

진동 캐비테이션 침식-부식 손상에 미치는 유속의 영향

황 재 호 · 임 우 조

부경대학교 공과대학 기계공학과

Effect of Flow Velocity on Erosion-Corrosion Damage under Vibratory Cavitation

Jae-Ho Hwang and Uh-Joh Lim

Pukyong National University

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. To suppress cavitation erosion as well as cavitation erosion-corrosion in hydraulic equipments, the addition of an inhibitor would be more general method, but there are few papers that refer to suppression of cavitation erosion-corrosion damage under vibratory cavitation by using flow.

In this study, 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.

The vibratory erosion-corrosion tests on commercial mild steel SS41 were carried out. We carefully observed the erosion pattern and cavitation damage process divided into three stages; plastic deformation period, work hardening period and removal period.

1. 서 론

기계 장치가 고속화, 고출력화 됨에 따라 유체를 사용하는 장치 부재에서의 유속 및 회전속도는 상승하고, 환경은 가혹화되는 경향을 나타내고 있다. 이와 같은 경향에 따라 기계장치의 부재에는 유체 충격과 정압의 저하에 따른 국부적 비등으로 인한 캐비테이션 침식이 발생할 수 있으며, 또 액체 중에서 기계부재에 고주파 진동이 발생하면 그 진폭이 작아도 극심한 캐비테이션 침식을 유발하여 기계장치의 수명에 치명

적인 영향을 미친다.

캐비테이션에 의한 표면 손상 특징은 기포 붕괴 시에 발생하는 충격력이 매우 짧은 시간, 미소 면적에 반복 작용하여 표면 손상이 일어나는 것으로 보통의 충격파괴나 피로파괴와는 달리 대단히 국소적으로 발생한다. 또 기포가 붕괴할 때에 생기는 충격력은 침식을 일으킬 만큼의 커다란 에너지를 가지는 것도 있으며 이에 미치지 못하는 충격력도 있다. 이러한 에너지가 무작위로 반복해서 작용하므로 금속재료의 캐비테이션 침식을 일으킨다.¹⁻⁴⁾

철도 기관차나 선박의 디젤기관 운전시 진동에 의한 실린더 라이너의 냉각수 측에 캐비테이션이 발생하여 공식(Pitting) 형태의 침식이 발생하고, 자동차용 가솔린 엔진에서는 고속 주행시에 냉각 순환수 펌프의 임펠러에 캐비테이션이 발생하여 손상을 일으킨다.^{5,6)} 이러한 손상을 줄이기 위해 부식 억제제(Inhibitor) 등을 사용한 억제 방법에 대한 많은 연구가 이루어졌다. 그러나 유속 및 환경 용액의 변화에 따른 캐비테이션 침식-부식 손상에 관한 연구는 거의 찾아 볼 수 없다.

따라서 본 연구에서는 연강(SS41)의 진동 캐비테이션 침식-부식 손상 및 억제에 미치는 유속 및 환경 용액의 영향에 관한 특성을 연구하기 위하여, ASTM 규격에 맞춘 진동 캐비테이션 발생 장치를 이용했다. 유속 및 환경 용액 조건에 의한 캐비테이션 침식-부식 손상 및 억제 양상을 고찰하고, 증류수에서의 소성 변형 거동 및 초기의 침식 과정을 관찰·조사하여 캐비테이션 침식에 있어서의 잠복기의 거동 특성을 구명(究明)함으로써 캐비테이션 침식-부식 방지를 위한 기초 설계 자료로 활용하는데 기여하고자 한다.

2. 시험편 및 시험장치

2.1 시험재료 및 시험편

본 실험에 사용된 시험편 재료는 시판의 연강인 일반 구조용탄소강재(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 탈지(脫脂)하였으며, 연마 및 오일 랩핑 중에는 가능한 한 시험편의 표면이 경화되지 않도록

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 (kg f/mm ²)		Yield strength (kg f/mm ²)		Elongation (%)
	42.4		25.8		32

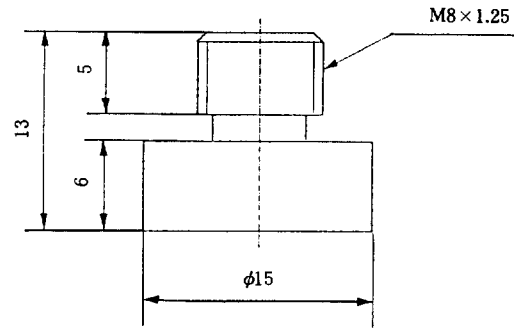


Fig. 1. Dimension of test specimen.

