

Nd:YAG 레이저 하이브리드 용접의 공정변수에 대한 연구

A Study on the Processing Variables of Nd:YAG Hybrid Laser Welding

현대중공업(주) 산업기술연구소 박영수, 신정현, 이윤식, 김 찬, 김형식

I. 서론

하이브리드 레이저(Hybrid laser) 용접은 기존의 용접에 비해 고속, 열변형 감소 등을 달성할 수 있는 효과적인 용접기법으로 후판을 주로 사용하는 조선산업에 적용이 가능하며 많은 연구가 진행되고 있다 레이저 용접은 저입열, 고속용접의 장점에도 불구하고 부재의 용접 두께 제한, JIG나 Fit-up 조건, 높은 시설 투자비 등으로 제한적으로 적용되어 왔으나 고출력 레이저의 개발 및 안정성 확보와 더불어 하이브리드 레이저 용접기술의 개발로 레이저 용접의 장점을 살리면서 현장 적용성을 높여가고 있다 즉 기존의 정도관리 수준으로 하이브리드 레이저 용접을 적용하여 레이저 용접 수준의 열변형 감소효과와 생산성 향상을 달성할 수 있게 된 것이다 하이브리드 레이저 용접은 아크열에 의한 용융풀(weld pool)에 레이저빔을 조사함에 따라 레이저빔 에너지의 흡수율을 증가시켜 용입증가 또는 용접속도 증가 효과를 얻을 수 있는 장점이 있는 반면에 두 가지 열원을 동시에 사용하므로 다양한 용접변수가 존재하며 적정화하기가 어렵다 따라서 용접변수를 적정화하기 위해 지속적인 연구가 진행되고 있으나 각각 적용되는 레이저와 아크용접기의 특성이 다르며 기타 변수들의 다양화로 적정화에 대한 연구는 시스템별로 이루어지고 있으며 경향성만 파악하고 있는 실정이다 상용으로 운용중인 Nd:YAG 레이저는 CO₂ 레이저에 비해 최대출력이 작지만 광파이버(optical fiber) 전송이 가능하므로 현장의 주변 여건에 대응하여 안정되게 빔을 작업영역까지 전송할 수 있는 장점이 있다 따라서 효율적인 빔 전송이 필요한 레이저로봇 가공시스템에 적용이 증가하고 있으며 DOCKLASER 프로젝트 등 조선이나 중공업분야에도 적용을 위한 연구가 활발하게 진행되고 있다[1][2] 따라서 본 연구에서는 하이브리드 레이저 용접공정을 필릿조인트에 적용함에 있어서 펄스용접조건을 적정화와 함께 Off-set과 Separation 등 여러 변수에 따른 용접성을 관찰하여 상관관계를 알아보았다

II. 실험방법

본 연구에 사용한 하이브리드 레이저 용접시스템은 갠트리 형태로 7m*3m*1m범위의 영역에서 버트조인트와 필릿조인트 용접이 가능하도록 X, Y, Z, C, T, Zt, Yt 방향의 7축 조절이 가능한 시스템으로 제작하였으며 그림 1에 하이브리드 레이저 용접시스템의 헤드 사진을 나타냈다 하이브리드 레이저 용접을 위한 파워소스로 4kW급 Nd:YAG레이저(HL4006D)와 450A급 GMAW 용접기(MILLER Invision 456P)를 사용하였으며 정밀한 용접을 위해 용접선을 추적할 수 있는 레이저 비전센서를 부착하였다. 또한 용접시 발생하는 스패터와 흡은 에어 크로스젯(air cross-jet)을 이용하여 고압으로 에어를 취입하여 광학계의 손상을 방지하였다.

필릿 용접시 안정적인 비드를 얻기 위해 연강(SS 400)위에 BOP(bead on plate)조건에서 펄스 GMAW 용접변수 조절을 통해 비드 퍼짐성 및 안정성에 관련된 하이브리드 용접성을 확인하고 이후 필릿조인트에서 완전용입이 가능한 조건 설정과 함께 부분용입에서 용접속도를 증가시키며 레이저빔의 초점위치 변화에 따라 스패터가 적고 각장형상이 안정적인 용접조건을 확보하기 위한 실험을 진행하였다

