저진공 레이저용접 연구 리뷰

이 용 기^{*,**} · 천 현 필^{*,†} · 김 철 희^{*,***,†}

^{*}한국생산기술연구원 용접접합그룹

^{**}연세대학교 기계공학과

^{***}포틀랜드주립대학 기계재료공학과

Review on Vacuum Laser Beam Welding

Yongki Lee^{*,**} Jason Cheon^{*} and Cheolhee Kim^{*,***,†}

^{*}Advanced Joining & Additive Manufacturing R&D Department, KITECH, Incheon, 21999, Korea

^{**}Department of Mechanical Engineering, Yonsei University, Seoul, 03722, Korea

^{***}Department of Mechanical and Materials Engineering, Portland State University, OR 97229, USA

[†]Corresponding author: jasonhp@kitech.re.kr; chkim@kitech.re.kr

(Received August 4, 2021; Revised November 1, 2021; Accepted November 22, 2021)

Abstract

Vacuum laser beam welding (VLBW) exhibits better welding characteristics, e.g., deep penetration, less pore, and spatter generation, compared with the conventional laser welding technique under atmospheric pressure. Low ambient pressure affects the vaporization temperature of the base material and the interaction between laser and plasma plume, which affects the behaviors of laser-induced plasma plume, keyhole, and weld pool flow. This review introduces improvements in welding characteristics such as penetration depth, pore, and spatter generation in the VLBW process. The effect of ambient pressure on welding characteristics was reviewed, and the behavior of laser-induced plume, keyhole, and molten pool under reduced ambient pressure was discussed to understand the mechanisms for enhanced weldability.

Key Words: Laser welding, Vacuum, Subatmospheric pressure, Penetration, Laser-induced plume, Keyhole, Molten pool

1. 서 론

레이저용접이 적용되는 산업 분야가 확대됨과 동시에 다양한 소재에 대한 고품질의 용접부 수요가 점차 증대됨에 따라 기존 레이저용접 공정을 개선시킬 수 있는 기술들이 개발 및 연구되고 있다^{1,2)}. 이 중 저진공 레이저용접(vacuum laser beam welding, VLBW)은 용접 특성의 향상을 위해 기존의 대기압 레이저용접에 전자빔용접의 장점을 결합한 공정이다. 전자빔용접에서와 같이 진공 챔버 시스템 내에서 용접 공정이 수행되나, 0.1-10 Pa의 고진공을 활용하는 전자빔 용접과는 다르게 대기압의 1/10 정도의 기압(10 kPa)에서

10 Pa 까지의 저진공 분위기 하에서 레이저용접을 수행한다.

진공도가 낮아지면 다음과 같은 현상들이 나타나 레이저용접 특성을 변화시키게 된다. 모재의 기화 온도가 낮아지고, 표면장력 및 점성이 증가하는 등 재료의 성질이 변화되며, 챔버 시스템 내 기체 분자의 수가 적어져 평균자유행로가 길어진다³⁻⁵⁾. 이 요인들의 복합적인 작용으로 인해 레이저 유기 플룸이 감소하고, 키홀 및 용융풀의 거동이 안정화된다. 따라서, 저진공 레이저용접에서는 대기압 레이저용접에 비하여 용입 깊이를 2 배 이상 증대시킬 수 있으며^{6,7)}, 키홀 및 용융풀의 거동이 안정화되어 기공 및 스패터의 발생을 효과적으로 저감시킬 수 있다^{8,9)}. 전자빔 용접과 유사한 용접 품질

확보가 가능하며^{10,11)}, 대기압 부근의 낮은 진공도를 활용함에 따라 진공 분위기 조성을 위한 시간이 줄어들어 생산성이 증가하였고, 방사선을 차폐하기 위한 별도의 장치가 필요 없다는 장점을 갖고 있다. 저진공 레이저 용접은 고품질이 필수적으로 요구되는 파워트레인 부품의 용접¹²⁾이나 대용입 필요한 극후판 부품¹³⁾의 용접에 적극적으로 활용될 것으로 예상된다.

국외에서는 강, 알루미늄을 포함한 다양한 소재들에 대하여 저진공 레이저 용접 현상들이 연구되고 있지만 국내에서의 저진공 레이저 용접 관련 연구가 제한적으로 수행되었다.

본 리뷰에서는 최근 10년 동안의 저진공 레이저 용접관련 문헌에서 나온 연구결과를 위주로 주요 내용을 소개하고자 한다. 저진공 레이저 용접의 결과인 용입 깊이, 기공 및 스패터에 대해 먼저 설명이 현상들의 주요 원인인 레이저 유도 플룸, 키홀 및 용융플 거동을 설명하고자 한다.

