

플룸 모니터링에 의한 SM45C 레이저 용접특성 평가

유영태*, 김재열⁺, 노경보⁺⁺, 양동조⁺⁺, 오용석⁺⁺, 임기건⁺⁺⁺, 김지환⁺⁺⁺⁺

(논문접수일 2003. 6. 3, 심사완료일 2003. 8. 11)

Estimation of Laser Welding Behavior of SM45C Steels by Plume Monitoring

Young-Tae Yoo*, Jae-Yeol Kim⁺, Kyoung-Bo Ro⁺⁺, Dong-Jo Yang⁺⁺,

Yong-Seak Oh⁺⁺, Kiegon Im⁺⁺⁺, Ji-Hwan Kim⁺⁺⁺⁺

Abstract

With the increased use of lasers in industrial welding applications, techniques for monitoring and controlling these processes become increasingly important. It is very important that we understand the dynamic behaviors of the laser induced plume in welding, because the laser induced plume has considerable effects on welding efficiency and the quality of materials. As the plume fluctuation was associated with keyhole instability, unstable vapor plume indicated the process was unstable and would result in poor welds. An Infrared Thermal-vision Camera can be utilized compensate for inaccuracies encountered in real-time monitoring during laser welding. We have results that instabilities of plume are closely related with hot cracking and defect of laser welding.

Key Words : Nd:YAG Laser, Laser Welding, Plume, Infrared Thermal-Vision Camera, Ultrasonic Inspector

1. 서론

기계구조용 중탄소강인 SM45C는 고주파 담금질에 의해 표면을 경화시키면 피로 강도가 높아져 마모에 강한 기계 부품으로 사용할 수 있어, 그 용도가 광범위하며 실제로 공

작기계의 각종 축과 나사, 기어 등의 재료로 이용되고 있다.

SM45C를 이용하는 제조라인의 다목적화를 위해 소재가 가지고 있는 고유한 성질을 상실하지 않는 용접공정을 도입하기 위해 요즘 산업현장에서 레이저 용접에 대한 연구가 관심이 되고있다. 레이저 용접은 고에너지 밀도 열원에 의

* 주저자, 조선대학교 기전공학과 (ytyou@chosun.ac.kr)
주소: 501-759 광주광역시 동구 서석동 375번지
+ 조선대학교 기전공학과
++ 조선대학교 대학원
+++ 전남대학교 물리학과
++++ KIST

해 단시간에 용융, 응고 과정이 진행되기 때문에 일반용접에 비해 종횡비(aspect ratio)가 대단히 크고, 용입깊이가 깊고, 열영향부(heat affected zone: HAZ)가 작은 용접을 할 수 있다^(1,2). 레이저용접은 용가재를 사용하지 않는 용접방법으로 높은 출력밀도로 매우 짧은 시간내에 용접하기 때문에 적절한 열확산과 적은 내부응력을 형성하여 용접변형이 적다⁽³⁾. 그래서 레이저 용접은 일반용접에 비해 금속조직이나 기계적 성질측면에서 모재에 영향을 미치는 부분이 매우 작아 우수한 평가를 받고 있다. 그리고 뛰어난 제어성과 대기 중 광파이버를 이용하여 장거리 전송이 가능하고, 산업용 로봇등과 결합하여 복잡한 빔전송경로의 시스템을 용이하게 구축할 수 있어서 일반용접으로는 용접하기 힘든 부위도 쉽게 용접할 수 있는 장점을 가지고 있다^(4,5).

그러나 레이저 용접은 공정변수에 민감하다는 문제점이 있다. 레이저 용접에서 용접공정변수로는 레이저빔의 출력, 레이저빔 이송속도, 초점거리, 보호가스의 유량 및 종류, 레이저빔의 파장 및 재질에 따라 용접결과가 다양하게 나타나기 때문이다. 고출력 레이저 용접시 레이저빔은 금속을 기화시키고, 금속증기와 보호가스의 일부를 플라즈마/플룸(plume)의 형태로 이온화시킨다. 플룸은 기화된 금속증기, 전자 및 금속이온으로 구성된 고온, 고휘도의 플라즈마이며, 에너지밀도와 밀접한 관련이 있다. 플룸의 양이 과다할 경우에는 용접에 소요된 레이저 에너지를 흡수 또는 산란시키므로 에너지 이용효율도 낮아지고, 용입깊이도 현저히 낮아지므로 레이저용접할 때 발생하는 플룸을 이해하는 것은 중요하다⁽⁶⁾.

고출력 레이저 용접에서 플룸의 파동은 전형적으로 킬로의 불안정과 관련있는데 불안정한 킬로는 킬스에서 용융된 금속의 불규칙적인 질량유동에 상당한 영향을 끼쳐 나쁜 용접성을 초래한다.