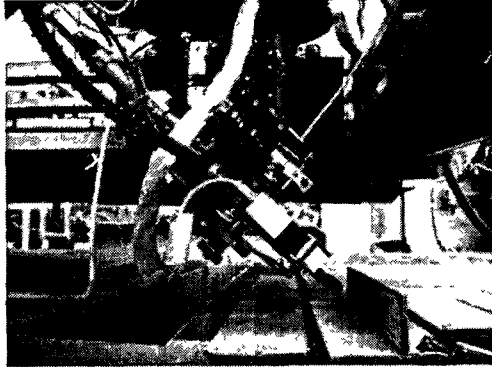


Fig 1 하이브리드 레이저 용접 헤드

III. 결과 및 고찰

1. BOP 용접

하이브리드 레이저 용접은 레이저와 GMAW에 관련된 변수들이 상호 영향을 미치기 때문에 적절한 용접조건을 찾기가 쉽지 않다 용접시 공정변수로는 용접속도, 레이저 출력, 레이저빔의 초점거리, 레이저빔과 와이어 끝단과의 거리, 아크의 전류, 전압, 와이어 송급속도, 펄스폭 등이 제어변수가 된다 또한 보호가스는 비드형상 및 용입깊이에 영향을 끼치므로 적절한 가스를 선정할 필요성이 있으며 통상 MIG/MAG 용접에서 아르곤은 안정된 스프레이 이행을 하므로 스파터 발생이 적고 안정적인 용접결과를 얻을 수 있으며[2] 본 연구에서 진행한 하이브리드 레이저 용접에서는 일반적으로 많이 사용하고 있는 Ar(80%)/CO₂(20%)의 비율인 혼합가스를 사용하였다 그리고 용접성에 영향을 미치는 변수 중 레이저 출력, 초점위치, 용접속도, 가스유량, GMAW토치의 위치 등은 고정하고 펄스 용접 조건 조절을 통해서 안정적인 용접을 이룰 수 있는 조건을 확인하고자 하였다 펄스용접시 주요 변수로는 피크 전압(Vpk, Peak voltage), 피크전류(Apk, peak current), 베이스전류(Abk, base current), 펄스 개수(PPS, pulse per second), 펄스폭(PWms, pulse width)등이 있으며 각각의 변화에 따른 비드 형상, 비드폭, 여성고, 스파터, 언더컷 등에 대한 조사를 통해 각각의 변수에 따른 용접성을 확인할 수 있었다 여러 변수 중 피크전압, 피크전류, 베이스 전류의 증가에 따라 비드폭이 약간 증가한 반면에 여성고의 변화에는 큰 영향을 미치지 않았으나 펄스개수와 펄스폭에 증가에 따라서 변화의 폭이 커짐을 관찰할 수 있었다 그림 2는 펄스폭과 펄스개수의 변화에 따른 비드폭과 여성고의 높이를 나타냈는데 그래프에 나타나듯이 적정범위까지 펄스폭 증가와 펄스개수 증가에 따라 비드폭이 넓어지고 안정적인 용접성을 얻을 수 있음을 알 수 있다

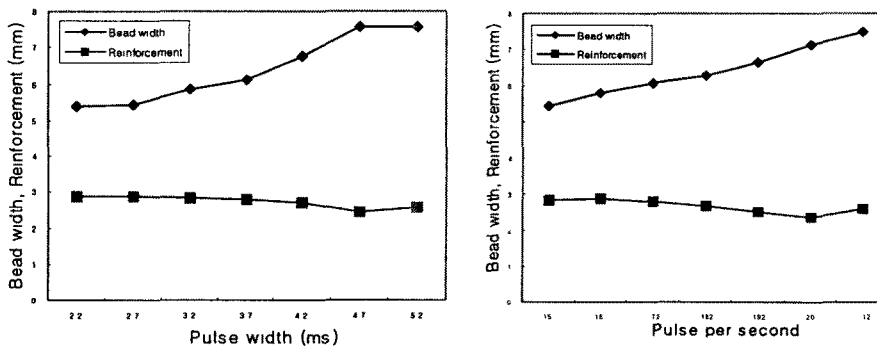


Fig 2 펄스폭과 펄스개수 변화에 따른 비드폭과 여성고

펄스폭을 증가시키면 와이어 끝단에서 낙하하는 용융금속의 용적이 크게 되며 또한 초 당 이송되는 펄스수를 증가시키면 용융된 액상 금속의 이동속도가 증가하므로 용접부 표면의 비드폭이 증가하여 폭 넓은 비드를 얻을 수 있는 것으로 예측된다 이상의 실험을 통해 펄스 GMAW 용접에서와 마찬가지로 하이브리드 레이저 용접시 펄스개수와 펄스폭에 관련된 변수들이 비드 퍼짐성에 주된 영향을 미치는 것을 알 수 있으며 이를 통해 필릿용접시 비드의 퍼짐성을 양호하게 할 수 있도록 적절하게 조절하여 실험에 적용하였다

