

레이저 용접조건에 따른 증발된 합금원소의 조성과 구조의 변화

김종도* · 조상명** · 김영식***

Chemical Composition and Structure of Evaporated Alloying Element by Laser Welding Condition

J. D. Kim · S. M. Cho · Y. S. Kim

Key words : Ultra-fine Particle(초미립자), Evaporation Phenomena(증발현상), Alloying Element(합금원소), Plasma Composition(플라즈마조성)

Abstract

This study is aimed to obtain fundamental knowledge of pulse laser welding phenomena, the authors investigated the structure and composition of evaporated particles of Al alloys in air and in the Ar atmosphere during pulsed laser welding. The ultra-fine particles of 5 to 100nm diameter in a globular or irregular shape were formed in laser-induced plasma and the main structure was $MgAl_2O_4$. The composition of particles was different depending on the power density of a laser beam; namely, under the low power density conditions, magnesium was predominant in the particles, while aluminium content increased with an increase in the power density. These results were attributed to evaporation phenomena of metals with different boiling points and latent heats of vaporization. On the other hand, the number density of laser-induced plasma species was obtained by Saha's equation. It was confirmed that the number density depends upon the plasma temperature and total pressures.

1. 서 론

본 연구는, 최근 조선, 항공분야의 대형 구조물

로부터 소형 IC 반도체에 이르기까지 폭넓은 범위에 걸쳐 적용되고 있는 레이저 용접¹⁾에 있어서, 용융 금속으로부터 증발하는 합금원소의 증발현

* 한국해양대학교 기관시스템공학부(원고접수일 : 99년 4월)

** 부경대학교 생산가공공학과

*** 한국해양대학교 재료공학과

상에 관한 기초적 지견을 얻어, 증발기구 및 용접 결합의 형성기구를 규명하는 것을 최종목적으로서 행하고 있는 것이다.

전 보고^{5,6)}에서는, 펄스 레이저의 열원을 이용한 알루미늄합금의 용접시 유기 플라즈마의 분광학적 특성과 그 물리량을 추정하고, 용접중 스펙트럼의 해석에 의해 합금원소의 증발거동을 명확히 하였다.

본고에서는, 각종의 레이저 조사 조건에서 증발하는 입자를 포집하여 금속재료학적 분석법에 의해 증발입자의 관찰, 분석 및 해석을 행하고, 용접중 증발입자의 거동을 전 보고에서의 분광 분석결과와 대응시켜 비교·검토하였다. 또한, 레이저 유기 플라즈마를 구성하는 입자의 밀도와 조성의 온도 및 압력 의존성에 대하여 열평형 상태를 가정한 계산식으로부터 추정하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

사용재료, 펄스 레이저 장치 및 레이저 점 용접법은, 전 보고 내용과 동일하다. 용접시에 사용재료로부터 증발·응축하는 입자를 포집하여 관찰과 분석을 행하였다. Fig. 1에 증발입자의 포집 방법을 나타낸다. 대기중 또는 Ar가스 분위기 중에서 3~100회의 레이저를 조사하고, 재료표면상의

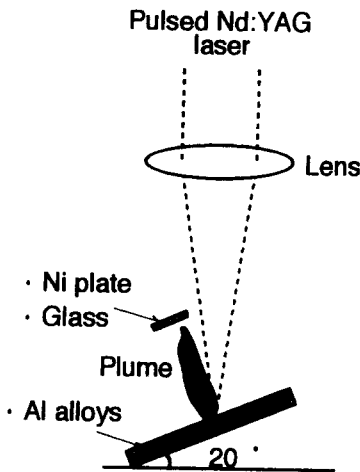


Fig. 1 Schematic illustration of collection of ultra-fine particles.

7~15mm 위치에서 순니켈판(pure Ni plate) 또는 글라스판(glass plate)위에 입자를 증착시켜서 포집하였다.

증발입자의 관찰에는 주사형 전자 현미경(SEM)을 이용하였으며, 전자 프로브 마이크로 아날라이저(EPMA)와 X선 회절장치(XRD)에 의해 증발·응축하는 입자의 구성원소 비율을 정량적으로 측정함과 더불어 결정물질의 동정을 각각 행하였다. 증발입자의 포집 기관은, 본 실험에 이용한 재료에 합금성분으로 함유되어 있지 않은 순니켈(99.9 mass%Ni)을 이용하였다. XRD에 사용한 X선은, target에 Cu를 이용하고, 管球전압 30kV 및 管球전류 40mA에서 발생시킨 것이다. 또한, 모노크로미터를 이용하여 $K\beta(\lambda=0.139217 \text{ nm})$ 의 강도를 약하게 하여 단일파장의 X선 $K\alpha(\lambda=0.154051 \text{ nm})$ 부터의 회절선을 이용하였다.

다음으로, Fig. 1의 글라스판(1 mm t)를 이용하여 증발입자를 포집하고, 입자의 추출 레프리카 막에 대해서 가속전압 200kV의 조건에서 투과형 전자 현미경(TEM)을 이용하여 3만~30만배의 배율로 미소영역에서의 초미립자 확대상을 관찰하였다.