이와같이 레이저용접은 고출력, 빠른속도로 용접하는 장점이 있지만, 주위조건의 변화에 따라 용접 건전성이 달라지기 때문에 용접공정변수 변화에 대한 용접성 평가가 중요하다. 용접의 건전성을 평가하기 위해 용접후 단면을 절단해서 관찰하면 생산성에 많은 문제가 있고, 용접중 재료내부에서 일어나는 현상을 직접 관찰을 하는 것은 어렵다. 따라서 레이저용접동안 실시간으로 용접성을 평가할 수 있는 문제가 전세계적으로 중요한 과제가 되고 있다. 그래서 지금까지는 레이저 유기 플룸/플라즈마의 발광(light emission: LE)강도, 음향방출(acoustic emission)신호, 레이저의 반사광 강도, 플라즈마 전계강도등을 측정하여 용접성을 실시간에 모니터링하는 방법을 연구하고 있다⁽⁷⁾.

본 연구에서는 SM45C 레이저 용접시 출력에 따라 시편 내부에서 금속증기의 증발 때문에 발생하는 플룸/플라즈마 모니터링을 통한 용접단면의 결함을 예측할 수 있는 방법을 선행연구논문^(8,9)의 결과를 기초로 해서 그 실험결과를 제시하고자 한다. 레이저로 용접할 때 용접공정변수에 따라 플룸/플라즈마의 거동이 달라질 수 있기 때문이다. 본 실험에 사용한 재질은 SM45C이며, 시편에 레이저빔을 조사시키면서, 열화상 카메라(infrared thermal-vision camera)를 이용하여 용융지(weld pool)에서 방사되는 적외선을 측정하여 용접부 결함발생과의 관련성을 밝혔다. 또한 초음파 탐상장치인 SAT(scanning acoustic tomograph)장비와 열화상카메라로 측정된 용접결과를 비교검토 하였다.

2. 실험

2.1 시편

본 실험에 사용한 시편은 기계구조용 중탄소강 SM45C이고, SM45C의 화학적 구성비는 C(0.42~0.48), SI(0.15~0.35), Mn(0.60~0.90), P(≤ 0.30), S(≤ 0.035)이다.

레이저 용접의 최적공정변수는 재료의 특성에 따라 다르므로, 재료별 물성을 파악하는 것은 중요하다. 본 실험에 이용한 SM45C의 물성은 Table 1과 같다. 레이저 용접특성 실험에 사용한 시편은 150mm(L)×50mm(W)×4.5mm(T)의 크기로 절단하여 비드온플레이트(bead-on-plate) 용접을 실시하였고, 각각의 시편은 레이저 용접 전에 시편의 표면을 아세톤으로 세척한 후 건조시켜 시편표면의 이물질들을 깨끗이 제거하였다.

2.2 실험장치

본 연구에 이용한 Nd:YAG레이저의 파장은 1.06 μ m이고, 최대출력은 2.8kW이다. 평균유효출력은 2kW인 연속파이고, 레이저빔은 직경이 600 μ m인 Step-Index-type 광섬유를

Table 1 Characteristics of medium carbon steels

chemical components(%)	melting point (°C)	electric conductivity(%)
C 0.3~0.45	1420~1450	15.0
coefficient of thermal expansion ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	tensile stress (kg f/mm ²)	thermal conductivity (kcal/wh °C) (20°C)
10.73~10.92	≥ 48	36.5~43.5

통해서 전달된다. 작업대는 겐트리 타입으로 회전축이 부착되어 있는 가공장치로서 x, y, z 축 이송거리는 1000mm×500mm×400mm이며, x축, y축에 대한 위치정밀도는 ±5 μm, z축에 대한 위치정밀도는 ±1 μm, 반복정밀도는 ±8 μm이다. 보호가스는 빔조사 부위에서 발생하는 플라즈마를 제거하고, 용접특성을 향상시키기 위해 불활성가스인 아르곤을 이용하였다.

정밀한 플룸측정을 위해 AGEMA 적외선 SYSTEM AB에서 생산한 적외선 Scanning system의 6세대 적외선 열화상 카메라(thermovision 900 system)를 이용하였다. 적외선 열화상 카메라는 용접면으로부터 310mm 거리를 두어, 시면표면에서 z축으로 85mm까지 측정하였다. 용접헤드와 열화상 카메라는 고정시켰고, y축으로만 작업대를 이송시켰다. 본 연구에 사용된 실험장치의 개략도는 Fig. 1과 같다.

용접단면의 내부결함 측정을 위해 초음파탐상에 이용한 SAT 시스템은 Hitachi사의 장비로서 3축 스캐너를 포함하고 있다. 수침법에 의한 결함 탐상으로 초음파 변환기(ultrasonic transducer)의 주파수는 15MHz를 사용하였다. 초음파의 송·수신 유닛들로부터 수신된 초음파 신호는 SAT 장비내에서 자체적으로 화상으로 변환되어 출력된다.

