

용접방향에 따른 겹치기 레이저 용접부의 피로강도

조성규* · 장상균** · 서 정*** · 김정오***

*전남대학교 대학원

**한국전력기술

***한국기계연구원

Effects of welding direction and residual stress on the Laser welds

S.-K. Cho*, S-G. Chang**, J. Suh*** and J.-O. Kim***

*Chonnam Nat. Uni.

**KOPEC

***KIMM

Abstract

Finite element analysis and experiment were performed to estimate the fatigue strength for the lap joint of laser weld. To consider quantitatively residual stress which effects on the fatigue strength of the lap joint of laser weld, after three dimensional modeling for the longitudinal and transverse direction, residual stress fields in the weldment were calculated using thermo-elastic-plastic finite element analysis, then the equivalent fatigue stress considering the residual stress was obtained. To ensure reliability of calculated fatigue strength, fatigue tests were performed. The calculated and experimental results showed a good agreement. The fatigue strength considering a residual stress was lower than that of without considering a residual stress in the lap joint of laser welding. The fatigue strength in the transverse direction was higher than that of longitudinal direction.

Key word : Fatigue strength, Laser welding, Residual stress, Sine's method, Finite element analysis(FEA), Plastic deformation

1. 서 론

지금까지는 레이저 용접 공정변수를 찾기 위하여, 단순 인장-전단 실험 및 경도 실험을 통한 용접부의 강도 평가에만 주된 관심이 있었으며, 피로강도를 고려한 신뢰성에 대한 연구는 미미하다. 실제적으로 이음부의 강도는 여러 가지 요인에 저하되며, 그 요인으로는 이음부에 작용하는 복잡한 반복하중, 기하학적인 형상, 잔류응력, 미세조직의

변화등으로 인하여 피로강도가 모재에 비하여 현저히 떨어지는 경향을 보인다. 따라서 반복하중을 받는 용접구조물의 강도는 용접부의 피로강도에 의해 결정되는 경우가 많다. 그러므로 레이저 용접부의 신뢰성에 있어서 피로강도의 평가는 매우 중요하다. 용접부의 피로강도에 관한 연구는 Richard, Maddox에 의한 용접부의 기하학적 형상 변화^{1,2)}, Grotke에 의한 미세조직 변화³⁾, Fisher에 의한 결함에 관한 연구 등이 있으며⁴⁾, Nguyen은 실험적으로 인장잔류응력은 피로강도

의 감소, 압축잔류응력은 피로강도를 개선한다고 실험결과를 보고하였다⁵⁾. 또한 저항 점 용접부에서 잔류응력을 고려한 피로강도에 관한 연구가 Yang에 의하여 수행되어졌다⁶⁾. 이와 같이 레이저 용접부의 잔류응력 및 용접방향에 따른 잔류응력을 고려한 연구는 미미한 실정이다. 일반적으로 용접공정은 온도의 불균일한 분포에 의해 열응력이 생성되어, 용접후 잔류응력이 존재하며 그 크기는 모재의 항복응력 정도로 큰 응력이 작용되고 있다. 그러므로 잔류응력이 존재하는 레이저 용접부는 피로강도에 매우 취약한 경향을 보인다. 따라서 잔류응력을 고려한 피로강도의 평가에 대한 연구가 필요하다. 또한 용접방향에 따라 다른 잔류응력 분포가 나타나므로, 생산 기술적인면에서 용접방향에 따른 피로강도의 연구가 필요하다.

본 연구에서는 레이저 용접부의 열유동 해석을 수행하여 시간에 따른 열이력을 구한 후, 각 용접방향에 따른 열탄소성 유효요소해석을 통하여 레이저 용접부의 잔류응력을 계산하였고 잔류응력이 존재하는 상태에서 외부하중을 가하여 등가의 단축피로응력을 얻어 레이저 용접부의 S-N곡선을 예측하였으며, 계산의 신뢰성 확보를 위하여 실험 후 계산결과와 비교하였다. 그리고 각각의 용접방향에 따른 잔류응력이 피로강도에 미치는 영향을 비교하였다.

