대한기계학회 2000년도 춘계학술대회논문집 A pp. 200~205 KSME 00S035

하중전달 십자형 필렛 용접부의 피로강도 평가에 관한 연구

이용복* · 남병찬* · 박인규* · 정진성** · 김호경***

A Study on the Fatigue Strength Evaluation of Load-Carrying Fillet welded Cruciform Joints

Yong Bok Lee, Byung Chan Nam, In Kju Park, Chin Sung Chung and Ho Kyung Kim

Key Words: Cruciform Joints(십자형 접합), Lack of Penetration(용입불량), Fatigue Life(피로수명)

Abstract

Fatigue failure modes of load-carrying cruciform weld joints are dependent on the characteristics of the fatigue crack initiation and propagation from the weld toe or the weld root. 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, stress range and microstructures of the weld zone.

1. 서 론

선박, 교량 등의 다양한 구조물에서 사용되는 필렛 용접은 용입불량이 자주 발견되는데, 완전히 분리파단될 때까지 피로균열을 탐지하기가 매우 어렵고, 보수용접을 하기도 곤란한 점이 많다. 필렛 용접부에서 피로균열의 2가지 유형은 루트 균열(Root crack)과 토 균열(Toe crack)이 있다. 루트부에서 발생하는 파단은 판 두께를 비롯한 용접형상을 적절하게 조절하면 방지할 수도 있다.[1] 용입결함(Lack of penetration, LOP)은 임계값인 용접된 판 두께의 반을 초과할 때 필렛 용접의 피로거동에 심각한 영향을 주고,[2] 필렛 용접의 크기가 충분하면 피로균열은 필렛 용접 토우부에서 시작하고, 용접부의 피로균열 성장거동은 재료특성, 사용응력 및 기하학적 형상에 의존한다고 보고되었다.[3]

실제 구조물의 용접 작업시 완전 용입을 하면 피로강도면에서 유리하지만, 시간과 비용이 상승함으로 인하여 구조물의 용접 중 루트부까지의 접근이 곤란하기 때문에 불완전 용입이 불가피하게 된다.[4] 그러나, 불완전용입 용접재의 용입 깊이에 따른 피로강도 및 균열 전파거동에 대한 자료가 미흡한 실정이어서 불완전 용입되어 있는 구조물의 안전성을 평가함에 있어서 많은 어려움이 있다.[5]

본 연구에서는 불완전 용입된 루트부에서 균열이 발생, 전파되는 거동을 파악하고 피로수명을 예측함으로써 보다 정량적인 데이터를 제공할 수 있을 것이다. 또한, 완전 용입된 용접부와 불완전 용입 결함을 포함하는 하중전달 십자형(Load-carrying cruciform) 용접부의 피로강도를 실험적으로 연구함으로써 피로균열 전파특성에 대한 기하학적 형상의 영향과 금속조직학적 미세조직의 영향을 고찰하고자 한다.

2. 실 험

2.1 재료 및 시험편

본 연구에 사용된 재료는 선박 및 교량등의 구조물에 많이 사용되고 있는 용접구조용 강재로써

* 홍익대학교 기계공학과
** 홍익대학교 과학기술연구소
*** 서울산업대학교 자동차공학과

화학적 성분과 기계적 성질을 각각 Table 1과 Table 2에 나타내었다.

시험편의 형상은 2.4mm~7.2mm의 용입결함을 갖는 시험편과 완전 용입된 하중 전달 십자형으로 판두께를 3종류(10mm, 15mm, 20mm)로 선택하여 Table 3의 용접조건으로 자동용접 하였다. 용접후 Table 4의 치수로 기계 절단하고 측면을 경면 연마하여 나이탈 용액으로 부식시킨 후 용접영역의 치수를 측정하였다.

Table 1 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 2 Mechanical compositions of the base metal

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

Table 3 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

Table 4 Dimensions of cruciform weld specimens

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

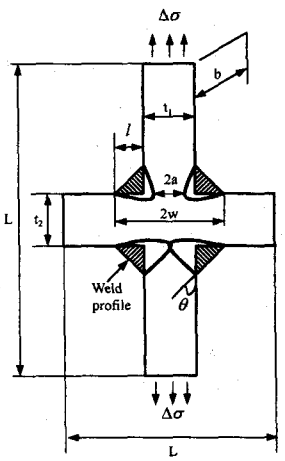


Fig. 1 Configuration of cruciform joints

2.2 실험장치 및 방법

피로실험은 Instron에서 제작한 25ton 용량의 전기 유압식 피로 시험기(Model 1332)를 사용하였으며 하중제어 방식으로 응력비($R=\sigma_{min}/\sigma_{max}$) 0인 10Hz의 정현파형 반복하중을 일정하게 가하여 수행하였다. 균열길이는 금속 현미경을 사용하여 100배의 배율로 1/100mm 오차 범위내에서 실험 중 수시로 측정하였으며, 측정을 용이하게 하기 위하여 산화크롬(Cr_2O_3)등으로 연마하였다. 미세조직은 시편 파단후 파단면 부근을 경면 연마하고 나이탈 용액으로 부식시킨후 주사전자현미경(SEM)으로 촬영하였다.

