

## 연구논문

## 소결밀도에 따른 분말 소결금속과 탄소강의 이종금속 레이저 용접성 고찰

김 용, 양현석, 박기영, 이경돈

고등기술연구원 로봇생산기술센터

### The Study of Laser Weldability of two different Metal, Carbon Steel and Sintered Materials, Depends on the Sintered Density

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

Institute for Advanced Engineering

#### ABSTRACT

Sintered specimen which used for a blade of diamond tool was manufactured in order to verify CO<sub>2</sub> laser weldability depend on sintered temperature. Five kind of specimen were prepared and the range of temperature is from 600°C to 1000°C at intervals of 100°C. As a result of the sintered density test, the porosity rate appeared in the range of 2.1%~21.4%. After welding, the most segments had exceeds the minimum fracture stress (600MPa, The Standard Safety of Europe) at the welding strength test except on the sintered at 600°C. In case of the sintered at 700°C, even satisfied the safety allowable stress but cannot get the good quality for bead appearance because of humping defect. In the conclusion, we could know that it showed not only relatively soundness bead but also enough welding strength when the sintered blade of diamond tool is included less than 4% of porosity rate.

**Key Words** : Sintered density, porosity rate, laser weldability, diamond saw blade

#### 1. 서론

다이아몬드는 지구상에 현존하는 물질 중 가장 경도가 높은 소재로 1950년대 초 미국에서 인조합성에 성공한 이래 기존의 알루미늄, 실리콘카바이드 등의 연마제를 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 전 세계에

걸쳐 관련 산업이 발달하고 있다<sup>[1]</sup>. 이러한 다이아몬드공구는 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(Brazing) 방식에서 레이저 용접방식으로 대체되고 있는 실정이다<sup>[2]</sup>. 레이저 용접은 이전의 브레이징 방식에 비해 Pb 등의 중금속 삽입재 사용이 필요 없고 공정자동화에 의한 생산량 증대 및 고밀도 에너지로 인해 열변형을 최소화하면서 깊은 용접부를 얻을 수 있는 장점을 가지고 있다. 그러나 다이아몬드공구 블레이드는 분말과 미리 혼합되어 내부에 존재하는 다이아몬드의 온도가 올라감에 따라 격자구조의 변화에 의한

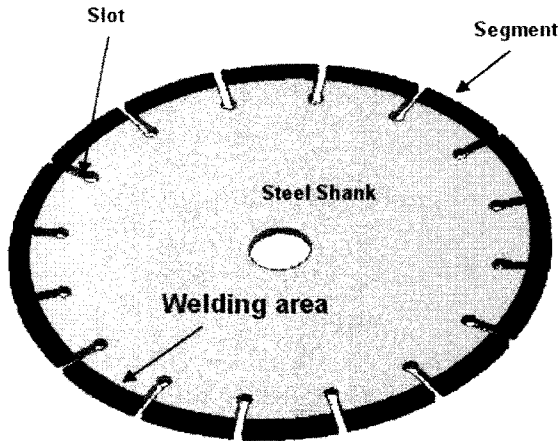


Fig. 1 Components of diamond saw blade.

Table 1. Chemical composition of welding materials (in wt.%)

Shank SCM435	C	Si	Mn	Mo	P	S	Fe
	0.36	0.20	0.68	0.30	0.015	0.004	Bal.
Blade	18%Co, 68%Fe, 14%Ni						

탄화를 막기 위해 1000℃ 이하에서 소결하는 고상 소결 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 결합형성과 용접 입열량의 상관성에 관한 연구 결과들이 발표되었으나<sup>3-5)</sup>, 본 연구와 같이 소결밀도에 따른 용접성 평가에 관한 연구는 없었다.

