韓國海洋工學會誌 第11卷 第3號, pp.39~47, 1997. 8

◉ 論 文

TMCP 고장력강 용접 부의 하한계 피로균열진전 특성평가

이 택 순*·오 대 석**·이 휘 원**

(97년 2월 28일 접수)

The characteristics of Near-threshold fatigue crack propagation for welding zone in TMCP high strength steels

Taik-Soon Lee* · Dae-Sek Oh** · Hwi-Won Lee**

Key Words : Accelerated cooling(가속냉각), Frequency(반복 주파수), Stress Ratio (응력비), near-threshold stress intensity factor(하한계응력확대계수)

Abstract

Recently developed TMCP steels, which were manufactured by controlled rolling followed by accelerated cooling process, were examined to study their characteristics and weldability. Accelerated cooling type TMCP steel's hardness test result exhibited high value on weld zone. On the contrary, base metal and HAZ exhibited comparatively the similar value. On this experiment result Softening of HAZ is not occurred. in the heat affected zone, grain size repression be caused by chemical composition properties which a small quantity Al-Ti-B-N. Changing stress ratio near-threshold fatigue crack propagation experiments were carried out. According to this result, crack propagation velocity of the HAZ exhibited slower than the base metal and near-threshold value had increased at the HAZ. Finally accelerated cooling type TMCP steels were exhibited excellent mechanical properties in both strength and toughness.

1. 서 론

최근에 조선 및 해양구조물 분야에서 TMCP (Thermo mechanical-Control Process) 강재는 인성이 우수할 뿐만 아니라, 탄소당량이 낮아 용접성이 매우 우수하기 때문에 크게 각광받고 있으며, 중공업 분야 및 천연가스 수송용 배관재등으로 사용범위가 확대추세에 있다. 이러한 가속냉각형 강재는 저 탄소당량임으로 대입열 용접시 용접열에 의한 강재가 열을 받아 TMCP강재의 강

* 영남대
** 영남대 대학원

화기구인 accelerated cooling 효과의 소멸로 인하여 용접부에서 연화현상이 발생하여 용접부의 피로특성을 저하시킨다는 보고가 있으나[1] 명확하게 규명되지 않고 있는 실정이다. 본 연구에서는 TMCP강재 용접시 용접열 영향부와 모재에 대하여 미세구조변화와 기계적성질 변화에 따른 하한계부근의 피로균열성장특성을 평가하는데 있다.

그리고 각 조건에 대하여 미세구조 변화를 광학현미경과 주사전자현미경(SEM)을 통하여 기계적성질을 조사한다. 또한 이들을 조사하여 피로균열전파에 미치는 영향을 비교 고찰하고, 응력비 변화에 따른 피로균열성장 특성을 평가 하고자 한다.

2. 재료 및 시험편

본 연구에 사용된 재료는 선박, 해양구조물 및 중공업 분야에 많이 사용되는 인장강도 50 Kg/mm^{2}급 가속냉각형 TMCP 강재이며, 강재의 두께는 20mm이며, 시험편은 압연방향으로 평행하게 채취하였다. 그리고 용접방법은 편면자동용접(one side one run Submerged Arc Welding)법으로 하였으며, Fig. 1 은 one pass에 용접이 완료되도록 금속분말과 backing재를 사용하였다. 그리고 용접재료는 S-705EF×H 14급 wire(φ4.8)와 bonded type flux를 사용하였으며, 압연방향과 직각으로 50°의 V노치를 가공한 후 116kJ/cm의 입열량으로 용접을 행하였다.

재료의 화학성분은 Table. 1에 나타내었으며, 기계적 성질은 Table. 2 에 나타내었다. 그리고 용접조건은 Table. 3에 제시하였다. 본 연구에 사용된 시험편 형상은 Fig. 2 에서 나타내었으며, 밀링(Milling)가공, EDM(Electric Discharge Machine) 가공, 평면 연마 작업순으로 제작되었다. 이때 균열선단에 응력집중이 되도록 40°의 V형태로 제작되었으며, 시험편 폭에 대한 노치의비(a/w)는 0.1로 하였다. 시험편 표면은 표면거칠기의 영향을 최소화하기 위하여 샌드 페이퍼(sand-paper)로 # 2000 까지 순차적으로 연마한 후 알루미나 분말을 사용하여 표면을 연마하였다.

