

# AE파형분류에 의한 용사코팅재의 파손해석 Fracture Analysis of Plasma Spray Coating by Classification of AE Signals

김귀식 · 박경석 · 홍용의  
G. S. Kim, K. S. Park and Y. U. Hong

**Key Words** : Acoustic Emission Waveform(음향방출파형), Plasma Spray(플라즈마 용사), Bend Test(굽힘시험), Tensile Test(인장시험) , Power Spectrum Analysis(주파수해석), Ceramic Coating(세라믹 코팅)

**Abstract** : The deformation and fracture behaviors of both Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and Ni 4.5wt.%Al plasma thermal spray coating were investigated by an acoustic emission method. Plasma thermal spray coating is formed by a process in which melted particles flying with high speed towards substrate, then crash and spread on the substrate surface cooled and solidified in a very short time, stacking of the particles makes coating. A tensile test is conducted on notch specimens in a stress range below the elastic limit of substrate. A bendind test is done on smooth specimens. The waveforms of AE generated from the both test coating specimens can be classified by FFT analysis into two types which low frequency(type I) and high frequency(type II). The type I waveform is considered to corresponds exfoliation of coating layers and type II waveform corresponds the plastic deformation of notch tip. The fracture of the coating layers can estimate by AE event and amplitude, because AE features increase when the deformation generates.

## 1. 서 론

최근 산업의 발달로 고온, 마모, 내식성 등이 복합적으로 작용하는 가혹한 환경하에서 사용되는 산업기계류가 증가하면서 재료의 표면에 사용 환경에 적합한 우수한 기능을 부여하는 표면개질기술이 널리 이용되고 있다. 플라즈마 용사방법은 표면개질기술의 한 방법으로 금속, 세라믹, 플라스틱 등 응용 가능한 거의 모든 재료에 적용이 가능하며 특히 세라믹의 뛰어난 열적, 기계적 특성으로 인하여 내열성, 내마모성 및 내식성 등의 기능이 필요한 기계구조물에 널리 사용되고 있다. 그러나, 세라믹용사는 세라믹코팅층과 기재의 물성차로 인한 결합력 저하와, 용사과정에서 기공 등이 형성되므로 이를 보완하기 위하여 기재와 기계적 성질이

유사한 중간층(bond coating)을 삽입하는 방법과 강화열처리를 행하는 방법 등을 적용하고 있으나 이에 의한 결합력 향상이나 변형 및 파괴에 대한 연구가 충분하지 않다<sup>1,2)</sup>.

최근 재료의 변형과 파괴의 비파괴평가는 재료 내부의 미소변형이나 손상을 연속적으로 검출할 수 있는 음향방출법(AE)에 의한 평가기술이 주목 받고 있는데 용사재의 변형과 파손해석에도 일부 적용하여 보고되고 있지만 그 수효는 많지 않다<sup>3,4)</sup>.

따라서, 본 연구에서는 중간층을 삽입한 세라믹 용사재에 대하여 인장과 굽힘하중 작용시의 변형과 파괴를 AE 파형과 주파수분석을 통하여 해석 하므로써, 용사코팅을 실시한 기계구조물의 신뢰성 향상과 용사코팅의 설계기법을 확립하고자 한다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1 시험편

시험편의 기재는 기계구조용 탄소강 S45C(두께

접수일 : 2002년 5월 23일  
김귀식 : 제주대학교 기계공학과  
박경석 : 제주지방중소기업청  
홍용의 : 제주대학교 대학원

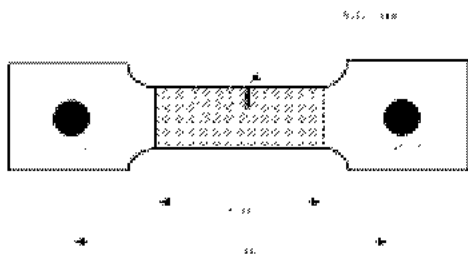
5mm)이며 그 화학성분을 Table 1에, 시험편의 형상과 치수를 Fig. 1에 나타낸다. 용사코팅을 실시한 부분은 Fig. 1의 사선부(60mm×25mm)이다. 시험편은 코팅 유형별로 Table 2에 나타낸 3종류의 시험편을 제작하였다. 코팅은 기재의 표면을 블라스팅한 후 플라즈마 용사장치(Metco 9MP)를 이용하여 Table 3의 용사조건으로 시험편 편면만을 실시하였다. 코팅재료는 Table 4에 나타낸 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>와 Ni 4.5%Al 합금 분말이다. 코팅두께는 Ni 4.5%Al은 약 100 $\mu$ m, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>은 약 200 $\mu$ m로 하였다. 인장시험편은 코팅후 시험편의 중앙부에 방전가공에 의해 6mm의 편노치를 삽입한 노치시험편을, 굽힘시험편은 노치가 없는 평활시험편을 사용하였다.

