

## 공정변수에 따른 Fe-Co-Ni 소결체와 탄소강의 CO<sub>2</sub> 레이저 용접부 결합 발생거동 연구

Effects of process variables on cavity formation of CO<sub>2</sub> laser fusion zone between  
sintered Fe-Co-Ni segment and mild steel shank of diamond saw blade

한양대학교 신소재공학부 신민효, 이창희  
이화다이아몬드공업(주) 기술연구소 김태웅, 박희동

### I. 서론

각종 산업현장에서 널리 사용되고 있는 diamond saw blade는 특히 건설현장에서 콘크리트, 아스팔트 등의 절삭에 필수 공구이며, 내화벽돌의 절단 및 도로, 교량 등의 보수작업에서도 그 활용도는 높다[1]. 이러한 diamond saw blade의 국내외 시장규모는 확대되고 있는 추세이며, 국내 생산량 및 수출량은 매년 꾸준히 증가하고 있다. 또한 고부가 가치창출이 용이하므로 국내 생산업체의 주력상품으로 자리하고 있으며, 최근에는 생산비용이 저렴한 고기능성 advanced diamond saw blade의 개발을 목표로 국제 경쟁력 확보에 노력중이다.

diamond saw blade는 소결체 팁과 탄소강의 몸체(shank) 두 부분으로 구성된다(Fig. 1). 소결체 팁은 다시 탄소강 몸체와 접합되며 다이아몬드가 없는 블랭크(blank)와 절삭에 사용되며 팁의 대부분을 차지하는 다이아몬드를 포함하는 본드(bond) 두 부분으로 구성된다. 기존의 접합방법으로는 브레이징(brazing)법이 이용되고 있으나, diamond saw blade 전체를 가열하는 방식이므로 열변형에 의한 불량증가 및 Cd 등이 포함된 중금속 삽입재 사용으로 인한 환경오염, 불충분한 접합강도의 문제점이 대두되면서 최근 레이저를 이용한 접합방법으로 대체되고 있는 실정이다. 레이저를 이용한 접합방법은 기홀을 이용한 용접으로 열변형을 최소화하면서 깊은 용접부를 얻을 수 있다. 따라서 브레이징법의 경우 발생하는 열변형에 따른 불량 및 낮은 접합강도에 따른 문제점을 동시에 극복할 수 있으며, 뿐만 아니라 중금속 삽입재 사용이 불필요하므로 환경오염이 없으며, 용접공정 자동화에 따른 생산성증대의 효과가 있다. 레이저 접합을 이용한 saw blade는 일본, 미국, 독일 등의 국가에서 생산되고 있으며, 국내에서는 최근에서야 생산품이 나오고 있는 실정이다. 그러나 용접부에 발생하는 불규칙 험프(irregular hump)나 캐비티(cavity) 등은 diamond saw blade의 외형상의 품질 뿐만 아니라 접합강도를 저하시키므로 저감되어야 할 요소이다. 따라서 본 연구에서는 diamond saw blade의 레이저 용접부에 발생하는 이들 결합의 형성기구 규명을 통한 저감대책 마련을 목적으로 하였다. 이를 위해 빔 파워(beam power), 빔 이송속도(travel speed) 및 팁 종류와 결합형성과의 상관관계 연구를 통해 결합형성기구를 파악하고자 하였다.