Table. 1 Chemical composition of TMCP steel (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

Table. 2 Mechanical properties of TMCP steel

Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)
363	560	24

Table. 3 Welding condition of TMCP steel

Current (A)	Voltage (V)	Speed (cm/m)	Heat input (KJ/cm)
970	36	18	116

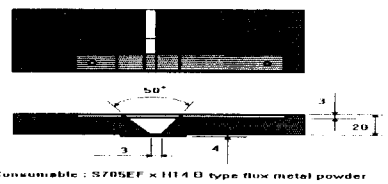


Fig. 1 Schematic diagram for SAW process

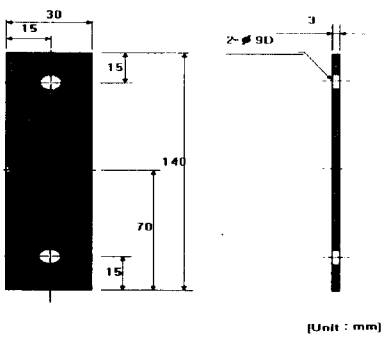


Fig. 2 Single edge notched specimen for threshold fatigure crack propagation test

3. 실험 방법

피로시험에 이용된 시험기는 최대용량 10ton인

일본시마즈(SHIMADZU)사 유압식 만능 시험기(모델명 : EFD-ED10-20L)을 사용하였다. 시험조건은 대기 중에서 인장-인장의 정현파(Sine Wave)으로 하였고, 반복 주파수(Frequency)는 10Hz으로 일정하게 유지하였다. 또한 응력비(Stress Ratio)는 0.05, 0.3, 0.5으로 각각 달리하여 응력비의 영향을 조사하였다. 그리고 균열길이 측정은 1/100mm까지 측정 가능한 이동식 광학 현미경을 사용하였고, 균열진전 경로는 레프리카 필름을 사용하여 관찰하였다.

또한 피로균열진전의 하한계값을 구하기 위하여 하중점감 시험법을 사용하였고, 하중 점감 방법은 균열선단에 작용한 응력을 평균응력으로 가정하여 균열선단 소성역 크기에 대해 3-5배 크기의 균열이 진전한 후 하중을 전 단계의 5%범위 내에서 감소시켰다.

그리고 시험초기에 노치의 영향을 최소화하기 위하여 피로 예균열을 도입하였고, 하한계값을 구하고난후 하중을 증가시켜 진전한 다음 하중점감법을 이용하여 매시험마다 하한계값을 다시 측정하였다. 피로균열진전속도(da/dn)의 계산은 ASTM 647-81에 제시된 Secant Method을 사용하였다. 그리고 하한계값은 피로균열진전 속도가 10^{-11} mm/cycle 이하일 때의 값으로 결정 하였다.

그리고 경도 시험기는 일본 마즈자와사(Mitsuzawa Seiki-Mode : No. DVK-3S)의 마이크로 비이커스(Micro Vickers) 경도계를 사용하였으며, 시험편은 에머리(emery)지로 깨끗하게 연마하여 앤빌위에 평형하게 올려놓고 대면각 136°의 다이아몬드계 피라미드(pyramid)형상의 압자로 하중은 30kg, 하중 유지시간은 30초로 하여 시험을 행하였고, 이때 경도값은 시험편 각각에 대하여 5번 측정한 후 평균값을 사용하였다.

그리고 피로실험을 행한 후 파괴된 시험편의 파면은 주사전자현미경 (SEM)을 통하여 파괴양상을 조사하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4-1. 경도 시험

가속냉각형 TMCP강재을 SAW(Submerged Arc Welding)법으로 입열량116KJ/cm의 조건에서 용접을 행하였다. 그리고 마이크로 비이커스(Micro-vickers) 경도계을 이용하여 열영향부의 연화정도를 조사하기 위하여 모재, 용착부 및 열영향부에 대하여 순차적으로 경도시험을 행하였다. 시험결과는 Fig. 3에서 나타내었다. 일반적으로 가속냉각형 TMCP강재는 보다 우수한 특성을 얻기 위해 제조과정 에서 강화기구인 가속냉각과정을 거쳐서 결정립을 미세화 시키며, 그 미세조직 상태는 항상 열역학적으로 준 안정(metastable) 상태로 존재 하기 때문에 용접시 용접열cycle에 의하여 이러한 효과가 소멸되어 용접 열영향부의 강도를 저하시키는 연화현상이 일어난다고 일부 보고되고 있다.

