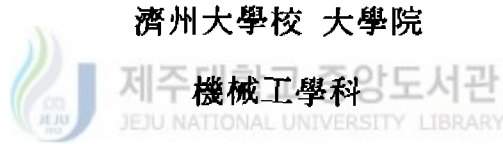


碩士學位論文

플라즈마 용사 세라믹 코팅 피막  
부식재의 음향방출 특성



洪 龍 義

1999年 12月

# 플라즈마 용사 세라믹 코팅 피막 부식재의 음향방출 특성

指導教授 金 貴 植

洪 龍 義

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함



洪龍義의 工學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 조 경 호 印  
委 員 임 종 환 印  
委 員 김 위 석 印

濟州大學校 大學院

1999 年 12 月

**Acoustic Emission Characteristics of  
Plasma Thermal Sprayed Steel  
after Salt Spray**

**Yong-Ui Hong**

**(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 1998**

# 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 염수분무실험 .....	9
2.2.3 인장시험 및 AE 측정 .....	9
III. 실험결과 및 고찰 .....	15
3.1 용사 코팅제의 인장에 따른 AE 특성 .....	15
3.1.1 용사 코팅제의 AE 발생거동 .....	15
3.1.2 용사 코팅층의 표면 관찰 및 파괴기구 .....	21
3.2 염수분무 시간에 따른 시험편의 인장시험시 AE특성 .....	26
3.2.1 염수부식에 따른 Ni-4.5wt.%Al 코팅제의 AE특성 .....	26
3.2.2 염수부식에 따른 Ni-4.5wt.%Al 코팅제의 파단면 관찰 및 파괴기구 .....	31
3.2.3 염수부식에 따른 TiO <sub>2</sub> 코팅제의 AE특성 .....	36
3.2.4 염수부식에 따른 TiO <sub>2</sub> 코팅제의 파단면 관찰 및 파괴기구 .....	42



3.2.5 염수부식에 따른 Ni-4.5wt.%Al + TiO <sub>2</sub>	
코팅제의 AE특성 .....	46
3.2.6 염수부식에 따른 Ni-4.5wt.%Al + TiO <sub>2</sub>	
코팅제의 파단면 관찰 및 파괴기구 .....	51
3.3 염수부식 후의 용사 코팅제의 표면부식 관찰과 무게감량 .....	57
IV. 결    론 .....	61
참 고 문 헌 .....	63



제주대학교 중앙도서관  
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

# SUMMARY

In this paper, adhesiveness of the plasma thermal sprayed coating steels is investigated through AE(acoustic emission) when a tensile loads. The powders used for the coating are nickel aluminum composite powder Ni-4.5wt.%Al (BOND) and titanium dioxide powder TiO<sub>2</sub> (TOP). Test specimens are BOND, TOP, and BT (BOND+TOP) that are sprayed these powders on carbon steel(S45C) by plasma thermal spray. In salt spray testing, salt solution is 5% NaCl and salt spray time is 2, 5 and 10 hours respectively. The exfoliation of the coating layers according to salt spray time is measured by AE during tensile testing with these specimens.

The results are summarized as follows ;

1. In the non-corrosion, the exfoliation of the coating layers is estimated possibly through AE signals such as AE event, count, energy and peak amplitude. AE signals rapidly increase when the exfoliation of the coating layer occurs.
2. AE signals of BOND specimen increase rapidly from 17% strain to fracture point, TOP specimen does from 1% to 5%, and BT specimen does from 6% to 11%. The adhesiveness of BOND specimen is better than that of TOP. The adhesiveness of BT specimen coated both Ni-4.5wt.%Al layer and TiO<sub>2</sub> layer is better than that of TOP specimen which is directly sprayed TiO<sub>2</sub> on the substrate.

3. AE signals of the coating specimens by salt corrosion decrease as salt spray time increases. Particularly, the exfoliation of BT specimen attacked a heavy corrosion by salt spray for 10 hours takes place between substrate and coating layers. and AE energy of TOP specimen increases in proportion to salt spray time.
  
4. In exfoliation mechanism of the coating steels by salt spray, salt solution penetrates into the surface of the substrate through pore of the coating layer built in the process of plasma spay. Corrosion production forms on the surface of substrate and spreads over the entire surface, By increasing salt spray time, the adhesiveness between the substrate and the coating layer is weaken by corrosion and the exfoliation initiated chiefly on the corrosion surface of the substrate.
  
5. The weight loss of the coating steels according to salt spray time is large in the order of the first BOND, the second TOP, the third BT specimen.

# I. 서 론

최근 산업의 발달로 고온, 마모, 내식성 등에 복합적으로 작용하는 가혹한 환경하에서 사용되는 산업기계류가 증가하면서 신소재의 개발이 절실한 실정이다. 이러한 신소재의 개발로 표면개질기술의 방법이 사용되고 있으며, 이는 크게 도금법, 화학증착법(CVD : Chemical Vapor Deposition), 물리증착법(PVD : Physical Vapor Deposition), 용사법등이 있다[1]. 용사법은 후막형성을 할 수 있고, 성막 속도가 빠르며, 코팅층 형성재료의 선택 자유도가 높아서, 항공기 부품의 보수, 철강제품의 방청, 방식 등에서 많이 사용되고 있다 [2]. 용사법에는 열원에 따라 화염용사(Flame spraying), 폭발용사(Detonation-gun spraying), 아크 용사(Arc spraying), 플라즈마 용사(Plasma spraying)등이 있다. 이 중 플라즈마 용사법은 금속, 세라믹, 플라스틱 등 용융 가능한 거의 모든 재료가 가능하고, 세라믹은 뛰어난 열적, 기계적 특성으로 인해 내열성, 내마모성 및 내식성 등의 기능이 필요한 기계적 특성으로 사용되고 있다[3]. 그러나 세라믹 용사가 안고 있는 가장 큰 문제점은 기재와 코팅층 사이의 밀착강도가 낮아 계면박리가 쉽게 발생할 수 있다는 점이며, 이러한 현상은 특히, 금속재료의 표면에 세라믹을 코팅했을 경우 더욱 두드러지게 나타나는데 그 원인은 기재금속과 세라믹 코팅층 양자간의 재료물성이 크게 다르기 때문이다[4]. 또한 용사과정 중에 용사과정이 안정되더라도 그 과정 자체가 순간적이어서 온도, 용사 거리, 분말의 공급 속도 등의 국부적인 변화가 불완전한 용융을 발생시켜 피막에 기공을 생성시키므로 [5-8], 외부와의 환경을 차단하여 부식을 방지하는데 있어 큰 결점을 가지고 있다.

이러한 결함과 박리의 파괴 거동을 관찰, 평가하기 위해 적용되는 비파괴 검사로는 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. 대부분은 정지 중에 결함의 발생을 감시하는 방법이지만, 음향 방출 시험은 가동상태를 유지 하면서 결함의 발생이나 성장유무를 연속적으로 감시할 수 있으며[9,10], 또한 금속간의 결함이나 마찰의 직접적인 원인에 근거한 신호를 감지하고 분석 하기 때문에 상대적으로 손상의 조기 탐지와 센서만을 원하는 부위에 부착하기만 하면 설비에는 전혀 영향을 주지 않는다는 장점을 가지고 있다[11]. 이러한 원인으로 기계부품의 운전중에 용사부재의 밀착성을 검사, 평가하기 위해 AE법을 이용한 기술에 대한 요구가 높아지고 있다[12].

AE는 고체 내에 국부적으로 형성되었던 변형에너지가 급격히 방출될 때 발생하는 탄성파로서, 고체 내에서의 전위(dislocation)의 이동이나 미소균열의 생성 및 성장 등이 대표적인 발생원이며, 전자의 경우는 연속형 신호를, 후자의 경우는 돌발형의 AE 신호를 발생하는 것으로 알려져 있다[13-15]. 독일의 Joseph Kaiser에 의해 재료의 변형에 대한 AE 연구가 시작되었고, 그는 일단 한번의 응력을 받은 재료에 대해 재차 하중을 부과할 때 이미 경험한 응력레벨 이하에서는 AE 신호가 방출하지 않는다는 Kaiser effect를 제안하였다[13]. 그 후 AE에 대한 연구는 이론적 기구를 규명과, 재료의 거동에 대하여 다방면으로 활발한 연구가 이루어져 왔다. 특히, 항공우주분야에서의 AE를 압력용기의 수압시험 등에 적용함으로써 복합재료의 항공기 구조에의 도입과 관련하여 많은 연구가 이루어지고 있고, 원자력발전에서는 AE를 비파괴시험 검사의 일환으로 적용되어 원자로의 냉각수 손실을 찾아내는 데에 적용하고 있다[13-15]. 일본에서는 공구 수명[16-21], 복합재료 특성 평가를 위한 검사법으로 이용되고 있다[23-28]. 한편, 국내에서는 공구파손과 공구마멸의 측면, 밀링가공의 회전체, 그리고 공작물쪽에서와 발전용 증기터빈 로터와 같은 발전용 강재에서의 크리프에서의 AE신호를 측정하여 안전진단에 이용하고있을 뿐만 아니라[29-34], 복합재료에서도 신뢰도 평가를 위해 사용되어지고 있다[35,36].

따라서 본 연구에서는 세라믹 용사 코팅제의 기계적 특성과 염수의 부식으로 인한 박리현상을 AE법으로 평가하기 위하여, 기계구조용강 S45C를 기재(substrate)로 하여 본드 코팅제로서 금속계 분말 Ni-4.5wt.%Al과 산화물계

세라믹  $TiO_2$ 를 플라즈마 용사법에 의해 코팅한 후, 코팅 종류와 부식시간에 따라 시험편을 마련하였다. 이들에 대한 인장하중 부가시의 AE특성을 파악하여 코팅제의 박리현상을 검토하였다.



## II. 재료 및 방법

### 2.1 실험재료

실험에 사용된 시험편의 기재(substrate)로는 기계구조용강(S45C)을 사용하였으며 기재의 화학 성분을 Table 1 에, 시험편 형상 및 치수는 Fig. 1에 나타냈다. 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 탑 코팅재료로  $TiO_2$  세라믹 분말을, 본드 코팅 재료로 Ni-4.5wt.%Al 합금 분말을 사용하였다. 코팅층의 두께는 본드코팅은 약  $100\mu m$ , 세라믹코팅은 약  $150\mu m$ 로 하였으며, 코팅 분말의 물리적 성질은 Table 4에 나타내었다.

시험편은 아래에 나타낸 3종류의 시험편을 제작하였다.

BOND : 기재(S45C)를 본드(NI-4.5wt.%Al)코팅한 시험편

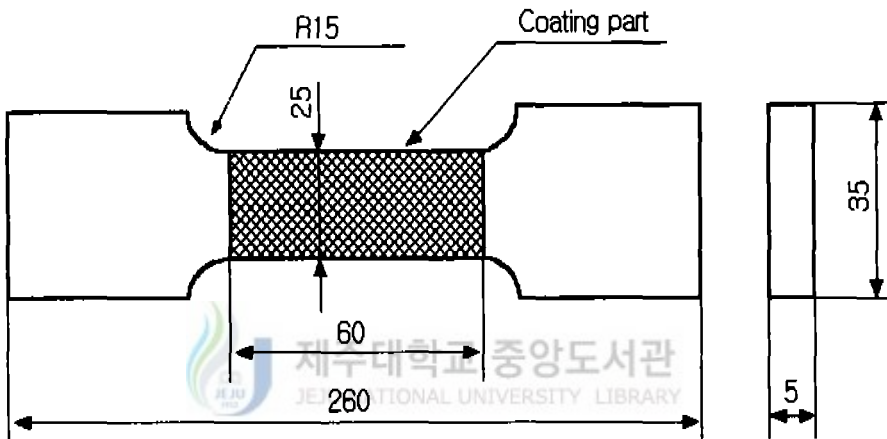
TOP : 기재를 세라믹( $TiO_2$ )코팅한 시험편

BT : BOND시험편 위에 세라믹 코팅한 시험편

이들 시험편은 염수분무시험기를 사용하여 2시간, 5시간, 10시간의 부식을 실시한 시험편의 부식시간에 따른 표기는 시험편 표기 앞에 기재하였다.(예: 염수분무시험기에서 2시간 부식을 한 BT제는 2BT로 표기하였다.)

**Table 1 Chemical composition of substrate S45C(wt.%)**

C	Si	Mn	P	S
0.464	0.246	0.770	0.0154	0.00693
~ 0.470	~ 0.251	~ 0.774	~ 0.0162	~ 0.00835



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

**Table 2 Blasting conditions**

Material composition	Powder size ( $\mu\text{m}$ )	Air pressure ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )	Distance (mm)
White alumina	15~53	5.5	50~100

Table 3 Plasma spraying conditions

Condition Powder	Powder feed unit		Plasma gas (psi)		DC (A)	DC (V)	Spray distance (mm)
	Flow rate (ft <sup>3</sup> /h)	Feed rate (g/min)	Ar	H <sub>2</sub>			
TiO <sub>2</sub>	13.5	53	80	15	500	65~70	75~100
Ni-4.5wt.%Al	13.5	68	80	15	500	65~70	100~150

Table 4 Powder conditions

Condition Powder	Typical composition	Typical size range (μm)	Melting point(°C)
TiO <sub>2</sub>	Titanium dioxide 99% minimum	8 ~ 88	1920
Ni-4.5wt.%Al	Aluminum 4.5% Nickel balance	45 ~ 90	660

## 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, 장치의 작동은 음극과 양극사이에 전기를 통하고 여기에 수소 및 아세틸렌가스를 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 기체에 적층시키는 장치이다.

### 2.2.2 염수분무실험

세라믹 코팅재의 부식환경 하에서의 AE 특성 및 부식특성을 조사하기 위하여 Fig. 3에 나타낸 염수분무시험기(대영 co.)를 사용하였다. 염수분무시험기는 포화탱크, 분무실, 공기압축기, 노즐 등으로 구성되어 있으며, 압축기에 의해 공급된 공기를 포화탱크에서 예열 시킴과 동시에 분무실의 상대습도가 95~98% 되도록 한 후, 포화탱크에서 나온 포화공기와 압축공기에 의해 미립화된 염수를 분무 노즐로 이송시켜, 분무실로 분사하는 장치이다. 분무실은 일정한 온도와 습도에 의해 부식을 가속화할 수 있는 부식 분위기를 조성하는 장치다. 시험방법은 ASTM B117에 따라 행하였으며, 염수농도 NaCl 5%, PH 6.8, 공기압 0.7kg/cm<sup>2</sup>, 분무실 온도 35℃와 염수분무량 2ml/hr로 하였다. 시험편의 부식을 위한 염수분무 시간은 2시간, 5시간, 10시간으로 하였다.

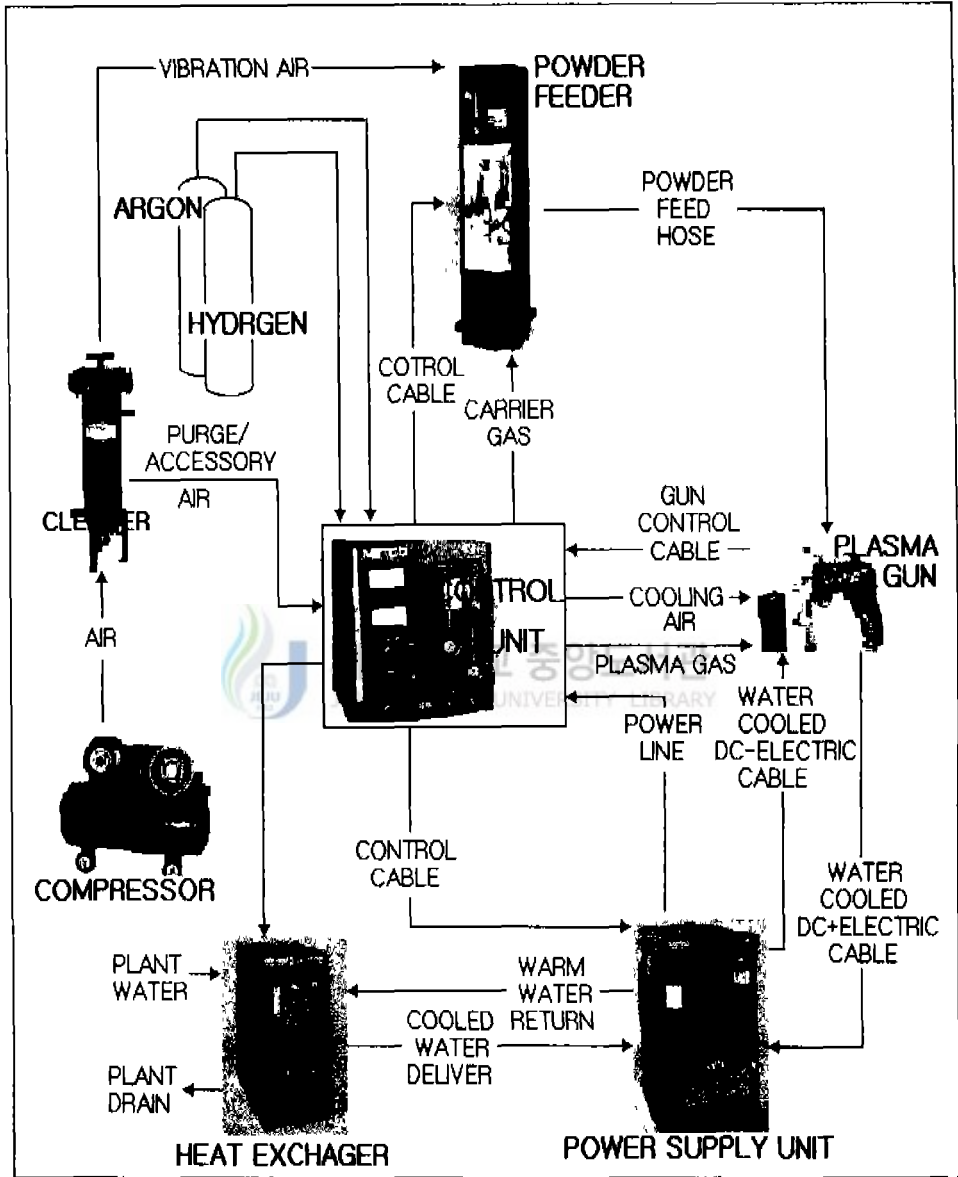
### 2.2.3 인장시험 및 AE 측정

플라즈마 용사장치에 의해 제작된 용사 코팅 시험편의 부식시간에 따른 AE특성을 조사하기 위하여 Fig. 4에 나타낸 바와 같이 인장시험과 AE 신호측정은 동시에 실시하였다. 인장시험은 만능재료시험기(Zwick Co.)를 사용하여 표점거리 50mm, 크로스헤드 이송속도 1mm/min로 시험을 실시하였다. 또

한, AE 측정장치는 MITRAS 2001(Physical Acoustics Co.)를 사용하였으며, 측정시 검출된 AE신호는 10kHz~2MHz의 Band pass filter를 사용하여 40dB로 증폭하였다. Fig. 5는 AE 측정원리를, Fig. 6은 돌발형 AE신호로서 본 연구에 사용된 AE 파라메타를 정의한 것이다. AE 파라메타는 문턱값(Threshold), 계수(Count), 진폭(Peak Amplitude), 사상수(Event) 및 에너지(Energy)등을 이용하여 정리하였다. 또한, AE센서와 고정용 지그와의 밀착은 고탄성 스폰지가 내재되어 있는 자석고정식 홀더로 일정한 압력으로 누르고, AE센서와 시험편과의 접촉은 고진공 Silicon을 발라 밀착성을 증가 시켰다.