2.2 실험방법

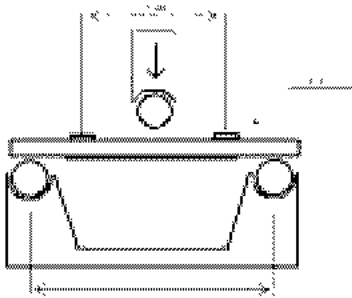
인장 및 굽힘시험에 사용된 시험기는 Instron사의 UTM이며, 크로스헤드의 이송속도를 0.25mm/min으로 하였다. AE측정장치는 Mistras 2001(PAC Co.)을 사용하였다. AE센서 부착위치를 Fig. 1에 보인다. 센서는 WD센서를, Preamp는 60dB, 100KHz에서 1.2MHz까지의 Band pass filter로 설치하였다.

Table 1 Chemical composition of 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



(a) Tensile test specimen



(b) Bend test

Fig. 1 Shape of test specimen (unit: mm)

Table 2 Test specimens

Specimen names	Coating materials
BOND	Ni 4.5wt.%Al
TOP	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
BT	Ni 4.5wt.%Al and Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>

AE데이터의 수집은 2개의 Mistras 2001 board를 2대의 컴퓨터에 각각 내장하고 병렬로 연결하여 동시에 MI LOC의 DTA파일과 MI TRA의 TDA 파일을 생성하였다.

AE파형해석은 두 센서로부터 수집된 채널 1과 2의 파형을 MI TRA에서 Group reply하여 파형과 스펙트럼을 관찰하였다. 기초실험에서 정확한 AE 신호의 선별을 위하여 Fig. 1에서 나타낸 2개의 AE센서 부착위치 중 한쪽 센서 부착위치에서 연필심의 절단에 의한 AE신호를 가했을 때의 채널 1과 2의 파형을 Fig. 2에 나타낸다. 두 채널간의 신호도달시간은 13.7 $\mu$ s의 차이를 보인다. 따라서 본 실험에서는 두 채널간의 파형시작의 시간차가 13.7 $\mu$ s이내의 신호만을 시험편에서 발생한 AE 파형으로 간주하고 그 이외의 파형은 모두 Noise로 처리하였다. 그리고 인장과 굽힘시험시 부하하중은 X Y Plotter에 기록하고, 또 MI LOC에 부하하중을 AE 파라메타로 지정하여 하중과 시간곡선을 작성하였다.

Table 3 Plasma spraying conditions

Condition	Powder feed unit		Plasma gas (psi)		DC (A)	DC (V)	Spray dis. (mm)
	Flow meter (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	100
Ni 4.5wt.%Al	13.5	68	80	15	500	65	150

Table 4 Powders used plasma spray

Powder	Composition	Typical size range
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> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5 ~ 45 $\mu$ m
Ni ~4.5wt.%Al	Al 45%, Nickel balance	45 ~ 90 $\mu$ m

