

TMCP 高張力鋼 銲接部の 腐蝕疲勞 特性에 관한 研究

이 택 순* · 이 휘 원** · 김 영 철***
(96년 2월 6일 접수)

A Study on Corrosion Fatigue Properties of Welded Joints for TMCP High Strength Steels

Taik-Soon Lee* · Hwi-Weon Lee** · Young Chul Kim***

Key Words : Accelerated Cooled Type TMCP Steel(가속냉각형TMCP강), One-Side One-Run Submerged Arc Welding(편면자동용접), Corrosion Fatigue(부식피로), Heat affected zone(열영향부), Softening(연화).

Abstract

The corrosion fatigue test were carried out to evaluate the fatigue characteristics of accelerated cooled (ACC) TMCP high tensile strength steels and weld joint with high heat input by one side one run submerged arc welding.

In this paper, the fatigue crack growth behaviors were investigated with the center crack tension specimen of base metal and heat affected zone in substitute sea water and air, respectively

Main results obtained are summarized as follows:

1. The fatigue crack growth rates in sea water faster than those in air environment for the different heat input values, crack growth rate of base metal is very fast and effect of heat input is not remarkable.
2. In HAZ (82kJ/cm, 116kJ/cm), the crack branching phenomena were observed in both air and sea water environment,
3. In SEM observation, the corrosion effect on base metal was larger than that on HAZ in corrosion environment

* 정회원, 영남대학교 기계공학과

** 영남대학교 기계공학과 대학원

*** 영남대학교 기계공학과 대학원

1. 서론

최근 선박과 해양구조물을 비롯한 각종 강구조물 건조시 구조경량화의 요구에 따라 고장력강의 사용이 급속히 증가하고 있다. 특히 선박 및 해양구조물을 구성하는 부재들은 외력 및 기타 하중과 함께 해수분위기에 의한 부식피로현상이 해양구조부재의 손상과 파괴에 중요한 인자가 되고 있다.^{1,2)} 또한 대입열용접은 대형구조물의 제작에는 생산성 향상과 공기단축의 측면에서 매우 필요한 시공방법이나 대입열용접으로 제작된 용접부의 인성은 약화되므로 구조물의 안정성 측면에서 용접입열은 제한받고 있는 실정이다.

따라서, 용접구조물 제작자들은 공기 단축을 위하여 용접입열에 제한 받지 않는 강재의 출현을 절실히 필요로 하게 되었다. 이와 같은 문제를 해결하기 위하여 최근 제강업체의 노력으로 Thermal-Mechanical Control Process(TMCP)가 개발되어 1980년대 초반부터 이에 의한 강재가 생산되어 극저온에서의 용접구조물의 안전하고 신뢰성 있는 조업이 가능하게 되었을 뿐만 아니라 생산성 향상을 위한 대입열용접의 적용도 확대되고 있다. 한편 TMCP란 제어압연(controlled rolling process)에 가속냉각공정(accelerated cooling process)을 연속적으로 실시하여 강재의 제반성질 특히 용접성을 향상시킨 압연방법이다. 그리하여 극한지역용 line pipe제작에 처음 TMCP가 적용된 이래, 조선, 육상 및 해양구조물등의 중공업 분야에서도 점차 TMCP강의 사용량이 크게 증가되고 있다.

특히 현재 가장 각광을 받고 있는 가속냉각형 TMCP 강재는 대입열 용접후에도 매우 우수한 기계적 성질을 유지하고 있으며, 이 강재에 편면자동용접(one side one run submerged arc welding)등의 대입열용접이 가능하게 되었다.

그러나, 가속냉각형 TMCP 강재의 대입열 용접부 특히 열영향부의 강도가 모재의 강도보다 저하되는 연화현상이 발생하여 용접부의 구조강도를 저하시키게 되어 구조물의 안정성을 위협하게 되므로 이에 대한 정량적인 평가는 TMCP 강재의 적용성 측면에서 매우 절실히 요구되고 있다.³⁾

용접후에도 우수한 기계적성질을 가지고 있는 TMCP 강재는 조선업계에서 크게 각광을 받고 있

으며, 중공업분야 및 천연가스 수송용 배관재(API 5L-X65)로 그 적용범위가 확대되고 있어서 관심의 대상이 되고 있다. 그러나, 용접후 열영향부의 강도저하는 공학적인 측면에서 기계 구조물의 파손으로 이어지고 있으므로 이에 대한 정량적 평가가 절실히 요구되고 있다. 공기중 피로의 경우, 압축잔류응력의 영향은 균열 완전개구 응력확대계수(Kop)의 상승으로서 표현되기 때문에, 균열전파 속도는 균열개폐구거동에 주목하여 정리를 잘한 것이 보고되어져 있지만, 부식환경중에는 균열 전파 및 개폐구에 영향을 주는 인자가 많이 있기 때문에 그 거동은 명확하지 않다.