2.3 실험방법

CW Nd:YAG레이저로 용접할 때 용접특성을 파악하기 위한 주요공정변수는 Table 2와 같이 변화시켜 실험을 수행하였다.

용접하는 동안 플룸 모니터링을 위해 열화상카메라를 이용하여 용접시 유기하는 플룸의 거동을 출력을 변화시키면서 계속하였다. 열화상 카메라는 용융지(weld pool)에서 방사되는 적외선을 측정하여 적외선 감지기에 의해 전기신호로 변환시킨 영상을 용접부 결합발생과도 관련하여 연구하였다. 적외선 열화상 카메라를 이용해 측정하고자 하는 플룸은 기화된 금속증기, 전자 및 금속이온으로 구성된 고온·고휘도의 플라즈마 상태인데, 용접 비드는 고-액상태이다. 따라서 플룸과 용접비드는 적외선 열화상 검출에 매우 중요한 인자인 방사율이 큰 차이가 있어서, 서로 다른 방사율의 중간 값인 0.5로 그 값을 정하여 측정하였다.

용접이 완료된 시점에 대해서는 SAT장비를 이용한 비파괴 검사를 통해, 플룸량의 변화와 초음파탐상에 의한 결함의 위치관계를 규명하였다.

또한, 용접방향에 대하여 수직이 되는 방향으로 와이어 커팅을 하고, 사포로 연마 및 기계연마(polishing)후, 5%

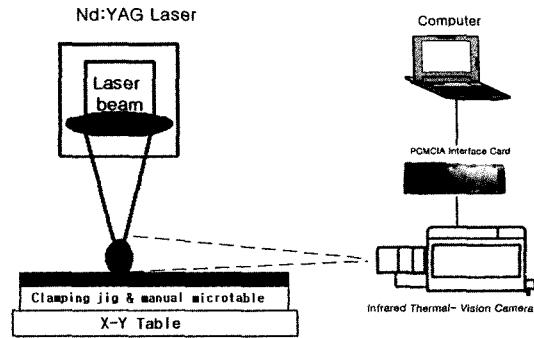


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental setup for investigating vapor plumes during laser welding

Table 2 Process parameters for experimental set-up

Laser power (W)	1000~2000
Travel speed (m/min)	1
Position of Focusing (mm)	0
Shielding gas	Ar (4 l/min)

perchloric acid + 95% methanol을 사용하여 에칭을 하였다. 에칭한 시편에 대해서는 광학현미경과 전자현미경을 이용하여 용접부의 형상(비드폭, 용입깊이등) 및 균열 등을 관찰하였다.

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 2는 연속파 Nd:YAG 레이저 용접에서 유량 4l/min, 빔 이송속도1000mm/min, 초점위치 z = 0으로 고정시켰을 경우, 레이저 출력을 1000W에서 2000W까지 증가시키면서 비드온플레이트 방법으로 실험한 결과를 나타냈다. 출력이 낮은 경우에는 일반적인 용접에서 볼 수 있는 표면열원에 의한 용접부 용입형상과 비슷한 형태를 보이다가 출력이 커지면서 용입깊이가 거의 선형적으로 깊어지고 있다. 출력 1800W이상에서는 최종 응고부인 용접금속 중앙부에 수직으로 고온균열(hot cracking)이 발생하였다. 이는 용접열에 의해 용융되었던 금속이 응고과정에서 SM45C의 조성에 포함되어있는 P, S, C 성분이 원인이라 사료된다. P는 용접이 낮아 국부적으로 응고온도를 낮추어 고온균열 감수성을 증가시키고, S는 C와 비교해서 확산에 의한 이동속도가 늦어서 응고중에 편석이 심하게 일어나기 때문에 균열감수성

