

대출력 화이버 레이저 용접

이 목 영

A Multi Kilowatts CW Fiber Laser Welding

Mok-Young Lee

1. 서 론

레이저는 20세기 빛의 혁명이라고 일컬어질 정도로 짧은 개발역사에 비하여 광범위하게 적용되고 있다. 인류가 만들어낸 대표적인 발명인 초고속인터넷이 레이저의 광섬유 전송에 의하여 실현되었으며, 의료분야에서는 레이저를 이용하여 치료 및 시술을 행하고 있으며, 제조업에서는 MEMS에서 초대형 철강구조물에 이르기까지 레이저가 광범위하게 적용되고 있다.

지금까지 산업적으로 적용된 레이저는 CO₂ 레이저, Nd:YAG 레이저, Diode 레이저 등이 있다. 이러한 레이저 들은 레이저 출력, 에너지 변환 효율, 빔전송 등의 측면에서 제약이 있기 때문에 얇은 판재의 절단, 자동화된 대량 생산라인의 용접 등 제한적인 분야에 적용되어 왔다.

그러나 산업이 고도화되고, 인류의 생활수준 향상에 따른 욕구증대, 에너지 혹은 환경문제에 따른 효율향상 등의 필요에 따라 보다 출력이 높고 효율이 우수한 레이저에 대한 Needs가 증폭되어 왔다. 최근 새로운 개념을 기반으로 한 화이버 레이저가 출현하였는데, 안정성, 확장성, 이동성 등이 우수하여 관심이 고조되고 있다.

2. 화이버 레이저의 개요

근적외선 파장의 고체레이저는 재료에 대한 레이저빔의 흡수율이 우수하고 광섬유 전송이 가능하여 산업 적용이 급격히 증가하고 있다. 초기의 Nd:YAG 레이저는 램프여기에 의하여 레이저를 발생시켰는데, 아크램프는 자외선에서부터 적외선까지 전 영역의 빛이 방출된다. 그러나 레이저 발전에는 700~900nm 파장범위의 일부 빛만이 사용되며, 그 이외의 빛은 열로 변환되어 냉각매체를 이용하여 제거하여야 한다.

다이오드레이저 여기 방식은 유효여기파장의 레이저만을 방출하는 다이오드레이저를 이용하여 레이저 효율

이 크게 향상되었다. 그러나 여전히 직경이 굵은 crystal을 레이저 매질로 사용하여 열렌즈효과에 따른 빔품질 저하 문제가 발생하였다.

화이버 레이저는 직경이 가늘고 길이가 긴 화이버 형태의 레이저 매질을 이용하여 빔품질이 우수하고, 출력 증가가 쉬우며, 효율이 높은 장점이 있다. 그림 1에 rod, 화이버 및 disk 형태의 레이저 매질을 나타내었다.

화이버 레이저의 여기 광원은 single emitter diode를 사용하는데, 이것은 적층 다이오드에 비해 열발생이 적어 수명이 길고 micro cooling channel 대신에 냉각판을 사용하므로써 냉각수의 순도 및 온도의존성이

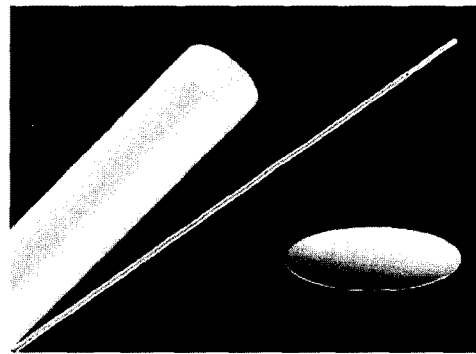


Fig. 1 Laser pumping medium

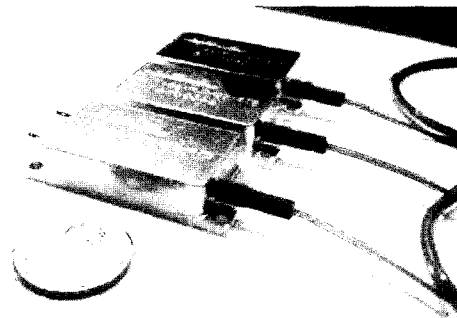


Fig. 2 Single emit diode

적으며, 하나의 셀이 파손되는 경우 인접한 셀이 연쇄적으로 파손되는 snowball 효과가 없기 때문에 출력이 균일하다. 여기서 다이오드는 광섬유에 의하여 전송되며 이 광섬유는 active fiber에 용착되어 손실이 적고, 기계적 진동 혹은 분진/습기 등의 환경적 외란에 강건하며, 수명이 반영구적이다.