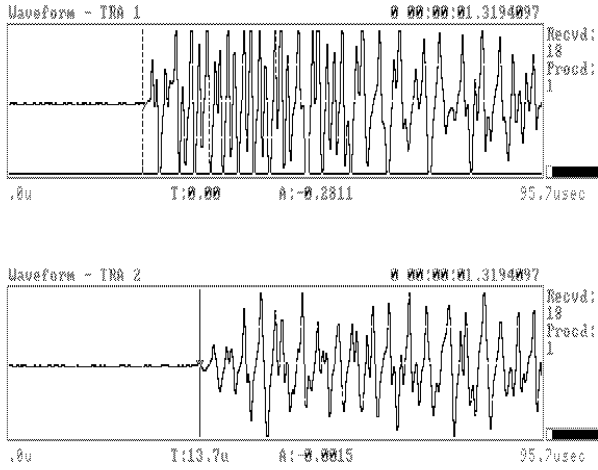


Fig. 2 AE waveform by pencil break

### 3. 실험결과 및 고찰

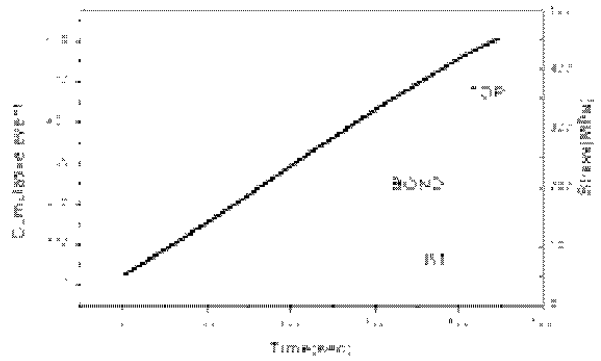
#### 3.1 AE 신호 발생

인장과 굽힘시험에 있어서 각 코팅재의 AE event를 Table 5에 나타낸다. 총 Event는 DTA file의 채널 1에 기록된 것이고, 선택 Event는 DTA file의 채널 1과 2의 파형을 비교하여 두 신호 도달시점이 13.7usec이내의 신호만 선택한 것이다. 인장시험에서 Event들은 TOP코팅재가 가장 많으며 BOND, BT의 순으로 적고, 굽힘시험에서는 그 반대의 경향이나 TOP의 경우 극단적으로 적다.

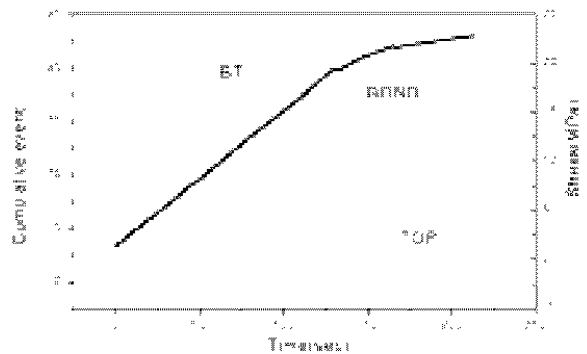
Fig. 3에 선택 Event를 시험시간에 따른 누적 Event와 부하응력의 관계를 도시하였다. 가는 실선은 누적Event와 시험시간, 굵은 실선은 응력과 시험시간의 관계를 나타낸다. Fig. 3 (a)의 인장시험에서 TOP코팅재의 경우 100~200sec와 400sec 이후에 누적 Event가 급격히 증가한다. BOND코팅재의 경우 100~200sec의 범위에서만 TOP코팅재의 경우와 동일하게 누적AE event가 급격히 증가한다. BT코팅재는 상기의 두 경우보다 소수의 AE event들이 300~450sec 범위에서 발생하였다.

Table 5 AE events obtained

Type	Tensile test		Bend test	
	Total event	Selected event	Total event	Selected event
BOND	1098	288	163	22
TOP	2227	606	103	3
BT	469	39	758	25



(a) tensile test



(b) bend test

Fig. 3 Cumulative events and stress vs. test time

한편, Fig. 3 (b)의 굽힘시험에서는 BT와 BOND가 전체 시험시간에 걸쳐 비교적 균일하게 증가되고 있지만, TOP의 경우는 약 180sec에서 발생하였다. 이 Event들의 발생원은 기재의 항복과 코팅층의 균열과 박리에 의해 발생된 것으로 생각되나, 이에 대하여는 후술한다. 참고로 기초 실험중 평활시험편에 대하여 Fig. 3 (a)에 나타낸 인장응력에서는 AE가 발생하지 않았다. 용사재 평활시험편에서 AE가 발생하지 않는 것은 窪堀後文 등<sup>2)</sup>도 보고하고 있다. Fig. 4은 부하응력과 Count의 분포를 나타낸다. 인장시험의 경우, 코팅재들의 Count 분포는 BOND코팅재는 저응력 영역에서 주로 발생하고, TOP코팅재는 고응력 영역에서, BT코팅재는 200~480MPa의 범위에 분포되었다. 굽힘시험의 경우, BT와 BOND는 전응력구간에 분산되어 있고, TOP은 약 12MPa에서 발생하였다.

