2004년도 춘계 학술발표대회 발표논문, 2004년 5월, 제주

Stainless Steel Loose Tube의 고속 PALW 공정 열해석

Heat Transfer Analysis of High Speed PALW for SSLT

조정호*, 박태완*, 나석주*, 윤석환**, 황재련***, 원용희****, 김태성****, 이상훈****
* 한국과학기술원 기계공학과
** 한국항공우주연구원
*** ㈜현대자동차
**** ㈜LG전선

1. 서 론

현재 다발의 광섬유를 생산하기 위해서는 Fig. 1과 같이 stainless steel strip으로 광섬유들을 둘러싸고, 이를 레이저로 용접하여 광섬유 튜브를 생산하는 방법이 이용되고 있다. 레이저 열원은 에너지 밀도가 높고 용접부 주변의 열변형이 작으므로 박판의 stainless steel strip의 용접이 가능하지만, 고출력의 레이저는 상당히 고가이므로 현장에서 고속으로 SSLT (Stainless Steel Loose Tube)를 생산하기 위해서는 무리가 따른다. 이에 저출력의 레이저로 SSLT를 고속생산하기 위해 플라즈마를 보조열원으로 사용하는 PALW (plasma augmented laser welding)를 채택하였다.

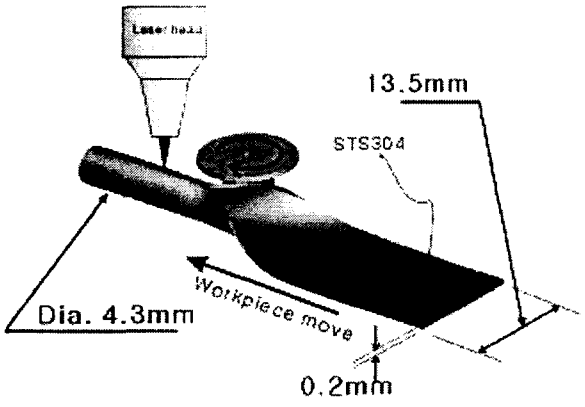


Fig. 1 SSLT의 레이저 용접.

PALW의 경우, 플라즈마가 용접부를 미리 가열하여 용접부의 레이저 흡수율을 높여주어 같은 레이저 출력에 대해서도 더 높은 생산량의 고속 용접이 가능하고, 덧붙여 플라즈마의 열원 반경이 레이저의 그것보다 더 크므로 용접선 오차에 여유를 주어 용접 결함이 발생할 가능성도 줄여준다.

본 연구에서는 SSLT의 고속 생산을 위해 채택된 PALW 공정에 관한 유한 요소 열해석을 수행하고 이 모사를 실험결과와 비교해본다.

2. 열원 모델링

PALW의 SSLT용접의 열해석에 있어서, 먼저 선행되어야 할 것이 바로 열원의 수학적 모델링이다. 레이저의 경우, 익히 알려진 것처럼 초점에서 에너지 밀도가 다음과 같이 Gaussian 분포를 갖는 열원으로 수식화될 수 있다.[1]

$$I(r) = I(x,y) = I_o \exp\left[-c^2 \frac{r^2}{r_o^2}\right] \quad (1)$$

여기서 $r^2 = x^2 + y^2$ 이고, r_o 는 초점에서의 유효반경으로 $c = \sqrt{3}$ 으로 하여 에너지의 95%가 유효반경의 원 안으로 집중되었다고 가정하였으며, 연구에서 사용된 680W, CO_2레이저의 초점유효반경은 0.25mm이다.

플라즈마도 레이저와 마찬가지로 Gaussian 의 에너지 분포를 갖는 열원으로 가정할 수 있으며, 그 수학적 모델은 아래와 같다.[2]

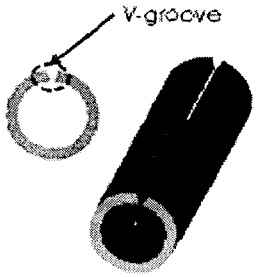


Fig. 2 SSLT before welding.

