

초극박재 냉연코일의 연속조업을 위한 Laser Line Welder

최준^{a,b*}

Laser Line Welder for Continuous Operation of Cold-rolled Steel Coil

Jun Choi^{a,b*}^a Engineering Research Center, POSCO, 1 Geodong-dong Nam-gu, Pohang, Gyeongbuk, 790-300, Korea^b Green Technology Center, Korea Institute of Industrial Technology, 55 Jongga-ro, Jung-gu, Ulsan 681-310, Korea

ARTICLE INFO

Article history:

Received	30	April	2014
Revised	16	June	2014
Accepted	14	October	2014

Keywords:

Laser line welder (LLW)
Disk laser
Ultra-thin steel plate
Continuous operation

ABSTRACT

A laser line welder using a solid-state laser (Yb:YAG) has been manufactured for joining ultra-thin cold-rolled steel coils in steelworks. The coils to be welded primarily range from 0.15 to 0.3 mm in thickness and 800 to 1,100 mm in width. Because the steel plate is extremely thin, it is very important to control the stop positions of the clamp at cutting and welding points. In this study, both hydraulic proportional control valves and LVDT sensor embedded cylinders were used to precisely control and monitor the positions of clamps with complementary stoppers. As a result, the positions could be controlled within an error of $\pm 30 \mu\text{m}$. Erichsen cupping tests on the welded joints show that the Erichsen index ranges from 4.4 to 4.6 mm. Furthermore, the tensile strength of welding points is comparable to that of the base metal.

1. 서론

철강 산업에서 웰더(welder)는 연속소둔라인(continuous annealing line), 산세와 냉간압연기(pickling and cold rolling mill), 정정라 인(re-coiling line), 연속아연도금라인(continuous galvanizing line) 등의 냉연 강판 제조 공정을 비롯하여 전기 강판과 STS 제품 생산, 빌렛(billet)을 이용한 선재 공정까지 다양한 형태로 변화하면서 연속 조업이 가능하도록 선, 후행재를 용접하는 매우 중요한 설비이다. 해당 공정의 웰더에서 용접부의 용접품질이 확보되지 않으면 용접 후에 이어지는 텐션 레벨링, 냉간 압연, 소둔, 정정 공정 등의 후속 작업에서 예기치 않은 스트립(strip)의 판과단을 초래할 수 있으며 이는 심각한 생산성 저하와 조업자 피로 누적으로 이어지게 된다. 따라서 용접 후 후속 작업에서 일어날 수

있는 용접부의 판과단을 사전에 방지하고 안정적인 조업을 가능하도록 하기 위해서는 용접부가 모재부 이상의 인장강도 및 굽힘강도를 가져야 한다. 이처럼 철강 공정에서 연속 작업을 위해 매우 중요하며 필수적인 설비인 웰더는 용접에 사용하는 열원 에너지의 종류에 따라 전기저항을 이용하는 플래쉬 버트 웰더(flash butt welder)와 심 웰더(seam welder)부터 플라즈마 레이저를 이용한 웰더까지 다양하게 발전하고 있다^[1-3]. 특히, 최근에는 새로운 수요에 따른 여러 가지 합금강의 개발로 인해 레이저를 이용한 웰더의 개발이 활발히 이루어지고 있다^[4,5].

현재 철강 산업에서 이용되고 있는 레이저 웰더는 대부분 독일, 일본 등의 소수 메이커(maker)에서 제작되어 공급되고 있는 실정이다. 또한 지금까지 제철소에서는 레이저 웰더에 대부분 CO₂ 레이저를 적용하였다. CO₂ 레이저는 레이저 빔 전송을 위해 구리 반

* Corresponding author. Tel.: +82-52-980-6680

Fax: +82-52-980-6669

E-mail address: junchoi@kitech.re.kr (Jun Choi).

사경(copper mirror)을 사용하는데 이러한 방식은 먼지가 많이 발생하는 제철소의 환경에 맞지 않아 주기적으로 정비해야 하는 문제가 있었다^[6]. 본 논문에서는 국내 제철소에서 최초로 구리 반사경을 사용하지 않고, 광 섬유(optical fiber)로 레이저 빔을 전송하는 방식인 디스크(disk) 레이저를 적용하여 레이저 라인 웰더(laser line welder, LLW)를 개발하였다.