#### 3.2 AE파형의 분류

인장과 굽힘시험에서 수집된 각 코팅재의 AE파형과 파워스펙트럼은 부하방식과 코팅재질의 종류에 관계없이 즉, TOP, BOND, BT코팅재가 동일하게 Fig. 5에 나타낸 Type I과 Type II의 파형이

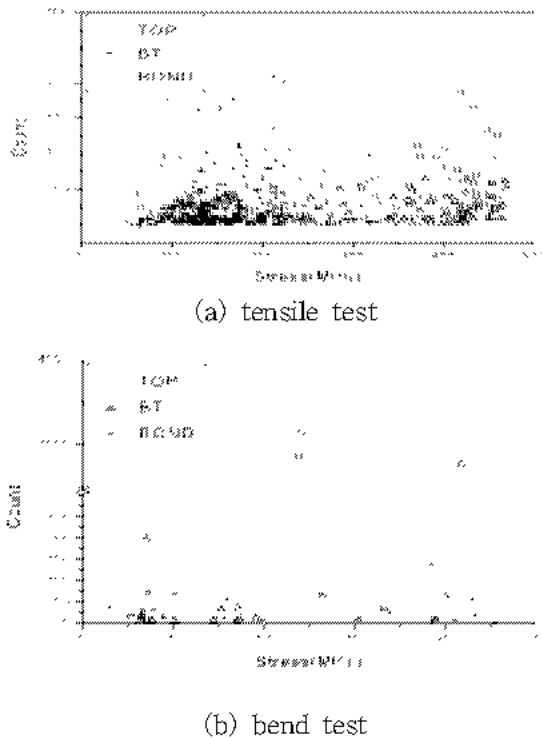


Fig. 4 Count vs. stress

관찰된다. 파워 스펙트럼의 주파수를 관찰하면 세 코팅재 모두 Type I 파형은 240KHz, Type II 파형은 580KHz의 성분이 가장 크게 나타난다. 따라서 각 코팅재의 AE파형은 240KHz의 성분이 크게 나타나는 Type I형과 580KHz의 성분이 크게 나타나는 Type II의 파형으로 구분하였다.

위의 파형 분류방법을 인장과 굽힘시험에서 수집한 선택 Event에 적용한 결과를 Table 6과 7에 나타낸다. 세 코팅재 모두 Type I이 II보다 많다. Type I과 Type II 파형의 발생원에 대하여 고찰하여 보면 Oda 등은 TiN코팅막의 AE에 의한 부착력시험에서 코팅층의 박리에 따른 AE의 주파수는 300KHz라고 보고하고 있으며<sup>5)</sup>, Akita 등은 1) Mo의 용사코팅의 박리에 대한 AE실험에서 250KHz의 파형과 100KHz의 파형을 검출하여 250KHz의 파형은 코팅층의 균열발생에 의한 것으로 보고하였다. 한편 남 등은 2024Al합금 노치재의 인장시험에 따른 AE특성에서 노치선단의 Blunting과 소성변형시의 AE파형의 주파수가 500KHz임을 보고하고 있다<sup>6)</sup>. 따라서 본 연구에서의 Type I 파형은 코팅층의 박리에 의해, Type II 파형은 기재의 소성변형에 의한 것으로 생각한다.

