

研究論文

## 광섬유전송에 의한 Zircaloy-4 봉단마개밀봉의 Nd:YAG LBW의 최적조건에 관한 연구

김수성\* · 김웅기\*\* · 양명승\*\* · 이영호\*\*\*

### A Study on the Optimum Conditions of Nd:YAG LBW for Zircaloy-4 End Cap Closure By Optical Fiber Transmission

S. S. Kim\*, W. K. Kim\*\*, M. S. Yang\*\* and Y. H. Lee\*\*\*

**Key Words** : Nd:YAG Laser Beam Welding (네오디뮴야그레이저용접), Optical Fiber (광섬유), Zircaloy-4 (지르칼로이-4), End Cap Closure Welding (봉단마개밀봉용접), Peak Power (첨두출력), Pulse Width (펄스폭), Pulse Frequency (반복율), Penetration depth (용입), Bead Width (비이드폭), Aspect Ratio (용입/비이드폭)

### Abstract

This study is to investigate the optimum conditions of Nd:YAG laser beam welding for Zircaloy-4 end cap closure by optical fiber transmission. Laser welding parameters which affect the penetration depth and bead width were experimentally examined using the various beam radius by the beam quality analyzer, joint geometries of end cap and the laser parameters which mean pulse width, repetition rate and pulse energy. Also, an optimum welding speed and the effect of assistant gas with varying the flow rate of He were investigated. We found that the laser average power for the end cap welding will be 230W and rotation speed must not exceed 8 RPM, the best position of focus using optical fiber with 600 $\mu$ m will be 2 to 3mm below the surface of the material.

※ 1997년 6월 24일 접수

\* 정회원, 한국원자력연구소

\*\* 비회원, 한국원자력연구소

\*\*\* 정회원, 충남대학교 기계공학과

## 1. 서 론

T. Maiman이 1960년도에 처음으로 루비레이저를 개발한 이후 레이저는 재료가공, 광계측, 광통신, 의료기기 등의 여러 분야에서 사용되고 있다. 그 중에서 고에너지광선의 특징을 가지고 있는 레이저를 이용한 재료가공(LMP: Laser Material Processing)은 산업계에서 뿐만아니라 원자력계에서 광범위한 응용분야로서 그 위치를 확고히 하고 있다. 레이저는 촛점에 집속시켜 생기는 강한 광선을 이용하여 높은 파워밀도, 뛰어난 제어성, 대기중에 전송할 수 있는 등 다른 가공방법으로는 얻을 수 없는 많은 특징을 가지고 있다. 이러한 특징을 이용하여 용접, 절단, 천공, 표면처리 등에서 크게 활용하고 있을 뿐만 아니라 최근에는 미세가공(micromachining)분야에서 정밀기계부품, 전자기기, 그리고 원자력분야의 핵연료부품에서 그 활용범위가 확산되어 가고 있는 실정이다.

레이저용접(LBW: Laser Beam Welding)은 일반적으로 CO<sub>2</sub>레이저와 Nd:YAG레이저가 사용되고 있으며, 현재 각각의 특성을 살려 산업현장에서 활용되고 있으며, 그중 파장이 1.06 $\mu$ m인 Nd:YAG 레이저는 광섬유(optical fiber)전송이 가능하므로 밀폐된 장소나 곡면부위의 용접이 가능하며, 특히 펄스폭과 반복율을 자유로이 제어할 수가 있으므로 반사도가 심하거나 용융점이 높은 재질에도 용접이 가능하다. Nd:YAG레이저는 CO<sub>2</sub>레이저에 비해 파장이 1/10정도로 짧고 펄스형이기 때문에 섬세하고 정밀한 제품에 요구되는 미소용접이나 절단에 매우 유리하다. 또한, 작업환경이 특수한 원자력시설에서는 방사선에 의한 접근이 어렵거나 작업이 문제되는 장소에서 광섬유의 전송기구를 이용하여 원격조작이 가능하므로 레이저의 장점을 최대한 발휘하여 사용하게 되면 널리 실용화되어 갈 것으로 기대된다.

현재 2 kW급 Nd:YAG레이저를 이용한 용접이 전자빔용접에 버금가는 방법으로 열변형이 적고 대기중에서도 깊은 용접을 얻을 수가 있는 장점을 가지고 있다. 이것은 광섬유를 이용하면 기존방법으로 불가능하거나 용접할 부위가 협소한 곳에 위치하고 있을 때 매우 우수한 능력을 가지고 있고 있으며, 특히 용접물의 형상이 복잡한 3차원용접

에도 가능하다. 근래에는 미국 Westinghouse 및 일본 MHI사의 원자력산업에서는 노후화된 증기발생기의 전열관내부에 대한 보수용접이 원격방법으로 광섬유전송기구가 사용되고 있는 것으로 보고되고 있다.<sup>1,2)</sup> 또한, 미국의 Rockwell 사에서는 차폐시설내부에서 사용후 핵연료의 절단작업에 Nd:YAG레이저를 활용하기 위한 연구도 이루어지고 있다.<sup>3)</sup>

본 연구는 250W급 펄스형 Nd:YAG레이저의 광섬유 전송기구를 이용하여 현재 증수로형 핵연료봉의 Zircaloy-4 봉단마개밀봉을 위한 레이저용접의 최적조건을 확립하기 위한 목적으로, 먼저 광섬유전송기구의 광학조건별 빔강도와 크기를 측정하였으며 적절한 봉단마개용접을 위해서 시험편의 기하학적 형상을 변화시켰을 때 용접결과에 미치는 영향을 알아보았다. 또한, 레이저번수를 변화시켰을 때 용접부의 비이드폭 및 용입과의 관계를 비교하였으며, 보호가스의 유량과 보호유리사용시 fume으로 인한 산화지르코늄의 영향에 따른 실험결과를 고찰하였다.

