

# 음향방출기법을 이용한 A106 탄소강의 부식평가

이진경\* · 이상필\*  
\*동의대학교 기계공학과

## Evaluation on Corrosion of A106 Carbon Steel using AE Technique

JIN-KYUNG LEE\* AND SANG-PILL LEE\*

\*Department of Mechanical Engineering, Dong-Eui University, Busan, Korea

**KEY WORDS:** A106 carbon steel A106탄소강, Corrosion 부식, Acoustic emission technique 음향방출기법, AE parameter 음향방출 파라미터, Events 사상수, Duration time 지속시간, Amplitude 진폭

**ABSTRACT:** A106 Carbon Steel has recently been used as the material for pipes, nozzles, and tank shells in nuclear power plants. Its corrosion resistance gives the steel many advantages for use in structures under high temperature and high pressure. This steel is also expected to be used as a structural material in the shipbuilding industry for applications involving severe conditions, such as high temperature and pressure. In this study, the mechanical properties of A106 carbon steel were evaluated in regard to its corrosion times. The tensile and yielding strengths decreased as the corrosion time increased. In particular, the tensile strength was influenced by corrosion. In addition, an acoustic emission (AE) technique was used to clarify the microscopic damage to specimens that had undergone corrosion for a certain period. It was found that AE parameters, such as events, energy, duration time, and amplitude were useful for evaluating the degree of damage and remaining life of the corroded specimen. Various properties of the waveform and frequency range were also seen, based on the degree of damage to the specimen from the corrosion time.

### 1. 서 론

공업 및 건축재료로서 널리 이용되고 있는 금속재료 중에서 강이 차지하는 비율은 80% 이상으로 가장 광범위하게 이용되고 있다. 이와 같이 강의 광범위한 이용은 강의 기계적 성질을 쉽게 변화시킴으로써 우리가 원하는 특성을 얻을 수 있고 우수한 강도와 소성가공특성을 이용하여 원하는 형상을 쉽게 얻을 수 있기 때문이다. 특히 탄소강은 선박의 선체 재료뿐만 아니라 거의 모든 부품의 소재로 사용되어지고 있다. 따라서 탄소강의 재료특성에 대한 연구는 많이 이루어져 왔으며 선박 등에 사용되어질 때 부식에 대한 탄소강의 특성변화 등도 많은 연구가 이루어져왔다. 특히, A106 탄소강인 경우 ASME/ASTM 규격에 따라 원자력 1차, 2차 배관 재료로서 사용되어지도록 채택하고 있다. A106 탄소강은 고압탄소강배관용 재료로서 Grade A, Grade B 및 Grade C로 구분하며 Grade B가 Grade C보다 높은 허용응력을 가지고 있어 높은 압력 등급에 유용하게 사용되고 있다. 원자력 배관은 높은 온도 및 압력의 유체가 흐르는 곳으로 이들에 의한 부식이 활발히 이루어지는 특성을 가지고 있다. 따라서 이들 고온고압 부식에 대한 저항성을 가지고 있는 재료를 사용해야만 한다. 선박에서도 보일러 및 압력용기 등의 고온고압의 유체 및 증기가 흐르는 배관들이 많이 이용되어지고 있기 때문에 이들 배

관 재료로서 A106 탄소강을 사용함으로써 배관 구조물의 안전성을 확립하고 부식에 의한 손상을 감소시킬 수 있을 것으로 기대된다(윤한기, 2001a; 2001b). 따라서 본 연구에서는 A106 탄소강이 선박의 다양한 부품의 재료로 사용되어지고 광범위한 응용을 위해 재료의 특성평가가 이루어져야 하며 특히 부식에 대한 재료의 기계적 특성이 명확하게 이루어져야 한다(Cabrera et al., 2002; Mendoza and Corvo, 1999; Mouri et al., 2001). 따라서 재료의 고온고압 부식특성을 평가하기 위하여 부식장치를 고안하였으며 고안된 부식장치에 시험편을 넣어 일정기간동안 부식시킨 후 시험편에 대한 인장시험을 실시하여 재료의 강도변화 및 질량변화 등을 평가하였다. 또한 이전연구에서 부식초기(60일)의 시험편에(Lee et al., 2007) 대한 비파괴시험이 이루어졌지만 본 연구에서는 65주 동안 부식된 시험편이 인장하중을 받아 변형을 일으켜 파단 되는 동안 재료의 미시적 거동을 평가하기 위하여 음향방출기법을 이용하였으며(Nam, 1999; Polyzos et al., 2000; 권상우 등 2007), 비파괴적으로 재료의 손상거동 및 잔존수명 등을 평가할 수 있는 지에 대해서도 논하였다.

