

# 접치기 용접부의 피로강도에 미치는 잔류응력의 영향

## The Effect of Residual Stress on Fatigue Strength in Lap Weldment

전남대학교 대학원 기계공학과 조성규, 손광재  
전남대학교 기계시스템공학부 양영수  
한국기계연구원 레이저연구기술그룹 서정, 김정오

### 서론

고밀도 에너지를 갖는 레이저 빔은 비교적 최근에 개발된 재료 가공 수단으로 좁은 면적에 농축된 열에너지를 전달하는 특성을 갖기 때문에 산소-아세틸렌 열원이나 전기 아크 열원 등과 비교 할 때, 가공부에 제한된 열 영향을 끼치면서 용접, 절단, 드릴링, 표면처리 등 여러 생산공정에 효과적으로 이용될 수 있다. 레이저 빔을 이용한 레이저 용접은 좁은 열영향부, 작은 열변형, 빠른 용접속도, 깨끗한 표면 등 여러 가지 장점을 가지고 있어 자동차 차체, 철도차량, 항공기 구조물 등 내구성과 신뢰성이 요구되는 구조물의 접합에 널리 사용되고 있다.[1-2] 특히 자동차 차체의 테일러드 블랭크 성형공정에서 많이 이용되어지고 있다. Paris에 의하면 기계 및 구조물의 파손은 피로에 의한 사고가 약 60%를 점하고 있으며 불안정 파괴도 20%를 점하고 있지만, 불안정 파괴중 많은 부분은 초기 결함이 사용 중 반복하중에 의하여 피로균열이 진전하여 균열이 한계치수에 도달한 시점에서 불안정 파괴를 일으키고 있으므로 손상파괴 중 약80%는 피로가 관계하고 있다고 말하고 있다.[3] 특히 반복하중을 받는 용접 구조물에 있어서 피로강도는 모재에 비하여 현저히 떨어지고, 용접부에서 피로균열의 발달을 유발 하기 때문에, 구조물의 강성과 강도는 용접부의 피로강도에 의해 결정되는 경우가 많다. 레이저 용접 공정은 고밀도 에너지의 레이저 빔을 재료에 조사, 가열하여 접합하고 냉각하는 공정이다. 이 때 공작물의 국부적인 가열에 의해서 재료내부에는 불균일한 온도 분포가 형성되어, 각 위치에서 열팽창량이 다르게 되므로 내부에 열응력을 발생시킨다. 발생한 열응력이 증가하여 항복점에 도달하고 공작물은 소성변형이 일어나며, 냉각 후 재료내부에 항복점에 가까운 잔류응력이 남게 된다. 다른 용접공정과는 달리 레이저 용접이 많은 장점을 가지고 있으나 용접공정의 특성상 용접 후에는 필연적으로 용접구조물 내에 잔류 응력이 남게 되는데, 피로 파괴 및 취성 파괴에 많은 영향을 미친다.

본 연구에서는 레이저 용접부의 피로 강도에 미치는 잔류응력의 영향을 정량적으로 고려하기 위하여 먼저 용접부 내에 남아 있는 잔류응력의 형태와 크기를 계산하였으며, 용접부 잔류응력 계산은 상용 유한 요소 프로그램인 ABAQUS package을 이용하여, 용접 진행시 시간 변화에 따른 온도 분포를 구하고, 이 열이력을 이용하여 가열 냉각 후 최후의 열응력 상태가 되는 잔류응력을 구하였다.[4] 잔류응력을 고려한 레이저 용접부의 피로강도를 예측하기 위하여 잔류응력이 존재하는 용접부에 반복하중을 적용시켜 Sins's method를 이용한 1축 등가응력을 구하여 모재의 S-N선도로부터 피로수명을 예측하였다.[5] 해석에 의해 얻어진 피로강도의 신뢰성을 확보하기 위하여 레이저 접치기 용접시편을 제작하여 피로 실험을 수행한 후 예측한 피로수명 값과 비교하여 타당성을 검증하였다.

### 실험방법

Lap joint은 같은 두께인 SPCC(1mm)시편의 횡 방향으로 2판 접치기 레이저 용접하여 제작하였다. 레이저 용접은 한국기계연구원이 보유한 4Kw급의 연속 출력과 CO<sub>2</sub>레이저를 이용하였으며, 동일한 용접 조건을 얻기 위하여 여러 개의 시편을 횡 방향으로 나열한 후 양 끝단을 지그로 고정시키고 레이저

빔이 겹치기한 시편의 중앙부를 지나가면서 용접하도록 하였다. 레이저 용접시편의 정적강도를 측정하고 파단 양상을 확인하여 용접부의 기계적성능의 추정 및 피로하중을 결정하기 위해 용접시편에 대하여 정적 인장-전단 시험을 수행하였다. 사용된 시험기는 INSTRON사의 전기유압식 시험기이고, 제어방식은 변위제어 방식으로 1mm/min의 속도를 이용하였다. 인장-전단 피로실험의 시편은 미세조직 실험과 인장-전단 실험에서 적용된 SPCC에 대한 겹치기용접의 경우에 대해서 실시하였다. 실험장치는 INSTRON사의 2.5ton 전기 유압식 시험기를 사용하였다. 실험방법은 하중제어 방식을 사용하였고, 하중비=0, 하중진동수=15Hz의 정현파를 사용하였다. 피로수명은 레이저용접된 시편의 두 판이 완전히 분리 될 때의 cycle로 하였으며, 피로한도는  $1.0 \times 10^6$  cycles까지로 하였다.

