

고강도 Al합금 A5083 및 A7N01의 CO₂ 레이저 용접성

김장량*, 하용수, 강정윤**, 김인배**

CO₂ Laser Weldability of High Strength Al Alloy A5083 and A7N01

Jang-Ryang Kim*, Yong-Soo Ha*, Chung-Yun Kang**, In-Bae Kim**,

*Graduate School, Dept. of Metall. Eng., Pusan National University

**Dept. of Metall. Eng., Pusan National University

ABSTRACT

This study has been performed to evaluate basic characteristics of CW-CO₂ laser welding process of A5083 and A7N01 Al alloy. The effect of welding parameters, such as shielding gas, gas flow rate, laser power and welding speed on the bead shape and porosity from bead on plate welding tests have been investigated.

Welds shielded by He gas had deeper penetration and better bead shape than those shielded by Ar. The penetration depth was augmented with the increase of laser power and the decrease of welding speed. Welds of A7N01 alloy had deeper penetration than those of A5083 alloy.

In beads of A5083 alloy which has deeper penetration, the volume fraction of porosities was high due to the number of its was few, but size of its was larger. The case of deeper penetration beads of A7N01 alloy, the porosity reduced under relatively higher power. The Volume fraction of porosities in weld of A5083 alloy was significantly higher than that in weld of A7N01 alloy.

Key Words :

A5083, A7N01, CO₂ laser, Power, Welding speed, Full penetration, Partial penetration, Porosity,

1. 서 론

수송기기와 같은 경량화 구조물의 용접에 있어

서는 최근 구조물의 대형화, 정밀화에 따른 용접 부에 요구되는 생산성, 신뢰성, 경제성 등의 관 점으로부터 레이저 및 전자빔 용접과 같은 고밀

도 에너지빔에 의한 용접에 대한 관심이 고조되고, 그 사용빈도가 증가하고 있다. 그 이유는 고밀도 에너지빔의 특성상 용접부의 변형이 적고, 고능률, 고정밀 용접이 가능하다는 특징 때문이다. 그러나 이들 고밀도 에너지빔 용접은 실제 공정에 적용되는 경우는 아주 미약하다.

그 이유는 고밀도 에너지빔 용접을 Al합금에 적용하였을 경우, Al합금 및 열원 고유특성에 의한 기공, 균열, 특정성분의 증발에 의한 용접부의 강도저하 등의 심각한 문제가 발생하기 때문이다^{1)~4)}. 따라서 이러한 제 문제들을 해결하는 것은 고강도 Al합금의 경량화에 대한 적용확대와 구조물의 용접부의 고품질, 고신뢰성의 확보가 관건이라고 할 수 있다. 그러나 이와 관련된 계통적인 연구는 국내에서는 아직까지 미진한 실정이다.

본 연구에서는 경량구조용 재료로서의 고강도 Al합금인 비열처리형인 A5083합금과 열처리형 합금인 A7N01합금에 대하여 레이저 용접을 적용하였을 경우, 우수한 용접성과 기계적성질을 확보할 수 있는 용접기술을 확립하기 위한 일환으로, 우선 용융 특성 및 기공감수성에 미치는 합금의 종류와 용접조건에 영향을 대하여 정량적으로 검토하고자 하였다.

2. 실험방법

모재는 비열처리용 합금인 Al-Mg계의 A5083합금과 열처리용 합금인 Al-Zn-Mg계 A7N01합금을 사용하였고, 화학조성은 Table 1과 같다. 단 A7N01합금은 T5 열처리된 것을 사용하였다.

Table 1. Chemical compositions of materials used

Materials	Chemical compositions (wt.%)									Treatment condition
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al	
5083	0.16	0.18	0.05	0.70	4.50	0.11	0.02	0.03	bal	H112'
7N01	0.09	0.18	0.10	0.41	1.23	0.19	4.52	0.02	bal	T5'

* as hot-rolled ** aging (120°C×24hrs)

본 연구에서 사용된 레이저 장치는 5축 3차원

가공기인 50kW급 CO₂ 레이저($\lambda=10.6\mu\text{m}$)가 공장치(Advanced Materials Processing Institute, Kinki, Japan)를 사용하였다. 용접은 모재를 120(L)×100(W)×4(T)mm 크기로 절단하여, 사포(#400)로 연마하고, 아세톤 세척을 한 후, 압출방향에 평행하게 CW-CO₂ 레이저로 비드용접(Bead on plate)을 행하였다. 기본적인 용접조건은 Table 2와 같다. 보호가스의 종류 및 유량을 선정하기 위해서, Ar과 He의 2종류 가스에 대하여 유량을 30~70 l/min로 변화시켰다. 이때의 용접조건은 용접속도를 1m/min로 고정시키고, 레이저 출력을 3kW 및 5kW로 하였다. 용입특성과 기공에 미치는 용접조건 및 합금 종류의 영향을 검토하기 위하여 레이저 출력을 4, 5, 6, 7kW로, 용접속도를 1, 2, 3, 4m/min로 변화시켜 용접하였다.

용접부의 외관은 실체현미경을 사용하여 관찰하였다. 용융특성은 용접선 방향과 용접선방향에 수직인 방향으로 시편을 절단하여 Image analyzer로 용입깊이를 측정하였다.

Table 2. CO₂ laser welding conditions used.