### 2. 실험방법

**Table 1** Chemical compositions of A106 carbon steel (wt%)

C	Si	Mn	P	S
0.35	0.25	0.43	0.035	0.035

교신저자 이진경: 부산광역시 부산진구 엄광로995

051-890-1663 leejink@deu.ac.kr

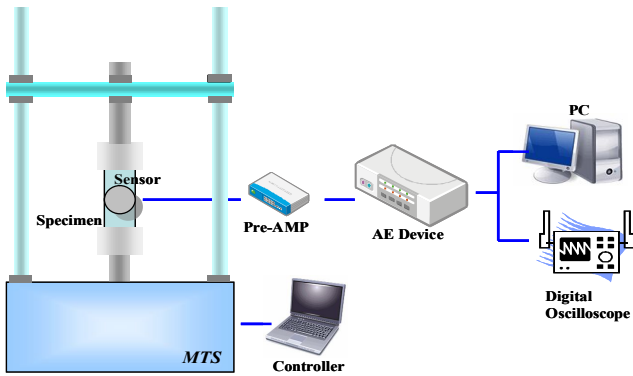


Fig. 1 Schematic diagram of experimental set-up for AE test

본 연구에서는 앞에서 언급한 바와 같이 재료를 부식시키기 위하여 부식장치를 고안하여 일정기간동안(65주) 시험편을 부식시켜 부식된 재료의 특성을 평가하였다. 부식장치는 고온고압을 유지하기 위하여 리액터(Reactor)를 제조하여 내부의 온도는 473K, 압력은 15MPa로 일정하게 유지시키고 인장시험편을 가공하여 함께 넣어 부식시켰다. 일정한 부식시간이 흐른 후 시험편을 꺼내어 인장시험과 음향방출 시험을 실시하였다. Table 1에서는 A106탄소강의 화학적 구성성분을 나타낸 것이다. Fig. 1은 부식된 재료의 인장강도 및 음향방출 특성을 평가하기 위한 도식도를 보여주고 있다. 그림에서 보여주는 바와 같이 최대 10ton의 인장시험기(MTS)를 이용하였으며 65주 동안 부식된 시험편을 1mm/min으로 인장하중을 가하여 강도와 변위를 측정하였으며 시험편의 중앙에 음향방출 센서를 부착하여 인장하중 시 재료의 변형 및 재료내부의 균열 등에 의해 발생하는 탄성파를 수신하였다. 수신된 탄성파는 미약한 신호이기 때문에 일차적으로 프리앰프에서 40dB 증폭시켰으며 증폭된 신호는 메인보드에서 각종 파라미터들에 의해 분석되어진다. 사용된 센서는 광대역 센서가 사용되었으며 프리앰프의 필터도 100kHz~1200kHz의 신호만 수신되도록 하였다. 또한 주위의 노이즈를 제거하기 위하여 문턱전압값(Threshold Level)은 45dB로 고정하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

본 연구에서는 65주 동안 부식된 시험편의 기계적 특성을 평가하기 위하여 인장강도의 변화를 관찰하였으며 부식이 증가함에 따른 질량감소(Weight loss)의 비율도 함께 평가하였다. Fig. 2에서는 A106 탄소강의 인장강도와 항복강도의 변화를 나타낸 것으로 부식을 전혀 받지 않은 시험편의 인장강도는 477MPa로 측정되었으며 65주의 부식을 받은 시험편의 인장강도는 435MPa로 약 9%정도의 감소를 보였다. 그리고 항복강도는 각각 334MPa와 317MPa로 5%정도의 감소를 보여주었다. 따라서 부식기간이 증가함에 따라 항복강도의 감소보다는 재료의 인장강도의 감소가 더욱더 현저함을 알 수 있었다. 이와 같은 현상은 두 시험편 모두 항복점 이후 가공경화 현상에 의해 강도가 점차적으로 증가하는 현상이 발생하는데 부식을 받

