

## 인가전위 하에서 HT-60강 용접부의 SCC특성 평가

나 의 균\*

(2001년 9월 6일 접수, 2002년 2월 18일 심사완료)

### Evaluation on the Characteristics of Stress Corrosion Cracking for the Weldment of HT-60 Steel under Applied Potentials

Eui Gyun, Na

**Key Words:** Stress Corrosion Cracking(응력부식균열), Weldment(용접재), Applied Potential(인가전위), Post Weld Heat Treatment(용접후열처리), Anodic(양극), Cathodic(음극), Polarization(분극), Time to Failure(파단시간), Reduction of Area(단면수축률), Softening(연화), Potential(전위), Ductility(연성), Brittleness(취성)

#### Abstract

The susceptibility of SCC for the weldment and PWHT specimens of HT-60 steel was evaluated using a slow strain rate method under applied potential by means of the potentiostat in synthetic seawater. In case of the parent, anodic polarization voltage was inappropriate in elongating the time to failure(TTF). -0.8V corresponding to cathodic protection range is most effective in improving the SCC resistance against corrosive environment. In case of the weldment, the values of reduction of area(ROA) and TTF at -0.68V corresponding to cathodic polarization value were 45.2% and 715.809sec which were the largest and longest life among other applied potentials. Those were vice versa at -1.1V. In case of the PWHT specimens, TTF and ROA at -0.68V was longest and largest like the weldment. Besides, PWHT is effective in prolonging the time to failure of the welded off-shore structure due to softening effect. Regardless of the weldment and PWHT specimen, as corrosion rate gets higher, TTF becomes shorter and deformation behaviour for the weldment and PWHT specimen at -1.1V was shown to be irregular. Finally, it was found that specimens showed brittle fracture at -1.1V, but more ductile fracture accompanying the micro-cracks at applied potential of -0.68V.

#### 1. 서 론

최근, 공업의 고도화와 더불어 각종 금속구조물들의 사용환경이 다양화, 가혹화 됨에 따라 환

경강도가 중요한 문제로 대두되고 있다. 실제 금속구조물에는 항상 정적응력 또는 반복응력이 작용하게 되고, 그 결과 응력부식균열(stress corrosion cracking: SCC)과 부식피로(corrosion fatigue: CF)에 의한 파손이 일어나는 경우가 많다.<sup>(1,5)</sup> 특정 부식환경 하에서 용접부가 부식환경에 민감한 경우는 용접부에서 용접구조물의 환경 파괴가 많이 일어난다.<sup>(6,7)</sup>

SCC현상은 기계적인 인자, 전기화학적 인자 및

\* 회원, 군산대학교 기계공학부

E-mail : egna@kunsan.ac.kr

TEL : (063)469-4719 FAX : (063)469-4727

야금학적 인자 등에 의해 영향을 받게 되며, 그 중에서도 전기화학적 인자의 영향을 크게 받게 된다. 이와 같은 사실은 특정 환경에서 전기화학적 인자 중에서 부식속도를 제어함으로써 재료의 손상정도를 조절할 수 있다는 것을 의미한다. 부식환경 하에서 사용 중인 용접구조물의 신뢰성을 확보하기 위해서는 이상과 같은 부식기구 (corrosion mechanism)를 용접구조물에 적용하여 부식환경에 의한 손상을 줄일 수 있는 방법을 적극적으로 찾아볼 필요가 있다.

본 연구에서는 파괴제어설계의 개념에 기초를 두어 고장력강 용접부를 대상으로 인위적으로 인장속도와 해수환경에서 부식속도를 조절하여 환경파괴의 손상정도를 평가하고, 부식환경 하에 놓여 있는 용접부의 SCC 감수성을 둔화시키는 방법을 모색하고자 한다. 이와 더불어 주사전자현미경으로 파단면을 분석하여 어떠한 파괴기구에 의해 환경파괴기구를 규명함으로써 부식환경을 고려한 고장력강 용접구조물의 설계시 기초가 되는 자료를 제공하고자 한다.

