

## 레이저 용접부의 피로강도에 미치는 잔류응력의 영향

Effect of residual stress on fatigue strength in laser weldment

조성규\*\*, 양영수\*, 손광재\*\*

\*전남대 기계공학과, \*\*전남대 대학원

### 1. 서론

최초 레이저가 출연한 이래 비교적 짧은 기간 동안, 레이저를 이용하는 기술은 비약적인 발전을 거듭하여, 이제 각종 산업에 미치는 기여도를 예측하기 힘들 정도로 확대되고 있다. 레이저 용접은 좁은 열영향부, 적은 열변형, 빔의 높은 에너지 밀도로 고속의 용접속도와 높은 생산성, 그리고 깨끗한 비드면을 갖는다.[1] 이러한 장점으로 인하여 앞으로 내구성, 신뢰성이 요구되는 각종 산업분야에 널리 사용되리라 본다. 다른 용접공정과 동일하게 온도의 불균일한 분포에 의해 열응력이 생성되어, 용접 후 냉각을 함에 따라 잔류응력이 존재하며 그 크기는 모재의 항복응력 정도로 큰 응력이 생성된다. 그러므로 잔류응력이 존재하는 레이저 용접부는 피로강도에 매우 취약한 경향을 보인다.[2,3] 특히 레이저 용접은 다른 용접공정과 달리 매우 좁은 부위에 항복응력 정도의 잔류응력이 분포한다. 그러므로 구조물의 강성과 강도는 레이저 용접부의 피로강도에 의해 결정되는 경우가 많다. 따라서 잔류응력을 고려한 피로강도의 평가에 대한 연구를 필요로 한다. 본 연구에서는 열 탄소성 유한요소해석을 통하여 레이저 용접부의 잔류응력을 계산하였고 잔류응력이 존재하는 상태에서 외부하중을 가하여 등가의 피로하중을 구하고 피로수명을 예측하였다. 유한요소 해석은 상용코드인 ABAQUS를 사용하였다.[4]

### 2. 잔류응력 및 피로하중계산

용접부의 잔류응력 및 변형해석을 위한 전 단계로서 용접부의 열이력을 얻기 위한 비정상상태의 온도 분포해석을 해석하였다. Fig.1과 같이

열원은 가우시안분포와 키흔 효과를 고려하기 위하여 깊이방향으로 라인 형태로 두 개를 동시에 고려하였다.[5,6] 열전달 해석시, Fig.2와 같이 해석 영역 내부의 초기조건은, 시작 시간에서의 온도는 상온이고 Fig.3과 같이 경계조건으로는 대기로 대류에 의한 열전달을 고려하였다. 요소분할은 Fig.5와 같이 대칭을 고려하여 반쪽을 해석영역으로 선정하였다. 잔류응력해석과 피로하중의 경계조건은 Fig.4와 같다. 레이저 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 작용하는 복합응력 상태를 구할 수 있다. 이러한 다축응력을 1축응력으로 등가 시키기 위하여 Sins' Method를 사용하였다. 등가 단축피로하중을 구하기 위한 식은 다음과 같다.[7]

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

$S_N$ 값을 구한 후, 모재의 S-N곡선에서 응력상태에 해당하는 피로 사이클을 구한다. 이 때  $m=0.25$ 를 사용하였으며  $K$ 값은 1.6을 사용하였다. 용접부의 잔류응력을 구한 후 최대값과 최소값의 응력을 계산하여 식(1)을 적용하였다.

### 3. 결과 및 고찰

열유동 해석의 결과로 구해진 열이력을 이용하여 잔류응력을 구하였다. 레이저 용접부의 잔류응력 해석의 경우 Fig.6에 나타난 바와 같이 열영향부 주변에서 최대치를 가짐을 알 수 있다.

