레이저 熔接現狀의 流動可視化에 의한 考察

Consideration by Flow Visualization of Laser Welding Phenomenon

指導教授 金 鍾 道

韓國海洋大學校 海事產業大學院

機關시스템工學科

太 綮 逢

本 論文을 太繁逢의 工學碩士 學位論文으로 認准함



2006年 12月 22日

韓國海洋大學校 海事産業大學院

機關시스템工學科

太緊逢

Abstract

1. 서론	1
1.1 연구 배경 및 목적	1
1.2 연구내용	2

2. 이론적 배경	
2.1 유동가시화기법의 종류와 원리	4
2.2 Nd:YAG 레이저의 발진원리와 특성	25
2.2.1 Nd:YAG 레이저의 발진원리	25
2.2.2 Nd:YAG 레이저의 특성	33
2.3 실드가스의 종류와 특성	39
2.3.1 실드가스의 종류	39
2.3.2 실드가스의 특성	40

3. 실험 장치 및 방법 45 3.1 실험 재료와 장치 45 3.1.1 실험재료 45 3.1.2 펄스 Nd:YAG 레이저 용접장치 49 3.1.3 고속도카메라 및 슈리렌 시스템 53 3.2 실험방법 57 3.2.1 레이저빔의 비드 점용접 방법 57 3.2.2 정적 및 동적 실드가스 분위기에서의 용접방법 59 3.2.3 슈리렌 시스템을 이용한 용접현상의 관찰방법 63

4. 실험결과 및 고찰65
4.1 레이저빔의 출력특성65
4.1.1 펄스폭에 따른 레이저 출력특성
4.1.2 인가전압 변화에 따른 레이저 출력특성67
4.2 레이저빔의 용접특성
4.2.1 집광 광학계의 비초점거리에 따른 용접특성
4.2.2 레이저 출력에 따른 용접특성
4.2.3 대기 및 정적 실드가스 분위기에서의 용접특성
4.3 정적 실드가스 분위기 변화에 따른 레이저용접 현상
4.3.1 각종 실드가스 분위기에서의 레이저 유기플라즈마의 거동 84
4.3.2 각종 실드가스와 레이저 출력변화에 따른 용접현상
4.3.3 정적 실드가스에 의한 스패터 발생
4.4 동적 실드가스 분위기에서의 레이저용접 현상
4.4.1 실드가스 노즐직경에 따른 레이저용접 현상
4.4.2 실드가스 유량변화에 따른 레이저용접 현상
4.4.3 실드가스 거리에 따른 레이저용접 현상
4.4.4 실드가스 분사각도에 따른 레이저용접 현상
4.4.5 실드가스 종류에 따른 레이저용접 현상

E	겨르	12	2
5.	설근	10	S

참고	ㅁ치	1	125	c
	군 인	I	.0.	2

Consideration by Flow Visualization of Laser Welding Phenomenon

Gyung-bong, Tae

Department of Marine System Engineering Graduate School of Korea Maritime University

Abstract

The main purpose of this study was to achieve optimum bead welding conditions when weld the STS304 stainless steel sheet with the pulse-Nd:YAG laser. The conducting characteristics of plasma/plume using the schlieren system and a high speed camera -a flow visualization techniquewere observed and analyzed.

The laser output characteristics of the STS304 stainless steel sheet were investigated from multiple viewpoints as follows:

- 1) the relation of laser output energy and peak power on pulse width,
- 2) the relation of laser output energy and peak power on lamp voltage,
- the relation of welding bead width and penetration depth on defocused distance.

Afterwards, the effects of the shield gases while laser welding under actual conditions were closely analyzed: in air, static, and dynamic shield gas atmosphere. In air, the occurrence of many spatters was observed, even in the low-end laser output condition. But, in a shield gas atmosphere, the spatters rarely occurred, even in the high-end laser output condition, and the plasma stabilized quickly. The laser outputs in a static shield gas atmosphere, were measured under three voltages (243V, 250V, 280V); the occurrences under actual conditions of the plasma/plume were compared and analyzed.

Measuring for various types of shield gas atmospheres (nitrogen, argon, and helium) revealed a gradual weakening in plasma intensity from argon to nitrogen to helium. The plasma volume gradually decreased, and the gas flow was virtually undetectable in the helium shield gas atmosphere.

Afterwards, the occurrences of spatter and plasma phenomena with nozzle diameters of 2, 4, 6, 8, and 10 mm, at the distances of 13, 16, 19, and 21 mm from the end of nozzle to the welding point, at nozzle angles of 0, 20, 40, and 60 degrees, and shield gas flow-rates of 5, 15, and 25 liters/min were observed and analyzed.

The optimum laser welding condition, using a nozzle in a dynamic shield gas atmosphere, was determined by the nozzle diameter, the distance from the nozzle end to the welding point, the nozzle angle, and the flow rate of the shield gas.

Using the STS304 stainless steel sheet as a test material, the optimum bead welding condition with the pulse-Nd:YAG laser was confirmed to be a nozzle diameter of 6 mm, at the distance of 13 mm from the nozzle end to the welding point, at a nozzle angle of 40 degrees, and at a shield gas flow-rate of 25 liters/min.

1. 서론

1.1 연구 배경 및 목적

예로부터 인류는 사물이나 현상정보들을 시각을 통해 습득해 왔으며, 청각, 촉각, 후각, 미각 등 4가지 감각정보 조차도 그 존재를 가시화하려는 노력을 지 속적으로 기울여 왔다. 즉, 속도, 압력, 온도, 밀도 등에 대한 가시화의 노력이 여러가지 기법으로 진척·개발되어 오늘날 과학기술의 발전에 큰 원동력이 되 었다.

최근 이러한 가시화 기법이 레이저 등의 고밀도에너지 가공에 응용됨으로써 제품의 품질 및 신뢰성 향상에도 많은 기여를 하고 있다.

그러나, 레이저빔은 고파워, 고품질의 우수한 열원임에도 불구하고 재료의 표 면상태에 따라 레이저빔의 반사, 흡수 및 투과정도가 달라지고, 유기 플라즈마 (induced plasma) 또는 플륨(plume)에 의한 빔흡수나 산란 등의 영향을 받는 등 몇 가지의 단점이 있다. 더욱이 용접변수를 제어함으로써 이러한 문제점을 어느 정도 해소하여 전 산업에 걸쳐 적용분야를 확대시키고는 있지만, 아직도 레이저 용접중 발생하는 플라즈마 또는 플륨은 빔의 흡수, 빔의 산란 및 전자 밀도 구배에 의한 빔의 굴절 등을 유발함으로써 레이저빔의 손실을 초래하여 재료 가공에 지대한 영향을 미치고 있다.

따라서, 레이저 용접시 플라즈마 제어에 이용되는 실드가스(shield gas)가 용접 현상의 안정성 및 결함 방지에 큰 영향을 미치기 때문에, 그에 따른 용접 및 결함형성 메카니즘에 대한 충분한 이해가 요망된다.

그러므로, 본 연구에서는 스테인리스강 STS304의 용접시 수반되는 여러가지 현상을 유동가시화 기법중 하나인 슈리렌 시스템(schlieren system)을 통해 분 석함으로써 유기 플라즈마 또는 플륨에 대한 실드가스의 영향을 이해하고자 하 였다.

- 1 -

1.2 연구내용

본 연구에서는, 300계열의 대표적인 스테인리스강인 STS304의 레이저 점용접 시의 출력특성을 관찰하고, 재료의 가공시 큰 장애요인으로 작용하는 유기 플 라즈마의 제어특성과 스패터의 발생원인에 대한 고찰 및 보조가스의 역할에 따 른 용접 메카니즘을 분석함으로써 레이저빔에 의한 가공신뢰성 뿐만아니라 제 품의 품질향상에 따른 경쟁력 제고에 기여하고자 하였다.

이를 위해 본 연구에 필요한 실험을 다음과 같이 실시하였다.

(1) 스테인리스강 STS304의 레이저용접 특성

각종 산업기기 및 전자부품 등의 재료로 사용되는 STS304 박판(0.6mm^t)에 점 용접(bead welding)을 실시하여 초점거리(*f*_d), 인가전압(V), 펄스폭(*τ*_p) 및 실드 가스의 노즐직경(*φ*), 노즐각도(*α*) 등에 따른 용접특성을 분석하였다.

(2) 스테인리스강 STS304의 레이저 점용접부 분석

STS304의 레이저 점용접 현상을 고속도 카메라로 촬영하여 유기 플라즈마의 거동을 파악하고, 정적 및 동적 실드가스 상황하에서 용접된 각 용접부를 광학 현미경을 통해 분석하였다.

(3) 슈리렌 시스템(Schlieren system)에 의한 용접현상의 분석

스테인리스강 STS304의 레이저 점용접시 발생하는 유기 플라즈마와 그에 따 른 실드가스의 흐름을 슈리렌 시스템으로 분석하였다.

2. 이론적 배경

2.1 유동가시화기법의 종류와 원리

유동가시화(flow visualization)는 전달현상(transport phenomena)과정을 가시 화하는 것으로, 속도, 압력, 밀도 및 온도 등과 같이 우리 눈에는 보이지 않는 유동정보의 공간분포를 시간과 공간의 어떤 범위 안에서 눈에 보이도록 하는 실험방법을 말한다. 유동가시화는 대부분 비접촉 방식으로 유동 자체를 교란시 키지 않으면서 어떤 순간의 전체 유동장을 가시화함으로써 측정하고자 하는 유 동에 대한 공간적인 유동정보를 제공한다^{1~6}.

특히 생활수준이 향상됨에 따라 유체속에 놓인 물체에 작용하는 항력과 유동 소음의 감소, 에너지 절약, 유체효율 향상, 대기오염의 저감 등에 대한 사회적 인식이 변화하면서 이들 유동을 정확하게 예측하고 제어하기 위한 유동해석 연 구의 필요성이 증대되기 시작하였다.

유동가시화는 정성적인 유동가시화 기법과 정량적인 유동가시화 기법으로 나 눌 수 있는데, 유동형태(flow pattern)나 유선형(streamline)을 눈으로 보거나 사 진으로 찍어서 관찰하여 유동장의 정성적 정보를 파악하는 방법이 정성적 유동 가시화이다. 정량적 유동가시화는 가시화된 유동영상(flow image)을 컴퓨터나 비디오 카메라를 이용하여 정량적으로, 즉 유체역학적 정보를 디지털화하여 수 치적으로 변환 표시하는 방법을 나타낸다^{7~8)}.

정성적인 유동가시화 기법 중에서 유동장 해석용으로 최근까지 사용되고 있 는 방법으로는 광학적 유동가시화기법과 전기제어법이 있다.

광학적 가시화 방법으로서 슈리렌 시스템(Schlieren system)과 쉐도우그래프 법(Shadowgraph), 마하첸더 간섭법(Mach-Zehnder interferometer) 및 홀로그래 픽 간섭법(Holographic interferometer) 등은 유동장의 밀도변화, 즉 매질의 굴 절률 변화를 이용하여 유동장 전체를 가시화하는 것이다⁹.

전기제어법에는 수소기포발생법(hydrogen bubble)과 연기를 이용하는 방법

(using smoke-wire)이 있는데, 이들은 물의 전기분해로 나오는 수소기포나 미네 랄유(mineral oil)를 태워서 나오는 연기 필라멘트(smoke filament)를 추적자 (tracer)로 사용하며, 이들의 발생을 전기적으로 제어함으로써 가시화한다.

한편, 정량적 유동가시화기법의 대표적인 것으로는 입자영상속도법(PIV) 등이 있으며 이외에도 많은 유동가시화 기법이 있지만 여기서는 현재까지 일반적으 로 많이 사용하는 방법을 소개하였다.

다음에 유동가시화기법을 종류별로 서술하였으며, 본 실험에 사용되어진 슈 리렌 시스템을 보다 상세히 기술하였다.

(1) 슈리렌 시스템(Schlieren system)

슈리렌 시스템은 1864년 퇴플러(A.Toepler)가 렌즈 결함 조사방법의 하나로 창안하였으며, 슈리렌(Schlieren)은 독일어로 줄무늬(streak) 또는 평행의 가는 줄(stria)을 의미한다.

이것은 기체의 밀도구배와 관계되는 함수들을 측정. 2차원적인 유동장의 측 정시 주로 사용하고, 유체에 물리·화학적 영향을 주지 않고 측정하는 비접촉성 유체가시화 시스템이며, 밀도변화가 큰 고속류의 측정에 자주 이용된다. 슈리렌 시스템의 기본적인 구성을 Fig. 2.1에 나타낸다^{10~11)}.

여기서, 광원 s는 첫째 주렌즈 L₁의 초점에 둔다.

즉, 첫째 주렌즈 L₁과 둘째 주렌즈 L₂의 사이에 있는 관측부 T에는, 평행광선이 통과한다. 둘째 주렌즈 L₂의 초점 K에 광원 s의 상이 맺힌다.

아울러, 카메라 렌즈 G는 관측부 T의 가운데에 있는 점 Q의 상을 스크린 위의 점 P에 맺히게 한다. 또한, 관측부에 있어서 밀도(또는 굴절율)가 x방향 혹은 y 방향으로 변화하지 않으면(엄밀하게는 변화가 균일치 않음), 실선으로 나타나듯 이 Q를 통과하는 광선과 Q'를 통과하는 광선도 초점 K위에서 완전히 일치하여, 광원의 선명한 상을 맺는다.

그런데, 관측부의 가운데에서, Q의 점만이 다른 점(Q'등)과 밀도구배가 상이하 여, Q를 통과하는 광선은 점선처럼 굴절하며, Q'등을 통과하는 광선이 맺는 상 과는 약간 어긋난 상을 맺게 된다. 그 편차량은 F2 & y로 된다.

여기서, F₂는 둘째 주렌즈의 초점거리이고, ε_y 는 Q를 통과하는 광선이 관측부 에서 y방향으로 굴절하는 각도이다.

그리고 S에 사각형의 광원을 이용하고, 나이프엣지(knife edge)를 K에 셋트 한다. 관측부에 광학적인 산란(국부적인 밀도구배)이 없을 때에, 광의 일부를 차 단하도록 광원을 상의 중간에 나이프엣지로 조정하면 스크린 상의 밝기는 전체 가 균일하게 조금 어두워진다.

여기서, 또한 Q에 광학적 산란이 생겨, 거기를 통과하는 광선이 점선으로 나 타난 것처럼 굴절하게 되며, 스크린 상의 Q의 상 P의 밝기는 Fig. 2.1에 나타낸 것과 같이 나이프엣지의 위를 통과해 오는 광량이 늘어나 나누어진 다른 점 P' 부터 밝아진다. 물론, Q에 있어서의 굴절이 이 그림과 역방향으로 되면 P의 밝 기는 어두워지게 된다.

이와 같을 때의 P의 광도 I의 변화량 △I는 다음식으로 주어진다.

 $\frac{\Delta I}{I} = \frac{F_2 \varepsilon_y}{a} \qquad (1)$

여기서, a는 광원의 상의 높이이다.

이보다, 슈리렌법의 감도를 올리려면 주렌즈의 초점거리 F₂를 크게 하고, 광원 의 상을 작게 하고, 굴절각을 크게 하기 위해 관측부의 폭 d를 크게 하면 좋다 는 것을 알 수 있다.

더욱이 Fig. 2.2에서 알 수 있는 것처럼, x-y면내의 2차원적인 흐름에 대해서 는 나이프엣지에 평행한 방향의 광원의 상의 움직임은 광도에 영향이 없으며, 직각한 방향의 움직임만이, (1)식에서 나타난 것과 같이 광원의 변화를 준다. 즉, 측정하고 싶은 현상의 압력구배가 급격한 방향과, 직각 방향으로 나이프엣 지를 셋트하면 감도가 가장 높아진다.

따라서, 슈리렌 시스템은 쉐도우그래프법과 비교하면 파동현상의 미세구조를 관찰하는 데에는 뒤떨어지는 반면, 밀도구배의 방향 판단이 가능하다는 잇점이 있다. 또한, 콘트라스트가 밀도구배에 비례하는 점이 쉐도우그래프법과 대조적 이며, 구성부를 살펴보면 다음과 같다.

슈리렌 광학계는 크게 광원부와 수광부 그리고 그 사이에 시험부로 구분되어 지며, 광원부는 광원과 광집속 렌즈 그리고 점광원 형성을 위한 핀홀로 구성된 다. 또한, 수광부는 나이프엣지와 카메라로 구성되며, 마지막으로 측정부의 입 사광을 평행광으로 만들어 주기 위한 한개 또는 두개의 슈리렌 미러(schlieren mirror)로 기본구성을 이룬다¹²⁾.

Fig. 2.3과 Fig. 2.4에 슈리렌 미러의 갯수에 따른 기본 구성도를 나타낸다. 광원부의 광원은 주로 텅스텐-할로겐(tungsten-halogen) 램프를 쓰는데 핀홀 효과와 수차제거나 특별한 파장의 빛을 얻기 위해 아크-제논(arc xenon) 램프나 아크-머큐리 (arc mercury) 램프 또는 레이저 광원을 쓰기도 하고 순간촬영이나 고속촬영을 위해 스트로보 광원을 쓰기도 하며, 핀홀 대신 컬러 필터(color filter)를 채용한 컬러 슈리 렌 시스템이 사용되기도 한다.

