

碩士學位論文

각종 내식성 용사 코팅재의
캐비테이션 침식 거동에 관한 연구



濟州大學校 産業大學院

機械에너지工學科

秦 熹 錫

2003

碩士學位論文

각종 내식성 용사 코팅재의
캐비테이션 침식 거동에 관한 연구



濟州大學校 産業大學院

機械에너지工學科

秦 熹 錫

2003

碩士學位論文

각종 내식성 용사 코팅재의
캐비테이션 침식 거동에 관한 연구

指導教授 金 貴 植

 제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY
濟州大學校 産業大學院

機械에너지工學科

秦 熹 錫

2003년 11월

각종 내식성 용사 코팅재의 캐비테이션 침식 거동에 관한 연구

指導教授 金 貴 植

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2003 年 11月 日

濟州大學校 産業大學院

機械에너지工學科



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

秦 熹 錫

秦熹錫의 工學 碩士學位 論文을 認准함

2003 年 11月 日

審査委員長 _____ 印

委 員 _____ 印

委 員 _____ 印

목 차

Summary	1
I. 서 론	3
II. 재료 및 실험방법	7
2. 1 시험편 제작	7
1) 고강도 황동합금의 화학성분 및 기계적 성질	7
2) 시험편 제작 및 용사 조건	9
2. 2 실험 장치 및 방법	13
1) 캐비테이션 실험 장치	13
2) 실험 방법	16
III. 결과 및 고찰	18
3. 1 각종 용사코팅재의 부식시간대별 캐비테이션 특성	18
1) 무부식 상태의 캐비테이션 침식	18
2) 500시간 부식후의 캐비테이션 침식	21
3) 1000시간 부식후의 캐비테이션 침식	24
3. 2 동일 코팅재별 캐비테이션 특성	28
1) 황동기재의 캐비테이션 침식	28
2) Amdry625 코팅재의 캐비테이션 침식	28
3) 크로미아 코팅재의 캐비테이션 침식	29
4) Al 코팅재의 캐비테이션 침식	29
5) Zn 코팅재의 캐비테이션 침식	30
6) SUS316 코팅재의 캐비테이션 침식	31
IV. 결 론	45
참 고 문 헌	47

A Study on Cavitation Erosion Behaviors
of Corrosion-resistance Thermal Spray
Coating Materials

Hee-Seok Jin

(Supervised by professor Gui-Shik KIM)

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FOR THE
DEGREE OF MASTER OF ENGINEERING



DEPARTMENT OF MECHANICAL-ENERGY
ENGINEERING GRADUATE SCHOOL OF
INDUSTRY CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

NOV. 2003

SUMMARY

The hydraulic machinery of screw propeller and pump impellers is damaged by cavitation erosion in sea water.

The cavitation erosion is a phenomenon leading a functional disorder of various fluid machinery and dropping off in efficiency by cavity fluid fluctuation.

This study is investigated the cavitation erosion of various metallic coatings made by thermal spraying methods.

The coating materials are AMDRY625, Cr_2O_3 , SUS316, Zn, Al. These metals are coated on substrate of high strength brass (Cu - Zn).

Test specimens are immersed in 3.5% NaCl solution for 500 and 1000 hours, respectively.

After pre-corrosion, the cavitation erosion test was conducted on coating specimens in 3.5% NaCl solution along 210 minutes.

The results are summarized as follows : 1. Both substrate and test specimens coated by thermal spray underwent weight loss in proportion to the time length of the cavitation erosion test, and the weight loss happened more to 1,000 hour-immersed test specimens and 500 hour-immersed ones in the time order rather than the ones in non-corrosion condition. 2. Substrate and Amdry625 and SUS316 test specimens were all influenced very little by weight loss regardless of the time length and the conditions of the test. 3. The amount of weight loss of aluminum and zinc test specimens and Cr_2O_3 test specimens heavily increased at the early stage regardless of the conditions but later decreased after the coated layers were fretted by cavitation erosion. 4. The comparison of weight loss after the test showed that Amdry625, SUS316 and substrate underwent very little weight loss, proving to be the very likely materials to bear cavitation erosion but aluminum and zinc and Cr_2O_3 underwent

very great weight loss, proving to be the very unlikely materials to bear cavitation erosion. 5. After the test, the surfaces of Amdry625, SUS316 and substrate showed that they had been less damaged by cavitation erosion but the rest showed that they had been very much damaged by it. 6. SUS316 is the appropriate thermal spray coating material to prevent cavitation erosion and at the same time to cut down the cost.



I. 서론

해수는 지구 표면의 약 2/3를 덮고 있는 전해질이며, 염소 이온과 용존 산소의 양이 많고, 파도 운동, 해류 등으로 인한 높은 무게 이동 속도를 갖는다. 그러므로 많은 구조용 금속들이 해수에서 쉽게 부식되고 이로 인한 경제적 손실은 매우 크다.

최근에는 산업 발전으로 인하여 공업 단지과 해상 철구조물 등 해양항만 시설, 간척지의 매립 등 인근 해변의 개발 지역에 각종 플랜트 사업 및 철구조물 설치가 증가하고 있어 해양 지역에는 각종 환경 오염과 오염된 폐수, 하천수 및 생활 하수로 인한 해수 오염이 넓게 확산되므로 금속의 부식 문제가 더욱 심각한 문제가 되고 있다.

이러한 환경조건에서 강한 내식성을 요구하는 해양 기계류 중에 스크류, 임펠라의 재질은 대부분 동합금계로 고강도 황동 합금을 사용한다.

고강도 황동 합금은 해수 중에서 우수한 내식성을 가지고 있는 것으로 알려져 있지만, 고강도 황동 합금의 부식은 사용되는 환경에 따라 부식 발생도 및 부식 속도가 달라진다.

부식발생도 및 부식 속도가 결정되는 요인으로는 미생물이 양극반응이나 음극반응을 촉진해서 부식원인이 되기도 하는 해양생물의 활동도, 해수유속에 의한 캐비테이션, 에로존, 용존 산소량 등이 결정되는 환경과 이밖에 염분, 온도, pH 등이 주요 결정요인이다.

특히, 해양기계류는 해수내에서 캐비테이션 부식이 발생할 수 있는 환경에 노출되어 있다. 캐비테이션 부식이란 펌프 임펠라 및 프로펠라 등이 고속으로 해수를 흘러 보낼 때 저압측에서 발생된 기포가 고압측에서 깨질 때 발생하는 충격이 산화물 피막을 파손하는데 이렇게 기포의 발생과 충격이 반복하여 침식 및 부식을 일으키는 현상을 말한다.

해양구조물들의 구성요소들인 임펠러, 밸브, 배관, 지지축 베어링 등에서 캐비테이션 침식-부식에 의한 피해가 약 12%이고,¹⁻³⁾ 그 중에서 펌프 임펠러의 침식손상이 약 9% 정도를 점유하고 있다.⁴⁻⁵⁾ 또한 대부분의 기계적인 캐비테이션 침식⁶⁻⁷⁾은 전기 화학적인 부식성 환경에서 일어나는 경향이 많은 데, 이와 같이 금속재료에 침식-부식이 중첩하여 발생하는 경우에는 침식과 부식이 상호간에 가속하는 상승효과 때문에 기계수명에 치명적인 악영향을 미친다.⁸⁾

이러한 각종 해양 부식을 방지하기 위해 페인트, 도료, 희생양극 등을 사용하는데 해양 방식에는 한계가 있다. 최근에는 소재가 가지고 있는 특성을 살리면서 소재의 표면에 내열성, 내부식성, 및 내마모성 등이 탁월한 기능을 부여하는 용사코팅기술(Thermal Spray Coating)이 많이 사용되고 있다.

용사 코팅 기술을 이용한 방식기법이란 방식이 요구되는 구조물 표면에 용사코팅을 실시하여 기존 구조물이 나타내는 부식속도보다 그 속도를 낮추는 방법이다. 코팅에 의해 낮은 부식속도를 나타내는 이유는 첫째, 코팅층이 구조물을 외부 환경과 차단시키기 때문이며(환경차단효과), 둘째로는 주어진 환경에서 코팅층의 재질이 구조물보다 전기 화학적으로 전위가 낮은 경우, 구조물의 표면과 코팅 층 사이의 갈바닉 연결로 구조물 표면의 전위가 부식전위보다 낮아져 부식속도가 매우 낮아지게 된다(음극방식효과).

대표적인 용사법은 전기아크, 플라즈마, 산소-아세틸린 화염 등의 열원으로 고상, 또는 분말상의 재료를 용융시켜 고속으로 재료의 표면에 분사하여 내열, 내식, 내마모 등의 탁월한 기능을 가진 코팅층을 형성하는 표면개질 기술이다.

플라즈마 용사법은 역극성 아크에 의해 불활성 가스로부터 생성되는 플라즈마흐름(속도 : 마하 2, 중심온도 : 16,500 ℃)에 피막재료를 투입

하고, 순간적으로 용융시켜 완전 용융된 분말 용사재를 고속으로 분사 밀착시켜 피막을 형성시키는 코팅 방법이다.

전기아크용사법은 전기 ARC를 열원으로 하여 용사하는 방법으로 피막이 치밀하고 경도가 높아지는 효과를 얻을 수 있다.

산소-아세틸린 화염 용사법은 아세틸렌과 산소 (3100 ℃)의 연소를 열원으로 하여, 각종 금속, 합금선재를 연속적으로 용사하여 피막을 형성시키는 방법이다.

그 중 플라즈마 용사법은 용사재료로는 금속, 비금속, 세라믹 (주로 금속산화물, 탄화물), Cermet 등 광범위하고, 탁월한 내마모성, 내열성, 내식성, 전기전도, 차폐성 등의 우수한 피막을 얻을 수 있다. 용사시의 가공물의 표면 온도가 150℃ 이내로 제어되기 때문에 모든 모재에도 피막을 형성시킬 수 있고, 응용분야도 매우 다양하다. 용사법의 특징을 보면 피막형성에 이용되는 재료의 자유도가 크고, 피복사용 재료의 종류, 형상 및 치수에 대한 자유도가 넓고, 용사시스템의 이동이 간단하므로 특정부분에도 적용이 가능하다. 또한 피막형성시 소재변형 및 재질변화가 적고 복합피복을 형성이 용이한 장점이 있다.