이러한 실험결과와 전자선 회절패턴, 그리고 에너지 분산 X선 분석법(EDS)에 의한 스펙트럼 해석결과와 비교·분석하여 종합적으로 해석함으로써 초미립자의 입경분포, 구조 및 조성에 대하여 상세한 검토를 행하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 증발·응축입자의 구조와 조성

알루미늄 합금의 레이저 유기 플라즈마로부터 Ni 기판상에 포집한 증발입자를 EPMA에 의해 분석하였다. Table I에 주된 동정원소인 Al과 Mg 그

Table I Component ratio of collected particles from Al-Mg alloys plasma in air.

A5083 ; $E_0=43\text{J/p}$, $\tau_p=10\text{ms}$, $f_a=0$, in air		
	Base metal (mass%)	Ratio of evaporated elements(mass%)
Al	94.17	34.44
Mg	4.58	16.22
O	—	47.61
Bal.	1.25	1.73

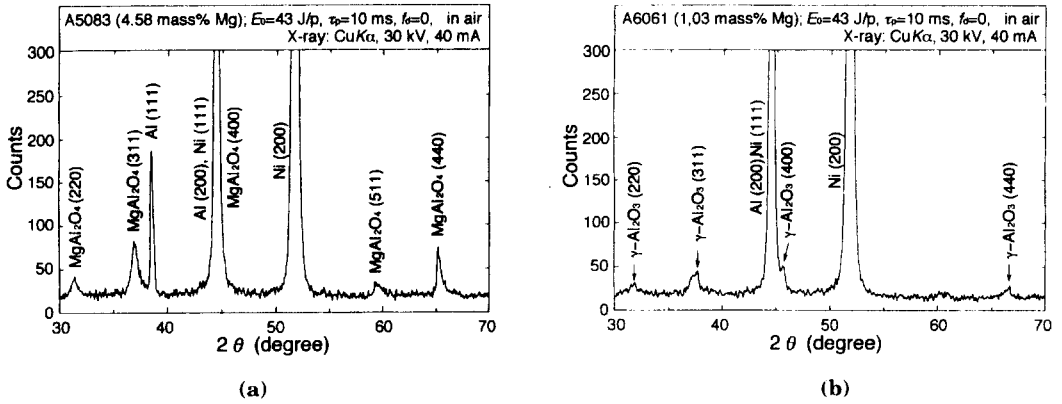


Fig. 2 X-ray diffractometer results of evaporation particles produced from Al-Mg alloys by laser.

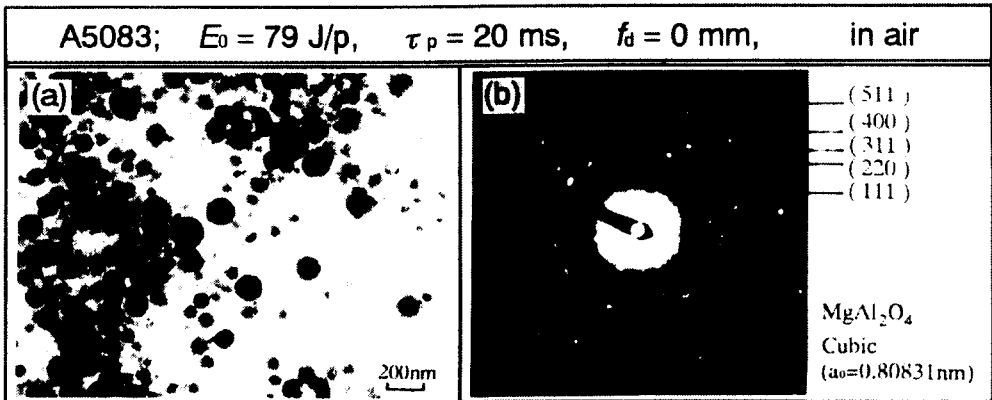


Fig. 3 TEM photos(a) and electron diffraction pattern(b) of ultra-fine particles by laser in air.

리고 O와의 정성적 비율을 나타낸다. 펄스 레이저 조사조건은, 대기중, τ_p (펄스폭)=10ms, f_d (초점을 벗어난 거리)=0mm에서 E_0 (레이저 펄스에너지)=43J/p이다. 증발입자는 알루미늄 합금 A5083의 주된 합금원소인 Al과 Mg으로 구성되어 있고, 다량의 O가 검출된 것으로부터 Al과 Mg이 상당히 산화되어 있음을 알 수 있다. 또한, Mg의 증발비율은 약 16%이며, 모재의 Mg 함유량 4.58%에 비하여 상당히 많이 증발하는 것을 알 수 있었다.

Fig. 2에, Mg성분의 함유량이 다른 알루미늄 합금으로부터 증발·응축하는 입자의 XRD동정결과를 나타낸다. 레이저 조사조건은 Table I의 조건과 동일하다. 각 그림중에서 상당히 높은 강도를 나타내는 Ni은, 증발입자의 포집시에 이용한

순니켈판으로부터 생긴 것이며, 또한, Al은 용융지의 용액이 스패터(splatter)로서 비산하여 순니켈판에 부착하여 검출된 것이다. Fig. 2로부터, 증발·응축입자의 주된 구조는 Mg성분의 함유량에 따라 변화하는 것을 알 수 있다. 즉, A5083 (4.58mass% Mg)의 경우 Spinel 구조의 $MgAl_2O_4$ 인데 반하여, A6061(1.03mass%Mg)의 경우는 주로 $\gamma-Al_2O_3$ 로 되어있다. 그리고 Mg함유량이 A5083과 A6061의 중간 정도인 A5052(2.69 mass%Mg)의 경우에는 $MgAl_2O_4$ 와 $\gamma-Al_2O_3$ 가 공존하고 있음을 부가적인 실험결과로부터 확인 할 수 있었다. 이것은 각 합금으로부터 Mg증발량이 감소함에 따라, 각각의 조성에서 보다 안정한 구조가 형성되었기 때문으로 생각된다. 이와 같이 XRD는, 결정면 간격이 가까운 동일구조의