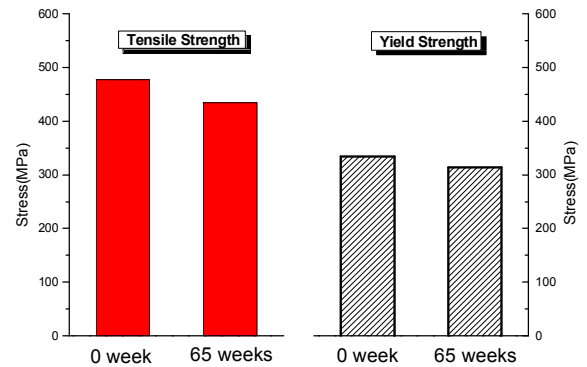


Fig. 2 The strength changes according to the corrosion time

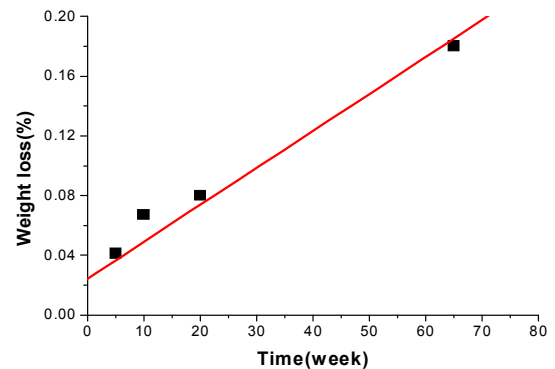


Fig. 3 Weight loss changes according to the corrosion time

은 시험편에서는 이와 같은 가공경화에 의한 강도증가 현상이 시험편 표면부식에 의해 많이 감소한 것으로 사료된다. 이와 같은 특성은 Fig. 4, Fig. 5의 인장강도 그래프의 결과에서 확인할 수 있었다. 즉 항복점 이후 강도증가의 경향이 부식을 받은 시험편에서 현저히 감소하는 것으로 나타났다. Fig. 3에서는 부식기간의 증가에 따른 탄소강의 질량감소를 나타낸 것으로 5주의 부식을 받은 시험편에서의 질량 감소(Weight loss)는 0.04%를 보여 급격하게 질량감소 현상이 발생하였지만 10주, 20주 등으로 부식기간이 증가함에 따라서는 질량감소가 선형적으로 증가함을 알 수 있었다. 이와 같은 현상은 부식초기에 시험편 표면에 급격히 부식현상이 발생하고 점차적으로 부식시간이 증가함에 따라 부식이 가속되는 속도도 감소하는 것을 알 수 있다. 따라서 부식초기 부식의 증가에 따라 급격히 질량감소가 발생하지만 이후부터는 일정한 비율로 점차적으로 증가하는 경향을 나타내었다. 따라서 이와 같은 결과를 기초로 하여 부식에 의해 시험편의 감소한 질량을 측정함으로써 부식기간 및 부식정도를 추정할 수 있음을 알 수 있었다. Fig. 4에서는 부식을 받지 않은 시험편과 부식을 받은 A106 탄소강의 미시적 파손거동을 음향방출기법을 이용하여 평가하기 위하여 시험편이 인장하중을 받고 소성변형을 거쳐 최종 파단에 도달될 때까지 발생된 음향방출 신호를 나타낸 것으로 Fig. 4에서는 발생한 사상수(Events)의 변화를 나타낸 것이다. 그림에

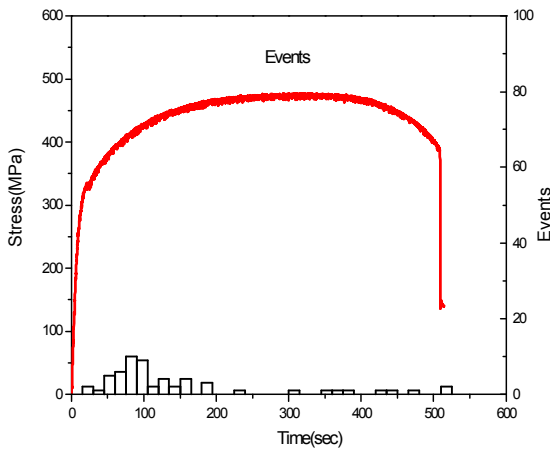


Fig. 4(a) Events for the specimen (0 week)

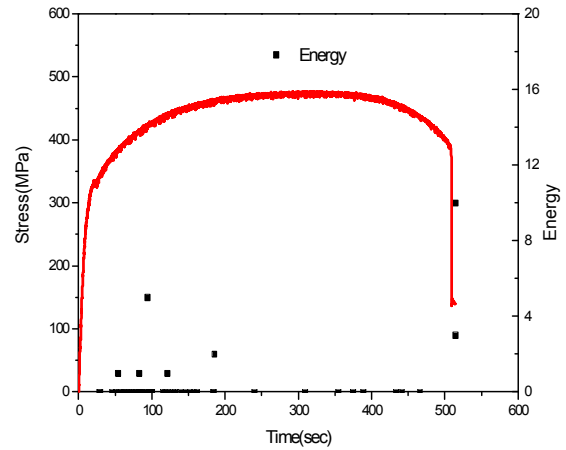


Fig. 5(a) Energy for the specimen (0 week)

