

碩士學位論文

음향방출법에 의한  
용사코팅 부식재의 박리 해석



機械에너지工學科

孫 昌 煥

2003年

碩士學位論文

음향방출법에 의한  
용사코팅 부식재의 박리 해석

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

孫 昌 煥

2 0 0 3 年

음향방출법에 의한  
용사코팅 부식재의 박리 해석

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 12月 日

濟州大學校 産業大學院



孫 昌 煥

孫昌煥의 工學 碩士學位 論文을 認准함

2003 年 12月 日

審査委員長 \_\_\_\_\_ 印


委 員 \_\_\_\_\_ 印

委 員 \_\_\_\_\_ 印

Exfoliation Analysis on Corroded Thermal  
Sprayed Coating Materials  
by Acoustic Emission

Chang-Hwan Shon

(Supervised by professor Gui-Shik Kim)

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

DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING  
GRADUATE SCHOOL  
CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

DECEMBER 2003

# 목 차

SUMMARY .....	1
I. 서 론 .....	3
II. 재료 및 방법 .....	6
2.1 실험재료 .....	6
2.2 실험장치 및 방법 .....	9
2.2.1 용사장치 .....	9
2.2.2 염수 침수실험 .....	9
2.2.3 인장시험 및 음향방출 측정 .....	9
III. 실험결과 및 고찰 .....	14
3.1 용사 시험편의 인장에 따른 음향방출 특성 .....	14
3.1.1 용사 시험편의 음향방출 발생거동 .....	14
3.1.2 용사 시험편의 표면 관찰 및 파괴기구 .....	20
3.2 염수침수 시간에 따른 시험편의 인장시험시 음향방출특성 .....	25
3.2.1 염수부식에 따른 Zn 코팅재의 음향방출특성 .....	25
3.2.2 염수부식에 따른 Zn 코팅재의 파단면 관찰 및 파괴기구 .....	28
3.2.3 염수부식에 따른 Al 코팅재의 음향방출특성 .....	31
3.2.4 염수부식에 따른 Al 코팅재의 파단면 관찰 및 파괴기구 .....	34
3.2.5 염수부식에 따른 Amdry 코팅재의 음향방출특성 .....	37
3.2.6 염수부식에 따른 Amdry 코팅재의 파단면 관찰 및 파괴기구 .....	40
IV. 결 론 .....	43
참 고 문 헌 .....	44

## SUMMARY

This paper is to investigate the adhesiveness between substrate and coating layer and the effect of corrosion by acoustic emission method in tensile loading. The used powders are Zn and Al. There are coated on brass alloy substrate, respectively. AE signals of Zn and Al coating layer increase drastically in strain 2%. but that of Zn specimen have more than that of Al specimen. When the specimens executed under 3.5% NaCl solution for 500 hours, the salt solution penetrated into the surface of the substrate through pore of the coating layer. Corrosion production formed on the surface of substrate. the adhesiveness between coating layers is weakened by the polarization and corrosion itself. The AE events, count and energy of corroded coating specimens decreased in comparison with specimens without corrosion.

The results are summarized as follows :

1. In the tensile tests, the times that it took for the cracks and exfoliations between the surface of the substrates and the thermal spray coatings to start and develop were different according to the thermal-sprayed materials, Zn, Al, and Amdry625. These phenomena were obvious at the strain rate 1 to 5% and few available data were found after the stage.

2. The specimens with Zn and Al showed the characteristics of cracking, while those with Amdry625 showed of exfoliating. It was judged that the thermal spray coatings on the specimen with Zn and Al have the cracks according to the changes of the tensile strength applied on the substrates, while those with Amdry625 have the exfoliations as a result of being adapted little to the tensile strength.

3. The anti-erosion specimens showed that the adhesive properties between the substrate and the thermal spray coating are strong in the order of Al, Zn, and Amdry, and erosion specimens showed that they are cracked or exfoliated easily even by the small energy in all the 3 cases because they have the comparatively weaker adhesive property.

4. Among the three immersed specimens, those with Zn and Al showed no corrosion phenomena on the surface of the substrates because they had the function of sacrifice anode, but that with Amdry625 showed the corrosion because it did not have that function.

## I. 서 론

공업의 발전과 더불어 기계설비, 선박 및 해양 구조물 등은 높은 강도와 고속 및 대형화되는 추세이고 이들을 구성하는 기계요소의 사용 환경도 점점 가혹한 환경으로 변하고 있다.

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

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

이런 부식들을 방지하기 위하여 금속의 표면에 내식성이 큰 재료를 피복하여 부식에 대한 저항성을 증가시키는 방법이 이용되고 있다. 이는 피복 재료에 따라서 금속, 유기물 및 세라믹으로 구분할 수 있으며 금속 피복방법은 내식성이 있는 금속을 분사하거나 전기 도금 또는 Cladding시키는 방법인데 피복 금속은 주로 Ni, Cr, Zn, Pb, Sn, Al 등을 사용한다. 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 많은 경우에는 사용에 어려움이 있다.<sup>[1]</sup> 그래서 현재는 더욱 내마모성이 강한 테프론이나 폴리에틸렌 등으로 피복하는 경향이 있다. 세라믹 코팅법은 유리나 도기 등을 금속 표면에 피복하는 방법으로 세라믹의 우수한 내마모성과 내열성을 이용하는 방법이다. 그러나 이 방법은 매우 가격이 비싼 편이어서 해수 설비에는 극히 일부만이 도입되고 있다.

방식용 코팅에 많이 사용되는 재료는 알루미늄, 아연 및 알루미늄-아연 합금이며, 분말 및 선재의 형태로 상용화되어 있다. 알루미늄 및 아연이 사용되는 이유는 철에 비해 전위가 낮아 부식환경 차단 효과뿐만 아니라 음극방식 효과까지 나타내기 때문이다.<sup>[2]</sup> 특히 용사코팅 후에 존재하는 기공 때문에 모재가 부식환경에 노출돼 부식될 수도 있으므로 음극방식효과는 필수적이라 할 수 있다. 용사코팅이 방식용으로 적용된 초기에는 주로 아연으로 코팅을 실시하였는데 그 이유는 낮은 용점의 아연은 가공도가 낮고 음극방식효과도 뛰어났으며 비용도 또한 비교적 저렴하다는 장점이 있었기 때문이다.<sup>[3]</sup>

알루미늄은 아연에 비하여 해양방식에 더 뛰어나다고 알려져 있었으나 용사코팅 특성이 나빠 그 적용범위가 제한적이었다. 알루미늄은 용사 코팅 시 액체금속의 유동도가 낮고 기공도는 높으며 또한 접착강도가 낮아 초기에는 그 사용범위가 적을 수밖에 없었다. 그래서 접착강도를 증가시키는 방법으로 보다 엄격한 표면 전 처리법(blasting)이 제시되었다. 그러나 최근 electric arc spray법이 등장하면서 이제 접착강도는 더 이상 문제가 되지 않고 있다.<sup>[4]</sup>

또한 기공도는 공정 및 건(gun)의 개발로 향상되었으며 특히 방수제를 이용하여 기공을 메우면 부식환경 차단효과를 크게 향상시킬 수 있다.<sup>[5]</sup>

한편 알루미늄의 장점인 낮은 부식속도와 아연의 장점인 건전한 코팅 층을 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.<sup>[6]</sup>

용사코팅에 의한 피복은 코팅층이 모재와 밀착성이 우수해야 하고, 방식 효과도 좋아야하며, 가격이 다른 용사금속 분말에 비해 저렴하여야 한다.

모재와의 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.<sup>[7]</sup> 대부분의 검사방법은 정



지 중에 시행하는 방법이지만, 음향 방출 시험은 가동상태를 유지하면서 검사할 수 있으며, 또한 금속간의 결함이나 마찰의 직접적인 원인에 근거한 신호를 감지하고 분석하며 상대적으로 원하는 부위에 센서를 부착만 하면 설비에는 전혀 영향을 주지 않는다는 장점을 가지고 있다.<sup>[8]</sup> 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 발생하는 것으로 알려져 있다.<sup>[9]</sup> 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. 그 후 AE에 대한 연구는 이론적 기구를 규명하고, 재료의 거동에 대하여 활발한 연구가 이루어져 왔다.<sup>[10]</sup>

본 연구에서는 용사코팅에 대한 선박 스크류프로펠라의 부식방지를 목적으로 어선용 스크류프로펠라 소재인 고강도 황동합금에 Al, Zn, Amdry625를 코팅하여 3.5% NaCl 수용액에 침지부식한 후 인장하중 부가시 코팅층의 균열 박리 현상을 AE방법에 의해서 조사·검토하였다.

## II. 재료 및 방법

### 2.1 실험재료

실험에 사용된 시험편의 기재(substrate)로는 Cu-Zn 황동 합금을 사용하였으며 기재의 화학 성분은 Table 1 에, 시험편 형상 및 치수는 Fig. 1에 나타났다. 코팅에 앞서 전 처리로서 기재의 표면을 Table 2의 조건으로 블라스팅(blasting)을 실시한 후, 초음파세척기에서 초음파 세척을 약 15분 동안 실시하였다. 코팅은 플라즈마 용사장치를 이용하였으며 Table 3의 조건으로 실시하였다.

코팅재료는 Al과 Zn은 와이어를 Amdry625는 분말을 사용하였다. 코팅층의 두께는 약 200 $\mu$ m로 하여 아래에 나타낸 4종류의 시험편을 제작하였다.

Sub : 황동 기재

Zn : 기재에 Zn을 코팅한 시험편

Al : 기재에 Al을 코팅한 시험편

Amdry : 기재에 Amdry625를 코팅한 시험편

이들 시험편은 염수 침수 전의 시험편과 염수침수를 500시간, 1000시간 부식을 시킨 시험편으로 구분하여 시험했으며 표기는 시험편 앞에 기재하였다.

(예 : 염수침수 전의 Zn시험편은 Zn으로, 500시간을 염수침수 부식시킨 Zn시험편은 500Zn으로, 1000시간을 염수침식 부식시킨 시험편은 1000Zn으로 표기하였다.)

