

스테인리스강의 Nd:YAG 레이저 겹치기 용접부 피로수명에 미치는 용접변수의 영향

Effects of Nd:YAG Laser Welding Parameters on Fatigue Life of Lap Joint Structure in Stainless Steel

김 용*, 양현석*, 박기영*, 이경돈*

* 고등기술연구원 로봇/생산기술센터

Abstract Experimental analysis was carried out to understand the fatigue phenomena of different thickness stainless steel overlap joining structure by Nd:YAG laser welding. The fatigue life was obtained through fatigue tests with the various levels of applied load. The fatigue life is related with the parameters such as gap condition and penetration depth through experiment. As the results, tensile and fatigue strength were proportional in heat input level and bead width was identified the major factor for joining strength. Also the fatigue life were decreased depend on gap condition, it was more affected at the low load level.

1. 서 론

현재 철도차량에 사용되는 스테인리스 강판의 전동차 차체를 제작하는데 대부분이 저항용접을 이용하고 있으나 최근 레이저의 급속한 발달로 이를 적용한 차체 개발이 가속화 되고 있다. 레이저 용접의 경우 저항용접에 비해 생산성뿐만 아니라 우수한 기계적 성질 및 미려한 용접부 외관을 얻을 수 있다는 장점이 있다.

따라서 최근 유럽, 일본 등 철도차량 선진국에서 스테인리스 강판으로 제작된 전동차 객차나 선박 및 버스 등의 차체 패널 등에 레이저 용접을 적용하여 고품질의 경량패널을 적용하는 연구가 활발히 진행 중에 있으며 일부는 이미 공정 안정화 상태에 접어들어 양산화 되고 있다. 그러나 이와 같은 레이저 용접을 적용하기 위해서는 용접공정 개발 외에도 공정에 적합한 레이저 발전기의 선택, 자동화 된 시스템 및 제어기술 등 많은 연구가 필요할 뿐만 아니라 차체의 최대 요구조건인 안전성을 만족시키기 위한 접합부의 인장, 피로 강도 및 기타 기계 금속학적 특성에 관한 정량적인 데이터가 요구된다. 특히, 최적의 공정 조건을 얻기 위해서는 차체 수명에 결정적인 역할을 하는 피로강도에 대한 선행 연구가 필요한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 스테인리스 301L강의 이중두께 겹치기 용접에서 부분 용입이 피로수명에 영향을 미치는 인자를 파악하고자 하였으며, 이를 위하여 용접 속도 및 이음부 gap 상태를 주요 변수로 놓고 실험을 실시하였다.

2. 실험 방법

2.1 실험 장치 및 재료

본 연구에 사용된 레이저 발전기는 빔 직경이 600 μ m인 HL3006D 3KW CW Nd:YAG 발전기로 본 실험에서는 최대 출력인 3KW로 고정하여 실험하였다. 레이저 헤드는 YASKAWA 6-axis robot에 장착하여 사용하였으며 초점위치는 재료 상부표면에 일치하도록 하였다.

실험에 사용한 스테인리스 301L 강판은 180 × 180 mm 사이즈로 상판 1.5t, 하판 2.0t이며 마그네틱 클램핑한 상태로 용접하였다. 또한 gap의 유무에 따른 접합강도의 변화를 파악하기 위해 0.1mm 두께의 칩(chip)을 용접선 좌우로 정렬하여 인위적으로 gap을 생성시켰으며, 실험에 사용된 STS 301L의 화학조성 및 기계적 성질은 Table 1 및 Table 2와 같다.

Table 1 Chemical composition of STS 301L

Material	C	Si	Mn	Ni	Cr	Others
%	≤0.03	≤1.0	≤2.0	6~8	16~18	≤N2.0

Table 2 Mechanical Properties of STS 301L

Material	Y.S (kgf/mm ²)	T.S (kgf/mm ²)	E.L (%)	Hv
STS 301L	22	56	45	≤200

2.2 용접조건 및 시험편 제작

시험편은 180 × 180 mm 사이즈로 끝단 40mm가 서로 겹치도록 용접하였다. 보호가스로는 He을 사용하였으며 유량은 15L/min으로 고정하였다. 용접조건은 예비실험을 통하여 부분 용입이 하판에서 각각 0.3, 0.6 및 0.9mm가 되는 속도를 도출하였고 그 속도는 각각 5.0, 4.2 및 3.4m/min이었다. 이 세 가지 용접조건에 대해 각각 No gap 상태와 gap이 0.1mm 존재하는 시험편을 제작하였으며 각 조건에 대해 2 set씩 용접하였다.