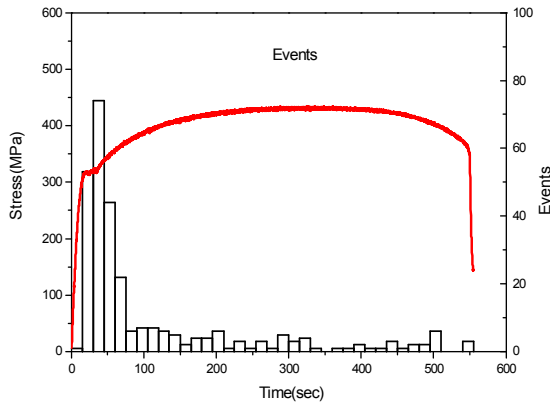


Fig. 4(b) Events for the corroded specimen (65 weeks)

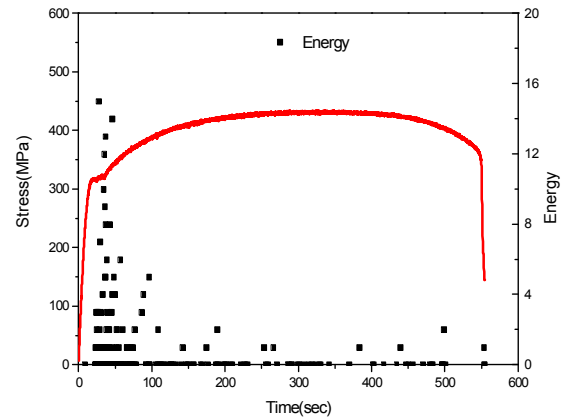


Fig. 5(b) Energy for the corroded specimen (65 week)

서 보여주는 바와 같이 부식을 받지 않은 시험편(Fig. 4(a))에서는 탄성영역에서는 사상수가 발생하지 않으며 항복점에서 0.08개/초의 사상수가 발생하고 소성영역이 진행하여 가공경화 현상이 발생하는 영역인 80~150초 사이에서 0.35/초의 다수의 신호가 발생하고 있음을 보여주고 있다. 그리고 소성영역이 급격하게 진행하더라도 사상수는 국부적으로 발생함을 보여준다. 반면에 Fig. 4(b)의 65주 동안 부식을 받은 시험편에서는 인장 하중시 탄성영역에서 극소수의 사상수가 발생하고 항복점 근처에서 4.23개/초로 급격하게 사상수가 발생하고 있음을 알 수 있다. 그리고 소성영역이 진행됨에 따라 사상수의 수는 점차적으로 감소하고 소성영역이 급격히 진행되는 영역에서는 0.13개/초로 부식을 받지 않은 시험편과 마찬가지로 사상수의 수는 급격히 감소함을 보여주고 있다. 이와 같이 부식을 받지 않은 시험편과 5주 동안 부식을 받은 시험편에서의 발생하는 사상수의 큰 차이점은 부식을 오랜 기간 동안 받은 재료에서는 항복점 근처에서 다수의 AE 신호가 발생하고 있다는 점이다. 이와 같은 현상은 재료가 항복이 발생할 때 부식에 의해 산화된 표면에6서의 미소균열 및 부식재료의 마찰 등에 의한 AE 신호가 다수 발생하고 있음을 보여주고 있다. 한편 소성영역이 급격하게 진행되는 영역에서는 부식되지 않은 시험편과 65주 부

식된 시험편 모두 AE 사상수가 발생하는 경향은 비슷하지만 전체적인 사상수의 개수는 부식을 받은 시험편에서 많이 발생 함으로써 이 영역에서도 부식에 의한 신호들이 소수 발생되고 있음을 알 수 있었다. 이와 같은 결과는 Fig. 9, Fig. 10의 미시적 손상거동에 따라 전형적으로 발생하는 AE 신호의 파형과 주파수 분석의 결과에서도 명확하게 알 수 있었다. Fig. 5는 인장시험 시 발생한 AE 신호의 에너지(Energy)의 변화를 나타낸 것으로 부식을 받지 않은 시험편(Fig. 5(a))에서의 에너지는 모든 영역에서 4이하의 아주 낮은 에너지를 나타내고 시험편이 완전히 파손될 때 다른 영역에 비하여 높은 4이상의 에너지를 나타내는 신호가 발생하였다. 반면 65주 동안 부식된 시험편에서는 Fig. 5(b)에서 보여주는 바와 같이 8이상의 높은 에너지를 나타내는 신호가 다수 검출되었다. 특히 항복점 근처에서 발생한 AE 신호의 에너지는 다른 영역에서 발생한 신호의 에너지 보다 훨씬 높은 10이상을 나타내는 신호가 다수 발생되었다. 이와 같은 결과는 부식현상의 특성으로 부식에 의해 산화된 표면에 하중이 가해질 때 산화된 표면층에서의 소성거동과 균열발생 및 전파에 의해 발생되어진 AE 신호로써 상당히 높은 에너지를 나타내는 신호가 발생되어지고 있음을 알 수 있었다. Fig. 6에서는 AE 신호의 지속시간(Duration time)을 나타낸 것

