

## 음향방출법에 의한 고 장력강 용접부의 부식손상 특성 평가

### Characterization of Stress Corrosion Cracking at the Welded Region of High Strength Steel using Acoustic Emission Method

나의균\*<sup>†</sup>, 김 훈\*\*

Eui-Gyun Na\*<sup>†</sup> and Hoon Kim\*\*

초 록 본 연구의 목적은 음향방출법을 이용하여 고 장력강 용접부의 응력부식균열특성을 평가하는데 있다. 이를 위해 용접재와 후열처리재를 대상으로 인공해수에서 저 변형률로 하중을 가하면서 응력부식균열을 일으키고, 동시에 음향방출법에 의해 손상과정을 감시하였다. 부식환경은 전위계에 의해 제어되었으며, 시험편에는 각각 -0.8 V와 -1.1 V의 전위 값을 가하였다. -0.8 V인 부식환경 하에서 일층 용접부는 후열처리재에 비해 단위 시간당 AE counts수가 훨씬 많이 발생하였으며, 응력부식균열과정에서 균열의 발생 및 합체가 가장 활발하게 이뤄지고 있음을 누적 AE counts의 결과로부터 확인할 수 있었다. 가해진 전위 값이 -1.1 V인 경우, 일층 용접재의 파단시간은 이층 용접재에 비해 줄었고, AE counts수는 이층 용접재에 비해 현저히 많이 발생하였다. AE진폭 범위는 -0.8 V 일층 용접재에서 가장 높았고, -1.1 V 일층 용접재에서 가장 작은 값을 보였는데, fractography분석결과 AE 진폭 범위는 균열의 크기 및 폭과 밀접한 관계가 있음을 알 수 있었다.

**주요용어:** 용접재, 후열처리재, 응력부식균열, AE counts수, 진폭범위, 일층용접, 이층용접, 균열, 파단시간

**Abstract** This study is to evaluate the characteristics of SCC at the welded region of high strength steel using acoustic emission(AE) method. Specimens were loaded by a slow strain rate method in synthetic seawater and the damage process was monitored simultaneously by AE method. Corrosive environment was controlled using the potentiostat, in which -0.8 V and -1.1 V were applied to the specimens. In the case of one-pass weldment subjected to -0.8 V, much more AE counts were detected compared with the PWHT specimen. It was verified through the cumulative counts that coalescence of micro cracks and cracks for the one pass weldment with -0.8 V were mostly detected. In case of the one pass weldment subjected to -1.1 V, time to failure became shorter and AE counts were produced considerably as compared with that of the two pass weldment. It was shown that AE counts and range of AE amplitude have close relations with the number and size as well as width of the cracks which were formed during the SCC.

**Keywords:** weldment, PWHT specimen, SCC, AE counts, amplitude, one pass weld, two pass weld, cracks, time to failure

#### 1. 서 론

에 따라 구조물 재료의 환경파괴, 예를 들어 응력 부식균열(stress corrosion cracking: SCC), 부식피로 등이 대단히 중요한 연구과제로 대두되고 있다[1-3]. 최근 공업재료의 사용환경이 다양화, 가혹화 됨

그런데 환경파괴의 대부분이 용접부에서 비롯되기 때문에[4,5] 부식환경에서 용접구조물의 안전성을 확보하기 위해서는 용접부에 대한 SCC와 관련된 연구가 절실히 필요하다. 용접에 의해 구성된 해양 구조물의 경우, 용접부는 조직이 불균일하고 미세한 결함을 함유할 가능성이 높기 때문에 다른 부분에 비해 우선적으로 부식손상이 일어날 가능성이 매우 높다. 이와 같은 이유 때문에 부식환경에서 용접에 의해 이루어진 기기 및 구조물을 대상으로 SCC에 의해 발생하는 피해를 최소화하고 건전성을 확보하기 위해서는 용접부에 대한 SCC의 감수성 평가와 더불어 부식손상의 기구(mechanism) 및 손상이 진행되는 과정을 감시(monitoring)할 수 있어야 한다.

본 연구에서는 전보에[6] 이어 고 장력강 용접부를 대상으로 변형률을 보다 느리게 가했을 때, SCC의 손상과정을 음향방출(acoustic emission : AE)법에 의해 실시간으로 평가하는 기법을 다루고자 한다. 이어 AE실험에서 얻어진 자료를 바탕으로 부식 환경 하에서 발생하는 용접부의 부식손상기구를 규명하고, fractography 해석을 통하여 부식손상과 AE거동과 어떠한 상관 관계가 있는 지를 밝혀보고자 한다.