## 2. 실험

### 2.1 시험재료 및 용접시편

본 실험에 사용된 재료는 두께 16mm의 고장력강(HT-60)이며, 재료의 화학적 조성과 기계적 성질은 Table 1과 같다. 용접은 두꺼운 판재의 자동 용접방법으로서 많이 이용되고 있는 잠호용접(submerged arc welding)을 압연방향과 직각방향으로 실시하였으며, 용접조건은 Table 2와 같다. 용접 후 열처리(post weld heat treatment: PWHT)가 SCC현상에 어떠한 영향을 미치는지를 알아보기 위해 용접판을 대상으로 후 열처리를 실시하였다. 열처리 조건은 열처리 온도 780℃에서 1시간 동안 유지시킨 후 노 내에서 서냉시켰다. 용접된 판재에서 시험편의 채취와 형상은 Fig. 1과 같이 용융선(fusion line)이 시험편의 정 중앙에 위치하도록 하였고, 시험편의 규격과 형상은 시험편 중앙부의 직경이 4mm인 인장형으로 하였다. 시험편의 규격과 형상은 시험편 중앙부의 직경이 4mm인 인장형으로 하였다. 이와 같은 형상을 택한 이유는 용접부의 강도가 모재보다 강하기 때문에 평활한 형태로 할 경우 모재 부분에서 먼저 손상·파괴되어 용접부의 SCC현상을 평가할 수

**Table 1** Chemical composition and mechanical properties

(a) Chemical compositions (wt.%)

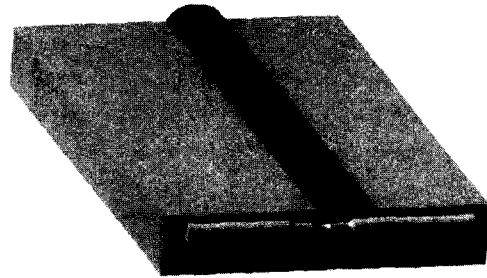
C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V
0.16	0.55	1.35	0.03	0.04	0.6	0.4	0.3	0.15

(b) Mechanical properties

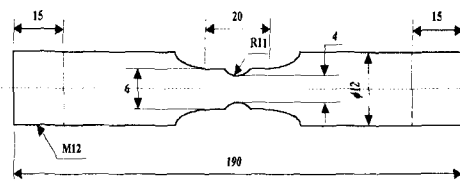
Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)
450.0	588.6	20.0

**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

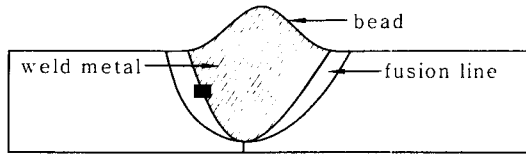


(a) Extraction of specimen from the welded plate

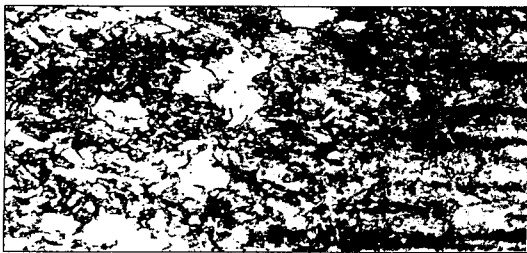


(b) Dimensions

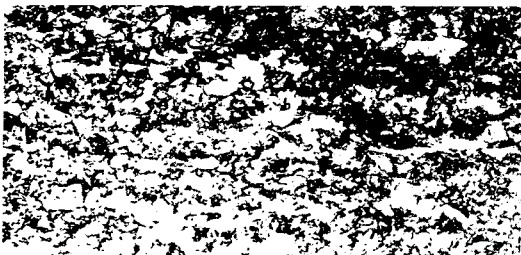
**Fig. 1** Extraction of specimen from the welded plate and dimension



(a) Schematic section of welded region



(b) Weldment



(c) PWHT specimen

Fig. 2 Micro-structure of welded region near fusion line

없기 때문이다. 본 시험편의 응력집중계수는 FEM해석결과 3.06이었으며, 실험결과 이 정도의 집중계수에서 SCC현상을 관찰할 수 있었다.<sup>(8)</sup>

Fig. 2는 용접재 및 후 열처리재의 용접부 조직 사진을 보인 것으로서 대상부위는 Fig. 2(a)에서 ■로 표시한 용융선(fusion line)부근으로 하였다.

용접부의 조직은 침상조직의 마르텐사이트를 관찰할 수 있으며, 결정립이 조대화되어 있고 퍼얼라이트와 페라이트도 혼재하였다. 후 열처리재의 조직은 페라이트의 양이 증가하였으며, 이와 같은 조직의 변화는 용접부의 기계적 성질의 변화를 초래하게 된다.

