

연구논문

보호가스에 따른 소결체의 Nd:YAG 레이저 용접성

김 용* · 양현석* · 박기영* · 이경돈*

*고등기술연구원 로봇/생산기술센터

**Weldability in Nd:YAG Laser of Sintered Material
Depend on Shielding Gases**

Yong Kim*, Hyun-Seok Yang*, Ki-Young Park* and Kyoung-Don Lee*

*Institute for Advanced Engineering

Abstract

This study includes the effects of shielding gas types and flow rate on Nd:YAG Laser weldability of sintered material. The types of shielding gas were evaluated for He, Ar and N₂. Bending strength, porosity rate, hardness and aspect ratio testing of laser weld are carried out to evaluated the weldability. As a results, Ar gas was showed the best welding strength even it has the most porosity content on weld metal, and depend on increases the gas flow rate, it was not only got deeper penetration depth but also showed higher bending strength. Therefore we could know that bending strength is not only affect the porosity content but also melting area.

Key words : Sintered material, Saw blade, Shielding gas, Nd:YAG laser, Porosity rate, Aspect ratio, Welding strength

1. 서 론

다이아몬드공구 제조에 있어서 레이저 용접은 이전의 브레이징(Brazing) 방식에 비해 중금속 삽입재 사용이 필요 없고 공정자동화에 의한 생산량 증대 및 고밀도에너지를 통해 열변형을 최소화하면서 깊은 용접부를 얻을 수 있는 장점을 가지고 있다. 그러나 다이아몬드공구 블레이드는 내부에 존재하는 다이아몬드의 탄화를 막기 위해 1,000°C 이하에서 소결하는 고상소결 방식으로 제조된다. 따라서 이렇게 제조된 소결체는 완전한 밀도를 가진 벌크 타입이 아니라 약 2~3% 미세 기공이 존재하게 된다. 따라서 레이저 용접의 우수성에도 불구하고 실제 공정에서는 기공, 열변형, 접합강도 미달 등

의 많은 문제점을 안게 된다. 때문에 기공을 최소화하고 공정을 안정화시키기 위해서는 현재 레이저 용접에서 발생되는 여러 현상들에 대해 이론적인 접근과 용접불량의 원인에 대한 정확한 분석이 필요하다. 이에 따라 몇몇 연구자들에 의해 결합형성과 용접 입열량의 상관성에 관한 연구 결과들이 발표되었으나^[1-2], 본 연구와 같이 Nd:YAG 레이저에서 보호가스에 의한 용접성 변화에 관한 연구는 없었다.

따라서 본 연구에서는 실제 다이아몬드공구 블레이드에 사용되는 소결체를 He, Ar 및 N₂의 보호가스와 유량 등의 변수를 조정하며 Nd:YAG 레이저를 이용하여 용접하였고, 각각의 보호가스 및 그 유량이 소결체와 탄소강의 이종재료 용접 시 용접성에 어떠한 영향을 미치며 이러한 결과

가 접합강도와는 어떤 연관성이 있는지 살펴보았다.

2. 실험 방법

다이아몬드공구 블레이드는 소결법으로 제조된다. 소결체에서 분말의 소결은 실제 절삭을 수행하는 다이아몬드가 포함된 본드(bond) 층과, 금속 샹크(shank)와의 용접성을 좋게 하는 블랭크(blank) 층으로 구성되어 있으며, 이를 동시에 소결하게 되는 구조를 갖는다. 따라서 본 실험에서는 2층의 구조를 갖는 직사각형의 소결체를 800°C에서 250kgf의 힘을 180초 동안 가해 제작하였다. 또한 샹크는 탄소함량이 0.36wt%인 JIS G 3311 SCM 435를 사용하였으며 이의 비커스 경도는 약 420Hv이다. 본 실험에 사용된 소결체 및 샹크의 주성분은 Table 1과 같다.