화이버 레이저의 펌핑방식은 side pumping 및 end pumping이 있는데, 수kW 이상의 대출력에는 side pumping 방식을 사용한다. 그림 3에 side pumping 방식의 모식도를 나타내었다. 이 방식은 active fiber의 측면에 펌핑 레이저 화이버를 용착하는 것으로 외형 치수가 작으며 다수의 펌핑 레이저 배치가 용이하여 출력 증대에 유리하다.

그림 4에 나타낸 바와같이 화이버 레이저에서 active fiber는 내측 glass 클래딩 및 그 외측의 polymer 클래딩의 이중 클래딩 구조를 갖는다. Single emitter로부터 방출되는 펌핑 광원은 glass 클래딩 층에 입사되고 내측/외측 경계면에서의 연속적인 반사에 의하여 클래딩 층을 투과하면서 레이저 매질을 여기시켜 레이저를 발진시킨다.

레이저 매질에서 광증폭을 위해서는 매질의 양단에서 반사를 시켜야 하므로 한측은 전반사 거울을, 다른 한측은 50%를 반사시키는 부분반사 거울을 사용한다. Side pumping 방식의 화이버 레이저에서는 광섬유격자(FBG, Fiber Bragg Grating)을 설치하여 레이저를 반사시켜 반복적으로 증폭시킨다. 광섬유격자에 의하여 반사되는 레이저의 파장은 다음식과 같다.

$$\lambda_B = 2n\Lambda$$

여기서 λ_B : 브래그파장, n: 광섬유 굴절률, Λ : 격자간격
 화이버 레이저의 개념은 1963년 Elias Snitzer에 의하여 처음 고안되었으며, 1980년대 후반에 이르러서야 상업화가 되었다. 그후 1990년대에 4W Erbium-doped 화이버 레이저가 개발되어 와트레벨 레이저의 시대가 열렸으며, 그후 괄목할 만한 성장이 지속되어 최근에는 10kW 이상의 레이저를 생산하고 있다.

화이버 레이저는 직경 100 μ m 가량의 가는 active fiber를 사용하여 빔품질이 우수한 것으로 알려져 있다. 그림 7은 레이저 출력 10kW 화이버 레이저의 빔 품질을 측정할 예로서, process fiber 직경 300 μ m 및 집속렌즈의 초점거리 300mm인 경우 초점위치 근방의 유효 빔직경을 나타낸 것이다.

그림 8은 특정의 초점위치에서 레이저빔의 3차원 강도 분포를 나타낸 것이다. (a)는 정초점위치로부터 -10mm 상단 즉, 정초점위치를 소재 내부 10mm로 설정한 경우 시편 표면에서의 레이저빔 강도분포를 보여준다. 두께 10mm 이상의 두꺼운 소재 용접에서는 초점위치를 소재 내부에 설정하는데, 이 때 키홀이 형성되기 전 소

