

碩士學位論文

Acoustic Emission의 파형 분석에 의한  
플라즈마 용사 세라믹 코팅재의 변형과  
파손 해석



110,763  
제주대학교 중앙도서관  
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

濟州大學校 大學院

機械工學科

吳 明 範

2001年 6月

Acoustic Emission의 파형 분석에 의한  
플라즈마 용사 세라믹 코팅재의 변형과  
파손 해석

指導教授 金 貴 植

吳 明 範

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함



吳明範의 工學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 \_\_\_\_\_ (印)

委 員 \_\_\_\_\_ (印)

委 員 \_\_\_\_\_ (印)

濟州大學校 大學院

2001年 6月

# Deformation and Fracture Analysis of Plasma Spray Coatings by Classification of AE Signals

**Myoung-Bum Oh**

**(Supervised by Professor Gui-Shik Kim)**



제주대학교 중앙도서관  
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

**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**

2001. 6.

# 목 차

SUMMARY .....	2
I. 서 론 .....	4
II. 재료 및 방법 .....	7
2.1 실험재료 .....	7
2.2 실험방법 .....	10
III. 실험결과 및 고찰 .....	16
3.1 AE신호발생 .....	16
3.2 AE파형 특성 .....	21
3.3 용사코팅제의 박리기구 .....	33
IV. 결 론 .....	40
참 고 문 헌 .....	41

## SUMMARY

Thermal spray coating is formed by the process which melted particles are flying with high speed towards substrate. The crashed and spreaded particles are cooled and solidified on the substrate surface in a very short time. So the stack of particles makes coating. The mechanical properties coating are much different from that of any substrate bulk material and they are not known yet. Deformation and fracture mechanism are not studied enough as well. The investigation on exfoliation in a stress range below the elastic limit of substrate steel is extremely important to establish the design principle and to increase the reliability of machines and structures which have the plasma spray coating in them.

In this study, the exfoliation process of  $Al_2O_3$  and Ni-4.5wt.%Al thermally sprayed coating is deposited by an AE method. Tensile and Bend stress are applied to each test specimen for the investigation. Test specimens are BOND, TOP and BT (BOND+TOP) that are sprayed on the substrate, S45C, with these powdes.

The results are summarized as follows ;

1. The waveform of AE generated from the three coating specimens can be classified by FFT analysis into two types which are low frequency(type I) and high frequency(type II). The type I of waveform is considered to corresponds the exfoliation of coating layers and type II of waveform corresponds the plastic deformation of notch tip

2. AE events under the tensile loading are much more than those of the bend loading, because of the AE events added by the plastic deformation of the notch tip.
3. The waveform difference of the bond coating and top coating cannot clarify. But BT coating generates little AE signals because of the restraint effect of surface plastic deformation.
4. The exfoliation of the coating layers can be estimated with AE signals such as AE event and amplitude. These AE parameters extremely increase when the exfoliation of the coating layer generate.



# I. 서론

공업기술의 급속한 발전은 우주항공분야, 핵융합로, 고압터빈요소 등의 가혹한 환경을 극복하기 위한 기계구조용 재료로서 금속 표면에 코팅하는 용사법은 고온의 열원을 이용하여 분말, 선재, 봉사의 금속 및 세라믹을 용융 또는 반응용 상태로 표면에 피복하는 일종의 표면처리 기법이다[1]. 용사는 다른 표면처리 기법에 비해 피막형성 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, 용사거리, 분말의 공급속도 등의 국부적인 변화가 불완전한 용융을 발생시켜 피막에 기공을 생성시킨다[5-6].

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 유지하면서 결함의 발생이나 성장유무를 연속적으로 감시할 수 있으며[8-10], 또한

금속간의 결합이나 마찰의 직접적인 원인에 근거한 신호를 감지하고 분석하기 때문에 상대적으로 손상의 조기 탐지와 센서만을 원하는 부위에 부착하기만 하면 설비에는 전혀 영향을 주지 않는다는 장점을 가지고 있다[7]. 이러한 원인으로 기계부품의 운전중에 용사부재의 밀착성을 검사, 평가하기 위해 AE법을 이용한 기술에 대한 요구가 높아지고 있다[11].

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[13-14]. 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[14]. 그 후 AE에 대한 연구는 이론적 기구를 규명, 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[13-14]. 일본에서는 공구 수명, 복합재료 특성 평가를 위한 검사법으로 이용되고 있다. 한편, 국내에서는 공구파손과 공구마멸의 측면, 밀링가공의 회전체, 그리고 공작물쪽에서와 발전용 증기터빈 로터와 같은 발전용 강재에서의 크리프에서의 AE신호를 측정하여 안전진단에 이용하고 있을 뿐만 아니라, 복합재료에서도 신뢰도 평가를 위해 사용되어지고 있다.

그러나, 용사재는 용사시 고온의 영향으로 모재에 열응력이 발생할 수 있고, 코팅재와 기재의 물성차로 인하여 코팅층과 기재사이의 낮은 결합력 및 계면박리에 의해 기계적 특성이 저하될 수 있으며, 특히 고온부에서 작동되는 기계 및 설비부분에서는, 코팅층이 열변형이 생겨 계면박리가 일어날 수 있다. 이러한 결합력의 저하와 열응력의 감소를 위하여 중간층(bond coating)을 삽입하는 방법, 강화열처리의 방법, 그리고 경사기능재료에 대한 연구가 진행중이다. 이



리한 방법을 사용하였을때 용사재를 결합력 향상이나 변형 및 파괴에 대한 연구가 충분하지 않은 실정이다.

따라서 본 연구에서는 중간재를 삽입한 세라믹 용사 코팅재의 변형과 파괴기구를 조사하기 위하여 인장과 굽힘응력 부하시 수집된 AE 파형 정보를 분석하여 용사코팅을 실시한 기재와 구조물의 신뢰성 향상과 용사코팅의 설계기법을 확립하고자 한다.



## II. 재료 및 방법

### 2.1 실험재료

본 실험에 사용된 시험편은, 일반적 기계구조용강 탄소강(S45C)기체에 플라즈마 용사코팅을 한 것이다. 시험편의 길이는 260mm이며 두께는 5mm이다. 코팅을 실시한 부분은 Fig. 1의 사선 부분이며 60mm×25mm의 면적을 갖는다. 기체의 화학 성분을 Table 1에, 시험편 형상 및 치수는 Fig. 1에 나타내었다. 코팅에 앞서 전 처리로서 기체의 표면을 Table 2의 조건으로 블라스팅(blasting)을 실시한 후, 초음파 세척을 약 15분 동안 실시하였다. 코팅은 코팅부 이외의 부분을 마스킹 한 후 플라즈마 용사장치(Metco Co. Model 9MP)에 의해 Table 3의 용사조건으로 시험편 편면만을 실시하였다. 코팅재료는 Table 4에 나타낸 바와 같이 탑코팅 재료로 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 세라믹 분말을, 본드 코팅 재료로 Ni-4.5wt.%Al 합금 분말을 사용하였다. 코팅층의 두께는 본드코팅은 약 100 μm, 세라믹코팅은 약 200 μm로 하여, 아래에 나타낸 3종류의 시험편을 제작하였다.

BOND : 기체(S45C)에 본드(NI-4.5wt.%Al)코팅한 시험편

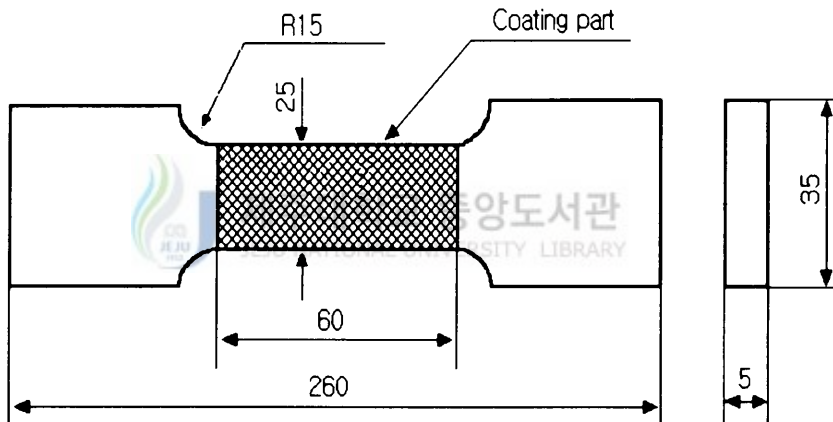
TOP : 기체에 세라믹(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)코팅한 시험편

BT : 기체에 BOND코팅 후 그 위에 Top코팅한 시험편

위의 3종류 시험편은 인장시험편과 굽힘시험편으로 구분했다. 굽힘시험편은 Fig. 1에 나타낸 시험편을 사용하였으나, 인장시험편은 Fig.1의 평활시험편으로서 AE파형이 발생하지 않았으므로 시험편의 중앙부에 방전가공에 의해 6mm의 편노치를 삽입한 노치시험편을 사용하였다[Fig. 3(a)].

**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>			
Al <sub>2</sub> O <sub>3</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 Powders

Condition Powder	Typical composition	Typical size range ( $\mu$ m)
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 2.5%TiO <sub>2</sub> 2%SiO <sub>2</sub> 1%Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 0.5 other oxides	5 ~ 45
Ni-4.5wt.%Al	Aluminum 4.5% Nickel balance	45 ~ 90

## 2.2 실험방법

Fig. 2는 플라즈마용사 코팅시험편의 인장과 굽힘시험시의 AE 특성을 조사하기 위한 시험장치의 모식도를 나타낸다. 사용된 시험기는 만능재료시험기(Instrong Co. 용량 20,000LBS)이며, AE측정장치는 Mistras2001(Physical Acoustics Co.)를 사용하여 측정하였다.