본 연구에 사용된 레이저는 빔 직경이 600 μm, 초점거리 200mm인 HL3006D 3kW CW Nd:YAG 레이저로 본 실험에서는 최대 출력 3kW로 하고 샹크 표면위에 초점을 고정시켰다. 소결체는 40mm × 11mm × 2.8mm로 제작하였으며 샹크는 1.8mm 두께로 Fig. 1과 같이 가공하여 직선용접이 가능하도록 하였다. 또한 샹크와 소결체의 상하 0.5mm 단차로 인해 레이저 입사각은 5°로 설정하였다. 보호가스는 He, Ar 및 N₂를 사용하였으며 구리 노즐 직경 4mm로 레이저 빔을 뒤따라가도록 공급하였다. 용접속도는 예비실험을 통하여 적절한 비드 외관이 형성되는 3m/min의 속도로 고정하였으며 적용 보호가스의 형태와 유량을 10, 20 및 30 l /min으로 변화시켜가며 보호가스가 적용되지 않은 시험편과 함께 총 10개의 시험편을 용접하였다. Fig. 1과 같이 용접된 시편은 EN 13236의 규정에 따라 굽힘강도 시험을 실시하였으며³⁾, 비커스 경도시험과 같은 기계적 특성 분석과 함께 비드 종단면 및 횡단면의 시편 준비를 하고 Image Analyzer 등을 통해 어스펙트 비(Aspect ratio), 용융면적 뿐만 아니라 기공의 크기 및 분포를 정량적으로 측정하였다.

Table 1 Chemical composition of material

Shank SCM435	C	Si	Mn	Mo	P	S	Fe
	0.36	0.20	0.68	0.30	0.015	0.004	Bal.
Blade	Main		30%Co, 28%Fe, 2%Ni, 38%Cu, 2%Sn				
	Blank		60%Co, 20%Fe, 20%Ni				

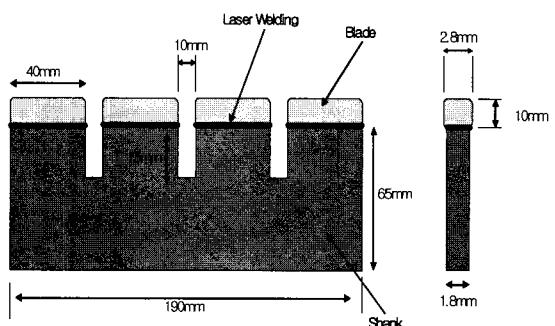


Fig. 1 Schematic of specimen.

3. 결과 및 고찰

3.1 보호가스에 따른 샹크의 용접성

소결체 용접을 실시하기에 앞서 보호가스 종류 및 유량에 따른 일반적인 레이저 용접 성과 이에 따른 비드 형상 변화를 확인하고자 샹크에 BOP(Bead on Plate) 용접실험을 실시하고 각각의 단면을 분석하였다. 용접조건은 모든 변수를 본 실험과 동일하게 고정하고, 레이저 출력만 1500W로 낮추어 두께 1.8t 샹크 위에 조사하였다. 그 결과 Fig. 2와 같이 동일 유량에서(30l /min) 보호가스 종류에 따라 비드 형상이 달리 나타났다. Fig. 2 (b)와 같이 He을 보호가스로 사용한 경우 이온화 포텐셜이 24.5eV로 매우 커서 이온화를 억제시켜 플라즈마 제거에 효과적이다. 또한 He의 열전도도는 다른 가스에 비해 우수하여 에너지가 전체적으로 비교적 균일하게 분산되어 타원형의 비드 형상을 갖게 된다. 그러나 Fig. 2 (c) N₂ 및 (d) Ar의 경우도 이온화 에너지는 각각 14.54eV, 15.76eV로 비교적 큰 이온화 에너지를 갖지만 열전도도가