2. 실험 방법

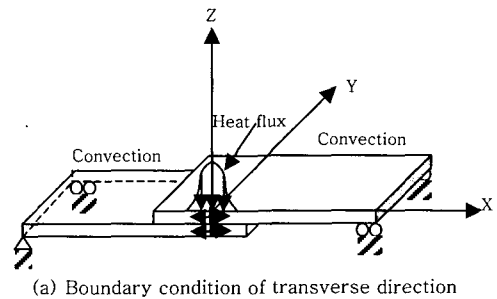
비정상 상태의 열유동과 열응력 해석은 유한요소법을 이용하였으며, 유한요소 프로그램은 상용 패키지인 ABAQUS를 이용하여 계산하였다⁷⁾.

레이저 용접부의 피로강도를 예측하기 위하여, 먼저 해석영역내의 온도분포를 구한 후, 시간의 변화에 따른 해석영역의 온도분포가 상온으로 냉각시까지의 열응력 및 잔류응력 값을 얻었다. 잔류응력이 존재하는 상태에서 외부하중을 가한 후 Sine's method를 이용하여 3축 응력

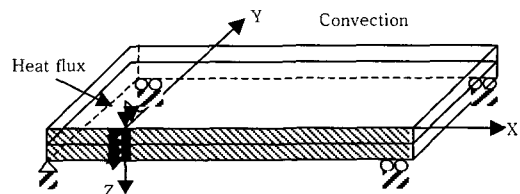
을 1축 응력으로 증가시켜 모재의 S-N선도에서 피로 수명을 예측하였다⁸⁾.

2.1 열유동 및 잔류응력 계산

레이저용접은 높은 에너지밀도를 갖는 레이저빔에 의해 기화 현상을 수반하는 공정이다. 이와 같은 현상을 나타내기 위하여, Fig. 1와 같이 열원의 입력은 유한 두께의 모재에 대하여 가우



(a) Boundary condition of transverse direction



(b) Boundary condition of longitudinal direction

Fig. 1 Boundary condition for finite element analysis

시안 분포를 갖는 열원과 기화용접을 대변하기 위하여 선열원을 동시에 조합하여 이동열원으로 하였다. 이는 박판 맞대기 용접에서 기화용접을 잘 대변하는 것으로 해석되었기 때문이다⁹⁾. 열유동 해석시 비열, 열전도도와 같은 재료의 열물성치들은 Fig. 2와 같이 온도 변화에 따라 다른 값들을 사용하였다¹⁰⁾. 경계조건은 Fig. 1와 같고, 상온에서는 해석영역의 표면에서 자연대류가 일어나는 조건으로 하였다. 열유동 해석 결과에서 얻어진 시간에 따른 열이력을 바탕으로 레이저 용접부의 잔류응력 해석을 실시하였다. 잔류응력 해석시 사용되는 재료의 탄성계수, 열팽창

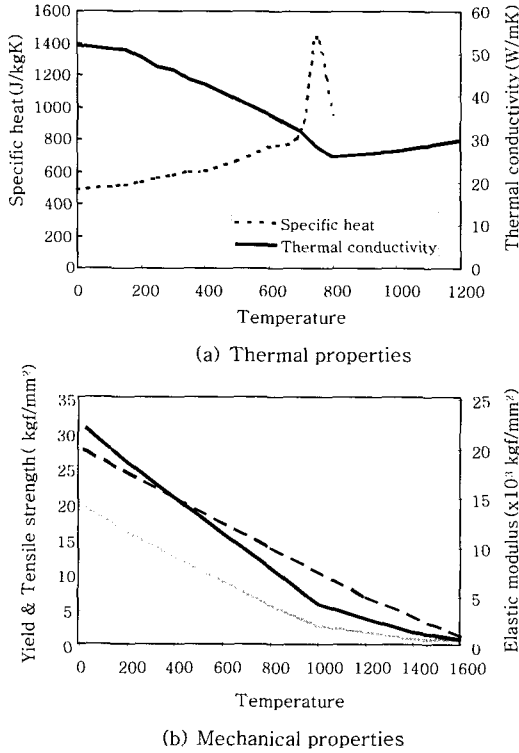


Fig. 2 Temperature dependent material properties

계수, 항복강도, 인장강도등과 같은 기계적 물성치들 또한 Fig. 2와 같이 온도 의존적인 값들을 가지므로 온도에 따른 물성치 값들을 고려하였다¹⁰⁾. 열유동 해석과 잔류응력 해석은 동일한 요소에서 행하였으며, 온도구배가 심한 용융부 부위에서는 작게 요소를 분할하였고 용융부에서 멀어진 부위에서는 큰 요소를 사용하였다. 용접 방향에 따른 잔류응력 분포가 다르므로 종방향 용접과 횡방향 용접에 대하여 해석하였다. 종방향과 횡방향 용접에 대한 요소 분할은 Fig. 3과 같다.