2. 필릿조인트 용접

필릿용접은 완전용입을 얻기 위한 조건 설정과 필요한 각장을 유지하면서 입열을 최소화하기 위한 부분 용입에 대해 실험하였다 완전용입을 위해서 레이저 출력은 최대 4kW로 고정하여 사용하였고, 초점위치는 부재 표면에서 2mm 아래에 위치하도록 설정하였다 완전용입을 위한 용접공정이므로 GMAW아크의 위치와 레이저빔의 상하 초점위치(separation)를 조절하였는데 GMAW아크는 필릿 조인트면에서 상면 비드를 형성하기 때문에 Base판과 Web판이 맞닿는 선에 아크 포인트를 정확히 위치시켜야 하고, 레이저빔은 조인트부를 관통하여 반대편까지 키홀을 형성할 수 있도록 GMAW 아크보다 상부에 위치하게 된다 즉 그림 3과 같은 필릿 조인트에서 레이저빔의 조사각도를 30도로 설정하면 Web의 두께가 6mm인 경우 레이저빔은 아크 포인트에서 3.46mm상부에 조사되어야 하며 완전용입되기 위해서는 레이저빔에 의한 용입 깊이가 6.93mm인 것을 알 수 있다 또한 Web의 두께가 7mm에서 레이저빔은 조인트에서 위로 4.04mm 위에 조사되고 완전용입이 되기 위해서는 레이저에 의한 용입깊이가 8.08mm인 것을 알 수 있다 레이저빔의 조사각도를 30도 이하로 낮추면 용입각도가 달라져 조사위치가 더 낮아짐을 예측할 수 있다

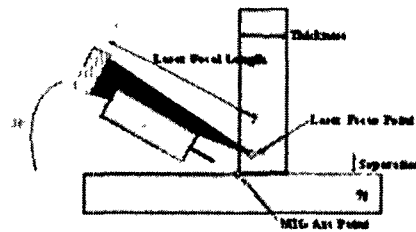


Fig. 3 레이저빔과 GM 아크 포인트의 설정 위치

필릿용접에 있어서 레이저빔과 GMAW아크의 간격과 각각의 용접변수에 따라 용접성에 영향을 미쳤으며 여러 변수들을 조절하여 6mm, 7mm 부재에 대하여 적정조건을 도출한 결과 그림 4와 같이 완전용입을 얻을 수 있었다

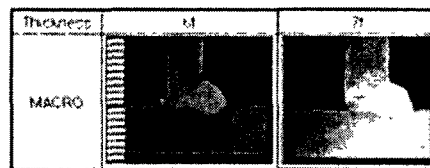


Fig 4 완전용입된 용접부 단면

실험에 사용된 부재 두께 6mm, 7mm 에서의 하이브리드 레이저 용접시 완전용입 조건에서는 분당 대략 1m의 정도의 속도로 이송되기 때문에 입열량이 많아 용접 후 부재의 변형이 증

가되는 등 저입열 기법의 장점을 얻기가 어려웠다 따라서 용접속도를 증가시켜 허용강도에 필요한 각장 형성과 동시에 비드를 안정화시키기 위한 조건을 확립하였다. 우선 예비테스트를 통해 용접속도를 증가시켜 대략적인 조건을 확보하였으나 블록비드의 과다 형성과 비드 형성시 안정성이 부족한 문제점이 있어 이를 안정화하기 위해 레이저빔의 초점위치와 아크포인트와의 거리에 따라 적정화되는 위치를 알아보았다 그림 5에 아크 포인트와 레이저빔 초점위치와의 전후 위치 차이를 off-set으로 정하고 상하 차이를 Separation으로 정해 각각 일정하게 증가시켰다

하이브리드 레이저 용접공정은 선행하는 열원에 따라 용접성에 영향을 미치는데 경우에 따라 적절한 방법이 적용되고 있으며 본 실험에서는 하이브리드 용접헤드 구성 및 비전센서 시스템의 활용을 위해 아크선행 방법을 적용하였다