2. 실험절차

2.1. 재료 및 용접

실험에 사용된 재료는 HT-60강으로서 화학적 조성과 기계적 성질은 Table 1과 같다.

Table 1 Chemical composition and mechanical properties

(a) Chemical compositions (wt.%)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V
0.16	0.55	1.35	0.03	0.04	0.6	0.4	0.3	0.15

(b) Mechanical properties

Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)
450.0	588.6	20.0

용접은 판재의 두께방향으로 V자 홈을 가공한 다음, 후판 용접에 가장 많이 적용되고 있는 잠호용접(submerged arc welding)기를 이용하여 Table 2와 같은 조건에서 일층 및 이중용접을 실시하였다.

Table 2 Welding conditions

Voltage (V)	Current (A)	Welding speed (cm/min)	Diameter of welding rod (mm)
224.0	350.0	24.0	3.2

시험편의 채취 및 형상과 치수는 Fig. 1과 같으며, 용융선(fusion line)이 시험편의 중앙부에 위치하도록 하였다.

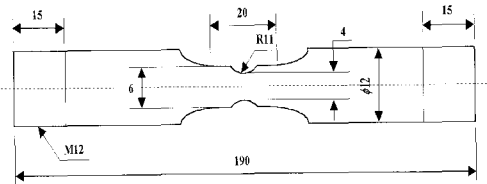


Fig. 1 Dimensions and configurations of the specimen for corrosion damage and AE tests

용접 후 열처리(post weld heat treatment: PWHT)는 열처리 온도 780℃에서 1시간 풀림 후 4시간 동안 노 내에서 서서히 냉각시켰다.

2.2. 부식손상 및 AE 실험

부식조와 시험편 및 AE장치의 조합을 Fig. 2에 개략적으로 나타내었으며, 부식용액은 Table 3과 같은 화학적인 조성으로 인공해수를 제조한 것을 이용하였다.

Table 3 Chemical compositions of synthetic seawater

Contents	Quantity(g)	Contents	Quantity(g)
NaCl	245.34	NaHCO <sub>3</sub>	2.01
MgCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	111.11	KBr	1.01
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	40.94	Sr <sub>2</sub> 6H <sub>2</sub> O	0.42
CaCl <sub>2</sub>	11.58	H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	0.27
KCl	6.95	NaF	0.03

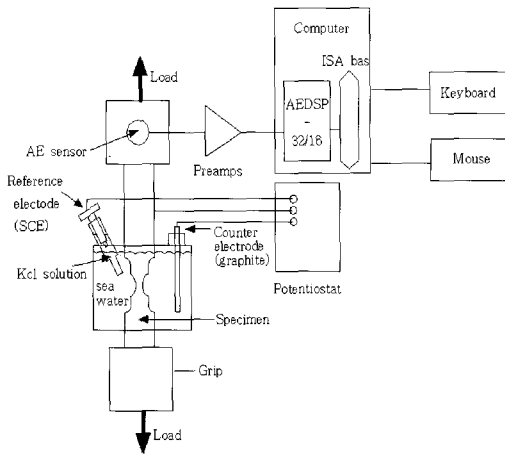


Fig. 2 Schematic diagram of SCC and AE tests

부식조 내에 시험편을 고정하고 부식용액은 시험편의 표점거리 까지만 위치하도록 하였다. 시험편은 표점거리 부분만 남겨두고 나머지 부분은 완전히 tape로 감쌌다.

부식환경은 전위차계를 이용하여 제어하였다. 시험편을 작용전극(working electrode), 대극은 탄소봉으로 하였으며, 기준전극으로는 포화 calomel 전극(saturated calomel electrode: SCE)으로 하였다. 기준전극은 작용전극에 가능한 한 가깝게 위치하도록 하여 IR drop을 제거하도록 하였다. 시험편에 가한 전위 값은 기존의 연구결과를 바탕으로 정했으며[6], 용접재 및 후열처리재 모두 음극전위의 영역에 해당하는  $-0.8$  V와  $-1.1$  V로 하였다.

