

PALW을 이용한 소경 스테인리스강 튜브의 용입특성 개선

황재련* · 윤석환** · 나석주***

*현대자동차 금형기술개발팀

**한국항공우주연구원 터보펌프개발그룹

***한국과학기술원 기계공학과

Improvement of Penetration Characteristics by Plasma Augmented Laser Welding of Small Diameter Stainless Steel Tubes

Jae-Ryeon Hwang*, Suk-Hwan Yoon** and Suck-Joo Na***

*Die Engineering Development Team, Hyundai Motor Company, Ulsan 683-791, Korea

**Turbopump Dept., KARI, Daejeon 305-333, Korea

***Dept. of Mechanical Engineering, KAIST, Daejeon 305-701, Korea

Abstract

Laser welding is obviously an attractive method to join small, thin parts such as small stainless steel tubes, but it is very sensitive to the joint clearance and tolerance, and this makes laser welding difficult to obtain consistent welding qualities over time. Recently, Plasma Augmented Laser Welding(PALW) is being developed to solve these problems. In this study, plasma arc welding(PAW) was introduced to join conventional V-grooved butt joint of thin stainless steel strips using single laser heat source in manufacturing small stainless steel tubes. The effect of the welding speed enhancement is investigated by the experiments. Effects of welding directions, distance between the heat sources and intensity of arc heat source on the optimal welding speed was investigated. Through this research, it was confirmed that PALW process has higher welding speed and robustness than laser welding process.

* Corresponding author : shyoon@kari.re.kr

(Received May 19, 2004)

Key Words : Plasma augmented laser welding, Hybrid welding, Butt welding

1. 서 론

레이저 용접과 아크 용접은 많은 시간에 걸쳐 산업에 이용되어 왔고, 그 응용 분야도 다양하다. 레이저는 열원을 매우 작은 크기로 집중시킬 수 있어 용접 시 열영향부가 작아 정교한 부품의 정밀가공이 가능하다. 또한, 출력 형태 및 강도 등이 전자적으로 쉽게 조정되고 키홀(keyhole) 생성 시 깊은 용입 용접(deep penetration welding)이 가능하다는 장점이 있다¹⁾. 그러나 레이저 용접을 현장에 직접 적용할 경우, 레이저의 작은 초점 반경과 용접부 공차 및 피용접물의 진동 등으로 인해 용접선의 추적에는 많은 어려움이 따른다²⁾. 또한 많은

용접 변수에 민감한 공정이므로 용접 변수가 엄격히 관리되지 않으면 기공 등의 결함이 쉽게 발생할 수 있는 단점이 있다³⁾.

현재 CW CO₂ 레이저를 사용한 용접은 쉽게 고출력을 얻을 수 있다는 장점으로 인해 여러 곳에 쓰이고 있으며, 대표적인 예로서 Fig. 1과 같이 스테인리스강 스트립(strip)으로부터 튜브를 제조하는 공정을 들 수 있다. 이 공정은 스테인리스강 스트립이 롤러를 통과하여 원통형으로 성형된 후 발생하는 연속적인 용접선을 레이저로 용접하여 튜브를 생산한다. 높은 생산성을 위해서는 용접 속도가 증가되어야 하고, 이를 위해서는 레이저의 출력이 증가되어야 하나 레이저 시스템만으로 용접 속도를 높이기 위해서는 몇 가지 제약이 따르게

된다. 첫째, 레이저의 출력이 시스템에 따라 제한되어 있으므로 레이저의 출력 향상은 결국 레이저 시스템의 교체를 필요로 하며, 이것은 대단히 높은 비용을 요구하는 단점을 가진다. 더구나 CO₂ 레이저는 스테인리스강 표면에 대한 흡수율이 일반적으로 15% 이하이므로 비용 대비 효율 면에서 좋지 않음을 쉽게 유추할 수 있다. 둘째, 용접 속도가 증가되면 스트립의 공급 속도가 빨라지고 그만큼 전체 시스템의 진동도 심하게 되어 용접선의 요동이 발생한다. 따라서 레이저 빔과의 일정한 정렬을 기대할 수 없으므로 지속적이고 일정한 용접 품질 및 용융풀 단면 형상을 보장할 수 없다는 점이다.

