工學碩士 學位論文

振動캐비테이션 試驗에서 被覆複合材와 金屬材간의 比較實驗 方法의 最適化

Optimization of Testing Method in Comparison with the Coated Composites and Metals by Vibratory Cavitation Test

指導敎授 : 金 允 海

2003年 2月

韓國海洋大學校 大學院

材料工學科

孫 暎 準

工學碩士 學位論文

振動캐비테이션 試驗에서 被覆複合材와 金屬材간의 比較實驗 方法의 最適化

Optimization of Testing Method in Comparison with the Coated Composites and Metals by Vibratory Cavitation Test

指導敎授 : 金 允 海

2003年 2月

韓國海洋大學校 大學院

材料工學科

孫 暎 準

本 論文을 孫暎準의 工學碩士 學位論文으로 認准함

委員長　　工學博士　　文 慶 萬　　㊞

委　員　　工學博士　　崔 日 東　　㊞

委　員　　工學博士　　金 允 海　　㊞

2002年　12月　20 日

韓國海洋大學交 大學院

材料工學科

孫　暎　準

목 차

Abstract 1

Nomenclature 4

제1장 서론 5

1.1 연구배경 및 목적 5

1.2 캐비테이션 발생 원인 및 종류 7

1.3 진동캐비테이션 실험장치 12

1.4 캐비테이션 침식에 대한 방지 대책 14

제2장 시험편 제작 및 실험방법 15

2.1 실험재료 및 시험편의 제작 15

2.1.1 실험재료 15

2.1.2 시험편의 제작 17

2.2 캐비테이션 실험방법 20

2.2.1 표준시험 20

2.2.2 개선된 시험 23

2.2.3 실험방법 28

제3장 실험결과 및 고찰 29

3.1 표준시험시 피복복합재 와 금속재 시험편의 파손 원인 29

3.2 무게감소량에 의한 시험법의 비교 32

3.2.1 금속시험편의 비교 32

3.2.2 피복복합재의 비교 33

3.3 피복복합재의 추정치와 금속재간의 침식량 비교 35

3.3.1 증류수중에서의 캐비테이션 침식거동 35

3.3.2 해수중에서의 캐비테이션 침식거동 39

3.4 표준시험과 개선된 시험에서 유체온도의 변화 42

3.5 개선된 시험에서 시험거리에 따른 시험유체의 온도와 침식량 변화 44

3.5.1 개선된 시험에서 거리에 따른 유체온도 변화 44

3.5.2 개선된 시험에서 거리에 따른 침식량 변화 45

3.6 환경에 따른 캐비테이션 침식표면 형상 비교 46

3.6.1 금속재의 침식표면 46

3.6.2 피복복합재의 침식표면 56

3.6.3 개선된시험에서 거리에 따른 침식 표면 62

3.7 캐비테이션 침식에 의한 재료의 표면조직 손상 특성 64

3.7.1 환경에 따른 침식면 64

3.7.2 표준시험과 개선된 시험에서의 침식면 68

3.7.3 개선된 시험에서 거리에 따른 침식면 70

제4장 결론 72

참고문헌 73

Optimization of Testing Method in Comparison with the Coated Composites and Metals by Vibratory Cavitation Test

Young-Jun Son

Abstract

Cavitation is a hydrodynamic phenomenon which results in the formation and collapse of vapor bubbles in a liquid.

In recent year, an equipment, an automobile, an aeroplane, ship and many industrial fields show a tendency of high output and lightweight along with industrial growth. In fluid machinery, if the speed of running fluid and rotative speed of machine become increase, the cavitation erosion happens because of partial cavitation bubbling with decreasing of static pressure and fluid shock.

Cavitation damage is encountered in a wide variety of fluid handling machinery and over a broad range of liquid pressures and temperatures.

Laboratory tests to establish the relative resistance of

materials are usually made in experimental facilities standardized to their most appropriate operating conditions. The vibratory facility is the most commonly used of these and has generated most of the available data.

At the first test, cavitation test(ASTM G-32) was compared with coated composite material and metals, but coated composite material specimens appeared to generating a low bubbles due to damping vibration and having a hard time testing for many hours due to interface delamination between metal and composite material.

In this study, to use cavitation apparatus, such as the piezoelectric vibrator with 20kHz, 50㎛ to cavity generation, we compared with the traditional cavitation testing method (ASTM G-32) and modified cavitation testing method.

Throughout this test, we investigated the optimization of testing method in comparison with the coated composites and metals by vibratory cavitation test.

The main results obtained from this cavitation erosion test are as follows:

(1) Test liquid temperature of nearby specimen was measured by using digital thermometer, and observation time was done at 1min. later of testing and 1min. before of finishing. In the result, the case of standard test show up changing temperature of ±2℃, but modified

test appear to change temperature of ±9℃.

(2) Weight loss between metals and coated composite materials was compared with standard test(ASTM G-32) and modified test. Weight loss of metals obtained from modified test was 40-60% lower than that of standard test. On the other hand, the weight loss of coated composite materials obtained from modified test has a tendency to decrease and below 30% than that of standard test.

(3) It was calculated to estimate weight loss of standard test with weight loss of coated composite materials obtained from modified test. And cavitation erosion between metals and coated composite materials was compared with standard test.

(4) MDPR(Mean depth penetration rate) between metals and estimated amount of coated composite materials by standard test compared with distilled-water and sea-water. Erosion rate was in the order of DL 〈 SUS316L 〈 SS400 ≒ Bronze 〈 Cast iron 〈 CL in distilled-water and in the order of DL ≒ SUS316L 〈 SS400 ≒ Bronze 〈 Cast iorn 〈 CL in the sea- water.

(5) The optimized test condition looked out for comparing with temperature change and weight loss according to various space in modified test.

Nomenclature

H_B : Hardness(Brinnell hardness)

ρ : Specific gravity

σ_{UTS} : Ultimate tensile strength

RE : Reference material specimen

DL : Duratough DL

CL : Ceramalloy CL

T_1 : Start temperature

T_2 : Finish temperature

$\triangle T$: $T_2 - T_1$

ASTM : Standard test of ASTM G-32

M-ASTM : Modified test of ASTM G-32

D : Distilled-water

S : Sea-water

MDPR : Mean depth penetration rate

제1장 서 론

1.1 연구 배경 및 목적

비약적인 공업의 발전과 더불어 기계장치나 각종 설비들은 고속화 및 고출력화되고, 이들의 사용환경은 다양화 및 오염화되는 추세에 있다. 이러한 경향에 따라 유체를 사용하는 모든 공학분야에 있어서 캐비테이션의 발생에 대해서 주의하지 않으면 안되는 상황이다.[1-2]

액체를 사용유체로 하는 펌프, 수력터빈 등의 유체기계에서 액체가 가속되어 액체의 정압이 포화증기압 이하로 낮아지면 기포가 형성되고 소음과 진동이 발생하면서 익면이 침식(Erosion)되고 유체기계의 성능이 저하하게 된다. 이러한 현상을 캐비테이션(Cavitation)이라 한다.[3]

캐비테이션 현상은 어떠한 유체에 있어서도 발생할 가능성이 있으며, 원자로의 냉각용 해수 펌프의 만곡부, 선박프로펠러, 가스터빈 블레이드, 기어나 베어링 및 기관의 냉각수 재킷이나 라이너 등에서 발생한다.[4-6] 또한 캐비테이션 침식손상은 사용 액체 중에 부식인자나 고체입자 등이 포화되는 경우에 더욱 극심한 캐비테이션 침식손상을 유발한다. 특히 오염된 부식성 환경 중에 사용되는 기계장치와 설비 등에 캐비테이션 현상이 발생하면서 기계적인 침식과 동시에 전기화학적인 부식이 발생하게 되며, 기계부

재의 금속재료에 침식과 부식(Corrosion)이 중첩하여 상호 가속적인 상승효과(Synergistic effect)로 인하여 기계장치의 수명에 치명적인 영향을 미치게 된다.[7-8]

지금까지 캐비테이션에 대한 연구는 거의 대부분이 캐비테이션 제트의 핵의 거동이나 캐비테이션 노이즈 측정, 분류의 흐름모양이나 상태 그리고 노즐의 형상에 따른 캐비테이션의 생성모양 등 모두가 캐비테이션 자체의 현상에 대한 것이다.[9]

현재의 선박기술의 발전과 대형화가 되어감에 따라 프로펠러의 용량 증대에 따른 라다(rudder)부위의 캐비테이션 현상이 심각하게 나타나고 있으며, 그것의 대처 방안으로는 내식성이 있는 재료로 대체하거나 피복재로 코팅하는 방법이 사용되고 있다.

본 연구에서는 ASTM G 32 규정의 캐비테이션 시험에서 피복복합재와 금속재의 실험시 피복복합재의 시험편에서 초음파의 감쇄로 인하여 캐비티(cavity)와 버블(bubble)이 감소하는 것으로 관찰되어 ASTM G 32규정의 시험과 개선된 시험을 통하여 피복복합재와 금속재의 캐비테이션 침식율을 측정·비교하여 최적의 시험조건을 규명하는데 그 목적이 있다.

1.2 캐비테이션 발생 원인 종류

물 유로의 일부에 유속의 차이가 있으며, 고속도의 부분에서는 정압이 저하한다. 이 경우 만약 압력이 그 온도에서 물의 증기압 이하가 되면, 캐비티(cavity)가 발생한다. 캐비티는 수중보다는 고체면에서 발생하기 쉽고, 그것이 수로의 유속이 낮은 곳에 운반되어 가면, 거기서는 정압이 상승하기 때문에 압착되고, 이 때 고체면에 커다란 충격이 가해져서 특유한 높은 소리를 발생하고 고체면은 해면상으로 침식된다. 이것을 캐비테이션 손상(Cavitation damage)이라고 부른다.[10]

이러한 캐비테이션에 의한 침식과정은 캐비티의 붕괴 및 감소시의 충격력에서 발생하는 것으로 Fig.1에 나타내고 있다.[11] Fig.1에 의하면 초기의 기포가 재료표면에 충돌하는 과정으로 기포가 금속표면에 접근하면서 양분된다. 이러한 기포가 양분된 사이에 또 다른 기포의 마이크로제트(Microjet)가 형성되어 금속표면에 강한 충격력을 가한다. 이때 생성되는 충격파는 약 60000psi 크기의 충격파를 생성하게 되어, 금속표면에서 캐비테이션 침식이 발생하게 된다.

Fig.2의 그림은 금속표면에서 캐비테이션 침식이 발생하는 모습을 도식화한 것이다. 처음으로 보호피막위에 캐비테이션 기포가 생성, 기포가 소멸되면서 피막을 파괴한다. 새로 노출되어진 금속

표면이 부식되고 따라서 피막이 다시 생성한다. 똑같은 지점에 새로운 캐비테이션 기포가 생성된다. 기포가 파멸되면서 피막을 다시 파괴한다. 노출 면적이 부식되고 피막이 또 다시 생성되는 과정을 보여주고 있다.[12]

캐비테이션에 의한 금속재의 손상에 대해서 과거에는 단순한 기계적 손상이라고 하는 설이 주류였는데, 그 후 부식작용도 중요한 요인이라는 것이 Petracchi[13]에 의해서 실험으로 나타났다. 현재 대개의 의견이 일치되고 있는 것은 캐비테이션에 의한 기계적 침식작용이 약할 때는 부식작용이 강하게 나타나고, 캐비테이션 침식이 강해짐과 함께 기계적 파괴작용이 우세하게 나타나는데, 그 전환이 일어나는 물유속은 약 10 ~ 30m/s일 것이라고 한다. 이러한 견해를 나타낸 것이 Fig.3의 그림이다. 전자의 영역은 캐비테이션 부식(Cavitation corrosion), 후자는 캐비테이션 침식(Cavitation erosion)의 이름으로 부르고 있다.[10]

캐비테이션 침식에 의한 양상은 스폰지나 벌집모양으로 나타나며, 캐비테이션 발생 종류[14]는 다음과 같다.

① 이동형 캐비테이션(Travelling cavitation)

발생된 캐비티가 유체를 따라 이동하는 캐비테이션을 말한다.

② 고착형 캐비테이션(Fixed cavitation)

흐름이 일정한 경우에 발생하는 것으로 물체의 표면에 은박지를 붙여놓는 것처럼 캐비티가 가만히 붙어 있는 것을 말한다.

③ 와류 캐비테이션(Vortex cavitation)

흐르는 유체 중의 소용돌이 중심은 압력이 매우 낮기 때문에 캐비테이션이 발생한다. 선박의 프로펠라 선단과 펌프 등의 날개의 끝에 주로 나타난다. Tip에서 생긴다고 해서 Tip 캐비테이션이라고도 한다.

④ 진동형 캐비테이션(Vibratory cavitation)

액체의 유속이 매우 느려서 액체가 반복적인 캐비테이션 현상에 노출되어 있는 곳에서 발생한다.

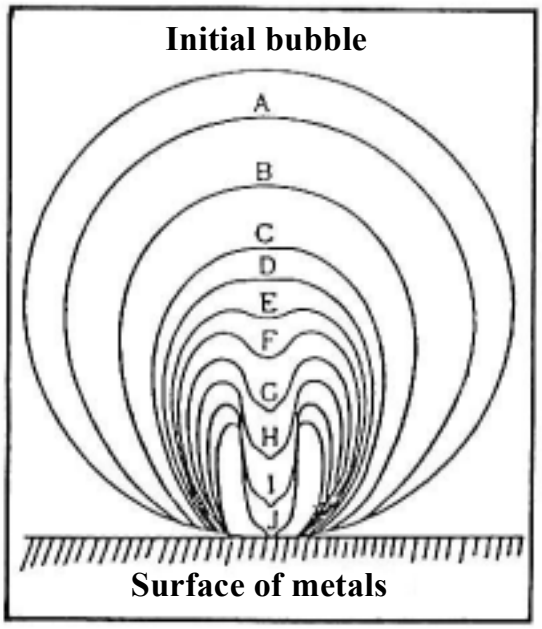
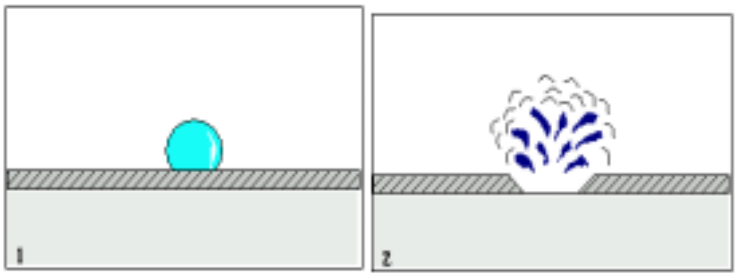
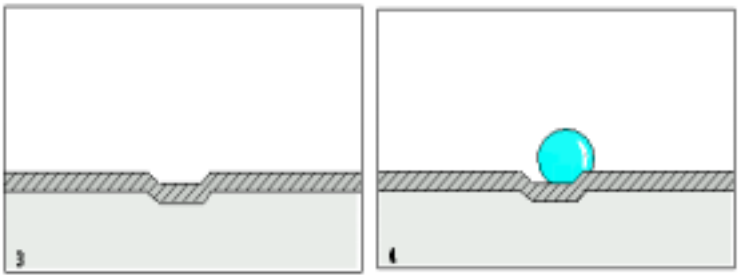


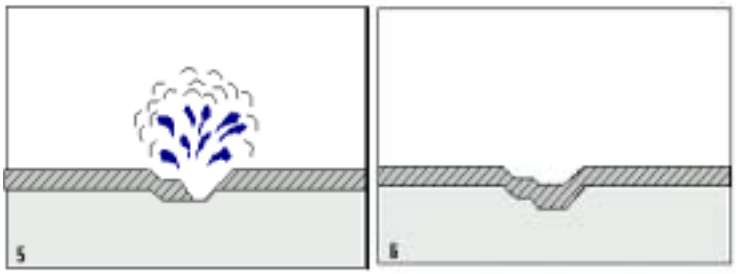
Fig.1 The collapse process of cavitation bubble.



(a) Bubble formation (b) Passive coating destruction by collapsing bubble



(c) Regeneration of passive coating (d) Bubble formation



(e) Passive coating destruction by collapsing bubble (f) Regeneration of passive coating

Fig.2 Generation steps of cavitation erosion.