Table 1. Chemical composition of substrate (wt %)

Cu	Zn	Sn	Ni	Fe	Mn	Al
55.3	42.3	0.4	0.1	0.7	0.5	0.5

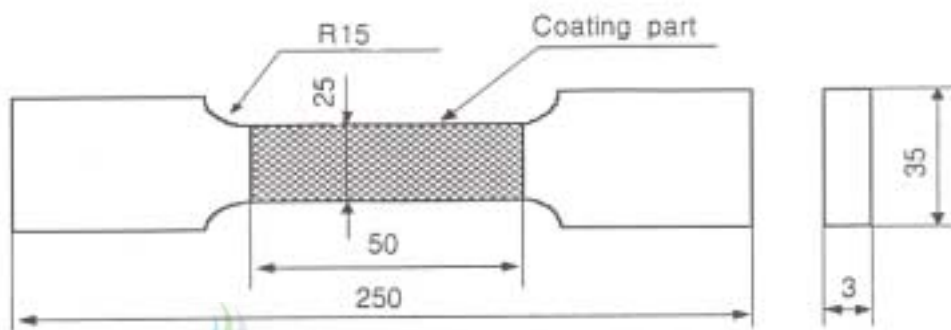


Fig. 1 The shape and dimension of test specimen ( unit : mm )

Table 2. Blasting condition

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

Table 3 Plasma spraying conditions

(a) Zn

Coating Method	Coating System	Wire	Wire Size	Volts [V]	Amps	Output (Lbs/Hr)	Spray Dist(m/m)
Arc Spray	PRAXAIR BP400	Zn	1.6Φ	26	240	50	250

(b) Al

Coating Method	Coating system	Wire	Air Cap	Wire Size	Lighting Pressure(PSI)			Flow Meter Reading(PSI)			Output (Lbs/Hr)	Spray Dist (m/m)
					Oxy	Acety	Air	Oxy	Acety	Air		
Flame Spray	Metco 14E	Al	EC	3.2Φ	30	15	70	45	42	53	45	200



(c) Amdry625

Coating Method	Coating System	Powder	Nozzle	Gas Pressure (PSI)		Gas Flow (PSI)		Set Amps	Volts [V]	Spray Dist m/m	Spray Rate (g/min)
				Ar	H2	Ar	H2				
Plasma	Metco 9MC	Amdry 625	732B	75	50	49	10	510	68	100	53

## 2.2 실험장치 및 방법

### 2.2.1 용사장치

실험에 사용된 플라즈마 용사장치(Metco Inc.)의 계통도를 Fig. 2에 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 플라즈마 용사장치는 Power Supply Unit, Plasma spray control unit, Powder feeder, Heat exchanger 및 Plasma gun 등으로 구성되어 있으며, 음극과 양극사이에 전기를 통하고 여기에 수소 및 아르곤가스를 통과시키면 가스는 가열과 분해에 의해 팽창되고 이온화를 일으켜 노즐 선단부에서 발생하는 고온(약16,500℃)에 분말상의 재료가 플라즈마 속에서 녹으면서 고속(650m/min)으로 분사되어 기재에 적층시키는 장치이고, 전기아크용사장치는 전기아크열로 1.6mm 붓을 용융 분사 적층시키며, 화염용사장치는 가스불꽃을 이용해서 붓을 용융 분사 적층시킨다.

### 2.2.2 염수부식실험

부식환경 하에서 코팅재의 음향방출 특성 및 부식특성을 조사하기 위하여 염수 부식 시험을 행하였다. 부식수조는 폴리에틸렌 수지로 된 10ℓ 용기를 제작하였으며 해수와 유사한 조건을 만족시키기 위해서 3.5% NaCl 용액에서 500시간과 1000시간 침전시켰고 NaCl 수용액은 72시간마다 교체했다.

### 2.2.3 인장시험 및 음향방출 측정

플라즈마 용사장치를 이용한 용사 코팅 시험편의 부식시간에 따른 음향방출특성을 조사하기 위하여 Fig. 4에 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. 5는 음향방출 측정원리를, Fig. 6는 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.

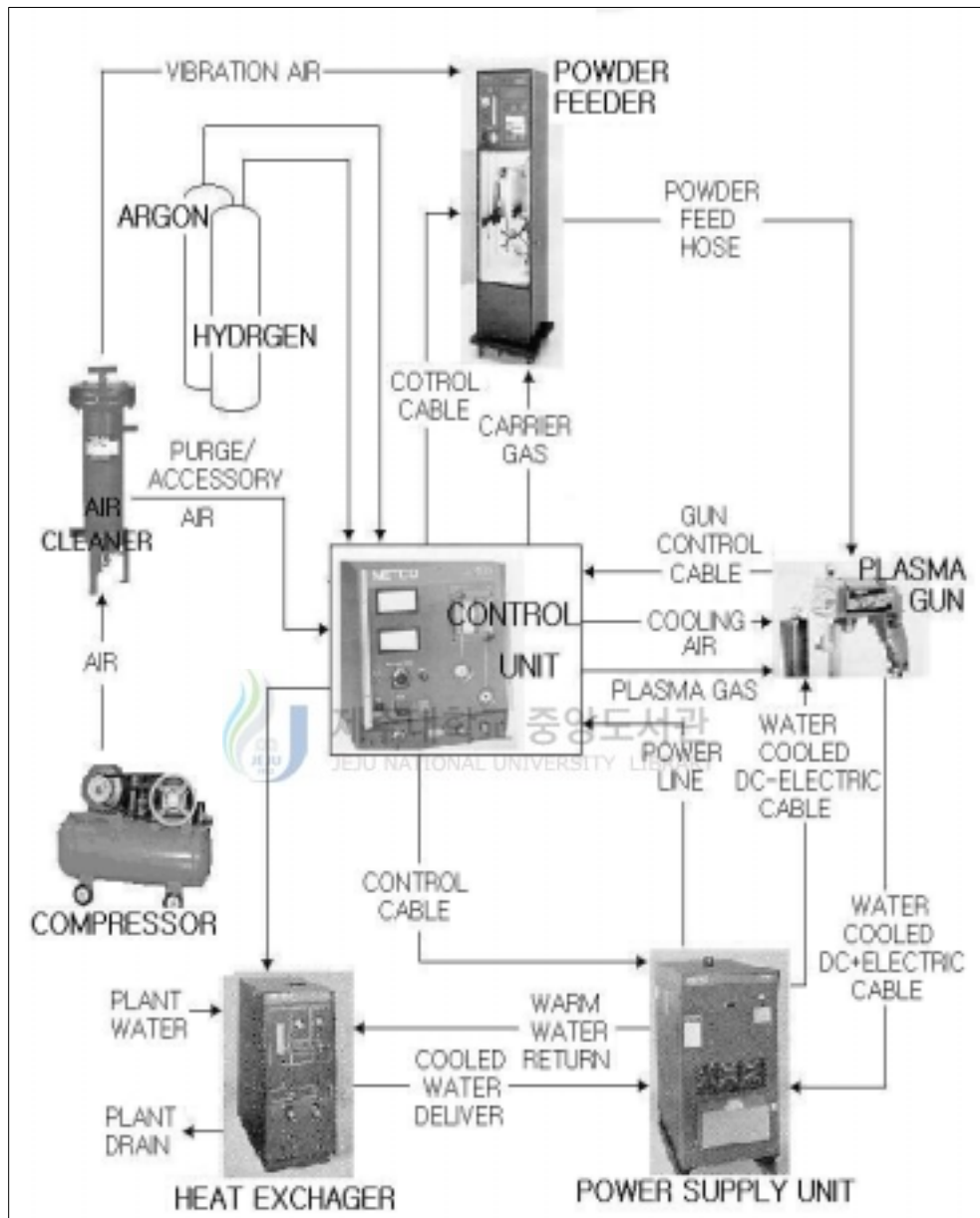


Fig. 2 Plasma spray system

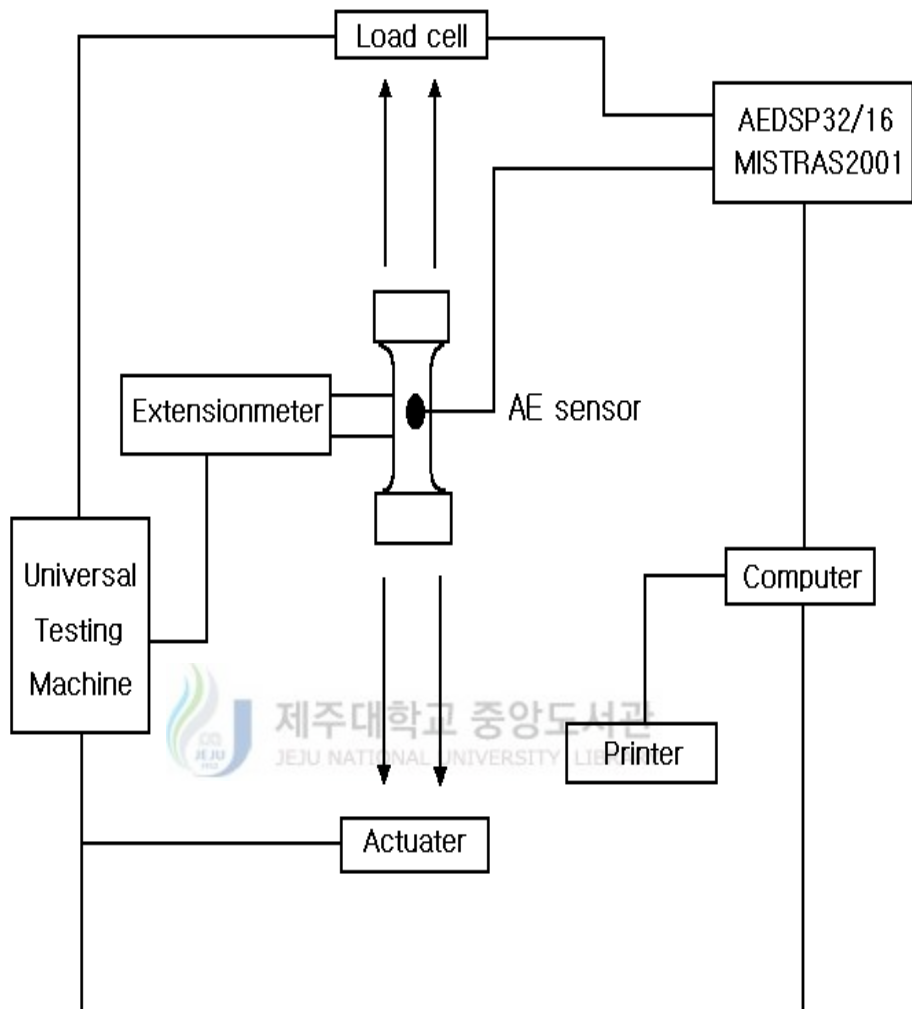


Fig.3 Schematic diagram of tensile and AE test

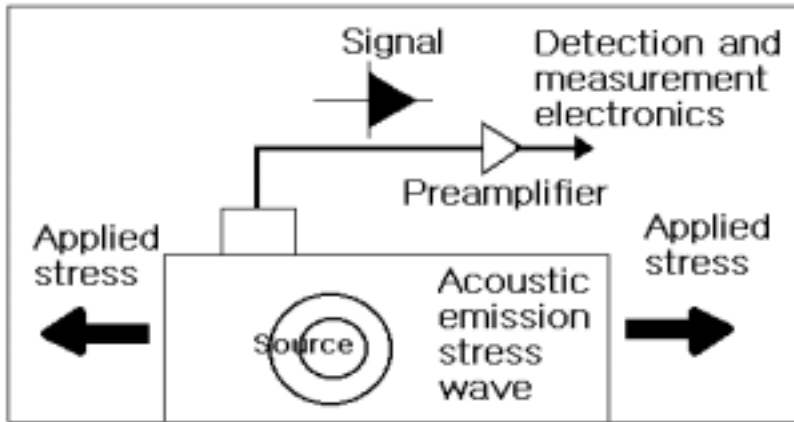


Fig. 4 Basic principle of AE method

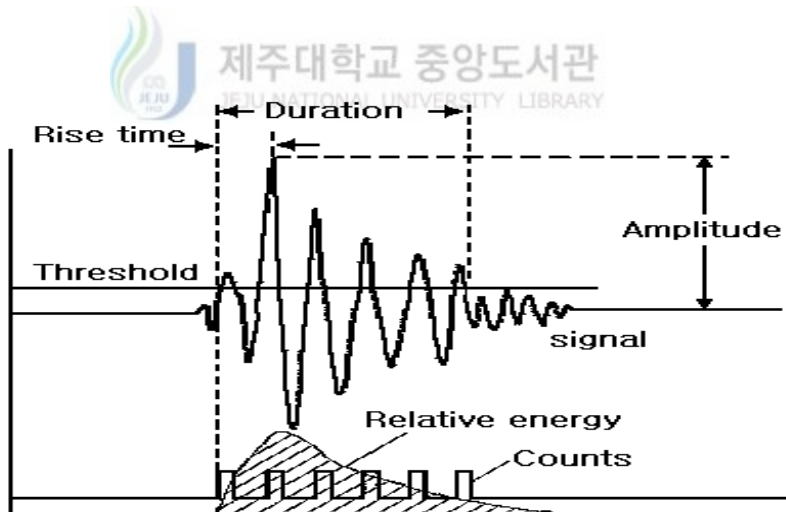


Fig. 5 Schematic AE signals corresponding to one AE Event



### Ⅲ. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 용사 코팅재의 인장에 따른 음향방출 특성

##### 3.1.1 용사 코팅재의 음향방출 발생거동

Sub시험편, Zn시험편, Al시험편 및 Amdry시험편에 대한 AE 사상수와 응력-변형률 곡선과의 관계를 Fig. 6에, 누적 AE 계수, 누적 AE 에너지와 응력-변형률 곡선과의 관계를 Fig. 7에 나타내었다.