본 연구에서는 인공해수 중에서의 50kg급 열가공 제어 TMCP강 용접재의 열영향부와 모재의 부식피로균열 전파거동을 대기중에서와 비교 검토하고, 미세조직의 변화를 대기중과 비교하여 균열전파의 가속과 감속의 기구를 명확히 하는데 있다.

2. 소재 및 시험편

본 실험에 사용된 재료는 포항종합제철(주)에서 생산한, 선박 및 해양구조물 제작에 많이 사용되는 인장강도 50 kg/mm^2 급 가속 냉각형 TMCP강재이다. Fig. 1에서와 같이 시험편은 ASTM E-647-88a⁴⁾에 따라 제작한 CCT(Center Crack Tension)시험편에서 노치선단의 형상은 피로균열 발생특성에 미치는 특성을 최소화하기 위하여 표면을 경면 가공한 후 인공노치는 E.D.M방전가공으로 $2a_0=6.3\text{mm}$ 로 가공하였다.

용접은 Fig. 2에서와 같이 편면자동용접(one side one run SAW)시공법을 사용하였으며, 용접재료는 S-705EF×H 14급 wire($\phi 4.8$)와 bonded type flux를 사용하였다. $300 \times 300 \times 20(\text{mm})$ 으로 절단된 소판에서는 고입열(116kJ/cm)을 가하였으며, $300 \times 300 \times 16(\text{mm})$ 소판에서는 저입열(82kJ/cm)으로 Fig. 2에서와 같이 압연방향과 직각으로 50° 의 V홈을 가공한후 1 polo one pass 용접을 가했다. 시험편 채취는 먼저, 폭을 36mm 길이 방향으로 절단한 뒤 방전가공으로 두께 3mm의 직사각형 모양으로 만든뒤 글로블 각이 있으므로 용착금속 주위를 에칭하여 열영향부를 찾은뒤 용접선에서 3mm가 되는 곳에 인공노치를 가하였다. 강재의 화학적 성분

과 기계적 성질, 용접조건은 각각 Table 1 과 Table 2, Table 3 과 같다. 피로크랙 발생의 관측을 용이하게 하기 위해 시험편 표면을 샌드페이퍼 #1500과 알루미늄 분말로 연마하였다.

Table 1 Chemical composition of TMCP HT50 (wt%)

C	Si	Mn	P	S	Sol.Al	Ti	Ceq
0.141	0.329	1.214	0.022	0.004	0.027	0.010	0.357

Ceq=C+Si/24+Mn/6+Ni/40+Cr/5+Mo/4+V/14(%)

Table 2 Mechanical properties

Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Hv (30kgf)
363	560	24	145.4

Table 3 Welding condition

Thickness	Current(A)	Voltage(v)	Speed(cm/m)	Heat Input(kJ/cm)
20	970	36	18	116
16	920	34	23	82

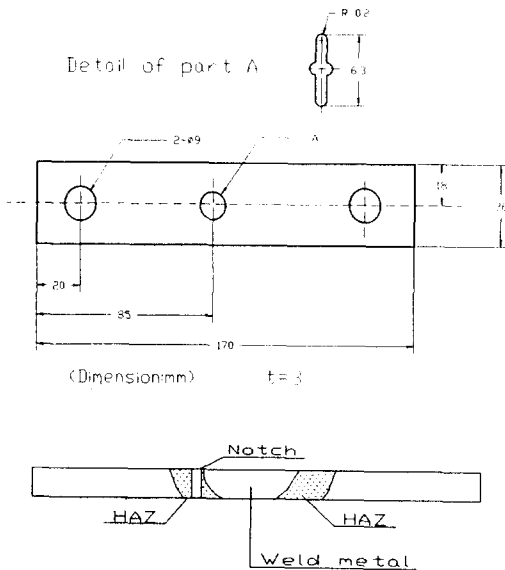
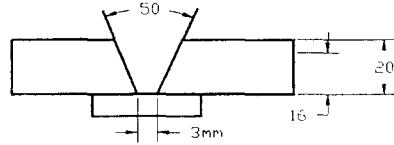


Fig. 1 Center notched specimen(CCT) and notch position for fatigue test

one-side one-run SAW



Consumable : S705EFXH14-Btype flux metal powder

Thickness : 16,20mm

Fig. 2 Schematic diagram for one side one run SAW process

3. 실험 방법

피로시험의 부식환경은 ASTM D1141-75³⁾ 에서 정한 Table 4의 조성으로 인공해수를 만들어 사용하였으며, 수용액의 온도는 실내온도를 유지하고, pH를 6-8로 유지하기 위해 수질측정기(WQC-1A)로써 일정시간마다 측정하였다.

