

연속파 파이버 레이저를 이용한 SS400의 절단 특성에 관한 연구

오용석*, 이가람⁺, 박은경⁺, 유영태⁺⁺

(Manuscript received: Oct, 19, 2011 / Revised: Apr, 12, 2012 / Accepted: Apr, 14, 2012)

A Study on SS400 Cutting Characteristics using Continuous Wave Fiber Laser

Yong-Seok Oh*, Ka-Ram Lee⁺, Eun-Kyeong Park⁺, Young-Tae Yoo⁺⁺

Abstract

This paper show the 2kW fiber laser cutting properties of SS400. The study was comparison of traditional 4kW CO₂ Laser cutting and 2kW Fiber laser cutting characteristics for the application of Industrial 2D Laser Cutting Machine. The laser used in this investigation was an IPG YLU-2000 multi-mode Ytterbium Fiber machine with a maximum power of 2000W and a wave length of 1070 nm. The laser was used in its Continuous Wave (CW) mode with an approximately top hat beam intensity distribution. Fiber laser high quality cuts at a large range of speeds (ranging from 2000 to 3800 mm/min) which has been obtained for the 2.3mm Sheet of SS400. 2kW power Fiber laser cut was able to max. 20mm sheets of SS400 (speed range from 650 to 850 mm/min). Fiber laser cutting used in conventional hole nozzle could cut 12mm SS400 but used in special dual cutting nozzle could cut 20mm SS400.

Key Words : Laser cutting(레이저 커팅), Fiber Laser(파이버 레이저), CO₂ Laser(CO₂ 레이저), SS400

1. 서론

레이저 절단은 고출력 빛 에너지를 이용하여 재료를 절단하는 고속가공으로써, 고정밀 절단을 요하는 건설, 기계, 전자산업 등 산업현장에서 다양하게 사용되고 있다.

현재 산업현장에서 일반적으로 사용하고 있는 레이저 절단의 경우 10.6 μ m 파장대를 가지고 있는 CO₂ 레이저 발진기를 주로 사용하고 있다. CO₂ 레이저 발진기를 사용하는 레이저절단기의 경우 레이저빔을 전송할 때 반사경(Mirror)을 이용한다. 반사경으로 레이저빔을 전송하면 동일한 사양의 레이저 가공기라 해도 사용하고 있는 작업자의 레이저 절단기의 유지관리

정도에 따라 절단 속도, 절단두께, 절단면 품질 등 제품의 생산성에 매우 큰 차이가 발생되고 있다. 이러한 원인으로는 레이저 빔의 반사경 전송에 의한 광학적 정렬(Align) 틀어짐, 반사경 오염에 의한 레이저 빔의 에너지 손실 및 빔 품질 저하, 레이저 빔이 전달되는 광학계의 열렌즈(Thermal Lens) 효과에 의한 초점거리 변경 등이 절단품질을 저해하는 요소로 작용할 수 있다. 근래에 들어 과학기술이 계속 발전됨에 따라 새로운 방식의 고출력 레이저가 등장하게 되었고, 정보통신 분야에서 각종 자료를 빛으로 전송하는데 활용되었던 광파이버(Optical Fiber)를 이용하여 고출력 레이저를 발진(Pumping)시키는 파이버 레이저가 새롭게 개발되었다. 파이버 레이저는 IR(Infra Red) 영

* 조선대학교 첨단부품소재공학과

+ 조선대학교 첨단부품소재공학과

++ 교신저자, 조선대학교 메카트로닉스공학과 (ytyou@chosun.ac.kr)

주소 : 501-759 광주광역시 동구 서석동 375

역인 1.07 μm 파장으로 1.06 μm 파장을 갖는 YAG 레이저와 거의 동일한 파장을 갖고 있어, 현재 기존 YAG 레이저에 의한 가공의 상당 부분이 파이버 레이저로 대체 되고 있다. 파이버 레이저의 장점으로는 파이버 내부에서 에너지 증폭이 이루어지기 때문에 기존 CO₂ 레이저 발진기의 반사경 반사에 의한 레이저 에너지 증폭 방식에 비해 에너지 손실이 매우 적다. 이로 인해 레이저 발진시 발생하는 열에너지를 냉각하기 위한 각종 냉각장치의 용량이 감소하게 되었다. 이로 인해 기존 레이저 발진기의 가장 큰 단점으로 레이저 발진 효율이 낮아 전력 소모량이 많았던 부분이 획기적으로 개선되었다. 이것이 파이버 레이저를 산업 현장에서 선호하고 있는 이유 중에 하나이다.

초기 파이버 레이저를 이용한 절단 및 가공에 대한 연구는 파이버 레이저를 개발에 참여한 독일 Fraunhofer IWS 등 연구 단체를 중심으로 기술교류가 진행되어 왔으며, 현재는 파이버 레이저가 세계 각국에 폭넓게 확대됨에 따라 국내외적으로 파이버 레이저를 이용해서 가공하는 기술에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 산업현장에서 범용화 되어 널리 사용되고 있는 2차원 레이저 절단기의 경우 파이버 레이저를 이용한 레이저 절단 시스템을 개발하기 위한 연구 및 개발이 진행되고 있다. Powell 등은 탄소강의 파이버 레이저 절단 시 절단각과 절단면의 변화에 대해 분석하였다⁽¹⁾. Mahrle 등은 파이버 레이저를 이용한 스테인리스강 박판 (0.05~0.5mm) 리모트 절단에 대해 연구를 진행하였다⁽²⁾. Sobih 등은 파이버 레이저와 CO₂ 레이저의 1.0mm 박판 탄소강 절단특성에 대해 고찰하였다⁽³⁾. Namgoong 등은 300W급 파이버 레이저를 이용한 SSPC 1.0mm 박판 절단에 대해 실험하였다⁽⁴⁾.