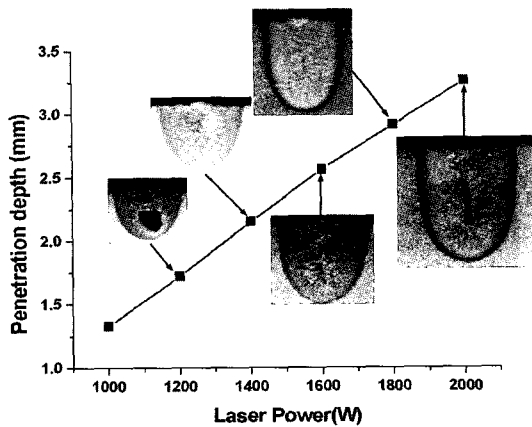


Fig. 2 Effect of laser power on the weld penetration

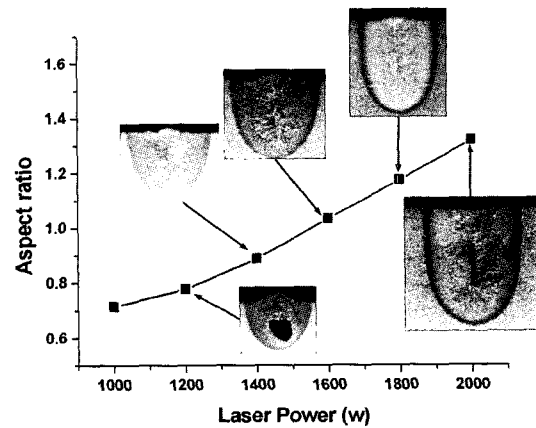


Fig. 3 Effect of laser power on the weld penetration

을 증가시킨다. C는 오스테나이트 안정화원소로 고온균열을 촉진하는데 Borland는 0.15% C 이상에서는 고온균열이 발생한다고 하였다^(10,11).

특히 2000W로 용입비가 큰 용접비드면의 중앙부에 고온균열현상이 현저하게 나타났다. 이것은 레이저빔이 시편에 조사되었을 때 가열 및 냉각 사이클에서 모재가 가지고 있는 온도에 비해 용융부의 온도는 매우 높기 때문에 온도구배가 급격하여 응고시 조직사이에 미세응력이 국소적으로 존재하게 되고, 용접부가 응고하는 단계에서 중심부에 아직 용액으로 잔류해 있는 액상에 의해 메워지지 못하고 균열이 발생한것이다.

SM45C의 조성분 중에 MnS와 FeS의 용융점은 1100~1200℃인데 비해서, Fe는 1538℃이기 때문에 철이 용융되기전에 MnS와 FeS가 용융되어 기포가 형성되고, 이 기포가 부력 때문에 용융풀에서 상승한다. 이때 레이저빔이 빠른 속도로 진행하면서 열의 냉각속도가 빠르기 때문에 용융풀이 표면에서 냉각되어 기포가 중간에 포획된 결과가 1200W일 때 나타났다. 레이저빔에 의한 심입용접의 정도를 예측하기 위해, 레이저 출력에 대한 용융폭과 용융깊이의 비인 종횡비를 Fig. 3에 나타내었다.

레이저빔의 출력이 작으면 에너지밀도가 작아 keyhole형성이 효과적이지 못해 용융풀의 깊이가 작아져 종횡비가 작으나, 출력을 증가시키면 출력밀도가 커져 순간적으로 형성된 키홀(keyhole)에서 에너지 흡수율이 급격하게 증가하여 종횡비가 커진다. 종횡비가 큰 경우, 즉 좁고 깊은 용접금속의 모양은 주상정이 내부로 성장하기 때문에 중심부에 편석이 심하게 일어나고 수축변형이 중앙에서 집중적으로 작용

하여 고온균열이 크게 나타났다. 용입깊이 증가율을 기준으로 표시한 Fig. 2와 비교하면 용입비(종횡비)의 증가는 출력이 증가할지라도 급속하게 증가하지 못하는데, 이와같은 현상은 플룸/플라즈마 형성과 관련하여 뒤에 다시 설명하겠다. 따라서, 이와같은 현상을 종합하여 고온균열을 최소화하기 위해서는 최적의 용접공정변수를 연구하고 결함을 예측할 수 있는 방법이 필요하다.

레이저 용접할 때, 출력변화에 따른 입열량을 식 (1)을 이용하여 계산하였고, Fig. 4에 나타냈다.

$$E = \frac{P}{W \cdot v} \text{ J/cm}^2 \quad (1)$$

여기서, E 는 입열량 (J/cm^2), P 는 출력 (w), W 는 용접면의 비드폭(cm), v 는 레이저빔의 이송속도 (m/s)이다.

Fig. 4는 레이저 출력이 1400W이하에서는 효율적으로 키홀을 형성하지 못하고 있어, 입열량의 변화가 거의 없었다. 그러나 1400W이상에서는 재료 표면에 순간적으로 키홀이 형성되어, 레이저의 에너지가 흡수되는 양이 급격히 많아져 선형적으로 입열량이 증가하고 있음을 나타내고 있다.

용접비드 폭에 대한 용입깊이의 비를 변수로 해서 입열량을 분석하기 위해 식 (2)를 이용하여 계산한 값을 Fig. 5에 나타내었다.

$$E = \frac{P}{\left(\frac{D}{W}\right) \times v} \text{ J/cm} \quad (2)$$

여기서, E 는 입열량, P 는 출력, D 는 용융깊이, W 는 용접비드폭, v 는 이송속도이다.