### 3.3 용사코팅재의 박리기구

Type I과 Type II로 분류한 AE파형의 발생원에 대한 검토를 위하여 BT시험편에 대하여 470MPa

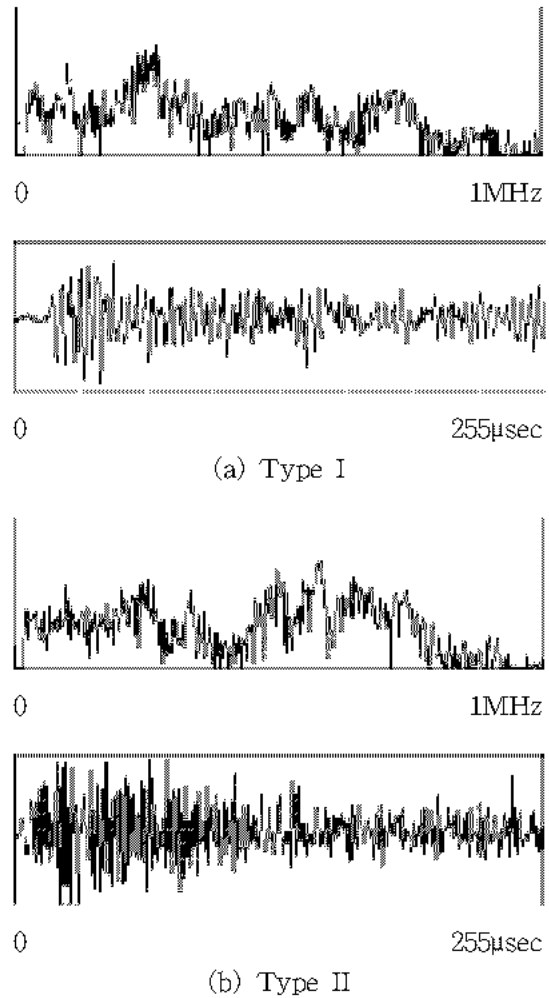


Fig. 5 Two types of typical AE waveform and power spectrum

Table 6 Classification of AE events for tensile test

Type	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 7 Classification of AE events for bend test

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

까지 부하응력을 가하여 인장시험을 실시한 경우(case 1)와 동일 시험편에 대하여 제하후 재차 530MPa까지 인장 응력을 가한 경우(case 2)의

AE Event와 응력을 Fig. 6에 도시하였다. Fig. 6에서 Case 2의 인장시험시 AE event는 Case 1의 인장시험을 행한 470Mpa 이하의 응력범위에서는 발생하지 않고 470Mpa 이상의 응력범위에서만 발생하는 Kasier효과를 보인다. Case 2의 경우 470Mpa이상의 응력범위에서 누적 AE event가 급격히 증가하였다.

Fig. 7에는 Case 2의 AE신호에 대하여 Type I과 Type II의 파형분류에 따른 AE진폭과 응력과의 관계를 나타낸다. Case 1의 경우 Table 6과 Fig. 8(c)에 나타낸 것처럼 Type I의 파형이 대부분이었으나, Case 2는 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.

위의 분류에 의해 인장과 굽힘시험에서 수집된 각 코팅재의 AE진폭과 응력과의 관계에 파형분류를 적용한 결과를 Fig. 8과 9에 나타낸다. Fig. 8의 인장시험의 경우, BOND코팅재는 Type I이 넓은 응력범위에 분포하고 Type II는 100MPa과 250MPa 사이에 편중되어 있다. 그리고 TOP코팅재의 경우는 250MPa이하의 저응력범위에서 Type I과 Type II가 함께 발생하고 그 이상의 고응력에