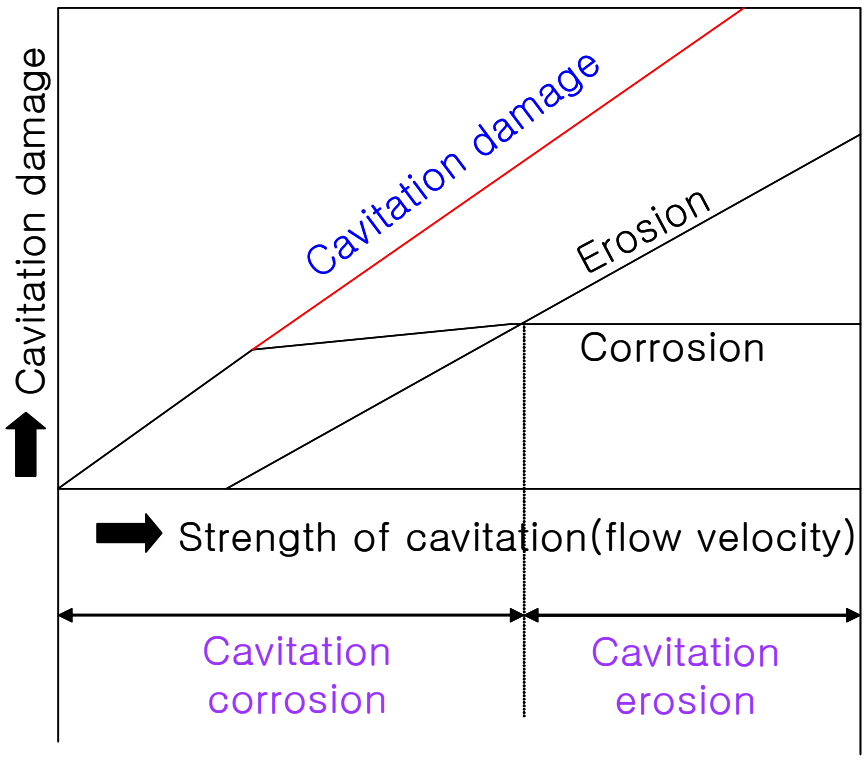


Fig.3 Concept to describe corrosion and erosion by cavitation.

1.3 진동캐비테이션 실험장치

캐비테이션에 의한 기기의 손상이 점차 증대함에 따라 이에 대한 연구도 점차 활발하게 진행되어 왔으나 시험에 대한 제반 조건과 방법이 서로 달라 그의 결과가 통일되지 못하던 중에 1950년대 말 니켈 튜브의 Magnetostrictive transducer가 사용되기 시작하였고, 이 장치가 점차 현대화되어 제반 사양에 대한 표준이 영국의 NEL을 거쳐 1966년 Hobbs에 의해 ASTM의 위원회에 재조명되었다.[15] 최근에는 전 세계적으로 ASTM에서 추천하는 Round robin 방식을 사용하고 있다. 본 논문에 사용된 시험기는 Round robin방식을 채택한 시험기이며, Photo.1의 진동캐비테이션 시험장치는 ASTM G 32 규정에 의해 제작된 시험장치 이다. 이 초음파 시험기는 간단하게 재료의 cavitation 저항을 평가할 수 있도록 제작된 것이다.

Photo.1의 진동캐비테이션 시험장치에 대한 초음파 진동 시스템의 블록선도(block diagram)를 Fig.4에 나타내었다. 여기서 초음파 진동기는 60Hz, 220V전원을 입력으로 소정의 전자회로를 거쳐 20kHz내외의 정격출력을 발생시켜 진동자 및 여러 장치에 공급하는 역할을 담당하는데, 초음파 진동장치에는 자동정지타이머, 제어장치(control unit), 진동자, 증폭기 혼(booster horn)등이 있다. 진동자는 발전기로부터 소정의 입력을 받아 전기에너지를 진동에너지로 변환시켜서 증폭기에 전달하는 과정으로 형성되어 있다.

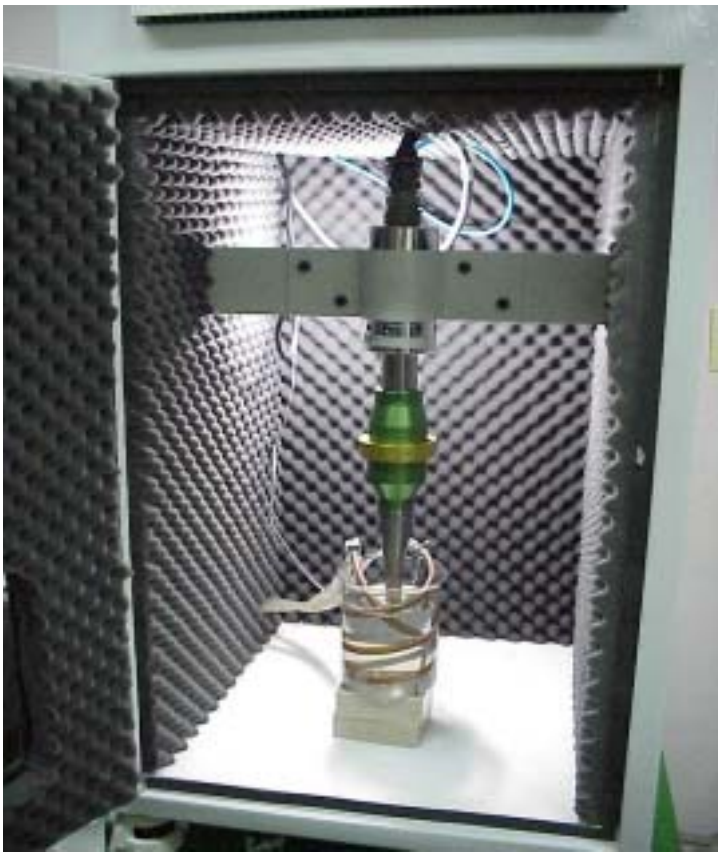


Photo.1 View of cavitation test machine.

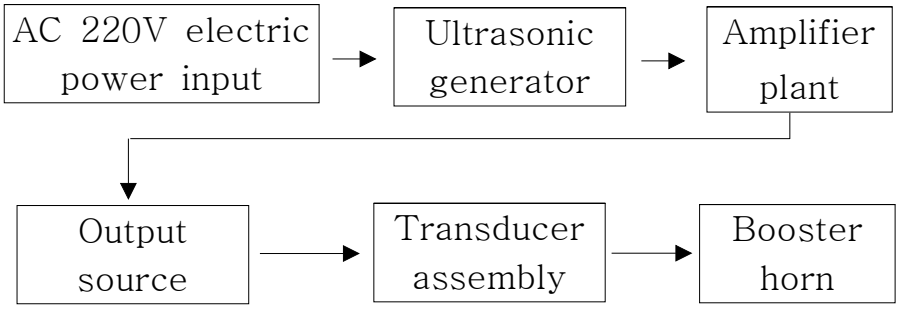


Fig. 4 Flow chart of ultrasonic unit.

1.4 캐비테이션 침식에 대한 방지 대책

현재까지 캐비테이션 부식 및 침식을 방지하기위해서 아래와 같은 방법을 사용하고 있다.[16]

① 수압의 차이가 최소가 되도록 설계한다.

② 내식성이 강한 재료를 선택한다.

③ 표면조건을 균일하게 함으로써 캐비테이션 기포의 우선적인 발생장소를 없앤다.

④ 고무나 플라스틱 등으로 금속부분을 피복한다.

⑤ 캐비테이션 기포의 소멸에서 생기는 충격파를 수소기포의 발생으로 인해서 완화시킬 수가 있는 음극방식을 실시한다.

제2장 시험편 제작 및 실험방법

2.1 실험재료 및 시험편의 제작

2.2.1 실험재료

본 실험에 사용된 금속재료는 선박용기기에 일반적으로 사용되는 재료인 FC250(Gray cast iron : 기기의 casting에 주로 사용), SS400(선박용 외판 및 rudder에 사용), Stainless steel(SUS316L, 내식용 코팅재료로 사용), Sn계 청동(선박용 propeller 또는 impeller에 사용)을 사용하였다. 피복복합재료로 사용된 재료는 에네콘사의 Duratough DL, Ceramalloy CL을 선택하였다. 이들에 대한 기계적인 특성은 표1과 같다.

실험에 사용된 유체는 캐비테이션 침식 현상을 궁극적으로 고찰하기 위하여 ASTM에서 규정된 용액과 선박이 처할 수 있는 환경과 동일한 두 종류의 용액을 아래 실험 대상 용액으로 하였다.

증류수

비저항 $15\times10^{3}\Omega\cdot$㎝이고, 밀도는 4℃에서는 1g/㎤이고 20℃에서는 0.99823g/㎤이다.

해수

천연해수를 사용하였으며 이에 대한 조성은 표2에 나타내어져 있다. 해수의 밀도는 수온과 염분으로 결정되는데 일반적으로 1.020~1.031g/㎤정도이다. 해수의 염분은 평균 35‰정도이다.

Table 1 Mechanical properties of materials used.

Mechanical Properties / Materials	H_B	ρ	σ_{UTS} (MPa)
Cast iron	223	7.03	256.7
Bronze	85	8.50	166.6
SS400	113	7.85	400
SUS316L	153	7.95	705.6
Duratough DL	55 (shore D)	1.13	-
Ceramalloy CL	82 (shore D)	2.44	-

Table 2 Most abundant solutes in seawater.

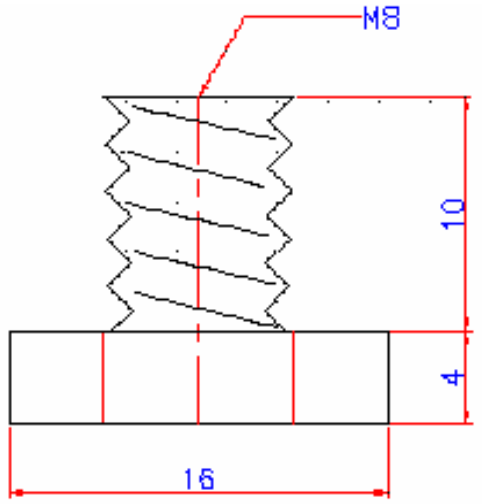
Constituents (Ions)	Concentration (‰, g/kg)	Weight Percent (%)
Chloride(Cl^-)	18.9799	1.9
Sodium(Na^+)	10.5561	1.1
Sultate(SO_4^{2-})	2.6486	0.3
Magnesium(Mg^{2+})	1.2720	0.1
Calcium(Ca^{2+})	0.4001	0.04
Potassium(K^+)	0.3800	0.04
Bicarbonate(HCO_3^-)	0.1397	0.01
Bromide(Br^-)	0.0646	0.0065
Trace Elements	0.633	0.1

2.2.2 시험편의 제작

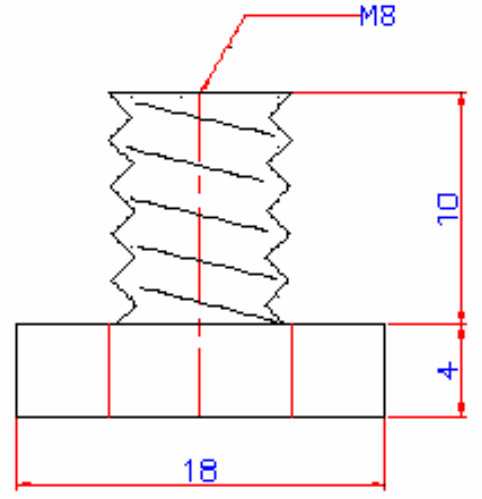
시험편의 직경은 16.00±0.05mm(표준시험에서의 시편크기)와 18.00±0.05mm(개선된 시험에서의 시편크기)로 한정하였고, 표준시험편의 두께는 3.2mm보다 크고 12.7mm보다 작은 4.0mm로 하였다. 시험편의 표면은 편평하며 Transducer의 축방향으로 각이 지도록 제작하였다. 외형규격은 Fig.5에 나타나 있으며, 이렇게 제작된 시험편은 캐비테이션 시험을 위하여 시험편 표면을 sand paper로 2000번까지 연마하였다. 시험편 나사 부분의 피로파괴를 방지하기 위해 시험편의 나사산 부위 또는 나사진 손잡이와 버튼 부분의 접합부에 예각의 코너가 없도록 제작되었다. 그러나 개선된 시험의 경우에 호른에서 나오는 버블이나 캐비티가 방사형으로 퍼지는 점을 감안하여 직경을 2mm정도의 여유분을 두었다.

피복복합재인 Duratoguh DL, Ceramalloy CL 시험편의 전체 높이는 4±0.5mm이며 금속시험편 위에 2±0.5mm가 되도록 피복재를 피복하여 시험하였다. 이 피복재를 피복하는 과정은 Photo.2에 나타내었으며, 그 과정은 다음과 같다.

가장 먼저 금속표면을 베이비 그라인더나 거친줄을 이용하여 표면을 거칠게 한 후, 몰드를 제작하고 시방서에 의해 혼합된 DL(주재와 경화재의 무게 혼합비율은 6.5:1)과 CL(주재와 경화재의 무게 혼합비율은 6:1)을 몰드위에 도포하여 72시간 이상 경화 시킨후 사용하였다.

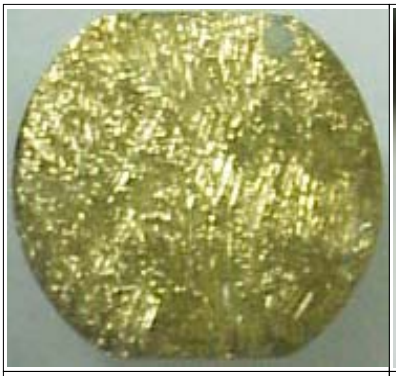


(a) ASTM specimen



(b) Modified test specimen

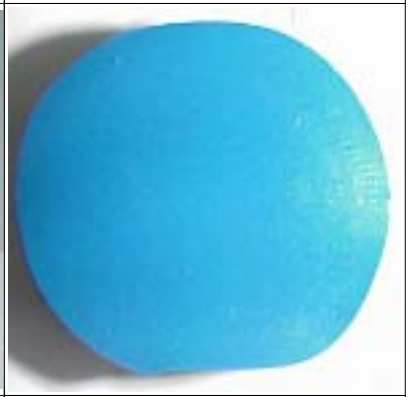
Fig.5 Shape of cavitation-erosion test specimen.



(a) Pretreatment of specimen

(b) Manufacturing mold

(c) Coating composite on specimen



(d) Completed specimen

Photo.2 Manufacturing process of coated composite specimens.

2.2 캐비테이션 실험방법

2.2.1 표준시험

본 실험에서 사용한 진동캐비테이션의 시험방법은 Round-robin 시험의 ASTM G 32이다. 이 시험법은 고주파수에서 진동하는 시험편의 표면에 캐비테이션 버블이 충돌하는 일반적인 시험방법이며, 이종물질간에서 오는 캐비테이션 침식의 비율을 결정하는데 이용된다. Fig.6에 진동캐비테이션의 표준시험기를 도식화하여 나타내었다.

표준시험은 250~500W 출력의 20㎑ 초음파가 얻어지는 Transducer에 시험편(Fig.5(a))을 부착하여 시험편의 Target 부분에 캐비테이션 버블이 충돌하여 침식되어지며, 그 측정은 시간대별 무게감소량을 측정하여 평균침식 깊이를 서로 비교하여 나타낸다.

표준시험조건[17]

ⅰ) 시험편의 직경은 3.2mm이상 12.7mm이하 이어야 한다.

ii) 주파수는 20±0.2㎑

iii) 시험용액의 온도는 22±1℃

iv) 공기압은 721±90mmHg

ⅴ) 시험용액에서 증폭되는 변위는 시험동안 0.51mm±0.5% 이내이어야 한다.

vi) 시험용액을 담은 용기의 용량은 최소 800㎖에서 1200㎖ 사이의 Low-form 유리비이커가 적당하며 시험액체의 양은 최소 600㎖이상 900㎖이하이어야 한다.

vii) 시험용액에 잠겨 있는 시험편의 끝부분과 시험용액의 표면 사이 거리는 3.2mm이상 12.7mm이하로 하여 한다.

viii) 시험계획은 같은 조건하에서 시험된 다른 물질의 정상화된 침식저항을 쉽게 계산하기 위하여 최소 아래의 시험물질을 포함하여야 한다.

㉠ Soft aluminum 1100-0

㉡ Commercially pure annealed nickel(INCO Nickel 270)

㉢ Austenite stainless steel Type 316 of hardness 150 to 175Hv

본 실험에서는 표준시험조건을 적용하였으나, 개선된 시험에서는 시험편 거취대의 크기로 인해 (vi)항의 용기용량 및 시험용액의 양을 조정하였다. 그리고 표준시험조건도 개선시험조건과 일치하는 용기용량 및 시험용액의 양을 설정하였으며, 그 양은 다음과 같다.

