

CO₂ 레이저 용접한 7N01 Al합금의 미세조직 특징(I) - 완전용입 용접부의 미세조직 -

윤재정* · 강정윤** · 김인배** · 김대업***

*부산대학교 대학원 금속공학과

**부산대학교 금속공학과

***현대모비스(주) 기술연구소

Microstructural Features of Al Alloy 7N01 Welded by CO₂ Laser - Microstructural Features of Full Penetration Joints -

Jae-Jung Yoon*, Chung-Yun Kang**, In-Bae Kim** and Dae-Up Kim***

*Dep. of Metallurgical Engineering, Graduate School, Pusan National University, Pusan 609-735, Korea

**Dep. of Metallurgical Engineering, Pusan National University, Pusan 609-735, Korea

***Research Institute, Hyundai MOBIS Co., Yongin 449-910, Korea

Abstract

The effect of welding condition on the microstructures of the weld metal in A7N01 welded by CO₂ laser was investigated.

The number of ripples was increased with decreasing power and increasing welding speed. In the bead without ripple lines, the subgrain microstructures distribution from the fusion line toward the center of the bead were in the order of cellular, dendritic and equiaxed dendrite. However, in the bead with ripple lines, cellular and dendritic were formed between the fusion boundary and the ripple line. In addition, those structures were also observed between the ripple line. Equiaxed dendrites were formed only at the center line region. Cellular and dendritics formed near the ripple line were larger than those formed near the fusion boundary.

The cooling rates estimated by the dendrite arm spacing were in the range of 200 to 1150°C/s. Cooling rate was increased with decreasing the power and increasing the welding speed. Mg and Zn segregated at the boundaries of cellulars and dendritics. Mg was segregated more than Zn. The segregation of Mg and Zn decreased with increasing cooling rate. Hardness of the weld metal was lower than that of the base metal in all welding conditions and increased as the cooling rate increased.

(Received May 19, 2001)

Key Words : A7N01, CO₂ laser, Power, Welding speed, Ripple line, Solidification structure, Dendrite arm spacing, Cooling rate, Segregation, Hardness

1. 서 론

자동차, 선박 등의 수송분야에서 경량화 추세로 고강도 Al합금의 사용빈도가 커지고 있고, 7000계 합금이 경량구조용 합금으로 주목을 받고 있다. 이 중에서도 A7N01 합금은 고속전철 차량, 자동차 등에 사용되고

있다. 고강도 Al합금으로 구성된 구조물의 대형화 및 고정밀화 추세에 따라서 레이저용접의 수요가 급증하여, 레이저 용접에 대한 연구는 활발히 이루어져 왔으나, 용접부의 미세조직에 대한 연구는 아주 적은 편이다.

미세조직에 관한 연구로는 A6061, A2024, A2090, A2219, A5549 및 A7075합금에 대한 CO₂ 레이저 용착금속의 결정립 성장과정^{1,2)} 및 순 Al 및

A1050, A5052합금의 결정 성장 거동³⁻⁵⁾과 덴드라이트 암 스페이싱(Dendrite arm spacing : DAS)으로부터 냉각속도를 계산하여 레이저, GTAW 및 전자빔 용접의 냉각속도를 비교한 보고⁶⁾가 있다. 또한 Al-9%Zn, Al-4.5%Cu, A2219, A5083합금의 레이저 용접부에 대한 편석현상을 검토한 보고^{1, 7, 8)}들이 있다. 그러나, A7N01 합금의 레이저 용접부의 미세조직에 관한 연구보고는 없다. 특히 레이저용접부의 미세조직은 주로 비드 중앙부의 등축정을 대상으로 검토되어 있고, 레이저 용접부에서 자주 나타나는 리플라인(Ripple line) 근방의 응고조직 변화에 대하여 자세하게 검토한 연구결과는 없다.

본 연구에서는 CW CO₂ 레이저로 비드용접(bead welding)한 A7N01 Al합금의 용접부에 대하여 조직학적 검토를 행하였다. 우선 용접조건에 따른 거시조직 및 미세조직의 변화를 관찰하고, 이 결과로부터 용융경계부, 리플라인 근방, 비드 중앙부로 나누어 조직변화를 체계적으로 분석하여 CO₂ 레이저 용접부의 미세조직 특징에 대해서 조사하였다. 또한 미세조직으로부터 냉각속도를 추정하여 용접금속의 편석 현상과 경도와의 상관관계를 검토하여 보았다.

2. 실험방법

모재는 열처리용 합금인 Al-Zn-Mg계 A7N01합금으로, 화학조성은 Table 1과 같고, T5 열처리된 것을 사용하였다.

본 연구에서 사용된 레이저 장치는 5-axis 3-

Table 1 Chemical composition of material used

Materials	Chemical compositions (wt.%)									Treatment condition
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al	
7N01	0.09	0.18	0.10	0.41	1.23	0.19	4.52	0.02	bal.	T5*

*aging (120°C × 24 hrs)

Table 2 Welding conditions

Welding speed(m/min)	1~4
Laser power(kW)	4~7
Shielding gas : He	Pressure : 3 (kgf/cm ²)
	Flow rate : 70 (l/min)
Focus point(mm)	±0
Focus length(mm)	250
Nozzle height(mm)	20
Nozzle angle(degree)	40
Nozzle diameter(mm)	8

dimensional Processing Machine인 50kW급 CO₂ 레이저($\lambda=10.6\mu\text{m}$) 가공장비(Advanced Materials Processing Institute, Kinki, Japan)를 사용하였다. 용접은 모재를 120(L)×100(W)×4(T)mm 크기로 절단하여, 사포 400번까지 연마하고 아세톤으로 세척한 후, He분위기에서 압출방향에 평행하게 CW-CO₂ 레이저로 비드 용접을 행하였다. 기본적인 용접 조건은 표 2와 같고, 미세조직의 영향을 검토하기 위하여 출력을 4, 5, 6, 7kW로, 용접속도를 1, 2, 3, 4m/min로 변화시켰다.

