

레이저 용접시 분광학적 수법에 의한 증발입자의 거동과 플라즈마 물성의 계측

김 종 도* · 김 윤 해**

Evaporating Particle Behaviors and Plasma Parameters by Spectroscopic Method in Laser Welding

J. D. Kim · Y. H. Kim

Key words : Alloying Element(합금원소), Evaporation Phenomena(증발현상), Plasma Temperature(플라즈마 온도), Electron number Density(전자밀도)

Abstract

The laser-induced plasma affects greatly on the results of welding process. Moreover, selective evaporation loss of alloying elements leads to change in chemical composition of weld metal as well as the mechanical properties of welded joint. This study was undertaken to obtain a fundamental knowledge of pulsed laser welding phenomena, especially evaporation mechanism of different aluminum alloys. The intensities of molecular spectra of AlO and MgO were different each other depending on the power density of a laser beam. Under the low power density condition, the MgO band spectrum was predominant in intensity, while the AlO spectra became much stronger with an increase in the power density. These behaviors have been attributed to the difference in evaporation phenomena of Al and Mg metals with different boiling points and latent heats of vaporization. The time-averaged plasma temperature and electron number density were determined by spectroscopic methods, and consequently the obtained temperature was $3,280 \pm 150\text{K}$ and the electron number density was $1.85 \times 10^{19} \text{ l/m}^3$.

1. 서 론

1967년경, 다이아몬드 다이스의 미세 구멍뚫기 가공에 최초로 레이저가 적용되었다. 그 이후, 엔

진용 회전부품, 자동차 보디의 용접, 발전기의 Stator core를 비롯하여 고속 부상형 여객선의 Corrugated Plate제작법에 레이저 용접법이 채택되는 등 최근 선박, 차량등의 수송기기의 고속화,

* 한국해양대학교 기관시스템공학부(원고접수일 : 99년 4월)
** 한국해양대학교 기계소재공학과

Table 1 Physical constants of pure aluminum and pure magnesium.

	Atomic number	Atomic weight	Melting point [K]	Boiling point [K]	Ionization potential [eV]	Heat of fusion [10^3 J/mole]	Heat of vaporization [10^3 J/mole]	Thermal conductivity (at 293 K) [$W/m \cdot K$]
Pure Al	13	26.9815	933.25	2750 ± 50	5.984	8.40 ± 0.16	293.8	238
Pure Mg	12	24.305	932 ± 0.5	1376 ± 5	7.644	8.96 ± 0.2	128.7	167

절전 에너지화 문제와 더불어 그 적용범위는 급속히 확산되고 있다¹⁾.

그러나 여기에는 가공기술의 Hi-Tech화가 보다 절실하게 요구되고 있으며, 이를 실현하기 위해서는 철저한 레이저 가공현상의 해명과 그 메커니즘을 규명하는 것이 선행되어야 하겠다.

레이저 용접현상의 해석과 관련한 전보고²⁾에서는, Al합금의 Nd³⁺:YAG 레이저 용접시에 유기되는 플라즈마에 대하여 발광분광분석을 행하고, 제각기 다른 가스 분위기 중에서 유기되는 합금원소의 증발종과 화학반응종의 동정 및 그들의 발광특성을 명확히 하였다. 즉, 알루미늄 합금의 주된 합금원소인 Al과 Mg를 비롯한 다수의 중성원자와 화학반응종이 검출되었고, 펄스 레이저에 의한 발광특성은 아크여기에 의한 스펙트럼 강도의 값과 잘 일치함을 알았다. 또한, 다량의 Al 및 Mg 원자가 증발하고 있으며 유기 플라즈마는 약전리 플라즈마임을 판명하였다. 더우기, 플라즈마의 물리량 계측에는 Cr과 Mg의 중성원자선, Mg의 1가 이온선 등이 유효하게 이용될 수 있음을 시사하였다.

본 연구보고에서는, 지난 보고²⁾에서 얻어진 결과에 근거하여 Al합금 A5083의 레이저 용접시에 발생하는 합금원소의 증발거동을 조사하기 위해, 유기 플라즈마의 초고속 촬영에 의한 거동해석과 발광분광분석법에 의해 스펙트럼선 강도의 공간분포 및 시간변화에 대하여 상세한 검토를 행하였다. 또한, 발광선의 상대강도 측정법에 의해 플라즈마의 기본적 물리량인 온도 및 전자밀도에 대해 추정하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

본 연구에 이용한 용접열원은 펄스 Nd³⁺:YAG 레이저 빔이며, 주로 사용한 재료는 약 4.6mass%

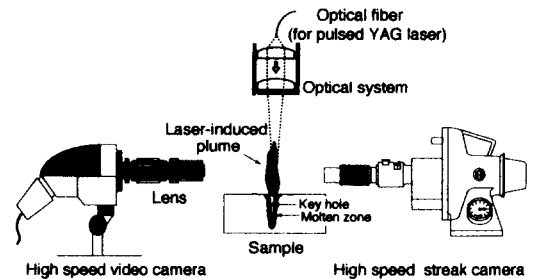


Fig. 1 Schematic experimental setup for observation of pulsed laser-induced plasma.

