

# 광신호 증폭기 EDFA LD 펌프 패키징 레이저 용접부 변형 해석

강대현\*, 손광재\*, 양영수\*\*

## Analysis of Laser Weldment Distortion in the EDFA LD Pump Packaging

Dae-Hyun Kang\*, Kwang-Jae Son\*, and Young-Soo Yang\*\*

### ABSTRACT

This paper presents a study on heat transfer and residual distortion analysis of laser welded EDFA(Erbium Doped Fiber Amplifier) LD(Laser Diode) Pump using the finite element method. In the production process of LD Pump in light-wave communication system, ferrule and saddle are welded by Nd-YAG laser. These parts experience thermal and mechanical effect during heating and cooling cycle with the laser welding. Thus distortion happens in the laser-welded packaging, and it makes an error in detecting the light signal translated through optical fiber in LD Pump. The amount of final displacement produced by the laser welding is predicted using the finite element method. And the optimal shape of saddle is proposed with the results of numerical analyses to minimize the displacement.

**Key Words** : EDFA(Erbium Doped Fiber Amplifier), LD(Laser Diode), Laser Welding(레이저 용접)

### 1. 서론

최근 각종 전자, 통신 부품의 소형화 및 집적화에 따라 미세 정밀용접이 여러 부문에서 필요로 하고있다. 미소 전자부품 접합의 경우 지금까지는 납땀이나 브레이징 등이 주로 이용되었으나 전기 전자 기술의 발달로 인한 부품의 소형화와 그 이용범위의 확대로 인해 가혹한 환경 하에서 내구성이 보장 되어야 하는 필요성이 요구되고 있다. 따라서, 충분한 접합강도를 가지며, 입열량의 직접적인 제어가 가능한 레이저 용접의 응용이 각광 받고 있다. 레이저 열원은 고밀도의 에너지를 집중시켜 국부적인 가열에 의해 용접이 이루어지므로, 열 영향부 및 열변형을 최소화할 수 있다.<sup>[1,2]</sup> 지금까지의 용접에 대한 연구는 크게 잔류응력과 변형

에 초점이 맞추어져 있었으며, 이 중 많은 연구가 부품의 강도설계 피로파괴의 영향등, 학문적인 중요도에 의해 잔류응력에 집중되어 왔다<sup>[3,4,5]</sup>. 그러나, 미소 전자부품의 경우 기존의 구조물과는 달리 용접에 의한 변형이 생산단계에서 많은 문제를 야기하는 한 요인이 되고 있는 실정이다.

본 연구는 Fig.1 에 보인 바와 같은 광통신 부품 중에 하나인 광 신호 증폭기의 핵심 부품인 LD 펌프의 패키징 공정에 대한 해석을 수행하였다. 광 신호 증폭기중 LD 펌프는 광섬유로부터 전달되는 도중 약화된 광 신호를 전송도중 증폭하는 장치이다. 연구는 전 공정에서 패키징 내에 부착된 LD 와 본 공정에서 공급되는 광섬유를 미세 정렬하고 접합하는 미소부품의 용접변형을 유한요소해석을 위한 모델링 작업을 수행하여 열 탄소성

\* 전남대학교 대학원 기계공학과

\*\* 전남대학교 기계공학과

문제를 시간에 따라 변화하는 비정상상태의 문제로 해석하는 것을 주로 하였다. 레이저 용접의 장점으로 거론되는 적은 열변형도 미세 부품의 정밀도에 문제가 되므로 용접변형을 최소화하는 부품의 형상을 결정하기 위하여 해석을 실시하였다. 해석에는 상용 코드인 ABAQUS 를 사용하였으며, 허용오차내의 변형을 가지는 부품의 형상을 도출하였다.