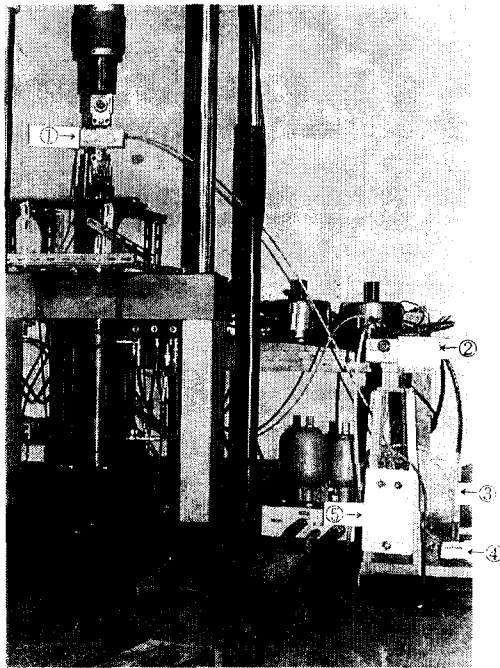
Table 4 Chemical composition of substitute sea water

Compound	Concentration, g/liter
NaCl	24.53
MgCl ₂	5.20
Na ₂ SO ₄	4.09
CaCl ₂	1.16
KCl	0.695
NaHCO ₃	0.201
KBr	0.101
H ₃ BO ₃	0.027
SrCl ₂	0.025
NaF	0.003

피로시험편에 각 농도의 용액을 직접 주입시키기 위해 아크릴로 개폐식 해수챔버(chamber)를 제작하였으며, 시험편표면에는 시험중 전기 화학적 부식의 영향을 배제하기 위하여 투명한 실리콘 본드로 부식용액의 누수를 방지하였다. Pump와 유량조절밸

브를 이용하여 25ml/min 유속으로 부식용액을 공급하고 고무호스를 따라 저장탱크에 배수하여 순환하도록 하였으며, Fig. 3에 시험장치를 나타내었다.

그리고, 균열길이는 면봉을 이용하여 부식생성물을 제거한 뒤 균열진전방향에 따라 25배율의 이동식 현미경(travelling microscope)으로 측정하였다. 파단면 관찰시 파면위에 부식생성물들이 쌓여 있기 때문에 아세톤에 30-40초정도 담그고, 초음파세척을 하였으며, 재료의 손상을 최소로 줄이면서 부식생성물을 제거한 후 주사전자현미경(SEM)으로 관찰하였다.



① corrosion chamber ② pump
③ holding vessel ④ air bank
⑤ control panel

Fig. 3 Corrosion fatigue test equipment

3.1 경도시험

경도시험은 마이크로 비커스(Micro Vickers) 경도계(Mitsuzawa Seiki Mode : No. DVK-3S)를 사용하였다. 하중은 30kg, 시험시간은 25초로 하였으며, 경도값은 5번을 평균한 값으로 결정하였다.

Fig. 4에서 비커스 경도치는 TMCP강의 일반적인 현상으로 대입열용접시 문제로 대두되는 연화현상은 본 실험재에서는 나타나지 않았으며, 열영향부에서

모재와 유사한 경도값을 보였다. 열영향부와 모재는 Hv-142.3~157.4범위의 경도값을 가졌다. 고입열재의 열영향부가 저입열재보다 경도값이 낮게 나타나는 것은 용접열사이클이 저입열재보다 높아 열영향부의 연화현상이 더 크게 나타난 것으로 보여진다. Fig. 4에서 저입열재의 열영향부는 5~7cm가량으로 측정되었고, 고입열재에서는 열영향부는 7~9cm가량이 측정되어 최대 9cm로하여 그림에 나타내었다.

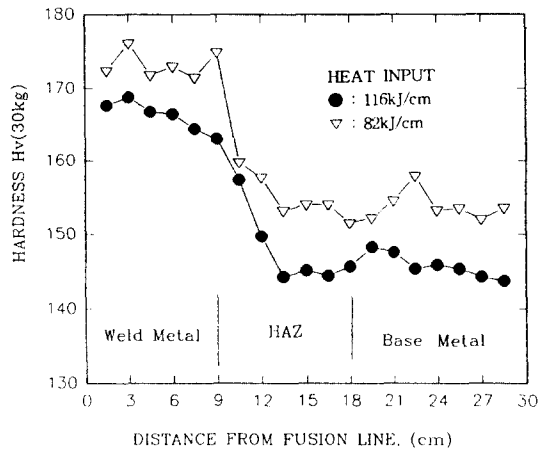


Fig. 4 Vickers hardness of ACC TMCP steel welded joint

열영향부 인성에 미치는 석출물의 영향은 석출물의 크기, 석출물 사이의 간격 등에 의해 좌우되며, Mo, V, Nb, Ti 등 합금원소의 첨가에 의한 파괴인성의 감소⁶⁾ M-A조직(martensite-austenite constituent)의 생성촉진에 의한 취화, PWHT에 의한 취화등이 보고되어 있다. 모재에 비해 경도값의 차이를 보이지 않는 이유로는, TMCP의 대입열 용접부 인성개선과 열영향부 연화방지를 위해서 적정 C와 탄소당량(Carbon equivalent: Ceq)수준유지 및 필요시 미량 원소의 영향이 효과적으로 작용하였으며, 열영향부가 용접열 사이클에 의해 보다 안정된 조직으로 변태되었기 때문인 듯하다.⁷⁾