Mg을 함유하는 Al-Mg계 합금 A5083이다. Table 1에 주된 합금원소인 Al 및 Mg의 물리정수^{3, 4)}를 나타낸다. Mg의 증발온도와 증발시의 잠열은 Al보다 상당히 낮은 것을 알 수 있다.

레이저 유기 플라즈마의 시간변화의 거동 관찰에는, streak 카메라(Max. Streak speed: 300 m/s)와 고속비디오 카메라(Max. speed: 40,500 f/s)를 동기시켜, 플라즈마의 streak상과 frame상을 대응시키면서 1.16 μ s의 시간분해능으로 플라즈마의 거동을 해석했다. 초고속 촬영시스템의 모식도를 Fig. 1에 나타낸다.

가공열원인 펄스 Nd³⁺:YAG 레이저($\lambda=1.064 \mu$ m) 장치와 용접방법, 유기 플라즈마의 발광분광분석에 이용한 광학계는 전에 보고한 내용²⁾과 동일하다. 발광분광시의 주된 레이저 조사조건은, 대기중에 있어서 펄스에너지(E_0) 80J/p, 펄스 시간(τ_p)21ms의 구형파로 파워밀도는 $1.0 \times 10^{10} W/m^2$ 이다. 광전측광에 의한 레이저 유기 플라즈마의 발광 스펙트럼선의 상대강도 측정에는, 각각의 스펙트럼에 대한 시간적 강도변화를 analyzer에 의해 100kHz의 데이터 처리속도로 10회 채취하고, 그 데이터를 A/D 변환한 후, 컴퓨터에 의해 시간평균화 처리를 했다. 계측된 스펙트럼 강도에 대해서는

표준광원을 이용하여 감도보정을 행하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 유기 플라즈마의 동적 거동

레이저 용접중에 유기되는 플라즈마의 가시적 거동을 초고속도 촬영하여 계측한 결과를 Fig. 2에 나타내고, 합금원소중 하나인 중성원자선을 이용하여 발광강도의 시간변화에 대한 계측결과를 Fig. 3에 나타낸다. 발광강도의 계측에 이용한 스펙트럼선은 알루미늄합금 A5083에 미량 함유되어 있는 Cr의 중성원자선($\lambda=425.435\text{nm}$, 0.116mass%)을 이용하였다. 이때, 함유량이 많은 합금원소인 Al또는 Mg를 계측에 이용하지 아니한 것은, 이들 스펙트럼선은 자기흡수의 영향이 커서 정확한 강도 측정에는 부적절하기 때문이다. 그래서 자기흡수가 발생하지 않는 CrI를 선택하였다.

Fig. 2는 유기 플라즈마의 거동을 streak상과 frame상을 대응시켜서 해석하고, 그 변동 상황을 가시화 한 것이다. 촬영조건은, streak속도(v_s)=86.12m/s, slit폭(W)=0.1mm, 시간 분해능(R_t)=1.16 μs 이며, 펄스파형은 레이저 조사시간(τ_p)=7ms의 구형파이다. A5083의 유기 플라즈마는 약 450~500 μs 의 주기로 심하게 변동하고 있음을 명확히 알 수 있다. 또한, 플라즈마의 공간 팽창거동을 streak상으로부터 계측한 결과, 플라즈마는 최대 270m/s의 아음속으로 상방향 전파하고 있음을

알았다.

플라즈마의 이와 같은 거동은 Fig. 3의 발광스펙트럼 강도의 계측결과로부터도 확인되었다. Fig. 3(a),(b) 및 (c)는, 각각 계측시에 이용한 레이저 출력의 강도, 발광스펙트럼선 강도의 미가공 데이터, 및 미가공 데이터를 5차의 9점 평활화 처리한 것을 나타낸다. 레이저 조사중에 유기 플라즈마의 발광강도는, 측정시간 영역에서 일정 peak치가

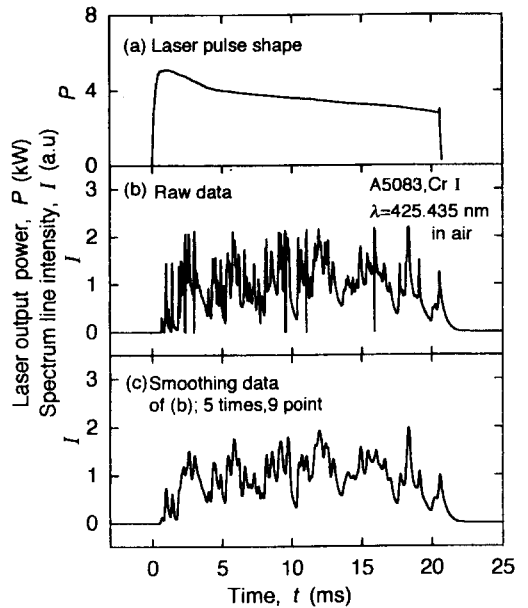


Fig. 3 Variation in spectral intensity as a function of time($E_0=80\text{J/pulse}$, $\tau_p=21\text{ms}$).