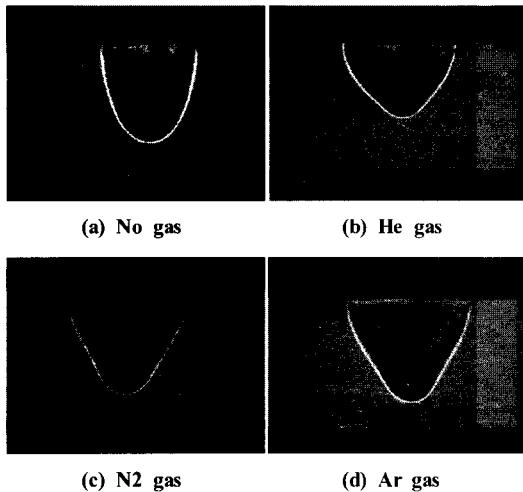


Fig. 2 Bead shape depend on gas types.

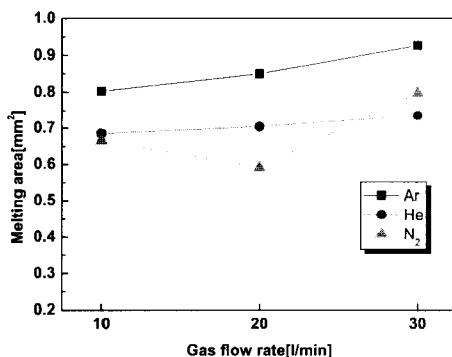


Fig. 3 Effect of shielding gas on melting area.

He의 1/10에 불과하여 에너지가 플라즈마 중앙부에 집중되어 종모양의 용입 형상이 나타났다. 이러한 보호가스의 특성은 결과적으로 비드 폭과 용입 깊이에 영향을 주며 결국 용융면적의 변화를 나타내게 된다. 따라서 Fig. 3과 같이 Ar의 경우가 가장 많은 용융량을 나타내며 He의 경우 전체적인 용융량이 가장 적게 나타났다.

또한 유량의 증가에 따라 Fig. 4와 같이 용입 깊이가 소폭으로 증가되는 경향을 볼 수 있는데, 이는 유량이 증가됨에 따라 플라즈마의 제거효율이 더욱 증가되어 플라즈마에 의한 에너지 손실을 줄여주고, 이에 따른 입열량의 증가로 인해 용입 깊이를 증가시킨 것으로 사료된다.

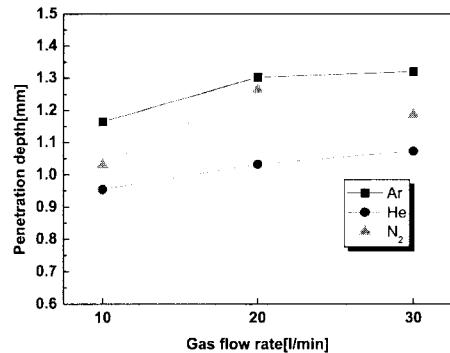


Fig. 4 Effect of shielding gas on penetration depth.

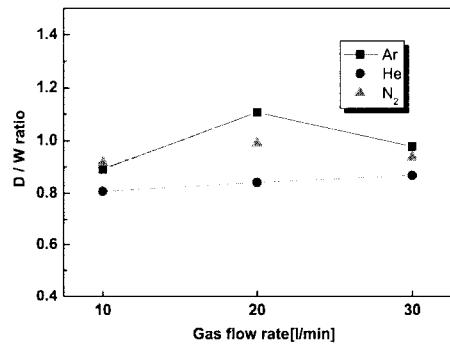


Fig. 5 Effect of shielding gas on aspect ratio.

한편 Fig. 5는 어스펙트 비를 보호가스 조건에 대하여 정리한 것이다. 여기에서 어스펙트 비가 1.0에 근접한다는 것은 비드 단면형상이 정사각형에 가깝다는 의미가 되는데 Ar과 N₂는 편차 내에서 1.0에 가까운 값을 보이지만, He의 경우 약 0.85 정도로 좌우가 더 긴 타원 형태로 비드가 형성됨을 알 수 있다.