▶ 용기의 용량 - 2000㎖의 Low-form 유리비이커를 사용

▶ 시험용액의 양 - 1800㎖

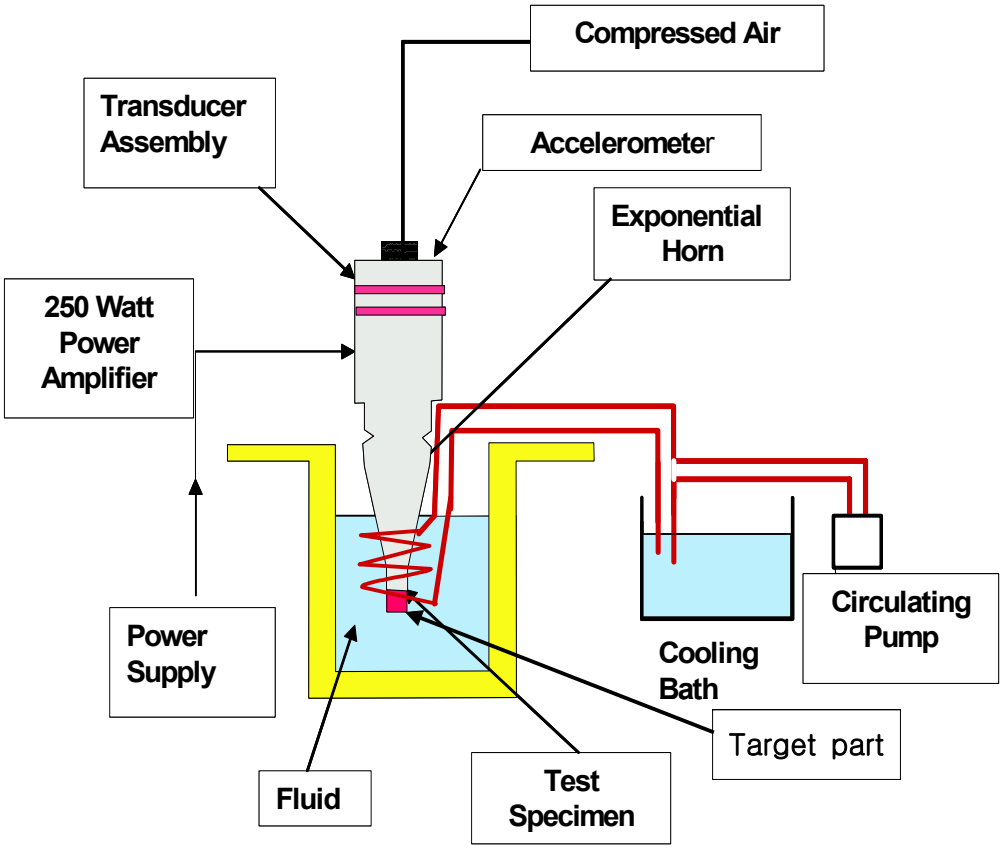


Fig.6 Schematic diagram of cavitation-erosion test apparatus.

2.2.2 개선된 시험

진동캐비테이션 시험에서 개선된 시험조건을 Fig.7의 (b)에 간략하게 도식화 하였다. 개선된 시험과 표준시험의 큰 차이는 Horn에 부착된 시험편을 일정한 재료로 선택하여 이 부분에서 생선된 버블이 아래에 있는 시험편에 충돌하여 붕괴되도록 제작한 것이다.

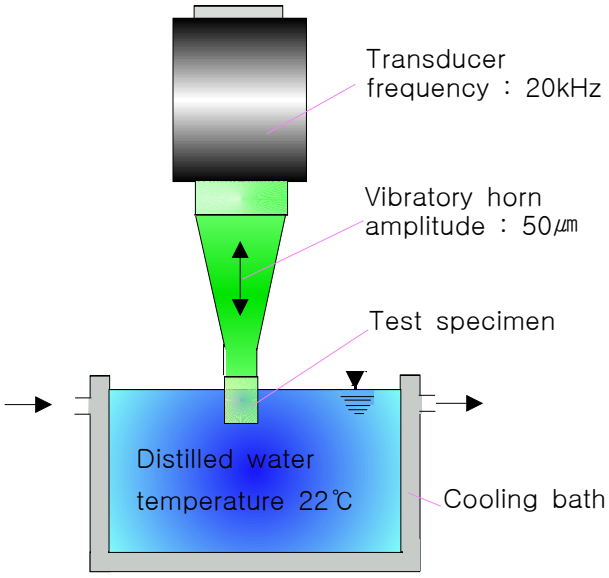
그러나 개선된 시험에서 호른에 부착된 시험편도 버블의 충돌에 의해 침식이 되므로 내식성이 강한 재료이고, ASTM G 32 규정에서 추천하는 Reference 재료인 stainless steel(SUS 316)을 선택하였다. 호른에 부착한 SUS 316을 본 논문에서는 RE시험편이라는 용어를 사용하였다.

이 RE시험편도 시간이 경과함에 따라 캐비테이션 침식이 일어나므로 RE시험편의 침식에 의한 버블의 감소, RE시험편에서 침식된 입자에 의한 Target 시험편의 영향을 최소화하기 위해 시간대 별로 침식양을 측정하여 나타낸 것이 Fig.8이다.

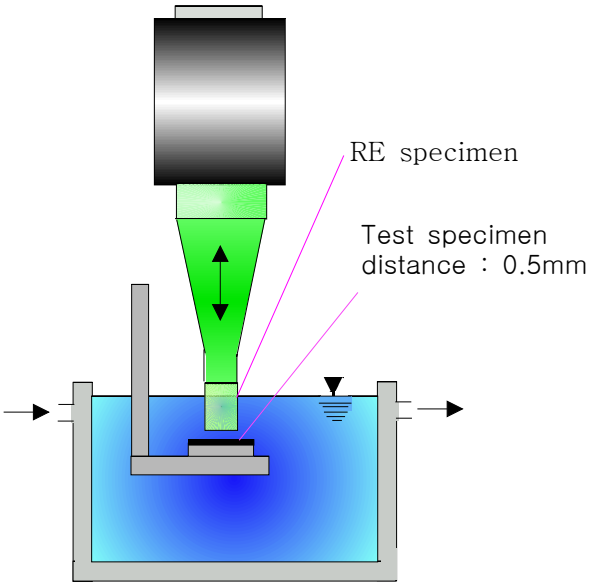
이 RE시험편은 캐비테이션 침식을 최소화하기 위해 시험편 표면을 6㎛까지 연마하였으며, Fig.8에 의해 4시간 마다 교체하여 시험을 실시하였다. 그리고 시험편의 형상은 Fig.4의 (a)와 같은 형상이다.

Photo.3은 시간변화에 따른 RE시험편의 캐비테이션 침식양상을 보여주고 있으며, 4시간 이후부터는 침식되어진 모습이 육안으로도 확연히 드러남을 알 수 있다. 개선된 시험조건은 표준 시험조건과 동일한 조건으로 시험하였다.

개선된 시험에서는 RE시험편과 Target 시험편의 거리에 대한 결정은 참고문헌[18]에서 나온 거리인 0.5mm로 하였다.



(a) ASTM G-32 test



(b) Modified test

Fig.7 Schematic of the vibratiory cavitation-erosion test.

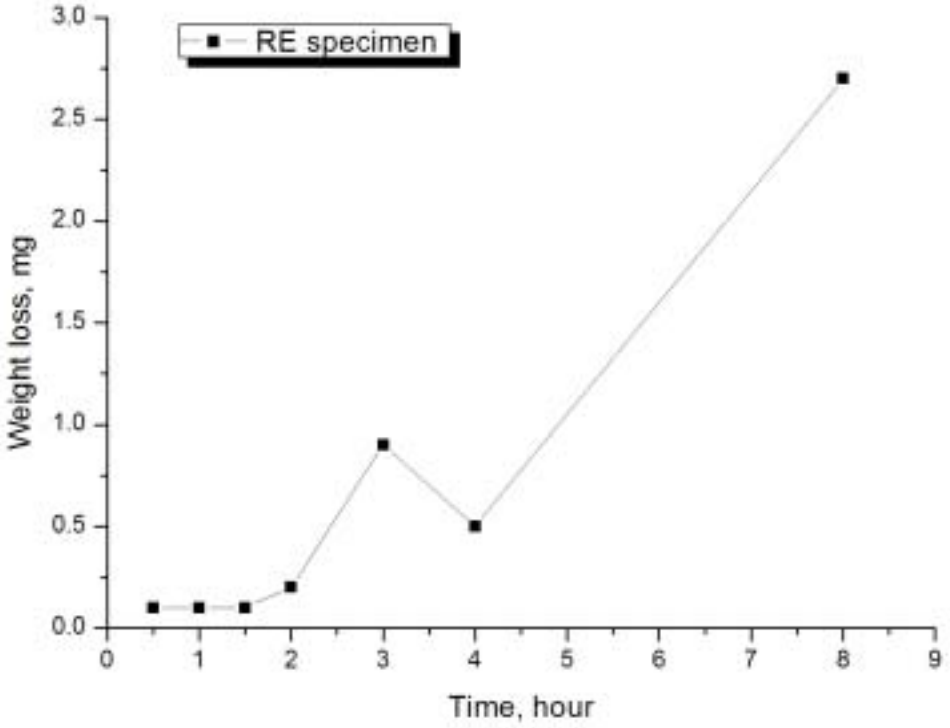


Fig.8 Weight loss vs testing time in sea-water.

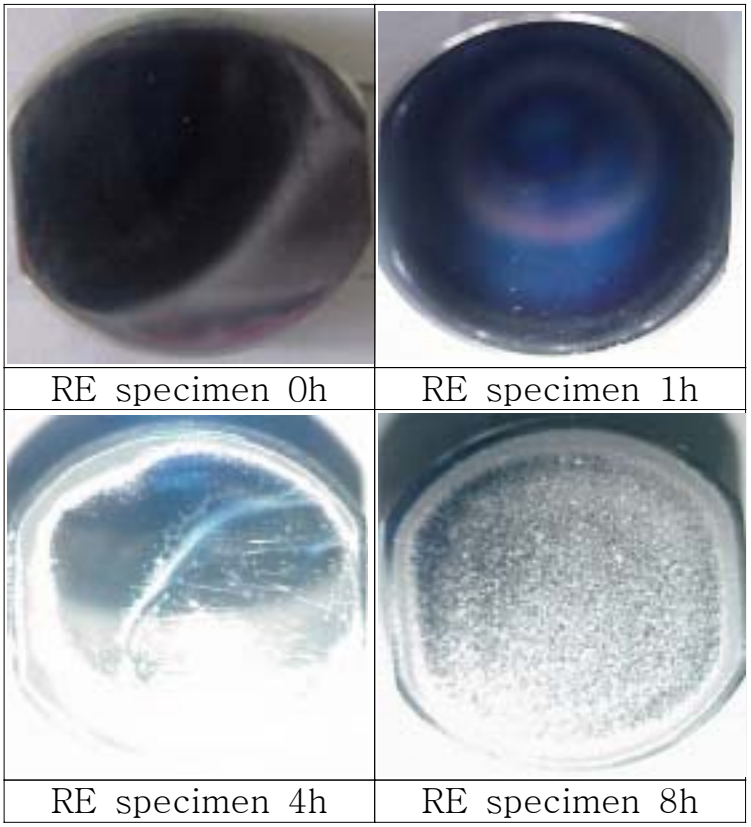


Photo.3 Successive observation of damaged surface according to test time(0, 1, 4, 8 hour) in sea-water for SUS316.

2.2.3 실험방법

본 실험에서는 금속과 피복복합재에 대한 캐비테이션 침식을 상대적으로 비교하기 위한 최적의 조건을 선정하기 위해서 진동캐비테이션의 표준시험(ASTM G 32)과 개선된 시험을 비교하였다.

이 두 시험법을 비교한 개략적인 그림이 Fig.7에 나타내었고, Fig.7의 (b)에서 RE시험편과 Target 시험편의 거리를 정확히 측정하기 위하여 micrometer기를 설치하였다.

실험용액의 양은 앞의 2.2.1장에서 언급한 내용과 같이 모두 1800㎖를 사용하였으며 시험편의 침지는 수면에서 6mm 깊이를 유지하도록 하였다. 캐비테이션 버블의 충돌과 기계자체의 발열로 인한 시험용액의 온도증가를 억제하기 위해 온도제어 시스템을 사용하였으며, 각 시간대 별 실험시작 1분후 와 실험종료 1분전에 디지털 온도계를 사용하여 시험편의 표면과 유체의 온도를 측정하였다.

시험시간은 초기 경향을 알기 위하여 30분, 60분, 90분, 120분, 180분, 240분으로 하였고, 4시간 후부터는 4시간 간격으로 총 24시간까지 시험하였다. 각 시간 간격마다 시험편을 건조(드라이어로 2분 동안 건조)하고 시험편의 무게를 전자저울로 소수점 4자리까지 측정하였다. 그리고, digital camera로 시험편의 손상과정을 촬영하였다.

제3장 실험결과 및 고찰

3.1 표준시험시 피복복합재 및 금속재 시험편의 파손 원인

표준시험에서 호른에 장착한 시험편의 파단 모습을 Photo.4에서 나타내고 있다. Photo.4의 (a)와 (b)는 금속시험편의 경우이고, (c)와(d)는 피복복합재의 경우이다. 금속시험편의 경우 표면에서의 파괴는 없는 반면, 피복복합재는 금속재와의 계면에서 박리가 되거나 부서져 버린 모습을 나타내고 있다.

Photo.4의 (a)와(b)는 호른과 접촉되어진 금속시험편의 나사 끝단부가 진공, 압축공기 및 시험편 형상의 문제로 인하여 시험편과 호른사이에 수분이 침입하여 그 부분에서 캐비테이션이 일어나는 등의 원인에 의해 파단되어진 것으로 사료된다. Bronze와 SUS 316L의 경우에는 인성이 SS400, Cast iron보다 높아 깨어지지 않은 것으로 사료된다.

Photo.4의 (c)는 금속과 DL간의 전처리 잘못으로 인해 계면사이의 결합력이 약화되어 2시간만에 파손된 것으로 사료된다. 이것을 해결하기 위해 금속시험편 표면에 거친줄을 이용하여 전처리를 하여 시험하였다.

Photo.4의 (d)는 (c)와 같은 파손을 피하기 위하여 전처리를 거친줄에 의해 행한 후 시험하였으나 4시간 이후 파손된 모습이다. 이것은 피복복합재와 금속의 계면사이로 수분이 들어가 이 부분에서 캐비테이션이 발생, 피복복합재의 결합력이 약한 부분에서 파손이 일어난 것으로 사료된다. 피복복합재의 경우에는 거친줄에 의해 전처리를 하였지만 실험시간 4시간 이후에 파괴되어 더 이상의 실험을 진행할 수 없었다.

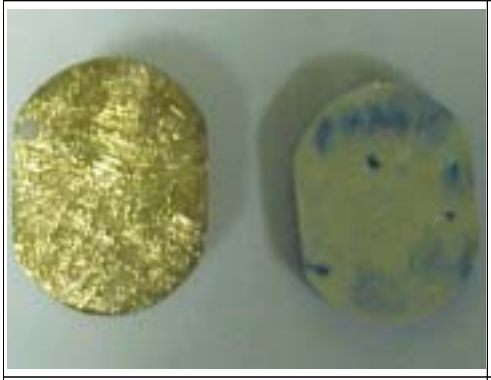
(a) Cast iron	(b) SS400
	
(c) Duratough DL	(d) Ceramalloy CL

Photo.4 Fractured surface in standard test.

3.3 무게감소율에 의한 시험법의 비교

3.3.1 금속시험편의 비교

ASTM G-32 규정에 의해 행해진 개선된 시험에서의 무게감소는 표준시험에서 얻어지는 캐비테이션 침식에 의한 무게 감소의 40 ~ 60%정도 이다[18].

개선된 시험의 침식량과 표준시험에서의 침식량에 대한 비교는 식(1)과 같다.

$$\text{비교침식량} = \frac{\text{개선된 시험의 침식량(mg)}}{\text{표준시험의 침식량(mg)}} \times 100 \quad \cdots\cdots \text{식(1)}$$

Fig.9에서 알 수 있는 것과 같이 본 실험에 사용한 금속시험편의 경우 증류수와 해수에 관계없이 개선된 시험에서 얻어진 침식량은 표준시험에서 얻어진 침식량의 40~60% 정도의 차이를 보인다.

예를 들어, Bronze의 경우 증류수에서는 58%, 해수에서는 40%의 무게감소를 보이고 있다. 증류수에서의 침식량보다 해수에서의 침식량이 높은 이유는 증류수 보다 해수의 밀도가 크고 다른 불순물의 영향에 의해 침식량이 크게 나타난 것으로 사료된다.

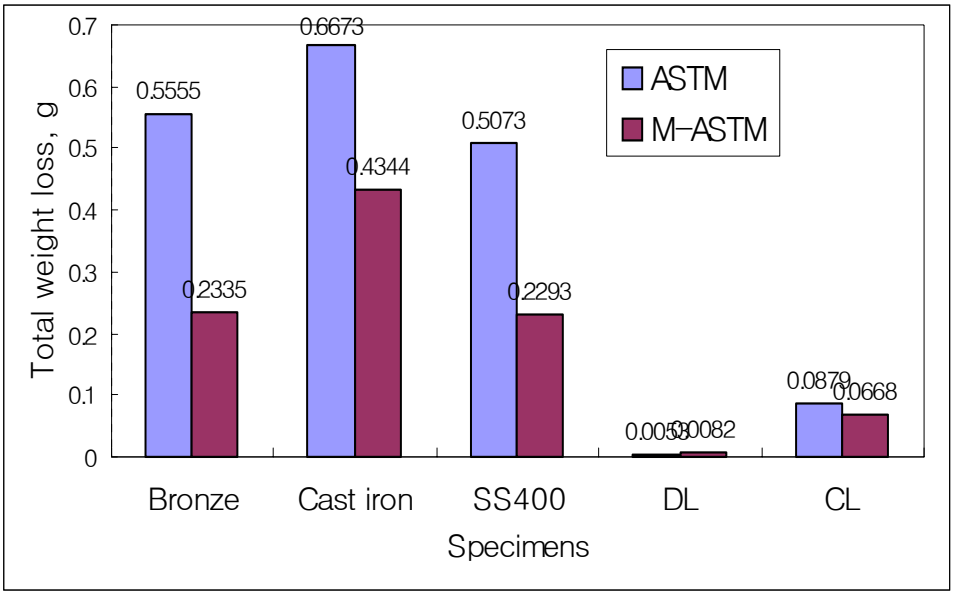
3.3.2 피복복합재의 비교

표준시험시 피복복합재의 경우, 4시간 이후에는 시험편의 계면에서 박리가 발생하여 24시간까지의 실험을 진행하지 못하고 4시간까지의 침식량을 측정하여 개선된 시험과 비교를 하였다.

