

펄스 YAG 레이저 용접시 유기하는 플라즈마의 스펙트럼선 同定과 발광특성

김 종 도

Spectral Line Identification and Emission Characteristics of the Laser-Induced Plasma in Pulsed Nd:YAG Laser Welding

J. D. Kim

Key words : Laser Welding(레이저용접), Aluminum Alloy(알루미늄합금), Laser-induced Plasma(레이저유기플라즈마), Emission Spectrum(방사스펙트럼)

Abstract

The paper describes spectroscopic characteristics of plasma induced in the pulsed YAG laser welding of alloys containing a large amount of volatile elements. The authors have conducted the spectroscopic analyses of laser induced Al-Mg alloys plasma in the air and argon atmosphere. In the air environment, the identified spectra were atomic lines of Al, Mg, Cr, Mn, Cu, Fe and Zn, and singly ionized Mg lines, as well as the intense molecular spectra of AlO and MgO formed by chemical reactions of evaporated Al and Mg atoms from the pool surface with oxygen in the air. In argon atmosphere, MgO and AlO spectra vanished, but AlH spectrum was detected. The hydrogen source was presumably hydrogen dissolved in the base metals, water absorbed on the surface oxide layer, or H₂ and H₂O in the shielding gas. The resonant lines of Al and Mg were strongly self-absorbed, in particular, self-absorption of the Mg line was predominant. These results show that the laser induced plasma was made of metallic vapor with relatively low temperature and high density.

1. 서 론

구조재료 및 기능재료로써 널리 이용되고 있는 알루미늄 합금은, 자원 리사이클이나 환경보호의 관점으로부터 그 이용확대가 더욱 기대되고 있다.

그 이용확대를 위해서는, 고품질·고정도·고속·플렉시블 집합법으로써 레이저 용접법의 확립이 기대되고 있다.

레이저 용접시에는 재료로부터 레이저 유기 플라즈마 또는 플룸으로 불리어지는 고휘도의 발광

* 정회원, 한국해양대학교(원고접수일 : 99년 4월)

체가 발생하고, 가공결과에 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 또한, 빔에너지가 상당히 좁은 미소영역에 집중함으로써, 합금원소의 선택적 증발손실이 발생하여, 용접금속부의 조성이 변화하고, 용접부의 기계적 특성이 열화하는 가능성도 지적되고 있다^{1,2)}.

따라서, 종래부터 레이저와 물질과의 상호작용에 관한 많은 연구가 이루어져 왔으나^{3,4)}, 증발원소나 증발현상 등에 대해서는 아직 불명한 점이 많다. 특히 증발하기 쉬운 합금원소를 함유하는 합금류에 있어서의 증발현상 및 유기 플라즈마의 거동은 충분히 이해되어 있지 아니하다.

그러므로, 본 연구에서는 각종 알루미늄 합금에 펄스레이저 용접을 행하고, 발광분광분석법에 의해 증발·여기종의 동정 및 발광특성을 규명했다.

2. 실험장치 및 실험방법

2. 1 사용재료

펄스 YAG 레이저 용접시에 사용한 재료는, 판두께 6mm의 각종시판 알루미늄합금 A5083(4.58% Mg-0.70%Mn-0.22%Fe-0.14%Si-0.12%Cr-0.04%Cu-0.02%Ti-0.01%Zn), A5182(4.55%Mg), A5052(2.69%Mg), A7NO1(4.74%Zn-1.18%Mg) 및 A6061(1.03%Mg-0.57%Si) 등이다. 본 연구에 주로 사용한 재료는 A5083이다.

2. 2 실험장치와 계측방법

레이저 용접시에 유기되는 플라즈마의 발광분광분석에 이용한 광학계의 개략도를 Fig. 1에 나타낸다. 용접에는 파형제어가 가능한 펄스 YAG 레이저 장치(최대 에너지 : 80 J/pulse, 20ms)를 사용하였다. 레이저 빔은 광화이버(GI형 : 0.8mm Φ)에 의해 전송하고, 초점거리(f)가 150mm인 렌즈로 집광했다. 이 때의 빔강도 분포는 가우스 분포를 나타낸다.

재료표면은 주로 초점위치에 설치하여, 대기중, Ar 또는 Ar+10%H₂가스분위기중에서 레이저 조사를 행하고, 레이저 조사전에는 시료표면을 에머리지 400번 또는 스텐레스 와이어 브러시로 연삭하여 산화막을 제거한 후, 아세톤으로 탈지하였다.

