

A6061-T6 알루미늄 합금의 Nd:YAG 레이저 용접에서

보호가스가 기공과 표면결함에 미치는 영향

An influence of shielding gas on the porosity and surface defect in Nd:YAG laser welding of Aluminum alloys A6061-T6

박기영, 이경돈
(사)고등기술연구원

1. 서 론

알루미늄을 Nd:YAG 레이저로 용접할 경우 보호가스의 중요성은 잘 알려져 있으며, 기공에 미치는 영향에 대해서는 많은 연구가 보고되었으나 표면결함에 미치는 영향에 대해서는 그렇지 않았다. 또한 기공이 용접부 인장강도에 미치는 영향에 대해서는 많은 연구가 진행되어 왔으나 보호가스에 의한 표면결함 발생이 용접부 인장강도에 미치는 영향에 대해서는 깊은 연구가 없었다. 본 연구에서는 알루미늄의 레이저 용접에서 He과 Ar의 보호가스가 기공형성과 표면결함 발생에 어떠한 영향을 주는가를 연구하였다. 여기서 보호가스 종류와 기공 및 표면결함과의 관계 그리고 보호가스 유량과 기공과의 관계 또한 형성된 기공과 표면결함이 용접금속의 인장강도에 어떠한 영향을 미치는지에 대한 연구를 x-ray 분석, 표면 조도측정, 광학현미경, 인장시험 그리고 경도시험 등을 통해 수행하였다.

2. 실험방법

본 연구에 사용된 레이저 발전기는 빔 직경이 600 μ m, 초점거리 200mm인 HL3006D 3kW cw Nd:YAG 발전기이며 보호가스로는 He과 Ar을 노즐직경 4mm, 각도는 모재 표면과 50°로 레이저빔을 뒤따라가도록 보호가스를 공급하였다. 실험에 사용된 모재는 두께 2mm의 A6061-T6 판재이며 시편은 가로150mm×세로300mm의 크기로 맞대기 용접을 하였다. 분석을 위한 용접시편은 각 용접조건에 대해 동일조건으로 5장 반복 용접하여 분석에 이용되었다. 그리고 용접비드의 표면측정을 위해서 접촉식 표면 조도측정기를 사용하였다. 본 예비실험에서 얻어진 맞대기 용접의 실험조건을 표 1에 나타내었다.

Table 1. Optimal welding conditions for A6061-T6 butt joint

Shielding gas	Gas flow rate(ℓ /min)		Power (kW)	Defocus (mm)	Welding speed
	upper	back			
Non-shielding	0	0	3.0	-1.0	4m/min
He	40	20			
Ar	15	10			

3. 실험결과 및 고찰

3.1 보호가스와 기공과의 관계

3.1.1 보호가스 종류에 따른 기공 발생현황
각 조건에 따른 용접시편에 대하여 전체 용접구간에 걸쳐 기공의 위치, 크기 및 수를 파악하였으며, 기공크기는 0.1mm 간격으로 분류하였다. 한편 기공은 직경 0.3mm 보다 큰 것이 용접금속 내에 존재할 경우 기계적 성질에 직접적으로 영향을 주는 것으로 보고되고 있으나 ISO 규격에서는 두께 2mm 모재에 대해 0.6mm의 기공까지 허용하고 있다.

Table 2. Number and size of porosity observed due to shielding gases

Shielding gas	No. of porosity	Porosity distribution				
		0.1 mm	0.2 mm	0.3 mm	0.4 mm	0.5 mm
Non-shielding	21.8	6.8	7.2	3.8	2.0	2.0
He	34.0	15.4	9.8	5.2	2.2	1.4
Ar	35.4	13.2	12.6	7.0	1.4	1.2

표 2에서 보는 것과 같이 보호가스를 사용하지 않은 조건의 용접시편에서 관찰된 평균 기공수는 21.8개이며 He 및 Ar 보호가스를 사용하여 용

는 8~11개로 그 폭이 심하였다. 관찰된 기공들 중 직경 0.4mm 이상인 기공의 경우 보호가스를 사용하지 않았을 경우 평균 4개, He 보호가스를 사용할 경우 3.6개, Ar 보호가스를 사용할 경우 2.6개로 Ar 보호가스를 사용할 경우 그 수가 가장 적게 관찰되었으며, 이와는 반대로 0.3mm 이하의 기공수는 보호가스 미사용, He, Ar 순으로 많이 발생하였다.

3.1.2 보호가스 유량과 기공과의 관계
용접속도 4.0m/min에서 He 보호가스를 이면 비드에는 20 l/min로 고정하고 상부에 각 20, 40, 60 l/min를 공급하여 발생한 기공과 크기에 따른 경향을 살펴본 결과 He 보호가스를 공급한 경우 20, 40 l/min에서는 기공 총 발생량이 유사하였으나 0.3mm 이상의 기공은 조금 더 관찰되었다. 그리고 유량 60 l/min에서는 총 기공수와 0.3mm 이상의 기공수가 크게 증가하였으나 이는 용융풀의 불안정으로 인한 비드 함몰의 영향이 큰 것으로 관찰되었다.