제주대학교 중앙도서관  
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

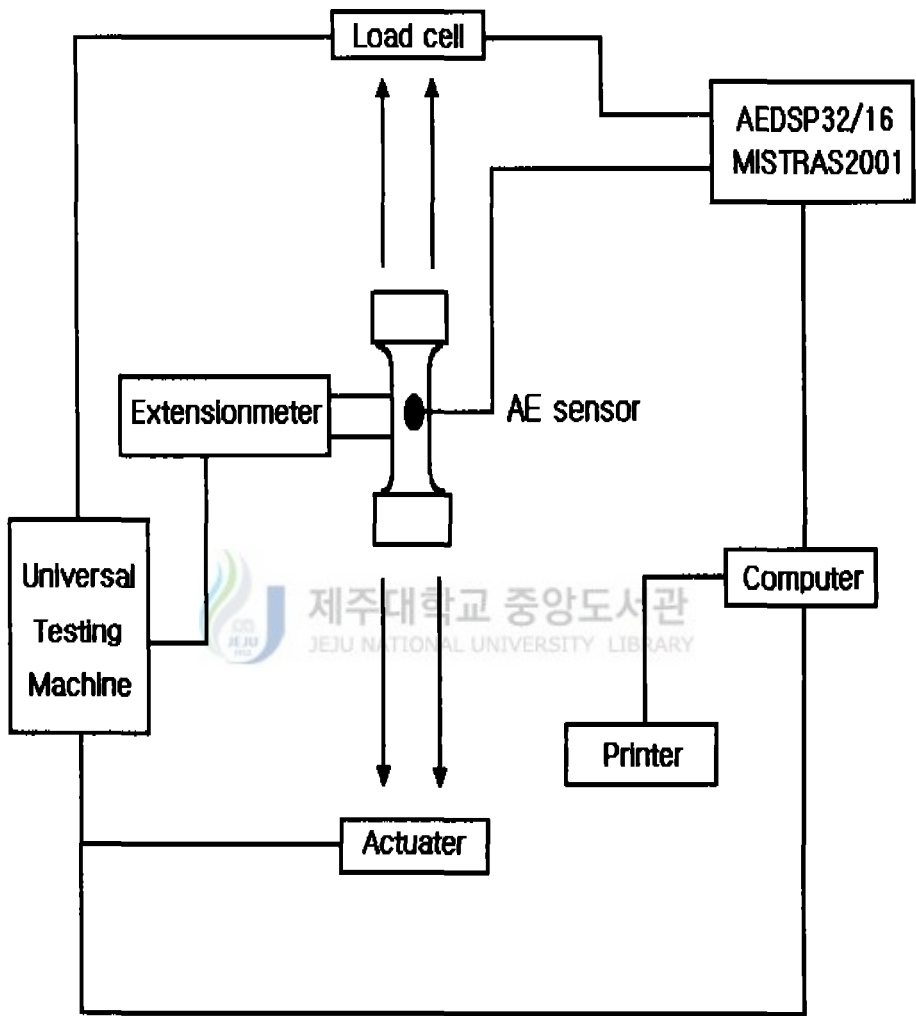


**Fig. 2 Plasma spray system**





**Fig. 3 Salt spray apparatus**



**Fig. 4 Installation of AE system**

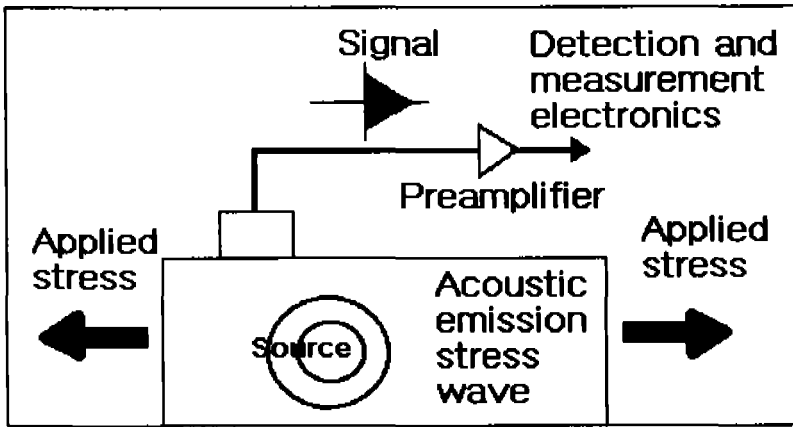


Fig. 5 Basic principle of AE method

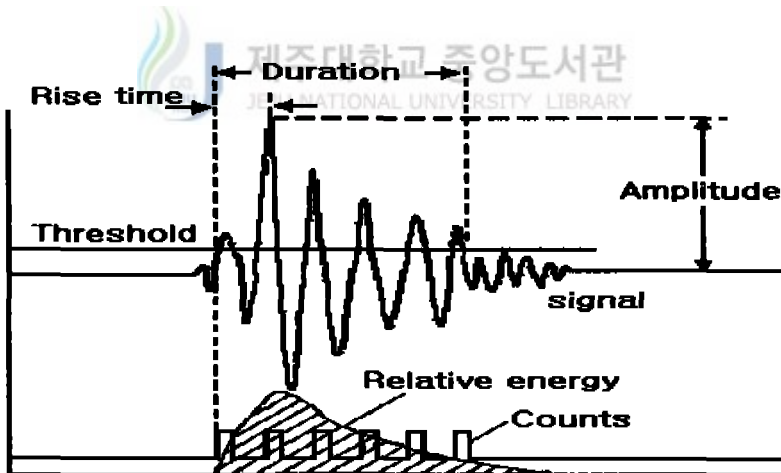


Fig. 6 Schematic AE signals corresponding to one AE Event

### Ⅲ. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 용사 코팅제의 인장에 따른 AE 특성

##### 3.1.1 용사 코팅제의 AE 발생거동

SUB시험편, BOND시험편, TOP시험편 및 BT시험편에 대한 AE 사상수와 응력-변형을 곡선과의 관계를 Fig. 7에, 누적량 AE 계수, 누적량 AE 에너지와 응력-변형을 곡선과의 관계를 Fig. 8에 나타내었다.

Fig. 7에 나타난 바와 같이 모든 시험편의 응력-변형을 곡선은 거의 동일하게 나타나고 있어 용사열에 의한 기체의 변형이 없음을 나타낸다. 또한 음향방출은 용사피막의 유무 및 코팅제의 종류에 관계없이 전 영역에서 발생하고 BT시험편, TOP시험편, BOND시험편, SUB시험편의 순으로 활발하게 일어나고 있음을 알 수 있다. 이와 같이 용사피막을 가진 코팅제가 SUB시험편에 비해 활발한 음향방출이 일어나는 것은 SUB시험편에는 없는 음향방출원 즉, 용사피막 내에서 박리의 생성, 성장 및 탈락 등에 의해 SUB시험편과는 다른 양상의 음향방출이 일어난다는 것을 알 수 있다[37].

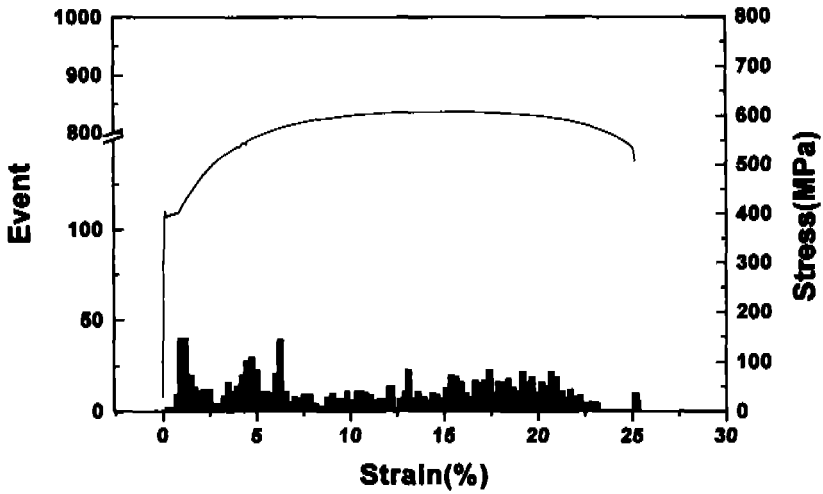
Fig. 7에서 AE 사상수 특성을 살펴보면 SUB시험편의 경우 응력-변형율의 증가에도 불구하고 용사 코팅제에 비해 작고 전 구간에서 비교적 일정하게 발생하고 있으나, BOND시험편의 경우 시험초기 SUB시험편과 비슷한 양상으로 발생하다가 변형율 15%를 전후로 증가하여 파단에 이르고 있음을 알 수 있다. 또한 TOP시험편의 경우 기체가 항복변형을 일으키는 구간 즉, 변형율 1%를 전후하여 급격히 증가하고 응력-변형율이 증가함에 따라 SUB시험편과 비슷한 양상의 AE 사상수가 발생하고, BT시험편의 AE 사상수는 변형율 6%~11%사이의 구간에서 급격히 증가하고 이후의 구간에서 BOND시험편과 비슷한 양상으로 발생하고 있어 코팅제의 중

류에 따라 음향방출 특성이 서로 다르게 나타나고 있음을 알 수 있다. 따라서 용사피막을 가진 시험편의 경우 AE 사상수가 급격히 증가하는 구간에서 기재(S45C)와 용사피막의 열팽창계수 차이로 많은 에너지가 축적되어 기재와 용사피막 혹은 용사피막 내에서 박리가 일어난다고 판단된다.

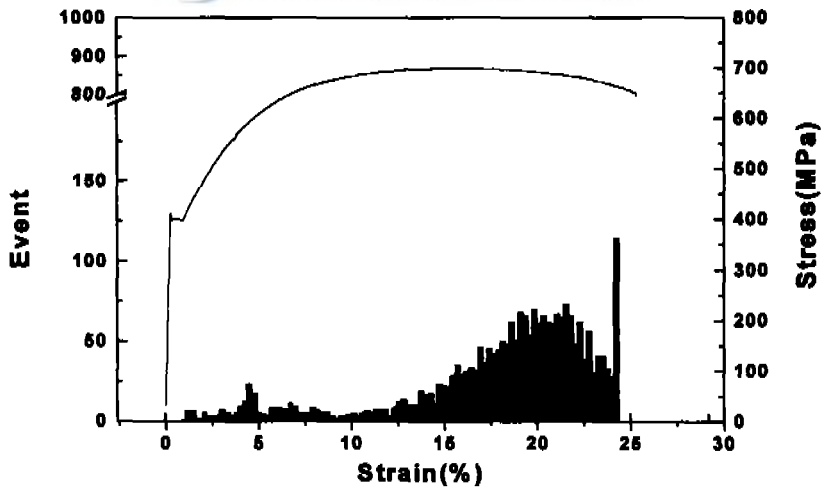
Fig. 8에 나타난 바와 같이 누적량 AE 계수와 누적량 AE 에너지 특성은 전술한 AE 사상수 특성과 마찬가지로 용사피막의 박리가 발생하는 구간에서 급격히 증가하며, 코팅제에 인장력이 작용시 그 에너지는 AE 사상수가 SUB시험편에 비해 급격히 증가하는 구간에서 기재와 용사피막에 축적되고, 축적된 에너지가 기재와 용사피막의 축적한계를 넘어서면 에너지가 방출한다. 결과적으로 기재와 용사피막 혹은 용사피막 내에서 박리의 발생, 성장 및 탈락이 일어나고 있음을 알 수 있으며, AE 계수 및 에너지의 총량은 BT시험편, TOP시험편, BOND시험편, SUB시험편의 순으로 높게 나타나고 있다.

한편, BT시험편의 경우 기재 위에 직접 세라믹 코팅한 TOP시험편에 비해 늦게 박리가 진행되고 있어 본드코팅 효과에 의해 밀착성이 개선되었음을 알 수 있다.

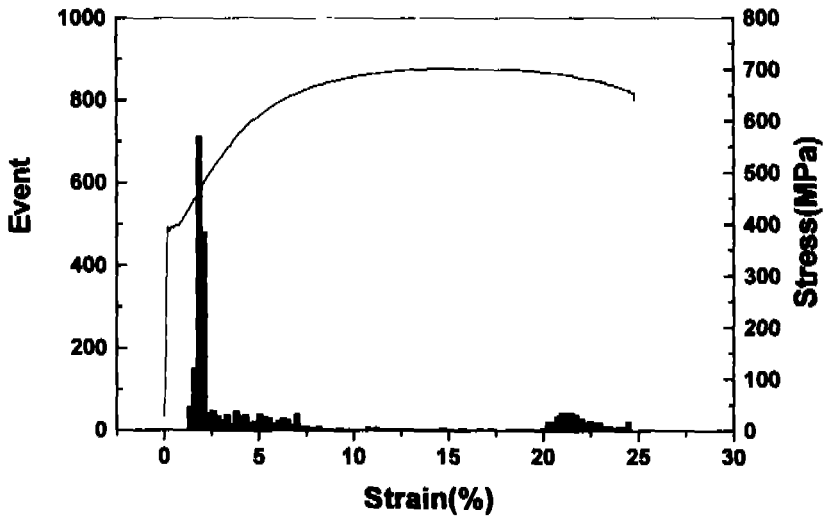




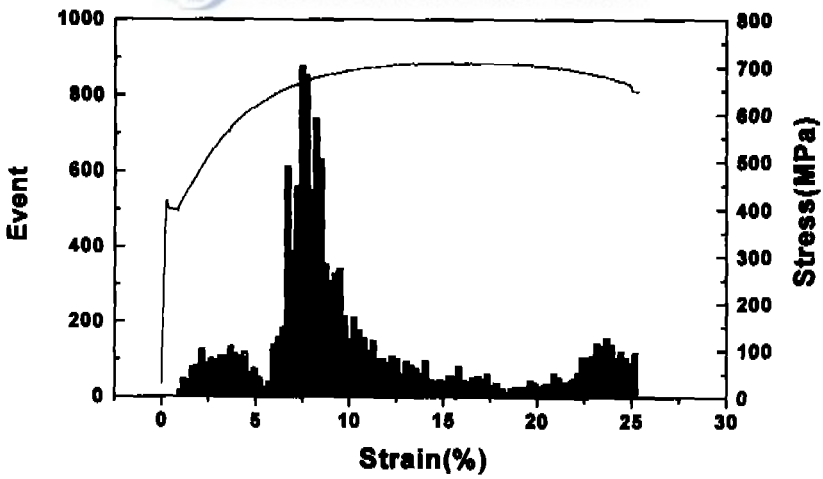
(a) SUB



(b) BOND

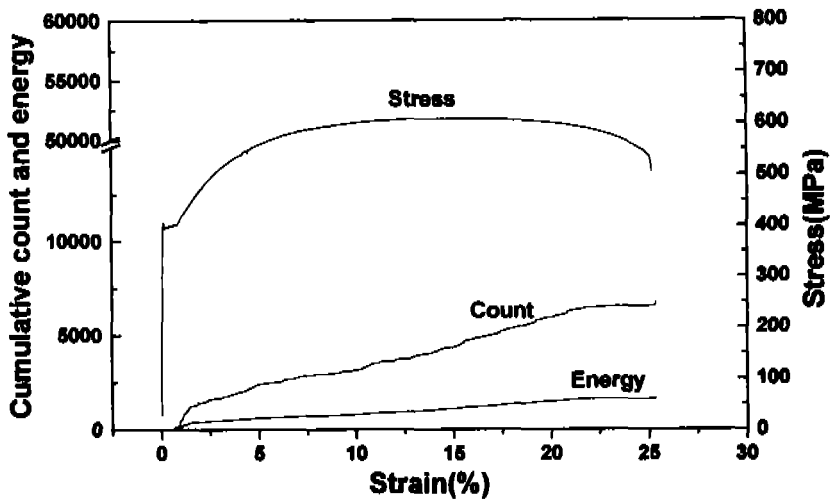


(c) TOP

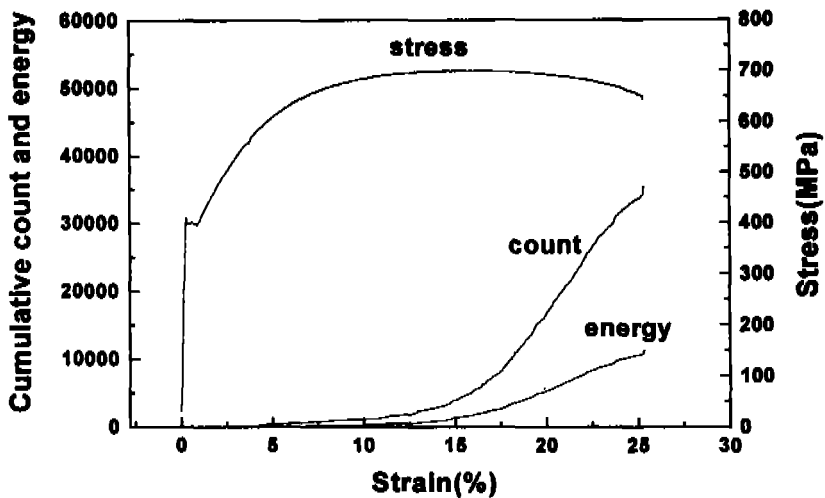
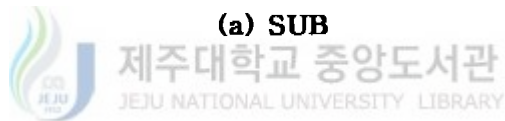