Fig. 2에서 AE센서로부터의 한 event당의 AE데이터를 수집 할 수 있는 MI-LOC 소프트웨어와 일정 Time당의 AE데이터를 수집 할 수 있는 MI-TRA 소프트웨어를 동시에 가동 할 수 있도록 2개의 Mistras Board를 각각의 컴퓨터에 내장하여 병렬로 연결하였다. 이렇게 함으로서 한 실험조건에서 AE 데이터는 DTA file과 TDA file로서 생성된다. 인장과 굽힘시험시의 부하방식과 AE센서 부착관계를 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3(a)의 인장시험의 경우 시험편은 중앙에 방전가공에 의해 6mm의 노치를 삽입하였다. 만능재료시험기의 크로스헤드의 이송속도를 0.25mm/min으로 하였다. 인장시 검출된 AE신호는 이때 2개의 WD센서(주파수범위 100-1000KHz)를 통하여 각각의 Preamplifier(PAC 1220A)에서 증폭되어 수집된다. 센서간의 거리는 103mm이며, preamplifier 60dB로 증폭하고 100KHz ~ 1.2MHz의 Band pass filter로 설치하였다.

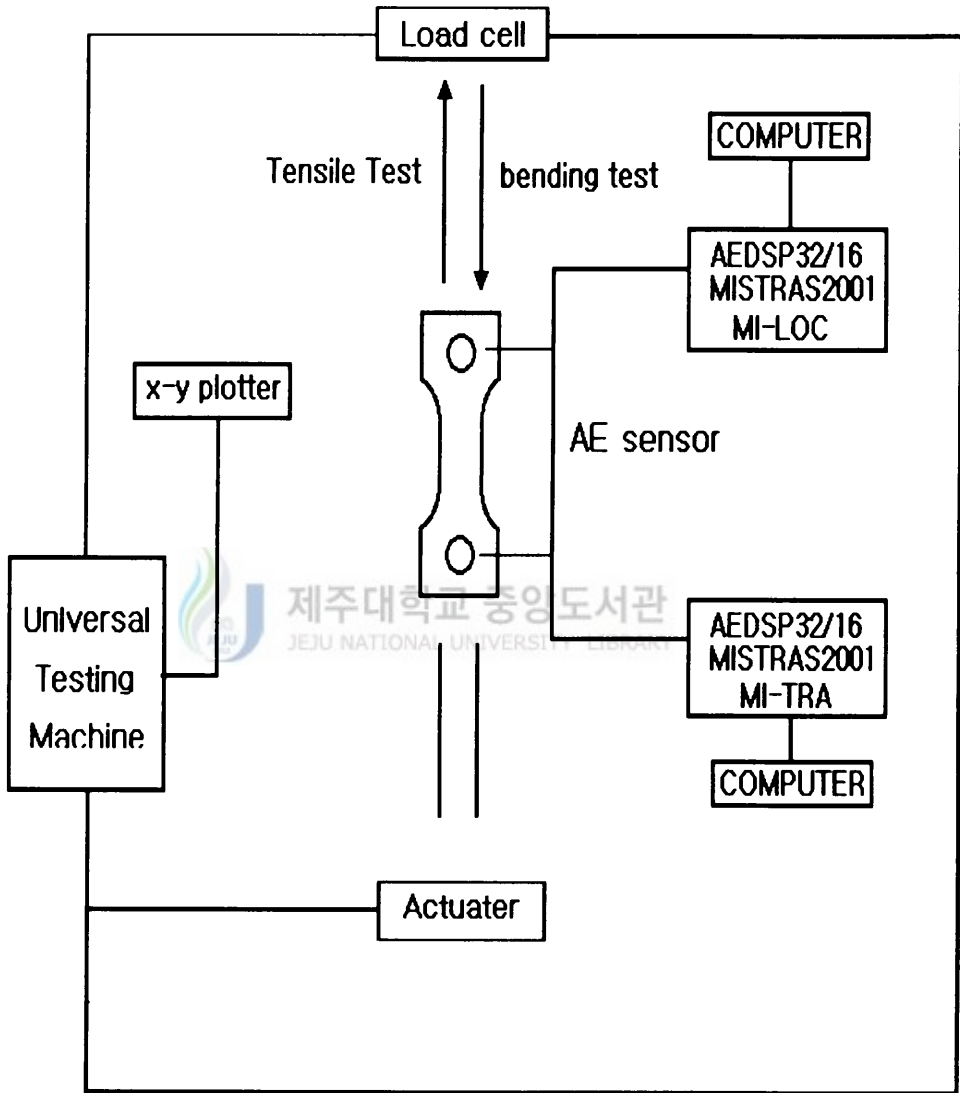
굽힘 시험은 Fig.3(b)에 나타낸 바와 같이 3점 굽힘 시험을 행하였다. 시험기의 크로스헤드 이송속도를 0.25mm/min로 하여 압축 하중을 가하였다. 지점 span간의 거리는 93mm이며, 시험편 상부에 부착한 AE센서간 거리는 50mm이다. AE신호 수집시의 preamplifier 와 filter 등의 설치는 인장시험의 경우와 동일하게 하였다. 그리고 AE실험에 있어서 AE센서와 시험편의 밀착성을 양호하게 하기 위하여 고진공 Silicon을 도포 한 후 센서를 부착하고 고밀착 테이프를 고정하였다.

AE파형 신호해석은 MI-TRA에서 두 센서로부터 수집된 Channel 1과 Channel 2의 파형과 파워스펙트럼을 관찰하였다. 이러한 신호해석에 대한 기초 실험의 일례를 Fig. 4에 나타낸다. Fig. 4는 Fig. 3의 2개의 AE센서 부착위치

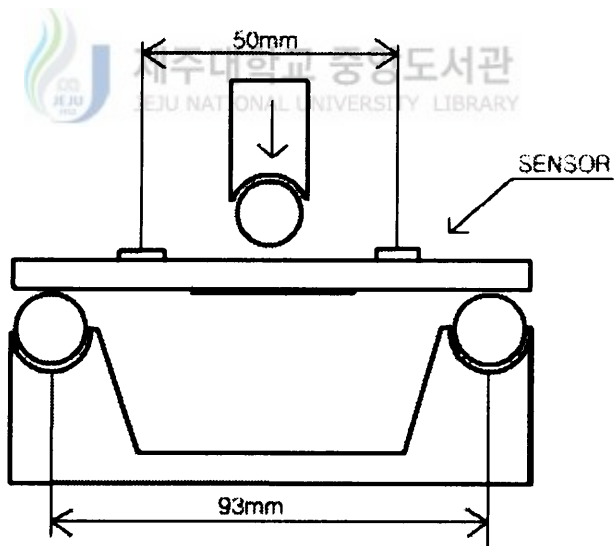
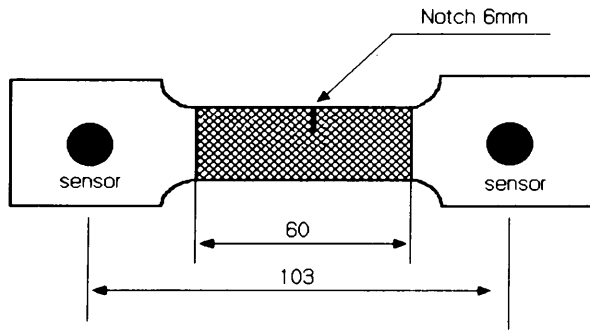
중 한쪽의 센서 부근에서 연필심의 절단에 의한 AE신호를 가했을 때 두 센서에서 수집된 AE파형 발생의 시간지연은 최대  $14\mu\text{s}$  이며 주파수 특성은 유사하다. 따라서 본 실험의 경우에 두 channel의 AE파형에서 시작시점이  $14\mu\text{s}$  범위 이내에 도달한 신호만을 시험편 내부에서 발생한 AE 파형으로 간주하고 그 이외의 파형은 모두 noise로 처리하였다. 그리고 인장 및 굽힘시험시의 부하하중은 X-Y Plotter(HP-3400A)에 의한 기록과 AE수집 프로그램 상에 하중을 설정하도록 하여 부하하중에 따른 AE 파라메타를 알 수 있도록 하였다.

한편 AE Event, Count, Amplitude 등의 AE파라메타들은 각 실험조건에서 DTA file과 TDA file 모두를 MI-TRA에서 실행하여 파형 해석과 주파수 분석을 하였으며 실험결과의 정리는 DTA file의 데이터를 ASCII Format으로 변환하여 그래프로 도시하였다.





