

HT-60강 용접부의 SCC 및 AE신호특성에 관한 연구

Study on Characteristics of SCC and AE Signals for Weld HAZ of HT-60 Steel

나의균*, 유효선**, 김 훈***
 Eui-Gyun Na*, Hyo-Sun Yu** and Hoon Kim***

초 록 인공해수에서 HT-60강 용접부의 응력부식균열(SCC)과 음향방출(AE)신호특성을 알아보기 위하여 SCC의 AE실험을 동시에 실시하였으며, 양 실험결과를 상호 비교·분석하였다. 모재의 경우, -0.8V에서 보다 긴 파단수명을 보였고, 용해기구 등으로 인하여 -0.8V에 비해 -0.5V에서 AE가 많이 발생하였다. 그러나 시험편에 가해진 전위 값에 관계없이 최대하중 이후의 영역에서 AE 발생 수는 감소하였다. 용접재의 경우, 모재 및 후열처리재와는 달리 용접부의 특이성 때문에 많은 AE 발생과 큰 진폭의 범위(40~100dB)를 나타내었으며 최대하중 이후에도 AE 발생이 활발하였다. 또한, 보다 크고 많은 균열이 파단면에 형성되었음을 SEM관찰을 통하여 관찰할 수 있었으며, 이들 결과로부터 용접부는 인공해수에서 SCC현상이 가장 심하게 일어나고 있음을 확인할 수 있었다. 후열처리는 용접부의 연화를 초래하였고, 용접재에 비해 부식환경에 대한 민감도를 떨어뜨리는 효과를 가져왔다.

주요용어: 응력부식균열, 음향방출, 변형률, 전위값, AE 발생 수, 용접재, 후열처리, 연화

Abstract In order to characterize the microscopic fracture behaviour of the weldment during stress corrosion cracking(SCC) phenomena, SCC and acoustic emission(AE) tests were carried out simultaneously and the correlation between mechanical parameters obtained from SCC and AE tests was investigated. In the case of base metal, much more AE events were produced at -0.5V than at -0.8V because of the dissolution mechanism before the maximum load. Regardless of the applied voltages to the specimens, however, AE events decreased after the maximum load. In the case of weldment, lots of AE events with larger amplitude range(40~100dB) were produced because of the singularities of weld HAZ in comparison to the base metal and post-weld heat-treated (PWHT) specimens. Numerous and larger cracks for the weldment were observed on the fractured surfaces by SEM examination. From these results, it was concluded that SCC for the weldment appeared most severely in synthetic seawater. Weld HAZ was softened by PWHT which also contributed to the reduced susceptibility to corrosive environment in comparison to the weldment.

Keywords: stress corrosion cracking, acoustic emission, strain rate, potential value, AE events, weldment, post-weld heat treatment, softening

1. 서 론

습·부식환경 하에 노출된 금속구조물은 SCC와 관련된 사고가 전체의 약 60%를 차지하고 있으며, 특히 용접

에 의해 구성된 해양구조물의 SCC에 의한 손상은 대부분이 용접부에서 비롯되고 있음이 보고되고 있다[1,2].

따라서 해수환경과 같은 가혹한 환경에서 용접에 의해 이뤄진 용접구조물의 안전성 및 설계자료를 확보하기 위해

서는 용접부를 대상으로 SCC에 관한 연구가 필요하다. 이와 더불어 부식환경 하에서 사용 중에 있는 기기 및 구조물들의 부식현상을 적극적으로 제어하여 SCC의 현상을 조절하는 것은 파괴제어설계의 관점에서 볼 때[3], 구조물의 건전성을 확보할 수 있는 도구를 찾아낼 수 있다는 면에서 중요한 의미를 갖는다. 또한, 응력부식에 의해 발생하는 파괴를 미연에 방지하기 위해서는 SCC에 의해 감시할 수 있는 방법을 적극적으로 모색할 필요가 있다.