(d) BT

Fig. 7 Stress and event vs. strain

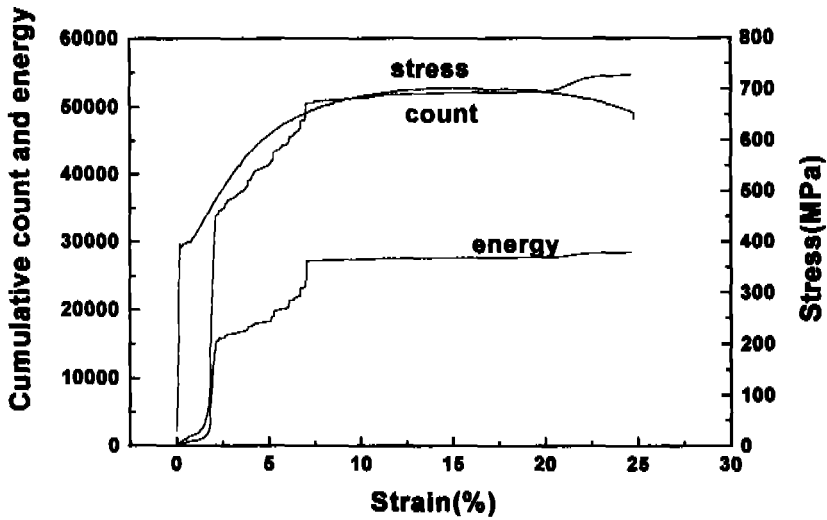


(a) SUB

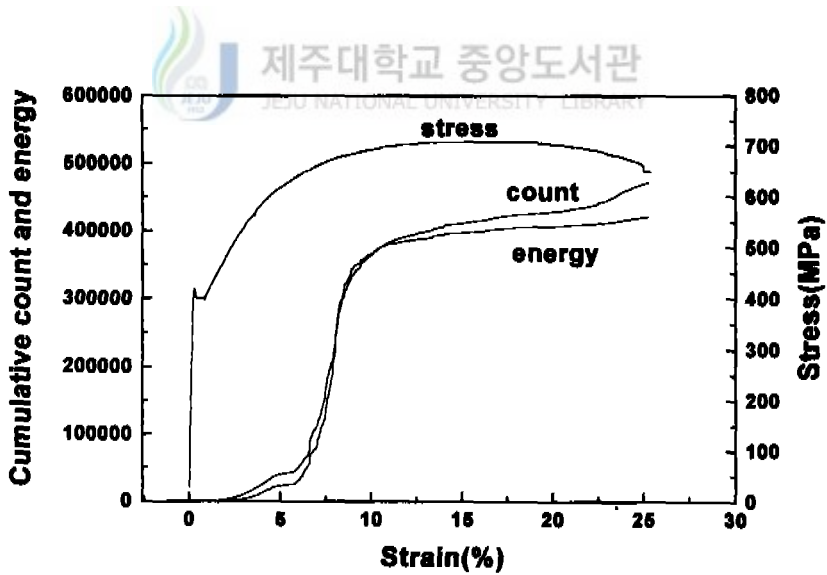


(b) BOND





(c) TOP



(d) BT

Fig. 8 Cumulative count and energy vs. strain

### 3.1.2 용사 코팅층의 표면 관찰 및 파괴기구

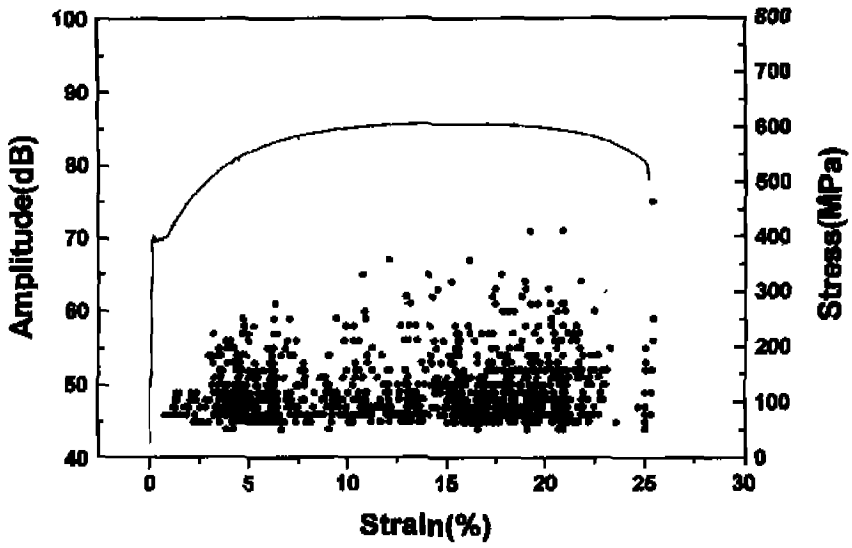
AE 진폭과 응력-변형율과의 관계를 Fig. 9에, 인장시험 후 파단부의 사진을 Fig. 10에 각각 나타내었다. Fig. 9에서 진폭 값은 Threshold 값을 45dB로 설정하였으므로 Threshold 값 이상의 신호만이 나타나 있다.

Fig. 9에서 AE 진폭 특성은 전술한 AE 사상수, 누적량 AE 계수와 누적량 AE 에너지 특성과 비슷하게 박리가 발생하는 구간에서 증가하고 있음을 알 수 있다. 한편, SUB시험편의 경우 대부분 약 65dB 이하의 AE 진폭이 발생하고 있으나, BOND시험편의 경우 기계와 용사피막사이의 박리로 추정되는 구간 즉, 변형율이 약 15%에서 파단점까지의 구간에서 SUB시험편 보다 조금 높은 80dB 이하의 진폭을 가진 음향방출이 활발하게 일어나고 있음을 알 수 있다. 따라서 이 구간에서의 SUB시험편과 비슷한 진폭을 갖는 음향방출의 증가는 본드 코팅층 내부에서의 소성변형과 파괴에 의해 발생한 것이고, SUB시험편 보다 높은 진폭을 갖는 음향방출은 기계와의 열팽창계수의 차이로 변형율의 증가에 따라 코팅층에 축적되어 있던 에너지가 발산되면서 다소 높은 진폭이 발생하여 기계와 본드 코팅층 사이의 층간 박리가 이루어진 것으로 판단된다. 이러한 결과는 Fig. 10(a)의 파단된 BOND시험편 사진에도 잘 나타나 있다. 용사피막의 파괴는 응력-변형율의 증가함에 따라 하중과 수직 방향으로 발생하며, 박리의 대부분은 변형율이 급격히 증가하는 넥킹(necking)부에 집중되고, 파단부 근방을 벗어나면 다수의 피막 균열이 나타난다.

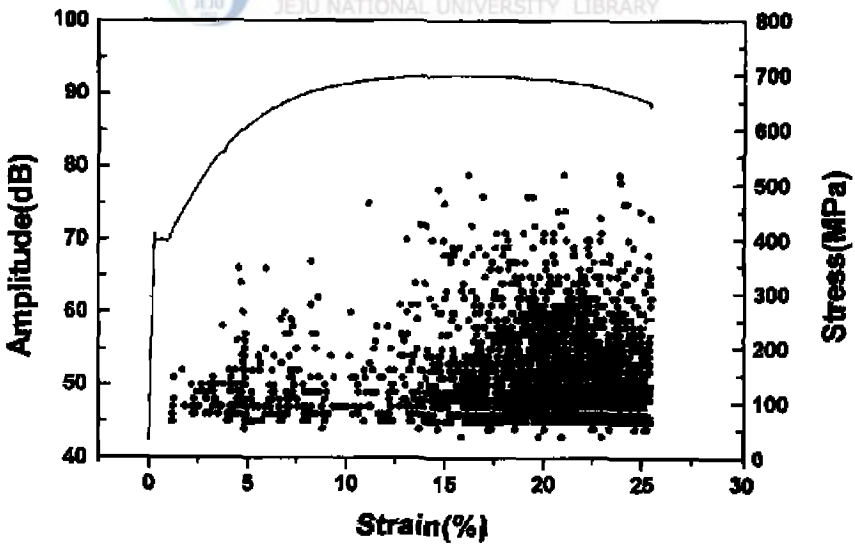
한편, TOP시험편의 경우 변형율 약 1%~5%의 구간에서 BOND시험편에는 없는 80dB이상의 높은 AE 진폭이 발생하고 있어, 이 구간에서 기계와 세라믹 사이의 큰 열팽창계수 차이로 기계와 코팅층 사이에 많은 에너지가 축적되어 비교적 큰 규모의 박리가 일어나고, 이때 용사피막은 기계로부터 완전히 분리되어 탈락되기 때문에 탑 코팅층의 박리시 진폭은 BOND코팅층에 비해 높게 나타나며, 밀착성은 감소하고 있음을 알 수 있다.

또한, BT시험편의 AE 진폭 특성은 변형율이 약 6%~11%의 구간에서 80dB이상의 진폭 분포 수는 TOP시험편에 비해 현저하게 증가하고, 80dB

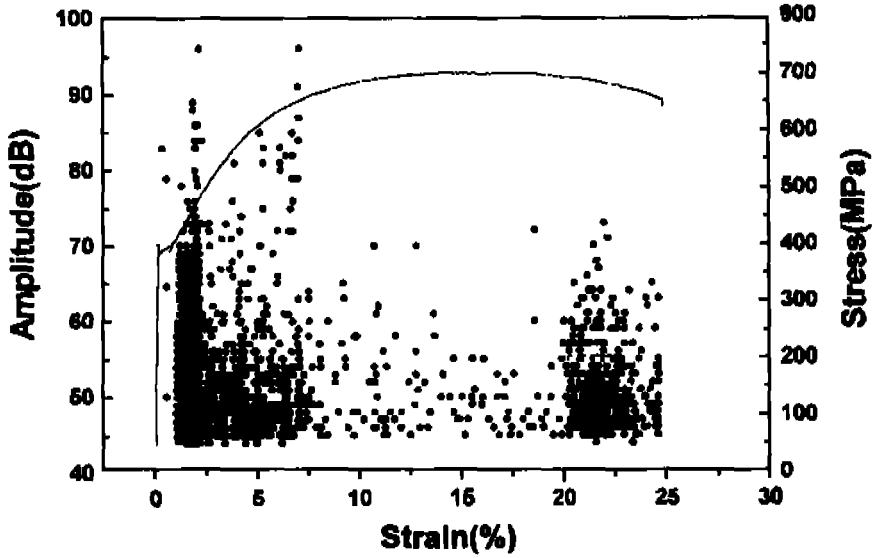
이하의 진폭 분포 수도 역시 증가하고 있음을 알 수 있다. 이는 기재와 밀착성이 비교적 양호한 본드 코팅층의 영향으로 기재와 탑 코팅층사이의 열팽창계수의 차이가 어느 정도 완화된 결과로 탑 코팅층과 본드 코팅층 사이의 층간 박리시 비교적 낮은 80dB이하의 진폭을 가진 음향방출이 일어나고, 탑 코팅층 내에서의 계면 박리시 비교적 높은 80dB 이상의 진폭을 가진 음향방출이 일어난 것으로 판단된다. 이러한 양상은 Fig. 10 (b)의 사진에도 잘 나타나 있다. 그림에 나타난 바와 같이 탑 코팅층은 파괴시 충격에도 불구하고 일부가 본드층과 밀착되어 있으며, 기재와 본드 코팅층 사이의 박리도 BOND시험편에 비해 심하지 않은 것으로 보아 BT시험편의 본드 코팅층 표면에 생성된 압축잔류응력과 탑 코팅에 의한 표면소성변형 구속효과로 인하여 밀착성이 개선되어 있음을 알 수 있다[38].



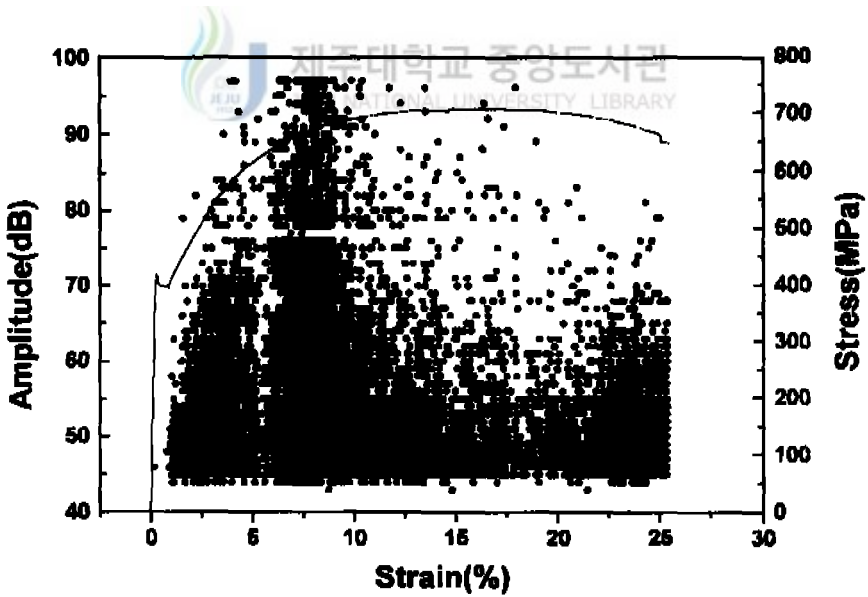
(a) SUB



(b) BOND

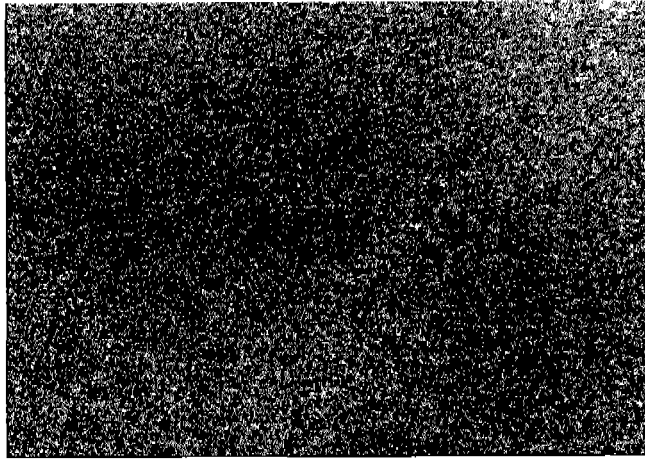


(c) TOP



(d) BT

Fig. 9 Stress and amplitude vs. strain



**(a) BOND**



**(b) BT**

←————→  
Load direction

**Fig. 10 Surface crack of coating layer after tensile testing**

## 3.2 염수분무 시간에 따른 시험편의 인장시험시 AE특성

부식은 염수분무시험기에서 BOND시험편, TOP시험편 및 BT시험편을 각각 2시간, 5시간, 10시간으로 염수분무 실험을 한 후, 전술한 시험방법으로 인장시험시 용력-변형을 특성과 함께 AE Parameter를 조사·검토하였다.

### 3.2.1 염수부식에 따른 Ni-4.5wt.%Al 코팅계의 AE특성

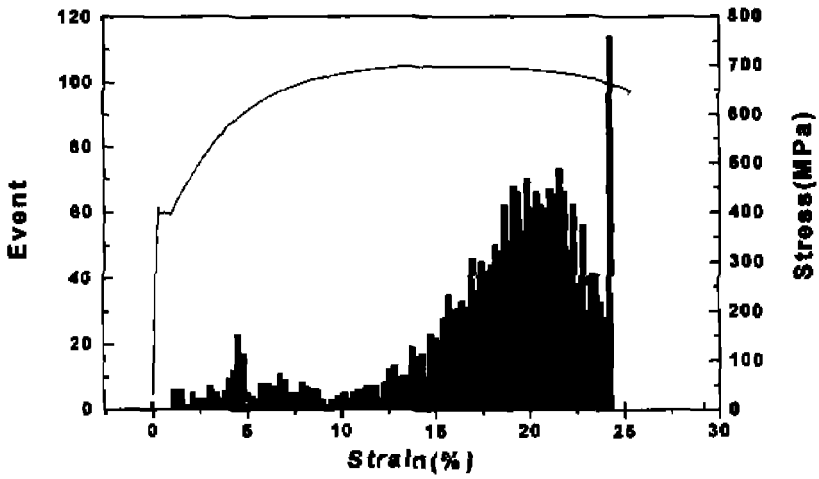
용사코팅 후 부식을 실시하지 않은 BOND시험편과 BOND시험편을 염수분무시험기에서 각각 2시간, 5시간, 10시간을 부식시험을 실시한 2BOND시험편, 5BOND시험편 및 10BOND 시험편의 AE 사상수와 용력-변형을 곡선을 Fig. 11에 나타냈으며, 부식시간에 따른 누적량 AE 계수와 누적량 AE 에너지의 곡선을 용력-변형을 곡선과 함께 Fig. 12와 13에 나타내었다.