Beam mode	RIng mode
Focus length	250mm
Focus point	±0mm
Nozzle height	20mm
Nozzle diameter	8mm
Nozzle angle	40°
Gas pressure (; He)	3kgf/cm ²

3. 실험결과

3.1 용융현상에 미치는 보호가스의 영향

CO₂레이저용접에서도 보호가스의 종류 및 유량에 따라 용접부 특성에 크게 영향을 미치고, 특히 N₂가스를 사용하는 경우, 비드 표면이나 내면에 AlN이 생성되어 언더컷드가 발생하기 쉬운 것으로 알려져 있다. 적절한 보호가스의 종류와 유량

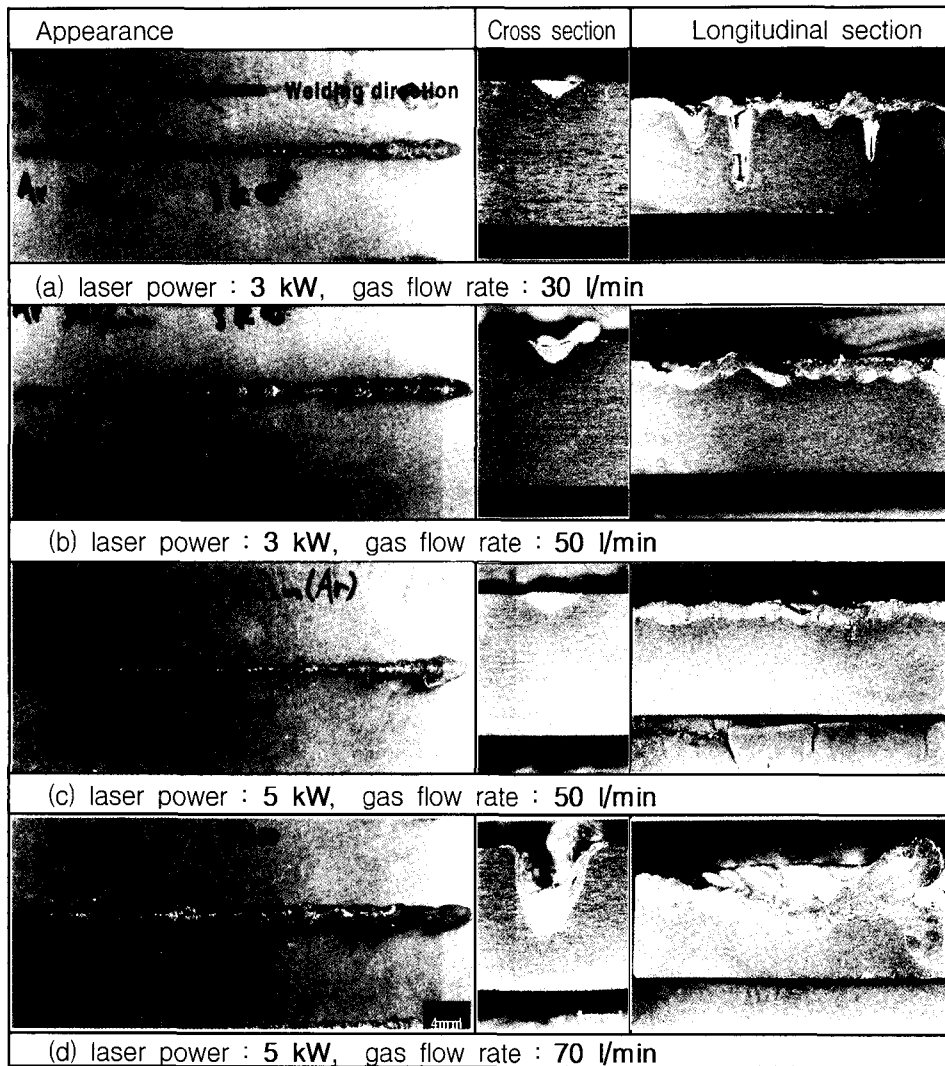


Fig.1 Appearance and shapes of bead with laser power and gas flow rate in A5083 alloy welded by Ar shield gas.

을 선정하기 위하여, Ar가스와 He가스를 대상으로 가스의 종류 및 유량에 따른 용접 비드 형상을 조사하여 보았다. A5083합금을 대상으로 출력을 3~5kW, 용접속도를 1m/min으로 용접하여 비교하였다.

Fig.1은 보호가스로 Ar가스 사용한 경우, 출력과 가스유량에 따른 대표적인 비드 외관과 비드의 종단면 및 횡단면의 조직을 나타낸 것이다. 출력을 3kW로 한 경우, 유량이 많은 50 l/min 인 비드가 30l/min인 것보다 표면 거칠기가 양

호하며, 용입깊이가 균일하였지만, 두 조건 모두 용접초기에 비해 용접 후기에 비드폭이 변화하는 것을 볼 수 있고, 용입깊이도 0.5mm 이하로 아주 낮다. 유량을 50l/min로 하고, 출력을 5kW로 상승시킨 경우(c), 3kW보다 비드폭 및 용입깊이의 분포는 안정하게 되지만, 용입깊이는 0.5mm이하이다. 그러나, 유량을 70l/min로 증가시킨 경우에는 용입깊이가 깊어지지만, 용융금속의 분출 현상으로 비드에 흠이 생기는 현상이 발생하는 것을 알 수 있다.