2.2. 부식제어 하에서 SCC실험

부식제어 하에서 SCC실험은 자체적으로 제작

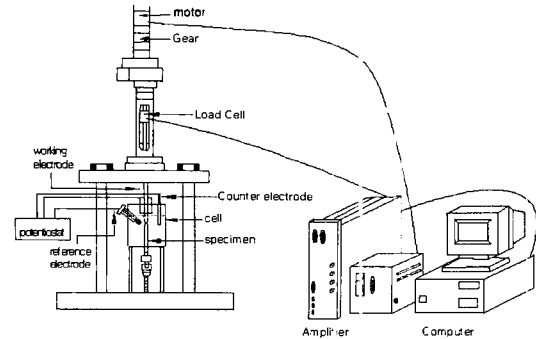


Fig. 3 Schematic apparatus of SSRT test under corrosion control

Table 3 Chemical compositions of synthetic seawater (in 10 liter water)

Compositions	Quantity(g)	Compositions	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

조립한 저 변형률 시험기를 이용하여 실시하였으며, Fig. 3에 개략도를 보였다. 시험편에 가해지는 변형률 속도는 조<sup>(9)</sup>의 실험에서 SCC평가에 가장 적합한 변형률속도를 참고하여 본 실험에서 택한 변형률 속도는 2.6× 10<sup>-7</sup>s<sup>-1</sup>과 2.6× 10<sup>-8</sup>s<sup>-1</sup>로 하였다.

부식용액은 Table 3에 보인 바와 같은 성분의 인공해수를 이용하였으며, 부식제어는 시험편이 부식용액에 잠긴 상태에서 약 10분 정도 유지하고 난 다음, 전위차계(Applied Research Model 273 계)에 의해 소정의 전위 값을 시험편에 가하였다. 대극(counter electrode)으로서는 탄소봉을 이용하였고, 기준전극은 포화감홍전극(saturated calomel electrode: SCE)으로 하였으며, 이 때 시험편은 작동전극(working electrode)이 된다. 가해진 전위는 전보의<sup>(8)</sup> 부식특성 실험에서 얻어진 결과를 참고하여 결정하였다.우선 모재의 경우 양극분극곡선(anodic polarization curve)의 범위에 해당하는 -0.5V와 음극분극의 영역에 해당하는 -0.7V, -0.8V, -1.1V를 가하였으며, 용접지와 후 열처리재

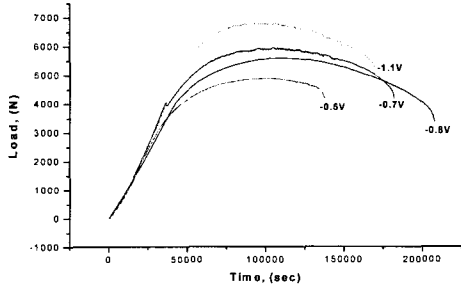


Fig. 4 Relationship between applied voltage and time to failure for the parent at  $2.6 \times 10^{-7} \text{s}^{-1}$

의 경우에는 음극분극영역의 전위 값인 -0.68V와 -0.8V, -1.0V, -1.1V를 각각 가하였다. 실험이 진행되는 동안 부식용액의 온도는  $25 \pm 1^\circ\text{C}$ 의 범위를 유지하도록 하였고, pH는 7.5로 일정하게 하였다.

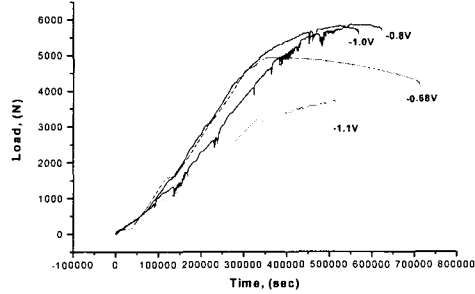
### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 모재의 SCC특성

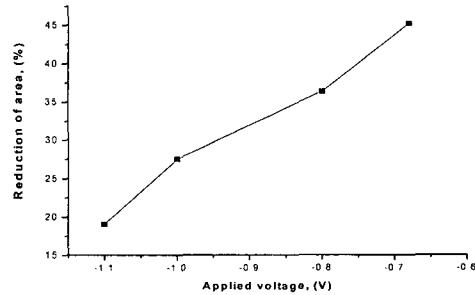
부식환경에서 SCC의 특성을 평가하는 인자로는 파단시간, 단면수축률, 최대하중 및 흡수에너지 등을 들 수 있다. 이 중에서 본 연구에서는 파단시간과 단면수축률의 관점에서 SCC특성을 논하고자 한다.