현재 방식용 코팅에 많이 사용되는 재료는 주로 알루미늄, 아연 및 알루미늄-아연 합금이며, 분말 및 선재의 형태로 상용화되어 있다. 알루미늄 및 아연이 사용되는 이유는 철에 비해 전위가 낮아 환경차단효과뿐만 아니라 음극방식효과까지 나타내기 때문이다. 특히 용사코팅 후에 존재하는 기공 때문에 모재가 환경에 노출돼 모재가 부식될 수 있으므로 음극방식효과는 필수적이라 하겠다. 용사코팅을 방식용으로 적용한 초기에는 주로 아연을 이용하여 코팅을 실시하였는데 그 이유는 낮은 용점의 아연은 가공도도 낮고 음극방식효과도 뛰어 났기 때문이다. 또한 비용도 비교적 저렴하다는 장점이 있다.

알루미늄은 아연에 비하여 해양방식에 더 뛰어나다고 알려져 있었으나

용사코팅 특성이 나빠 그 적용이 제한적이었다. 알루미늄은 용사 코팅 시 액체금속의 유동도가 낮아 기공도가 높고 또한 접착강도가 낮아 초기에는 그 사용이 제한될 수밖에 없었다. 접착강도를 증가시키는 방법으로는 보다 엄격한 표면 전 처리법(blasting)이 제시되었다. 그러나 최근 electric arc spray법이 등장하며 접착강도는 더 이상 문제가 되지 않고 있다.⁹⁾

또한 기공도도 공정 및 건(GUN)의 개발로 향상되었으며 특히 sealant를 이용하여 기공을 메우면 환경차단효과를 크게 향상시킬 수 있다고 한다.¹⁰⁾

한편 알루미늄의 장점(낮은 부식속도)과 아연의 장점(건전한 코팅 층)을 이용하려고 알루미늄과 아연을 합금 내지는 다층 코팅한 경우도 있다. 이러한 코팅들은 여러 분위기에서 순금속보다 더 우수한 방식 특성을 보이기도 하지만 어느 조성이 특별히 우수한지는 적용된 경우마다 다르다.¹¹⁾

용사코팅에 의한 피복은 코팅층이 모재와 밀착성이 좋아야 하며, 방식의 효과가 뛰어나고, 가격이 다른 용사금속 분말에 비해 저렴하여야 한다.

본 연구는 선박 스크류 소재의 표면에 내식성 금속을 용사 코팅하여 캐비테이션 침식의 방지효과를 조사, 검토하였다. 즉 고강도 황동 기재의 표면에 내식성이 강한 재질로 알려진 AMDRY625, Cr₂O₃, SUS316, Zn, Al를 코팅을 하였고 3.5% NaCl용액에서 500시간과 1000시간의 침지 후, 초음파 발생 캐비테이션 장치를 이용하여 3.5% NaCl용액에서 210분 동안 캐비테이션 실험을 하여 내식성 코팅재들의 캐비테이션에 의한 무게 감소와 표면손상을 조사 검토하였다.

II. 재료 및 실험 방법

2.1 시험편 제작

1) 고강도 황동합금의 화학성분 및 기계적 성질

황동은 Cu-Zn의 2성분 합금으로 공업적으로 사용되는 Zn 45%이하의 합금중 Zn 30% 또는 40%를 함유한 합금이 가장 많이 사용된다. 이는 Zn 30% 황동의 연신율이 가장 좋으며, Zn 40%에서 인장강도가 가장 크기 때문이다. Cu-Zn합금의 상(phase)은 Zn의 조성에 따라 α , β , γ , δ , ϵ , η 의 6개의 상이 있는데, 공업적 사용한계인 Zn 45%이하에서는 α 와 β 상만이 고려된다. 저아연농도에서의 α 상, 고아연농도에서의 β 상과 그 중간영역에서는 $\alpha+\beta$ 상이 나타난다. α 상은 부식에 강하나 강도가 약하고, $\alpha+\beta$ 의 2상합금은 탈아연 부식에 민감하나 강도가 양호하며, β 상은 더욱 부식에 민감하다. Zn 30%의 합금은 α 상의 조직이, Zn 40%의 합금은 $\alpha+\beta$ 상의 조직이 되는데 Fe, Mn, Ni, Al 등을 첨가하여 강도와 내식성을 향상시킨 것을 고강도 황동 혹은 망간청동이라 한다.

photo.1 고강도 황동합금의 조직을 나타내고, Fig.1 고강도 황동합금의 응력 - 변형을 선도를 나타내고 있다. 기지가 α 상을 나타내고 흰색으로 나타나는 것이 β 상이다. 인장강도는 487.1 N/mm^2 , 항복강도는 265.5 N/mm^2 , 연신율은 22.47%이다.

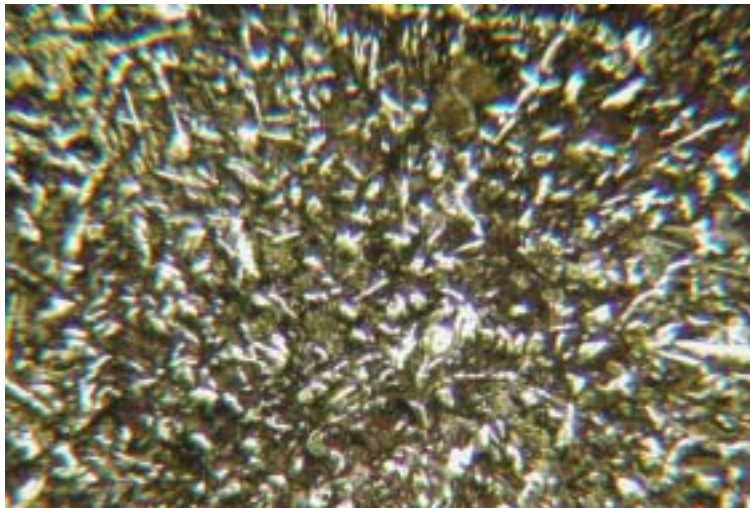


Photo.1 Organization of high strength brass

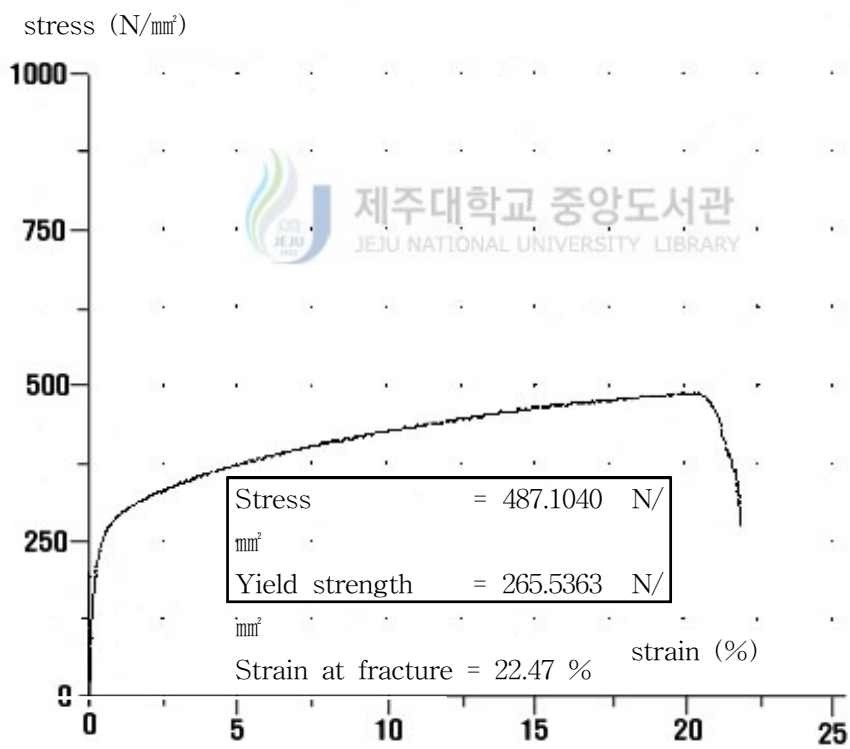


Fig.1 Stress-strain diagram of high strength brass

2) 시험편 제작 및 용사 조건

본 실험에 사용한 기재는 선박 및 해양구조물과 같이 전기화학적인 침식성이 강한 해수환경에서 주로 내침식 재료로 잘 알려진 황동합금을 기본 시험편으로 선택하였는데, 황동합금은 화학적 조성에서 동(Cu)과 아연의 성분이 97.6%, 그리고 나머지 Mn, Fe, Ni, Al 등은 무시할 정도로 함유되어 있다.

Table 1은 기본 시험편인 황동합금 주물의 화학성분을 나타낸 것이다.

그리고, 용사 전처리로 기재의 표면에 용사시 접촉강도를 향상시키기 위해 블라스팅 처리를 실시하였는데 Table 2에 나타내고 있다.

기재인 황동합금에 해수환경에서 음극방식법중 가장 많이 응용되는 양성금속인 아연, 알루미늄과 AMDRY625, SUS316, Cr₂O₃을 각각 용사를 하였고, 용사 피복층의 두께는 약 200 μ m로 하였고 35(L) \times 35(W) \times 6(D) mm의 직육면체로 제작하여 부식시간에 따라 Table 3과 같이 구분하였고 18개의 시험편을 제작하였다.

Table 4는 기본 기재 위에 각각의 시험재료를 용사 코팅한 작업 조건표를 나타내고 있다.

유효 노출 표면은 저속 밀링 및 미세 사포(Emery cloth)로 정밀 연마한 후 아세톤으로 탈지(脫脂)하고, 나머지 부분은 전기 절연을 위해 에폭시 수지(Epoxy resin)로 도장(塗裝)을 하여 부식환경을 차단하였다.

에폭시 수지가 완전히 마른 후 기재인 황동합금, Zn, Al, AMDRY625, SUS316, Cr₂O₃의 6종류의 시험편을 무부식상태 캐비테이션부식 실험을 하였고, 인공해수에서 침수시킬 시험편 12개를 500시간, 1000시간동안 침수시킨 다음 캐비테이션 실험을 하였다. 그리고 침수시간이 끝나면 밀봉을 하여 부식환경에서 차단하기 위해 보관하다가 실험전에 에폭시 수지를 완전히 제거를 한 다음에 실험을 하였다.

Table 1. Chemical compositions of high strength brass.

Compositions	Cu	Zn	Sn	Ni	Fe	Mn	Al
Wt(%)	55.3	42.3	0.4	0.1	0.7	0.5	0.5

Table 2. Blasting conditions.

Blasting Type	Air Pressure	Grit Mesh	Nozzle Type	Surface Roughness
Direct pressure	6.8-7.0kg	-14+30 (# 24)	Boron 7Φ	Ra 7.82-7.99

Table 3. Test specimens.