SCC실험은 상기와 같은 부식환경 하에서 저 변형을 실험장치를 이용하여 인장하중을 가하였으며, 변형률 속도는  $10^{-6}$  mm/sec로 하였다. 실험이 진행되는 동안 부식용액의 온도는  $25 \pm 1^{\circ}\text{C}$ 의 온도범위를 유지하도록 하였고, pH는 7.5로 일정하게 하였다.

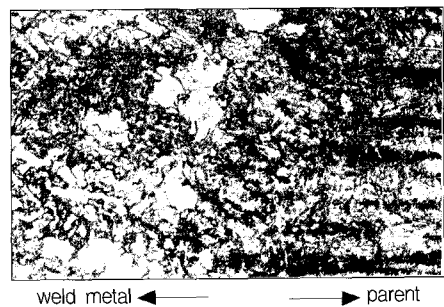
AE신호는 일정한 변형률로 부식손상이 진행되는 동안 실시간으로 컴퓨터에 저장되도록 하였다. 장치는 감지기, 진폭기, 기록계, 자료저장장치와 자료축적장치로 구성하였다. AE 실험조건은 전치 증폭기(pre-amplifier)의 gain은 40 dB, 문턱(threshold) 값은 시험편과 감지기 사이의 미세한 잡음 및 각종 기계적 잡음 등을 고려하여 40 dB로 하였으며, sample rate는 4 MHz로 하였다. 또한, filter의 범위는 10 kHz - 1200 kHz의 범위로 하였다. 이어 300 kHz의 공진형 AE(R30, PAC)를 부식환경 하에서 시험편의 표면에 장착할 수 없기 때문에 시험편

을 고정하는 grip부분에 부착하였다. 시험 초기, 시험편과 grip사이의 결합부분에서 미끄럼(sliding)에 의한 잡음을 최소화하기 위해 일정시간(5분정도) 초기하중을 가한 다음, AE신호를 받아들였다.

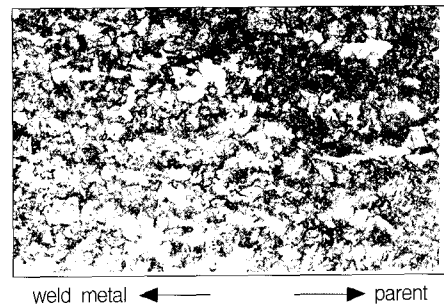
### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1. 용접부 조직

Fig. 3은 일층 및 이층 용접재와 후열처리재의 조직사진을 보인 것으로서 용접된 판의 정 중앙에 위치한 용융선(fusion line)근처를 대상부위로 하였다.



(a) weldment(one pass)



(b) PWHT specimen(one pass)



(c) Two pass weldment

Fig. 3 Microstructures of HAZ for the one-pass and the two-pass weldments

일층 용접재의 조직은 침상조직의 마르텐사이트가 주종을 이루고 있으며, 퍼얼라이트와 페라이트도 혼재하고 있음을 볼 수 있다. 또한, 용접열영향부로 위치가 바뀔에 따라 결정립이 보다 크게 되어 있고, 모재 쪽에 가까워질수록 조직은 미세하게 변하면서 모재의 조직인 퍼얼라이트와 페라이트가 지배적으로 나타나고 있다. 이어 용접재를 후열처리를 실시했을 때 조직은 후열처리로 인해 침상조직이 둔화되었고, 용접재의 페라이트내에 탄소가 입상으로 존재하는 양상을 보였다. 이층용접재는 일층용접재와는 다르게 결정립이 성장되어 재결정화(recrystallization)가 이루어져 있으며, 일층용접재에서 관찰할 수 있었던 침상조직을 발견하기 어려웠다. 또한, 결정경계의 폭이 일층 용접재 보다는 훨씬 넓게 형성되어 있음을 볼 수 있다. 이와 같은 조직이 형성되는 것은 두께방향으로 일층용접을 실시하고 난 다음, 계속된 용접으로 인해 용융온도에 해당하는 열이 다시 가해지기 때문에 용접부가 재결정화가 이루어지기 때문이라고 생각된다.