이 때 광원에 따른 사용가능 카메라의 범위가 결정되는데 일반 스틸 카메라 는 고속 광원을 제외한 모든 광원에 사용가능하고, 고속 카메라를 사용할 경우 카메라의 사양에 따라 연속 광원이나 스트로보 광원을 선택하여 쓰는 것도 가 능하지만, 우수한 유동 영상을 얻기 위해 최근에는 다음과 같은 장점 때문에 레이저 광원을 많이 이용하고 있다.

- 유동을 교란시키지 않는다

- 짧은 파장, 우수한 지향성과 직진성, 높은 광도

- 광파를 펄스형태로 발생시킬 수 있다



note) 1. $\varepsilon_{\rm y}\!:$ Refracting angle toward "y" direction from the observation point as the light through "Q"

2. F_2 : Main lens, The focal distance of $L_2 % \left({{\Gamma _2}} \right) = {\Gamma _2} \left({{\Gamma _2}} \right) = {\Gamma _2} \left({{\Gamma _2}} \right)$

Fig. 2.1 The principle of schlieren method



(a) schematic illustration of x-y plane



(b) schematic illustration of y-z planeFig. 2.2 Effect of knife edge on light contrast



Fig. 2.3 Schlieren system using one schlieren mirror



Fig. 2.4 Schlieren system using two schlieren mirror

(2) 쉐도우그래프법(Shadowgraph method)

쉐도우그래프법은, 그 이름이 표시하는 것처럼, "그림자" 사진이다.

기체 또는 액체의 밀도변화에 의한 광의 그림자를 직접 스크린 또는 필름상에 투영하여 관찰하는 것으로, 직접투영법이라고도 불린다.

원리 및 장치는 간단하여 예로부터 충격파나 파동현상의 가시화에 이용되어 왔다¹³⁾.

원리는 *Fig.* 2.5에 나타낸 것과 같이, 매질의 밀도변화에 의한 굴절율의 변화 를 이용한 것이다. 점광원 S에서의 광은 밀도가 다른 관측기체를 통과할 때 굴절하고, 스크린 P의 위에 밝은 농담을 가진 상을 만든다. 간단하기 때문에 밀 도변화는 2차원적으로 지면에 수직한 x방향으로는 변하지 않는다. 점 A를 통과 한 광선 Γ_A의 굴절각은, 굴절율 n이 n=1+Kρ로 표현되는 기체에 대해서는

로 된다.

밀도는 y방향으로만 변화하는 것으로 하면 광선 Γ_A의 전굴절각은

$$\mathcal{E}_{\nu} = \frac{\mathrm{kd}}{\mathrm{n}} \cdot \frac{\mathrm{d}\rho}{\mathrm{d}y} \tag{3}$$

로 된다.

만약, 밀도구배 dρ/dy가 y방향에 일정하다면 모든 광은 똑같이 굴절하고, 스크 린 위에서의 상의 밝기 I는 변하지 않는다. 즉, 밝기의 변화 △I는 밀도구배의 변화에 의해서 나타난다는 것을 알 수 있으므로,

$$\Delta \mathbf{I} \propto \frac{\mathrm{d}\boldsymbol{\varepsilon}_{\nu}}{\mathrm{d}\boldsymbol{y}} \propto \frac{\mathrm{d}^{2}\boldsymbol{\rho}}{\mathrm{d}\boldsymbol{y}^{2}} \qquad (4)$$

이며, 밀도가 x, y방향 모두 변화하는 일반적인 경우는

$$\Delta \mathbf{I} \propto \frac{\mathbf{a}^2 \boldsymbol{\rho}}{\mathbf{a} \mathbf{x}^2} \propto \frac{\mathbf{a}^2 \boldsymbol{\rho}}{\mathbf{a} \mathbf{y}^2} \quad \dots \tag{5}$$

의 관계가 성립한다.

이상으로부터, 쉐도우그래프법에 의해서 얻어지는 스크린 또는 필름면 상의 콘 트라스트는, 기체밀도의 2차 미분, 즉 밀도구배의 변화에 비례하는 것이라고 할 수 있다.



Fig. 2.5 Principle of shadowgraph method

(3) 마하첸더 간섭법(Mach-Zehnder interferometer method)

이 기법은 유속측정법 중 공학적인 면에서 가장 정확한 것으로 알려져 있으 며, 레이저의 간섭을 이용하여 물리적인 현상과 물성치 측정이 가능하다. 마하 첸더를 통해 열전달을 시각적으로 측정할 수 있고, 정성적인 열전달의 흐름을 알 수도 있다^{14~15)}.

Fig. 2.6에서 보는 바와 같이 먼저 실험장치를 살펴보면, 처음 레이저가 방사 되고 오목거울을 통과하면서 평행광이 만들어 진다. 이렇게 만들어진 평행광은 부분투과경(half mirror)을 통과하여 서로 다른 방향으로 진행하게 된다. 그 중 하나의 경로는 우리가 원하는 시험부(test section)를 통과하고, 나머지 하나의 경로는 중간에 아무런 영향을 받지 않고 진행한다. 이렇게 나누어진 경로로 진 행하는 두 빛은 다시 전반사경(full mirror)을 통과하게 된다.

이때 두 경로의 길이는 같다. 즉, 만약 중간에 어떤 영향을 받지 않게 되면 두 빛의 특성은 같게 되며, 위상이 같아져서 서로 같은 특성을 지니게 된다.

그러나 시험부(test section)를 지나게 되면서 물리적인 영향을 받게 되면(예; 뜨거운 공기층을 지나게 되는 경우) 빛의 진행경로에 변화가 생기게 되고 위상 의 변화도 생기게 된다.

이렇게 위상의 변화를 가진 빛과 아무런 영향을 받지 않은 빛이 다시 만나게 될 경우 간섭현상을 일으키게 된다. 이 간섭현상을 관찰함으로써 열특성의 정 성적인 면과, 정량적인 면을 파악하게 된다.

다시 말하면 서로 다른 밀도를 가진 지역을 지나는 빛 다발의 중첩을 이용하여, 밝고 어두운 형태가 스크린 위에 나타나게 되는 것이 마하첸더의 원리이다.



Fig. 2.6 Mach-Zehnder interferometer system

(4) 홀로그래픽 간섭법(Holographic interferometer method)

이 기법은 빛 또는 다른 파동의 간섭성을 이용하여 물체에서 나오는 신호파 를 홀로그램에 기록하고, 이 홀로그램에 다른 광파를 부딪치게 함으로써 신호 파를 재생하는 방법이며, 이것을 이용한 광학적인 기술을 총칭하여 홀로그래피 (holography)라 한다¹⁶⁾.

홀로그래피에 쓰이는 기록매체를 홀로그램이라 하는데, 물체에서 회절을 받 은 광파(신호파)와, 그것과 간섭성이 있는 다른 광파(참조파)와 간섭시켜 생긴 간섭무늬를 감광 재료에 기록한 것이다. 홀로그램의 제작에는 간섭성이 큰 레 이저광이 쓰이지만, 특별히 고안한 간섭성이 작은 빛이나 X선, 마이크로파, 전 자살(electron beam), 음파 등에 의해서도 실현 가능하다.

홀로그래피는 진폭과 위상의 양 성분을 간섭무늬의 콘트라스트와 간섭무늬 위치로 기록되어 파면의 모습을 기록한 후 입체의 모습을 볼 수 있는 기록매체 이다.

홀로그래픽 간섭계도 또한 비접촉식 계측방식으로 유체의 유동에 영향을 주 지 않고, 간섭무늬에 의해 공간적인 온도분포를 계측할 수 있으며, 시간의 변화 에 따른 열 및 유체의 이동을 실시간으로 계측할 수 있는 장점도 갖고 있다.

이 방법은 Fig. 2.7에서 보이는 것처럼 촬영시 암실 및 진동이 없는 곳이라야 하며, 가변 빔분할기(variable beam-splitter)를 이용해서(필요시 수정 요함) 빛의 세기를 조절한다.

이상적으로는 홀로그래픽판(holographic plate)에 도달하는 기준빔의 세기가 같을 때 감광효율이 가장 좋다. 하지만 여러가지 변수들을 고려하여 일반적으 로 물체빔보다 기준빔을 더 강하게 한다. 홀로그래픽 간섭계는 일반적으로 기 준빔의 세기를 물체빔의 약 2배 정도로 한다.

그러나 10배까지 강하게 해도 재생하는 데는 별다른 문제가 없는 것으로 나타 났다.

노출시간을 살펴보면, 파장 632.8nm, 출력 10mW의 He-Ne 레이저를 기준으로 하였을 때 홀로그래픽 간섭계에서, 반사를 잘하는 백색물체 촬영시에는 약 5초 정도의 노출이 필요하며, 반사율이 떨어지는 물체는 10초 또는 그 이상 노출도 필요하다.

이렇게 현상한 물체의 재생시에는 홀로그래픽판 원래의 촬영위치에 설치하였 을 때 가장 선명한 상을 얻을 수 있다.

실제 실험시에는 흘로그래픽판을 현상한 후 흘로그래픽판 고정기(holder)에 정 확하게 제자리에 놓는 것이 핵심이다. 그러므로 사전에 홀로그래픽판의 장착 느낌을 정확하게 인지하여야 한다.



Fig. 2.7 Holographic interferometer system

(5) 연기를 이용하는 방법(Using Smoke-wire method)

염료에 비해 상당히 작은 입자(particles)로 응집된 영역(field)인 연기를 이용 하여 기체에서의 흐름을 묘사하기 위한 방법으로 이 입자는 대개 1µm 미만의 작은 입자로 이루어져 있다. 많은 양의 빛을 산란하여 기체의 넓고 전체적인 유동을 묘사하기에 적합하다. 그리고 그 현상을 관찰할 때는 사진촬영기법을 이용한다. 사용되는 연기에는 증기, 가스, 연무 등이 있다¹⁴.

예를 들어 관측하고 싶은 기류중에 금속세선(약 0.1mm 정도)을 설치하여 그 곳에 기름을 바르면 표면에 유막을 형성하던가 혹은 표면장력에 의해 보다 작 은 유적선으로 되어 거의 등간격으로 금속세선에 부착하게 된다. 이때 금속세 선에 전류를 통하게 하면 흰 연기가 발생하여 유동장을 가시화할 수 있다.

감지할 수 있는 충분한 빛을 얻기 위해서는 연기 입자의 직경은 0.15µm 보다 는 커야 한다. (참고로 담배연기의 크기는 0.2~0.4µm 정도 임) 연소시킴으로써 연기를 발생시킬 경우 인체에 해로운 성분이 발생하기 때문에 상용되고 있는 연기발생기(smoke generator)의 대부분은 보다 안전한 탄화수소유의 기화를 이 용하고 있다.

이러한 기름들 중에서 석유가 평균입자크기, 증발온도, 그리고 화염성 측면에 서 장점이 많기 때문에 보편적으로 사용하는 기름이다. 하지만 재순환 풍동에 서의 유동가시화를 위해 이러한 연기를 사용하면 일정시간 후엔 터널안이 연기 로 가득차게 되는 문제가 발생한다. 이러한 단점을 해결하기 위해 액체질소와 같은 찬 물질과 섞여 있는 흐름이 공기유동에 노출되는 연무현상이 형성되는 점을 이용하여 추적자로 증기를 사용하기도 한다. 이러한 연기는 공기의 주유 동과 평행하게 놓여진 연기 분사파이프를 통해 외부에서 주입할 수 있다.

최근에는 이 연기를 사용하여 정성적 및 정량적 가시화기법인 입자영상속도 법(PIV)에 많이 활용되고 있어 혼용하여 부르기도 하며, *Fig. 2.8*에 그 개요도를 나타낸다.



Fig. 2.8 Schematic diagram of using smoke method

(6) 수소기포법(Hydrogen-Bubble method)

물속에 두 전극을 담그고 직류전압을 걸어주면 전기분해가 일어나 음극 (cathode)에서는 수소기포가, 양극(anode)에서는 산소가 발생되는 원리를 이용 하여, 산소에 비해 크기가 무척 작은 수소기포를 추적자로 이용하는 방법이다. 음극은 유동에 수직으로 놓여진 매우 가는 전선이고 짧은 주기의 전기펄스를 걸어주면 전선을 따라 수소기포의 열(column)이 발생해 유동을 따라가게 된다.

전선은 직경이 0.01~0.02mm정도의 백금이나 스테인리스강으로 만들어진다. 유체는 주로 물을 사용하며, 전기전도성을 높이기 위해 황산나트륨을 첨가하기 도 한다^{17~18)}.

이때 부력으로 인해 기포가 떠오르게 되는데 이를 최소화하려면 수소기포의 크기가 작아야 한다. 이 미세한 수소기포는 발생하자마자 주위의 기포와 뭉치 려는 경향을 갖고 있는데 이럴 경우 음극의 전선에서 발생하는 수소기포의 직 경은 전선직경보다 큰 것으로 알려져 있다. 그러나 전선의 직경과 함께 기포크 기를 결정하는 인자는 유체의 전도도, 전극 양단에 걸리는 전압과 전류 등이 있는데, 이들을 적절히 조절하면 더욱 미세한 수소기포를 발생시킬 수 있다. 발 생한 수소기포는 다시 용해되므로 관찰 가능한 시간은 제한된다.

레이놀즈(Re)수가 증가할수록 기포의 확산은 증대되고 난류에서는 더 빨라진 다. 따라서 이 기법은 저속유동(최대 속도가 20~30cm/sec)에서 가시화실험을 하는 것으로 제한된다. 레이놀즈(Re)수를 작게 유지하기 위해서 설탕물이 사용 되기도 한다. 층류 후류이론으로부터 기포의 속도는 음극전선에서 직경의 70~ 100배 정도 떨어진 위치에서 자유유동속도에 도달함을 알 수 있으므로, 시험유 동장은 적어도 전선으로부터 직경의 100배 이상 뒤에 위치해야 한다.

전극 양단에 일정한 간격으로 전압을 걸어주면 시간선과 유맥선이 결합된 형 태를 관찰할 수 있어, 보텍스구조 연구에 이 기법이 많이 적용된다. Fig. 2.9에 수소기포법의 개요도를 나타낸다.



Fig. 2.9 Schematic diagram of hydrogen-bubble method

(7) 입자영상속도법(PIV : Particle Image Velocimetry method)

최근들어, 컴퓨터와 전자산업의 발달과 화상처리기술의 도입으로 유동입자들 의 변위정보를 담고 있는 유동화상(particle image)을 이용한 속도장 측정기법 (Particle Image Velocimetry, 넓은 의미의 PIV)이 개발되어 정성적인 순간 유동 정보 뿐만 아니라 정량적인 속도장 정보를 제공하고 있다. 이 기법은 미국 일 리노이대학의 전기 및 컴퓨터공학과 교수이자 Beckman 첨단과학기술연구소의 연구원인 David Beebe와 과학자들이 개발한 이래 지난 10여년간 이와 같은 PIV속도장 측정기술은 매우 빠른 속도로 발전하여 이제는 복잡한 비정상 (unsteady), 난류유동(turbulent flow)의 유동구조를 높은 공간분해능으로 정확 히 해석하는 것도 가능하게 되었다^{19~20)}.

이 방법은 유동속에 살포한 추적자의 입자영상(particle image)을 화상처리 하여, 주어진 유동의 속도장을 측정하는 것이며, 그 기본원리는 Fig. 2.10과 같 다. 화상처리를 이용한 속도장 측정시스템은 크게 레이저와 광학장치, 기록매 체, 입자 등으로 구성되어 있다. 속도장 측정을 위해서는 먼저 유동을 잘 추종 하는 작은 크기의 입자를 유동 속에 주입한다. 그리고 측정하고자 하는 유동단 면을 레이저 평면광(laser light sheet)으로 조사하게 되면, 이 빛에 조명된 유동 입자들은 산란하게 된다.

레이저 평면광은 레이저빔을 원주형 및 구형 렌즈와 같은 광학계를 지나게 함으로써 만들 수 있다. 레이저 평면광에 산란된 입자영상 1장을 시간 t=t。순 간에 필름방식의 일반 카메라나 CCD 카메라 같은 영상입력장치(imaging device)로 취득한다.

그리고, 시간간격 △t가 지난 t = t₀ + △t 순간에 2번째 입자영상을 취득한다. 시간간격 △t는 유동의 속도에 따라 다르게 설정한다. 이렇게 얻어진 2장의 입 자영상을 2차원 화상데이터로 컴퓨터에 저장한 후 디지털화상처리기법으로 분 석함으로써 시간간격 (△t) 동안 움직인 유동입자들의 변위(displacement) 정보 △S를 계측한다. 여기서 입자들의 변위 △S는 시간과 공간의 함수로 △S = △ S(x,y;t)로 표현되어 진다. 속도벡터 U(x, y)는 입자들의 변위벡터 △S를 시간간 격 △t로 나누어줌으로써 구할 수 있다.

Fig. 2.11은 PIV 속도장 측정에서 시간간격 (△t) 동안 움직인 유동입자 들의 속도 벡터를 구하는 원리를 나타낸 것이다. 주 유동방향(x) 속도성분 u와 수직 방향 (y) 속도성분 v는 시간간격 (△t)동안 유동과 함께 움직인 입자들의 변위 (△x, △y)를 시간간격 (△t)으로 나누어줌으로써 속도벡터를 추출하는 것이다.

즉, 2 차원 평면에서의 속도성분 u와 v는 다음과 같은 공식에 의해 계산되어 진다.

이때 변위 △x는 △x/△t 가 속도성분 u와 잘 일치하도록 충분히 작아야 한다. 즉, 입자의 괘적(trajectory)이 x축과 거의 일직선을 이루어야 하며, 괘적을 따른 입자의 속도도 거의 균일해야 한다.