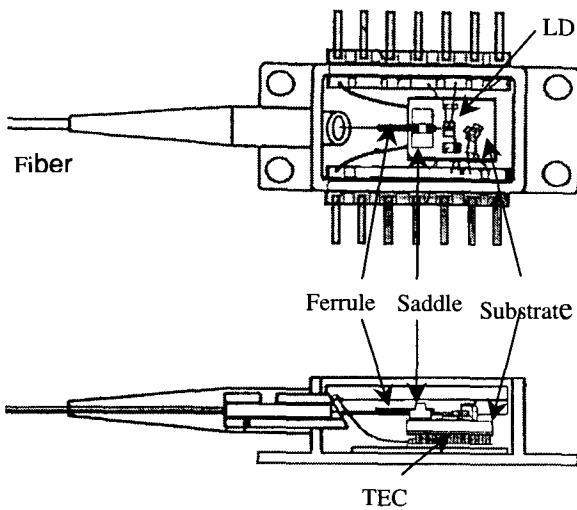


Fig. 1 Schematics of EDFA LD Pump

## 2. 유한요소 모델링

레이저 용접공정은 재료를 부분적으로 가열하여 접합하고, 냉각하는 공정이다. 이 때, 공작물의 국부적인 가열은 불 균일한 온도분포를 형성하며, 각 위치에서 열팽창량이 다르게 되므로 내부에 열 응력을 유발한다. 이렇게 발생된 열 응력이 증가하여 항복점에 도달하고 공작물은 소성변형이 일어나며, 냉각 후 재료 내부에 잔류응력과 변형이 남게 된다<sup>[6]</sup>.

생산현장에서 용접변형에 대한 대응은 현장 경험을 바탕으로 감각적으로 이루어지고 있는 실정이다. 이것은 새로운 구조물이나 용접구조물의 크기 및 형상 변경 시 이에 적응하기 위해서는 수차례의 반복 작업과 시행착오를 필요로 한다. 만약 용접변형에 관한 정성적, 정량적 데이터가 확보된다면 새로운 제품에 대해 쉽게 적용할 수 있

다. 용접변형과 관련된 여러 경우의 실험데이터의 확보는 사실상 불가능하므로 컴퓨터 해석 (computer simulation)을 통하여 위의 문제를 해결할 수 있다.<sup>[7]</sup>

본 연구에서, 유한요소해석은 주어진 기하학적 형상에 근거하여 유한요소를 생성하였으며, 열 유동 해석과 열 응력 및 변형해석을 상용 유한 요소 해석 프로그램인 ABAQUS 를 이용하여 수행하였다. 해석된 결과를 바탕으로 새로운 모델을 제안하고 제안된 모델을 다시 앞의 단계를 거쳐 해석한 후 비교하여, 다시 수정 모델을 제안하고 해석하는 과정을 거쳐서 이루어진다.

### 2.1 용접공정

LD 펌프 패키징 공정은 Fig.1 에 보인 saddle 과 ferrule 의 레이저 용접이 공정의 마지막 부분에서 이루어진다. 이 접합공정에 의해 saddle 과 ferrule 에는 잔류 열변형이 발생하여 LD(Laser Diode)를 통해 증폭된 광신호가 광섬유로 모두 입사되지 못하는 현상이 발생하게 된다. 광신호가 LD 에 정확히 입사되는지의, 여부는 측정된 광신호의 강도에 의해 결정되며, 이를 이용해 레이저용접으로 인한 ferrule 의 미소변위를 측정하게 된다. 따라서 saddle 과 ferrule 의 용접은 LD 펌프의 패키지 공정에서 독립적으로 이루어질 수가 없고 다른 부품들이 모두 패키징된 후에야 가능하게 된다.

레이저용접 시 사용된 레이저는 multi-mode Nd-YAG 레이저이다. 빔의 입사방향은 saddle 이 아치 형태를 가지고 있고 패키지 내에 부착된 후에 용접이 이루어지므로 수평방향의 입사가 곤란하므로 수직방향으로 입사가 이루어져야 한다. 그리고 수직방향의 입사 시에도 saddle 의 크기가 레이저발생장치의 헤드부에 비해 매우 작기 때문에 각 빔이 y 축으로부터 15° 기울여 입사된다. 레이저 용접작업은 Fig.2 에 나타난 바와 같이 saddle 뒤쪽 2 지점을 동시에 용접하고 saddle 앞쪽 2 지점을 동시에 용접하게 되어 총 네 지점에서 용접이 이루어진다.