Specimens names	Coating materials	Corrosion times in 3.5% NaCl(hours)
SUB	Substrate	0
SUB 500		500
SUB 1000		1000
AM	Amdry 625	0
AM 500		500
AM 1000		1000
Cromia	Cr ₂ O ₃	0
Cromia 500		500
Cromia 1000		1000
Al	Al	0
Al 500		500
Al 1000		1000
Zn	Zn	0
Zn 500		500
Zn 1000		1000
SUS	SUS 316	0
SUS 500		500
SUS 1000		1000

Table 4. Spray conditions of materials.

(a) Amdry 625, Cr₂O₃

Coating method	Coating system	Nozzle	Gas pressure		Gas flow		Set amp	Volts	Spray dist m/m	Spray
			Ar	H ₂	Ar	H ₂				
Plasma	METCO 9MC	732B	75	50	75	50	500	70	55	38
	SYSTEM	732B	75	50	75	50	49-510	62-68	100	53

(b) SUS316, Zn

Coating method	Coating system	Wire size	Set amp	Volts	Spray dist m/m	Out put (Lbs/Hr)
Arc Spray System	PRAXAIR	1.6Φ	240	26-30	250	29
	BP 400	1.6Φ	240	22-26	250	50

(c) Al

Coating method	Coating system	Wire size	Lighting pressure (psi)			Flow meter reading			Spray dist m/m	Out put (Lbs/Hr)
			Oxy	Acety	Air	Oxy	Acety	Air		
Flame Spray System	METCO 14E SYSTEM	3.2Φ	30	15	70	45	42	53	200	45

2.2 실험장치 및 방법

1) 캐비테이션 실험장치

본 실험에 사용된 캐비테이션 발생장치는 주문 제작을 하였고(주)大韓 超音波) 압전효과(Piezoelectric Effect)를 이용한 진동발생장치이다.

Photo. 2는 해수중에서의 황동합금 및 시험편에 대한 캐비테이션 침식-부식실험의 장치를 나타낸 것이다. 초음파 발전기는 60Hz, 220V의 전력을 전자회로를 거쳐 20kHz의 정격 출력을 발생시켜 진동자에 공급하는 역할을 하며, 진폭은 정진폭 자동제어방식으로 24 μ m로 일정하게 하였다. 압전소자에 의한 진동발생은 지수형 원추혼(Horn)에 전기적인 교류를 가함으로써 축 방향으로 진동을 일으키는 현상을 이용하였다. 압전소자에 의한 진동이 혼에 의해 증폭되고, 축 방향의 반복된 진동이 캐비테이션 침식을 일으키는 최적의 진동으로 하였다. 실험장치는 제어장치, 진동자, 증폭기 혼 및 자동정지 타이머 등으로 구성되며, 환경조는 전기화학적인 부식의 영향이 없도록 아크릴 재료로 제작하였다.

그리고, 시험편은 진동자의 혼(Horn)과의 대향(對向)하도록 아크릴 판에 고정하고 환경용액의 온도는 25 \pm 2 $^{\circ}$ C 되도록 하였다.

고체벽면에 충돌하는 직경 1cm 기포 붕괴시의 액체 분사속도는 128m/s에 달하고, 진동수 20kHz와 진폭 24 μ m에서의 마이크로 제트에 의한 충격력은 800atm에 달한다.¹²⁾

본 실험은 ASTM규정(G32-85)에서 규정한 진동수, 진폭인 20kHz와 진폭 24 μ m인 진동자를 사용하였다.¹³⁾

Fig. 2는 20KHz의 공진 주파수와 24 μ m의 진폭을 가진 진동자(Transducer)에 의해 캐비티를 발생시키는 가속진동시험기의 계통도이다.

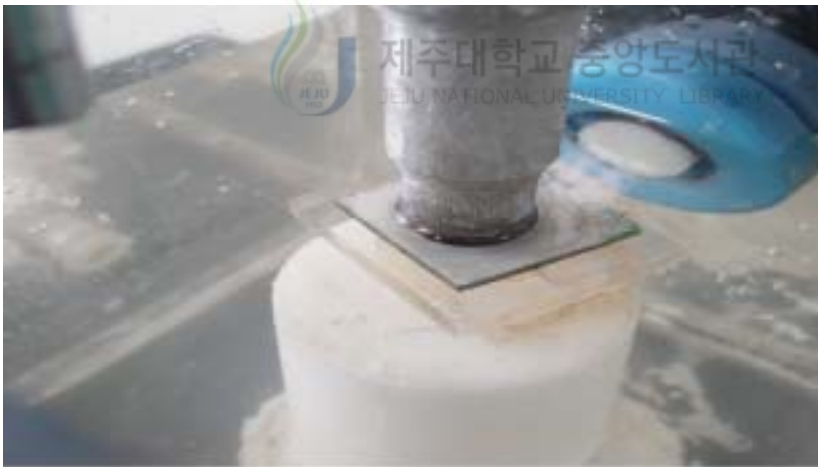
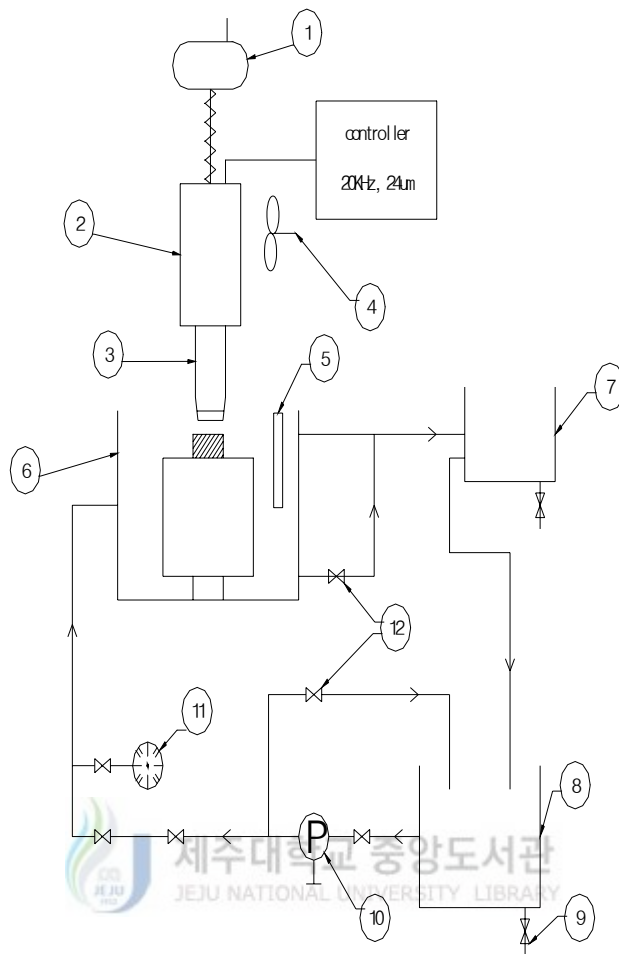


Photo. 2 Cavitation erosion experimental.



- | | | |
|------------------|--------------|----------------|
| ① handling | ② Transducer | ③ Horn skirt |
| ④ Cooling fan | ⑤ Temp.gauge | ⑥ Water tank |
| ⑦⑧ Drain tank | ⑨ Drain line | ⑩ Recycle pump |
| ⑪ Pressure gauge | ⑫ Valve | |

Fig.2 Schematic diagram of cavitation erosion test.

2) 실험방법

본 연구의 실험방법은 3.5 wt%의 NaCl용액을 환경용액으로 하여 황동합금과 황동합금 기재에 Amdry625, Cr₂O₃, Al, Zn, SUS316을 용사하여 무부식 상태와 3.5 wt%의 NaCl용액에 500시간, 1000시간동안 각각 부식을 시킨 후 캐비테이션 실험을 하였다.

캐비테이션실험은 210분 동안 실시하였는데 60분까지는 매 10분마다 무게를 측정하고, 60분부터 210분까지는 30분마다 무게 감소량을 측정하였다. 캐비테이션 부식실험을 한 뒤 구간별 무게감소량, 구간별 누적 감소량 등을 관찰하여 시간대별 각 시험편의 캐비테이션 부식특성을 관찰하였다.

환경용액으로는 천연해수에 가까운 3.5 wt%의 NaCl용액을 사용하였고, 그 환경용액의 수위를 조절할 수 있는 부착형 장치를 설치 하였으며, 각각의 시험편 실험 종료마다 인공환경용액을 교환하였고 필터청소는 주기적으로 하였다. 환경용액의 농도 및 전기전도도의 변화를 방지하기 위하여 플라스틱재인 순환수 펌프로 분당 2.8리터의 양으로 순환하였다.

시험편과 혼(Horn)과의 간극(0.4mm)은 다이얼 게이지 및 간극 게이지로 실험 종료마다 측정하여 간극을 일정하게 유지하였고, 혼(Horn)이 인공해수에 잠기는 깊이는 3.5mm로 일정하게 유지시켰다.

그리고, 자동정지 타이머에 의한 실험 시간을 조정하여 시험편을 지지대에서 분리시킨 후, 초음파 세정기(아세톤)로 먼저 정화 처리한 다음 건조한 후, 시험편의 무게 감소량을 1/1000mg 용인디지털 저울을 사용하여 측정하였다.

특히, 양극인 각 시험편과 대극(對極)인 혼(Horn)과의 전기 화학적인 부식영향은 캐비테이션 발생에 의한 침식 - 부식작용에 비하여 극소함으로서 무시하였다.¹⁴⁾

본 실험을 실시하기 전에 액체내의 액체내의 가스량을 안정화시키기 위하여 보조시편을 사용하여 약 15분 동안 예비 시험을 실시하였다.



Ⅲ. 결과 및 고찰

3.1 각종 용사코팅재의 부식시간대별 캐비테이션특성

1) 무부식 상태의 캐비테이션 침식

무부식상태에서 각 시험편의 구간별 캐비테이션부식의 특징을 살펴보면 Zn 시험편, Al 시험편들은 무게 감소량이 실험초기에 크게 나타나고, 90분에서 120분 사이에 무게 감소폭이 가장 크게 나타났다. 실험 종료직전에는 실험초기와 같은 무게감소 현상이 관찰이 되었다.

Cr₂O₃ 시험편은 실험초기에서 60분대까지는 무게감소폭이 적은 상태로 일정한 상태로 유지하다가 90분대에서 무게감소량이 크게 나타나다가 150분부터는 무게감소량이 실험종료까지는 실험 초기의 무게감소량과 비슷한 양상을 보였다. Amdry 시험편, Cu-Zn Substrate 시험편, SUS316 시험편은 실험초기부터 실험종료까지 무게감소량이 매우 적어 그래프상으로 거의 일직선을 유지하였다.

