

부분용입된 하중전달 십자형 용접부의 피로강도 평가에 관한 실험적 연구

A Experimental Study on the Fatigue Strength Evaluation of Load-Carrying Weldments with Lack of Penetration

박상흡* · 이용복** · 남병찬** · 정진성*** ·

* 천안공업대학 용접기술과

** 홍익대학교 기계공학과

*** 홍익대학교 과학기술연구소

Abstract In this study, constant amplitude fatigue tests on load-carrying fillet welded specimen carried out, and fatigue strengths were evaluated. Also, an attempt is made to develop a new analytical model with more accuracy to predict the fatigue crack propagation life of fillet welded cruciform joints of SWS 490B steels containing lack of penetration defects. From the result of this study, fatigue crack growth characteristics of load-carrying fillet welded cruciform joints, containing lack of penetration defects are found to be affected by the weld geometry and the number of weld pass.

1. 서론

강 구조물의 용접부에서 발생하는 피로균열은 내부 결함 또는 기하학적인 불연속부인 용접단부에서 발생한다.¹⁾ 피로균열이 내부결함으로부터 발생하는 경우에는 결함의 치수, 모양, 위치 등에 관계하지만 용접단부에서 발생하는 경우는 단부의 곡률반경과 접선각에 의존한다.

필렛 용접부의 2가지 피로균열 유형은 루트 균열(Root crack)과 토 균열(Toe crack)이 있다. 루트부에서 발생하는 피로 파단은 판 두께를 비롯한 용접치수들을 적절하게 조절하면 회피할 수도 있으며 필렛 용접의 크기가 충분하면 피로균열은 필렛 용접 토우부에서 시작하고, 용접부의 피로균열 성장거동은 재료특성, 사용응력 및 기하학적 형상에 의존한다.^{2~3)}

실 구조물에서 완전 용입을 하면 피로강도 면에서 유리하지만, 시간과 비용이 상승함으로 인하여 구조물의 용접 중 루트부까지의 접근이 곤란하기 때문에 불완전 용입을 허용하게 된다.⁴⁾ 십자형 필렛 용접이음은 매우 다양한 용도로 실 구조물에 사용되고 있지만, 장기간에 걸쳐 사용되므로 피로의 관점에서의 검토가 철실하게 요구된다. 따라서, 본 논문에서는 불완전 용입 깊이와 판 두께를 변화시킨 하중전달 십자형 용접부의 피로강도를 실험적으로 연구하여 피로균열 전파 특성에 대한 기하학적 형상의 영향을 고찰하고자 한다.

2. 실험

시험편은 재료두께를 3종류($t_1=10$, $t_2=15$, $t_3=20$)로 선택하여 Fig. 1과 같이 하중전달 십자형으로 하였으며, 시험편의 치수는 Table 1에 나타내었다. 시험편의 재료는 용접구조물 제작에 흔히 사용되는 SWS490B로 화학적 성분과 기계적 성질은 Table 2과 Table 3에 각각 나타내었다.

본 실험에 사용된 시험편은 Table 3의 조건으로 자동용접 되었으며, 측면의 용접영역을 구분하기 위하여 기계절단하고 경면 연마하여 부식시킨 후 치수를 측정하였다.

Table 1 Dimensions of specimens (Unit:mm)

t_1 (mm)	t_2 (mm)	L(mm)	b(mm)	D(mm)
10	12	260	25	85
15	12	260	25	85
20	12	260	25	85

Table 2 Chemical compositions of the base metal wt.(%)

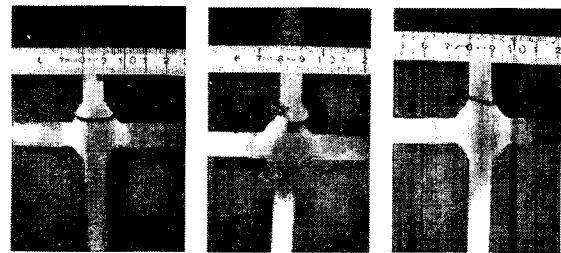
Material	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr
SWS 490B	0.14	0.36	1.55	0.14	0.02	0.22	0.21	0.02

Table 3 Mechanical compositions of the base metal

Material	Yield strength	Tensile strength	Elongation (%)
SWS 490B	400(MPa)	572(MPa)	26