본 연구에서는 최근 해양구조물 재료로서 이용의 폭이 날로 증가하고 있는 HT-60강의 용접부를 대상으로 부식 제어 하에서 SCC의 감수성을 평가하고자 한다. 이어 SCC실험과 AE실험을 동시에 실시하여 인공해수 중에서 응력부식으로 인한 손상과정을 검출하여 보고 SCC거동 및 AE특성과의 상호관계를 고찰하여 해양구조물의 설계 시 활용될 수 있는 기초자료를 제공하고자 하는 것이 연구의 목표이다.

2. 실험절차

2.1. 공시재 및 용접

본 연구에 사용된 재료는 두께 18mm인 HT-60강이며, Table 1에 화학적인 조성과 기계적인 성질을 보였다.

용접은 압연방향에 직각으로 후판 용접에서 가장 많이 이용되고 있는 잠호(submerged arc)용접을 실시하였으며, Table 2에 용접조건을 나타내었다.

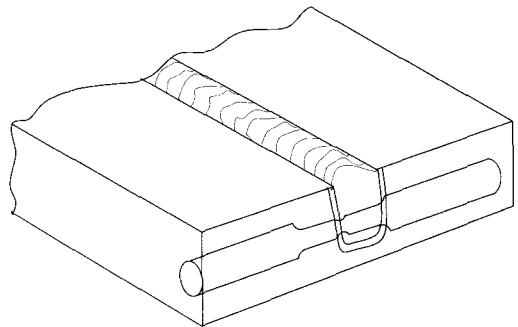
후 열처리(post weld heat treatment: PWHT)가 SCC 거동에 미치는 영향을 알아보기 위해 용접된 판을 780°C에서 1시간 풀림 처리한 다음, 4시간동안 노(furnace) 내에서 서서히 냉각시킨 후 시험편을 채취하였다.

용접된 판에서 시험편의 채취와 규격은 Fig. 1과 같이

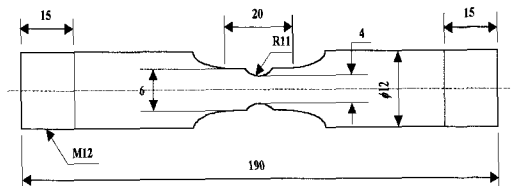
하였다. 인장형 시험편의 중앙부위에 용접열영향부(heat affected zone: HAZ)가 위치하도록 하였으며, 중앙부에 round를 주어 가공하였다. 이는 용접부의 matrix가 모재보다 강하기 때문에 SCC실험이 진행되는 동안 모재 부분에서 먼저 파단되는 것을 방지하기 위함이다.

Fig. 2는 용접부의 조직사진을 보인 것으로서 용융선(fusion line)부근을 대상으로 하였다. 용접부의 조직은 침상조직의 마르텐사이트가 주종을 이루고 있으며, 결정립이 조대화되어 있고 퍼얼라이트와 페라이트도 혼재하였음을 볼 수 있다.

Fig. 3은 미시 비커스 경도계(하중: 100g)를 이용하여 측정된 용접부의 경도분포를 보인 것이다. subcritical-HAZ에서 용융선(fusion line)으로 이동함에 따라 경도치는 서서히 증가하였으며 다시 용융선에서 HAZ로 위치가 이동함에 따라 경도치는 최대치를 보이다가 용착금속(weld metal)에서 약간 경도치가 감소하는 경향을 보이고 있다. 이에 대해 용접후열처리재의 경우에는 전반적으로 경도가 용접재에 비해 감소하고 있어서 후 열처리로 인해 연화(softening)되었음을 알 수 있다.



(a) Extraction of specimen from the welded block



(b) Dimensions of specimen

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

Fig. 1 Extraction of specimen from the welded block and dimensions for SCC and AE tests