Table 2. Compositions of test solutions

Solutions Items	Sea Water (S.W.)	Distilled Water (D.W.)
pH	8.2	6.8
Cl(mg/ℓ)	18,630	—
CaCO ₃ (mg/ℓ)	9.1	—
Dissolved Oxygen (mg/ℓ)	8.6	9.2
Specific Resistance (Ω·cm)	25	15,000

육 저속으로 가공하였다.

진동 캐비테이션 침식-부식 손상에 미치는 환경 용액의 영향을 고찰하기 위해 본 실험에 사용된 각 환경 용액의 성분을 분석한 결과를 Table 2에 나타내었다.

2.2 실험장치

본 실험의 진동 캐비테이션 침식-부식 실험장치의 전체 계통도(系統圖)는 Fig. 2와 같으며, 본 실험장치(DH-1400, 대한초음파(주))는 60Hz, 220V의 전력을 받아 전자 회로의 초음파

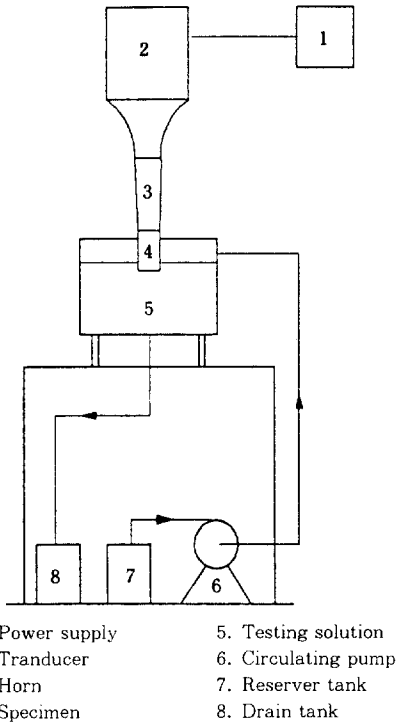


Fig. 2. Schematic diagram of cavitation erosion test apparatus.

발전기를 거쳐 정격 출력을 얻어 진동자에 공급하여 진동을 발생시키는데, 이 때 진동자는 초음파 발전기로부터 전기에너지를 받아 압전소자로서 기계적인 진동 에너지를 발생시킨다. ASTM에 의거 공진 주파수를 20kHz로 하였고, 진폭은 정진폭 자동제어(constant amplitude regulation)방식을 사용해서 24 μ m로 일정하게 유지하였다.

진동 캐비테이션 침식-부식 손상에 미치는 유속의 영향을 고찰하기 위해 Fig. 3에 캐비테이션 발생 부분에 측면 유속을 가하는 방법의 상세도를 나타냈다.

실험 장치에는 제어장치, 진동자, 증폭기 혼(booster horn) 및 자동 정지 타이머 등으로 구성되어 있다. 그리고 환경조(최대 용량 950ml, 시험액량 650ml, 통 깊이 100mm)는 전기화학적 인 부식에 의한 영향을 없애기 위해 아크릴 재

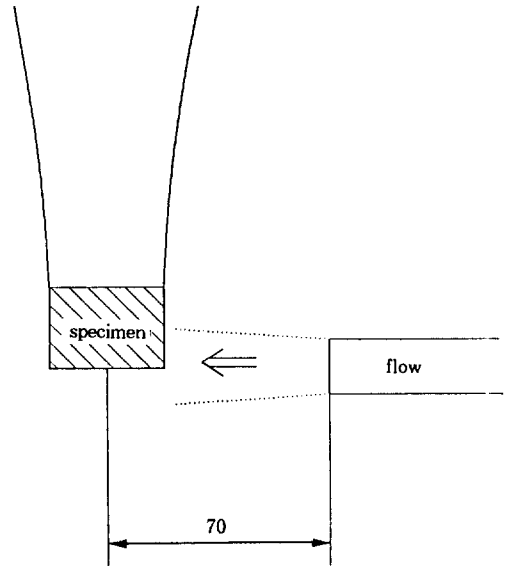


Fig. 3. Schematic diagram of vibratory cavitation erosion-corrosion test with flow(unit:mm).

료를 사용하여 제작하였다.

2.3 실험방법

환경 용액은 Table 2와 같은 천연해수 및 증류수로 하고 수온은 22 \pm 3 $^{\circ}$ C로 유지하였다. 그리고 침식-부식의 생성물에 의한 영향을 감소시키기 위하여 5분마다 환경 용액을 교환하였다.