그림에 나타난 바와 같이 부식시간에 따른 용력-변형을 곡선은 부식을 실시하지 않은 시험편과 비교시 변화가 없는 것으로 보여주고 있다. 따라서 부식의 영향으로 인한 기체의 강도변화는 없는 것으로 나타났다. 한편 부식시간에 따른 음향방출은 10BOND시험편, 5BOND시험편, 2BOND시험편, BOND시험편 순으로 적게 일어나고 있음을 알 수 있으며, AE 사상수, 누적량 AE 계수 및 누적량 AE 에너지의 특성을 살펴보면 용력-변형율의 증가에도 불구하고 시험초기에는 비교적 적은 성장을 보이다가 변형율 17%부근에서 음향방출이 활발하게 진행되고 있어 부식을 실시하지 않은 BOND시험편과 비슷한 시기에 음향방출이 증가하고 있음을 알 수 있다. 그러나 부식을 실시한 시험편은 실시하지 않은 시험편에 비해 음향방출이 활발치 못하며, 특히 부식을 10시간 실시한 10BOND시험편의 경우 변형율 17%에서 파단점에 이르는 구간의 AE 사상수, 누적량 AE 계수 및 누적량 AE 에너지 특성이 다른 시험편에 비해 매우 적게 나타나고 있어 기체와 코팅층 사이의 부식으로 인한 결함의 발생으로 밀착성을 저하시키고 있음을 보여주고 있다. 이는 용사코팅계가 부식환경에 노출될 경우 용사코팅 후에 용사코팅 표면에 잔존하는 기공 등의 결함으로 염수가 기체로 침투되고[39], 기체로 침투한 염수는 시간이 경과함에 따라 용사코팅층과 기체사이로 확산되어 부식을 일으키며, 특히 불

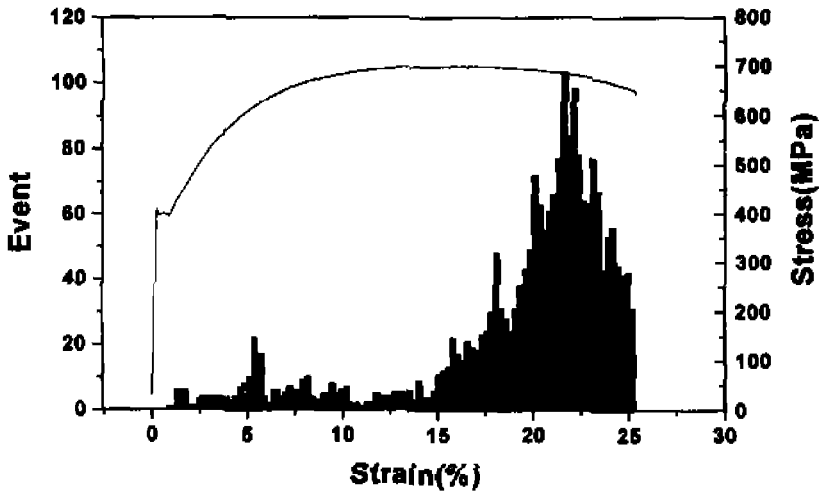
라스팅에 의한 기재표면의 조대화로 부식이 빠르게 진행되어, 밀착성이 현저히 감소하기 때문에 비교적 적은 에너지로도 쉽게 박리가 일어난다고 추정되며 이러한 사실은 후술하는 파단면 관찰의 결과에도 잘 나타나 있다.



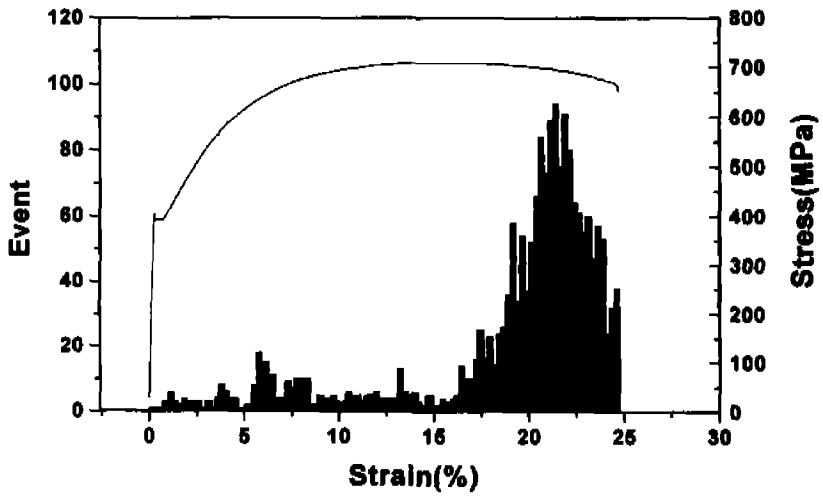




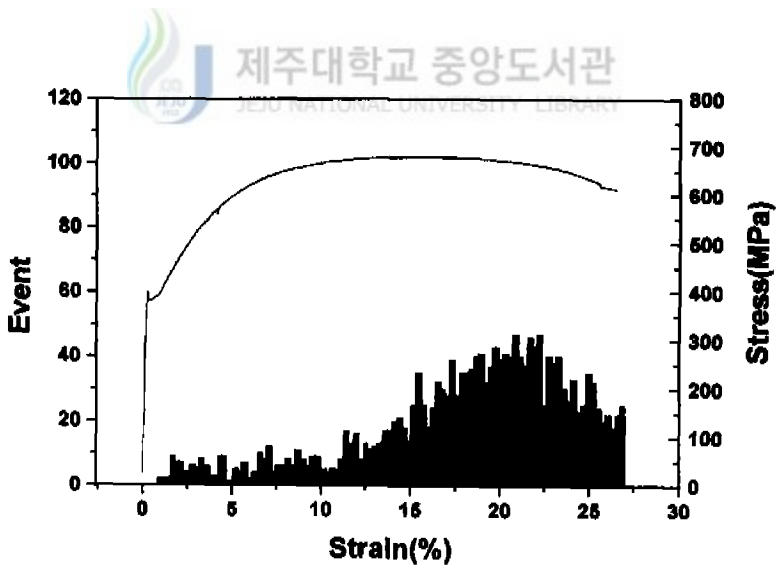
(a) BOND



(b) 2BOND



(c) 5BOND



(d) 10BOND

Fig. 11 Stress and event vs. strain

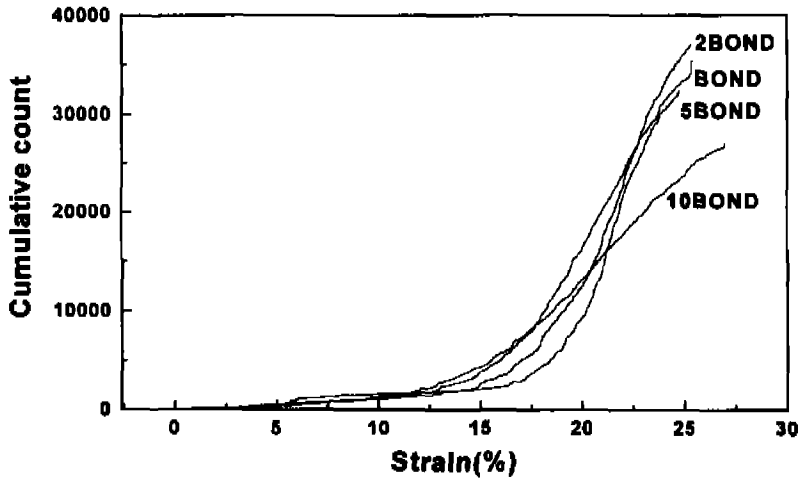


Fig. 12 Cumulative count vs. strain

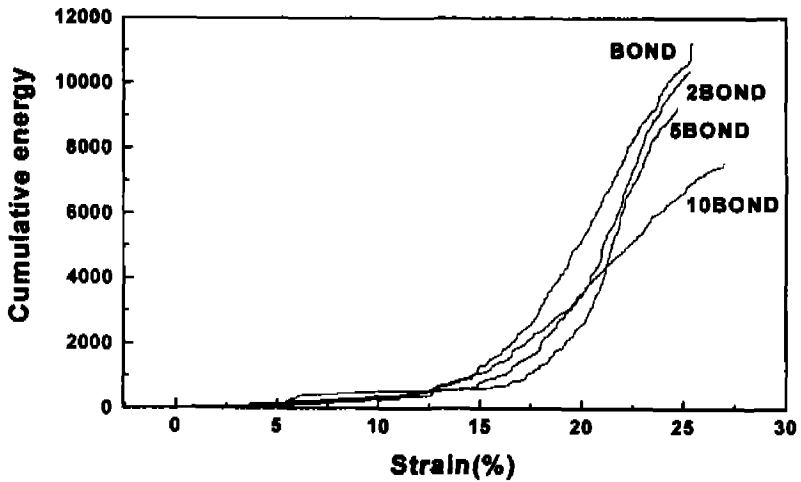


Fig. 13 Cumulative energy vs. strain

### 3.2.2 염수부식에 따른 Ni-4.5wt.%Al 코팅재의 파단면 관찰 및 파괴 기구

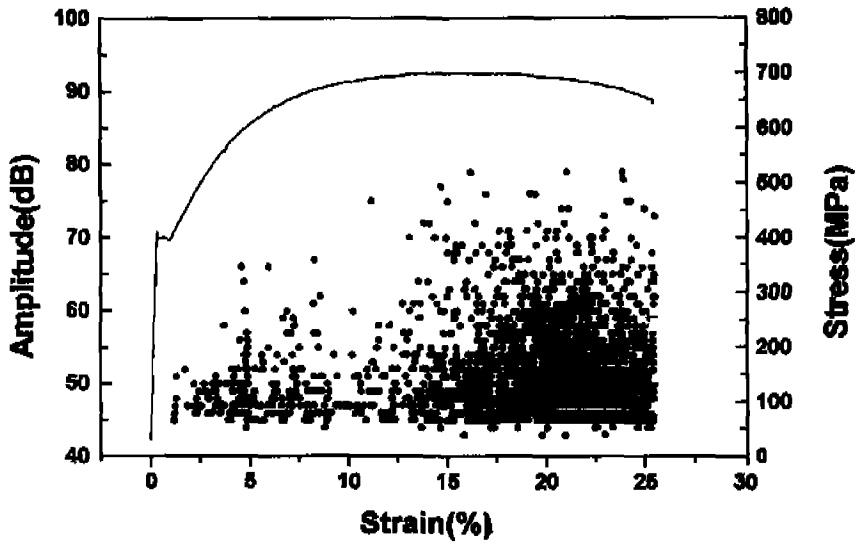
AE 진폭과 응력-변형율과의 관계를 Fig. 14에, 인장시험시 파단된 시험편의 표면사진을 Fig. 15에 나타내었다.

Fig. 14에서 모든 시험편은 부식시간에 관계없이 본드 코팅의 음향방출원으로 추정되는 음향방출을 발생시키고 있으며, 또한 AE 진폭 최대값은 80dB 정도이다. 진폭이 인장 초기부터 변형을 17%까지의 전 구간에서 걸쳐 65dB 이하의 분포를 보이고 있어, 기재와 코팅재 사이의 박리 등에 의한 결함이 거의 발생하고 있지 않음을 알 수 있다. 그러나 변형을 17%를 지나 파단점에 근접하면서 비교적 높은 진폭들이 급증하고 있다. 이는 본드 코팅층의 박리 또는 소성변형과 파괴로 추정된다. 부식시간이 경과함에 따라 2BOND시험편과 5BOND시험편은 BOND시험편의 진폭 분포와 비교해보면, 염수부식에 의한 영향으로 이 구간의 진폭이 비교적 적은 감소를 보이고 있지만 전반적으로 비슷한 경향을 나타내고 있어, 본드 코팅층과 기재와의 밀착성이 크게 감소하지 않음을 알 수 있다. 그러나, 염수부식을 10시간 실시한 10BOND인 경우 진폭의 분포는 다른 시험편과 같이 인장초기에서는 비슷한 경향을 나타내고 있지만, 변형을 15%에 이르러서는 비교적 적은 값을 가진 65dB이하의 진폭 분포가 많아지고, 그 후의 구간에서도 본드 코팅의 박리로 추정되는 진폭의 분포도 현저한 감소의 경향을 보이고 있다. 이는 용사 코팅 후에 존재하는 기공 등에 의해 기재가 염수에 노출되어 부식이 진행이 되고, 이로 인해 생긴 부식물이 팽창이 되어 코팅층으로 밀어내고 올라오면서 밀착성을 감소시키고 있다고 사료된다. 부식의 시간이 증가함에 따라 이러한 진행이 가속화되어, 10BOND에서 비교적 적은 에너지의 값을 가진 적은 진폭이 비교적 밀착성이 저하된 부분에 집중되고, 에너지의 축적한계를 넘어서게 되어서 쉽게 박리와 탈락이 이루어진 결과로서 그림과 같이 진폭의 분포를 보이고 있다고 추정된다.

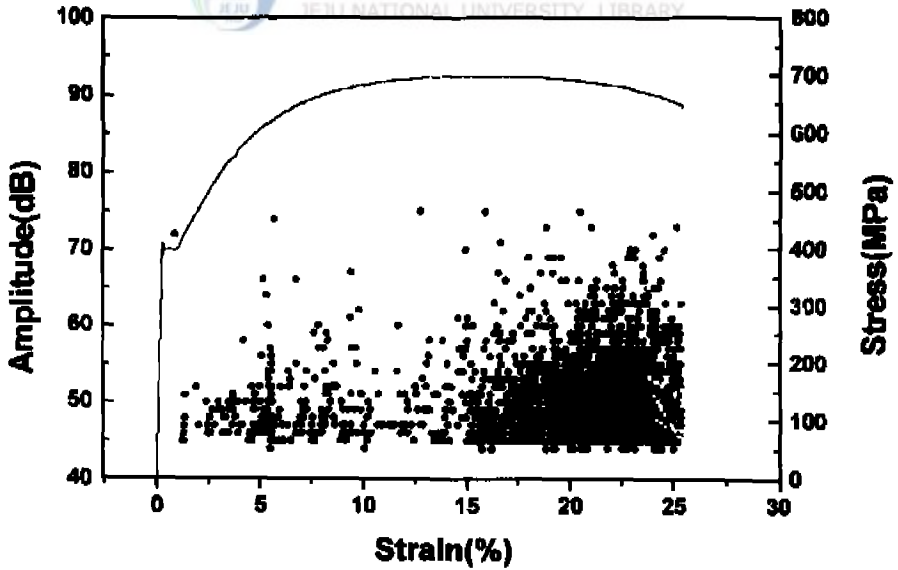
Fig. 16에 나타난 사진은 10BOND시험편의 파단 후 표면사진으로 인장시험시 염수부식에 의해 현저히 감소한 밀착성의 영향으로 변형을 3% 전후에 녹이 올라온 부근에서 하중을 가하는 방향에 수직으로 균열이 발생 성장

하면서 부풀어오르는 현상이 발생하였고, 그 후 적은 값을 가진 진폭이 다른 시험편과는 달리 많이 분포한 변형을 15%이르러 적은 양의 에너지로도 충분히 균열을 성장시키면서 전면적으로 확산이 되어 비교적 큰 규모의 박리를 생성하여 탈락을 하고 있음을 보이고 있다.