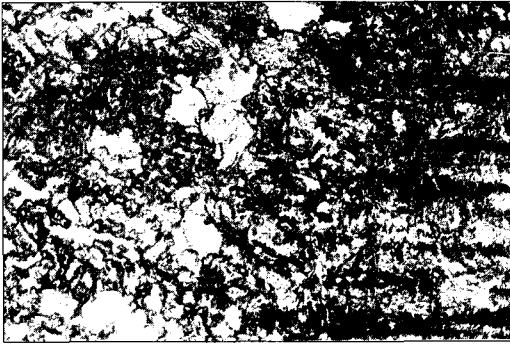


Fig. 2 Microstructure of HAZ for the weldment

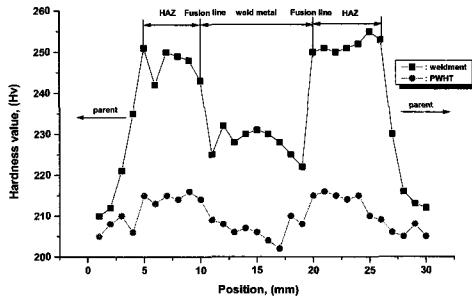


Fig. 3 Distribution of hardness for the weldment and PWHT specimens

2.2. SCC 및 AE실험

SCC실험은 자체적으로 제작한 저 변형률 실험(slow strain rate test: SSRT)장치를 이용하였으며, 가해진 크로스 헤드의 속도는 기존의 연구결과를 참고하여 10⁻⁵mm/min를 택하였다[4]. SSRT장치는 모터, 감속기어 및 load cell로 구성되어 있으며, 특정부식환경에서 금속재료와의 응력부식 민감도를 빠른 시간 내에 정성적으로 평가하는데 이용되고 있는 새로운 개념의 실험장치이다[5]. 부식용액은 인공해수를 제조하여 사용하였으며, Table 3에 인공해수의 조성을 나타내었다.

Fig. 4는 SCC 및 AE실험장치의 개략도를 보인 것이다. SCC실험을 실시할 때 시험편의 HAZ를 제외한 부분은 테이프로 감쌌으며, 인공해수는 용접시험편의 대상부위인 HAZ에 해당하는 부분까지만 채운 다음, 대기 개방 상태에서 SCC실험을 실시하였다. 실험도중 용액의 pH는 7.5로 일정하게 유지하였으며, 해수의 온도는 25±1°C 범

Table 3 Chemical compositions of synthetic seawater

(in 10 liter water)			
Compositions	Quantity(g)	Compositions	Quantity(g)
NaCl	245.34	NaHCO ₃	2.01
MgCl ₂ ·6H ₂ O	111.11	KBr	1.01
Na ₂ SO ₄	40.94	Sr ₂ 6H ₂ O	0.42
CaCl ₂	11.58	H ₃ BO ₃	0.27
KCl	6.95	NaF	0.03

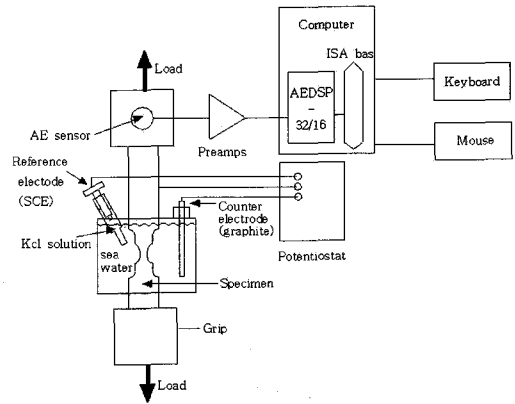


Fig. 4 Schematic diagram of SCC and AE test apparatus

위에 있도록 하였다.

부식제어는 전위계(BG&G 273-A)를 이용하였으며, 기준전극(reference electrode)은 포화 감홍전극(saturated calomel electrode: SCE), 대극(counter electrode)은 흑연(graphite)을 사용하였다. 부식제어에 의해 시험편(작용전극: working electrode)에 가해진 전위 값은 모재의 경우 -0.5V와 -0.8V로 하였고, 용접재 및 후 열처리재의 경우에는 -0.8V로 하였다. 상기의 전위 값을 택한 이유는 모재, 용접재 및 후 열처리 재를 대상으로 Fig. 5와 같은 Tafel분극곡선을 구하여[6] 음극분극영역에 해당하는 전위 값과 양극분극곡선 영역에 해당하는 값을 택하여 가해진 전위 값의 차이가 SCC 및 AE거동에 미치는 영향을 알아보기 위해서이다.

