

## 초정밀 레이저용접을 이용한 티타늄 안경테 제조

황 용 화\* · 김 수 성\* · 이 형 권\* · 민 덕 기\* · 고 진 현\*\*

# Manufacturing Ti-Alloy Frames of Glasses with High-Precision Laser Beam Welding

Yong-Hwa Hwang\*, Soo-Sung Kim\*, Hyung-kwon Lee\*, Duck-Ki Min\*, and Jin-Hyun Koh\*\*

**요약** 본 연구에서는 상용 순수 티타늄 소재를 사용하여 안경테를 레이저 빔 용접으로 제조하기 위하여 광섬유로 전송되는 가변 펄스폭 80  $\mu$ s-10 ms, 최대 평균출력 200 W, 첨두출력 12 kW와 최대 펄스에너지 50J 성능의 초정밀 Nd:YAG 레이저 용접장치를 설계 제작하고 이 장치로 사용하여 안경테 제조를 위한 최적 용접조건을 선정하기 위한 실험을 수행하였다. 안경테를 위한 T이음 및 맞대기 이음형상을 용접할 때 평균출력, 광섬유 형태, 초점위치 등에서 용입상태와 용접결함을 조사하여 최적 용접조건을 선정하였고 안경테 부품 장식(temple hinge)과 다리, 톱바를 레이저 용접으로 시제품을 제작하였다.

**Abstract** An attempt was made to develop commercially pure titanium frames of glasses with a high-precision laser beam welding machine, in which a resonator with 12kW of the peak power and 200 W of maximum mean power has the capacity of variable in the range of 0.08~10 ms pulse width. In addition, the optical fiber beam transmission with 400  $\mu$ m of the core diameter and a weld chamber to contain specimens in the inert gas atmosphere were also designed and used. In the present study, titanium frames of glasses parts such as temple plus spring hinge, bridge and top bar were experimentally manufactured by utilizing the optimum welding parameters with the optical fiber of GI 400  $\mu$ m, 2.9J energy per pulse, and focussing position for Tcc and butt joints. The titanium welded joints with laser beam welding did not reveal any severe weld defects or weld bead appearance except some pores in the weld section.

**Key Words :** Titanium frame, Glasses, Spring hinge

### 1. 서 론

현재 국내 안경테 제조산업은 전형적인 수작업에 의존하며 자동화가 어려운 3-동집약적인 중소기업 산업특성을 가지고 있고 안경테는 우리나라의 주요 수출품목이다[1]. 안경제품은 대개 안경테, 렌즈와 기타 부품으로 구성되며 일반적으로 안경상품이라 함은 안경테 제품을 지칭하는 경우가 많다. 안경테는 소재에 따라 금속안경테와 합성수지 안경테로 구분된다. 합성수지 안경테는 플라스틱 사출 안경테가 많이 사용되고 있다. 한편 금속안경테로는 양백선(nickel-silver wire), 황동선(brass wire), 고니켈선(high nickel wire)과 티타늄 소재 등으로 제조되고 있다. 이것을 소비자의 기호에 따라 다양하게

금장 및 도장으로 표면처리 되고 있다. 지금까지는 일반적으로 저가품 안경테의 소재로는 황동선, 중고가품은 양백선을 소재로 하여 제조되어 왔으나 최근에는 경량화, 소재의 고급화, 패션화의 요구에 따라 밀도가 질계와 비교하여 훨씬 가볍고 내식성이 우수하여 스테인리스강이나 니켈합금의 안경테 부품을 대체하는 고부가가치의 고급품인 티타늄소재를 사용한 안경테의 생산이 증대되고 있는 추세이다[1]. 이것은 불과 얼마 전까지만 하여도 안경은 시력보존용 제품으로 여겨졌던 것이 최근에는 젊은 여성 소비자를 중심으로 안경을 벗내기 위한 패션 소품화하는 경향이 있다. 따라서 집단 디자인과 고급소재 등을 바탕으로 고부가가치의 제품을 만들기 위해서는 우수한 제조기술이 요구되고 있다.