따라서 본 연구에서는 실제 다이아몬드공구 블레이드에 사용되는 소결체를 소결온도를 달리하여 제조하였고, 온도에 따른 소결특성을 분석한 후 이러한 특성이 소결체와 탄소강의 이종재료 용접 시 용접성에 어떠한 영향을 미치는지 살펴보았다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 실험 재료

본 연구에 사용된 다이아몬드공구의 구성은 Fig. 1과 같다. 다이아몬드공구는 탄소강으로 이루어진 샹크와 소결 블레이드로 이루어져 있고 이러한 블레이드의 구조는 실제 절삭을 수행하는 다이아몬드가 포함된 본드(bond)층과, 금속 샹크와의 용접성을 좋게 하는 블랭크(blank) 층으로 구성되어 있으며, 이를 동시 성형 및 소결한 후 최종적으로 금속 샹크와 용접되는 구조를 갖는다. 본 연구에서는 용접성 평가만을 위한 것이므로 블랭크로만 블레이드를 구성하여 용접에 사용하였다. 샹크는 탄소함량이 0.36wt%인 JIS G 3311 SCM 435를 사용하였고 조성은 Table. 1과 같다. 샹크의 지름은 228.6mm, 두께는 1.8mm인 것을 사용하였으며 소결 블레이드의 경우는 가로 40mm, 세로 10mm, 두께는 2.4mm로 제조하였다. 블레이드는 Fe, Co 및 Ni이 적절히 혼합된 분말을 사용하였으며 이 또한 Table. 1에 나타내었다.

소결은 진공저항소결 방식으로 하였으며 소결압력 280kgf에서 3분간 가압하여 소결하였다. 소결온도는 600℃~1000℃로 100℃ 간격으로 총 다섯 종류의 소결체를 제작하였으며 이렇게 제작된 소결체에 대해 밀도, 경도, 항절력 시험(Transverse rupture strength, TRS) 및 미세조직 등의 실험을 실시하여 그 소결 특성을 파악하고자 하였다.

### 2.2 실험 장치 및 방법

용접 실험은 마그네틱 클램핑을 이용하여 출력 700W, 속도 6m/min으로 양면 가접을 우선 실시한 뒤 본 용접은 샹크의 앞과 뒤 동일 입열 조건으로 두 번의 용접을 하였다. 레이저는 TEM<sub>01</sub>\* 모드의 CO<sub>2</sub> 레이저를 사용하였으며, 보호가스로는 질소가스를 15ℓ/min의 유량으로 레이저 빔을 뒤따라가도록 공급하였다. 용접 출력 및 속도는 선행실험을 통해 용접 비드 상, 하부가 완전 중첩이 되면서도 적절한 비드외관을 나타내는 조건인 2.3kW의 출력에 5.2m/min의 용접속도를 적용하였다. 샹크와 소결체의 0.5mm 단차로 인해 레이저 입사각은 5°로 선정하였으며, 초점위치는 샹크 표면에서 1mm 아래로 위치시켰다. 구체적인 공정 변수 및 조건은 Table. 2와 같다.

Table 2. Welding process parameters

Model	Max. 4kW CW CO <sub>2</sub> Laser
TEM mode	TEM01*
Focus spot size	0.4mm
Laser power	2.3kW
Welding speed	5.2m/min
Beam angel	5°
Shielding gas	N <sub>2</sub>
Flow rate	15 ℓ /min

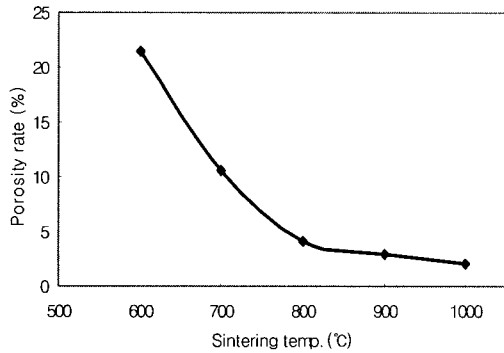


Fig. 2 Relationship between porosity rate and sintered temperature.

