

용접지단부 TIG처리에 의한 피로강도향상 및 피로특성

Fatigue Strength Improvement and Fatigue Characteristics by TIG-Dressing on Weld Bead Toes

정영화* 김익겸** 남왕현*** 장동휘***
Jung, Young Hwa Kim, Ik Gyeom Nam, Wang Hyeon Chang, Dong Huy

Abstract

The 4-point bending tests have been performed in order to estimate the effect of TIG-dressing on fatigue strength and fatigue characteristics quantitatively for non load-carrying fillet welded joints subjected to pure bending. As a result of fatigue tests, fatigue strengths of as-welded specimens have satisfied the grade of fatigue strength prescribed in specifications of Korea, AASHTO and JSSC. Fatigue strength at 2 million cycles of TIG-dressing specimens have increased compared with as-welded specimens.

As the result of beachmark tests, fatigue cracks occurred at several points, where the radius of curvature and flank angle in the weld bead toes were low, and grew as semi-elliptical cracks, then approached to fracture. As a result of finite element analysis, stress concentration factor in weld bead toes has closely related to the flank angle and radius of curvature, and between these, the radius of curvature has more largely affected in stress concentration factor than flank angle. As a result of fracture mechanics approaches, the crack correction factor of test specimens has largely affected on stress gradient correction factor in case a/t is below 0.4. From the relations between stress intensity factor range estimated from FEM analysis and fatigue crack growth rate, fatigue life has been correctly calculated.

키워드 : TIG 처리, 응력집중계수, 피로강도, 피로균열성장속도, 응력확대계수범위

Keywords : TIG-Dressing, Stress Concentration Factor, Fatigue Strength,

Fatigue Crack Growth Rate, Stress Intensity Factor Range

1. 서론

반복하중이 작용하는 강구조물에서는 하중반복 횟수가 증가함에 따라서 정적파괴하중보다 훨씬 낮은 하중에서 피로균열이 발생할 수 있다. 이러한 피로균열의 대부분은 용접이음부에서 발생하고 있으며, 특히 용접지단부에서 피로균열이 발생, 성장하는 것으로 보고되고 있다.[3],[6],[14],[19]

이와 같이 용접지단부에서 발생하는 피로균열의 발생원인으로는 재료내부에 개재되어 있는 불순물에 의한 초기결함, 부재가공 및 용접시의 잔류변형, 급격한 단면변화에 따른 응력집중 등이 주원인으로 작용하고 있다.[13],[16]

용접지단부의 기하학적 형상의 변화에 따른 응력집중을 완화하기 위해서 현재까지 제안되어 온 방법으로는 TIG 처리(TIG-Dressing) 및 부가용접법 등이 제안되고 있다.[13],[17]

이중 TIG 처리는 TIG 아크에 의해서 용접지단부를 재용융하는 방법으로써, 용접지단부를 TIG 처리함에 따라 약 10~30% 정도 피로강도가 향상

* 강원대학교 토목공학과 교수, 공학박사
** 강원대학교 토목공학과 대학원 박사수료
*** 강원대학교 토목공학과 대학원 석사과정

된다고 보고하고 있으며, [13] 피로강도의 향상원인으로는 용접지단부의 형상개선에 따른 응력집중의 완화, TIG 처리부의 경도증가, 재용융에 따른 미소균열의 보수 등을 제안하고 있다.

그러나 이와 같은 용접부 후처리에 대한 국내의 연구는 아직 미미한 실정이며, 실교량에서 발생한 피로균열 발생부에 대한 적용사례도 미미한 실정이다.

따라서 이 연구에서는 하중비전달형 필렛용접부를 대상으로 용접지단부를 TIG 처리함으로써 용접지단부의 기하학적 형상개선에 따른 피로강도특성을 정량적으로 평가하기 위해서 일련의 실험 및 유한요소해석을 실시하였다.

이 결과로부터 용접지단부의 기하학적 형상변화에 따른 응력집중의 변화정도, 피로균열발생 및 성장특성을 정량적으로 평가하였으며, 다양한 용접이음부에 대한 피로강도 향상방안에 대해서 검토하고 향후 우리나라 고유의 강교량의 피로설계기준에 필요한 자료를 제시하고자 한다.

2. 실험

2.1 시험체 및 형상

이 연구에서 사용한 시험체는 용접구조용강재인 SM490B로써, 이에 대한 화학성분 및 기계적 성질은 표 2.1 및 표 2.2와 같다.

표 2.1 화학성분

강종	화학성분				
	C	Si	Mn	P	S
SM490B	0.18	0.40	1.30	0.011	0.005

표 2.2 기계적 성질

강종	기계적 성질			
	항복강도 (MPa)	인장강도 (MPa)	탄성계수 (GPa)	연신율 (%)
SM490B	386.0	539.0	206.0	22

또한 이 연구에서 사용한 시험체는 반자동용접법인 플럭스코어드 아크용접법(FCAW)을 이용해서 용접하였으며, 용접방법은 표 2.3과 같다.

표 2.3 용접방법

시험체종류	봉경 (mm)	전압 (volt)	전류 (amp)	속도 (cm/sec)
ASW	1.2	36~38	270~300	10~15

한편, 이 연구에서는 용접후처리를 실시하지 않은 시험체를 대상으로 용접지단부를 후처리하였는데, 처리방법은 국제용접학회(IIW) 기준에 준해서 실시하였으며, TIG 처리조건은 표 2.4와 같다.

