

연강의 캐비테이션 浸蝕 - 腐蝕 特性에 관한 연구(2)

- 진동 캐비테이션 침식 - 부식 손상 거동 -

황 재 호 · 임 우 조

부경대학교

(1996년 7월 25일 접수)

Study on the Characteristics of Cavitation Erosion - Corrosion for Mild Steel(2)

- Damage Behaviour of Vibration Cavitation Erosion - Corrosion -

Jae - Ho Hwang and Uh - Joh Lim

Pukyong National University

(Received July 25, 1996)

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

This study was tested by using the piezoelectric vibrator with 20kHz, 24μm for cavitation generation. And also, the vibratory cavitation erosion - corrosion tests on commercial mild steel SS41 were carried out.

We carefully observed the erosion pattern and surface photography. The geometrical mechanism of pit growth, which is to be likely these processing ; shallow type → undercut type → wide shallow type.

1. 序 論

유체 기계나 장치가 소형화, 고속 및 고출력화 되어감에 따라 유체를 사용하는 기계 장치 등에 유속 및 회전속도가 상승하는 경향이 나타나고 있다. 이러한 경향에 따라 기계 장치의 부재에는 유체 충격과 정압의 저하에 따른 국부적 비등으로 인한 캐

비테이션 침식이 발생할 수 있으며, 또한 액체 중에서 기계 부재에 고주파 진동이 발생하면 그 진동이 작아도 극심한 캐비테이션 침식을 유발하여 기계 장치 수명에 치명적인 영향을 미친다.

캐비테이션에 의한 표면 손상의 특징은 기포 붕괴 시에 발생하는 충격력이 매우 짧은 시간에 미소 면적에 반복 작용하여 표면 손상이 일어나는 것으

로 보통의 충격 파괴나 피로 파괴와는 달리 대단히 국소적으로 발생한다. 또한 기포가 붕괴할 때에 생기는 충격력은 침식을 일으킬 만큼의 커다란 에너지를 가지는 것도 있으며 이에 미치지 못하는 충격력도 있다. 이러한 에너지가 무작위로 반복해서 작용하므로 금속 재료의 캐비테이션 침식을 일으킨다.^{1)~4)}

선박 디젤 기관이나 철도 기관차 운전시 진동에 의한 실린더 라이너의 냉각수 측에 캐비테이션이 발생하여 공식(Pitting) 형태의 침식이 발생한다. 그리고 자동차용 가솔린 엔진에서는 고속 주행시에 냉각 순환수 펌프의 임펠러와 라지아터 등에 캐비테이션이 발생한다. 이러한 캐비테이션 손상이 발견된 이후 현재까지 각종 재료 표면의 캐비테이션 침식에 대한 다수의 연구가 행하여져 왔으나 종래의 연구들에서는 유체 역학적 현상에 대해서 주로 수행하여 졌으며 증류수 및 천연해수 중에서의 진동 캐비테이션 침식-부식 손상 기구 대한 연구 보고는 거의 찾아 볼 수 없다.^{5)~10)}

따라서 본 연구에서는 진동 캐비테이션 발생 양상을 연구하고 각종 환경 조건 하에서 연강(SS41)의 캐비테이션 침식-부식 실험을 실시하여 시험편의 손상 입자 크기, 피트(pit)의 배열 형태와 크기 그리고 피트의 기하학적 구조를 관찰·조사하였다. 이러한 실험 결과를 토대로 하여 캐비테이션 침식-부식 특성을 구명(究明)함으로써 캐비테이션 침식-부식 방지를 위한 기초설계 자료로 활용하는데 기여하고자 한다.

2. 시험편 및 실험장치

2-1 시험재료 및 시험편

본 실험에 사용된 시험편 재료는 연강인 일반 구조용탄소강재(SS41)로 그 화학적 성분과 기계적 특성은 Table 1 과 같다.

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

이와 같은 화학적 성분과 기계적 특성을 가진 시험 재료로부터 절취하여 제작 가공한 진동 캐비테이션 침식-부식 시험편의 형상은 전보(前報)와 같다.¹¹⁾

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 저속으로 가공하였다.

