

플라즈마/플름 측정에 의한 레이저 용접 공정 감시

박서정·김숙환·권영각

Monitoring and Measurement of Plasma/Plume in Laser Welding Process

Seo-Jeong Park, Sook-Hwan Kim and Young-Gak Kweon

1. 시작하며

관찰은 현상을 이해하는 출발점이다. 시간(시간분해능)과 공간(공간분해능)을 확대한 관찰은 현상을 이해하고 가공의 특성을 파악 할 수 있는 중요한 수단이다. 특히 레이저 용접 분야에 있어서 실용화를 위한 신뢰성의 문제와 품질 평가 기술의 개발이 요구 되어 왔다.

이러한 목적에 부응하기 위해서는 가공현상을 실시간으로 평가 할 수 있는 시스템의 개발이 필수불가결하다. 실제로 가공 중에 발생하는 정보신호(Signal)는 대단히 많이 존재하지만 측정의 한계로 인해, 공정 감시 목적에 따라 지배적인 신호를 효과적으로 분석하는 것이 유효하다고 할 수 있다.

2. 공정감시의 목적과 수단

공정 감시를 위한 실시간 모니터링의 목적은 ① 현상의 이해와 파악, ② 신뢰성 향상, ③ 품질 평가 수단 등으로 생각 할 수 있다. 또한, 레이저 빔과 재료와의 상호 작용에서 발생하는 신호는 크게 두 단계를 거치면서 현상을 이해하고 파악 할 수 있는데, 그 첫 번째는 모니터링의 하드웨어에 속하는 검출 수단과 방법의 선정이며 두 번째는 소프트웨어인 해석으로 나눌 수 있다. 검출수단과 방법을 선정하기 위해서는 먼저 공정감시의 목적이 설정이 되어야 하며, 그 목적에 따라 분류 할 수 있는 검출신호들은 다음과 같다.

- (가) 형상 (Image)
- (나) 온도 (Temperature)
- (다) 플라즈마/플름 (Plasma/Plume)
- (라) 반사광 (Reflected beam)
- (마) 음향 (Acoustic Emission)

실시간 변화하는 현상을 관찰하기 위해서는 주로 고속카메라를 이용하며, 관찰 대상으로서는 용융지(Welding

Pool) 나 플라즈마/플름의 발광 형태를 모니터링 한다¹⁾. 더 나아가 X선 투시 실시간 관찰을 통해 키 홀의 거동을 분석한다²⁾. 레이저 빔에 의해 형성된 재료 내부의 키 홀은 용접 열원으로써 재료의 온도 변화를 지배하기 때문에 이러한 온도측정에 의해 현상을 관찰 할 수 있다. 다수의 레이저 용접 연구자들은 현상에서 측정된 온도와 이론적 계산에 의한 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 레이저 용접 현상을 규명하고 있다³⁾. 또한 레이저 용접 공정 감시 기술로서 반사광의 측정 및 분석은 중요한데, 이는 가공점을 중심으로 재료의 상방향으로 확산되는 반사광의 공간 분포가 용융지 표면 형상을 반영한다는 것에 착안 한 것이다⁴⁾. 그리고 재료에 대한 빔의 흡수율 변화를 알 수 있다는 점에서 유효한 감시 수단이다. 확산되는 반사빔의 분포는 광 검출 다이오드 센서에 의해 측정이 가능하며, 전체 레이저 반사빔 파워를 측정하기 위해서는 광학 장치의 하나인 적분구(Integrating sphere)를 사용하면 가능하다⁵⁾. 음향 신호 역시 키 홀의 거동을 추정하는 데 유효한 수단⁶⁾이다. 예를 들면 키 홀의 형상이 좁고 짧은 경우에 발생하는 신호의 파형은 진폭이 좁거나 주파수가 높게 측정이 된다. 이러한 음향 신호의 변화는 키 홀의 형성과정 및 유동과 직접적 관련이 있으며 카메라 촬영과 병행하면 더 정확한 모니터링이 가능하다.