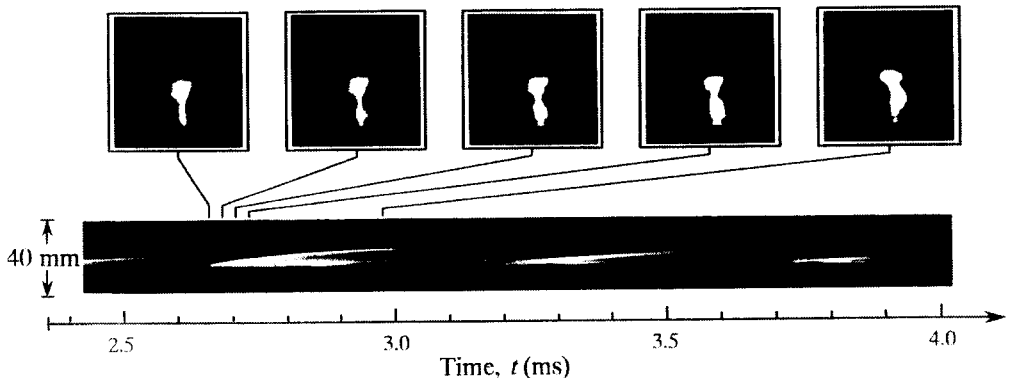


Fig. 2 High speed streak image and frame photographs of pulsed laser induced plasma of aluminum alloys in air ($V_s=86.12\text{m/s}$, $R_t=1.16\mu\text{s}$, $n_f=40,500\text{f/s}$, $\tau_p=7\text{ms}$, $E_0=28.7\text{J/p}$).

존재하지 않고 극히 짧은 시간에 심하게 변동하고 있음을 알 수 있다.

이상의 결과로부터, A5083 합금의 유기 플라즈마는 레이저 조사시간중 약 450~500 μ s의 주기성을 가지고 심하게 변동하고 있으며, 용접시 합금원소의 증발거동도 마찬가지로 변동하고 있을 것으로 생각된다. 이와 같은 플라즈마의 변동은, 레이저 빔과 재료와의 에너지 커플링의 변화에 의한 킥홀의 주기적 변동에 기인하는 것으로 추정된다⁵⁾.

3.2 발광스펙트럼선 상대강도의 시간변화 및 공간분포

펄스레이저 용접시에 유기되는 여기종의 발광강도에 대한 시간변화의 계측을 행하였다. 또한 시료표면으로부터 높이방향에 대한 발광강도의 변화와 화학반응의 거동을 관찰하여 합금원소의 증

발거동을 검토하였다.

레이저 조사시 A5083의 사용재료로부터 증발·여기하는 발광스펙트럼 강도의 시간변화에 수반되는 거동을 Fig. 4와 Fig. 5에 나타낸다. 동시계측을 행한 파장역은 약 495~525nm이며, 각각의 발광스펙트럼 강도의 데이터는 20ms의 레이저 조사시간(τ_p)중 0~20.2ms의 범위내에서 일어나는 현상에 대해서, 100 μ s의 시간분해능으로 gate 위치를 바꾸면서 각각 10회의 데이터를 검출기에 채취하여 적산한 것이다. Fig. 4에는 레이저 조사가 종료되기 직전의 극히 짧은 시간내에서 일어나는 발광스펙트럼 강도의 변화를 나타낸다. 한편, Fig. 5는 레이저 조사시간의 전반에 걸쳐서 AlO(507.94nm)와 MgO(500.73nm)의 거동을 계측하고, 각각의 상대강도비를 구한 결과를 나타낸다.

이러한 결과로부터, 레이저가 조사되는 시간중 레이저의 파워밀도가 높을 때에는 AlO의 발광강도가 MgO보다 훨씬 높으나, 레이저 조사가 개시되기 직전 및 종료직후의 파워밀도가 상대적으로 낮을 때에는, 그들의 강도분포가 역전하고, MgO 강도가 오히려 AlO보다 높게 됨을 알 수 있다. 이와 같은 현상이 발생하는 이유는, Table I에 나타낸 바와 같이 Mg의 비점 및 증발잠열(1376 \pm 5K, 128.7 \times 10³J/mol)이 Al(2750 \pm 50K, 293.8 \times 10³J/mol)보다 약 1/2 정도로 낮다는 점과 용융시료 표면의 온도가 낮고, Al의 충분한 증발온도까지 도달해 있지 않기 때문에 비점 및 증발잠열이 낮은 Mg의 증발이 우선적으로 일어나고, 그 결과 MgO

