

研 究 論 文

大韓熔接學會誌
第8卷第4號 1990年 12月
Journal of the Korean
Welding Society
Vol. 8, No. 4, Dec., 1990

TMCP 고장력강재와 그 용접부의 저사이클피로특성에 관한 연구⁺

김영식* · 한명수**

Low Cycle Fatigue Behaviour of TMCP Steel in As-Received and Welded States

Y.S. Kim*, M.S. Han**

Key Words: Low Cycle Fatigue(저사이클피로), Strain Control(변형률제어), Differential Strain Technique(차동변형률법), Total Strain Amplitude(전변형률진폭), Number of Reversal(역전수), Apparent Strain Amplitude(겉보기변형률진폭), Cyclic Softening(반복연화), Softening by Welding(용접연화), Rub Mark(러브마크)

Abstract

TMCP steel manufactured by controlled rolling followed by accelerated cooling process is known to have extra-ordinary mechanical properties such as tensile strength and toughness. However, there is much uncertainty about the fatigue fracture characteristics, especially, in the welded state of this steel.

In case of this steel, the softening zone by welding is generated in heat affected zone in contrast with the case of conventional normalized high strength steel. This softening zone is considered to play significant roles in low cycle fatigue fracture of the welded part of this steel.

In this paper, the low cycle fatigue behaviors of TMCP steel were inspected in as-received and welded state using the smooth specimen. The fatigue life-time was separately investigated on the basis of failure of the specimen and crack initiation which is detected by differential strain method.

Moreover, the low cycle fatigue characteristics of TMCP steel were quantitatively compared with those of the conventional normalized steel of same strength level.

⁺ 대한용접학회 추계학술대회(1988. 11. 19) 및 춘계학술대회(1989. 6. 29)발표.

* 정회원, 한국해양대학

** 정회원, 한국해양대학 대학원

1. 머리말

TMCP(Thermo-Mechanical Controlled Process) 강재는 제어압연과 제어냉각공정을 병용하여 제조된 강재로서, 최근, 선박이나 해양구조물용 재료로서 각광을 받고 있다.

TMCP는 슬래브의 가열과 열간압연 및 냉각공정을 단지 성형가공으로서만이 아니고, 가열, 열처리공정으로서 유효하게 이용하여 기지조직을 미세화함과 아울러 강의 강도와 인성의 향상을 달성하고자 하는 프로세스이다¹⁾. 따라서, TMCP강은 종래의 고강도강과는 달리 제조공정에서 고강도, 강인화가 달성되기 때문에 동일 강도레벨의 종래강에 비해 탄소당량(carbon equivalent)을 낮게 할 수 있어서 소입열용접에 대한 내균열성이나 대입열용접에 대한 용접열영향부의 인성등의 견지에서 용접성이 탁월한 것이 특징이며, 또한, 취성파괴의 견지에서도 우수한 특성을 나타낸다^{2,3)}.

그러나, 이 강재는 낮은 탄소당량때문에 용접구조물 제작시, 용접열영향부에서 용접열사이클로 인한 연화 현상이 일어나 강도상 문제를 일으킬 수 있다⁴⁾.

본 연구에서는 제어압연과 가속냉각효과를 가미시켜 제조된 HT50급의 TMCP강재 모재 및 용접부에 대해 실온의 공기중에서 저사이클 피로시험을 실시하여 그 특성을 동급강도레벨의 노멀라이즈드(normalized) 강과 비교, 고찰하였다. 그 결과, TMCP강재의 사용시, 저사이클 피로수명의 기초자료를 제시하였다.

2. 실험방법

2.1. 실험재료 및 시험편

Table 1은 본 실험에 사용한 TMCP강재와 비교재인 노멀라이즈드(이하, Nor로 표기함) 강재의 화학적 성분과 기계적성질을 나타낸 것이다.

TMCP강재의 용접시험편은 SAW용접법으로 제작되었으며, 이때 채용된 용접조건을 Table 2에 제시하였다.

Fig. 1은 실험재료들의 모재와 용접부에서 절삭하여

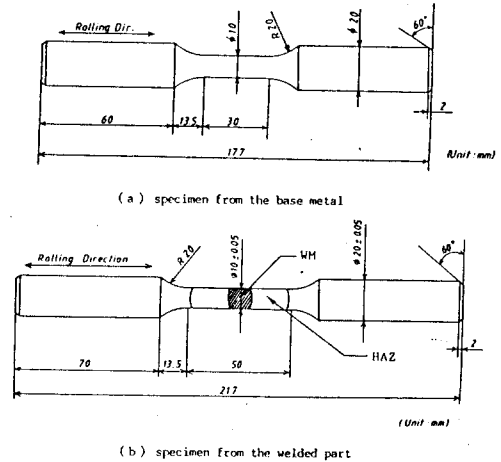


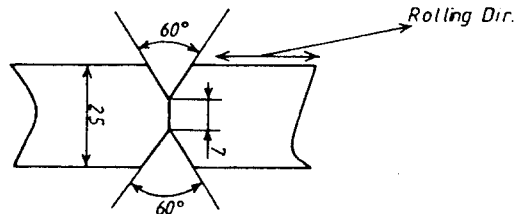
Fig. 1 The shape of specimens

Table 1 Chemical composition and mechanical properties of test materials

Materials	Chemical composition (wt. %)									Mechanical properties		
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Ceq	Pcm	Y. S. (Mpa)	T. S. (MPa)	EL. (%)
TMCP	0.15	0.33	1.16	0.02	0.003	0.01	0.02	0.348	0.22	440	539	20
Normalized	0.13	0.40	1.43	0.02	0.001	0.30	0.23	0.391	0.234	362	534	30

Table 2 Welding condition

Wire × Flux (SAW)	Side	Current (A)	Voltage (V)	Speed (cm/min.)	Heat Input (kJ/cm)
H-14 × S-705EF (φ4.8)	Face	880	38	23	87.2
	Back	980	40	25	94.0



가공한 피로시험편의 형상 및 치수를 각각 나타내고 있다. 각 시험편은 두께가 25mm인 판의 중앙부에서 압연방향과 평행하게 채취되었다.

2.2. 시험기 및 실험방법

실험에 사용한 시험기는 정적최대하중 250kN, 동적최대하중 125kN용량의 폐회로 서보 유압식 피로시험기였다. 모재의 피로시험은 변형률제어에 의해 한개의 시험편에 시험편의 축방향으로 일정한 전변형률진폭을 반복부하하는 다수시험법 (companion specimen method)으로 수행되었다. 용접부에 대한 저사이클 피로시험은 용접부 각 부위가 모두 존재하는 시험편 평활부를 신장계 (extensometer)에 의해 변위제어하는 방법으로 행해졌다.