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 24μm로 일정히 유지하였

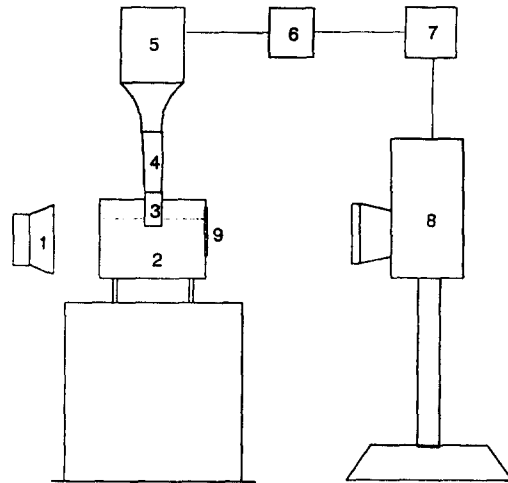


Fig. 1 Schematic diagram of observation apparatus for vibratory cavitation generation appearance

- 1. Tungsten light
- 2. Testing solution
- 3. Specimen
- 4. Horn
- 5. Tranducer
- 6. Power supply
- 7. Synchro-controller
- 8. High speed camera
- 9. Observation window

다.^{11),12)}

Fig. 1는 진동 캐비테이션 관측 방법의 개략도를 나타냈다.

여기서 진동 캐비테이션 발생 양상 관찰용으로 사용된 카메라는 고속 카메라(Photec IV, 16mm)로써 로타리 프리즘식이며 최대 20,000fps까지 촬영 가능한 것이다. 그리고 캐비테이션 발생 부분을 명확하게 관찰하기 위해 텅스텐 플래쉬(500W)로써 조광(照光)하고, 캐비테이션이 발생하기 시작하는 순간부터 연속적으로 촬영하기 위하여 동기 장치(Synchro-controller)를 사용하였다.

2-3 실험방법

환경 용액은 천연 해수와 증류수로 하고 수온은 $22 \pm 3^\circ\text{C}$ 로 유지하였다. 그리고 침식-부식의 생성물에 의한 영향을 감소시키기 위하여 10분마다 환경 용액을 교환하였다.

또 시험편 표면의 캐비테이션 침식에 의한 피트(pit)의 성장 거동을 관찰하기 위해 시험편을 캐비테이션 침식-부식 시험 시작 후 30분마다 실험 장치의 혼(horn)에서 해체하여 아세톤으로 세척한 후 건조시켜서 표면 사진을 촬영하였다. 그리고 캐비테이션 침식-부식에 의해 발생한 침식 손상 입자는 환경 용액을 교환할 때 자석을 이용해서 수거하여 광학 현미경으로서 크기를 관찰했다.

침식에 의한 시험편 표면의 손상 면적은 이미지 프로세서(Image Pro II DT-2853, 브이텍(주))를 이용하여 측정하였고, 시험편 표면의 손상 부위의 깊이는 침봉 다이얼 게이지(Needle dial gauge, 1/1000mm)으로서 표면의 손상이 일어나지 않은 부분을 기준으로 해서 손상이 발생한 부분과의 차를 이용하여 피트(pit)의 최대 깊이를 측정하였다.

3. 結果 및 考察

3-1 진동 캐비테이션의 발생 양상

Photo. 1는 고속 카메라를 이용하여, 진동 캐비테이션 발생 양상을 100fps(초당 100컴마)의 속도로써 촬영한 것을 나타냈다.