2.2 잔류응력을 고려한 피로강도 예측 계산법

잔류응력이 존재하는 상태에서 외부하중을 가하여 유한요소해석을 수행하면, 용접부에 작용

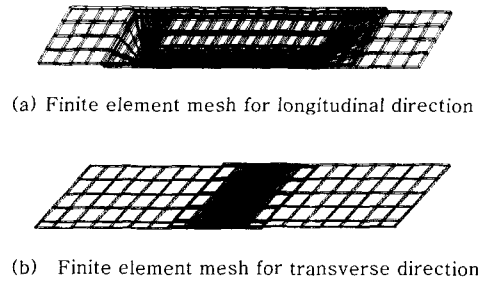


Fig. 3 Finite element mesh for three-dimensional analysis

되는 복합응력 상태를 구할 수 있다. 이러한 복합응력을 등가 단축피로응력으로 만들기 위하여 Sine's Method를 사용하였다. 등가 단축피로응력을 구하기 위한 식은 다음과 같다.

$$\left[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \right]^{\frac{1}{2}} + m(\sigma_{m1} + \sigma_{m2} + \sigma_{m3}) = \sqrt{2} \frac{S_N}{K} \quad (1)$$

여기서 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 은 교변응력으로 $\sigma_1 = 1/2(\sigma_{\max} - \sigma_{\min})$ 와 같고, $\sigma_{m1}, \sigma_{m2}, \sigma_{m3}$ 은 평균응력, m 은 평균응력 영향계수, K 는 피로 노치계수, S_N 은 다축응력 상태의 피로수명에 해당하는 등가 단축 피로응력이다. 수치해석에 의하여 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_{m1}, \sigma_{m2}, \sigma_{m3}$ 을 구하고 식(1)에 대입하여 S_N 값을 구한 후, 모재의 S-N곡선에서 S_N 응력상태에 해당하는 피로수명을 구하였다. 이때 m 은 0.25를 사용하였으며 K 값은 1.6을 사용하였다. 노치를 갖는 부재에 대한 K 값은 식(2)에 나타난 바와 같이 Peterson식을 이용하여 구하였다¹¹⁾.

$$K = 1 + \frac{K_t - 1}{1 + \frac{a}{r}} \quad (2)$$

여기서 K_t 는 응력집중계수, a 는 재료상수로서 대략 식(3)과 같다¹²⁾. r 은 노치 선단 반경을 나타낸다.

$$a = \left[\frac{300}{S_u} \right]^{1.8} \times 10^{-3}, S_u : \text{인장강도} \quad (3)$$

용접부의 잔류응력을 구한 후, 피로하중의 최대값과 최소값을 작용한 응력상태를 계산하여 식(1)을 적용하였다. 일반적으로 연강의 경우 피로수명과 인장강도와의 관계는 다음과 같다.

$$S = 10^c N^b \quad (\text{for } 10^3 < N < 10^6) \quad (4)$$

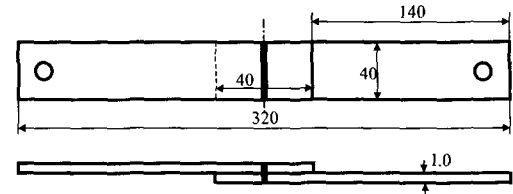
여기서 S 는 교변응력, N 은 피로수명이고, 상수 C 와 b 는 다음과 같이 정의된다.

$$C = \log_{10} \frac{(S_{1000})^2}{S_e}, \quad b = -\frac{1}{3} \log_{10} \frac{S_{1000}}{S_e}$$