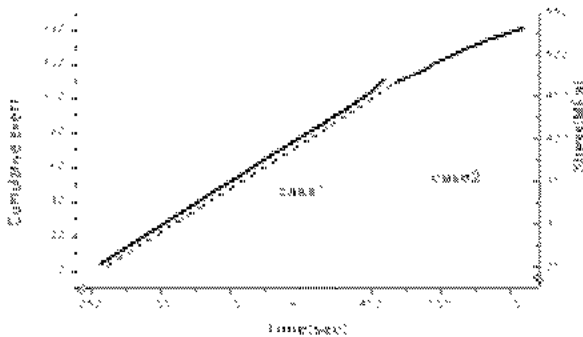


Fig. 6 Stress and events vs. test time

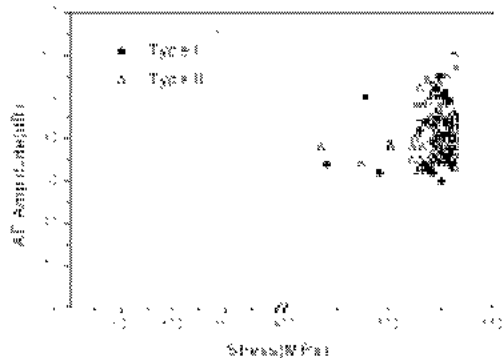
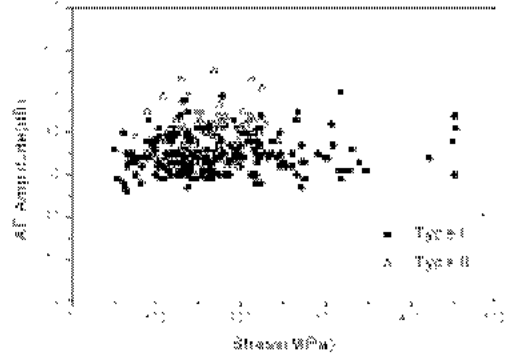


Fig. 7 Amplitude vs. stress of case 2

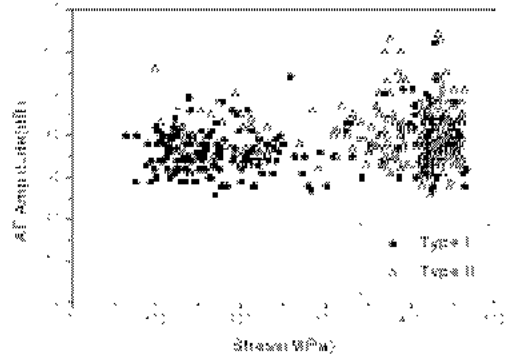
서는 대부분 Type II가 관찰된다. 한편 BT코팅재의 경우 250MPa 이하의 저응력에서는 AE진폭이 발생하지 않고 그 이후의 고응력에서 Type I과 Type II가 발생하고 있으나 Type I이 Type II보다 많다.

한편, Fig. 9의 굽힘시험의 경우, BOND와 BT 모두 Type I이 전응력 구간에 걸쳐 나타나며, 약 20MPa의 고응력에서 소수의 Type II의 파형이 보인다. TOP재의 경우는 12MPa부근에서 Type I만이 보이나 Type II의 파형은 없다.