실험에 사용한 신장계의 표점거리는 모재실험의 경우 25mm이었으며, 용접부에 대한 실험의 경우 50mm이었다. 전 실험을 통하여 변형률비 (strain ratio)는 $R_\epsilon = -1$ 인 완전양진으로 하였으며, 변형률속도 (strain rate)는 0.005/sec로 일정하게 하였다.

2.3. 균열발생수명과 파단수명의 검출방법

Fig. 2는 시험편 상의 평활부에서 발생하는 균열을 감지하기 위해 착안된 차동변형률법 (differential strain technique)의 개요를 나타낸 것이다. 시험편의 그립 (grip)에 고정되는 시험편의 양단중 한쪽단의 원주를 120° 씩 3등분하고, 3등분선을 각각 하중축방향으로 연장하여 그 연장선 중의 하나에 신장계를 부착하였다. 또한, 시험편고정부에서 나머지 두 연장선 상에 각각 변형률계이지 (표점거리 5mm, 저항 120Ω)를 부착하여 접속하고 변형률측정기와 연결하여 휘스톤브리지 (Wheatstone bridge) 회로를 만들었다.

이 때, 각 변형률계이지의 출력전압치는 부하시 항상 동일부호가 되므로 변형률측정기의 출력치는 그림에서 보여지는 바와 같이, 양 변형률값의 차인 $\epsilon_1 - \epsilon_2$ 로 된다. 따라서, 시험편상의 어느 부위에서 균열이 발생하여 성장하는 경우, 차동변형률 ($\epsilon_1 - \epsilon_2$) 값의 변화도 그에 동반하여 커지게 된다.

본 실험에서는 이러한 차동변형률값의 변화를 Fig. 2에 나타낸 바와 같이, 시간기준 펜기록계에 의해 계측하여 시간과 차동변형률과의 구배 ($d(\epsilon_1 - \epsilon_2)/dt$)가 대략 0인 곳에서의 반복수를 구하고 이 반복수를 그 시험편에 부착된 전변형률진폭 (total strain amplitude; 이하, ϵ_{ta} 로 표기함)에 대한

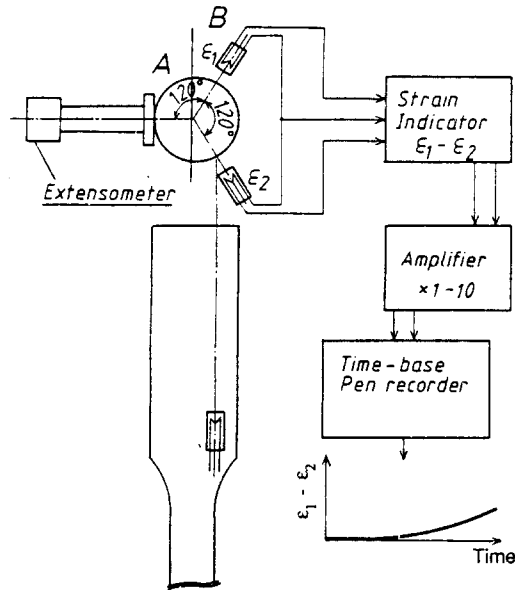


Fig. 2 Schematic illustration of the differential strain method to detect crack initiation

균열발생수명 (number of cycle to crack initiation; 이하, N_c 로 표기함)으로 취하였다. 이와 같은 방법에 의해 감지된 $d(\epsilon_1 - \epsilon_2)/dt \approx 0$ 인 때의 균열의 길이를 레플리카법에 의해 확인한 결과, 균열의 발생부위 및 부하변형률의 크기에 따라 다소간 편차가 있었으나, 어느것이나 수백 μm -1mm사이의 것이 되었다.

한편, 시험편의 파단은 임의반복수에서의 인장시의 최대응력 ($(\sigma_{TM})_N$)이 (1)식으로 되는 조건일 때 이루어진 것으로 하여, 그 때의 반복수를 부착된 ϵ_{ta} 에 대한 파단반복수 (number of cycles to failure; 이하, N_f 로 표기함)로 하였다.

$$(\sigma_{TM})_N \leq \frac{\sigma_{HL}}{2} \quad (1)$$

여기서, σ_{HL} 은 매 반복수에서의 인장시의 최대응력들의 산술평균응력 (half life average tensile peak stress)이다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. TMCP강 모재의 저사이클 피로특성

Fig. 3의 (a), (b)는 TMCP강 모재에 $\epsilon_{ta} = 0.2$

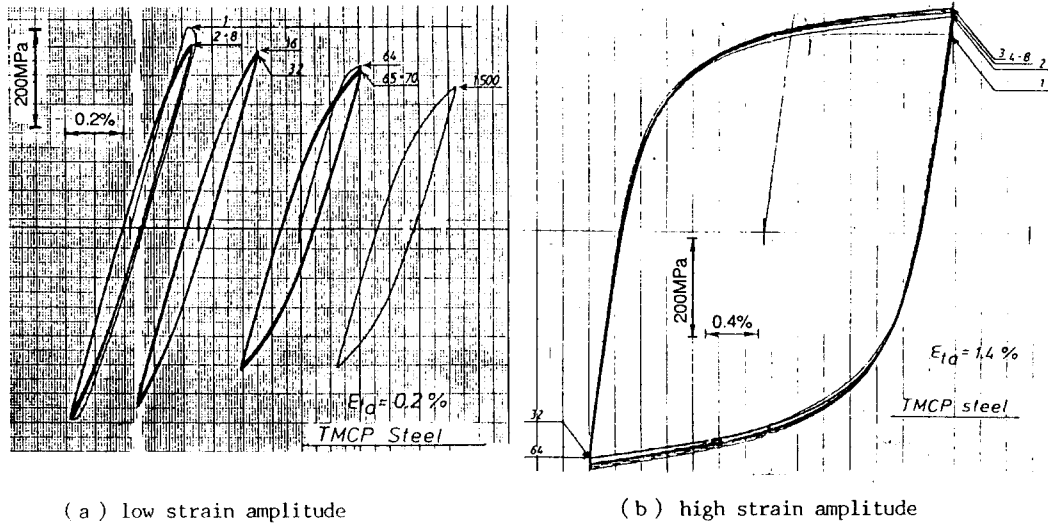


Fig. 3 Stress-strain hysteresis loops

%와 $\epsilon_{ta} = 1.4\%$ 를 각각 부하하였을 때의 응력-변형률 히스테리시스 루프(hysteresis loop)를 나타내고 있다. 이 그림에 의하면, 저변형률진폭조건에서는 반복연화(cyclic softening)가 일어나지만, 고변형률진폭조건에서는 반복경화(cyclic hardening)가 발생함을 알 수 있고, 이와 같은 현상은 Nor강 모재에서도 관찰되었다.

