

HT60급 TMCP강 용접부의 피로 거동

Fatigue Behavior of Welded Joints in HT60 Grade TMCP Steel

용 환 선¹⁾ · 김 석 태²⁾ · 조 용 식³⁾
YONG, Hwan Sun KIM, Seok Tae CHO, Yong Sik

ABSTRACT : Application of the relationship $da/dN=C(\Delta K)^m$ is effective in the analysis of fatigue crack growth life. The values of material constant C and m have great influences on the predicted fatigue life and the relationship between fatigue crack growth rate(da/dN) and stress intensity factor range(ΔK) is effective in fatigue crack growth behavior.

In this paper, fatigue crack growth behavior of the welded joints in HT60 grade TMCP(Thermo Mechanical Control Process) steel have been studied. To evaluate the fatigue crack growth rates of HT60 grade TMCP steel, fatigue test was performed by base metal(BM), heat affected zone(HAZ) and weld metal(WM) in TMCP steel at room temperature. We determined the relationship of da/dN - ΔK by correlation between C and m obtained from the Paris-Erdogan power law data supplied HT60 grade TMCP steel.

The obtained results from this study indicate that fatigue crack growth rate of TMCP steel is not influenced by softening effect which occurs in the HAZ when high heat input weld is carried out. Softening effects, which affect fatigue properties, are shown that it is not affected to the fatigue growth rates significantly.

1. 서 론

90년대 들어서 건설중이거나 건설계획중인 교량 중 시공성 또는 품질관리 측면에서 강교로 설계되고 있는 교량의 비율이 증가하고 있는 추세이

다. 또한, 교량의 수명이나 공용중 유지·보수 등의 비용을 고려하면 전체적인 경제성 면에서 강교가 콘크리트 교량에 비하여 비교 우위를 갖는다는 인식이 확산되고 있어서, 앞으로 강교의 건설은 확대될 것으로 예상할 수 있다. 특히, 강재는 콘크

1) 정회원, 수원대학교 토목공학과 교수, 공박
2) 수원대학교 토목공학과, 공학석사
3) 수원대학교 토목공학과 대학원, 석사과정

리트에 비하여 비강도(강도/중량비)와 비강성(강성/중량비)이 커서 장시간일수록 유리하며 자연경관과 어울리는 미관 추구, 지형적 조건 및 경제성 등으로 장대교에서 강교의 채용이 증대되고 있는 추세이고 이러한 현상은 21세기까지 계속될 전망이다.

또한, 토목구조물이 장대화 및 대형화됨에 따라서 강구조물에 사용하는 강재에 대하여 고장력화, 극후화를 요구하게 되었고, 이러한 요구에 따라 시공된 강구조물은 시공시 용접부의 갈라짐, 용접 결함 유발, 열영향부의 연화로 인한 인성의 저하 등이 문제점으로 대두되고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 강도, 용접성, 경제성 및 용접부 인성 등의 면에서 우수한 구조용 강재가 요구되었고, 이러한 요구에 부응하여 국내에서도 TMCP (Thermo Mechanical Control Process) 강재를 개발하여 사용하게 되었다.^{1,3,4)} TMCP 강은 저탄소 당량이므로 대입열 용접시 용접열에 의하여 재가열을 받아서 가속냉각 효과가 소멸되어 이로 인해 발생하는 용접부 연화현상이 보고되기도 하지만 구체적으로 규명되지 않은 실정이다. 또한 용접부 연결상세에서의 연화현상이 구조물의 국부적인 거동에 미치는 영향이 명확히 규명되지 않아서 국내에서는 아직 교량에 적용을 못하고 있는 실정이다. 강구조물에 사용되는 구조용 강재는 그 용도에 따른 안전성 및 신뢰성의 확보가 엄밀히 요구되며, 이 때 강재의 피로균열 성장거동의 정량적 평가는 구조물의 공용수명을 결정하는데 중요한 자료로 활용된다.

피로에 의한 파괴과정을 크게 나누어 보면 균열의 발생과 성장과정으로 나눌 수 있으며, 피로균열의 성장에 대한 연구는 파괴역학적 수법을 이용하여 보다 정량적인 해석이 수행되어지고 있다. 이러한 연구에서는 피로균열성장률과 응력확대계수범위에 대한 관계와 불안정 파괴상태에서 한계 균열길이가 응력 변화에 따라 어떤 경향을 가지고 변하는지 연구되었고, 이러한 관계들로부터 반복하중을 받는 시험편을 이용한 피로시험을 통하여

피로수명을 예측하고 있다. 피로수명을 정량적으로 예측하는 경우 피로수명의 대부분은 침예한 균열이나 결함으로부터 피로균열의 성장과정에 소요되고 있어 피로균열의 성장특성이 중요한 의미를 갖는다. 이미 외국에서는 강교량의 피로거동에 관한 지속적인 연구를 통해 많은 실용적인 데이터를 축적하였고, 이로부터 각종 강재의 강구조물 설계에 실용화하고 있다.

