

# 원형 커버의 펄스 레이저 용접 후 부품 잔류변형 개선에 관한 유한요소해석

김관우\* · 조해용\*<sup>†</sup>

\*충북대학교 공과대학 기계공학부

## Finite Element Analysis on the Improvement of Residual Deformation of the Part After Pulse Laser Welding of Circular Cover

Kwan-Woo Kim\* and Hae-Yong Cho\*<sup>†</sup>

\*Dept. of Mechanical Engineering, Chungbuk National University, Cheongju 362-763, Korea

<sup>†</sup>Corresponding author : [hycho@cbungbuk.ac.kr](mailto:hycho@cbungbuk.ac.kr)

(Received December 7, 2015 ; Accepted December 17, 2015)

### Abstract

Molten zone shape of pulse laser welding is affected by welding conditions such as beam power, beam speed, irradiation time, pulse frequency, etc. and is divided into conduction type and keyhole type. It is necessary to design heat source model for irradiation of laser beam in the pulse laser welding. Shape variables and the maximum energy density value of the heat source model are different depending on the molten zone shape. In this paper, pulse laser welding simulation for joining of cylindrical part and circular cover was carried out. The heat source model for pulse laser beam with circular path was applied to the heat input boundary condition, radiative and conductive heat transfer were considered for the thermal boundary condition. For each phase, thermal and mechanical properties according to temperature were also applied to analysis. Analytical results were in good agreement with the molten zone size of specimen under the same welding conditions. So, the reliability of the welding simulation was verified. Finally, the improvements for reducing residual deformation after cover welding could be reviewed analytically.

Key Words : Pulse laser, Welding, Heat source, Analysis, Residual deformation

### 1. 서 론

펄스 레이저 용접은 레이저 빔을 펄스 형태로 조사시켜 소재를 접합시키는 방법으로서 보통의 CW(continuous welding)보다 좁고 깊은 용융접합이 가능하다. 따라서 CW보다 동일두께 소재용접 후 잔류 변형량을 더 줄일 수 있으므로 용접 후 잔류 응력과 변형에 민감한 작은 소재의 접합에 많이 적용되고 있다<sup>1-3)</sup>. 또한 용접 후 용융부 및 열 영향부에 잔류 응력이 발생되며 그 크기에 따라 발생하는 잔류 변형은 용접품의 치수 및 기하 공차의 허용범위를 만족해야 하므로 이것들

을 측정하는 실험적 연구가 진행되고 있다<sup>4-6)</sup>. 용접조건에 따른 용융부 형상, 잔류응력 및 잔류변형 등은 다름으로 그 적정 조건을 찾는 데는 많은 시행착오를 겪을 수 있고, 그에 따른 비용과 시간이 소비되게 된다. 이런 문제를 해결하기 위해 용접결과 예측에 대한 많은 해석적 연구도 진행되고 있지만 예측한 해석결과를 실험으로 검증하는 수준이 대부분이다<sup>7-10)</sup>.

본 연구에서는 얇은 원형 커버와 홀이 있는 원통형 부품의 펄스 레이저 용접 시뮬레이션을 하였고, 용접 후 잔류변형에 의한 부품 홀의 수축현상을 해석적으로 구현하였다. 또한, 수축량 감소를 위한 부품 형상개선 안들에 대해 용접 시뮬레이션을 하였고, 그 잔류변형 결

과들을 비교분석하여 적정 개선안을 제시하고자 하였다.

## 2. 펄스 레이저 용접 열응력 해석

원형 커버와 원통형 파트의 펄스 레이저 용접 후 잔류응력 및 변형 등을 예측, 비교분석 하기위해 상용 유한요소 프로그램인 SYSWELD를 이용하였다. 용접 후 소재 잔류변형을 정확히 예측하기 위해서는 레이저 빔 조사에 의한 소재 가열, 용융, 냉각 등에 대한 열 해석(열전달 및 상변화)이 우선적으로 수행되어야 하며, 열 팽창 및 열수축에 대한 기계적 해석(잔류응력, 잔류변형)이 연계된다.

### 2.1 열원 모델링을 통한 열적 경계조건

펄스 레이저 용접 후 용융부 형상은 Fig. 1과 같이 전도형과 키홀형으로 나누어지며 많은 용접조건(빔 파워, 이송속도, 조사반경, 입열시간, 펄스 주파수 등)의 영향을 받는다.