2.3 인장 및 피로시험 방법

본 연구에 사용된 인장 및 피로시험 장비는 최대 100KN 용량의 MTS-810 series로 수행되었다. 인장 시험조건은 하중제어 방식으로 초당 65N의 하중을 적용하였으며, 시험 결과를 토대로 하중-변위선도를 작성하였다. 피로시험의 경우, 응력비(Load ratio)는 R=0으로 하였으며, 하중 주기는 20Hz으로 설정하고 및 변위량에 대한 결과를 얻었다.

겹치기 용접부에 대한 항복하중은 선행 인장시험 결과, 평균 5,124N이 나왔고 편의상 5,000N에 대해 70, 50, 30, 25 및 22%의 load level을 준 뒤 파단 될 때까지의 피로주기를 기록하였으며 1×10⁶까지 파단되지 않고 견디는 경우를 피로한도(fatigue limit)로 정의하였다. 구체적인 피로 적용하중은 Table 3과 같다.

Table 3 Applied fatigue load level conditions

Test No.	Fatigue level (%)	Test value (N)
1	70	3,500
2	50	2,500
3	30	1,500
4	25	1,250
5	22	1,100

3. 결 과

3.1 인장전단시험 결과

인장 실험은 각 용접조건 당 2set씩 진행되었으며 그 결과는 Fig. 1과 같다. Fig. 1은 각 용접조건에 대해 최대 인장전단하중 및 항복하중의 변화를 나타낸 그래프인데, 항복하중의 경우 용접조건에 상관없이 평균 항복하중 5,124N을 기준으로 거의 일정한 level을 나타내었으나, 인장전단하중의 경우 입열량이 적은 조건에서 하중이 비교적 약하게 나타났다. 또한 gap의 유무는 인장하중에 별 영향을 미치지 않았으며 파단은 용접조건에 상관없이 용접부가 slip되는 형태로 파단 되었다. 이를 응력의 개념(단위면적당 받는 하중)으로 생각할 때 비드 폭이 인장하중을 결정짓는 큰 영향을 준 것으로 판단된다.

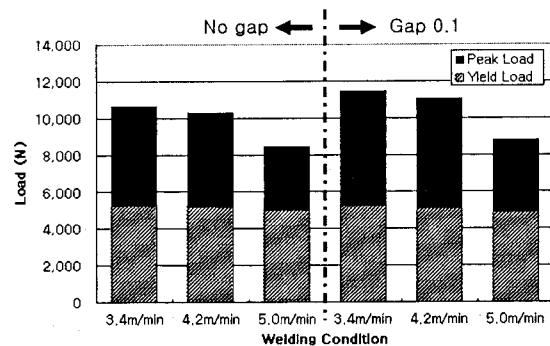


Fig. 1 Tensile-shear load distribution depend on welding parameters

3.2 피로시험 결과

Fig 2는 No gap 시험에서 입열량에 따른 피로 수명을 나타내는 그래프로써 동일한 하중 level에서 입열량에 따라 피로수명은 적용하중 level이 낮을수록 그 차이가 현저히 나타났다.

Gap의 존재 유무 또한 피로수명을 결정짓는데 많은 영향을 미치는 것으로 나타났다. Fig 3은 4.2m/min으로 용접된 시험에서 gap의 유무에 따른 S-N 선도를 나타낸 것인데 No gap 조건의 경우 실제 겹치기 용접부 항복하중인 5,000N의 약 22%인 1,100N에서 피로한도에 도달하였으나 gap이 0.1mm 존재하는 경우 파단수명은 317,376 cycle로 그 차이가 현저하였다.

동일한 적용하중에 대해 용접조건 및 gap의 유무에 따른 피로수명 차이를 살펴보면 각각의 적용하중에서 용접조건 및 gap에 의해서 피로수명

이 감소하는 경향을 볼 수 있으며 저하중일수록 그 정도가 심하다. 이러한 결과는 gap이 피로하중 적용 시 노치효과로 인해 국부적 응력집중 발생정도가 No gap 상태보다 더욱 심했기 때문으로 사료되며, 따라서 gap의 존재유무가 피로수명을 결정짓는 최대 인자로 사료된다.