### II. 실험방법

Fe-Co-Ni 분말 소결체와 탄소강(mild steel) 상크를 최대 출력 3kW의 CW CO<sub>2</sub> 레이저를 이용하여 용접을 하였다. 용접방법으로는 먼저 저입열 공정조건의 레이저 빔을 이용하여 한쪽 면을 가접한 후 반대면을 고입열 공정조건의 레이저 빔을 이용하여 본 용접을 하는 방법이며, Table 1에 나타낸 바와 같이 가접조건은 고정하고 본 용접조건을 달리하여 실험을 하였다. 또한 소결기 내부에서의 소결 위치에 따른 결합형성 경향 파악을 위해 소결 물드와 접촉한 팁과 접촉하지 않은 팁을 사용하여 용접을 한 후 결합형성을 비교 분석하였으며, 용접거리에 따른 캐비티 형성경향도 파악하였다. 공정변수와 캐비티 형성과의 상관관계 및 형성원인 규명을 위해 Image analyzer를 이용하여 캐비티의 수, 팁 내의 Preexist pore의 양을 측정하였으며, AES를 이용하여 캐비티 내벽의 성분변화를 분석하고자 하였다. 또한 Preexist pore의 형성원인 파악을 위해 EDS를 이용하였다.

### III. 결과 및 고찰

#### III-I. 불규칙 험프(Irregular hump)

Fig. 2에 나타난 바와 같이 용접부 표면 및 내부에 캐비티가 다수 존재함을 확인할 수 있었고, 언더 컷(under cut)을 동반하는 불규칙한 험프의 형성이 관찰되었다. 용접공정조건에 따라 험프의 형성 경향이 달랐으며, 험프간 간격 편차를 기준으로 험프 형태를 세 종류로 분류하였다. 먼저 험프간 간격 최대 최소 값의 차가 0.2mm 미만의 비교적 규칙적인 험프를 A type, 0.3mm 미만을 B type, 0.3mm 이상의 간격편차를 가지는 불규칙한 험프를 C type으로 구분하였고, A에서 C로 갈수록 불규칙도 및 언더컷 발생이 증가하며 험프의 높이 또한 증가하였다. 따라서 C type의 험프가 형성된 용접부는 가장 불규칙한 험프 및 다수의 언더 컷을 동반하므로 용접조건을 재설정 필요하다. 입열량을 기준으로 험프 type을 비교해 본 결과 10.4 kJ/min에서 17.6 kJ/min 입열량 범위 내에서 A, B Type의 험프가 형성되었으며, 이들 입열량 범위 밖에서는 C type의 험프가 형성되었다. 이러한 불규칙 험프형성은 키홀(keyhole)입구의 용융금속의 resonant oscillation에 의한 것으로 알려져 있으며[2], 따라서 연구결과는 resonant oscillation이 특정 입열량 범위에서 저감됨에 기인한 것으로 판단된다. 그러나 확인된 결과가 없으므로 추가 연구를 통해 보다 명확한 기구가 제시되어야 할 것이다.