열원 모델은 열 해석에 있어서 입열 경계조건으로 적용되며 Fig. 2는 용접시편의 용융부 형상에 따른 적용 열원 모델을 나타낸 것이다. Fig. 2 (a)의 원형 커버와 원통형 부품의 용접시편 용융부 형상은 전도형으로 본 연구에서는 콘형 열원 모델이 적합함을 알 수 있다. Fig. 2 (b)는 키홀형 용융부에 적합한 열원 모델을 나타낸 것<sup>11)</sup>으로 용융부 형상에 따라 적용 열원 모델은 달라 질 수 있다<sup>12)</sup>. 열원 변수로는 최대 에너지밀도( $q_{w0}$ ), 표면 반경( $r_{wu}$ ), 깊이 반경( $r_{wb}$ ), 깊이( $z=x_{wb}-x_{wu}$ )가 있고 그 값에 따라 해석의 용융부 형상 및 크기 결과는 달라진다. Fig. 2 (a)의 동일조건 용접실험 시편의 용융부 크기(W, D)를 갖는 해석결과 비교를 통해 변수

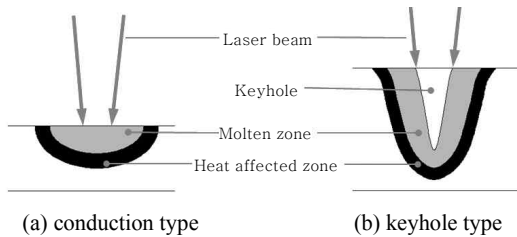


Fig. 1 Shape type of molten zone

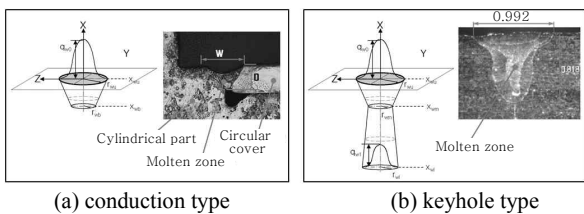


Fig. 2 Heat source model for molten zone shape

값들은 결정되었다. 열원 모델은 서브프로그램으로 작성되어 해석에 적용되며 펄스 주파수와 입열 시간이 고려된다. 열 해석의 냉각조건으로는 가열된 소재와 외부 공기 사이의 대류 및 입열부의 복사를 고려하였고, 외부공기 온도 20℃를 가정하여 서브프로그램을 작성하여 해석에 적용시켰다.

### 2.2 해석 모델

Fig. 3은 설계 개선전의 원형 커버와 원통형 부품의 해석 모델을 나타낸 것으로 축대칭 형상임을 고려해 전체의 1/4 모델을 해석에 적용하였고 요소 수는 16,359개, 노드 수는 14,520개이다. 원형 커버 크기는 직경 7 mm, 두께 0.2 mm이고, 원통형 부품은 외경 9 mm, 높이 6 mm, 홀 직경 4 mm이다.

Fig. 4는 커버 용접 후 원통형 부품 홀 상부의 수축 문제 개선을 위한 설계방안들의 해석 모델을 나타낸 것이다. Fig. 4 (a)는 원통형 부품 상부를 컷팅하고, 돌출부 두께를 0.2 mm로 줄이는 설계방안 1로서 커버의 용접 후 중심방향 수축 영향이 원통형 부품 상부 돌출부에 집중되게 함으로써 홀의 수축량을 줄이는 설계안이다. Fig. 4 (b)~(d)는 원통형 부품에 홈 가공을 하는 설계방안 2~4를 나타낸 것으로 부품 상부의 커버