현재, 두께 0.2mm의 박판 스테인리스강 스트립을 사용하는 경우에 통상적으로 현장에서 생산하는 튜브의 생산 속도는 1.3kW의 레이저 출력 기준으로 약 7m/min의 속도인데, 본 연구에서는 더 높은 생산 속도를 얻음과 동시에 앞서의 문제점을 해결하는 방법으로 다른 형태의 보조 열원의 도입을 제안하였다. 하이브리드 용접 등의 분야에서 레이저와 함께 보편적으로 많이 쓰이고 있는 열원으로는 아크 열원을 들 수 있는데⁴⁻⁶⁾, 본 연구의 특성상 피용접물이 박판이며 정밀한 용접이 요구되므로 마이크로 플라즈마 용접(Micro PAW)의 도입을 추진하였다.

마이크로 플라즈마 용접은 Fig. 2와 같이 보호가스과 파일럿 아크를 사용함으로써 플라즈마의 발생이 용이하

고, 수냉식 구리 노즐에 의하여 집중된 아크 플라즈마를 발생시켜 아크의 분산 각이 일반 TIG 용접에 비해 훨씬 작으므로 작은 부위의 정밀한 용접이 가능하다는 장점이 있다⁷⁾. 또한 레이저 빔의 초점반경과 비교해 볼 때 상대적으로 가열 부위가 크므로 고속 용접 시에 발생할 수 있는 용접선의 좌우 요동에 둔감하다는 장점을 가진다.

본 연구에서는 이 두 가지 열원을 사용한 용접 방법, 즉 Plasma Augmented Laser Welding(PALW)에서 추가된 플라즈마 용접 열원이 전체 용접 속도 향상에 미치는 영향과 각각의 열원의 위치 및 거리 변화에 따른 효과에 대해 알아보려고 한다.

2. 실험 시스템 및 방법

실제 튜브 생산 공정에서, Fig. 3에서와 같이 성형이 완료되어 용접 공정으로 들어가기 직전의 용접선의 단면은 V형 그루브 형태를 가지게 된다. 이 과정을 실험실에서 모사하여 실험을 수행하기 위해서, Fig. 4와 같이 특별한 지그를 사용하여 두 개의 스트립을 수평선에 대해 각각 5°씩 기울여서 V형 그루브의 밑 부분 각도가 10°가 되도록 하여 용접을 수행하였다.