으로 부식을 받지 않은 시험편(Fig. 6(a))에 발생한 신호의 지속시간은 대부분  $50\mu\text{s}$  이하의 신호가 발생하고 시험편이 완전 파손될 때 지속시간이 긴 신호가 소수 발생하였다. 그러나 65 주 동안 부식을 받은 시험편에서는  $50\mu\text{s}\sim 150\mu\text{s}$ 의 신호가 소성 거동을 하는 전 영역에 걸쳐 다수 발생하고 있다. 이와 같은 결과는 부식된 시험편과 부식되지 않은 시험편과의 두드러진 특징으로 시험편이 소성거동이 발생할 때 부식에 의한 신호는 지속시간이 긴 신호가 발생한다는 것을 나타낸다. 특히 항복점 근처에서 신호의 차이는 현격하였다. 이와 같은 결과를 토대로 탄소강이 단순 인장하중을 받아 소성변형이 발생할 때에는 지속시간이 짧은 신호가 주로 발생하는 반면 부식에 의해 손상을 받은 시험편에서는 인장하중 시 부식에 의한 표면의 특성 변화에 따라 지속시간이 긴 신호가 다수 발생하고 있음을 알 수 있었다. 이러한 현상은 소성변형이 급속히 진행되는 영역에서도 부식을 받은 시험편에서는  $50\mu\text{s}$  이상의 지속시간을 가지는 신호가 다수 발생하여 에너지와는 조금 다른 양상을 나타내었다. Fig. 7은 진폭(Amplitude)의 변화를 나타낸 것으로 부식을 받지 않은 시험편(Fig. 7(a))에서는 주로 60dB 이하의 진폭을 나타내는 신호가 다수 발생하는 반면 부식을 받은 시험편(Fig. 7(b))에서는 60dB 이상의 진폭을 나타내는 신호도 다수

발생하고 있음을 알 수 있다. 특히 항복점 부근에서 발생한 AE 신호들은 부식을 받은 시험편에서 70dB 이상의 현격히 높은 진폭을 나타내었으며 소성이 급격하게 진행되는 곳에서는 부식을 받은 시험편 및 부식을 받지 않은 시험편 모두 60dB 이하의 비슷한 진폭을 가진 신호가 발생하고 있음을 보여준다. 한편 음향방출 신호의 카운터(Counts)의 변화는 Fig. 8에서 보여주는 바와 같이 부식을 받지 않은 시험편에서 발생한 신호의 카운터는 대부분 10이하의 값을 나타낸 반면 부식된 시험편에서는 10이상의 카운터를 나타내는 신호가 다수 발생하고 있다. 특히 항복점 근처에서 발생하는 카운터는 부식을 받지 않은 시험편에 비하여 현저히 높은 카운터를 나타내었다. 이와 같은 현상은 앞에서 언급한 바와 같이 하중이 가해져 항복점에 도달하게 되면 부식된 표면에서 먼저 소성거동이 발생하고 부식된 조직은 취화되어 있으므로 하중이 가해지면 쉽게 소성 및 균열이 발생하고 이때 발생하는 탄성파는 취성재료에서 발생하는 것과 비슷한 경향을 보이고 있다. 즉, Fig. 10(a)에서 보여주는 바와 같이 에너지가 높고, 진폭 및 카운트 등이 높은 신호가 발생하고 있음을 알 수 있다. 따라서 이와 같은 AE 파라미터들을 분석함으로써 부식된 재료와 부식되지 않은 재료가 각각 하중을 받아 소성변형을 하고 균열이 발생하는 등의

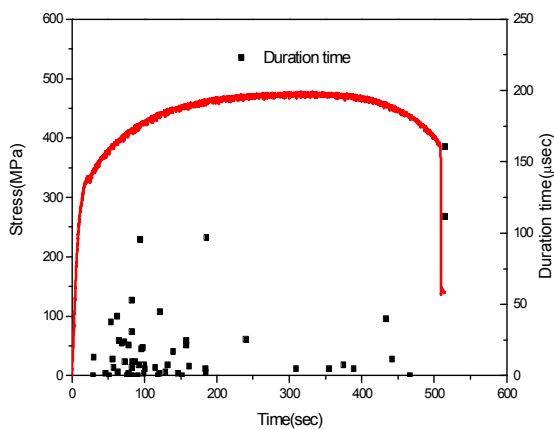


Fig. 6(a) Duration time for the specimen (0 week)