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 측정하였다.

캐비테이션 침식-부식 손상에 의한 시험편 표면의 손상 면적은 이미지 프로세서(Image Pro II DT-2853, 브이텍)를 이용하여 손상 면적을 측정하였고, 시험편 표면의 손상 부위의 깊이는 금속광학현미경으로서 표면의 손상이 일어나지 않은 부분을 기준으로 해서 손상이 발생한 부분과의 초점차를 이용하여 피트(pit)의 최대 깊이를 측정하였다.

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

3. 결과 및 고찰

3.1 진동 캐비테이션의 발생 양상

Photo. 1는 고속 카메라(Photec IV, 16mm, 로타리 프리즘식, 최대 20,000fps까지 촬영 가능)를 이용하여, 100fps(초당 100장)의 속도로서 촬영한 것이다. Photo. 1㉔의 0ms에서는 초음파가 발생하기 전의 상태로서 시험편의 표면에 가시적인 기포가 붙어 있는 것을 볼 수 있으며 0ms가 지나면서 Photo. 1㉕의 10ms에서는 시험편의 중앙부에서 캐비테이션이 보이기 시작하며 테두리부에서는 중앙부에 비해 적은 양의 캐비테이션이 보이기 시작한다. Photo. 1㉖의 20ms부터는 시험편의 중앙부에서 캐비테이션이 확연히 나타나고 있으며 30ms에서는 중앙부를 중심으로 기포가 모이고 Photo. 1㉗의 40ms부터 Photo. 1㉘의 80ms까지는 캐비테이션 기포군이 완전히 분무 형태를 이룬다. 그리고 Photo. 1㉙의 90ms 이후 부터는 캐비테이션 기포군이 시험편 전반에 완전히 형성되고, 이 기포군이 나팔 모양의 분무형을 이루면서 시험편 표면에 캐비테이션 침식 손상을 일으키는 것으로 생각된다.

Fig. 4는 Photo. 1과 같은 진동 캐비테이션 발생 양상을 압력 P와 시간 t에 대해 추정하여 정리한 것이다.

정압 Po(보통 1기압)를 중심으로 해서 압력의 증감이 발생하고, 곡선 A는 초음파의 출력으로 압력의 진폭이 작은 경우이며, 곡선 B는 출력이 큰 경우로서 큰 과압(過壓)과 부압(負壓)을 일으킨다. 이 부압(負壓)에 의해 액체는 갈라지고 액체 중의 기포 핵이나 용존 산소가 모

이거나 생성 성장을 해서 2에서 기포를 일으킨다. 3에서는 기포가 더욱 발달해서 최대로 되고, 기포가 압축되어 4에서 공동의 소멸 혹은 소 기포가 그대로 남아 있는 상태에서 단일압축(매우 순간적인 현상이므로 근사적으로 단일이라 본다)되어, 5의 고압 고온의 미소 기포로 되어 6에서 기포가 파괴되고 다시 원래의 분자상으로 흩어질 것으로 추정된다. 본 연구에서와 같은 실험 조건에서 C. M. Preece 등은 20kHz, 24 μ m인 진동수 및 진폭일 때의 충격력이 800atm이며 이때 생긴 증기포의 수명은 1/1000초로 보고한 바 있다.⁴⁾

3.2 측면 유속 및 환경 용액 조건에 의한 진동 캐비테이션 침식-부식 손상 억제 거동

Fig. 5는 진동 캐비테이션 기포군에 측면 유속을 가해 유속의 변화 및 Table 2의 환경 용액 조건에 따른 시험편의 무게 감소량(Wt)을 나타낸 것이다.

진동 캐비테이션에 의한 무게 감소량은 증류수 중에서 보다 천연 해수 중에서 많고, 유속이 증가할수록 무게 감소량은 적어진다. 그리고 유속이 빨라질수록 천연해수에서의 무게 감소량의 감소폭은 증류수 보다 더 작게 나타나고 있다. 측면 유속이 빨라질수록 천연 해수에서 무게 감소량이 증류수에 비해 큰 폭으로 줄어드는 이유는 진동 캐비테이션에 의해 발생한 기포군에 측면 유속이 가해져 기포가 제거됨으로써 기포의 붕괴에 따른 충격력의 감소와 캐비테이션 기포 붕괴압에 의해 생성되는 피트들이 감소함으로써 Peterson 등이 주장하는 갈바닉 전지 형성이 어려워져 침식과 부식 간에 상호 가속하는 작용이 큰 폭으로 줄어들기 때문이라 생각된다.⁷⁾

