

# 소형 가스용기 레이저 용접부의 열유동 해석

## Analysis of Heat flow in Laser Welding of Small Gas Pressure Vessel

김재웅\* · 박상국\*\* · 김기철\*\*\*

\* 영남대학교 기계공학부, \*\* 삼성전자(주)

\*\*\* 포항산업과학연구원 접합가공연구팀

### 1. 서 론

용접부의 온도분포해석은 용접에 의해 발생하는 모든 현상들을 분석하는데 기초가 되는 가장 중요한 부분이라고 할 수 있다.<sup>1~4)</sup> 본 연구에서는 Fig. 1에 보인 소형 가스용기의 제조에서 레이저 용접을 적용하였을 때 동반하는 현상들을 예측함으로써 레이저 용접공정의 적용가능성뿐 아니라, 용접 후 일어나는 여러 현상들을 공정 최적화의 관점에서 평가하는 것을 목적으로 하였다. 즉 0.5mm 두께의 박판으로 성형된 소재 2 매를 맞대어 겹쳐 놓고 레이저 용접하는데 있어서 생산공정의 최적화를 위해서는 충분한 실험과 다양하고 많은 조건에서 폭넓은 관찰이 필요하다. 따라서, 본 연구에서는 가스용기 제조를 위한 기초자료로서 레이저 용접공정의 열유동 현상을 해석하여 용접부의 크기 및 열영향부 크기의 변화를 예측한다. 즉, 용접부의 크기에 미치는 용접조건들의 영향을 해석함으로써 최적조건 선정을 위한 데이터를 확보하기 위하여 유한요소법에 의한 열유동 해석방법을 제시하였다.



Fig. 1 Shape of a gas pressure vessel

### 2. 열원의 모델링

레이저 용접 중에 일어나는 열유동 현상은 3차원의 형태를 가지게 된다. 그러나 3차원의 열유동 현상을 정밀하게 해석하는 데에는 큰 용량의 메모리와 많은 컴퓨터 해석시간이 요구되어 비효율적인 면을 가지고 있다. 본 연구에서는 이러한 3차원의 열유동 현상을 준정상상태(Quasi-steady state)로 가정하여 2차원으로 해석을 수행하였다. 즉, 모재 단면을 계산영역

으로 하고 열원이 이 계산영역을 통과하는 것으로 하였다.<sup>5)</sup>

레이저 용접은 고에너지 밀도의 용접이라는 특성상 Fig. 2에서와 같은 키홀(keyhole)이 형성되고 모재에서는 키홀을 중심으로 방사형의 열 유동형태를 가지게 된다. 이러한 키홀의 형태를 본 연구에서는 재료가 박판임을 감안하여 원통형으로 가정하였다.

이 때 레이저빔에 의해 만들어진 원통형의 키홀 벽면으로부터 단위면적당 모재로 들어가는 열유속(heat flux)의 양은 다음과 같다

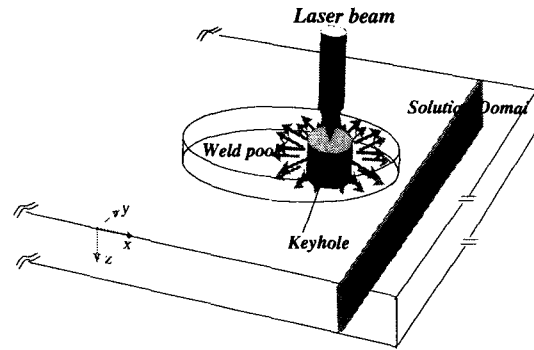


Fig. 2 Heat flow in the vicinity of keyhole

$$q_{3D} = \frac{Q}{2\pi r h} \quad (1)$$

여기서,  $q_{3D}$  : 3차원 열유동에서 heat flux

$r$  : 키홀의 반경

$h$  : 키홀의 깊이

$Q$  : 레이저 입력 파워

Fig. 2에서 빔이 2차원의 해석영역을 지나갈 때 용접선 방향의 열유동 형태가 고려되지 않기 때문에 해석 영역을 지나는 동안 적용되는 열의 양은 다음과 같다.