3.2. 용접재 및 후열처리재의 AE신호특성

변형률이  $10^{-5}$  mm/min에서  $10^{-6}$  mm/min으로 느려짐에 따라 일층용접재의 경우, 파단수명은 172,000초에서 623,800초로, 후열처리재의 파단수명은 184,000초에서 1,150,000초로 현저히 긴 파단수명을 보였다. 파단시간이 길어짐에 따라 부식반응은 보다 활발하게 이뤄진 것으로 생각되며, 이하에서는 부식손상이 진행되는 과정에서 AE거동이 어떻게 이뤄지고 있는지 고찰하고자 한다.

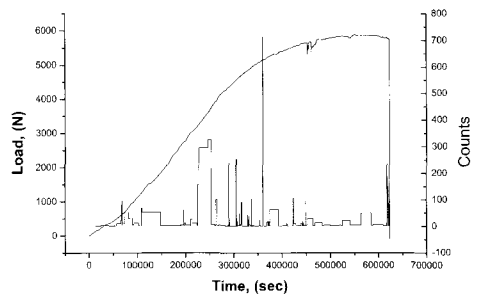
Fig. 4는 -0.8 V의 전위 값을 가한 일층 용접재와 후열처리재의 부식손상에 따른 음향방출 거동을 보인 것이다.

그림에서 볼 수 있는 것처럼 부식환경 하에서 SCC거동은 충분한 소성변형이 없이 취성적으로 이뤄졌으며, AE counts수는 두 시험편 모두 최대하중 이전에 많이 발생하였다. 일반적으로 SCC가 진행되는 동안 AE신호원(signal source)을 분류하여 보면 금속의 용해, 수소가스의 발생(evolution), 산화 막의 파손(breakdown), 균열의 진전 및 소성변형 등으로 알려져 있다[7]. 그러나 본 실험에서는 음향방출원이 어떠한 기구(mechanism)에 의해 발생하는지를 분류한다는 것은 사실상 불가능하였다. 다만, 일층 용접재의 경우에는 총 AE counts수는 7,477이

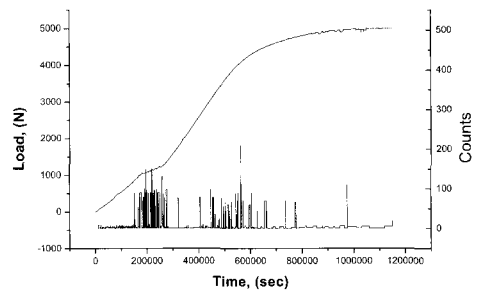
고, 후열처리재의 총 AE counts수는 7,991이다. 이를 단위 시간(초) 당 발생한 AE counts수로 환산하면 일층 용접재의 경우에는 0.011985인데 반해, 후열처리재는 0.006949로서 일층용접재의 경우가 훨씬 많이 발생하였다. 파단수명을 보면 일층 용접재는 623,880초인데 반해, 후열처리재는 1,150,000초로서 일층 용접재가 후열처리재에 비해 부식 환경에서 파단수명이 거의 반에 해당하였다. 일층 용접부에서 단위 시간당 AE counts수가 훨씬 많이 발생하고 있음은 부식환경에서 일층 용접부의 손상이 많이 발생하고 있음을 의미한다. 일층 용접재의 AE activity가 후열처리재에 비해 보다 활발하게 이뤄지고 있음은 다음과 같은 이유라고 생각한다.

첫째, 일층 용접부의 특이성 즉, 일층 용접부는 국부적으로 기계적 성질이 다르기 때문에 균열의 격임(deflection)현상 등이 발생하고 지그재그형태로 균열이 진전하기 때문이고[8],

둘째, 일층 용접부에는 조대화된 조직이 존재할 가능성이 높고, 미시결함과 존재할 가능성이 높기 때문에 틈 부식(crevice corrosion)과 같은 국부적



(a) one pass weldment



(b) PWHT specimen(one pass)

Fig. 4 Relationship between AE counts and load with time for the one-pass and the PWHT weldment tested at -0.8 V

부식에 의한 손상이 일어날 가능성이 높다. 즉 미시적인 균열현상이 부식환경 하에서 발생할 경우, 미시균열은 소 양극(small anode)으로 되고, 그 주위에는 대 음극(large cathode)이 형성되어 부식에 의한 균열의 손상은 보다 빨리 이뤄진다. 이에 따라 공극(pit)이 생성되는 곳이 많이 형성되며, 계속된 하중에 의해 균열들의 합체가 많은 곳에서 일어나기 때문에 보다 많은 AE counts수가 발생하게 되는 것으로 생각된다. 이는 기존의 연구보고[9]에서 용접부가 왜 부식환경에 보다 민감하다고 하는 지를 잘 설명하여 주는 내용이다.