안경테는 현재 솔더링, 브레이징 및 저항용접으로 제조되고 있으나 고급소재인 티타늄과 그 합금에서 작업

\*한국원자력연구소 \*\*한국기술교육대학교

본 논문은 1999년도 과기부 "Ti합금 안경테 제조용 초정밀레이저 용접기술 실용화" 과제로 개발하였으며, 그 핵심내용은 고부가가치를 지닌 티타늄 소재의 미세용접을 제안하였다. 이는 티타늄의 밀도가 일반적인 철계나 니켈의 반으로 상대적으로 가벼우면서 상온 인장강도가 높기 때문에 기존의 안경테 부품을 대체할 수 있는 기능성 소재에 대한 기초 자료로 활용될 수 있을 것이다. (Tel: 042-868-2494)

공정수를 줄이고 제조 후 외관을 미려하게 하기 위하여 초정밀 레이저를 사용할 필요가 있다. 레이저 용접은 집속된 레이저광을 열원으로 사용하여 재료를 국소적으로 가열·용융시켜 접합된다. 또 고밀도에너지에 의해 아주 작은 열원의 공급으로 용접부의 금속학적 및 기계적 특성에 영향을 미치는 열영향부와 열변형이 작은 것이 특성이다[2-4]. 또 레이저용접은 피용접물과 비접촉공정으로 3차원 용접, 고속용접과 용접자동화로 고도의 정밀 용접이 가능하여 생산성이 증대된다.

초정밀 용접에 적합한 Nd:YAG 레이저는 광섬유를 이용하므로 기존의 방법으로 불가능한 협소한 부위와 3차원으로 복잡한 형상의 용접도 가능하다. 또 실제 생산라인에서 펄스폭과 펄스모양을 자유로이 가변시킬 수 있어 용접이 까다로운 티타늄 등의 재질에도 적합하다[5,6]. 레이저 출력을 펄스당 에너지 mJ에서 수십 J까지의 조절이 가능하고 또 펄스 반복률과 펄스크기의 변화도 가능하므로 초정밀 재료가공 및 용접이 가능하다. 그리고 레이저용접은 국소적인 순간 가열이 가능하여 열에 예민한 소재나 특히 고용접의 티타늄 등의 용접에 응용할 수 있다.

본 연구에서는 티타늄 소재의 안경테 부품의 시제품 제작을 목적으로 초정밀 레이저 용접으로 제조 가능성을 조사하기 위해 티타늄 소재의 용접특성을 조사하였다. 이를 위해 안경테 제조에 적합하도록 설계 제작된 공진기를 가진 레이저 용접기를 사용하여 티타늄 소재의 안경테 시제품 제작에 적합한 용접조건을 선정하기 위해 용접부를 현미경으로 분석하였다.

## 2. 초정밀 레이저 장치

### 2.1. Nd:YAG 레이저

펄스형 Nd:YAG 레이저는 레이저 출력형태가 펄스형으로 접두출력이 세고 다양한 가공변수를 구현할 수 있고 원거리 전송이 가능하므로 작은 부품의 정밀용접에

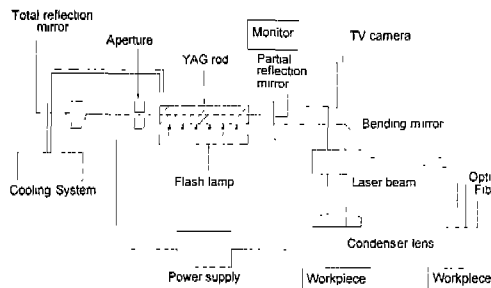


Figure 1. 초정밀 Nd:YAG 레이저의 개략도.

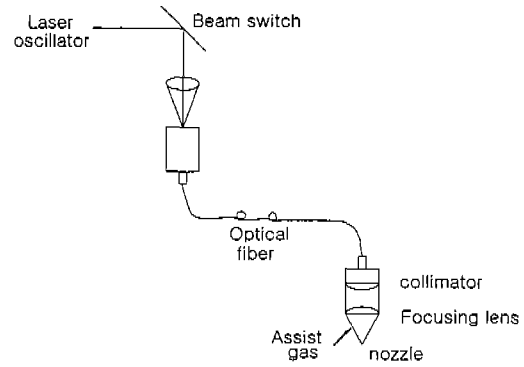


Figure 2. 광섬유 전송형 광학계의 구성도.

