

복합재료를 이용한 유동유체 환경하의 각종 구조물의 캐비테이션 침식손상의 최소화 방안

이정주* · 김찬공** · 김용직*** · 김윤해****

(Minimizing of Cavitation-Erosion Damage for Various Structures using Composites under the various Condition of Fluid Flow Systems)

Jung-Ju Lee, Chang-Kong Kim, Yong-Zig Kim and Yun-Hae Kim

Key Words: Cavitation-Erosion(캐비테이션 침식), MDP(평균침식율), Supersonic Vibrator(초음파 발생기), Fluid Flow System(유체 유동시스템), Composite Materials(복합재료), Cavitation(캐비테이션), Volume Loss(체적손실)

Abstract

This study is mainly concerned with phenomenon of cavitation-erosion on the several materials and corrosive liquids which were applied with vibrator (suggested by ASTM G-32, 20KHZ, 24 μ m). The main results obtained are summarized as follows ;

- (1) The maximum erosion rate by cavitation erosion in both of fresh-water and sea-water appeared to be proportioned to their hardness and tensile strength.
- (2) Cavitation weight loss and rate of cast iron in sea-water condition were greater (approximately 3 times) than that in distilled-water condition, however in case of stainless and brass the cavitation weight loss and their rates were not so different in both of their conditions.
- (3) Cavitation weight loss of composite materials were shown as below on this test, DuraTough DL : Weight loss in sea-water condition were greater (approximately 2.3 times) than it's fresh-water condition.
- (4) As the result of observation with digital camera of specimens, the main tendency of cavitation erosion for metals, was that small damaged holes causing by cavitation erosion was appeared with radial pattern, and composites materials was that small damaged holes were appeared randomly.

기호설명

- H_B : Hardness (Brinell hardness)
- γ : Specific gravity
- σ_{UTS} : Ultimate tensile strength

1. 서론

* 한국해양대학교 재료공학과 대학원
** 한국해양대학교 재료공학과 대학원
*** 한국해양대학교 기계소재공학과 대학원
**** 한국해양대학교 재료공학과

최근 공업의 발전과 더불어 장치·설비, 자동차, 항공기 및 선박 등은 고속, 고출력, 경량화 추세이다. 이와 같은 추세에 따라 유체를 사용하고 있는 기계요소에서 유속 및 회전속도 등이 빠르게 되면 유체충격과 정압의 저하에 따른 국부적 비등으로 인하여 침식이 발생하면서 기계의 성능 저하와 손상을 일으킨다¹⁾²⁾. 이와 같은 침식 손상은 액체의 제트 또는 액적이 고체표면에 충돌하여 발생하는 충격 침식과 캐비테이션 발생시의 기포붕괴에 따른 액적의 충격압으로 의해 일어나는 캐비테이션 침식(cavitation-erosio

n)3)등으로 대별 할 수 있다.

강전해질의 해양환경 중에서 기계적인 충격 침식과 더불어 전기화학적인 부식이 중첩하여 일어나는 경우에는 침식과 부식이 상호간에 가속하는 상승효과 때문에 기계장치의 수명에 치명적인 영향을 미친다4).

이러한 강전해질인 해양환경 중에서 침식-부식 손상을 방지하기 위하여, 가격이 저렴한 탄소강에 내식 및 내마모성이 우수한 다른 재료로 피복하는 방식법이 많이 사용되고 있다. 따라서 해양환경 중에서 복합재료피복재의 침식-부식거동에 관해 파악 하기 위하여, 본 연구에서는 Flexible composites를 프로펠라의 재료인 황동에 피복한 후에 증류수와 해양환경 중에서 Cavitation 시험을 실시하였다. 이러한 실험결과를 토대로 하여, 충격침식-부식거동에 대해 규명하고 모재에 대한 복합재료 피복재의 침식과 부식의 억제효율을 정량적으로 평가함으로써 해양환경 중에서 침식-부식의 방지에 대한 근거를 제시하고자 한다.