$$Q_{in} = 2 \int_0^\pi q_{3D} \sin \theta \cdot h r d\theta \quad (2)$$

$$= 4 r h q_{3D} = \frac{2}{\pi} Q$$

따라서 2차원 해석시의 입열량은 원래 입열량의 2/

$\pi$  만큼만 고려된다. 이를 보정하기 위하여 2차원 해석 시의 열유속을 다음과 같이 모델링함으로써 입열량을 보정하였다.

$$q_{2D} = \frac{\pi}{2} q_{3D} \quad (3)$$

또 키홀이 해석영역을 지날 때 열유속의 강도변화를 Sin함수로 가정하여, 다음과 같은 2차원 해석을 위한 열원모델을 설정하였다.

$$q = \frac{Q}{4rh} a \sin(\beta \times t) \quad (4)$$

여기서,  $t(0, \frac{\pi r}{2v})$  : 빔이 해석영역을 지나가는 시간

$\alpha, \beta$  : 빔이 해석 영역을 sin 함수의 반주기 내에 통과하기 위한 보정 계수

$Q$  : 레이저 입력과워

$v$  : 용접 속도

열유동의 유한요소해석을 위하여 상용 프로그램인 'ABAQUS'를 사용하여 계산하였다.<sup>6)</sup>

### 3. 가스용기의 열유동 해석

#### 3.1 해석 모델링

가스용기의 온도 분포해석에 적용한 조건은 Table 1에 나타내었다. 레이저 입력과워를 변화시켜 용접하였는데, 이는 용융라인과 열영향부 형상 및 크기를 비교하기 위해서 이다. 계산을 위해 Fig. 3에서와 같이 가스용기의 중앙 횡단면을 해석영역으로 선택하였다. 유한요소 모델은 총 9444의 요소와 8864개의 노드로 구성하였다. 경계조건은 그림에서와 같이 자연대류 조건으로 하였다.

Table 1 Conditions for Nd-YAG laser welding

Power ( W )	Speed (m/min)	Absorptivity ( % )	Beam Diameter (mm)	Keyhole Depth(mm)
750	1	19.5	0.6	0.8125
720	1	19.5	0.6	0.75
670	1	19.5	0.6	0.6875

Table 2에서와 같이 계산은 10단계로 나누었으며 1, 3, 5, 7 단계는 선택된 계산영역으로 레이저빔이 지나가는 단계이며, 2, 4, 6, 8 단계는 해석 영역 이외의 부분을 용접할 때이다. 9단계는 가스용기로부터 지그를 제거하는 단계이며, 10단계는 가스용기를 자연 대류 상태 조건에서 구조물이 상온에 도달하도록 충분히 냉각시키는 단계이다. 용접 지그의 재료는 크롬-구리합금으로 온도 변화에 따른 재료의 물성치는 Metal

Handbook<sup>7)</sup>에서 참고하였다.

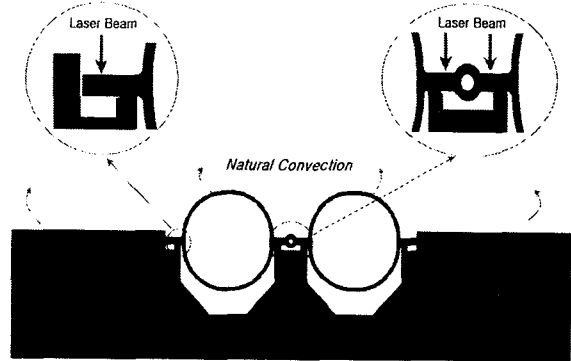


Fig. 3 2-D finite element model for gas pressure vessel

Table 2 Calculation step for laser welding

Step	Time(sec)	State
1	0.0565	Heat input
2	5.5539	Moving
3	0.0565	Heat input
4	6.9936	Moving
5	0.0565	Heat input
6	5.5539	Moving
7	0.0565	Heat input
8	10	Moving
9	0.00001	Jig Separation
10	3000	Cooling

Fig. 4는 실험을 위한 장치들로서 레이저 용접용 지그를 볼 수 있다.