Fig. 4는 변형률 속도가  $2.6 \times 10^{-7} \text{s}^{-1}$ 에서 모재의 경우, 일정 인가전위 하에서 파단시간(time to failure)과 하중과의 관계를 보인 것이다. 양극분극전위에 해당하는 -0.5V에서는 파단시간이 137,843초, 음극분극범위인 -0.7V에서는 182,602초, -0.8V에서는 207,720초이며, -1.1V에서는 160,320초로서 -0.8V에서 가장 긴 파단시간을 보였다. 양극분극전위인 -0.5V에서 파단시간이 현저하게 줄어든 것은 시험편이 작용전극으로 기능하면서 시험편의 표면 전반에 걸쳐서 부식반응인 용해(dissolution)반응이 활발하게 진행되고, 여기에 저 변형속도로 인장하중이 계속적으로 가해지면서 SCC에 의한 손상이 발생하기 때문이다.

이와 같은 결과로부터 HT-60강재의 경우, 첫째 부식제어에 의해 SCC를 받는 부재의 파단수명을 증가시키기 위해서는 양극분극전위에 해당하는 전위 값을 피해야 한다는 것이고, 둘째 -0.8V에서 최적의 방식효과를 보였다는 점이다. 기존의 연구에 의하면<sup>(10)</sup> 철강재료의 경우 SCC현상을 억제



(a) Load versus time



(b) Reduction of area versus applied voltage

Fig. 5 Relationship between load and time, including dependence on the applied voltage of reduction of area for the weldment

하는데 양극분극전위를 이용하는 법이 있다고 보고 되고 있다. 그러나 양극분극전위에 의해 방식효과를 내기 위해서는 스테인리스 강 정도에 해당하는 만큼의 Cr과 Mo, Ni의 양이 존재하여야 가능하다고 생각된다. 왜냐하면 Cr과 Mo, Ni의 양이 많아질수록 한계전류밀도가 작아지기 때문에 부동태 피막(passive film)이 시험편의 표면에 용이하게 형성되어 부식반응을 억제하는 효과가 있기 때문이다. 그러나 본 실험에 사용된 HT-60강재는 Cr, Mo의 양이 부동태 피막을 형성할 정도로 충분하지 않기 때문에 양극분극법에 의한 방식은 불가능하다고 할 수 있으며, 부식제어에 의해 SCC현상을 억제하기 위해서는 음극분극범위에 해당하는 -0.8V가 적절한 전위 값이라고 할 수 있다.

#### 3.2 부식전위에 따른 용접재 및 후 열처리재의 SCC특성

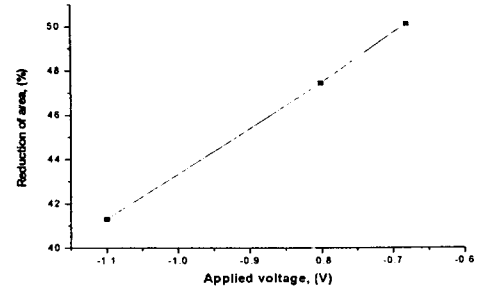
용접재 및 후 열처리재에 가해진 전위는 음극

분극곡선영역에 해당하는  $-0.68\text{V}$ ,  $-0.8\text{V}$ ,  $-1.0\text{V}$  및  $-1.1\text{V}$ 를 택하였으며, 변형률 속도를  $2.6 \times 10^{-8}\text{s}^{-1}$ 로 하였다. 모재와 다른 변형률 속도를 택한 것은 용접재의 음극분극범위에 해당하는 전위 값을 걸어주었을 때 부식제어효과를 보다 명확하게 파악하기 위해서이다. Fig. 5는 용접재를 대상으로 일정 전위에서 파단시간 및 하중과 더불어 인가 전위와 단면수축률과의 관계를 보인 것이다.

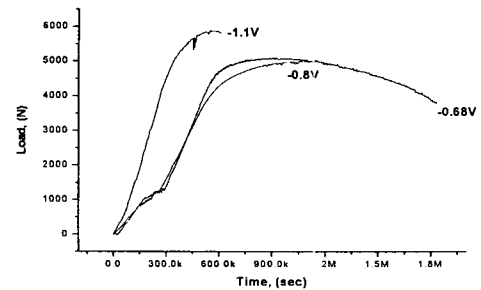
가해진 전위 값에 따른 파단시간의 의존성을 살펴보면, 전위 값이  $-0.68\text{V}$ 에서 파단수명은 714,180초,  $-0.8\text{V}$ 에서는 623,880초이고,  $-1.0\text{V}$ 에서는 569,675초이며,  $-1.1\text{V}$ 에서는 534,000초로서  $-1.1\text{V}$ 에서 가장 짧은 파단시간을 보였다.  $-1.1\text{V}$ 에서 가장 짧은 파단시간을 보이는 것은 과 방식(over-cathodic charging)에<sup>(11)</sup> 의해 시험편 내부로 수소가 침투되어 취화되었기 때문으로 생각된다.

