

## 음향방출법에 의한 용사코팅 피막부식재의 파손 해석

김귀식\* · 현창해\*\* · 홍용의\*\*\* · 손창환\*\*\*\*

\*제주대학교 기계에너지생산공학부

\*\*제주관광산업대학교 메카트로닉스학과

\*\*\*제주대학교 대학원 기계공학과

\*\*\*\*제주대학교 산업대학원 기계에너지공학과

### Failure Analysis of Corroded Coating Materials by Acoustic Emission

GUI-SHIK KIM\*, CHANG-HAE HYUN\*\*, YONG-UI HONG\*\*\*, CHANG-HWAN SHON\*\*\*\*

\*Faculty of Mechanical, Energy and Production Eng, Cheju Nat'l Univ, Jeju, Korea

\*\*Mechatronics Majors, Cheju Tourism Collage, Jeju, Korea

\*\*\*Department of Mechanical Engineering, Univ, Jeju, Korea

\*\*\*\*Department of Mechanical Engineering, Graduate school, Cheju Nat'l Univ, Jeju, Korea

**KEY WORDS:** Plasmal Spray Coating 플라즈마용사코팅, Corroded Material 부식재료, Acoustic Emission 음향방출, Exfoliation 박리

**ABSTRACT:** This paper is to investigate the effect of corrosion by acoustic emission method in tensile loading and the adhesiveness between substrate and coating layer. The powders used are Zn and Amdry625, respectively. They are coated on brass alloy substrate. AE signals of Zn and Amdry625 coating layer increase drastically in strain 2%. However, those of Zn specimen have more than those of Amdry625 specimen. When the specimens executed the corrosion test under 3.5% NaCl solution for 500, 1000 hours, the salt solution penetrated into the surface of the substrate through the pores of the coating layer. As a result, corrosion production formed on the surface of the substrate. The adhesiveness between coating layers is weakened by the polarization and corrosion itself. The AE event, count, and energy of corroded coating specimens decrease, compared to specimens without corrosion. The results are summarized as follows :

1. In the tensile tests, the time that it took to start and develop the cracks and exfoliations between the surface of the substrates and the plasma spray coatings were different according to the type of plasma sprayed material, which are Zn and Amdry625. These phenomena were obvious at the strain rate 1 to 5%, and few available data were found after that stage.
2. The specimens with Zn coating showed the characteristics of crack, according to the changes of the tensile strength applied on the substrates while those with Amdry625 showed exfoliation as a result of low adaptation to the tensile strength.
3. The anti-corrosion specimens showed that the adhesive properties between the substrate and the plasma spray coating were strong in the order of Zn, Amdry. It showed that Corroded specimens cracked or exfoliated easily, even with the small energy, because those had a comparatively weakened adhesive property, due to corrosion.
4. Zn specimen showed no corrosion phenomena on the surface of the substrates, because they had the function of sacrifice anode however, Amdry625 specimen showed the corrosion, because it did not have that function.

### 1. 서 론

공업의 발전과 더불어 기계요소 사용 환경도 점점 가혹한 환경으로 변하고 있다. 특히 해양산업관련 구조물 및 기계요소들은 해수에서의 염소 이온과 용존 산소 등으로 인한 부식으로 경제적 손실도 매우 크다. 부식을 방지하기 위하여 금속의 표면에 내식성이 큰 재료를 피복하여 부식에 대한 저항성을 증가시키는 방법과 철에 비해 전위가 낮아 부식 환경 차단 효과 뿐만 아니라 음극방식효과를 가지고 있는 알루미늄 및 아연 합금(민경오와 이창희, 1998)등을 기체에 용사코팅하는 방법

이 이용되고 있다. 그러나 용사코팅층과 기체의 불성차로 인한 결합력저하와 용사과정에서 생기는 기공등으로 부식환경에서 사용시 결점으로 지적되고 있다.

최근 재료의 변형과 비파괴평가는 재료 내부의 미소변형이나 손상을 연속적으로 검출할 수 있는 음향방출법(AE)에 의한 평가기술이 활용되고 있으며, 용사코팅재의 변형과 파손해석에도 적용되고 있다.(김귀식 등, 2001)

따라서 본 연구에서는 용사코팅에 대한 선박 스크류의 부식 방지를 위하여 어선용 스크류 소재인 고강도 황동합금에 Zn과 Amdry625를 코팅하여 3.5% NaCl 수용액에 침수부식한 후 인장하중 부가시 코팅층의 균열 및 박리 현상을 AE방법에 의해서 조사·검토하였다.

제 1저자 김귀식 연락처 : 제주도 제주시 제주대학로 66  
064-754-3622 kingusi@cheju.ac.kr

## 2. 재료 및 방법

### 2.1 실험재료

실험에 사용된 시험편은 플라즈마 용사 코팅을 실시한 것이다. 기재는 Cu-Zn 황동 합금을 사용하였고 기재의 화학 성분을 Table 1에, 시험편 형상 및 치수는 Fig. 1에 나타냈다. 코팅에 앞서 전 처리로서 기재의 표면을 블라스팅한 후, 초음파 세척을 하였다. 코팅은 플라즈마 용사장치를 이용하였으며 Table 2의 조건으로 실시하였다.

코팅재료는 Zn은 와이어를 Amdry625는 분말을 사용하여 아래에 나타낸 3종류의 시험편을 제작하였으며, 코팅층의 두께는 약 200 $\mu$ m이다.

