

다이아몬드공구 소결체의 레이저 용접성에 미치는 보호가스의 영향

김 용*† · 박 기 영*

*고등기술연구원 로봇생산기술센터

Effect of Shielding Gas on Laser Weldability of Sintered Diamond Saw

Yong Kim*† and Ki-Young Park*

*Center for Robot & Manufacturing, Institute for Advanced Engineering

†Corresponding author : welding@iae.re.kr

1. 서 론

다이아몬드는 지구상에 현존하는 물질 중 가장 경도가 높은 소재로 1950년대 초 미국에서 인조합성에 성공한 이래 기존의 알루미늄, 실리코카바이드 등의 연마체를 대체하여 석재, 건설용 및 기계, 반도체 등 산업용 소재의 가공분야에 있어서 우수한 가공특성 및 높은 생산성 등의 장점으로 적용범위가 급속히 확대되고 있다. 특히 다이아몬드공구의 생산량에 있어서 콘크리트, 석재, 내화물과 같은 비금속 건축용 자재의 절단에 사용되는 원형 다이아몬드 블레이드 톱(Diamond saw blade, 이하 다이아몬드공구라 칭함)이 가장 높은 비중을 차지하고 있으며 국내를 포함하여 미국, 유럽 등 전세계에 걸쳐 관련 산업이 발달하고 있다¹⁾. 이러한 다이아몬드공구는 Fig. 1과 같이 탄소강으로 된 샹크(shank)와 금속 분말의 소결에 의해 미세한 다이아몬드가 함유된 블레이드를 접합하는 방식으로 제작된다. 이러한 제작방식은 산업용 고출력 레이저의 급속한 발전에 따라 이전에 고주파 브레이징 방식에서 레이저 용

접방식으로 급격히 대체되고 있다²⁾. 레이저 용접은 이전의 브레이징 방식에 비해 Pb 등의 중금속 삽입재 사용이 필요 없고 공정자동화에 의한 생산량 증대 및 고 밀도 에너지로 인해 열변형을 최소화하면서 깊은 용접부를 얻을 수 있는 장점을 가지고 있다. 그러나 다이아몬드공구 블레이드는 분말과 미리 혼합되어 내부에 존재하는 다이아몬드가 소결 온도가 올라감에 따라 격자구조의 변화에 의한 탄화를 막기 위해 1,000℃ 이하에서 소결하는 고상소결 방식으로 제조된다. 이렇게 제조된 소결체는 소결이 완벽히 이루어졌다 할지라도 100%의 밀도를 가진 벌크(bulk) 형태가 아니라 약 2~3% 정도의 미세 기공이 내부에 존재하게 된다. 따라서 레이저 용접의 여러 장점에도 불구하고 실제 공정에서는 기공의 발생 및 이에 따른 접합강도 미달 등의 많은 문제점을 안게 된다. 이에 따라 많은 연구자들에 의해 다양한 용접공정 변수에 따른 결합형성과 용접성의 상관성에 관한 연구 결과들이 발표되었으나³⁻⁶⁾, 보호가스에 따른 용접성 평가에 관한 연구는 거의 찾아볼 수 없었다.

따라서 본 기고에서는 실제 다이아몬드공구 블레이드에 사용되는 소결체를 He, Ar 및 N₂의 보호가스와 유량 등의 변수를 조정하며 Nd:YAG 또는 CO₂ 레이저를 이용하여 용접하였고, 각각의 보호가스 및 그 유량이 소결체와 탄소강의 이종재료 용접 시 접합강도 및 기공분율 그리고 전반적인 용접성에 어떠한 영향을 미치는지 살펴보았다.