2. 저진공 레이저용접 특성

주변 환경의 진공도와 금속 소재의 기화 온도는 Fig. 1과 같이 지수함수를 나타내며, 식 1과 같이 Clausius-Clapeyron 방정식으로 표현된다.

$$\ln\left(\frac{P_1}{P_2}\right) = -\frac{\Delta H_{vap}}{R} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}\right) \quad (1)$$

여기에서 T_1 은 온도, P_1 는 온도 T_1 에서의 증기압, ΔH_{vap} 는 증발 엔탈피, R 은 기체상수를 의미한다.

강 및 알루미늄의 경우 대기압 분위기에 비해 1 kPa 분위기에서는 약 800 K만큼 기화온도가 낮아지고, 0.01 kPa 분위기에서는 약 1200 K 만큼 기화 온도

Fig. 1 Vaporization temperature of steel and aluminum according to ambient pressure

가 낮아진다.

레이저용접에서 키홀은 용접금속의 기화 및 증기압 (recoil pressure)에 의해 형성되는데 저진공 분위기에서는 더 낮은 온도에서 기화 및 키홀 형성이 시작되고, 키홀 내에서 다중 반사현상과 결합하여 더 깊은 키홀 형성이 가능하기 때문에 용입 깊이를 대기압 보다 깊게 얻을 수 있다^{14,15)}. 또한 용입 깊이는 저진공 레이저용접 시 레이저 유기 플룸의 감소에 의해서도 영향을 받는데 이는 3절에서 상세하게 다룬다.

진공도가 낮아짐에 따라 용입 깊이가 증가하는 특성은 여러 연구자들에 의해 증명되었다. Fig. 2와 같이 Reisinger¹⁰⁾은 싱글 모드 레이저로 1 kPa의 진공분위기에서 강재를 용접할 때 600 W의 출력 및 0.27 m/min의 용접속도에서 대기압 대비 약 4배 더 깊은 용입을 확보함을 보여주었으며, Katayama¹³⁾는 디스크 레이저로 10 kPa의 진공분위기에서 Al 5052 합금을 용접할 때 16 kW의 레이저 출력 및 1 m/min의 용접속도에서 대기압 대비 약 1.6 배 깊은 용입 깊이를 확보하였다.

하지만 압력 감소에 따라 기화온도가 지수함수에 따라 하락하므로 용입 깊이가 증가량도 진공도 증가에 따라 선형적으로 감소하지 않고 지수함수에 따라 완만하게 감소하는 경향이 있다^{16,17)}. Youhei¹⁷⁾는 스테인리스강 저진공 레이저용접에서 레이저 출력 16 kW 및 진공도 10 kPa이나 이하일 경우 용입 깊이가 수렴하는 경향성을 가짐을 실험적으로 증명하였으며, Wang⁶⁾은 Al

Fig. 2 Weld penetration depth change in (a) Steel, and (b) Al 5052 alloy^{10,13)}

5A06 합금에 10-30 kW의 레이저 출력을 적용할 때 용입 깊이가 급격하게 증가하는 임계 진공도가 10 kPa이며, 그 진공도 이하에서도 용입 깊이는 유사하게 나타나거나 오히려 더 적게 나타나기도 한다는 연구결과를 제시하였다(Fig. 3). 따라서 작업 진공도를 너무 높게 설정하면 해당 진공도를 달성하기 위한 펌프 가동 시간이 증가하거나 고성능의 펌프가 요구되기 때문에 저진공 레이저용접을 수행할 때 품질과 생산성을 고려한 적절한 목표 진공도 설정이 바람직하다.

저진공 레이저용접에서의 용입 깊이는 진공도와 용접 속도의 교호작용에 의해 영향을 받는다. 진공도에 따른 용입 깊이의 변화는 용접속도가 느릴 때는 명확하나 용접속도가 빠를 경우에는 크지 않다^{9,16,18,19}. Börner¹⁶에 의하면 S355 강을 용접하는 경우 10 m/min의 고

Fig. 3 Weld penetration depth according to ambient pressure, (a) STS 304 and Al 5052 alloy¹⁷⁾, and (b) Al 5A06 alloy⁶⁾

속용접 조건에서는 저진공 레이저용접과 대기압 레이저 용접이 유사한 용접부 형상을 가지고, Katayama¹⁹⁾는 Al 5052 합금을 6 m/min의 용접속도로 저진공 레이저용접할 경우 용입 깊이가 대기압 조건에 비해 낮다고 보고 하였다(Fig. 4). 그러나 이러한 현상에 대한 원인은 아직 자세히 규명된 바 없다.

진공도 감소는 기공과 스패터의 형성에도 영향을 미치게 된다. 키펀 거동 안정화와 용융풀 유동 방향의 변화가 주된 원인이며 해당 현상에 대해 본 논문의 4절과 5절에서 상세하게 설명한다.

