

鐵道橋梁의 鎔接部에서 疲勞균열의 成長特性

Fatigue Crack Growth Properties of Welded Joint for the Railway Bridge Steel

張	東	一*
Chang	Dong	II
龍	煥	鮮**
Yong	Hwan	Sun

Abstract

In the welded structures, fatigue fracture mainly depends upon crack growth behavior. Specially anisotropy of crack growth orientation and welding direction become important factor of fracture in the welding joint.

When fatigue stressed steel welded with nonfatigue stressed steel, at the low stress intensity factor range, residual stress become more important factor of growth behavior than properties of base metal but when the crack growth in the weld metal, toughness of weld metal become the most important factor.

Especially nonhomogeneity of toughness for the weld metal make more scatter the relations of $da/dN-\Delta K$.

要 旨

용접구조에서 피로파괴는 피로균열의 성장거동에 주로 지배를 받는다. 특히 용접방향과 피로균열 성장방향의 이방성은 용접부 피로파괴의 중요한 영향인자가 된다.

피로이력을 갖고 있는 강재와 피로이력이 없는 강재를 용접시 저 ΔK 영역에서는 모재의 재질적인 영향인자보다 잔류응력의 영향이 크게 작용하였다. 그러나 균열이 용착금속에서 성장을 하는 경우는 용착금속의 인성이 가장 중요한 영향인자가 되는 것으로 밝혀졌다. 특히 용착금속의 인성불균일은 $da/dN-\Delta K$ 관계를 넓게 분포시킨다.

1. 序 論

동적인 반복하중을 받는 구조부재에 있어서

피로에 의한 균열의 발생과 성장은 구조물의 변형과 파괴의 중요한 원인이 된다.^(1,2,3)

특히 용접구조에 있어서 용접부에는 피할 수 없는 결함, 즉 Porosity, Inclusion, Lack of Fusion, Shrinkage crack 과 노-치 즉 under Cut, Lack of Penetration, Surface ripple 등을 갖게 되

*正會員·漢陽大學校 工科大學 土木工學科 教授

**正會員·大林工業專門大學 土木工學科 助教授

며 이들 결합이나 노-치 등은 응력집중을 유발해서 피로균열의 발생원인이 되고 있으며 용접구조의 용접부에 생긴 잔류변형에 의한 잔류응력이나 용접조건에 따른 용착금속과 열영향부의 미시적조직의 변화 등은 피로균열의 성장특성에 중요한 영향인자가 된다. 따라서 용접구조는 균열의 발생이 비용접구조에 비하여 훨씬 용이할 뿐 아니라 그 성장특성을 지배하는 영향인자가 다양하며 이에 대한 연구가 많이 진행되어 왔다⁽⁴⁾.

H.S. Reemsynder⁽⁶⁾는 용접구조의 피로에 영향을 주는 영향인자에 관하여 연구하였고 W.H. Munse⁽⁶⁾는 여러 형식의 구조물의 용접연결부에 있어서 피로평가를 위한 부재형상과 이에 대한 피로응력범위를 제안하였다.

특히 용접구조물에 있어서 피로균열은 구조재 자체에 노-치상의 결합이 포함되어 있지 않는 한 거의 용접부의 결합에서 발생하며⁽⁷⁾ 균열은 반복회수가 증가하면서 용접부를 따라 성장하거나 아니면 용접금속을 가로질러서 용착금속 열영향부 모재로 성장하여 구조파손을 일으킨다. 이러한 문제에 관하여 Sandifer, Bowie⁽⁸⁾는 용접금속, Fusion Line, 열영향부, 모재에 있어서 피로균열성장율(Fatigue Crack Growth Rate)을 비교 연구하였고 용접금속부에서 모재보다 피로균열의 성장율이 늦는 것으로 발표하였다. 또한 T. Okumura⁽⁹⁾등의 Barsom 방법에 의한 연구결과에 따르면 용접금속 열영향부, 모재에서 피로균열성장율의 차이는 거의 없는 것으로 나타났다.

또한 피로균열의 성장방향과 용접방향의 상호관계에 따른 피로균열성장율과 응력강도계수(Stress Intensity Factor Range)의 관계를 규명하는 것도 피로파괴거동을 규명하는데 있어서 중요하다⁽¹⁰⁾. 특히 용접관형에서 균열의 발생 및 성장은 용접부에서 플랜지나 북부관으로 성장하든지 플랜지와 북부관의 용접선을 따라서 성장한다. 즉 균열이 용접선을 직교하든지 아니면 용접선을 따라 용착금속안에서(평행) 성장한다. Miki⁽¹¹⁾등은 용접방향과 균열성장방향의 상위, 용접입열량(Heating Energy) 용접재료(Electrode) 등에 따른 피로균열의 성장율에 관하여 연구하였으며 이에 따르면 저강도강재의 소입열용접에

서는 용접방향에 대하여 균열이 직각으로 성장하는 경우 성장율이 약간 낮거나 비슷하였고 저강도강재의 대입열용접에서는 양자가 비슷하였다. 고강도강재의 소입열용접에서는 용접방향의 상위에 따른 차이가 거의 없었고 고강도강재의 대입열용접에서는 응력강도계수범위에 따라서 서로 다른 결과를 나타냈다.

또한 Y. Kitsunai⁽¹²⁾의 연구에 의하면 피로균열의 성장율은 균열이 용접부를 지나기 전에는 직교하는 경우가 평행한 경우보다 약간 늦었으나 용접부를 지나면 반대의 현상을 나타냈다.

이상에서와 같이 용접부에서 피로균열의 성장거동은 여러 가지 영향인자에 의해 변할 수 있다. 따라서 본 연구는 앞서 지적한 영향인자 이외에 피로이력을 갖고 있는 강재를 용접하는 경우 피로균열의 성장거동을 규명해 보고자 한다.