Table 1. 레이저 빔의 출력특성

발진파장: 1.064 $\mu\text{m}$	펄스 주파수: 단일(single)-100 Hz
펄스폭: 80 $\mu\text{s}$ -10 ms	최대 평균출력: 200 w
접두출력: 12 kW	최대 펄스에너지: 50J
출력안정도: $\pm 10\%$ 이내	광섬유 전송: 400-1000 $\mu\text{m}$ SI 또는 GI형

많이 사용되고 있다. Figure 1은 초정밀 Nd:YAG 레이저 발진부의 개략도로 레이저 공진기는 공진미러(전반사미러와 출력미러)와 개구(aperture), 레이저 봉(rod), 섬광램프(flash lamp)와 펄핑 반사체로 구성된다. 표적에서의 에너지 밀도를 높이기 위해 400  $\mu\text{m}$  굵기의 가는 GI(Grade Index)형과 SI(Step Index)형의 두 종류의 광섬유를 사용하였다. Figure 2는 광섬유 전송형 광학계의 구성도로 광속확대기, 열반사미러와 집광렌즈로 이루어진 레이저 전달장치 대신 광섬유를 이용하여 레이저를 전송한다.

다음 Table 1은 티타늄 안경테 제조를 위해 설계 제작된 레이저에서 발진되는 빔의 출력특성이다.

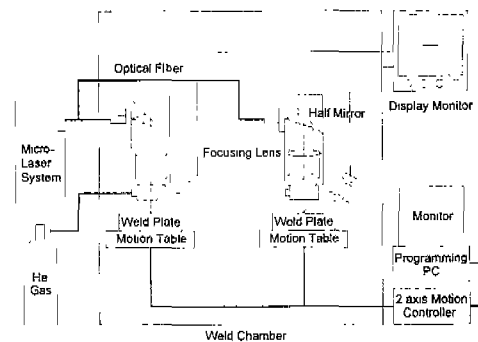


Figure 3. 용접챔버와 광섬유전송을 사용한 2축 구동형 안경테 레이저 용접장치 구성도.

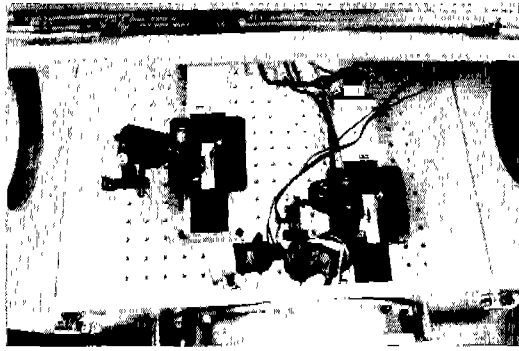


Figure 4. 2축 구동형 안경테 레이저 용접장치.

정밀(마이크로) 용접은 고기능성 안경테와 같이 용접폭이 1 mm 이하의 범위를 갖는 미세한 부분을 정밀하게 용접하여야 하기 때문에 오차를 최대한으로 줄여야 한다. 오차를 줄이기 위해서는 정밀한 기계장치의 조작과 함께 오차가 발생했을 때 오차를 확인하고 정밀하게 보정하기 위해 감시장치를 사용하였다.

Figure 3은 활성극속인 티타늄을 불활성 가스로 채워 용접챔버(weld chamber)에서 용접하기 위한 2축 구동형 안경테 레이저 레이저용접장치의 구성도이며 안경테 2개를 동시에 용접할 수 있다. 2대의 카메라를 통하여 레이저 용접부를 관측한다. Figure 4는 본 연구에서 설계 제작한 2축 구동형 안경테 레이저 용접장치이다.

## 2.2. 레이저 용접감시

정밀용접은 티타늄 안경테에서 요구되는 1 mm 이하 용접폭의 미세한 부분을 정밀하게 용접하여야 하기 때문에 오차를 최대한으로 줄여야 한다. 오차를 줄이기 위해 정밀한 기계장치의 조작과 함께 오차가 발생했을 때 오차를 확인하고 정밀하게 보정하기 위해 감시장치를 사용하였다. Figure 5는 흑백 CCD 카메라를 이용한 용접감시용 카메라장치 구성도이다. 카메라와 렌즈 사이에 삽입된 확장링은 렌즈와 카메라 CCD면 사이의 거리를 증가시켜 렌즈와 근접한 물체에 대해 초점을 맺는 기능이 있다. 렌즈에 장착된 필터세트는 산란되는 1.06 μm 파장의 Nd:YAG 레이저빔과 용접시 발생하여 관측을 방해하는 강한 가시광선을 여과하고 용접불꽃을 적절히 차단하며 플라즈마 가스 등의 이물질이 렌즈표면에 부착되지 않도록 렌즈를 보호하는 기능을 갖고 있다. 여기서 사용되는 UV필터는 자외선과 적외선 차단과 이물질 부착 방지기능을 담당하며, ND 필터는 강한 가시광선 영역을 일정 수준으로 차단하며 칼라필터는 관측에 방해되는 가시광선을 차단하는 역할을 수행한다. Figure 6은 본 연구에서 제작한 감시카메라 장치이다.