Fig. 4는 TMCP 및 Nor강 모재의 단순인장곡선과 반복응력-변형률곡선을 함께 나타낸 것이다. 여기서, 각 강재의 단순인장곡선은 시험편을 3%의 변형률까지 인장시켰을 때의 응력-변형률곡선의 일부를 나타낸 것이다. 또한, 반복응력-변형률곡선 중의 실험점들은 각 ϵ_{ta} 에 대한 N_c 의 1/2인 반복수에서의 응력응답을 그 때의 부하변형률에 대한 응력값으로 취하여 나타낸 것이다.

그림에서, 각 강재의 단순인장곡선은 항복이후 변형률의 증가에 관계없이 일정한 응력값을 보이며, 이것으로부터 두 강재는 본 실험범위 ($\epsilon = 3\%$ 이하)내에서는 변형률경화현상을 나타내지 않음을 알 수 있다. 한편, 반복응력-변형률곡선은 부하변형률이 증가함에 따라 응력도 같이 증가하고, 이들 응력과 변형률사이에는 Fig. 5에 나타난 바와 같은 일정한 관계가 있다. 이 관계를 수식화하면 (2)식과 같다.

$$\begin{aligned} \sigma_a &= K' \cdot (\epsilon_{pa})^{n'} \\ &= K'' \cdot (\epsilon_{ta})^{n''} \end{aligned} \quad (2)$$

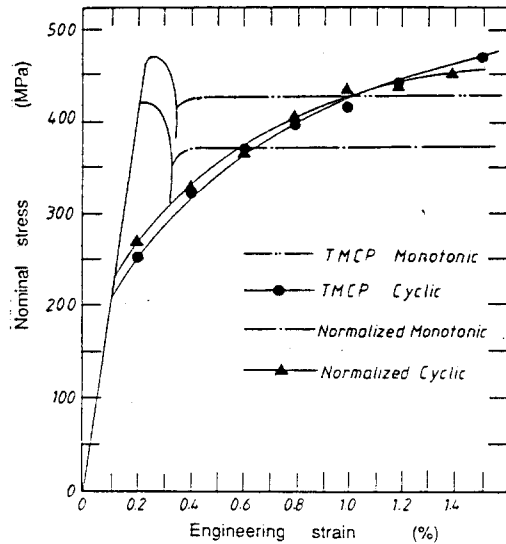


Fig. 4 Comparison of monotonic & cyclic stress-strain curve.

여기서, ϵ_{pa} 는 소성변형률진폭(plastic strain amplitude)이고, K' 과 K'' 는 반복강도계수, n' 와 n'' 는 각각 반복변형률경화지수이다. 각 강재에 대한 (2)식의 계수 및 지수를 정리하면 Table 3과 같다.

위의 결과들에 의하면, 단순인장시의 강도특성은 TMCP강재의 경우가 Nor강재에 비해 우수한 것으로 나타나고 있다. 반면, 두 강재의 반복응력

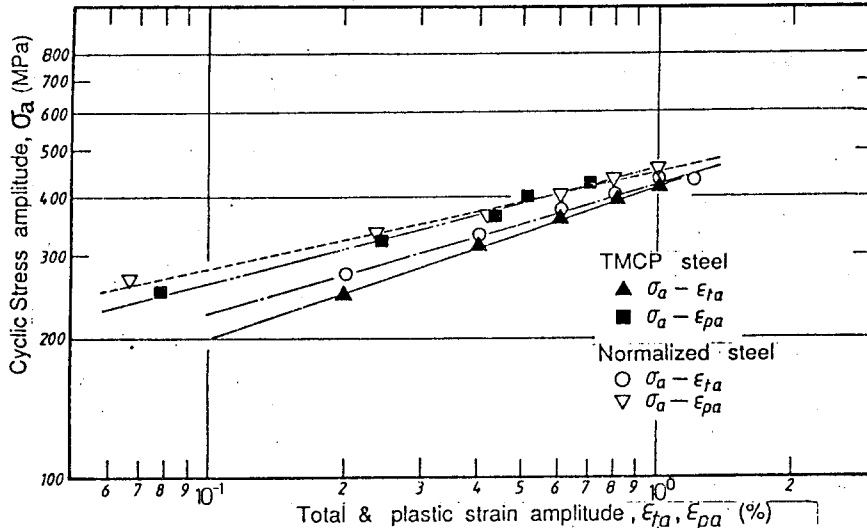


Fig. 5 Cyclic stress-strain relationships of test materials

Table 3 Cyclic stress-strain material constants

	K' (MPa)	n'	K'' (MPa)	n''
TMCP	438	0.2234	415.8	0.3043
Normalized	438	0.1848	420.5	0.2646

-변형률거동은 본 실험범위내에서 거의 동일하였지만, 반복변형률경화지수에 있어서 TMCP강재가 약간 높게 나타났다.

또한, Fig.4에서 두 강재의 반복응력-변형률곡

선은 저변형률역에서는 단순인장곡선의 하부에 위치하여 반복연화한다는 것을 나타내고 있지만, TMCP강재의 경우, 부하변형률이 약 1.0%, Nor강재의 경우 약 0.6%이상에서는 반복경화를 나타낸다. 이와 같이 동일재료에서도 변형률의 대소에 따라 반복연화 또는 경화하는 것은 류더스 변형률(Lüders strain)을 가지는 재료들의 특징으로 알려져 있다⁵⁾.