Fig. 5는 PALW를 위한 레이저 헤드, 플라즈마 토치 및 피용접물의 배치를 나타낸 그림이며, Fig. 6은

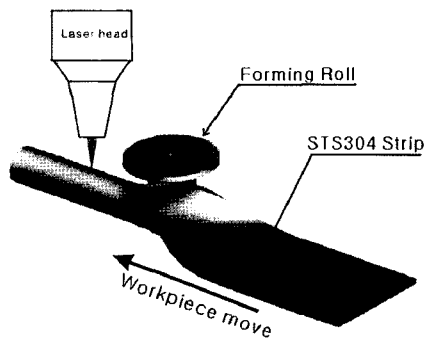


Fig. 1 Manufacturing of stainless steel tube

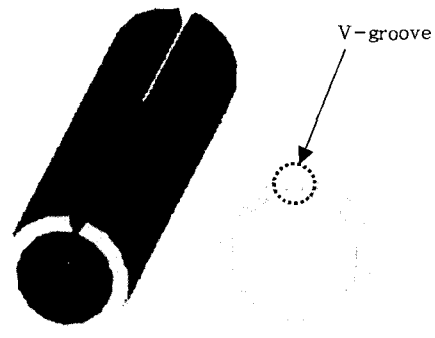


Fig. 3 Formed STS304 strip

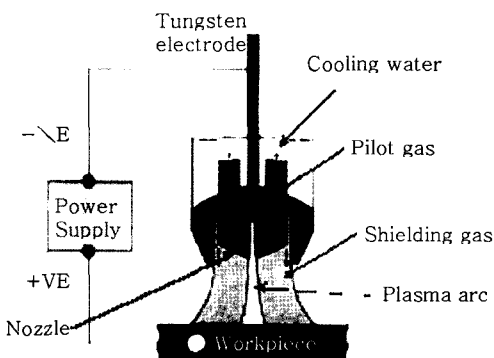


Fig. 2 Plasma arc welding method

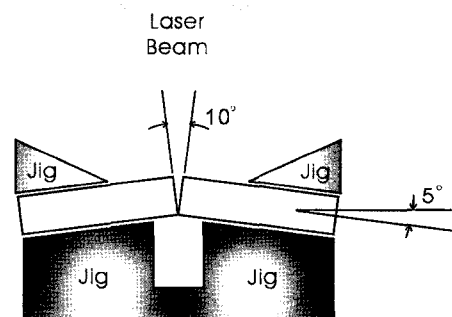


Fig. 4 Simplified welding setup

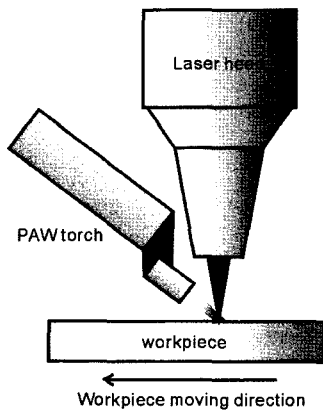


Fig. 5 Schematics of PALW system

실제 실험 장치를 나타내고 있다. 두 개의 토치들은 고정되어 있으며 피용접물인 스테인리스강 스트립이 1축 테이블에 의해 공급되면서 용접이 이루어지게 된다.

레이저 용접기는 CW CO₂ 레이저이며 빔 초점 반경은 0.25mm이다. 또한 초점 거리는 125mm이며 최대 출력은 700W급의 레이저를 사용하였다. 한편, 마이크로 플라즈마 용접기의 최대 전류는 80A이며 파일럿 아크를 위한 파일럿 전류는 1.5 - 2.5A의 범위를 가진다. 실험 시 플라즈마 토치를 위한 보호가스 및 파일럿 가스로서 Ar 가스를 사용하였으며 유량은 각각 5.0ℓ/min 및 0.5ℓ/min으로 하였다. 실험에 사용된 재료는 실제 튜브 생산에 쓰이고 있는 범용 스테인리스강인 STS 304L이며, 폭 13.5mm, 두께 0.2mm의 스트립을 사용하였다. Fig. 6은 실제 구현된 PALW 시스템의 토치 부분을 자세하게 보이고 있다. 레이저 헤드가 수직으로 위치하고 있고 마이크로 플라즈마 토치가 45°의 각도를 가지고 비스듬히 인접하여 있으며, 용접부를 관찰하기 위한 CCD 카메라를 측면 방향에 설치하였다.

실험은 레이저만을 사용한 용접과 레이저 및 플라즈마를 동시에 사용한 두 가지 실험으로 크게 구분되며 각각의 용접 특성 및 적정 용접 속도를 비교하였다. 또

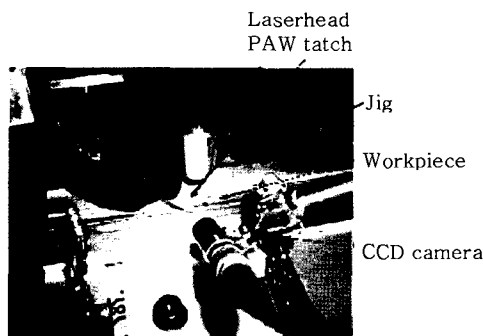


Fig. 6 Experimental setup of PALW system

Table 1 Chemical composition(wt%) of STS304L

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Fe
≤0.03	≤1.0	≤2.0	≤0.04	≤0.03	9.0-13.0	18.0-20.0	bal.