## 2. 시험편 및 실험방법

### 2.1 시험편

실험재료는 Fig. 1에서와 같이 증수로형 핵연료봉의 Zircaloy-4피복관과 봉단마개가 맞닿는 겹치기이음구조로 구성되어 있으며, 용접될 봉단마개의 끝단은 144°로 돌출되게 하였다. 봉단마개는 지름이 13.15mm로 700℃에서 2시간 annealing된 봉

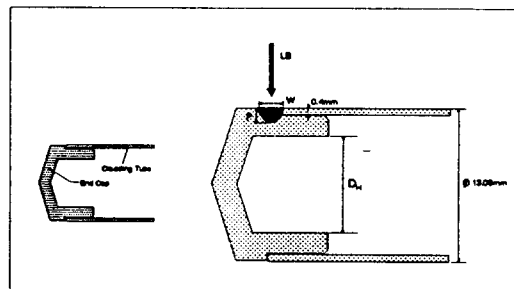


Fig. 1 Joint geometry and experimental specimen for end cap welding.

이며 피복관은 냉간가공후 520℃에서 2시간 정도 stress-relief annealing하였으며, 직경은 13.08mm, 두께 0.4mm 그리고 길이는 500mm 이다. 봉단마개의 기하학적 형상을 변화시키기 위해서 Fig. 1과 같이 봉단마개의 구멍깊이 6.5mm, 원추각도 120° 그리고  $D_H$ (Hole Diameter) 4에서 10mm의 1mm간격으로 가공된 시험편을 이용하였다. 그리고 시험편은 공기중에 표면산화 및 기계가공으로 인한 기름이나 이물질 등이 완전히 제거되기 위하여 Freon 113용액에 30분간 담구어 세척된 다음 건조기에 의해 60℃로 건조시켰다.

### 2.2 광섬유전송기구

Nd:YAG레이저캐비티에서 발전된 빔을 직접 보낼 경우 위치자유도가 떨어지고 가공물체의 좁은 공간에서 사용하기가 불편하므로 유연성이 좋은 가늘고 긴 광섬유를 사용하게 된다. 광섬유전송기구는 Fig. 2에서와 같이 광학입구커플러(optical input coupler), 광섬유(optical fiber), 그리고 광학출구커플러(optical output coupler)로 구성된다. 광학입구커플러는 입사렌즈에 의해 레이저가 광섬유 코어내부로 집속되는 부분이다. 광섬유는 순수 SiO<sub>2</sub>인 석영유리로서 굴절률이 큰 코어부분과 굴절률이 작은 피복부분으로 구성되어 있고, 코어직경은 600, 800, 1000 $\mu$ m이고 길이가 20m이다. 이것은 SI(Step Index) 멀티모드형이며 광섬유의 개구수(NA:Numerical Aperture)는 0.22 이다. 광학출구커플러는 앞의 광섬유에서 퍼져나온 레이저를 recollimation시켜 피용접물에 다시 집속시키는 부분이다. 이때 피용접물에서 조사된 레이저의 빔강도와 크기는 collimation lens ( $f_1$ )와 focusing lens ( $f_2$ )의 초점에 따라 달라지므로, 이러한 것은 레이저용접에서 용입특성에 크게 영향을 미친다.

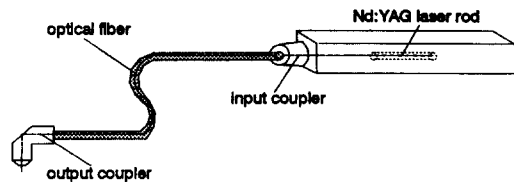


Fig. 2 Schematic illustration of optical fiber delivery system.

### 2.3 실험방법

Zircaloy-4 모의시험편을 이용한 용접실험에서는 자체 개발된 용접챔버가 사용되었으며, Fig. 3에서 나타난 바와 같이 용접챔버는 시험편을 회전시켜 주는 척, 용접위치를 정확하게 조절해 주는 미세조정부 그리고 봉단마개의 삽입부로 구성되어 있다. 챔버내에는 먼저 진공도가 10-1 Torr로 공기를 뽑은 후 챔버내부에 He를 0.2kg/cm<sup>2</sup>에서 연료봉내부까지 완전충진시킨 후 봉단마개를 삽입하고 밀봉용접을 하는 순서로 되어있다. 이때 레이저용접중에 보호가스는 He를 사용하였으며 He 압력이 0.2kg/cm<sup>2</sup>를 초과하면 float식 밸브가 열려지도록 설계되어 있다. 광섬유전송기구를 이용한 레이저용접실험에서는 먼저 광섬유를 통과한 빔의 강도 및 크기를 알아보기 위해서 beam quality analyzer를 이용하였다. Fig. 4에서와 같이 beam quality 분석을 위한 실험장치의 구성도를 보여주고 있다.

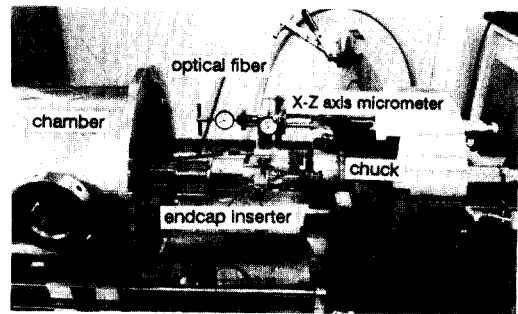


Fig. 3 Photography of welding chamber for end cap welding.

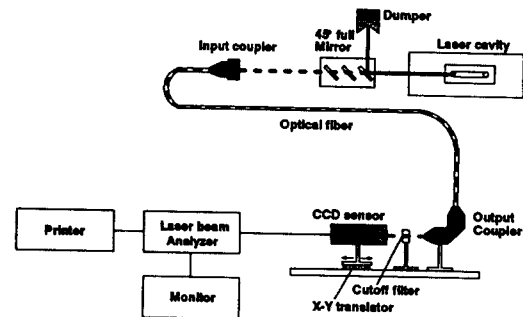
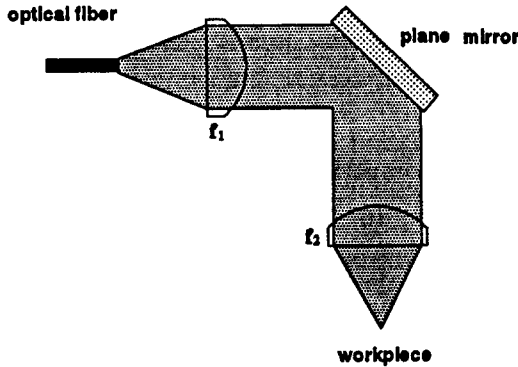


Fig. 4 Experimental set up for beam quality analyzer system.