**Fig. 2 Test apparatus**

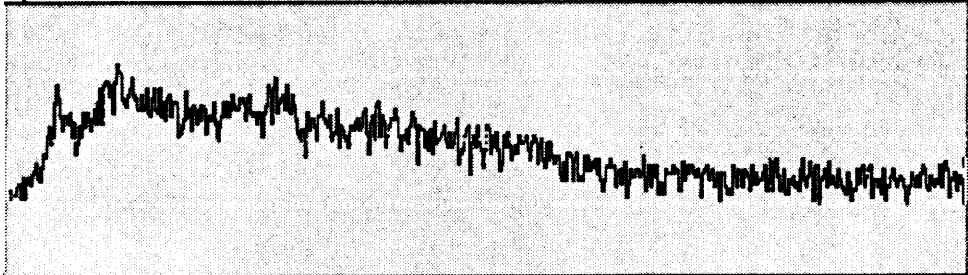


**Fig. 3 Loading methods.**



spectrum - TRA-2

0 00:00:01.3194097



Recvd:  
18  
Proc'd:  
1

00

F:0.00

A:+23.30

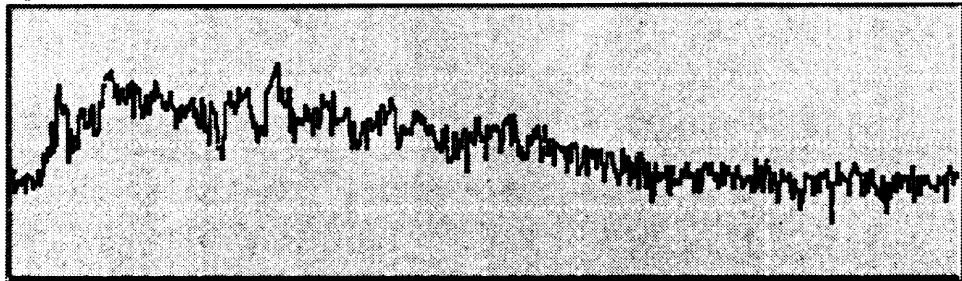
2.00MHz



제주대학교 중앙도서관  
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Spectrum - TRA 1

0 00:00:01.3194097



Recvd:  
18  
Proc'd:  
1

00

F:0.00

A:+32.30

2.00MHz

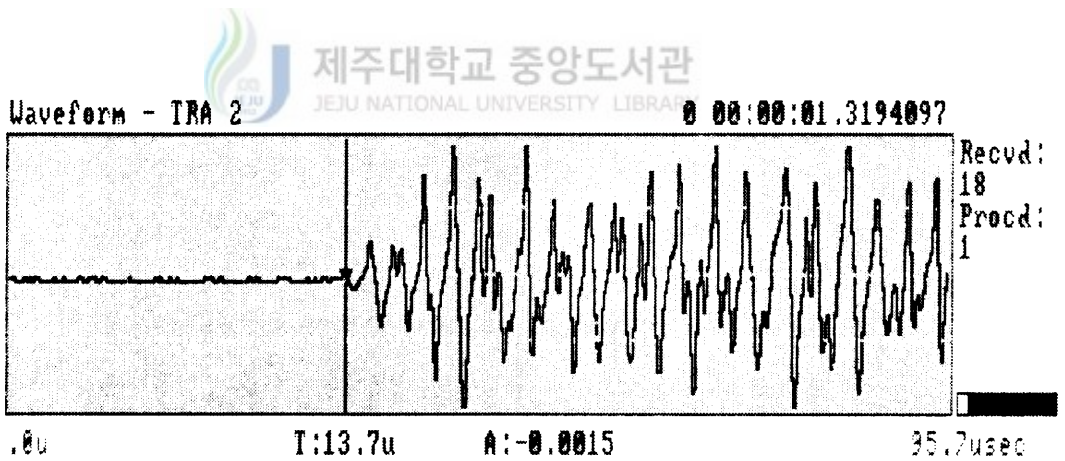
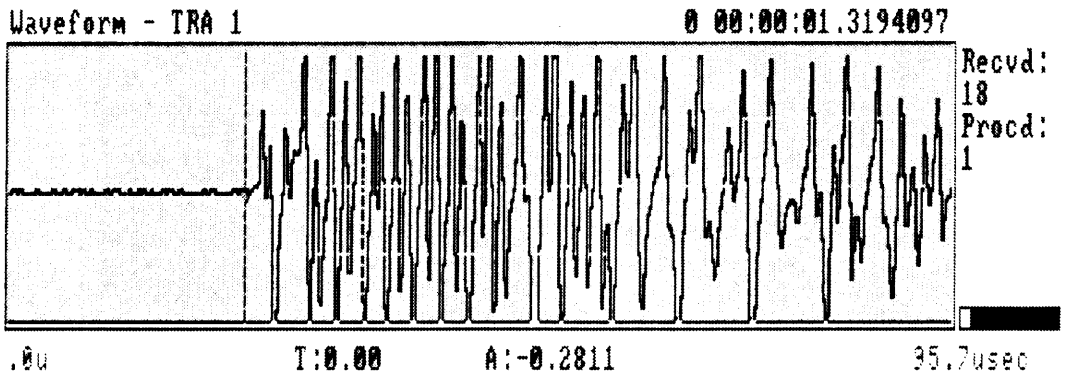


Fig. 4 AE waveform and power spectrum by lead pencil break.

### Ⅲ. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 AE 신호 발생

Table 5와 6에는 인장과 굽힘시험에서 수집한 시험편 종류별 AE event 수를 나타낸다. 총 event는 MI-LOC의 데이터 파일에 기록된 것이고, 선택 event는 2개의 AE센서로부터 수집된 Channel 1과 2의 AE신호 파형을 MI-TRA에서 비교하여 두 Channel의 신호 도달시점이  $14\mu\text{sec}$  이내이면 시험편 내부에서 발생된 탄성파로 간주하여 선택한 것이다. Table 5와 6에서 event 들은 인장의 경우가 굽힘의 경우보다 많다. 코팅재의 AE event는 코팅층의 균열과 박리에 의해 발생되는데, 인장시험의 경우 시험편이 노치재이므로 기재의 노치선단의 항복 즉, 노치선단의 blunting과 소성역의 발생으로 인한 전위운동이 AE의 발생원이 되므로 인장의 AE event수가 굽힘시험의 경우보다 많아진 것으로 생각한다. 참고로 Fig. 5에 제시한 응력 범위에서 평활시험편에서는 AE event와 수집되지 않았다. Kibohori 등 역시 Fe 와  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 를 용사한 코팅재의 AE에 의한 밀착성 평가의 기초실험으로 행한 용사를 실시하지 않은 기재의 평활시험편들에 극한하중까지의 인장하중을 부하 하였을때 AE가 전혀 관찰되지 않음을 보고하고 있다[11].

Fig. 5와 6의 인장시험과 굽힘시험의 경우 각 코팅재들의 누적 AE event와 부하응력의 시험시간에 따른 관계를 도시하였다. Fig. 5의 인장시험의 경우 부하응력은 기재의 항복이 발생하지 않은 선형 탄성 구간내에서 시험하였다. 시험편 인장시간에 따른 AE event들은 Top코팅재가 가장 많으며 Bond코팅재, BT코팅재의 순으로 적다. Top코팅재의 경우 100-200sec와 400sec 이후에 AE 누적 event가 급격히 증가한다. Bond 코팅재의 경우 100-200sec의 범위에서만 Top코팅재의 경우와 동일하게 누적AE event가 급격히 증가한다. BT코팅재는 상기의 두 경우보다 소수의 AE event 들이 300~ 450sec 범위에서 발생하였다.

Fig. 6의 굽힘시험의 경우 부하응력은 기재의 항복에 의한 소성변형이 발생

되는 구간까지 부하 되었다. 각 코팅제들의 누적 AE event는 인장시험의 결과와는 달리 BT코팅제와 Bond제가 인장초기 즉 50sec 내의 범위에서 증가하며 Top코팅제는 거의 발생하지 않았다. TOP코팅제는 S45C 기체에  $Al_2O_3$ 세라믹만을 코팅한 경우이므로, 굽힘응력하에서 세라믹은 탄성파를 거의 발생하지 않음을 나타낸다. Akita등의[15] Mo과 Ni-Cr용사코팅제의 4점굽힘시험에 대한 AE발생원인에 대하여 실험한 결과에 따르면 금속분말 코팅층의 경우 코팅층의 마이크로 균열발생과 균열면의 슬립에 의해 AE신호가 발생한다고 보고하고 있는 바 금속분말이 아닌 세라믹 코팅의 경우 거의 AE가 발생하지 않는 것으로 생각된다.

Fig. 7과 8은 부하응력과 AE count의 분포를 나타낸다. Fig. 7의 인장시험에서 코팅제들의 count 분포는 Bond코팅제는 저응력 영역에서 주로 발생하고, Top코팅제는 고응력 영역에서, BT코팅제는 200~480MPa의 범위에 분포한다. 전응력 구간에서 Count의 크기에 대하여 비교하여 보면 Count가 많은 것은 Top코팅제이며, Bond코팅제, BT코팅제의 순서로 적어지고 있다. 여기서 Count수가 많은 것은 용사피막의 박리부분이 많기 때문으로 생각된다. 한편 Fig. 8의 굽힘시험에서는 Bond와 BT는 전응력 구간에 골고루 분포되어 있다. Count수의 크기는 Top코팅제가 그 숫자는 많지 않으나 Bond가 BT에 비해 크다.