### 2.2 온도분포해석

레이저 빔에 의한 열에너지가 모재로 전달 될 때 모든 열이 모재로 유입되는 것이 아니라 용접의 종류나 접합 대상 재료의 종류 등과 같은 여러 가지 변수들에 의해 손실이 있게 된다. 특히 레이

저 빔의 특성상 재료와 레이저 빔의 반사에 의한 열 손실도 고려해야 한다. 본 연구에서 사용한 재료는 스테인리스강(STS304L)으로, 온도 분포 해석 시 필요한 대상 재료의 물성치는 열전도도, 비열, 밀도, 잠열 등이 있고, 이러한 재료의 물성치들은 온도 의존적인 값들이다. 밀도는 온도에 따른 변화가 미미하므로 해석시의 입력 데이터에서는 모든 온도 구간에서 일정한 값으로 가정하였다. 그러나 열전도도, 비열, 열팽창계수 등은 온도에 따른 변화가 매우 크므로 각 온도구간을 나누어 입력하였다. 응력해석 시에 필요한 기계적 성질에 대한 물성치로는 탄성계수, 항복응력, 인장강도 등이 있는데, 모두가 온도 의존적이므로 재료의 온도 변화에 따른 물성치의 변화를 고려하였다.

레이저 용접 시 모재에 유입되는 열원의 분포 즉, 열원의 형상은 플럭스 형태로 재료 표면에 열이 유입된다고 가정하였으며, 그 분포양상은 Gaussian profile 을 사용하였다. 이를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$q(r) = \frac{3Q}{\pi(\bar{r})^2} \exp\left[-3\left(\frac{r}{\bar{r}}\right)^2\right] \quad (1)$$

여기서,  $q(r)$  =평판의  $r$  위치의 단위 시간당, 면적당 heat flux,  $r$  =레이저 빔 중심으로부터 거리,  $\bar{r}$  =총 열량의 95%가 유입되는 레이저 빔의 반경,  $Q$  =재료에 흡수되는 레이저 출력(레이저출력×효율),을 나타낸다.

해석에서는 실제 생산공정에서 정해진 재료 및 레이저 용접조건과 동일하게 STS 304 의 레이저 흡수율을 35%, 레이저 빔의 빔 허리반경  $\bar{r} = 80\mu\text{m}$ ,  $Q = 1.25 \times 0.35\text{ J}$ , 레이저 주사시간을 0.15 초로 하여 해석 하였다.

레이저 용접 중 레이저 주사는 매우 짧은 시간에 이루어지며 saddle 은 substrate 에 접합되어 있고, 이 substrate 의 아래쪽에는 TEC(Thermal Electric Cooler)가 있어 일정한 전류를 통하게 되면 25°C 를 유지하게 된다. 따라서 온도분포 해석에서 saddle 의 하단부를 일정온도라고 가정하였다. Saddle 하단부가 상온(25°C)으로 유지되므로 이 부분으로의 전도 열 전달량이 공기 중으로 전달되는 대류 열 전달의 양보다 매우 크기때문에 대기중으

로 빠져나가는 대류 열 전달의 영향은 무시하였다. 열변형 해석을 위해 용접부를 용접 1, 용접 2 로 나누어 해석 하였고, 용접 1 에 레이저 빔이 주사 되고 완전히 냉각된 후 용접 2 에 레이저 빔이 주사 된다. Ferrule 을 기준으로 y-z 평면에 대해 대칭이므로 x 방향은 단열조건으로 하였다.

### 2.3 열 응력 해석

열 전달 해석에 의해 온도분포 이력을 구한 후 이 데이터를 이용하여 열 응력을 시간 변화에 따라 피접합물이 상온으로 냉각 시까지 계산하여 잔류변형 값을 구하였다. 변형 해석시의 경계조건은 Fig.2 에 나타난 바와 같이 saddle 의 하단부가 substrate 에 고정되어 있으므로 saddle 하단부에 위치하는 node 들의 변위와 회전을 모든 방향에 대하여 구속하였고, ferrule 을 기준으로 y-z 평면에 대해 대칭이므로  $x=0$  에서 x 방향 변위를 구속하였다. ferrule 을 기준으로 대칭조건을 만족하므로 해석영역은 Fig.4 와 같이 대칭면을 기준으로 반쪽 부분으로 하였다.