Fig.6은 TMCP 강재의 최적피로곡선(best fit

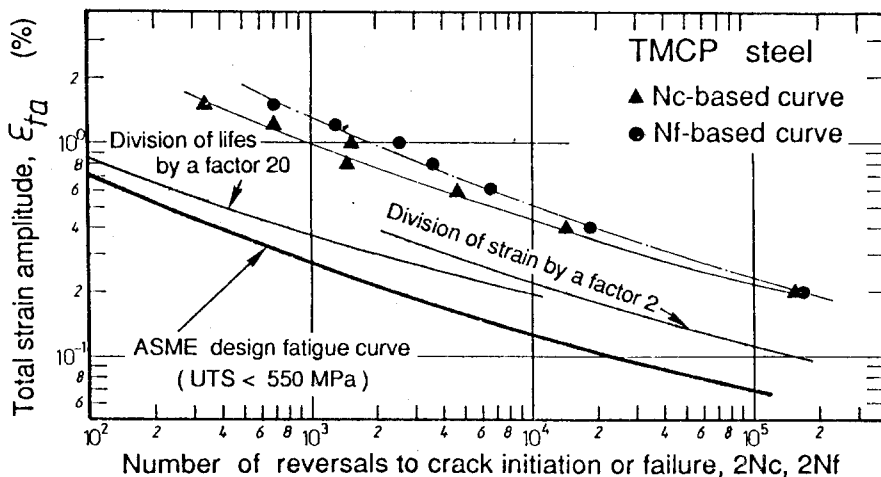


Fig. 6 Comparison between crack initiation life and failure life curve of low cycle fatigue

curve)인 $\epsilon_{ta}-(2N_f)$ 선도와 $\epsilon_{ta}-(2N_c)$ 선도(단, 여기서 $2N_f$, $2N_c$ 는 각각 파단반복수와 균열발생까지의 반복수의 2배인 역전수(number of reversals)를 의미한다.)를 나타낸 것이다. 고변형률(단수명)역으로 갈 수록 균열발생수명과 파단수명간의 차는 커지지만, 저변형률(장수명)역으로 갈 수록 그 차는 거의 없어지게 된다. 이것은 고변형률역으로 갈 수록 전수명에 대한 균열발생까지의 수명의 비가 작아지는 반면, 저변형률부하조건에서는 그 비가 커지게 되기때문이라 생각된다. 한편, 그림중에는 $2N_c$ 에 기준한 TMCP강재의 최적피로곡선을 수명에 대한 안전계수, $f_N=20$ 과 변형률에 대한 안전계수, $f_s=2$ 를 고려하여 이동시킨 곡선을 각각 나타내고 있다.

보일러 및 압력용기에 관한 ASME Code Sec. III, Div.1 및 Sec.VIII, Div.2⁸⁾에서는 위의 두 안전계수를 고려하여 얻은 곡선중 하방에 위치하는 곡선끼리 이은 곡선을 사용재료에 대한 설계피로곡선(design fatigue curve)으로 하도록 규정하고 있다. 또한, 그림중에 인장강도 550MPa이하, 사용온도 350°C 이하에서 사용되는 보일러 및 압력용기용 저탄소강재에 대하여 ASME에서 공통적으로 주고 있는 설계피로곡선도 함께 비교하여 나타내었다⁹⁾.

그림에서 TMCP강재의 설계피로곡선이 ASME 설계피로곡선의 상방에 위치하여 TMCP강재가 보일러 및 압력용기용재료로서 충분한 저사이클피

로강도를 가지고 있음을 알 수 있다. 그러나, 본 실험결과들은 상온의 실험조건하에서 얻어진 것들이기 때문에, ASME에서 규정하고 있는 최고사용온도(350°C)에서의 실험결과와의 비교, 검토가 행해져야 할 것으로 사료된다.

한편, Fig. 6의 세로축성분인 ϵ_{ta} 는 히스테리시스 루프로 부터 탄성변형률 성분(ϵ_{ea})과 소성변형률 성분(ϵ_{pa})으로 나뉘어 진다. Fig. 7은 이와 같이 나뉘어진 ϵ_{ea} 및 ϵ_{pa} 와 $2N_c$ 및 $2N_f$ 와의 관계를 TMCP강재에 대해 도시한 것이다. (단, 그림중의 ϵ_{ea} 및 ϵ_{pa} 는 N_f 에 기준한 경우 $(1/2)N_f$ 에서, N_c 에 기준한 경우 $(1/2)N_c$ 에서의 히스테리시스 루프로 부터 나뉘어진 탄성성분과 소성성분이다. 여기서, ϵ_{ea} 와 각 수명($2N_f$, $2N_c$)과의 관계는 Basquin식인 (3)식으로 나타내어 진다⁷⁾.

$$\begin{aligned} \epsilon_{ea} &= C_e \cdot (2N_f)^{-a} \\ &= C_e' \cdot (2N_c)^{-a'} \end{aligned} \quad (3)$$

또한, ϵ_{pa} 와 각 수명과의 관계는 Manson-Coffin식인 (4)식으로 표현된다⁸⁾.

$$\begin{aligned} \epsilon_{pa} &= C_p \cdot (2N_f)^{-b} \\ &= C_p' \cdot (2N_c)^{-b'} \end{aligned} \quad (4)$$

따라서, ϵ_{ta} 와 각 수명과의 사이에는 (5)식에 나타낸 것과 같은 관계가 있다.

$$\epsilon_{ta} = C_e \cdot (2N_f)^{-a} + C_p \cdot (2N_f)^{-b}$$

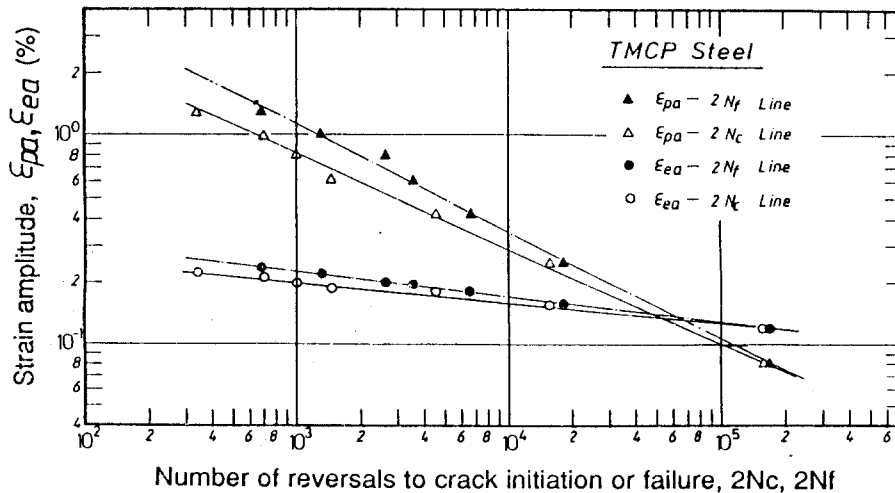


Fig. 7 Several strain-life line for TMCP steel.