Photo. 1는 진동 캐비테이션 장치에서 캐비테이

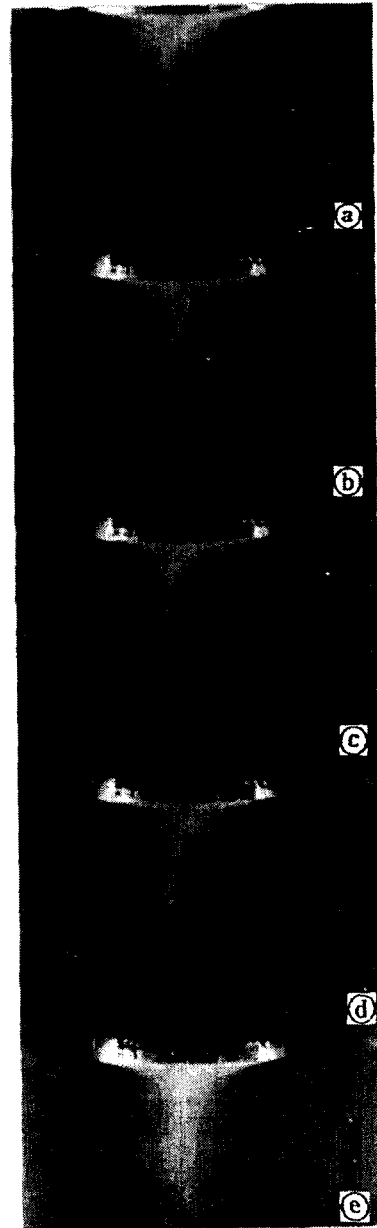


Photo. 1 Appearance of cavitation generation

션이 발생된 후 24/100 초에서의 기포 발생 양상으로서 시험편의 테두리부와 중앙부에서 발생한 캐비테이션 기포들이 중앙부를 중심으로 모이고 있으며 나팔 모양의 분무 형상을 하고 있다. 이후 시험시간이 경과하면서 더 많은 캐비테이션 기포가 중앙부로 모여 시험시간 27/100초가 경과한

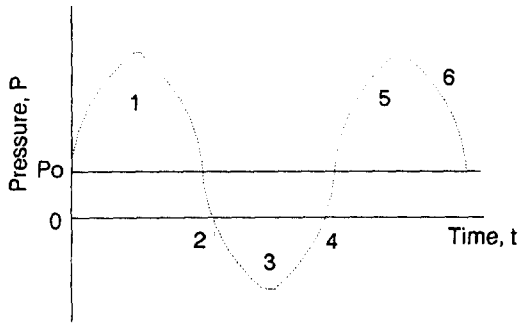


Fig 2 Process of cavitation generation
 2,3 ; Bubble form
 4,5 ; Partial bubble disappearance
 6 ; Bubble collapse
 Po ; Static pressure

Photo. 1 ㉔에서는 원기둥 모양의 분무 형상을 갖 추고 있으며, 이 과정에서 기포의 생성과 파괴가 반복해서 발생하여 시험편 표면에 캐비테이션 침식 손상을 일으키는 것으로 추정 된다.

Fig. 2는 Photo. 1과 같은 진동 캐비테이션 발생 양상을 압력 P와 시간 t에 대해 추정하여 정리한 것이다.

초음파 출력이 큰 경우에는 큰 과압(過壓)과 부압(負壓)을 일으킨다. 부압 발생의 원인은 시험편이 고속으로 진동을 할 때 액체는 자신의 관성에 의해 빠른 속도로 진동하는 시험편과 일체로 움직이지 못하므로 시험편과 액체 사이의 계면에 순간적으로 공간이 형성되며, 이 공간의 압력이 순간적으로 대기압 이하로 떨어지기 때문이라 생각된다. 여기서 액체 중의 기포 핵이나 용존 산소가 모이거나 생성·성장을 해서 2에서 기포를 일으킨다. 3에서는 기포가 더욱 발달해서 최대로 되고, 기포가 압축되어 4에서 공동의 소멸 혹은 소 기포가 그대로 남아 있는 상태에서 단열압축(매우 순간적인 현상이므로 근사적으로 단열이라 본다)되어, 5의 고압 고온의 미소 기포로 되어 6에서 기포가 파괴되고 다시 원래의 분자상으로 흩어질 것으로 추정된다.²⁾

3-2 부식 환경에 따른 손상 입자 양상

Photo. 2은 천연해수와 증류수 중에서 캐비테이션 침식-부식 시험을 실시 하여 시험 시간 30분

과 600분에서의 시험편 표면 상태와 600분간 시험한 후 시험 용액 중에 떨어져 나간 손상 입자(Damaged particles)들을 자석으로 회수하여 그 형상을 관찰한 것이다.