Fig. 6에 나타난 바와 같이 모든 시험편의 응력-변형률 곡선은 거의 동일하게 나타나고 있어 용사열에 의한 기재의 변형은 거의 없음을 나타낸다. 또한 음향방출은 Zn시험편, Al시험편, Amdry시험편, Sub시험편의 순으로 활발하게 일어나고 있음을 알 수 있다. 이와 같이 용사피막을 가진 코팅재가 Sub시험편에 비해 활발한 음향방출을 발생하는 것은 Sub시험편에는 없는 음향방출원 즉, 용사피막 내에서 박리의 생성, 성장 및 탈락이나 균열의 발생 성장 등 소성변형에 의해 Sub시험편과는 다른 양상의 음향방출이 일어난다는 것을 알 수 있다.

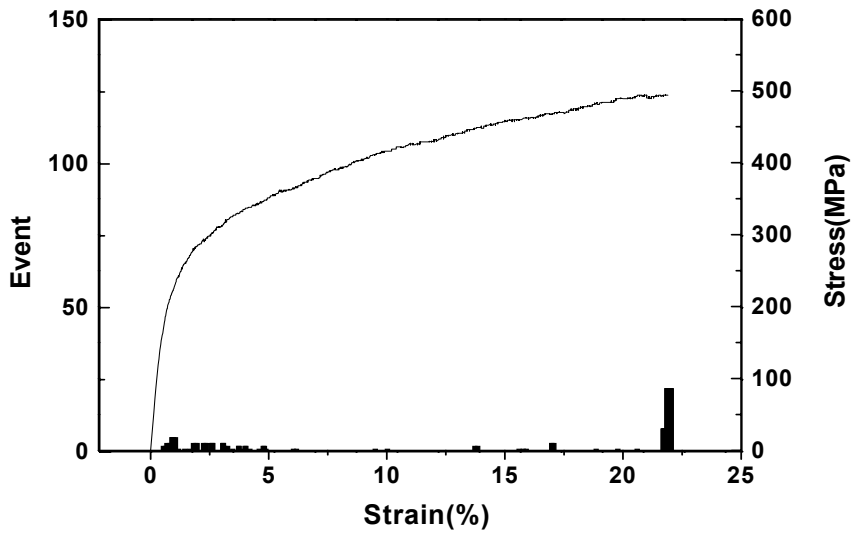
Fig. 6에서 AE 사상수 특성을 살펴보면 Sub시험편의 경우 응력-변형률의 증가에도 불구하고 용사 코팅재에 비해 적게 나타나고 있고, Zn시험편과 Al시험편의 경우는 응력이 증가함에 따라 변형률 2%이내에서 AE 사상수가 급격히 증가하고 있음을 보이고 있다. Amdry시험편의 경우는 응력이 증가함에 따라 변형률 2%까지 급격한 발생을 하다가 그 후에도 양은 줄었지만 8%까지 꾸준히 AE 사상수가 발생하고 있는 양상을 보이고 있고 변형률 8%이후에서는 AE 사상수가 간헐적으로 나타나다가 과단에 이르고 있음을 보여주고 있다.

또한 전체적으로 Zn시험편의 AE 사상수는 변형률 2%이내에서 Al시험편 보다 약 2배정도 많게 나타나고 있다. 이는 Al용사코팅재가 Zn용사코팅재 보다 연신율이 크기 때문에 변형률에 따른 용사코팅재의 균열의 생성, 성장이 적게 나타나는 것으로 사료된다.

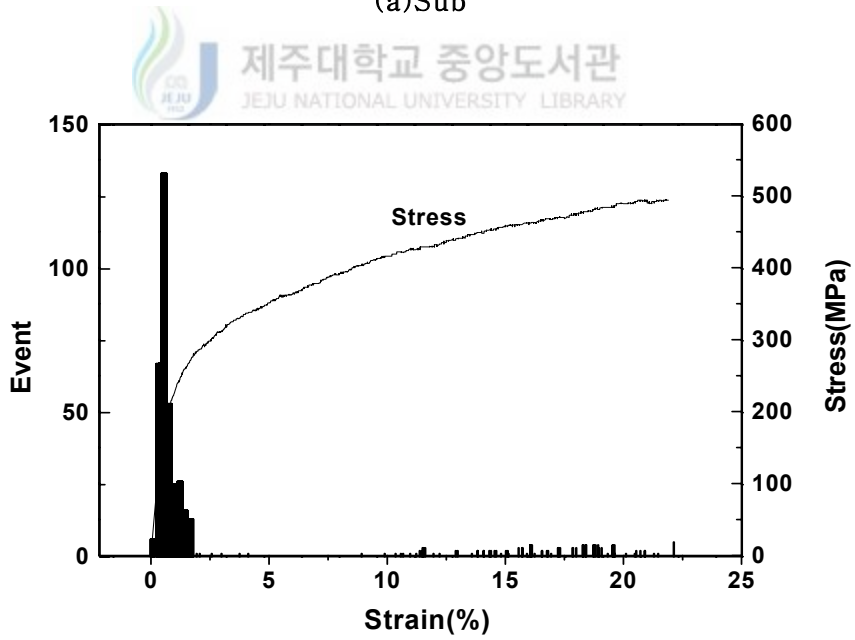
Amdry시험편은 AE 사상수가 변형률 1%~8%사이 구간에서 음향방출 사상수가 밀집해 있으며, 그 이후의 구간에서는 밀집현상이 없음을 보여주고 있다. 이는 Amdry 용사코팅 시험편은 AE 사상수가 급격히 증가하는 구간에서 기재(Sub)와

용사층의 열팽창계수 차이로 인해 많은 에너지가 축적되고, 그 결과 기재와 용사층 사이에서 박리가 발생하며 또한 용사재 자체의 균열이나 파단이 일어나고 있다고 판단된다

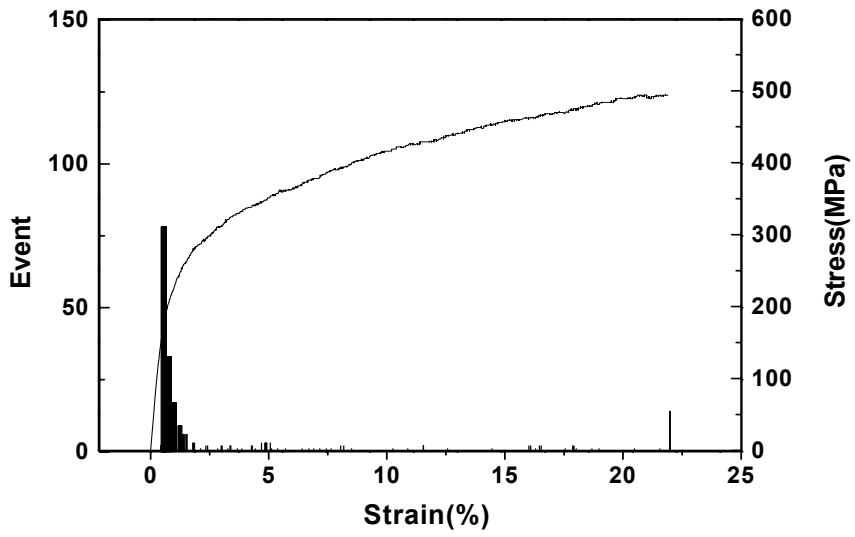
Fig. 7에 나타난 바와 같이 누적량 AE 계수와 누적량 AE 에너지 특성은 전술한 AE 사상수 특성과 마찬가지로 용사피막의 균열이나 박리가 발생하는 구간에서 급격히 증가하며, 코팅재에 인장력이 작용시 그 에너지는 AE 사상수가 Sub시험편에 비해 급격히 증가하는 구간에서 기재와 용사피막에 축적되고, 그 에너지가 기재와 용사피막에서 축적한계를 넘어서게 되면 방출된다.<sup>[11]</sup> 결과적으로 기재와 용사피막 사이에서 혹은 용사피막 내부에서 균열이나 박리의 발생, 성장 및 탈락이 일어나고 있음을 알 수 있으며, AE 계수 및 에너지의 총량은 Zn시험편, Al시험편, Amdry시험편, Sub시험편 순으로 높게 나타나고 있다.