용접부의 피로 수명은 (1)식의 Sins' Method을 이용하여 잔류응력을 고려한 피로수명과 잔류응력을 고려하지 않은 피로 수명을 계산하였다. 본 연구에서는 끝단부터 0.8mm지점의 열영향부 응력을 계산하여 등가 응력을 구하였다. 잔류응력을 고려하여 예측한 피로수명이 그렇지 않은 경우의 예측값 보다 잘 맞는다. 이는 인장잔류응력이 열영향부 주변에 매우 크게 존재하므로 외부 하중과의 증폭작용을 일으켜 피로수명에 큰 영향을 주기 때문이다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 레이저 용접부에 대한 유한요소 해석을 통하여 열이력과 잔류응력을 구하고, 이를 바탕으로 Sins' Method를 사용하여 용접부에 작용하는 등가 단축 피로하중을 도출하여 피로수명을 추정하였다. 즉 레이저 용접부에 작용하는 잔류응력을 고려한 피로 수명 예측방법을 제한하였다. 이와 같은 일련의 과정들을 통해 다음과 같은 결론을 도출 할 수 있다.

1. 레이저 용접부에 존재하는 최대 인장 잔류응력은 열영향부에서 나타나며 레이저 용접부의 피로파괴는 외부하중과 최대 인장잔류응력의 중첩 효과로 이 부분에서 발생한다.

2. 잔류응력을 고려하여 예측한 피로수명이 잔류응력을 고려하지 않고 추정한 피로수명보다 작은 값을 가진다. 이는 레이저 용접부 주변에 존재하는 잔류응력이 피로수명에 큰 영향을 미치는 인자이기 때문이다.

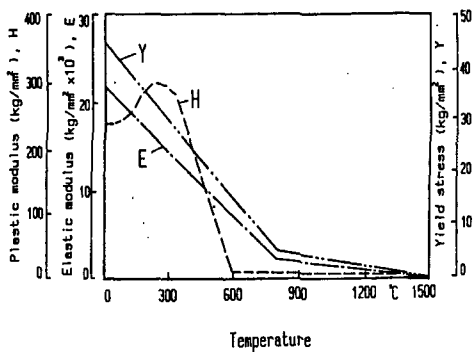


Fig.1 Mechanical properties of AISI1045

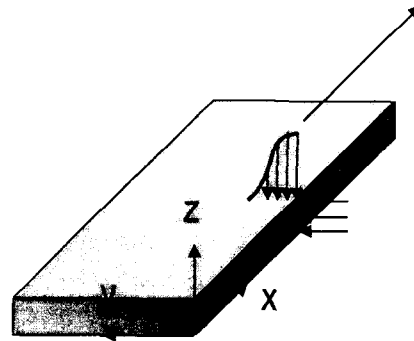


Fig.2 Heat source modeling and direction

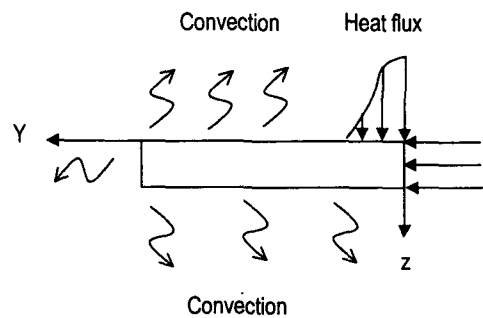
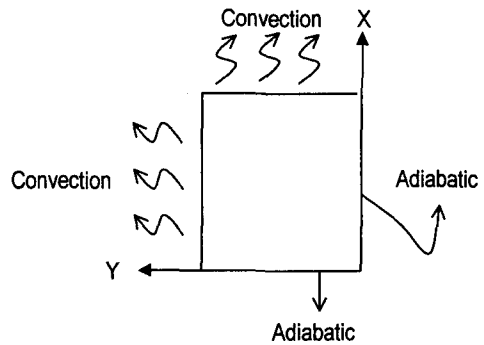