대칭(Lagrangian) 속도장에서 시간간격 △t가 테일러 마이크로스케일에 근접 할 정도의 작은 값을 가질 경우, 이러한 조건을 만족시키는 것으로 알려져 있 다.

속도장 측정시 시간간격 (△t)를 작게 하면 계측하고 있는 입자 위치에서의 속도벡터를 보다 정확히 측정할 수 있지만, 입자변위 △S도 함께 작아져 △S의 측정오차가 증가하게 된다. 반면에 △S를 길게 잡으면, 속도측정 위치 설정에 정확도가 떨어지게 된다.

이러한 입자화상을 이용한 PIV 속도장측정 기법은 전체 유동의 순간 속도장 정보를 제공하며 공간분해능도 우수하다. 이에 반해, 단점으로는 하드웨어 가격 이 비싸고, 레이저, 입자, 화상 및 신호처리기법 등에 관한 사전 지식이 요구되 어 정확한 속도장 결과를 얻을 때까지 많은 노력과 경험축적이 필요하다. *Fig.* 2.12는 PIV 시스템의 상세 배치도를 나타낸 것이다.



Fig. 2.10 Schematic diagram of experimental setup with PIV system



Fig. 2.11 Calculation of velocity vector of moving particle



Fig. 2.12 Detail diagram of PIV system

2.2 Nd:YAG 레이저의 발진원리와 특성

2.2.1 Nd:YAG 레이저의 발진원리

(1) 레이저의 발진원리

레이저(LASER)는 『Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation』 의 머릿글자를 따서 1957년 11월 미국 고든 굴드에 의해 그 명칭이 만들어졌 다. 번역하면 『방사의 유도방출에 의한 빛(광)의 증폭』이며, 이 한마디에 레이 저의 모든 것이 들어 있다. 달리 표현하자면 『방향, 위상, 파장이 고른 인공의 빛』이라 할 수 있다²¹⁾.

1958년 A.L.Schwlow와 C.H.Townes 등이 광의 증폭에 대한 논문을 발표해 그 가능성을 예언한데서 시작되어, 1960년 7월 T.H.Maiman에 의해 루비를 발 진매질로 해서 레이저발진에 성공한 것이 시초로 그 역사가 어느 과학기술보다 도 짧다. 그 후, 레이저광은 40년 사이에 지상 최대의 발명으로 광화이버, 정보 통신, 정밀측정, 정밀기기, 의료, 가공분야 등 거의 모든 영역을 섭렵하고 있다.

이 중 실제 가공분야에 이용되고 있는 레이저는 그리 많지 않다. 특히 YAG레이저는 공진기의 구조가 간단하고, 광화이버를 통한 빔의 원거리 전송이 가능한 장점이 있을 뿐만 아니라, 매질을 투과할 수 있어 광학계의 구 조를 간소화할 수 있으며, 특별한 장치 없이 수중용접을 할 수 있는 등, 응용범 위는 점차 확대되고 있다. 다음에 YAG레이저의 발진원리를 서술한다^{22~25)}.

YAG레이저는 4준위 레이저를 기본으로 한다. *Fig.* 2.13과 *Fig.* 2.14에 나타낸 바와 같이 여기광을 흡수하여 기저상태에서 20,000cm⁻¹ 전후의 상부에 있는 강 한 흡수대 [E₃]로 여기되면, 광을 방출하지 않고 급속도로 ⁴F_{3/2} 준위 [E₂]로 떨 어지게 된다. 이 사이의 체류시간은 약 230µs로 비교적 길다.

이에 반해 레이저 천이의 하준위인 ⁴I_{11/2} 준위 [E₁]은 기저상태 ⁴I_{9/2} 준위 [E₀] 로부터 약 2,000cm⁻¹ 의 높이에 있어, 비어 있는 상태로 되므로 상준위의 원자 수와 하준위의 원자수의 열평형상태가 역전하여, ⁴F_{3/2} 준위와 ⁴I_{11/2} 준위와의 사 이에서 반전분포가 생긴다. 그 결과 1.06µm의 강한 근적외광이 발생한다. 이것이 상준위 ⁴F_{3/2} 준위 [E₂]로 부터 하준위 ⁴I_{11/2} 준위 [E₁]으로 천이할 때 이 사이의 에너지 차 [E₂-E₁]에 의한 자연방출과 반전분포에 의한 유도방출된 레이저이다.

⁴I_{11/2} 준위는 기저상태 ⁴I_{11/2} 준위로부터 충분한 거리가 있는 위쪽으로 광을 방출하지 않는 비방사천이기 때문에, 네오디뮴(Nd) 이온의 분포는 적다. 그 때 문에 기저상태에서의 여기가 다소일지라도 준위 사이의 반전분포 형성이 용이 하다.

그런 의미에서 Nd:YAG레이저는 정확한 4준위 레이저이며, 같은 고체레이저 인 3준위 루비레이저에 비해 YAG레이저의 발진효율이 높은 것도 바로 이 때 문이다.

특수하게는 ⁴F_{3/2} → ⁴I_{11/2} 준위 사이에서의 천이에 대응하는 파장 1.35µm 와 ⁴F_{3/2} → ⁴I_{9/2} 준위 사이에서의 천이에 대응하는 파장 0.914µm의 레이저발진이 가능하고, 이 특성을 이용하여 한 대의 장치에서 다수의 파장을 서로 바꾸어 사용하는 YAG레이저도 일부 있다. 특히 파장 1.3µm의 발진광은 광화이버에 대 한 손실과 분산이 적은 파장영역이기 때문에 통신용으로도 기대되고 있다.

(2) 레이저의 구조

① 레이저의 매질

Nd:YAG레이저는 1964년 미국 bell연구소에서 J.E.Geusic과 그 연구진에 의해 발명된 것으로, Nd⁺³(네오디뮴 3가 이온)을 활성이온으로 한 YAG결정(Y₃Al₅O₁₂: <u>Yttrium A</u>luminium <u>G</u>arnet)이 광여기에 의해 얻어지는 파장 1.06µm의 가장 강 력한 근적외광이 발진되며, 현재 가장 실용화 되고 있는 고체 레이저이다. YAG는 입방정의 결정구조를 가지며 융점은 1,950℃이고, 경도는 모스경도 8~8.5로 높고 굴절률도 n=1.8로 높은 무색투명한 결정이다.

통상 YAG로드(rod)는 직경 3~8mm, 길이 50~80mm의 봉(棒) 형의 것이 이용 되고 있다. 봉의 양 끝단은 파장 λ의 10분의 1(λ/10) 정도로 경면연마한 후 그 위에 무반사 코팅을 행하며, 여기광이 로드 전체에 흡수되도록 측면은 불투 명하게 만든다.

YAG의 결정은 통상, 원재를 이리듐(Ir)제의 도가니에 넣고, 녹여 종결정을 회 전시키면서 0.5~0.6mm/hr 라고 하는 극히 느린 속도로 성장시키는 방법(초크랄 스키법-Czochralski single crystal growth)으로 만들어 진다. 여기에 네오디뮴 3 가 이온으로 소량(중량비 약 0.75%) 도프(dope)한 것을 레이저 매질로 이용하고 있 다. 이 도프한 YAG 결정은 연보라색을 띈다. *Table 2.1*에 Nd:YAG의 물리.광학적 특성을 나타낸다.

② 레이저의 여기원

YAG 레이저는 광여기에 의해 발진한다. YAG 로드의 광여기에 대한 흡수대 는 Fig. 2.15와 같이 0.6μm의 가시영역과 특히 0.75μm, 0.81μm 부근의 근적외영역 대에서 강한 피크를 보인다.

YAG로드의 여기용 광원으로는 다음과 같은 것이 있다.

- 가) 요오드-텅스텐(I-W) 램프
- 나) 칼륨-수은(K-Hg) 램프
- 다) 크세논(Xe) 아크(arc) 램프
- 라) 크립톤(Kr) 아크(arc) 램프
- 마) GaAsxP1-x 발광 다이오드

이 중에서도 크세논(Xe) 아크(arc) 램프는 순간적으로 대전류 방전이 일어나므 로 펄스 여기광으로 사용되기도 하지만, 크립톤(Kr) 아크(arc) 램프는 비교적 수명 이 길고, 고휘도(高輝度) 발광이 가능하며, 연속아크 뿐만 아니라, 고반복 펄스동작 도 가능하기 때문에 더 많이 이용되고 있다.

보통 램프의 점등 형태에 따라 펄스 점등의 경우에는 펄스 여기 레이저, 연 속 점등의 경우에는 CW(<u>C</u>ontinuous <u>W</u>ave) 여기 레이저로 구분하고 있다.

③ YAG레이저의 구조

YAG 레이저에서 공진기는 기본적으로, YAG로드, 여기램프, 전반사미러 및

출력미러와 관련한 광학계, 효율 좋은 여기광을 얻기 위한 YAG로드에 집광시 킬 집광기의 반사판 및 램프 여기용 전원 등으로 구성되어 있다. 또한 램프 점 등시에는 많은 에너지가 소모되어 열이 발생하고, YAG로드에서는 흡수된 에너 지의 90% 이상이 열에너지로 바뀌기 때문에 여기용 플래시램프 및 로드를 수 냉시키는 구조로 되어 있다.

아울러, 가느다란 여기용 램프로부터 발출되는 여기광은 주위 전 방향으로 방출되므로, 광이 손실되는 결점을 갖고 있다.

그러므로 가장 기본적인 YAG레이저는 YAG로드와 여기램프를 평행하게 하 여 타원형 단면인 관형상의 집광기 내 2개의 초점위치에 설치한다. 한편, 집광기 내면이 고반사 코팅되어 있어 여기용 램프로부터 발광된 여기광 은 타원의 한쪽 초점위치에 있기 때문에 다른 방향의 초점위치에 있는 YAG로 드에 집중 조사되는 구조로 이루어져 있다.

이와같이 광이 집광하여 램프에 조사되면 YAG로드가 여기되어 경면 연마된 양 단면방향으로 광이 방출되는 것이다.

집광기의 집광방식으로는, i. 구면형 집광방식, ii. 타원통형 집광방식, iii. 원 통형 집광방식, iv. 이중 타원통형 집광방식, v. 회전 타원체형 집광방식 등 몇 가지 종류가 있으며, 높은 집광효율을 얻기 위해 통상 황동 등으로 형상을 만 들고 내면을 경면 마무리한 후 금으로 도금 또는 증착하여 사용한다.

Fig. 2.16은 YAG레이저 공진기의 기본구조를 나타낸 것이다.

공진기는 전반사미러(rear mirror)와 부분투과미러(output mirror 또는 output coupler)의 2장으로 구성된 안정형공진기로 구성되어 있고, 발진된 레이저는 2 장의 미러를 왕복함으로써 증폭된다. 통전된 여기램프는 강력한 여기광을 조사하고, 주위로 방사된 광은 반사판에 반사되어 YAG로드에 집광한다.

그 결과 YAG매질 중의 원자를 여기하여 레이저가 발진된다. 증폭에 의해 일 정값을 넘은 일부는 출력미러로부터 투과광으로서 외부로 발진된다. 로드 단면 에 미러 대신 코팅하는 경우도 있다. 하지만 전술한 구성이 다양한 부가기능에 대응할 수 있어 보다 일반적으로 이용되고 있다.

- 27 -

YAG레이저는 발진파장이 1.06µm이므로 광학계에 글래스렌즈(glass lens)를 사용 하기도 하고, 소정의 반사율을 가진 광학계를 제작하기 위해 미러에 투전률이 다른 2 종류의 막(SiO₂, TiO₂ 등)을 ↓파장의 두께로 겹쳐 놓는 경우도 있다.

레이저발진을 정지코자 할 때에는 램프 광원을 차단하든지 기계적으로 광로 를 차단하기 위해 설치한 셔터를 작동시키면 멈추게 된다.



Fig. 2.13 Laser transition of YAG laser pumping mechanism



Fig. 2.14 YAG laser energy level and laser transition



Fig. 2.15 Absorption spectrum by light pumping of YAG rod



Fig. 2.16 Basic formation of YAG laser resonator
Specific character	Unit
Central generation wave	1.064 <i>µ</i> m
Nd ₂ O ₃ additional rate	1.0 at.%
Nd ³⁺ density	1.38X10 ²⁰ ions/ cm ²
Sectional area of stimulated emission	$\sigma_{21} = 6.5 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$
Fluorescent life	230µs
Linear thermo-expansion coefficient [100]	8.2×10⁻⁶/ ℃
[110]	7.7×10⁻ ⁶ / ℃
[111]	7.8×10⁻ ⁶ / ℃
Spectrum line width	0.45nm
Relax time(${}^{4}I_{11/2} \rightarrow {}^{4}I_{9/2}$)	30 ns
Radiation life(${}^{4}F_{3/2} \rightarrow {}^{4}I_{11/2}$)	550µs
Refracting rate	1.82
Disperse loss scale	0.002 cm ⁻¹
Melting point	1,970 ℃
Heat transfer	13 W/m°K

Table 2.1 Physical & optical specific character of Nd:YAG

2.2.2 Nd:YAG 레이저의 특성

YAG레이저는 파장영역에서 보다시피 금속표면에서의 반사율도 작고, CO₂레 이저로는 다소 곤란하다고 여겨왔던 구리, 알루미늄 등의 고반사 재료의 가공 에도 활용도가 매우 높다. 또한 단파장이기 때문에 집광성이 우수하고, 미세가 공에 적합하여, 전자부품의 소형화에 따른 고밀도화, 고집적화에 대응하는 마이 크로 가공의 수요와 더불어 종래의 방법을 대체하는 신가공법으로 주목받고 있 다.

다만 일반적으로 비금속 가공시 곤란하다고 여겨왔던 것도 최근 고출력으로 화이버 전송이 가능하게 됨에 따라 유연한 자동화 프로세서에 적합한 고정도 (高精度) 가공도 가능하게 되었다.

그러나, 전기입력에서 레이저출력까지의 변환효율이 겨우 2~3%로, 가공용 YAG레이저는 전원용량이 수 kW에서 수십 kW나 되지만, 변환효율이 낮은 만큼 열로 변환되는 양이 증가하기 때문에 이에 적합한 냉각기와 큰 전원용량을 필 요로 하게 되므로 장치가 커지게 된다. 그러므로 상당히 컴팩트한 레이저 헤더 를 가짐에도 불구하고 헤더가 분리된 형태로 장치화되어 있는 것이 많다.

YAG레이저의 일반적인 장점으로는 다음과 같은 것이 있다.

(1) 집광이 용이하다.

Fig. 2.17에서와 같이 직경 *D*, 파장 *λ*의 코히어런트(coherent)한 광을 초점거리 *f*의 이상적인 렌즈로 집광하면, 집광스폿의 직경*d*는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$d = 2.44 \times \frac{\lambda f}{D} \tag{7}$$

예를 들면, f=100mm, d=20mm, λ=1μm라고 하면, 집광스폿의 직경은 약 12μm 로 작아, 매우 정밀한 절단이나 천공가공이 가능하다. 또한, 레이저파워 W=1,000으 로 하면, 초점에서는 1㎝당 레이저파워밀도(W/πd²)는 약 109W/㎡의 큰 값이 되므로, 아무리 융점이 높은 재료라도 순식간에 증발해 버린다.

각종 열원의 파워밀도를 *Table.2.2*에 나타낸 바와 같이 가스염이나 아크등의 열원에 비해 레이저빔이 더 높은 것을 알 수 있다. 전자빔도 레이저빔과 마찬 가지로 에너지밀도가 높지만, 진공 중에서만 활용이 가능하고, X선 발생의 위험성이 나 자장의 영향을 받기 쉬운 등 실용상 제약이 많다. 그러나 레이저빔은 유일하게 대 기 중에서 활용이 가능한 실용적인 고에너지 밀도 열원이다.

(2) 에너지를 멀리 전송할 수 있다.

레이저빔은 거의 확산되지 않으므로 원거리 전송이 가능하다. 레이저빔의 확 산각 △ *θ* 는 다음 식으로 주어진다.

$$\Delta \theta = 2.44 \times \frac{\lambda}{D} \quad \dots \tag{8}$$

이를 회절한계의 확산각이라 한다. 또한 진공에서도 감쇠하지 않고, 원거리 전소이 가능하므로 현장의 레이아웃 등에도 큰 자유도를 줄 수 있다. 더불어 1 대의 레이저 발진기를 사용하여 다수 워크스테이션으로 가공도 쉽게 할 수 있 다. *Fig. 2.18*은 멀티스테이션(multiplestation) 가공의 예를 나타낸 것이다.

가공부품을 셋팅하고 있는 동안 다른 부품을 가공할 수 있기 때문에 대폭 능 률을 향상시킬 수 있다. 광통신 등에 광화이버를 활용하면, 더욱 편리해 진다. 예를 들어 방사능이 많은 지역, 인간의 손이 닿지 못하는 곳, 유해가스 발생지 역 등 위해 장소뿐만 아니라 인체의 혈관으로도 빔을 입사시킬 수 있다. 통상 기계가공에서 미리 공구가 비치되어 있는 공장에 부품만 갖고 가면 모든 작업 이 가능한 것과 마찬가지로 그 편리함을 바로 인지할 수 있을 것이다.

(3) 비접촉 가공이다.

접촉하지 않고 가공할 수 있는 것도 매우 유리한 특성중의 하나이다. 그럼으

로써 다이아몬드와 같은 초경재료도 전혀 마모 없이 간단히 천공 가능하다.