각 구간별 누적된 무게감소량을 비교해 보면 Zn 시험편(0.2771g), Al 시험편(0.1283g) 순으로 무게감소량이 크게 나타났고, 예상외로 Cr₂O₃(0.0507g)시험편이 그 다음으로 나타났다. 나머지 Amdry 시험편(0.0021g), Cu-Zn Substrate 시험편(0.0077g), SUS316 시험편(0.0090g)은 무게 감소가 아주 미미하게 관찰이 되었지만, 이 세 종류의 시험편은 캐비테이션 부식에 아주 강한 내성을 갖고 있는 것을 알 수가 있었다. Fig. 3에서 Fig. 6까지는 각각의 시험편을 무부식상태에서 캐비테이션 부식실험을 무게 감소량, 구간별 무게 감소량 및 구간별 누적 무게 감소량을 210분 동안 나타낸 그래프이다.

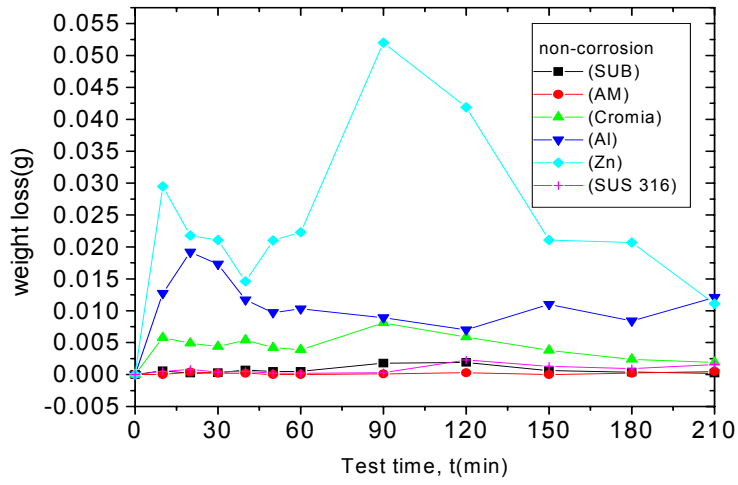


Fig. 3 Interval weight loss under non-corrosion

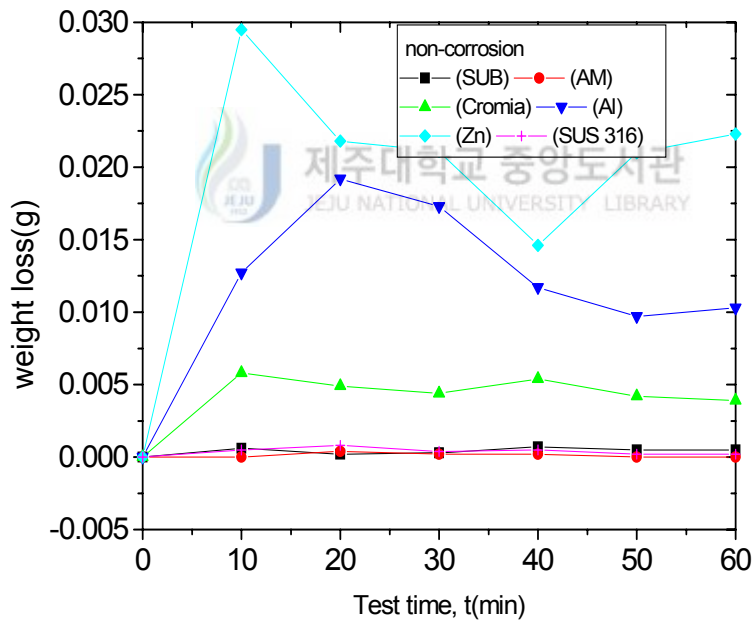


Fig. 4 Interval weight loss in initial stage under non-corrosion

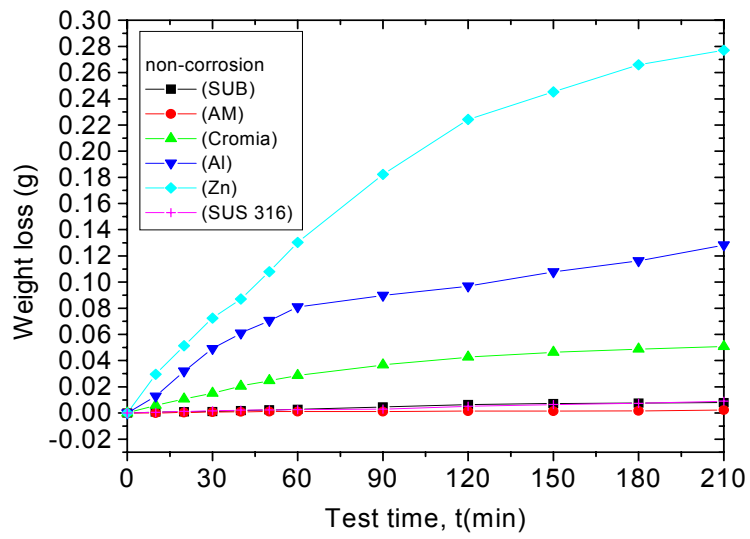


Fig. 5 Cumulative weight loss under non-corrosion.

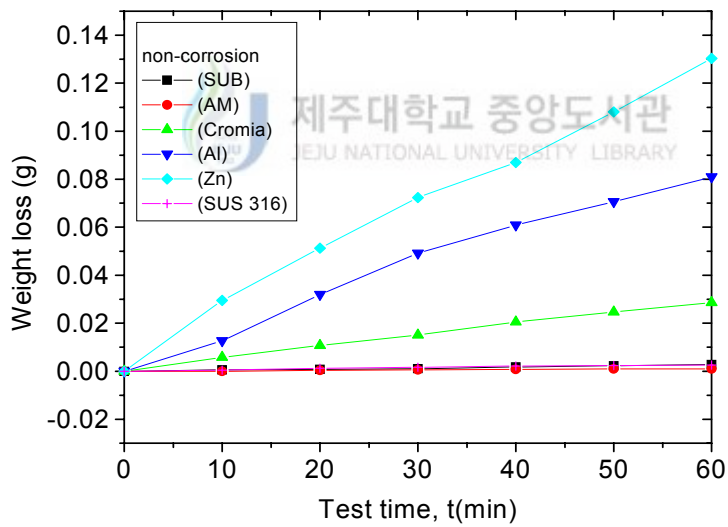


Fig.6 Cumulative weight loss in initial stage under non-corrosion.

2) 500시간 부식후의 캐비테이션 침식

500시간 인공해수에 침수시킨 corrosion상태에서 각 시험편의 구간별 캐비테이션부식의 특징을 살펴보면 무부식상태에서와 마찬가지로 Zn 시험편, Al 시험편들은 무게 감소량이 실험초기에 크게 나타나고, Zn 시험편은 실험 종료까지 지속적인 무게감소가 관찰이 되었지만 Al 시험편은 150분대에서 실험종료까지 무게감소폭이 다소 떨어진 상태에서 유지되었다.

Cr₂O₃ 시험편은 무부식상태의 실험처럼 실험초기에서 60분대까지는 무게감소폭이 약간의 증감의 변화를 보이다가 무게감소량이 실험종료까지는 실험 초기의 무게감소량과 비슷한 양상을 보였다.

Amdry 시험편, Cu-Zn Substrate 시험편, SUS316 시험편은 무부식상태의 실험 결과처럼 실험초기부터 실험종료까지 무게감소량이 매우 적어 그래프상으로 거의 일직선을 유지하였다.

각 구간별 누적된 무게감소량을 비교해 보면 무부식상태에서 보다 무게감소량이 어느 정도 증가함을 관찰이 되었다. Zn 시험편(0.3032g), Al 시험편(0.1509g) 순으로 무게감소량이 크게 나타났고, Cr₂O₃(0.0560g) 시험편이 그 다음으로 나타났다. 나머지 Amdry 시험편(0.0015g), Cu-Zn Substrate 시험편(0.0096g), SUS316 시험편(0.0126g)은 무게 감소가 아주 적게 관찰이 되었다. 이 세 종류의 시험편은 인공해수에 침식시킨 후에도 캐비테이션 부식에 아주 강한 성질을 갖고 있는 것을 관찰할 수가 있었다.

Fig. 7에서 Fig. 10까지는 각각의 시험편을 500시간동안 용기안에서 침식 시킨후 캐비테이션 부식실험을 무게 감소량, 구간별 무게 감소량 및 구간별 누적 무게 감소량을 210분 동안 나타낸 그래프이다.

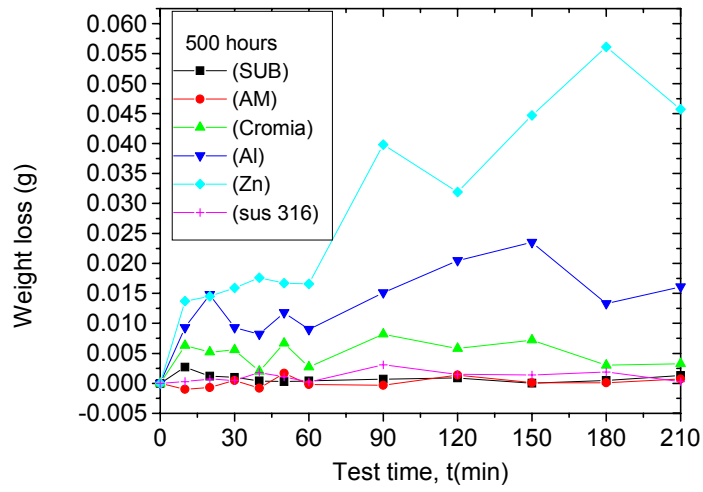


Fig. 7 Interval weight loss under corrosion times of 500 hours.

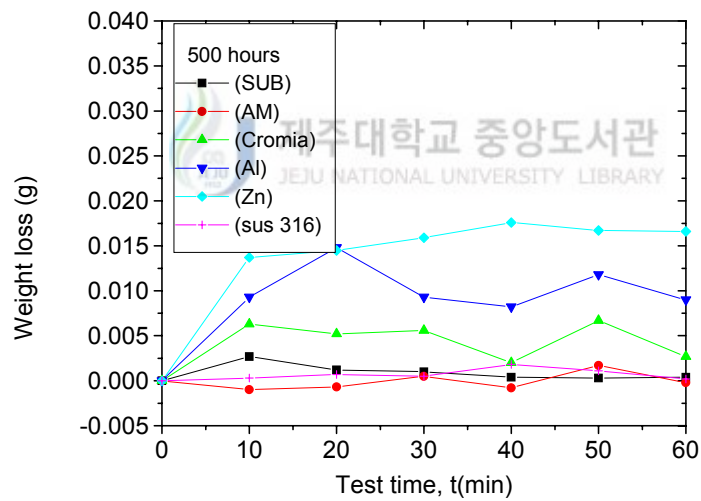


Fig.8 Interval weight loss in initial stage under corrosion times of 500 hours.

