

음향방출 신호처리에 의한 플라즈마용사코팅 피막부식재의 파손해석

김 귀 식* · 박 경 석** · 홍 용 의*** · 현 창 해****

Fracture Analysis of Plasma Spray Coating Layer Corroded by Acoustic Emission Signals

Gui-Shik Kim*, Kyung-Shuk Park**, Yong-Ui Hong*** and Chang-Hae Hyun****

ABSTRACT

This paper was to investigate of a adhesiveness of the plasma sprayed coating materials did a salt spray by acoustic emission method in tensile loading. The powders used for the coating were nickel aluminum composite powder Ni-4.5wt.%Al and titanium dioxide powder TiO_2 . These powders were coated on a carbon steel S45C by plasma spray method. The salt solution was a 5% NaCl and the salt spray times were 2, 5 and 10 hours respectively. The salt solution penetrated into the surface of the substrate through pore of the coating layer built in the process of plasma spray. Corrosion productions formed on the surface of substrate. The adhesiveness between the substrate and the coating layer is weaken by corrosion and the exfoliation initiated chiefly at the corrosion surface of the substrate. The AE events and energy of the corroded coating specimens decreased as the salt spray times increased. The AE amplitudes increased at strain range of 6%-11%.

Key words : Acoustic emission, plasma spray coating, coating layer corrosion, adhesiveness.

1. 서 론

최근 산업의 발달로 고온, 마모, 내식성 등에 복합

- * 제주대학교 기계공학과, 산업기술연구소
Dept. of Mechanical Eng., Res. Inst. Ind. Tech., Cheju
Nat'l Univ.
- ** 제주지방중소기업청
Regional Office of Cheju SMBA
- *** 제주소방서
Cheju Fire Station
- **** 제주관광대학 메카트로닉스계열
Cheju Tourism College, Mechatronics Majors

적으로 작용하는 가혹한 환경하에서 사용되는 산업기
계류가 증가하면서 재료의 표면에 사용환경에 적합한
우수한 기능을 부여하는 표면개질기술이 널리 이용되
고 있다¹⁾. 플라즈마 용사방법은 표면개질기술의 한
방법으로 금속, 세라믹, 플라스틱 등 용융 가능한 거
의 모든 재료에 적용이 가능하며, 특히 세라믹의 뛰
어난 열적, 기계적 특성으로인해 내열성, 내마모성 및
내식성 등의 기능이 필요한 기계구조물에 널리 사용
되고 있다²⁾. 그러나 세라믹용사는 소재와 코팅층 사
이의 낮은 결합력과, 용사과정에서 형성되는 기공 등
으로 부식환경에서 사용시 큰 결점으로 작용하여 실

용화에 문제점으로 지적되고 있다³⁾. 이러한 결합의 측정은 주로 파괴검사법으로 행하여져 왔으나, 최근에는 재료 내부의 미소한 변형이나 손상을 연속적으로 검출할 수 있는 음향방출법(이하 AE)에 의한 평가기술이 주목받고 있다⁴⁾.

따라서 본 연구에서는 부식환경이 세라믹 용사 코팅재에 미치는 영향을 파악하기 위하여, 세라믹 TiO₂ 과 합금분말 Ni-4.5%Al을 플라즈마용사에 의해 코팅하여, 염수분무에 의한 부식을 실시한 후, 인장하중 부가시 용사코팅재의 파손에 따른 AE특성을 검토하였다.

II. 실험방법

시험편의 기재로는 탄소강(S45C)을 사용하였으며, 이의 형상 및 치수는 Fig. 1에 나타냈다. 코팅에 앞서 전 처리로서 기재의 표면을 블라스팅한 후, 초음파 세척을 하였다.

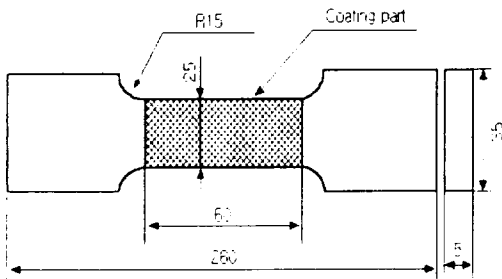


Fig. 1. The shape and dimension of test specimen.