표 2.4 TIG 처리조건

전극봉 직경 (mm)	절드 가스	가스 분출율 (l/min)	예열 온도 (°C)	전류 (amp)	전압 (volt)	이동속도 (mm/min)
2.0	아르곤	10	50	250	15	80

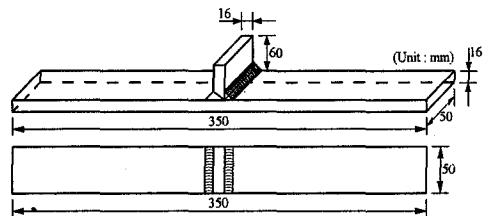


그림 2.1 시험체 형상 및 치수

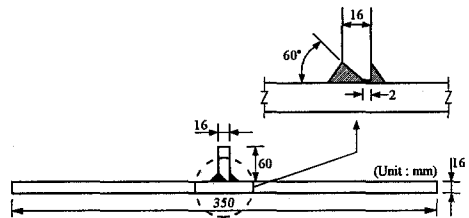


그림 2.2 시험체 용접모식도

2.2 실험방법

이 연구에서는 순수휨을 받는 하중비전달형 필렛용접부의 피로강도특성을 정량적으로 평가하기 위해서 현재 강원대학교에서 보유하고 있는 ±25 ton 용량의 전기 유압식 피로 시험기(Shimadzu社)를 이용해서 그림 2.3과 같이 4점 휨피로실험을 실시하였다.

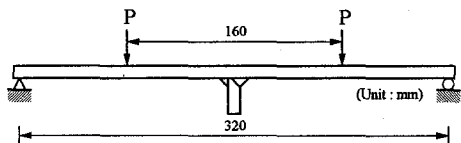


그림 2.3 피로실험방법

피로실험시 작용하중은 일정진폭하중, 하중파형은 정현파를 이용하였으며, 하중재하속도는 5Hz, 응력비는 0.1로 하였다.

또한 용접지단부에서의 피로균열발생 및 성장특성을 정량적으로 평가하기 위해서 일정반복회수마다 비치마크를 도입하였으며, 각 시험체에서 피로균열발생점을 예상하고 유한요소해석 모델링시 용접지단부의 기하학적 형상에 관한 자료로 활용하기 위해서 인상재를 이용해서 용접지단부의 형상을 정량적으로 측정하였다.[20]

한편, 그림 2.4에서와 같이 시험체에 작용하는 공칭응력과 용접지단부에서의 국부응력을 측정하기 위해서 변형률게이지를 부착하였다.

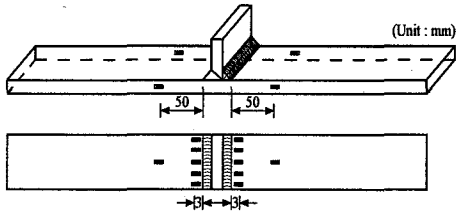


그림 2.4 변형률게이지 부착위치

3. 실험결과 및 고찰

3.1 피로강도특성

순수휨상태에서 하중비전달형 필렛용접부의 피로강도특성을 정량적으로 평가하기 위한 4점 휨 피로실험결과로부터 공칭응력범위와 반복회수사이의 관계를 나타내면 그림 3.1과 같다.

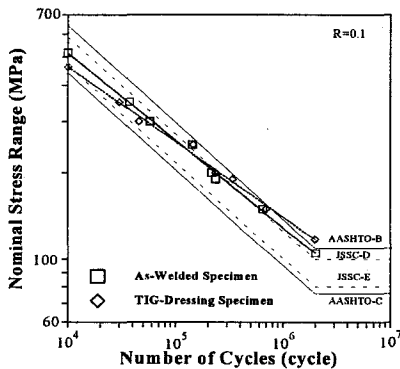


그림 3.1 공칭응력범위-반복회수 선도

그림 3.1의 B등급과 C등급은 AASHTO,[7] D등급과 E등급은 JSSC[13]에서 규정하고 있는 하중비 전달형 필렛용접부의 피로강도등급이며, 그림 중의 실선과 점선은 각각 AASHTO와 JSSC에서 규정하는 피로설계곡선을 나타낸다.

한편 그림 3.1에서 나타낸 결과로부터 회귀분석법을 이용해서 공칭응력범위와 반복회수 사이의 관계를 나타내면 표 3.1과 같다.

표 3.1 공칭응력범위와 반복회수 사이의 관계식

시험체 종류	회귀분석식	2×10^6 회피로강도 (MPa)	S-N선도 기울기
ASW	$\log(\Delta \sigma) + 0.30 \log(N) = 9.0$	105	3.3
TIG	$\log(\Delta \sigma) + 0.26 \log(N) = 8.5$	118	3.9

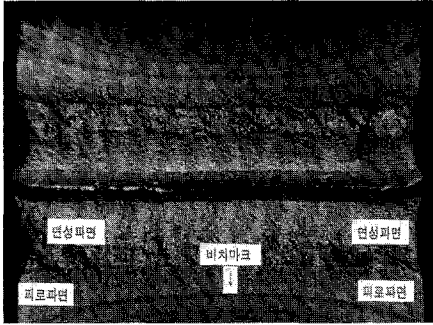
그림 3.1 및 표 3.1에서 알 수 있는 바와 같이 순수휨을 받는 하중비전달형 필렛용접부의 피로강도는 용접후처리를 실시하지 않은 시험체의 경우 현행 국내 도로교표준시방서와 AASHTO, JSSC에서 규정하고 있는 피로강도등급을 만족하고 있음을 알 수 있으며, 현행 시방서에서 규정하는 피로설계곡선의 기울기 3보다 다소 완만한 경향을 나타내고 있었다.