미세조직은 Kerller's시약으로 부식시켜 광학현미경 및 SEM으로 관찰하였으며, 덴드라이트 암 스페이싱(Dendrite arm spacing : 이하 DAS로 표기)은 상분석기(Image analyzer)로 분석하였다. 편석 현상을 검토하기 위하여, EPMA로 성분분석을 행하였다.

3. 실험결과

3.1 용접부의 매크로조직

용접조건에 따른 용접부 미세조직의 변화를 관찰하기에 앞서 먼저 출력 4kW~7kW, 용접속도 1m/min~4m/min로 변화시켜 용접한 후, 용접방향과 수직인 단면 비드로부터 용입현상을 파악하여 보았다. 그 결과를 Table 3에 나타낸다.

출력이 높을수록 용접속도가 느릴수록 용입 깊이가 증가하고, 특히 1m/min의 용접속도에서는 4~7kW의 출력에서 모두 완전용입이 일어난다. 고출력인 7kW에서는 1~3m/min의 용접속도 범위에서, 6kW에서는 1~2m/min, 5kW에서는 1m/min에서만 완전용입이 일어남을 알 수 있다. 본 연구에서는 완전용입이 일어난 용접부의 미세조직에 대해서만 검토하고자 한다. 그림 1은 용접조건을 달리한 경우에 용접부 단면 매크로조직을 나타낸 것이다. 출력이 증가할수록 비드폭은 넓어지지만, 냉각속도가 증가할수록 비드폭은 감소하는 경향이 있고, 비드의 형상은 용접조건에 따라서 변화하는 것을 알 수 있다.

Table 3 Relationship between penetration depth and welding conditions

Speed \ Power	1m/min	2m/min	3m/min	4m/min
4kW	FP	3.07	2.45	1.42
5kW	FP	3.13	2.52	2.05
6kW	FP	FP	3.01	2.18
7kW	FP	FP	FP	3.60

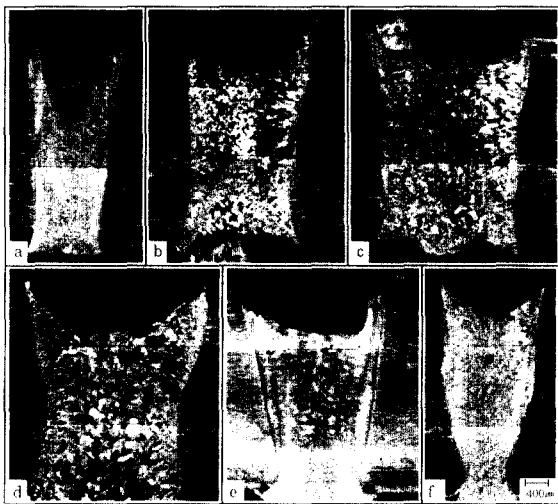


Fig. 1 Cross-sections of CO₂ laser welds with welding conditions
 (a) 4kW x 1mm/min (b) 5kW x 1m/min
 (c) 6kW x 1m/min (d) 7kW x 1m/min
 (e) 7kW x 2m/min (f) 7kW x 3m/min

비드의 형상 변화를 파악하기 위하여, 비드의 각각 상부(Wt), 중앙부(Wc) 및 하부(Wb)에 대해서 폭을 측정하여 비교하여 보았다. 그림 2는 1m/min의 용접 속도에서 출력을 달리한 경우에 각 위치에서 비드폭의 변화를 나타낸 것이다. 출력의 증가에 따라서 각 부위 별로 폭은 넓어지지만, 폭의 증가율은 부위별로 다른 것을 알 수 있다. 이 증가율의 차이에 의해서 그림 내에 표시한 것처럼, 비드의 형상은 출력의 증가에 따라서 A→B→C 형상으로 변화하는 경향이 있다. 저출력인 4kW에서는 전형적인 레이저빔 용접의 비드 형상인 A처럼 되지만, 출력이 증가할수록, 용접속도가 느

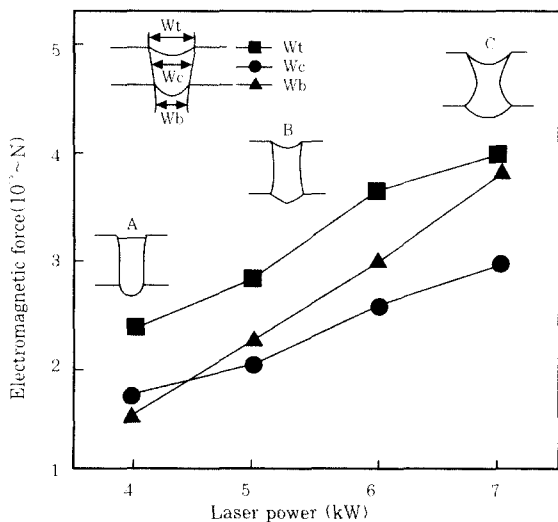


Fig. 2 Change of bead width with laser power at welding speed 1m/min

릴수록, 킥홀에 의한 용융과 더불어 열전도에 의한 모재의 용융량이 증가하여 상부와 하부의 넓이의 차가 적은 B형상으로 변화하고, 더 나아가 C형상으로 변화하는 것으로 생각된다.