코팅은 플라즈마 용사장치(Metco Co.)를 이용하여 Table 1의 용사조건으로 실시하였다. 코팅재료는 Table 2에 나타낸 바와같이 Top코팅재료로는 세라믹TiO₂와 Bond코팅재료로는 Ni-4.5wt.%Al 합금분말을 사용하였다. 시험편 상의 코팅면은 Fig.1의 사선 부로서 시험편 편면이며, 코팅두께는 본드코팅 100 μm, 탑코팅 200μm으로 하였으며, 제작된 시험편은 아래의 2종류이다.

BOND: Ni-4.5wt.%Al를 코팅한 시험편

TOP: TiO₂코팅한 시험편

Table 1. Plasma spraying conditions

Condition	Powder feed unit		Plasma gas(psi)		Spray dis. (mm)
	Flow meter (ft ³ /h)	Feed rate (g/min)	Ar	H ₂	
TiO ₂	13.5	53	80	15	75~100
Ni-4.5wt.%Al	13.5	68	80	15	100~150

Table 2. Powder conditions

Powder	Typical size	Melting point
Ni-4.5wt.%Al	170~325mesh	660°C
TiO ₂	10~270mesh	1920°C

이들 시험편의 부식은 염수분무장치를 사용하였다. 염수 및 분무조건은 ASTM B117에 따라 염수농도 NaCl 5%, PH 7.2, 공기압 0.7kg/cm², 분무실온도 35°C, 염수분무량 2ml/hr으로 실시하였다. 염수분무시간은 2시간, 5시간, 10시간으로 하였다. 부식시간에 따른 시험편의 구분은 각시험편의 명칭에 숫자로 표시하였다. 예를들면 2시간 부식한 TOP시험편은 2TOP이다.

AE시험은 만능재료시험기(Zwick Co.)를 이용하여 크로스헤드 이송속도를 1mm/min로 하여 인장하중을 가하면서, MITRAS 2001(PAC)를 사용하여 AE신호를 측정하였다. AE측정에 있어서 사용센서는 50Hz~200Hz의 주파수범위를 갖는 R15센서이며, Preamp를 40dB로 설정하였다. AE센서와 시험편과의 밀착재는 고진공 Silicon을 사용하였다.

III. 실험결과 및 고찰

3.1 Ni-4.5%Al 코팅재의 Event와 Energy 특성

용사코팅 후 부식을 하지 않은 BOND시험편과 각각 2시간, 5시간, 10시간 부식을 실시한 2BOND시험편, 5BOND 및 10BOND의 AE Event와 응력과 변

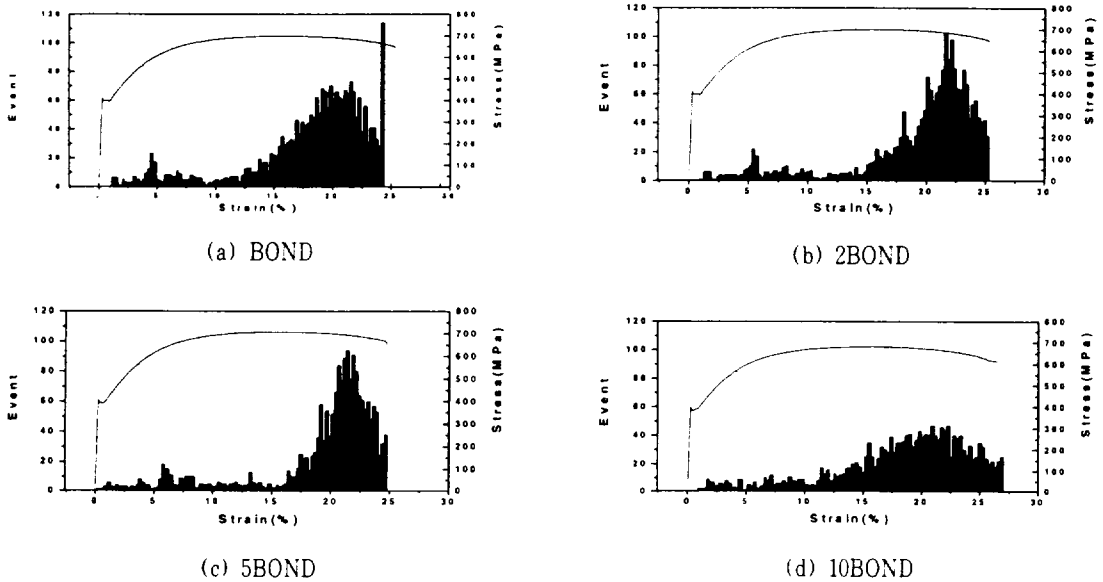


Fig. 2. Stress and event vs. strain.

