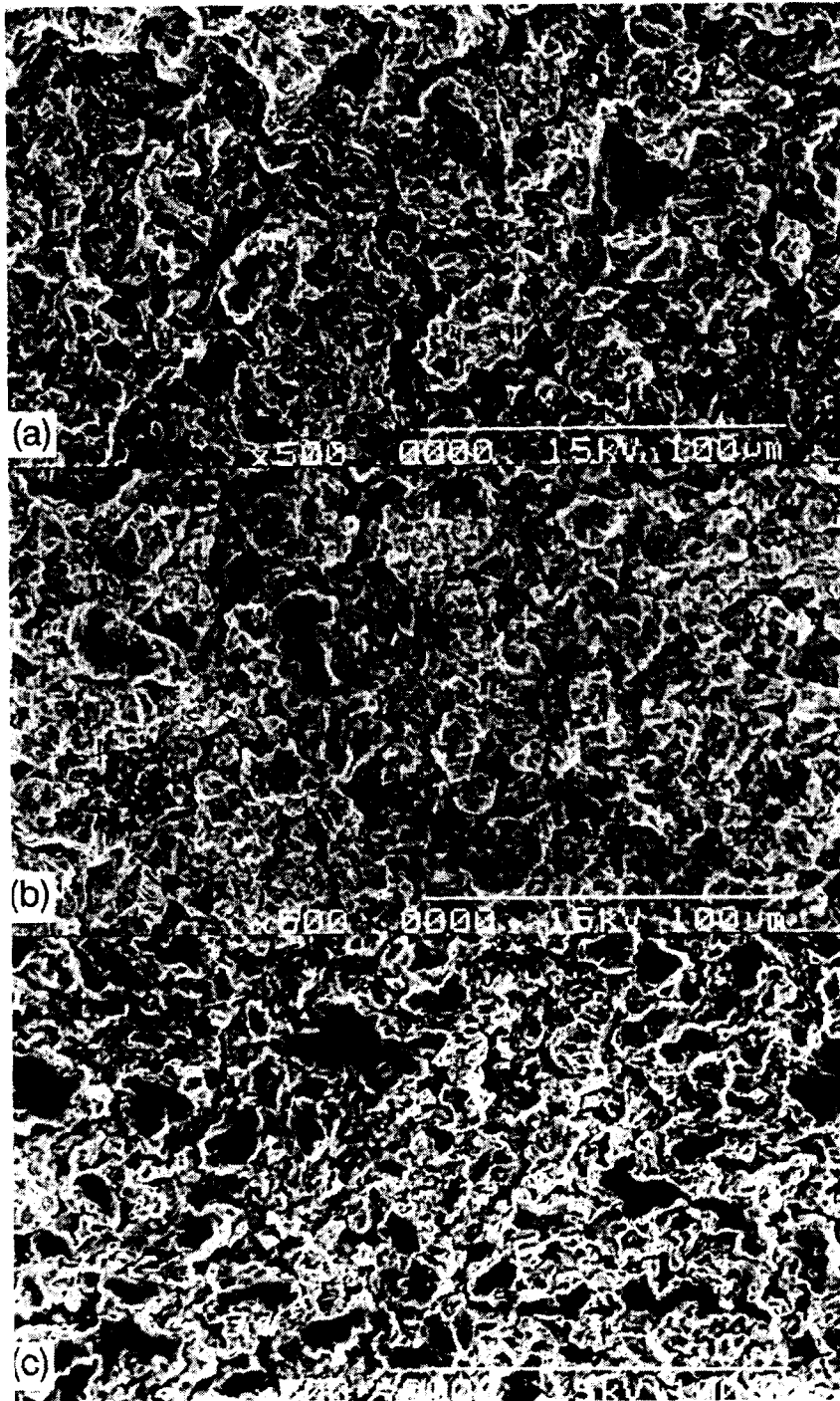


Photo.2 SEM Photographs of cavitation damage on specimen surface with flow velocities for 60min in sea water ;

(a) $V=0\text{m/s}$, (b) $=1.0\text{m/s}$ and (c) $V=2.0\text{m/s}$

때문이라 생각된다. 그리고 유속이 감소할 수록 시험편 표면의 요철이 심하고 미탈리부가 거의 없어지는 것은 표면에 미치는 기포 붕괴압이 측면 유속이 빠를 때 보다 크기 때문이라 추정된다.

4. 결 론

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

- 1) 진동 캐비테이션 침식-부식의 손상이 억제 효율은 유속이 증가할수록 증가한다.
- 2) 진동 캐비테이션 침식-부식 손상에 있어서의 잠복기는 측면 유속이 빨라짐에 따라 더 지연된다.
- 3) 측면 유속이 빠를수록 진동 캐비테이션 침식-부식에 의한 손상 표면의 탈리가 억제된다.

참고문헌

- 1) D.A. Jone(1992), Principles and Prevention of Corrosion, Macmillan, 3 - 4.

- 2) T. Okada and Y. Iwai(1988), Effects of Plating on Cavitation Erosion, Wear, 124, 21 - 31.
- 3) Plesset, M.S.(1960), On Cathodic Protection in Cavitation Damage, ASTM STP, Vol82 - 4, 802 - 820.
- 4) 황재호, 임우조(1996) : 연강의 캐비테이션 침식 - 부식 특성에 관한 연구(2), 한국어업기술학회지, 32(3), 302 - 309.
- 5) Annual Book of ASTM Standards (1986) : 03.02 Wear and Erosion; Metal Corrosion, G32 - 85, 188 - 195.
- 6) 황재호, 임우조(1996), 진동 캐비테이션 침식-부식 손상에 미치는 유속의 영향, 한국부식학회, 25(3), 317 - 326.
- 7) K. Steller and T. Krzysztofowic(1973), ASTM STP 567, 152 - 170.
- 8) Talks, M.G. and Moreton, G.(1981) : Proc. ASME Symp. Cavitation Erosion Fluid System, 139.
- 9) Ailor, W.H.(1980) : Engine Coolants Testing, State of the Art, ASTM STP 705, 81 - 101.
- 10) G.C. Gould (1970) : Some Observations on Erosion by Cavitation and Impingement, ASTM, 182 - 211.