소결온도에 따른 소결정도를 파악하기 위해 기본적으로 로크웰 경도(HRB)를 측정하였으며 3점의 평균값을 기록하였다. 또한 항절력 시험을 실시하여 소결체 자체의 강도 특성 분석과 함께 파단특성에 대해 SEM 관찰을 실시하였다. 소결밀도 및 기공률은 수은압입법을 통해 정확히 측정되었으며 또한 SEM으로도 그 기공분포를 확인하였다. 미세조직 관찰을 위해 Nital 5% 에칭을 실시하였으며 최종적으로 소결밀도에 따른 상크와 소결체의 접합강도를 확인하기 위해 EN 13236 규격에 의거하여 굽힘 시험을 실시하였다.

### 3. 실험 결과 및 고찰

#### 3.1 소결온도에 따른 소결체 특성

각기 다른 온도에서 소결된 소결체의 밀도 측정 결과는 Table. 3에 제시하였다. 기공의 평균적인 크기 및 기공률은 소결온도에 따라 감소되는데 이는 온도의 증가에 따라 내부 기공의 수축 또는 소멸량이 많아졌음을 뜻하며 또한 물질의 이동이 기공 내로 많이 이루어졌음을 의미한다. Fig. 2와 같이 온도가 올라갈수록 기공률은 감소하는데 이는 소결이 진행됨에 따라 표면적이 증가하여 더 많은 소결 진행을 위해서는 더 높은 구동 에너지를 필요로 하기 때문이다. 이에 따라 비교적 안정적인 소결온도라 판단되는 900°C의 소결온도에서도 100% 밀도로 소결이 이루어지지 않고 약 3% 정도의 기공을 내부에 함유하고 있음을 알 수 있으며 다섯 조건 중 가장 건전함을 보이는 1000°C로 소결된 소결체의 기공률은 약 2.1%, 기공의 평균 크기는 0.18μm로 나타났다.

이와 같이 나타나는 소결 경향에 대해 광학현미경으로 관찰해 보았으며 그 결과는 Fig. 3의 상단과 같다. 관찰 결과 온도가 올라 갈수록 검은색 부분이 적게 나타나는 것을 알 수 있는데 이는 Nital 부식액이 Fe의 부식을 위한 것이며 Ni 및 Co의 내식성이 강하기 때문에 검은색 부분은 기공과 Fe 성분으로 이루어졌다고 예상할 수 있다. 즉, 온도가 상승함에 따라 Fe 소결이 더욱 깊이 진행되어 표면에너지가 적어져 매우 안정한 상태의 구조를 나타내기 때문에 부식에 더 강한 면을 보여 검은색 부분이 감소된 결과로 해석할 수 있으며, 이를 증명하기 위해 EDAX 측정을 실시하였다. EDAX 측정 결과 예상과 마찬가지로 검은 부분에서 60% 이상의 Fe 함량을 나타내

Table 3. Change in sintered density and porosity rate with the variation of temperature

Sintered temp. (°C)	Total pore area (m <sup>2</sup> /g)	Ave. pore diameter (μm)	Bulk density (g/mL)	Apparent density (g/mL)	Porosity rate (%)
600	0.331	0.3925	6.5994	8.3997	21.4326
700	0.199	0.2813	7.5669	8.4656	10.6157
800	0.095	0.2423	7.0981	7.4003	4.0838
900	0.039	0.1927	7.6932	7.9242	2.9148
1000	0.007	0.1794	7.6164	7.7801	2.1048