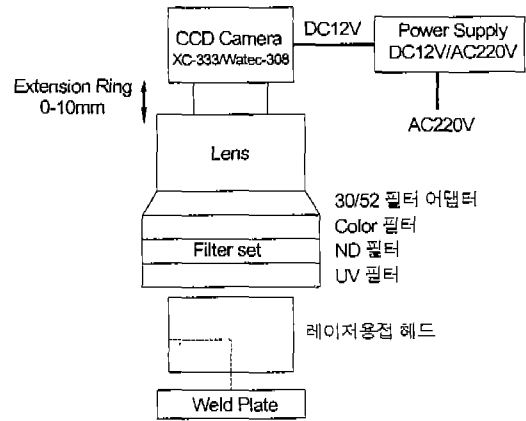


Figure 5. 용접감시용 카메라 장치 구성도.

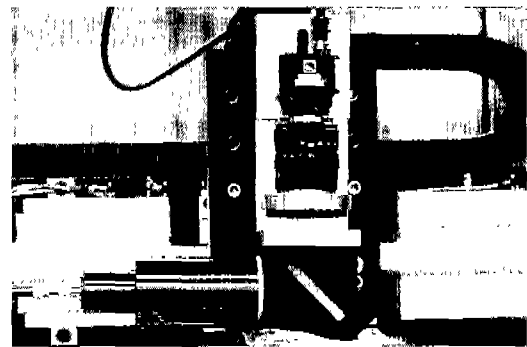


Figure 6. 용접감시용 카메라 장치.

## 2.3. 용접 제어장치

사고 형상이 복잡한 안경테를 용접하기 위해서는 정밀한 기계 및 제어장치가 필요하다. 용접부가 1 mm 이하이기 때문에 정밀제어가 되어야 요구되는 용접특성을 만족시킬 수 있다. 용접부의 자동이송을 위해 다축제어 및 단축제어장치를 사용하였다. 다축제어장치: x-y-z-r의 4축으로 구성되어 입체적인 용접위치 선정은 가능하지만 제어가 복잡하여 용접 파라미터 선정 등 예비실험에 사용되었고 본 용접실험에는 단축제어장치로 수행되었다.

## 3. 용접실험

### 3.1. 시험편 준비

본 실험에서는 안경테 부품의 소재로 상용순수 티타늄(Gr 5 pure titanium)을 사용하여 금속안경테 부품 중 Figure 7(a)와 같이 장식용 템플+스프링 힌시의 Tce(또는 fillet)형상과 Figure 7(b)와 같이 코다리(브리지), 립바

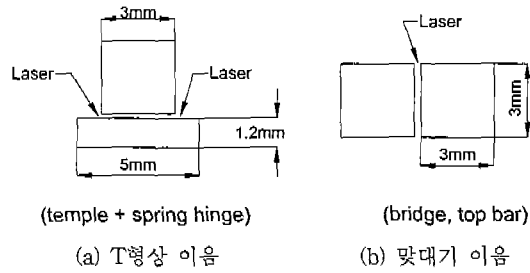


Figure 7. 티타늄 안경테 부품 용접을 위한 시험편 이음 형상.

Table 2. 티타늄 용접시험편의 이음형상 및 치수

시험편	이음형태	치 수 (두께×길이×폭, mm)
Temple+spring hinge	T(필릿)	1.2 × 35 × 5
Bridge, top bar	맞대기	3.0 × 18 × 3

(top bar)의 맞대기 이음(butt joint)형상을 레이저로 용접하기 위한 시험편을 준비하였으며 용접시험편의 규격은 Table 2와 같다.