플라즈마의 크기와 용입 깊이와의 관련성을 발표한 보고에 의하면 플라즈마 기둥의 크기와 용입 깊이는 상관성이 매우 크며 이에 따라 He 이 여러 측면에서 유리한 기체로 알려져 있다⁴⁻⁷⁾. 그러나 이러한 연구 결과들은 대부분 10.6 μm의 큰 파장대를 갖는 CO₂ 레이저를 대상으로 연구된 결과들이며, 1.06 μm의 파장대를 나타내는 Nd:YAG 레이저의 경우 흡수율이 더욱 우수해 본 연구처럼 3kW의 출력 범위에서는 플라즈마에 의한 영향이 비교적 작을 것으로 판단되며,

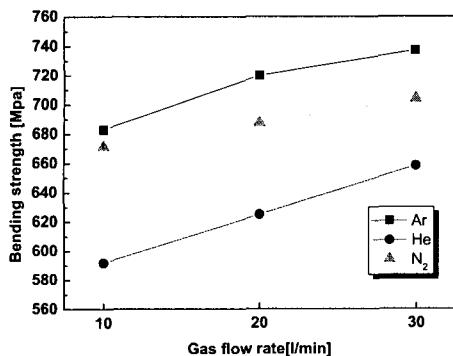


Fig. 6 Relationship between bending strength and gas type, flow rate.

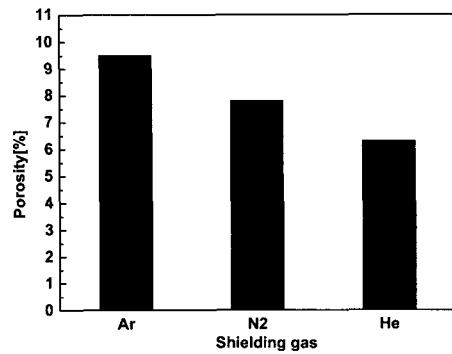


Fig. 8 Effects of shielding gas type on porosity rate.

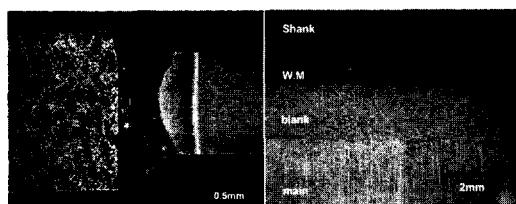


Fig. 7 Inner cavity distribution in cross and upper section of laser welds.

이는 4kW 이하의 경우 Ar 가스로도 충분한 용입을 얻을 수 있다는 Faerber⁸⁾의 연구 결과와도 부합되는 내용이다. 따라서 본 실험 결과는 용접성 측면에서 Ar이 가장 유리한 가스이며 He가 가장 불리한 결과를 나타내었다. 하지만 여기서 명심해야 할 사항은 본 실험에서 최대 유량을 30l /min으로 제한하였기 때문에 He의 특성이 가장 작게 나타났지만 그 이상에서의 유량을 적용 시 더욱 우수한 성능을 기대할 수 있으나 본 연구에서는 경제적 측면을 이유로 그 범위를 제한하였다.

3.2 소결체의 용접성 고찰

Fig. 1과 같은 형태의 용접을 실험계획에 따라 실시한 후 보호가스의 종류 및 유량에 따른 접합강도를 평가하기 위해 굽힘강도 시험을 하였으며 그 결과는 Fig. 6과 같다. 독일 안전기준 협회(DSA) 규정에 의하면 Saw blade의 최소 접합강도를 600MPa로 규정하였으며 대부분의 시험조건에서 Ar > N₂ > He 순으로 강도 기준을 만족하였다. 시험 결과는 또한 보호가스

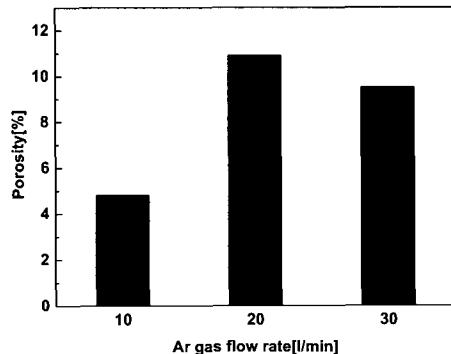


Fig. 9 Effects of gas flow rate on porosity rate.