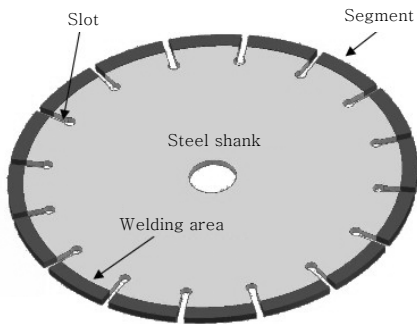


Fig. 1 Components of diamond saw blade

2. 실험 방법

다이아몬드공구 블레이드는 소결법으로 제조된다. 소

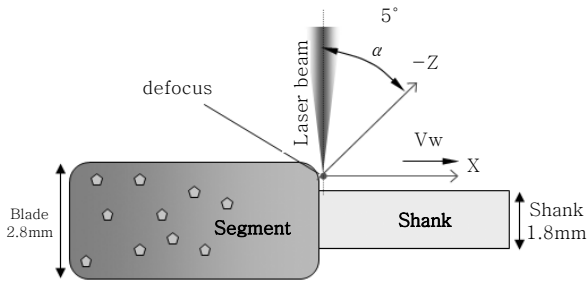


Fig. 2 Laser welding of specimen

결체에서 분말의 소결은 실제 절삭을 수행하는 다이아몬드 포함된 본드(bond) 층과, 금속 샹크(shank)와의 용접성을 좋게 하는 블랭크(blank) 층으로 구성되어 있으며, 이를 동시 소결하게 되는 구조를 갖는다. 따라서 본 실험에서는 2층의 구조를 갖는 직사각형의 소결체를 800℃에서 250kgf의 힘을 180초 동안 가해 제작하였다. 소결체는 40mm × 11mm × 2.8mm의 크기로 제작하였으며 샹크의 두께는 1.8mm로 하였고, 이를 Fig. 2와 같이 이중두께 맞대기용접을 실시하였다. 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.

한편 본 연구에 사용된 레이저는 3kW Nd:YAG 레이저 및 CO₂ 레이저 두 종류를 사용하였다. 또한 보호가스로는 He, Ar 및 N₂를 사용하였으며 구리 노즐 직경 4mm로 레이저 빔을 뒤따라가도록 공급하였다. 용접속도는 예비실험을 통하여 적절한 비드 외관이 형성되는 속도로 고정하였으며 적용 보호가스의 형태와 유량을 10, 20 및 30L/min으로 변화시켜가며 용접하였다. 용접된 시편은 EN13236의 규정에 따라 Fig. 3과 같이 굽힘강도 시험을 실시하였다. 또한 비커스 경도시험과 같은 기계적 특성 분석과 함께 비드 종단면 및 횡단면의 시편 준비를 하고 이미지분석 S/W를 이용해 종횡비(D/W) 값, 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					

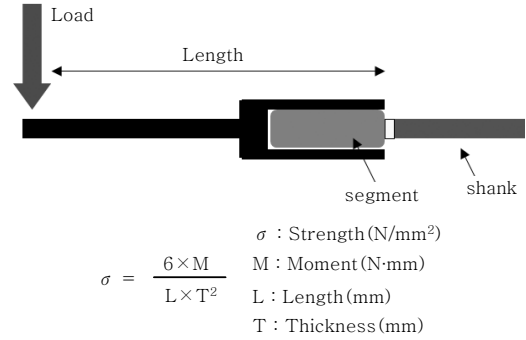


Fig. 3 Schematic of bending test method(EN13236)

3. 결과 및 고찰

3.1 Nd:YAG 레이저에서 보호가스의 영향

선행 시험을 거쳐 적절한 출력과 속도를 도출한 후 보호가스의 종류 및 유량에 따른 영향을 파악하기 위해 Ar, N₂ 및 He 가스를 각각 적용하여 시편을 제작하였다. 이후 보호가스가 접합강도에 미치는 영향을 평가하기 위해 굽힘강도 시험을 하였으며 그 결과는 Fig. 4와 같다. 독일 안전기준 협회(DSA) 규정에 의하면 다이아몬드공구 블레이드의 최소 접합강도를 600MPa로 규정하였으며 대부분의 시험조건에서 Ar>N₂>He 순으로 강도 기준을 만족하였다. 시험 결과는 또한 보호가스 유량의 증가에 따라 접합강도가 향상되는 결과를 얻었으나, He을 사용한 경우 일부 안전기준을 만족하지 못하였다.