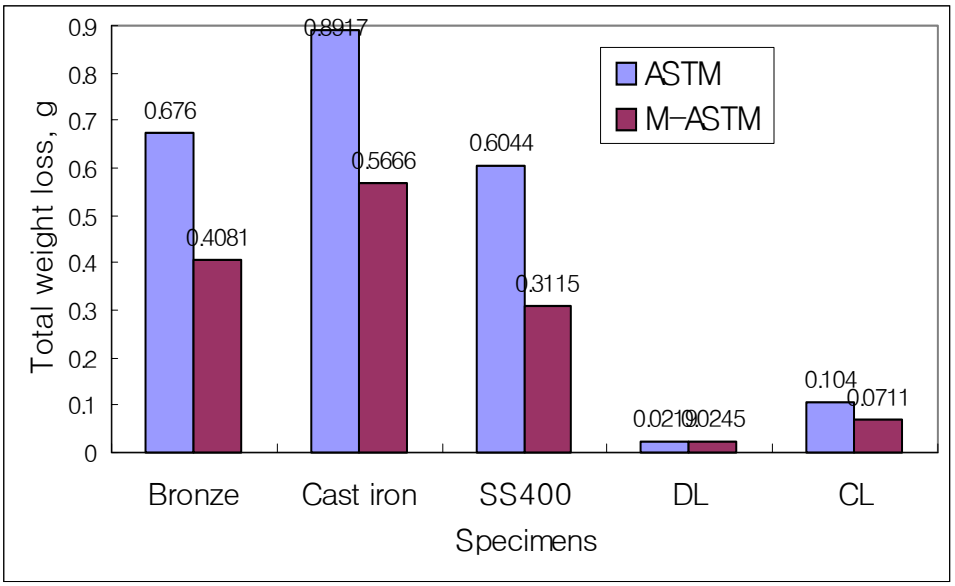
Fig.9에서 피복복합재인 DL과 CL의 표준시험과 개선된 시험의 총무게 감소량은, 증류수의 경우에는 각각 0.0053 : 0.0082, 0.0879 : 0.0668이고, 해수의 경우는 0.0219 : 0.0245, 0.1040 : 0.0711이다.

Fig.9에서 알 수 있듯이 피복복합재의 경우에는 개선된 시험과 표준시험과의 비교시 CL의 경우 비교 침식량은 증류수에서 24%, 해수에서는 32%정도의 침식량 차이를 보인다. 그러나 DL의 경우에 비교 침식량은 증류수에서는 155%, 해수에서는 112%을 나타낸다. 이것은 오히려 개선된 시험에서의 침식량이 표준시험에서의 침식량보다 높게 나온 것을 의미한다.

이러한 원인은 표준시험시 초음파가 복합재에 의해 피복된 시험편의 계면에서 산란이 일어나고, 복합재 시험편에 존재하는 기공들에 의해 초음파가 산란되는 진동 감쇄가 발생한다. 그 결과 시험편에서의 캐비테이션 기포수가 감소하여 표준시험시 침식량이 작게 나타난 것으로 사료되어진다.



(a) Distilled-water



(b) Sea-water

Fig.9 Comparison between standard test and modified test with decreasing total weight loss in distilled-water and sea-water.

3.3 피복복합재의 추정치와 금속재간의 침식량 비교

3.3.1 증류수중에서의 캐비테이션 침식거동

피복복합재와 금속재 시험편의 진동캐비테이션 시험에서 표준시험으로는 4시간 이상 비교할 수가 없었으며, 금속재 시험편으로 개선된 시험을 비교하였을 경우, 증류수와 해수에서 일정한 침식경향을 나타내지 못하므로 다음과 같은 방법에 의해 피복복합재와 금속재의 캐비테이션 침식량을 비교하였다. 먼저, 금속의 경우 표준시험에 의한 무게감소량으로 비교하였으며, 피복복합재의 경우에는 개선된 시험에 의해 피복합재의 무게감소량을 구한 후 금속 시험편에서 나온 보상량인 40~60%를 보정한 무게감소량을 식(2)에 의해 계산하였다.

x는 개선된 시험의 침식량에 40%의 무게감소량을 보상한 값
y는 개선된 시험의 침식량에 60%의 무게감소량을 보상한 값

$$x = \frac{\text{개선된 시험의 침식량(mg)}}{0.4}$$

$$y = \frac{\text{개선된 시험의 침식량(mg)}}{0.6} \qquad \text{식(2)}$$

위에서 계산된 침식량을 식(3)에 의해 금속재와 추정된 피복복합재의 평균 침식 깊이(MDPR)를 계산하였다.

이때 피복복합재의 평균 침식 깊이는 40 ~ 60%의 그래프가 나타내는 영역이 될 것이며, 본 논문에서는 침식 깊이의 비교시 피복복합재의 침식 깊이는 최대값으로 비교를 하였다.

금속과 피복복합재의 침식 깊이를 비교한 것이 Fig.10이고, 침식속도를 비교한 것이 Fig.11이다.

$$\frac{\text{표준시험에서의 침식량(mg)}}{\text{시험편의 밀도(㎎/㎟)}} = \text{시험편의 체적 감소량(㎟)}$$

$$\frac{\text{시험편의 체적 감소량(㎟)}}{\text{시험편의 면적(㎟)}} = \text{평균침식깊이(㎜)} \qquad \text{식(3)}$$

Fig.10는 증류수 중에서 시간단위별 평균침식깊이의 누적을 나타내고 있으며, 캐비테이션 침식이 가장 잘 발생하는 것은 CL > Cast iron > Bronze ≒ SS400 > SUS316L > DL의 순서이다.

Fig.11의 그림에서 알 수 있듯이 금속 시험편의 경우 초기 30분까지는 침식량의 작은 증가를 보이고 있으며, 1시간부터 4시간까지는 일정하게 유지, 4 ~ 8시간까지는 감소, 8시간 이후부터는 일정한 경향을 보이고 있다.

그러나 피복복합재인 CL의 경우 4시간까지 증가를 보이며, 4~8시간 까지는 감소, 8~12시간까지는 일정, 12~16시간까지는 감소, 16시간이후부터는 침식량이 일정하게 나타나는 것을 알 수 있다. 여기서 16시간 이후 갑자기 침식량이 하락하여 일정하게 유지되는 원인으로는 거리를 일정하게 유지한 개선된 시험에서

12시간까지의 침식깊이가 깊어짐에 따라 거리에 따른 캐비테이션 기포수가 감소하고 액적의 충격력이 약해짐에 따라 일어나는 현상으로 사료된다. 이러한 그래프를 나타내는 것이 Fig.17에 나타내어져 있다.

DL의 경우에는 일반적인 금속의 경우와는 다르게 증가 및 감소가 나타나지 않고 거의 일정한 양상을 나타낸다. 이러한 원인은 Duratough DL이 캐비테이션시 발생되는 마이크로젯(microjet)에 대해 점탄성 변형을 하면서 충격파를 흡수하기 때문인 것으로 사료된다.

충격응력(Impact stress)은 금속의 성질과 비교하여 Duratough DL의 낮은 Acoustic impedance로 인해 충격응력이 약해지고 충격응력이 Duratough DL로 방산되기 때문에 더욱 충격응력이 약화되는 것으로 사료된다.

이러한 것을 이용하여 항공기에서는 Radome(항공기의 외부레이다용 안테나 플라스틱 덮개)에 Polyuethan을 코팅하여 사용하고 있어 Flexibility를 가진 재질이 캐비테이션에 유용한 영향을 미친다는 보고가 있다.[19, 20]

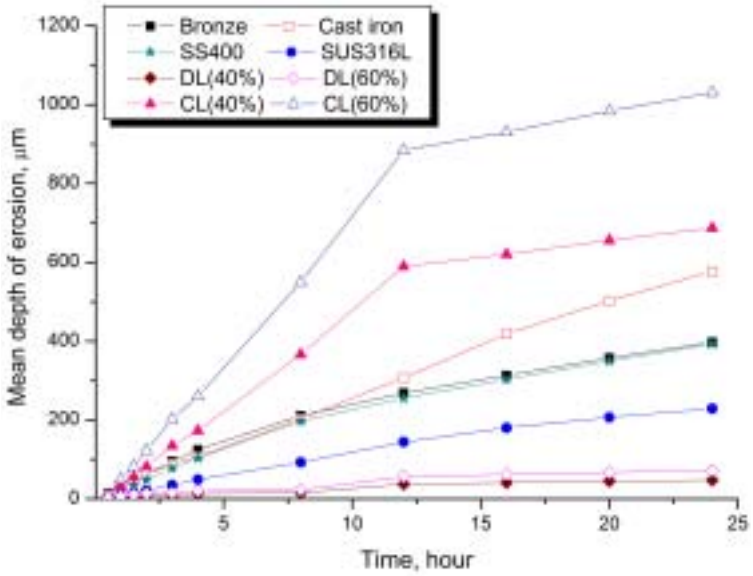


Fig.10 Comparison between an estimated amount of coated composite material and metals in distilled-water.

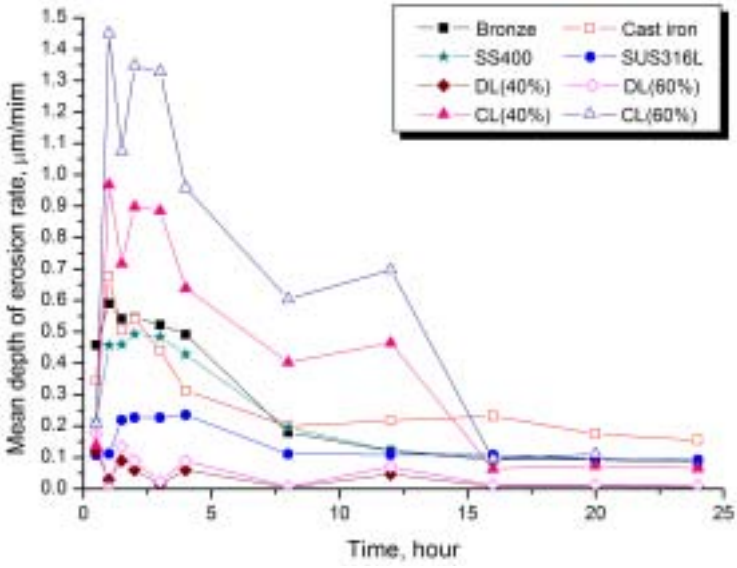


Fig.11 Mean depth of erosion rate vs testing time for an estimated amount of coated composite material and metals in distilled-water.

3.3.2 해수중에서의 캐비테이션 침식거동

해수중에서 개선된 시험에 의해 얻어진 피복복합재의 침식량을 앞의 식(2)와 (3)에 의해 평균 침식 깊이를 계산하였다. 보상된 피복복합재와 금속재간의 평균 침식 깊이 및 침식율을 비교한 것이 Fig.12 ~ 13에 나타내어져 있다.

Fig.12는 시간단위별 평균 침식 깊이 누적을 나타내고 있으며, 캐비테이션 침식이 가장 잘 발생하는 것은 CL > Cast iron > SS400 ≒ Bronze > SUS316L ≒ DL의 순서이다.

SS400과 Bronze의 경우, 증류수와 해수에서의 캐비테이션 침식속도는 Fig.11과 Fig.13에서 보여주는 것과 같이 초기에는 서서히 증가한 후 안정을 유지한다. 이러한 원인은 초기 기포가 금속표면에 충격을 주어 금속 표면이 경화되는 소성가공경화를 일으켜 기포의 충격파에 의한 무게감소가 적게 일어난다. 이것이 안정기가 되는 1시간 이후부터는 소성가공경화에 의한 무게감소가 일정하게 일어나게 된다.

SUS316L의 침식율이 DL과 비슷하게 나오는 것은 경우 40 ~ 60%를 보정하여 최대값을 선정하였기 때문이며, 40 ~ 60%사이로 보면 오히려 SUS316L보다 높은 내캐비테이션 성향을 보인다.

Fig.13에서 보여지는 CL, Cast iron, Bronze, SUS316L, SS400은 앞의 Fig.11과 비슷한 경향을 보이고 있다.

그러나 DL의 경우 30분까지는 증가, 90분까지는 감소, 다시 2시간부터 증가, 4시간이후 부터는 안정화되어 간다.

처음의 30분까지 침식률이 증가하는 이유는 초기 캐비테이션 침식시험시 시료표면의 전처리 부족에 의해 접착력이 부족한 부위와 DL의 경화제 혼합시 혼입된 기포에 의해 얇게 형성된 피막 부위가 떨어져 나감으로써 침식율이 급격히 증가한 것으로 보인다. 90분부터 증가한 원인은 표면의 기공부가 노출되면서 피복이 찢어지고 떨어져서 일어난 현상이라 사료된다.

Fig.10, Fig.12에 의해 추정된 피복복합재의 캐비테이션 침식거동을 금속과 비교하기 위하여 평균 침식 깊이(MDPR)를 나타낸 결과 증류수에서는 DL이 가장 낮고 해수에서는 DL과 SUS316L이 가장 낮게 나타나고 있으며, CL은 증류수와 해수에서 가장 높게 나타났다. 그리고 증류수와 해수에서의 DL 침식율 차이는 약 3배 정도 발생하며 그 원인으로는 해수가 증류수보다 점성과 밀도가 높아 마이크로 젯의 충격파에 대한 폭발력이 커지기 때문에 침식률이 증가한 것으로 사료된다.

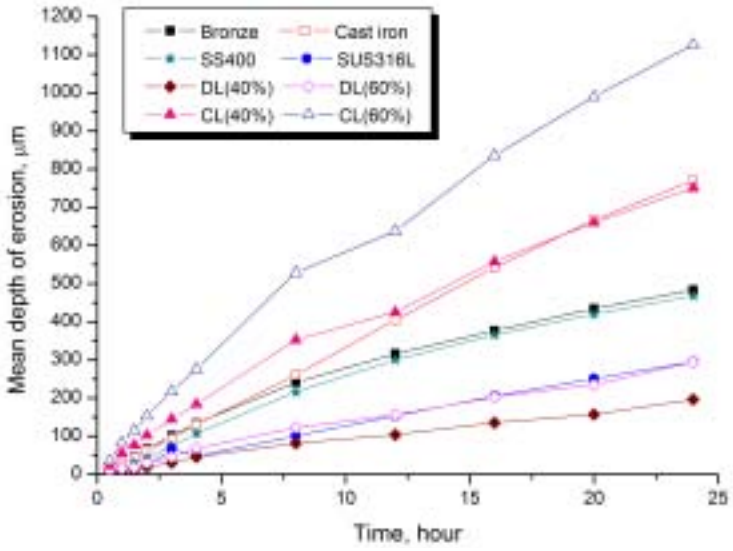


Fig.12 Comparison between an estimated amount of coated composite material and metals in sea-water.

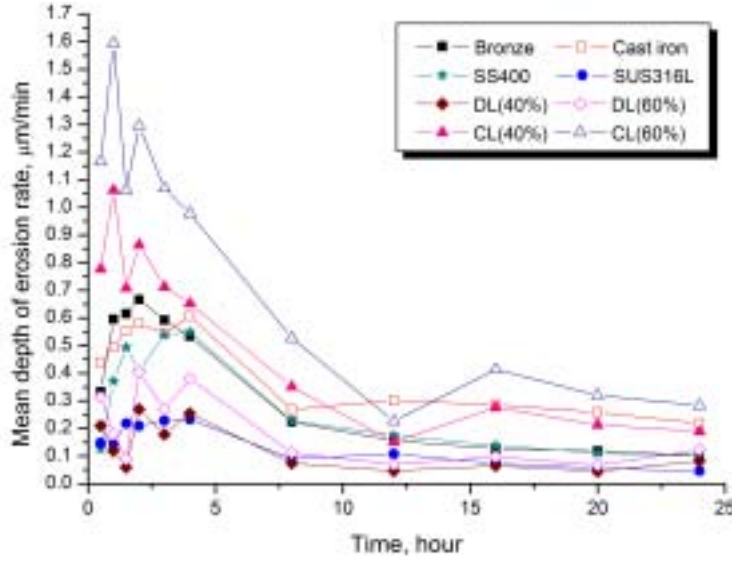


Fig.13 Mean depth of erosion rate vs testing time for an estimated amount of coated composite material and metals in sea-water.