유기 플라즈마의 발광분광분석에 이용한 분광기는, 집광거리 500mm의 체르니·타나형 회절격자 분광기로서, 광전 측광 및 사진 측광용으로 모두 사용가능하다. 주로 사용한 회절격자는 2400gr/mm(Blaze 파장 : 240nm)이며, 측광범위는 200~900nm, 파장분해능은 0.02nm(slit width : 10 μ m)이다.

분광용 집광광학계에 있어서는, 플라즈마 이미지를 색수차 및 비점수차 보정광학계인 A와 B로 유도한 후, 고차의 광은 필터에 의해 제거하였다. 이용한 화이버는 자외선 전송용 화이버(직경 : 200 μ m, NA : 0.2)로 40개 직선으로 배치한 밴드

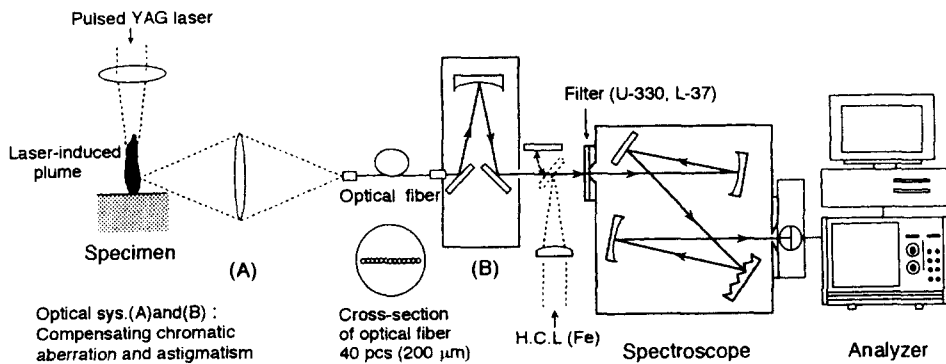


Fig. 1 Schematic optical arrangement for spectroscopic measurement.

형을 이용하였다. 광전측광에 있어서는 파형해석 장치(최대 데이터 처리속도 : 100 kHz) 및 멀티채널 분광측광 시스템을 이용하였다.

2. 3 발광 스펙트럼선의 동정법

레이저 유기 플라즈마의 발광분광분석에 있어서 파장의 동정을 고정도로 행하기 위해, 우선 파장교정용으로 사용되고 있는 각종 광원을 이용해서, 250~600nm 범위의 기준선 파장 동정을 행하였다.

본 연구에서는, 기준선으로써 주로 Hollow Cathod Lamp(HCL, 봉입가스 : Ne)의 발광스펙트로선을 이용하였는데, 이것은 타의 광원에 비해서 스펙트로선의 폭이 좁고, 아크 광원보다 안정한 강도가 용이하게 얻어짐은 물론, 봉입가스인 Ne선도 Fe선과 더불어 기준선으로써 사용할 수 있기 때문이다. 이와 같은 장점을 가진 HCL(Fe)의 파장

을 결정하기 위해서 Hg Lamp, Cd Lamp, pure Fe와 Tungsten Rod 와의 아크(아크전류 : 10A) 및 HCL(Al)의 4종류의 광원을 이용하였다.

즉, 각각의 발광스펙트로선을 사진건판상에 나란히 촬영하고, 직선내삽법을 이용하여 스펙트럼 파장표⁵⁻⁷⁾에 의해 각 광원의 발광파장을 결정하였다. 또한, 폭넓은 파장범위(250~600nm)에 걸쳐서, 색수차에 의한 초점거리의 변화를 계측하여 보정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3. 1 대기중 발광 스펙트럼선의 동정

각종의 알루미늄 합금에 있어서, 레이저 유기 플라즈마의 사진측광 및 광전측광에 의한 파장의 동정과 스펙트럼선의 해석을 상세히 행하였다.