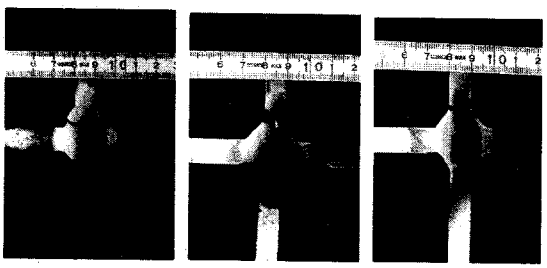
3. 실험결과 및 고찰

3.1 S-N 선도와 피로수명

Fig. 2는 하중전달 십자형 시험편의 3가지 피로파단 형태로써, a)루트부 파단은 용접부의 루트부에서 균열이 진전되어 전단에 의해서 급속 파단되고, b)혼합파단은 루트부에서 시작된 균열과 토우부의 균열이 만나 동시에 파단되며, c)토우부 파단은 루트부에서도 균열이 약간 진전되었으나 결국은 토우부에서 파단되었다.

Fig. 3는 판 두께 및 용입결함의 치수가 서로 다른 시험편에 대한 피로시험 결과를 파단 형태에 따라서 분류한 것으로, 응력범위는 구조물 설계시 강도해석에 주로 사용되는 구조부재에 걸리는 최대정적응력을 기준으로 하였는데, 여기에서 목두께는 AWS Rule[6]에 따른 유효목두께로 설정하였다. Fig. 3에서는 이미 잘 알려진 것과 같이 3가지 파단형태중 토우부에서 파단된 시험편이 혼합파단이나 루트부에서 파단된 경우보다는 상대적으로 피로강도가 우수하게 나타났다. 파단형태중 피로수명이 취약한 루트부 파단이 발생되지 않도록 적절히 피로설계를 하는 것은 매우 중요하며, 용입결함을 포함하고 있는 하중전달 십자형 시험편의 파단위치에 따른 지배 영향 인자를 체계적으로 고찰함으로써 좀더 경제성 있는 피로설계로 접근할 수 있을 것이다.

Fig. 4는 피로실험결과를 용입결함을 포함하는 시험편의 기하학적 형상에 변화에 대한 파단 발생위치를 FEM해석한 Bokalrud의 결과[7]와 비교분석한 것으로, 실험결과 몇몇 시험편에서 Bokalrud의 해석결과와 불일치 하였다. Fig. 4에서 나타난 결과는 파단형태를 결정하는 여러 가지 요인 가운데 하나인 응력범위의 영향[8]이 고려되지 못하여 발생한 것으로 판단되며, 이런 응력범위의 영향에 따라서 하중전달 십자형 시험편의 파단위치가 변화하는 것을 Fig. 5에서 관찰 할 수 있다. 따라서, Fig. 4의 파단형태 경계선에서는 시험편의 기하학적 형상 뿐만 아니라 응력범위의 영향을 고려하여 파단 경계선의 신축성을 부여하는 것이 필요하다고 판단된다.



a) Root failure b) Mixed failure c) Toe failure

Fig. 2 Fatigue failure modes of fillet welded cruciform joints

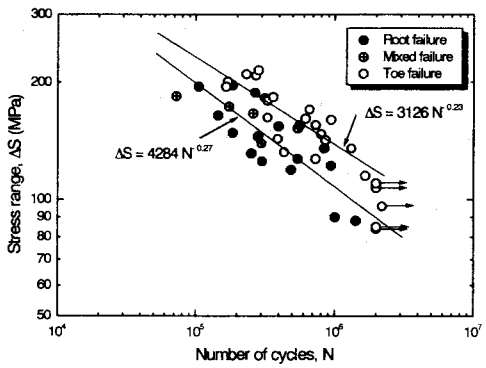


Fig. 3 Fatigue test results of t_1=10, t_1=15 and t_1=20 specimens

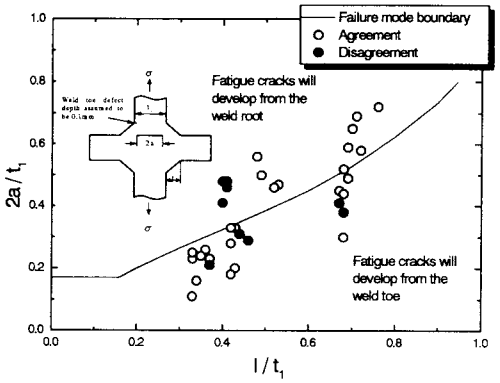


Fig. 4 Diagram showing whether fatigue cracks will develop from the toe or root defects

