

博士學位論文

소형선박용 고강도 황동합금
프로펠러의 내식성 향상에 관한 연구

濟州大學校 大學院

機械工學科



玄 昌 海

2005年 12月

소형선박용 고강도 황동합금
프로펠러의 내식성 향상에 관한 연구

指導教授 金 貴 植

玄 昌 海

이 論文을 工學 博士學位 請求論文으로 提出함

2005年 12月

玄昌海의 工學 博士學位 論文을 認准함

 제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

審査委員長	_____	印
委 員	_____	印
委 員	_____	印
委 員	_____	印
委 員	_____	印

濟州大學校 大學院

2005年 12月

A Study on the Improvement in Corrosion
Resistance of High Strength Brass Alloy
Propeller for Small Ship

Chang-Hae Hyun
(Supervised by Professor Gui-Shik Kim)

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL
FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS FOR THE
DEGREE OF DOCTOR OF ENGINEERING



Department of Mechanical Engineering
GRADUATE SCHOOL
CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

DECEMBER 2005

목 차

List of Tables	iv
List of Figures	v
Abstract	ix
I. 서 론	1
1. 연구의 배경	1
2. 연구의 목적	5
II. 내식성 용사 코팅재의 캐비테이션 침식 거동	7
1. 서 언	7
2. 재료 및 방법	8
2.1 실험재료	8
2.1.1 고강도 황동합금의 화학성분 및 기계적 성질	8
2.1.2 시험편 제작 및 용사 조건	12
2.2 실험장치 및 방법	15
2.2.1 캐비테이션 실험장치	15
2.2.2 실험방법	18
3. 결과 및 고찰	19
3.1 각종 용사코팅재의 부식 시간대별 캐비테이션 침식	19
3.1.1 무 부식 상태의 캐비테이션 침식	19
3.1.2 500시간 부식후의 캐비테이션 침식	22
3.1.3 1000시간 부식후의 캐비테이션 침식	25

3.2 코팅재별 캐비테이션 특성	28
3.2.1 Amdry625 용사 코팅재의 캐비테이션 침식	28
3.2.2 Cr ₂ O ₃ 용사 코팅재의 캐비테이션 침식	28
3.2.3 Zn 용사 코팅재의 캐비테이션 침식	29
3.2.4 Al 용사 코팅재의 캐비테이션 침식	30
3.2.5 SUS316 용사 코팅재의 캐비테이션 침식	30
4. 결 언	42
Ⅲ. 음향방출법에 의한 용사 코팅재의 파손 해석	44
1. 서 언	44
2. 재료 및 방법	45
2.1 실험재료	45
2.2 실험방법	47
3. 실험결과 및 고찰	50
3.1 용사 코팅재의 인장에 따른 음향방출 특성	50
3.1.1 용사 코팅재의 음향방출 발생거동	50
3.1.2 용사 코팅재의 표면관찰 및 파괴기구	56
3.2 부식 시간에 따른 음향방출 특성	61
3.2.1 부식 시간에 따른 Zn 용사 코팅재의 음향방출 특성	61
3.2.2 부식 시간에 따른 Zn 용사 코팅재의 표면관찰 및 파괴기구	65
3.2.3 부식 시간에 따른 Al 용사 코팅재의 음향방출특성	68
3.2.4 부식 시간에 따른 Al 용사 코팅재의 표면관찰 및 파괴기구	72
3.2.5 부식 시간에 따른 Amdry625 용사 코팅재의 음향방출 특성	75
3.2.6 부식 시간에 따른 Amdry625 용사 코팅재의 표면관찰 및 파괴기구 ..	78
4. 결 언	82

IV. 브라스팅에 의한 프로펠러의 내식성 향상 효과	83
1. 서 언	83
2. 부식 제거장치 개발	84
2.1 블라스팅	84
2.2 노즐	87
2.3 부식 제거장치 설계 및 제작	89
3. 재료 및 방법	92
3.1 시험편 제작.....	92
3.2 표면 거칠기, 경도 및 무게감소량 측정	94
3.3 전기화학실험.....	94
3.4 Cavitation 침식실험	97
4. 결과 및 고찰	98
4.1 프로펠러 표면 부식 제거 효과	98
4.2 표면 거칠기 및 경도	102
4.3 분극 특성	104
4.4 캐비테이션 침식	107
5. 결 언.....	111
V. 결 론	112
참 고 문 헌	114

List of Tables

Table 1 Chemical compositions of brass alloy	11
Table 2 Blasting conditions	13
Table 3 Chemical compositions of Amdry625	13
Table 4 Test specimens	13
Table 5 Spray conditions of materials	14
Table 6 Test specimens	45
Table 7 Comparison of nozzle life time.....	88
Table 8 Blasting conditions	92
Table 9 Change of specimens roughness after surface polishing and grinding.....	102
Table 10 Hardness [Hv]	103
Table 11 Weight loss [g]	103
Table 12 Comparison corrosion potentials(E_{corr}) with corrosion current densities(I_{corr}) obtained by the blasting and grinding methods.....	104

List of Figures

Fig. 1 Phase diagram of Cu-Zn.....	9
Fig. 2 Mechanical properties of Cu alloy	10
Fig. 3 Microstructure of test specimen	10
Fig. 4 Stress-strain diagram of test specimen	11
Fig. 5 Cavitation erosion experimental apparatus.....	16
Fig. 6 Schematic diagram of cavitation erosion test.. ..	17
Fig. 7 Weight loss under non-corrosion	20
Fig. 8 Weight loss in initial stage under non-corrosion	20
Fig. 9 Cumulative weight loss under non-corrosion.....	21
Fig. 10 Cumulative weight loss in initial stage under non-corrosion	21
Fig. 11 Weight loss under corrosion times of 500 hours	23
Fig. 12 Weight loss in initial stage under corrosion times of 500 hours.	23
Fig. 13 Cumulative weight loss under corrosion times of 500 hours	24
Fig. 14 Cumulative weight loss in initial stage under corrosion times of 500 hours	24
Fig. 15 Weight loss under corrosion times of 1000 hours.....	26
Fig. 16 Weight loss in initial stage under corrosion times of 1000 hours	26
Fig. 17 Cumulative weight loss under corrosion times of 1000 hours	27
Fig. 18 Cumulative weight loss in initial stage under corrosion times of 1000 hours.....	27
Fig. 19 Damaged surface of Amdry625 coating specimens	

	after cavitation erosion test.....	32
Fig. 20	Damaged surface of Cr ₂ O ₃ coating specimens	
	after cavitation erosion test.....	33
Fig. 21	Damaged surface of Zn coating specimens	
	after cavitation erosion test.....	34
Fig. 22	Damaged surface of Al coating specimens	
	after cavitation erosion test	35
Fig. 23	Damaged surface of SUS316 coating specimens	
	after cavitation erosion test	36
Fig. 24	Weight loss under cavitation	
	at 0, 500, and 1000 hours (Amdry625).....	37
Fig. 25	Cumulative weight loss under cavitation at 0, 500,	
	and 1000 hours. (Amdry625).....	37
Fig. 26	Weight loss under cavitation at 0, 500, and 1000 hours. (Cr ₂ O ₃).....	38
Fig. 27	Cumulative weight loss under cavitation	
	at 0, 500, and 1000 hours(Cr ₂ O ₃)	38
Fig. 28	weight loss under cavitation at 0, 500, and 1000 hours. (Al)	39
Fig. 29	Cumulative weight loss under cavitation	
	at 0, 500, and 1000 hours (Al)	39
Fig. 30	Weight loss under cavitation	
	at 0, 500, and 1000 hours (Zn)	40
Fig. 31	Cumulative weight loss under cavitation	
	at 0, 500, and 1000 hours. (Zn)	40
Fig. 32	Weight loss under cavitation	
	at 0, 500, and 1000 hours (SUS 316)	41

Fig. 33 Cumulative weight loss under cavitation at 0, 500, and 1000 hours (SUS 316)	41
Fig. 34 The shape and dimension of test specimen (unit : mm)	46
Fig. 35 Schematic diagram of tensile and AE test	48
Fig. 36 Basic principle of AE method	49
Fig. 37 Schematic AE signals corresponding to one AE Event	49
Fig. 38 Stress and event vs. strain	53
Fig. 39 Cumulative count and energy vs. strain	55
Fig. 40 Stress and amplitude vs. strain	59
Fig. 41 Surface crack of coating layer after tensile testing.....	60
Fig. 42 Stress and event vs. strain	63
Fig. 43 Cumulative count and energy vs, strain	64
Fig. 44 Stress and amplitude vs. strain	66
Fig. 45 Surface crack of Zn coating layer after tensile testing according to corrosion time	67
Fig. 46 Stress and event vs. strain	70
Fig. 47 Cumulative count and energy vs, strain	71
Fig. 48 Stress and amplitude vs. strain	73
Fig. 49 Surface crack of Al coating layer after tensile testing according to corrosion time	74
Fig. 50 Stress and event vs. strain	76
Fig. 51 Cumulative count and energy vs. strain.....	77
Fig. 52 Stress and amplitude vs. strain	80
Fig. 53 Surface crack of Am625 coating layer after tensile testing according to corrosion time	81

Fig. 54 Schematic diagram of blasting	84
Fig. 55 Diagram of suction type blasting system	85
Fig. 56 Boron nozzle and blast gun	88
Fig. 57 Diagram of corrosion removing apparatus	90
Fig. 58 Air cylinder attached proximity sensor and controller	90
Fig. 59 Corrosion removing apparatus	91
Fig. 60 The test specimen for blasting	93
Fig. 61 Schematic diagram of polarization behavior	95
Fig. 62 Schematic diagram of polarization test	96
Fig. 63 Specimen for polarization test.....	96
Fig. 64 An installed propeller in chamber of corrosion removing apparatus	98
Fig. 65 Profile variation of a propeller by various blasting times.....	100
Fig. 66 Profiles of a propeller before and after of corrosion removing test	101
Fig. 67 Polarization curves to various blasting times (Emery)	105
Fig. 68 Polarization curves to various blasting times (Al_2O_3)	105
Fig. 69 Variation of polarization curves according to various polishing conditions	106
Fig. 70 Photographs of a tested cavitation erosion specimen	108
Fig. 71 Weight loss after cavitation erosion test	110

ABSTRACT

This thesis focuses on the basic research for the prevention of corrosion and erosion of propellers as a part of small boats. The study is designed to illuminate the characteristics of cavitation erosion-corrosion of the thermal sprayed layers after spraying the corrosion resistance materials on the surface of substrates of high strength brass alloy(52.3%Cu-42.3%Zn), besides the characteristics of fracture of the sprayed coating layers by Acoustic Emission(AE) are investigated. This study also examined the capabilities of corrosion resistance and how corrosion resistance operates by developing a screw propeller corrosion removing unit with blasting method.

The first work was investigated some specimens immersed in the solution of 3.5% NaCl for 500 to 1,000 hours, after spraying Amdry625, Cr₂O₃, SUS316, Zn, and Al on the substrates of the high strength brass alloy(52.3%Cu-42.3%Zn) in order to research the surface damage and weight loss of corrosion-coated materials after experimenting with 3.5% NaCl solution for 210 minutes, using the self-made cavitation unit which generates electromagnetic waves.

The volume of corrosion with substrates and spray-coated specimens's cavitation shows an increase in proportional to the numbers of both test hours and corrosion hours. Regardless of the number of corrosion hours, the corrosion caused by cavitation on Amdry625-sprayed and SUS316-sprayed coating specimens is less than that of Al-sprayed, Zn-sprayed, Cr₂O₃-sprayed specimens.

The second work was to examine the characteristics of cracks and exfoliation of the coated layers of the substrates of the high strength brass alloy(52.3%Cu-42.3%Zn) sprayed with Zn, Al, and Amdry625 during extension test of the 500 hour-immersed specimen in

non-corrosion specimen and 3.5% NaCl liquid, using acoustic emission unit.

The cracks and exfoliation, a kind of plastic deformation occurred in between plasma sprayed coating layers, tend to occur less than the rate of 1% to 2.5% of deformation while the early stage of extension, however Amdry625-sprayed specimen shows a tendency of occurring in the rate of 5% to 20% due to the substrate's corrosion. The Zn-sprayed specimen has less occurrence in case of shorter length of corrosion, contrary to the Al-sprayed specimen. Al-sprayed and Zn-sprayed specimens show the characteristics of cracks, while Amdry625-sprayed specimen shows the characteristics of exfoliation. The coating layers of the Zn-sprayed specimen is considered to be cracked along with extension, however the coating layers of Am-sprayed specimen is considered to be exfoliated due to the fact that Am-sprayed specimen has less softness than substrates. Among immersed specimens, Zn and Al specimens functioned as sacrificial anodes that resulted in non-corrosion on the surface of the substrates. On the other hand, Am specimens resulted in corrosion on the surface of the substrates since it have no function as sacrificial anodes.

The last one was make the device to remove corrosion on the surface of the propeller adopted the principle of blasting in order to enhance counter-corrosion ability, as a finish work to facilitate the removal of any corrosion on the corroded propeller. With the test for corrosion removal on the surface of the propeller and the test for better counter-corrosion capability, the study examined accordingly the characteristics of the weight loss of the propeller, surface roughness, corrosion potentials, and cavitation erosion. The use of air pressure and sensor helps the automatic transportation of the nozzles easier. And they developed a device of corrosion removal by adopting

the principle of blasting that sprays particles with air on the substrates while letting the propeller do a rotary motion. The test resulted in complete removal of corrosion rusts on the propellers for fishing boats by the automatic transportation of the nozzle. It also shows that the specimens blasted by the developed device have improved in solidity and surface roughness, and the specimens blasted for 20 seconds, regardless of media, show the low level of corrosion potentials. Therefore, corrosion resistance of high strength brass alloy propeller for small ship was proven to be improved when using the developed device.



I. 서 론

1. 연구 배경

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 단지와 해상 철 구조물 등 해양 항만 시설, 간척지의 매립 등 인근 해변의 개발 지역에 각종 플랜트 사업 및 철 구조물 설치가 증가하고 있어 해양 지역에는 각종 환경오염과 오염된 폐수, 하천수 및 생활하수로 인한 해수 오염이 넓게 확산되므로 금속의 부식 문제가 더욱 심각한 문제가 되고 있다.

이러한 환경조건에서 강한 내식성을 요구하는 해양 기계류 중에 프로펠러, 임펠러의 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. 대부분의 해양기계류는 환경적으로 부식에 취약한 노출되어 있으며 특히 해수의 유동에 접하는 부품들은 해수에 의한 부식과 캐비테이션 현상에 의한 침식작용으로 손상이 나타난다. 해양구조물들의 구성요소들인 임펠러, 밸브, 배관, 축, 베어링 등에서의 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 침식 [6-7] 은 전기 화학적인 부식성 환경에서 일어나는 경향이 많은데, 이와 같이 금속재료에 침식-부식이 중첩하여 발생하는 경우에는 침식과 부식이 상호간에 가속하는 상승효과 때문에

기계수명에 치명적인 악영향을 미친다 [8] .

이런 부식들을 방지하기 위하여 금속의 표면에 내식성이 큰 재료를 피복하여 부식에 대한 저항성을 증가시키는 방법이 이용되고 있다. 유기물 피복은 탄소강이나 주철 표면을 페인트로 도장하거나 에폭시 또는 고무 등으로 피복하는 방법으로 현재 해수 취수관이나 복수기 Barrel, 폐수 처리 설비 등에 사용되고 있다. 이 방법은 표면을 완벽하게 피복시킨 경우에는 해수 속에서 내식성이 우수하나 피복 재료의 내마모성이 떨어지므로 모래 등의 이물질이 많을 경우에는 사용에 어려움이 있다 [9] . 최근에는 기재 표면에 내식성 재료를 용사 코팅하여 기체가 나타내는 부식속도보다 그 속도를 낮추는 방법이 이용되고 있는데, 이는 코팅층이 기체를 외부 부식 환경과 차단시키는 효과와 코팅층의 재질이 기재 보다 전기 화학적으로 전위가 낮은 경우, 기재의 표면과 코팅 층 사이의 갈바닉 연결로 구조물 표면의 전위가 부식전위보다 낮아져 부식속도가 매우 낮아지게 되는 음극방식효과를 이용한 것이다.

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. 용사법의 특징을 보면 피막형성에 이용되는 재료의 자유도가 크고, 피복사용 재료의 종류, 형상 및 치수에 대한 자유도가 넓고, 용사시스템의 이동이 간단하므로 특정부분에도 적용이 가능하며, 피막 형성 시 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 환경차단효과 뿐만 아니라 음극방식효과까지 나타내기 때문이다. 특히 용사코팅 후에 존재하는 기공 때문에 기체가 환경에 노출되어 부식될 수 있으므로 음극방식효과는 필수적이라 하겠다. 용사

후 용사 피막과 기재와의 접착강도가 매우 중요하다. 이를 증가시키는 방법으로는 보다 엄격한 표면 전 처리법(blasting)이 제시되고 있으며, electric arc spray 법이 개발되어 접착강도의 향상에 크게 기여하고 있다 [10]. 또한 기공도도 공정 및 건(GUN)의 개발로 향상되었으며 특히 sealant를 이용하여 기공을 매우면 환경차단효과를 크게 향상시킬 수 있다고 한다 [11]. 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 [12].

용사코팅에 의한 피복은 코팅층이 기재와 밀착성이 좋아야 하며, 방식의 효과가 뛰어나고, 가격이 다른 용사금속 분말에 비해 저렴하여야 한다. 기재와의 밀착성을 포함한 코팅재의 재료 특성을 관찰, 평가하는 비파괴 검사 방법은 방사선 투과법(RT : Radio-graphy Testing), 초음파 탐상법(UT : Ultra-sonic Testing), 와전류 탐상법(ECT : Eddy Current Testing), 자분 탐상법(MT : Magnetic particle Testing), 침투 탐상법(PT : Penetrant Testing), 음향 방출법(AE : Acoustic Emission) 등이 있다. 대부분의 검사방법은 정지 중에 시행하는 방법이지만, 음향 방출 시험은 가동상태를 유지하면서 검사할 수 있으며, 또한 금속간의 결합이나 마찰의 직접적인 원인에 근거한 신호를 감지하고 분석하며 상대적으로 원하는 부위에 센서를 부착만 하면 설비에는 전혀 영향을 주지 않는다는 장점을 가지고 있다 [13]. 이러한 원인으로 기계부품의 운전 중에 용사부재의 밀착성을 검사, 평가하기 위해 AE법을 이용한 기술의 요구는 점점 높아지고 있다. 음향 방출법(AE : Acoustic Emission)은 고체 내에 국부적으로 형성되었던 변형에너지가 급격히 방출될 때 발생하는 탄성파로서, 고체 내에서의 전위(dislocation)의 이동이나 미소균열의 생성 및 성장 등이 대표적인 발생원이고, 전자의 경우는 연속형 신호를, 후자의 경우는 돌발형의 AE 신호를 발생하

는 것으로 알려져 있다 [14] . 독일의 Joseph Kaiser에 의해 재료의 변형에 대한 AE 연구가 시작되었고, 그는 일단 한번의 응력을 받은 재료에 대해 재차 하중을 부과할 때 이미 경험한 응력 레벨 이하에서는 AE 신호가 방출하지 않는다는 Kaiser effect를 제안하였다. 최근 AE에 의한 용사코팅 피막의 파괴 거동에 관한 연구는 활발하게 이루어지고 있다 [15-17] .

대부분 어선의 프로펠러는 캐비테이션 침식과 부식에 의한 성능저하를 줄이기 위해 연2회 정도 프로펠러 표면의 가공을 행한다[18-19]. 이 가공은 핸드 그라인더를 이용하여 수작업으로 표면 부식 녹을 제거하는 연삭작업이며, 이때 중금속인 황동 분말과 부식생성물이 분진이 되어 작업장의 공기 중에 유포되므로 열악한 작업환경이 된다. 핸드 그라인더에 의한 수작업은 프로펠러의 부식 부분만 연삭되는 것이 아니라 기재 부까지 연삭되므로 두께의 감소로 인한 프로펠러의 수명의 단축이 우려되며, 정밀 연삭을 한다 하더라도 표면 거칠기가 크게 됨을 피할 수 없다. 프로펠러의 거친 표면은 프로펠러의 부식과 공동현상의 가속에 직접적으로 연관되므로, 이 또한 프로펠러의 수명을 단축시킬 수 있다. 어선 프로펠러 제작사들은 그 영세성으로 인하여 우리나라 전역에서 위와 같은 핸드 그라인더에 의한 부식 녹 제거작업을 하고 있으므로 친환경적이며 프로펠러의 부식 녹을 쉽게 제거할 수 있는 장치의 개발이 필요한 실정이다.

일반적으로 구조물의 페인트와 부식을 제거하는 가공방법으로 블라스팅법을 이용하고 있다. 블라스팅은 고경도의 투사재(Media)를 고압공기로 구조물 표면에 입체적으로 분사시켜 표면처리를 하며, 피닝효과로 경도와 강도 및 내부식성을 향상시키는 방법이다[20-22] . 블라스팅 공법은 블라스팅 조각, 교목가공 등의 목공예와 모형제작, 마킹 등의 석재, 유리가 광범위하게 사용되고 있으며 치과기공 등의 의료산업 분야와 선박엔진 수리 등의 부품재생산업 분야 등에 널리 사용되고 있는 실정이다.

2. 연구 목적

제주도내 어선은 약 3340척 (2001년 제주도청 해양수산물 자료)으로 이들 선박용 프로펠러의 재질은 대부분 동합금계로 고강도 황동합금을 사용한다. 이들 어선들의 프로펠러는 정박 중 항만내의 오염해수 등에 의한 표면 부식과 운항 중 발생하는 공동현상으로 인한 침식에 의해 표면이 손상되어 선박 추진성능이 저하한다. 특히 현재 가장 많이 사용하는 FRP선박에서는 선체 및 프로펠러에 대한 방식이 행하여지지 않아 더욱 피해가 심각하다. 그러나 효율적인 방식방법의 부재로 수작업에 의한 그라인딩 작업을 통하여 부식면을 가공하는 실정이다.

최근 기능성 용사코팅기술의 개발과 발달로 적용이 확대되고 있으며, S45C를 기재로 한 용사피막의 밀착성 및 파괴거동에 대한 연구도 이루어지고 있다. 또한 황동합금의 조성비의 변화에 따른 캐비테이션 특성에 대해서도 연구가 이루어지고 있다. 그러나 고강도황동합금의 표면에 내식성 재료를 용사코팅 한 후 그 피막의 파괴 거동과 캐비테이션 침식 특성에 관한 연구는 거의 없는 실정이다. 부식된 프로펠러에 대한 효율적인 부식제거 방법에 대한 방법도 강구되어야 한다.

따라서 본 연구는 어선용 프로펠러의 방식을 목적으로 프로펠러 소재인 고강도 황동을 기재로 표면에 다양한 내식성 재료를 용사 코팅한 시험편을 제작하여 용사부식피막의 캐비테이션 침식 특성과 AE 특성을 규명하였다. 그리고 자체 설계한 소형어선용 프로펠러 부식제거 장치를 개발하여 그 성능을 검토하였다.

본 연구는 모두 5장으로 구성되어 있으며 각 장의 내용을 요약하면 다음과 같다.

제1장에서는 서론으로서 소형어선용 프로펠러의 내식성 향상을 위한 관련 기

술과 본 연구의 목적과 필요성 등을 기술하였다.

제2장에서는 소형어선용 프로펠러에서 발생하는 캐비테이션 침식에 대한 저항성을 검토하기 위하여 고강도 황동기재에 내식성 재료를 용사하고 3.5% NaCl용액에서 부식 시킨 후 캐비테이션 침식 실험을 통해 무게 감소와 표면손상을 조사 검토하였다.

제3장에서는 소형어선 프로펠러의 물리적 힘에 대한 용사코팅 피막의 조성변형을 검토하기 위하여 고강도 황동기재에 내식성 재료를 용사 코팅하고 3.5% NaCl용액에서 부식시킨 시험편을 음향방출장치를 이용하여, 인장시험 중 코팅층의 균열과 박리 특성을 고찰하였다.

제4장에서는 부식된 프로펠러 표면의 효율적 부식제거 및 프로펠러의 내 부식성 향상을 위해 블라스팅 원리를 적용한 프로펠러 부식제거 장치를 제작하여 성능시험을 실시하고, 그에 따른 프로펠러의 경도변화, 무게감소량, 표면 거칠기, 부식전위, 캐비테이션침식 특성 등을 고찰하였다.

제5장에서는 결론으로서 본 연구의 전체 내용을 요약하고 각 장에서 얻어진 결과들을 정리하였다.



Ⅱ. 내식성 용사 코팅재의 캐비테이션 침식 거동

1. 서 언

소형어선의 프로펠러의 소재로는 일반적으로 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.

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

S45C를 기재로 용사코팅을 하여 표면 개질을 한 재료의 건전성 파악을 위한 피로파괴거동 검토 [23], 용사 코팅한 재료의 마찰마멸에 대한 검토 [24-25], AE기법을 활용한 열처리에 따른 코팅피막의 파괴기구검토 [26] 등 다양한 연구 결과가 보고 있으나, 해수 환경에서 고강도 황동합금을 기재로 한 용사피막에 대한 연구는 미흡한 실정이다.

특히, 어선의 프로펠러는 항구수에 의한 부식과 더불어 추진축의 고속회전으

로 인하여 프로펠러의 뒷면에서 기포의 발생과 충격이 반복하며 이때 발생하는 충격으로 산화물 피막을 파손하여 침식 및 부식을 일으키는 캐비테이션 부식이 발생한다. 고체벽면에 충돌하는 직경 1cm 기포 붕괴시의 액체 분사속도는 128%에 달하고, 진동수 20kHz와 진폭 24 μ m에서의 마이크로 제트에 의한 충격력은 800atm에 달한다 [27]. 이와 같이 침식-부식이 중첩하여 발생하는 경우에는 침식과 부식이 상호간에 가속하는 상승효과 때문에 프로펠러의 수명에 치명적인 악영향을 미친다. 따라서 어선용 프로펠러의 방식을 위해 용사 코팅한 재료에 대한 부식 환경에서의 캐비테이션침식에 대한 검토가 필요하다.

본 장에서는 선박 프로펠러 소재인 고강도 황동 합금 표면에 내식성이 강한 재질로 알려진 Amdry625, Cr₂O₃, SUS316, Zn, Al를 용사 코팅한 시험편을 3.5% NaCl용액에서 500시간과 1000시간동안 부식시킨 후, 초음파 발생 캐비테이션 장치를 이용하여 3.5% NaCl용액에서 210분 동안 캐비테이션 실험을 하여 내식성 코팅재들의 캐비테이션침식에 의한 무게 감소와 표면손상을 조사 검토하였다.