또한 용접지단부를 TIG 처리를 실시하는 경우에는 용접후처리를 실시하지 않은 경우보다 피로강도가 약 11% 증가함을 알 수 있었으며, 또한 용접지단부를 TIG 처리한 경우 용접후처리를 실시하지 않은 경우보다 피로설계곡선의 기울기가 보다 완만한 경향을 나타내고 있는데, 이로부터 피로균열이 용접루트부로 전이하지 않고 용접지단부에서 발생, 성장해서 파단에 이르는 경우에는 TIG 처리가 매우 효율적임을 알 수 있었다.

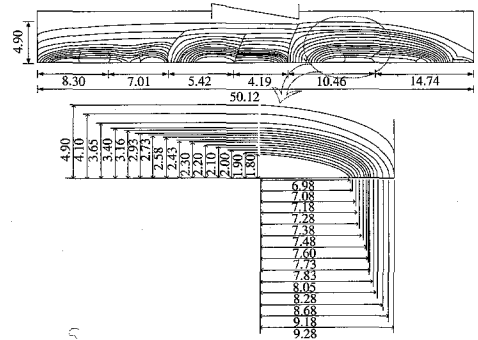
3.2 파단면 특성

순수휨을 받는 하중비전달형 필렛용접부의 피로균열발생 및 성장특성을 조사하기 위해서 대상 시험체에 대해서 피로실험을 종료한 후의 파단면 형상 및 파단면 모식도를 그림 3.2와 그림 3.3에 나타내었다.

그림 3.2와 그림 3.3에서 알 수 있는 바와 같이 용접지단부의 응력집중계수가 큰 여러 부분에서 피로균열이 다발적으로 발생해서 반타원형상으로 관쪽, 관두께 방향으로 성장하다가 인접한 동일한 형태의 피로균열과 합체되어 보다 큰 형상의 반타원형 균열로 성장해서 파단에 이르는 것을 확인할 수 있었다.



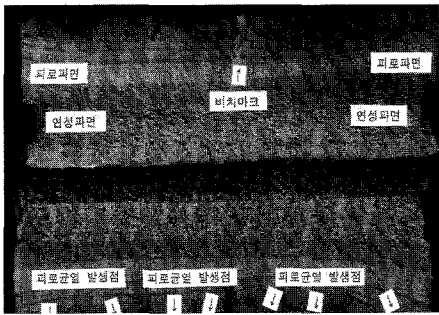
(a) 용접후처리를 실시하지 않은 시험체



$\sigma_{max} = 211.1(MPa), \sigma_{min} = 21.1(MPa)$
 $\Delta\sigma = 190(MPa), N_f = 340,000(cycles), R = 0.1$

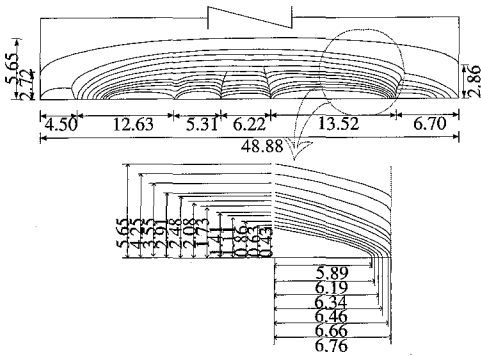
(b) TIG 처리한 시험체

그림 3.3 피로실험결과에 따른 파단면 모식도



(b) TIG 처리한 시험체

그림 3.2 피로실험결과에 따른 파단면 사진



$\sigma_{max} = 211.1(MPa), \sigma_{min} = 21.1(MPa)$
 $\Delta\sigma = 190(MPa)$
 $N_f = 236,490(cycles), R = 0.1$

(a) 용접후처리를 실시하지 않은 시험체

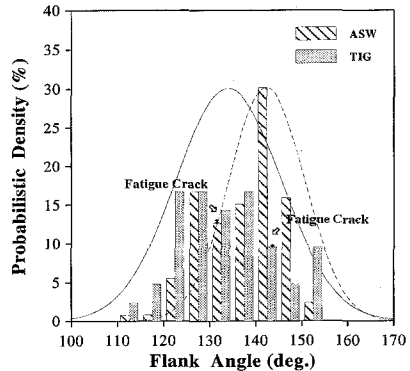
4. 유한요소해석

유한요소해석시 용접지단부의 기하학적 형상을 정확하게 고려하기 위해서 비드형상을 측정하여 그 평균값을 이용하였으며, 용접비드형상에 대한 분포특성을 나타내면 그림 4.1과 같다.

표 4.1 용접지단부의 형상에 대한 통계분석결과

시험체 종류	최대값	최소값	평균값	표준편차	
ASW	θ (°)	156.0	113.6	134.1	11.4
	ρ (mm)	2.25	0.22	1.31	0.53
TIG	θ (°)	157.8	118.0	142.4	8.2
	ρ (mm)	3.5	0.84	1.61	0.63

한편 그림 4.1의 결과로부터 용접비드형상 즉, 비드접선각도와 곡률반경에 대한 통계분석을 실시해서 비드접선각도와 곡률반경의 최대값, 최소값, 평균값, 표준편차를 정리해서 나타내면 표 4.1과 같다.