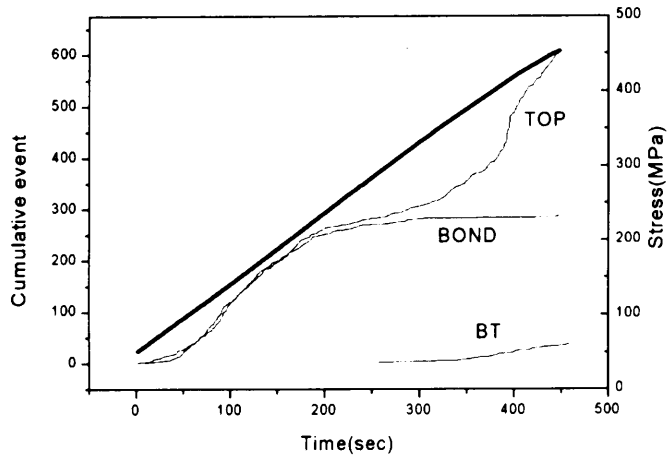
**Table. 5 AE events obtained from tensile test**

Type	Total event	Selected event
BOND	1098	288
TOP	2227	606
BT	469	39

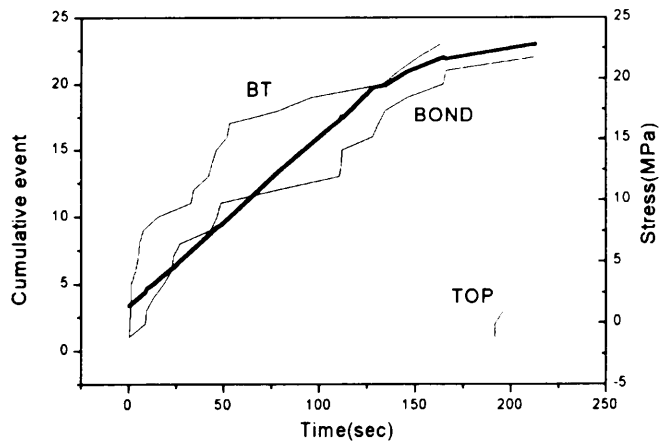


**Table. 6 AE events obtained from bend test**

Type	Total event	Selected event
BOND	163	22
TOP	103	3
BT	758	25



**Fig. 5 Relation between Cumulative event and stress VS time in tensile test.**



**Fig. 6 Relation between Cumulative event and stress VS time in bend test.**

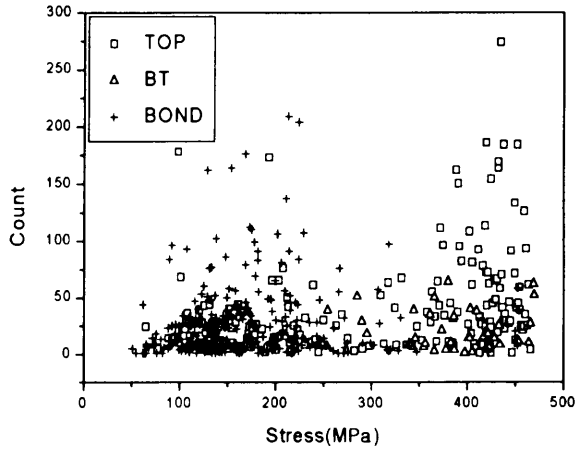


Fig. 7 Count VS stress in tensile Test

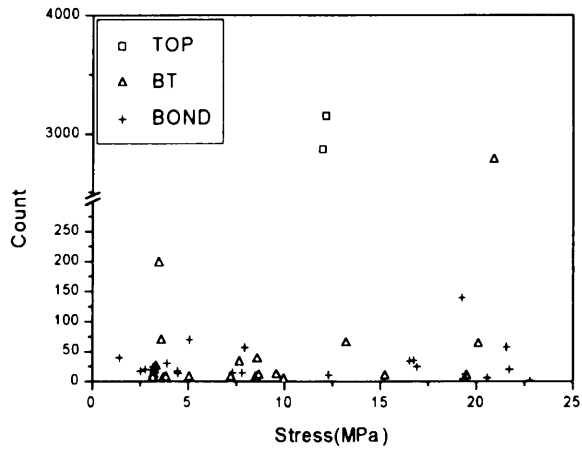


Fig. 8 Count VS stress in Bend Test

### 3.2. AE파형 특성

각 코팅제의 인장시험과 굽힘시험시에 수집된 DTA파일의 AE파형을 MI-TRA에서 정밀 관찰한 결과 전체 AE파형은 100~260KHz의 주파수 성분이 많은 비교적 저주파의 파형과 500~580KHz의 주파수성분이 강한 고주파의 파형으로 분류되었다. Fig. 9~12에 각 실험의 경우에서 관찰된 전형적인 AE 파형과 스펙트럼을 나타낸다. Fig. 9~11에 나타낸 인장시험의 AE파형의 경우 Top코팅제, Bond코팅제, BT코팅제 모두 동일하게 Type I, Type II의 파형이 관찰된다. Fig. 9의 Bond코팅제의 경우 Type I 파형의 주파수대역은 100KHz, 240KHz의 성분이 크다. 그리고 Type II 파형의 주파수대역은 500KHz와 580KHz의 성분이 크다. Fig. 10의 Top코팅제의 Type I 파형은 Bond의 경우와 동일하고 Type II 파형은 100KHz, 240KHz 500KHz 580KHz의 성분이 크다. Fig. 11의 BT코팅제의 Type I파형은 260KHz 성분이 크고, Type II 파형은 500KHz와 580KHz이 성분이 크다. 세가지 코팅제 모두 Type I 파형은 240KHz - 260KHz, Type II 파형은 580KHz의 성분이 가장 크게 나타난다.

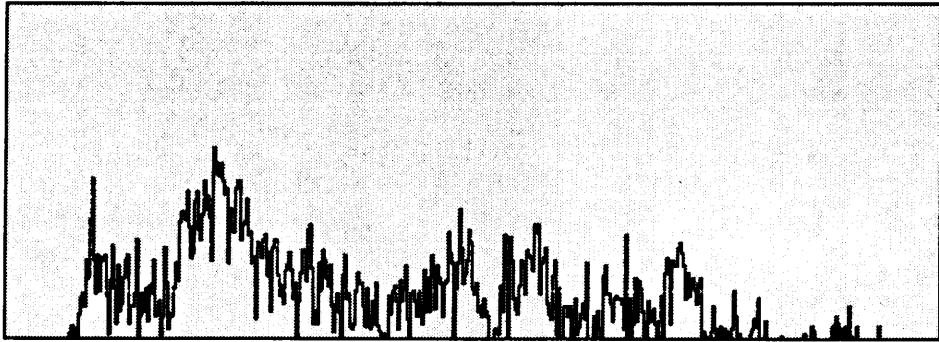
한편 Fig. 12에 나타낸 굽힘시험의 경우 대부분이 Type I의 파형이 관찰되나 그 주파수 특성이 인장시험에서 Type I의 파형과는 차이가 있다. Bond코팅제의 파형은 100KHz의 주파수성분이 가장 크고 240KHz, 580KHz에서도 크다. Top코팅제의 경우 100KHz와 240KHz에서 크고, BT코팅제 역시 100KHz와 240KHz에서 크다. 세가지 코팅제 모두 100KHz에서 피크치를 보이고 있지만, WD센서의 경우 센서에 직접연필심 절단의 탄성파를 신호를 주었을 때 100KHz의 주파수성분이 주로 나타나므로 본 연구에서는 굽힘시험의 각 코팅제에서 나타나는 Type I 파형의 주파수는 240KHz 성분이 가장 큰 것으로 생각된다. 따라서 인장시험과 굽힘시험에서 각 코팅제의 AE 파형은 약 240KHz 성분이 크게 나타나는 Type I 파형과 580KHz 성분이 크게 나타나는 Type II의 파형으로 구분하였다.

선택 event에 이 구분을 적용시킨 결과를 Table 7과 Table 8에 나타내었다. Table 7의 인장시험결과 세종류의 코팅제 모두 Type I이 Type II 보다 많다.



Table 8의 굽힘시험의 경우 AE event 수가 Table. 7의 인장시험의 결과에 비해 소수이며 대부분이 Type I의 AE파형이 관찰되고 Type II의 파형은 거의 발생하지 않았다. Type I과 Type II AE파형의 발생원인에 대하여 고찰하여 보면 Oda 등[18]은 TiN코팅 박막의 AE에 의한 부착력 평가 시험결과 코팅층의 박리에 따른 AE의 주파수 범위가 300KHz 라고 보고하고 있으며, Akita 등[15]은  $M_0$ 의 용사코팅의 박리에 대한 AE실험에서 250KHz의 파형과 100KHz의 파형을 검출하여 250KHz의 파형은 코팅층의 균열발생에 의한 것이고 100KHz의 파형은 박리에 의한 것으로 보고하고 있다. 한 편 남등[21]은 2024Al합금 노치재의 인장시험에 따른 AE특성에서 노치선단의 Blunting과 소성변형시의 AE파형의 주파수 대역이 500KHz임을 보고하고 있다. 따라서 본 연구에서의 Type I 파형은 코팅층의 박리에 의해 발생한 것이고 Type II 파형은 기재의 소성변형에 의한 것으로 생각한다.