강구조물의 대형화 및 장대화에 따르는 강재의 고강도화, 극후화, 용접성의 개선 등의 조건에 부응하기 위해 개발된 TMCP 강은 동일한 강도를 갖는 종래 강에 비하여 내균열성이나 인성의 관점에서 용접성이 뛰어나고, 취성파괴에 대한 저항성능이 우수한 강종으로 인식되고 있지만 구조접합 상세에서 연화현상이 부재의 국부적인 거동에 미치는 영향이 명확히 규명되지 않았고, 안전성을 보증할 수 있는 데이터가 축적되지 않아 도로교나 철도교에 적용할 수 있는 설계 및 제작에 관한 시방규준이 제정되지 않은 상태이다.^{3,4)} 이에 본 연구는 HT60급 TMCP 강의 피로시험을 통하여 용접부의 연화현상이 피로균열성장률에 미치는 영향과 모재 및 열영향부, 용착금속의 피로균열 성장거동을 정량적으로 분석하여 TMCP 강강의 강교에의 적용에 대비한 기초 자료를 제공하고, 아직 초기단계에 있는 TMCP 강의 구조용 강재로서의 적용성과 사용성을 확인하기 위하여 TMCP 강 용접부의 피로균열 성장특성을 규명하는데 목적이 있다.

2. 피로균열성장 해석

일반적으로 강구조물의 피로균열성장은 보통 초기균열 발생 및 성장단계, 그리고 최종파괴의 3 단계로 구분되고 있는데, 공학분야에서의 피로해석은 피로균열의 성장단계인 제2단계에 집중되고 있다.

그림 1과 같은 피로균열선단 끝에서의 응력은 식(1)과 같이 표현된다.

$$\sigma_{ij} = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}(\theta) \quad (1)$$

여기서, σ_{ij} : 임의 방향의 응력

($i=x,y,z$; $j=x,y,z$)

r, θ : 균열끝에서의 극좌표

$f_{ij}(\theta)$: 균열끝에서의 극좌표

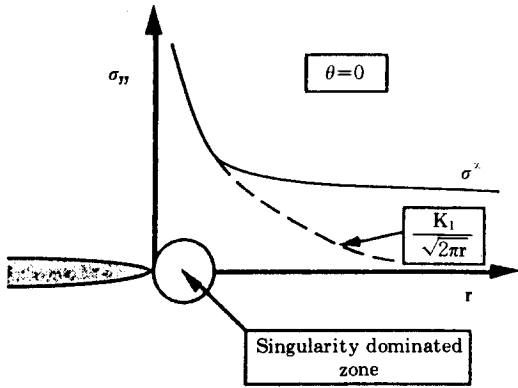


그림 1 모드 I 변형에서 균열선단 근방의 응력

식(1)에 따라 균열선단 끝에서의 응력장은 응력 확대계수 K 에 의해 표현되며 함수 $f_{ij}(\theta)$ 를 제외하고 모든 하중모드에 적용되며 기하학적 형상에 독립적이다.

유한 평판에서의 응력확대계수 K 의 일반적인 표현은 식(2)와 같다.

$$K = \sigma \sqrt{\pi a} \cdot f(a/w) = \beta \sigma \sqrt{\pi a} \quad (2)$$

여기서, a : 균열길이

σ : 공칭응력

β : 기하학적 형상함수

응력확대계수는 식(2)에 의해 전응력장에 대해 표현될 수 있으며, 두 개의 다른 균열선단 끝에서 응력강도가 같으면 응력분포도 같게 된다.

선형파괴역학의 개념을 기초로 한 피로균열 성장단계에서의 균열성장수명 해석은 반복횟수당의

하중이력에 따른 균열성장거동을 나타내는 피로균열성장률(da/dN)과 응력확대계수범위(ΔK)를 구체화한 Paris-Erdogan식이 사용되고 있다.⁹⁾ 이 식에서 피로균열성장거동은 응력확대계수범위 ΔK 에 의해 지배되고, 재료상수 m 값, C 값은 균열성장수명 예측에 큰 영향을 미친다.

$$da/dN = f(\Delta K) = C(\Delta K)^m \quad (3)$$

여기서, da/dN : 피로균열성장률

ΔK : 응력확대계수범위

C, m : 재료상수

식(3)은 반복하중하에서 하중이력을 균열선단의 3가지 변형양식중 제 I 모드인 개구모드(Opening mode) 파괴에서 응력확대계수범위($\Delta K = K_{max} - K_{min}$)로서 나타낼 수 있고, 따라서 응력확대계수범위 ΔK 는 매 Cycle당의 최대, 최소응력과 재료의 형상에 관계되는 함수로서, 최대응력이 항복응력보다도 커지더라도 응력이 작으면 선형탄성 파괴역학의 적용이 가능하고, $\log(da/dN) = \log(C(\Delta K)^m m)$ 의 관계로 해석하여 양대수 좌표계에서 직선관계를 유지한다는 특성이 있다.