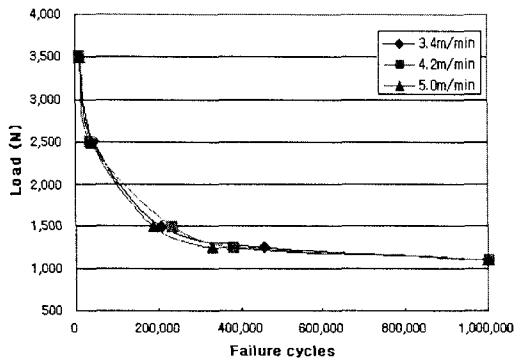


Fig. 2 Variation of fatigue life depend on heat input levels

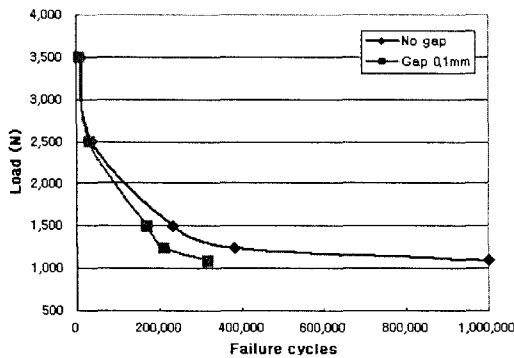


Fig. 3 Variation of fatigue life depend on gap condition

3.3 손상분석

문헌에 따르면 오스테나이트계 스테인리스강의 용접부에서 적절한 δ -ferrite함량의 제어는 필수적이다. 적절한량의 δ -ferrite는 고온균열(Hot cracking), SCC 및 pitting 부식에 대한 저항성을 향상시켜 주지만, 너무 과하면 연성이나, 인성 그리고 부식 저항성이 감소되며, 너무 적은 양은 응고균열을 야기 시킬 수 있다.

이러한 δ -ferrite 함량은 슈펠러선도 (Schaeffler diagram)를 통해 예측할 수 있으나 이 경우도 입열조건에 따라 약간의 차이가 나타난다. 슈펠러 선도에 따르면 전체적으로 γ -austenite상의 기지 위에 δ -ferrite상이 약 15% 정도 분포하는 것으로 예측할 수 있으나 δ -ferrite함량 또는 크

기는 입열량이 적을수록 냉각속도가 빨라지기 때문에 증가될 가능성이 있다. 이러한 결과는 Fig. 4의 경도분포 확인을 통해서도 알 수 있는데, 모든 용접조건에 대해 HAZ 부분에서 최고 경도를 나타냈다. 최고 경도 값은 용접 입열량이 적을수록 그 차이가 현저하게 나타났으며 용접조건에 따라 최대 30HV 정도의 차이를 나타내었다.

일반적으로 경도 값의 차이가 많이 발생하는 경계면에 잔류응력이 집중되며, 따라서 외부에서 응력이 가해질 때 이 부위가 가장 취약한 부위가 되어 초기 균열이 발생할 가능성이 가장 높다. 따라서 입열량 차이로 인해 발생된 경도(δ -ferrite 함량 및 크기)차이가 피로강도에 영향을 주는 주요 인자로 판단할 수 있다.

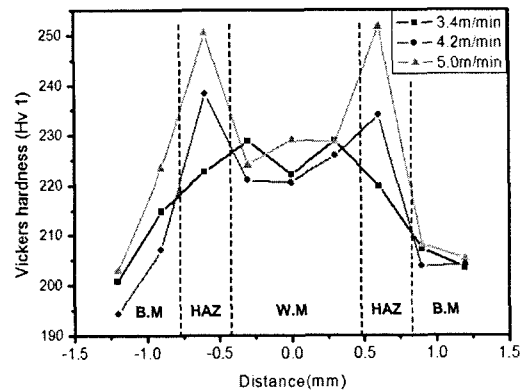


Fig. 4 Hardness distribution depend on heat input

4. 결 론

- 1) 인장-전단 시험 결과, 그 강도는 입열량의 증가에 비례하였으나, gap의 유무는 인장강도에 별 영향을 미치지 않았다.
- 2) 피로시험 결과, low fatigue level의 하중이 적용될수록 피로 수명의 차이가 나며 임계하중은 1×10^6 cycles에서 약 1,100N의 피로강도를 나타냈다.
- 3) Gap의 존재는 노치효과를 나타내어 피로강도에 영향을 나타내며 이는 용접 입열량에 의한 변수보다 더욱 큰 영향을 미친다.

참 고 문 헌

1. Sindo Kou, Welding Metallurgy, 1987, 179-180
2. S.K.Cho, Y.S.Yang, K.J.Son, J.Y.Kim, Finite Elements in Analysis and Design 40 (2004) 1059-1070