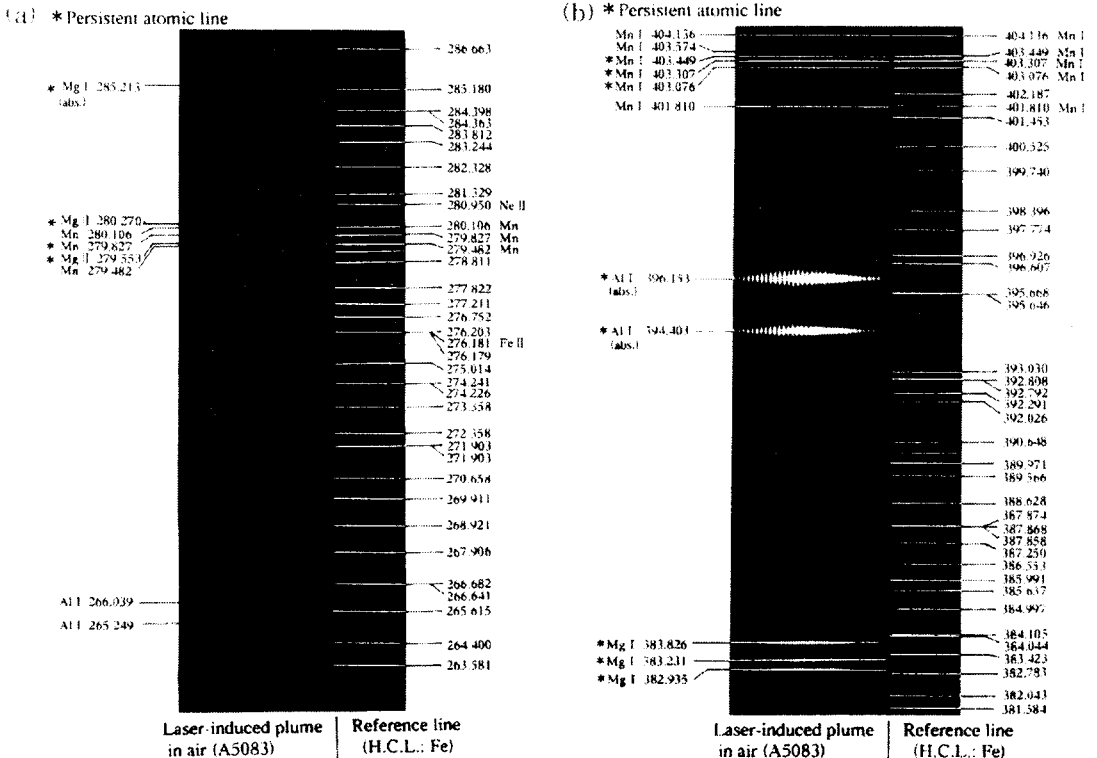


Fig. 2 Plasma emission spectra(atoms) by pulsed YAG laser irradiation on A5083 ($E_0=80J/pulse$, $\tau_p=20ms$) in the air and reference lines of HCL(Fe).

사진측광시의 레이저 조사조건은, 대기중 $\tau_p = 20\text{ms}$, $E_0 = 80 \text{ J/pulse}$ (Peak power : 5.0kW) 이다. 플라즈마의 분광계측은 시료표면으로부터 높이 3mm의 위치에서 행하고, 사진건판의 감도문제로 펄스 레이저 조사를 2~6회 행하였다.

Fig. 2에 A5083으로부터 유기되는 플라즈마의 원자 발광 스펙트럼선의 분광사진예를 나타낸다. 이 사진의 오른쪽은 기준선인 HCL(Fe)의 발광선이며, 왼쪽은 A5083의 레이저 유기 플라즈마의 발광선과 그 동정결과를 나타낸다. 발광선 가운데 상하방향으로 줄지어 있는 다수의 좁은선은, 분광측광시에 이용한 40개의 밴드형 화이버로부터의 각각의 정보를 나타내며, 이것은 유기플라즈마의 좌우방향 공간강도분포를 반영하고 있다. 또한, 동정 원소의 왼쪽 *표기는 영존선(Persistent atomic line)⁹⁾을 나타낸다. 유기플라즈마로부터 동정된 여러종의 강도특성은, 짧은 시간의 펄스 여기임에도

불구하고, 각각의 파장표^{5~7)}에 있어서 스파크 여기에 의한 스펙트로 강도분포보다 오히려 아크 여기에 의한 스펙트로 강도분포와 잘 일치함을 알 수 있었다.

Fig. 2(a)에서, Mg의 1가 이온선으로써 279.553 및 280.270nm의 스펙트럼선이 동정됨에 따라, 고휘도의 발광체는 약전리 플라즈마임이 판명되었다. 그리고, 280.270nm의 1가 Mg이온선은, 또 하나의 동일 종류의 중성 원자선과의 상대강도 측정에 의해 플라즈마의 물리량(전자밀도) 추정에 유효하게 이용될 수 있을 것이다.

Fig. 2(a) 및 (b)에서의 Al과 Mg의 중성 원자선은, 양쪽 모두 중앙부에 검은선이 형성되어 있는 것으로부터, 자기흡수(Self-absorption)현상이 발생하고 있으며, Mg의 경우 자기흡수의 정도가 심하게 일어나고 있음을 알 수 있다.