최종 제품에 있어서 열변형의 주요 관심 사항은 ferrule 끝 단의 y 축 방향 변형량으로 허용 오차는 0.25 $\mu\text{m}$  이다.(Table.1) x, z 방향의 변형이 허용오차 이상 발생하여 문제가 발생할 수도 있으나, 형상의 기하학적 대칭성이 만족하며 용접공정도 대칭성을 가지기 때문에 이를 무시하였고, 실제 공정에서도 x,z 방향의 변형량은 미미하다.

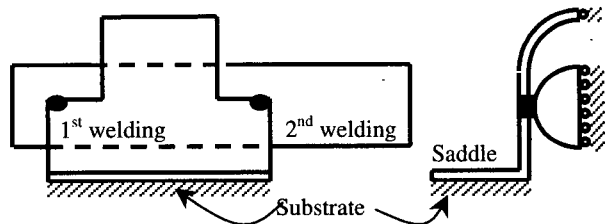


Fig. 2 Boundary Conditions of Deformation Analysis

### 3. 결과 및 고찰

모델링은 산업체에서 사용하고 있는 실제 부품의 형상과 용접조건을 그대로 유한 요소 생성과 해석에 이용하였다. 해석에 사용된 모델은 기존 제품에 대한 모델과 이를 개선한 모델, 그리고 최종 수정 모델의 3 가지로 나누어진다. 편의상 기존

모델을 Model-1, 개선된 모델을 Model-2, 최종 수정 모델을 Model-3 으로 표기하고, Fig.3 에 각 모델의 기하학적 형상을 나타내었다.

올로 확대해서 나타내면 Fig.7 과 같다. Ferrule 끝 단의 시간에 따른 y 방향의 변위는 Fig.8 과 같으며 최종 변형량은 10 $\mu$ m이다.

위 해석결과를 보면 ferrule 끝 단의 처짐이 허용변위오차 한계인 0.25  $\mu$ m 를 크게 벗어남을 알 수 있다. 이는 ferrule 을 지지하는 판 아래부분이 용접부의 소성변형량을 증가시키는 비교적 큰 구속을 형성하기 때문이다.

이상의 결과로부터 saddle 의 용접부 아래부분에서 급격한 열 전달이 이루어지는 과정에서 온도 변화로 인한 열변형이 주요 작용 인자임을 알 수 있다. 따라서 이를 해결하기 위한 새로운 모델의 제안이 필요하다. 즉, 레이저 용접부 아래쪽의 열 전달로 인한 열변형이 문제가 되므로 이를 해결하기 위해서 이 부분으로의 열 전달을 억제하거나 차단하여 열변형이 발생하는 것을 줄일 수 있는 모델을 제안해야 한다. 이런 관점에서 새로운 모델인 Model-2 를 제안하여 해석하였다.

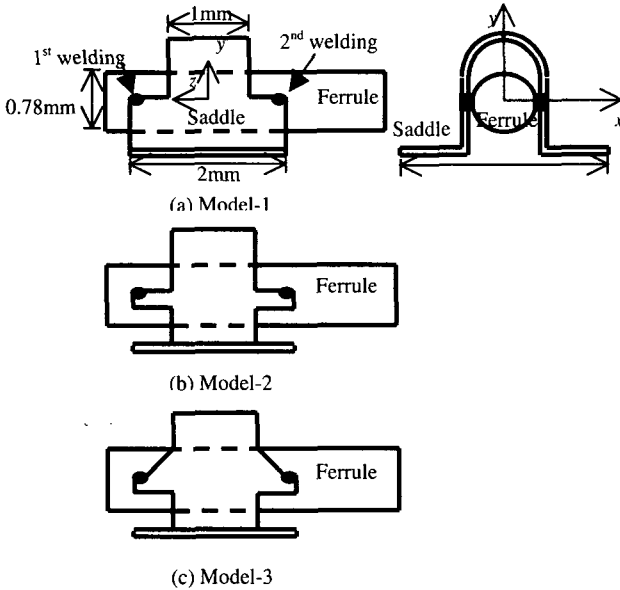


Fig. 3 Shapes of Saddle and Ferrule in each Model

**3.1 Model-1**

Model-1 은 Fig.3(a)에 나타낸 바와 같은 형상을 가지며 유한요소 분할은 3 차원 8node brick 요소를 사용하였고(Fig.4), Fig.3(a)에서 보인 용접부 1 에 레이저 빔이 주사되어 충분히 냉각된 후 같은 조건의 빔이 용접부 2 에 주사되는 두 공정을 갖는다고 생각하였다. 용접 1 에 레이저 빔이 주사된 직후의 온도분포 양상을 Fig.5 에 나타내었다. Fig.6 은 전 공정에 대해 용접 1 과 용접 2 지점의 온도 변화를 시간에 대해 나타내었다. 온도분포 해석의 결과는 일반적인 레이저 빔에 의한 가열의 특징인 아주 빠른 냉각 양상을 보인다.