Photo. 2(a)-1은 천연해수 중에서 30분간 시험한 시험편의 표면을 배율 400배로 촬영한 것으로 소성 변형과 가공경화 현상이 심하게 일어나지 않은 상태에서 부식과 침식이 동시에 작용해서 손상이 발생한다. 그리고 Photo. 2(a)-2는 증류수 중에서 30분간 시험한 시험편의 표면을 나타낸 것으로 소성 변형과 가공경화 현상이 심하게 발생하며 가공경화부를 중심으로 손상이 발생하기 시작한다.

Photo. 2(a)-3, (a)-4는 천연해수와 증류수 중에서 시험시간 600분이 지난 후 시험편 표면의 상태를 나타낸 것이다. 그리고 Photo. 2(b)-1, (b)-2는 시험시간 600분에서 천연해수와 증류수 중에 떨어져 나간 손상 입자를 나타낸 것으로 천연해수의 경우는 입자의 크기 약 2-50 μ m로 크기의 차가 크며, 증류수의 경우 크기가 약 5-18 μ m 정도로 천연해수에 비하여 비교적 균일한 크기로 나타났다.

천연해수에서의 손상 입자 크기의 차가 크게 나타나는 것은 강전해질인 천연해수에서 생성된 산화물 피막이 기포 붕괴압에 의해 떨어져 나가 큰 입자가 되며, 산화물 피막 입자에서 떨어져 나간 입자 조각이 매우 작은 크기의 입자로 나타나기 때문인 것으로 사료된다. 그리고 증류수의 경우는 소성 변형과 가공 경화 과정을 거쳐 순수 침식이 일어나므로 비교적 균일한 크기의 입자가 발생되는 것으로 사료된다.

3-3 캐비테이션 침식 피트의 밀도와 직경 변화 거동

Fig. 3은 시험시간의 경과에 따른 시험편 표면 중앙부에서의 캐비테이션 침식 피트(pit)의 밀도(10mm² 당 침식 손상 피트의 갯수)를 나타낸 것이다.