이와 같은 결과로부터, 레이저 유기 플라즈마는,

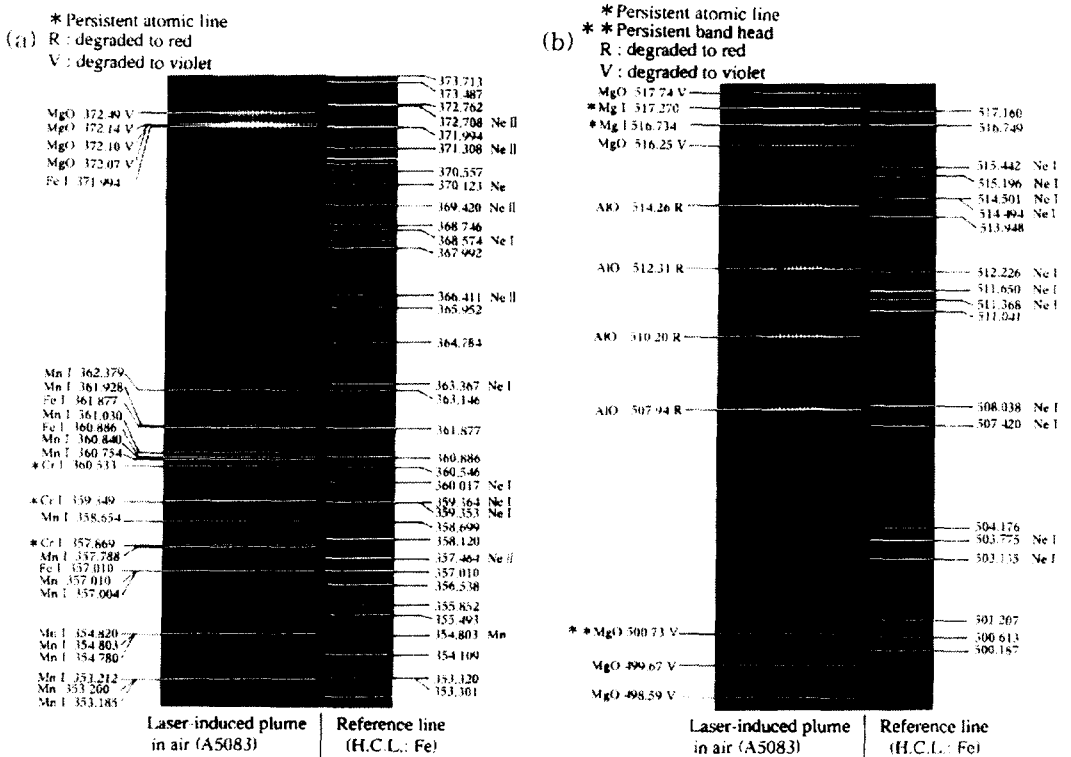


Fig. 3 Plasma emission spectra(atoms and molecules) by pulsed YAG laser irradiation on A5083($E_0 = 80\text{J/pulse}$, $\tau_p = 20\text{ms}$) in the air and reference lines of HCL(Fe).

비점(沸點)부근의 원자상태의 증기가 일부 약전리한 것이며, 그 가운데는 Al과 Mg의 중성원자가 다량으로 존재하고 있음이 판명되었다.

Al-Zn계 합금, A7N01(4.74mass%Zn, 0.08 mass%Cu)의 경우 Zn의 중성원자로서 강한 발광 강도를 가진 334.502nm의 영존선을 비롯하여 328.233, 330.294nm 등 다수의 ZnI선이 동정되고, 또한 Cu의 중성원자에 대해서는 324.754, 327,396 nm의 약한 강도를 가진 영존선이 검출되었다. 이로부터, 레이저 용접시에 다량의 Zn과 미량의 Cu가 증발하고 있음이 확인되었다. 또한 A6061(0.17mass%Cu)에 있어서도 A7N01과 동일한 Cu의 영존선이 동정되었다.

Fig. 3(a) 및 (b)는 중성원자와 분자스펙트로가 동정된 분광사진의 예를 나타낸다. 그림중 R(Red) 또는 V(Violet)의 기호는 분자선의 회전구조의 강도감쇄의 방향을 나타내고 있다. *표시는 원자의 영존선(Persistent atomic line), **표시는 영존 밴드헤드(Persistent band head)를 나타내고 있다. 본 연구에서는, 원자와 분자의 영존선을 구별하기 위해, 각각 영존선과 영존 밴드헤드*로 명명했다. Fig. 3에서는, 강한 발광강도를 가진 AlO와 MgO 분자 스펙트로선이 다수 동정되어 있다. 이러한 결과로부터, 레이저 용접중에 증발한 합금원소에서는 대기중 산소와의 화학반응이 심하게 발생하고 있음을 알 수 있었다. 또한, 동정된 Cr의 영존선은 다른 파장영역에서도 다수 동정되었으며, 그들의

발광스펙트럼선은 반치폭(FWHM)이 좁고 강도가 강하며, 자기흡수가 발생하고 있지 않는 점, 그리고 인접선에 의한 간섭의 영향을 받고 있지 아닌한 점등의 까닭으로 플라즈마의 물리량 추정에 유효하게 이용될 수 있음을 알 수 있었다.