Fig. 6은 유속 및 환경 용액 조건의 변화에 따른 캐비테이션 손상 억제 효과를 좀 더 정량적으로 검토하기 위하여, 각 환경 중에서 유속을 가하지 않았을 때의 무게 감소량을 기준으로 해서 각 유속에서의 무게 감소량을 나눈 값으로

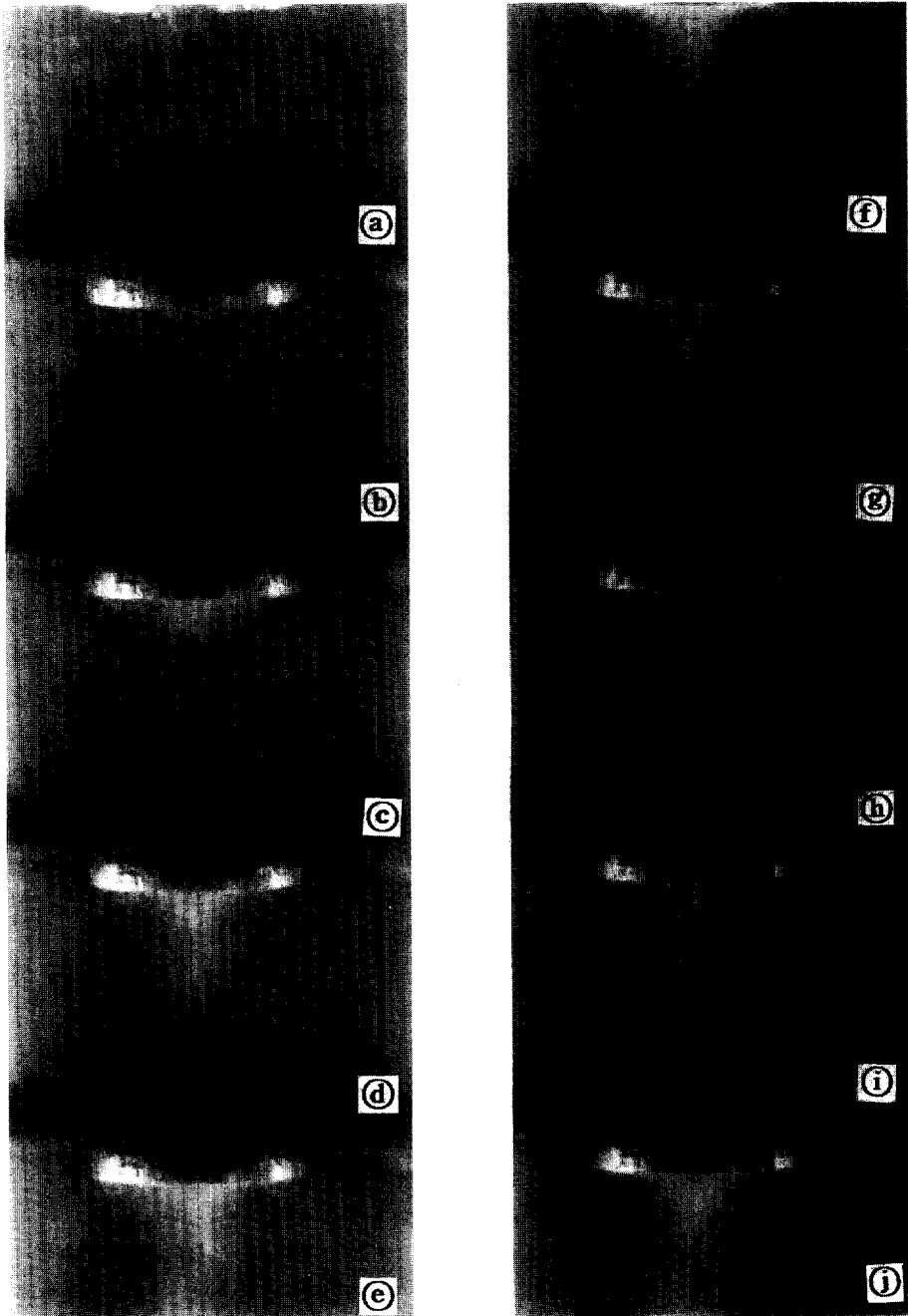


Photo. 1. Appearance of cavitation generation.

억제 효율(Pe)은 다음 식과 같다.

