

틈새가 존재하는 레이저 용접부의 피로특성 연구

A STUDY ON THE FATIGUE CHARACTERISTIC OF LASER-WELDED STEEL WITH GAP

양해석¹, 박태학¹

1) 국방과학연구소, 대전 305-600

교신 저자: 양해석, yhs4501@Add.re.kr

요약

본 연구는 틈새가 존재하는 레이저 용접부의 피로특성에 관한 연구로써 틈새가 존재하는 용접시편을 제작하여 피로시험을 통해 틈새 크기에 대한 피로수명을 분석하였다. 틈새 시편은 0.06, 0.12, 0.20mm에 대해 각각 제작하였으며, 용접은 ND-YAG 용접기를 사용하여 수행하였다. 피로시험은 6가지 하중 조건에 대해 수행하였으며, 그 결과를 S-N 선도로 작성하여 비교하였다. 그 결과 각 틈새 조건에 대해 고주기(high cycle)와 저주기(low cycle)에서 피로특성이 차이가 발생하였으며, 이 결과는 틈새 크기를 고려한 구조물 설계시 활용 가능하다고 판단된다.

1. 서론

이음부의 강도는 여러 가지 요인에 의하여 저하된다. 그 요인으로는 이음부에 작용하는 복잡한 반복하중, 기하학적인 형상, 잔류응력, 미세조직의 변화 등으로 인하여 피로강도가 순수모재에 비하여 현저히 떨어지는 경향을 보인다. Nguyen[1]은 선형탄성파괴역학(linear elastic fracture mechanics)을 이용하여 잔류응력, 용접부 형상, 언더컷(undercut)에 의한 맞대기 용접부에 대한 피로강도를 예측하기 위한 유한요소 해석모델을 구성하였다. Cho[2]는 용접방향에 따른 피로강도를 연구하여 피로시험 하중방향에 수직한 용접방향이 평행한 용접방향보다 피로강도가 우수함을 나타내었다. 맞대기 이음, 필렛이음, 종방향과 횡방향등 용접부의 형상에 따른 피로거동은 Munse[3] 등에 의하여 폭넓게 연구되었고, 용융금속의 건전성을 결정 하는 용접결함과 그에 따른 피로수명 분석에 관해서도 많은 연구결과가 발표되고 있다[4][5]. Jang[6][7]은 틈새가 존재하는 구조물의 틈새부위의 육성용접시 발생하는 잔류응력, 변형에 대해 연구하였으며, 규정을 초과한 틈새부위의 육성용접의 경우 피로특성이 저하됨을 보였다. 이와 같이 틈새가 존재하는 용접부 형상에 대해 피로수명에 대한 틈새크기의 영향은 매우 중요한 요소라고 판단되며, 용접구조물 설계시 반드시 고려해야할 분야이다. 따라서 본 연구에서는 용접시편에 대한 피로시험을 수행하여 용접시편의 S-N 곡선과 모재시편의 S-N 곡선을 비교하였으며, 틈새크기가 피로강도에 미치는 영향을 비교하였다.

2. 본론

2.1 시험시편

본 연구에서 수행한 용접부 시편에 대한 틈새의 정의를 Fig. 1에 나타내었고, 피로시험을 위한 시편형상을 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 1에서와 같이 뼈대는 AISI630으로 이루어졌고, 스킨은 AISI304로 구성하였으며, 실제 유도무기용 날개 제작시 적용하고 있는 소재이다.