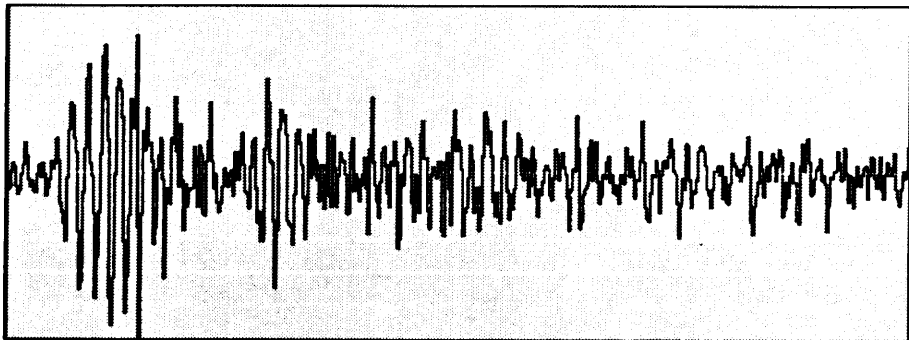




0.00

1.00MHz

(a) Type I power spectrum

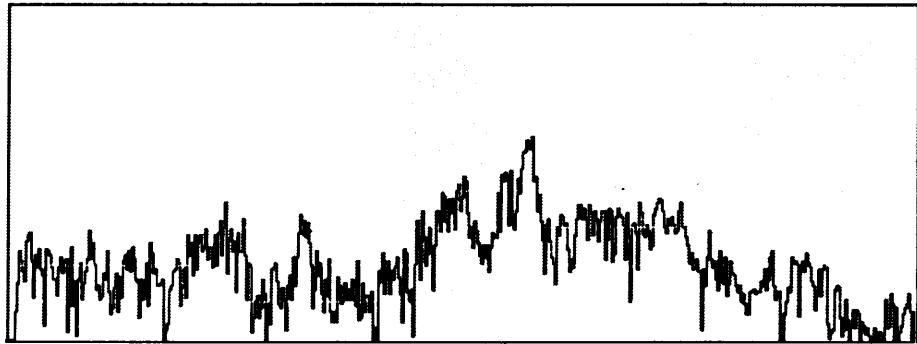


0.0

255.  $\mu$

ses

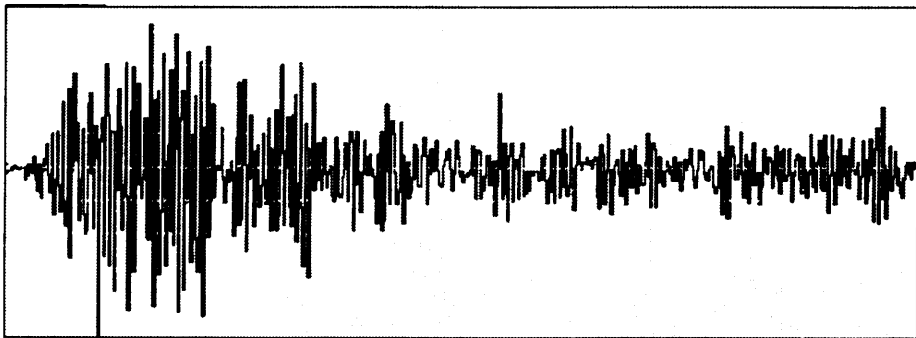
(b) Type I waveform



0.00

1.00MHz

(c) Type II power spectrum

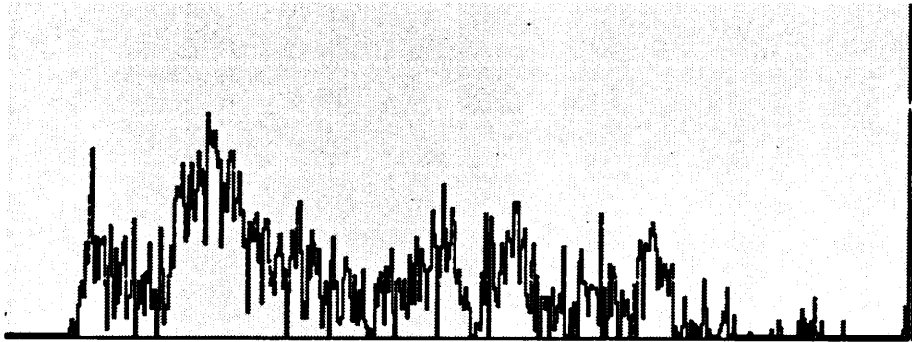


0.0

255.  $\mu$  ses

(d) Type II waveform

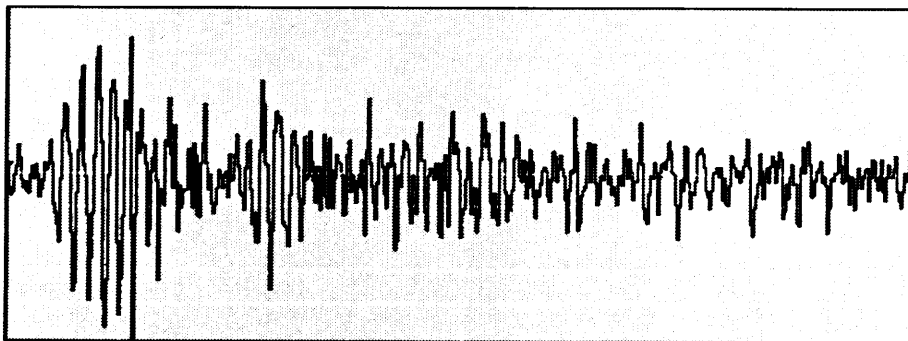
**Fig. 9 Two types of typical AE waveform and power spectrum(Bond)**



0.00

1.00MHz

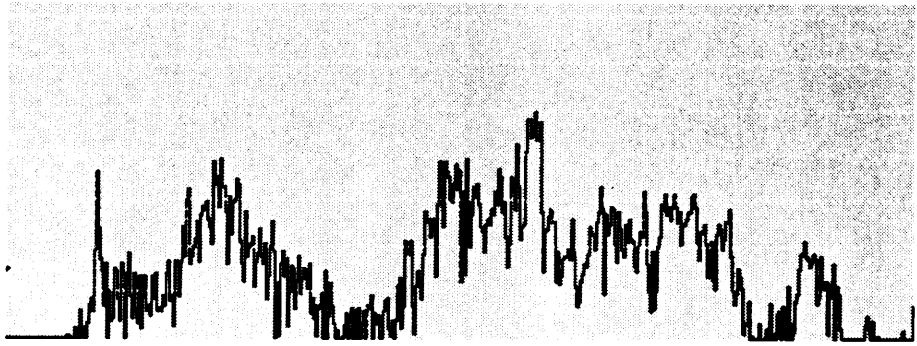
(a) Type I power spectrum



0.0

255.  $\mu$  ses

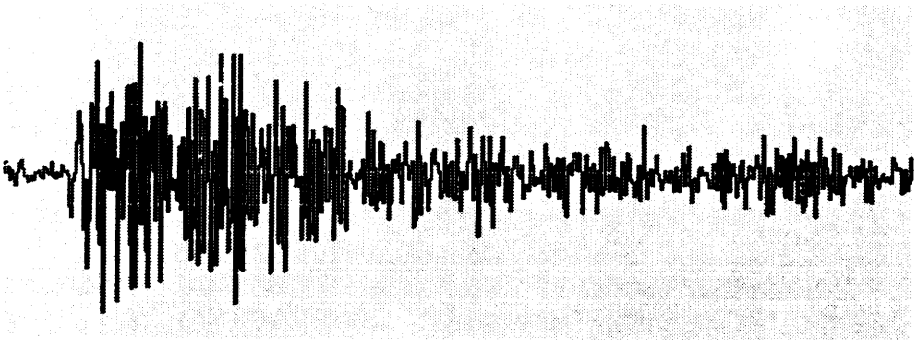
(b) Type I waveform



0.00

1.00MHz

(c) Type II power spectrum

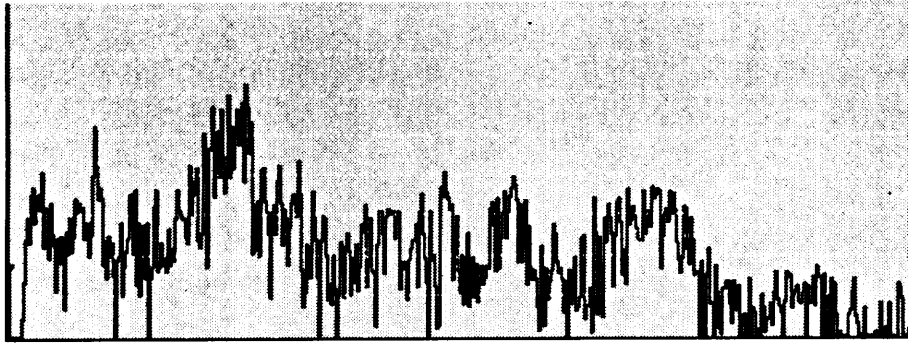


0.0

255.  $\mu$  ses

(d) Type II waveform

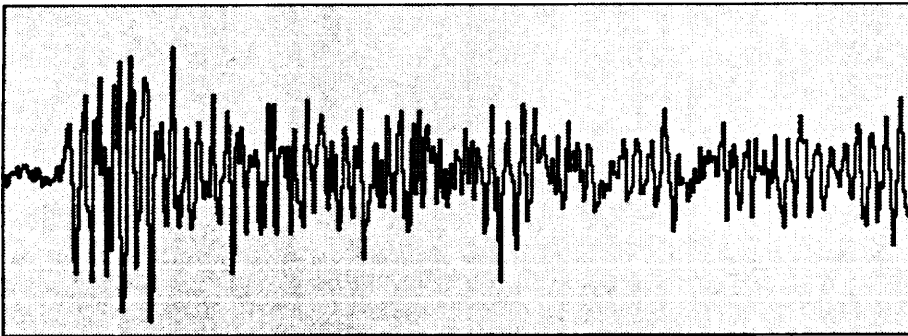
**Fig. 10 Two types of typical AE waveform and power spectrum(Top)**