화합물을 식별하는데 상당히 유효한 방법이며⁷⁾, 본 연구에 있어서도 $MgAl_2O_4(a_0=0.80831nm)$ 와 $\gamma-Al_2O_3(a_0=0.790nm)$ 와 같은 산화물의 구별이 가능하였다.

다음으로, 증발입자의 TEM상과 전자선 회절 패턴의 해석결과 및 입경분포를 각각 Fig. 3 및 Fig. 4에 나타낸다. 레이저 조사조건은, 대기중 $E_0=79J/p$, $\tau_p=20ms$, $f_d=0mm$ 이다. 이 결과로부터, 증발로 생성한 초미립자는, 100nm이하의 원형이며, 이용한 가공열원인 YAG 레이저 빔의 파장보다 상당히 작은 것을 알 수 있다. 즉, 레이저 용접시에는 조사되는 레이저빔과 유기 플라즈마 주변에서 생성되는 초미립자와의 상호작용에 의해서 강한 레이리 산란이 발생하고 있음을 판명하고 있다⁸⁾. 또한 이 레이리 산란광 강도는 입사광 파장의 4승에 반비례하는 관계에 있으므로 CO_2 레이저($10.06\mu m$)의 약 1/10의 파장을 가진 YAG 레이저($1.06\mu m$)에 있어서는 그 영향이 크다고 생각된다.

또한, Fig. 3(b)의 전자선 회절상의 해석결과로부터, 초미립자는 주로 spinnel구조의 $MgAl_2O_4$ 임을 알 수 있는데, 이것은 XRD에 의한 해석결과와 잘 일치하고 있다. spinnel 구조⁹⁾는 입방 최밀배치를 가지는 음이온의 4면체 홀(A Site)의 1/8과 팔면체의 홀(B Site)의 1/2을 양이온이 차지하는 구조이다. Spinnel 구조를 가진 화합물의 일반식은 AB_2X_4 이며, 단위격자는 이 Unit를 8개 포함하

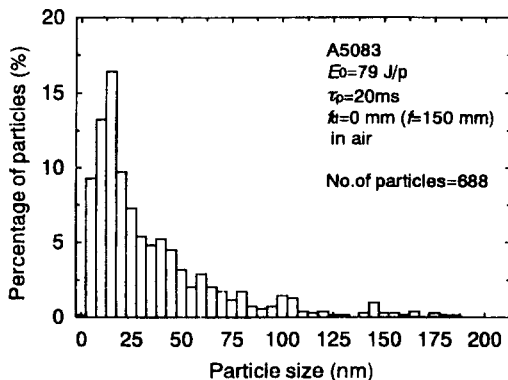


Fig. 4 Size distribution of ultra-fine particles produced from Al-Mg alloys by laser in air.

고 있는 매우 복잡한 구조이다.

3.2 증발·응축입자의 구조 및 조성에 미치는 파워밀도의 영향

앞 절에서는, 증발·응축입자의 구조와 조성, 입경분포 등의 특징을 명확히 하고, 용접시에는 유기 플라즈마중의 초미립자에 의한 레이리 산란현상에 의하여 레이저 빔 에너지의 손실 가능성을 시사

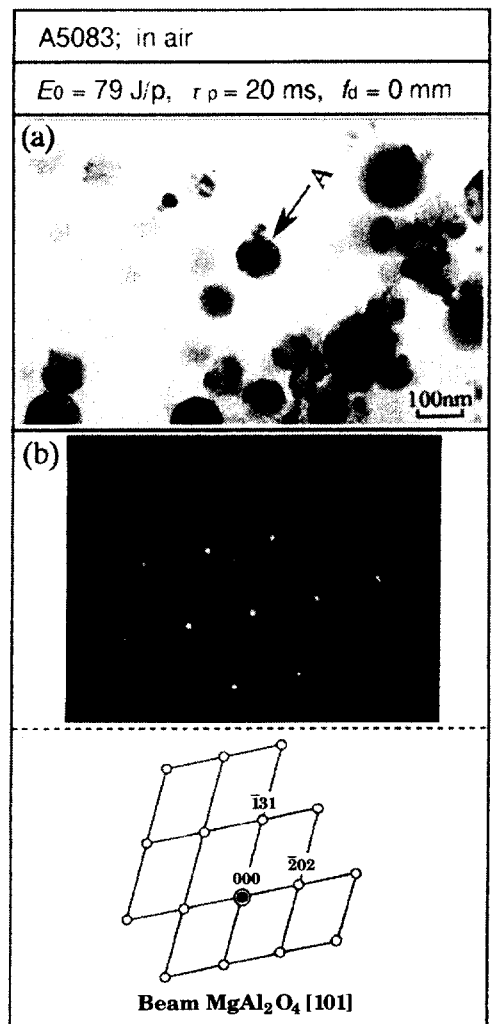


Fig. 5 Ultra-fine particles produced from Al-Mg alloys by laser in air, and (b) was taken from remark A in photo (a). (a) TEM photo, (b) electron diffraction pattern and its key diagram.