형을 곡선을 Fig. 2에 나타낸다.

Fig. 2에 나타난 바와 같이 부식시간에 따른 응력-변형을 곡선은 무부식의 시험편과 동일하므로 부식으로 인한 기재의 강도변화는 없다. 부식시간에 따른 AE event는 BOND시험편, 2BOND시험편, 5BOND 시험편, 10BOND시험편 순으로 부식시간이 길면 감소하고 있다. 변형율과 Event관계에서 부식시간이 길어지면 최대 Event가 나타나는 변형율이 감소하고 있다. 이는 부식이 증가하면 코팅재의 박리 혹은 용사 피막 내부의 소성변형과 파괴가 촉진됨을 나타낸다.

Fig. 3과 Fig. 4에 시험편의 인장변형에 따른 누적 AE Count와 누적 AE Energy를 나타낸다. Fig. 3과 Fig. 4에서 부식시간에 따른 누적 AE Count와 누적 AE Energy의 경향은 유사하므로 함께 고찰한다.

2시간, 5시간의 부식재에 대한 이들 누적 Count와 Energy는 초기변형율에는 극히 소규모의 증가를 보이다가 17%이상의 변형율 부근에서 급격히 증가한다. 이는 무부식재의 경향과 비슷하다. 그러나 10시간 부식시의 10BOND시험편의 경우 변형율 17%부근에서의 Count와 Event의 증가는 적게 나타나고 있다. 이는 코팅층의 박리와 피막내부의 소성변형이 많아지면 용사피막내에서 흡수할 수 있는 에너지가 적게되므로

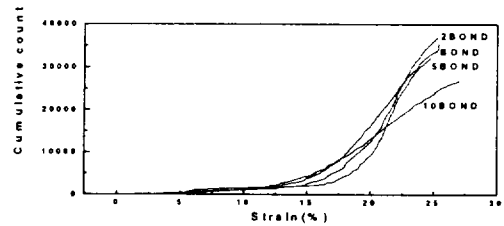


Fig. 3. Cumulative count vs. strain.

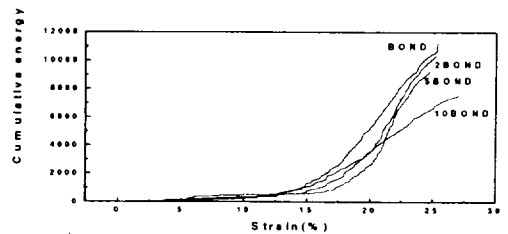


Fig. 4. Cumulative energy vs. strain.

기재와 코팅층 사이가 부식으로 인하여 밀착성이 저하되고 있음을 나타낸다. 용사코팅재가 부식환경에 노출될 경우 용사코팅표면에 잔존하는 기공 등의 결함으로 염수가 기재로 침투되고, 기재로 침투한 염수는 시간이 경과함에 따라 용사코팅층과 기재사이로 확산되어

부식을 일으키며, 특히 블라스팅(blasting)에 의한 기재 표면의 잔류응력과 표면조도의 변화로 부식이 빠르게 진행되어, 밀착성이 현저히 감소하기 때문이다. 그러나 5시간까지의 부식에는 이러한 영향이 거의 없다.

3.2 Ni-4.5%Al 코팅재의 AE진폭분포

Fig. 5에 응력과 변형율에 따른 AE진폭분포를 나타낸다. 그림에서 모든 시험편은 부식시간에 관계없이 전체 인장변형을 구간에서 AE진폭이 나타나며, AE진폭의 최대값은 약 80dB이다. 이들 AE진폭분포는 변형을 15%이후에 65dB이하의 진폭들이 밀집되어 있다. 따라서 이 변형을 간에서 코팅층의 박리와 소성변형이 발생한다고 생각된다. 특히 이 구간에서 2BOND와 5BOND시험편의 AE진폭분포를 무부식시험편의 경우와 비교하면, 부식재의 경우는 무부식재보다 진폭들이 감소하고 있지만 그 정도는 작다. 따라서, 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, 변

형을 10%이상에서 65dB이하의 진폭분포가 많아지고 있다. 전술한 바와같이 코팅층에 존재하는 기공들에 염수가 침입하여 기재의 부식이 촉진되고, 이로 인한 부식생성물이 코팅층과 기재의 밀착성을 감소시키기 때문으로 생각된다.