2. 疲勞균열成長特性

균열상의 결합을 갖고 있는 용접구조가 반복하중을 받는 경우 구조재의 피로수명은 대부분 균열의 성장과정에 지배되므로 일정한 응력강도계수 범위(ΔK)에서 피로균열성장율(da/dN)의 관계를 규명하는 것이 대체적인 경향이다^(13,14). 피로균열성장율과 응력강도계수범위의 관계는 여러 가지 영향인자에 의해 변하기 때문에 각각의 영향인자를 고려한 관계식이 제안되었다.^(15,16)

$$\text{Forman과 Pearson은 평균응력 } R = \left(\frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} \right)$$

과 파괴인성 K_{Ic} (Fracture Toughness)에 대응하는 응력강도계수범위 ΔK 를 고려하여

$$\text{Forman } da/dN = \frac{C(\Delta K)^m}{\{(1-R)K_{Ic} - \Delta K\}} \quad (2.1)$$

$$\text{Pearson } da/dN = \frac{C(\Delta K)^m}{\{(1-R)(K_{Ic} - \Delta K)\}^{1/2}} \quad (2.2)$$

여기서 c 와 m 은 재료의 상수

또한 Priddle은 하한계 응력강도계수범위 ΔK_{th} (Threshold Stress Intensity Factor Range)와 최대응력강도계수 K_{max} 를 고려한 식을 제안하였다.

$$\text{Priddle } da/dN = c_1 \left[\frac{\Delta K - \Delta K_{th}}{K_c - K_{th}} \right] + c_2 \quad (2.3)$$

여기서 K_c 는 파괴인성

위의 Forman, Pearson, Priddle의 식들은 파괴인성에 대응하는 응력강도계수의 계산이 정확하다는 가정아래서 제안되었으나 응력강도계수의 이론적인 해석은 결함의 모양을 규칙적인 형태로 가정하기 때문에 균열끝의 응력장이 단순한 것으로 보고 있는데 반하여 실제문제에 있어서 파괴역학을 적용하는 경우 특히 용접구조에 있어서는 결함의 형태가 불규칙하므로 인해 응력장이 불규칙해지기 때문에 Forman, Pearson, Priddle의 식들은 이론적인 연구단계에 머물러 있다⁽¹⁷⁾.

반면에 P.C. Paris와 F. Erdogan은 균열끝(Crack Tip)주위의 응력장이 탄성적이라는 가정하에 피로균열의 성장율을 응력강도계수의 함수로 보고 실험결과로부터 실험공식을 제안하였고 그후 많은 연구자들이 Paris와 Erdogan 법칙에 따라 피로균열성장율과 응력강도계수범위의 관계를 다루었다. Paris-Erdogan 법칙은⁽¹⁸⁾

$$da/dN = C(\Delta K)^m \quad (2.4)$$

여기서 a 는 균열길이, N 은 반복회수, C 와 m 은 재료의 상수, ΔK 는 시험편의 형상과 균열의 길이에 따른 함수로서 $\Delta K = K_{max} - K_{min}$ 을 나타낸다.

균열끝의 응력장이 탄성적인 경우 응력강도계수는 표준균열을 갖는 무한판에서 균열길이 $2a$ 와 작용응력 σ 에 대하여

$$K = \sigma \sqrt{\pi a} \quad (2.5)$$

이며 응력강도계수의 범위 ΔK 는

$$\Delta K = \Delta \sigma \sqrt{\pi a} \quad (2.6)$$

식 (2.6)에서 $\Delta \sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min}$ 으로서 응력범위(Stress Range)를 나타낸다.

균열끝의 응력장이 소성변형을 수반하는 경우 소성변형은 탄성응력장에서와 탄성변형에 지배되므로 Dugdal의 균열모델에서 반복응력을 받는 경우에 소성역(Plastic Region)의 크기를 Rice는

$$r_{rev} = \frac{\Delta K^2}{12\pi\sigma_y} \quad (2.7)$$

여기서 r_{rev} 는 최대소성역의 크기, σ_y 는 항복

응력이며 이때 균열개구변위량(Crack Opening Displacement)은

$$\text{COD} = \frac{\Delta K^2}{\Delta E \sigma_y} \quad (2.8)$$

식 (2.5)에서 응력강도계수는 균열의 형상 시험편의 형상에 관계되며 시험편의 형상 및 균열의 형상에 따라서 달라진다. 반복응력을 받는 CT(Compact Tension Test)시험편에서 W.K. Wilson⁽¹⁹⁾은 응력강도계수를

$$K = \frac{P}{B\sqrt{a}} \left[0.296 \left(\frac{a}{\omega} \right) - 1.855 \left(\frac{a}{\omega} \right)^2 + 6.557 \left(\frac{a}{\omega} \right)^3 - 10.17 \left(\frac{a}{\omega} \right)^4 + 6.389 \left(\frac{a}{\omega} \right)^5 \right] \quad (2.9)$$

여기서 P 는 작용하중, B 는 시험편의 두께, a 는 균열표면으로부터 균열끝까지 거리, ω 는 판의 폭이다.

또한 Emery⁽¹⁴⁾는

$$K = \sqrt{\pi a} \left[1.1\sigma_a - \left[f \left(\frac{x}{a} \right) \frac{d\sigma}{dx} dx \right] \right] \quad (2.10)$$

여기서 $f \left(\frac{x}{a} \right)$ 는

$$f \left(\frac{x}{a} \right) = 0.8 \left(\frac{x}{a} \right) + 0.04 \left(\frac{x}{a} \right)^2 + 0.36210^{-5} e^{11.18 \left(\frac{x}{a} \right)} \quad (2.11)$$

여기서 a 는 균열길이, σ_a 는 균열표면으로부터 거리 x 에서의 응력을 나타낸다.

ASTM E 399-74는 평면변형조건을 만족하는 균열의 형상 및 시험편(Compact Tension Test Specimen)의 형상을 규정하고 있으며 다항식으로

$$\Delta K = \frac{\Delta P}{B\sqrt{\omega}} \left[\frac{(2+\alpha)}{(1-\alpha)^{1/2}} \right] (0.866 + 4.64\alpha - 13.32\alpha^2 + 14.72\alpha^3 - 5.6\alpha^4) \quad (2.12)$$

와 같이 표현하였다. 여기서 ΔP 는 하중범위, B 는 시험편의 두께, a 는 균열길이, ω 는 시험편의 폭이며 $\alpha = a/\omega$ 를 나타낸다.