2. 재료 및 방법

2.1 실험재료

2.1.1 고강도 황동합금의 화학성분 및 기계적 성질

황동은 Fig. 1 에서 보이는 바와 같이 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 상만

이 고려된다. 저 아연농도에서의 α 상, 고 아연농도에서의 β 상과 그 중간영역에서는 $\alpha+\beta$ 상이 나타난다. α 상은 부식에 강하나 강도가 약하고, $\alpha+\beta$ 의 2상합금은 탈 아연 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.

Fig. 2에 나타낸 황동 성분내 따른 경도 변화에서 동성분이 70%가 될 때까지는 인장력이 강하고 경도가 증가하면서 연신율은 증가하는데, 동성분이 60%가 되면 인장력이 강하고 경도는 급격히 증가하고 연신율은 적어진다. 이 범위에서 전연성(展延性)이 좋기 때문에 쉽게 판, 관, 봉, 선으로 가공되어 여러 가지 용도로 이용된다. 그러나 동성분이 57%이하가 되면 딱딱해져 취성이 되므로 신동품(伸銅品)으로는 거의 사용되지 않는다. 실험을 위해 제작된 황동합금 시험편의 조직을 Fig. 3에 나타내고, 응력 변형을 선도는 Fig. 4에 나타내고 있다. 기지가 α 상을 나타내고 흰색으로 나타나는 것이 β 상이다. 인장강도는 487.1 N/mm², 항복강도는 265.5 N/mm², 연신율은 22.47%이다.

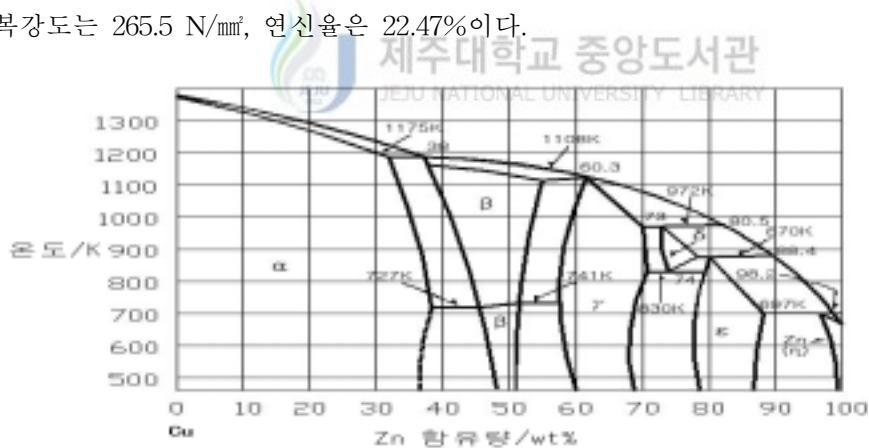


Fig. 1 Phase diagram of Cu-Zn

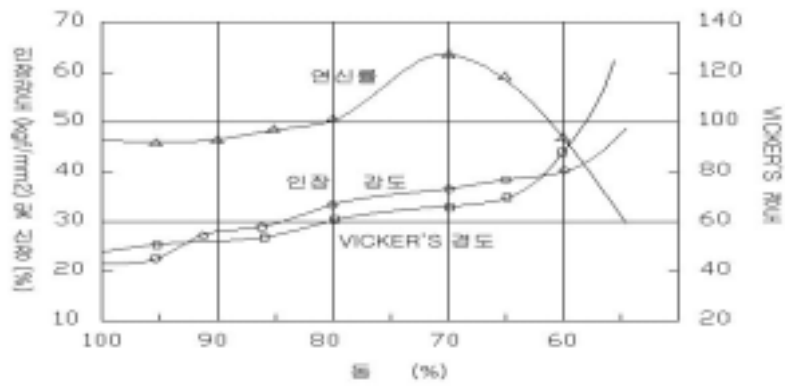


Fig. 2 Mechanical properties of Cu alloy

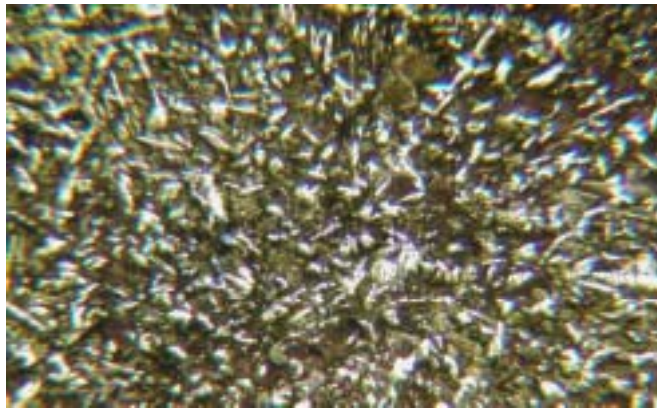


Fig. 3 Microstructure of test specimen

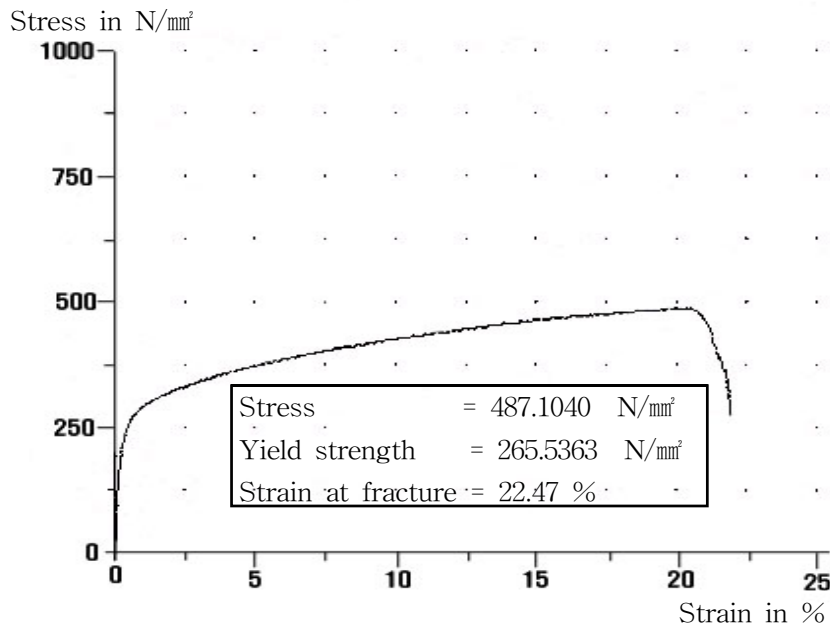


Fig. 4 Stress-strain diagram of test specimen

본 실험에 사용한 기재는 전기화학적인 부식성이 강하고 해수환경에서 주로 내침식 재료로 잘 알려진 황동합금으로 만들어진 소형선박의 프로펠러이다. Table 1에 나타난 황동합금의 화학적 조성은 동(Cu)과 아연의 성분이 97.6%, 그리고 나머지 Mn, Fe, Ni, Al 등은 무시할 정도로 함유되어 있다.

Table 1 Chemical compositions of brass alloy

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

2.1.2 시험편 제작 및 용사 조건

기재인 황동합금을 35(L)×35(W)×6(D) mm의 직육면체로 가공하여 용사 전 처리로 기재의 표면에 용사 시 접착강도를 향상시키기 위해 블라스팅 처리를 하였으며, 블라스팅 조건은 Table 3에 나타내었다.

해수환경에서 음극방식법 중 가장 많이 응용되는 양성금속인 Al, Zn과 해수에 대한 내식성이 강하다고 알려진 Amdry625, SUS316, Cr₂O₃을 각각 용사를 하였다. Amdry625는 Ni을 기본으로 한 내해수성 합금으로 Table 2에 화학적 성분을 나타내었다. 용사방법은 Amdry625, Cr₂O₃은 Plasma Spray System인 METCO 9MC SYSTEM을, SUS316과 Zn은 Arc Spray System인 PRAXAIR BP 400을 사용하였으며, Al은 Plasma Spray System인 METCO 14E SYSTEM을 사용하였다. 용사 피복층의 두께는 약 200 μ m이고 부식시간에 따라 Table 4와 같이 18개의 시험편을 제작하였다. Table 5는 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 부식 환경을 차단하였다.

에폭시 수지가 완전히 마른 후 Zn, Al, Amdry625, SUS316, Cr₂O₃의 5종류의 재료를 용사 코팅한 시험편을 무 부식 상태에서 캐비테이션 침식 실험을 하였고, 인공해수에서 침수시킬 시험편 10개를 500시간, 1000시간동안 부식시킨 후 캐비테이션 침식 실험을 하였다.

Table 2. Blasting conditions

Blasting Type	Air Pressure	Grit Mesh	Nozzle Type	Surface Roughness
Direct pressure	6.8-7.0kg/c m ²	-14+30 (# 24)	Boron 7Φ	Ra 7.82-7.99

Table 3 Chemical compositions of Amdry625

Compositions	Ni	Cr, ,	Mo	Fe	Co
wt.(%)	66.5	21.5	8.5, ,	3	0.5

Table 4. Test specimens

Specimens notification	Coating materials	Corrosion times in 3.5% NaCl(hours)
AM	Amdry625	0
AM500		500
AM1000		1000
Cromia	Cr ₂ O ₃	0
Cromia500		500
Cromia1000		1000
Al	Al	0
Al500		500
Al1000		1000
Zn	Zn	0
Zn500		500
Zn1000		1000
SUS	SUS 316	0
SUS500		500
SUS1000		1000

Table 5. Spray conditions of materials

(a) Amdry625 and Cr₂O₃

Coating method	Coating system	Nozzle	Gas pressure (psi)		Gas flow (ft ³ /h)		Set amp	Volts	Spray dist m/m	Spray rate g/min
			Ar	H ₂	Ar	H ₂				
Plasma Spray System	METCO 9MC SYSTEM	732B	75	50	75	50	500	70	55	38
		732B	75	50	75	50	49-510	62-68	100	53

(b) SUS316 and Zn

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

2.2.1 캐비테이션 실험장치

본 실험에 사용된 캐비테이션 발생장치는 압전효과(Piezoelectric Effect)를 이용한 진동발생장치로써 (주)大韓 超音波에서 제작하였다.

Fig. 5는 해수 중에서의 황동합금 및 시험편에 대한 캐비테이션 침식 실험 장치를 나타낸 것이고, Fig. 6은 계통도이다. 초음파 발전기는 60Hz, 220V의 전력을 전자회로를 거쳐 진동자에 공급하며, ASTM규정(G32-85)에서 규정한 20kHz의 정격 출력을 발생시켜 진동자에 공급하는 역할을 하며, 진폭은 정진폭 자동 제어방식으로 24 μ m로 일정하게 하였다 [28]. 압전소자에 의한 진동발생은 지주형 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.



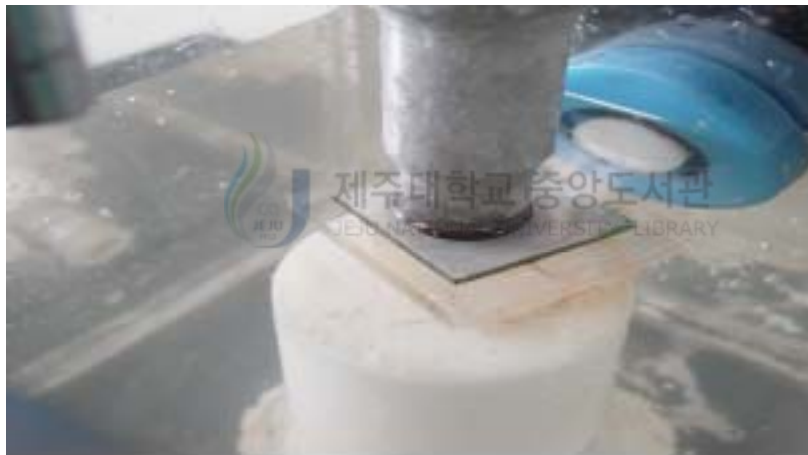
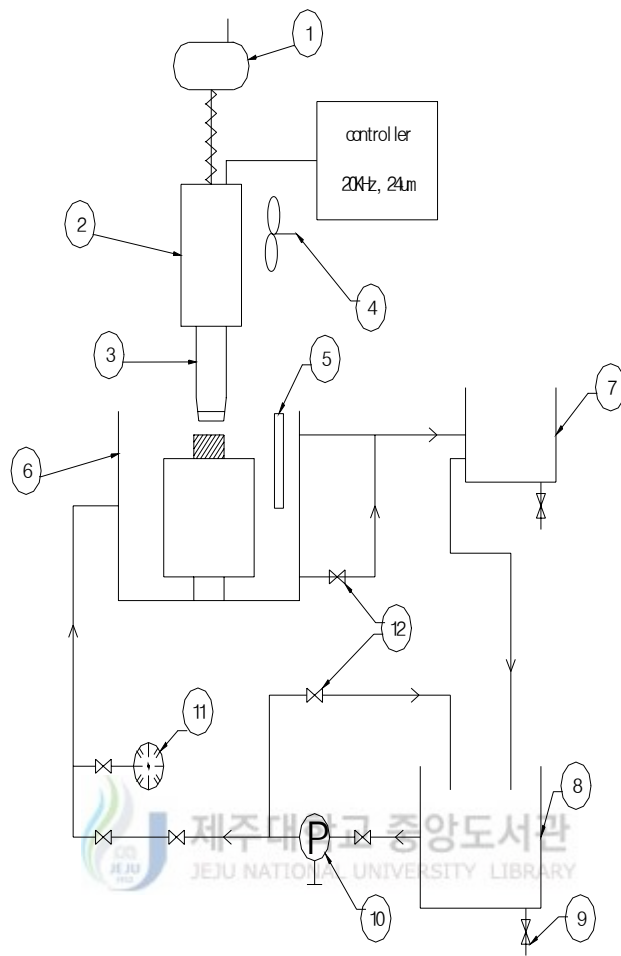


Fig. 5 Cavitation erosion experimental apparatus



- | | | |
|----------------|------------------|--------------|
| ① handling | ② Transducer | ③ Horn skirt |
| ④ Cooling fan | ⑤ Temp. gauge | ⑥ Water tank |
| ⑦ Drain tank | ⑧ Drain tank | ⑨ Drain line |
| ⑩ Recycle pump | ⑪ Pressure gauge | ⑫ Valve |

Fig. 6 Schematic diagram of cavitation erosion test

2.2.2 실험방법

본 연구의 실험은 고강도 황동합금 기재에 Amdry625, Cr₂O₃, Al, Zn, SUS316을 용사 코팅한 시험편을 무 부식 상태와 3.5 wt%의 NaCl용액에 500시간, 1000시간동안 각각 부식을 시킨 후 캐비테이션 침식 실험을 하였다. 캐비테이션 침식 실험은 210분 동안 실시하였는데 60분까지는 매 10분마다 무게를 측정하고, 60분부터 210분까지는 30분마다 무게 감소량을 측정하였다. 캐비테이션 침식 실험을 한 뒤 구간별 무게감소량, 구간별 누적 감소량 등을 관찰하여 시간대별 각 시험편의 캐비테이션 침식특성을 관찰하였다.

환경용액으로는 천연해수에 가까운 3.5 wt.%의 NaCl용액을 사용하였고, 그 환경용액의 수위를 조절할 수 있는 장치를 설치하였으며, 각각의 시험편 실험 종료마다 인공 환경용액을 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 처리하였다. 침식량 시험편을 건조시킨 후, 디지털 저울(1/10000mg 用)을 사용하여 시험편의 무게 감소량을 측정하였다.

특히, 양극인 각 시험편과 대극(對極)인 혼(Horn)과의 전기 화학적인 부식영향은 캐비테이션 발생에 의한 침식 - 부식작용에 비하여 극소함으로서 무시하였다 [29]. 본 실험을 실시하기 전에 액체내의 가스량을 안정화시키기 위하여 보조시험편을 사용하여 약 15분 동안 예비 시험을 실시하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 각종 용사코팅재의 부식시간대별 캐비테이션 침식

3.1.1 무 부식 상태의 캐비테이션 침식

무 부식상태에서 각 시험편의 구간별 캐비테이션 침식의 특징을 살펴보면, Fig. 7에서 Fig. 10까지에 나타난 그래프와 같이 Zn 용사 시험편, Al 용사 시험편들은 무게 감소량이 실험초기에 크게 나타나고, 90분에서 120분 사이에 무게 감소폭이 가장 크게 나타났다. 실험 종료직전에는 실험초기와 같은 무게감소 현상이 관찰이 되었다.

Cr₂O₃ 용사 시험편은 실험초기에서 60분대까지는 무게감소폭이 적은 상태로 일정한 상태로 유지하다가 90분대에서 무게감소량이 크게 나타나다가 150분부터는 무게감소량이 실험종료까지는 실험 초기의 무게감소량과 비슷한 양상을 보였다. Amdry625 용사 시험편, SUS316 용사 시험편은 실험초기부터 실험종료까지 무게감소량이 매우 적어 그래프상으로 거의 일직선을 유지하였다.

각 구간별 누적된 무게감소량을 비교해 보면 Zn 용사 시험편(0.2771g), Al 용사 시험편(0.1283g) 순으로 무게감소량이 크게 나타났고, 예상외로 Cr₂O₃ (0.0507g) 용사 시험편이 그 다음으로 나타났다. 나머지 Amdry625 용사 시험편 (0.0021g), SUS316 용사 시험편(0.0090g)은 무게 감소가 아주 미미하게 관찰이 되었지만, 이 세 종류의 시험편은 캐비테이션 침식에 아주 강한 내성을 갖고 있는 것을 알 수가 있었다. Fig. 7에서 Fig. 10까지는 각각의 시험편을 무 부식 상태에서 210분 동안 캐비테이션 침식실험 한 결과를 무게 감소량, 구간별 무게 감소량 및 누적 무게 감소량으로 나타난 그래프이다.

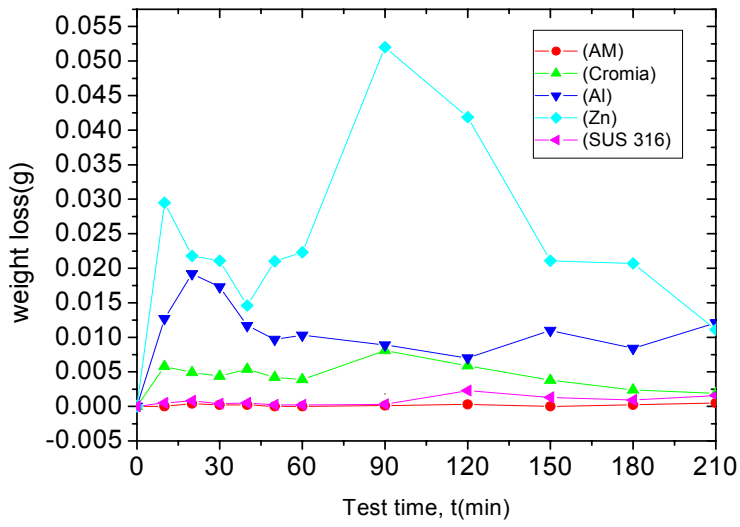


Fig. 7 Weight loss under non-corrosion

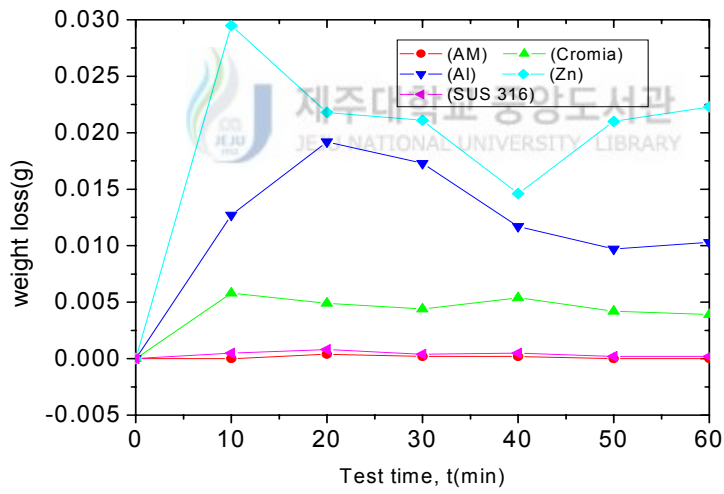


Fig. 8 Weight loss in initial stage under non-corrosion

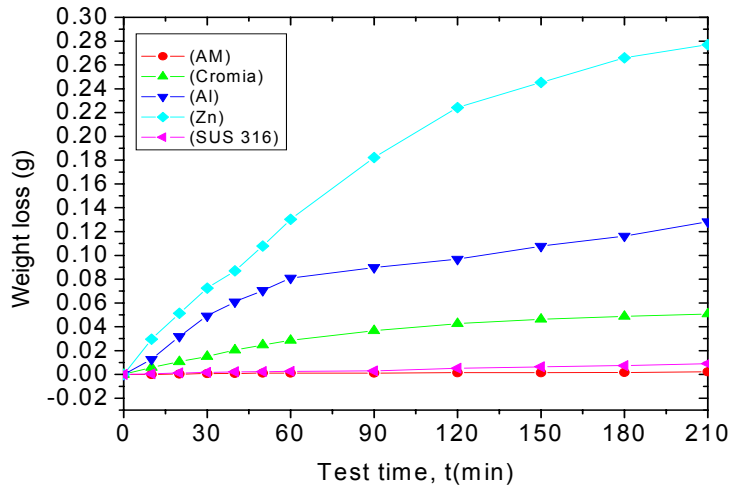


Fig. 9 Cumulative weight loss under non-corrosion

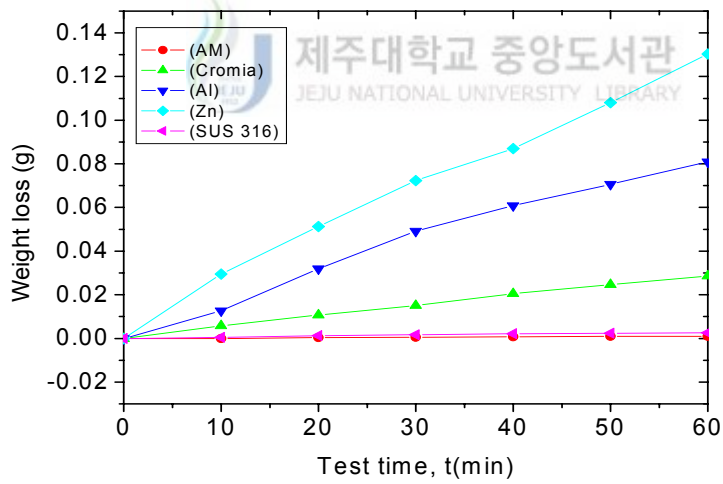


Fig. 10 Cumulative weight loss in initial stage under non-corrosion

3.1.2 500시간 부식후의 캐비테이션 침식

500시간동안 3.5 wt.%의 NaCl용액에서 부식시킨 상태에서 각 시험편의 구간별 캐비테이션부식의 특징을 살펴보면 무 부식상태에서와 마찬가지로 Zn 용사 시험편, Al 용사 시험편들은 무게 감소량이 실험초기에 크게 나타나고 있으며, Zn 용사 시험편은 실험 종료까지 지속적인 무게감소가 관찰이 되었지만 Al 용사 시험편은 150분대에서 실험종료까지 무게감소폭이 다소 떨어진 상태에서 유지되었다.

Cr₂O₃ 용사 시험편은 무 부식 시험편의 실험처럼 실험초기에서 60분대까지는 무게감소폭이 약간의 증감의 변화를 보이다가 90분 이후 실험종료까지는 실험초기의 무게감소량과 비슷한 양상을 보였다.

Amdry625 용사 시험편, SUS316 용사 시험편은 무부식상태의 실험 결과처럼 실험초기부터 실험종료까지 무게감소량이 매우 적어 그래프상으로 거의 일직선을 유지하였다.

각 구간별 누적된 무게감소량을 비교해 보면 무 부식상태에서 보다 무게감소량이 어느 정도 증가함을 관찰이 되었다. Zn 용사 시험편(0.3032g), Al 용사 시험편(0.1509g) 순으로 무게감소량이 크게 나타났고, Cr₂O₃(0.0560g) 용사 시험편이 그 다음으로 나타났다. 나머지 Amdry625 용사 시험편(0.0015g), SUS316 용사 시험편(0.0126g)은 무게 감소가 아주 적게 관찰이 되었다. 이 두 종류의 시험편은 인공해수에서 부식시킨 후에도 캐비테이션 침식에 아주 강한 성질을 갖고 있는 것을 관찰할 수가 있었다.

Fig. 11에서 Fig. 14까지는 각각의 시험편을 500시간동안 3.5 wt.%의 NaCl용액에서 500시간 동안 부식 시킨 후, 210분 동안 캐비테이션 침식실험을 한 후 무게 감소량, 구간별 무게 감소량 및 구간별 누적 무게 감소량을 나타낸 그래프이다.