특히, Fig. 3(b)에서는, AlO 와 MgO 밴드스펙트럼의 강도감쇄방향이 서로 다름을 알 수 있다. 각각의 분자 스펙트럼에 대한 발광강도의 정성적 분포를 멀티 채널 분광측광시스템을 이용해서 계측한 결과를 Fig. 4에 나타낸다. AlO의 밴드스펙트럼은 장(長)파장측으로, MgO는 단(短)파장측으로 감쇄하고 있음을 알 수 있다.

이와같은 2원자 분자의 스펙트럼에서는, 각각의 분자의 진동구조와 그 진동구조 가운데 회전구조에 의한 밴드헤드가 거의 동일간격으로 배열되어 있다. 각각의 밴드의 상대강도는 각 분자의 내부에 에너지를 반영하고 있으므로 증발증기의 물성계측에 이용되는 등 유용한 정보를 제공할 것으로 사려된다. 본 연구에서는, 2원자 분자 스펙트럼의 구조 해석에 의해, 지금까지 전혀 보고되지 아니한 AlO의 455.83, 457.67 nm등 다수의 미지(未知) 스펙트럼도 동정되었다. 2원자 분자 스펙트럼의 상세는 3. 4절에서 고찰한다.

3. 2 불활성가스 분위기 중에서의 발광 스펙트럼선의 동정

대기중에서는, AlO와 MgO가 폭넓은 파장영역에 걸쳐서 강하게 발광하는 것을 알게 되었는데, 그 원인을 확인하기 위해, Ar불활성 분위기에서도 동일한 실험방법으로 계측을 행하였다. 그 결과를 Fig. 5에 나타낸다. AlO, MgO의 분자스펙트럼은 소실되고, 중성원자(Mg)만이 검출되었다. 그러나 실드가스인 Ar선은 검출되지 않았다. 이로부터 AlO와 MgO의 분자 스펙트럼은 레이저 가공시에 증발한 Al혹은 Mg원자와 대기중의 산소와의 화학반응에 의해 생성된 것임을 알 수 있었다.

한편, Ar불활성 분위기중에서는 산화반응종은 모두 소실되었으나, 430 nm부근에서 AlH분자스펙트럼이 검출되었다. Fig. 6에 AlH의 발광강도특성에 미치는 분위기 가스 및 시료표면상태의 영향을 나타낸다. Fig 6(a)와 (b)는 각각 시료의 표면은

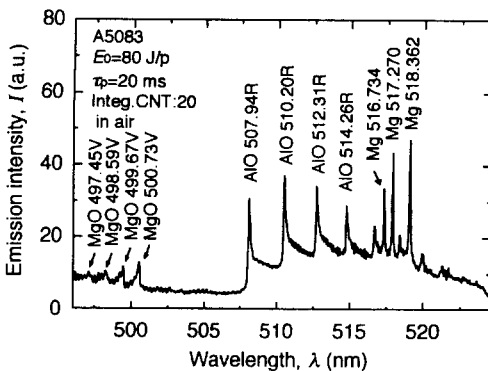


Fig. 4 Molecular spectra near 510nm of A5083 plasma in the air, showing the vibration structure of AlO and MgO.

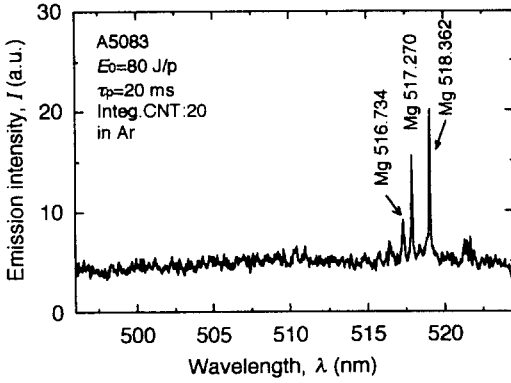


Fig. 5 Spectral lines of laser-induced plasma in Ar near 510nm measured with a multi-channel detector.