Fig. 5와 같이 Cai²⁰⁾는 주변압력이 감소할 때 용접부 내 잔존한 기공률이 감소한다는 것을 보여주었다. Al 5083합금 소재를 대상으로 대기압에서는 큰 기공들이 다수 분포되어 있으나, 1 kPa의 진공도에서는 기공률이 확연하게 감소되며, 0.01 kPa 주변압력 이하에서는 기공이 발견되지 않았다는 결과가 제시되었다. Jiang¹⁵⁾

Fig. 4 Weld penetration depth according to welding speed. (a) S355 steel¹⁶⁾, and (b) Al 5052 alloy¹⁹⁾

Fig. 5 Change in porosity and pore morphology of Al 5083 alloy^{15,20)}

은 진공도 감소에 따른 기공의 형상적인 특징을 설명하였다. 대기압 조건에서 직경이 최대 약 3 mm인 기공이 존재하였으며 그 형상이 크고 불규칙하였지만, 진공도가 10 kPa 이하에서 직경이 0.75 mm 이하의 작고 구형에 가까운 기공들이 분포되어 있다.

Fig. 6는 저진공 레이저용접에서 나타나는 스패터 특성을 나타낸다. Börner⁹⁾는 16MnCr5 합금에 대한 완전용입 용접에서 진공도가 10 kPa로 감소하면 스패터의 발생 정도가 확연하게 줄어들며, 1 kPa의 진공도에서 스패터가 거의 발생되지 않는다는 결과를 제시하였다. Yang⁸⁾은 아연도금강의 레이저용접에 구리관을 통한 진공 보조 시스템을 적용할 때 스패터가 거의 발생되지 않고 미려한 비드를 나타낸다고 보고하였다.

3. 레이저 유기 플룸의 변화

플라즈마 플룸이라고도 표현되는 레이저 유기 플룸은 레이저와 모재 혹은 보호가스 사이의 상호작용으로 인하여 발생되며, 이온화된 플라즈마와 응축된 입자 및 금속증기로 이루어져 있다²¹⁾. 용접 중 발생하는 레이저 유기 플룸은 10 μ m 파장대의 CO₂ 레이저와 1 μ m 파장대의 고체레이저에서 다른 거동을 가진다.

(a)

(b)

Fig. 6 Spatter generation according to ambient pressure, (a) 16MnCr5 alloy and (b) Zinc-coated steel^{18,9)}

CO₂ 레이저에서 나타나는 레이저 유기 플룸의 온도는 1 μ m 파장 레이저에서 발생한 레이저 유기 플룸보다 높은 범위를 가지며²²⁾, 역제동복사(inverse bremsstrahlung) 현상 발생에 따른 레이저 에너지 흡수가 레이저 유도 플룸 발생의 주된 요소로 작용한다²³⁾. 1 μ m 파장 레이저에서는 파장 특성으로 인해 레이저 에너지 흡수로 인한 레이저 유기 플룸 발생이 상대적으로 적다고 알려져 있다²⁴⁾. 이를 제어하지 않으면 레이저 에너지가 온전히 모재로 전달되기 어렵기 때문에 용입 깊이를 감소시키며²⁵⁾, 높은 열전달 계수를 갖는 재료의 경우 키흐의 단힘으로 인해 불연속적인 용접이 이루어지거나 용접 길이방향으로 용입 깊이의 편차가 크게 발생되기도 한다^{26,27)}. 대기압 레이저용접에서는 레이저 에너지 손실을 방지하기 위해 보호가스나 보조가스를 활용해 레이저 유기 플룸을 제어하기도 한다^{28,29)}.

반면, 저진공 레이저용접에서는 진공 분위기라는 용접 공정의 특성으로 인하여 레이저 유기 플룸이 효과적으로 억제된다. 진공도를 낮추면 레이저 유기 플룸 내 전자 밀도 및 온도가 낮아지며, 키흐에서 분출되는 금속증기의 속도가 빨라지기 때문에 응축 및 레이저와의 상호작용 시간이 매우 짧아져서 나타나는 현상으로 보고되고 있다^{10,30)}. Jiang³¹⁾은 대기 중 5,700 K인 전자 온도가 진공도 5 kPa에서는 4,300 K로 낮아지며, 전자밀도는 약 10 배 감소한다는 결과를 제시하였다

(Figs. 7a and 7b). Amara³²⁾는 키홀 내에서 분출되는 증기의 속도를 계산하여 대기압에서 최대 마하 1.28의 속도이며, 10 kPa의 진공도에서는 마하 2로 증기의 속도가 증가하는 결과를 제시하였다 (Fig. 7c).