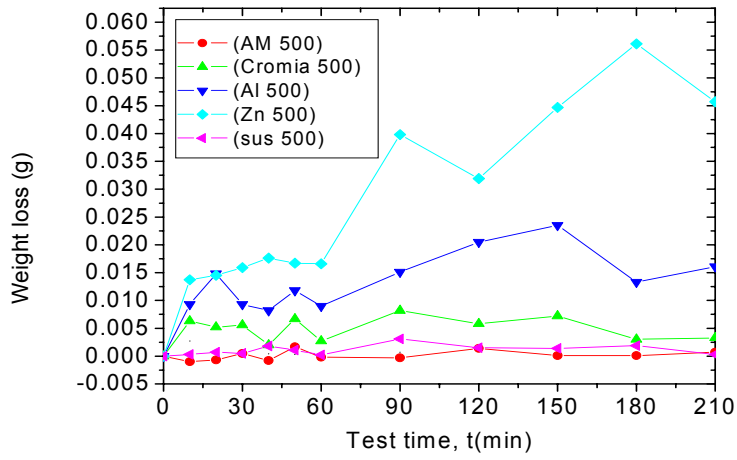


Fig. 11 Weight loss under corrosion times of 500 hours

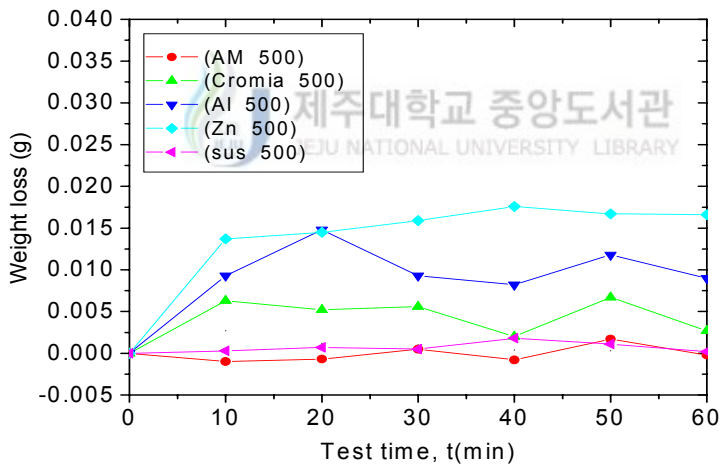


Fig.12 Weight loss in initial stage under corrosion times of 500 hours

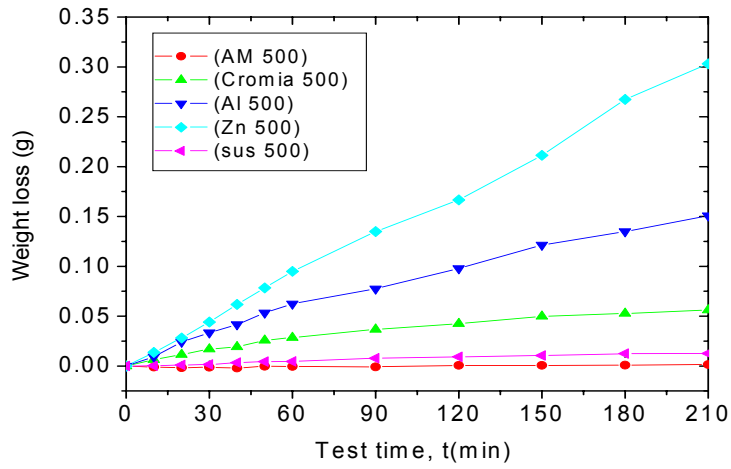


Fig.13 Cumulative weight loss under corrosion times of 500 hours

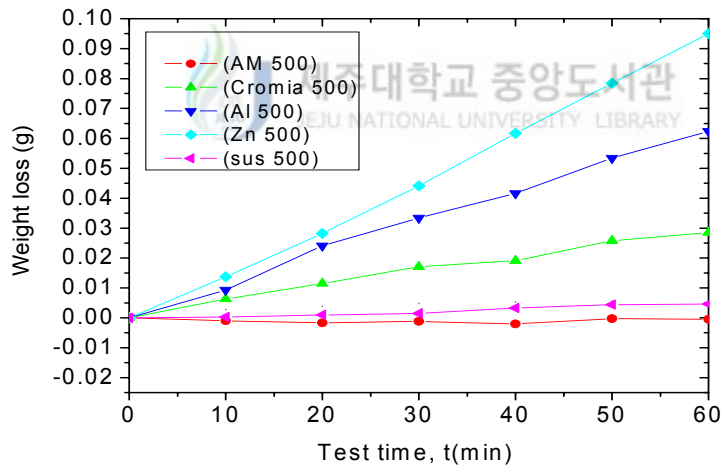


Fig.14 Cumulative weight loss in initial stage under corrosion times of 500 hours

3.1.3 1000시간 부식후의 캐비테이션 침식

1000시간동안 3.5 wt.%의 NaCl용액에서 부식시킨 상태에서 각 시험편의 구간별 캐비테이션 침식의 특징을 살펴보면 무 부식상태, 500시간동안 부식시킨 실험과 마찬가지로 Zn 용사 시험편, Al 용사 시험편들은 무게 감소량이 실험초기에 크게 나타남을 알 수 있었다, Zn 용사 시험편은 실험 종료까지 계속적인 무게감소가 관찰이 되었지만, 처음 10분대에서 나타난 무게감소량보다 20분에서 60분까지는 오히려 무게감소량이 떨어졌다. 그 후 실험종료까지는 계속적인 캐비테이션 침식 실험에 의한 무게감소가 큰 폭으로 증가함을 관찰할 수가 있었다. Al 시험편은 실험종료까지 무게감소폭이 다소 떨어진 상태에서 유지되었다.

Cr₂O₃ 용사 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.

Amdry625 용사 시험편, SUS316 용사 시험편은 무 부식상태, 500시간 부식시킨 시험편의 캐비테이션 침식 실험 결과처럼 실험초기부터 실험종료까지 무게 감소량이 매우 적어 그래프상으로 거의 일직선을 유지하였다.

Fig. 15에서 Fig. 18까지는 각각의 시험편을 1000시간동안 용기 안에서 부식시킨 후 캐비테이션 침식실험을 통해 무게 감소량, 구간별 무게 감소량 및 구간별 누적 무게 감소량을 210분 동안 나타낸 그래프이다.

각 구간별 누적된 무게감소량을 비교해 보면 무부식상태가 500시간 부식시킨 시험편 보다 누적 무게감소량이 증가함을 알 수 있었다. Zn 용사 시험편(0.3505g), Al 용사 시험편(0.1671g) 순으로 무게감소량이 크게 나타났고, Cr₂O₃(0.0917g) 용사 시험편이 그 다음으로 나타났다. 나머지 Amdry625 용사 시험편(0.0016g), SUS316 용사 시험편(0.0131g)은 무게 감소가 아주 적게 관찰이 되었다. 이 두 종류의 시험편은 인공해수에 1000시간 부식시킨 후에도 캐비테이션 부식에 아주 강한 성질을 갖고 있는 것을 관찰할 수가 있었다.

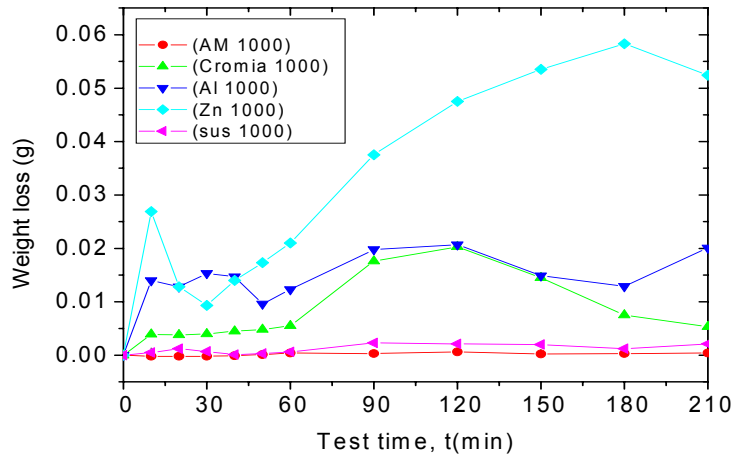


Fig. 15 Weight loss under corrosion times of 1000 hours

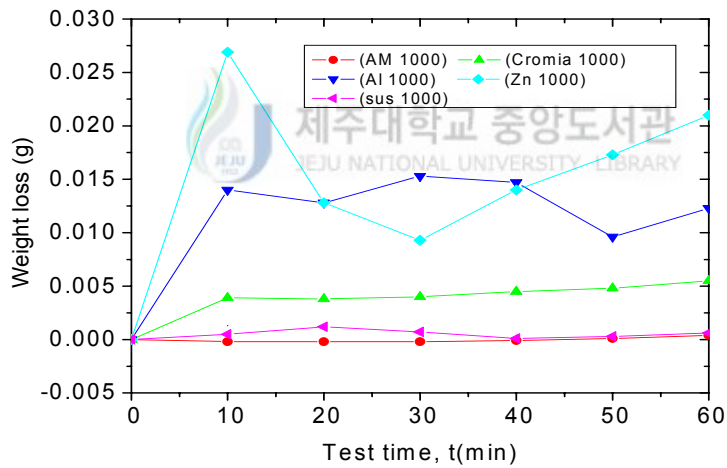


Fig. 16 Weight loss in initial stage under corrosion times of 1000 hours

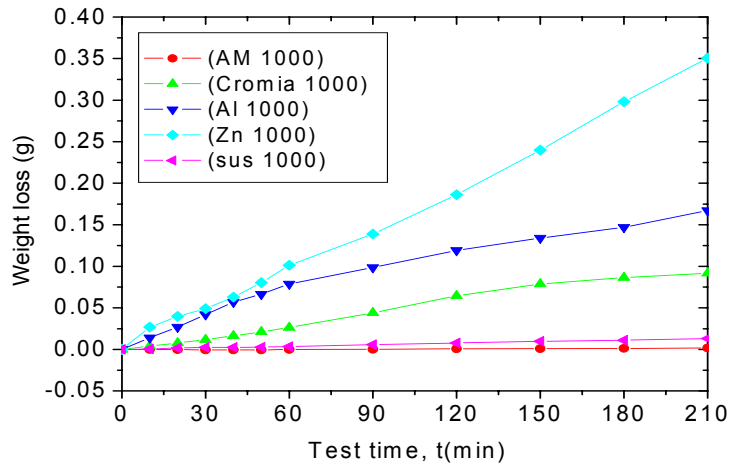


Fig. 17 Cumulative weight loss under corrosion times of 1000 hours

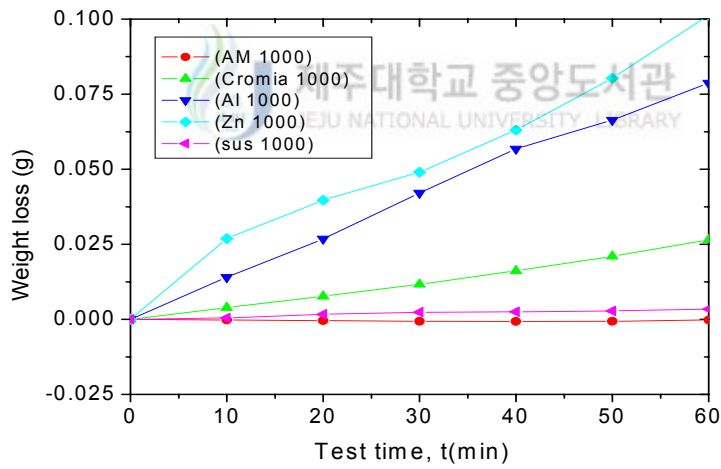


Fig. 18 Cumulative weight loss in initial stage under corrosion times of 1000 hours

3.2 코팅재별 캐비테이션 특성

Fig. 19에서 Fig. 23까지는 각각의 시험편을 0시간, 500시간, 1000시간 동안 인공해수에 부식시킨 후, 캐비테이션 침식 실험을 한 상태의 시험편 표면을 나타내고 있고, Fig. 25에서 Fig. 33까지는 각 용사 코팅재의 캐비테이션 침식실험에 의한 구간별, 누적 무게 감소량- 부식 시간대별 특성을 나타낸 그래프이다.

3.2.1 Amdry625 용사 코팅재의 캐비테이션 침식

AM 시험편, AM500 시험편, AM1000 시험편 모두 초기에 무게감소가 거의 발생하지 않거나, 무게증가현상이 미미하게 관찰이 되었다. 여기서 AM500 시험편, AM1000 시험편이 초기에 무게증가 현상이 일어난 것은, 용사 코팅층의 캐비테이션 침식에 대한 저항성은 매우 뛰어나 캐비테이션에 의한 침식현상이 거의 일어나지 않았는데, 시험편 표면에 아주 미량의 부식 생성물이 생겼기 때문이라고 볼 수 있다. 부식 생성물이 생성되는 이유는 용사 코팅된 Amdry625는 음극 방식 기능이 없어 용사 코팅층의 기공사이로 침투한 염수 성분이 기재와 반응을 하여 아주 미량의 부식생성물이 형성되었기 때문이라고 판단된다.

AM500 시험편, AM1000 시험편을 실험 시작하기 전에 표면을 관찰한 결과, 부분적으로 염수부식에 의한 기재의 부식 흔적을 볼 수 있다.

실험 종료 후에는 세 종류의 시험편 모두 무게감소량이 아주 미미한 것으로 나타나 캐비테이션 침식에 아주 강하다는 것을 알 수가 있었다.

3.2.2 Cr₂O₃ 용사 코팅재의 캐비테이션 침식

Cromia 시험편, Cromia500 시험편, Cromia1000 시험편 모두 실험초기 20분부터 60분대까지는 무게감소량이 적다가 그 후 150분대까지는 무게감소량이 크게 증가하였고, 180분에서 실험종료까지는 실험초기와 같은 무게감소가 발생하였다. 혼 윤곽의 모양의 캐비테이션 침식이 일어나는 현상을 뚜렷하게 관찰이 가

능하였고, 실험 종료 210분대에서는 전체적으로 기체가 돌출되는 현상을 관찰할 수가 있어 캐비테이션 침식에 대해 매우 취약하다고 판단된다.

3.2.3 Zn 용사 코팅재의 캐비테이션 침식

Zn 시험편에서는 캐비테이션 실험한지 10분 경과 후 혼 모양의 캐비테이션 흔적이 뚜렷하게 관찰되었으며, 90분후 4가량의 기체가 보이기 시작하여 150분에 거의 기체가 나타나는 결과를 얻을 수 있었다. 이러한 현상은 Zn500, Zn1000 시험편 모두 비슷한 양상을 보였다.

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

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

그리고 혼의 가장자리에서 기체의 고유의 색상이 보이기 시작하여 점차 그 주위인 가장자리로 이동하는 현상은 혼의 중심에서 가장자리로 수류가 확산 이동하는 현상이라고 여겨진다.

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

용사재료 자체에 음극 방식 기능이 있어 500시간, 1000시간 부식시킨 시험편에서도 무 부식 시험편과 같이 표면에 부식 현상이 나타나지 않았다.

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 침식에 의해 크게 좌우한다는 사실을 알 수 있었다.

3.2.4 AI 용사 코팅재의 캐비테이션 침식

AI 시험편에서는 실험초기인 10분경과 후, 혼 운곽으로 캐비테이션 부식현상이 관찰이 되었고, 120분대에서 1/2정도의 기재가 보이기 시작하여 실험 종료 후에는 일부분만 남기고 기재를 볼 수 있었다. AI500 시험편, AI1000 시험편 모두 캐비테이션에 의한 침식량이 매우 뚜렷이 확인되며 거의 비슷한 캐비테이션에 의한 표면변화 과정을 관찰할 수 있었다.

AI 시험편에서도 실험 종료 후 중심부에서 기재의 흔적이 관찰이 되었으며, 이는 처럼 혼의 중심에서 가장자리로 수류가 확산 이동하는 현상에 의한 것이라고 판단된다.

Zn을 용사 코팅한 시험편과 같이 AI 용사코팅층 자체에 음극 방식 기능이 있어서 시험편의 표면에 기재의 부식 생성물을 확인 할 수 없다.

실험초기인 10분에서 30분 사이에 무게감소량이 크게 증가하였고, 150분부터는 코팅된 AI과 기재의 무게감소가 동시에 일어나 실험초기보다 무게감소량이 크게 감소하였다. AI500, AI1000 시험편에서도 실험초기인 10분에서 30분 사이, 90분에서 120분 사이에 무게감소량이 크게 증가하였고, 150분부터는 코팅된 AI과 기재의 무게감소가 동시에 일어나 실험초기보다 무게감소량이 크게 감소하였다.

Zn 용사 코팅 시험편의 경우와 같이 AI 용사 코팅재 역시 1000시간 부식시킨 시험편, 500시간 부식시킨 시험편, 무 부식 시험편 순으로 무게감소량이 크다는 결과를 얻을 수 있었다.

3.2.5 SUS316 용사 코팅재의 캐비테이션 침식

세 종류의 시험편 모두가 초기에서 60분대까지는 캐비테이션 침식에 의한 무

계감소가 아주 적은 양으로 보이다가, 모두 90분에서 120분대에서 무게 감소량이 소폭으로 증가함을 보였다. 180분부터는 초기보다 무게 감소량이 초기 실험과 같은 현상을 관찰 할 수가 있었다.

SUS1000시험편의 표면에 나타난 부식생성물은 용사재료자체에 음극방식 기능이 없어서, 용사 코팅층의 기공을 통해 침투한 염수에 의해 기재의 부식으로 인해 나타난 것이라고 판단된다.

전체적으로 SUS 시험편, SUS500 시험편, SUS1000 시험편 모두 실험 종료까지 무게감소량이 Amdry625 용사 코팅시험편에서 나타난 결과처럼 캐비테이션 침식에 의한 무게감소는 아주 적은 양으로 나타났다.





(a) Non - corrosion



(b) 500 hours corrosion



(c) 1000 hours corrosion

Fig. 19 Damaged surface of Amdry625 coating specimens after cavitation erosion test



(a) Non - corrosion

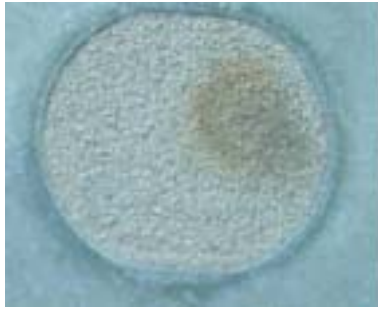


(b) 500 hours corrosion

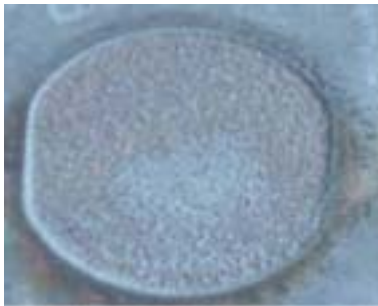


(c) 1000 hours corrosion

Fig. 20 Damaged surface of Cr_2O_3 coating specimens after cavitation erosion test



(a) Non - corrosion

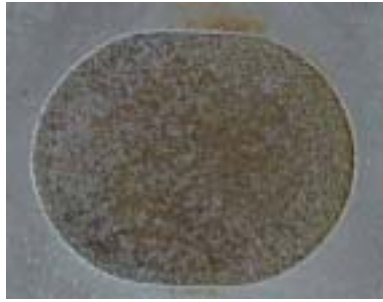


(b) 500 hours corrosion



(c) 1000 hours corrosion

Fig. 21 Damaged surface of Zn coating specimens after cavitation erosion test



(a) Non - corrosion



(b) 500 hours corrosion



(c) 1000 hours corrosion

Fig. 22 Damaged surface of Al coating specimens after cavitation erosion test



(a) Non - corrosion



(b) 500 hours corrosion



(C) 1000 hours corrosion

Fig. 23 Damaged surface of SUS316 coating specimens after cavitation erosion test

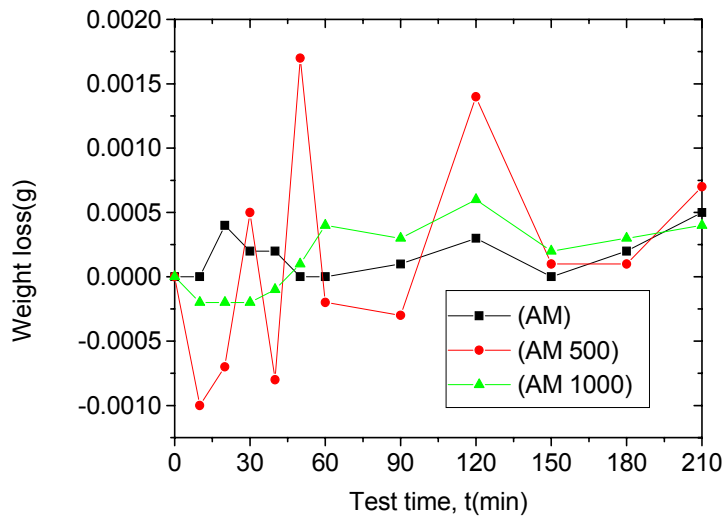


Fig. 24 Weight loss under cavitation at 0, 500, and 1000 hours (Amdry625)

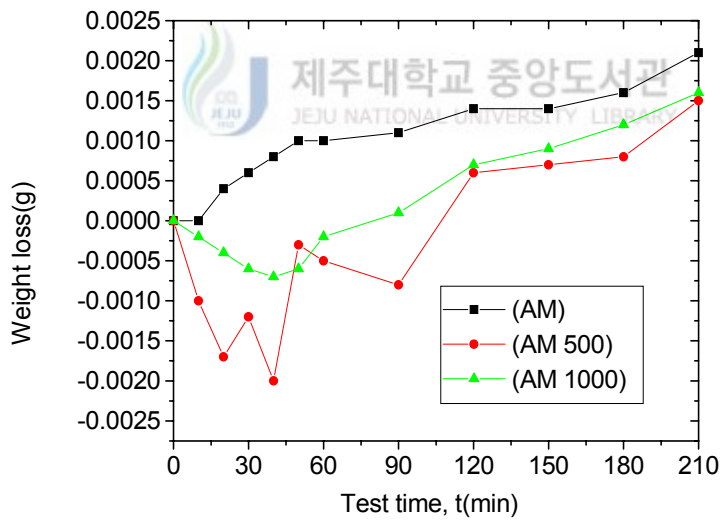


Fig. 25 Cumulative weight loss under cavitation at 0, 500, and 1000 hours (Amdry625)

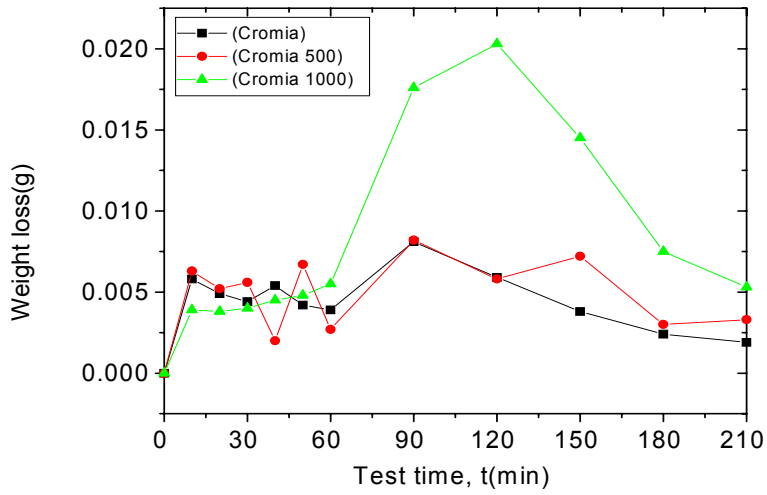


Fig. 26 Weight loss under cavitation at 0, 500, and 1000 hours (Cr₂O₃)

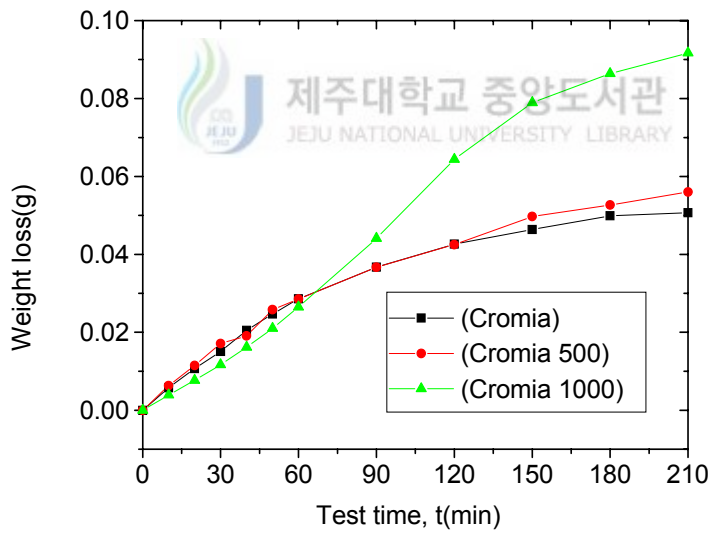


Fig. 27 Cumulative weight loss under cavitation at 0, 500, and 1000 hours (Cr₂O₃)

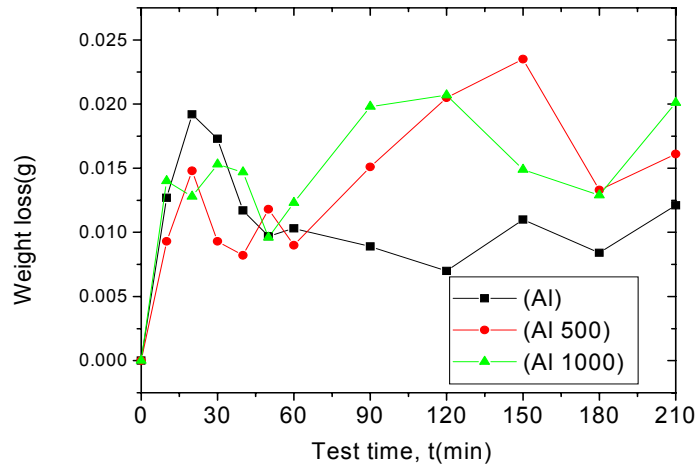


Fig. 28 Weight loss under cavitation at 0, 500, and 1000 hours (Al)

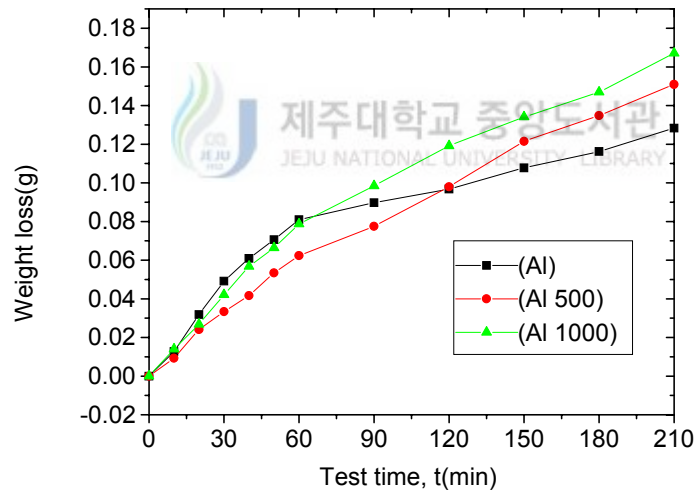


Fig. 29 Cumulative weight loss under cavitation at 0, 500, and 1000 hours (Al)

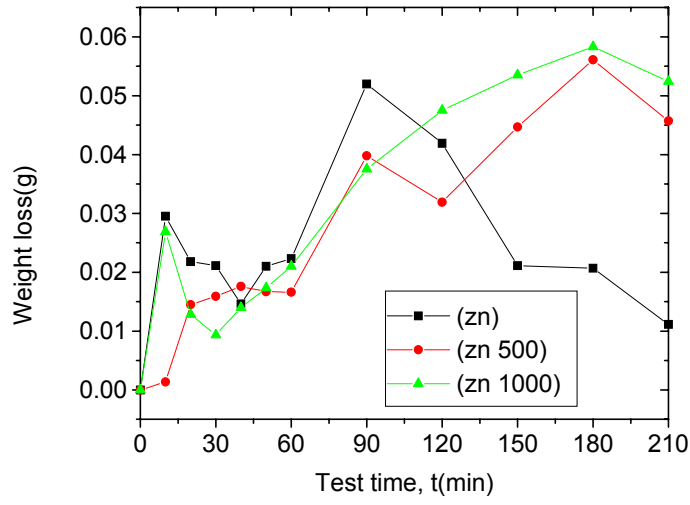


Fig. 30 Weight loss under cavitation at 0, 500, and 1000 hours (Zn)