3.2 보호가스와 기계적 성질

3.2.1 보호가스와 인장강도와의 관계
인장시험 결과 표 3에서 보는 것과 같이 보호가스를 사용하지 않은 조건에 비하여 He 및 Ar 보호가스를 사용한 조건에서 기공이 많이 존재하였음에도 기공수가 많은 보호가스를 사용한 시편의 최대 인장강도는 평균 22.3MPa 및 24MPa로 크게 관찰되었다. Ar 가스를 사용한 경우 0.5mm의 가장 큰 직경을 가진 시편의 인장강도는 246.5MPa인 반면 228.1MPa의 최소 인장강도 값을 가진 시편에서의 최대 기공 크기는 0.25mm이었다. 마찬가지로 He과 보호가스를 사용하지 않은 조건에서도 동일한 결과가 나왔다. 즉 위의 결과를 정리해보면 각 용접조건에 상관없이 6061 알루미늄 합금의 레이저 용접부 내에 위치한 기공의 수와 크기는 인장성질과 큰 연관성을 가지지 않음을 보이고 있다.

Table 3. Porosity and tensile strength

Shielding gas	Porosity			UTS (MPa)
	~0.3mm	>0.3mm	Total	
Base metal	-	-	-	350.4
Non-shielding	0.83	-	0.83	226.9
He	1.0	0.5	1.5	249.2
Ar	1.43	0.57	2.0	250.9

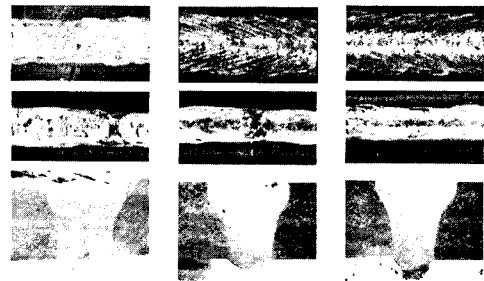
3.2.2 보호가스와 경도와의 관계
위와 같은 인장성질에 대한 원인을 분석하기 위해 먼저 각 용접조건에 따른 경도값을 비교한 결

과 모재의 경우 약 HV_{0.2} 110이며, 용접금속의 경우 보호가스를 사용하지 않은 조건에서 평균 경도값은 HV_{0.2} 95.8 그리고 He 보호가스를 사용할 경우 HV_{0.2} 90.6, Ar 보호가스를 사용할 경우 HV_{0.2} 96.1로 서로 유사한 경도값을 나타내고 있다. 한편 모재에 비해 약 15% 저하된 경도값에 비해 최대 인장강도 값은 모재에 비하여 보호가스를 사용하지 않았을 경우 35.2%, He 보호가스를 사용한 경우 28.9%, Ar 보호가스를 사용한 경우 28.4% 저하되었으며 경도값 저하 정도에 비해 더욱 심한 것으로 드러났다. 이와 같은 결과는 인장강도에 영향을 미치는 요인이 용접부의 경도 저하나 기공에 의한 결과라기보다는 용접부 표면에 의한 원인으로 추정할 수가 있다.

3.3 보호가스와 표면결함과의 관계

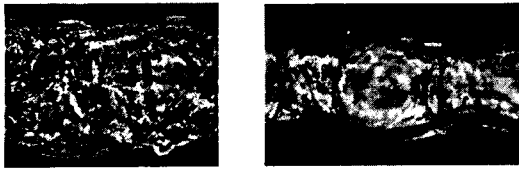
3.3.1 용접비드 표면형상

사진 1에서와 같이 보호가스가 없는 경우는 상하비드 모두 비드양이 매우 불균일하게 덮여 있으며 용융부 표면에 많은 균열과 깊은 함몰형상을 하고 있다. 반면 He과 Ar 보호가스를 사용한 경우는 일정한 패턴을 가진 상하비드 형상을 하고 있으며 모재와 용융부 경계면 또한 노치가 전혀 없는 완만한 경사를 보여주고 있다.



(a) Non-shielding (b) He (c) Ar
Photo 1. weld bead shape along a shielding gases

보호가스가 없는 경우의 비드면을 자세히 관찰하면 사진 2와 같이 상부비드는 비드양과 폭이 매우 불규칙하고 모재와 용융부와의 경계면이 수직으로 파여 있는 심한 노치부를 형성하고 있으며 또한 용융부 표면은 심한 균열의 형상을 보이고 있다. 하부비드도 용접 길이방향으로 비드양이 매우 불균일하고 상부비드와 마찬가지로 모재와 용융부 경계면이 매우 심한 노치 형상을 보임과 함께 비드 불연속 부위에 횡균열 형상을 가진 갈라짐 현상을 하고 있다. 이러한 균열과 노치가 용접부 강도에 커다란 영향을 미쳤을 것이라 생각된다.