AE신호는 AE 장치(상용해석 프로그램: MISTRAS)를 PC에 장착하여 일정한 변형률로 SCC가 진행되는 동안 실시간(real time)으로 컴퓨터에 저장되도록 시스템을 구성하였다. AE실험조건은 전치 진폭기(pre-amplifier)의

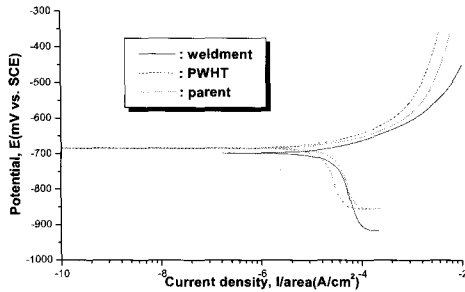


Fig. 5 Relationship between potential and current density for the weldment, PWHT and parent in synthetic seawater

gain는 40dB, 문턱값(threshold)은 시험편과 감지기 사이의 미세한 잡음 및 각종 기계적 잡음 등을 고려하여 40dB으로 하였으며, sample rate는 4MHz로 하였다. 또한, filter의 범위는 10kHz~1200kHz의 범위로 하였으며 hit length는 1000 point로 하였다. 이어 300kHz의 압전 감지기를 시험편의 구조상 직접 시험편의 표면에 장착할 수 없기 때문에 시험편을 고정하는 grip부분에 설치하였다. 실험이 진행되는 동안 시험편과 grip사이의 결합부분에서 미끄럼(sliding)에 의한 잡음을 제거하기 위하여 일정시간(5분) 동안 초기하중을 가한 다음, AE신호를 받아들였다.

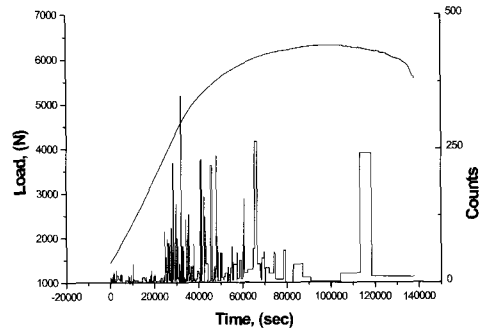
3. 실험결과 및 고찰

3.1. 모재의 SCC특성 및 AE거동

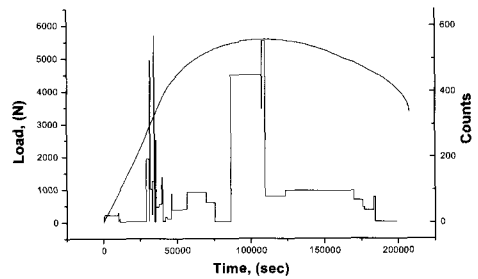
SCC 및 AE실험결과를 동시에 하나의 그래프 상에 나타내어 SCC거동에 따른 AE신호특성을 비교함으로써 시험재료의 SCC손상특성을 고찰하고자 한다.

Fig. 6은 가해준 전위 값이 -0.5V와 -0.8V인 모재의 AE counts특성을 SCC거동인 하중-시간선도와 함께 보인 것이다. 여기서 AE counts는 개개의 AE hit에 해당하는 event수를 의미한다.

그림에서 가해준 전위가 -0.5V인 모재의 경우, 음향방출이 초기에서부터 상당히 심하게 발생하고, 재료의 항복점 근처에서 최대의 counts를 보이며, 그 이후에도 상당한 정도의 AE counts가 감지되었다. 하지만 최대하중을 넘어선 영역에서는 AE counts가 거의 발생하지 않은 상태에서 최종 파단에 이르렀다. 초기하중 근처에서부터 AE counts가 나타나면서 상당한 빈도수로 AE counts가



(a) -0.5V



(b) -0.8V

Fig. 6 Relationship between load-time and AE counts-time for the parent at the applied voltage of -0.5V and -0.8V

검출되는 것은 재료의 변형에 따른 탄성파와 가해준 전위 값이 -0.5V로서 양극용해(anodic dissolution)에 원인이 있는 것으로 생각된다.