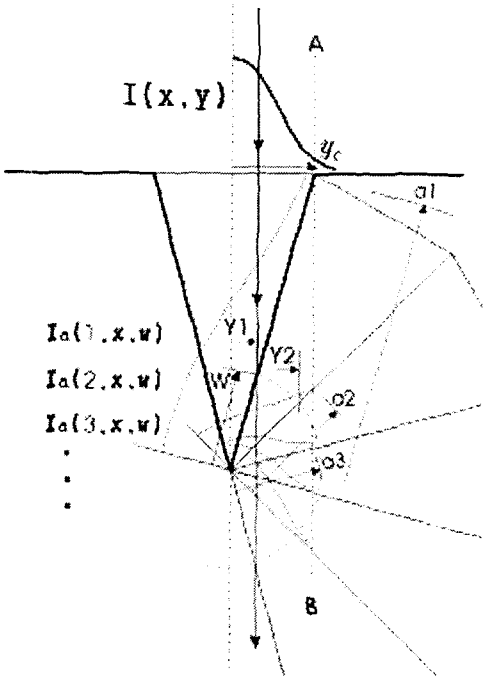


Fig. 3 Multiple reflection model with virtual surface.

$$I_P(r) = I_P(x,y) = I_{Po}\exp\left[-c_P^2\frac{r^2}{r_{Po}^2}\right] \quad (2)$$

여기서 I_{Po} 는 플라즈마 용접기의 설정전압(V)과 전류(I), 그리고 플라즈마 반경(r_{Po})에 따른 값으로서 공급 전력을 P_P 라고 하면, 다음과 같이 계산된다.

$$I_{Po} = \frac{P_P c_P^2}{\pi r_{Po}^2} = \frac{IVc_P^2}{\pi r_{Po}^2} \quad (3)$$

마찬가지로 $c_P = \sqrt{3}$ 으로 가정하고, 채택된 플라즈마 토치의 유효반경 $r_{Po} = 0.5\,\mathrm{mm}$이다.

Stainless steel strip 이 성형을 거쳐 튜브와 같은 형태가 되면 열원이 가해지는 지점은 Fig. 2 와 같은 V-groove 이 된다.

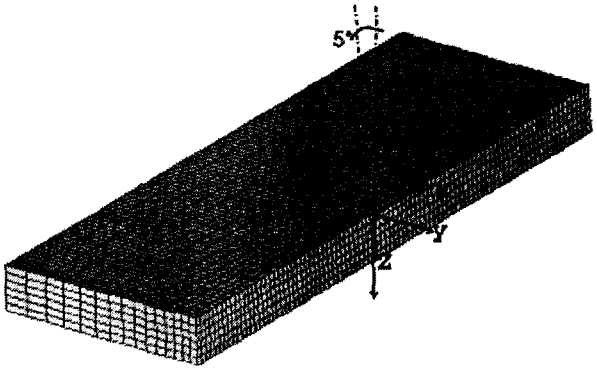


Fig. 4 Half solid model for FEA.

3. 다중반사 모델링

레이저가 V-groove에 조사되는 경우는 키홀 현상에서와 같은 다중 반사가 일어난다. 해석의 정확도를 높이기 위해 아래와 같이 이 현상을 모델링 하였다.

레이저가 모재 표면에 θ 의 각도로 조사되는 경우, 이 각도에 따른 Fresnel 흡수계수는 아래와 같다.[3]

$$A(\theta) = 1 - \frac{1}{2}\left(\frac{1+(1-\varepsilon\cos\theta)^2}{1+(1+\varepsilon\cos\theta)^2} + \frac{\varepsilon^2 - 2\varepsilon\cos\theta + 2\cos\theta^2}{\varepsilon^2 + 2\varepsilon\cos\theta + 2\cos\theta^2}\right) \quad (4)$$