3.2 용접부의 미세조직

그림 3은 용접조건을 달리하여 용접한 경우, 비드 중앙부에서 모재(왼쪽)로부터 용접금속의 중심부까지 연속 촬영한 단면 조직을 나타낸 것이다. 여기서 (c)와 (d)는 출력 7kW, 용접속도 1m/min의 같은 용접 조건이지만, (c)는 리플라인이 없는 용접부를, (d)는 리플라인이 형성된 용접부를 나타낸 것이다. 일반적으로 Al합금의 용접금속의 경우, 용융경계부에서 비드 중앙부에 이르기까지의 조직변화는 셀(Cellular), 덴드라이트(Dendritic : Cellular dendritic or Columnar dendritic), 등축정(Equiaxed dendrite)의 순으로 변화한다. 그러나, 각 사진 내에 화살표로 표시한 리플라인 부분에서 덴드라이트의 성장 도중에

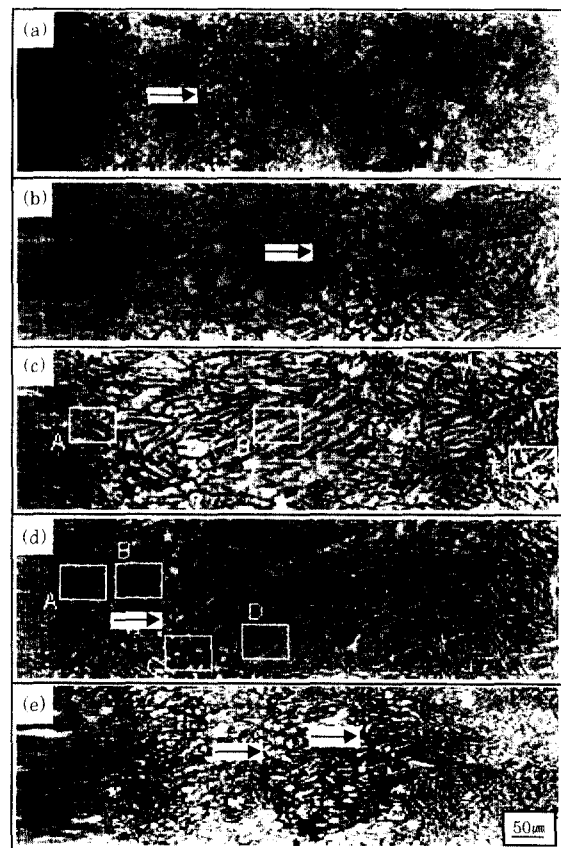


Fig. 3 Microstructures in the weld metal with welding conditions
 (a) 4kW x 1mm/min (b) 5kW x 1m/min
 (c) 7kW x 1m/min (d) 7kW x 1m/min
 (e) 7kW x 3m/min

응고조직의 형상이 변화하고, 용접조건에 따라 응고 조직의 크기가 다른 것을 알 수 있다.

우선 레이저 용접부 중에 리플라인의 존재 여부에 따른 응고거동을 검토하기 위하여, 출력 7kW, 용접속도 1m/min로 용접한 그림 3의 (c)와 (d)를 확대하여 비교하여 보았다.

그림 4의 (a), (b) 및 (c)는 리플라인이 없는 그림 3의 (c)에서 A, B 및 C로 표시한 부위를 각각 확대한 것이다. 용융경계부에서는 셀 형상의 조직이, 중심부에서는 등축정 조직이 나타나고, 중간 부위에서는 덴드라이트 조직이 나타남을 알 수 있다. 한편 그림 5는 리플라인이 존재하는 그림 3의 (d)에서 용융경계부의 A, 용융경계부와 리플라인 사이의 B, 리플라인의 C 및 리플라인에서 약간 떨어진 부위 D로 표시된 부분을 각각 확대한 미세조직을 나타낸 것이다. 용융경계부와 리플라인 사이에는 셀과 덴드라이트 조직만이 존재하고, 등축정이 보이지 않으며, 리플라인 근방에서는 다시 셀(c), 덴드라이트(d)가 형성되어 있는 것을 알 수 있다. 특히 리플라인에서 형성된 조직들은 용융경계부에 형성된 것보다 다소 크기가 큰 것을 알 수 있다.