기준에 발표된 여러 연구결과에 의하면 소결체 용접 시 입열량의 증가에 따라 기공분율이 증가하며²⁻³⁾, 이러한 기공의 종류는 소결체 내부에 존재하던 2~3%의 미세 기공이 용융과정에서 성장된 경우와 함께 용융금속의 급속한 기화에 의해 발생하는 경우로 구분하였다. 따라서 이러한 접합강도 시험결과가 기공분율과 어떤

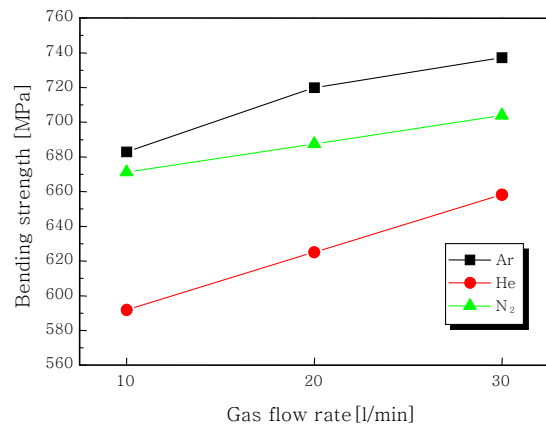


Fig. 4 Relationship between bending strength and gas type, flow rate

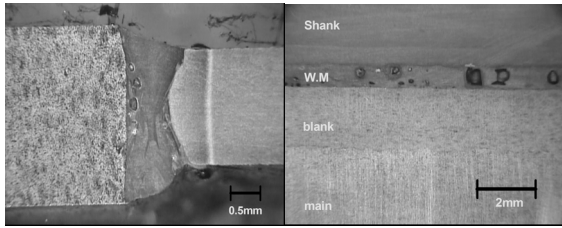


Fig. 5 Inner cavity distribution in cross and upper section of laser welds

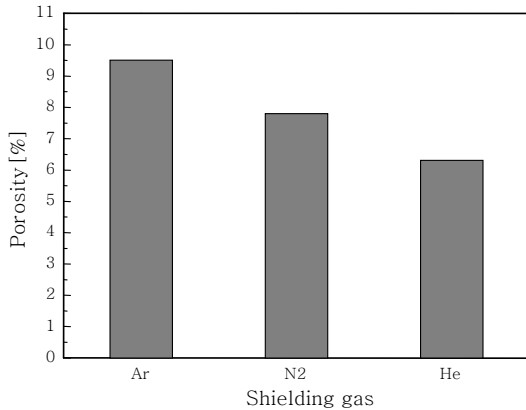


Fig. 6 Effects of shielding gas type on porosity rate

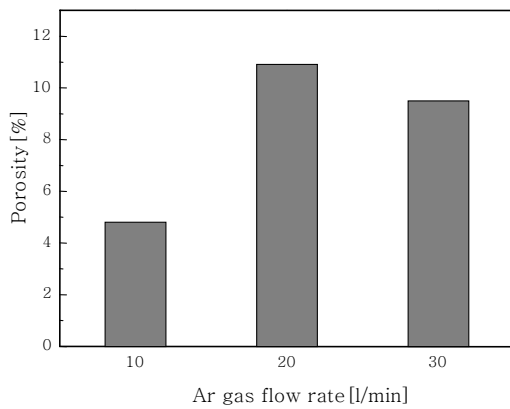


Fig. 7 Effects of gas flow rate on porosity rate

관계가 있는지 확인하기 위하여 Fig. 5와 같이 시편의 횡단면 및 종단면을 준비하여 이미지분석 S/W를 이용해 정량적으로 측정하였고, 그 결과는 Fig. 6 및 Fig. 7과 같다. 정량적 분석 결과 접합강도가 우수하게 나타나는 Ar에서의 기공분율이 약 10% 정도로 가장 높았으며, He의 기공분율은 5~7% 정도로 기공 발생 측면에서 가장 우수한 결과를 나타냈다. 또한 Fig. 7와 같이 Ar 가스에서 유량이 증가됨에 따라 기공분율도 증가하는 경향이 나타났는데 이는 보호가스의 냉각효과에 기인하여 용융부 응고속도가 증가되고 이에 따라 기화내 기체가 빠져나갈 시간이 상대적으로 감소되었기 때