3.2 피로균열진전시험

부식피로시험에 사용된 시험기는 Instron사 제

품의 유압 서어보 피로 시험기(hydraulic servo fatigue test machine : Model No.1332)로서 최대 용량은 20KN이다. 응력레벨은 $\Delta\sigma=115.54\text{MPa}$ 하에서 실험하였다. 주파수는 대기중과 인공해수에서 3Hz를 유지하고, 정현파형으로 응력비 $R=0.1$ 로 일정하게 하였으며, 하중제어방식을 사용하였다.^{8,9)}

본 연구의 목적상 균열진전은 일정시간이 경과한 후 1mm진전을 기준으로 하여 시험기를 정지시킨 후 이동식 현미경으로 측정하였으며, 시험편 양측면을 측정한 후 평균을 내어서 측정하였다. 시험편 중앙을 기점으로 초기 인공노치를 포함한 크랙 길이의 증가분을 a 라 정의하고, 모재와 열영향부 각 시험편에 대해서 균열길이 (a)와 반복하중 회수(N)의 데이터로 $a-N$ 선도 및 $da/dN-\Delta K$ 선도를 얻어서 각 조건에 대해 3번의 실험을 통하여 그 재료에 대한 발생시기, 피로균열진전을 알아보았다. 피로균열진전속도(da/dN)는 식(1)과 같이 시컨트법(secant method)¹⁾으로 인접하는 2개의 균열길이의 점을 직선으로 연결하고 이의 기울기로 정의하였다.

$$\frac{da}{dN} = \frac{a_{i+1} - a_i}{N_{i+1} - N_i} \quad (1)$$

이 경우 da/dN 은 ($a_{i+1} - a_i$)에 대한 평균값으로 ΔK 는 평균균열길이 ($a_{i+1} + a_i$)/2에 대한 평균값이다. 그리고, 응력확대계수(ΔK)는 H. Tada가 제안한 식(2)을 이용하여 계산하였다.

$$\Delta K = \Delta\sigma\sqrt{\pi a}F\left(\frac{a}{W}\right) \quad (2)$$

4. 실험결과 및 고찰

4.1 균열길이(a)와 반복하중회수(N)과의 관계

TMCP 고장력강 모재와 열영향부의 시험편에 대해 대기중과 인공해수에서 피로와 부식피로시험을 행한 후 얻은 데이터 즉, 각 시험편 전면 좌우의 균열길이를 평균한 Δa 와 반복하중회수 N 과의 관계로 나타내었다. Fig. 5에서 보듯이 인공해수에서는 모재, 고입열, 저입열의 순으로 대기중에서도 같은 형태를 보였다. 그러나, 모재가 열영향부에 비하여 빠르게 나타났다.

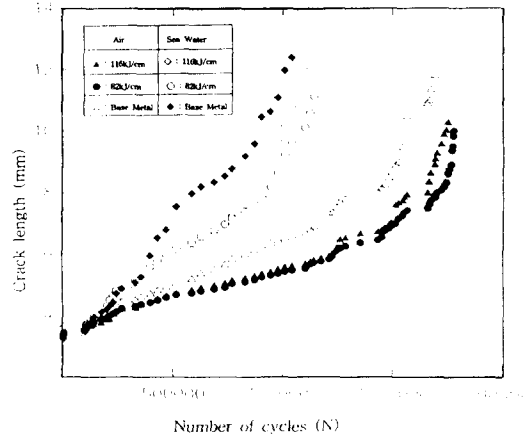
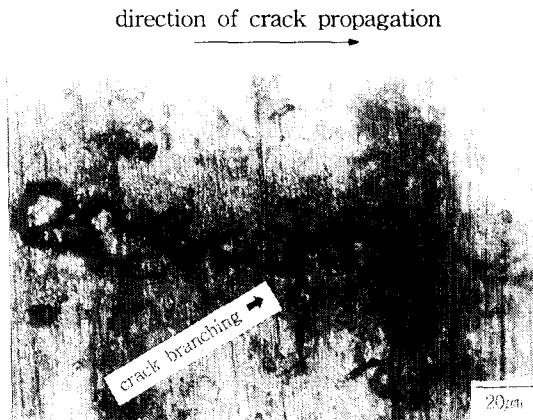


Fig. 5 Fatigue crack growth of base metal, heat affected zone in air and sea water



(a)



(b)

Fig. 6 Micrograph of crack growth behavior for heat affected zone welded with (a) 116kJ/cm (b) 82kJ/cm