전위 값에 따라 파단시간이 다르다는 것은 음극분극방식에 의해 SCC현상을 조절할 수 있다는 점을 시사한다. 즉 본 실험에 사용된 해수환경에서 HT-60강 용접부의 SCC저항성을 증가시키기 위한 전위 값으로서  $-0.68\text{V}$ 가 적절한 전위 값이라고 할 수 있다. 또한, 동일 전위 값에서 용접재의 SCC거동이 모재와 다른 결과를 보인 것은 용접에 따른 미세조직의 변화가 SCC현상에 영향을 미친 것으로 생각된다. 한편 단면수축률의 관점에서 보면,  $-0.68\text{V}$ 에서 단면수축률은 45.2%,  $-0.8\text{V}$ 에서는 36.3%,  $-1.0\text{V}$ 에서는 27.5%, 그리고  $-1.1\text{V}$ 에서 19.0%로서 가해진 전위 값이  $-1.1\text{V}$ 인 경우 변형능력이 가장 많이 저하되고 있음을 알 수 있었으며, 이와 같이 가해진 전위 값이 작아짐에 따라 단면수축률이 작아지는 경향을 보인 것은 기존의 연구결과와 유사하였다.<sup>(12)</sup>

한편, 모재와는 다르게 용접재는 가해진 전위 값이 증가함에 따라 단면수축률이 커지는 결과를 보였는데, 이는 앞서서도 언급하였듯이 모재의 경우에는 가장 높은 전위 값이 양극분극전위에 해당하는데 반해, 용접재의 경우에는 음극분극영역에 해당하는 전위 값만을 가해주었기 때문이다. Fig. 6은 일정전위에서 후 열처리재의 파단시간 및 하중과 더불어 인가전위와 단면수축률과의 관계를 보인 것이다. 파단시간의 관점에서 보면, 전위 값이  $-0.68\text{V}$ 에서는 파단수명이 1,838,420초이며,  $-0.8\text{V}$ 에서는 1,100,000초, 그리고  $-1.1\text{V}$ 에서는



(a) Load versus time



(b) Reduction of area versus applied voltage

Fig. 6 Relationship between load and time, including dependence on the applied voltage of reduction of area for the PWHT specimens

609,300초로서 앞선 용접재와 마찬가지로  $-0.68\text{V}$ 에서 가장 긴 파단수명을 보였다.  $-1.1\text{V}$ 에서 파단수명이 가장 짧은 수명을 보이고 있는 것은 용접재와 마찬가지로 수소취화에 기인하는 것으로 생각된다. 즉, 수소환원반응에 의해 발생하는 수소가스는 시험편의 표면에 흡수되어 변형에너지를 저하시키게 되고, 그 결과 파단수명을 단축시키는 결과를 초래하는 것으로 생각된다. 수소가스의 발생여부는 저 변형률실험과정에서 시험편의 표면에 형성되는 기포(bubble)의 존재로 알 수 있었으며,<sup>(13)</sup> 기포의 양은 가해진 전위 값에 따라 달랐으나  $-1.1\text{V}$ 에서 가장 많이 발생되고 있음을 육안으로 확인할 수 있었다.

단면수축률의 관점에서 보면,  $-0.68\text{V}$ 에서 수축률은 50.1%이고,  $-0.8\text{V}$ 에서는 47.4%. 그리고  $-1.1\text{V}$ 에서는 41.3%로서 앞선 용접재에 비하여 전반적으로 가해진 일정 전위 값에서 단면수축률이 증가하였다. 이는 후 열처리에 의해 용접부의 기계적 성질이 변