이상과 같이 레이저 용접에 있어 공정감시의 주 대상은 키 홀의 거동과 분석이라고 말 할 수 있다. 본 장에서는 레이저 빔과 재료의 상호작용에서 발생하는 유기 플라즈마/플름을 모니터링하는 수법과 해석 방법에 대해 논의 하기로 한다.

3. 레이저 빔 유기 플라즈마/플름

3.1 발생 메커니즘

재료표면에 집광된 레이저 빔에 의하여 용융 증발이

일어나며 다중 흡수에 의해 키 홀 형성이 시작된다. 키 홀의 내부 및 상층부에서는 금속의 입자, 증기, 이온 등이 분출하면서 레이저 빔을 흡수하고 가속화 된다. 이것은 전자가 무거운 이온 또는 중성입자에 의해서 감속 되어질 때 광자를 방출하는 제동 복사의 역과정이다. 이것을 유기 플라즈마에 의한 역제동복사 (Inverse Bremsstrahlung)라고 한다. 가속된 초기전자가 차례로 중성입자를 충돌 여기 또는 전리 시킴으로써 전면적인 전리 파괴가 일어나고 플라즈마가 발생한다. 이러한 레이저 유기 플라즈마/플름은 입사빔 에너지의 손실을 가져오며 키 홀의 거동에 영향을 미치게 되며, Fig. 1 과 같이 용접 비드의 형상은 표면 폭이 넓은 와인 컵과 같은 형상이 나타난다. 역제동복사에 의한 플라즈마 내부에서는 빔의 흡수, 밀도구배에 의한 빔의 굴절, 미립자에 의한 빔의 산란 등을 생각 할 수 있는데 세가지 중 어떤 것이 지배적이냐는 온도나 전자 밀도 등

3.2 플라즈마/플름 측정기술

전술 한 바와 같이 레이저에 의한 용접 프로세스를 적절히 제어하기 위해서는 유기 플라즈마/플름의 특성을 정확히 이해하고 파악 하는 것이 중요하다. 이것을 측정하기 위해서는 스트리크 카메라 (Streak camera)와

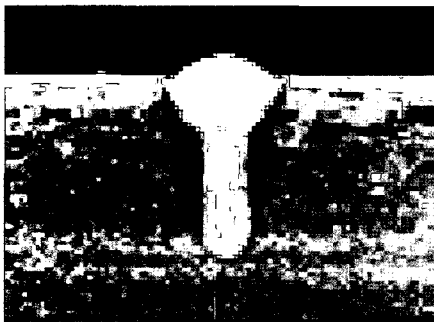


Fig. 1 Weld shape due to the hot plasma/plume

분광기 (Spectroscope) 를 사용하면 가능하다. 이러한 분광계측법⁸⁾에 의한 온도 측정에는 ① 절대강도법(또는 볼츠만 플롯법: Boltzmann Plot) ② 2선법 ③ 아벨 (Abel)변환법이 있다. 그리고 플라즈마의 전자 밀도 측정법에는 강도비례법, 프로브 빔(Probe beam)의 투과에 의한 방법 등이 있다. 본 장에서는 플라즈마/플름의 발광강도를 광 검출 다이오드 센서로서 측정 하는 방법과 분광 계측법에 의한 플라즈마의 온도 측정(절대 강도법=볼츠만 플롯법)에 관해 논의한다.

4. 플라즈마/플름의 발광강도 측정과 스펙트럼 분석

4.1 플라즈마/플름 (Plasma/Plume) 발광 강도의 공간적 변화

플라즈마/플름에서는 여러가지 신호(Signal)들이 존재하며 이들을 관찰하기 위해서는 각각의 수단과 방법이 필요하다. 먼저, 분석 할 수 있는 신호로서는 발광 강도, 스펙트럼 선 분석에 의한 온도 및 전자밀도, 플라즈마의 형태변화(발광형상) 등으로 구분 되어 질 수 있다.