### 결과 및 고찰

용접부의 잔류응력 및 변형 해석을 위한 전 단계로서 요구되는 용접부의 열이력을 얻기 위한 비정상상태의 온도분포해석을 수행하였다. 레이저빔 조사에 의한 급속의 용접에는 깊은 용입을 가능하게 하는 키홀기구(Keyhole-mechanism)라는 에너지 전달 현상이 있다. 열원은 이동열원으로 하였으며 열원의 입력은 Flux형태로 재료 표면에서 열이 입력되고 Keyhole의 효과를 고려하기 위하여 선열원 형태로 재료 내부에서도 열이 유입되게 하였다. 열전달 해석시, 해석영역 내부의 초기조건은 시작 시간에서의 온도는 상온이고 경계조건으로는 대기로 대류에 의한 열전달을 고려하였다. 요소분할은 Fig.1과 같다. 용융부에서는 온도가 급격하게 변하므로 요소를 더 작게 나누었으며 열원으로부터 멀어질수록 요소를 크게 하였다. 겹치기 용접부의 잔류응력을 구하기 위하여, 열유동 해석을 통하여 얻은 열이력을 바탕으로 모재의 탄소성 해석을 수행하였다. 용접부 열유동과 열응력 해석을 수행하면 용접부에 작용하는 잔류응력장을 구할 수 있고 잔류응력이 존재하는 상태에서 외부하중을 가하여 유한요소해석을 수행하면, 용접부에 작용되는 응력상태를 구할 수 있다. 각 방향의 잔류응력의 분포와 Von mises응력 분포는 Fig.2-Fig.5에 나타내었다. 이러한 다축응력을 1축응력으로 등가 시키기 위하여 Sines' method를 사용하였다.[5] 등가 단축피로하중을 구하기 위한 식은 다음과 같다.

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

$S_N$ 값을 구한 후, 모재의 S-N곡선에서 응력 상태에 해당하는 피로 사이클을 구한다. 이때  $m=0.25$ 를 사용하였으며  $K$ 는 1.2를 사용하였다. 용접부의 잔류응력을 구한 후 피로하중의 최대값과 최소값을 작용한 응력상태를 계산하여 식(1)을 적용하였다. 일반적으로 연강의 경우 피로수명과 인장강도와의 관계는 다음과 같다.[6]

$$S = 10^c N^b \quad (10^3 < N < 10^6) \quad (2)$$

용접부의 피로수명은 (1)식과 (2)식을 이용하여 잔류응력을 고려한 피로수명과 잔류응력을 고려하지 않은 피로 수명을 계산하였다. 잔류응력을 고려하거나, 고려하지 않은 경우 모두 외부하중에 의한 응력의 분포는 용접부 및 열영향부에 집중되는 양상을 보인다. 그러나 응력의 크기에 있어서는 Fig.6에 나타낸 바와 같이 잔류응력을 고려했을 경우가 그렇지 않은 경우보다 용접부 주변에서 매우 크게 존재함을 알 수 있다. 본 연구에서는 용접부 중심으로부터 0.4mm지점의 응력을 계산하여 등가응력을 구하였는데 이는 레이저 용접부의 파단이 인장-전단피로 실험결과에 의하면 대부분이 인장잔류응력이 존재하는 열영향부 주위에서 균열이 발생하여 성장하고 파단에 이르는 것을 알 수 있었다. 3차원의 해석 결과 용접부 중심으로부터 0.4mm위치에서는 항복응력에 해당하는  $24\text{kgf/mm}^2$  크기의 인장잔류응력이 존재하고, 6mm영역부터는 압축 잔류응력이 존재함을 알 수 있었다. 실험을 통해 얻은 인장-전단 시험의 피로수명과 본 연구에서 제안한 방법을 통해 구한 피로수명과 관계는 Fig.7에 나타내었다. 잔류응력을 고려

하여 예측한 피로수명이 그렇지 않은 경우의 예측값 보다 실험치에 잘 근접함을 볼 수 있는데 이는 인장잔류응력이 열영향부 주변에 매우 크게 존재하므로 외부하중과의 증폭작용을 일으켜 피로수명에 큰 영향을 주기 때문이다.

### 결론

레이저용접은 국부적인 곳에 집중적으로 열이 가해짐으로서 불균일한 온도분포를 갖게되며 이로 인하여 열 응력이 발생하게 된다. 따라서 피로 반복하중을 받고 있는 용접구조물에 대하여 강도증가 및 안전성 확보를 위하여 잔류응력을 고려한 설계가 필요하다고 판단된다. 본 연구에서는 레이저 용접시편들에 대한 유한요소해석을 통하여 열이력과 잔류응력을 구하고 이를 바탕으로 Sins's Method를 사용하여 용접부에 작용하는 피로하중을 도출하여 피로수명을 예측하였다. 정적 인장시험과 피로시험을 통하여 정적 하중-변위관계와 반복하중-피로수명 데이터를 얻어 피로수명 예측 값의 타당성을 확보하였다.