따라서 본 연구의 목적은 금속재료와 복합재료의 캐비테이션 침식거동을 명확히 함과 더불어 복합재료를 이용한 캐비테이션 침식을 최소화하기 위한 방안을 마련하는 것이다.

2. 실험장치 / 방법

2.1 실험재료

본 실험에 사용한 재료는 선박용 기기에서 일반적으로 사용되는 재료로 회주철 (Gray cast iron:기기의 Casing에 주로 사용), Sn계 황동 (Bronze:선박용 Propeller 또는 Impeller에 사용)와 Stainless강(SUS 316, 내식용 Pump의 Impeller 재질로 사용)과 복합 재료인 Coating재를 모재 표면에 코팅(coating)한 것(내식/내마모성 외피 처리) 등의 4종을 선택하였고 이들의 기계적인 특성은 Table 1과 같다.

2.2 시험편의 제작

시험편의 직경은 0.625 ± 0.002 in. (15.88 ± 0.05 mm)로 한정하였고, 표준 시험편의 두께는 0.125 in. (3.2mm)보다 크고 0.5 in.(12.7mm)보다 작은 0.173 in.(4.40 mm)로 하였다. 시험편의 표면은 편평하며 Transducer의 축방향으로 각이

지게 제작되었다. 외형 규격은 Fig. 1과 같으며 제작 후 시험편의 표면은 sand paper 2000번까지 연마하였다.

2.3 캐비테이션 시험기

본 시험은 ASTM⁵⁾⁶⁾에서 추천하는 Round robin 방식7)을 사용하여 아래와 같은 ASTM G-32 규격을 적용하여 실험을 행하였다

시험장치의 초음파 진동자의 진동수는 20KHz이고 지수형 혼을 부착하여 증폭되도록 하였다.

Table 1. Mechanical properties of each materials used

Mechanical Properties Materials	H _B	τ	σ_{UTS} (MPa)
Gray cast iron (FC 250)	223	7.03	256.76
Bronze	85	8.50	166.6
Stainless	153	7.95	705.6
Composites (DuraTough DL)	55 (shore D)	1.13	-

본 실험에 사용한 캐비테이션 발생 장치는 초음파를 이용한 진동가속시험기로 전체 계통도는 Fig. 2와 같다.

본 진동 실험 장치는 시험 용액의 표면안에 부분적으로 침지되어 시험편에 축방향 진동을 발생시켜 캐비테이션 침식연구에 적합하게 설계되어진 것이다. 이 기구의 핵심인 진동기기는 상업적으로 생산 가능한 적당한 전기 진동과 파워 진폭기에 의해 구동되는 자전기 또는 압전기(피에조 전기) Transducer로 이루어져 있다. Transducer는 테이퍼진 부재로 Case에 고정되어 있고 운전중에 이의 Transducer에서 발생하는 소음이 매우 높으므로 Case는 구조로 되어 있다. 시험 액체는 매 실험 단위당 1000ml로 하였고 용기는 Low form 유리 비이커를 사용하였다. 실험액체는 Transducer의 운전 중 진동 마찰에 의해 용액의 온도가 상승하게되는데 본 기기에는 이를 막아주고 온도를 일정하게 유지시켜주기 위해 온도 조절 장치를 부착하였다.

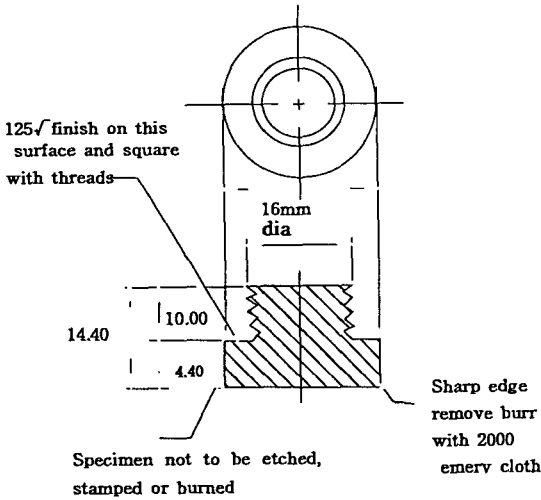


Fig. 1 Shape of specimen for cavitation erosion test specimen (dimension : mm)