문으로 판단된다.

일반적으로 레이저 용접에서 보호가스의 역할은 용접부의 산화를 억제하여 그 품질을 향상시키고 동시에 용접구역에서 발생하는 플라즈마를 제거시켜 용접효율을 증진시키며, 때에 따라서는 이들 보호가스가 용접부에 빠른 냉각작용을 주어 열영향부 범위를 최소화 시킨다고 알려져 있다⁷⁻⁸⁾. 따라서 이들 보호가스의 플라즈마 제거 정도에 따른 용접효율 증진 효과를 보기위해 D/W 값을 측정하였으며, 또한 냉각효과를 살펴보기 위해 경도를 측정하였으며, 그 결과는 Fig. 8 및 Fig. 9에 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 D/W 값은 약간 감소하는 경향을 보였으나 용융부의 최고 경도 값은 반대로 증가되는 현상을 나타낸다. 이러한 결과는 보호가스 유량의 증가로 인해 플라즈마가 더욱 효과적으로 제거되면서 용융금속의 양을 증가시켜 D/W 값은 감소되나, 샹크와 소결체의 희석정도가 증가됨에 의해 소결체의 블랭크 층에 혼재되어 있던 코발트(Co) 성분 및 샹크의 탄소 성분이

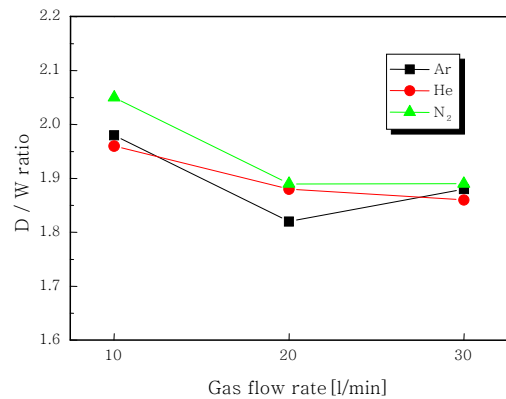


Fig. 8 Relationship between shielding gas and D/W ratio

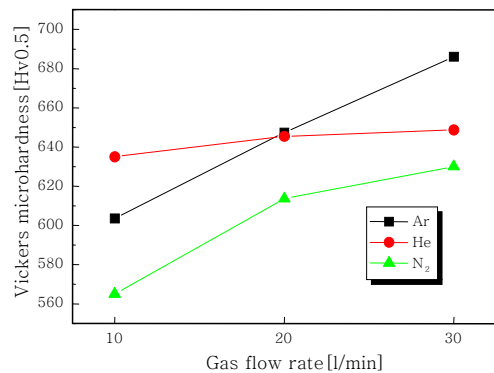


Fig. 9 Relationship between shielding gas and weld metal hardness

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 달라 나타나는 가장 근본적인 이유는 레이저와 재료의 상호작용에 의해 필연적으로 발생하는 플라즈마와 보호가스의 플라즈마 제거 능력 및 레이저 빔과의 반응 등 여러 복합적인 원인에 기인한 것으로 판단된다.

