

GMA-레이저 하이브리드 용접의 3차원 용융풀 해석

Three-dimensional molten pool analysis of GMA-laser hybrid welding

조정호*, 나석주**

* Ohio State University, Industrial, Welding, and System Engineering Department

** 한국과학기술원 기계공학과

1. 서 론

용접은 금속 소재의 접합에 가장 널리 이용되는 방법으로 전통적으로 아크 용접의 응용이 가장 많았으며, 근래에는 다양한 용접법들을 병용하는 하이브리드 개념이 인기를 얻고 있다. 그 중 가장 응용 범위가 넓은 것이 바로 레이저와 아크의 하이브리드 용접법으로, 본 연구에서는 후판 용접에 효과적인 GMA-레이저 하이브리드 용접의 용융풀을 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 3차원적으로 모사하기로 한다.

2. 이론적 배경

용융풀 해석은 기본적인 유동 해석과 그 궤를 같이 한다. 따라서, 이 해석의 지배 방정식은 질량 보존 방정식, 운동량 보존 방정식과 에너지 방정식이다. 덧붙여, 자유 표면 추적이 무엇보다도 중요한 이슈이기 때문에 VOF방법[1]을 이용하여 자유표면을 표현하였다. 이 네 가지 지배 방정식은 이미 널리 알려져 있고, 문헌에서 찾아보기 쉬우므로 본 논문에서는 생략하기로 한다.

아크에 의한 모재의 용융을 모사하기 위해서는 아크의 열원 특성을 수학적으로 표현해야 한다. 우선, 아크를 모재의 표면 열원으로 간주하여 가우시안 형태로 가정함으로써 수학적 모델을 이끌어낸다. 다음으로 중요한 것은 아크라는 전류 흐름에 의해 발생하는 전자기력이다. 마지막으로, 아크는 일종의 플라즈마 유동이므로 이에 의해 발생하는 아크 압력을 모재의 표면 경계 방정식으로 설정해 주어야 한다.[2]

레이저는 단일 파장의 직진 성향을 갖는 빛으

로 렌즈에 의해 한 점으로 집적되었을 경우, 매우 높은 에너지 밀도를 갖는다. 이러한 에너지 밀도를 이용해 금속의 용융 및 증발이 가능하므로 정밀 용접과 고용입 용접에 가장 적합한 방법이라 하겠다. 레이저 역시 아크와 마찬가지로 가우시안 분포를 갖는 표면 열원으로 수학적 모델이 널리 이용되고 있다.

레이저 용접시 좁고 깊은 단면 비드를 일컫는 키홀을 형성하는데 가장 큰 역할을 하는 것은 바로 반발 압력으로 알려진 모재의 증발 압력이다. 본 연구는 여러 가지 증발 모델 중 실험 결과와 비교적 잘 일치하면서도 수식 형태가 간단한 모델을 이용하여 증발 압력을 표면 경계 조건으로 설정해 주었다. 마지막으로, 레이저 용접의 해석에서 가장 중요한 문제는 바로 다중 반사 모델[3]이다. 레이저에 의해 용융되고 반발 압력에 의해 변형된 용융 표면은 키홀을 형성하고, 키홀 내로 들어온 레이저 빔은 키홀 벽면을 따라 반사를 반복하여 모재에 의해 흡수된 후 키홀을 빠져 나온다. 본 연구는 기존에 저자가 발표했던 다중 반사 모델을 본 해석 모델에 그대로 적용하였다.

다중 반사와 더불어 모재의 레이저 흡수는 Fresnel 반사 모델을 적용하여 레이저 빔이 도달하는 모든 지점에서 흡수율을 계산해 주었다.

해석 모델은 Fig.1 과 같이 길이 42mm에 너비와 높이 모두 10mm 설정하였으며, 자유 표면 추적을 위해 그림과 같이 상단 면 위 3mm를 유체가 없는 빈 공간으로 설정해 주었다. 레이저의 파워는 3.7kW이고 아크는 2.5kW이며, 용접속도는 1m/min으로, 모재는 일반적인 연강으로 설정

해 주었다.

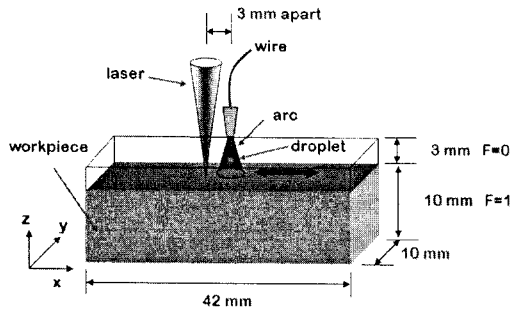
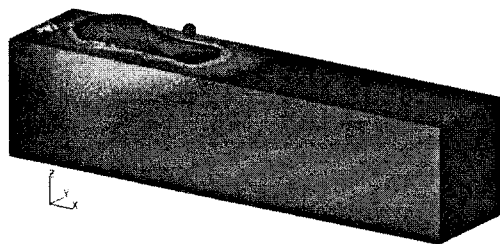
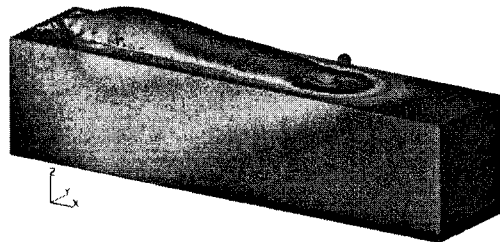


Fig. 1 – Schematic diagram of laser-GMA hybrid welding simulation.



(a) $t=0.45$ sec.