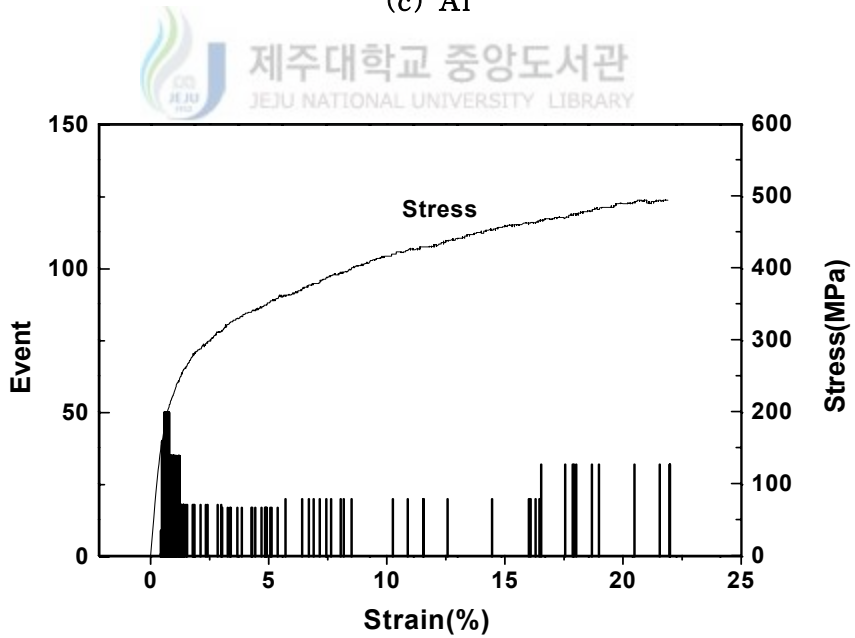
(a)Sub



(b) Zn

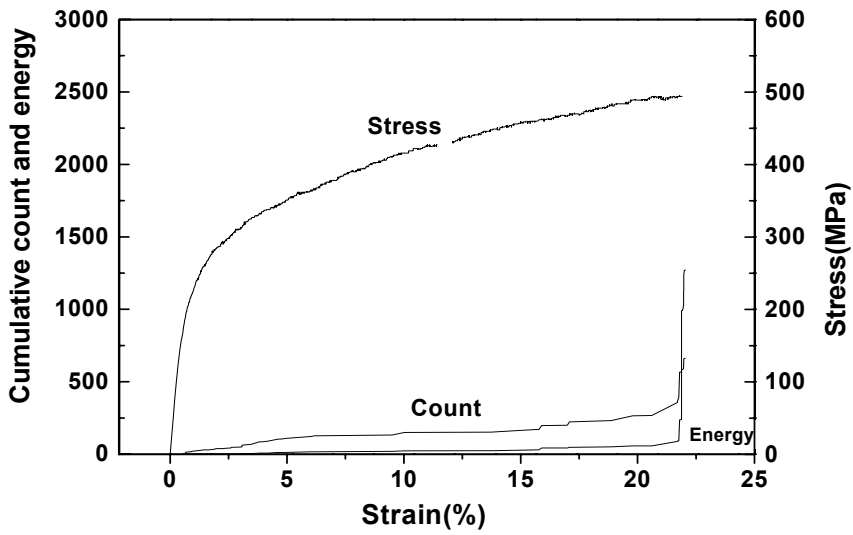


(c) Al

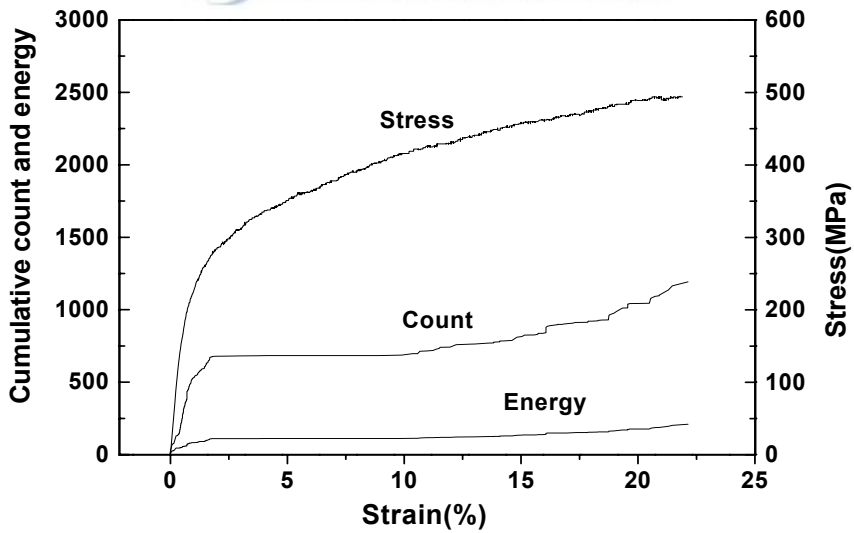
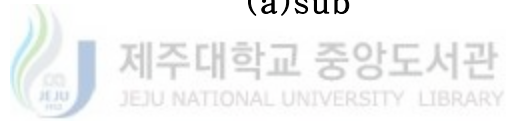


(d) Amdry

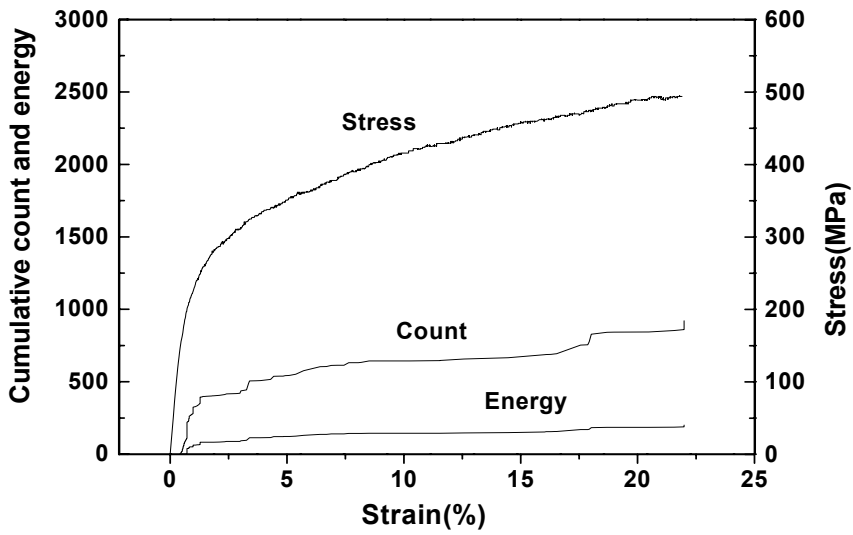
Fig. 6 Stress and event vs. strain



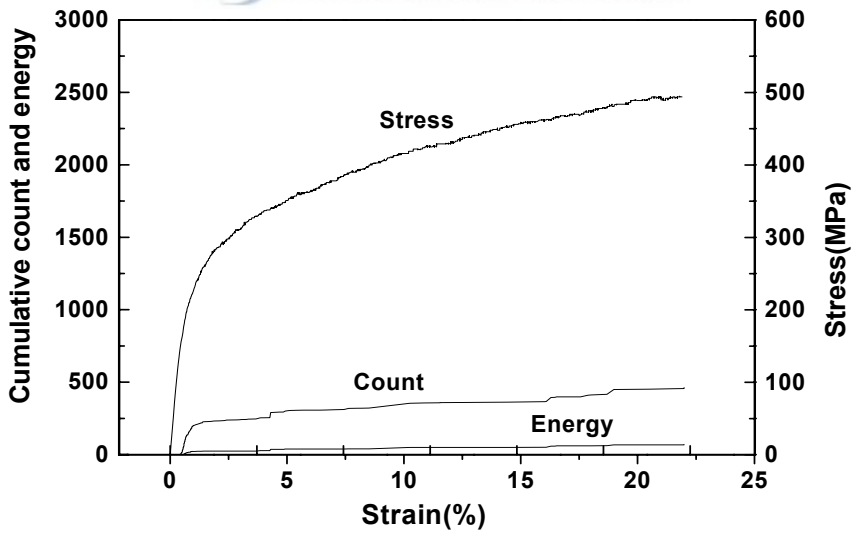
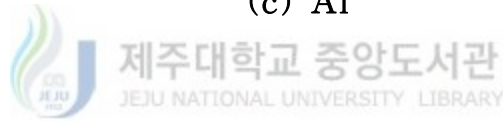
(a)sub



(b) Zn



(c) Al



(d) Amdry

Fig. 7 Cumulative count and energy vs. strain

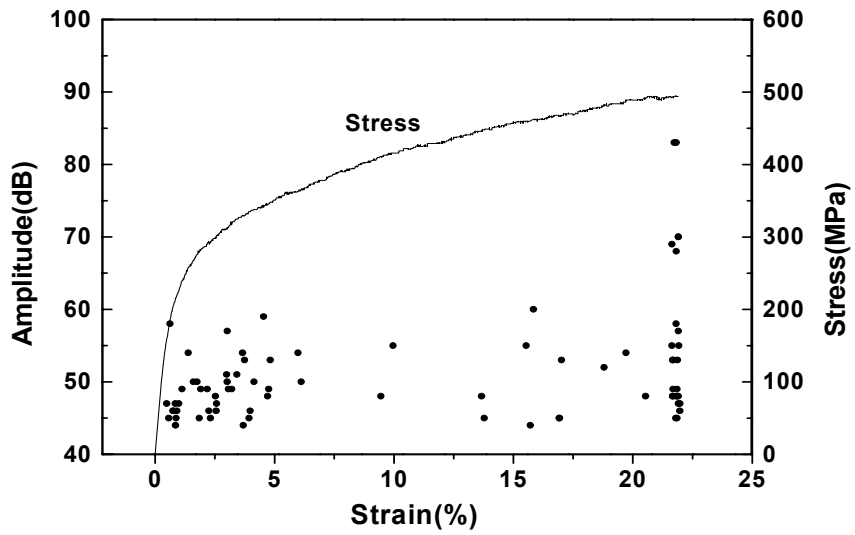
### 3.1.2 용사 코팅층의 표면 관찰 및 파괴과정

음향방출 진폭과 응력-변형율과의 관계를 Fig. 8에, 인장시험 전 사진과 시험 후의 파단사진을 Fig. 9에 각각 나타내었다. Fig. 8에서 진폭 값은 Threshold 값을 45dB로 설정하였으므로 Threshold 값 이상의 신호만이 나타나게 된다.

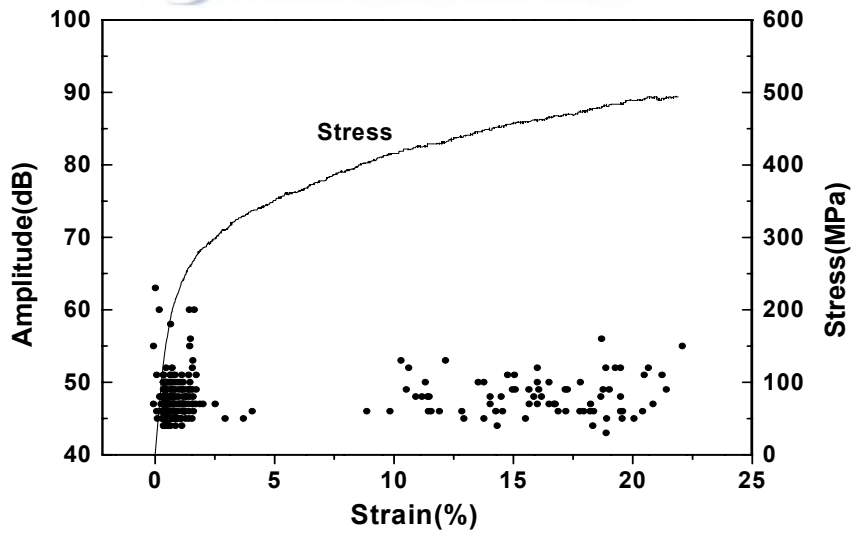
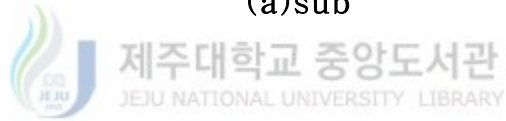
Fig. 8에서 AE 진폭 특성은 전술한 AE 사상수, 누적량 AE 계수와 누적량 AE 에너지 특성과 비슷한 균열이나 박리가 발생하는 구간에서 증가하고 있음을 알 수 있다. 한편, Sub시험편의 경우 대부분 약 60dB 이하의 AE 진폭이 완만하게 발생하고 있으나 Zn시험편의 경우는 기재와 용사피막사이의 균열이나 박리로 추정되는 구간인 변형율 2%이내에서 음향방출이 활발하게 발생하다가 그 이후는 거의 Sub시험편과 비슷한 음향방출을 보여주고 있다. 즉, 변형율 2%이내의 구간은 용사층 내부나 용사층과 기재사이에 소성변형인 균열이나 박리가 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. 9(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. Al시험편은 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 소성변형이 발생하고 변형율 7%이후에서는 용사재의 연신을 및 기재와의 밀착성 등으로 인해 발생한 균열이 그 부분에서 성장하고 있는 것으로 사료된다. 이 결과는 Fig. 9(b)의 파단된 Al시험편 사진에 잘 나타나고 있다. 용사층은 파괴시 충격에도 불구하고 기재와 밀착되어 있으며, 기재와 용사층 사이의 박리나 균열도 Zn시험편에 비해 심하지 않으며, 이것은 Al이 Zn보다 변형율이 높기 때문이다.<sup>[12]</sup> Amdry시험편의 경우는 시험 시작 후 2% 이내에서 많은 음향방출이 발생하고 있음을 보이고 있다. 이는 Amdry 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. 9(c) 사진을 관찰해보면 용사피막은 기재로부터 완전히 분리되어서 탈락되어 있음 알 수 있다.