(a) 비드접선각도

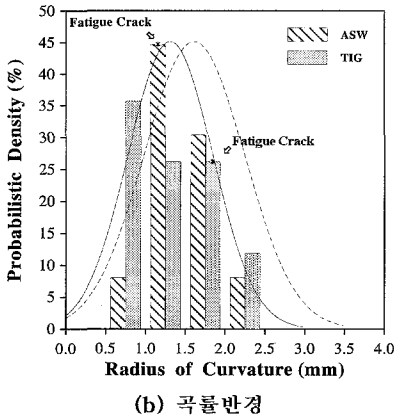


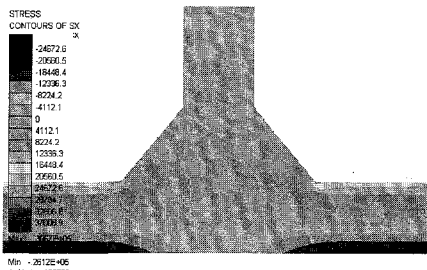
그림 4.1 용접지단부의 형상측정 결과

표 4.1 및 그림 4.1에서와 같이 용접지단부를 TIG 처리한 경우 비드점선각도는 약 6%, 곡률반경은 23% 증가하는 것을 알 수 있었다. 용접지단부의 형상 중 곡률반경이 응력집중계수에 보다 큰 영향을 미친다는 연구결과[9],[10],[12],[20]로부터 용접지단부를 TIG 처리함으로써 곡률반경이 매우 증가하고 이로부터 용접지단부의 응력집중계수가 감소함으로써 피로균열발생수명이 증가함으로써 피로강도가 향상되는 것으로 생각한다.

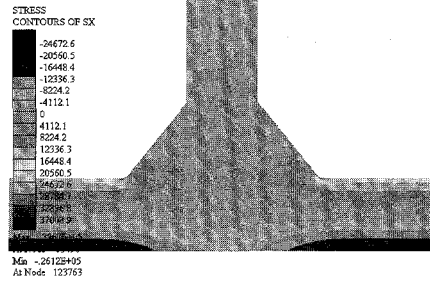
한편 용접지단부에서의 국부적인 응력특성을 평가하고 용접지단부의 응력집중계수를 산정하기 위해서 상용 유한요소 해석프로그램인 IUSAS[8]를 이용해서 선형탄성해석을 실시하였다.

유한요소해석 모델링시 용접지단부의 기하학적 형상에 관한 자료는 표 4.1에서 나타낸 평균값을 이용하였으며, 해석모델은 2차원 평면변형요소를 이용하였으며, 요소의 크기는 0.2~1.0mm까지 변화시켰다.

대상 시험체에 단위하중을 작용시킨 경우의 유한요소해석 결과의 일례를 나타내면 그림 4.2와 같으며, 그림 4.2에서 Stress Contour가 나타내는 값은 주응력을 의미하고 단위는 t/m^2 이다.



(a) 용접후처리를 실시하지 않은 시험체



(b) TIG 처리한 시험체

그림 4.2 유한요소해석결과의 일례

한편 본 유한요소해석 결과의 타당성을 검증하기 위해서 해석결과로부터 용접지단부로부터의 거리에 따른 응력집중계수(실제응력/공칭응력)의 변화 정도와 그림 2.4에서 나타낸 용접지단부에서 측정된 응력자료를 나타내면 그림 4.3과 같다.

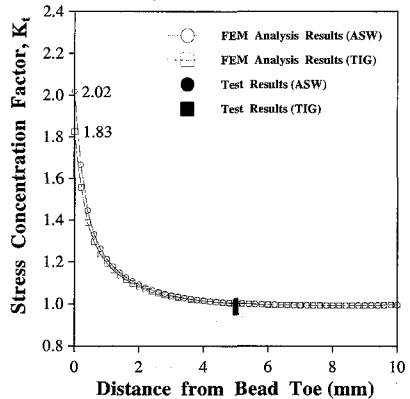


그림 4.3 용접지단부로부터 응력집중계수의 변화

그림 4.2에서와 같이 최대응력은 용접지단부에서 발생하였으며, 그림 3.2에서 나타낸 피로균열 발생 위치가 유한요소해석결과의 최대응력 발생위치와 일치하는 것을 알 수 있었다.

또한 용접지단부에서의 응력집중계수는 용접후 처리를 실시하지 않은 경우 2.02, TIG 처리를 실시한 경우 1.83으로써 용접지단부를 TIG 처리함으로써 응력집중계수는 약 10% 정도 감소하였는데, 이러한 결과는 표 4.1에서 나타낸 바와 같이 용접후 처리를 실시하지 않은 경우에 비해서 TIG 처리를 실시한 경우에 비드점선각도와 곡률반경이 증가하였기 때문인 것으로 생각되며, 용접지단부의 기하학적 형상이 응력집중계수에 큰 영향을 미치는 것

을 알 수 있었다.