Beam quality 측정은 Fig. 4에서 볼 수 있듯이 먼저 레이저가 발진되면 45° full mirror에 의해 98% 이상이 dumper로 보내지고 나머지 1% - 2%의 레이저가 광섬유로 전달되어 광학출구커플러에 도달되면 직접 적외선 CCD센서에 직접 당게하는 방법으로 하였다. Beam quality의 실험조건은 레이저변수인 충전전압 320V, 반복율 15pps, 펄스폭 5ms의 레이저출력이 230W이다. 그리고 빔크기는 전산수치해석이 가능한 knife edge 계산법에 의해 측정되었다. 광섬유의 빔정렬을 위해서 먼저 광학입구커플러에서 X-Y-Z축의 미세조정부를 이용해서 광섬유의 코어중심부에 정확하게 위치해 놓았다. 그리고 봉단 마개용접의 광학출구커플러를 위한 실험에서 Fig. 5와 같이 collimating lens ( $f_1$ )와 focusing lens ( $f_2$ )를 3가지 방법으로 변화시켰다.



	output coupler conditions		
	A	B	C
optical factor (a)	2.2	1.24	1.0
collimating lens ( $f_1$ )	20	35.5	44.1
focusing lens ( $f_2$ )	44.1	44.1	44.1

Fig. 5 Schematic of optical conditions for output coupler.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 광섬유에 의한 빔특성 조사

광섬유전송시 레이저용접에 필요한 주요변수중 하나가 레이저의 빔형태와 크기이며, 레이저의 빔

정렬 및 용접위치가 어떤 곳에 놓여 있는가에 따라 비이드폭과 용입에 영향을 미친다. 이것은 실제 용접실험에 있어서 레이저의 빔형상과 강도분포를 미리 예측하여 용접품질에 영향을 미치는 인자들에 대해 조사함으로써 최적조건 선정의 기반을 마련할 수 있었다. 일반적으로 광학계에서 레이저빔의 특성은 W를 레이저빔의 반경,  $\theta$ 를 발산각이라 할 때 빔품질의 보존법칙, 즉 Beam Quality=W ·  $\theta$ =constant가 성립된다.<sup>4)</sup> 광섬유전송에 있어서 레이저빔의 입사각도를 나타내는 개구수는 통상 0.2 내지 0.25정도이다. 광섬유를 통과하는 빔발산각은 거의 광섬유의 개구수와 같기 때문에, 레이저용접에 있어서 파워밀도를 높이는 데는 광학출구커플러를 사용할 수 있으며 또한 코어직경이 작은 광섬유를 이용하는 것이 필요하다. 광섬유전송의 고효율을 내기 위해서는 코어반경의 범위내에 집광각이 잘 정렬된 입사빔이 얻어지도록 빔크기와 강도를 미리 진단할 필요가 있다.

본 실험에서는 광섬유전송시 광학출구커플러가 사용되었으며, 조사된 빔이 만나는 부분의 빔형태를 측정하기 위하여 적외선 CCD센서가 사용되었다. 레이저빔의 특성실험은 Fig. 4에서와 같이 CCD장치에 부착된 X-Y translator를 이용하여 빔위치별로 정밀하게 이동하게 하였다. 레이저가 CCD센서의 접촉면에서 만나는 빔의 크기가 가장 작을 때 "0"으로 하고, defocus(-) 지점은 CCD센서의 접촉면에서 광학출구커플러와 가까운 방향으로 focusing되고, defocus(+) 지점은 CCD센서의 접촉면에서 광학출구커플러와 멀어지는 방향으로 focusing된 것이다. Fig. 6은 광섬유의 코어직경이 600 $\mu$ m으로 전송시 CCD센서에 의해 빔크기가 측정되었는데, 이때 초점위치에 따른 빔크기의 결과를 보여주고 있다. Fig. 6에서와 같이 "0"지점에 위치할 때 광학출구커플러의 C구조에서 빔크기가 700 $\mu$ m이하로 가장 작게 나타났으며, CCD센서위치가 초점위치 "0"지점부터 좌우로 벗어날수록 빔크기는 증가됨을 보여주고 있다. 이때 광학출구커플러의 A구조는 B, C구조에 비하여 빔의 위치에 따른 변화에서 빔이 대체로 크게 나타내고 있음을 알 수 있다. Fig. 7과 8은 코어직경이 800 및 1000 $\mu$ m인 광섬유를 통하여 전송될 때 초점위치에 따른 빔크기의 측정결과이다. 본 실험에서는 광학출구커플러의 B와 C구조에서 -3mm부터 +3mm지점에서의

빔크기가 비슷한 양상을 띄고 있었으나, A구조는 빔크기가 대체로 2mm이상으로 넓게 분포되어 있다. Fig. 6, 7 및 8에서 나타난 바와같이 광학출구 커플러의 A구조는 빔크기가 크게 나타났으며 반면에 C구조는 상대적으로 작게 나타났다. 이것은 A구조의 경우 빔크기가 커진 것은 같은 파워밀도에서 용입이 작아질 것이고, C구조는 A, B구조보다 용입이 큰 것으로 예측될 수 있다. 따라서 본 실험에서는 광학출구 커플러의 A, C구조에 비해 빔크기가 중간위치에 분포된 1.5mm 부근의 B구조를 선택하였으며, 이때 초점위치는 "0" 지점의 아래인 -2mm 내지 -3mm로 하였다.