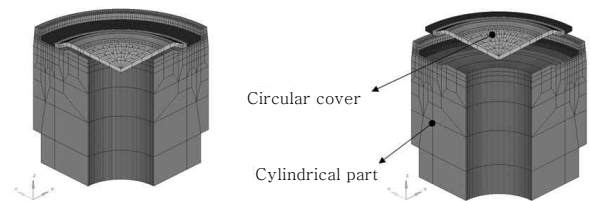


Fig. 3 Original analysis model

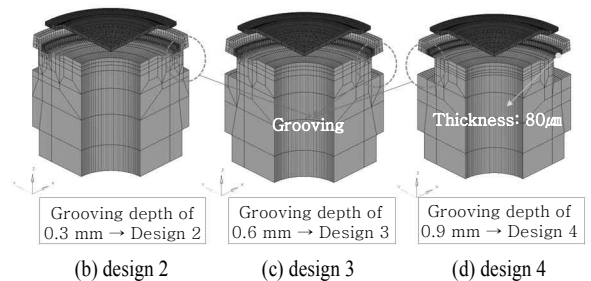
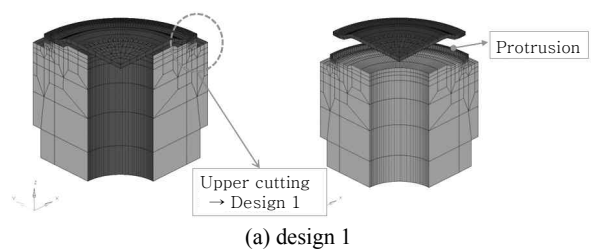


Fig. 4 Designs for improvement of residual deformation

안착 면부터 홈 가공 면까지의 두께는 0.08 mm이고, 홈 가공 깊이는 0.3, 0.6, 0.9 mm이며, 홈 가공 폭은 1 mm이다. 이 해석모델들은 용접 후 커버 수축에 의한 원통형 부품 변형을 홈 가공 윗부분에 국한시켜 부품 상부 변형을 줄이는 방안이다.

본 연구에서는 우선 Fig. 3의 모델과 동일한 실험 시편으로 펄스 레이저 용접을 하고, 용융부 단면 크기를 측정하였다. 그리고 동일조건 열해석 결과인 용융부 크기를 비교분석하면서 열원 모델의 최대 에너지밀도 값과 형상 변수 값들을 결정함으로써 열원 모델링을 완료하였다. 다음으로 이 열원 모델을 해석의 입열 경계조건으로 적용시키고, 설계방안 1~4의 해석 모델에 대해 용접 후 변형 양상과 크기를 예측, 비교하여 적정 설계방안을 검토하고자 하였다.

### 2.3 변위구속에 대한 기계적 경계조건

Fig. 5는 해석모델의 변위구속을 도식적으로 나타낸 것이다. 용접조건에 따른 용접 후 잔류 열변형 즉, 원통형 부품 홈 상부의 열 수축량을 비교분석하기 위해서는 적절한 변위구속의 기계적 경계조건이 적용되어야 한다. 1/4 모델이므로 잘린 단면에 대해 각각 X축, Y축 방향의 변위를 구속하였고, 용접 후 열 변형에 대한 커버 중심의 이동을 방지하기 위해 중심부 아래 노드는 X축, Y축 방향, 위 노드는 X축, Y축, Z축 방향의 변위를 구속시켰다.

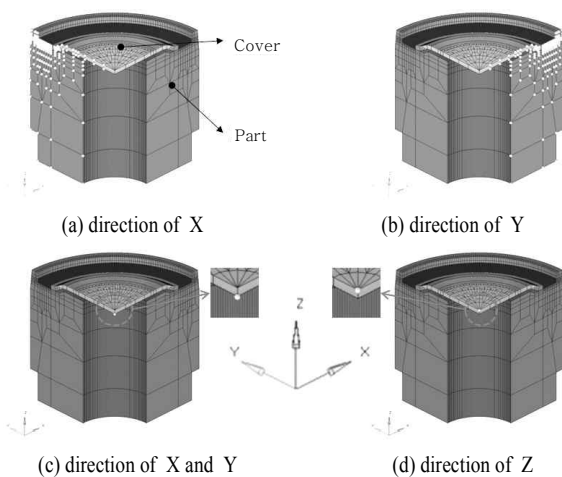


Fig. 5 Boundary condition for fixed displacement

### 2.4 재료물성

Table 1은 원형 커버와 원통형 부품의 화학조성을 나타낸 것으로, 커버는 AISI 304이고 부품은 AISI 420이다. 열처리나 용접과 같이 상 변태점 이상으로 소재를 가열하는 가공에 대한 열응력 해석에서 열적, 기계적 적용물성은 온도에 따른 데이터 이외에 상변태에 따른 각 상의 온도에 따른 데이터가 요구되며 SYSWELD의 내부물성은 이를 충족한다. 커버의 AISI 304는 오스테나이트 스테인리스 스틸로서 오스테나이트의 단일 상을 갖고, 부품의 AISI 420은 마르텐사이트 스테인리스 스틸로서 오스테나이트와 마르텐사이트의 두 개 상으로 조성되어 있다. 해석에 적용된 SYSWELD의 내부물성은 두 재료의 각 상에 대해서 온도에 따른 물성 데이터로 이루어져 있다. 따라서 용접 후 용융부와 열영향부의 상 조성비에 따른 열적, 기계적 성질이 해석에 적용되므로 보다 정확한 잔류변형 예측이 가능하다.