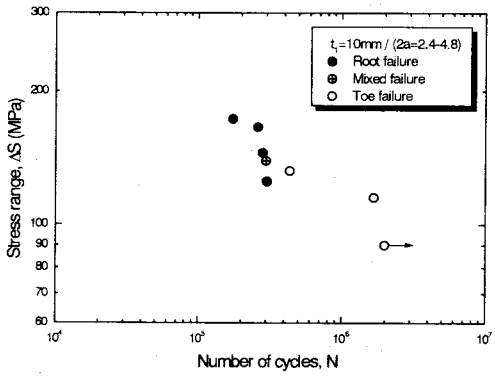


Fig. 5 S-N curve showing stress range effect of t_1=10 specimen

3.2 응력확대계수와 피로균열진전속도

Fig. 1과 같은 하중전달 십자형 용접부에서 루트부의 응력확대계수범위(ΔK)는 다음과 같다.[9]

$$\Delta K=\frac{\Delta\sigma}{1+2(l/t_1)}[A_1+A_2a^*][\pi a\cdot\sec(\frac{\pi a^*}{2})]^{1/2} \quad (1)$$

여기서, $\Delta\sigma$는 주판의 응력범위, a는 루트부 균열반폭, a^*는 필렛폭과 균열길이의 비(a/W), l/t_1는 주판에 대한 다리길이의 비를 나타낸다. 또한, A_1과 A_2값은 용접형상 (l/t_1)의 함수로 다음과 같다.

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

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

윗 식을 단순화하면 다음과 같다.[10]

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

$$f^*(a)=\frac{[A_1 + A_2a^*][\pi a^*\cdot\sec(\pi a^*/2)]^{1/2}}{1+2(l/t_1)}$$

Fig. 6은 t_1=10인 시험편에 대한 초기응력확대계수 범위와 초기수명 및 파단수명에 따른 관계이다. 여기서 루트부의 초기결함(LOP)으로부터 균열이 1mm진전되었을 때를 초기 응력확대계수범위, 그때의 수명을 초기수명으로 가정하여 균열초기수명과 균열진전수명을 구분하였으며, 내구 응력확대계수의 범위를 추정할 수 있다. Fig. 6과 동일한 방법으로 구한 내구 피로수명 2×10^6에 대응하는 응력확대계수 범위 ΔK_e는 판두께가 10mm(8.4 $MPa\cdot\sqrt{m}$)와 15mm(7.2 $MPa\cdot\sqrt{m}$)의 경우보다 20mm(13.5 $MPa\cdot\sqrt{m}$)인 경우가 매우 높게 나타났다.

Fig. 7은 루트부의 초기 응력확대계수와 균열초기수명에 대한 관계를 나타내고 있는데, 균열초기수명 영역에서도 판두께 20mm인 시험편이 10mm와 15mm인 경우보다 장수명으로 균열생성면에서도 우수한 인성을 나타내었다.

Fig. 8은 균열전파속도와 응력확대계수 범위의 관계를 나타내며, 식(1), (2)를 사용하여 응력확대계수를 계산하였다. 판두께 10mm와 15mm인 2pass 용접에 비하여, 3pass 용접된 판두께 20mm인 시험편의 경우가 상대적으로 균열전파속도가 완만하여 피로균열 성장저항이 우수한 것으로 나타났다.