대출력 레이저를 이용한 후판 용접의 경우, 박판 용접과 비교해서 키홀 (Key Hole) 의 Aspect Ratio 가 크기 때문에 키홀 내부의 현상 해석에 곤란한 점이 많다. 따라서 키홀 상층부에서 발생하는 플라즈마/플름의 발광 강도의 변화 만으로서는 키홀 내부의 거동을 해석하기에 한계가 있으므로 발광 강도 및 주파수 성분을 공간적 분할을 통하여 해석 하는 것이 바람직 하다. Fig. 2에 모니터링의 수단과 방법(좌측)과 레이저 유기 플라즈마/플름 개념도(우측)를 나타낸다. 이 수단과 방법은 미야모토 교수에 의해 제안(1992년)⁹⁾되어졌고, 공간적으로 변화하는 발광의 강도를 측정 할 수 있는데 착안 한 것이다. 일정한 거리에 각도 θ 의 위치에

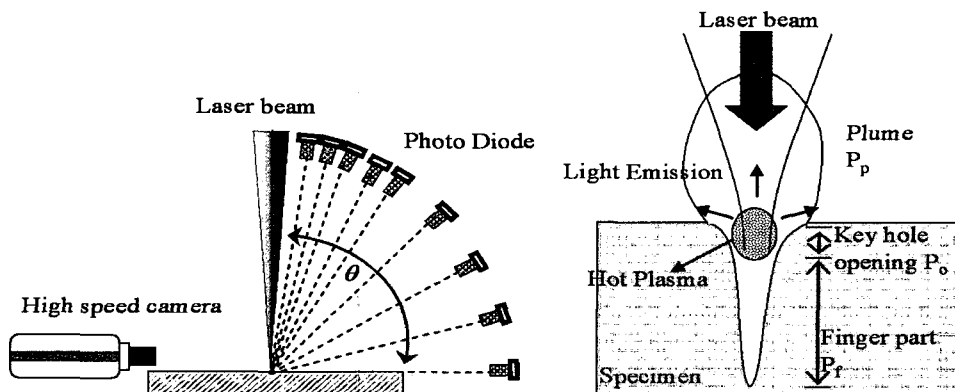


Fig. 2 Experimental set up for measurement of plasma/plume emission

수개의 광 검출 다이오드를 설치하고 재료표면에 대한 개개의 광 검출 다이오드의 각도는 0에서 86도의 범위로 하였고, 고속 비디오 카메라에 의해 광 검출 다이오드의 샘플링과 동기 시켜 플라즈마/플름의 촬영도 행하였다.

Fig. 3은 20KW CO₂ 레이저에 의한 연강(Mild Steel, 25mm Thick) 실험(Bead on Plate)에서 얻어진 발광 강도를 나타내고 있다. Fig. 3안의 각 파형은 0도, 45도, 86도의 위치에서 검출된 발광 강도를 나타내고 있으며, 높은 각도 일수록 강도가 높게 나타났다. 또한 100Hz 정도의 파형 피크는 플름의 분출을 시사하고 있다. 이러한 수단과 방법에 의하여 Fig. 2에 표시된 개념도에서와 같이 ①플름의 평균 발광 강도 P_p (측정 광 검출 다이오드의 각도 : 0도), ② 키홀 핑거부(Key hole finger part)에서의 발광 강도 P_f (측정 광 검출 다이오드의 각도 : 45도-83도), ③ 키홀 개구부(Key hole opening)의 발광 강도 P_o(측정 광 검출 다이오드의 각도 : 0도-45도)의 변화를 알 수 있으며 또한 주파수 특성을 분석하여 키홀 내부의 거동 해석과 용융 깊이의 변화를 추정 할 수 있다.

상기의 플라즈마 플름의 발광 특성을 통하여 키홀의 변화를 알아보는 공정감시 기술은 비교적 간단하며, 컴팩트한 시스템 설계에 의해 실제 현장에서의 적용도 가능할 것으로 기대 되어 진다.