이상의 결과로부터 AE법에 의해 용접부의 부식 손상의 기구를 밝히는데 유용한 도구(tool)로 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

한편, 후열처리재의 경우에는 파단수명이 일층 용접재에 비해 길어졌고, AE counts수가 훨씬 감소하였는데, 이는 후열처리로 인해 용접부에 연화(softening)현상이 발생하기 때문이라고 생각된다[10].

Fig. 5는 가해진 전위 값이 -1.1 V인 일층 용접재와 2층 용접재의 SCC 과정을 보인 것이다.

앞선 -0.8 V를 가해준 경우와는 현저히 다른 SCC거동을 보여주고 있는데, 우선 손상과정에서

많은 불규칙한 변형과정을 보이고 있다. 또한, 일층 용접재의 총 AE counts수는 19,807인데 반해, 이층 용접재의 경우에는 7,079로서 일층 용접재가 현저히 많이 발생하였다. 이와 같은 거동을 보인 것은 일층 용접재가 2층 용접재에 비해 보다 취성적인 부식손상이 이뤄지기 때문에 나타나는 현상이라고 생각한다. 아울러 2층 용접재의 파단시간은 615,258초인데 반해, 일층용접재의 파단시간은 441,914초로서 2층 용접재가 보다 긴 수명을 보였다. -0.8 V와 -1.1 V를 가해준 시험편을 비교하여 보면 후 열처리나 이층 용접에 의해 용접부가 재열처리된 경우에는 파단수명이 보다 긴 결과를 보여주고 있다. 이로서 해수 환경에서 용접구조물의 경우 부식손상을 줄이기 위해서는 일종의 열처리를 하는 것이 바람직하다는 결론을 얻을 수 있었다.

### 3.3. 축적된 AE counts수 거동

Fig. 6은 -0.8 V를 가한 일층 용접재와 후열처리재의 SCC과정을 보다 자세히 알아보기 위해 상기에서 얻어진 결과를 바탕으로 축적된 AE counts수의 견지에서 정리한 것이다.

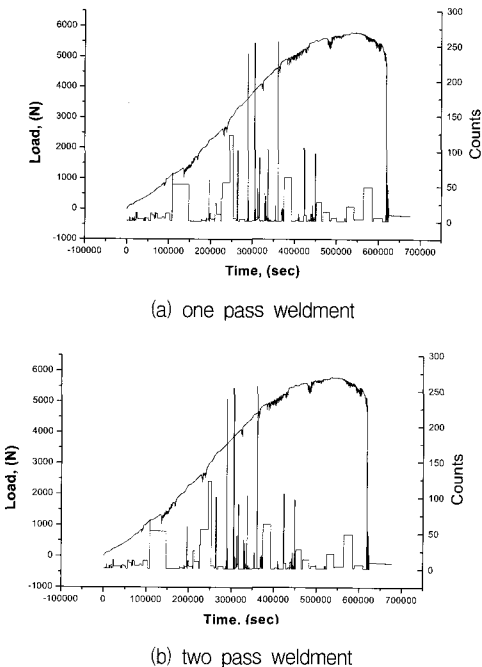


Fig. 5 Relationship between AE counts and load with time for the one-pass and the two pass weldments tested at -1.1V

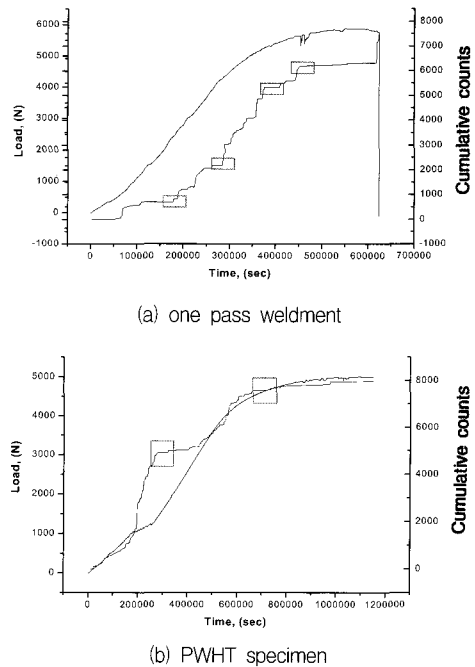
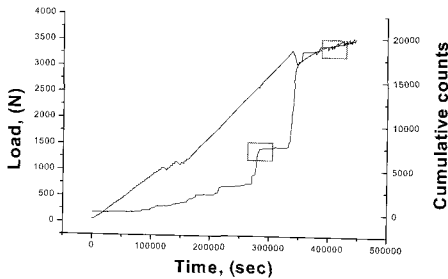