비접촉의 또 다른 효과로는 가공부에 이물 혼입의 염려가 없어 순수(clean)한 가공도 가능하다. 또한 공구와 공작물의 접촉시 발생하는 소음이 없어 작업환 경이 향상될 뿐만 아니라 과밀 주거지역도 주·야간 어느 때라도 작업이 가능 하다.

(4) 다품종 소량생산·자동가공에 적합하다

갈수록 다양해지는 소비자의 요구에 부응하기 위해, 최근에는 다품종 소량생 산 체제로 전환되고 있으며, 펀치프레스 등과 같은 공구는 대량생산인 경우에 는 능률이 뛰어나지만, 일부분의 형상변화가 있어도 새로이 "형"을 만들어야 하기 때문에, 제작에 추가 비용뿐만 아니라 별도의 작업공간 확보도 필연적이 다.

레이저가공에서는 부품형상의 변형이 이루어져도 소프트웨어 조작만으로도 즉시 대응이 가능하며, 자동적으로 가공조건이 프로그래밍되므로 숙련공이 요 구되지 않는 것도 장점중의 하나이다.

(5) 열영향이 거의 없다.

열영향이 거의 없기 때문에 절단이나 용접할 때에도 열변형이 거의 일어나지 않는다.

Fig. 2.19는 아크용접과 레이저용접 변형을 서로 비교한 것이다. 일반 아크용 접 등에서는 용접후 다소 변형되거나 정형·기계가공 등의 공정이 필요하지만, 이러한 과정을 생략하는 것도 가능하다. 더욱이 플라스틱, 고무 등의 저융점재 료의 완성품에 가까운 단계에서도 용접이나 천공 등의 공정이 가능하므로 제품 설계의 자유도가 매우 넓다.

(6) 분위기의 제약이 크지 않다.

진공중이거나 가압분위기 등, 어떠한 가스분위기 중에서도 가공이 가능할 뿐

만 아니라, 투명한 재료를 통과하는 특수한 분위기 상의 피가공재도 외부 가공 이 가능하다. 예를 들어, 외부에 유리가 있는 시계 문자판의 마킹, 진공으로 봉 한 유리관 내부의 용접, 수중(水中) 철판의 천공 및 용접 등 활용도가 뛰어나다. 이상의 장점이 있는 반면 다음과 같은 문제점도 상존하고 있다.

가. 타 가공법에 비해 고가(高價)이다.

가공에 사용되는 레이저장치는 가스절단, 아크, 플라즈마 제트 등의 기존 가 공법과 비교해 보면 상당히 고가이며, 러닝코스트(running cost)도 결코 적지 않다. 기기의 가격이 높고, 발진효율도 낮아 고부가가치 제품의 가공에 한정되 고 있다. 비록 수년 사이에 레이저가공기의 코스트가 상당히 저하되었지만, 더 많은 가공기술이 보급되려면 한층 더 저가격화가 요망된다.

나. 안정성이 충분하지 않다.

레이저빔은 강력한 파워빔이며, 파워업의 속도에 광학부품이 충분히 따르지 못하고 있다. 이 점이 현미경이나 망원경 등의 미약한 광을 다루는 기존 광학 분야와 대별된다. 특히 강한 레이저빔에 노출된 광학부품은 코팅부가 손상되기 쉽고 장기간에 걸쳐 재현성이 우수한 레이저가공을 위해서는 철저한 품질관리 가 필요하다. 그러므로 파워빔용 광학부품의 개발은 레이저가공에 부여된 중대 한 과제가 되고 있다.

다. 레이저에 적합한 설계 및 재료개발이 쉽지 않다.

레이저는 초점 스폿직경이 작기 때문에, 아크용접보다도 재료의 그루브가공 을 더욱 정밀하게 할 필요가 있다. 또한 냉각속도가 빨라 탄소강에서도 경화되 기 쉽고, 레이저 용접부의 온도가 높아 저융점의 합금은 증발되어 소실되기 쉽 다.

따라서, 이제까지의 가공법을 레이저로 단순 대체하는 것만으로는 기대에 못 미치는 경우도 많아, 레이저가공에 적절한 설계변경이나 재료개발이 필요하다.



Fig. 2.17 Condensing of laser by lens

Table 2.2 Power density of heat source for typical material processing

Heat source for pr	Power density (kW/cm ²)			
Gas flame (Oxyhyo	~3			
Light beam (Xenor	1~5			
Open Arc discharg	~15			
Plasma jet	$50 \sim 100$			
Electron beam	Pulse	>10 ⁴		
	C.W	>10 ³		
Laser beam	Pulse	>10 ⁴		
	C.W	>10 ³		



Fig. 2.18 Multiple-station processing with laser



Fig. 2.19 Comparison of weld distortion formed by laser and arc heat source

2.3 실드가스의 종류와 특성

본 실험에 사용된 실드가스(shield gas)는 종류도 다양하지만 레이저가공 방 법에 따라 용도, 특성 및 영향이 달라진다.

여기서는 실드가스로 사용되는 각 가스들의 일반적인 사항들을 종류별로 서 술하고, 용접시 사용되는 실드가스의 적용방법에 따른 현상과 특성에 대해서도 알아본다.

2.3.1 실드가스의 종류

(1) 아르곤(Ar)

실드가스의 종류중 Ar은 질소, 산소와 더불어 공기의 3대 성분중의 하나(약 0.9%)로 무색, 무취, 무미하며 불활성 및 불연성 가스이다.

대기압하에서는 -186℃의 비등점을 나타내며, 기체상태의 아르곤은 물보다 약 1.4배 무겁다. 또한 공업적으로는 주로 ASU(Air Separating Unit)에 의해 공기 로부터 분리가 가능하고, 높은 순도의 제품을 얻을수 있으며, 질소와 달리 고 온, 고압하에서도 불활성이므로 특수용접이나 고부가성 특수강의 정련 등 고온 에서의 분위기 가스로 사용된다.

(2) 질소(N₂)

질소는 공기중에 가장 많이 존재(약 78%)하는 성분으로 Ar과 마찬가지로 무 색, 무취, 무미하며 불활성 및 불연성 가스이다. 또한 기체상태의 질소는 공기 보다 가볍고,액체상태의 질소는 물보다 다소 가벼우며, 대기압하에서는 -196℃ 의 비등점을 갖고 있다. 공업적으로는 ASU, PSA(Pressure Swing Adsorption) 등의 방법으로 공기로부터 분리하여 기체상태나 저온의 액체상태로 이용한다.

(3) 헬륨(He)

헬륨은 무색, 무취의 불활성 희귀가스로서 비중은 0.138이며 비등점은 -268.9℃ 이다. 공기 중에 미량(0.00052%)으로 존재하는 헬륨은 주로 0.5~3%의 함량을 갖고 있는 천연가스로부터 심냉분리법에 의해 제조되고 있다. 2.3.2 실드가스의 특성

(1) 센터가스

용융금속은 공기와 접촉하면 산화하기 때문에, 전술한 Ar이나 He등의 불활 성의 실드가스로 덥는 것이 필요하다. *Fig. 2.20*과 같이 레이저빔과 동축의 노 즐에서 실드가스를 공급하는 센터가스가 널리 이용되고 있다^{26~27)}.

CO₂레이저용접에서, 센터가스는 플라즈마를 냉각하여 빔홉수를 방해할 뿐만 아니라, 금속증기나 스패터링(spattering)으로부터 렌즈의 보호도 겸하고 있다. 보다 효과적으로 렌즈를 보호하기 위해서는, 노즐내로 가스를 선회류로 하는 것도 있다.

실드가스의 열전도율이 큰쪽이 냉각효과가 크고, 용입깊이도 크게 된다. 키홀 에서 분출하는 금속증기는, 레이저빔에 의해서 가열되어 플라즈마화 하는데, 실 드가스로 열이 이동하므로써 냉각된다. 다만, 열전도율이 큰 He가스는 고가이 기 때문에, 실용적으로는 Ar가스를 이용하는 경우가 많다. 또한, 용융금속과의 반응이 문제로 되지 않는 경우에는, N₂가스가 이용되기도 한다.

Fig. 2.21은, Ar센터가스의 유량을 변화한 경우의 플라즈마의 높이와 용입깊 이의 관계를 나타낸다. 센터가스의 유량이 증가하면, 플라즈마가 보다 강하게 냉각되어, 플라즈마의 높이가 낮아짐에 따라 용입깊이가 증대한다.

또한, 알루미늄 같이 반사율이 높은 재료에서는, 실드가스중에 산소를 조금 혼 합시키면, 용융지면에 형성되는 얇은 산화피막이 흡수율을 증대하기 때문에, 용 입깊이를 증대시킬 수 있다.

(2) 사이드가스

Fig. 2.22와 같이, 사이드에서 분출하는 어시스트가스를 사이드가스라고 부르고 있다. 센터가스의 경우에는 플라즈마가 주위에서의 열전도에 따라 냉각되지 만, 플라즈마 중심부는 효과적으로 냉각되지 않는다.

이에 반하여 사이드가스의 경우에는, 빔의 경로에서 플라즈마를 걷어내므로, 센터가스보다 효과가 크다. 좁은 노즐을 이용하여 용접진행 방향에 사이드가스

를 분출하면, 용융지에 거의 영향을 주지 않고 플라즈마를 제어할 수 있다.

Fig. 2.23과 Fig. 2.24는 사이드가스 압력과 용입깊이의 관계 및 사이드가스의 효과를 도시하고 있다. 최적조건은, 사이드가스 압력이 키홀에서 분출하는 금속 증기 압력보다도 적고 높은 경우이다(영역Π). 그때 플라즈마는 레이저빔의 경 로에서 벗어나 후방으로 분출되고, 레이저빔은 직접 키홀에 입사하기 때문에, 용입깊이는 증대한다. 단, 사이드가스의 압력이 너무 낮으면(영역Ι), 플라즈마 는 상방향으로 분출하여 레이저빔을 흡수하기 때문에, 용입깊이는 얕게 된다. 역으로, 어시스트가스압력이 너무 강하게 되면(영역Π), 키홀을 둘러싼 용융금속 을 밀어내 험핑비드(요철인 비드)로 되어, 용입깊이도 얕게 된다. 또한, 다시 용 융금속이 키홀로 되돌아 올 때 가스를 끌어들여 포로시티를 발생시킨다.

사이드가스에서는 좁은 노즐을 이용하여 가스의 흐름을 집중시키므로, Fig. 2.25에 나타는 것과 같이, 표적 위치가 조금 벗어나면 부정비드로 된다. 이와 같이 분사방향을 정확하게 할 필요가 있고, 이것이 본방법의 실용화의 장애로 되고 있다.



Fig. 2.20 Gas shield by the same axle nozzle



Fig. 2.21 Ar center gas flux and penetration depth



Fig. 2.22 Arrangement of side gas nozzle



Fig. 2.23 Corelation of side gas pressure and penetration depth (STS304)



Fig. 2.24 Control mechanism of Plasma by side gas



Fig. 2.25 Corelation of 'aiming position of side gas nozzle' & 'penetration depth'

3. 실험장치 및 방법

3.1 실험재료와 장치

3.1.1 실험재료

본 실험에 사용된 스테인리스강은 철(Fe)에 약 12%이상의 크롬(Cr)을 넣음으 로써 부동태피막이 형성되어 녹이 잘 슬지 않도록 만들어진 강으로 필요에 따 라 탄소(C), 니켈(Ni), 규소(Si), 망간(Mn), 몰리브덴(Mo) 등을 소량 포함하고 있 는 특수강이며, 이렇게 만들어진 스테인리스강은 철(Fe)을 주성분으로 하면서 보통의 강이 지니고 있지 않은 여러가지 특성을 갖고 있다.

또한 스테인리스강은 크게 나누어 400계열(Fe-Cr계열)과 300계열(Fe-Cr-Ni계 열)로 나눌 수 있으며, 각각의 특성을 *Table 3.1*에 나타낸다²⁸⁾.

그 중 본 실험에서 사용된 스테인리스강은 300계열로써 일반 용접용, 화학공업 재료설비, 열교환기 및 각종 탱크에 많이 이용되고 있는 오스테나이트계 스테 인리스강인 STS304이다. 이 STS304는 기계적 강도, 내열·내식성이 뛰어나고, 내 입계부식성이 우수하며, 상온에서 비자성인 오스테나이트 조직이기 때문에 최 근에는 전자부품 등에도 많이 활용되고 있다.

사용재료의 두께는 0.6mm^t이며, 그 화학조성 및 기계적, 물리적성질을 Table 3.2 및 3.3에 나타내었다.

아울러 STS304에 대한 레이저 점용접시 실드가스(shield gas)로는 아르곤(Ar), 질소(N₂) 및 헬륨(He) 가스를 사용하여 레이저 용접성에 미치는 실드가스의 정 적·동적 특성을 검토하였다. 이 가스들의 물성을 **Table 3.4**에 나타내었다.

Division	Character	Specific character
	Ferrite descent	 Body-centered Cube Constitution (BCC) Do not hardening by heat treatment master steel : STS430
Fe-Cr descent (400 descent)	Martensite descent	 Show ferromagnetism at normal temperature Corrosion proof is low but Strength is excellent Creation to Martensite transition by air-cooling or oil-cooling in Austenite structure master steel : STS410
	Austenite descent	 Face-centered Cube Constitution (FCC) Do not hardening by heat treatment, hardened by processing. non-magnetism, hardened after processing master steel : STS304
Fe-Cr-Ni descent (300 descent)	Duplex descent	 Mixing structure of Austenite & Ferrite at normal temperature It is mutual complementary thing that low resistant character to local corrosion of Austenite descent and low toughness of Ferrite descent master steel : STS329J1 It's improved thing hardness as
	Precipitation hardening descent	precipitate intermetallic compound(Cu, Al, Ti, Nb etc.) after heat treatment • master steel : STS630

Table 3.1 Kinds of stainless steel and specific character

Element Material	С	Si	Mn	Р	S	Ni	Cr	Fe
STS304	0.05	1	2	0.04	0.03	8	18	Balance

Table 3.2 Chemical composition of the STS304 (wt. %)

Table 3.3 Mechanical and physical properties of STS304

Character		Mechanical properties				Proce temp b heat	ssing etween (°C)	Heat treat temp (℃)	Hens.	Elastic	Specific heat	Thermal	Coeff. of therm
Material	Y.P (kg/mm²)	T.S (kg/mm)	E1 (%)	RA (%)	BHN	Heat temp.	Finish temp.	Aneal (WC)	(g/ cm²)	(kg/mm)	temp. (cal∕g℃)	(cal/cm°C)	-sion (x10 ⁻⁴)
STS304	≥22	≥53	≥ 40	≥60	≤187	1150	930	1010 ~ 1120	8.0	19.70	0.12	0.0388	17.3

Gas Properties	Ar	N_2	He
mol. wt.	39.948	28.0134	4.0026
sp. gravity	1.38	0.9676	0.1389
Thermal conductivity at 1000 K (mW/cm K)	0.427	0.61	3.63
Ionization potential (eV)	15.7	N ₂ - 15.65 N - 14.52	24.5
Dissociation potential (eV)	_	$N_2 = N + N$ at 9.1	-

Table 3.4 Physical constants of each shield gases

3.1.2 펄스 Nd:YAG 레이저 용접장치

본 실험에 이용한 용접장치는 플래시램프 여기방식의 펄스 Nd:YAG 레이저 용접기이며, 레이저 발진파장은 1.064µm이고, Nd:YAG 레이저 용접장치의 빔모 드(beam mode)는 TEM⁰⁰이다. 그리고 최대 출력에너지는 50J/p(펄스 폭 10ms 기준)이다.

출사 집광렌즈의 초점거리는 $f_d=83$ mm이며, 광 화이버로 동시 4분기가 가능하 다. 또한, 노즐끝단에서 시편까지의 작동거리(working distance)는 70mm이다.

Table 3.5에 Nd:YAG 레이저 용접장치의 주요사양을 나타내었으며, Fig. 3.1 에 Nd:YAG 레이저 용접장치의 사진을 나타내었다.

레이저 용접중에 발생하는 유기 플라즈마(induced plasma) 및 스패터(spatter) 를 고속도 카메라로 촬영하였다. 촬영된 프레임(frame) 사진은 A/D 변환 후 컴 퓨터로 전송하여 유기 플라즈마와 비산입자의 거동해석에 이용하였으며, *Fig.* 3.2 에 그 촬영 상황을 나타낸다.

Maker	MIYACHI YAG LASER
Model	ML-2331B
Weight	250kg
Size	1,030(H) X 550(W) X 1,060(D)mm
	1) Maximum Regularity Output : 50W
	2) Maximum Output Energy : 50J/P
	(pulse width 10ms)
	3) Pulse Width : 0.3~20.2ms (0.1ms STEP)
	4) Pulse Repetition Speed : $1 \sim 20$ pps
Generator	5) Generation wavelength : 1.064µm
	6) Beam Diameter : 8mm
	7) Resonance Machine Shutter : On-Off Sensor
	installation
	8) Located decision Guide Light :
	Builted Visible Laser (Red color)
Power	1) Supply Power : 3-Phase AC200V10% $50{\sim}60{\rm Hz}$ 12A
Power	2) Setting Voltage: DC150~500V (1V step)
	1) Setting of Condition :
	Repeat number Combination 16 Type Setting
Laser	2) Counter : Total Count & Chemical Count 8-Line
	3) Alarm Indication : Message Display in Liquid
Controller	crystal
	4) Remote handling :
	Can be Remote Control in Standard 3m Cable
	1) Heat Exchange Method : Water - Water
Cooler	2) Supply Water : $1 \sim 3 \text{kg/cm}$, flow quantity 8Q/min
	Supply Water Temp. $5 \sim 25 ^\circ \mathbb{C}$
	3) Hose Inside-diameter : 15mm

Table 3.5 Specification of Nd:YAG laser



(a) Schematic diagram



(b) Experimental setup

Fig. 3.1 Schematic diagram and experimental setup of pulsed Nd:YAG laser equipment



(a) Schematic diagram



(b) Experimental setup

Fig. **3.2** Schematic diagram and experimental setup of laser spot welding by High-speed camera

3.1.3 고속도카메라 및 슈리렌 시스템

이번 장에서는 본 실험에는 일본 Photron사의 고속도카메라와 KOMI사의 가 시화 장치인 슈리렌 시스템을 사용하였고, 각각의 사진을 Fig. 3.3에 나타낸다.