Fig. 9는 광섬유의 600 $\mu$ m으로 전송시 초점위치에 따른 빔크기와 강도분포가 빔품질분석기의 모니터에 의해 관찰될 수 있었다. Fig. 9에서와 같이 초

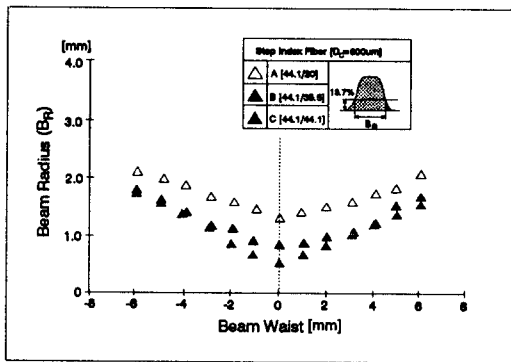


Fig. 6 Beam radius vs. beam waist using fiber 600 $\mu$ m.

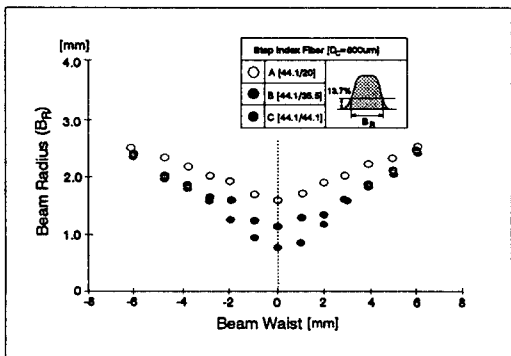


Fig. 7 Beam radius vs. beam waist using fiber 800 $\mu$ m.

점위치가 "0" 지점에서 빔크기가 작게 보여주며, 역시 빔의 강도분포가 높게 나타내고 있었다. 또한, 초점위치가 "-3" 지점에서의 강도분포가 균일하게 나타낸 반면에 "+3" 지점에서는 분포도의 상단에서 균일하지 않은 약간의 concave한 형태를 보이고 있다. 실제 레이저용접의 경우 일정한 용입이 유지되기 위해서는 무엇보다도 빔형태의 균일한 강도분포가 요구되기 때문에 빔변화로 인한 용접부의 특성차이는 큰 의미를 가진다고 할 수 있다.

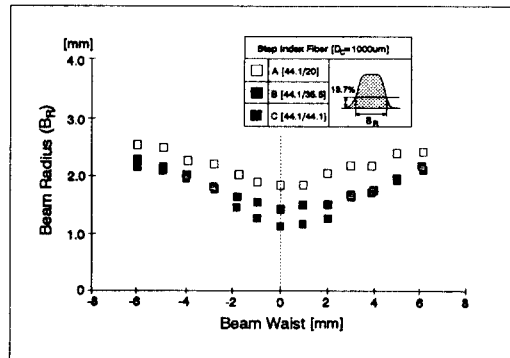


Fig. 8 Beam radius vs. beam waist using fiber 1000 $\mu$ m.

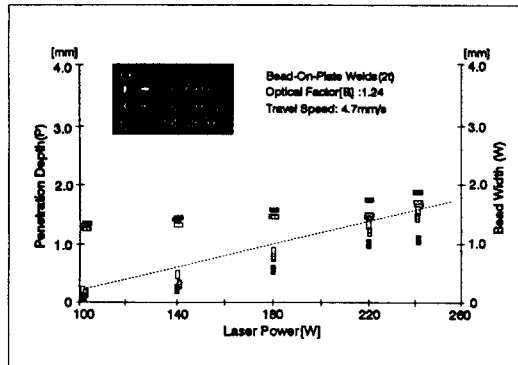


Fig. 10 Dependence of penetration depth and bead width on various laser powers.

Fig. 10은 광학출구 커플러의 B구조를 사용하여 광섬유에 따른 레이저출력별 용입과 비이드폭을 비교한 것을 나타내고 있다. 이때 기초실험을 위해서 Zircaloy-4판재인 2mm두께의 bead-on-plate 용접이 수행되었다. Fig. 10에서와 같이 레이저출