유량의 증가에 따라 접합강도가 향상되는 결과를 얻었으나, He을 사용한 경우 일부 안전기준을 만족하지 못하였다.

기존에 발표된 여러 연구결과에 의하면 소결체 용접 시 입열량의 증가에 따라 기공분율이 증가하며¹⁻²⁾, 이러한 기공의 종류는 소결체 내부에 존재하던 2~3%의 미세 기공이 용융과정에서 성장된 경우와 함께 용융금속의 급속한 기화에 의해 발생되는 경우로 구분하였다. 따라서 이러한 접합강도 시험결과가 기공분율과 어떤 관계가 있는지 확인하기 위하여 Fig. 7과 같이 시편의 횡단면 및 종단면을 준비하여 Image Analyzer를 이용해 정량적으로 측정하였고, 그 결과는 Fig. 8 및 Fig. 9와 같다. 그 결과 또한 Fig. 8처럼 접합강도가 우수하게 나타나는 Ar에서의 기공분율이 약 10% 정도로 가장 높았으며, He의 기공분율은 5~7% 정도로 기공 발생 측면에서 가장 우수한 결과를 나타냈다. 또한 Fig. 9와 같이 Ar 가스에서

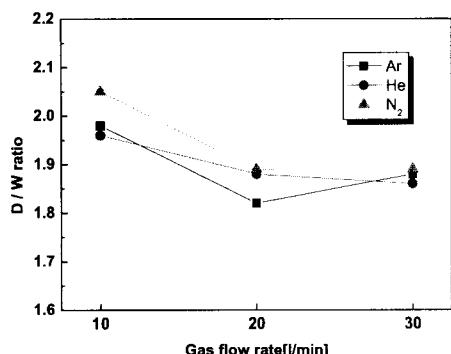


Fig. 10 Relationship between shielding gas and aspect ratio.

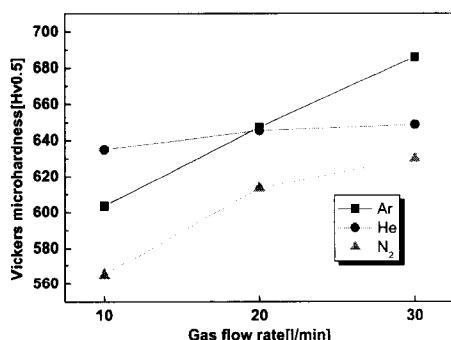


Fig. 11 Relationship between shielding gas and weld metal hardness.

유량이 증가됨에 따라 기공분율도 증가하는 경향이 나타났는데 이는 보호가스의 냉각효과에 기인하여 용융부 응고속도가 증가되고 이에 따라 키홀 내 기체가 빠져나갈 시간이 상대적으로 감소되었기 때문으로 판단된다.

일반적으로 레이저 용접에서 보호가스의 역할은 용접부의 산화를 억제하여 그 품질을 향상시킴과 동시에 용접구역에서 발생하는 플라즈마를 제거시켜 용접효율을 증진시키며, 때에 따라서는 이들 보호가스가 용접부에 빠른 냉각작용을 주어 열영향부 범위를 최소화 시킨다⁹⁾. 따라서 이들 보호가스의 플라즈마 제거 정도에 따른 용접효율 증진 효과를 보기 위해 어스펙트비를 측정하였으며, 또한 냉각효과를 살펴보기 위해 경도를 측정하였다. 그 결과는 Fig. 10 및 Fig. 11에 나타내었다. 결과는 완전 용입 조건에서 용입 깊이가 샹크의 두께를 기준, 1.8mm로 동일하다고 할 때 가스의 종류와 상관없이