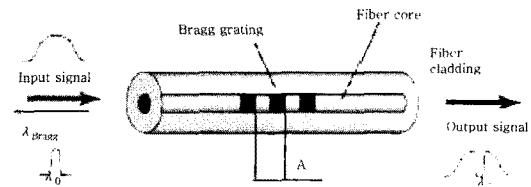


Fig. 5 광섬유격자의 개념도

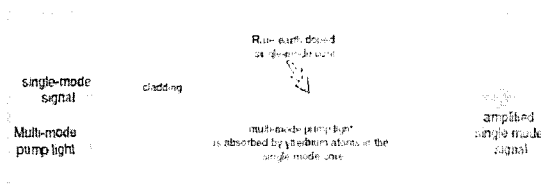


Fig. 3 Schematic view of side pumping

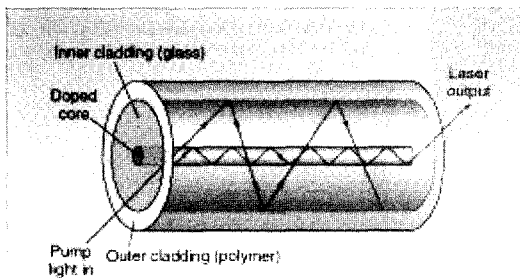


Fig. 4 Schematic design of active fiber

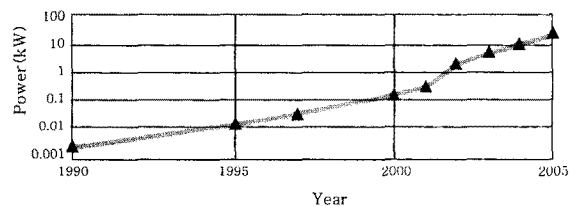


Fig. 6 The increase of the output power

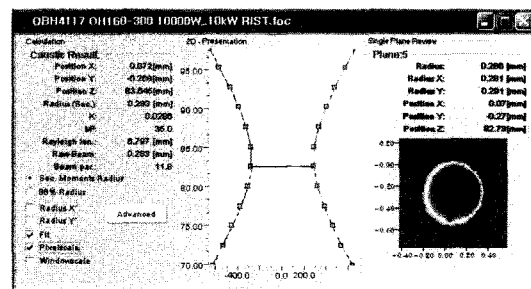


Fig. 7 Beam quality of fiber laser

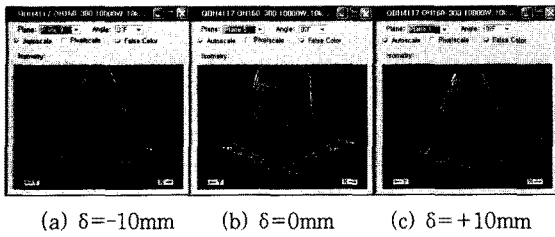


Fig. 8 3-D Energy distribution of fiber laser

재표면에 조사되는 레이저 빔의 강도분포에 해당한다. 레이저 빔 중심으로부터 거리에 반비례하여 강도는 비교적 완만하게 감소하여 상대적으로 낮은 강도구배를 보인다. (b)는 정초점위치의 강도분포를 나타낸 것으로, 유효 레이저 빔 직경 내에서 강도변화는 크지 않으며 그 외주에서는 강도구배가 매우 급격하였다. (c)는 레이저 정초점위치로부터 +10mm 하부에서의 강도분포를 나타낸 것으로 (a)의 -10mm 상부에서의 강도분포와 유사하여 매우 우수한 빔품질 보였다.

화이버 레이저는 확장성이 우수하여 레이저의 용량이 비교적 가파르게 증가하여 최근에는 30kW 급 CW 레이저가 양산판매되고 있다. 그림 9는 최대출력 30kW CW 화이버 레이저의 외형을 나타낸 것으로, 3개의 화이버 발진 캐비닛으로 구성되었다. Feeding fiber의 직경은 200 μ m, BPP는 10.8mm·mrad이며, 발진기의 바닥면적은 2m²이고, 소모 전력은 105kW로 28% 가량의 효율을 나타낸다.