그림 6은 출력(a) 및 용접속도(b)에 따른 비드 단면 중앙부에 나타난 평균 리플라인의 수를 조사한 것이고, 리플라인의 모식도도 함께 나타낸 것이다. 리플라



Fig. 4 Typical microstructures of cellular, dendritic and equiaxed dendrite in the bead without ripple line((c) of Fig.3)

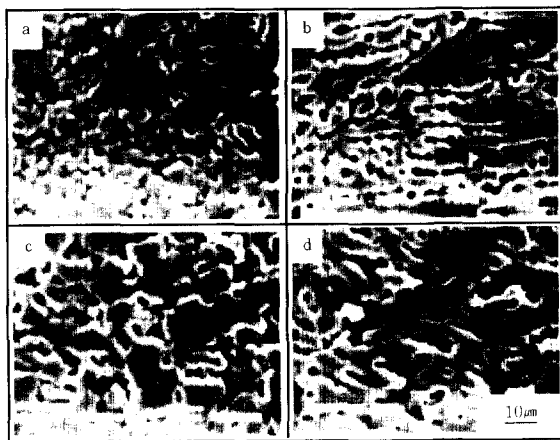


Fig. 5 Comparison to microstructures formed near the fusion boundary and ripple line in the bead with ripple line((d) of Fig. 3)

인의 수는 출력이 증가할수록 감소하고, 냉각속도가 빠를수록 증가하는 경향이 있다. 또한 리플라인이 여

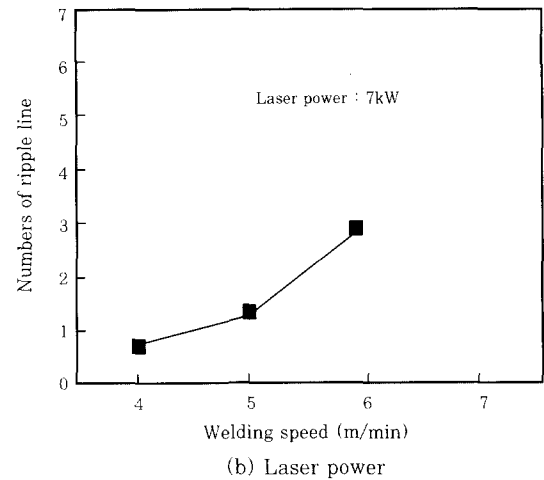
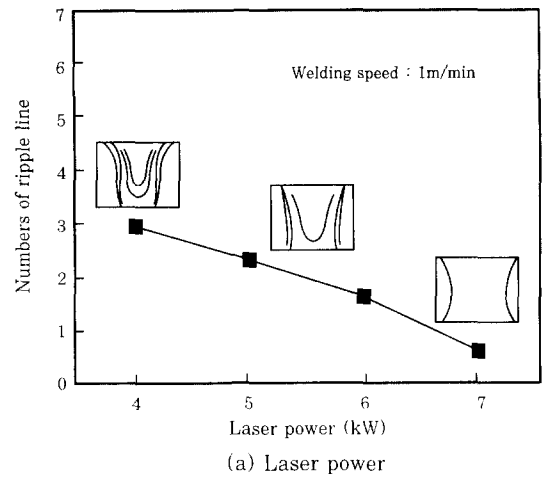


Fig. 6 Effect of laser power (a)and welding speed (b) on the number of ripple line

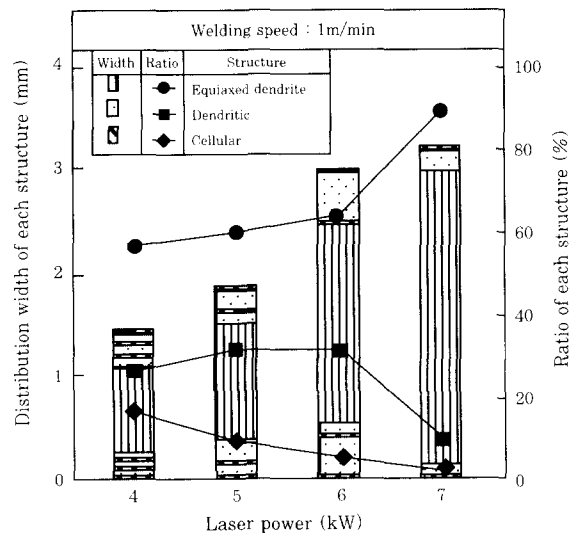


Fig. 7 Distribution of each microstructures with laser power

러 개 형성되는 용접부의 경우, 용융경계부와 리플라인 사이 및 리플라인들 사이에서는 셀과 덴드라이트만이 형성되고, 제일 안쪽에 있는 리플라인에서는 다시 셀, 덴드라이트, 등축정의 순으로 형성되었다.

그림 7은 용접속도를 1m/min로 한 경우, 출력에 따른 비드 단면 중앙부에 나타난 조직분포를 길이(막대 그림) 및 비율(선 그림)로 나타낸 것이고 그림 8은 출

력을 7kW로 한 경우 용접속도에 따른 조직분포를 나 할수록 셀의 점유율은 연속적으로 감소하고, 덴드라이트와 등축정의 점유율은 4kW에서 6kW까지 모두 아주 미소하게 증가하지만, 7kW의 경우 덴드라이트의 점유율은 급격히 감소하고, 등축정의 점유율은 급격히 상승하는 경향이 있다. 용접속도에 따른 조직분포의 경우, 속도가 증가할수록 셀조직의 점유율은 점진적으로 증가하고, 덴드라이트와 등축정의 점유율은 1m/min와 2m/min의 차이가 크지만, 2m/min와 3m/min의 차는 아주 적다. 출력 4kW~6kW에서는 등축정이 55.8~63.4%, 셀이 16.7~5.5%, 덴드라이트가 27.5~31.1%를 점유하고, 용접속도 2m/min~3m/min의 조건에서는 등축정이 55.4~50.3%, 셀이 8.2~12.5%, 덴드라이트가 36.4~37.2%를 점유하고 있다. 반면에 출력 7kW, 용접속도 1m/min의 것은 등축정이 88.5%, 셀이 2.4%, 덴드라이트가 9.1%를 점유하고 있다.