0.00

1.00MHz

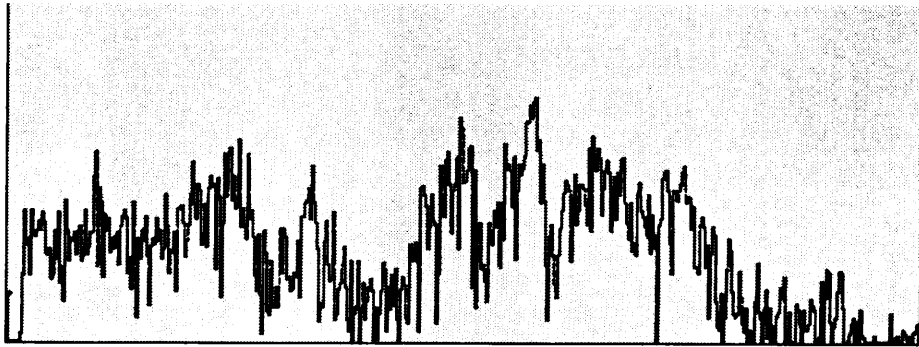
(a) Type I power spectrum



0.0

255.  $\mu$  ses

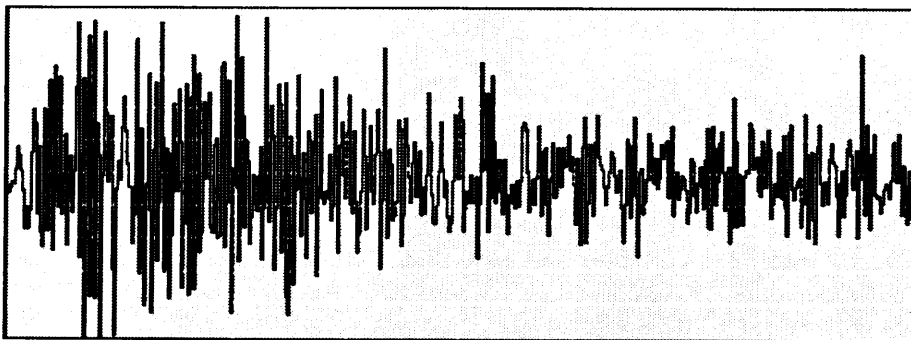
(b) Type I waveform



0.00

1.00MHz

(c) Type II power spectrum

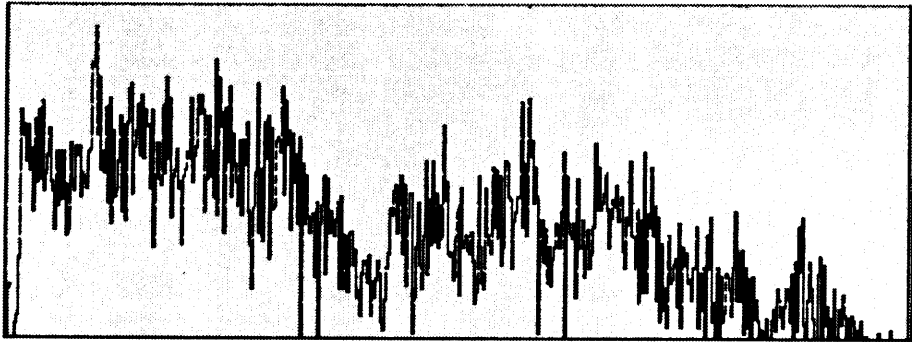


0.0

255.  $\mu$  ses

(d) Type II waveform

**Fig. 11 Two types of typical AE waveform and power spectrum(BT)**



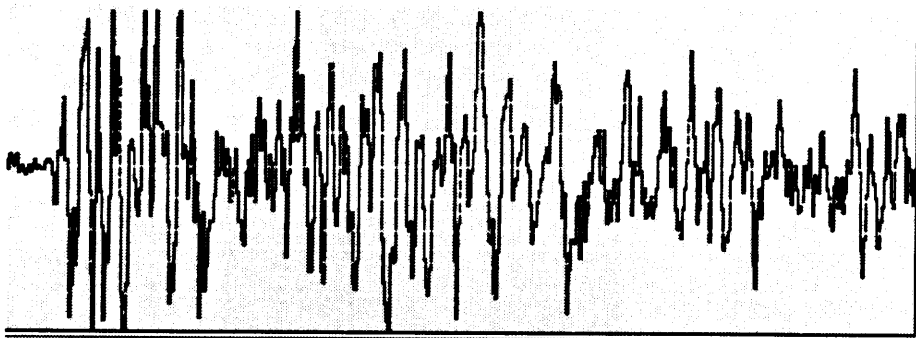
0.0

1.00MHz

Type I power spectrum



제주대학교 중앙도서관  
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY



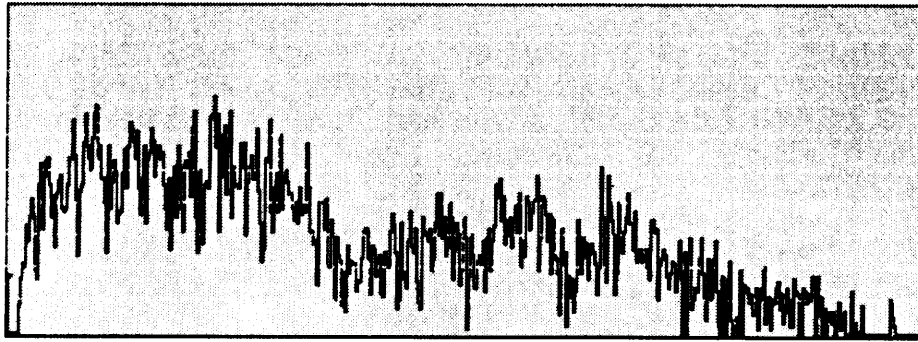
0.0

255. μ ses

Type I waveform

(a) BOND

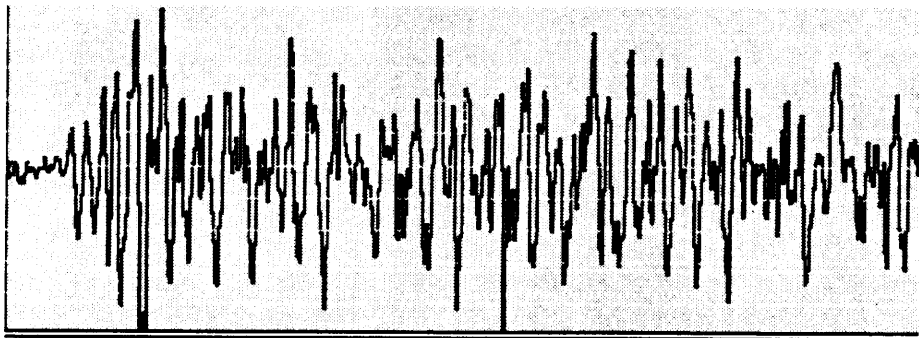




0.0

1.00MHz

Type I power spectrum

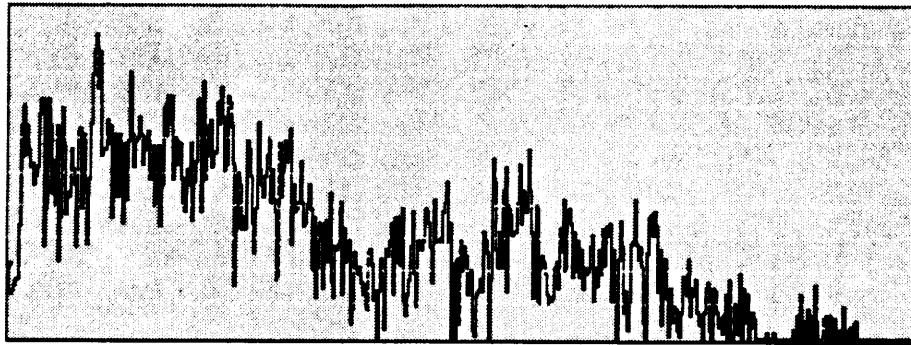


0.0

255.  $\mu$  ses

Type I waveform

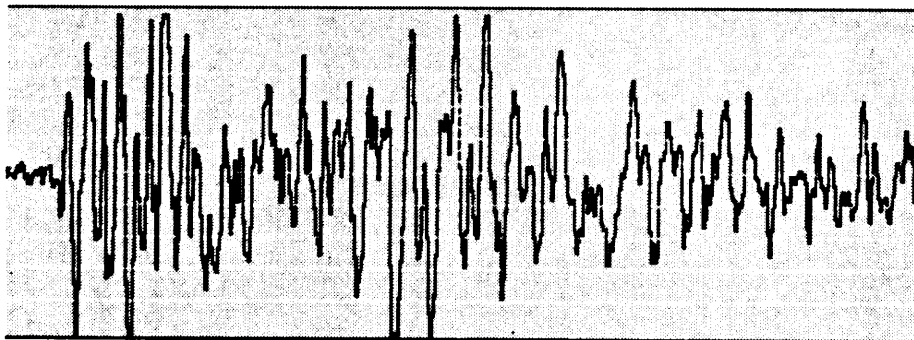
(b) TOP



0.0

1.00MHz

Type I power spectrum



0.0

255.  $\mu$  ses

Type I waveform

(c) BT

Fig. 12 type I of typical AE waveform and power spectrum(Bend test)

**Table. 7 Classification of AE events obtained from tensile test**

Specimen	Selected event	Type I	Type II
BOND	288	208(72%)	80(28%)
TOP	606	352(58%)	254(42%)
BT	39	32(82%)	7(18%)



**Table. 8 Classification of AE events obtained from bending test**

Specimen	Selected event	Type I	Type II
BOND	22	21(95%)	1(5%)
TOP	3	3(100%)	0(0%)
BT	25	24(96%)	1(4%)