3.4 표준시험과 개선된 시험에서 유체온도의 변화

캐비테이션 시험에서 시험유체의 온도가 상승함에 따라 침식량이 계속적으로 증가하다가 시험유체의 공기압이 증가하는 끓는점 근방에서는 침식량이 감소하는 온도의 영향을 Fig.14에서 보여주고 있다.[10, 21]

Fig.15에서 T_1은 시험시작 1분후에 온도를 측정한 값이고, T_2는 시험종료 1분전에 시험편과 시험용액 사이의 온도를 측정한 값이다.

Fig.15에서 보여지는 것과 같이 표준시험법에 의한 온도의 변화는 시험횟수의 약80%정도가 오차범위인 ±2℃이내에 들어가나, 개선된 시험법은 RE시험편과 시험편 사이의 거리(0.5mm)가 짧아 캐비테이션 시험기에서 나오는 열, 버블과 캐비티의 충격파에 의해 생기는 열을 냉각시키지 못하여 온도차(최대 9℃)가 심하게 나타남을 알 수 있다.

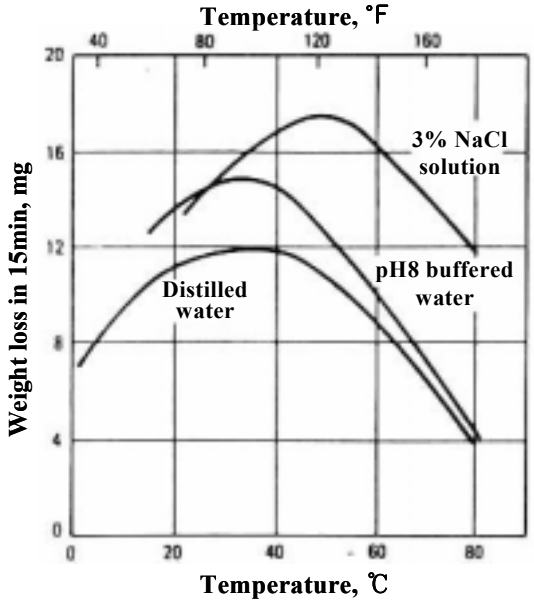


Fig.14 Influence of temperature on the erosion rate of plain carbon steel in a vibratory cavitation device.

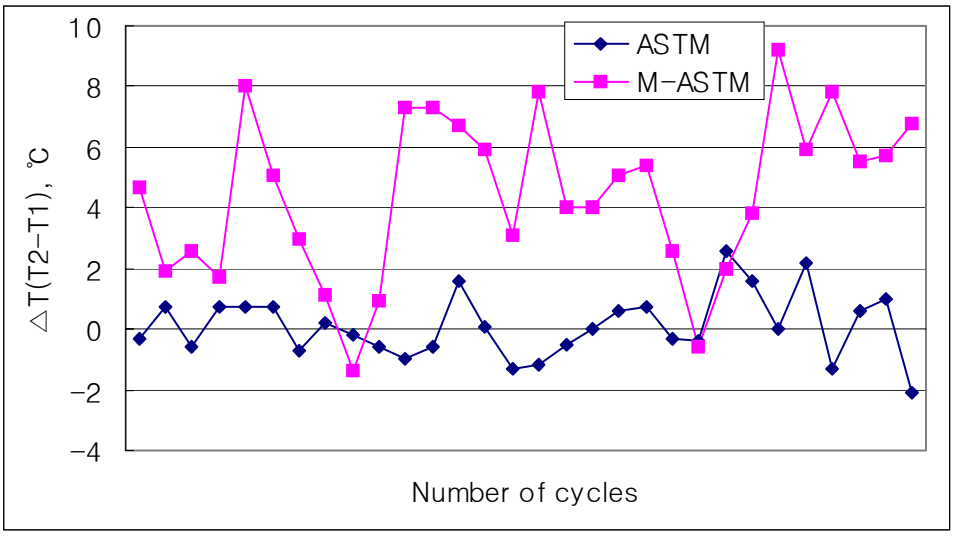


Fig.15 Comparison between standard test and modified test by $\triangle T(T_2 - T_1)$.

3.5 개선된 시험에서 시험거리에 따른 시험유체의 온도와 침식량 변화

3.5.1 개선된 시험에서 거리에 따른 유체온도 변화

거리에 따른 온도 변화를 측정하기위해 사용된 시험편은 CL이며, 해수환경 중에서 행하였다. 그 이유로는 해수환경은 액적의 점성과 밀도가 크므로 이로 인한 버블의 폭발 시 충격이 더욱 커져 온도가 높게 나타날 것으로 예상되었기 때문이다.

Fig.11은 개선된 시험에서 RE시험편과 시험편 사이의 거리변화에 따른 온도변화를 보여주고 있다. 온도변화가 가장 심한 순서는 거리가 0.5 > 1 > 1.5> 2mm의 순서이며, 여기서 0.5mm일때는 온도변화의 폭이 심한 반면, 1mm이상에서는 온도변화가 ±2℃이내에 근접하고 있는 것을 알 수 있다.

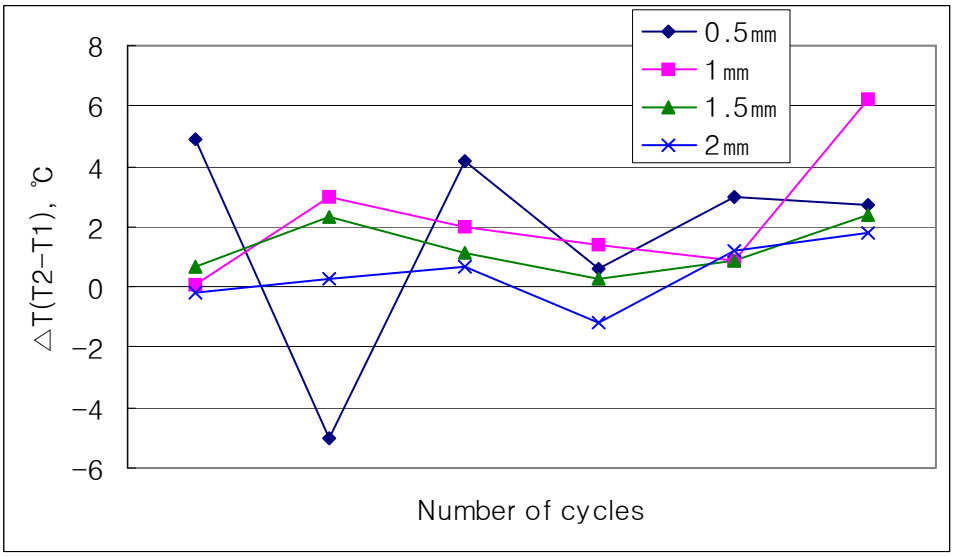


Fig.16 $\triangle T(T_2-T_1)$ according to various space in sea-water.

3.5.2 개선된 시험에서 거리에 따른 무게 변화

Fig.13에서의 그래프와 같이 시간이 지남에 따라 무게감소율의 순서는 0.5 > 1 > 1.5 > 2mm의 순서로 나타났다. 1mm와 0.5mm에서의 누적 침식량은 거의 일정하게 나타나고 있으나 1.5mm 보다 멀어질 경우에는 침식량의 급격한 차이를 보이고 있다.

이것은 캐비테이션 발생장치로부터 거리가 떨어짐에 따라 캐비테이션 기포수가 감소하고 기포소멸시 충격력이 감소하여 침식의 세기가 작아지는 것으로 사료된다.[22]

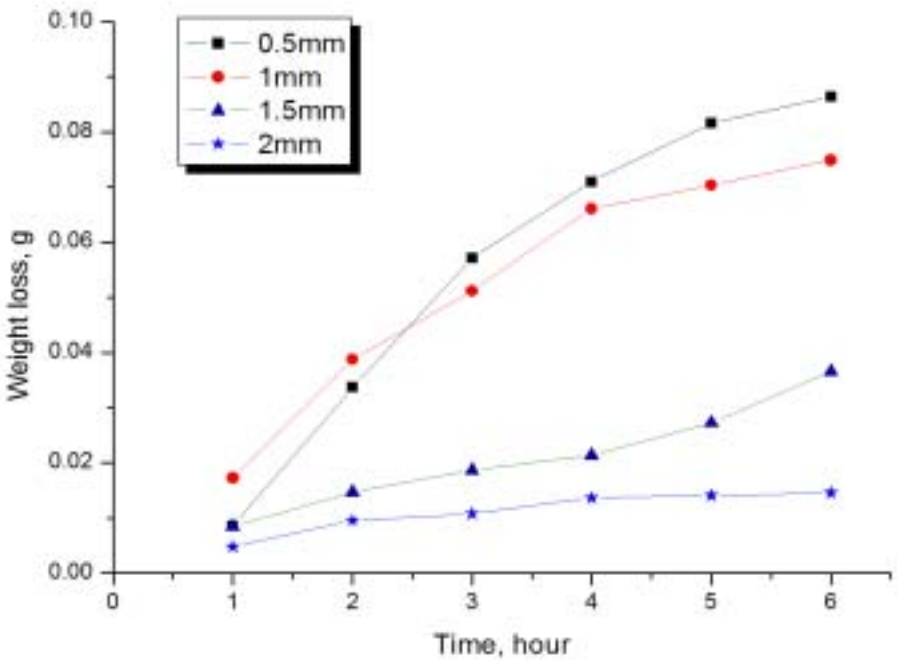


Fig.17 Weight loss vs testing time according to various space in sea-water.

3.6 환경에 따른 캐비테이션 침식표면 형상 비교

3.6.1 금속재의 침식표면

Photo.5 ~ Photo.12까지는 금속시험편의 시간대별 캐비테이션 침식 양상을 보여주고 있다.

본 사진에서와 같이 금속 시험편은 유체의 종류, 재료의 특성에 따라 약간 다르게 나타나지만, 아래와 같은 일반적인 특징을 가진다.

가장 먼저, 캐비테이션 기포의 충격력에 의해 금속시험편의 표면에 소성변형이 생겨 재료의 광택이 사라지는 가공경화가 일어난다. 그후, 금속표면의 산화피막과 이중층이 서서히 탈락하여 침식소공이 형성된다. 금속 시험편의 표면에 수개의 침식소공이 발생하고 성장하여 재료의 노출면적이 증대함에 따라 손상속도가 촉진되는 단계에 이른다. 이후, 전 재료표면에 침식손상이 발생하는 양상으로 되며, 손상면의 침식 소공에 흡착된 기포의 완충작용으로 침식손상 상태가 거의 일률적으로 일어나는 안정화 단계에 이르게 된다.

유체용액에 상관없이 침식형태를 고찰하여 보면, 초기 침식의 형태는 시편의 표면 가장자리부터 방사형태의 침식소공이 형성되어 점차 중심부로 성장하는 모습을 관찰 할 수 있다.

Fig.10과 Fig.12를 비교하여 관찰하면 증류수에서의 캐비테이션 침식량보다 해수에서 더 높은 침식량을 나타내고 있으며, Photo.5 ~ Photo.12를 통하여 증류수의 침식면과 해수에서의 침식면을 비교하면, 증류수 중에서의 캐비테이션 침식손상 표면은 대부분 기포의 충격파에 의한 기계적인 손상으로 인해 비교적 평활하게 나타나고, 해수 중에서의 침식소공은 더 날카롭게 나타난다. 이러한 원인은 증류수 보다 해수의 밀도가 높아 캐비티(cavity)의 폭발시 더 높은 충격을 가하고, 부식에 의한 손상이 표면에 가중된 것으로 사료된다.

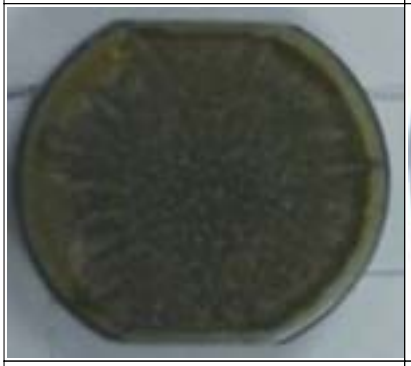
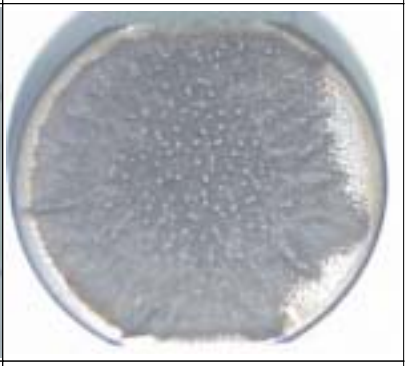
Cast iron D 0h	Cast iron D 1h
	
Cast iron D 2h	Cast iron D 4h
Cast iron D 12h	Cast iron D 24h

Photo.5 Successive observation of damaged surface according to test time(0, 1, 2, 4, 12, 24 hour) in distilled-water for Cast iron.

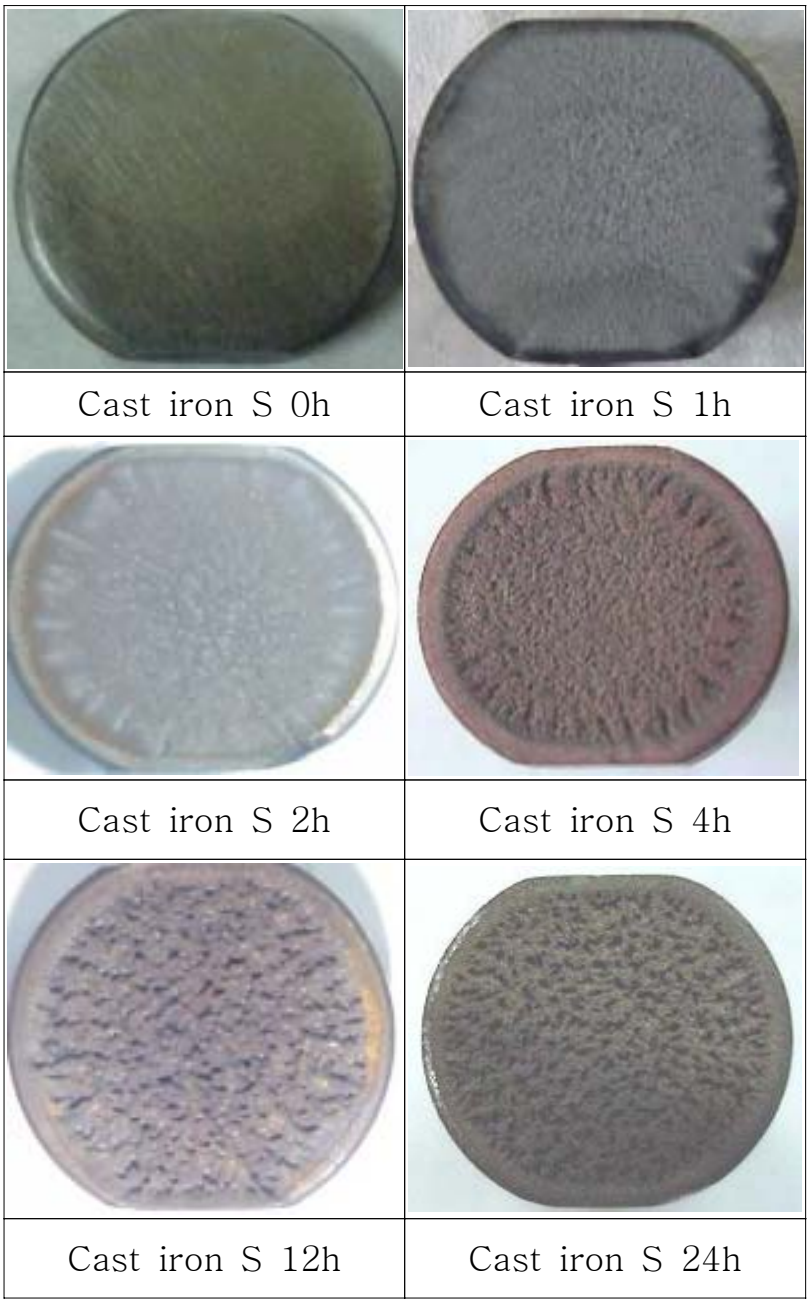


Photo.6 Successive observation of damaged surface according to test time(0, 1, 2, 4, 12, 24 hour) in sea-water for Cast iron.