피로균열성장률을 나타내는 da/dN 은 측정된 균열길이와 하중반복횟수를 이용하여 할선법(Secant Method)과 7점 증분다항법(Seven Point Incremental Polynomial Method)중 할선법을 이용하여 구하였다. 할선법은 피로균열성장길이와 하중반복횟수를 나타내는 $a-N$ 선상에서 근접한 점을 연결하는 직선의 기울기로서 평가하며 피로균열성장률 da/dN 은 식(4)와 같이 표현할 수 있다.

$$\left(\frac{da}{dN}\right)_a = \frac{(a_{i+1} - a_i)}{(N_{i+1} - N_i)} \quad (4)$$

식(4)로부터 계산된 da/dN 은 $(a_{i+1} - a_i)$ 구간에서의 평균 균열성장률이다. 응력확대계수범위 ΔK 는 소규모 항복 조건하에서 균열범위의 응력강도를 평가하는 것으로 CT시험편에 대한 ΔK 의 계산식

은 ASTM E647-91에 제시된 식(5)를 사용하여 평가할 수 있다.¹⁰⁾

$$\Delta K = \frac{\Delta P(2+\alpha)}{B\sqrt{W}(1-\alpha)^{3/2}}(0.886+4.64\alpha-13.32\alpha^2+14.72\alpha^3-5.6\alpha^4) \quad (5)$$

여기서, ΔP : 하중범위
 B : 시험편 두께
 $\alpha=a/W$ a : 균열 길이
 W : 시험편 폭

3. 피로시험

3.1 시험재료 및 시편

본 연구에 사용된 강재는 두께 50mm의 HT60 급 TMCP강재로서 아아크 전류 600A, 아아크 전압 30V, 용접속도 50Cm/min, 용접 와이어의 지름 4.8mm의 용접 조건으로 하였으며 재료의 화학적 성분 및 기계적 성질은 각각 표 1 및 표 2와 같다.

표 1. 재료의 화학적 성분

Element	C	Si	Mn	P	S	S-Al
weight(%)	0.14	0.26	1.23	0.015	0.001	0.045
Element	Cr	Cu	Nb	V		
weight(%)	0.01	0.01	0.012	0.004		

표 2. 재료의 기계적 성질

σ_y	σ_b	E	$\frac{\sigma_y}{\sigma_b}$
(MPa)	(MPa)	(GPa)	
447.18	614.88	244.28	0.727

표 3. 시험편의 채취 위치 및 균열성장 경로

Specimen	Depth	Crack propagation
P Type	P 2	2 mm
	P12	12 mm
	P22	22 mm
R Type	R 2	2 mm
	R12	12 mm
S Type	S 2	2 mm
	S12	12 mm
	S22	22 mm

피로시험에 사용된 용접 CT시험편은 표면으로부터 채취 깊이 및 피로균열 성장방향에 따라 표 3 및 그림 2와 같이 분류하여 채취하였고, CT시험편의 형상은 그림 3과 같다.

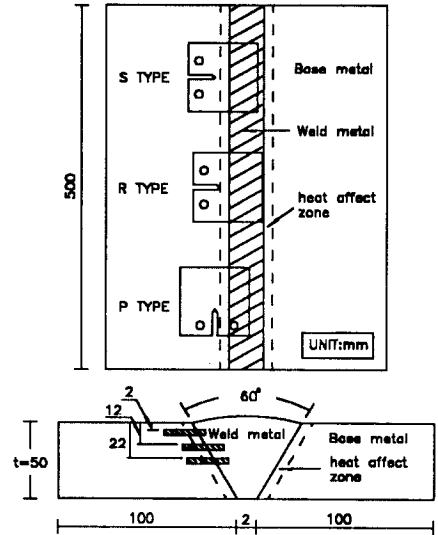


그림 2 CT 시험편의 채취 부위

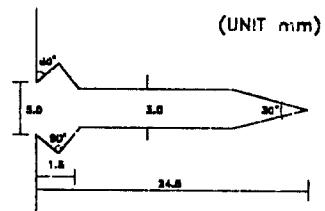
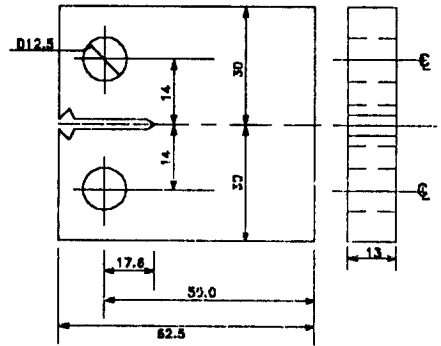


그림 3 CT 시험편의 치수와 형상

3.2 피로시험 방법

본 피로시험에서는 ASTM E647-91에 따라 CT 시험편에 인위적인 노치를 주었으며 피로균열을 발생시키기 위한 초기 예비균열은 시험편 폭의 0.1 배이상 주었다. 시험은 용량 10ton의 서보유압식 피로시험기(MTS)를 사용하였으며, 최대하중 P_{max} 는 12kN, 하중 반복주기 10Hz의 정현파형의 하중 제어방식으로 응력비 $R=0.3$ 으로 하여 피로시험을 행하였다. 피로시험의 수행과정은 그림 4와 같다.