### 3.3. 용사코팅재의 박리기구

Fig. 13과 Fig. 14에는 인장시험과 굽힘시험시의 응력과 AE진폭 분포를 나타낸다. 그림에서의 각 진폭들은 Type I과 Type II의 진폭을 구분하여 도시하였다. Fig. 13과 14에 나타낸 AE진폭들은 25dB~70dB의 범위에 있다. Fig. 13의 인장시험에서 Bond코팅재의 경우 약 350MPa 이하의 저응력하에서 Type I과 Type II가 많이 발생하고 있으며 그 이후의 고응력에서는 Type I의 AE진폭이 관찰되나 event수는 적다. Type I인 경우 넓은 응력범위에 걸쳐 분포하고 있으나 Type II는 100MPa-250MPa 사이에 편중되어 있다. 그리고 Top코팅재의 경우는 250MPa이하의 저응력하에서 Type I과 Type II가 다수 발생하였고 그 이후의 고응력에서는 Type I과 Type II가 발생하나 Type II의 편이 Type I보다 많다. 한편 BT코팅재의 경우 250MPa 이하의 저응력에서는 AE진폭이 발생하지 않고 그 이후의 고응력에서 Type I과 Type II가 발생하고 있으나 Type I이 Type II보다 많다. Bond코팅재는 Top코팅재의 고응력 영역에서 보이는 Type II의 파형이 나타나지 않고 BT코팅재는 고응력 영역에서 Type I이 주로 관찰되는 점에 주목하여 고찰하여 보면 Top코팅층은 밀착력이 강하지 않은 세라믹이 코팅되어 있으므로 코팅층의 기재 노치부 표면의 소성변형 억제 효과가 거의 없으나 Bond코팅재에는 그 효과가 있으며 BT코팅재의 경우에는 고응력 영역에서 코팅층의 박리인 Type I이 주로 관찰되므로 표면소성변형구속효과의 영향이 큼을 알 수 있다. Fig. 14(굽힘시험)의 경우 Bond코팅재와 BT코팅재의 경우 인장시험의 경우와는 달리 AE의 수가 적지만 부하 초기부터 재하시까지 골고루 분포하고 있지만 거의모두 Type I이며 Type II는 각각 하나의 AE진폭이 관찰되었다. Top코팅재의 경우 AE진폭이 거의 발생하지 않고 Type I의 AE가 3개만이 관찰되었다. 굽힘응력이 작용하는 경우 노치재의 인장의 결과에서 나타난 코팅에 의한 표면소성변형구속효과는 나타나지 않았다.

코팅재의 밀착성이 가장 양호한 BT코팅재에 대한 AE파형의 상세 분석을 위하여 470MPa까지 부하응력을 가하여 인장시험을 한 결과(case 1)와 100MPa까지 응력을 제하 한후 재차 응력을 부하하여 기재의 소성변형이 나타나는

530MPa까지 인장 응력을 가한 결과(case 2)의 AE Event와 응력을 Fig. 15에 도시하였다.

Fig. 15에서 case 2의 AE event는 1차 인장을 행한 470MPa 응력범위에서는 발생하지 않는 Kasier효과가 나타나며 그 이후 470MPa~530MPa 응력에서만 발생한다. 이 현상은 Kasier효과로서 알려져 있다.[14] Case 2에서 누적 AE event가 급격히 증가하였다.

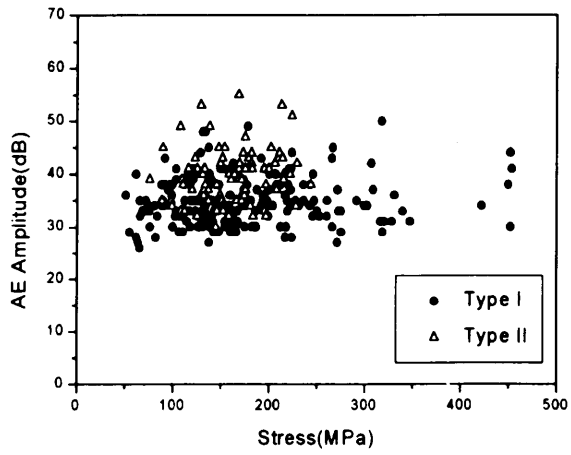
Fig. 16에는 Fig. 15의 case 1과 case 2의 AE신호에 대하여 Type I과 II의 AE파형과 파워스펙트럼을 분석하여 AE진폭과 응력과의 관계를 나타낸다. case 2의 재차 부하 응력을 가한 범위에서 주로 Type II의 AE파형이 관찰된다. 따라서 Type I의 AE파형은 코팅피막의 박리에 관련되어 발생한 것이고 Type II는 기재 노치선단의 소성변형에 의해 발생된 것임을 알 수 있다.

따라서, Type I의 저주파 AE파형은 코팅 피막의 균열, 탈락에 의한 AE파형으로, Type II는 기재의 소성변형에 따른 AE파형으로 분류하여 인장과 굽힘시의 코팅층의 박리기구를 고찰한다. 먼저 인장시험의 경우 노치재의 저면에서의 소성변형에 의해 코팅피막의 균열과 slip 및 박리가 발생할 것이다. Top코팅재의 경우 저응력에서 Type I과 II가 발생하는 것은 기재의 소성변형에 따라 세라믹의 균열 박리가 발생하기 때문이며 이때 노치 저면부의 세라믹 코팅재에 의한 AE발생이 거의 종료되므로 고응력에서는 주로 Type II의 AE파형이 나타난다. Bond 코팅재의 경우 저응력역에서 Type I과 II의 AE파형이 노치면의 소성변형에 의해 발생하지만 고응력역에서는 금속코팅층의 소성변형 억제 혹은 완충에 의해 Top코팅재에서 나타났던 Type II가 관찰되지 않는 것으로 생각된다.

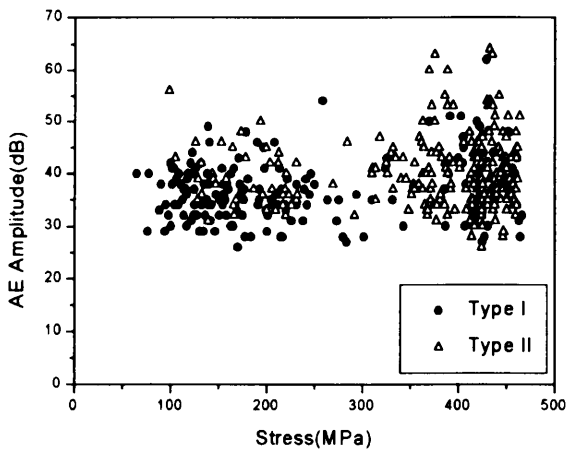
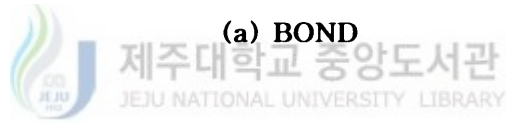
한편, BT코팅재의 경우에는 세라믹 코팅층에 의해 Bond코팅층에 생성된 표면 소성 변형구속효과[19,20]에 의해 저응력에서는 AE파형이 발생되지 않으며 고응력에서 약간의 Type I과 II의 AE파형이 관찰된다.

굽힘시험의 경우는 노치제가 아니므로 고응력에서 소성변형이 생기지만 그 정도가 미약하므로 Type II의 AE파형이 거의 발생하지 않은 것으로 생각된다. 따라서 용사코팅제의 인장 및 굽힘시의 코팅피막의 파손방지와 밀착성은 BT코팅제가 가장 우수한 것으로 나타난다[16].