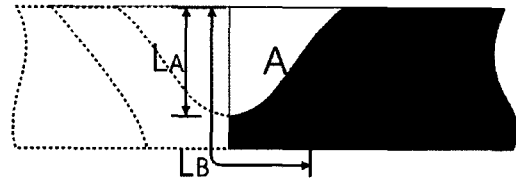


Fig. 7 Characteristic length(L) of weld zone

한 용접부 단면의 평가를 용이하게 하기 위하여 본 연구에서는 용입 깊이를 다음 Fig. 7과 같이 특성 길이(characteristic length)로 정의하여 사용하였다.

그림에서 알 수 있듯이 부분용입일 때에는 특성길이를 LA로 정의하여 용입깊이와 같은 값을 가지게 하고, 완전용입 이상일 때에는 모재의 두께와 하단 비드폭의 절반을 더한 값인 LB로 정의하여 용입 깊이의 척도로서 사용하였다.

용접된 시편은 횡단면을 절취하여 마운팅(mounting) 작업을 실시한 후, 사포와 다이아몬드 컴파운드를 이용한 표면 연마와 폴리싱, 그리고 에칭(etching)을 거쳐 단면부의 미세 조직을 관찰하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

레이저만으로 용접한 경우에 나타나는 용접부의 횡단면 형상과 특성길이 변화를 Fig. 8과 Fig. 9에 나타내

Welding speed(m/min)	Cross-section of weld bead
4.0	
5.0	
6.0	

Fig. 8 Cross-section of weld bead for various welding speeds in laser welding

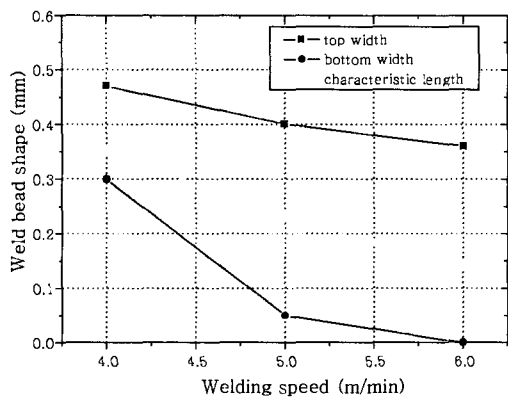


Fig. 9 Result of weld bead shape measurements

있으며, 이때 용접속도는 4.0 - 6.0m/min으로 변화시켰다. 레이저 빔의 출력은 680W로 고정시켰고, 레이저 빔 반경은 모재 상단 표면에서 0.25mm가 되도록 조절하였다. 용접이 끝난 후 용접부의 횡단면을 관찰하였고, 횡단면 형상 정보로부터 용접부의 폭과 용입 깊이의 변화를 관찰하였다. 용접부 횡단면 형상으로부터 윗면에서의 비드폭, 아랫면에서의 비드폭 및 특성 길이를 측정하여 Fig. 9에 정리하였다.

Fig. 8과 Fig. 9의 결과를 살펴보면 레이저 출력 680W에 대해서 약 4m/min의 용접 속도에서 충분한 입열로 인하여 양호한 용접부 단면을 보이고 있음을 알 수 있고, 5m/min 및 6m/min의 속도에서는 점차 용입 깊이가 줄어드는 부분용입 현상이 발생하는 것으로 나타났다. 이러한 맞대기 용접에서의 용입은 단순한 비드 용접(bead welding)에서의 용입에 비하여 깊게 나타났다. 비드 용접일 경우 약 3.0m/min의 용접 속도에서 가장 양호한 용접부 단면을 보였는데, 그 이유는 맞대기 용접부의 좁은 그루브 내부에서 용융지의 하강에 따른 용융잠열의 효과가 큰 것으로 보이며, 또 다른 이유로서 그루브 내부에서의 레이저 빔의 다중반사 효과도 일부 나타나는 것으로 보인다.