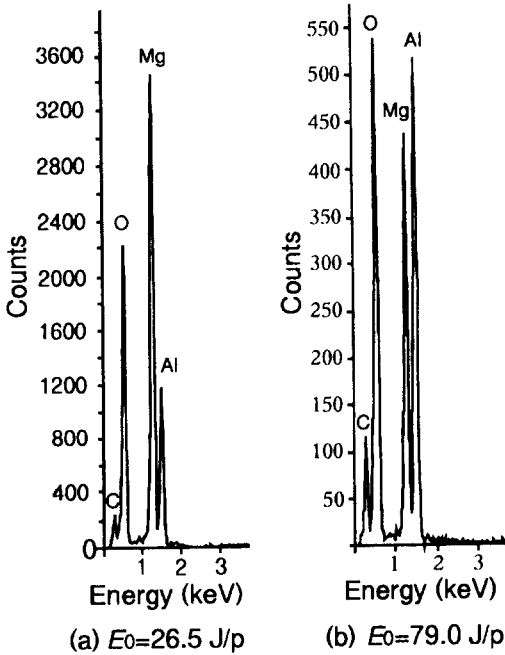


Fig. 6 EDS spectra of one ultra-fine particles from Al-Mg alloys by laser in air. ($\tau_p=20\text{ms}$, $f_d=0\text{mm}$).

했다. 본 절에서는, 레이저 빔 에너지와 증발·응축 입자의 구조 및 조성과의 관련성에 대해서 검토를 행한다.

대기중에서 증발된 입자의 TEM상과 하나의 입자에 대한 전자선 회절 패턴 및 그 key diagram의 해석결과, 그리고 EDS 분석결과와 한 예를 Fig. 5 및 Fig. 6에 각각 나타낸다. EDS 선 가운데 C성분은, TEM 관찰을 위한 추출 레프리카의 탄소(carbon)막으로부터 검출된 것이며, 증발입자의 성분은 아니다. Fig. 5로부터, 증발입자를 구성하는 개개의 초미립자는 MgAl_2O_4 인 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 약 $3.4 \times 10^9 \text{W/m}^2$ (26.5J/p)의 저파워 밀도의 레이저 조사 조건에 있어서도 동일하게 관찰되었다. 더욱이 이것은 Fig. 2(a) 및 Fig. 3에서의 전반적인 구조의 해석결과와도 일치하며, 파워 밀도가 변하여도 입자의 구조는 변하지 않음을 알 수 있었다. 그러나, Fig. 6에 나타난 하나의 입자에 대한 EDS분석 결과에 의하면, $3.4 \times 10^9 \text{W/m}^2$ (26.5J/p)의 저파워 밀도에 있어서는 Mg의 강도

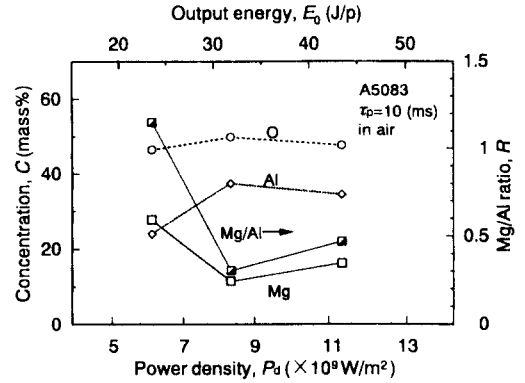


Fig. 7 Component ratio of collected particles as a function of laser power density in Al-Mg alloys.

가, $10.3 \times 10^9 \text{W/m}^2$ (79.0J/p)의 고파워 밀도의 경우에는 Al의 강도가 크고, 각각의 레이저 조사조건에서의 Mg과 Al의 증발량 차이가 인정된다. 또한, 분석하는 각각의 입자에 따라서 Al과 Mg의 강도 비율의 차이가 다소 발생하지만 전반적인 경향은 변하지 않았다.

Fig. 7은 레이저의 파워밀도(펄스에너지)를 변화시켜 얻어진 A5083으로부터의 증발입자 조성을 EPMA로 분석하여, 주된 동정원소인 Al, Mg 및 O의 비율을 조사한 결과이다. Al과 Mg의 증발 비율은 펄스에너지의 변화에 따라서 변동하여, 저파워 밀도의 경우에 Mg증발량이 많고, 고파워 밀도가 되면 Al의 증발량이 Mg보다 많아졌다.

이와 같은 증발거동은, 앞 보고⁶⁾에서 유기플라즈마의 분광학적 해석결과에도 나타나 있는데, 이번의 분석결과로부터 더욱 명확하게 되었다고 할 수 있을 것이다. 이와 같은 현상이 발생하는 원인은, Mg의 비점 및 증발잠열($1376 \pm 5 \text{K}$, $128.7 \times 10^3 \text{J/mol}$)이 Al($2750 \pm 50 \text{K}$, $293.8 \times 10^3 \text{J/mol}$)보다 약 1/2정도로 낮으므로 레이저 파워밀도가 낮을 때에는 용융지의 표면온도도 낮게 되어, Mg의 증발이 Al보다 쉽게 일어나기 때문으로 생각된다.