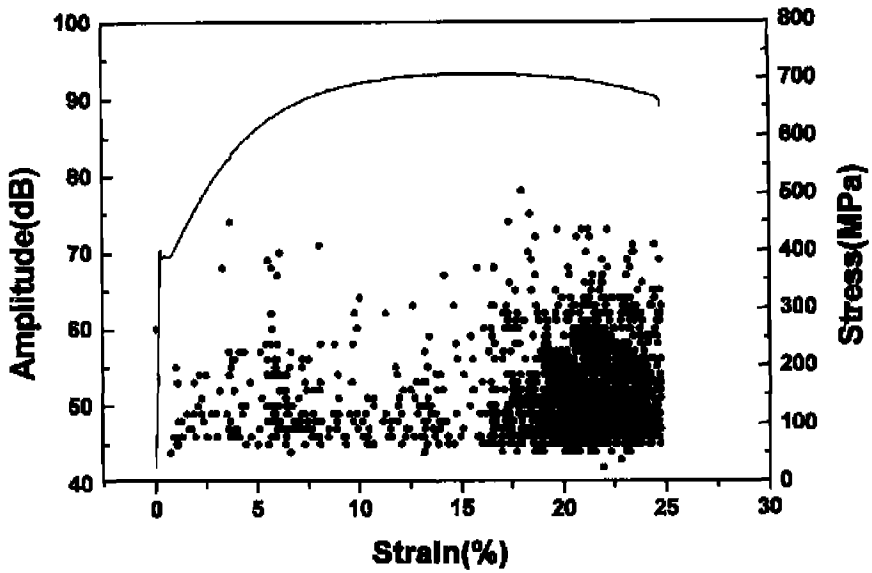




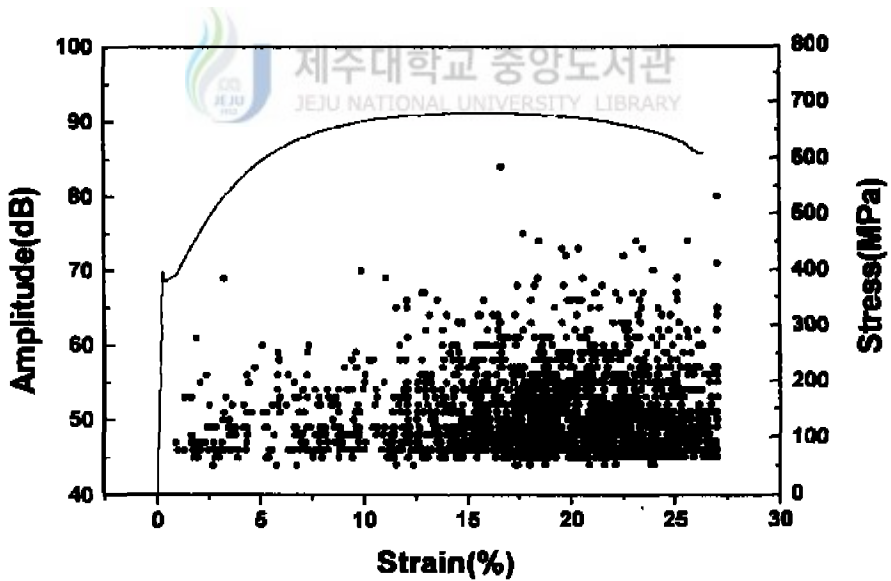
(a) BOND



(b) 2BOND

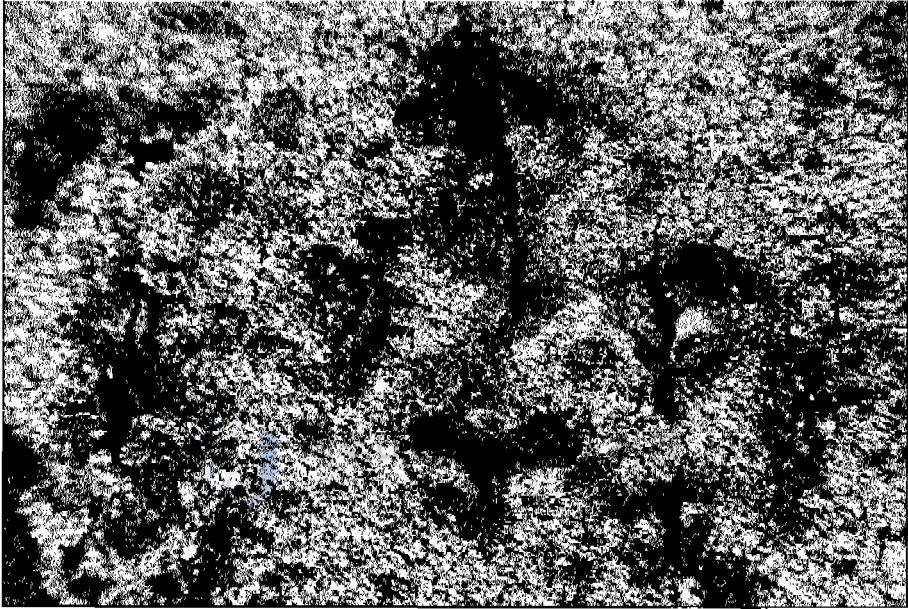


(c) 5BOND



(d) 10BOND

Fig. 14 Stress and amplitude vs. strain



←————→  
Load direction

**Fig. 15 Surface crack of 10BOND coating layer after tensile testing**



### 3.2.3 염수부식에 따른 TiO<sub>2</sub> 코팅제의 AE특성

용사코팅 후 부식을 하지 않은 TOP시험편과 염수분무시험기에서 TOP시험편을 각각 2시간, 5시간, 10시간을 부식시험을 실시한 2TOP시험편, 5TOP시험편 및 10TOP시험편의 AE 사상수와 응력-변형을 곡선을 Fig. 16에 나타냈으며, 부식시간에 따른 누적량 AE 계수와 누적량 AE 에너지의 곡선을 응력-변형을 곡선과 함께 Fig. 17과 18에 나타내었다. 그리고 Fig. 19에는 AE 에너지와 응력-변형을 곡선을 나타내었다.

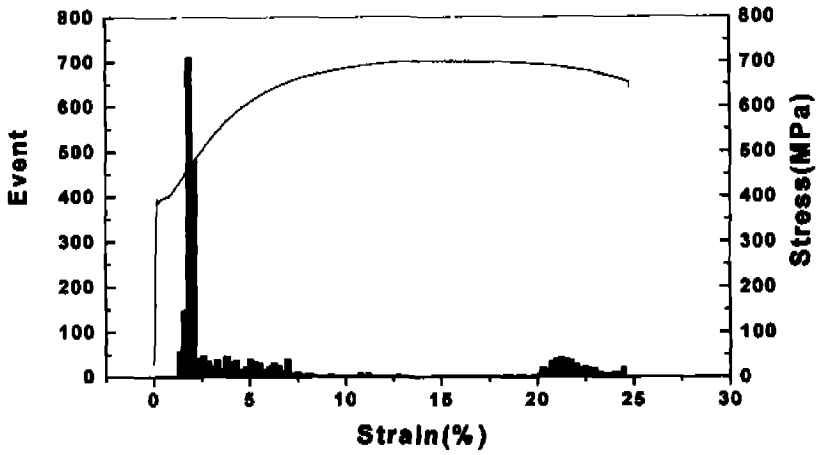
그림에 나타난 바와 같이 음향방출은 부식시간에 관계없이 전 영역에서 발생하고 있으며, 용사피막내의 박리가 생성, 성장 및 탈락 등에 의해 음향방출이 발생한다고 추정 할 수 있다. 한편, 부식을 실시한 용사 코팅제에서 변형을 약 1%를 전후하여 약5%를 지나는 구간에서의 AE 사상수의 특성은 부식시간에 따라 10TOP시험편, 5TOP시험편, 2TOP시험편, TOP시험편 순으로 적게 발생하고 있음을 보이고 있다. 그리고 누적량 AE 계수와 누적량 AE 에너지에 있어서, 모든 시험편들은 AE 사상수가 증가하는 구간에서 누적량도 급격하게 증가하고 있다. 또한 변형을 약 1%구간을 전후하여 부식시간이 증가함에 따라 누적량은 10TOP시험편, 5TOP시험편, 2TOP시험편, TOP시험편 순으로 조기에 급격하게 상승하고 있음을 보이고 있다. 이는 용사코팅제가 부식환경에 노출될 경우 용사코팅 후에 용사코팅 표면에 잔존하는 기공 등의 결함으로 염수가 기체에 침투되고, 기체로 침투한 염수는 시간이 경과함에 따라 용사코팅층과 기체 사이로 확산되어 부식을 일으킨다. 또한 블라스팅에 의해 조대화된 기체표면은 부식을 더욱 가속화되어 용사 피막층의 입계나 계면에서 많은 결함이 발생되고 밀착성도 감소 하고 있다고 사료되며, 또한 생성된 부식물은 본드 코팅층 보다 조밀한 탑 코팅층의 표면 외부로 유출이 원활히 이루어지지 않음으로 인해 기체와 탑 코팅층 사이에서 팽창되어 밀착성을 더욱 감소시켜 조기에 박리와 탈락이 발생하고 있다고 사료된다.

그러나 누적량 AE 에너지에 있어서 부식시간이 증가함에 따라 AE 에너지가 증가하고 있음을 보이고 있으며, 10TOP시험편이 가장 많은 AE 에너지를 보이고 있다. 다음으로 5TOP시험편이며, 2TOP시험편과 TOP시험편은 비슷한 양의 에너지의 발생을 보이고 있다. 이는 전술한 바와 같이 코팅층의 기공

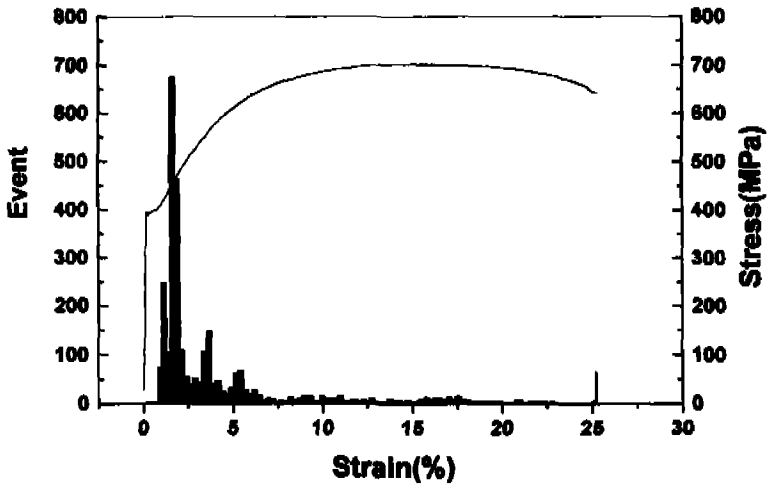
으로 침투된 염수가 기재표면을 부식시키고, 부식시간이 증가에 의해 밀착성은 저하된다. 이에 인장하중이 부가되어 발생한 에너지는 취성이 큰 탑 코팅층에 집중되고, 적은 변형율에서 순간적으로 큰 규모의 박리와 탈락이 이루어지면서 에너지가 발산된다. 부식시간의 증가에 의해 밀착성은 더욱 저하되어 박리의 규모와 탈락이 크게 이루어지면서, 에너지도 순간적으로 크게 발산되고 있음을 Fig. 19에서 보여주고 있다. 이러한 결과는 후술하는 Fig. 21의 인장시험 후 박리된 TOP시험편의 파단면 사진에도 잘 나타나 있다



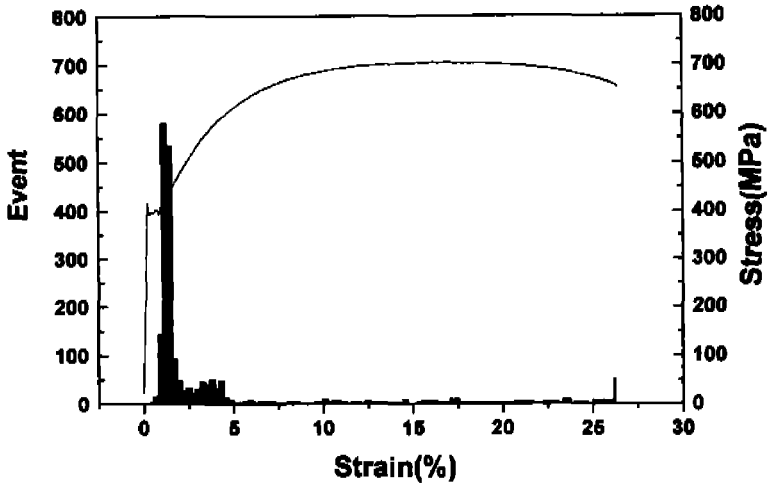
제주대학교 중앙도서관  
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY



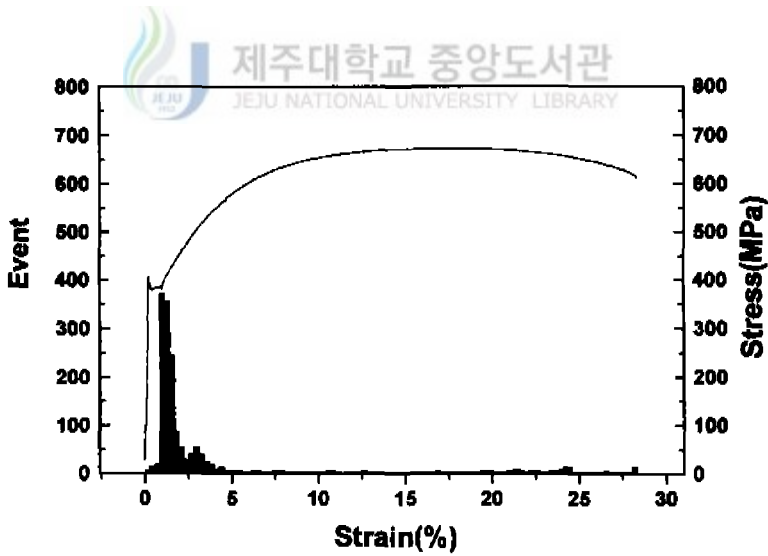
(a) TOP



(b) 2TOP



(c) 5TOP



(d) 10TOP

Fig. 16 Stress and event vs. strain

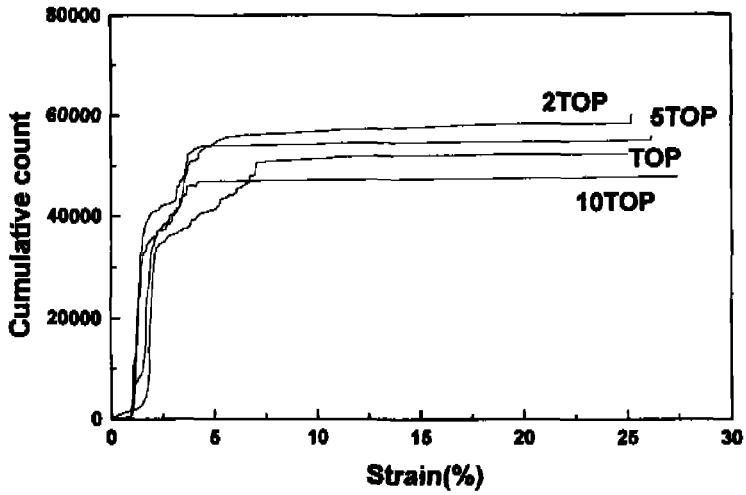


Fig. 17 Cumulative count vs. strain

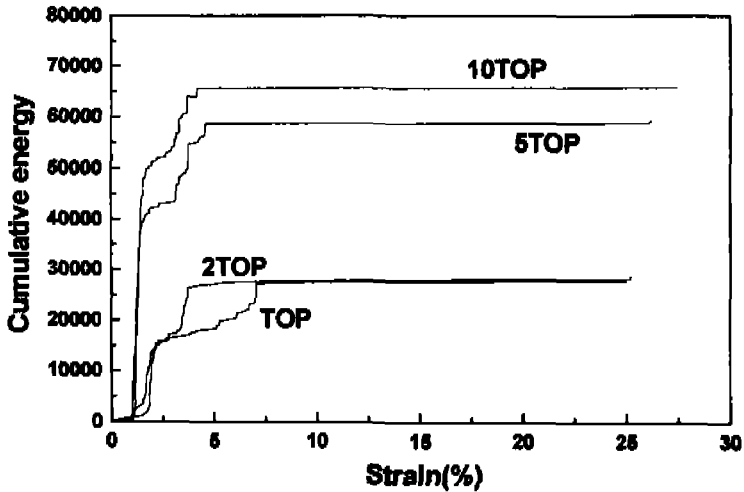
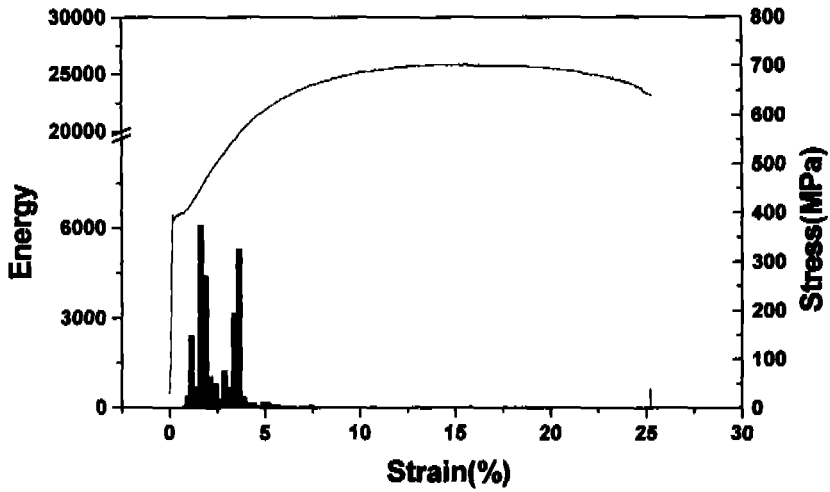
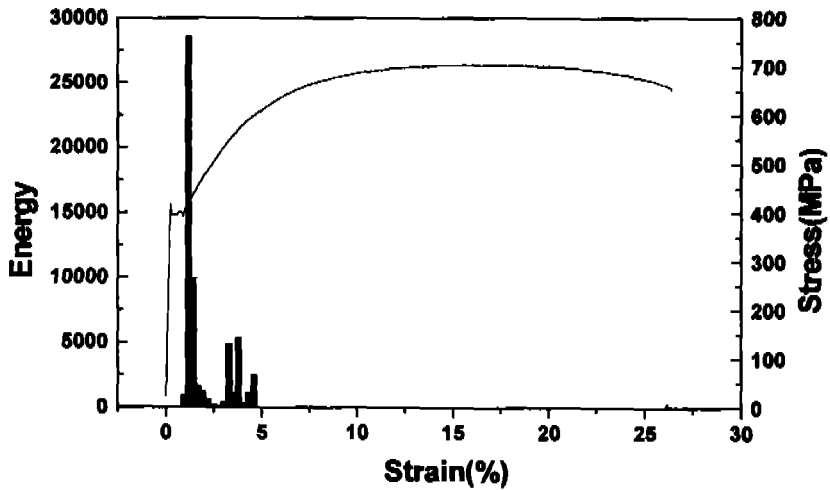


Fig. 18 Cumulative energy vs. strain



(a) 2TOP



(b) 5TOP

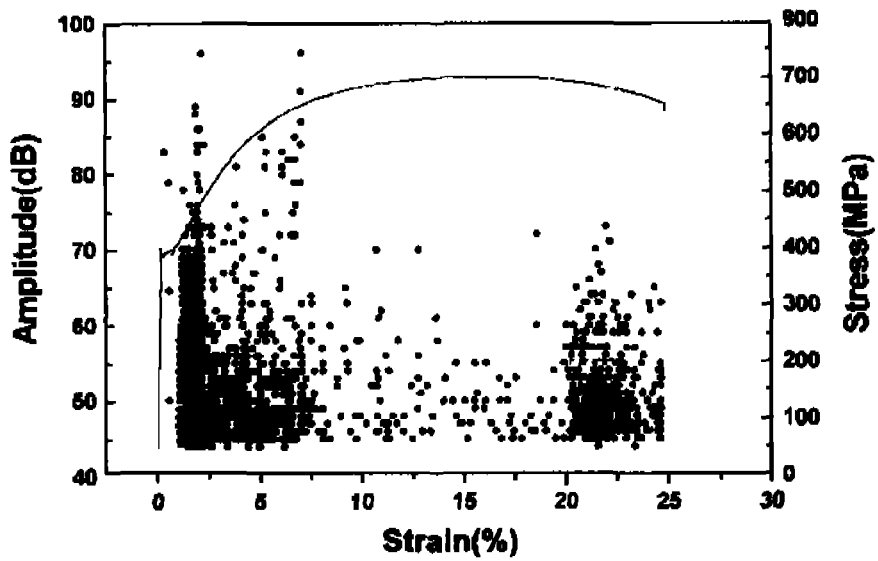
Fig. 19 Stress and energy vs. strain

### 3.2.4 염수부식에 따른 TiO<sub>2</sub> 코팅제의 파단면 관찰 및 파괴기구

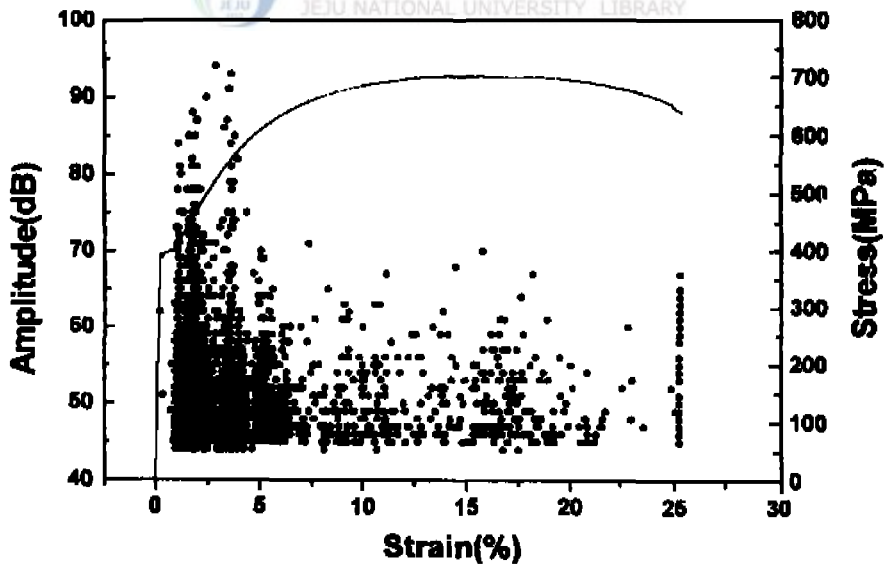
Fig. 20에는 AE 진폭과 응력-변형율과의 관계를, Fig. 21 인장 시험후 큰 규모의 박리가 생성되어 탈락한 코팅층의 사진을 나타내었다.