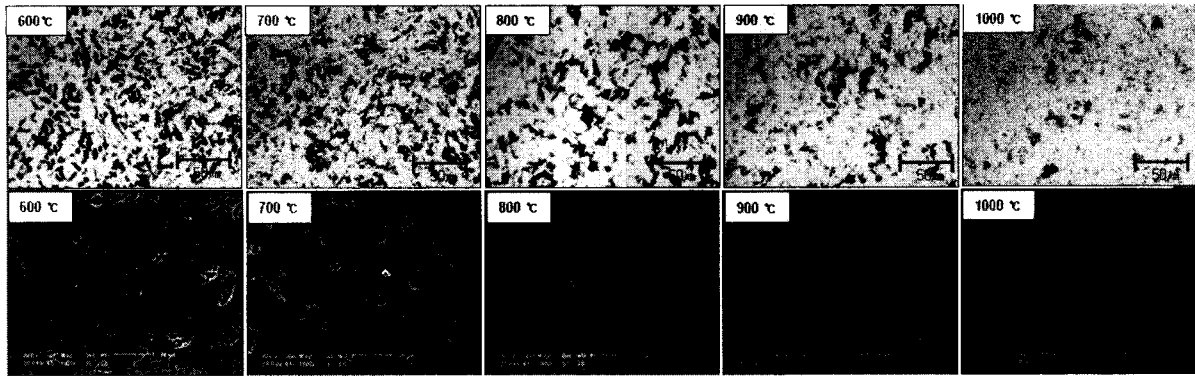


Fig. 3 Photographs of microstructure and SEM at each sintered temperatures.

있으나 흰색 부근에서는 30% 이내의 함량을 보였으며 Fig. 3 하단에 나타낸 SEM 관찰 결과와 같이 Fe로 둘러싸인 기공으로 판명되었다.

이러한 조직적 차이에 대한 해석은 소결체의 기계적 물성으로도 설명될 수 있기에 경도 및 항절력 시험을 실시하였다. Fig. 4는 각 소결체에 대한 HRB 경도 특성을 보여준다. 결과는 소결온도가 증가할수록 경도가 증가하다 800°C 소결체에서 최고 경도 값인 97 HRB를 보여주며 이후 경도가 약간 저하되는 결과를 나타내고 있으며 이러한 결과는 밀도 및 조직적 차이와는 약간 다른 경향을 보인다. 그 이유는 소결체의 성분은 68% Fe와 Co, Ni이 각각 18%, 14%로 이루어져 있는데 일반적으로 Co의 소결성이 우수하기 때문에 800°C 부근에서 경도가 높은 Co의 소결이 대부분 일어나 높은 경도를 나타내나 이후 온도가 증가할수록 연성의 성질을 보이는 Fe 및 Ni의 확산으로 인해 경도가 약간 저하된 것으로 사료된다.

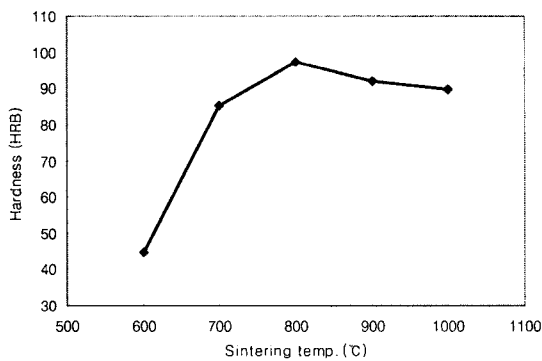


Fig. 4 Relationship between sintered temperature and HRB hardness.

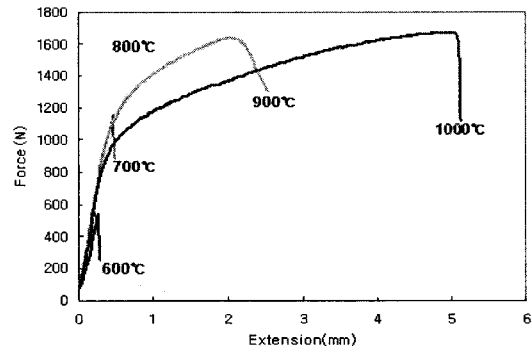


Fig. 5 Results of transverse rupture strength testing.