3.2 CO₂ 레이저에서 보호가스 영향

CO₂ 레이저는 10.6 μ m의 적외선 파장을 가지고 있어, Nd:YAG 레이저보다 금속표면에 대한 흡수율이 매우 적다. 이에 따라 금속표면 상부에 발생하는 플라즈마가 용접성에 미치는 영향이 Nd:YAG 레이저에 비해 보다 중요하다고 할 수 있으며, 효율적인 제거 방안이 요구된다. CO₂ 레이저에서 플라즈마를 제거하기 위한 가장 좋은 보호가스는 He로 알려져 있다. He의 이온화 포텐셜은 24.5eV로 철의 이온화 포텐셜보다 매우 커서 플라즈마의 생성-성장-소멸 주기가 길어지게 되어 보다 효율적이며, 또한 열전도도가 보호가스들 중에서 제일 좋아 용입성이 향상되기 때문이다. 그러나 원자 질량이 4g/mol로 매우 낮아 타 가스보다 많은 양의 보호가스를 불어주어야 하며 또한 가격이 매우 고가인 단점으로 인해 본 실험에서는 실용적 측면에서 제외하였다.

이에 따라 보호가스의 종류 및 유량에 따른 소결체 용접특성을 확인하기 위해 No gas, N₂ 및 Ar 가스를 각각 적용하였다. 이때 적용된 용접조건은 출력 2.3kW 및 속도는 6.8m/min의 조건에서 유량은 15 l/min을 적용하였다. 각각의 실험결과는 Fig. 10과 같이 N₂ 사용 시 가장 양호한 비드 외관을 확보할 수 있었다. 그러나 N₂ 가스는 금속과 반응하는 활성 가스로서 용융 금속과 반응하여 내부에 기공을 발생시키게 되는 단점이 있다. Fig. 10에서도 N₂ 가스 사용 시 용접부 내부에 기공이 발견되었지만, 이러한 기공이 N₂와 반응하여 형성된 기공인지 아니면 소결체의 특성상 밀도가 100%가 아닌 상태에서 용융 후 재응고되는 과정에서 발생한 기공인지는 밝혀지지 않았다.

한편 가스를 사용하지 않는 경우는 비드 표면에 산화와 함께 다량의 스패터가 발생하였으며, Ar 가스를 적용한 경우는 과도한 플라즈마 발생으로 용입이 이루어

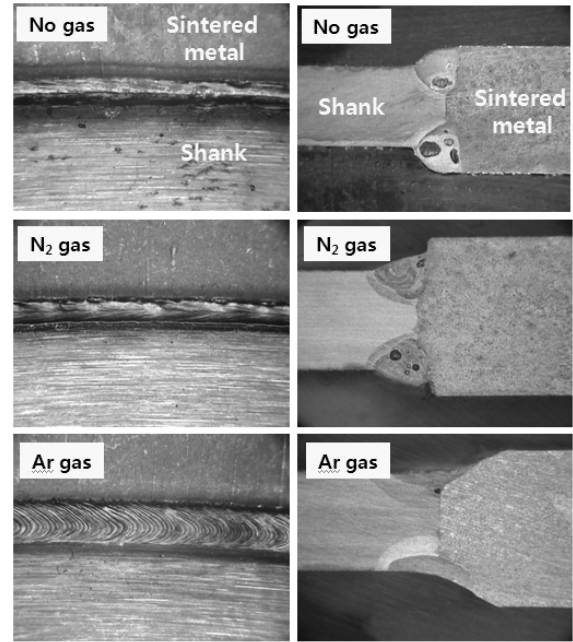


Fig. 10 Results for the weldability depend on shielding gas type in CO₂ laser welding

지지 않았다. Ar 가스는 He과 같이 불활성 가스로서 아르곤용접 시에는 보호가스로서 널리 사용되나, 고출력의 CO₂ 레이저 용접에서는 거의 사용되지 않는다. 그 이유는 CO₂ 레이저에서 임계 출력치 이상에서는 Ar이 원자상태로 이온화되어 용접부 표면의 상당히 위에서 매우 크게 응집되어 형성되므로 상당량의 레이저 빔이 모재로 흡수되는 것을 막기 때문이다.