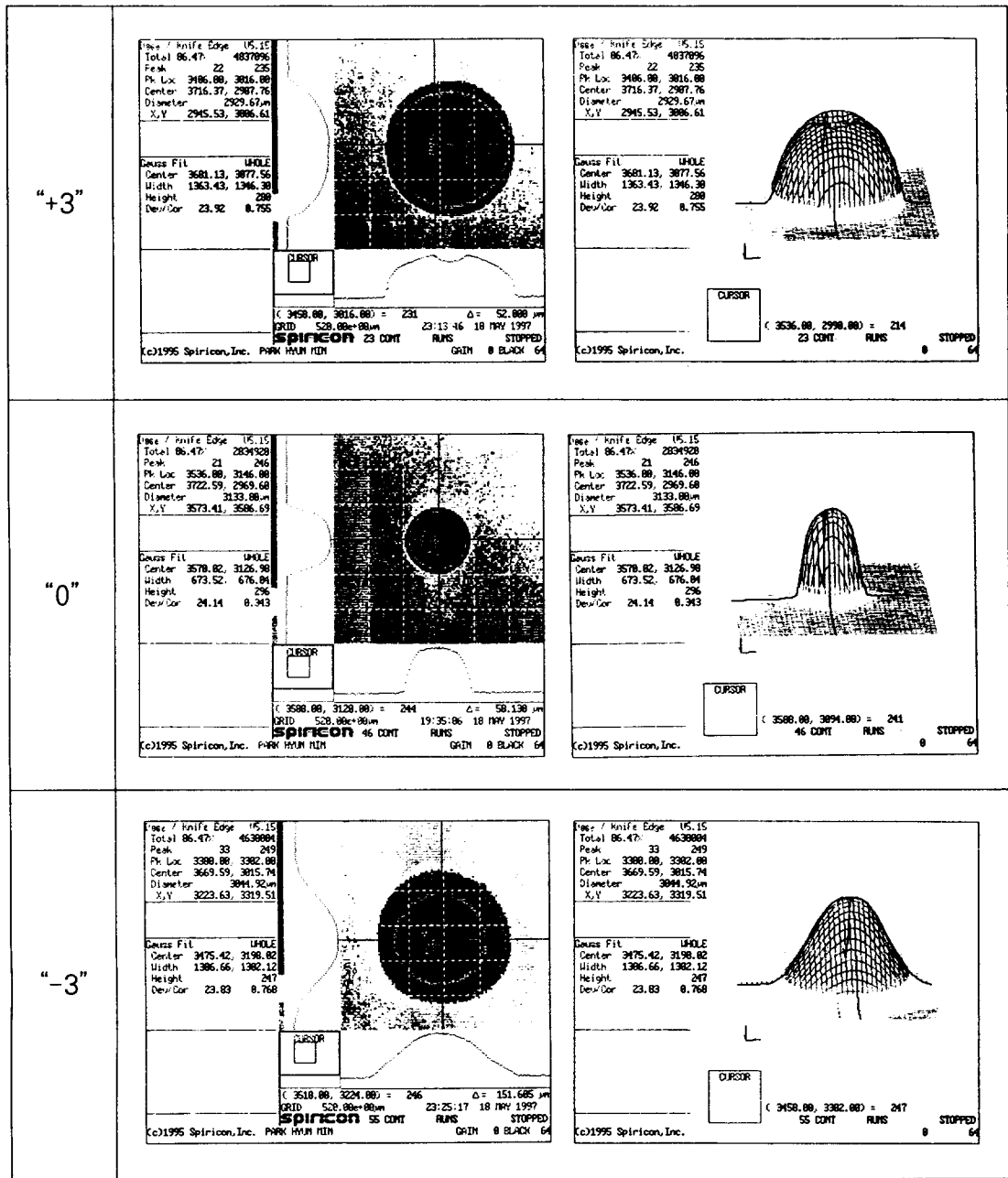


Fig. 9 Transmitted intensity distributions and beam profiles in focal plane.

력이 커질수록 용입이 증가됨을 보이나, 특히 광섬유의 1000 $\mu$ m일 때 출력이 높을수록 용입은 증가되지 않고 비이드만 커지면서 심한 spattering과

concave한 비이드로 나타났다. 이것은 레이저가 입사되는 면적이 크기 때문에, 이에 따른 파워밀도가 낮아져서 용입저하가 생긴 것으로 해석된다. 광

섬유의 600 $\mu$ m인 경우는 레이저의 입사면적이 작아지면서 파워밀도가 높아져 용입이 대체로 증가되었으며, 이때 광학입구커플러를 통과하는 레이저는 광섬유의 코어직경 중심부로 정확하게 배열되어야 한다. 이와같이 고려해볼 때 봉단마개용접을 위해서는 Fig. 10에서 나타났듯이 대체로 용입이 높은 광섬유의 600 $\mu$ m과 광학출구커플러의 B구조가 유리한 것으로 판단되었으며, 본 실험에서는 여러 가지 봉단마개의 기하학적 형상, 레이저변수 및 보호가스 등에 따른 용접특성이 연구되었다.

### 3.2 봉단형상에 의한 용입영향

핵연료가 연소되면 연료봉내부에서 Xe, Kr 같은 핵분열기체 (fission gas)가 발생해서 연료봉 내압을 높게 되며 핵분열기체의 방출은 연소도가 높아질수록 증가하게 된다. 따라서 핵분열기체를 수용할 수 있는 연료봉내의 공간을 가능한 많이 확보하는 것이 핵연료성능의 관점에서 유리하다. 이러한 관점에서 볼 때 핵연료봉의 봉단마개형상은 매우 중요한 의미를 갖으며, 용접관점에서 볼 때 기하학적 구조가 열변형, 용입깊이 그리고 용접결합에 큰 영향을 미치게 된다.

Fig. 11은 봉단마개형상의 구멍크기  $D_H$ 에 따른 용접결과를 나타낸 것으로  $D_H$ 가 커질수록 용입이 거의 일정하게 나타나다가 봉단마개의 벽두께가 2.1mm의  $D_H=8$ mm에서 크게 증가되며, 이때 봉단마개의 가공된 구멍내부에는 약간 변색되어 있었다. 또한 봉단마개의 벽두께가 1.2mm인  $D_H=10$ mm이상에서는 피복관과 봉단마개의 연결부위가 거의 관통되었고, 역시 봉단마개내부에서 spattering 흔적과 파랗게 변색되어 있었다. Fig. 11에서 나타난 바와 같이 I는 비이드폭이 일정한 부분용입구역 (partial penetration region)이며, II는 비이드폭이 크고 표면이 오목한 형태를 보여주는 완전용입구역 (complete penetration region)이다. 여기서 봉단마개의 체적이 감소할수록 용입이 증가될 것으로 판단되었으나, 실험에서는 현격한 차이를 찾아볼 수가 없었다. 이것은 용융점이 높은 Zircaloy-4 재료인 경우 입열이 크게 필요하는 GTAW(가스텅스텐아크용접)에 비하여 레이저용접에서는 높은 파워밀도에 의해 용접열사이클이 매우 짧게 작용된 것으로 해석된다. Fig. 12는  $D_H=$

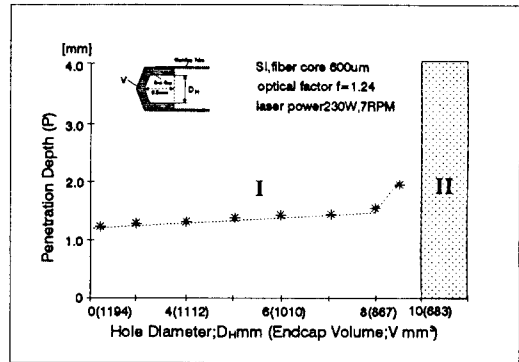


Fig. 11 Dependence of penetration depths on various  $D_H$  parameters.