그림에 나타난 바와 같이 AE 진폭 특성을 살펴보면 전술한 AE 사상수 및 AE 에너지 누적량이 증가하는 구간에서 AE 진폭 분포량도 증가하고 있음을 알 수 있다. 그리고 변형율이 약 1%~5%의 구간에서 70dB 이상의 높은 값을 가진 AE 진폭이 발생하고 있어, 탑 코팅에 의한 박리의 발생, 성장 및 탈락이 이루어지고 있고, 이후의 구간에서는 SUB시험편과 비슷한 값을 가진 AE 진폭이 발생하고 있어 더 이상 박리가 일어나고 있지 않음을 알 수 있다. 한편, 용사코팅제의 AE 진폭 발생 시기는 10TOP시험편, 5TOP시험편, 2TOP시험편, TOP시험편 순으로 부식시간이 증가 할 수록 AE 진폭 발생시기와 박리의 생성 및 성장 구간도 점차 짧아지며, 진폭 분포 수도 감소하고 있음을 보여주고 있다. 이는 용사코팅 후 잔존하는 기공 등의 결함을 통하여 침투한 염수에 의해 기재의 표면이 부식되고 이 과정에서 생성된 부식물이 다시 탑 코팅층의 기공을 통해 배출되는 과정에서 원활한 배출이 이루어지지 못하고 기재와 코팅층 사이에서 팽창되면서 코팅층을 밀어내어 기재와 코팅층 간의 밀착성을 감소시키기 때문으로 판단된다.

Fig. 21에는 인장시험 후 박리된 TOP시험편의 대표적인 탈락된 코팅층 사진을 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 TOP시험편의 코팅층 박리는 기재에 비해 취성이 매우 크기 때문에 후술하는 본드 코팅층을 가진 BT시험편의 박리의 모습과는 달리 박리된 탑 코팅 피막에서 균열이 발생, 성장한 모습이 거의 없으며, 박리와 탈락이 BT시험편 보다 조기에 발생하고, 짧은 기간 내에 비교적 큰 규모로 순간적으로 일어나고 있음을 알 수 있다.

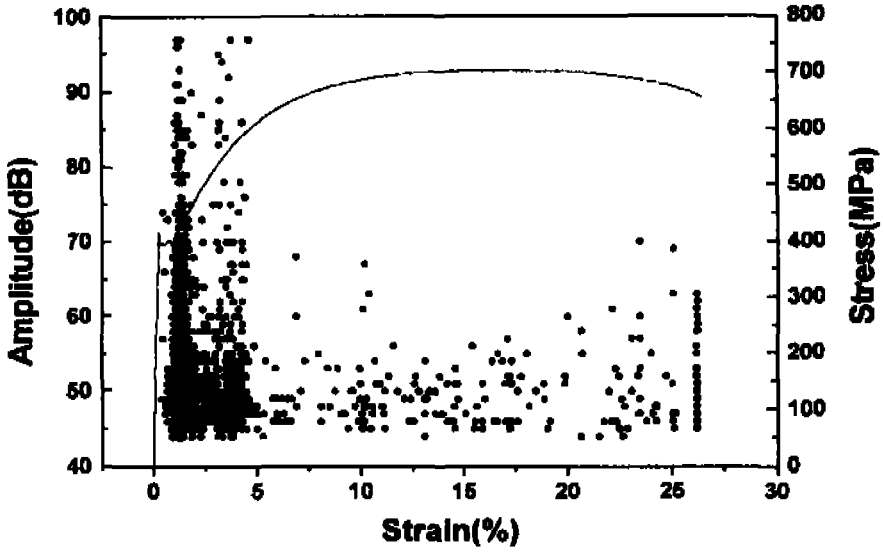


(a) TOP

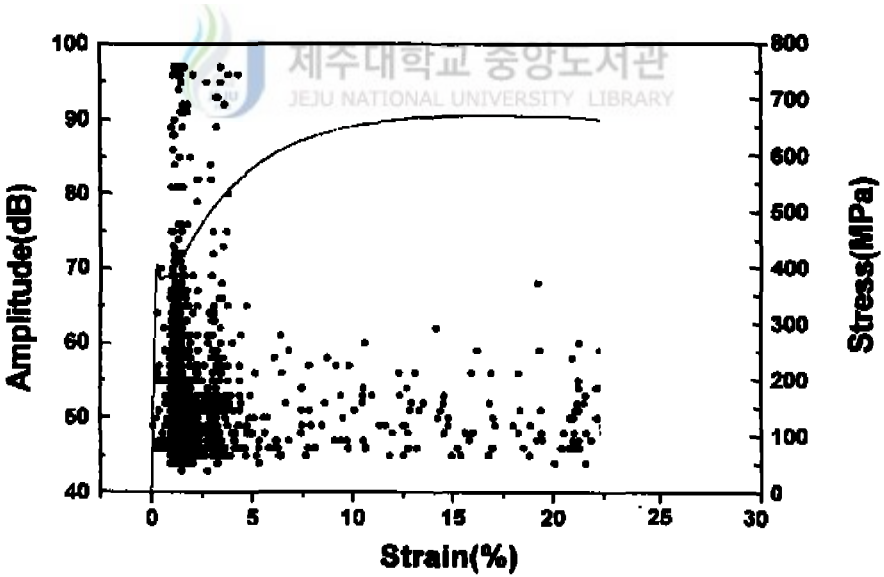


(b) 2TOP



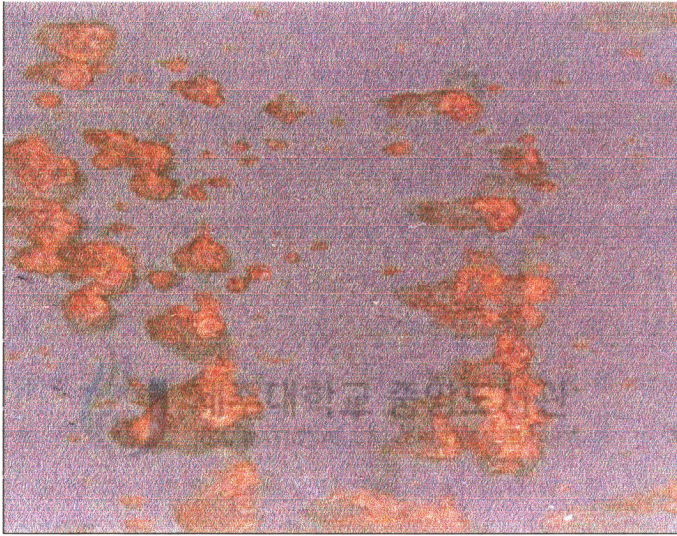


(c) 5TOP



(d) 10TOP

Fig. 20 Stress and amplitude vs. strain



↔  
Load direction

**Fig. 21 Photograph of the exfoliation apart from 5TOP specimen**

### 3.2.5 염수부식에 따른 Ni-4.5wt.%Al + TiO<sub>2</sub>코팅제의 AE특성

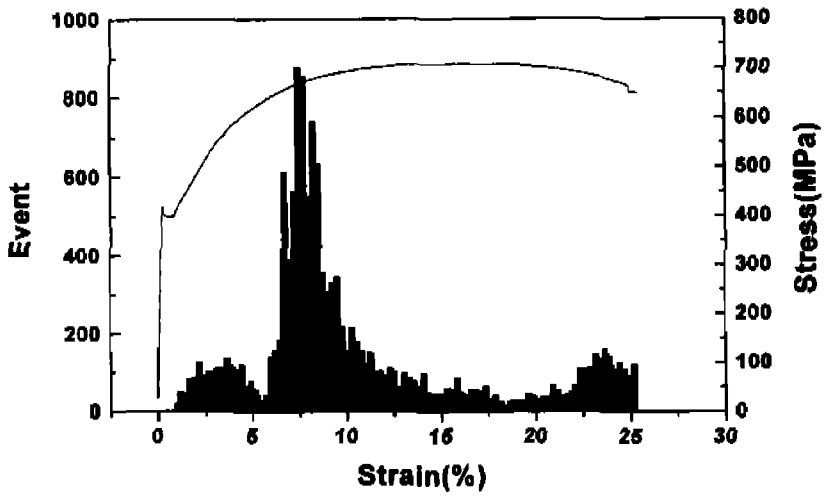
용사코팅 후 부식하지않은 BT시험편과 염수분무시험기에서 BT시험편을 각각 2시간, 5시간 10시간을부식시험을 실시한 2BT시험편, 5BT시험편 및 10BT 시험편의 AE 사상수와 응력-변형을 곡선을 Fig. 22에, 부식시간에 따른 누적량 AE 계수와 누적량 AE 에너지의 곡선을 응력-변형을 곡선과 함께 Fig. 23와 Fig. 24에 나타내었다.

그림에 나타난 바와 같이 음향방출 특성은 부식시간의 증가에 따라 10BT시험편, 5BT시험편, 2BT시험편, BT시험편 순으로 적게 발생하고 있다. 그리고 비슷한 형태의 음향방출을 발생하고 있는 BT시험편, 2BT시험편, 5BT시험편에서는 변형을 약 6% 이전에서 TOP시험편 보다는 비교적 적은 양의 AE 사상수가 발생하며, 누적량 AE 계수와 누적량 AE 에너지도 급격하게 증가하지 않고 있다. 이는 본드 코팅에 의해 탑 코팅층의 밀착성이 개선되어 변형을 약 6%구간 이전에서는 비교적 적은 양의 음향방출을 발생하고 있다고 사료된다. 변형율의 증가함에 따라 에너지는 계속 축적되면서 변형을 6~11%구간에 이르러서는 축적된 에너지가 발산되면서 기재와 코팅층, 본드 코팅층과 탑 코팅층에서 큰 규모의 박리와 탈락이 발생하고 있으며, 또한, 취성이 큰 탑 코팅층에 에너지가 집중되어 큰 음향방출을 발생하고 있다고 사료된다. 변형을 11%구간 이후에서부터 파단점까지 음향방출은 비교적 적게 발생하고 있다. 이는 탑 코팅층이 탈락한 후에도 본드 코팅층은 여전히 기재에 남아 있어 변형율의 증가에 의해 계속적으로 박리와 탈락이 이루어지고 있다고 사료된다. 그러나 이러한 특성은 부식시간의 증가에 의해 음향방출은 더욱 적게 발생하고 있으며, 특히 코팅층의 박리와 탈락이 많이 이루어지는 구간 변형을 6~11%에서의 음향방출이 현저하게 감소하고 있다. 이는 코팅 후 잔존하는 기공 등의 결함으로 침투한 염수가 블라스팅으로 인해 조대화된 기재의 표면을 부식시키고 있으며, 이로 인해 생긴 부식물은 팽창하여 본드 코팅층과 탑 코팅층을 밀어내고 있어 밀착성이 감소하여 가고 있다고 사료되며, 본드 코팅과 탑 코팅으로 인하여, 기공층 등의 결함의 감소로 TOP시험편 보다는 부식의 진행에 따른 밀착성 감소가 적게 나타나고 있다고 사료된다.

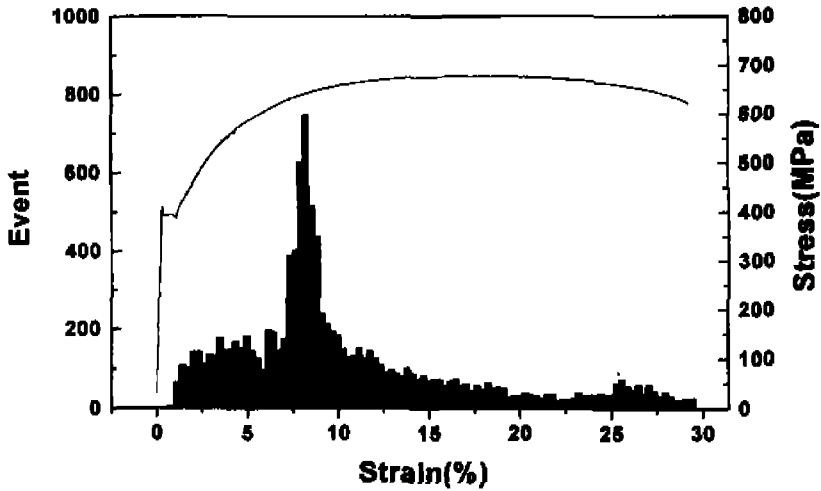
부식시간이 더 경과한 10BT시험편은 인장시험 초기부터 파단점까지 적은 양의 음향방출을 발생하여 다른 시험편과는 다른 형태를 보이고 있다. 이는 부식시간의 증가로 인해 기공으로 침투된 염수는 많아지고, 이러한 염수는 비교적 부식이 쉽게 이루어질 수 있는 코팅층 보다는 기재의 표면을 크게 부식시킨다. 이로 인한 밀착성은 본드 코팅층과 탑 코팅층 보다는 기재와 본드 코팅층 사이에서 크게 감소하여 이러한 부분에서 박리와 탈락이 이루어지고, 이러한 과정에서 비교적 적은 사상수, 계수와 에너지를 발산하고 있다고 사료된다.



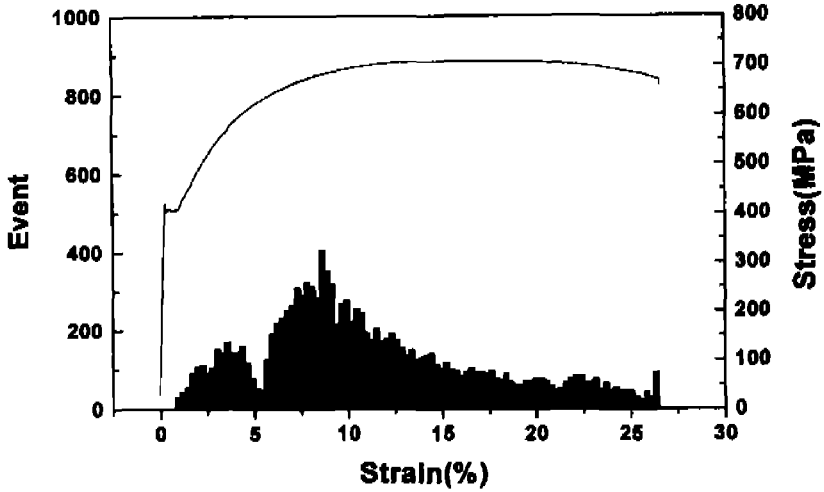
제주대학교 중앙도서관  
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY



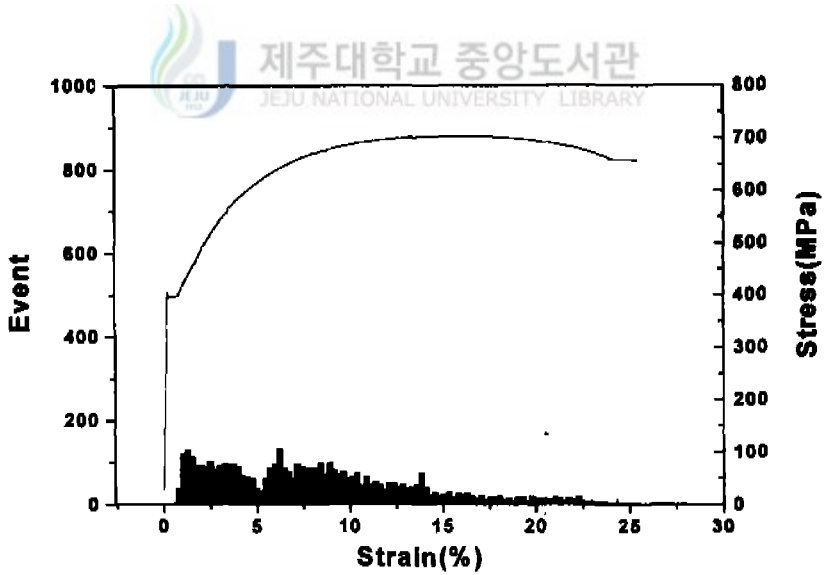
(a) BT  
 제주대학교 중앙도서관  
 JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY