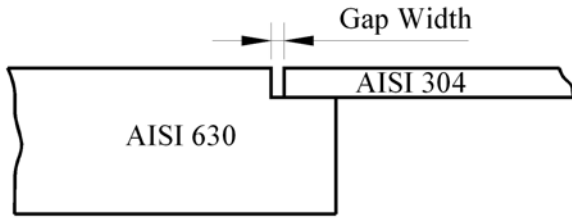


Fig. 1 Definition of gap width

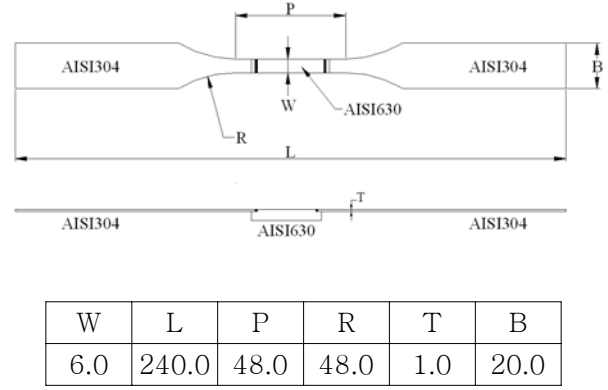


Fig. 2 Dimensional details of specimen used in the experiment

2.2 피로시험

피로시험은 ASTM-E466[66]에 따라 INSTRON 사의 10ton 전기 유압식 시험기를 사용하였으며, 실험방법은 Table 1과 같이 하중제어 방식을 사용하였다. 최대하중과 최소하중의 비는 0.1로($\sigma_{\max}/\sigma_{\min} = 0.1$) 하였으며, 하중조건은 Table 2와 같이 6가지 조건을 적용하였다. 피로수명은 시편의 용접부가 완전히 파단 및 분리 될 때의 사이클로 하였으며, 100만 cycle 이상에서의 수명은 무한 수명으로 고려하였다. 단, 용접시편 시험시 모재가 파단되는 경우는 저주기(1000 cycle 이하)를 제외하고는 피로강도를 판단하기 위한 결과 자료에 포함시키지 않았다. 시편 개수는 하나의 조건에 대해 최소 5개 이상 용접부에서 파단이 발생할 때까지 제작하여 피로시험을 수행하였다.

Table 1. Fatigue test condition

Specimen	Test condition
Control	Control method
	Load control
	Load ratio
	0.1
	Frequency
	11Hz
	Wave form
	sine curve

Table 2. Fatigue test load condition

Case	Mean Value (MPa)	Amplitude (MPa)	σ_{\max} (MPa)	σ_{\min} (MPa)
1	169.8	138.9	308.7	30.87
2	188.7	154.4	343	34.3
3	207.5	169.8	377.3	37.73
4	226.4	185.2	411.6	41.16
5	255.0	200.7	445.9	44.59
6	264.1	216.1	480.2	48.02

각종 시편에 대해 S-N 선도를 구하기 위해 시험시 얻은 피로강도에 대한 피로수명 값을 단순선형회귀법(simple linear regression)을 사용하여 계수를 구했으며, 그 값을 단축 양진(fully reversed) Basquin의 식(1)에 대입하여 S-N선도를 구했다. Basquin은 S-N 선도의 직선관계식을 다음 식(1)와 같이 제안하였다.

$$S_{Nf} = A(N_f)^B \quad (1)$$

여기서 S_{Nf} 는 양진(fully reversed), 즉 $R=-1$ 일 때 N_f 주기에서의 피로강도, A는 1 주기에서 S_{Nf} 의 값, B는 S-N 선도의 기울기를 의미한다. 또한 A와 B는 시험을 통해서 얻는 것이 가장 정확하고, 기울기 B는 많은 요소에 의해 변화하며, 노치가 없는 시편에 대해 -0.05에서 -0.2구간의 값을 나타낸다. Fig. 3은 Basquin의 식을 설명하기 위한 그림이며, 일반적으로 $1\sim 10^3$, $10^3\sim 10^6$, $10^6\sim 10^9$ 구간으로 나누어 식을 적용한다. 식(1)에서 S_{Nf} 는 수정 Goodman 식(2)를 이용하여 다음과 같이 구했다.

$$\frac{S_a}{S_{Nf}} + \frac{S_m}{S_u} = 1 \quad (2)$$

여기서 S_a 는 교번응력(alternating stress)으로 $S_a = (\sigma_{\max} - \sigma_{\min})/2$ 이고, S_m 은 평균응력(mean stress)으로 $S_m = (\sigma_{\max} + \sigma_{\min})/2$ 이며, S_u 는 AISI304 모재의 경우 781(MPa)을 입력하였고, 두 소재가 혼합된 용접부 시편에 대해서는 별도 인장강도 시편에서 구한 용융부의 인장강도 값 1139(MPa)를 입력하였다. 피로시험을 통해 각 조건별로 자료를 도출하여 AISI304 모재 및 각 틸새 시편에 대한 Basquin 식의 계수 A와 B를 계산하여 Table 3에 나타내었다.

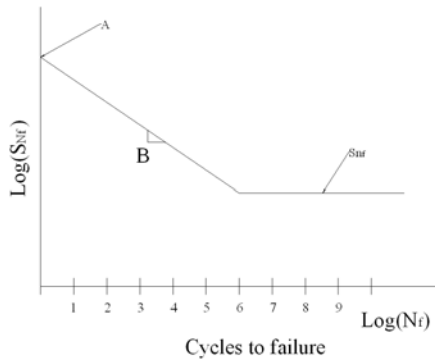


Fig. 3 Basquin type S-N curves

Table 3. Factor of Basquin's equation for AISI304 and weld specimen

종류	AISI304	틈새 크기(mm)		
		0.06	0.12	0.20
계수				
A(MPa)	2363	1343	1544	1979
B(기울기)	-0.18	-0.15	-0.17	-0.19

3. 결론

AISI304 모재시편에 대한 피로시험결과를 Fig. 4에 나타내었다. 모재시편의 경우 피로강도(S_{Nf})가 Table 2의 조건 2인 203.5(MPa) 이하의 하중에서 무한수명(10^6 cycle)이 발생하였다. 용접시편에 대한 피로시험결과를 Fig. 5~7에 나타내었다. 용접시편의 경우 피로강도(S_{Nf})가 Table 2의 조건 1인 163.2(MPa) 이하의 하중에서 무한수명이 발생하였다. 따라서 용접시편의 피로강도는 AISI304 모재시편의 약 80% 정도임을 알 수 있다. 잔류응력이 포함된 부위의 피로파단하중임을 고려할 때 양호한 값으로 판단하였다.