Table 3.6에 관측용 고속도 카메라의 상세 장치사양을 나타내었으며, 슈리렌 시스템에서는 특별 고안한 광학벤치를 설치하여 각종 광학부품들의 광축정렬 및 사용이 용이하도록 하였고, 각 주요 구성품들의 사양을 Table 3.7에 나타내 었다.



(a) High-speed camera controller and peripheral equipment



(b) Schlieren system arrangement plan

Fig. 3.3 General view of high-speed camera and schlieren system

Classification	Specification
Model	FASTCAM Super 10KC
Maker	PHOTRON Co., Ltd.
Power	12 VDC (240V)
Sensor	210 watts with light
Gray Scale	658x496 pixels (512x480 displayed)
Lens mount	256 levels
Scanning speed	30~10,000 FPS
Tripod mount	C-Mount. 1/3 Format
Operating temp.	$1/4$ \sim 20 & 3/8 \sim 16 standard ANSI hole pattern
Storage temp.	$0{}^\circ {\mathbb C}$ to $35{}^\circ {\mathbb C}$ & -20 ${}^\circ {\mathbb C}$ to $70{}^\circ {\mathbb C}$ (no condensation)

Table 3.6 Specification of high speed color digital camera

Classification	Specification
Schlieren Mirror	Effective particle diameter = $\oint 200[SM-200]$ Focal distance = 2,000mm 3 axle detail settlement possibility
Light Source	Tungsten Halogen Lamp 200~208 VAC 37/37 W
Pinhole	\varPhi 100/ 300/ 1,000/ 1,500/ 1,800 μm [PH-3]
Plane Mirror	100mm Al coating [PM-100]
Knife Edge	2-pair's parallel knife edge [KEA-2]
High speed digital camera	FASTCAM Super 10KC [PHOTRON Co., Ltd.] Scanning speed : 30~10,000 FPS Gray scale : 658×496 pixels
Color Filter (opposed Pinhole)	1-pair's round shape filter for Light quantity adjustment4-color round shape/square filter [DFA-4]
Optical bench	60mm Al-profile Optical bench for transport, Vibration absorbent adhesion [OBF-60] Slide & screw fixing type

Table 3.7 Specification of Schlieren system

3.2 실험방법

3.2.1 레이저빔의 비드 점용접 방법

펄스 Nd:YAG 레이저를 사용하여 두께 0.6mm^t의 스테인리스강 STS304 및 판 에 점용접을 실시하였다.

점용접은 먼저 대기중에서 펄스폭 12.5ms, 초점거리(fd=0)에서 인가전압을 243V, 250V, 255V 및 280V로 변화시키면서 실시하였으며, 펄스폭 20.0ms에서 는 인가전압을 220V, 225V 및 230V로 변화시키면서 실시하였다.

다음으로는 각 실드가스(He, N₂, Ar) 분위기에서 상기 조건에 정적 및 동적 실드상태에 따른 용접을 실시하였다. 또한 각 조건에서의 레이저 점용접부의 현상을 대기중과 실드가스 분위기와의 비교·검토를 위해 고속도 카메라를 통 해 찰영한 후 용접비드 상태를 광학현미경으로 관찰하였다.

현 상황의 이해를 돕기 위해 레이저빔 비드 점용접시의 각 조건에서의 개략 도를 Fig. 3.4에 나타내었다.



(a) Laser spot welding in atmospheric state



(b) Laser spot welding in static shield gas state



(c) Laser spot welding in dynamic shield gas state

Fig. 3.4 Schematic diagram of laser spot welding in each condition

3.2.2 정적 및 동적 실드가스 분위기에서의 용접방법

레이저 점용접시 보조가스(Ar, N₂, He)를 사용하여 정적(static) 및 동적 (dynamic) 실드가스 분위기에서의 용접현상을 고속도 비디오 카메라(Max. n_f = 10,000FPS)를 이용하여 촬영하였으며, 대기중에서의 용접현상과의 차이점을 비 교·검토하였다.

특히, 가스노즐을 이용한 동적 실드가스 분위기를 적용하기 위해서 용접성에 영향을 줄 수 있는 노즐 지배인자 즉, 노즐직경(d), 분사위치(L), 분사각도(α)와 가스유량(Q) 등을 고려하여 레이저 점용접성에 미치는 영향을 검토하였다. 실 드가스 노즐의 지배인자를 Fig. 3.5의 모식도에 나타낸다.

레이저 점용접을 위한 정적 및 동적 실드상황에서 용접현상 촬영시의 개략도 와 사진을 Fig. 3.6과 Fig. 3.7에 각각 나타낸다.

정적 실드가스 분위기에 대한 실험은 두께 0.6mm^t의 STS304 판재를 사용하였 고, Fig. 3.6과 같이 실드 분위기 조성을 위해 실드박스를 사용하여 박스 내를 가스로 치환시켰다. 각각의 가스실드 분위기에서 레이저 출력을 변화시켜 비드 용접을 행하고 가스별 용접현상을 비교하였다.

Fig. 3.7과 같이 가스노즐을 사용한 동적 실드가스 분위기에서의 실험에서는 노즐 내경을 2, 4, 6, 8 및 10mm ∅ 등 5가지로 변화시켜 관찰하였고, 가스분사각 도는 0~80°까지 가변가능하나 40°를 기준으로 하여 0°, 20° 및 60°로 변화시켰 다. 가스유량과 노즐분사위치를 변화시켜 최적의 조건을 선정하고, 가스 종류와 노즐에 따른 동적 실드가스의 레이저 용접성을 검토하였다.

- 58 -



Fig. 3.5 Parameters of shield gas nozzle



(b) Experimental setup





(b) Experimental setup

Fig. 3.7 Schematic diagram and experimental setup of laser spot welding in the dynamic shield gas

3.2.3 슈리렌시스템을 이용한 용접현상의 관찰방법

레이저 점용접시 각종 인자(parameter)에 따라 용접현상이 고속도 카메라와 어떤 차이점이 나타나는 지를 슈리렌 시스템으로 비교·검토하였다.

먼저 Fig. 3.8의 개략도에서 보는 바와 같이, 첫번째 광축에 먼저 광원인 텅 스텐-할로겐 램프를 설치하고, 핀홀을 설치한 후, 평면경(plane mirror)을 설치 하였다.

다음으로는 첫번째 슈리렌 미러(mirror)를 배치하였다. 이 때 핀홀에서 첫번째 슈리렌 미러까지 약 1.9m 정도의 거리를 두었다.

첫번째 슈리렌 미러와 두번째 슈리렌 미러 사이에 형성된 평행광에 시험부를 두었으며, 두번째 광축에는 또 하나의 평면경을 설치하고, 나이프엣지(knife edge)를 설치한 후 촬영용 고속도 카메라를 설치하였다. 이 때 두번째 슈리렌 미러에서 나이프엣지까지 약 1.9m 정도의 거리를 두었으며, 고속도 카메라로 유기 플라즈마와 실드가스의 거동을 관찰하였다.



(a) Schematic diagram



(b) General view

Fig. 3.8 Schematic diagram and general view of Schlieren system

4. 실험결과 및 고찰

4.1 레이저빔의 출력특성

4.1.1 펄스폭에 따른 레이저 출력특성

램프전압을 273V로 일정하게 유지하고 레이저 펄스폭(*r*_p)을 변화시켰을 때의 레이저 출력에너지(output energy)와 첨두출력(peak power)을 *Fig. 4.1과 Fig.* 4.2에 나타낸다. 레이저빔의 펄스폭이 증가함에 따라 출력에너지는 증가하는 반 면에 첨두출력은 이와 반대로 감소하고 있음을 알 수 있다.

따라서 첨두출력(W)는 *W*(watt)=J(Joule; output energy)÷ms(irradiation time) 이므로 첨두출력은 출력에너지에 비례하고, 펄스폭에 반비례한다는 것을 확인 할 수 있었다.



Fig. 4.1 Relation between laser output energy and laser pulse width



Fig. **4.2** Relation between laser peak power and laser pulse width

4.1.2 인가전압 변화에 따른 레이저 출력특성

레이저빔의 펄스폭을 20ms로 일정하게 고정하고, 램프전압을 변화시켰을 때 의 레이저 출력에너지(output energy)와 첨두출력(peak power)를 *Fig. 4.3*과 *Fig. 4.4*에 각각 나타낸다.

여기서, 램프전압이 증가함에 따라 레이저빔의 출력에너지와 첨두출력 둘 다 비례하여 증가하고 있음을 알 수 있다.


Fig. 4.3 Relation between laser output energy and lamp voltage



Fig. 4.4 Relation between laser peak power and lamp voltage

4.2 레이저빔의 용접특성

4.2.1 집광 광학계의 비초점거리에 따른 용입특성

형상인자를 배제한 비드용접(bead welding)시 초점거리에 따른 용입특성을 조사하였다.

Fig. 4.5에 초점거리 변화에 따른 용입과 용입형상의 변화를 나타내고, 그때의 비드폭과 용입깊이의 변화를 Fig. 4.6과 Fig. 4.7에 각각 나타낸다.

용입깊이의 변화는 초점에서 가장 깊고 (-)비초점 영역이 (+)비초점 영역보다 유리한 조건이라 할 수 있다. 용접결과에서 볼 수 있듯이, 비드폭과 용입깊이가 반비례하는 전형적인 거동을 보이고 있다.

일반적으로 레이저빔 에너지의 출력이 높거나 초점심도가 깊은 경우에는 초 점에서보다 (-)비초점 영역에서 더 깊은 용입을 나타내는 경향을 보인다.



Fig. 4.5 Effect of beam defocused distance on penetration depth and weld shape in bead welding



Fig. 4.6 Variation of bead width by defocused distance in bead welding



Fig. 4.7 Variation of penetration depth by defocused distance in bead welding

4.2.2 레이저 출력에 따른 용접특성

(1) 펄스폭에 따른 용접특성

스테인리스강 STS304의 용접시 펄스폭 증가에 따른 용입깊이의 변화를 Fig. 4.8에 그래프로 나타낸다. 일정한 인가전압에서 펄스폭의 증가에 따른 출력에너 지는 크다. 하지만, 피용접재로의 입열량이 상대적으로 적은 경우(3ms)를 제외 하고는 출력에너지가 증가함에 따라 용융깊이는 증가하지 않고 일정한 위치에 서 포화하며, 어스펙트비가 감소하는 경향을 나타낸다. 이것은 레이저 출력 에 너지가 증가함에 따라 피용접재로의 입열량이 증가하고 있으나 상대적으로 피 크파워가 감소하기 때문에 입열량에 비례한 용입깊이가 얻어지고 있지 않는 것 이다. 또한 피크파워는 감소되더라도 입열 에너지가 증가함에 따라 재료 내부 로의 열전도 특성에 따라 용입깊이는 포화하게 되며, 용융면적은 상대적으로 넓어지게 되는 것이다. 이것은 레이저빔의 피크출력이 피용접재의 용입깊이를 지배하는 인자이며, 피크출력이 낮은 출력에너지는 용융비드 폭을 넓히는 인자 임을 보여주는 것이다.



Fig. 4.8 Variation of penetration depth by pulse width

(2) 인가전압에 따른 레이저 용입특성

앞의 결과로부터 용입깊이를 좌우하는 주된 인자가 피크파워라는 사실로 미 루어 볼 때, 일정한 레이저빔 조사시간에서 램프전압을 증가시키면 레이저 출 력에너지와 피크파워가 증가하기 때문에 용입깊이가 깊어질 것이라 사료된다. 인가전압 변화에 따른 용접결과 용입깊이 변화를 *Fig. 4.9*에 나타낸다. 램프전 압증가에 따른 레이저빔의 출력특성에 따라 용입깊이가 급격하게 증가함을 알 수 있다.

레이저빔의 조사시간을 4ms에서 7ms로 증가시킨 경우 전압변화에 따른 용접 결과 용입깊이 변화를 *Fig.* 4.10에 나타낸다. 7ms의 경우도 4ms와 마찬가지로 유사한 경향의 출력특성과 용접결과를 나타내지만, 7ms의 경우에는 4ms와 동 일한 전압에서, 예를 들면 290V일 때, 7ms의 피크파워(870W)가 4ms의 경우 (1,010W)보다 낮지만, 용입깊이는 0.77mm(7ms)로 4ms(0.7mm)보다 깊은 용입을 나 타내었다. 이는 재료로 입열되는 빔에너지의 증가로 인한 것이라고 판단된다.

여기서, 피크파워가 용입을 깊게 하는 주된 인자이지만, 조사시간 증가로 인 해 피크파워가 낮아도 많은 양의 입열 에너지가 재료내로 투여되고 재료의 열 전도와 대류특성에 기인하여 용접부가 넓어지고, 다소 깊어지게 되는 것으로 사료된다.



Fig. 4.9 Variation of penetration depth by lamp voltage



Fig. 4.10 Variation of penetration depth by lamp voltage

4.2.3 대기 및 정적 실드가스 분위기에서의 용접특성

지금까지의 실험에서는 레이저빔의 초점거리와 펄스폭, 인가전압 등과 같은 가공인자를 중심으로 스테인리스강 STS304의 점용접 특성을 검토하였다.

용접중에 비산하는 스패터의 저감 또는 방지를 위한 방법으로써 초점거리 및 펄스폭 등 가공인자의 제어도 가능하겠지만, 실드가스를 이용하여 STS304의 용 접부의 산화현상을 억제함으로써 재료내부에 형성되는 키홀의 거동을 안정화시 키고, 유기되는 플라즈마를 제어하는 것도 매우 효과적인 방법이라고 할 수 있 다.

따라서, 본 절에서는 우선 정적 실드가스 분위기(static shield gas condition) 에서의 용접현상을 고속도카메라 및 슈리렌 시스템을 이용하여 해명함으로써 그 차이점을 비교·검토 하였다.

(1) 대기 및 실드가스 분위기중에서의 용접현상

대기 및 실드가스 분위기 중에서의 용접현상과 용접부 단면을 Fig. 4.11에 나 타내었고, 또한 Fig. 4.12와 Fig. 4.13에 슈리렌 시스템을 통한 대기 및 실드가스 분위기에서의 스패터 및 유기 플라즈마의 발생상황을 비교하였다. 여기서 대기 중에서의 산화현상을 방지하기 위하여 실드가스로써는 N₂가스를 사용하였다.

대기 및 실드가스 분위기에서의 용접현상을 비교해보면, 용접부 비드표면의 산화정도와 용접부 단면형상, 그리고 유기 플라즈마의 형상과 거동에 큰 차이 가 있다. 대기 중에서는 레이저 용접중 증발하는 합금원소의 산화반응에 의해 플라즈마의 거동은 매우 높은 발광강도를 가지고 격렬하게 움직이는 가운데, 소량의 융액이 비산하는 것을 볼 수 있으며, 발광강도 시간도 다소 지속되는 것을 볼 수 있다. 또한 용융부 표면비드에는 산화의 흔적이 뚜렷하고 용융비드 형상은 험핑비드의 완전 관통용입이 되어 있다.

이에 반하여 실드가스 분위기에서는, 가늘고 긴 안정된 플라즈마의 거동을 볼 수 있으며, 깨끗한 표면비드와 부분용입이 얻어졌다. 다시 말하면, 대기중에 서의 산화반응은 그 만큼 격렬하고도 폭발적으로 일어나며, 이러한 현상은 용 응부의 융액을 비산시키면서 레이저빔 에너지 열원에 부가되어 제 2의 열원으 로 작용함으로서 용융깊이는 실드가스 분위기보다 현저하게 깊어지는 것으로 사료된다. 그러나 실드가스 분위기에서는 재료의 산화반응이 억제되어 상대적 으로 플라즈마의 발광강도는 약해지고 짧아지는 것으로 판단된다.

이러한 대기중에서의 산화반응을 실드분위기로 억제하여 용융지내의 키홀과 유기 플라즈마의 거동을 안정시킴으로써 융액의 비산을 방지하는 것이 매우 효 과적이라고 판단된다.



Fig. 4.11 Comparison of welding phenomena in atmosphere and N_2 gas



Fig. 4.12 Schlieren high speed photographs of atmosphere gas by spot welding in air



Fig. 4.13 Schlieren high speed photographs of atmosphere gas by spot welding in N_2 gas

(2) 레이저 출력변화에 따른 용접현상

대기 및 질소 실드가스 분위기에서의 레이저 출력변화에 따른 스패터 및 유 기 플라즈마의 거동과 용융부의 형상변화에 대하여 상호작용 관점에서 비교하 였다.