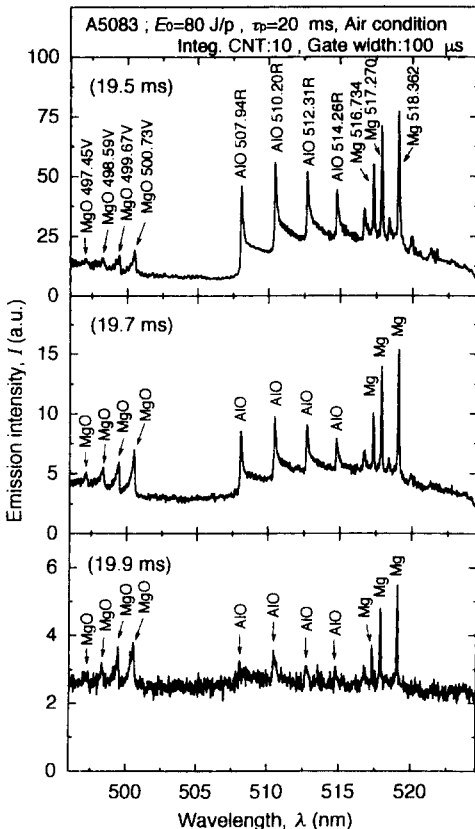


Fig. 4 Relative intensity of emission lines as a function of time.

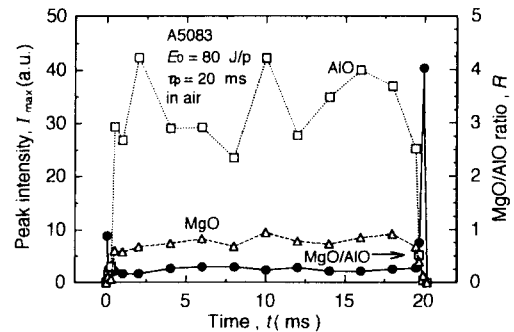


Fig. 5 Variation in relative intensities of MgO and AlO molecular spectra as a function of time.

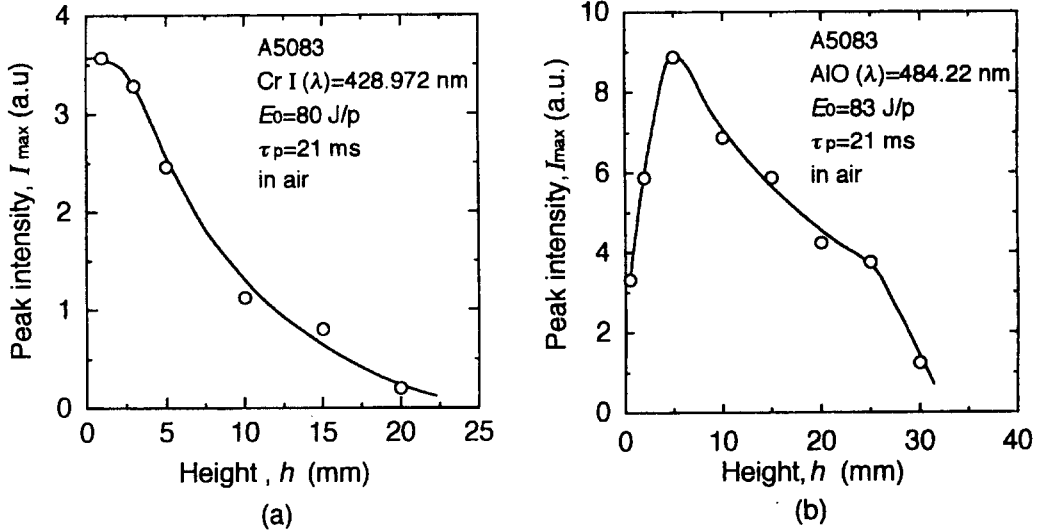


Fig. 6 Spatial distribution of spectral intensity as a function of height from specimen surface.

로의 화학반응에 의한 발광도 AlO보다 높게 나타난 것으로 판단된다.

다음으로, 각종 여기종의 공간분포에 대해서 계측을 행하였다. Fig. 6에 중성원자 및 AlO의 분자 스펙트럼에 대해서 플라즈마의 성장방향으로의 강도변화를 광전측광에 의해서 계측한 결과를 나타낸다. 계측에는 중성원자 스펙트럼선인 CrI($\lambda=428.972$ nm)를 이용하고, 분자 스펙트럼으로서는 AlO(484.22 nm)를 이용하였다. 이러한 중성원자선 및 분자선은, 각각 영존선(persistent atomic line) 및 영존 밴드헤드(persistent band head)⁶⁾로서 그 강도가 높고, 다른 파장과 충분히 떨어져 있으므로 간섭의 영향을 받지 않기 때문에 선정하였다. 레이저 조사조건은, $\tau_p=21$ ms, $E_0=80$ J/p이며 시료표면은 레이저 빔의 초점에 위치한다. Fig. 6(a) 및 (b)로부터, 중성원자 스펙트럼의 강도는 시료표면 부근에서 최대로 되고, 표면으로부터 멀어질수록 약하게 됨을 알 수 있다. 한편 AlO분자 스펙트럼의 경우, 그 강도는 시료표면 부근에서 상대적으로 약하고, 상방향으로 갈수록 높게 되어 높이 약 5mm의 위치에서 최고의 강도를 나타낸후 점차 약하게 감소하고 있다. 이것은 펄스 레이저 조사에 의해서 용융부로부터 증발되는 Al 원자가 시료표면상의 공간을 이동중에 대기중의