3.2. 시험편 레이저 용접

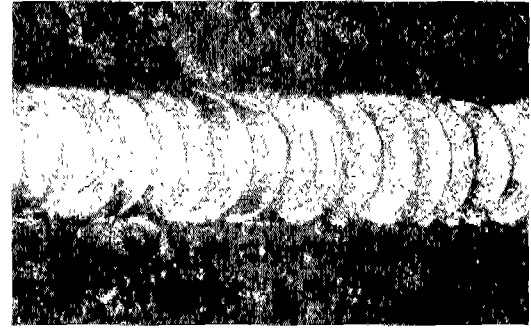
본 실험에서는 안경테의 코다리 구조와 장식 및 다리 형상을 정밀용접을 위해 시험편을 안경테 부품에 따라 제작된 고정구(지그)에 위치하였다. 레이저 용접에서 사용된 펄스당 에너지는 2.3, 2.6과 2.9J로 변화시켰다. 용접 중 집광렌즈의 흠 제거 및 시험편의 산화방지를 위해 순도 99.999% 이상의 고순도의 헬륨(He)을 보호가스(assist gas)로 사용하였고 유량은 40 l/min, 용접속도는 280 mm/min였다. 레이저 초점은 노즐에서 시험편 표면까지 6~7 mm 거리로 맞추고, 초점위치는 다이오드 레이저를 통하여 시험편에 초점을 맺게 한 다음 CCD 카메라의 모니터에 의해 초점이 가장 작을 때 용접을 수행하였다. 광섬유 400 μm의 SI(Step Index)와 GI(Grade Index)를 이용하여 비드 온 플레이트(bead on plate)용접도 하였다.

3.3. 용접부 현미경 관찰

티타늄 소재의 미세 용접된 시험편을 용접속에 대해 횡방향으로 절단하여 연마후 100 ml 증류수, 4 ml 질산과 2 ml 불산으로 구성된 Kroll 부식액을 사용하여 5~10초 범위에서 부식하였다. 부식된 용접시편을 입열 에너지에 따른 용접부의 건진상, 용집깊이와 용접부의 크기, 모재, 열영향부 및 용융부의 매크로 조직 및 마이크로 조직을 금속현미경으로 관찰하였다.



(a) SI type



(b) GI type

Figure 8. 광섬유 SI 및 GI형을 이용하여 용접된 비드 형태(×30).

4. 결과 및 고찰

400 μm 광섬유의 SI형과 GI형을 사용하여 비드 온플레이트(bead on plate)용접한 것으로 두 형태의 광섬유에서 비드폭은 모두 0.4 mm이었으나 광섬유에서 SI형 보다 GI형을 사용한 경우에 용접 중 흠(fume)과 스퍼터링(spattering) 현상이 약간 더 많이 발생하였다. 또 Figure 8은 광섬유 SI형과 GI형 모두에서 펄스 간격의 겹침(overlapping)의 비율이 70% 이상으로 양호하였지만 GI형 경우가 SI경우보다 플라즈마 형성에 의해 급속증기의 영향으로 용접비드가 더 거칠게 나타났다. 이와 같이 두 가지 형태의 광섬유에 의한 용접결과를 비교하면 SI형을 사용한 경우가 GI형을 사용한 경우 보다 흠과 스퍼터 발생이 작았고 용집비드 표면도 더 매끈하게 나타났으므로 안경테 제조에 더 적합한 것으로 여겨진다.

레이저 평균출력의 영향을 조사하기 위하여 400 μm 광섬유 SI형, 펄스폭 1.5 ms와 평균출력은 15 W에서 40 W로 증가하면서 안경테 코다리와 틀바를 용접하여 용입 깊이와 비드폭을 조사하였다. Figure 9는 평균출력 20 W로 장식의 T이음형상의 용집부로 용입은 0.4 mm였고 레이저 출력이 각각 15 W, 25 W에서 펄스형태를 70~