2.4 실험방법

2.4.1 표준시험조건

ASTM규정에 따라 다음의 표준시험조건을 적용하였다. 시험액체의 온도를 77 ± 2 °F(25 ± 1 °C)로 유지하였다. 그리고 시험액체표면의 공기압을 28 ± 3.5 in.Hg(7.21 ± 90 mmHg)로 유지하였으며, 물 안에서 증폭되는 변위는 시험동안 0.002 in. (0.51 mm) $\pm 5\%$ 이내로 하였다 그리고 자연해수를 채취하여 실제 사용환경에서의 경향을 알아보기 위해 해수를 사용하였다.

2.4.2 실험방법

기계적인 캐비테이션 관찰을 위하여 Low form 비이커에 시험대상 용액을 1000ml 담아 각각의 시험편을 Transducer 끝부분의 Horn에 장착하여 끝부분을 액체표면에서 20mm 깊이로 침지하여 시험을 시행하였다.

캐비테이션 침식시험후의 시험편을 항상 세정하여 건조하였다 (건조는 드라이어로 동일하게 2분을 건조함). 캐비테이션 진행중의 경과를 관찰하기 위해 총 시험재료별 시험시간을 24시간으로 하였으며, 4시간 간격으로 시험 무게를 측정하였고, Digital camera로 손상과정을 촬영하였다.

그리고 최종시험 완료 후 시험편 표면을 전자현미경으로 관찰을 실시하였다.

3. 실험결과 / 고찰

3.1 캐비테이션-침식 거동

(1) 증류수 중에서 캐비테이션 거동

아래의 Figs. 3~4에서 도시한 바와 같이 캐비테이션 침식시험을 24시간 시행한 결과, 각 시험재료의 Volume loss는 각각 다를 수 있었다.

시험편에 대해 증류수 (F.W, 비저항 15×10^3 $\Omega \cdot \text{cm}$ 인 pH7의 중성용액으로 부식성이 거의 없이 기계적인 침식작용만 있는 것으로 가정함) 중에서 시간단위별 무게 감소량(Wt)을 측정하여 체적 손실량을 구하여 Fig. 4에 도시하였다. 이에 의하면 24시간 후의 시험결과 증류수 중의 Volume loss가 가장 큰 재료는 Brass로 Composites DuraTough DL(이하 DL)를 제외한 재질에 비하면 약 2-8배 이상의 침식량을 나타내고 있다.

시험한 재료의 침식량은 Brass > Cast iron \approx Stainless > DL로 내침식량은 DL이 가장 우수한

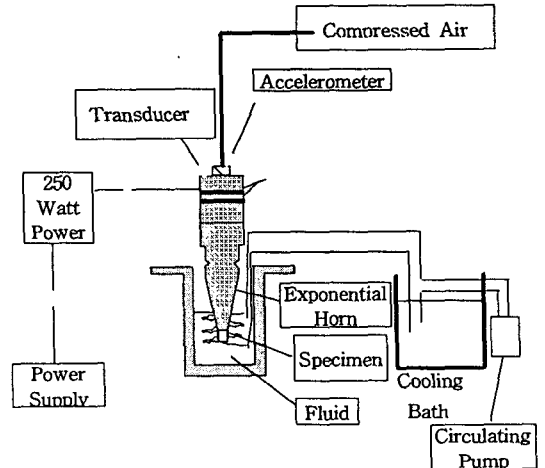


Fig. 2 Schematic diagram of cavitation-erosion test apparatus

결과를 나타내고 있다. 이 때 Stainless steel과 Cast iron은 거의 비슷한 내캐비테이션 특성을 나타내고 있고 DL은 약 720분 정도부터는 안정화되고 있지만, 이를 제외한 나머지 3개의 재료는 24시간까지 계속되는 추세를 나타내고 있다.