그러나 본 실험에서 경도 분포는 용착부에서는 높은 값을 나타내고 있지만, 모재와 열영향부에서 경도값은 Hv 140-156정도 범위로 거의 일정한 값을 보여주고 있으므로 용접열cycle에 의한 연화현상은 거의 일어나지 않은 것으로 사료된다.

이러한 현상은 용접시 열영향부 조직의 조대화를 억제하기 위하여 미량의 Al-Ti-N 등을 첨가한 화학조성의 특성에 어느정도 기인한 것으로 사료된다.

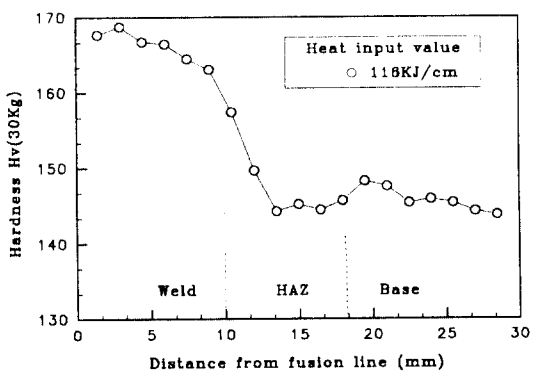


Fig. 3 Micro vickers hardness of TMCP steel welded in SAW process

4-2. 피로균열진전속도와 응력확대계수와의 관계

가속냉각형 TMCP 강재를 입열량 116KJ/cm로 SAW(Submerged Arc-Welding)기법으로 용접하여 모재 및 용접시 열cycle에 의하여 연화현상이

일어난다고 일부 보고되고 있는 열영향부(Heat affected zone)에 대하여 응력비(R)를 각각 0.05, 0.3, 0.5로 달리 하여 하한계영역에서 응력확대계수(ΔK)와 피로균열진전속도(da/dN)의 관계을 Secant법을 이용하여 구하였다. 실험결과 모재와 열영향부에 대하여 얻어진 응력확대계수(ΔK)와 피로균열 진전속도(da/dN)와의 관계는 Fig. 4에서 R=0.5, Fig. 5에서 R=0.3, Fig. 6에서는 R=0.05으로 각각 나타내었다. Fig. 4, 5, 6에서 나타난 결과에서 각각의 응력비에 따른 모재와 열영향부에 대하여 비교해 보면, 동일한 응력확대계수(ΔK)범위에서 균열 진전속도(da/dN)는 10^{-9}m/cycle범위 이전까지는 모재와 열영향부가 비슷한 경향을 보이고 있지만, 균열진전속도 10^{-9}m/cycle범위 이후에는 열영향부의 진전속도가 점차적 으로 조금씩 느린 경향을 보이고 있다.

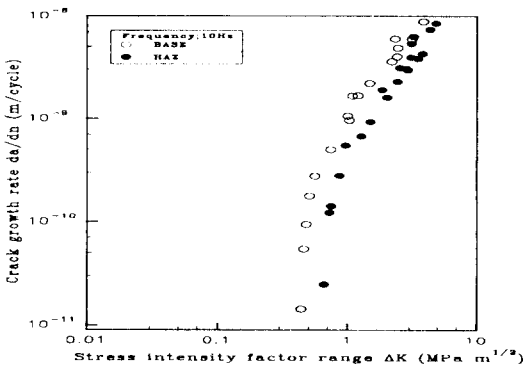


Fig. 4 Near-threshold fatigue crack propagation rates vs ΔK of TMCP steel in base and HAZ for R=0.5

피로균열진전속도(da/dN)가 10^{-9}m/cycle범위 이전까지 모재와 열영향부가 비슷한 경향을 나타내고 있는 것은 균열닫힘(Crack closure)현상이 일어나지 않는 높은 하중범위라고 생각되어지며, 따라서 하중이 점점 감소하면서 하한계응력확대계수(near- threshold stress intensity factor, ΔK_{th})는 균열진전속도 10^{-9}m/cycle범위 이후에 열영향부가 모재 보다 증가하는 경향을 나타내었으며, 그 차이는 아주 근소하게 나타났다.