Fig. 4.14에 대기중과 실드가스 분위기중에서의 레이저 출력변화에 따른 용접 현상을 비교하여 나타낸다. 그리고 그때의 용접부 전면과 이면비드의 폭을 계 측하여 Fig. 4.15에 나타낸다. 대기와 실드가스 분위기에서 레이저 점용접의 유 기 플라즈마와 실드가스의 거동을 슈리렌 시스템으로 촬영하여 Fig. 4.16과 Fig. 4.17에 각각 나타낸다.

Fig. 4.14~Fig. 4.17에서 알 수 있듯이 대기중에서 레이저 출력이 증가함에 따 라 용접부 전면과 이면비드 폭이 증가하고, 용접부 단면은 리벳형상으로 변화 하고 있다. 또한 대기 중의 슈리렌 촬영으로부터 용융부에서 비산하는 스패터 를 관찰할 수 있을 뿐만 아니라 플라즈마의 발광이 출력변화에 비례하여 강도 및 주변 대기의 유동이 증가하는 것을 볼 수 있었으나, Fig. 4.17의 유기 플라 즈마는 대기중의 현상과는 달리 출력에 따른 플라즈마의 발광정도 및 주변 대 기의 유동이 상대적으로 작다는 것을 알 수 있다. 이것은 빔의 에너지밀도가 증가하면서 키홀을 통하여 유기 플라즈마가 전면비드 뿐만 아니라 비드이면으 로도 배출됨으로써, 플라즈마의 재복사열에 의해, 이면비드 폭이 커지고 전면비 드 표면에서의 플라즈마가 다소 작아지는 것으로 판단된다. 이 경우 비드이면 으로 다량의 스패터가 비산될 수 있음을 예상할 수 있다.

그러나, 실드가스 분위기에서의 스패터 및 유기 플라즈마 거동은 빔 에너지 가 증가해도 스패터가 발생하지 않고, 안정적인 플라즈마 거동 및 대기의 유동 을 볼 수 있었다.

이는 대기 중에서의 산화 반응을 최소한 억제했기 때문이라고 판단된다.



Fig. 4.14 Comparison of welding bead shape by laser output energy in atmosphere and N_2 gas



Fig. 4.15 Bead width by laser output energy in atmosphere and shield gas



(a) Voltage=243V



(b) Voltage=250V

Fig. 4.16 Schlieren high speed photographs of atmosphere gas by spot welding in air





Fig. 4.16 To be continued



(a) Voltage=243V



(b) Voltage=250V

Fig. 4.17 Schlieren high speed photographs of atmosphere gas by N_2 gas in spot welding



(c) Voltage=280V

Fig. 4.17 To be continued

4.3 정적 실드가스 분위기 변화에 따른 레이저용접 현상

4.3.1 각종 실드가스 분위기에서의 레이저 유기플라즈마의 거동

동일한 레이저 조사조건에서도 사용하는 실드가스에 따라서 용접중 유기하는 플라즈마의 거동과 융액의 비산현상, 그리고 용융부의 동적 거동과 용융깊이 및 비드형상에는 큰 차이가 있다. 지금까지의 세계 각 국에서 보고된 논문과 보고서를 종합해보면, 용접중 널리 사용되는 가스로서는 Ar, N₂와 He이 있으 며, 가공 목적에 따라서 상기의 혼합가스가 이용되기도 한다. He이 플라즈마 제어와 용입특성 개선에 가장 효과가 있는 것으로 보고되고 있으나, 타 실드가 스에 비해 상당히 고가인 것이 큰 결점이라 할 수 있겠다.

현장실무 차원에서 가장 중요한 것은 실드가스의 사용에 대한 당위성을 현실 적으로 받아들이는 것이다. 이를 위해서는 사용하는 실드가스의 종류에 따른 분자량, 기체의 확산속도, 열전도도 및 이온화포텐셜 등의 물리적 성질을 이해 하고, 이러한 인자들이 용접특성에 미치는 영향과 실드가스로서의 사용한계를 숙지하여 제각기 다른 용접환경과 사용조건에서 최적의 가스를 선택할 수 있는 전문적인 지식을 가져야 할 것이다. 따라서, 우선 본 항에서는 용접현상을 비 교·검토하기 위하여 각 실드가스 조건에서의 유기 플라즈마 거동을 고속도카 메라 및 슈리렌 시스템으로 관찰하여 그 거동을 분석하였다.

Fig. 4.18~Fig. 4.25에서 유기 플라즈마의 거동을 비교해보면, 대기중인 Fig. 4.18과 Fig. 4.19의 경우 높은 발광강도를 가지며 스패터의 비산과 함께 격렬한 시간적 변화와 주변가스의 급속한 팽창을 보이고 있는데 반하여, Fig. 4.20~ Fig. 4.25의 각종 실드가스 분위기에서는 Ar>N₂>He 가스의 순서로 플라즈마 강도는 상대적으로 약해지며 그 크기는 점차 작아지면서, 시간적 변화에 따라 안정적인 거동을 보일 뿐만아니라 주변가스의 팽창속도가 점점 작아지다가 He 분위기에서는 가스의 유동이 거의 보이지 않았다. 이러한 현상은 각 실드가스 가 가지고 있는 고유의 물리적인 성질, 즉 각종 가스의 분자량, 밀도와 열전도 도, 그리고 이온화 포텐셜이 다르기 때문이라고 판단된다.



Fig. 4.18 Behaviors of laser-induced plasma in air



Fig. 4.19 Schlieren high speed photographs of atmosphere gas by spot welding in air



Fig. 4.20 Behaviors of laser induced plasma in Ar shield



Fig. 4.21 Schlieren high speed photographs of atmosphere gas on Ar gas in spot welding



Fig. 4.22 Behaviors of laser induced plasma in N2 shield

Spot welding, Voltage; 243V, $\tau_p = 12.5 \text{ms}$, $f_d = 0 \text{mm}$ Atmosphere gas; N_2 , $v_p = 1,000 \text{FPS}$								
Laser Glass beam Specimen Table	ł	-8						
Schematic	t+0ms	t+1ms	t+2ms	t+3ms	t+4ms			
	*		-		T			
t+5ms	t+6ms	t+7ms	t+8ms	t+9ms	<i>t</i> +10ms			
	R							
<i>t</i> +11ms	<i>t</i> +12ms	t+13ms	t+14ms	t+15ms	<i>t</i> +16ms			

Fig. 4.23 Schlieren high speed photographs of atmosphere gas on N_2 gas in spot welding



Fig. 4.24 Behaviors of laser induced plasma in He shield



Fig. **4.25** Schlieren high speed photographs of atmosphere gas on He gas in spot welding

4.3.2 각종 실드가스와 레이저출력변화에 따른 레이저용접 현상

각종 실드가스 분위기 변화에 따른 유기 플라즈마의 거동분석과 재료적 측면 에서 용접부에 형성되는 비드의 형상을 비교·분석하였다.

Fig. 4.26에는 동일한 레이저 출력 6.84J/p의 조사조건에서 얻어진 대기 중과 각 실드가스 분위기에서의 용접부 단면과 그 때의 유기 플라즈마의 대표적인 정지화상을 나타내며, 그 때의 용접부 비드폭과 용입깊이의 변화를 Fig. 4.27에 나타낸다.

Fig. 4.26에서 알 수 있듯이 대기중에서는 용접비드 외관은 산화되었고, 험핑 비드를 형성하면서 완전 관통용접이 이뤄지고 있다. Fig. 4.28(a)에 나타낸 것과 같이 대기중의 유기 플라즈마는 다른 실드가스 분위기에 비해 강한 발광강도를 가지며 주변의 가스 또한 격렬하게 거동하고 있음을 볼 수 있다. 이러한 현상 은 대기 중에서의 폭발적인 산화반응에 의해 플라즈마가 격렬하게 거동하게 되 고, 용접열원인 레이저빔 에너지 이외에도 산화반응열이 제 2의 열원으로 작용 하여 용접부에 보다 많은 에너지를 전달함으로써, 용접부의 융액을 비산시켜 스패터를 유발시키고 결국 험핑비드를 형성시키게 된 것으로 판단된다.

실드가스 분위기에서는 모두 유사한 깊이의 부분용입를 나타내고, 비드 표면 은 산화되지 않았으며, 비드폭이 넓은 와인컵 형상의 비드를 나타내고 있다. Ar, N₂, He 순으로 유기 플라즈마의 발광강도가 약해지며, 안정적인 거동을 보 이고 있다. 이는 대기중의 격렬한 산화반응이 수반되지 않기 때문에 안정되고 양호한 용접결과를 나타낸 것으로 판단된다.

Ar의 경우 가스의 분자량은 40이고 비중이 1.38로 크고, 기체의 확산속도와 열전도도(0.427째/cm°K)도 다른 가스보다 낮기 때문에 유기되는 플라즈마는 열 을 축적하는 결과를 초래함으로서 기하급수적으로 레이저빔 에너지를 흡수하여 플라즈마는 고온의 높은 발광강도를 가지게 된다. 더욱이 이온화 포텐셜이 15.7eV로 다른 가스보다 상대적으로 낮아서 높은 레이저 출력의 경우에는 이온 화되기도 쉬워 그 온도와 발광강도는 더욱 커지게 되는 것이다.

그러나, 상대적으로 비중이 작고 열전도도가 큰 N2, He의 경우, 기체팽창이

쉽고 열전도성이 좋아 플라즈마가 형성되었다 하더라도 열을 축적하는 효과가 적으므로 그 물성의 차이만큼 발광강도와 그 크기는 점차 작아지게 된다. 그러 나, 피용접재의 표면에서 플라즈마에 의한 재복사열로 인하여 용융부 표면은 내부보다 넓게 용융되어 얕고 폭이 넓은 와인컵 형상에 유사한 비드가 형성되 는 것으로 사료된다.

각 단계별 출력 변화시 펄스 빔 에너지(J/p)의 선정은, 보편적으로 사용되는 실드가스인 Ar, N₂, He의 분위기에서 용접시, 재료내부에 형성되는 부분용입 용접조건(6.84J/p)과 재료의 관통이 이루어지기 시작하는 용입조건(8.77J/p), 그 리고 완전한 관통용입 용접조건(12.64J/p)에서 각각의 용접특성을 비교하기 위 하여 근소한 에너지 차이를 두고 이루어졌다. 8.77J/p 경우의 용접결과를 Fig. 4.29과 Fig. 4.30에 나타내고, 그때의 슈리렌 촬영 사진을 Fig. 4.31에 나타낸다. 또한 12.64J/p에 대한 용접결과를 Fig. 4.32와 Fig. 4.33에 각각 나타내고, 그때 의 슈리렌 촬영 사진을 Fig. 4.34에 나타낸다.

레이저 출력을 6.84J/p에서 8.77J/p과 12.64J/p로 증가시켰을 때의 결과를 각 각 비교해 보면, 전체적인 용접현상의 추이는 레이저 출력 6.84J/p일 때의 경우 와 유사한 경황을 보이고 있음을 알 수 있다. 단지 8.77J/p의 조사조건인 Fig. 4.29와 Fig. 4.30의 결과로부터 용접 전면 비드 폭은 유사하다 하더라도 그 모양 은 제각기 다른 양상을 보이고 있는데, 이것은 조사되는 레이저빔과 유기 플라 즈마, 그리고 재료와의 물성변화에 따른 상호작용에 기인한 것이다. 또한, 12.64J/p로 빔 출력 증가 시에는 Fig. 4.32와 Fig 4.33에서 알 수 있듯이, 비드형 상은 리벳이음을 한 모양을 하고 있으며, 이것은 빔 에너지 출력증가로 재료내 부에 형성되는 키흘이 이면으로 강하게 관통되고, 그 키흘을 통하여 재료표면 으로 분출하던 플라즈마가 비드 표면과 이면으로 동시에 분출됨에 따른 간접적 인 열복사와 재료표층부에서의 양호한 열전도 성질에 기인한 것으로 판단된다.

Fig. 4.32(a)에 나타내는 대기 중 산화 분위기의 경우, 그 이외의 용접비드 형 상에 비해 다소 직선적인 것은 Fig. 4.34(a)의 슈리렌 촬영 결과로부터 산화반응 을 수반하면서 격렬하게 유기하는 플라즈마와 에너지가 재료내부로 강하게 전 달된 결과라고 볼 수 있다. 또한 레이저 출력 증가에 따른 유기 플라즈마의 거 동은 실드 분위기와는 달리 대기중에서 강한 융액의 비산현상이 수반되고 있는 데, 이 또한 산화반응에 의한 결과로 추정된다.



Fig. **4.26** Comparison of weld bead shape and induced plasma by shield gas species (output energy : 6.84J/p)



Fig. **4.27** Variation of penetration depth and bead width by shield gas species (in Fig. 4.26)



(a) In air



⁽b) Ar gas

Fig. **4.28** Schlieren high speed photographs of atmosphere gas by spot welding in each shield gas



(c) N_2 gas



(d) He gas Fig. 4.28 To be continued



Fig. 4.29 Comparison of weld bead shape and induced plasma by shield gas species (output energy : 8.77J/p)



Fig. **4.30** Variation of front bead width and back bead by shield gas species (in Fig. 4.29)



(a) In air



⁽b) Ar gas

Fig. 4.31 Schlieren high speed photographs of atmosphere gas by spot welding in each shield gas



(c) $N_2\ gas$



(d) He gas Fig. 4.31 To be continued



Fig. 4.32 Comparison of weld bead shape and induced plasma by shield gas species (output energy : 12.64J/p)



Fig. **4.33** Variation of penetration depth and bead width by shield gas species (in Fig. 4.32)



(a) In air



⁽b) Ar gas

Fig. 4.34 Schlieren high speed photographs of atmosphere gas by spot welding in each shield gas



(c) N_2 gas



(d) He gas Fig. 4.34 To be continued

4.3.3 정적 실드가스에 의한 스패터 발생

레이저 출력을 증가시킴에 따라 용접분위기에 따른 용접비드의 형상변화와 플라즈마 거동에 대하여 검토하였으며, 그 가운데 대기중 유기 플라즈마에는 많은 융액의 비산현상이 관찰되었으나 실드가스 분위기에서는 현저히 줄어든 양상을 볼 수 있었다. 그러나, 레이저 조사에너지가 동일하다 하더라도 용접 분 위기에 따라 크게 용접현상이 다를 수 있기 때문에, 스패터(spatter)의 발생상황 을 서로 비교·분석하기에는 그 용용깊이가 서로 달라서 정의하기가 어려웠다. 그래서, 대기중과 대표적인 실드가스(N₂) 분위기에서, 양자 모두 유사한 용융깊 이가 얻어지는 출력조건을 선정하여 그때의 스패터의 발생상황에 대하여 서로 비교·검토하였다.

Fig. 4.35(a), (b) 그리고 (c)에는 대기와 질소 실드가스분위기 중의 유사한 용 입깊이를 갖는 각각의 레이저 조사조건에서, 즉 부분용입과 관통용입 그리고 완전 관통용입조건에서의 용접비드 현상과 플라즈마 거동 및 스패터 발생상황 을 비교하여 나타낸다. 비슷한 용융깊이를 가지는 조건임에도 불구하고 대기중 에 비해 레이저빔 출력에너지가 훨씬 높은 실드가스 분위기에서 스패터의 발생 이 현저히 감소하고 있음을 알 수 있다. 이는 대기중에서의 산화반응을 억제시 키고 오직 레이저 에너지만에 의한 용접이 이루어지기 때문이라고 판단된다.

그러나, 대기중인 Fig. 4.36과 N₂ 분위기인 Fig. 4.37의 슈리렌 촬영 결과는 플라즈마의 강도와 관계없이 주변 가스가 비슷한 팽창 거동을 보인다. 이는 대 기중의 레이저조사 조건이 N₂ 분위기 중의 레이저조사 조건보다 출력이 낮아도 산화반응열에 의한 추가적인 입열로 주위에 미치는 영향이 비슷하기 때문이라 고 사료된다.

따라서, 용접중 부가적인 열원으로 추가되는 산화반응열은 그 제어가 어렵고, 그 반응은 급격하고 폭발적으로 진행됨에 따라 융액의 비산현상은 피할 수 없 다. 용접품질관리 측면에서 볼 때, 용접중 실드 분위기를 조성해서 레이저 용접 시의 산화반응에 의한 부가적인 인자를 배제시키고 레이저빔 에너지만에 의한 제어가 이루어지게 함으로써 좋은 용접품질을 얻을 수 있는 것이다.