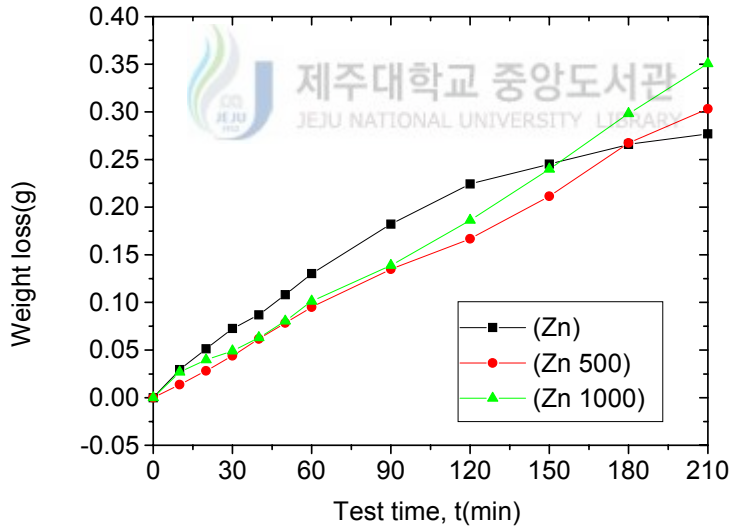


Fig. 31 Cumulative weight loss under cavitation at 0, 500, and 1000 hours (Zn)

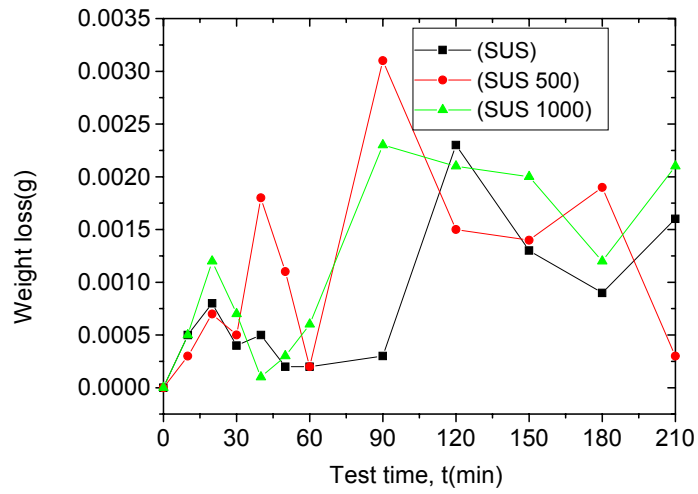


Fig. 32 Weight loss under cavitation at 0, 500, and 1000 hours (SUS 316)

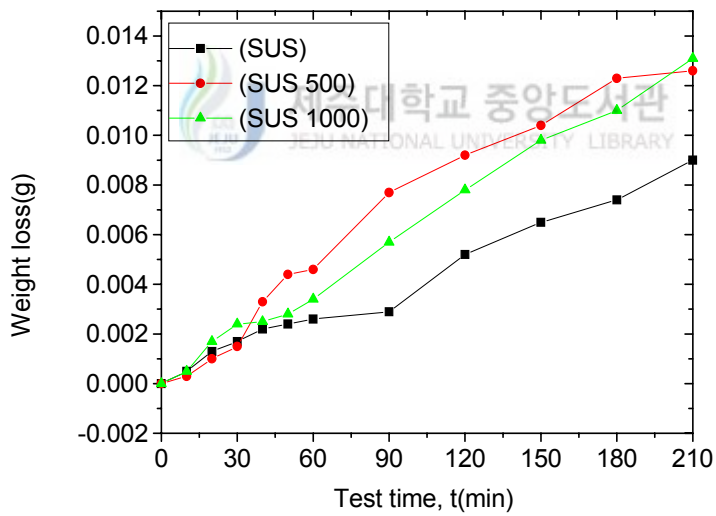


Fig. 33 Cumulative weight loss under cavitation at 0, 500, and 1000 hours (SUS 316)

4. 결 언

선박 프로펠러, 펌프 등의 유체 기계들은 해수 중 중요한 손상 원인중의 하나는 캐비테이션 침식이 고려된다. 캐비테이션은 수중에서 가동되는 기계가 고속 회전시 발생하는 압력차에 의해 발생하는 기포공동현상으로 재료 표면을 침식하여 기계 기능과 성능 저하를 초래한다.

본 연구에서는 고강도 황동합금 기재의 표면에 내식성이 강한 재료로 알려진 Amdry625, Cr₂O₃, SUS316, Zn, Al를 용사를 하여 시험편을 준비하였다. 용사 코팅재의 내식성 비교 실험 방법으로는 3.5% NaCl용액에서 500시간과 1000시간동안 부식 후, 초음파 발생 캐비테이션 실험 장치를 이용하여 3.5% NaCl용액에서 210분 동안 캐비테이션 침식 실험을 하여 내식성 코팅재들의 캐비테이션 침식에 의한 무게 감소와 표면손상을 조사 검토하였다.

각 시험편의 캐비테이션 실험을 토대로 얻은 결과는 다음과 같다.

1. 고강도 황동합금의 표면에 내식성재료인 Amdry625, Cr₂O₃, SUS316, Zn, Al를 용사 코팅한 시험편의 캐비테이션 침식에 의한 무게감소량은 실험시간이 증가함과 비례하여 증가하였다.

2. 캐비테이션 침식에 의한 무게 감소량은 Zn > Al > Cr₂O₃ > SUS316 > Amdry625을 용사 코팅한 시험편순이며, 특히 Amdry625와 SUS316를 용사 코팅한 시험편은 매우 적었다.

3. Amdry625을 용사 코팅한 시험편은 3.5% NaCl 용액에 의한 사전 부식의 영향을 받지 않았으나, SUS316, Al, Zn 그리고 Cr₂O₃을 용사 코팅한 시험편은

부식 시간이 길수록 무게 감소량이 증가하였다.

4. 캐비테이션 침식으로 인한 표면손상은 Amdry625, SUS316이 용사 코팅된 시험편은 매우 적었으나, Al, Zn 그리고 Cr₂O₃을 용사 코팅한 시험편들은 손상이 매우 크다.



Ⅲ. 음향방출법에 의한 용사 코팅재의 파손 해석

1. 서 언

공업의 발전과 더불어 기계요소들의 사용 환경도 점점 가혹한 환경으로 변하고 있다. 특히 해양산업관련 구조물 및 기계요소들은 해수에서의 염소 이온과 용존 산소 등으로 인한 부식으로 경제적 손실도 매우 크다. 소형 어선용 프로펠러는 해양 지역이 각종 환경오염 과 오염된 폐수, 하천수 및 생활하수로 인한 해수 오염이 넓게 확산됨으로 인해 소재의 부식 문제는 더욱 심각한 문제가 되고 있다.

부식을 방지하기 위하여 금속의 표면에 내식성이 큰 재료를 피복하여 부식에 대한 저항성을 증가시키는 방법과 기체에 비해 전위가 낮아 부식 환경 차단 효과뿐만 아니라 음극방식효과를 가지고 있는 알루미늄 및 아연 합금 등을 기체에 용사 코팅하는 방법이 이용되고 있다. 그러나 용사 코팅층 과 기체의 물성차로 인한 결합력 저하와 용사과정에서 생기는 기공 등으로 부식 환경에서 사용 시 결점으로 지적되고 있다. 한편 용사피막의 밀착 강도를 평가하는 방법으로는 열충격 시험, 이로우전 시험 등이 사용되고 있으나 최근에는 물질 내부에서 소성 변형이 일어날 때 발생하는 탄성파를 검출하는 AE(acoustic emission)법을 사용하여 밀착 강도 및 피막의 박리와 균열 거동을 해석하고 있다. 코팅 피막과 기체의 박리 또는 피막내부의 균열은 그 과정에서 기체에서 방출하는 AE신호 외의 추가적인 AE신호를 통해 재료의 미세 조직의 변형이나 손상에 대한 직접적인 정보를 얻을 연속적으로 검출할 수 있으므로, 용사코팅재의 변형과 파손해석에 적용되고 있다.

따라서 본 연구에서는 용사코팅에 대한 선박 프로펠러의 부식방지를 위하여 어선용 프로펠러 소재인 고강도 황동합금에 각각 Al, Zn, Amdry625를 코팅하여 3.5% NaCl

수용액에 침수부식한 후 인장하중 부가 시 코팅층의 균열 및 박리 현상을 AE방법에 의해서 조사·검토하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 실험재료

실험에 사용된 시험편의 기재(SUBstrate)로는 제Ⅱ장에서 사용된 재료와 동일한 기재와 용사조건으로 시험편을 제작하였으며, 시험편 형상 및 치수는 Fig. 34에 나타냈다. 코팅재료는 Al과 Zn은 와이어를 Amdry625는 분말을 사용하였다. 코팅층의 두께는 약 200 μ m로 하여 Table 6에 나타낸 12종류의 시험편을 제작하였다. 이들 시험편은 무부식 시험편과 3.5% NaCl용액에서 500시간, 1000시간 부식을 시킨 시험편으로 구분하였으며 표기는 시험편 뒤에 기재하였다. 부식 수조는 폴리에틸렌 수지로 된 10ℓ 용기를 사용하였으며 3.5% NaCl용액은 72시간마다 교체했다.

Table 6. Test specimens

Specimens notification	Coating materials	Corrosion times in 3.5% NaCl(hours)
SUB	SUBstrate	0
SUB500		500
SUB1000		1000
AM	Amdry625	0
AM500		500
AM1000		1000
Al	Al	0
Al500		500
Al1000		1000
Zn	Zn	0
Zn500		500
Zn1000		1000

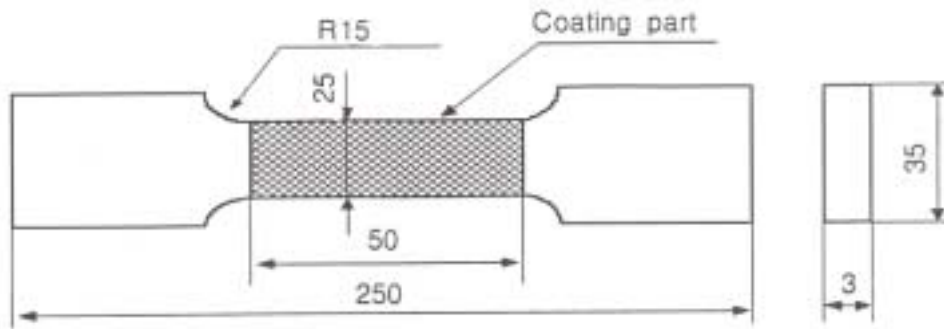


Fig. 34 The shape and dimension of test specimen (unit : mm)

2.2 실험방법

플라즈마 용사장치를 이용한 용사 코팅 시험편의 부식시간에 따른 음향방출 특성을 조사하기 위하여 Fig. 35에 나타난 바와 같이 인장시험과 음향방출 신호 측정은 동시에 실시하였다. 인장시험은 만능재료시험기(Zwick Co.)를 사용하여 표점거리 50mm, 크로스헤드 이송속도 1mm/min로 시험하였다. 또한, 음향방출 측정장치는 MITRAS 2001(Physical Acoustics Co.)을 사용하였으며, 측정시 검출된 음향방출신호는 10kHz~2MHz의 Band pass filter를 사용하여 40dB로 증폭하였다. Fig. 36는 음향방출 측정원리를, Fig. 37는 돌발형 음향방출신호로서 본 연구에 사용된 음향방출 파라메타를 정의한 것이다. 음향방출 파라메타는 문턱값(Threshold), 계수(Count), 진폭(Peak Amplitude), 사상수(Event) 및 에너지(Energy)등을 이용하여 정리하였다.



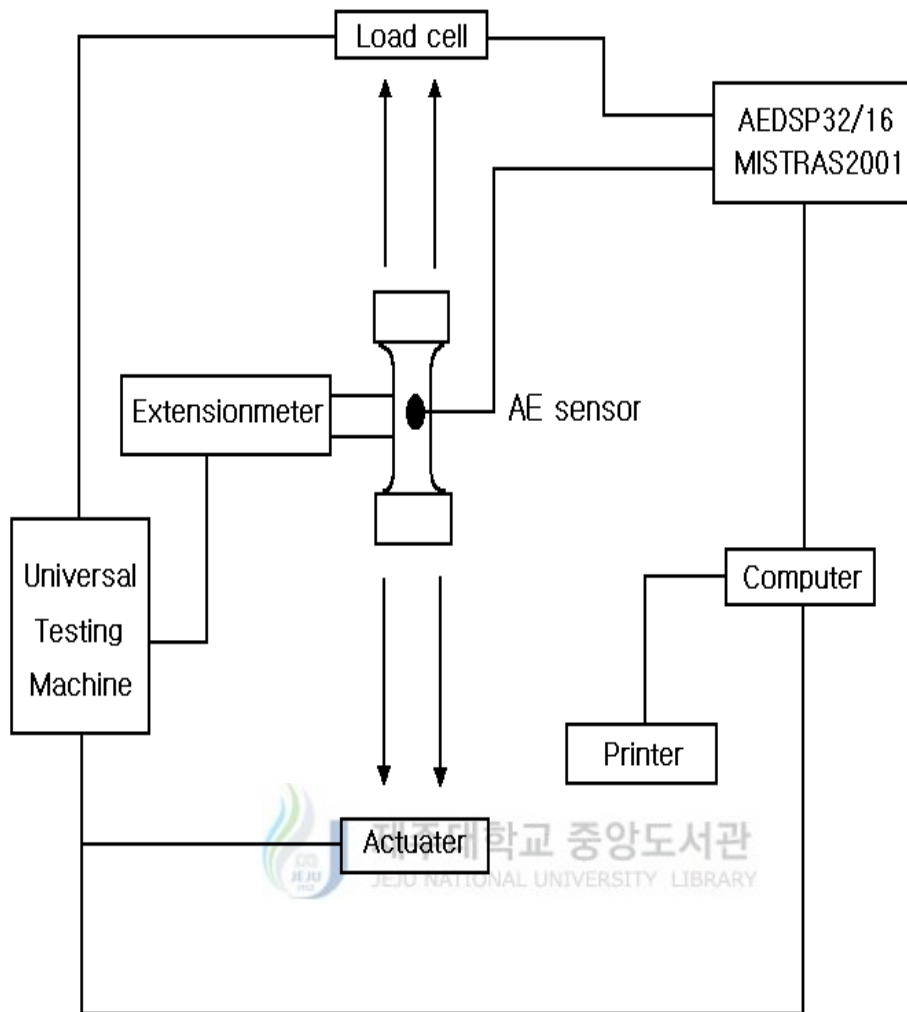


Fig. 35 Schematic diagram of tensile and AE test

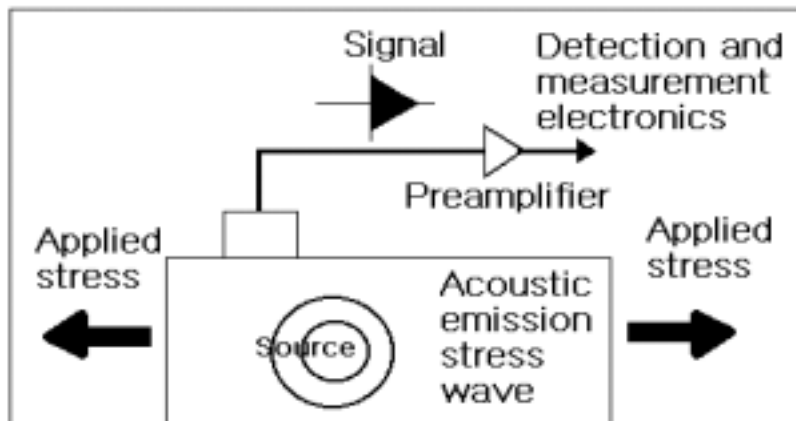


Fig. 36 Basic principle of AE method

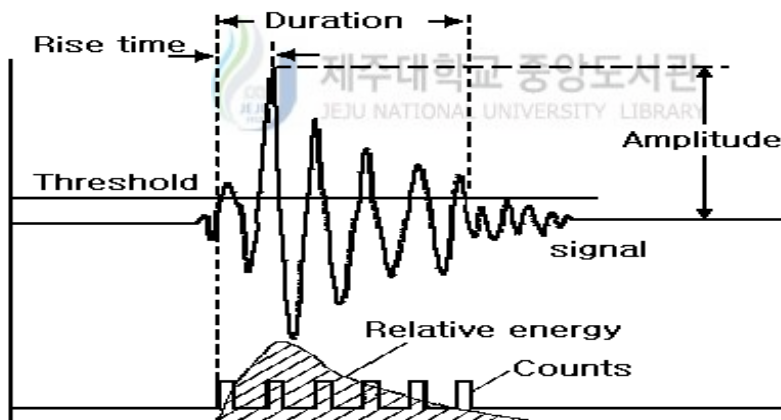


Fig. 37 Schematic AE signals corresponding to one AE Event

3. 실험결과 및 고찰

3.1 용사 코팅재의 인장에 따른 음향방출 특성

3.1.1 용사 코팅재의 음향방출 발생거동

SUB시험편, Zn시험편, Al시험편 및 AM시험편에 대한 AE 사상수와 응력-변형을 곡선과의 관계를 Fig. 38에, 누적 AE 계수, 누적 AE 에너지와 응력-변형을 곡선과의 관계를 Fig. 39에 나타내었다.

Fig. 38에 나타난 바와 같이 모든 시험편의 응력-변형을 곡선은 거의 동일하게 나타나고 있어 용사열에 의한 기재의 변형은 거의 없음을 나타낸다. 또한 음향방출은 Zn시험편, Al시험편, AM시험편, SUB시험편의 순으로 활발하게 일어나고 있음을 알 수 있다. 이와 같이 용사피막을 가진 코팅재가 SUB 시험편에 비해 활발한 음향방출을 발생하는 것은 SUB시험편에는 없는 음향방출원 즉, 용사피막 내에서 박리의 생성, 성장 및 탈락이나 균열의 발생 성장 등 소성변형에 의한 음향방출이 발생하고 있다.

SUB시험편의 AE 사상수는 응력-변형률의 증가에도 용사 코팅재에 비해 적게 나타나고 있다. Zn시험편과 Al시험편의 경우는 응력이 증가함에 따라 변형률 2%이내에서 AE 사상수가 급격히 증가하고 있다. AM시험편의 경우는 응력이 증가함에 따라 변형률 2%까지 급격한 발생하고, 변형률 2~8% 이내에서는 지속적으로 AE 사상수가 발생하고 있다. 또한 변형률 8%이후에서는 AE 사상수가 간헐적으로 발생하다가 과단에 이르고 있다.

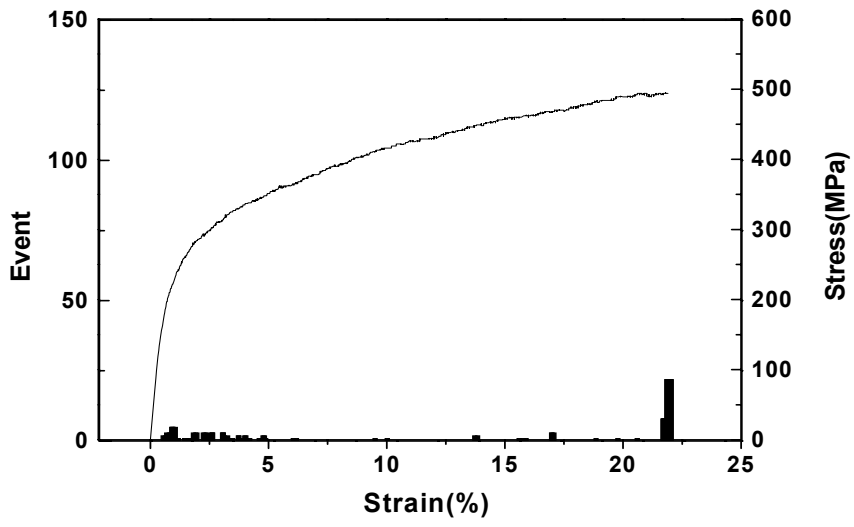
또한 변형률 2% 이내에서 Zn시험편의 AE 사상수는 AM시험편 보다 약 3배정도 많이 나타나고, Al시험편의 AE 사상수는 AM시험편 보다 약 2배정도 많이 나타나고 있다. 이는 Zn, Al 및 Amdry625의 연신율차이로 인하여 변형률에 따른 용사코팅재의 균열의 생성, 성장이 적게 나타나는 것으로 판단

된다.

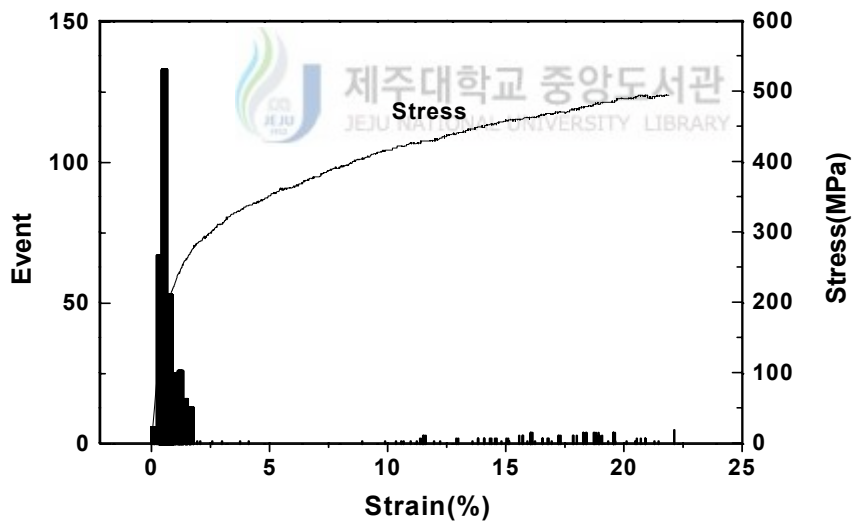
AM시험편에서의 AE 사상수는 변형율 1%~8%사이 구간에서 많이 발생하고 있고, 그 이후의 구간에서는 비교적 적게 발생하고 있음을 보여주고 있다. 이는 사상수가 급격히 증가하는 구간에서 기재(SUB)와 용사층의 물성 차이로 인해 많은 에너지가 축적되어 기재와 용사층 사이에서 박리 발생 및 용사재 자체의 균열이나 파단에 의해 발생하고 있는 것으로 판단된다

Fig. 39에 나타난 바와 같이 누적량 AE 계수와 누적량 AE 에너지 특성은 전술한 AE 사상수 특성과 마찬가지로 용사피막의 균열이나 박리가 발생하는 구간에서 급격히 증가하고 있다. 코팅재에 인장력이 작용시 그 에너지는 AE 사상수가 SUB시험편에 비해 급격히 증가하는 구간에서 기재와 용사피막에 축적되고, 그 에너지가 기재와 용사피막에서 축적한계를 넘어서게 되면 방출된다 [30]. 결과적으로 기재와 용사피막 사이에서 혹은 용사피막 내부에서 균열이나 박리의 발생, 성장 및 탈락이 일어나고 있음을 알 수 있으며, AE 계수 및 에너지의 총량은 Zn시험편, Al시험편, AM시험편, SUB시험편 순으로 높게 나타나고 있다.