이 시험 결과에 의하면 Table 1에 나타난 각 재질의 정도와 내침식성은 비슷한 양상을 보이고 있으나 (정도 Cast iron > Stainless > Brass > DL), 반드시 내침식성의 순위가 정도순위와는 일치하지 않음을 볼 수 있었다. 이것은 DL이 캐비테이션 중에 발생하는 마이크로젯(microjet)에 대해 점탄성 변형을 하면서 충격파를 흡수하기

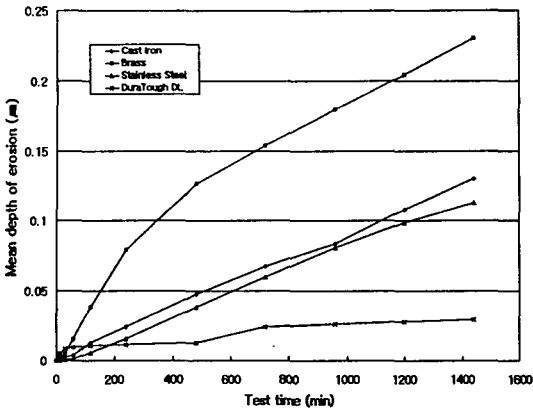


Fig.3 Mean depth of erosion as a function of cavitation erosion test time

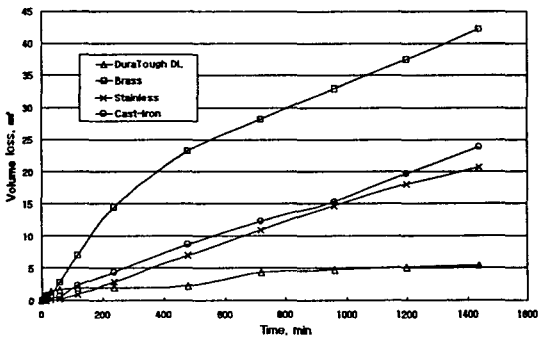


Fig.4 Volume loss vs testing time in distilled-water

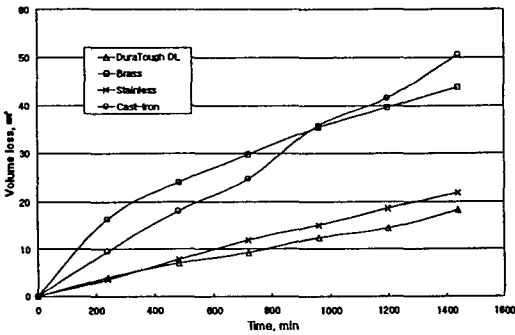


Fig.5 Volume loss vs testing time in sea-water

때문으로 사료된다. 충격응력(Impact stress)은 금속의 성질과 비교하여 DL의 flexibility로 인해 점탄성 변형을 하면서 충격응력이 약해지고 충격응력이 방산되기 때문에 더욱 충격응력이 약화되게 된다. 전체적으로, 재질의 경도가 높을수

록 내침식성도 높아지는 경향을 나타내지만, 꼭 경도순으로 내침식성이 정해지는 것이 아님을 알 수 있었다.

Brass의 경우에는 연성재료에서 흔히 나타나는 소성변형현상으로 인해 초기에는 기포의 충격파에 의해 무게 감소가 많이 일어나다가 점차 가공경화가 일어나 무게 감소가 서서히 안정화하는 경향을 보이고 있다. Fig. 3의 처음 100분간에서 보듯이 일반적으로 재료의 캐비테이션은 초기에 캐비테이션 손실이 거의 발생하지 않는 잠복기(incubated period)를 거쳐 손실깊이가 시간에 따라 직선적으로 증가하는 최종단계를 보이는 것으로 알려져 있다.8) 실제로 본 실험에서는 24시간 동안의 무게감소량을 측정 후 재료의 밀도와 표면적을 이용하여 평균 cavitation 침식 깊이를 구하였다.(MDPR : Mean Depth Penetration Rate)(Fig. 3) 이와 같은 연성재료에서는 캐비테이션의 잠복기가 아주 빠르게 지나가며, 시험대상 재료의 최고침식율(R_{max} , 시험편의 부피감소율이 가장 크게 나타나는 값을 칭함)이 가장 크게 나타나는 것을 상대 비교하면 Brass > Cast iron \approx Stainless > DL의 순서로 DL에서 가장 안정적인 양상을 보여준다.