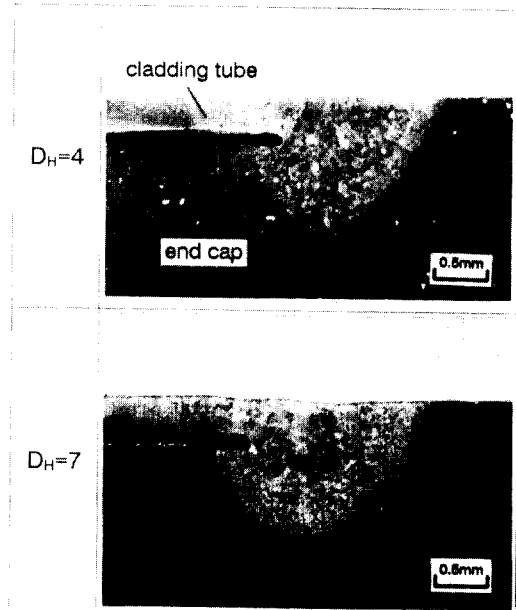


Fig. 12 Transverse sections of end cap welding dependence on various  $D_H=4$  & 7mm.

4 와 7mm일 때 용입면에서 거의 비슷하게 나타난 봉단마개용접시험편의 단면을 보여주고 있다. 본 실험에서는 연료봉의 피복관과 봉단마개의 이음구조가 완전용입되는 경우보다 봉단마개의 벽두께가 2.1mm인  $D_H$ 가 적어도 8mm까지는 용입과 변색정도에 양호한 것으로 관찰되었다. 보다 정확한 봉단마개이음을 위해서는 기계적 강도시험인 필시험 (peel test), 인장시험 (tension test), 파열시험

(burst test)의 분석과 그에 따른 용접부의 크리, 소성특성, 열팽창 그리고 야금학적 고찰 등은 더 연구되어야 할 것이다.

### 3.3 용접변수에 의한 용입특성

본 실험에서 광섬유를 이용한 레이저용접에서 용입특성에 영향을 미치는 주요인자는 크게 3가지로 구분되는 데, 이것은 레이저변수, 용접속도 그리고 보호가스이다. 먼저 레이저변수는 광섬유에 의해 이미 고정된 광학조건에 의해 레이저의 침투출력, 반복율, 펄스폭 등과 관련된 것이다. 둘째로는 레이저변수와 용접속도가 봉단마개용접부의 용입과 비이드폭에 미치는 영향을 조사하기 위한 것이고, 셋째로는 챔버내에 보호가스가 용접특성에 미치는 영향을 연구하기 위한 것으로, 이것은 용입과 유량의 관계 그리고 레이저용접시의 fume으로 기화된 산화지르코늄량을 예측하기 위한 것이다.

#### 3.3.1 레이저변수의 영향

펄스형 Nd:YAG레이저는 CO<sub>2</sub>레이저와 달리 레이저출력에 따라 빔발산각과 크기가 달라지며, 특히 광섬유를 이용한 레이저용접인 경우 레이저변수인 펄스폭, 반복율 그리고 펄스에너지 등과 함께 중요한 변수가 될 수 있다. 실험에서는 광섬유전송시 Zircaloy-4 봉단마개용접을 위한 정확한 정보를 가질 필요가 있어서 여러가지 레이저변수에 따라 용접특성이 어떻게 변하는지 알아 보았다.

Fig. 13은 레이저출력이 230W로 일정하고 펄스폭 3ms에서 9ms로 변화시킬 때 봉단마개시험편의 용입, 비이드폭 그리고 용입비(용입/비이드폭)가 비교된 것이다. 이때 광섬유의 코어직경이 600 $\mu$ m 이고 광학출구커플러는 B구조( $f=1.24$ )로 사용되었다. Fig. 13에서 나타났듯이 용입은 펄스폭에 따라 점차로 증가됨을 보이다가 펄스폭 7ms에서 줄어드는 경향이 보였으며, 반면에 비이드폭은 펄스폭이 증가함에 따라 거의 일정하게 나타났다. S. Aruga 등은 Nd:YAG레이저용접에서 나타나는 전형적인 형태로 긴 펄스에만 용입감소를 나타내고 있으며, 이러한 현상은 입사효율을 저하시킨다고 보고되고 있다.<sup>5)</sup> 여기서 Nd:YAG레이저의 특성상 펄스폭이 긴 경우 시험편으로 입사되는 빔크기가 커지고, 반면에 펄스폭이 짧은 경우 빔크기가 작아

져서 입사효율이 좋아지게 된다. 이것은 Fig. 13에서 나타났듯이 반복율과 평균출력을 일정하게 하고 펄스폭만을 변화시킨 경우는 침투출력을 변화시킨 경우와 동일한 해석이므로 역시 용입면에서 차이가 있음을 알 수 있었다. 따라서 광섬유전송시 펄스폭변화는 시험편에 입사되는 에너지효율이 결정되는 데 중요한 역할을 하며, 또한 용융점이 높은 Zircaloy-4의 경우 효율적으로 레이저를 흡수하기 위해서는 펄스폭이 적정수준에서 유지되어야 한다. 실험에서는 레이저의 침투출력이 3kW, 펄스폭 5ms일 때 용입과 비이드가 적절함이 사료된다.

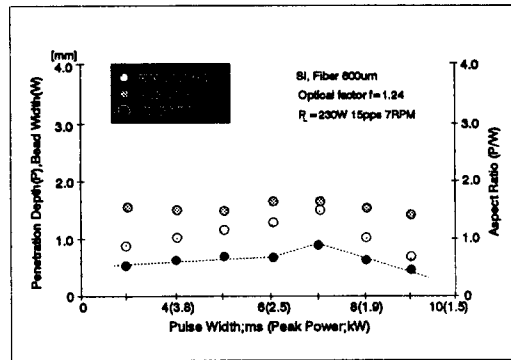


Fig. 13 Dependence of penetration depths and bead widths on various pulse widths.