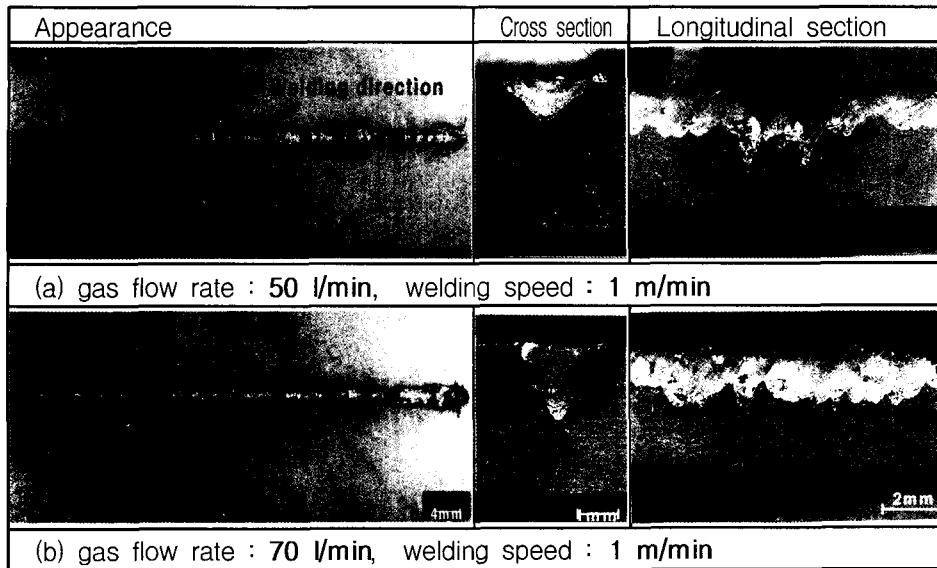


Fig.2 Appearance and shapes of bead with gas flow rate in A5083 alloy welded by 3kw laser power and He shield gas.

Fig.2는 보호가스로 He가스로 하고, 출력을 3kW로 하여 용접한 경우, 유량 변화에 따른 대표적인 비드 외관과 비드의 종단면 및 횡단면의 조적을 나타낸 것이다. 같은 용접조건에서 Ar가스로 용접한 것과 비교하여 보면, He가스를 사용한 것이 Ar가스를 사용한 것보다 비드폭과 용입깊이도 균일하며, 특히 용입깊이가 깊다. 유량 70 l/min로 증가시키면, 비드 폭도 균일하게 유지하면서, 용입깊이도 다소 증가함을 알 수 있다.

실드가스의 종류에 따라서 용융현상이 차이나는 이유는 다음과 같이 생각된다. 금속은 일반적으로 전리전압이 낮기 때문에 금속증기는 레이저 빔에 의해 쉽게 전리되고, 플라즈마로 되어 발광되며, 이를 유기플라즈마라고 하고, 이 유기플라즈마는 밀도가 높아 적외선 영역에서 강하게 발광하고, 동시에 빔을 흡수하는 성질이 있다⁵⁾. 따라서 유기플라즈마는 레이저 빔을 흡수하므로 빔에너지가 감소하게 되어 용융특성이 저하하게 된다. Ar은 전리전압이 낮기 때문에 쉽게 전리되어, 유기플라즈마의 성장을 조장하지만, He은

전리전압이 높기 때문에 전리되기 어려워 유기플라즈마의 성장을 억제하는 효과가 있다⁵⁾. 따라서 실드가스로 Ar을 사용하면 유기플라즈마가 심하게 발생되어 레이저빔이 불안정하고, 에너지도 감소하게 되어 용입율이 저하하지만, He은 유기플라즈마의 영향이 적어 Ar보다 용입깊이가 깊은 것으로 생각된다.

이상의 결과로부터, 보호가스로서 Ar가스보다, He가스가 적당하고, 가스유량은 70 l/min가 적당한 것으로 생각되어, 이후의 실험은 70 l/min의 He가스를 실드가스로 사용하였다.

3.2 용융현상에 미치는 출력 및 용접속도의 영향

용융특성에 영향을 미치는 인자 중에 가장 영향이 큰 것은 출력과 용접속도일 것으로 예상되어, 레이저 출력을 4~7kW, 용접속도를 1~4m/min로 변화시켜 비드언플레이트 용접한 후, 용융특성으로 비드 외관 및 용입깊이를 검토하여 보았다.

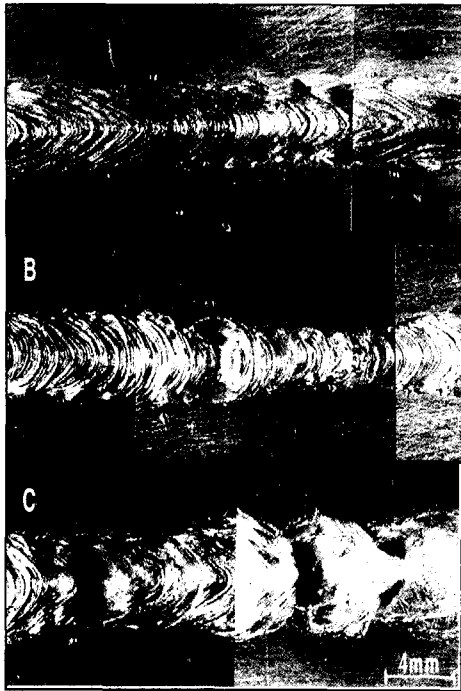
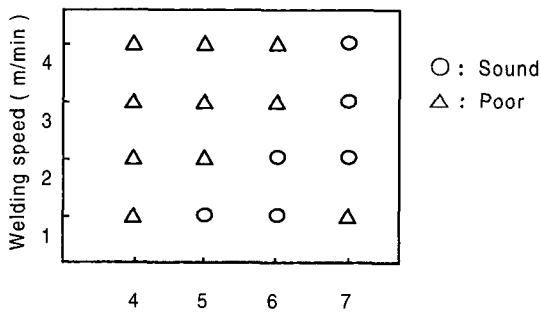


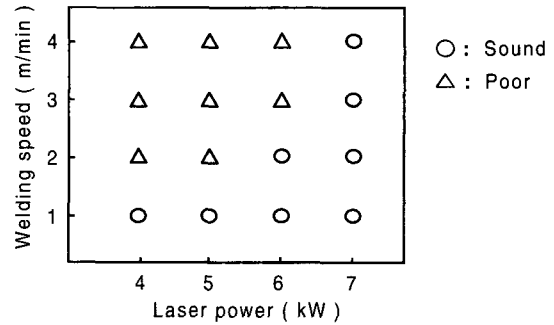
Fig.3 Typical appearance of bead in A5083 alloy weld.

(a) sound bead (b) poor bead (c) poor bead.