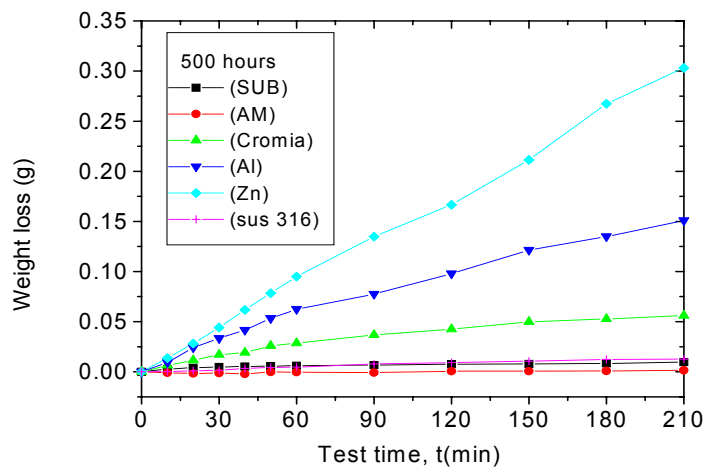


Fig.9 Cumulative weight loss under corrosion times of 500 hours.

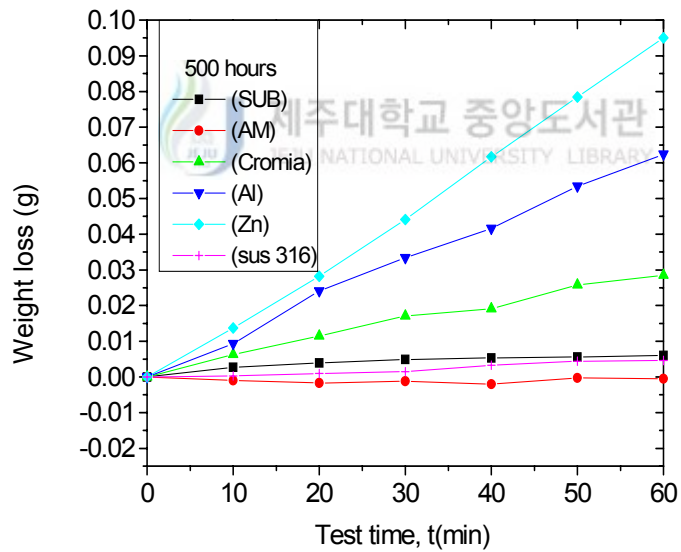


Fig.10 Cumulative weight loss in initial stage under corrosion times of 500 hours.

3) 1000시간 부식후의 캐비테이션 침식

1000시간 인공해수에 침수시킨 corrosion상태에서 각 시험편의 구간별 캐비테이션부식의 특징을 살펴보면 무부식상태, 500시간 corrosion시킨 실험과 마찬가지로 Zn 시험편, Al 시험편들은 무게 감소량이 실험초기에 크게 나타남을 알 수 있었다, Zn 시험편은 실험 종료까지 지속적인 무게감소가 관찰이 되었지만, 처음 10분대에서 나타난 무게감소량보다 20분에서 60분까지는 오히려 무게감소량이 떨어졌다. 그 후 실험종료까지는 지속적인 캐비테이션 부식 실험에 의한 무게감소가 큰 폭으로 증가함을 관찰할 수가 있었다. Al 시험편은 실험종료까지 무게감소폭이 다소 떨어진 상태에서 유지되었다.

Cr₂O₃ 시험편은 실험초기에서 60분대까지는 무게감소폭이 약간의 증감의 변화를 보이지만 거의 비슷한 무게감소량이 관찰이 되었고, 그 후 150분까지는 실험초기보다 다소 증가함을 보이다가 실험종료까지는 실험 초기의 무게감소량과 비슷한 양상을 보였다.

Amdry 시험편, Cu-Zn Substrate 시험편, SUS316 시험편은 무부식상태, 500시간 corrosion실험 결과처럼 실험초기부터 실험종료까지 무게감소량이 매우 적어 그래프상으로 거의 일직선을 유지하였다.

각 구간별 누적된 무게감소량을 비교해 보면 무부식상태가 500시간 corrosion에서 보다 누적 무게감소량이 증가함을 알 수 있었다. Zn 시험편(0.3505g), Al 시험편(0.1671g) 순으로 무게감소량이 크게 나타났고, Cr₂O₃(0.0917g)시험편이 그 다음으로 나타났다. 나머지 Amdry 시험편(0.0016g), Cu-Zn Substrate 시험편(0.0087g), SUS316 시험편(0.0131g)은 무게 감소가 아주 적게 관찰이 되었다. 이 세 종류의 시험편은 인공해수에 1000시간 침식시킨 후에도 캐비테이션 부식에 아주 강한 성질을 갖고 있는 것을 관찰할 수가 있었다.

Fig. 11에서 Fig. 14까지는 각각의 시험편을 1000시간동안 용기안에서

침식 시킨후 캐비테이션 부식실험을 무게 감소량, 구간별 무게 감소량
및 구간별 누적 무게 감소량을 210분 동안 나타낸 그래프이다.



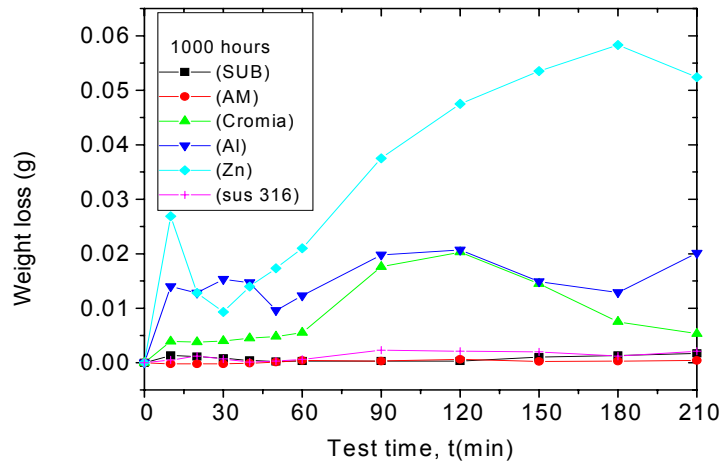


Fig. 11 Interval weight loss under corrosion times of 1000 hours.

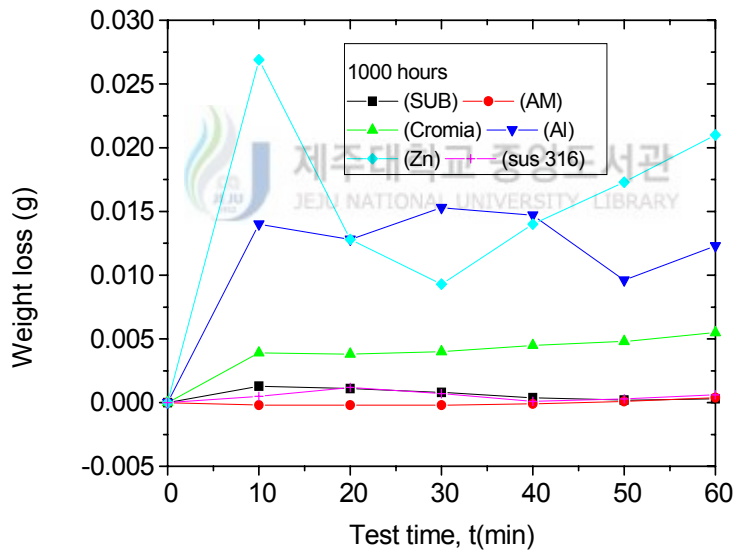


Fig.12 Interval weight loss in initial stage under corrosion times of 1000 hours.

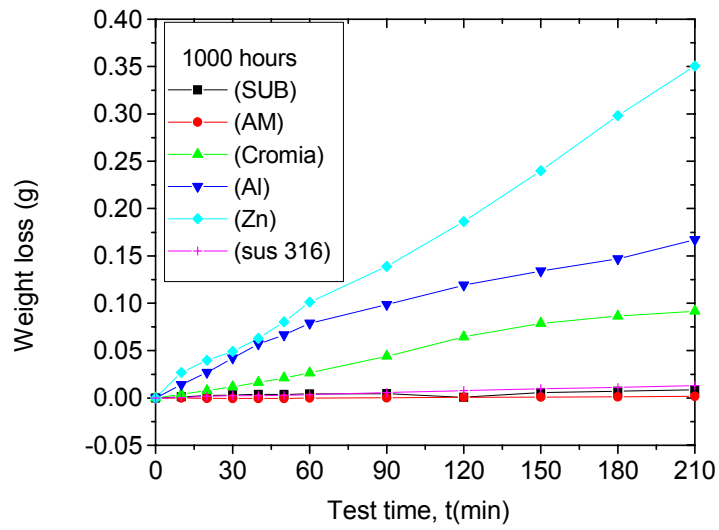


Fig.13 Cumulative weight loss under corrosion times of 1000 hours.

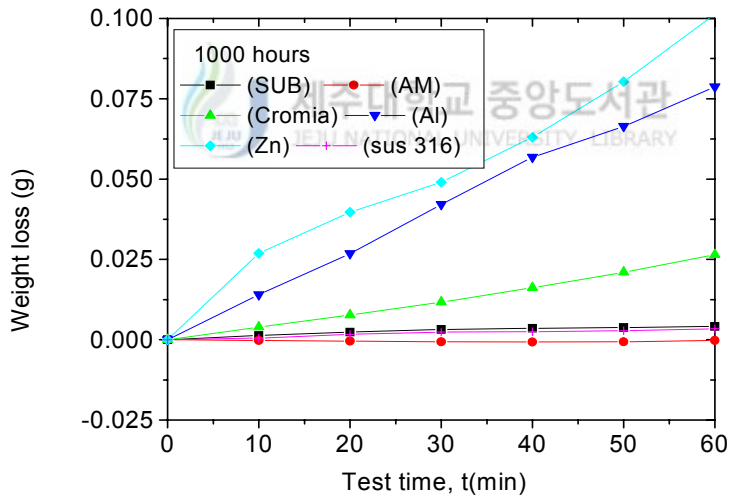


Fig.14 Cumulative weight loss in initial stage under corrosion times of 1000 hours.