본 연구에서는 일반구조용 압연강 SS400의 2.0kW 급 파이버 레이저를 이용한 절단특성을 기존 4kW급 CO₂ 레이저의 절단 특성과 비교하여 SS400을 파이버 레이저 2kW로 절단했을 때 최대 절단 두께에 따른 절단속도의 변화에 대한 결과를 도출하였다. 이를 통해 산업현장에서 사용되고 있는 4kW급 CO₂ 레이저와 비교하여 파이버 레이저의 최대 절단두께 및 절단속도 등에 따른 특성을 제시하고자 한다.

산업현장에서 주로 사용되는 SS400 소재의 두께별 파이버 레이저 최적 절단 영역을 확인하여, CO₂ 레이저 절단 특성과 파이버 레이저 절단 특성을 비교 분석하였다. 이러한 분석을 통해 파이버 레이저의 산업용 레이저 절단기로 응용을 위한 사전 연구에 목적이 있다.

2. 실험

2.1 실험 장치 및 실험방법

본 연구에 사용한 절단용 레이저는 최대출력 2.0kW의 연속 파형 파이버레이저(IPG, YLU-2000)이다. Fiber Cable에는 자

동 초점거리 조절 기능이 장착된 절단헤드(Precitec, HP1.5)가 결합되어 있다. 절단헤드는 X/Y 2축 제어 리니어 모터 스테이지(Liner Motor Stage)에 장착되어 있고, 절단은 레이저 2D 절단시스템을 이용했다. 본 연구에 사용한 실험 장비를 Fig. 1에 나타내었다.

이 절단 헤드의 자동 초점거리 제어장치(Auto focusing control system)는 절단 시 노즐 끝단부와 절단소재와의 거리를 항상 일정하게 유지시켜주는 장치로써 노즐 끝단부와 가공소재사이의 전기적 정전용량변화에 따른 전압차를 실시간으로 측정하여, 변동된 전위차만큼 절단헤드가 수직 이동하여 초점거리를 일정하게 유지한다⁽⁵⁾. 노즐과 가공소재와의 거리는 초기 절단을 위한 피어싱(Piercing)의 경우 1.0~5.0mm를 유지하고, 절단 시 0.5~1.5mm 범위에서 절단 실험을 실시하였다.

본 실험에서 사용된 연속파형 파이버 레이저는 Fig. 2에 나타낸 것 같이 펌프 다이오드 레이저(LD, Pump Diode Laser), 이터븀 액티브 파이버(Ytterbium Active Fiber), FBG(Fiber Bragg Grating)로 구성되어 있다. 다량의 수W급 펌프 다이오드 레이저에서 방출된 빛을 이중구조의 액티브 파이버 클래드를 통해 전반사하면서 LD에서 방출된 빛(pump light)은 액티브 파이버 코어에 흡수된다. 흡수된 빛은 이 과정에서 파장이 1.07 μm 인 레이저광을 방출하고, 거울 역할을 하는 FBG에 의해 빛이 증폭된다. 파이버 레이저는 빛의 펌핑에서부터 레이저 출력의 전 과정이 파이버의 내부에서 이루어지기 때문에 외부



Fig. 1 Experimental set-up

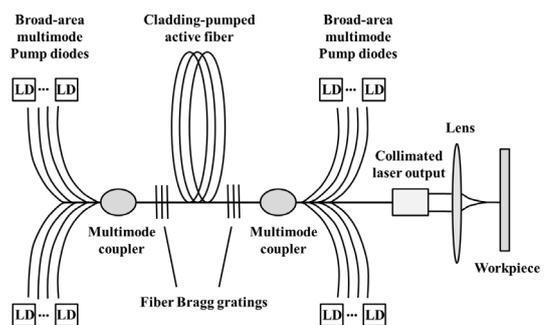


Fig. 2 Schematic diagram of Fiber laser oscillation

충격에 강하고 광학계의 정렬이 필요 없을 뿐만 아니라, 파이버 내부의 난반사로 인해 편광이 존재하지 않아 CO₂ 레이저와 같은 편광의 영향으로 인해 절단 방향에 따라 절단 품질이 변화하지 않는다. 또한 CO₂ 레이저와 같이 전송된 빔의 경로차이에 의해 초점크기가 변화하지 않고 항상 일정한 빔 특성이 유지되는 장점이 있다.