다양한 용접조건으로 각 합금에 대해서 용접하여 비드의 외관을 조사한 결과, Fig.3과 같이 크게 3개의 형상으로 분류되었다. (a)는 비드 전반에 걸쳐서 폭이 일정하고, 거칠기도 양호한 편인 비드, (b)는 비드 폭의 변화가 심한 비드, (c)는 비드 폭이 균일하지만, 부분적으로 깊은 홈이 파여 거칠기가 거친 비드이다.



(a) A5083



(b) A7N01

Fig.4 Classification of bead appearance with laser power and welding speed

Fig.4는 용접조건에 따른 비드의 외관 상태를 양호(○), 불량(△)으로 분류하여 정리한 결과이다. 두 합금에서 공통적인 현상은 용접속도가 느리거나, 출력이 높은 경우에는 양호한 비드가 얻어지는 경향이 있다. 이것은 후술하는 용입깊이와도 관계가 있다. 즉, 완전 용입된 비드는 대체로 양호한 비드이고, 부분 용입된 비드는 대체로 불량한 비드인 것으로 구별되었다.

Fig.5는 A5083합금과 A7N01합금에 대하여 출력을 6kW하여 용접속도를 변화시킨 경우, 대표적인 비드의 단면조직을 나타낸 것이고, Fig.6은 용접조건에 따른 용입깊이를 정량화하여 출력 및 용접속도 별로 정리한 것이다. 용입깊이는 11곳의 비드 단면으로부터 측정하여 평균값으로 정량화 하였다. A5083합금의 경우 (a), 4kW 및 5kW에서는 용입깊이에 미치는 용접속도의 영향이 거의 없지만, 6kW 및 7kW에서는 용접속도가 증가할수록 용입깊이가 감소하고, 6kW에서 그 감소 폭이 큰 것을 알 수 있다. 특히 7kW의 1~2m/min에서, 6kW의 1mm/min에서 관통 용접되는 것을 알 수 있다. 한편, A7N01합금의 경우(b), 4kW 및 5kW에서는 용접속도가 빠를수록 용입깊이도 급격히 감소하는 경향이 있다. 특히 7kW에서는 용접속도

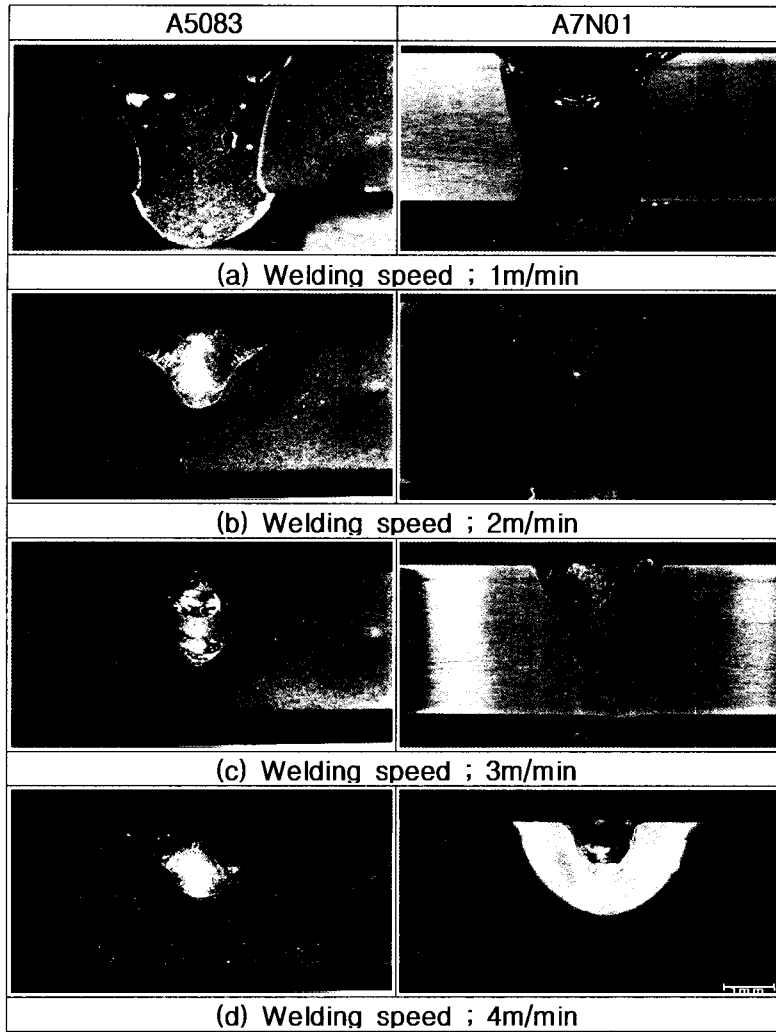


Fig.5 Cross sections of bead on plate welds with welding speed at laser power, 6kW

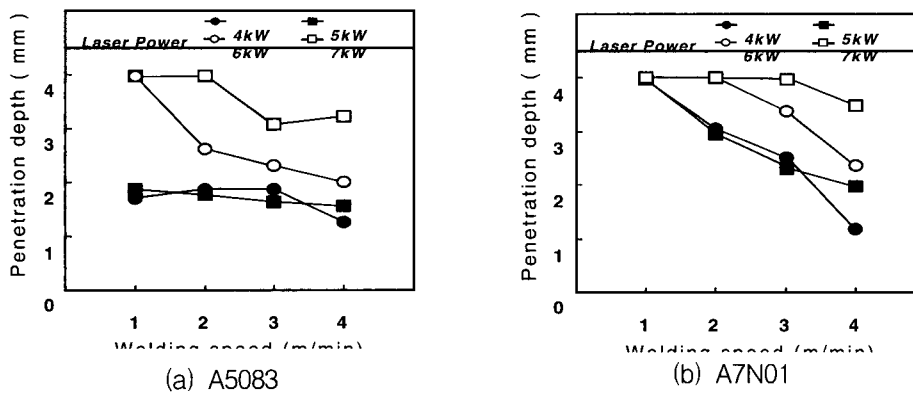


Fig.6 Effect of laser power and welding speed on the penetration depth.