강과 알루미늄의 경우 10 kW 이상의 고출력을 사용하더라도 1 kPa 수준의 진공도가 형성되면 레이저 유

(a)

(b)

(c)

Fig. 7 Change in laser-induced plume characteristics according to ambient pressure, (a) Electron temperature, (b) Electron density and (c) Vapor ejection speed inside of the keyhole^{31,32)}

기 플룸의 발생이 효과적으로 억제되어 레이저 유기 플룸의 밝기가 거의 사라지고 Fig. 8과 같이 용융풀 및 레이저가 전파되는 형상까지 관찰이 가능한 것으로 다수의 연구자들에 의해 보고되었다^{9,10,13,17,19,20)}.

레이저 유기 플룸이 용접특성에 미치는 영향을 정량적으로 분석하기 위한 다양한 방식으로의 연구가 수행되었다. 분광 분석을 통한 전자의 온도 및 밀도를 측정하여 역제동복사 효과에 의한 레이저 에너지 흡수율을 계산하였으며 (Fig. 9)³¹⁾, 프로브 빔을 활용하여 레이저 유기 플룸 내에서 발생하는 레이저 빔의 굴절 및 감쇠율을 계산하였다(Fig. 10)^{17,31,33)}. 1 μm 파장대 레이저에서 발생하는 레이저 유기 플룸의 레이저 빔 흡수계수는 주변압력이 낮아짐에 따라 감소하며, 이를 통해 대기압에서 11%, 5 kPa의 주변 압력에서 0.3%가 플룸에 의해 흡수된다는 결과가 제시되었다. 5 kPa 이하의 진공도에서 굴절각은 0.03-0.06 mrad으로 대기압 대비 약 10 배 낮은 값을 나타내며, 감쇠율은 대기압에서 12.9%에서 1 kPa 진공도에서는 2.4%로 감소되는 것이 보고되었다. 이는 저진공 분위기에서 모재로 안정적인 레이저 에너지 전달이 가능하다는 것을 의미한다.

연구 결과들을 종합하였을 때 1-10 kPa 수준의 진공도를 형성하더라도 레이저 에너지 손실이 효과적으로

Fig. 8 Laser-induced plume formation of (a) STS 304 steel, and (b) Al5052 alloy^{13,17)}

Fig. 9 Inverse bremsstrahlung absorption according to ambient pressure³¹⁾

(a)

(b)

Fig. 10 Refraction and attenuation of laser beam according to ambient pressure, (a) Angle of probe laser beam refracted through laser-induced plume and (b) Attenuation of the laser beam through laser-induced plume^{17,31)}

줄어들기 때문에 생산성을 고려하여 적절한 수준의 진공도 선정이 중요하다. 또한 저진공 분위기에서 기화 온도 감소와 레이저 유기 플룸의 변화가 용입 깊이에 복합적으로 영향을 미치나 아직 레이저 유기 플룸이 독립적으로 용입 깊이에 주는 영향에 대해 평가가 이루어지지 않아 해당 현상을 규명하는 연구가 필요하다고 사료된다.

4. 키홀 거동의 변화

레이저용접에서 키홀의 거동은 기공 발생 및 용접비드의 형상을 결정하는 중요한 요소이다. 저진공 레이저

(a)

(b)

Fig. 11 Longitudinal welds characteristics according to ambient pressure, (a) Phosphorus-deoxidized copper³⁴⁾ and (b) Al 5A06 alloy²⁷⁾

용접에서는 대기압 레이저용접보다 더 깊은 키홀이 형성되에도 안정적인 거동을 나타낸다. 이는 주변 압력 변화에 따른 기화 온도의 감소, 표면장력 및 점성의 증가와 키홀 내부에서 외부로 배출되는 금속 증기 제트의 속도 증가가 복합적으로 작용한 결과이다. 기화온도는 주변 압력 감소에 따라 지수적 감소를 나타내는데 반해 용융점은 거의 변화가 없기 때문에¹⁵⁾ 기화점과 용융점 간의 차이가 적어져 용융플의 두께가 얇아진다. 또한 용융플의 평균 온도는 기화 온도의 감소로 인하여 낮아져 표면장력 및 점성이 증가한다³⁰⁾. 따라서 대기압 레이저용접에 비해 적은 열변형을 나타내며³⁴⁾, 키홀의 붕괴 가능성을 감소시킬 수 있다³⁵⁾. 일반적으로 키홀의 거동이 불안정한 알루미늄 및 구리에 저진공 레이저용접을 적용하면 키홀의 안정성 증가로 인하여 용접 특성이 크게 향상되는 연구결과가 보고되었다(Fig. 11)^{26,27)}.