천연해수에 있어서 캐비테이션 침식 피트 밀도는 시험시간이 경과함에 따라 증가하다가 시험시간이 390분이 되면서 감소하기 시작하며, 이후 계

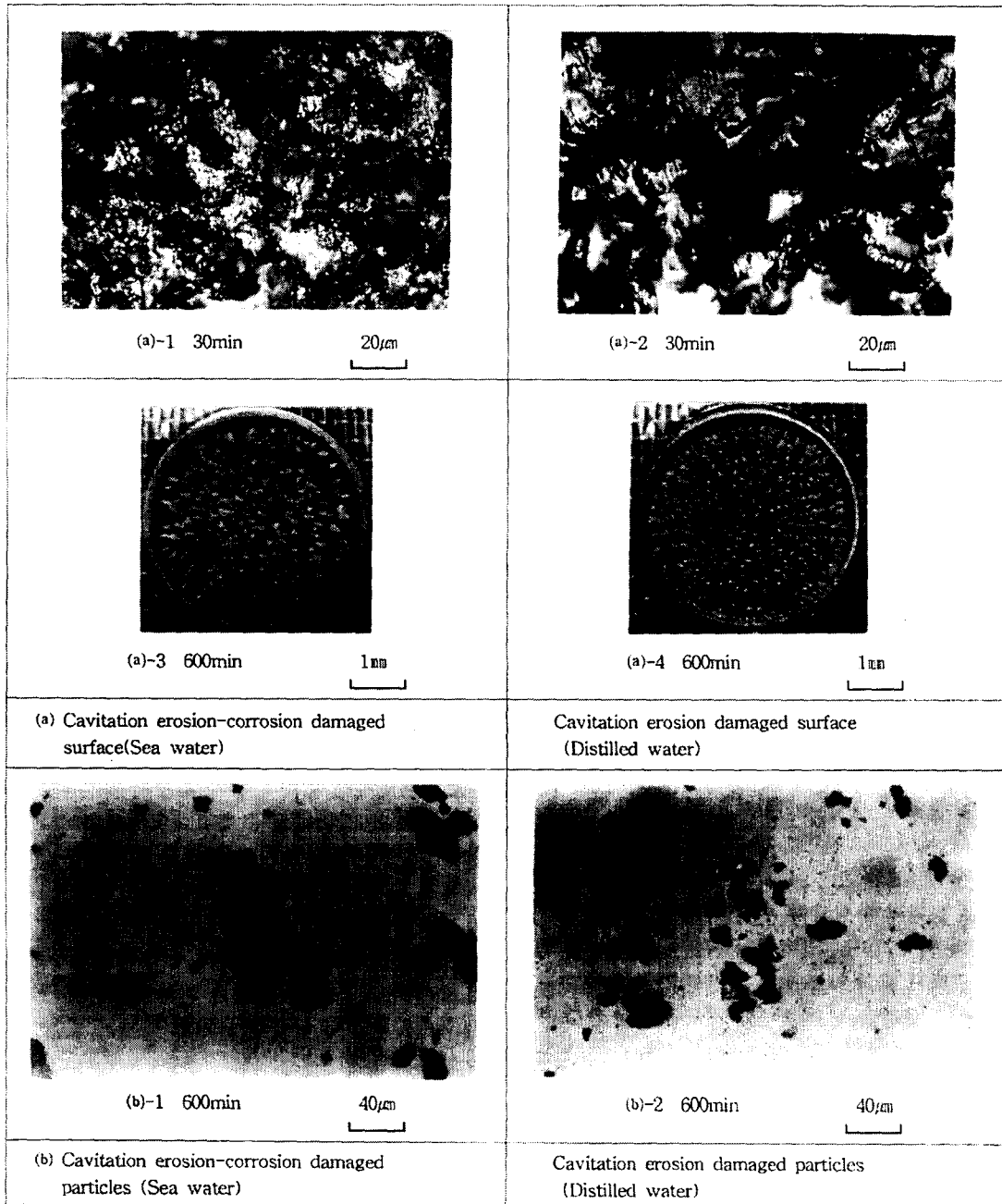


Photo. 2 Appearance of cavitation erosion - corrosion damaged surface and particles

속적으로 감소하는 경향을 보인다. 한편 증류수의 경우도 시험시간의 경과와 함께 피트의 밀도가 증가하다가 시험시간이 480분이 되면서 피트의 갯수가 줄어들어 밀도가 감소하며 이후 계속적으로

감소하는 경향을 보인다. 또한 캐비테이션 침식 - 부식에 의한 피트 밀도의 감소폭은 천연해수가 증류수보다 더 큰 폭으로 나타나고 있다.

캐비테이션 침식에 의해 생성된 피트의 밀도가

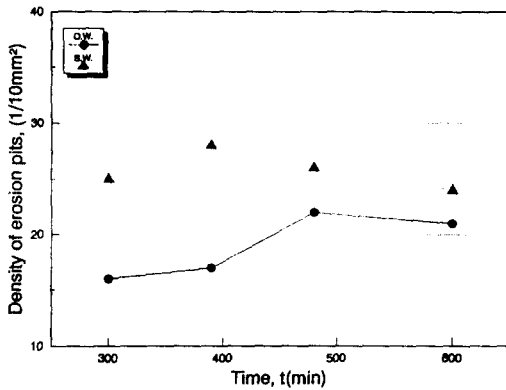


Fig. 3 Relationship between density of the pits and testing time in each solutions