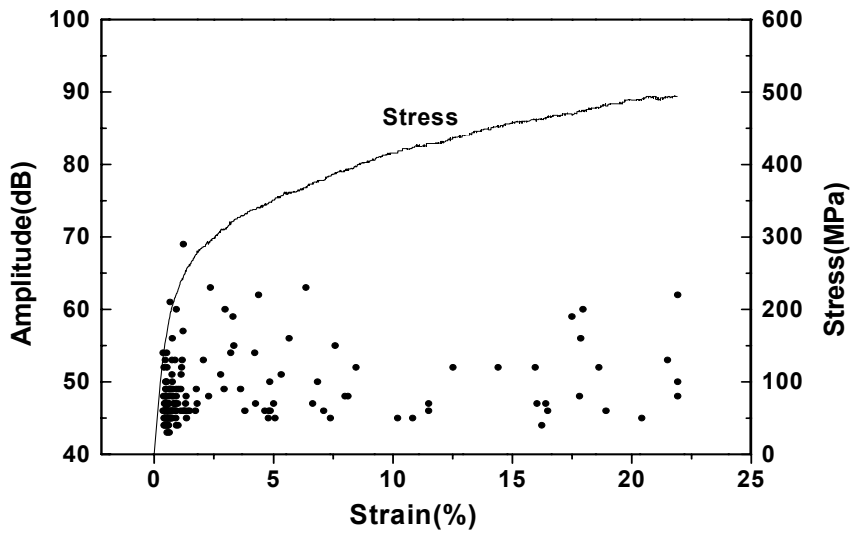




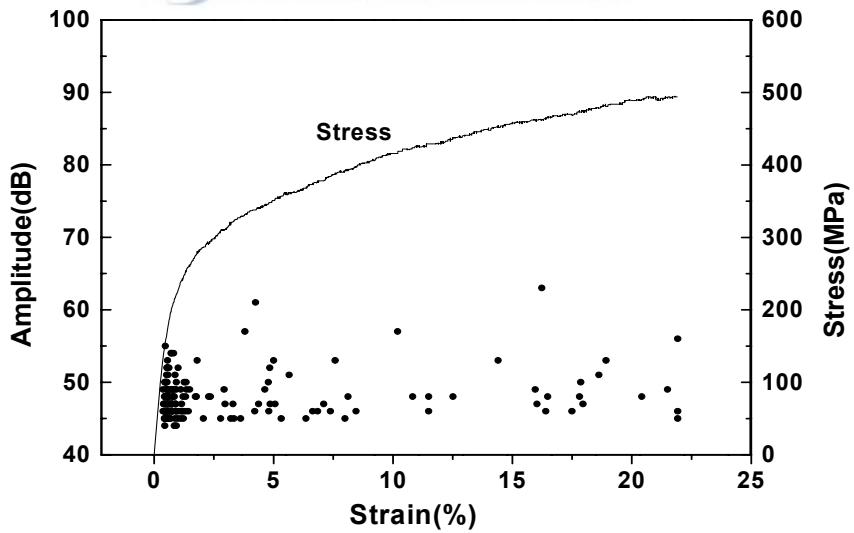
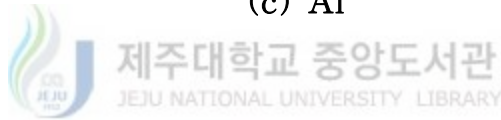
(a) sub



(b) Zn



(c) Al



(d) Amdry

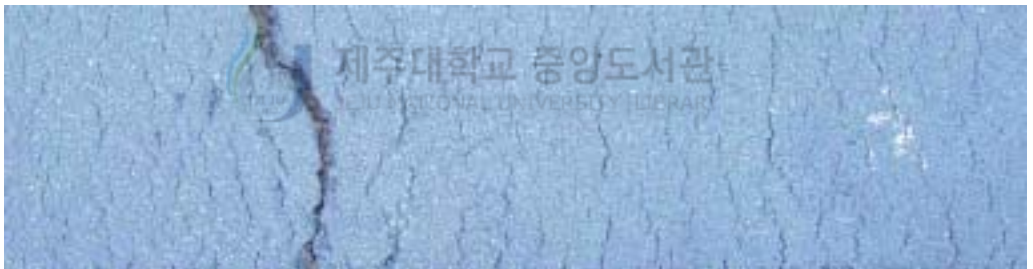
Fig. 8 Stress and amplitude vs. strain



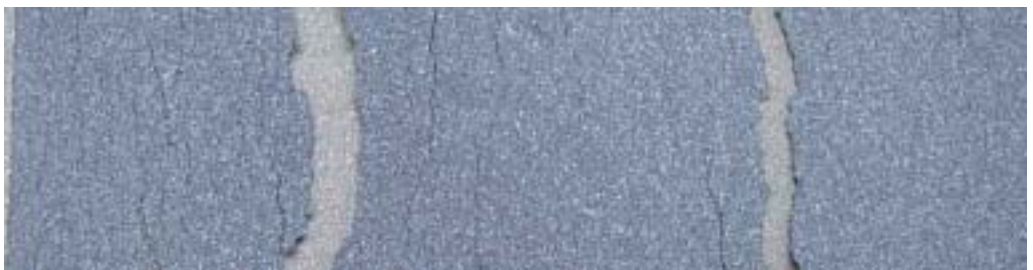
(Sub)



(a) Zn



(b) Al



(c) Amdry

← Load direction →

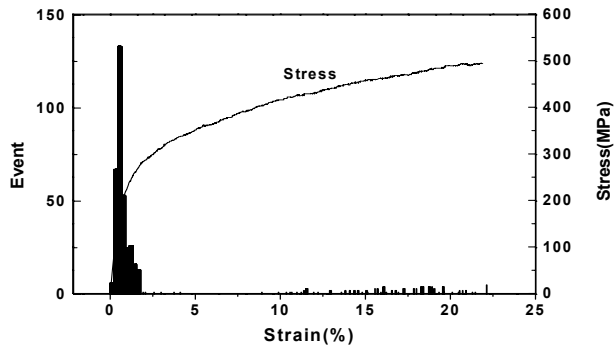
Fig. 9 Surface crack layer after tensile testing

### 3.2 염수 침수 시간에 따른 시험편 인장시험 시 음향방출 특성

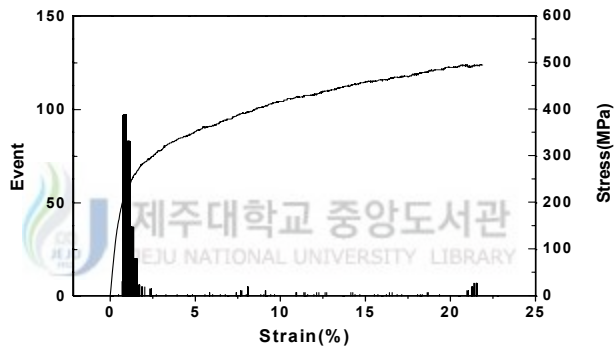
침수 부식 시험은 전술한 바와 같이 3.5% NaCl 수용액에 Zn시험편, Al시험편, Amdry시험편을 각각 500시간과 1000시간을 침수시킨 후 초음파 세척기에서 세척 건조하여 인장시험을 하였으며, 인장시험시 응력-변형 특성과 함께 음향방출 특성을 조사·검토하였다.

#### 3.2.1 염수 침수 부식에 따른 Zn시험편의 음향방출 특성

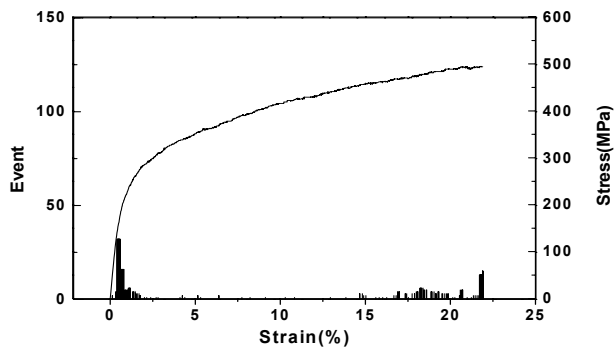
용사 후 부식시험을 하지 않은 시험편과 500시간을 침수부식한 시험편, 1000시간을 부식한 Zn시험편에 대해 각각 Zn시험편, 500Zn시험편, 1000Zn시험편으로 표시하였다. 이들 시험편에 대한 AE 사상수와 응력-변형율곡선을 Fig. 10에 나타내었으며 누적량 AE 계수와 누적량 AE 에너지의 곡선 및 응력-변형율 곡선을 Fig. 11에 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 부식시간에 따른 응력-변형율 곡선은 부식을 실시하지 않은 시험편과 비교시 변화가 없음을 보여주고 있다. 이는 부식으로 인한 기재의 강도 변화는 없다는 것을 보여주고 있다. 한편 부식시간에 따른 음향방출은 Zn시험편, 500Zn시험편, 1000Zn시험편의 순서로 발생하고 있다. AE 사상수, 누적량 AE 계수 및 누적량 AE 에너지의 특성을 살펴보면 AE 사상수가 증가하는 변형율 2% 이내에서 누적량 AE 계수 및 누적량 AE 에너지가 급격하게 증가하고 변형율 2% 이후에는 세 시험편 모두 완만하게 증가하고 있다. 그러나 부식을 실시한 시험편은 실시하지 않은 시험편에 비해 음향방출이 활발하지 못하며, 특히 1000Zn시험편의 경우 변형율 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 용사코팅층 틈새 사이로 확산되고 Zn용사코팅층은 자신이 희생양극으로서 Zn용사코팅층을 빠르게 부식시킨다.<sup>[13]</sup> 따라서 용사코팅층은 결합력이 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