화이버 레이저는 직경이 가는 active fiber 및 single emitter 여기 광원을 사용하고, 화이버 용착에 의한 optical coupling을 사용하여 소모부품이 적으므로 유지비용이 저렴하다. 그림 10은 레이저 종류에 따른 단위 시간당 용접비용을 비교한 것이다. 동일한 레이저 출력에 대해 초기 투자비는 기존의 CO₂ 레이저 혹은 램프 펌핑 Nd:YAG 레이저에 비하여 다소 높지만 낮은 출력으로도 종래의 레이저와 유사한 용접성능을 얻

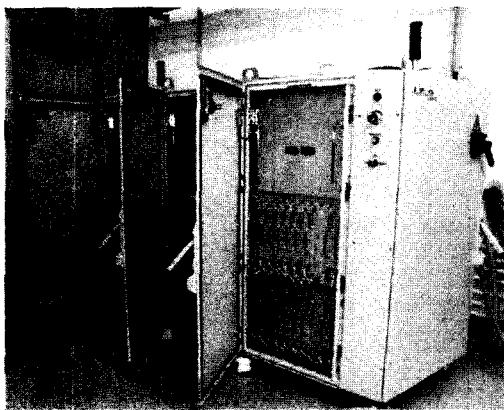


Fig. 9 Feature of 30kW CW fiber laser

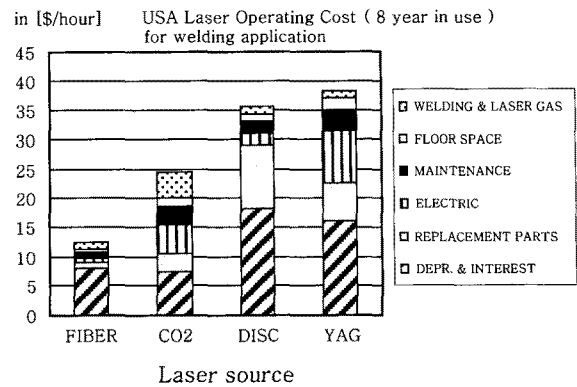


Fig. 10 Cost comparison according to laser type

을 수 있다는 점에서 유사할 것이다. 그 외에 소모품, 전력, 가스의 비용이 상대적으로 적게 소요되며, 유지/보수 인력 및 기회손실비용, 공간 활용 등 종합적으로 화이버 레이저의 용접비용이 가장 저렴하다. 레이저의 수명 8년을 기준으로 자동차용 강판에 대한 용접비용은 시간당 15,000~20,000원 가량이 소요되며, 레이저 출력 즉 용접두께에 비례하여 증가된다.

3. 대출력 화이버레이저의 응용

2006년부터 출시가 되기 시작한 10kW 이상의 화이버 레이저는 조선, 파이프라인, 중공업, 토목/건축 등에 적용이 기대된다.

대출력 화이버 레이저의 초기 응용은 자동차 차체 조립공정의 remote 용접이다. 광학계 혹은 피용접재를 이송하는 종래의 용접에서는 용접속도에 한계가 있지만, 광학계를 회전(tilting)시켜 레이저 빔을 이송하는 remote 용접에서는 초고속 용접이 가능하다. 특히 자동차 차체 조립공정의 부분(stitching)용접에서 용접 seam 사이의 이송시간을 최소화하여 사이클타임이 크게 향상되므로, 동일한 생산 설비에서 생산량이 증가된다. 그림 11에 remote 용접의 개념을 나타내었다. 초기에는 slab CO₂ 레이저를 이용하였는데, 플라즈마에 의한 레이저 빔의 흡수/산란 및 곡면부위 용접의 제약으로 적용이 어려웠다. 램프 펌핑 Nd:YAG 레이저는 플라즈마에 의한 외란이 적고, 광섬유 빔 전송으로 곡면 용접에는 유리하지만, 짐속 광학계의 초점이 짧기 때문에 실효성이 적었다. 화이버 레이저는 이러한 문제점 해결이 가능하여 양산 적용이 활발히 추진되고 있다.