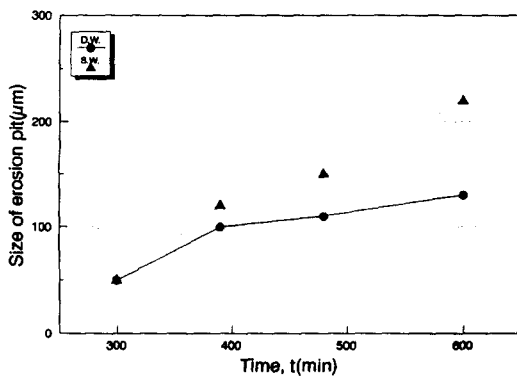


Fig. 4 Relationship between size of the pit and testing time in each solutions

증류수에서 보다 천연해수에서 더 빠른 시간에 감소하기 시작하는 것은 시험 초기의 피트 밀도가 천연해수에서 훨씬 높기 때문이다. 그리고 모든 환경 중에서 어느 일정한 시험시간에서 피트의 밀도가 감소하기 시작하는 것은 시험편 표면에 발생된 피트의 갯수가 시험시간의 경과와 함께 계속 증가하다가 일정한 시간이 지나면 피트 밀도의 증가가 멈추며, 이후 시험시간이 더 경과하면 서로 인접한 피트들끼리 합쳐져 피트의 갯수가 줄어들기 때문이라 생각된다.

Fig. 4는 천연해수와 증류수 중에서 시험시간 300분이 경과한 후에 시험편 표면의 중앙부에 발생한 피트들 중에서 직경이 50µm인 특정한 한 피트를 지정하여 시험시간 경과에 따른 직경의 변화를 나타냈다.

천연해수에서는 시험시간의 경과와 함께 직경은 계속 증가하고 시험시간 600분에서는 직경이 약 4.4배까지 성장하며, 증류수의 경우 초기 직경의 약 2.6배까지 성장한다. 시험시간 600분 후의 천연해수에서의 피트 직경이 증류수에서 보다 약 1.6배 더 크게 나타났다.

Fig. 3과 Fig. 4를 비교한 결과, 시험시간의 경과에 따른 피트 밀도와 피트 직경의 증가폭이 증류수에 비해 천연해수에서 더 큰 폭으로 나타남으로써 천연해수에서의 손상량이 증류수에서 보다 더 많은 것으로 사료된다.

3-4 캐비테이션 침식 피트의 기하학적 성장 기구 및 배열 형태

Photo. 3는 천연해수 중에서 캐비테이션 침식-부식 작용에 의해 발생한 피트(pit)의 기하학적 성장 기구(Geometrical growth mechanism) 및 피트의 배열 형태를 나타낸 것이다.

Photo. 3(a)는 시험시간이 120분이 지나면서 시험편의 중앙부에 발생한 특정 피트 ①은 얇은형(Shallow type)을 보이며, 시험편 표면의 중앙부를 중심으로 점 배열(Point Arrangement) 형태로 피트들이 발생하고 있다.

Photo. 3(b)는 시험시간이 360분이 지나면서 시험편의 중앙부의 피트 ①은 언더컷형(Undercut type)으로 성장하고, 피트의 발생 형태는 시험편의 중앙부에서는 점 배열 형태를 유지하며, 시험편의 테두리부에서는 선 배열(Strip Arrangement) 형태를 이루면서 얇은 고랑 형상을 나타내고 있다.

Photo. 3(c)의 시험시간 480분에서는 인접한 피트가 성장하면서 피트 ①의 언더컷 부분이 약간 떨어져 나가지만 여전히 Photo. 3(b)에서와 같이 언더컷 형으로 계속 성장한다. 그리고 피트의 배열은 Photo. 3(b)에서와 같은 형태를 나타내고 있다.