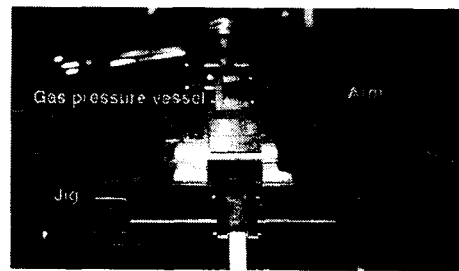


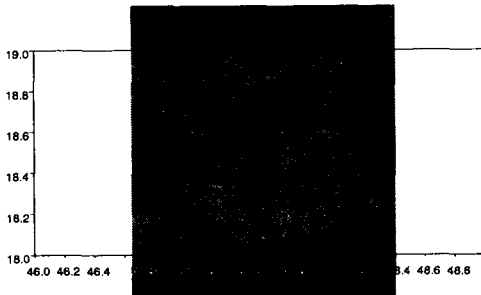
Fig. 4 Welding jig system

#### 3.2 해석결과 및 고찰

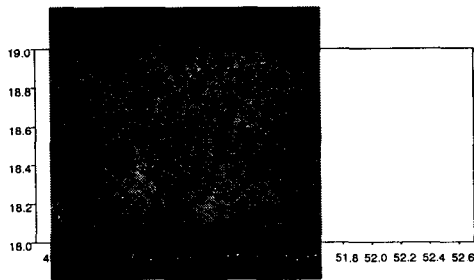
가스용기의 열유동 해석결과와 실험결과를 비교치를 Fig. 5에 나타내었다. 각 용접부의 위치는 그림에 맨 위에서부터 Fig. 3의 모델에 나타난 좌측-중앙좌측-중앙우측-우측의 순서이다.



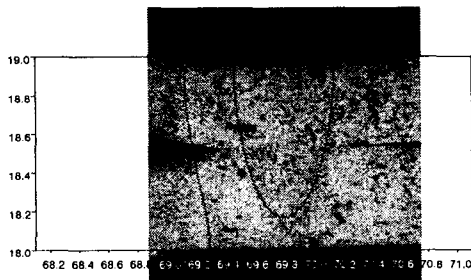
(a) Left weld



(b) Central left weld



(c) Central right weld



(d) Right weld

Fig. 13 Shape of weld with 720 W

그림에서 볼 수 있듯이 지그와 접촉한 부분에서는 열방출이 활발히 일어나 HAZ의 폭이 좁게 나타났다. 이것은 지그가 용접부의 과열을 막고 열영향부의 폭을 감소시킴으로써 강도의 변화를 감소시키는데 기여한다는 것을 알 수 있다. 결론적으로 가스용기의 레이

저 용접에 있어서 열유동 해석을 수행함으로써 용융부의 크기나 열영향부의 크기를 예측하였고, 실제 실험결과들과 비교하여 좋은 일치성을 얻을 수 있었다.

#### 4. 결론

소형 가스용기의 레이저 용접공정에 있어서 열유동 해석을 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수가 있었다.

1) 레이저 열원의 특징을 고려하여 2차원 열유동 해석을 위한 열원모델을 개발하였고, 이를 가스용기의 레이저 용접공정에 적용하여 실험결과와 근접한 결과를 얻을 수 있었다.

2) 가스용기의 용접에 있어서 지그에 의한 온도분포의 양상을 분석할 수 있었다.

3) 가스용기등 박판재의 레이저 용접공정에서 일어나는 열유동 현상들을 해석할 수 있는 해석모델을 구축하였다.

#### 참고 문헌

1. D.T. Swift-Hook and A.E.F. Gick : Penetration welding with lasers, *Welding Journal*, 52-11 (1973), pp492s-499s
2. J. Mazumder and W.M. Steen : Heat transfer model for CO<sub>2</sub> laser material processing, *J. Appl. Phys.* 51-2(1980), pp.941-947
3. R. Ducharme, K. Williams, P. Kapadia, J. Dowden, and W. M. Steen : An integrated mathematical model of the keyhole and weldpool in the laser welding of thin metal sheets, *ICALEO*, (1992), pp.177-186
4. R. Ducharme, K. Williams, P. Kapadia, J. Dowden, B. Steen, and M. Glowacki : The laser welding of thin metal sheets : an integrated keyhole and weldpool model with supporting experiments, *J. Phys. D; Appl. Phys.*, 27(1994), pp.1619-1627
5. J. Mazumder : Transient and residual thermal strain-stress analysis of GMA weld, *J. of Engineering Materials and Technology*, 113(1991), pp.336-343
6. ABAQUS 5.7 User's Manual. Hibbit Karlsson & Sorensen, Inc. (1997)
7. Metal Handbook, Tenth Edition, ASM international