TMCP강 용접열영향부 연화현상으로 용접열 사이클재현에 의해서 열영향부의 인성이 모재에 비하여 취약한 것이 일반적이다. 열영향부에서 모재에 비해 균열진전이 지연되는 이유는 열영향부에서 압축잔류응력이 존재하고, Fig. 6에서 보여주는 바와같이 열영향부에서 주 균열의 불규칙한 갈림(branching)현상이 많이 나타나기 때문인 것으로 사료된다. 대기와 인공해수에서 균열지연의 원인으로 인하여 균열성장이 모재에 비하여 불규칙하게 진행되고 있는 것이다. 초기단계에서는 반복횟수에 대한 크랙길이의 차이가 크지 않았으나, 어느 정도 반복 횟수가 증가함에 따라 크랙성장에 차이가 나고 있다. 이것은 균열진전시 불연속성으로 부식피트에 의한 것으로 생각되어지며, 마지막 단계에서는 크랙의 성장은 해수분위기에 의한 영향보다는 역학적인 피로작용에 의한 영향을 강하게 받는 것으로 생각된다.^{7,10)}

4.2 피로균열의 성장속도와 응력확대계수와와의 관계

부식분위기에서 피로균열의 성장속도는 역학적인 것에 의한 것과 부식환경에 의한 것이 일반인데, 양극용해기구와 수소취성기구에 의한 제안이 대두되고 있다. 본 실험에서는 노치선단에서 산화물의 형성으로 인한 부동태화가 일어나지 않으며, 부식피로 크랙은 시험편의 표면에 slip, slip band, 미시크랙의 발생이 부식 피트 저부의 응력집중과 반복소성역이 부식액의 침투로 부식피트가 발생 산화개재물의 형성으로 재료내부에 극히 심하게 변형된 영역으로 피로사이클 중 항상 수소가 확산해 들어갈 수 있어 취성과파괴를 일으켜 피로크랙이 성장한 것이다.^{7,9)}

Fig. 7은 인공해수에서의 모재, 고입열, 저입열의 균열진전속도와 응력확대계수와와의 관계를 대기와 비교한 것이다. 부식분위기에서 인공해수중이 대기중보다 균열진전의 차이를 명확히 보이고 있다. 모재의 경우 인공해수중이 대기중보다 빠르게 나타났으며, 고입열과 저입열의 경우도 동일한 결과를 보여주고 있다. 입열량의 차이에 따른 변화를 볼때 인공해수나 대기중에서 모재가 열영향부보다 피로균열진전의 차이가 명확하게 나타났으며, 인공해수중 고입열과 저입열의 차이는 크게 나타나지

않은 결과를 보여주고 있으며, 대기중에서도 동일한 결과를 보여주고 있다. 즉, 입열량의 차이에 따른 재료의 변화는 민감하지 않은 듯하다.

Chung⁽¹⁰⁾에 의하면 열영향부의 조대조직이 모재에 비하여 조직의 미세구성이 복잡하게 변화되고 있어 균열의 진전경로가 불규칙해 지는데 그 원인이 있다.

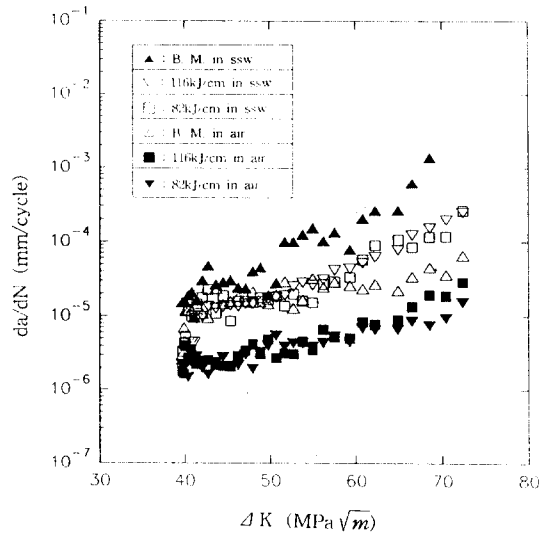


Fig. 7 Behavior of corrosion fatigue crack growth for base metal and heat affected zone of TMCP steel, including in air

대기중 열영향부에서 ΔK값이 증가함에 따라 피로균열 성장속도가 둔화되다가 다시 성장이 가속되어지고 있으며, ΔK값이 성장함에 따라 균열 성장과 둔화가 나타나는데 이것은 이미 현저하게 성장한 피로균열로 인해 균열의 영향이 매우 작아지는 반면에 열영향부의 균열갈림현상 등에 의한 피로균열 성장방향에서 균열의 성장지연과 합체등에 의해서 성장이 이루어진 듯하다⁽¹⁰⁾.

4.3 조직과 파면형상

Fig. 8은 용접부와 Fusion line 그리고 ×200배로 확대해서 조직을 관찰한 것으로 열영향부의 조직이 용접열사이클에 의하여 조대하며 모재로 갈수록 미세한 형상을 보여주고 있다. 이것은 용접열



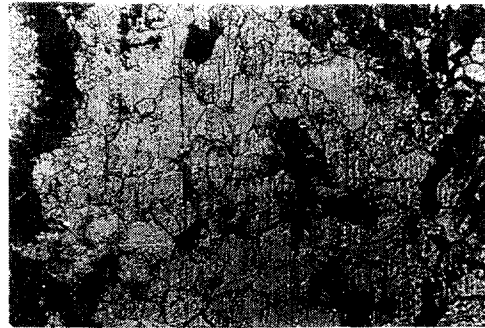
(a)