(b) 2BT



(c) 5BT



(d) 10BT

Fig. 22 Stress and event vs. strain

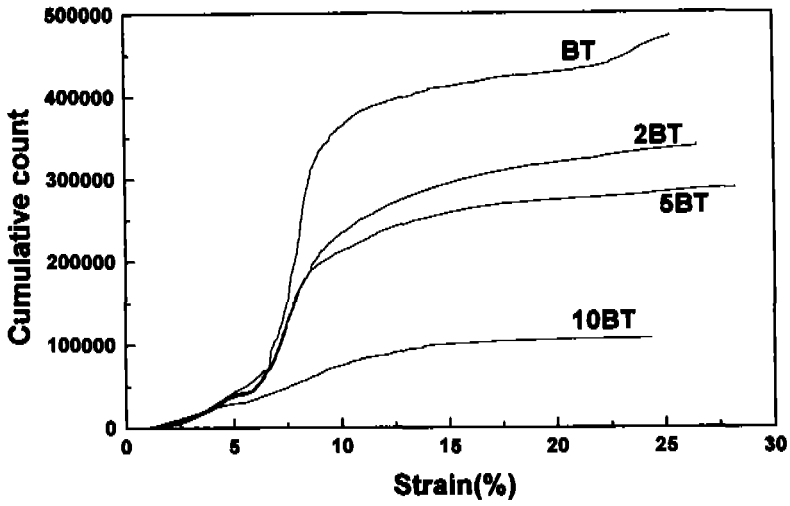


Fig. 23 Cumulative count vs. strain

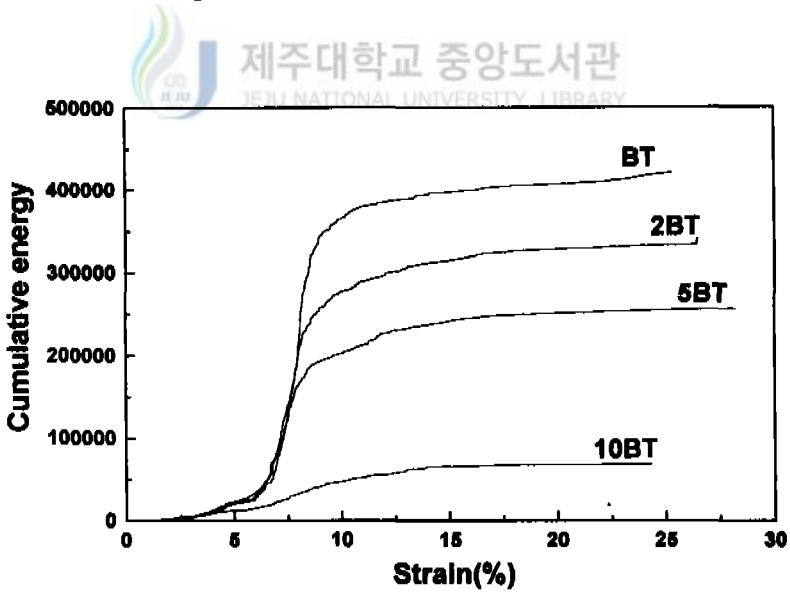


Fig. 24 Cumulative energy vs. strain

### 3.2.6 염수부식에 따른 Ni-4.5wt.%Al + TiO<sub>2</sub>코팅계의 파단면 관찰 및 파괴기구

AE 진폭과 용력-변형율과의 관계를 Fig. 25에, 파단후의 시험편 표면 사진과 탈락된 코팅층 사진을 Fig. 26과 Fig. 27에 나타내었다.

Fig. 25에 나타난 바와 같이 진폭 특성은 전술한 AE 사상수, 누적량 AE 계수 및 누적량 AE 에너지 특성과 비슷하게 박리여부에 따라 증가 또는 감소하는 현상을 보이고 있고, 모든 시험편의 진폭은 본드 코팅으로 인한 특성과 탑 코팅으로 인한 특성 모두 같고 있으며, 최대값은 97dB으로 나타나고 있다. 부식시간의 증가에 따른 진폭 분포는 10BT시험편, 5BT시험편, 2BT시험편, BT시험편 순으로 적게 분포하고 있다. BT시험편과 부식을 실시한 2BT시험편, 5BT시험편의 진폭의 분포는 전반적으로는 비슷한 경향을 보이지만, 부식시간에 따른 밀착성의 감소로 인해 특히, 박리와 탈락이 크게 이루어지는 변형을 6~11% 구간에서의 진폭 분포가 감소하고 있음을 보이고 있다. 이는 전술한 바와 같이 용사 코팅 후에 잔존하는 기공 등의 결함 등으로 침투된 염수가 블라스팅으로 조대화된 기재의 표면의 부식을 가속화시키면서 이로 인해 생긴 부식물이 팽창하여 코팅층을 밀어냄으로써 밀착성의 감소가 더 빨리 이루어진다고 사료된다.

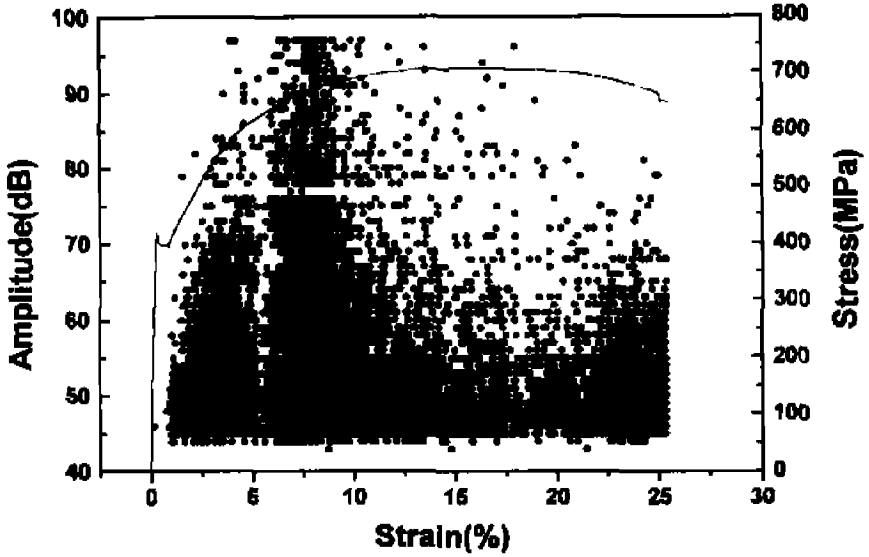
또한, 이들 시험편중에서 10BT시험편은 전술한 AE 사상수, 누적량 AE 계수, 누적량 AE 에너지와 같이 다른 시험편과는 다른 형태의 분포를 보이고 있다. 또한 진폭의 분포는 인장시험 초기부터 변형을 약 15%구간에서 코팅층의 탈락과 박리로 추정되는 진폭이 발생하고 있으며, 이 후의 구간에서는 기재에 나타나는 진폭의 분포를 보이고 있어, 진폭의 분포수도 다른 BT시험편에 비해 확연하게 감소하였음을 보이고 있다. 이는 염수에 의한 부식시간이 장기화됨에 따라 부식으로 인한 밀착성의 감소와 부식물의 팽창으로 본드 코팅층과 탑 코팅층의 밀착성보다는 기재와 본드 코팅층의 밀착성을 현저하게 감소시켜 인장하중에 부가에 따라서 취성이 큰 탑 코팅층에 에너지가 집중되면서 박리와 탈락이 발생하였다. 이때 본드 코팅층과 탑 코팅층의 밀착성은 양호하고, 본드 코팅층과 기재의 밀착성은 현저히 감소하였기 때문에 탑 코팅층이 탈락할 때 본드 코팅과 같이 박리와 탈락이 발생하였다고 사료된다.



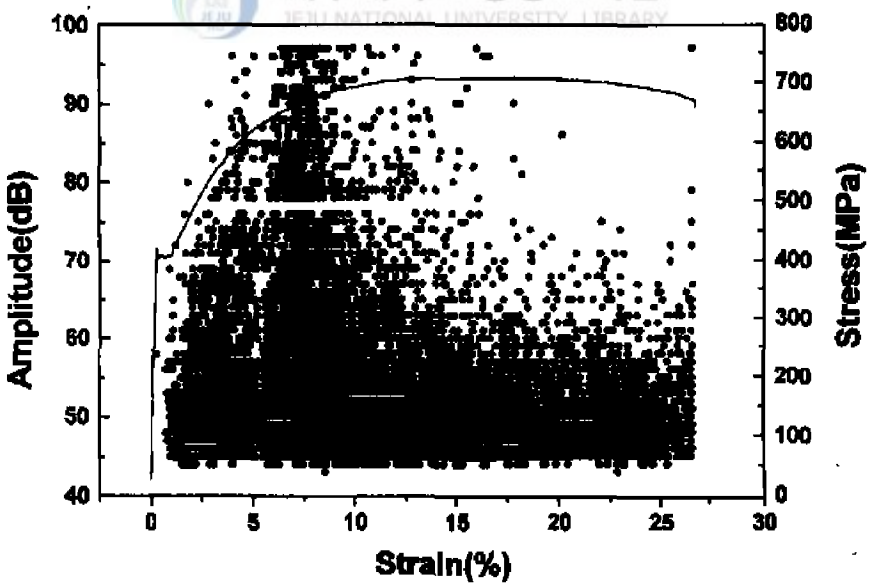
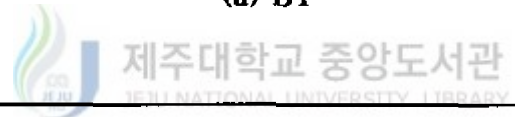
Fig. 26의 사진에서 살펴보면 5시간 부식을 실시한 BT시험편은 파단 후에도 기재에 본드 코팅층이 여전히 남아 있지만 10시간 부식을 실시한 BT시험편은 기재에 본드 코팅층이 남아 있지 않음으로 탑 코팅층과 함께 박리와 탈락이 이루어졌다고 사료된다.

Fig. 28에서는 전술한 TOP시험편과는 다른 양상의 박리형태를 보이고 있으며, 코팅 피막은 하중방향과 수직으로 균열이 발생하고 있음을 보이고 있다. 이는 본드 코팅으로 인하여 밀착성이 개선되어 인장하중 증가시 박리와 탈락이 이루어질 때 탑 코팅층과 본드 코팅층과의 밀착성이 기재와 코팅층과의 밀착성 보다는 양호하여 에너지가 증가함에 따라 발산하면서 에너지 방출을 위해 이러한 균열을 발생시키고 있다고 사료된다.

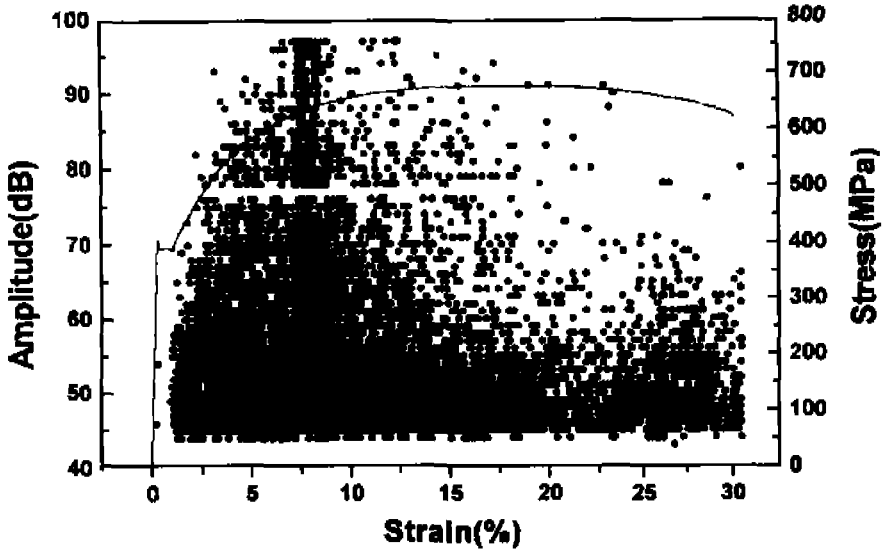




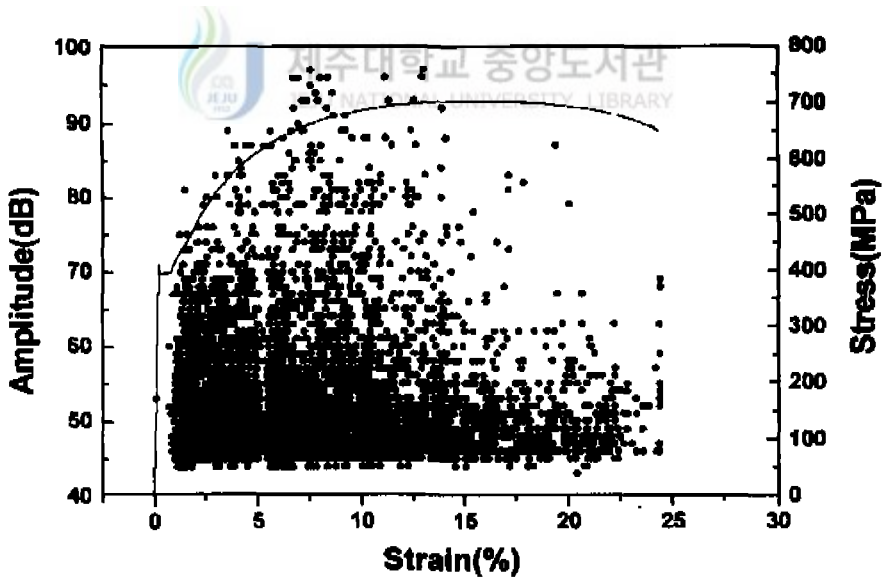
(a) BT



(b) 2BT

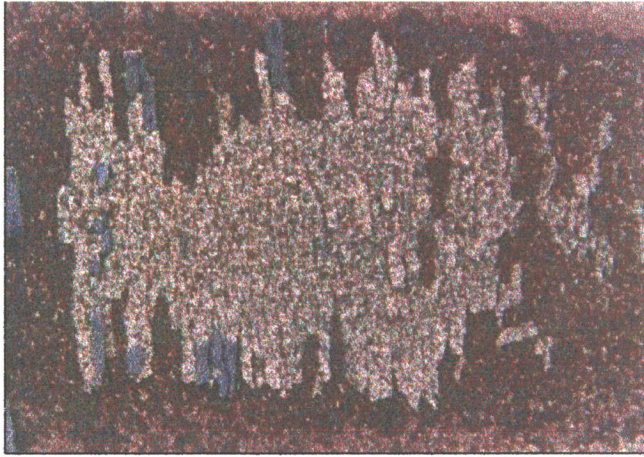


(c) 5BT

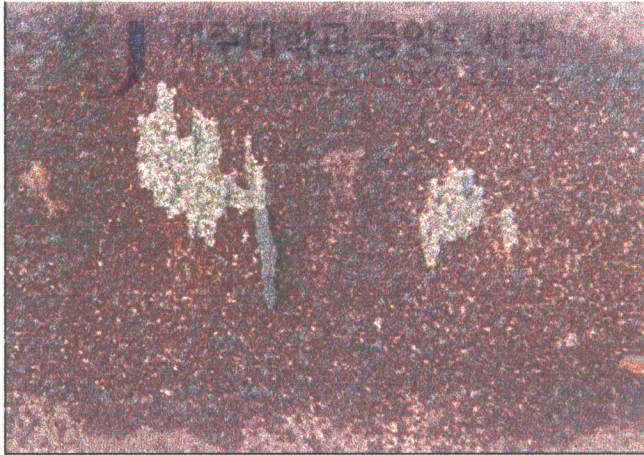


(d) 10BT

Fig. 25 Stress and amplitude vs. strain



(a) 5BT



(b) 10BT

↔  
Load direction

**Fig. 26 Surface crack of coating layer after tensile testing**



Load direction

**Fig. 29** Photograph of the exfoliation apart from 10BT specimen

### 3.3 염수부식 후의 용사 코팅제의 표면부식 관찰과 무게감량

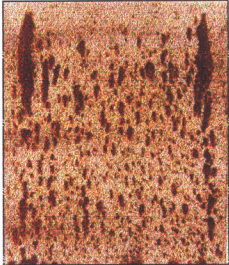
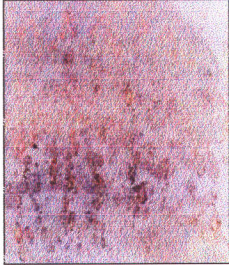
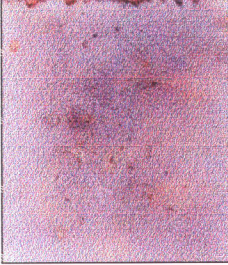
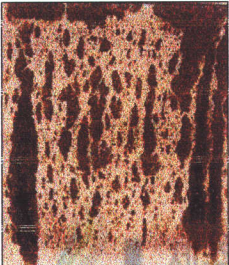
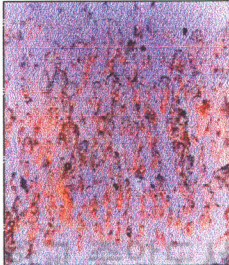
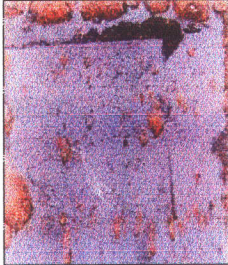

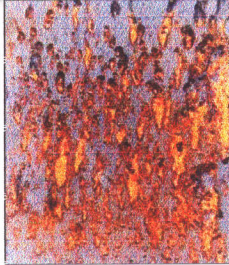
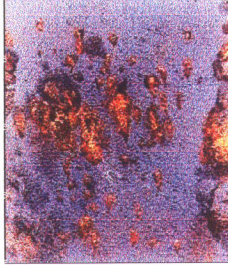
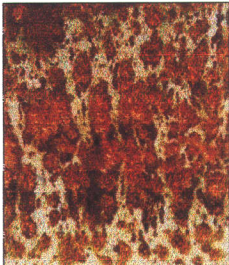
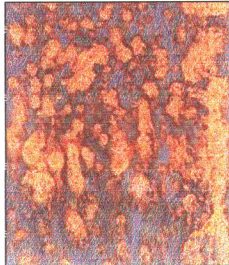
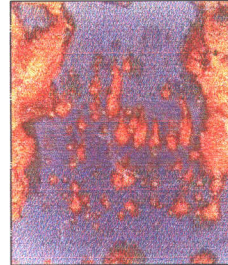
Fig. 29에서는 부식 시간에 따른 용사 코팅제의 표면부식 사진을 보여 주고 있다. 염수분무 시간에 따라서 부식정도가 각각 다르게 나타나고 있음을 알 수 있다. 부식의 진행은 코팅 피막 내에 잔존하고 있는 기공 등의 결함으로 염수가 기계로 침투하여 기계를 부식시키고, 부식이 점차로 진행되면서 코팅피막으로 부식물이 올라오고 있음을 보이고 있다. BOND시험편은 2시간 염수분무를 실시한 시험편에서는 부분적으로 검붉은 녹이 올라오고 있고, 5시간 이후에서는 이러한 부분적인 녹이 넓은 분포로 확산되어 가고 있음을 보이고 있으며, 20시간에서는 전 면적으로 확대되어 코팅층 표면을 덮고 있음을 보이고 있다. TOP시험편은 2시간 부식을 한 시험편에서는 아주 미세하게 녹이 피어오르면서, 5시간 경과하였을 때는 미세한 녹이 점점 뚜렷하게 표면으로 노출되어, 10시간 이후에는 전 표면으로 확산되어 가고 있으며, 20시간 이후에서는 전 표면을 검붉은 녹으로 덮혀 있음을 보이고 있다. BT시험편은 5시간 정도 경과해야 부분적으로 미세하게 녹이 올라오고 있음을 보이고 있고, 10시간 경과 후에는 중앙에서의 미세한 녹이 뚜렷하게 표출되어, 20시간 이후에도 비슷한 양상을 가지지만 가장자리에서 올라오는 녹이 많은 면적을 차지해 가고 있음을 보이고 있다.