Fig. 6에 10BOND 시험편의 인장시험 후 시험편의 표면을 관찰한 사진으로 코팅층에 발생한 부식과 균열 양상을 나타낸다. 기재의 부식으로 인하여 생긴 부식생성물이 코팅층 표면에 나타나며 인장하중을 부하시 이 부분을 중심으로 균열이 발생. 성장하면서 주변이 박리되는 현상을 보여 주고 있다.

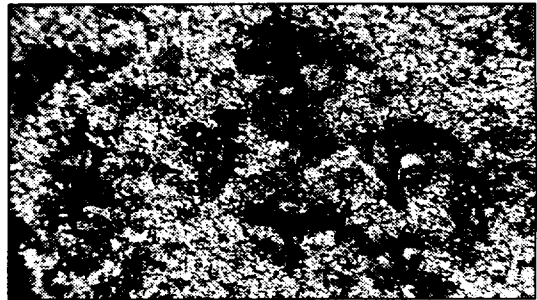


Fig. 6. Crack and corrosion on 10BOND surface.

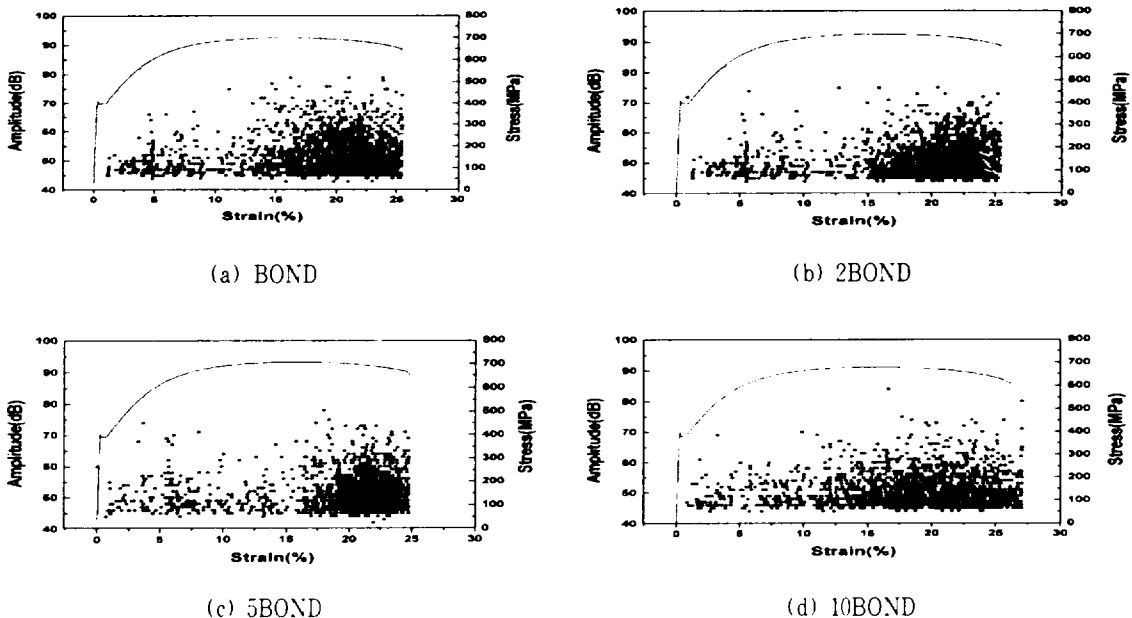


Fig. 5. Amplitude vs. strain.