산소와 화학반응에 일어나고 있음을 나타내는 것이다. 즉 AlO 분자스펙트럼은 증발한 금속원자와 대기중 산소와의 화학반응에 의해서 형성되어 방사된 것으로 판단된다.

또한, AlI(394.401 과 396.152 nm) 및 MgI(285.213 nm)의 자기흡수현상의 공간거동에 대해서도 계측한 결과, 자기흡수현상은 시료표면에 가까울수록 강하게 발생하고, 플라즈마의 상방향으로 갈수록 약하게 변화하고 있음을 알 수 있었다. 즉, 레이저 용접시에는 다량의 Al과 Mg원자가 용융지 표면으로부터 증발하고 상방향으로 갈수록 그들 원자상태의 농도는 떨어짐을 알 수 있었다.

3.3 증발·여기종의 스펙트럼선 강도에 미치는 파워밀도의 영향

펄스 레이저 용접시에 발생하는 합금원소의 증발 거동과 그 발광강도에 미치는 파워밀도의 영향을 조사하기 위해서, 증발·여기종의 발광스펙트럼선의 강도변화를 다채널 분광측광 시스템을 이용하여 계측하였다. 분석에 이용한 파장역은 AlO와 MgO 발광강도 변화의 동시계측이 가능한 $495\sim 525$ nm이며, 사용재료인 A5083의 주된 합금원소인 Al과 Mg의 증발거동에 관한 예측이 가능하기 때문에 선정하였다. 레이저 조사조건은 시료표면을 레이저

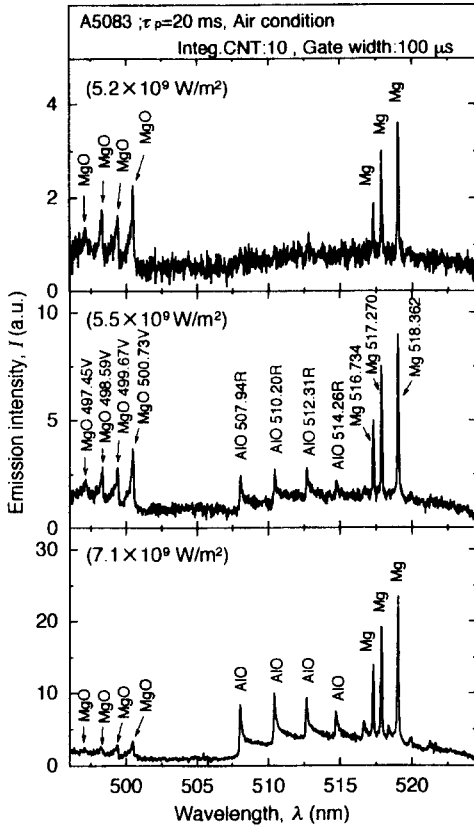


Fig. 7 Relative intensity of emission lines as a function of laser power density.

범의 초점위치에 두고, 펄스폭(τ_p)은 20ms에서 펄스에너지를 26~76J/p까지 17등분으로 나누어, 대기중에서 레이저를 조사하여 파워밀도에 의한 발광스펙트럼의 강도변화를 관찰하였다.

유기 플라즈마의 관찰위치는 재료표면으로부터 3mm의 높이이며, 레이저 조사후 2ms후의 현상을 약 100 μ s간 검출기에 채취후 10회의 데이터를 적산하였다. 그 결과를 Fig. 7 및 Fig. 8에 나타낸다. Fig. 7은 레이저 파워밀도의 변화에 따라서 발광강도의 변화가 현저한 곳에 대해 게인값을 높여 나타낸 것이다. 파워밀도가 높게 되면, MgO와 AlO의 발광강도가 역전하는 것을 알 수 있다. 따라서, 이와 같은 발광거동을 보이고 있는 MgO 및 AlO에 주목하여, MgO(500.73nm)와 AlO(507.94nm)의 상대강도비를 레이저 파워밀도(펄스에너지)에 대해서 정리한 것이 Fig. 8이다. 이러한 결과로부터

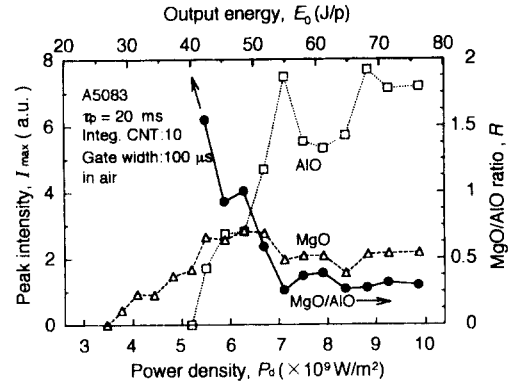


Fig. 8 Variation in relative intensities of MgO and AlO molecular spectra as a function of laser power density.