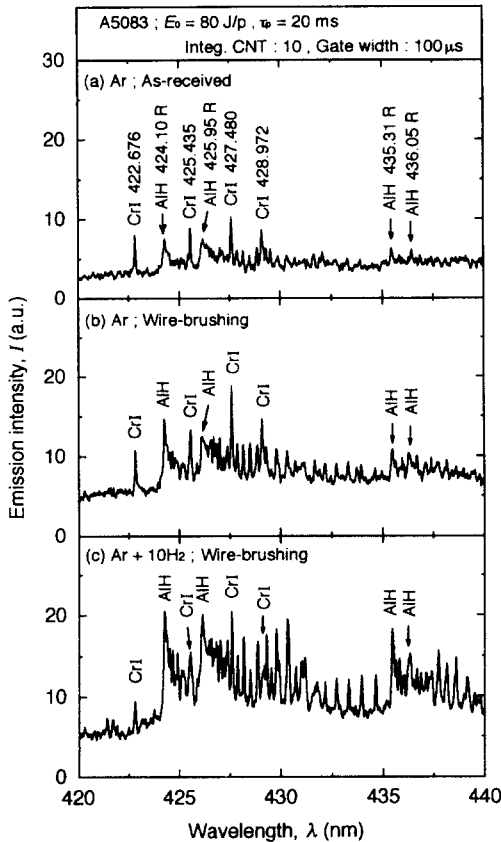


Fig. 6 Effect of surface conditions and ambient gas on the intensity of AlH molecular spectra in laser irradiated A5083.

가공하지 아니한 상태 및 스텐레스 와이어브러시로 시료표면의 산화막을 제거한 경우이며, Ar분위기중에서 레이저 조사를 행하고 있다.

한편, Fig. 6(c)는 (b)와 동일한 표면상태에서 Ar+10% H_2 의 혼합가스 분위기에서의 스펙트럼강도이다. 본 연구에서는, 그림에 나타내듯이, 4개의 AlH분자의 밴드가 동정되었다. 이러한 결과로부터, 표면상태에 따라서 발광강도가 변화하고, 분위기 가스중의 수소농도가 증가하면 AlH발광강도는 현저하게 증가함을 알 수 있다.

이러한 AlH분자선은, Al증기와 H또는 H_2 가 공존하는 경우, 화학반응에 의해 발광하는 것으로 사려된다⁶⁾. 본 계측에 동정된 AlH분자선의 수소원은, Al합금의 시료표면에 흡착해 있던 수분이나 실드가스중의 수분과의 화학반응, 혹은 Al합금시료 내에 고용되어 있는 수소와의 반응에 의한 것으로 추정된다. 일반적으로 Al 및 Al합금의 용접시에는, 수소에 의해 기공이 생성되기 쉽다는 것이 보고되어 있다⁹⁾.

이러한 AlH밴드스펙트럼은 그 진동·회전구조에 대한 상대강도해석에 의해, 합금원소의 비점이 가까운 저온 플라즈마의 내부에너지 계측에 유효하게 이용되리라 사려된다.

3. 3 영존선의 자기흡수현상

자기흡수현상¹⁰⁾은, 광원내부에서 여기되어 방사된 스펙트럼선이 계외로 나오는 도중에, 광로(光路)상에 존재하는 동일종류의 원소에 의해 일부 흡수되는 현상이다. 그 때의 흡수정도는 스펙트럼선의 최대강도부근에서 가장 크기 때문에, 측정되어야 할 파장의 위치에는 파크강도가 존재하지 않는 상태로 된다. 공명선에 있어서는 완전한 자기반전을 나타내고, 2중선과 같이 보이게 된다.

앞절에서 동정된 A5083으로부터 증발·여기되는 Al과 Mg의 증성원자선은 자기흡수현상을 나타내고 있으며, 특히, Mg의 경우 자기흡수정도가 크다는 것이 명확히 밝혀졌다. 이들 자기흡수선의 에너지레벨을 조사해보면^{11, 12)} 하위준위가 기저상태 혹은 기저상태에 가까운 곳에 있으며, 그곳으로의 천이에 의해 발생하는 것임을 알 수 있었다.

그러나, 자기흡수현상의 정량적인 정도는 분광

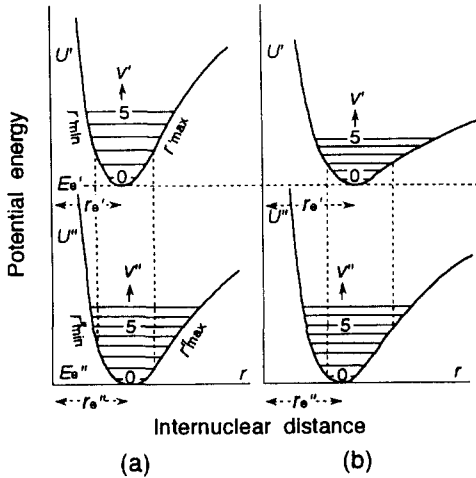


Fig. 8 Schematic potential energy diagram for different vibrational transitions.