Table 4 Welding conditions

Thickness (mm)	LOP(mm)	Number of pass	Welding current(A)	Voltage (V)
t ₁ =10	2a=0	1	180	24
		2	140	20
	2a=2.4	1	190	20
		2	140	20
	2a=4.8	1	180	24
		2	140	20
2a=7.2	1	170	23	
	2	140	20	
t ₁ =15	2a=0	1	190	26
		2	170	20
	2a=2.4	1	190	26
		2	170	20
	2a=4.8	1	190	26
		2	170	20
2a=7.2	1	190	25	
	2	170	20	
t ₁ =20	2a=0	1	190	25
		2	190	25
		3	160	21
	2a=2.4	1	190	25
		2	180	23
		3	170	21
	2a=4.8	1	170	26
		2	180	23
		3	170	21
2a=7.2	1	190	25	
	2	170	20	
	3	170	20	



a) Root failure b) Mixed failure c) Toe failure
Fig. 2 Fatigue failure modes of load-carrying cruciform joints

피로실험은 Instron에서 제작한 25ton 용량의 전기유압식 만능 피로 시험기(Model 1332)를 사용하여, 하중제어 방식으로 응력비 ($R = \sigma_{min} / \sigma_{max}$) 0인 10 Hz의 정현파형(Sine Wave Form) 반복하중을 일정하게 가하여 수행하였다. 균열길이는 금속 현미경(Unitron Versamet-2)을 사용하여 1/100 mm 오차 범위 내에서 측정하였으며, 균열측정을 용이하게 하기 위하여 연마지와 산화크롬(Cr_2O_3)분말을 사용하여 연마하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 S-N 선도와 피로수명

하중전달 십자형 시험편의 피로 파단 형태는 Fig. 2와 같이 3종류로 분류되었다. 즉, a)루트부 파단은 용접부의 루트부에서 균열이 진전되어 전단에 의해서 급속 파단되고, b)혼합파단은 루트부에서 시작된 균열과 토우부의 균열이 만나 동시에 파단되며, c)토우부 파단은 루트부의 균열성장도 관찰되었으나, 결국은 토우부에서 파단되었다.

Fig. 3은 용입결합의 치수가 7.2mm인 시험편에 대한 피로시험 결과를 판두께에 따라 분류한 것이며, Fig. 4는 완전용입된 시험편에 대한 판두께에 따른 피로시험 결과이다. 여기서, 응력범위는 구조물 설계시 강도해석에 주로 사용되는 구조부재에 걸리는 최대정적응력을 기준으로 하였는데, 여기에서 목두께는 AWS Rule⁵⁾에 따른 유효목두께로 설정하였다.

용입결합이 7.2mm인 시험편은 파단위치가 대부분 루트부에서 파단되었으나, 완전용입된 시험편에서는 모두 토우부에서 파단되었다. 피로실험 결과를 S-N선도로 평가한 결과 용입결합이 7.2mm인 경우, 3pass용접된 판 두께 20mm인 시험편이 2pass용접된 10mm, 15mm인 시험편과 비

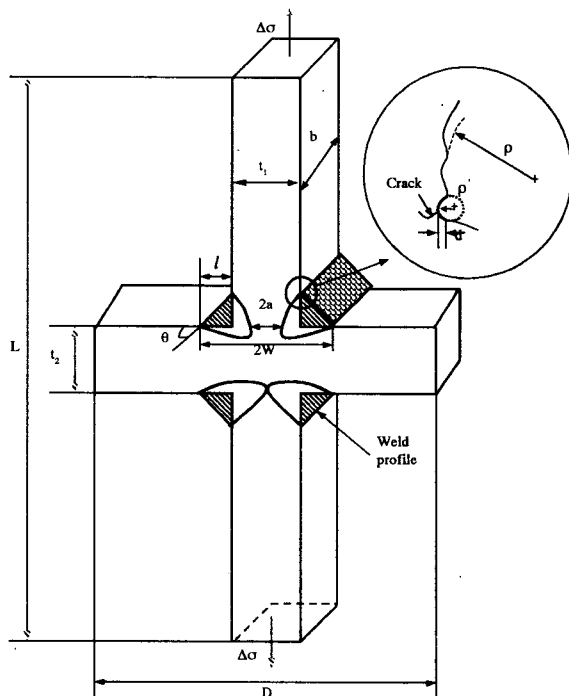


Fig. 1 Configuration of cruciform joints

교하여 상대적으로 피로수명이 우수하였으며, 완전 용입된 시험편에서는 모두 토우부에서 파단되었기 때문에 피로강도에 용접횟수의 영향이 나타나지 않았다.