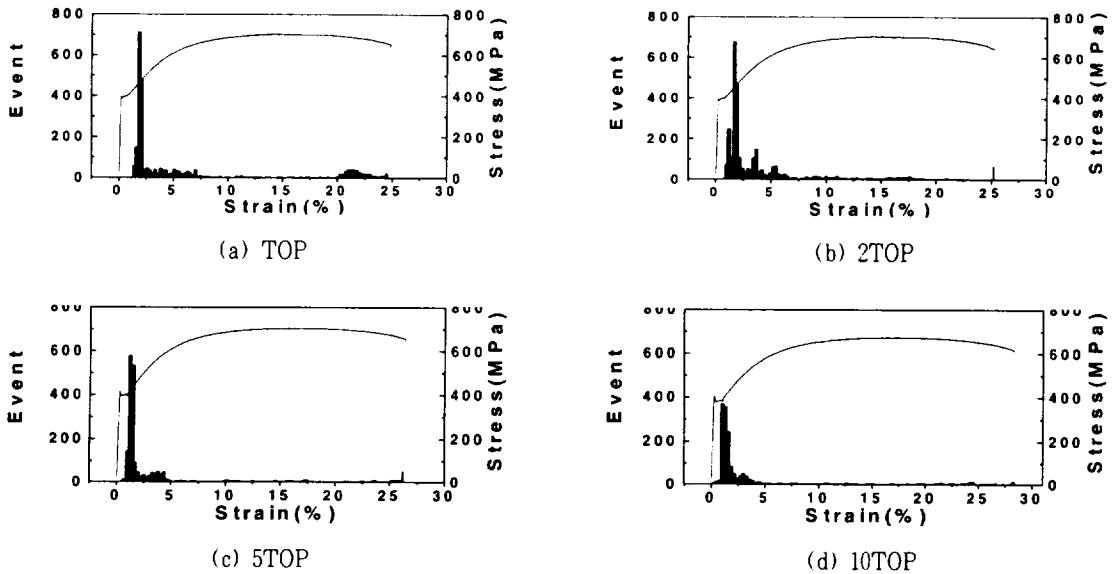


Fig. 7. Stress and event vs. strain.

3.3 TiO₂ 코팅재의 Event 와 Energy특성

Fig. 7은 부식시간에 따른 TOP재의 인장시험시 AE event를 응력-변형률 선도와 함께 나타낸다. TOP재의 Event는 BOND재와는 달리 항복점후 변형률이 약 1-4%의 구간에서 급격히 증가하고, 그 이후의 구간에서는 거의 나타나지 않는다. 따라서 AE사상수가 급격히 증가하는 변형률1-4%구간에서 세라믹(TiO₂)과 기재(S45C)의 연신율 차이로 인하여 용사피막의 박리 및 탈락이 일어나고 있음을 알 수 있다.

한편, 부식시간이 증가함에 따라 BOND재와 동일하게 TOP, 2TOP, 5TOP 및 10TOP의 순으로 AE 사상수가 감소하고 있다. 이는 염수에 의한 기재 표면의 부식으로 기재와 피막의 계면에서 많은 결함이 발생되었기 때문으로 추정된다.

Fig. 8에 인장변형에 따른 누적Count를 나타낸다. Fig. 8에서 부식시간에 따른 누적Count는 약 3%의 변형률 이하에서 급격히 증가하고, 3%-7%의 구간에서 재차 증가하고 있으며, 그 이후에는 수평을 보이고 있다. 이들 상승 구간이 AE 발생구간이며, 수평에서 AE발생이 종료됨을 나타낸다. AE발생의 변형률 구간은 무부식재가 부식재보다 길다.

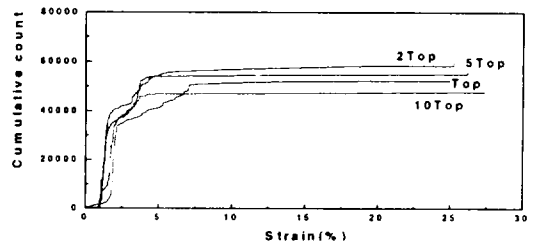


Fig. 8. Cumulative count vs. strain.

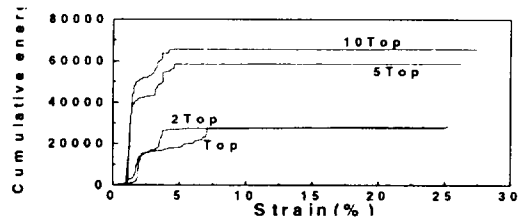


Fig. 9. Cumulative energy vs. strain.