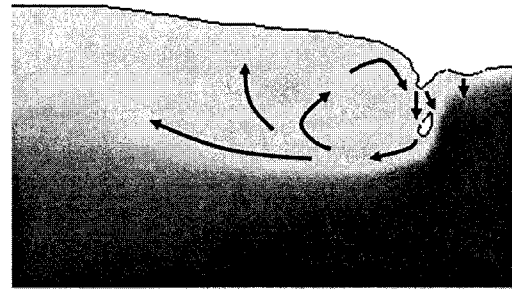
(b) $t=1.35$ sec.

Fig. 2 – 3D perspective views of simulation result.

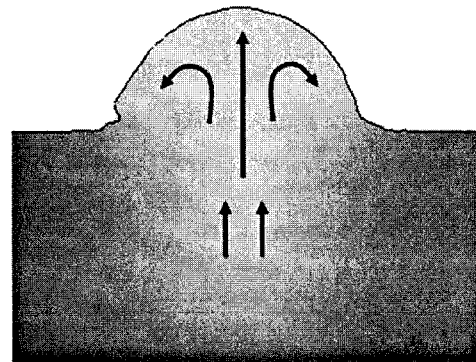
3. 결 과

GMA-레이저 하이브리드 용접의 3차원 용융풀 해석 결과는 Fig.2와 같다. 그림은 용융풀 해석 결과를 시간 순으로 나열한 것으로, 용융풀의 외관을 보여주고 있다. 그림에서 보듯이, GMA 용접법이 모재를 먼저 용융시키고 바로 이후에 레이저에 의한 키홀이 뒤따르고 있음을 알 수 있다. 아크에 의해 용융된 용접 와이어는 용적의 형태로 모재로 전달되고 있으며, 아크 압력에 의해 약간 변형된 모재 표면 내에 깊은 키홀 입구의 모습이 보이고 있다.

Fig. 3은 해석 결과의 측단면과 종단면의 모습으로 화살표가 용융풀의 거동을 보여주고 있다.

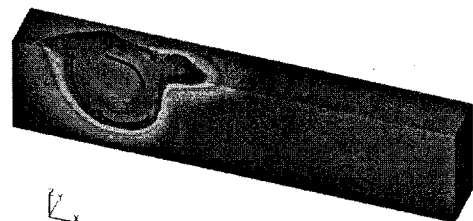


(a) Side view flow pattern.

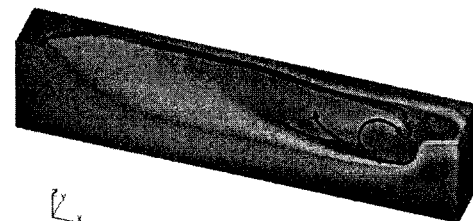


(b) Front view flow pattern.

Fig. 3 – Flow patterns of simulation result in cross-sectioned side and front views.



(a) $t=0.53$ sec.



(b) $t=1.96$ sec.

Fig. 4 – Flow patterns of simulation result in 3D perspective views.

Fig. 3 (a)에서 보듯이 키홀은 끊임없이 생성과 붕괴를 반복하며, 키홀 바닥까지 내려왔던 유동은 키홀은 용접방향으로 진행함에 따라 뒤로 밀

러나가는 운동을 통해 용융풀 전체를 통해 보여지는 와류를 형성하고 있다.

Fig. 3 (b)는 용융풀 종단면의 유동을 나타낸 것으로 키홀 형성 후 아래 방향으로 향하던 유동이 키홀 진행 후 윗방향으로 바뀌면서 상단 비드를 형성하는 모습을 보여주고 있다. 상단 비드를 형성하는 유동이 크게 퍼지지 않고 가운데로 모여서 불꽃한 형상을 유지하는 것은, 주로 아크에 의한 전자기력과 표면 장력에 의한 것으로 전자기력은 유동을 아크 중심으로 모아주며, 표면장력은 용융된 금속 표면이 최소가 되도록 유동을 지배한다.

Fig. 4는 이와 같은 용융풀의 유동을 측단면, 종단면, 횡단면으로 분석한 각 단면에서의 유동을 3차원으로 재구성한 것으로 시간이 지남에 따라 유동의 양상이 복잡해지고 있음을 보이고 있다. 용접 초기에 용융풀은 하나의 큰 와류를 형성하고 있으나, 열원이 진행함에 따라 키홀 바닥부분의 유동이 점차 여러 갈래로 갈라져 좀더 복잡한 유동으로 발달한다. 하지만, 초기 형성되었던 와류는 그대로 유지가 되는 것을 볼 수 있다.

4. 결 론

본 연구는 아크 용접의 해석 모델과 레이저 용접의 키홀 해석 모델을 병합함으로써, GMA-레이저 하이브리드 용접의 용융풀 해석 모델을 제안하였다. 해석 결과를 통해 용융풀 내부의 유동 뿐 아니라, 상단 비드의 형성 과정도 관찰할 수 있었다.

해석 결과를 토대로, 키홀 형성에 따른 용융풀 내부의 와류를 관찰할 수 있었으며, 이 와류는 용접이 진행되는 가운데 계속해서 유지되지만 키홀 바닥 부분의 유동이 점차 여러 갈래로 나뉘어지면서 유동이 좀더 복잡해짐을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

1. C. W. Hirt, B. D. Nichols, Volume of fluid method for the dynamics of free boundaries, J. Comp. Phys. 39 (1981) 201-25
2. 조정호, GMA - 레이저 하이브리드 용접의 3차원 용융풀 해석에 관한 연구, KAIST 2007, 박사학위논문
3. J. H. Cho, S. J. Na, Implementation of real-time multiple reflection and Fresnel absorption of laser beam in keyhole, J. Phys. D: Appl. Phys. 39 (2006) 5372-78