일반적으로 SCC가 진행되는 동안 AE신호원(signal source)을 분류하여 보면 금속의 용해, 수소가스의 발생(evolution), 산화 막의 파손(breakdown), 균열의 진전 및 소성변형 등을 들 수 있다[8]. 이와 같은 여러 요인에 의해 발생하는 AE 신호를 그래프 상에서 구분하여 고찰한다는 것은 불가능하다고 생각한다. 다만 일반적으로 인장실험을 실시하자마자 AE신호가 방출되는 경우는 거의 없으며 어느 정도의 가해주는 응력에 의해 변형이 수반되긴 다음부터 AE 신호가 검출된다는 점에서 볼 때, 본 실험의 경우 시험초기에서부터 AE 신호가 탐지되고 있는 것은 기계적인 변형 예를 들어, 소성변형과 SCC진전에 의한 AE 신호의 발생은 아니라고 생각한다. 이와 같은 관점에서 볼 때 최대하중 이전에 감지되는 AE counts는 전기 화학적인 요인, 예를 들어 수소가스의 발생 또는 금속의 용해 및 탄성파에 기인하는 것으로 생각된다.

가해준 전위 값이 -0.8V인 경우에는 앞선 -0.5V인 경

우에 비해 파단시간 전반에 걸쳐 AE counts가 훨씬 줄어든 상태를 보여주고 있다. 즉 $-0.5V$ 인 경우 단위 시간 당(초) AE counts의 발생률은 0.07 인데 반해, $-0.8V$ 인 경우에는 0.03 으로서 거의 반 이상 감소하였다. 이와 같은 결과를 보이는 것은 가해진 전위 값이 음극분극전위 영역에 해당하는 후자의 경우 시험편의 표면에서 용해가 발생하지 않기 때문이다. 이상의 결과로부터 부식환경에서 양극분극영역에 해당하는 영역에서는 음극분극영역에 비해 보다 많은 AE counts가 발생하는 것으로 결론지을 수 있다.

3.2. 용접재·열처리재의 SCC 및 AE거동

모재는 균질성 재료로 취급할 수 있는 반면, 용접재는 불연속부의 존재와 그에 따른 기계적 성질의 차이 등으로 인해 모재와는 상당히 다른 AE거동을 보일 것으로 생각된다. 따라서 이하에서는 용접재 및 후 열처리재의 SCC 및 AE 거동을 상호 비교·검토하여 보기로 한다. 단, 가해진 전위 값이 $-0.8V$ 인 경우에 한하여 얻어진 자료를 대상으로 고찰하고자 한다. 그 이유는 앞선 모재를 대상으로 SCC실험을 실시하였을 때 $-0.8V$ 에서 파단시간이 보다 길어진 결과를 얻을 수 있었기 때문에 부식제어 하에서 SCC에 의한 손상을 줄이기 위해서는 $-0.8V$ 의 전위 값이 적합하다고 판단하였기 때문이다.

Fig. 7은 가해진 전위 값이 $-0.8V$ 에서 용접재의 SCC 및 AE거동을 보인 것이다. 그림에서 볼 수 있는 것처럼, 초기 8330초까지는 AE신호가 거의 나타나지 않다가 이후부터 AE counts가 발생하는 점으로 보아 초기에 하중이 가해지는 단계에서는 용접재에 가해진 응력에 충분히 견디는 시기로 볼 수 있으며, 이는 micro-crack 현상이 형성되고 있지 않음을 의미하는 것이다. 그러나 초기 단

계 이후에는 작용하중이 증가할수록 AE counts가 증가하다가 최대하중에서 가장 많이 발생하였다. 이는 최대하중에서 많은 양의 micro-crack이 재료내부 또는 표면에서 발생함과 동시에 균열간의 합체가 이뤄지는 것으로 추정된다.

한편, 모재의 경우와는 달리 용접재의 경우에는 최대하중 이후에도 많은 AE counts가 발생하였다. 이와 같이 용접재의 AE의 activity가 모재에 비해 보다 활발하게 이뤄지고 있음은 다음과 같은 이유라고 생각된다.