Fig. 3은 실험에 사용된 파이버 레이저의 빔 품질을 Focus Monitor(Primes, FM120)로 측정된 결과이다. 레이저에서 공급되는 파이버 직경은 100 μ m, 절단헤드의 조준렌즈(Collimeter Lens)와 초점렌즈(Focus Lens)는 각각 100mm, 125mm, 상태에서 측정된 결과 BPP(Beam product Parameter) 3.5mrad, 반경 66 μ m, Rayleigh length 1.227mm로써 레이저 초점 크기가 작고, 빔 프로파일(Beam profile)이 빔 전송 파이버의 코어 부분을 중심으로 멀티모드 형태로 항상 균일함을 확인하였다.

Fig. 4는 레이저 파장에 따른 소재의 에너지 흡수율과의 관계를 나타내었다⁽⁶⁾. 그림에서와 같이 파장이 10.6 μ m인 CO₂ 레이저의 경우 파장이 길어 거의 모든 금속에서 10% 미만의 에너지가 금속 내부로 흡수되고 나머지는 반사됨을 알 수 있다. 그러나 파장이 10.7 μ m인 파이버 레이저의 경우 파장이 CO₂ 레이저에 비해 1/10 정도로 짧아 철(Fe)에서 30% 이상의 에너지가 흡수되고, 다른 금속 및 금속산화물역시 CO₂ 레이저에 비해 파이버 레이저의 에너지 흡수가 잘 됨을 알 수 있다. 그러므로 절단을 위한 피어싱 시 CO₂ 레이저에 비해 적은 출력으로도 가공이 용이하였다. 본 연구에 사용된 레이저 절단 헤드는 5인

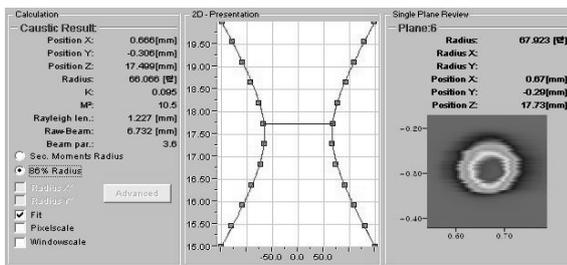


Fig. 3 Laser beam Focus monitor Data

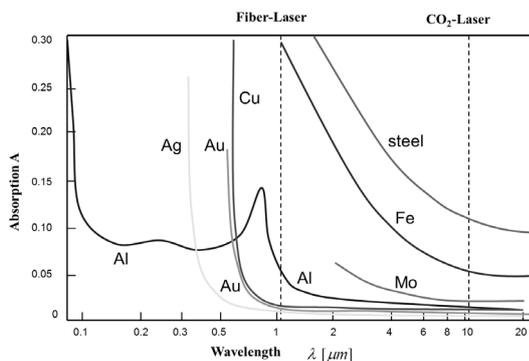


Fig. 4 Absorption rate of light to metal

치, 7.5인치, 10인치(Inch) 초점렌즈를 카트리지 방식으로 교체하여 사용할 수 있는 절단헤드로써 초점렌즈의 초점거리가 길수록 집광되는 빔의 크기(Spot size)는 크게 되고, 초점심도는 길어진다. Fig. 5와 같이 초점거리(f_1)가 짧은 단초점 렌즈(5Inch)를 쓰면, 집광되는 빔의 크기($d_{of,1}$)가 작기 때문에 절단 폭이 좁고, 에너지 밀도(intensity)가 높아 박판의 고속절단에 적합하다. 단, 초점심도(2ZR,1)가 짧아 초점위치의 변화에 절단품질이 민감하게 달라질 수 있으므로, 초점위치 조절을 보다 정확하게 할 필요가 있다. 초점거리(f_2)가 긴 장초점 렌즈(10inch)를 쓰면, 집광되는 빔의 크기($d_{of,2}$)가 크고, 초점심도가 길기 때문에 용융물 배출이 용이하여 연강 및 스테인레스 강의 후판 절단에 적합하다.

본 연구에 사용된 재료는 산업현장에서 일반적으로 널리 사용되어지고 있는 일반구조용 압연강재인 SS400 판재를 선택하였다. CO₂ 레이저로 절단했을 때 절단 두께 및 절단속도에 대한 성능비교를 위해 보조가스로 산소를 사용해서 탄소강의 절단 실험을 했다. 시편은 SS400으로 하였고 두께를 1~20mm로 변화시켜 절단 가능한 조건을 찾기 위해 실험하였다. 시편의 성분비와 기계적 물성은 각각 Table 1 및 2와 같다.

본 연구에 사용된 공정 변수 중 레이저 출력은 1.6kW와 2.0kW 2가지로 고정하였다. 초점렌즈는 7.5Inch와 10Inch 두 종류를 사용했다. 절단가스는 산소를 사용하였고, 절단가스 압력은 0.5~1.0bar, 노즐경은 1.0~5.0mm, 노즐 옵셋 거리는

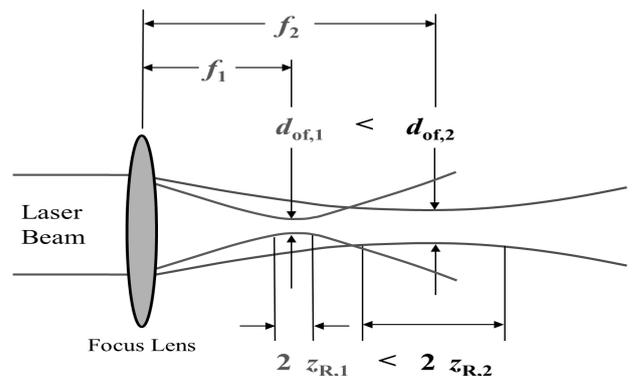


Fig. 5 Beam Characteristics according to the focus lens

Table 1 Chemical composition of KS D3503 SS400 (wt%)