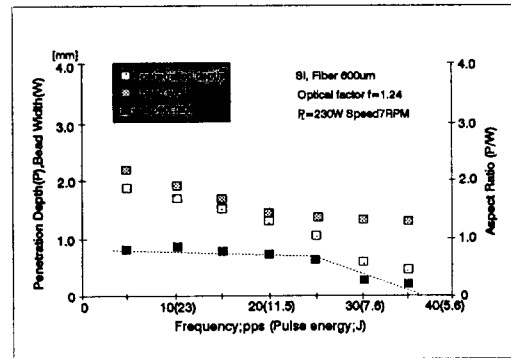


Fig. 14 Dependence of penetration depths and bead widths on various repetition rates.

Fig. 14는 레이저출력이 230W로 일정하고 반복율만을 변화시킬 때 용입, 비이드폭 그리고 용입비를 보여준다. Fig. 14에서와 같이 반복율이 증가



될수록 펄스에너지는 작아져서 반복율 25pps에서 용입이 현저하게 줄어들었고 용입비도 감소되었다. 비이드폭은 반복율 20pps까지 감소되다가 그 이후부터는 일정하게 나타났다. 또한, 반복율이 작을수록 비이드표면에서 spattering과 fume이 심하게 나타나며, 이때 비이드가 매우 거칠고 용접 중에 플라즈마현상이 관찰되었다. 여기서 피복관과 봉단마개용접을 위해서는 반복율 15pps에서 펄스당 에너지가 적어도 15J임을 알 수 있었다.

### 3.3.2 용접속도의 영향

앞절에서 언급된 레이저변수를 변화시키는 것은 용접특성을 이해하는 데 부족하다. 특히 광섬유전송시 레이저용접은 실제의 용접속도가 용입과 비이드폭에 미치는 영향이 연구되는 것은 다른 의미에서 매우 중요하다. Fig. 15는 광섬유의 600 $\mu$ m으로 전송시 봉단마개용접의 회전속도가 용입, 비이드폭 그리고 용입비에 미치는 영향을 보여주는데, 회전속도가 증가될수록 용입과 비이드폭은 감소되고, 특히 비이드폭에 비해 용입이 크게 작아짐을 알 수 있었다. 실제로 육안관찰에는 회전속도가 4 RPM이하로 줄어들수록 비이드폭이 커질뿐만 아니라 비이드표면도 거칠며 용접중에 심한 spattering현상이 있었다. 또한 비이드에 spatter가 많이 발생하면 광학출구커플러의 보호유리와 집광렌즈에 심한 손상을 줄 위험이 있으므로 고려되어야 한다. Fig. 15에서와 같이 봉단마개용접에서는 용입비가 대체로 1 근처에서 얻어질 때 비이드폭과 용입이 1.2mm 내지 1.5mm에서 유지됨이 확인

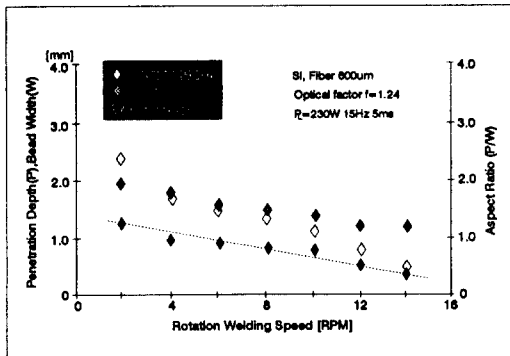


Fig. 15 Dependence of penetration depths and bead widths on various rotation speeds.

되었다. 이때 봉단마개용접의 회전속도가 6RPM 내지 8 RPM일 때 비이드면이 아주 매끄럽게 나타났다으며, 또한 용입과 비이드폭이 급격히 증가되지 않아서 좋은 용접결과를 얻을 수가 있었다.

### 3.3.3 보호가스의 영향

레이저용접에서 보호가스의 역할은 크게 두가지로 나눌 수 있는데, 첫째는 아크용접의 경우 대기 중에 산화방지 및 용접중에 용융금속을 보호해 주고, 둘째는 레이저용접에서 레이저가 재료표면에 도달하게 되면 플라즈마형성으로 입사효율을 저하시키는 불꽃기둥, 즉 plume을 제거하기 위한 것이다.<sup>6)</sup> Nd:YAG레이저용접에서 보호가스의 유량은 가스이온과 재료에서 발생한 플라즈마에 의해 흡수효율이 달라지게 된다. 이러한 유량의 특성은 가스압력, 커플러의 노즐직경, 커플러의 노즐입사각 그리고 재료와 노즐간의 거리에 따라 매우 복잡하게 작용된다. 또한 레이저용접과정시 fume현상과 보호가스는 매우 밀접한 관계에 있으므로 용입 특성에 중요한 영향을 미친다.

Fig. 16은 레이저용접시 He이 보호가스로 사용될 때 유량이 용입에 미치는 영향을 보여주고 있다. 이때 광학출구커플러의 노즐간 거리를 6mm로 하였다. Fig. 16에서 알 수 있듯이 보호가스의 유량이 증가될수록 용입이 점차 커졌으나 He유량이 50 l/min부터는 급격히 감소된다. 또한 유량증가와 더불어 용접단면의 macro관찰에는 용융금속내의 중앙 혹은 하단부에서 약간의 기공이 형성되었다. 이것은 보호가스의 압력이 레이저용접중에 형

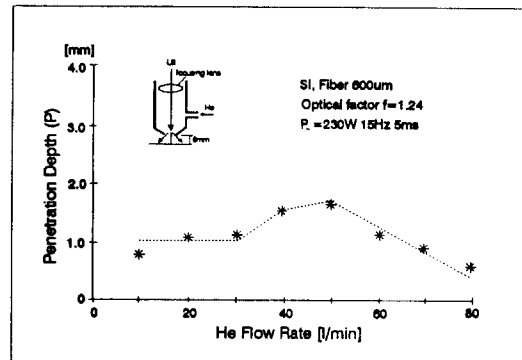


Fig. 16 Effect of the penetration depths on flow rates of He gas.