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

Wt_v : 각 유속에서의 무게 감소량(mg)

$Wt_{v=0}$: 유속 $V=0$ 일 때의 무게 감소량(mg)

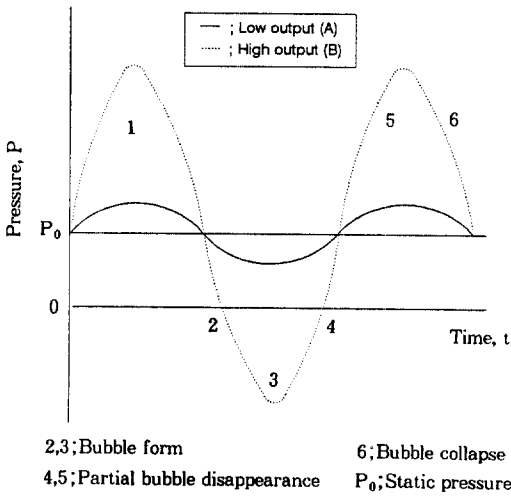


Fig. 4. Process of cavitation generation.

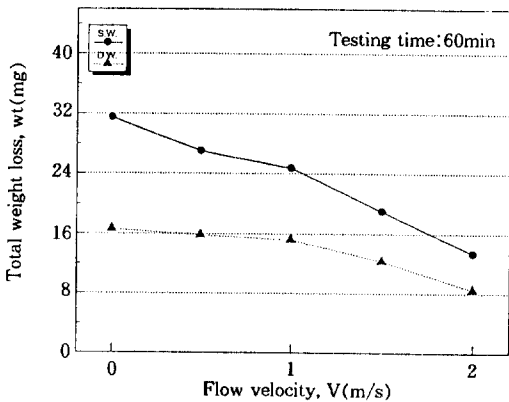


Fig. 5. Total weight loss vs. flow velocity in solutions of sea water and distilled water (S.W.:Sea Water D.W.:Distilled Water).

유속 $V=1.0\text{m/s}$ 에서의 캐비테이션 손상 억제 효율은 천연 해수의 경우는 약 22%이고, 증류수는 약 8%를 보이고 있다. 그러나 유속이 $V=2.0\text{m/s}$ 에서의 캐비테이션 손상 억제 효율은 천연 해수는 약 58%, 증류수는 48%로 크게 억제되고 있음을 보이고 있다. 또 캐비테이션 침식-부식이 발생하는 천연 해수의 경우 캐비테이션 기포 군에 $V=1.0\text{m/s}$ 의 유속을 가해 기포를 제거시킴으로써 침식과 부식의 상호 작용이 급격하게 감소되기 때문에 캐비테이션 침식이 발생하

는 증류수에 비해 억제 효율이 높아진다. 그리고 유속이 더욱 빨라지는 $V=2.0\text{m/s}$ 에서는 $V=1.0\text{m/s}$ 에서와 비교해 유속이 빨라짐으로써 캐비테이션에 의해 발생한 기포가 더 많이 제거되나 시험편 표면에 도달하는 유량이 많아져서 천연 해수의 경우 부식에 의한 손상이 $V=1.0\text{m/s}$ 에서보다 증가되어 억제 효율폭이 증류수에 비해 약간 더 떨어지는 것으로 생각된다. 따라서 증류수 중에서 유속이 증가함에 따라 진동 캐비테이션 손상 억제 효과가 더 있는 것으로 추정된다.

Photo. 2는 캐비테이션에 의한 침식-부식의 상승효과(synergistic effect)의 영향이 크게 되는 천연 해수 중에서 시험을 한 후 광학현미경으로 시험편 표면을 관찰한 것이다. 시험시간 10분 후에 유속이 $V=0\text{m/s}$ 인 경우, 캐비테이션 침식-부식 상승효과에 의한 소성변형과 균열양상이 심하게 나타나지만 $V=2.0\text{m/s}$ 에서는 이러한 상승효과가 둔화된다. 그리고 시험시간 30분 후에는 유속이 $V=0\text{m/s}$ 인 경우 캐비테이션 침식-부식의 상승효과에 의한 극심한 탈리 현상이 관찰되고 있으나 $V=2.0\text{m/s}$ 에서는 침식-부식 상승효과가 둔화되어 탈리 현상은 $V=0\text{m/s}$ 에서의 시험시간 10분에서 보다는 좀 더 나타나는 것으로 추정된다.⁸⁾

3.3 유속에 의한 잠복기 지연 특성

Photo. 3은 $V=0\text{m/s}$, $V=2.0\text{m/s}$ 의 증류수에서 시험편 표면 중의 한 부분을 지정하여 시험시간 5분 마다 400 배율의 광학현미경으로 촬영해서 연강의 내 침식성의 기준으로 볼 수 있는 잠복기를 관찰한 것이다.