C	Si	Mn	P	S	Fe
0.14	0.16	0.62	0.028	0.014	Bal

Table 2 Mechanical properties of Ks D3503 SS400

Yield strength (Mpa)	Tensile Strength (Mpa)	Elongation (%)
310	458	28

0.5~1.0mm로 하였다. 본 실험에서는 레이저 절단기 X/Y 로봇의 속도 가감속의 영향을 주는 코너 및 모서리부에 대한 특성을 고려하지 않기 위해 단축 직선부 절단을 기준으로 실험하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 출력별 파이버 레이저 절단 특성 비교

SS400을 산화반응으로 소재를 용융시켜 절단효과를 높이기 위해 절단가스로 산소를 사용하여 절단실험 하였다. 레이저로 시편을 절단할 때 용융물의 흐름과 배출을 최적의 상태로 유지하여 절단해야 양호한 절단 가공품을 얻을 수 있다. 절단노즐은 절단가스와 레이저빔을 균일하고 연속적으로 절단부에 작용시켜 용융물을 효과적으로 제거되도록 하는 역할을 한다. 양호한 절단 품질을 얻기 위해서는 노즐로부터 분사되는 절단가스(Cutting gas)의 역할이 충분히 발휘할 수 있도록 노즐 사양을 결정하는 것이 중요하다. 노즐로부터 분사된 절단가스는 노즐 출구에서 멀어짐에 따라 노즐 팁에서 속도분포가 확산되면서 속도강도분포가 작아져 산소가스의 농도가 상대적으로 감소한다. 노즐 팁(Tip)의 직경이 작을수록 노즐 팁 부분에서 발생하는 회절효과가 크기 때문에 거리가 멀어짐에 따라 급격하게 산소의 농도가 감소한다. 이를 보완하기 위해 절단두께가 두꺼울수록 노즐로부터 분사된 농도가 높은 보조가스가 절단면 하단까지 도달하도록 노즐 팁의 직경을 크게 제작하여 사용한다⁽⁷⁾.

절단가스의 역할은 산화반응열의 생성이나 용융금속을 절단홈에서 배출시켜, 가공능력을 높여 가공품질을 양호하게 하는 것뿐만 아니라, 절단시 발생하는 스페터 등 비산물질로부터 절단헤드의 렌즈를 보호하고, 절단 주변부와 렌즈를 냉각하는 역할도 담당한다. 산소가스는 주로 연강(Mild steel) 절단에 사용한다. 산소가스는 산화 반응열에 의해 절단효율을 큰 폭으로 향상시키는 효과와, 산화막을 생성시켜 고반사 재질의 빔 흡수율을 향상시키는 효과도 있다. 절단시 최적으로 분사되는 절단가스 압력은 가스의 종류 및 소재의 두께, 출력파형(연속파/펄스)등에 따라 바뀐다. 일반적으로 드로스가 부착하는 경우는 가스압력을 높게 하고, 절단면이 거친 경우는 가스압을 낮게 조정한다. 절단면의 산화막 발생을 방지하기 위한 무산화 절단의 경우 절단가스 압력을 고압력으로 레이저 빔에 의해 용융된 소재를 배출할 목적으로 절단가스를 사용하지만, 금속의 산화반응열을 이용한 산화절단의 경우 금속과 산화반응시간이 요구됨에 따라 저압력 조건에서 절단한다. 이와 같은 이유로 본 실험에서는 가스압을 1.0bar 이하로 조정하여 실험하였다. 절단 품질은 Fig. 6과 같이 상, 중, 하로 구분하였으며, 각 두께별 절단 조건 영역을 도출하였다. 후판의 절단의 경우 일반적인 1구형 노즐을 사용할 경우 2kW 파이버 레이저에서 12mm까지 절단품질을 확보할 수 있었다. 그러나 절단가스의 분사특성

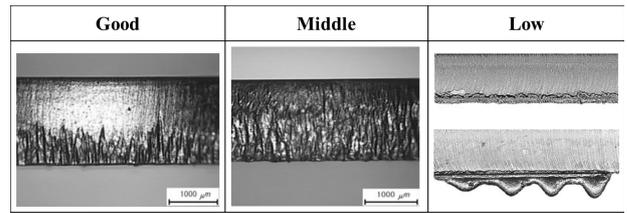


Fig. 6 Classification of Laser Cutting Quality

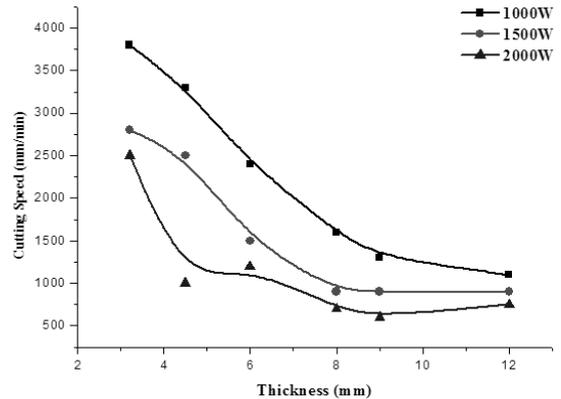


Fig. 7 Influence of cutting speed on the according to power of fiber laser of SS400

을 변경한 이중형 노즐을 사용할 경우 20mm 까지 절단능력을 향상시킬 수 있었다. 이는 후판 절단일수록 용융금속을 얼마나 잘 배출시킬 수 있는지가 절단 능력을 향상시킬 수 있는 중요한 요소임을 알 수 있었다⁽⁸⁾.