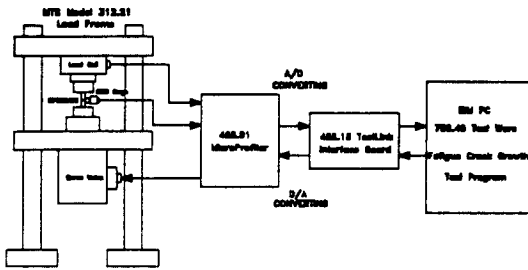


그림 4 피로시험 수행 과정

균열성장길이는 clip-on gage로부터 얻어지는 균열개구변위 COD(Crack Opening Displacement)와 하중사이의 컴플라이언스를 이용하여 Kikukawa-compliance법을 이용하여 측정하였다. 측정된 균열길이를 이용하여 응력확대계수 범위를 ASTM E647-91에서 제시한 식(5)를 이용하여 구하였다.

4. 시험 결과 및 고찰

HT60급 TMCP강의 CT시험편의 피로시험결과를 이용하여 용접부의 피로균열성장 거동을 분석하기 위해 각 깊이(2mm, 12mm, 22mm)에서 R type, P type의 용접부에서의 피로균열성장률을 비교하여 그림 5, 그림 6과 표 4에 나타내었다. 또한 각 시편의 피로균열성장거동을 정량적으로 분석하기 위해 회귀분석(Regression analysis)을 수행하였다. 회귀직선의 기울기와 종축의 절편으로서 구한 Paris-Erdogan식의 재료상수 m 값 및 C 값과 각각의 데이터값의 회귀직선에 대한 신뢰도를

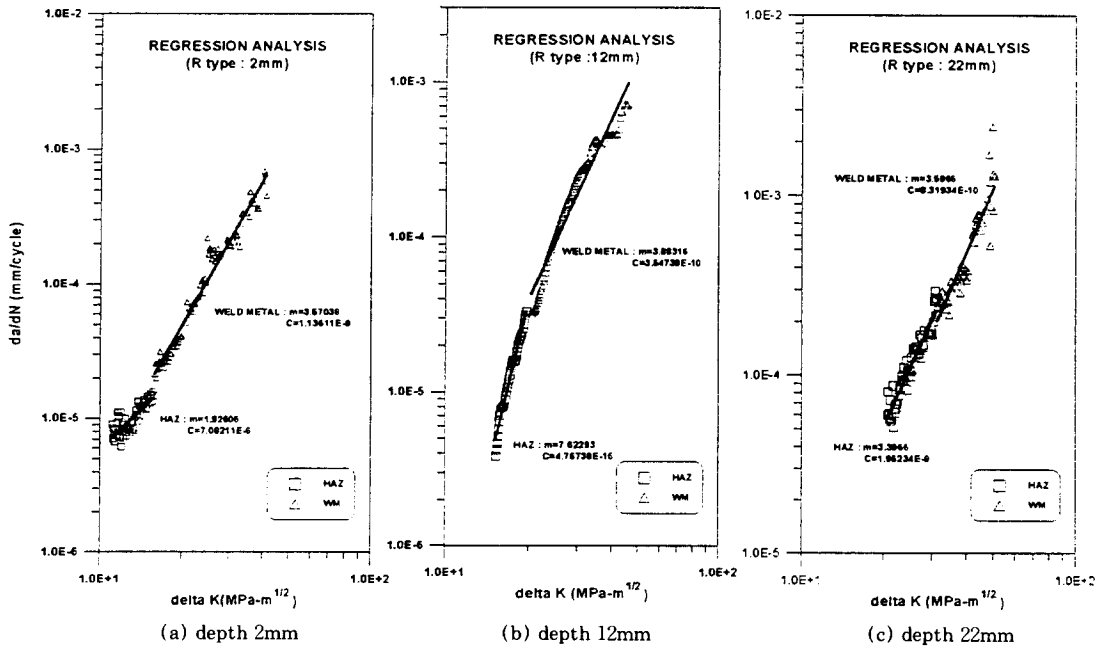


그림 5 R type 시험편의 da/dN-ΔK 관계

표 4. 각 시험편의 피로시험 결과

Specimen. No	m	C
P2	3.12501	4.66988E-09
P12	3.33368	1.83801E-09
P22	3.60041	1.11670E-09
R2	HAZ	1.92606
	WM	3.57038
R12	HAZ	7.62293
	WM	3.88316
R22	HAZ	3.3966
	WM	3.5966
S2	BM	7.06704
	HAZ	3.44166
	WM	3.18636
S12	BM	6.86418
	HAZ	3.73371
	WM	3.30768
S22	BM	5.57977
	HAZ	4.15610
	WM	3.94978

평가할 수 있는 결정계수(coefficient of determination) r^2 를 구하여 표 5에 정리하였다. 결정계수 r^2 은 산포되어 있는 데이터값에 대한 회귀식의 기