성되는 금속이온의 압력보다 높은 현상으로 기인된 것이다. 여기서 He를 보호가스로 사용할 때의 용입증가현상은 레이저용접과정에 플라즈마로 인한 입사효율이 커짐과 동시에 최대한의 에너지 전달효과(enhanced energy coupling)를 얻은 것이고, 7) 반면에 용입감소현상은 He유량이 많을수록 재료에 에너지흡수로 생긴 열이 그대로 빠져나가 냉각효과를 유발했기 때문으로 해석된다.

Fig. 17은 실제 레이저용접시 fume으로 기화된 산화지르코늄( $ZrO_2$ )이 보호유리판에 달라붙게 되어 이때 유량에 미치는 영향을 보여준다. 시험편과 보호유리(재료: BK7, AR coated glass)와의 간격은 30mm이고 보호유리에 조사된 레이저가 재반사를 방지하기 위해서 5°의 경사각이 유지되며, 레이저셔터의 열림시간은 100초이다. 이때 He유량별 실험에서 보호유리의 산화지르코늄을 측정하기 위하여 미세전자저울기(micro-electro balance)를 사용하였다. Fig. 17과 같이 He유량이 증가될수록 산화지르코늄량은 줄었으며, 특히 He유량이 40 l/min 이상일 때 산화지르코늄량이 대체로 5mg

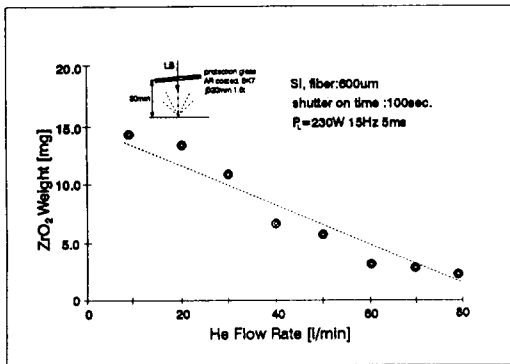


Fig. 17 Effect of the  $ZrO_2$  amounts on flow rates of He gas.

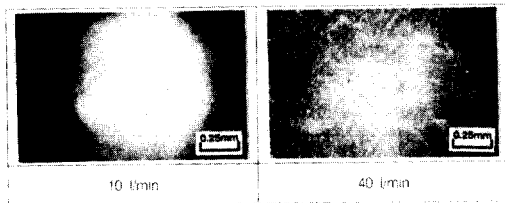


Fig. 18 Photos of typical  $ZrO_2$  appearances on the protection glass.

이하에서 측정되었다. Fig. 18은 He유량이 10 l/min과 40 l/min로 사용될 때 광학출구커플러의 보호유리에 부착된 산화지르코늄의 분말모양을 보여주고 있다. 여기서 실제 봉단마개용접에 걸리는 시간이 약 10초 정도이므로, 보호유리에 달라붙는 산화지르코늄은 크게 영향을 받지 않을 것으로 사료되나, 보호유리를 장시간 사용시 손상을 줄 위험이 있으므로 고려되어야 한다.

#### 4. 결 론

본 연구는 광섬유전송에 의한 250W 급 Nd:YAG 레이저를 이용하여 Zircaloy-4 봉단마개의 레이저용접시 최적조건을 연구조사한 것으로 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 광섬유전송시 적외선 CCD센서에 의해 초점위치별 빔크기와 강도를 측정하여 용접전에 비이드폭을 예측할 수 있었다. 레이저용접의 용입효과에서는 광섬유의 코어직경이 600 $\mu$ m이 유리하며, 적절한 초점위치는 광학출구커플러 B구조의 -2mm 내지 -3mm임을 알 수 있었다.
2. 봉단마개형상을 변화시키는 실험에서는 양호한 용접결과를 얻었으며, 연료봉의 피복관과 봉단마개의 이음구조가 완전용입되는 경우보다  $D_H$ 가 적어도 8mm까지는 용입과 변색정도에서 적절한 것으로 판단되었다.
3. Zircaloy-4 봉단마개용접의 적정용입과 비이드를 얻기 위해서는 레이저출력 230W, 펄스폭 5ms, 반복율 15pps, 펄스에너지는 15J이 되어야 하며, 이때 용접속도는 8RPM을 넘지 말아야 한다.
4. 광학출구커플러의 보호가스는 He이 사용되었고, 유량은 용입에 지대한 역할임이 확인되었다. 이때 He유량이 30l/min 내지 40l/min에서 좋은 비이드와 용입을 얻을 수가 있었다.

#### 참 고 문 헌

1. T. Ishide, Y. Nagura : High Power YAG Laser Welded Sleeving Technology for Steam Generator Tubes in Nuclear Power Plant,

- Proceedings of LAMP'92, June, (1992), pp. 957-962
2. Bala R. Nair : Application of Laser Welding Technology to the Repair of Nuclear Power Plant Steam Generators, Westinghouse Electric Corporation, (1993)
  3. G. Subbaraman, R. Hindy : Fiber Delivered Lasers for Dismantlement Applications, Boeing North American, Inc., Energy Technology Engineering Center, October, (1996), pp. 1-6
  4. C. J. Nonhof, G. Notenboom : Spot Welding With Nd Lasers, Annual Review of Laser Processing, (1988), pp. 40-51
  5. S. Aruga : Efficient and High-Quality Overlap Welding of Car-Body Al Alloy Metal Sheets with High Power Nd:YAG Laser by Flexible Fiber Beam Delivery, Proceedings of LAMP'92, June, (1992), pp. 517-522.
  6. G. Takano, O. Matsumoto : The Control of High Power YAG Laser Plume in Narrow Space Welding, ICALEO, (1990), pp. 373-381
  7. K. Behler, E. Beyer : Laser Welding of Aluminium, Laser Material Proceeding, ICALEO'88, November, (1988), pp. 249-258