Sub : 황동 기재

Zn : 기재에 Zn을 코팅한 시험편

Am : 기재에 Amdry625를 코팅한 시험편

이들 시험편들은 3.5% NaCl 용액에서 각각 500시간, 1000시간동안 염수에 침지하였으며, 부식시간의 표기는 시험편 앞에 기재하였다.

Table 1 Chemical composition of substrate (wt %)

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

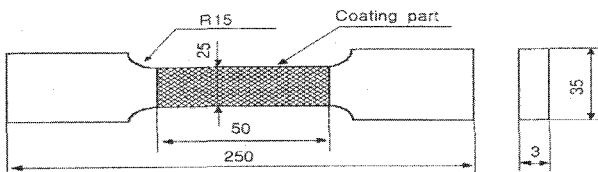


Fig. 1 The shape and dimension of test specimen(unit : mm)

Table 2 Plasma spraying conditions

(a) Zn

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

(b) Amdry625

| Coating Method | Coating System | Powder    | Nozzle | Gas Pressure (PSI) |                | Gas Flow (PSI) |                | Set Amps | Volts [V] | Spray Dist m/m | Spray Rate (g/min) |
|----------------|----------------|-----------|--------|--------------------|----------------|----------------|----------------|----------|-----------|----------------|--------------------|
|                |                |           |        | Ar                 | H <sub>2</sub> | Ar             | H <sub>2</sub> |          |           |                |                    |
| Plasma         | Metco 9MC      | Amdry 625 | 732B   | 75                 | 50             | 49             | 10             | 510      | 68        | 100            | 53                 |

### 2.2 실험 방법

플라즈마 용사장치를 이용한 용사 코팅 시험편의 부식시간에 따른 음향방출특성을 조사하기 위하여 인장시험과 음향방출 신호 측정은 동시에 실시하였다. 인장시험은 만능재료시험

기(Zwick Co.)를 사용하여 표점거리 50mm, 크로스헤드 이송 속도 1mm/min로 시험하였다. 또한, 음향방출 측정장치는 MITRAS 2001(Physical Acoustics Co.)을 사용하였으며, 측정시 검출된 음향방출신호는 10kHz~2MHz의 Band pass filter를 사용하여 40dB로 증폭하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 용사 코팅재의 음향방출 발생거동

Sub시험편, Zn시험편 및 Am시험편에 대한 사상수와 응력-변형을 곡선과의 관계를 Fig. 2에, 누적 계수, 누적 에너지와 응력-변형을 곡선과의 관계를 Fig. 3에 나타내었다.

Fig. 4에 나타난 바와 같이 모든 시험편의 응력-변형을 곡선은 거의 동일하여 용사열에 의한 기재의 변형은 거의 없음을 나타낸다. 또한 음향방출은 Zn시험편, Am시험편, Sub시험편의 순으로 활발하게 일어나고 있음을 알 수 있다. 이와 같이 용사 피막을 가진 코팅재가 Sub시험편에 비해 활발한 음향방출을 발생하는 것은 Sub시험편에는 없는 음향 방출원 즉, 용사피막 내에서 균열의 발생, 성장 및 모재와 용사피막의 바리 등 소성 변형에 의한 음향방출이 발생하고 있다.

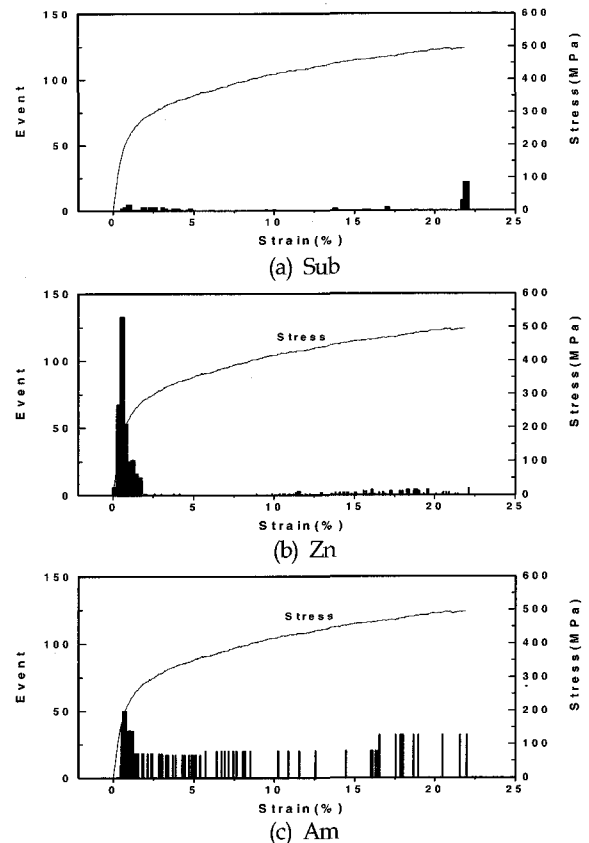


Fig. 2 Stress and event vs. strain

Sub시험편의 AE사상수는 응력-변형률의 증가에도 용사 코팅재에 비해 적게 나타나고 있다. Zn시험편은 응력이 증가함에 따라 변형률 2%이내에서 사상수가 급격히 증가하고 있다. Am 시험편은 응력이 증가함에 따라 사상수는 변형률 2%까지 급격한 발생하고, 변형률 2%~8% 이내에서는 지속적으로 AE사상수가 발생하고 있다. 변형률 8%이후에서는 사상수가 간헐적으로 발생하다가 파단에 이르고 있다. 또한 변형률 2%이내의 사상수에서 Zn시험편은 Am시험편 보다 약 3배정도 많게 나타나고 있다. 이는 Zn용사코팅재가 Am용사코팅재 보다 연신율이 크기 때문에 변형률에 따른 용사코팅재의 균열의 발생, 성장이 지속적으로 전개되고 있는 것으로 판단된다.