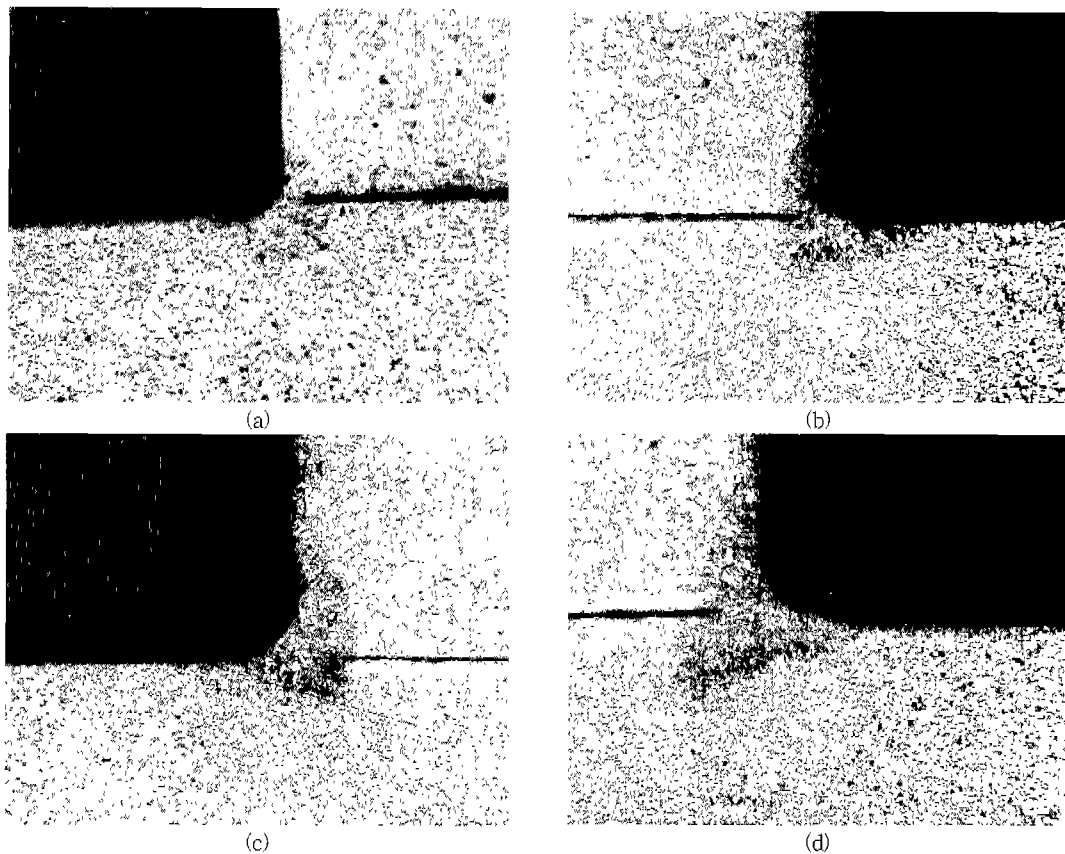


Figure 9. 레이저 빔 출력변화에 따른 T이음의 응접단면( $\times 30$ ) (a) 15 W, (b) 20 W, (c) 25 W, (d) 40 W.

80% 겹치게 하여 용접된 시험편으로 용입깊이는 평균 출력 15 W에서 0.3 mm로 양호하였다. 평균출력 25 W에서는 용입깊이가 0.5 mm이었고 비드표면은 매끈하였다. 이와 같이 평균출력이 15 W, 20 W, 25 W와 40 W로 증가됨에 따라 용입깊이는 0.3, 0.4, 0.5 mm로 증가되었고, 평균출력 25 W 이상에서는 비드폭은 0.5 mm 용접비드의 종횡비(aspect ratio, 용입깊이/폭)는 대체로 1정도였으며 평균출력 25 W 이상에서는 용입깊이에는 큰 차이가 없었다.

Figure 10과 11은 레이저 펄스당 에너지를 2.3, 2.6, 2.9J 범위에서 변화시켜 맞대기(butt) 이음과 T형상이음이 용접된 단면이다. 맞대기 이음에서는 펄스당 에너지 2.3, 2.6, 2.9J로 증가함에 따라 용입깊이는 0.1, 0.3, 0.5 mm로 증가하였다. 두 이음형상에서 구형 기공이 발생된 것을 제외하고는 균열이나 용입부족, 용합불량과 언더컷 등 용접부의 성능과 외부 미관에 영향을 미칠 결정적인 결함의 발생은 없었다. 이들 큰 구형기공이 용접표면으로 노출되어 존재하면 안경테의 강도에 영향을 미칠 뿐 아니라 외관에도 나쁜 영향을 미치므로 큰 기공의 발생을

최소화하는 신뢰성 있는 용접기술이 필요하다고 사료된다. 그리고 이 빔에너지 변화 즉 레이저 펄스당 에너지 변화에서 용입깊이에는 큰 차이가 없었다.