그림 9는 용접조건에 따른 용융경계부 근방의 셀 조직과 덴드라이트 및 용접금속 중심부의 등축정의 크기를 비교한 것이다. 모든 조직의 크기는 출력이 증가할수록 커지고, 용접속도가 증가할수록 작아지는 경향이 있다. 그림 7~그림 8로부터 출력이 낮을수록, 용접속도가 빠를수록, 용접금속에 리플라인이 많이 형성되기 때문에, 위치에 따라서 응고조직이 다양하게 분포하

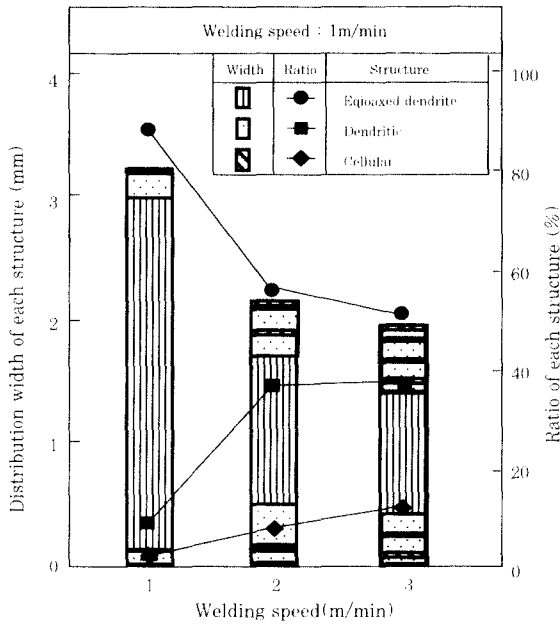


Fig. 8 Distribution of each microstructures with welding speed

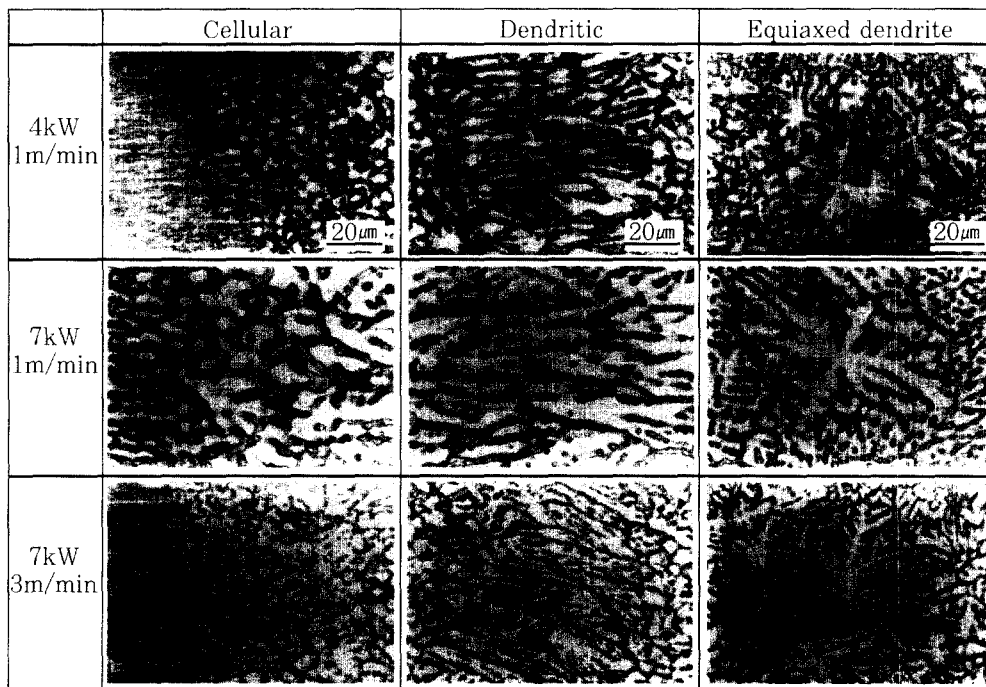


Fig. 9 Comparison to size of each microstructures with welding condition

고, 그 크기도 각각 다른 것이 특징이다.

아크용접에서 리플라인은 용융지 내에서 여러 가지의 원인에 의해 액상의 요동이 발생하여, 성장하는 응고조직이 단속적으로 성장속도나 온도구배가 변화하기 때문에 발생하는 것으로 보고^{9,10)}되고 있다. 그러나, 그 형성기구에 대해서는 아직 명확하게 규명되어 있지 않다. 레이저용접의 경우, 레이저빔에 의해 가열된 부위가 증발이 활발하게 되면, 증발원소의 반조압(Recoil pressure)으로 인하여 키흐이 형성되고, 용융금속이 모재 혹은 먼저 응고한 고체에 순차적으로 부착되어 용접금속이 형성된다¹¹⁾. 이러한 레이저용접의 특유의 용융금속 유동에 의해 아크용접과 마찬가지로 리플라인이 발생할 것으로 생각되며, 이때 고상의 성장속도와 온도구배가 변화하므로 리플라인에서 응고조직도 변화하는 것으로 생각된다. 또한 용접속도가 느리거나 출력이 높은 경우에는 충분한 액상이 공급되고, 냉각속도도 느리므로 리플라인이 적지만, 용접속도가 빠르거나 출력이 낮은 경우에는 액상의 공급량이 적고, 응고속도가 빠르기 때문에 리플라인의 수가 증가하는 것으로 사료된다.