와 관계없이 거의 관통 용접에 이르고, 6kW의 1~2m/min의 용접속도에서는 관통 용접되고, 3m/min 이상의 용접속도에서는 속도가 증가할수록 용입깊이가 감소한다. 이상의 결과로부터 출력이 증가할수록, 용접속도가 느릴수록, 용입깊이가 증가하고, A7N01 합금이 5083합금보다 용입이 잘 되는 것을 알 수 있다.

이와 같이 합금에 따라서 용융현상이 차이가 나는 이유는 다음과 같이 생각된다. 레이저빔 용접에서는 레이저빔에 의해 가열된 부위가 활발하게 증발되고, 이 증발원소의 반조압(Recoil pressure)으로 인하여 키흔이 형성되고, 용융금속이 모재 혹은 먼저 응고한 고체에 순차적으로 부착되어 용접금속이 형성된다. 따라서 모재 중에 증기압이 높은 Mg, Zn등이 많이 함유할수록 키흔 현상이 잘 일어날 것이고, 용입깊이가 깊을 것으로 생각된다. 합금별 증기압이 높은 원소의 함유량을 비교하여 보면, 5083합금은 Mg가 4.50wt%, Zn이 0.02wt% 함유되어 있고, A7N01합금은 Mg가 1.23wt%, Zn이 4.52wt% 함유되어 있다. 따라서 A7N01이 증기압이 높은 원소의 양이 많기 때문에 용입깊이가 깊은 것으로

생각된다.

3.3 기공 발생에 미치는 출력 및 용접속도의 영향

우선 CO₂ 레이저 용접부의 기공발생 정도를 조사하기 위하여, 7N01합금을 대상으로 X-ray 투과 시험으로 측정하여 보았다. Fig.7은 용접속도를 1m/min로 일정하게 하고, 출력을 4~7kW로 변화시킨 경우, Fig.8은 출력을 7kW로 일정하게 하고, 용접속도를 1~4m/min으로 변화시킨 경우의 X-ray 투과사진과 그 사진에서의 결합 부위를 스케치한 것이다. 이것으로부터 출력이 낮을수록, 용접속도가 빠를수록, 기공 발생률이 증가하는 것을 알 수 있다.

X-Ray 투과시험에서는 작은 기공이 검출되지 않기 때문에, 용접선 방향으로 절단한 횡단면에 대해서 광학현미경으로 조사하여 보았다.

Fig.9는 관통 용접된 용접부와 부분 용입된 용접부의 횡단면에서 나타나는 대표적인 기공의 형상을 나타낸 것이다. A5083의 경우, 부분 용입된 비드에서는 기공이 주로 키흔이 형성된 부분에 많이 존재하고, 완전 용입된 비드에서는 기

P_0	X-ray transmission photo	Schematic representation
4kW		
5kW		
6kW		
7kW		

Fig.7 X-ray transmission photography and schematic diagram showing porosity of A5083 welds. Welding speed : 1m/min

v	X-ray transmission photo	Schematic representation
1 m/min		
2 m/min		
3 m/min		
4 m/min		

Fig.8 X-ray transmission photography and schematic diagram showing porosity of A5083 welds. Laser power : 7kW

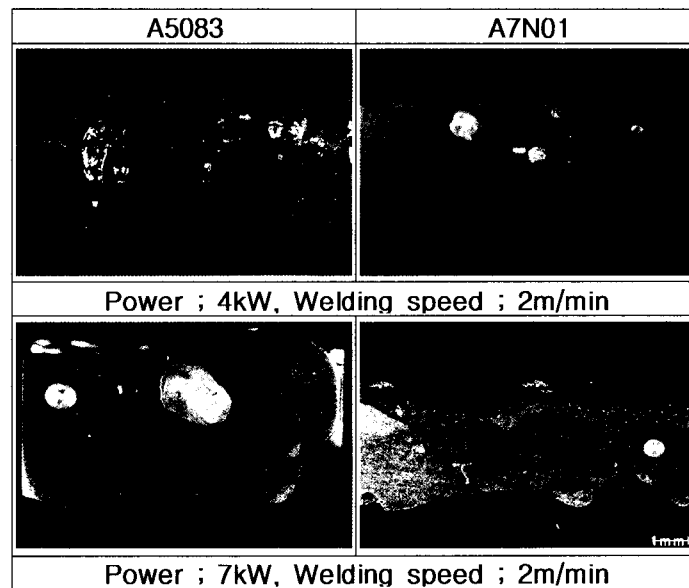


Fig.9 longitudinal sections of bead on plate welds

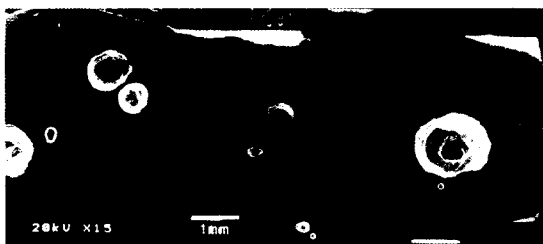


Fig.10 shape and size of porosities.

공이 주로 상부에 존재함을 알 수 있다. 또한 A5083합금이 A7N01합금보다 기공 발생량이 많음을 알 수 있다.

기공발생 감수성은 기공의 수와 체적률로 평가된다. Fig.10은 횡단면 비드에서 나타나는 기공의 형상을 나타낸 것으로, 기공의 형상은 주로 구형이고, 크기는 아주 다양함을 알 수 있다. 따

라서 기공의 수로 평가할 경우에는 크기를 분류하여 정량하는 것이 바람직할 것으로 생각된다.