Photo. 3(d)의 시험시간 600분에서는 인접한 작은 피트가 계속 성장하고, 피트 ①의 언더컷 부분이 기포 붕괴압에 의해 떨어져 나가므로써 인접한 작은 피트와 피트 ①이 합쳐져서 하나의 커다란 피트인 넓고얇은형(Wide shallow type)의 피트로 되어 시험편 표면의 손상이 증가한다. 그리고 시험시간 480분까지 점 배열 형태를 나타내던 중앙부에

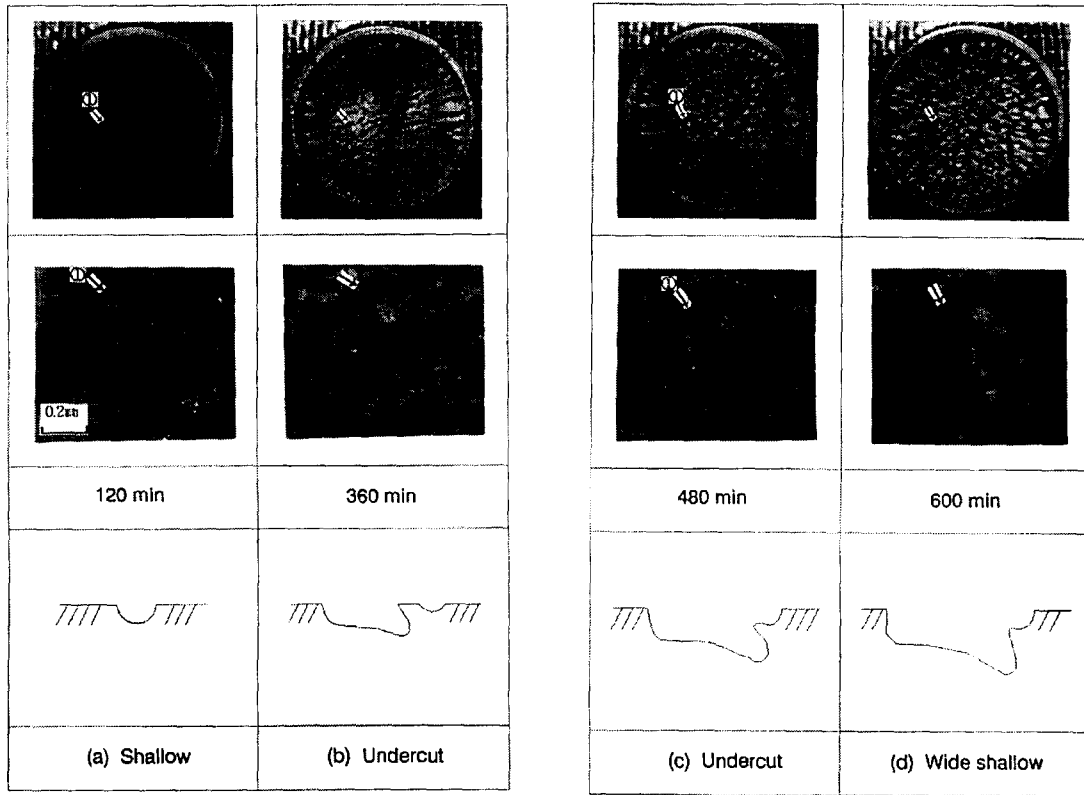


Photo. 3 Pit growth mechanism by cavitation erosion - corrosion in sea water

서의 피트 배열이 각 피트들의 성장으로 인접한 피트들 끼리 합쳐지면서 반점 배열(Total one arrangement)를 나타내며 테두리 부에서의 배열 형태는 계속적으로 선 배열 형태를 나타내고 있다.¹³⁾

피트의 성장 기구는 얇은형 → 언더컷형 → 넓고 얇은형의 과정을 나타내는데 이 과정 중에서 언더컷형 피트의 발생 원인은 기포 붕괴압에 의해 시험 초기에 발생된 얇은형의 피트가 시험시간이 경과함에 따라 피트의 깊이가 점점 깊어지며, 이 때 피트의 최저부에 들어간 기포들에는 Fig. 4의 6단계(정압 이상의 압력이 작용하여 기포의 붕괴가 일어나는 과정)에서 정압 이상의 압력이 미치지 않아 기포가 파괴되지 않고 그대로 남아 있게 된다. 그리고 정압 이상의 압력 미치는 범위에 있던 피트 중 상위부의 기포들은 붕괴하게 되며, 이 때 피트 최저부에 남아 있던 기포들은 중상위부에 있던 기포가 붕괴할 때 발생하는 충격압을 완충하는 역할

을 하여 피트 최저면의 손상은 일어나지 않으며, 피트의 측면 손상을 일으켜 언더컷형의 피트가 발생하게 되는 것으로 사료된다.