• Bead on plate spot welding, STS 304 (0.6 mm^{t}) • Pulse width : 20ms, $f_{d}=0$							
Condition		Front bead		Cross	Cross section		
220V, 5.18J/p In air							
High	n speed o	came	era still pictu	ares, $n_{\rm f} = 600$	OFPS		
á.	•		٠	:0	` ë		
1	2		3	4	5		
∳					\$		
6	7		8	9	11		
Condition		Front bead		Cross section			
240V, 8.49J/p Shield gas (N ₂)							
High speed camera still pictures, $n_{\rm f}$ = 600FPS							
•	6		•	ŕ	•		
1	2		3	4	5		
١	ì		١	1	i		
7	7 8		10	11	12		



Fig. 4.35 Spattering situation in air and static shielding $condition(N_2)$

• Bead on plate spot welding, STS 304 (0.6 mm^{t}) • Pulse width • 20ms, $f_{d}=0$							
Condition		Front bead		Cross	Cross section		
225V, 5.89J/p In air		0					
High	n speed o	came	era still pictu	ares, $n_{\rm f} = 600$	OFPS		
			•				
1	2		3	4	5		
•	•			•	•		
6	8		10	11	12		
Condition		Front bead		Cross section			
250V, 10.23J/p Shield gas (N ₂)			Q				
High speed camera still pictures, $n_{\rm f}$ = 600FPS							
4	à			٠.	x		
1	2		3	4	5		
6	6 7		8	10	12		
	,		\$	V			



Fig. 4.35 To be continued
• Bead on plate spot welding, STS 304 (0.6 mm^{t})					
Condition		Frank hard	Crease evelier		
230V, 6.7 In ai	r				
High	n speed ca	mera still pictu	ares, $n_{\rm f}$ = 600	OFPS	
		. ∳ r		•	
1	2	3	4	5	
•	- • D - ` ∳ •			- - 1	
6	7	8	10	12	
Conditi	ion	Front bead	Cross	section	
260V, 12.24J/p Shield gas(N ₂)					
High speed camera still pictures, $m_{\rm f}$ = 600FPS					
	٠	۰.	(.	N ² .	
1	2	3	4	5	
1.		•		1	
6	7	8	10	12	

(c) Drop out

Fig. 4.35 To be continued



(a) voltage : 220V



(b) voltage : 225V







Fig. 4.36To be continued



(a) voltage : 240V





Fig. 4.37 Schlieren high speed photographs of atmosphere gas by spot welding in N_2 gas

Spot welding	ing, Voltage; $260V$, $\tau_p=20.0ms$, $f_d=0mm$				
Atmosphere gas; N_2 , $v_p=1,000$ FPS					
Laser Glass beam Specimen Table	Y	P	*	-	9
Schematic	t+0ms	t+2ms	t+4ms	t+6ms	t+8ms
-	-	P			
<i>t</i> +10ms	<i>t</i> +12ms	<i>t</i> +14ms	<i>t</i> +16ms	<i>t</i> +18ms	<i>t</i> +20ms
<i>t</i> +22ms	<i>t</i> +24ms	<i>t</i> +26ms	<i>t</i> +28ms	<i>t</i> +30ms	<i>t</i> +32ms





4.4 동적 실드가스 분위기에서의 용접현상

일반적으로 현장에서의 용접부 실드방식은 전체를 실드하기에는 가스소비량 이 많아지게 되고, 환경적 요인 등으로 인해, 일반적으로 정적(static) 실드방식 보다는 노즐(nozzle)을 이용해서 국부적으로 용접부만 실드하는 동적(dynamic) 실드방식이 채택되고 있다. 이러한 동적 실드방식 적용에 있어서 가스의 유량 과 유속에 따른 융액의 대류 및 유기 플라즈마의 유동특성이 상당히 변화하게 된다. 아울러 노즐의 내경(d), 가스 분사각도 및 분사위치(r)에 따라서도 용접특 성에 영향을 미친다.

본 항에서는, 정적실드 분위기에서의 결과를 기초로 하여, 제 3장의 Fig. 3.7 에 나타낸 것과 같이 동적실드 분위기에서의 용접시 실드가스 노즐의 주 지배 인자인 노즐직경(d), 분사위치(r), 분사각도(a), 가스유량(Q) 등에 의한 용접성에 미치는 영향을 고속도카메라 및 슈리렌 유동가시화 기법으로 관찰·검토하였 다.

4.4.1 실드가스 노즐의 직경에 따른 레이저용접 현상

실드가스는 현재 산업현장에서 많이 적용하고 있는 질소(N₂) 가스를 이용하 였으며, 실드 노즐각도(*a*)는 많은 연구 보고서 및 논문의 분석결과에서 권장하 는 바와 같이 40°로 고정시켜 레이저 조사부위의 오른쪽에서 분사하였다.

먼저 질소(N₂) 가스의 유량을 25ℓ/min로 일정하게 유지한 후 내경 2mm ∅, 4 mm ∅, 6mm ∅, 8mm ∅ 및 10mm ∅의 노즐에 따른 점용접 결과를 Fig. 4.38에 나타내 었으며, 또한 이 노즐들을 사용한 점용접시의 슈리렌시스템 관찰결과를 Fig. 4.39에 나타내었다.

Fig. 4.38에 나타낸 것과 같이 2mm ∅와 4mm ∅의 노즐 이용시, 다량의 스패터 가 발생하였으며, 용접부의 비드표면에 산화흔적과 함께 험핑비드가 형성되었 다. 또한 재료내의 용접비드의 단면형상은 가스 분사방향과 반대 방향인 왼쪽 으로 기울어져 나타나고 있다.

이러한 현상은 Fig. 4.39(a)와 (b)에 나타낸 것과 같이 2mm Ø와 4mm Ø의 노즐 이 실드가스를 빠른 유속으로 분사하기 때문에 용융지의 융액이 실드가스의 분 사압력에 영향을 받은 것으로 보이며, 가스의 유동 또한 플라즈마의 영향에 따 른 팽창과 동시에 빠른 속도로 밀려 나가는 것을 알 수 있다.

그러나, 빠른 유속은 플라즈마를 조기에 안정화시키는 것과 동시에 베르누이 정리에 따라 유선 주위의 압력은 하강하면서 와류를 수반한다. 이 때 주변의 대기는 용융지 주위로 몰리고 와류에 의해 실드가스 내로 일부 대기가 유입되 어 산화를 일으킨 것으로 사료된다.

8m Ø 및 10m Ø 의 노즐은 용접부를 실드하기는 하나, 느린 유속에 의해 플 라즈마 및 그에 따른 증발가스를 효과적으로 제어하지 못하는 것으로 판단된 다. 즉, 용융지에 가스의 유속이 영향을 미친 결과라고 여겨진다. 이것은 융액 의 대류와 열전도 현상, 그리고 스패터 발생 및 유기 플라즈마의 거동에 실드 가스가 큰 영향을 미치고 있음을 의미한다.

반면에, Fig. 4.39(c)의 6mm ∅ 노즐 이용시 용융단면은 대칭형의 건전한 비드 를 보이고 있다. 또한 비드표면의 산화현상은 거의 일어나지 않았으며, 용접성 과 스패터발생 억제 및 플라즈마 거동도 비교적 안정된 형상을 나타내고 있다. 상기 실험결과로부터 노즐 직경에 따른 실드가스의 유속이 재료의 용접성과 품질에 있어서 중요한 지배인자중 하나로 작용하고 있음을 알 수 있다.

• Bead on plate spot welding, STS 304 (0.6mm ^t)				
• Condition: 241V, $\alpha = 40^{\circ}$, $\tau_{p} = 20$ ms, 8.45J/p, $f_{d} = -1$, N ₂				
Shield cond.		Appearance	Cross section	
	2mm <i>ø</i>			
	$4\mathrm{mm}~\phi$	()		
Q= 25ℓ/min	6 mm ϕ	0		
	8mm Ø	0		
	10mm Ø			

Fig. **4.38** Variation of weld bead shape and plasma by shielding condition



(a) d=2mm ϕ



(b) d=4mm ∅

Fig. 4.39 Schlieren high speed photographs of shield gas on each nozzle diameter in spot welding



(c) d=6mm ϕ



(d) d=8mm φ

Fig. 4.39 To be continued



(e) d=10mm ∅

Fig. 4.39 To be continued

4.4.2 실드가스 유량변화에 따른 레이저용접 현상

본 절에서는 일반적으로 많이 사용되는 질소(N₂) 실드가스 사용시 유량변화 에 따른 용접현상을 비교·분석하여 가장 적절한 가스량을 선정함으로써 양호 한 용접품질과 가스소비량을 최소화하기 위해서이다.

실험조건으로는 지금까지의 실험결과 얻어진 최적의 조건 즉, 노즐직경(d)은 6mm Ø, 노즐각도(α)는 40°, 그리고 노즐위치는 용접점으로부터 반경(r) 13mm로 고정하였다.

Fig. 4.40의 비드표면과 용접단면에서 알 수 있듯이 유량이 5ℓ/min일 때에는 용접시 스패터와 함께 산화현상이 다소 수반되지만, 15ℓ/min와 25ℓ/min인 경 우에는 산화반응이 수반되지 않은 양호한 용접결과를 얻을 수 있었다. 또한 Fig. 4.41(a)의 슈리렌 촬영 사진에 나타낸 것과 같이 유량 5ℓ/min일 때에는 플 라즈마 및 그에 따른 증발가스가 실드가스의 흐름에 거의 영향을 받지 않는 것 을 관찰할 수 있었다.

그러나, Fig. 4.41(b)와 (c)에 나타낸 15ℓ/min와 25ℓ/min인 경우에는 적절한 증발가스의 제거와 플라즈마의 제어가 이루어지고 있는 것이 확인되었다. 즉, 적절한 실드가스 장치의 셋업시 일정 이상의 실드가스는 용접결과에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.

그러나, 실험재료인 STS304 박판(薄板)의 경우에는 상기와 같은 현상이 발생 하였지만, 고온의 플라즈마가 유기되는 고출력의 후판(厚板) 용접과 비교할 때, 후판의 경우 플라즈마의 전리정도가 크기 때문에 상황이 크게 다를 수도 있을 것으로 사료된다. 따라서, 최적의 용접조건을 선정하기 위해서는 사용되는 실드 가스의 유속에 따른 유량을 세밀하게 검토·조정하여야 함을 알 수 있다.

· Bead on plate spot welding, STS 304 (0.6mm ^t)						
• Condition: 241V, 20ms, 8.45J/p, f_d =-1						
· Atmosphere /	· Atmosphere / Shield gas: N ₂ , d=6mm ϕ , α =40°, r=13mm					
Condition	Appearance	Cross section	Still picture			
(a) Q=5ℓ/min						
(b) Q=15ℓ/min			•			
(c) Q=25ℓ/min	0		¢			

Fig. 4.40 Comparison of weld bead shape and spattering in air and dynamic shield condition



(a) Q=5 ℓ /min



⁽b) Q=15 ℓ /min

Fig. 4.41 Schlieren high speed photographs of shield gas on each flow rate in spot welding



(c) $Q=25 \ell / min$

Fig. 4.41 To be continued

4.4.3 실드가스 거리에 따른 레이저용접 현상

가스노즐의 위치변화에 따른 레이저 점용접부와 실드가스 사이에 미치는 영 향에 대해서 검토한 결과, Fig. 4.42의 비드외관 및 단면형태에서 나타낸 것과 같이 노즐 위치(r)를 용접점으로부터 13㎜에서 16㎜, 19㎜ 및 21㎜로 각각 이동 하였을 때, 최적의 조건인 r=13㎜에서는 건전한 비드가 형성되었지만, 거리가 멀어짐에 따라 비드외관이 산화되는 경향을 보였다.

또한, Fig. 4.43에 나타낸 것과 같이 건전한 용접상태를 보인 (a)의 r=13mm로 부터 노즐의 거리가 멀어질 수록 유기 플라즈마의 휘도는 점차 밝아지는 것을 확인할 수 있으며, (d)의 r=21mm에서는 다량의 스패터가 수반되는 것이 확인되 었다. 즉, 이는 분사거리에 따른 유속의 감소 및 용접부와 노즐 사이의 대기가 영향을 미친 것으로 사료된다.

따라서, 형상의 변화가 큰 경우나, 정밀부품의 적용에 있어서는 더욱 정확한 분사위치 및 거리가 요구되며, 피용접재료의 형상인자를 고려하여 적용하여야 할 것이다.

• Bead on plate spot welding, STS 304 (0.6mm ^t)					
• Condition: 241V, 20ms, 8.45J/p, f _d =-1					
• Shield gas: N ₂ , d=6mm ϕ , α =40°					
Condition	Appearance Cross section				
(a) r=13mm	0				
(b) r=16mm	3				
(c) r=19mm	0				
(d) r=21 mm					

Fig. 4.42 Comparison of weld bead shape and cross section on each distance from welding point



(a) *r*=13mm



(b) r=16mm

Fig. **4.43** Schlieren high speed photographs of shield gas on distance between welding point and nozzle in spot welding



(c) *r*=19*mm*



(d) *r*=21*mm Fig.* **4.43** To be continued

4.4.4 실드가스 분사각도에 따른 레이저용접 현상

레이저 용접점을 향해 실드가스 분사시 그 각도는 약 40°로 권장되고 있는데, 이때 각도가 너무 작거나 크면 재료 내부에 형성되는 키홀과 융액의 거동에 직 접적으로 영향을 미쳐 결함을 야기시킨다. 본 절에서는 일반적인 용접현장의 상황을 고려하고 여러 변수를 감안하여 그 적정여부를 검토하였다.

실드가스 노즐의 분사각도(α) 변화에 따른 용접부의 비드형상, 비드폭 및 플 라즈마의 거동을 Fig. 4.44에 나타낸다. 또한 슈리렌시스템에 의한 분사각도 변 화에 따른 용접현상을 Fig. 4.45에 나타내었다.

Fig. 4.44에서 알 수 있듯이 용접부는 실드가스의 영향으로 산화되지 않았으 며, 비드 폭은 각도를 증가시킴에 따라 미소하게 증가하는 경향을 보이고 있다. 그러나, 노즐각도 20° 및 60°의 경우 비드외관은 오손되었다. 또한, Fig. 4.45(a) 와 (b)에서 보이는 것과 같이 낮은 각에 의해 수직으로 플라즈마를 제어하는 것 같으나, 오히려 용융지에 영향을 미쳐 Fig. 4.44의 플라즈마 사진에서와 같이 스패터를 유발하였다.

그리고 고각으로 분사하는 Fig. 4.45(d)의 경우에는 유기 플라즈마와 실드가 스의 분사각도의 차가 작아져 플라즈마 및 증발가스를 효과적으로 제어하지 못 하고 결함을 유발하는 것으로 보인다.

따라서, 스패터의 발생정도는 $\alpha = 0^{\circ} > 20^{\circ} > 60^{\circ} > 40^{\circ} 순으로 적게 나타났으며, 이$ 것은 실드가스의 분사각도가 너무 작거나 클 경우 가스압력이 용융액을 비산시키기 쉬운 것을 의미한다. 이러한 현상은 다량의 가스유량 유입시에도 유사하게 나타났으며, 특히 aspect ratio(용융깊이/비드폭)가 큰 후판의 용접인 경우재료내부에 기공과 같은 결함을 발생시키기 쉬운 결과를 초래할 수도 있는 것이다.

· Bead on plate spot welding, STS 304 (0.6mm ^t)						
• Condition: 241V, 20ms, 8.45J/p, f_d =-1						
· Shield gas	• Shield gas : He, Q= 25ℓ /min, d=6nm ϕ , r= 13mm					
Nozzle angle (α)	Appearance	Cross section	Still picture			
0°			·.			
20°	0		i			
40°	۲		•			
60°						

Fig. 4.44 Comparison of weld bead shape and plasma by nozzle angle regulation



(a) $\alpha = 0^{\circ}$



⁽b) $\alpha = 20^{\circ}$

Fig. 4.45 Schlieren high speed photographs of shield gas on each nozzle angle in spot welding



(c) $\alpha = 40^{\circ}$



(d) $\alpha = 60^{\circ}$ *Fig.* 4.45 To be continued

4.4.5 실드가스 종류에 따른 레이저용접 현상

본 절에서는, 일반적으로 널리 사용되는 N₂ 가스와 Ar 및 He 가스 사용시의 용접현상을 비교·분석하여 실드가스로서 가장 적절한 가스 종을 선정하고자 하였다.

Fig. 4.46은 가스 노즐을 이용하여 실드 분위기를 조성할 때, 실드가스 종류 에 따른 용접비드 외관과 형상의 변화를 나타내며, Fig. 4.47은 각종 실드가스 종류에 따른 유기 플라즈마의 상태를 나타낸다.

본 실험은 지금까지의 실험결과 얻어진 최적의 조건을 적용하여 점용접을 실 시하였다. 즉, 노즐각도(α)는 40°, 노즐직경(d)은 6mm Ø, 그리고 노즐위치(r)는 용접점으로부터 반경 13mm의 위치에 고정하였으며, 가스유량(Q)은 25ℓ/min의 조건에서 Ar, N₂, 및 He을 실드가스로 사용하였다.

그러나 지금까지의 실험결과에서 도출해 낸 최적의 용접조건을 선택하였다 하더라도 가스의 종류별로 조금씩 다른 현상이 나타나는 것을 Fig. 4.48의 슈리 렌 촬영 사진으로 알 수 있었다.

Ar의 경우 일부 산화현상이 일어나고 있는 반면 He의 경우, Ar과 N₂ 실드가 스에 비해 매우 양호한 용접결과가 얻어 졌다. 결과적으로 최적의 용접품질을 얻기 위해서도 실드가스의 종류가 크게 기인한다는 것을 잘 알 수 있다.

이러한 현상이 일어나는 원인은 우선, 레이저 빔과 유기 플라즈마, 유기플라 즈마와 재료, 그리고 레이저 빔과 재료라는 3자간의 복합적인 상호작용도 고려 될 수 있으나, 소출력의 용접조건의 경우 3장의 Table 3.4에 나타낸 것과 같이 실드가스의 물성 중 각 가스의 비중에 영향을 받은 것으로 사료되나 각 기체의 분자량과 확산속도도 용접에 미치는 영향이 매우 크다고 판단된다. 즉, 각 가스 의 비중(specific gravity)은 Ar(1.38)>N₂(0.9676)>He(0.1389)의 순이고, 분자량도 Ar(40)>N₂(28)>He(4)의 순으로 큰 차이를 보이며, 이에 따른 기체의 확산속도는 He>N₂>Ar 순으로 반비례하고 있다.