2시간 염수분무를 실시한 BOND시험편에서는 전 표면에서 부분적으로 녹이 피어오르고 있고, TOP시험편과 BT시험편에서는 녹이 아주 미세하게 나타나고 있다. 5시간에서는 BOND시험편은 검붉은 녹이 많은 면적으로 성장해 가지만, TOP시험편과 BT시험편은 부분적으로 녹이 올라오고 있다. 10시간에서는 BOND시험편은 녹은 아주 검게 형성되어가고, TOP시험편은 녹이 뚜렷히 나타나며, BT시험편은 중앙에서의 녹이 올라오고 있음을 보이고 있다. 20시간에서는 TOP시험편은 급속히 부식이 진행되어 BOND시험편과 같이 전면적으로 녹이 덮혀 있음을 보이고 있지만, BT시험편은 중앙에서 녹은 10BT시험편 보다 10시간 더 부식을 한 BT시험편의 부식이 그다지 크게 성장하지 않았음을 보이고 있다. 이는 탑 코팅층의 표면은 본드 코팅층 보다 더 조밀하여 기공 등의 결함이 적었으며, BT시험편은 본드 코팅과 탑 코팅으로

인하여 더욱 결함이 감소하여 염수의 침투가 비교적 적게 이루어졌다고 사료된다.

Fig. 30에서는 염수분무 시간에 따른 코팅재의 무게감량을 나타내었다. 여기에서 SUB는 표면을 블라스팅 처리한 시험편이다. 도표에서 무게감량은 SUB가 코팅재보다는 많은 무게감량을 보이며, 이는 블라스팅에 의한 표면의 조대화로 즉, 염수와 접촉하는 면적이 코팅재에 비해 커서 염수의 침투가 용이하게 이루어진 결과로 추정된다. 코팅재에서는 BOND시험편이 가장 많은 무게감량이 이루어지는 것은 용사 코팅 후에 존재하는 기공층등에 의해 염수가 기체에 침투되어, SUB시험편과 같이 블라스팅에 의한 표면의 조대화 염수의 확산이 다른 코팅 시험편에 비해 많은 무게 감량이 이루어진 것으로 보인다. BT시험편과 TOP시험편은 탑 코팅으로 인하여 BOND시험편에 비해 코팅층이 조밀하고, 용사 후의 잔존하는 기공으로 염수의 침투가 덜 되었으리라 추정되며, BT시험편은 탑 코팅과 본드 코팅으로 인하여 표면의 기공 등의 감소로 염수가 기체에 침투가 비교적 적게 이루어져 가장 적은 무게감량이 이루어진 것으로 사료된다.



Type Salt spray time(hr)	BOND	TOP	BT
2			
5			
10			
20			

**Fig. 29** Photographs of specimen surfaces according to salt spray time



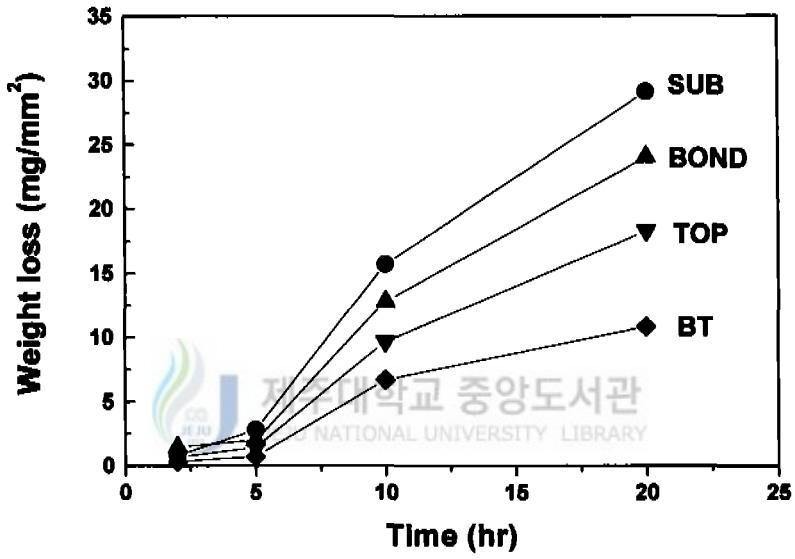


Fig. 29 Weight loss of the specimens according to salt spray time

## IV. 결 론

탄소강 S45C을 기체로 하여 Ni-4.5wt.%Al(BOND) 합금분말 및 세라믹 TiO<sub>2</sub>(TOP) 분말을 재료로 플라즈마 용사 장치에 의해 BOND, TOP 및 BT (BOND+TOP) 용사코팅 시험편을 제작한 후, 염수분무 시험기에서 NaCl 5%의 농도로 각각의 시험편에 2시간, 5시간 및 10시간 동안 염수분무를 실시한 용사코팅재에 인장응력이 작용시 비파괴검사법의 한 종류인 AE법을 사용하여 부식시간에 따른 기체와 용사피막과의 박리상태를 조사·검토한 결과는 다음과 같다.

1. 인장시험시 플라즈마 코팅재의 용사피막의 박리시기 및 종료시기의 추정 은 AE 사상수, 계수, 에너지 및 진폭 등의 AE 신호 분석을 통하여 측정이 가능하며, AE신호는 용사피막 내에서 박리의 발생, 성장 및 탈락이 발생하는 구간에서 급격히 증가한다.
2. 인장시험시 용사코팅재의 AE신호는 BOND시험편은 변형을 17%에서 과 단점에 이르는 구간에서, TOP시험편은 항복점 이후 변형을 1~5%의 구간에서, BT시험편은 변형을 6~11%의 구간에서 급격하게 증가하며, 기체와 코팅층 간의 밀착강도는 BOND시험편의 경우 TOP시험편과 BT시험편에 비해 양호하며, 세라믹 코팅재의 경우 기체에 직접 코팅한 TOP시험편 보다 본드 코팅을 가진 BT시험편이 양호하게 나타났다
3. 염수분무를 실시한 코팅재의 AE 신호 및 밀착성은 부식시간이 증가함에 따라 감소한다. 10시간 실시한 BT시험편에서는 다른 BT시험편과 다른 경향을 나타내며, 박리는 주로 기체와 코팅층에서 발생한다. TOP시험편의 AE 에너지는 부식 시간에 따라 증가하며, 부식의 정도 판별에 있어서 에너지가 가장 잘 나타낸다.

4. 염수분무를 실시한 용사코팅제의 부식은 코팅시 발생한 기공 등의 결함으로 염수가 침투하여 기재와 코팅층 사이의 기재의 블라스팅한 표면에서 일어나 부식이 확산되고, 부식시간이 증가함에 따라 기재와 코팅층의 결합력을 약화시켜, 이 부분을 중심으로 박리가 발생한다.
  
5. 염수분무를 실시한 용사 코팅제의 부식시간에 따른 무게감량은 BOND시험편, TOP시험편 및 BT시험편의 순으로 많은 무게 감량이 나타나며, 부식의 진행도 이와 같다.

## 참 고 문 헌

- [1] 나종주, 이구현, 이상호, 1997, 상압 플라즈마의 응용 현황, 기계와 재료, 9권, 4호, 100-117
- [2] 송요승, 이구현, 노병호, 1996, 기능성 용사 피막 응용 현황, 기계와 재료, 8권, 4호, 82-94
- [3] 서창민, 김경렬, 1997, 세라믹 코팅된 1Cr-Mo-0.25V강의 피로균열성장 특성, 대한기계공학회논문집(A), 제21권, 제10호, 1674-1682
- [4] 김부안, 남기우, 조문호, 1999, 금속기지 내열 경사기능 복합재료 개발에 관한 연구, 한국해양공학회지, 제13권 제11호, 62-69
- [5] 오병중, 1998, TiO<sub>2</sub> 세라믹 용사 코팅제의 강도 및 마멸 특성, 제주대학교 박사학위 논문
- [6] Fukumoto M, Huangy, Ohwatari M, 1998, Flattening Mechanism in Thermal Sprayed Particle Impinging on Flat Substrate, Proceedings of the 15th International Thermal Spray Conference, 401-406
- [7] M Fukumoto, S Katoh, I Okane, 1995, Splat Behavior of Plasma Sprayed Particles on Flat Substrate Surface, Proceeding of ITSC'95, 353-358
- [8] Eiji Nishioka, Masahiro, Fukumoto, 1997, Splat-quench Solidification of Freely Falling Molten Droplet by Impinging on a Flat Substrate, International Symposium on Designing Processing and Properties of Advanced Engineering Materials 156Committee, 535-539
- [9] 송성진, 1998, 결합의 정량적 비파괴평가 기술, 기계저널, 제38권, 제9호, 49-53

- [10] 비파괴평가연구그룹, 1996, '96비파괴시험교육, 한국표준과학연구원
- [11] 윤동진, 권오양, 정민화, 1993, 음향방출을 이용한 제어널 베어링의 이물질 혼입의 영향에 대한 고찰, 한국음향방출(AE)연구회, 제4권, 제1호, 18-32
- [12] 窪堀後文, 生田稔郎, 尹藤征郎, 1996, AE(Acoustic Emission)法及び超音波検査法による溶材皮膜の密着性の評価. 溶材, Vol.33, No. 4, 32-39.
- [13] Ronnie K Miller, Paul McIntire, 1991, NONDESTRUCTIVE TESTING HANDBOOK ACOUSTIC EMISSION TESTING, American Society for Nondestructive Testing, 2nd, Vol5, 23-33
- [14] 윤동진, 1997, 음향방출을 이용한 구조물진단기술, 대한기계학회지, 제22권, 6호, 47-53
- [15] 오세규, 1998, AE에 의한 비파괴검사와 응용, 한국박용기관학회지, 제12권, 제4호, 2-9
- [16] Thomas Blum, Ippei Suzuki, Ichiro Inasaki, 1988 AE-moniteoring Systems for the Detection of Single-point and Multipoint Cutting Tool Failures, The Japanese Society for NDI, Progress in Acoustic EmissionIV, 470-477.
- [17] Zang Yaohui, Xu Rongbao, 1988, A Study on The Seperation of Acoustic Emission Signals in The Metal Cutting Process, The Japanese Society for NDI, 462-469.
- [18] Eizo suzuki, Tominosuke kotani, Tadasuke kishigami, Nobuhiro teraoka, Eiichi ogawa, Tsuneyuki ohkoshi, 1990 An Experimental Study on AE Monitoring of Fine Wire Drawing Process, The Japanese Society for NDI, Progress in Acoustic Emission V, 38-43.
- [19] N.S. Venkataraman, G.S. Kandasami, 1990, Application of Acoustic Emission Technique to Machining Processes, The Japanese

Society for NDI, Progress in Acoustic Emission V, 51-58.

- [20] Wileried Konig, Georg Ketteler, Thomas Klumpen, 1994, Monitoring Turning, Milling, Drilling and Grinding Processes Using Acoustic Emission Signals, The Japanese Society for NDI, Progress in Acoustic Emission VII, 519-624.
- [21] 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, 625-830.
- [22] 森脇俊道, 1986, AEによる切削状態認識の現状と将来. 日本機械學會誌 第89巻 第807, 17-23.
- [23] 駒井 謙治郎, 算島弘二, 蓋谷豊茂, 一方向強化炭素纖維/エポキシ樹脂複合材料の引張破壊特性と AE波解析, 日本機械學會論文集(A編), 56巻, 528号, 2-79.
- [24] 鈴木専, 木田外明, 苦松正後, 小山洋典, 官木毅, 1995, AE法よる FRPC の破壊機構の解明に関する研究, 日本機械學會論文集(A編), 61巻, 588号, 7-62.
- [25] Megumu Suzuki, Hiroshi Nakanishi, Masaharu Iwamoto, Eiichi Jinen, enichiro Maekawa, Akira Mori, Feng Sun, Studies on fracture mechanisms of CFRP by Acoustic Emission method. 日本機械學會論文集(A編), 53巻, 492号, 1459-1466.
- [26] Sotoaki Kida, Megumu Suzuki, Hisanori Miyashita, Katsuhiko Matsumoto, Fumihiko Mizutani, Yasushi Miyano, 1994, Study on fracture mechanisms of CFRP by Acoustic Emission technique, 日本機械學會論文集(A編), 60巻, 577号, 112-118.
- [27] Megumu Suzuki, Sotoaki Kida, Hisanori Miyashita, Masatoshi Wakamatsu, Yohsuke Oyama, Tsuyoshi Miyaki. 1994, Fracture

Mechanisms of FRPC by Acoustic Emission Monitoring, 日本機械學會論文集(A編), 60卷, 578号, 2242-2247.

- [28] 尾田雅文, 原利昭, 1996, AEお 이용한 TIN 薄膜의 付着力 評價方法의 檢討, 日本機械學會論文集(A編,) 62卷595号, 277-283.
- [29] 김태복, 강신열, 왕덕현, 김원일, 이윤경, 1996, CNC선반에서 연속절삭 및 단속절삭시 공구손상에 대한 음향방출신호 특성 연구, 제13권, 제14호, 136-142.
- [30] 용장우, 이영신, 심봉식, 지용관, 주영상, 1989, 탄소섬유 복합재료의 AE 특성에 관한 연구, 대한기계학회논문집, 제13권, 第1호, 105-114.
- [31] 윤동진, 권오량, 정민화, 1993, 음향방출을 이용한 저어닐베어링의 이물질 혼입의 영향에 대한 고찰, 한국음향방출(AE)연구회, 제4권, 제1호, 18-32.
- [32] 정희돈, 1993, AE기법을 이용한 글래스 복합재료의 파괴인성 및 미시 파괴 과정의 평가, 한국음향방출(AE)연구회, 제4권, 제1호, 39-53.
- [33] 정재현, 석창성, 김영진, 1997, 음향방출을 이용한 회전마찰계의 마찰특성 및 안정성 해석, 대한기계학회논문집(A), 제21권, 제4호, 555-565.
- [34] 오세규, 전태언, 박일동, 오명석, 이주석, 1996, 마찰용접에 의한 초경공구재와 금속간의 압접기술개발과 AE에 의한 품질평가, 한국해양공학회지, 제10권, 제1호, 36-46.
- [35] 이종오, 이주석, 윤운하, 이승희, 1993, 복합재료 접합부 파괴과정의 감시에 관한 연구, 한국음향방출(AE)연구회, 제4권, 제1호, 1-17
- [36] 정희돈, 1993, AE기법을 이용한 글래스 복합재료의 파괴인성 및 미시 파괴과정의 평가, 한국음향방출(AE)연구회, 제4권, 제1호, 39-53
- [37] 김귀식, 1998, 플라즈마용사에 의한 세라믹 코팅 강재의 음향방출 특성, 한국동력기계공학회지, Vol.2, No.3, 49-54
- [38] 오명중, 오창배, 김귀식, 1998, 세라믹 용사된 S45C 강재의 기계적 특성

및 피로강도, 한국해양공학회지, 제12권, 제1호, 32-38

- [39] 민경오, 이창희, 1998, 안수분위기에서의 내부식 용사 코팅 기초, 한국용사기술 협회 등, 1-17





## 감사의 글

미숙한 저를 여기까지 올 수 있도록 지난 2년 동안 성심껏 지도해 주신 김귀식 교수님의 큰 은혜에 깊은 감사를 드립니다.

논문에 어려움이 있을 때마다 저의 논문에 세심한 주의로 지도하여 주신 임중환 교수님, 조정호 교수님께 감사드리오며, 또한 보잘 것 없는 논문을 깊은 관심으로 지도해 주시고, 항상 맑은 미소와 따뜻한 조언으로 대하여 주신 권기린 교수님, 현명택 교수님, 허종철 교수님께도 감사드립니다.

한 가족과 같이 옆에서 저를 도와주신 박경석, 현창해, 김성익, 대학원생 선배님과 이성철, 김희곤, 오명범, 김창호 대학원생 그리고 양정부, 부성환, 홍훈기 학우에게도 감사를 드립니다.

끝으로 이 논문이 있기까지 변함없는 관심과 무엇이든 열심히 해 보라는 말씀을 해 주시던 부모님, 힘이 들 때면 항상 제게 자신감을 심어 주신 누님 내외분 감사의 마음을 전하며, 제 옆에서 힘이 되어 준 변지인에게도 진심 어린 마음으로 감사하며 이 소중한 기쁨을 함께 나누고 싶습니다.

1999. 12

洪龍義拜