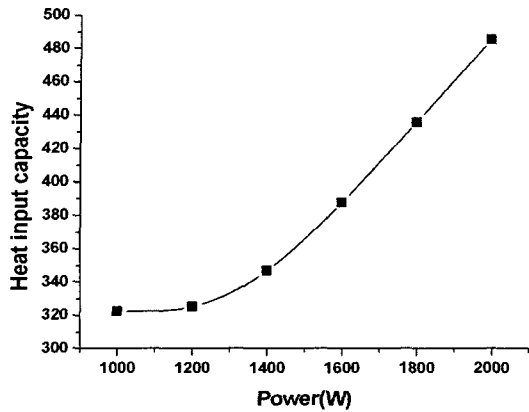


Fig. 4 Effect of laser power on the heat input capacity

출력1400W까지는 출력이 증가함에 따라 레이저 빔의 에너지를 흡수하는 입열량이 증가하였다. 출력 1400W이상에서는 용접비드면의 폭이 용입깊이에 비해 상대적으로 작아져 종횡비가 1이상이 되기 때문에 입열량이 감소한 형태로 나타난다. Fig. 4와 Fig. 5에 나타난 방법으로 표면에서의 입열량과 용입비를 나타내는 종횡비는 예측할 수 있지만, 용접단면의 결함은 예측할 수 없다. Fig. 5의 결과에 의하면 레이저출력을 증가시켜도 1600W부터는 입열량이 작아 비틀림이나 주위로의 열전달이 작아 열영향부(HAZ)가 작다는 것은 분석할 수 있지만, 용접부 내부 결함은 예측할 수 없다.

그래서 용접단면의 내부 결함을 분석하기 위해 Fig. 2에서 결함이 두드러지게 나타나는 출력 2000W, 속도 1000 mm/min에서 용접한 시편을 5mm간격으로 4등분하여 Fig. 6에 나타냈다.

용입폭과 용입깊이는 일정하였지만, 용접비드면에 발생한 용접결함 중 특히 고온균열의 크기가 일정하지 않았고, 특히 4번그림에서는 다른 평균열 용접결함도 나타났다. 이처럼 레이저 출력이 증가하면 용입깊이는 증가하지만 내부에 결함이 많이 발생하면 용접단면의 유효접착 면적이 작아지게 된다. 그래서 용접하면서 내부결함을 예측하는 것은

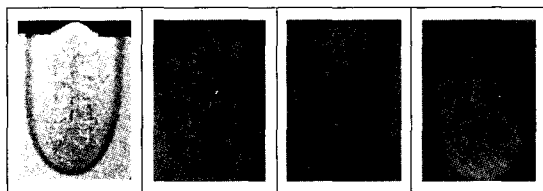


Fig. 6 Welding bead in power 2000W

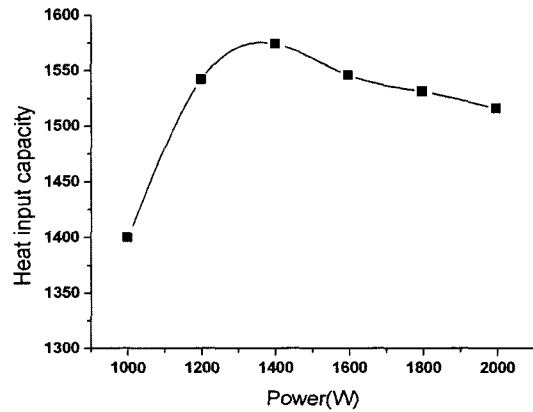


Fig. 5 Effect of laser power on the heat input capacity

매우 중요한 관건이다. 레이저 용접할때 실시간에 용접단면의 건전성을 예측하기 위해 용접결함이 발생할 때 키흐에서 발생하는 플룸의 거동과 용접결함이 비교적 작은 영역의 용접공정변수에서 용접했을 때 플룸의 거동을 열화상카메라로 측정하여 비교 분석하였다.

Fig. 7은 열화상카메라를 이용하여 플룸을 측정할 때 방사율(emissivity) 0.5, 기준온도 350℃로 할 경우 출력에 따른 플룸의 양을 나타낸 것이다. 출력의 증가에 따른 플룸의 양이 1800W까지는 급격하게 증가하지만, 1800W이상에서는 플룸의 증가율이 둔화되고 있다. 이것은 출력의 증가에 따라 플라즈마 밀도가 증가하여 발생하는 차폐현상의 영향 때문인 것으로 판단된다.