T이음형상에서 안경테 장식과 다리부분을 레이저빔 초점을 변화시켜 용접특성을 조사하기 위하여 장식 및 다리부분이 만나는 이음과 이 아래 다리 쪽으로 0.1 내지 0.2 mm 이동하여 초점을 맞추어 용접하였다. 장식부분과 다리부분이 만나는 중심에 초점을 맞추어 용접하였을 때 용접표면에 오목(concave)한 형상이 나타났다. 그러나 초점을 다리 쪽으로 이동하여 용접한 결과 오목한 형상이 줄어들었다.

앞에서 고찰한 광섬유 형태, 펄스 당 에너지와 초점 등을 고려하여 400  $\mu\text{m}$  광섬유 SI형과 레이저 펄스 당 에너지 2.9J, 초점을 이음이 만나는 점에서 다리부분으로 0.2 mm 이동하여 용접하는 것이 안경테 부품에 적합한 용접변수로 사료된다. Figure 12는 티타늄 장식 및 다리 연결부이고 Figure 13은 티타늄 고리 및 다리 연결부이며 Figure 14는 티타늄 림과 코다리 연결부로 이러한 조건을 이용하여 안경테 부품이 레이저 빔 용접된 예들

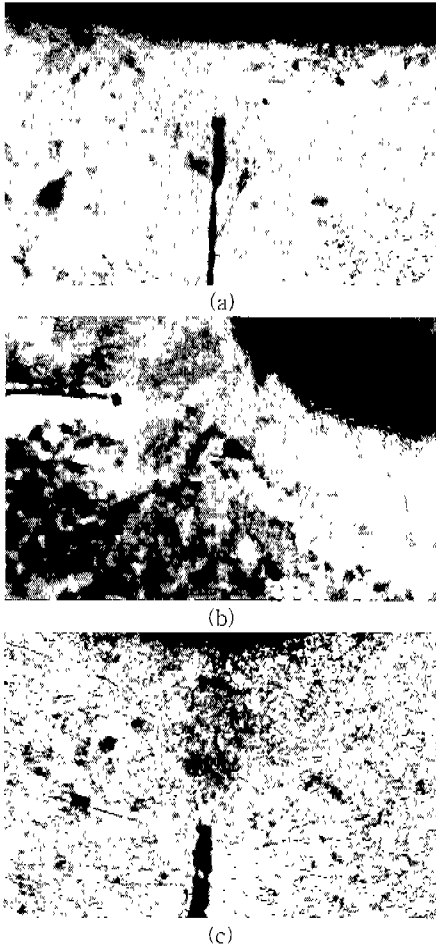


Figure 10. 에너지(J)별 맞대기 이음부의 용접단면 (a) 2.3, (b) 2.6, (c) 2.9 ( $\times 100$ ).

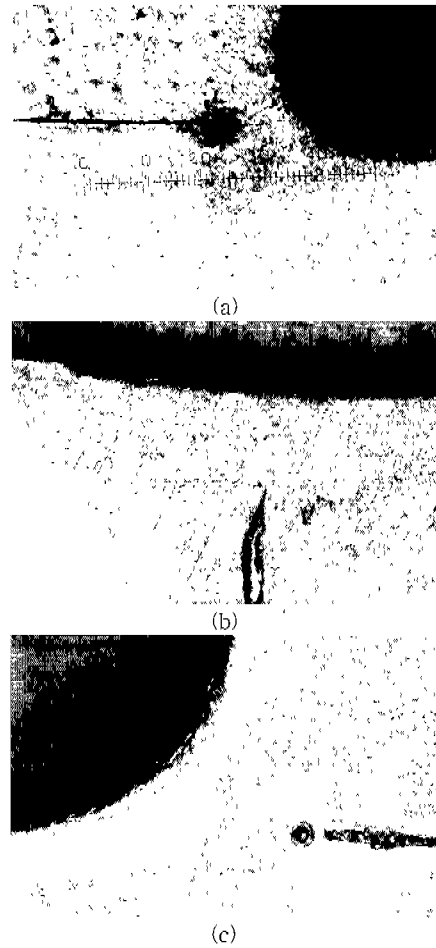


Figure 11. 에너지(J)별 T이음부의 용접단면 (a) 2.3, (b) 2.6, (c) 2.9 ( $\times 100$ ).