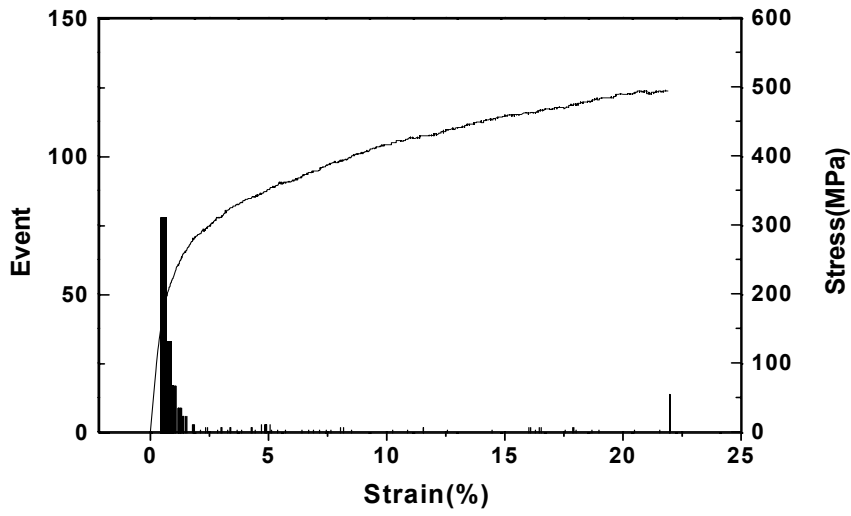




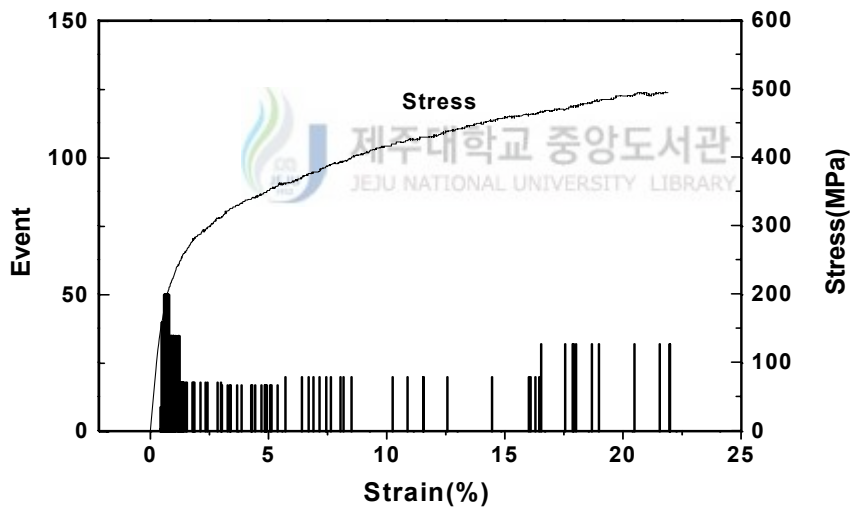
(a) SUB



(b) Zn

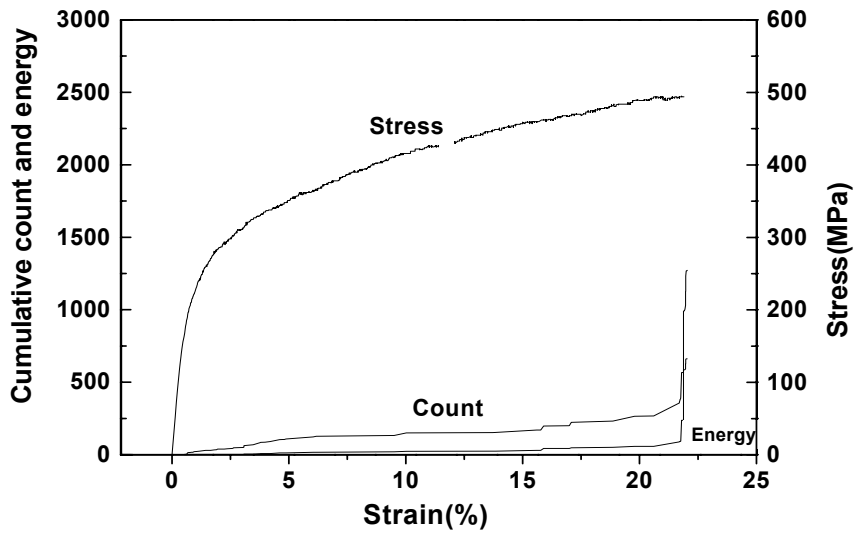


(c) Al

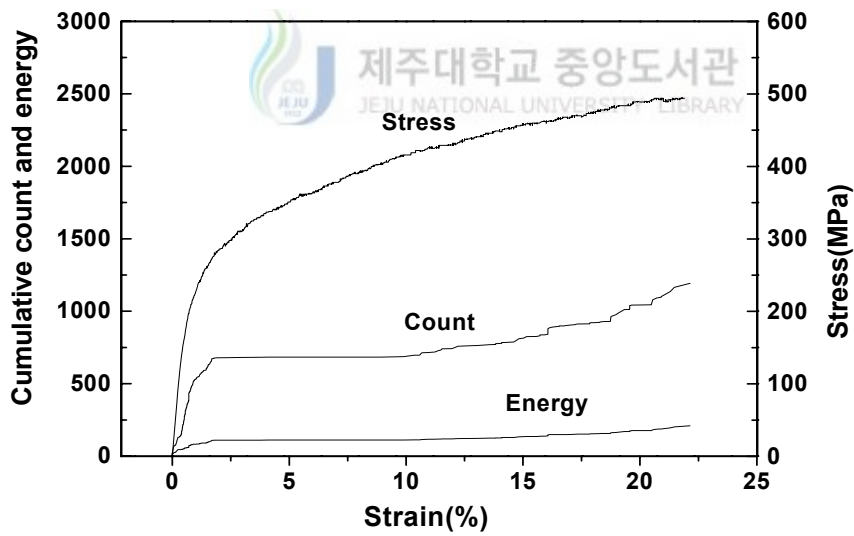


(d) AM

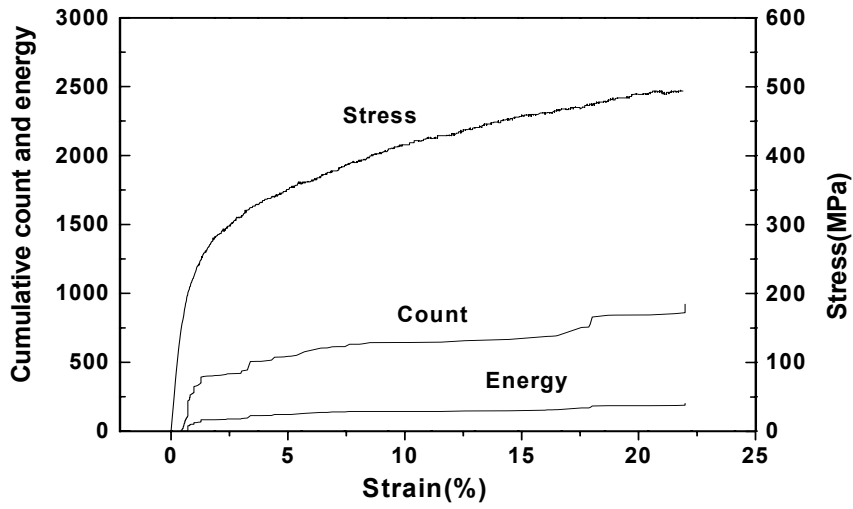
Fig. 38 Stress and event vs. strain



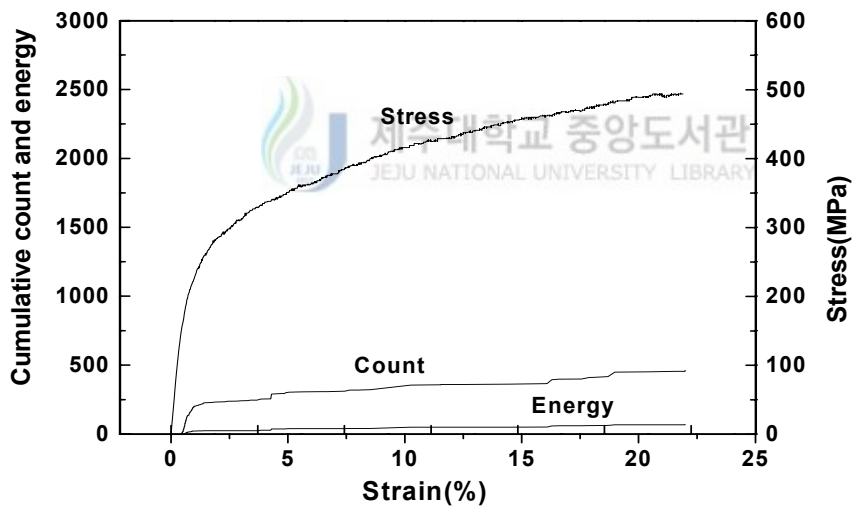
(a) SUB



(b) Zn



(c) Al



(d) AM

Fig. 39 Cumulative count and energy vs. strain

3.1.2 용사 코팅재의 표면관찰 및 파괴과정

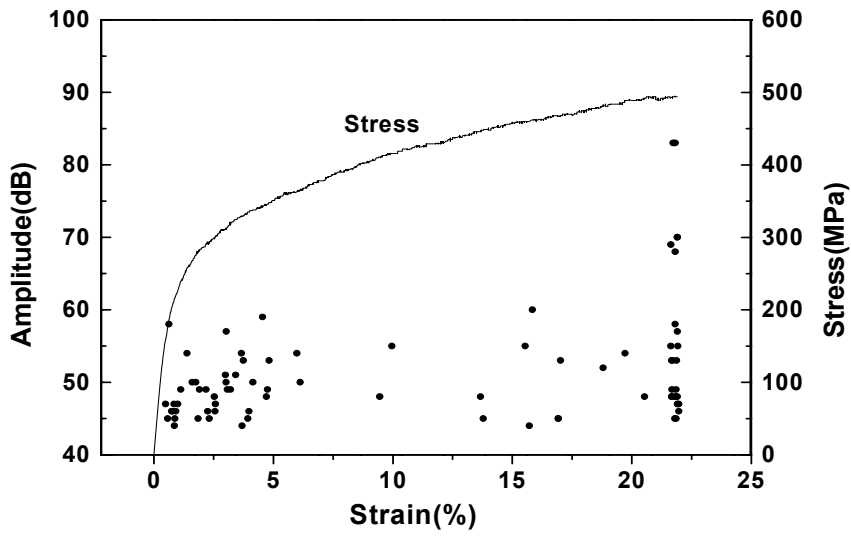
음향방출 진폭과 응력-변형율과의 관계를 Fig. 40에, 인장시험 후의 용사 코팅재의 파단사진을 Fig. 41에 각각 나타내었다. Fig. 40에서 진폭 값은 Threshold 값을 45dB로 설정하였으므로 Threshold 값 이상의 신호만이 나타나게 된다.

Fig. 40에서 AE 진폭 특성은 전술한 AE 사상수, 누적량 AE 계수와 누적량 AE 에너지 특성과 비슷한 균열이나 박리가 발생하는 구간에서 증가하고 있음을 알 수 있다. 한편, SUB시험편의 경우 대부분 약 60dB 이하의 AE 진폭이 완만하게 발생하고 있으나 Zn시험편의 경우는 기재와 용사피막사이의 균열이나 박리로 추정되는 구간인 변형율 2%이내에서 음향방출이 활발하게 발생하다가 그 이후는 거의 SUB시험편과 비슷한 음향방출을 보여주고 있다. 즉, 변형율 2%이내의 구간은 용사층 내부나 용사층과 기재사이에 소성변형인 균열이나 박리가 이루어지고 있고 그 후의 구간에서는 균열이나 박리가 거의 발생하지 않는 것으로 판단된다. 이는 용사코팅재의 변형율이 크기 때문에 인장에 따른 변형으로 균열이 발생하였으며 변형율 2% 이후의 구간에서는 기재와 밀착성으로 인해 균열 부분에서 지속적으로 균열이 성장하고 있는 것으로 판단된다. 이러한 결과는 Fig. 41(a)의 파단된 Zn시험편 사진에서 확인할 수 있다.

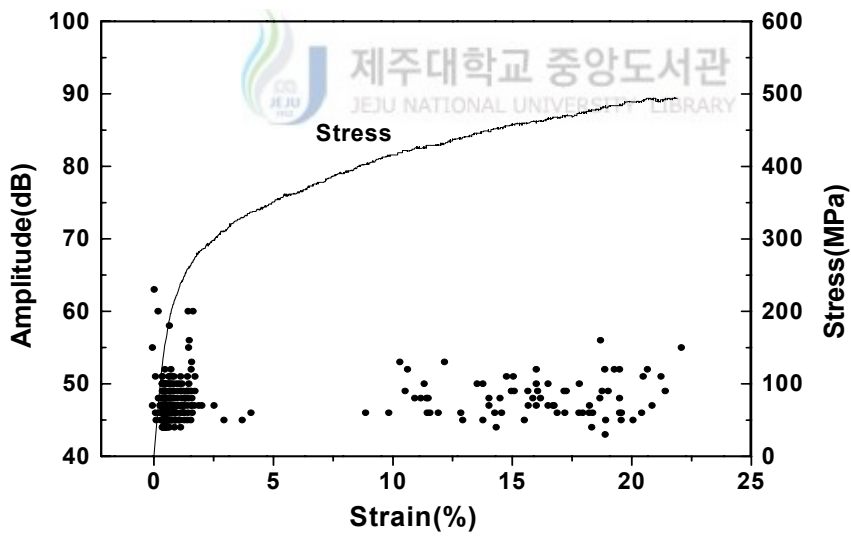
용사피막의 파괴는 응력-변형율의 증가함에 따라 하중방향과는 직각인 수직 방향으로 발생하며, 큰 길이의 균열은 대부분 변형율이 급격히 증가하는 넥킹(necking)부에 집중되고 있고, 파단부 주위를 벗어나면 다수의 피막 균열이 나타나고 있다. AI시험편은 65dB까지 진폭이 발생하고 있으며, 변형율 2%이내에서 음향방출이 활발하게 발생하다가 점차 줄어들어서 변형율 7% 이후에서는 SUB와 비슷한 음향방출 형태를 보이는 것으로 나타나고 있다. 이는 2%이내의 구간에서는 용사층 내부, 혹은 용사층과 기재사이에 소성변

형이 발생하고 변형을 7%이후에서는 용사재의 연신율 및 기재와의 밀착성 등으로 인해 발생된 균열이 그 부분에서 성장하고 있는 것으로 사료된다. 이 결과는 Fig. 41(b)의 파단된 Al시험편 사진에 잘 나타나고 있다. 용사층은 파괴 시 충격에도 불구하고 기재와 밀착되어 있으며, 기재와 용사층 사이의 박리나 균열도 Zn시험편에 비해 심하지 않으며, 이것은 Al이 Zn보다 연신율이 높기 때문이다 [31]. AM시험편의 경우는 시험 시작 후 2% 이내에서 많은 음향방출이 발생하고 있음을 보이고 있다. 이는 AM 용사피막을 가진 시험편의 경우 AE 사상수가 급격히 증가하는 구간에서 기재(SUB)와 용사피막의 열팽창계수 차이로 많은 에너지가 축적되어 기재와 용사피막 혹은 용사피막 내에서 박리가 일어난다고 사료되며 Fig. 41(c) 사진을 관찰해보면 용사피막은 기재로부터 완전히 분리되어서 탈락되어 있음 알 수 있다.

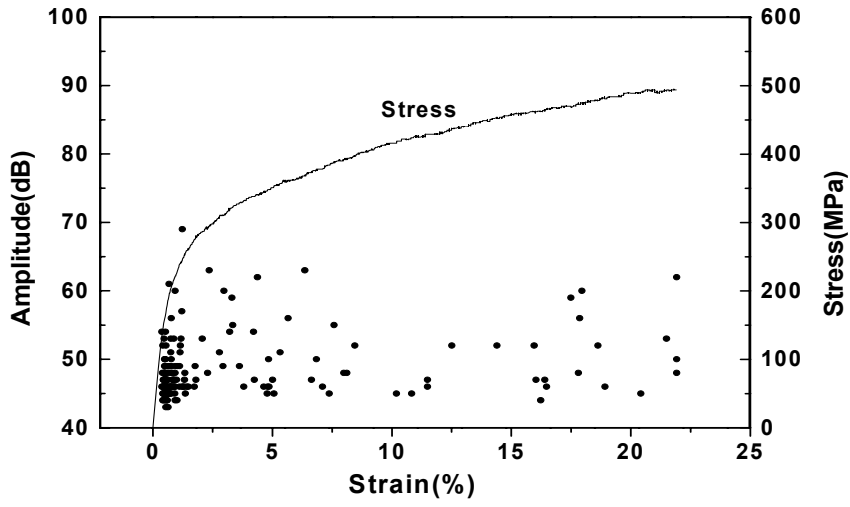




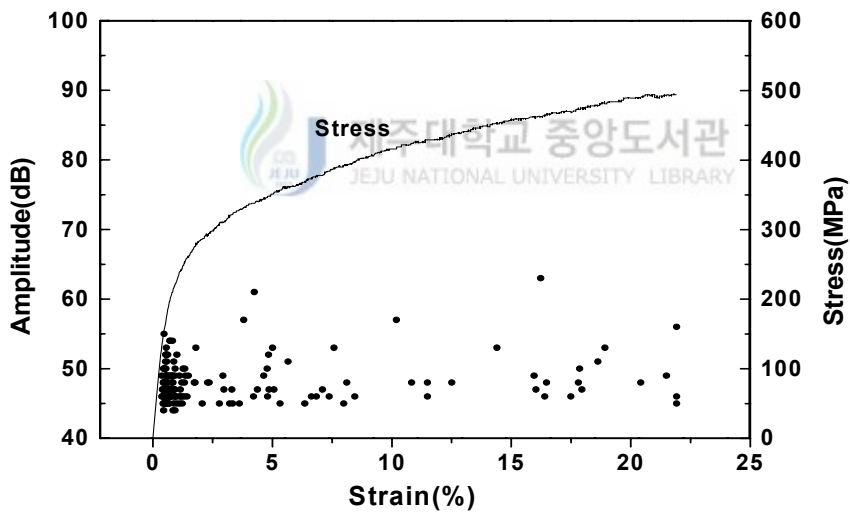
(a) SUB



(b) Zn



(c) Al



(d) AM

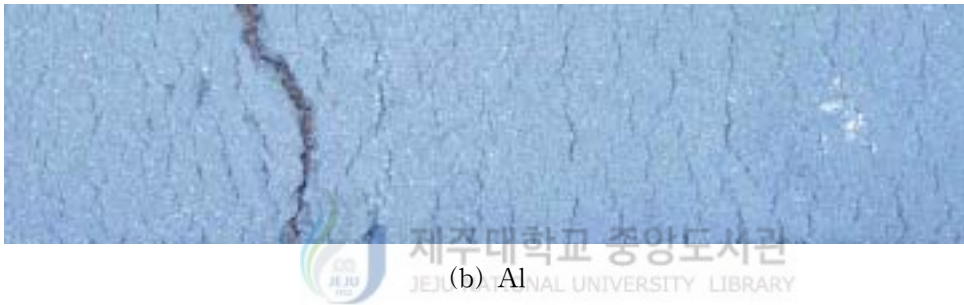
Fig. 40 Stress and amplitude vs. strain



(SUB)



(a) Zn



(b) Al



(c) AM



Load direction

Fig. 41 Surface crack of coating layer after tensile testing

3.2 부식시간에 따른 음향방출 특성

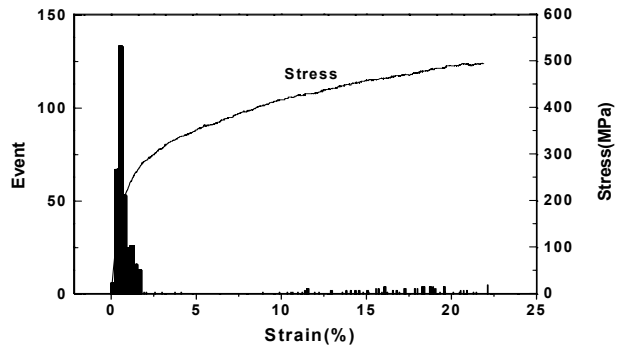
부식시간에 따른 음향방출 특성 실험은 전술한 바와 같이 3.5% NaCl 수용액에 Zn시험편, Al시험편, AM시험편을 각각 500시간과 1000시간 동안 부식시킨 후 초음파 세척기에서 세척 건조하여 인장시험을 하였으며, 인장시험 시 응력-변형 특성과 함께 음향방출 특성을 조사·검토하였다.

3.2.1 부식시간에 따른 Zn 용사 코팅재의 음향방출 특성

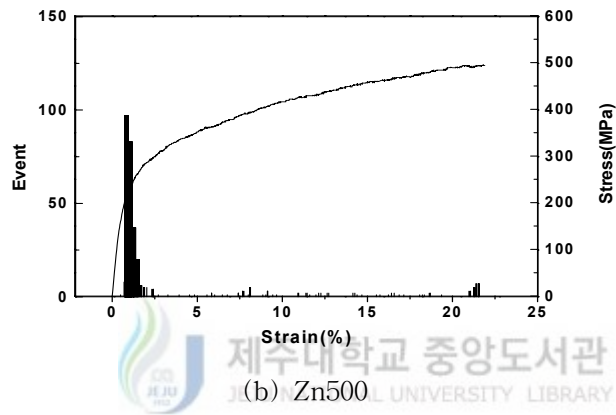
부식하지 않은 시험편과 500시간, 1000시간을 부식한 Zn시험편에 대해 인장하중을 가하며 AE음향방출 실험을 하여 얻어진 AE 사상수와 응력-변형을 곡선을 Fig. 42에 나타내었으며 누적량 AE 계수와 누적량 AE 에너지의 곡선 및 응력-변형을 곡선을 Fig. 43에 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 부식시간에 따른 응력-변형을 곡선은 부식을 실시하지 않은 시험편과 비교 시 변화가 없음을 보여주고 있다. 이는 부식으로 인한 기재의 강도변화는 없다는 것을 보여주고 있다. 한편 부식시간에 따른 음향방출은 Zn시험편, Zn500시험편, Zn1000시험편의 순서로 발생하고 있다. AE 사상수, 누적량 AE 계수 및 누적량 AE 에너지의 특성을 살펴보면 AE 사상수가 증가하는 변형을 2% 이내에서 누적량 AE 계수 및 누적량 AE 에너지가 급격하게 증가하고 변형을 2% 이후에는 세 시험편 모두 완만하게 증가하고 있다. 그러나 부식을 실시한 시험편은 실시하지 않은 시험편에 비해 음향방출이 활발하지 못하며, 특히 Zn1000시험편의 경우 변형을 2% 이내에서 AE 사상수, 누적량 AE 계수 및 누적량 AE 에너지 등 AE특성이 다른 시험편에 비해 매우 적게 나타나고 기재와 코팅층간의 부식에 의해 밀착성은 저하되고 있다. 용사코팅재가 부식 환경에 노출될 경우 염수가 표면에 있는 기공을 통해 기재로 침투하게 된다. 염수는 시간이 경과함에 따라 기재와 용사 코팅층 틈새 사이로 확산되고 Zn 용사 코팅층은 자신이 희생양극으로서 Zn용사 코팅층을 빠르게 부식시킨다 [32]. 따라서 용사 코팅층은 결합

력이 감소하게 되고 부식 시간이 증가함에 따라 비교적 적은 에너지로도 쉽게 균열이 생성, 성장한다고 추정되며 이러한 사실은 후술하는 파단면 관찰의 결과에도 잘 나타나 있다.

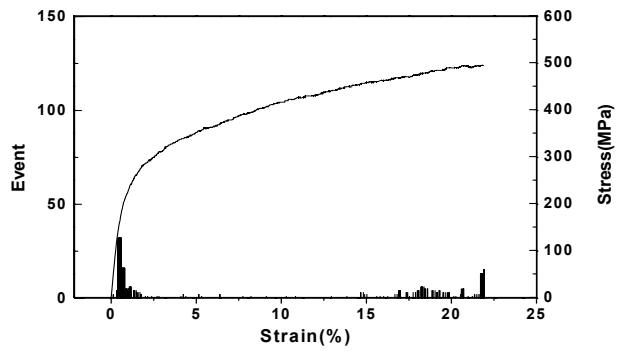




(a) Zn

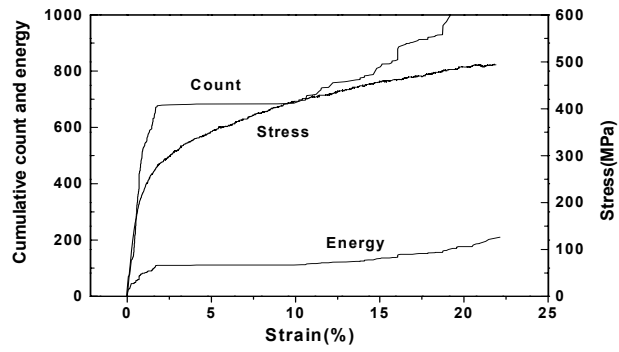


(b) Zn500

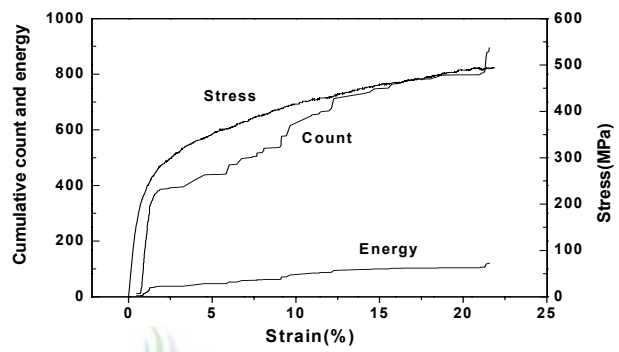


(c) Zn1000

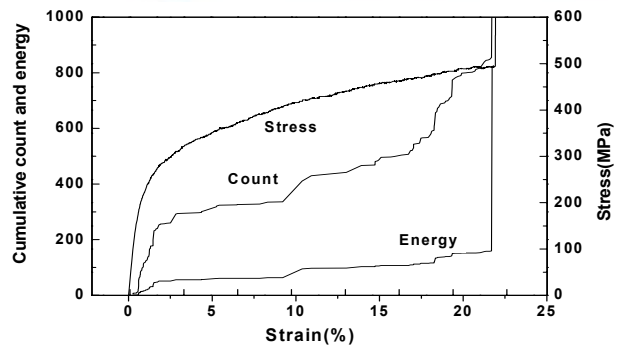
Fig. 42 Stress and event vs. strain



(a) Zn



(b) Zn500



(c) Zn1000

Fig. 43 Cumulative count and energy vs, strain

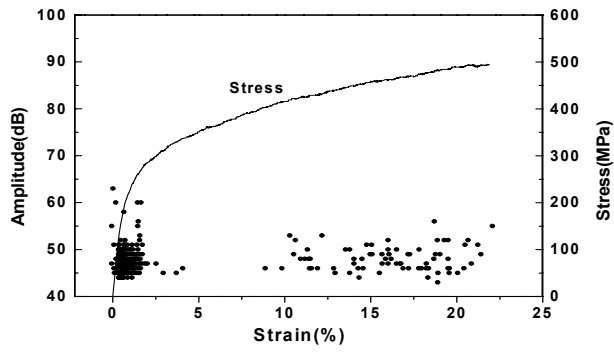
3.2.2 부식시간에 따른 Zn 용사 코팅재의 표면관찰 및 파괴기구

음향방출 진폭과 응력-변형율과의 관계를 Fig. 44에 인장시험시 과단된 시험편의 표면사진을 Fig. 45에 나타내었다.

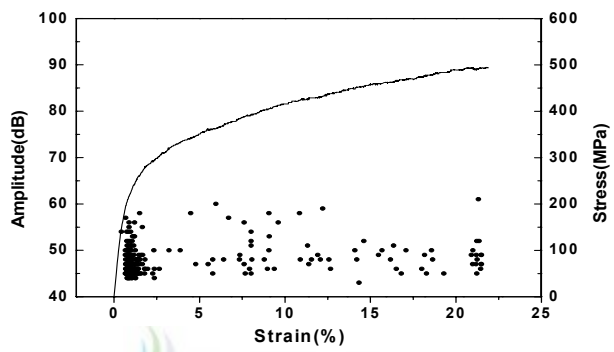
Fig. 44에서 모든 시험편은 부식시간에 관계없이 음향방출을 발생시키고 있으며, 또한 음향방출 진폭 최대값은 60dB 정도이다.

부식시간이 경과함에 따라 Zn시험편과 Zn500시험편은 Zn1000시험편의 진폭 분포율을 비교해보면, 모든 시험편이 부식의 영향으로 변형율 2% 이내 구간에서 음향방출에 의한 진폭을 많이 발생하고 있다. 그리고 Zn시험편은 변형율 10% 구간 이 후에 다시 음향방출이 발생하고 있고 Zn500시험편은 5% 이후에 간헐적으로 음향방출을 하고 있으며 Zn1000시험편은 변형율 2% 이후의 구간에서 간헐적으로 발생하다가 다시 변형율 15%이후에 발생이 활발한 것을 알 수 있다. 이는 용사코팅 후에 생긴 기공에 의해 기재가 염수에 노출되어 있지만 Zn용사층 자신이 희생양극으로 부식되고 진행이 빠르게 이루어진다. 기재에 침투한 염수는 시간이 경과함에 따라 비교적 결합력이 저하된 기공에 집중되고, 에너지의 축적한계를 넘게 되면 쉽게 균열이 발생 및 성장으로 진행되고 있다 [33]. Zn500시험편과 Zn1000시험편에서 2% 이후의 간헐적인 진폭 발생은 부식이 진행됨에 따라 계속적으로 미세한 균열이 발생과 성장으로 보이며, 특히 Zn1000시험편의 경우는 변형율 15%이후에도 균열 발생이 활발하게 진행되고 있음을 보여주고 있다.