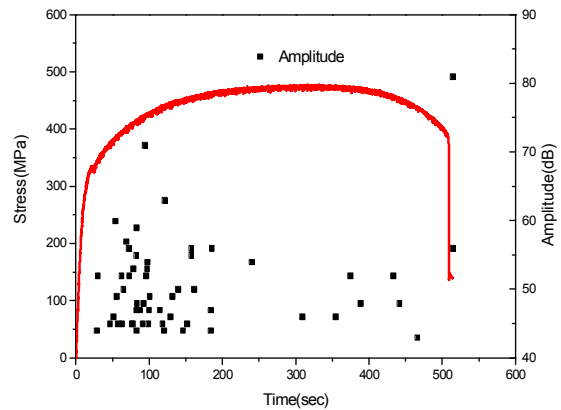


Fig. 7(a) Amplitude for the specimen (0 week)

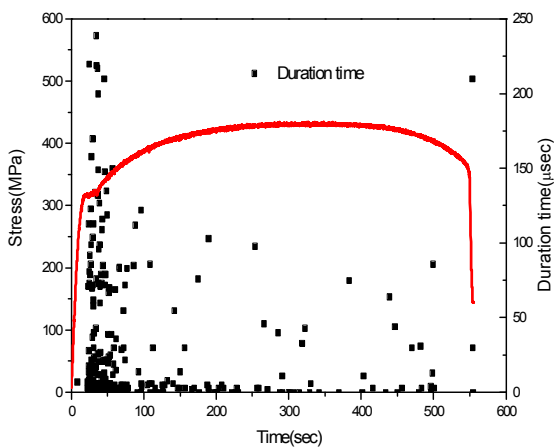


Fig. 6(b) Duration time for the corroded specimen (65 weeks)

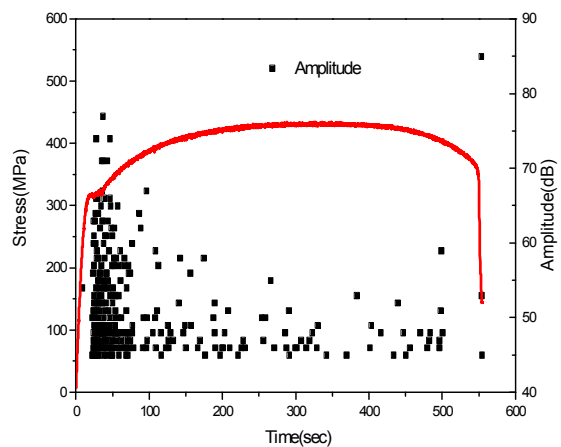


Fig. 7(b) Amplitude for the corroded specimen (65 weeks)

미시적 손상거동을 평가할 수 있는 기초를 마련하였다. 특히 부식된 재료에서는 부식되지 않은 재료에 비하여 항복점에서 현저히 높은 AE 파라미터들을 나타내고 있으므로 부식된 재료의 항복시점을 정확히 판단할 수 있고 부식정도를 어느 정도 평가할 수 있을 것으로 사료되어진다. Fig. 9, Fig. 10은 A106 탄소강의 미시적 손상을 평가하기 위하여 전형적으로 발생하는 파형과 주파수 특성을 분석한 결과를 나타낸 것이다. 먼저 Fig. 9에서는 부식을 받지 않은 시험편이 인장하중을 받을 때 발생하는 신호로써 소성영역 전체에서 발생하는 대표적인 파형과 주파수 특성을 분석한 결과를 나타낸 것이다. 그림에서 보여주는 바와 같이 전압이 낮은 돌발형 형태의 신호이고 주파수 특성도 420kHz 근처의 주파수 특성을 보여주었다. 반면 부식된 시험편에서의 전형적인 파형과 주파수는 Fig. 10(a), Fig. 10(b), Fig. 10(c)에 보여주는 바와 같이 시험편이 인장하중을 받아 변형을 일으킬 때 각각의 영역에서 발생하는 신호는 조금씩 차이를 보였다. 먼저 Fig. 10(a)는 항복점 근처에서 전형적으로 발생하는 파형과 주파수를 분석한 것으로 전압이 높은 돌발형 신호가 다수 발생하였으며 주파수 특성도 430kHz영역을 나타내었다. 주파수영역은 부식을 받지 않은 시험편에서 발생하는 영역과 비슷한 결과를 보여주고 있지만 파형의 진폭은 훨씬 높은 값을 나타

내었다. 그리고 Fig. 10(b)는 소성이 급격하게 진행되는 영역에서 발생하는 전형적인 파형을 보여주고 있는 것으로 진폭은 부식을 받지 않은 시험편과 비슷한 낮은 신호를 나타내었지만 주파수는 950kHz의 주파수 특성을 보여 타 영역에서 발생한 신호들보다 현저히 높은 주파수 특성을 나타내었다. 그리고 마지막으로 Fig. 10(c)는 시험편이 파단될 때 발생하는 신호로써 거시적 균열이 발생할 때에는 이와 같이 진폭이 현저히 높은 신호가 발생하고 있음을 알 수 있다. 그러나 주파수 영역은 520kHz의 영역을 나타내어 Fig. 10(b)보다는 낮게 나타났다. 이와 같이 각 시험편의 손상 영역에 따라 발생하는 AE 신호의 진폭과 주파수를 함께 분석함으로써 손상정도 및 잔존수명을 평가할 수 있음을 보여준다.