마지막으로 N₂ 가스의 유량에 따른 용접성을 비교하기 위해 동일한 용접조건에서 유량을 30 l/min까지 10 l 씩 변화시켜가며 용접한 결과, 유량의 증가에 따라 전체적으로 외관이 양호해 지는 것을 확인하였으며, 최소 20 l/min 이상에서 충분한 보호가스 효과를 얻을 수 있음을 확인하였다.

4. 결 론

이상의 실험으로 보호가스에 따른 다이아몬드공구 소결체의 Nd:YAG 및 CO₂ 레이저 용접성에 미치는 보호가스의 영향을 정량적으로 평가할 수 있었으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) Nd:YAG 레이저의 경우 접합강도 측면에서 적절한 유량을 사용 시 Ar이 최적의 보호가스로 판명되었으며, He의 경우 30L/min 이상의 유량 사용 시 보호가스에 의한 효과를 기대할 수 있었다. 반면 CO₂ 레이저에서는 Ar 가스 사용 시 과도한 플라즈마 발생으로 인해 용입이 일어나지 않았으며, N₂ 가스를 사용하여

적절한 품질을 도출할 수 있었다.

(2) 접합강도의 증가는 보호가스의 유량의 증가에 비례하였으며, 이는 기공분율, 경도 및 비드 폭의 증가에도 기인하였다.

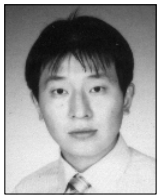
(3) 보호가스의 종류에 따라 소결체의 기공발생 및 강도 등의 용접 특성에 차이가 났으며, 이들의 영향은 보호가스 자체의 특성에 의해 결정되는 플라즈마 제거 효율 및 기타 여러 가지 복합적 원인에 기인한다.

참 고 문 헌

1. V. V Borisova, S. M. Kutev and S.F. Moryashev: Laser Welding Diamond Bearing Segments to Steel Holders. *Welding Journal*. **5** (1993). 56-58
2. Jeong Hoon Lee and Chang Hee Lee : Characteristic of Brazed Joint of Sintered Bronze/Steel Using Ag-Cu-Zn-Cd Type Filler Materials. *Journal of KWS*. **7-3** (1999). 79-89 (in Korean)
3. Min Hyo Shin, Tai-Woung Kim, Hee Dong Park and Chang Hee Lee : A Study on the Formation Mechanism

of Discontinuities in CO₂ Laser Fusion Zone of Fe-Co-Ni Sintered Segment and Carbon Steel. *Journal of KWS*, **21-3** (2003) 58-67 (in Korean)

4. J. W. Park and C. H. Lee : CO₂ Laser Weldability Between Sintered Co, Co+Ni alloy and Carbon Steel. *Journal of KSLP*. **3-2** (2000) 13-24 (in Korean)
5. N. J. Cho, W. G. Jung, S. W. Kim, C. H. Lee and S. D. Kim : A Study on the Formation of Cavity and Welding Property in the Laser Welding Fusion Zone between Sintered Segment and Mild Steel Shank. *Korean Journal of Materials Research* **14-4** (2004). 300-306 (in Korean)
6. Yong Kim, Hyun Seok Yang, Ki Young Park and Kyoung Don Lee : Weldability in Nd:YAG Laser Welding of Sintered Material Depend on Shielding Gases. *Journal of KSLP*. **10-4** (2007) 7-12 (in Korean)
7. R.Fabbro : Beam-plasma coupling in laser material processing, *LAMP* 92, 305-315, 1992
8. I. Miyamoto and H.Maruo : Spatial and temporal characteristics of laser induced plasma in CO₂ laser welding, *LAMP* 92, 311-316, 1992



- 김 용
- 1979년생
- 고등기술연구원 로봇/생산기술센터
- 용접가공
- e-mail : welding@iae.re.kr



- 박기영
- 1962년생
- 고등기술연구원 로봇/생산기술센터
- 레이저 용접 및 자동화
- e-mail : young@iae.re.kr