3.3 냉각속도와 마이크로 편석

Al합금에 있어서 DAS와 냉각속도 사이에는 아래 식과 같은 관계가 있고, 이 관계는 넓은 범위의 용접속도에서 성립하는 것으로 알려져 있다^{12,13)}.

$$d = AC^{-n}$$

여기서 d 은 DAS(m), C 은 냉각속도, A 와 n 은 상수이다. 비드 단면 중앙부의 미세조직으로부터 DAS를 구하여 (1)식을 사용하여 냉각속도를 추정하여 보았다. 여기서 상수 A 및 n 은 문헌¹³⁾에 나타난 A7N01합금의 값인 각각 78 및 0.38로 하였다. 그림 10 및 그림 11은 출력 및 용접속도에 따른 덴드라이트 간의 거리 d 과 (1)식을 사용하여 얻어진 냉각속도 C 의 변화를 나타낸 것이다. 출력이 증가함에 따라서 DAS는 증가하고, 역으로 냉각속도는 감소하고 있다. 한편 용접속도가 증가함에 따라서 DAS는 감소하고, 역으로 냉각속도는 증가하고 있다. 본 연구의 용접조건에서 얻어진 냉각속도는 200℃/s~1,150℃/s의 범위에 있다.

A5083합금($t=6\text{mm}$)을 출력 5kW로 고정하고, 0.6m/min~9m/min으로 레이저 용접한 경우의 용접속도는 300℃/s~1,500℃/s의 범위이고, 전자빔 용접의 500℃/s~900℃/s보다 빠른 것으로 보고⁶⁾되고 있다. Al-Cu합금을 TIG 용접한 경우의 냉각속도

는 50℃/s~800℃/s 정도이고, 특히 800℃ 정도의 빠른 냉각속도는 비드 폭이 아주 좁은 경우에만 얻어 지지만, 일반적인 비드 폭에서는 냉각속도가 50℃/s~200℃/s인 것으로 알려져 있다³⁾. 합금이 다르지만, 이들 데이터와 비교하여 보면, 레이저 용접부의 비드 형상과 관련이 있는 것으로 생각된다. 출력 4kW, 용접속도 1m/min인 그림 1의 (a)와 출력 7kW, 용접속도 3m/min인 (f)와 같이 전형적인 레이저 용접 비드에서만 1,000℃/s 이상의 아주 빠른 냉각속도가 얻어지고, 상부와 하부의 비드 폭의 차이가 적고, 비드 폭이 넓은 비드형상을 가지는 (b), (c), (d), (e)의 용접 조건에서는 냉각속도가 200℃/s~800℃/s 범위이고, 이 냉각속도는 TIG용접의 냉각속도 범위에 속한다.

이것으로부터 완전용입된 레이저빔 용접부에서 냉각속도는 비드의 형상 및 폭과 밀접한 관계를 가지는 것

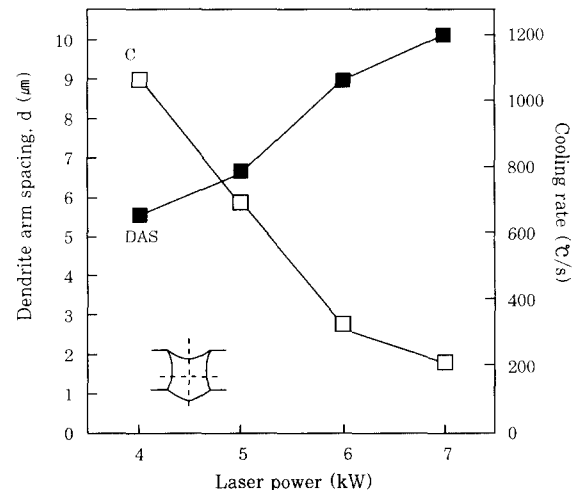


Fig. 10 Effect of laser power on dendrite arm spacing(DAS) and cooling rate(C)

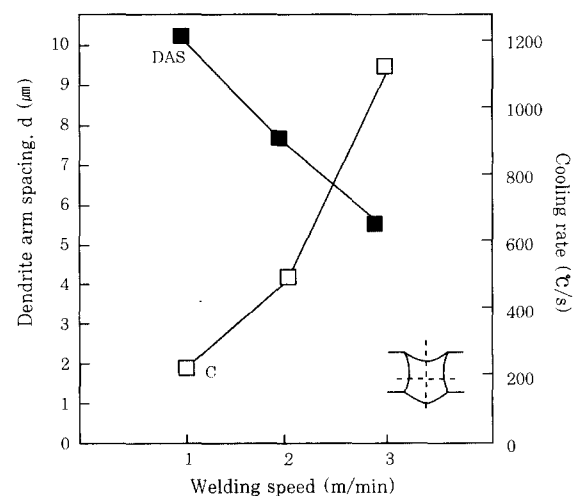


Fig. 11 Effect of welding speed on dendrite arm spacing(DAS) and cooling rate(C)

으로 판단된다.