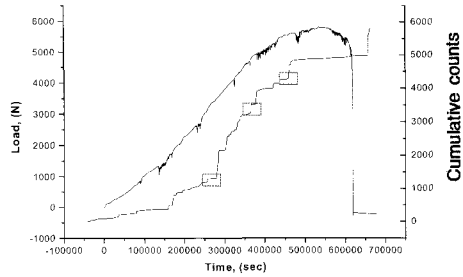
Fig. 6 Relationship between cumulative AE counts and load with time for the one pass and PWHT weldments tested at -0.8 V

일층 용접재의 경우에는 후열처리와는 다르게 SCC과정에서 jump(그림에서 □로 표시)현상이 많이 발생되고 있음을 볼 수 있는데, 이는 앞선 고찰에서 언급하였듯이 보다 많은 미시균열들의 발생과 계속된 하중에 의해 미시균열들의 합체(coalescence)가 보다 활발하게 이뤄지기 때문에 나타나는 현상이라고 생각된다. 또한, 어떠한 경우를 막론하고 최대하중 이후에는 AE counts수의 증가율이 현저히 저하하고 있는데, 이는 SCC과정이 최대하중 이전에서 활발하게 진행되기 때문에 나타나는 현상이다.

Fig. 7은 -1.1 V를 가한 일층 및 이층 용접재의 SCC과정을 추적된 AE counts수로 나타낸 것이다. -1.1 V를 가한 일층 용접재의 경우에는 jump의 폭이 대단히 크게 나타나고 있는데, 이는 음극방식 하에서 취성적인 부식손상이 매우 심하게 일어나기 때문에 일어나는 현상이라고 생각한다. 또한, 앞선 경우와는 다르게 최종 파단이 발생할 때까지 AE counts수의 증가율은 계속되는 특징을 보여주고 있다. 이층 용접재의 경우, 최대하중 이후에는 AE counts수의 증가율이 거의 없이 일정한 상태에서 최종 파단에 이르고 있는데, 이는 이층 용접으로

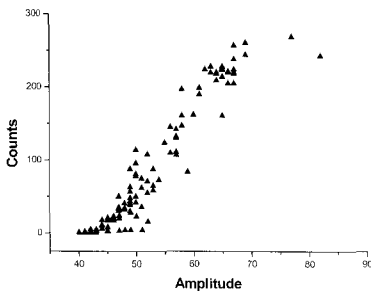


(a) one pass weldment

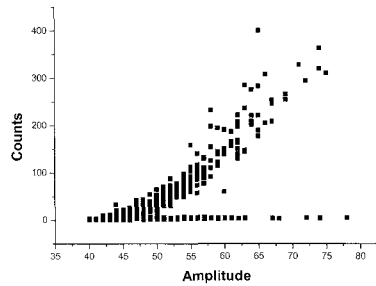


(b) two pass weldment

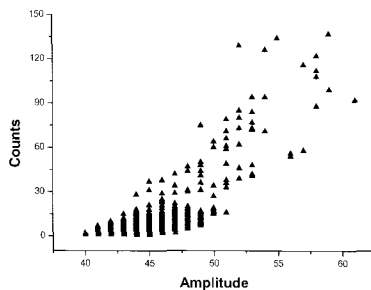
Fig. 7 Relationship between cumulative AE counts and load with time for the one pass and PWHT weldments tested at -0.8 V



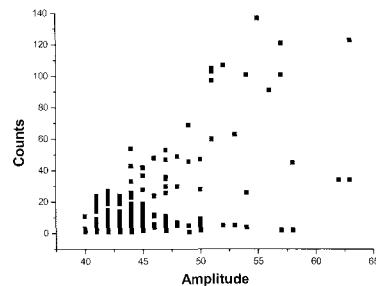
(a) one pass weldment (-0.8V)



(b) PWHT specimen (-0.8 V)



(c) one pass weldment (-1.1 V)



(d) two pass weldment (-1.1 V)

Fig. 8 Relationship between amplitude and counts for each specimen

인해 일층 용접부가 일층의 재 열처리를 받아 용접부의 기계적인 성질 즉, 용접부의 강도가 달라지기 때문에 나타난 결과라고 생각한다.