Am시험편에서의 사상수는 변형률 1%~8%사이 구간에서 많이 발생하고 있고, 그 이후의 구간에서는 비교적 적게 발생하고 있음을 보여주고 있다. 이는 사상수가 급격히 증가하는 구간에서 기재와 용사층의 물성 차이로 인해 많은 에너지가 축적되어 기재와 용사층 사이에서 박리가 발생 및 용사재 자체의 균열이나 파단에 의해 발생하고 있다(김귀식, 1998).

Fig. 3에 나타난 바와 같이 누적 계수와 누적 에너지 특성은 전술한 사상수 특성과 마찬가지로 용사피막의 균열이나 박리가 발생하는 구간에서 급격히 증가하고 있다. 에너지가 급격히 증가하는 구간에서는 인장 에너지가 기재와 용사피막에 축적

되고, 그 에너지가 기재와 용사피막에서 축적한계를 넘어서게 되면 방출이 된다(나중주 등, 1997). 결과적으로 기재와 용사피막사이에서 혹은 용사피막 내부에서 균열이나 박리의 발생, 성장 및 탈락이 일어나고 있다. 또한 계수 및 에너지의 총량은 Zn시험편, Am시험편, Sub시험편 순으로 높게 나타나고 있다.

### 3.1.1 용사 코팅층의 표면 관찰 및 파괴과정

음향방출 진폭과 응력-변형률과의 관계를 Fig. 4에, 용사코팅된 시험편의 인장시험 후의 표면사진을 Fig. 5에 각각 나타내었다.

Fig. 4에서 진폭 특성은 전술한 사상수, 누적량 계수와 누적량 에너지 특성과 비슷한 균열이나 박리가 발생하는 구간에서 증가하고 있음을 알 수 있다. 한편, Sub시험편의 경우 대부분 약 60dB 이하에서 진폭이 완만하게 발생하고 있으나 Zn시험편은 기재와 용사피막사이의 균열이나 박리로 추정되는 구간인 변형률 2%이내에서 Sub시험편 보다 많은 진폭이 발생하다가 그 이후는 거의 Sub시험편과 비슷한 음향방출을 보여주고 있다. 즉, 변형률 2%이내의 구간은 용사층 내부나 용사층과 기재사이에 소성변형인 균열이나 박리가 이루어지고 있고 그 후의 구간에서는 균열이나 박리가 거의 발생하지 않는 것으로 판단된다. 이는 용사코팅재의 변형률이 크기 때문에 인장에 따른 변형으로 균열이 발생하였으며 변형률 2% 이후의 구간에서는 기재와 밀착성으로 인해 균열 부분에서 지속적으로 균열이 성