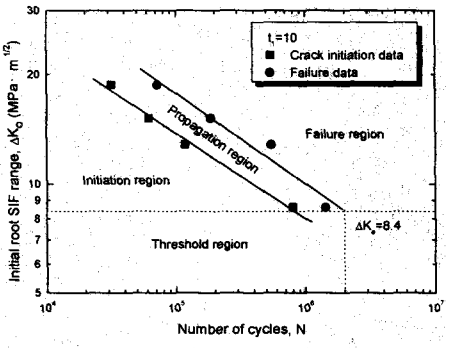


Fig. 6 Crack initiation and propagation related to initial SIF range

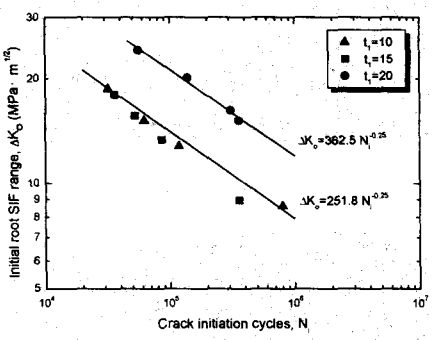


Fig. 7 Initial root SIF range vs. crack initiation cycles

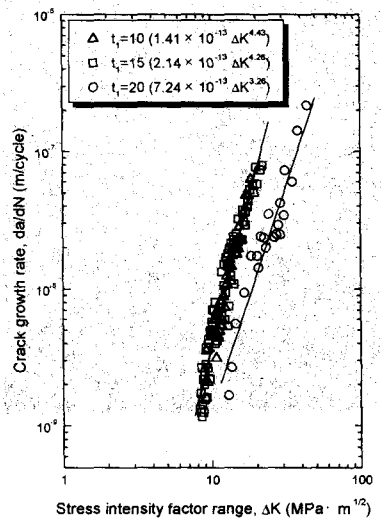
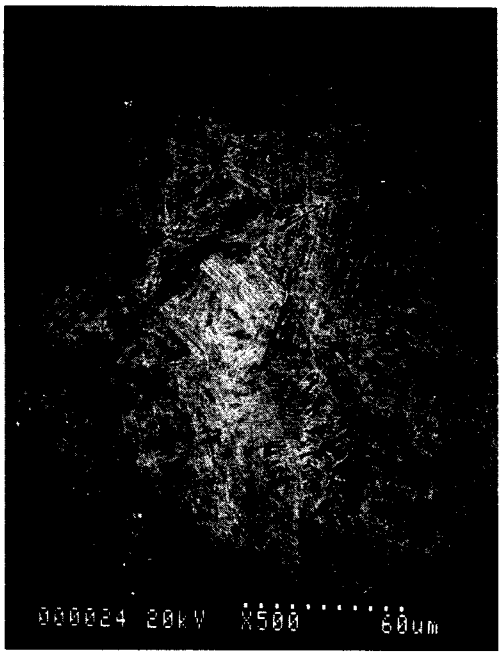
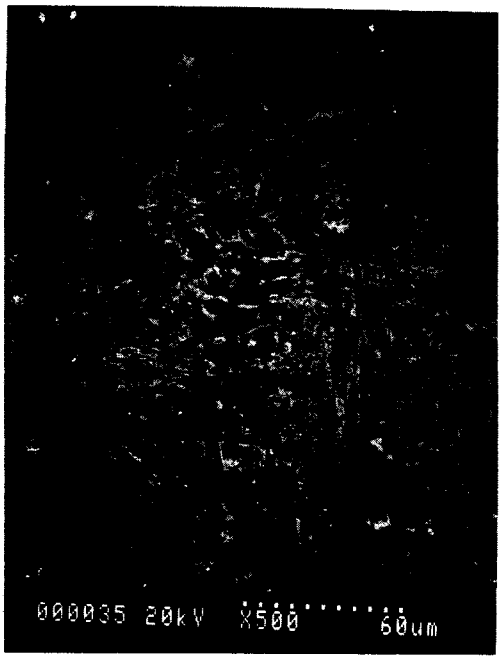


Fig. 8 Crack growth rate curves



(a) 2 pass weld (t_l=15)



(b) 3 pass weld (t_l=20)

Fig. 9 SEM micrographs showing typical micro -structures of weld metal

3.3 피로균열 전파영역의 미세조직

용접부는 용접 입열, 이음형상, 판 두께, 예열 조건 및 용접횟수에 따라 여러 가지 냉각속도로 냉각되기 때문에 여러 가지 변태조직이 용접부에 나타나게 된다.[11] 금속학적으로 용접금속의 파괴인성은 결정립의 크기, 조직, 분산입자 및 기지조직 특성 등에 지배된다. 본 연구에서도 용접횟수에 따라 Fig. 9에서와 같이 다른 미세조직이 관찰되었다. Fig. 9의 a)는 판두께 15mm를 2pass로 용접한 경우의 미세조직이고, b)는 판두께 20mm를 3pass로 용접한 경우이다. 먼저, a)에서는 베이나이트를 주체로한 중간단계조직과 전형적인 마르텐사이트조직이 관찰되었으며, b)에서는 3pass시의 재가열로 인한 냉각속도의 지연으로 미세한 침상조직 페라이트가 많이 관찰되었는 데, 이 조직은 개재물을 기점으로 방사선상으로 생성되며, 두께가 2 μm정도이고, 두께와 길이의 비가 1/3~1/10으로 대부분이 구오스테나이트 입내에 존재한다.[11]