3.4. AE신호특성과 부식손상 사이의 관계

Table 4는 본 실험에서 얻어진 결과 즉 파단시간, 최대하중, 총 AE counts수 및 AE 진폭의 범위 등을 정리한 것이다. 표에서 진폭의 범위는 Fig. 8에서 보인 것처럼, 각 시험편에 대해 횡 좌표 상에 나타난 값을 의미한다.

AE 진폭의 범위는 -0.8 V 일층 용접제에서 40-82 dB로 가장 큰 값의 범위를 보였고, -1.1 V를 가해 준 일층 용접제의 경우에는 40-61 dB로서 가장 작은 값의 범위를 보였다. 이와 같이 AE 신호 값들과 SCC과의 관계를 알아보기 위해 주사전자 현미경에 의해 부식손상을 받은 시험편을 관찰하였다.

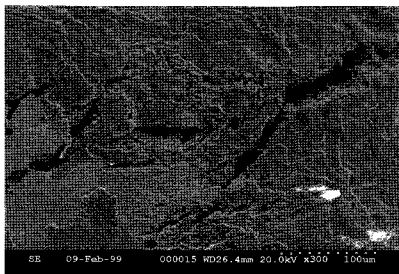
Fig. 9는 일층 -0.8 V의 일층 용접제의 파단면 주위를 나타낸 사진으로서 수많은 균열이 시험편 주위에 형성되어 있음을 볼 수 있으며, 후열처리재의 경우에는 용접제에 비해 균열의 발생이 현저히 줄어든 상태를 보였다.

Table 4 Test results of corrosion damage and AE parameters

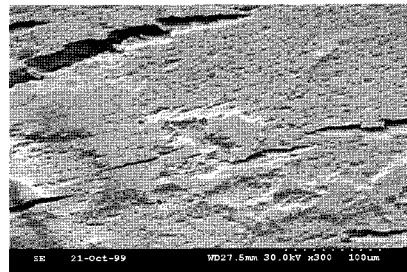
Specimen	Time to failure (sec)	Maximum load (N)	Range of amplitude (dB)	Total counts	Applied voltage (V)
one pass weldment	623,800	5,873	40~82	7,477	-0.8
PWHT specimen	1,150,000	5,002	40~77	7,991	-0.8
one pass weldment	441,914	3,794	40~61	19,705	-1.1
two pass weldment	615,258	5,762	40~63	7,079	-1.1

이로부터 AE counts수는 SCC과정에서 발생된 균열의 수와 밀접한 관계가 있음을 알 수 있었다.

Fig. 10은 AE진폭의 범위가 가장 큰 -0.8 V의 일층 용접제와 AE 진폭의 범위가 가장 작은 -1.1 V의 일층 용접제의 SCC상태를 보인 것이다.

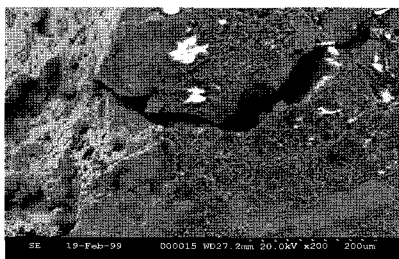


(a) one pass weldment

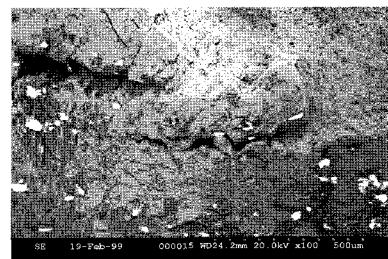


(b) PWHT specime

Fig. 9 Cracks formed on the surfaces of one pass weldment and PWHT specimen tested at -0.8 V



(a) -0.8V



(b) -1.1V

Fig. 10 Fracture morphology for the one pass weldment tested at -0.8 V and -1.1 V