유량의 증가에 따라 비드 폭이 증가하여 결과적으로 어스펙트 비는 약간 감소하는 경향을 보였으나 용융부의 최고 경도 값은 반대로 증가되는 현상을 나타낸다. 이러한 결과는 선행 실험된 샹크의 BOP 용접 결과와 마찬가지로 유량의 증가로 인해 플라즈마가 더욱 효과적으로 제거되면서 용융금속의 양을 증가시켜 어스펙트 비는 감소되나, 샹크와 소결체의 회석정도가 증가됨에 의해 소결체의 블랭크 층에 혼재되어 있던 Co 성분 및 샹크의 탄소 성분이 용융부 내로 더 많이 유입되어 경도 상승을 가져온 것으로 판단된다.

이와 같은 결과들을 종합할 때 가스의 종류 및 유량은 플라즈마 제거에 의한 용접효율 증가와 함께 용융량의 증가 및 용접부의 냉각효과를 동반하여 접합강도에 영향을 미치는 기공분율의 증가에도 불구하고 서로의 영향을 상쇄, 최종적인 접합강도가 증가하게 되는 것으로 판단된다. 또한 보호가스 종류에 따라 특성이 달리 나타나는 가장 근본적인 이유는 레이저와 재료의 상호작용에 의해 필연적으로 발생하는 플라즈마와 보호가스의 플라즈마 제거 능력 및 레이저 빔과의 반응 등 여러 복합적인 원인에 기인한 것이며, Nd:YAG 레이저의 소결체 용접 시 보호가스 종류에 따른 기공 및 플라즈마 발생 특성 변화에 대해서는 추가적인 연구가 진행되어야 한다.

4. 결 론

이상의 실험으로 보호가스에 따른 소결체의 Nd:YAG 레이저 용접성을 평가할 수 있었으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 접합강도 측면에서 10~30 l/min의 범위에서 적절한 유량을 사용 시 Ar이 최적의 보호가스로 판명되었으며, He의 경우 20 l/min의 유량 사용 시 접합강도가 강도 기준치를 만족하였다.
- (2) 접합강도의 증가는 유량의 증가에 비례하였으며, 이는 기공분율, 경도 및 비드 폭의 증가에도 기인하였다.

- (3) 보호가스의 종류에 따라 소결체의 기공발생 및 강도 등의 용접 특성에 차이가 났으며, 이들의 영향은 보호가스 자체의 특성에 의해 결정되는 플라즈마 제거효율 및 기타 여러 가지 복합적 원인에 기인한다.

참고문헌

- 1) 신민효, 김태웅, 박희동, 이창희, “Fe-Co-Ni 분말 소결 금속과 탄소강의 이종재료간 레이저 용접부의 결합형성기구 연구”, 대한용접학회지 제21권 제3호, pp. 58-67. 2003년.
- 2) 박종원, 이창희, “Co/Co+Ni 성분의 분말 소결 금속과 탄소강의 레이저 용접성에 대한 고찰”, 한국레이저가공학회지 제3권 제2호, pp. 13-24, 2000년.
- 3) EN 13236, “Safety requirements for superabrasives”, 2001.
- 4) 김기철, 이기호, 이목영, “테일러드 블랭크용 박판 강재의 레이저 용접성 1”, 대한용접학회지 제16권 제2호, 1998년.
- 5) R.Fabbro, “Beam-plasma coupling in laser material processing,” LAMP 92, pp. 305-315, 1992.
- 6) I. Miyamoto and H.Maruo, “Spatial and temporal characteristics of laser induced plasma in CO₂ laser welding,” LAMP 92, pp. 311-316, 1992.
- 7) 김기철, 혀재협. “저탄소 박판 강재의 Nd:YAG 레이저 용접부 형성에 미치는 공정변수의 영향”, 대한용접학회지 제19권 제3호, pp. 66-73, 2001.
- 8) M. Faerber, “Gases for increased productivity of laser processing,” OQE 27, pp. 1449-1455, 1995.
- 9) 김도훈, 레이저 가공학, 경문사, pp. 129-132, 1990.