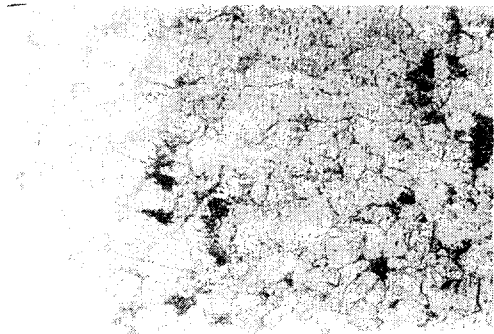
(b)



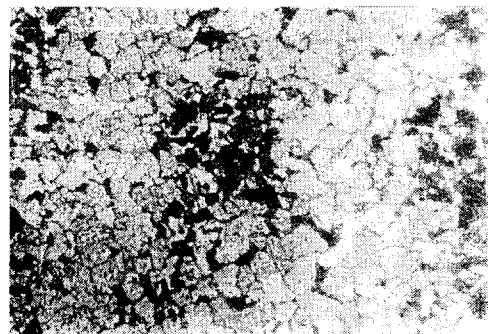
(c)



(d)

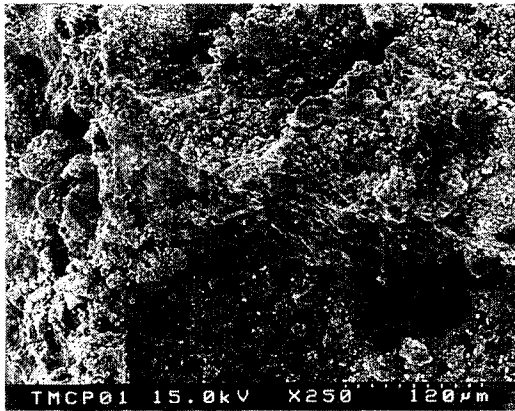


(e)

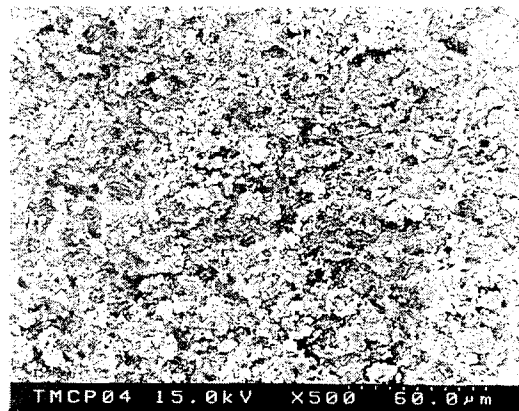


(f)

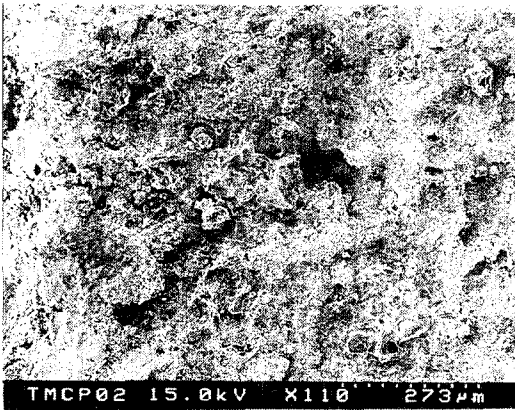
Fig. 8 Micrograph of (a) weld metal (b) fusion line (c) fusion line+3mm (d) fusion line+5mm (e) fusion line+8mm (f) base metal



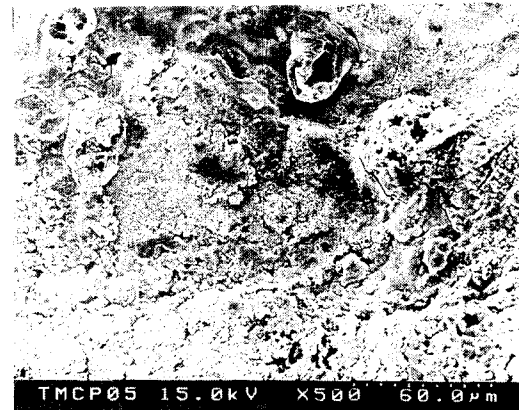
(a) Notch tip in B.M.