3. 實 驗

3.1. 실험재료 및 실험편

본 실험에 사용된 강재는 경부선안양천철교에

표 3.1 Chemical Composition And Mechanical Properties

Steel	Chemical Composition (%)					Mechanical Properties		
	C	Si	Ni	T	S	Ultimate Strength (MPa)	Section Constriction (%)	Shore Hardness (HS)
AN YANG	0.31	0.06	0.43	0.023	0.050	437.98	51.90	20.0
SB 41	0.28	0.07	0.76	0.015	0.016	438.18	56.27	22.5

서 근년에 철거된 판형중 복부판의 일부로서 두께 10 mm 인 판이며 기발표된 연구에 사용하였던 강재(이하 구강재)와 포항제철산 SB41(이하 신강재)를 사용하였으며 화학성분 및 기계적성능은 표 3.1 과 같다.

본 실험연구에서는 피로이력을 갖고 있는 강재에서 용접시 용접부의 피로균열성장거동을 규명하기 위하여 용접 CT(Compact Tension Test) 시험편을 제작하였다.

시험편의 종류는 구강재와 구강재를 용접한 시험편과 이와 비교하기 위하여 구강재와 신강재를 용접하였고 피로균열의 성장거동을 균열성장방향과 용접방향의 상위에 따른 관점에서 밝혀보기 위하여 상기의 시험편에 균열의 방향을 용접선과 직각(A Type) 및 평행(B Type)이 되도록 하였다.

표 3.2 Type of Specimen

No	Type	A : 직각	No	Type	B : 평행
yc A1	신강재 + 구강재		yc B3	신강재 + 구강재	
yc A2	신강재 + 구강재		yc B4	신강재 + 구강재	
yc A5	구강재 + 구강재		yc B7	구강재 + 구강재	
yc A6	구강재 + 구강재		yc B8	구강재 + 구강재	

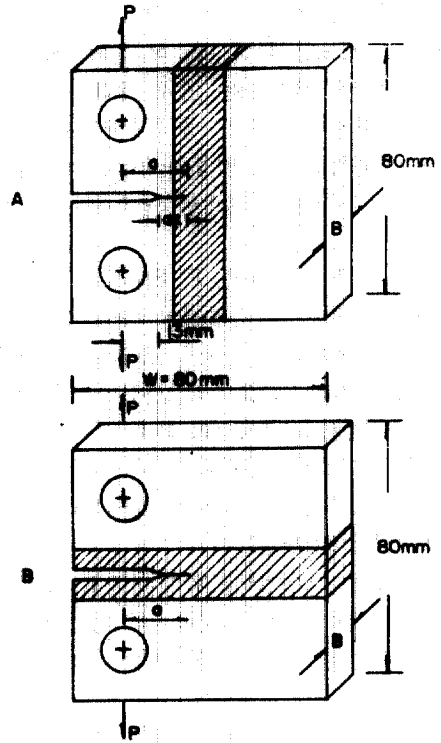


그림 3.2 시험편의 치수 및 용접방향에 대한 균열성장방향 (a_1 : 예비균열길이)



그림 3.1 시험편의 형상

시험편은 모재의 종류 및 용접선과 피로균열 성장방향의 상위에 따라 표 3.2와 같이 분류하였고 형상 및 치수는 그림 3.1 및 그림 3.2와 같다.

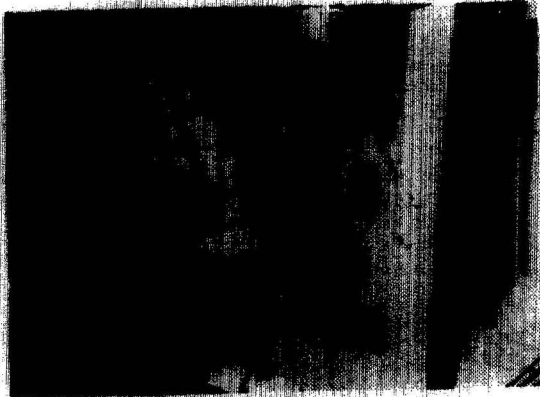
시험편의 용접은 V형으로 개선한 맞대기 용접 Manual Arc Welding이다. 용접봉은 철도건설공사표준시방서⁽²⁾에 따라 저수소계의 용접봉을 사용하였고 용접시에 생긴 잔류변형(Residual Deformation)은 현장의 조건과 일치시키기 위하여 그대로 두었으며 피로균열 성장

에 대한 Beed의 형상과 표면조직의 영향을 제거하기 위하여 양면을 연삭하여 두께 B 가 8 ± 0.1 mm(그림 3.2 참조)가 되게 하였다.

3. 실험방법

피로시험기는 그림 3.3과 같은 용량 5kVA의 진기유압식이며 사용하중은 상한하중이 1.4t에서 1.8t까지 응력비(Stress Ratio: $R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}$)가 $R = 0.05 \sim 0.07$ 인 범위의 Constant Load Method를 적용하였으며 모든 시험편에 대하여 20 Hz에서 측정하였다. 시험편에는 그림 3.4, 3.5와 같이 Crack Gage를 전면에 부착하여 균열길이의 증가와 하중반복수의 관계를 Dynamic Amplifier와 $\epsilon-t$ Oscillo-Graph로 측정하였다.

시험편에 부착된 Crack Gage로부터 $\epsilon-t$ Oscillo-Graph까지의 회로도는 그림 3.6과 같으며 측정된 균열길이-시간 선도는 그림 3.7과 같다.