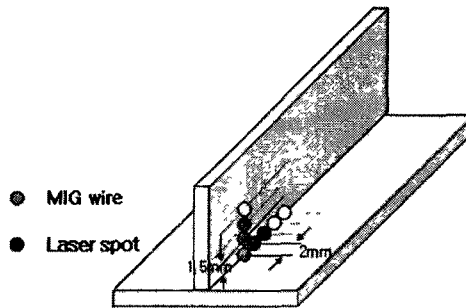


Fig 5 Off-set과 separation의 결정

아크포인트는 비드형성 및 아크 안정화를 위해 하부판과 Web 부재가 맞닿는 면에 고정하였으며 레이저빔 조사 위치는 아크포인트와 동일한 위치에서 순차적으로 2mm씩 증가시키고 이후 위쪽으로 Separation 간격을 15mm, 3mm로 증가시키며 용접을 수행하였으며 용접 후 비드면과 단면을 확인하여 위치 변화에 따른 용접성을 알아보았다. 용접조건은 예비테스트를 통해 얻어진 결과를 바탕으로 레이저 출력, 이송속도, 피크전압, 피크전류, 베이스전류, 펄스개수, 펄스폭은 고정하였으며 아크포인트와 레이저빔의 조사위치를 변화시켰다 그림 6은 Off-set을 0으로 하고 Separation을 2mm, 4mm, 6mm, 8mm, 10mm까지 증가시키며 비드형상을 관찰한 사진인데 레이저빔의 위치가 아크포인트와 같은 경우 약간의 언더컷이 발생하고 전체적으로 블록비드가 형성되었다. 점차 Off-set을 6mm이상 떨어뜨리게 되면 여성고가 낮아지고 비드가 안정화 되었으며 10mm 이상에서는 언더컷은 발생하지 않았으나 다시 블록비드 형상이 관측되었다 또한 Separation을 약간씩 증가시키고 Off-set을 주게 되면 아크포인트와 레이저빔이 일직선에 있는것보다 상각장 형성은 양호하여 비드 위쪽의 퍼짐성이 아주 우수하게 나타났으나 하각장 형성은 다소 부족한 양상을 보였다 이는 아크에 의해 형성된 용융풀과 레이저빔에 의해 형성된 킨홀사이에 열원의 중첩 및 표면장력에 의해 비드가 끌려가며 만일 이중초점광학계를 사용하여 집속된 두 빔의 Separation을 +2mm, -2mm에 위치시킨다면 좀더 퍼짐성이 좋고 안정된 비드를 얻을 수 있다고 예측할 수 있으며 상세한 메커니즘에 대한 부분은 추가 연구를 통해 규명할 필요성이 있다

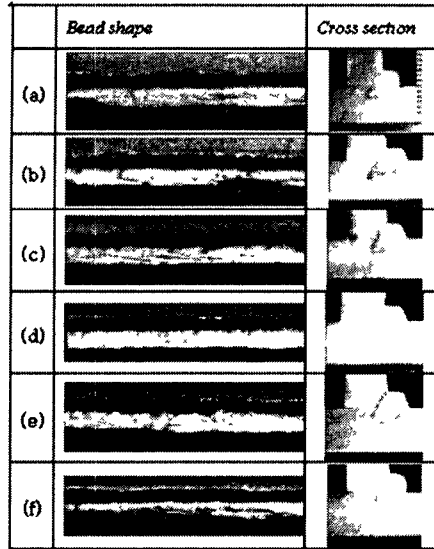


Fig 6 레이저 조사위치(off-set)에 따른 용접부 형상
(a)0mm, (b)2mm, (c)4mm, (d)6mm, (e)8mm, (f)10mm

IV. 결론

필릿 조인트에 대한 하이브리드 레이저 용접에서 펄스용접조건에 대한 최적화와 레이저빔의 조사위치를 최적화하기 위한 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다

- 1) 하이브리드 레이저 용접에서 완만한 비드폭과 안정적인 각장형성에 영향을 미치는 주요 인자는 펄스 개수와 펄스폭으로 이 값이 일정한 영역까지 증가하면 비드폭의 증가와 완만한 비드형상을 얻을 수 있다
- 2) 필릿조인트 용접시 완전용입을 얻기 위하여 레이저빔의 조사위치와 입사각도는 용입두께에 따라 적절하게 조절되어야 한다
- 3) 필릿조인트 용접시 입열량을 줄이며 고속 용접이 가능한 부분용입에서 완만한 비드형상과 안정적인 용접 결과를 얻을 수 있는 조건은 레이저와 아크의 거리(off-set)와 높이(separation)가 적정하게 유지되어야 한다

V. 참고문헌

- 1 Frank Roland, Luciano Manzon, Pentti Kujala, Advanced Joining Techniques in European Shipbuilding, Journal of Ship Production, Vol 20, No 3 (2004)
- 2 D S Howse, C H J Gerntsen Welding of Structural Steel Components with High Power, Fibre delivered Nd YAG Lasers, 2nd International Conference on Recent Developments and Future Trends in Welding Technology (2003)
- 3 Claus Bagger, Flemming O Olsen Review of laser hybrid welding, Journal of Laser Applications Vol 17 No 1 (2005)