본 논문에서 제작된 LLW는 제철소 냉연공정의 정정라인(re-coiling line)에서 초극박재 코일 용접에 적용되었다. 또한 두께 0.15~0.3 mm, 폭 800~1,100 mm의 초극박재 코일을 레이저로 맞대기 용접할 때, 용접품질을 향상시키고 안정적으로 조업하기 위해서 스트립의 절단과 용접위치를 정밀 제어할 수 있는 클램프(clamp) 장치를 개발하였다. 본 논문에서는 개발된 정밀 제어 장치의 성능을 LVDT 센서를 이용하여 검증하는 연구 및 실험을 수행하였고, 이를 통해 LLW에 의한 코일의 용접부가 기계적, 물리적 요구 사항을 만족시키는지 확인하기 위한 실험결과를 보인다. 마지막으로 초극박재 스트립을 맞대기 용접할 때 나타나는 용접결합과 이로 인한 용접품질 저하에 대한 연구와 실험을 수행하고자 한다.

2. 레이저 라인 웰더와 클램프 장치

2.1 레이저 라인 웰더의 장치 구성 및 제작

본 논문에서 사용된 레이저는 Yb:YAG(파장 λ : 1030 nm)를 이용한 디스크 레이저^[7,8]이며 코일의 절단 및 용접에 모두 레이저가 적용되었다. 레이저 출력은 최대 4 kW이며 절단과 용접 속도는 10~20 mpm, 절단 가스는 주로 질소를 사용하였다. 개발된 LLW는 냉연공장의 정정라인에서 선, 후행 코일을 용접하여 냉연코일 제품을 연속 생산하기 위한 목적으로 제작, 설치되었다. 일반적으로 선행 코일의 작업이 완료되면 후행 코일이 페이 오프 릴(pay off reel, POR)로부터 LLW로 진입하여 조업 중이던 선행 코일의 테일(tail)부와 용접된 후에 후속 작업을 거쳐서 텐션 릴(tension reel)에 다시 감기게 된다(Fig. 1). 용접이 완료된 냉연코일은 형상을 교정하기 위해 텐션 레벨러(tension leveler)를 거치게 되는데, 이 때 용접부에 가장 큰 텐션이 걸리고 롤과 롤 사이를 이동하면서 수차례의 굽힘 부하도 겪게 된다. 따라서 용접된 코일이 끊어지는 판파단이 일어나지 않고 연속조업이 원활하게 진행될 수 있도록

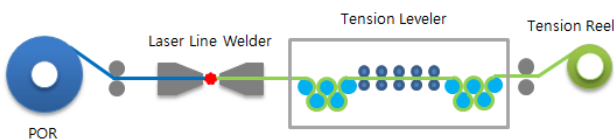


Fig. 1 Laser line welder of re-coiling line in steel process

용접부의 충분한 인장강도와 굽힘강도를 확보해야 한다.

본 논문의 LLW는 Fig. 2와 같이 용접하기 전에 선, 후행 코일을 정렬하기 위한 장치, 절단 및 용접할 때 코일의 위치를 고정시키거나 이동시키는 장치, 용접품질 판정을 위한 센서부, 유압 장치 등으로 구성된다. 또한, LLW는 크게 코일이 들어오는 엔트리(entry), 코일이 빠져나가는 엑시트(exit), 드라이브 사이드(drive side, D/S)와 워크 사이드(work side, W/S) 부분으로 구분한다. 엔트리와 엑시트 쪽에는 작업이 끝난 선행 코일의 테일 부와 새로 작업을 하려는 후행 코일의 탑(top)부를 고정하여 정렬시키는 클램프와 선, 후행 코일의 중심선과 생산 라인의 중심부를 일치시켜 주는 센터링(centering) 장치가 각각 설치되었다. POR의 선행 코일이 풀려서 모든 작업을 마치고 텐션 릴에 감긴 후에, 다음 후행 코일이 POR에 들어와서 선, 후행 코일을 다시 용접할 때까지 LLW는 대기 상태를 유지한다.