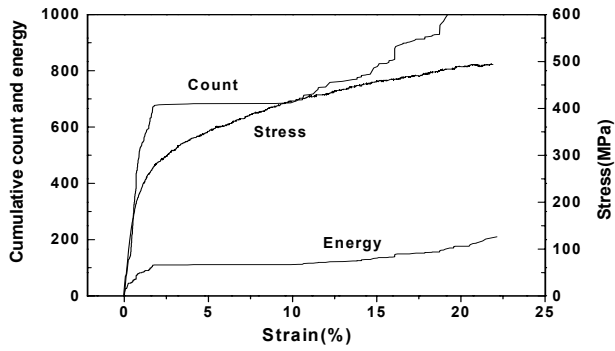


(b) 500-Zn

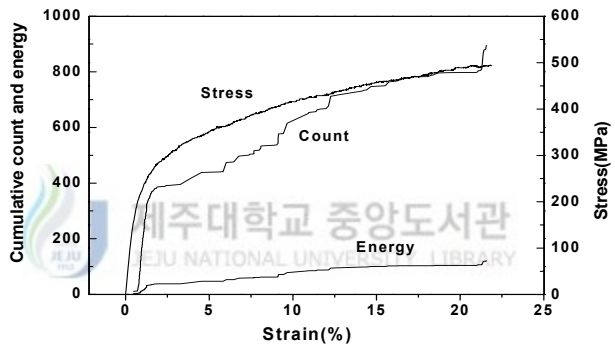


(c) 1000-Zn

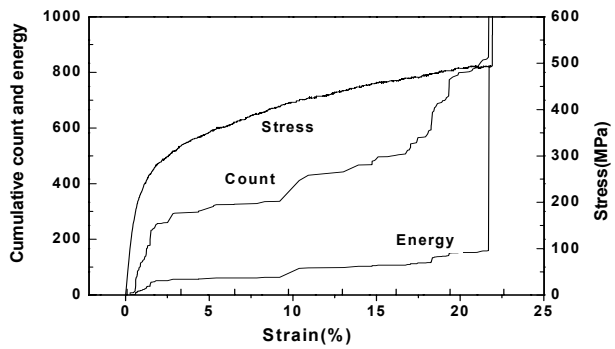
Fig. 10 Stress and event vs. strain



(a) Zn



(b) 500-Zn



(c) 1000-Zn

Fig. 11 Cumulative count and energy vs, strain

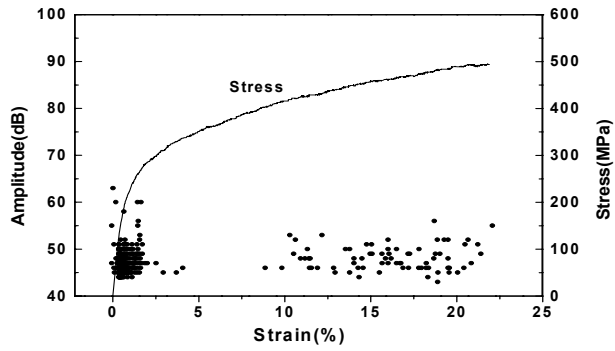
### 3.2.2 염수 침수 부식에 따른 Zn시험편 파단면 관찰 및 파괴기구

음향방출 진폭과 응력-변형율과의 관계를 Fig. 12에 인장시험시 파단된 시험편의 표면사진을 Fig. 13에 나타내었다.

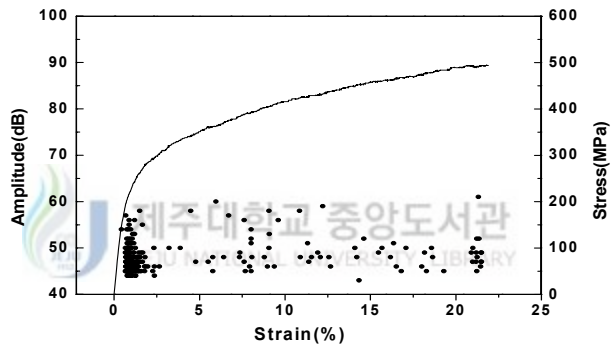
Fig. 12에서 모든 시험편은 부식시간에 관계없이 음향방출을 발생시키고 있으며, 또한 음향방출 진폭 최대값은 60dB 정도이다.

부식시간이 경과함에 따라 Zn시험편과 500Zn시험편은 1000Zn시험편의 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 500Zn시험편은 5% 이후에 간헐적으로 음향방출을 하고 있으며 1000Zn시험편은 변형율 2% 이후의 구간에서 간헐적으로 발생하다가 다시 변형율 15%이후에 발생이 활발한 것을 알 수 있다. 이는 용사코팅 후에 생긴 기공에 의해 기체가 염수에 노출되어 있지만 Zn용사층 자신이 희생양극으로 부식되고 진행이 빠르게 이루어진다. 기체에 침투한 염수는 시간이 경과함에 따라 비교적 결합력이 저하된 기공에 집중되고, 에너지의 축적한계를 넘게 되면 쉽게 균열이 발생 및 성장으로 진행된다.<sup>[14]</sup> 500Zn시험편과 1000Zn시험편에서 2% 이후의 간헐적인 진폭발생은 부식이 진행됨에 따라 계속적으로 미세한 균열이 발생과 성장으로 보이며, 특히 1000Zn시험편의 경우는 변형율 15%이후에도 균열 발생이 활발하게 진행되고 있음을 보여주고 있다.

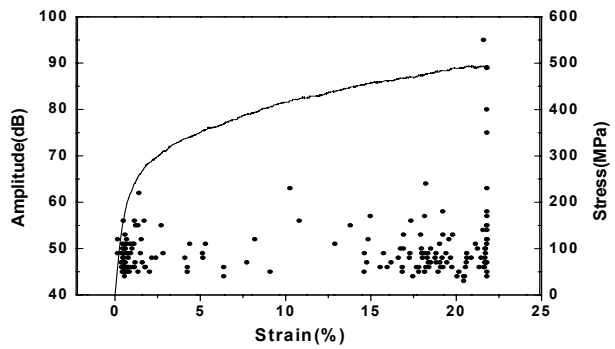
Fig. 13에서 보여주는 사진들은 시험편이 파단된 후의 표면사진으로 인장시험시 하중 방향과 직각 방향으로 많은 균열이 발생, 성장하고 있음을 보여주고 있고, 박리보다는 균열에 의한 소성변형이 주로 나타나고 있다. 부식시간이 긴 시험편은 용사층 자체 부식으로 표면이 연화되어 있고 이로 인해 표면 Zn 성분이 탈락으로 인해 요철 형상을 보이고 있다.



(a) Zn



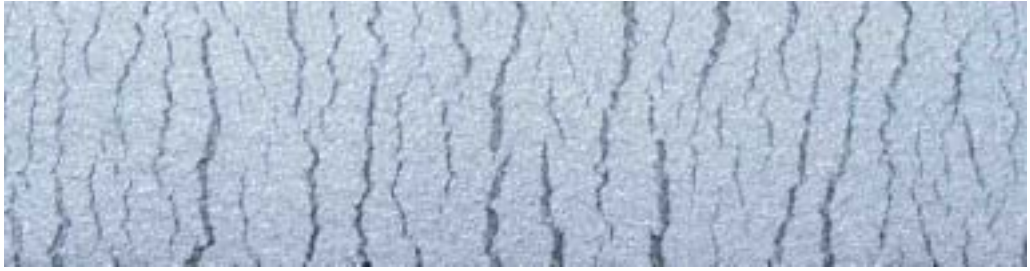
(b) 500-Zn



(c) 1000Zn

Fig. 12 Stress and amplitude vs. strain






(a) Zn



(b) 500-Zn

 제주대학교 중앙도서관  
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY



(c) 1000-Zn

← Load direction →

Fig. 13 Surface crack of Zn layer after tensile testing according to corrosion time

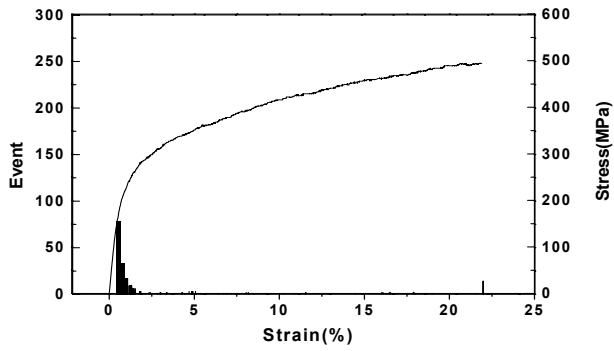
### 3.2.3 염수 침수 부식에 따른 AI시험편의 음향방출특성

용사 후 부식시험을 하지 않은 시험편과 500시간, 1000시간을 부식한 AI시험편에 대해 각각 AI시험편, 500AI시험편, 1000AI시험편으로 표시하였다. 이들 시험편에 대한 AE 사상수와 응력-변형률곡선을 Fig. 14에 나타내었으며 누적량 AE 계수와 누적량 AE 에너지의 곡선 및 응력-변형률 곡선은 Fig. 15에 나타내었다.

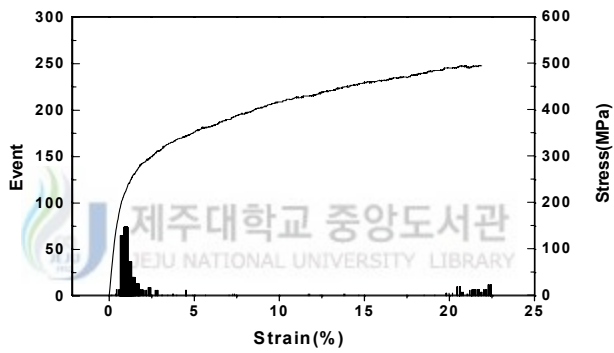
그림에 나타난 바와 같이 음향방출은 부식시간에 관계없이 변형률 2% 이내에서 많이 발생하고 있으며 이는 용사층 내에서 균열의 발생과 성장 등이 진행되고 있음을 알 수 있다. 음향방출의 발생량을 관찰해볼 때 변형률 약 2% 이내의 구간에서 1000AI시험편, 500AI시험편, AI시험편 순으로 발생하고 있음을 알 수 있다. 그리고 누적량 AE 계수와 누적량 AE 에너지에서도 모든 시험편들은 AE 사상수가 증가하는 구간에서 누적량카운트도 크게 증가하고 있다.

또한 부식시간이 증가함에 따라 누적량카운트는 1000AI시험편, 500AI시험편, AI시험편 순으로 상승하고 있다. 이는 용사코팅재가 부식환경에 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 AI 용사층은 희생양극으로서 용사층 자체가 부식되고 그로 인해 기재를 보호하고 있는 것으로 판단되며 부식이 진행됨에 따라 AI 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.<sup>[14]</sup>

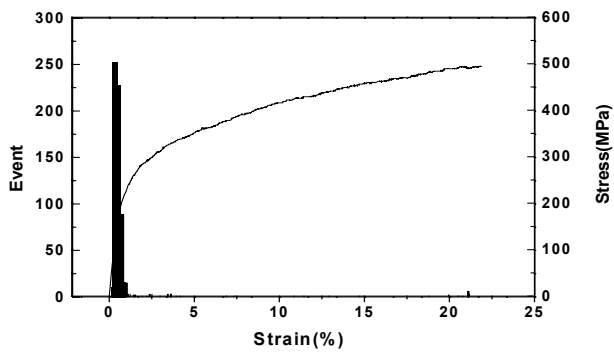
그러나 누적량 카운트에 의한 그래프는 Zn시험편과는 달리 음향방출이 증가하는 경향을 보이고 있다. 이는 전술한 바와 같이 용사층 기공으로 침투한 염수가 AI용사층 자체의 희생양극으로 인해 용사층을 부식시키고 코팅층 간의 결합력을 저하시킨다. 이에 인장하중이 부가되어 발생한 에너지는 결합력이 약한 부분 즉 용사층의 기공에 집중되어 있고, 적은 변형률에서도 균열이 발생, 성장이 이루어지면서 에너지가 발산되고 있음을 Fig. 15에서 보여주고 있다. 이러한 결과는 후술하는 Fig. 17의 AI시험편 파단면 사진에도 잘 나타나 있다.