항절력 시험결과는 Fig. 5에 제시되어 있으며 여기서는 온도의 증가에 따라 소결체의 파단하중 및 연성이 증가됨을 볼 수 있다. 특히 파단하중은 800°C 이상에서는 큰 차이를 나타내지 않았으나 연성이 큰 차이를 나타내는데 그 이유는 기공률의 감소에 따라 입자가 치밀화 되고 또한 경도 특성과 마찬가지로 FCC 구조로서 연성을 나타내는 Fe 및 Ni의 확산이 이루어져 소결체의 연성을 증가시켰기 때문으로 판단된다. 이러한 파단특성을 확인하기 위하여 파단면을 SEM 관찰한 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 소결온도가 높아질수록 파면의 형태는 연성파괴를 대표하는 딴플(dimple)로 대표되고 있음을 알 수 있다. 반면, 소결온도가 낮은 경우에는 기공률이 매우 높아 초기 분말입자의 형태가 거의 그대로 유지되고 있으며 상대적으로 직경이 작은 분말입자가 소결 후에 주된 하중지탱영역으로서의 역할을 한 흔적들을 볼 수 있다. 이 경우에는 특히 직경 3µm 이내의 미세한 분말이 상대적으로 직경이 큰 분말입자들 사이에서 접착제 역할을 하게 되고 하중이 가해질 경우 주된 하중지탱영역으로 작용하게 됨을 알 수 있었다.

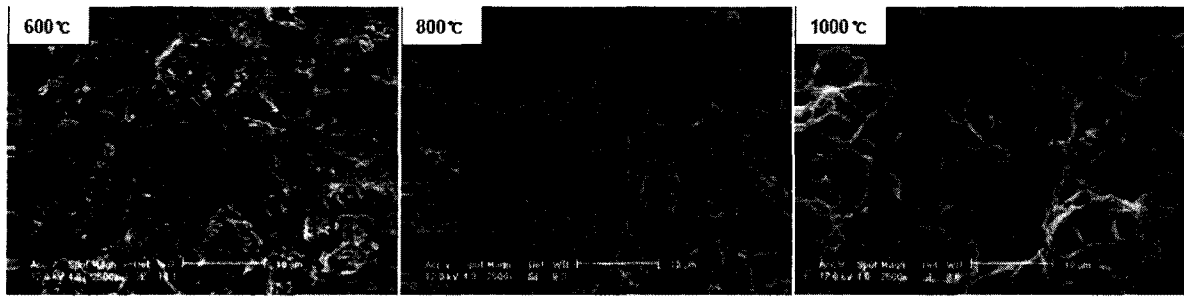


Fig. 6 Fractographies of specimens sintered at the temperatures of 600°C, 800°C and 1000°C.

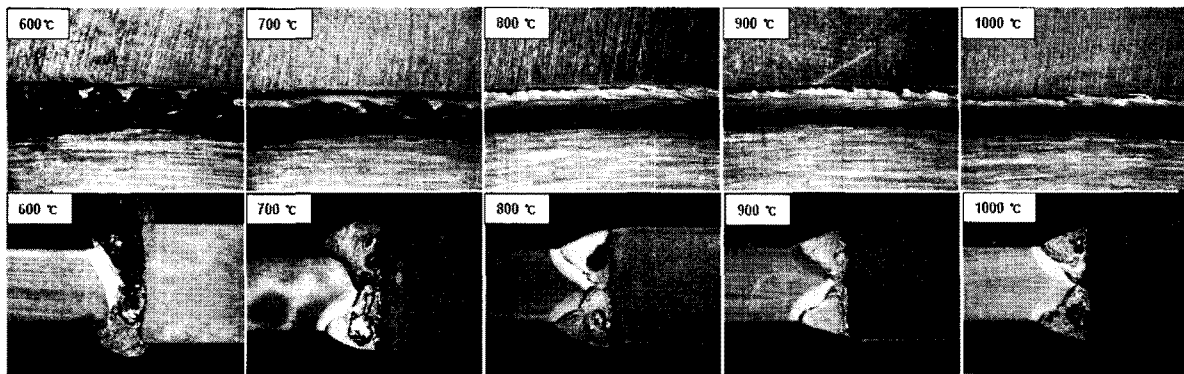


Fig. 7 Top and cross sectional views of laser welds as a function of sintered temperature.