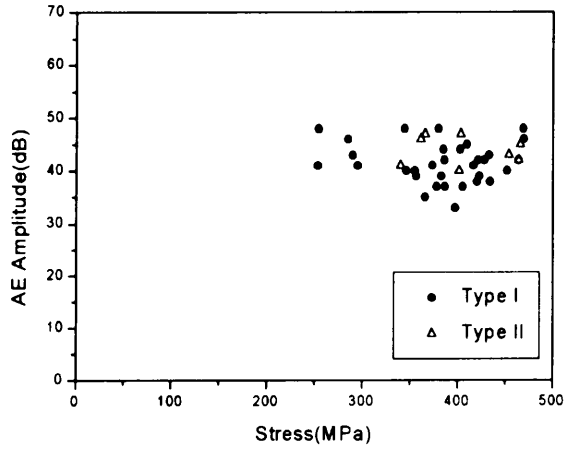




(a) BOND

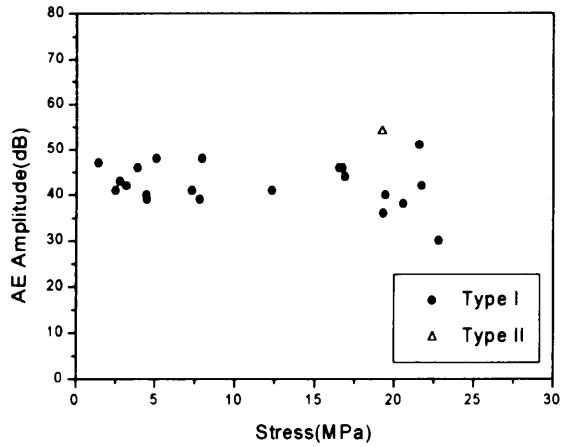


(b) TOP



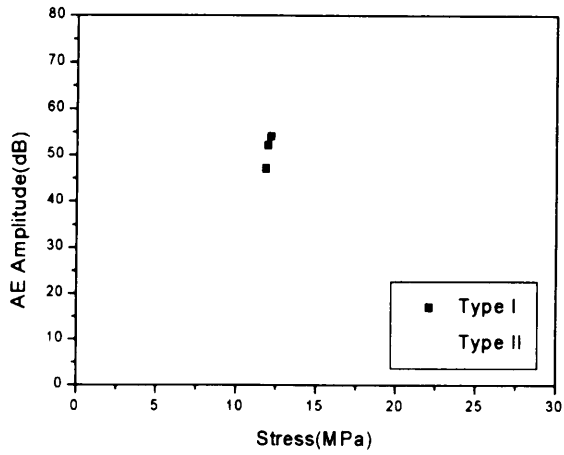
(c) BT

Fig. 13 AE amplitude vs stress in tensile test

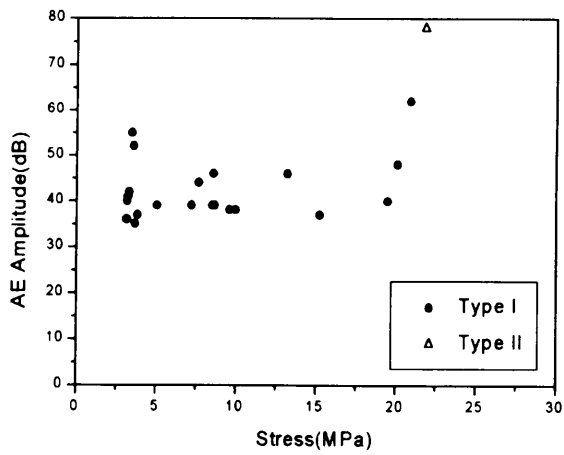
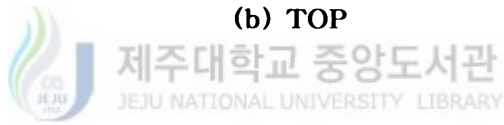


(a) BOND





(b) TOP



(c) BT

Fig. 14 AE amplitude vs stress in bend test

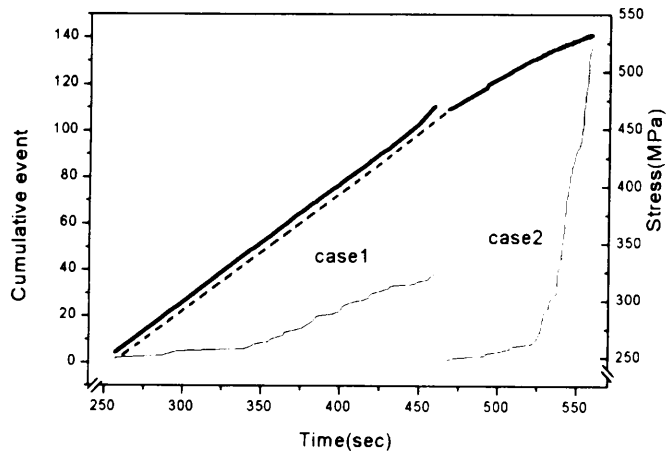


Fig. 15 The results of re-loading.

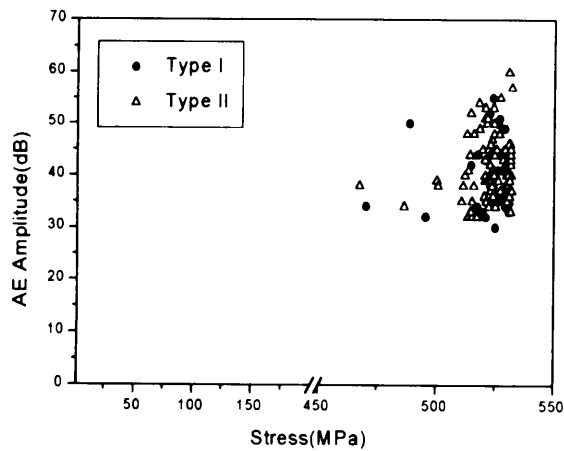


Fig. 16 AE amplitude vs stress of BT specimen in tensile test(case 2)

## IV. 결 론

기체구조용 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, 용사코팅체에 인장응력 및 굽힘응력 작용시 비파괴검사법의 한 종류인 AE법을 사용하여 용사코팅층의 박리거동에 대하여 음향방출 파형을 분석한 결과는 다음과 같다.

1. 용사코팅체의 AE파형은 240KHz 저주파영역의 Type I과 580KHz 고주파영역의 Type II로 구분할 수 있는데, Type I은 코팅층의 박리, Type II는 기체의 소성변형에 의해 발생한다. 노치체의 인장시험에는 Type I과 Type II 굽힘시험에 있어서는 주로 용사코팅층 박리에서는 Type I의 파형이 나타난다.
2. AE 신호는 인장시험의 경우 많이 나타나며 굽힘시험의 경우 소수다. 특히 인장시험의 BT코팅체의 경우 세라믹층의 표면소성변형 구속효과에 의해 Bond코팅, Top코팅보다 작으나, 굽힘시험의 경우는 표면소성구속효과가 거의 없다.
3. 인장시험과 굽힘시험의 파형 분석결과 Bond와 Top의 피막 박리 구분이 가능하지 않다. 즉, 코팅분말의 종류에 따른 AE파형의 특징 본 연구의 경우 나타나지 않았다.
4. 용사코팅층의 박리는 AE event, Count 및 진폭 등의 AE신호 분석을 통하여 측정이 가능하며, AE파라메타는 용사피막의 박리가 발생하는 구간에서 급격히 증가한다.

## 참 고 문 헌

- [1] 나종주, 이구현, 이상호, 1997, 상압 플라즈마의 응용 현황, 기계와 재료, 제 9권, 제4호, pp.100-117
- [2] 송요승, 이구현, 노병호, 1996, 기능성 용사 피막 응용 현황, 기계와 재료, 제8권, 제4호, pp.82-94
- [3] 서창민, 김경렬, 1997, 세라믹 코팅된 1Cr-Mo-0.25V강의 피로균열성장 특성, 대한기계공학회논문집(A), 제21권, 제10호, pp.1674-1682
- [4] 김부안, 남기우, 조문호, 1999, 금속기지 내열 경사기능 복합재료 개발에 관한 연구, 한국해양공학회지, 제13권 제11호, pp.62-69
- [5] M. H. Fukumoto, M. Ohwatari, 1998, Flattening Mechanism in Thermal Sprayed Particle Impinging on Flat Substrate, Proceedings of the 15th International Thermal Spray Conference, pp.401-406
- [6] M. Fukumoto, S. Katoh, I. Okane, 1995, Splat Behavior of Plasma Sprayed Particles on Flat Substrate Surface, Proceeding of ITSC'95, 353-358
- [7] E. 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 156 Committee, pp.535-539
- [8] 송성진, 1998, 결합의 정량적 비파괴평가 기술, 기계저널, 제38권, 제9호, pp.49-53
- [9] 비파괴평가연구그룹, 1996, '96비파괴시험교육, 한국표준과학연구원
- [10] 윤동진, 권오양, 정민화, 1993, 음향방출을 이용한 저어닐 베어링의 이물질 혼입의 영향에 대한 고찰, 한국음향방출(AE)연구회, 제4권, 제1호,

pp.18-32

- [11] 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射皮膜の密着性の評価. 溶射, Vol.33, No. 4, pp.32-39.
- [12] 윤동진, 1997, 음향방출을 이용한 구조물진단기술, 대한기계학회지, 제22권, 제6호, pp.47-53
- [13] 오세규, 1998, AE에 의한 비파괴검사와 응용, 한국박용기관학회지, 제12권, 제4호, pp.2-9
- [14] K. M. Ronnie, M. Paul, 1991, Nondestructive Testing Handbook Acoustic Emission Testing, American Society for Nondestructive Testing, 2nd, Vol.15, pp.23-33
- [15] K. Akita, S. Wakayama, S. Tobe, 1996, Deformation and Fracture Analysis of Thermal Spray Coatings by AE Method, The Japanese Society for NDI, pp.193-198.
- [16] 김귀식, 박경석, 홍용의, 2001, 플라즈마 세라믹코팅 피막부식재의 음향방출 특성, 한국해양공학회 춘계학술대회 논문집, pp.344-349
- [17] K. Ono, Q. Huang, 1994, Pattern Recognition Analysis of Acoustic Emission Signals, The Japanese Society for NDI, pp.69-78
- [18] M. Oda, T. Hara, Adhesion Evaluation of TiN Film by Acoustic Emission Technique, 1996, 日本機械學會論文集, 第62卷, 第595号, pp.277-283
- [19] 黄貞雄 小川武史 戸梶恵郎, 1993, セラミック溶射材の疲労強度と破砕壊機構, 日本機械學會論文集(A編), 第60卷, 第570号, pp.90-99.
- [20] 黄貞雄 小川武史 戸梶恵郎, 1994. セラミック溶射材の腐植環境における疲労強度よび破壊機構, 日本機械學會論文集(A編), 第59卷, 第563号, pp.90-94.

- [21] K. W. Nam, S. J. Kim, B. K. Kim, Life Prediction by Retardation Behavior of Fatigue Crack and its Nondestructive Evaluation, 1998, 한국동력기계학회, 추계학술대회 논문집, pp.115-121
- [22] X. Q. Ma, S. Cho, M. Takemoto, 2000, Acoustic Emission Source Analysis of Plasma Sprayed Thermal Barrier Coatings During Four-pont Bend Tests, Surface & Coatings Technology, Vol.139 pp.55-62