Photo. 3의 $V=0\text{m/s}$ 인 증류수에서는 시험시작 15분이 지나면서 시험편 표면에 소성변형(plastic deformation)이 일어나 뚜렷한 파문(ripple, 波紋) 형상을 나타내며 파문의 폭은 약 $2-6\mu\text{m}$ 이고 피트의 직경은 약 $2-5\mu\text{m}$ 이다. 그리고 파문의 끝이 집중되는 곳과 파문의 테두리부를 중심으로 검은색을 약간 띠면서 가공경화의 초


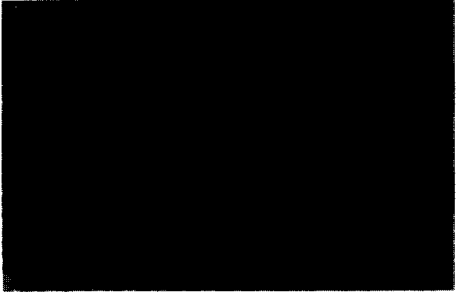

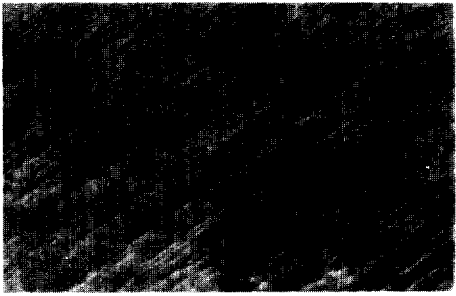
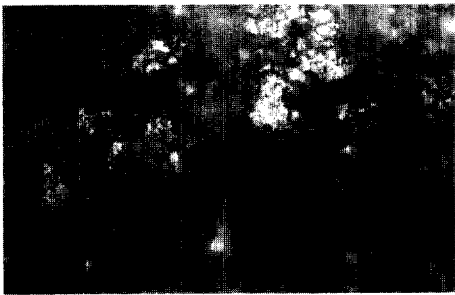
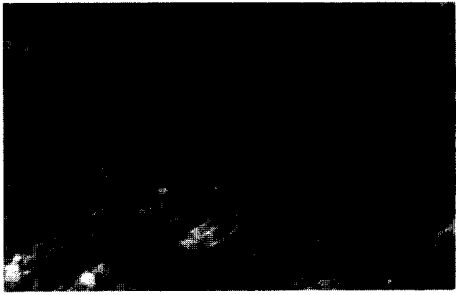
T=0		
T=10		
T=30		
T (min) V (m/s)	24 μm	(V=0) Sea water (V=2.0)

Photo. 2. Optical micrographs of the cavitation erosion damage with various flow velocities.

기 상태를 나타내며 잠복기 단계로 추정된다. 시험시간 20분이 지나면서 소성변형 파문들의 형태, 파문의 길이 그리고 파문의 수는 변하지 않으며 파문①, ② 및 ③와 같이 소성변형 파문

(plastic deformation ripple)의 태두리부에서 가공경화 현상이 두드러지고, 파문의 폭이 가는 부분에 기포 붕괴압이 집중되어 이곳을 중심으로 파문의 폭이 급격히 줄어들어 탈리가 발생하