센터링 장치, 클램프 등을 제외한 LLW의 중심부에는 Fig. 3과 같이 상, 하부 캐리지(carriage)로 구성된다. 상부 캐리지에는 선,

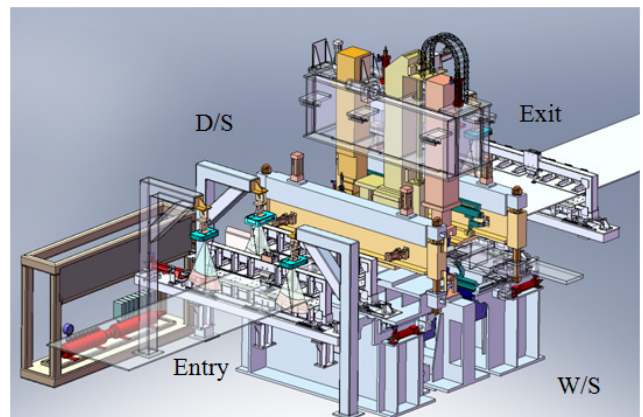


Fig. 2 Schematic of laser line welder

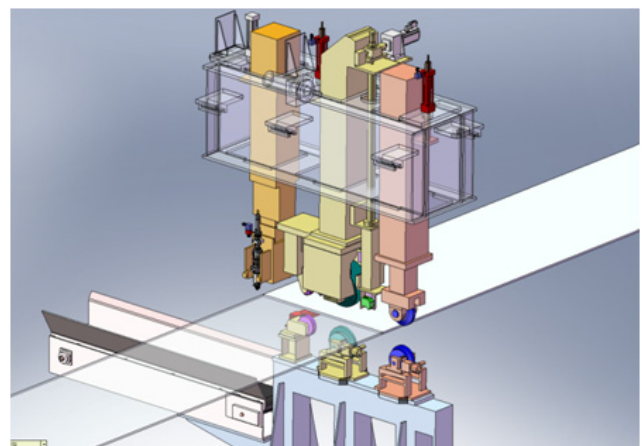


Fig. 3 Upper and lower carriage consisting of a laser welding head, two laser cutting heads, a pilot roll and a planishing roll

후행 코일을 동시에 절단하기 위한 레이저 커팅 헤드가 엔트리, 엑시트에 각각 설치된다. 또한 코일을 용접할 때 레이저가 출사되는 레이저 웰딩 헤드와 용접 시에 양측 스트립의 단차(mismatch)를 제거해주는 역할을 하는 파일롯 롤(pilot roll) 그리고 용접된 직후 용접부를 압착하는 플래니싱 롤(planishing roll)이 위치하게 된다. 하부 캐리지는 상부 캐리지에 대응되는 하부 서포트 롤(support roll)과 플래니싱 롤이 각각 설치된다. 본 논문의 LLW는 하나의 레이저 발진기를 이용하여 선, 후행 코일의 절단과 용접을 모두 수행한다. 즉, 상, 하부의 캐리지가 D/S에서 W/S로 이동하면서 선, 후행 코일을 절단하고, 다시 W/S에서 D/S로 복귀하면서 코일을 용접한다. 초극박재의 경우 스트립을 절단하고 용접하기 위한 레이저 파워가 크지 않기 때문에 코일의 절단 작업에 전단기(shear)를 이용하는 것보다 레이저 절단이 우수한 절단 품질을 얻을 수 있다. 그러나 코일이 두꺼워지면 절단 시간이 길어지므로 사이클 타임(cycle time)을 고려해야 할 것이다.

2.2 초극박재 코일 정렬을 위한 클램프 설계 및 제어 성능 향상

용접부의 편파단이 일어나지 않도록 강건한 용접품질을 안정적으로 구현하기 위해 LLW에서 가장 기본적이고 중요한 것 중의 하나가 용접하고자 하는 스트립과 레이저의 정렬(alignment)이다^[9]. 매번 용접할 때마다 두 스트립의 맞대기 위치가 항상 일정해야 레이저 빔에 의해 용접되는 부분의 위치가 일정하게 되고 용접품질 또한 일정하게 확보될 것이다. 특히 본 논문에서와 같이 스트립의 두께가 1 mm 이하의 초극박재인 경우는 맞대기 위치에 대한 재현성은 더욱 중요해진다. 선, 후행 스트립이 절단과 용접을 위해 정지하는 위치가 매번 다르게 되면 스트립이 만나서 이루는 경계 부분인 갭(gap)의 위치나 상태가 달라지면서 고정된 위치의 레이저 헤드에서 발사되는 레이저 빔은 용접이 되어야 할 갭의 중앙에 조사되지 못하고 모재부로 편향되어 조사될 것이다. 이는 바로 용접품질의 저하를 초래하게 된다.

LLW에서 용접하고자 하는 스트립을 움직이지 않도록 고정하여 레이저의 절단 및 용접 포지션에 정확하게 이동시키는 역할을 하는 것이 클램프 장치이다. 앞서 언급한 스트립과 레이저의 정렬, 그리고 선, 후행 스트립의 맞대기 위치에 대한 재현성을 확보하기 위해 본 논문에서는 Fig. 4와 같이 클램프를 제작하였다. 스트립을 고정시키거나 이동시키는 역할을 하는 클램프, 클램프를 구동하기 위해 설치된 유압 실린더, 유압 실린더의 스트로크(stroke)를 모니터링하기 위한 LVDT 센서, 실린더를 용접 및 커팅위치에 정지시키기 위한 스톱퍼(stopper), 유압 실린더의 이동 속도를 제어하기 위한 제어 알고리즘, 유압 실린더의 속도 제어 파라미터를 입력할 수 있는 HMI 등으로 구성된다. 본 논문에서는 비례 제어 밸브와 기계적인 스톱퍼를 이용하여 간단하면서 저렴한 유압 제어 방식을 적용하