알 수 있듯이, 저파워 밀도의 레이저를 조사했을 때에는, AlO는 검출되지 않고 MgO만이 동정되어 있다. 파워밀도가 증가해가면 AlO의 발광도 시작되고, 보다 높은 고파워 밀도에서는 MgO와 AlO의 강도가 역전하여 AlO의 발광이 지배적으로 된다. 또한, MgO의 발광강도는, 레이저 파워 밀도의 증가에 따라서 AlO와 더불어 해리될 때까지는 크게 될 것이지만 파워밀도가 약 $6 \times 10^9 \text{W/m}^2$ 이상에서는 발광강도의 상승이 일어나지 않고 있다.

이와 같은 현상이 발생하는 원인은, 3.2절에서 서술한 여기종의 발광스펙트럼 강도의 시간변화의 원인과 같이 생각할 수 있다. 즉, 저파워 밀도의 레이저 조사조건에서는, 용융지의 표면온도가 낮고 Mg의 증발이 주로 일어나게 되어 MgO로의 화학반응에 의한 발광이 현저하게 된다. 파워밀도를 증가시켜 가면, 용융지의 표면온도가 상승하여 Al도 다량으로 증발하여 화학반응에 의한 AlO의 발광강도가 MgO보다 훨씬 높게 되는 것으로 사려된다. 한편, 고파워 밀도에서 MgO의 발광강도가 높게 되지 아니한 것은 본 분석에 이용한 A5083의 Mg함유량이 4.6mass%에 지나지 않기 때문이다.

3.4 플라즈마 온도 및 전자밀도의 측정

분광학적 수법에 의한 플라즈마의 진단법은, 물리현상을 해명하는 경우에 유효한 방법의 하나이다. 그러나, 플라즈마로부터 방사강도의 절대량을 측정하는 것은 기술적으로 간단하지 아니하다. 그

래서 그 물성은, 일반적으로 어느 입자의 2종류 혹은 그 이상의 스펙트럼선의 방사강도 상대량을 측정함으로써 구하게 된다^{7,8)}.

본 측정법에서는, 플라즈마가 국소열평형(LTE) 상태라고 가정하면 식(1)이 성립한다. 이 식으로부터, 다수의 스펙트럼 강도를 측정하고, 그들 상대강도의 관계로부터 플라즈마의 온도를 구하였다.

$$I_n = \left(\frac{I_{nm} \lambda_{nm}}{g_n A_{nm}} \right) = - \frac{E_n}{kT} + \ln \left(\frac{N_0 hc}{Z} \right) \quad (1)$$

여기에서,

- I_{nm} : 플라즈마의 스펙트럼 선 강도 (n→m)
- λ_{nm} : 스펙트럼선의 파장 (n→m)
- g_n : n번째의 통계적 중량
- A_{nm} : 양자적 천이확률 (n→m)
- E_n : n번째의 여기 에너지 레벨
- k : 볼츠만 정수
- N_0 : 플라즈마 단위체적당의 전원자수
- h : 플랑크 정수
- Z : 온도 T에서의 그 원자의 분배함수
- c : 광의 속도

이러한 관계식으로부터, 다수의 스펙트럼선에 대해서 종축에 $I_n(I_{nm} \lambda_{nm}/g_n A_{nm})$, 횡축에 E_n 을 취하여 플롯하면, 기울기는 $-1/(kT)$ 의 직선으로 표시되어 온도가 구해진다. 실제로는 측정오차나 천이확률 A_{nm} 의 부정확성 등의 요인 때문에 측정결과를 직선의 주위에 흩어져 나타난다. 이 때문에 최소 이승법 등의 수단으로 기울기를 구하고 그 기울기로부터 온도 T를 구한다.

Table II에 A5083의 레이저 유기 플라즈마의 온도측정에 이용한 선 스펙트럼과 볼츠만 플롯을 행할 시의 각각의 스펙트럼에 대한 통계적 중량과 천이확률⁹⁾을 나타낸다. 측정에 이용한 CrI선은,

Table II. Physical property of Cr I spectral lines.

$\lambda(\text{nm})$	$E_n(\text{eV})$	$g \cdot A(10^7/\text{s})$
357.869	3.46	8.3
359.349	3.45	7.0
360.553	3.44	5.2
425.435	2.91	2.0
427.435	2.91	2.0
427.480	2.90	1.5
428.972	2.90	0.95

A5083에 0.12mass% 함유되어 있는 Cr원소로부터 여기된 것으로, 자기흡수가 발생하지 않고, 다른 스펙트럼선의 간섭의 영향을 받지 않음으로 선정하였다.