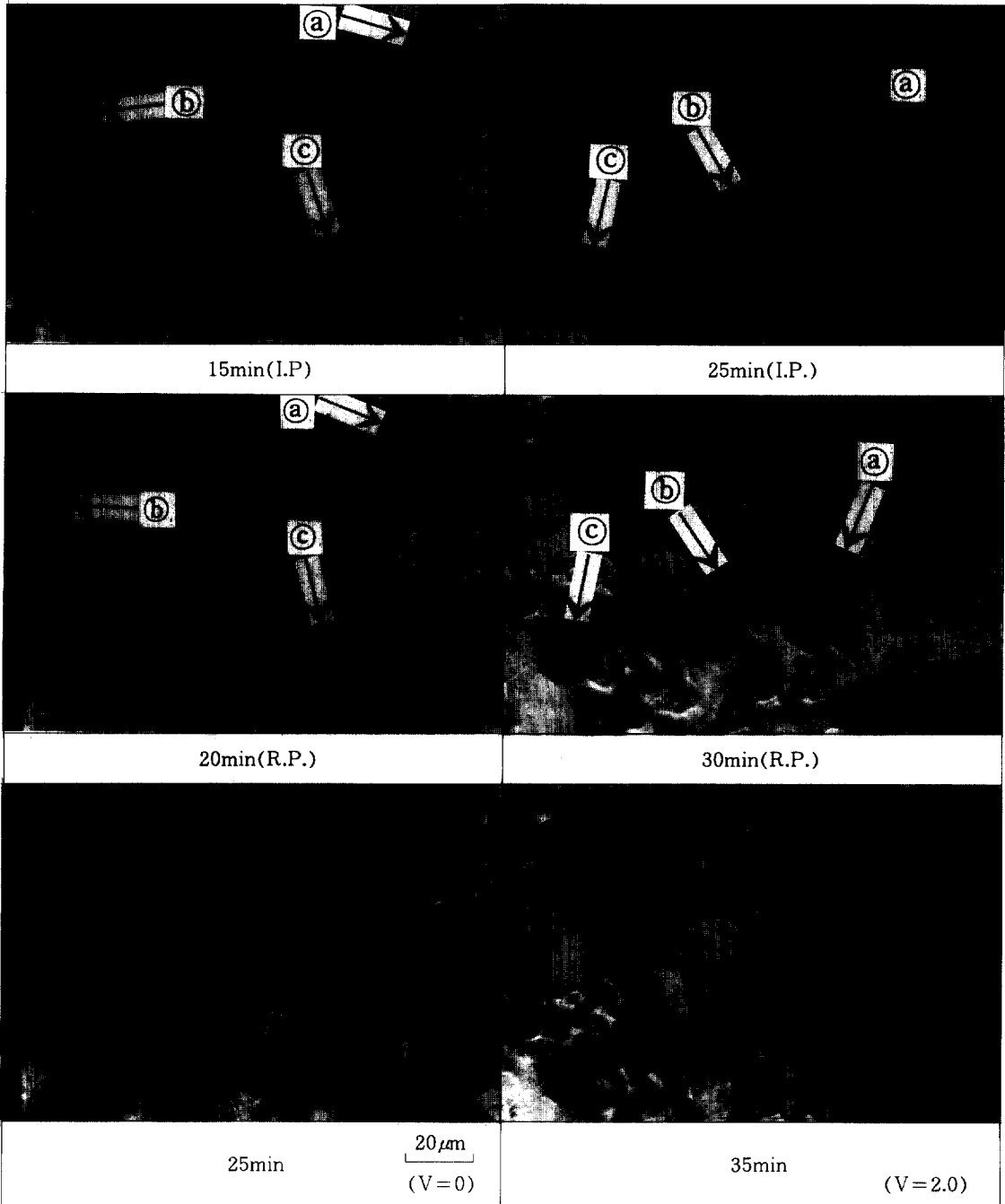


Photo. 3. Optical micrographs showing incubation period in distilled water(I.P.:Incubation Period, R.P.:Removal Period).

고 또한 파문들의 끝이 집중되는 곳을 중심으로 탈리가 발생하여 탈리기가 시작되면서 진동 캐

비테이션 침식에 의한 손상이 일어나는 것으로 생각된다.

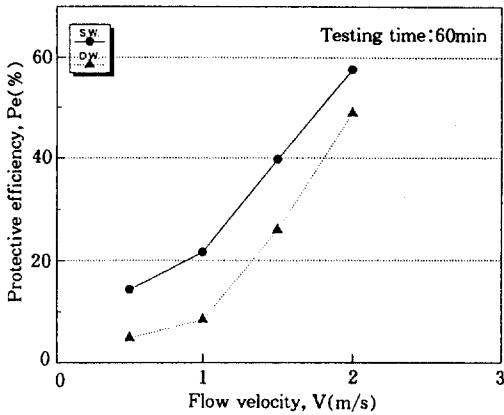


Fig. 6. Protective efficiency vs. flow velocity in solutions of sea water and distilled water.

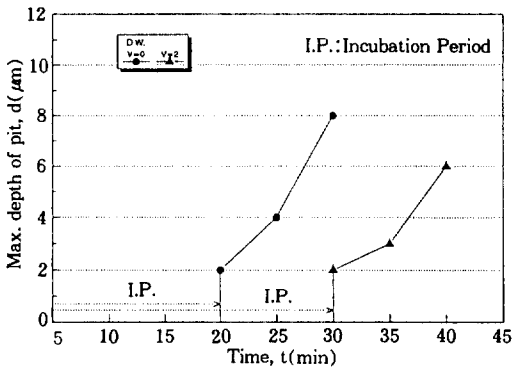


Fig. 7. Relationship between max. depth of the pit and testing time in distilled water.