하고, 회전선의 간격이 좁고 회전선이 수많이 존재한다는 것 등의 이유로 통상의 광학적 수단으로는 동정 및 분석이 일반적으로 어렵다. 더우기 고온 플라즈마 가운데는 다원자 분자의 존재량은 적고, 원자 및 2원자 분자가 주된 관측대상으로 된다^{13~15)}.

본 연구에서 동정된 가시광 영역에서의 AlO, MgO 및 AlH분자 스펙트럼은 전자항 천이에 의한 전자스펙트럼이며, Table 1에 이들 2원자 분자의 물성을 나타낸다. 또한, Fig. 8에 2원자 분자의 진동상태간 천이시의 모식도를 나타낸다. MgO분자선은 (a)에, AlO 및 AlH분자선은 (b)에 대응하고 있다. 한 예로서 나타내는 AlO는 $\gamma' > \gamma''$ ($0.16670 > 0.16179$ nm)의 경우이며, $\omega' < \omega''$ ($870.95 < 979.23$)에서 아래 전자상태의 진동준위 간격이 넓고, 밴드구조는 적외(장파장)측으로 점차 감쇄한다. 또한, 회전정수가 $B' < B''$ ($0.6040 < 0.6413$)의 경우, 밴드헤드는 R기, 밴드는 장파장측으로 감쇄한다.

MgO는 $\gamma' < \gamma''$ 의 경우이며, $\omega' > \omega''$ 에서 밴드는 자외(단파장)측으로 점차로 감쇄하고, $B' > B''$ 에서 밴드헤드는 P기, 밴드는 단파장측으로 감쇄한다.

AlH의 경우에는, AlO와 그 형태가 유사하나 AlO보다 회전정수가 큰 값, 즉 AlH분자가 AlO보다 가벼운 분자이므로 회전선의 간격이 넓게 되어

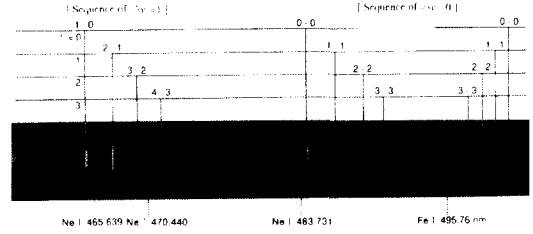


Fig. 9 Molecular structure of plasma induced by pulsed YAG laser irradiation on A5083($E_0 = 80$ J/pulse, $\tau_p = 20$ ms).

회전구조까지 분리해서 관측할 수가 있다. 그러나 AlO는 상대적으로 무거운 분자이므로 회전선의 간격이 좁아서 회전구조의 분리가 어렵게 되어 다른 형태의 진동구조가 관측되게 된다.

이러한 분자 스펙트럼은, 그 진동구조 혹은 회전구조에서의 상대강도분포를 측정함으로써 레이저 용접시 유기하는, 특히 저온 플라즈마의 진동온도 및 회전온도 등의 내부에너지의 계측에 매우 중요한 역할을 할 것으로 사려된다. 즉, 분해능이 높은 분광기를 사용하여, 대기중의 용접에서는 AlO 및 MgO, 불활성 분위기의 용접에서는 AlH분자의 진동·회전스펙트럼을 이용하면 플라즈마의 온도가 정도 좋게 계측될 수 있다.

Fig. 9에 A5083의 레이저 유기 플라즈마에서 동정된 AlO 및 MgO전자 스펙트럼 해석 결과의 한 예를 나타낸다. 이들 각 밴드는 $\Delta v' = v' - v'' = 0, 1$ 의 시퀀스와 $v'' = 0, 1, 2, 3$ 의 각 프로그래션으로 나뉘어 질 수 있다. 이와 같은 해석에 의해 미지의, 지금까지 밝혀지지 아니한 분자선의 동정이 가능하다.

4. 결 론

각종 알루미늄 합금의 펄스 YAG 레이저 용접시에 유기되는 플라즈마에 대해 발광분광분석을 행하고, 제각기 다른 분위기 가스 중에서 여기종의 동정 및 그들의 발광특성을 명확히 했다. 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 증발·여기종으로서, Al, Mg, Cr등의 중성 원자선과 Mg의 1가 이온선 및 AlO, MgO, AlH의 2

원자 분자선이 동정되었다.