모든 시험편의 침식율 변화가 안정기에 접어든 24시간 시험 종료시를 기점으로 침식율을 비교하면 Brass > Cast iron \approx Stainless > DuraTough DL의 순서를 나타내고 있다.

2) 해수중에서의 캐비테이션 거동

Fig. 5에서와 같이 시험편에 대해 해수(S.W, 비중 1.15의 자연상태의 해수사용)중에서 시간당 위별 무게 감소량(Wt)을 측정하여 Volume loss를 구하였다. 이에 의하면 24시간의 시험결과 해수중의 Volume loss가 가장 큰 재료는 담수의 경우와 같이 Brass이며, 증류수 중에서는 Stainless steel과 비슷한 경향을 나타내던 Cast iron이 해수 중에서는 brass와 비슷한 경향을 보이고 있다. 그리고 DL은 Stainless steel과 비슷한 경향을 나타내고 있다. 이들은 내침식성이 우수하게 나타나고 있으며, Brass에 비해 침식량이 1/5정도의 수준이다.

시험한 재료 4가지에 대한 침식량을 상대 비교하면, Brass \approx Cast iron > Stainless > DL 순이며 순위는 증류수의 경우에는 약간 차이를 나타내고 있다. 도시한 그림과 같이 DL의 경우에는 초기 시험시간까지는 침식량의 변화가 급격히 진행되는 경향을 나타내고 있다. 이 시험결과에 의하면 Table 1에 나타난 각 재질의 경도와 내 침

식성은 비슷한 양상을 보이고 있으나 순위가 꼭 일치하지는 않는다는 것을 보여주고 있다

(3) 환경 변화에 대한 특성 비교

Fig. 4는 Cast iron, Stainless, Brass의 캐비테이션 침식에 의한 무게 감소량(Weight loss)를 각각 도시한 것으로 각각의 특성은 다음과 같다.

Cast iron의 경우 해수 환경하에서의 Weight loss가 증류수에서의 경우보다 약 2.0~2.5배 이상을 나타낸다. 이는 Cast iron이 부식성이 강한 환경에 침식-부식작용이 촉진되기 때문에 나타나는 현상으로 사료된다.

Brass의 경우 담수나 해수 양자간의 환경에서 Weight loss가 거의 동일하게 이루어진다. 이는 내부부식성이 다른 재료보다는 비교적 강하다는 것을 나타낸다.

Stainless는 다른 금속재료에 비해 내캐비테이션 침식성이 아주 우수함을 보여주며 또한 부식 성향의 외부환경에 영향을 받지 않음을 보여준다. 각기 재료의 침식성향을 재질고유의 기계적인 특성과 비교해 보면 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

인장강도 (σ_{ms} , MPa) : Stainless (706)
Cast iron (257) > Brass (167)

경도 (H_B) : Cast iron (223) > Stainless
(153) > Brass (85)

내캐비테이션 침식성 (24시간 시험시)
: Stainless > Cast iron \approx Brass

이와 같이 내캐비테이션 침식성은 재료의 인장강도, 경도와 일치하는 경향을 발견할 수 있다.

Fig. 4의 그래프를 고찰하면, Cast iron의 경우 초기 침식율의 증가가 최초 100분까지의 경우에는 증류수(D.W) 환경 하에서의 반응이 격렬히 일어나다가 점차 시간이 지남에 따라 안정화하여 침식율의 변화가 없음을 볼 수 있으나 해수(S.W) 환경하에서는 초기 침식율이 급격히 상승한 이후에도 지속적으로 침식율이 증가함을 볼 수 있다. 24 시간이 경과한 후 침식율은 S.W환경 하에서가 D.W환경 하에의 경우에 비해 침식율이 약 2~2.5배 정도 됨을 알 수 있다. Brass의 경우는 침식율의 증가가 부식환경에 영향을 적게 받고 있음을 알 수 있다. Stainless 또한 부식환경의 영향을 적게 받고 있음을 보여주며, 각 재료의 침식율 경향을 비교하면 다음과 같다.