3.2 동일 코팅재별 캐비테이션 특성

1) 황동기재의 캐비테이션 침식

무부식 시험편은 실험초기에는 무게감소량이 초기에서 60분대까지는 캐비테이션 부식에 의한 무게감소가 아주 적은 양으로 보이다가, 모두 90분에서 120분대에서 무게 감소량이 소폭으로 증가함을 보였고 120분대에서 실험종료까지는 무게감소량이 실험 초기치와 비슷한 양으로 관찰을 할 수 있었다.

500h 시험편, 1000h 시험편 모두가 실험초기에는 무부식 시험편의 무게 감소량보다 다소 많은 무게감소가 관찰이 되었다. 모두 90분에서 120분대에서 무게 감소량이 소폭으로 증가함을 보였고 120분대에서 150분까지는 다시 감소를 하다가 실험종료까지는 무게감소량이 실험 초기치와 비슷한 양으로 증가함을 관찰할 수 있었다.

전체적으로 무부식 시험편, 500h 시험편, 1000h 시험편 모두 실험 종료까지 무게감소량이 Amdry 시험편, Cu-Zn Substrate 시험편에서 나타난 결과처럼 Zn 시험편, Al 시험편에 비해 캐비테이션 부식에 의한 무게감소는 아주 적은 양으로 나타났다.

2) Amdry625 코팅재의 캐비테이션 침식

무부식 시험편, 500h 시험편, 1000h 시험편 모두 초기에 무게감소가 거의 발생하지 않거나, 아주 미미한 무게증가가 관찰이 되었다. 여기서 500h 시험편, 1000h 시험편이 초기에 무게증가 현상이 일어난 것은, 시험편 표면에 아주 미량이 부식 생성물 때문이라고 볼 수 있다. 부식 생성물이 생성되는 이유는 용사 코팅된 Amdry 성분 중에는 Fe이 5% 미만으로 함유되는데, 초기의 캐비테이션이 부식이 일어나면서 Fe과 염수 성분과 반응을 하여 아주 미량의 부식생성물이 형성되는 과정이 관

찰이 되었다. 이것은 금속 표면에 얇고 치밀한 산화물 피막이 형성된 부동태화 현상이 형성되는 과정이라고 볼 수 있다. 이 부동태는 뛰어난 내식성을 갖게 해준다.

500h 시험편, 1000h 시험편을 실험 시작하기 전에 표면을 관찰한 결과, 전혀 염수부식이 일어나지 않아 무부식 시험편의 표면과 거의 흡사하였다.

실험 종료 후에는 세 종류의 시험편 모두 무게감소량이 아주 미미한 것으로 보아 염수 캐비테이션 부식에 아주 강하다는 것을 알 수가 있었다.

3) 크로미아 코팅재의 캐비테이션 침식

무부식 시험편, 500h 시험편, 1000h 시험편 모두 실험초기 20분부터 60분대까지는 무게감소량이 적다가 그 후 150분대까지는 무게감소량이 크게 증가하였고, 180분에서 실험종료까지는 실험초기와 같은 무게감소가 발생하였다. 혼 윤곽의 모양의 캐비테이션 부식이 일어나는 현상을 뚜렷하게 관찰이 가능하였고, 실험 종료 210분대에서는 전체적으로 기체가 돌출되는 현상을 관찰할 수가 있었다.

4) Al 코팅재의 캐비테이션 침식

무부식 시험편에서는 실험초기인 10분 경과 후, 혼 윤곽으로 캐비테이션 부식현상이 관찰이 되었고, 120분대에서 ½정도의 기체가 보이기 시작하여 실험 종료 후에는 일부분만 남기고 기체를 볼 수 있었다. 무부식 시험편과 조금 늦은 시기지만 500h 시험편, 1000h 시험편 모두가 시간상으로 거의 비슷한 시기에 대체적으로 거의 비슷한 캐비테이션 실험 과정을 관찰할 수 있었다.

Al 시험편에서도 실험 종료 후 중심부분에서 기체의 흔적이 관찰이

되어, Zn 시험편에서 처럼 혼의 중심에서 가장자리로 수류가 확산 이동하는 현상을 뚜렷하게 관찰이 가능하였다.

실험초기인 10분에서 30분 사이에 무게감소량이 크게 증가하였고, 150분부터는 코팅된 Al과 기재의 무게감소가 동시에 일어나 실험초기보다 무게감소량이 크게 감소하였다.

500h, 1000h 시험편에서도 실험초기인 10분에서 30분 사이, 90분에서 120분 사이에 무게감소량이 크게 증가하였고, 150분부터는 코팅된 Al과 기재의 무게감소가 동시에 일어나 실험초기보다 무게감소량이 크게 감소하였다.

Zn 시험편처럼 1000h 시험편, 500h 시험편, 무부식 시험편 순으로 무게감소량이 크다는 결과를 얻을 수 있었다.

5) Zn 코팅재의 캐비테이션 침식

무부식 시험편에서는 캐비테이션 실험한지 10분 경과 후 hone모양의 캐비테이션 흔적이 뚜렷하게 관찰되었으며, 90분후 ¼가량의 기재가 보이기 시작하여 150분에 거의 기재가 나타나는 결과를 얻을 수 있었다. 이러한 현상은 500h, 1000h 시험편 모두 비슷한 양상을 보였다.

500시간 부식시킨 시험편에서는 1000시간 부식시킨 시험편과 함께 실험하기 전에 표면을 관찰한 결과, 거의 100%정도가 백청이 표면을 덮고 있었다.

실험초기인 10분에서 30분 사이, 90분에서 120분 사이에 무게감소량이 크게 증가하였고, 120분부터는 코팅된 아연과 기재의 무게감소가 동시에 일어나 실험초기보다 무게감소량이 크게 감소하였다. 실험초기에는 감소량이 그다지 크지 않으나 90분대, 180분대에서 크게 무게감소가 크게 증가하였다.

그리고 혼의 가장자리에서 기재의 고유의 색상이 보이기 시작하여 점

차 그 주위인 가장자리로 이동하는 현상은 혼의 중심에서 가장자리로 수류가 확산 이동하는 현상이라고 여겨진다. 따라서 가장자리부분의 가장 캐비테이션 방식 기능이 떨어진다고 볼 수 있다.

1000시간 부식시킨 시험편에서는 초기에 조금 무게감소가 있었으나, 90분 이후의 무게감소량에는 미치지 못하고 있고, 이 시험편 역시 90분대 이후에 많은 무게감소가 일어나고 있음이 관찰되었다.

대체적으로 세 종류의 시험편이 실험시간이 증가함과 동시에 무게감소량이 증가하고 있고, 1000시간 부식시킨 시험편, 500시간 부식시킨 시험편, 무부식 시험편 순으로 무게감소량이 크다는 결과를 얻을 수 있었고, 무게감소량은 염수 부식보다는 캐비테이션 부식에 의한 무게 감소가 크게 좌우한다는 사실을 얻을 수 있었다.

그리고, Al 시험편, Cr₂O₃ 시험편에서 무게감소량을 측정한 결과 Amdry 시험편, SUS316 시험편, Cu-Zn Substrate 시험편 등의 무게감소량보다 훨씬 많은 양의 무게감소가 발생함을 알 수가 있었다.

6) SUS316 코팅재의 캐비테이션 침식

SUS316은 주로 부동태화된 상태에서 상용화되는 재료이기 때문에 Amdry 시험편처럼 부동태가 형성되어 양호한 내식성을 갖게 해준다. 여기서 부동태는 옥시수산화물이라는 얇은 피막이 1~5 nm 두께로 형성되어 양호한 내식성을 갖게 해준다.

세 종류의 시험편 모두가 초기에서 60분대까지는 캐비테이션 부식에 의한 무게감소가 아주 적은 양으로 보이다가, 모두 90분에서 120분대에서 무게 감소량이 소폭으로 증가함을 보였다. 180분부터는 초기보다 무게 감소량이 초기 실험과 같은 현상을 관찰 할 수가 있었다.

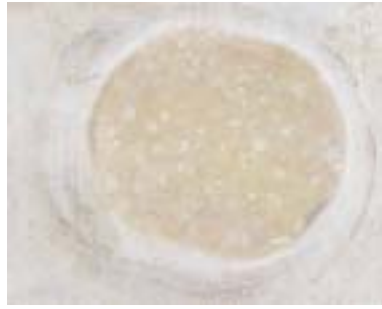
전체적으로 무부식 시험편, 500h 시험편, 1000h 시험편 모두 실험 종료까지 무게감소량이 Amdry 시험편, Cu-Zn Substrate 기재 시험편에

서 나타난 결과처럼 캐비테이션 부식에 의한 무게감소는 아주 적은 양으로 나타났다.

Photo.3에서 Photo.8은 각각의 시험편을 무부식상태에서, 500시간, 1000시간동안 인공해수에 침식시킨 후 캐비테이션 실험을 한 상태의 표면을 나타내고 있다.

Fig. 15에서 Fig. 26까지는 각각 용사된 시험편 각 용사코팅재의 구간, 누적별 무게 감소량- 부식 시간대별 특성을 나타내는 그래프이다.

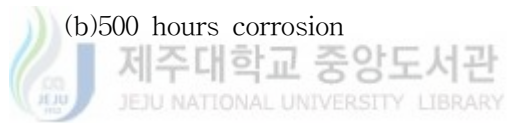




(a)Non - corrosion



(b)500 hours corrosion



(c)1000 hours corrosion

Photo.3 Damaged surface of Cu-Zn substrate after cavitation erosion.



(a)Non - corrosion



(b)500 hours corrosion



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY



(c)1000 hours corrosion

Photo.4 Damaged surface of Amdry after cavitation erosion.



(a)Non - corrosion

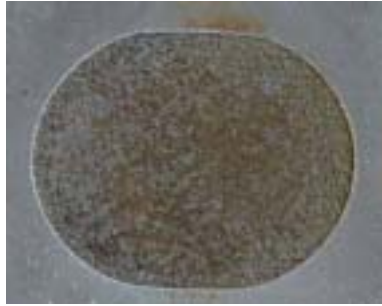


(b)500 hours corrosion



(c)1000 hours corrosion

Photo.5 Damaged surface of Cr₂O₃ after cavitation erosion.