#### III-II. 캐비티(Cavity)

입열량 변화에 따른 용접부 외부에서 관찰되는 외부 캐비티(outer cavity)의 형성경향은 Fig. 3에 나타난 바와 같으며, 입열량이 감소함에 따라 전체 캐비티의 수는 증가하였다. 이들 캐비티는 키홀 내부를 채워야 할 용융금속의 부족에 의해 발생하는 것으로 생각된다. 입열량이 감소함에 따라 키홀 내부에서 방출되었던 용융금속의 응고속도는 증가하게 되며, 또한 빔 이송속도의 증가에 따라 키홀 입구의 용접전방에서 후방으로의 유동속도가 증가하게 된다. 그 결과 키홀 내부를 채우기 위한 용융금속의 부족은 증가하게 되고 따라서 외부 캐비티가 증가하는 것으로 파악된다. Fig. 4에서는 입열량 변화에 따른 내부 캐비티(inner cavity) 형성 경향을 보여주며, 외부 캐비티와 마찬가지로 입열량이 감소함에 따라 전체 캐비티 수는 증가함을 알 수 있다. 용접거리와 내부 캐비티(inner cavity)형성과의 상관관계는 Fig. 5와 같으며, 용접거리가 증가할수록 캐비티의 형성도 증가한다. 이는 응고가 선행된 부분의 응고수축에 의하여, 용접중인 부분의 gap이 발생하였기 때문으로 생각된다. 용접부에 gap이 형성되면 레이저 에너지가 흡수되지 못하고 통과하며, 결과 입열량 감소에 따라 캐비티의 형성이 증가하기 때문으로 판단된다. Fig. 6에서 볼 수 있듯이 용접부 길이방향 및 수직방향으로 관찰한 결과 키홀 바닥부분에서 발생한 금속증기 및 소결팁에서 성장한 기포[3]가 용융금속내에서 용접부 표면으로 떠오르는 도중 용융금속의 응고가 완료되어 캐비티를 형성함을 확인할 수 있었다[4]. 이는 입열량 증가에 따라 용융금속의 응고속도가 지연되며, 그 결과 용융금속내의 기포들이 용융금속 표면으로 떠올라 제거될 수 있는 충분한 시간을 제공하므로 입열량 증가에 따라 내부 캐비티가 감소하는 것으로 파악된다. AES를 이용하여 내부 캐비티 내벽을 분석해 본 결과 산화막이 존재함을 확인할 수 있었다. 이는 대기에서의 산소 유입 및 소결체 팁 내부에 포함되어 있던 산소의 유입에 따른 것으로 생각되며, 소결 팁 내부의 산소는 소결시 사용한 파라핀의 연소, 소결분말 표면의 산화막에 기인한 가능성이 있다. Fig. 7에서 볼 수 있듯이 EDS 분석결과 preexist pore근접부에서 Fe 함량이 많은 것으로 분석되었으며, preexist pore의 형성은 Fe 분말표면 산화막에 따른 분말 계면간 확산속도 감소에 의한 것으로 생각된다. 소결 팁의 종류에 따른 내부 캐비티 형성경향을 비교 분석한 결과, 소결 몰드 접촉 팁의 경우 비접촉 팁보다 내부 캐비티의 형성이 많았으며, 이는 소결 몰드 접촉 팁 보다 비 접촉팁에서 preexist pore의 함량이 많았기 때문이며, 팁의 preexist pore가 내부 캐비티를 형성함을 확인할 수 있었다. 이러한 preexist pore의 함량차는 소결기 내부의 압력분포의 불균일에 따른 것으로 파악된다.

#### IV. 결 론

이상의 연구결과로 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 용접부 표면에 형성되는 불규칙 험프는 10.4 kJ/min에서 17.6 kJ/min 입열량 범위 내에서 감소되었다.
2. 외부 캐비티는 입열량 감소에 따라 증가하였으며, 생성원인은 키홀 내부를 채워야 할 용융금속의 부족에 따른 것이다.
3. 용접거리에 따라 내부 캐비티의 형성이 증가하였으며, 이는 응고수축에 의한 용접부 gap의 발생에 의한 것으로 생각된다.
4. 내부 캐비티는 입열량 감소에 따라 증가하였으며, 키홀 바닥에서 발생한 금속증기 및 소결팁에서 성장한 기포가 용융금속 내에서 떠오르는 도중 용융금속의 응고가 완료되어 형성되었다.
5. 탄소몰드 접촉 팁의 경우 비접촉 팁보다 내부 캐비티의 형성이 많았으며, 이는 소결시 소결기 내의 불균일 압력분포에 의한 Preexist pore 함량 차에 따른 것으로 파악된다.

#### V. 참고문헌

1. V.V Borisova, S.M. Kutev and S.F Moryashev : Laser welding diamond bearing segments to steel holders Paton, Welding Journal, 5-1(1993), pp56-581.
2. Martin Klassen, Jochen Skupin and Gred Sepold : Process instabilities by laser beam welding of aluminium alloys generated by laser modulations, Proceedings europto series, lasers in material processing, munich, 3097(1997), pp137-146.
3. H.Zhao and T. Debroy : Pore formation during laser beam welding of Die-cast Magnesium alloy AM60B-Mechanism and remedy, Welding Journal, 80-8(2001), pp204-210
4. K.Girard, J.M.jouvard, Ph. Naudy : Little porosities trapping during laser spot welding of tantalum, F-ICALEO (1998), pp168-178

Beam power(W)	Travel speed(m/min)	focal point	shielding gas flow rate ,Ar
1350	1	Surface of specimen	80ℓ/min
1470	1.2		
	1.35		
1650	1.7		

Table 1 Welding conditions applied in this experiment.