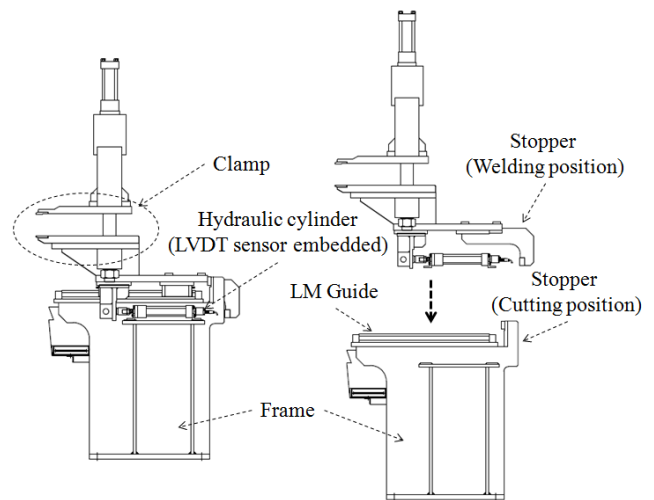


Fig. 4 Clamp structure of laser line welder

였다. 이를 통해 두께가 수 백 μm 인 초극박재를 레이저 맞대기 용접이 가능하도록 클램프가 스트립의 절단 및 용접위치에 정확히 위치할 수 있는 제어 정밀도를 구현하였다.

3. 클램프 제어와 초극박재 레이저 용접 평가

3.1 클램프 제어 방법 및 모니터링

클램프는 D/S와 W/S의 실린더를 구동하는 각각의 비례 제어 밸브를 이용하여 클램프의 이동 속도 제어 및 양측의 동기화를 구현할 수 있도록 제작되었다. 이 때 각각의 실린더에 LVDT 센서를 설치하여 실린더의 이동 거리에 대한 스트로크를 실시간으로 모니터링하며, 이를 이용하여 PLC에서 조업 환경에 맞게 속도 제어 및 D/S와 W/S의 이동 속도에 대한 동기화를 구현하였다. 스트립의 절단위치와 용접위치로 이동하여 정지하는 동작을 반복하는 클램프가 시간이 흐름에 따라 정지 위치가 변하지 않도록 재현성을 유지하는 것이 중요하며, 이를 모니터링 하면서 정지 위치가 변했을 때는 신속하게 보정해주어야 우수한 용접품질을 지속적으로 확보할 수 있다. 이를 위한 제어 방법으로 클램프를 절단 및 용접위치로 이동시키는 실린더의 스트로크를 가상의 3개 구간으로 나누고 구간별로 위치와 속도를 제어할 수 있도록 하였다. 이러한 구간은 반드시 3개로 국한되는 것이 아니고 상황에 따라 변경될 수 있다.

클램프를 이동시키기 위한 실린더의 스트로크를 Fig. 5와 같이 0~A (target position) 구간으로 정의하고, 0 ~ A- α 를 가속 구간, A- α ~ A- β 를 감속 구간, A- β ~ A+ γ 를 재가속 구간으로 설정하였다. 정지 위치의 재현성을 높이기 위해 실제로 실린더의 정확한 스트로크 값은 A이지만 실린더가 전체 스트로크(full stroke)를 이동해서 스톱퍼와 접촉한 후에도 스톱퍼를 계속해서 밀고 있는 상태를 유지하도록 PLC에서 가상의 마진(margin) 값을 적용하였다. 클램

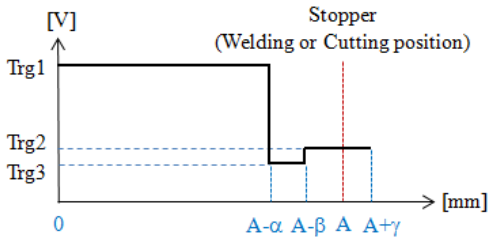


Fig. 5 Target voltage to control the moving speed for each section in the cylinder stroke of the clamp

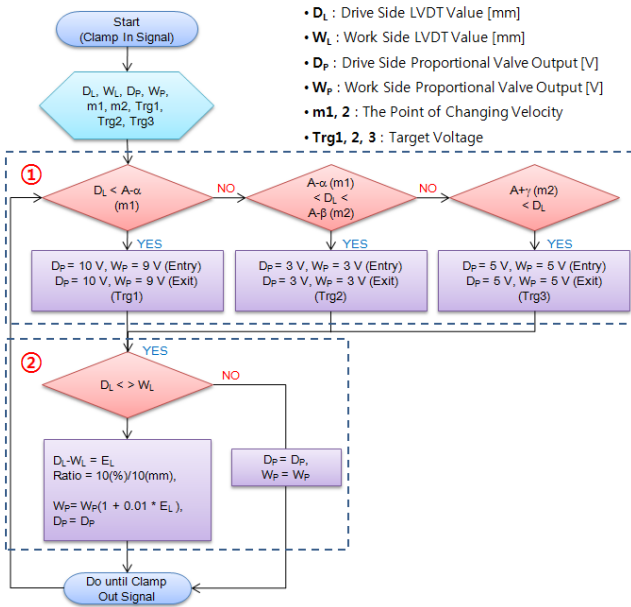


Fig. 6 Flow chart for monitoring the clamp positions and controlling the moving speed