### 2.5 용접 실험 및 해석조건

Fig. 6은 펄스 레이저 용접 장비인 IPG QCW 150W이고, Table 2에 용접조건을 정리하여 나타내었다. 용접 실험은 Fig. 3의 형상 개선전의 커버와 부품을 사용하였고, Fig. 7은 용접 후 결과로서 Fig. 7 (a)는 용접된 원형 커버를 위에서 본 사진이고, Fig. 7 (b)는 용접단면 사진을 나타낸 것이다. Table 2의 용접조건에 대한 용융부 크기 측정결과는 Table 3에 정리하여 나타내었다.

Table 2에서 펄스 주파수 10 Hz조건 용접시편의 용융부 크기를 동일조건 해석결과와 비교분석하여 Fig. 2

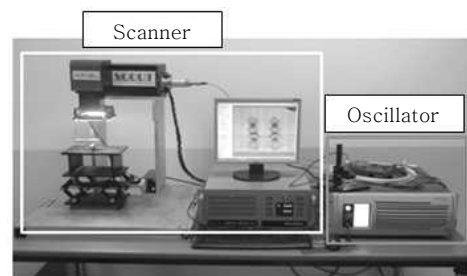


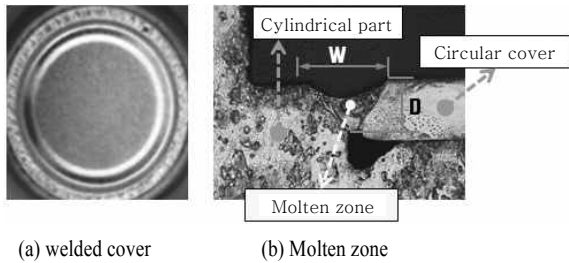
Fig. 6 Experimental equipment

Table 1 Chemical compositions

Part	Material	C	Cr	Mn	Ni	Si	S	P
Circular cover	AISI 304	0.07	17~19.5	2	8.0~10.5	1	0.03	0.045
Cylindrical part	AISI 420	0.16~0.25	12~14	1.5	-	1	0.03	0.04

**Table 2** Experimental conditions of pulse laser welding

Power (W)	Shot	Pulse frequency (Hz)	Welding time (sec)	Flash time (ms)	Beam speed (mm/s)	Remark
45	240	10	24	0.3	0.877	Heat source modeling
45	240	20	12	0.3	1.754	-



**Fig. 7** Experimental results

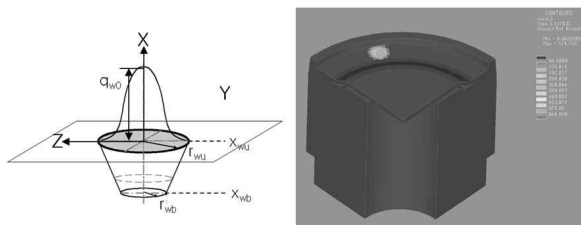
(a)의 전도형에 대한 열원 모델링을 하였다. 또한 펄스 주파수 20 Hz조건에 대한 용융부 크기비교를 통해 열 해석결과를 검증하였다. 검증된 열 해석의 열원 모델을 이용하여 Fig. 4의 4가지 설계방안을 해석적 방법을 통해 비교, 검토하고, 용접 후 원통형 부품 홀 수축을 최대 줄일 수 있는 방안을 제시하고자 하였다.

### 3. 해석결과 및 고찰

#### 3.1 열적 해석결과

열응력 해석은 열적 해석과 기계적 해석이 연계되며 열 해석의 온도 및 상변화 결과에 따른 재료물성 변화가 기계적 해석에 반영된다. Fig. 8은 원형 경로를 갖는 펄스 레이저 열원모델의 입열 조건에 대한 소재에 적용되는 에너지 밀도 분포 해석결과를 나타낸 것으로 입열은 주파수 주기 당 0.3 ms로 매우 짧게 이루어진다.