Fig. 9에 측정결과로부터 구한 볼츠만 플롯을 나타낸다. 레이저 조사조건으로서는 $E_0=80\text{J/p}$, $\tau_p=21\text{ms}$ 에서 파워밀도는 $1.0 \times 10^{10}\text{W/m}^2$ 이다. 발광스펙트럼의 상대강도는, 시료표면으로부터 높이 1mm의 위치에서 각각의 스펙트럼의 시간적 변화를 100kHz의 데이터 처리속도로 10회 채취하고 그 데이터를 A/D 변환한 후, 컴퓨터에 의해 시간 평균화 하였다. 측정된 스펙트럼 강도에 대해서는 표준광원을 이용하여 감도보정을 행하였다. 그 결과, 플라즈마의 온도는 $3,280 \pm 150\text{K}$ 로 구할 수 있었다. 이 온도는 H. C. Peebles등¹⁰⁾이 구한 플라즈마 온도($3,400 \pm 300\text{K}$)와 거의 일치하고 있다. 또한 이것은 연속의 고파워 CO₂레이저 용접등에서 구한 온도(약 6,000~13,000K)보다는 낮다.

플라즈마의 전자밀도는 Saha의 식(2)를 이용하여 추정하였다.

$$S_k = \frac{N_i N_e}{N_a} = \frac{(2\pi m_e kT)^{3/2}}{h^3} \cdot \frac{2Z_i}{Z_a} \exp\left(-\frac{V_i}{kT}\right) \quad (2)$$

여기에서,

- S_k : Saha의 이온화정수
- N_a, N_i, N_e : 원자, 이온 및 전자의 밀도
- m_e : 전자의 질량
- Z_a, Z_i : 원자와 이온의 분배함수
- V_i : 이온화 에너지

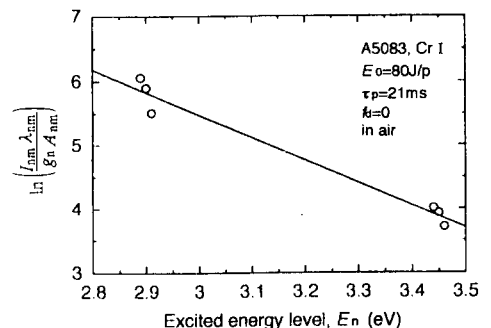


Fig. 9 Boltzman plot of Cr I spectral line from laser-induced plasma.

플라즈마 중의 중성원자의 스펙트럼선 강도 I_a 와 1가 이온의 스펙트럼선 강도 I_i 는 각각 다음식으로 나타낼 수 있다.

$$I_a = N_a \frac{g_a}{Z_a} A_a h \nu_a \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) \quad (3)$$

$$I_i = N_i \frac{g_i}{Z_i} A_i h \nu_i \exp\left(-\frac{E_i}{kT}\right) \quad (4)$$

여기에서,

g_a, g_i : 여기준위의 통계적 중량

E_a, E_i : 여기준위의 에너지

A_a, A_i : 천이 확률

V_a, V_i : 천이 스펙트럼의 진동수

(3)과 (4)식을 각각 분배함수에 대해서 풀고, Saha의 식인 (2)식에 대입해서 N_e 에 대해서 정리하면

$$N_e = \frac{I_a}{I_i} \frac{g_i A_i \nu_i}{g_a A_a \nu_a} \cdot \frac{2(2\pi m_e kT)^{3/2}}{h^3} \exp\left(-\frac{E_a - E_i - V_i}{kT}\right) \quad (5)$$

로 된다. 플라즈마의 온도 및 동일원소의 원자선과 이온선의 상대강도를 각각 측정하면, 식(5)의 관계로부터 열평형 플라즈마의 전자밀도를 구할 수 있다.

A5083의 레이저 유기 플라즈마의 전자밀도를 구하는데는, 앞에서 서술한 볼츠만 플로트로부터 구한 플라즈마의 온도 3280K 및 Mg원소의 중성 원자선(333.668nm)과 1가 이온선(280.270nm)의 상대강도를 이용하였다. 이것으로부터 구한 전자밀도는 $N_e = 1.85 \times 10^{19}/\text{m}^3$ 의 값을 얻게 되었다. 이상의 결과로부터, 본 연구에서 이용한 대기중 $1.0 \times 10^{10} \text{W}/\text{m}^2$ 의 레이저 조사조건에서, A5083 합금의 펄스 레이저 유기 플라즈마는 그 온도가 Al의 비점보다 약 500K정도 높은 약전리 플라즈마임을 알 수 있었다.

4. 결 론

레이저 용접시 합금원소의 증발기동과 유기 플라즈마의 물리량을 초고속 촬영법 및 발광분광분석법에 의해 검토하였다. 얻어진 결과를 정리하면

다음과 같다.