프를 이동시키는 실린더가 Forward, Reverse 방향으로 진행할 때 A, α, β, γ 값에 의해 결정된 각각의 구간에 대해서 이동 속도를 결정할 수 있도록 PLC에서 유압 컨트롤러(controller)의 증폭기(amplifier)에 전달되는 제어값(전압)을 설정할 수 있다. 예를 들면, Fig. 6의 ①부분과 같이 엔트리 부 클램프의 D/S의 경우 가속 구간을 10 V, 감속 구간을 3 V, 재가속 구간을 5 V로 설정하였고, W/S의 값은 보통 D/S 비슷하거나 같은 값을 할당한다. 이와 같이 제어 방식을 구성한 이유는 클램프가 연속해서 절단, 용접을 위해서 이동하여 정지할 때마다 정지 위치의 스트로퍼와 부딪쳐서 시간이 흐름에 따라 정지 위치가 변하는 것을 방지하기 위한 것이다.

클램프의 D/S와 W/S 양측에 설치된 유압 실린더의 시간에 따른 스트로크 변위가 다르면 불균형(unbalance)에 의해 클램프의 이동이 부자연스러워지며 심하면 움직이지 않거나 장치의 수명이 짧아질 수 있다. 따라서 유압 실린더에 설치된 LVDT 센서로 스트로크를 실시간 측정하여 D/S나 W/S의 어느 한 쪽을 기준으로 (본 논문에서는 D/S가 기준) 다른 쪽의 스트로크를 비교하면서 이동 중에 양 쪽의 위치를 동일하게 맞출 수 있도록 유압의 유량을

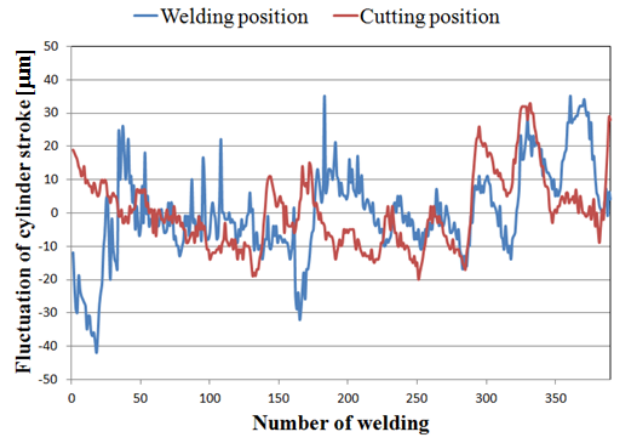


Fig. 7 Change of welding and cutting positions due to the fluctuation of hydraulic cylinder strokes

조절, 실린더 스트로크의 속도를 제어한다. Fig. 6의 ②부분과 같이 D/S와 W/S 각각의 LVDT 센서의 측정값(D_L , W_L)을 실시간으로 비교하여 두 값의 차이(E_L)가 있을 경우에는 W/S의 실린더의 유량을 조절하여 속도를 제어하면서 D/S와의 위치를 맞추게 된다. 이 때 W/S의 속도를 결정하는 방법은 아래와 같은 수식을 이용하였다.

$$W_P(\text{updated}) = W_P + 0.1 \times W_P \frac{E_L}{10[\text{mm}]} \quad (1)$$

여기서 W_P 는 D/S의 실린더 스트로크의 속도를 제어하기 위한 수치이다. 수식 (1)의 첫 번째 항은 제어하기 전의 W_P 값, 두 번째 항은 W_P 의 10%값에 대한 10 mm당 D/S와 W/S의 위치 편차($E_L = D_L - W_L$) 값의 곱을 각각 의미한다. Fig. 7은 용접 횟수에 따른 엑시트 부 클램프의 D/S 스트로크를 모니터링해서 용접위치와 절단위치를 나타낸 것이다. 용접과 절단 시에 이와 같이 클램프의 정지 위치에 변동이 발생하는 이유는 하루 중 기온 차, 계절에 따른 온도의 변화가 유압유의 점도에 영향을 미치는 것으로 추측된다. Fig. 7에서 0 값이 클램프의 정렬 기준이며 대부분 오차가 $\pm 30 \mu\text{m}$ 이내에서 제어된다. 측정값의 미세한 변동(fluctuation)은 하루 동안(용접 횟수: 20~25회)의 온도 차이에 의한 기계부 금속의 열팽창과 유압유 점도의 변화, 기계적인 진동 등이 복합적인 원인으로 작용한 것으로 판단된다. 이와 같이 두께 0.15~0.3 mm의 스트립을 용접할 때, 오차 $\pm 30 \mu\text{m}$ 이내에서 클램프의 위치 제어 정밀도가 유지되어야 용접품질이 양호하였다. 또한, 용접위치와 절단위치에 대한 오차의 차이를 Fig. 8과 같이 나타내었을 때, 일반적으로 이 값이 $50 \mu\text{m}$ 이내이어야 초극박재 코일의 용접품질이 확보되었다.