그리고 시험편 표면 테두리부에서의 피트 배열 형태가 선 배열로 나타나는 것은 Photo. 3의 캐비테이션 발생 과정에서 볼 수 있듯이 시험 초기에 캐비테이션 기포가 시험편의 테두리부와 중앙부에서 동시에 발생한다. 그리고 시험 시간이 지나면서 테두리부의 기포가 중앙부로 모이고 시험시간 약 27/100초 이후 부터는 원기둥 모양의 분무 형상을 이루며, 이러한 캐비테이션 분무를 계속 유지하면서 캐비테이션 침식 - 부식 손상을 일으키는 것으로 사료된다. 이 과정 중에서 테두리부에서 발생된 기포가 반경 방향으로 이동되면서 붕괴되어 선 배열 형태의 피트 배열이 나타나는 것으로 추정된다.

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) 캐비테이션 침식 - 부식 손상 거동에서 시험편 표면의 피트(pit) 밀도는 증류수 보다 천연해수에서 더 높으며, 피트의 크기도 증류수 보다 천연해수에서 더 크게 나타난다.

2) 피트는 얇은형(Shallow type) → 언더컷형(Undercut type) → 넓고얇은형(Wide Shallow type)의 성장 과정을 나타낸다.

3) 캐비테이션 침식 - 부식 피트의 배열 형태는 시험편 표면의 중앙부에서는 점 배열(Point arrangement) 형태, 테두리부에서는 선 배열(Strip arrangement) 형태를 나타낸다.

參考文獻

- 1) Talks, M. G. and Moreton, G.(1981) : Proc. ASME Symp. Cavitation Erosion Fluid System, 139.
- 2) 松村昌信, 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.
- 3) 千葉 近(1990) : 超音波 噴霧, 山海堂.
- 4) 松村昌信 外 2名(1991) : 工業用純鐵のキャビテーションエロージョンに及ぼすインヒビターの影響,

- 材料と環境, 40, 814 - 820.
- 5) Tretheway, K. R. and Chamberlain, J.(1988) : Corrosion (for students of science and engineering), Longman Scientific & Technical, 153 - 156.
- 6) Talks, M. G. and Moreton, G.(1981) : Proc. ASME Symp. Cavitation Erosion Fluid System, 139.
- 7) Ailor, W. H.(1980) : Engine Coolants Testing, State of the Art, ASTM STP 705, 81 - 101.
- 8) G. C. Gould (1970) : Some Observations on Erosion by Cavitation and Impingment, ASTM, 182 - 211.
- 9) Young, S. G. and Johnston, J. R.(1970) : Effect of Temperature and Pressure on Cavitation Damage in Sodium, ASTM, 67 - 108.
- 10) 加藤洋治(1979) : キャビテーション, 日本振書店, 1.
- 11) 임우조, 황재호(1995) : 연강의 캐비테이션 침식 - 부식 특성에 관한 연구(1), 한국어업기술학회지, 31(4), 413 - 422.
- 12) Annual Book of ASTM Standards (1986) : 03.02 Wear and Erosion ; Metal Corrosion, G32 - 85, 188 - 195.
- 13) K. Steller and T. Krzysztowic (1973) : Effect of Cavitation on Material in Field and Laboratory Conditions, ASTM STP, 567, 152 - 170.
- 14) 坂本晃大 外 2名(1994) : 金屬材料に生ずるキャビテーション損傷の指標, 材料と環境, 43, 76 - 81.