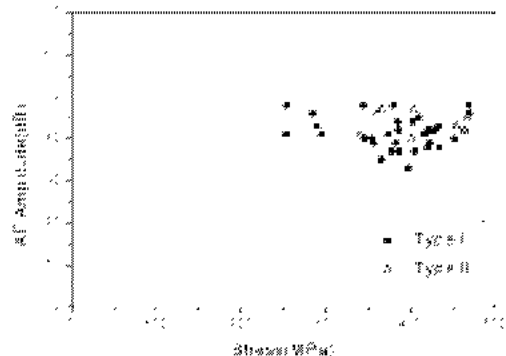
파형분류를 기초로 하여 용사코팅재의 변형과 파



(a) BOND



(b) TOP



(c) BT

Fig. 8 Amplitude vs. stress in tensile test

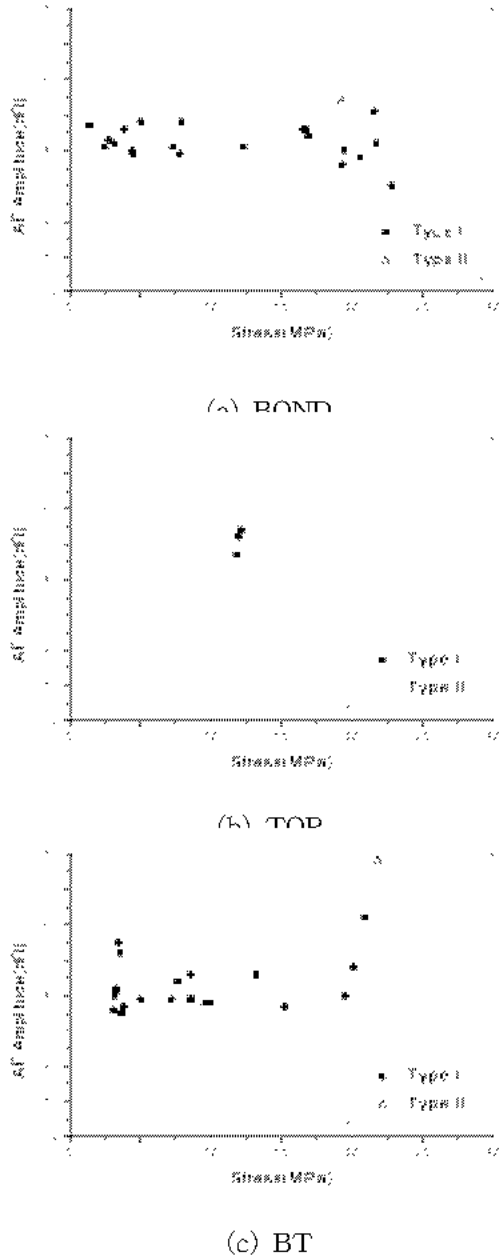


Fig. 9 Amplitude vs. stress in bending test

에서 노치시험편의 기재가 소성변형을 하면 그에 따라 코팅피막의 균열과 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 II 파형이 나타난다. Bond 코팅재의 경우 저응력역에서 Type I과 II의 파형이 노치면의 소성변형에 의해 발생하지만 고응력역에서는 본드코팅층의 소성변형 억제 혹은 완충에 의해 TOP코팅재에서 나타났던 Type II가 관찰되지 않는 것으로 생각된다. 한편, BT코팅재의 경우 세라믹 코팅층에 의해 BOND코팅층에 생성된 표면소성변형구속효과<sup>6,7)</sup>에 의해 저응력에서

는 AE파형이 발생되지 않으며 고응력에서 약간의 Type I과 II의 AE파형이 관찰된 것으로 생각하지만, 이에 대해서는 BOND코팅재의 박리를 포함하여 더욱 명확한 연구가 필요하다.

한편, 굽힘하중 부가시에는 시험편의 변형에 의해 코팅층이 균열과 파손에 의해 Type I이 발생하지만 TOP재에서의 Type I 파형이 소수이므로 이것은 주로 BOND코팅층의 균열과 파손에 의한 것으로 간주된다.

#### 4. 결 론

기계구조용 탄소강 S45C에 Ni 4.5wt.%Al 합금 분말과 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 세라믹분말을 플라즈마 용사한 코팅재에 인장과 굽힘응력 부가시 코팅층의 파손거동에 대한 AE파형을 분석한 결과는 다음과 같다.

- 1) 용사코팅재의 AE파형은 240KHz의 주파수대역의 Type I과 580KHz의 주파수대역의 Type II로 구분되며, Type I은 코팅층의 파손, Type II는 기재의 소성변형에 의해 발생한다.
- 2) 인장과 굽힘시험의 파형 분석결과 BOND와 TOP의 코팅층 파손은, 주로 BOND코팅층의 파손에 기인하며, 코팅분말의 종류에 따른 AE파형의 특징은 나타나지 않았다.
- 3) 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. Akita K, Wakayama S. and Tobe S, "Deformation and Fracture Analysis of Thermal Spray Coatings by AE Method", The Japanese Society for NDI, pp. 193~198, 1996
- 2.窪堀後文, 生田稔郎, 尹藤征郎, "AE法及び超音波検査法による溶射皮膜の密着性の評價", 溶射, Vol.33, No. 4, pp. 32~39, 1996
3. 김귀식, 오명범, K. Ono, "Acoustic Emission 파형분류에 의한 플라즈마 용사 코팅재의 인장 해석", 한국해양공학회지, 제15권, 제4호, pp. 60~65, 2001
4. Ma X. Q, Cho. S and Takemoto M, "Acoustic Emission Source Analysis of Plasma Sprayed

Thermal Barrier Coatings During Four point Bend Tests", Surface & Coatings Technology, Vol.139, pp. 55-62, 2000

5. Oda M and Hara T, "Adhesion Evaluation of TiN Film by Acoustic Emission Technique", 日本機械學會論文集, 第62卷, 第595号, pp.277~283, 1996
6. Nam, K.W., Kim, S. J. and Kim, B. K., "Life Prediction by Retardation Behavior of Fatigue Crack and its Nondestructive Evaluation", 한국동력기계학회 추계학술대회논문집, pp.115~121, 1998
7. 黄貞雄, 小川武史, 戸椋恵郎, "セラミ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, 1994