4.2 플라즈마/플름의 발광 스펙트럼 강도에 의한 온도측정

발광의 스펙트럼 분석을 통하여 유기 플라즈마의 온도와 전자 밀도 분석을 행할 수 있고, 또한 그러한 변화들의 측정에 의해 불안정 또는 안정된 키홀의 상황을 파악 할 수 있는 동시에 빔과 재료의 물리적 상호작용을 이해 할 수 있다. 이러한 바탕 위에서 용접 프로세스의 적정 가공조건을 마련 할 필요가 있다.

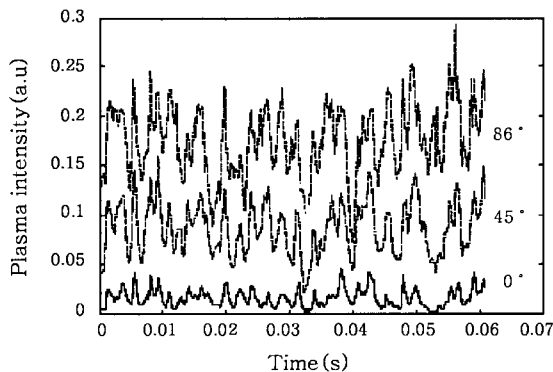


Fig. 3 Plasma intensity at different angles

먼저, 유기 플라즈마/플름의 발생 상황을 살펴 보면, 재료의 표면에 조사된 레이저 빔은 단시간 내에 재료의 온도를 상승시키고 용융 증발이 일어난다. 그리고 증발된 가스구름(중성원자, 이온 등)이 후속 빔을 흡수 하면서 여기가 일어나고 플라즈마/플름이 발생하며, 다시 하위 에너지 준위에 천이를 할 때 빛을 방출 하는데 이것이 플라즈마/플름의 발광 현상이다.

이러한 빛은 개개의 원자나 이온으로부터 방출 되기 때문에 이 들 입자의 에너지 준위나 천이 확률에 의해 파장이나 강도가 결정되어 진다.

이러한 레이저 유기 플라즈마/플름은 국소적으로 열평형 상태에 있다고 가정을 하며 다음과 같은 조건을 만족하고 있다.

- (1) 분자, 원자, 이온, 전자 등 모든 입자는 어떤 에너지 상태 있어서 맥스웰(Maxwell) 속도 분포를 따른다.
- (2) 각각의 입자가 다른 에너지 상태간의 상대적인 분포는 볼츠만분포에 따른다.
- (3) 원자, 분자 등의 이온화는 사하(Saha)의 식에 따르고, 분자나 라디칼의 해리는 화학 평균적으로 취급을 한다.

플라즈마가 국소 열평형(Local Thermal Equilibrium)에 있고 각 준위 간에 볼츠만 분포가 성립하고 있다고 하면 플라즈마 간에 존재하는 중성원자는 Fig. 4에 나타낸 것과 같이 여기 준위 n에 있는 원자의 밀도를 N_n, n준위에서 m준위로의 자연천이 확률(n>m)를 A_{nm}이라고 하면 이 천이에 따라 광으로서 방출하는 스펙트럼 선 강도 I_{nm}은 다음식으로 표시할 수 있다.

$$I_{nm} = N_n A_{nm} h\nu$$

여기서 h는 프랭크 정수, ν는 스펙트럼 선의 진동수이다. 온도T의 열평형 플라즈마는 여기 상태의 원자 밀도 N_n과 기저상태의 원자 밀도 N₀와의 관계에 볼츠만 분포법칙이 성립한다.

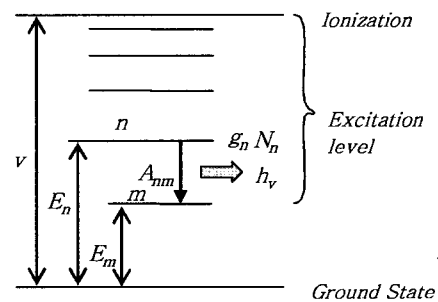


Fig. 4 Energy level

$$\frac{N_n}{N_0} = \left(\frac{g_n}{g_0}\right) \exp\left(\frac{-E_n}{kT}\right)$$

여기서 g_n, g_0 는 여기상태 n 및 기저상태 0 의 통계적 중률, k 는 볼츠만 정수 이다. 위의 두식에 의해 스펙트럼 선 강도 I_{nm} 의 식은 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$I_{nm} = \left(\frac{N}{Z}\right) g_n A_{nm} h\nu \exp\left(\frac{-E_n}{kT}\right)$$

여기서 N 은 중성원자 전체의 밀도, Z 는 분배함수 ($Z = \sum g_i \exp(-E_i/kT)$) 이다.