피로시험기



Dynamic Amplifier
그림 3.3 피로시험장치

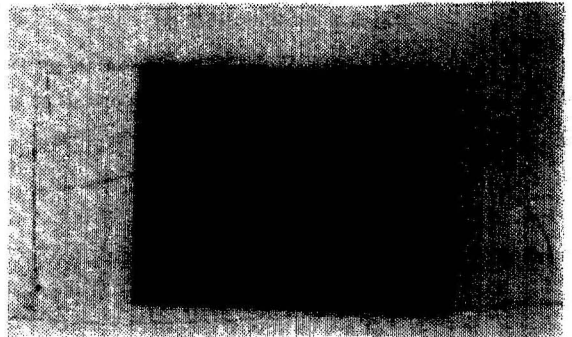


그림 3.4 크랙게이지

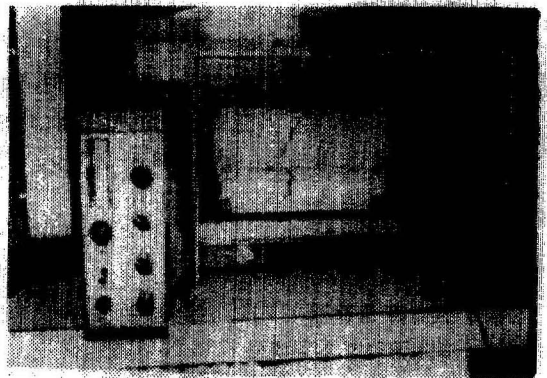


그림 3.5 $\epsilon-t$ Oscillo-Graph

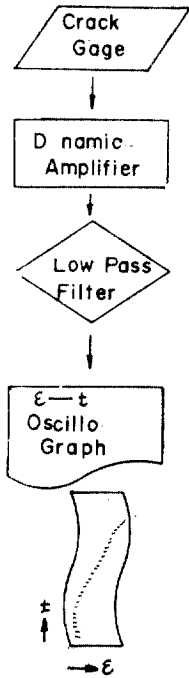


그림 3.6 ε-t 측정의 흐름도

F.V. Lawrance⁽¹⁴⁾ 및 많은 연구자들에 의한 피로수명의 많은 부분이 피로균열의 발생에 소모되고 있으나 실제문제에 있어서 용접구조에서는 균열의 성장이 균열상의 결함에서 시작되기 때문에 초기균열발생에 관계되는 문제는 본 실험에서는 연구의 대상에서 제외하였다. 따라서 균열성장율이 $da/dN > 10^{-5} \text{m/cycle}$ 이상인 균열의 성장거동만을 대상으로 하였기 때문에 예비균열 a_i (그림 3.2 참조)을 만들었다.

응력강도계수범위의 계산은 ASTM이 추천하는 식(2.12)을 사용하였다. 측정치로부터의 ΔK 및 da/dN 의 계산은 Computer에 의해 해석하였고 $da/dN - \Delta K$ 의 좌표도 Computer에 의해 Plot 하였으며 흐름도는 그림 3.8과 같다.

4. 考 察

4.1. 균열이 용접선과 직교하는 경우 모재에 따른 피로균열의 성장특성

그림 4.1~4.4는 피로균열의 성장방향이 용

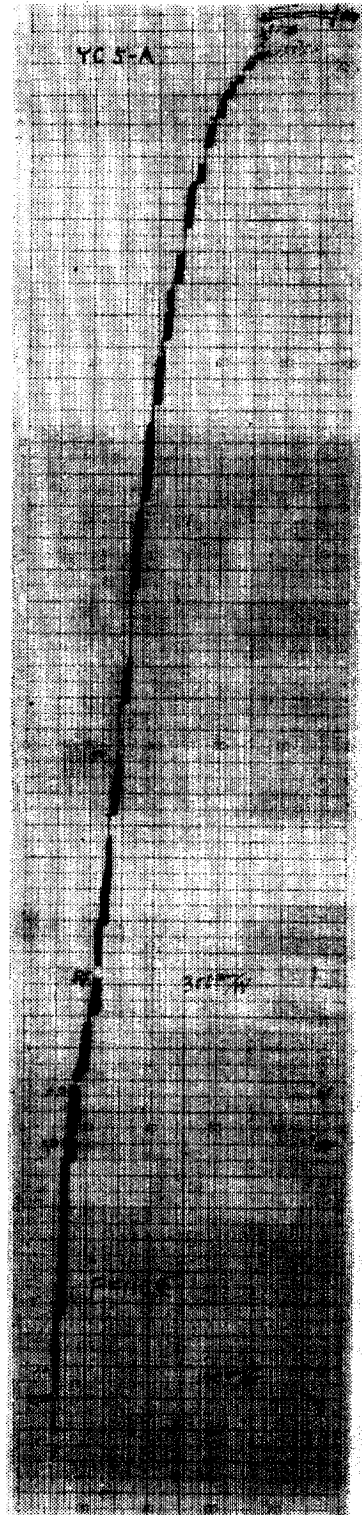


그림 3.7 ε-t선도

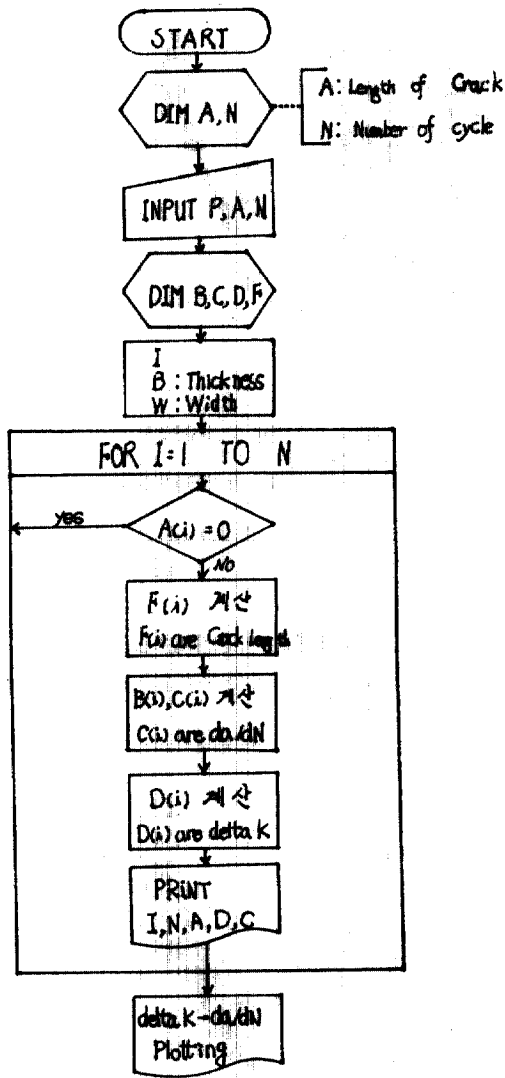


그림 3.8 컴퓨터해석을 위한 흐름도

접방향과 직교하는 시험편에서 피로균열성장율과 응력강도계수의 관계를 나타낸다. 그림에서 실선은 피로균열성장율(da/dN)과 응력강도계수(JK)의 관계를 회귀분석에 의해 선형적으로 나타내고 있으며 P 는 직선의 기울기로서 피로균열성장율의 증가상태를 나타내는 것으로서 Paris-Erdogan 법칙중 JK 의 Exponent m 과 같고 Q 는 절편으로서 c 와 같다.