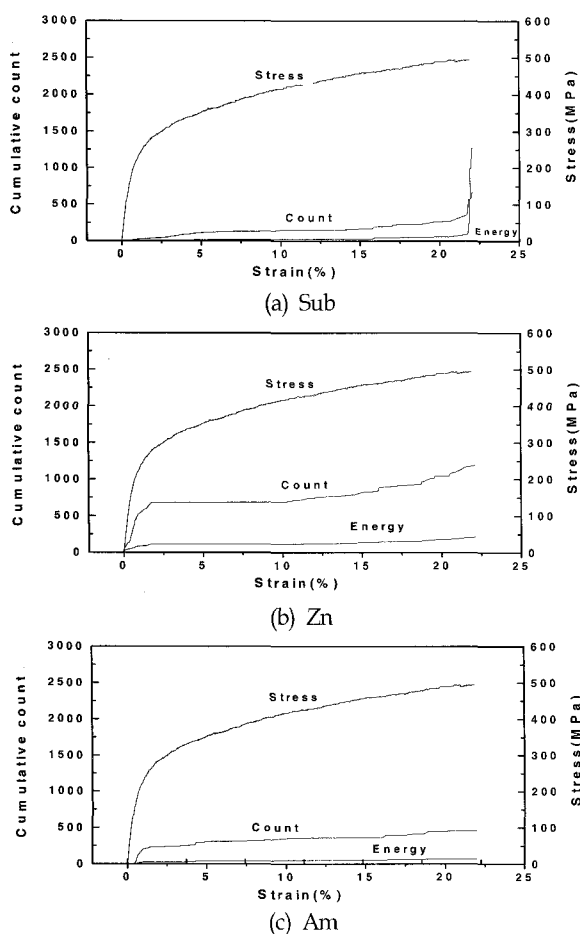


Fig. 3 Cumulative count and energy vs. strain

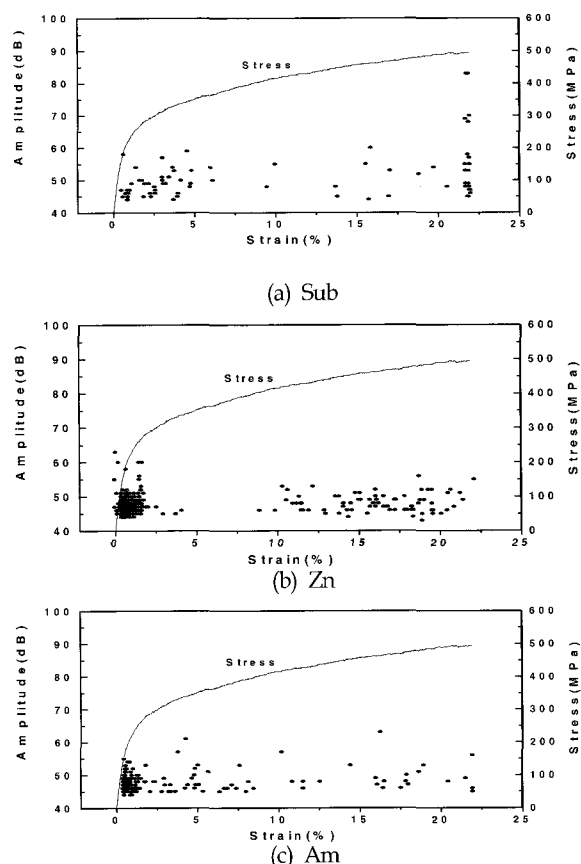


Fig. 4 Stress and amplitude vs. strain

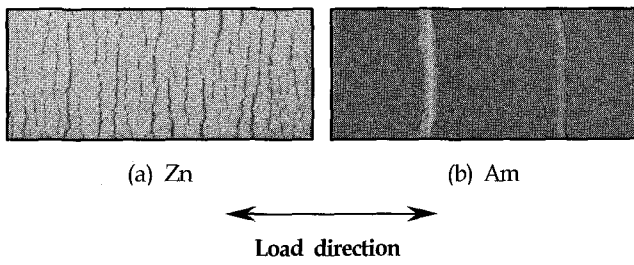


Fig. 5 Surface crack layer after tensile testing

장하고 있는 것으로 판단된다. 이러한 결과는 Fig. 5(a)의 파단된 Zn시험편 사진에서 확인할 수 있다. 용사피막의 파괴는 응력-변형률의 증가함에 따라 하중방향과는 직각인 수직 방향으로 발생하며, 큰 길이의 균열은 대부분 변형률이 급격히 증가하는 변형률 2%이내의 구간에서 다수의 피막 균열이 발생, 성장되고 있다. Am시험편의 경우는 시험 시작 후 2% 이내에서 많은 음향방출이 발생하고 있음을 보이고 있다. 이는 Am 용사피막을 가진 시험편의 경우 사상수가 급격히 증가하는 구간에서 기재와 용사피막의 물성 차이로 많은 에너지가 축적되어 기재와 용사피막 혹은 용사피막 내에서 박리가 일어난다고 사료되며 Fig. 5(b)에서 보여주고 있듯이 용사피막은 기재로부터 완전히 분리되어 탈락되어 있음을 알 수 있다.

3.2 염수침수 시간에 따른 시험편 인장시 음향방출 특성

침수 부식시험은 3.5% NaCl수용액에 Zn시험편, Am시험편을 각각 500시간과 1000시간을 침수시킨 후 초음파 세척기에서 세척 건조하여 인장시험을 하였으며, 인장시험시 응력-변형 특성과 함께 음향방출 특성을 조사·검토하였다.

3.2.1 염수침수 부식에 따른 Zn시험편의 음향방출 특성

500, 1000시간을 염수침수 부식한 Zn시험편에 대한 사상수와 응력-변형률곡선을 Fig. 6에, 누적량 계수와 누적량 에너지의 곡선 및 응력-변형률 곡선을 Fig. 7에 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 부식시간에 따른 응력-변형률 곡선은 부식을 실시하지 않은 시험편과 비교시 변화가 없음을 나타내고 있어, 부식으로 인한 기재의 강도변화는 없다는 것을 보여주고 있다. 한편 부식시간에 따른 음향방출은 Zn시험편, 500Zn시험편, 1000Zn시험편의 순서로 많이 발생하고 있다. 사상수, 누적량 계수 및 누적량 에너지의 특성을 살펴보면 사상수가 증가하는 변형률 2% 이내에서 누적량 계수 및 누적량 에너지가 급격하게 증가하고 변형률 2% 이후에는 세 시험편 모두 완만하게 증가하고 있다. 그러나 부식을 실시한 시험편은 실시하지 않은 시험편에 비해 음향방출이 많이 발생하고 있지 않다. 특히 1000Zn시험편의 경우 변형률 2% 이내에서 사상수, 누적량 계수 및 누적량 에너지 등 AE특성이 다른 시험편에 비해 매우 적게 나타나고 있다. 용사코팅재가 부식 환경에 노출될 경우 염수가 표면에 있는 기공을 통해 기재로 침투하게 된다. 염수는 시간이 경과함에 따라 기재와 용사코팅층 틈새 사이로 확산되고 Zn용사코팅층은 자신이 희생양극으로서 Zn용사코팅층을 빠르게 부식시킨다(Frederic et al., 2002). 따라