그림 12는 출력 7kW, 용접속도를 1m/min으로 용접한 비드의 용융경계부 및 등축정이 존재하는 중심부에 대하여 EPMA로 면분석을 행하여 얻어진 Mg과 Zn의 분포를 나타낸 것이다. 그림의 우측에 표시한 것처럼 청색, 녹색, 적색으로 갈수록 농도가 높다. 모재에서는 Mg 및 Zn이 균일하게 분포하고 있지만, 용접금속에서의 농도분포는 셀과 중앙부의 덴드라이트 모양과 대응되며, 셀 및 덴드라이트의 경계에서 Mg, Zn의 농도가 높은 것을 알 수 있으며, Zn보다 Mg의 농도 차가 더욱 뚜렷하게 나타나는 것을 알 수 있다.

그림 13은 용접속도를 1m/min으로 고정하고, 출력을 4kW와 7kW로 용접한 비드에서 등축정이 존재하는 중심부에 대하여 EPMA로 면분석을 행하여 얻어진 Mg와 Zn의 분포를 비교한 것이다. 고출력인 7kW보다 저출력인 4kW에서 Mg 및 Zn 농도가 균일하게 분포하고 있다. 펄스레이저 용접으로 Al합금을 급냉급속응고시킨 경우, 셀조직의 크기가 작게 되어, 셀 중앙부의 용질농도가 평균농도에 가깝게 높게 되기 때문에 편석 정도가 감소하는 것으로 알려져 있다^{3, 6)}. 한편 7kW와 4kW의 냉각속도는 각각 약 200℃/s와 1,080℃/s이다. 따라서 4kW는 7kW보다 냉각속도가 빠르기 때문에 셀조직의 크기가 작고, 편석 정도도 감소하여 비교적 균일하게 분포하는 것으로 생각된다.

그림 14는 용접조건에 따른 비드 중앙부에서 용접부 근방의 경도 분포를 나타낸 것이다. 모든 용접조건에서 용접금속의 경도가 모재보다 낮고, 출력이 높을수록, 용접속도가 느릴수록 경도가 낮은 것을 알 수 있다. 본 실험에 사용한 모재는 T5로 시효처리하였기 때

문에 경도가 높지만, 용접금속은 키흔 현상에 의해서 증기압이 높은 Mg, Zn이 다소 증발하여 농도가 낮아지고, 더욱이 응고시 편석이 심하게 일어나 경도가 감소하는 것으로 생각된다. 또한 4kW의 용접부가 7kW보다 경도가 높은 것은 전술한 바와 같이 4kW의 것이 7kW보다, 3m/min의 것이 1m/min보다 응고속도가 빠르므로 조직의 크기가 작고, 용질원자의 편석이 적어, 고용량이 많기 때문인 것으로 생각된다. 이 결과는 응고속도에 따라서 마이크로 편석에 차이가 있음을 잘 반영하고 있다.

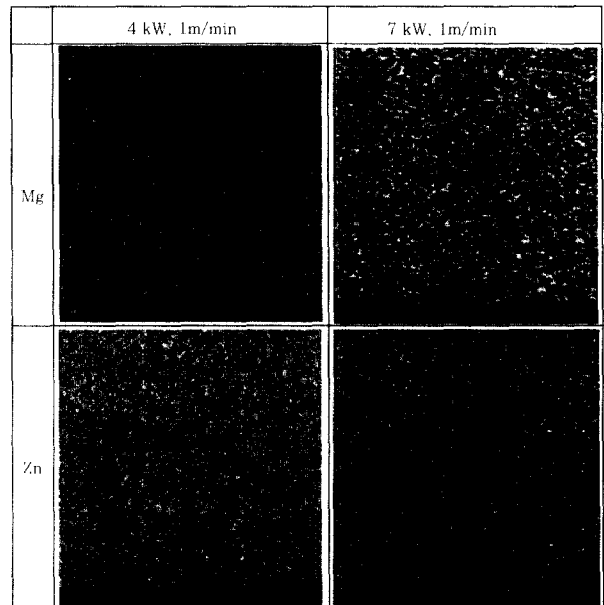


Fig. 13 Comparison to distribution of Mg and Zn content with welding condition

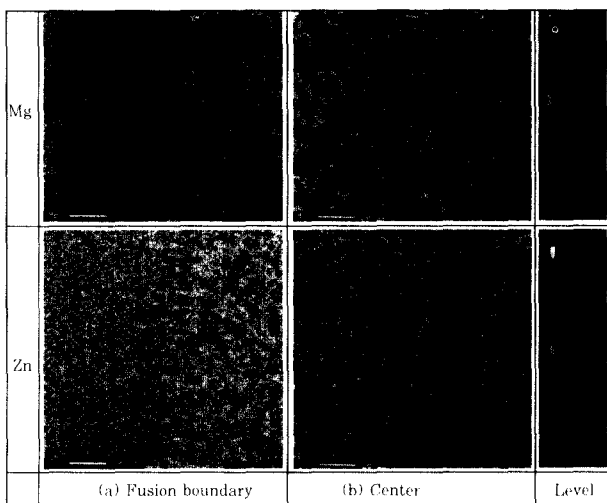


Fig. 12 Results of EPMA analysis near the fusion boundary and the center of the bead (P_o = 7kW, v = 1m/min)