용접선과 피로균열이 직교하는 시험편에서 피로균열성장율(da/dN)과 응력강도계수(JK)의 관계는 $da/dN=Q(\Delta K)^P$ 로서 다음과 같다.

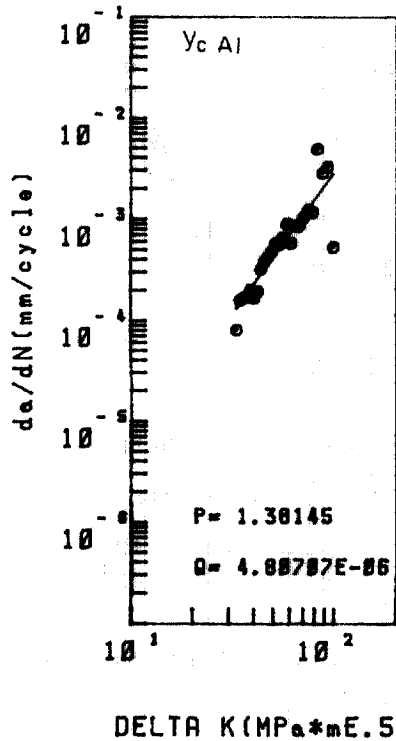


그림 4.1 ycA1 시험편의 균열성장율과 응력강도계수와의 관계

$$ycA1 \quad da/dN = 4.80707 \times 10^{-6} \Delta K^{1.38145} \quad (4.1)$$

$$ycA2 \quad da/dN = 3.50157 \times 10^{-7} \Delta K^{2.19971} \quad (4.2)$$

$$ycA5 \quad da/dN = 8.5512 \times 10^{-7} \Delta K^{2.00324} \quad (4.3)$$

$$ycA6 \quad da/dN = 5.36566 \times 10^{-7} \Delta K^{2.33398} \quad (4.4)$$

그림 4.5는 균열이 용접선에 직교하는 각 시험편의 $da/dN-\Delta K$ 의 상호관계를 나타낸 것이다. 그림 4.5에 의하면 구강재와 구강재를 용접한 시험편의 피로균열성장율이 전체 JK 영역에서 신강재와 구강재를 용접한 시험편보다 약간 크나 $JK < 50MPa\sqrt{m}$ 의 저 JK 영역에서는 서로 접근하는 경향을 보여주고 있다. 이러한 경향은 구강재의 피로경화영향⁽²²⁾이 구강재에서 균열성장속도를 증가시키는 것이 아닌가 생각한다. 식 (4.1)(4.2)에서 회귀직선의 기울기 P 가 큰 차이를 나타내는 것은 용접재료변형의 영향