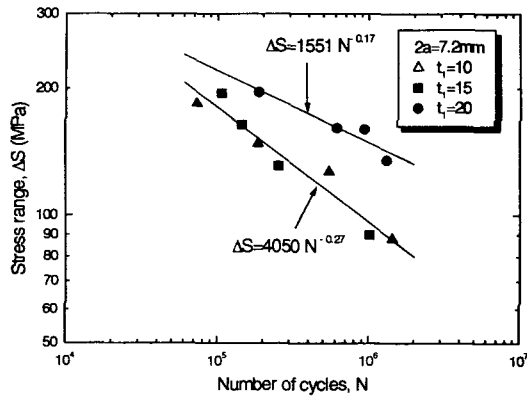


Fig. 3 Fatigue test results of LOP(2a=7.2mm) specimens

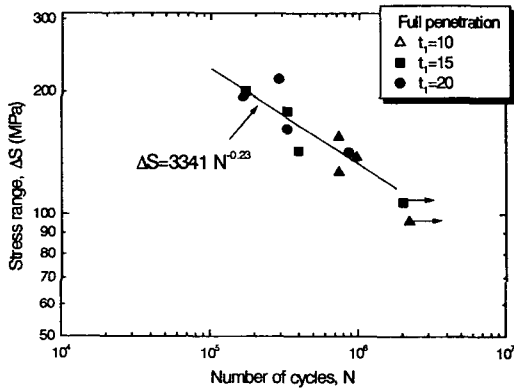


Fig. 4 Fatigue test results of full penetration specimens

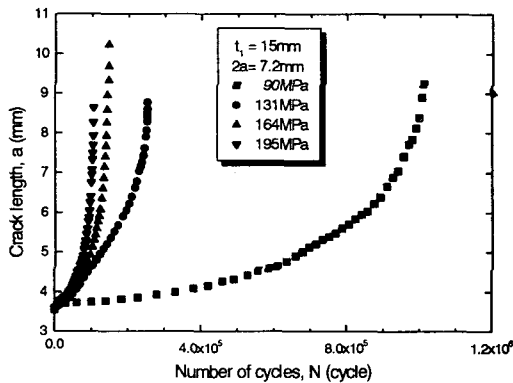


Fig. 5 Typical root crack growth curves of cruciform weld specimens

3.2 응력확대계수와 피로균열진전속도

Fig. 1과 같은 하중전달 십자형 용접부에서 루트부의 응력확대계수범위는 다음과 같다.⁶⁻⁷⁾

$$\Delta K = \Delta \sigma \cdot f^*(a) \cdot W^{1/2} \quad (1)$$

$$f^*(a) = \frac{[A_1 + A_2 a^*][\pi a^* \cdot \sec(\pi a^*/2)]^{1/2}}{1 + 2(l/t_1)}$$

여기서, $\Delta \sigma$ 는 주판의 응력범위, a 는 루트부 균열반폭, a^* 는 필렛폭과 균열길이의 비(a/W), l/t_1 는 주판에 대한 다리길이의 비를 나타낸다. 또한, A_1 , A_2 값은 용접형상 (l/t_1)의 함수로 다음과 같다.

$$A_1 = 0.528 + 3.287(l/t_1) - 4.361(l/t_1)^2 + 3.696(l/t_1)^3 - 1.874(l/t_1)^4 + 0.415(l/t_1)^5$$

$$A_2 = 0.218 + 2.7717(l/t_1) - 10.171(l/t_1)^2 + 13.122(l/t_1)^3 - 7.775(l/t_1)^4 + 1.785(l/t_1)^5$$