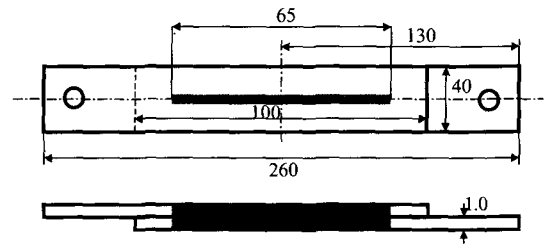
여기서, $S_{100} = 0.9S_u, S_e = 0.5S_u, S_u$ 는 재료의 인장강도 이고 S_e 는 재료의 피로한도를 나타낸다. 모재의 인장강도를 알고 있으므로, 본 연구에서 사용된 재료인 SPCC의 S-N곡선은 (4)식에서 제안된 관계식을 이용하여 예측할 수 있다¹³⁾.

2.3 피로 시험 방법

피로 시험에 사용된 시편은 Fig. 4와 같은 형상을 가진, 두께 1mm인 SPCC로서 겹치기 레이저 용접하여 제작하였다. 각 시편의 레이저 용접조건은 Table. 1과 같다. SPCC는 일반적으로 자동차 차체에 이용되어지는 냉간압연강판이다. 시편의 기계적 물성치인 인장강도는 325 Mpa이고, 항복강도는 200Mpa이다. 열유동 해석의 타당성을 검증하기 위하여 미세조직 실험을 수행하였으며, 용융부와 열영향부의 크기와 형상을 열유동 해석 결과와 상호 비교하여



(a) Transverse direction welding



(b) Longitudinal direction welding

Fig. 4 Schematic diagrams of fatigue test specimens (all dimensions, mm)

Table. 1에 나타내었다. 용접방향에 따른 피로강도를 실험적으로 알아보고, 예측된 피로강도의 신뢰성 확보를 위하여 피로 시험을 수행하였다. 종방향 용접시편과 횡방향 용접시편에 대하여 동일한 축방향 하중으로 인장-전단 피로실험을 수행하였다. 피로 실험장치는 INSTRON사의

Table. 1 Welding conditions and size of fusion and heat affected zone (HAZ) of specimens

Specimen type	Laser power	Welding speed
Transverse direction	2 Kw	2 m/min
Longitudinal direction	2 Kw	2 m/min

Fusion Zone (Upper)	Fusion Zone (Rear)	H A Z (Upper)
Experiment. F E M	Experiment. F E M	Experiment. F E M
2.0mm, 2.14mm	0.8mm, 0.75mm	2.3mm, 2.43mm
2.1mm, 2.2mm	0.9mm, 0.84mm	

2.5ton 전기 유압식 시험기를 사용하였으며 실험방법은 Table. 2와 같이 하중제어 방식을 사용하였고 하중비(R=0), 하중진동수(15Hz)의 정현파로 하였다. 피로 수명은 시편의 두 판이 완전히 분리 될 때의 사이클로 하였으며, 1.0×10^6 cycle까지 파단되지 않았을 경우 피로한도에 도달한 것으로 취급하였다.

Table. 2 Fatigue test conditions for Tensile-shear specimen

Control	Specimen	Tensile-shear test
Control method		Load control
Load ratio		0(0/tension)
Frequency		15Hz
Wave form		Sine curve
Fatigue life		$1.0 \times (10^6 \text{Cycles})$

3. 결과 및 고찰

서론에서 서술한 바와 같이, 열유동 해석의 결과로 얻어진 열이력을 이용하여, 횡방향과 종방향의 용접방향에 따른 잔류응력을 계산하였다. Fig. 5, Fig. 6에 나타난 유한요소해석결과를 살펴보면, 용접방향이 종방향인 경우는 x-방향의 잔류응력이 y-방향, z-방향에 비해 매우 크고, 횡방향인 경우는 y-방향의 잔류응력이 x-방향, z-방향보다 매우 크게 존재한다. 이는 용접의 길이 방향에서 최대 인장잔류응력이 분포한다는 사실과 잘 맞고 있다. Fig. 7은 동일한 축방향의 외부하중을 가하였을 때, 잔류응력을 고려한 경우와 고려하지 않는 경우를 나타내고 있는데 잔류응력을 포함한 해석결과치의 응력분포가 매우 크게 나타났으며, 종방향용접인 경우에 횡방향용접보다 크게 나타난다. 이는 잔류응력이 외부하중으로 인한 응력장에서 증폭하는 역할을 하며, 레이저 용접부의 강도면에서 고찰하였을 때 상당한 악영향이 미침을 알 수 있다. 잔류응