$$= C_e' \cdot (2N_c)^{-a'} + C_p' \cdot (2N_c)^{-b'} \quad (5)$$

Fig.7의 결과를 최소자승법으로 처리하고 TMCP 강재에 대해 구한 (3), (4)식에서의 각 계수 및 지수를 Nor강재와 비교하여 정리하면 Table 4와 같다. Table 4의 탄성성분변수인 C_e, C_e', a, a' 는 재료의 반복응력-변형률거동과 관계가 있다. 따라서, Fig.4에 나타나 있는 두 강재의 반복응력-변형률거동이 거의 동일하므로 Table 4에서의 결과와 같이, 탄성성분변수들의 강재에 따른 차이는 거의 나타나지 않았다. 또한, 이들 탄성성분변수들은 재료가 탄성거동을 하는 고사이클영역에서의 피로수명을 결정하므로, 이전의 연구결과들^{9,10})에서 나타난 바와 같이 두 강재의 고사이클피로강도도 거의 동일할 것이라는 것을 알 수 있다.

Fig.8은 TMCP와 Nor강재의 $\epsilon_{pa}-N_f$ 와의 관계를 著者들이 이전의 실험에서 사용한 강종(SM41B, SF45A)들에 대한 결과와 함께 나타낸 것이다¹¹⁾. 그림에서, 각 실험재료들의 ϵ_{pa} 와 N_f 와의 관계는 분산폭이 있기는 하지만, 동일한 분산대내에 존재하여 강

종 및 재료강도에 따른 수명차가 거의 나타나지 않음을 알 수 있다.

Fig.9는 위의 Fig.8에서 사용한 4종의 강재에 대한 ϵ_{ta} 와 N_f 와의 관계를 이전의 문헌으로부터 인용된 보일러와 압력용기용 강재인 SB46, SCM2, SCM3, SCM4 (이상은 일본공업규격에 의한 강종의 분류기호)에 대한 실온조건하에서의 실험결과와 비교하여 나타낸 것이다¹²⁾. 그림에서, 대부분의 실험점들은 하나의 분산대내에 수렴하고 있으나, 문헌에서 인용된 SCM4의 결과만이 분산대의 하방에 위치하여 다른 재료들에 비해 낮은 피로강도를 나타내고 있다.

3.2. TMCP강 용접부의 저사이클피로특성

Fig.10은 TMCP강 SAW용접부의 판표면 및 판내부의 경도분포를 나타내고 있다. 또한, 그림에는 용접부 중 대표적인 영역의 미세조직사진도 함께 나타나 있다. 용접열영향부의 경도치는 대체

Table 4 Coefficients and exponents of Basquin's and Manson-Coffin eq.

	C_p	C_e	a	b	C_p'	C_e'	a'	b'
TMCP	0,4068	0,00514	0,1206	0,5167	0,1757	0,004	0,0996	0,4473
Normalized	0,580	0,00432	0,10	0,5624	0,2879	0,004	0,0925	0,50