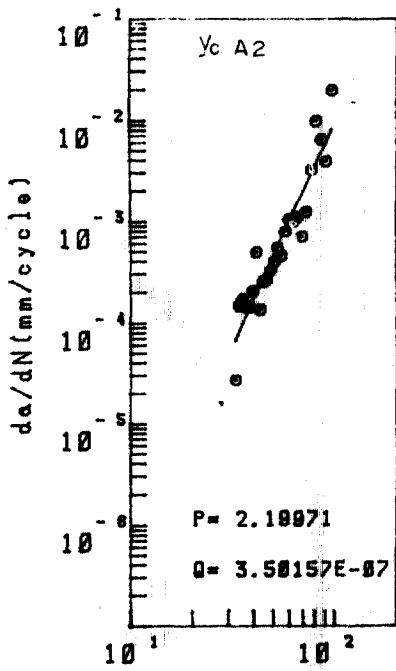


그림 4.2 YcA2 시험편의 균열성장률과 응력강도계수범위의 관계

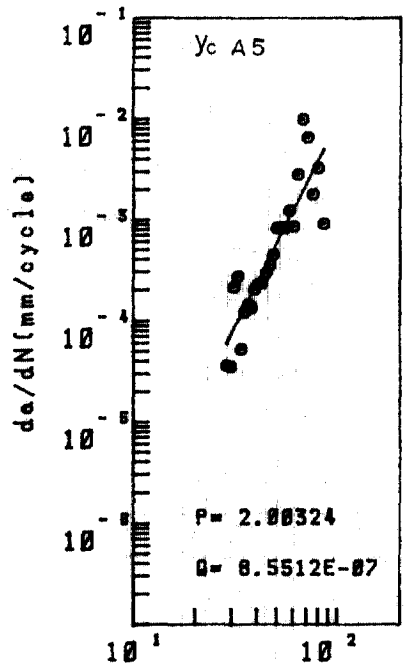


그림 4.3 YcA5 시험편의 균열성장률과 응력강도계수범위의 관계

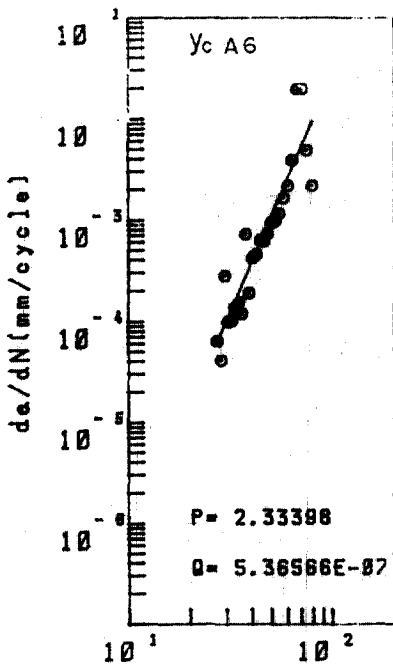


그림 4.4 YcA6 시험편의 균열성장률과 응력강도계수범위의 관계

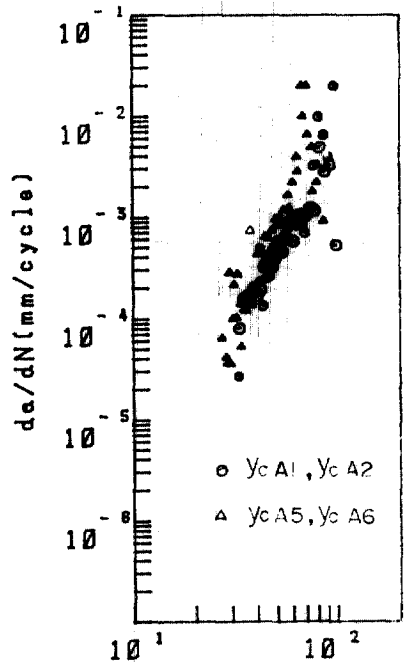
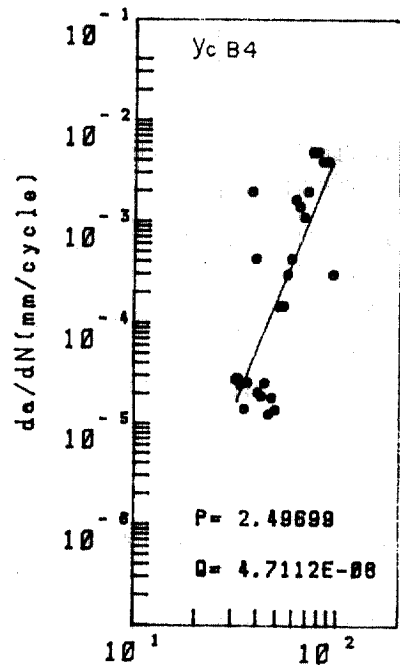
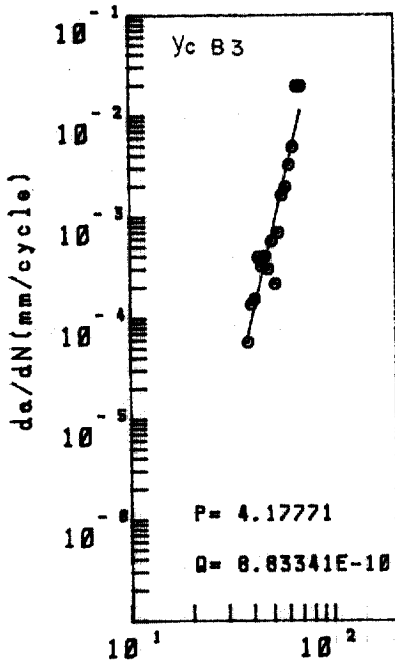


그림 4.5 균열성장방향에 용접선과 비교하는 경우 모재에 따른 균열성장률과 응력강도계수범위의 관계

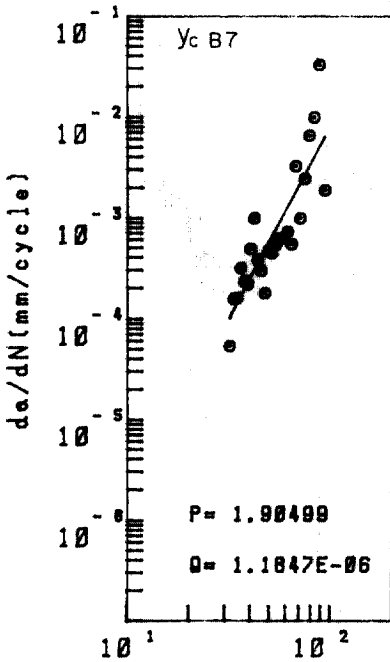


DELTA K (MPa*mE.5)

그림 4.6 ycB3시험편의 균열성장률과 응력강도계수 범위의 관계

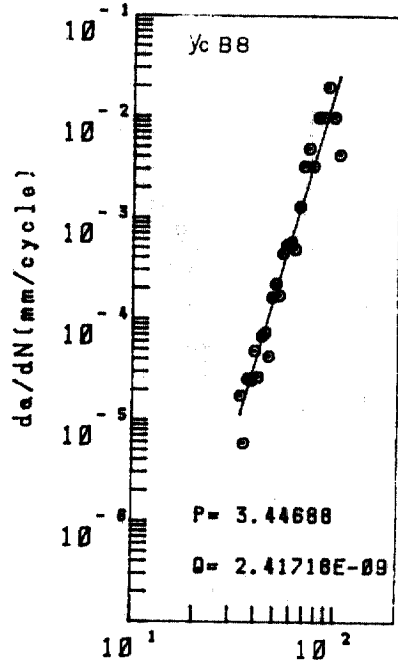
DELTA K (MPa*mE.5)

그림 4.7 ycB4시험편의 균열성장률과 응력강도계수 범위의 관계



DELTA K (MPa*mE.5)

그림 4.8 ycB7시험편의 균열성장률과 응력강도계수 범위의 관계



DELTA K (MPa*mE.5)

그림 4.9 ycB8시험편의 균열성장률과 응력강도계수 범위의 관계

이 각각 다르게 나타난 것으로 보이며 이러한 현상은 측정된 $\epsilon-t$ Diagram에서도 확인할 수 있었다.

4.2. 균열성장방향이 용접선과 평행한 경우 모재에 따른 피로균열성장특성

그림 4.6~4.9는 피로균열이 용접방향과 평행한 경우 피로균열성장율과 응력강도계수의 관계를 나타낸다. 각 시험편에서 $da/dN-\Delta K$ 관계는 다음과 같다.