3.3 불활성가스 분위기에서의 증발·응축입자의 구조와 조성

불활성 Ar가스 분위기중에서, Al-Mg계 합금의

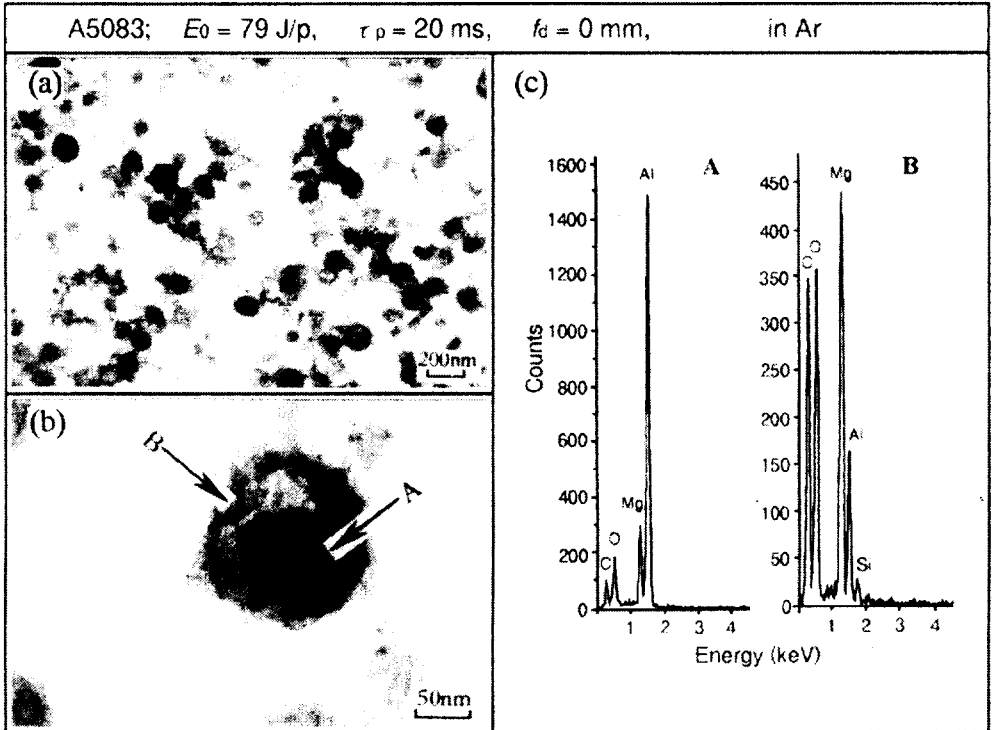


Fig. 8 Ultra-fine particles produced from Al-Mg alloys by laser in Ar.
 (a) TEM photo($\times 30,000$), (b) TEM photo($\times 150,000$), and (c) EDS spectra of remark A and B in photo (b).

펄스 레이저 용접시 증발·응축하는 입자의 분석 결과를 Fig. 8 및 Fig. 9에 나타낸다. Fig. 8은 $10.3 \times 10^9 \text{ W/m}^2 (79 \text{ J/p})$ 의 고파워 밀도의 레이저 조사 조건에서 얻어진 결과이다. (a)와 (b)는 각각 포집한 입자를 저배율(3만배)과 고배율(15만배)로 관찰한 TEM상이다. 또한 (c)는, (b)중의 하나의 입자에 대해서 내측(화살표A)과 외측(화살표B)의 EDS분석결과를 나타낸다. 증발입자는 주로 약 100nm이하의 특정한 형태를 갖지 아니한 부정형의 초미립자이며, 이것은 대기중에서 포집한 초미립자의 원형과는 다른 모양을 보이고 있다. EDS 분석결과와 더불어 행한 전자선 회절패턴의 해석 결과로부터, 하나의 입자중에서도 내부에는 Al이 많고, 외측에는 Mg가 많은 구성원소임을 알 수 있다. 이와 같은 현상의 원인은, 앞 보고⁹⁾에서 기술한 유기 플라즈마의 선 강도에 대한 시간변화의 해석결과, 그리고 앞 절에서의 TEM관찰과 EPMA분석결과로부터 예측할 수 있다. 즉, Mg의

비점 및 증발잠열이 Al보다 약 1/2정도로 낮은 것에 기인해서, 레이저 조사중은 Al의 증발이 지배적으로 되어 주로 Al구조로서 응축되며, 레이저 빔의 종료시에는 용융지 표면의 온도가 낮게 되어 비점이 낮은 Mg의 증발이 지배적으로 일어나기 때문에 한 입자의 외측과 내측의 조성이 다른 것으로 추정된다.

Fig. 9는, Ar중에서 $3.4 \times 10^9 \text{ W/m}^2 (26.5 \text{ J/p})$ 의 저파워 밀도의 레이저 조사 조건에서 얻어진 증발·응축입자의 분석결과를 나타낸다. 단, 이 경우 글라스판에 의한 증발입자의 포집이 곤란하기 때문에 레이저 점용접 후에 재료표면에 부착해 있는 초미립자를 채취하였다. Fig. 9에서 증발입자의 TEM상 (a)와 그 내부의 하나의 입자 A에 대한 전자선 회절상의 해석결과로부터, 초미립자는 부정형이며 입자 A는 hcp구조의 Mg($a_0 = 0.32095 \text{ nm}$, $c_0 = 0.52104 \text{ nm}$)임을 알았다.