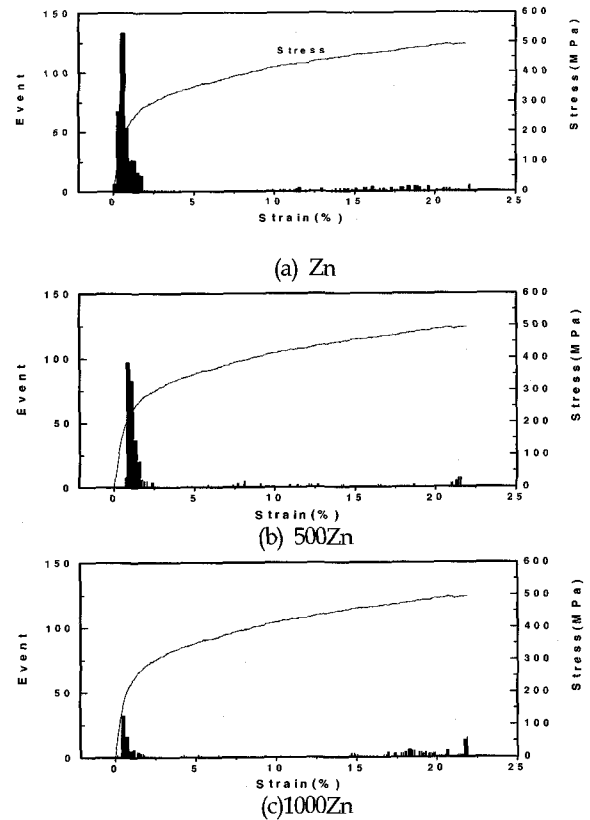


Fig. 6 Stress and event vs. strain

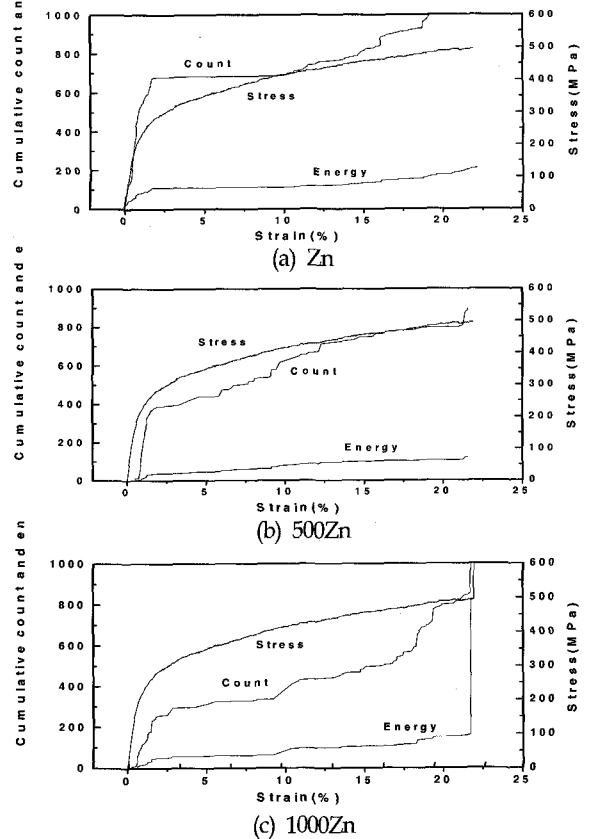


Fig. 7 Cumulative count and energy vs. strain

서 용사코팅층은 결합력이 감소하게 되고 부식 시간이 증가함에 따라 비교적 적은 에너지로도 쉽게 균열이 생성, 성장한다고 추정되며 이러한 사실은 후술하는 파단면 관찰의 결과에도 나타나있다.

3.2.2 부식에 따른 Zn시험편 파단면 관찰 및 파괴기구

음향방출 진폭과 응력-변형률과의 관계를 Fig. 8에 인장시험시 파단된 후 시험편의 표면사진을 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 8에서 모든 시험편은 부식시간에 관계없이 음향방출을 발생시키고 있으며, 또한 음향방출 진폭 최대값은 60dB 정도이다. Zn시험편, 500Zn시험편, 1000Zn시험편의 사상수를 비교해보면, 모든 시험편이 변형률 2%이하 구간에서 음향방출이 많이 발생하며, 부식시간이 많은 시험편일수록 적게 발생하고 있다. 그리고 Zn시험편은 변형률 10% 구간 이후에 다시 음향방출이 발생하고 있고 500Zn시험편은 5% 이후에 간헐적으로 음향방출을 하고 있으며 1000Zn시험편은 변형률 2% 이후의 구간에서 간헐적으로 발생하다가 다시 변형률 15%이후에 발생이 활발한 것을 알 수 있다. 이는 용사코팅 후에 생긴 기공에 의해 기체가 염수에 노출되어 있지만 Zn용사층 자신이 희생양극으로 부식되고, 기체에 침투한 염수는 시간이 경과함에 따라 비교적 결합력이 저하된 기공에 집중되고, 에너지의 축적한계를 넘게 되면 쉽게 균열이 발생 및 성장으로 진행되고 있는(이종락과 임우조, 1996)것으로 판단된다.