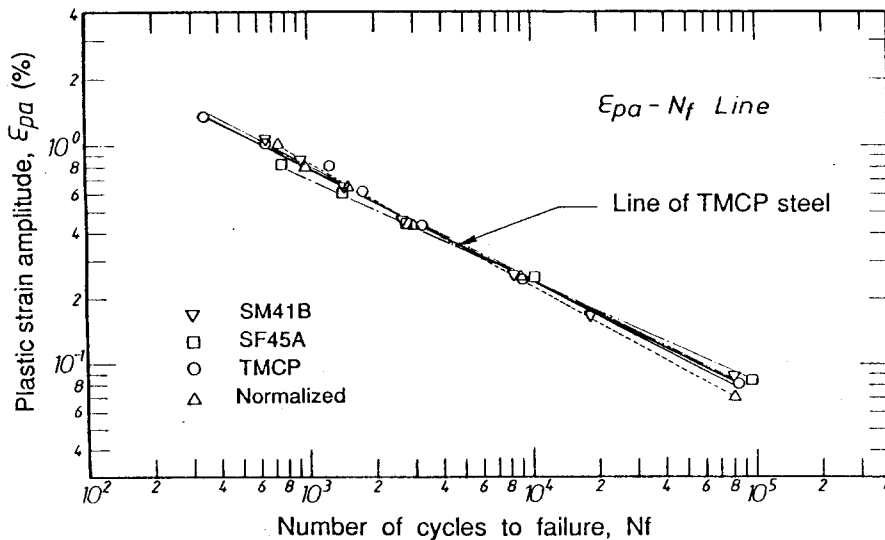


Fig. 8 Plastic strain-life lines based on failure of specimen

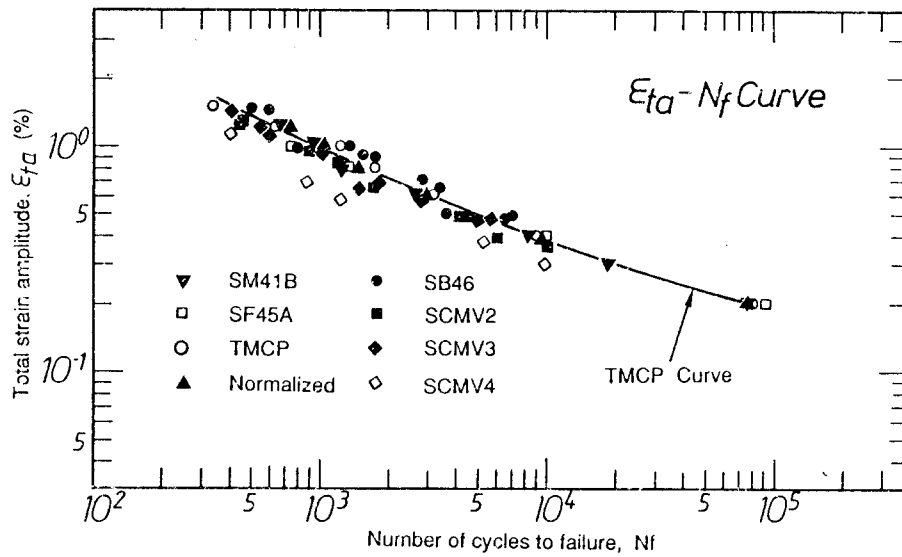


Fig. 9 Comparison of the obtained results with the existing data

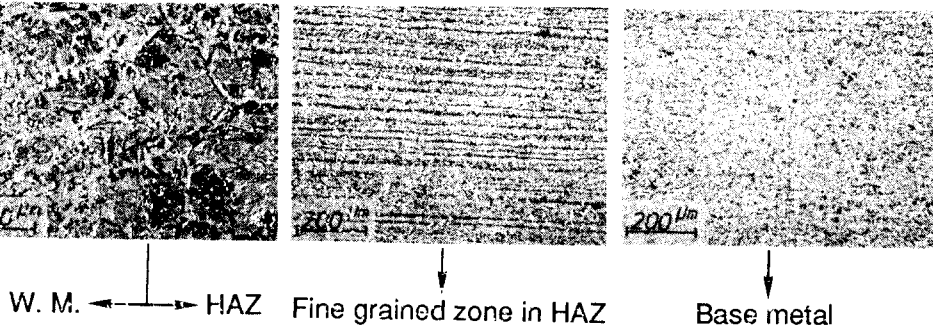
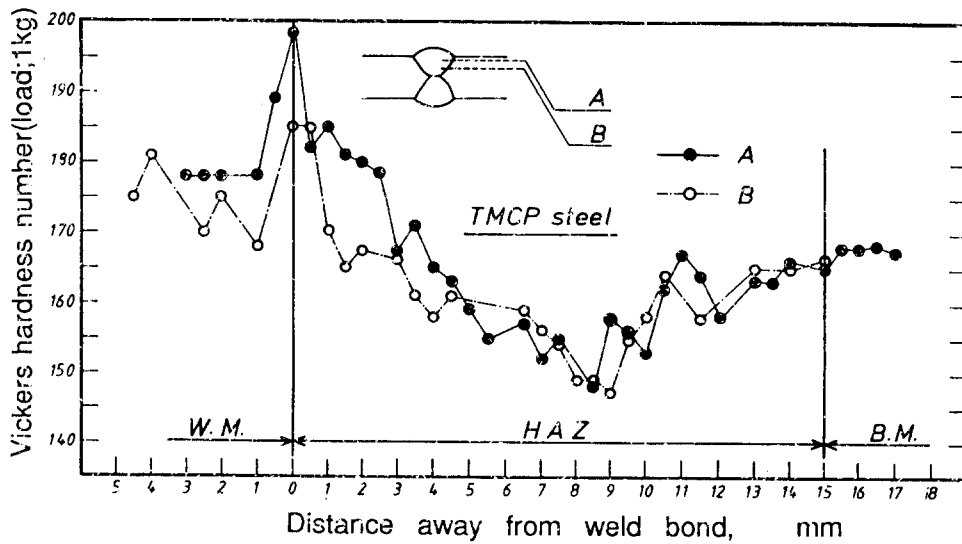


Fig. 10 Micro-Vickers hardness distribution and microstructure of TMCP welds

적으로 모재의 그것에 비해 낮아 용접열사이클로 인해 열영향부에서 연화가 발생함을 알 수 있다. 특히, 용접본드부로부터 약 9mm 떨어진 영역이 최고의 연화현상을 나타내며, 이 영역은 조직사진에 보여지는 바와 같이, 용접열영향부 세립역 (fine grained zone)이었다. 이와 같이 용접열영향부에서 연화현상이 발생하는 것은 TMCP강의 강화기구인 가속냉각효과가 용접열사이클로 인해 소실되었기 때문이다.

Fig. 11은 TMCP강 용접부에 대한 변위제어 저사이클피로시험결과를 결보기전변형률진폭(이하, $\bar{\epsilon}_{fa}$ 로 표기함)과 $2\dot{N}_c$ 및 $2N_f$ 와의 관계로 각각 나타낸 것이다. 여기서, $\bar{\epsilon}_{fa}$ 란, 표점거리 50mm인 신장계에 의해 용접부 전 조직에 걸쳐 반복부하되는 일정변위를 신장계의 표점거리로 나눈 값이다. 실제로는 용접금속과 열영향부 및 모재의 강도특성이 각기 상이하기 때문에 일정변위를 반복부하시 각각 다른 변형률거동을 나타낼 것이나, 본 실험에서는 용접부 전체의 평균변형률로서 $\bar{\epsilon}_{fa}$ 를 취했다¹³⁾.

$\bar{\epsilon}_{fa} \leq 0.6\%$ 인 조건에서 시험편의 파단위치는 모두 열영향부 세립역이었다. 이와 같이 용접열영향부 세립역에서 파단이 발생하는 것은 Fig. 10의 경도분포에서 알 수 있는 바와 같이, 세립역에서 용접열사이클로 인한 연화현상이 가장 현저하여 반복부하시, 변형저항이 가장 작은 세립역으로 변형률집중이 일어났기 때문이라 사료된다¹³⁾.

$\bar{\epsilon}_{fa} = 0.8\%$ 인 조건에서 시험편의 파단은 용접금속에서 발생하였다. 이것은 고변형률역에서의 수명을 가장 크게 좌우하는 연성(ductility)이 용접금속에서 가장 작았거나, 용접으로 인한 미세용접결함이 용접금속에 존재했기 때문이라 사료된다^{13,16,17)}.

한편, 용접부의 저사이클피로수명곡선은 $\bar{\epsilon}_{fa}$ 를 기준으로 하여 수식화될수 있음이 이전의 연구결과들에서 보여지고 있다¹³⁻¹⁶⁾.

$$\begin{aligned} \bar{\epsilon}_{fa} &= A \cdot (2N_f)^{-\alpha} \\ &= B \cdot (2N_c)^{-\beta} \end{aligned} \quad (6)$$

본 실험결과들을 이용하여 (6)식의 계수 및 지수들을 구하여 정리하면 (7)식과 같다.

$$\begin{aligned} \bar{\epsilon}_{fa} &= 6.22 \cdot (2N_f)^{-0.293} \\ &= 4.312 \cdot (2N_c)^{-0.263} \end{aligned} \quad (7)$$

한편, 그림중에 나타내져 있는 분산대는 이전의 연구자들에 의해 행해진 보일러 및 압력용기용강 용접부에 대한 저사이클피로시험 결과들을 시험편의 파단수명에 기준하여 정리한 것이다^{13,14)}. TMCP강 용접부의 파단수명은 분산대의 상방에 존재하여 여타의 강재에 비해 충분한 용접부 피로특성을 나타냄을 알 수 있다.