Fig. 9에 변형률과 누적Energy를 나타낸다. TOP재의 누적Energy는 BOND재의 누적Energy의 결과와는 달리 부식재가 무부식재에 비해 증가하고 있으며, 부식시간이 증가에 따라 AE 에너지누적량이 증가하고 있다. 그러나 누적Energy가 증가하는 변형률 구간은

감소하고 있다. 이에 대한 상세 고찰을 위하여 변형율에 따른 Energy분포의 일례를 Fig. 10에 도시한다. Fig. 10에서 5시간 부식재의 Energy분포는 2시간 부식재에 비하여 조기의 변형율 구간에서 급격한 Energy 증가를 보이고 있다. 이는 기재표면의 부식으로 인해 코팅층과의 계면에서의 박리가 원인이라고 생각되나 Fig. 4에서 나타나는 BOND재와는 다른 결과를 보인다. 이는 코팅재료의 상이한 물성 즉, 세라믹과 금속 분말의 연신율 등의 물성차 때문으로 생각된다.

앞에서 설명한 바와 같이 기재의 부식으로 인한 코팅층의 박리와 피막내부의 소성변형이 많아지면 용사 피막내에서 흡수할 수 있는 에너지가 적게 되므로 코팅층의 박리가 크면 AE Energy가 감소한다. 그러나 세라믹의 경우 연신율이 작으므로 기재의 부식이 증가하면 작은 부하응력에서 대규모의 박리가 발생하므

로 부식시간이 길어지면 Energy가 증가하지만, 대규모 박리가 발생하는 변형율은 감소한다고 생각된다.

3.4. TiO₂ 코팅재의 AE진폭분포

Fig. 11에 부식시간에 따른 TOP시험편의 AE진폭분포를 응력-변형율 선도와 함께 나타냈다. TOP코팅재의 AE 진폭들은 변형율 약5%이하의 구간에서 많이 분포되어 있다. 부식시간에 따른 AE진폭들은 TOP, 2TOP, 5TOP, 10TOP시험편의 순으로 부식이 증가 할수록 AE진폭 발생시기가 빠르며, 대규모 박리가 발생하는 변형율구간이 단축되고 있다. 이는 전술한 바와 같이 용사코팅층에 존재하는 기공 등의 결함을 통하여 침투한 염수에 의해 기재의 표면이 부식되고 부식면의 확대 혹은 부식생성물의 팽창으로 기

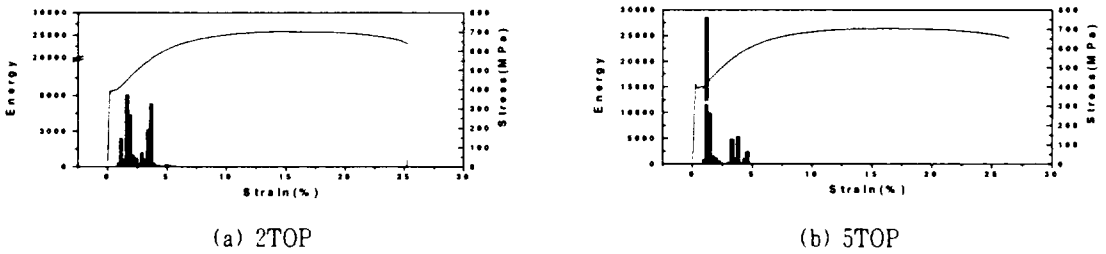


Fig. 10. AE energy vs. strain.