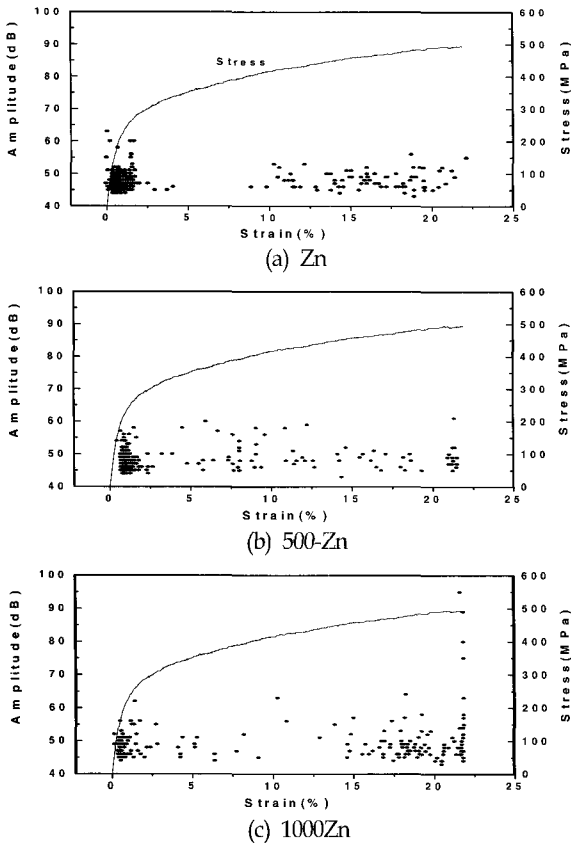


Fig. 8 Stress and amplitude vs. strain

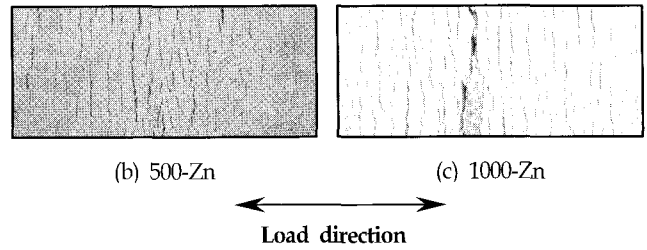


Fig. 9 Surface crack of Zn layer after tensile testing according to corrosion time

Fig. 9에서 보여주는 사진들은 시험편이 파단된 후의 표면사진으로 인장시험시 하중방향과 직각 방향으로 많은 균열이 발생, 성장하고 있음을 보여주고 있고, 박리보다는 균열에 의한 소성변형이 주로 나타나고 있다. 부식시간이 긴 시험편은 용사층 자체 부식으로 표면이 연화되어 있고 이로 인해 표면 Zn 성분이 탈락으로 인해 요철 형상을 보이고 있다.

3.2.3 염수 침수 부식에 따른 Am시험편의 음향방출특성

500, 1000시간을 부식시킨 Am시험편의 사상수와 응력-변형률 곡선을 Fig. 10에 나타냈으며 부식시간에 따른 누적량에너지의 곡선을 응력-변형률 곡선과 함께 Fig. 11에 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 변형률에 따른 사상수는 500Am시

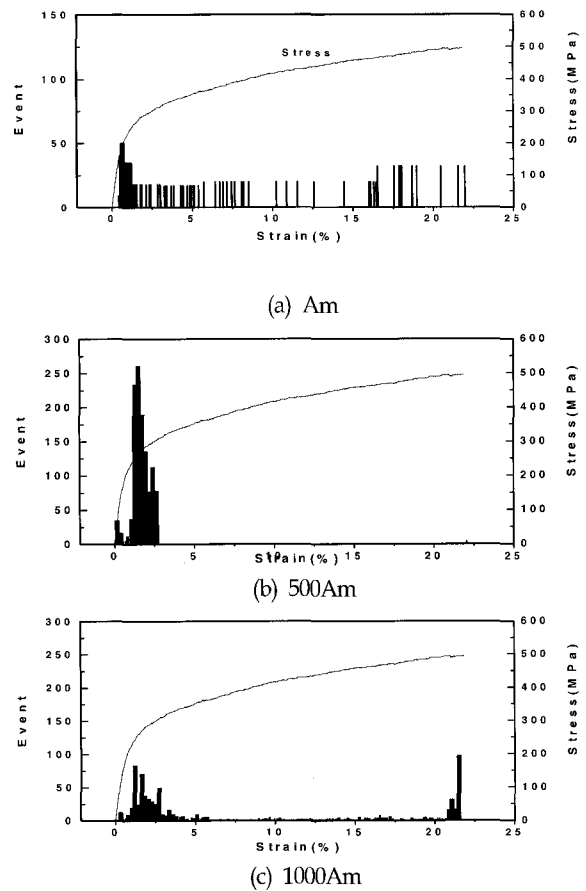


Fig. 10 Stress and event vs. strain

험편, Am시험편, 1000Am시험편의 순으로 크게 발생하고 있다.

Am시험편에서는 1%에서 8%사이의 구간에서 AE 사상수 발생 빈도가 높고 이 후의 구간에서는 AE 사상수 발생 빈도가 낮게 나타나고 있다. 500Am시험편은 변형률 2.5% 이내에서 많은 사상수가 발생되고 있고 1000Am시험편에서는 5% 이내에서 사상수 발생 빈도가 높게 나타나고 있다.