전체적인 키홀의 거동은 X-ray를 이용하여 관찰하는 방법이 가장 정확하나 고가 장비를 요구하여 레이저 입사방향에 대해 동측으로 관찰하거나 내열 글래스(Boro-silicate glass)를 활용하여 키홀의 거동을 관찰하는 방식도 많이 사용되었다^{7,36-38)}. Jiang³⁶⁾은 강을 용접할 때 대기압 및 1 kPa 진공도에서 키홀 수축현상과 후면벽 부풀 (bulging) 현상이 공통적으로 발생되었으나, 1 kPa의 진공도에서는 크기가 더 작으며, 키홀이 붕괴되지 않고 키홀의 깊이가 안정화되었다고 보고하였다. Tang³⁷⁾은 60 kPa의 진공도에서 상대적으로 큰 변동이 키홀 후면벽에 나타나나, 진공도가 5 kPa로 감소하면 깊은 키홀이 형성되고 키홀 후면벽의 변동성이 완화된 키홀이 안정화된다는 결과를 보고하였다(Fig. 12).

수치해석적인 접근을 통해 키홀의 거동을 예측하기도 하였다^{4,14,39)}. 대기압에 비해 0.01 kPa 진공도에서는

키홀의 직경이 약 0.3 mm 증가되며 키홀 벽의 두께는 약 0.9 mm 감소되는 것이 Li⁽⁴⁾의 연구에서 관찰되었다. Pang⁽³⁹⁾의 연구결과에서는 대기압에서 진공 분위기로 변화함에 따라 키홀 벽의 온도가 약 600 K 정도 낮아지는 것을 제시되었다.

5. 용융풀 거동의 변화

레이저용접에서 용융풀의 거동은 키홀과 마찬가지로

Fig. 12 Longitudinal observation image of the keyholes according to ambient pressure⁽³⁵⁾

Fig. 13 Calculated temperature distribution and profiles of keyhole and molten pool, (a) Ref. 4 and (b) Ref. 39

용접비드 형상과 기공 형성과 밀접한 연관성이 있다. 용융풀의 거동은 레이저용접변수에 따라 결정되는데, 고출력 및 고속용접에서 키홀의 불안정성 또는 재료의 특성에 의해 발생한 기공을 외부로 배출하기 유리하다고 알려져 있다⁽⁴⁰⁾. 저진공 레이저용접에서는 깊은 키홀이 형성되면서 키홀 후면벽을 따라 위쪽으로 상승하는 유동이 형성되어 키홀 하단부에서 발생한 기공을 용융풀 외부로 배출하기에 용이하며, 용융풀 표면의 거동이 안정화하여 비드의 형상이 미려하다^(27,35,41). 또한 용융풀의 변동성 완화와 키홀의 안정적인 거동은 스파터 발생저감에도 긍정적인 영향을 미친다.

초기 저진공 레이저용접의 연구에서는 용융풀에 텅스텐 입자를 투입하여 해당 입자가 갖는 궤적분석을 통해 용융풀의 거동을 예측하는 방식이 Katayama의 연구에서 활용되었다⁽⁴¹⁾. 대기압에서는 유동이 키홀의 후면벽을 따라 하강하는 방향으로 형성된 후 용융풀의 아래쪽을 따라 뒤쪽으로 진행되면서 Fig. 14에서 보는 것과 같이 시계방향의 거동을 가지지만, 저진공 분위기에서는 키홀의 후면벽을 따라 위로 상승하는 유동이 형성되어 반시계 방향의 거동을 가져서 키홀의 끝 부분에서 형성된 기공이 용융풀 외부로 배출되기 용이함을 가지

Fig. 14 Schematic illustration of molten pool flow by using tungsten particle⁽⁴¹⁾

Fig. 15 The effect of ambient pressure on molten pool behavior, (a) Weld pool surface flow³⁵⁾ and (b) Internal weld pool flow¹⁵⁾

화하였다(Fig. 14).

고속카메라를 활용하여 용융풀 표면에서의 변동성이 분석된 사례가 존재하며^{35,37,42)}, 키홀의 거동을 관찰하는 방식과 마찬가지로 내열 글래스를 활용하여 키홀 후면부의 용융풀 거동이 관찰되기도 하였다¹⁵⁾ (Fig. 15). 3 kPa 이하의 진공도에서 용융풀 표면의 변동성이 완화되며, 레이저 유기 플룸의 각도가 용접방향에 수직한 방향으로 변화되는 것이 Luo에 의해 보고되었다³⁵⁾. Jiang¹⁵⁾의 연구에서는 내열 글래스를 적용하여 주변 압력이 낮아질수록 기공률이 감소하는 원인에 대한 Katayama⁴¹⁾의 결과를 확인하였다. 대기압 하에 용융풀 상단부 및 하단부에서 용융풀 뒷쪽으로 향하는 유동이 발생하여 기공이 용융풀 외부로 배출되기 어려우나, 10 kPa의 주변압력에서는 용융풀 길이가 짧고, 키홀 하단부에서 형성된 기공이 키홀 후면벽을 따라 용융풀 상단부를 향해 상승하는 유동이 형성되어 기공 배출에 유리하여 기공률 감소에 효과적임이 보고되었다.