3.2 초극박재 레이저 용접 및 품질 분석

본 논문의 LLW에서 사용된 변수와 레이저 에너지 전달 효율에

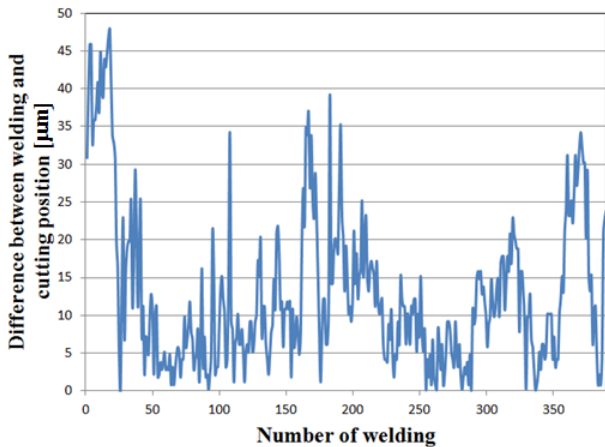


Fig. 8 Difference between welding and cutting position of hydraulic cylinder stroke

Table 1 Parameters of laser line welder

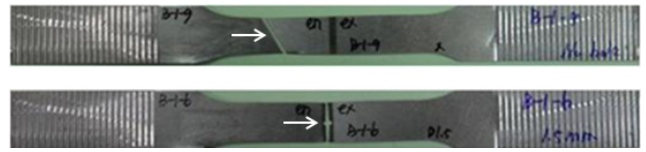
Thickness (mm)	Laser Power (W)	Area of the weld (mm ²)	0.3
0.15	450	Christensen number (C _h)	210
0.18	660	Rykalin number (R _y)	438
0.2	880	Melting efficiency (η _m)	47.9%
0.25	1260	Power absorbed (P _a , W)	120.8
0.3	1500	Energy transfer efficiency (η _t)	26.8%

관련된 파라미터를 Table 1에 나타내었다. Table 1에 나타낸 두께 별 레이저 용접 파워는 기준으로 제시한 값이며, 스트립의 강종, 표면 반사도 등에 의해 실제 레이저 파워는 변경되어야 한다. 또한 본 논문에서 실시된 레이저 용접의 용해 효율(melting efficiency) 과 에너지 전달 효율(energy transfer efficiency)을 계산하여 나타내었다⁹⁾.

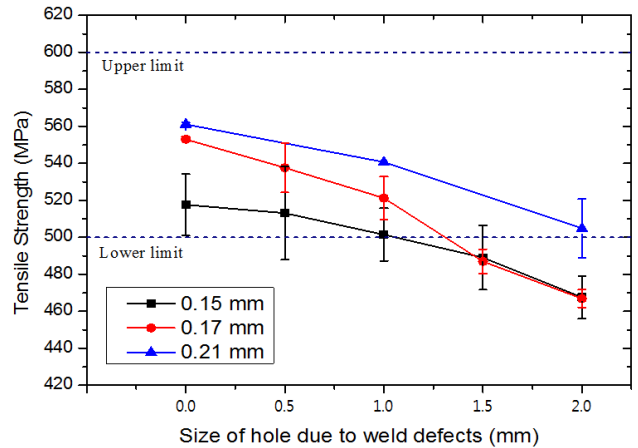
$$C_h = \frac{v^2 \times A}{k_t^2} \quad (2)$$

$$C_h = R_y \times \left[\begin{matrix} 0.48 - 0.29 \times \exp\left(\frac{-R_y}{6.8}\right) \\ -0.17 \times \exp\left(\frac{-R_y}{59}\right) \end{matrix} \right] \quad (3)$$