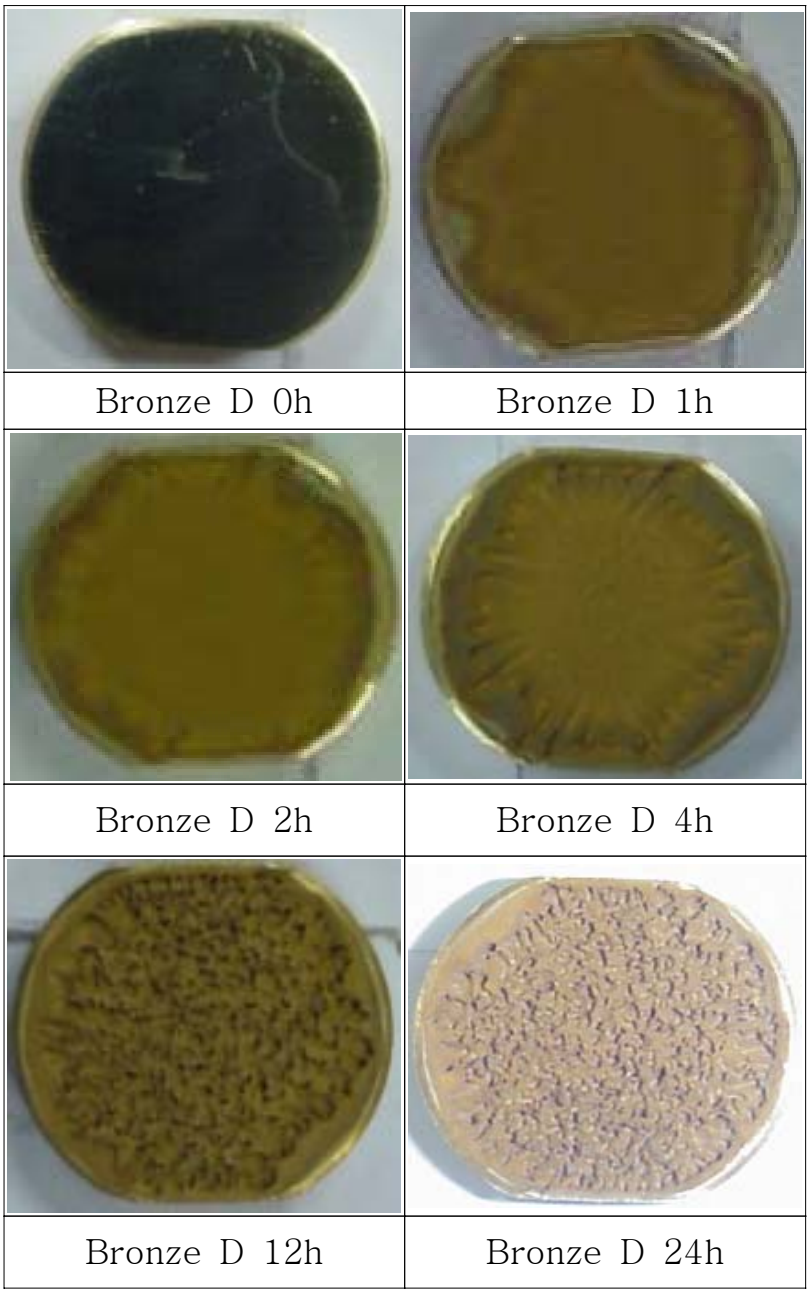
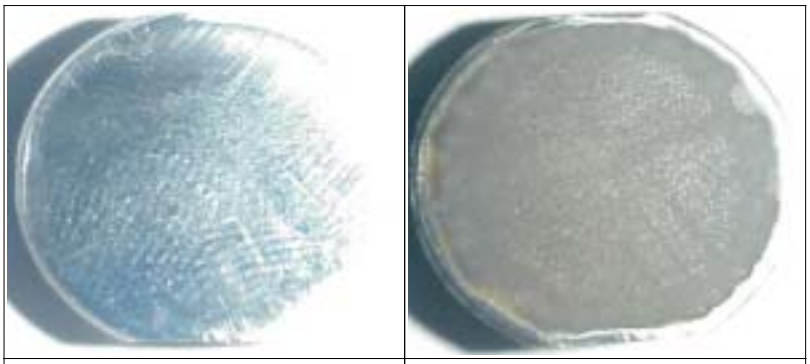


Photo.7 Successive observation of damaged surface according to test time(0, 1, 2, 4, 12, 24 hour) in distilled-water for Bronze.

Photo.8 Successive observation of damaged surface according to test time(0, 1, 2, 4, 12, 24 hour) in sea-water for Bronze.



SS400 D 0h	SS400 D 1h

SS400 D 2h	SS400 D 4h

SS400 D 12h	SS400 D 24h

Photo.9 Successive observation of damaged surface according to test time(0, 1, 2, 4, 12, 24 hour) in distilled-water for SS400.

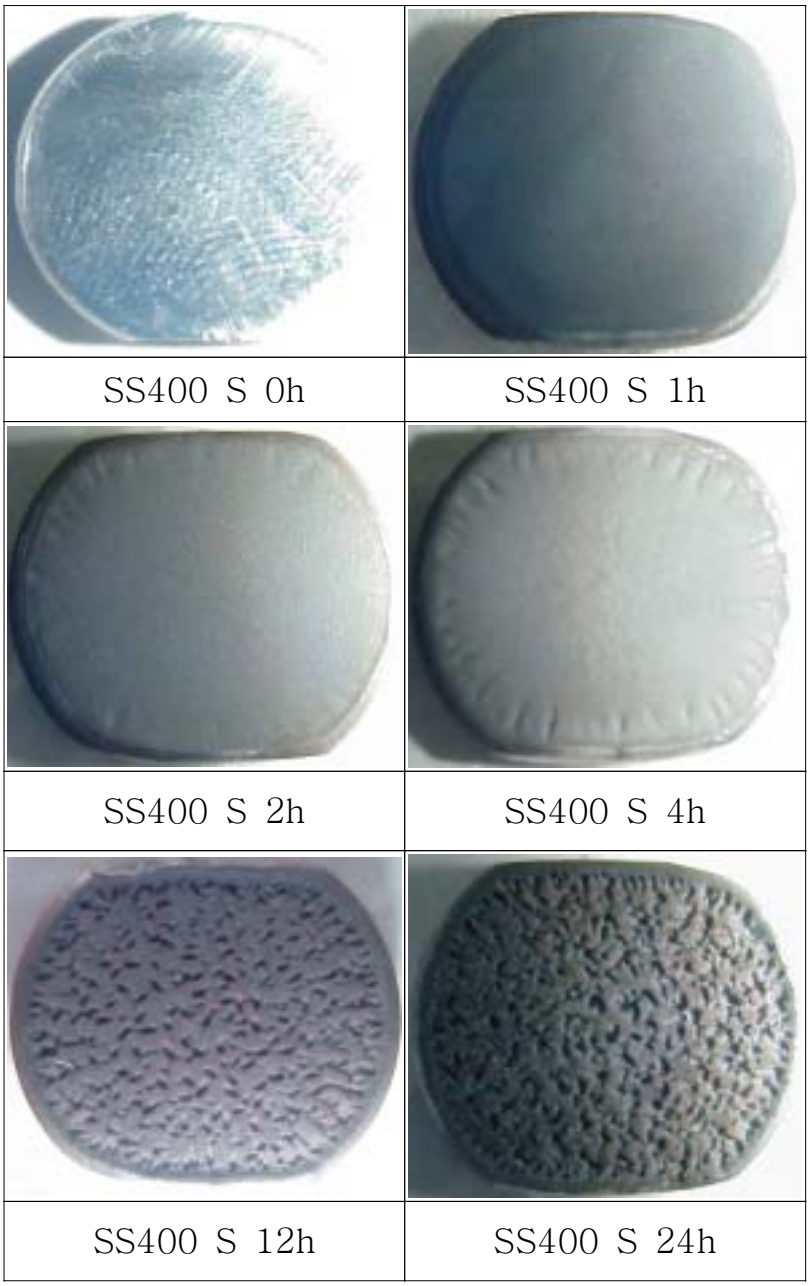
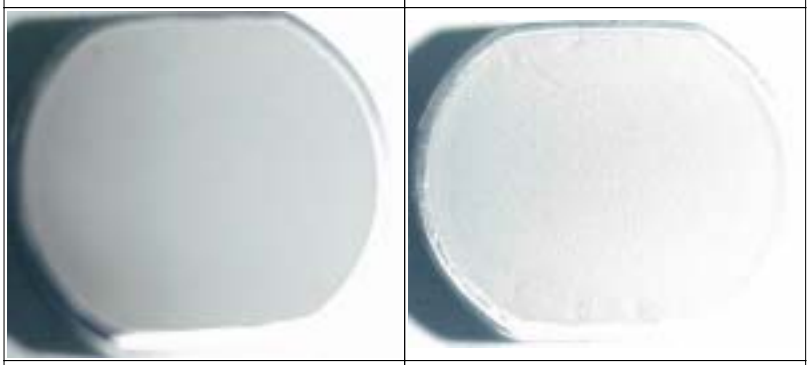
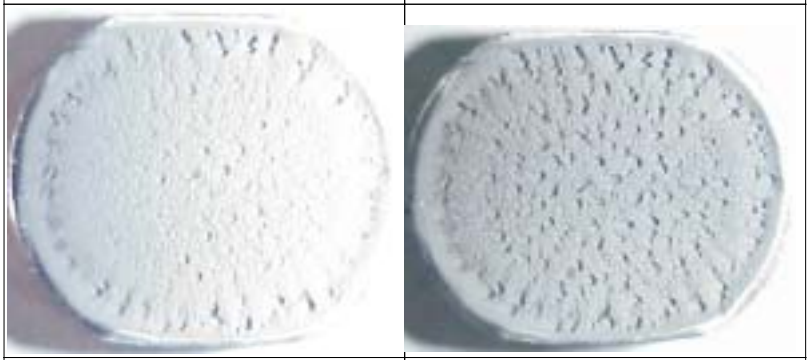


Photo.10 Successive observation of damaged surface according to test time(0, 1, 2, 4, 12, 24 hour) in sea-water for SS400.

SUS316L D 0h	SUS316L D 1h



SUS316L D 2h	SUS316L D 4h



SUS316L D 12h	SUS316L D 24h

Photo.11 Successive observation of damaged surface according to test time(0, 1, 2, 4, 12, 24 hour) in distilled-water for SUS316L.

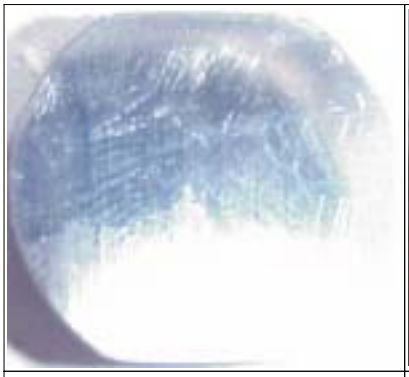
	
SUS316L S 0h	SUS316L S 1h
SUS316L S 2h	SUS316L S 4h
SUS316L S 12h	SUS316L S 24h

Photo.12 Successive observation of damaged surface according to test time(0, 1, 2, 4, 12, 24 hour) in sea-water for SUS316L.

3.6.2 피복복합재의 침식표면

Duratough DL

Photo.13 ~ 14은 개선된 시험에서의 캐비테이션 침식을 보여주고 있다. Photo.13는 증류수에서의 DL에 대한 캐비테이션 침식을 보여주며, Photo.14는 해수에 대한 캐비테이션 침식을 보여주고 있다. 복합피복재 DL은 금속과는 다르게 주변부에서 캐비테이션이 발생하는 것이 아니라 주변부부터 중심부까지 분산되어 캐비테이션이 발생하고 있다. 이러한 원인은 시험편의 제조시 기포가 표면층에 내재되어 취약한 표면부터 침식소공이 발생한 것으로 사료된다.

고분자 소재인 DL의 경우 캐비테이션중 발생되는 마이크로젯(microjet)에 대해 점탄성 거동을 하여 충격파를 흡수하기 때문에 금속의 경우와는 다르게 침식소공의 크기가 크게 진전하지 않는 모습을 보여주고 있다.

Photo.14에서는 2시간이후 기포가 있는 시험편 표면에서 찢어져 떨어져 나간 DL 시험편의 모습을 보여주고 있으며, Fig.13과 비교하여 보면 2시간부터 4시간사이에 침식율이 증가한 원인으로 사료된다. DL시험편 표면을 증류수와 해수에서 비교하면 해수환경 하에서의 침식표면에서의 기공이 많고 표면이 거칠게 나타나는데, 이러한 원인은 해수의 점성이 높아 마이크로젯의 폭발력이 훨씬 높기 때문인 것으로 사료된다.

Ceramalloy CL

Photo.15~16은 개선된 시험에서 CL의 시간변화별 침식양상을 나타내고 있다. 2시간까지는 시험편 제조시 내부의 기포가 잔재한 표면부터 먼저 캐비테이션이 발생하고 시험편 전체에서 침식소공이 발생하고 있다. 침식소공의 형태는 딤플모양으로 소공수가 많고 조밀하다.

Fig.11, Fig.13에서 12시간까지 침식이 높게 일어나고 그 이후부터는 점차적으로 일정하게 나타나고 있다. 그 원인으로 Photo.15~16에서 12시간까지는 거친 표면과 깊은 침식율을 보이고 있으나 침식율이 깊어짐에 따라 캐비테이션 버블의 수와 충격력이 감소하여 24시간에서는 표면부중 거친 부위에서 선택적으로 캐비테이션이 발생하여 재료의 표면이 평탄하게 나타나는 것으로 사료된다.

증류수와 해수에 대해 비교하면 해수에서 침식표면이 거칠고 깊은 것을 알 수 있다. 이러한 원인은 해수가 증류수보다 점도가 높아 캐비테이션 기포가 폭발할 때 충격력이 커졌기 때문에 이와 같은 현상이 일어난 것으로 사료된다.

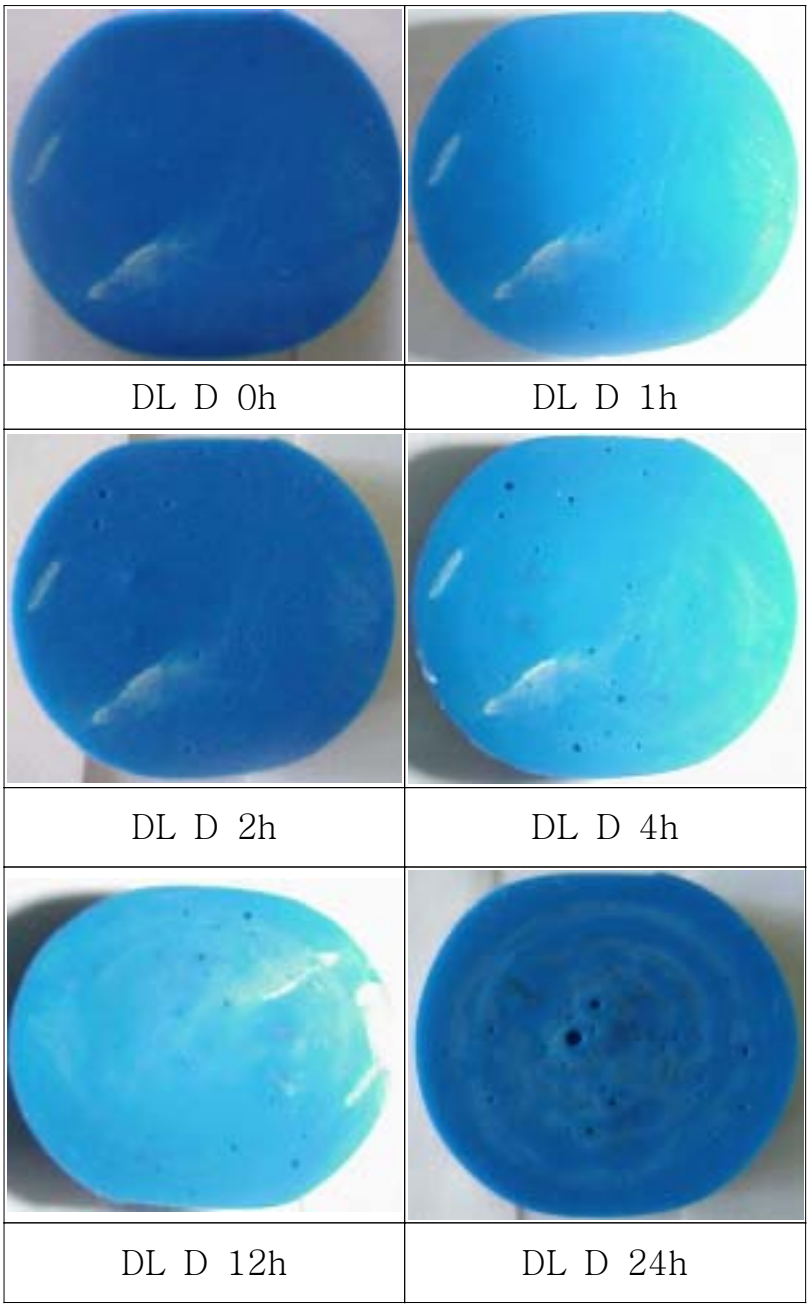


Photo.13 Successive observation of damaged surface according to test time(0, 1, 2, 4, 12, 24 hour) in distilled-water for Duratough DL.