온도분포 해석에서 구한 시간에 따른 온도의 변화를 이용하여 각각의 시간에 대하여 변형을 계산하였고, 관심의 대상이 되는 ferrule 끝 단의 최종 변형량을 구하였다. 변형을 계산할 때 필요한 재료의 기계적 물성치들은 온도 의존적인 거동을 보이므로 위에서 언급한 바와 같이 각각의 온도에서 다른 값들을 이용하였다. 용접공정이 완료되어 상온으로 냉각된 후의 전체 변형양상을 50 배의 배

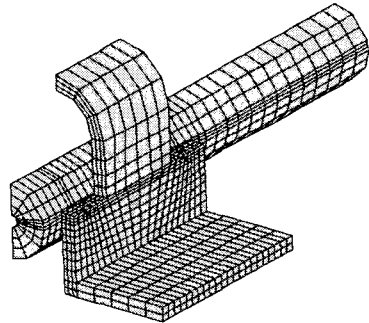


Fig. 4 Finite Element Mesh of Model-1

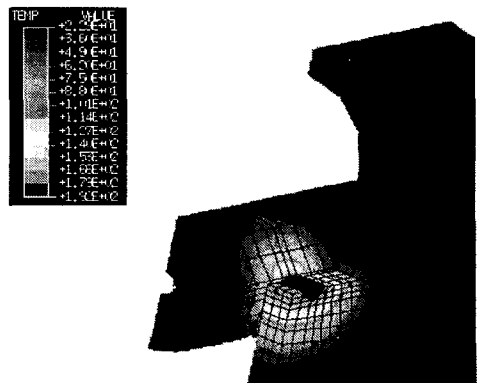


Fig. 5 Temperature Distribution at 1<sup>st</sup> Welding Procedure in Model-1

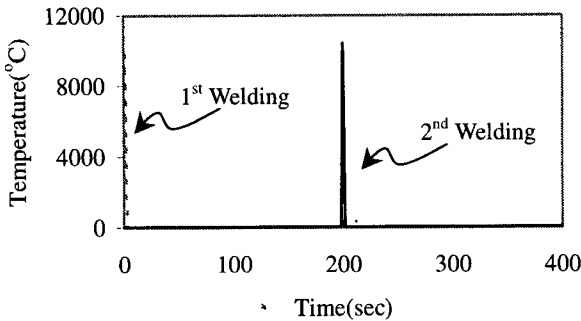


Fig. 6 Temperature Change of each Weldment in Model-1

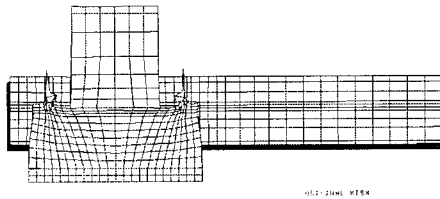


Fig. 7 Final Deformed Shape of Model-1(x50)

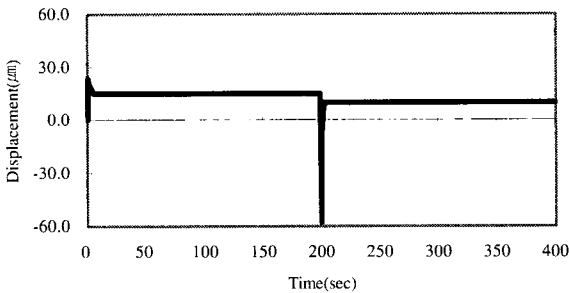


Fig. 8 Displacement Change of Ferrule Edge in Model-1

### 3.2 Model-2

y 방향의 변형은 x, z 방향의 온도 구배에 의해 발생하는 열 응력에 기인하므로 온도 구배를 감소하여 구속조건을 완화시키기 위하여 용접부의 y 방향 구속을 해제시키는 모델을 선택하였다. Model-2 의 형상은 Fig.3(b)와 같다. 해석 시 사용된 요소는 4 node tetrahedron(Fig.9) 이며 온도분포 및 열변형 해석 시 사용된 열 및 기계적 물성치와 열 및 기계적 구속조건은 기존 모델인 Model-1 과 동일하게 하였다.