진공도 감소에 따른 기공 발생 메커니즘은 여러 실험 방식을 통해 증명되었다. 특히 키홀 끝 부근에서 형성된 기공을 외부로 배출하는데 효과적이기 때문에 키홀 및 용융풀의 불안정성에 의해 기공이 주로 발생되는 비철금속의 용접에 적용하게 되면 결함 개선 효과를 나타낼 수 있을 것으로 사료된다.

6. 결 론

본 리뷰에서는 저진공 레이저용접에서 진공도가 용접 특성 변화에 미치는 영향에 대한 선행연구를 리뷰하였

으며, 그 결과는 다음과 같이 정리할 수 있다.

1) 진공도 저감에 따라 레이저 유기 플룸, 키홀 및 용융풀의 거동 변화가 발생하여 용입 깊이 증가와 기공, 스패터의 감소가 가능하다.

2) 저진공 분위기에서 기화온도 감소로 인해 키홀 및 용입 깊이가 증가한다. 진공도를 낮출 때 용입 깊이는 1-10 kPa의 주변압력까지 가파르게 상승하며, 더 낮은 진공도에서는 수렴하므로 적정 수준의 진공도 선정이 필요하다.

3) 저진공 분위기에서 용입 깊이의 증가 효과는 용접속도가 낮을수록 커지며, 6 m/min 이상의 빠른 용접속도에서는 용입 깊이 증가 효과가 크지 않다.

4) 저진공에서는 레이저 유기 플룸이 적게 발생하고 레이저 빔의 굴절각 및 감쇠율이 낮아 에너지 손실이 적기 때문에 레이저 에너지 전달에 유리하다.

5) 저진공 분위기에서 기화온도와 용융온도의 작은 차이로 인하여 안정된 키홀 형성이 가능하며, 스패터 발생 및 키홀 붕괴에 따른 기공 형성 가능성을 낮춘다.

6) 안정된 키홀 거동에 의해 용융풀 표면의 변동성이 완화되어 적은 스패터 및 미려한 비드 형상을 얻을 수 있다. 키홀 후면을 따라 위쪽으로 용융풀 유동이 발생하여 키홀 끝에서 형성된 기공 배출에 용이하다.

Acknowledgements

이 논문은 2019년도 정부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (NO.2019R1F1A1042353)

ORCID: Yongki Lee: <http://orcid.org/0000-0001-9601-5669>

ORCID: Jason Cheon: <http://orcid.org/0000-0003-2271-2511>

ORCID: Cheolhee Kim: <http://orcid.org/0000-0003-4127-3171>

References

1. M. Kang, W. S. Choi, and S. Kang, Ultrasonic and Laser Welding Technologies on Al/Cu Dissimilar Materials for the Lithium-Ion Battery Cell or Module Manufacturing, *J. Weld. Join.* 37(2) (2019) 52-59. <https://doi.org/10.5781/JWJ.2019.37.2.8>
2. T. W. Kim and H. W. Choi, Study on Laser Welding of Al-Cu Dissimilar Material by Green Laser and Weld Quality Evaluation by Deep Learning, *J. Weld. Join.* 39(1) (2021) 67-73. <https://doi.org/10.5781/JWJ.2021.39.1.8>
3. U. Reisgen, S. Olschok, and S. Jakobs, Laser beam welding in vacuum of thick plate structural steel, in International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics, *Laser Inst. America, City*, (2013) 341-350. <https://doi.org/10.2351/1.5062897>