이러한 레이저 시스템에 대하여 생산성을 고려하여 용접 속도를 높이고자 한다면 레이저 출력을 증가시키는 방안이 가장 간단한 방법이나, 레이저 시스템을 교체하는 막대한 비용을 감수해야 하는 단점이 있음을 쉽게 유추할 수 있다. 따라서 두 번째 실험으로서 레이저 용접에 마이크로 플라즈마를 보조 열원으로 사용하여 최적의 용접 속도를 증가시키고자 하였다.

레이저 용접에 마이크로 플라즈마를 보조 열원으로 사용하게 되면 두 열원 사이의 방향 및 배치 간격에 따라 용접 결과가 달라질 수 있다. 따라서 본 연구에서는 용접 방향에 대하여 레이저 열원이 선행하는 경우와 마이크로 플라즈마 열원이 선행하는 경우에 대한 용접 실험

험을 모두 실시하였으며, 각각의 경우 두 열원 사이의 거리를 오프셋(offset)으로 정의하여 용접 결과를 비교하였다. Fig. 10에 이와 같은 열원의 배치에 대한 정의를 나타내고 있다.

두 열원 간 배치 및 오프셋에 따라 용접한 후, 용접부의 단면부 조직을 관찰한 결과를 Fig. 11에 나타내었다. 레이저 용접 시보다 용접 속도를 대폭 증가시켜 12m/min의 속도로 고정시켜 실험을 실시하였고, 오프셋은 0, 1, 3 및 5mm의 네 가지로 나누어 결과를 비교하였다. 레이저 출력은 레이저 용접 시와 동일한 680W로 고정시켰고, 플라즈마 아크의 전류는 12A로 조절하여 실험하였다. 실험 결과에서 가장 눈에 띄는

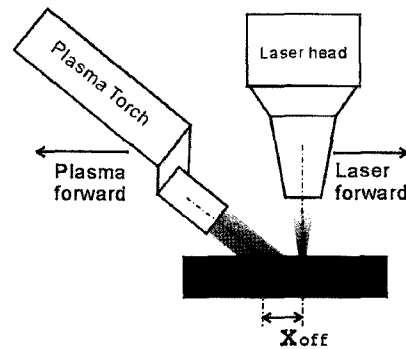


Fig. 10 Configuration of two heating sources

Offset (mm)	Laser forward	plasma forward
0		
1		
3		
5		
cf) Laser only ar 12m/min		

Fig. 11 Weld bead shapes for various offset distances in PALW process

부분으로서, 레이저 선행 용접보다 플라즈마 아크 선행 용접에서 훨씬 용입 깊이가 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. 이것은 두 열원이 대등하게 용접에 사용되는 것이 아니라 레이저에 대하여 플라즈마 아크 열원이 보조적으로 사용됨으로서 기인하는 현상으로 볼 수 있다. 플라즈마 아크 열원이 레이저보다 선행할 경우 아크에 의하여 용접부가 먼저 예열되고 이러한 상태에서 레이저가 조사되면 레이저의 적은 출력으로도 용접부의 온도가 모재 용융 온도 이상으로 상승하는 것으로 보인다. 결과에서 오프셋이 증가하면 플라즈마 아크 열원에 의하여 가열된 부분에 바로 레이저가 조사되지 못하고 약간의 시간 후 레이저가 조사되므로 이 같은 예열 효과가 약화되어 용입 깊이가 감소하는 것으로 사료된다.

플라즈마 아크와 수 킬로와트(kW) 이상의 고출력 레이저를 사용하는 일반적인 하이브리드 용접부의 단면은 아크에 의하여 넓은 가열 폭을 얻음과 동시에 고출력 레이저에 의하여 중심 부분에서 깊은 용입이 얻어지는 장점이 있다. 이러한 원리로 인하여 레이저 단독으로 용접할 때 보다 접합부의 공차에 둔감하면서도 레이저 용접과 같은 깊은 용입을 얻을 수 있다. 반면 본 연구에서의 용접부 횡단면 형상은 대부분 깊고 좁은 레이저 용접 특유의 용접부 단면 형상을 보이지 않고, 비교적 넓은 용접부 단면 형상을 보이고 있는데, 이것은 레이저 출력이 작아 킥홀 모드가 생성되지 않고 전도 모드(conduction mode)에 의한 용융이 주로 이루어지기 때문인 것으로 생각되며, 플라즈마 아크에 의해 표면이 넓게 가열되는 것도 하나의 원인으로 생각된다.