### 3.2 소결밀도에 따른 레이저 용접성

각 조건에 따라 소결된 시편들을 동일한 용접 조건(2.3kW-5.2m/min)에서 양면 용접 한 후 외관 및 단면 형태에 대해 Fig. 7과 같이 그 결과를 비교하여 나타내었다. 800°C 이상 소결된 시편의 용접성이 외관상 양호한 품질을 나타내며 험핑(humping) 비드 현상도 거의 발생하지 않았다. 그러나 600°C 및 700°C로 소결된 소결체의 경우는 내/외부에서 불규칙적인 기공 발생이 발생된 것을 확인할 수 있었다.

기존에 발표된 여러 연구결과에 의하면 소결체 용접 시 입열량의 증가에 따라 기공 발생이 증가하며, 이러한 기공은 소결체 내부에 존재하던 2~3%의 미세 기공이 용융과정에서 성장된 것이라 발표하였다<sup>[4,5]</sup>. 레이저 빔 위치를 소결체 쪽으로 치우쳐 용접할 시 기공의 발생량이 더욱 증가되는 사실이 이를 뒷받침하며 이에 따라 모든 용접조건이 최적의 상태라 가정할 경우 소결체가 미리 갖고 있던 기공률의 차이가 용접성을 결정하는 최대 인자가 되는 것이다. 따라서 이와 같이 나타난 기공률은 접합강도와는 어떠한 영향을 미치지 확인하기 위해 EN 규격의 유럽안전 기준 규정에 따

라 굽힘강도 시험을 실시하였다. 안전 규정에 의하면 다이아몬드공구 블레이드의 최소 접합강도는 600MPa 이상을 허용하고 있으며, 실제 시험결과는 600°C로 소결된 시편을 제외한 나머지에서 모두 강도 기준을 훨씬 상회하여 만족하였다. 이러한 결과는 우선 소결체의 구성 성분인 Fe, Co 및 Ni이 탄소강인 상크와 이종금속 간 용접조건에 잘 어울리는 성분이고 또한 파괴 시에도 용융부에서 연성 파괴형태를 취하므로 어느 정도 소결 진행이 이루어 졌다면 양호한 접합 강도를 나타내는 것으로 판단된다. 몇몇 연구자들은 이에 대해 기공 발생량이 입열량의 증가에 비례한다는 사실아래 접합강도와 기공률 간의 연관성을 찾아보려는 시도를 하였으나<sup>[5,6]</sup>, 기공의 발생은 입열량 뿐 아니라 보호가스, 초점위치 등 여러 가지 공정조건에 민감하게 반응할 뿐 아니라 입열량의 차이에 따라 어스펙트 비(aspect ratio)가 변화되어 그 연관성을 찾기 어려웠다. 본 연구에서 또한 Fig. 9와 같이 용접된 소결체의 횡단면을 준비한 후 이미지 분석기(Image analyzer)를 이용하여 소결체가 갖고 있던 기공률이 용접 후 내/외부 기공과의 비례적인 특성을 확인하고자 하였으나 Fig. 10과 같은 결과를

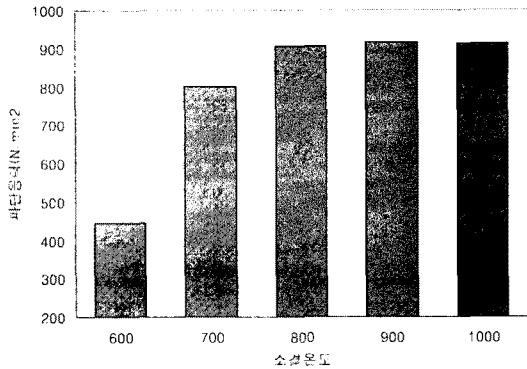


Fig. 8 Bending experiment as a function of sintered temperature.