복수의 선 스펙트럼의 강도를 측정해서 그들의 상대 강도로부터 여기 온도를 구하는 방법이 알려져 있지만 이것과 같은 원리로 온도 T 에서의 발광 스펙트럼의 강도 분포를 추정하는 것도 가능하다. 다시 말해 위의 식에서 (N/Z) 는 모든 스펙트럼 선에 대해서 같은 정수이기 때문에 $g_n A_{nm}$ 이 이미 알고 있는 스펙트럼 선에 대해서 온도 T 의 함수로서 I_{nm} 의 상대강도를 구하면 된다.

Fig. 5은 플라즈마/플름의 발광 스펙트럼을 측정하기 위한 장치도이다. 가공점에서 플라즈마/플름이 방출되면 집광 렌즈에 의해 석영 글래스(Glass)의 광 파이버로 집속을 하고 분광기와 스트리크 카메라(Streak Camera)를 사용하여 분석한다. 이때 스펙트럼 발광강도 $I(\lambda)$ 는 보정이 필요한데 분광기안에 내장된 회절격자의 회절 효율 $E_g(l)$ 과 스트리크 카메라의 파장감도 특성 $E_s(\lambda)$ 을 고려하여야만 한다. 또한 렌즈나 광파이버를 사용하기 때문에 이들의 분광 투과 특성을 파악하기 위하여 표준램프(Standard of Spectral Radiance)에 의한 측정광학계 전체의 분광 감도 보정을 하여야만 한다.

Fig. 6은 Nd:YAG 레이저에 의한 Al 용접에서 발광 스펙트럼 강도를 측정하여 전형적인 절대 강도법 (볼츠만 플롯법)으로 계산 되어진 플라즈마/플름의 온도를 나타내고 있다¹⁰⁾. 이 때의 온도가 약5900K 이며, 발광 스펙트럼의 측정위치에 따라 온도는 변화하는데 이

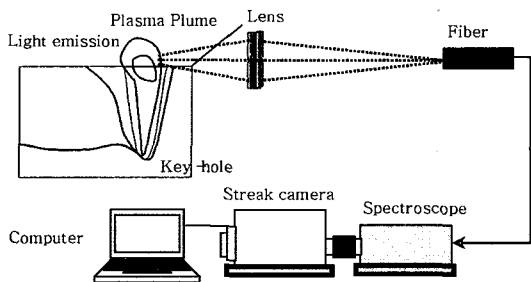


Fig. 5 Experimental set up for measurement of spectrum

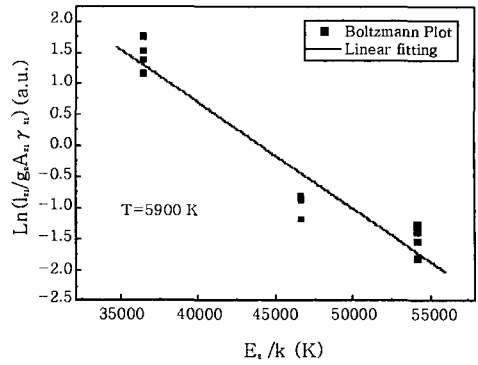


Fig. 6 Typical Boltzmann plot and its linear fitting for excitation temperature

를 통해 재료의 상층부에 형성된 플라즈마/플름의 온도 분포도 알 수 있다.

이상과 같은 방법으로 온도를 측정 할 수 있으나 플라즈마 분광계측법의 최대 제약으로써는 분광기에 의해 측정된 발광강도가 측정방향의 적분된 평균치라는 것이다. 실제 유기 플라즈마의 발생상황은 매우 불안정하고 시간적,공간적으로 변동이 심하기 때문에 이들에 대응한 플라즈마 분광계측법의 연구가 필요하다.