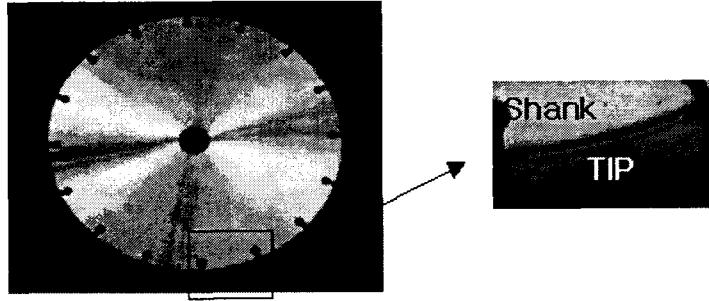


Fig. 1 Structure of diamond saw blade

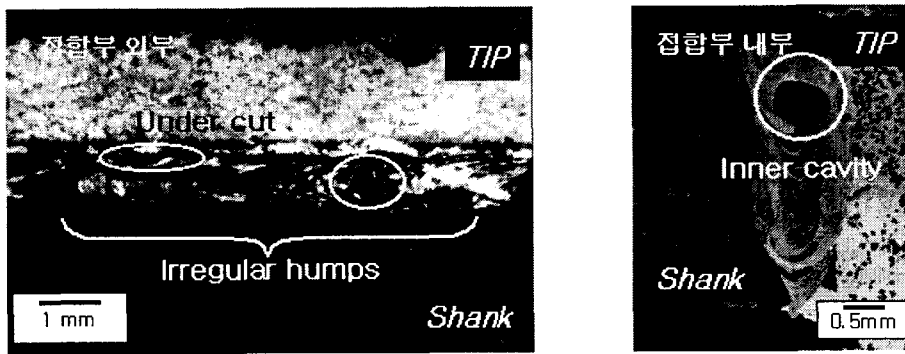


Fig. 2 Imperfections in CW CO<sub>2</sub> laser fusion zone of diamond saw blade

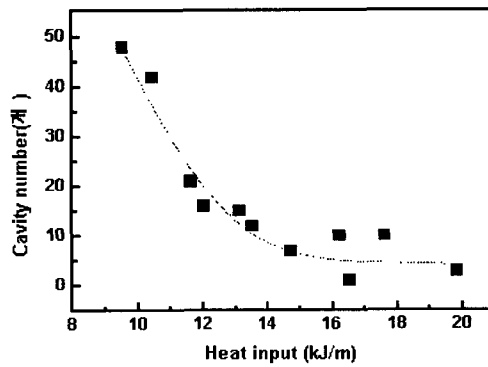


Fig. 3 Effect of heat input on outer cavity formation in carbon mold contacted tip

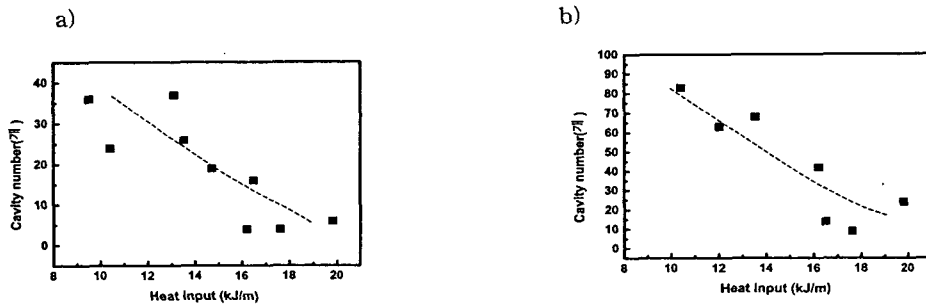


Fig. 4 Effect of heat input on inner cavity formation in a) carbon mold non-contacted tip b) carbon mold contact tip