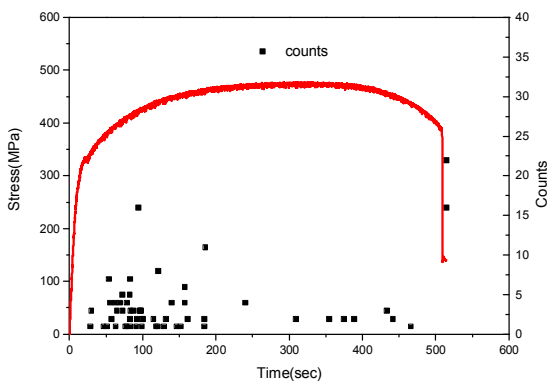


Fig. 8(a) Counts for the specimen (0 week)

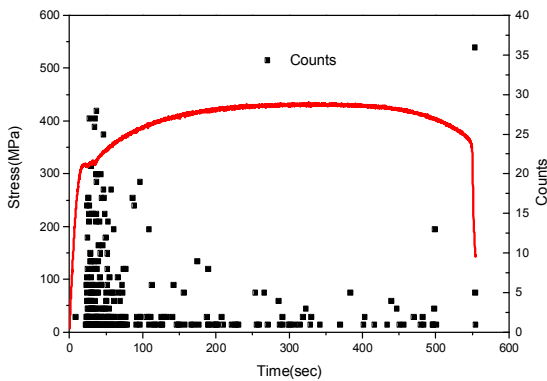


Fig. 8(b) Counts for the corroded specimen (65 weeks)

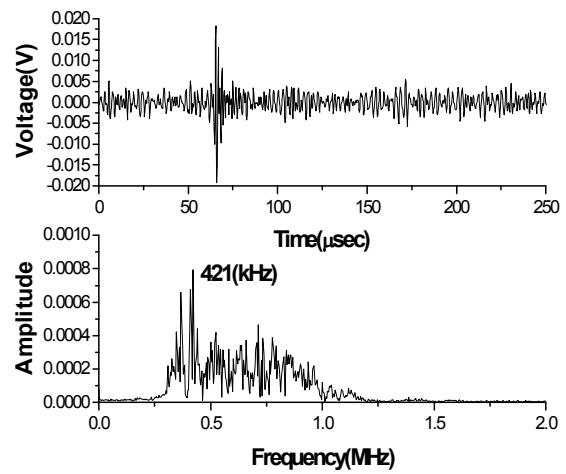


Fig. 9 The typical waveform and frequency analysis for the specimen (0 week)

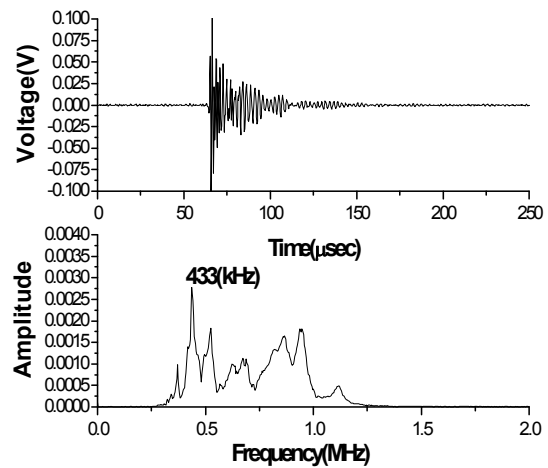


Fig. 10(a) The typical waveform and frequency analysis at the yielding point of the corroded specimen (65 weeks)

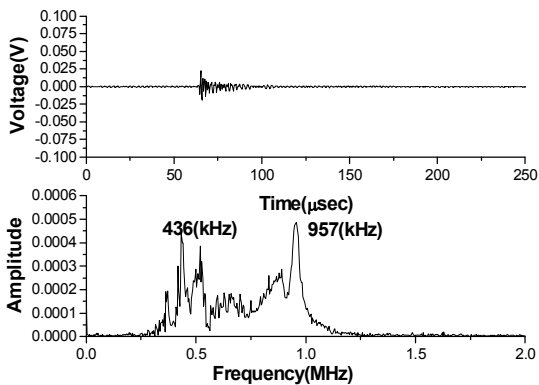


Fig. 10(b) The typical waveform and frequency analysis at the plastic ranges of the corroded specimen (65 weeks)