1. 레이저 용접부의 실제적인 잔류응력을 구하기 위하여 3차원의 모델을 가지고 고밀도 에너지 용접의 특성인 Keyhole효과를 고려한 열유동 해석 및 열응력 해석을 수행하였다.
2. 레이저 용접부에 존재하는 최대 인장 잔류응력은 용접부에서 나타나며 실제 레이저 용접부의 피로 파괴는 열영향부에서 발생한다.
3. 잔류응력을 고려하여 예측한 피로수명이 잔류응력을 고려하지 않고 추정된 피로수명보다 적은 값을 가지며 실험을 통해 얻은 피로수명 데이터와 잘 근접함을 보인다. 이는 레이저 용접부 주변에 존재하는 잔류응력이 피로수명에 큰 영향을 미치는 인자임을 알 수 있다.

### 참고 문헌

1. J. K. Baysore, M. S. Williams : Laser Beam Welding and Formability of Tailored Blanks, Welding journal, pp. 345-351, Mar, (1992)
2. P. Lazzrin, E.Rabino : Fatigue behavior of laser and resistance seam welds in the automotive industry, Welding International, pp. 19-25, Sep, (1995)
3. Paris : Fatigue strength of welded constructions, Publication dela soudure autogine, (1976)
4. ABAQUS/Standard User's manual : Version 6.1, Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc
5. H. O. Funchs : Metal fatigue in engineering, pp. 176-186, (1980)
6. J. A. Bannantine, J. J. Comer, J. L. Handrock : Fundamentals of metal fatigue analysis, pp. 4-14, (1990)



Fig.1 Finite Element Mesh

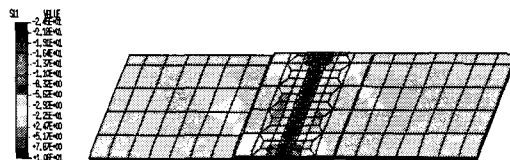
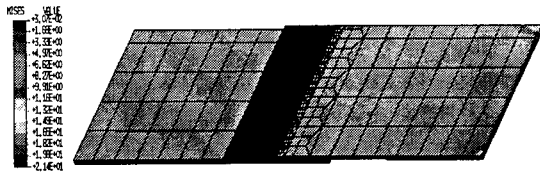


Fig.2 X-direction residual stress



Fig.3 Y-direction residual stress



(a) Von Mises stress after loading (300Kg<sub>f</sub>) only

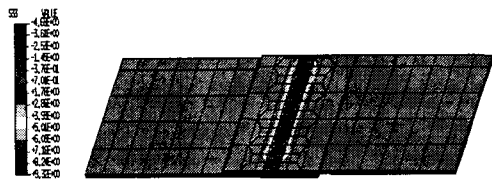


Fig.4 Z-direction residual stress



(b) Von Mises stress after loading (300Kg<sub>f</sub>) with residual stress



Fig.5 Residual stress (Von-Mises stress) distribution

Fig.6 Stress distribution for tensile-shear loading(300Kg<sub>f</sub>)

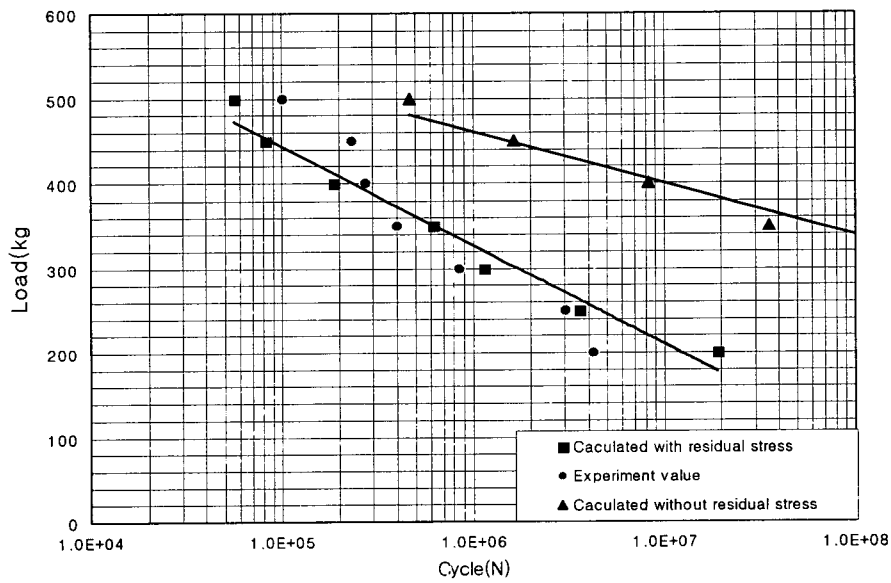


Fig.7 Experimental and calculated fatigue life for tensile-shear specimen