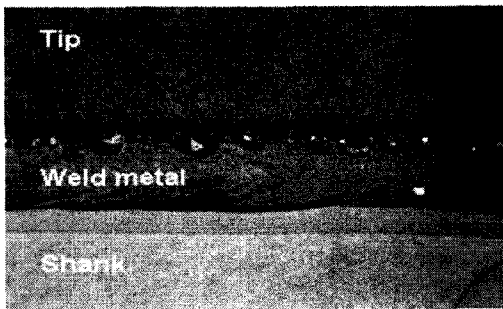


Fig. 9 Inner cavity distribution in upper section of laser welds.

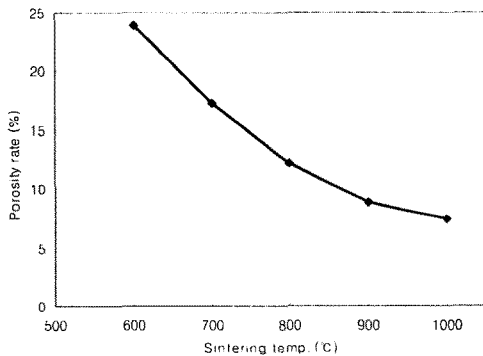


Fig. 10 Relationship between sintered temperature and porosity rate within laser welded zone.

나타내었다. Fig. 10은 용접 후 내부 기공률에 대한 측정 결과를 보여주는 그림으로 4%의 기공률을 갖고 있던 800°C 소결체의 경우 용접 후 기공이 10% 이상 발생된 결과로 나타났다. 이는 용접 후 소결체에 존재하던 내부 기공 뿐 아니라 기타 여러 외란에 의해 기공이 발생하는 것으로 판단할 수 있다. 이에 대해 R. M. German<sup>[7]</sup>의 경우 소결 첨가제로 사용되는 파라핀의 탄소성분이 용접 중

산소와 결합함으로써 CO<sub>2</sub> 기체를 형성하게 되기 때문에 주장하기도 하였다. 본 연구를 통해서도 소결체의 레이저 용접 시 기공률이 4% 이하(소결 온도 800°C)일 때 비교적 건전한 비드 형성과 함께 충분한 용접강도를 얻을 수 있을 것이라 판단된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 실제 다이아몬드공구 블레이드에 사용되는 소결체를 소결온도를 달리해 제조하여 온도에 따른 소결특성을 분석한 후 이러한 특성이 탄소강과의 이중재료 용접 시 용접성에 어떠한 영향을 미치는지 살펴보았으며 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 소결온도에 따라 소결체의 밀도는 증가하는 경향을 나타냈으며 가장 양호한 소결성을 나타내는 1000°C에서 소결체의 기공률은 약 2.1%, 기공의 평균 크기는 0.18μm로 나타났다.
- 2) 소결온도의 증가는 소결밀도, 경도, 항절력, 기공률뿐만 아니라 용접 후 접합강도와 용접 품질에도 영향을 미쳤다.
- 3) 소결체의 기공률이 4% 이하일 때부터 비교적 건전한 비드 형성과 함께 충분한 용접강도를 얻을 수 있었다.

#### 후 기

본 연구는 지식경제부(산업자원부)에서 시행한 부품소재 전문기업 기술지원 사업에 의하여 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

- 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 CO<sub>2</sub> 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 : CO<sub>2</sub> 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. M. German, Powder Metallurgy Science, 2nd edition(1994), Metal Powder Industries Federation, Princeton, 195-197.