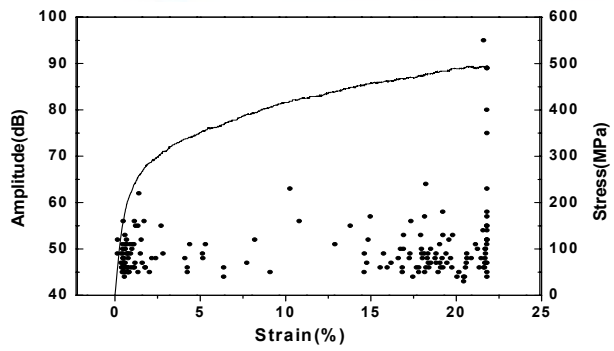
Fig. 45서 보여주는 사진들은 시험편이 과단된 후의 표면사진으로 인장시험시 하중방향과 직각 방향으로 많은 균열이 발생, 성장하고 있음을 보여주고 있고, 박리 보다는 균열에 의한 소성변형이 주로 나타나고 있다. 부식시간이 긴 시험편은 용사층 자체 부식으로 표면이 연화되어 있고 이로 인해 표면 Zn 성분이 탈락으로 인해 요철 형상을 보이고 있다.



(a) Zn

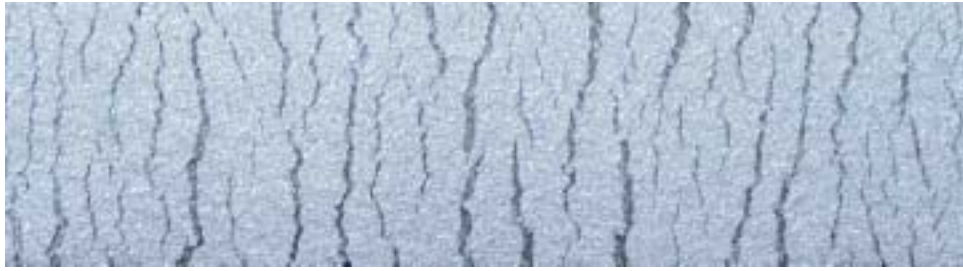


(b) Zn500



(c) Zn1000

Fig. 44 Stress and amplitude vs. strain



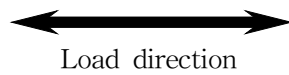
(a) Zn



(b) Zn500



(c) Zn1000



Load direction

Fig. 45 Surface crack of Zn coating layer after tensile testing according to corrosion time

3.2.3 부식시간에 따른 Al 용사 코팅재의 음향방출 특성

무 부식 시험편과 500시간, 1000시간을 부식한 Al시험편에 대해 인장하중을 가하면서 AE 음향방출 실험을 시행하여 얻어진 시험편에 대한 AE 사상수와 응력-변형을 곡선을 Fig. 46에 나타내었으며 누적량 AE 계수와 누적량 AE 에너지의 곡선 및 응력-변형을 곡선은 Fig. 47에 나타내었다.

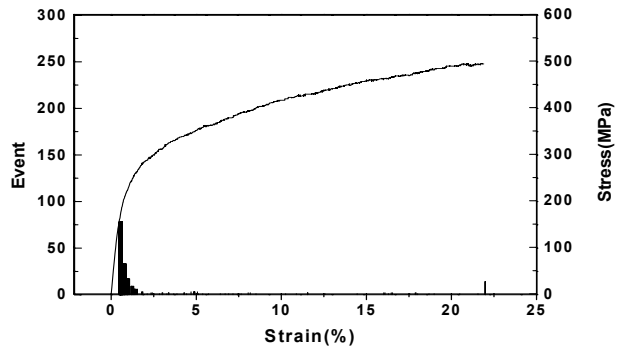
Fig. 46에 나타난 바와 같이 음향방출은 부식시간에 관계없이 변형을 2% 이내에서 많이 발생하고 있으며 이는 용사층 내에서 균열의 발생과 성장 등이 진행되고 있음을 알 수 있다. 음향방출의 발생량을 관찰해볼 때 변형을 약 2% 이내의 구간에서 A11000시험편, A1500시험편, A1시험편 순으로 발생하고 있음을 알 수 있다. 그리고 누적량 AE 계수와 누적량 AE 에너지에서도 모든 시험편들은 AE 사상수가 증가하는 구간에서 누적량 카운트도 크게 증가하고 있다.

또한 부식시간이 증가함에 따라 누적량 카운트는 A11000시험편, A1500시험편, A1시험편 순으로 상승하고 있다. 이는 용사코팅재가 부식 환경에 노출될 경우 용사 후에 용사층 표면에 있는 기공을 통해 염수가 기재에 침투하고, 침투한 염수는 시간의 경과에 따라 용사층과 기재 사이에 넓게 확산되어 부식을 일으킨다. 이 과정에서 Al 용사층은 희생양극으로서 용사층 자체가 부식되고 그로 인해 기재를 보호하고 있는 것으로 판단되며 부식이 진행됨에 따라 Al 용사층의 부식은 더욱 가속화되어서 용사 피막층의 입계나 계면에 많은 결함이 발생되는 것으로 판단된다. 또한 이미 침투되어 있는 염수는 기공에서 균열의 발생과 성장을 촉진하고 용사층에서의 결합력을 더욱 감소시켜 조기에 음향방출이 급격하게 발생하고 있다 [34].

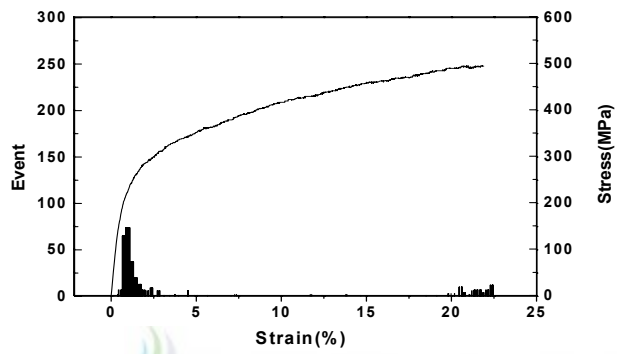
그러나 누적량 카운트에 의한 그래프는 Zn시험편과는 달리 음향방출이 증가하는 경향을 보이고 있다. 이는 전술한 바와 같이 용사층 기공으로 침투한 염수가 Al 용사층 자체의 희생양극으로 인해 용사층을 부식시키고 코팅층 간의 결합력을 저하시킨다. 이에 인장하중이 부가되어 발생한 에너지는 결합력이 약한

부분 즉 용사층의 기공에 집중되어 있고, 적은 변형율에서도 균열이 발생, 성장이 이루어지면서 에너지가 발산되고 있음을 Fig. 47에서 보여주고 있다. 이러한 결과는 후술하는 Fig. 49의 AI시험편 표면 사진에도 잘 나타나 있다.

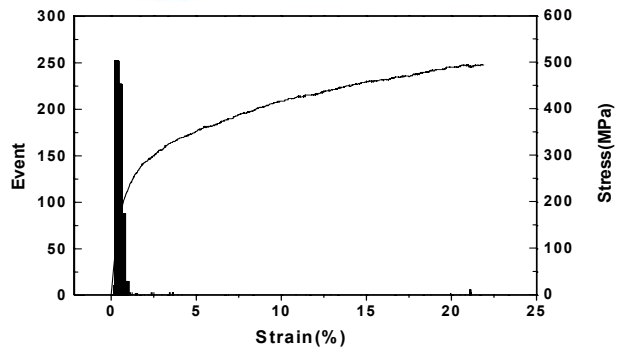




(a) Al

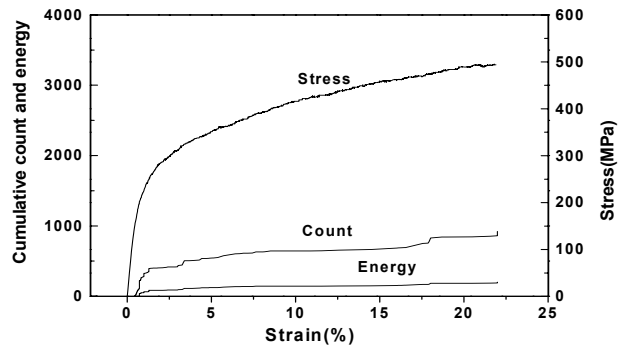


(b) Al500

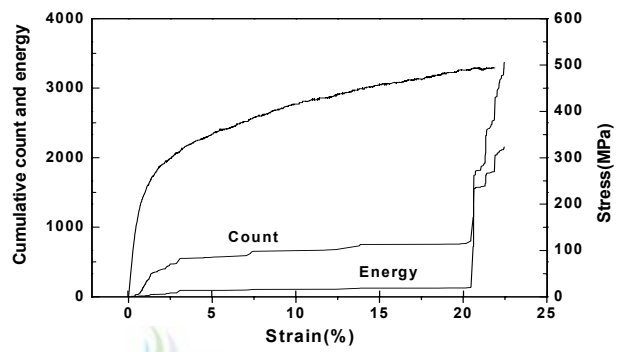


(c) Al1000

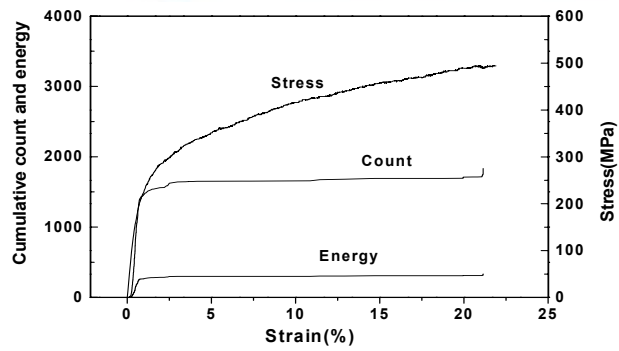
Fig. 46 Stress and event vs. strain



(a) Al



(b) Al500



(c) Al1000

Fig. 47 Cumulative count and energy vs. strain

3.2.4 부식시간에 따른 Al 용사 코팅재의 표면관찰 및 파괴기구

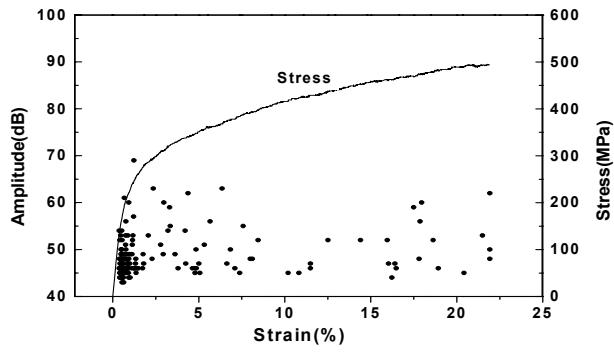
음향방출 진폭과 응력-변형율과의 관계를 Fig. 48에, 인장시험 시 파단된 시험편의 표면사진을 Fig. 49에 나타내었다.

Fig. 48에서 진폭의 분포를 보면 모든 시험편은 변형율 2%이내에 진폭이 집중되어 있으며 Al1000시험편, Al500시험편, Al시험편 순으로 빈도수가 높다. 또한 부식시간이 진행됨에 따라 2%이후의 구간에서는 진폭이 비교적 적게 나타나고 있음을 보여주고 있다.

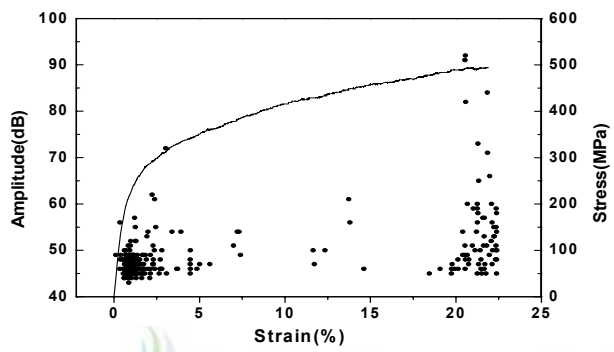
이는 용사 후에 존재하는 기공을 통해 기체가 염수에 노출되어 있지만 Al 용사층이 희생양극이 되어 자체부식이 빠르게 진행된 것으로 판단된다. 그러나 기체에 침투된 염수는 시간이 경과함에 따라 비교적 적은 에너지의 값으로 결합력이 저하된 부분인 기공에 집중되고, 에너지의 축적한계를 넘게 되면 쉽게 균열이 발생 및 성장이 이루어지는 것으로 추정된다.

Fig. 49에 나타난 사진들은 시험편이 파단된 후 표면사진으로 박리보다는 균열에 의한 소성변형이 주로 작용했음을 보여주고 있다. 또한 부식시간이 긴 시험편은 Zn시험편에서와 같이 용사 코팅층 자신이 부식되고 이로 인해 표면이 연화되어 Al 성분이 탈락되어 요철 형상을 보여주고 있다. 또한 인장시험에서 변형율이 증가하면 코팅층에서의 결합력이 약화로 인해 균열이 발생, 성장하고 있으며 균열의 길이와 수가 증가하고 있음을 보여주고 있다.

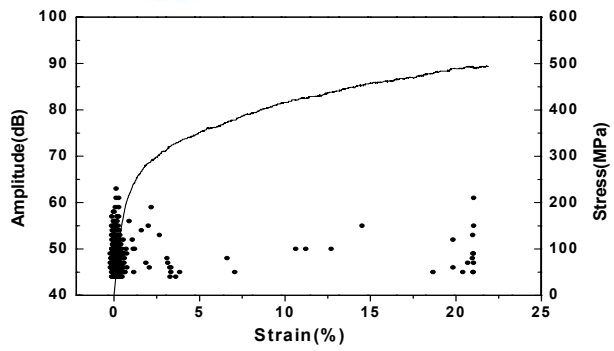
Fig. 45와 비교해 보면 부식을 실시한 Al시험편은 부식을 실시한 Zn시험편에 비해 더 많은 부식이 진행된 것을 보여주고 있고, 인장시험에 따른 균열의 발생 빈도도 더 많음을 보여주고 있는데, 이는 Al 용사재가 Zn 용사재에 비해 희생양극 정도가 높기 때문에 변형율 2% 이내에서 많은 균열이 생성, 성장해 가고 있는 것으로 보인다.



(a) Al



(b) Al500



(c) Al1000

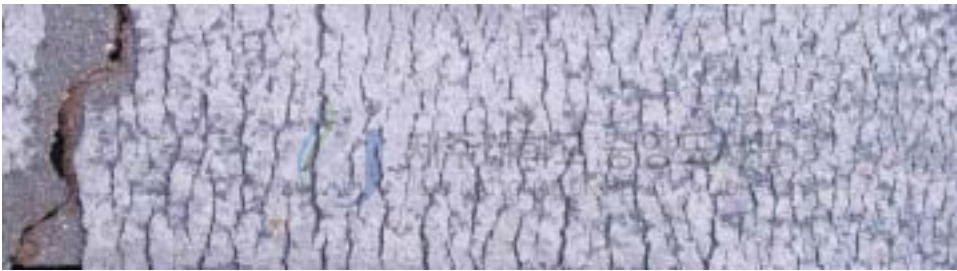
Fig. 48 Stress and amplitude vs. strain



(a) Al



(b) Al500



(c) Al1000

↔
Load direction

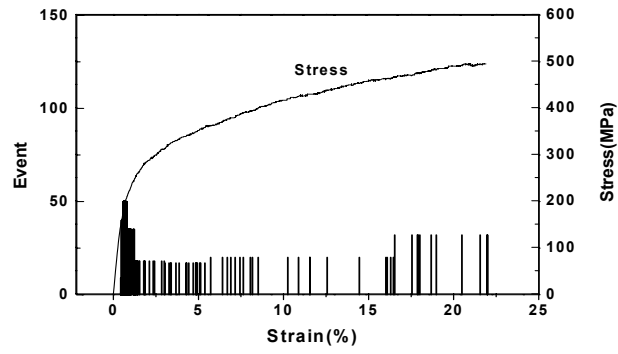
Fig. 49 Surface crack of Al coating layer after tensile testing according to corrosion time

3.2.5 부식시간에 따른 Amdry625 용사 코팅재의 음향방출 특성

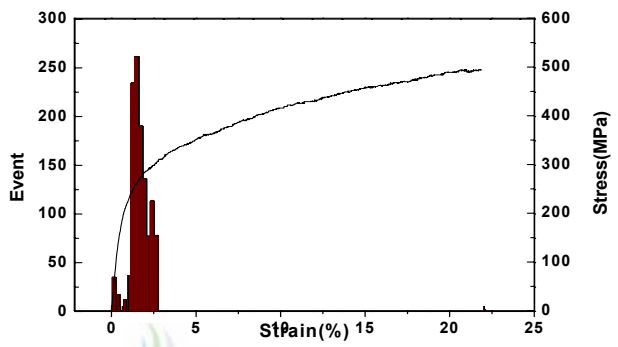
무 부식 시험편과 500시간, 1000시간을 부식시킨 시험편을 인장하중을 가하면서 AE 음향방출 실험을 하여 얻어진 AE 사상수와 응력-변형을 곡선을 Fig. 50에 나타냈으며 부식시간에 따른 누적량 AE 에너지 곡선을 응력-변형을 곡선과 함께 Fig. 51에 나타내었다.

그림에 나타난 바와 같이 변형률에 따른 AE 사상수는 AM500시험편, AM시험편, AM1000시험편의 순으로 크게 일어나고 있으며, AM시험편에서는 1%에서 8%사이의 구간에서 AE 사상수 발생 빈도가 높고 이 후의 구간에서는 AE 사상수 발생 빈도가 낮게 나타나고 있다. AM500시험편은 변형률 2.5% 이내에서 높은 AE 사상수가 발생되고 있고 AM1000시험편에서는 5% 이내에서 AE 사상수 발생 빈도가 높게 나타나고 있다. 그리고 누적량 AE 계수와 누적량 AE 에너지에 있어서, 모든 시험편들은 AE 사상수가 증가하는 구간에서 누적량도 급격하게 증가하고 있다.

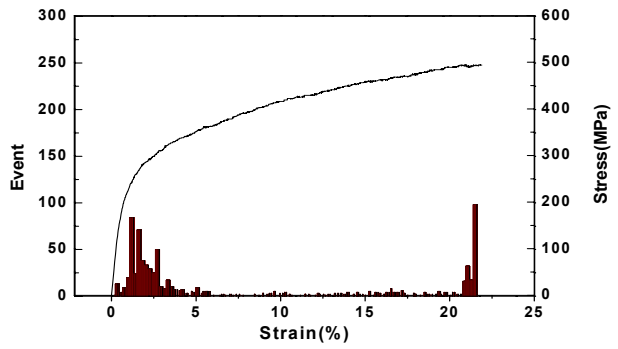
AM시험편에서 비교적 변형률이 넓은 구간에 거쳐 음향방출이 발생하는 것은 비교적 소성 변형율이 기재보다 작은 Amdry625 용사재가 균열과 박리, 탈락이 한번에 이루어지지 않고 잔존하는 기재와의 밀착력에 의해 변형률 증가에 따라 계속적으로 진행되고 있는 것으로 사료된다. AM500시험편이 변형률 2.5%이내에서 높은 사상수가 나타나는 것은 용사층에 있는 기공을 통해 침투된 염수가 기재와 용사층을 부식시켜 밀착성이 저하된 것으로 추정된다. 이로 인하여 소성 변형이 작은 용사층은 적은 변형률에 의해서도 큰 규모의 박리와 탈락이 발생된 것으로 사료된다. AM1000시험편은 변형률 5%이내에서 AM500시험편 보다 낮은 AE 사상수를 나타내고 있다. 이는 부식이 가속화 되어 AM500시험편에 비해 적은 에너지로도 더욱 큰 규모의 용사층 과 기재사이에 박리와 탈락을 발생하게 하고 있으며, 또한 기재와 경계층 사이의 부식이 많이 진행되고 부식에 의한 밀착성의 저하로 인해 사상수가 적게 나타나는 것으로 판단된다



(a) AM

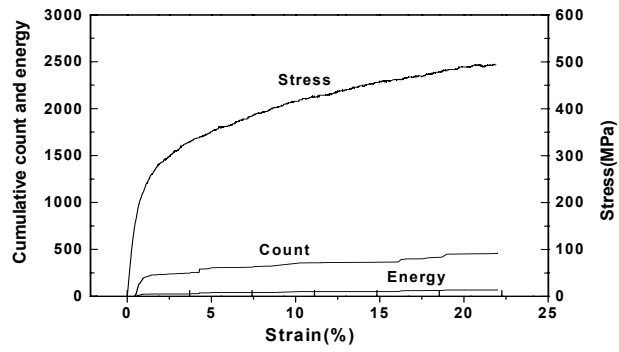


(b) AM500

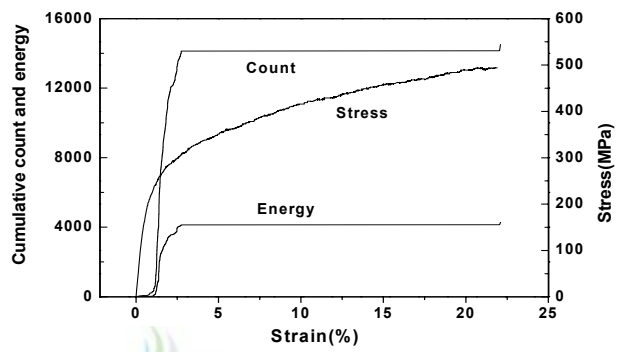


(c) AM1000

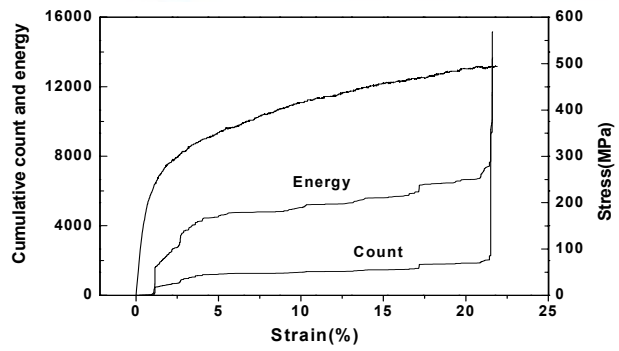
Fig. 50 Stress and event vs. strain



(a) AM



(b) AM500



(c) AM1000

Fig. 51 Cumulative count and energy vs. strain

3.2.6 부식 시간에 따른 Amdry625 용사 코팅재의 표면관찰 및 파괴기구

음향방출 진폭과 응력-변형율과의 관계를 Fig. 52에, 인장시험 시 파단된 시험편의 표면사진을 Fig. 53에 나타내었다.

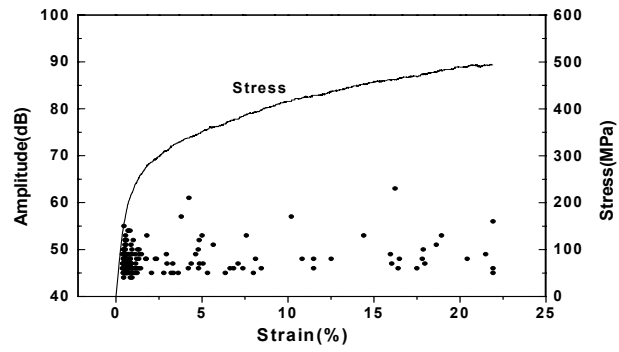
Fig. 52에서 AM시험편은 변형율 2% 이내에서 AE 진폭 발생 빈도가 높으며 이후의 구간에서는 진폭이 간헐적으로 나타나고 있다. 그러나 부식을 실시한 AM500시험편과 AM1000시험편은 AM시험편에 비해 높은 진폭을 보여주고 있는데 이는 에너지 강도가 높음을 의미한다.

AM시험편에서 비교적 변형률이 낮은 구간에 거쳐 AE 진폭이 발생하는 것은 비교적 소성 변형율이 낮은 Amdry625용사재가 박리와 탈락이 한번에 이루어지지 않고 잔존하는 기재와의 밀착력에 의해 변형율 증가에 따라 계속적으로 균열과 박리가 진행되고 있는 것으로 사료된다. AM500시험편에서 변형율 2.5%이내에서 비교적 많은 AE 진폭이 나타나는 것은 용사 후 용사층에 남아있는 기공으로 침투된 염수에 의해 기재와 용사층이 부식되어 밀착성이 저하된 것으로 추정된다. 이로 인하여 소성 변형율이 적은 용사층은 큰 규모의 박리와 탈락이 이루어진 것으로 사료된다. AM1000시험편에서는 변형율 5%이내에서 AM 500시험편 보다 적은 AE진폭 분포와 이후의 구간에서 계속적으로 AE진폭이 발생되고 있음을 보이고 있다. 이는 부식이 가속화 되어 AM500시험편에 비해 적은 에너지로도 더욱 큰 규모의 용사층 박리와 탈락이 이루어지고 있으며, 또한 기재와 경계층 사이에서 부식이 많이 진행되어 산화층에 의한 밀착성으로 AE 진폭이 나타나는 것으로 사료된다.

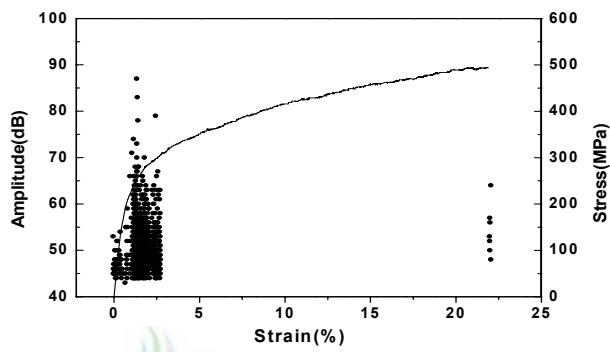
Fig. 53에 나타난 표면사진들은 인장시험 후 부식시간에 따른 박리된 Amdry625 용사 시험편의 용사층 사진들을 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 Amdry625 용사 시험편의 코팅층은 기재에 비해 취성이 매우 크기 때문에 전술한 Al시험편과 Zn시험편의 균열 모습과는 달리 기재와 완전히 탈락이 이루어졌다. 부식시간에 따른 용사층 모습은 균열이 발생, 성장한 모습이 거의 없으

며, 용사층의 기공으로 침투된 염수에 의해 기체가 부식되어 생성된 부식재가 다시 기공을 통해 코팅층 표면으로 배출된 모습을 보여주고 있다. 따라서 부식된 시험편은 부식되지 않은 시험편에 비해 박리와 탈락이 조기에 발생하고, 짧은 시간에 일어나고 있음을 알 수 있다.