한편 그림 4.3에서와 같이 용접지단부로부터 5mm 떨어진 위치에서의 응력은 실측값과 해석값이 거의 일치하는 경향을 나타내고 있으므로 본 연구에서 실시한 유한요소해석은 비교적 타당함을 알 수 있었다.

또한 순수굽 상태에서 판두께 방향의 응력분포 특성을 나타내면 그림 4.4와 같다.

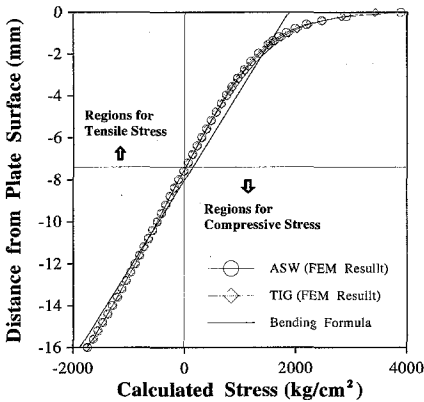


그림 4.4 판두께 방향의 응력분포도

그림 3.2에서 나타낸 파단면 모식도에서와 같이 피로파괴는 시험체 전체 두께의 약 절반 이하 정도에서만 발생하고 있으며, 그 이상에서는 연성파괴형상을 나타내고 있었는데, 이러한 이유는 그림 4.4에서 알 수 있는 바와 같이 판두께의 약 0.45t 까지만 인장응력이 발생하고 그 이하에서는 압축응력이 발생하기 때문인 것으로 생각된다. 이는 기존의 연구결과[5]에서도 알 수 있는 바와 같이 피로균열은 일반적으로 압축응력이 작용하는 영역에서는 성장하지 않기 때문인 것으로 생각된다.

5. 파괴역학적 해석

5.1 응력확대계수범위

중양부에 길이가 $2a$ 인 관통균열을 갖는 무한판에 등분포응력 $\Delta\sigma$ 가 작용할 때 응력확대계수범위 ΔK 는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta K = \Delta\sigma\sqrt{\pi a} \quad (1)$$

실제 구조물은 이상적인 구조물과는 달리 반드시 결함을 포함하며, 결함의 형상이나 결함이 존재하는 부재의 형상을 고려함으로써 일반적인 경우

의 응력확대계수범위는 식 (1)에서 균열에 대한 보정계수 $F(a)$ 를 고려해서 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta K &= F(a)\Delta\sigma\sqrt{\pi a} \\ F(a) &= F_e F_s F_w F_g \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, F_e 는 균열형상에 대한 균열형상보정계수, F_s 는 표면균열에 대한 자유표면보정계수, F_w 는 유한판폭, 판두께에 대한 유한판보정계수, F_g 는 응력집중의 영향을 고려한 기하학적 형상보정계수이다.

(1) 표면균열에 대한 보정계수

H.Tada, P.C.Paris 및 G.R.Irwin은 등분포 응력을 받는 반무한판에 존재하는 반타원형 균열의 균열길이방향 선단에서의 자유표면보정계수를 식 (3)과 같이 정의하고 있다.[2]

$$F_s = 1 + 0.12\left(1 - \frac{a}{c}\right) \quad (3)$$

여기서, a : 반타원균열의 짧은지름, c : 반타원균열의 긴지름이다.

(2) 균열형상에 대한 보정계수

S.J.Maddox는 무한체 내부에 매립된 타원형 균열의 균열개구변위에 대한 해를 이용해서 균열형상보정계수를 식 (4)와 같이 정의하고 있다.[3]

$$F_e = \frac{1}{E(k)}(1 - k^2 \cos^2 \theta)^{\frac{1}{4}} \quad (4)$$

$$\text{여기서, } E(k) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} (1 - k^2 \sin^2 \theta)^{\frac{1}{2}} d\theta$$

$$k^2 = 1 - \left(\frac{a}{c}\right)^2, \quad \theta : \text{위상각이다.}$$

(3) 유한판폭에 대한 보정계수

유한판두께 또는 유한판폭의 중앙에 길이 $2a$ 인 관통균열에 대한 유한판보정계수는 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$F_w = (1 - 0.025\lambda^2 + 0.06\lambda^4)\sqrt{\sec\left(\frac{\pi\lambda}{2}\right)} \quad (5)$$

여기서, $\lambda = a/t$ 이다.

(4) 응력구배에 대한 보정계수

P.Albrecht 등은 용접지단부에서의 응력집중계수에 대한 회귀분석결과로부터 기하학적 형상보정계수를 식 (6)을 이용해서 산정할 수 있다고 보고하였다.[4]

$$F_g = \frac{2}{\pi} \int_0^a \frac{K_{Ic}}{\sqrt{a^2 - x^2}} dx \quad (6)$$

여기서, K_{Ic} 는 응력집중계수에 대한 다항식이다.

식 (6)을 이용해서 기하학적 형상보정계수를 산정하기 위해서는 응력집중계수를 거리 x 에 대한 다항식의 형태로 나타내는 것이 편리하다.

따라서, 그림 4.3에서 나타낸 해석결과에서 응력집중계수를 거리 x 에 대한 다항식의 형태로 나타내면 식 (7)과 같으며, 식 (6)을 이용해서 기하학적 형상보정계수를 나타내면 식 (8)과 같다.

$$\frac{K_{Ic}}{(K_I)_{x=0}} = 1 + Ax + Bx^2 + Cx^3 + Dx^4 + \dots \quad (7)$$

$$\frac{F_g}{(K_I)_{x=0}} = 1 + \frac{2A}{\pi} a + \frac{B}{2} a^2 + \frac{4C}{3\pi} a^3 + \dots \quad (8)$$

식 (8)을 이용해서 용접후처리를 실시하지 않은 경우와 TIG 처리한 경우의 기하학적 형상보정계수 산정결과를 나타내면 그림 5.1과 같다.