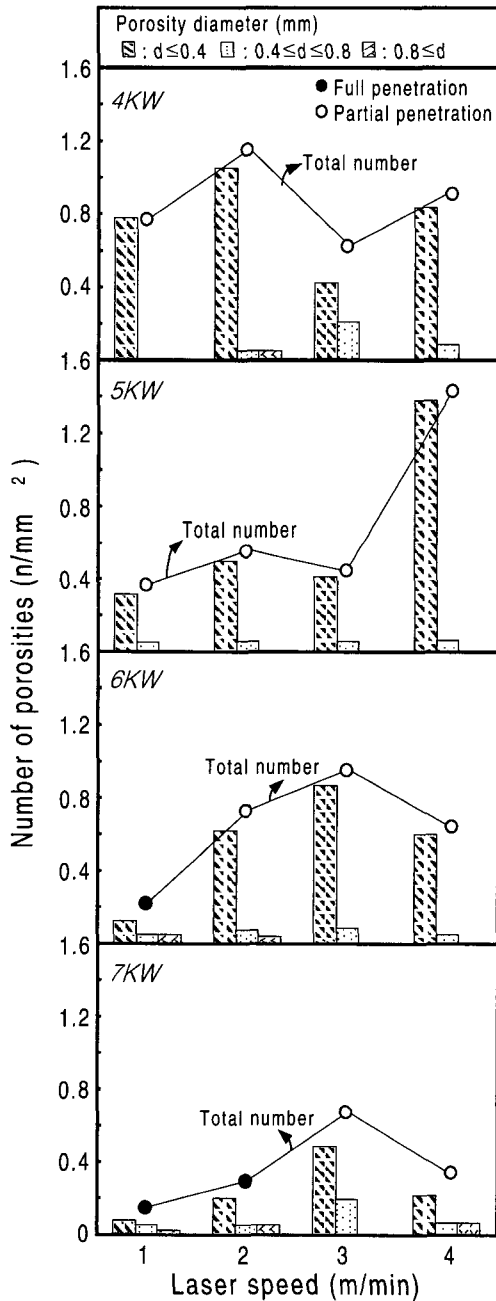


Fig.11 Effect of laser power and welding speed on the number of porosities in A5083 weld .

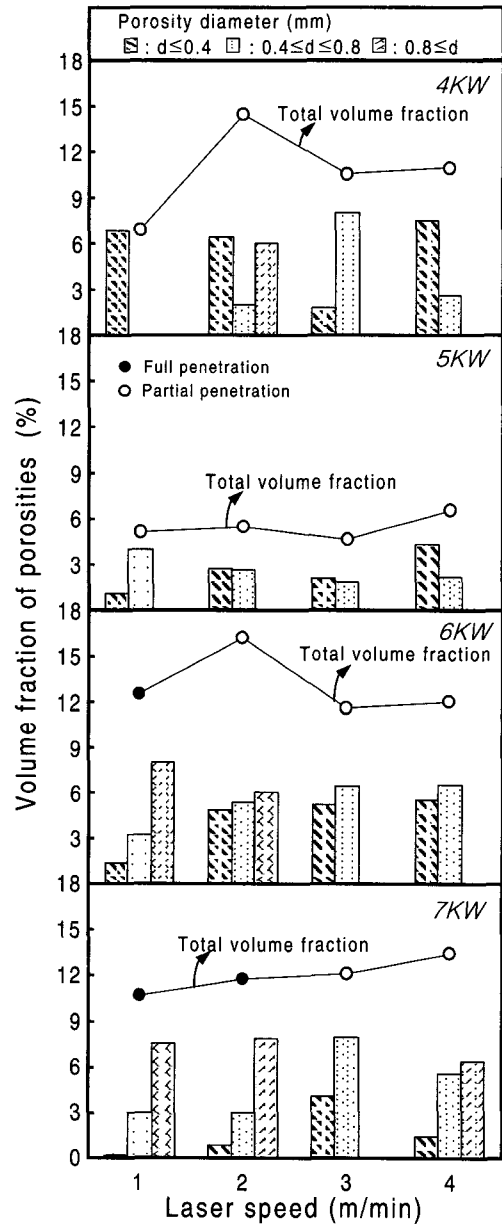


Fig.12 Effect of laser power and welding speed on the volume fraction of porosities in A5083 weld.

Fig.11 및 Fig.12는 A5083합금에 대해서 레이저 출력 및 용접속도에 따른 기공 감수성을 각각 기공의 수와 체적률로 비교한 것이고, 기공의 크기를 분류하여 정량화 한 것도 함께 나타낸다. 또한 Fig.13 및 Fig.14는 A7N01합금의 기공 발생 감수성을 평가한 결과를 나타낸 것이