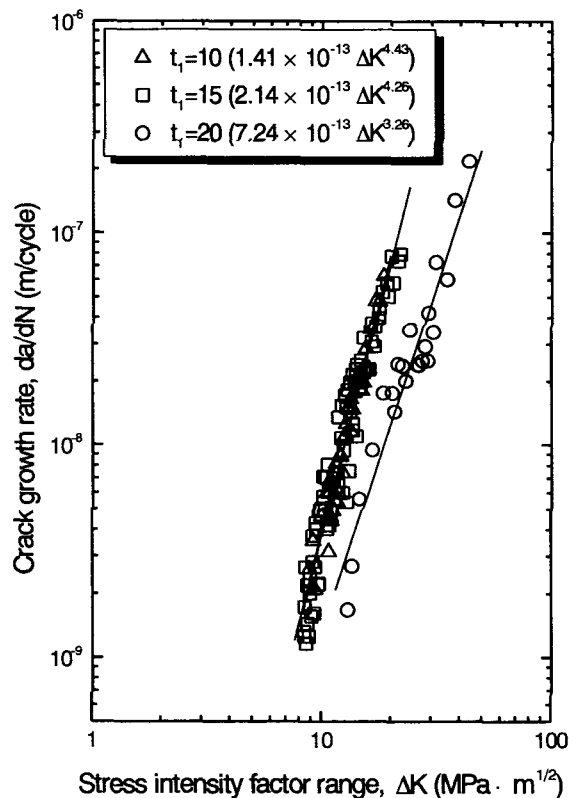


Fig. 6 Root crack growth rate curves of cruciform weld specimens

불완전 용입된 십자형 시험편의 루트부에서 전형적인 반복피로수명에 대한 균열성장 길이의 관계를 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5는 판 두께 15mm, 루트부 초기균열 7.2mm인 상태에서 90MPa~195MPa의 일정응력범위로 실험한 결과이며, 이 응력구간에서 피로균열은 비교적 안정적으로 성장하였다.

Fig. 6은 3가지 판 두께에 대한 일정진폭 피로 실험 결과로부터, 루트부의 피로균열전파 특성을 파괴역학적으로 평가한 균열진전속도와 응력확대 계수 범위 관계를 나타내었다. 여기서, 응력확대 계수는 식(1)을 적용하여 계산하였으며, 추세선은 최소자승법을 사용하였다. 판두께 10mm와 15mm인 2pass 용접에 비하여, 3pass 용접된 판두께 20mm인 시험편의 경우가 상대적으로 균열전파 속도가 감소하여 피로균열 성장저항이 우수하였다. 이것은 용접횟수의 증가에 의해서 파괴인성이 증가되는 다층용접의 영향으로 판단된다.

4. 결론

- 1) 용입결함(LOP)을 갖는 시험편에서 판두께가 10mm와 15mm인 경우는 대부분의 파단형태가 루트부에서 균열이 진전되어 최종파단된 반면, 용입결함(LOP)을 갖는 판두께 20mm인 경우와 완전용입된 시험편은 토우부에서 대부분 파단되었다
- 2) 피로실험 결과를 S-N선도로 평가한 결과 루트부에서 파단된 경우보다 토우부에서 파단된 경우가 피로강도 면에서 우수하였다. 또한, 동일한 루트부 파단에서도 3pass용접한 판두께 20mm의 경우가 2pass용접한 판두께 10mm, 15mm의 경우보다 우수한 피로저항특성을 나타냈다.
- 3) 루트부의 피로균열전파 특성을 파괴역학적으로 평가한 $da/dN-\Delta K$ 선도에서도 2pass용접과 비교하여 3pass용접의 균열전파속도가 감소한 것은, 용접횟수의 증가에 의해서 파괴인성이 증가되는 다층용접의 영향으로 판단된다

참고문헌

1. D. Radaj, "Review of fatigue strength assessment of nonwelded and welded structures based on local parameters," Int. J. Fatigue v 18, n 3, 1996, pp. 153~170
2. 엄동석, 강성원, 유덕상, "십자형 필렛 용접이음의 피로균열에 대한 파괴역학적 고찰," 대한용접학회지, 제 1권, 제 1호, 1983, pp. 37~46

3. J. M. Ferreira, C. M. Branco, "Influence of weld and plate geometry on the fatigue strength of cruciform joints," Theo Appl Frac Mech, 1988, pp. 23~32
4. V. Balasubramanian and B. Guha, "Influence of weld size fatigue crack growth characteristics of flux cored arc welded cruciform joints," Materials Science and Engineering A265, 1999, pp. 7~17
5. ANSI/AWS, 1986, "Structural Welding Code-Steel," DI. 1-86
6. K. H. Frank, J. W. Fisher, "Fatigue strength of Fillet Welded Cruciform Joints," J. Struct. div., ASCE, 105, 1979, pp. 1727~1740
7. S. D. Pathak, V. M. Radhakrishnam and B. Guha, "fatigue crack growth in cruciform welded joints," Joining and Materials 1988