Fig. 9는 펄스 레이저 용접 열 해석 결과 중 온도분포와 용융부 범위를 나타낸 것이다. Fig. 9 (a)에서 용접 속도에 따른 열원의 이동으로 짧은 꼬리를 갖는 온도 분포를 볼 수 있고, 짧은 입열 시간 동안 용접부만

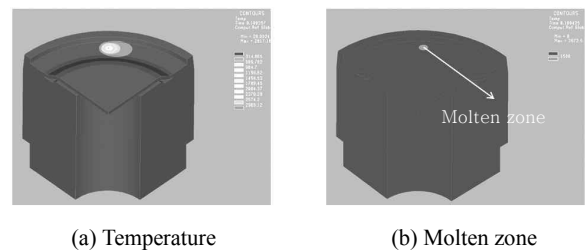


**Fig. 8** Energy density distribution for irradiation of pulse laser beam

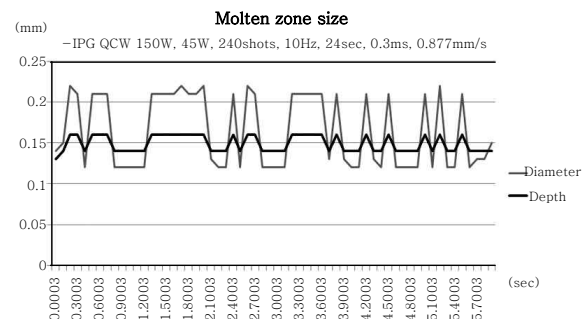
급격히 온도가 상승된다. Fig. 9 (b)는 1500 °C이상의 온도범위로서 용융부 범위를 나타낸 것이다. AISI 304의 용융점은 1440 °C, AISI 420은 1494 °C이다.

Fig. 10은 용접 시뮬레이션 중 용융부 크기 및 변화를 나타낸 것으로 용융부 표면 직경과 깊이 값은 평균 값으로 측정되었다. 용접 시뮬레이션 중 용융부 크기 변화는 각 펄스 주기 당 열원이 위치한 곳의 빔 조사 범위에 포함되는 요소들의 개수와 분포형태에 영향으로 생각되며, 표면용융부 직경에서 보다 크게 나타남을 알 수 있다. Table 3은 용접 실험과 열 해석의 용융부 크기 결과를 비교하여 나타낸 것으로 동일 조건에서 그 값들이 잘 일치됨을 볼 수 있다. 따라서 설계된 열원 모델이 적용된 해석의 신뢰성을 검증 할 수 있었다. 펄스 주파수 변화에 따른 실험치 변화는 없었지만 그 경향은 해석결과와 같다고 판단된다.

Fig. 11은 용접 후 상변화 결과를 나타낸 것이다. 용융부, 열영향부, 모재의 상 조성 비율이 다를 수 있고, 열 해석과 연계된 기계적 해석에서 조성된 각 상에 대한 온도에 따른 기계적 물성이 적용되어 잔류



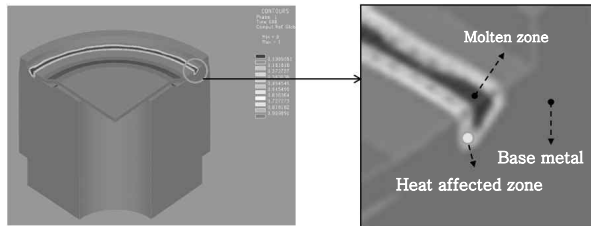
**Fig. 9** Results of thermal analysis



**Fig. 10** Molten zone size during pulse laser welding

**Table 3** Comparisons of experimental and analytical results for molten zone

Pulse frequency (Hz)	Experiment		Analysis		Remark
	Width(mm)	Depth(mm)	Width(mm)	Depth(mm)	
10	0.18	0.15	0.164	0.149	Heat source modeling
20	0.18	0.15	0.183	0.156	verification of analysis result

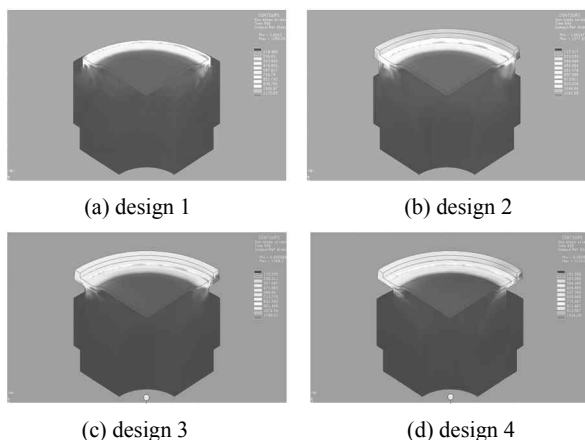


**Fig. 11** Analytical result of phase transformation

응력 및 변형이 계산된다.