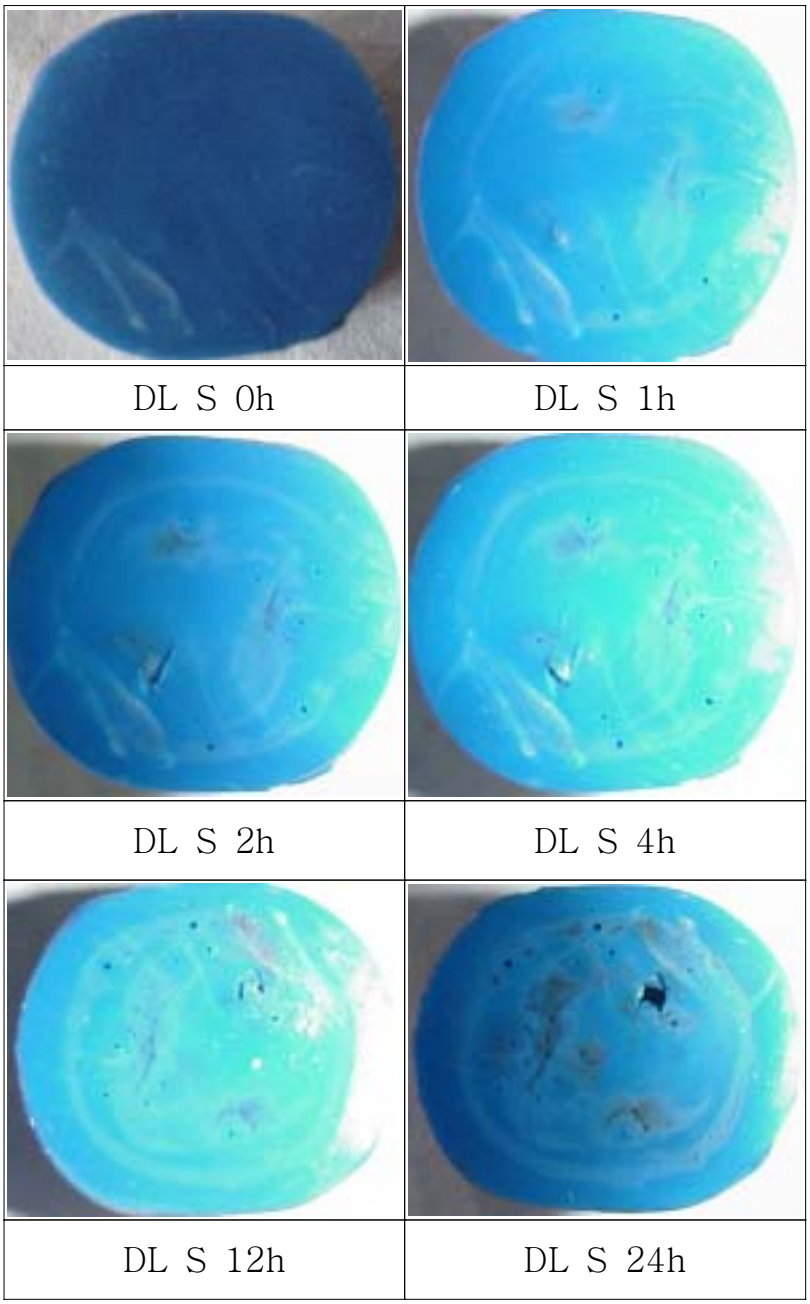


Photo.14 Successive observation of damaged surface according to test time(0, 1, 2, 4, 12, 24 hour) in sea-water for Duratough DL.

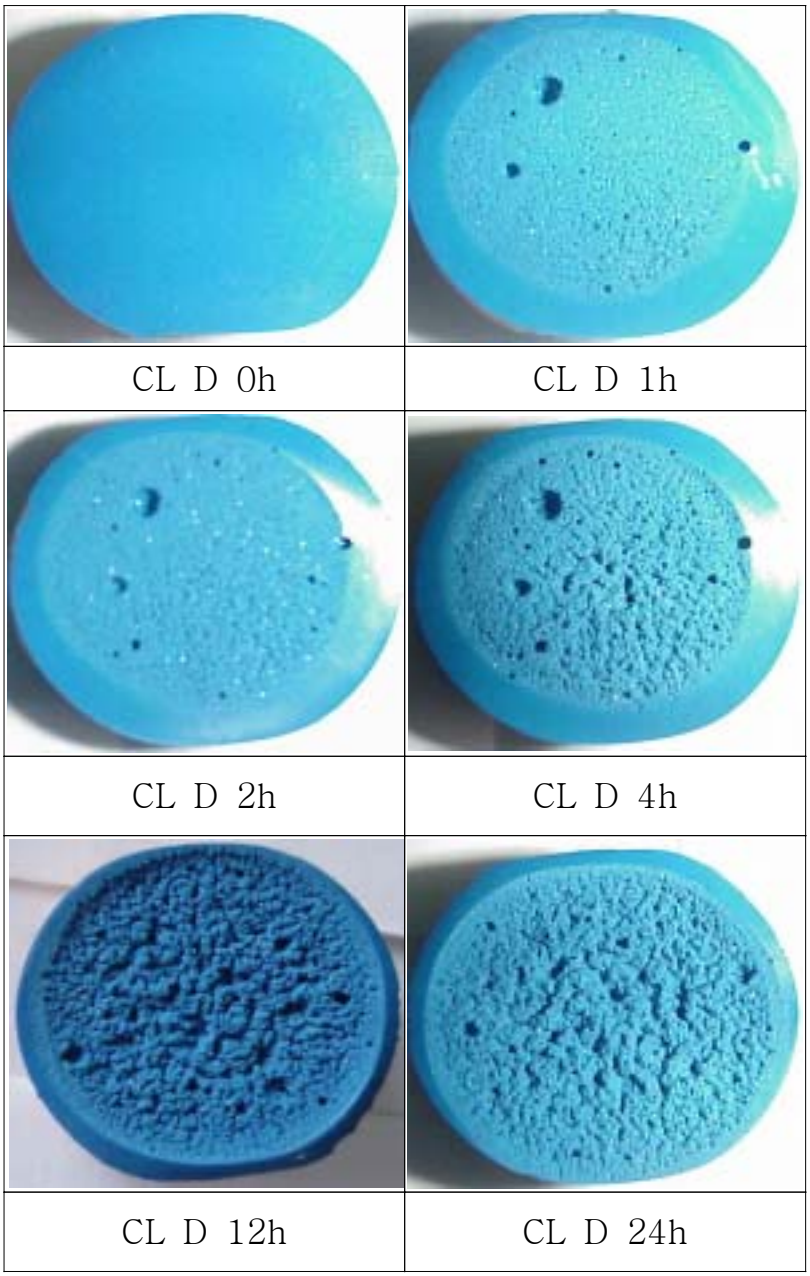


Photo.15 Successive observation of damaged surface according to test time(0, 1, 2, 4, 12, 24 hour) in distilled-water for Ceramalloy CL.

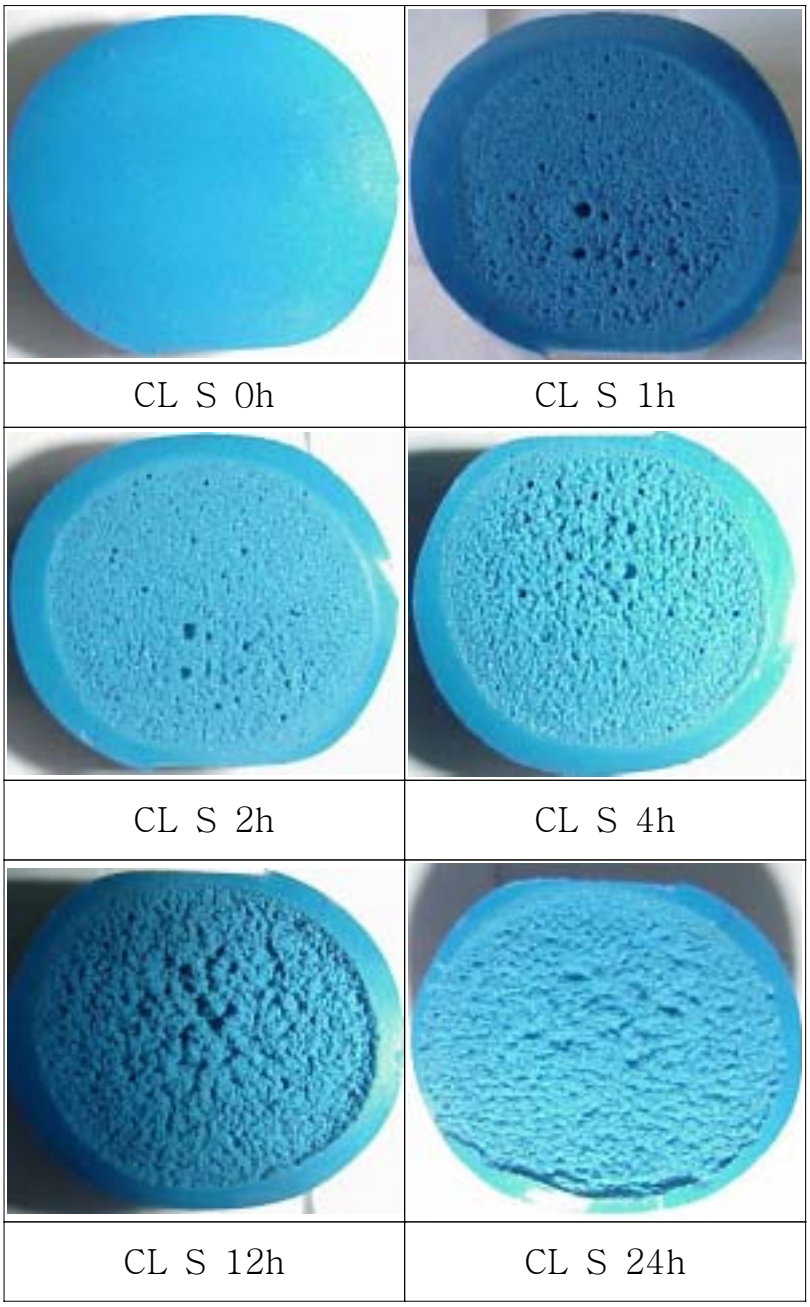


Photo.16 Successive observation of damaged surface according to test time(0, 1, 2, 4, 12, 24 hour) in sea-water for Ceramalloy CL.

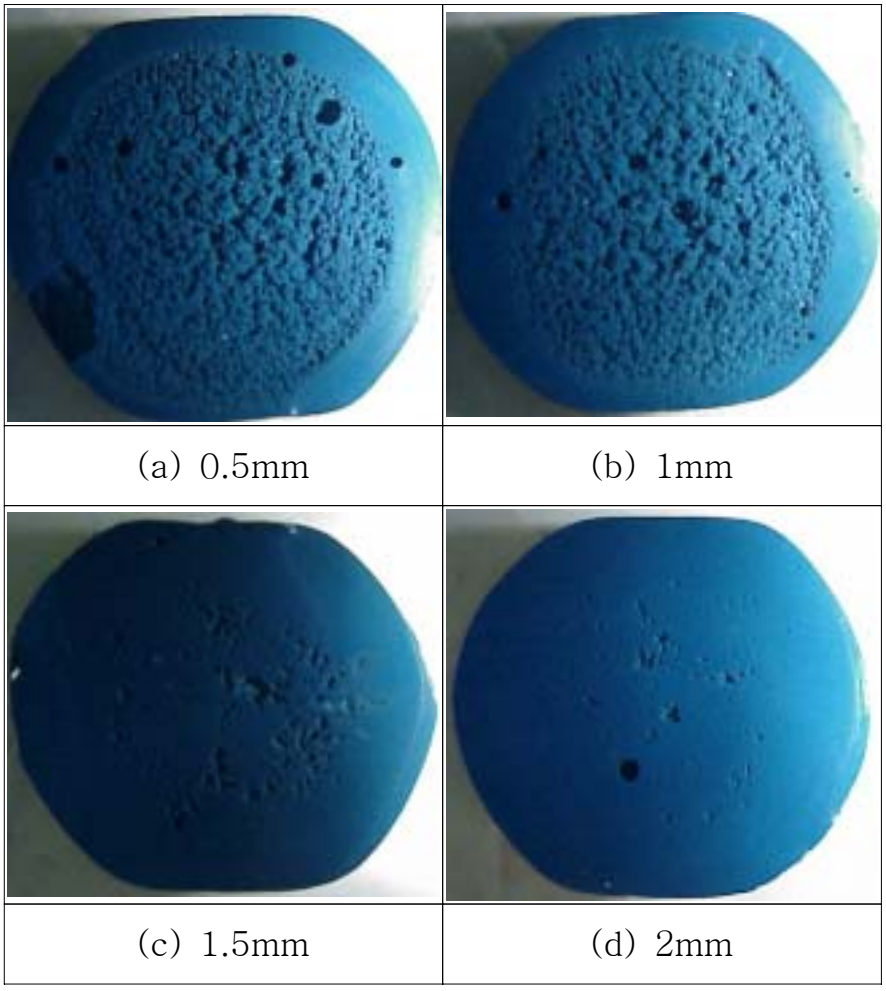
3.6.3 개선된 시험에서 거리에 따른 침식 표면

Photo.17는 해수중에서 개선된 시험의 거리에 따른 침식양상을 보여주고 있으며, 개선된 시험의 거리에 따라 침식양상이 달라짐을 알 수 있다.

진동호른과 시험편사이의 거리가 멀어질수록 캐비테이션 기포수와 충격력이 약하여 점점 더 표면에 피해를 주지 못하고 있는 것을 알 수 있다. 그러나 0.5mm, 1mm에서는 큰 차이를 보이고 있지 않지만 1.5mm이후부터는 육안으로도 확연히 구별되고 있다.

12시간 이후의 Photo.15~16, Fig.11, Fig.13을 동시에 비교하면 침식이 깊어져 시험편과 진동자 사이의 거리가 멀어질수록 캐비테이션의 기포수와 충격력이 약해져 침식이 많이 일어나지 않는 것을 알 수 있다.

CL의 경우 금속과는 달리 표면부의 침식이 깊고 주변부가 아주 미세한 침식소공을 보여주고 있다. 이러한 원인은 캐비테이션 기포가 1차적으로 중앙부에 충격을 주고 이것이 다시 주변부에 충격을 주어 일어나는 현상으로 사료된다.



(a) 0.5mm | (b) 1mm

(c) 1.5mm | (d) 2mm

Photo.17 Successive observation of the damaged surfaces according to space of 0.5, 1, 1.5 and 2mm in sea-water for Ceramalloy CL, and testing time of 6hours.

3.7 캐비테이션 침식에 의한 재료의 표면조직 손상 특성

3.7.1 환경에 따른 침식면

(1) 금속재료의 침식면 비교

Photo 18에서 Bronze, SUS316L의 경우에는 배율을 50배로 하여 표면을 관찰하였고, Cast iron, SS400의 경우에는 100배로 관찰하였다.

금속시험편의 경우에 증류수에서 보다 해수에서 침식소공이 더 깊고 큰 것을 알 수 있었다.

가) Bronze

증류수의 경우 전면에 걸쳐 균일한 파공현상을 발견할 수 있으나 해수의 경우 침식공격에 파괴가 상대적으로 격렬히 일어난 것을 발견할 수 있었다.

나) SS400

증류수의 경우 침식소공이 약 10~20㎛정도이고, 침식의 모양은 딤플형태의 소공이며, 해수에서 침식소공의 크기는 약 150㎛정도이고, 침식소공 주변부에 금속분의 별리작용이 일어난 것을 발견할 수 있었다.

다) Cast iron

침식의 모양은 딤플형태의 소공이며 소공주변부에 금속분의 별리작용이 심하게 발생하고 특히 미소소공이 소공핵으로 침식면에 발생되어 있다. 또한 소공주변부는 미세한 균열작용이 보이

고 있다. 특히, 해수의 경우에는 증류수에 비하여 부식생성물 또는 염분의 표면상 퇴적량이 많음을 알 수 있고, 침식소공의 상태가 깊어 침식작용이 활발하였음을 알 수 있다.

라) SUS316L

금속시험편 중 내식성이 강한 SUS316L의 시험편은 증류수에서는 침식소공이 깊이 나타나지 않으나 해수에서는 깊은 것을 알 수 있다.

(2) 피복복합재의 침식면 비교

Photo.18에는 개선된 시험에서 DL과 CL의 조직표면 100배의 배율로 관찰한 사진이다.

DL의 경우, 증류수에서는 침식형태가 부분적으로 쇄기형으로 소공이 산발적으로 발생한 상황으로 조직내부의 일정한 미립자가 이탈한 형상이 아니고 파공 부위의 전체가 파단을 일으켜 빠져나간 형태를 나타내고 있다. 해수에서는 기포의 충격력이 증류수보다 높기 때문에 침식소공 주변부의 조직이 이탈한 모습을 보이고 있다.

CL의 경우, 증류수와 해수에서 큰 차이가 없으나, 해수의 기포 충격력이 크므로 인해 침식소공주위의 조직 이탈이 증류수보다 높은 것을 알 수 있다.