Fig. 7은 파이버 레이저 출력별 절단 속도를 나타내었다. 절단속도가 감소할수록 레이저빔과 시편이 서로 상호작용하는 시간이 증가하여 두꺼운 시편을 절단하는 경향을 나타내고 있다. 3.0mm이하의 박판인 경우 1kW 이상으로 절단시 입열량 과다로 인한 품질저하 현상이 발생되어 3.2~12mm까지의 출력별 절단속도를 비교하였다. 시편의 두께가 3.2mm일 경우 양호한 절단 단면을 나타내는 출력별 속도를 분석하면 1,000W 일 때 절단속도는 2,500mm/min이고, 이 보다 출력을 500W 증가시켜 1,500W로 절단할 때는 절단속도가 200mm/min 증가한 2,700mm/min로 절단 했을 때 양호한 절단결과를 얻을 수 있었다. 특이한 현상은 1,500W보다 500W를 증가시켜 절단했을 경우에는 출력이 낮은 경우에 비해 절단속도가 급격히 증가하여 1,000mm/min가 증가한 3,700mm/min에서도 양호한 절단 단면을 얻을 수 있었다. 이와 같은 실험결과는 레이저빔의 출력 증가에 대한 레이저빔의 이송도 증가율이 시편두께가 얇은 경우에는 선형적으로 증가하지 않음을 나타내고 있다. 이후 시편의 두께가 증가할수록 레이저빔의 이송속도 상승 효율은 감소하여 12mm인 경우에는 증가비율이 변화가 크지 않았다. 이는 시편의 두께가 증가할수록 모재로 레이저빔의 에너지를 흡수

하여 레이저 절단효율을 감소시키기 때문인 것으로 판단한다. 이와 같은 결과는 레이저빔으로 시편을 절단 할 때 시편의 두께가 작으면 속도증가율의 효과가 크지만 시편의 두께가 두꺼워지면 생산성 측면에서 큰 효과를 기대할 수 없다는 의미이다.

3.2 박판에서의 파이버 레이저 절단

SS400 2.3mm의 박판소재의 파이버 레이저 절단 실험은 파이버 직경 100 μ m, 노즐직경 1.0mm, 산소절단가스 0.5Bar, 노즐과 판재사이의 거리를 1mm 이격시킨 상태에서 SS400 2.3mm 파이버 레이저 절단을 실시하였다. Fig. 8은 2.3mm 에서의 파이버 레이저 최적 절단 영역 분포를 나타내었다. 절단시 초점 크기(O_{foc})는 Fig. 9의 파이버 전송 레이저 가공헤드에서와 같이 광학렌즈배울 즉, 콜리메이터(Collimator) 렌즈 초점거리(F_{col})를 초점렌즈 초점거리(F_{foc})로 나눈 값에 가공헤드에 부착되는 파이버 직경을 곱한 값이 초점크기가 된다. 실험에 사용된 콜리메이터 렌즈 초점거리는 100mm 이며, 7.5인치(190.5mm) 초점렌즈를 사용하여, 가공헤드의 광학적 배율은 약 1.9배이다. 빔 전송 파이버의 직경이 100 μ m 이므로, 최종 가공단에서의 초점크기는 190 μ m 이다. 2.3mm의 얇은 판재의 경우 800W 및 1000W 에서는 절단품질이 양호하였으나, 출력을 1500W로 증가시킬 경우 입열량 과다로 인한 절단 품질 저하가 발생되었다.

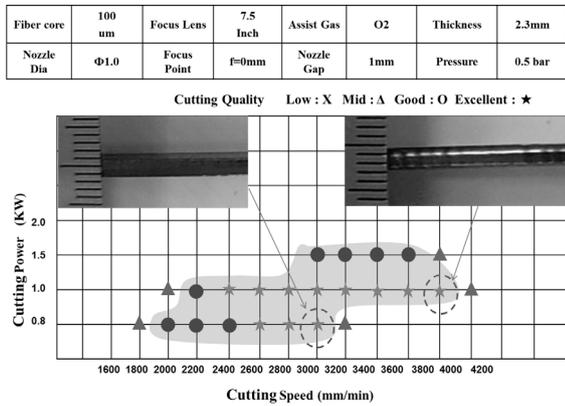


Fig. 8 The best cutting area (SS400 2.3mm)