Brass \approx Cast iron > Stainless

Stainless steel의 경우도 증류수나 해수나 거

의 차이가 나지 않았다. 이것은 오로지 기포의 충격파에 의한 기계적인 Cavitation 손실만 있었던 것으로 사료되며, 이러한 이유는 Stainless steel은 Cr_2O_3 라는 치밀하고 강한 산화피막을 표면에 형성하고 있기 때문에 해수 중에 존재하는 Cl^- , SO_4^{2-} 이온 등이 Stainless steel 표면 내로의 침투를 막아줘서 부식에 의한 Cavitation 손실량이 거의 없었던 것으로 사료된다.

(4) 캐비테이션 침식에 의한 재료의 표면 조직 손상특성

해수 및 증류수환경에서의 캐비테이션 침식, 부식의 24시간 시험 종료 후 침식 손상상태를 보다 자세히 관찰하기 위하여 침식 손상면에 대한 SEM 사진을 Photos 1에 나타내었다.

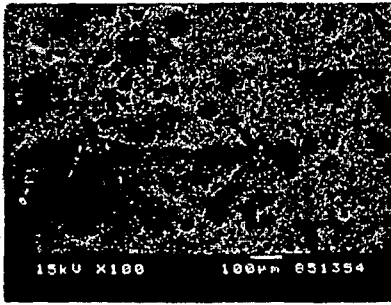
1) Cast iron

Photos 1과 같이 증류수 중에서 보다 해수 중에서 캐비테이션 손상이 더 많이 일어났음을 알 수 있다. 증류수에서는 해수에 비해 비교적 등골고 작은 소공(小孔)이 전체적으로 골고루 분포되어 있으며 Brass나 Stainless steel과 같이 2차 충격파에 의해 소공 모양이 반달모양으로 진행되어진 것은 관찰되지 않았다. 이는 Cast iron이 Brass나 Stainless steel보다 경도가 높아 2차, 3차 충격에 의한 연성파괴가 일어나지 않았기 때문인 것으로 사료된다.

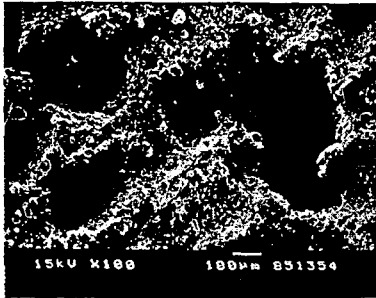
해수의 경우는 기포가 파열하면서 생긴 충격파에 의해 표면이 취성적으로 파괴되는 것 이외에 해수중에 존재하는 Cl^- 이온이 Cast iron표면에 형성된 Fe_2O_3 산화피막을 파괴하여 산화물층을 한꺼번에 탈락시킨 것으로 사료된다. 그리고 Fe_2O_3 산화피막은 기지와 결합력이 약하고 치밀하지 못하기 때문에 틈으로 기포가 들어가 충격파를 가하기 때문에 더욱 가혹한 환경이 된 것으로 사료된다.

2) Brass

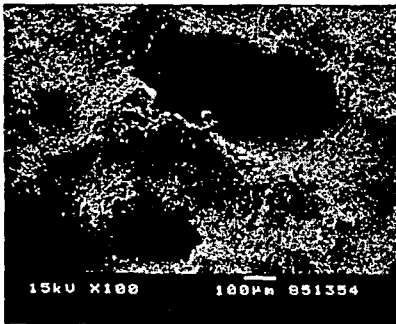
Photos 1의 (b)와 같이 표면전체가 기계적인 충격파에 의해 소성변형 되면서 연성파괴가 일어났음을 알 수 있다. 그 파면 형상을 보면 방사형으로 퍼져 나갔음을 알 수 있는데, 이것은 1차 충격파에 의해 깊게 파여지고 다시 2차, 3차의 약화된 충격파에 의해서도 작게나마 파괴가 일어난 것으로 생각된다. 이것은 앞에서 본 것과 같이 Brass가 제일 큰 Volume loss를 나타내는 것과 일