(a) Al

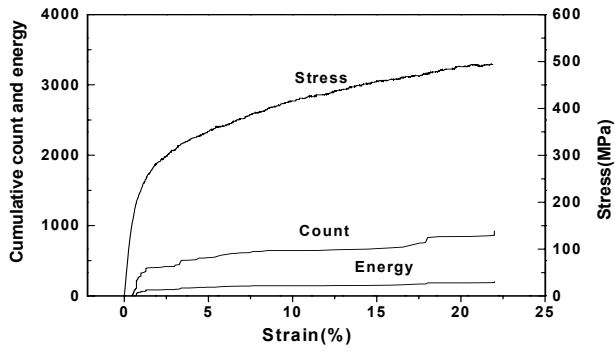


(b) 500-Al

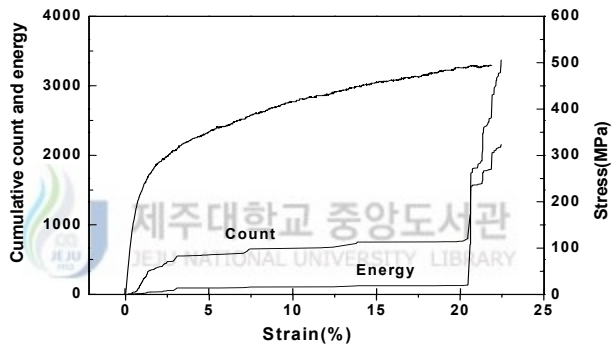


(c) 1000-Al

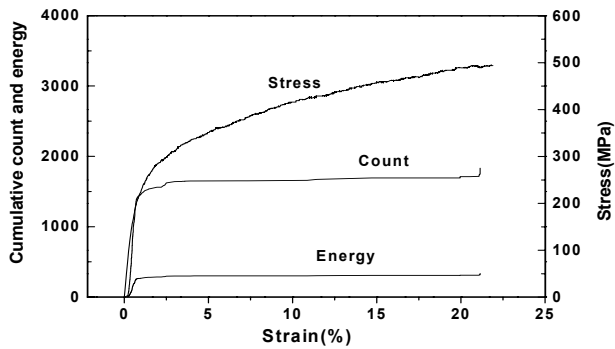
Fig. 14 Stress and event vs. strain



(a) Al



(b) 500-Al



(c) 1000-Al

Fig. 15 Cumulative count and energy vs, strain

### 3.2.4 염수 침수 부식에 따른 AI시험편 파단면 관찰 및 파괴기구

음향방출 진폭과 응력-변형율과의 관계를 Fig. 16에, 인장시험시 파단된 시험편의 표면사진을 Fig. 17에 나타내었다.

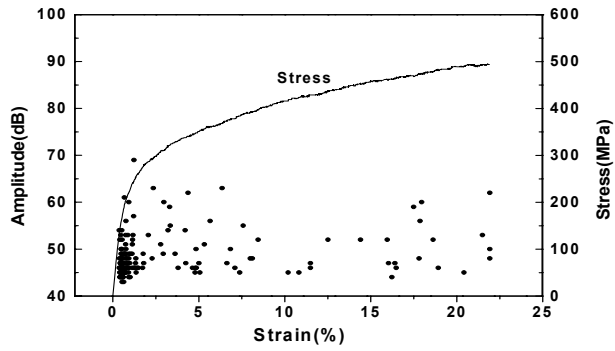
Fig. 16에서 진폭의 분포를 보면 모든 시험편은 변형율 2%이내에 진폭이 집중되어 있으며 1000AI시험편, 500AI시험편, AI시험편 순으로 빈도수가 높다. 또한 부식시간이 진행됨에 따라 2%이후의 구간에서는 진폭이 비교적 적게 나타나고 있음을 보여주고 있다.

이는 용사 후에 존재하는 기공을 통해 기체가 염수에 노출되어 있지만 AI용사층이 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.

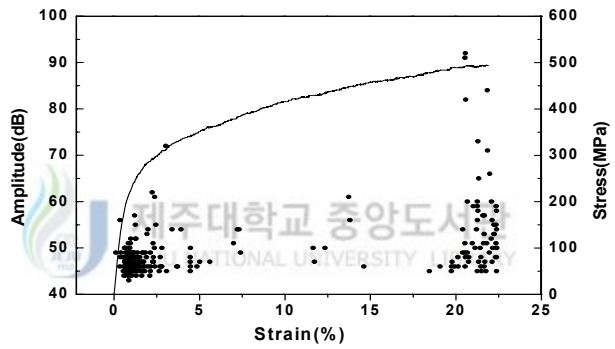
Fig. 17에 나타난 사진들은 시험편이 파단된 후 표면사진으로 박리보다는 균열에 의한 소성변형이 주로 작용했음을 보여주고 있다. 또한 부식시간이 긴 시험편은 Zn시험편에서와 같이 용사코팅층 자신이 부식되고 이로 인해 표면이 연화되어 AI 성분이 탈락되어 요철 형상을 보여주고 있다.<sup>[15]</sup>

또한 인장시험에서 변형율이 증가하면 코팅층에서의 결합력이 약화로 인해 균열이 발생, 성장하고 있으며 균열의 길이와 수가 증가하고 있음을 보여주고 있다.

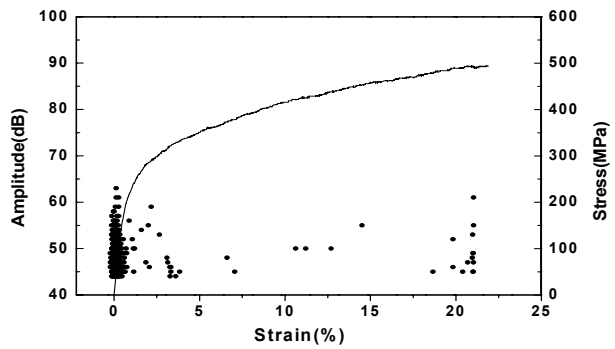
Fig. 13과 비교해 보면 부식을 실시한 AI시험편은 부식을 실시한 Zn시험편에 비해 더 많은 부식이 진행된 것을 보여주고 있고, 인장시험에 따른 균열의 발생 빈도도 더 많음을 보여주고 있는데, 이는 AI 용사재가 Zn 용사재에 비해 희생양극 정도가 높기 때문에 변형율 2% 이내에서 많은 균열이 생성, 성장해 가고 있는 것으로 보인다.



(a) Al



(b) 500-Al



(c) 1000-Al

Fig. 16 Stress and amplitude vs. strain



(a) Al



(b) 500-A1



(c) 1000-A1

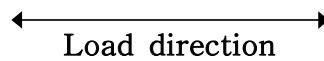


Fig. 17 Surface crack of Al layer after tensile testing according to corrosion time

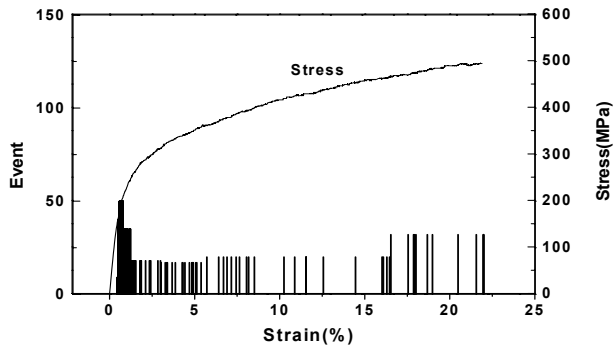
### 3.2.5 염수 침수 부식에 따른 Amdry시험편의 음향방출특성

용사 후 무부식 시험편과 500시간, 1000시간을 부식시킨 시험편을 각각 Am, 500Am, 1000Am로 표시하였다. 각 시험편의 AE 사상수와 응력-변형률곡선을 Fig. 18에 나타냈으며 부식시간에 따른 누적량 AE 에너지의 곡선을 응력-변형률 곡선과 함께 Fig. 19에 나타내었다.

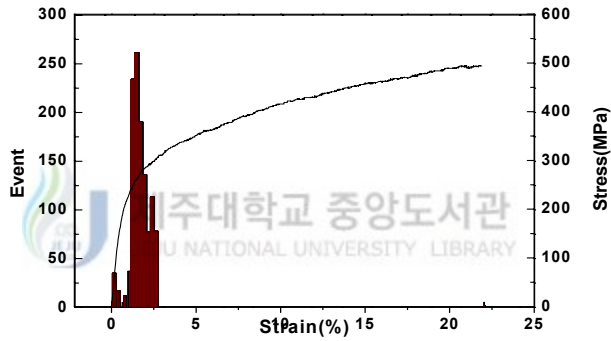
그림에 나타난 바와 같이 변형률에 따른 AE 사상수는 500Amy시험편, Am시험편, 1000Am시험편의 순으로 크게 일어나고 있으며, Am시험편에서는 1%에서 8%사이의 구간에서 AE 사상수 발생 빈도가 높고 이 후의 구간에서는 AE 사상수 발생 빈도가 낮게 나타나고 있다. 500Am시험편은 변형률 2.5% 이내에서 높은 AE 사상수가 발생되고 있고 1000Am시험편에서는 5% 이내에서 AE 사상수 발생 빈도가 높게 나타나고 있다. 그리고 누적량 AE 계수와 누적량 AE 에너지에 있어서, 모든 시험편들은 AE 사상수가 증가하는 구간에서 누적량도 급격하게 증가하고 있다.

Am시험편에서 비교적 변형률이 낮은 구간에 거쳐 음향방출이 발생하는 것은 비교적 소성변형율이 기재보다 작은 Am용사재가 균열과 박리, 탈락이 한번에 이루어지지 않고 잔존하는 기재와의 밀착력에 의해 변형률 증가에 따라 계속적으로 진행되고 있는 것으로 사료된다. 500Am시험편이 변형률 2.5%이내에서 높은 사상수가 나타나는 것은 용사층에 있는 기공을 통해 침투된 염수가 기재와 용사층을 부식시켜 밀착성이 저하된 것으로 추정된다. 이로 인하여 소성변형이 작은 용사층은 적은 변형률에 의해서도 큰 규모의 박리와 탈락이 발생된 것으로 사료된다. 1000Am시험편은 변형률 5%이내에서 500Am시험편 보다 낮은 AE 사상수를 나타내고 있다. 이는 부식이 가속화 되어 500Am시험편에 비해 적은 에너지로도 더욱 큰 규모의 용사층과 기재사이에 박리와 탈락을 발생하게 하고 있으며, 또한 기재와 경계층 사이의 부식이 많이 진행되고 부식에 의한 밀착성의 저하로 인해 사상수가 적게 나타나는 것으로 사료된다