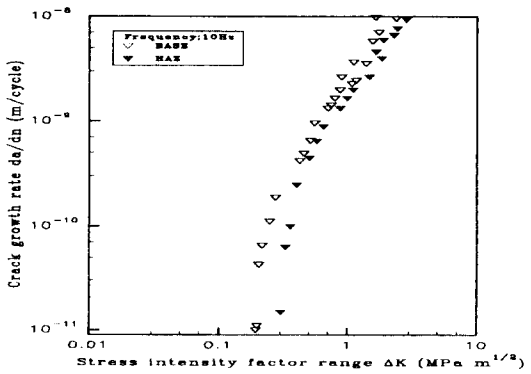


Fig. 5 Near-threshold fatigue crack propagation rates vs ΔK of TMCP steel in base and HAZ for R=0.3

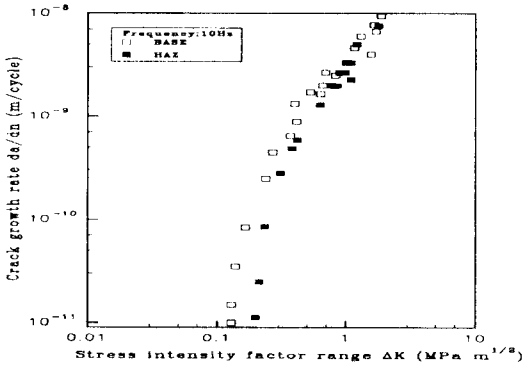


Fig. 6 Near-threshold fatigue crack propagation rates vs ΔK of TMCP steel in base and HAZ for R=0.05

그리고 응력비가 점차적으로 낮아짐에 따라 모재와 열영향부의 균열진전속도(da/dN)는 조금씩 다른차이을 나타냈었으며, 응력비가 0.05일 때 가장많은 차이를 나타냈었다.

이와같이 모재보다 열영향부의 하한계응력확대계수(ΔK_{th})가 조금 증가하는 경향을 보인 것은, 먼저 가속냉각형TMCP 강재의 제조과정을 살펴보면, 압연후 가속 냉각장치를 이용하여 austenite를 재결정이 일어나지 않는 온도영역에서 다시 압연하여 단위부피당 입계면적을 증가시키며, 조직의 미세화로 인성이 다른 동종강재에 비해 향상되었다.

그리고 저Al-Ti-B-N 등의 성분을 함유하고 있는 가속냉각형 TMCP 강재는 용접시 용접열Cycle 중에 안정한 질화물, 산화물 등을 모재에 미세 분산시켜 열영향부의 오스테나이트 결정립 성장을 억제하고, 페라이트, 펄라이트 변태를 촉진시키고, 저탄소 당량을 유지하여 대입열 용접 시에도 매우 우수한 열영향부의 인성을 가지고 있다고 현재 많이 보고되고 있는 실정 이므로[14], 본 연구에 나타난 결과와 같이 모재보다 열영향부의 하한계응력확대계수(ΔK_{th})가 증가된 경향을 보이는 것은 위와같은 영향이 일부 기인한 것으로 판단된다.

