

레이저 용접에서의 키홀 및 다중 반사 모델링 Keyhole and Multiple Reflection Modeling in Laser Welding

조 정 호*, 나 석 주*

* 한국과학기술원 기계공학과

1. 서 론

레이저를 이용한 키홀 용접은 좁고 깊은 용입을 얻을 수 있으며 열영향부가 작다는 이점이 있다. 이로 인해 접합 산업의 많은 부분에서 레이저가 용접 열원으로 사용되고 있으며, 그에 따른 이론적 연구도 활발히 이루어지고 있다.

특히 레이저 용접에서의 용융풀의 거동은 키홀이라는 특이 현상으로 많은 관심을 받고 있으며 이를 유동학적 관점에서 접근하려는 시도 역시 끊지 않은 역사를 이루고 있다. 키홀의 가장 독특한 현상 중 하나로 다중 반사를 들 수 있는데, 조사된 레이저가 키홀의 벽면에 반사를 거듭하여 키홀 바닥까지 도달함으로써 더욱 더 깊은 용입을 얻게 하는 원동력이 된다.

H. S. Ki et al은 level set method를 바탕으로 자유 표면을 추적함과 동시에 실질적인 ray tracing을 현실화 함으로써 키홀 유동을 해석했으며, J. Y. Lee et al은 콘 형태의 키홀 모양을 가정한 후 이 형태 내에서의 다중 반사를 고려하여 키홀 내에서의 흡수율을 조정해 주는 방식으로 VOF를 이용 키홀 유동을 보여 주었다.

본 논문에서는 VOF를 이용하여 키홀의 자유 표면을 추적하는 동시에 변화하는 키홀 유동에 따라 동시적으로 ray tracing을 통한 다중 반사를 고려하여 키홀 유동을 해석하였으며, 이를 실제 실험 결과와 비교, 분석한다.

2. 키홀 내에서의 다중 반사

키홀 벽면을 따라 반사된 레이저 빔은 키홀 바닥까지 도달하게 되고, 이렇게 중첩된 열원 모델은 키홀을 더욱 깊게 만드는 원동력이 된다.

모재가 레이저를 흡수하는 모델은 여러 가지가 있겠으나 계산상의 편의를 위해 해석상에서 Gaussian 분포를 가지며, 초점 거리를 갖는 표면 열입력으로 주었으며, 다중 반사를 고려하기 위해 Fresnel 흡수 모델을 사용하였다.

Fresnel 흡수 모델은 레이저 빔과 흡수 표면의 법선 사이의 입사각, 모재의 유전체 상수, 진공 투자율, 레이저의 각 주파수 등에 관한 함수로서 다중 반사 중 입사광과 VOF상 자유 표면의 법선 사이의 각으로 흡수율이 정해지도록 계산해 주었다.

키홀 내에서의 다중 반사는 ray tracing 기법을 이용하여, 입사된 빔과 반사된 빔의 진행을 계산해 주었으며, 실제 VOF와 함께 적용하기 위해 해석 영역의 격자간 거리를 고려하여 Fig. 1과 같이 Matlab을 이용하여 ray tracing의 성공적인 적용을 입증하였다.

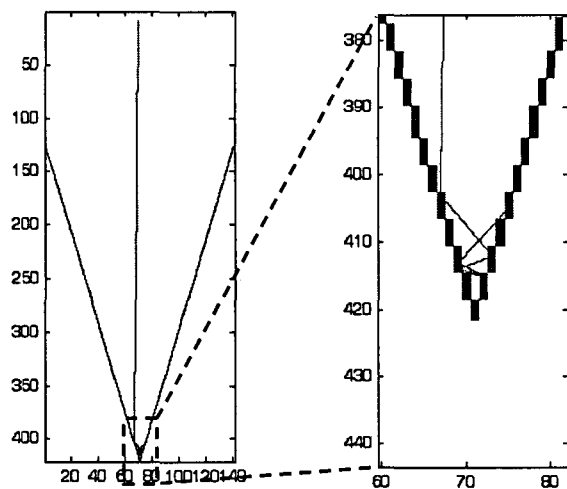


Fig. 1. Ray tracing of laser beam in the keyhole

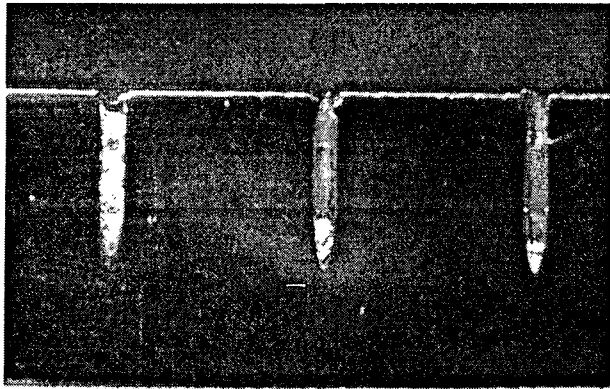


Fig. 2. Laser drilling experiment with 9kW peak power Nd:YAG laser for 4ms pulse width. Workpiece is low carbon steel with 7mm thickness.

3. 해석 및 실험 결과

Fresnel 흡수와 다중반사를 고려한 키홀 모델링은 Nd:YAG 레이저를 이용해 Fig. 2와 같은 드릴링 실험 결과와 비교, 분석하였다.

사용된 Nd:YAG 레이저는 350V의 입력전압으로 4ms의 펄스폭으로 조사하였으며, 이 조건을 레이저 파워 미터로 측정된 결과 약 36J의 에너지를 나타내었다. 이는 사용된 레이저가 약 9kW의 피크파워를 가진다는 뜻이며, 이에 따라 해석에 사용된 Gaussian 열원을 수식화해 주었다.

전체 해석시간은 실제 드릴링 시간보다 긴 10ms으로 설정해 주어 용융물의 거동 후 재응고한 상황까지 모사하였다. Fig. 3은 해석결과와 실험결과를 비교한 그림으로 제시한 키홀 모델이 비교적 잘 맞음을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 키홀의 해석학적 모델을 제시하기 위해 다중반사를 고려한 Fresnel 흡수 방식을 적용하였으며, 실험 결과와의 비교는 제시된 모델이 비교적 합당함을 나타낸다.

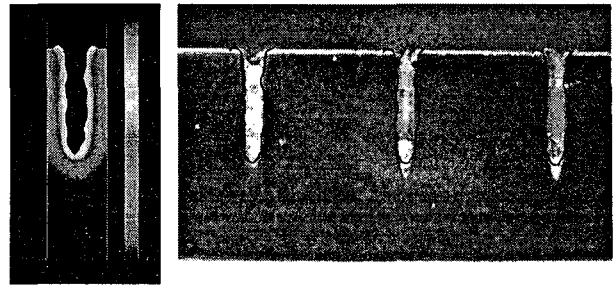


Fig. 3. Comparison of suggested analytical keyhole model to experimental one.

참고문헌

1. H. Ki, P. S. Mohany, J. Mazumder : Multiple reflection and its influence on keyhole evolution, Journal of Laser Applications, Vol 14, No. 1, 39-45.
2. J. Y. Lee, S. H. Ko, D. F. Farson and C. D. Yoo : Mechanism of keyhole formation and stability in stationary laser welding, J. Phys. D: Appl. Phys. 35(2002), 1570-1576.