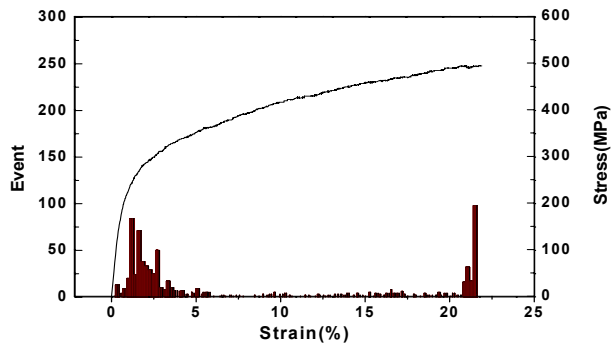




(a) Am

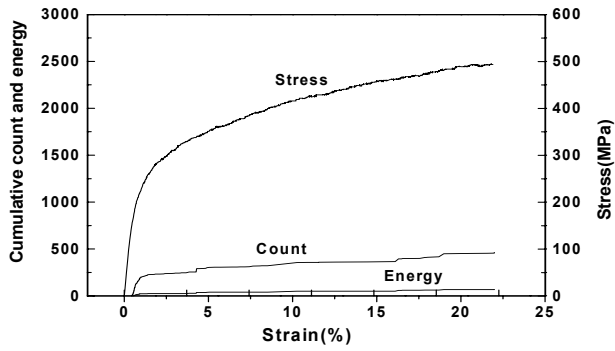


(b) 500Am

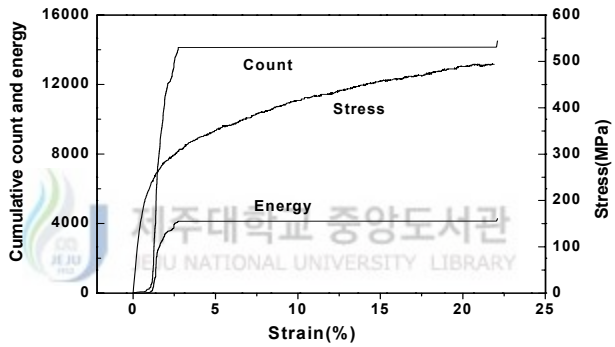


(c) 1000Am

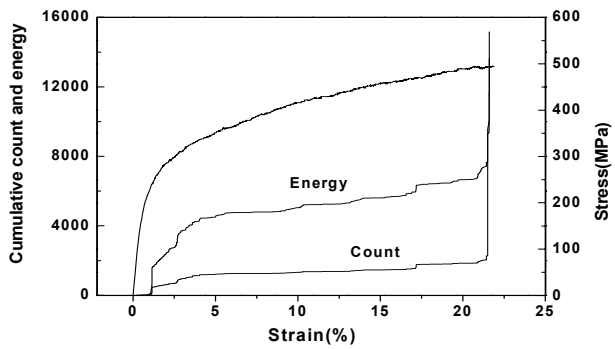
Fig. 18 Stress and event vs. strain



(a) Am



(b) 500Am



(c) 1000Am

Fig. 19 Cumulative count and energy vs, strain

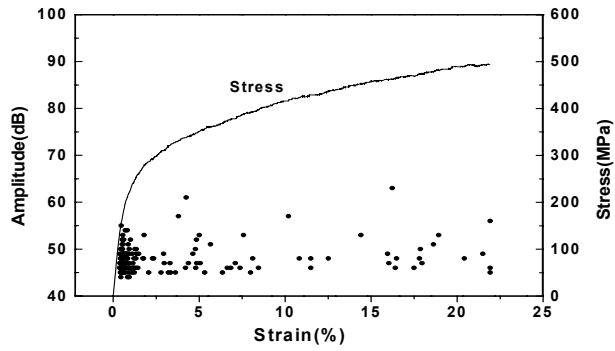
### 3.2.6 염수 침수 부식에 따른 Amdry시험편 파단면 관찰 및 파괴기구

음향방출 진폭과 응력-변형율과의 관계를 Fig. 20에, 인장시험시 파단된 시험편의 표면사진을 Fig. 21에 나타내었다.

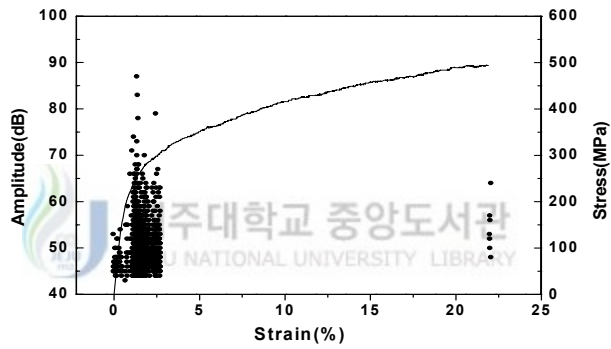
Fig. 20에서 Am시험편은 변형율 2% 이내에서 AE 진폭 발생 빈도가 높으며 이후의 구간에서는 진폭이 간헐적으로 나타나고 있다. 그러나 부식을 실시한 500Am시험편과 1000Am시험편은 Am시험편에 비해 높은 진폭을 보여주고 있는데 이는 에너지 강도가 높음을 의미한다.

Am시험편에서 비교적 변형률이 낮은 구간에 거쳐 AE 진폭이 발생하는 것은 비교적 소성변형율이 낮은 Am용사재가 박리와 탈락이 한번에 이루어지지 않고 잔존하는 기재와의 밀착력에 의해 변형율 증가에 따라 계속적으로 균열과 박리가 진행되고 있는 것으로 사료된다. 500Am시험편에서 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 탄성변형율이 적은 용사층은 큰 규모의 박리와 탈락이 이루어진 것으로 사료된다. 1000Am시험편에서는 변형율 5%이내에서 500Am시험편 보다 적은 AE진폭 분포와 이후의 구간에서 계속적으로 AE진폭이 발생되고 있음을 보이고 있다. 이는 부식이 가속화 되어 500Am 시험편에 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.

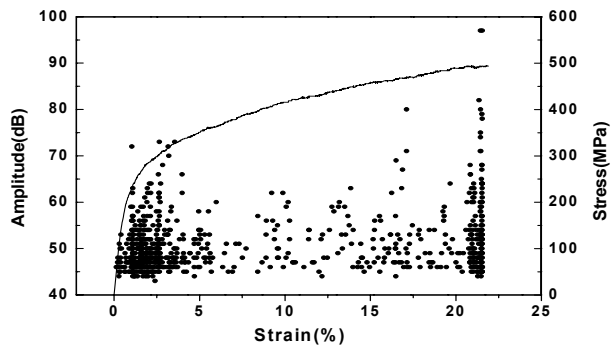
Fig. 21에 나타난 표면사진들은 인장시험 후 부식시간에 따른 박리된 Am시험편의 용사층 사진들을 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 Am시험편의 코팅층은 기재에 비해 취성이 매우 크기 때문에 전술한 Al시험편과 Zn시험편의 균열 모습과는 달리 기재와 완전히 탈락이 이루어졌다. 부식시간에 따른 용사층 모습은 균열이 발생, 성장한 모습이 거의 없으며, 용사층이 기공으로 침투된 염수에 의해 기재가 부식되어 생성된 부식재가 다시 기공을 통해 코팅층 표면으로 배출된 모습을 보여주고 있다. 따라서 염수 부식 시험편은 Am시험편에 비해 박리와 탈락이 조기에 발생하고, 짧은 시간에 일어나고 있음을 알 수 있다.



(a) Am



(b) 500Am



(c) 1000Am

Fig. 20 Stress and amplitude vs. strain



(a) Am



(b) 500Am



제주대학교 중앙도서관  
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY



(c) 1000Am

←—————→  
Load direction

Fig. 21 Surface crack of Am layer after tensile testing according to corrosion time

## IV 결론

어선용 스크류 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 용사코팅재 사이에서 소성변형인 균열의 발생과 성장 및 박리의 발생과 성장, 탈락 등의 시기는 인장초기인 변형을 1%~2.5%미만에서 대부분 발생하고 그 후는 거의 유용한 데이터가 산출되지 않는 것으로 판단되며 용사코팅재의 사상수, 누적카운트, 에너지 및 진폭 등은 기재와 비교 시 많이 발생함을 보여주고 있다.
2. Zn과 Al시험편은 균열발생의 특성을 보이는 반면 Am시험편은 박리에 의한 특성을 보이는데 이는 Zn과 Al시험편의 용사층은 인장변형과 함께 균열이 발생하지만 Am시험편의 용사층은 거의 인장이 되지 못해서 박리가 발생하는 것으로 판단된다.
3. 기재와 용사층간의 밀착성은 무부식시 Al > Zn > Am 순서이고 500시간과 1000시간 부식시킨 시험편은 부식되지 않은 시험편에 비해 적은 에너지로도 쉽게 균열이나 박리가 발생하는 것으로 판단된다.
4. 침수시킨 시험편중에서 Zn과 Al시험편은 희생양극으로서의 기능을 수행하여 기재 표면에서 부식현상을 볼 수 없으나 Am시험편은 희생양극의 기능이 없어 기재표면에 부식현상이 나타나고 있다.

## 참 고 문 헌

- [1] 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 34권 제1호, pp21-29.
- [2] 민경오, 이창희, 1998, 염수 분위기에서의 내부식 용사 코팅 기초, 한국용사기술 협회 등, pp1-17.
- [3] 송요승, 이구현, 노병호, 1996, 기능성 용사 피막 응용 현황, 기계와 재료, 8권, 4호, pp82-94
- [4] 金貴植 外, 2001, 플라즈마용사 세라믹코팅 피막부식재의 音響 放出 特性, 한국해양공학회지 제15권 제3호, pp69-74.
- [5] 김귀식, 1998, 플라스머용사에 의한 세라믹 코팅 강재의 음향방출 특성, 한국동력 기계공학회지, Vol.2, No.3, pp49-54
- [6] 김부안, 남기우, 조문호, 1999, D금속기지 내열 경사기능 복합재료 개발에 관한 연구, 한국해양공학회지, 제13권 제11호, pp62-69
- [7] 오맹종, 오창배, 김귀식, 1998, 세라믹 용사된 S45C 강재의 기계적 특성 및 피로 강도, 한국해양공학회지, 제12권, 제1호, pp32-38
- [8] 윤동진, 1997, 음향방출을 이용한 구조물진단기술, 대한기계학회지, 제22권, 6호, pp47-53
- [9] 김태복, 강신열, 왕덕현, 김원일, 이윤경, 1996, CNC선반에서 연속절삭 및 단속 절삭시 공구손상에 대한 음향방출신호 특성 연구, 제13권, 제14호, pp136-142.
- [10] 정재현, 석창성, 김영진, 1997, 음향방출을 이용한 회전마찰제의 마찰특성 및 안정성 해석, 대한기계학회논문집(A), 제21권, 제4호, pp555-565.
- [11] 나종주, 이구현, 이상호, 1997, 상압 플라즈마의 응용 현황, 기계와 재료, 9권, 4호, pp100-117
- [12] 민경오, 이창희, 1998, 안수분위기에서의 내부식 용사 코팅 기초, 한국용사기술 협회, pp1-17
- [13] Frederic Ferrerd 外, 2002, Acoustic emission study of active - passive transition during carbon steel erosion, corrosion science 44, pp1529-1540.
- [14] 李鍾樂 · 林祐助, 1996, 化物被覆鋼材의 密着성과 耐蝕性에 關한 研究, 韓國

漁業技術學會誌,32, pp157-162.

- [15] Jan Zizka, M. Shiraishi, 1994, Acoustic Emission and Force Signal Intergration for Cutting Tool Wear Sensing and/or Monitoring, The Japanese Society for NDI, Progress in Acoustic Emission VII, pp625-830.