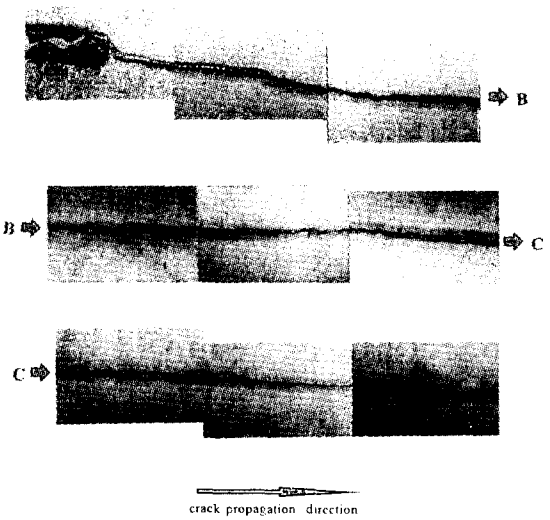


Fig. 7 The photograph of fatigue crack propagation in TMCP steel for base

그리고 Fig. 7에 제시된 모재에 대한 균열진전양상을 살펴보면, 모재는 비교적 인장 방향에 대하여 수직방향으로 일정하게 성장 하였다. 그리고 Fig. 8에서 보는 것과 같이 대부분 입내파괴 양상이 두드려지게 나타났으며, 균열진전속도가 미세하고 균일한 입내를 따라 빠르게 진전한 것으로 관찰되어 졌다. 그리고 Fig. 9에서 제시한 열영향부의 균열진전양상을 살펴 보면 인장방향에 대하여 수직방향으로 진전하였지만, 용착금속부를 피하여 모재 방향으로 경사지게 진전하였다. 그리고 입내와 입계로 혼재된 양상으로 진전하였지만 대부분 입내를 따라 지그재그형태의 진전 경향을 보였으며, Fig. 10에서 보는 것과 같이 하중값이 점점 낮아지면서 입내를 통과한 균열선단은 grain boundary 에서 균열진전이 정체되면서 균열의 가지 현상(Crack branching)인 부균열의 생성도 관찰되었다. 이러한 결과로 인하여 균열경로 편차가 크게 나타났으며, 따라서 동일한 균열 길이를 진전하는데 모재보다 열영향부가 더많은 cycle 이 소요되었고, 이러한 결과로 인하여 모재보다 열영향부의 하한계응력확대계수(ΔK_{th})을 증가시키는 요인으로 기인 하였다.

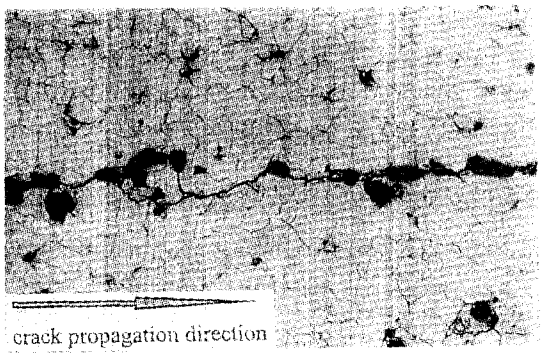


Fig. 8 Photograph of Transgranular fatigue crack propagation for base

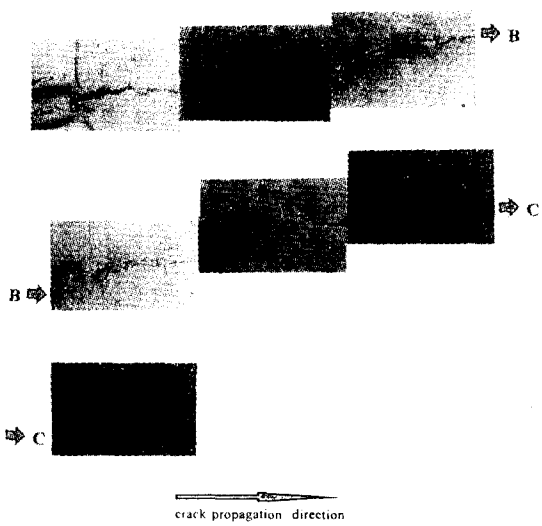


Fig. 9 The photograph of fatigue crack propagation in TMCP steel for HAZ

그리고 응력비(R)을 각각 0.05, 0.3, 0.5로 변화시켰을 때 얻어진 응력확대계수(ΔK)와 피로균열진전속도(da/dN)선도를 모재에 대하여 Fig. 11, 열영향부에 대하여 Fig. 12에 나타내었다. 그리고 모재와 열영향부에 대한 하한계치를 Table. 4에 나타내었다.

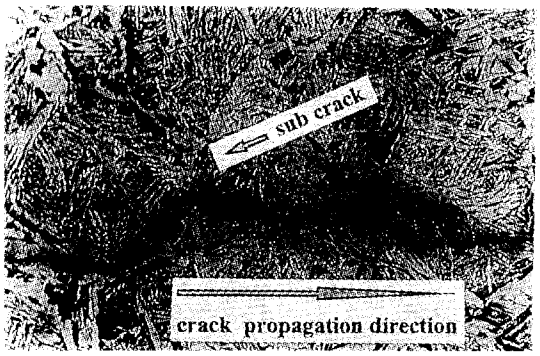


Fig. 10 Photograph of Transgranular fatigue crack propagation for HAZ

Table. 4 near threshold stress intensity factor range of TMCP steel in base and HAZ for R= 0.05, 0.3, 0.5

Zone / Stree Ratio	Threshold value(ΔKth)	
	Base metal MPa$\sqrt{m}$	HAZ MPa$\sqrt{m}$
0.05	0.44	0.66
0.3	0.20	0.30
0.5	0.13	0.20

Fig. 11과 Fig. 12에서 나타난 결과와 같이 모재와 열영향부에서 응력비가 감소됨에 따라 전반적으로 균열진전속도는 상당히 둔화되는 양상을 보이고 있다.