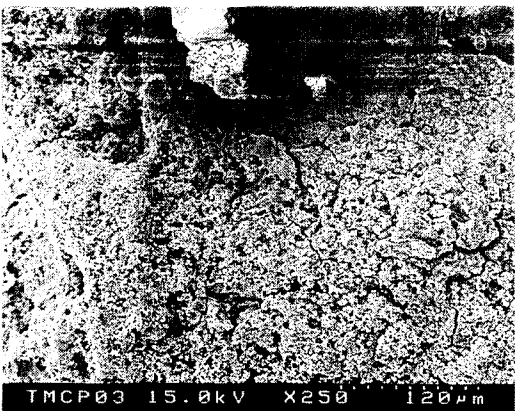
(b) Notch tip+3mm in B.M.
($\Delta K=354.71\text{MPa}\sqrt{m}$)



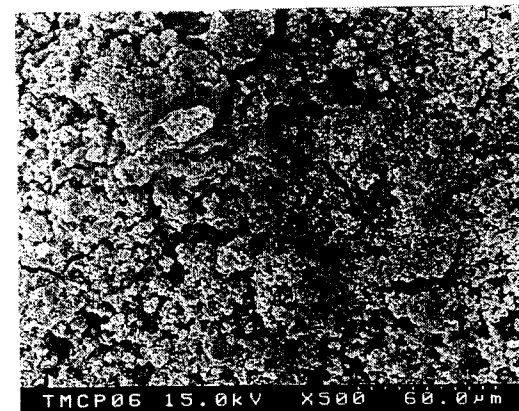
(c) Notch tip in HAZ(116kJ/cm)



(d) Notch tip+3mm in HAZ(116kJ/cm)
($\Delta K=354.71\text{MPa}\sqrt{m}$)

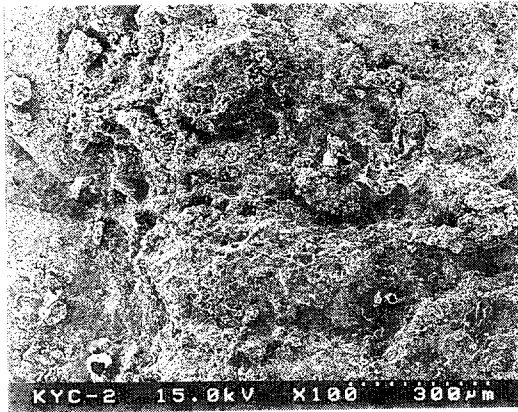


(e) Notch tip HAZ(82kJ/cm)

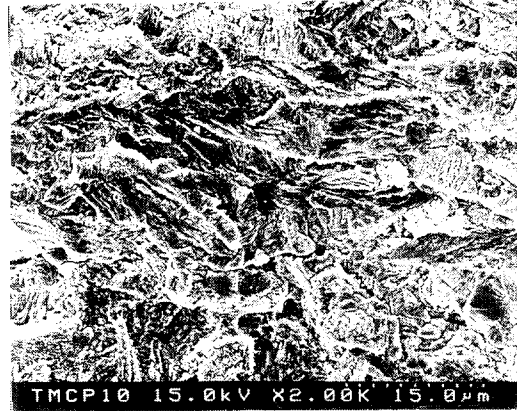


(f) Notch tip+3mm in HAZ(82kJ/cm)
($\Delta K=354.71\text{MPa}\sqrt{m}$)

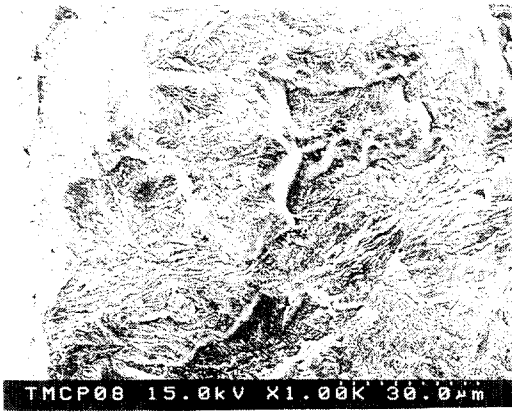
Fig. 9 SEM of notch tip and notch tip+3mm in air



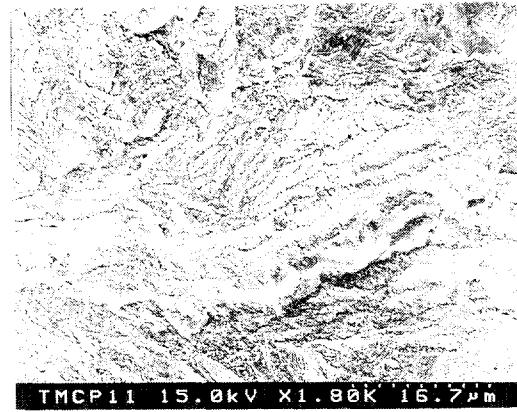
(a) Notch tip in B.M.



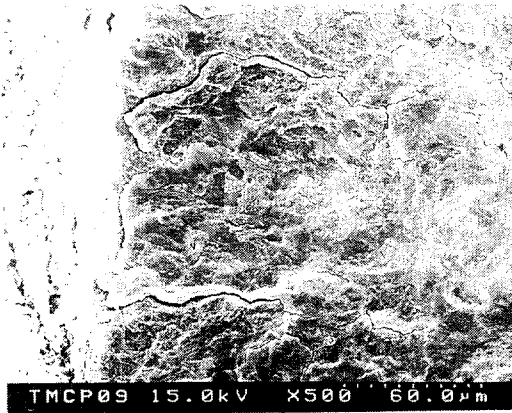
(b) Notch tip+3mm in B.M.
($\Delta K=354.71\text{MPa}\sqrt{m}$)