4. L. Li, G. Peng, J. Wang, J. Gong, and S. Meng, Numerical and experimental study on keyhole and melt flow dynamics during laser welding of aluminium alloys under subatmospheric pressures, *Int. J. Heat Mass Transf.* 133 (2019) 812-826.
<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.12.165>
5. U. Reisgen, S. Olschok, S. Jakobs, and C. Turner, Sound welding of copper: Laser beam welding in vacuum, *Phy. Procedia*, 83 (2016) 447-454.
<https://doi.org/10.1016/j.phpro.2016.08.046>
6. J. Wang, G. Peng, L. Li, C. Si, S. Meng, and J. Gong, 30 kW-level laser welding characteristics of 5A06 aluminum alloy thick plate under subatmospheric pressure, *Opt. Laser Technol.* 119 (2019) 105668.
<https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2019.105668>
7. M. Gao, Y. Kawahito, and S. Kajii, Observation and understanding in laser welding of pure titanium at subatmospheric pressure, *Opt. Expr.* 25(12) (2017) 13539-13548.
<https://doi.org/10.1364/OE.25.013539>
8. S. Yang, J. Wang, B. Carlson, and J. Zhang, Vacuum-assisted laser welding of zinc-coated steels in a gap-free lap joint configuration, *Weld. J.* 92(7) (2013) 197-204.
9. C. Börner, T. Krüssel, and K. Dilger, Process characteristics of laser beam welding at reduced ambient pressure, in High-Power Laser Materials Processing, Lasers, Beam Delivery, Diagnostics, and Applications II, *International Society for Optics and Photonics*, San Diego, (2013) 86030M.
<https://doi.org/10.1117/12.2003858>
10. U. Reisgen, S. Olscho, and S. Longerich, Laser beam welding in vacuum-a process variation in comparison with electron beam welding, in International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics, *Laser Institute of America*, Anaheim, (2010) 638-647.
<https://doi.org/10.2351/1.5062093>
11. J. Elmer, J. Vaja, and H. Carlton, The effect of reduced pressure on laser keyhole weld porosity and weld geometry in commercially pure titanium and nickel, *Weld. J.* 95 (2016) 419-430.
12. U. Reisgen, S. Olschok, S. Jakobs, and M. Mücke, Welding with the Laser Beam in Vacuum, Close to production test series for the vehicle industry, *Laser Tech. J.* 12(2) (2015) 42-46.
<https://doi.org/10.1002/latj.201500014>
13. S. Katayama, Y. Abe, R. Ido, M. Mizutani, and Y. Kawahito, Deep penetration welding with high power disk lasers in low vacuum, in International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics, *Laser Institute of America*, City??, (2011) 669-678.
<https://doi.org/10.2351/1.5062308>
14. X. Han, X. Tang, T. Wang, C. Shao, F. Lu, and H. Cui, Role of ambient pressure in keyhole dynamics based on beam transmission path method for laser welding on Al alloy, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 99(5-8) (2018) 1639-1651.
<https://doi.org/10.1007/s00170-018-2592-7>
15. M. Jiang, X. Chen, Y. Chen, and W. Tao, Mitigation of porosity defects in fiber laser welding under low vacuum, *J. Mater. Process. Technol.* 276 (2020) 116385.
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.116385>
16. C. Börner, K. Dilger, V. Rominger, T. Harrer, T. Krüssel, and T. Löwer, Influence of ambient pressure on spattering and weld seam quality in laser beam welding with the solid-state laser, in International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics, *Laser Institute of America*, Orlando, (2011) 621-629.
<https://doi.org/10.2351/1.5062302>
17. A. Youhei, K. Yousuke, N. Hiroshi, N. Koji, M. Masami, and K. Seiji, Effect of reduced pressure atmosphere on weld geometry in partial penetration laser welding of stainless steel and aluminium alloy with high power and high brightness laser, *Sci. Technol. Weld. Join.* 19(4) (2014) 324-332.
<https://doi.org/10.1179/1362171813y.0000000182>
18. V. Rominger, P. Berger, and H. Hügel, Effects of reduced ambient pressure on spattering during the laser beam welding of mild steel, *J. Laser Appl.* 31(4) (2019) 042016
<https://doi.org/10.2351/1.5007186>
19. S. Katayama, Y. Abe, M. Mizutani, and Y. Kawahito, Deep penetration welding with high-power laser under vacuum, *Tran. JWRI*, 40(1) (2011) 15-19.
<https://doi.org/10.1016/j.phpro.2011.03.010>
20. C. Cai, G. Peng, L. Li, Y. Chen, and L. Qiao, Comparative study on laser welding characteristics of aluminium alloy under atmospheric and subatmospheric pressures, *Sci. Technol. Weld. Join.* 19(7) (2014) 547-553.
<https://doi.org/10.1179/1362171814Y.0000000223>
21. P. Y. Shcheglov, A. Gumenyuk, I. B. Gornushkin, M. Rethmeier, and V. Petrovskiy, Vapor-plasma plume investigation during high-power fiber laser welding, *Laser Phy.* 23(1) (2012) 016001.
<https://doi.org/10.1088/1054-660X/23/1/016001>
22. P. Shcheglov, Study of vapour-plasma plume during high power fiber laser beam influence on metals, *Bundesanstalt für Materialforschung und-prüfung (BAM)*, 2012.
23. Y. Cheng, X. Jin, S. Li, and L. Zeng, Fresnel absorption and inverse bremsstrahlung absorption in an actual 3D keyhole during deep penetration CO2 laser welding of aluminum 6016, *Opt. Laser Technol.* 44(5) (2012) 1426-1436.
<https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2011.12.024>
24. Y. Kawahito, K. Kinoshita, N. Matsumoto, M. Mizutani, and S. Katayama, Effect of weakly ionised plasma on penetration of stainless steel weld produced with ultra high power density fibre laser, *Sci. Technol. Weld. Join.* 13(8) (2008) 749-753.