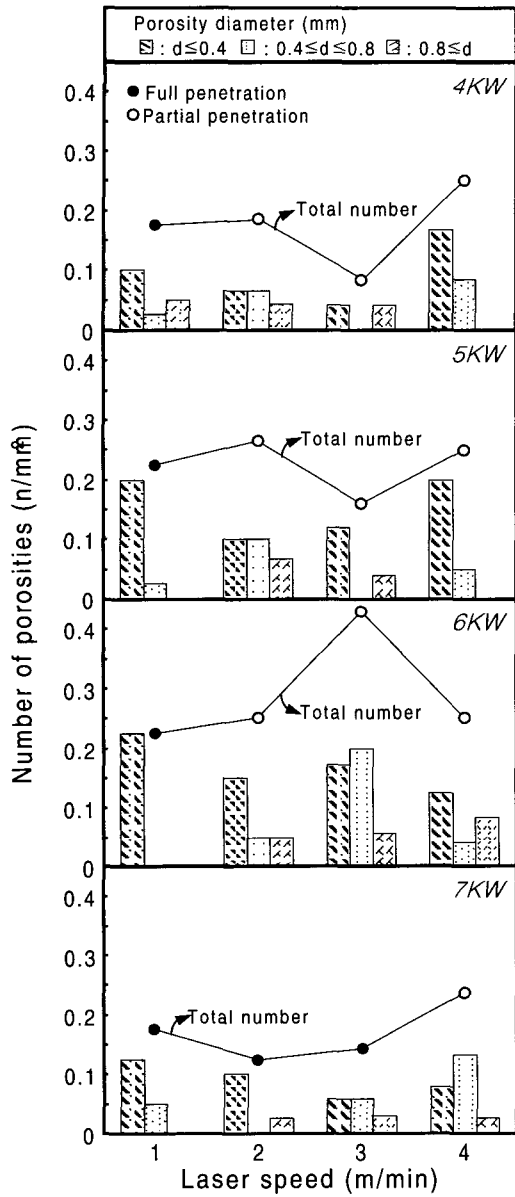


Fig.13 Effect of laser power and welding speed on the number of porosities in A7N01 weld

다. 여기서 막대로 표시한 것은 크기 별로 정량화 결과이고, 크기의 분류는 중간 정도 크기를 0.4~0.8mm로 정하고 이보다 적은 것과 큰 것 3종류로 분류하였다. 그림에서 원(●,○)으로 표시한 것은 총 기공 수와 총 체적률을 나타내고, ●로 표시된 것은 완전 용입, ○로 표시된 것은 부분

용입된 것을 나타낸다. 기공 수는 길이 10mm의 횡단면 비드로부터 측정하고, 수/mm²로 나타내었고, 체적률은 화상분석에서 얻어진 기공의 면적을 측정면적으로 나누어 면적비로 평가하였다.

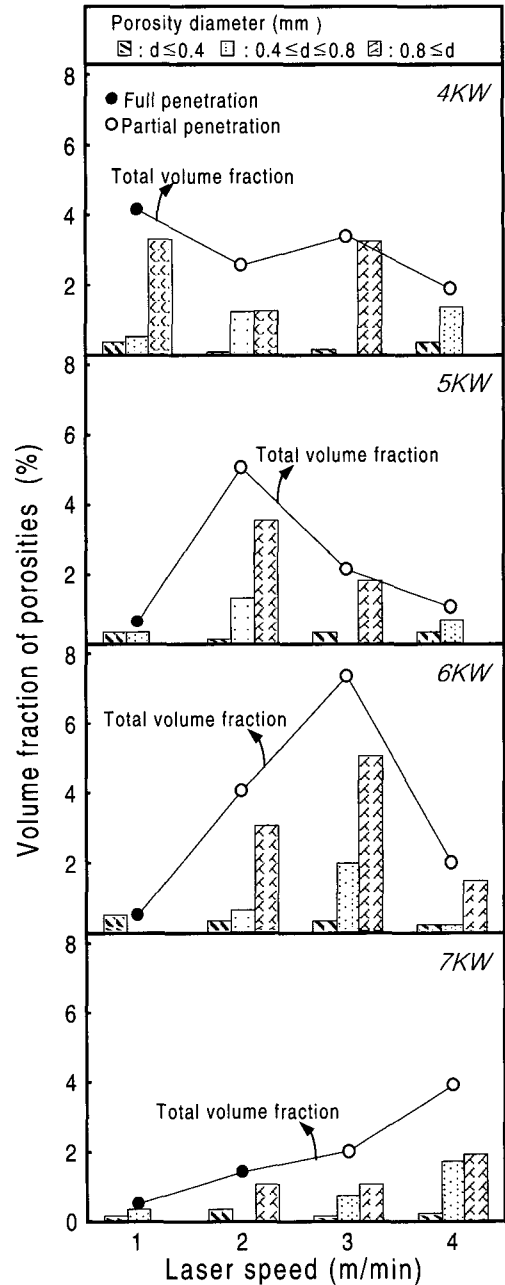
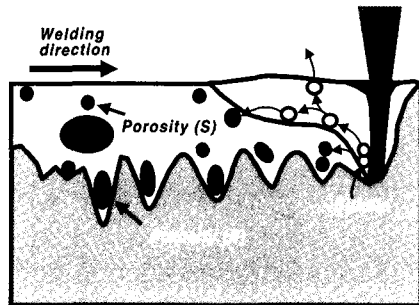


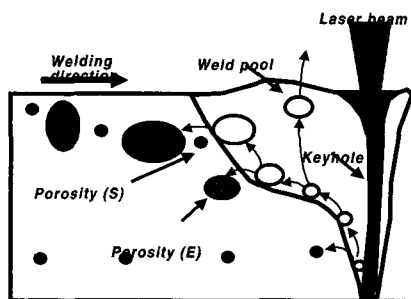
Fig.14 Effect of laser power and welding speed on the volume fraction of porosities in A7N01 weld.

A5083 용접부의 경우, 기공 감수성에 미치는 용접속도 및 출력의 영향은 일정한 상관관계를 찾아보기가 힘들지만, 용입깊이가 깊은 고출력, 저속도에서는 기공의 수는 적으나, 큰 기공들이 많아 체적률이 큰 것이 특징이라고 말할 수 있다. 특히 4kW의 저출력에서는 작은 기공도 많고, 체적률도 높다.

A7N01 용접부의 경우도 기공 감수성에 미치는 용접속도 및 출력의 영향은 일정한 상관관계를 찾아보기가 힘들지만, 완전용입 조건에서는 기공의 체적률이 낮고, 특히 출력이 높을수록 기공 체적률이 감소하는 경향을 보이고 있다. 부분용입 조건에서는 대체로 체적률이 높다고 말할 수 있다. 이러한 결과는 전술한 X-ray 투과 시험결과와 잘 일치한다. 합금에 따른 기공 감수성을 비교하면, A7N01합금이 A5083 합금보다 기공 감수성이 낮은 것을 알 수 있다.