3.4. 용접으로 인한 연화현상이

저사이클피로강도에 미치는 영향

모재 및 용접부의 반복응력 - 변형률관계식과

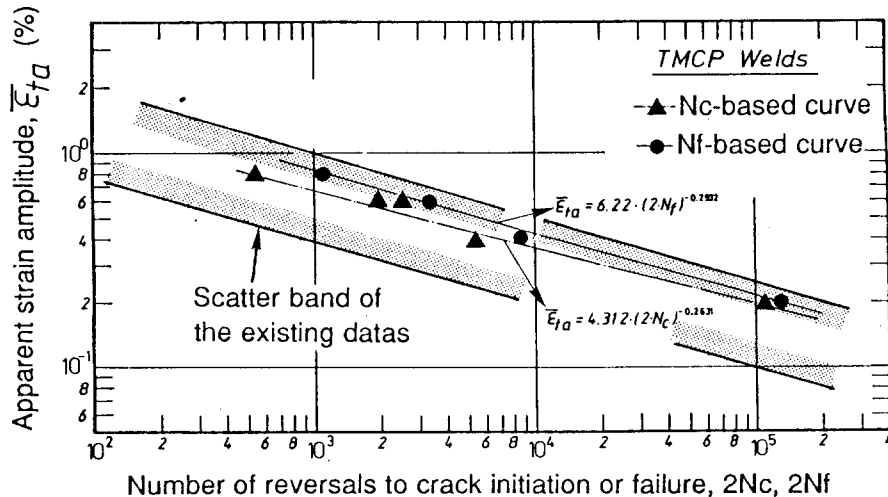


Fig. 11 Low cycle fatigue curves of TMCP steel weldment

저사이클피로수명식인 (2), (4), (6)을 조합하면, (8)식을 얻는다.

$$\begin{aligned} \sigma_a &= K' \cdot (C_p \cdot (2N_f)^{-b})^{n'} = K' \cdot (C_p' \cdot (2N_c)^{-b})^{n'} \\ &= \bar{K} \cdot (A \cdot (2N_f)^{-\alpha})^{\bar{n}} = \bar{K} \cdot (B \cdot (2N_c)^{-\beta})^{\bar{n}} \end{aligned} \quad (8)$$

여기서 \bar{K} , \bar{n} 는 $\bar{\epsilon}_{ta}$ 에 기준한 용접부의 반복강도계수 및 반복변형률경화지수이며, 그 외의 계수 및 지수들은 앞서 설명한 것과 같다.

Fig. 12는 TMCP강 모재 및 용접부의 반복응력(σ_a)과 수명과의 관계를 나타낸 것이다. 여기서, 각각의 직선들은 (8)식에 의해 얻어진 결과이다. 그림에서, 모재와 용접부의 수명차는 단수명축으로

갈수록 커지게 됨을 알 수 있으며, 용접부의 피로수명과 모재의 피로수명과의 비는 N_f 에 기준한 경우 최고 약 3.5이었으며, N_c 에 기준한 경우 약 3이었다. 이와 같이 용접부의 저사이클피로 수명이 모재의 수명에 비해 저하하는 것은 앞서 고찰한 바와 같이 용접으로 인해 열영향부에 발생하는 연화역으로 변형률이 집중하여 그곳에서 파단이 일어났기 때문이라 사료된다.

또한, 단수명축으로 갈수록 양수명간의 차이가 커지는 것은 연화역으로의 변형률집중의 정도가 고변형률일 수록 커진다는 것과 저변형률부하시, 모재의 경우 크게 반복연화하여 반복응력(σ_a)이

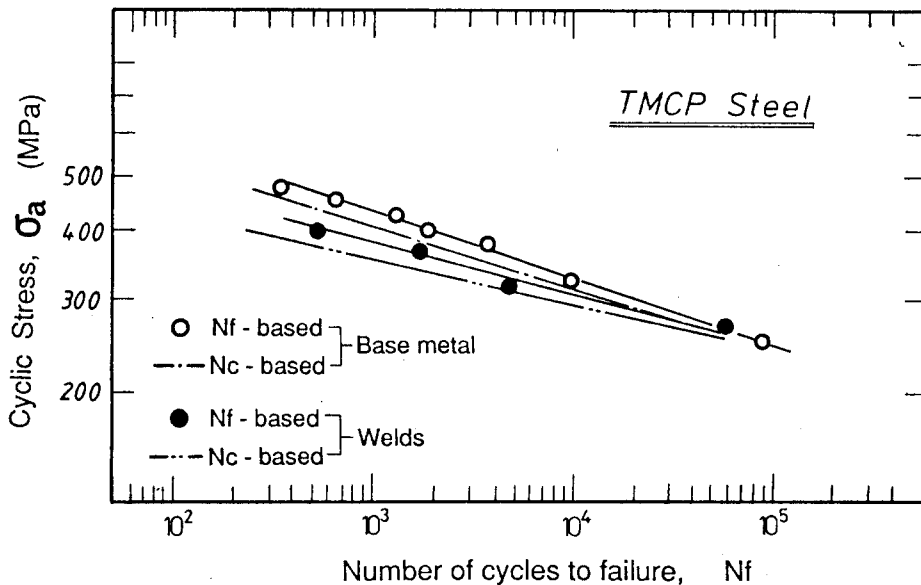
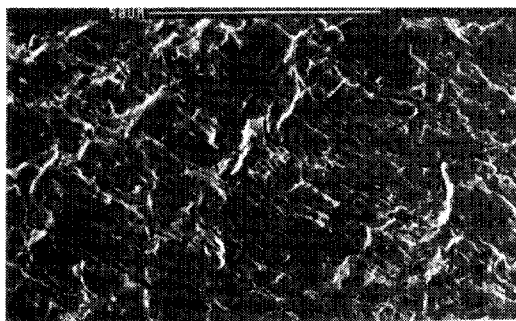
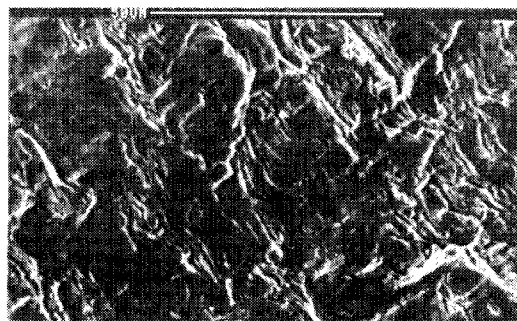


Fig. 12 Cyclic stress-number of cycles curve of TMCP steel and welds



(a) TMCP base metal, $\epsilon_{ta} = 0.2\%$



(b) TMCP welds, $\epsilon_{ta} = 0.2\%$

Photo. 1 Comparison of low cycle fatigue fracture surface of TMCP base metal and welds (Here, welds means the fine grained zone in HAZ)

반복초기의 응답응력에 비해 상당히 낮아지지만, 용접부의 경우는 거의 반복연화현상을 나타내지 않는다는 것에 기인하는 것이라 사료된다.