시험결과 저주기(low cycle)의 경우 틸새크기 0.20, 0.12, 0.06 순으로 피로강도가 낮게 나타났으며, 고주기(high cycle)의 경우 0.06, 0.20, 0.12 순으로 피로강도가 낮게 나타났으나, 그 차이는 미미하였다. 따라서 유도무기용 날개와 같이 저하중에서 운용되는 구조물은 용접부의 틸새 크기를 0.20mm 이하로 하는 것이 피로특성 관점에서 적당하다고 판단된다.

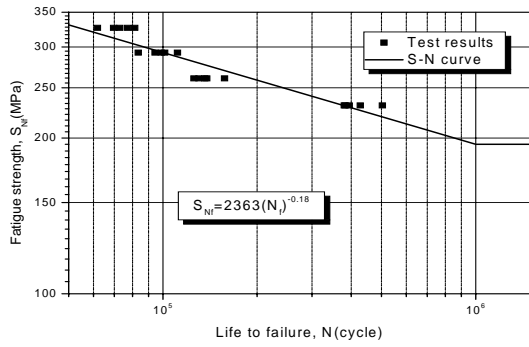


Fig. 4 S-N curve for base metal

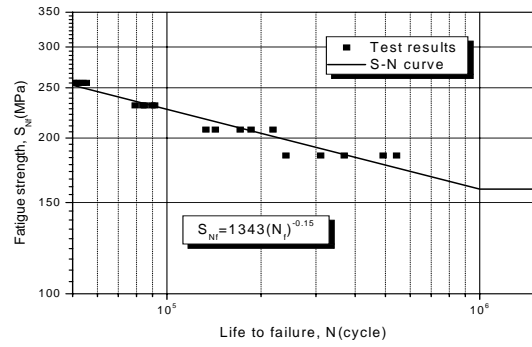


Fig. 5 S-N curve for gap 0.06

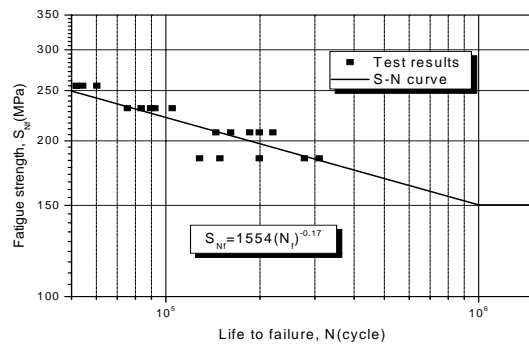


Fig. 6 S-N curve for gap 0.12

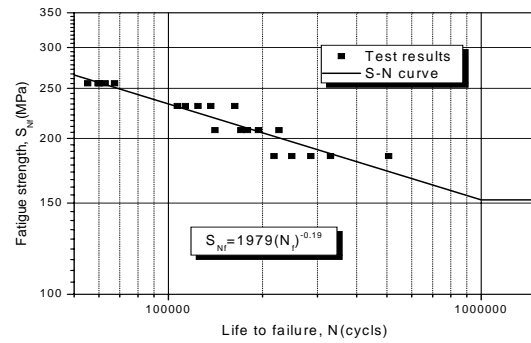


Fig. 7 S-N curve for gap 0.20

참고문헌

1. Nguyen, N. T. and Wahab, M. A., "The effect of undercut, misalignment and residual stresses on the fatigue behavior of butt welded joints," Fatigue & fracture of engineering materials & structures, Vol.55, No.3, 1996, pp.769-778
2. Cho, S. K., Yang, Y. S., Son, K. J. and Kim, J. Y., "Fatigue strength in laser welding of the lap joint," Finite elements in analysis and design, v.40, No.9/10, 2004, pp.1059-1070
3. Munse, W. H., Fatigue of welded structure, Welding research council, New York, 1964
4. Lawrence, F. V., Munse, W. H. and Burk, J. D., "Effects of porosity on the fatigue properties of 5083 aluminium alloy weldments," Welding research council bulletin, No.206, 1975, pp.0-
5. Buchanan, R. A. and Young, D. M., "Effect of porosity on elevated temperature fatigue properties of 2.25Cr-Mo steel weldment," Welding journal, Vol.54, No.9, 1975, pp.296s-301s
6. Jang, G. B., Kim, H. K. and Kang, S. S., "The effects of root opening on mechanical properties, deformation and residual stress of weldments," Welding journal, Vol.80, No.3, 2001 pp.80s-89s
7. 장경복, 이원근, 강성수, "용접부의 기계적 성질 및 피로강도에 미치는 루트 간격의 영향," 대한용접학회, Vol.19, No.2, 2001, pp.235-240