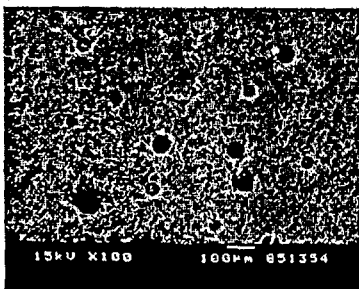
(a) Cast iron, × 100



(b) Brass, × 100



(c) Stainless × 100



(d) DL × 100

Photos 1. SEM for cavitation-erosion surface of each material in distilled-water

치한다는 것을 알 수 있다. 해수 중에서의 Brass 역시 방사형의 십자가 모양의 파면이 관찰된다. 중심부의 큰 파단부는 굉장한 속도의 micro jet에 의한 직접적 공격이 집중되면서 생긴 것으로 보인다. 그리고 그 옆에서 관찰되는 손가락 끝모양의 파면은 2차, 3차 rebound되어 튀어나오는 bubble들의 붕괴로 형성된 shock wave가 퍼져나가면서 형성된 것으로 보인다. 계속 rebound되어 가면 bubble의 크기가 작아지고 따라서 shock wave 또한 약해져 그 파면의 깊이가 점점 알아지는 것을 볼 수 있었다. 다른 경도가 높은 재료와 비교해 볼 때 높은 경도의 재료에서는 Brass와 같은 현상을 볼 수 없었다.

3) Stainless

Photos 1에서 증류수 중의 스테인레스 강은 높은 경도답게 그다지 심한 파괴는 보이지 않는다. 그것은 하나의 소공이 한 줄기의 방사형태만 가지는 것으로 알 수 있다. 그러나 스테인레스 강은 Brass보다 표면이 상당히 거칠게 보이는데 이것은 표면의 아주 작은 입자들이 깨지거나 파괴되어 일어난 것으로 생각된다

앞에서 본 바와 같이 해수 중에서도 증류수 중에서의 스테인레스 강의 조직은 별다른 차이가 없었다. 이것은 스테인레스 강이 아주 치밀한 부동태 피막을 가지고 있기 때문인 것으로 사료된다. 그리고 저속 유체에서는 Cl⁻ 등에 의한 공식 / 틈부식으로 피막이 파괴 되지만 고속에서는 공식 / 틈부식이 일어나지 못하므로 고속 유체에서 내부식성이 더욱 좋아지게 된다는 보고가 있다. 따라서 증류수에서는 이러한 공식 / 틈부식이 일어나지 못하지만 해수에서는 충분히 일어날 수 있음에도 불구하고 초음파에 의해 빠른 유속의 분위기로 되므로 해수와 증류수의 분위기에서 실험한 data는 별차이 없는 것으로 사료된다. 반대로 부식 메카니즘이 다른 Cast iron에서는 해수 중에서 증류수 보다 훨씬 심한 파면과 Volume loss를 나타내게 되는 것이다.

4) DL

전체적인 침식파괴 형상은 부분적으로 쇄기형으로 소공이 산발적으로 발생하였는데 이것은 제작 시 주재, 경화제등의 혼합경도와 혼합비율, 혼합시의 분위기에 따라 틀려지므로 발생한 상황으로 사료된다. 또한 시편 제작상의 숙련도의 부족으로 내부에 기포가 형성되었다가 표면이 파단됨을 드러나게 되는 현상으로 볼 수 있다.

그러나 해수 중에서는 증류수보다 거친표면을 발견할 수 있는데 혼입된 기포가 얇은 층 바로 안쪽에 위치하여 드러난 구멍에 충격파와 마이크로젯으로 인해 누적된 피로에 의한 취성적 파괴로 사료된다. 계속 rebound되어 가면 bubble의 크기가 작아지고 따라서 shock wave 또한 약해져 그 파면의 깊이가 점점 알아지는 것을 볼 수 있다. 다른 경도가 높은 재료와 비교해 볼 때 높은 경도의 재료에서는 Brass와 같은 현상을 볼 수 없었다.