그리고 응력비 R=0.3, R=0.5일 때와 비교하여 응력비 R=0.05일때 균열진전속도는 현저하게 늦어지는 경향을 관찰할 수 있었다.

그리고 Table. 4에 제시한 모재에 대한 하한계값을 살펴보면, 응력비 R=0.5와 R=0.3 일때는 하한계값 0.07 MPa$\sqrt{m}$ 정도의 근소한 차이를 보여주고 있지만, R=0.3일 때와 R=0.05을 비교하면 하한계값 0.24 MPa$\sqrt{m}$ 의 큰 차이를 보여주고 있다.

열영향부도 모재와 유사한 경향을 나타내었으며, 응력비R=0.5와 R= 0.3일 때 하한계값은 0.1 MPa$\sqrt{m}$의 차이로 모재의 0.07 MPa$\sqrt{m}$ 과 비슷한 차이를 나타내고 있다. 하지만 R=0.3일 때와 R=0.05을 비교하면 하한계값 0.36 MPa$\sqrt{m}$ 의 차이로 비교적 모재보다는 열영향부가 조금 큰 차이를 보여주고 있다. 따라서 응력비가 감소할수록 모재와 열영향부의 하한계값은 조금씩 높아지는 경향을 알 수 있다.

이와 같은 현상들은 반복하중 상태 하에서 균열의 상하파면의 접촉, 즉 프레팅(fretting)에 의해서 산화 게재물이 생성되고 이러한 것들이 균열선단에서 굳어져 쐐기현상을 유발 시켜 오로지 균열 닫힘현상이 일어나서 균열진전속도를 현저히 둔화시킨 것으로 사료되어진다. 그리고 열영향부에서 용접시 용접열Cycle중에 미세하게 분산된 산화물, 질화물 등의 의해 모재보다 산화게재물등이 더많이 생성되어 균열진전속도을 현격히 둔화시킨 요인으로 작용한 것으로 사료되어진다. 이러한 현상은 응력비 감소와 저응력 영역에서 산화물유기 균열 닫힘(Oxide induced crack closure)이 더욱더 심화된 것으로 추정된다.

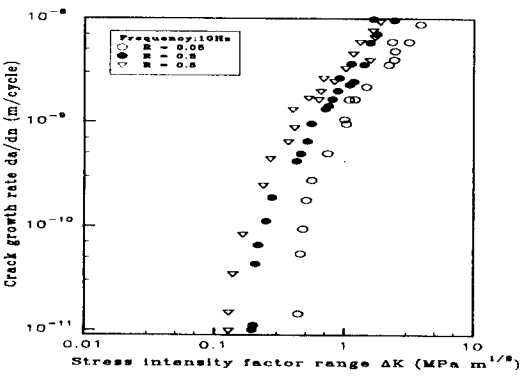


Fig. 11 Near-threshold fatigue crack propagation rates vs ΔK of TMCP steel in base for R=0.05, 0.3, 0.5

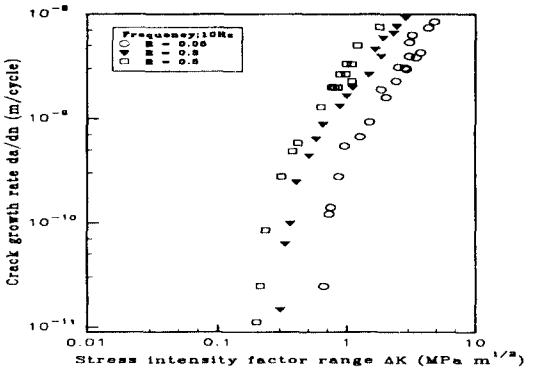
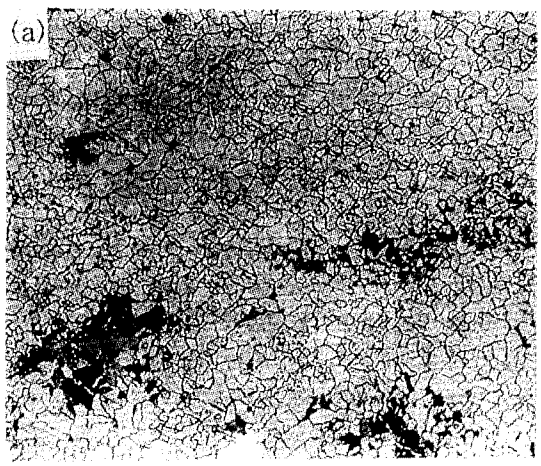