(a)Non - corrosion

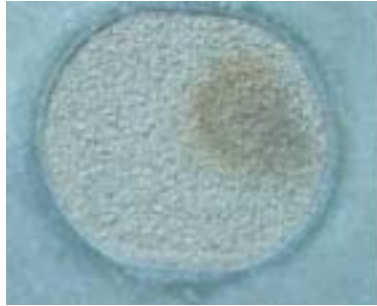


(b)500 hours corrosion

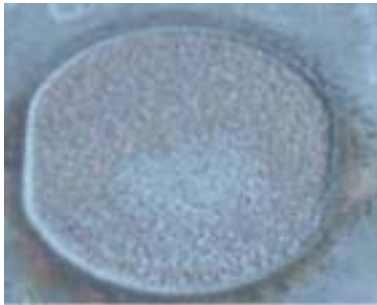


(c)1000 hours corrosion

Photo.6 Damaged surface of Al after cavitation erosion.



(a)Non - corrosion



(b)500 hours corrosion



(c)1000 hours corrosion

Photo.7 Damaged surface of Zn after cavitation erosion.



(a) Non - corrosion



(b)500 hours corrosion



(C)1000 hours corrosion

Photo.8 Damaged surface of SUS316 after cavitation erosion.

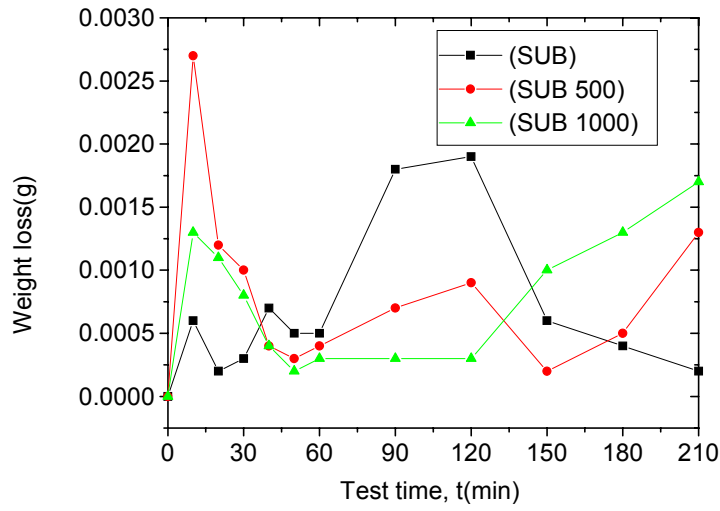


Fig. 15 weight loss under cavitation at 0, 500, and 1000 hours.(SUB)

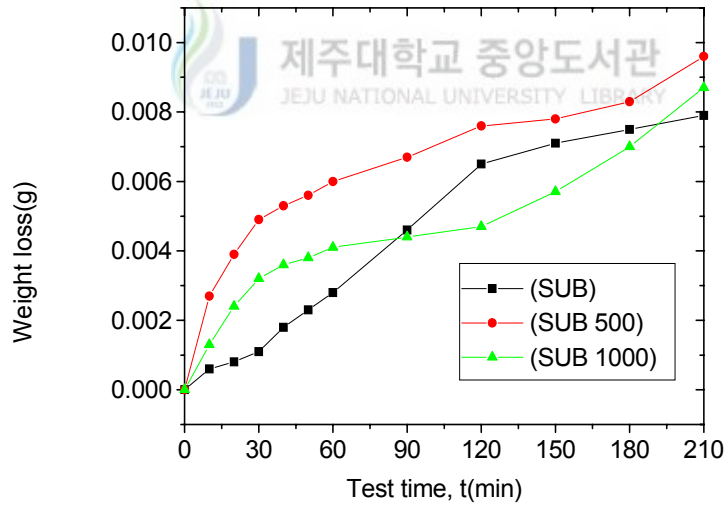


Fig. 16 Cumulative weight loss under cavitation at 0, 500, and 1000 hours. (SUB)

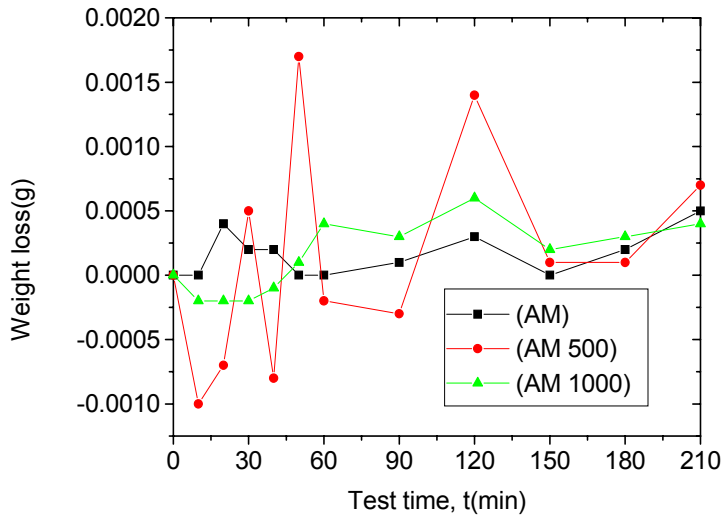


Fig. 17 weight loss under cavitation at 0, 500, and 1000 hours. (AM)

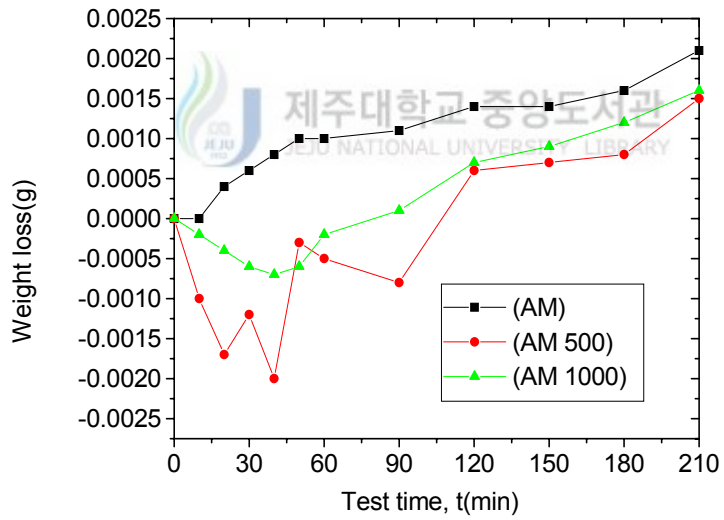


Fig. 18 Cumulative weight loss under cavitation at 0, 500, and 1000 hours.

(AM)

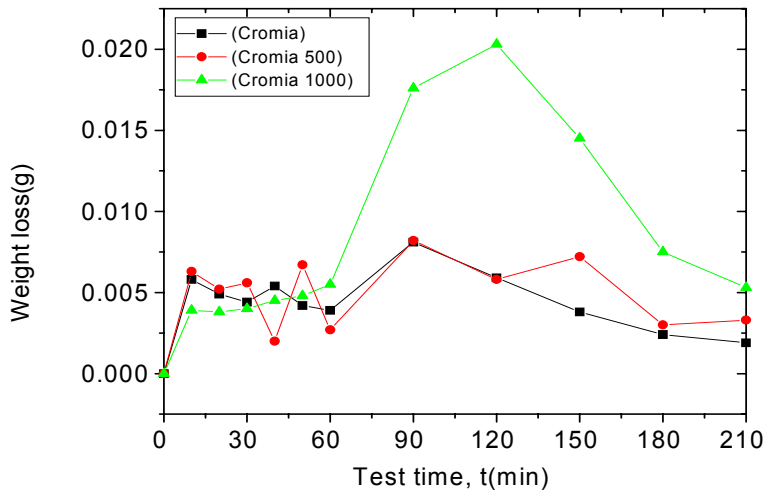


Fig. 19 weight loss under cavitation at 0, 500, and 1000 hours. (Cr_2O_3)

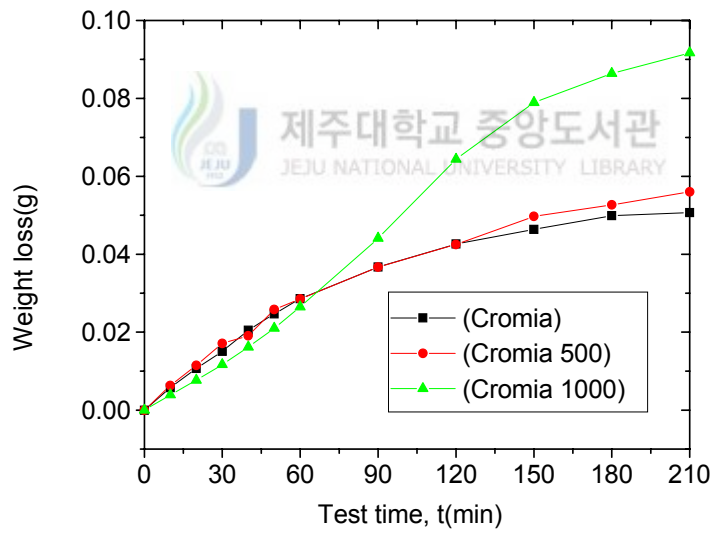


Fig. 20 Cumulative weight loss under cavitation at 0, 500, and 1000 hours.
(Cr_2O_3)

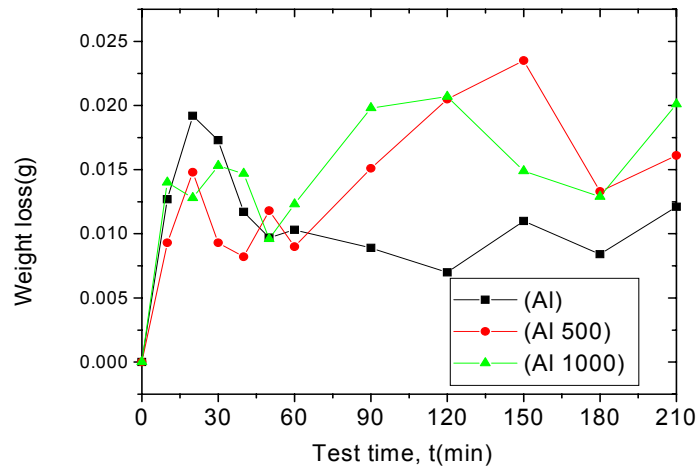


Fig. 21 weight loss under cavitation at 0, 500, and 1000 hours. (A1)

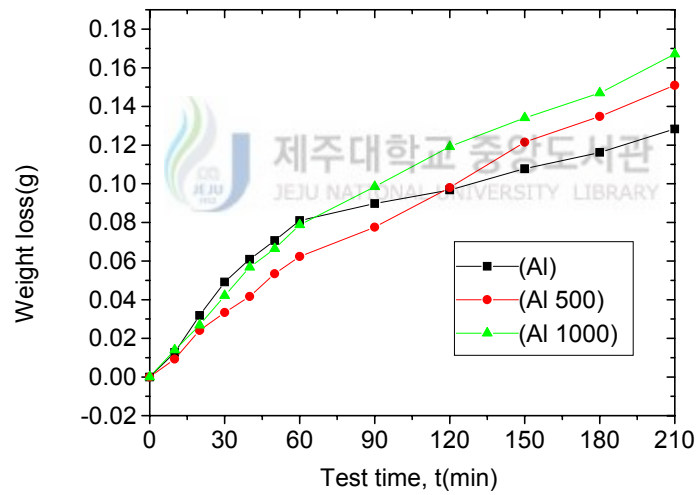


Fig. 22 Cumulative weight loss under cavitation at 0, 500, and 1000 hours.