Am시험편에서 비교적 변형률이 넓은 구간에 거쳐 음향방출이 발생한 것은 소성변형율이 기재보다 작은 Am용사재가 균열과 박리, 탈락이 한번에 이루어지지 않고 잔존하는 기재와의 밀착력에 의해 변형률 증가에 따라 지속적으로 진행된 것으로 사료된다. 500Am시험편이 변형률 2.5%이내에서 높은 사상수가 나타나는 것은 용사층에 있는 기공을 통해 침투된 염수가 기재와 용사층을 부식시켜 밀착성이 저하된 것으로 추정된다.

3.2.4 부식에 따른 Am시험편 파단면 관찰 및 파괴기구

음향방출 진폭과 응력-변형율과의 관계를 Fig. 13에, 인장시험시 파단된 시험편의 표면사진을 Fig. 14에 나타내었다.

Fig. 13에서 Am시험편은 변형률 2% 이내에서 AE 진폭 발생 빈도가 높으며 이후의 구간에서는 진폭이 간헐적으로 나타나고 있다. 그러나 부식을 실시한 500Am시험편과 1000Am시험편은 Am시험편에 비해 높은 진폭을 보여주고 있는데 이는 에너지 강도가 높음을 의미한다.

Am시험편에서 비교적 변형률이 넓은 구간에 거쳐 진폭이 발생하는 것은 비교적 소성변형율이 낮은 Am용사재가 박리와 탈락이 한번에 이루어지지 않고 잔존하는 기재와의 밀착력에 의해 변형률 증가에 따라 계속적으로 균열과 박리가 진행되고 있는 것으로 사료된다. 500Am시험편에서 변형률 2.5%이내에

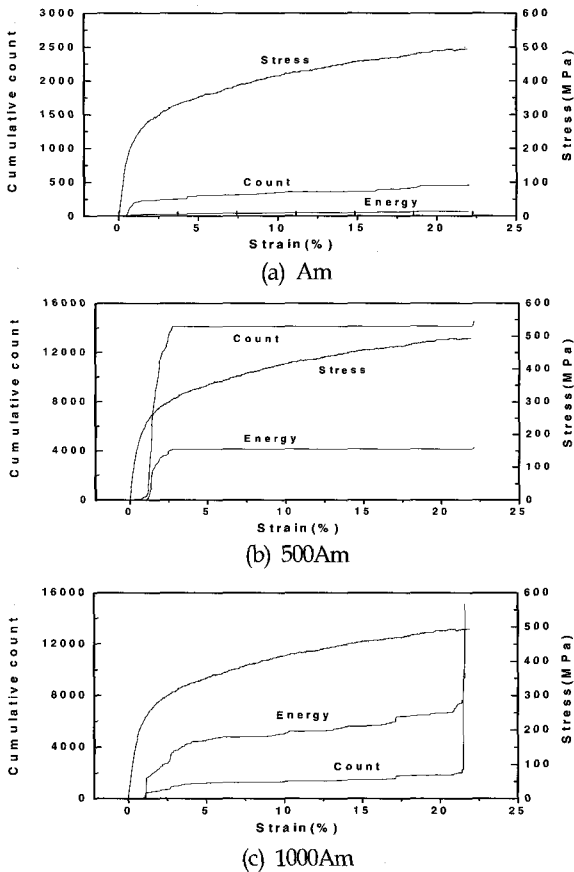


Fig. 11 Cumulative count and energy vs. strain

이로 인하여 소성변형이 작은 용사층은 적은 변형율에 의해서도 큰 규모의 박리와 탈락이 발생된 것으로 판단된다. 1000Am 시험편은 변형률 5%이내에서 500Am시험편 보다 낮은 AE 사상수를 나타내고 있다. 이는 부식이 가속화 되어 500Am시험편에 비해 적은 에너지로도 더욱 큰 규모의 용사층과 기재사이에 박리와 탈락을 발생하게 하고 있으며, 또한 기재와 경계층 사이의 부식이 많이 진행되고 부식에 의한 밀착성의 저하로 인해 사상수가 적게 나타나는 것으로 사료된다.