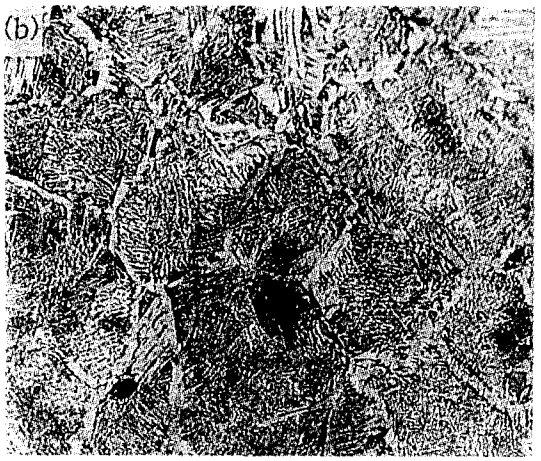
Fig. 12 Near-threshold fatigue crack propagation rates vs ΔK of TMCP steel in HAZ for R-0.05, 0.3, 0.5

4-3. 미세조직관찰 실험 결과

가속냉각형TMCP 강재는 압연상태에서 열처리재에 상응하거나, 보다나은 재질을 얻기 위해 개발된 강재이다. 제조과정시 물분사장치를 이용하여 austenite를 재결정이 일어나지 않는 온도영역에서 냉각시키면서 압연하여 단위부피당 입계면적을 증가 시키므로써 많은 ferrite핵 생성처를 제공하며 따라서 결정립의 크기를 미세화 시킨다. 그리고 가속 냉각공정을 거쳐서 일부 bainite조직의 형성도 일어난다.



(a) Base



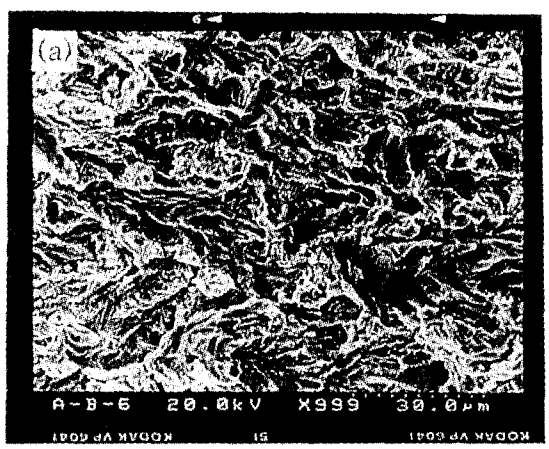
(b) HAZ

Fig. 14 Microstructures of TMCP steel.

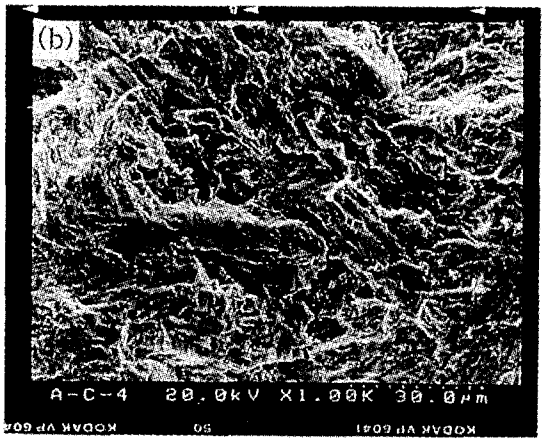
Fig. 14(a)에서 와같이 가속 냉각공정에 기인하여 pearlite의 band상을 없애주면서, 미세한ferrite 조직에 일부banite조직이 복합된 형태의 조직을 나타내었다.

그리고 Fig. 14(b)에서 용접시 열영향부(HAZ)의 결정립은 fusion boundary에서 가장 크게 형성되었으며, fusion boundary에서 멀어질수록 결정립의 크기는 점차 감소하였다.

그리고 Fig. 15은 응력비(R) 0.3에 대한 모재와 열영향부의 파면을 나타내었다.



(a) Base



(b) HAZ R=0.3

Fig. 15 The fractograph of fracture surface

5. 결 론

TMCP 고장력강을 편면자동용접(one side one run submerged arc welding)기법으로 용접을 행한후 하한계(ΔK_{th})영역에서 모재와 열영향부에 대하여 응력비(R)를 0.05, 0.3, 0.5로 각각 달리하여 피로균열진전 특성을 평가하였고, 그 결과는 다음과 같다.