3) Stainless

Photos 1에서 보여지는 것과 같이 증류수 중의 스테인레스 강은 높은 경도답게 그다지 심한 파괴는 보이지 않는다. 그것은 하나의 소공이 한 줄기의 방사형태만 가지는 것으로 알 수 있다. 그러나 스테인레스 강은 Brass보다 표면이 상당히 그러나 이션 거동을 나타내었는데 이는 파면에서도 나타나듯이 거의 침식되지 않았다는 것을 볼 수 있다. DL은 그 특성상 기포가 표면에서 파괴되면서 충격용력이 생겨도 점탄성변형을 하면서 생기는 충격파를 흡수하기 때문인 것으로 사료된다.

5. 결 론

실험의 중요한 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 금속재료의 내 캐비테이션 침식성의 경향은 본 실험의 범위 내에서는 대체로 대상 재료의 경도와 인장력에 비례하나, 점탄성거동을 하는 복합재료 DuraTough DL의 경우는 이와 달리 경도 및 인장력이 낮음에도 불구하고 가장 뛰어난 내 캐비테이션특성을 보여준다.

2) Cast-iron의 경우, 담수에 비해 해수쪽이 캐비테이션 손상량 및 손상율은 각각 3배 정도이다. 반면, Stainless(SUS 316) 및 DL의 경우, 캐비테이션 손상량과 손상율은 담수와 해수 분위기에서 큰 차이는 없었다.

3) DuraTough DL의 경우 캐비테이션 손상량과 손상율이 담수에 비해 해수쪽이 각각 약 2.3배 정도이나 다른 재질(Cast iron, Stainless, Brass)에 비하면 월등히 뛰어난 내 캐비테이션을 가짐을 알 수 있었다.

4) SEM사진과 디지털 카메라에 의한 침식표면 관찰의 결과, 금속재료의 경우 기포에 의한 재료 표면의 이탈이 원주방향을 중심으로 하여 캐비테

이션 손상이 방사형태로 이루어짐을 알 수 있었으며, 복합재료의 경우는 랜덤하게 침식 소공이 나타나서 소공의 확대 및 그 개수가 증가되는데, 이것은 그 부위를 기포가 강하게 충격함으로써 용력 집중에 의한 집중적인 침식을 받지만 전체적으로 볼 때는 균일한 침식 양상을 나타내어 해수 중 실험한 Cast iron이나 Brass와 같이 집중적인 뼈대모양으로 침식되는 형태의 재료 약화를 가져오지는 않는다.

참고문헌

- (1) Gaines, N., "A Magnetstriction Oscillator Producing Intense Audible Sound and Some Effects Obtained." *Physics*, Vol 3, No. 5, 1935, pp. 209-229.
- (2) Hobbs, H. M., "Vibratory Cavitation Erosion Testing at NEL," *Proc. Proc. Conf. on Cavitation, Fluid mach. Group, Institution of Mechanical Engineers, Edinburgh, 1974*, pp 269-274
- (3) 이진열, 베어링 합금재의 캐비테이션 침식 거동 및 그 억제에 관한 연구, 부경대학교 대학원 박사학위논문, 1994
- (4) Masanobu Matsumura and Yoshinori Oka(1982), "Influence of Erosion on Corrosion, *Corrosion Engineering*, Vol. 31, No. 2, pp 67-68
- (5) ASTM, "Standard Method of Vibratory Cavitation Erosion Test" pp1
- (6) Robinson, L. E., Holmes, B. A., and Leith, W. C., "Progress Report on Standardization of the Vibratory Cavitation Test," *Transaction, ASME, Am. Soc. Mechanical Engrs.*, Vol 80, 1958, pp103-107
- (7) Hammitt, F. G. et al., "Round Robin Test with Vibratory Cavitation and Liquid Impact Facility of 6061-T6511 Aluminum alloy, 316 Stainless Steel and Commercially Pure Nickel," *Material Reserch and Standard, ASTM GT10 No. 10. October 1970*, pp. 16-36
- (8) *Annual Book of ASTM Standards G-32, ASTM (1992)*, 115