-0.8 V의 용접재의 균열의 폭은 대단히 크게 형성되어 있는데 반해, -1.1 V의 일층 용접재의 균열의 폭은 상대적으로 작게 형성되고 그 수도 상당히 그리 많지 않음을 볼 수 있다. 이상의 결과로부터

AE counts수는 SCC과정에서 발생하는 균열의 수와 관계가 있고, AE 진폭의 범위는 균열의 크기 또는 폭과 상관관계가 있음을 알 수 있었다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 부식 환경 하에서 고 장력강 용접부의 SCC과정과 기구를 AE법에 의해 평가하였으며, AE법에 의해 용접부의 SCC의 민감도를 평가할 수 있는지에 관한 내용을 다루어 보았다.

- (1) 부식환경 하에서 용접부는 미소결함이 보다 많이 발생하기 때문에 후열처리재에 비해 단위시간당 AE counts수가 훨씬 많이 발생하였으며, 이는 용접부의 SCC가 보다 심하게 나타나는 결과를 초래하였다. 또한, 축적된 AE counts수의 결과로부터 SCC 과정은 가해진 전위 값과 용접 종류에 따라 각각 다르게 나타났으며, -0.8 V인 일층 용접재의 경우 SCC과정에서 균열의 발생 및 합체가 가장 활발하게 이뤄졌다.
- (2) 가해진 전위 값이 -1.1 V인 경우, 일층 용접재의 파단시간은 이층 용접재에 비해 줄었고, AE counts수는 이층 용접재에 비해 현저히 많이 발생하였는데, 이는 일층 용접부가 부식 환경에 보다 민감하다는 것을 의미한다.
- (3) AE진폭 범위는 -0.8 V 일층 용접재에서 가장 높았고, -1.1 V 일층 용접재에서 가장 작은 값을 보였는데, fractography분석결과 AE진폭 범위는 균열의 크기 및 폭과 밀접한 관계가 있음을 확인할 수 있었다.

이상의 결과로부터 AE법은 부식환경 하에서도 SCC과정에서 균열의 발생 및 합체 등을 정성적으로 감시할 수 있으며, 용접부의 SCC 기구를 밝히는 데 유용한 도구로 활용될 수 있음을 알 수 있었다.

#### 참고문헌

- [1] A. A. Shreinker and J. D. Wood, "Stress corrosion cracking of a high strength steel," ASTM STP 518, pp. 16-18 (1972)
- [2] H. S. Isaacs and Brijesh Vyas, "Scanning reference electrode technique in localized corrosion," *Electrochemical Corrosion Testing*, ASTM STP 727, pp. 3-33, (1981)
- [3] J. E. Fimegan and W. H. Hartt, "Stress intensity factor dependence of stress corrosion crack growth rate in 7079-T651 aluminum," ASTM STP 610, pp. 44-59 (1987)
- [4] J. O. Nilson and J. O. Andersson, "Secondary austenite formation and its relation to pitting corrosion in duplex stainless steel weld metal," *Materials Science and Technology*, Vol. 11, pp. 276-283 (1995)
- [5] L. W. Tsay, W. L. Lin, S. W. Cheng and G. S. Leu, "Hydrogen sulphide stress corrosion cracking of 2.25Cr-Mo steel weldments," *Corrosion Science*, Vol. 39, No. 7, pp. 1165-1176, (1997)
- [6] 나의균, 유효선, 김훈, "HT-60강 용접부의 SCC 및 AE신호특성에 관한 연구," *비파괴검사학회지*, 제 21권, 제 1호, pp. 63-68, (2001)
- [7] 한국비파괴검사학회, 음향방출시험, p. 11 (1996)
- [8] V. Moorthy, T. Jayakumar and Baldev Raj, "Acoustic emission for identification of stage to the transition during stage II fatigue crack growth in parent and weld metal in AISI 316 austenite stainless steel," *Materials and Technology*, Vol. 12, pp. 56-58, (1996)
- [9] J. A. Hartt, "Fatigue of welded structural and high strength steel plate specimens in seawater," *Fatigue and fracture testing of weldments*, ASTM STP 1058, pp. 78-95, (1990)
- [10] 김완수, "고장력강 용접부의 응력부식균열손상에 따른 AE신호 분석," *군산대학교 석사학위논문*, (1999)