3.2 기계적 해석결과

Fig. 12는 용접 후 10분 냉각 시점에서의 잔류응력 해석결과를 정리하여 나타낸 것이다. Fig. 12 (a)의 설계방안 1은 원통형 부품 상부를 컷팅한 것으로 잔류응력은 상부 돌출부에 집중됨을 볼 수 있다. Fig. 12 (b)~(d)는 설계방안 2~4로서 부품 상부 아래 부분에 홈 가공을 하는 것이다. 잔류응력은 설계방안 1에 비해 홈 가공 위 부분에 보다 넓게 분포한다. 따라서 용접 후 커버 수축에 의한 원통형 부품의 변형은 홈 가공 위에서 대부분 발생할 것으로 판단된다. Fig. 13은 원통형 부품의 잔류변형 측정위치를 도식적으로 나타낸 것이다. 홈의 아래, 중간, 위의 3부분에서 X축, Y축 변위( $\delta_x, \delta_y$ )를 측정하였고, 총 변위량( $\delta_{sum}$ )을 계산하여 개선안들에 대한 잔류변형 정도를 해석적으로 비교검토했다. 각각의 측정위치에서 용접 후 홈 변형은 중간에



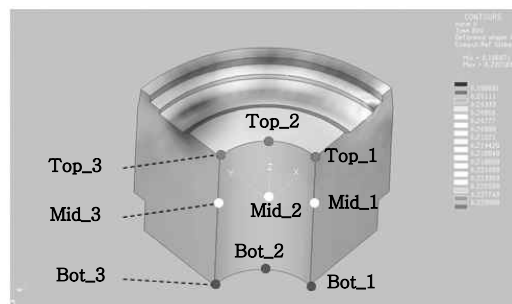
**Fig. 12** Analytical result of residual stress

서 위 부분까지는 수축, 중간에서 아래 부분까지는 확대되는 양상을 나타냈고 이는 동일조건 용접시편의 홀 측정결과와 잘 부합되었다.

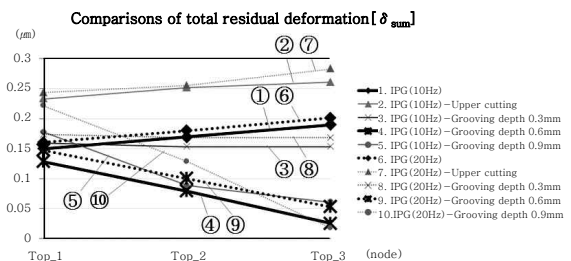
Fig. 14는 원통형 부품의 홀 상부 3노드(Top\_1, Top\_2, Top\_3)의 잔류 변형량을 비교한 그래프로서 Table 3의 2가지 용접조건 각각에 대해 Fig. 3, 4의 5가지 해석모델을 적용시킨 해석결과를 도시적으로 나타낸 것이고, Table 4는 펄스 주파수 10 Hz에 대한 잔류 변형량 결과를 정리하여 나타낸 것이다.

Fig. 14의 1과 6번 선도는 설계 변경 전의 해석모델을 적용시킨 결과로서 펄스 주파수 변화에 따른 변형량 차이는 약 10  $\mu\text{m}$ 로 크지 않고, 잔류 변형량은 대략 170~200  $\mu\text{m}$ 로 예측되었다.

Fig. 14의 2와 7번 선도는 원통형 부품 상부를 컷팅하는 설계방안 1에 대한 결과로서 펄스 주파수 변화에 따른 변형량 차이는 약 20  $\mu\text{m}$ , 잔류 변형량은 대략 250~280  $\mu\text{m}$ 로 예측되었다. 이는 설계 변경 전보다 약 80  $\mu\text{m}$  큰 값으로 Fig. 4 (a)의 해석모델에서 원통형 부품 상