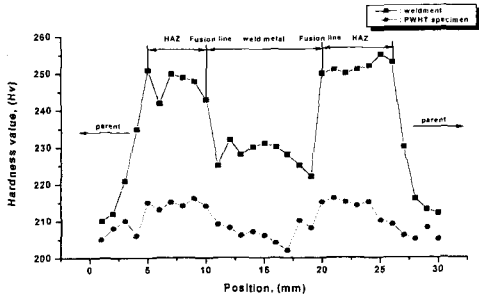
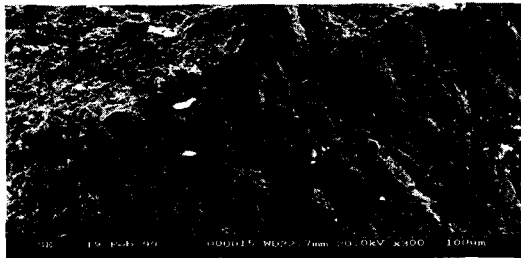
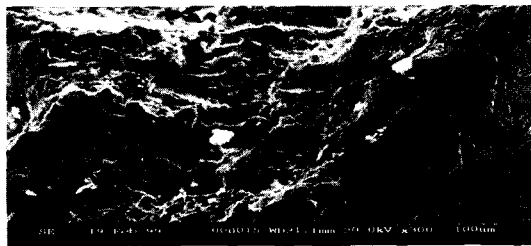


Fig. 7 Variation of hardness value for the weldment and PWHT specimen



(a) -0.68V



(b) -1.1V

Fig. 8 Formation of cracks on the fractured part near surface for the weldment under -0.68V and -1.1V after failure

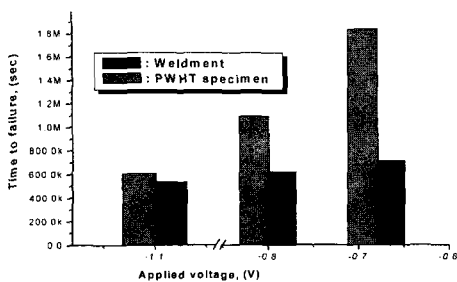


Fig. 9 Relationship between applied voltage and time to failure for the weldment and PWHT specimen

화되었음을 의미하며, 그 결과 음극분극영역에서 용접재와는 다른 SCC현상을 보였다. 후 열처리로 인한 기계적 성질의 변화를 알아보기 위해 미시 비커스 경도계(하중: 100g)를 이용하여 경도를 측정하였으며, 그 결과를 Fig. 7에 보였다.

용접재의 경우 subcritical-HAZ에서 용융선(fusion line)으로 이동함에 따라 경도치는 서서히 증가하였으며 용융선에서 HAZ로 위치가 이동함에 따라 경도치는 최대치를 보이다가 용착금속(weld metal)에서 약간 경도치가 감소하는 경향을 보이고 있다. 이에 대해 후 열처리재의 경우에는 전반적으로 용접재에 비해 감소하여 후 열처리로 인해 연화(softening)되었음을 확인할 수 있었으며, 후 열처리재가 용접재에 비해 보다 긴 파단수명을 보인 것은 열처리에 따른 연화현상에 기인하는 것으로 생각된다.

한편, 용접재 및 후 열처리재의 경우 -1.1V에서 상당히 불규칙한 변형거동을 보이고 있는데, 이는 과 방식 하에서 시험편 표면에 형성되는 공식(pit)들이 연속적인 하중에 의해 불규칙하게 합체되면서 균열이 형성·진전되기 때문으로 생각된다. 이를 보다 자세히 알아보기 위해 -0.68V와 -1.1V를 가해준 용접재를 대상으로 Fig. 8에서처럼 파단 후 시험편의 파단면 근처를 관찰하여 보았다. -0.68V인 경우에는 시험편 표면에 균열의 분포수가 비교적 적게 형성된 반면, -1.1V를 가해준 시험편의 경우에는 보다 많은 균열이 불규칙하게 형성되어 있음을 볼 수 있다.

이와 같은 양상을 보이는 것은 -1.1V를 가해준 경우 균열의 시초인 공식(pit)이 시험편 표면에 보다 많이 형성되고, 계속된 하중에 의해 불균일하게 공식들이 합체되어 균열이 형성되면서 파단되어 가기 때문에 변형거동이 불규칙하게 나타나는 것으로 생각된다.

Fig. 9는 일정 전위 값에서 용접재와 후 열처리재의 파단시간과 단면수축률과의 관계를 보인 것이다.

전위 값에 관계없이 후 열처리재가 용접재에 비해 파단수명이 길어졌으며, 특히 -0.68V에서 그 정도가 현저하게 나타났다. 일반적으로 용접 후 열처리는 구조용 강 용접구조물의 파괴인성을 증가시키기 위해 실시하지만,<sup>(13)</sup> 본 연구에서 확인할 수 있었던 것은 SCC저항성을 향상시키는 경우에도 후 열처리가 유효하다는 점이다.