여율로서 $0 \leq r^2 \leq 1$ 의 범위내에 있으며 값이 클수록 회귀식에 대한 신뢰도가 높다는 것을 나타낸다. 균열이 열영향부(HAZ)에서 용착금속(WM)으로 성장하는 깊이 2mm R type(R2 시험편)의 경우 균열성장률은 열영향부보다 용착금속에서 빠른 것으로 나타났고, 계면에서 약간의 균열성장 지연현상이 발생하였다. R2 시험편의 열영향부 균열성장속도의 감소는 부재자체의 결함이나 불균질로 인한 현상으로 사료된다. 또한 R12 시험편의 경우 열영향부의 균열성장은 편향없이 빠른 진전을 보이고 있지만 이것은 초기 균열진전에 따르는 응력집중과 초기균열의 작용으로 사료된다. R22 시험편의 경우는 열영향부나 용착금속부에서의 피로균열성장률은 큰 차이가 나지 않는 것으로 나타났다. S type의 경우도 마찬가지로 균열성장초기의 모재부는 피로균열성장률이 R12 시험편과 동일한 특성을 가지고 용착금속이나 열영향부보다 크게 나타났다. S22 시험편의 열영향부에서만 피로균열성장 지수 m 값이 4.0을 상회할 뿐 나머지

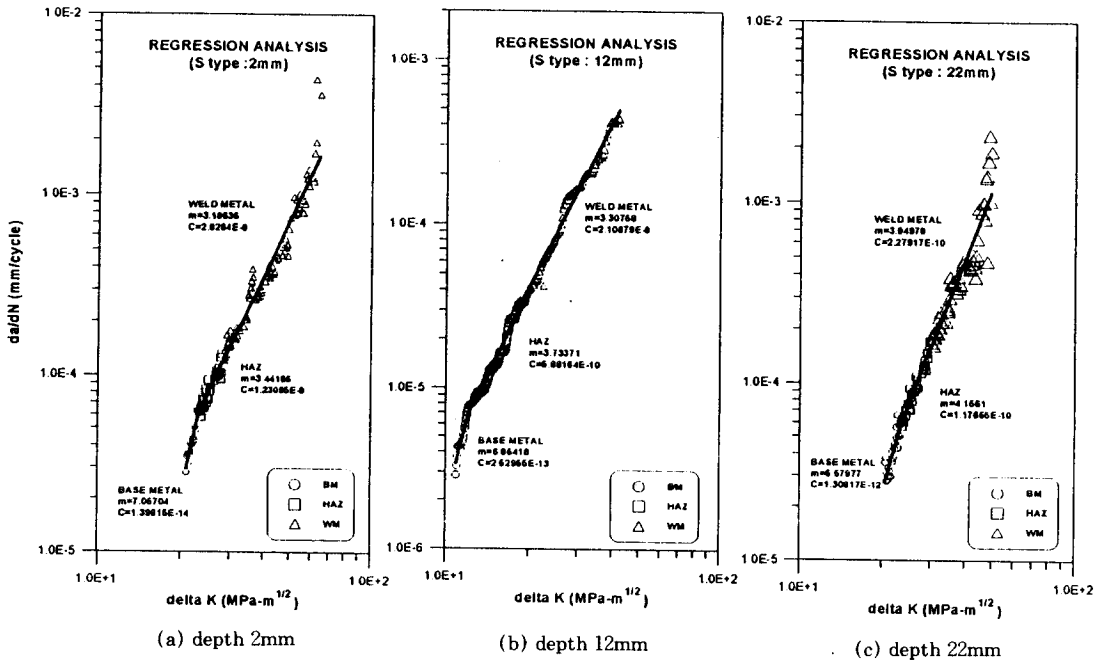


그림 6 S type 시험편의 da/dN-ΔK 관계

표 5. 재료상수 m 값과 C 값

Specimen	m	C	r^2
P 2	3.12501	4.66988E-09	0.928978
P 12	3.33368	1.83801E-09	0.989641
P 22	3.60041	1.11670E-09	0.947859
R 2	3.62464	9.33395E-10	0.979588
R 12	4.59276	3.03400E-11	0.965079
R 22	3.24003	3.17507E-09	0.956309
S 2	3.32513	1.68037E-09	0.970927
S 12	3.53487	9.89617E-10	0.992893
S 22	4.07705	1.44478E-10	0.968878

용접부의 피로균열성장지수 m 값은 4.0 이하로 나타나 전반적으로 용접부의 연화현상은 우려할 만한 수준은 아님을 알 수 있다.