용접부에 가해지는 레이저 빔에 의한 피 접

합물의 온도 분포를 시간에 대하여 계산하였다. 열원은 (1)식에서 주어지는 Gaussian distribution 을 갖는 flux 형태의 열원을 입력하였다. 레이저 흡수율, 유효반경, 입열량 및 주사시간 등은 기존 모델과 동일하고 공정 또한 기존모델과 같은 조건을 사용하였다. 용접 1 에 레이저 빔이 주사 된 직후의 온도분포 양상을 Fig.10 에 나타내었다.

온도분포 해석에서 구한 시간에 따른 온도의 변화를 이용하여 각각의 시간에 대하여 변형을 계산하였고 관심의 대상이 되는 ferrule 끝 단의 최종 변형량을 구하였다. 용접공정이 완료되어 상온으로 냉각된 후의 전체 변형양상을 100 배의 배율로 확대해서 나타내면 Fig.11 과 같으며 ferrule 끝 단의 처짐이 기존 모델에 비하여 비교적 작은 값으로  $-3.8 \mu\text{m}$  이다. 이는 saddle 의 일부분을 제거하여 소성변형량을 감소시키는 비교적 적은 구속을 형성하기 때문이다. Ferrule 끝 단의 시간에 따른 y 방향의 변위는 Fig.12 와 같다.

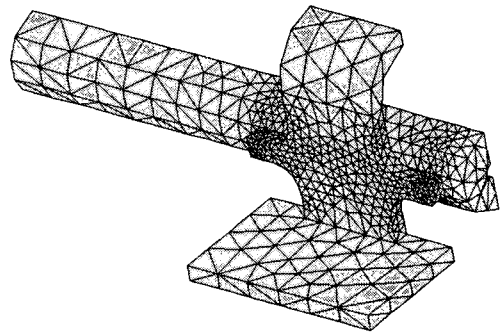


Fig. 9 Finite Element Mesh of Model-2

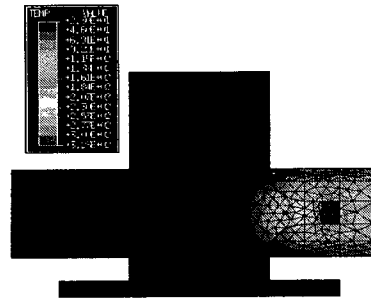


Fig. 10 Temperature Distribution at 1<sup>st</sup> Welding Procedure in Model-2

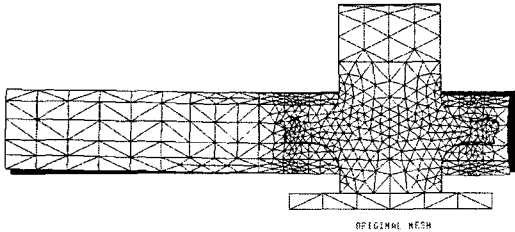


Fig. 11 Final Deformed Shape of Model-2(x100)