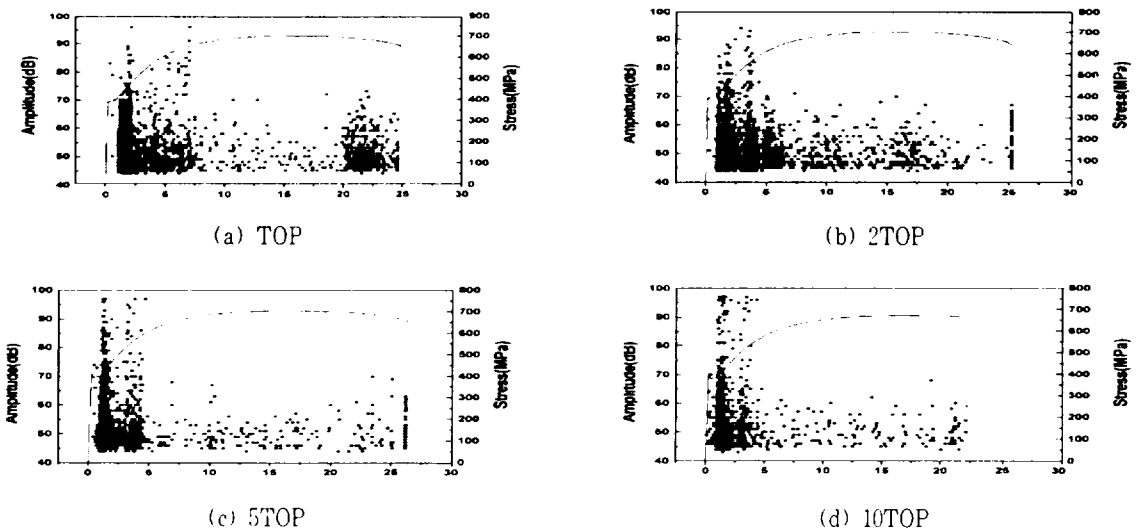


Fig. 11. AE amplitude vs. strain.

재와 코팅층과의 밀착성을 감소시키기 때문이다.

Fig. 12에 5TOP시험편의 인장시험후 시험편의 표면을 관찰한 사진으로 코팅층의 탈락후 코팅 표면의 부식을 나타낸다. 세라믹인 TOP코팅층은 취성이 크므로 BOND코팅층과 같은 균열은 관찰되지 않고 코팅면의 부식면이 관찰된다.

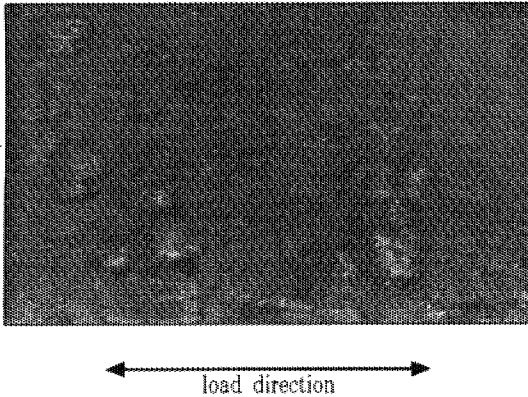


Fig. 12. Exfoliation and corrosion on 5TOP surface.

IV. 결 론

부식환경이 용사코팅피막의 파손에 미치는 영향을 파악하기 위하여, 세라믹 TiO_2 (TOP)와 합금분말 Ni-4.5%Al (BOND)을 플라즈마용사에 의해 코팅하여, 염수분부에 의한 부식을 실시한 후, 인장하중 부가시 용사피막 부식재의 파손에 따른 AE특성을 검토한 결과는 다음과 같다.

- 1) TOP코팅과 BOND코팅 용사피막의 박리 및 종료 시기는 AE 신호분석을 통하여 추정할 수 있다. TOP재는 항복점후 변형을 5%이내의 구간에서,

BOND재는 변형을 17% 이후의 구간에서 박리가 발생하여 AE event가 급격히 증가한다. 또한 부식시간이 증가할수록 낮은 인장변형률에서 박리가 발생한다.

- 2) 용사피막의 부식시간에 따른 AE발생은 세라믹 TOP재와 BOND재 모두 부식시간이 증가하면 AE Event수는 감소하지만, 두 코팅재료의 물성차로 인하여 AE Energy 분포는 상이하다. 부식시간이 증가하면 TOP코팅재의 Energy는 증가하나 BOND코팅재의 Energy는 감소한다.
- 3) 용사코팅재의 부식은 코팅시 발생한 기공 등의 결합으로 염수가 침투하여 기재와 코팅층 사이의 기재의 블라스팅한 표면에서 일어나 부식이 확산되고, 부식시간이 증가함에 따라 기재와 코팅층 및 코팅층 간의 결합력을 약화시켜, 이 부분을 중심으로 박리가 발생한다.

참고 문헌

- 1) 서창민, 김경렬, "세라믹 코팅된 1Cr-Mo-0.25V 강 의 피로균열성장 특성", 대한기계공학회논문집(A), 제21권, 10호, pp.1674-1682, 1997.
- 2) 김부안, 남기우, 조문호, "금속기지 내열 경사기능 복합재료 개발에 관한 연구", 한국해양공학회지, 제13권 제11호, pp.62-69, 1999
- 3) 오병중, " TiO_2 세라믹 용사 코팅재의 강도 및 마멸 특성", 제주대학교 박사학위 논문, 1998
- 4) 窪堀後文, 生田稔郎, 尹藤征郎, 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價, 溶射, Vol.33, No.4, pp.32-39, 1996