HT60급 TMCP강의 CT시험편을 사용하여 피로균열성장시험을 행하여 측정된 실험결과를 P type, S type 시험편에 대해 $\log(da/dN) - \log(\Delta K)$ 상에 정리하여 모재(P type)의 회귀직선과 비교하여 그림 7 및 그림 8에 나타내었다. 균열이 열영향부(열영향부)에서 시작하여 용착금속(WM)으

로 성장한 R type에서 R2 시험편의 경우에는 모재(P2 시험편)의 피로균열 성장속도와 거의 유사하고 열영향부와 용착금속의 계면에서 약간의 피로균열성장률의 지연현상을 보일 뿐 피로균열 성장속도는 거의 모재와 같은 수준을 나타내어 거시적으로 분석하여 볼 때 열영향부의 연화현상이 모재 및 용접부의 균열성장률에는 큰 영향을 주지 않는 것으로 나타났다. R12 시험편의 피로균열 성장속도는 모재의 피로균열 성장속도보다 약간 빠른 성향을 나타내었으나 그리 유의할 수준은 아닌 것으로 사료된다. R12 시험편의 경우에도 균열성장속도는 모재(P22 시험편)와 거의 같은 수준을 나타내고 있다.

균열이 모재(BM)에서 시작하여 열영향부(HAZ), 용착금속(WM)으로 성장한 S type에서 S12 시험편의 경우 피로균열 성장속도가 거의 모재(P12 시험편)의 피로균열 성장속도와 같고 데이터의 편향도 없이 거의 같은 수준을 나타내었다. 또한 S2, S22 시험편의 경우는 피로균열 성장거동이 모재