플라즈마 아크 선행 방법의 또 한 가지 장점은 플라즈마 아크에 의하여 용접부의 온도가 상승하면 재료에 대한 레이저의 흡수율이 증가한다는 것이다⁸⁾. 대부분의 금속 재료에 대하여 온도 상승에 대한 레이저 흡수율의 증가는 잘 알려져 있는 사실인데, 특히 CO₂ 레이저는 일반적으로 상온의 금속 표면에 대하여 낮은 흡수율을 나타내므로 재료의 온도를 상승시켜 레이저 빔의 흡수율을 증가시키는 것은 CO₂ 레이저 빔 자체의 효율을 높이는 면에서 바람직한 방법임을 알 수 있다.

반면 레이저 선행 용접의 경우 전반적으로 적은 용입 깊이를 나타내고 있다. 이것은 상온의 용접부에 레이저가 조사됨으로써 낮은 흡수율에 의한 미미한 용융이 일어나고, 레이저 가열의 특성 상 용융부가 급격히 냉각되어 후속의 플라즈마 아크 열원이 용융부의 확장에 별다른 영향을 미치지 못하는 것으로 유추할 수 있다. 또한 이러한 이유로 인하여 레이저 선행 용접에서도 두 열원 사이의 오프셋이 증가할수록 용입 깊이가 보다 더 감소하는 것을 알 수 있었다. 오프셋이 증가하면 점차

플라즈마 열원에 의한 영향이 미미해지며, 이에 따라 용입 깊이가 점차 감소하여 그림 하단의 레이저만을 사용한 용접 결과와 비슷해지는 결과를 보임을 알 수 있다.

레이저 출력을 680W로 고정하고 플라즈마 아크 전류 및 오프셋을 변화시키면서 용융부 단면을 관찰하여 특성 길이를 측정하여 비교하였는데, 그 결과를 Fig. 12에 나타내었다.

위의 결과를 살펴보면, 앞의 결과와 마찬가지로 같은 오프셋일 때에는 플라즈마 아크 선행 방법에서 보다 큰 특성 길이를 나타내었다. 이는 효과적인 용입을 위해서는 플라즈마 아크 열원이 레이저보다 선행하는 것이 보다 유리하다는 것을 의미한다. 이러한 현상은 역시 열원간의 거리가 커질수록 뚜렷이 나타나며, 오프셋이 5mm일 경우 레이저 선행 방법은 플라즈마 아크 선행 방법에 비하여 매우 낮은 용입 깊이를 나타내었다. 또한 플라즈마 아크 전류가 증가할수록 용접부를 가열하는 효과가 높아져 용입 깊이가 증가하는 것으로 나타났으며, 이것은 열원의 선행 여부나 열원간의 거리에 상관없이 공통된 현상으로 나타남을 알 수 있었다. 따라서 용접 속도 12m/min에서 용입 깊이를 증가시키기 위해서는 플라즈마 아크 열원을 선행으로 하고 두 열원 사이의 거리를 최소화하는 것이 가장 효과적인 방법임을 확인할 수 있었다. 일반적으로 아크와 레이저를 동시에 사용하는 하이브리드 용접의 경우 아크와 레이저가 서로 교차되거나 같은 지점에 겹쳐 조사될 때, 플라즈마에 의한 서로 간의 상호 작용 및 상호 흡수, 그리고 이에 따른 열원의 강도 저하 현상이 많이 보고 되어 있어 본 연구에서도 이러한 현상을 주의 깊게 관찰하였다. 그러나 이러한 현상은 주로 고출력 레이저 및 고전류 아크에서 많이 발생한다고 알려져 있다. 레이저 파워미터(laser power meter)를 이용한 출력 측정 및 용접 결과를 통하여 확인한 결과 본 연구에서와 같은 저출력 레이저 및 미세한 직경을 가진 저전류의 마이크