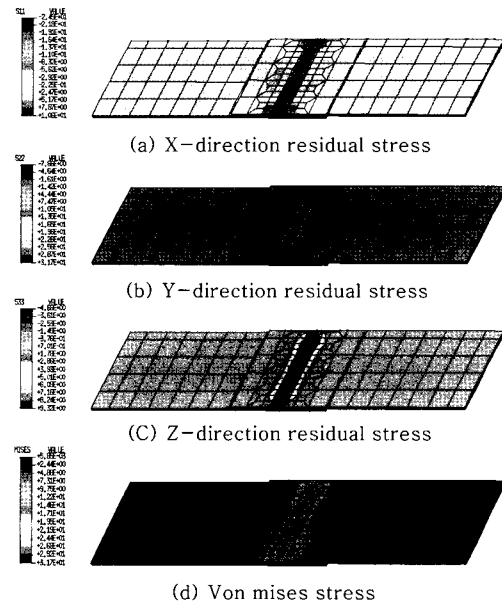


Fig. 5 Residual stress distribution after lap laser welding of transverse direction

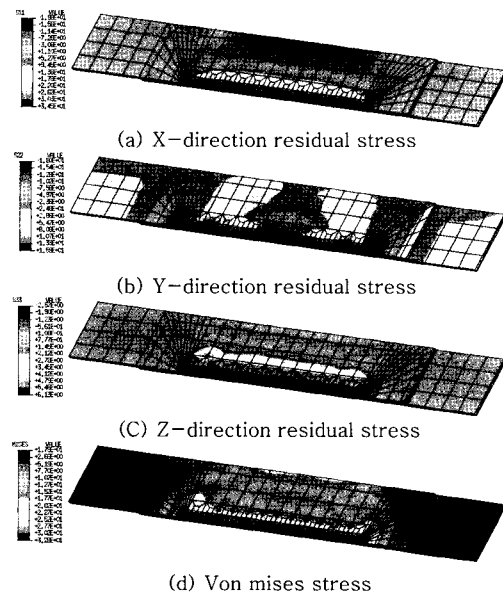


Fig. 6 Residual stress distribution after lap laser welding of longitudinal direction

력을 고려하거나 고려하지 않은 경우 모두 외부하중에 의한 응력의 분포는 용융부 및 열영향부의 주변에 집중되는 양상을 보인다.

각각의 용접방향에 따른 시편에 대하여 동일

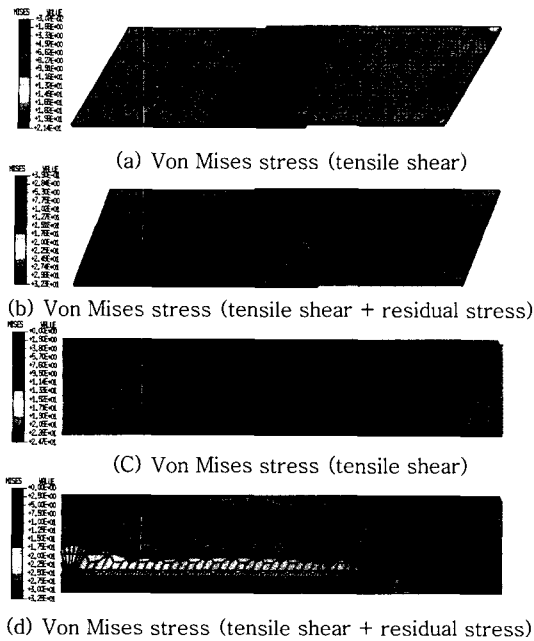
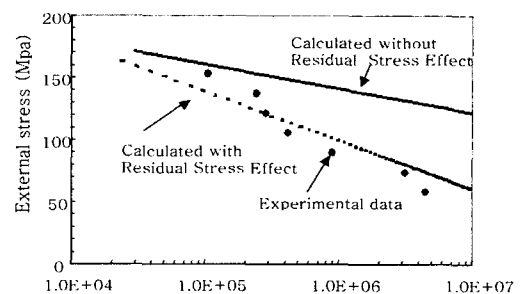