고에너지의 레이저빔이 시편표면에 조사되면 용융지에서 증발원소가 발생하고, 반발력에 의해 키흐이 형성된다. 이

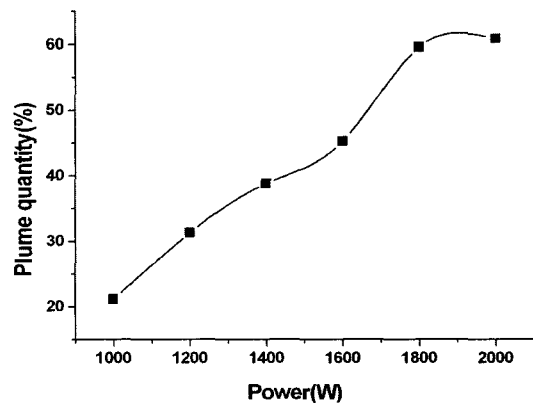


Fig. 7 Relation between plume quantity(%) and power

때 발생한 금속증기가 플라즈마 상태가 되어 입사되는 레이저빔을 재흡수한다. 플라즈마 가스의 밀도가 높아지면 이온 가스에 의한 레이저광의 재흡수 때문에 차폐효과가 발생하여 레이저광 에너지가 플라즈마 때문에 표면을 감싸고 있기 때문에 용입깊이는 더 이상 증가하지 못하고 플라즈마 압력 때문에 용융지의 용융물질 유동성이 저하된다. 플라즈마 가스의 밀도가 높아지면 용융지 표면압력증가로 용융물 내부에 있는 기포 등이 분출되지 못하고 내부에 포획되는 양이 많아 질 수 있다. 또 한편으로는 시편의 표면열원으로 작용하여 용접폭이 증가하여 용입비가 증가되지 못하기 때문에 보호가스로서 제거해야 심입용접이 가능하게 된다.

레이저출력이 증가하면 레이저빔의 출력밀도 증가로 키홀에서 핫스팟(hot spot)이 발생하게 되고, 이 핫스팟은 키홀에서 상승과 하강을 반복하면서 키홀의 내부로 침투된다. 키홀내부에 있는 이 핫스팟이 다시 상승하여 시편표면에 이르게 되면 팽창하여 스패터(spatter)로 분출되는 현상이 1800W와 2000W에 현저하게 나타나고 있음을 Fig. 8에 나타냈다. 저출력일 경우에는 플라즈마 밀도가 작기 때문에 용접표면에 발생하는 기포나 금속증기가 대기로 분출된다. 그러나 1800W이상에서는 핫스팟이 분출되는 주기가 빨라져 플라즈마 밀도가 높아지므로 용접비드면 내부에서 발생하는 기공이 플라즈마 압력 때문에 분출하지 못하여 내부결함으로 남아있게 된다. 레이저 출력이 더욱 증가하여 플룸/플라즈마 양이 많아지면, 높은 밀도의 금속증기의 반발력도 커져 발생하는 스패터양이 많아져 용접표면에 기포분출 흔적 등과 같은 언더컷이 발생하여 용접표면상태의 품질도 저하된다. 이와같은 현상은 고품질 제품을 요구하는 산업현장에서는 바람직하지 못한 현상이기 때문에 스패터양의 증가율이 둔화된 부분을 기준으로 하여 각 레이저 출력별 플룸양을 분석했다.

Fig. 7과 Fig. 8을 비교 검토하면 플룸양이 60%이상되면 용접부내부에 기공이나 고온균열과 같은 내부결함이 앞에서 언급한 이유 때문에 발생하고 있다. 그러므로 내부결함을 최소화하기 위해선 플룸생성량이 60%를 초과하지 않도록 외부적으로 제어할 필요가 있다.

그래서 레이저 출력증가에 따라 발생하는 플룸/플라즈마 형태를 열화상 카메라로 측정된 결과를 고찰해보면, 레이저 출력을 2000W로 증가시키면 플룸을 형성하고 있는 작은 입자들끼리의 응집력이 커져 덩어리(cluster)를 형성한다. 레이저 출력 증가에 따라 금속표면에서 발생한 가스의 응집력이 증가하여 클러스터는 작아져 접시를 쌓아있는 것처럼 보인다. 이 얇은 접시를 쌓아 올린 것 같은 플룸/플라즈마

층이 많아지면서, 밀도가 높아져 용융지 표면압력을 증가시키는 것으로 판단된다. 용융지 표면압력이 높아지면 증발급속의 반발력도 커져 플룸과 스패터양도 많아지고 있다.

레이저 출력변화에 대한 플룸/플라즈마 발생과 관련하여 용입비가 크면서, 내부결함이 비교적 없는 1600W와 고온균열등 결함이 발생했던 2000W에서의 용접결과를 비교분석하기 위해 Fig. 9와 Fig. 10에 나타냈다.