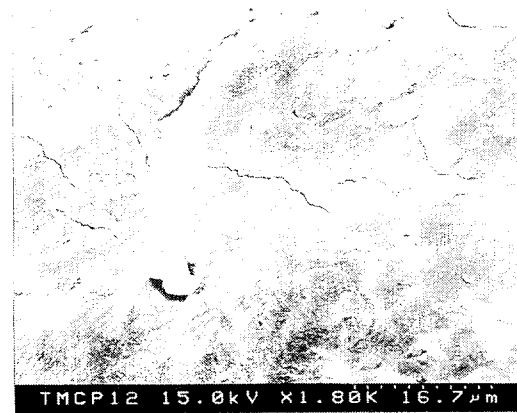
(c) Notch tip in HAZ(116kJ/cm)



(d) Notch tip+3mm in HAZ(116kJ/cm)
($\Delta K=354.71\text{MPa}\sqrt{m}$)



(e) Notch tip HAZ(82kJ/cm)



(f) Notch tip+3mm in HAZ(82kJ/cm)
($\Delta K=354.71\text{MPa}\sqrt{m}$)

Fig. 10 SEM of notch tip and notch tip+3mm in ssw

에 의해서 조직의 미세성분의 구성과 결정입자의 크기가 다양하게 변화된 열영향부조직이 모재에 비하여 부식에 더 민감함을 말해주고 있다.

Fig. 9는 부식피로균열 파단면을 대기중 노치선단부에서 1mm, 3mm부분에서의 조직을 관찰한 것으로 모재에 비하여 고입열, 저입열로 갈수록 노치선단에서 3mm로 갈수록 조직이 더 복잡하며 용접열에 의한 요철과 불규칙성을 볼수있다. Fig. 10은 인공해수에서 내부로 갈수록 모재가 열영향부보다 부식의 영향을 크게 받았으며 고입열이 저입열에 비하여 부식의 영향이 컸음을 알수있다.

6. 결 론

TMCP 고장력강을 편면자동용접으로 용접한후 CCT시험편을 제작하여 인공해수에서 부식피로 실험을 행하였다. 모재와 열영향부 부식피로 균열전파 특성과 파단면을 실험적으로 고찰한 결과는 다음과 같다.

1. 균열성장은 대기중보다 인공해수중에서 더욱 빠르게 진전하였다.
2. 인공해수와 대기중에서의 균열지연현상은 주 균열의 갈림현상과 열영향부등에 존재하는 아주 작은 용접결합, 기공등의 발생때문이다.
3. 부식분위기 하에서의 피로균열진전은 모재의 경우 대기중보다 인공해수에서 더욱 빠르게 나타났고, 열영향부에서도 대기중보다 인공해수에서 더욱 빨랐다.
4. 입열량차이에서의 피로균열진전은 인공해수와 대기에서 모재가 열영향부보다 빠르며, 인공해수나 대기중에서는 입열량에 의한 영향이 크지 않았다.

후 기

본 논문은 1995학년도 영남대학교 학술연구조성비에 의한 것으로 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 1) H. L. Craig, T. W. Crooker, D. W. Hoepfner "Corrosion-Fatigue Technology" ASTM STP 642, pp. 19~47, 1976
- 2) 류호림, 김규영, "3Ni-Cr-Mo계 高靱性 高張力鋼의 腐蝕疲勞 龜裂傳播거동研究" 韓國腐蝕學會誌 vol.12, No.4, pp. 249~259, 1992
- 3) K. Komai, K. Minoshima, "Corrosion Fatigue Crack Growth Characteristics of 50kg/mm² TMCP Steel in Synthetic Sea Water", iron steel Inst. Japan. pp. 358-364, 1988
- 4) Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rate ASTM E 647-88
- 5) "Standard Test Method for Water Absorption of Plastics," ASTM D1141-75
- 6) Tetelman, A. J. McEvily, Jr., "Fracture of Structural Materials", John Wiley and Sons, pp. 250-258, 1967
- 7) 金永植, 朴武昌, "高張力鋼 銲接部の 海水중 腐蝕疲勞龜裂 成長特性에 관한 研究", 韓國海洋工.學會誌, 제1권, 제2호, pp. 289-298, 1987
- 8) M. Kanama, O. Akio, "Fatigue Crack Characteristics of Four 50kg/mm² TMCP Steels and Their Weld-Heat-Affected-Zone in Synthetic Sea Water at a frequency of 0.17Hz", 日本機械學會論文集(A編) 제55권, 제510호, pp. 186-191, 1989
- 9) 이상호, 한정섭, "TMCP鋼의 腐蝕疲勞 舉動에 미치는 鹽分의 影響에 관한 研究", 韓國海洋工.學會誌, 제7권, 제2호, pp. 303-818, 1993
- 10) 정세희, 김태영, 나의균 "海水環境에서 鋼 銲接部の 環境強度評價에 관한 研究(I)", 大韓銲接學會誌, 제6권, 제2호, pp. 56-63, 1988