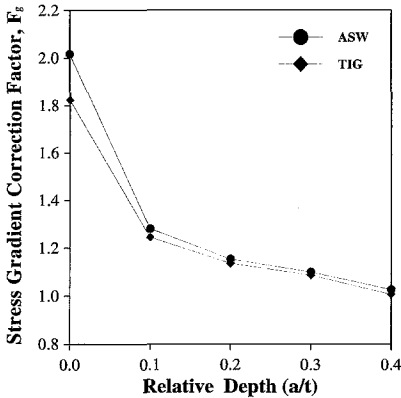


그림 5.1 기하학적 형상보정계수 산정결과

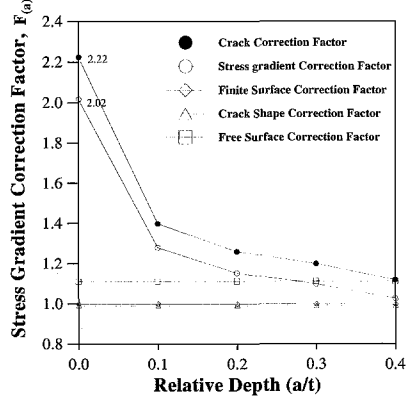
그림 5.1에서 a/t 는 피로균열의 성장에 따른 두께의 감소량을 의미하며, a/t 가 증가함에 따라 기하학적 형상보정계수는 급격하게 감소함을 알 수 있었다.

이 결과에서 피로균열발생 초기에는 용접지단부에서의 기하학적 형상에 따른 응력집중계수가 가장 큰 영향을 미치는 인자임을 알 수 있었다.

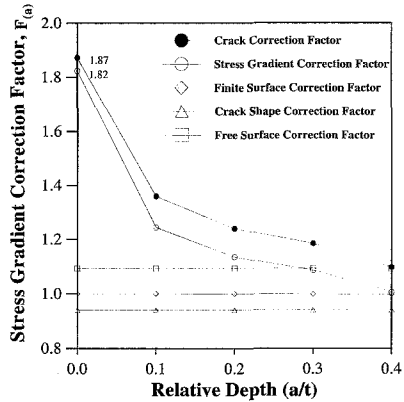
또한 그림 5.1에서 상대깊이를 0.4 이하로 제한한 이유는 그림 4.4에서 나타낸 판두께 방향의 응력분포에서 피로균열의 성장에 영향을 미치는 인장응력이 전체 판두께의 약 45%에서만 작용하기

때문이다.

한편 본 연구에서는 파괴역학적 해석을 실시하기 위해서 일련의 균열보정계수를 산정한 결과를 나타내면 그림 5.2와 같다.



(a) 용접후처리를 실시하지 않은 시험체



(b) TIG 처리한 시험체

그림 5.2 균열보정계수 산정결과에의 일례

그림 5.2에서와 같이 균열보정계수 중 균열형상보정계수와 자유표면보정계수 및 유한판보정계수는 a/t 에 관계없이 일정한 경향을 나타내고 있으나, a/t 가 0.4 이하인 경우에 기하학적형상보정계수가 균열보정계수에 가장 지배적인 영향을 미치는 인자임을 알 수 있었다.

한편 그림 5.2의 결과에서 균열보정계수에 대한 식을 상대깊이에 대한 다항식의 형태로 나타내면 식 (9) 및 식 (10)과 같다. 여기서, $F(a)$ 에 대한 식은 $a/t \leq 0.4$ 인 경우에만 유효하다.

[용접후처리를 실시하지 않은 경우]

$$F(a) = 2.2 - 15.0\left(\frac{a}{t}\right) + 88.1\left(\frac{a}{t}\right)^2 - 228.6\left(\frac{a}{t}\right)^3 + 212.1\left(\frac{a}{t}\right)^4 \quad (9)$$

[TIG 처리를 실시한 경우]

$$F(a) = 1.9 - 8.8\left(\frac{a}{t}\right) + 46.4\left(\frac{a}{t}\right)^2 - 111.3\left(\frac{a}{t}\right)^3 + 94.8\left(\frac{a}{t}\right)^4 \quad (10)$$

한편, 피로실험시 도입한 비치마크실험결과로부터 $a-N$ 선도를 나타내면 그림 5.3과 같다.