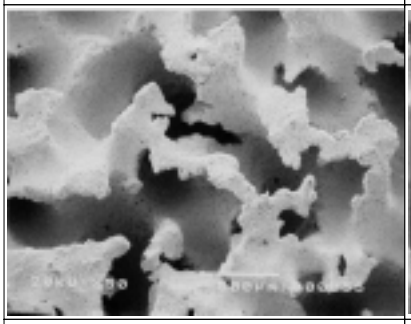
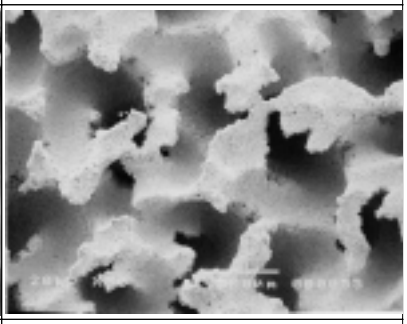
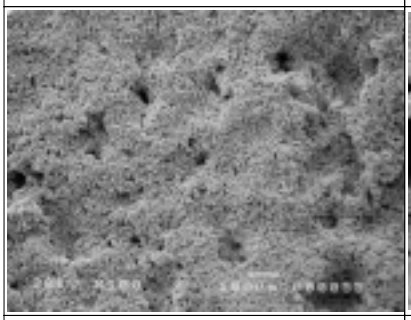
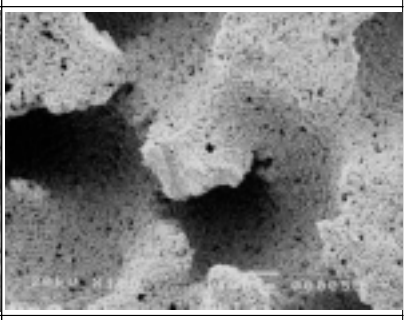
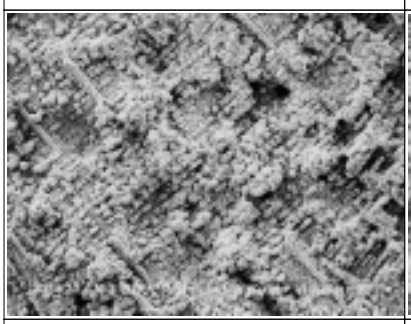
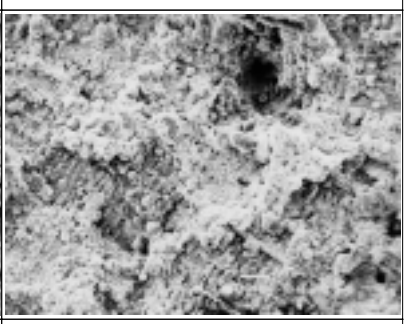
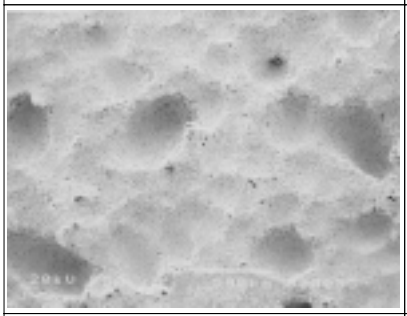
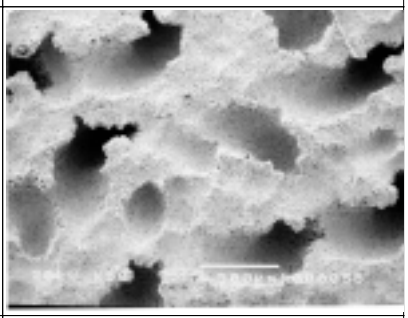
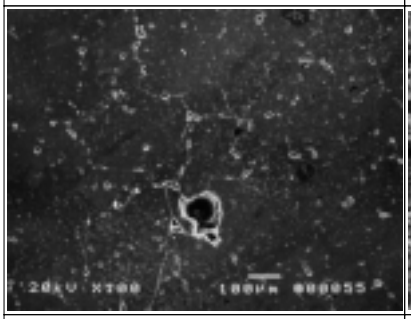
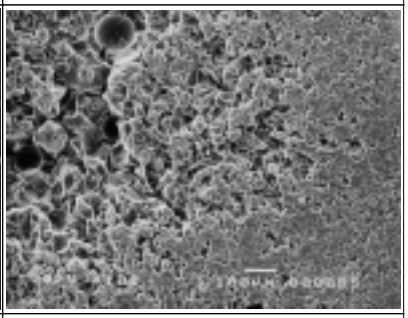
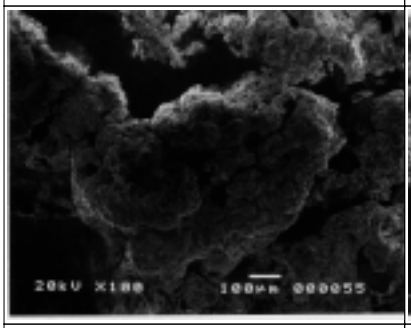
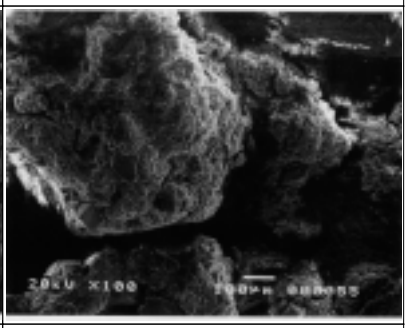
Distilled-water	Sea-water
	
Bronze	Bronze
	
SS400	SS400
	
Cast iron	Cast iron

Photo.18 SEM for cavitation-erosion surface of each materials in distilled-water and sea-water.

Distilled-water	Sea-water
	
SUS316L	SUS316L
	
Duratough DL	Duratough DL
	
Ceramalloy CL	Ceramalloy CL

- Continued -

3.7.2 표준시험과 개선된 시험에서의 표면조직

Photo.19는 증류수중에서 표준시험과 개선된 시험을 금속표면에 의해 비교한 시진이며, 현미경의 배율은 100배이다.

먼저, Bronze의 경우에는 표준시험에서의 침식소공 직경은 약 150㎛이나 개선된 시험의 경우 80㎛를 나타내고 있다.

SS400의 경우, 개선된 시험의 표면은 아주 조밀한 침식소공이 나타나는 반면, 표준시험에서는 캐비테이션 충격을 입은 침식소공의 크기가 약 200㎛이고, 사진에서 뚜렷이 관찰되어진다.

Cast iron의 경우, 표준시험에서는 약 30㎛정도의 침식소공을 볼 수 있으나 개선된 시험에서는 미세한 침식소공과 아주 거친 표면을 볼 수 있다.

표준시험과 개선된 시험에서 침식표면 손상이 다르게 나타나는 원인은 개선된 시험은 진동자와 시험편 사이의 거리차가 있으므로 개선된 시험에서의 캐비테이션 수와 기포의 충격력이 떨어져 이와 같은 현상이 일어난 것으로 사료되며, Fig.9의 그래프에서 개선된 시험시 표준시험에서 얻을 수 있는 침식량의 약 40~60% 밖에 나오지 않는 원인을 Photo.19에서 알 수 있다고 사료된다.

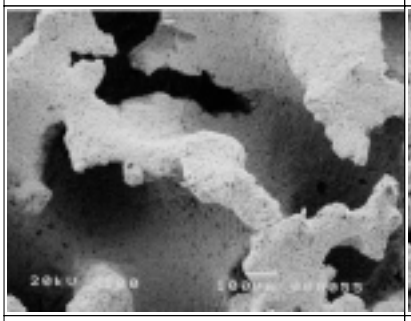
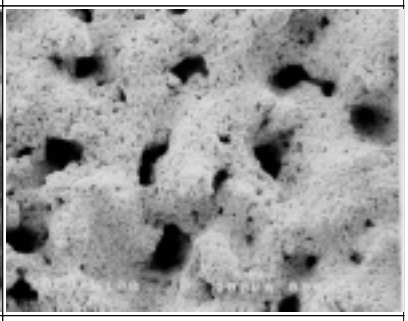
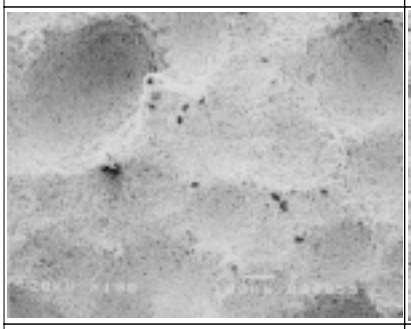
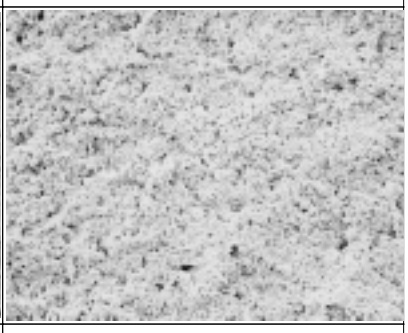
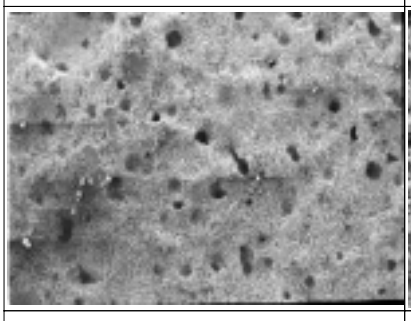
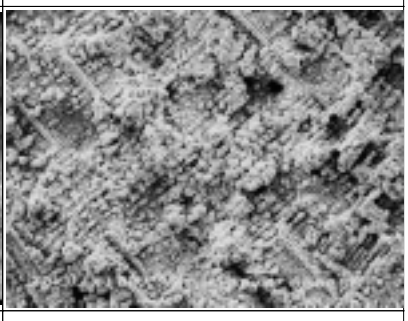
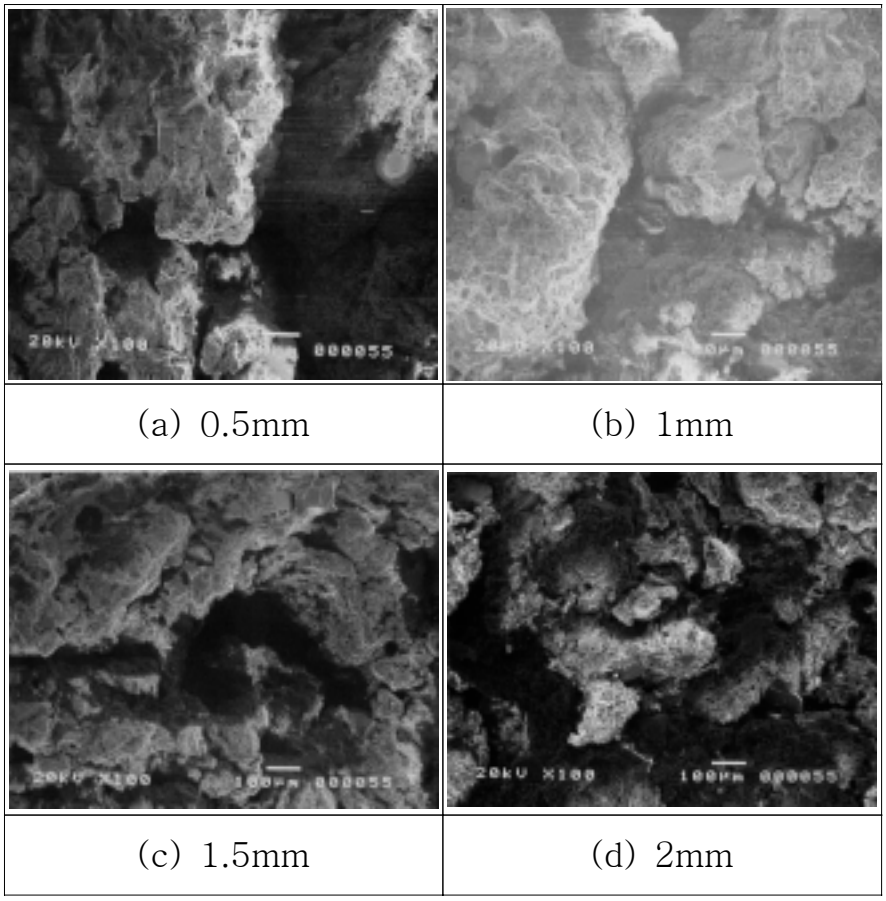
ASTM	M-ASTM
	
Bronze	Bronze
	
SS400	SS400
	
Cast iron	Cast iron

Photo.19 SEM for cavitation-erosion surface according to standard test and modified test in distilled-water for Bronze, SS400 and Cast iron.

3.7.3 개선된 시험에서 거리에 따른 침식면

Photo.20은 개선된 시험에서 거리에 따른 CL의 표면 형상을 전자현미경에 의해 100배의 배율로 촬영한 것이다.

해수중에서 발생한 점도가 높은 기포의 충격에 의해 뚜렷하게 구별은 할 수 없으나 (a)와 (b) 경우에는 침식소공들이 대부분 큰 반면, (c)와 (d)에서의 침식소공은 작은 것을 관찰할 수 있었다. 그 원인으로는 거리가 멀어짐에 따라 캐비테이션의 기포수가 감소하고 충격력이 감소하였기 때문인 것으로 사료된다.



(a) 0.5mm | (b) 1mm

(c) 1.5mm | (d) 2mm

Photo.20 SEM for cavitation-erosion surface according to space of 0.5, 1, 1.5 and 2mm in sea-water for Ceramalloy CL, testing time of 6 hours.

제4장 결 론

본 실험에서의 중요한 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 금속재 시험편의 진동캐비테이션 시험은 시험편의 정확한 형상 및 재료의 불균일이 발생할 시에는 파손된다는 점을 고려하여, ASTM G 32 규정에 의해 실험하여 침식량을 비교하는 것이 타당하다고 사료된다.

2. 피복복합재 시험편의 진동캐비테이션 시험은 ASTM G 32규정에 의해 시험 할 경우 피복재와 금속사이의 계면에서 박리가 발생하여 장시간의 시험을 하기는 곤란하고, 피복재가 캐비테이션 진동자의 초음파를 상쇄시키는 효과에 의해 ASTM G 32규정보다는 개선된 시험을 통하여 얻어지는 침식량을 서로 비교하는 것이 타당하다고 사료된다.

3. 금속재와 피복복합재 시험편의 캐비테이션 침식량 비교는 금속재의 경우 ASTM G 32규정에 의해 침식량을 구하고, 피복복합재는 개선된 시험을 통하여 얻어진 침식량을 표준시험과 비교한 양으로 추정하여 비교하는 것이 타당하다고 사료된다.

4. ASTM G 32규정의 시험과 개선된 시험의 온도차에 대한 비교에서 개선된 시험은 짧은 거리에 의해 유체의 열을 충분히 냉각시키지 못하므로 개선된 시험시 시험편의 거리는 온도변화 및 무게 감소량의 차이가 적은 거리인 1±0.1mm이내에서 행하는 것이 최적의 조건이라 사료된다.

참 고 문 헌

(1) Tretheway.K.R & Chamberlain.J,"Corrosion for Solid Surfaces by the Impact of Liquid Drops", Academic Press, pp 185~247, 1982

(2) 임우조, 이진열, 양학회, 인현만, “부식과 방식”, 원창출판사, pp1~4, 1994

(3) 이명호, 이종원 “수퍼캐비테이션 익열의 유동 특성 해석”, 대한기계학회논문집 제16권 제4호, pp 803~810, 1992

(4) J.H.Brunton and M.C.Rochester, "Erosion of Solid Surface by the Impact of Liquid Drops", Acadecmic Press, pp185~247, 1982

(5) W.M.Wuijbregets, "Materials Perfomance", Vol.23, No.11, pp39, 1982

(6) 임우조, 백성종, 황재호, “캐비테이션 침식-부식에 미치는 액체와 고체입자의 영향” 한국어업기술학회지, 제29권, 제2호, pp124~130, 1993

(7) K.Zhou and F.G.Hammitt, "Cavitation Erosion of Diesel Engine Wet Cylinder Liners", Wear, 76, pp321~328, 1982

(8) Boshoku Gijitsu,"Mechanism of the Mutual Action between Erosion and Corrosion", Vol.35, No.6, pp320~321, 1986

(9) 박정도, “캐비테이션 제트에 의한 SUS 316의 잔류응력 개선에 대한 연구”, 대한기계학회 논문집 A권, 제22권 제11호, pp1956~1963, 1998

(10)전대희, “부식방식의 관리”, 일중사, pp133~136, 1985

(11)R.T.Knapp, J.W.Daily and F.G.Hammitt(1970), "Cavitation", McGraw-Hill, New York

(12)이학렬, “금속방식공학”, 연경문화사, pp130~135, 1997

(13)Petracchi, G. "La Metallugia", (1), 1, 1949

(14)Knapp,R.T., et al : "Cavitation", McGraw-Hill, Inc.(1970)

(15)김영렬, “유동유체하의 캐비테이션 침식손상의 최소화 방안에 관한 연구”. 한국해양대학교 대학원, 1999

(16)ASM "ASM Handbook", Volume 13, pp311~313

(17)Annual Book of ASTM Standards G 32, ASTM(1992), pp115

(18)Kreye H., Schwetzke R., Buschinelli A., Boccanera L., "Cavitation Erosion Resistant Coating Produced by Thermal Spraying and Weld Clading", Proceedings of the 15th International Thermal Spray Conference, pp 260~273, 25-29 May 1998

(22)이진열, “베어링 합금재의 캐비테이션 침식 거동 및 그 억제에 관한 연구”, 부산수산대학교 대학원, 박사학위 논문, pp 12~13, 1994

(19)ASM, "Failure Analysis and Prevention", Metalhandbook Vol.11, pp 171, 1986

(20)김윤해 “선박구조물의 부식손상의 최소화 방안에 관한 연구” 한국해양대학교 해사산업연구소, pp 25~26, 1999

(21)C.M.Preece, "Treatise on Materials Science and Engineering", Ed., Erosion, Vol 16, Academic Press, 1979