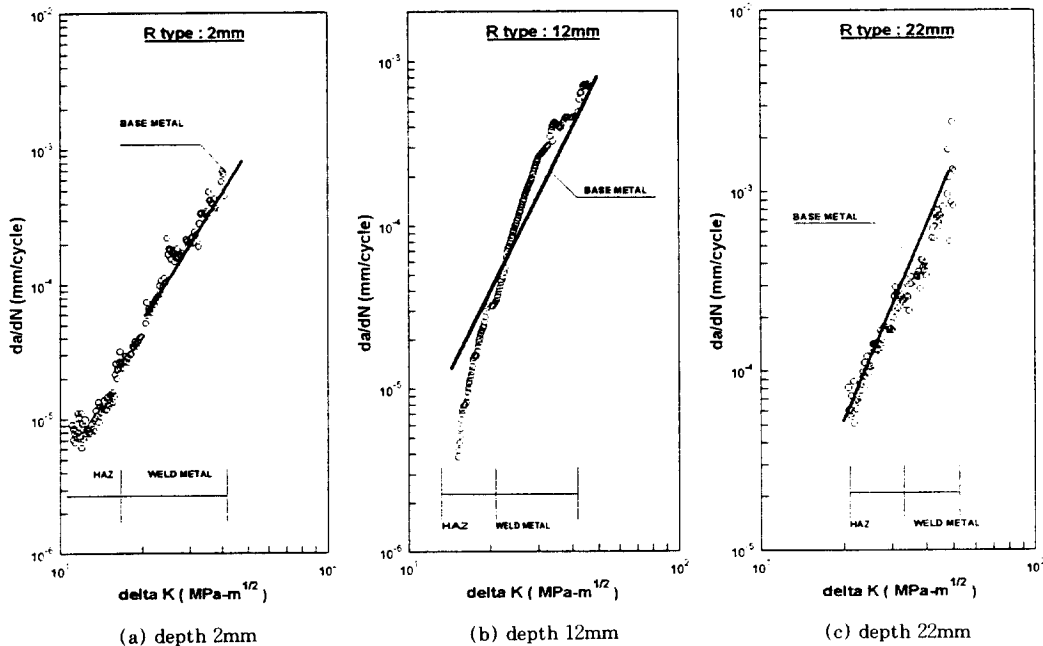


그림 7 모재와 R type 시험편의 $da/dN - \Delta K$ 관계 비교

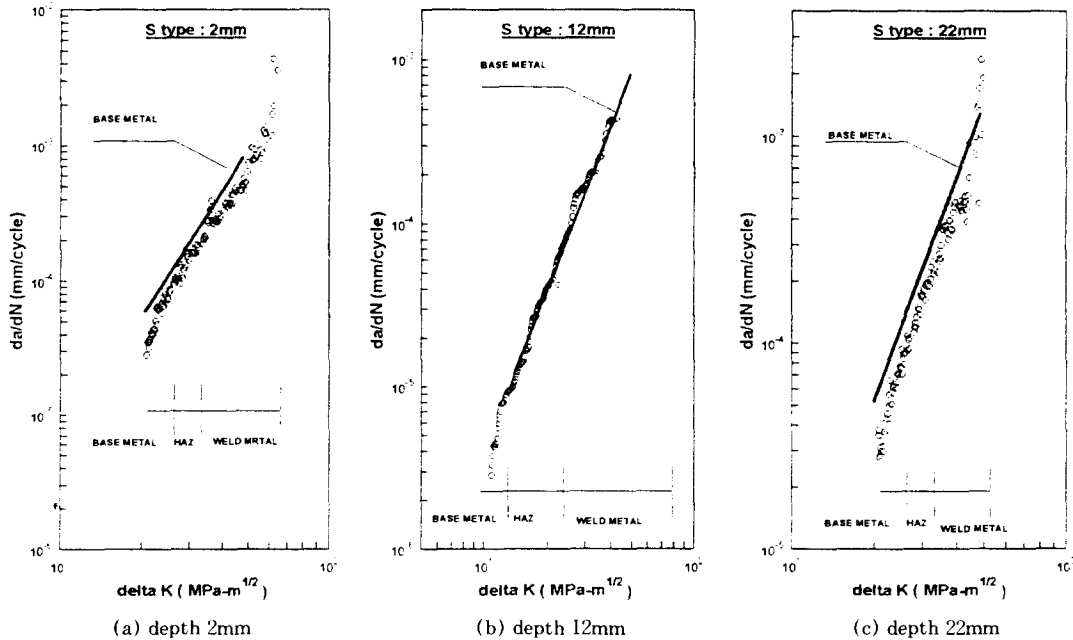


그림 8 모재와 S type 시험편의 da/ dN-ΔK 관계 비교

(P2, P12 시험편)보다 각각 고응력확대계수 범위에서 나타났지만 전체적인 피로균열 성장속도는 모재와 거의 일치하게 나타나고 있어 전반적으로 용접부의 연화현상에 의한 피로균열 성장특성의 변화는 없는 것으로 사료된다.

HT60급 TMCP강의 용접부의 피로시험결과를 각 시험별로 표 5에 정리하여 나타내었다.

외국에서 사용되는 일반 구조용강에 대한 피로설계 지침의 설계파라메타인 m 값은 미국의 AASHTO¹⁴⁾ 및 영국의 BS 5400,¹⁵⁾ 일본 JSSC의 피로설계지침¹⁶⁾에서 3.0을 사용하고 있고, 유럽의 ECCS¹⁷⁾에서는 3.5를 사용하고 있다. 이를 표 5의 HT60급 TMCP강의 m 값과 비교하여 보면 거의 유사한 값을 나타내고 있는 것을 볼 수 있다. 이와 같은 결과는 거시적인 면에서 HT60급 TMCP강의 피로균열성장률에 대한 열영향부의 연화현상의 영향은 유의할 수준이 아님을 나타낸다.

그림 9는 시험결과로부터 회귀분석한 자료를 종합하여 나타낸 것으로서 이 결과에 의하면 HT60

급 TMCP강재의 모재 및 용접이음부에서 열영향부에 따른 피로균열 성장특성이 거의 같은 범위내에 들어 있어 큰 차이가 없음을 보이고 있고 종래의 압연 HT50급 강재의 열영향부에 따른 피로균열 성장시험의 결과³⁶⁾와 비교하여도 거의 같은 경향을 보이고 있다.

피로균열 성장법칙에 있어서의 지수 m 과 계수 C 는 서로 독립적인 것이 아니라 반대수(semi-log) 그래프상에 나타낼 경우 직선관계에 있으며 $C=A/B^m$ 의 관계에 따른다. TMCP강의 피로시험결과에 의한 m 값과 C 값의 관계를 T.R. Gurney가 구조용강 및 고강도강, 용착금속, 열영향부에 대하여 제안한 m 값과 C 값의 관계식과 비교하여 그림 10에 나타내었다.¹¹⁾

그림 10에서 HT60급 TMCP강의 m 값과 C 값의 관계는 T.R. Gurney의 제안식과 거의 일치하고 있어 TMCP강의 피로균열 성장거동은 일반 구조용강의 피로균열 성장거동과 비슷한 경향을 나타내고 있음을 확인할 수 있다.

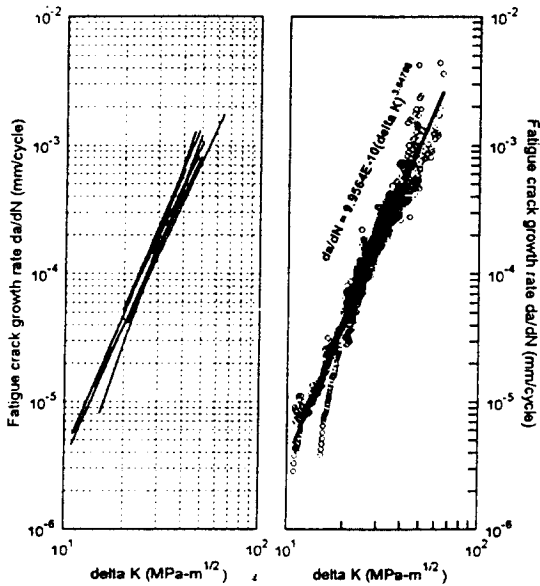


그림 9 HT 60급 TMCP강의 da/ dN-ΔK 회귀분석 결과

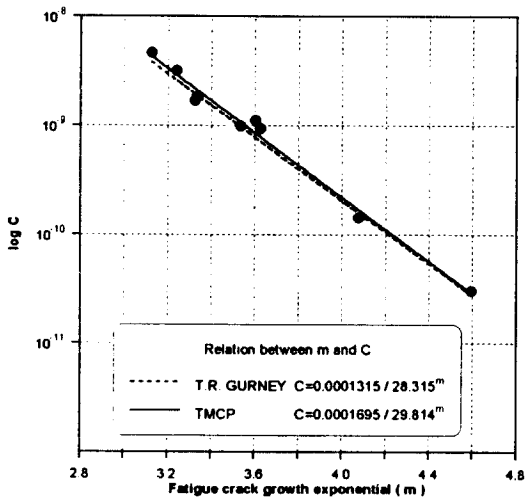


그림 10 재료상수 m과 C와의 관계

5. 결 론

HT60급 TMCP강재를 사용하여 피로균열 성장 시험을 수행하여 이의 결과를 균열성장률(da/dN)과 응력확대계수범위(ΔK)의 관계로 정리하여 검