2) 발광 스펙트럼선의 상대적 강도는, 짧은 펄스 레이저 열원에 의한 단시간의 발광에도 불구하고, 각종 파장표에 있어서 아크 여기의 스펙트럼 강도 값과 잘 일치했다.

3) 화학반응종인 2원자 분자 스펙트럼의 구조 해석에 의해, AlO의 455.83 nm 등 다수의 미지의 스펙트럼이 동정되었다.

4) 플라즈마의 온도나 전자밀도 등의 물리량계측에는, Cr과 Mg의 중성원자선, Mg의 1가이온선 및 AlO, MgO 그리고 AlH 분자선이 유효하게 이용될 수 있음을 알 수 있었다.

5) AlI와 MgI의 공명선에는 심한 자기흡수현상을 나타내었다. 이것으로부터, 전자기저상태에 있는 Al와 Mg원자가 다량으로 증발하고 있고, 플라즈마의 온도는 증발점 온도부근임이 예측된다. 이와 같은 자기흡수 현상은, Mg함유량이 많은 재료일수록 심하게 발생하고 있음을 알 수 있었다.

6) AlO와 MgO분자선은 대기중 강한 발광강도를 나타내었으나, Ar불활성가스 분위기 중에서는 검출되지 않았다. 이들 분자선은 레이저 조사에 의해 증발된 Al 및 Mg가 대기중의 산소와 화학반응에 의해 생성된 것이다.

7) Ar불활성가스 분위기 중에서 AlH분자선이 동정되었으며, 그 발광강도는 분위기 가스중의 H₂ 농도에 따라 민감하게 변화했다.

참고문헌

1. M.M.Collur, A.Daul and T.Debroy : "Mechanism of Alloying Element Vaporization during Laser Welding", Metallurgical Transaction B, Vol.18B, pp733-740, 1987.
2. D.W.Moon and E.A.Metzbower : "Laser Beam Welding of Aluminum Alloy5456", Welding Journal, pp.53s-58s, 1983.
3. A.Matsunawa, and T.Ohnawa : "Beam-Plume Interaction in Laser Materials Processing", Transactions of JWRI in Osaka University, Vol.20-1, pp.39-15, 1991.
4. 渡部武弘, 吉田嘉太郎, 志茂主税 : "レーザー加工形状の数値解析", レーザー研究, Vol. 16-5,

pp.252-266, 1988.

5. G.R.Harrison : "Wavelength Table", The M.I.T. Press, Cambridge, 1969.
6. A.R.Stiganov and N.S.Sventitskii : "Tables of Spectral Lines of Neutral and Ionized Atoms", IFI Plenum, New York, 1968.
7. A.N.Zaidel, V.K.Prokofev and S.M.Raiskii : "Tables of Spectrum Lines", Pergamon Press, Berlin, 1961.
8. R.W.B.Pearse and A.G.Gaydon : "The Identification of Molecular Spectra", Chapman and Hall LTD, London, 1976.
9. P.A.Molian and T.S.Strivatsan : "Weldability of Aluminium-lithium 2090 using Laser Welding", Journal of Material Science, Vol.25, pp.3347-3358, 1990.
10. 日本分光學會シリーズ : No.2, 13, 19, 學會出版センター.
11. C.H.Corliss and W.R.Bozman : "Experimental Transition Probabilities for Spectral Lines of Seventy Element", NBS Monograph 53, pp.5, 185, 1962.
12. S.Bashkin and J.O.Stoner : "Atomic Energy Levels and Grotrian Diagrams" Vol. I, North-Holland Pub. Co., Oxford, pp.388, 440, 1975
13. 竹尾陽敏, 中永泰介, 若山信子 : "熱プラズマの分光計測", 高温學會誌, Vol.18-5, pp.207-215, 1992.
14. G.V.Marr : "Plasma Spectroscopy", Elsevier Pub. Co., Amsterdam, Chap. V, 1968.
15. K.P.Huber and G.Herzberg : "Molecular Spectra and Molecular Structure IV, Constants of Diatomic Molecules", Van Nostrand Reinhold Co., New York, 1979.

저 자 소 개



김종도(金鍾道)

1963년 1월 28일생, 1985년 한국해양대학교 기관학과 졸업, 1995년 일본, 오사카대학(大阪大學) 대학원 생산기공공학과 고온공학교스 졸업(석사), 1997년 동대학원 생산기공공학과 고온공학교스 졸업(공학박사), 1998년-현재 한국해양대학교 전임강사