첫째, 용접부의 특이성 즉, 용접부는 국부적으로 기계적 성질이 다르기 때문에 균열의 꺾임(deflection)현상 등이 발생하고 지그재그형태로 균열이 진전하기 때문이고,

둘째, 용접부에는 미시결합이 존재할 가능성이 높기 때문에 틈 부식(crevice corrosion)과 같은 국부적 부식에 의한 손상이 일어날 가능성이 높고, 이에 따라 공식(pit)이 생성되는 곳이 모재에 비해 많으며, 계속된 하중에 의해 균열들의 합체가 수 많은 곳에서 일어나기 때문에 보다 많은 AE counts가 발생하게 되는 것으로 생각된다.

용접재의 경우 모재에 비해 AE counts가 많이 발생하고 있음은 응력부식의 과정에서 미시적인 균열현상이 보다 많이 생성되고 있다는 것을 의미한다[9]. 미시적인 균열현상이 부식환경 하에서 발생할 경우, 미시균열은 소양극(small anode)으로 되고, 그 주위에는 대 음극(large cathode)이 형성되어 부식에 의한 균열의 손상은 보다 빨리 이뤄진다. 이는 기존의 연구보고[10]에서 용접부가 모재에 비해 왜 부식환경에 보다 민감하다고 하는지를 잘 설명하여 주는 내용이다.

Fig. 8은 후 열처리재의 하중-시간과 시간-AE counts와의 관계를 보인 것이다. 후 열처리재의 AE counts는 항복점 부근에 해당하는 시간에서 가장 많은 AE counts

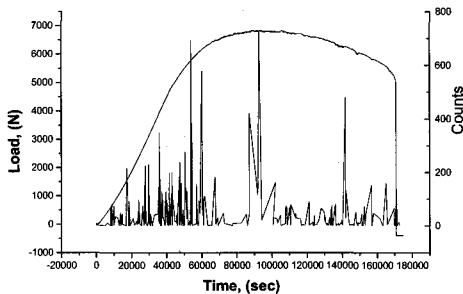


Fig. 7 Relationship between load-time and AE counts of the weldment at $-0.8V$

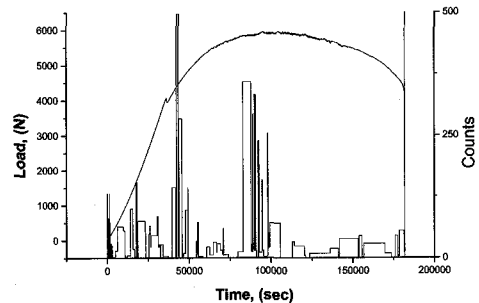
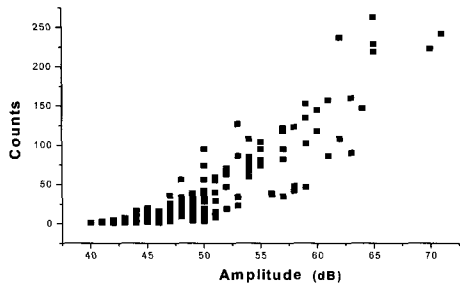


Fig. 8 Relationship between load-time and AE counts of the PWHT specimen at $-0.8V$

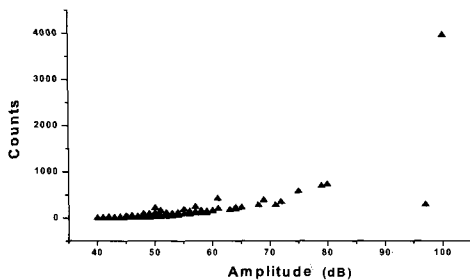
가 발생하였으며, 최대하중을 넘어선 영역에서는 AE counts가 용접재에 비해 현저히 감소하는 결과를 보였다. 시험시간 전반에 걸쳐 후 열처리재(AE counts의 총 수: 8336)의 AE counts의 발생률은 0.05인데 반해 앞선 용접재(AE counts의 총 수: 13896)는 0.08로서 후 열처리재의 경우 감소한 결과를 보였다. 이와 같은 결과를 보이는 것은 후 열처리에 의해 용접부가 연화(softening)되기 때문이라고 생각된다.

Fig. 9는 용접재와 후 열처리재의 진폭과 AE counts와의 관계를 보인 것이다. 상기에서 언급하였듯이 AE counts의 수는 균열발생에 관한 정보량이라고 한다면, AE 진폭은 micro-crack의 상대적인 크기를 나타내는 인자라고 할 수 있다[11,12].