이는 정해진 직경을 가진 노즐을 이용하여 특정위치에서 실드가스를 용접점 까지 분사했을 때 용접점에서의 산화여부와 그 정도(程度)는, 각 가스가 용접점 까지 대기중의 공기를 헤치고 충분히 도달할 것인지 그리고 도달하더라도 그 유속이 빨라 주위의 공기를 끌어들여 오히려 산화를 유발시킬 지를 결정하는 것은 역시 각 가스가 가진 특성이라 판단된다.

Fig. 4.47과 Fig. 4.48은 Fig. 4.46의 조건으로 용접했을 때의 유기 플라즈마 거동과 스패터의 발생상황 및 실드가스의 유동을 나타낸다. 유기 플라즈마의 크기와 스패터의 발생정도는 (a)Ar>(b)N₂>(c)He의 순으로 나타났으며, 이 경우 고려되어야 할 주 인자는 물론 용접부의 산화정도가 고려되어야 하겠으나 각 가스가 가진 열전도도의 차이가 또 하나의 주 지배인자가 된다. 여기서 이온화 포텐셜(eV)은 이와 같은 소출력의 레이저인 경우 우선 고려하지 않아도 될 것 으로 사료된다.

부언하자면, 각 가스의 열전도도(thermal conductivity at 1000°K)의 크기는 He(3.63)>N₂(0.61)>Ar(0.427)의 순서인데, 상기의 특성과는 반대의 경향을 나타 낸다. 이러한 물성으로 미루어 볼 때, 단원자 분자인 He과 같이 비중과 분자량 이 상대적으로 작으면 대기 중으로의 팽창이 용이하게 되고 플라즈마로부터의 열을 빼앗아 달아나는 효과, 다시 말하자면 플라즈마의 냉각효과가 커서 플라 즈마 온도와 크기는 상대적으로 낮고 작아지는 것이며, 안정한 거동을 보이게 되어 비산현상도 줄어든다고 볼 수 있다. Ar은 He에 비해서 상대적으로 무거 워서 대기 중으로의 확산이 어렵기 때문에 플라즈마가 용이하게 형성되고 열을 품고 정체하게 된다. 따라서 플라즈마의 냉각효과는 저하하여 플라즈마가 다소 크고, 온도도 높게 될 뿐만 아니라 융액의 비산을 억제하는 효과가 He 보다 작 게 된다고 사료된다.

이러한 각 가스에 따른 냉각효과는 대출력 레이저인 경우 그 영향은 더욱 커 지며, 심지어 특정 실드가스의 사용을 완전히 배제하여야 하는 경우도 있다.



Fig. 4.46 Variation of bead appearance and bead cross section shape by shield gas species

· Bead on plate spot welding, STS 304 (0.6 mm^{t})						
• Condition: 241V, 20ms, 8.45J/p, f _d =-1						
· Q= 25 ℓ /min, α = 40°, d= 6mm ϕ , r= 13mm						
Condition	Condition High speed camera pictures, $n_{\rm f}$ = 600FPS					
	ť	,	¢	÷		
(a)	1	2	3	4	5	
Ar shield	648 m	2 * :		#3	•	
	F	¥7	đ.	τ.	¢.,	
	6	7	8	9	10	
	4	*	ě			
(b)	1	2	3	4	5	
N ₂ shield	- N. A.		6 ^{- 1}	<i>.</i>	4 · ·	
	6	7	8	9	10	
	£	4		+	÷	
(c)	1	2	3	4	5	
He shield	÷	÷		•	•	
	6	7	8	9	10	

Fig. 4.47 Situation of laser-induced plasma and spattering in shield gas species



(a) Ar gas



⁽b) N₂ gas

Fig. 4.48 Schlieren high speed photographs of shield gas on kind of gas in spot welding



(c) He gas

Fig. 4.48 To be continued

5. 결론

대다수의 압력용기와 정밀부품의 재료로 사용되고 있는 스테인리스강 (STS304)을 이용하여 펄스 Nd:YAG 레이저 점용접시의 빔 출력특성과 초점거 리 등의 가공인자에 따른 용접특성을 파악하고, 고속도 카메라와 슈리렌시스템 을 이용하여 가시화함으로써 그 때 수반되는 용접현상을 분석하였다.

- 일반적으로 STS304는 현장에서 경제성 등의 이유로 기존 저항용접 등에 많 이 의존하고 있으나, 박판(薄板)의 경우 소출력의 레이저 용접에 의해 양호한 용융 특성을 보이고 있음을 알 수 있었으며, 또한 최적의 가스실드 조건에서 제품의 품질이 더욱 우수하다는 것을 알 수 있었다.
- 2. 펄스 Nd:YAG 레이저빔의 기본 출력특성은 여기램프 전압을 상승시킬수록, 그리고 조사시간을 길게 할수록 비례하여 증가하였으며, 펄스빔의 첨두출력 (peak power)은 동일 인가전압에서 레이저 조사시간을 짧게 할수록 크게 된 다. 또한, 레이저빔의 첨두출력은 피용접재의 용융깊이를 지배하는 인자이며, 출력에너지는 용융비드폭이 넓어지게 되는 인자임을 확인하였다. 아울러, 초점거리 변화에 따른 용접성 평가에서 초점위치에서 가장 깊은 용 입을 얻을 수 있었고, (+)비초점 영역보다는 (-)비초점 영역으로 갈수록 비드 천이에 의해 깊은 용입 용접이 되었다.
- 3. 레이저 용접시 대기상태에서의 산화반응은 용접부위를 산화시킬 뿐만 아니 라 레이저빔 에너지 이외에 제 2의 열원으로 작용하여 용입은 깊어지고, 스 패터를 유발시키며 험핑비드를 형성시킨다. 그러나, 불활성의 실드가스 분위 기에서는 산화반응이 억제되어 플라즈마의 거동은 안정화되고, 스패터의 발 생은 상당량 저감 또는 억제되었다. 이로 인해 재료의 용접시 산화되지 않은 용접비드가 얻어졌다.

- 4. 동일한 레이저 조사조건에서도 사용하는 실드가스에 따라 유기 플라즈마의 거동과 용입깊이 및 비드형상에 큰 차이를 나타내었다. 이는 각 가스의 분자 량과 비중, 열전도도, 이온화 포텐셜(또는 분자의 해리 포텐셜) 및 확산속도 (그레이엄의 기체확산속도법칙: 기체의 확산속도는 기체 분자량의 제곱근에 반비례하고, 밀도의 제곱근에 반비례 함)의 차이에 기인하기 때문이다. 또한, 각 실드가스 분위기에서 Ar>N₂>He 가스의 순서로 플라즈마 강도는 상대적으로 약해지고, 점차 안정적인 거동을 보였으며, 용접부의 산화정도도 급속히 줄어 들었다.
- 5. 대기중과 실드가스 분위기에서는, 거의 비슷한 용융깊이를 가지는 레이저 조 사 조건임에도 불구하고 대기중에 비해 실드가스 분위기에서 스패터의 발생 이 현저히 감소한다. 이것은 대기중에서의 산화반응이 폭발적이고 격렬하게 일어남에 따라 융액의 비산이 촉진되기 때문이다. 따라서, 용접품질에 대한 관리는 불활성가스 실드 분위기에서 산화반응을 일으키는 부인자를 배제시 키고, 레이저빔 에너지만의 제어에 의해 이루어져야 양질의 용접부가 얻어 진다.
- 6. 적정 노즐을 이용한 동적 실드분위기에서도 정적 실드분위기와 마찬가지로 대기상태에서 필연적으로 일어나는 산화반응을 억제시키고, 플라즈마 거동을 조속히 안정화시키면서 스패터의 발생을 현저하게 저감시킬 수 있었다.
 동적 실드가스 분위기를 적용함에 있어서 노즐내경(d), 가스유량(Q), 분사위 치(r) 및 노즐각도(a) 등의 각종 지배인자에 대한 영향을 면밀히 숙지하여 융액의 거동(대류와 열전도 특성 등)에 큰 영향을 미치지 않으면서도 산화현 상을 방지할 수 있어야 한다. 본 연구의 실험에서는, 노즐내경 r=6mm Ø, 노즐 각도 a=40° 그리고 유량 Q=25ℓ/min에서 최적의 조건을 도출할 수 있었다.
 또한, 실드가스로 사용되는 가스의 물성을 잘 이해하여 유량을 적절하게 조 정하여야 할 것이며, 본 연구의 실험조건에서 보는 바와 같이 가격이 저렴하

고 가스유량 적용범위가 다소 넓은 질소(N₂) 가스가 가장 적절한 것으로 판 단된다.

7. 지금까지의 실험결과로부터 알 수 있듯이 용접부를 실드하였더라도 현장의 여건으로 불가피하게 발생되는 스패터는 빔의 스폿직경과 용융지의 크기, 그리고 재료표면으로 급속히 팽창하는 플라즈마와 스패터의 팽창폭을 고려 하여 노즐내경을 선정하여야 한다. 또한, 융액의 거동에 큰 영향을 미치지 않도록 최적의 노즐위치와 가스유량을 설정하여야 한다.

참고문헌

- Harald Slinde, Jacek T. Gabzdyl, David R, F, West and Roger C. Reed, : The Influence of Assist Gas during Laser Welding of Low-Alloy Steel, LAMP'92, (1992), 469-475
- Susumu Tsukamoto, kazuo Hiraoka, Yoshikazu Asai, Hirosada Irie : Characteristics of Stable Induced Laser Plasma, ICALEO'96, Laser Institute of America, 81(1996), Section B 76-85
- 3. Schlichting, H. "Boundary-Layer Theory", 7thed., 1979, McGraw-hill., Inc.
- 4. Frank M. White "Fluid Mechanics", 2nded., 1986, McGraw-hill., Inc.
- John D. Anderson, Jr. "FUNDAMENTALS OF AERODYNAMICS", 1985, McGraw-hill., Inc.
- Rolf H.Sabersky, Allan J. Acosta, Edward G. Hauptmann "Fluid flow-A First Course in fluid Mechanics", 2nded., 1971, Macmillan Publishing Co., Inc.
- Yang, W. J., "Handbook of Flow Visualization", Hemisphere Pub. Cor., 1989.
- 8. Frank m. White : Elementary Fluid Mechanics, sixth ed., Vennard & Street, Fluid Mechanics
- 9. Hessenlink, I., "Digital image processing in flow visualization," Ann. Rev. Fluid Mech., pp.421-485, 1988.
- 10. 田中 將基 : 光學的方法によるレーザ加工現象の解明に關する基礎的研究, 大阪大學大學院工學研究科, (1986)
- 11. 최병렬 : 디젤 단공노즐의 분무특성 연구, 2002, pp. 24-26
- 12. Schlieren System Manual Color & B/W, KOMI(Korea Optical Metrology Industry)
- 13. Uberoi, M.S., L.S.G., Kovasznay, L.S.G., "Analysis of turbulent density

fluctuations by the shadow method," J. Appl. Phys., Vol.26, 1955.

- 14. Kobayashi, T., Saga, T., Segawa, S., Kanda, H., "Development of a real time velocity measurement system for two dimensional flow fields using a digital image processing technique," JSME, No.87-1402A, 1989.
- Coutnceau, M. and Defaye, J. R., "Circular Cylinder Wake Configuration: A Flow Visualization Study", Appl. Mech. Rev., Trans. ASME, Vol 44(6), PP.255-305, 1991.
- Hijikata, K., Mimatsu, M., Inoue, J., "A study of wall pressure structure in backward step flow by a holographic/velocity-pressure cross-correlation visualization," ASME, FED-128, p.61, 1991
- 17. 김귀순, 최종수, 정수인 : "충동형 터빈의 전단해석 및 모델 시험", 과학기술부,2004
- H.B. Kim and S.J. Lee, "Performance Improvement of Two-Frame Particle Tracking Velocimetry Using a Hybrid Adaptive Scheme", Measurement Science & Technology, Vol.13, pp.573-582, 2002.
- Sang-Joon Lee, "PIV(Particle Image Velocimetry) Velocity Field Measurement", AFERC., 1999
- 20. 이영호, "PIV에서의 동시다점계측의 원리 및 적용", 대한기계학회 96년도
 열 및 유체공학부문 학술강연 논문집, pp. 30-44, 1996
- 21. David A. Belforte, Morris Levitt : The Industrial Laser Handbook, Springer-Verlag New York Inc., 1992-1993
- 22. 新井武二, 宮本 勇 : レーザー加工の基礎, マシニスト出版, 1993
- 23. 新井武二, 沓名宗, 春 宮本 勇 : レーザー溶接加工, マシニスト出版, 1993
- 24. 末澤滂文:先端 溶接工學,共立出版株式會社, 1988
- 25. 森安雅治: レーザー溶接の實際, 溶接學會誌, 第63券 第3號(1994), 16-20
- 26. 하승협, 양우영, 김명도, 김종도, 조상명, 김영식 : 브라운관 전자총 부품의 펄스 Nd:YAG 레이저 용접성(제1보) -빔 출력특성과 광학변수-, 특별강연 및

추계학술발표대회 개요집, 제36권(2000), 268-270

- 27. 김종도, 하승협, 조상명, 양우영, 김명도, 김영식 : 브라운관 전자총 부품의 펄스 Nd:YAG 레이저 용접성(제2보) -레이저 용접성에 미치는 보조가스의 영향, 특별강연 및 추계학술발표대회 개요집, 제37권(2001), 171-173
- 28. William D. Callister, Jr. : Materials Science and Engineering an Introduction, Sixth Edition
- 29. J. Xie and A. Kar. : Laser welding of Thin Sheet Steel with Surface Oxidation, Journal of America Welding Society, (1999), 343-348
- Paul. A., Debroy. T. : Heat Transfer and Fluid Flow in Laser Melted Weld Pools., Advances in Welding Science and Technology, (1986), 29-33.
- Paul. A. and Debroy. T : Free Surface flow and Heat Transfer in Conduction Mode Laser Welding, Metallurgical Transactions B, Volume 19B, 1988, 852-858.
- 32. 日本 レーザ技術總合研究所: Institute of Laser Technology, Maruzen Co. Ltd., Japan, 1997
- Compact Output Pulse Nd:YAG Laser Welder (ML-2331A) Treatment and Specification, MIYACHI Co. Ltd.
- 34. 文仁炯譯: 金屬組織에칭技術, 淸文閣, 1983
- 35. 대한용접학회 : 용접·접합 용어사전, 2001. 1

감사의 글

지난 2년간의 짧았던 시간동안 소중하고 많은 것들을 깨닫게 된 이 작은 성 과에 가슴 벅찬 감정을 느낍니다. 오늘의 결실이 있기까지 한국해양대학교 김 종도 교수님을 지도교수님으로 모시고 무사히 이 논문을 완성하게 되어서 진심 으로 감사드립니다. 항상 관심과 열정으로 학문에 매진할 수 있도록 지도해 주 셔서 다시 한번 존경의 인사드립니다.

아울러 논문 심사를 위해 많은 조언과 격려를 해주신 이명훈 교수님, 김윤해 교수님 및 여러 교수님께도 진심으로 감사드립니다.

지난 2년간 한국해양대학교 김종도 교수님의 레이저 가공 실험실에서 수학을 하게 된 후로 많은 힘이 되어준 엠에스오토텍의 김장수 소장님, 동도바잘트의 윤희종 전무님, 레베산업의 이상수 사장님과 이명훈 교수님 연구생들에게도 감 사드립니다.

후배들에게 늘 부탁만 하고 도움 주지 못해서 마음 한구석엔 항상 죄스러운 맘이었으며, 저를 선배로서, 친지처럼 잘 따라주고, 직장생활의 애로사항을 잘 이해해주고 귀중한 시간을 할애하여 적극적으로 도와준 레이저 가공 실험실의 박현준군, 이창제군, 강운주군, 이정한군, 곽명섭군 등 여러 연구생들에게도 감 사의 마음 전합니다. 그리고, 논문의 완성에 일조해 주신 최혜원님에게도 진심 으로 감사드립니다.

또한, 대학원 진학과 이 연구에 한마디의 불평없이 물심양면으로 지원해 준 사랑하는 나의 가족들에게도 진심으로 감사드리며, 이 지면을 빌어서 다시금 아내 현주와 아들 영훈이, 강훈이에게 감사와 미안한 마음 전하고자 합니다. 지난 2년간 휴일한번 가족과 제대로 못지내고, 직장과 학업에 매달린 나의 건
강에 노심초사한 걸 항상 마음에 새기고 가족에게 소홀히 하지 않도록 더욱 노 력코자 합니다. 그리고 지금은 고인이 되셨지만 어려운 형편에도 오늘의 제가 있게 해주신 부모님께 재삼 감사의 마음 전합니다.

아울러, 늘 한 걸음 물러나셔서 저를 지켜 봐주시고, 헌신적인 사랑과 끊임없 이 격려해 주신 두 분 누님과 매형, 형님 그리고 동생과 제수씨에게도 감사의 마음 전합니다. 또한, 먼데서 나마 학업에 열중할 수 있도록 격려해 주신 장 인·장모님 그리고 군산의 모든 가족들에게도 감사의 마음 전합니다.

끝으로, 학문에 매진할 수 있도록 언제나 저에게 힘이 되어 주셨던 이상순 인천지사장님과 전임 에너지관리공단 인천지사장님이셨던 기술개발관리실의 공 타광 실장님, 그리고 인천지사 동료 여러분 및 많은 직장동료 여러분과 친구들 에게도 다시 한번 감사의 인사 전합니다.

2007년 1월