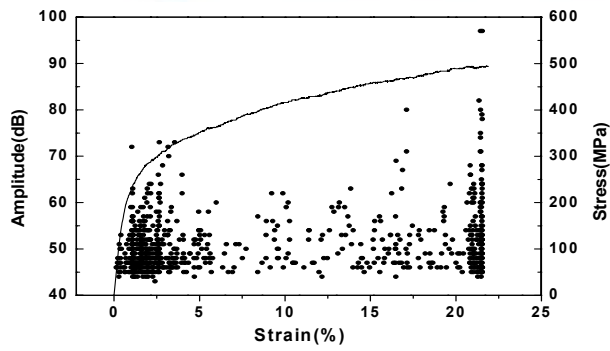




(a) AM



(b) AM500



(c) AM1000

Fig. 52 Stress and amplitude vs. strain



(a) AM



(b) AM500



(c) AM1000



Load direction

Fig. 53 Surface crack of Am625 coating layer after tensile testing according to corrosion time

4. 결 언

어선용 프로펠러 재료인 고강도 황동 합금을 기재로 하여 내식성이 우수한 Zn, Al, Amdry625를 용사코팅하여 무부식 시험편과 3.5% NaCl 용액에서 500시간, 1000시간을 침수 부식시킨 시험편을 음향방출장치를 이용, 인장시험중의 코팅층의 균열과 박리 상태를 조사·검토한 결과는 다음과 같다.

1. 기재와 용사 코팅재 사이에서 소성변형인 균열의 발생과 성장 및 박리의 발생과 성장, 탈락 등의 시기는 인장초기인 변형율 1%-2.5%미만에서 대부분 발생하고 용사코팅재의 사상수, 누적카운트, 에너지 및 진폭은 기재 보다 많이 발생함을 보여주고 있다.

2. Zn, Al시험편은 균열발생에 의한 특성을 보이는 반면 AM시험편은 박리에 의한 특성을 나타내며, 이는 Al, Zn시험편의 용사층은 인장변형과 함께 균열이 발생하지만 AM시험편의 용사층은 기재에 비해 연성이 매우 작기 때문에 박리가 발생하는 것으로 판단된다.

3. 500시간 과 1000시간 부식시킨 시험편은 부식되지 않은 시험편에 비해 적은 에너지로도 쉽게 균열이나 박리가 발생하는 것으로 판단된다.

4. 3.5% NaCl 용액에서 부식시킨 시험편중에서 Zn, Al시험편은 희생양극으로서의 기능을 수행하여 기재 표면에서 부식현상을 볼 수 없으나 AM시험편은 희생양극 기능이 없어 기재표면에 부식현상이 나타나고 있다.

IV. 브라스팅에 의한 프로펠러의 내식성 향상 효과

1. 서 언

소형어선의 프로펠러는 항만내의 해수 오염으로 인한 기재인 황동합금의 부식과 캐비테이션에 의한 침식 등에 의하여 어선의 추진성능이 크게 저하된다. 이러한 프로펠러의 부식생성물을 제거하기 위하여 제주도내의 어선들은 1년에 2회 정도 핸드 그라인더에 의한 수작업으로 부식을 제거 한다. 그러나 프로펠러의 부식부 만이 연삭되는 것이 아니라 기재 부까지 연삭되므로 두께의 감소로 인한 프로펠러의 수명의 단축도 우려되며, 정밀 연삭을 한다 하더라도 표면 거칠기가 크게 됨을 피할 수 없다. 프로펠러의 거친 표면은 프로펠러의 부식과 공동현상의 가속에 직접적으로 연관되므로, 이 또한 프로펠러의 수명을 단축시킬 수 있다. 또한 작업 과정에서 발생하는 분진 등을 고려하여 친환경적이며 프로펠러의 부식 녹을 쉽게 제거할 수 있는 장치의 개발이 필요한 실정이다.

블라스팅은 고경도의 투사재(Media)를 고압공기로 구조물 표면에 입체적으로 분사시켜 표면처리를 하며, 피닝효과로 경도와 강도 및 내 부식성을 향상시키는 방법으로 알려져 있어, 어선용 프로펠러의 최종 표면 처리에 유용하게 사용 될 수 있다.

따라서 본 연구에서는 어선 프로펠러의 부식녹제거와 표면가공을 자동화로 행할 수 있고, 가공 시 폐처리 물질의 수집과 처리가 용이하여 작업장의 환경을 개선할 수 있는 기계장치를 개발하였다. 또한, 개발된 장치에 의한 프로펠러의 표면가공 제품에 대해 경도, 표면 거칠기, 가공에 따른 무게감량, 양극산화 거동 및 캐비테이션 침식 특성을 규명함으로써 부식 제거장치에 의한 가공 제품의 내식성 향상을 검토하였다.

2. 부식 제거장치 개발

2.1 블라스팅

본 연구에서 개발하고자 하는 프로펠러 부식제거장치는 블라스팅 방법의 일종이다. Fig. 54에 도시한 바와 같이 블라스팅은 금강사 입자나 쇼트 등의 투사재를 공기압축기나 임펠라 등을 이용하여 적절한 속도로 피가공 물체에 투사하여 입자가 가지는 운동에너지로 제품 표면을 가공하는 방법이다.

블라스팅의 기본원리는 Fig. 55에 나타내는 것처럼 투사재를 공기압에 의해 노즐로 이송하여 압축공기로 피가공체의 표면에 투사되어 표면을 가공한다. 블라스팅은 0.3mm~1.0mm정도의 투사재를 압축공기에 의해 고속으로 투사하여 가공체 표면 및 표면 하 수백 μm 부분의 조직, 경도 및 잔류응력을 변화시킴으로서 표면근처의 성질을 개선시키는 Peening 효과를 낸다.

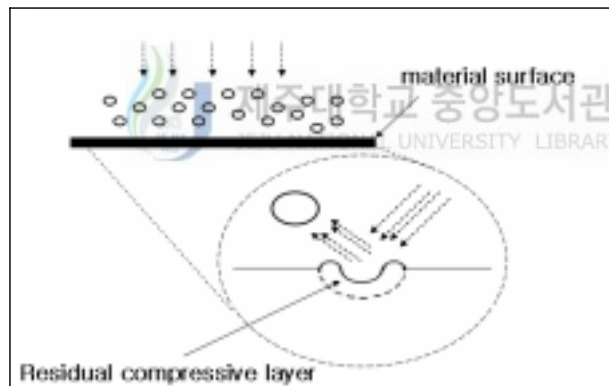


Fig. 54 Schematic diagram of blasting

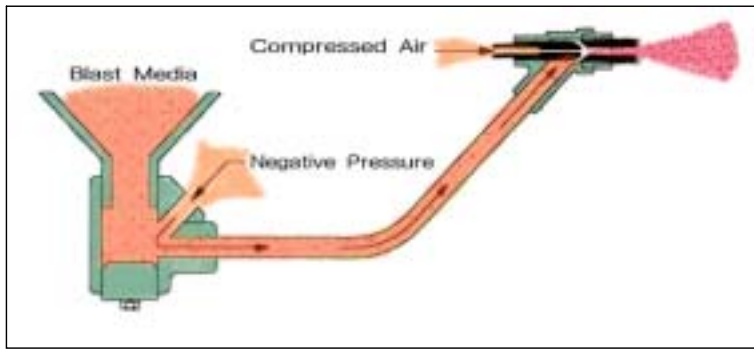


Fig. 55 Diagram of suction type blasting system

실험에 사용된 알루미나(Al_2O_3)의 특징은 Steel 분말에 비해 수명이 짧지만 가공제품의 기재 손실을 줄이면서 표면을 좀더 매끄럽게 처리할 수 있어 다용도로 사용 가능하다. 금강사(Emery)는 가격이 저렴해서 쉽게 구해서 사용하기 때문에 일반적인 투사재로 쓰이고 있으며 환경오염에 원인이 되지 않는 조건에서 재처리를 통해 다시 사용할 수도 있다.

강의 표면에 1개의 투사재가 전달하려고 하는 에너지는 다음 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$E = \frac{1}{2}MV^2 \cdot \sin\theta \quad (1)$$

M : 투사재 1개의 질량
 V : 투사재의 속도
 θ : 입사각

반면에 복수의 투사재가 T 시간동안 단위면적에 전달하려고 하는 에너지는 식(2)에 나타낸다.

$$E_T = \left(\frac{1}{2}MV^2 \cdot \sin\theta\right) \cdot N \cdot T \quad (2)$$

N : 단위시간, 단위면적에 충돌하는 투사재의 개수

그렇지만 실제로 제품에 전달되는 에너지는 더 복잡하여 투사재 서로의 간섭(제품표면에서의 입사 투사재와 반사 투사재) 및 제품이 투사재와 충돌시 발생하는 변형에 대한 에너지 손실도 고려하지 않으면 안 된다.

그것들을 고려한 전달효율을 K 라고 놓으면 단위면적에 시간 T 동안 전달되는 에너지 E_T 는 식(3)에 나타내었다.

$$E_T = \left(\frac{1}{2}MV^2 \cdot \sin\theta\right) \cdot N \cdot T \cdot K \quad (3)$$

이 에너지는 제품 표면에 전달되어 일부는 내부마찰에 의한 열로 변환되고 나머지는 변형 에너지로서 압축잔류응력을 발생시킨다. 그러므로 블라스팅 가공 시에는 제품 표면에 주어지는 물리적 변화 중 압축잔류응력이 가장 중요한 요소로 작용한다[35].

2.2 노즐

먼저 노즐의 종류부터 살펴보면 국내에서는 주로 강철노즐 혹은 열처리된 강철노즐을 사용하고 있으며 일본산 혹은 국산 세라믹노즐을 사용하고 있으나 미국, 일본, 독일 등 선진국에서는 세라믹 노즐을 샌딩용으로 사용하는 경우는 찾아 볼 수 없으며, 강철노즐을 사용하고 있는 경우는 더욱 찾아보기 힘들다. 현재 선진국에서는 100%가 보론 재질의 노즐을, 그리고 일부 특수한 경우에 한하여 텅스텐카바이드 노즐을 사용하고 있다.

보론 재질의 특성은 강한 반면 충격에 깨지기 쉬운 단점이 있어 대개 폴리우레탄이나 알루미늄 등 케이스로 보호 되어 사용되고 있으며, 보론은 비중이 2.5 kg/cm^3 로 강철의 1/6 무게이며 유리의 비중 2.3 kg/cm^3 과 비슷하며 상당히 가벼운 것이 장점이다. 또한, 마찰계수가 대단히 작아 거의 물과 같은 정도의 윤활성을 갖고 있으며 충격을 흡수하는 완충작용도 갖고있어 내마모성을 더욱 높여준다. Table 7에 보론노즐과 여러 노즐과의 수명을 비교하였으며 여기서 보론카바이드 즉, 보론노즐이 텅스텐 카바이드에 비하여 약 4배정도 수명이 길고, 세라믹노즐에 비하여 약 900배 정도 긴 수명을 갖는다. 이러한 이유로 보론노즐을 부식제거 장치에 장착하였다. Fig. 56에 보론노즐과 블라스트 건을 나타낸다 [36].

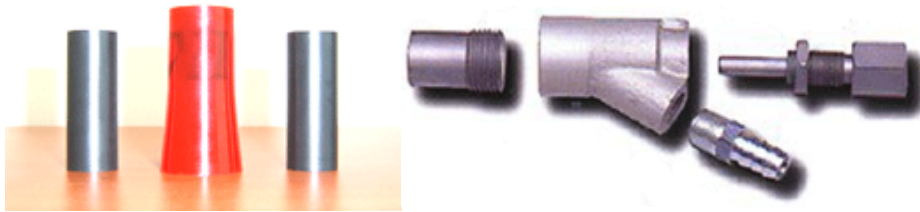


Fig. 56 Boron nozzle and blast gun

Table 7 Comparison of nozzle life time

Material	Nozzle life time
Steel nozzle	40 mins
Ceramic nozzle	4 hours
Tungsten carbide nozzle	1,000 hours
Boron carbide nozzle	3,500 hours

2.3 부식 제거장치 설계 및 제작

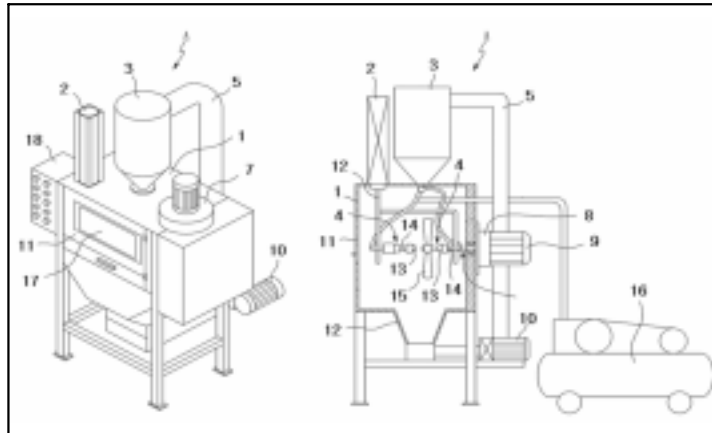
소형선박용 고강도 황동합금 프로펠러 표면 부식 제거장치는 프로펠러의 부식 녹 제거작업을 밀폐용기 안에서 할 수 있도록 하고, 프로펠러는 수직방향으로 지지하였다. 지지된 프로펠러는 지속적으로 회전하고 프로펠러의 앞면과 뒷면에 각각 별도의 노즐을 설치하여 투사재를 투사함으로써 앞뒷면을 동시에 부식 녹을 제거 할 수 있도록 하였다.

Fig. 57은 설계를 바탕으로 제작된 프로펠러 부식 녹 제거장치를 나타낸다. 장치크기는 폭이 1,440mm, 길이가 990mm, 높이가 2,360mm이며 이동성을 고려하여 하부에 바퀴(Caster)를 설치하였다. 이장치는 창을 통하여 내부 작업 상황을 확인할 수 있게 하였고, 밑의 폐처리 물질 수거 받이를 설치하여 작업 후 폐물질 수거를 용이하게 하였다.

상부에 달린 송풍기는 부식 녹 제거장치의 내부와 외부와의 압력차를 발생시켜 블라스팅 후 장치 하부로 떨어지는 투사재를 이송관을 통해 다시 상부의 호퍼로 충전 된다. 이때 외부로 배출되는 공기는 측면의 필터 망을 거쳐 중금속인 황동 분말과 부식생성물 등의 분진을 집진 시킨 후 배출 되어진다.

실제 프로펠러를 가공함에 있어 표면적이 좁은 보스 부근은 부식 녹을 제거하는 블라스팅 투사 시간을 짧게 하고, 표면적이 넓은 날개 끝단 부분에서는 블라스팅 투사 시간을 길게 할 필요가 있으므로 프로펠러의 회전속도를 노즐의 블라스팅 위치에 따라 변화하도록 하여 부식 녹을 좀더 정밀하게 제거 할 수 있게 설계하였다. 프로펠러 구동모터는 기본 회전수(1,750rpm)에서 50:1의 감속비로 감속되어 35rpm으로 장착된 프로펠러를 회전시키나, 공압 실린더의 위치에 따라 회전 속도를 달리하게 하였다. Fig. 58과 같이 공압 실린더 이송 구간을 센서의 의해 3단계로 나누어 주파수 제어를 통해 프로펠러 구동 모터 회전수를 제어하게 된다. 1구간은 60Hz(35rpm), 2구간은 40Hz(23.3rpm), 3구간은

20Hz(11.7rpm)의 속도로 제어된다. 설계 제작된 소형선박용 고강도 황동합금 프로펠러 표면 부식 제거장치를 Fig. 59에 나타냈다.



- | | | |
|----------------|--------------------------|-------------------------|
| 1.Body | 2.Air cylinder | 3.Hopper |
| 4.Blast nozzle | 5.Air line | 6.Screw propeller fixed |
| 7.Air blower | 8.Speed reduction device | 9.Execution motor |
| 10.Filter | 11.Door | 12.Wastes outlet |
| 13.Nozzel | 14.Injection pipe | 15.Screw propeller |
| 16.Air comp. | 17.Window | 18.Controller |

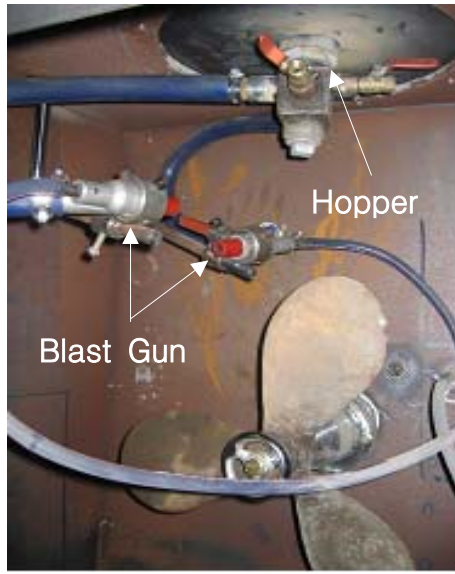
Fig. 57 Diagram of corrosion removing apparatus



Fig. 58 Air cylinder attached proximity sensor and controller



(a) Front side



(b) Inside



(c) Reverse side



(d) Filter

Fig. 59 Corrosion removing apparatus

3. 재료 및 방법

3.1 시험편 제작

본 실험에 사용한 재료는 전기화학적인 침식성이 강하고 해수환경에서 주로 내식 재료로 잘 알려진 소형선박 프로펠러용 고강도 황동합금이다. 화학적 성분과 기계적 성질은 제II장 2.1절에 나타낸 것과 동일하다.

시험편은 실제 프로펠러를 가공하여 두께 6mm의 고강도 황동 판재를 크기 35(L)mm × 35(W)mm로 하였다. 시험편은 개발된 장치에 의해 표면 거칠기와 경도 및 분극특성을 조사하기 위하여 표면가공 조건을 달리한 시험편과 투사재의 종류를 달리한 시험들로 구분하여 제작하였다.

표면가공 조건에 있어서는 그라인딩 가공, 블라스팅 가공 처리한 시험편들을 제작하였다. 그라인딩에 사용한 연마재는 프로펠러제작업체에서 사용하고 있는 것과 동일한 알루미늄옥사이드(Aluminum oxide) 연마재(VA113, P36, Disk type)를 사용하였다. 블라스팅 투사재의 종류에 대하여는 알루미나(Al_2O_3)와 금강사(Emery)의 두 종류를 사용하여 블라스팅 처리 시간을 변화한 시험편들을 제작하였고, 블라스팅은 Fig. 60에서처럼 개발된 부식 제거장치에 내부에 시험편을 단단히 고정된 후 Table 8의 조건으로 행하였다.

Table 8 Blasting conditions

Blasting type	Air pressure	Grit mesh	Nozzle type	Distance
Suction pressure system	6.0kg/cm ²	Alumina : #48 Emery : #80	Boron 6φ	5cm

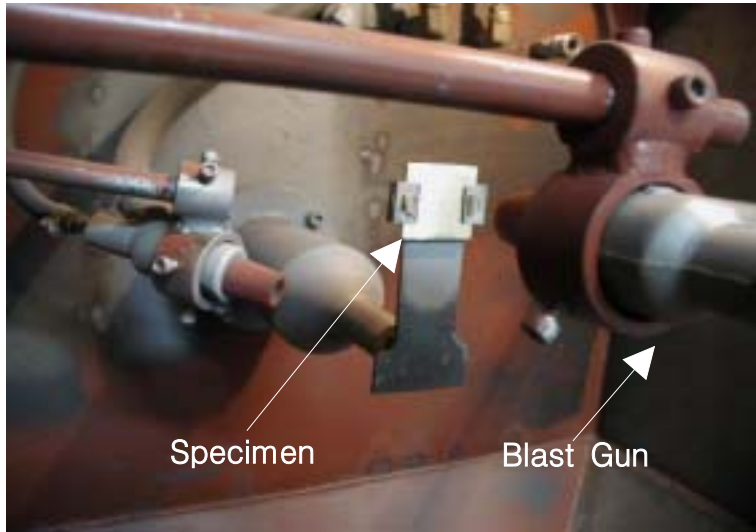


Fig. 60 The test specimen for blasting

3.2 표면 거칠기, 경도 및 무게 감소량 측정

블라스팅 전과 후의 표면 거칠기 측정은 KS B 0811-99(SE-3FS)을 이용하여 조사하였고, 경도 측정은 한국표준규격 KS B 0811-99 (비커스경도 측정)에 따라 경도시험기 하중 10kg을 사용하여 시험하였다. 1개의 시험편에 대하여 10개소의 경도를 측정하여 평균치를 계산하였다. 블라스팅 전후의 무게 감소량은 시험편을 초음파 세정기(아세톤)로 먼저 정화 처리한 다음, 건조시킨 후, 디지털 저울(1/10000mg 用)을 사용하여 측정하였다.

3.3 전기화학실험

금속의 부식은 전기화학적인 면에서 보면 금속의 산화반응이며, 전기화학적인 부식 시험법에는 타펠연장시험법(Tafel extrapolation), 선형분극 시험법(Linear polarization), 동전위분극측정법(Potentio-dynamic polarization), 국부적인 부식 시험법(Pitting corrosion), 전지부식(Galvanic corrosion), 입계부식시험법(Inter-granular corrosion)등이 있다[37].

연구에서 사용한 동전위분극측정방법(Potentio dynamic)은 시편의 전위-전류관계를 이용, 용액중에서의 부식특성을 평가하는 방법으로서 시편의 전위를 양극 혹은 음극 쪽으로 서서히 증가시켜 전체적인 전위-전류곡선을 구하여 부동태화 경향, 부식방지제 혹은 산화제의 효과 및 특성분석에 활용된다. 실험은 부식전위 혹은 그 이하 20mV에서 대략 $\pm 1.6V$ 혹은 그 이상까지 주사(Scan)하며, 속도는 시간당 1mV정도 이다. Fig. 61에 전위-전류곡선을 나타내며, 여기서 활성화영역(Active)은 금속표면 또는 금속/용액의 계면에서 일어나며 전하의 교환 (Charge transfer) 에 의하여 지배적으로 일어날 때 나타나며 이러한 전극반응을 일반적으로 금속부식 과정에서 초기에 금속이 이온화하여 용해되거나, 혹은 수용액에서 음극반응을 일으키는 수소의 환원과정에서 수소기체의 생성과정

을 예로서 들 수 있다. 부동태영역(Passive)은 전위가 증가하여도 전류밀도가 감소하여 일정 전류밀도에서 거의 안정된 값을 보여주며 금속의 표면에 용해되지 않는 얇은 피막이 형성되어 금속의 부식이 효과적으로 방지되는 현상을 말하며, 과부동태영역(Transpassive)은 전위를 증가시키에 따라 전류밀도가 다시 증가하는 영역으로 이미 형성된 부동태막의 파손에 의한 것으로 알려져 있다 [38].

Fig. 62에 실험에서 사용한 전위차계(Wonatech Co. WPG100)와 그 외의 실험 장치를 나타낸다. 분극전위는 이용하여 동전위분극전위(Potentio dynamic)로 측정하였고, 기준전극은 포화칼로멜전극(Saturated calomel electrode; SCE)을, 대극은 흑연탄소봉을 사용하였다. 분극전위의 측정 구간은 $-0.8 \sim +0.8V$ 이며, Scan rate는 $0.2mV/s$ 로 주사하였다. 실험용액은 유사해수인 3.5%NaCl 용액을 사용하였다. Fig. 63에 나타낸 분극실험용 시험편은 노출면적을 $1cm^2$ 으로 하였고, 그이외의 표면은 에폭시 수지로 피복하여 방식처리 하였다.

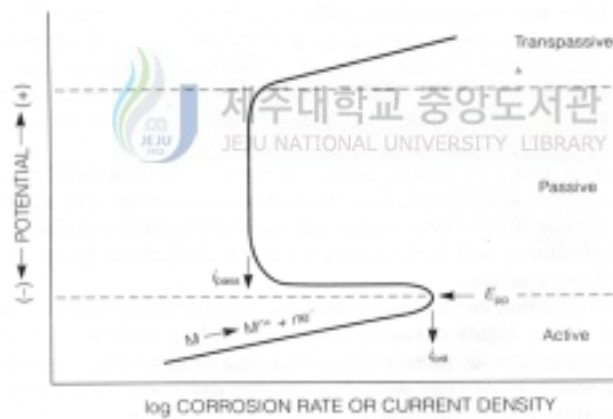
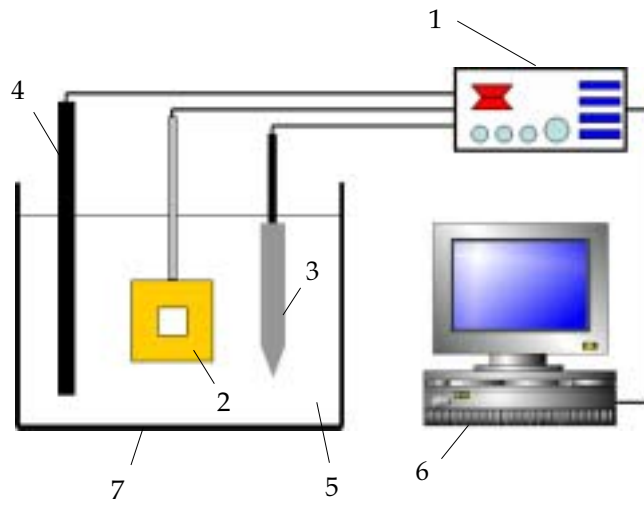


Fig. 61 Schematic diagram of polarization behavior



- | | | |
|---------------------|----------------------|-----------------------|
| 1.Potentiostat | 2.Specimen | 3.Reference electrode |
| 4.Counter electrode | 5.Synthetic seawater | |
| 6.Personal computer | 7.Corrosion cell | |

Fig. 62 Schematic diagram of polarization test

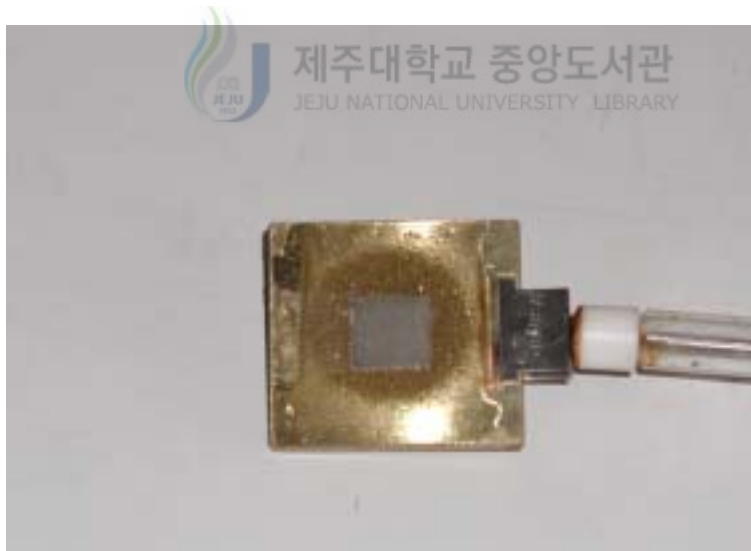


Fig. 63 Specimen for polarization test

3.4 Cavitation 침식실험

본 실험에 사용된 장치와 방법은 제Ⅱ장 2.2항과 같으며, 실험시간은 180분 동안 실시하였는데 60분까지는 매 10분마다 질량을 측정하고, 60분부터 180분까지는 30분마다 질량 감소량을 측정하였다.