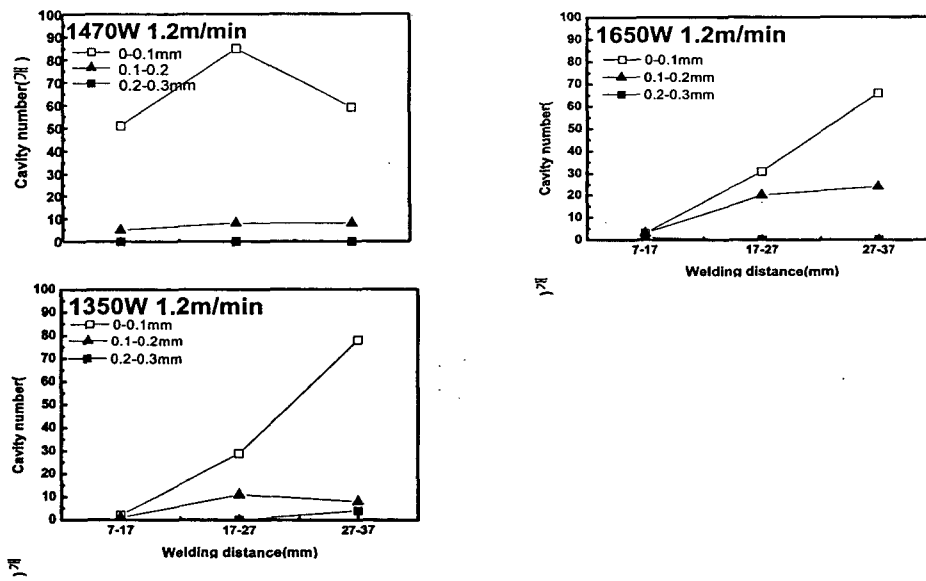


Fig.. 5 Relation between welding distance and inner cavity formation

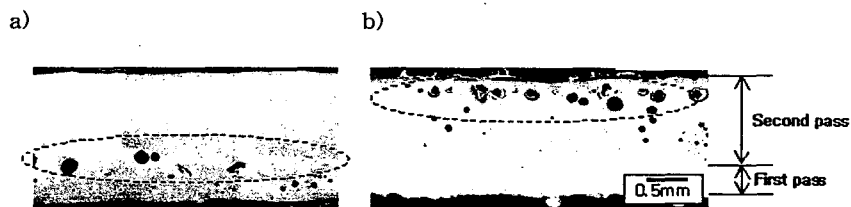


Fig. 6 Inner cavities in longitudinal section of weld a) 1350W, 1m/min partial penetration b) 1650W 1.2m/min full penetration

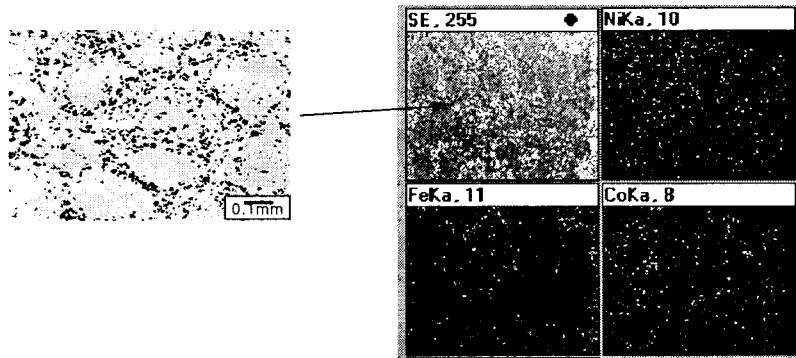


Fig. 7 EDS mapping of sintered tip