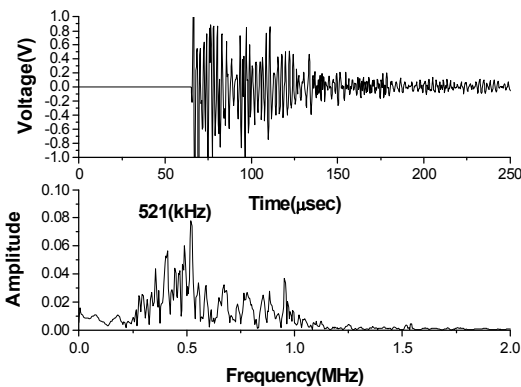


Fig. 10(b) The typical waveform and frequency analysis at the complete fracture of the corroded specimen (65 weeks)

#### 4. 결 론

본 연구에서는 A106 탄소강의 부식에 따른 기계적 특성과 미시적 손상거동을 평가하기 위하여 음향방출기법을 적용한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) A106 탄소강의 인장강도와 항복강도의 변화를 평가한 결과 부식되지 않은 시험편의 인장강도는 65주의 부식을 받은 시험편에 비하여 약 9% 정도의 높게 나타난 반면, 항복강도는 5% 정도 높게 나타남으로써 부식기간이 증가함에 따라 항복강도의 감소보다는 재료의 인장강도의 감소가 더욱더 현저함을 알 수 있었다.

(2) 부식기간에 따른 질량감소를 평가한 결과 부식초기에는 급격히 질량감소가 발생하지만 10주 이상의 부식기간부터는 일정한 비율로 점차적으로 증가하는 경향을 나타내었다.

(3) 부식된 시험편과 부식되지 않은 시험편의 음향방출시험 결과 항복점 부근에서 발생한 음향방출신호의 모든 파라미터 값들이 부식된 시험편에서 훨씬 높게 나타나 부식된 시험편의

소성거동이 시작되는 시점 등을 정확히 평가할 수 있었다.

(4) 파형과 주파수 분석에서 부식되지 않은 시험편에서는 대부분의 신호가 진폭이 낮은 돌발형이고 420kHz의 주파수 영역을 나타낸 반면 부식된 시험편에서는 항복점 부근에서 발생한 신호는 진폭이 높은 돌발형과 430kHz의 주파수 영역을 보였지만 소성이 급격히 진행되는 영역에서는 진폭은 낮지만 950 kHz의 높은 주파수 영역을 나타내는 신호가 발생하였다.

#### 후 기

본 논문은 2005년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (KRF-2005-206-D00001)

#### 참 고 문 헌

- 권상우, 공유식, 김선진 (2008). "Alloy718 마찰접합조건에 최적 화와 비파괴평가", 한국해양공학회지, 제22권, 제1호, pp 53-57.
- 윤한기 (2001a). "가스배관재의 탄소성파괴인성에 미치는 측면 흡 영향", 한국해양공학회지, 제15권, 제3호, pp 63-68.
- 윤한기 (2001b). "압력용기용 SA516 / 70강의 고온파괴인성평가", 한국해양공학회지, 제15권, 제2호, pp 99-104.
- Cabrera, S.R., Sosa, E., Oropeza, M.T. and Gonzalez, I. (2002). "Electrochemical Study on Carbon Steel Corrosion Process in Alkaline Sour Media", *Electrochimica Acta*, Vol 47, No 13-14, pp 2149-2158.
- Lee J.K., Lee, S.P. and Lee J.H. (2007). "Study on Damage Mechanism of Pipe Using Ultrasonic Wave and Acoustic Emission Technique", *Key Engineering Materials*, Vol 353-358, pp 2415-2418.
- Mendoza, A.R. and Corvo, F. (1999). "Outdoor and Indoor Atmospheric Corrosion of Carbon Steel", *Corrosion Science*, Vol 41, No , pp 75-86.
- Mouri, L., Mabile, I., Fiaud, C., Amouroux, J., Catillon, G. and Gras, R. (2001). "Study of Corrosion Resistance and Surface Properties of Carbon Steel after a Duplex Plasma Treatment", *Thin Solid Films*, Vol 389, No 1-2, pp 153-160.
- Nam, K. (1999). "Acoustic Emission from Surface Fatigue Cracks in SS41 steel", *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, Vol 22, No 12, pp 1103-1109.
- Polyzos, B., Douka, E. and Trochidis, A. (2001). "Acoustic Emission Induced by Dislocation Annihilation during Plastic Deformation of Crystals", *J. of Applied Physics*, Vol 89, No 4, pp 2124-2129.

2008년 8월 4일 원고 접수

2008년 9월 26일 최종 수정본 채택