4. 결과 및 고찰

4.1 프로펠러 표면 부식 제거 효과

Fig. 64에서와 같이 표면이 부식된 프로펠러를 부식 제거장치에 장착한 후 자동운전으로 20분간 프로펠러 부식제거시험을 실시했다. 이때 투사재는 금강사로 입도크기는 #80이다.

Fig. 65(a)~(d)에 블라스팅 시간에 따른 프로펠러 표면의 부식이 제거되는 과정을 시간에 따라 나열한 것이다. 그 결과로 Fig. 66을 보면 프로펠러 표면의 부식이 블라스팅작업 전·후가 확연히 차이가 나며, 부식이 완전히 제거된 것을 알 수 있다



Fig. 64 An installed propeller in chamber of corrosion removing apparatus



(a) After 2 min



(b) After 8 min



(c) After 14 min



(d) After 20 min

Fig. 65 Profile variation of a propeller by various blasting times



(a) Before blasting



(b) After blasting

Fig. 66 Profiles of a propeller before and after of corrosion removing test

4.2 표면 거칠기 및 경도

Table 9에 나타난 것과 같이 표면 거칠기(Roughness) 측정값은 그라인딩 가공한 시험편이 블라스팅 처리한 시험편보다 높게 나타나고 있다. 또한 블라스팅 가공에서 투사재의 입도 크기에 따라 금강사(#80)가 알루미나(#48)보다 낮은 결과로 나타나고 있는데 이것은 투사재 크기에 따라 표면 거칠기가 영향을 받는다는 것을 알 수 있다.

Table 10에 각 시험편의 경도를 나타내었으며, 블라스팅 가공한 시험편에서 경도가 높게 나타났다. 이 결과는 블라스팅 가공으로 생성되는 압축잔류응력에 의해 경도가 향상되어 나타난 결과로 사료된다.

투사재에 따른 연삭력과 기재의 손실을 확인하기 위해 블라스팅 가공 전·후 및 가공시간에 따른 시험편의 무게 감량을 Table 11에 나타내었다. 투사재의 입도크기가 큰 알루미나(Al_2O_3)가 연삭력이 클 것으로 생각했으나 금강사(emery)가 큰 결과를 얻은 것으로 보아 입도크기에 따른 분사량과 투사재의 경도에 따른 차이로 사료되며 투사재에 따른 경도 값을 조사하여 규명하여야 할 것으로 사료된다.



Table 9 Change of specimens roughness after surface polishing and grinding

Blasting							Grinding	
Media	Emery			Alumina(Al_2O_3)			Media	Aluminum oxide
Blasting time(sec)	10	20	30	10	20	30	number of revolutions(rpm)	1430
$R_{max}[\mu m]$	35.0	38.5	35.5	44.2	45.7	46	$R_{max}[\mu m]$	48.3
$R_z[\mu m]$	29.5	27.7	28	38	34.5	37.5	$R_z[\mu m]$	39.5

Table 10 Hardness [Hv]

Blasting							Grinding	
Media	Emery			Alumina(Al_2O_3)			Media	Aluminum oxide
Blasting time(sec)	10	20	30	10	20	30	number of revolutions(rpm)	1430
Hardness	325	277	314	414	380	295	Hardness	223

Table 11 Weight loss [g]

Media	Emery			Alumina(Al_2O_3)		
Blasting time(sec)	10	20	30	10	20	30
Before blasting	29.9159	29.5901	29.6992	29.9077	29.9475	29.7059
After blasting	29.7749	29.3757	29.3622	29.8499	29.8013	29.4711
Weight loss	0.1410	0.2144	0.3370	0.0578	0.1462	0.2348

4.3 분극특성

투사재의 종류와 블라스팅 시간을 달리한 시험편의 분극곡선을 Fig. 67과 Fig. 68에, 블라스팅과 그라인딩 가공에 따른 분극특성 비교는 Fig. 69에 나타낸다. 또한 각 시험편의 부식전위(E_{corr}) 및 부식전류밀도(I_{corr})는 타펠외삽법(Tafel extrapolation)을 이용하여 구한 값들을 Table 12에 나타내었다.

투사재에 상관없이 20초간 블라스팅 가공한 각 시험편의 부식전위와 부식전류밀도가 상대적으로 10초나 30초 가공한 시험편에 비해 낮게 나타났다. 이것은 블라스팅 가공 효과인 압축잔류 응력에 의한 경도 향상과 표면 거칠기와 밀접한 관계로 나타나는 것으로 생각되며 블라스팅 가공 시 일정시간 이상의 가공은 그만큼 가공효과가 반감될 수 있다는 걸 알 수 있다. 블라스팅 과 그라인딩 표면가공에 따른 분극특성을 살펴보면 그라인딩에 의한 표면 연삭 가공법이 블라스팅에 비해 부식전위와 부식전류밀도가 확연히 높게 나타났다. 이 결과로 보아 개발된 프로펠러 표면 부식 제거 장치를 이용한 프로펠러 가공이 일반적으로 사용되는 그라인딩 가공법에 비해 양호한 내식성 효과를 보여주고 있음을 알 수 있다.



Table 12 Comparison corrosion potentials(E_{corr}) with corrosion current densities(I_{corr}) obtained by the blasting and grinding methods

Media	Blasting						Grinding	
	Emery			Alumina(Al_2O_3)			Media	Aluminum oxide
Blasting time(sec)	10	20	30	10	20	30	number of revolutions(rpm)	1430
E_{corr} (mV/SCE)	-327	-430	-362	-389	-410	-389	E_{corr} (mV/SCE)	-282
$I_{corr} \times 10^{-5}$ (A/cm ²)	4.58	1.14	1.10	0.76	0.71	1.64	$I_{corr} \times 10^{-5}$ (A/cm ²)	3.02

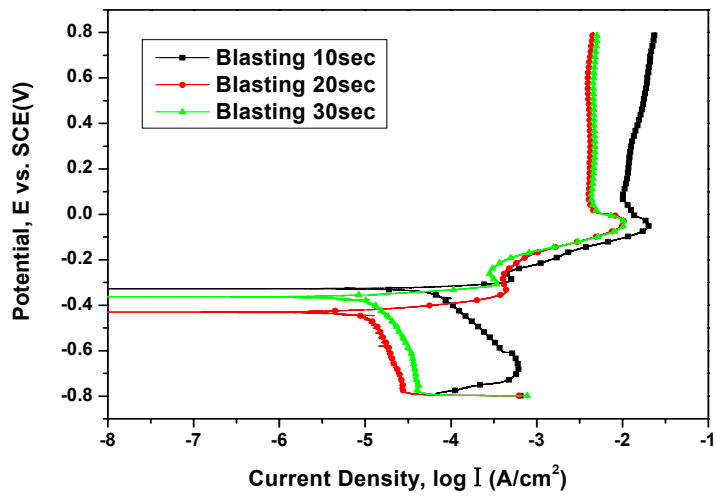


Fig. 67 Polarization curves to various blasting times (Emery)

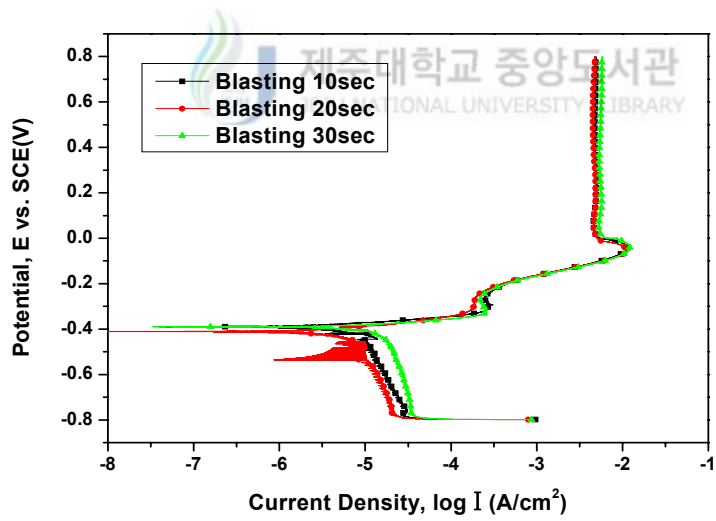


Fig. 68 Polarization curves to various blasting times (Al₂O₃)

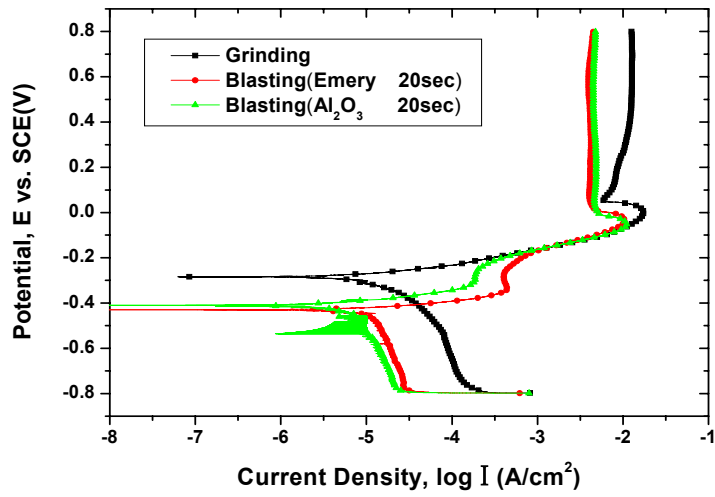


Fig. 69 Variation of polarization curves according to various polishing conditions

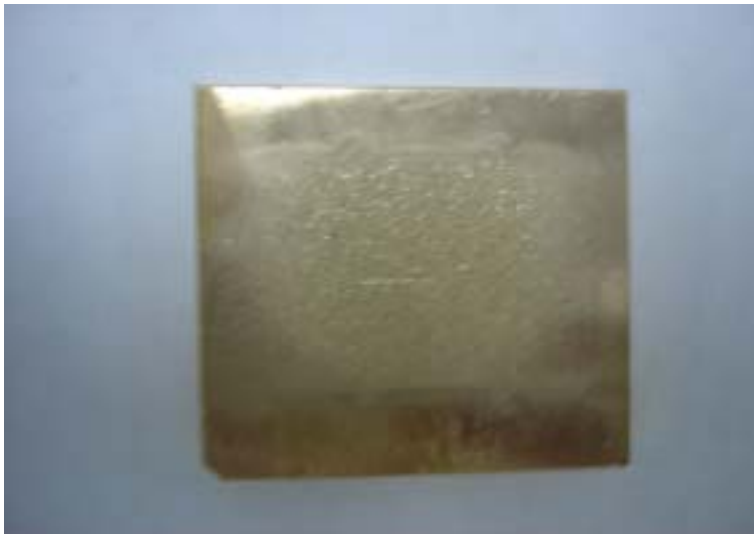
4.4 캐비테이션 침식

Fig. 70(a)는 캐비테이션 침식 실험전의 블라스팅 처리된 시험편이며 Fig. 70(b)는 캐비테이션 침식 실험후의 시험편을 나타낸다. 여기서 중앙에 둥글게 패인 부분이 침식으로 인한 기재 손실을 볼 수 있다.

Fig. 71은 시험편들의 캐비테이션 침식실험 후 그 결과를 구간별 누적 무게 감소량을 나타낸 그래프이다. 각 시험편의 구간별 캐비테이션침식의 특징을 살펴보면 대체적으로 초기 30분 정도에서 무게감소가 크게 나타나고 있으며, 30분 이후는 일정한 감소량을 보이고 있다. 또, 표면을 그라인딩처리와 알루미늄, 금강사 투사재를 이용한 블라스팅 처리한 시험편을 캐비테이션 침식 실험 후 비교해본 결과 모두 비슷한 캐비테이션침식 특성을 보이며, 실험 후 최종 무게감소량은 그라인딩 처리한 시험편이 0.0130g, 블라스팅 투사재 중 알루미늄을 사용한 시험편이 0.0131g, 금강사를 사용한 시험편이 0.0115g로 비슷한 무게감량을 나타내고 있다.

이 결과로 보아 블라스팅법에 의한 프로펠러소재의 가공표면은 캐비테이션침식에 의한 무게감량과의 관계가 거의 없는 것으로 나타났다.



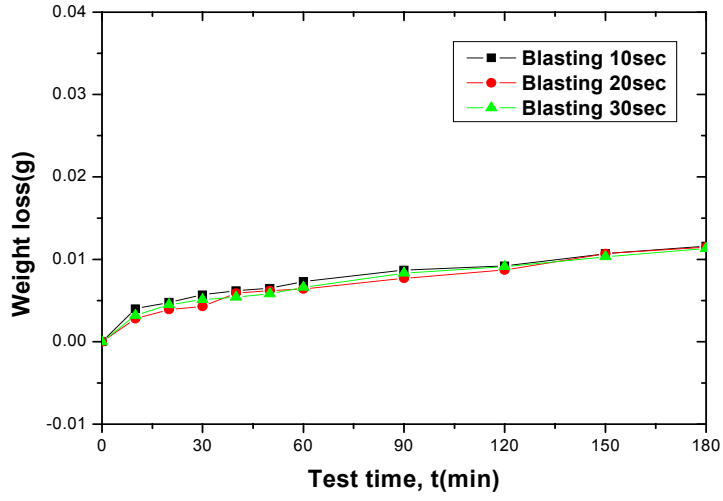


(a) Before cavitation erosion test

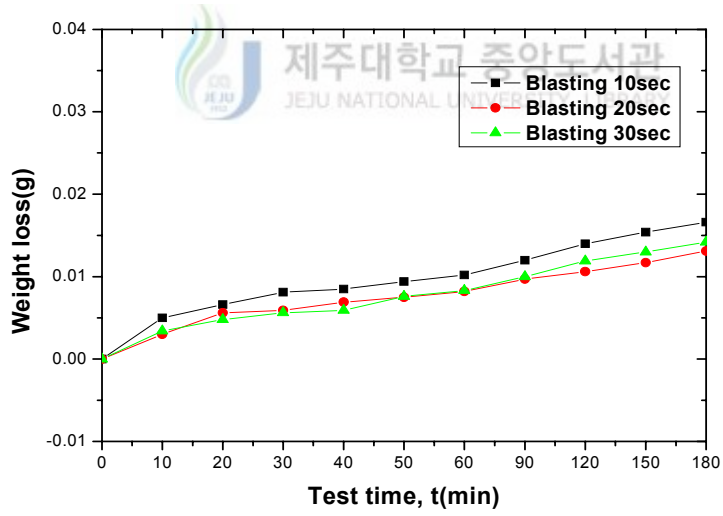


(b) After cavitation erosion test

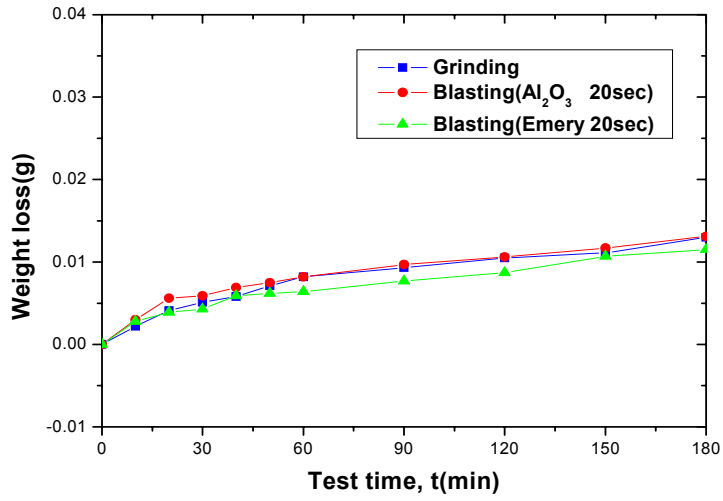
Fig. 70 Photographs of a tested cavitation erosion specimen



(a) Emery



(b) Al₂O₃



(c) Grinding and blasting

Fig. 71 Weight loss after cavitation erosion test

5. 결 언

본 연구에서 블라스팅의 원리를 적용하여 프로펠러 부식 제거장치를 설계 및 제작하였다. 그리고 실제 부식된 프로펠러를 부식 제거장치에 장착하여 프로펠러의 표면 부식 제거 성능시험을 실시하였다. 또한 소형어선용 프로펠러 소재인 고강도 황동합금 시험편을 제작한 후 제작된 장치를 이용하여 표면 가공 후 경도변화, 무게감소량, 표면 거칠기, 부식전위, 캐비테이션침식 특성 등에 관한 실험 결과를 그라인딩작업을 한 시험편과 비교 검토하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 소형선박용 프로펠러 표면 부식 제거장치(표면가공, 자동화, 작업환경 개선)가 개발 되었다.(실용신안등록 제 361471 호)
2. 개발된 장치를 이용한 블라스팅 처리한 결과가 그라인딩 가공방법에 의한 것보다 표면 거칠기와 경도가 향상되었다.
3. 부식 전위 및 전류 밀도는 투사재에 관계없이 20초간 블라스팅 가공한 시험편에서 가장 낮게 나타났다. 따라서 개발된 장치를 이용한 표면가공방법이 내식성 향상에 효과가 있다.
4. 표면가공(블라스팅, 그라인딩)에 따른 캐비테이션 침식 무게감량과의 관계는 거의 없다.



V. 결 론

소형선박용 고강도 황동합금 프로펠러의 내식성 향상을 위한 기초 연구로서, 선박용 프로펠러 소재인 고강도 황동합금을 기재로 표면에 내식성 재료를 용사한 후 용사피막의 캐비테이션침식 특성과 인장시 용사 코팅층의 파괴거동 특성을 규명하고, 브라스팅 원리를 이용한 부식제거 장치를 개발하여 브라스팅을 통한 프로펠러의 내식성 향상 효과를 규명하였다.

Amdry625, Cr₂O₃, SUS316, Zn, Al를 용사 한 후 3.5% NaCl용액에서 500시간과 1000시간의 침지시킨 시험편을 초음파 발생 캐비테이션 장치를 이용하여 3.5% NaCl용액에서 210분 동안 캐비테이션 침식실험을 통해 내식성 코팅재들의 캐비테이션에 의한 무게 감소와 표면손상을 조사 검토하였다.

Zn, Al, Amdry625를 용사 코팅하여 무 부식 시험편과 3.5% NaCl 용액에서 500시간, 1000시간을 침수 부식시킨 시험편을 음향방출장치를 이용, 인장시험 중 용사 코팅층의 균열과 박리 특성을 고찰하였다.

브라스팅 원리를 적용하여 프로펠러 표면부식 제거장치를 제작하여 프로펠러의 부식제거 및 내식성 향상 성능시험을 실시하고, 그에 따른 프로펠러의 경도 변화, 무게감소량, 표면 거칠기, 부식전위, 캐비테이션침식 특성 등을 고찰하였다.

이상의 실험에서 얻은 결과를 종합하면 다음과 같다.

1. 기재 및 용사 코팅된 시험편의 캐비테이션 침식 실험시간이 증가와 비례하여 무게감소량이 증가하였고, 부식시간이 길수록 캐비테이션에 의한 침식량이 많다.

2. Amdry625, SUS316을 용사 코팅한 시험편은 Al, Zn, Cr2O3 을 용사 코팅한 시험편 보다 부식시간에 관계없이 캐비테이션에 의한 침식량이 적다.

3. 기재와 용사 코팅재 사이에서 소성변형인 균열의 발생과 성장 및 박리의 발생 시기는 인장초기인 변형을 1%~2.5%미만에서 대부분 발생하며, Zn, Al을 용사 코팅한 시험편은 균열발생에 의한 특성을 보이는 반면 Amdry625을 용사 코팅한 시험편은 박리에 의한 특성을 나타낸다.

4. 3.5% NaCl 용액에서 부식시킨 시험편은 부식되지 않은 시험편에 비해 적은 에너지로도 쉽게 균열이나 박리가 발생하는 것으로 판단된다.

5. 3.5% NaCl 용액에서 부식시킨 시험편중에서 Zn, Al을 용사 코팅한 시험편은 희생양극으로서의 기능을 수행하여 기재 표면에서 부식현상을 볼 수 없으나 Amdry625을 용사 코팅한 시험편은 희생양극 기능이 없어 기재표면에 부식 현상이 나타나고 있다.



6. 브라스팅 원리를 적용한 부식제거 장치를 개발하였으며, 성능시험을 행한 결과 소형선박용 프로펠러의 부식 제거, 경도, 표면 거칠기에 양호한 효과를 얻었다.

7. 브라스팅 처리한 시험편이 그라인딩 처리한 시험편 보다 부식 전위가 낮게 나타나므로 개발된 장치를 이용한 표면 가공방법이 내식성 향상에 효과가 있음을 알 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] 황재호, 임우조, 정기철(1997). “연강의 캐비테이션 침식-부식 특성에 관한 연구(3)”, 한국어업기술학회지, 제33권, 제3호, pp. 202-208.
- [2] 이진열, 임우조, 오인호(1994). “해상용 원심펌프 임펠러의 침식억제법으로 음극방식 및 재료개발에 관한 기초연구(2)”, pp. 92-100.
- [3] 김기주, 김용규(1994). “유사해수에서 동합금강의 부식특성에 관한 연구”, 한국부식학회지, 제23권, 제3호, pp. 194-202.
- [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, 제30권, 제6호, pp. 342-347.
- [7] 성진경, 이상하(1996). “방식용 열용사코팅의 해수 부식 특성 평가”, RIST 연구논문, 제10권, 제4호, pp. 447-462.
- [8] M.G Talk and G.Moreton(1981) “Proc. ASME Symp. Cavitation Erosion Fluid system”, pp. 139.

- [9] 鄭熙敦, 1994, “音響放出法の 工學的 利用을 위한 基礎”, 大韓機械學會誌, 제34권, 제1호, pp. 21-29.
- [10] R.H. Unger(1987). ASM international, pp. 399.
- [11] R.A. Sulit, S.L.Kullerd, and F. West, Procs(1987). ASM international, pp. 241.
- [12] B.A. Shaw and A.G.S. Morton, Pprocs(1989). ASM international, pp. 385.
- [13] 윤동진, 1997, “음향방출을 이용한 구조물진단기술”, 대한기계학회지, 제22권, 6호, pp. 47-53
- [14] 김태복, 강신열, 왕덕현, 김원일, 이윤경, 1996, “CNC선반에서 연속절삭 및 단속 절삭시 공구손상에 대한 음향방출신호 특성 연구”, 제13권, 제14호, pp. 136-142.
- [15] 金貴植 外, 2001, “플라즈마용사 세라믹코팅 피막부식재의 音響 放出 特性”, 한국해양공학회지 제15권 제3호, pp. 69-74.
- [16] 김귀식, 1998, “플라즈마용사에 의한 세라믹 코팅 강재의 음향방출 특성”, 한국동력기계공학회지, Vol.2, No.3, pp. 49-54

- [17] 정재현, 석창성, 김영진, 1997, “음향방출을 이용한 회전마찰제의 마찰특성 및 안정성 해석”, 대한기계학회논문집(A), 제21권, 제4호, pp. 555-565.
- [18] 松山 晃, 西矢 豊就, 慌木 猛, 今田 忠志, 2001, “船体および推進器の汚損が推進性能にえる影響”, 長崎大學水産學部研究報告, 82, pp. 111-118.
- [19] Fukuda, K. Ishizawa, M. Kimura, A. Umino, T. Nakano, I. and Kurose, Y. 1975, “Protection Method for Corrosion on Manganese Bronze Propellers”, The Journal of M.E.S.J, Vol. 10, No. 10, pp. 836-843.
- [20] Batis, G. Kouloumbi, N. and Soulis, E. 1998, “Sandblasting: The Only Way to Eliminate Rust?”, Anti-corrosion Methods and Materials, Vol 45, No. 4, pp. 222-226.
- [21] Andronikos, G. Valiadis, and P. Vassiliou, P. 1998, “The Effect of Blasting Materials on The Corrosion of Protected Steel in Sea Water”, Anti-corrosion Methods and Materials, Vol 45, No 3, pp. 153-156.
- [22] Javaherdashti, R. 2000, How corrosion affect industry and life, Anti-Corrosion Methods and Materials, Vol. 47, No. 1, pp. 30-33.
- [23] 이성철, “플라즈마 용사 세라믹 코팅 강재의 피로균열 성장 특성” 제주대학교 석사학위논문, 1993.
- [24] 김성익, “Ceramic 용사재의 마모특성” 제주대학교 석사학위논문, 1996.

- [25] 이봉길, “Cr₂O₃와 ZrO₂ 세라믹 용사 코팅재의 마모 특성” 제주대학교 석사 학위논문, 2004.
- [26] 오맹중, 오창배, 김귀식, 1998, “세라믹 용사된 S45C 강재의 기계적 특성 및 피로강도”, 한국해양공학회지, 제12권, 제1호, pp. 32-38
- [27] M.S.Plesset and R.B.Chapman(1970). Report No.85-09, Office of Naval Research.
- [28] “Annual Book of ASTM Standard(1989). 03:02 Wear and Erosion : Metal Erosion, G32-85”, ASTM, pp. 115~119.
- [29] 山本洋一(1989). 産業調査會, pp. 74,79.
- [30] 나종주, 이구현, 이상호, 1997, “상압 플라즈마의 응용 현황”, 기계와 재료, 9권, 4호, pp. 100-117
- [32] 민경오, 이창희, 1998, 안수분위기에서의 내부식 용사 코팅 기초, 한국용사 기술 협회, pp. 1-17
- [33] Frederic Ferrerd 外, 2002, Acoustic emission study of active - passive transition during carbon steel erosion, corrosion science 44, pp. 1529-1540.

- [34] 李鍾樂 · 林祐助, 1996, “酸化物被覆鋼材의 密着性과 耐蝕性에 關한 研究”, 韓國漁業技術學會誌, 32, pp. 157-162.
- [35] 정성균, 김태형(2003). “Al7075-T6의 최적 쇼트피닝 조건에 관한 연구”, 한국항공우주학회지, 제31권, 제7호, pp. 63-68.
- [36] Roy, N. and Jeff, S. 1997, “Abrasive Blasting”, U.S.Environmental Protection Agency Office of Air Quality Planning and Standards Emission Factor and Inventory Group
- [37] “부식(腐蝕) 시험법”, 한국표준과학연구원 내구성 연구그룹
- [38] Al-Kharafi, F. M, Ateya. B. G and Abd-Allah, R. M. 2004, “Selective Dissolution of Brass in Salt Water”, Journal of Applied Electrochemistry, Vol. 34, pp. 47-53.