$$ycB3 \quad da/dN = 8.3341 \times 10^{-10} \Delta K^{4.17771} \quad (4.5)$$

$$ycB4 \quad da/dN = 4.7112 \times 10^{-8} \Delta K^{2.40699} \quad (4.6)$$

$$ycB7 \quad da/dN = 1.1847 \times 10^{-6} \Delta K^{1.90499} \quad (4.7)$$

$$ycB8 \quad da/dN = 2.41718 \times 10^{-9} \Delta K^{3.44688} \quad (4.8)$$

그림 4.10은 균열성장방향이 용접선과 평행

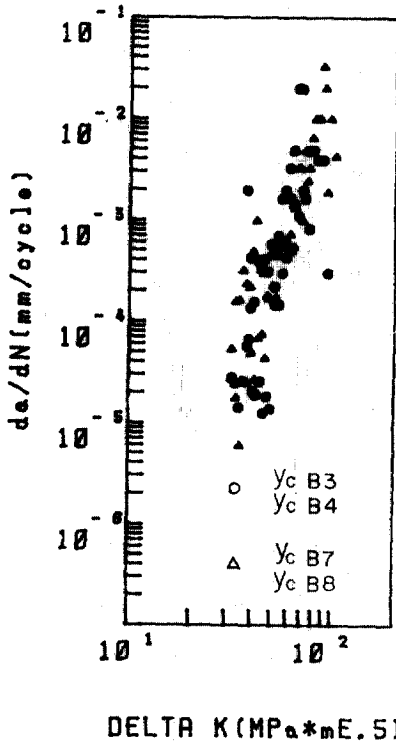


그림 4.10 균열성장방향이 용접선과 나란한 경우 모재에 따른 균열성장율과 응력강도계수범위의 관계

한 시험편에서 균열성장속도와 응력강도계수의 상호관계를 나타낸다. 식 (4.5)와 (4.8)에 의하면 회귀직선의 기울기가 타시험편에 비하여 상당히 크며 ycB3는 그 현상이 더욱 뚜렷하다. 이의 원인으로서는 여러 가지가 있겠으며 실험의 제약으로 인해 확인치 못하였으나 용접에 의한 압축잔류변형의 영향이 크게 작용한 것으로 보인다⁽²³⁾.

균열성장율은 $\Delta K < 50 \text{MPa} \sqrt{m}$ 의 저 ΔK 영역에서는 서로 비슷하였으나 $\Delta K > 50 \text{MPa} \sqrt{m}$ 의 고 ΔK 영역에서는 신강재와 구강재를 용접한 시험편이 구강재와 구강재를 용접한 시험편보다 약간 크다. 균열이 용착금속안에서 성장하는 경우 모재의 재질적인 영향보다는 용착금속의 성질에 따른 영향을 더 받고 있는 것으로 생각된다.

4.3. 모재가 동일한 경우 균열성장방향이 다른 피로 균열성장특성

그림 4.11은 신강재와 구강재를 용접한 경우

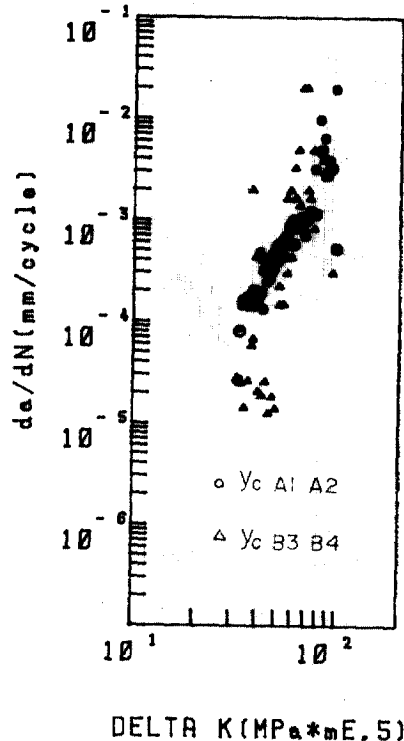


그림 4.11 신강재와 구강재를 용접한 시험편에서 균열 성장방향에 따른 균열성장율과 응력강도계수범위의 관계

에 피로균열이 용접선과 직교하는 시험편과 평행한 시험편에서 피로균열성장율과 응력강도계수의 관계를 나타낸다. 균열이 용접선과 직교하는 경우에 비하여 평행한 경우 즉 균열이 용착 금속안에서 성장하는 경우에 $da/dN-\Delta K$ 관계가 넓게 분포되어 있다. 이러한 현상은 용접시 용착물에 비금속개재물이 혼입되고 불순원소가 고형상태로 존재하게 되며 다층용접에 따른 열영향이 균일치 않는 등 여러가지 원인에 의해 용착금속의 인성이 불균일함에 따른 것으로 보인다.^(24,26) 균열성장율은 $\Delta K < 50 \text{MPa}\sqrt{m}$ 의 저 ΔK 영역에서는 균열이 용접선과 직교하는 시험편에서 크나 $\Delta K > 50 \text{MPa}\sqrt{m}$ 의 고 ΔK 영역에서는 평행한 시험편에서 더 크다. 그러나 $\Delta K \approx 50 \text{MPa}$ 의 영역에서는 거의 같은 경향을 보이고 있다.

용접구조에서 용접열에 의한 잔류변형은 용접선에 대하여 직각방향으로 더 크게 되는 경향이 보이므로 직교하는 균열은 인장잔류응력을 받을

수 있고 이러한 현상으로 인해 저 ΔK 영역에서 균열성장율이 더 크게 나타난 것으로 보이며 용접잔류응력을 제거한 시험편의 시험결과와 다른 경향을 보였다. 그러나 고 ΔK 영역에서는 직교하는 시험편의 인장잔류변형이 제거되어 평행한 시험편보다 늦게 된 것으로 생각된다. 따라서 잔류변형을 제거한다면 앞서의 현상과 일치하지 않는 결과를 나타낼 수도 있다고 생각한다⁽²⁶⁾.

그림 4.12는 구강재와 구강재를 용접한 경우 피로균열이 용접선과 직교하는 시험편과 평행한 시험편에서 균열성장율과 응력강도계수의 관계를 나타낸다. 균열방향이 용접선과 평행한 시험편은 구강재와 구강재를 용접한 시험편과 같이 da/dN 관계가 넓게 분포되어 있어 같은 경향을 나타내고 있다.

균열성장속도는 전체 ΔK 영역에서 직교하는 경우가 약간 크다. 식 (4.8)에서 보듯이 균열이 용접선과 평행한 경우 압축잔류변형이 작용하고 있음은 앞서 지적하였으며 이 영향 및 직교하는 시험편에서 인장잔류변형이 작용하여 전 ΔK 영역에서 균열성장율을 크게 한 것으로 사료된다⁽¹⁰⁾.

용접구조의 용접부에서 균열의 성장율에 영향을 주는 원인으로는 여러 가지가 있으나 각 시험편에 동일하게 주어진 영향인자 이외에 용접조건 미시적금속조직 등에 관한 것은 실험상의 제약으로 인해 부득이 규명치 못하였음을 밝혀두며 앞으로 더 규명해야 할 과제라고 생각하고 있다.

5. 結 論

본 실험연구에서 얻은 결론을 다음과 같이 요약할 수 있다.