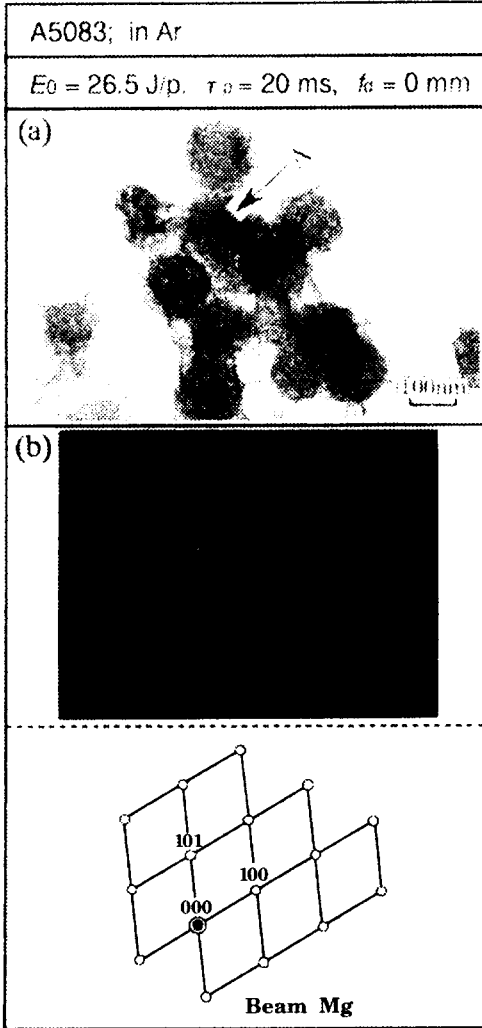


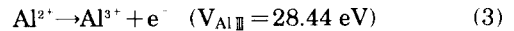
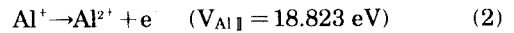
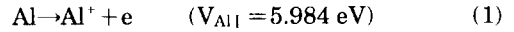
Fig. 9 Ultra-fine particles produced from Al-Mg alloys by laser in Ar, (b) was taken from remark A in photo (a).
 (a) TEM photo, (b) electron diffraction pattern and its key diagram.

3. 4 열평형 상태에서의 입자밀도 계산

레이저 용접시 유기 플라즈마의 온도와 전자밀도, 그리고 압력과는 어떠한 관계에 있는가를 검토하기 위해, 지금까지의 실험에서 얻어진 결과를 기초로 하여 플라즈마가 열평형 상태에서 이상기체인 것을 가정해서, 우선 순알루미늄(pure Al)에 대한 레이저 유기 플라즈마의 평형조성을 이하의 순

서로 구했다^{10,11)}.

순알루미늄의 레이저 유기 플라즈마에는 다음의 반응이 일어나고 있다고 한다. (단, 4가 이상의 이온은 무시한다.)



단, V_{AlI} , V_{AlII} , V_{AlIII} 은 각각 원자, 1가 이온, 2가 이온의 전리에너지이다. Al, Al^+ , Al^{2+} , Al^{3+} 및 e에 대해서 각각 농도를 C_1, C_2, C_3, C_4 및 C_e 로 정하면, 각 반응의 전리평형정수 K는 각각 다음과 같이 된다.

$$K_1 = C_2 \cdot C_e / C_1 \quad (4)$$

$$K_2 = C_3 \cdot C_e / C_2 \quad (5)$$

$$K_3 = C_4 \cdot C_e / C_3 \quad (6)$$

단, C_X 는 X입자의 농도를 나타낸다. 플라즈마는 전기적으로 중성이므로,

$$C_2 + 2C_3 + 3C_4 = C_e \quad (7)$$

각입자의 농도의 합은 1이 되므로,

$$C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_e = 1 \quad (8)$$

여기에서, 평형정수 K_1 은 중성원자, 전자 및 이온의 상태합(혹은 분배함수)를 이용해서 표현하면, 다음식에 의해서도 주어진다.

$$K_1 = A_i \frac{T^{5/2}}{P} \exp\left(-\frac{v - \Delta v}{kT}\right) \quad (9)$$

v : 전리에너지 P : 압력

κ : 볼츠만 정수 T : 플라즈마의 온도

A_i 를 전리화학정수로 가칭하고, 이것은 다음식으로 나타내어진다.

$$A_i = \frac{(2\pi m_e)^{3/2} + k^{5/2}}{h^3} + \frac{Z_{A'} + Z_e}{Z_A} \quad (10)$$

h : 플랑크 정수 m_e : 전자의 질량

$Z_A, Z_{A'}$: 기체입자의 원자 및 이온의 분배함수

Z_e : 전자의 분배함수 (=2)

또한, 기체입자의 분배함수는 다음식에 의해 나타

내어진다.

$$Z = \sum_i g_i \exp\left(-\frac{E_i}{kT}\right) \quad (11)$$

E_i : 기체입자의 i 번째 에너지 레벨의 여기에너지
 g_i : 기체입자의 i 번째 에너지 레벨에서의 통계적 증가(重價)

전체 입자수는, 이상기체의 상태방정식으로부터, 다음과 같이 구할 수 있다.