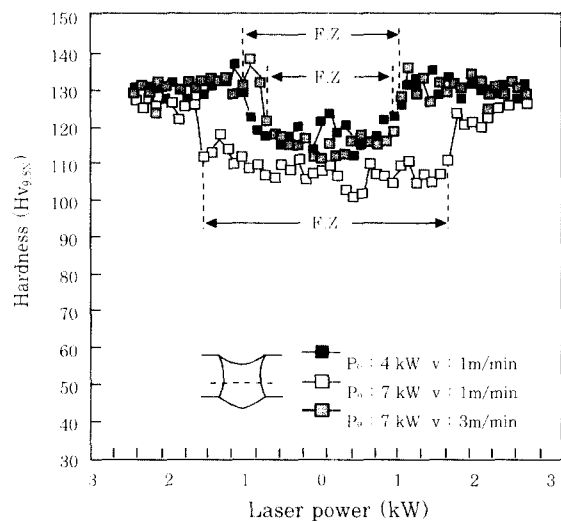


Fig. 14 Effect of welding condition on the hardness distribution of weld metal

4. 결 론

7N01 Al합금을 CW CO₂ 레이저로 비드 용접한 경우, 용접조건에 따른 단면 비드의 응고조직 변화를 각 부위 별로 검토하고, 미세조직으로부터 냉각속도를 추정하여 용접금속의 편석 현상과 경도와의 상관관계를 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 리플라인이 존재하지 않은 비드의 경우, 용융경계부에서 중앙부 사이의 응고조직은 셀(cellular) → 덴드라이트 → 등축정(Equiaxed dendrite) 순으로 분포하였다.

2) 비드 내에 리플라인이 존재하는 경우, 용융경계부와 리플라인 사이에는 셀과 덴드라이트만이 형성되고, 리플라인에서는 다시 셀과 덴드라이트가 형성되었다. 리플라인과 리플라인 사이에서도 셀과 덴드라이트가 관찰되었고, 등축정은 중앙부에서만 관찰되었다. 또한 리플라인에서 형성된 조직들은 용융경계부에 형성된 것보다 다소 크기가 조대하였다.

3) 리플라인의 수는 출력이 증가할수록 감소하고, 냉각속도가 빠를수록 증가하는 경향이 있다. 리플라인의 수가 많을수록, 용접금속 내의 조직 분포는 다양하며, 형성된 조직의 크기도 다양하였다.

4) 본 연구의 용접조건에서 얻어진 냉각속도는 200 °C/s ~ 1,150 °C/s 이었고, 용접속도가 빠르고, 출력이 낮을수록 냉각속도는 증가하였다. 냉각속도는 레이저 용접 고유의 비드 형상인 와인컵 형상은 빠르고, 비드의 상하 폭이 넓은 비드 형상은 느렸다.

5) 용접금속에서 Mg의 편석은 Zn보다 심하였고, 냉각속도가 빠를수록 편석의 정도는 감소하였다.

6) 용접금속의 경도는 모재보다 낮았으며, 출력이 높을수록, 용접속도가 느릴수록 감소하였다. 이것은 조직의 크기가 크고, 편석이 많아 Mg, Zn의 고용량이 적어지기 때문인 것으로 생각되었다.

후 기

이 논문은 1997년 학술진흥재단 대학부설연구소과제 연구비에 의하여 수행된 결과이며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 片山, C.D. Lundin : 各種アルミニウム合金のレーザー溶接, 輕金屬溶接, 29-8(1991), 349
2. 輕金屬學會 編集研究委 : アルミニウム合金のレーザー溶接技術の現状, 輕金屬溶接, 32-5(1994), 222
3. 片山, 村木, 清水, 松 : アルミニウム合金のレーザー急速凝固組織とマイクロ偏析, 輕金屬溶接協會シンポジウム, (1991.11), 35
4. A. Matsunawa, S. Katayama and H. Simidzu : Laser Rapid Solidification Microstructure in Single Crystal of Al and Al-2%Cu alloys, Trans. JWRI, 19-1(1990), 67
5. 山口, 加藤, 西尾, 澤井 : レーザ溶接したアルミニウム及びアルミニウム合金における結晶の成長挙動, 溶接學會論文集 18-3(2001), 459
6. 山口, 加藤, 西尾, 野上 : 高エネルギー密度溶接したアルミニウム合金A5083-0の材料科學的特性溶接學會論文集 17-1(1999), 69
7. A. Munitz : Microstructure of Rapidly Solidified Laser Molten Al-4.5%Cu Surface, Metall. Trans. B, 16B(1985) 145
8. 山口, 加藤, 西尾, 深海 : YAGレーザー溶接したアルミニウム合金A5052溶接部の硬さ分布溶接學會論文集 19-1(2001), 114
9. D.J.Kotecki : Mechanism of ripple formation during weld solidification, W.J., 51-8(1972), 386s
10. Garland J.G. and Davies G.J. : Surface rippling and growth perturbations during weld pool solidification, Metal Construction and British Welding Journal, 2-5(1970), 171
11. 黃地尙義 : 溶接接合プロセスの基礎, 産報出版(1996), 180
12. T.F.Bower, H.D. Brody, M.C. Fleming : Measurement of Solute Redistribution in Dendritic Solidification, Transaction of Metallurgical Society of AIME, 236-5(1966), 624
13. 輕金屬學會 研究委員會編 : アルミニウム合金のテンドライトアームスペーシングと冷却速度の測定法, 報告(1988.8), 3