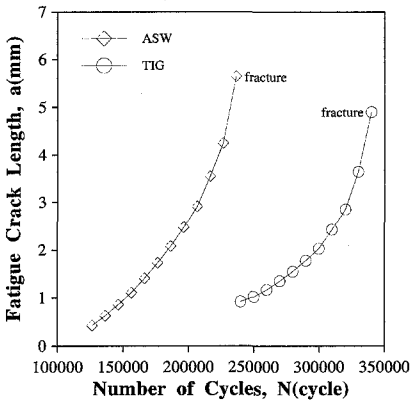


그림 5.3 균열길이(a)-반복회수(N) 선도

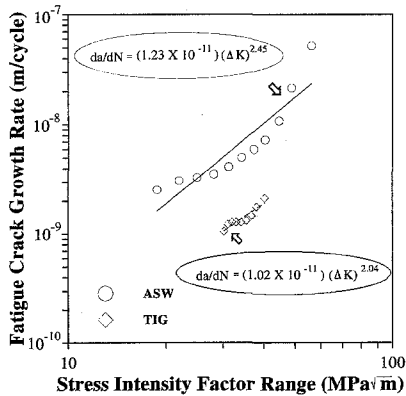


그림 5.4 $da/dN - \Delta K$ 선도

또한 그림 5.3의 결과로부터 7점법을 이용해서

산정한 피로균열성장속도 da/dN 과 식 (9) 및 식 (10)의 균열보정계수를 이용해서 산정한 응력확대 계수범위 ΔK 사이의 관계를 나타내면 그림 5.4와 같다.

한편, 그림 5.4의 피로균열성장속도와 응력확대 계수범위 사이의 관계로부터 선형회귀분석법을 이용해서 재료상수 C 와 m 을 산정한 결과 용접후처리를 실시하지 않은 경우 $C=1.23 \times 10^{-11}$, $m=2.45$ 이며, TIG 처리한 경우 $C=1.02 \times 10^{-11}$, $m=2.04$ 임을 알 수 있었다.

위에서 나타낸 재료상수 C , m 은 표 5.1에서 나타낸 바와 같이 JSSC의 피로설계지침의 최안전설계곡선이나 평균설계곡선에서 제시하고 있는 값 중 m 값은 대체적으로 만족하지만 C 값은 편차가 있는 것을 알 수 있었다.

또한 본 연구결과를 JSSC 피로설계지침의 최안전설계곡선 및 평균설계곡선과 비교해서 나타내면 그림 5.5와 같다.

표 5.1 $da/dN - \Delta K$ 선도의 제안정수

구분	C	m	ΔK_b (MPa√m)
최안전설계곡선	2.7×10^{-11}	2.75	2.0
평균설계곡선	1.5×10^{-11}	2.75	2.9

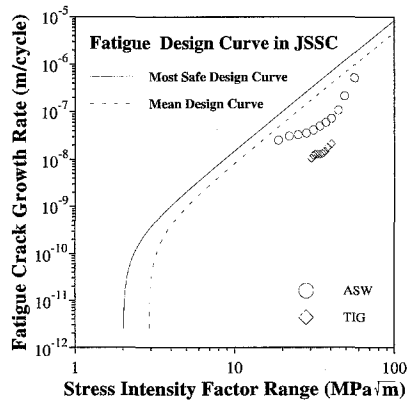


그림 5.5 JSSC 피로설계지침과의 비교

그림 5.5에서와 같이 파괴역학적 해석결과 JSSC의 피로설계지침의 평균설계곡선의 기울기는 거의 유사한 경향을 나타내고 있으나 전반적으로 하회하는 경향을 나타내고 있었다. 또한 용접후처리를 실시하지 않은 경우보다 TIG 처리한 경우가 보다 하회하는 경향을 나타내고 있었다.

한편 식 (11)에서 나타낸 Paris-Erdogan의 식을 이용해서 피로수명을 산정할 수 있다.[2]

$$N = \int_{a_i}^{a_f} \frac{1}{C(\Delta K)^m} da \quad (11)$$

여기서, 초기균열길이 a_i 는 용접후처리를 실시하지 않은 경우 0.43mm, TIG 처리한 경우 1.80 mm로 가정하였으며, 한계균열길이 a_f 는 용접후처리를 실시하지 않은 경우 5.65mm, TIG 처리한 경우 4.90mm로 가정하였다.

따라서 제3장에서 나타낸 실험피로수명과 JSSC 피로설계지침의 제안값 및 유한요소해석으로부터 산정한 계산피로수명 사이의 관계를 나타내면 그림 5.6과 같다.

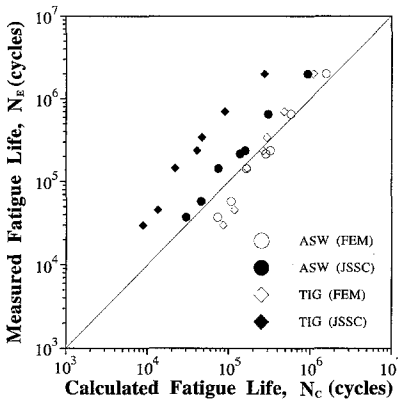


그림 5.6 실험피로수명과 계산피로수명과의 비교

그림 5.6에서 알 수 있는 바와 같이 실험피로 수명과 계산피로수명의 비(N_c/N_m)는 용접후처리를 실시하지 않은 시험체의 경우 $0.78 \leq N_c/N_m \leq 1.95$, TIG 처리한 시험체의 경우 $0.55 \leq N_c/N_m \leq 2.84$ 에서 분포하고 있으며, 계산결과가 실험결과보다 다소 과대평가하고 있는 경향을 나타내고 있었다.

이와 같이 실험결과와 계산결과에 차이가 존재하는 이유는 비치마크실험으로부터 측정된 피로균열을 정확하게 측정하는 데에 한계가 있었으며, 시험체에 용접열영향으로 인한 각변형이 존재함으로써 용접지단부의 모퉁한 부분에서 면외휨 인장응력이 추가적으로 작용하였기 때문이 것으로 생각된다.