(a) partial penetration



(b) Full penetration

Fig.15 Schematic diagram on mechanism of porosity formation during CO₂ laser welding in alloys

용접조건에 따라서 기공의 발생위치 및 감수성의 차이가 나는 이유와 합금에 따라서 기공 감수성의 차이가 나는 이유를 고찰하면 다음과 같다. 마이크로포커스 X선 투과영상장치를 이용하여 A5083합금의 키홀의 거동과 기공의 생성거동을 검토한 연구보고⁶⁾에 의하면, 키홀은 대단히 격렬하게 팽창과 수축을 반복하므로, Fig. 15의 (a)와 같이 키홀 선단에서 기포가 발생하고, 생성된 기포는 용융지 내에서 빠른 용융금속의 흐름에 따라 상부 쪽으로 이동하면서 서로 합체하여 성장하거나, 이동 중에 이미 응고된 고체 벽에 트랩되어 기공으로 잔류하고, 일부는 용융지 표면으로 부상하여 소멸되는 것으로 확인되었다. 또한 출력이 낮고, 용접속도가 빠른 조건에서 얻어지는 부분 용입 용접부에서는 루트부가 가장 응고속도가 빠르므로, 이곳에서 기포가 쉽게 트랩될 것으로 생각된다. 이러한 이유로 Fig. 9에서 볼 수 있듯이 부분 용입 용접부에서는 기공이 주로 루트부 근방과 비드의 중부 혹은 하부에서 기공이 많이 관찰된다. 한편 관통용접에서는 키홀 선단부가 관통되므로, Fig.15의 (b)와 같이 키홀 선단에서 증발과 기포의 발생이 적기 때문에 루트부에서는 기공의 발생량이 적을 것으로 생각된다.

따라서 기공량은 기포의 발생 정도와 이들 기포의 이동 정도에 따라서 좌우될 것이다. 키홀 선단에서 기포의 발생은 키홀의 안정성과 관계가 있고, 기포가 이동 속도는 용융금속의 흐름과 응고속도와 깊은 관계가 있을 것으로 생각된다. 이러한 관점에서 A7N01은 A5083보다 용입깊이가 깊은 것으로 보아서, 키홀의 안정성이 A5083보다 양호하므로 기포의 발생량이 적고, 냉각속도가 A5083보다 느리기 때문에⁷⁾ 기포가 표면으로 탈출하기 쉬워 기공의 발생량이 적은 것으로 생각된다.

용접조건과 기공 감수성과의 상관관계에 대한 고찰은 어렵다. A7N01 합금의 경우, Fig. 14

에서 알 수 있는 것처럼 출력이 높고, 용접속도가 느린 관통용입 조건에서는 기공의 부피분율이 아주 낮은 것이 특징이다. 이것은 출력이 높을수록, 용접속도가 느릴 수록 응고속도가 느리므로⁸⁾ 기공이 탈출할 수 있는 확률이 높기 때문일 것으로 사료된다.

4. 결 론

용접구조용 재료로 주로 사용되는 Al합금인 A5083 및 A7N01합금을 연속 CO₂ 레이저로 비드언플레이트 용접을 행하여, 용융특성 및 기공감수성에 미치는 합금의 종류와 레이저 출력, 용접속도 등과 같은 용접조건에 대한 검토하여 얻어진 결과는 다음과 같다.

1) 보호가스로서는 Ar가스보다 He가스를 사용한 경우, 비드 외관이 더 균일하며 깊은 용입 깊이를 얻을 수 있었다.

2) 출력이 증가할수록, 용접속도가 느릴수록 용입깊이가 증가하였고, A7N01합금이 A5083합금보다 용입특성이 우수하였다. 이것은 7N01합금이 증기압이 높은 Zn, Mg의 양이 많기 때문인 것으로 생각되었다.

3) 기공 감수성에 미치는 용접조건에 영향을 뚜렷한 상관관계가 없었다. A5083합금의 경우, 용입깊이가 깊은 고출력, 저속도에서는 기공의 수는 적으나, 큰 기공들이 많아 체적률이 높았고, A7N01 용접부의 경우 완전용입 조건에서는 기공의 체적률이 낮고, 특히 출력이 높을수록 기공 체적률이 감소하는 경향을 보이고 있다.

4) 합금에 따른 기공 감수성을 비교하면, A7N01합금이 A5083 합금보다 기공 감수성이 낮았다. 이것은 A5083합금이 7N01합금보다 용융특성이 불량으로 빔의 불안정하여 기포의 발생률이 높고, 응고속가 빠르기 때문인 것으로 사료되었다.

후기

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

참고문헌

- 1) 金澤祐孝, "4kW YAG레이저による アルミニウム合金の溶接特性", 輕金屬溶接, Vol.35, No.7, pp.306-311, 1997
- 2) 輕金屬溶接學會, "アルミニウム合金のレーザー溶接技術の現状(1)", 輕金屬溶接, Vol.32, No.4, pp.25-36, 1994
- 3) 輕金屬溶接學會, "アルミニウム合金のレーザー溶接技術の現状(2)", 輕金屬溶接, Vol.32, No.5, pp.215-222, 1994
- 4) 吉川, 黒尺, 中田, 木村, 青木, 各種アルミニウム合金のYAG레이저溶接, 輕金屬溶接, Vol.32, No.9, pp.399-407, 1994
- 5) 黃地尙義, "溶接接合プロセスの基礎", 産報出版, pp.213-216, 1996
- 6) 瀬渡, 金鍾道, 水谷, 片山, 松, "X線透過法によるレーザー溶接時のキーホール現象とポロシティ生成舉動の觀察", 第44回レーザー加工研究會論文集, pp.7-13, 1998.
- 7) 이봉근, 김경남, 하용수, 강정운, 김인배, Al합금의 CW CO₂레이저 용접부의 응고조직에 관한 연구, 한국레이저가공학회 춘계학술 발표대회 논문개요집, pp..35-38, 2001