- 1) 레이저 유기 플라즈마의 변동주기는 A5083의 경우 약 450~500 μs 였다. 이것은, 레이저 빔과 재료와의 에너지 커플링의 변화에 의한 키흐의 주기적 변동에 기인하는 것으로 추측된다.
- 2) CrI 중성원자 스펙트럼의 강도는 재료표면 부근에서 최대로 되고, 한편 AlO 및 MgO의 분자 스펙트럼은 높이 약 5mm의 위치에서 최대치를 나타내었다. 이것은 Al 및 Mg 증발 원자가 시료표면의 공간을 이동중에 대기중의 산소와 화학반응을 일으키고 있음을 시사한다.
- 3) AlI와 MgI의 자기흡수현상의 공간거동은, 시료표면의 부근에서 강하게 발생하고, 멀어질수록 약하게 나타났다. 이것은 용접시 다량의 Al과 Mg원자가 용융시 표면으로부터 증발하고, 상방향으로 갈수록 원자상태의 농도가 감소하는 것을 의미한다.
- 4) 저파워 밀도의 레이저 조사 조건에서는, MgO의 발광강도가 지배적이며, 고파워 밀도에서는 AlO가 MgO보다 훨씬 높은 강도를 나타내었다. 이와 같은 현상은 1 펄스의 레이저 기간중에서 발광강도의 시간변화에 있어서도 동일하게 관찰되었다. 이러한 이유는, Mg의 비점 및 증발잠열이 Al보다 약 1/2정도로 낮다는 점, 그리고 용융시 표면의 온도상태로부터 이해할 수 있다.
- 5) 대기중, $1.0 \times 10^{10} \text{W}/\text{m}^2$ 의 레이저 조사조건에서, 상대강도 측정법에 의해 구해진 유기 플라즈마의 온도 및 전자밀도는 각각 $3280 \pm 150 \text{K}$ 및 $1.85 \times 10^{19} / \text{m}^3$ 이었다. 따라서 A5083 합금의 레이저 유기 플라즈마는, 온도가 Al의 비점보다 약간 높은 약전리 플라즈마인 것으로 결론을 내릴 수 있다.

참고문헌

1. 김종도, 松繩 朗: "레이저 용접현상과 산업계로의 응용", 한국박용기학회지, Vol.22-6, pp.16~25, 1998.

2. 김종도 : "펄스 YAG 레이저 용접시 유기하는 플라즈마의 스펙트럼선 동정과 발광특성", 한국박용기관학회지, Vol.23-3, pp.86~94, 1999.
3. 日本金屬學會 : "金屬データブック(3版)", 丸善株式會社, 東京, 1993.
4. C.E.Moore : "Atomic Energy Level(Circular of the National Bureau of Standard 467", Vol. I, Washington, 1949.
5. 金鍾道, 片山 聖二, 竹本 正, 松繩 朗 : "レーザー深溶込み溶接時のブルームとキーホル挙動", 日本溶接學會全國大會講演概要 第57集, pp.440~442, 1995.
6. R.W.B.Pearse and A.G.Gaydon : "The Identification of Molecular Spectra", Chapman and Hall LTD, London, 1976.
7. H.R.Grim : "Plasma Spectroscopy", McGraw-Hill, New York, Chap.6, 1964.
8. J.Jarosz, J.M.Mermet and J.P.Robin : "A Spectrometric Study of a 40-MHz Inductively Coupled Plasma- III. Temperature and Electron Number Density", Spectrochimica Acta, Vol.33B, pp55~78, 1978.
9. C.H.Corliss and W.R.Bozman : "Experimental Transition Probabilities for Spectral Lines of Seventy Element", NBS Monograph 53, pp.5, 185, 1962.

10. H.C.Peebles and R.L.Williamson : "The Role of the Metal Vapor Plume in Pulsed Nd : YAG Laser Welding on Aluminum 1100", Proceeding of Lamp, pp.19~24, 1987.

저 자 소 개



김종도(金鍾道)

1963년 1월 28일생. 1985년 한국해양대학교 기관학과 졸업. 1995년 일본. 오사카대학(大阪大學) 대학원 생산가공공학과 고온공학코스 졸업(석사). 1997년 동대학원 생산가공공학과 고온공학코스 졸업(공학박사). 1998년~현재 한국해양대학교 기관시스템공학부 전임교수. 대한용접학회 국제위원회 위원. 한국생산기술평가원 외부기술평가위원



김윤해(金允海)

1961년 6월 19일생. 1983년 한국해양대학교 기관공학과 졸업. 1987년 한국해양대학교 대학원 졸업(공학석사). 1990년 일본 도쿠시마대학 대학원 졸업(공학석사). 1993년 일본 큐슈대학 대학원 졸업(공학박사). 1993년~현재 한국해양대학교 기계소재공학과 부교수. 1997년~1998년 미국 국립표준연구소 초청 연구교수