6. 결 론

이 연구에서는 하중비전달형 필렛용접부를 대상으로 순수휨상태에서 용접지단부를 TIG 처리함으로써 피로강도의 향상정도 및 피로특성을 정량적으로 평가하기 위해서 일련의 피로실험, 유한요소해석 및 파괴역학적 해석을 실시하였으며, 이로부

터 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 순수휨을 받는 하중비전달형 필렛용접부의 피로강도는 국내 및 외국의 피로설계기준의 피로강도등급을 만족하고 있음을 알 수 있었으며, 용접지단부를 TIG 처리함에 따라서 2×10^6 회 피로강도는 약 11% 향상되었다.
- (2) 피로균열은 용접지단부의 비드접선각도 및 곡률반경이 작은 점에서 다발적으로 발생하였으며, 반타원형 표면균열의 형태로 성장하다가 인접한 동일한 형태의 피로균열과 합체되어 보다 큰 형상의 반타원형 균열로 성장해서 파단에 이르는 것을 확인하였으며, 이로부터 응력 집중부와 피로균열발생부는 일치함을 알 수 있었다.
- (3) 유한요소해석결과 용접지단부의 응력집중계수는 용접지단부의 기하학적 형상 즉, 비드접선각도 및 곡률반경과 밀접한 관련이 있으며, 이 중 곡률반경에 보다 큰 영향을 받음을 알 수 있었다.
- (4) 파괴역학적 해석결과 균열보정계수 중 균열형상보정계수와 자유표면보정계수 및 유한판보정계수는 a/t 에 관계없이 일정한 경향을 나타내고 있으나, a/t 가 0.4 이하인 경우에 기하학적 형상보정계수가 균열보정계수에 가장 지배적인 영향을 미치는 인자임을 알 수 있었다.
- (5) 피로균열성장속도와 유한요소해석결과 및 기존의 제안식으로부터 산정한 응력확대계수범위 사이의 관계로부터 피로수명을 비교적 정확하게 산출할 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] P.C.Paris, F.Erdogan, "A Critical Analysis of Crack Propagation Laws", Trans. of ASME, Series-D, Vol.85, No.4, pp.528-533, 1963.
- [2] H.Tada, P.C.Paris and G.R.Irwin, "The Stress Analysis of Crack Handbook", Del Research Corp., Hellertown, 1973.
- [3] S.J.Maddox, "An Analysis of Fatigue Cracks in Fillet Welded Joints", International Jr. of Fracture Mechanics, Vol.11, No.2, pp.221, 1975.
- [4] P.Albrecht, K. Yamada, "Rapid Calculation of Stress Intensity Factors", Journal of the Structural Division, Proceedings of the ASCE., Vol.103, No.ST2. pp.377- 389, 1977.
- [5] S.T.Rolfe, J.M.Barsom, "Fracture and Fatigue Control in Structures-Application of Fracture Mechanics", Prentice-Hall

pp.425-454, 1977.

- [6] J.W.Fisher, "*Fatigue and Fracture in Steel Bridges*", John Wiley & Sons, 1984.
- [7] AASHTO, "*Standard Specification for Highway Bridges*", pp.144-147, 1996.
- [8] LUSAS, "*Lusas Theory Manual et al*", Ver.13.1, FEA Korea Ltd, 2000.
- [9] 西田正孝, "應力集中", 培風館, pp.633-635, pp.651, 1967.
- [10] 中村宇八郎, 福澤光男, 失田敏夫, "すみ肉溶接継手の適正寸法に關する研究", 石川島播磨技報, 第16卷, 第5號, pp.513-521, 1976.
- [11] 山田健太郎, M.A.Hirt, "破壊力學を應用したパラメトリックな疲勞壽命解析", 日本土木學會論文報告集, 第319號, 1982.
- [12] 後川 理, 中山英治, "溶接継手部の應力集中係數", 石川島播磨技報, 第23卷, 第4號, 1983.
- [13] 日本鋼構造學會編, "鋼構造物の疲勞設計指針・同解説", 技報堂出版, pp.5-12, pp.240-260, 1993.
- [14] 日本土木學會編, "鋼橋における劣化現象と損傷の評價", (株)丸善, pp.10-12, 1996.
- [15] 건설교통부, "도로교표준시방서 - 설계, 시공 및 유지관리편", pp.119-122, 1996.
- [16] 홍성욱, "횡방향 맞대기 용접부의 피로특성에 관한 연구", 한양대학교 대학원 박사학위논문, 1998.
- [17] 임청권, 락문호, 장준호, "필렛용접이음부의 후처리에 따른 피로강도 향상메카니즘의 연구", 한국강구조학회논문집, 제11권, 제3호, 1999.
- [18] 정영화, 홍성욱, 김익겸, 정진석, "강판형의 덮개관 형상에 따른 피로특성", 한국강구조학회 논문집, 제12권, 제2호, 2000.
- [19] 김동준, 홍성욱, 경갑수, 최동호, "순수힘을 받는 하중비전달형 필렛용접부의 피로특성에 관한 연구", 한국강구조학회 학술발표회 논문집, 2000.
- [20] 김동준, "그라인딩 처리에 따른 하중비전달형 필렛용접부의 피로특성", 한양대학교 대학원 석사학위논문, pp.29-30, 2000.