일반적으로 용접금속의 미세한 침상 페라이트(Fine acicular ferrite)조직은 양호한 노치인성을 나타내지만, 조대한 페라이트 조직과 마르텐사이트, 베이나이트 등의 래스(Lath)상 조직은 취약한 노치인성을 나타낸다. 2pass에서 관찰된 미세조직의 경우 오스테나이트로부터 형성된 마르텐사이트와 베이나이트 조직에서는 결정방위와 일치하는 래스번들(Lath bundle)이 발달하여 노치인성은 낮다. 3pass 용접금속에서 다른 조직에 비하여 매우 우수한 인성을 지니는 미세한 침상 페라이트가 관찰되었다.

결론적으로 다층용접의 경우 용접횟수의 증가에 따라 연속냉각 변태도에서 냉각속도가 지연되면서 파괴인성이 우수한 미세한 침상 페라이트가 많이 형성되었으며, 이 미세한 침상조직 페라이트조직에 의해 2pass 용접한 경우보다 3pass 용접된 경우가 균열전파에 대한 저항력이 증가한 것으로 판단된다.

4. 결 론

1) 하중전달 십자형 용접부의 피로파단은 루트부 파단, 혼합파단 및 토우부 파단의 3가지 형태로 나타나며, 루트부에서 파단되는 것이 상대적으로 취약하다. 또한, 기하학적 형상의 영향뿐만 아니라 응력범위의 영향도 파단형태를 결정하는 중요

한 변수이다.

2) 피로수명 2×10^6에서의 내구 응력확대계수 범위(ΔK_e)는 판두께가 10mm와 15mm의 경우보다 20mm의 경우가 매우 높게 나타났다. 또한, 판두께 20mm인 경우는 균열전파 속도도 상대적으로 완만한 피로특성을 나타내었다.

3) 20mm 판두께의 경우 3pass 용접시 재가열로 인하여 냉각속도가 지연되면서 파괴인성이 우수한 미세한 침상 페라이트가 많이 관찰되었고, 2pass 용접한 경우보다 균열진전에 대한 저항력이 증가한 것으로 판단된다.

참고문헌

(1) T. R. Gurney, 1979, "An Analysis of Some Fatigue Crack Propagation Data for Steels Subjected to Pulsating Tension Loading," Weld. Res. Int., Vol. 9, No. 4, pp. 45～52

(2) V. Balasubramanian and B. Guha, 1998, "Influence of Flux Cored Arc Welded Cruciform Joint Dimensions on Fatigue Life of ASTM 517 'F' Grade Steels," Int. J. Pres. Ves. & Pip., 75, pp. 765～772

(3) J. M. Ferreira and C. M. Branco, 1988, "Influence of Weld and Plate Geometry on the Fatigue Strength of Cruciform Joints," Theo. Appl. Frac. Mech., pp. 23～32

(4) S. D. Pathak, V. M. Radhakrishnam and B. Guha, 1988, "Fatigue Crack Growth in Cruciform Welded Joints," Joining and Materials Dec., pp. 12～16

(5) V. Balasubramanian and B. Guha, 1999, "Influence of Weld Size Fatigue Crack Growth Characteristics of Flux Cored Arc Welded Cruciform Joints," Mat. Sci. Eng. A265, pp. 7～17

(6) ANSI/AWS, 1986, "Structural Welding Code-Steel," DI. 1-86

(7) A. Almar-Næss, 1985, "Fatigue Handbook," TAPIR, pp. 255～256

(8) 강성원, 하우일, 신종석, 장태원, 제정신, 1996, "필렛 용접이음부의 피로파괴 특성에 관한 연구," 대한조선학회논문집, 제 33권, 제 4호, pp. 133～141

(9) K. H. Frank and J. W. Fisher, 1979, "Fatigue Strength of Fillet Welded Cruciform Joints," J. Struct. Div., ASCE, 105, pp. 1727～1740

(10) B. Guha, 1995, "A New Fracture Mechanics Method to Predict the Fatigue of Welded Cruciform Joints," Eng. Frac. Mech., Vol. 52, No. 2, pp. 215～229

(11) ASM International, 1993, "Welding Brazing and Soldering," ASM Handbook, Vol. 6, pp. 75～79