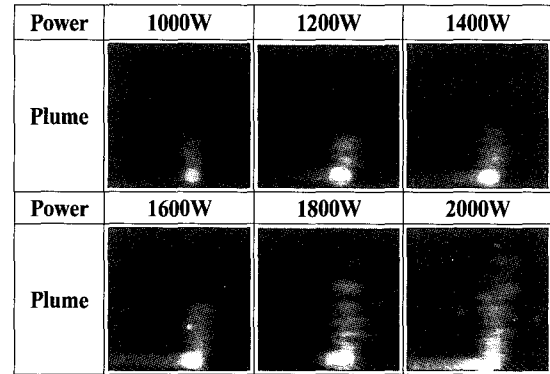


Fig. 8 Infrared thermal image according to power change

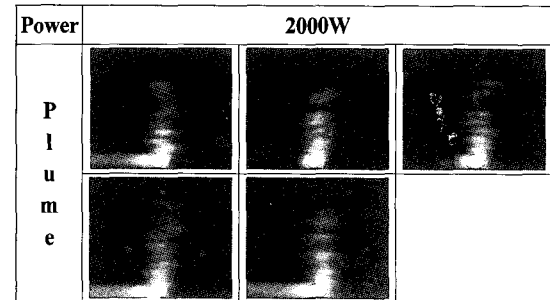


Fig. 9 Infrared thermal image in power 2000W

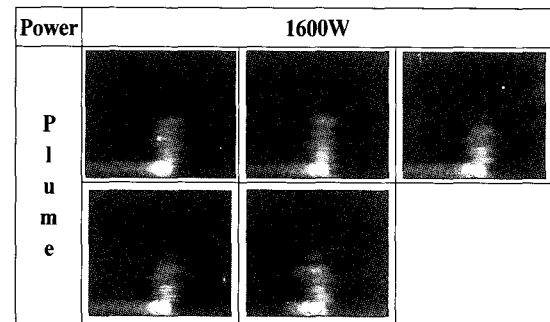


Fig. 10 Infrared thermal image in power 1600W

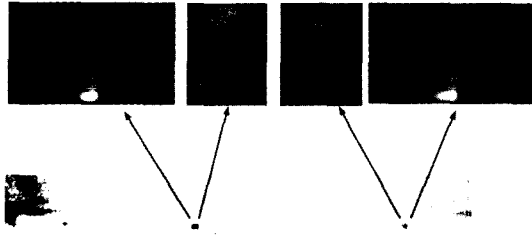


Fig. 11 Image of welding bead measured by using SAT at laser power 2000W

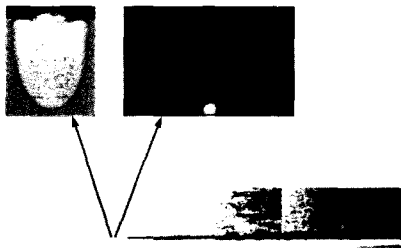


Fig. 12 Image of welding bead measured by using SAT at laser power 1600W

앞에서 언급했듯이 플룸의 양 60%이상인 경우는 증가된 증발금속의 반발력때문에 스패터가 많이 발생하고, 밀도가 높은 클러스터등이 2000W에서는 현저하게 나타났다. 반면에 레이저 출력이 1600W인 경우에는 플룸/플라즈마의 밀도가 작아 용접내부에서 발생하는 기포분출이나 플라즈마의 압력이 용융지에 커다란 영향을 주지 않아 용융지표면의 유동성 저항을 작게 받아 기포 등이 발생할 경우, 용융물이 메워지고 억제동복사 등이 적어 내부결함이 비교적 작은 것으로 판단된다. 따라서 레이저 용접시 용입비가 큰 심입용접을 하기 위해서는 입열량만 증가시키는 것 보다는 플룸/플라즈마의 양이 Fig. 7에 제시된 것처럼 60%이하가 되도록 보호가스나 용접속도 및 출력을 모니터링해서 용접하는 것이 양호한 용접면을 얻을수 있을 것으로 판단된다.

용접단면의 결함을 분석하기 위해 용접단면을 5mm간격으로 절단해서 Fig. 6에 나타냈지만, 용접내부 결함측정을 위해 비파괴검사법으로 초음파검사기(SAT)를 이용하여 측정된 결과를 용접단면과 플룸/플라즈마영상을 함께 Fig. 11과 Fig. 12에 나타냈다.

Fig. 11은 레이저 출력이 2000W일 때 SAT로 측정된 결과인데 비드내부에 띄엄띄엄 결함이 있는 것이 관측되고 있

다. 그러나 레이저출력이 1600W인 경우에는 초음파검사로 측정된 결과에는 내부결함이 Fig. 12에 나타낸 바와같이 나타나지 않았다. 이상의 실험연구결과 SM45C를 Nd:YAG 연속파형 레이저로 용접할 경우 용접공정변수로 레이저 초점면 $z = 0$, 레이저빔 이송속도 1000mm/min, 보호가스를 아르곤으로 했을 때 유량 4l/min으로 하면, 최적의 용접출력조건은 1600W였다.