(a) upper bead (b) under bead
Photo 2. weld bead shape at non-shielding

측정결과 용접비드 함몰깊이는 보호가스를 사용하지 않은 경우가 크며, 노치각도는 보호가스를 사용하지 않은 경우가 보호가스를 사용한 경우보다 약 30도 정도 예각을 이루고 있으며, 그림에서와 같이 노치를 만들고 있는 형상을 보면 용접부 모재로부터 급격한 경사면을 형성하고 있으며 그 끝은 날카롭다.

Table 4. Notch shape at weld bead surface

Shielding gas	Incompletely filled groove	Notch angle
Non-shielding	0.16	116.6
He	0.15	146.6
Ar	0.12	147.1

3.3.2 인장강도에 미치는 노치 효과

보호가스를 사용하지 않은 인장시편의 파단면은 상하부 용접비드 표면의 국부적 함몰구간 및 용접 진행방향에 수직으로 발생한 횡균열에 의한 노치 효과로 이 부분에서 파단이 일어나고 인장강도가 저하된 것으로 생각되며, 채취한 모든 인장시편 상하부 비드표면에서 균열이 관찰되었으며 인장강도 값은 이러한 불규칙한 균열 형태에 따라 216.8~233.3MPa로 커다란 편차를 보이고 있다. 그러나 He이나 Ar 보호가스를 사용한 경우 인장시편 파단면에서는 노치 효과를 일으킬 만한 표면결함이나 국부적 함몰구간이 관찰되지 않았고 파단 또한 모재와 용융부의 경계면이 아닌 용접비드 내부에서 발생하였다. 이들 시편의 인장강도 값은 He, Ar 각각 242.6~254.1MPa, 243.2~257.6MPa로 보호가스를 사용하지 않은 조건에 비해 큰 인장강도 값과 함께 작은 편차를 나타냈다.

특히 Ar 보호가스를 사용한 경우 용접 시작지점에서 채취한 인장시편 파단면에서는 보호가스를 사용하지 않았을 때와 유사한 형태의 상부 용접비드 균열이 여러 개 관찰되었고 이 시편은 228.1MPa로 낮은 인장강도를 가졌으며 표면결함에 의한 노치 효과를 나타내주는 경우라 할 수 있다.

4. 결 론

1) 보호가스별 발생한 총 기공수는 non-shielding, He, Ar 각각 21.8, 34.0, 35.4개이나 크기는 0.5mm 이하이었으며, 노치각도는 각각 116.6°, 146.6°, 147.1° 이다.

2) He 유량이 20, 40 l/min인 경우 기공수는 유사하였으나, 60 l/min로 변화시킨 결과 총 기공수와 0.3mm 이상의 기공수는 더 관찰되었다.

3) 인장강도 값은 non-shielding, He, Ar 각각 226.9MPa, 249.2MPa, 250.9MPa로 모재대비 각각 35.2%, 28.9%, 28.4%만큼 감소하였으며, 경도값은 각각 HV_{0.2} 95.8, 90.6, 96.1로 모재대비 82~87%로 감소되었다.

4) 보호가스를 사용하지 않은 경우의 상하부 용접비드는 모재와 용접부 경계면에 깊은 함몰과 함께 노치를 형성하고 있으며, 보호가스를 사용하였을 경우에는 함몰과 노치가 없는 균질의 비드형상을 가지고 있다. 그리고 표면조도를 측정 한 결과 보호가스를 사용하지 않은 용접비드가 보호가스를 사용한 비드에 비해 약 30도 가량의 예각을 형성하며 노치 효과를 가지고 있다.

5) 인장시편 파단면 관찰결과 보호가스를 사용하지 않은 경우 모재와 용접부 경계의 노치부에서 파단이 발생하였으며, 보호가스를 사용한 경우에는 용접비드 내에서 파단이 일어났다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 '국가지정연구실 사업' 과 고등기술연구원의 연구비 지원에 의해 수행되었다. 관계자 여러분께 깊은 감사를 드린다.

참고문헌

1. M. Pastor, H. Zhao, R. P. Martukanitz and T. DebRoy: Porosity, Underfill and Magnesium Loss during Continuous Wave Nd:YAG Laser Welding of Thin Plates of Aluminum Alloys 5182 and 5754, Welding Journal, June, 1999, pp.207s~216s
2. ISO 13919-2, British standard, Welding-Electron and laser beam welded joints-Guidance on quality levels for imperfections-Part 2: Aluminum and its weldable alloys.
3. S. Katayama and C.D. Lundin : Laser welding of commercial aluminum alloys. Laser weldability of aluminum alloys, Journal of Light Metal Welding and Construction, 1991, v29 n8, pp.349-360