화이버 레이저는 출력 증강이 용이하여 그 역사에 비하여 단시간에 매우 높은 출력의 레이저가 개발되었다. 두께 6mm 이하의 열연강판 혹은 냉연강판의 용접은 기존의 레이저 혹은 아크용접으로도 충분하므로, 화이

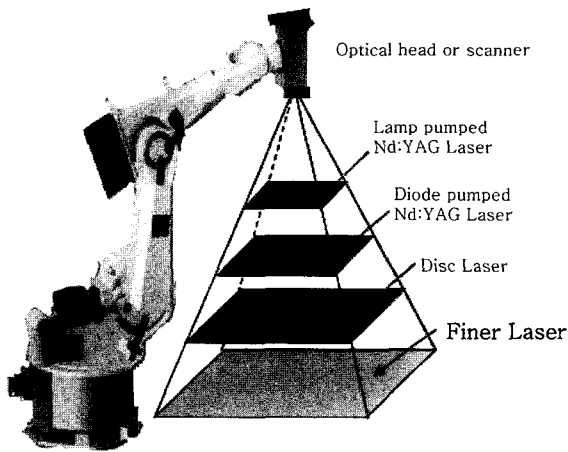


Fig. 11 Concept of remote laser welding

버 레이저는 기존의 방법으로 용접이 어려운 후판 용접이 가능해야 한다. 그림 12는 스테인리스강에 대한 최대출력 20kW, 초점직경 420 μ m의 화이버 레이저의 용접성능을 나타낸 것이다. 두께 25mm의 스테인리스강을 1m/min의 속도로 용접이 가능하며, 20m/min의 용접속도로는 두께 3mm까지 1 패스로 용접이 가능하다. 최대출력 10kW 이상의 화이버 레이저는 두께가 두꺼운 후판의 용접이 가능하다는 장점을 갖고 있지만, 용접시 0.3MW/mm² 이상의 매우 높은 에너지 밀도를 갖기 때문에 지금까지 겪어보지 못했던 새로운 문제들이 발생하는 것으로 알려져 있다. 후판을 화이버 레이저로 용접하는 경우에는 직경이 작고 깊은 키홀이 형성되므로, 키홀내부의 높은 플라즈마 압력으로 인하여 스파터 발생이 심해지며, 비드 저면의 기공 잔존 가능성이 증가한다.

Katayama 등은 대출력 화이버 레이저 용접에서 플라즈마와 레이저빔의 상호작용을 알아보았다(그림 13). 화이버 레이저와 동일한 파장의 probe laser를 키홀 상부의 플라즈마 형성부위에 조사하고 맞은 편에 설치

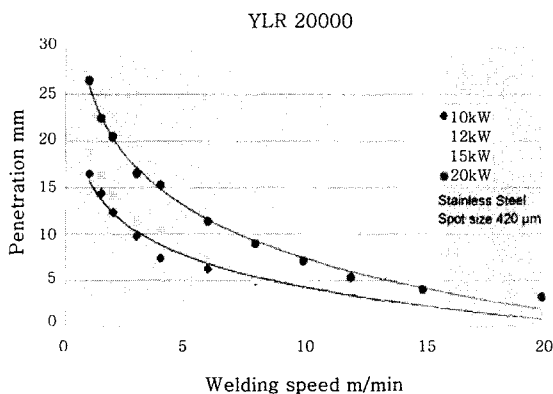


Fig. 12 Welding performance of fiber laser for stainless steel

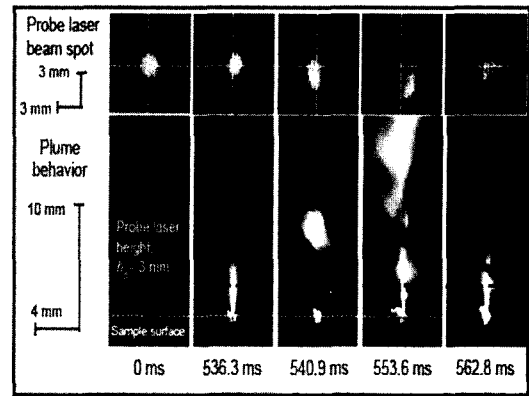


Fig. 13 Laser - plasma interaction in high power fiber laser welding

된 세라믹판에 반사되는 레이저의 형태를 관찰하였다. Nd:YAG 레이저에서 플라즈마의 영향이 거의 없는 것으로 알려졌으나, 대출력 화이버 레이저에서는 플라즈마에 의하여 레이저 빔이 산란/흡수되는 것으로 보고하였다.