용접재의 경우는 진폭의 범위가 40dB~100dB의 값을 보이고 있는데 반해, 후 열처리재는 진폭이 40dB~72dB의 범위에 걸쳐 분포하고 있다. 다시 말해, 용접재가 후 열처리재에 비해 최대진폭이 보다 큰 값을 보였다. 이와 같이 용접재가 후 열처리재에 비해 상기와 같은 결과를 보인 것은 용접재가 후 열처리재에 비해 최대강도가 높고 용접부의 조직과 같이 경한 마르텐사이트 조직과 큰 결정입도로 구성되어 있기 때문이다. 아울러 용접재의 경우



(a) weldment



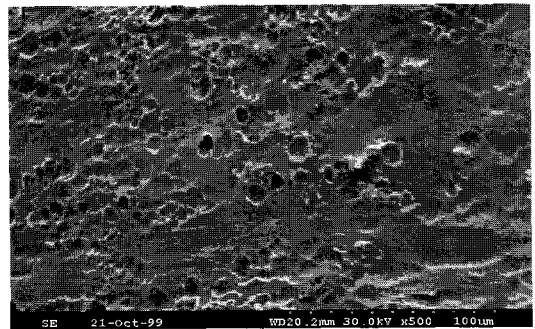
(b) PWHT specimen

Fig. 9 Relationship between counts and amplitude for the weldment and PWHT specimen

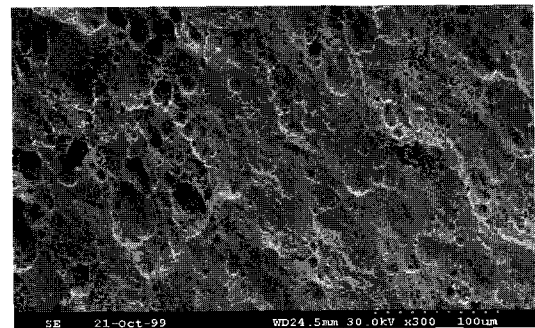
AE진폭이 보다 크게 나타난 것은 일정한 인가하중에서 발생한 미시균열의 크기가 후 열처리재에 비해 크다는 것을 의미한다.

이와 같은 양상을 보다 자세히 알아보기 위해 SCC 실험이 끝난 후 모재와 용접재의 표면을 관찰한 사진이 Fig. 10이다. 모재에 비해 용접재의 경우 시험편의 표면에 무수히 많은 공극이 형성되어 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 11은 용접재와 후 열처리재의 파단면 주위를 주사전자현미경으로 촬영한 사진이다. 우선 용접재의 경우에는 파단면의 양상이 취성적이고 요소요소에 제 2균열들이 무수히 발생하였음을 관찰할 수 있는데 반하여, 후 열처리재의 파단면은 연성적인 파단면으로서 용접재와는 명백한 대조를 이루고 있다. 이와 같은 결과를 보이는 것은 용접부의 경우, 용접부의 특이성이 AE신호의 진폭을 증가시키는 요인으로 작용하고 후 열처리재에 비해 보다 큰 균열이 많이 발생하게 되며, 연성적인 파단을 보이는 후 열처리재는 보다 작고 적은 수의 균열이 발생하는 점에서 볼 때, 후 열처리재는 SCC의 민감도를 감소시키는 역할을 한 것임을 SEM관찰을 통하여 규명할 수 있었다.

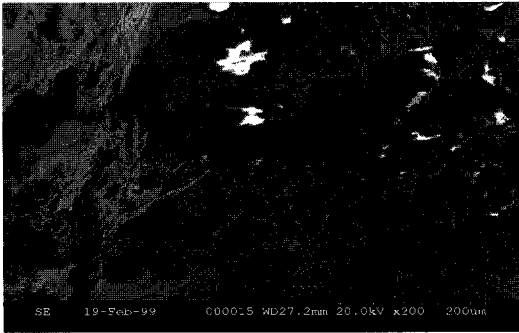


(a) parent

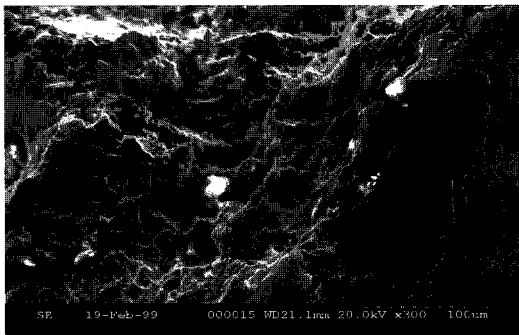


(b) weldment

Fig. 10 Formation of pits on the surface for parent and weldment under $-0.8V$ at the maximum load