**Fig. 13** Measuring positions of residual deformations



**Fig. 14** Comparisons of residual deformations on the upper position of the hole

**Table 4** Analytical results of residual deformations for pulse frequency 10 Hz

Measuring position	Original	Upper cutting	Grooving		
		Design 1	Depth 0.3 mm	Depth 0.6 mm	Depth 0.9 mm
			Design 2	Design 3	Design 4
$\delta_{sum}(\mu m)$					
Top_1	0.1494	0.2330	0.1589	<b>0.1277</b>	0.1774
Top_2	0.1693	0.2515	0.1533	<b>0.0791</b>	0.0882
Top_3	0.1900	0.2606	0.1532	<b>0.0252</b>	0.0610
Mid_1	0.0300	0.0230	0.0224	0.0296	0.0379
Mid_2	0.0336	0.0232	0.0174	0.0234	0.0356
Mid_3	0.0373	0.0254	0.0121	0.0178	0.0340
Bot_1	0.0598	0.0610	0.0280	0.0120	0.0113
Bot_2	0.0727	0.0743	0.0502	0.0339	0.0242
Bot_3	0.0839	0.0838	0.0636	0.0449	0.0302

부의 반경방향 두께 감소에 따른 강성저하가 원인으로 판단된다.

Fig. 14의 3와 8번 선도는 원통형 부품 상부 아래 부분을 폭 1 mm, 깊이 0.3 mm로 홈 가공하는 설계 방안 2에 대한 결과로서 펄스 주파수 변화에 따른 변형량 차이는 약 15  $\mu m$ , 잔류 변형량은 대략 150~170  $\mu m$ 로 예측되었다. 이는 설계 변경 전보다 약 30  $\mu m$  정도 작은 값으로써 홈 가공에 대한 설계방안이 효과가 있을 수 있다는 가능성을 볼 수 있다.

Fig. 14의 4와 9번 선도는 원통형 부품 상부 아래 부분을 폭 1 mm, 깊이 0.6 mm로 홈 가공하는 설계 방안 3에 대한 결과로서 펄스 주파수 변화에 따른 변형량 차이는 약 28  $\mu m$ , 잔류 변형량은 대략 100~140  $\mu m$ 로 예측되었다. 이는 설계 변경 전 잔류 변형량 170~200  $\mu m$ 보다 약 70  $\mu m$  작은 값으로 약 30~40 %의 변형량 감소 효과가 기대된다.

Fig. 14의 5와 10번 선도는 원통형 부품 상부 아래 부분을 폭 1 mm, 깊이 0.9 mm로 홈 가공하는 설계 방안 4에 대한 결과로서 펄스 주파수 변화에 따른 변형량 차이는 약 44  $\mu m$ , 잔류 변형량은 대략 130~220  $\mu m$ 로 예측되었다. 이는 설계 변경 전 잔류 변형량 170~200  $\mu m$ 임을 감안할 때 변형량 감소 효과는 거의 없다고 판단된다.

이상의 용접조건 변경과 부품 형상 설계 변경안 10 가지를 비교, 검토한 결과 용접 후 부품 홀 상부의 수축 변형량을 감소시킬 수 있는 방안으로 Fig. 14의 4번 선도 조건이 그 중 가장 적절할 것이다. 또한 모든 해석조건에서 펄스 주파수를 높이면 잔류 변형량이 증

가함을 볼 수 있다. Table 2의 용접조건을 보면 펄스 주파수가 2배 증가하면 빔 이송속도도 2배 높아지는 관계로서 용접시간도 1/2로 줄어든다. 즉, 펄스 당 빔 조사 영역의 중첩율은 같게 하면서 용접속도를 높이면 잔류 변형량도 같이 커지는 결과로서 잔류변형 측면에서 용접속도를 낮추는 것이 유리함을 알 수 있었다.

#### 4. 결 론

상용 유한요소해석 프로그램인 SYSWELD를 이용하여 AISI 304의 얇은 원형 커버와 AISI 420의 원통형 부품의 펄스 레이저 용접 시뮬레이션을 하였고, 잔류변형 개선을 위한 용접실험과 열응력 해석을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 원형 경로를 갖는 펄스 레이저 용접 열원을 모델링 하였고, 용접 시편의 용융부 비교를 통해 전도형 열원 모델의 최대 에너지밀도 값 및 형상 변수 값들을 결정할 수 있었으며, 이를 적용한 다른 용접 조건의 해석과 실험의 용융부 크기는 잘 일치됨으로써, 개발된 이동형 열원을 적용한 열 해석의 신뢰성을 검증할 수 있었다.
- 2) 홀이 있는 원통형 부품 상단에 원형 커버를 용접할 때 홀 상단부는 수축되고 하단부는 확장되는 잔류변형 해석결과의 양상은 동일 조건 실험결과와 잘 부합되었고, 열응력 해석을 통한 잔류 응력 및 변형의 정성적 비교평가가 충분히 가능함을 확인할 수 있었다. 따라서 다양한 소재와 가공패턴 등이 다른 용접에도 이와 같은 해석적 연구는 변형문제의 원인분석과 해결에 많은 도움을 줄 수 있을 것이다.
- 3) 용접 후 원통형 부품 홀의 수축문제 개선을 위해