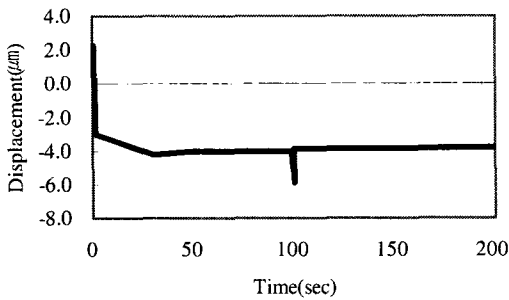


Fig. 12 Displacement Change of Ferrule Edge in Model-2

Model-2 의 열 전달 양상은 Model-1 의 경우와 같이 매우 빠른 시간에 이루어짐을 알 수 있다. 용접변형 양상의 경우는 Model-1 과 다르게 나타난다. 그리고 Model-1 보다는 변형의 크기가 줄어들었으나 이 경우 역시 허용변위오차보다는 큰 오차를 발생시킨다는 것을 알 수 있다. Model-1 은 용접부 주위가 모두 남아 있어 용접 시 z 방향으로 불 균일한 온도 구배에 의해 구속효과가 매우 크므로 y 방향 잔류 열변형의 주 원인이 되는 y 방향의 소성변형량이 크게 되어 잔류 열변형이 Model-2 보다 크게 발생하였다. 즉, Model-2 는 Fig.3(b)에 나타난 바와 같이 Model-1 에 비해 z 방향의 구속 조건을 감소시키고 y 방향의 소성변형량을 감소시키는 효과를 가져 Model-1 보다 상당량의 변형량 감소를 가져왔다. 그러나 이 Model-2 또한  $-3.8 \mu\text{m}$  의 변형이 잔류하게 되므로 허용 오차 범위  $0.25 \mu\text{m}$  를 초과하게 된다. 따라서 구속 조건을 더욱 감소시킬 수 있는 새로운 모델의 제안이 요구된다.

### 3.3 Model-3

Model-2 의 열변형이 형상변화를 가질 때 온도 구배의 감소가 열응력의 감소를 일으키고 y 방향의 구속조건을 제거함에 따라 잔류 열변형이 감소하는 경향에 착안하여 변형이 최소화되는 Model-3 을 제안하였다. 제안된 모델(Model-3)은 Fig.3(c)에 나타난 바와 같이, ferrule 지지부 상단의 형상을 변화시킴으로써 용접 시 발생하는 y 방향의 열 전달의 속도를 Model-2 에 비해 빠르게 함으로써 y 방향의 소성변형을 감소시켜 그 방향의 변형을 줄일 수 있었다. Model-3 의 유한요소해석 시 열 전달 및 변형해석 경계조건은 Model-1 과 동일하게 하였고, 4 node tetrahedron 요소를 사용하여 유한 요소생성을 하였다(Fig.13). 용접 1 에 레이저 빔이 주사된 직후의 온도분포 양상을 Fig.14 에 나타내었다. 용접 시 열 전달이 Model-2 지지부의 아래 부분 보다 위 부분으로 더 빨리 진행됨을 알 수 있다. 이 Model-3 또한 입열 후 냉각과정이 Model-1 과 같이 매우 빠른 시간동안 이루어지는 양상을 보인다. 온도분포 해석에서 구해진 시간에 따른 온도의 변화를 이용하여 각각의 시간에 대하여 변형을 계산하였고 관심의 대상이 되는 ferrule 끝단의 최종 변형량을 구하였다.

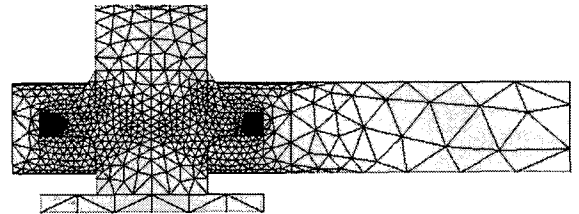


Fig. 13 Finite Element Mesh of Model-3

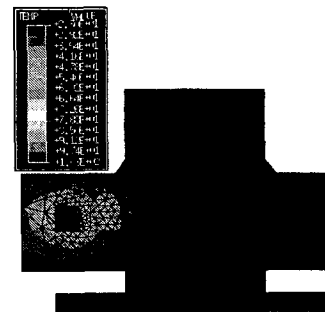


Fig. 14 Temperature Distribution at 1<sup>st</sup> Welding Procedure in Model-3

용접공정이 완료되어 상온으로 냉각된 후의 전체 변형양상을 100 배의 배율로 확대해서 나타내면 Fig.15 와 같고 ferrule 끝 단의 시간에 따른 y 방향의 변위는 Fig.16 과 같이 0.25  $\mu\text{m}$  이하로 오차범위 내에 존재함을 알 수 있다.