토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) HT60급 TMCP강 용접부의 피로균열 성장 거동은 모재의 피로균열 성장거동과 유사하여 열 영향부의 연화현상은 전체적인 용접부의 균열성장률에 영향을 주지 않는다.

(2) HT60급 TMCP강 용접부의 피로균열 성장지수 m 값과 피로균열 성장계수 C 값은 일반구조용강 용접부의 m , C 값과 거의 유사한 값을 나타내고 있어 HT60급 TMCP강 용접부의 연화현상은 유의할 수준은 아니다.

(3) HT60급 TMCP강 용접부의 피로균열 성장 거동은 Paris-Erdogan이 제안한 실험식에 따라 재료상수는 $C=9.956 \times 10^{-10}$, $m=3.548$ 을 적용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{da}{dN} = 9.956 \times 10^{-10} (\Delta K)^{3.548}$$

(4) HT60급 TMCP강 용접부의 피로균열 성장 법칙에 따른 지수 m 값과 계수 C 값의 관계는 $C=A/B^m$ 의 관계에 따라 $A=1.695 \times 10^{-4}$, $B=29.814$ 를 적용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$C = \frac{1.695 \times 10^{-4}}{29.814^m}$$

이상의 결과로부터 HT60급 TMCP강 용접부의 피로균열 성장특성은 일반 구조용강의 피로균열 성장특성과 거의 비슷한 경향을 나타내고 있어서 TMCP강재의 열영향부의 연화현상이 피로균열 성장에 미치는 영향은 유의할 수준이 아니며, 강구조 접합상세에서 피로에 대한 거시적 영향은 거의 없음을 알 수 있다.

참 고 문 헌

1. 龍煥鮮 外, "TMCP鋼의 疲勞", 韓國鋼構造學會 論文集, No.4, VOL.7, pp.193~202, 1995.12.
2. 張東一, 龍煥鮮, "鐵道橋梁의 銻接部에서 疲勞龜

- 裂의 成長特性”, 大韓土木學會 論文集, No.1, VOL.4, pp.125~136, 1984.
3. 韓國鋼構造學會, “TMCP鋼材를 利用한 構造物의 接合部 特性에 關한 實驗的 研究”, 1993.4
 4. 浦港製鐵株式會社, “建築構造用 TMCP 鋼板”, 韓國鋼構造學會誌, No.2, VOL.3, pp.43~48, 1990.8.
 5. 金永植, “TMCP 鋼材의 鎔接性”, 韓國鋼構造學會誌, No.2, VOL.4, pp.23~32, 1990.11.
 6. 金永植 外, “TMCP 高張力鋼材와 그 鎔接部의 低사이클疲勞特性에 關한 研究”, 大韓熔接學會誌, No.4, VOL.8, pp.46~57, 1990.12.
 7. 金錫兌, “TMCP鋼의 鎔接部 疲勞龜裂成長舉動에 關한 研究”, 水原大學校 大學院 碩士學位 論文, 1995.12.
 8. C. Miki外 “Fatigue crack growth rates in structural steels”, PROC. OF JSCE, No. 322, 1982. 6.
 9. P.C Paris and F. Erdogan “A Critical Analysis of Crack Propagation Laws”, Journal of Basic Engineering, VOL. 85, pp.528~534, 1960.
 10. ASTM “Metal Test Methods and Analytical Procedures”, E647-91, pp.674~701, 1992.
 11. T. R. Gurney, “Fatigue of welded Structures”, 2nd Edition, pp.53~64, 1979.
 12. John M. Barsom & Stanley T. Rolfe, “Fracture and Fatigue Control in Structures”, 2nd Edition, pp.250~277, 1984.
 13. J.P.Sandifer, G.E.Bowie, “Fatigue Crack Propagation in A537M Steel”, Fatigue Testing of Weldments ASTM STP648, pp.185~196, 1978.
 14. AASHTO, “Standard Specification for Highway Bridges”, 13th Edition, American Association of Steel Highway and Transportation Officials, 1983.
 15. BS5400, “Steel, Concrete and Composite Bridges - part 10”, 1980.
 16. 日本鋼構造協會, “鋼構造物 疲勞設計 指針·同解説”, 技報堂出版, 1993
 17. ECCS, “Recommendations for Fatigue Design of Steel Structure” European Convention for Construction Steelwork, 1985