$$P = nkT \quad (P: \text{압력}) \quad (12)$$

(12) 식으로부터, 플라즈마내의 총입자 n_{all} 은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$n_{all} = \frac{P}{kT} \quad (13)$$

각각의 입자밀도 n_i 는, n_{all} 을 이용해서

$$n_i = C_i \times n_{all} \quad (14)$$

로서 주어진다. 식(9)의 ν 는 전자밀도 n_e 에 의해 영향을 받고

$$\Delta\nu = 6.96 \times 10^{-9} n_e^{1/3} \quad (15)$$

만큼 감소한다. 이것을 식(9)에 대입하고 반복되는 일련의 계산을 행한다. 식(15)의 $\Delta\nu$ 식은 Unsöld의 보정식으로, 이온전계에 의한 원자 또는 이온의 전리전압 저하를 나타낸다. 더욱이 내부상대합의

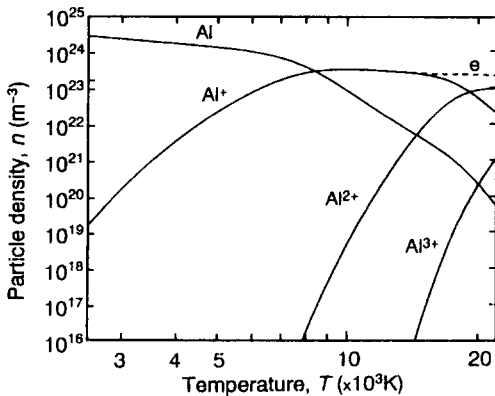


Fig. 10 Temperature dependence of equilibrium composition. (Total pressure : 1×10^5 Pa, pure Al)

계산에도 영향을 미친다. 이 연립방정식을 푸는 기본적인 수법으로서는 Newton-Raphson법을 이용하고, 각 플라즈마 온도에 대해서 계산을 행하여 그 온도에 대한 입자밀도를 결정했다. 이온과 중성원자의 분배함수 계산에 있어서 각 입자에 대한 에너지 레벨의 여기에너지와 그 통계적 重價에는 문헌¹²⁾의 값을 이용하였다. 이상과 같이 계산한 pure Al의 레이저 유기 플라즈마의 평형조성을 Fig. 10에 나타낸다.

이로부터, 전자밀도는 10,000K부근에서 포화하고, 그 후 조금씩 감소해간다. 또한, 약 15,000K이하의 온도범위에 있어서는, Al의 2가 이온이 전자밀도에 미치는 영향은 매우 적고, 전자밀도와 1가 이온의 밀도는 거의 같다고 말할 수 있다.

다음으로, Al(65at%)와 Mg(37at%)으로부터 형성되는 플라즈마의 평형조성을 구하였다. 플라즈마 가운데는 다음과 같은 반응이 일어나고 있다고 한다. 여기에서는 3가 이온까지를 고려한다.



Al, Al^+ , Al^{2+} , Al^{3+} 및 Mg, Mg^+ , Mg^{2+} , Mg^{3+} , e^- 에 대해서 각각의 농도를 $C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6, C_7, C_8, C_e$ 로 정하면, Al과 Mg플라즈마에서의 조성비 (A_m)은,

$$A_m = \frac{C_5 + C_6 + C_7 + C_8}{C_1 + C_2 + C_3 + C_4} \quad (22)$$

이때 A_m 은 37/63이다. 이 조성비율은 펄스 YAG 레이저 용접시(대기중 $E_0 = 79\text{J/p}$, $f_d = 0\text{mm}$)에 생성하는 증발입자를 포집해서 EPMA분석한 결과로부터 얻어진 Al과 Mg의 at%비율이다. 또한, 분위기조건으로서 화학반응이 일어나지 않는 Ar불활성 분위기임을 가정했다. 각 입자밀도는 Al의 경우와 같이 산출하였다.

Fig. 11은 전압력 1×10^5 Pa에서의 Al(63at%) + Mg(37at%) 플라즈마의 평형조성을 나타낸다. 이

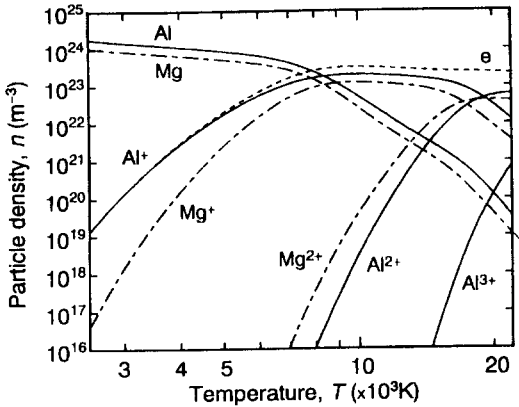


Fig. 11 Temperature dependence of equilibrium composition. ($1 \times 10^6 \text{Pa}$, Al : Mg = 63 : 37at%)

것에 의하면, 약 3,500~10,000K의 저온역에서는 전자밀도의 증가가 pure Al의 경우보다 현저함을 알 수 있다. 이와 같은 저온역에서의 전자밀도 증가는, Mg^+ 이온 밀도와 더불어 증대하고 있는 점으로부터, $\text{Mg} \rightarrow \text{Mg}^+ + e^-$ 의 전리반응에 의한 전자 (e^-)에 의해서 초래된 것임을 알 수 있다.