3. 4. TMCP강 모재 및 용접부 피로파면의 특징

Photo. 1(a), (b)는 각각 TMCP강 모재와 용접부에 0.2%의 전변형률진폭을 부하하여 파단시킨 시험편의 파단면을 SEM으로 확대, 촬영한 사진이다. 먼저, 모재의 경우인 (a)에 있어서는 딥플형의 연성파면과 스트라이에이션이 혼재된 상태로 나타나 있다. 반면, 용접부인 (b)에 있어서는 러브마크(rub mark)와 스트라이에이션이 혼재된 상태로 나타나 있다. 이와 같이 저변형률 부하조건임에도 불구하고 용접부에서 러브마크가 나타나는 것은 앞서 고찰했던 바와 같이, 열영향부 세립역으로 변형률집중이 일어나, 압축시 열영향부 세립역이 모재의 경우보다 더 큰 압축변형을 받았기 때문인 것으로 사료된다¹⁸⁾.

4. 결 론

HT50급 TMCP강재를 대상으로 모재와 용접부에 대해 저사이클피로시험을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 이 강재는 저변형률진폭범위에서는 반복연화하지만, 1.0%이상의 고변형률진폭범위에서는 반복경화하였다.

2) 이 강재의 저사이클피로수명은 동급의 노오멀라이즈강재와 거의 동일하였으며, 부하변형률진폭, ϵ_{ta} 와 균열발생수명, $2N_c$, 및 시험편 파단수명 $2N_f$ 와는 다음의 관계로 나타났다.

$$\begin{aligned}\epsilon_{ta} &= 0.00514 \cdot (2N_f)^{-0.1205} \\ &\quad + 0.4068 \cdot (2N_f)^{-0.5157} \\ &= 0.004 \cdot (2N_c)^{-0.0996} \\ &\quad + 0.1757 \cdot (2N_c)^{-0.4473}\end{aligned}$$

3) 용접부의 저사이클피로수명은 심한 경우 모재피로수명의 약 0.3배로 저하되었다. 한편, 절보기전변형률진폭, ϵ_{ta} , 와 $2N_c$ 및 $2N_f$ 와의 관계는 다음의 식으로 나타났다.

$$\begin{aligned}\epsilon_{ta} &= 6.22 \cdot (2N_f)^{-0.2932} \\ &= 4.312 \cdot (2N_c)^{-0.2631}\end{aligned}$$

4) TMCP강 모재와 용접부의 저사이클 피로수명차는 단수명역으로 갈수록 크게 나타났다.

5) 저사이클피로파면은 모재에서는 딥플과 스트라이에이션이 혼재된 상태로 나타났으나 용접부에서는 러브마크가 지배적으로 나타났다.

후 기

이 연구는 1989년도 한국과학재단연구비지원(과제번호; 891-0907-027-1)에 의해 수행 되었음을 밝혀 두는 바이며, 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- 1) 渡邊：鐵鋼新素材，TMCP鋼の適用分野，日本溶接學會誌，55-7，(1986)，p. 411.
- 2) 日本造船研究協會：第193研究部會：新製造法による50キロ級高張力鋼の有効利用に関する研究(第1次報告書)，(1983).
- 3) 日本造船研究協會，第193研究部會：新製造法による50キロ級高張力鋼の有効利用に関する研究(第2次報告書)，(1984).
- 4) 河野，外3人：鐵鋼新素材，TMCP鋼溶接部の使用性能，日本溶接學會誌，55-6，(1986)，pp. 349-353.
- 5) 趙相明：切欠きにおける疲労き裂の初期傳播特性に関する研究，日本大阪大學博士學位論文，(1987)，p.31.
- 6) ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Sec. III, Div. 1, Sec. VIII, Div. 2, (1986).
- 7) Fuchs, H.O., Stephens, R.I.: Metal fatigue in engineering. A Wiley Int. Pub., (1980), p.78.
- 8) Tavernelli, J.F., Coffin, L.F.: Experimental support for generalized equation predicting low cycle fatigue, Trans. ASME, J. Basic Eng., Vol. 84, No. 4, (1962), p. 533.
- 9) 김영식, 한명수 외2명：TMCP高張力鋼 溶接部の 疲勞破壞特性에 關한 研究，韓國船舶機關學會誌，第12卷，第1號，(1988)，pp. 47~52.
- 10) 矢島，多田，外4人：TMCP型 高張力鋼板の 船舶・海洋構造物への有効利用，三菱重工技報，

- Vol. 23, No. 4, (1986), pp. 383~392.
- 11) 김영식, 한명수, 노재충: 構造用低炭素鋼材의 低 사이클 疲勞特性에 관한 研究. 大韓機械學會 論文集, 第13卷, 第2號, (1989), pp. 307~315.
 - 12) D'Haeyer, R., Simon, P.: Low-cycle fatigue behavior of thick high-strength steel plates for pressure vessels, ASTM STP 770, (1982), pp. 296~310.
 - 13) 日本機械學會: 金屬材料疲勞強度의 設計資料 IV, 低사이클 疲勞強度, (1983), pp. 186~187.
 - 14) Gurney, T.R.: Fatigue of welded structures, Cambridge Univ. Press, (1979), pp. 287~289.
 - 15) Harrion, J.D.: Low cycle fatigue test on welded joint in high strength steel, Conf. on Fatigue of Welded Structures. Vol. 2. in Proceedings, The Welding Institute, (1971), pp. 194~207.
 - 16) Lieurade, H.P., Maillard-Salin, C.: Low-cycle fatigue behavior of welded joints in high strength steel, ASTM STP 770, (1982), pp. 311-336.
 - 17) Sonsino, C.M.: Low cycle fatigue behavior of the ferritic steel Fe E 460 and austenitic steel $\times 10$ CrNiTi189(AISI321) in as-received and welded states-investigation of weld defects, IIW Document, XIII-270-88, (1988).
 - 18) Hotta, T., Ishiguro, T., et al: Fractographic studies on the low cycle fatigue of steel, Cracking and fracture in welds, Pro. of 1st Int. Sym. of the JWS, (1971), IIIA 9.1~9.13.