(A1)

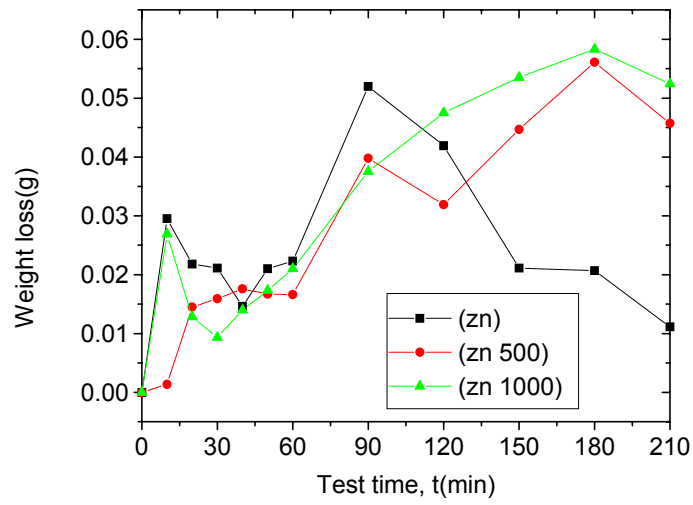


Fig. 23 weight loss under cavitation at 0, 500, and and 1000 hours. (Zn)

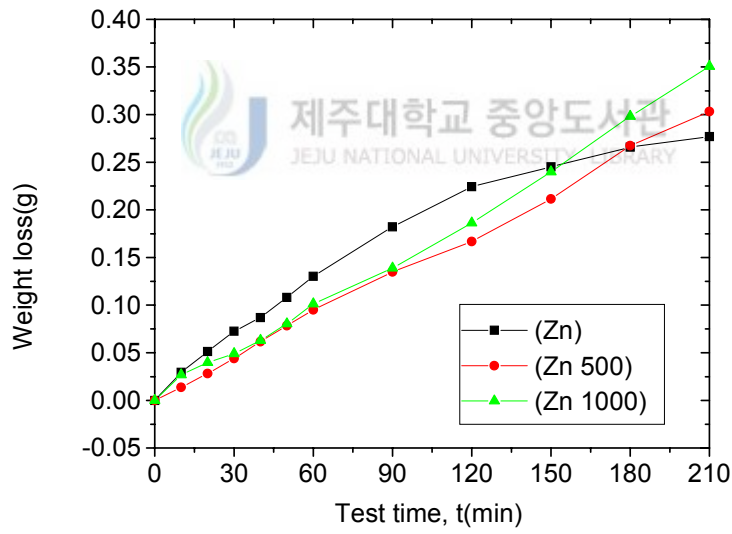


Fig. 24 Cumulative weight loss under cavitation at 0, 500, and 1000 hours.
(Zn)

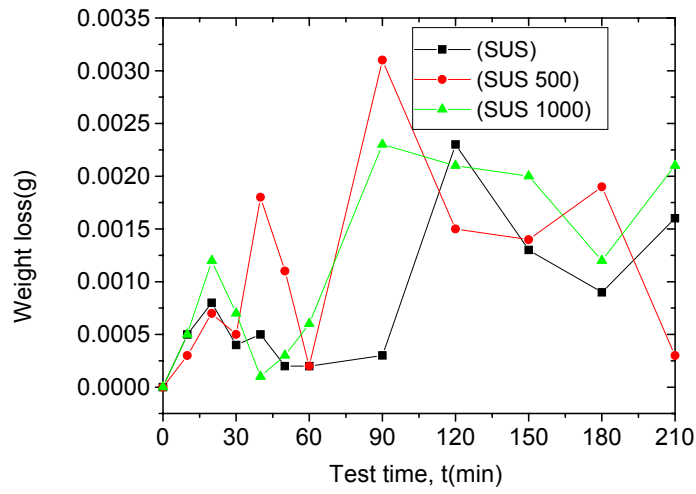


Fig. 25 weight loss under cavitation at 0, 500, and 1000 hours. (SUS 316)

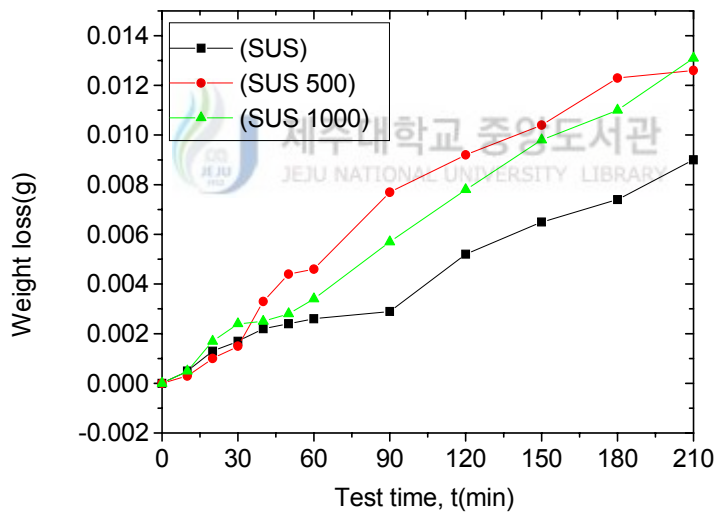


Fig. 26 Cumulative weight loss under cavitation at 0, 500, and 1000 hours. (SUS 316)

IV. 결론

선박 스크류, 펌프 등의 유체 기계들은 해수 중 중요한 손상 원인중의 하나는 캐비테이션이 고려된다. 캐비테이션은 수중에서 가동되는 기계가 고속회전시 발생하는 압력차에 의해 발생하는 기포공동현상으로 재료 표면을 침식하여 기계 기능과 성능 저하를 초래한다.

본 연구에서는 고강도 황동 기재의 표면에 내식성이 강한 재질로 알려진 AMDRY625, Cr₂O₃, SUS316, Zn, Al를 용사를 하여 시험편을 준비하였다. 용사 코팅재의 내식성 비교 실험 방법으로는 3.5% NaCl용액에서 500시간과 1000시간의 침지 후, 초음파 발생 캐비테이션 장치를 이용하여 3.5% NaCl용액에서 210분 동안 캐비테이션 실험을 하여 내식성 코팅재들의 캐비테이션에 의한 무게 감소와 표면손상을 조사 검토하였다.

각 시험편의 캐비테이션 실험을 토대로 얻은 결과는 다음과 같다.



1. 단순 기재 및 기재상에 용사 코팅된 시험편의 캐비테이션 부식실험 시간이 증가함과 동시에 무게감소량이 증가하였고, 1000시간 침지시험편, 500시간 침지시험편, 무부식 상태의 시험편 순으로 무게감소량이 크다는 것을 알 수 있었다..
2. 단순 기재 및 Amdry625, SUS316 시험편은 시험편의 초기 부식 상태에 상관없이 모두가 실험초기부터 실험종료까지 무게감소량이 매우 적었다.
3. 알루미늄과 아연 시험편, Cr₂O₃ 시험편에서는 무부식 시험편, 500시간 침지시험편, 1000시간 침지시험편 모두 초기에 무게 감소량이 큰 증가현상을 보이다가 각 용사된 층이 캐비테이션 부식에 의해 탈락이 되

면 무게감소량이 둔화됨을 관찰할 수 있었다.

4. 캐비테이션 부식에 의한 무게감소량을 비교해본 결과 Amdry625, SUS316, 기재는 실험 후 무게감소량이 적어 캐비테이션 부식에 강한 재료임이 관찰되었으나, 알루미늄과 아연, Cr_2O_3 는 무게감소량이 커 캐비테이션 부식에 아주 약한 재료임이 관찰되었다.

5. 캐비테이션 부식 실험 후 Amdry625, SUS316, 기재들의 표면은 캐비테이션으로 인한 부식 손상이 적었고, 알루미늄과 아연 시험편, Cr_2O_3 시험편들은 부식 손상이 매우 큼을 알 수가 있었다.

6. 본 연구에서 조사한 용사 코팅 재료 중 용사비용 절감 및 캐비테이션 부식 방지 등을 고려할 때 SUS316이 가장 우수한 특성을 나타내었다.



참 고 문 헌

- 1) 황재호, 임우조, 정기철(1997). 연강의 캐비테이션 침식-부식 특성에 관한 연구(3), 한국어업기술학회지, 33(3).
- 2) 이진열, 임우조, 오인호(1994). 해상용 원심펌프 임펠러의 침식억제법으로 음극방식 및 재료개발에 관한 기초연구(2), 한국학술진흥재단공모과제.
- 3) 김기주, 김용규(1994). 유사해수에서 동합금강의 부식특성에 관한 연구, 한국부식학회지, 23(3).
- 4) Herbert H. Uhlig and R. Winston Revie(1985). "Corrosion and Corrosion Control", John Willey and Sons, pp.217-221.
- 5) 小若正論(1983). "金屬の 耐食損傷と 防食技術", 新日本印刷, pp.10-11.
- 6) 김용철, 고영태(2001). Al-2%Zn 용사코팅층의 박리에 따른 기재의 방식성능 평가, 한국부식학회지 30(6).
- 7) 성진경, 이상하(1996). 방식용 열용사코팅의 해수부식 특성 평가, 해양공간 이용 대형 복합 플랜트 개발과제 연구논문.
- 8) M.G Talk and G.Moreton(1981) "Proc. ASME Symp. Cavitation Erosion Fluid system", pp.139.
- 9) R.H. Unger(1987). ASM international, pp.399.
- 10) R.A. Sulit, S.L.Kullerd, and F. West, Procs(1987). ASM international, pp.241.
- 11) B.A. Shaw and A.G.S. Morton, Pprocs(1989). ASM international, pp.385.
- 12) M.S.Plesset and R.B.Chapman(1970). "Report No.85-09", Office of Naval

Research.

13) "Annual Book of ASTM Standard(1989). 03:02 Wear and Erosion :
Metal Erosion, G32-85", ASTM, pp 115~119.

14) 山本洋一(1989). 産業調査會, pp.74,79.