또한 전자밀도에 미치는 전압력의 영향을 검토한 결과, 전자밀도는 압력의 증대에 의해 현저히 증가하는 것을 알았다.

4. 결 론

Al-Mg계 알루미늄 합금의 펄스 레이저 용접시 증발·응축하는 입자의 거동을 재료학적 관점으로부터 관찰 및 분석을 행하였다. 또한, 입자의 평형조성에 대한 온도 및 압력 의존성에 대해서 열평형 상태를 가정한 계산식으로부터 추정하였다. 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 대기중 Al-Mg계 합금으로부터의 증발입자는 약 5~100nm의 입경을 가진 원형의 초미립자로, 주된 구성은 spinnel구조의 MgAl_2O_4 임을 알았다. 이것으로부터, 레이저 용접중에는 레이리 산란현상에 의해 빔 에너지 손실 등이 발생 할 것으로 사려된다.
- 2) 합금중의 Mg함유량이 적어짐에 따라, 초미립자의 주된 구조는, $\text{MgAl}_2\text{O}_4 \Rightarrow \text{MgAl}_2\text{O}_4$ 와 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 공존 $\Rightarrow \gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 로 변화하였다.

3) Al-Mg계 합금의 Al과 Mg의 증발량에 대해서는 고과워 밀도의 경우 Al가 Mg보다 많이 증발하고, 저과워 밀도에서는 Mg가 Al보다 많게 되어 Mg과 Al의 증발비율은 역전하였다. 이와 같은 증발거동은 Ar불활성 가스 분위기 중에서도 발생하였다. 이러한 현상은 Mg의 비점 및 증발잠열이 Al보다 약 1/2정도로 낮다는 점과 용융지의 온도분포의 차이로부터 이해 될 수 있다.

4) 열평형 상태에서 입자밀도의 거동을 계산한 결과를 정리하면 다음과 같다.

- a) Pure Al플라즈마의 평형조성으로부터, 약 15,000K이하의 온도에 있어서는, 2가 이온이 전자밀도에 미치는 영향은 매우 적고, 전자밀도와 1가 이온의 밀도는 근사적으로 같다고 할 수 있다.
- b) Al(63at%)+Mg(37at%)플라즈마의 경우, $\text{Mg} \rightarrow \text{Mg}^+ + e^-$ 의 전리반응에 의해서 약 3,500~10,000K의 저온역에서는, 전자밀도의 증가가 pure Al 플라즈마의 경우보다 현저하였다.
- c) 전압력을 파라메타로 한 전자밀도의 온도 의존성에 대해서 계산한 결과, 전자밀도는 압력의 증대에 의해 현저하게 증가하였다.

참고문헌

1. 谷九 浩, 花井 政吉, 齊藤 裕一: "産業用エキシマレーザとその應用", 溶接技術, pp.100~105, 1991.
2. 김 중도, 松繩 朗: "레이저 용접현상과 산업계로의 응용", 한국박용기관학회지, Vol.22-6, pp.16~25, 1998.
3. Y.V.Poloskin, V.D.Talalaev and V.M.Trishkin: "Wide Possibilities of Laser Technology in Production of Aircraft Engines", Proceedings of LAMP' 92, Nagaoka Japan, pp.987~992, June 1992.
4. 高藤 英生, 市古 修身: "鐵鋼業におけるレーザーの利用", 鐵と鋼, Vol.71-14, pp.28~38, 1985.
5. 김중도: "펄스 YAG 레이저 용접시 유기하는 플라즈마의 스펙트럼선 同定과 발광특성", 한국박용기

- 관학회지, Vol.23-3, pp.86~94, 1999.
6. 김종도, 김윤해: "레이저 용접시 분광학적 수법에 의한 증발입자의 거동과 플라즈마 물성의 계측", 한국박용기관학회지, Vol.23-4, 1999.
 7. 西山善次, 幸田成康編: "金屬の電子顯微鏡寫眞と解説", 丸善, 東京, 1975.
 8. 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.
 9. F.S. ガラッソー, 可藤誠軌, 植松敬三譯: "圖解フラインセラミック스의結晶化學", アグネ 技術センター, 東京, pp.246, 1984.
 10. 中野: "プラズ마工學例題演習", コロナ, 東京, Chap.3, 4, 1974.
 11. 作田, 鬼頭, 宮地: "銅蒸氣混入による高温蒸氣中の電子密度の増大", 電氣學會論文集A, Vol.98-4, pp.33~38, 1978.
 12. C.E.Moore: "Atomic Energy Level(Circular of the National Bureau of Standard 467", Vol.1, Washington, 1949.

저 자 소 개



김종도(金鍾道)

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



조상명

1952년 2월생. 1977년 한국해양대학교 기관학과 졸업. 1982년 동 대학원 졸업(석사). 1988년 일본 대관대학 졸업(박사). 1983년~1992년 한국해양수산연수원 교수. 1993~현재 부경대학교 생산기공공학과 교수. 당학회 회원.



김영식

1944년 10월생. 1967년 한국해양대학교 기관공학과 졸업. 1973년 동대학원 졸업(석사). 1979년 동경공업대학교 졸업(박사). 1974년~현재 한국해양대학교 재료공학과. 당학회 부회장, 대한용접학회 회장, 한국선급 금속전문위원, 중소기업 기술혁신 개발사업 평가위원.