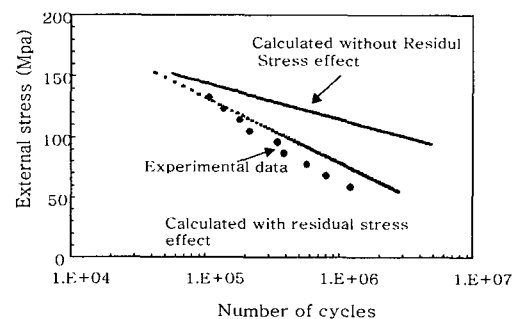
Fig. 7 Stress distribution for tensile shear loading (2940N) of lap laser welding

한 축방향으로 인장-전단 피로시험을 수행하면서 피로파괴가 시작되는 지점을 관찰하였다. 종방향용접인 경우에는 용융부 길이방향의 끝부분으로부터 1mm인 지점에서 피로균열이 생성된 후 용융부의 중심에서 양쪽방향으로 균열이 진전하다가 순간적으로 파괴가 일어나는 것을 알 수 있고, 횡방향용접인 경우에는 용융부 중심으로부터 0.5mm인 지점에서 피로균열이 생성된 후 폭방향으로 열영향부(HAZ)을 따라 피로균열이 진전하다가 순간적으로 파괴가 일어나는 것을 알 수 있다. 피로파괴가 발생하는 지점에서 기하학적인 형상과 잔류응력을 고려한 레이저 용접부 피로수명예측을 하였다. (1)식을 이용하여 등가 단축피로응력을 계산한 후 (2)식의 모재의 인장강도와 피로수명과의 관계를 이용하여, 잔류응력을 고려한 피로 수명과 잔류응력을 고려하지 않은 피로수명을 예측하였다. 계산결과를 정리하여 종방향과 횡방향용접에 대한 S-N곡선을 Fig. 8에 나타내었다. 종방향용접이나 횡방

향용접 둘 다 잔류응력을 고려하여 예측한 피로수명이 잔류응력을 고려하지 않고 예측한 피로수명보다 더 낮은 피로수명을 갖음을 알 수 있다. 따라서 잔류응력이 레이저 용접부의 피로강도에 상당한 영향을 미치는 인자임을 알 수 있다. 예측된 피로수명의 신뢰성을 검증하기 위하여, Fig. 8에 피로 실험 결과치를 나타내었는데 예측된 피로수명과 실험결과가 상당히 유사함을 알 수 있다. 그리고 Fig. 9은 Fig. 8의 결과를 용접방향에 따른 예측된 피로수명으로 재 정리한 결과이다. 종방향용접이 횡방향용접보다 동일한 응력에서 더 낮은 피로수명을 가짐을 알 수 있다. 이는 동일한 축방향 반복하중에 대하여, 횡방향 용접의 경우에는 외부하중 방향과 최대 인장잔류응력 방향인 y축과 수직을 이루고 있는 반면, 종방향 용접의 경우에는 외부하중 방향과 최대 인장잔류응력 방향인 x축과 동일하므로 증폭작용을 하여 피로균열을 더 빨리 생성한다고



(a) Transverse direction welding



(b) Longitudinal direction welding

Fig. 8 Experimental and calculated fatigue lives

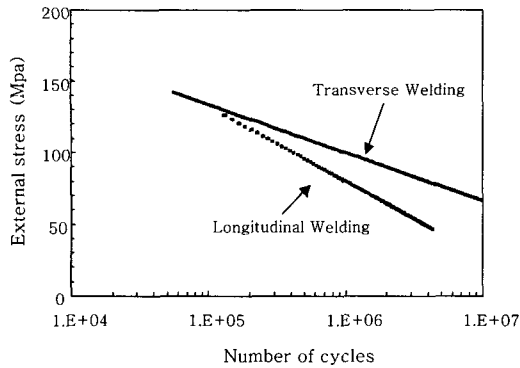


Fig. 9 Calculated fatigue lives Comparison of longitudinal direction and transverse direction

볼 수 있다. 생산 기술적인 면에서 고찰해보면 동일한 축방향 하중에 대하여 종방향 용접보다는 횡방향 용접의 피로강도가 더 크다. 따라서 레이저 용접 방향과 하중방향이 동일시 되지 않도록 설계하는 것이 바람직하다.