3.3 부식특성 및 파괴기구

SCC현상에 환경강도에 영향을 주는 요소 중에서 부식반응은 부식용액과 금속재료 사이의 전기 화학적 반응을 일컫는 것으로서 피할 수 없다. 이와 같은 관점에서 볼 때, 부식제어 하에서 파 단수명과 부식특성 치들과의 관계를 고찰하는 것 은 매우 의미 있다고 생각되어 이하에서는 이와 관련된 내용을 다루어 보고자 한다.

Fig. 10은 용접재 및 후 열처리재의 부식속도와 파 단시간과의 관계를 보인 것이다. 부식속도는 전보에서 얻어진 결과를 이용하였다.<sup>(4)</sup> 우선 용접재 의 경우, 부식속도가 29.13mpy(milli irch per year)이 고, 파단수명이 714,180초이며, 후 열처리재의 부식 속도는 18.64mpy, 파단수명은 1,838,420초이다. 용접 재의 경우 부식속도가 높아짐에 따라 파단시간이 짧아졌고, 부식속도가 낮은 후 열처리의 파단수명은 현저히 증가하는 결과를 보였다.

Fig. 11은 -0.68V와 -1.1V의 부식전위를 가한 용접재 및 후 열처리재가 어떠한 파괴기구에 의 해 손상되었는지를 알아보기 위해 파단면 부위를 주사전자 현미경에 의해 촬영한 결과를 보였다.

-0.68V를 가해준 용접재의 경우, 파면이 상당히 불규칙한 양상을 보였고, 시험편 표면에 근접한 부분에 많은 수의 미세한 균열들을 수반하면서 비교적 연성적으로 파단되었다.

후 열처리재는 용접재에 비해 보다 많은 변형 을 수반하면서 연성적으로 파단되었다. 이에 반 해 -1.1V를 걸어준 시험편의 경우에는 시험편의 종류에 무관하게 파단면의 중앙부위는 부분적으 로 연성적이지만 시험편의 표면에 가까운 부분은 취성적인 파면의 양상이 지배적이었다.

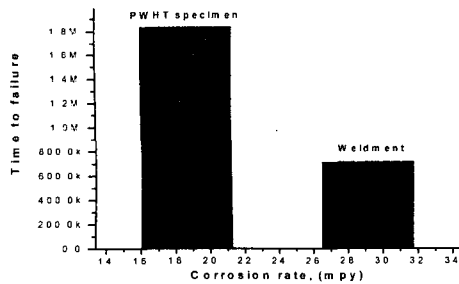
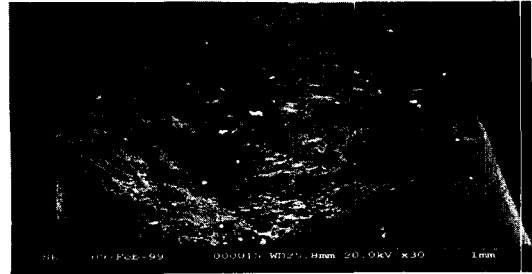
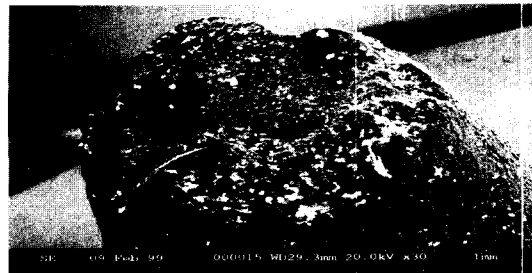


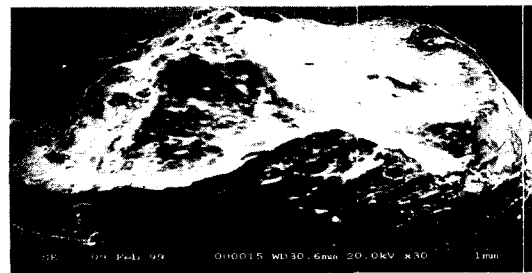
Fig. 10 Relationship between corrosion rate and time to failure for the weldment and PWHT specimen



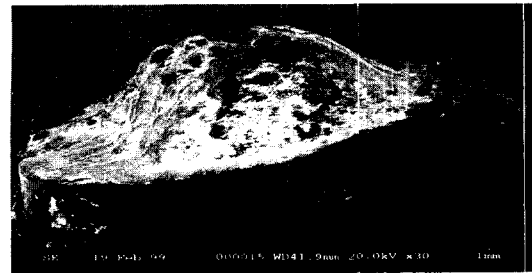
(a) Weldment (-0.68V)