(a) weldment



(b) PWHT specimen

Fig. 11 Fractured parts of the weldment and PWHT specimens

4. 결 론

본 연구에서는 HT-60강 용접부를 대상으로 부식제어 하에서 SCC와 AE실험을 동시에 실시하였다. 모재의 SCC거동은 외부로부터 가해지는 전위 값의 차이에 따라 각각 다르게 나타났다. 즉 양극분극전위에 해당하는 전위 값(-0.5V)을 가해주는 경우에는 SCC의 수명이 빨랐고, AE counts는 보다 많이 발생되는 반면, 음극분극전위에 해당하는 영역에서는 그 반대의 결과가 얻어졌다. 또한, 가해진 전위 값에 관계없이 최대하중 이후에는 AE counts가 거의 나타나지 않았다. -0.8V인 전위 값에서 용접재의 경우는 모재 및 후 열처리재와는 다르게 최대 하중 이후에도 AE counts가 많이 발생하였고 진폭 또한 크게 나타났는데, 이는 용접부의 특이성 예를 들어, 조직의 불균일성, 용접부에 존재하는 미시결함 등과 같은 요인에 기인한다. 용접재의 경우 시험편의 표면에 무수히 많은 공극이 발생하고 용해가 활발하게 이루어지며, 파단면의 양상이 취성적이고 요소요소에 제 2균열들이 무

수히 발생하였음을 관찰할 수 있었다. 이에 반해 후 열처리재의 파단면은 연성적인 파단면으로서 용접재와는 명백한 대조를 이루고 있음을 SEM관찰을 통하여 확인할 수 있었다.

후 열처리는 용접부의 응력부식의 감수성을 떨어뜨리기 때문에 실제 용접에 이뤄진 해양구조물의 경우 후 열처리를 실시하는 것이 바람직하다고 결론지을 수 있다.

참고문헌

- [1] 이재익, "plant설비의 손상경향에 대하여", 한국부식학회지, Vol. 17, NO. 3, pp. 172-181, (1988)
- [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] 小林英男, 破壊力學, pp. 156-166, (1993)
- [4] 안용택, "저 변형을 실험법에 의한 HT-60강 용접부의 SCC감수성 평가에 관한 연구", 군산대학교, 석사학위논문, (1998)
- [5] G. J. Theus, J. R. Cels, "Slow strain rate technique to stress corrosion cracking studies," *Corrosion*, Vol. 20, pp. 221-226, (1975)
- [6] Na Eui Gyun, Koh Seung Ki and Seok Hyung Oh, "Study on corrosion characteristics and stress corrosion cracking of the weldment for HT-60 steel in synthetic seawater," *KSME International Journal* Vol. 14, No. 2, pp. 152-158, (2000)
- [7] A. A. Sbeinker and J. D. Wood, "Stress corrosion cracking of a high strength steel," *Stress Corrosion Cracking of Metals*, ASTM STP 518, pp. 16-38, (1972)
- [8] 한국비파괴검사학회, 음향방출시험, pp. 11, (1996)
- [9] 장병국, 이상국, "AE에 의한 알루미늄 세라믹스의 Micro-crack생성과 파괴거동의 평가", 한국요업학회지 Vol. 35, No. 6, pp. 551-558, (1998)
- [10] 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)
- [11] 손두익, "음향방출탐상 시험의 기초이론", 안전보건, Vol. 9, No. 1, pp. 73, (1997)
- [12] 정희돈, "음향방출법의 공학적 이용을 위한 기초", 대한기계학회지, Vol. 34, No. 1, pp. 20-32, (1994)