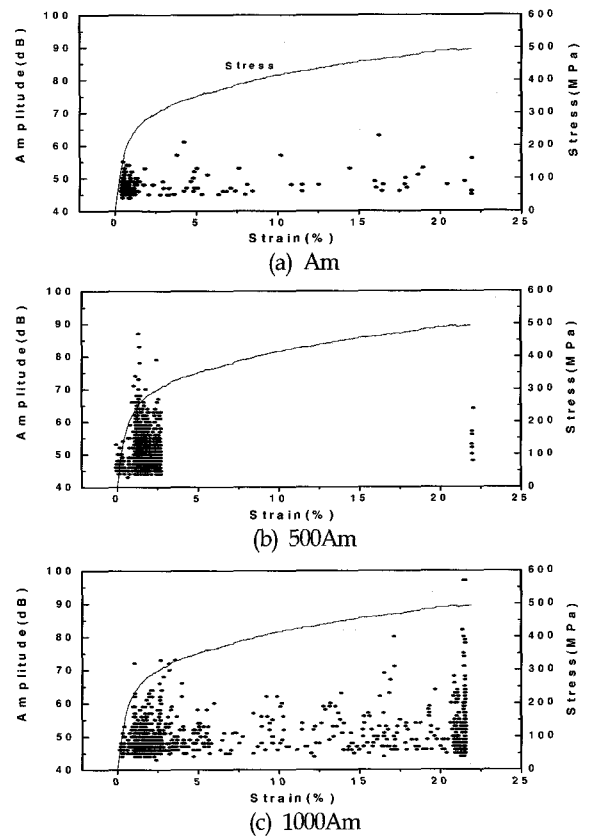


Fig. 12 Stress and amplitude vs. strain

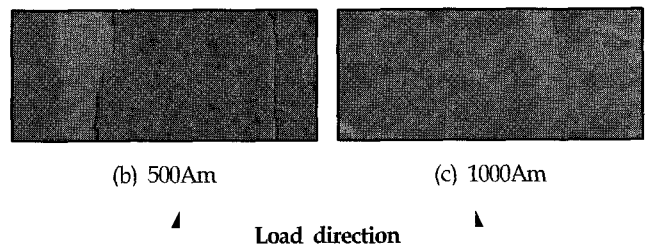


Fig. 13 Surface crack of Am layer after tensile testing according to corrosion time

서 비교적 많은 AE 진폭이 나타나는 것은 용사 후 용사층에 남아있는 기공으로 침투된 염수에 의해 기재와 용사층이 부식되어 밀착성이 저하된 것으로 추정된다. 이로 인하여 탄성변형율이 적은 용사층은 큰 규모의 박리와 탈락이 이루어진 것으로 사료된다. 1000Am시험편에서는 변형율 5%이내에서 500Am 시험편 보다 적은 AE진폭 분포와 이후의 구간에서 계속적으로 AE진폭이 발생되고 있음을 보이고 있다. 이는 부식이 가속화되어 500Am시험편에 비해 적은 에너지로도 더욱 큰 규모의 용사층 박리와 탈락이 이루어지고 있으며, 또한 기재와 경계층 사이에서 부식이 많이 진행되어 산화층에 의한 밀착성으로 음향방출이 타나는 것으로 사료된다.

Fig. 15에 나타난 표면사진들은 인장시험 후 부식시간에 따른 박리된 Am시험편의 용사층 사진들을 나타내었다. 그림과 같이 Am시험편의 코팅층은 기재에 비해 연성이 매우 작기 때문에 전술한 Zn시험편의 균열 모습과는 달리 기재와 완전히 탈락이 이루어졌다. 부식시간에 따른 용사층 모습은 균열이 발생, 성장한 모습이 거의 없으며, 용사층이 기공으로 침투된 염수에 의해 기재가 부식되어 생성된 부식제가 다시 기공을 통해 코팅층 표면으로 배출된 모습을 보여주고 있다.

#### 4. 결 론

어선용 스크류 재료인 고강도 황동 합금을 기재로 하여 내식성이 우수한 Zn, Amdry625를 용사코팅하여 무부식 시험편과 3.5% NaCl 용액에서 500시간, 1000시간을 침수 부식시킨 시험편을 음향방출장치를 이용, 인장시험중의 코팅층의 균열과 박리 상태를 조사·검토한 결과는 다음과 같다.

1. 기재와 용사코팅제 사이에서 소성변형인 균열의 발생과 성장 및 박리의 발생과 성장, 탈락 등의 시기는 인장초기인 변형율 1%~2.5%미만에서 대부분 발생하고 용사코팅제의 사상수, 누적카운트, 에너지 및 진폭 등은 기재 보다 많이 발생함을 보여주고 있다.
2. Zn시험편은 균열발생에 의한 특성을 보이는 반면 Am시험편은 박리에 의한 특성을 나타내며, 이는 Zn시험편의 용사층은 인장변형과 함께 균열이 발생하지만 Am시험편의 용

사층은 기재에 비해 연성이 매우 작기 때문에 박리가 발생하는 것으로 판단된다.

3. 기재와 용사층간의 밀착성은 무부식시 Zn > Am 순서이고 500시간과 1000시간 부식시킨 시험편은 부식되지 않은 시험편에 비해 적은 에너지로도 쉽게 균열이나 박리가 발생하는 것으로 판단된다.
4. 침수시킨 시험편중에서 Zn시험편은 희생양극으로서의 기능을 수행하여 기재 표면에서 부식현상을 볼 수 없으나 Am 시험편은 희생양극 기능이 없어 기재표면에 부식현상이 나타나고 있다.

#### 참 고 문 헌

- 김귀식, 박경석, 홍용의. (2001). "플라즈마용사 코팅 피막부식제의 음향방출 특성", 한국해양공학회지, 제15권, 제3호, pp69-74.
- 김귀식. (1998). "플라즈마용사에 의한 세라믹 코팅 강재의 음향방출 특성", 한국동력기계공학회지, 제2권, 제3호, pp49-54.
- 나중주, 이구현, 이상호. (1997). "상압 플라즈마의 응용 현황", 기계와 재료, 제9권, 4호, pp100-117.
- 민경오, 이창희. (1998). "염수 분위기에서의 내부식 용사 코팅 기초", 한국용사기술 협회 등, pp1-17.
- 이종락·임우조. (1996). "산화물피복강재의 밀착성과 내식성에 관한 연구", 한국 어업기술학회지, 제32권, pp157-162.
- Frederic, F., Faure, T., Goudiakas, J. and Andres, E. (2002). "Acoustic Emission Study of Active - Passive Transition During Carbon Steel Erosion", corrosion science, Vol 44, No 7, pp 1529-1540.

2005년 7월 6일 원고 접수

2005년 10월 5일 최종 수정본 채택