Fig.3 Boundary conditions of thermal analysis

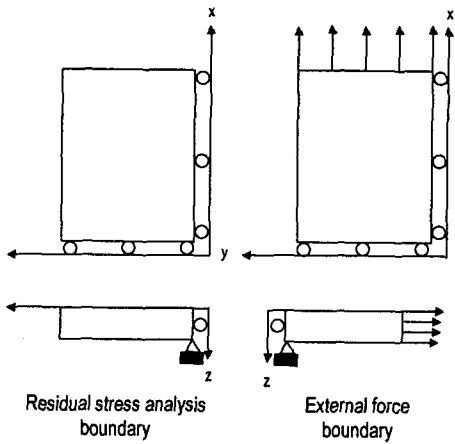


Fig.4 Boundary conditions of mechanical analysis

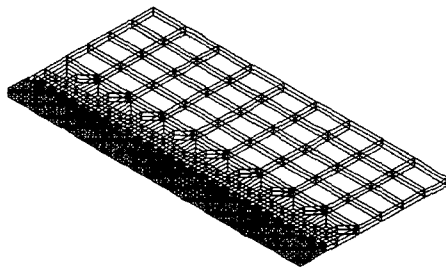


Fig.5 Mesh of analysis domain

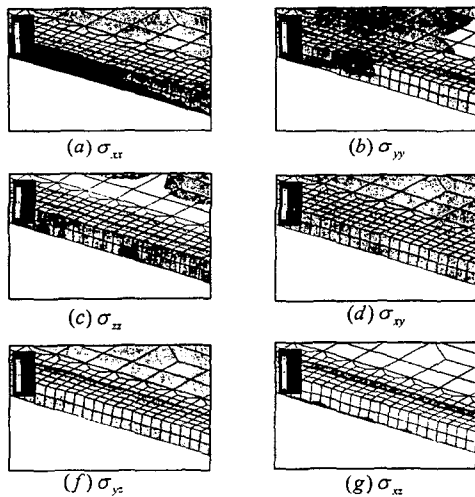


Fig.6 Residual stress distribution

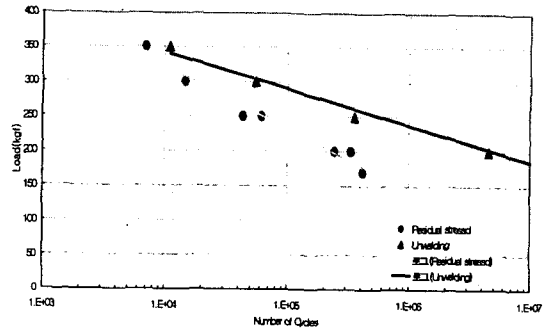


Fig.7 Calculated fatigue life

참고문헌

[1]W. W. Duley, 1998, Laser Welding, John Wil & Sons

[2]K. Tokaji, H. Shiota, A. Minagi and M. Miy Fatigue strength of mash seam welded joi Fatigue Frat Engng Mater Struct, Vol pp453-459

[3]T.Ninh Nguyen, M.A.Wahab, The dffect of we geometry and residual stress on the fatig welded joints under combined loading, Journ Materials Processing Technology, Vol 77, 1 pp201-208

[4]Hibbitt,Karlsson & Sorensen, ABAQUS/Standard manual

[5] W. Sudnik, D. Radaj, and W Erofeew Computerized simulation of laser beam weld modelling and verification, J. Phys. D: Phys. Vol 29, 1996, pp2811-2817

[6]R.Fabro and K.Chouf, Keyhole modeling dur laser welding, Journal of applied physics, V Number9, pp4075-4083

[7] J.Mazumder and W.M.Steen, Heat trans model for cw laser material process J.Appl.Phys, Vol 51, Number 2, 1980, pp941-947

[8]H. O. Fuchs and R. I. Stephens, 1980, M Fatigue in Engineering, , Fatigue Frat Engng Struct, Vol 23, pp453-459