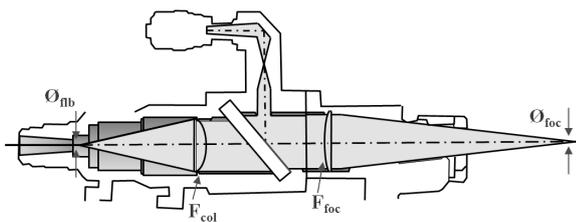


Fig. 9 Schematic diagram of the fiber transmission laser Processing head

Fiber core	100 μ m	Focus Lens	7.5 Inch	Assist Gas	O2	Thickness	3.2mm
Nozzle Dia	Φ 1.2	Focus Point	f=0mm	Nozzle Gap	1mm	Pressure	0.6 bar

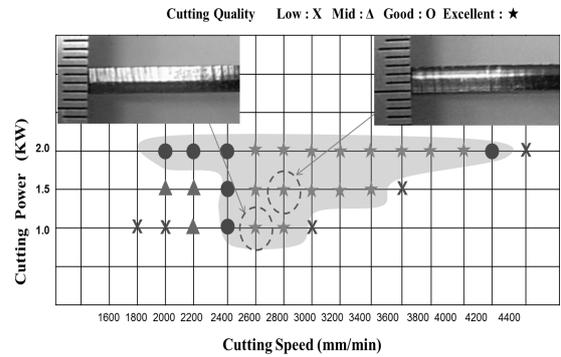


Fig. 10 The best cutting area (SS400 3.2mm)

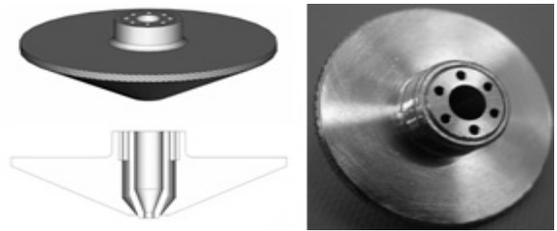


Fig. 11 Fiber Laser Dual cutting nozzle

Fig. 10은 3.2mm 에서의 파이버 레이저 최적 절단 영역 분포를 나타내었다. Fig. 9는 Fig. 7에 비해 소재 두께가 0.9mm 두꺼워 2.3mm에서는 주로 1.0kW에서 최상의 절단 품질 영역이 분포되었으나, 3.2mm에서는 2.0kW로 최상의 절단 품질 분포 영역이 이동되었음을 알 수 있다.

3.3 후판에서의 파이버 레이저 절단

후판의 절단의 경우 일반적인 1구형 노즐을 사용할 경우 노즐 끝단에서의 절단가스가 확산 분사되어 2kW 파이버 레이저에서 12mm까지 절단이 가능하였으나, Fig. 13과 같은 절단가스의 확산 분사가 최소화 되도록 노즐 특성을 변경한 이중형 노즐을 사용할 경우 20mm 까지 절단능력을 향상시킬 수 있었다. 이는 후판 절단일수록 후판 소재의 아래 부분까지 산화절단이 가능한 노즐 선택 역시 절단품질 및 절단 능력을 향상시킬 수 있는 중요한 요소임을 알 수 있었다.

Fig. 12는 SS400 16mm 후판소재에서 파이버 레이저 최적 절단 영역 분포를 나타내었다. 후판의 경우 안정된 최적 절단품질 영역을 확보하기 위해 10인치(254mm) 초점렌즈를 사용하여 초점크기를 190 μ m에서 254 μ m으로 증가시켰다. 레이저 출력의 증가와 함께 초점렌즈로 입사되는 에너지손실이 상대적으로 적어 기존보다 초점크기가 64 μ m 증가되면서 두꺼운 절단 소재를 용융 증발시켜 최적 절단영역을 확보할 수 있었다. 이

때의 레이저 빔의 출력은 1.5~2.0kW 이고 레이저빔의 이송속도는 650~850mm/min 였다. 초점크기가 커짐에 따라 절단노즐도 직경 3.5mm인 대구경 노즐을 장착하여 절단을 실시하였다.

Fig. 13은 SS400의 20mm 후판 소재에 대한 레이저 최적 절단 영역 분포를 나타내었다. Fig. 12에서와 같이 절단상태가 양호한 조건의 영역은 레이저 출력의 한계로 인해 매우 한정적이었다. 파이버 레이저 출력 2kW를 이용하여 SS400 소재의 판재 절단 최대 두께는 20mm 였다. 이때의 초점크기 254μm이며, 20mm 절단을 위한 레이저빔에 의한 단위면적당 입열량 범위는 44,900~46,300J/cm² 이었다. 레이저빔 이송속도에 따른 단위면적당 에너지 밀도 E(J/cm²)는 다음 식으로 계산하였고, 이때 레이저 빔의 흡수율(A=100%)의 변화는 고려하지 않았다.

$$E = \frac{A \cdot D}{m^2} \times \frac{P}{v} \quad (1)$$

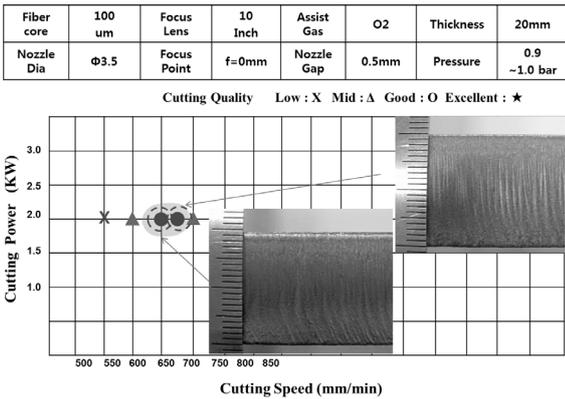


Fig. 12 The best cutting area (SS400 16t)