5. 공정감시 기술의 전망

레이저를 이용한 절단, 비아 홀(Via hole), 용접, 표면처리, 마킹 등 각종 가공기술들은 폭 넓게 보급 되고 있으며 고품질을 보장 하고 있지만 한편으로는 많은 가공 파라미터에 의해, 품질의 신뢰성 확보에 어려움이 있다. 이를 위해 레이저 가공의 실시간 모니터링(In-process real time monitoring)이 가공현상을 해명하는 학술적 의미와 더불어 중요한 과제로 되어 있다.

이러한 공정감시 기술의 발전은 피드 백(Feed Back) 제어가 가능한 하이테크 기술로의 전환이 기대 되어진다.

또한 현재 자동차 산업계 현장에서는 실시간 레이저 가공 공정감시 기술을 응용하여 고품질과 신뢰성을 확보를 위해 노력을 하고 있고(Fig. 7) 이러한 성과들을 바탕으로 지능형 레이저 가공시스템 (Intelligent laser



Fig. 7 Sensors for In process monitoring

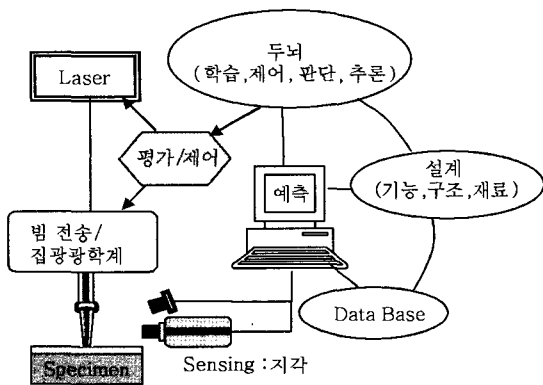


Fig. 8 Intelligent laser process control system

process control system)을 구축 해 나갈 것으로 전망 되어진다. 인간의 오감과 같이 지각 가능한 고감도 센서 시스템의 개발과 더불어 Fig. 8의 지적 레이저 가공 시스템 개념도에 나타난 바와 같이 레이저 빔과 재료의 상호작용, 가공 메커니즘의 파악, 가공 프로세스의 정량화 등에 기초한 소프트웨어의 개발이 기대 되어진다.



- 박서정 (朴曙汀)
- 1969년생
- 포항산업과학연구원
- 레이저 용접, 현상 계측
- e-mail : sjpark@rist.re.kr



- 권영각 (權寧珏)
- 1952년생
- 포항산업과학연구원
- 철강 및 비철 금속의 부식 및 방지, 용사, 용접부 피로
- e-mail : ygkweon@rist.re.kr



- 김숙환 (金肅煥)
- 1959년생
- 포항산업과학연구원
- 고밀도에너지 빔 용접공정, 정밀접합, 용접야금
- e-mail : weldksh@rist.re.kr

참고 문헌

1. T.Kojima, E.Ohmura and I.Miyamoto : Analysis of Laser welding Phenomena based on Image Processing of High Speed Photographs, ICALEO'98 LIA Vol.85 Section C113-C121
2. 김종도 : 레이저 용접 현상의 시간, 공간高分解能計測と欠陥形成構造および防止法に関する研究, 博士論文, 大阪大學工學研究科大學院
3. K.Lankalapalli and Jay F.Tu : Penetration Depth Estimation for Monitoring CO₂ laser Welding Process, ICALEO'95 LIA 573-582
4. S.J Park, R.Honma, and I.Miyamoto : A method to evaluate Nd:YAG laser microscopic spot welding process using reflected laser power, SPIE Vol 4088 295-298
5. S.J Park, T.Ooie and I.Miyamoto : Precision Micro-welding using Single mode Fiber laser, 일본 고온학회지 Vol.30 87-92
6. L.Li and W.M.Steen : Non-contact Acoustic Emission Monitoring During Laser Processing, ICALEO'92 719-728