조선산업에서 레이저를 적용하기 위해서는 출력 10kW 이상의 레이저가 요구되었으며, 이것을 충족시키기 위해서는 CO₂ 레이저를 사용할 수밖에 없는데, CO₂ 레이저 빔을 전송하기 위해서는 반사광학계를 사용해야 하므로, 플랜트를 신규로 건설하여야만 하였다. 화이버 레이저는 외형 치수가 작고, 기계적 진동에 강건하므로 이동성이 우수하여 기존의 생산현장에 적용하기 위한 연구가 활발히 진행되었다. 그림 14는 EU 프로젝트로 개발된 DOCK-LASER의 응용 예를 보여준다. 이 프로젝트에서는 최대 출력 10kW의 화이버 레이저 발전기 및 냉각기를 컨테이너에 탑재를 하고, 이것을 크레인 혹은 트럭으로 이동시키면서 기존의 생산현장에 적용하기 위한 연구를 수행하였다. 그 결과로서 tractor guided cutting head에 의한 in-situ 후판 절단, 하이브리드 용접 등의 기술을 개발하였다. 이 외에도 라인파이프 원주용접, 콘크리트 절단, 지뢰제거 등에 적용하기 위한 연구가 진행되고 있다.



Fig. 14 Mobile DOCK-LASER for shipbuilding

4. 대출력 화이버레이저 용접 시험

국내 제조업에 대출력 화이버 레이저를 본격 적용시켜 국가 경쟁력에 향상에 기여하기 위하여 용접센터에서 증기저점과제의 일환으로 최대 출력 10kW의 화이버 레이저를 도입하였다. 화이버 레이저의 용접성능을 평가하기 위하여 두께 12mm의 5000계열 알루미늄 및 SS400 구조용 강재를 사용하였다. 용접을 위하여 폭 100mm × 길이 200mm 시편을 고정지그로 고정한 후, 레이저 용접실험을 수행하였다. 용접공정변수에서 레이저 출력은 8kW로 고정하고 용접속도를 변화시켰으며, 보호가스는 유량 25l/min의 아르곤을 사용하였다.

그림 15는 연강에 대한 화이버 레이저의 용접부 외관을 용접속도에 따라 나타낸 것이다. 대출력 레이저에 의하여 용접비드 폭이 다소 넓기는 하였으나 비교적 양호한 용접표면품질을 보였다.

그림 16은 연강에 대한 화이버 레이저 용접부 단면을 용접속도에 따라 나타낸 것이다. 용접속도가 느린 1m/min에서 루트부에 미세한 기공이 형성되었으나, 그 이상의 용접속도에서는 기공 및 균열 등의 내부결함이 없는 매우 건전한 용접부를 형성하였다. 용접속도가 빠른 5m/min에서는 under cut이 형성되었는데, 이는 보호가스의 양이 많고 표면에 산화피막이 있었기 때문이다. 이러한 under cut은 보호가스의 유량조정 및 표면 산화피막 제거에 의하여 감소되었다.

그림 17은 연강 및 5000계열 알루미늄 합금에 대한 대출력 화이버레이저의 용접특성을 나타낸 것이다. 용접속도 1m./min에서 연강의 최대 용입깊이는 11.6 mm이며, 비드의 폭은 5mm 가량이였다. 알루미늄 합금에 대