(b) PWHT specimen (-0.68V)



(c) Weldment (-1.1V)



(d) PWHT specimen (-1.1V)

Fig. 11 Fractured parts for the weldment and PWHT specimens at the applied voltage of -0.68V and -1.1V at 2.6× 10<sup>-8</sup>s<sup>-1</sup>

#### 4. 결 론

본 연구에서는 HT-60강재의 용접재 및 후 열처리재를 대상으로 부식제어 하에서 저 변형률실험에 의해 SCC실험을 실시하고 난 다음, 각 시험편에 대해 SCC특성을 평가하여 보았다. 얻어진 결과를 요약하면 아래와 같다.

(1) 모재의 경우, 양극분극전위에 해당하는 전위 값은 부식제어에 의해 파단수명을 길게 하는 데는 적절하지 못하며, 음극분극영역인 -0.8V에서 SCC현상을 효과적으로 억제할 수 있었다.

(2) 용접재의 경우, 음극분극영역인 -0.68V에서 단면수축률과 파단수명이 각각 45.2%와 715,809 초로서 가장 크고 길었으며, -1.1V에서 19.0%와 580,200초로서 가장 작고 짧았다.

(3) 후 열처리재의 전위 값의 의존성은 -0.68V에서 단면 수축률은 50.1%이고 파단수명은 1,838,420초이었고, -1.1V에서는 41.3%와 609,300초로서 가장 짧은 수명을 보였다. 이로부터 용접재 및 후 열처리재의 SCC의 수명연장을 위해 적절한 전위 값은 음극분극전위영역인 -0.68V임을 확인할 수 있었다. 또한, 정해진 전위 값에서 후 열처리재의 파단수명은 용접재에 비해 전반적으로 길었으며, 후 열처리하는 용접부의 SCC저항성을 증가시키는데 유효하였다.

(4) 가해진 전위 값이 -0.68V에서 용접재 및 후 열처리재의 파면은 연성적인 파면양상을 보였으나 -1.1V를 가해진 시험편의 파면에는 시험편의 종류에 관계없이 부분적으로 연성적인 파면과 취성적인 파단면이 혼재하였다.

#### 참고문헌

- (1) 이재익, 1988, "plant설비의 손상경향에 대하여," 한국부식학회지, 제 17권, 제 3호, pp. 172~181.
- (2) 大西, 1983, 金屬の腐蝕損傷と防蝕技術, p. 178.
- (3) Fimegan, J. E. and Hartt, W. H., 1976, "Stress Intensity Factor Dependence of Stress Corrosion Crack Growth Rate in 7079-T651 Aluminum," ASTM STP 610, pp. 44~59.
- (4) Gough, H. J., 1932, Corrosion Fatigue of Metals, J. Inst, Metals, p. 49.
- (5) Pao, P. S. and Wei, P. R., 1979, "In Environmental-sensitive Fracture of Engineering Materials," TMS-AIME, Warrendale, pp. 565~580.
- (6) Gooch, T. G., 1974, Welding J. 53, p. 287.
- (7) Knight, J. W., 1977, "Welding Research International," Vol. 7, No. 5, pp. 385~411.
- (8) Na, Eui-Gyun, Koh, Seung-Ki Koh and Oh, Seok-Hyung, 2000, "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.
- (9) 조정운, 1990, "강 용접부의 응력부식크랙 감수성평가에 관한 연구," 전북대학교 대학원 석사학위논문.
- (10) 손운택, 1980, 금속부식학, p. 20.
- (11) Hinton, B. R. and Procter, R. P., 1983, "The Effect of Strain Rate and Cathodic Potential on the Tensile Ductility of X-65 Pipelines Steel," *Corrosion Science*, Vol. 23, No. 2, pp. 101~123.
- (12) Mark Wilhelm, S. and Kane, R. D., 1984, "Effect of Heat Treatment and Microstructure on the Corrosion and SCC of Duplex Stainless Steels in H<sub>2</sub>S/Cl<sup>-</sup> Environments," *The Journal of Science and Engineering*, Vol. 40, No. 8, pp. 431~439.
- (13) 이동욱, 1999, "음극방식 하에서 HT-60강 용접부의 응력부식균열 감수성평가에 관한 연구," 군산대학교 석사학위논문.
- (14) 정세희, 박창언, 1986, "강 용접열영향부의 소성변형거동에 관한 연구," 대한기계학회 춘계 학술대회초록집, pp. 29~34.