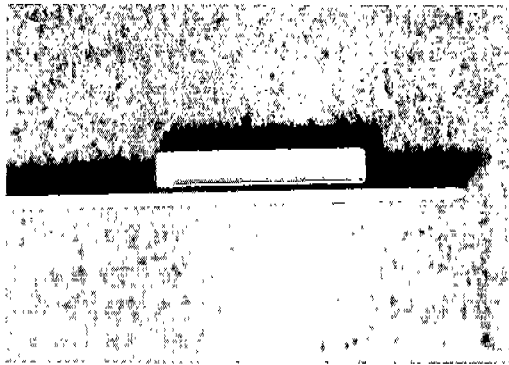


Figure 12. 티타늄 안경테의 장식 및 다리연결부의 레이저 용접된 모습( $\times 20$ ).



Figure 13. 티타늄 고리 및 다리연결부의 레이저 용접된 모습( $\times 20$ ).

이나, 이와 같이 조정된 레이저빔을 이용하여 티타늄 안경테의 용접이 가능함을 알 수 있으나 좀 더 신뢰할 수 있는 용접기술을 보완하여 상용화를 실현하면 현재 수

작업에 의존하고 있는 안경테 제조공정에서 공수를 많이 줄일 수 있을 것으로 사료된다.

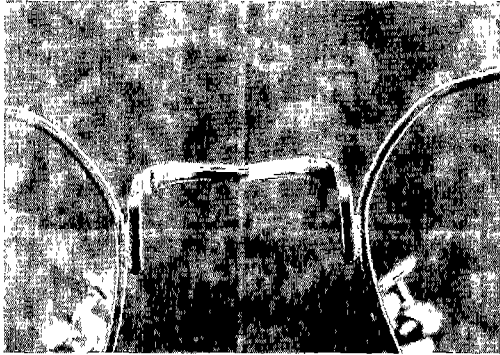


Figure 14. 티타늄림 및 코다리 연결부의 레이저 용접된 모습( $\times 20$ ).

## 5. 결 론

본 연구에서는 상용 순수 티타늄 안경테 제조를 위해 설계 제작된 초정밀 레이저 장치를 이용하여 안경테 부품의 시제품을 제조할 목적으로 용접인자선정을 위하여 수행된 용접결과는 다음과 같다.

(1) 본 연구에서 설계 제작된 레이저 장치로 최대 평균출력 200 W, 질주출력 12 kW, 최대 펄스 에너지 50J의 성능과 광섬유전송이 가능하고 펄스폭을 가변 할 수 있고 용접챔버가 있어 티타늄 같은 활성단속으로 부품을 작고 복잡한 형상 이음의 용접이 가능하였다.

(2) 광섬유 SI형과 CI형으로 용접된 결과를 비교하면 SI형에서 흠과 스패터 발생이 적었고 용접비드 표면도 더 매끈하였다.

(3) 안경테의 제조에서 T형상 이음에 적합한 용접변수는 펄스당 에너지 2.9J, 평균출력 25~30 W, 초진은 두

부품이 만나는 이음에서 0.1~0.2 mm 벗어나게 위치시켰을 때 용접결과가 양호하였다.

(4) 본 연구에서는 안경테의 장식과 다리 연결부, 고리와 다리연결부, 림과 코다리 연결부를 고정구를 사용하여 용접한 결과 외관상 양호하였을 뿐 아니라 용접단면 조사에서도 기공 발생을 제외하고는 용접구조물에 큰 영향을 미칠 용접균열의 발생은 없었다. 그러나 티타늄 안경테제조에 초정밀 레이저를 상용적으로 사용하기 위해서는 용접부 내에 큰 기공이 발생되고 있는데 이를 줄일 용접기술개발이 필요한 것으로 사료된다.

## 참 고 문 헌

- [1] 이희수, "대구지역 안경테 수출증대 방안", 경북대학교, 무역학과, 1993.
- [2] 고진현, "핵연료 봉단을 위한 원격용접기술개발", 한국원자력연구소, 연구보고서, KAERI/CM-218/97.
- [3] 김수성, "지르칼로이-4 핵연료 봉납마개밀봉을 위한 Nd:YAG 레이저용접 특성에 관한 연구", 충남대학교 대학원 박사학위논문, 1999.
- [4] 황용화, "Nd:YAG 레이저를 이용한 Zircaloy-4 판재의 맞대기 용접에 관한 연구", 한국기술교육대학교 대학원 석사학위논문, 2000.
- [5] P. E. Denney, "Laser Beam welding of Titanium", J. of AWS, pp. 342-346, 1989.
- [6] J. Mazumder, "Structure and Properties of Laser Welded Titanium Alloy", TMS-AIME Fall Meeting, No. F79-17, 1979.