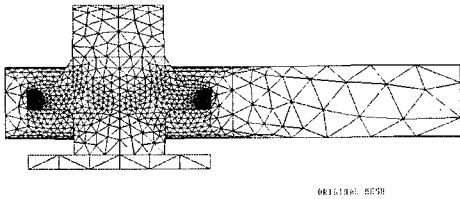


Fig. 15 Final Deformed Shape of Model-3( $\times 100$ )

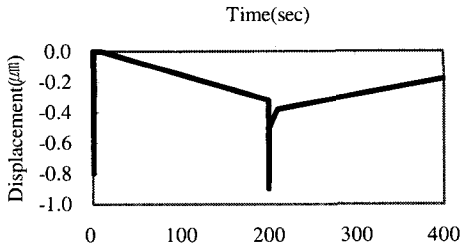


Fig. 16 Displacement Change of Ferrule Edge in Model-3

Table 1 Ferrule Edge Displacement of each Model and Allowance

Models	Displacement ( $\mu\text{m}$ )	Allowance ( $\mu\text{m}$ )
Model-1	10.00	$\pm 0.25$
Model-2	-3.80	
Model-3	-0.18	

#### 4. 결론

광 파이버 지지대의 레이저 용접 시 발생하는 용접 잔류변형에 대한 수치 해석적 연구를 통해서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 광 파이버 지지대의 형상 변화를 통한 열 전

달 및 기계적 구속조건의 변화가 잔류 열변형량의 형성에 큰 영향을 미침을 알 수 있었다.

2) Model-1 의 잔류 열변형은 지지대 아래 부분이 연결되어 있어 냉각 수축 시 기계적 구속을 강하게 하여 ferrule 의 변형량이 지지대 아래 부분이 제거된 Model-2 에 비해 크게 나타났다.

3) Model-3 의 최종 변형량의 계산 결과는 허용 오차 범위 내에 존재 한다. 이는 냉각 수축 시 지지부 하단의 기계적 구속을 제거하였을 뿐만 아니라 상단의 보강재가 아래부분보다 위 부분으로의 열 전달을 가속시켜 변형 방향의 열 응력을 감소시켰고 열 전달에 따른 수축을 저지하는 복합적인 역할을 수행하기 때문이다.

미소전자부품의 레이저 용접은 전자 및 전기 산업의 발달로 인해 그 수요가 지속적으로 증가하고 있는 추세이며, 상대적으로 그에 대한 연구가 미비한 실정이다. 이상의 결과로부터 미소부품의 레이저용접은 상대적으로 대형 구조물에 비하여 그 크기에 비하여 큰 입열량과 형상의 변화에 매우 민감한 변화를 보임을 알 수 있다. 또한 최종 공정단계에서 이루어지는 레이저 용접은 그 변형과 열 영향에 대한 측정이 타 구조물에 비해 곤란하다. 따라서 이런 난점의 해결을 위한 FE 해석은 공정변수 및 형상의 변화에 따른 열변형의 결과를 미리 예측하여 공정에 응용할 수 있다는 점에서 큰 의미를 갖는다.

#### 후기

본 연구는 삼성전자(주)의 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사 드립니다.

#### 참고문헌

1. S.-J. Na, Y.-S. Yang, "Heat Flow and Thermal Stress in Laser Surface Hardening Process," 3rd ASME/JSME Thermal Engineering Joint Conference, March 17-22, Reno, Nevada, U.S.A, pp. 339~344, 1991.
2. D. S. Alles, Trends in Laser Packaging, in proc. 40th ECTC, pp. 185~192, 1990.
3. P. Tekriwal, J. Mazumder, "Transient and Residual Thermal Strain-Stress Analysis of GMAW," J. of Eng. Mat. And Tech., Vol. 113, pp. 336~343, 1991.

4. Y. Shim, Z. Feng, S. Lee, D. Kim, J. Jaeger, C. Papritan and C. L. Tsai, "Determination of Residual Stresses in Thick-Section Weldment," *Welding Journal*, pp. 305~312, 1992.
5. J. Canas, R. Picon, F. Paris and J. C. Marin, "Experimental and Numerical Analysis of Residual Stresses in Welded Al-5083-O Aluminum Plate," *Welding International*, pp. 30~35, 1994.
6. Dieter Radaj, *Heat Effect of Welding-Temperature Field, Residual Stress, Distortion*, [Springer-Verlag, 1992]
7. Y.-S. Yang, S.-J. Na, "Residual Stresses in Laser Surface Hardening of Large Areas," *Surface and Coating Technology*, Vol. 42, pp. 165~174, 1990.