- <https://doi.org/10.1179/136217108X356971>
25. J. Zou, W. Yang, S. Wu, Y. He, and R. Xiao, Effect of plume on weld penetration during high-power fiber laser welding, *J. Laser Appl.* 28(2) (2016) 022003.
<https://doi.org/10.2351/1.4940148>
 26. U. Reisgen, S. Olschok, and C. Turner, Laser Beam Welding of Copper, Reduced pressure as key for sound welding of high plate thicknesses, *Laser Tech. J.* 13(5) (2016) 34-37.
<https://doi.org/10.1002/latj.201600029>
 27. G. Peng, L. Li, J. Wang, H. Xia, S. Meng, and J. Gong, Effect of subatmospheric pressures on weld formation and mechanical properties during disk laser welding of 5A06 aluminium alloy, *J. Mater. Process. Technol.* 277 (2020) 116457.
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.116457>
 28. J. Xu, Y. Luo, L. Zhu, J. Han, C. Zhang, and D. Chen, Effect of shielding gas on the plasma plume in pulsed laser welding, *Measurement*, 134 (2019) 25-32.
<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.10.047>
 29. Y. Miyazaki and S. Katayama, Influence of laser-induced plume on penetration in laser welding, *Weld. Int.* 29(5) (2015) 349-355.
<https://doi.org/10.1080/09507116.2014.921067>
 30. U. Reisgen, S. Olschok, S. Jakobs, and C. Turner, Laser beam welding under vacuum of high grade materials, *Weld. World*, 60(3) (2016) 403-413.
<https://doi.org/10.1007/s40194-016-0302-3>
 31. M. Jiang, W. Tao, S. Wang, L. Li and Y. Chen, Effect of ambient pressure on interaction between laser radiation and plasma plume in fiber laser welding, *Vacuum*, 138 (2017) 70-79.
<https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2017.01.012>
 32. E. Amara, R. Fabbro, and A. Bendib, Modeling of the compressible vapor flow induced in a keyhole during laser welding, *J. Appl. Phy.* 93(7) (2003) 4289-4296
<https://doi.org/10.1063/1.1557778>
 33. Y. Luo, X. Tang, F. Lu, Q. Chen, and H. Cui, Effect of subatmospheric pressure on plasma plume in fiber laser welding, *J. Mater. Process. Technol.* 215 (2015) 219-224.
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.08.011>
 34. Reisgen Uwe, Olschok Simon, Holtum Niklas, and J. Stefan, Laser beam welding in mobile vacuum, *Proceedings of the Lasers in Manufacturing Conference (LIM2017)*, Munich, Germany (2017).
 35. Y. Luo, X. Tang, S. Deng, F. Lu, Q. Chen, and H. Cui, Dynamic coupling between molten pool and metallic vapor ejection for fiber laser welding under subatmospheric pressure, *Journal of Materials Processing Technology*, 229 (2016) 431-438.
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.09.048>
 36. M. Jiang, X. Chen, Y. Chen, and W. Tao, Increasing keyhole stability of fiber laser welding under reduced ambient pressure, *J. Mater. Process. Technol.* 268 (2019) 213-222.
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.01.026>
 37. X. Tang, S. Deng, F. Lu, H. Cui, and Y. Luo, Bead formation characteristics in laser welding of high-strength steel under subatmospheric pressures, *Weld. World*, 63(2) (2019) 401-407.
<https://doi.org/10.1007/s40194-018-0647-x>
 38. J. Ning, S. J. Na, L. J. Zhang, X. Wang, J. Long, and W. I. Cho, Improving thermal efficiency and stability of laser welding process for magnesium alloy by combining power modulation and subatmospheric pressure environment, *J. Magnesium Alloys*, (2021).
<https://doi.org/10.1016/j.jma.2021.02.005>
 39. S. Pang, K. Hirano, R. Fabbro, and T. Jiang, Explanation of penetration depth variation during laser welding under variable ambient pressure, *J. Laser Appl.* 27(2) (2015) 022007
<https://doi.org/10.2351/1.4913455>
 40. S. Katayama, Fundamentals and Details of Laser Welding, *Springer*, Singapore (2020)
<https://doi.org/10.1007/978-981-15-7933-2>
 41. S. Katayama, Y. Kobayashi, M. Mizutani, and A. Matsunawa, Effect of vacuum on penetration and defects in laser welding, *J. Laser Appl.* 13(5) (2001) 187-192.
<https://doi.org/10.2351/1.1404413>
 42. S. Katayama, R. Ido, K. Nishimoto, M. Mizutani, and Y. Mizutani, Full penetration welding of thick high tensile strength steel plate with high-power disk laser in low vacuum, *Weld. Int.* 32(5) (2018) 289-302.
<https://doi.org/10.1080/09507116.2017.1346776>