부품 상단부의 커팅과 홈 가공에 대한 4가지 설계방안을 도출하였고, 열응력 해석을 이용한 정성적 비교평가를 통해 빔 파워 45 W, 펄스 주파수 10 Hz, 펄스 당 빔 조사시간 0.3ms의 용접조건과 원통형 부품 상단부에 폭 1 mm, 깊이 0.6 mm의 홈 가공하는 것을 잔류 변형을 줄일 수 있는 적정 방안으로 제시할 수 있었다.

4) 펄스 레이저 용접에 있어서 펄스 당 빔 조사영역의 중첩율과 빔 파워 조건을 고정하면, 펄스 주파수와 빔 이송속도는 비례관계가 성립되며, 본 연구에서는 용접속도를 올리면 잔류 변형량이 증가함을 해석적 검토를 통해 알 수 있었다. 따라서 원형 커버의 펄스 레이저 용접 후 원통형 부품 홀 상부의 수축량을 줄이기 위해서는 펄스 주파수와 빔 이송속도를 낮추는 용접조건이 보다 유리할 것이다.

## 후 기

본 연구는 산업원천기술개발사업 “Eco/Bio 산업의 기능성 부품 생산용 차세대 융복합 가공시스템 개발, No. 10039982” 과제의 지원으로 수행되었으며 관계자 여러분께 감사드립니다.

## References

1. J.O. Kim, J.H. Lee, J. Suh, S.W. Lee, Welding characteristics of Metal bellows using a pulsed Nd:YAG laser, *Journal of KSLP*, 15-1 (2012), 10-14
2. J.D. Kim, B.L. Kil, C.J. Lee, The Weldability of Laminated Stator Core for Motor by Pulsed Nd:YAG Laser [1], *Journal of KSME*, 30-5 (2006), 629-635
3. Y.C. Liao, M.H. Yu, Effects of laser beam energy and incident angle on the pulse laser welding of stainless steel thin sheet, *Journal of Materials Processing Technology*, 190-1 (2007), 102-108
4. T.J. Li, G.Q. Li, Y.B. Wang, Residual stress tests of welded Q690 high-strength steel box- and H- sections, *Journal of Constructional Steel Research*, 115 (2015), 283-289
5. Z.W. Liu, D.Q. Zou, W.Z. Chen, W.N. Wang, Y. Fang, Residual Deformation Measurement of Laser Weldment Using the Laser Interferometry, *Journal of Key Engineering Materials*, 326-1 (2006) 63-66
6. V. Hennion, J.M. Sprauel, H. Michaud, Residual Stress Evaluation by X-ray Diffractometry Application to Materials Surfaces with High Stress Gradients, *International conference on residual stresses*, 5-2 (1997), 670-675
7. C.K. Lee, W.R. Lee, Analysis of Stress Distribution in the Laser Welding Process, *Journal of KOSUR*, 1-1 (2013), 6-12
8. D.H. Bae, C. H. Kim, S.Y. Cho, J.K. Hong, C.L. Tsai, Numerical Analysis of Welding Residual Stress Using Heat Source Models for the Multi-Pass Weldment, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 16-9 (2002), 1054-1064
9. H.S. Bang, H.S. Bang, Numerical analysis on the residual stress and fracture toughness of the heavy thick steel welded joints by welding process, *Journal of KWJS*, 33-2 (2015), 32-39
10. S.Y. Hwang, J.H. Lee, S.C. Kim, K.K. Viswanathan, Numerical Simulation of Welding Residual Stress Distribution on T-joint Fillet Structure, *Journal of Ocean System Engineering*, 2-2 (2012), 82-91
11. K.W. Kim, G.J. Nam, J.H. Lee, J. Suh, H.Y. Cho, Finite element analysis for prediction of bead shape of Nd:YAG laser butt welding, *Journal of KOSME*, 32-1 (2008), 137-146
12. K.W. Kim, J.H. Lee, J. Suh, H.Y. Cho, Finite element analysis for prediction of bead shape of Nd:YAG laser fillet welding, *Journal of KSME*, 21-1 (2007), 839-846