4. 결 론

본 연구에서는 용접방향이 다른 레이저 용접부에 유한요소해석을 수행하여 열이력과 잔류응력을 구하였다. 이를 바탕으로 Sine s Method를 이용하여 용접부에 작용하는 등가 단축피로응력을 도출하여, 용접방향에 따른 레이저 용접부의 S-N곡선을 예측 할 수 있었다. 또한 피로시험을 수행하여 해석결과와의 타당성을 검증하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 유한 요소 해석을 수행하여 레이저 용접부에 존재하는 잔류응력의 분포를 알 수 있었으며, 최대인장잔류응력은 모재의 항복강도까지의 크기를 갖는다는 것을 알 수 있었다. 또한 잔류응력을 고려한 용접부의 피로수명을 예측하였고, 실험을 수행하여 예측한 피로수명의 타당성을 검증하였다.

2) 잔류응력을 고려하여 예측한 피로수명이

잔류응력을 고려하지 않고 추정된 피로 수명보다 작은 값을 가지며, 실험을 통해 얻은 피로수명과 잘 근접함을 보인다. 이는 레이저 용접부 주변에 존재하는 잔류응력이 피로수명에 큰 영향을 미치는 인자임을 알 수 있었다.

3) 생산기술적 인면에서는 피로실험을 수행하지 않고, 유한요소 해석을 통한 레이저 용접부의 피로강도를 예측함으로써 비용과 시간적인 면에서 경제적이다. 또한 용접방향이 동일한 외부 하중방향에 대하여 종방향 보다는 횡방향의 레이저 용접부가 더 우수한 피로강도를 가짐을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 2002년도 두뇌한국21 사업에 의하여 지원되었습니다.

참 고 문 헌

1. K. G. Richards, "Fatigue strength of welded structures", The Welding Institute, Abington Hall, England, (1969)
2. S. J. Maddox, "Fatigue strength of welded structures", 2nd ed, Abington Publishing, The Welding Institute, Cambridge, England, (1911)
3. E. Grotke, "Indirect tests for weldability", Welding Research Council, Newyork, (1978)
4. J. W. Fisher, et al, "Effect of Weldments on the fatigue strength of steel beams", NCHRP Report 102, Transportation Board, Washington, DC, (1970)
5. N. T. Nguyen, M. A. Wahab, "The effect of undercut, misalignment and residual stresses on the fatigue behaviour of butt welded joints", Fatigue & fracture of engineering materials & structures, 769-778 (1996)
6. Y. S. Yang, et al, "Effect of residual stress on fatigue strength of resistance spot weldment", Science and technology of welding and joining, 397-401 (2001)

7. ABAQUS/Standard User's manual Version 6.1, (Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc)
8. H. O. Funchs, "Metal fatigue in engineering", 173-186 (1980)
9. R. Ducharme, K. Williams, P. Kapadia, J. Dowden, B. Steen and M. Glowacki, "The laser welding of thin metal sheets-an integrated keyhole and weld pool model with supporting experiments", J. of Physics: D: Appl. Phys., 1619-1627 (1994)
10. Metal Handbook, American Society for Metals Materials Park, 2, 10th edition, 195-199 (1990)
11. R. E. Peterson, "Analytical approach to stress concentration effects in aircraft materials", Technical Report 59-507, U. S. Air Force-WADC Symp. Fatigue Metals, (1959)
12. Society of Automotive Engineers, "Fatigue design handbook", SAE, 29 (1968)
13. J. A. Bannantine, J. J. Comer, J. L. Handrock, "Fundamentals of metal fatigue analysis", Prentice Hall, 4-14 (1990) Table.1 Welding conditions and size of fusion and heat affected zone (HAZ) of specimens