광선이 V-groove내에서 반사되는 횟수는

$$N_m = \left\lceil \frac{\pi - \theta_o}{2\theta_o} \right\rceil \quad (5)$$

이며, θ_o 는 V-groove의 반각이다. 그리고, 광선이 n번째 벽면에서 흡수되는 intensity는 아래와 같다.

$$I_a(n,x,w_n) = I(x,y)\sin\theta_n A(\theta_n)\times \prod_{i=1}^{n-1}\left[1 - A(\theta_i)u(a_n - w_n)\right] \quad (6)$$

여기서, θ_n 은 n번째 반사벽면에서 빔의 입사각이며, w_n은 groove입구의 y위치로 들어온 광선의 n번째 가상벽면에서 w좌표값이다. (Fig. 3)

4. 유한 요소 열해석

열해석은 Fig. 4 에서와 같이, 두 박판이 V-groove 을 이루면서 맞대어져 있는 경우를 생각하여 유한 요소를 구성하였다.

레이저와 플라즈마 사이의 상호 간섭은 없다고 가정하였으며, 용접 방향에 따라 플라즈마가 모

재에 먼저 조사된 후 레이저가 조사되는 순서로 모사하였다. 모재의 플라즈마 에너지 흡수율은 문헌에 따라 60%로 정해 주었고[4], 레이저는 온도에 따라 그 흡수율을 정해 주었다.[5]

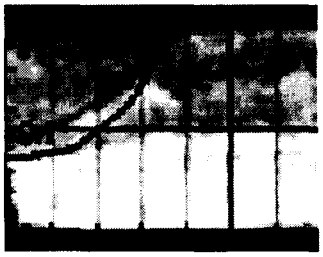
그리고, 해석의 정확도를 높이기 위해 용융풀이 V-groove을 채우는 과정을 요소의 deactivation 효과를 주어 모사하였다.

4. 결 론

Fig. 5에서 굵은 선이 모사 결과이며 이 결과의 용융풀의 모습과 용접 실험 결과 후의 용융풀의 모습이 비교적 잘 일치함을 알 수 있다. (c)의 그림과 비슷한 깊이의 용입을 얻기 위한 레이저 용접의 속도는 4mpm정도인데 반해, PALW로 속도가 12mpm까지 상승했음을 알 수 있다. 그리고, 다음과 같은 결과를 도출할 수 있다.

1) 두가지 열원에 대한 모델링과 다중 반사 모델링을 통한 모사가 실험 결과와 비교적 일치하여 타당성이 있음을 확인하였다.

2) 플라즈마를 보조열원으로 사용하여, 레이저만으로 용접하는 경우보다 약 250%까지 용접속도를 상승시킬 수 있었다.



(a) Plasma current 12A.

(b) Plasma current 16A.

(c) Plasma current 10A.

Fig. 5. 680W laser power with plasma leading in 12mpm welding speed. Simulation results with experimental results.

후 기

본 연구는 ㈜LG전선과 두뇌한국21사업의 지원으로 수행되었습니다. 관계자 여러분들에게 감사의 뜻을 전합니다.

참고문헌

1. W.-S. Chang and S.-J. Na, "Prediction of Laser-Spot-Weld Shape by Numerical Analysis and Neural Network", Metallurgical and Materials Transactions B, Vol.32B, Aug. 2001.
2. Y.-T. Cho, "A Study on Process Analysis in Pipe Inside Girth Welding Using GTAW", M.S. Thesis, 1998.
3. P. Solana and G. Negro, "A study of the effect of multiple reflections on the shape of the keyhole in the laser processing of materials". Appl. Phys. 30 (1997) 3216–3222.
4. J.C. Metcalfe and M.B.C. Quigley, "Heat Transfer in Plasma-Arc Welding", Welding Journal, March 1975, 99/s-103/s.
5. T. J. Wieting and J. T. Schriempf, "Infrared absorptances of partially ordered alloys at elevated temperatures.", J. Appl. Phys. 47(9) 4009.