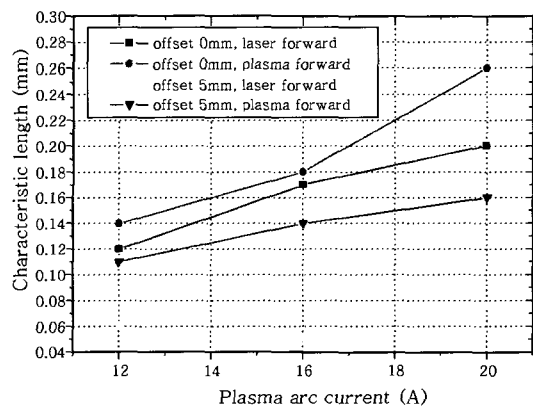


Fig. 12 Characteristic length according to plasma current and offset distance

로 플라즈마 아크는 서로 간의 상호 작용이 크지 않으며 이에 따른 레이저 빔의 출력 저하도 작은 수준인 것으로 확인되었다.

본 연구를 통하여 12m/min의 빠른 용접 속도에서도 안정적으로 완전 용입을 이루어 양호한 용접부가 형성되는 것을 확인하였으며, 레이저만을 이용한 용접의 적정 용접 속도가 약 5m/min임을 감안할 때 대폭적인 용접 속도의 증가를 통해 생산성을 높일 수 있음을 입증하였다.

4. 결 론

레이저 시스템에 마이크로 플라즈마 아크 열원을 추가하여 스테인리스강 박판 튜브의 용접 속도를 증가시키는 본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 마이크로 플라즈마 아크 열원을 레이저 열원에 대한 보조 열원으로 추가하여 용접 실험을 실시한 결과 용접부의 예열 효과 및 온도 상승에 따른 레이저 빔의 흡수를 상승효과 등을 통하여 용접 속도를 대폭적으로 상승시킬 수 있었으며, 고속 용접 시에도 안정적인 완전 용입부를 얻을 수 있었다.

2) 두 개의 열원에 대한 상호 위치 및 거리에 따른 용접부의 상관관계를 실험적으로 규명하였고, 보다 유리한 용입을 위해서는 플라즈마 아크 열원이 레이저 열원보다 선행하여 용접이 이루어져야 함을 알게 되었다. 두 열원의 거리가 멀어지면 두 열원에 의한 연쇄적인 가열 효과가 감소되어 용입 깊이도 감소함을 확인하였다.

후 기

본 논문은 (주)LG전선과 두뇌한국 21사업의 지원으로 수행되었습니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. J.F. Lancaster: The Physics of Welding (2nd edition), Oxford Pergamon Co., 1986, 306-325
2. C. Dawes: Laser Welding, Abington Publishing Co., 1992, 26-29
3. K. Girard, J.M. Jouvard, and Ph Naudy: Study of Voluminal Defects Observed in Laser Spot Welding of Tantalum, Appl.Phys, **33** (2000), 2815-2824
4. C. J. Page, T. Devermann, J. Biffin and N. Blundell: Plasma Augmented Laser Welding and Its Applications, Science and Technology of Welding and Joining, **7-1** (2002), 1-10
5. N. Abe and M. Hayashi: Trends in Laser Arc Combination Welding Methods, Welding International, **16-2** (2002), 94-98
6. H.-S. Kim, Y.-S. Lee, Y.-S. Park, J.-T. Choi and J.-H. Shin: The Study for the Hybrid Laser Arc Welding Application in Shipbuilding, 제6회 고에너지 연구위원회 연구발표회 논문집, 대한용접학회, 서울, 2003. 8. 28, 52-57 (in Korean)
7. K. K. Johnson: Introduction to Microjoining, Edison Welding Institute, 1985, 1-10
8. T. J. Wieting and J. T. Schriempf: Infrared Absorptances of Partially Ordered Alloys at Elevated Temperatures, J. Appl. Phys., **47-9** (1996), 4009-4011