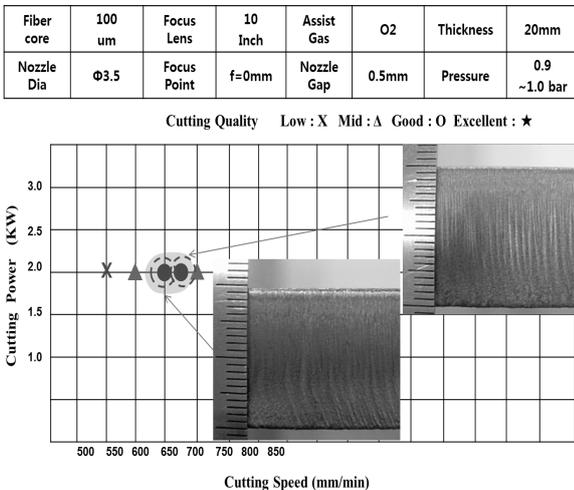


Fig. 13 The best cutting area (SS400 20mm)

A는 금속의 레이저빔 흡수율(%), D는 레이저빔이 시편표면에 조사된 초점직경, P는 레이저빔 출력, r은 레이저빔 조사반경, v는 레이저빔의 이송속도이다⁽⁹⁾.

3.4 CO₂ 레이저와 파이버 레이저의 절단 속도비교

2kW급 파이버 레이저와 4kW급 CO₂ 레이저 절단 속도를 비교하기 위해 일반적인 빠른 축 흐름(이하 FAF, Fast Axial Flow) 방식의 4kW급 CO₂ 레이저 2차원 판재 절단기 절단 조건표에서 제시된 SS400의 두께별 절단 속도를 실험 결과와 비교 분석하였다⁽¹⁰⁾.

비교 분석한 결과는 Fig. 14에서와 같이 4mm이하의 박판 소재에서는 2kW 파이버 레이저가 4kW CO₂ 레이저에 비해 빠른 절단이 가능했으며, 후판에서는 비교된 두 레이저의 절단속도는 동등 수준 이었다.

시편의 두께가 작을 때는 파이버 레이저가 월등하게 빠르게 절단이 되지만, 두께가 두꺼워지면 레이저빔이 시편의 내부로 매우 빠르게 손실되기 때문에 절단속도 차이 거의 없는 것으로 생각된다.

1.2mm 박판의 SS400 절단의 경우 파이버 레이저의 절단속도는 18m/min인데 비해 4kW CO₂레이저의 경우 절단속도는 8.8m/min로, 파이버 레이저가 약 2배의 속도로 절단이 이루어졌음을 확인 할 수 있었다. 이는 파이버 레이저의 경우 레이저빔이 광섬유 내부에서 전반사하면서 전달되는 flat op 형태의 에너지 분포를 갖지만, CO₂ 레이저는 레이저 빔이 반사경으로 전달되어 도넛 형태의 빔 에너지 분포가 형성되므로, 파이버 레이저가 시편표면에서 에너지밀도가 상대적으로 높기 때문에 발생하는 현상으로 생각할 수 있다. 또 하나는 CO₂레이저에 비해 파이버 레이저 파장이 약 1/10정도 작기 때문에 시편표면에서 레이저빔이 반사되어 손실되는 양이 작기 때문이라고 생각한다.

1.2mm 파이버 레이저 절단 시 초점크기는 190μm이었다. 1.2mm CO₂ 레이저의 빔 특성은 에너지 분포가 도넛 형태의 TEM₀₁ 저차모드이며 M² 값은 1.5이다.

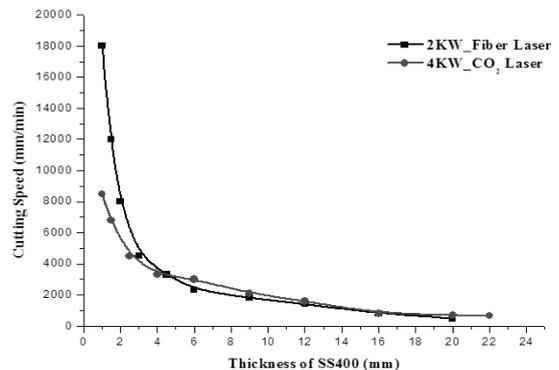


Fig. 14 Comparison of cutting speed with 2KW fiber laser and 4KW CO₂ laser (SS400)