그리고 Photo. 3은 $V=2.0\text{m/s}$ 인 증류수에서의 시험편 표면 사진으로 시험시간 25분이 지나면서 시험편 표면에 소성변형 파문이 형성되고 파문의 폭 약 $2\text{-}5\mu\text{m}$, 피트들의 직경 약 $2\text{-}6\mu\text{m}$ 로서 잠복기 단계이다. 30분이 지나면서 $V=0\text{m/s}$ 에서와 같이 파문㉓의 단독 피트(isolated pit)들과 가공 경화부가 합쳐지는 곳, 파문㉔와 같이 소성변형 파문 테두리의 가공 경화부가 여러개 마주치는 곳을 중심으로 국부적인 탈리가 시작되면서 잠복기는 끝나고 탈리기에 들어간다. 이러한 현상은 측면 유속을 가함으로써 시험편 표면에 발생한 캐비테이션 기포군이 제거되어 기포

의 붕괴에 따른 충격압이 줄어들어, 시험편 표면 전반의 파문의 폭과 길이가 감소하여 잠복기가 지연된다고 생각된다.

캐비테이션 침식 손상은 검은 색을 띤 소성변형 파문의 가공경화부가 여러개 마주치는 곳, 파문의 폭이 가는 부분 그리고 여러개의 단독 피트(isolated pit)들과 파문의 가공경화부가 합쳐지는 곳을 중심으로 국부적인 탈리가 시작되면서 잠복기가 끝나고 탈리기에 들어간다. 이러한 결과들을 정리하면 캐비테이션 침식 손상은 소성변형기(plastic deformation period), 가공경화기(work hardening period), 탈리기(removal period)의 세 과정을 거쳐서 발생함을 알 수 있다.⁹⁾

Fig. 7은 증류수 중에서 연강의 내 침식성 기준으로 볼 수 있는 잠복기(incubation period)를 시험 시간과 침식 깊이를 비교해서 나타낸 것으로 피트(pit)의 깊이는 광학현미경의 초점차를 이용해서 측정했다.

측면 유속 $V=2.0\text{m/s}$ 을 가한 경우 $V=0\text{m/s}$ 에 비해 증류수에서는 잠복기가 20분에서 30분으로 약 10분간 더 지연되었고, 시간이 경과하면서 침식의 깊이가 더 깊어지는 거동을 보이며, 이 거동은 Photo. 3과 잘 일치되고 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

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

1) 진동 캐비테이션은 시험편의 중앙부에서 발생하기 시작하여 중심으로 기포가 모여 분무형을 이룬 후, 기포군이 시험편 표면 전반에 형성된다.

2) 진동 캐비테이션 손상에서 유속 증가에 의한 손상 억제 효율은 천연해수가 증류수에서 보다 높지만, 손상 억제 효율의 증가폭은 증류수

증에서 더 크게 된다.

3) 유속이 빠를수록 소성변형 파문의 길이가 짧고, 파문 폭이 좁아지면서 캐비테이션 침식 하에서의 잠복기는 지연된다.

5. 참 고 문 헌

1. 松村倉信,岡 良則, 防食技術 31, 67-72 (1982).
2. 千葉 近, 超音波 噴霧, 山海堂 (1990).
3. Tretheway, K. R. and Chamberlain, J., Corrosion(for students of science and engineering), Longman Scientific & Technical, 153-156 (1988).
4. Talks, M. G. and Moreton,G., Proc. ASME Symp. Cavitation Erosion Fluid System, 139 (1981).
5. 腐蝕防食協會, エロ-ジョン コロ-ジョン分科會: エロ-ジョン コロ-ジョンの 實態, 腐食防食協會, 110 (1989).
6. 松村昌信 外 2名, 材料と 環境, 40, 814-820 (1991).
7. T. McGuinness and A. Thriuvengadam, ASTM STP 567, 30 - 55 (1974).
8. R. J. K. Wood & S. A. Fry, J. Fluids Eng., 111, 271-277(1989).
9. K. Steller and T. Krzysztowic, ASTM STP 567, 152-170 (1973).
10. G. C. Gould, ASTM, 182 - 211 (1970).
11. S. G. Young and J. R. Johnston, ASTM, 67-108 (1970).
12. 加藤洋治, キャピテ-ション, 積書店, (1979).
13. 渡邊 豊, 高橋秀明, 日本防食技術 37(2), 69-74 (1988).
14. 임우조, 황재호, 한국어업기술학회지, 31(4), 413-422 (1995).