용해 효율은 스트립에 의해 흡수되는 열에 대해 융합부(Fusion Zone)가 용융되는데 필요한 열의 비(Ratio)로 정의되며, 이를 계산하기 위해 수식 (2)와 (3)을 이용하여 크리스텐젠 넘버(Christensen number, Ch)와 리칼린 넘버(Rykalin number, Ry)를 각각 구한다. 이를 이용하여 용해 효율은 η_m = C_h/R_y와 같이 구한다. 이 때 ν는 용접 속도(mm/s), A는 용접부 면적(mm²), k_t은 열 확산율(thermal diffusivity)을 나타낸다. 본 논문에서 계산된 용해 효율은 47.9%이다. 또한 스트립에 입사되는 레이저 파워 대비 실제로



(a)



(b)

Fig. 9 Relation between tensile strength and pinhole type of weld defect for ultra-thin strip (a) samples of tensile tests (b) tensile test results for different thickness of strips

스트립에 흡수되는 레이저의 파워 비를 나타내는 에너지 전달 효율은 약 26.8%로 나타났다.

용접품질을 정확한 수치로 평가하기 위해 두께 0.17 mm의 코일을 용접하여 용접부의 인장강도(tensile strength)를 테스트하는 실험을 수행하였다. 두께 0.15~0.3 mm의 초극박재를 맞대기 용접하는 경우, 후물재 용접에서 나타날 수 있는 단차, 언더컷(undercut), 기공(porosity) 등의 결함보다는 대부분 핀홀(pinhole) 형태의 결함이 나타난다. 따라서 용접부에 발생된 핀홀이 용접품질에 미치는 영향과 핀홀의 크기가 인장강도에 미치는 영향을 알아보기 위한 인장강도 테스트도 병행하였다. Fig. 9(a)과 같이 용접부에 핀홀이 없는 경우에 인장강도 테스트에 의해 모재부가 끊어지는 반면, 용접부에 직경 1.5 mm 이상의 핀홀이 발생한 경우 인장강도 테스트에서 기준 수치를 넘기지 못하고 용접부가 파단되는 것을 알 수 있었다. 따라서 초극박재의 용접 시에 용접부에 발생하는 핀홀 형태의 용접결함은 용접품질에 상당한 영향을 미치며 지속적으로 모니터링을 해야 할 필요가 있다.

용접부의 인장강도를 비교하기 위한 기준으로 용접을 하지 않은 모재의 인장강도에 대한 상한, 하한의 범위(501~600 MPa)를 Fig. 9(b)와 같이 나타내었다. 용접을 하지 않은 모재부의 인장강도 범위에 용접부의 인장강도가 속해야 용접품질이 양호하다고 할 수 있다. 본 논문에서는 스트립의 두께가 각각 0.15, 0.17, 0.21 mm 일 때 용접부에 발생하는 핀홀의 크기에 따라 인장강도를 측정하였으며, 각각 직경 1.0, 1.5, 2.0 mm 이상의 핀홀 결함이 발

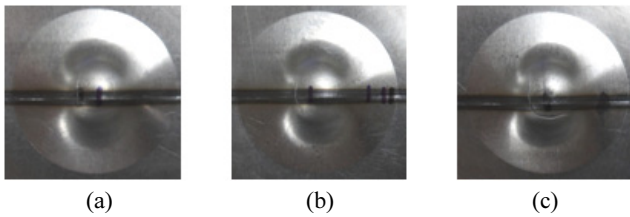


Fig. 10 Erichsen cupping test results of the welding points on the strip

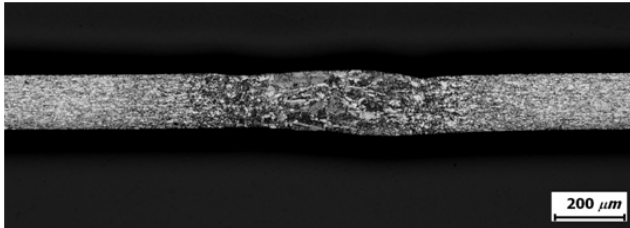


Fig. 11 Cross section of the ultra-thin steel plate in a laser line welder

생했을 때 모재의 기준 인장강도 범위를 벗어나는 것을 알 수 있었다. Fig. 10은 두께 0.17 mm 코일의 용접품질을 확인하기 위해서 에릭슨 테스트(Erichsen cupping test)^[10]를 수행한 결과이다. 에릭슨 테스트는 비교적 간단하지만 정확하게 용접부의 연성(ductility)을 측정하는 방법이다. 일반적으로 용접부를 곡률이 일정한 구형으로 서서히 늘리면서 파단이 일어나는 것을 관찰하여 용접상태를 판정한다. 본 논문에서는 용접품질이 양호할 때 에릭슨 테스트 결과 용접부가 터지지 않고 용접부에 수직으로 모재부가 파단되는 것을 알 수 있었다. 이 때 에릭슨 테스트에 의해 용접부가 파단되지 않고 늘어난 수직 길이인 에릭슨 인덱스(Erichsen cupping index)는 Fig. 10(a)~(c)와 같이 4.4~4.6 mm의 분포를 보였다.