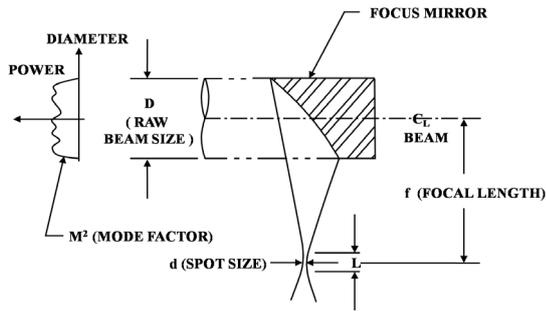


Fig. 15 Schematic diagram of the CO₂ laser

Fig. 15는 CO₂ 레이저를 이용한 절단 작업 시 광학계 구성부분을 나타내었다. CO₂ 레이저 박판 절단시 사용되는 초점렌즈는 5인치(125mm)를 사용하였고, 초점렌즈에 입사되는 Raw Beam size는 22mm 이며, 이때의 초점크기는 156 μ m였다. CO₂ 레이저의 초점크기는 다음 식으로 계산하였다.

$$d = \frac{4\lambda f}{\pi D} M^2 \quad (2)$$

λ 는 레이저의 파장, 즉 CO₂ 레이저 10.6 μ m, f 는 초점거리, M 레이저빔 모드 인수, D 는 입사빔 직경 이다⁽¹¹⁾.

1.2mm 박판 절단시 초점크기는 CO₂ 레이저가 파이버 레이저에 비해 17.8% 더 작지만, Fig. 4에서와 같이 파이버 레이저는 CO₂ 레이저에 비해 파장이 1/10으로 짧아 SS400조성의 약 99%를 차지하는 Fe 소재의 빔 흡수율이 30% 정도인데 비해 CO₂ 레이저는 7~8%로 약 4배 이상 파이버 레이저빔 흡수가 용이하다. 이는 특히 적은 입열량에도 쉽게 절단이 가능한 박판 절단에서 파이버 레이저의 절단 속도가 2배 이상 향상시킬 수 있음을 알 수 있었다.

4. 결론

SS400 소재의 파이버 레이저 절단을 통해 아래와 같은 결론을 얻었다.

- (1) 2kW 파이버 레이저를 이용하여 SS400 소재 20mm 까지 절단을 실시하였고, 20mm 절단을 위한 레이저빔의 단위 면적당 입열량 범위는 44,900~46,300J/cm² 이었다.
- (2) 파이버 레이저빔 흡수가 용이하여, 적은 입열량에도 쉽게 절단이 가능한 SS400 1.2mm 박판 절단에서 파이버 레이저의 절단 속도가 CO₂ 레이저에 비해 2배 이상 향상 되었다.
- (3) 후판 절단일수록 최적절단 영역이 한정적 이었으며, 12mm 이상 후판 절단의 경우 1구형 노즐이 아닌 절단가스의 분사 특성을 최적화한 이중형 노즐을 사용하여 20mm 까지 절단 품질을 확보할 수 있었다.

References

- (1) Powell, J., Al-Mashikihi, S. O., Kaplan, A. F. H., and Voisey, K. T., 2011, "Fibre Laser Cutting of Thin Section Mild Steel : An Explanation of the 'Striation Free' Effect," *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 49, No. 8, pp. 1069~1075.
- (2) Mahrle, A., Lutke, M., and Beyer, E., 2010, "Fiber Laser Cutting: Beam Absorption Characteristics and Gas-free Remote Cutting," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, Vol. 224, pp. 1007~1018.
- (3) Sobih, M., Crouse, P. L., and Li, L., 2008, "Striation-free Fibre Laser Cutting of Mild Steel Sheets," *Applied Physics A Materials Science & Processing*, Vol. 90, No. 1, pp. 171~174.
- (4) Namgoong, O. M., Oh, S. J., and Han, Y. H., 2008, "Application of Low Power Fiber Laser for Thin Plate Cutting," *proceedings of KSLP*, pp. 28~34.
- (5) Ahn, D. G., Byun, K. W., and Yoo, Y. T., 2007, "Effects of an Auto-tracking of the Focal Distance on the Quality of the Cut Part in the Laser Cutting of a Low Carbon Sheet," *The Journal of Manufacturing Engineering & Technology*, Vol. 16, No. 4, pp. 101~107.
- (6) Kaminski, D., 2011, "Laser Marking: How to Choose the Best Laser for Your Marking Application," *Journal of Laser Focus World*, 2011/04, pp. 12.
- (7) Kanaoka, M., 2000, *Laser Process Engineering*, Korea Industrial Information Center, Korea.
- (8) Dohnke, I., Peter, D., Comps, J., Sprunk, T., and Heiniger, K. C., 2004, "Modelling of Supersonic Gas Flow of Nozzles for Laser Cutting Systems," *Laser Assisted Net Shape Engineering*, Vol. 4, pp. 1025~1031.
- (9) Oh, Y. S., Shin, H. J., Yang, Y. S., Hwang, C. Y., and Yoo, Y. T., 2011, "A Study on the Fiber Laser Welding of Ultra-low Carbon Interstitial Free Steel of Automotive," *The Journal of Manufacturing Engineering & Technology*, Vol. 20, No. 3, pp. 342~349.
- (10) ROFIN-SINAR Laser GmbH, 2007, *The Slab Principle, A Fact Book for the Most Advanced CO2 Laser in the World*, pp. 16~18.
- (11) ROFIN-SINAR Laser GmbH, 2002, *Process Fundamental of Industrial Laser Welding and Cutting*, pp. 9.