(1) 모재와 열영향부에 대한 경도 값은 Hv 143 - 155의 범위로 거의 비슷한 값을 나타 내었다. 용접시 열영향부의 조직의 조대화을 억제하기 위하여 미량의 Al-Ti-B-N 등의 화학 조성의 특성에 일부 기인한 것으로 사료된다.

(2) 모재와 열영향부에 대한 응력확대계수(ΔK)와 균열진전속도(da/dN) 관계에서 동일한 응력확대계수(ΔK)범위에서 열영향부의 균열진전속도는 모재보다 둔화되는 양상을 보였으며, 따라서 열영향부의 하한계값(ΔK_{th})은 모재보다 높은값을 나타내었다.

이러한 현상은 용접성 향상을 위해 저탄소당량의 사용과 미량의 Al-Ti-B-N등과 같은 화학조성의 영향으로 열영향부 조직의 조대화 억제 로 인성이 향상 되었다.

그리고 균열은 grain boundary을 따라 용착 금속부을 피하여 지그재그형태로 경사지게 진전하였고, 그리고 균열의 가지현상(Crack branching)이 생성 되어 열영향부의 하한계값(ΔK_{th})을 증가시켰다.

(3) 모재와 열영향부에 대한 응력비(R) 감소에 따라서 하한계값이 증가 하였다.

이러한 현상은 균열선단에 형성된 산화게재물이 굳어져 쐐기현상을 유발 시켜서 균열 진전속도가 상당히 둔화된 것으로 사료된다. 그리고 열영향부에서 모재보다 균열진전속도가 더많이 둔화된 요인은 용접열Cycle중에 미세하게 분산된 산화물, 질화물의 영향에 기인한 것으로 추정된다.

참고문헌

1) 김희진, "TMCP 강재의 연화현상", Journal of the korean welding society, Vol.6, No.2, Jun, 1988

2) Kenjiro KOMAI, Kohji MINOSHIMA, Guisik KIM, Hideki OKAMOTO, "Corrosion Fatigue Crack Growth Characteristics of High-Tensile Strength Steel Weldments in Synthetic Seawater", 日本機械學會 論文集(A),No.88-0223A, pp.179-185, 1989

3) P. K. Liaw, A. Saxena, V. P. Swaminathan, and T. T. Shin, "Effects of Load and Temperature on the Near Threshold Fatigue Crack Propagation Behavior in a Cr-Mo-V Steel", Metallurgical Transaction A, pp. 1631-1640, 1982

4) G. MARCI, "A Fatigue Crack Growth Threshold", Engineering Fracture Mechanics, Vol.41, No.3, pp.367-385, 1992

5) 김희진, 윤중근, "가속냉각형 TMCP 강재 대입열 용접부의 피로특성", Journal of the korean welding society, Vol.6, No.1, Mar, 1988

6) P. D. Liaw, "Near-Threshold Fatigue Crack

Growth Behavier in Couper", Met. Trans., 13A, pp.293-299, 1982

7) R. J. Bucci, P. C. Paris, R. W. Hertzberg, R. A. Schmide, "Fatigue Threshold Crack Propagation in Air and Dry Argin for a Ti-6Al-4V Alloys", ASTM STP 513, pp. 125-140, 1972
8) G. R. Yoder, L. A. Cooley and T. W. Cooker, J. Engng. Mater. Tech. Trans. ASME, 101, p.86, 1979
9) G. M. Lin and M. E. Fine, Scripta Metal., 16, p.1249, 1982
10) J. Masounave and J. P. Bailon, Scripta Metal., 10, p.165, 1976
11) R. A. Schmidt and P. C. Paris, ASTM STP 536, p.79, 1973
12) J. A. Lewis, Fatigue Threshold, Proc. 1st. EMAS Publ. 3, 1982
13) "Standard Test Method for Constant load amplitude fatigue crack growth rate above 10^{-8} m/cycle", ASTM, 647-83a, pp.739-759
14) K. Tsukada, T. ohkita, C. ouchi, T. nagamine K. Hirabe and K. Yako : Nippon Koran Technical Report Overseas NO. 53, 1982
15) K. kenjiro, M.Kohji, "Corrosion Fatigue Crack Growth Characteristics of 50kg/mm^2 TMCP Steel in Synthetic Sea Water", Iro steel Inst. Jpn. pp.358-364, 1988