용접할 때 코일의 표면에 비산된 스패터(spatter)를 용접이 끝난 직후에 제거하고 용접부에 의해 생산 라인의 후속 작업에서 제품 표면에 전사되는 결함 발생을 방지하기 위해서 LLW의 플래니싱 롤을 이용하여 용접부의 표면을 평평하고 고르게 압착한다. Fig. 11(코일 두께: 0.155 mm)은 용접 후 플래니싱 작업을 완료한 용접부의 단면을 나타낸다.

4. 결론

본 연구에서는 기존에 주로 제철소에서 사용되던 CO₂ 레이저와 달리 Yb:YAG 디스크 레이저를 이용하여 LLW를 개발, 제철소 냉연공장의 연속공정을 위해 적용하였다. 두께 0.15~0.3 mm, 폭 800~1,100 mm의 초극박재 냉연코일이기 때문에 절단과 용접에 많은 시간이 소요되지 않으며 정정라인의 특성상 사이클

타임에는 큰 제약이 없기 때문에 절단과 용접에 모두 레이저를 적용하였다. 그러나 초극박재 코일을 맞대기 용접을 하였기 때문에 용접을 할 때마다 절단위치와 용접위치가 항상 일정하도록 재현성을 확보하는 것이 중요하다. 이를 위해 절단과 용접 작업을 할 때 선, 후행재를 고정하고 이동시키는 역할을 하는 클램프에 유압 방식의 비례 제어를 적용한 정밀 제어 장치를 개발하였다. 클램프의 실린더 스트로크를 모니터링하면서 절단 및 용접위치에서 정지 위치의 변동을 오차 $\pm 30 \mu\text{m}$ 이내로 제어하였다. 에릭슨 테스트 결과, 위와 같은 오차 수준으로 클램프 정지 위치를 제어했을 때 주어진 두께에 대한 코일의 용접이 양호하게 유지되었다.

초극박재의 특성상 핀홀 형태의 용접결함이 주로 나타나며 핀홀의 크기에 따른 인장강도의 변화를 분석하여 용접품질 판정의 기준을 제시하였다. 마지막으로 본 논문에서 개발된 LLW로 용접된 코일 용접부의 인장강도 테스트 결과, 용접부의 인장강도가 모재부의 인장강도보다 크게 나타나는 연구 결과를 얻었고 실제 생산 라인에 적용했을 때 용접부의 파단 발생 없이 정상적인 조업이 가능하였다.

후 기

본 연구는 포스코 기술연구원의 지원으로 수행되었습니다.

References

- [1] Ito, M., Yokozawa, F., Kawai, Y., Tachbana, R., 1999, Welding Characteristics of Stainless Steel in 10 kW Laser Beam Welder, ISIJ International 39:7 737-741.
- [2] Mahrle, A. *et al.*, 2011, Process Characteristics of Fibre-laser-assisted Plasma Arc Welding, Journal of Physics D: Applied Physics, 44:34 345502.
- [3] Lancaster, J.F., 1984, The Physics of Welding, Physics in Technology, 15:2 73.
- [4] Yan, J., Gao, M., and Zeng, X., 2010, Study on Microstructure and Mechanical Properties of 304 Stainless Joints by TIG, Laser and Laser-TIG Hybrid Welding, Optics and Lasers in Engineering, 48 512-517.
- [5] Lee, K. R., Hwang, C. Y., Yang, Y. S., Park, E. K., and Yoo, Y. T., 2013, The Porosity Control Technology of Lap Joint Using Continuous Wave Nd:YAG Laser of the Low Carbon Steel SS41, Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, 22:4 665-672.

- [6] Wang, W., Lu, B., Liu, C., Zhang, D., and Luo, Y., 2003, The Morphology of Pulsed Laser-induced Damage on the Surface of a Copper Film Mirror, *Optics & Laser Technology*, 35 303-307.
- [7] TRUMPF Technical Documentation Department, 2007, Laser Machining Solid-state Lasers, TRUMPF GmbH.
- [8] Iqbal, S., Gualini, M.M.S., and Grassi, F., 2007, Laser Welding of Zinc-coated Steel with Tandem Beams: Analysis and Comparison, *Journal of Materials Processing Technology*, 184 12-18.
- [9] Sharma, R. S., and Molian, P., 2011, Weldability of Advanced High Strength Steels Using an Yb:YAG Disk Laser, *Journal of Materials Processing Technology*, 211 1888-1897.
- [10] Manesh, H. D., and Taheir, A. K., 2003, Bond Strength and Formability of an Aluminum-clad Steel Sheet, *Journal of Alloys and Compounds*, 361 138-143.