1. 저 ΔK 영역에서 피로균열성장율 및 성장율의 증가는 잔류변형이 존재하는 경우에 모재의 종류나 균열의 성장방향에 관계없이 잔류응력의 영향을 더 크게 받는다.
2. 균열이 용접선과 직교하는 경우는 모재의 재질적인 영향을 받고 있으나 균열이 용착금속에서 성장하는 경우는 모재의 재질보다는 용착금속의 인성의 영향을 크게 받고 있다. 따라서

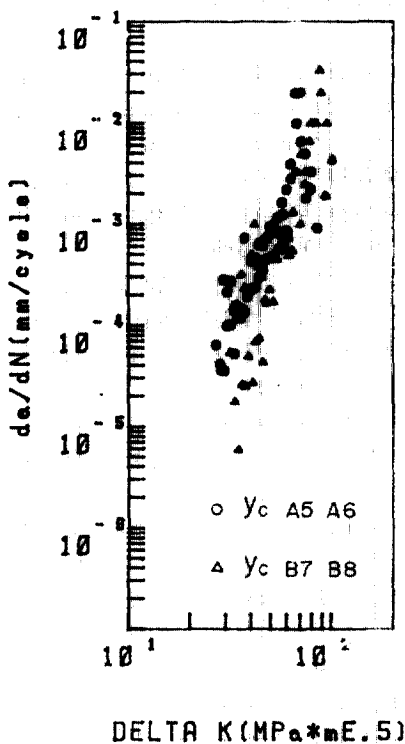


그림 4.12 구강재와 구강재를 용접한 시험편에서 균열 성장방향에 따른 균열성장율과 응력강도계수범위의 관계

균열이 직교하는 경우는 구강재와 구강재를 용접한 시험편의 균열성장속도가 크고 평행한 경우는 신강재와 구강재를 용접한 시험편이 크다.

3. 균열이 용접선과 평행하게 성장하는 경우는 용착금속의 인성불균일로 인해 $da/dN \sim \Delta K$ 관계가 넓게 분포되며 이의 원인은 다른 영향인자보다 인성의 불균일이 크게 작용한 것으로 사료된다.

4. 초기의 저 ΔK 영역에서 균열이 용접부를 횡단하는 경우에 피로균열성장율이 더 커서 판딩의 플랜지와 부부판의 필렛용접부에서 발생한 균열이 플랜지나 부부판으로 성장해 나갈 확률이 더 많음을 보여준다.

참 고 문 헌

1. 장동일, 정영화 “강교량의 취성과파사해와 이에 대한 고려” 대한토목학회지, 제26권, 제2호, 1978. 6.
2. John. W. Fisher “Quinnipiac River Bridge Cracking” *ASCE Structural Division Vol. 106. No. ST*, 1980.
3. 西村俊夫 三木千壽 “인장응력에 기인하는 강교량의 변상” 일본토목학회지 제26권 제2호, 1975년 11월
4. R.C. Andrew and J. Waring “Effect of Porosity on Transverse Weld Fatigue Behavior” *Welding Research Supplement* 1974. 1, pp.85~90.
5. H.S. Reemsynder “Development and Application of Fatigue Data for Structural Steels Weldments” *ASTM STP 648*, 1977.
6. W.H. Munse “Fatigue of Weldments Test, Design and Service” *ASTM STP 648* 1977.
7. M.A. Hirit J.W. Fisher “Fatigue crack Growth in Welded Beam” *Engineering Fracture Mechanics, Vol 5*. 1973, pp.415~429.
8. J.P. Sandifer and G.Z. Bowie “Fatigue Propagation in A573 M Steel” *ASTM STP 648*.
9. T. Okumura, T. Nishimura, C. Miki, K. Hasegawa “Fatigue crack Growth Rates in structural steels” *Proc of JSCE No 322* June 1982.
10. S.M. Soudani, R.M. Pelloux “Anisotropy of Fatigue Crack Propagation in Alminum Alloy Butt Welded Joints” *Welding Research Supplement May*, 1975.
11. C. Miki 장동일, 정영화 T, Mori “Fatigue crack Growth Rate in Weld Metals” 東京大 土木科 研究報告書, No, 31, 1983. 8.
12. Y. Kitsunai “Fatigue crack propagation properties on Butt Weld Metal and Base Metals” 日本機械學會誌 論文集, 제47권, 419호, 1981. 7.
13. R.J. Bucci, W.G. Clark Jr. P.C. Paris “Fatigue Clack Propagation Growth Rates under a variation of ΔK for on ASTM A517 Grade FCT-1 steel” *ASTM STP 513*.
14. F.V. Lawrance “Estimation of Fatigue crack propagation Life in Butt Weld” *Welding Research Supplement* 1973. 5.
15. T.R. Gunney, “Fatigue of Welded Structures”
16. S. Kocanda “Fatigue Failure of Metal” Sijthoff and Noordhoff International Publishers 1978, pp.199~268.
17. S. Maddox “Assessing the Significance of flow in Welds Subject to Fatigue” *Welding Research* 1974. 10.
18. P.C. Paris and Erdogan, F. “A critical analysis of propagation Laws” *ASME Winter Annual Meeting Paper No. 62-WA-234*, November, 1962.
19. S. Rolfe and J.M. Barsom “Fracture and Fatigue Control in Structures Application of Fracture Mechanics” Prentice Hall INC.
20. *ASTM E647-78T* Tentative Test Method for Constant-Load-Amplitude Fatigue Crack Growth Rate Above 10^{-7} m/cycle
21. 철도청공보 “철도건설공사표준시방서”호외제125호.
22. 장동일, 황윤극, 용환선 “구조용연강재에 대한 피로경화의 영향에 관한 연구”, 대한토목학회지 제2권 제4호, 1982. 12.
23. T. Mori, K. Horikawa “피로균열전파속도에 미치는 용접잔류응력의 영향”, 일본용접학회논문집, 제1권(1983) 제3호.
24. M. Nakanishi “시브머지드아-크용접금속의 조직과 인성”, 일본용접학회지 제50권(1981), 제1호.
25. M. Toyoda, K. Satoh “인성분포를 갖는 용접부의 파괴성능과 인성평가”, 일본원서조선학회지, 제179호, 1980. 12.
26. Y. Kitsunai, “Sus 304강 및 A533B 강의 용접계수에 있어서 피로균열의 전파거동”, 일본재료학회지 제32권 363호, 1983. 12.

(接受: 1984. 1. 26)