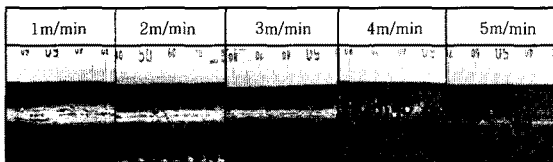


Fig. 15 Appearance of weld bead

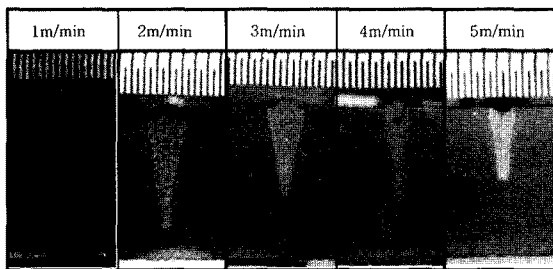


Fig. 16 Cut views of welds

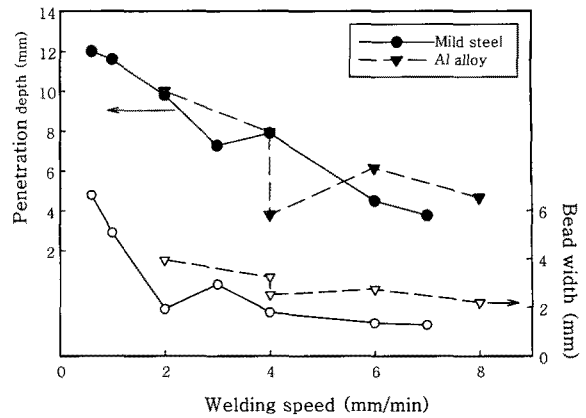


Fig. 17 Penetration and bead width change according to welding speed

해서는 용접속도 2m/min에서 용입깊이는 10mm이었으며, 이때 비드폭은 4mm가량이였다. 일반적으로 전기전도도 및 열전도도가 우수한 알루미늄 합금은 소재의 레이저빔 흡수율이 낮고, 레이저 빔이 흡수되어 변환된 열이 상대적으로 빠른 속도로 전도되어 손실되므로 철강재에 비하여 용입깊이가 낮거나 용접속도가 느린 것으로 알려졌다. 그러나 레이저 출력이 상대적으로 높은 대출력 화이버레이저에서는 용접성능이 유사하거나 오히려 연강에 비하여 알루미늄의 용접성능이 다소 우수한 것으로 나타났다.

5. 결 론

대출력 화이버 레이저의 특성을 알아보고, 후판소재의 용접에 대한 적용성 검토 결과는 다음과 같다.

1) 대출력 화이버레이저는 빔품질이 우수하고, 물리적 충격에 강건하며, 에너지 효율이 우수하여 향후 적용이 급격히 증가할 것으로 예상된다. 특히, 장비 구성이 간단하고 무게가 가벼우므로 기동성을 요구하는 조선 혹은 현장용접에 적합하였다.

2) 대출력 화이버 레이저의 용접특성은 기존의 lamp pumping Nd:YAG와는 다소 상이한 용접특성을 보였다. 그러나 깊은 용입 및 빠른 용접속도에서도 내부 결함은 거의 없는 우수한 용접부 품질을 나타냈다.

참 고 문 헌

1. W.W. Duley: Laser Welding, John Willey & Sons, Inc.
2. V. Gapontsev, W. Krupke: Fiber lasers grow in power, Laser Focus World, Aug. 2002, 83-87
3. V. Gapontsev: Ultra high power ytterbium fiber

lasers, PICALEO 2004

4. V. Gapontsev et. al.: US patent No. 5, 999, 673, 1996
5. L. Quintion, A. Costa, R. Miranda, D. Yapp, V. Kumar and, C.J. Kong : Welding with high power fiber lasers - A preliminary study, Materials and Desigh, 28 (2007), 1231-1237
6. Antti salminen and Anna Fellman: The effect of laser and welding parameters on keyhole and melt pool behavior during fiber laser welding, ICALEO 2007, 416-422
7. X. Zhang, E.Ashida, S. Katayama, M. Mizutain, Y Anma ans X. Luo: High power fiber laser welding of thick steel at low welding speed, ICALEO 2007, 850-857
8. H. Nagayama, M. Mizutani, Y. Kawahito and S. Katayama: Weld penetration and welding phenomena of aluminum alloy with high-power fiber laser, ICALEO 2007, 916-924
9. S. Katayama, Y. Kawahito, K. Kinoshita, N. Matsumoto and M. Mizutani: Weld penetration and phenomena in 10kW fiber laser welding, ICALEO 2007, 353-359



- 이목영 (李穆泳)
- 1965년생
- 포항산업과학연구원 용접연구실
- 대출력화이버레이저용접, 하이브리드용접
- e-mail: acceleee@rist.re.kr