레이저 용접은 많은 공정변수로 이루어져 있는데 레이저빔의 이송속도 변화에 따라서 입열량이 달라진다. 본 연구에서는 출력변화에 따른 용접특성을 연구했지만, 레이저빔의 이송속도 변화 때문에 발생하는 플룸/플라즈마 거동도 레이저 용접특성을 이해하는데 필요할 것 같아 다음 연구과제로 진행중이다.

4. 결론

연속파 Nd:YAG 레이저를 이용하여 두께 4.5mm의 기계구조용 중탄소강 SM45C를 비드온플레이트 용접하여 출력변화에 대한 용접결함을 SAT와 열화상카메라로 측정하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 레이저 출력이 1400W이하에서는 효율적으로 keyhole을 형성하지 못하고 있어, 입열량의 변화가 거의 없지만 1400W이상에서는 재료내부에 레이저 출력의 증가에 따라 선형적으로 에너지를 흡수하였다.
- (2) 열화상카메라를 이용한 플룸측정시 방사율(emissivity) 0.5, 기준온도 350℃로 할 경우 출력의 증가에 따른 플룸의 양이 1800W까지는 급격하게 증가하였지만, 1800W 이상에서는 플룸의 증가율이 둔화되고 있다. 이것은 출력의 증가에 따라 플라즈마 밀도가 증가하여 발생하는 차폐현상의 영향 때문인 것으로 판단된다.
- (3) 출력 1800W이상에서는 플룸형상이 불안정하고, 스패터가 발생하였는데, 용접금속 중앙부에 수직으로 발생하는 고온균열과 밀접한 관련이 있었다.
- (4) 플룸의 양 60%이상인 경우는 증발금속에 의한 반발력에 의한 스패터, 밀도가 높은 클러스터등이 2000W에서는 현저하게 나타났다. 반면에 레이저 출력이 1600W인 경우에는 플룸클러스터의 밀도가 작아 용접내부에서 발생하는 기포분출이나 플라즈마의 압력이 용융지에 커다란 영향을 미치지 않아 내부결함이 비교적 적은 것으로 판단된다.
- (5) 출력 2000W와 1600W에서의 SAT를 이용한 초음파

탐상 출력 2000W에서는 용접비드에 결함이 검출되었지만 출력 1600W에서는 결함이 검출되지 않았다.

후 기

한국과학재단 연구비(RRC)와 광특화연구센터장비를 이용하여 연구를 수행하였으며, 관계자에게 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- (1) Kim, J. D., Kim, C. J. and Chung, C. M., 2001, "Repair Welding of Etched Tubular Components of Nuclear Power Plant by Nd:YAG Lasers", *J. of MPT*, Vol. 114, pp. 51~56.
- (2) Havrilla, D., 1999, "Laser Welding of Stainless Tube", *J. of Fabricator*, Vol. 19, No. 6, pp. 24~25.
- (3) XIE, J. and KAR, A., 1999, "Laser Welding of Thin Sheet Steel with Surface Oxidation", *The welding journal research supplement*, Series S, p. 348.
- (4) Masaru, K., 2000, *Laser Manufacturing Technologies*, Korea Industrial Information Center, pp. 10~30.
- (5) Banaa, C. M., 1978, *Optics Engineering*, pp. 210~215.
- (6) J. of KWS, *Welding Dictionary*, p. 65.
- (7) Kim, J. D. and Kim, Y. S., 2000, "The State of In-Process Quality Monitoring Technology in Laser Welding", *J. of KWS*, Vol. 18, No. 4,
- (8) Yoo, Y. T., Ro, K. B., Oh, Y. S., Kim, J. S. and Im, K. G., 2003, "Process Parameters of Butt Welding of SM45C Using a Continuous Wave Nd:YAG Laser Beam", *Trans. of KSPE*, Vol. 20, No. 7, PP. 44~55.
- (9) Yoo, Y. T., Oh, Y. S., Ro, K. B. and Im, K. G., 2003, "Comparison of Welding Characteristics of Austenitic 304 Stainless Steel and SM45C Using a Continuous Wave Nd:YAG Laser", *Trans. of KSMTE*, Vol. 12, No. 3, PP. 58~67.
- (10) Jeong, H. C., 1999, "Weld Hot Cracking in C-Mn Steel", *J. of KWS*, Vol. 17, No. 5, PP. 1~9.
- (11) Borland, J. C., 1961, "Suggested Explanation of Hot Cracking in Mild and Low Alloy Steel Welds", *J. of British Welding*, Vol. 8, p. 526.